

博士論文

親潮系冷水域におけるカタクチイワシの初期生態に関する研究

林 晃

2016

博士論文

親潮系冷水域におけるカタクチイワシの初期生態に関する研究

東京大学農学生命科学研究科水圏生物科学専攻

林 晃

指導教員 東京大学大気海洋研究所教授

渡邊良朗

2016 年 3 月

目次

第 1 章	緒言	1
第 2 章	親潮系冷水域の各海域における初期生態	7
2.1	三陸・道南・道東沖合海域	7
2.1.1	はじめに	7
2.1.2	材料と方法	8
2.1.3	結果	14
2.1.4	考察	18
2.2	三陸中部沿岸域	45
2.2.1	はじめに	45
2.2.2	材料と方法	45
2.2.3	結果	53
2.2.4	考察	60
2.3	常磐南部沿岸域	128
2.3.1	はじめに	128
2.3.2	材料と方法	129
2.3.3	結果	130
2.3.4	考察	136
2.4	常磐—三陸沖合域	174
2.4.1	はじめに	174
2.4.2	材料と方法	175
2.4.3	結果	178

2.4.4	考察	183
第3章	資源量変動と資源構造変化に関わる初期生態	233
3.1	産卵場の形成と拡大	233
3.1.1	はじめに	233
3.1.2	材料と方法	234
3.1.3	結果	235
3.1.4	考察	236
3.2	親潮系冷水域沿岸の仔稚魚資源の由来	247
3.2.1	はじめに	247
3.2.2	材料と方法	248
3.2.3	結果	250
3.2.4	考察	252
3.3	成長速度と変態過程の海域間比較	267
3.3.1	はじめに	267
3.3.2	材料と方法	268
3.3.3	結果	269
3.3.4	考察	273
3.4	黒潮親潮移行域における仔魚成長速度の変動と加入量	297
3.4.1	はじめに	297
3.4.2	材料と方法	297
3.4.3	結果	298
3.4.4	考察	300
第4章	総合考察	311
	引用文献	333

第 1 章

緒言

カタクチイワシ *Engraulis japonicus* は北西太平洋に広く分布する動物プランクトン食性の小型浮魚類であり、仔魚（シラス）から成魚まで生活史を通じて重要な漁業資源として人間に利用される。また本種は、海洋生態系の中で魚食性魚類や海獣類、海鳥類など高次捕食者の餌料生物として重要であり、低次生産と高次捕食者の間のエネルギーの流れを媒介する、重要な役割を果たしている。カタクチイワシの資源量変動は、漁獲量変動となって現れるだけでなく、生態系の変動にとっても重要な意味を持つ。本種太平洋系群の漁獲量は系群全体としては数倍の幅で変動するが、数百倍の漁獲量変動幅をもつマイワシと比較すれば、資源量は安定的と理解されている。この比較的安定的な本種の資源量は、仔魚の発生と生物生産のピークとの時間的合致の重要性を論じた match/mismatch 仮説 (Cushing, 1975, 1982) の視点から、ほぼ周年にわたる産卵がリスクを分散させているためと説明されている (Takasuka et al., 2008a; 鶴田, 1992)。

魚類の資源量変動の幅には、生活史戦略の異なる魚種間において明瞭な差異がみられる。北西太平洋に分布するニシン科 3 種を比較すると、資源量の変動幅は亜熱帯域で生活史を完結するウルメイワシ *Etrumeus teres* で小さいのに対し (CV: 26%)、亜寒帯域に生息するニシン *Clupea pallasii* (CV: 118–178%) や亜熱帯域で生まれて亜寒帯域へ索餌回遊するマイワシ *Sardinops melanostictus* (CV> 120%) で大きいことがわかる (Watanabe, 2007)。このような資源量変動様式の南北差は、仔魚期における成長速度や繁殖投資の比率など、各種の生活史戦略がそれぞれの分布域の生物生産構造、即ち「小規模ながら安定的に起こる再生生産に特徴づけられる亜熱帯水域」や、「無光層からの栄養塩供給による大規模かつ変動的な新生産によって特徴

づけられる亜寒帯水域」のような特性に対応して生じていることが指摘されている (Watanabe, 2007).

カタクチイワシ太平洋系群の漁獲量を犬吠埼を境に黒潮系暖水域と親潮系冷水域に分けると、ニシン科魚類の魚種間に見出されたような変動様式の南北差が見えてくる (Fig. 1.0-1). 1956 年から 2012 年についてみると、犬吠埼以南の黒潮系暖水域における漁獲量は 6 万 3 千トン (1981 年) から 22 万トン (2004 年) とおよそ 3.5 倍の幅で変動した. これに対して、犬吠埼以北の親潮系冷水域における漁獲量は 2400 トン (1986 年) から 17 万トン (2003 年) の間で変動し、その変動幅はおよそ 70 倍と大きかった (農林水産省大臣官房統計部, 2011). ニシン科魚類の種間にみられた南北差と同様に、カタクチイワシの種内にみられるこのような漁獲量変動様式の南北差も、暖水域と冷水域の環境特性に対応した生活史特性の違いに基礎づけられることが想定される.

カタクチイワシの主要な産卵場は黒潮系暖水域に形成されるが、資源量の増加に伴って産卵親魚が親潮系冷水域へ来遊することが報告されている (三原, 2000). 本種の繁殖生態を海域間比較した先行研究によると (須原ら, 2013), 親潮域の道東・千島列島沖合海域の親魚は対馬暖流域の若狭湾や黒潮系暖水域の相模湾・鰐瀨で採集された親魚に比べて大型で孕卵数が多かった. また、生殖腺体指数や孕卵数の季節変動から、暖流域に比べて親潮域の親魚が短期間に集中的に産卵していることも推察され (須原ら, 2013), ニシン科魚類にみられるような繁殖生態の海域差がカタクチイワシの種内においても見出された.

繁殖生態にみられたような南北差は本種の初期生態においてもみられるのであろうか. 資源量高水準期の親潮系冷水域では、産卵親魚の来遊のみならず卵仔魚の出現も確認されており (三原, 1994; 小達, 1957), 本種の産卵場および初期生活域が資源量の増大に伴って親潮系冷水域へと拡大していることがわかっている. しかし、親潮系冷水域における本種の初期生態に関する知見はほとんどなく、比較的沿岸域において月 1 回の頻度で行われる産卵量調査結果のほかは、卵仔魚の空間分布に関する調査報告が数例 (三原, 1994; 小達, 1957) あるのみである. 犬吠埼以北の親潮系冷水域におけるカタクチイワシ漁獲量は、資源量高水準期に太平洋系群全体の漁獲量のおよそ半分を占めるまでに増加している (Fig. 1.0-1). しかし、親潮系冷水域における本種

の産卵場・初期生活域の拡大機構や資源構造の実態は全く不明である。

カタクチイワシ類やマイワシ類の産卵場は、資源量の変動と対応して空間的に拡大・縮小することが知られている (Checkley et al., 2009)。カリフォルニア海流域に分布する北米カタクチイワシ *Engraulis mordax* とカリフォルニアマイワシ *Sardinops caeruleus* の産卵場は、それぞれの資源量増加に伴って沿岸域を北方へと岸沿いに拡大する (Hewitt, 1980; Moser et al., 2002)。これに対して、日本周辺のカタクチイワシ (Zenitani and Kimura, 1997) とマイワシ (Watanabe et al., 1996a) では、資源量増加に伴って産卵場が沿岸域から外洋域へと沖合方向へ拡大することが知られている。産卵場拡大の様式に違いはあるものの、資源量増加に伴う産卵場の空間的拡大はイワシ類に一般的な現象であることがわかる (Checkley et al., 2009)。しかしながらカタクチイワシ太平洋系群では、資源量増加に伴う産卵場拡大が沖合方向への拡大に加えて南北方向にも起こり (三原, 1994; 小達, 1957)、海洋学的特性の大きく異なる親潮系冷水域においても卵が出現するようになる点で、他のイワシ類と決定的に異なっている。魚類の産卵場形成は一般に保守的で、これはサケ類 (Dittman and Quinn, 1996) を始めとしてウナギ *Anguilla japonica* (Tsukamoto et al., 2011) やニシン科魚類 (Corten, 2002) に代表される回遊性魚類において、広い生息場から特定の産卵場へ回帰する産卵回遊が見られることに典型的にあらわれている (Corten, 2002)。外洋域で産卵するクロマグロやブリにおいても、広大な回遊範囲の中の限られた海域を産卵場として利用することに、進化過程における産卵場形成の保守性が表れていると見ることができる。

日本の太平洋海域のマイワシ資源は 1980 年代に資源量を爆発的に増加させたが、産卵資源量の大きな変動にもかかわらず産卵場は黒潮系暖水域に限られた (Watanabe et al., 1996b)。これに対してカタクチイワシでは、産卵資源量の増大に伴って生息域のみならず産卵場をも親潮系冷水域に拡大したとみられる。カタクチイワシに特異的な親潮系冷水域産卵群の形成は、どのようにして可能になっているのか。その生態的な仕組みとして、繁殖生態の低温適応が考えられる。カタクチイワシの産卵水温の下限は、飼育条件下における産卵行動の観察 (約 15°C: 鶴田, 1992) や野外採集個体の生殖腺の組織学的観察 (約 15°C: Funamoto et al., 2004)、および日本の太平洋岸で採集された卵の分布水温の解析 (15.6°C: Takasuka et al., 2008a) から、およそ 15°C と考えられている。これに対して黒潮親潮移行域の沖合域では、5–13°C の水域において吸水卵を

持った成熟雌が採集され (Funamoto and Aoki, 2002; 靄田・高橋, 1997), 産卵親魚が既知の産卵水温より低い水温域で産卵している可能性が指摘されている。しかし定型的な産卵量調査の結果を見ると (e.g. 高須賀ら, 2011), 茨城県以北における産卵は春季から夏季に限定されており, また産卵場の北限が季節的昇温に伴って北上する様子も見られることから, 本種が実際に低温水域で産卵しているかどうかについては議論の余地がある。本種の産卵場の北方拡大の仕組みを明らかにするため, 実際に卵を採集して水温との対応を検討する必要がある。

親潮系冷水域の中でその北部に位置する金華山以北の海域には, 北方から南下する親潮系水と, 南方から北上する黒潮系暖水の波及に加えて, 津軽海峡を経由した津軽暖流系水の流入がみられる (Kawai, 1972)。したがって, この海域には日本海を含む他海域からの卵仔魚の流入が想定され, 本海域におけるカタクチイワシの資源構造は単純ではないと考えられる。親潮系冷水域の南部に位置する鹿島灘ではカタクチイワシのシラスや成魚が大量に漁獲されており, 本海域に分布する仔魚や成魚の生物量は親潮系冷水域資源において相当の割合を占めると考えられる。本海域も黒潮系暖水と親潮系冷水の影響を受ける海域である (久保, 1988) ため, この海域におけるカタクチイワシの資源構造に関する情報も本種の資源量変動を考えるうえで重要である。

親潮系冷水域に位置する黒潮親潮移行域は, 本種太平洋系群の加入の場としての重要性が指摘されている。亜寒帯前線 ($T_{100m} = 4.0^{\circ}\text{C}$: Favorite et al., 1976) と黒潮続流前線 ($T_{200m} = 14.0^{\circ}\text{C}$: Kawai, 1969) の間に位置する移行域は, 栄養塩を多く含む親潮と温暖な黒潮とが混合することによって生物生産力が大きく, カタクチイワシのみならずマイワシ, サンマ *Cololabis saira*, サバ類 (マサバ *Scomber japonicus*, ゴマサバ *S. australasicus*) などの回遊性小型浮魚類にとって重要な索餌場・成育場となっている。粒子追跡実験から, マイワシ資源の高水準の加入には黒潮親潮移行域への仔魚の輸送が不可欠であることが明らかとなった (Kasai et al., 1997)。移行域の冬春季の表面水温とマイワシの加入量との間には負の相関が認められ (Noto and Yasuda, 1999), マイワシの生残と加入が本海域の海洋環境と関連していると考えられている。カタクチイワシでは, 1996–2002 年における加入量の変動が, 移行域における仔魚期後期から稚魚期の成長速度によって説明できることが報告されており (Takahashi et al., 2009), このような成長速度の年

変動は太平洋数十年周期振動 (Pacific Decadal Oscillation, PDO, Mantua et al., 1997) の変動と対応する本海域の水温変動に起因していることが指摘されている。

カタクチイワシ太平洋系群の資源量は 2003 年以来減少を続けており (上村ら, 2014), 本系群の親潮系冷水域資源が消滅に向かっているかに見える。本種太平洋系群の資源が数十年周期で増減してきたことを考えると, 現在の資源量減少過程は, 1970 年代以来数十年振りに巡ってきた, また今後数十年にわたって訪れない研究機会であるといえる。この局面における本種の資源構造の動態を記述する観点からも, 本海域の初期生態を詳細に調べる必要がある。

本研究は, 犬吠埼以北の親潮系冷水域におけるカタクチイワシ資源の初期生態を解明し, 本系群の資源量高水準期に現れる親潮系冷水域資源の加入過程と資源構造を理解することを目的とした。本章に続く第 2 章では親潮系冷水域の各海域におけるカタクチイワシ卵仔魚の分布・輸送・成長について系統的に記述した。第 3 章では, 第 2 章で得られた知見に基づき, 卵仔魚の分布解析および仔稚魚の成長の海域間・年間比較から産卵場と初期生活域の拡大の仕組みを考察し, 粒子追跡実験によって本海域の資源構造を考察した。第 4 章ではカタクチイワシ太平洋系群全体の中における親潮系冷水域資源の生態と資源構造を明らかにし, 資源量変動に伴う資源構造の変化について考察した。

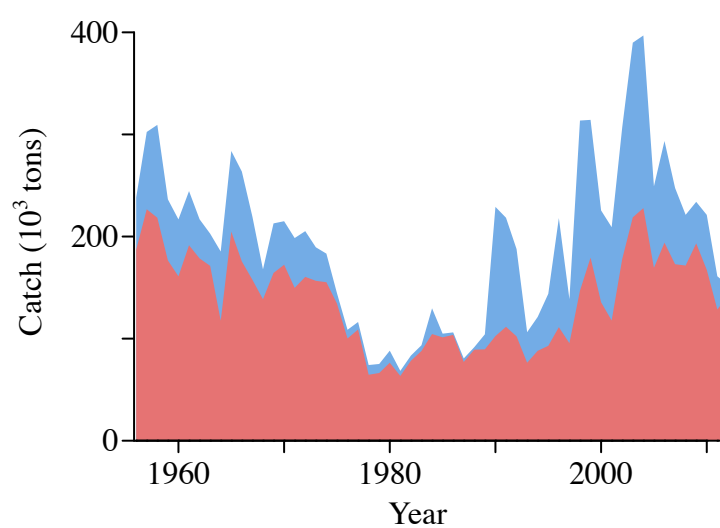


Fig. 1.0-1: Annual catch of Japanese anchovy in the Pacific waters around Japan north (*blue*) and south (*red*) of the Cape Inubo.

第 2 章

親潮系冷水域の各海域における初期生態

カタクチイワシ太平洋系群の主な分布域は黒潮系暖水域である。しかし、資源量高水準期には、犬吠埼以北の親潮系冷水域における分布量が増大して、太平洋系群資源量のおよそ半分を占めるようになる。親潮系冷水域におけるカタクチイワシの生態を理解するためには、まず本海域において本種の卵仔稚魚の分布や成長を調べ、初期生態を明らかにする必要がある。そこで本章では、三陸・道南・道東の親潮域（第 2.1 節）、津軽暖流の影響を受ける三陸中部沿岸域（第 2.2 節）、黒潮系暖水が波及する常磐南部沿岸域（第 2.3 節）、黒潮続流域である常磐—三陸沖合域（第 2.4 節）において調査を行い、北日本の沖合海域における初期生態を明らかにした。

2.1 三陸・道南・道東沖合海域

2.1.1 はじめに

1988—89 年に起こったレジームシフトに伴って、カタクチイワシ太平洋系群は資源量を増加させ、成魚の回遊範囲は黒潮親潮移行域を越えて道南・道東・千島列島沖合海域（三原, 1998）、さらにはカムチャッカ半島周辺海域にまで（Nagasawa and Azuma, 1992）拡大した。これと時期を同じくして、道南・道東沖合海域に卵仔魚が出現するようになり（三原, 1994）、カタクチイワシが成魚の回遊範囲のみならず、初期生活域までも北日本の沖合海域へ拡大したと考えられるようになった。本海域における卵仔魚の分布は 1950 年代後半（小達, 1957）や 1960 年代前半（小林・阿部, 1962）にも報告されていることから、本種の初期生活域の北方拡大は資源量高水準期に起こる現象と考えられる。これら北日本の沖合海域における卵仔魚の分布報告はいずれも空

間分布と出現量の記述にとどまり、海洋環境と対応させた考察が不十分であるために、初期生活域の北方への拡大の実態は不明のままである。

北日本沖合域でこれまで行われた繁殖生態の研究結果は、亜寒帯の親潮域への繁殖生態の適応を示唆している。カタクチイワシの産卵水温の下限は、飼育実験(靄田, 1992) や野外採集個体の生殖腺の組織学的観察 (Funamoto et al., 2004) および卵の分布水温の解析 (Takasuka et al., 2008b) から 15°C とされているが、道南・道東・千島列島沖合海域では 7–21°C の水域において成熟生殖線を持った雌雄が採集されている (三原, 2000)。常磐の沖合海域においても、5–13°C と既知の産卵水温の下限よりも低水温の水域で吸水卵を持つ成熟雌の採集報告がある (Funamoto and Aoki, 2002; 靄田・高橋, 1997)。また、本海域の産卵親魚は暖流域と比べて体サイズ(体長, 肥満度)が大きく (三原, 2000; 須原ら, 2013)、個体あたりの孕卵数が多く (須原ら, 2013)、夏季に集中して産卵すること (三原, 2000; 須原ら, 2013) がわかっている。これらの先行研究を総合すると、15°C よりも低水温の海域で実際に産卵がおこったかはわからないものの、本海域の産卵生態は黒潮域とは異なっていると考えられる。

そこで本節では、カタクチイワシが低温環境で産卵可能になったと考え、卵仔魚の分布を海洋環境と併せて解釈することによって、本種の初期生活域の北方拡大のしくみを考察した。さらに本節では、これまで知見の蓄積が皆無である本海域の仔魚の成長様式を記述し、海洋環境と対応付けた解析によって本海域における仔魚の成長動態を明らかにした。

2.1.2 材料と方法

卵仔魚の採集

三陸・道南・道東沖合海域において学術研究船淡青丸 (610 トン) により、カタクチイワシ卵仔魚の採集調査を実施した (Fig. 2.1-1)。2011 年 8 月 6–12 日 (KT-11-18 次航海) には東経 142–144 度、北緯 39–41 度 40 分で (三陸-北海道海域, Stns 1–17)、2012 年 7 月 29–8 月 5 日 (KT-12-19 次航海) には東経 142 度 30 分–145 度 30 分、北緯 41 度–42 度 50 分で (北海道海域, Stns 1–15) 調査を行った。各調査点において、濾水計を装着した改良型ニューストンネット (網口 1.3 × 0.75 m, 目合 0.45 mm, Oozeki et al., 2001) を夜間に 1 回ずつ曳網した (対水 2

kt, 15 分間)。海上保安庁発行の天測暦に基づき、毎夜の第 1 調査点の投網時刻を日没の 30 分後に設定し、日出までに 3 調査点での採集を完了した。ネット揚収後、採集物をただちに氷冷し、およそ 200 個体を上限にカタクチイワシ仔魚を選別した。以下に続く固定および保存処理による仔魚の体長収縮の補正係数を求める目的で、三陸-北海道海域の Stns 4, 10 では仔魚を選別後、ただちに体長 (L) をデジタルノギスを用いて 0.1 mm まで計測した。脊索屈曲前の個体については脊索長を、脊索屈曲後の個体については標準体長を計測した。体長計測された仔魚を、5 mL ガラスチューブを用いて 1 個体ずつ 5% 中性ホルマリン溶液中で固定した。およそ 1 時間後に、ピペットを用いてホルマリン溶液を清水に置換して氷冷した。更に 1 時間毎に計 2 回、ピペットを用いて清水を交換した後、90% エタノール中に保存して研究室に持ち帰った。仔魚の体長計測を船上で行わなかったその他の調査点では、選別された仔魚を一括して 50 mL バイアル瓶に入れ、上記と同様に固定および保存処理を行った。個体数密度を求める目的で、カタクチイワシ卵と未選別の仔魚を含む採集物を 5% 中性ホルマリン溶液で固定し、研究室に持ち帰った。

海洋観測

夜間に卵仔魚の採集を行った各調査点において、昼間にバケツ採水によって表面水温 (SST) を測定し、溶存酸素計^{*i}と蛍光光度計^{*ii}を取り付けた CTD^{*iii}を水深 500 m まで降下させて水温 (°C)、塩分、溶存酸素濃度 (mL L^{-1}) およびクロロフィル濃度 ($\mu\text{g L}^{-1}$) を観測した。水深が 500 m 以浅であった調査点^{*iv}では海底上 20 m まで観測を行った。各観測点における水塊の鉛直構造を、Hanawa and Mitsudera (1987) の定義に基づいて津軽暖流水系 (the Tsugaru Warm Current water system, TW)、親潮水系 (the Oyashio water system, OW)、黒潮水系 (the Kuroshio water system, KW)、低層低温水系 (the cold lower-layer water system, CL)、表層水系 (the surface-layer water system, SW)、沿岸親潮水系 (the Coastal Oyashio water system, CO) の 6 水系に分類した。蛍

^{*i} SBE 43, Sea-Bird Electronics Inc.

^{*ii} AquaTracka III, Chelsea Technologies Group Ltd.

^{*iii} SBE 9, Sea-Bird Electronics Inc.

^{*iv} 北海道海域: Stns6, 13, 14; 三陸-北海道海域: Stns1, 4, 7, 17

光光度計の校正マニュアルに基づき、クロロフィル濃度 ($\mu\text{g L}^{-1}$) を式 2.1 のように求めた.

$$\text{chlorophyll } [\mu\text{g L}^{-1}] = \frac{l \times (10^{\frac{V}{s}} - 10^{V_b})}{10^{V_1} - 10^{V_a}} + o \quad (2.1)$$

ここで、 V は蛍光光度計の出力電圧を示し、その他の係数については蛍光光度計の校正時に求めた以下の値を用いた; $l = 1.000$, $s = 1.000$, $V_b = 0.445$, $V_1 = 2.047$, $V_a = 0.454$, $o = 0.000$.

海水の鉛直的安定度の低下は、仔魚の摂餌機会を減少させると考えられている (Lasker, 1981). 仔魚が分布した水域の鉛直的安定度を調べる目的で、表層から水深 50 m について、上層の海水密度に対する下層の海水密度の差分を水深 1 m 間隔で算出し、得られた 49 個の差分を合計して密度勾配 $\Delta\rho$ とした.

カタクチイワシ卵仔魚が経験する輸送環境を調べる目的で、調査期間を通じ、船底に装備された超音波ドップラー流速計 (ADCP) を用いて、船底から水深 650 m までの海流を 3 秒間隔で記録した. 海流データは 40 層に区分されて記録されたが、本研究では卵仔魚が分布した表層の輸送環境を調べるため、第 1 層のデータ (水深 <20 m) を解析に用いた. 停船時に ADCP のデータ精度が低下するため、海洋観測中に記録されたデータは解析から除外した. 航走中に得られた緯度、経度、流向、流速の各データを 30 分ごとに平均して解析に用いた.

卵仔魚分布の解析

ニューストンネットによる採集物を研究室で清水に浸漬してホルマリンを除去した後、カタクチイワシ卵と残存仔魚を選別して計数した. 標本の量が多い場合には、標本分割器を用いて分割した後に選別と計数を行った. 1 曳網によって採集された卵と仔魚の個体数とニューストンネットの濾水量から、各調査点における卵 (粒 m^{-2}) と仔魚 (尾 m^{-2}) の個体数密度を算出した.

北海道海域と三陸-北海道海域それぞれにおいて、各調査点の SST を卵仔魚の分布密度で式 2.2 のように重み付けし、加重平均水温 T_{egg} , T_{larva} を月ごとに求めた.

$$T_{egg, larva} = \sum \frac{t_i \cdot n_i}{N} \quad (2.2)$$

ここで、 t_i と n_i はそれぞれ調査点 i における SST と卵 (または仔魚) の個体数密度、 N は北海道海域 (2012 年) または三陸-北海道海域 (2011 年) における卵 (または仔魚) の個体数密度

の合計値を示す。

日齢、孵化日および成長速度の推定

各調査点で採集された標本から 200 個体を上限に無作為に仔魚を抽出し、実体顕微鏡下でデジタルノギスを用いて体長 (L , mm) を 0.1 mm まで計測した。船上で体長を計測した三陸-北海道海域の Stns 4, 10 の仔魚 (計 50 個体, 固定前体長 5.2–25.9 mm) の体長を再計測し、固定・保存処理による体長収縮を補正する係数を線形回帰によって求めた ($R^2 = 0.99$)。さらに、Theilacker (1980) の方法によって採集時における摩滅による仔魚の体長収縮を補正した。各調査点で採集された仔魚を 2 mm 間隔の体長階級に区分し、体長組成を得た。また、北海道海域と三陸-北海道海域の体長組成を把握する目的で、各調査点の体長組成を仔魚の分布密度によって重み付けし、海域別に合計した。

体長計測された仔魚のうち、2012 年に北海道海域で採集されたものについては、合計個体数が 50 個体前後となるように体長階級から均等に標本を抽出し、2011 年に三陸-北海道海域で採集されたものについては各調査点につき 30 個体程度の標本を無作為に抽出して耳石日輪解析に供した。実体顕微鏡下で、仔魚の頭部から左右の扁平石をスライドグラス上に摘出し、清水を含ませた筆で洗浄して 50°C の恒温槽で 1 夜乾燥させた後、耳石の体側面を上にしてエナメル樹脂で封入した。耳石日輪解析には原則として左側の耳石を用いたが、左側の耳石を破損または紛失した場合には右側の耳石を用いた。

耳石日輪解析には、光学顕微鏡、ビデオカメラ、画像解析ソフトウェア^{*i}によって構成される耳石日輪計測システムを用いた。このシステムでは、光学顕微鏡からビデオカメラを通して対物マイクロメータのデジタル画像を取り込み、モニタの 1 ピクセルあたりの距離をソフトウェア上で対物レンズの倍率別に設定しておくことによって、モニタに映った耳石のデジタル画像上において日輪の計数と日輪間隔の計測が可能である。本研究では、この装置を用いて耳石核から体軸後方の最大半径上に計測線を設定し、この計測線上の全ての日輪を顕微鏡の焦点を微調整しながら計数した。日輪間の距離である日輪間隔を耳石の核から縁辺までの全てについて合計して耳石半径 (R) とした。カタクチイワシでは、孵化から 3–4 日後に栄養源が卵黄から

^{*i} JISEKI5, ラトックシステムエンジニアリング株式会社

外部栄養へと切り替わる時点で耳石に第1輪が形成される (Tsuiji and Aoyama, 1984). そこで本研究では, 日輪数に3を加えて日齢 (d) とし, 仔魚の採集日から日齢を差し引いて孵化日を求めた. 耳石日輪解析によって推定した仔魚の日齢を用い, 孵化から採集時までの平均体長成長速度 (G , mm day^{-1}) を求めた. 飼育実験より報告されているカタクチイワシの孵化体長 2.7 mm (Fukuhara, 1983) を孵化時の体長とし, 採集時までの体長の増加量を日齢で除して G を算出した. 各調査点における日齢・孵化日・ G の頻度分布を解析個体数で除して解析努力量を均し, さらに採集個体数で重み付けしてから海域別に集計して, 北海道海域と三陸-北海道海域における仔魚の日齢, 孵化日および G の組成を得た.

本節の調査では, 耳石第1輪形成時の体長 (5.6 mm, Fukuhara, 1983) よりも小型の仔魚が採集されたため, この値を切片として用いる Biological intercept method (Campana, 1990; Campana and Jones, 1992) の使用が不適当と判断された. そこで, カタクチイワシ仔魚の耳石半径が体長と正相関すること (Takahashi et al., 2001) を根拠に, 耳石日輪間隔 (μm) を仔魚の体長成長速度 (mm day^{-1}) の指標として用いた. ある月の1–15日を前半, 16–31日を後半と定義し, 耳石日輪解析された仔魚を半月単位のコホートに分類して, 耳石成長履歴を孵化半月を揃えた海域間, または同一海域内での半月コホート間で比較した.

仔魚の成長速度を採集時の海洋環境と対応させる解析には採集前成長速度が用いられる. 本節では, 仔魚が採集直前5日間において同一の水塊に分布し続けたと仮定し, 採集前5日間における耳石成長速度 ($G_{5\text{otolith}}$, $\mu\text{m day}^{-1}$) を8日齢以上の仔魚を用いて式2.3のように算出した.

$$G_{5\text{otolith}} = \frac{R_{\text{catch}} - R_{\text{catch}-5}}{5} \quad (2.3)$$

ここで, R_{catch} と $R_{\text{catch}-5}$ はそれぞれ採集日とその5日前における耳石半径である.

調査海域では南西流が卓越していたため (結果), 仔魚の南方輸送の実態を解析する目的で, 同経度範囲の同緯度に位置する3調査点を1測線とし, 仔魚の体長を隣り合う緯度測線間で採集年ごとに比較した. 解析に用いた緯度測線は, 三陸-北海道海域では北緯41度40分 (Trn-4140), 41度00分 (Trn-4100), 40度20分 (Trn-4020), 39度40分 (Trn-3940), 39度00分 (Trn-3900) 上の5測線で, 北海道海域では北緯41度40分 (Trn-4140) と北緯41度00分 (Trn-4100) 上の2測線であった. 測線間での体長比較に先立ち, 各測線の体長組成をクラスター分析によって

(Fraley and Raftery, 2002) 2 つまたは 3 つの正規分布に分離した。各正規分布のピーク体長のうち、最も小さかったもの (L_1) と 2 番目に小さかったもの (L_2) について、ある測線上の L_1 とすぐ南側の測線上の L_2 を比較することで、測線間の南向きの輸送を解析した。

仔魚の日齢—体長関係 (Fig. 2.1-2) を用いて L_1 と L_2 体長時における日齢を算出し、それぞれ d_1 , d_2 とした。日齢—体長関係の切片に年間差異がみられたため (ANCOVA, $P < 0.001$), d_1 と d_2 はそれぞれの採集年の回帰線を用いて算出した。孵化から体長が L_1 に達するまでの平均体長成長速度 (G_1 , mm day⁻¹) を式 2.4 のように求めた。

$$G_1 = \frac{L_1 - L_{hatch}}{d_1} \quad (2.4)$$

ここで、 L_{hatch} は孵化体長 2.7 mm (Fukuhara, 1983) である。孵化から体長が L_2 に達するまでの平均成長速度 (G_2) も同様に求めた。ある測線の L_1 から隣り合う南の測線の L_2 までの体長の増分 (L_{inc}) を式 2.5 のように算出した。

$$L_{inc} = \frac{G_{2,south} + G_{1,north}}{2} \times (d_{1,south} - d_{2,north}) \quad (2.5)$$

ここで、 $G_{1,north}$ ($d_{1,north}$) はある測線における G_1 (d_1), $G_{2,south}$ ($d_{2,south}$) は隣り合う南の測線における G_2 (d_2) である。

仔魚の成長解析

仔魚の $G_{Sotolith}$ を目的変数とし、採集時の海洋環境を説明変数として仔魚の成長を解析した。説明変数の候補として、SST, CTD データ最上層における塩分 (SSS), 溶存酸素 (DO), クロロフィル濃度 ($Chla_0$) および $\Delta\rho$ を用いた。また、これらの海洋環境変数に対して主成分分析を行い、得られた主成分をモデルの説明変数として用いる方法も検討した。主成分分析の結果、主成分 1 (PC1) と主成分 2 (PC2) が海洋環境変数の分散の 88.3% を説明することがわかったため (結果, Table 2.1.1), 主成分 1 と主成分 2 を説明変数の候補とした。 $G_{Sotolith}$ と仔魚の体長との間に有意な相関が認められたため、仔魚の体長もモデルの説明変数の候補とした。

成長解析では、誤差項に正規分布を仮定した線形モデル (式 2.6) と、仔魚が成長速度依存的な生残過程を経験すると考え、誤差項にガンマ分布を仮定した一般化線形モデル (式 2.7) とを

検討した。

$$G_{5otolith_{ij}} \sim N(\mu_{ij}, \sigma^2) \quad (2.6)$$

$$G_{5otolith_{ij}} \sim Gamma(\mu_{ij}) \quad (2.7)$$

ここで、 $G_{5otolith_{ij}}$ は調査点 i における個体 j の成長速度、 μ_{ij} は調査点 i における個体 j の体長および経験した海洋環境、 σ^2 は標準偏差である。使用する説明変数およびそれらの相互作用の有無も含めた全ての組み合わせのモデルを作成し、最適モデルを Vuong の方法 (松尾, 2004) によって決定した。

2.1.3 結果

海洋環境

2012 年 7 月 29–8 月 5 日の北海道海域 15 調査点の SST は 12.4–21.7°C の範囲にあった (Table. 2.1.2, Fig. 2.1-3 左上)。襟裳岬以南の Stns 1–9 では 17.0–21.7°C と比較的高水温であったのに対し、襟裳岬以北の Stns 10–15 では 12.4–15.9°C と比較的低水温であった。調査海域の北東部に位置する Stns 6–12, 15 の水深 100 m における水温は 1.3–3.3°C であった (Fig. 2.1-3 右上)。塩分と密度の値も総合すると (Fig. 2.1-4)、これらの調査点の水深 100 m には親潮系水が分布していたことがわかった。水深 100 m における水温 (7.2–9.2°C, Fig. 2.1-3 右下)、塩分と密度 (Fig. 2.1-4) から同様に判断すると、Stns 1–5 には津軽暖流系水が分布していたことがわかった。ただし、これらの調査点においてもおよそ水深 200 m 以深には親潮系水や低層低温水系水が分布していた (Fig. 2.1-4)。

2011 年 8 月 6–12 日の三陸-北海道海域 17 調査点の SST は 18.6–24.6°C と北海道海域より比較的高く、さらに調査海域内では北部で低く、南部で高い傾向が見られた (Table. 2.1.3, Fig. 2.1-3 左下)。水深 100 m における水温 (Fig. 2.1-3) および塩分と密度 (Fig. 2.1-4) から、調査海域の南東部に位置する Stns 3, 5 には親潮系水が、その他の調査点には津軽暖流系水が分布していたことがわかった。ただし、Stn 2 と Stns 8–16 においても、水深 100m 以深には親潮系水や低層低温水系水が分布していた (Fig. 2.1-5)。調査海域の南東部に位置する Stn 6 では、水深お

よそ 50–90 m に黒潮系水が観測された。

北海道海域と三陸-北海道海域で観測された流向流速の空間分布を Fig. 2.1-6 に示した。両海域では、観測された海流の 90% 以上が南向き成分であった (Fig. 2.1-7)。観測された流向のうち、北海道海域では 54% 以上が、三陸-北海道海域では 66% 以上が西向き成分であった (Fig. 2.1-7)。流速は、北海道海域では 0.4–2.0 kt、三陸-北海道海域では 0.6–5.3 kt の範囲にあり、平均流速はそれぞれ 0.9 kt と 1.2 kt であった。

海洋環境パラメタについての主成分分析の結果を Table. 2.1.1 に示した。主成分 1 と 2 の標準偏差は 1 を超え、分析に用いた各海洋環境パラメタをよく代表することがわかった。また、主成分 1 と 2 によって海洋環境パラメタの分散の 88.2% を説明できることがわかった。主成分 1 と 2 の主成分負荷量および各調査点の海洋環境パラメタの主成分得点を Fig. 2.1-8 に示した。主成分 1 を示す x 軸（第 1 軸）の値が大きくなるほど SST と SSS が高く、DO と Chl_0 および $\Delta\rho$ は低かった。主成分 2 を示す y 軸（第 2 軸）の値が大きくなるほど SSS は高く、 $\Delta\rho$ は低かった。

卵仔魚の分布

北海道海域と三陸-北海道海域において、カタクチイワシ卵仔魚が採集された (Tables. 2.1.2, 2.1.3, Fig. 2.1-9)。北海道海域では、カタクチイワシ卵は SST が 17.0°C 以上であった Stns 1–9 に加え、SST が 15.9°C であった道東の Stn 10 でも採集された (Fig. 2.1-9 左上)。卵分布密度の最高値と最低値はそれぞれ 114.07 粒 m^{-2} (Stn 6) と 0.06 粒 m^{-2} (Stn 10) で、卵の加重平均水温 T_{egg} は 16.9°C であった。カタクチイワシ仔魚の分布は襟裳岬以南の Stns 1–9 に限られた (Fig. 2.1-9 右上)。仔魚分布密度の最高値と最低値はそれぞれ 5.15 尾 m^{-2} (Stn 8) と 0.09 尾 m^{-2} (Stn 9) であった。仔魚が採集された最低 SST は 16.7°C であった。仔魚の加重平均水温 T_{larva} は 19.1°C と、 T_{egg} よりも高かった。三陸-北海道海域では、カタクチイワシ卵は水温的にも地理的にもパッチ状に分布した (Fig. 2.1-9 左下)。卵の分布密度の最高値と最低値はそれぞれ 70.16 粒 m^{-2} (Stn 10) と 0.04 粒 m^{-2} (Stn 8) であった。三陸-北海道海域では、SST が最低値 (18.6°C) と最高値 (24.4°C) を示した Stns 16 と 3 においてもカタクチイワシ卵が採集された。 T_{egg} と T_{larva} はそれぞれ 24.0°C と 23.8°C であった。

仔魚の体長組成

北海道海域で採集された仔魚の体長範囲は 4.8–25.1 mm で、モードは 12–14 mm にあった (Table. 2.1.4, Fig. 2.1-10 上). 仔魚の体長組成を調査点別にみると, Stn 6 以外の調査点において正規分布に従った (Kolmogorov-Smirnov test, $P > 0.05$) (Fig. 2.1-11). Stn 6 では 90% 近くを占めた体長階級 6–8 mm の仔魚に加え, 16 mm 以上の体長階級に属する仔魚もわずかに採集された. 仔魚の平均体長は Stns 1–3, 7–9 では 11.8–13.9 mm であったのに対し, Stns 4–6 では 7.3–9.3 mm と小さい傾向にあった. 仔魚の平均体長は 13.8 mm であった.

三陸-北海道海域で採集された仔魚の体長範囲は 5.9–28.6 mm と北海道海域よりも大きかったが, モードは 8–10 mm と北海道海域よりも小さかった (Table. 2.1.5, Fig. 2.1-10 下). 調査点別にみると, 三陸-北海道海域における仔魚の体長組成は北海道海域よりも複雑であった. 体長組成は Stns 1–3, 8, 11–12 において正規分布しておらず (Kolmogorov-Smirnov test, $P < 0.05$), その他にも Stns 9, 15 において双峰型を示した (Fig. 2.1-12). 仔魚の平均体長は 12.1 mm と, 北海道海域よりも有意に小さかった (Mann-Whitney U test, $P < 0.01$).

北海道海域の Trn-4140 (Stns 4–6) と Trn-4100 (Stns 1–3) における仔魚の体長組成はともに 3 つの正規分布に分離された (Fig. 2.1-13). Trn-4140 上の L_1 (5.9 mm) が属する正規分布が南の Trn-4100 へと輸送されると考えると (考察), Trn-4100 上の L_2 (12.1 mm) は Trn-4140 上の L_1 (5.9 mm) と L_{inc} (6.5 mm) の合計 (12.4 mm) と実質的に同じであった (Table 2.1.6).

三陸-北海道海域の各緯度測線における仔魚の体長組成は 2 つまたは 3 つの正規分布に分離された (Fig. 2.1-14). 南への輸送を考えると (考察), Trn-4100 上の L_2 (15.8 mm) は Trn-4140 上の L_1 (9.8 mm) と L_{inc} (4.8 mm) の合計 (14.6 mm) と実質的に同じであった (Table 2.1.6). 同様に Trn-4020, Trn-3940 および Trn-3900 上の L_2 も, 隣り合う北の測線上の L_1 と L_{inc} の和と概ね一致した (Table 2.1.6).

仔魚の日齢と孵化日

北海道海域で採集された仔魚の日齢組成は正規分布に従い (Kolmogorov-Smirnov test, $P > 0.05$), 日齢は 4–26 の範囲にあった (Fig. 2.1-15 上). 一方, 三陸-北海道海域で採集された

仔魚の日齢組成は正規分布に従わず、日齢は 4–35 の範囲にあった (Fig. 2.1-15 下). 北海道海域と三陸-北海道海域で採集された仔魚の平均日齢は、それぞれ 13.4 と 13.6 日齢と近似した (Mann-Whitney U test, $P > 0.05$).

三陸-北海道海域において、仔魚の孵化日は 2011 年 7 月 2 日–8 月 9 日の範囲にあり、モード (7 月 31–8 月 2 日) は中央値 (7 月 27 日) よりも晚かった (Fig. 2.1-16 右). 北海道海域では、2012 年 7 月 7–28 日に孵化した仔魚が採集された (Fig. 2.1-16 右). 北海道海域においても、仔魚の孵化日のモード (7 月 25–27 日) は中央値 (7 月 21 日) よりも晚かった.

仔魚の成長

北海道海域と三陸-北海道海域どちらにおいても、仔魚の平均成長速度は正規分布に従わなかった (Kolmogorov-Smirnov test, $P > 0.01$) (Fig. 2.1-17). 三陸-北海道海域では、仔魚の G のモードは $0.6\text{--}0.7\text{ mm day}^{-1}$ にあったが、北海道海域では $0.8\text{--}0.9\text{ mm day}^{-1}$ にモードを持つ峰に加えて 0.5 mm day^{-1} 未満にも峰が見られた. G の平均値は北海道海域 (0.85 mm day^{-1}) で三陸-北海道海域 (0.67 mm day^{-1}) より高かった (Mann-Whitney U test, $P < 0.01$).

仔魚の耳石半径と体長の両対数関係は、北海道 (式 2.8) および三陸-北海道 (式 2.9) の両海域において有意に線形回帰され (t test, $P < 0.01$), 回帰直線の傾きは海域間で有意に異なった (ANCOVA, $P < 0.05$) (Fig. 2.1-18).

$$\log L = 0.43 \times \log R + 1.09 \quad (2.8)$$

$$\log L = 0.52 \times \log R + 0.65 \quad (2.9)$$

7 月前半コホートにおいても 7 月後半コホートにおいても、仔魚の耳石成長履歴に海域差はなかった (Mann-Whitney U test, $P > 0.05$) (Fig. 2.1-19). 同一海域内で比較すると、耳石成長履歴のコホート間差異は三陸-北海道海域のみににおいて認められた (Fig. 2.1-20 左). 三陸-北海道海域で採集された 7 月前半・後半コホートは、8 月前半コホートよりもそれぞれ 4–7 日齢時と 4–9 日齢時において有意に耳石半径が大きかった (Mann-Whitney U test, $P < 0.05$). 7 月後半コホートの日齢時耳石半径は前半コホートよりも 12 日齢時にのみ大きかったが (Mann-Whitney U test, $P < 0.05$), その他の期間においては近似した.

仔魚の採集前5日間における平均耳石成長速度は体長と主成分分析から得られた主成分1によって説明された (Table. 2.1.7). 耳石成長速度の実測値 ($G_{5otolith}$) とモデル推定値 (G_{5glm}) との残差は推定値や説明変数の変化に対して一定の傾向を見せず, また-1 から 1 の比較的狭い範囲に収まったことから, 本モデルの妥当性が確認された. 仔魚の成長は体長と主成分1の増加によって有意に加速され, 体長の影響が特に大きいことがわかった (Table. 2.1.7, Fig. 2.1-22).

2.1.4 考察

親潮域における産卵

本研究は, 詳細な海洋観測と卵の定量的採集を行い, 海洋学的に親潮域に分類される水域においてカタクチイワシが産卵していることを確認した. これまでにも, 北日本沖合域における卵の採集例はあったものの (三原, 1994; 小達, 1957), いずれにおいても卵仔魚分布と海洋環境との対応関係は不明であった. 本研究では, 水温と塩分を用いた海洋学的な判断基準 (Hanawa and Mitsudera, 1987) によって, 北海道海域の全域と三陸-北海道海域のほとんどの調査点の 200 m 以深で親潮系水の分布を確認した (Fig. 2.1-4, 2.1-5). さらに, 襟裳岬以東の北緯およそ 41 度 40 分以北ではおよそ 100 m 以浅でも親潮が観測され, カタクチイワシ卵はこれらの調査点を含む計 16 調査点で採集された (Fig. 2.1-9). 本研究は, 主に黒潮系暖水域に形成されるカタクチイワシの産卵場が, 亜寒帯の親潮系冷水域へと拡大したことを初めて明らかにしたのである.

このような海洋学的性質の大きく異なる海域への産卵場の拡大は, カタクチイワシに特異的な現象である. 資源量の増加に伴う緯度方向の産卵場拡大は, 北米カタクチイワシ *Engraulis mordax* (Checkley et al., 2009), ヨーロッパカタクチイワシ *E. encrasicolus* (Bellier et al., 2007), チリマイワシ *Sardinops sagax* (Kreiner et al., 2011) など他の海流系のイワシ類においても報告されているが, これら東岸湧昇域では等温線が海岸線にほぼ平行に走り, 緯度方向には水温勾配がほとんどみられない (Buckingham et al., 2014; Michel et al., 2009). マイワシの産卵場も 1980 年代前半の資源量増加に伴って黒潮内側域から黒潮流軸内へと沖合方向へ拡大したが (Watanabe et al., 1996a; 菊地ら, 1992), 亜寒帯前線を越えて親潮系冷水域へ拡大することはなかった. マイワシ *Sardinops melanostictus*, サンマ *Cololabis saira*, サバ類, ウナギ類やサケ類

など、1000 km を超える大回遊を行う魚類が産卵回帰を行うこと自体が、産卵場位置の保守性を示している (Corten, 2002).

本研究の結果は、親潮系冷水域におけるカタクチイワシの産卵生態も、水温の観点から見れば保守的であったことを意味している。北海道海域と三陸-北海道海域では、下層に親潮が存在する水域において卵が採集されたが、卵が採集された最低 SST は 15.9°C と、既知の産卵水温の下限 (靄田, 1992) とほぼ一致した (Table. 2.1.2, Fig. 2.1-9). 親潮系冷水域へのカタクチイワシの産卵場拡大は、夏季における表層の季節昇温を利用することによって可能になっていたのである.

親潮系冷水域のカタクチイワシは、低水温の水塊を索餌場として、高水温の水塊を産卵場に利用しているのかもしれない。黒潮-親潮移行域は渦やストリーマによるフロントに富んだ複雑な構造を持つ海域である (Kawai, 1972). この海域でみられる冷水ストリーマは、近傍の暖水渦や暖水ストリーマと比べて非常に高い生物生産を示すことが知られており (Furuya et al., 1998), この海域の $5\text{--}13^{\circ}\text{C}$ の低水温域では吸水卵を持ったカタクチイワシが採集されている (Funamoto and Aoki, 2002; 靄田・高橋, 1997). マイワシでは、沿岸域に分布する群れの中から、ある夜に産卵が可能になった個体が産卵群を形成して沖合の黒潮流軸内へ移動して産卵し、再び沿岸域へ戻ることが報告されている (Aoki and Murayama, 1993). 本海域における産卵水温の下限が黒潮系暖水域と同様におよそ 15°C であることを考え併せると、この水温よりも低水温の水域で採集された成熟雌は (Funamoto and Aoki, 2002; 靄田・高橋, 1997), 産卵に備えて冷水域で摂餌をしていた個体と理解することができる.

親潮域における仔魚の成長

本研究は詳細な成長解析によって、海洋学的に親潮域に分類される水域がカタクチイワシ仔魚の成育場として十分に機能しうることを明らかにした。北海道および三陸-北海道の両海域で採集された仔魚の孵化から採集時までの平均体長成長速度 G の平均値はそれぞれ 0.85 mm day^{-1} と 0.67 mm day^{-1} であった (Fig. 2.1-17). 飼育条件下における G の平均値として、カタクチイワシ ($2.7\text{--}38.0\text{ mm L}$) では 0.43 mm day^{-1} が (Fukuhara, 1983), Bay anchovy *Anchoa mitchilli* ($4.2\text{--}16\text{ mm L}$) では 0.7 mm day^{-1} が (Houde and Schekter, 1981; Kramer and Zweifel, 1970), 北米

カタクチイワシ (4–35 mm L) では 0.67 mm day^{-1} が (Detwyler and Houde, 1970) 報告されている。野外採集個体の G の平均値としては、瀬戸内海のカタクチイワシ (12.0 mm L) から 0.76 mm day^{-1} が (Zenitani et al., 2009), ビスケー湾のヨーロッパカタクチイワシ (2.4–20.9 mm L) から 0.6 mm day^{-1} が (Cotano et al., 2008) 報告されている。本来の成育場ではない親潮系冷水域におけるカタクチイワシ仔魚の成長速度は、飼育個体のみならず世界の主要な成育場におけるカタクチイワシ類の成長速度に匹敵していたことがわかった。

仔魚の瞬間耳石成長速度 $G_{5\text{otolith}}$ は、仔魚の体長の影響を大きく受け、体長成長とともに増加した (Table. 2.1.7, Fig. 2.1-22)。一方、先行研究には魚類の仔魚の体長成長速度と体サイズとの負相関を示した例があり (Buckel et al., 1995; Zenitani et al., 2009), 本研究の結果はこれらと矛盾したように見える。一般に、魚類の仔魚の成長様式は、横軸に日齢、縦軸に体長をとったゴンペルツ曲線によって表現できる。この手法を用いた研究から、ヨーロッパカタクチイワシ仔魚 (3.9–23.7 mm L) の日齢–体長関係の変曲点が 11–17 日齢であることが報告され (Palomera et al., 1988), サンマ仔魚においては、成長速度は体長およそ 15 mm まで急激に増加し、その後は緩やかに単調減少することが報告されている (Oozeki et al., 2004)。本研究で観測された体長成長に伴う $G_{5\text{otolith}}$ の加速は、仔魚の日齢が主に成長様式の変曲点より若齢側に分布していたことによると考えられた (Fig. 2.1-15)。仔魚の G を単純に比較した場合に、北海道海域が三陸-北海道海域よりも高かったのは (Fig. 2.1-17), 平均体長の有意な海域差による (Fig. 2.1-10) と考えられた。

仔魚の成長速度増加のほとんどは体長成長によるが、海洋環境も仔魚の成長に影響を与えることがわかった (Table. 2.1.7, Fig. 2.1-22)。各海洋環境変数の主成分負荷量に着目すると (Fig. 2.1-8), 主成分 1 の得点は、表層水が黒潮系水の性質に近いことを意味することがわかった。体長を揃えた場合には、成長速度は黒潮系水の表層水に分布する仔魚で高く (Fig. 2.1-22 左), つまり体長成長に伴う成長速度の加速度を高めるためには、北海道海域に分布する仔魚は三陸-北海道海域へ輸送されることが望ましいと考えられた。

輸送環境と初期生態

本章の調査海域で観測された親潮第一分枝、津軽暖流、黒潮系水は、仔魚の成長や資源構造に影響を与えると考えられる。北海道および三陸-北海道の両海域において観測された海流の流向は過半数が南西向きであった (Fig. 2.1-6, 2.1-7)。北海道海域の Stns 6, 7, 10–15 では南西流とともに観測された水深およそ 200 m 以浅の低塩分水は、西部の亜寒帯循環である親潮第一分枝と考えられる。本海域では、暖水渦による弱い東向きの流れが偶発的に観測されるが、親潮第一分枝が定常的な強い南西流として周年観測されることがわかっている (Uehara et al., 1997)。このような輸送環境を考えると、北海道海域に産み出された卵仔魚は南西向きに輸送されながら成長していることが想定され、仔魚の体長の緯度測線間比較の結果も、本海域に分布する仔魚の南方への輸送を示唆した。これを支持するように、北海道海域の T_{larva} (19.1°C) は T_{egg} (16.9°C) よりも高く、三陸-北海道海域の T_{larva} (23.8°C) は同海域の T_{egg} (24.0°C) よりも低かったものの北海道海域の T_{larva} (19.1°C) を上回った。また、仔魚の体長組成と日齢組成が三陸-北海道海域のみで正規分布に従わなかったことも (Fig. 2.1-10, 2.1-15)、北海道海域から本海域への仔魚の輸送を意味しているのかもしれない。親潮系冷水域における産卵水温の下限が黒潮域と同様に 15°C であることを考えると、親潮第一分枝による南西への輸送は、仔魚の経験水温と成長速度が黒潮系暖水域と同程度になることを可能にすると考えられる。

一方で、三陸-北海道海域の輸送環境は、複数の発生海域からのカタクチイワシ仔魚の移入も示唆した。本海域の北西部で観測された強い南東流は津軽暖流と判断された (Fig. 2.1-6)。この海流の上流に位置する対馬暖流域ではカタクチイワシ対馬暖流系群が再生産を行っている (内田・道津, 1958)。5–6 月には、常磐・三陸海域で産卵が始まるよりも早く、青森県の日本海・太平洋海域で卵が採集されることがあり^{*i}、また津軽暖流系水が本海域全域の低層に観測されたことから (Fig. 2.1-5)、対馬暖流域で発生した仔魚が津軽海峡を經由して三陸-北海道海域へ移入していることが考えられる。

また、常磐南部の沿岸域では、黒潮続流の北上時に沿岸へ分派する暖水反流に載ってカタクチイワシ仔魚が来遊するとされており (黒山ら, 2006)、三陸-北海道海域の Stn 6 で黒潮系水が観

^{*i} 日本海区水産研究所 後藤常夫博士私信

測されたことや (Fig. 2.1-5), 黒潮由来の暖水ストリーマが三陸沖合海域にまで到達することを考えると, 黒潮系暖水域からの仔魚の来遊可能性も否定できない. 親潮系冷水域の資源構造を理解するためには, 他海域からの仔魚の移入の量的規模について粒子追跡実験によって調べる必要があるだろう.

本節で行った研究によって, 亜寒帯の親潮域へのカタクチイワシの産卵場拡大は, 低水温環境での産卵ではなく, 表層の季節的昇温を利用した産卵によっていたことがわかった. 成長速度から本海域がカタクチイワシ仔魚の成育場として十分に機能しており, 親潮第一分枝による南西方向への輸送が仔魚の経験水温を黒潮系暖水域と近似した値に保つことも, 本海域が成育場として機能する上で重要と考えられた.

Table 2.1.1: Summary of principal component analysis on the environmental factors in Hokkaido and Sanriku-Hokkaido Areas. Standard deviation, proportion of variance, cumulative proportion of each principal components (PCs) are shown.

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
Standard deviation	1.80	1.07	0.64	0.35	0.25
Proportion of variance	65.2	23.1	8.1	2.5	1.2
Cumulative proportion	65.2	88.2	96.3	98.8	100.0

Table 2.1.2: Sampling results of anchovy eggs and larvae in Hokkaido Area in the research cruise KT-12-19 by R/V *Tansei-maru*.

Stn	Date and time (JST)	Latitude (N)	Longitude (E)	T0 (°C)	T100 (°C)	Egg ($N\ m^{-2}$)	Larva ($N\ m^{-2}$)
1	4 Aug 02:11	40° 60.0′	142° 30.0′	19.7	8.8	0.24	1.20
2	3 Aug 23:32	40° 60.0′	143° 00.3′	20.6	8.4	0.10	1.87
3	3 Aug 19:49	40° 59.9′	143° 31.2′	19.9	9.2	0.16	0.77
4	1 Aug 19:47	41° 39.9′	142° 30.1′	19.4	9.1	3.24	1.05
5	1 Aug 23:15	41° 37.9′	142° 59.9′	21.7	7.2	0.49	0.69
6	2 Aug 02:07	41° 40.0′	143° 30.1′	16.7	2.4	114.07	0.12
7	3 Aug 02:38	41° 40.1′	144° 00.2′	17.3	3.3	3.75	1.76
8	2 Aug 22:52	41° 39.9′	144° 29.7′	18.5	1.6	2.40	5.15
9	2 Aug 19:48	41° 40.0′	145° 00.6′	17.0	3.1	0.08	0.09
10	1 Aug 01:35	42° 19.9′	144° 00.1′	15.9	1.3	0.06	0.00
11	31 Jul 22:21	42° 20.1′	144° 30.1′	13.4	1.8	0.00	0.00
12	31 Jul 19:40	42° 19.8′	144° 60.0′	14.7	1.9	0.00	0.00
13	31 Jul 00:34	42° 49.4′	144° 33.8′	12.4	2.7 ^a	0.00	0.00
14	30 Jul 21:59	42° 50.0′	145° 00.0′	13.1	1.8 ^b	0.00	0.00
15	30 Jul 19:20	42° 50.0′	145° 29.2′	12.5	1.4	0.00	0.00

^a Value at 91 m depth

^b Value at 97 m depth

Table 2.1.3: Sampling results of anchovy eggs and larvae in Sanriku-Hokkaido Area in the research cruise KT-11-18 by R/V *Tansei-maru*.

Stn	Date and time (JST)	Latitude (N)	Longitude (E)	T0 (°C)	T100 (°C)	Egg ($N\ m^{-2}$)	Larva ($N\ m^{-2}$)
1	8 Aug 19:16	39° 00.0′	142° 00.6′	22.1	11.2	0.00	0.39
2	8 Aug 22:26	38° 59.8′	142° 30.8′	24.6	7.2	0.00	1.79
3	9 Aug 01:41	39° 00.5′	143° 00.6′	24.4	5.6	0.08	1.43
4	7 Aug 19:16	39° 40.0′	142° 09.5′	23.5	10.0	0.00	0.06
5	7 Aug 21:41	39° 39.7′	142° 30.6′	23.0	5.0	0.00	1.64
6	8 Aug 00:51	39° 40.0′	143° 00.9′	23.6	9.9	0.00	2.78
7	10 Aug 19:43	40° 19.9′	142° 00.0′	21.6	11.4 ^a	0.00	0.50
8	10 Aug 22:51	40° 19.4′	142° 29.7′	22.8	10.1	0.04	0.20
9	11 Aug 01:54	40° 19.2′	142° 59.9′	20.8	8.2	0.00	0.08
10	9 Aug 22:44	40° 19.4′	143° 29.9′	24.1	9.6	70.16	4.11
11	9 Aug 19:43	40° 19.3′	143° 59.6′	24.0	7.8	0.00	11.43
12	6 Aug 19:21	41° 00.3′	141° 59.9′	23.0	12.5	0.00	0.06
13	6 Aug 22:46	40° 59.2′	142° 29.8′	18.8	10.3	0.66	0.03
14	7 Aug 02:10	40° 59.5′	143° 00.3′	20.2	9.5	0.00	0.40
15	12 Aug 02:36	41° 39.7′	141° 59.8′	19.5	13.6	0.00	0.04
16	11 Aug 23:00	41° 39.4′	142° 30.1′	18.6	12.5	0.05	0.01
17	11 Aug 19:46	41° 39.9′	142° 59.1′	20.3	10.8	0.05	0.09

^a Value at 95 m depth

Table 2.1.4: L (mm), d (days), and date of hatch of anchovy larvae collected in Hokkaido Area in the research cruise KT-12-19 by R/V *Tansei-maru*. N.D. represents not detected.

Stn	Sampling date	T0 (°C)	L (mm)	N	d (days)	Date of hatch	N
1	4 Aug	19.7	4.8–17.7	100	9–20	15–26 Jul	10
2	3 Aug	20.6	4.6–21.1	100	7–20	14–27 Jul	7
3	3 Aug	19.9	5.2–19.8	90	9–20	14–25 Jul	10
4	1 Aug	19.4	4.7–15.6	100	4–6	26–28 Jul	2
5	1 Aug	21.7	3.7– 9.6	100	7–8	24–25 Jul	2
6	2 Aug	16.7	4.6–23.0	84	22–26	07–11 Jul	2
7	3 Aug	17.3	5.0–19.9	100	6–11	23–28 Jul	4
8	2 Aug	18.5	4.9–18.3	100	6–16	17–27 Jul	5
9	2 Aug	17.0	7.8–18.9	55	8–22	11–25 Jul	7
10	1 Aug	15.9			N.D.		
11	31 Jul	13.4			N.D.		
12	31 Jul	14.7			N.D.		
13	31 Jul	12.4			N.D.		
14	30 Jul	13.1			N.D.		
15	30 Jul	12.5			N.D.		

Table 2.1.5: L (mm), d (days), and date of hatch of anchovy collected in Sanriku-Hokkaido Area in the research cruise KT-11-18 by R/V *Tansei-maru*.

Stn	Sampling date	T0 (°C)	L (mm)	N	d (days)	Date of hatch	N
1	8 Aug	22.1	6.5–20.8	144	8–19	20–31 Jul	31
2	8 Aug	24.6	4.8–14.6	100	5–21	18 Jul–03 Aug	30
3	9 Aug	24.4	5.1–19.2	172	6–21	19 Jul–03 Aug	30
4	7 Aug	23.5	7.2–18.0	32	7–17	21–31 Jul	30
5	7 Aug	23.0	9.5–23.8	170	13–24	14–25 Jul	29
6	8 Aug	23.6	5.1–15.9	95	5–20	19 Jul–03 Aug	29
7	10 Aug	21.6	6.9–15.0	81	7–24	17 Jul–03 Aug	29
8	10 Aug	22.8	6.5–23.8	84	8–26	15 Jul–02 Aug	31
9	11 Aug	20.8	6.5–26.3	66	10–33	09 Jul–01 Aug	28
10	9 Aug	24.1	4.6– 9.9	92	5–12	28 Jul–04 Aug	30
11	9 Aug	24.0	5.1–16.6	162	4–17	23 Jul–05 Aug	28
12	6 Aug	23.0	8.3–26.5	46	10–35	02–27 Jul	30
13	6 Aug	18.8	10.5–24.1	20	11–28	09–26 Jul	20
14	7 Aug	20.2	8.8–25.7	184	10–27	11–28 Jul	30
15	12 Aug	19.5	6.3–21.1	25	3–26	17 Jul–09 Aug	26
16	11 Aug	18.6	8.0–21.9	6	8–31	11 Jul–03 Aug	6
17	11 Aug	20.3	8.3–18.0	43	8–24	18 Jul–03 Aug	29

Table 2.1.6: L (mm), d (days), G (mm day⁻¹), and L_{inc} (mm) of the normal distributions of larval L in Hokkaido Area in 2012 and Sanriku-Hokkaido Area in 2011.

Area	Transect	Ordinal peak number	L (mm)	(SD)	d (days)	G (mm day ⁻¹)	L_{inc} (mm)
Hokkaido	Trn-4140	1	5.9	(1.0)	3.7	0.85	-
		2	7.8	(1.6)	6.1	0.84	-
	Trn-4100	1	8.8	(2.1)	7.3	0.83	-
		2	12.1	(0.4)	11.4	0.83	6.5
	Trn-4140	1	9.8	(1.8)	10.9	0.65	-
		2	17.2	(2.0)	19.4	0.75	-
Sanriku-Hokkaido	Trn-4100	1	11.2	(1.2)	12.5	0.68	-
		2	15.8	(2.1)	17.8	0.74	4.8
	Trn-4020	1	9.6	(1.2)	10.8	0.64	-
		2	16.1	(3.2)	18.1	0.74	4.0
	Trn-3940	1	9.0	(2.2)	10.0	0.63	-
		2	16.9	(2.2)	19.0	0.74	5.7
	Trn-3900	1	6.5	(0.8)	7.2	0.53	-
		2	11.4	(1.0)	12.8	0.68	1.8

Table 2.1.7: Model coefficient of each parameters in generalized linear model on larval $G_{50tolith}$.

Parameters	Regression coefficient	S.E.	t -value	Pr ($> t $)
Intercept	-1.46	0.14	-10.31	<0.001
L	0.36	0.01	30.18	<0.001
PC1	0.10	0.03	3.43	<0.001

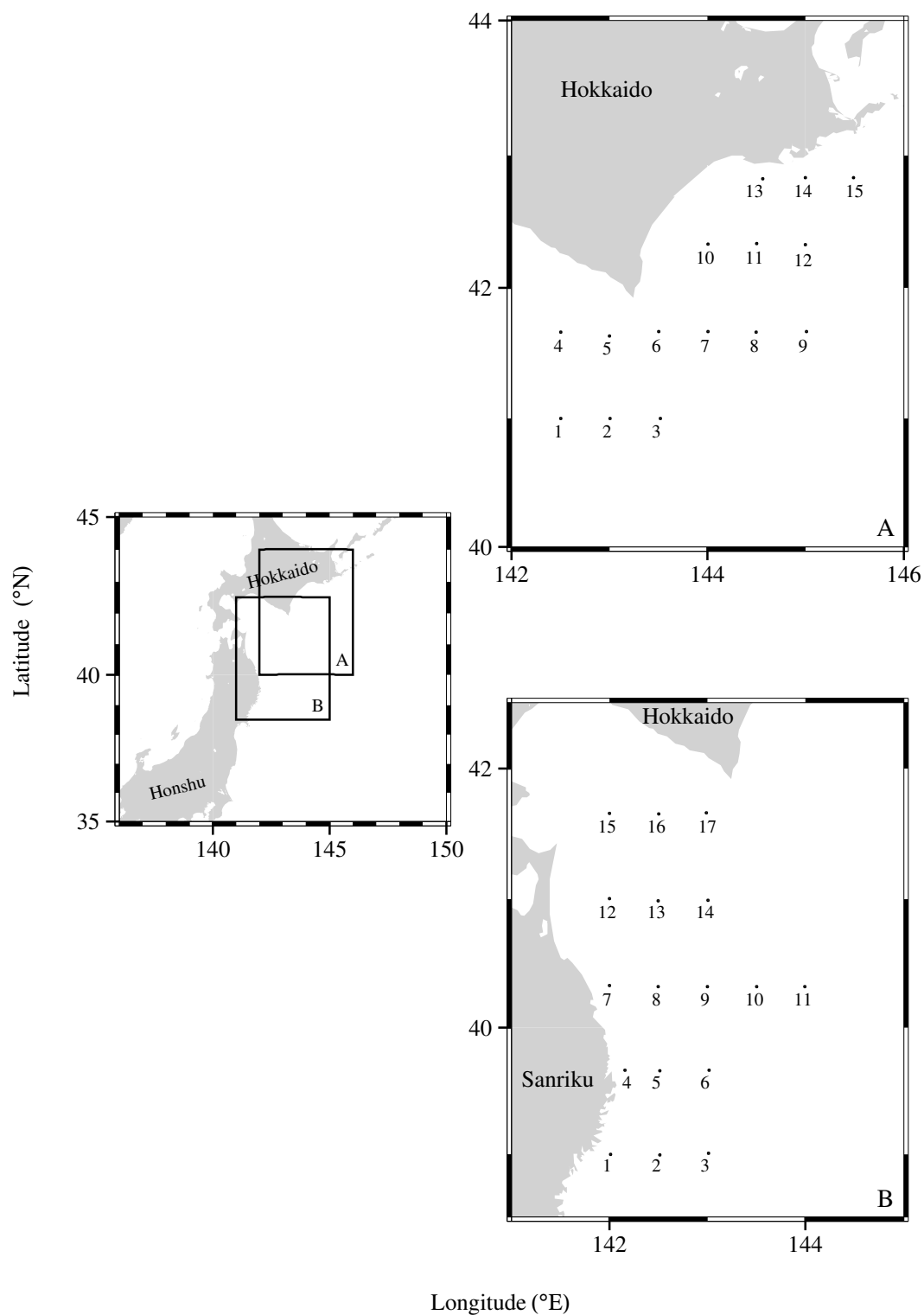


Fig. 2.1-1: Sampling stations of anchovy eggs and larvae in Hokkaido (A, research cruise KT-12-19 during 29 July–5 August 2012) and Sanriku-Hokkaido (B, research cruise KT-11-18 during 6–12 August 2011) Areas by R/V *Tansei-maru*. Ordinal station numbers are shown.

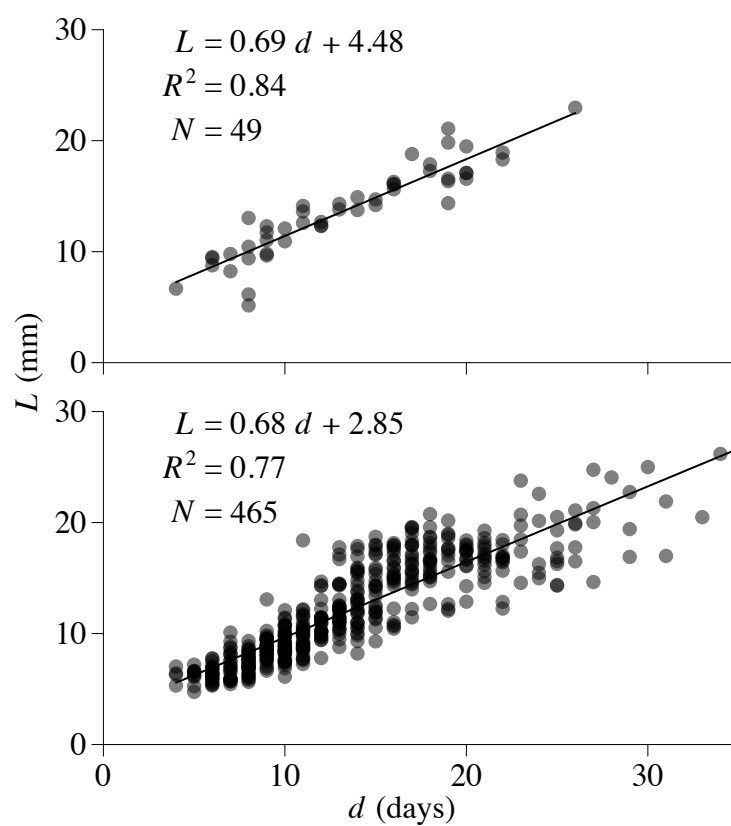


Fig. 2.1-2: d – L relationships of anchovy larvae collected in Hokkaido Area in 2012 (*top*) and Sanriku-Hokkaido Area in 2011 (*bottom*).

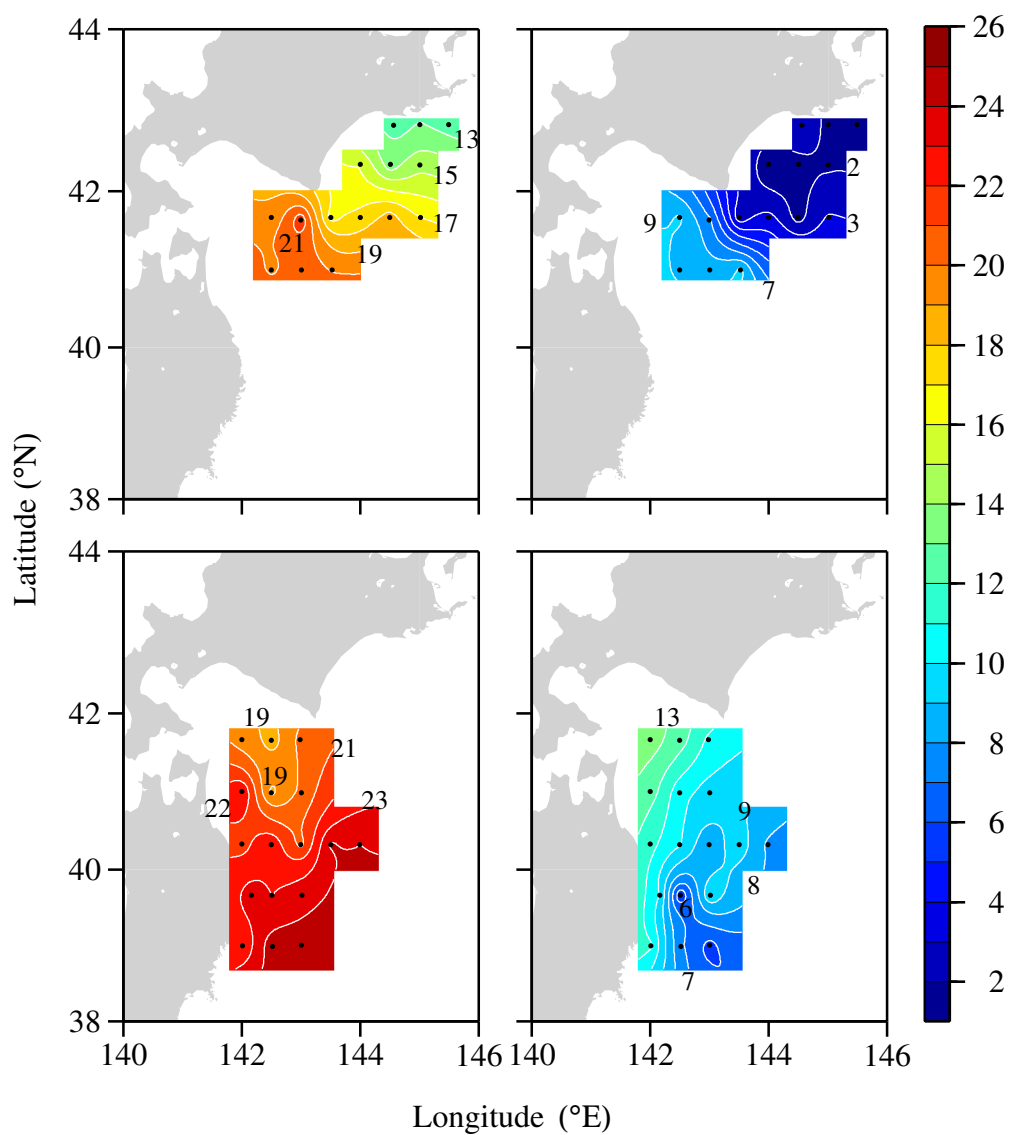


Fig. 2.1-3: Water temperatures at the surface (*left*) and at 100 m depth (*right*) in Hokkaido (*top*) and Sanriku-Hokkaido (*bottom*) Areas.

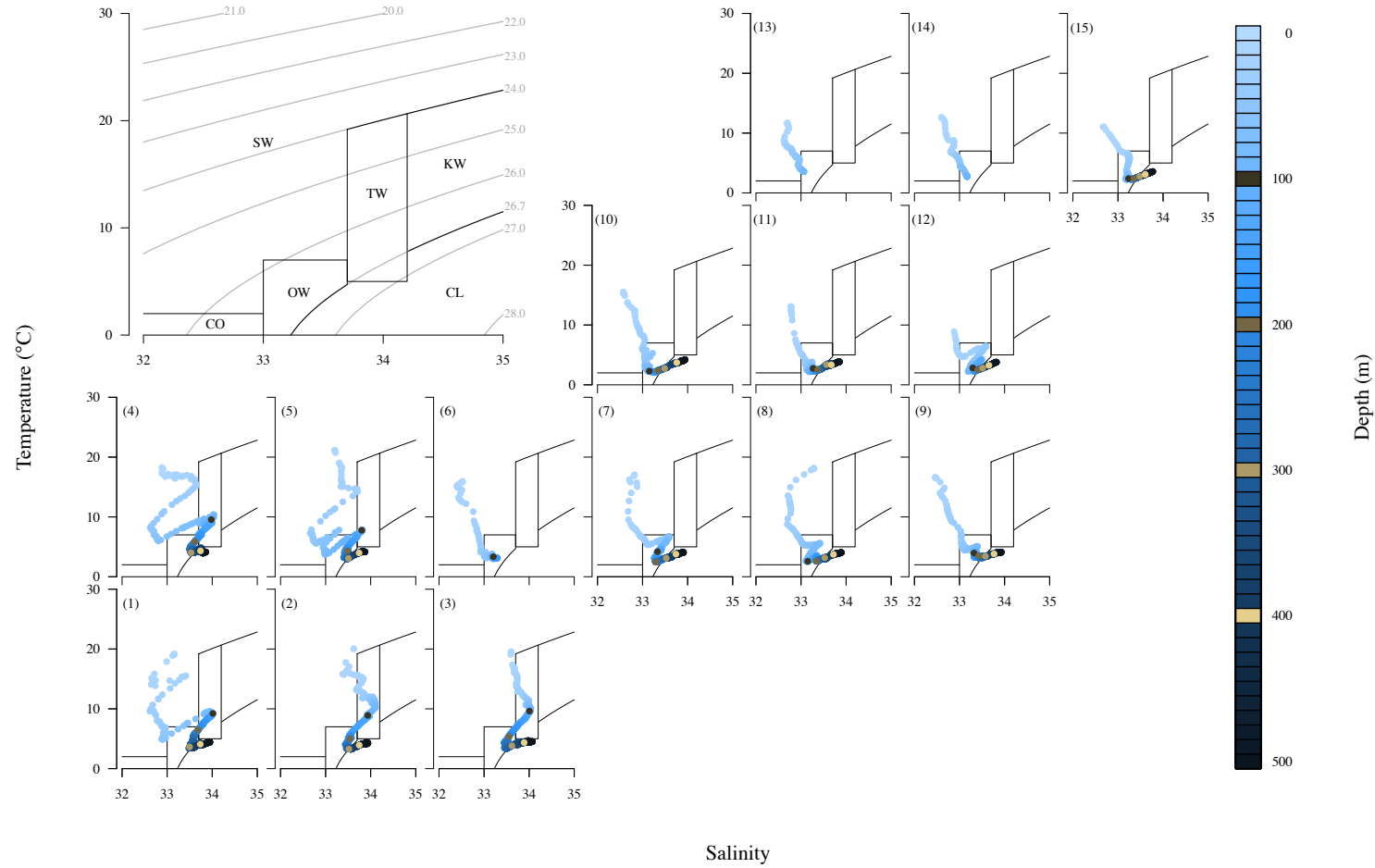


Fig. 2.1-4: T-S diagrams in Hokkaido Area. The arrangement of each small panel corresponds to the geographic location of the stations. Number in parenthesis in each small panel represents the stn number. The legends of density in σ_t (gray lines) and the classification of water system (the Tsugaru Warm Current water system, TW; the Oyashio water system, OW; the Kuroshio water system, KW; the cold lower-layer water system, CL; the surface-layer water system, SW; the Coastal Oyashio water system, CO, Hanawa and Mitsudera, 1987) are shown in the large panel on the top left. Color represents depth.

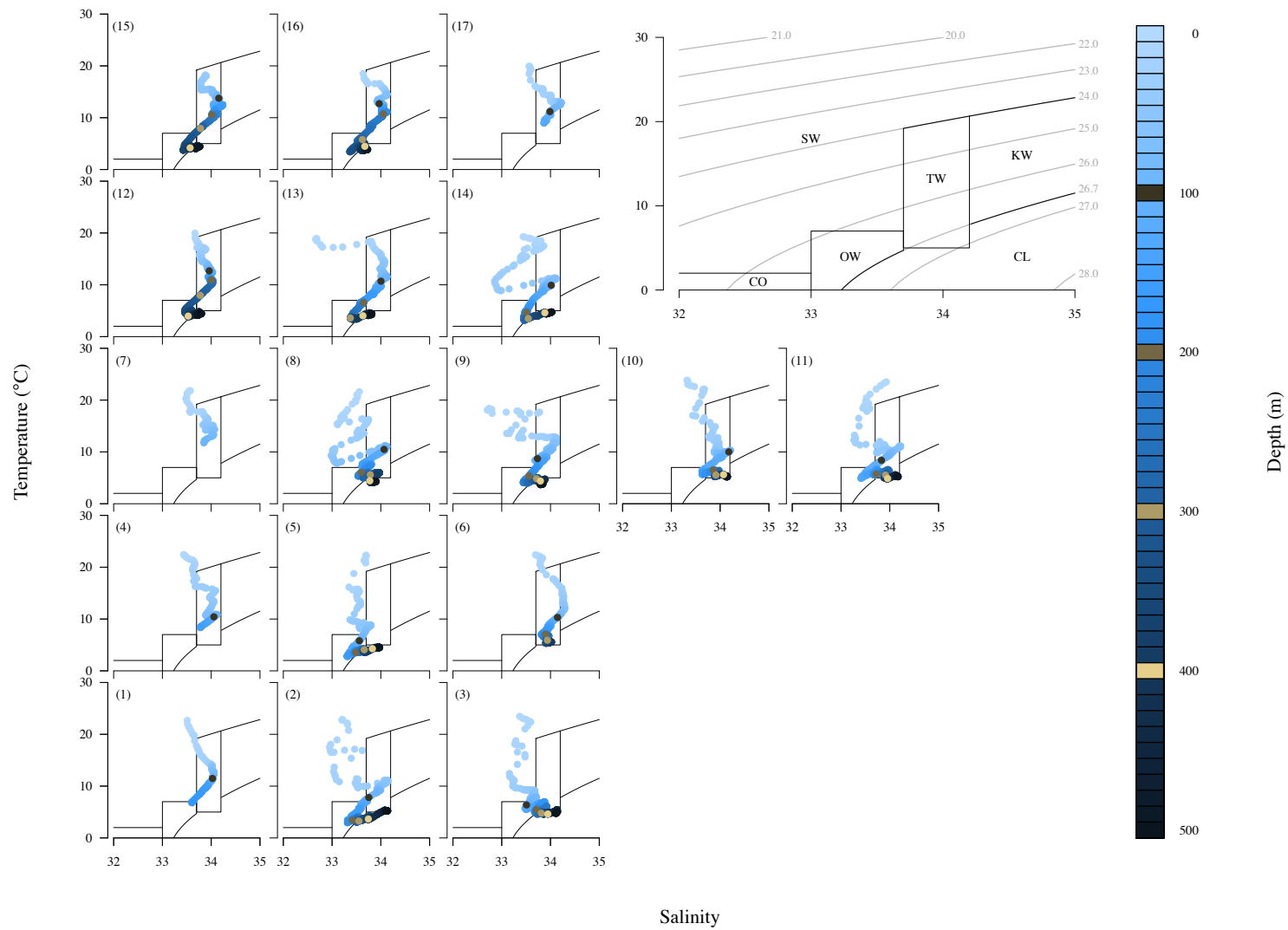


Fig. 2.1-5: T-S diagrams in Sanriku-Hokkaido Area is shown as in Fig. 2.1-4 but for the legends panel on the top right.

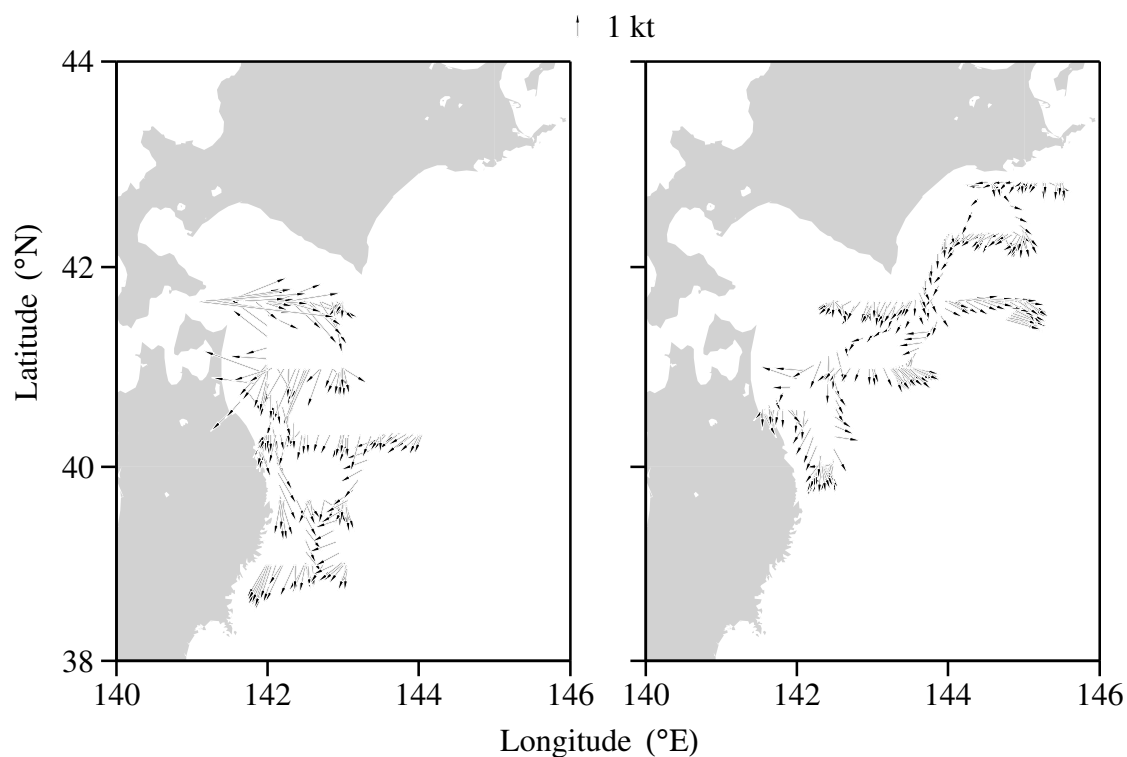


Fig. 2.1-6: Current fields of Sanriku-Hokkaido (*left*) and Hokkaido (*right*) Areas.

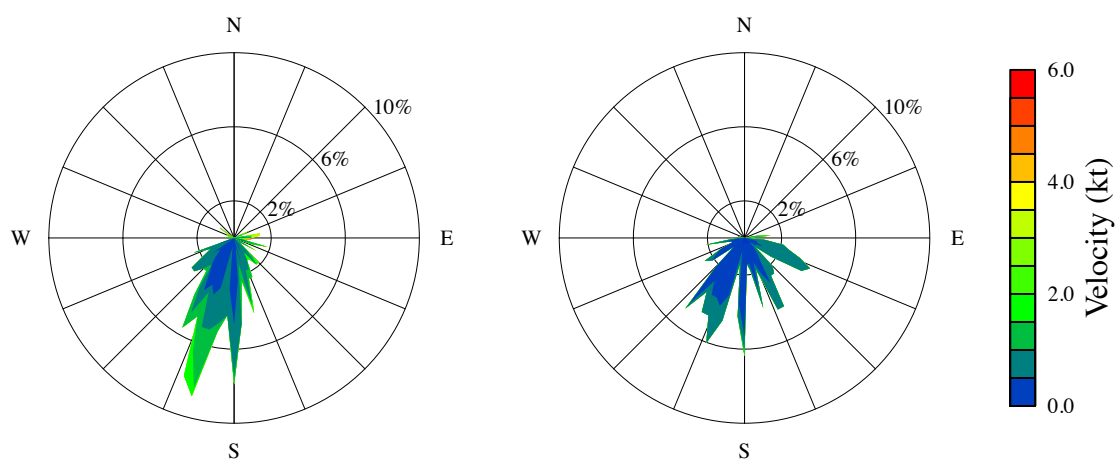


Fig. 2.1-7: Rose diagrams of the currents observed in Sanriku-Hokkaido (*left*) and Hokkaido (*right*) Areas. Color represents the velocity (kt) of the current.

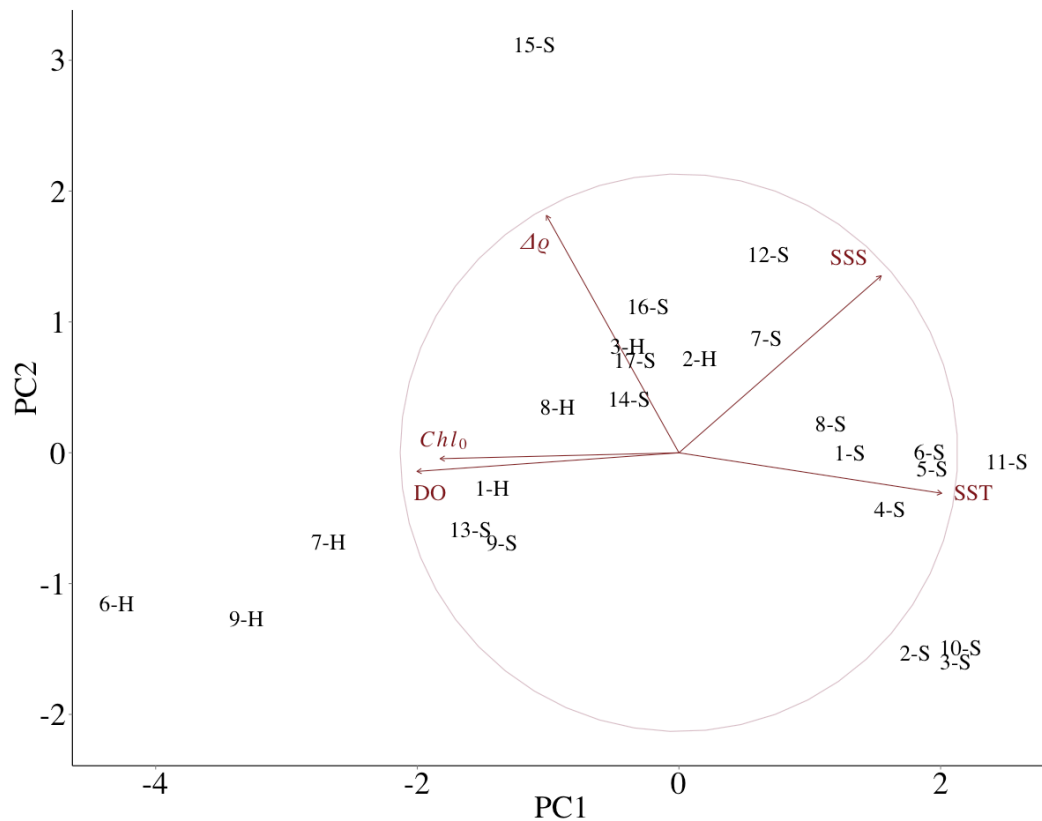


Fig. 2.1-8: Correlation plot of environmental factors (EFs) and oceanographic characters of the sampling stations in Hokkaido and Sanriku-Hokkaido Areas obtained by principal component analysis. The x - and y - axes correspond to the first two components (respectively 65.1% and 23.1% of the variance). The coordinate of each arrow tip reflect principal component loadings of each EF (*red character*). Red circle represents the variance 1 among principal component loadings. The principal component score of each sampling station (*number*) in each area (Hokkaido Area, H; Sanriku-Hokkaido Area, S) are shown in black characters separated by a hyphen.

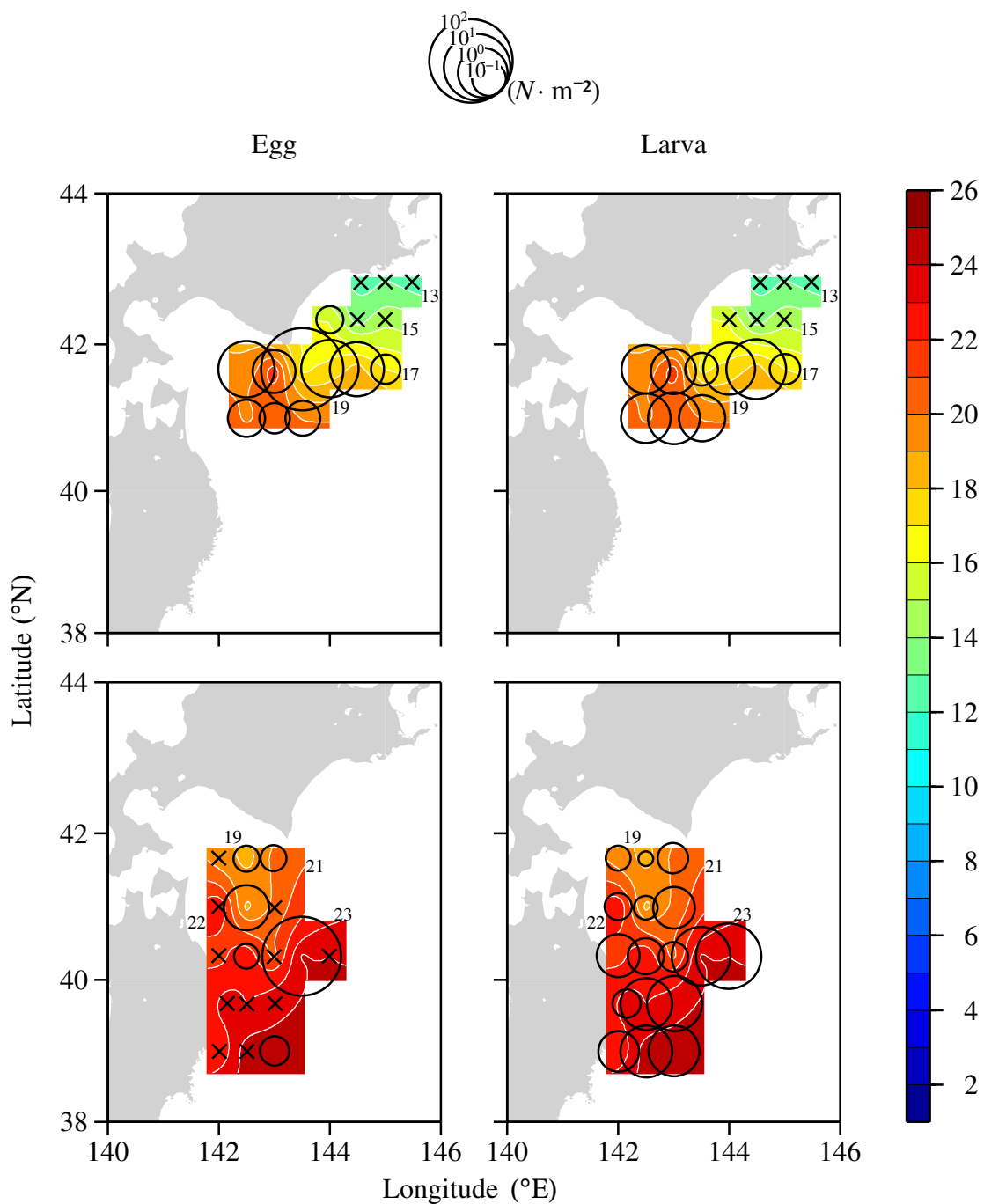


Fig. 2.1-9: Distribution densities (circles, $N \cdot m^{-2}$) of anchovy eggs (left) and larvae (right) collected in Hokkaido (top) and Sanriku-Hokkaido (bottom) Areas. Cross represents station with no egg or larva collection. Isotherms at the sea surface are shown in colors.

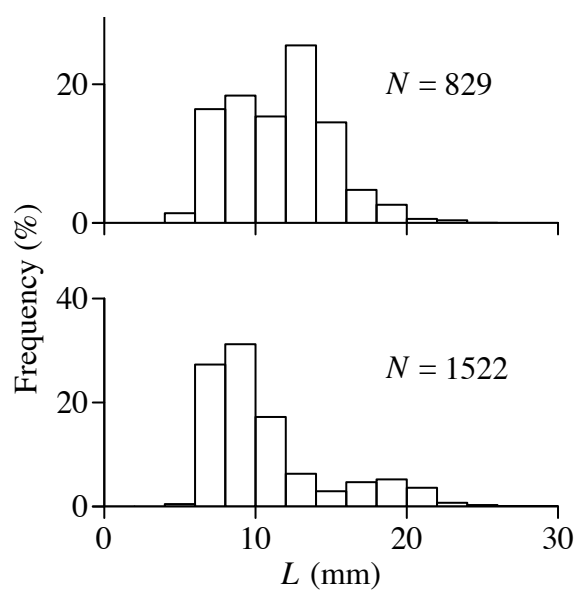


Fig. 2.1-10: L (mm) frequency distributions of anchovy larvae collected in Hokkaido (*top*) and Sanriku-Hokkaido (*bottom*) Areas.

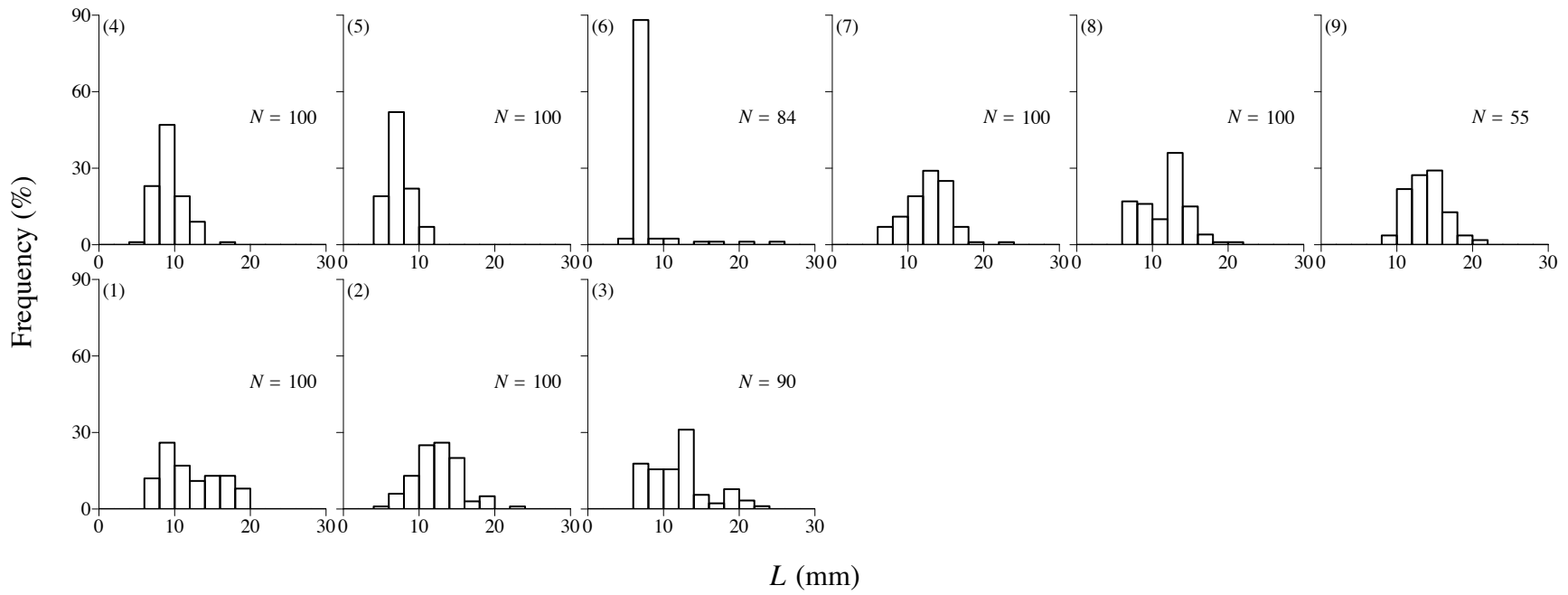


Fig. 2.1-11: L (mm) frequency distributions of anchovy larvae collected in Hokkaido Area. The arrangement of each panel corresponds to the geographic location of the stations. Number in parenthesis in each panel represents the stn number.

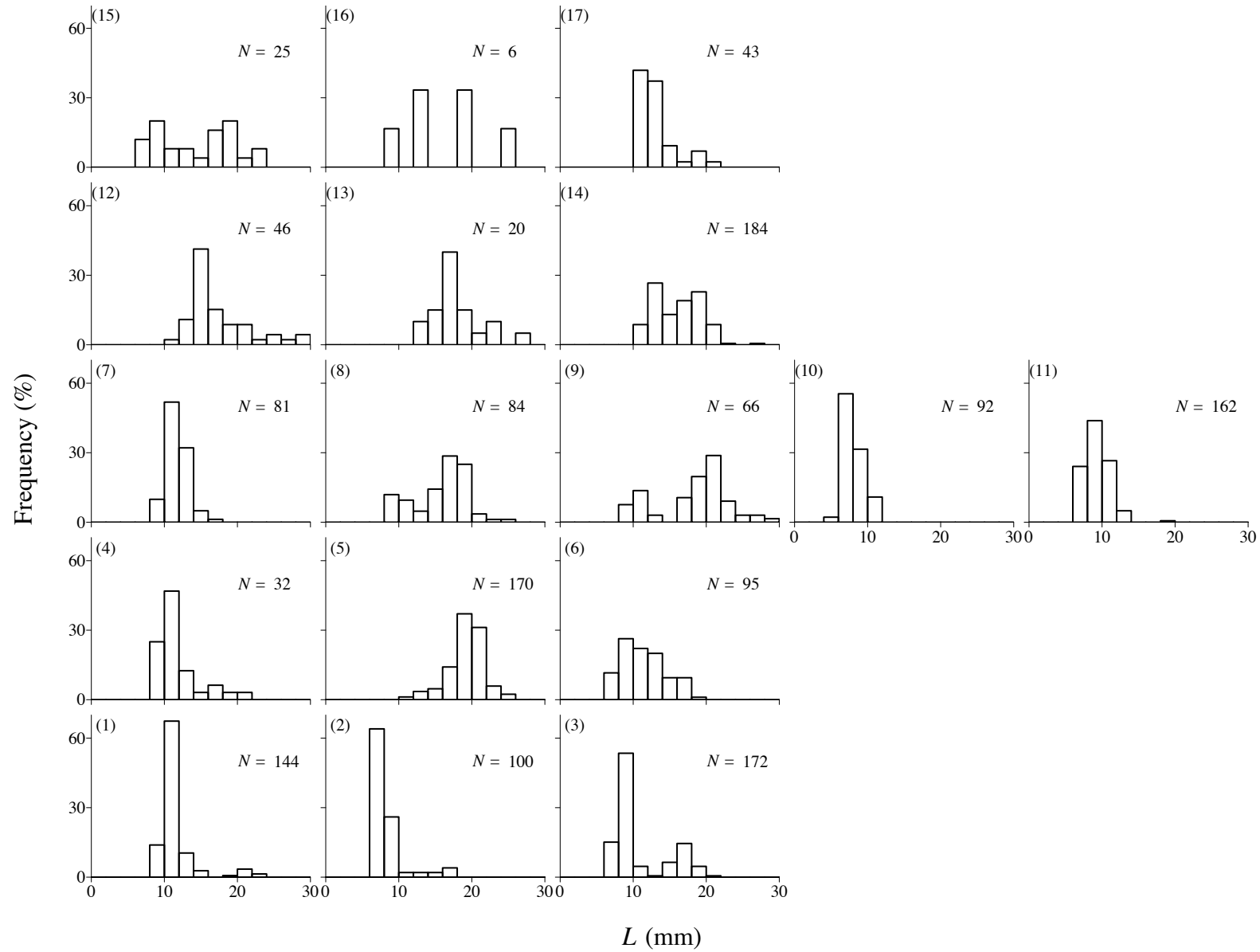


Fig. 2.1-12: L (mm) frequency distributions of anchovy larvae collected in Sanriku-Hokkaido Area. The arrangement of each panel corresponds to the geographic location of the stations. Number in parenthesis in each panel represents the stn number.

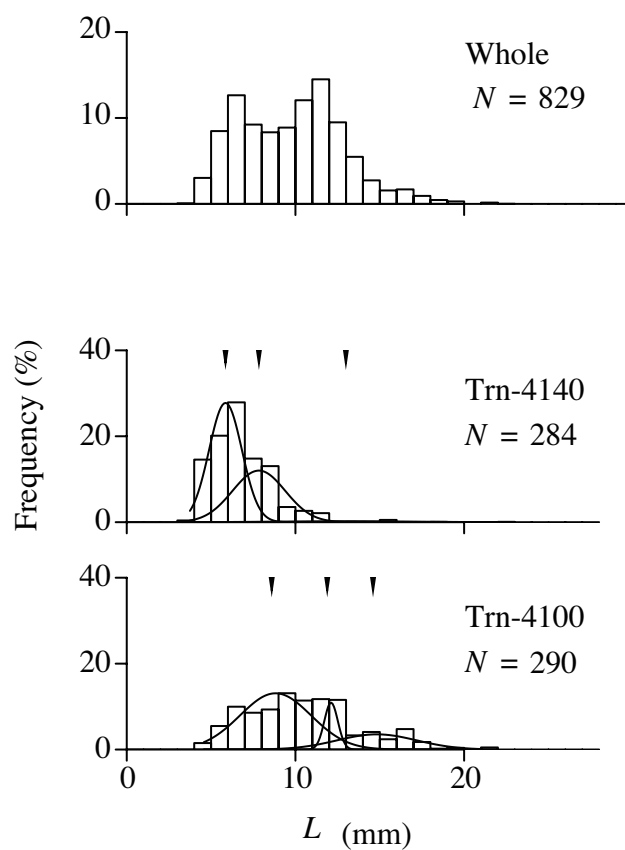


Fig. 2.1-13: L (mm) frequency distributions of larvae collected in Hokkaido Area in 2012, whole area (*top*), Trn-4140 (*middle*) and Trn-4100 (*bottom*). Peaks of the normal distributions are pointed by arrowheads.

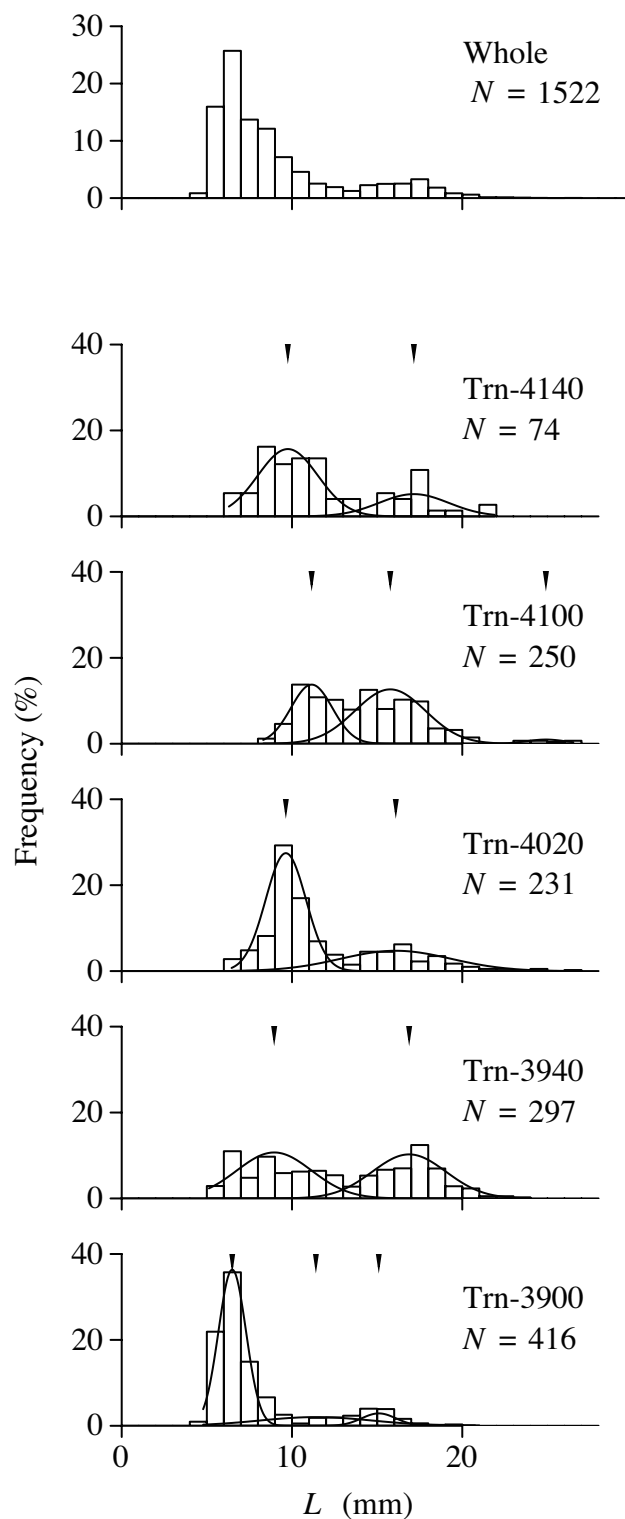


Fig. 2.1-14: L (mm) frequency distributions of larvae collected in Sanriku-Hokkaido Area in 2011, whole area (*top*) and five transects to the bottom (Trn-4140, Trn-4100, Trn-4020, Trn-3940 and Trn-3900). Peaks of the normal distributions are pointed by arrowheads.

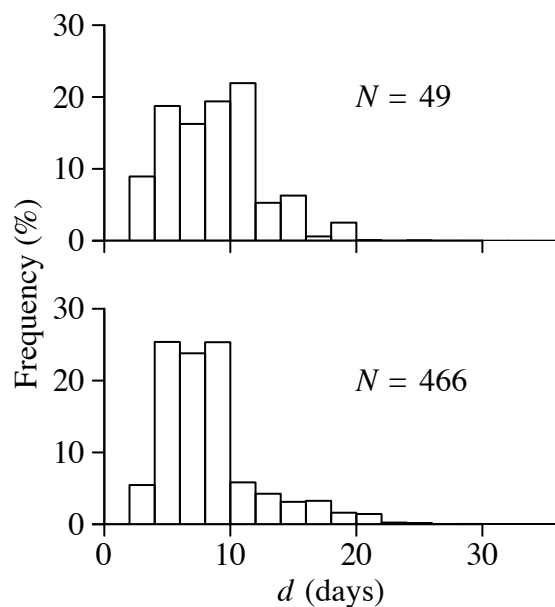


Fig. 2.1-15: d (days) frequency distributions of anchovy larvae collected in Hokkaido (*top*) and Sanriku-Hokkaido (*bottom*) Areas.

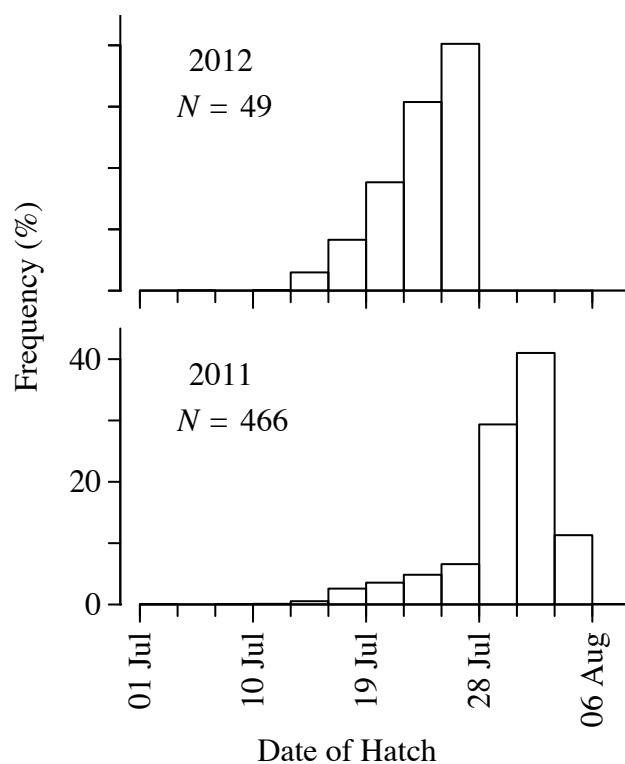


Fig. 2.1-16: Hatch-date frequency distributions of anchovy larvae collected in Hokkaido (*top*) and Sanriku-Hokkaido (*bottom*) Areas.

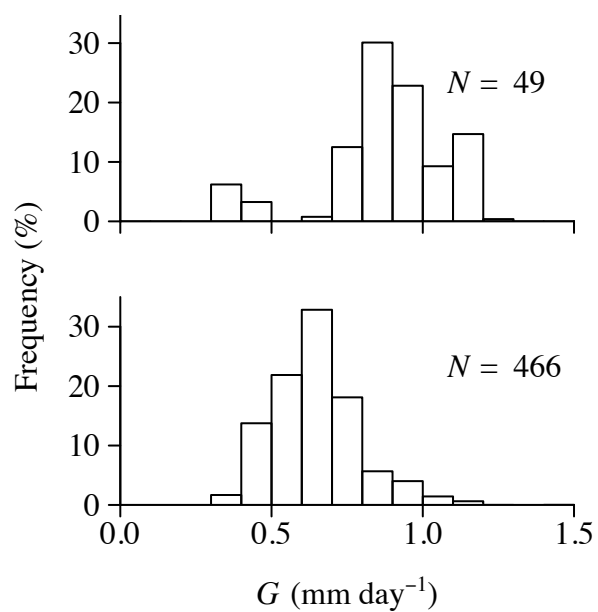


Fig. 2.1-17: $G \text{ (mm day}^{-1}\text{)}$ frequency distributions of anchovy larvae collected in Hokkaido (*top*) and Sanriku-Hokkaido (*bottom*) Areas.

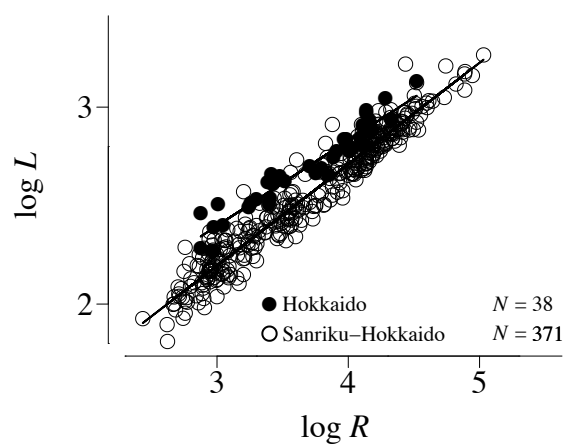


Fig. 2.1-18: R - L relationship of anchovy larvae. Closed- and open- circles represent larvae collected in Hokkaido and Sanriku-Hokkaido Areas, respectively.

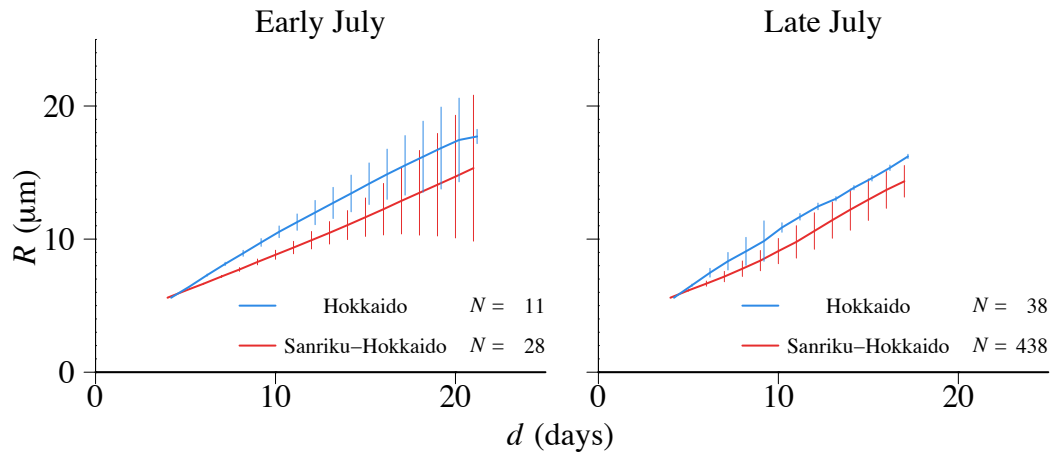


Fig. 2.1-19: R -growth history of anchovy larvae hatched in early- (*left*) and late- (*right*) July. Blue- and red- lines represent the mean value of R of the larvae collected in Hokkaido and Sanriku-Hokkaido Areas, respectively. Vertical line represents standard deviation.

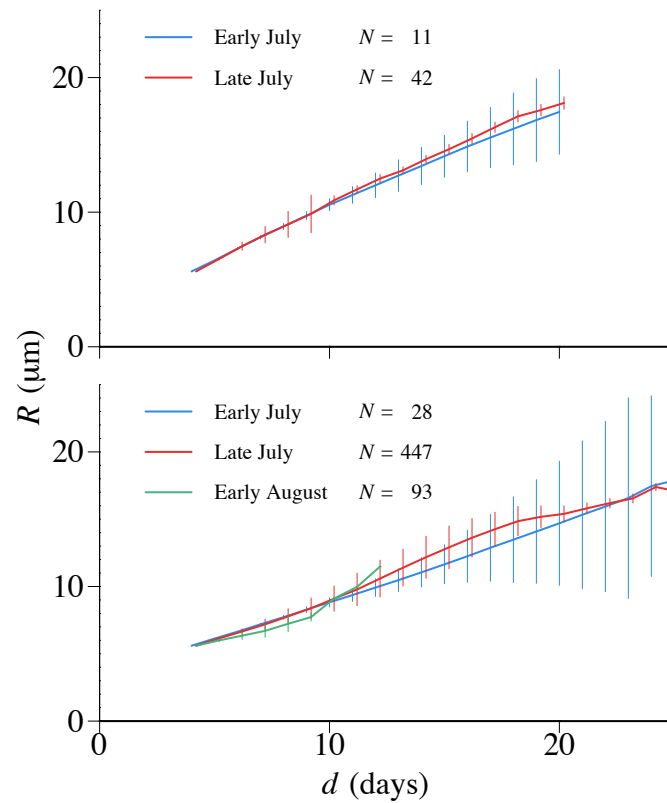


Fig. 2.1-20: R -growth history of anchovy larvae collected in Hokkaido (*top*) and Sanriku-Hokkaido (*bottom*) Areas. Red-, blue- and green- lines represent larvae hatched in early- and late- July, and early August, respectively. Vertical line represents standard deviation.

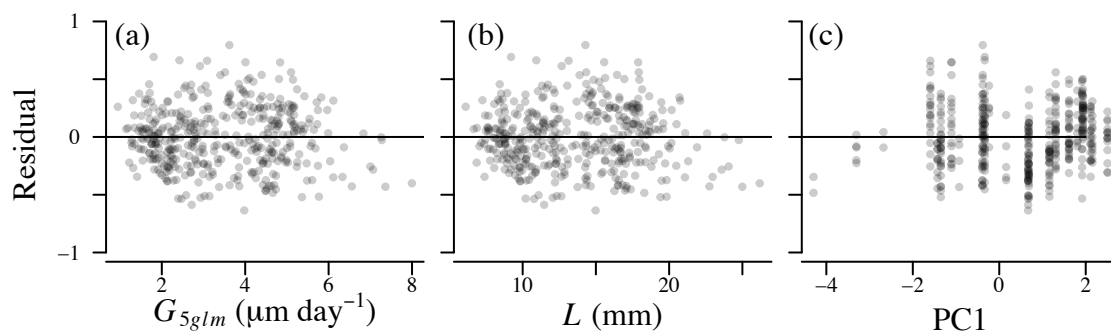


Fig. 2.1-21: Pearson residuals of the growth model against fitted values (a), body size (b), principal component 1 (c),

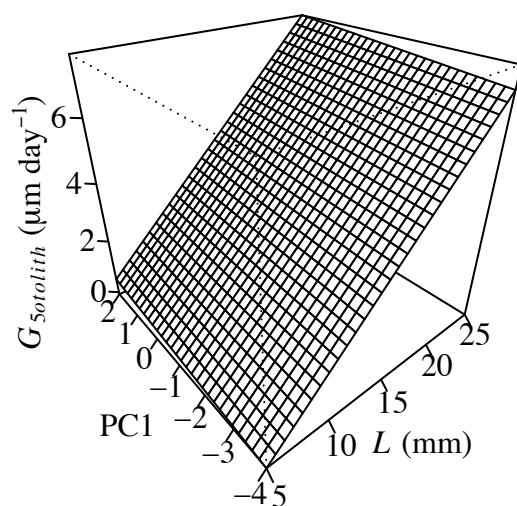


Fig. 2.1-22: Effect of body length and principal component 1 on larval $G_{5otolith}$.

2.2 三陸中部沿岸域

2.2.1 はじめに

カタクチイワシ太平洋系群の資源量増加と産卵場の北方拡大との関係を知るためには、資源量増加過程を通じた卵の分布調査が必要である。岩手県沿岸域（三陸沿岸海域）では、岩手県水産技術センターによる月 1 回の海洋観測が 1910 年代から継続されてきた。この調査では、プランクトンネット曳網による動物プランクトンおよび魚類プランクトンの採集が行われており、標本の蓄積はカタクチイワシの資源量が未だ低水準にあった 1985 年にまで遡る。これらの時系列標本を用いて卵の分布密度の経年変動を求めることで、資源量増加過程における卵の出現動態を知ることができる。

第 2.1 節では、北海道海域や三陸海域に分布する卵仔魚が、親潮第 1 分枝によって沿岸域へと輸送されていることが示唆された。三陸沿岸海域へは、親潮系水のみならず黒潮系水や津軽暖流系水が流入することが古くから知られている。これらの水域ではそれぞれカタクチイワシが再生産を行っているため、三陸沿岸海域における資源構造についても検討が必要である。しかし、親潮系冷水域の北部沿岸域におけるカタクチイワシの初期生態についての知見は皆無であり、仔稚魚の出現動態や成長の態様など、基礎的知見から整理する必要がある。

本節では、岩手県水産技術センターが蓄積する沿岸定線調査の時系列標本を用いてカタクチイワシ卵仔魚の出現動態を調べた。これと併せて、三陸沿岸海域においてカタクチイワシ仔稚魚がどのように成長して資源へと加入しているのかを調べる目的で、岩手県中部に位置する宮古湾でカタクチイワシ仔稚魚を採集し、成長動態と成育環境を明らかにした。

2.2.2 材料と方法

卵と仔稚魚の採集

三陸沿岸海域

三陸沿岸海域では 2012–2015 年の 5–10 月に、岩手県水産技術センターの漁業指導調査船岩手丸（154 トン）による岩手県沿岸定線観測において、カタクチイワシ卵仔魚の分布調査を月

1回の頻度で実施した。沿岸定線観測は、岩手県の黒崎 (KR)、鮎ヶ崎 (TD)、尾崎 (OZ)、樺島 (TS) から東方沖合へ4つの測線を設け、各測線上の陸から0, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 70 マイルの計8点を定点とした海洋観測である (Fig. 2.2-1A)。本調査ではこれらの定点のうち、黒崎測線の0マイルと50マイル定点 (Stns KR00, KR50)、尾崎測線の10マイル定点 (Stn OZ10)、樺島測線の0マイルと50マイル定点 (Stns TS00, TS50) において、新稚魚ネット (網口内径 130 cm, 目合い 0.45 mm^{*i}) を船速2ノットで10分間曳網した。ネット採集物は船上にてただちに5% 中性ホルマリン溶液にて固定し、岩手県水産技術センターの研究室に持ち帰った。研究室にて、新稚魚ネット採集物を清水で2回すすいでホルマリンを除去し、90% エタノール中に保存した。

卵仔魚の分布を数十年単位で遡及的に解析する目的で、岩手県水産技術センターが1985–2011年の5–10月に稚魚ネットまたは新稚魚ネットによって採集した標本を用いた。

宮古湾

2012–2015年の4–11月に月1回から2回の頻度で、宮古湾の湾奥部に設定した定点 (Stns 1–6) においてカタクチイワシ仔稚魚を採集した (Fig. 2.2-1B)。各調査点において船曳網 (43 × 3 m, 袋網目合い 10 mm) を1回ずつ曳網し、2012年5月1日–2013年8月6日の調査では採集物を90% エタノール中に保存して研究室に持ち帰った。2013年8月22日以降の調査では、採集物を船上でただちに氷冷し、採集から2時間以内に東北区水産研究所宮古庁舎で冷凍した後に研究室に持ち帰った。また東北区水産研究所が、宮古湾湾奥部における地引き網調査 (2012年9月25日, 10月12日, 11月1日, 2013年2月4日) で採集したカタクチイワシ仔稚魚標本を用いた。

海洋観測

三陸沿岸海域

岩手県水産技術センターの1980年から現在にかけての岩手沿岸定線観測における計32定点の海洋観測データを用い、三陸沿岸海域の海洋環境を遡及的に解析した。三陸沿岸海域の海洋

^{*i} NGG52, 離合社

環境の年単位および月単位での変化や、定点間での時間変動の傾向を把握する目的で、海洋環境データを用いたクラスター分析を行った。各定点における水色^{*i}、透明度 (m)、水深 0 m と 50 m における水温 (°C) と塩分を海洋環境変数として用いた。

卵仔魚採集点の水塊構造の年変動および季節変化を調べる目的で、Stns KR00, KR50, OZ10, TS00, TS50 における鉛直方向の最大 11 層^{*ii}の海水を、水温と塩分の値から第 2.1 節と同様に 6 水系 (Hanawa and Mitsudera, 1987) に分類した。定点間での水深の違いによるデータ数の差を補正するために、6 水系の出現の度合いを出現頻度 (%) として算出し、年変動と季節変化を定点ごとに調べた。水系の出現頻度の算出には、年変動の検討には 1–12 月のデータを、季節変化の検討には 1980–2015 年のデータを用いた。

宮古湾

仔稚魚の成育場環境を調べる目的で、仔稚魚の採集日あるいは前日に CTD 観測を行った。仔稚魚の採集点において、CTD センサ^{*iii}をおよそ 0.5 m s^{-1} の速度で海底まで降下させて揚収し、水温 (°C) とクロロフィル *a* 濃度 ($\mu\text{g L}^{-1}$) を計測した。6 定点における水深 1 m における水温を平均し、採集日における表面水温とした。クロロフィル *a* 濃度は定点ごとのばらつきが大きかったため、6 定点の水深 1 m における幾何平均 (式 2.10) を採集日の代表値とした。

$$\text{Chlorophyll-}a = \left(\prod_{i=1}^6 n_i \right)^{\frac{1}{6}} \quad (2.10)$$

また、湾内の表面水温の季節変動を調べる目的で、仔稚魚の採集点 (Stns 1–6) の中央に位置するカキの養殖いかだに、センサ部が水深 1 m に位置するようにメモリー式水温塩分計^{*iv}を繫留し、10 分間隔で水温を記録した。短期的な変動の影響を除去するため、5 日間の移動平均データを解析に用いた。

仔稚魚の成育場の餌料環境を調べる目的で、動物プランクトンを採集した。目合い $335 \mu\text{m}$ の網地^{*v}および濾水計を取り付けた改良型ノルパックネット (網口内径 45 cm) を海底 (水深

^{*i} フォーレル階級

^{*ii} 水深 0, 10, 20, 30, 50, 75, 100, 150, 200, 300 m

^{*iii} AAQ-RINKO, JFE アドバンテック株式会社

^{*iv} ACTW-USB, JFE アドバンテック株式会社

^{*v} NMG52, 離合社

<3 m) から海面まで鉛直に曳網してメソプランクトンを採集し、直ちに 300 mL の PVC 瓶中に移して 5% フォルマリン溶液で固定した。ミクロプランクトンを海面付近の海水ごと 1 L の PVC 瓶で採集し、フォルマリン溶液をおよそ 10 mL 添加して固定した。研究室に持ち帰ったプランクトン標本は、濃縮処理を施した後に分類・計数した。まず、研究室に持ち帰ったミクロプランクトン標本を 24 時間以上静置した後、先端を J 字に曲げたサイフォンチューブを用いて上澄みを除去し、液量を 1 L からおよそ 200 mL まで濃縮した。続いて、メソプランクトン標本と、濃縮後のミクロプランクトン標本をそれぞれ 500 mL メスシリンダーに移して 24 時間以上静置し、サイフォンチューブを用いて液量およそ 50 mL まで濃縮した。濃縮処理後のプランクトン標本を、双眼実体顕微鏡下でカイアシ類、蔓脚類幼生、多毛類、貝形類、枝角類、クラゲ類、等脚類、十脚類幼生、ホヤ類幼生、端脚類、腹足類、アミ類、二枚貝類、プルテウス幼生、線虫類、ヤムシ類に分類して計数した。カイアシ類についてはさらにノープリウス幼生、コペポダイト幼体、カラヌス目成体、キクロプス目成体、ハルパクチクス目成体に分別して計数した。採集量が多い場合には、プランクトン標本分割器^{*i}を用いて標本を分割した後に計数した。メソプランクトンについては、各分類群について採集個体数を濾水量で除することにより、環境水 1 L あたりの分布密度を算出した。海水 1 L とともに採集したミクロプランクトンについては、採集個体数を環境水 1 L あたりの分布密度とした。

餌料環境の評価には炭素重量による表示が有効であるため、各分類群につき 50 個体を上限に、動物プランクトンの体サイズを計測した。カイアシ類のカラヌス目成体とキクロプス目成体については前体部長と体幅を、カイアシ類ハルパクチクス目とコペポダイト幼体、ノープリウス幼生は全長を計測し、蔓脚類幼生、枝角類、十脚類幼生については、Uye (1982) の方法に従い、分類群に応じて体サイズを計測した。動物プランクトンの体サイズデータを各分類群の採集個体数で重み付けし、Hirota (1981), Uye (1982), Uye et al. (1996) の各方法に従って環境水 1 L あたりの炭素重量 ($\mu\text{gC L}^{-1}$) に換算した。

^{*i} 5605-F, 離合社

卵と仔稚魚の分布解析

三陸沿岸海域

5–10月の各月5定点の新稚魚ネット採集物を清水ですすぎ、カタクチイワシ卵仔魚を選別した。採集された卵が多かった場合には、仔魚を選別した後、プランクトン分割器^{*i}で標本を分割し、採集された卵の総数を推定した。これらに加えて、岩手県水産技術センターより提供された1980–1984年5–10月の魚類プランクトン採集台帳より、カタクチイワシ卵仔魚の採集個体数を抽出して解析に用いた。各定点における卵仔魚の採集個体数をネットの掃海面積($\approx 803 \text{ m}^2$)で除することによって、卵仔魚の分布密度($N \text{ m}^{-2}$)を算出した。

卵仔魚の空間分布の傾向を把握する目的で、各年月に採集された卵仔魚の分布密度を変数としたクラスター分析を行った。データ欠損の影響によって卵仔魚の分布傾向による年および月の分類はできなかったため、定点の分類のみ行った。

採集点の表面水温を卵仔魚の分布密度で重み付けし、卵仔魚の分布密度加重平均水温($T_{egg, larva}$)を算出した。卵仔魚の分布水温について、月ごとの年変動や年ごとの季節変動に着目する場合には、表面水温を定点間で加重平均した(式2.11)。

$$T_{egg, larva} = \sum \frac{t_i \cdot n_i}{N} \quad (2.11)$$

ここで、 t_i と n_i はそれぞれある年月の調査点*i*における表面水温と卵(または仔魚)の分布密度、 N は卵(または仔魚)の分布密度の総和である、一方、卵仔魚の分布水温の定点間差異に着目する場合には、表面水温を採集月方向に加重平均した(式2.12)。

$$T_{egg, larva} = \sum_{m=5}^{10} \frac{t_m \cdot n_m}{N} \quad (2.12)$$

ここで、 t_m と n_m はある年、定点における*m*月の表面水温と卵(または仔魚)の分布密度、 N は5–10月における卵(または仔魚)分布密度の総和である。

宮古湾

Takahashi and Watanabe (2004c)の方法に従い、腹腔内あるいは体表にグアニンが沈着した個

^{*i} 5605-A, 離合社

体を稚魚，グアニン沈着が見られない個体を仔魚とし，仔稚魚の採集個体数を定点ごとに計数した．採集個体数が多かった場合には，標本の総重量を計測し，下記の体重計測によって得られた仔稚魚の平均体重で除することによって総採集個体数を推定した．仔魚と稚魚それぞれについて，6 定点における平均採集個体数を CPUE ($N \text{ haul}^{-1}$) として算出した．

仔稚魚の体長と体重の計測

三陸沿岸海域

各定点につき 100 個体を上限に，第 2.1 節と同様に仔魚の体長 (L , mm) を計測した．固定・保存処理による仔魚の体長収縮を第 2.1 節と同様に補正し，さらに 10 分間の曳網による体長収縮を Theilacker (1980) の方法に従って補正した．体長組成を年，月あるいは定点ごとに合算する場合には，各定点における体長の頻度分布を仔魚の分布密度で重み付けした．仔魚出現動向を調べる目的で，仔魚の体長頻度分布を変数としたクラスター分析を行った．データ欠損の影響により，年の分類が出来なかったため，月と定点の分類を行った．

各定点につき 50 個体を上限に，電子天秤を用いて仔魚の体重 (W , mg) を 0.1 mg まで計測した．

宮古湾

各定点の採集物から 100 個体を上限に標本を抽出し，発達段階を仔魚と稚魚に分けて記録した．仔稚魚の標準体長 (L , mm) をデジタルノギスを用いて 0.1 mm まで計測した．2013 年からは稚魚の頭長 (L_{head} , mm) も 0.1 mm まで計測した．

体長計測された仔稚魚の体重 (W , mg) を，電子天秤を用いて 1 mg まで計測した．エタノール中で保存された標本は，脱水の影響を補正する目的で，個体識別をした後にデシケーター中で 24 時間以上乾燥させ，乾燥重量を 1 mg まで計測した．茨城県大洗漁場で採集された個体（第 2.3 節を参照）を用い，以下のように体長と体重の補正係数を算出した．2012 年 7 月 10 日に採集された仔魚の中から 50 個体を無作為に抽出して体長と体重を計測し，個体識別をした後にエタノール溶液中で保存した．およそ 1 ヶ月後に仔魚の体長を再計測し，デシケーター中で 24 時間以上乾燥させ，乾燥重量を 1 mg まで計測した．エタノール固定による仔魚の体長の収縮率，

および湿重量と乾燥重量との関係を求め、体長と体重の補正係数を算出した。宮古湾で採集され、エタノール固定された仔稚魚の体長と乾燥重量を、上記のように求めた補正係数を用いて補正した。

ニシン目に属するカタクチイワシは、仔魚から稚魚にかけての発達に伴って体長に対する体高の割合が増加する（イワシ型変態，沖山, 1979; Blaxter and Hunter, 1982）。このような発達に伴う体型変化を調べる目的で、仔稚魚の肥満度 (C) を式 2.13 のように算出した。

$$C = \frac{W}{L^3} \times 10^3 \quad (2.13)$$

日齢，孵化日および成長速度の推定

三陸沿岸海域

2012 年に採集された仔魚について，第 2.1 節と同様に耳石日輪解析を行うことによって日齢 (d) と孵化日を推定した。2012 年における日齢—体長関係 (Fig. 2.2-2) を用いて，1985—2011 年に採集された仔魚の日齢を体長から推定し，これを採集日から減じることによって孵化日を推定した。仔魚の体長と日齢から，平均体長成長速度 (G , mm day⁻¹) を第 2.1 節と同様に求めた。

本研究では，成長履歴の解析を目的として仔魚の逆算体長を求めた。体長の逆算を群単位の耳石半径と体長の関係を用いて行くと，耳石半径—体長関係の群内変異により，実際の体長と逆算体長との間に誤差が生じる (Campana, 1990)。そこで本研究では，体長の逆算に Biological intercept method (Campana, 1990; Campana and Jones, 1992) を用いた。体長逆算に先立ち，まず仔魚の耳石半径 (R , μm) と体長の関係を Watanabe and Kuroki (1997) および Takahashi et al. (2001) に従ってアロメトリー式に回帰させた（式 2.14, Fig 2.2-3）。

$$L = a \times R^b \quad (2.14)$$

次に，個体別に耳石半径—関係の始点（第 1 輪形成時）と終点（採集時）における耳石半径と体長の値を用いて，式 (2.14) 中の定数 a と b の値を決定した。第 1 輪形成時の体長として，Fukuhara (1983) が報告した卵黄吸収時（孵化後 3 日）における体長 5.6 mm を用いた。Biological intercept method によって求めた仔魚の体長成長履歴を，孵化月コホート間で比較した。

ある月に産み出された卵と、それから発生した仔魚との間で出現の有無を比較した。卵が採集されたが、その月の孵化群が以後採集されなかった月数の合計を N_{e+l-} 、卵が採集されなかったにも関わらず、その月の孵化群が採集された月数の合計を N_{e-l+} とした。

宮古湾

耳石日輪解析を第2.1節と同様に行うことによって仔稚魚の日齢と孵化日を推定し、平均体長成長速度を求めた。また、三陸沿岸海域と同様に Biological intercept method を用いて仔稚魚の体長を逆算した、

黒潮親潮移行域の沖合では、資源への加入に必要な成長速度の最低値として、40日齢時における 0.25 mm day^{-1} が報告されている (Takahashi and Watanabe, 2004b)。そこで本研究では、40日齢時における成長速度 G_{d40} を孵化月コホートごとに式2.15のように求めた。

$$G_{d40} = \sum_{d=38}^{42} (L_d - L_{d-1}) \quad (2.15)$$

ここで、 L_d は d 日齢時における逆算体長である。

採集前5日間における成長速度 G_5 を式2.16のように求めた。

$$G_5 = \frac{L_{\text{catch}} - L_{\text{catch}-5}}{5} \quad (2.16)$$

ここで、 L_{catch} と $L_{\text{catch}-5}$ はそれぞれ採集日とその5日前における体長である。

仔稚魚を孵化月コホートに振り分け、体長成長履歴をコホート間で比較した。また、同じ孵化月コホート間で、宮古湾の仔魚と稚魚の間、および三陸沿岸海域の仔魚と宮古湾の仔魚との間で体長成長履歴を比較した。

既往知見より、カタクチイワシ仔稚魚の良好な成育には 16°C 以上の水温と 200 mgDW m^{-2} 以上の餌料生物密度が必要であることがわかっている (Takahashi and Watanabe, 2005)。そこで、仔稚魚の G_5 と、採集日の水温および餌料環境との関係を調べた。好適な餌料生物密度の基準値である 200 mgDW m^{-2} (Takahashi and Watanabe, 2005) を、動物プランクトンの乾燥重量—炭素重量関係 (気象庁, 1999) およびノルパックネットの濾水量から $0.28 \mu\text{gC L}^{-1}$ と換算して解析に用いた。カタクチイワシ仔魚の体長成長速度は加齢に伴って変動するため、 G_5 と海洋環境とを対応させた解析には体長を 20–30 mm の範囲に限定して行った。

2.2.3 結果

三陸沿岸海域

海洋環境

卵仔魚の採集を行った 5 定点における水塊構造の年変動を Fig. 2.2-4 に示した。沿岸に位置する Stns KR00, OZ10, TS00 では 1990 年前後から 2000 年頃にかけて表層水系の頻度が増加したものの、津軽暖流水系の占める割合が多いことがわかった。親潮水系と低層低温水系は沖合に位置する Stns KR50 と TS50 において顕著で、6–8 年周期での増減が認められた。また親潮水系と低層低温水系は Stn OZ10 においてもわずかに観測されたが、その出現頻度の増減には沖合に比べおよそ 15 年ほどの比較的長い周期が認められた。黒潮系水はどの定点においても観測されたが、特に南東に位置する Stn TS50 で顕著であった。沿岸親潮系水は 1987, 1992, 2001, 2003, 2005, 2013 年に認められた。

水塊構造の季節変動を Fig. 2.2-5 に示した。いずれの定点においても親潮水系の勢力は 2–4 月に拡大し、以後 12 月に向けて弱まることがわかった。表層水系と低層低温水系の占める割合は夏季に増加する傾向にあり、沿岸親潮水系の出現は 2–5 月に限られた。津軽暖流水系の占める割合は 3–4 月と 8–10 月にやや少なくなることがわかった。黒潮系水系の出現頻度は 11–2 月に高くなる傾向にあった。

海洋環境変数に対するクラスター分析の結果を Fig. 2.2-6 に示した。年の分類では、まず 1985–2005 年、2007–2013 年、2006 年の 3 クラスターが分類され、さらに 1985–2005 年のクラスターは若干の前後はあるものの概ね年代に従って分類された (Fig. 2.2-6 上)。月の分類では、まず 1–6 月と 7–12 月が分類され、さらにそれぞれのクラスターは月の進行に従って概ね 3 ヶ月ごとのクラスターに分類された (Fig. 2.2-6 中)。定点に対してクラスター分析を行うと、Stn TD70 が独立したクラスターを形成し、続いて沖合の Stns TD50, OZ70, TS70 からなるクラスター、そして全ての KR 定点と残りの沿岸の定点とを含む大型のクラスターに分類された (Fig. 2.2-6 下)。この大型のクラスターの中では、Stns KR20–70 が独立したクラスターを形成し、残りの定点は主に 10 マイル付近を境界に沿岸と沖合の定点に分類された。この沿岸と沖合の各ク

ラスターの中では、OZ 測線が独立したクラスターを形成する傾向にあった。

卵仔魚の分布

1980–2015 年の卵仔魚の月別空間分布を Figs. 2.2-7–2.2-14 に示し、平均分布密度の月別の年変動と年別の季節変動をそれぞれ Fig. 2.2-15 と Fig. 2.2-16 に示した。卵の分布密度は 1980–1987 年と 1990–1991 年には 5–10 月を通して低く、1988 年には卵は採集されなかった。1992 年と 1994 年の卵分布密度はそれぞれ 7 月と 6 月にやや増加し、8 月に急上昇した。その後は卵が全く採集されない年 (1995, 1996, 1999, 2004, 2007–2010 年) もあったが、高密度で採集される年 (2001, 2006, 2011, 2012, 2014 年) もみられた。このように高密度で採集された年にも、卵は 9 月と 10 月にはほとんど採集されなかった。

卵とは対照的に、仔魚はどの年にも出現し、9–10 月まで分布がみられた。仔魚の出現開始時期は 1985–91 年には 7–9 月であったが^{*i}^{*ii}^{*iii}、1992 年には 6 月へと早まった。仔魚の高密度分布は 1992 年の 9 月に初めて確認され、以後は 2001, 2006, 2014 年の 8 月や 2010 年の 6 月などにみられた。

卵仔魚分布密度の年変動および季節変動を、5 定点別に Figs. 2.2-17 と 2.2-18 および Figs. 2.2-19 と 2.2-20 に示した。卵が高密度で採集される傾向にあるのは Stns KR00 と OZ10 で、仔魚はこれらに加えて Stn KR50 でも高密度で採集される傾向にあった。Stn TS50 では卵の分布密度に対して仔魚の分布密度が高い傾向にあることがわかった。これらの定点別の卵仔魚の出現動向に対してクラスター分析を行った結果、まず Stn TS00 が独立したクラスターに分類され、その他の定点は南から北の測線へ向かって分類される傾向にあった (Fig. 2.2-21)。

卵 (T_{egg}) および仔魚 (T_{larva}) の分布密度加重平均水温の年変動を、月別に Fig. 2.2-22 に示した。 T_{egg} は 5 月と 6 月には 15°C を下回る年が多かったが、7 月には 15°C を上回る年が多くなり、8 月以降は 20°C 前後となった。 T_{larva} は 6, 7 月に 11.8–20.1°C の範囲で大きく年変動したが、8 月以降には 20°C 前後で安定的であった。 T_{larva} と T_{egg} とを各年で比較すると、1985, 1987, 1990, 1992 年に、有意に T_{larva} が高かった (Fig. 2.2-23)。

^{*i} 7 月: 1986・1988・1990 年

^{*ii} 8 月: 1981・1985・1987 年

^{*iii} 9 月: 1989 年

T_{egg} と T_{larva} の年変動を定点別にみると (Fig. 2.2-24), T_{egg} では Stns KR50 と OZ10 で特に年変動が大きかった. T_{larva} は Stn KR50 を除いて比較的安定的であったが, Stns OZ10 と TS50 では 2010 年前後に大きい変動がみられた. T_{egg} には定点間で差がみられなかったが, T_{larva} では Stn TS50 における値が有意に高かった (Fig. 2.2-25). 各定点において T_{egg} と T_{larva} を比較すると, Stns KR00, TS00, TS50 において有意に T_{egg} より T_{larva} が高かった (Fig. 2.2-26).

T_{egg} と T_{larva} の季節変化を年別に Fig. 2.2-27 に示した. 7 月に例外的に高い T_{larva} が観測された 1991 年を除き, T_{egg} と T_{larva} はいずれも 5 月から 9 月にかけて上昇し, 10 月には 8 月と同水準にまで低下した.

仔魚の体長と体重

仔魚の体長組成の年変化を月別に Fig. 2.2-28 に, 定点別に Fig. 2.2-29 に示した. 採集された仔魚の体長組成を年別にみると, 採集月や定点によって峰の形状や数は様々であった. 仔魚の体長組成の季節変化を定点別にみると (Fig. 2.2-30), 一部例外はみられたものの^{*i}, 各定点における仔魚の体長は 6 月から 7 月にかけて小型化し, 以後は採集月の進行とともに大きくなった. 仔魚の体長を変数としたクラスター分析の結果, 7 月と 8 月が独立したクラスターを形成した (Fig. 2.2-31 左).

定点間での体長組成の違いを月別にみると (Fig. 2.2-32), 有意差のなかった 6 月と一部の例外^{*ii}を除き, KR00 で採集される仔魚の体長は TS00 と TS50 で採集されるものよりも小さかった. また OZ10 で採集される仔魚も, 一部の例外^{*iii}を除き, TS00 と TS50 で採集されるものと比べて小さかった. TS00 と TS50 で採集される仔魚の体長を比較すると, 6 月を除き, 沖合の TS50 よりも沿岸の TS00 で大きかった. 仔魚の体長頻度分布を変数としたクラスター分析の結果, まず OZ10 が独立したクラスターに分類され, 残りの定点はさらに測線ごとに分類された (Fig. 2.2-31 右).

仔魚の体長—体重関係を年別, 月別, 定点別に Figs. 2.2-33—2.2-35 に示した. 仔魚の体長—体重の両対数プロットは全ての年において有意に線形回帰され, 回帰線の傾きは年によって異

^{*i} OZ10 の 9—10 月, TS00 の 6—7 月, TS50 の 8—9 月

^{*ii} 9 月の TS50, 10 月の KR00

^{*iii} 9 月の TS50

なった (ANCOVA, $P < 0.01$) (Fig. 2.2-33).

月別にみると、仔魚の体長—体重の両対数プロットは 6・7・10 月において有意に線形回帰され、それぞれの傾き (4.2, 3.9, 4.6) は有意に異なった (Fig. 2.2-34).

定点別にみると、仔魚の体長—体重の両対数プロットは Stns KR50 と TS50 において有意に線形回帰されたが、それぞれの傾き (4.6 と 4.5) には有意差は検出されなかった (Fig. 2.2-35).

仔魚の日齢・孵化日と成長

三陸沿岸海域で 2012 年に採集された仔魚の日齢は 4–38 の範囲に、モードは 13–14 日齢にあった (Fig. 2.2-36). これらの仔魚は 7 月 19–21 日にモードを持つ 7 月 9 日–24 日孵化群と、8 月 24–26 日にモードを持つ 8 月 5 日–9 月 9 日孵化群の 2 群に分類された (Fig. 2.2-37).

日齢—体長関係から推定した 1985–2011 年に採集された仔魚の孵化日組成を Fig. 2.2-38 に示した. ほとんどの年において 6–8 月に孵化した仔魚の割合が高かったが、1989 年と 1993 年には 9 月孵化群が、2009 年と 2010 年には 5 月孵化群が優占していた.

1985・1990・2011 年は例外的に、仔魚の孵化月には必ず卵が採集されていたが、その他の年にはある月に卵が採集されていなくとも、その孵化月の仔魚が採集された (Fig. 2.2-39 上). 1985–1987 年と 2001・2006 年には、卵が採集されたにも関わらず、その月の孵化群が出現しなかった (Fig. 2.2-39 上). その他の年には、卵が採集された月の孵化群はその後必ず採集された.

2012 年に採集された仔魚の平均体長成長速度は $0.5\text{--}1.1\text{ mm day}^{-1}$ の範囲にあった (Fig. 2.2-40). 耳石日輪解析によって推定した 7 月コホートと 8 月コホートの体長成長履歴を Fig. 2.2-41 に示した. 2 群間の日齢時体長には有意差はみられなかった.

宮古湾

水温・餌料環境と仔稚魚の出現動態

宮古湾の水温は、8 月下旬の 26.0°C を最高値、2 月中旬の 5.7°C を最低値とする季節変動をみせた (Fig. 2.2-42). クロロフィル *a* 濃度の季節変化傾向は年による違いを見ると、2014 年は春季に高い傾向にあったが、2015 年は夏季に高い傾向にあった (Fig. 2.2-43). 宮古湾の動物プランクトンの分布密度と分類群組成を Fig. 2.2-44 に示した. メソプランクトンの分布密度は 4

月中旬から 5 月下旬にかけて高く、そのほとんどはカラヌス目カイアシ類によって占められていた (Fig. 2.2-44 左)。6 月から 8 月にかけては、年による違いはあるものの、ノープリウス幼生、蔓脚類幼生や多毛類、キクロプス目カイアシ類などの占める割合が増加した。一方、宮古湾湾奥部のミクロプランクトン集合の大部分はノープリウス幼生によって構成されており、これらの分布密度は 5 月下旬から 6 月上旬にかけて増加した (Fig. 2.2-44 右)。2012 年 7 月–8 月上旬には多毛類が、2013 年 7 月 22 日にはカラヌス目カイアシ類とカイアシ類コペポダイト幼体の割合が例外的に高かった。

カタクチイワシ仔稚魚の主な出現時期は 5–10 月で、いずれの年においても仔魚と稚魚の CPUE のピークはほぼ一致し、2012 年と 2013 年では 8 月、2014 年は 10 月であった (Fig. 2.2-45)。

仔稚魚の体長

2012 年には、5 月に体長 30 mm を超える大型の仔魚が採集されたが、採集月の進行とともに採集される仔魚の体長は小型化した (Table. 2.2.1, Fig. 2.2-46)。6 月に採集された主な稚魚は体長 50 mm を超え、仔魚とは異なる発生群であった。7 月における仔稚魚の体長組成は連続しており、仔魚が体長成長とともに稚魚へと変態している様子がみてとれた。その後、8–10 月にかけても一部で仔魚稚魚の体長組成に連続性がみられたものの、50 mm を超える稚魚が再び採集されるようになった。11 月には仔魚は採集されず、40–42 mm 体長階級にモードを持つ稚魚群のみが採集された。

2013 年には、2 月に体長 50 mm を超える大型の稚魚が採集された (Table. 2.2.2, Fig. 2.2-47)。6 月には体長 30 mm を超えるやや大型の仔魚と体長 40 mm 前後の稚魚が採集されたが、8 月にはより小型の仔稚魚が採集された。8 月から 9 月にかけて、稚魚の体長モードは 28–30 mm 階級から 35–36 mm 階級へと大型化した。

2014 年に初めて仔稚魚が採集されたのは 7 月と晚かったが (Table. 2.2.2, Fig. 2.2-45)、仔魚と稚魚の体長モードがそれぞれ 25–26 mm と 31–32 mm と小型であった点で 2012 年 7 月と同様であった (Fig. 2.2-48)。8 月には仔魚の出現が一時途絶えたが、9 月と 10 月には体長 30 mm 以下の小型の仔魚が再び出現した。

仔稚魚の体重

5月から7月にかけて出現する仔魚群の小型化は、体重組成の変化にも現れていた (Figs. 2.2-49–2.2-51). 2012年の5–6月と2013年の6月には、体重300 mgを超える仔魚が採集されたが、7月以降には2014年を含めほとんどの仔魚が180 mg以下の3階級に位置していた。稚魚の体重組成は仔魚の体重組成と比べて離散的であった、

仔稚魚の肥満度

仔稚魚の肥満度組成を Figs. 2.2-52–2.2-54 に示した。肥満度組成は、体長組成や体重組成で離散的であった稚魚群の階級を圧縮した。2012年には8–11月にかけて、稚魚の肥満度が低下傾向にあった。5–7月にかけての仔魚の小型化とともに仔魚群の肥満度も低下傾向にあり、また体長成長に伴う稚魚への変態は、肥満度の増加を伴っていた。

仔稚魚の相対成長

各月の仔魚または稚魚の体長–体重関係の両対数プロットはいずれも有意に線形回帰された (Fig. 2.2-55). 仔稚魚が同時に採集された全ての月において、体長–体重関係の傾きは稚魚よりも仔魚で有意に大きかった。仔魚の体長–体重関係の傾きは5月には4.8であったが、6–8月には4.9–5.5まで増加し、その後9–10月には3.4–3.5まで低下した。2月には2.7であった稚魚の体長–体重関係の傾きは6–7月には3.7に、8月には4.0にまで増加した。稚魚の体長–体重関係の傾きはその後9–10月には3.5–3.6にまで減少し、11月には再び2.8と2月と同水準にまで低下した。

稚魚の体長–頭長関係の両対数プロットはいずれの月においても有意に線形回帰された (Fig. 2.2-56). 稚魚の体長–頭長関係の傾きは2月には0.7で、7月には1.0へと増加した。体長–頭長関係の傾きはその後8月には1.2、9–10月には1.3–1.4と月を追うにつれ有意に増加した。

仔魚の耳石半径–体長の両対数プロットは5–7月と9月において有意に線形回帰された (Fig. 2.2-57). いずれの月の間においても、耳石半径–体長関係の傾きに有意差はみられなかったが、6月と7月を境に、耳石半径–体長関係の切片が小さくなった。

仔稚魚の日齢組成と孵化日組成

仔稚魚の日齢組成を Fig. 2.2-58 に示した。仔稚魚の日齢は 20–80 日齢の範囲にあり、主に 35–45 日齢の仔魚が高頻度で出現した。

仔稚魚の孵化日組成を Fig. 2.2-59 に示した。仔稚魚の孵化日は 3 月上旬–8 月下旬の範囲にあり、採集月の進行に伴って晩くなった。

仔稚魚の成長

40 日齢時における体長成長速度 G_{d40} をコホート別に Fig. 2.2-60 に示した。 G_{d40} は 0.27–0.87 mm day⁻¹ の範囲にあり（外れ値: 0.21 mm day⁻¹）、コホート間で有意差は検出されなかった。 G_{d40} の中央値は 3 月コホートでは 0.47 mm day⁻¹ であったが 4 月コホートでは 0.55 mm day⁻¹ に上昇し、以後 7 月コホートの 0.43 mm day⁻¹ まで低下した。いずれのコホートにおいても、仔稚魚の平均体長成長速度 G は 0.34–0.99 mm day⁻¹ の範囲にあり、5 月から 7 月にかけて低下する傾向にあった。8 月に採集された仔稚魚の平均成長速度は 5・6 月と比べて有意に低下した。仔魚の体長成長履歴を孵化コホートごとに Fig. 2.2-62 に示した。仔魚の日齢時体長は 3–5 月コホートでは比較的大きかったが、6–8 月コホートでは孵化月の進行とともに小さくなる傾向にあった。特に、7 月コホートの日齢時体長は 3・4 月、5 月、8 月コホートと比べてそれぞれ 24–38 日齢時、28–31 日齢時、27–34 日齢時において有意に小さかった (Steel Dwass, $P < 0.01$)。稚魚の日齢時体長も 5 月コホートに比べ、6–8 月コホートで小型化する傾向にあったが、仔魚と比べて個体差が大きく、有意差は検出されなかった (Fig. 2.2-63)。仔魚と稚魚の日齢時体長は、5–8 月のどのコホートにおいても近似した (Fig. 2.2-64)。宮古湾で採集された仔魚と三陸沿岸海域で採集された仔魚の成長速度は、7 月コホートと 8 月コホートどちらにおいても、比較を行った期間において近似した (Fig. 2.2-65)。

仔稚魚の採集前 5 日間における平均成長速度 G_5 と採集日の水温との関係を Fig. 2.2-66 に示した。水温と G_5 との間に有意な相関は見られず、水温 14.8–26.2°C の範囲において、 G_5 は 16.5°C における 0.57 mm day⁻¹ において最も高かった。 G_5 は 22.1°C において 0.25 mm day⁻¹ の最低値を示した。

水温と餌料環境が必要水準を下回った場合だけでなく (Fig. 2.2-67 上)、必要水準を満たす場

合においても (Fig. 2.2-67 下), 仔稚魚の G_5 と水温および餌料生物密度との間に有意な相関はみられなかった。

2.2.4 考察

資源量変動と卵仔魚の分布

三陸沿岸海域における卵の出現動態から, 親潮系冷水域におけるカタクチイワシ卵の分布密度増加は, 太平洋系群の資源量増加の結果として起こったと考えられる。資源量が低水準にあった 1982–87 年には, 道東海域ではカタクチイワシ卵の分布は認められなかったが (三原, 1994), 三陸沿岸海域では 1980 年から少数ながら採集された (Fig. 2.2-7)。卵分布密度は 1988/89 年のレジームシフト年にも低く, 急増がみられたのは資源量が高水準となった後の 1992 年であった (Figs. 2.2-7, 2.2-9, 2.2-16)。1980 年代後半のマイワシ *Sardinops melanostictus* の加入失敗の分析から (Watanabe et al., 1995), 小型浮魚類の加入量は卵や摂餌開始期の仔魚の豊度ではなく, 初期生活史を通した累積的な死亡によって決まると考えられている。本研究でもレジームシフトに伴う生残率の変化を示唆する結果が得られ, 1990 年代以降, 卵に対する同月孵化群の仔魚の採集頻度に増加がみられた (Fig. 2.2-39)。本研究で得られた以上の結果は, 何らかの要因で仔稚魚の生残率が向上することによってまず資源量が増加し, その後に親潮系冷水域における産卵が活発化したことを示していると考えられる。ついでみ摂餌を行うカタクチイワシ類 (*Engraulis*) は濾過食性の強いマイワシ類 (*Sardinops*) に比べて (van der Lingen, 1994), 摂餌成功のために 1 個体あたりにより広い空間を必要とすると考えられている (Barange et al., 2009)。分布域の拡大が資源量の増大による高密度化を回避するためによって起こるのであれば, 1 個体あたりより広い空間を必要とするカタクチイワシは, 黒潮域の産卵場・成育場の沖合域への拡大に加えて, マイワシでは見られなかった北方水域への産卵場・成育場拡大を行ったと考えられる。そうであれば, 産卵場・成育場の北方拡大は必然的に資源量増大の後におこると考えられる。

資源量増加後も, 三陸沿岸海域における卵分布密度には年変動がみられた。卵は 1992・1994・2011–2012 年には高密度に分布したが, 1995・1996・1999・2004・2007–2010 年のように全く

採集されない年もあった (Figs. 2.2-9, 2.2-11, 2.2-13). このように、資源量高水準期の親潮系冷水域における卵分布の様式は大きく年変動することがわかった。これは、本海域がカタクチイワシ産卵場の地理的縁辺に位置するためと考えられる。

卵の季節的出現動態は、資源量変動に伴って変化した。資源量低水準期には5–10月に卵が採集されていたが、資源量高水準期には卵の出現時期は主に6–8月に限られた (Figs. 2.2-7, 2.2-9, 2.2-11, 2.2-13, 2.2-16). このような短期集中的な卵の出現は、道南・道東・千島列島沖合域で採集されたカタクチイワシ親魚の生殖腺の成熟度が6・7月に限って高く、9・10月に著しく低下したことと一致する (三原, 2000; 須原ら, 2013). このように、親潮域における産卵には夏季に集中する特徴がある。資源量高水準期の6–8月に集中的に産み出された卵と、資源量低水準期の5月や10月に出現した卵とでは、その由来が異なっていたかもしれない。

三陸沿岸海域におけるカタクチイワシの資源構造

三陸沿岸海域に分布する卵の由来を正しく理解するためには、黒潮域で生まれて親潮系冷水域へと北上回遊する親魚群に加え、木下 (1962, 1977) が報告した津軽海峡で産卵する対馬暖流系群の親魚群と、永島 (2007) が報告した三陸沿岸で再生産する地付きの群の存在も考慮に入れる必要がある。木下 (1962, 1977) は、体長と鰓耙数との関係を用いて北日本のカタクチイワシを太平洋群、北海道南西部日本海沿岸群、富山県・新潟県沿岸群に分類したうえで、津軽海峡と陸奥湾には、少なくとも6・7月までに北海道南西部日本海沿岸群が来遊し、産卵していることを報告した。この研究では標本の採集が5月下旬以降に限られるため、これらの群がいつから津軽海峡や陸奥湾に来遊しているのかは明らかにされていないものの、陸奥湾では5月下旬からカタクチイワシ卵の分布が確認されている^{*i}。岩手県の沿岸海域において5月頃から高頻度に観測される津軽暖流水は (Figs. 2.2-4, 2.2-5), 津軽海峡で産卵された卵の三陸沿岸海域への来遊を示唆する。

宮城県では、生物特性値^{*ii}を変数にとったクラスター分析によって、沖合を回遊する群とは明確に分離される地付き群の存在が明らかとなっている (永島, 2007). これら地付き群の繁殖生

^{*i} 北海道大学 高津哲也教授, 未発表

^{*ii} 体長, 肥満度, 脊椎骨数, 生殖腺指数, 頭長比

態についての詳細な知見はないものの、体長範囲から判断して発生時期は夏季から秋季にわたると考えられ、三陸沿岸海域で9–10月に採集される卵はこれらの群の産卵によるものと考えられる。地付き群は体長が小さく、脊椎骨数が少なく、体長に対する頭長が大きいことで特徴づけられている(永島, 2007)。本研究においても9月以降の宮古湾で採集された頭長比の大きい稚魚は、これら地付き群の稚魚かもしれない(Fig. 2.2-56)。

道南・道東・千島列島海域に分布する産卵親魚は体長が大きく、肥満度と生殖腺体指数(Gonado Somatic Index, GSI)も著しく高いことが報告されている(三原, 2000; 須原ら, 2013)。これは肥満度およびGSIが低い三陸海域の地付き群とは大きく異なっている(永島, 2007)。一方、津軽海峡に來遊する北海道南西部日本海沿岸群は体長が13 cm前後と大型で、産卵期が5–8月と短い(木下, 1962)点で道南・道東・千島列島海域に分布する親魚と類似している。ところが、北海道南西部日本海沿岸群の特徴として、産卵水温の下限が黒潮系暖水域の15°C(靄田, 1992)と比べて低いことが挙げられる。青森県の日本海側沖合では12°C^{*i}、陸奥湾では10°C^{*ii}において卵の採集報告がある。三陸沿岸海域において5月と6月に15°Cよりも低い水温帯で採集される卵は(Fig. 2.2-27)、北海道南西部日本海沿岸群由来と考えられる。

三陸沿岸海域や宮古湾で採集されるカタクチイワシ仔稚魚は、三陸沿岸海域に分布した卵から孵化した群に加えて、調査海域外で孵化して移入した群によって構成されていると考えられる。移入群の存在は、ある月の孵化群が卵の採集なしに出現したことによって示されたが(Fig. 2.2-39)、宮古湾で採集された仔稚魚の孵化日組成についても注目する必要がある。宮古湾では、3・4月に孵化した仔稚魚が採集されたが(Fig. 2.2-59)、近傍海域ではこれらの月には産卵は行われていない。三陸沿岸海域で黒潮系水や津軽暖流水が観測されることを考えれば(Figs. 2.2-4, 2.2-5)、これらの暖水域で産卵され、孵化した仔魚の來遊が推測される。これについては、粒子追跡実験によって検討する必要があるだろう。クラスター分析による月と定点の分類結果が、海洋環境を変数とした場合(Fig. 2.2-6)と卵仔魚の分布や生物特性値を変数とした場合(Figs. 2.2-21, 2.2-31)とで異なるのは、三陸沿岸海域の仔魚が複数の群から構成されていることの表れかもしれない。

^{*i} 日本海区水産研究所 後藤常夫博士, 私信

^{*ii} 北海道大学 高津哲也教授, 未発表

以上のように、三陸沿岸海域で採集されるカタクチイワシ仔稚魚は、南部と北部沖合域で生まれた太平洋系群の親魚に加えて、北海道南西部日本海沿岸群と地付き群が産み出した卵から発生した混成群と考えられた。

仔稚魚の成長

成長解析を行った 2012–2014 年には、カタクチイワシ仔稚魚の成長に適した期間は、宮古湾では初夏までに限られると考えられた。水温に対する仔稚魚の採集前 5 日間における平均成長速度 G_5 は、16.5°C (2014 年 7 月 1 日) において最も高く、高水温ほど低くなる傾向にあった (Fig. 2.2-66)。カタクチイワシ仔稚魚の成長速度は、好適な餌料条件下 (餌料生物密度 $>200 \text{ mgDW m}^{-2}$) で水温と正相関することが報告されている (Takahashi and Watanabe, 2005)。夏季の動物プランクトン分布密度が低下していることを考えると (Fig. 2.2-44)、水温に対する G_5 の反比例傾向は、夏季に成長速度が餌料環境に律速された結果と考えられた。有意差は見られなかったものの、仔稚魚の 40 日齢時における平均成長速度 G_{d40} の中央値が 4・5 月孵化群で高い傾向にあり、また 7・8 月孵化群ではほとんどの個体で 0.5 mm day^{-1} 以下となることから、本海域の成育環境が好適であるのは初夏までと考えられる。ところが、このような餌料環境の劣化にも関わらず仔稚魚は 7 月以降にも引き続き採集され (Fig. 2.2-45)、仔稚魚の孵化日組成からも (Fig. 2.2-59)、3–8 月と幅広い時期に孵化した群が次々と入れ替わりながら宮古湾を利用していたことがわかる。カタクチイワシのこのような宮古湾の利用形態は、同じく宮古湾に分布するニシン *Clupea pallasii* とは大きく異なる。宮古湾のニシン仔稚魚の孵化時期は 2 月から遅くとも 5 月までの範囲に収まり (Chimura et al., 2009)、成長とともに分布域を湾奥部から湾口部の深所へと移し (千村, 2004)、水温が 20°C を超えると湾奥部には現れなくなる^{*i}。回帰性が強いニシン仔稚魚の宮古湾の利用形態は、成育環境の季節変化と密接に対応している。一方カタクチイワシでは、その時々に移入した群が成育環境の優劣に関わらず宮古湾を利用していた。このように、宮古湾の成育環境には季節変動がみられたものの、仔稚魚の G_{d40} はほとんどの個体において沖合域で報告されている資源への加入に必要な下限値である 0.25 mm day^{-1} (Takahashi and Watanabe, 2004b) を上回った (Fig. 2.2-60)。このことから、カタクチイワシ仔稚魚が出現する初

^{*i} 東北区水産研究所 白藤徳夫博士、私信

夏から秋季の宮古湾は、本種の成育場として機能すると考えられた。

本研究で解析を行った 2012–2013 年の春–夏季において、宮古湾の餌料条件は劣悪であったと考えられる。黒潮親潮移行域の沖合において、カタクチイワシ仔魚の成長速度は好適な餌料条件下（餌料生物密度 $>200 \text{ mgDW m}^{-2}$ ）で水温と正相関することが報告されている (Takahashi and Watanabe, 2005)。ところが本研究では、同様の餌料条件下（餌料生物密度 $>0.28 \mu\text{gC L}^{-1}$ ）でも、仔魚の成長は水温と正相関しなかった (Fig. 2.2-67)。これは、先行研究と本研究との間で海域および水深が異なるため、濾水量を用いても餌料条件を同等に比較することが困難になっているためと考えられる。即ち、先行研究ではノルパックネットを 150 m から鉛直曳網しているため、水柱の表層に動物プランクトンが集中していた場合、カタクチイワシ仔魚が分布する表層の動物プランクトン密度を過小評価している可能性がある。鉛直方向の不均一分布による過小評価の可能性は本研究においても考えられるが、本研究がカタクチイワシ仔魚を採集した宮古湾の湾奥部は水深が 5 m に満たないため、過小評価の度合いは小さくなる。解析を行った期間内においては、宮古湾の餌料環境は黒潮親潮移行域の沖合域に劣った可能性がある。

宮古湾の餌料環境は夏季に劣悪になったが、宮古湾はカタクチイワシ成育場としての親潮系冷水域を代表しない可能性がある。湾内の動物プランクトンではカラヌス目カイアシ類が優占したが、さらにカラヌス目の中で優占したのは親潮域の代表種ではなく、沿岸性の *Acartia* 科カイアシ類であった。親潮域の沖合域における動物プランクトン密度も 5 月に最大値を示すが、6–8 月においても 3 月の水準を下回することはほとんどない (小達, 1994)。宮古湾の 20 km ほど南に位置する岩手県大槌湾でも、動物プランクトン密度は 5 月にピークを示した後、9 月頃まで比較的高く維持される (Nishibe et al., *in press.*)。このような親潮系冷水域における一般的な餌料環境動態から考えると、夏季の宮古湾の劣悪な餌料環境は親潮系冷水域の中でも特異であったと考えられ、夏季の宮古湾におけるカタクチイワシ仔稚魚の成長動態は、北日本の沿岸域における一知見、という理解に留めるのが妥当かもしれない。

仔魚の体長–体重関係に着目すると、体長に対する体重の成長加速度は稚魚よりも仔魚で大きかった (Fig. 2.2-55)。これは、発達に伴い体長に対する体高の割合を増加させるニシン目仔魚に一般的な特徴であるが (Blaxter and Hunter, 1982)、宮古湾ではこの体長–体重関係にも季節

変化が認められ、これが肥満度の季節変化となって表れていたことが考えられる (Fig. 2.2-55). これは、仔稚魚の相対成長が成育環境の変化に応じて変化していること、もしくは仔稚魚の由来が季節によって異なっていることを示唆している. いずれにせよ、相対成長の季節変化から、カタクチイワシ仔稚魚の成長様式には高い可塑性があることがわかる.

本節によって、カタクチイワシ太平洋系群は資源量の増加の結果として回遊範囲を北日本の太平洋海域へと拡大し、北海道南西部日本海沿岸群や地付き群とともに産卵するようになったことがわかった. 三陸中部に位置する宮古湾で採集される仔稚魚は、これら由来の異なる親魚が三陸沿岸海域で産み出した卵から孵化した群と、対馬暖流域や道南・道東海域などの遠隔水域で孵化した群の混成群と考えられた. これらの仔稚魚の成長は初夏に良好で、夏季以降には餌料環境の劣化によると考えられる成長速度の低下がみられたが、ほとんどの個体が資源へと加入していると考えられた.

Table 2.2.1: L (mm), d (days), and date of hatch of anchovy larvae and juveniles collected in Miyako Bay in 2012. N.D. represents not detected. Dash represents no data.

Date	SST	Larva					Juvenile				
		L (mm)	N	d (days)	Date of hatch	N	L (mm)	N	d (days)	Date of hatch	N
22 May	14.8	27.3–42.5	215	28–71	12 Mar–24 Apr	27			N.D.		
5 Jun	15.2	30.8–37.1	88	39–64	02–27 Apr	20			N.D.		
24 Jun	15.4	18.8–39.2	351	25–78	07 Apr–30 May	22	37.5–107.1	110	42–54	01–13 May	5
3 Jul	-			N.D.			64.2–110.3	19	-	-	-
10 Jul	20.0	14.5–31.8	172	21–61	10 May–19 Jun	16	28.3–51.4	81	37–84	17 Apr–03 Jun	16
27 Jul	22.6	17.2–31.5	211	20–51	06 Jun–07 Jul	25	28.2–46.3	91	43–78	10 May–14 Jun	5
15 Aug	21.6	23.3–30.3	21	34–44	02–12 Jul	9			N.D.		
29 Aug	26.2	24.9–26.8	3	37–43	17–23 Jul	3	33.8–125.6	87	55–81	09 Jun–05 Jul	4
19 Sep	22.4	23.4–33.2	5	34–67	14 Jul–16 Aug	5	31.8–31.8	1	50–50	31–31 Jul	1
25 Sep	22.1	23.6–27.5	4	32–39	17–24 Aug	4	27.2–59.7	135	45–107	10 Jun–11 Aug	10
12 Oct	21.6	28.0–28.0	1	-	-	-	28.7–59.1	18	115–115	19–19 Jun	1
1 Nov	18.0			N.D.			32.1–63.4	225	72–72	21–21 Aug	1

Table 2.2.2: L (mm), d (days), and date of hatch of anchovy larvae and juveniles collected in Miyako Bay in 2013. N.D. represents not detected. Dash represents no data.

Date	SST	Larva					Juvenile				
		L (mm)	N	d (days)	Date of hatch	N	L (mm)	N	d (days)	Date of hatch	N
4 Feb	7.4			N.D.			46.4–76.1	100	87–153	04 Sep–09 Nov	13
6 Jun	16.1	29.2–35.2	3	-	-	-			N.D.		
20 Jun	16.2	34.3–36.8	2	36–37	14–15 May	2	37.2–42.0	3	44–66	15 Apr–07 May	3
22 Jul	19.4			N.D.			68.1–81.8	6	-	-	-
23 Jul	19.4			N.D.			45.8–91.2	4	-	-	-
6 Aug	22.4	19.7–29.7	167	-	-	-	26.8–37.2	49	-	-	-
22 Aug	24.3			N.D.			29.4–29.4	1	-	-	-
4 Sep	22.5	20.9–27.4	20	-	-	-	30.0–92.1	28	-	-	-
18 Sep	22.0	21.1–29.7	26	33–37	12–16 Aug	5	27.6–41.9	44	38–76	04 Jul–11 Aug	5

Table 2.2.3: L (mm), d (days), and date of hatch of anchovy larvae and juveniles collected in Miyako Bay in 2014. N.D. represents not detected. Dash represents no data.

Date	SST	Larva					Juvenile				
		L (mm)	N	d (days)	Date of hatch	N	L (mm)	N	d (days)	Date of hatch	N
1 Jul	16.5	18.7–34.7	88	32–39	23–30 May	3	32.7–48.4	23	39–46	16–23 May	5
23 Jul	20.8	16.4–31.4	117	35–47	06–18 Jun	5	26.5–36.6	348	39–54	30 May–14 Jun	5
7 Aug	22.9	25.0–25.0	1	-	-	-	25.1–38.9	117	-	-	-
2 Sep	23.1	21.4–28.6	115	-	-	-	35.4–36.5	3	-	-	-
27 Sep	20.4	18.2–30.7	120	-	-	-	23.8–48.4	353	-	-	-
20 Oct	18.6	20.8–28.6	129	-	-	-	23.6–58.9	260	-	-	-

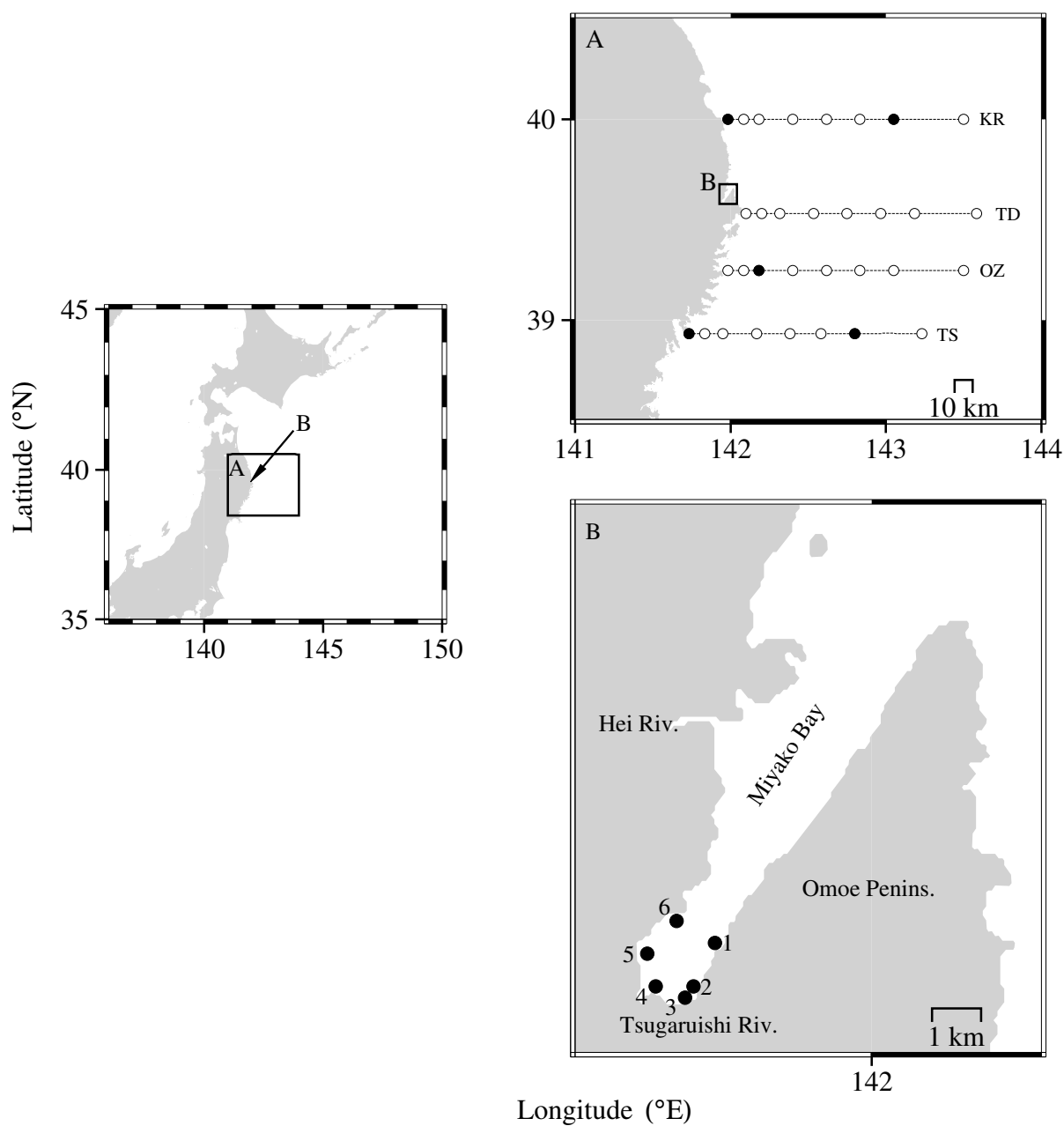


Fig. 2.2-1: Stations of the monthly surveys in Coastal Sanriku Area. (A) Closed circles represent net-tow stations of the survey conducted by *Iwate-maru*. CTD were casted at all the stations shown. (B) Closed circles represent stations of the purse seine survey in Miyako Bay. Ordinal station numbers are shown.

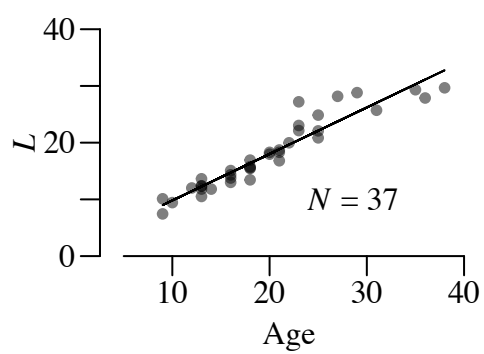


Fig. 2.2-2: d – L relationship of anchovy larvae collected in Coastal Sanriku Area in 2012.

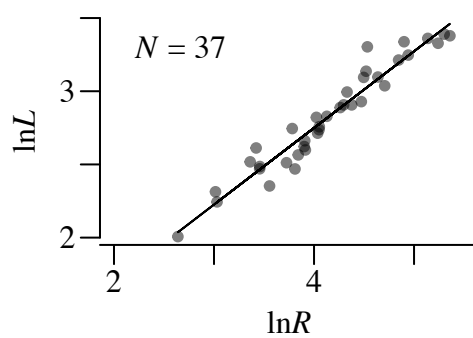


Fig. 2.2-3: R – L relationship of anchovy larvae in Coastal Sanriku Area in 2012.

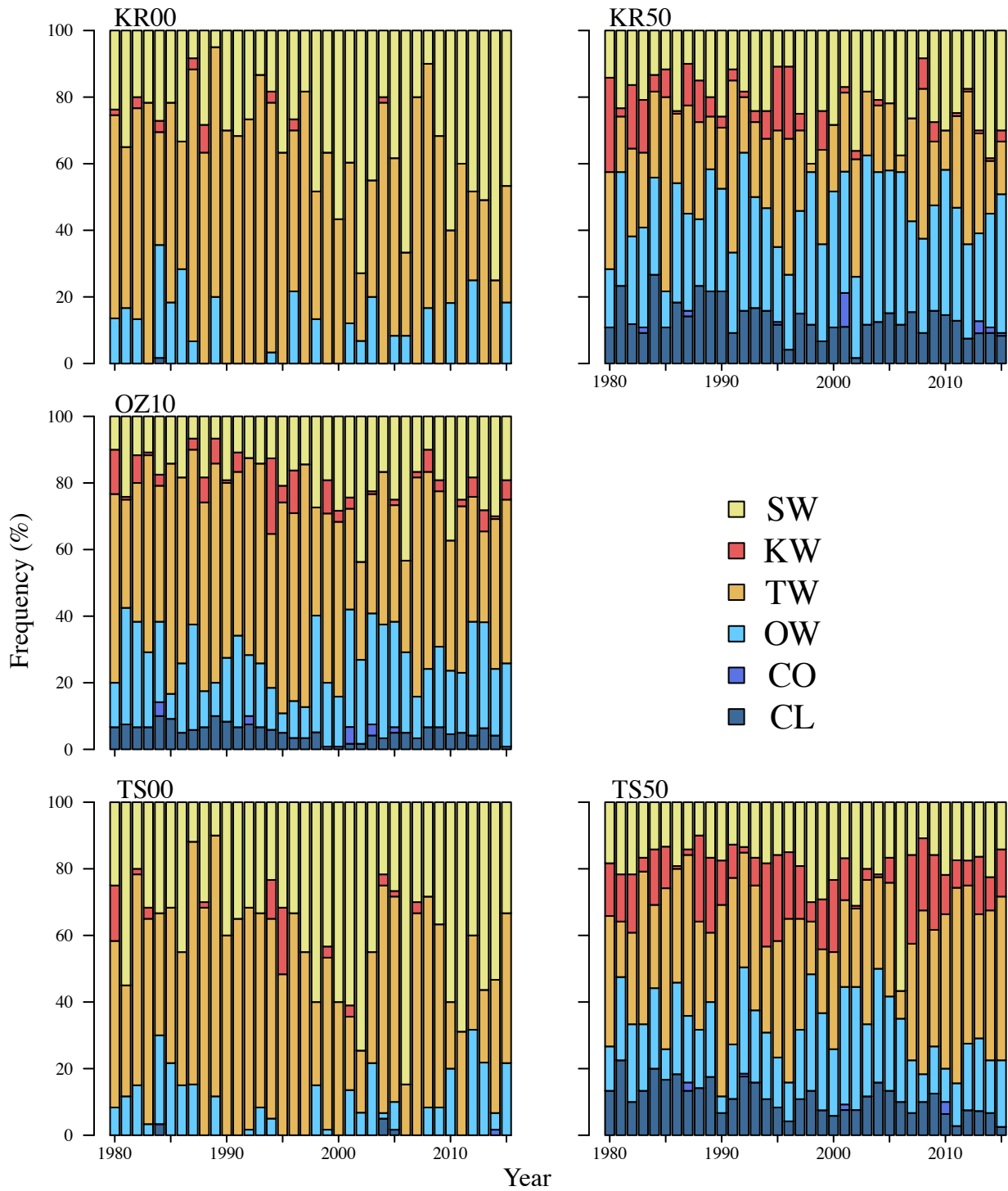


Fig. 2.2-4: Annual fluctuations of water system (the surface-layer water system, SW; the Kuroshio water system, KW; the Tsugaru Warm Current water system, TW; the Oyashio water system, OW; the Coastal Oyashio water system, CO; the cold lower-layer water system, CL) composition at Stns KR00 (*top left*), KR50 (*top right*), OZ10 (*middle left*), TS00 (*bottom left*), and TS50 (*bottom right*) in Coastal Sanriku Area.

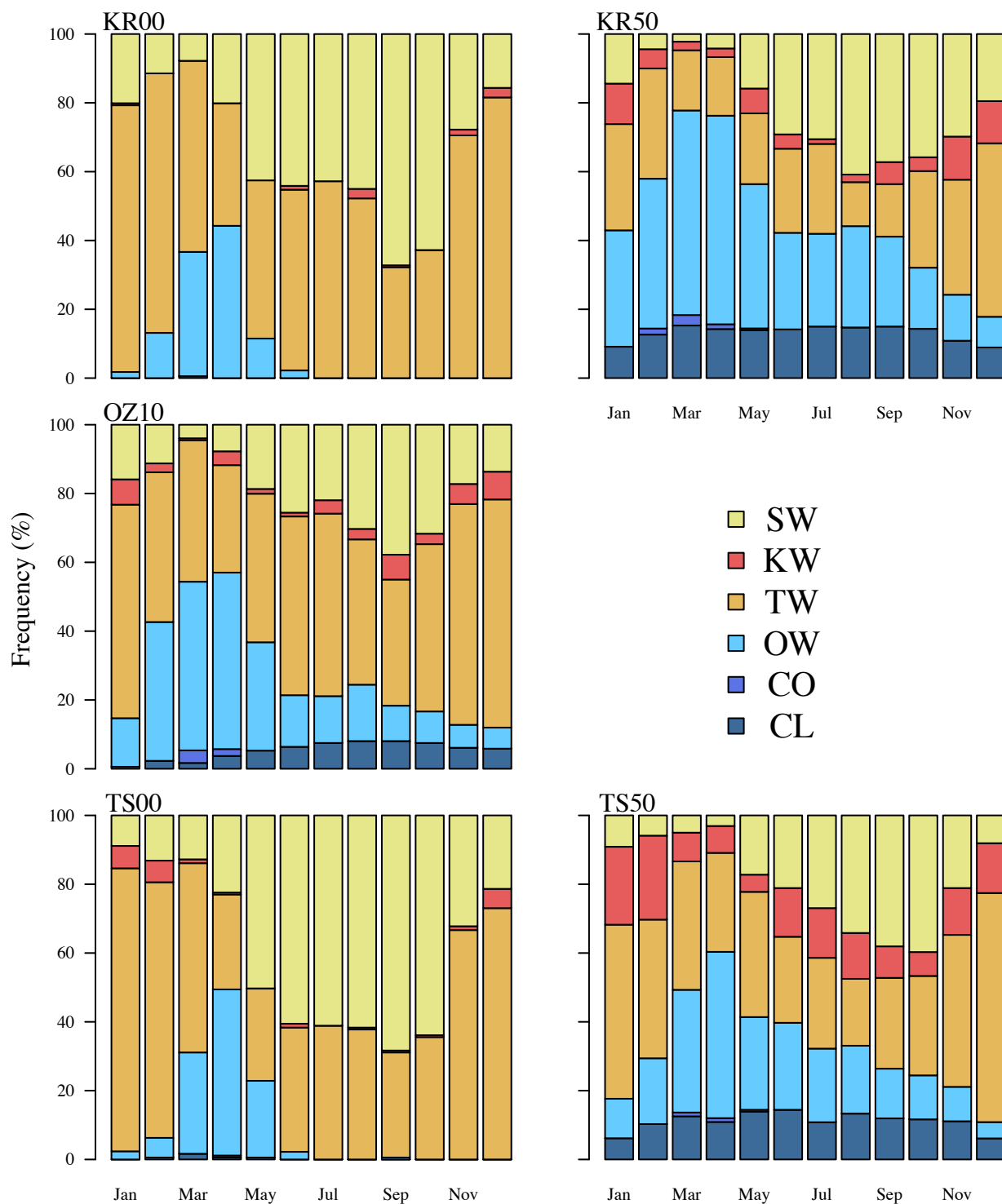


Fig. 2.2-5: Monthly change of water system composition shown as in Fig. 2.2-4.

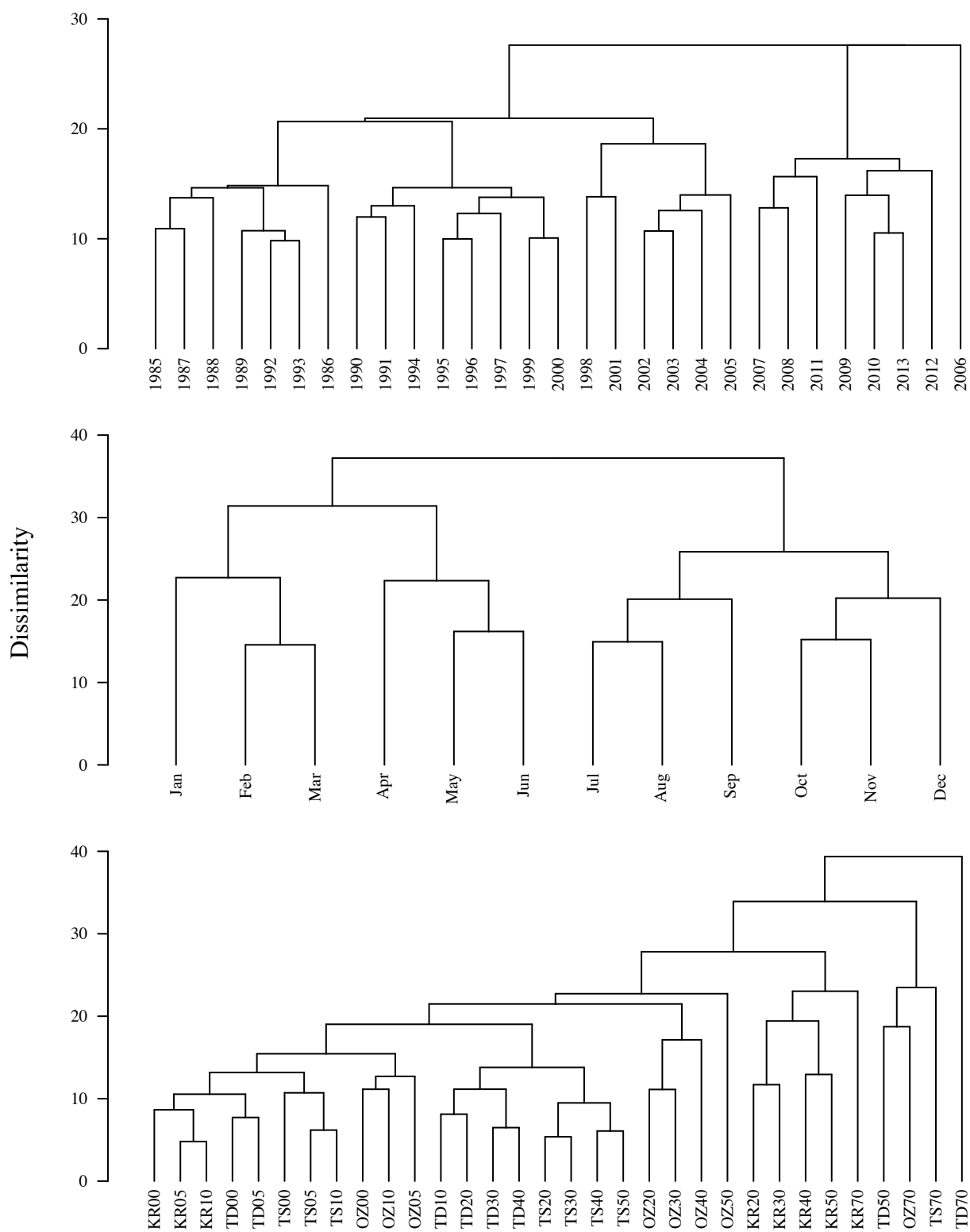


Fig. 2.2-6: Results of cluster analysis on environmental variables of Coastal Sanriku Area among years (*top*), months (*middle*), and stations (*bottom*).

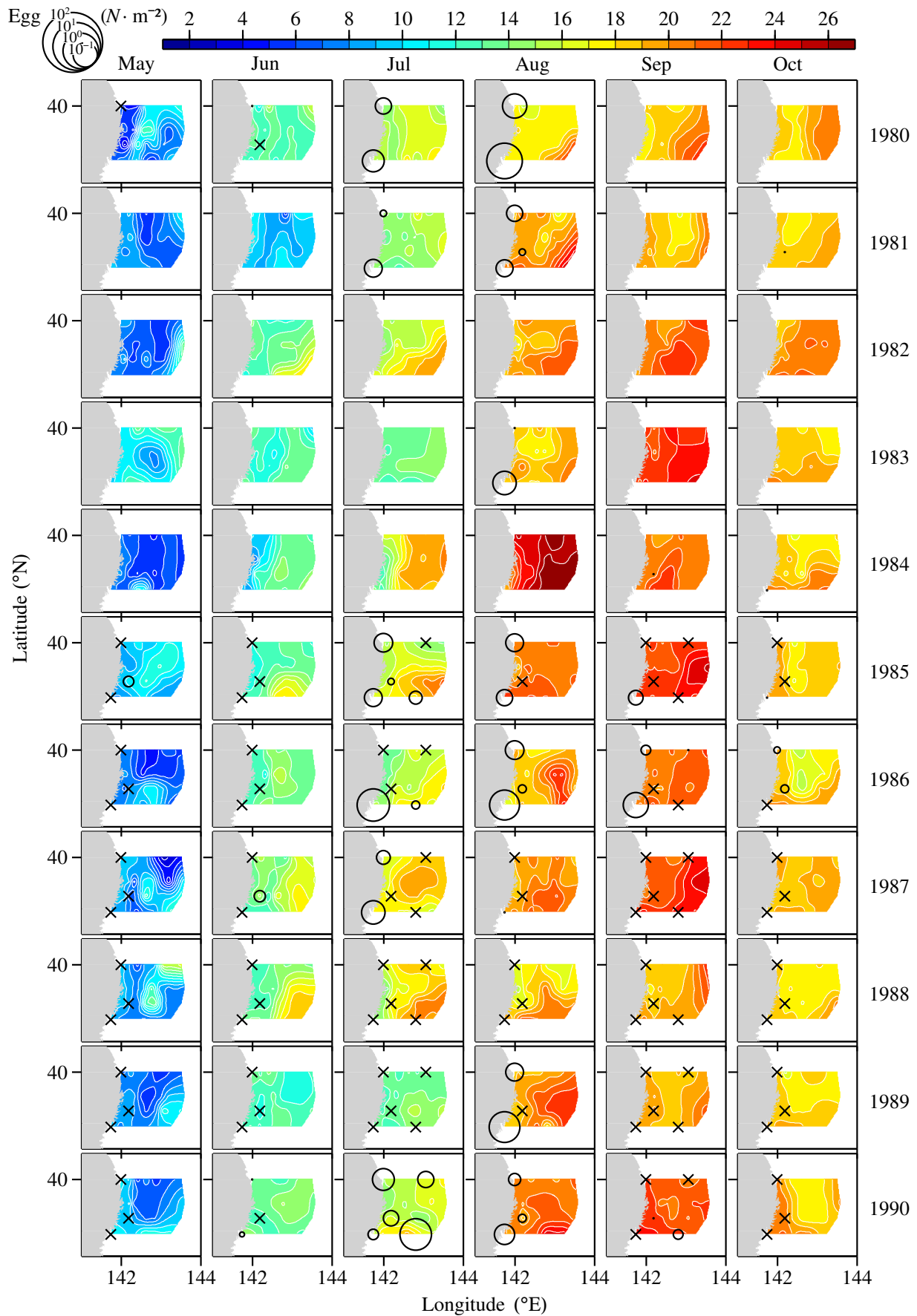


Fig. 2.2-7: Spatial distribution of anchovy eggs in Coastal Sanriku Area from May to October in 1980–1990. Cross represents the station with no egg collection. SST is shown by color.

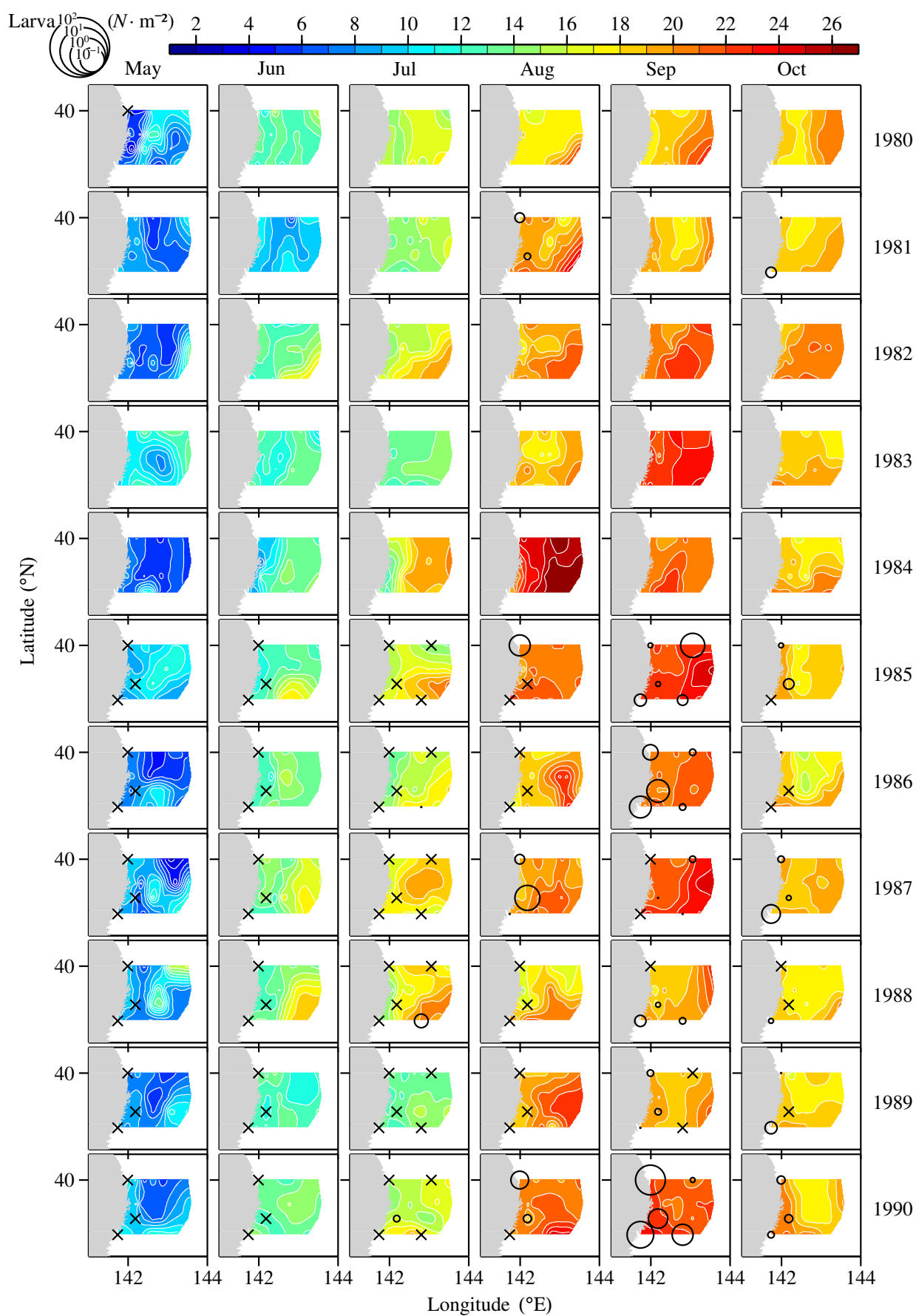


Fig. 2.2-8: Spatial distribution of anchovy larvae in Coastal Sanriku Area from May to October in 1980–1990. Cross represents the station with no larva collection. SST is shown by color.

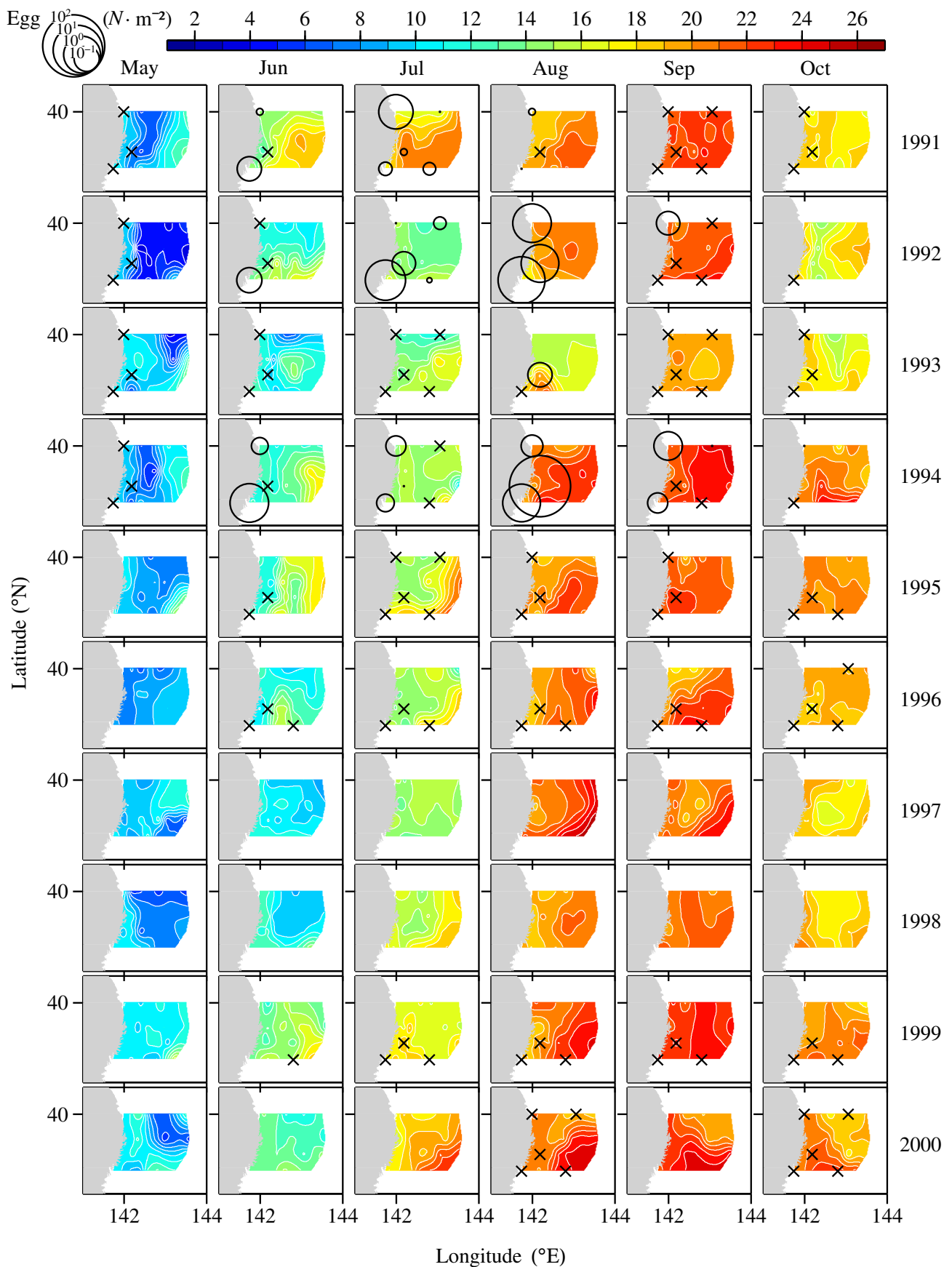


Fig. 2.2-9: Spatial distribution of anchovy eggs in Coastal Sanriku Area from May to October in 1991–2000. Cross represents the station with no egg collection. SST is shown by color.

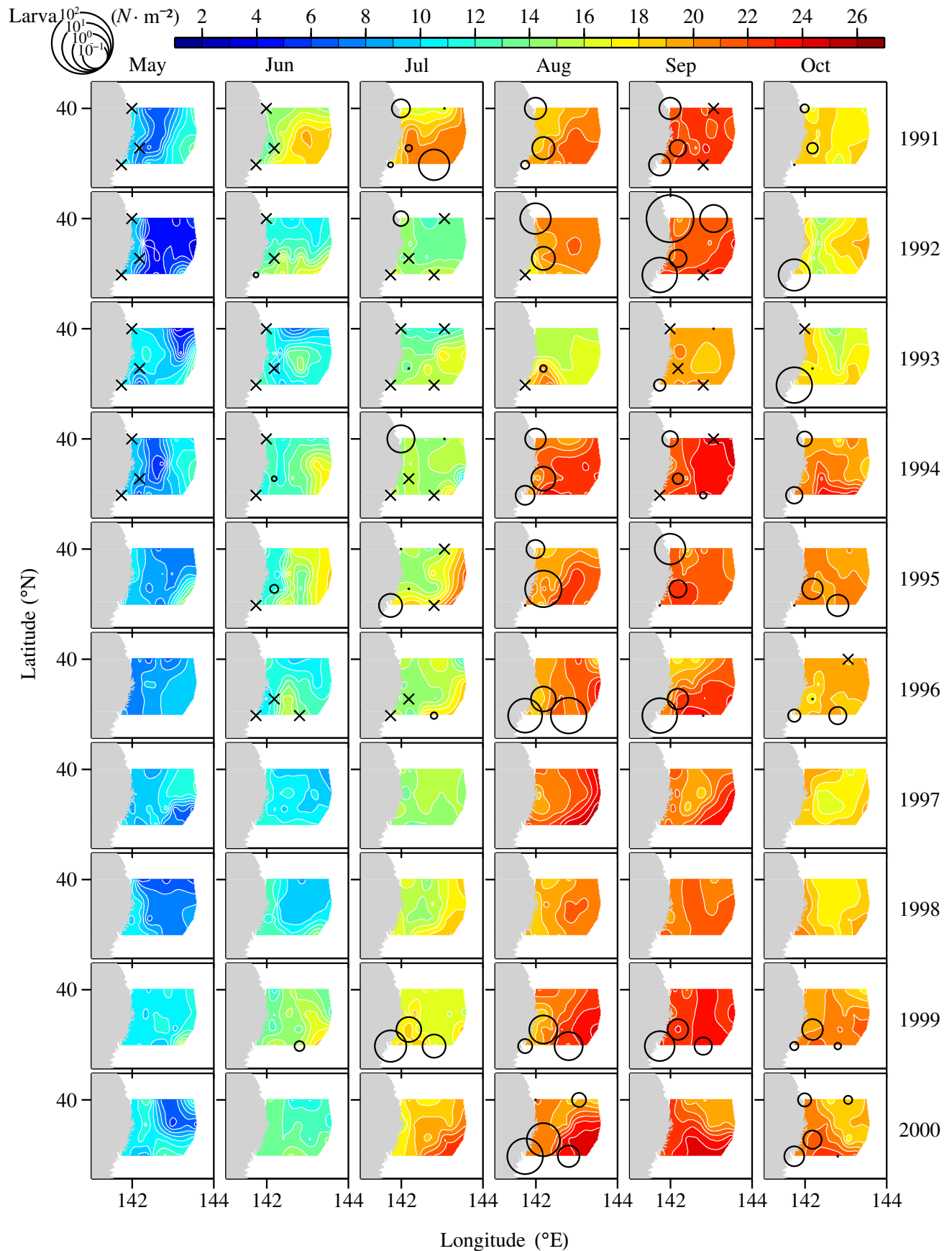


Fig. 2.2-10: Spatial distribution of anchovy larvae in Coastal Sanriku Area from May to October in 1991–2000. Cross represents the station with no larva collection. SST is shown by color.

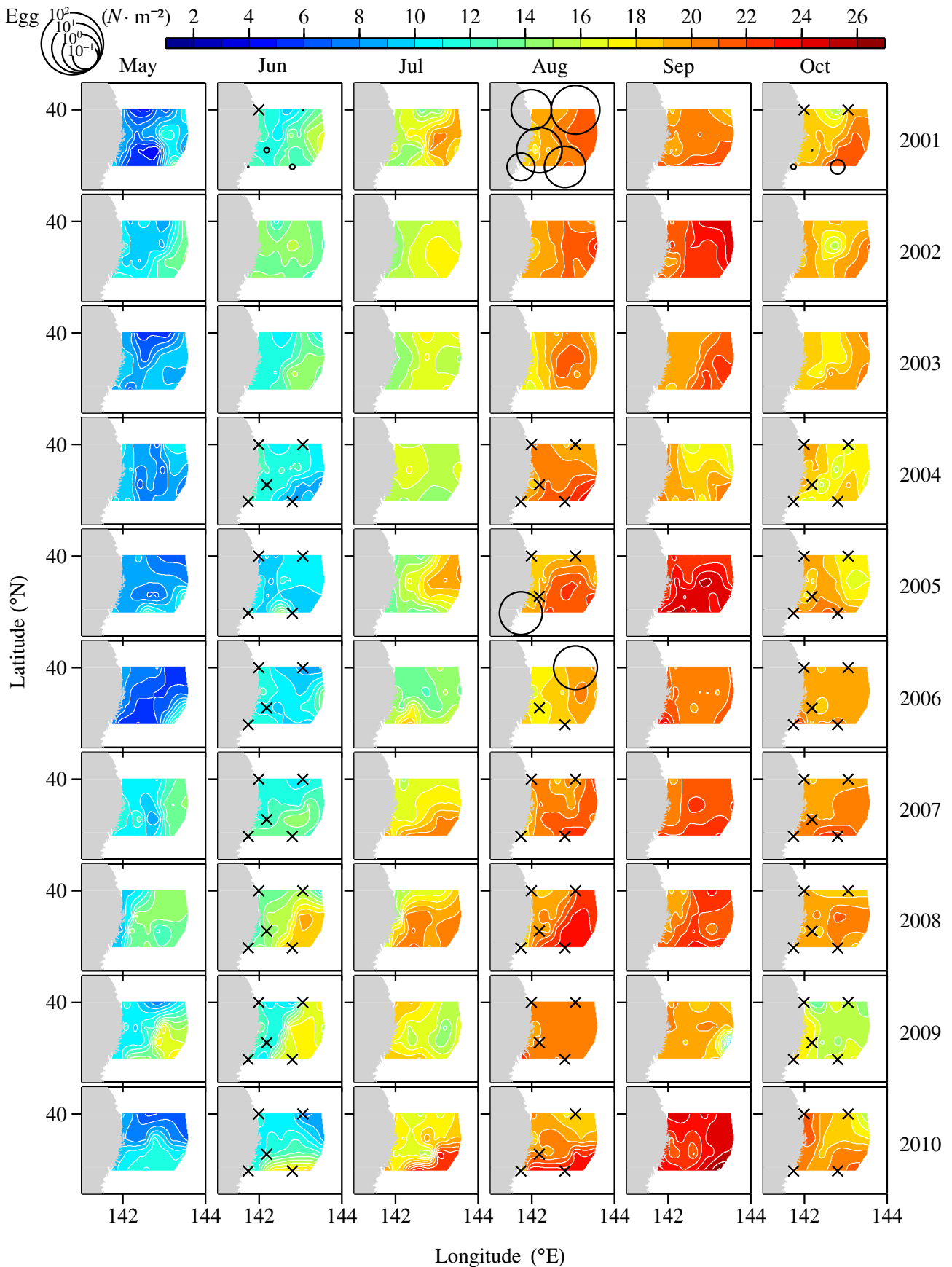


Fig. 2.2-11: Spatial distribution of anchovy eggs in Coastal Sanriku Area from May to October in 2001–2010. Cross represents the station with no egg collection. SST is shown by color.

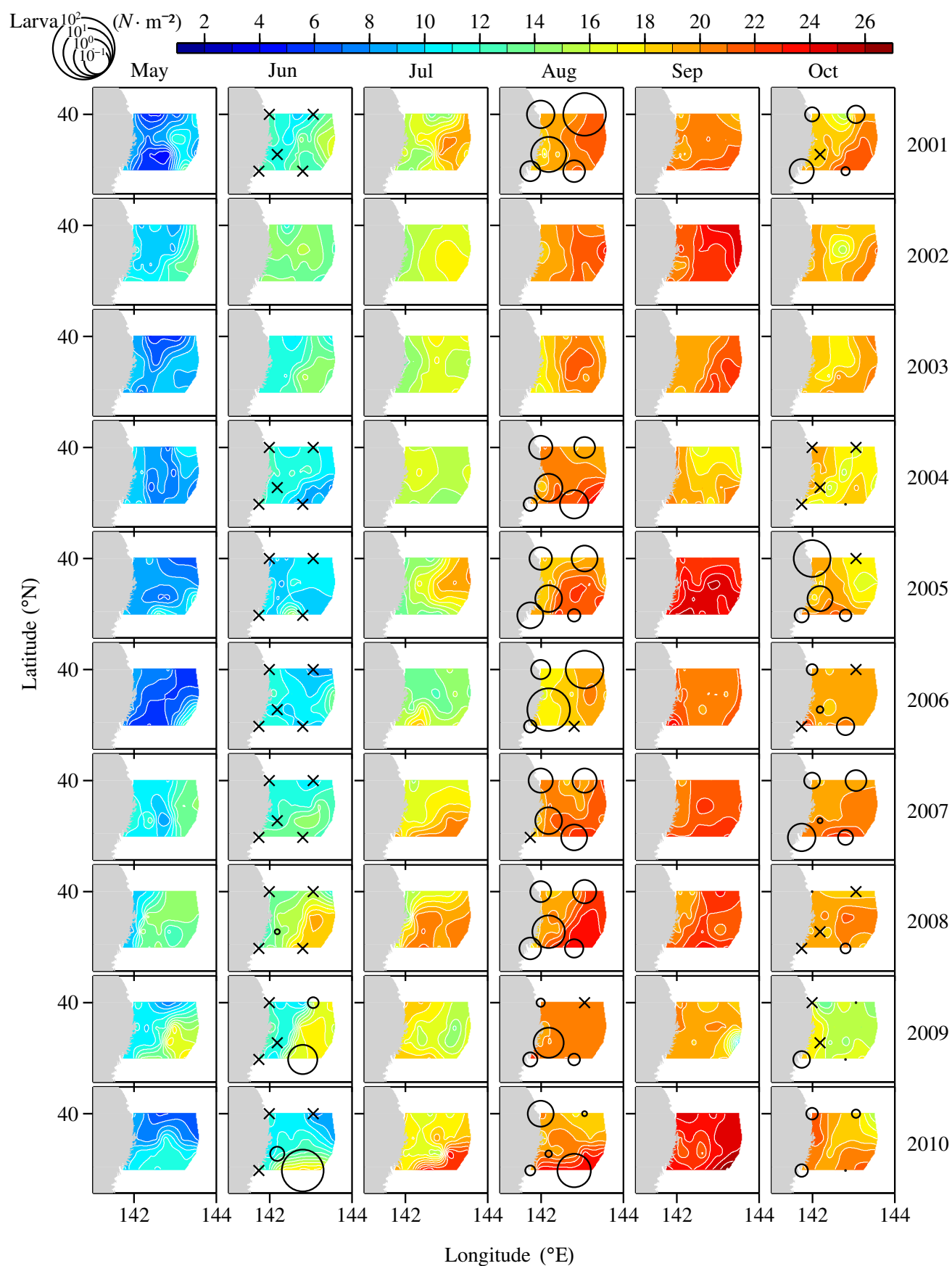


Fig. 2.2-12: Spatial distribution of anchovy larvae in Coastal Sanriku Area from May to October in 2001–2010. Cross represents the station with no larva collection. SST is shown by color.

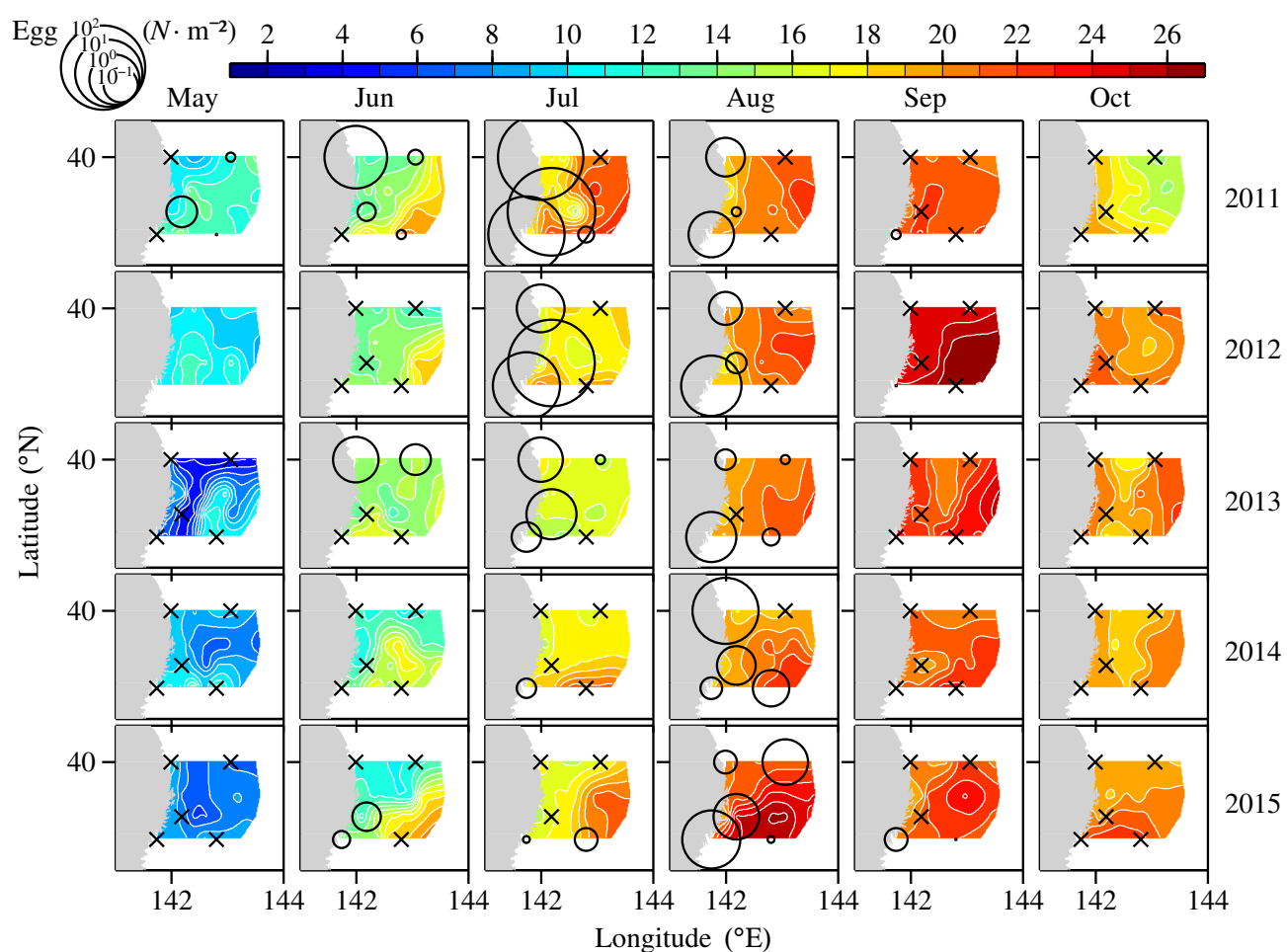


Fig. 2.2-13: Spatial distribution of anchovy eggs in Coastal Sanriku Area from May to October in 2011–2015. Cross represents the station with negative egg collection. SST is shown by color.

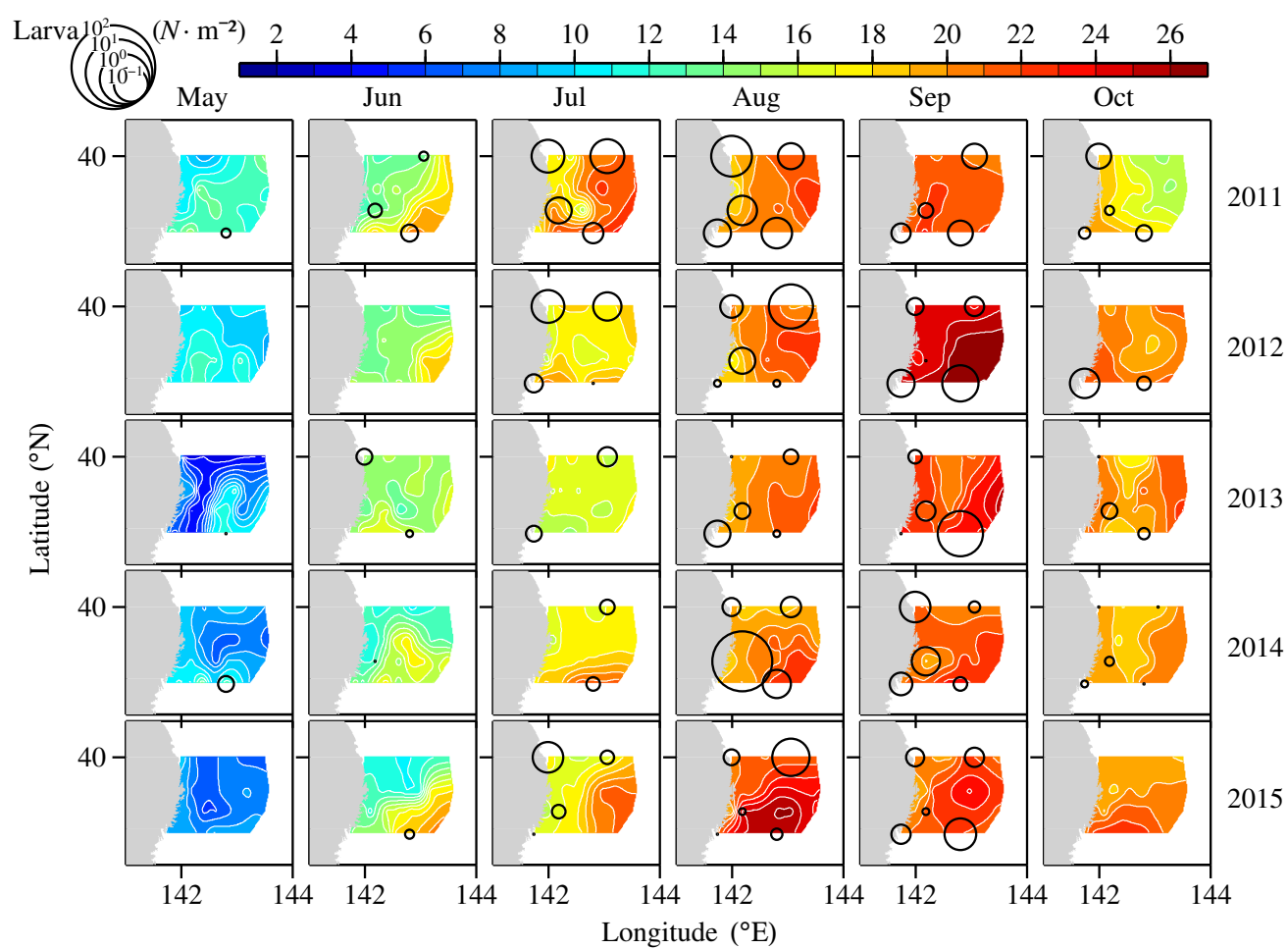


Fig. 2.2-14: Spatial distribution of anchovy larvae in Coastal Sanriku Area from May to October in 2011–2015. Cross represents the station with negative larva collection. SST is shown by color.

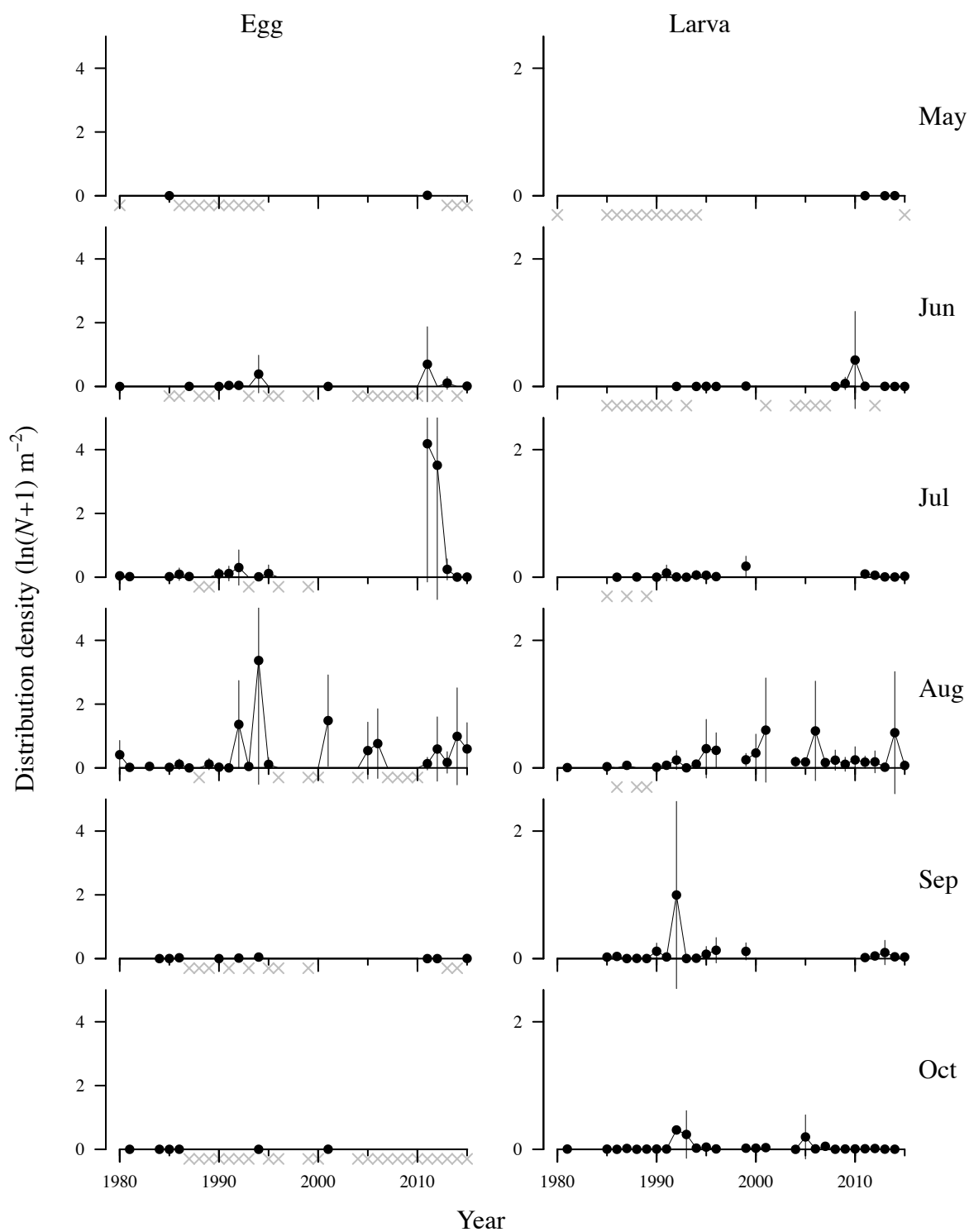


Fig. 2.2-15: Annual variations in mean distribution density of anchovy eggs (*left*) and larvae (*right*) in Coastal Sanriku Area by months from May to October. Cross represents year with no collection. Vertical line represents 0.1 standard deviation.

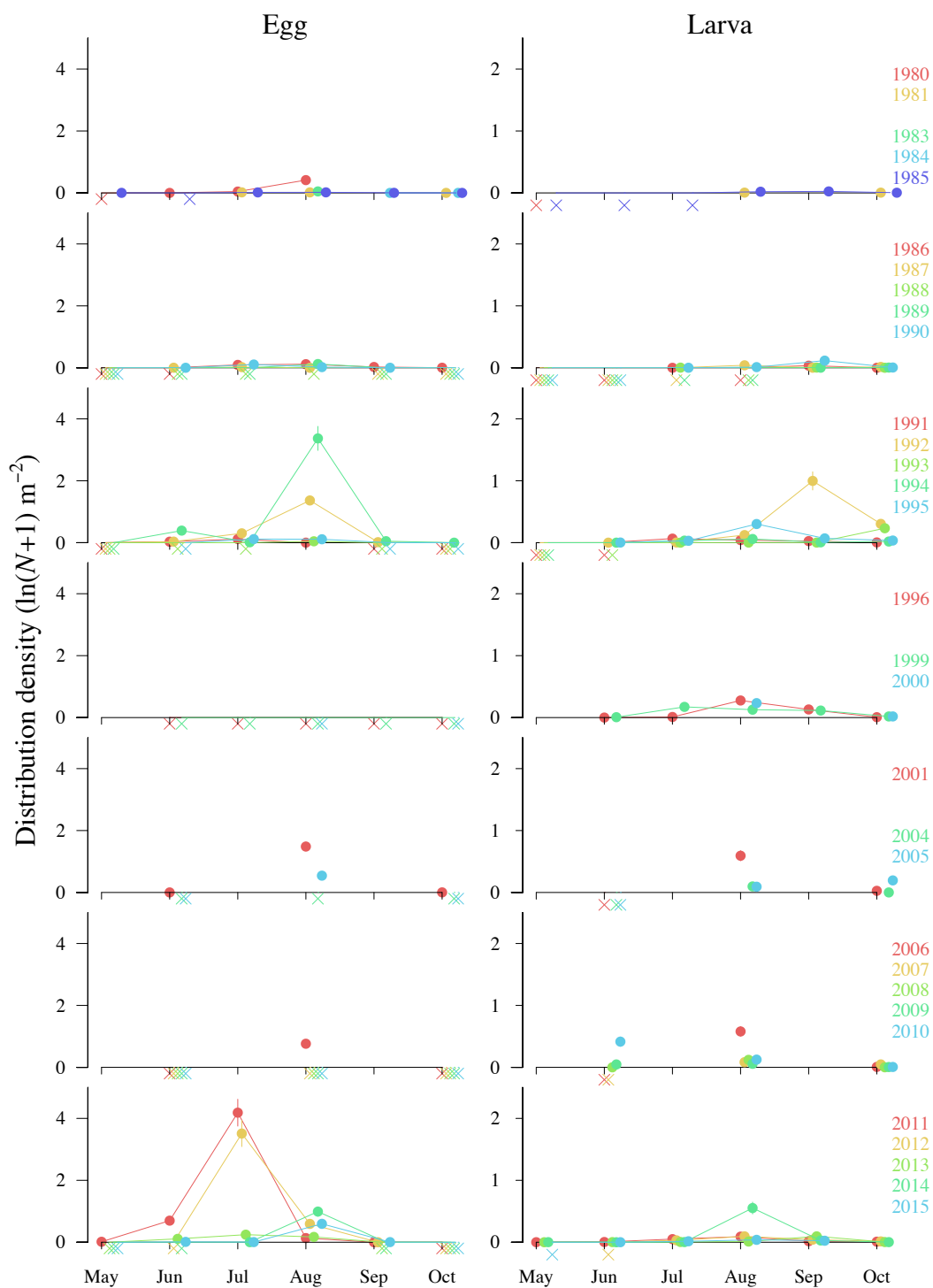


Fig. 2.2-16: Monthly variations in mean distribution density of anchovy eggs (*left*) and larvae (*right*) in the 5 stations in Coastal Sanriku Area by years from 1980 (*top*) to 2015 (*bottom*). Cross represents month with no collection. Vertical line represents 0.1 standard deviation.

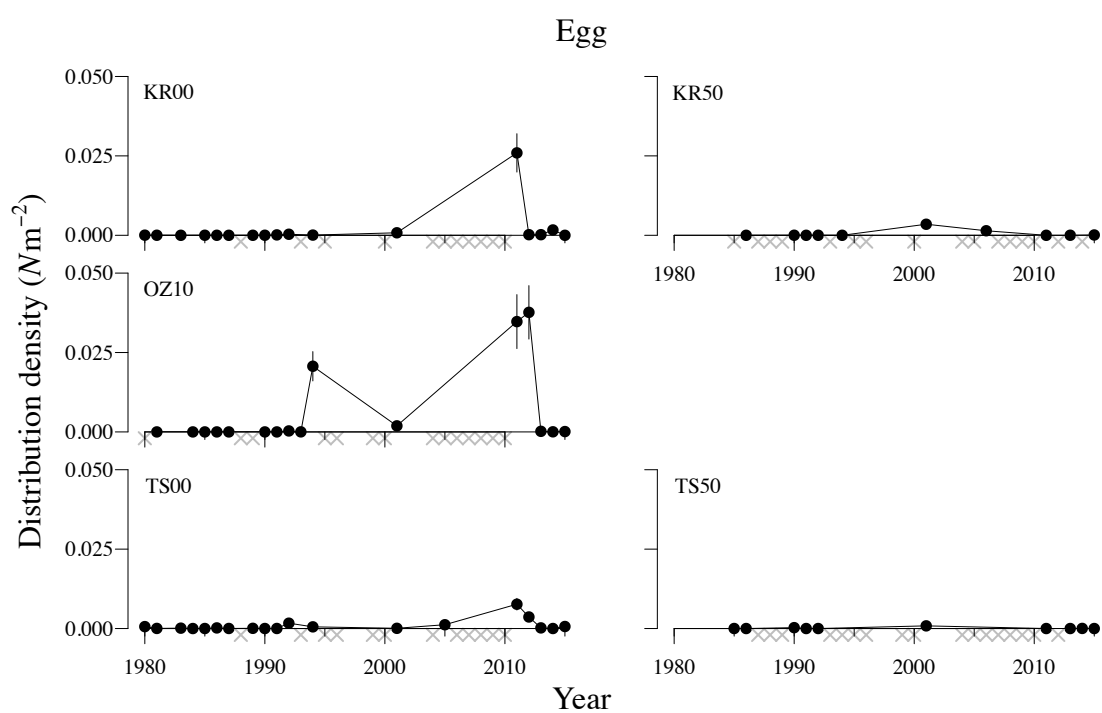


Fig. 2.2-17: Annual variations in mean distribution density of anchovy eggs from May to October in Coastal Sanriku Area by stations. Cross represents year with no collection. Vertical line represents 0.1 standard deviation.

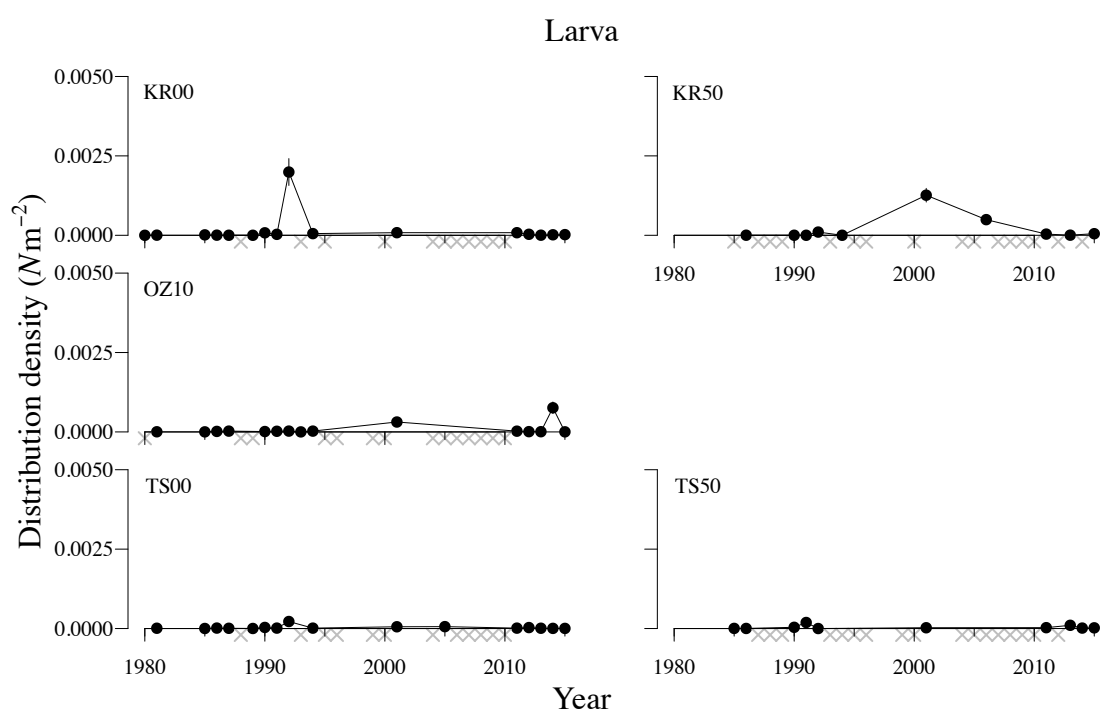


Fig. 2.2-18: Annual variations in mean distribution density of anchovy larvae from May to October in Coastal Sanriku Area by stations. Cross represents year with no collection. Vertical line represents 0.1 standard deviation.

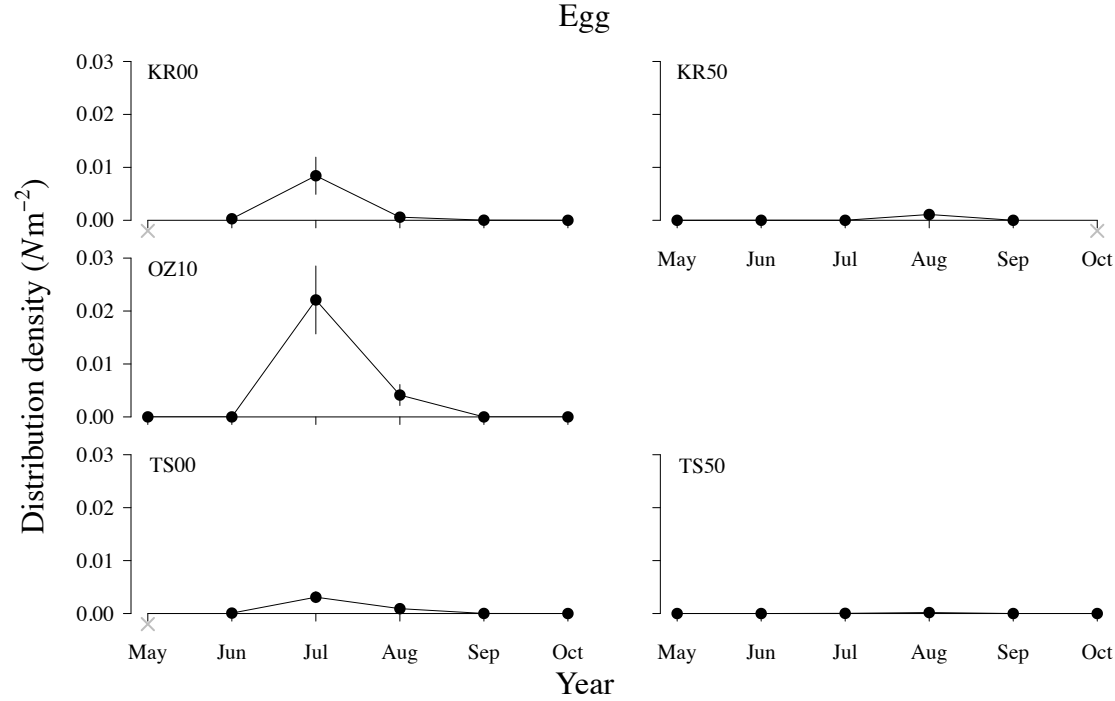


Fig. 2.2-19: Monthly variations in mean distribution density of anchovy eggs in 35 years from 1980 to 2015 in Coastal Sanriku Area by stations. Cross represents year with no collection. Vertical line represents 0.1 standard deviation.

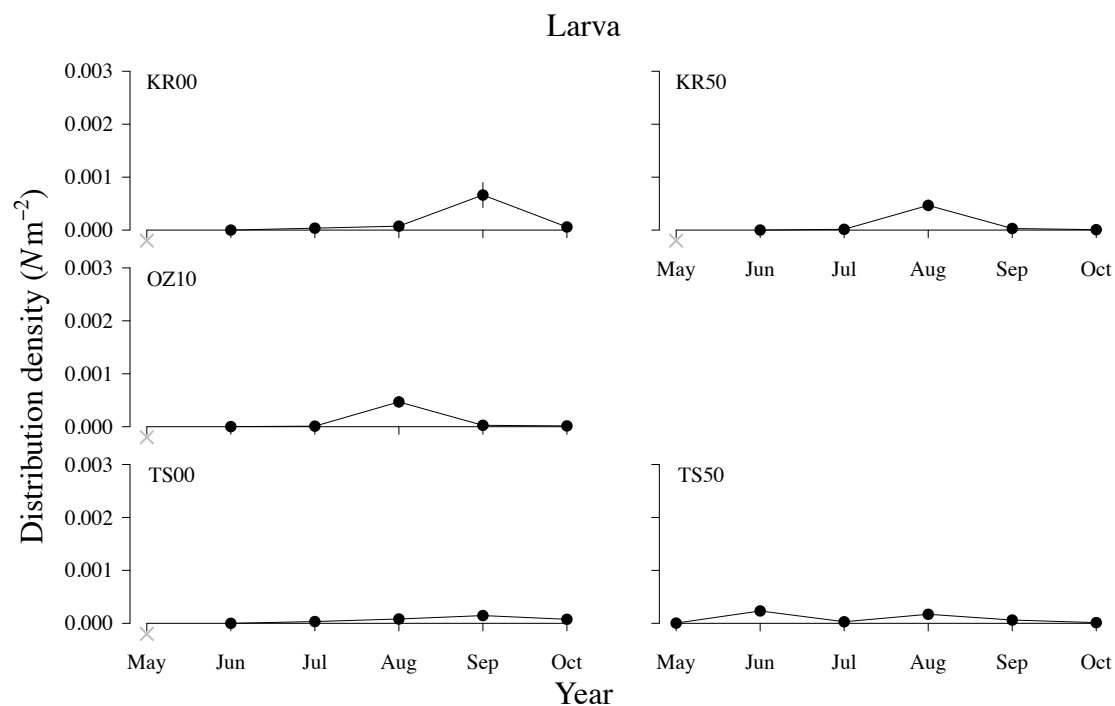


Fig. 2.2-20: Monthly variations in mean distribution density of anchovy larvae in 35 years from 1980 to 2015 in Coastal Sanriku Area by stations. Cross represents year with no collection. Vertical line represents 0.1 standard deviation.

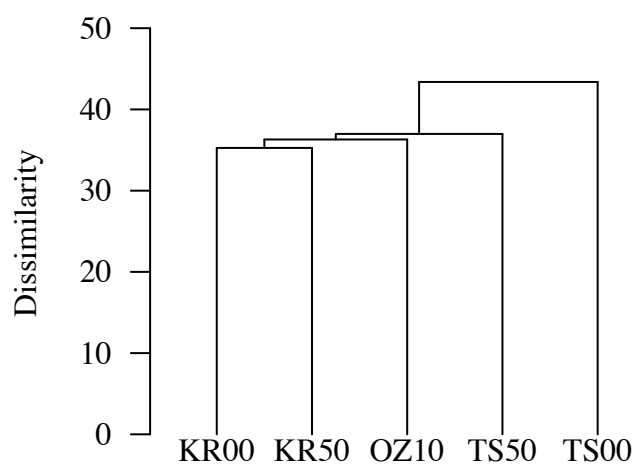


Fig. 2.2-21: Cluster analysis on distribution density of eggs and larvae in each year and month in Coastal Sanriku Area by stations.

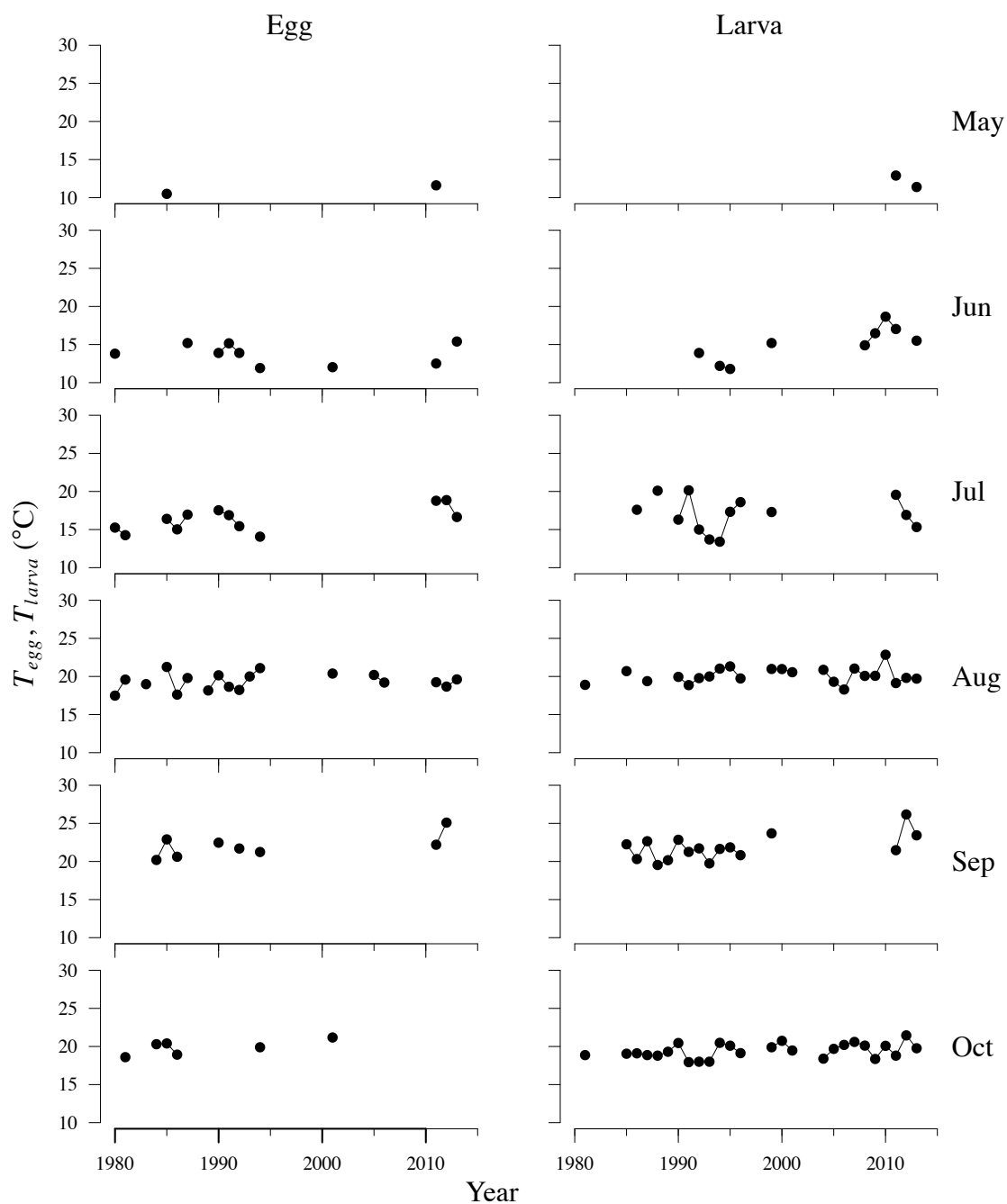


Fig. 2.2-22: Annual variations in mean T_{egg} (left) and T_{larva} (right) from May to October in Coastal Sanriku Area by months.

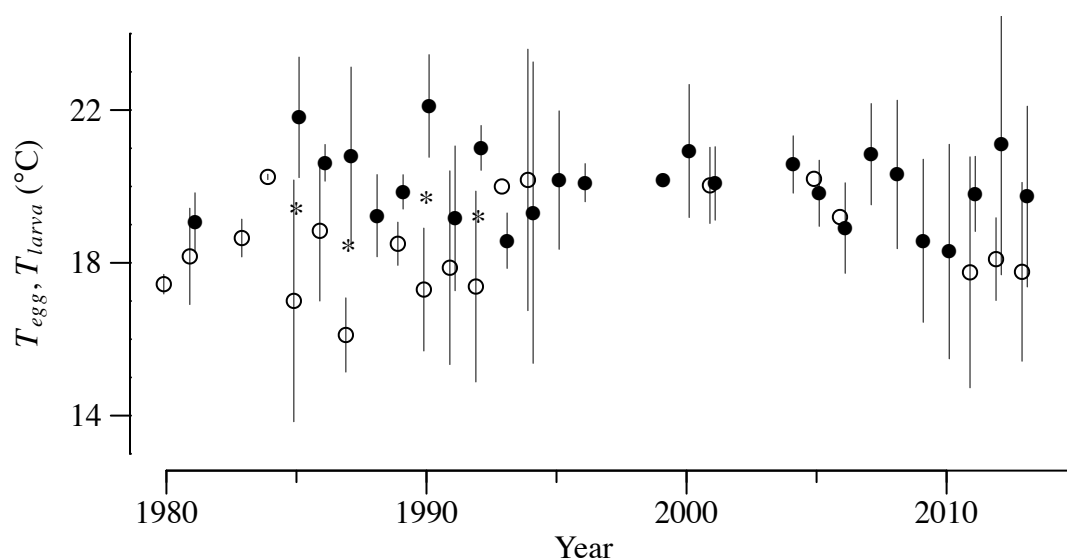


Fig. 2.2-23: Within-year difference in mean T_{egg} (open circle) and T_{larva} (closed circle) from May to October in Coastal Sanriku Area by years. Vertical line represents standard deviation. Asterisk indicates significant difference (between the two).

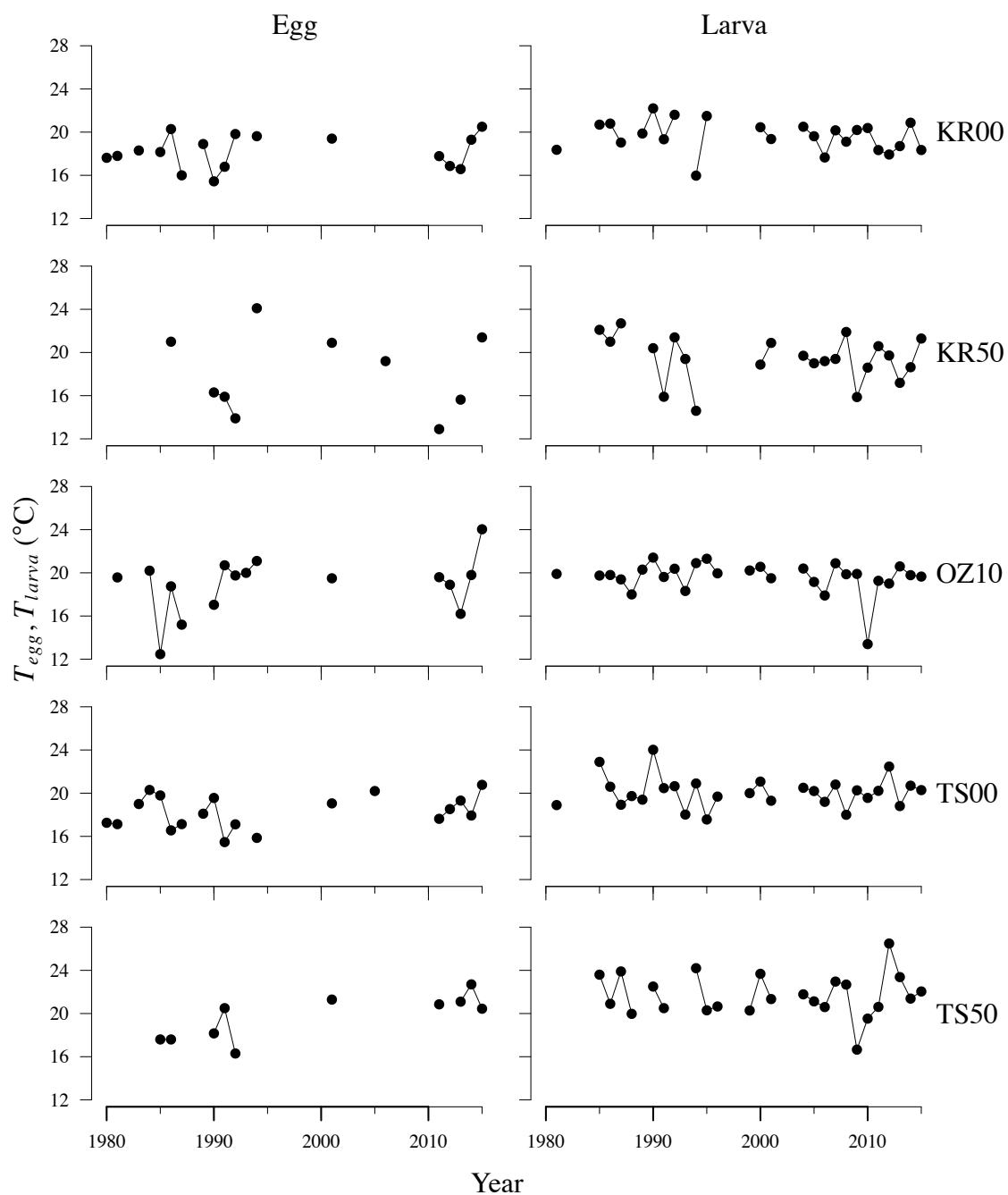


Fig. 2.2-24: Annual variations in mean T_{egg} (left) and T_{larva} (right) from May to October in Coastal Sanriku Area by stations.

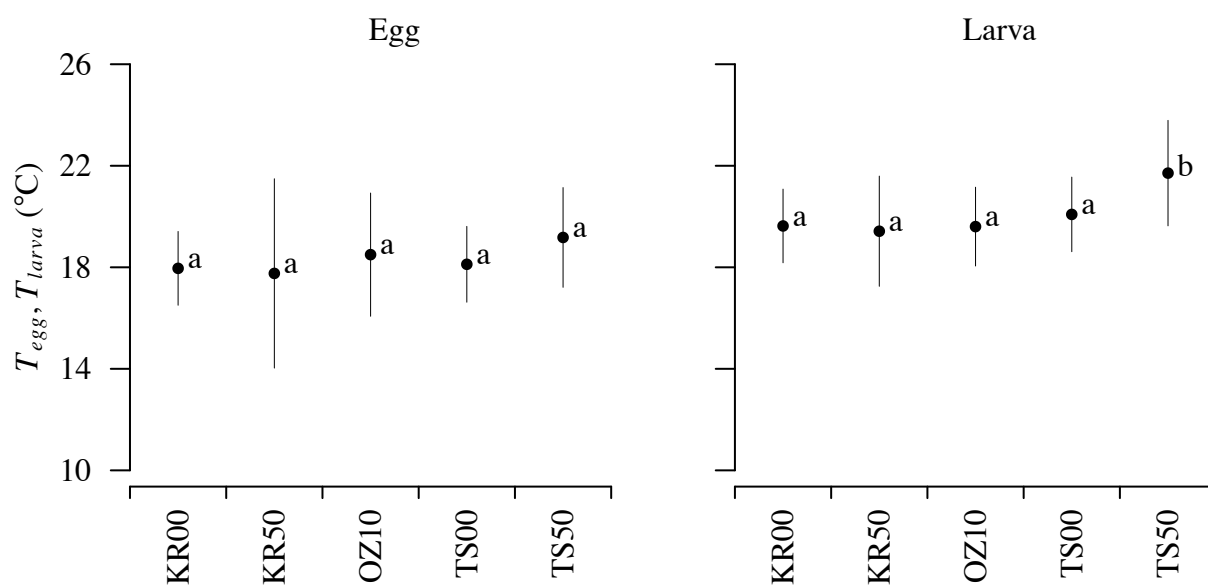


Fig. 2.2-25: Among-station difference in T_{egg} (left) and T_{larva} (right) in Coastal Sanriku Area. Values are different between the stations with different letters.

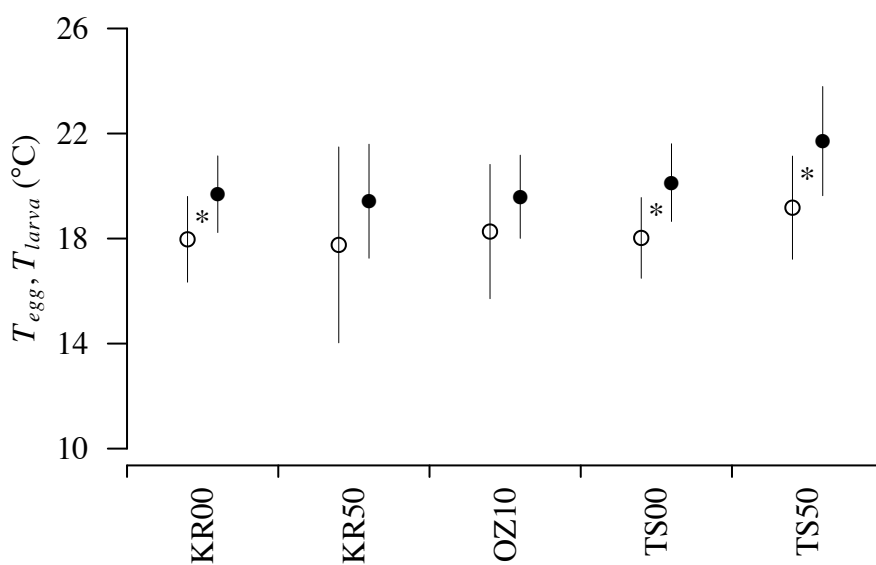


Fig. 2.2-26: Within-station difference in T_{egg} and T_{larva} in Coastal Sanriku Area by stations. Values are different between egg and larvae at station with asterisk.

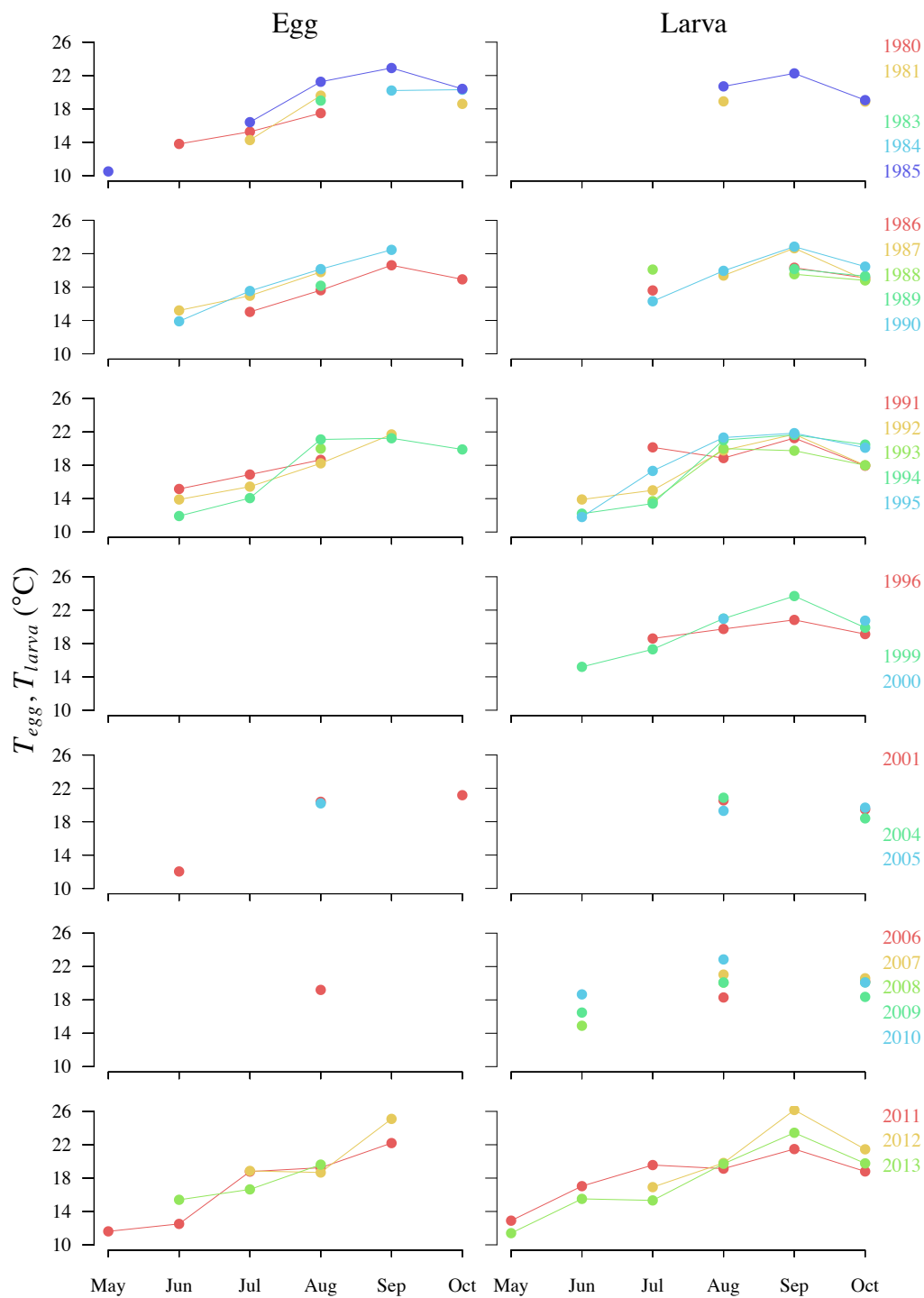
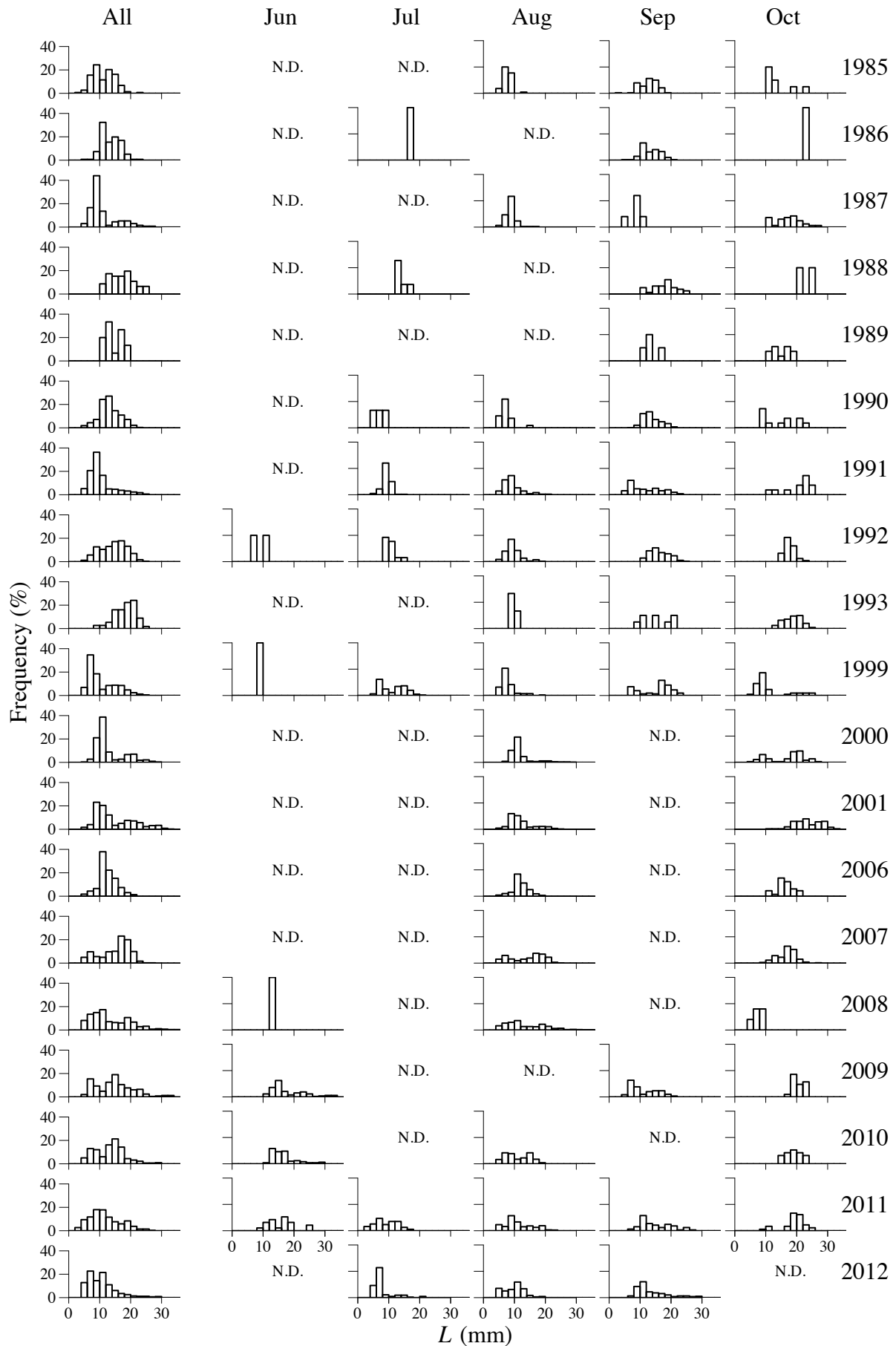


Fig. 2.2-27: Monthly variations in mean T_{egg} (left) and T_{larva} (right) in the 5 stations in Coastal Sanriku Area by years.

Fig. 2.2-28: Annual variations in L frequency distribution of anchovy larvae collected in the 5 stations in Coastal SanrikuArea by months. The leftmost column represents the overall L frequency distribution in each year. N.D. means not detected.

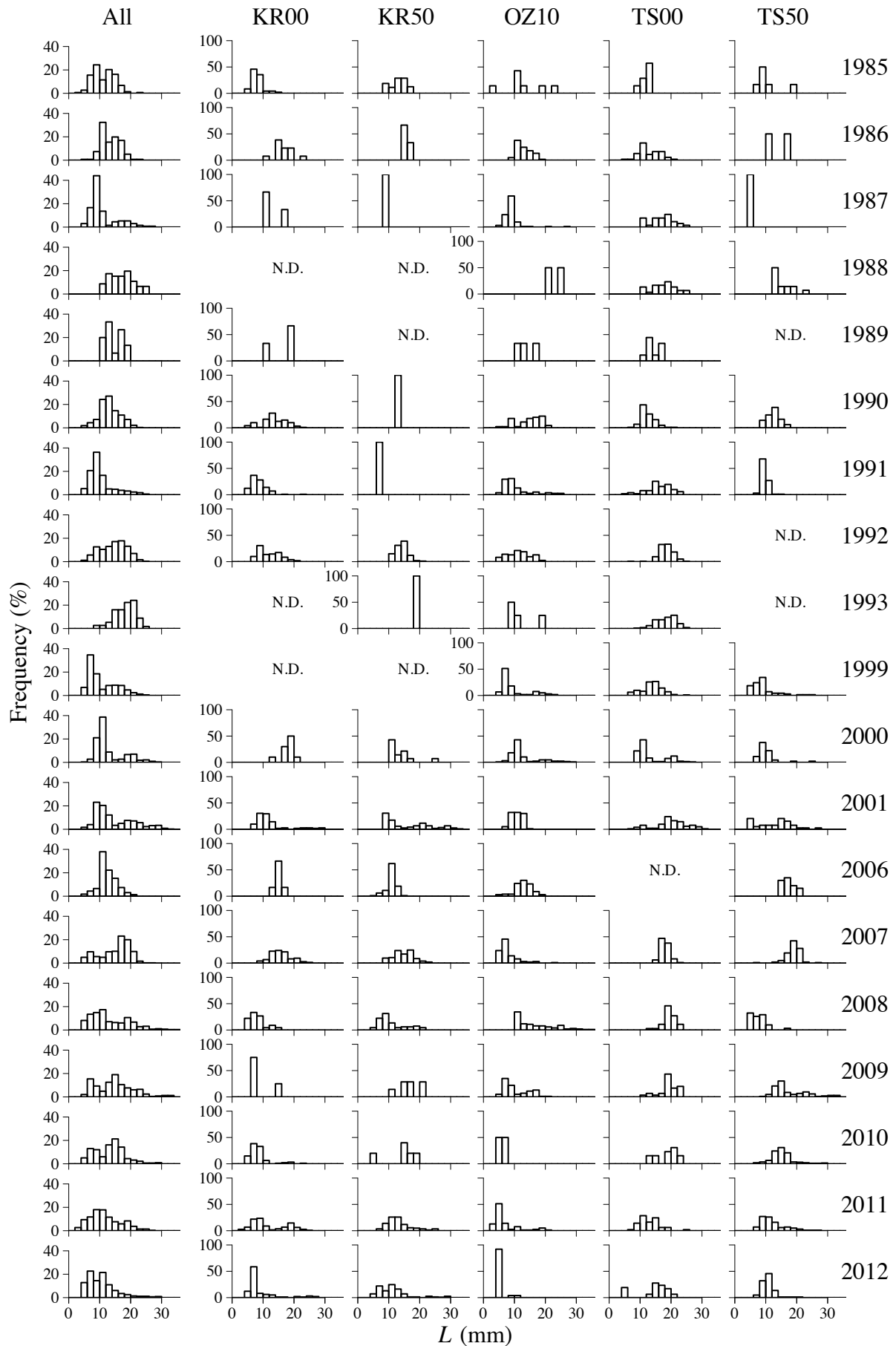


Fig. 2.2-29: Annual variations in L frequency distribution of anchovy larvae collected from May to October in Coastal Sanriku Area by stations. The leftmost column represents the overall L frequency distribution in each year. N.D. means not

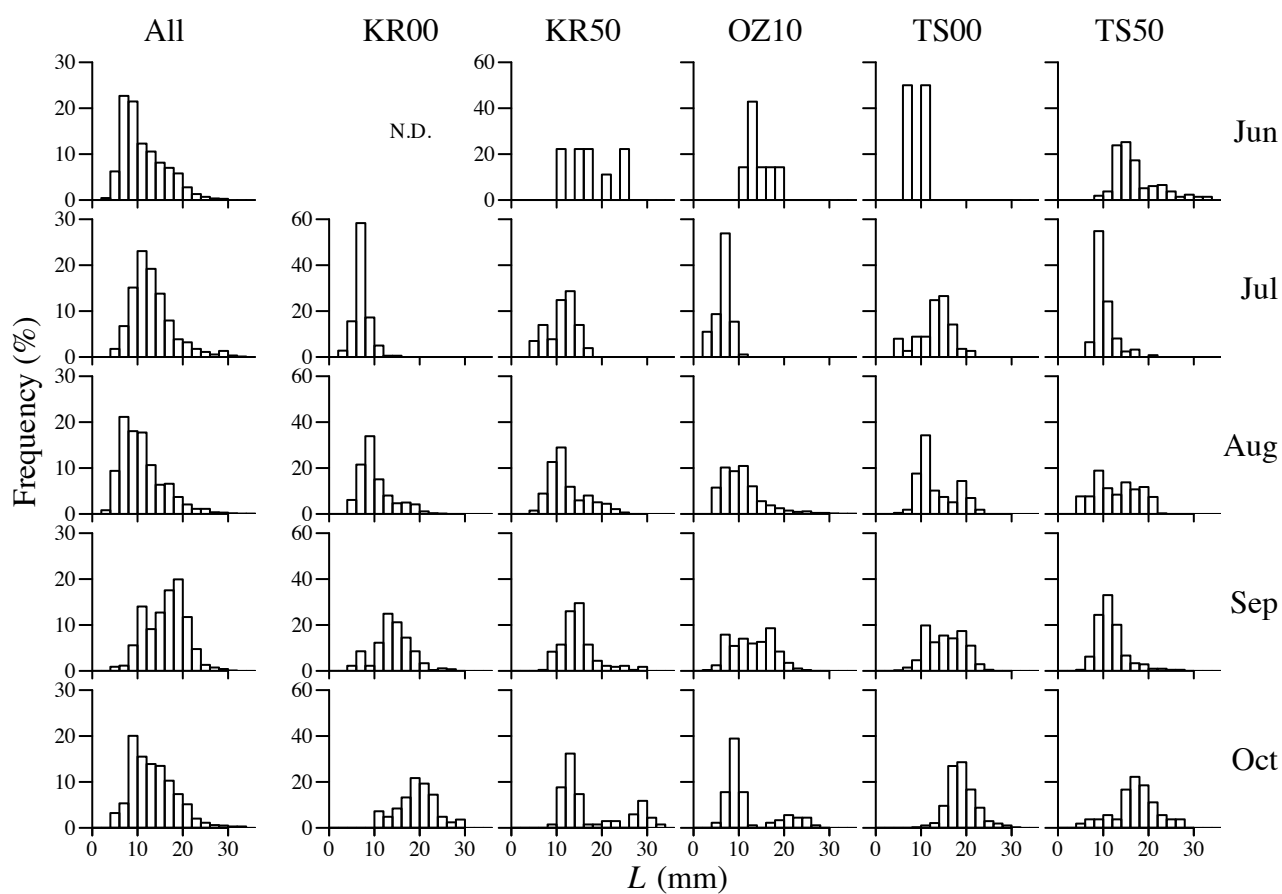


Fig. 2.2-30: Monthly variations in L frequency distribution of anchovy larvae collected from 1980 to 2015 in Coastal Sanriku Area by stations. The leftmost column represents the overall L frequency distribution in each month. N.D. means not detected.

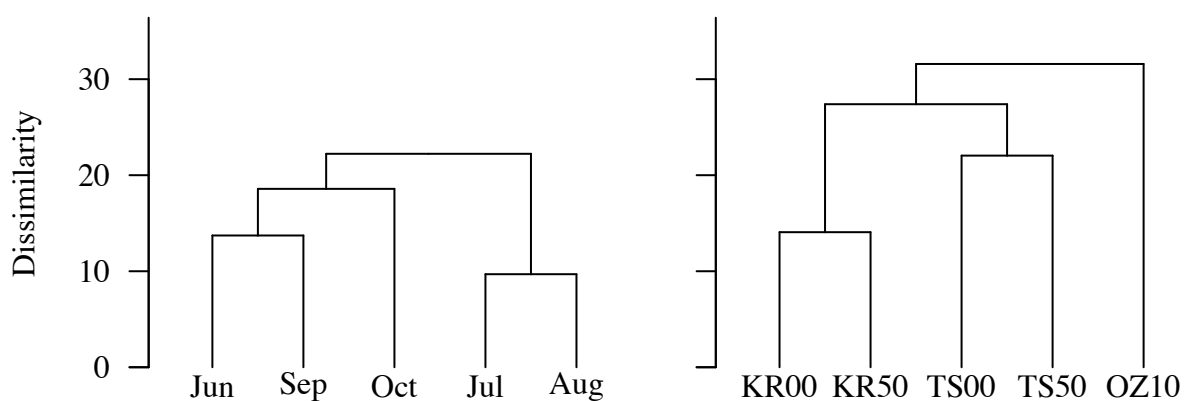


Fig. 2.2-31: Cluster analysis on larval L frequency distribution in Coastal Sanriku Area by stations (*left*) and months (*right*).

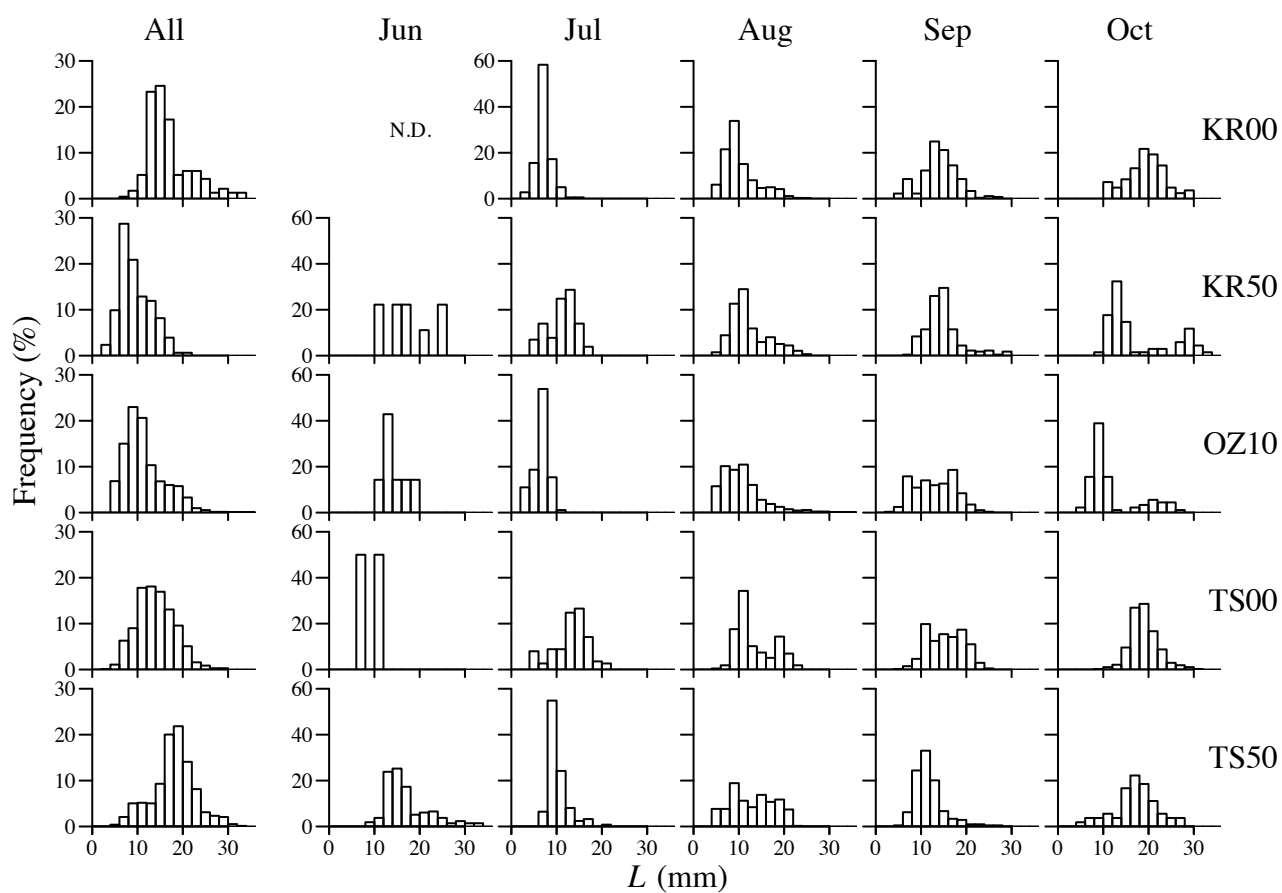


Fig. 2.2-32: Variation in L frequency distribution of anchovy larvae between stations collected from 1980 to 2015 in Coastal Sanriku Area by months. The leftmost column represents the overall L frequency distribution at each station. N.D. means not detected.

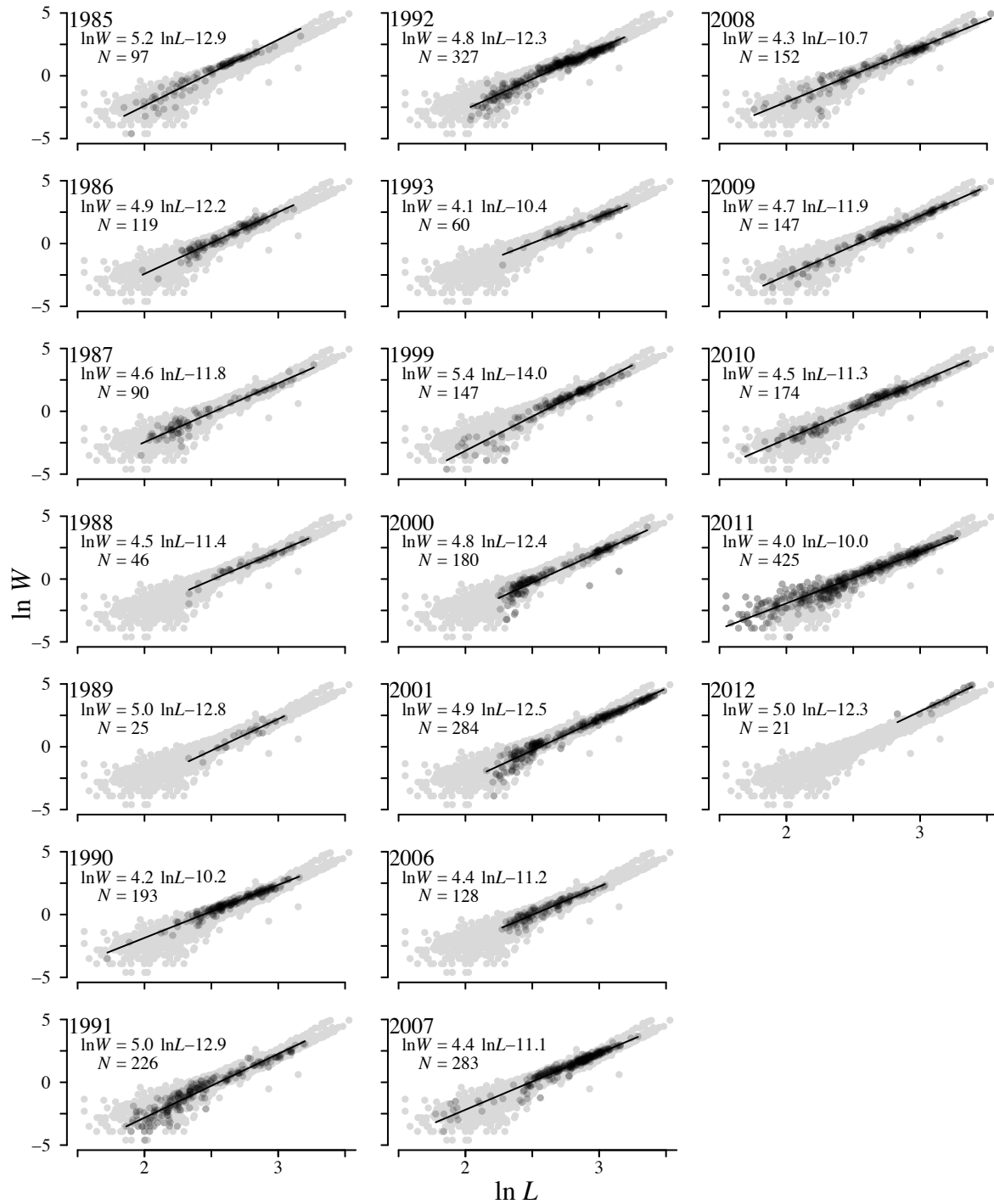


Fig. 2.2-33: L - W relationship of anchovy larvae by years in Coastal Sanriku Area. Data in each year are plotted over the overall data shown by gray plots.

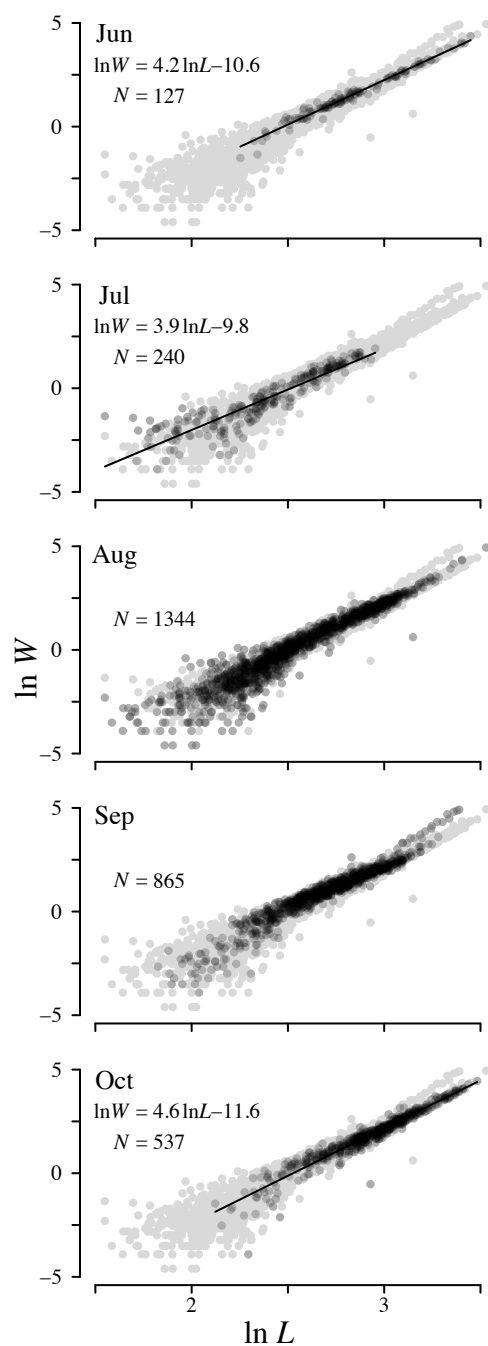


Fig. 2.2-34: L – W relationship of anchovy larvae by months in Coastal Sanriku Area. Data in each month are plotted over the overall data shown by gray plots.

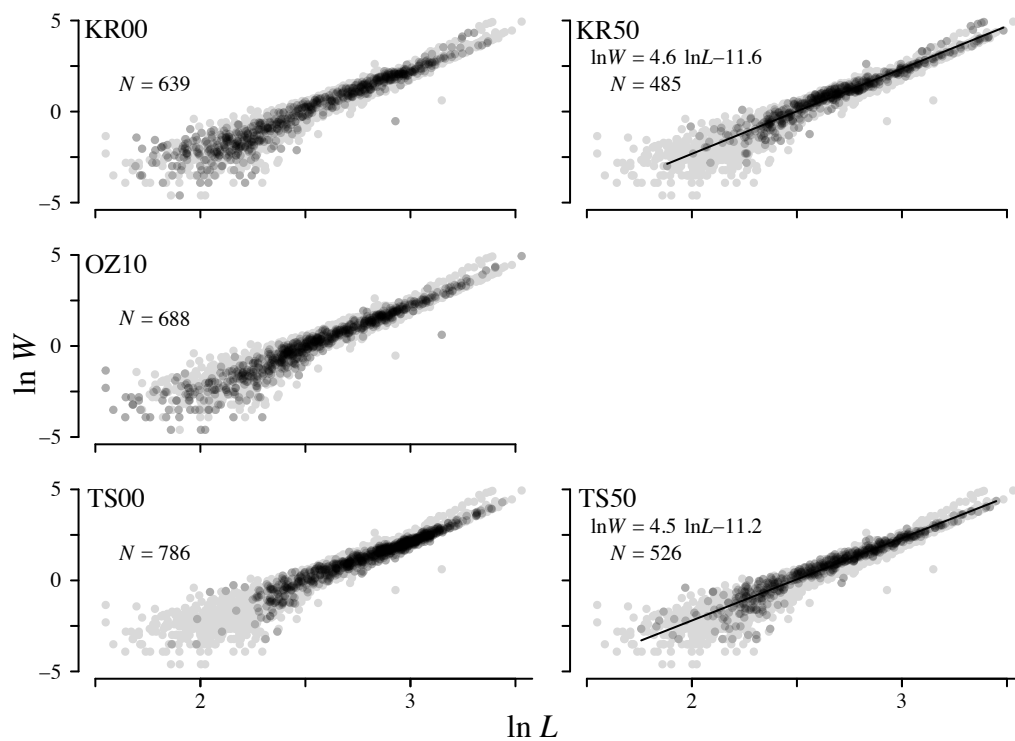


Fig. 2.2-35: L – W relationship of anchovy larvae by stations in Coastal Sanriku Area. Data at each station are plotted over the overall data shown by gray plots.

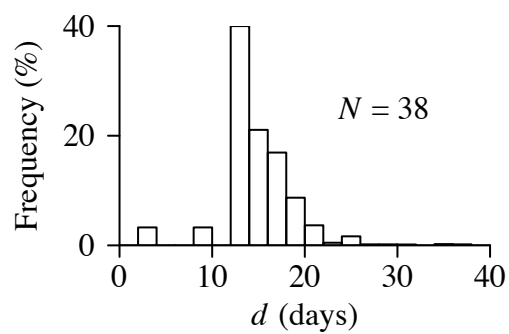


Fig. 2.2-36: d (days) frequency distribution of anchovy larvae in Coastal Sanriku Area in 2012.

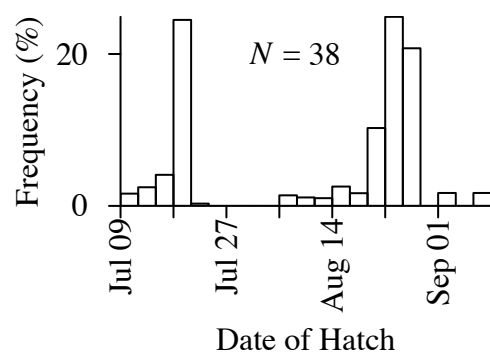


Fig. 2.2-37: Hatch-date frequency distribution of anchovy larvae in Coastal Sanriku Area in 2012.

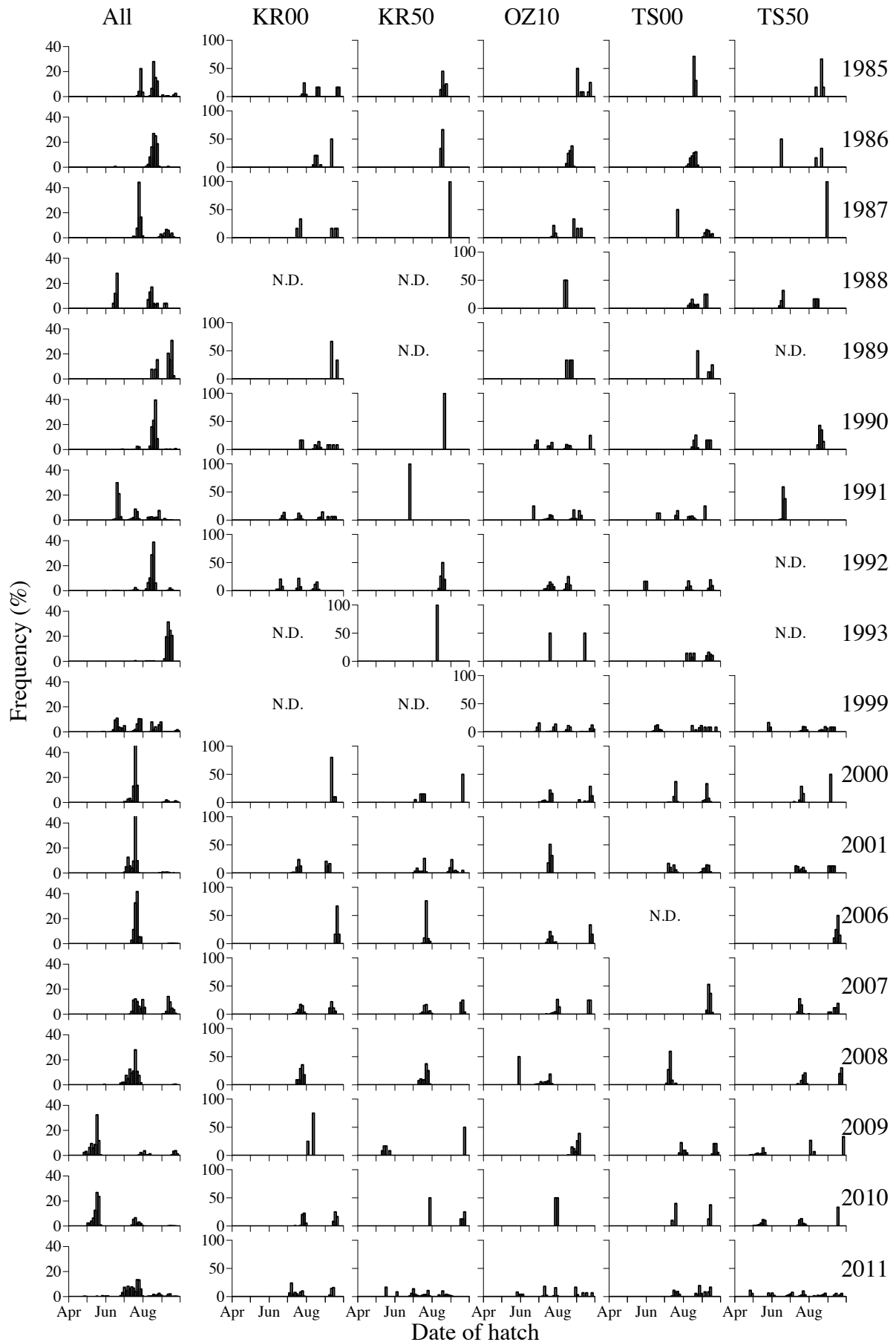


Fig. 2.2-38: Frequency distribution of estimated date of hatch of anchovy larvae by stations and years in Coastal Sanriku Area. N.D. means not detected.

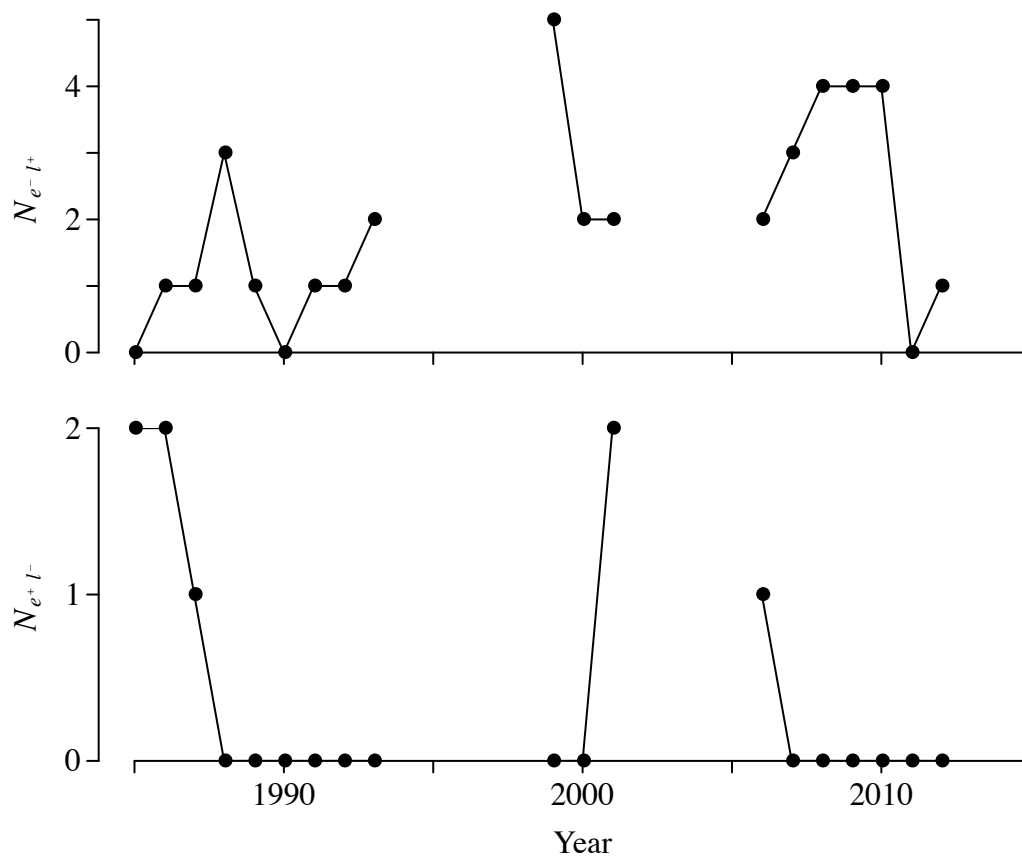


Fig. 2.2-39: Annual variations in presence/absence patterns between eggs and larvae in Coastal Sanriku Area. N_{e-l+} represents the number of months with larval hatch month but without egg collection (*top*). N_{e+l-} represents the number of months with egg collection but without larval hatch month (*bottom*).

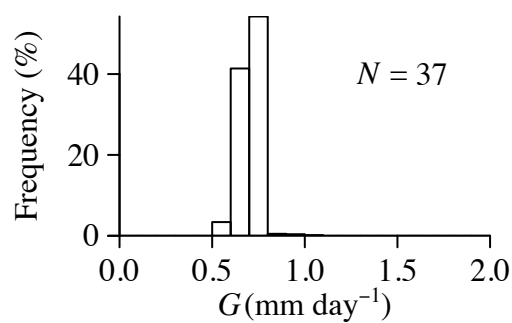


Fig. 2.2-40: G (mm day⁻¹) frequency distribution of anchovy larvae in Coastal Sanriku Area in 2012.

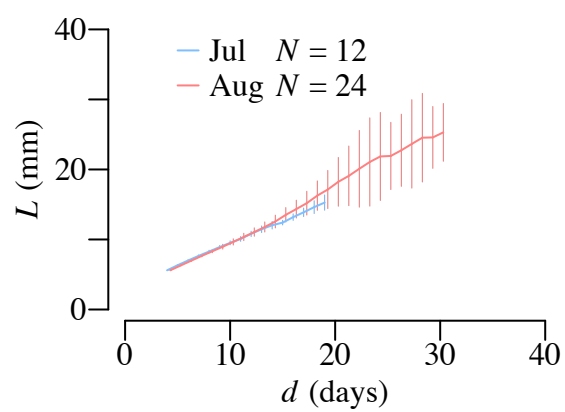


Fig. 2.2-41: L -growth history of anchovy larvae by hatch months in Coastal Sanriku Area.

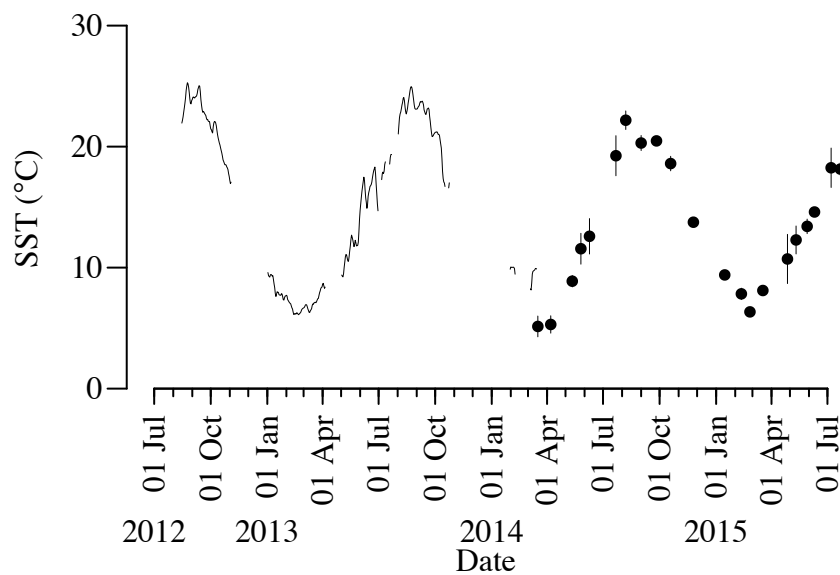


Fig. 2.2-42: Monthly variations in SST in Miyako Bay. Data are smoothed by 5-day moving average filter.

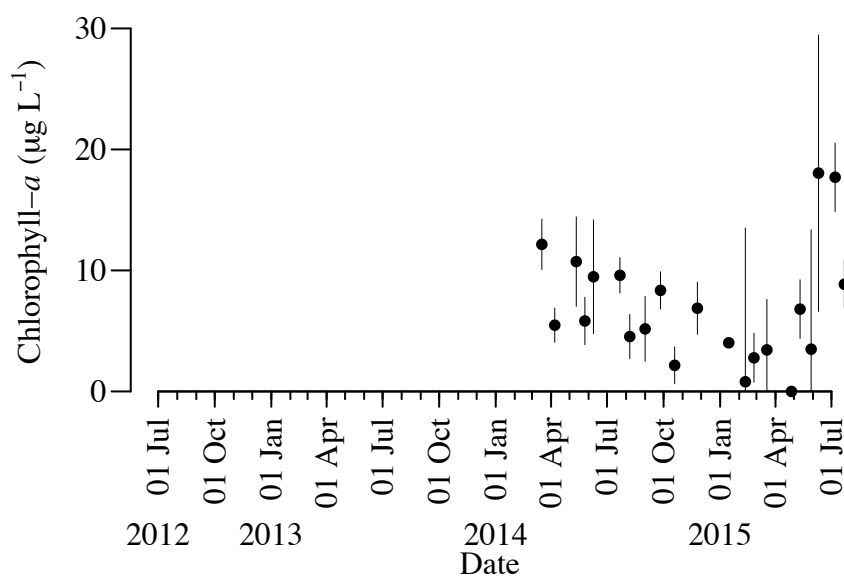


Fig. 2.2-43: Monthly variations in Chlorophyll-a concentration in Miyako Bay.

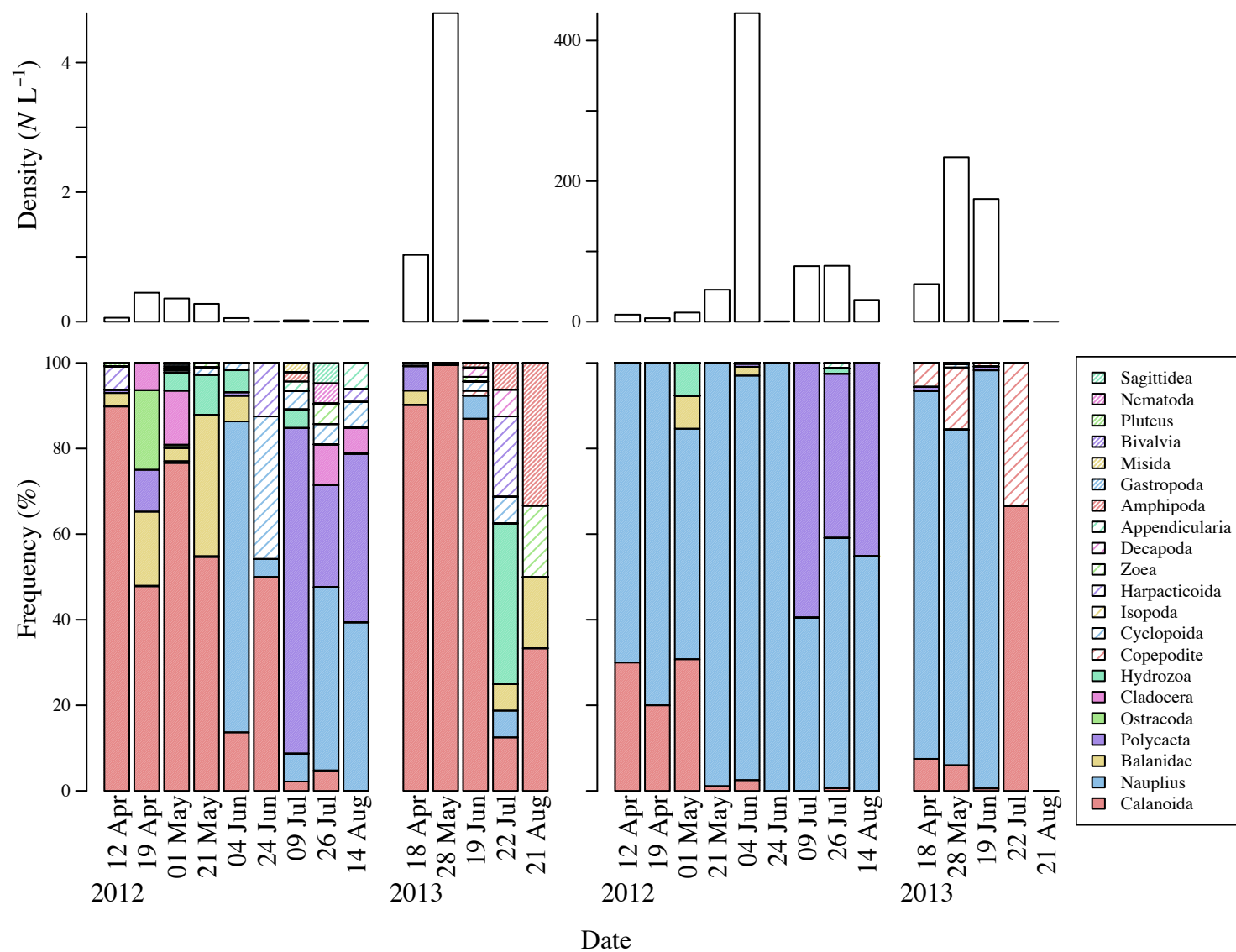


Fig. 2.2-44: Monthly variations in density (*top*) of planktonic organisms collected by NORPAC Net (*left*) and water sampling (*right*), and their composition (*bottom*) in Miyako Bay.

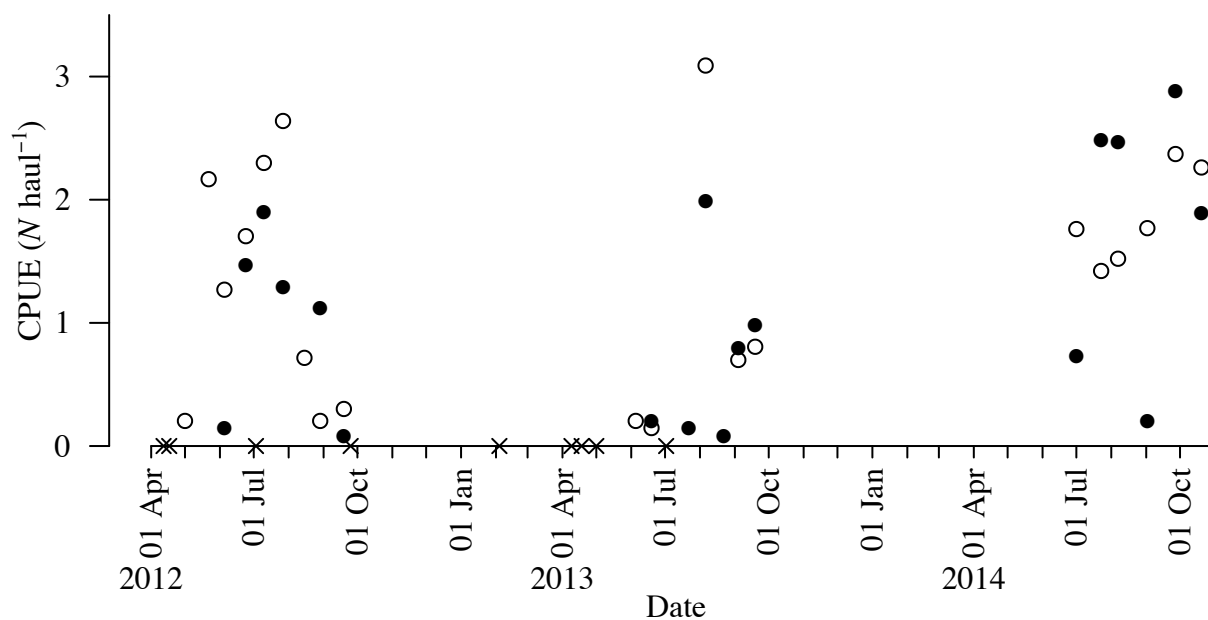


Fig. 2.2-45: Monthly variations in CPUE of anchovy larvae (*open circle*) and juveniles (*closed circle*) in Miyako Bay. Cross indicates no collection.

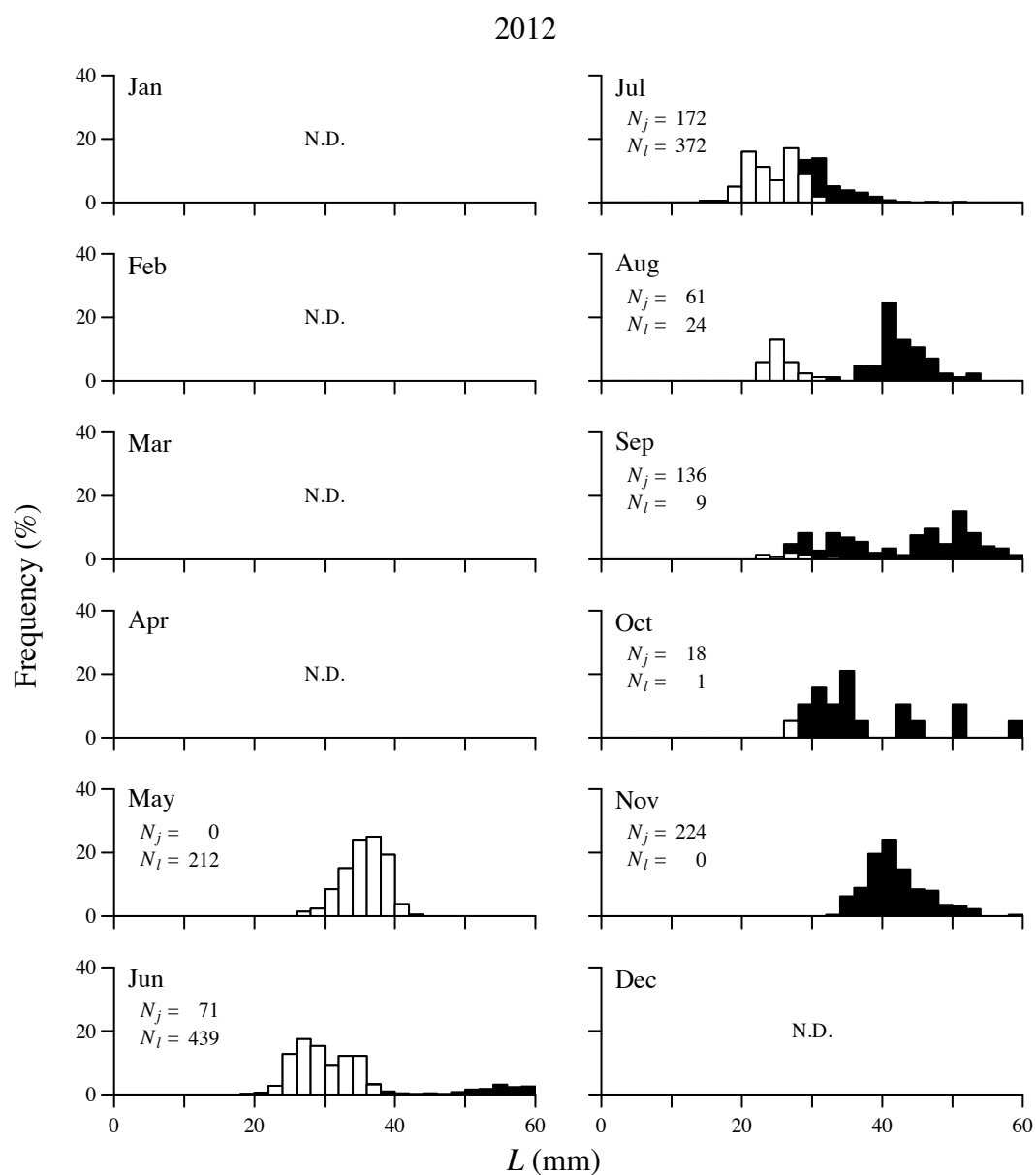


Fig. 2.2-46: Monthly variations in L frequency distributions of anchovy larvae (*open column*) and juveniles (*solid column*) in Miyako Bay in 2012. N_l and N_j represent numbers of larvae and juveniles, respectively. N.D. represents not detected.

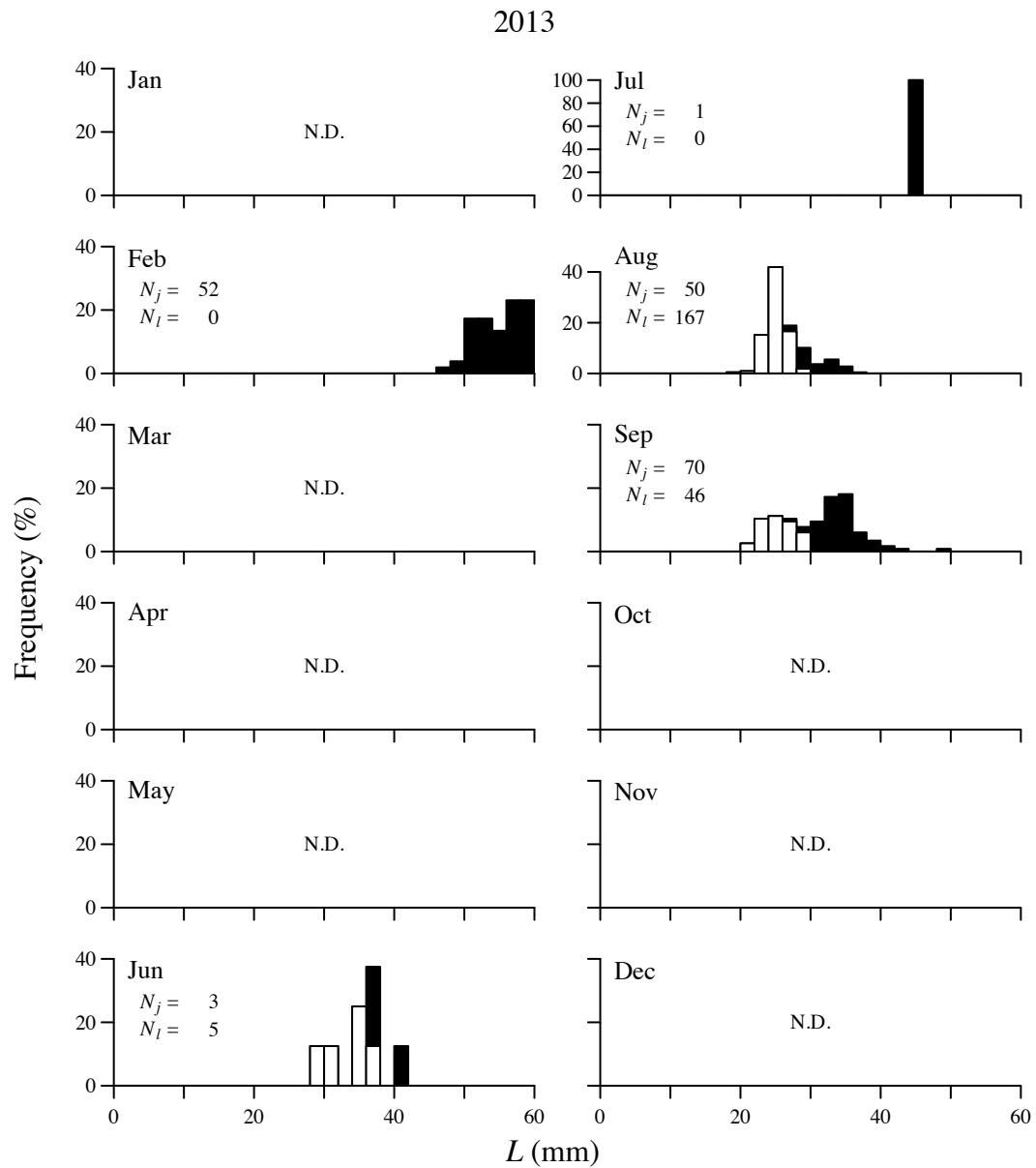


Fig. 2.2-47: Monthly variations in L frequency distributions of anchovy larvae (*open column*) and juveniles (*solid column*) in Miyako Bay in 2013. N_l and N_j represent numbers of larvae and juveniles, respectively. N.D. represents not detected.

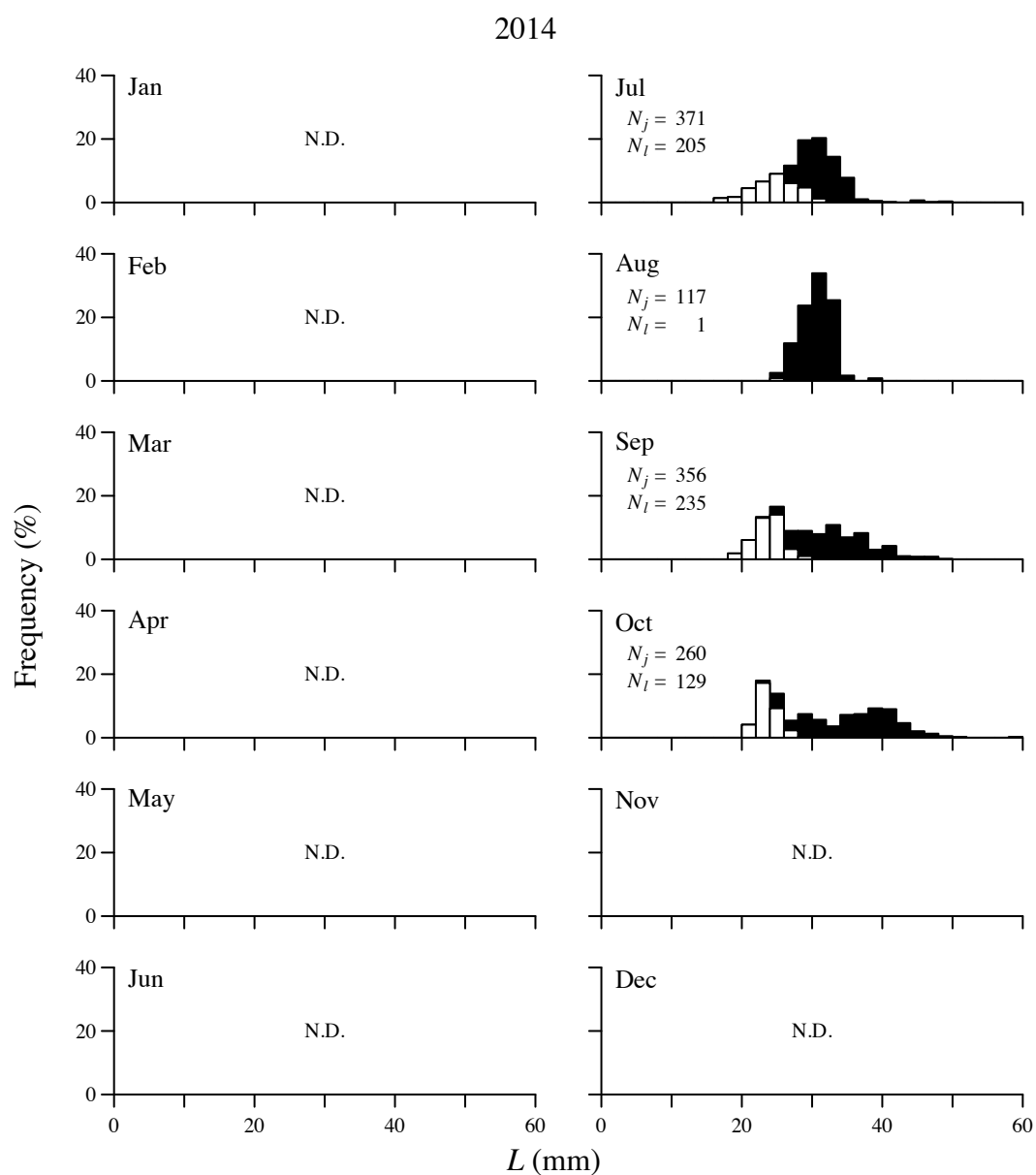


Fig. 2.2-48: Monthly variations in L frequency distributions of anchovy larvae (*open column*) and juveniles (*solid column*) in Miyako Bay in 2014. N_l and N_j represent numbers of larvae and juveniles, respectively. N.D. represents not detected.

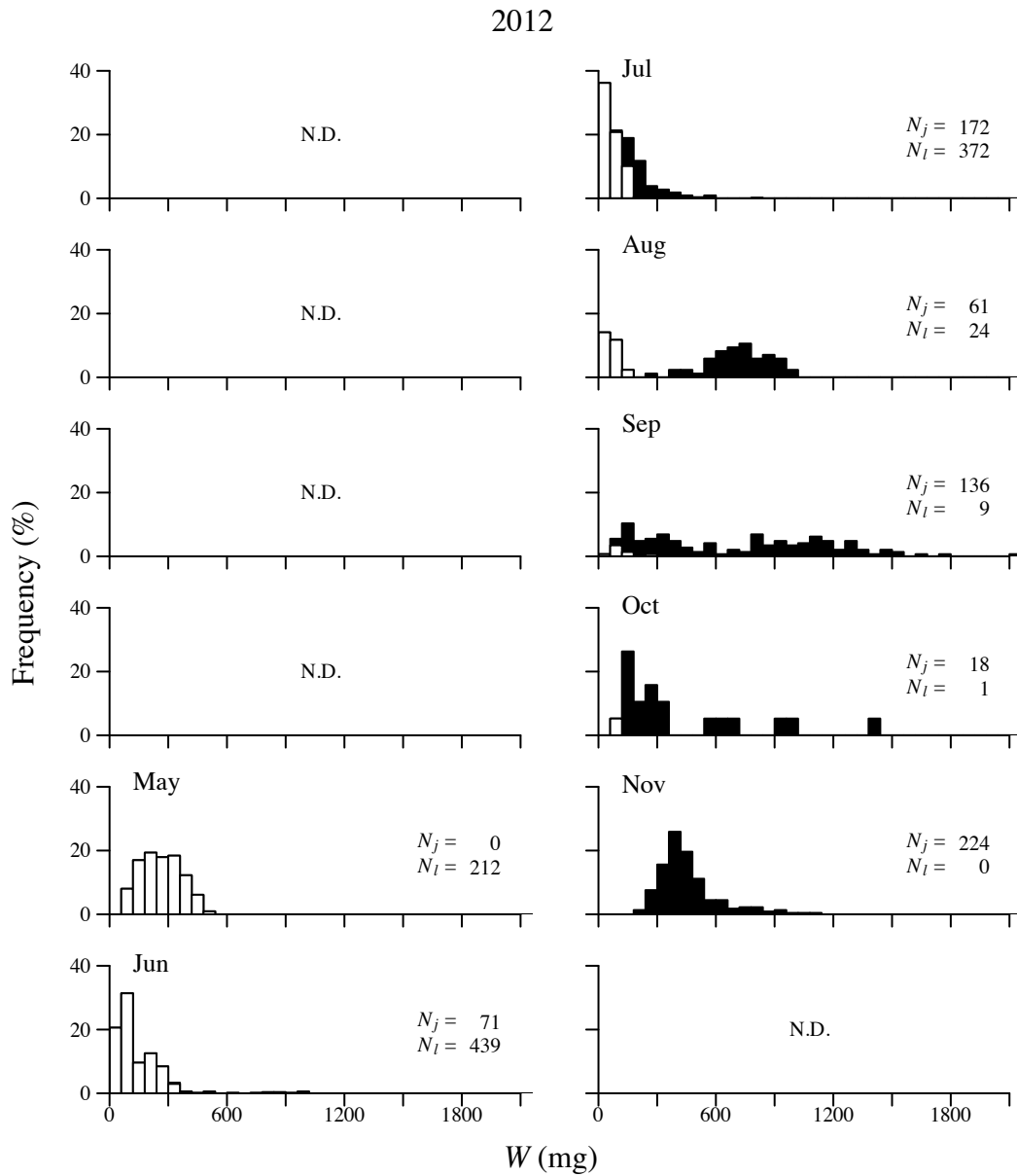


Fig. 2.2-49: Monthly variations in W frequency distributions of anchovy larvae (*open column*) and juveniles (*solid column*) in Miyako Bay in 2012. N_l and N_j represent numbers of larvae and juveniles, respectively. N.D. represents not detected.

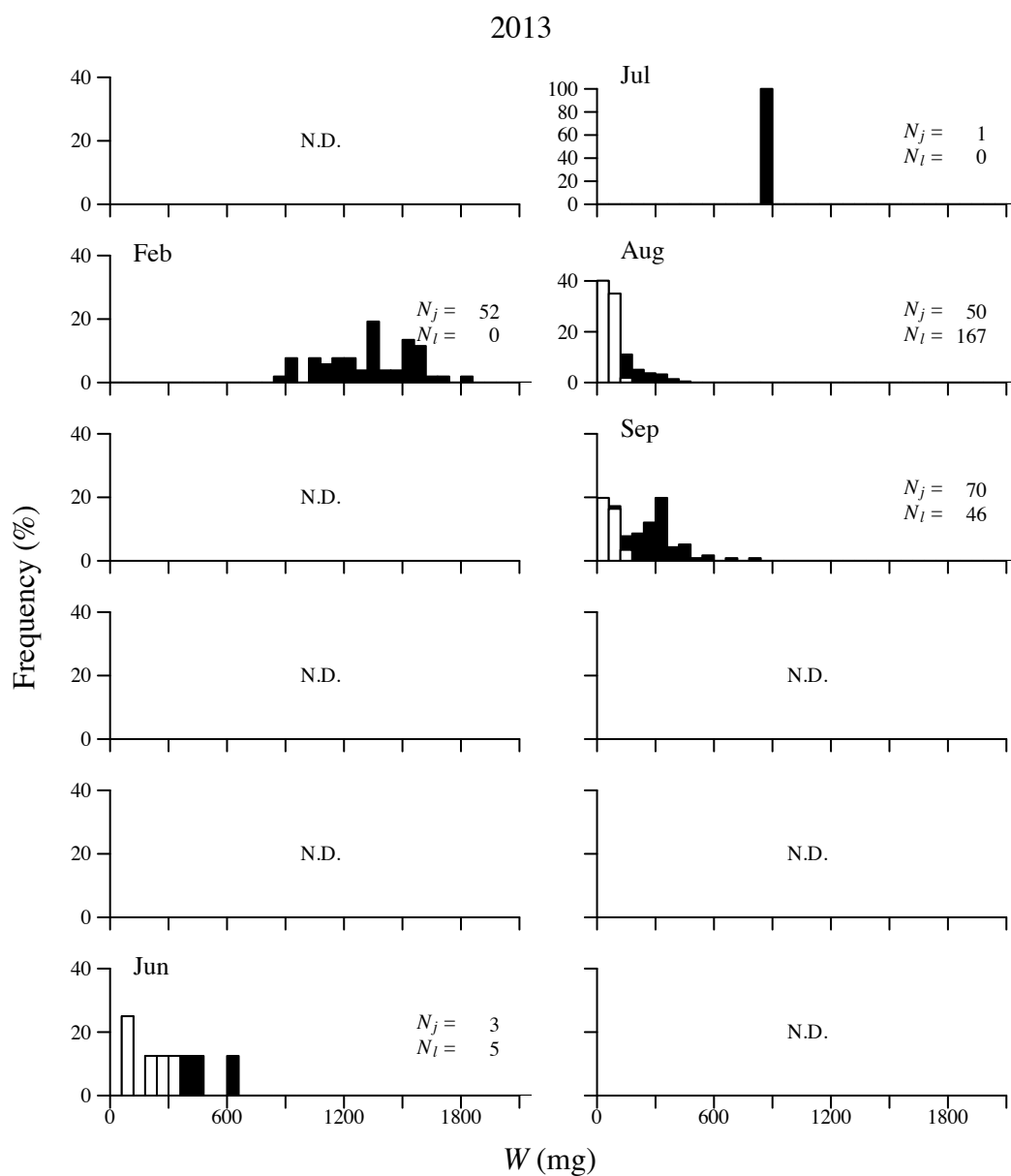


Fig. 2.2-50: Monthly variations in W frequency distributions of anchovy larvae (*open column*) and juveniles (*solid column*) in Miyako Bay in 2013. N_l and N_j represent numbers of larvae and juveniles, respectively. N.D. represents not detected.

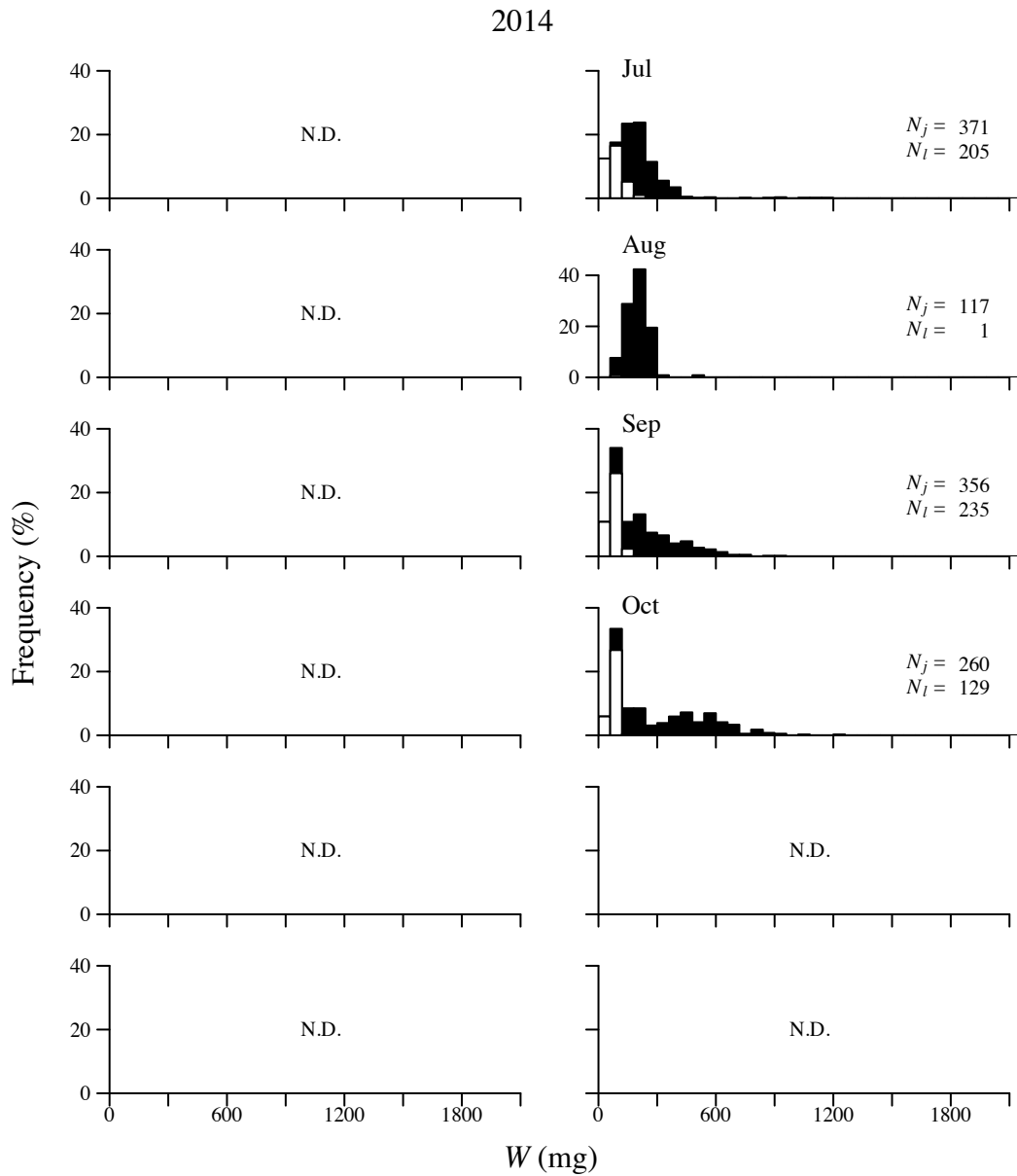


Fig. 2.2-51: Monthly variations in W frequency distributions of anchovy larvae (*open column*) and juveniles (*solid column*) in Miyako Bay in 2014. N_l and N_j represent numbers of larvae and juveniles, respectively. N.D. represents not detected.

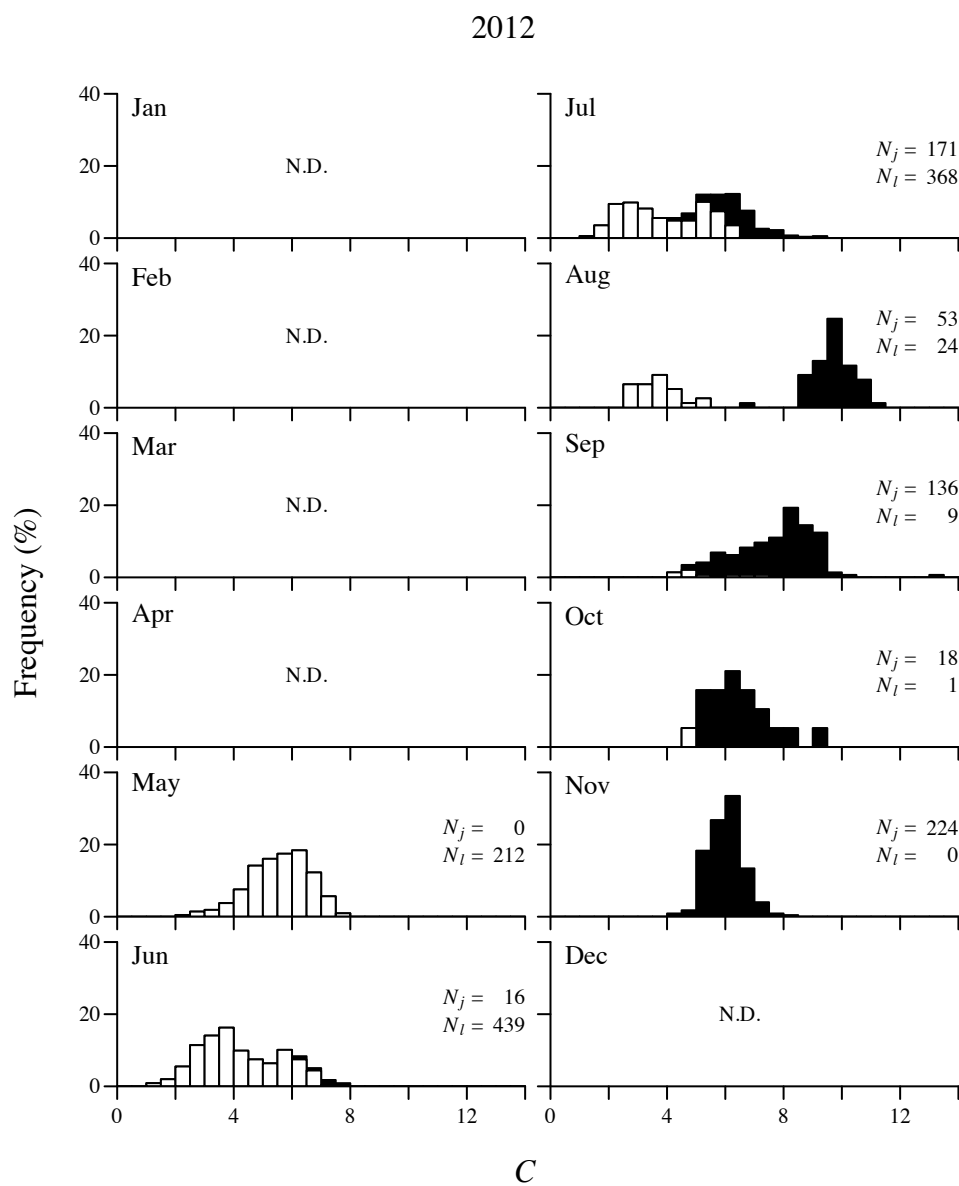


Fig. 2.2-52: Monthly variations in C frequency distributions of anchovy larvae (*open column*) and juveniles (*solid column*) in Miyako Bay in 2012. N_l and N_j represent numbers of larvae and juveniles, respectively. N.D. represents not detected.

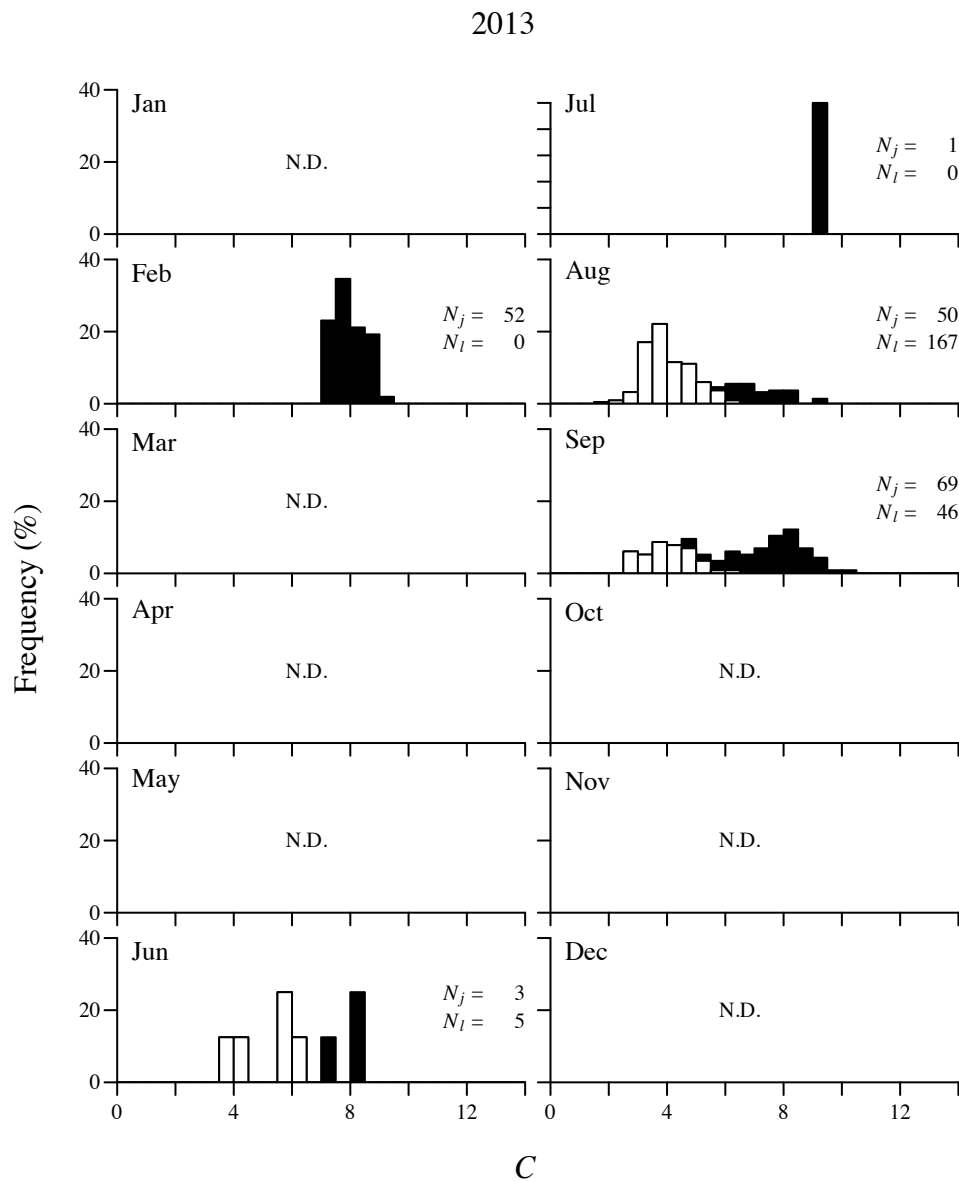


Fig. 2.2-53: Monthly variations in C frequency distributions of anchovy larvae (*open column*) and juveniles (*solid column*) in Miyako Bay in 2013. N_l and N_j represent numbers of larvae and juveniles, respectively. N.D. represents not detected.

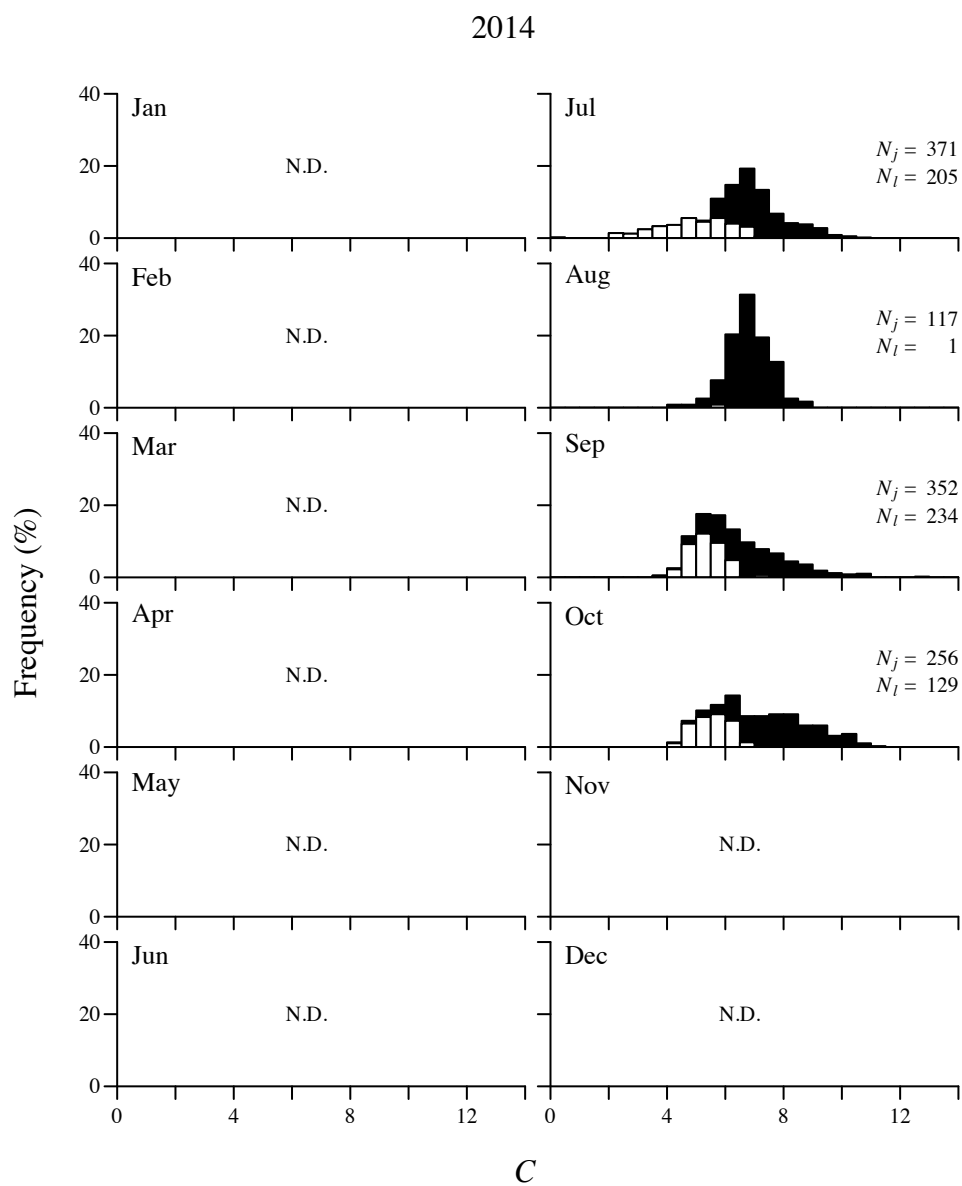


Fig. 2.2-54: Monthly variations in C frequency distributions of anchovy larvae (*open column*) and juveniles (*solid column*) in Miyako Bay in 2014. N_l and N_j represent numbers of larvae and juveniles, respectively. N.D. represents not detected.

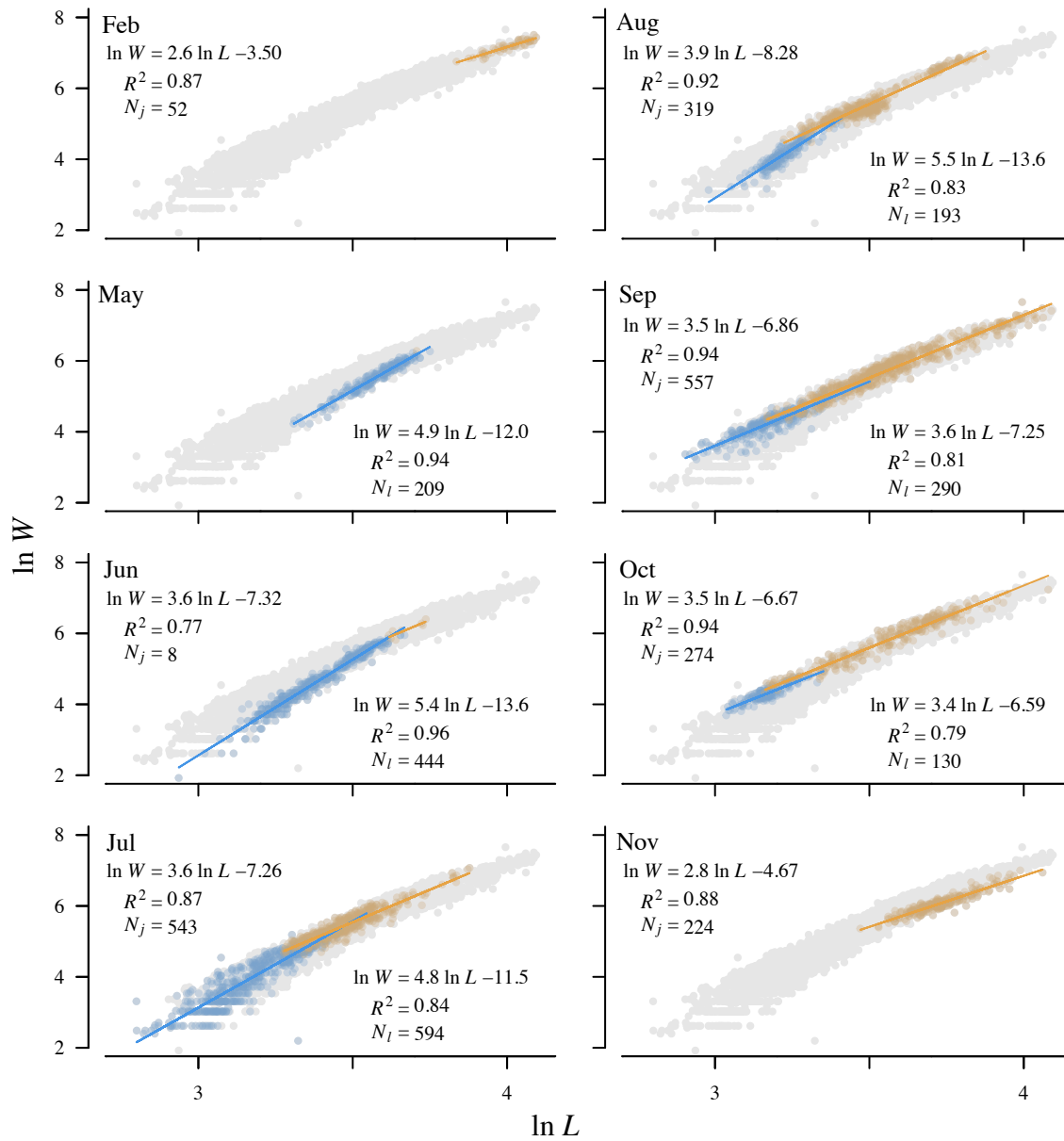


Fig. 2.2-55: Monthly variations in L – W relationships between larvae (blue) and juveniles (yellow) in Miyako Bay. Data in each month are plotted over the overall data shown by gray plots. N_i and N_j represent numbers of larvae and juveniles, respectively.

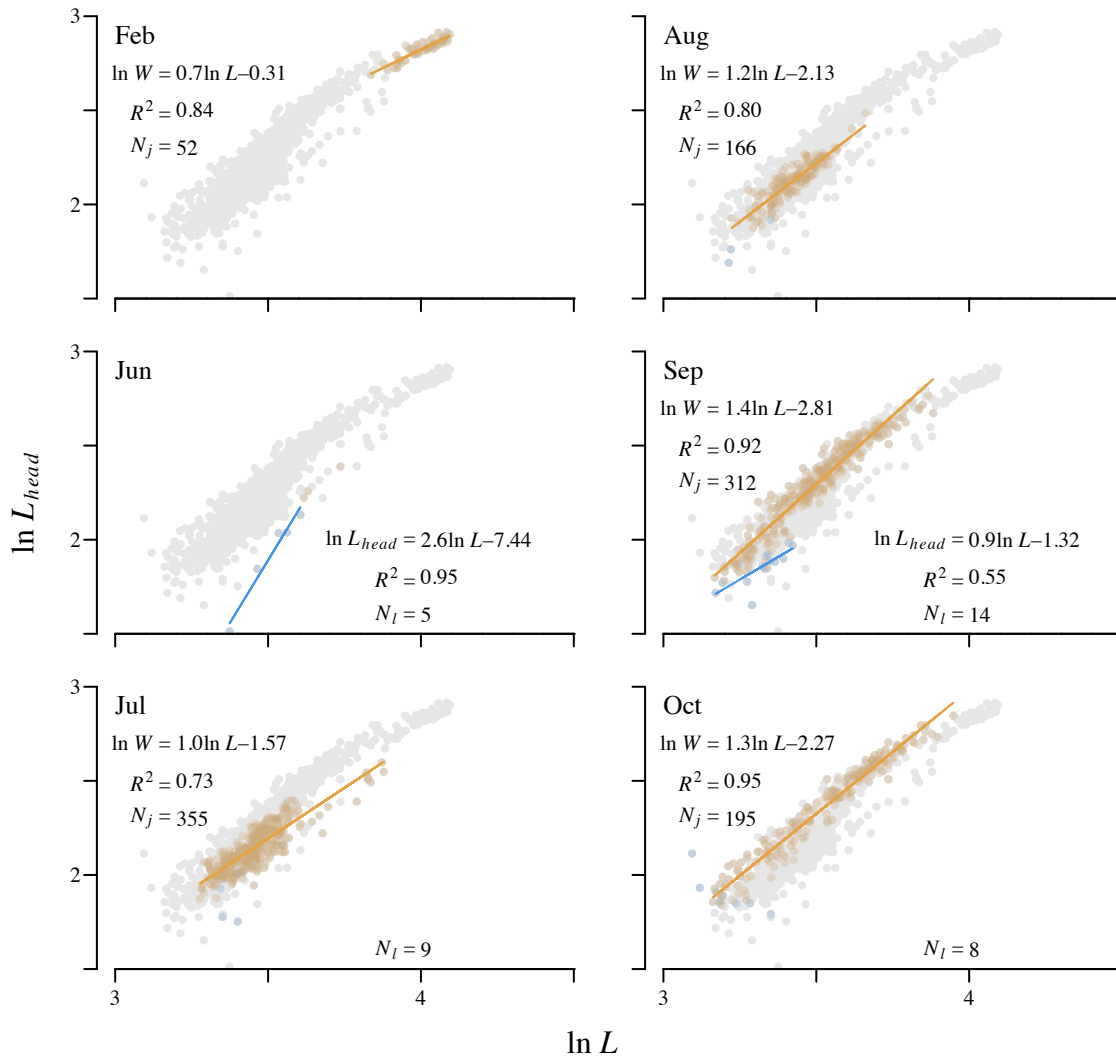


Fig. 2.2-56: Monthly variations in L – L_{head} relationships between larvae (blue) and juveniles (yellow) in Miyako Bay. Data in each month are plotted over the overall data shown by gray plots. N_l and N_j represent numbers of larvae and juveniles, respectively.

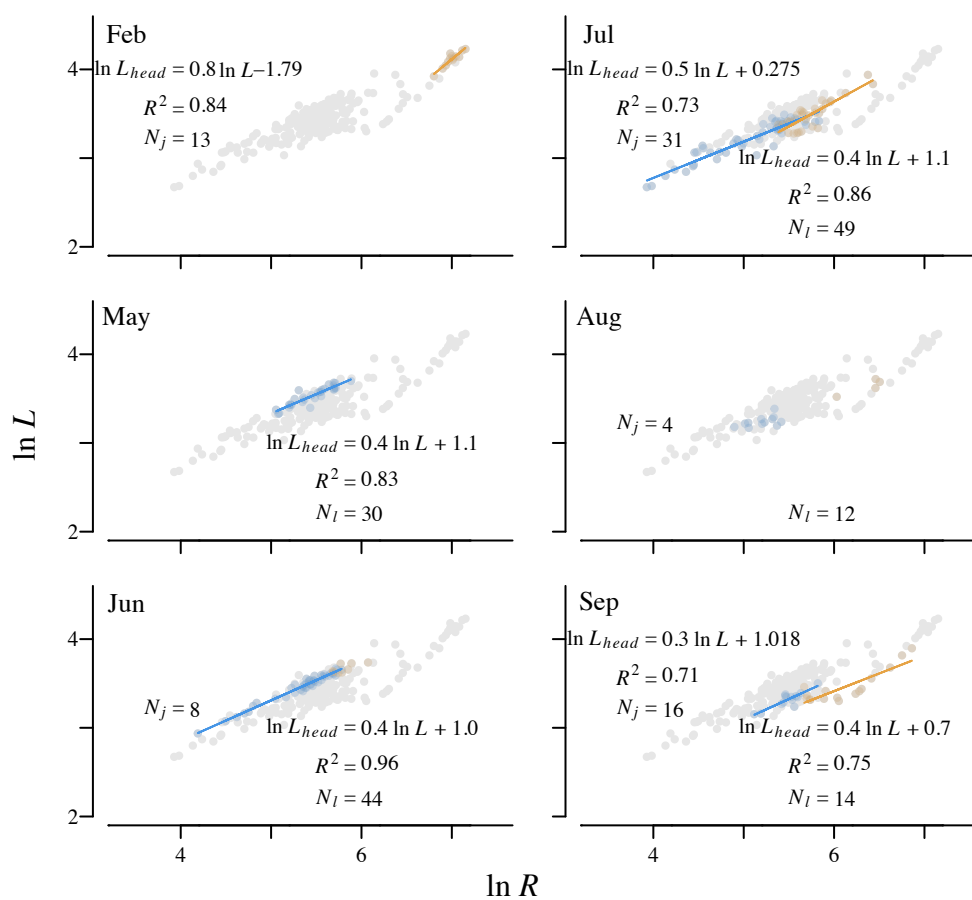


Fig. 2.2-57: Monthly variations in R – L relationships between larvae (blue) and juveniles (yellow) in Miyako Bay. Data in each month are plotted over the overall data shown by gray plots. N_l and N_j represent numbers of larvae and juveniles, respectively.

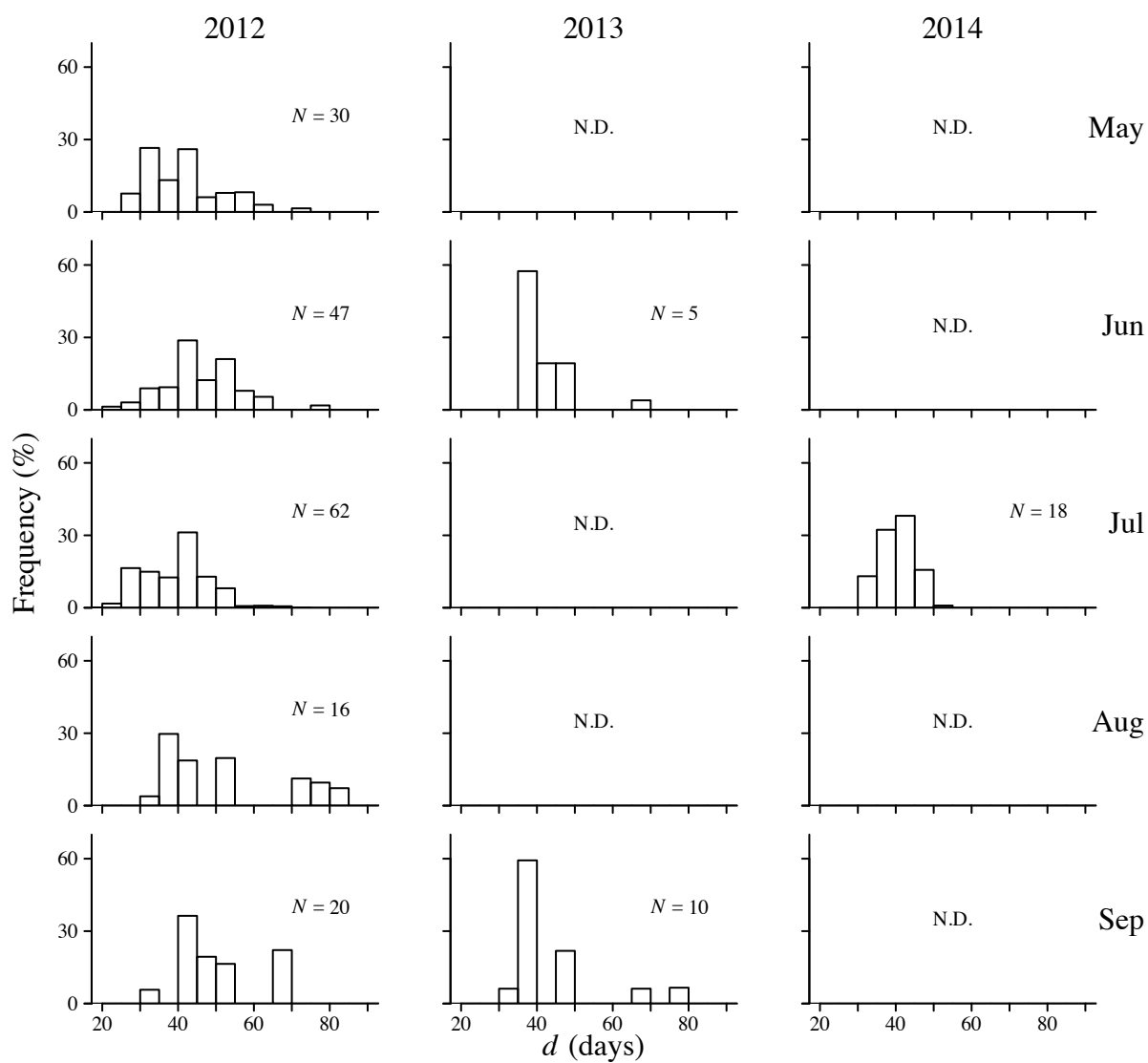


Fig. 2.2-58: Monthly variations in daily-age frequency distribution of anchovy larvae and juveniles in Miyako Bay in 2012–2014. N.D. represents no data.

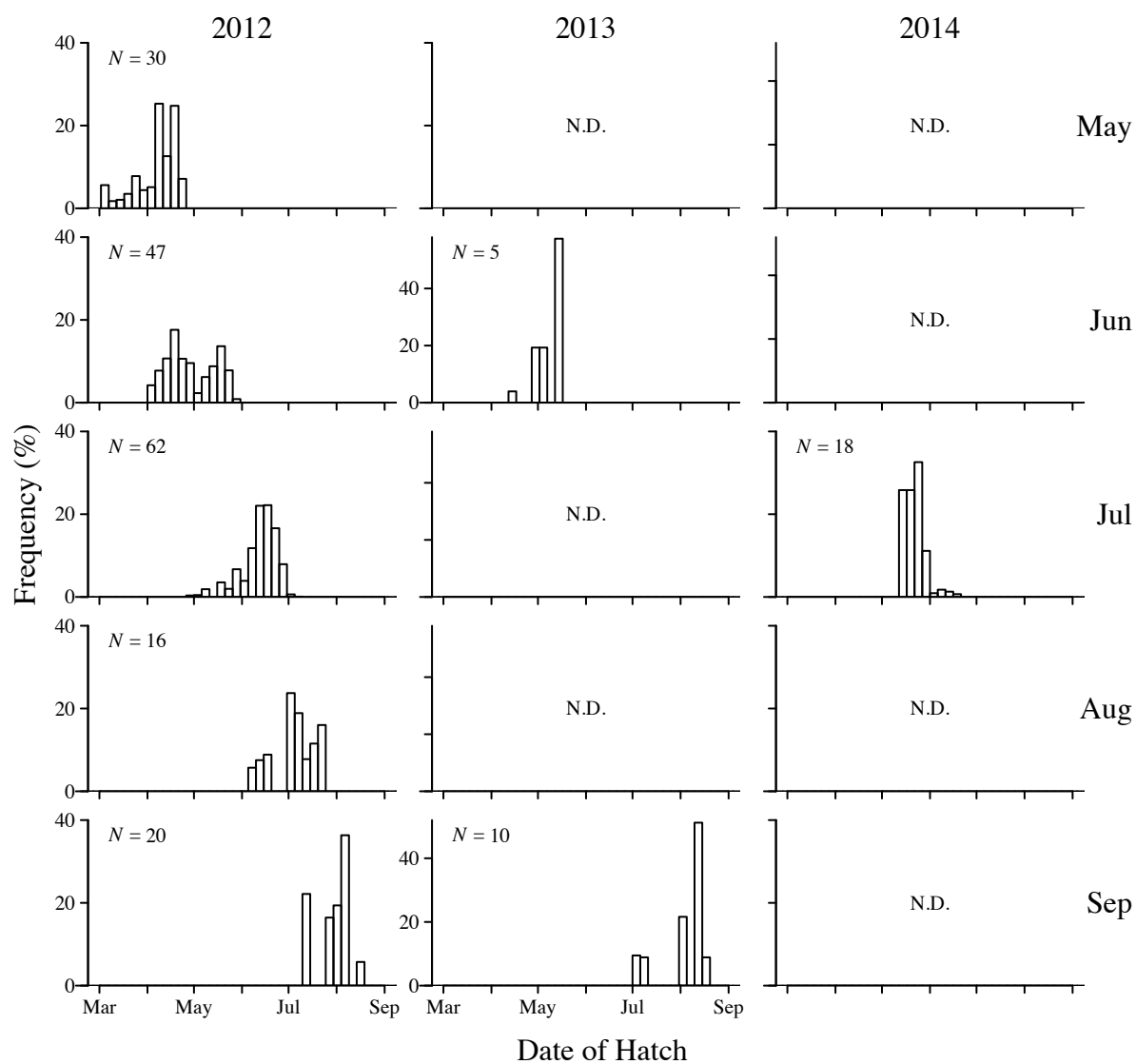


Fig. 2.2-59: Monthly variations in hatch-date frequency distribution of anchovy larvae and juveniles in 3 years in Miyako Bay. N.D. represents no data.

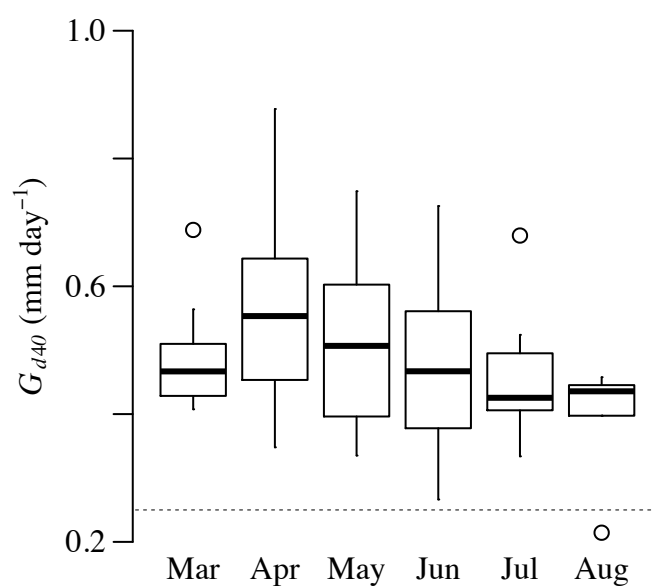


Fig. 2.2-60: G_{d40} of anchovy larvae and juveniles by hatch month cohorts in Miyako Bay. Top and bottom ends of box represent the third and the second quartiles and thick horizontal line in the box represents the median. The end of the upper and the lower hinge represents the first and the fourth quartiles. Dot represents outlier. Horizontal dashed line represents the slowest possible growth rate for survival reported by Takahashi and Watanabe (2004b).

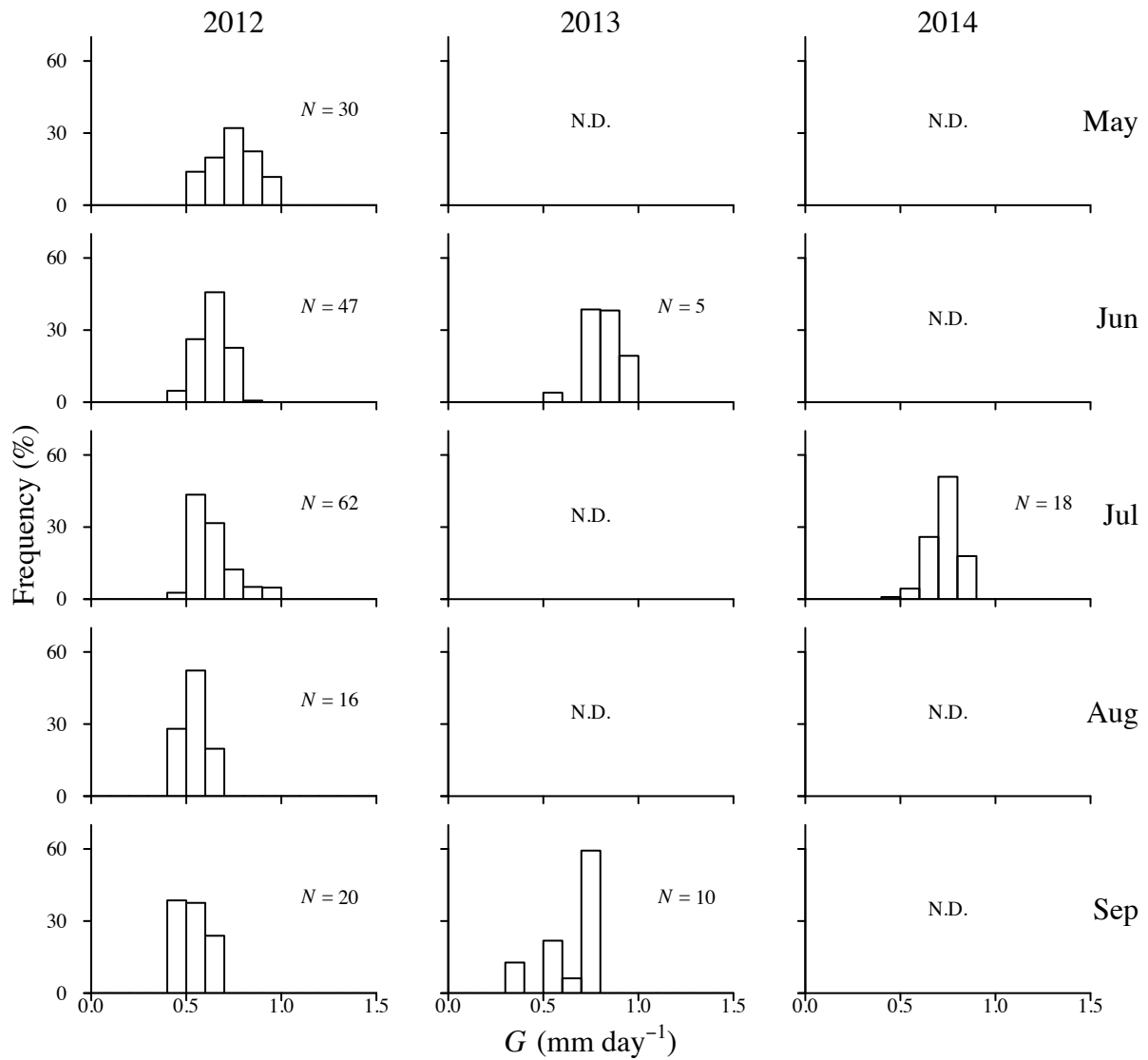


Fig. 2.2-61: Monthly variations in G (mm day^{-1}) frequency distribution of anchovy larvae in Miyako Bay in 2012–2014.

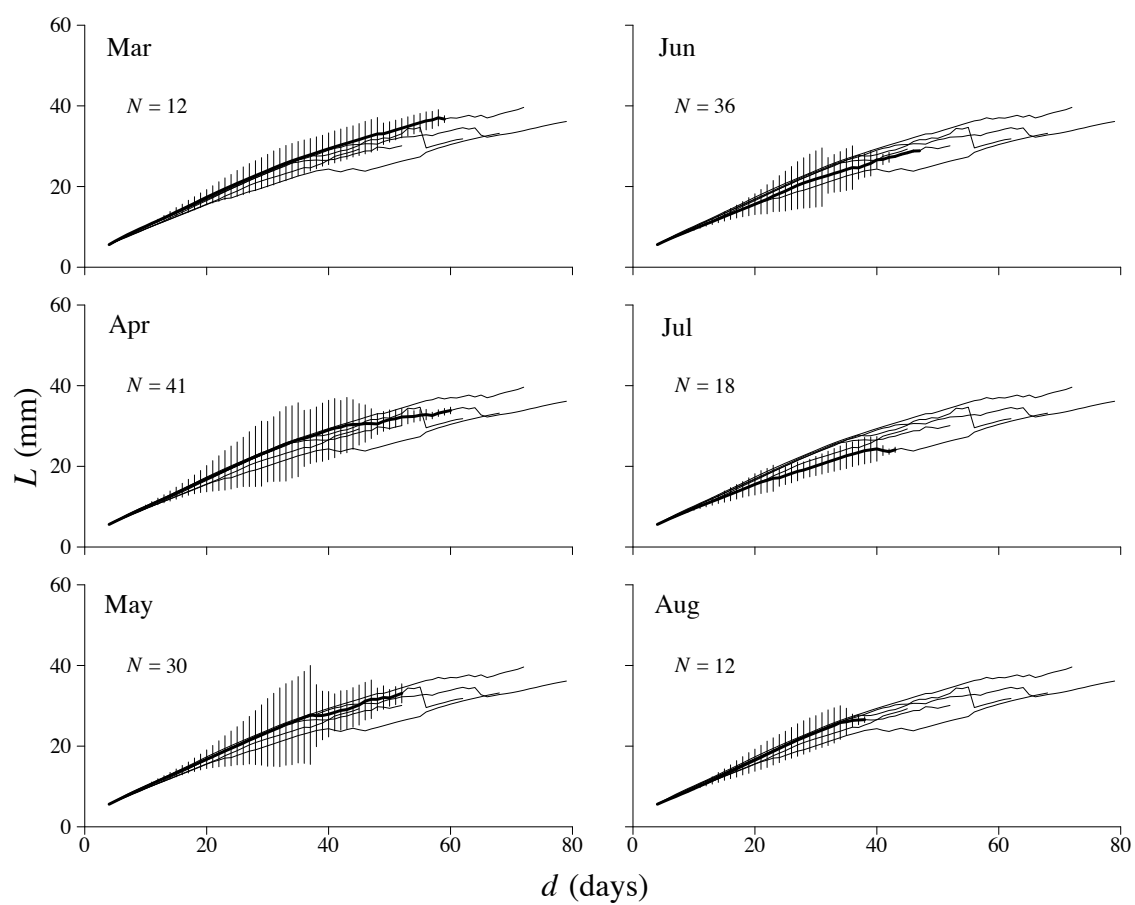


Fig. 2.2-62: Monthly variations in L -growth history of anchovy larvae collected in Miyako Bay in 2012–2014. Mean value (*thickline*) and standard deviation (*verticalline*) in each month plotted over the data in the other months (*thinline*).

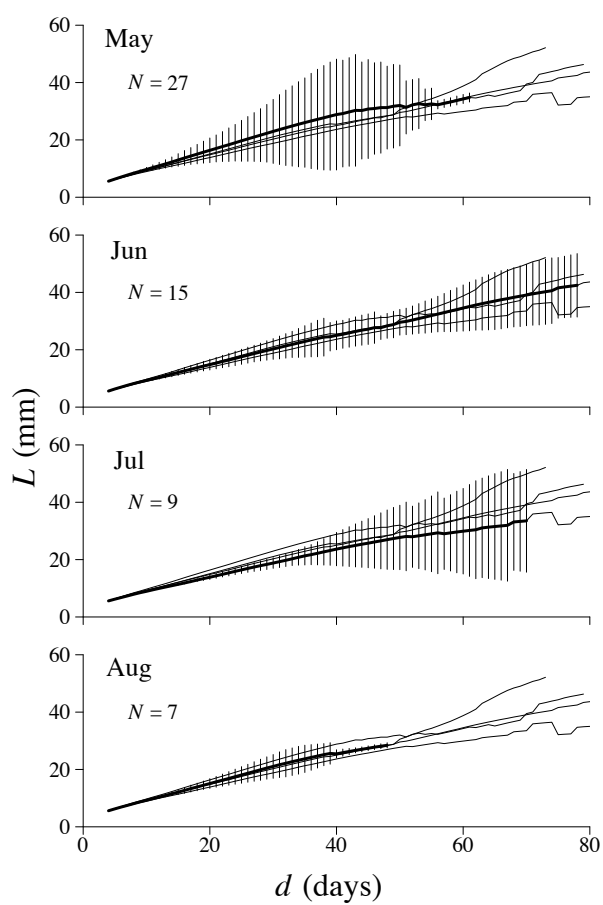


Fig. 2.2-63: Monthly variations in L -growth history of anchovy juveniles collected in Miyako Bay in 2012–2014. Mean value (*thickline*) and standard deviation (*verticalline*) in each month plotted over the data in the other months (*thinline*).

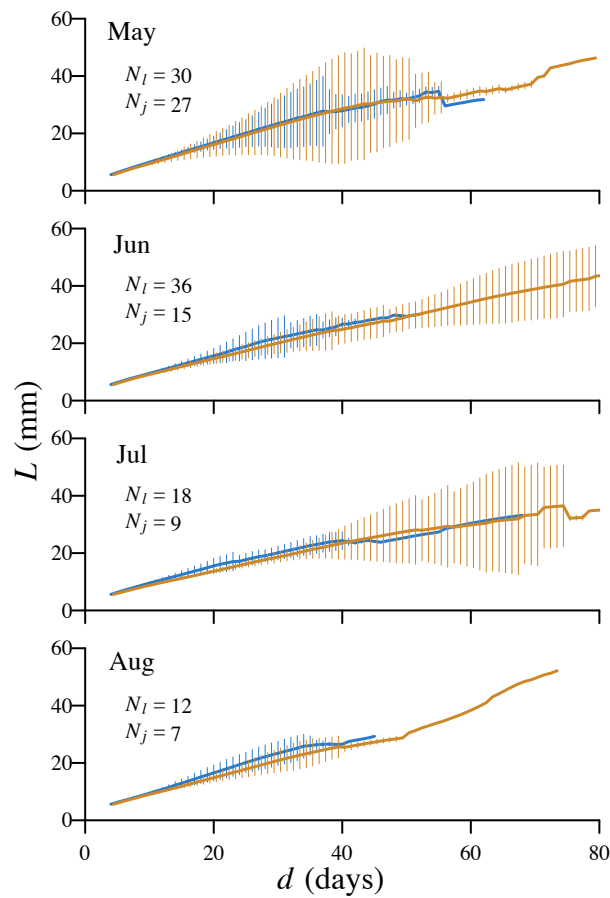


Fig. 2.2-64: Comparison between larval (blue) and juvenile (yellow) L -growth history in Miyako Bay by month. Vertical line represents standard deviation. N_l and N_j represent numbers of larvae and juveniles, respectively.

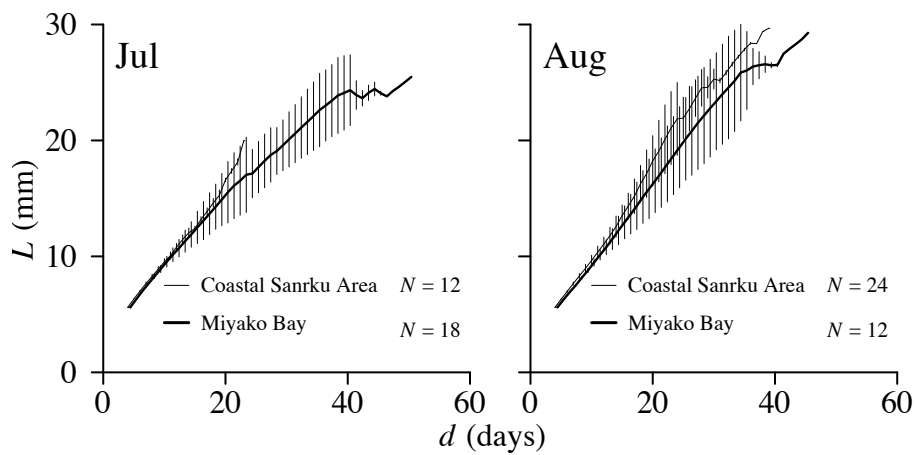


Fig. 2.2-65: Comparison of mean L -growth trajectories between larvae collected in Coastal Sanriku Area (thin line) and Miyako Bay (thick line) by hatch month cohorts. Vertical line represents standard deviation of each group.

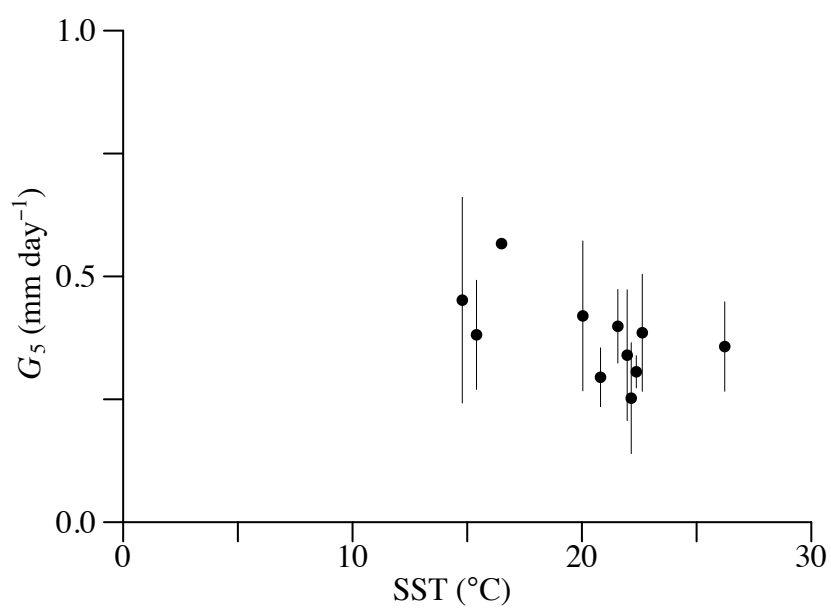


Fig. 2.2-66: Relationships between SST and G_5 of anchovy larvae and juveniles in Miyako Bay. Each plot and vertical line represent mean G_5 of anchovy larvae and juveniles and its standard deviation on each sampling day.

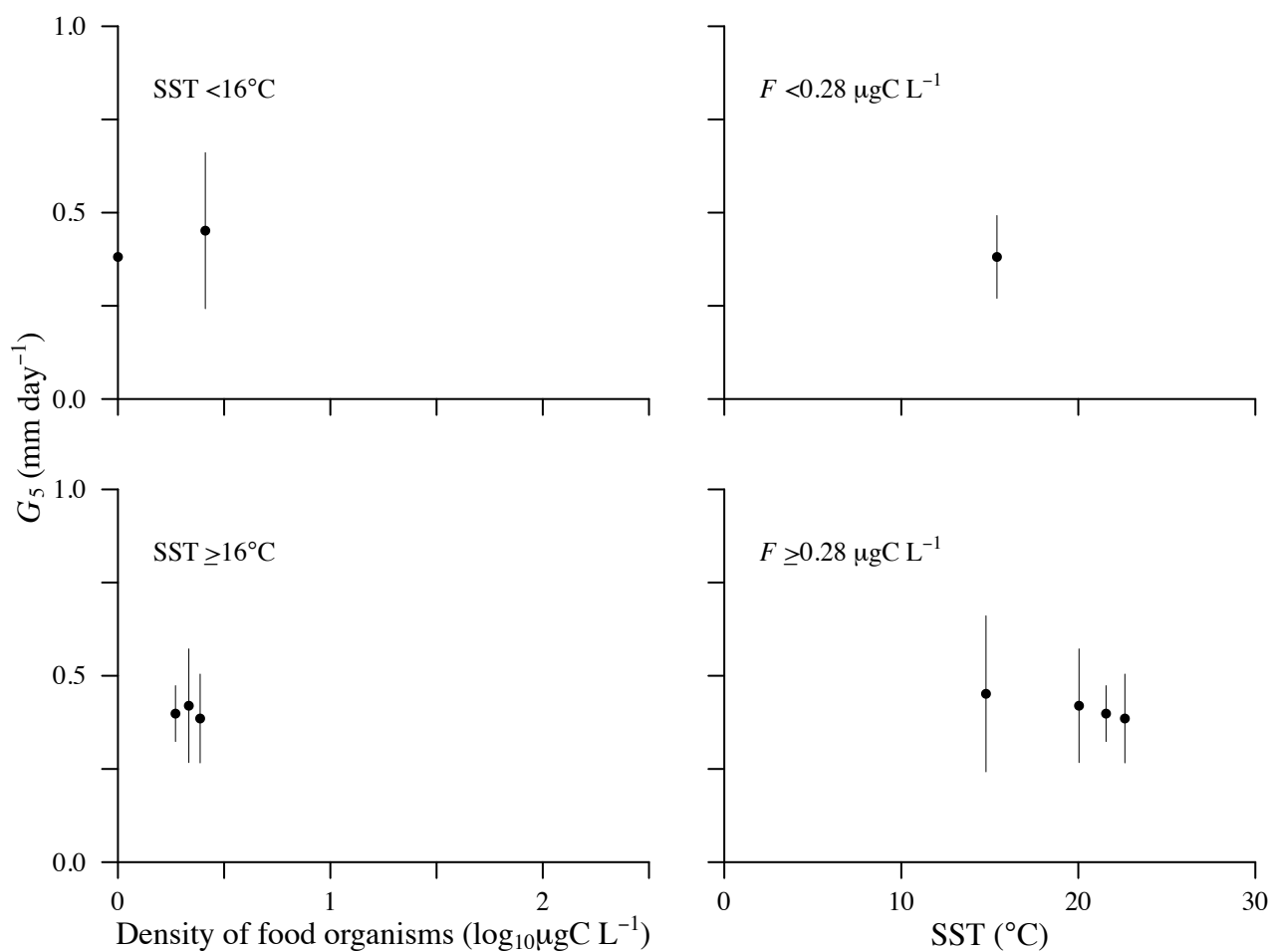


Fig. 2.2-67: G_5 of anchovy larvae and juveniles on changes in density of food organisms and SST in Miyako Bay. Each plot and vertical line represent mean G_5 of anchovy larvae and juveniles and its standard deviation on each sampling day.

2.3 常磐南部沿岸域

2.3.1 はじめに

常磐南部に位置する茨城県沿岸域には、沖合から親潮系・黒潮系水が波及し、サバ類をはじめマイワシ、スルメイカ、サンマ、ツノナシオキアミ、イカナゴなどの冷水性資源のみならず、ブリ類、カタクチイワシ、アジ類などの暖水性資源の好漁場が形成される(茨城県農林水産部漁政課, 2014)。茨城県では春季から秋季にかけて、主にカタクチイワシの仔魚を対象とした「シラス漁業」の操業があり、2–7月の水揚げは「春シラス」、8–12月の水揚げは「秋シラス」として区別されている。カタクチイワシ太平洋系群の漁獲量変動との完全な対応はないものの、茨城県におけるシラスの年間漁獲量には数十年周期の変動がみられる(Fig. 2.3-1)。本県のシラス漁獲量は1960年代後半から1970年代前半に比較的高く、4000トン前後で推移したが、1970年代後半から1980年代前半には3000トンを下回る年が多くなった。漁獲量は1980年代後半に急増し、大きく変動しながらも近年まで中～高水準を維持している。本県の大洗漁場(Fig. 2.3-2)における漁獲量は、1970年代前半には4–6月における漁獲量が年間漁獲量の70%近くを占めたことが報告されているが(堀, 1971)、2011–2015年には秋シラスの割合が高い年もみられ、年間3100–4700トンの漁獲量のうち秋シラスが占める割合は28.7–55.3%の範囲で変動している(Fig. 2.3-3)。

茨城県沿岸域は親潮系冷水域に属するが、本海域には黒潮系暖水域からも仔稚魚が供給されることが考えられている。本海域では卵の分布量に比して仔稚魚の量が多いことが1970年代末から指摘されていた(渡部, 1977)。1990年代後半には本県の春シラス漁獲量と地先定置水温との間に正の相関関係が見出され、これは黒潮系暖水の波及によって南方起源の卵仔魚が供給されるためと考えられていた(海老沢, 1999)。2000年代に入ると、海面高度の解析から黒潮系暖水の波及メカニズムが解明され(八木ら, 2001)、南方起源の卵仔魚は黒潮統流流軸の北偏に伴って生じる反時計回りの反流に載って本県の沿岸域へと供給されることが明らかとなった(黒山ら, 2006)。

春シラスが黒潮系暖水域起源とされる一方、秋シラスの一部は親潮系冷水域からの移入群と

考えられている。シラス漁獲量と水温との間には9月と10月に限り負の相関関係が認められ、また10月と11月の漁獲量は、本県沿岸域に暖水が波及した場合よりも冷水が南下した場合において高くなる傾向があることが報告されている(海老沢, 1997)。さらに、常磐南部沿岸域には親潮系冷水の南下が7月と8月に多く観測されることから(久保, 1988)。これらの月にも親潮系冷水域発生群(第2.1節, 第2.2節)の移入が考えられる。

本海域でこれまで実施されたカタクチイワシ仔魚に関する研究は来遊量予測に関するものがほとんどである(鈴木・富永, 1993; 黒山ら, 2006; 八角, 2011; 富永, 1994)。それら以外には仔魚の体長の空間分布から発達に伴う接岸を指摘したものや(富永・二平, 1997)、また耳石日輪解析による成長解析から体長成長速度の季節・年変動を報告した例があるものの(富永・二平, 1999a,b)、仔稚魚の生態学的研究が決定的に不足している。

本節では、常磐南部沿岸域における仔稚魚の生態をシラス漁業を利用して季節的に調べることによって、まず本海域における初期生態に関する基礎的情報を整理し、得られた知見に基づいて仔稚魚の由来と本海域の成育場としての機能を評価した。

2.3.2 材料と方法

仔稚魚の採集

2011–2012年の7–11月に毎月1回または2回の頻度で、茨城県大洗漁港に水揚げされたカタクチシラス漁獲物から標本を採集した。シラス漁業に用いるパッチ網は、コッドエンド(目合およそ1.8 mm)の網口側に、漁獲物への異物混入を防止する目的で目合およそ5 mmの前網が取り付けられているため(茨城県水産試験場, 1977)、体サイズの大きい稚魚を水揚げ物から得ることは困難である。そこで、2013–2015年の4–10月には茨城県大洗漁場で操業するシラス漁船の船上にて、コッドエンドおよび前網に入網した漁獲物からカタクチイワシ仔稚魚を採集した。

体長と体重の計測

1採集日につきおよそ100個体を上限に、第2.2節と同様に個体の発達段階を記録した後に体長(L , mm)と体重(W , mg)を計測し、式2.13から肥満度(C)を算出した。

日齢、孵化日および成長速度の推定

第2.2節と同様に耳石日輪解析を行い、仔稚魚の日齢(d)と孵化日を推定した。また各種成長解析を目的とし、第2.2節と同様に体長成長履歴を推定し、採集前5日間(G_5)、孵化から採集時まで(G)、および40日齢時(G_{d40})における平均体長成長速度(mm day^{-1})を算出した。

水温データ

茨城県水産試験場が公開する那珂湊^{*i}(Fig. 2.3-2)の日別定置水温データを解析に用いた。第2.2節と同様に、5日間の移動平均値を解析に用いた。

2.3.3 結果

水温の季節変動

那珂湊における水温の季節変動をFig. 2.3-4に示した。2011–2015年における年間最低水温は7.3–9.8°Cの範囲にあり、2012年と2013年には1月中旬に、2014年には2月中旬に、2015年には3月中旬に記録された。年間最高水温は23.7–24.8°Cの範囲にあり、2011–13年は9月上–中旬、2014年は8月下旬に記録された。いずれの年においても、水温は5月上–中旬に15°Cを上回った。

仔稚魚の体長組成

2011年の8–10月における仔魚の体長モードはそれぞれ24–26 mm, 22–24 mm, 20–22 mmで、採集月の進行とともに小型化した(Fig. 2.3-5)。稚魚は採集個体数が少なかったものの、体長モードは仔魚と同様に採集月の進行とともに小型化する傾向がみられた。

2012年における仔魚の体長モードは7月には26–28 mmにあったが、8月には16–18 mmへと小型化し、9月には18–20 mmとやや大型化した(Fig. 2.3-6)。稚魚の体長モードも、採集個体数が少ないながらも7月(32–34 mm)から8月(30–32 mm)にかけてやや小型化した。11月には、体長49 mmを超える大型の稚魚のみが採集された。

^{*i} 北緯36度22.15分、東経140度37.46分

2013 年 5 月には、体長モードが 28–30 mm に位置する大型の仔魚が採集されたが、6 月に採集された仔魚は体長モードが 22–24 mm に位置するやや小型の群であった。仔魚の体長組成は 8 月には 2 峰型を示し、第 1 モードは 16–18 mm、第 2 モードは 24–26 mm にあった。9 月と 10 月に採集された仔魚は、8 月の第 2 モードと同様に 24–26 mm に体長モードを持つ群であった。稚魚の体長モードは 8 月には 30–32 mm に位置していたが 9 月に 26–28 mm へと小型化し、10 月には再び 30–32 mm に現れた (Fig. 2.3-7)。

2014 年 4 月には、体長モードが 26–28 mm に位置する仔魚群に加え、体長が 40 mm を超える大型の仔魚が採集された。5 月にも、体長モードがそれぞれ 30–32 mm、28–30 mm に位置する大型の仔魚が採集された。8 月には体長モードが 30–32 mm に位置する群に加えて 20–22 mm に位置する群が加入し、仔魚の体長組成は双峰型となった (Fig. 2.3-8)。9 月と 10 月には、それぞれ体長階級 28–30 mm と 22–24 mm に仔魚の体長モードが現れた。4 月には体長 36 mm の稚魚が、5–8 月には体長モード 32–34 mm の稚魚群が採集された。稚魚の体長モードは、9 月と 10 月には体長階級 28–30 mm、26–28 mm と小型化した。

2015 年 6 月には、体長モードが 20–22 mm に位置する仔魚群が採集されたが、7 月と 8 月には仔魚の体長モードが 22–24 mm に移った (Fig. 2.3-9)。稚魚は 8 月に採集され、体長モードは体長階級 30–32 mm に位置していた。

仔稚魚の体重組成

仔魚の体重モードは、2011 年の 8 月と 9 月にはいずれも 60–120 mg 階級にあったが、10 月には 0–60 mg 階級へと移った (Fig. 2.3-10)。稚魚の体重モードも 8 月と 9 月 (120–180 mg 階級) から 10 月 (60–120 mg 階級) にかけて小型の階級へ移った。

2012 年における仔魚の体重モードも、体長モードと同様に 7 月 (60–120 mg 階級) と比べて 8 月に (0–60 mg 階級) 小型化した (Fig. 2.3-11)。9 月には仔魚の体重は更に減少し、ほとんどの個体が 0–60 mg 階級に位置していた。稚魚の体重も 7 月から 8 月にかけて減少し、8 月には 180–240 mg 階級に位置する個体が採集された。11 月に採集された大型の稚魚は 960–1120 mg 階級以上に離散的に分布し、体重モードは 1440–1500 mg 階級にあった。

2013 年 5 月に採集された仔魚の体重モードは 180–240 mg 階級にあった (Fig. 2.3-12)。仔魚

の体重は7月と8月に減少し、モードは0–60 mg 階級に移った。仔魚の体重モードは9月に60–120 mg 階級に移ったが、10月には再び0–60 mg 階級に移った。稚魚の体重モードは8月には240–300 mg 階級にあり、9月に180–240 mg へと減少した後、10月には再び240–300 mg 階級へ移った。

2014年に採集された仔魚の体重は4月から5月にかけて増加し、モードは60–120 mg 階級から180–240 mg 階級へと移った (Fig. 2.3-13)。7月に採集された仔魚の体重は5月に採集された仔魚よりも小さく、モードは60–120 mg 階級にあった。8月には仔魚の体重組成は双峰化し、第1モードは0–60 mg 階級に、第2モードは180–240 mg 階級にあった。9月にはやや大型の仔魚が採集され、体重組成は180–240 mg にモードをもつ単峰型であった。10月には0–60 mg 階級に体重モードをもつ小型の仔魚が採集された。稚魚の体重モードは4月の420–480 mg 階級から5月には180–240 mg 階級に移った。7月に採集された稚魚の体重組成は180–240 mg 階級と300–360 mg 階級にモードをもつ双峰型であった。稚魚の体重モードには8–10月にかけて240–300 mg 階級から60–120 mg 階級へと1階級ずつ移った。

2015年に採集された仔魚の体重モードは6–8月を通じて0–60 mg 階級にあり、8月に採集された稚魚の体重モードは180–240 mg 階級に位置していた (Fig. 2.3-14)。

仔稚魚の肥満度組成

2011年の8月と9月には、肥満度モードが5.0–5.5に位置する仔魚が採集された (Fig. 2.3-15)。10月には、肥満度モードが4.0–4.5に位置する仔魚群に加え、6.5–7.0に位置する仔魚群が採集された。稚魚の肥満度モードは8–10月にかけて7.0–7.5から6.5–7.0、5.0–5.5と採集月の進行とともに低下した。

2012年に採集された仔魚の肥満度モードは7月には4.5–5.0にあったが、8月には2.5–3.0へと低下し、9月には3.5–4.0へとやや上昇した (Fig. 2.3-16)。7月には肥満度が7.5–8.9の、8月には肥満度が7.2–9.2の範囲にある稚魚が採集された。11月には稚魚の肥満度範囲は7.1–10.2と8月よりも広がったが、肥満度モードは8.0–8.5と8月の8.5–9.0とほぼ同様であった。

2013年に採集された仔魚の肥満度モードは5月には5.5–6.0にあったが、6月と8月には4.0–5.0に低下し、10月にも4.5–5.0に現れた (Fig. 2.3-17)。9月には肥満度モードが6.5–7.0

に位置する仔魚群が採集された。5月に採集された稚魚の肥満度は7.3–7.6の範囲にあった。8–10月にかけて、稚魚の肥満度モードはそれぞれ8.0–8.5, 7.0–7.5, 6.0–6.5と、採集月の進行に伴って低下した。

2014年の4–7月には仔魚の肥満度モードはそれぞれ5.5–6.0, 6.5–7.0, 6.0–6.5にあった (Fig. 2.3-18)。8月には肥満度モードが4.5–5.0に位置する群と7.5–8.0に位置する仔魚群が採集された。9–10月には仔魚の肥満度モードは6.5–7.0, 4.5–5.0と順次低下した。5月と6月にはそれぞれ肥満度モードが7.0–7.5と6.5–7.0に位置する稚魚群が採集された。稚魚の肥満度モードは8月と9月にはそれぞれ8.0–9.0, 8.0–8.5に上昇したが、10月には6.0–6.5に低下した。

2015年の7月と8月にはそれぞれ肥満度モードが4.0–4.5と3.5–4.0に位置する仔魚群が採集された (Fig. 2.3-19)。8月には、仔魚の肥満度モードは5.5–6.0へと上昇した。稚魚は8月に採集され、その肥満度は7.7–8.5の範囲にあった。

仔稚魚の相対成長

仔稚魚の体長–体重関係の両対数プロットを、採集年月別に Fig. 2.3-20 に示した。体長–体重関係の傾きは発達段階による違いが大きく、稚魚（中央値: 3.2）よりも仔魚（中央値: 4.2）で大きかった (ANCOVA $P < 0.01$) (Fig. 2.3-21)。2011年を除き、仔魚の体長–体重関係には、採集月間でも有意差がみられた (ANCOVA $P < 0.01$)。回帰線の傾きは、2012・2013・2015年には特に8月に大きく、2014年には5月において小さかった (t -test with Holm's correction, $P < 0.01$)。稚魚の体長–体重関係には、採集月間で有意差はみられなかった (ANCOVA $P > 0.05$)。

仔稚魚の体長–頭長関係の両対数プロットを、採集年月別に Fig. 2.3-22 に示した。体長–体重関係と同様に、体長–頭長関係の両対数プロットの傾きには、発達段階による差が大きい傾向があった (Fig. 2.3-23)。体長–頭長関係の両対数プロットの傾きは、2014年に採集された仔魚では採集月間で有意に異なり (ANCOVA $P < 0.01$)。回帰線の傾きは7月において5月と8月よりも大きかった (t -test with Holm's correction, $P < 0.001$)。仔稚魚の体長と耳石半径の両対数プロットを Fig. 2.3-24 に示した。仔魚の耳石半径–体長関係の両対数プロットの傾きには一定の傾向はみられなかったものの、2014年を除いて採集月間で有意に異なった (ANCOVA $P < 0.05$)。

仔稚魚の日齢組成と孵化日組成

仔稚魚の日齢組成を採集年月別に Fig. 2.3-25 に示した。仔稚魚の日齢のモードは、4 月には 35–40 日齢にあったが、5 月には 40–45 日齢へとやや高齢化した。6 月には仔稚魚の日齢組成は若齢化し、特に 15–20 日齢階級の個体の割合が増加した。7 月以降に採集された仔稚魚の日齢組成には傾向的な変化はみられなかった。8 月に採集された仔稚魚の日齢組成は、2011 年と 2013 年にはそれぞれ 30–35 日齢と 35–40 日齢にモードを持つ単峰型であったが、2012 年には 20–25 日齢と 50–55 日齢にモードをもつ双峰型であった。

仔稚魚の孵化日組成を採集年月別に Fig. 2.3-26 に示した。仔稚魚の孵化日は 2 月 15 日–10 月 5 日の範囲にあり、冬季を除くほぼ周年にわたっていた。2011–2014 年のいずれの年においても、仔稚魚の孵化日は採集月の進行とともに晩くなった。

仔稚魚の成長

40 日齢時における仔稚魚の平均体長成長速度 G_{d40} を、採集年月別に Fig. 2.3-27 に示した。2013 年の 4 月コホートのおよそ 25% が既往知見より得られている加入最低水準の 0.25 mm day^{-1} を下回ったが、その他のコホートではほとんどの個体が 0.25 mm day^{-1} を上回った。年別に見ると、2011 年の 7 月コホートの G_{d40} は、6 月コホートと 8 月コホートよりも有意に低かった (Steel Dwass, $P < 0.01$)。コホート別に見ると、2011 年の 7 月コホートの G_{d40} は 2012 年の 7 月コホートよりも有意に低かった (Steel Dwass, $P < 0.001$)。

孵化から採集時までの期間における仔稚魚の平均体長成長速度 G の組成を採集年月別に Fig. 2.3-28 に示した。2013 年 6 月を除き、仔稚魚の G 組成は概ね単峰型を示し、モードは $0.6\text{--}0.7 \text{ mm day}^{-1}$ にあった。2013 年 6 月には $0.60\text{--}0.65 \text{ mm day}^{-1}$ に G モードを持つ群に加えて $0.80\text{--}0.85 \text{ mm day}^{-1}$ に G モードを持つ群が採集され、 G 組成は双峰型を示した。

10 日齢時 (L_{d10}) と 20 日齢時 (L_{d20}) における仔稚魚の逆算体長 (mm) の頻度分布を、採集年月別に Fig. 2.3-29 に示した。5–7 月に採集された仔稚魚の L_{d10} のモードは 9–10 mm で、これは 4 月および 8–11 月に採集された仔稚魚の L_{d10} のモード (8–9 mm) よりも大きかった。仔稚魚の L_{d10} は全ての採集年月で概ね単峰型を示したが、2013 年 6 月に採集された仔稚魚の L_{d20}

は 15–16 mm と 19–20 mm とにモードをもつ双峰型を示した。

仔魚の体長成長履歴を孵化年月別に Fig. 2.3-30 に示した。2011 年には 9 月コホートの日齢時体長が大きい傾向にあり、35–38 日齢時と 35–37 日齢時においてそれぞれ 7 月コホートと 8 月コホートよりも有意に体長が大きかった (t -test with Bonferroni's correction, $P < 0.01$)。2012 年には 6 月コホートの日齢時体長が大きい傾向にあり、5–29 日齢時において 8 月コホートよりも有意に大きかった。2013 年にも 6 月コホートの日齢時体長が大きい傾向にあり、12–20, 28–31, 16–19 日齢時においてそれぞれ 4 月コホート, 7 月コホート, 9 月コホートよりも有意に大きかった。2013 年において、6 月コホートに次いで日齢時体長が大きかったのは 7 月コホートで、21–38 日齢時において 4 月コホートよりも有意に大きかった。2014 年においても日齢時体長は 6 月コホートで大きい傾向にあり、2 月コホート (11–38 日齢時), 3 月コホート (8–35 日齢時), 8 月コホート (5–38 日齢時), 9 月コホート (7–13 および 19–38 日齢時) よりも有意に大きかった。2014 年においても、7 月コホートの日齢時体長は 6 月コホートに次いで大きく、2 月コホート (8–28 日齢時), 3 月コホート (9–27 日齢時), 8 月コホート (7–28 日齢時), 9 月コホート (7–27 日齢時) よりも有意に大きかった。

稚魚の日齢時体長を孵化年月別に Fig. 2.3-31 に示した。2011 年には 7 月コホートしか採集されず、2012 年には日齢時体長に孵化月コホート間での差異は認められなかった。2013 年には 7 月コホートと 8 月コホートの日齢時体長が大きい傾向にあり、それぞれ 14–28 日齢時と 10–21 日齢時において 6 月コホートよりも有意に大きかった。2014 年には 8 月コホートが 6–38 日齢時において 6 月コホートよりも有意に大きかった。

仔魚と稚魚の日齢時体長を比較した結果を Fig. 2.3-32 に示した。2011 年と 2014 年には、仔魚と稚魚の日齢時体長に有意差は認められなかった。2012 年と 2013 年の 6 月にはそれぞれ 6–38 日齢時と 8–26 日齢時における仔魚の体長が稚魚よりも有意に大きかった。稚魚の日齢時体長が仔魚よりも大きかったのは、2013 年の 7 月 (35 日齢時) と 8 月 (34–35 日齢時) であった。

水温と仔稚魚の採集前 5 日間における平均成長速度 G_5 との関係を Fig. 2.3-33 に示した。仔稚魚の G_5 は $0.30\text{--}0.62\text{ mm day}^{-1}$ の範囲にあり、水温との間に有意な線形関係はみられなかつ

た ($R^2 < 0.002$). G_5 は 18.1°C (2013 年 6 月 26 日, 6 月 28 日) において $0.61\text{--}0.62\text{ mm day}^{-1}$ と特に高い値を示した.

2.3.4 考察

常磐南部海域に分布するシラス資源の由来

常磐南部沿岸の水温および沖合域の海況を常磐南部海域におけるシラス漁獲量と対応させて解析した研究によって, 春シラス (4–7 月) は茨城県以南からの, 秋シラス (10–11 月) の一部は茨城県以北からの来遊群である可能性が指摘されている (海老沢, 1997). 太平洋系群の産卵量の季節変動 (高須賀, 2012) をみると, 3–4 月における産卵は主に房総半島野島崎以西の黒潮系暖水域で行われ, 常磐近海における卵分布はごく低密度にとどまっている. 常磐南部においてまとまった産卵が確認され始めるのは 5 月で, この時期は卵分布の北端も常磐南部に位置している. 那珂湊の水温が 15°C を上回る時期が例年 5 月上旬–中旬であることを考えると (Fig. 2.3-4), 本種の産卵は, 親潮系冷水域の南部に位置する常磐南部海域においても, 黒潮系暖水域や親潮系冷水域北部 (第 2.1 節) と同様におよそ 15°C 以上で行われると考えられる. 5 月以降, 仔魚の供給源候補となる産卵場の北限は, 6 月には塩屋崎沖合に, 7 月と 8 月には金華山–八戸の沖合や道南・道東海域にまで北上する (第 2.1 節, 第 2.2 節).

シラス漁業による漁獲物は, 伊勢湾 (中村元彦, 2002) や相模湾 (三谷, 1990) など湾入の深い漁場では地先発生群によって構成されるが, 土佐湾など深い湾入のない漁場では近傍水域よりもむしろ地理的に離れた水域からの移入群によって構成される傾向にある. 本種仔魚は濁度走性によって能動的に漁場へと接岸するが (魚谷ら, 1993), 遊泳力の獲得に至るまで ($L < 15\text{ mm}$, 三谷, 1990) は沖合域を受動輸送される (木下, 2006). 大洗沿岸で採集された仔稚魚の平均体長成長速度 (0.67 mm day^{-1} , Fig. 2.3-28) から判断すると, 5 月以降に大洗沿岸で産み出された仔魚は遊泳力の獲得までにおよそ 18 日間の輸送を受けることになる. これらの地先発生群はこの間に遠隔水域へ輸送され, 大洗沿岸で採集される群は同じく 20 日間前後の輸送の末に来遊した遠隔水域発生群である可能性が高い. このような遠隔水域からの仔魚の供給は黒潮本流域の土佐湾において報告されたものであり, 遠隔水域とは黒潮のより上流域である. 本研究で対象とし

た常磐南部のシラス漁場は、仔魚の供給源として黒潮系暖水域に加えて親潮系冷水域を考える必要がある点で特異的である。

本研究で検討した体長に対する仔稚魚の頭長、および耳石半径の相対成長は、季節間で有意に異なっていた (Figs. 2.3-22, 2.3-24)。本研究と同一の海域において、本種の変態期における相対成長や消化器官の発達を調べた先行研究からは、夏季 (7–9 月) 発生群は春季 (3–6 月) 発生群と比べて小さい体長で変態し、体長に対する頭長、吻長、眼径が大きく、また消化管の発達も早いことが報告されている (富永・二平, 1999a)。常磐南部への輸送環境を考慮すると、本海域で採集された仔稚魚の相対成長にみられる春季と夏季の違いは、発生海域である黒潮と親潮の違い、即ち孵化から常磐南部海域への来遊までの環境履歴の反映であると考えられる。カタクチイワシと同じニシン目に属する春産卵ニシン *Clupea harengus* (Fey, 2001) や Atlantic menhaden *Brevoortia tyrannus* (Fey, 2006) でも、耳石半径–体長関係が水温によって変化することが確認されている。

由来の異なる仔稚魚の混在は、日齢時体長の比較からも示唆された。2013 年 6 月に採集された仔稚魚では、20 日齢時の体長組成は双峰型であった (Fig. 2.3-29)。これは仔魚が遊泳力を獲得して接岸する 20 日前後までには、異なる環境履歴の群が混在していたことを意味する。このような仔魚期前期における逆算体長組成の双峰化が 2013 年の 6 月に限定された要因として、本海域の仔稚魚の供給源として優占する海域は 1 つであり、その他の水域で発生した群は本海域の資源の一部を構成するにとどまっていることが考えられる。

本海域への親潮系冷水域発生群の移入の可能性については、相模湾などの親潮系冷水域発生群の移入が起こらない漁場で採集された仔稚魚との比較を通して、詳しく検討する必要がある。

カタクチイワシ仔稚魚の成長および成育場としての常磐南部沿岸域

水温と仔稚魚の採集前 5 日間における成長速度との間に相関が見られなかったことから (Fig. 2.3-33)、常磐南部海域の仔稚魚の成長速度は、水温だけではなく餌料環境の影響を受けていると考えられる。成長速度がほとんど水温のみによって説明できるウルメイワシ *Etrumeus teres* 仔魚 (Watanabe et al., 2014, 2013) とは異なり、カタクチイワシ仔魚は餌料への依存度が比較的高いことが、黒潮系暖水域における研究から明らかになっている (Yasue et al., 2011;

Watanabe et al., 2014). カタクチイワシ仔魚よりも餌料への依存度が高いと考えられるマイワシ *Sardinops melanostictus* 仔魚では、成長速度は水温によって説明できないこともわかっていることを考えると (Yasue et al., 2011; Watanabe et al., 2014), 大洗沿岸のカタクチイワシ仔稚魚の成長速度は、水温に依存せず餌料環境により強く依存すると考えられる点で、マイワシ的な水温依存性をもっていると解釈できる。

成長速度から判断すると、常磐南部沿岸域は本種仔稚魚の重要な成育場となっていると考えられた。本海域で採集された仔稚魚の平均体長成長速度は $0.43\text{--}1.1\text{ mm day}^{-1}$ で、これはこれまで他の成育場から報告されている値に相当していた。南日本の成育場におけるカタクチイワシ仔魚の平均体長速度は、瀬戸内海では体長範囲 $12\text{--}25\text{ mm}$ の仔魚から $0.44\text{--}0.76\text{ mm day}^{-1}$ が (Zenitani et al., 2009), 黒潮親潮移行域の沖合では体長範囲 $20\text{--}30\text{ mm}$ の仔魚から $0.46\text{--}0.62\text{ mm day}^{-1}$ が (Takahashi et al., 2001), 相模湾では体長範囲 $5\text{--}20\text{ mm}$ の仔魚から $0.59\text{--}0.71\text{ mm day}^{-1}$ が (辻, 1983) 報告されている。さらに、大洗沿岸で採集された仔稚魚のほとんどは、既往研究から得られている生残に必要な体長成長速度の閾値 (0.25 mm day^{-1} , Takahashi and Watanabe, 2004b) を超えていた (Fig. 2.3-27)。

日齢時体長に着目すると、2012 年と 2013 年の 6 月孵化群では稚魚よりも仔魚で有意に大きかったが (Fig. 2.3-32), これらの仔魚と稚魚はそれぞれ採集日が異なっており、成長速度の低い個体に変態していることを示すわけではない。これらの群を除けば、日齢時体長には仔魚と稚魚の間で差がなかった (Fig. 2.3-32)。この結果は、カタクチイワシ仔稚魚に対する本海域の成長速度に依存した選択圧が低いこと、つまり本海域が水温や餌料環境などの成育環境に優れていることを示しているのかもしれない。

仔魚期後期を対象とした初期生態研究において、体重に関する知見は非常に乏しい。仔魚の体長—体重関係の両対数グラフの傾き、つまり体長—体重関係の冪乗数は $3.8\text{--}4.7$ で、これは稚魚の $2.7\text{--}4.6$ (外れ値: 5.1) よりも大きかった (Fig. 2.3-21)。体長—体重関係の冪乗数が 35 mm 以後ほぼ一定となり (Takahashi and Watanabe, 2004c), 成魚ではほぼ 3 となることを併せて考えると、本研究の結果は「シラス」型体型 (沖山, 1979) から成魚の体型への変化が仔魚期後期に起こることを表している。

カタクチイワシ仔稚魚の肥満度変化を季節的に解析した先行研究 (深道, 2010) から, 黒潮系暖水域の相模湾では, カタクチイワシの変態は肥満度の閾値 7.3 を達成した個体から始まると考えられている。北米カタクチイワシ *Engraulis mordax* の瞬間死亡率は, 稚魚への変態によって劇的に低下することが知られている (Houde, 1987)。死亡率の高い仔魚期の継続期間は, 資源の豊度を決定する重要な要因である孵化から加入までの累積死亡率を大きく左右すると考えられる。本海域の成育場としての機能を詳細に評価するため, 本海域における仔魚の変態時期を黒潮系暖水域と比較する必要がある。

本節によって, 常磐南部沿岸域は黒潮系暖水域と親潮系冷水域で発生した仔稚魚が混在する海域であり, またこれらの海域から移入した仔稚魚の成育場として機能しうることがわかった。

Table 2.3.1: L (mm), d (days), and date of hatch of anchovy larvae and juveniles collected in Oarai coast in 2011. N.D. represents not detected. Dash represents no data.

Date	SST	Larva					Juvenile				
		L (mm)	N	d (days)	Date of hatch	N	L (mm)	N	d (days)	Date of hatch	N
3 Aug	21.8	14.4–28.7	100	20–45	19 Jun–14 Jul	40			N.D.		
23 Aug	23.2	14.6–29.8	100	21–49	05 Jul–02 Aug	48	26.7–29.1	11	30–51	03–24 Jul	10
9 Sep	22.2	17.0–28.5	99	22–46	25 Jul–18 Aug	31	26.9–26.9	1	47–47	24–24 Jul	1
28 Sep	20.7	18.7–29.1	98	24–49	10 Aug–04 Sep	28	27.3–27.6	2	43–43	16–16 Aug	1
11 Oct	20.1	17.7–30.3	90	25–48	24 Aug–16 Sep	26	25.2–30.9	10	33–42	30 Aug–08 Sep	4

Table 2.3.2: L (mm), d (days), and date of hatch of anchovy larvae and juveniles collected in Oarai coast in 2012. N.D. represents not detected. Dash represents no data.

Date	SST	Larva					Juvenile				
		L (mm)	N	d (days)	Date of hatch	N	L (mm)	N	d (days)	Date of hatch	N
10 Jul	19.6	17.7–35.0	100	32–40	31 May–08 Jun	5			N.D.		
23 Jul	18.7	22.3–32.2	94	28–45	08–25 Jun	26	31.9–37.1	6	38–49	04–15 Jun	4
22 Aug	20.9	13.8–25.7	100	16–38	15 Jul–06 Aug	25			N.D.		
23 Aug	19.8	18.0–31.8	99	22–51	03 Jul–01 Aug	28	30.0–33.3	25	47–60	24 Jun–07 Jul	25
3 Sep	22.0	14.1–26.0	100	18–39	26 Jul–16 Aug	27			N.D.		
28 Nov	14.9			N.D.			49.3–82.6	100	94–137	14 Jul–26 Aug	13

Table 2.3.3: L (mm), d (days), and date of hatch of anchovy larvae and juveniles collected in Oarai coast in 2013. N.D. represents not detected. Dash represents no data.

Date	SST	Larva					Juvenile				
		L (mm)	N	d (days)	Date of hatch	N	L (mm)	N	d (days)	Date of hatch	N
2 May	14.4	17.9–33.6	98	21–50	13 Mar–11 Apr	32	33.3–36.5	3	51–63	28 Feb–12 Mar	3
30 May	11.0	17.8–31.1	100	-	-	-			N.D.		
4 Jun	15.4	17.2–28.2	100	21–44	21 Apr–14 May	35			N.D.		
5 Jun	16.6	18.6–36.2	100	-	-	-			N.D.		
26 Jun	17.8	13.9–30.9	104	13–38	19 May–13 Jun	33	30.5–33.1	2	32–46	11–25 May	2
28 Jun	17.9	12.7–31.9	100	12–34	25 May–16 Jun	27			N.D.		
9 Aug	24.0	14.2–30.1	128	24–42	28 Jun–16 Jul	17	29.0–34.3	22	37–53	17 Jun–03 Jul	14
30 Aug	22.6	21.2–31.5	90	20–42	19 Jul–10 Aug	27	30.3–34.4	10	39–51	10–22 Jul	7
11 Sep	23.7	17.6–29.3	78	23–46	27 Jul–19 Aug	25	26.9–31.4	22	34–46	27 Jul–08 Aug	12
29 Oct	18.2	16.5–32.3	115	24–51	08 Sep–05 Oct	32	29.3–35.3	15	-	-	-

Table 2.3.4: L (mm), d (days), and date of hatch of anchovy larvae and juveniles collected in Oarai coast in 2014. N.D. represents not detected. Dash represents no data.

Date	SST	Larva					Juvenile				
		L (mm)	N	d (days)	Date of hatch	N	L (mm)	N	d (days)	Date of hatch	N
8 Apr	12.2	18.5–30.7	100	24–48	19 Feb–15 Mar	30			N.D.		
16 Apr	13.4	17.8–40.3	99	-	-	-	36.0–36.0	1	-	-	-
14 May	15.5	26.8–37.7	100	-	-	-			N.D.		
28 May	17.6	21.6–33.2	93	-	-	-	32.8–35.1	7	-	-	-
9 Jul	20.0	19.3–32.0	86	-	-	-	30.4–33.0	14	-	-	-
29 Jul	21.3	21.1–34.6	86	24–48	11 Jun–05 Jul	51	31.8–35.9	14	34–52	07–25 Jun	14
8 Aug	19.3	17.8–28.6	100	-	-	-			N.D.		
26 Aug	22.6	16.0–33.0	88	-	-	-	30.6–33.4	12	-	-	-
19 Sep	21.4	16.2–30.9	82	38–42	08–12 Aug	5	28.8–32.8	18	37–47	03–13 Aug	5
3 Oct	21.0	19.7–29.2	94	25–43	21 Aug–08 Sep	25	25.6–28.1	6	29–46	18 Aug–04 Sep	6

Table 2.3.5: L (mm), d (days), and date of hatch of anchovy larvae and juveniles collected in Oarai coast in 2015. N.D. represents not detected. Dash represents no data.

Date	SST	Larva					Juvenile				
		L (mm)	N	d (days)	Date of hatch	N	L (mm)	N	d (days)	Date of hatch	N
2 Jun	18.3	17.1–29.8	100	-	-	-			N.D.		
30 Jun	18.9	16.4–27.6	100	-	-	-			N.D.		
23 Jul	18.4	13.0–32.1	100	-	-	-			N.D.		
6 Aug	20.6	16.4–28.5	96	-	-	-	27.9–30.5	4	-	-	-

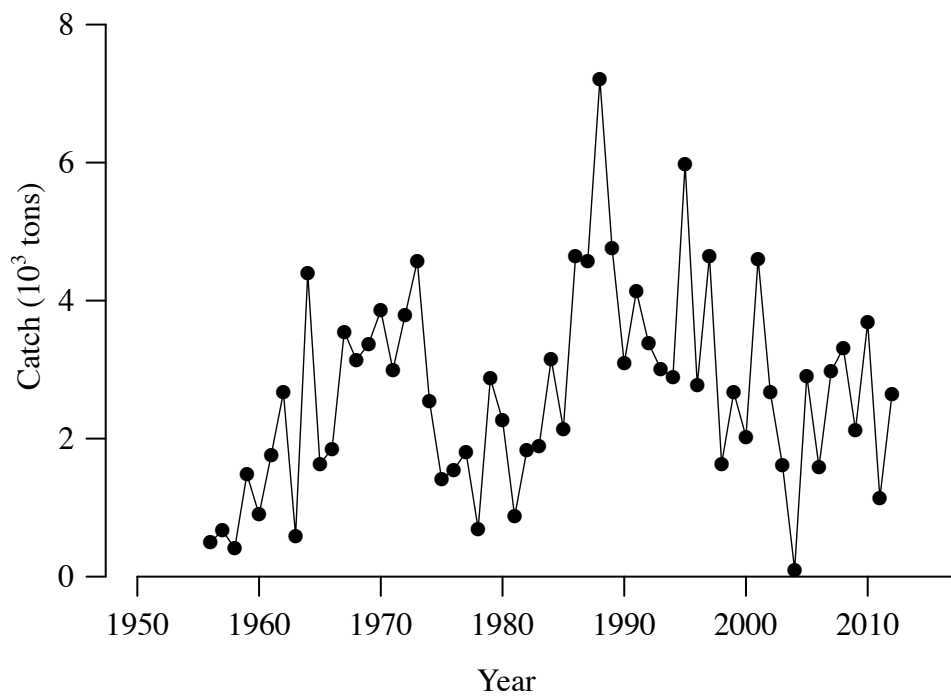


Fig. 2.3-1: Annual fluctuations in the *shirasu* fishery landings in Ibaraki prefecture.

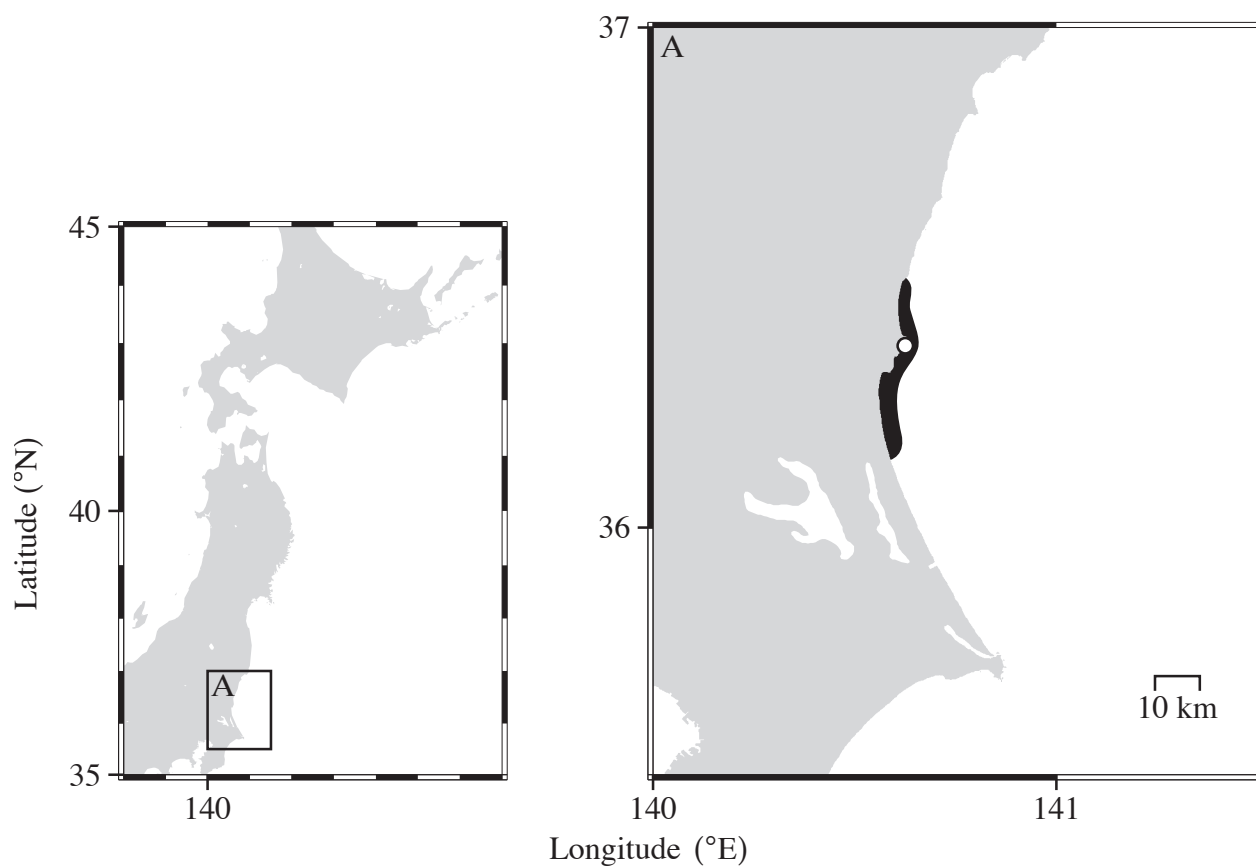


Fig. 2.3-2: *Shirasu* fishing ground along Oarai coast (black shaded area). Open circle represents the location of the temperature-recording station by Ibaraki Prefectural Fisheries Experimental Station.

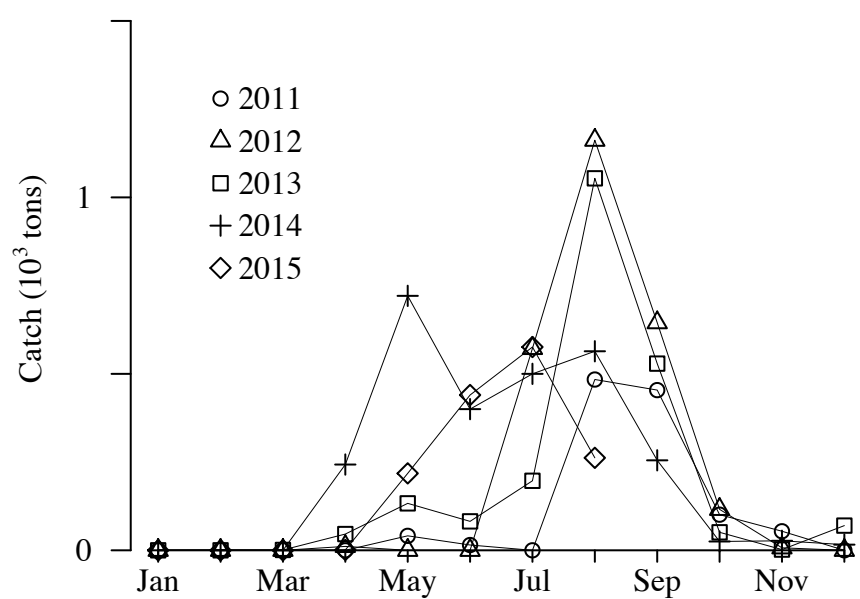


Fig. 2.3-3: Monthly landings of *shirasu* fishery in Oarai coast.

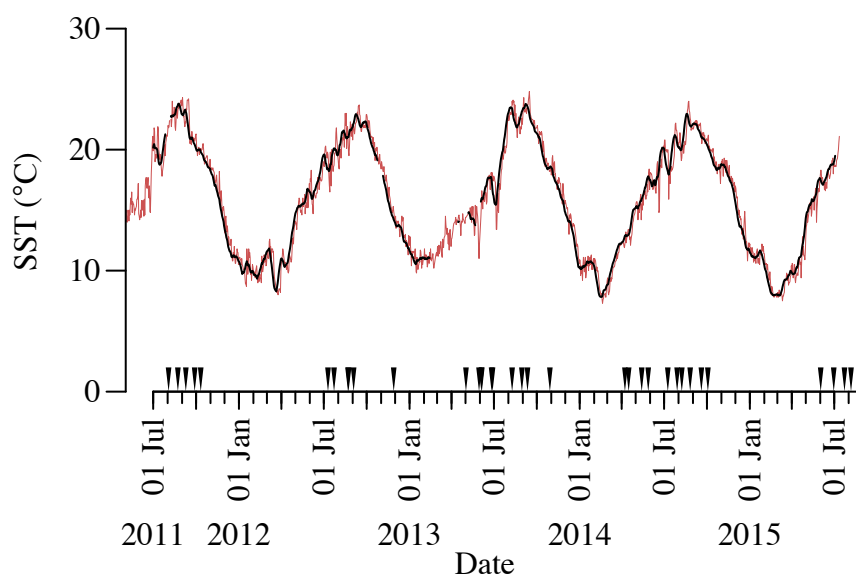


Fig. 2.3-4: Seasonal variation in SST in Oarai coast. Thin red line and thick black line represent the original data and the data smoothed by 5-day moving average filter, respectively. Arrowhead points the sampling date.

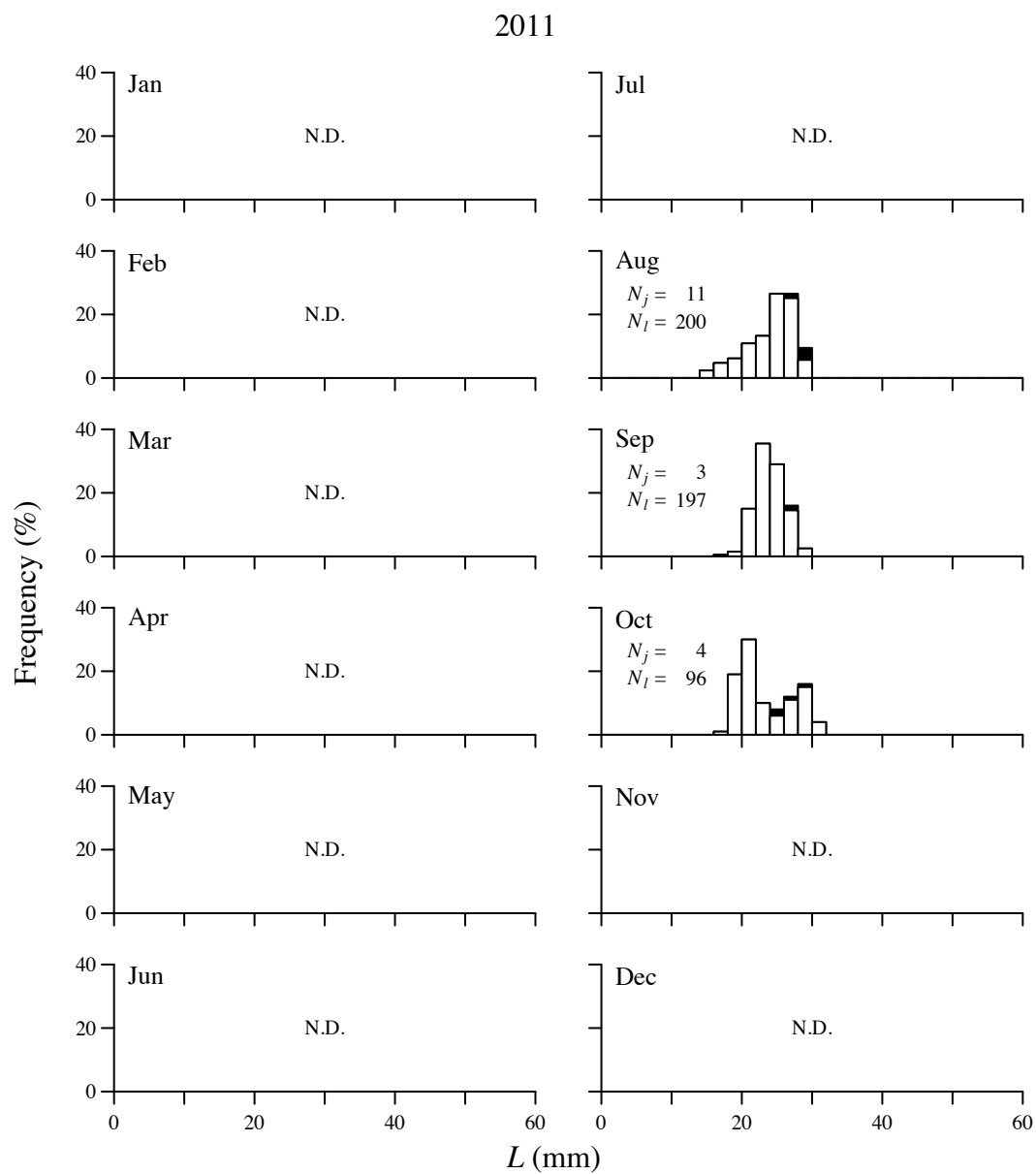


Fig. 2.3-5: Monthly variations in L frequency distributions of anchovy larvae (*open column*) and juveniles (*solid column*) in Oarai coast in 2011. N_l and N_j represent the numbers of larvae and juveniles. N.D. represents not detected.

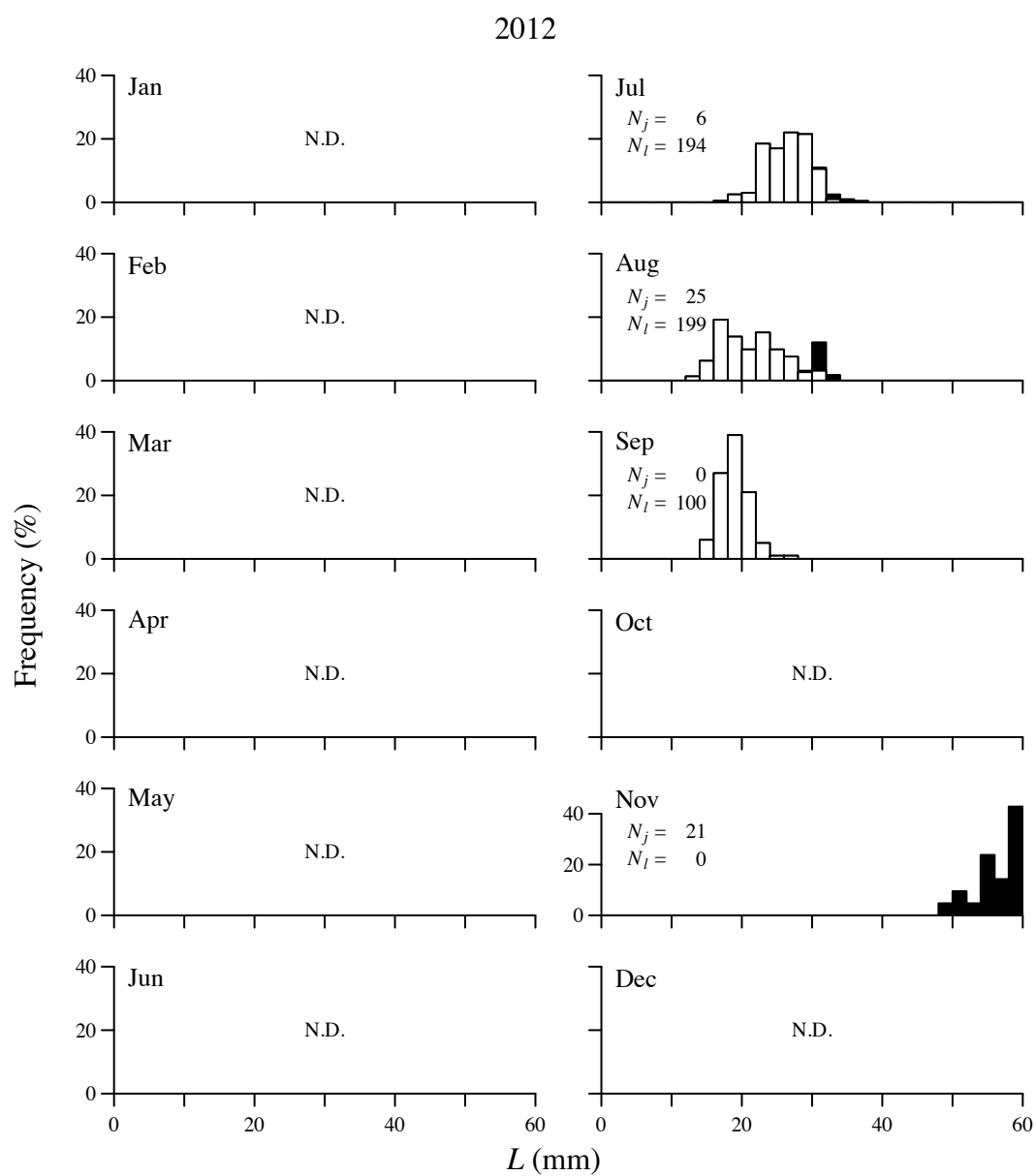


Fig. 2.3-6: Monthly variations in L frequency distributions of anchovy larvae (*open column*) and juveniles (*solid column*) in Oarai coast in 2012. N_l and N_j represent the numbers of larvae and juveniles. N.D. represents not detected.

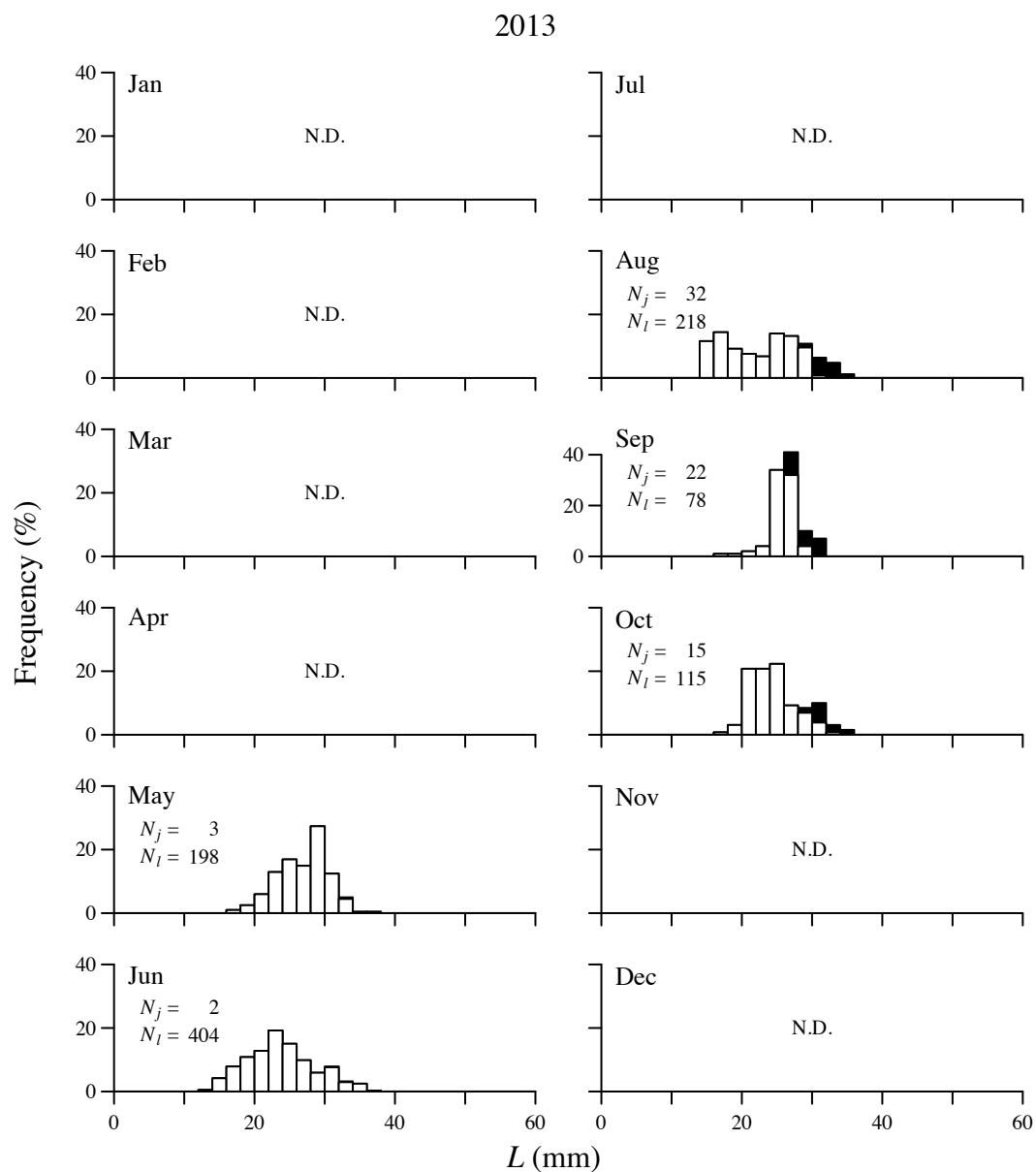
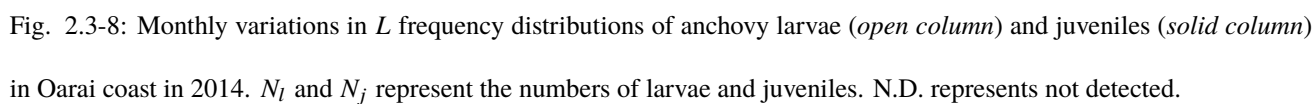


Fig. 2.3-7: Monthly variations in L frequency distributions of anchovy larvae (*open column*) and juveniles (*solid column*) in Oarai coast in 2013. N_l and N_j represent the numbers of larvae and juveniles. N.D. represents not detected.



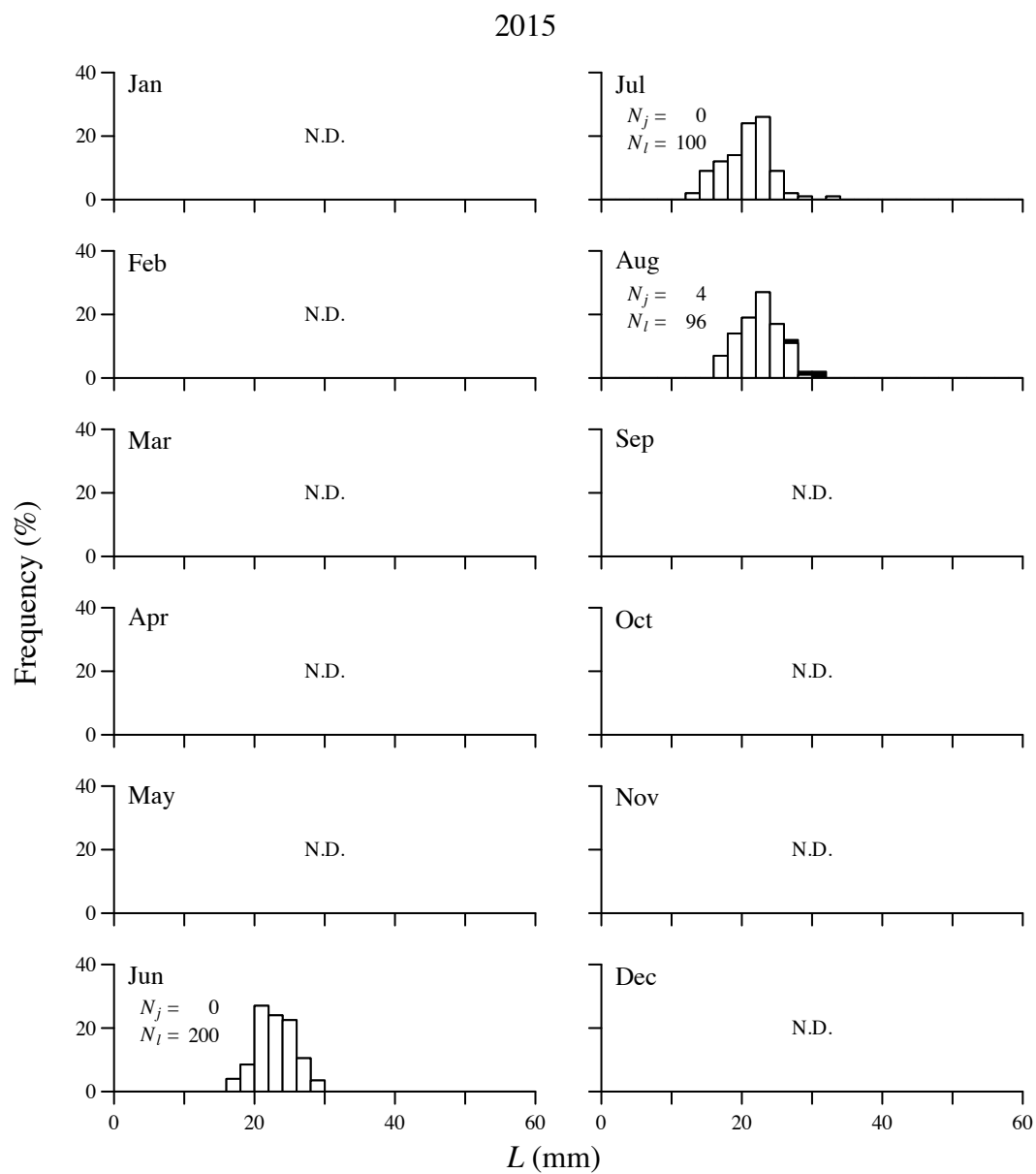


Fig. 2.3-9: Monthly variations in L frequency distributions of anchovy larvae (*open column*) and juveniles (*solid column*) in Oarai coast in 2015. N_l and N_j represent the numbers of larvae and juveniles. N.D. represents not detected.

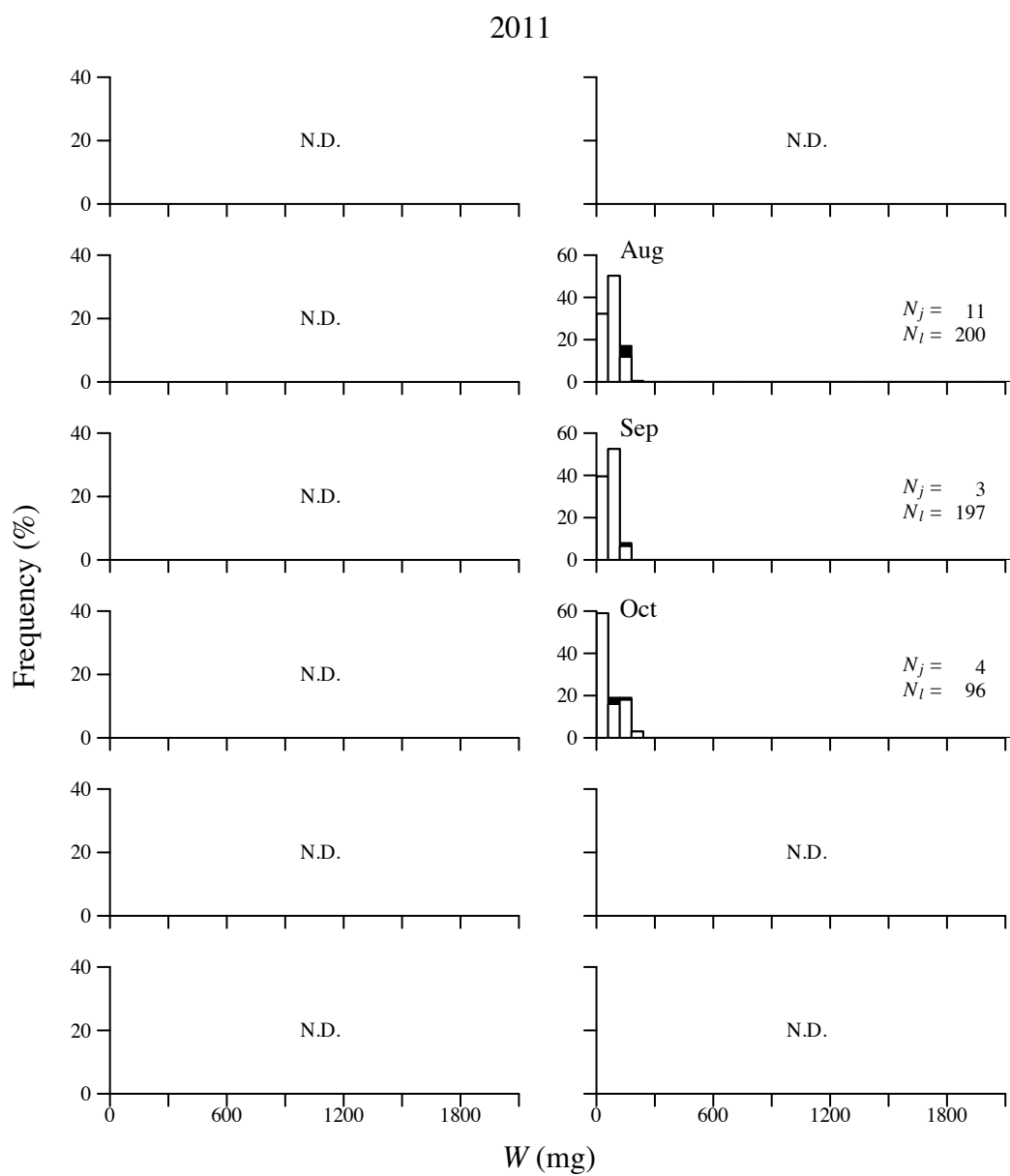


Fig. 2.3-10: Monthly variations in W frequency distributions of anchovy larvae (*open column*) and juveniles (*solid column*) in Oarai coast in 2011. N_l and N_j represent the numbers of larvae and juveniles. N.D. represents not detected.

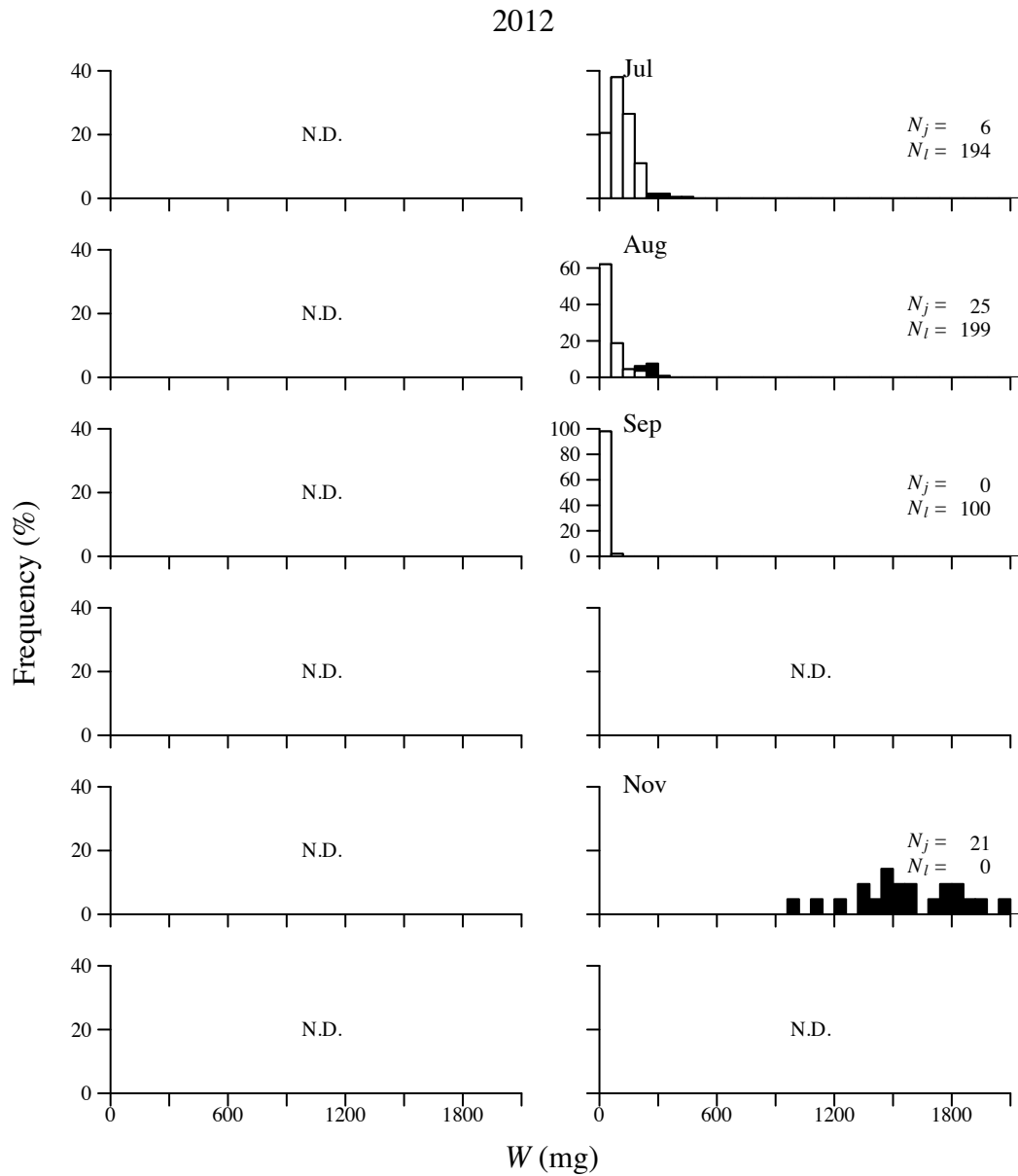


Fig. 2.3-11: Monthly variations in W frequency distributions of anchovy larvae (*open column*) and juveniles (*solid column*) in Oarai coast in 2012. N_l and N_j represent the numbers of larvae and juveniles. N.D. represents not detected.

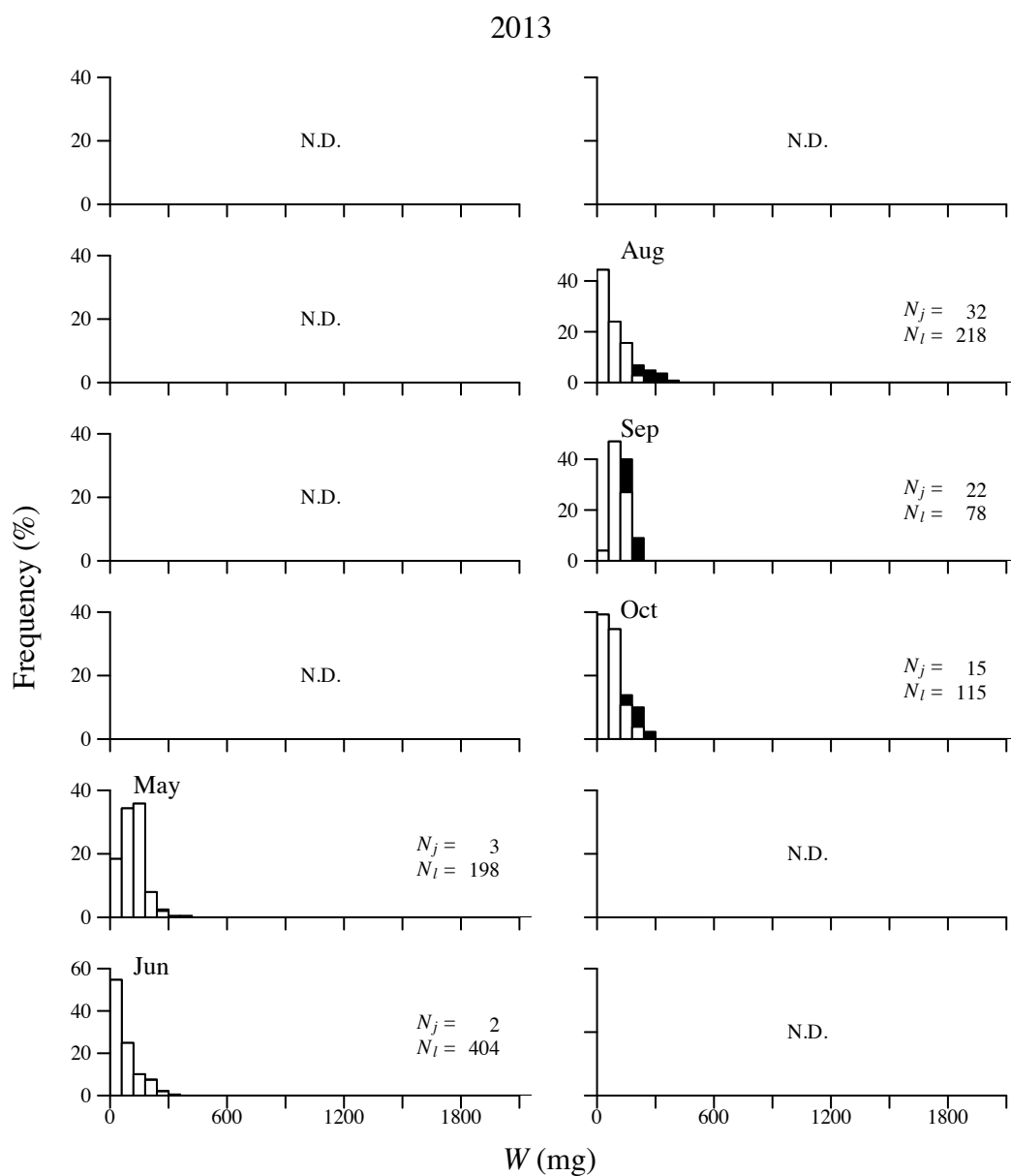


Fig. 2.3-12: Monthly variations in W frequency distributions of anchovy larvae (*open column*) and juveniles (*solid column*) in Oarai coast in 2013. N_l and N_j represent the numbers of larvae and juveniles. N.D. represents not detected.

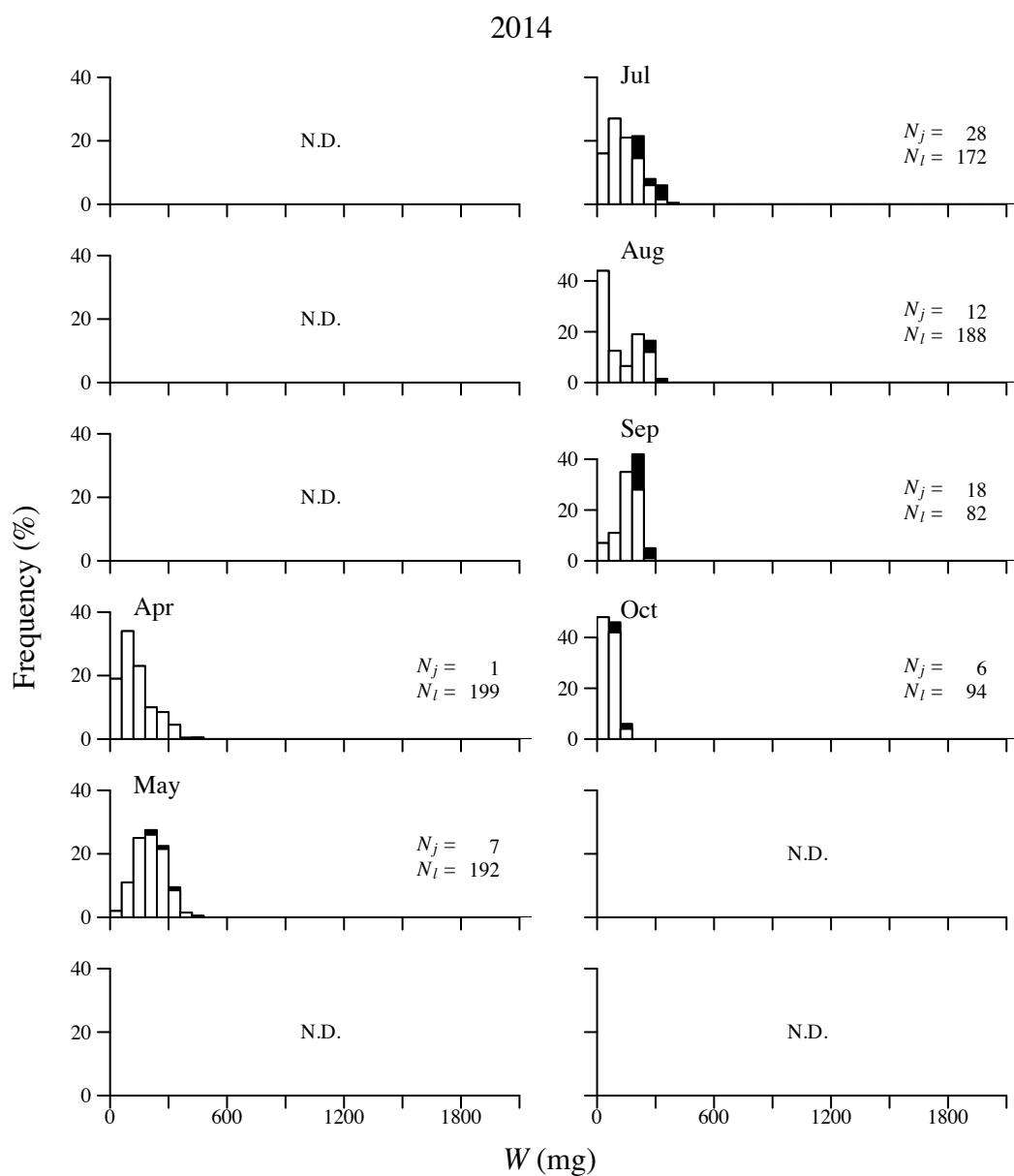


Fig. 2.3-13: Monthly variations in W frequency distributions of anchovy larvae (*open column*) and juveniles (*solid column*) in Oarai coast in 2014. N_l and N_j represent the numbers of larvae and juveniles. N.D. represents not detected.

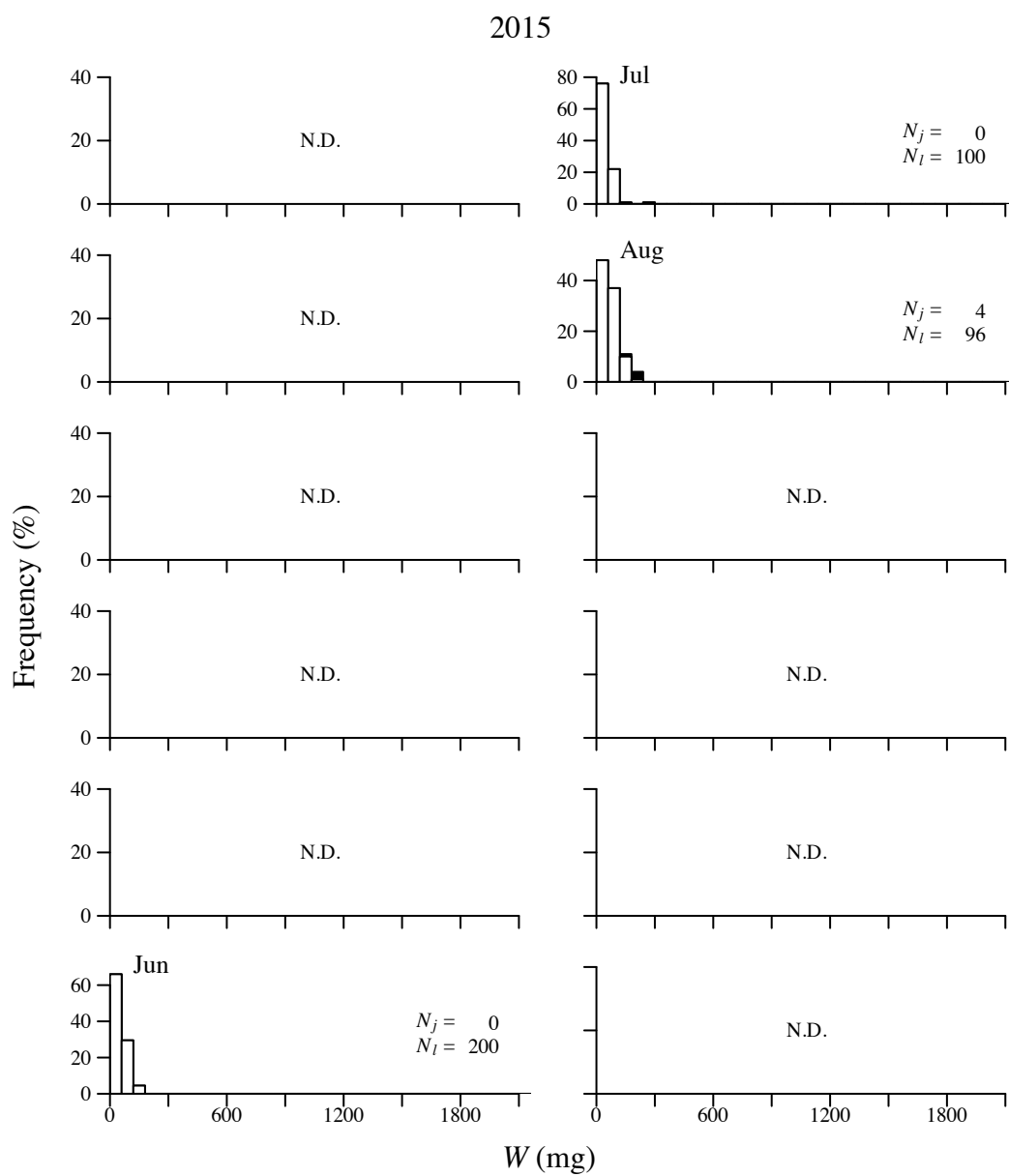


Fig. 2.3-14: Monthly variations in W frequency distributions of anchovy larvae (*open column*) and juveniles (*solid column*) in Oarai coast in 2015. N_l and N_j represent the numbers of larvae and juveniles. N.D. represents not detected.

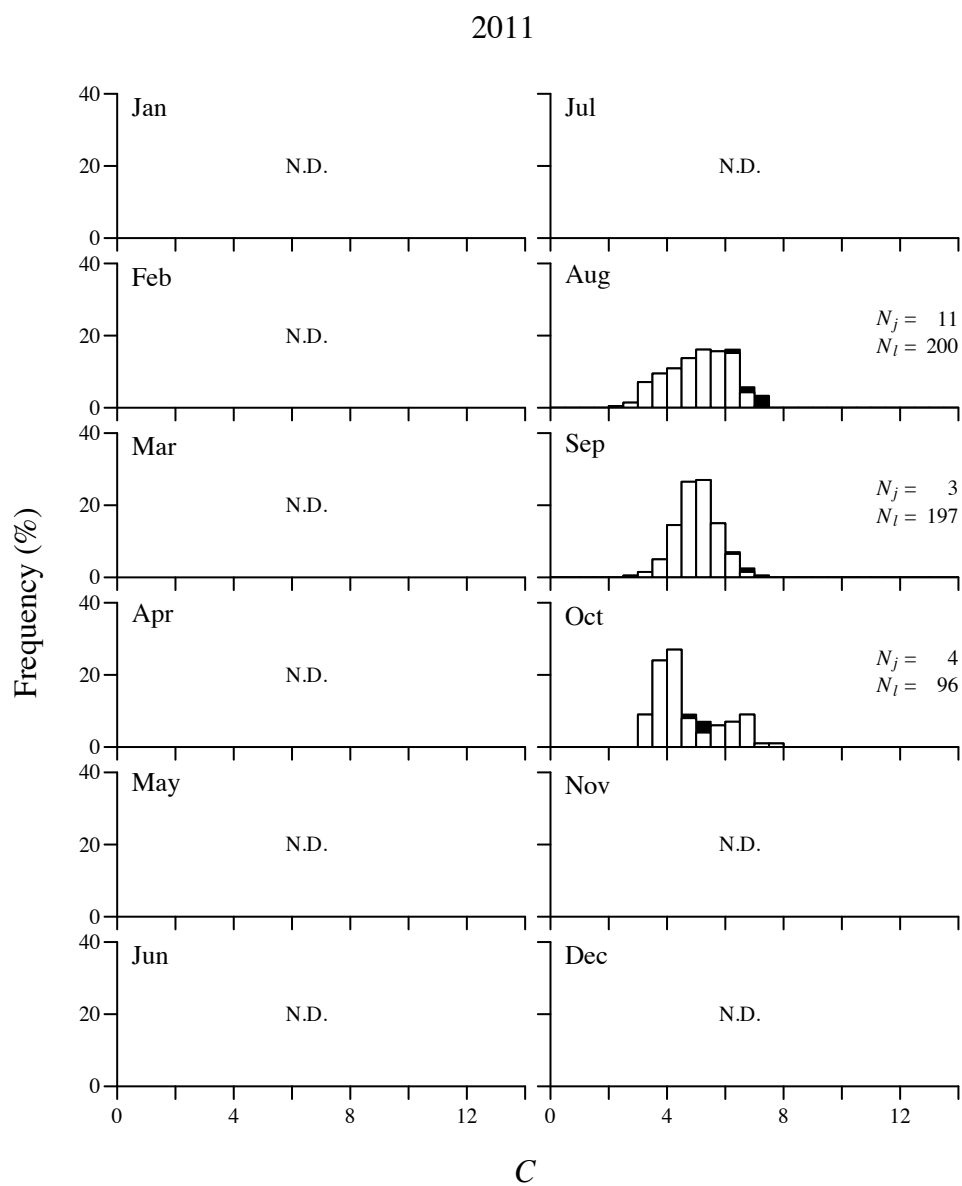


Fig. 2.3-15: Monthly variations in C frequency distributions of anchovy larvae (*open column*) and juveniles (*solid column*) in Oarai coast in 2011. N_l and N_j represent the numbers of larvae and juveniles. N.D. represents not detected.

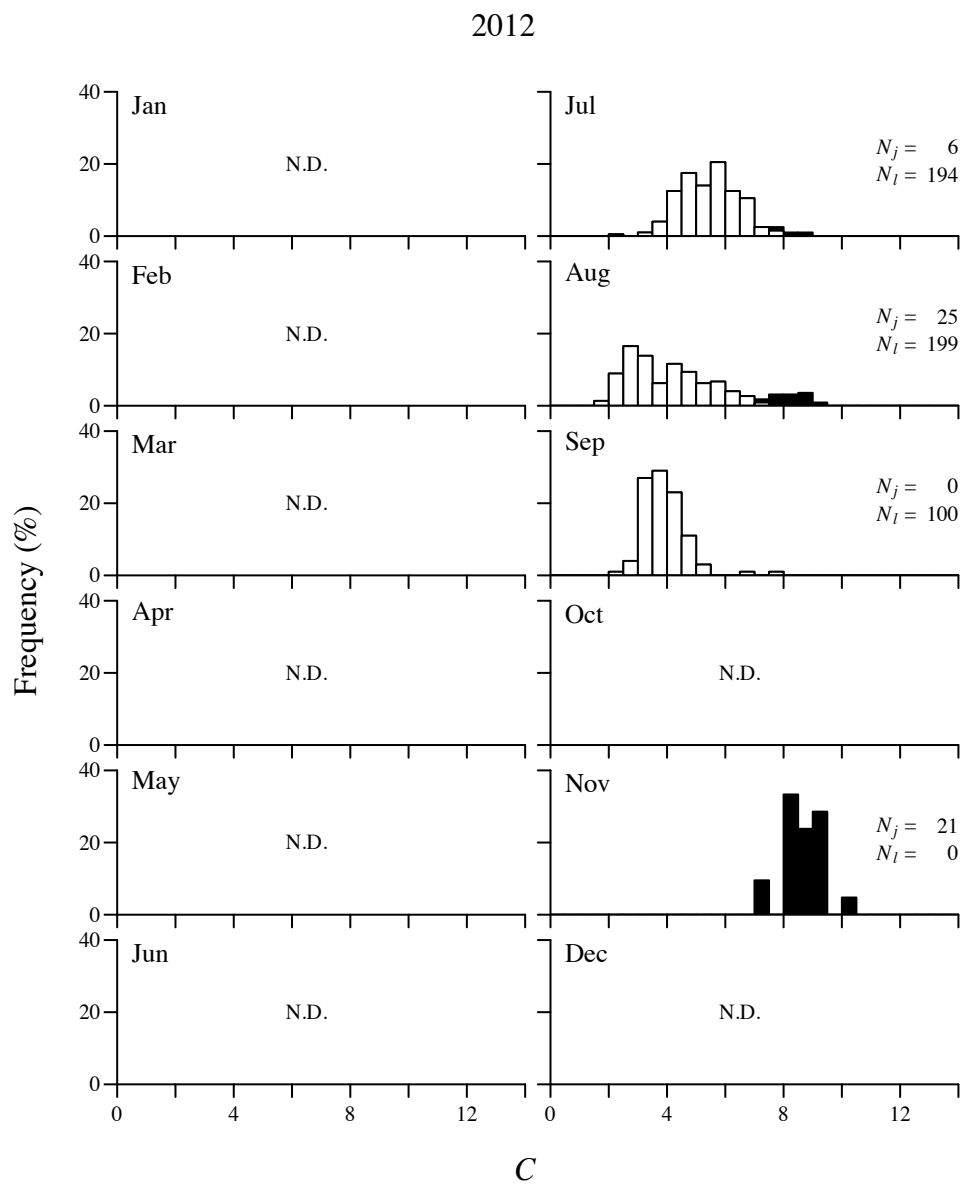


Fig. 2.3-16: Monthly variations in C frequency distributions of anchovy larvae (*open column*) and juveniles (*solid column*) in Oarai coast in 2012. N_l and N_j represent the numbers of larvae and juveniles. N.D. represents not detected.

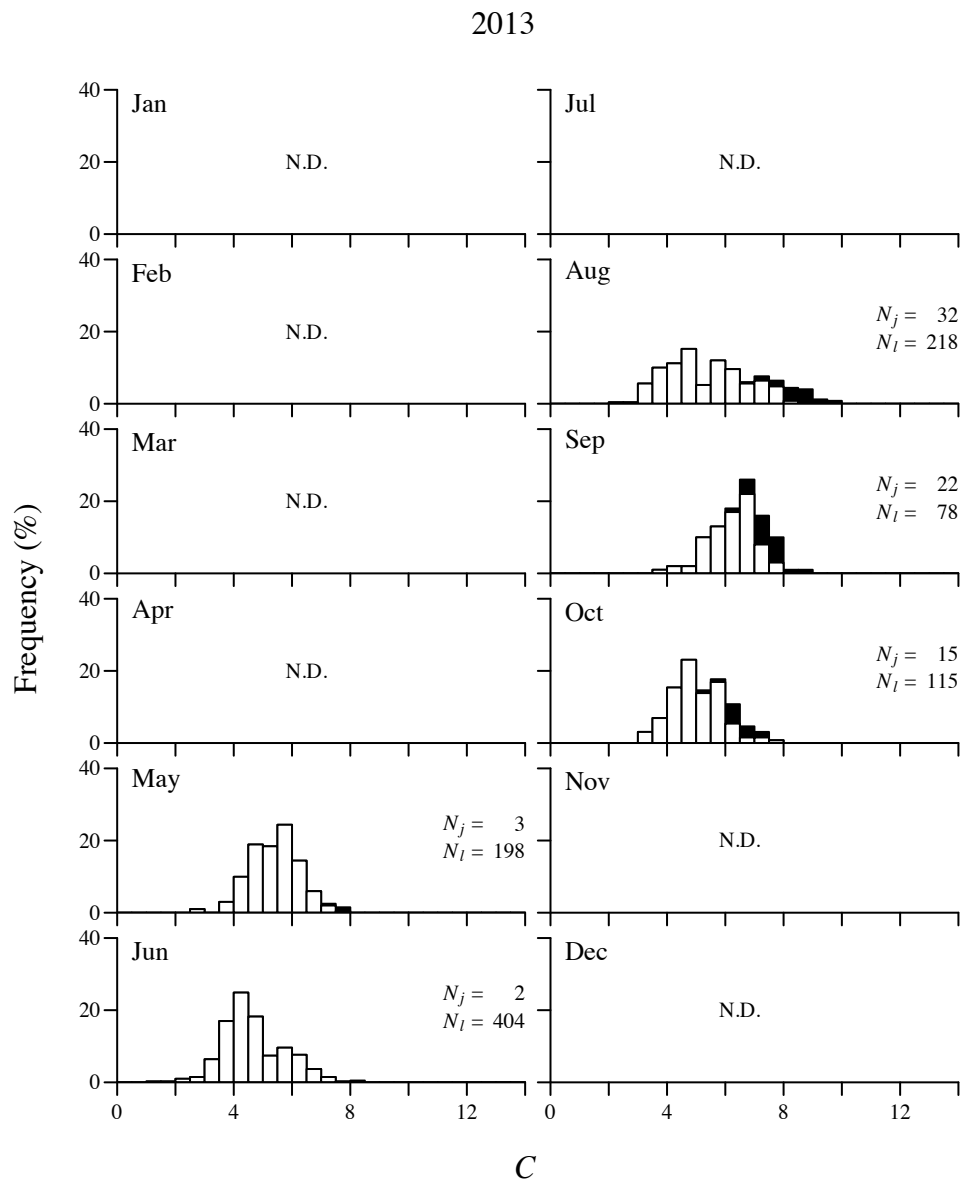


Fig. 2.3-17: Monthly variations in C frequency distributions of anchovy larvae (*open column*) and juveniles (*solid column*) in Oarai coast in 2013. N_l and N_j represent the numbers of larvae and juveniles. N.D. represents not detected.

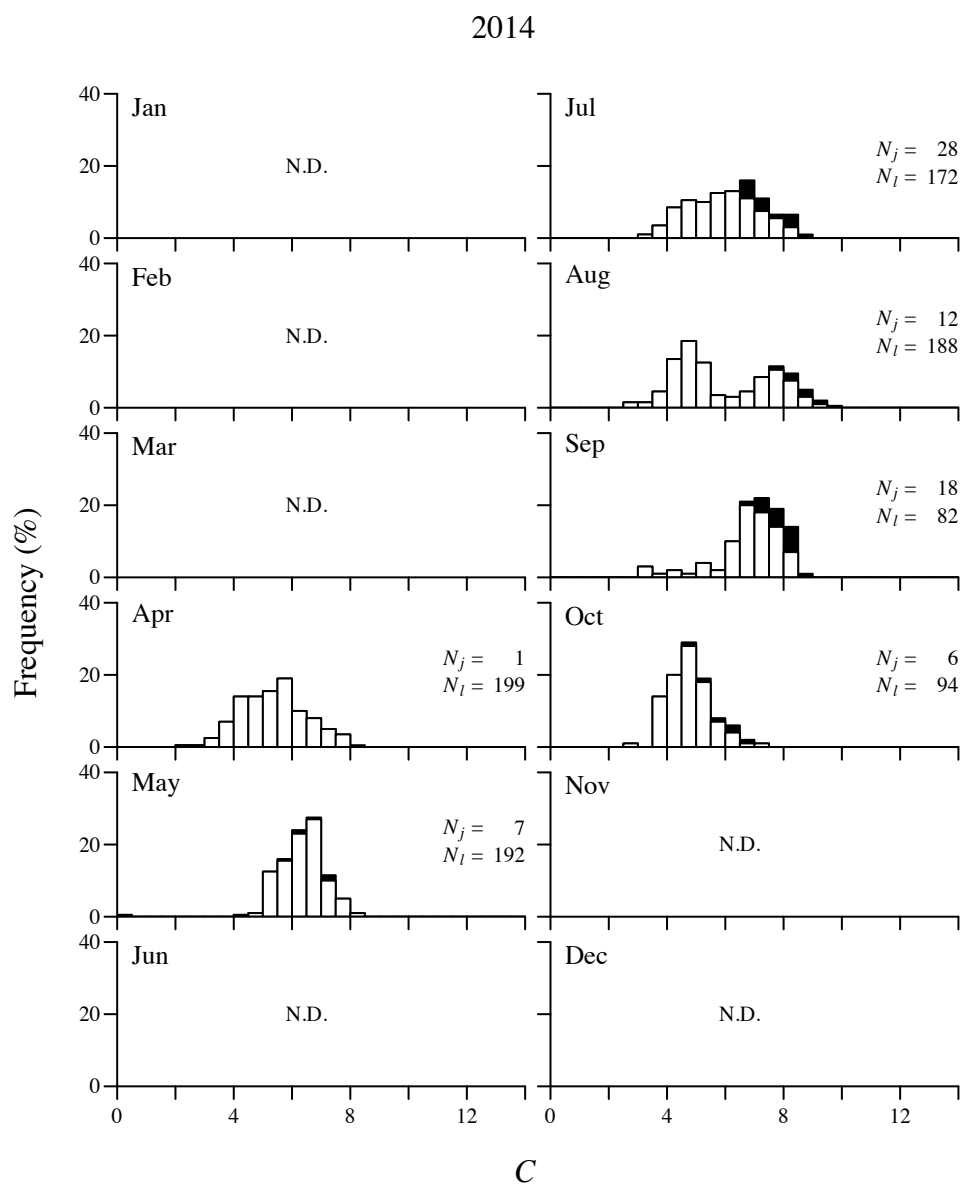


Fig. 2.3-18: Monthly variations in C frequency distributions of anchovy larvae (*open column*) and juveniles (*solid column*) in Oarai coast in 2014. N_l and N_j represent the numbers of larvae and juveniles. N.D. represents not detected.

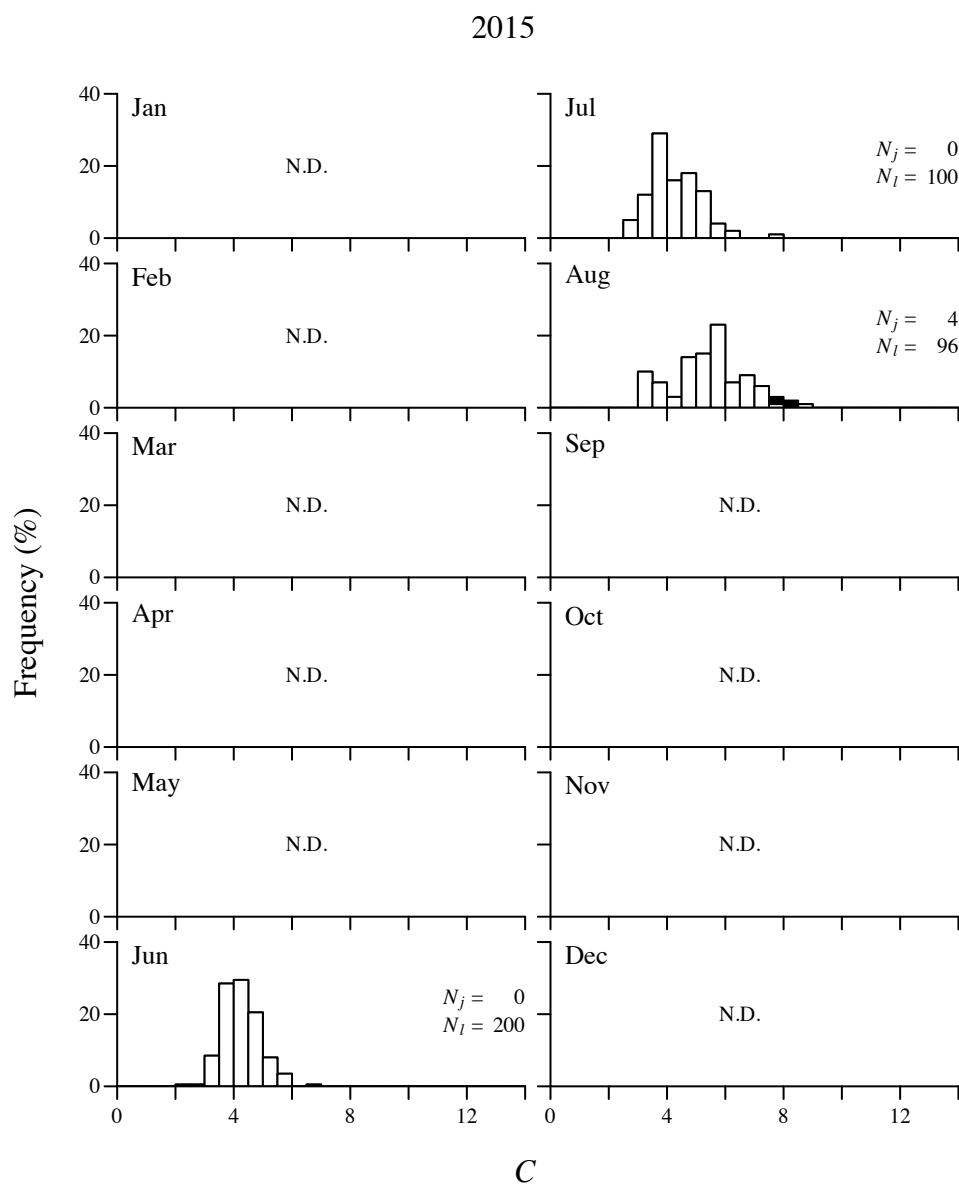


Fig. 2.3-19: Monthly variations in C frequency distributions of anchovy larvae (*open column*) and juveniles (*solid column*) in Oarai coast in 2015. N_l and N_j represent the numbers of larvae and juveniles. N.D. represents not detected.

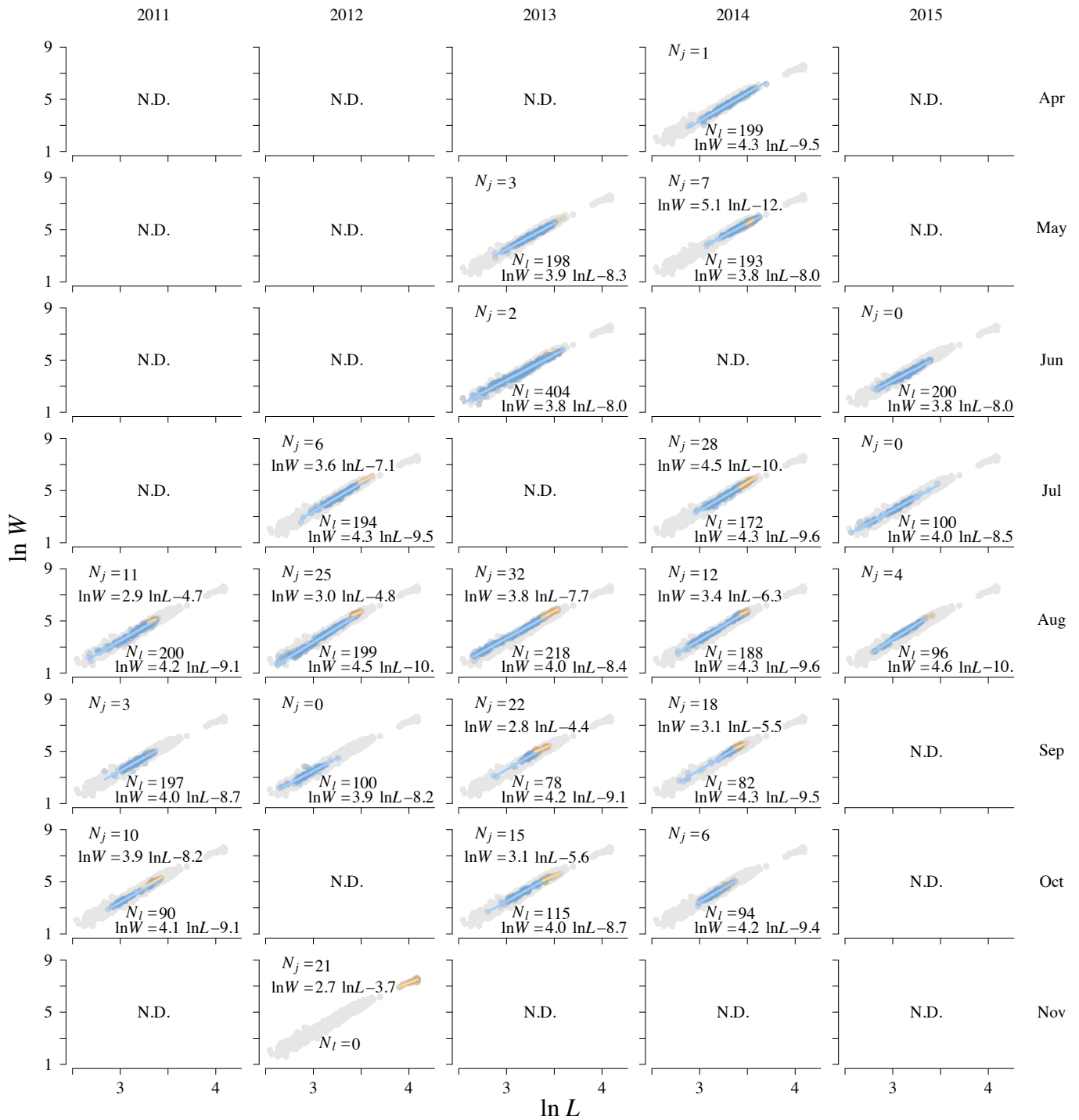


Fig. 2.3-20: Monthly variations in L - W relationships between larvae (blue) and juveniles (yellow) by sampling years and months in Oarai coast. Data in each month are plotted over the overall data shown by gray plots. N_l and N_j represent the numbers of larvae and juveniles. N.D. represents not detected.

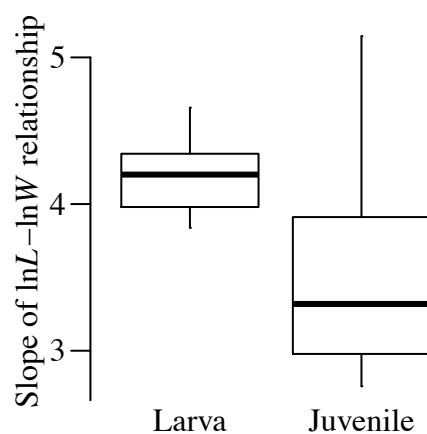


Fig. 2.3-21: Comparison of slope of $L-W$ relationships between larvae and juveniles in Oarai coast. Top and bottom ends of box represent the third and the second quartiles and thick horizontal line in the box represents the median. The end of the upper and the lower hinge represents the first and the fourth quartiles.

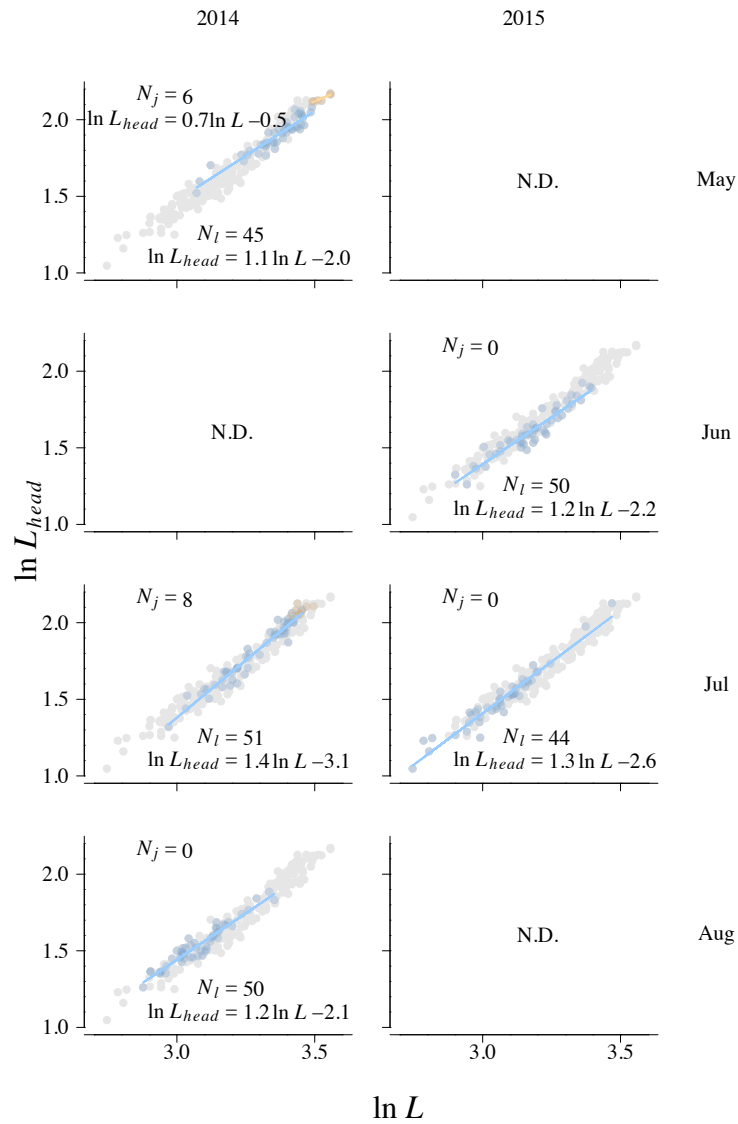


Fig. 2.3-22: Monthly variations in $L-L_{head}$ relationships between larvae (blue) and juveniles (yellow) by sampling years and months in Oarai coast. Data in each month are plotted over the overall data shown by gray plots. N_l and N_j represent the numbers of larvae and juveniles.

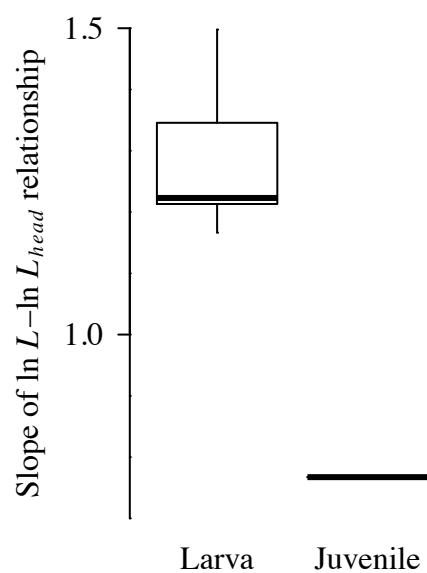


Fig. 2.3-23: Comparison of slope of $L-L_{head}$ relationships between larvae and juveniles in Oarai coast. Top and bottom ends of box represent the third and the second quartiles and thick horizontal line in the box represents the median. The end of the upper and the lower hinge represents the first and the fourth quartiles.

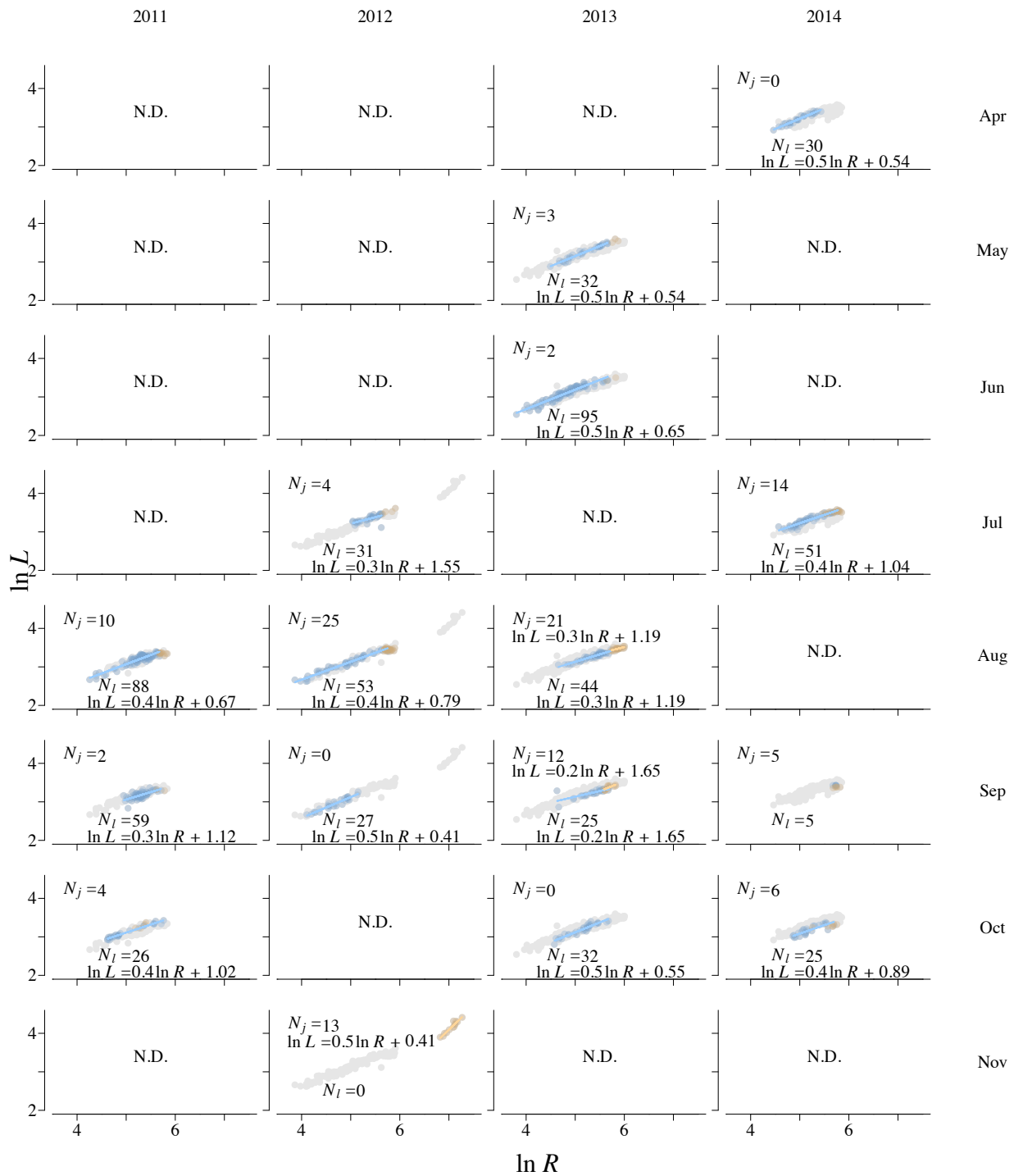


Fig. 2.3-24: Monthly variations in R – L_{head} relationships between larvae (blue) and juveniles (yellow) by sampling years and months in Oarai coast. Data in each month are plotted over the overall data shown by gray plots. N_l and N_j represent the numbers of larvae and juveniles. N.D. represents not detected or no data.

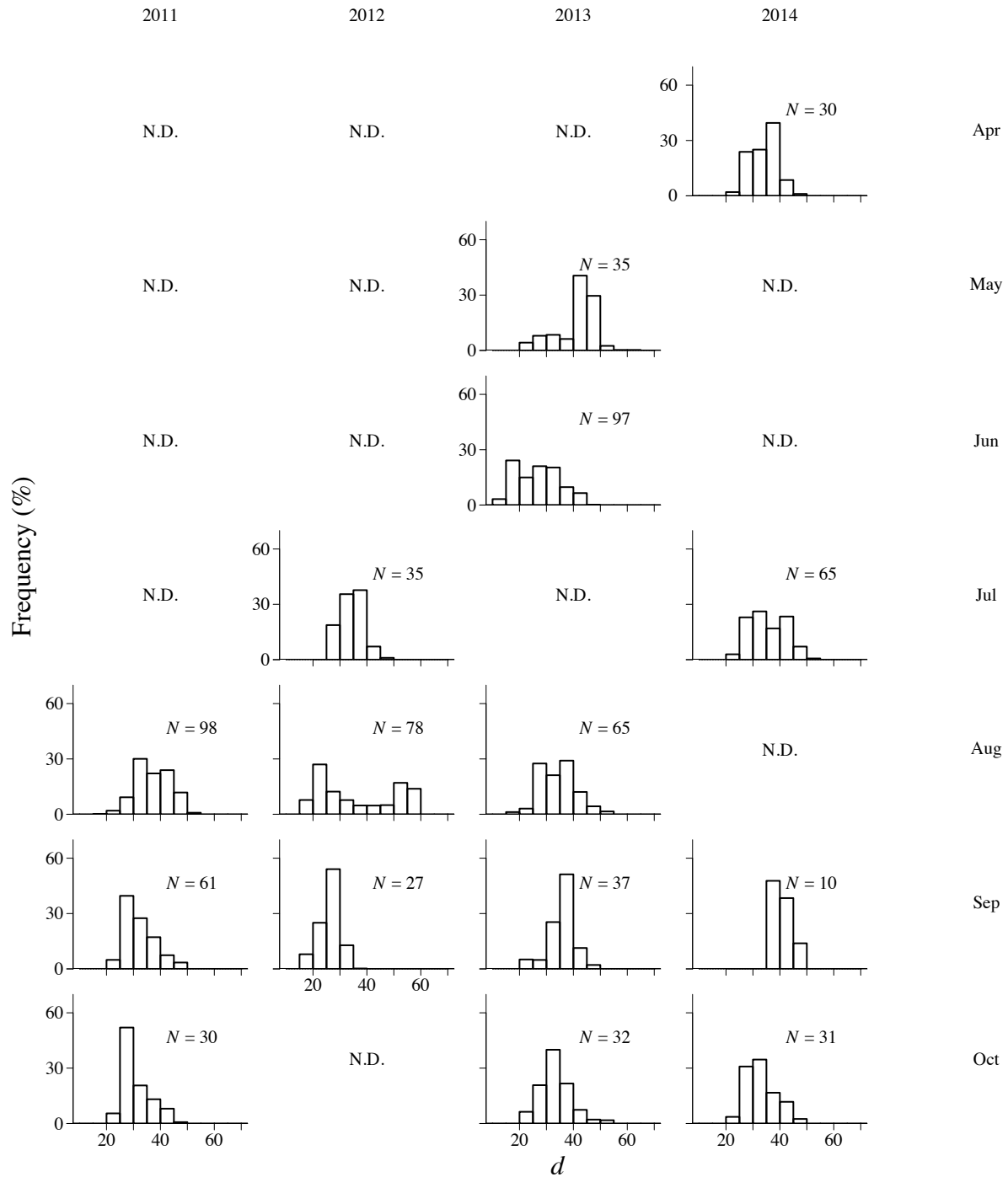


Fig. 2.3-25: Monthly variations in daily-age frequency distribution of anchovy larvae and juveniles in Oarai coast. N.D. represents not detected or no data.

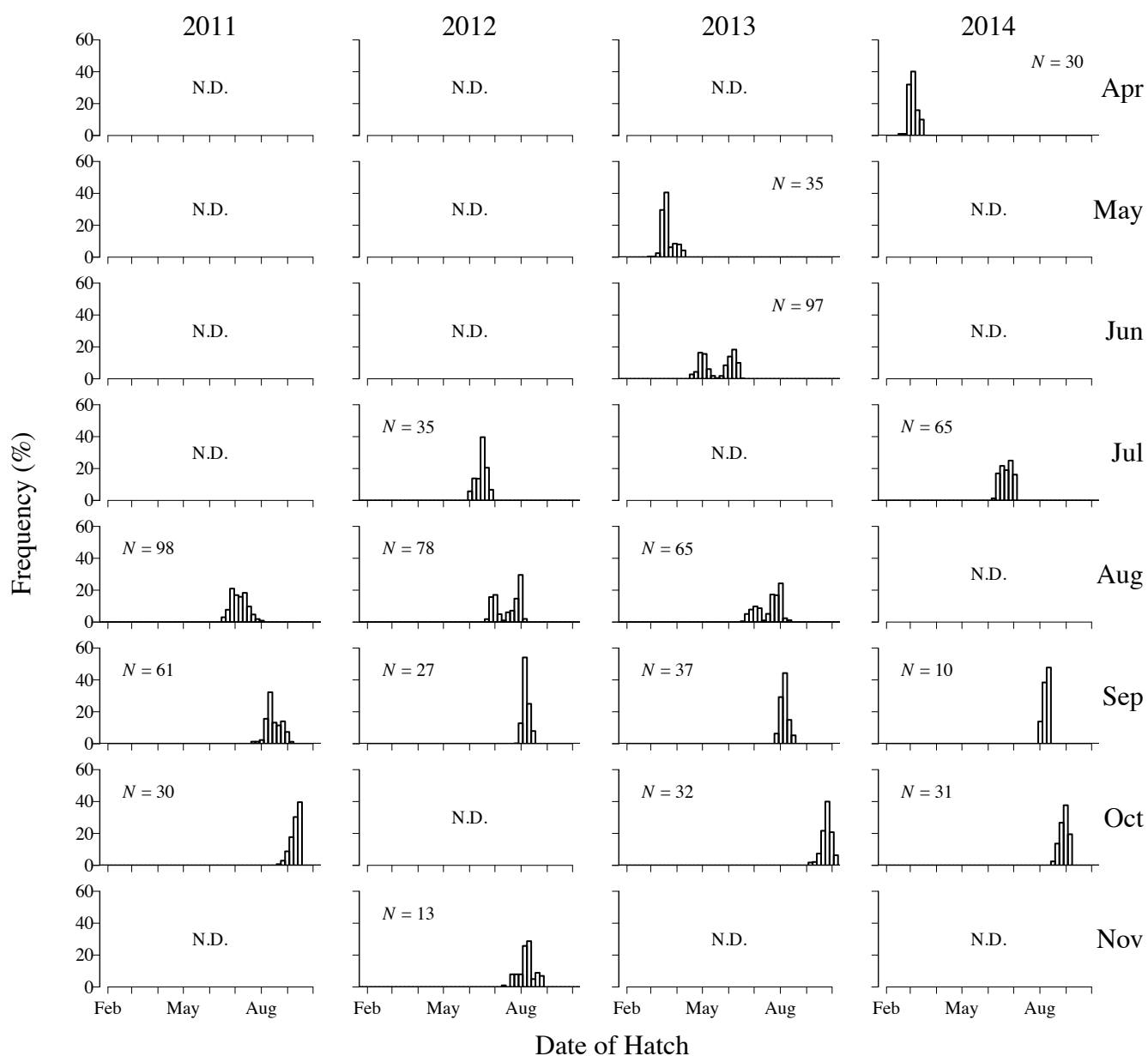


Fig. 2.3-26: Monthly variations in hatch-date frequency distribution of anchovy larvae and juveniles sampling month in Oarai coast. N.D. represents not detected or no data.

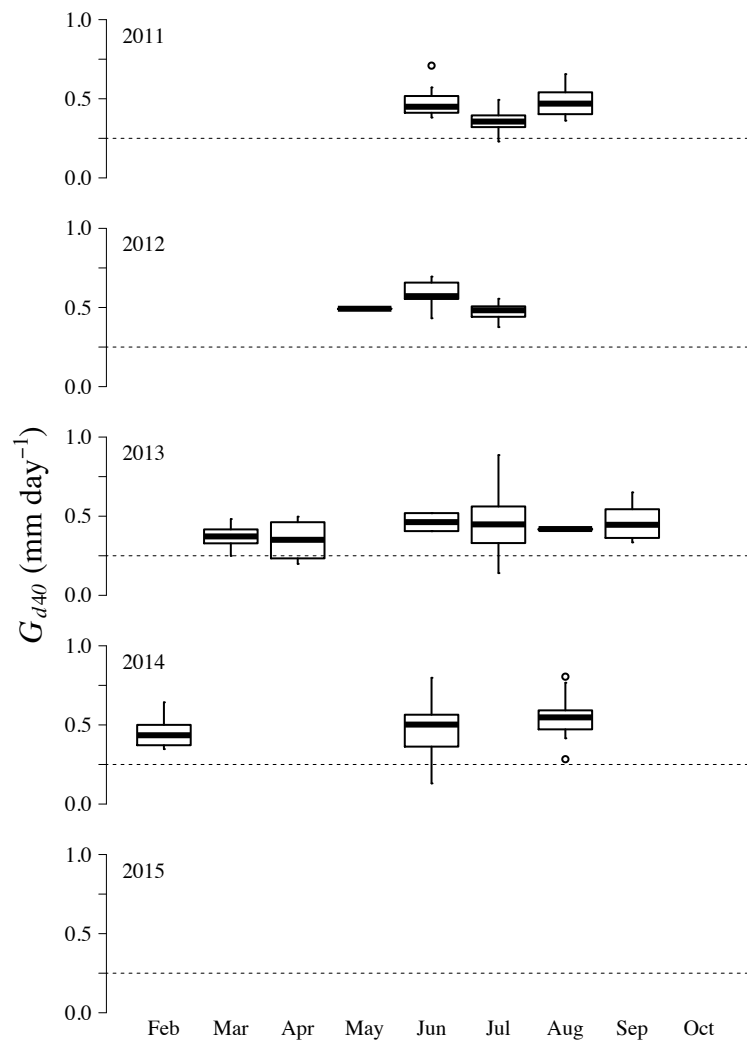
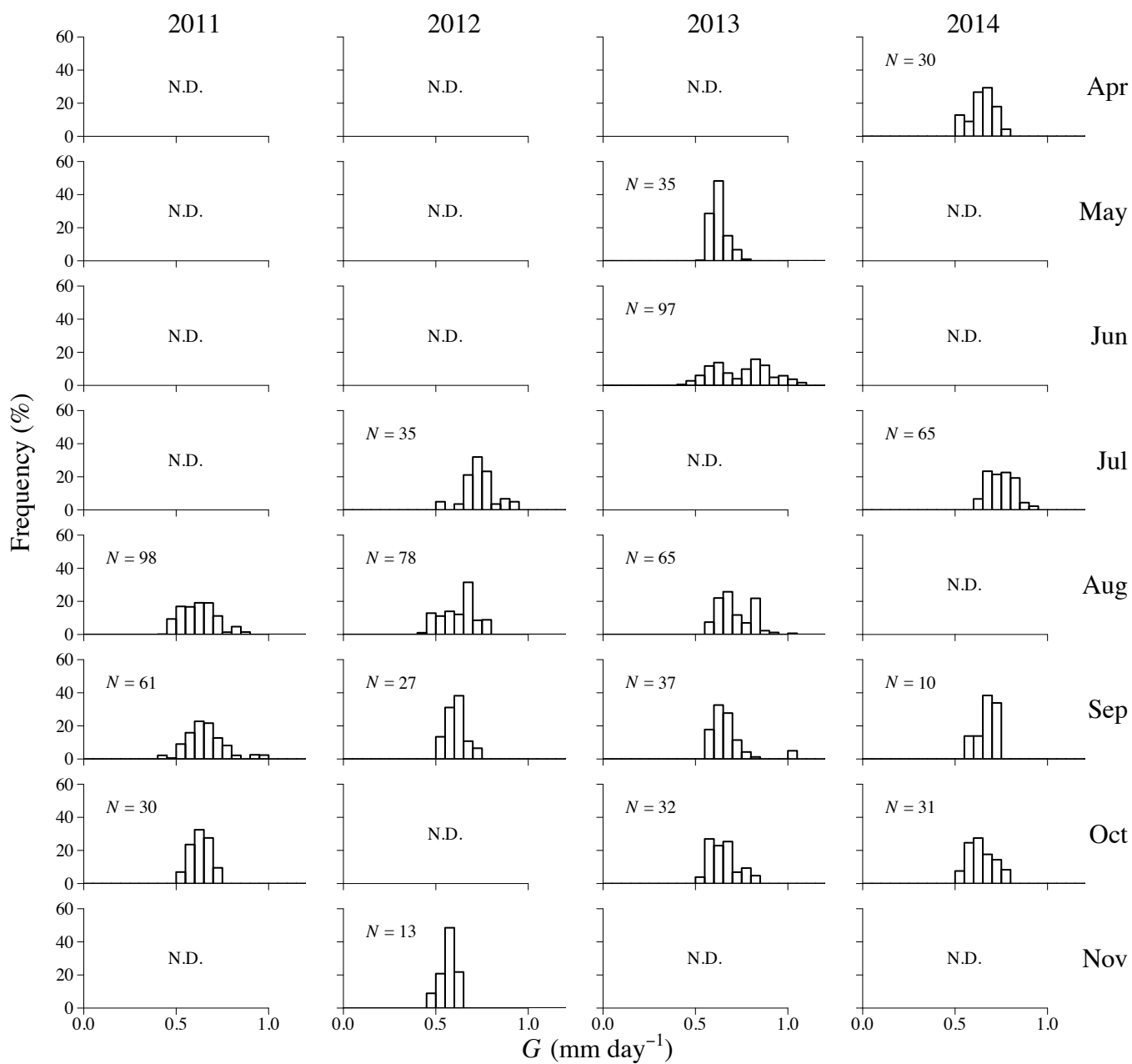


Fig. 2.3-27: G_{d40} of anchovy larvae and juveniles by hatch cohorts in Oarai coast. Top and bottom ends of box represent the third and the second quartiles and thick horizontal line in the box represents the median. The end of the upper and the lower hinge represents the first and the fourth quartiles. Dot represents an outlier. Horizontal dashed line represents the slowest possible growth rate for survival reported by Takahashi and Watanabe (2004b).

Fig. 2.3-28: Monthly variations in G frequency distribution of anchovy larvae in Oarai coast.

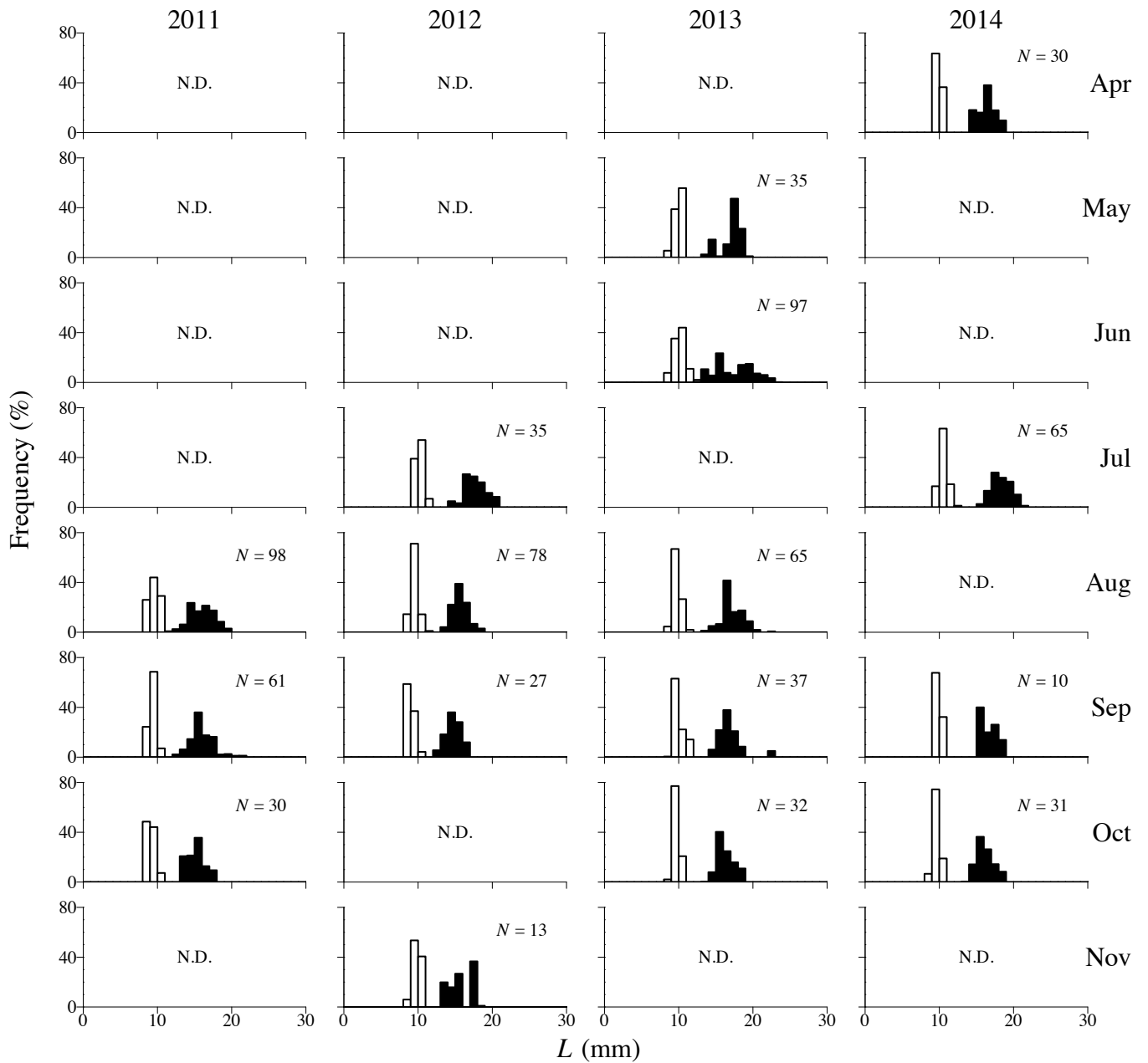


Fig. 2.3-29: Monthly variations in frequency distributions of L_{d10} (open column) and L_{d20} (solid column) of anchovy larvae and juveniles by sampling year and month in Oarai coast.

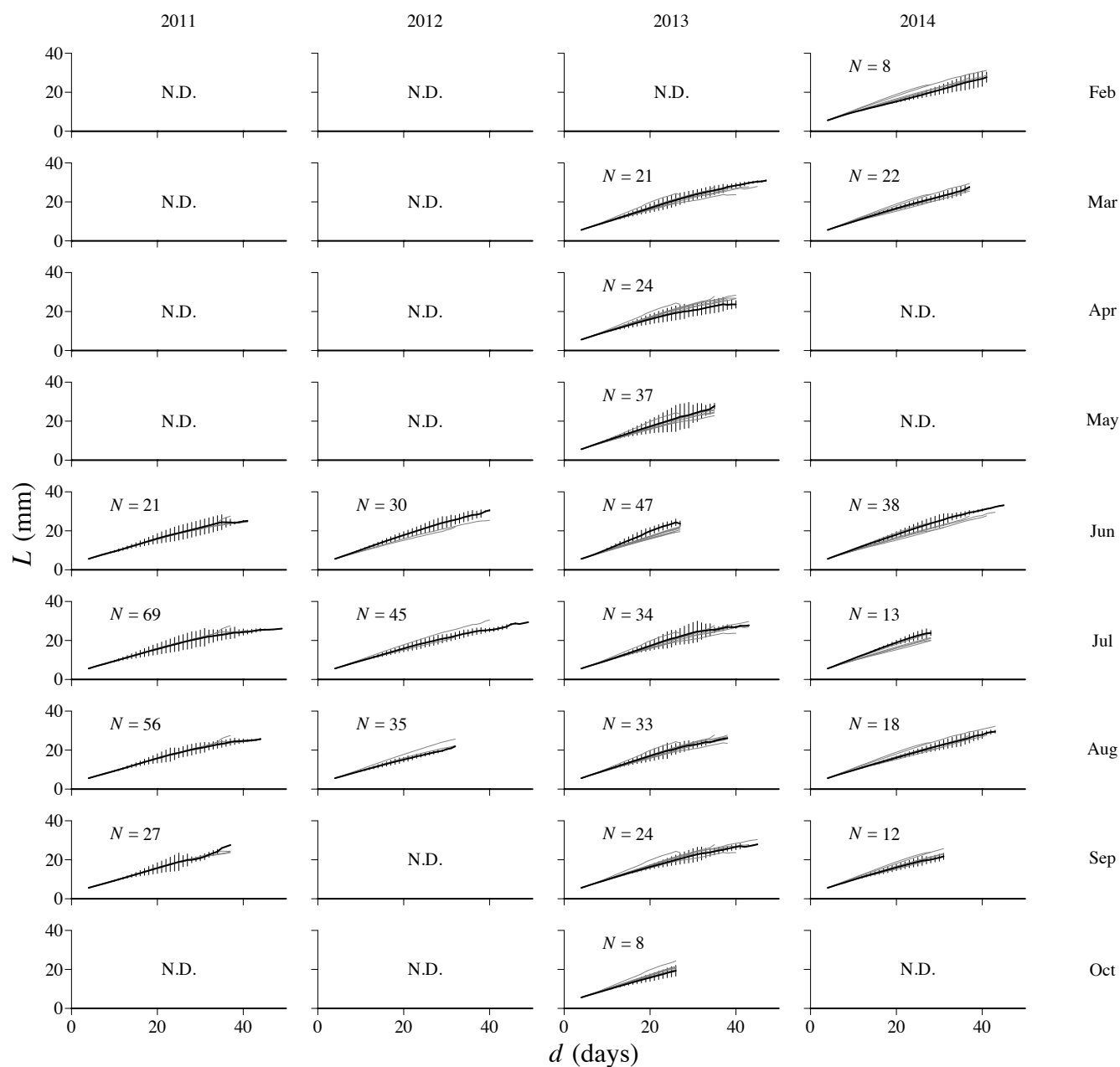


Fig. 2.3-30: Monthly variations in L -growth history of anchovy larvae by hatch month cohorts in Oarai coast. Mean value (*thick line*) and standard deviation (*vertical line*) in each month are plotted over the data in the other months (*thin line*). N.D. represents not detected or no data.

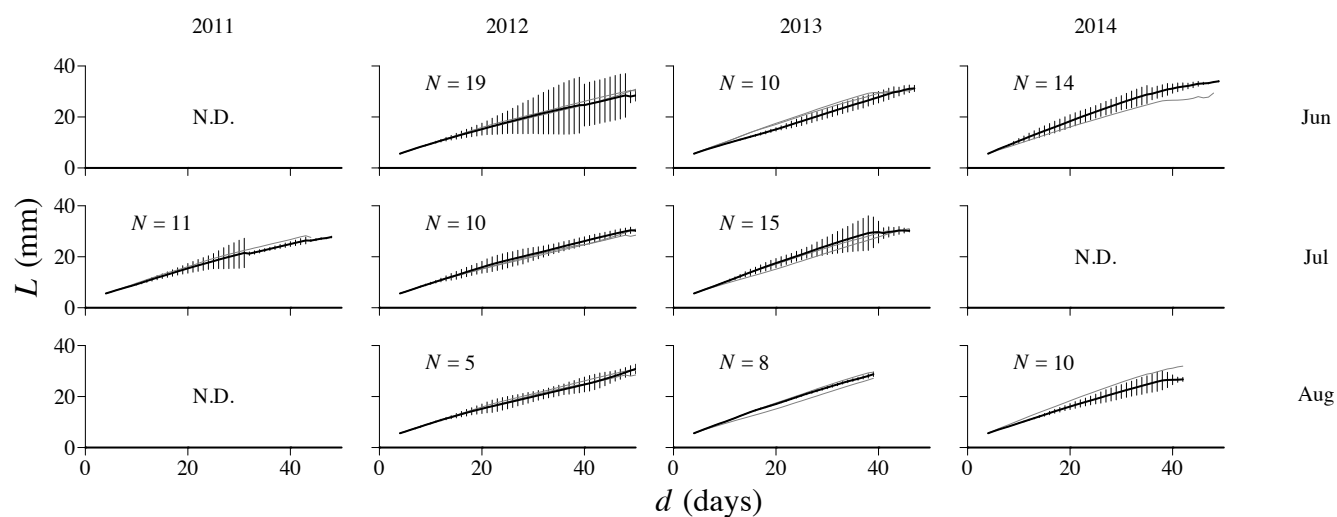


Fig. 2.3-31: Monthly variations in L -growth history of anchovy juveniles by hatch month cohorts in Oarai coast. Mean value (*thick line*) and standard deviation (*vertical line*) in each month are plotted over the data in the other months (*thin line*). N.D. represents not detected or no data.

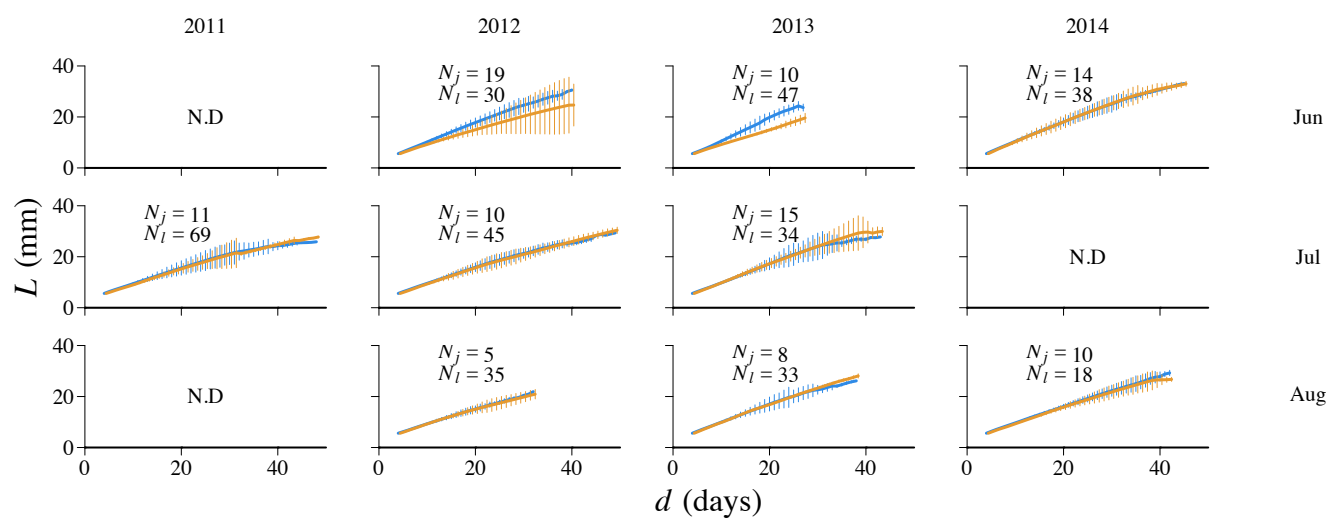


Fig. 2.3-32: Comparison between larval (blue) and juvenile (yellow) L -growth history by hatch month cohorts in Oarai coast. Standard deviation of the data are shown by vertical lines. N.D. represents not detected or no data.

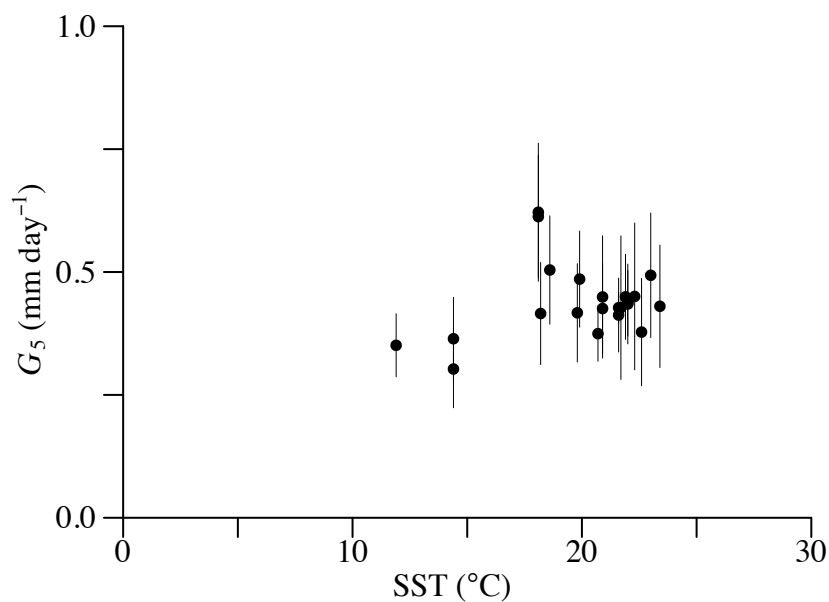


Fig. 2.3-33: Relationships between G_5 of anchovy larvae and juveniles on SST in Oarai coast. Each plot and vertical line represent mean G_5 of anchovy larvae and juveniles and its standard deviation on each sampling day.

2.4 常磐—三陸沖合域

2.4.1 はじめに

1990年代後半から2000年代前半の黒潮親潮移行域で実施された先行研究 (Takahashi and Watanabe, 2004b) は、本海域に分布するカタクチイワシ仔稚魚の日齢を耳石日輪解析によって推定し、これらの仔稚魚がマイワシ *Sardinops melanostictus* での例 (Kasai et al., 1997) と同様に本州の太平洋岸から輸送されうることを指摘した。さらに、ある年に採集された仔稚魚と、その翌年に同一海域で採集された資源加入後の成魚との間における成長速度の比較によって、本海域に分布するカタクチイワシ仔稚魚のうち、成長速度の大きい個体が選択的に生残し、資源へと加入していることが明らかとなっている (Takahashi and Watanabe, 2004b)。このような成長速度依存的な加入過程を考慮した場合に、水温が高く、餌料生物として重要なカイアシ類が高密度に分布する黒潮親潮移行域の南西部が、カタクチイワシ仔稚魚の成長と生残に重要な海域であることがわかった (Takahashi and Watanabe, 2005)。さらに、この黒潮親潮移行域の南西部に形成される低気圧性の中規模渦では、カタクチイワシ卵とともにカイアシ類ノープリウス幼生の高密度分布が報告され (Kimura et al., 2000)、本海域が変態期の仔魚だけでなく孵化後間もない仔魚にとっても好適な成育環境を持つことも明らかとなっている。

1980年代末に、カタクチイワシ太平洋系群の0歳魚の資源尾数の急増が産卵量の増加に先行して起こったことは (Fig. 2.4-1)、本種の資源量変動を考えるうえで成長と生残を調べることの重要性を示している。1990年代後半から2000年代初頭と比較すると、2010年以降におけるカタクチイワシ太平洋系群の加入量は低く、負偏差に転じつつあるように見えるが (Fig. 2.4-1)、黒潮親潮移行域における本種の分布と成長に関する研究は2000年代初頭以降には行われておらず、近年の加入量減少がどのようにして起こっているのかは不明である。カタクチイワシ太平洋系群の資源量は2003年の149万トンピークに減少傾向にあり、2007年(90万トン)以降、資源量は中位水準とされている (上村ら, 2014)。本節では、カタクチイワシ資源量の減少過程における知見という観点から、黒潮親潮移行域におけるカタクチイワシ仔魚の分布と成長を調べた。

2.4.2 材料と方法

仔稚魚の採集と生物測定

初夏の黒潮親潮移行域において、中央水産研究所の調査船蒼鷹丸（892 トン）によりカタクチイワシ仔稚魚を採集した (Figs. 2.4-2, 2.4-3). 調査期間は 2011 年には 5 月 25–29 日（航程-1, Stns 1–10）と 6 月 5–16 日（航程-2, Stns 11–40）, 2012 年には 5 月 24 日–6 月 6 日（航程-1, Stns 1–40）と 6 月 11–18 日（航程-2, Stns 41–60）, 2013 年には 5 月 25 日–6 月 8 日（航程-1, Stns 1–38）と 6 月 13–20 日（航程-2, Stns 39–59）, 2014 年には 5 月 24 日–6 月 7 日（航程-1, Stns 1–43）と 6 月 12–18 日（航程-2, Stns 44–63）, 2015 年には 5 月 23 日–6 月 6 日（航程-1, Stns 1–39）と 6 月 11–18 日（航程-2, Stns 40–62）であった. 荒天の場合を除き、表層トロール網^{*i}を 1 調査昼夜あたり 3 回曳網した. 昼間に曳網する場合には太陽高度が十分に高い間に、夜間に曳網する場合には日没 30 分後～日出 60 分前の間に投網～揚網作業を完了した. 曳網速度は対水 3 ノット, 曳網時間は昼間には 60 分間, 夜間には 30 分間とした. 船上にて、トロール採集物からカタクチ仔稚魚を選別し、-20°C で冷凍して研究室に持ち帰った. 研究室にて、各調査点で採集された仔稚魚の中から 100 個体を上限に無作為に標本を抽出して、第 2.2 節と同様に体長 (L , mm) と体重 (W , mg) を計測し、肥満度 (C) を算出した. 各個体の発達段階を第 2.2 節と同様に記録し、仔魚のみを解析に用いた. 環境履歴の違いが相対成長に反映されることを想定し、2014 年と 2015 年に採集された仔魚について各調査点につき 50 個体を上限に頭長を計測して、体長に対する仔魚の体重と頭長の関係を第 2.2 節と同様に検討した.

海洋観測

トロール曳網の前あるいは後に、CTD^{*ii}によって水深 300 m までの水温を観測した. CTD を海面下まで降下した時点で、バケツ採水によって表面水温 (SST) を測定した. 5 月と 6 月の水深 100 m における黒潮統流の指標水温としてそれぞれ 17.24°C と 17.62°C が報告されているため (村上, 1993), これらの中央値である 17.4°C を黒潮統流の指標として用いた.

^{*i} JP-1, ニチモウ株式会社

^{*ii} SBE 42 or SBE 19plus V2 SeaCAT, Sea Bird Electronics Inc.

カタチイワシ仔稚魚にとっての餌料環境を把握する目的で、動物プランクトンを採集した。目合い $335\ \mu\text{m}^{*i}$ と $100\ \mu\text{m}^{*ii}$ の網地および濾水計を取り付けたノルパックツインネット（各網口内径 $45\ \text{cm}$ ）を海面を $0\ \text{m}$ として線長 $150\ \text{m}$ まで降下し、線速 $1.0\ \text{m s}^{-1}$ で海面まで鉛直に曳網してメソプランクトンを採集した。採集物はただちに 5% フォルマリン海水溶液中で保存し、研究室に持ち帰った。研究室にて、目合い $335\ \mu\text{m}$ の網地によって採集された標本からおよそ $10\ \text{mm}$ 以上のゼラチン質生物^{*iii}、体長およそ $20\ \text{mm}$ 以上の大型生物^{*iv}および卵、仔稚魚を取り除いた。残滓プランクトン標本を目合い $100\ \mu\text{m}$ のナイロンガーゼを一端に張った直径約 $3\ \text{cm}$ の円筒型濾過器へ移し、フォルマリン海水溶液を除去した。標本を濾紙上に移し、竹べら等で塊として水分を吸い取りながら、肉眼で見て水分が濾紙上に染み出さなくなった時点で湿重量を $10\ \text{mg}$ まで計測した。

先行研究 (Takahashi et al., 2009) との比較の都合上、動物プランクトンの湿重量に 0.06 を乗じて乾燥重量に換算し (気象庁, 1981)、網口面積で除することによって、動物プランクトン密度を単位面積あたりの乾燥重量 (mgDW m^{-2}) として算出した。動物プランクトンの分布密度からカタチイワシ仔稚魚の重要な餌生物であるカイアシ類の分布密度を推定する目的で、1996–2002 年の黒潮親潮移行域における動物プランクトンデータ^{*v}を解析した。カイアシ類の分布密度は本研究と同様の手法によって計測された動物プランクトン^{*vi}の分布密度と有意に線形回帰されたため (線形モデル)、本研究の動物プランクトンの分布密度に 0.25 を乗ずることによってカイアシ類の分布密度を推定した。

仔魚の分布解析

各調査点において、採集個体数が少なかった場合には全個体数を計数し、採集個体数が多かった場合には一部を計数して、重量法を用いて 30 分間（夜間）または 60 分間（昼間）の曳網によって採集された個体数を推定した。昼間に採集を行った調査点では採集個体数を 2 で除する

^{*i} NMG52, 離合社

^{*ii} NXX13, 離合社

^{*iii} サルパ類, クラゲ類

^{*iv} オキアミ類, ヤムシ類, 魚類

^{*v} 西海区水産研究所 高橋素光博士提供 採集データ

^{*vi} オキアミ類, カイアシ類, 甲殻類, その他の動物プランクトン

ことによって、全ての調査点において 30 分間の曳網あたりの採集数 (CPUE, $N \text{ haul}^{-1}$) を算出した。仔魚の CPUE と SST および 100 m 水温 (T_{100m}) との関係を調べた。

調査海域の海洋環境を、先行研究 (Takahashi et al., 2009) から得られているカタクチイワシ仔魚の成長に好適な水温 ($\geq 17.3^{\circ}\text{C}$) とカイアシ類の分布密度 ($\geq 56.4 \text{ mgDW m}^{-2}$) に基づいて評価し、仔魚の空間分布との関係を調べた。また各調査年において、水温と餌料条件のどちらか一方、もしくは両方が好適な水域における仔魚の CPUE が総 CPUE に占める割合を算出した。

各調査年における仔魚の体長組成を 3 調査点からなる 1 採集昼夜ごとに集計し、体長組成の空間分布を調べた。総 CPUE に対する 1 採集昼夜の CPUE を乗じた各調査の体長頻度分布を合計し、累積頻度に対する百分率に換算して 1 採集昼夜の体長組成を得た。同様の手順を経て肥満度組成の空間分布を調べ、また仔魚の体長と肥満度それぞれの平均値を調査点ごとに算出し、調査点の緯度・経度との関係を調べた。

日齢、孵化日および成長速度の推定

仔魚の日齢 (d) を第 2.2 節と同様に耳石日輪解析によって決定し、孵化から採集時までの平均体長成長速度 (G , mm day^{-1}) を求めた。解析を行った調査点における G の頻度分布をその調査点における仔魚の体長組成および調査点間の CPUE 比で重み付けし、 G 組成を得た。本節においても仔魚の耳石半径 (R , $\mu\text{m day}^{-1}$) と体長は有意にアロメトリー回帰されたため (Fig. 2.4-4), Biological intercept method (Campana, 1990; Campana and Jones, 1992) によって仔魚の体長を逆算し、採集前 5 日間における採集前成長速度 (G_5 , mm day^{-1}) を求めた。仔魚の G_5 の平均値と調査点の水温および餌料生物密度との関係を調べた。資源加入に必要な体長成長速度の最低値 (0.25 mm day^{-1} , Takahashi and Watanabe, 2004b) と比較する目的で、40 日齢時における体長成長速度 (G_{d40} , mm day^{-1}) を第 2.2 節と同様に求めた。

孵化から採集時までの輸送過程における仔魚の成長速度の変化履歴を調べる目的で、孵化から採集時までの各日における体長の増分 (ΔL , mm day^{-1}) を求めた。調査海域を経度 5 度ごとに西区 ($< 145^{\circ}\text{E}$), 中区-1 ($\geq 145^{\circ}\text{E}$, $< 150^{\circ}\text{E}$), 中区-2 ($\geq 150^{\circ}\text{E}$, $< 155^{\circ}\text{E}$), 東区 ($\geq 155^{\circ}\text{E}$) の 4 海区に分け、仔魚の ΔL と日齢時体長の変化履歴を海区間および調査点間で比較した。

各年の調査海域全域における仔魚の日齢組成と孵化日組成を得る目的で、仔魚の日齢を体長—

日齢関係から推定した。カタクチイワシ仔魚の加齢に伴う体長成長を表すモデルの候補として、Gompertz の成長曲線 (Gompertz, 1825, 式 2.17) または von Bertalanffy の成長曲線 (Bertalanffy, 1957, 式 2.18) を選択した。

$$L_d = L_\infty e^{\ln \frac{L_{hatch}}{L_\infty} e^{-Kd}} \quad (2.17)$$

$$L_d = L_\infty (1 - e^{-Kd}) \quad (2.18)$$

ここで、 L_d は d 日齢時における体長、 L_∞ と L_{hatch} はそれぞれカタクチイワシの極限体長と孵化体長、 K は成長係数である。カタクチイワシの孵化体長と極限体長は本節で扱った仔魚の体長範囲外にあることが自明であるため、孵化体長には 2.7 mm を (Fukuhara, 1992)、極限体長にはカタクチイワシ太平洋系群の資源評価に用いられている 170 mm を (e.g. 上村ら, 2014) それぞれ与え、成長係数を求めた。ただし、von Bertalanffy の成長曲線 (式 2.18) では 0 日齢時における体長が 0 と算出されるため、0 日齢時の体長を孵化体長となるように補正した式 2.19 を用いた。

$$L_d = L_\infty (1 - e^{-Kd}) + L_{hatch} e^{-Kd} \quad (2.19)$$

AIC に基づいたモデル選択の結果、von Bertalanffy の成長曲線 (式 2.19, Fig. 2.4-5) が選択された。式 2.19 を日齢について整理した式 2.20 を用いて仔魚の体長から日齢を推定し (Fig. 2.4-6)、各調査点における CPUE で重み付けすることによって各調査年における仔魚の日齢組成と孵化日組成を得た。

$$d = \ln \frac{L_\infty - L_{hatch}}{L_\infty - L_d} \times 228 \quad (2.20)$$

2.4.3 結果

仔魚の分布

2011 年には、全 40 回の曳網のうち 29 回においてカタクチイワシ仔魚が採集された (Table. 2.4.1)。2012 年には 41 回 (全 60 回) (Table. 2.4.2)、2013 年には 32 回 (全 59 回) (Table. 2.4.3)、2014 年には 44 回 (全 63 回) (Table. 2.4.4)、2015 年には 47 回 (全 62 回) (Table. 2.4.5) の曳網においてカタクチイワシ仔魚が採集された。

カタクチイワシ仔魚が採集された調査点（有漁点）の SST は 10.1–22.8°C の範囲に (Figs. 2.4-7, 2.4-8), T_{100m} は 1.0–19.0°C の範囲に (Figs. 2.4-9, 2.4-10) あった。2011 年と 2012 年には 1 曳網当たり採集尾数 (CPUE) と水温との間に一定の傾向は見られず、CPUE1000 以上の調査点の SST(T_{100m}) 範囲はそれぞれ 10.1–22.8 (1.8–16.8)°C, 11.5–22.4 (3.2–18.4)°C と広がった (Fig. 2.4-11)。2013–2015 年には、仔魚 CPUE が高い調査点は 2011 年と 2012 年に比べて狭い水温範囲に集中し、CPUE1000 以上の調査点の SST(T_{100m}) の範囲はそれぞれ 17.2–22.8 (10.7–17.0)°C, 17.7–22.4 (9.6–18.5)°C, 15.7–20.0 (9.8–15.5)°C であった。仔魚の分布密度加重 SST は 2011 年と 2015 年にはそれぞれ 18.1°C と 18.2°C とやや低く、2012 年と 2014 年にはそれぞれ 19.0°C と 19.4°C で、2013 年に 19.9°C と最も高かった。仔魚の分布密度加重 T_{100m} は 2011 年 (12.8°C) に最も低く、順次 2012 (13.0°C), 2015 年 (13.1°C), 2014 (15.0°C), 2013 (15.4°C) 年の順に高くなった。分布密度加重 T_{100m} はいずれの調査年においても黒潮続流前線の指標水温 17.4°C より低かった。

仔魚の CPUE と水温およびカイアシ類分布密度との関係を Fig. 2.4-12 に示した。また各調査年に採集された仔魚のうち、水温条件、餌料条件、および水温と餌料の両条件が好適な水域に分布した仔魚の割合を求め、Fig. 2.4-13 に示した。2011 年と 2012 年には低水温域 (<17.3°C) においてもカタクチイワシ仔魚が比較的多く採集されたため、好適な水温範囲における CPUE はそれぞれ総 CPUE の 70.6% と 75.9% を占めるに留まった。2013–2015 年には 94% 以上の仔魚が好適な水温範囲 (≥ 17.3) で採集された。好適なカイアシ類分布密度の水域に分布した仔魚の割合は年によって大きく変動し、2011, 2014, 2015 年には 77% 以上と比較的高かったが、2012 年と 2013 年はそれぞれ 19.0%, 13.3% と低かった。水温とカイアシ類分布密度が共に好適な水域に分布した仔魚の割合は 2014 年と 2015 年にはそれぞれ 76.1%, 87.3% と高く、2011 年にも 50.2% と比較的高かったが、2012 年と 2013 年には 10% 未満と低かった。

仔魚の体長と肥満度

仔魚の体長組成を Figs. 2.4-14–2.4-18 に、仔魚の平均体長の空間分布を Fig. 2.4-19 に示した。仔魚の体長は 11.6–40.9 mm の範囲にあった。仔魚の平均体長は概して北の調査点ほど、また東の調査点ほど大きい傾向にあり、南西部の調査点では 20 mm 台、北東部の調査点では 30

mm 台であった (Fig. 2.4-19). 例外的に, 2011 年には調査海域北西部に位置する Stns 11–13 では 30–32 mm 階級に体長モードを持つ大型の仔魚群が, 調査海域東部に位置する Stn 26 では 24–26 mm に体長モードを持つ小型の仔魚群が採集された (Fig. 2.4-14). また 2013 年には調査海域南部に位置する Stns 8–9 と 14 では体長モードが 30 mm を超える大型の仔魚が, 調査海域北部に位置する Stns 31 と 42 では体長モードが 25 mm よりも小さい仔魚群が採集された (Fig. 2.4-16). 2014 年には調査海域南東部に位置する Stns 11 と 12 では 30–32 mm に体長モードを持つ大型の仔魚群が, 調査海域北西部に位置する Stns 33–38 と 43 では 20–24 mm に体長モードを持つ小型の仔魚群が採集された (Fig. 2.4-17).

仔魚の肥満度組成を Figs. 2.4-20–2.4-24 に, 仔魚の平均肥満度の空間分布を Fig. 2.4-25 に示した. 仔魚の肥満度は 0.9–10.7 の範囲にあり, 2014 年を除いて空間的な変化傾向は認められなかった (Fig. 2.4-25). 肥満度の平均値は 2011 年には 5.5–6.0 または 6.5–7.0 の範囲にある調査点が多かったが (Fig. 2.4-20), 2012 年には 5.0–6.5 の範囲にある調査点が多く (Fig. 2.4-21), 2013 年と 2014 年にはそれぞれ 5.0–5.5, 5.5–6.0 の範囲にある調査点が多かった (Figs. 2.4-22, 2.4-23), 2014 年には, 調査海域南部の Stns 1–3 と 10–12 で採集された高肥満度 (モード > 6) の仔魚群と, 調査海域北部に位置する Stns 26, 34, 35, 37, 38, 43 で採集された低肥満度 (モード < 5) の仔魚群によって, 肥満度は南の調査点ほど高い傾向にあった (Fig. 2.4-23).

仔魚の相対成長

仔魚の体長–体重の両対数プロットを Fig. 2.4-26 に示した. L – W 関係はいずれの年においても有意に線形回帰され (線形モデル), 回帰直線の傾きは年によって有意に異なった (ANCOVA, $P < 0.001$) (Fig. 2.4-26). 回帰直線の傾きは 2013 年には 3.5 と他の年よりも有意に小さく (ANCOVA with Holm's correction, $P < 0.01$). 2011 年には 3.9 と 2014 年の 4.0 よりも有意に小さかった (ANCOVA with Holm's correction, $P < 0.05$).

仔魚の体長–頭長関係は 2014 年と 2015 年の両年において有意に線形回帰された (線形モデル) (Fig. 2.4-27). 回帰直線の傾き (ANCOVA, $P > 0.6$) と切片 (ANCOVA, $P > 0.2$) のいずれにおいても, 両年間で有意差は認められなかった.

日齢組成と孵化日組成

体長—日齢関係（式 2.20）から推定した仔魚の日齢は 12.5—59.1 日齢の範囲にあった (Fig. 2.4-28). 仔魚の日齢組成は 2012 年を除き概ね単峰型を示し、日齢のモードは 2011 年には 24—26 日齢, 2013 年には 16—18 日齢, 2014 年には 18—20 日齢, 2015 年には 32—34 日齢にあった. 日齢組成が概ね双峰型を示した 2012 年には、日齢のモードは 14—16 と 24—26 日齢にあった.

日齢から推定された仔魚の孵化日は 3 月下旬から 6 月上旬の範囲にあった (Fig. 2.4-29). 2011 年には仔魚の孵化月組成は概ね単峰型を示し、ピークは 4 月中旬に位置していた. その他の調査年には仔魚の孵化月組成は概ね双峰型を示し、孵化月のピークは 2012 年には 5 月上・中旬と 5 月下旬に、2013 年には 4 月上旬から 5 月上旬と 5 月下旬に、2014 年には 4 月中旬と 5 月上旬に、2015 年には 4 月中旬と 5 月下旬に位置していた.

仔魚の成長

平均体長成長速度 G

仔魚の平均体長成長速度 G は $0.39\text{--}1.06\text{ mm day}^{-1}$ の範囲にあった (Fig. 2.4-30). G のモードは 2011 年には $0.65\text{--}0.70\text{ mm day}^{-1}$, 2012 年には $0.70\text{--}0.75\text{ mm day}^{-1}$, 2013 年には $0.75\text{--}0.80\text{ mm day}^{-1}$ に位置し、 G の平均値はそれぞれの年間で有意に異なった (Steel Dwass, $P < 0.001$).

日間成長量 ΔL の変化履歴と G_{d40}

孵化から採集時までの期間における仔魚の 1 日あたりの体長の増分 ΔL の変化履歴は、海区间のみならず採集調査点間でも大きく異なった (Fig. 2.4-31). 2011 年には、仔魚の ΔL は西区で高い傾向にあった. 西区では、Stn 1 で採集された仔魚の ΔL の変化履歴が Stns 2 と 3 で採集された仔魚とやや異なったものの、仔魚の ΔL は孵化から採集時まで概ね 0.6 mm day^{-1} より高く維持された. 中区-1 で採集された仔魚の ΔL の変化履歴は多様であったが、ほとんどの調査点において採集のおよそ 20 日前には ΔL が 0.6 mm day^{-1} を下回っていた. 中区-2 では南部に位置する Stn 32 を除き、仔魚の ΔL は採集のおよそ 20 日前から 0.6 mm day^{-1} を下回り、東区では採集のおよそ 30 日前から 0.6 mm day^{-1} を下回った.

2012年に西区の南部に位置する Stn 3 で採集された仔魚では、 ΔL が採集のおよそ 20 日前から 0.7 mm day^{-1} を下回った。一方、中区-1 と中区-2 で採集された仔魚では、孵化から採集までの期間において ΔL はほとんど低下せず、概ね 0.6 mm day^{-1} 以上で推移した。東区では、Stns 49–51 で採集された 40 日齢未満の比較的若齢の仔魚では、 ΔL が少なくとも採集の 10 日前まで概ね 0.6 mm day^{-1} 以上で維持されたが、Stns 16 と 17 で採集された高齢の仔魚では、採集の 50 日以上前から ΔL が 0.6 mm day^{-1} を下回った。

2013 年に中区-1 で採集された仔魚の ΔL は調査点間で大きく異なり、北部に位置する Stn 39 で採集された仔魚では採集の 40 日前頃から 0.6 mm day^{-1} 前後で推移した。南部に位置する Stn 58 で採集された仔魚の ΔL は近接する Stn 57 で採集された仔魚よりもやや水準が高かったが、両調査点ともに仔魚の ΔL は採集のおよそ 1 週間前から急激に低下した。同じく中区-1 の南部に位置する Stn 4 で採集された仔魚の ΔL は採集の 10 日前までは Stn 58 で採集された仔魚と近似したが、以後低下した。中区-2 の Stn 45 で採集された仔魚の ΔL は比較的高く、孵化から採集のおよそ 10 日前まで 0.8 mm day^{-1} 以上で推移し、以後採集時まで低下がみられたもののおよそ 0.7 mm day^{-1} 以上を維持した。東区に位置する Stn 25 で採集された仔魚の ΔL は孵化直後にはおよそ 0.9 mm day^{-1} 前後と高かったが、採集のおよそ 20 日前から 0.7 mm day^{-1} を下回った。

仔魚の G_{d40} は $0.17\text{--}0.91 \text{ mm day}^{-1}$ の範囲にあり (Fig. 2.4-32)、先行研究から得られている体長成長速度の加入最低水準 0.25 mm day^{-1} (Takahashi and Watanabe, 2004b) を下回ったのは 2011 年の 2 個体のみであった。2011–13 年における仔魚の G_{d40} の中央値はそれぞれ 0.51 mm day^{-1} ($N = 145$)、 0.49 mm day^{-1} ($N = 57$)、 0.60 mm day^{-1} ($N = 22$) であった。

体長成長履歴

体長成長履歴を Fig. 2.4-33 に示した。20 日齢時 (40 日齢時) における逆算体長の採集点平均値は、2011 年には $17.4\text{--}20.8$ ($28.0\text{--}33.5$) mm, 2012 年には $16.3\text{--}21.4$ ($25.6\text{--}33.6$) mm, 2013 年には $15.3\text{--}23.3$ ($29.2\text{--}34.4$) mm の範囲にあった (Fig. 2.4-33)。仔魚の日齢時体長は日間成長量 ΔL の影響を受け、海区間のみならず採集調査点間でも大きく異なった。日齢時体長の調査点間での大小関係は孵化直後から採集までほとんど変化せず、初期成長が比較的遅かった個体は小型で採集される傾向にあった。

採集前体長成長速度 G_5 と水温およびカイアシ類分布密度との関係

仔魚の採集前体長成長速度 G_5 と表層水温との関係は有意に線形回帰され（線形モデル），決定係数は 0.40 であった (Fig. 2.4-34). 水温 17.3°C，カイアシ類分布密度 56.4 mgDW m⁻² を境界として採集点を分類し，仔魚の G_5 と水温およびカイアシ類分布密度との関係を調べた (Fig. 2.4-35). 水温環境が好適でない (<17.3 °C) 調査点と好適な (≥17.3°C) 調査点のどちらにおいても， G_5 の平均値とカイアシ類分布密度との間に有意な関係は見られなかった (Fig. 2.4-35 左上，左下). カイアシ類分布密度が低い (<56.4 mgDW m⁻²) 調査点と高い (≥56.4 mgDW m⁻²) 調査点のどちらにおいても， G_5 の平均値は水温と有意に正相関し（線形モデル），決定係数はそれぞれ 0.37 と 0.23 であった (Fig. 2.4-35 右上，右下).

2.4.4 考察

仔魚の由来と輸送

黒潮親潮移行域に分布する仔魚は，主に黒潮系暖水域から常磐南部海域で発生した群であると考えられる．本節で扱った仔魚の孵化日は主に 4 月と 5 月に集中しており，この時期の日本の太平洋岸における産卵は日向灘から房総沖合域にかけての黒潮系暖水域と常磐南部沖合域にみられる (高須賀, 2012). 多くの先行研究によって，これらの産卵場から本節の調査海域である黒潮親潮移行域への仔魚の供給を示唆する結果が示されている．1990 年代後半から 2000 年代初頭に本研究と同一の海域で実施された先行研究は，採集された仔稚魚の日齢と黒潮流軸の流速とを対照し，これらの仔稚魚が日本の太平洋岸の産卵場から来遊した群であることを指摘した (Takahashi et al., 2001). 粒子追跡実験の結果では，カタクチイワシ仔魚は遠州灘の産卵場からおおよそ 20 日間で，屋久島や種子島周辺の産卵場から 1 ヶ月間以内に房総沖合海域へ輸送されることが報告されている (Itoh et al., 2011). また，粒子追跡実験から仔魚の経験水温と生残率を推定すると，移行域に分布する仔魚の供給源は熊野灘から房総沖合域にかけての黒潮系暖水域である可能性が高いとされている (Itoh and Kimura, 2007). さらに，犬吠埼沖を流れる黒潮続流の東向き成分が強くなると，常磐沿岸水の引き込みが起こるため (久保, 1988)，常磐沖発生群が黒潮親潮移行域に来遊することも考えられる．これらの先行研究は共通して，本研究海域へ

の仔魚の供給過程として黒潮続流の重要性を示している。本節でみられた仔魚の平均体長の北東方向への増加傾向は (Fig. 2.4-19), 黒潮続流による輸送と, 暖水ストリーマによる輸送や拡散 (Aoki and Miyashita, 2000; Heath et al., 1998; Itoh and Kimura, 2007; 久保田, 2003) の結果と考えられる。また本研究において, 仔魚の分布密度加重 T_{100m} が黒潮続流の指標水温よりも低水温側に位置していたことは (Fig. 2.4-11), 黒潮続流によって輸送された仔魚が, 続流北側のやや低温の水域に集積していたことを意味する。移流と拡散のみによって受動的に輸送される粒子では, エクマン輸送により黒潮続流の南側への輸送が起こると考えられているが, 本研究の結果は, 本海域へのカタクチイワシ仔魚の輸送過程における仔魚の能動的遊泳を示唆する。マイワシ *Sardinops melanostictus* 仔稚魚を想定した粒子追跡実験では, 粒子に好適な水温と餌料生物密度への走性をもたせることによって, 黒潮域の産卵場から移行域への輸送と親潮域への北上回遊がよく再現されたことが報告されている (Okunishi et al., 2012)。カタクチイワシ仔魚も, 受動輸送の過程で好適な水温や餌料環境を指向した遊泳を行っているかもしれない。

黒潮親潮移行域で採集されるカタクチイワシ仔稚魚が黒潮系暖水域からの移入群であることが想定される一方で, 本調査海域内でもカタクチイワシ卵が採集されている (高須賀, 2012)。実際に卵の採集はされていないものの, 1991 年の 5 月と 6 月には北緯 37–40 度, 東経 146–171 度の計 4 調査点において (靄田・高橋, 1997), 1996–1998 年の同時期には北緯 34 度 40 分–38 度 50 分, 東経 139 度 16 分–161 度 00 分の計 8 調査点において (Funamoto and Aoki, 2002), 成熟した親魚が採集されている。本研究でも, 20 日齢未満と比較的若齢の仔魚が採集されており (Fig. 2.4-28), 調査海域内発生群の存在が示唆される。本海域は, カタクチイワシ太平洋系群の重要な成育場であると同時に再生産の場になっていると考えられる。

成育環境と仔魚の分布

SST は概ね調査海域の南部で高く, 北部で低い傾向があったが, 等温線の分布は年によって大きく異なった (Figs. 2.4-7, 2.4-8)。100 m 水温に着目すると, 仔魚の供給過程として重要な黒潮系暖水 ($\geq 17.4^{\circ}\text{C}$) の分布を見ることができる。2011 年と 2013 年には黒潮続流の一部とみられる暖水が中区-2 や中区-1 の南部で観測された (Fig. 2.4-9)。2011 年の水塊構造は他の年と比べて比較的単純で, 中区-1 で観測された親潮系の冷水塊 ($< 5^{\circ}\text{C}$) を除き等温線はほぼ緯度線に

並行に描かれた。2013 年の水塊構造も比較的単純で、等温線の間隔が広く、目立った渦は観測されなかった。一方 2012・2014・2015 年の水塊構造は複雑で、中区-1 以東に黒潮系の暖水塊 ($\geq 14^{\circ}\text{C}$) が複数観測され、その空間分布は年によって異なっていた (Figs. 2.4-9, 2.4-10)。本節で採集された仔魚は、このように変動的な輸送過程によって本海域に来遊したことになる。

仔魚の分布水温から判断すると、2011–2015 年の成育環境は好適と考えられた。各調査年における全曳網点の仔魚分布密度と SST から算出した加重平均 SST は $18.1\text{--}19.9^{\circ}\text{C}$ の範囲にあった (Fig. 2.4-11)。本節と同一の海域で 1996 年と 1997 年に実施された先行研究では、経度 5 度の海区ごとに算出した加重平均 SST の最高値として 19.7°C と 17.8°C が報告されている (Takahashi et al., 2001)。算出方法の違いを考慮すれば、本研究を実施した 2011–15 年におけるカタクチイワシ仔魚の分布水温は、本種の加入量が高水準であった 1996 年と 1997 年と比較して高いと考えられ、カタクチイワシ仔魚の成長は少なくとも $14\text{--}25^{\circ}\text{C}$ の範囲において水温と正相関したことが黒潮系暖水域の沿岸域において報告されていることから (Yasue and Takasuka, 2009; Watanabe et al., 2014)、近年の水温環境は 1990 年代後半に比べて本種仔魚の成長に好適と判断される。調査海域に分布した仔魚のうち、2011 年と 2012 年には 70% 以上、2013–2015 年には 90% 以上と大部分が好適な水温帯に分布していた (Fig. 2.4-13)。

カタクチイワシ仔魚の餌料環境への依存度は、マイワシ仔魚ほど高くはないもののウルメイワシ *Etrumeus teres* 仔魚よりも高いと考えられ、体長成長速度は水温のみからは十分に説明できないことがわかっている (Watanabe et al., 2014; Yasue et al., 2011)。2012 年と 2013 年の好適水温帯における CPUE% は 2011 年よりも高かったが、これらの年には好適餌料環境域における CPUE% が 20% 未満と著しく低く (Fig. 2.4-13)、結果的に水温と餌料条件が共に好適な水域における CPUE% は 2011 年を大きく下回った。カタクチイワシ仔魚の高成長のためには、成育環境の水温と餌料環境が同時に好適条件を満たす必要があるが、2011–2015 年において、好適水温域と好適餌料環境域がよく重複したのは 2014 年と 2015 年のみであった。両年における加入量データは未だ整備されていないが、2011–2015 年における仔魚の分布と加入量との関係は今後検討する必要がある。

成育環境と仔魚の成長

仔魚の体長成長速度が加入に必要な下限値を上回ったものの (Fig. 2.4-32), 2011–2015 年の黒潮親潮移行域における餌料環境は, 1996–2002 年と比べて劣化していたと考えられる. 2011–2015 年におけるカイアシ類分布密度の最大値は 367 mgDW m^{-2} で, 好適水温域における最大値はさらに低く, 253 mgDW m^{-2} であった (Fig. 2.4-12). 一方, 1996–2002 年のカイアシ類分布密度には 400 mgDW m^{-2} を超える値もみられ, 最大で 1000 mgDW m^{-2} が報告されている (Takahashi et al., 2009), 本研究の好適水温域 ($\geq 17^\circ\text{C}$) において, 仔魚の G_5 とカイアシ類分布密度との間に正相関が見られなかったことの一因として, 400 mgDW m^{-2} を超えるカイアシ類の分布密度が見られず, 結果的に説明変数の範囲が先行研究と比べて狭くなったことが考えられる.

餌料環境の劣化の影響を除外する目的で, 餌料環境が好適な水域 ($>56.4 \text{ mgDW m}^{-2}$) のみに着目しても, 本研究で採集した仔魚の成長は 1997–1999 年に同一海域で採集された仔稚魚よりも劣っていたことがわかった. 水温が重複する範囲 ($15^\circ\text{C} \leq \text{SST} \leq 19^\circ\text{C}$) において, 本研究で得られた G_5 は先行研究 (Takahashi and Watanabe, 2005) から報告されている値よりも小さく, また SST– G_5 関係の回帰直線の傾きも先行研究と比較して小さかった (Fig. 2.4-34). Takahashi and Watanabe (2005) では腹腔内や体表にグアニン沈着が見られ始めた稚魚 (Takahashi and Watanabe, 2004c) も解析対象としており, 本海域における本種の成長速度依存的な加入を考えれば (Takahashi and Watanabe, 2004b), 仔魚のみを解析対象とした本研究では各年の成長速度を過小評価している可能性がある. 近年の資源量減少過程におけるカタクチイワシ仔魚の成長動態を客観的に評価するため, 過去の資源量増加過程における成長速度との比較を, 発達段階を揃えて行う必要がある.

仔魚の相対成長

仔魚の平均体長には北東方向へ向かって増加傾向が見られた (Fig. 2.4-19). これとは異なつて, 平均肥満度には 2014 年を除いて空間的な変動傾向は見られなかった. これは, 成育環境が好適でなくとも体長成長は僅かながら持続するが, 体重成長は直ちに停滞することの現れと

考えられる。黒潮系暖水域の相模湾では、冬季から春季にかけて「大シラス」とよばれる体長 35 mm を超える大型のカタクチイワシ仔魚が採集されることが知られており (辻, 1983; 深道, 2010), 茨城県沿岸域でも同様に「ゴロゴロボウズ」とよばれる大型の仔魚が 4–7 月と 12–1 月に出現することが知られている (堀, 1971)。相模湾における周年観察から、カタクチイワシ仔魚は好適な成育環境下では発達に伴って肥満度を増加させ、肥満度が 7.3 に達すると稚魚へと変態すると考えられている (深道, 2010)。この考えに基づき、成育環境の劣悪な冬季の相模湾に出現する大型の仔魚は、少ない摂取エネルギーを体長増加へ振り分け続けるために肥満度が変態に必要な 7.3 に達せず、稚魚への変態が進行しないことによって出現すると考えられている (深道, 2010)。

本節では仔魚の平均肥満度と採集点の水温およびカイアシ類分布密度との間には相関はみられなかったが、これは経験した成育環境が累積的に肥満度に反映されるため、短期的な成育環境によっては説明できないことを示している。調査海域内に不規則に分布する高肥満度の仔魚群は、輸送過程の比較的長い期間において好適な成育環境を経験した群と考えられるが、ある年級の加入量水準を高肥満度の仔魚の割合の大小によって単純に予測することはできない。

魚類の加入量変動の要因として、生活史初期における累積的死亡の重要性が広く認識されるようになった (Watanabe et al., 1995)。累積的な死亡率の低減には、死亡率の高い仔魚期を速やかに通過することが重要である (Houde, 1987)。カタクチイワシの変態がある肥満度に達することによって始まると考えるならば、その肥満度の高低と、肥満度の増加速度が仔魚期の継続期間を決定する要因として重要である。体長—体重関係のみならず、仔魚の分布密度を反映させた日齢組成に年間差異がみられたことから (Fig. 2.4-28)、変態開始を制御する一律の基準、即ち変態開始の閾値に着目し、仔魚期の存続期間を年間比較する必要性は明らかである。なお、推定日齢の残差プロットは体長 35 mm 以上でやや正偏したため (Fig. 2.4-6 下)、大型個体の推定日齢は過小評価されていると考えられるが、この体長域における残差の正偏は、成長速度の高い個体が稚魚へと変態し、本解析の対象外となっていることを意味しているかもしれない。

本海域では、仔魚の体長—体重関係のみならず耳石半径—体長関係の傾きも年によって異なった (2013 > 2011: ANCOVA with Holm's correction, $P < 0.01$; 2013 > 2012: ANCOVA with Holm's

correction, $P < 0.05$) (Figs. 2.4-4, 2.4-26). 一方、体長–頭長関係の線形回帰式では傾きと切片のいずれにも年間差異は見られなかった (Fig. 2.4-27). 宮城県沿岸域では、沖合回遊群と地付き群とを分けるクラスター分析の観測値の1つとして体長–頭長関係が有用であることが報告されており (永島, 2007), この頭長比が個体の発生海域を特定する手がかりとなりうることがわかる. 本節の結果は、本海域に分布する仔魚の体長に対する体重や耳石半径の相対成長は輸送過程における成育環境の年変動を反映して変化するが、頭長比は仔魚の発生海域が基本的に黒潮系暖水域に限定されているため一定であることを意味しているのかもしれない. 日本の太平洋岸の沖合海域で採集されるカタクチイワシの頭長比が瀬戸内海などの暖流域と比べて小さいことは経験的に知られているものの、実際に海域間で比較検討した例はない. 本種の資源構造を明らかにする観点から、仔魚の頭長比の海域間比較を行う必要がある.

本節によって、常磐～三陸沖合の黒潮親潮移行域に分布するカタクチイワシ仔魚は主に黒潮系暖水域や常磐南部沖合海域の範囲で発生した群と考えられ、これらの仔魚の平均体長からは、黒潮続流や暖水ストリーマによる移流および拡散の複合的な輸送過程によって北東方向へ輸送されている様子が観察された. 資源量増加過程にあった1996年および1997年という高加入年と比較すると、資源量減少過程にある本研究の調査年にはカタクチイワシ仔魚は高い割合で好適水温域に分布したが、経験した餌料環境は全体的に劣っていたと考えられた. 40日齢時における体長成長速度が加入基準値を満たしたことから、本研究で採集された仔魚の資源加入が想定されたものの、本節で扱った仔魚の分布水温範囲における体長成長速度は、1996年と1997年に同一の水温帯で採集された仔稚魚よりも低かった. 近年の資源量減少過程における成長動態を正確に把握するために、発達段階の影響を除外した解析を行う必要があることがわかった.

Table 2.4.1: Sampling results of anchovy larvae off the Pacific coast of northern Japan by R/V *Soyo-maru* during May–June in 2011.

Leg-1								Leg-2							
Stn	Date and time (JST)	Latitude (N)	Longitude (E)	Area	T0 (°C)	T100 (°C)	CPUE	Stn.	Date and time (JST)	Latitude (N)	Longitude (E)	Area	T0 (°C)	T100 (°C)	CPUE
1	25 May 19:10	37° 03.7′	144° 02.8′	West	19.4	14.7	31734	11	5 Jun 20:16	38° 58.1′	144° 00.0′	West	13.2	10.2	480
2	25 May 23:17	37° 24.9′	144° 10.4′	West	19.3	14.8	45267	12	5 Jun 23:23	38° 56.2′	144° 12.5′	West	13.0	9.3	388
3	26 May 02:22	37° 37.4′	144° 18.9′	West	19.2	15.3	28251	13	6 Jun 02:17	38° 53.5′	144° 31.0′	West	11.6	9.4	659
4	26 May 19:48	37° 02.4′	147° 24.2′	Mid-1	16.8	10.7	0	14	6 Jun 19:47	38° 58.3′	147° 01.6′	Mid-1	13.6	10.1	14419
5	26 May 23:00	36° 56.3′	147° 32.1′	Mid-1	17.5	10.8	0	15	6 Jun 22:06	38° 54.6′	147° 24.5′	Mid-1	13.2	10.2	9444
6	27 May 19:36	36° 42.3′	150° 29.8′	Mid-2	20.9	19.4	0	16	7 Jun 02:08	38° 50.2′	147° 48.3′	Mid-1	13.0	10.4	825
7	28 May 01:58	37° 00.7′	150° 28.9′	Mid-2	20.6	18.6	0	17	7 Jun 19:33	39° 10.1′	150° 43.6′	Mid-2	10.4	1.8	2345
8	28 May 19:58	37° 45.9′	149° 32.0′	Mid-1	18.3	11.9	14794	18	7 Jun 22:52	39° 26.1′	150° 49.6′	Mid-2	10.1	2.2	2235
9	28 May 23:03	38° 00.1′	149° 29.7′	Mid-1	16.1	9.2	0	19	8 Jun 01:50	39° 41.0′	150° 44.3′	Mid-2	11.4	2.5	3702
10	29 May 02:08	38° 22.1′	149° 29.7′	Mid-1	12.7	8.2	0	20	8 Jun 19:09	39° 24.4′	153° 33.1′	Mid-2	15.6	12.4	0
								21	8 Jun 22:32	39° 36.6′	153° 40.8′	Mid-2	14.9	9.1	19
								22	9 Jun 01:28	39° 49.3′	153° 46.8′	Mid-2	14.9	9.5	956
								23	9 Jun 19:05	38° 52.7′	156° 48.0′	East	15.5	12.1	1561
								24	9 Jun 22:33	38° 38.6′	157° 05.2′	East	15.6	13.5	82
								25	10 Jun 18:56	38° 18.5′	159° 30.8′	East	16.1	14.0	0
								26	10 Jun 22:16	38° 04.0′	159° 21.2′	East	16.1	13.6	447
								27	11 Jun 01:13	37° 51.4′	159° 08.3′	East	17.3	13.4	592
								28	11 Jun 19:15	37° 11.9′	156° 30.2′	East	17.5	14.0	0
								29	11 Jun 22:30	37° 07.4′	156° 14.0′	East	17.4	13.3	1
								30	12 Jun 21:49	36° 43.6′	153° 29.8′	Mid-2	20.7	18.7	0
								31	13 Jun 00:58	36° 56.5′	153° 27.5′	Mid-2	20.4	16.8	1013
								32	13 Jun 19:37	37° 31.3′	151° 19.0′	Mid-2	18.9	13.7	221
								33	14 Jun 19:46	38° 01.0′	148° 59.8′	Mid-1	16.3	9.9	2178
								34	14 Jun 23:02	38° 16.5′	148° 47.2′	Mid-1	16.0	7.7	1169
								35	15 Jun 01:49	38° 31.6′	148° 35.7′	Mid-1	14.2	10.3	933
								36	15 Jun 20:02	38° 27.0′	145° 52.6′	Mid-1	18.8	10.7	0
								37	15 Jun 23:18	38° 09.7′	145° 44.0′	Mid-1	16.4	10.1	17386
								38	16 Jun 01:57	37° 50.7′	145° 47.3′	Mid-1	17.1	4.2	6767
								39	16 Jun 20:08	36° 33.9′	143° 31.7′	West	20.7	14.0	22013
								40	16 Jun 23:09	36° 19.2′	143° 38.9′	West	20.5	15.3	16810

Table 2.4.2: Sampling results of anchovy larvae off the Pacific coast of northern Japan by R/V *Soyo-maru* during May–June in 2012.

Leg-1								Leg-2							
Stn	Date and time (JST)	Latitude (N)	Longitude (E)	Area	T0 (°C)	T100 (°C)	CPUE	Stn.	Date and time (JST)	Latitude (N)	Longitude (E)	Area	T0 (°C)	T100 (°C)	CPUE
1	24 May 20:18	36° 15.1′	143° 32.5′	West	22.3	18.4	0	41	11 Jun 20:28	39° 58.0′	145° 32.6′	Mid-1	11.1	3.6	0
2	24 May 23:33	36° 24.2′	143° 41.6′	West	16.9	12.8	0	42	12 Jun 01:35	39° 58.1′	146° 14.3′	Mid-1	12.2	2.3	0
3	25 May 02:12	36° 33.8′	143° 50.4′	West	18.1	10.3	36	43	12 Jun 19:51	39° 58.9′	149° 38.4′	Mid-1	13.2	4.8	0
4	25 May 19:57	36° 28.1′	146° 32.6′	Mid-1	18.5	11.9	14184	44	12 Jun 22:51	39° 45.9′	149° 37.3′	Mid-1	14.5	9.2	0
5	25 May 23:15	36° 14.2′	146° 59.0′	Mid-1	17.6	10.6	2806	45	13 Jun 01:36	39° 34.4′	149° 34.3′	Mid-1	15.2	11.5	0
6	26 May 02:08	36° 02.8′	147° 10.4′	Mid-1	17.3	9.3	43	46	13 Jun 19:25	39° 52.9′	152° 55.2′	Mid-2	14.6	11.3	0
7	26 May 19:17	36° 02.9′	150° 23.6′	Mid-2	20.1	18.5	100	47	13 Jun 22:03	39° 56.3′	153° 10.5′	Mid-2	13.5	10.8	0
8	26 May 22:59	35° 53.9′	150° 55.7′	Mid-2	16.6	11.7	802	48	14 Jun 01:19	39° 56.4′	153° 28.7′	Mid-2	14.5	10.8	0
9	27 May 01:56	35° 49.8′	151° 22.6′	Mid-2	17.1	11.2	0	49	14 Jun 19:06	38° 18.9′	156° 25.2′	East	13.0	10.7	121
10	27 May 18:54	36° 00.1′	154° 31.8′	Mid-2	15.9	9.7	0	50	14 Jun 21:48	38° 03.7′	156° 13.8′	East	12.3	7.5	18108
11	27 May 22:35	36° 01.2′	155° 59.5′	East	16.5	10.3	8106	51	15 Jun 01:15	37° 46.7′	156° 03.9′	East	13.6	9.9	4
12	28 May 01:28	36° 05.1′	155° 23.8′	East	19.4	14.7	10576	52	15 Jun 19:32	37° 30.3′	152° 07.2′	Mid-2	17.2	13.4	23
13	28 May 19:10	38° 31.4′	155° 03.5′	East	17.7	17.2	8298	53	15 Jun 22:06	37° 30.1′	151° 44.6′	Mid-2	20.1	13.6	21577
14	28 May 22:25	38° 48.4′	155° 11.2′	East	17.7	12.5	1193	54	16 Jun 01:30	37° 30.8′	151° 18.8′	Mid-2	19.4	10.2	39204
15	29 May 01:23	39° 04.4′	155° 04.4′	East	16.2	11.6	1653	55	16 Jun 19:34	37° 58.9′	148° 30.4′	Mid-1	16.7	9.4	5639
16	29 May 18:52	38° 59.1′	157° 58.0′	East	14.2	11.8	1021	56	16 Jun 22:31	36° 41.7′	148° 33.0′	Mid-1	17.3	12.1	48460
17	29 May 22:12	38° 42.2′	157° 52.8′	East	14.3	9.9	522	57	17 Jun 01:48	36° 32.2′	148° 36.3′	Mid-1	20.5	15.6	17250
18	30 May 18:57	38° 28.3′	160° 00.3′	East	14.0	10.6	99	58	17 Jun 19:43	36° 14.8′	145° 57.9′	Mid-1	22.4	16.8	37696
19	30 May 22:12	38° 10.7′	160° 01.2′	East	15.4	10.8	252	59	17 Jun 22:42	36° 27.8′	146° 00.1′	Mid-1	21.7	13.7	10133
20	31 May 01:02	37° 53.1′	160° 00.9′	East	17.1	10.8	260	60	18 Jun 02:17	36° 39.7′	146° 08.8′	Mid-1	17.6	11.8	1
21	31 May 18:43	36° 00.9′	159° 58.0′	East	18.2	13.7	0								
22	31 May 22:08	36° 04.3′	159° 33.1′	East	18.1	13.1	0								
23	1 Jun 01:09	36° 07.2′	159° 08.9′	East	15.4	10.4	4442								
24	1 Jun 19:33	36° 02.2′	157° 22.8′	East	19.5	13.7	1057								
25	1 Jun 22:26	35° 59.8′	157° 14.9′	East	20.3	17.0	6088								
26	2 Jun 01:21	36° 00.1′	156° 58.8′	East	20.4	18.4	1281								
27	2 Jun 19:15	37° 46.7′	154° 43.6′	Mid-2	18.4	17.4	7042								
28	2 Jun 21:56	37° 52.5′	154° 28.3′	Mid-2	18.2	17.4	2122								
29	3 Jun 01:26	37° 59.0′	154° 10.2′	Mid-2	17.8	17.3	26792								
30	3 Jun 19:27	38° 59.1′	151° 43.8′	Mid-2	13.3	6.3	0								
31	3 Jun 22:34	39° 01.0′	151° 31.9′	Mid-2	16.3	4.8	19								
32	4 Jun 01:31	39° 02.1′	151° 07.5′	Mid-2	11.5	3.2	3119								
33	4 Jun 19:40	37° 58.6′	148° 28.8′	Mid-1	20.6	12.0	82981								
34	4 Jun 22:51	37° 46.7′	148° 10.9′	Mid-1	19.8	14.1	323								
35	5 Jun 01:49	37° 32.6′	147° 47.8′	Mid-1	19.6	10.7	1165								
36	5 Jun 19:44	38° 00.9′	146° 00.4′	Mid-1	19.8	11.9	0								
37	5 Jun 22:20	37° 53.2′	146° 01.1′	Mid-1	19.8	11.9	NA								
38	6 Jun 01:30	38° 08.3′	145° 42.0′	Mid-1	18.5	11.1	32								
39	6 Jun 20:18	39° 00.8′	142° 55.6′	West	14.7	5.3	0								
40	6 Jun 23:02	39° 07.3′	142° 50.5′	West	14.7	5.0	0								

Table 2.4.3: Sampling results of anchovy larvae off the Pacific coast of northern Japan by R/V *Soyo-maru* during May–June in 2013.

Leg-1								Leg-2							
Stn	Date and time (JST)	Latitude (N)	Longitude (E)	Area	T0 (°C)	T100 (°C)	CPUE	Stn.	Date and time (JST)	Latitude (N)	Longitude (E)	Area	T0 (°C)	T100 (°C)	CPUE
1	25 May 15:50	36° 25.4′	143° 31.5′	West	20.1	13.9	2511	39	13 Jun 04:33	41° 06.5′	145° 15.6′	Mid-1	11.5	3.4	40
2	25 May 19:48	36° 25.5′	143° 32.4′	West	20.3	13.9	118	40	13 Jun 09:32	40° 40.5′	145° 32.8′	Mid-1	12.1	1.0	31
3	26 May 23:14	36° 45.1′	143° 31.2′	West	18.4	NA	106	41	13 Jun 14:45	40° 10.5′	145° 53.6′	Mid-1	11.2	1.1	3
4	26 May 15:50	36° 58.0′	146° 43.3′	Mid-1	19.4	15.7	30984	42	14 Jun 03:46	39° 38.5′	148° 52.3′	Mid-1	16.9	5.8	201
5	26 May 19:54	36° 56.5′	146° 42.5′	Mid-1	19.4	15.7	36110	43	14 Jun 08:42	39° 19.6′	149° 22.0′	Mid-1	17.8	9.2	0
6	26 May 23:02	36° 57.1′	147° 03.1′	Mid-1	17.6	11.9	0	44	14 Jun 14:12	38° 59.8′	149° 52.1′	Mid-1	17.9	12.4	0
7	27 May 15:11	36° 58.8′	148° 56.3′	Mid-1	17.4	16.0	20121	45	15 Jun 03:46	38° 59.5′	152° 46.7′	Mid-2	17.1	10.4	157
8	27 May 19:41	36° 59.8′	148° 57.8′	Mid-1	17.2	16.0	6901	46	15 Jun 08:48	38° 49.8′	153° 26.6′	Mid-2	19.0	13.1	0
9	28 May 00:15	36° 58.9′	149° 37.1′	Mid-1	17.4	15.0	10406	47	15 Jun 15:11	38° 39.5′	154° 06.4′	Mid-2	18.4	11.2	164
10	28 May 15:12	36° 59.7′	152° 01.8′	Mid-2	16.1	13.8	0	48	16 Jun 08:46	38° 29.1′	158° 00.2′	East	18.6	11.4	0
11	28 May 19:18	37° 00.7′	151° 59.4′	Mid-2	15.8	13.8	91	49	16 Jun 14:06	38° 21.1′	157° 19.5′	East	19.5	12.2	10
12	29 May 00:12	36° 53.3′	152° 43.1′	Mid-2	15.9	14.8	0	50	16 Jun 19:56	38° 11.6′	156° 43.5′	East	20.5	14.1	1
13	29 May 15:05	36° 29.6′	154° 57.3′	Mid-2	17.2	11.4	0	51	17 Jun 14:16	38° 01.8′	152° 52.4′	Mid-2	18.6	11.8	0
14	29 May 19:05	36° 30.3′	154° 57.0′	Mid-2	17.1	11.4	499	52	17 Jun 19:51	38° 00.5′	152° 10.1′	Mid-2	18.6	12.2	0
15	30 May 00:15	36° 14.9′	155° 24.9′	East	18.1	14.5	0	53	18 Jun 00:14	38° 00.2′	151° 37.0′	Mid-2	18.7	10.7	0
16	31 May 15:21	34° 52.2′	158° 07.0′	East	17.2	13.7	6	54	18 Jun 14:26	38° 38.7′	148° 43.4′	Mid-1	20.3	12.7	0
17	31 May 18:57	34° 52.4′	158° 07.9′	East	17.0	13.7	0	55	18 Jun 20:08	38° 36.7′	148° 10.6′	Mid-1	18.7	12.2	0
18	31 May 22:46	35° 14.6′	158° 21.3′	East	16.9	14.0	0	56	19 Jun 00:18	38° 29.8′	147° 39.7′	Mid-1	21.9	13.1	24094
19	1 Jun 15:13	37° 03.4′	159° 34.7′	East	15.9	13.4	46	57	20 Jun 08:46	37° 31.0′	145° 00.4′	Mid-1	20.3	10.8	3305
20	1 Jun 18:55	37° 02.7′	159° 35.4′	East	15.9	13.4	0	58	20 Jun 14:16	37° 02.4′	145° 00.6′	Mid-1	22.8	17.0	29294
21	1 Jun 22:38	37° 27.0′	159° 45.8′	East	15.3	12.9	0	59	20 Jun 19:56	36° 31.8′	145° 01.7′	Mid-1	24.1	21.9	0
22	2 Jun 18:44	38° 51.9′	160° 06.2′	East	15.6	11.4	0								
23	2 Jun 22:03	38° 40.9′	159° 45.5′	East	14.7	12.5	2								
24	3 Jun 01:16	38° 34.8′	159° 30.9′	East	14.7	12.6	1								
25	3 Jun 19:01	37° 09.7′	157° 16.8′	East	15.9	11.7	507								
26	3 Jun 21:47	37° 00.0′	156° 59.5′	East	18.1	14.6	103								
27	4 Jun 01:25	36° 46.9′	156° 38.3′	East	18.3	14.6	20								
28	4 Jun 19:21	39° 34.7′	155° 50.3′	East	13.4	9.7	0								
29	4 Jun 21:51	39° 35.5′	155° 28.6′	East	14.5	10.3	0								
30	5 Jun 01:24	39° 37.2′	154° 56.6′	Mid-2	15.6	11.6	0								
31	5 Jun 19:04	39° 42.9′	153° 57.3′	Mid-2	14.9	10.4	52								
32	5 Jun 21:56	39° 54.0′	153° 41.0′	Mid-2	12.9	7.4	0								
33	6 Jun 01:27	40° 07.9′	153° 22.4′	Mid-2	12.9	7.9	5								
34	6 Jun 19:26	39° 24.3′	150° 31.6′	Mid-2	16.7	11.2	233								
35	6 Jun 22:07	39° 04.7′	150° 34.5′	Mid-2	16.9	12.9	0								
36	7 Jun 01:26	38° 43.5′	150° 35.5′	Mid-2	16.6	12.4	76								
37	7 Jun 19:46	37° 43.6′	147° 58.9′	Mid-1	20.1	16.1	0								
38	8 Jun 21:38	39° 23.2′	144° 29.9′	West	13.6	3.9	0								

Table 2.4.4: Sampling results of anchovy larvae off the Pacific coast of northern Japan by R/V *Soyo-maru* during May–June in 2014.

Leg-1								Leg-2							
Stn	Date and time (JST)	Latitude (N)	Longitude (E)	Area	T0 (°C)	T100 (°C)	CPUE	Stn.	Date and time (JST)	Latitude (N)	Longitude (E)	Area	T0 (°C)	T100 (°C)	CPUE
1	24 May 13:53	35° 58.5′	143° 14.2′	West	19.3	18.5	5221	44	12 Jun 07:16	40° 31.4′	144° 57.6′	West	12.9	2.1	0
2	24 May 20:05	36° 02.0′	143° 36.3′	West	19.1	18.5	51	45	12 Jun 14:05	40° 03.4′	144° 50.6′	West	13.7	1.1	0
3	24 May 22:43	36° 14.4′	143° 45.2′	West	19.7	18.2	4629	46	12 Jun 19:15	39° 46.4′	144° 47.5′	West	12.6	1.9	0
4	25 May 19:37	36° 00.8′	145° 53.8′	Mid-1	17.4	14.7	364	47	13 Jun 14:45	37° 39.3′	145° 00.1′	Mid-1	19.0	9.6	388
5	25 May 22:24	36° 02.4′	146° 18.3′	Mid-1	19.7	15.8	312	48	13 Jun 19:31	37° 22.4′	144° 60.0′	West	19.6	11.3	348
6	26 May 02:01	36° 01.6′	146° 48.9′	Mid-1	15.4	6.3	30	49	13 Jun 23:42	37° 06.0′	145° 02.1′	Mid-1	20.4	13.2	159
7	26 May 19:17	36° 29.5′	149° 00.1′	Mid-1	16.0	10.1	90	50	14 Jun 14:42	37° 08.9′	147° 59.3′	Mid-1	19.5	11.4	653
8	26 May 22:17	36° 52.7′	148° 60.0′	Mid-1	15.8	9.7	203	51	14 Jun 19:45	36° 40.3′	148° 00.0′	Mid-1	20.2	14.7	343
9	27 May 01:45	37° 15.1′	148° 59.1′	Mid-1	16.0	10.5	152	52	14 Jun 23:42	36° 22.5′	148° 00.9′	Mid-1	20.8	15.3	164
10	27 May 19:01	35° 49.0′	151° 44.4′	Mid-2	17.6	11.7	71	53	15 Jun 14:37	36° 31.1′	150° 30.3′	Mid-2	21.5	17.5	119
11	27 May 22:01	36° 03.2′	152° 02.0′	Mid-2	17.7	12.9	5262	54	15 Jun 19:16	37° 03.1′	150° 34.6′	Mid-2	20.8	17.6	117
12	28 May 01:35	36° 18.8′	152° 13.1′	Mid-2	17.9	14.4	85	55	15 Jun 23:35	37° 34.4′	150° 37.2′	Mid-2	20.9	17.7	72
13	28 May 19:05	37° 04.7′	154° 28.3′	Mid-2	15.2	12.2	35	56	16 Jun 14:43	39° 00.2′	150° 58.6′	Mid-2	17.4	7.0	128
14	28 May 21:56	37° 24.8′	154° 30.5′	Mid-2	13.9	9.9	9	57	16 Jun 20:22	38° 57.4′	150° 25.6′	Mid-2	16.8	10.0	0
15	29 May 01:29	37° 44.1′	154° 32.1′	Mid-2	13.9	11.3	0	58	16 Jun 23:36	38° 56.9′	149° 55.2′	Mid-1	18.5	11.7	81
16	29 May 18:51	36° 09.7′	157° 12.9′	East	16.4	11.4	0	59	17 Jun 14:38	38° 00.8′	148° 57.9′	Mid-1	21.8	15.2	171
17	29 May 21:38	35° 55.2′	157° 16.2′	East	18.4	15.8	1	60	17 Jun 19:35	37° 59.6′	148° 10.3′	Mid-1	20.2	11.4	103
18	30 May 01:09	35° 39.6′	157° 19.3′	East	18.5	16.3	0	61	17 Jun 23:36	37° 59.3′	147° 34.8′	Mid-1	20.7	11.2	86
19	30 May 18:40	36° 01.6′	159° 59.1′	East	15.3	12.0	0	62	18 Jun 14:39	36° 60.0′	146° 29.2′	Mid-1	22.4	9.7	2862
20	30 May 21:30	36° 20.0′	159° 59.1′	East	16.0	12.7	0	63	18 Jun 19:36	36° 58.5′	145° 52.0′	Mid-1	22.8	13.9	0
21	31 May 01:02	36° 42.5′	159° 57.7′	East	14.8	11.5	0								
22	31 May 18:45	38° 58.3′	159° 01.8′	East	14.2	11.7	0								
23	31 May 21:30	38° 39.8′	159° 01.6′	East	14.0	11.9	0								
24	1 Jun 00:53	38° 20.7′	158° 58.7′	East	14.5	12.0	0								
25	1 Jun 18:50	37° 49.2′	156° 29.0′	East	15.2	10.9	0								
26	1 Jun 21:43	37° 29.8′	156° 29.3′	East	15.1	10.9	2								
27	2 Jun 01:06	37° 09.4′	156° 28.6′	East	15.3	10.5	19								
28	2 Jun 19:02	37° 58.8′	153° 29.3′	Mid-2	14.7	9.9	2								
29	2 Jun 21:56	37° 42.4′	153° 09.6′	Mid-2	16.7	12.0	478								
30	3 Jun 01:20	37° 28.1′	152° 53.4′	Mid-2	17.7	14.9	5551								
31	3 Jun 19:13	38° 00.2′	151° 32.7′	Mid-2	19.2	16.6	86								
32	3 Jun 22:06	38° 15.7′	151° 34.3′	Mid-2	16.9	13.3	202								
33	4 Jun 14:41	38° 59.8′	148° 28.5′	Mid-1	19.2	11.1	94								
34	4 Jun 19:30	38° 57.7′	147° 53.4′	Mid-1	16.7	10.6	27								
35	4 Jun 23:06	38° 55.4′	147° 26.9′	Mid-1	15.6	10.5	329								
36	5 Jun 15:01	38° 00.9′	146° 57.5′	Mid-1	16.9	7.9	666								
37	5 Jun 19:29	37° 57.8′	146° 24.6′	Mid-1	19.6	14.0	191								
38	5 Jun 23:13	37° 58.6′	145° 55.7′	Mid-1	19.9	15.4	30550								
39	6 Jun 15:09	39° 00.8′	143° 58.6′	West	15.6	5.0	0								
40	6 Jun 19:47	39° 23.7′	143° 54.9′	West	15.1	5.2	0								
41	6 Jun 23:28	39° 40.1′	143° 58.3′	West	14.7	4.7	0								
42	7 Jun 15:24	38° 01.5′	142° 58.3′	West	14.8	4.7	0								
43	7 Jun 19:50	37° 51.3′	142° 51.1′	West	14.4	4.7	27								

Table 2.4.5: Sampling results of anchovy larvae off the Pacific coast of northern Japan by R/V *Soyo-maru* during May–June in 2015.

Leg-1								Leg-2							
Stn	Date and time (JST)	Latitude (N)	Longitude (E)	Area	T0 (°C)	T100 (°C)	CPUE	Stn.	Date and time (JST)	Latitude (N)	Longitude (E)	Area	T0 (°C)	T100 (°C)	CPUE
1	23 May 19:20	36° 02.6′	142° 32.4′	West	21.9	18.1	0	40	11 Jun 13:49	38° 01.0′	144° 00.4′	West	19.0	11.7	7336
2	23 May 23:17	36° 29.5′	142° 39.9′	West	22.1	18.9	0	41	11 Jun 19:32	38° 20.7′	143° 59.2′	West	17.5	10.5	4536
3	23 May 02:20	36° 49.9′	142° 48.1′	West	19.4	11.7	366	42	11 Jun 23:39	38° 39.6′	144° 00.1′	West	17.0	11.6	123
4	24 May 19:38	37° 20.5′	146° 21.1′	Mid-1	19.6	13.3	609	43	12 Jun 14:45	38° 40.6′	147° 01.9′	Mid-1	18.6	12.2	24850
5	24 May 22:55	37° 33.5′	146° 21.7′	Mid-1	19.7	15.0	439	44	12 Jun 19:33	38° 39.4′	147° 32.5′	Mid-1	18.4	13.2	5045
6	25 May 01:56	37° 50.7′	146° 24.1′	Mid-1	19.0	15.1	3748	45	12 Jun 23:40	38° 40.1′	148° 01.1′	Mid-1	17.1	11.7	0
7	25 May 19:25	37° 30.3′	148° 57.9′	Mid-1	17.5	11.6	68	46	13 Jun 14:46	39° 00.2′	151° 05.6′	Mid-2	14.0	10.3	811
8	25 May 22:41	37° 18.3′	148° 53.1′	Mid-1	16.8	11.2	8	47	13 Jun 19:36	39° 00.8′	151° 47.1′	Mid-2	15.9	8.9	0
9	26 May 01:42	37° 02.1′	148° 48.6′	Mid-1	18.8	13.3	6895	48	13 Jun 23:35	39° 00.1′	152° 21.4′	Mid-2	15.8	11.1	0
10	27 May 19:22	36° 41.0′	152° 34.6′	Mid-2	21.2	19.0	463	49	14 Jun 14:48	38° 59.0′	155° 32.5′	East	17.9	12.3	208
11	27 May 22:30	36° 49.0′	152° 55.8′	Mid-2	21.1	18.4	151	50	14 Jun 19:34	38° 26.4′	155° 42.3′	East	19.1	15.4	520
12	28 May 01:31	36° 57.2′	153° 18.1′	Mid-2	19.8	15.8	370	51	14 Jun 23:41	37° 58.6′	155° 44.1′	East	17.5	15.5	425
13	28 May 19:06	36° 59.4′	155° 01.0′	East	18.3	14.0	25803	52	15 Jun 14:47	37° 29.2′	153° 01.0′	Mid-2	21.4	16.0	0
14	28 May 22:16	36° 56.8′	155° 23.2′	East	18.3	15.2	9386	53	15 Jun 19:38	37° 58.8′	152° 59.7′	Mid-2	18.8	12.8	4581
15	29 May 01:16	36° 56.1′	155° 52.9′	East	19.8	16.5	158	54	15 Jun 23:38	38° 23.8′	152° 55.5′	Mid-2	15.4	8.0	46
16	29 May 18:48	36° 59.2′	157° 32.6′	East	20.4	17.2	190	55	16 Jun 14:48	38° 30.6′	149° 58.5′	Mid-1	17.0	9.8	6580
17	29 May 22:06	37° 09.0′	157° 56.1′	East	20.5	16.7	20	56	16 Jun 19:33	38° 04.5′	149° 51.9′	Mid-1	18.6	13.1	1040
18	30 May 01:05	37° 19.6′	158° 15.3′	East	16.3	14.2	735	57	16 Jun 23:35	37° 40.4′	149° 46.6′	Mid-1	18.5	11.2	4265
19	30 May 18:35	36° 31.1′	159° 59.9′	East	17.4	13.1	126	58	17 Jun 14:44	37° 30.0′	147° 29.0′	Mid-1	18.2	11.1	6308
20	30 May 21:53	36° 48.8′	159° 58.9′	East	16.0	11.8	68	59	17 Jun 19:34	37° 56.0′	147° 21.0′	Mid-1	18.0	11.1	381
21	31 May 00:31	37° 05.8′	159° 55.8′	East	15.8	12.1	23	60	17 Jun 23:38	38° 19.0′	147° 15.0′	Mid-1	18.3	12.2	1869
22	31 May 19:01	39° 21.3′	160° 01.4′	East	13.9	11.2	0	61	18 Jun 14:37	37° 31.0′	144° 58.0′	West	20.0	15.5	1058
23	31 May 22:09	39° 24.1′	159° 51.6′	East	13.7	11.1	0	62	18 Jun 19:42	37° 32.9′	144° 10.2′	West	20.2	9.6	584
24	1 Jun 00:51	39° 26.1′	159° 41.5′	East	14.6	11.0	0								
25	1 Jun 18:57	39° 49.0′	157° 09.4′	East	11.6	9.4	19								
26	1 Jun 22:02	39° 34.1′	157° 02.5′	East	16.1	12.7	226								
27	2 Jun 01:06	39° 38.9′	156° 44.8′	East	14.6	11.5	13								
28	2 Jun 19:01	39° 28.9′	154° 39.4′	Mid-2	14.9	10.6	49								
29	2 Jun 22:14	39° 07.9′	154° 39.1′	Mid-2	15.7	11.7	1941								
30	3 Jun 01:09	38° 47.3′	154° 42.3′	Mid-2	17.9	13.5	85587								
31	3 Jun 18:47	40° 21.3′	153° 18.8′	Mid-2	10.6	15.9	0								
32	3 Jun 21:38	40° 37.3′	153° 00.5′	Mid-2	12.6	2.5	0								
33	4 Jun 00:47	40° 49.2′	152° 46.1′	Mid-2	12.4	5.9	0								
34	4 Jun 19:30	40° 11.4′	149° 20.6′	Mid-1	15.5	10.9	0								
35	4 Jun 22:37	40° 13.5′	149° 08.9′	Mid-1	16.3	11.0	9								
36	5 Jun 21:29	39° 42.1′	146° 59.3′	Mid-1	12.8	6.1	0								
37	6 Jun 00:39	39° 18.9′	146° 57.4′	Mid-1	13.1	6.5	0								
38	6 Jun 19:48	38° 30.6′	145° 09.7′	Mid-1	16.6	11.1	444								
39	6 Jun 22:59	38° 43.8′	145° 08.9′	Mid-1	16.8	10.8	1								

Table 2.4.6: L (mm), d (days), and date of hatch of anchovy larvae collected off northern Japan in 2011. N.D. represents not detected. Hyphen represents no data.

Stn	Sampling date	T0 (°C)	L (mm)	N	d (days)	Date of hatch	N
1	25 May	19.4	18.6–38.3	100	23–45	10 Apr–02 May	10
2	25 May	19.3	18.6–35.6	100	24–39	16 Apr–01 May	18
3	26 May	19.2	19.6–32.9	100	34–46	10–22 Apr	7
4	26 May	16.8			N.D.		
5	26 May	17.5			N.D.		
6	27 May	20.9			N.D.		
7	28 May	20.6			N.D.		
8	28 May	18.3	19.7–42.1	100	26–47	11 Apr–02 May	8
9	28 May	16.1			N.D.		
10	29 May	12.7			N.D.		
11	5 Jun	13.2	19.3–39.8	100	-	-	-
12	5 Jun	13.0	28.9–46.0	72	-	-	-
13	6 Jun	11.6	29.2–44.5	55	-	-	-
14	6 Jun	13.6	22.5–48.4	35	39–56	11–28 Apr	3
15	6 Jun	13.2	25.3–38.0	100	33–48	19 Apr–04 May	13
16	7 Jun	13.0	24.4–47.7	20	37–56	12 Apr–01 May	7
17	7 Jun	10.4	25.0–38.8	100	36–53	15 Apr–02 May	19
18	7 Jun	10.1	25.7–40.8	100	-	-	-
19	8 Jun	11.4	23.8–35.3	87	40–48	21–29 Apr	11
20	8 Jun	15.6	28.7–58.5	20	-	-	-
21	8 Jun	14.9	27.1–44.0	100	-	-	-
22	9 Jun	14.9	27.4–52.9	82	-	-	-
23	9 Jun	15.5	25.9–53.6	100	39–58	12 Apr–01 May	17
24	9 Jun	15.6	28.8–70.3	19	46–59	11–24 Apr	10
25	10 Jun	16.1	38.6–53.1	4	-	-	-
26	10 Jun	16.1	21.0–35.3	64	-	-	-
27	11 Jun	17.3	31.2–67.1	100	-	-	-
28	11 Jun	17.5			N.D.		
29	11 Jun	17.4	32.4–63.7	100	-	-	-
30	12 Jun	20.7			N.D.		
31	13 Jun	20.4	21.2–40.3	78	-	-	-
32	13 Jun	18.9	24.5–54.9	100	34–41	03–10 May	12
33	14 Jun	16.3	23.6–42.8	100	33–53	22 Apr–12 May	30
34	14 Jun	16.0	23.6–42.3	32	32–45	30 Apr–13 May	10
35	15 Jun	14.2	21.7–36.9	84	37–53	23 Apr–09 May	39
36	15 Jun	18.8			N.D.		
37	15 Jun	16.4			N.D.		
38	16 Jun	17.1			N.D.		
39	16 Jun	20.7			N.D.		
40	16 Jun	20.5			N.D.		

Table 2.4.7: L (mm), d (days), and date of hatch of anchovy larvae collected off northern Japan in 2012. N.D. represents not detected. Hyphen represents no data.

Stn	Sampling date	T0 (°C)	L (mm)	N	d (days)	Date of hatch	N
1	24 May	22.3			N.D.		
2	24 May	16.9			N.D.		
3	25 May	18.1	22.3–33.8	36	25–58	28 Mar–30 Apr	35
4	25 May	18.5	17.9–36.5	100	-	-	-
5	25 May	17.6	19.4–37.6	100	-	-	-
6	26 May	17.3	17.3–28.9	43	-	-	-
7	26 May	20.1	17.4–33.9	100	-	-	-
8	26 May	16.6	28.1–54.8	100	-	-	-
9	27 May	17.1			N.D.		
10	27 May	15.9	35.8–53.8	6	-	-	-
11	27 May	16.5	20.1–45.6	100	-	-	-
12	28 May	19.4	20.3–45.5	100	-	-	-
13	28 May	17.7	23.6–43.6	100	-	-	-
14	28 May	17.7	24.7–37.5	100	-	-	-
15	29 May	16.2	20.7–38.7	100	-	-	-
16	29 May	14.2	21.5–41.9	100	45–73	17 Mar–14 Apr	22
17	29 May	14.3	24.3–41.0	20	44–67	23 Mar–15 Apr	8
18	30 May	14.0	29.5–37.6	8	-	-	-
19	30 May	15.4	21.6–47.4	80	-	-	-
20	31 May	17.1	24.4–34.0	55	-	-	-
21	31 May	18.2	35.9–74.9	99	-	-	-
22	31 May	18.1	36.2–76.0	100	-	-	-
23	1 Jun	15.4	19.4–35.5	100	-	-	-
24	1 Jun	19.5	23.2–55.8	150	-	-	-
25	1 Jun	20.3	19.4–34.1	13	-	-	-
26	2 Jun	20.4	21.5–36.0	100	-	-	-
27	2 Jun	18.4	22.8–35.6	100	-	-	-
28	2 Jun	18.2	27.9–61.4	100	-	-	-
29	3 Jun	17.8	24.2–55.2	100	-	-	-
30	3 Jun	13.3			N.D.		
31	3 Jun	16.3	46.2–71.3	11	-	-	-
32	4 Jun	11.5	19.6–51.6	100	-	-	-
33	4 Jun	20.6	15.4–31.1	100	19–32	03–16 May	11
34	4 Jun	19.8	18.9–34.0	100	21–45	20 Apr–14 May	9
35	5 Jun	19.6	17.3–31.4	100	27–39	27 Apr–09 May	8
36	5 Jun	19.8	35.7–71.1	100	-	-	-
37	5 Jun	19.8			N.D.		
38	6 Jun	18.5	21.1–63.0	123	-	-	-
39	6 Jun	14.7			N.D.		
40	6 Jun	14.7			N.D.		
41	11 Jun	11.1	36.1–68.0	45	-	-	-
42	12 Jun	12.2	36.5–72.5	100	-	-	-
43	12 Jun	13.2	34.3–71.2	100	-	-	-
44	12 Jun	14.5	33.0–80.0	100	-	-	-
45	13 Jun	15.2	32.3–80.6	68	-	-	-
46	13 Jun	14.6	42.2–78.3	90	-	-	-
47	13 Jun	13.5	36.6–74.5	88	-	-	-
48	14 Jun	14.5	65.9–72.2	4	-	-	-
49	14 Jun	13.0	17.9–36.5	76	21–50	25 Apr–24 May	18
50	14 Jun	12.3	25.2–34.2	94	33–42	03–12 May	10
51	15 Jun	13.6	30.1–75.8	100	39–39	07–07 May	1
52	15 Jun	17.2	17.0–36.2	18	19–47	29 Apr–27 May	12
53	15 Jun	20.1	20.3–53.4	148	28–40	06–18 May	8
54	16 Jun	19.4	16.3–33.5	100	21–35	12–26 May	14
55	16 Jun	16.7	18.4–37.0	100	-	-	-
56	16 Jun	17.3	18.1–33.7	79	-	-	-
57	17 Jun	20.5	15.4–32.7	71	-	-	-
58	17 Jun	22.4	15.1–24.9	100	-	-	-
59	17 Jun	21.7	16.6–28.4	100	-	-	-
60	18 Jun	17.6	29.8–29.8	1	-	-	-

Table 2.4.8: L (mm), d (days), and date of hatch of anchovy larvae collected off northern Japan in 2013. N.D. represents not detected. Hyphen represents no data.

Stn	Sampling date	T0 (°C)	L (mm)	N	d (days)	Date of hatch	N
1	25 May	20.1	13.4–32.2	100	-	-	-
2	25 May	20.3	18.1–34.8	87	-	-	-
3	26 May	18.4	21.8–36.4	106	-	-	-
4	26 May	19.4	16.9–29.1	100	25–38	18 Apr–01 May	5
5	26 May	19.4	17.6–29.5	100	-	-	-
6	26 May	17.6			N.D.		
7	27 May	17.4	11.6–27.1	100	-	-	-
8	27 May	17.2	26.4–34.9	100	-	-	-
9	28 May	17.4	21.5–33.9	100	-	-	-
10	28 May	16.1			N.D.		
11	28 May	15.8	19.0–49.9	15	-	-	-
12	29 May	15.9			N.D.		
13	29 May	17.2			N.D.		
14	29 May	17.1	26.4–85.1	100	-	-	-
15	30 May	18.1			N.D.		
16	31 May	17.2	19.2–83.7	5	23–28	03–08 May	3
17	31 May	17.0			N.D.		
18	31 May	16.9			N.D.		
19	1 Jun	15.9	20.3–67.0	29	-	-	-
20	1 Jun	15.9			N.D.		
21	1 Jun	15.3			N.D.		
22	2 Jun	15.6			N.D.		
23	2 Jun	14.7	30.6–30.6	1	-	-	-
24	3 Jun	14.7	30.6–30.6	1	-	-	-
25	3 Jun	15.9	31.8–59.9	52	38–46	18–26 Apr	5
26	3 Jun	18.1	21.1–32.3	50	-	-	-
27	4 Jun	18.3	16.1–26.8	14	-	-	-
28	4 Jun	13.4			N.D.		
29	4 Jun	14.5			N.D.		
30	5 Jun	15.6			N.D.		
31	5 Jun	14.9	19.7–39.9	23	-	-	-
32	5 Jun	12.9			N.D.		
33	6 Jun	12.9	27.0–47.2	5	-	-	-
34	6 Jun	16.7	24.0–39.0	100	-	-	-
35	6 Jun	16.9			N.D.		
36	7 Jun	16.6			N.D.		
37	7 Jun	20.1			N.D.		
38	8 Jun	13.6			N.D.		
39	13 Jun	11.5	24.9–34.7	33	37–52	22 Apr–07 May	16
40	13 Jun	12.1	19.1–74.1	16	-	-	-
41	13 Jun	11.2	28.2–73.5	4	32–46	28 Apr–12 May	3
42	14 Jun	16.9	16.8–38.9	90	-	-	-
43	14 Jun	17.8			N.D.		
44	14 Jun	17.9			N.D.		
45	15 Jun	17.1	19.4–34.5	68	20–35	11–26 May	30
46	15 Jun	19.0			N.D.		
47	15 Jun	18.4	19.2–34.6	100	-	-	-
48	16 Jun	18.6			N.D.		
49	16 Jun	19.5	20.0–27.4	7	-	-	-
50	16 Jun	20.5	21.4–21.4	1	32–32	15–15 May	1
51	17 Jun	18.6			N.D.		
52	17 Jun	18.6			N.D.		
53	18 Jun	18.7			N.D.		
54	18 Jun	20.3			N.D.		
55	18 Jun	18.7			N.D.		
56	19 Jun	21.9	16.0–30.6	100	-	-	-
57	20 Jun	20.3	18.7–31.9	100	23–43	08–28 May	37
58	20 Jun	22.8	14.4–29.5	100	19–38	13 May–01 Jun	41
59	20 Jun	24.1			N.D.		

Table 2.4.9: *L* (mm), *d* (days), and date of hatch of anchovy larvae collected off northern Japan in 2014.

Stn	Sampling date	T0 (°C)	<i>L</i> (mm)	<i>N</i>	<i>d</i> (days)	Date of hatch	<i>N</i>
1	24 May	19.3	22.6–34.0	100	-	-	-
2	24 May	19.1	23.9–35.2	27	-	-	-
3	24 May	19.7	23.5–33.0	100	-	-	-
4	25 May	17.4	23.8–36.2	59	-	-	-
5	25 May	19.7	17.4–30.9	100	-	-	-
6	26 May	15.4			N.D.		
7	26 May	16.0	24.7–37.3	44	-	-	-
8	26 May	15.8	21.0–39.8	100	-	-	-
9	27 May	16.0	21.8–36.2	92	-	-	-
10	27 May	17.6	19.4–35.6	32	-	-	-
11	27 May	17.7	20.1–36.9	100	-	-	-
12	28 May	17.9	27.4–34.0	35	-	-	-
13	28 May	15.2	25.8–37.1	23	-	-	-
14	28 May	13.9	30.5–38.1	9	-	-	-
15	29 May	13.9			N.D.		
16	29 May	16.4			N.D.		
17	29 May	18.4	33.9–33.9	1	-	-	-
18	30 May	18.5			N.D.		
19	30 May	15.3			N.D.		
20	30 May	16.0			N.D.		
21	31 May	14.8			N.D.		
22	31 May	14.2			N.D.		
23	31 May	14.0			N.D.		
24	1 Jun	14.5			N.D.		
25	1 Jun	15.2			N.D.		
26	1 Jun	15.1	34.3–34.7	2	-	-	-
27	2 Jun	15.3	19.3–35.2	10	-	-	-
28	2 Jun	14.7	30.1–30.1	1	-	-	-
29	2 Jun	16.7	25.4–35.2	100	-	-	-
30	3 Jun	17.7	18.4–37.6	100	-	-	-
31	3 Jun	19.2	21.7–33.3	86	-	-	-
32	3 Jun	16.9	17.9–33.5	49	-	-	-
33	4 Jun	19.2	15.9–34.0	29	-	-	-
34	4 Jun	16.7	19.1–31.1	13	-	-	-
35	4 Jun	15.6	17.2–34.8	43	-	-	-
36	5 Jun	16.9	16.0–37.0	100	-	-	-
37	5 Jun	19.6	15.5–27.9	78	-	-	-
38	5 Jun	19.9	17.6–28.1	100	-	-	-
39	6 Jun	15.6			N.D.		
40	6 Jun	15.1			N.D.		
41	6 Jun	14.7			N.D.		
42	7 Jun	14.8			N.D.		
43	7 Jun	14.4	23.4–28.4	5	-	-	-
44	12 Jun	12.9			N.D.		
45	12 Jun	13.7			N.D.		
46	12 Jun	12.6			N.D.		
47	13 Jun	19.0	23.1–31.8	67	-	-	-
48	13 Jun	19.6	17.8–30.2	78	-	-	-
49	13 Jun	20.4	25.4–32.1	57	-	-	-
50	14 Jun	19.5	17.7–33.4	79	-	-	-
51	14 Jun	20.2	19.9–27.7	59	-	-	-
52	14 Jun	20.8	20.2–33.5	70	-	-	-
53	15 Jun	21.5	20.0–34.2	83	-	-	-
54	15 Jun	20.8	23.4–34.7	94	-	-	-
55	15 Jun	20.9	22.4–32.4	31	-	-	-
56	16 Jun	17.4	22.6–33.8	60	-	-	-
57	16 Jun	16.8			N.D.		
58	16 Jun	18.5	21.1–31.3	52	-	-	-
59	17 Jun	21.8	21.8–35.1	80	-	-	-
60	17 Jun	20.2	20.6–30.9	38	-	-	-
61	17 Jun	20.7	19.1–34.8	68	-	-	-
62	18 Jun	22.4	17.0–29.8	100	-	-	-
63	18 Jun	22.8			N.D.		

Table 2.4.10: L (mm), d (days), and date of hatch of anchovy larvae collected off northern Japan in 2015.

Stn	Sampling date	T0 (°C)	L (mm)	N	d (days)	Date of hatch	N
1	23 May	21.9			N.D.		
2	23 May	22.1	14.9–24.0	100	-	-	-
3	23 May	19.4	14.8–23.3	50	-	-	-
4	24 May	19.6	19.0–36.5	65	-	-	-
5	24 May	19.7	21.2–31.0	54	-	-	-
6	25 May	19.0	18.4–36.0	100	-	-	-
7	25 May	17.5	24.0–31.5	42	-	-	-
8	25 May	16.8	28.5–32.4	7	-	-	-
9	26 May	18.8	22.2–30.8	100	-	-	-
10	27 May	21.2	19.8–31.4	100	-	-	-
11	27 May	21.1	19.0–32.5	100	-	-	-
12	28 May	19.8	16.1–29.6	100	-	-	-
13	28 May	18.3	20.6–31.1	100	-	-	-
14	28 May	18.3	24.6–35.9	100	-	-	-
15	29 May	19.8	22.0–33.6	80	-	-	-
16	29 May	20.4	20.0–32.3	19	-	-	-
17	29 May	20.5	22.7–30.3	12	-	-	-
18	30 May	16.3	26.6–34.4	85	-	-	-
19	30 May	17.4	25.7–36.4	32	-	-	-
20	30 May	16.0	29.5–49.2	60	-	-	-
21	31 May	15.8	33.6–54.8	35	-	-	-
22	31 May	13.9			N.D.		
23	31 May	13.7			N.D.		
24	1 Jun	14.6			N.D.		
25	1 Jun	11.6	29.9–35.9	17	-	-	-
26	1 Jun	16.1	25.4–58.9	86	-	-	-
27	2 Jun	14.6	28.5–39.4	8	-	-	-
28	2 Jun	14.9	33.9–43.1	7	-	-	-
29	2 Jun	15.7	26.7–38.9	84	-	-	-
30	3 Jun	17.9	29.8–39.6	100	-	-	-
31	3 Jun	10.6			N.D.		
32	3 Jun	12.6			N.D.		
33	4 Jun	12.4			N.D.		
34	4 Jun	15.5			N.D.		
35	4 Jun	16.3	24.2–35.6	7	-	-	-
36	5 Jun	12.8	26.9–75.8	6	-	-	-
37	6 Jun	13.1	34.5–70.6	12	-	-	-
38	6 Jun	16.6	22.3–36.3	98	-	-	-
39	6 Jun	16.8	27.3–63.0	2	-	-	-
40	11 Jun	19.0	19.6–28.7	100	-	-	-
41	11 Jun	17.5	21.7–31.2	100	-	-	-
42	11 Jun	17.0	27.0–32.6	70	-	-	-
43	12 Jun	18.6	12.8–31.6	100	-	-	-
44	12 Jun	18.4	20.9–35.7	67	-	-	-
45	12 Jun	17.1			N.D.		
46	13 Jun	14.0	26.7–41.9	100	-	-	-
47	13 Jun	15.9			N.D.		
48	13 Jun	15.8			N.D.		
49	14 Jun	17.9	20.2–32.5	100	-	-	-
50	14 Jun	19.1	22.9–31.2	100	-	-	-
51	14 Jun	17.5	27.4–33.3	100	-	-	-
52	15 Jun	21.4	30.9–30.9	1	-	-	-
53	15 Jun	18.8	22.1–31.0	92	-	-	-
54	15 Jun	15.4	27.2–35.7	10	-	-	-
55	16 Jun	17.0	20.2–34.5	100	-	-	-
56	16 Jun	18.6	22.6–38.1	100	-	-	-
57	16 Jun	18.5	22.7–41.4	100	-	-	-
58	17 Jun	18.2	19.5–39.2	100	-	-	-
59	17 Jun	18.0	23.4–51.9	100	-	-	-
60	17 Jun	18.3	20.6–48.9	100	-	-	-
61	18 Jun	20.0	19.2–35.6	100	-	-	-
62	18 Jun	20.2	20.4–32.8	100	-	-	-

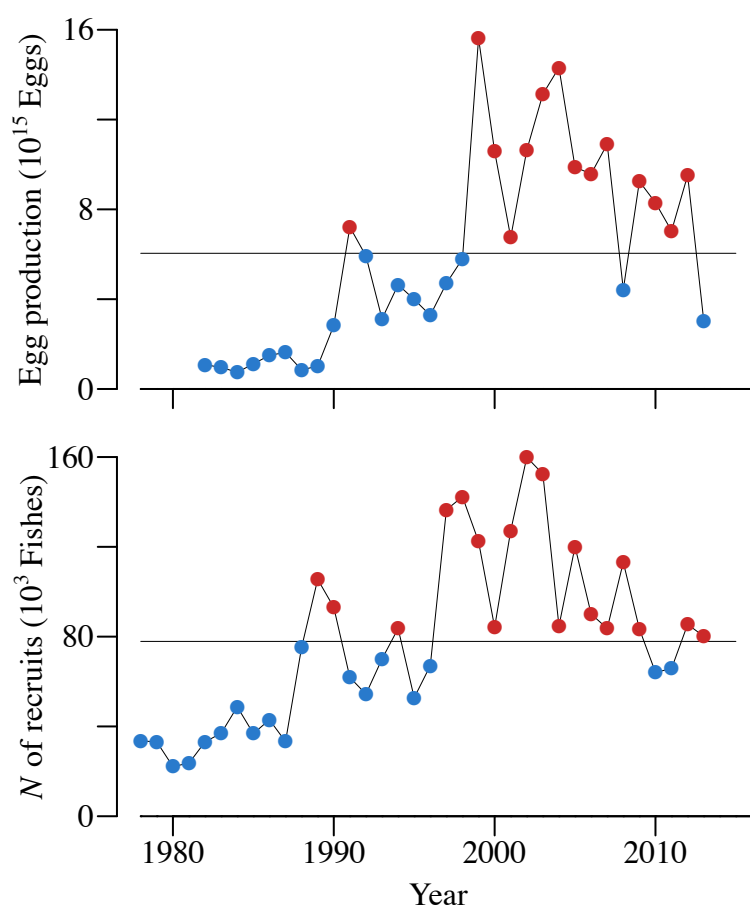


Fig. 2.4-1: Annual fluctuations of egg production and number of recruits of the Pacific stock of Japanese anchovy. Red and blue circles represents positive and negative anomaly defined from the mean value (*horizontal line*) during 1978–2013, respectively. Data were obtained from (Kamimura et al., 2014).

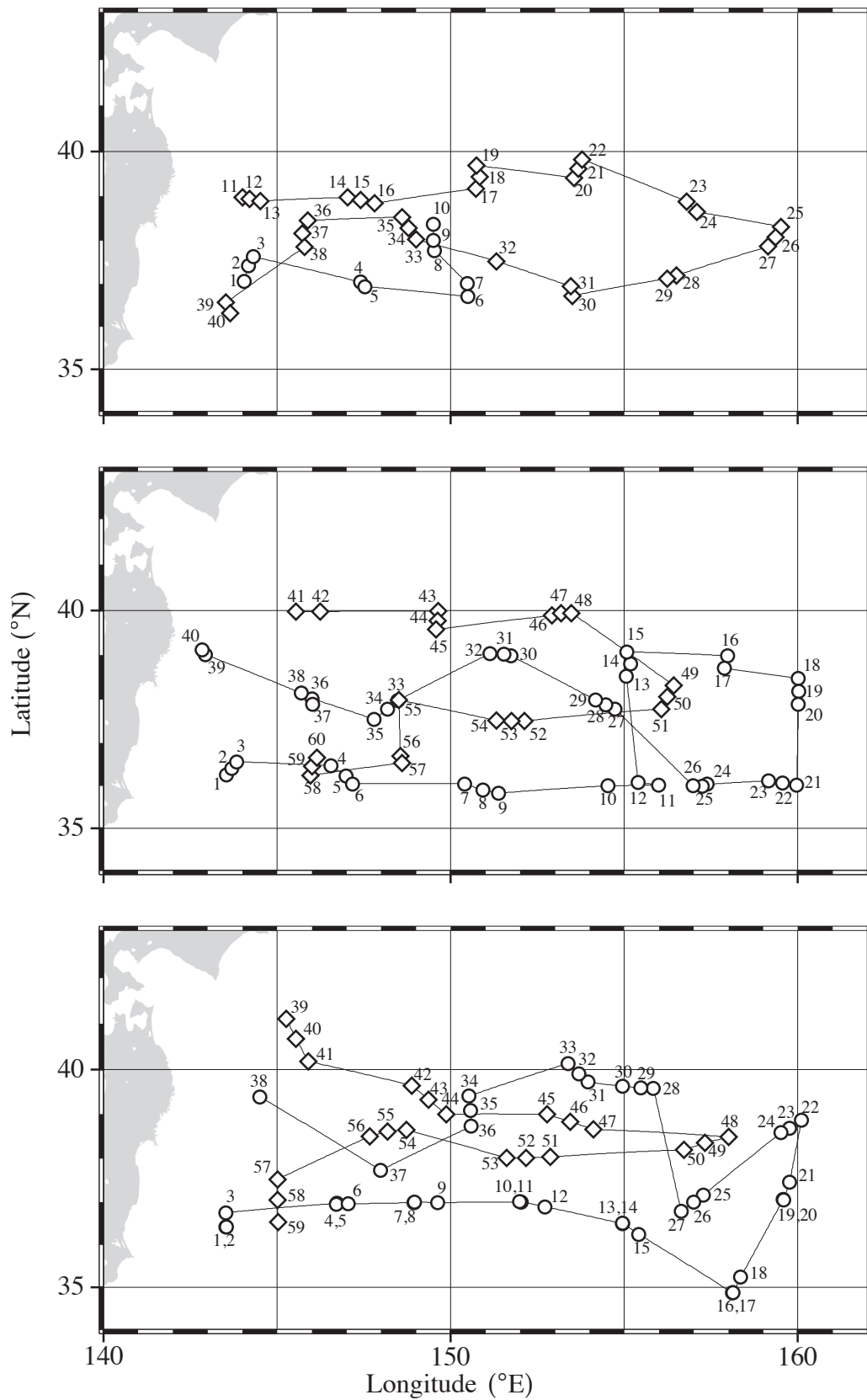


Fig. 2.4-2: Trawl- and CTD- stations off northern Japan in 2011 (*top*), 2012 (*middle*), and 2013 (*bottom*) by R/V *Soyo-maru*.

Circle and diamond represent station in Leg-1 and Leg-2 for each year, respectively. Number shows station number.

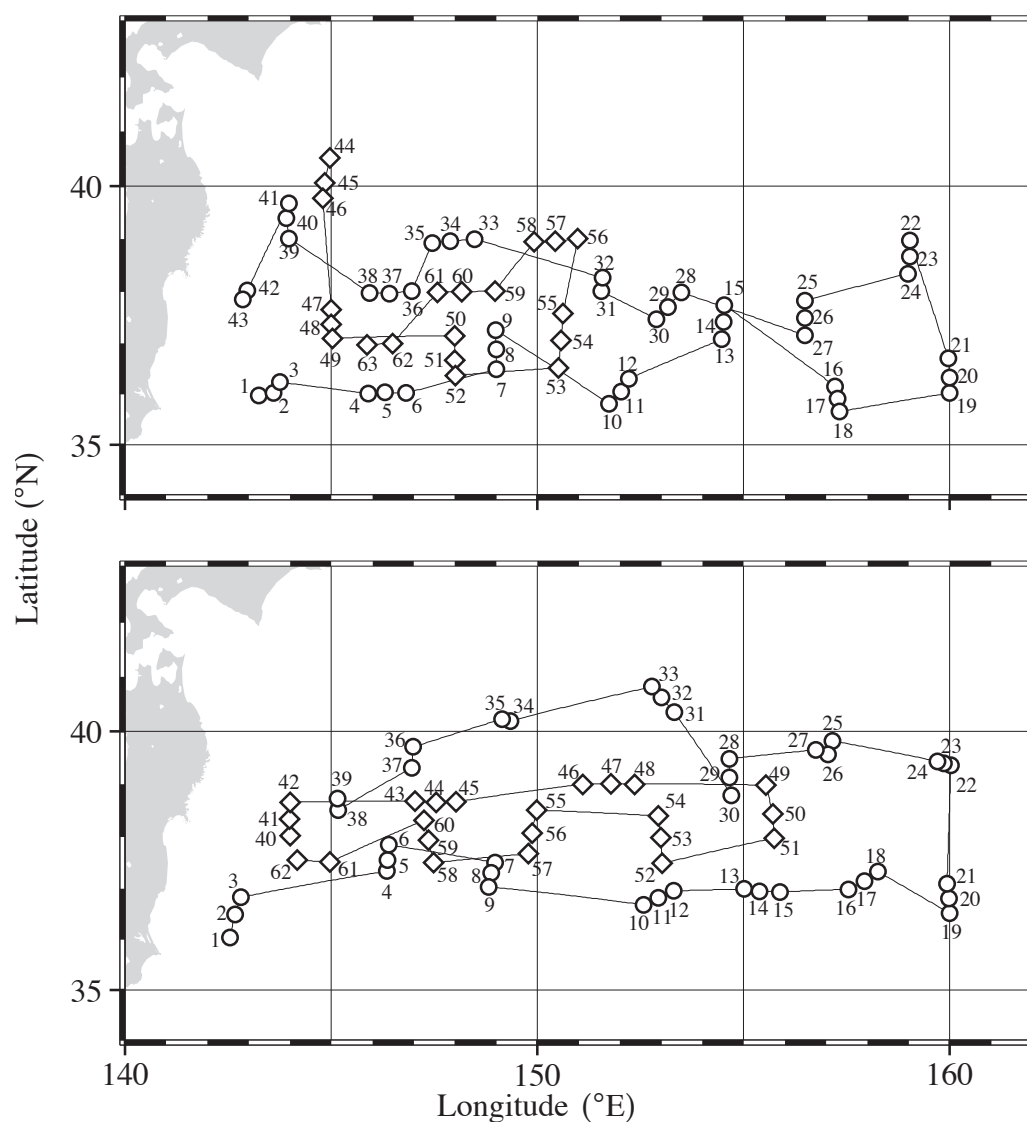


Fig. 2.4-3: Trawl- and CTD- stations off northern Japan in 2014 (*top*) and 2015 (*bottom*) by R/V *Soyo-maru*. Circle and diamond represent station in Leg-1 and Leg-2 for each year, respectively. Number shows station number.

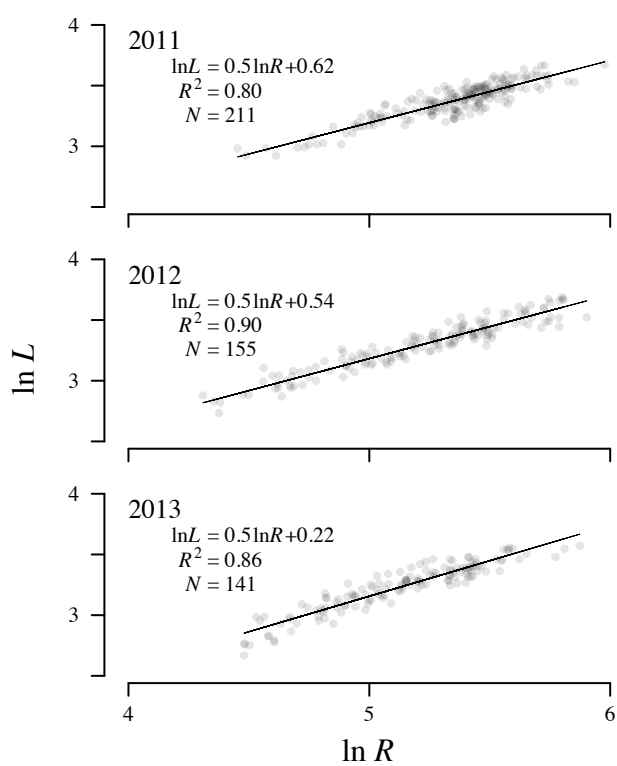


Fig. 2.4-4: R – L relationship of anchovy larvae collected off northern Japan in 2011 (*top*), 2012 (*middle*) and 2013 (*bottom*).

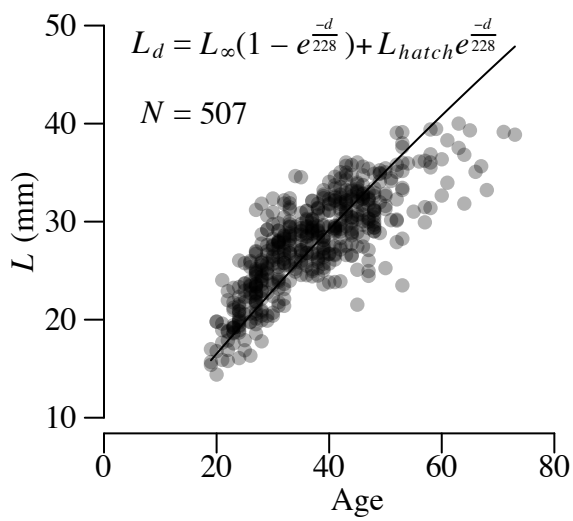


Fig. 2.4-5: d – L relationship of anchovy larvae collected off northern Japan in 3 years from 2011 to 2013. Theoretical asymptotic length, L_∞ , was set to 170 mm (e.g. Kamimura et al., 2014) and L at hatch, L_{hatch} , was to 2.7 mm (Fukuhara, 1992).

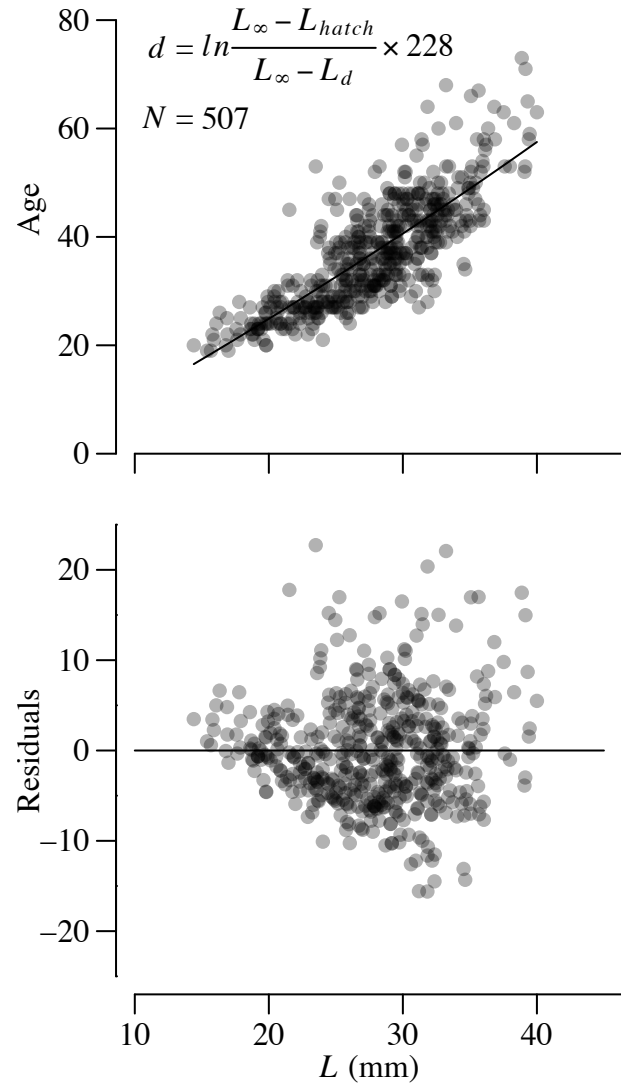


Fig. 2.4-6: L – d relationship of anchovy larvae collected off northern Japan in 3 years from 2011 to 2013 (top) and residual plot of the regression (bottom). Theoretical asymptotic length, L_∞ , was set to 170 mm (Kamimura et al., 2014) and L at hatch, L_{hatch} , was to 2.7 mm (Fukuhara, 1992).

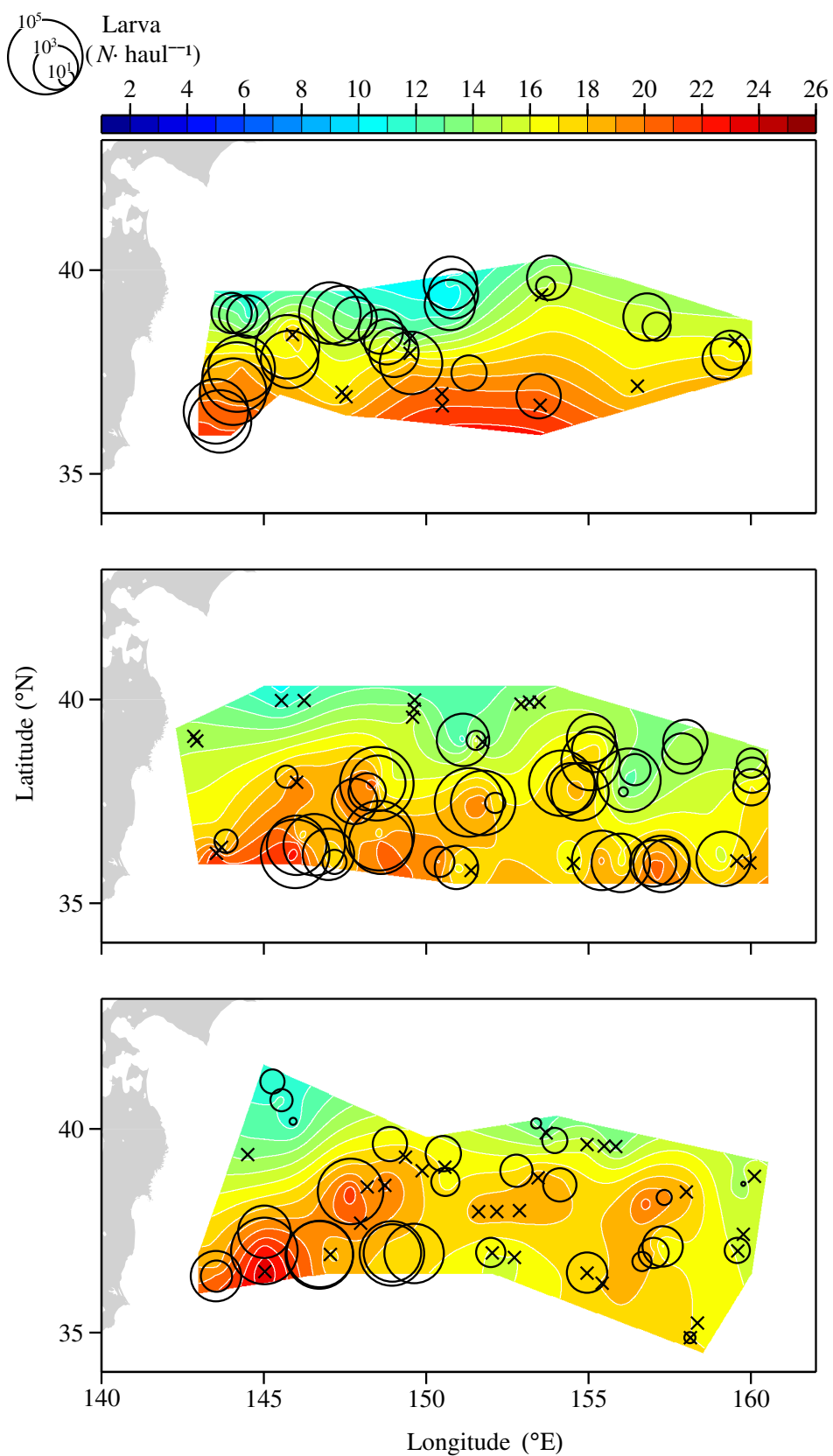


Fig. 2.4-7: Geographical distribution of anchovy larvae and SST off northern Japan in 2011 (*top*), 2012 (*middle*), and 2013 (*bottom*).

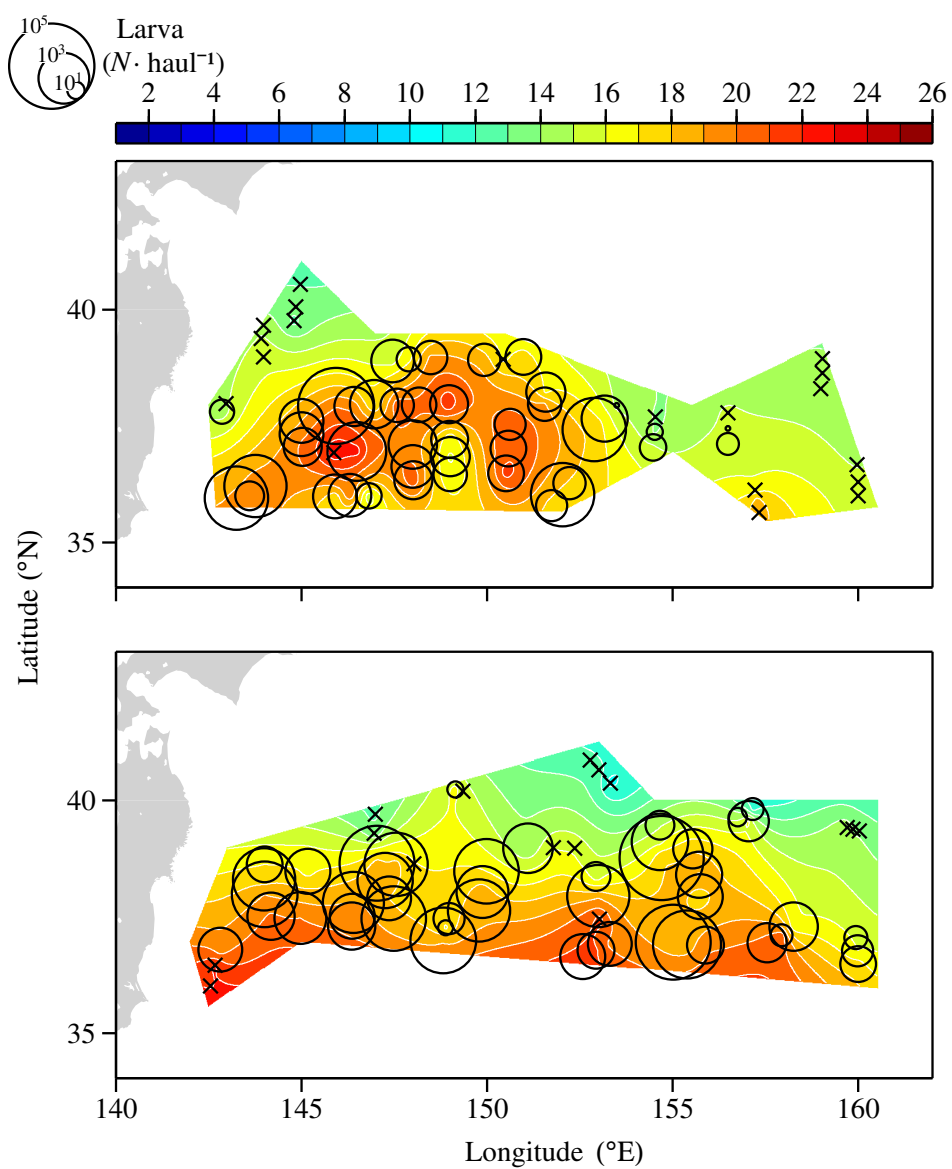


Fig. 2.4-8: Geographical distribution of anchovy larvae and SST off northern Japan in 2014 (*top*) and 2015 (*bottom*).

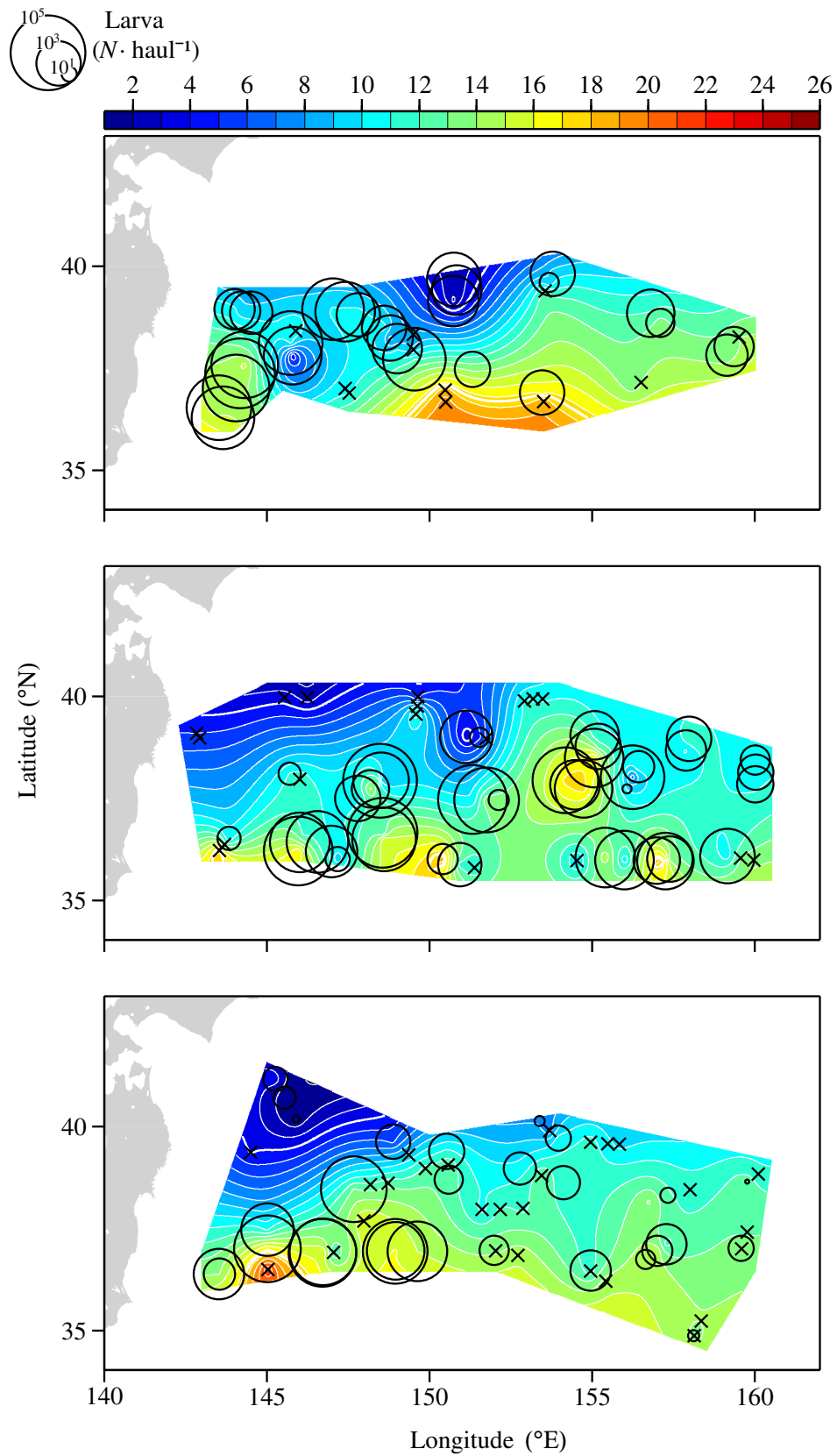


Fig. 2.4-9: Geographical distribution of anchovy larvae and T_{100m} off northern Japan in 2011 (*top*), 2012 (*middle*), and 2013 (*bottom*). Subarctic Front (5.0°C) and Kuroshio Extension Front (17.4°C) were shown by thick white lines.

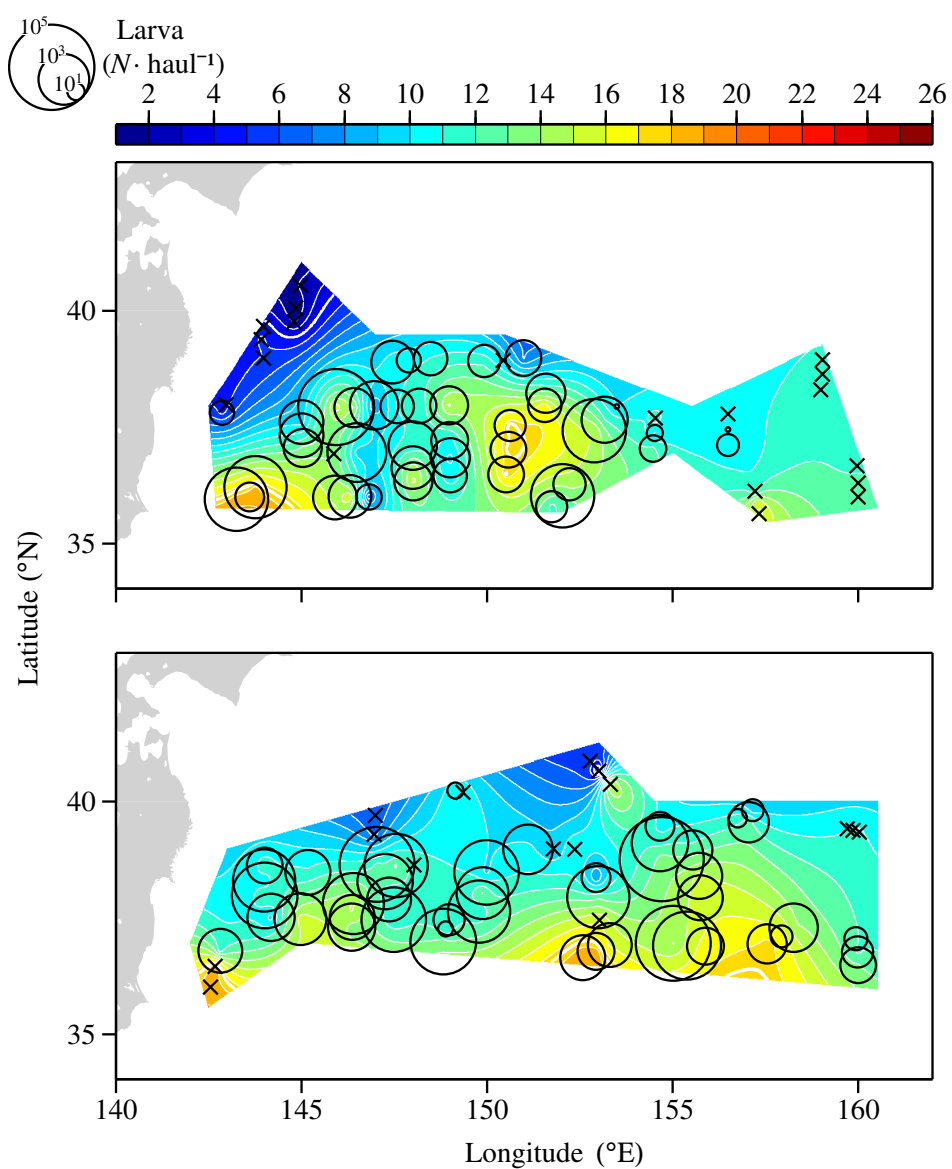


Fig. 2.4-10: Geographical distribution of anchovy larvae and T_{100m} off northern Japan in 2014 (*top*) and 2015 (*bottom*).

Subarctic Front (5.0°C) and Kuroshio Extension Front (17.4°C) were shown by thick white lines.

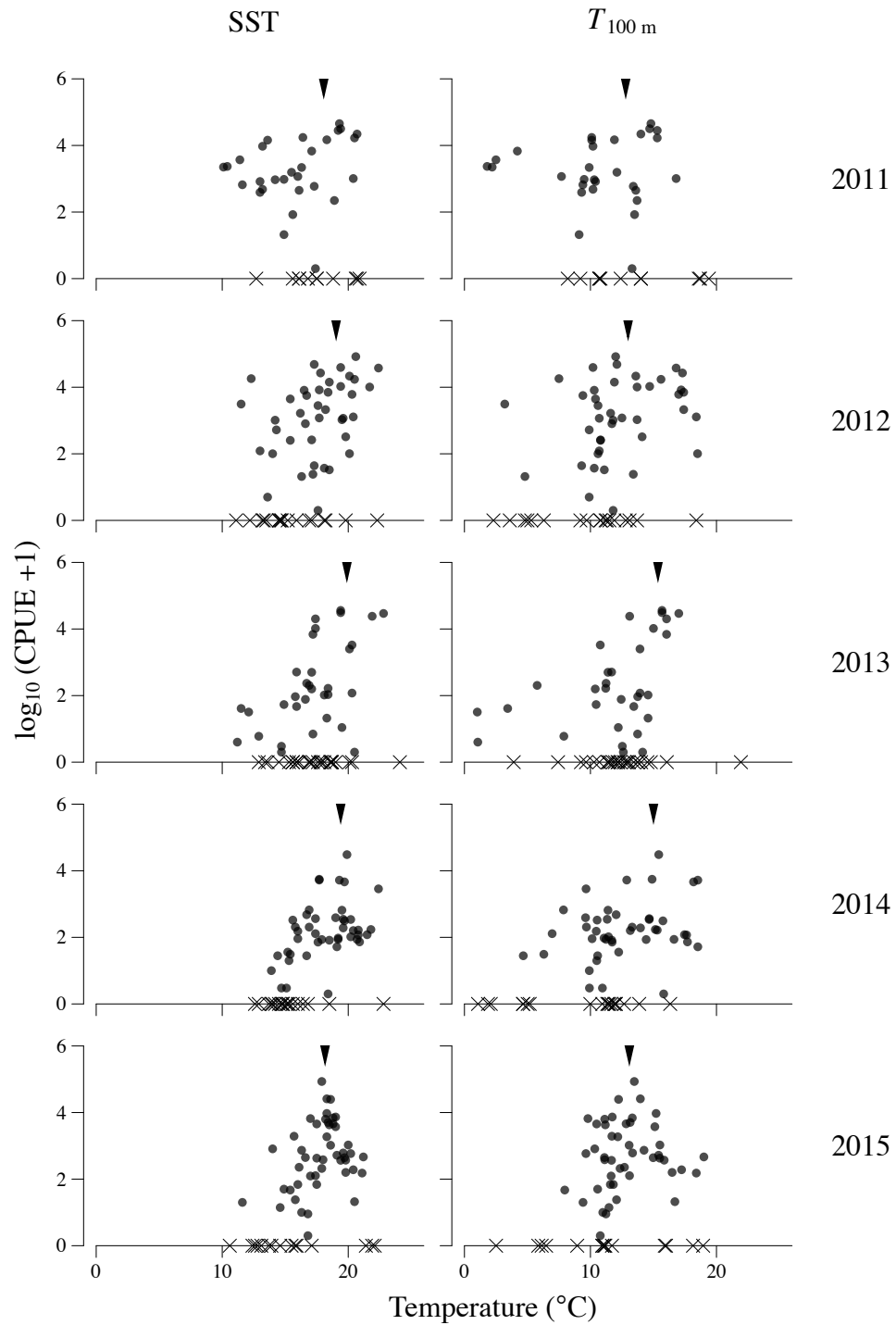


Fig. 2.4-11: Relationship between SST (*left*) or T_{100m} (*right*) and CPUE of anchovy larvae by years off northern Japan.

Cross represents temperature with no larva collection. Arrowhead points T_{larva} calculated by SST (*left*) and T_{100m} (*right*).

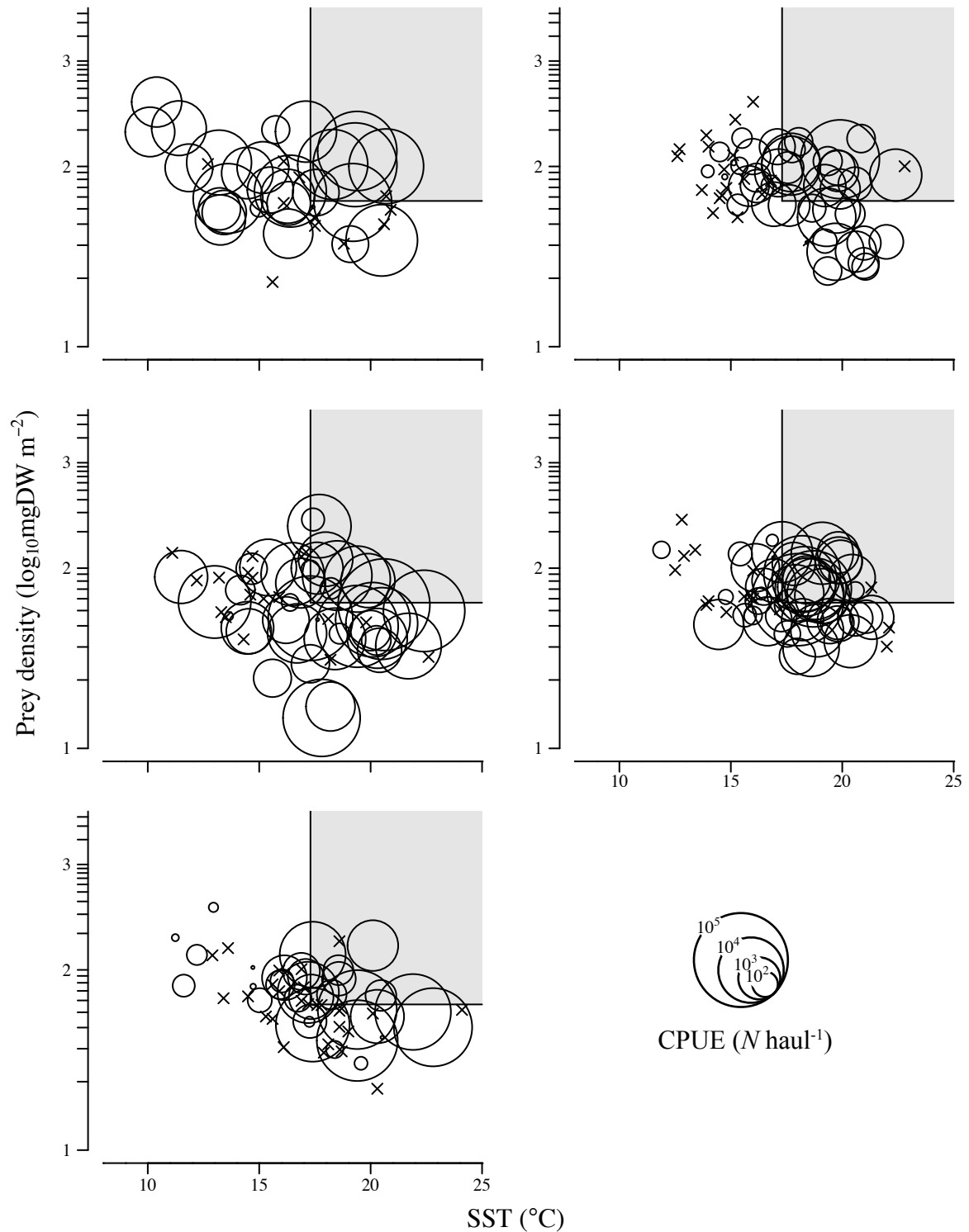


Fig. 2.4-12: Distribution of anchovy larvae in relation to SST and prey density off northern Japan by years. The left column represents the results in 2011–2013 (*top*, *middle*, *bottom*, respectively), and the right in 2014 (*top*) and 2015 (*bottom*). The area of the circle indicates larval CPUE ($N \text{ haul}^{-1}$). Cross indicates negative larva collection. Shaded area indicates the favorable ranges for temperature and prey density estimated by Takahashi et al. (2009).

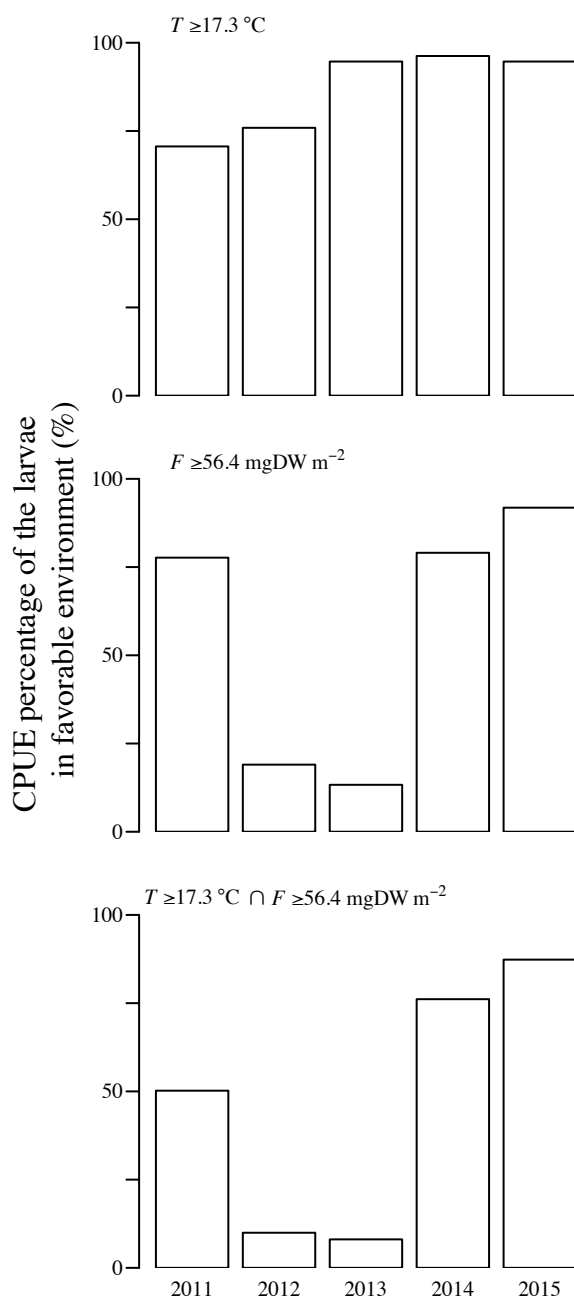


Fig. 2.4-13: Proportion of anchovy larvae CPUE in favorable temperature higher than 17.3°C (*top*), zooplankton density higher than 56.4 mgDW m⁻² (*middle*) and both temperature and food availability (*bottom*) conditions off northern Japan. Favorable temperature and zooplankton density are defined according to Takahashi et al. (2009).

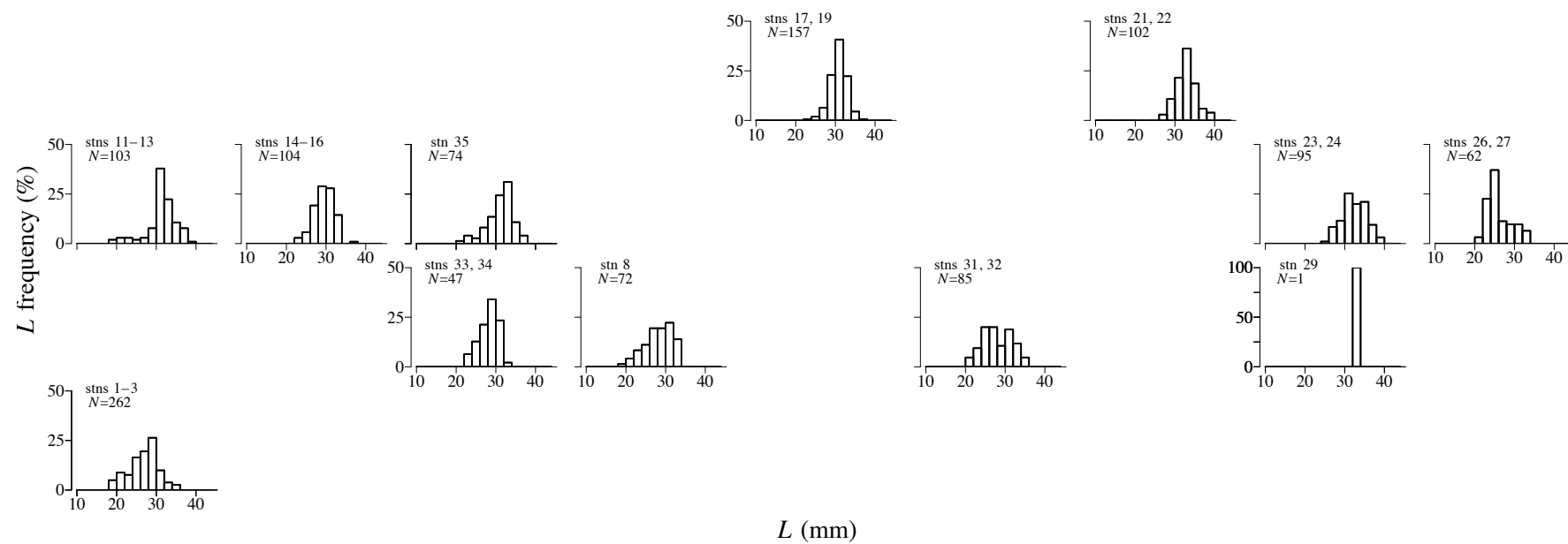


Fig. 2.4-14: L frequency distribution of anchovy larvae off northern Japan in 2011. Arrangement of the panels corresponds to geographical location of the stations.

Open columns represent frequencies of given sampling nights.

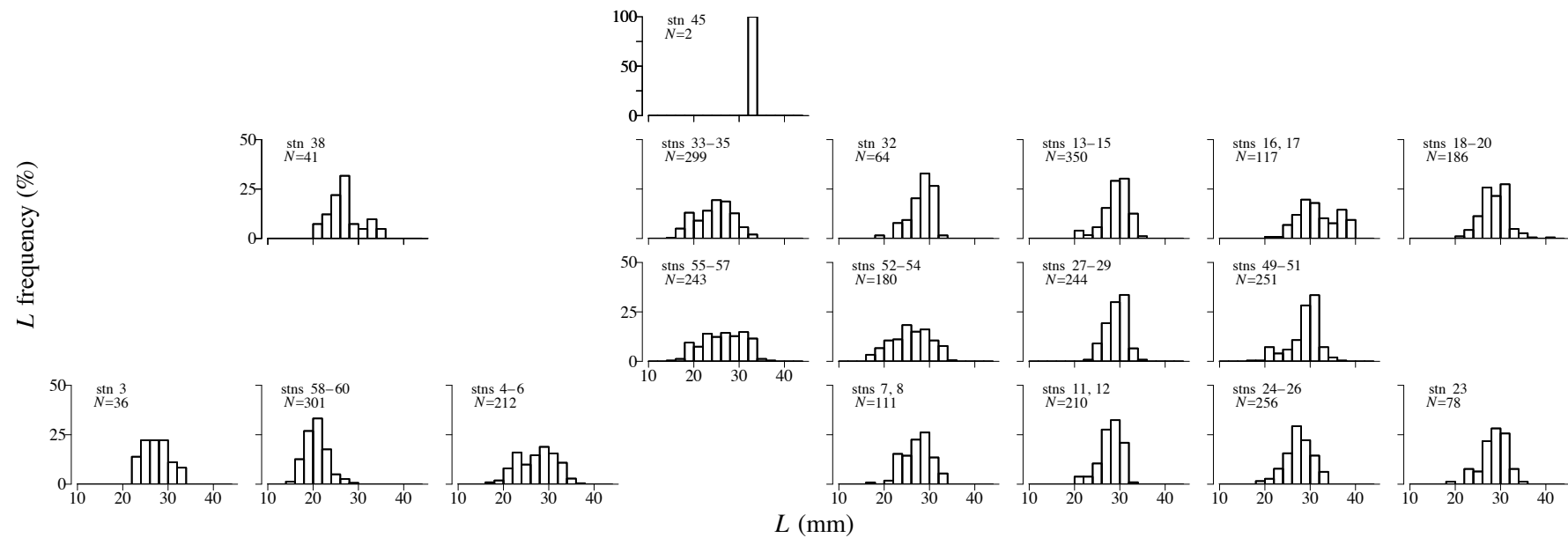


Fig. 2.4-15: L frequency distribution of anchovy larvae off northern Japan in 2012. Arrangement of the panels corresponds to geographical location of the stations.

Open columns represent frequencies of given sampling nights.

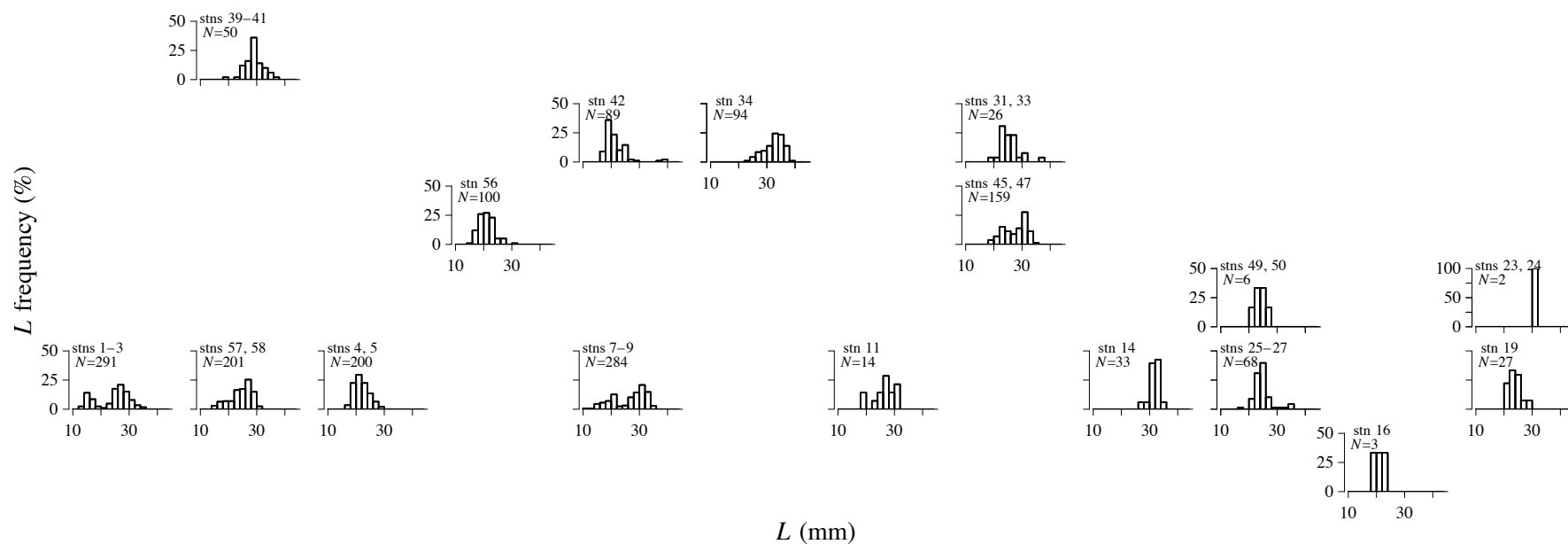


Fig. 2.4-16: L frequency distribution of anchovy larvae off northern Japan in 2013. Arrangement of the panels corresponds to geographical location of the stations.

Open columns represent frequencies of given sampling nights.

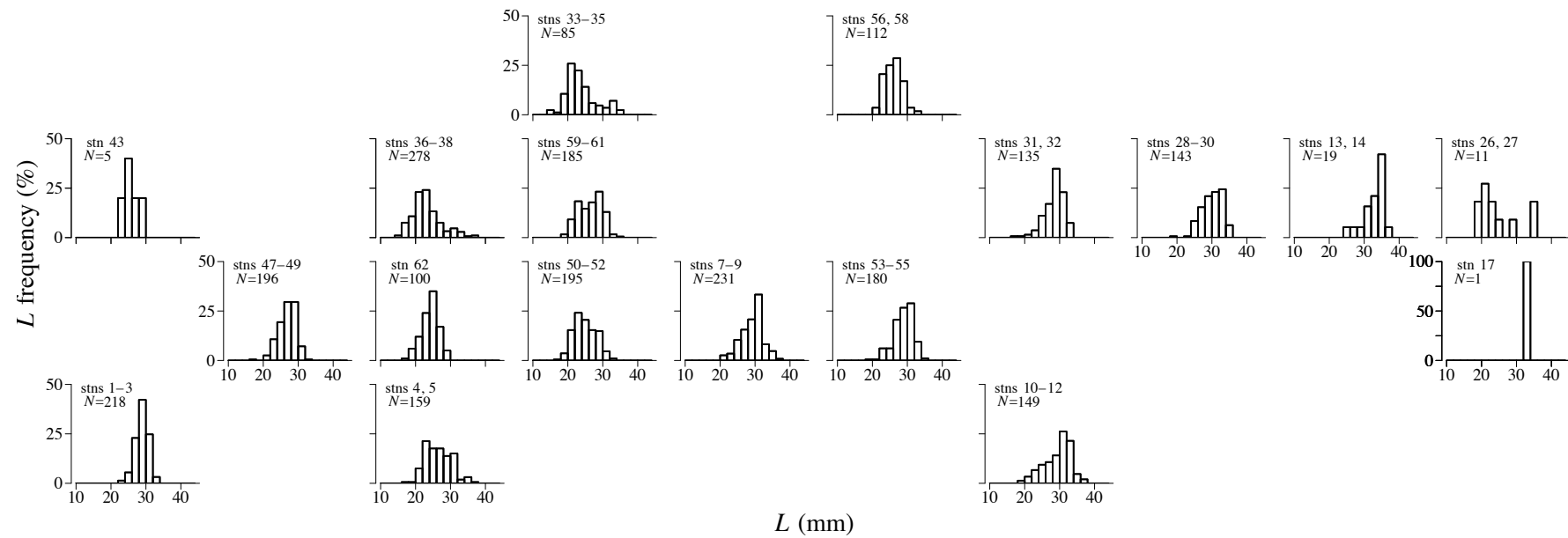


Fig. 2.4-17: L frequency distribution of anchovy larvae off northern Japan in 2014. Arrangement of the panels corresponds to geographical location of the stations.

Open columns represent frequencies of given sampling nights.

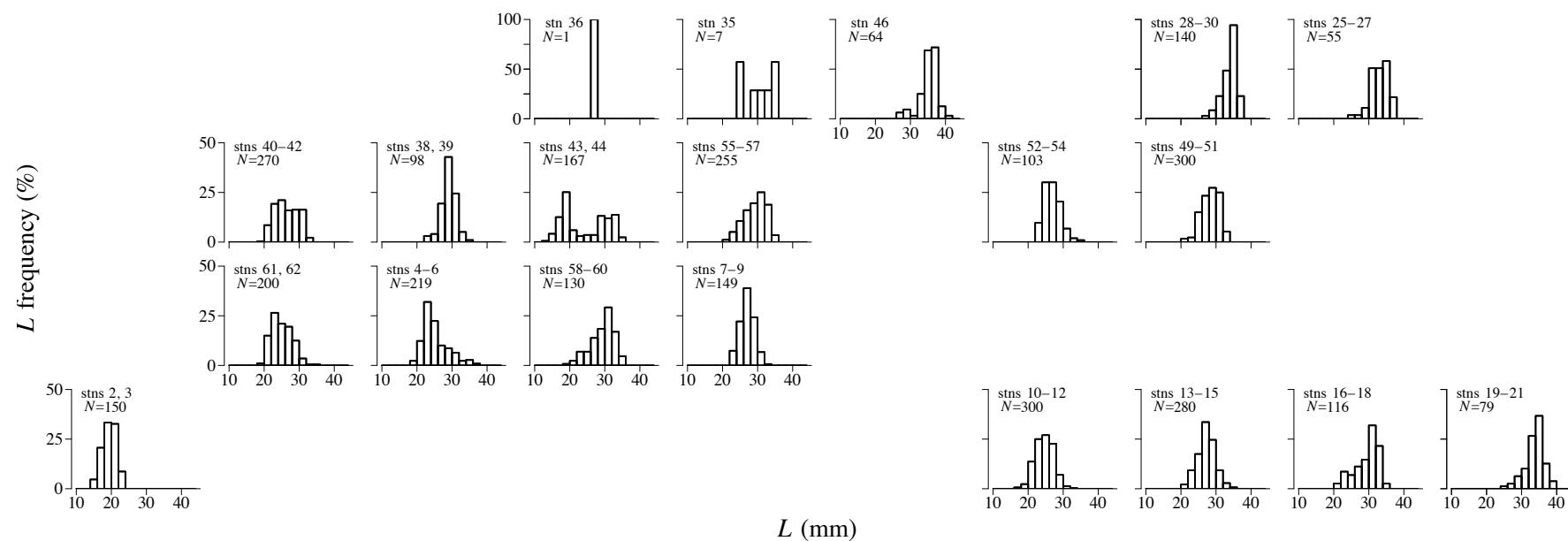


Fig. 2.4-18: L frequency distribution of anchovy larvae off northern Japan in 2015. Arrangement of the panels corresponds to geographical location of the stations.

Open columns represent frequencies of given sampling nights.

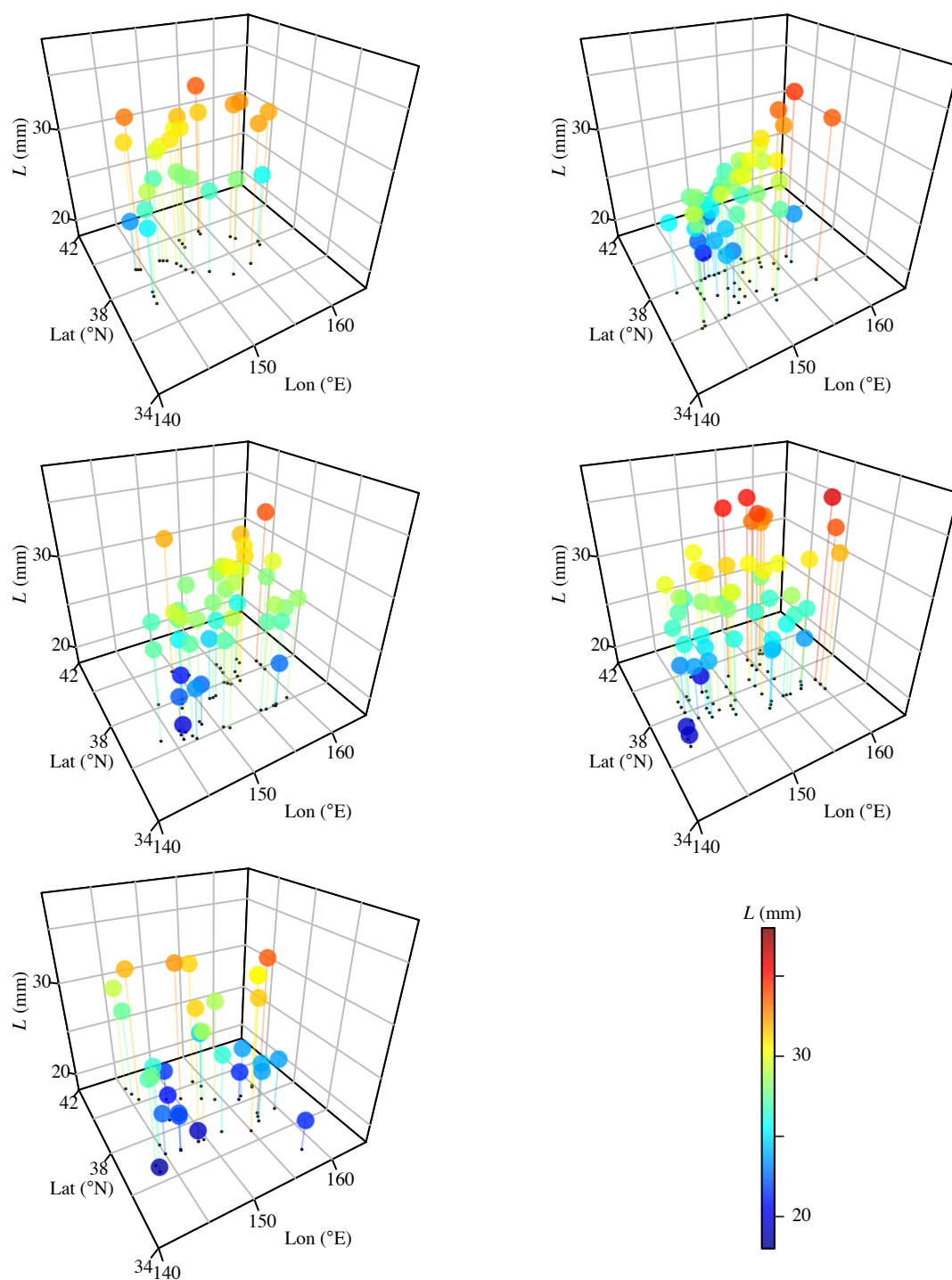


Fig. 2.4-19: Geographical distributions of larval mean L by years off northern Japan. The left column represents the results in 2011–2013 (*top*, *middle*, *bottom*, respectively), and the right in 2014 (*top*) and 2015 (*bottom*). Larval mean L at each station is shown by both z -value and color.

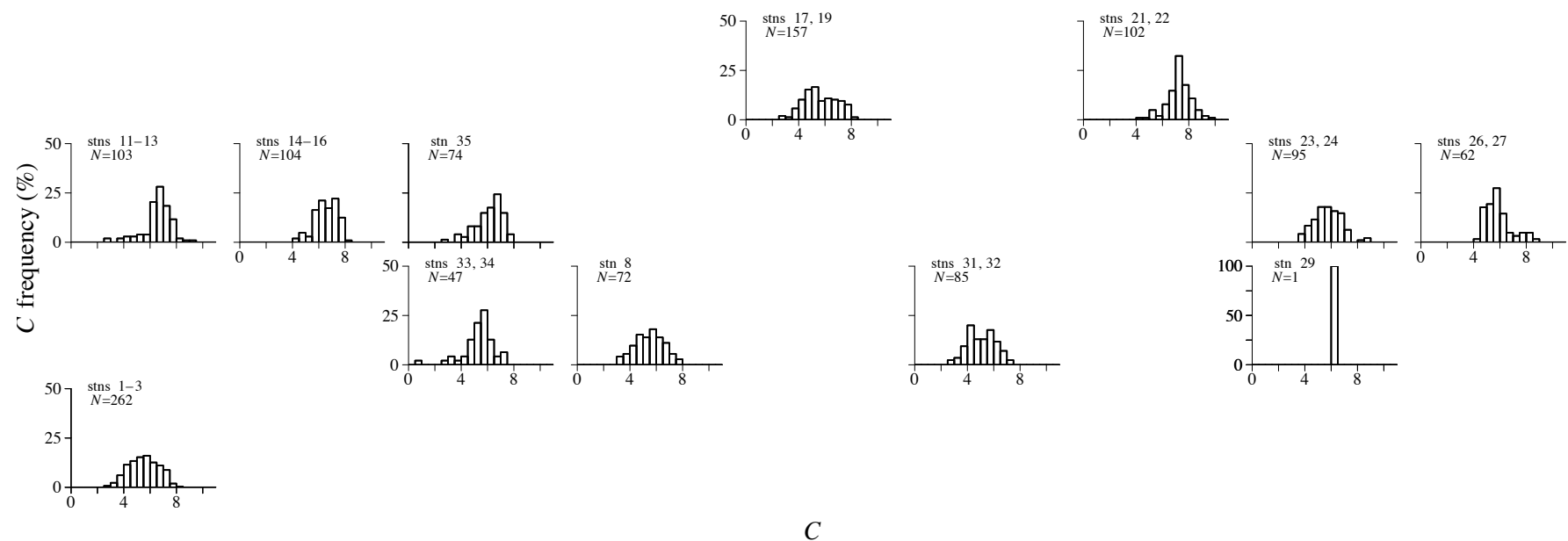


Fig. 2.4-20: *C* frequency distribution of anchovy larvae off northern Japan in 2011. Arrangement of the panels corresponds to geographical location of the stations.

Open columns represent frequencies of given sampling nights.

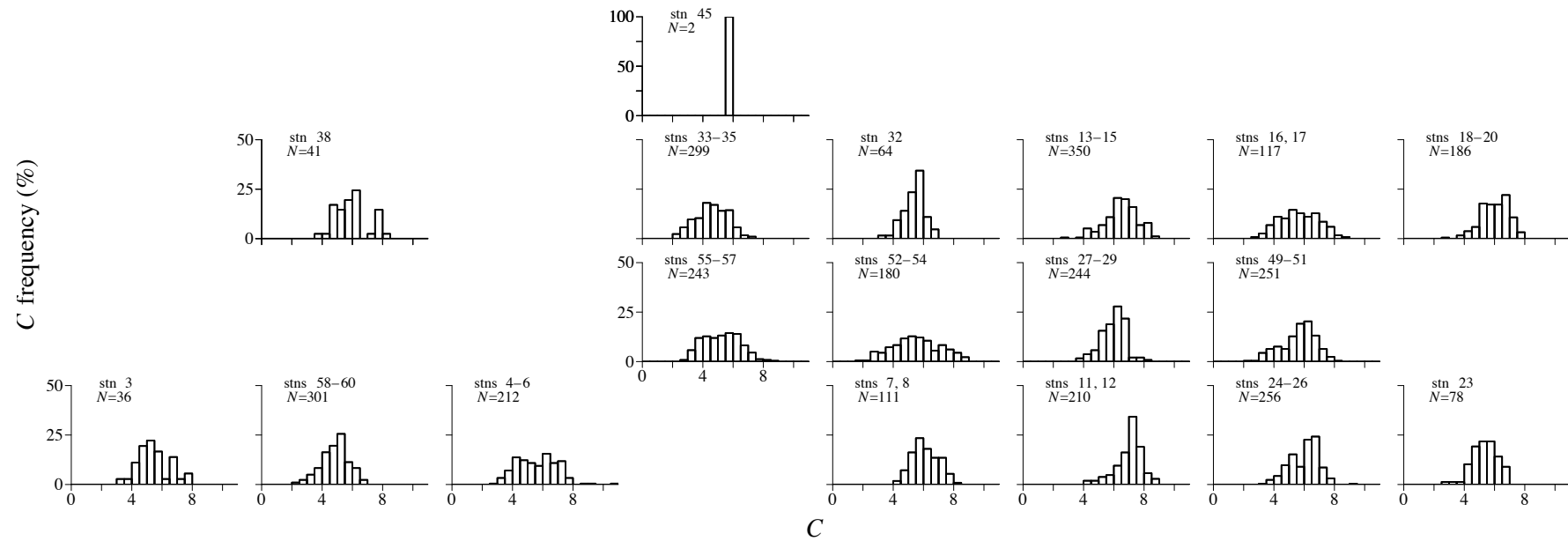


Fig. 2.4-21: *C* frequency distribution of anchovy larvae off northern Japan in 2012. Arrangement of the panels corresponds to geographical location of the stations.

Open columns represent frequencies of given sampling nights.

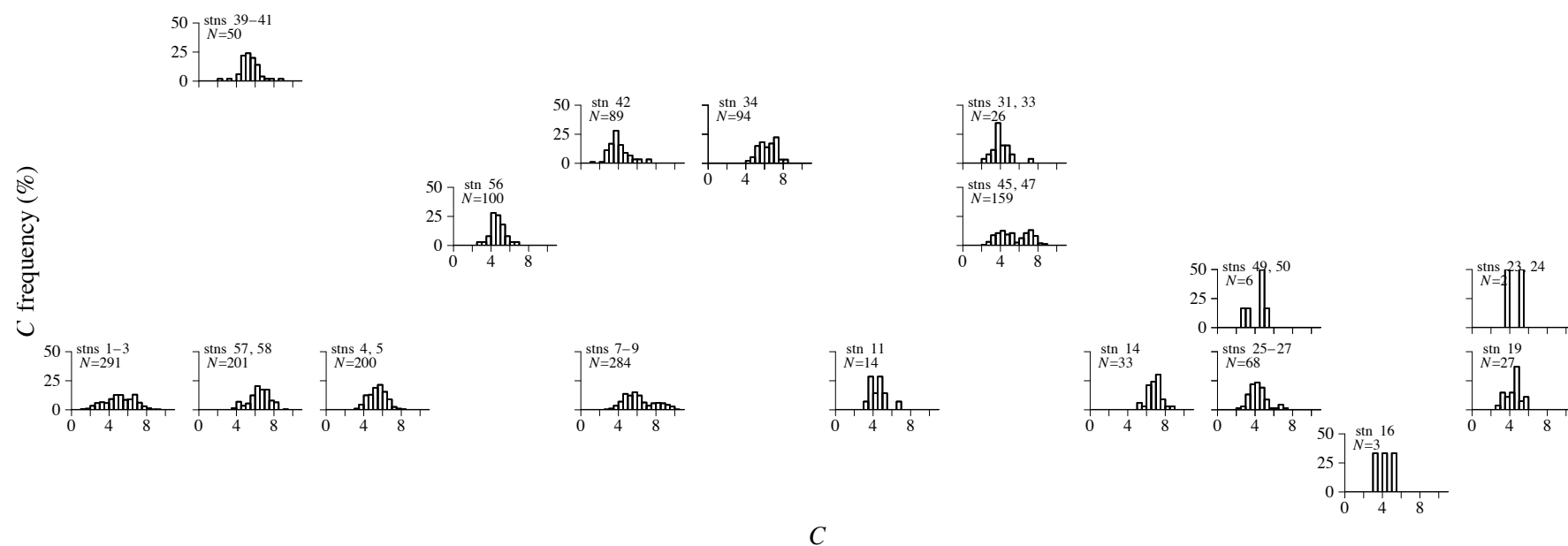


Fig. 2.4-22: C frequency distribution of anchovy larvae off northern Japan in 2013. Arrangement of the panels corresponds to geographical location of the stations.

Open columns represent frequencies of given sampling nights.

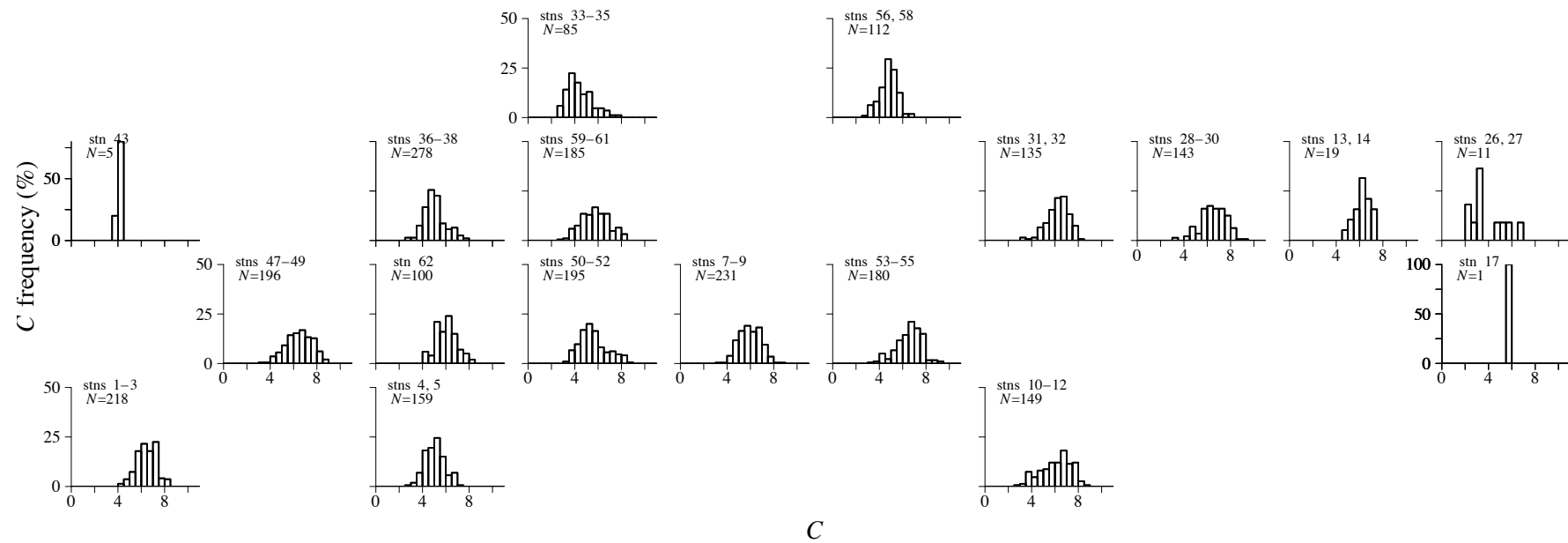


Fig. 2.4-23: C frequency distribution of anchovy larvae off northern Japan in 2014. Arrangement of the panels corresponds to geographical location of the stations.

Open columns represent frequencies of given sampling nights.

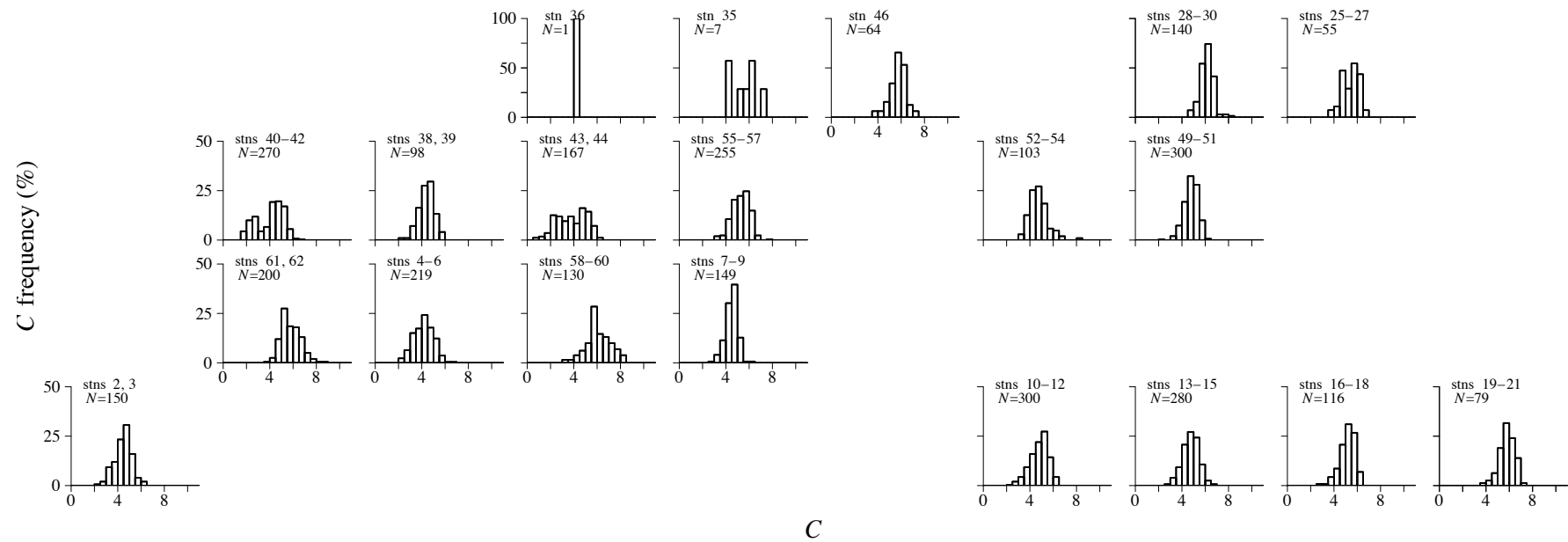


Fig. 2.4-24: *C* frequency distribution of anchovy larvae off northern Japan in 2015. Arrangement of the panels corresponds to geographical location of the stations.

Open columns represent frequencies of given sampling nights.

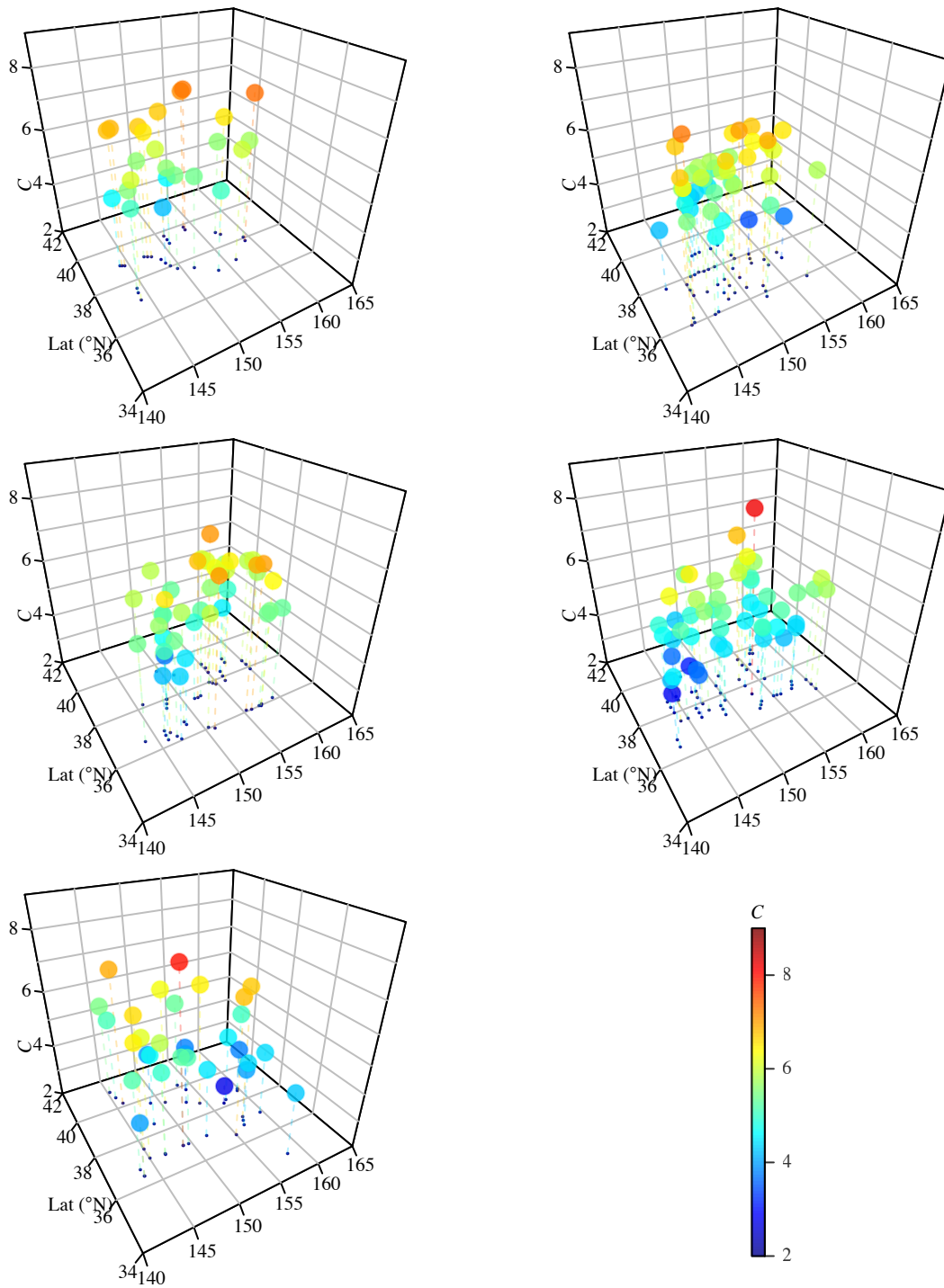


Fig. 2.4-25: Geographical distributions of larval mean C by years off northern Japan. The left column represents the results in 2011–2013 (*top*, *middle*, *bottom*, respectively), and the right in 2014 (*top*) and 2015 (*bottom*). Larval mean C at each station is shown by both z -value and color.

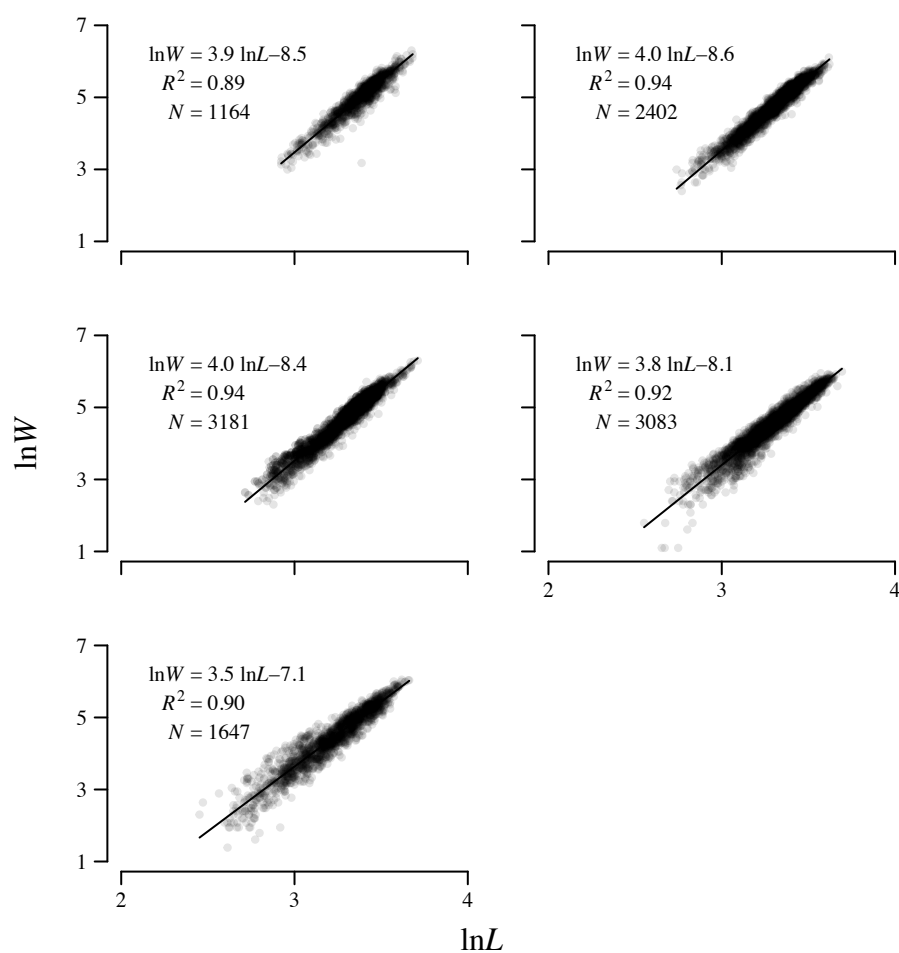


Fig. 2.4-26: L – W relationship of anchovy larvae off northern Japan by years. The left column represents the results in 2011–2013 (*top*, *middle*, *bottom*, respectively), and the right in 2014 (*top*) and 2015 (*bottom*).

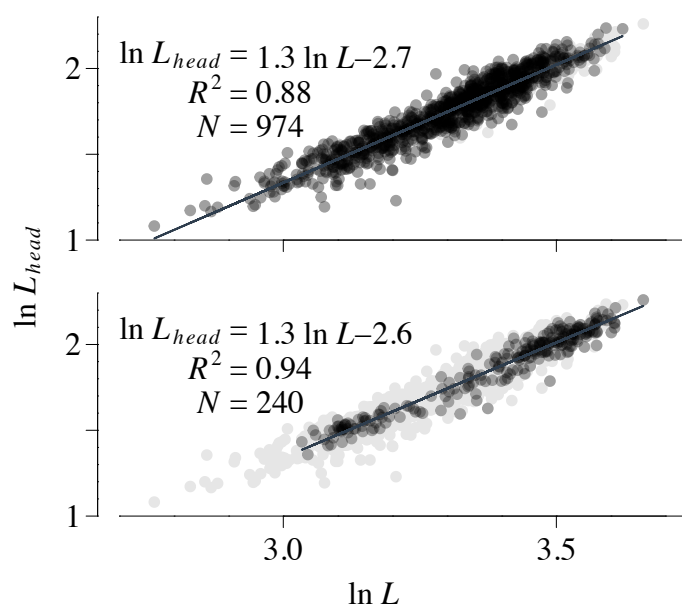


Fig. 2.4-27: L – L_{head} relationship of anchovy larvae off northern Japan by years in 2014 (*top*) and 2015 (*bottom*).

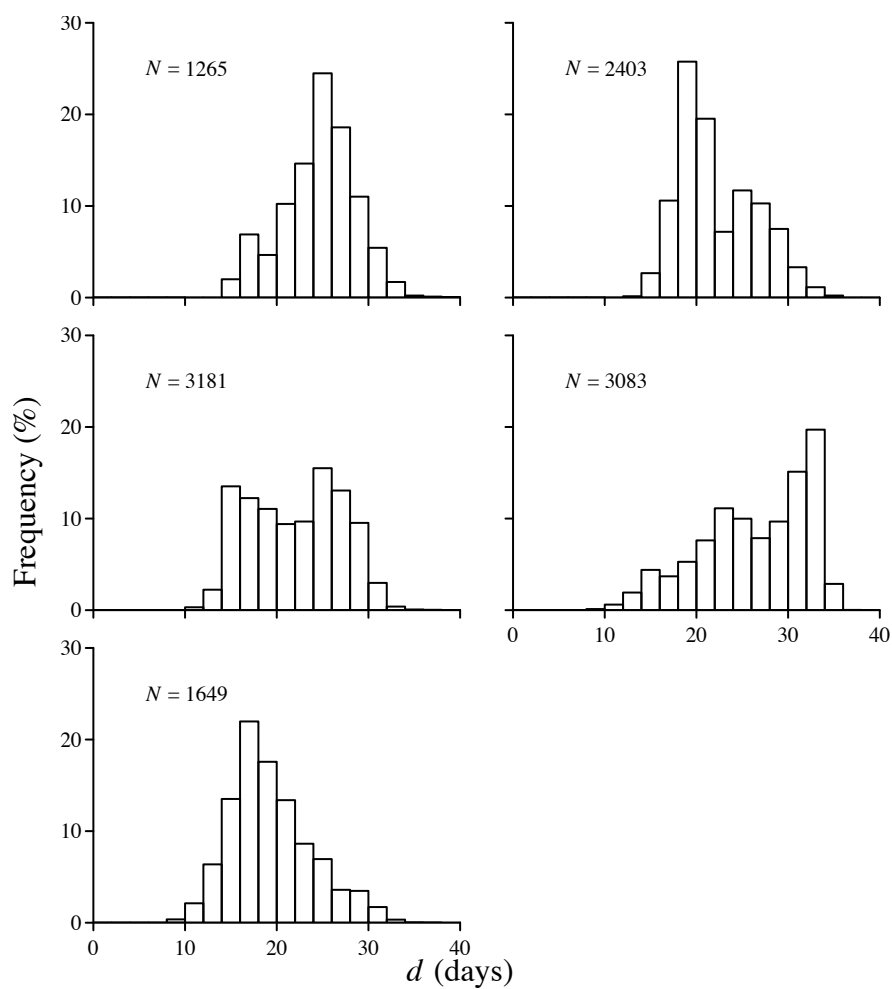


Fig. 2.4-28: d frequency distribution of anchovy larvae by years off northern Japan. The left column represents the results in 2011–2013 (*top*, *middle*, *bottom*, respectively), and the right in 2014 (*top*) and 2015 (*bottom*).

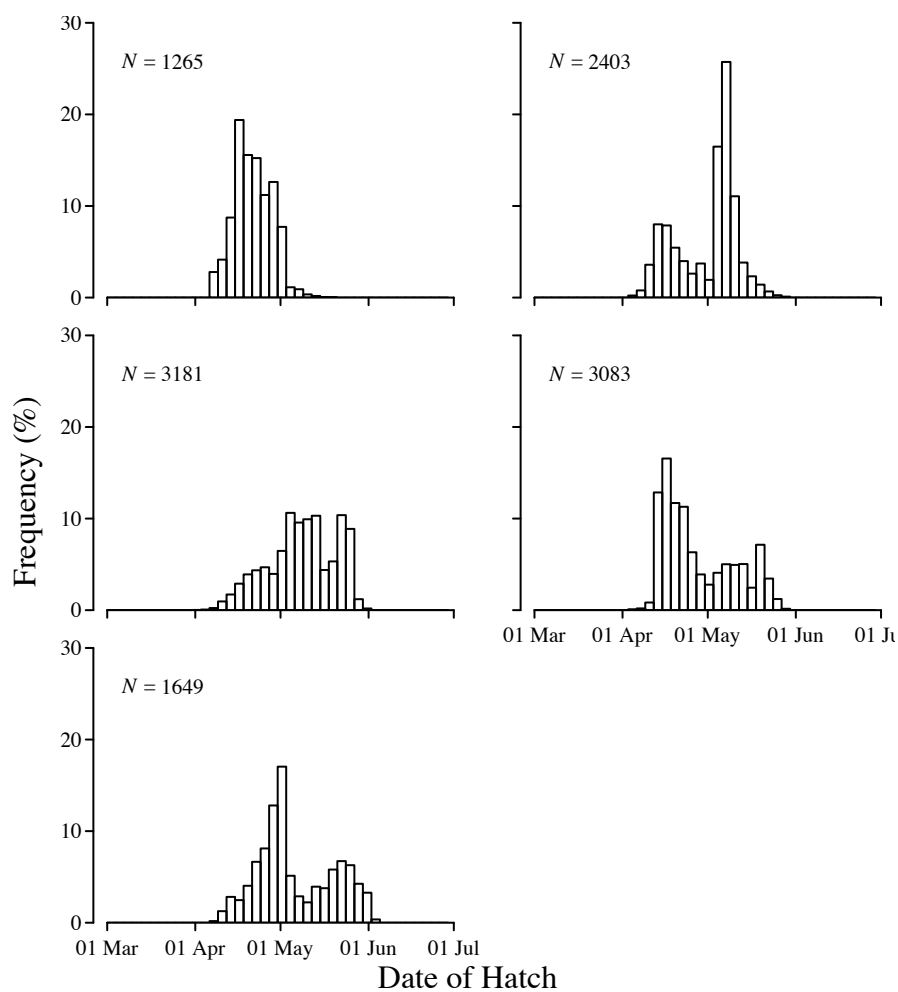


Fig. 2.4-29: Hatch-date frequency distribution of anchovy larvae by years off northern Japan. The left column represents the results in 2011–2013 (*top*, *middle*, *bottom*, respectively), and the right in 2014 (*top*) and 2015 (*bottom*).

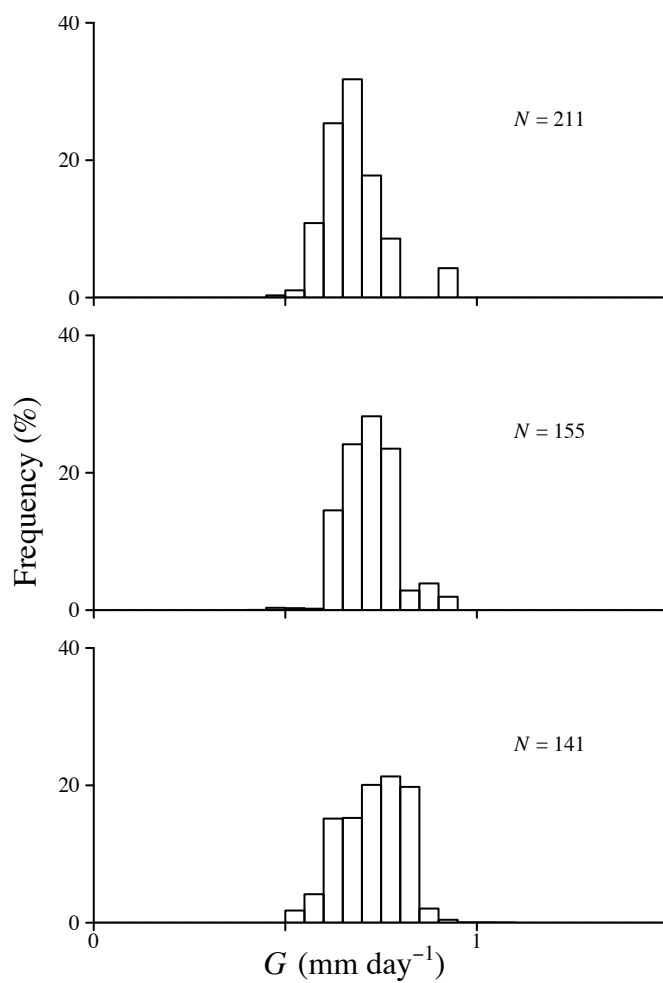


Fig. 2.4-30: G frequency distribution of anchovy larvae by years off northern Japan. The left column represents the results in 2011 (*top*), 2012 (*middle*) and 2013 (*bottom*).

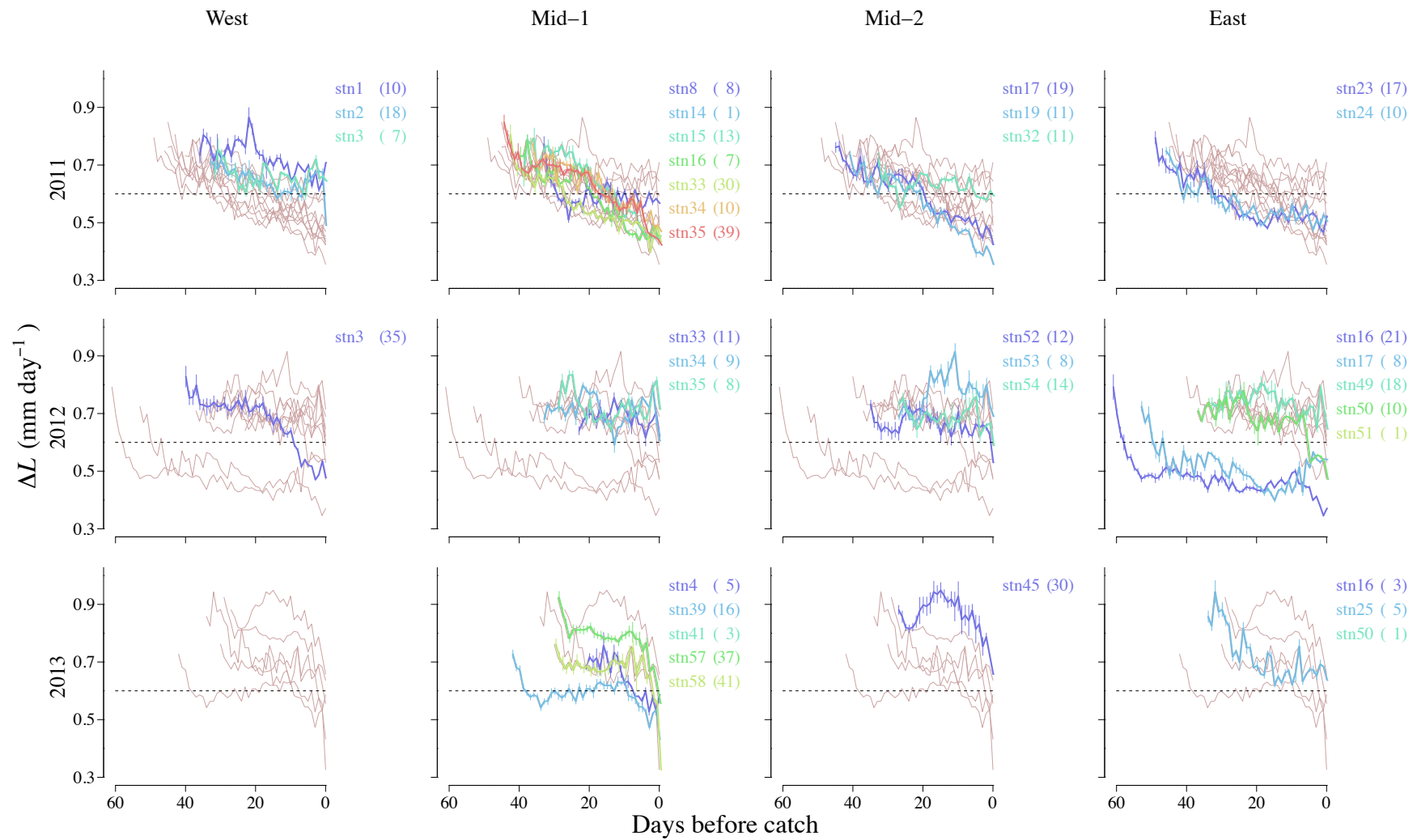


Fig. 2.4-31: L -growth increment of anchovy larvae off northern Japan by stations, areas and years. Number in parentheses represents the number of specimens.

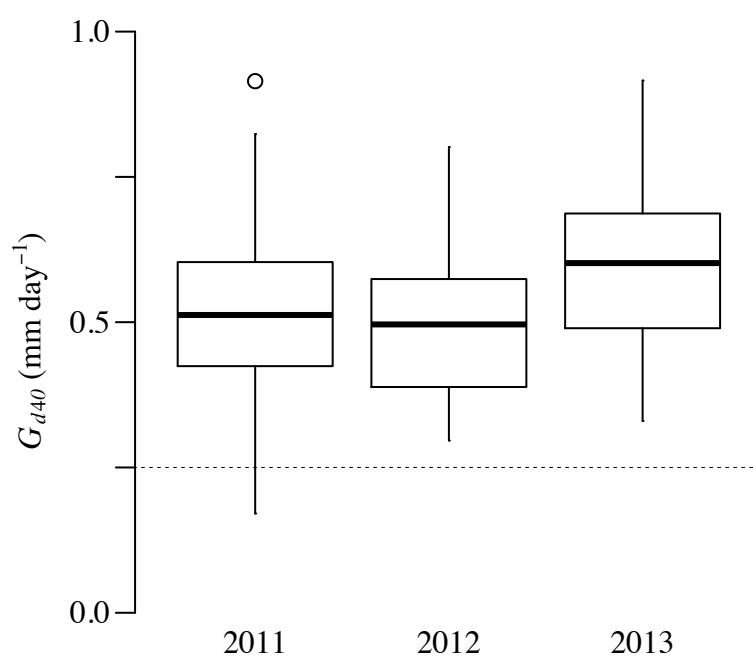


Fig. 2.4-32: G_{d40} of anchovy larvae off northern Japan by years. Top and bottom ends of box represent the third and the second quartiles and thick horizontal line in the box represents the median. The end of the upper and the lower hinge represents the first and the fourth quartiles. Dot represents an outlier. Horizontal dashed line represents the slowest possible growth rate for survival reported by Takahashi and Watanabe (2004b).

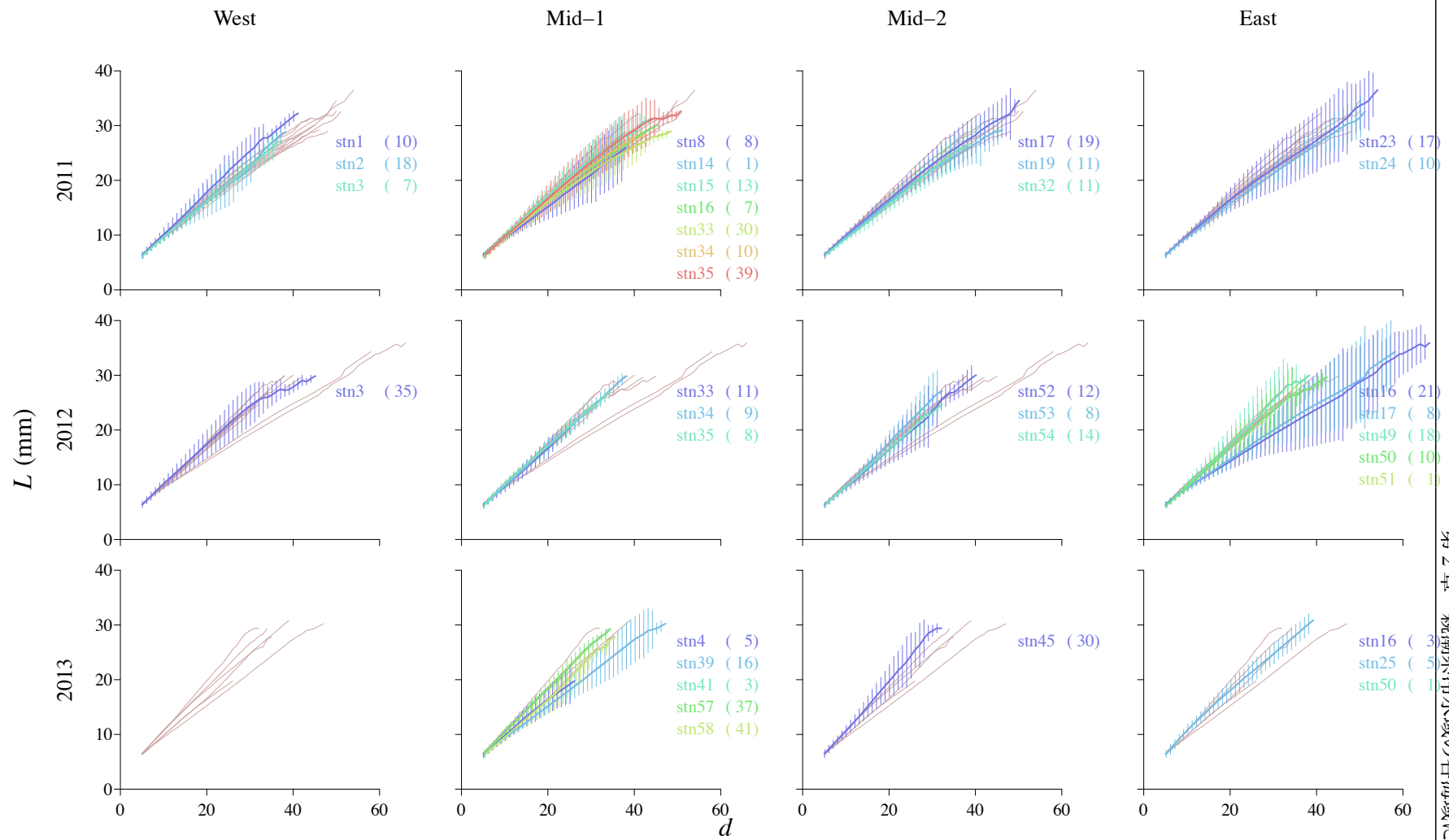


Fig. 2.4-33: L -growth history of anchovy larvae off northern Japan by years, areas and stations. Number in parentheses represents the number of specimens.

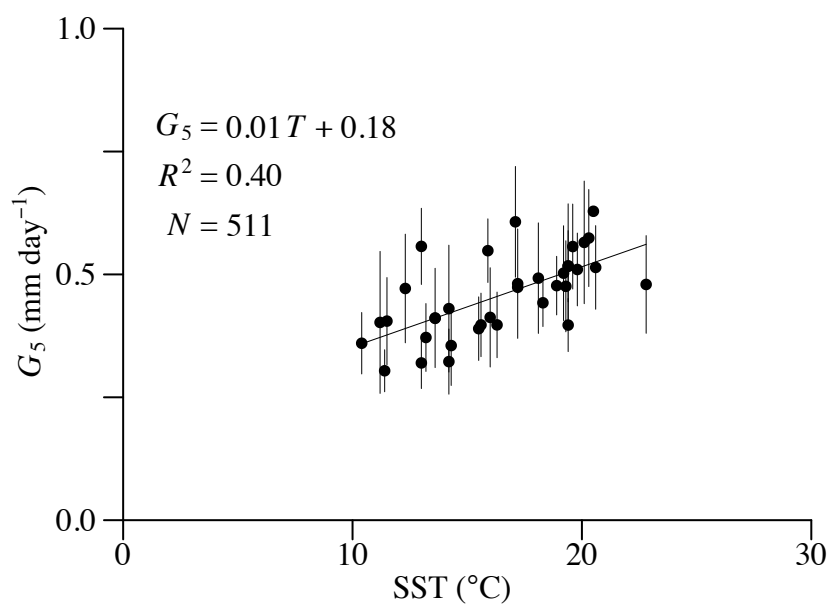


Fig. 2.4-34: Relationship between SST and G_5 of anchovy larvae off northern Japan in 2011–2013. Each plot and vertical line represent mean G_5 of anchovy larvae and their standard deviation at each trawl station.

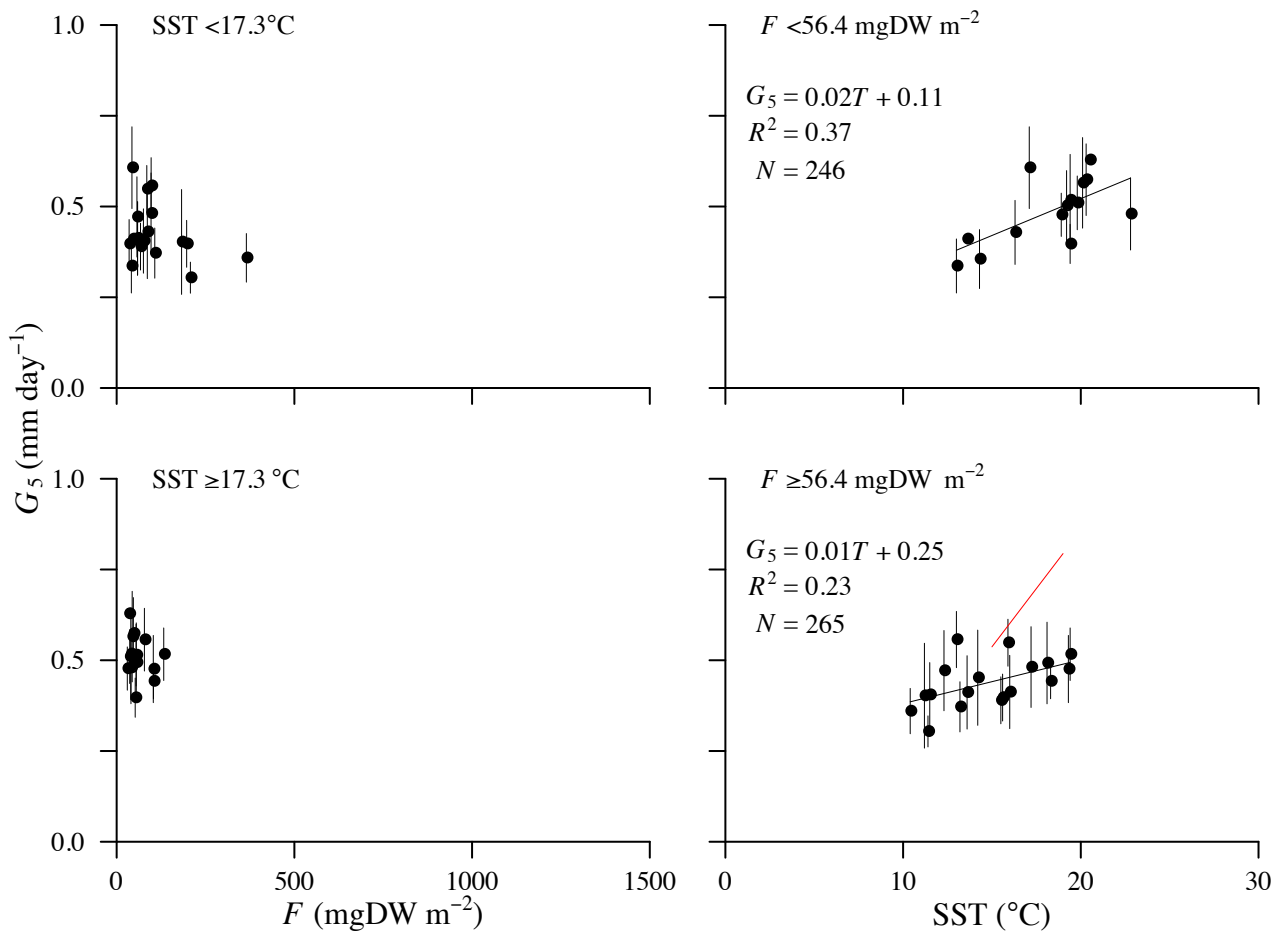


Fig. 2.4-35: G_5 of anchovy larvae under unfavorable ($<17.3^\circ\text{C}$) and favorable ($\geq 17.3^\circ\text{C}$) T and unfavorable ($<56.4 \text{ mgDW m}^{-2}$) and favorable ($\geq 56.4 \text{ mgDW m}^{-2}$) density of food organisms off northern Japan in 2011–2013. Each plot and vertical line represent mean G_5 of anchovy larvae and their standard deviation at each trawl station. Red line in the right bottom panel represents the regression obtained from larvae collected in 1997–1999 (Takahashi and Watanabe, 2005).

第 3 章

資源量変動と資源構造変化に関わる初期生態

第 2 章において各海域における初期生態を明らかにしたことによって、親潮系冷水域がカタクチイワシの産卵場および仔稚魚期の成育場として機能していることがわかった。第 3 章ではカタクチイワシの資源量変動および資源構造の変化の仕組みを解明するために、第 2 章で得られた卵仔稚魚データを詳しく解析し、必要に応じて他海域や過去のデータと比較対照した。第 3.1 節で親潮系冷水域における産卵場の形成要因と産卵場の拡大機構を検討し、第 3.2 節では粒子追跡実験によって本海域沿岸の仔稚魚資源の由来と構成比を検討した。第 3.3 節では親潮系冷水域で採集された仔稚魚の成長・変態動態を黒潮系暖水域と比較し、本種の初期成育場がどのように本海域へと拡大したのかを考察した。第 3.4 節では、黒潮親潮移行域における仔魚の分布と成長を、資源量減少年代と資源量増加年代との間で比較することによって、本種の資源量変動機構を考察した。

3.1 産卵場の形成と拡大

3.1.1 はじめに

海流系の違いに着目したカタクチイワシの繁殖生態研究の歴史は浅く、海域間比較の着眼点は主として沿岸域と沖合域の違いにあった (Funamoto and Aoki, 2002; 鶴田, 1992)。ニシン目魚類の資源量変動様式の種間差異が、繁殖生態や成育場として利用する海流系の生態系構造と対応していることが指摘されると (Watanabe, 2007)、同様の着眼点を持ったカタクチイワシの繁殖生態研究によって (須原ら, 2013)、摂餌によって得たエネルギーを直ぐに繁殖へ配分する

income breeder 的と一括りに理解されてきた本種の産卵生態が、親潮域では索餌期にエネルギーを蓄積して後の産卵期になってそれを繁殖へ投資する capital breeder 的であると理解されるようになった。本研究では、親潮系冷水域における卵の分布から産卵期を決める要因を調べ、緯度的比較を通して本海域におけるカタクチイワシの産卵生態の特徴を明らかにした。続いて解析によって得られた、産卵水温と臨界日長を用いて、本種が産卵場として利用可能な水域の面積を推定し、その長期変動履歴から産卵場拡大のしくみを考察した。

3.1.2 材料と方法

1980–2015 年の三陸沿岸海域におけるカタクチイワシ卵仔魚分布密度データ（第 2.2 節）を採集の有無によって 2 値データに変換し、調査点の表面水温（ T , °C）との関係を Lluch-Belda et al. (1991) の方法に従って解析した。卵（仔魚）が採集された調査点のみの水温（ t^+ ）と全調査点の水温（ t ）を 0.5°C 間隔の水温階級に分け、 i 番目の水温階級における頻度分布をそれぞれ式 3.1 と式 3.2 のように求めた、

$$T_i^+ = \frac{t_i^+}{\sum t_i^+} \quad (3.1)$$

$$T_i = \frac{t_i}{\sum t_i} \quad (3.2)$$

各水温階級について、式 3.3 のように卵（仔魚）の分布指数（ Q ）を求めた。

$$Q_i = \frac{T_i^+}{T_i} \quad (3.3)$$

各調査点の調査年月日と緯度経度から日長（hr）を計算して（長沢, 1999）6 分間隔の日長階級に分け、日長に対する卵の分布指数を水温と同様に求めた。水温と日長の両変数について、5 階級間における卵（仔魚）の分布指数の移動平均値を解析に用いた。

日本海洋データセンター^{*i}より日本の太平洋岸の定置水温データを入手し、水温の季節変化を緯度間で比較した。利用可能であった 2002–2009 年の定置水温データのうち、欠測の少なかつ

^{*i} <http://www.jodc.go.jp>

た 2002 年の宮城県^{*i}，茨城県^{*ii}，神奈川県^{*iii}，和歌山県^{*iv}および宮崎県^{*v}の 365 日分のデータを用いた。水温の季節変化と日長の季節変化の対応を調べる目的で，各定置水温の観測点について，水温データの観測年月日における日長を緯度経度から求めた(長沢, 1999)。中央ブロック卵・稚仔，プランクトン調査研究担当者協議会研究報告(石田ら, 2002)よりカタクチイワシ卵分布の有無の 2 値データを得て，定置水温観測点の周辺海域におけるカタクチイワシの産卵期を調べた。三陸沿岸海域では 2002 年における卵分布データが欠損していたため，2012 年の卵分布データと水温・日長データを解析に用いた。

東北沖合海域における水温の長期変動履歴を調べる目的で，超高解像度海洋大循環モデル(OFES)^{*vi}の 1950–2007 年 4–9 月における月平均表面水温データを解析した。カタクチイワシの産卵適水温(Takasuka et al., 2008a)から，水温が 15–28°C の水域をカタクチイワシの産卵可能水域と定義し，北緯 38–45 度，東経 142–145 度に設定した調査領域における産卵可能水域の面積を算出した。産卵可能水域の面積が気候変動に伴ってある水準から別の水準へと跳躍的に変移すると考え，1950–2007 年の調査期間における有意な変移を Rodionov (2004) の方法に従って検出した。

3.1.3 結果

水温・日長と卵分布

仔魚の分布指数は 18.5°C 以上の水温階級で 1 を超える傾向にあり，高水温側において分布指数の低下は認められなかった(Fig. 3.1-1 上)。一方，卵の分布指数は水温階級 15.0–15.5°C をピークとする尖度の高い分布様式を示し，概ね水温階級 14–17.5°C よりも低水温側と高水温側に向かって低下した(Fig. 3.1-1 下)。卵の分布指数の中心は太平洋岸全域で採集された卵のデータセットを用いて同様の手法を用いて算出されたカタクチイワシの好適産卵水温範囲(15.6–27.8°C, Takasuka et al., 2008a)の下限近くに位置し，19°C 以上の水温階級では，卵の分

^{*i} 牡鹿半島: 38-22N, 141-29E

^{*ii} 那珂湊: 北緯 36 度 23 分, 東経 140 度 38 分

^{*iii} 三浦半島: 北緯 35 度 08 分, 東経 139 度 38 分

^{*iv} 岸本港: 北緯 33 度 29 分, 東経 135 度 48 分

^{*v} 熊野江港: 北緯 32 度 40 分, 東経 131 度 47 分

^{*vi} 水平解像度: 0.1 度

布指数はほぼ1となった。日長階級に対する卵の分布指数を調べた結果、卵の分布は13時間以上の日長階級に集中していた (Fig. 3.1-2)。

産卵可能水域の長期変動

1950–2007年の4–10月において、産卵可能水域の面積が調査領域に占める割合を Fig. 3.1-3 に示した。産卵可能水域の面積が調査領域に占める割合は季節的昇温とともに増加する傾向にあったが、その年変動は昇温が進んでいない春季から初夏に大きく、夏季には小さいことがわかった。産卵可能水域の変動幅 (CV) は4月には0–29.0% (127.0%)、5月には0.1–37.3% (76.6%)、6月には18.1–57.3% (23.9%)、7月には49.1–88.8% (12.4%)、8月には71.4–90.1% (5.8%)、9月には69.8–89.8% (6.4%) であった。調査領域において、表面水温がカタクチイワシの産卵適水温の上限を上回る水域はほとんど現れなかった。

産卵可能水域の変動が大きかった4–6月に加え、9月にも産卵可能水域の有意な変移が検出された (Fig. 3.1-4)。4月と5月には1962/1963年に負方向の有意な変移が検出され、5月には1991/1992年にも負方向の有意な変移が検出された (t -test, $P < 0.01$)。6月には1991/92年に負方向、1999/2000年に正方向の有意な変移が検出された (t -test, $P < 0.01$)。9月には1961/1962年に負方向の有意な変移が検出された (t -test, $P < 0.01$)。

3.1.4 考察

産卵場範囲の決定

三陸沿岸海域におけるカタクチイワシ仔魚の分布指数は、同様の手法で算出された太平洋海域のカタクチイワシ仔魚の分布水温範囲 (17.6–28.1°C, Takasuka et al., 2008a) とよく対応し、高水温方向へ向かう低下は認められなかった (Fig. 3.1-1 上)。一方で、卵の分布指数は既知の卵の分布水温範囲 (15.6–27.8, Takasuka et al., 2008a) 内であるにもかかわらず、19.5°C 以上の水温区で急速に低下した (Fig. 3.1-1 下)。同様の解析を日長に対して行くと、卵の分布指数はおよそ13時間以下の日長において低かった。これらの結果からは高水温と短日のどちらが産卵期の終息の要因であるかは断定できないが、夏季に産卵する魚類における産卵期の終息要因は、一般に高水温ではなく秋季の短日化であることが知られ (清水, 2006)、カタクチイワシにおいて

も短日化によって生殖腺の成熟停滞が報告されていることから(靄田, 1992), 三陸沿岸海域でみられる 19°C 以上の水温区における卵の分布指数の低下 (Fig. 3.1-1 下) も短日化の影響と考えるのが合理的であろう。卵の分布指数が 1 を下回った日長は, 飼育実験から得られている本種の臨界日長 12–12.5 時間(靄田, 1992) と近い値であった。

本節において, 卵の分布指数の鋭いピークが確認された水温階級 15.0–15.5°C は, 既知のカタクチイワシの産卵水温範囲の下限 (Takasuka et al., 2008a; 靄田, 1992) とほぼ一致していた。黒潮親潮移行域沖合の 5–13°C の水温帯で吸水卵を持った産卵親魚が採集されたことから, 親潮系冷水域へ分布を拡大した親魚はこれまで, 低水温環境下で産卵する能力を獲得した群であると考えられてきた (Funamoto and Aoki, 2002; 靄田・高橋, 1997)。低水温環境における産卵は, 産み出された卵仔魚が正常に発生し, 成長・生残することによって初めて有効となる。水温に対する仔魚の分布指数が 1 を超えたのは 18.5°C 以上の水温階級で (Fig. 3.1-1 上), これは太平洋岸全域のデータを用いて算出された仔魚の分布適水温 (17.6–28.1°C, Takasuka et al., 2008a) の下限と一致していた。この結果からは, 新稚魚ネットで採集される仔魚期前期のカタクチイワシ ($L < 20$ mm) が黒潮系暖水域の仔魚と比べて低水温環境に適応しているとは判断されず, 産卵水温の低水温適応を本種の産卵場拡大の要因とするのは合理的でない。産卵生態の緯度間比較に関する知見の多い Atlantic silverside *Menidia menidia* においても, 高緯度域における産卵の早期化は, 仔魚の成長可能な水温範囲でのみ起こると報告されている (Conover, unpublished: reviewed in Conover, 1992)。18.5°C 未満の水温区でみられた仔魚の低い分布指数は, 親潮系冷水域北部に分布する 20 mm L 未満の仔魚期前期のカタクチイワシの分布水温が, 本種の主な産卵場である黒潮域系暖水域と同等であると考えられることを示している。

以上のように, 親潮系冷水域北部におけるカタクチイワシの産卵は, 水温がおよそ 15°C を超えることによって始まり, 日長がおよそ 13 時間を下回ることによって終息すると考えられた。

卵分布様式の緯度間差異

上記の解析によって得られた産卵水温の下限 (15°C) と臨界日長 (13 時間) に着目すると, 三陸沿岸海域の水温と日長の季節変化の対応関係は Fig. 3.1-5 のようになった。これをより南の海域と比較すると, 概ね茨城県を境に南と北で異なっていた (Fig. 3.1-6), 宮城県では, 岩手県

と同様に、日長が13時間を上回るのは4月であったが、この時点では水温はまだ10°C以下であった。茨城県では、水温が15°Cを超える時期と日長が13時間を超える時期は4月中旬でほぼ一致していた。神奈川県以南では、日長が13時間を上回るより早い3月以前に水温が15°Cを超え、特に和歌山県と宮崎県の水温は、周年を通してほとんどカタクチイワシの産卵適水温以上にあった。三陸沿岸海域では9月に採集された卵 (Fig. 3.1-6) が1粒のみであった (Fig. 2.2-13) ことを考えると、岩手県と宮城県では日長が13時間を下回る9—4月には卵がほとんど分布しない傾向にあることがわかる。一方、茨城県以南では、日長が13時間を下回る時期にもカタクチイワシ卵が採集された (Fig. 3.1-6)。産卵期を終了させる要因としての日長の影響は、産卵期の開始が水温によって支配される高緯度域で強いように見える。一般に、低緯度域に分布する魚類の繁殖年周期は日長よりも水温によって支配される傾向にある (Blaxter, 2009)。カタクチイワシは幅広い緯度範囲で産卵を行う特異な回遊性浮魚であるが、近年明らかになりつつある本種の産卵生態の適応的な種内変異を考えれば (須原ら, 2013)、本種の繁殖年周期の光周性に対する依存度が緯度間で異なっている可能性が考えられる。本種の繁殖生態における日長の影響については別途精査が必要であるものの、本種の産卵期は特に親潮系冷水域の北部において短期集中的であることがわかった。

短期集中的な産卵は、生態学的にどのような意味をもつのであろうか。高緯度の個体群の産卵生態が低緯度域と比べて短期集中的であることは、Atlantic silverside を用いた室内実験から報告されており (Conover and Present, 1990)、高緯度域における産卵が好適水温下においても早期に終了することは、産み出された仔魚が冬季以前に一定以上のサイズに成長する時間を確保し、体サイズに依存する冬季の死亡率を低減させることに役立っていると説明されている。この先行研究は種内変異を報告しているものの、採集緯度の異なる独立な3個体群を、さらに実験室で継代を繰り返して固定した遺伝的に異なる系統を用いて行われた。本研究で認められたカタクチイワシの卵出現様式の緯度間差異は (Fig. 3.1-6)、遺伝的独立性が確認されていない回遊性資源の種内において認められた点で重要である。Takasuka et al. (2008a) は、本研究と同様の手法 (Lluch-Belda et al., 1991) を日本の太平洋岸におけるカタクチイワシ、マイワシ *Sardinops melanostictus*、サバ類 (マサバ *Scomber japonicus*, ゴマサバ *Sc. australasicus*)、マア

ジ *Trachurus japonicus* 卵仔魚の採集データに適用し、卵仔魚の分布は大規模な資源量変動を示すマイワシとサバ類では狭温的で、資源変動が安定的なカタクチイワシとマアジでは広温的であることを指摘した。太平洋岸全域について見るとカタクチイワシの分布水温は 15.6–27.8°C と幅広く、明確なピークを示さなかったのに対して (Takasuka et al., 2008a), 親潮系冷水域北部で採集された卵を用いて算出した分布指数は 15.0–15.5°C に明確なピークを示し (Fig. 3.1-1), マイワシのような狭温的な分布様式であると解釈できる。カタクチイワシの漁獲量変動は一般に安定的と理解されているが、犬吠埼以北の親潮系冷水域では漁獲量は数十倍の幅を年変動する (Fig. 1.0-1)。狭温的な卵分布様式を示したマイワシとサバ類の資源量が共に大きく変動することを指摘した Takasuka et al. (2008a) と同様の視点からすれば、親潮系冷水域北部におけるカタクチイワシの狭温的な卵分布様式は、北日本の変動が大きい資源と対応的である。このような卵の分布特性は親潮系冷水域のカタクチイワシ資源を理解するための 1 つの定式となるであろう。

産卵場の拡大機構

親潮系冷水域北部におけるカタクチイワシの産卵は 15°C 以上で始まり、13 時間を下回る短日化によって終わると考えられた。日長 13 時間を下回る時期は経年変動しないので、この海域における産卵期の長さは水温が 15°C を上回る時期によって経年変動することになる。本研究では、季節的な昇温の程度をカタクチイワシの産卵適水温を満たす水域の面積に換算し、その年変動を調べた。産卵可能水域面積の長期変動履歴には数年から数十年周期の変移がみられたものの、産卵可能水域面積の拡大・縮小と資源量の増加・減少は対応していなかった (Fig. 3.1-4)。1980 年代後半に連続した加入失敗がみられたマイワシでは、産卵量と翌年の加入量との間に全く相関が見られなかったことから (Watanabe et al., 1995), 初期減耗の大きい浮魚類の加入量を、水温から推定した産卵量面積から説明することはできないと考えられる。

しかし本研究の結果、カタクチイワシが産卵可能な水温から定義した産卵可能水域が、資源量低水準期においても親潮系冷水域北部に存在していたことがわかった。即ち、資源量低水準期の親潮系冷水域には産卵場として利用可能な水域が存在しなかったのではなく、存在したにもかかわらず親魚の来遊がなかったのである。カタクチイワシ類とマイワシ類の資源量と産卵

場面積との関係を調べた先行研究は (Barange et al., 2009), カタクチイワシ類の親魚資源量あたりの産卵場面積がマイワシ類よりも広いことを, 両者の摂餌生態の違い (van der Lingen et al., 2006) によって説明した. ついばみ摂餌を行うカタクチイワシが, 濾過食性を示すマイワシと比べて効率的な摂餌のために 1 個体あたりにより広い面積を必要とするこの考え方に従うならば, 1980 年代末から 1990 年代前半にかけて, 道東海域や南千島沖の太平洋海域で流し網やサンマ棒受け網漁で混獲され始めたカタクチイワシ成魚 (三原, 1998) は, 親潮系冷水域南部以南の海域における個体数密度の増加に伴って北上回遊した群と解釈できる. カタクチイワシの産卵場拡大は, 初夏から夏季の親潮系冷水域に変動しつつも常に存在する 15°C 以上の水域への親魚の来遊量が増えることによって, つまり資源量増加の結果として起こったと考えられる.

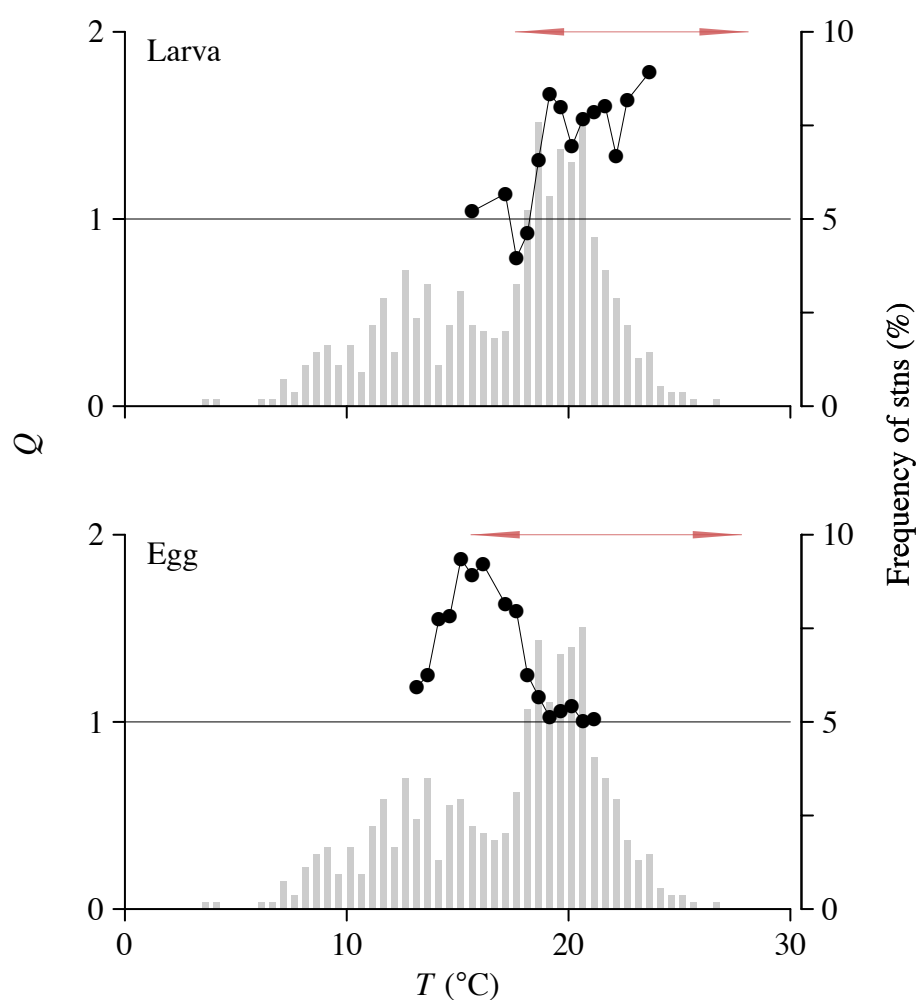


Fig. 3.1-1: Quotient value (*dot*) of anchovy larvae (*top*) and eggs (*bottom*) on T - frequency distribution (*column*) in Coastal Sanriku Area. Red arrow in the top (*bottom*) panel indicates the range of optimal temperature range of anchovy larvae (eggs) calculated from the data which cover the entire Pacific waters off Japan (Takasuka et al., 2008a).

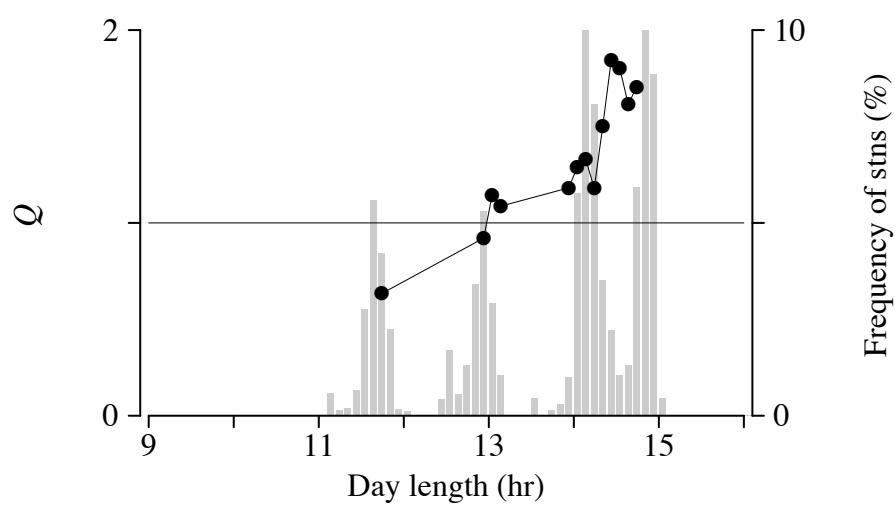


Fig. 3.1-2: Quotient value (*dot*) of anchovy eggs on day-length frequency distribution (*column*) in Coastal Sanriku Area.

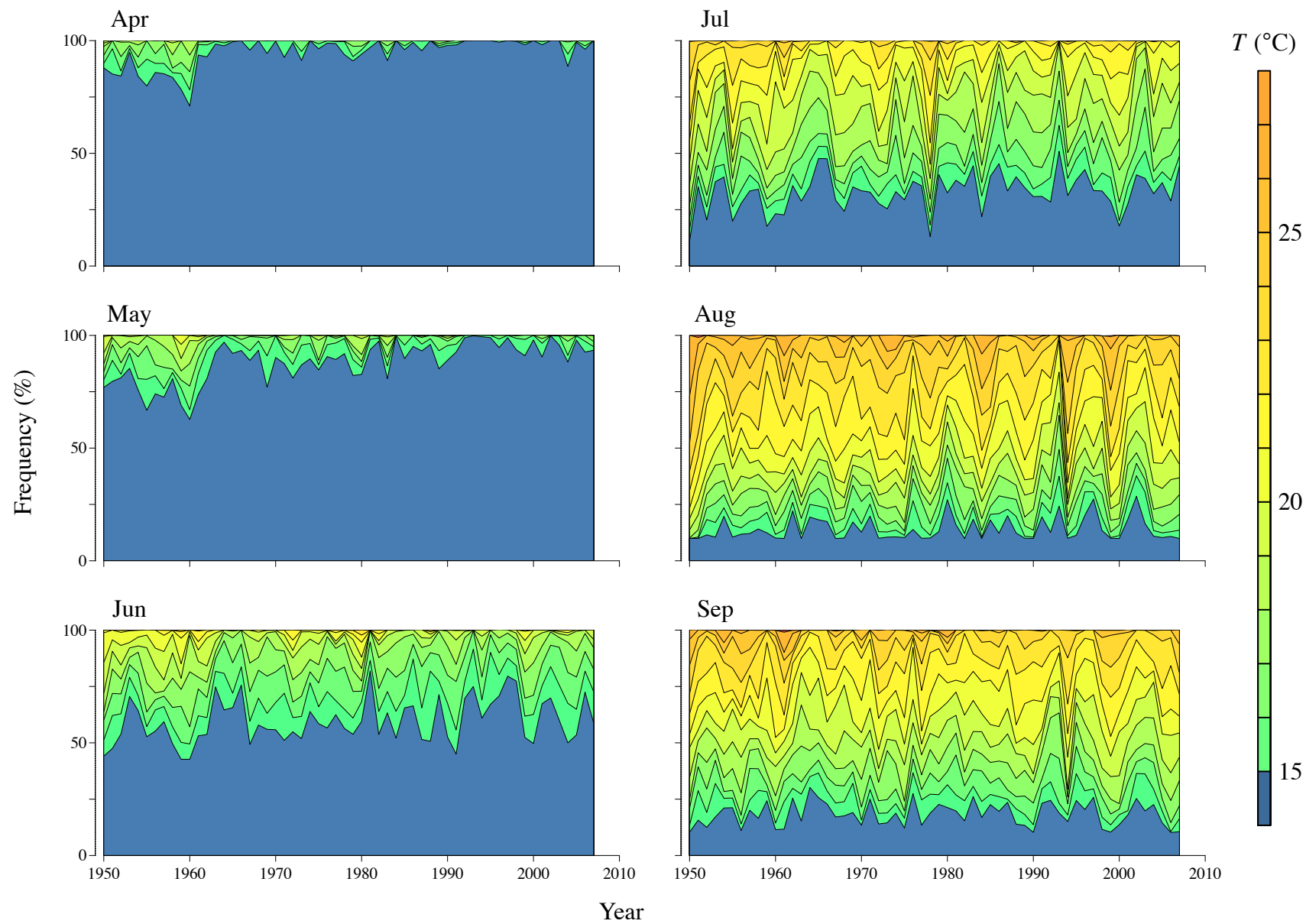


Fig. 3.1-3: Annual fluctuation in frequency of the potential spawning range (15–28°C) in the offshore Tohoku region from 1950 to 2007. Color indicates the T class.

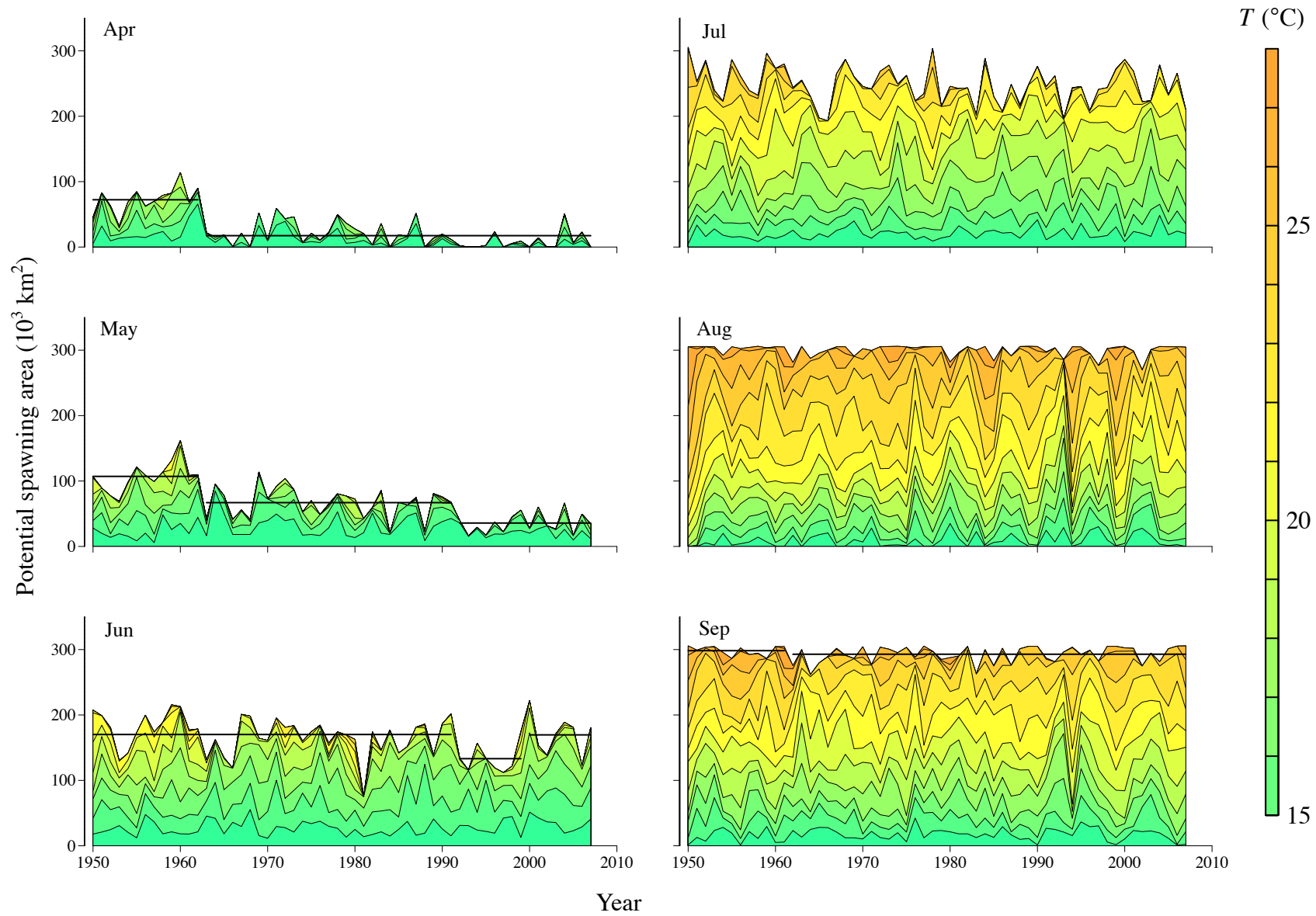


Fig. 3.1-4: Annual fluctuation in the area of the potential spawning area in the offshore Tohoku region from 1950 to 2007. Horizontal lines in April-, May-, June- and September- panel indicate the mean values of the 2 or 3 regimes.

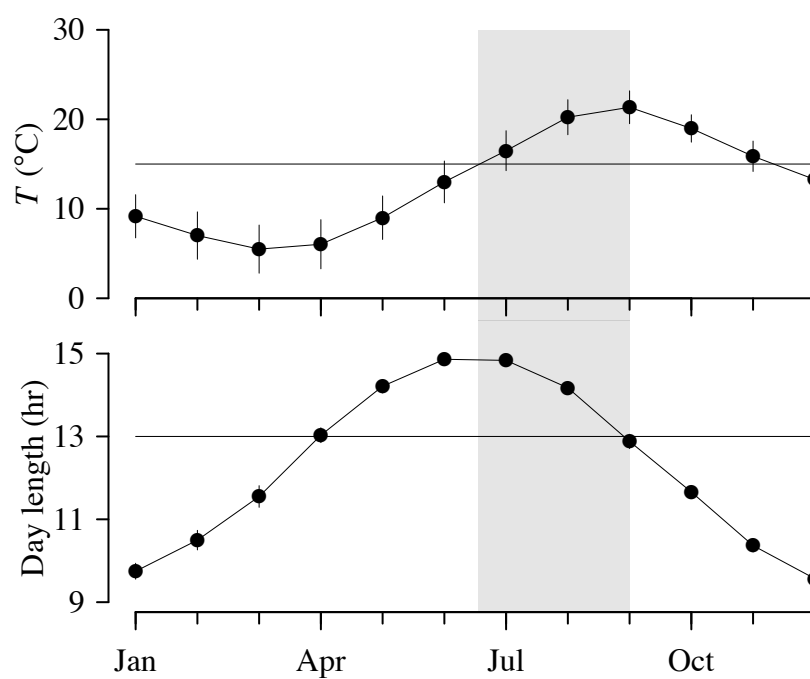


Fig. 3.1-5: Monthly change in T ($^{\circ}\text{C}$, *top*) and day length (hr, *bottom*) in Coastal Sanriku Area from 1980 to 2015. Shaded area represents the spawning season estimated from egg quotient value on T ($\geq 15^{\circ}\text{C}$, Fig. 3.1-1) and day length (≥ 13 hrs, Fig. 3.1-2) in Coastal Sanriku Area.

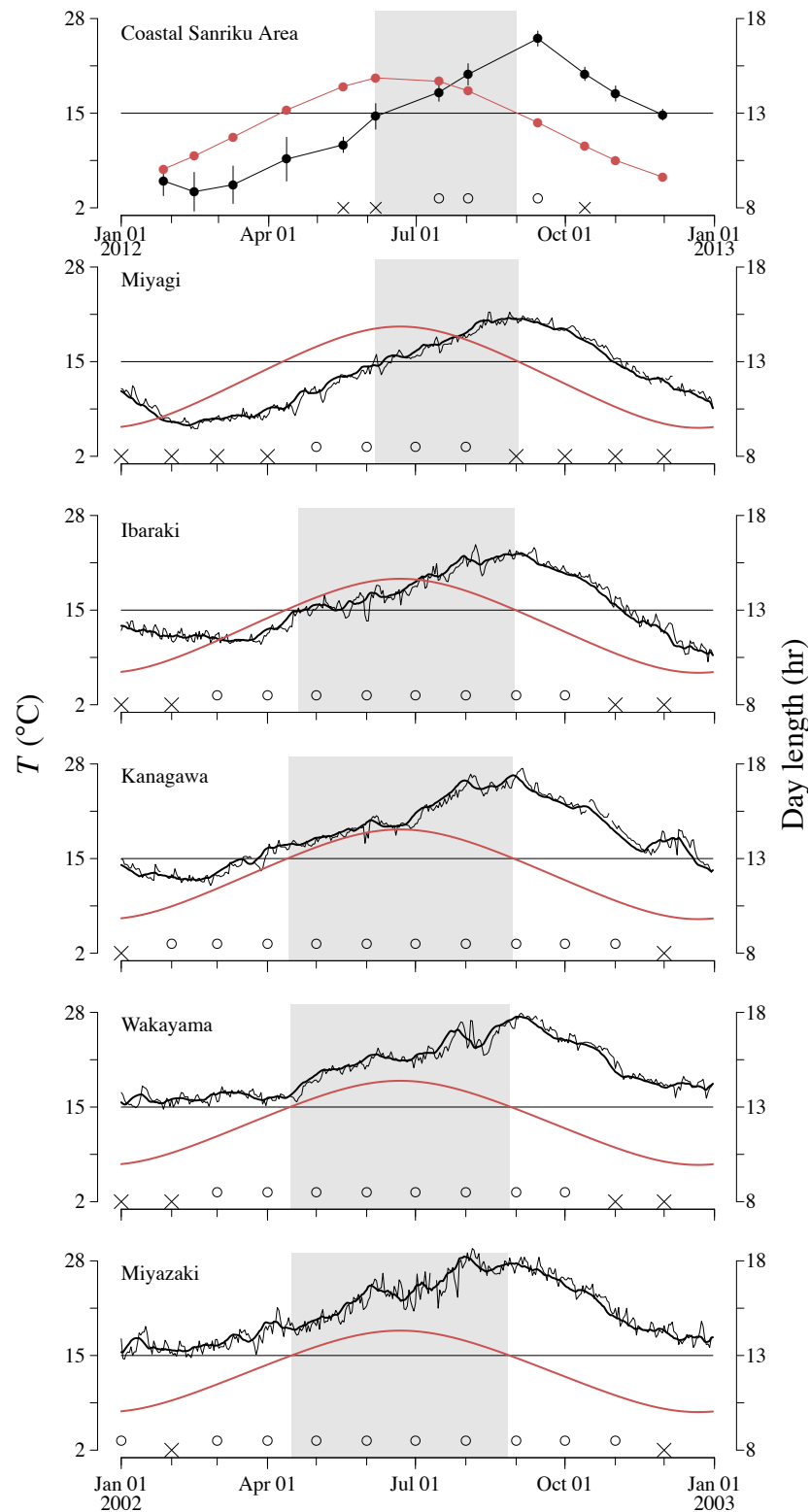


Fig. 3.1-6: Monthly change in T ($^{\circ}\text{C}$, closed black circle, black line) and day length (hr, closed red circle, red line) among waters with different latitudes and spawning season of anchovy in the adjacent waters. Open circle (cross) represents positive (negative) egg collection (Ishida et al., 2002). Shaded area represents the spawning season estimated from egg quotient value on T ($\geq 15^{\circ}\text{C}$, Fig. 3.1-1) and day length (≥ 13 hrs, Fig. 3.1-2) in Coastal Sanriku Area.

3.2 親潮系冷水域沿岸の仔稚魚資源の由来

3.2.1 はじめに

親潮系冷水域の資源量が増減することによって、カタクチイワシ太平洋系群の資源構造は数十年周期で変化していると考えられる。北日本の沖合域は北方から南下する親潮のみならず、南方からの黒潮系の暖水舌や暖水渦の波及、さらに津軽海峡を經由した対馬暖流系の津軽暖流の流入が認められる複雑な海域である (Kawai, 1972)。親潮系冷水域のカタクチイワシ資源はこれら複数の海流系に由来する群から構成されていると考えられる。

沿岸の仔稚魚群が供給源の異なる群から構成されている可能性については、常磐南部に位置する大洗漁場において、海洋観測とシラス漁況とを対照した研究によって指摘されている (海老沢, 1997)。また、本研究による仔稚魚の相対成長および成長速度の解析結果もそれを示唆している (第 2.3 節)。親潮系冷水域北部におけるカタクチイワシ成魚の相対成長を調べた研究から、津軽海峡には太平洋側と日本海側両方からの産卵親魚の来遊が想定されている (木下, 1977)。さらに、三陸中部の宮古湾で採集した仔稚魚の相対成長が著しく季節変化したという本研究の結果も (第 2.2 節)、異なる環境履歴の仔稚魚の季節的な入れ替わりを示唆するものであった。そこで本節では、複数の供給源からの仔稚魚の来遊が想定される親潮系冷水域の資源構造を解明する目的で、カタクチイワシ太平洋系群および対馬暖流系群の産卵場を粒子の投入点とした粒子追跡実験を行い、本海域の沿岸域に加入する仔稚魚の供給源と、その組成の季節変動を調べた。また本海域の資源構造を黒潮系暖水域との対比を通して理解するために、黒潮系暖水域の相模湾を加入海域とした粒子追跡実験も行った。

分離浮性卵を産むカタクチイワシでは、卵から仔魚期前期における輸送先の空間的な違いが、生活史の違いを生む要因として重要と考えられる。そこで本節では、カタクチイワシ太平洋系群および対馬暖流系群の産卵場で産み出された卵仔魚を輸送先の違いによって複数群に分け、それぞれの群の比率を調べて資源構造を考察した。

3.2.2 材料と方法

北緯 30—47 度，東経 130—150 度を粒子追跡実験の実験区域とし，2011 年におけるカタクチイワシ太平洋系群 (高須賀, 2015) と対馬暖流系群^{*i}の 30 分升目月別産卵量データに基づいて粒子投入点を設定した．対馬暖流系群については東経 135 度以東における産卵量データの各格子の中心，太平洋系群については実験区域に含まれる産卵量データの各格子の中心を粒子追跡実験の粒子投入点とした．粒子投入点は，海流系および地理的位置に基づいて以下のように 6 つの投入海区に区分した (Fig. 3.2-1)．我が国の漁業統計大海区の大海区 I を PN (Pacific North) 区とし，さらに牡鹿半島を境に N-PN (North Pacific North) 区と S-PN (South Pacific North) 区に分けた．大海区 II を E-PS (East Pacific South) 区とし，大海区 III と IV を合わせて W-PS (West Pacific South) 区とした．対馬暖流域の粒子投入点は，能登半島を境に W-SJ (West Sea of Japan) 区と E-SJ (East Sea of Japan) 区に分けた．

粒子追跡実験の水温および流動場は，モデル領域東経 108—180 度，北緯 10.5—62 度，水平解像度 12 分の 1 度の FRA-JCOPE2 (Miyazawa et al., 2009) の出力から得た．モデルの鉛直 47 層のうち最表層の水温および流向流速データを用い (Fig. 3.2-2)，各粒子投入点に 2011 年 1 月 1 日—12 月 31 日にそれぞれ 100 個の粒子を毎日投入し，投入から 30 日間の各日における各粒子の位置を拡散を模したランダムウォークと移流から求め，粒子が位置した格子の水温を経験水温として記録した．

カタクチイワシ卵および孵化仔魚は海流によって受動輸送されるが，体長およそ 15 mm までに尾鰭の鰭条が発達し，遊泳力を獲得すると考えられている (三谷, 1990)．低塩分・高濁度の沿岸水への仔魚の集積には遊泳力の獲得が重要と考えられているため (魚谷ら, 1993; 木下, 2006; 富永・二平, 1997)，本研究では輸送過程におけるカタクチイワシ仔魚の成長を再現する目的で，投入後の粒子に式 3.4 のように定義した仮想体長 L_{virt} を与えた．

$$L_{virt} = G_{\leq 30} \times d + L_{hatch} \quad (3.4)$$

ここで， $G_{\leq 30}$ は孵化から 30 日齢時までの期間におけるカタクチイワシ仔稚魚の平均体長成長

^{*i} 日本海区水産研究所，後藤常夫博士提供

速度 0.63 mm day^{-1} , d は粒子投入からの経過日数, L_{hatch} は既往研究から報告されているカタクチイワシの孵化体長 2.7 mm (Fukuhara, 1983) である. $G_{\leq 30}$ の算出には, 第2章で用いた仔稚魚 ($N = 2071$) に加えて黒潮系暖水域の相模湾^{*i} ($N = 1787$) で採集された仔稚魚を用いた.

宮古湾 (東経 142 度 00 分, 北緯 39 度 42 分), 大洗漁場 (東経 140 度 36 分, 北緯 36 度 18 分), および相模湾 (東経度 139 度 18 分, 北緯 35 度 18 分) を想定した座標を中心とした半径 0.3 度の円を加入水域として設定し (Fig. 3.2-1), 加入水域内に入った仮想体長 15 mm 以上の粒子を加入粒子と定義し, 累積加入粒子数とその投入海区組成を月ごとに求めた.

実験結果にカタクチイワシ産卵量の時空間的变化を反映させる目的で, 3 つの加入水域それぞれについて, m 月に加入した j 点由来の粒子の投入年月日 i を調べ, i が属する投入月 m^* における j 点の産卵量 (Fig. 3.2-3) を用いて加入粒子数を重み付けした (式 3.5).

$$N_m = \sum_i \sum_j \frac{n_{i,j-\text{recrt}}}{n_{\text{rels}}} \times \frac{P_{m^*,j}}{d_{m^*}} \quad (3.5)$$

ここで, $n_{i,j-\text{recrt}}$ と n_{rels} はそれぞれ投入年月日 i の投入点 j 由来の加入粒子数と粒子投入数 100 , $P_{m^*,j}$ は m^* 月の投入点 j における産卵量, d_{m^*} は m^* 月の日数である. 重み付け後の加入粒子数を用い, 加入粒子の投入海区組成を求めた.

対馬暖流域から津軽海峡を通過して太平洋海域に移入した粒子の割合を求める目的で, 対馬暖流域の投入点に投入された粒子のうち, 30 日目に東経 141 度 24 分よりも東かつ北緯 43 度よりも南に位置した粒子の割合を求めた. 同様に, 東経 141 度 24 分よりも西かつ北緯 43 度よりも南に分布した粒子を日本海に留まった粒子, 北緯 43 度よりも北に分布した粒子を日本海北部へ輸送された粒子とみなし, それぞれの投入粒子総数中に占める割合を求めた.

沿岸への加入可能性がある粒子の分布東限を調べる目的で, 加入粒子について, 投入から加入までの軌跡の最大経度を調べ, 東経 146 度 7 分を得た. 太平洋海域を東経 146 度 7 分を境に東西に分け, 太平洋海域の投入点に投入された粒子について, 30 日目に両水域に分布した割合をそれぞれ求めた.

^{*i} 深道絹代氏提供測定データ, 2008–2009 年 1–12 月採集

3.2.3 結果

加入粒子の供給源と輸送の軌跡

産卵量による重み付けをしなかった場合の宮古湾・大洗漁場・相模湾への加入粒子の軌跡とその投入点を Figs. 3.2-4—3.2-6 に示した。

N-PN に属する投入点を出発した粒子は、全ての月において宮古湾へ加入した (Fig. 3.2-4)。これに加え、1—3 月には S-PN に属する投入点からも加入がみられ、4 月にはさらに E-SJ が、7 月には W-SJ が加わった。8 月以降には、S-PN に属する投入点からの粒子の加入は起こらなかった。10 月以降には、東経 143 度 25 分以東の投入点からの粒子の加入は起こらなかった。

S-PN と E-PS に属する投入点を出発した粒子は、全ての月において大洗漁場へ加入した (Fig. 3.2-5)。5, 6, 12 月を除く月には N-PN に属する投入点からの加入がみられ、6 月と 7 月を除く月には W-PS に属する投入点からの加入もみられた。

相模湾へ加入した粒子の供給源は、周年を通じて W-PS または E-PS に属する投入点のみであった (Fig. 3.2-6)。

加入粒子数と投入海区組成

産卵量による重み付けをしなかった場合の宮古湾・大洗漁場・相模湾への加入粒子数とその投入海区組成を Fig. 3.2-7 に示した。

宮古湾への加入粒子数のピークは主に 5 月と 11 月に現れた (Fig. 3.2-7 左上)。加入粒子の投入海区は周年を通じておよそ 70% 以上が N-PN によって占められていたが、2—6 月には S-PN が、6—12 月には E-SJ が、9 月には W-SJ が一部を占めた (Fig. 3.2-7 左下)。

大洗漁場への加入粒子数のピークは 2 月と 10 月にみられた (Fig. 3.2-7 中上)。加入粒子の投入海区は周年を通じてほとんどが S-PN によって占められていたが、4—6 月には W-PS と E-PS の投入点がおおよそ 28% を占めた (Fig. 3.2-7 中下)。7—10 月には全体の 34% 以上が N-PN の投入点由来の粒子によって占められていた。E-SJ の投入点由来の粒子が大洗漁場への加入粒子数に占めた割合は 0.3% 未満であった。

相模湾への加入粒子数には明瞭なピークがみられなかった (Fig. 3.2-7 右上)。W-SJ・E-SJ・

N-PN・S-PN に属する投入点からは相模湾への粒子の加入はみられなかった。W-PS の投入点由来の粒子が 39% と比較的高い割合を占めた 9 月を除き、加入粒子数の 83% 以上が E-PS の投入点由来の粒子によって占められていた (Fig. 3.2-7 右下)。

産卵量による重み付け後の宮古湾・大洗漁場・相模湾への加入粒子数とその投入海区組成を Fig. 3.2-8 に示した。

宮古湾への粒子の加入は 5–7 月と 9 月に限られ、特に 7 月に多かった (Fig. 3.2-8 左上)。5・7・9 月には加入粒子の全てが N-PN 由来であったが、6 月には加入粒子のおよそ 25% が S-PN 由来、およそ 30% が E-SJ 由来であった (Fig. 3.2-8 左下)。

大洗漁場への粒子の加入は 3–11 月に限られ、特に 4–7 月に多かった (Fig. 3.2-8 中上)。2 月と 3 月には加入粒子の全てが E-PS 由来であったが、他の月には加入粒子のほとんどは S-PN 由来であった (Fig. 3.2-8 中下)。N-PN 由来の粒子の加入がみられたのは 8 月のみであった。産卵量による重み付けの結果、E-SJ 由来の粒子の加入はみられなくなった。

相模湾への粒子の加入は 3–12 月に限られ、特に 4–8 月に多かった (Fig. 3.2-8 右上)。加入粒子の投入海区組成は、E-PS 由来の粒子が占める割合が全体的に増加したことを除いて産卵量による重み付け前とほとんど変化しなかった (Fig. 3.2-8 右下)。W-PS 由来の粒子が 27% 以上を占めた 9 月を除き、加入粒子のほとんどは E-PS 由来の粒子によって占められていた。

加入粒子の水温履歴

加入粒子の水温履歴を Fig. 3.2-9 に示し、これを用いて求めた目的水域の水温からの投入点の水温の差を Fig. 3.2-10 に示した。宮古湾に加入した粒子が投入点において経験した水温は 5 月 (12.7°C) から 7 月 (21.3–23.6°C) にかけて上昇し、9 月 (16.1°C) には下降した (Fig. 3.2-9 左)。7 月に S-PN に投入された粒子を除き、加入粒子の経験水温は投入時よりも宮古湾への加入時において高かった (Fig. 3.2-10)。

大洗漁場に加入した粒子が投入点において経験した水温は 2 月 (15.0°C) から 8 月 (24.2–27.6°C) にかけて上昇し、以後 11 月 (17.6–20.8°C) に向けて下降した (Fig. 3.2-9 中)。4–6 月に E-PS と S-PN に投入された加入粒子の経験水温は、投入時よりも大洗漁場への加入時の方が高く、その上昇の度合いは S-PN でより大きい傾向にあった (Fig. 3.2-10)。3–5 月に

E-PS よりもさらに黒潮の上流側に位置する W-PS から投入された加入粒子の経験水温は、投入時よりも大洗漁場への加入時の方が低かった。8–11 月には、どの投入海区に投入された加入粒子においても、経験水温は投入時よりも加入時で低かった。

相模湾に加入した粒子が投入点において経験した水温は 4 月 (15.0–18.6°C) から 8 月 (26.7–27.5°C) にかけて上昇し、以後 12 月 (19.3–20.8°C) に向けて下降した (Fig. 3.2-9 右)。相模湾に加入した粒子の投入から加入までの経験水温変化を見ると、3 月に W-PS に投入された粒子では -3.1°C、E-PS に投入された粒子では -0.1°C と投入時から加入時に向けて低下する傾向にあったが、6 月にかけて、より黒潮の上流側に位置する W-PS から順に上昇傾向へと変化した (Fig. 3.2-10)。その後、投入時と加入時の経験水温差は 12 月へ向けて低下する傾向にあった。

粒子の輸送先

カタクチイワシ対馬暖流系群の産卵場に投入された粒子の 92.0–99.6% と大部分は、投入から 30 日目に北緯 43 度よりも南の日本海に留まった (Fig. 3.2-11 上)。投入から 29 日後に北緯 43 度よりも北の日本海に分布した粒子の割合は周年を通じて低く、7 月 (7.5%) から 10 月 (4.7%) に比較的高かったものの、その他の月には 0.1–2.4% であった。投入から 29 日後に太平洋海域に分布した粒子の割合も周年を通じて低く、投入粒子数の 0.5% 以下に過ぎなかった。

カタクチイワシ太平洋系群の産卵場に投入された粒子についても同様に、投入から 30 日目に分布した位置を調べた (Fig. 3.2-11 下)。沿岸への加入が不可能な東経 146 度 7 分よりも東の太平洋海域に分布した仔魚は全体の 22.9–36.5% を占めた。東経 146 度 7 分よりも西の太平洋海域に分布し、沿岸への加入可能性があった粒子は全体の 47.6–62.7% を占めた。

3.2.4 考察

沿岸域における仔稚魚資源の構成比

黒潮系暖水域に属する相模湾への加入粒子が黒潮系暖水域由来の粒子によって構成されていたのに対し、親潮系冷水域に属する宮古湾と大洗漁場では、親潮系冷水域由来の粒子に加えて対馬暖流域または黒潮系暖水域由来の粒子も来遊し、結果として複数の海流系由来の粒子が混在していた点で大きく異なった (Figs. 3.2-7, 3.2-8)。

産卵量で重み付けした宮古湾への加入粒子数をみると (Fig. 3.2-8), 宮古湾のカタクチイワシ仔稚魚群は主に, 金華山以北の親潮系冷水域の産卵場で産み出された群によって構成されていると考えられる。一方で, 6 月には絶対量としては比較的少ないものの, その 3 分の 1 は日本海東部の産卵場で産み出された対馬暖流系群の仔稚魚群によって構成されていると考えられた。

対馬暖流域の産卵場から津軽海峡を經由して太平洋海域に流入する粒子の割合が少ないことと (Fig. 3.2-11), 親潮系冷水域における夏季の集中産卵 (第 2.2 節) を考え併せれば, 夏季の宮古湾における仔稚魚群のほとんどは親潮系冷水域発生群によって占められると判断されるが, 秋季における構成比については対馬暖流系群の産卵量データの不足のために未だ不明である。産卵量による重み付けをしない場合の加入粒子の投入海区組成をみると (Fig. 3.2-7), 8—11 月にかけて, 対馬暖流域由来の粒子が占める割合が増加しており, 夏秋季の輸送環境は津軽暖流の渦モード (Conlon, 1982) によって対馬暖流系の卵仔魚の移入が起こりやすい状態にあると考えられる。しかし, この時期にはカタクチイワシ対馬暖流系群の産卵量調査が実施されていないため (Fig. 3.2-3), これら対馬暖流域由来の粒子は重み付け処理後の加入粒子数には反映されていない (Fig. 3.2-8)。親潮系冷水域におけるカタクチイワシの資源構造を理解するためには, 本種対馬暖流系群の産卵生態解明も必要である。

産卵量による重み付けをしない場合の大洗漁場への加入粒子数のピークが春季と夏・秋季に現れたことから (Fig. 3.2-7), 本漁場において春季と夏・秋季にみられるシラス漁獲量のピークは, 輸送環境の季節変動が基礎となっていると考えられる。また加入粒子の投入海区組成をみると, 仔稚魚の供給源は金華山以南の親潮系冷水域を主としながらも, 春季には黒潮系暖水域の割合が, 秋季には金華山以北の親潮系冷水域の割合が増加すると考えられ (Fig. 3.2-7), この結果は大洗漁場におけるシラス漁獲量の増加が, 5 月と 6 月には黒潮系暖水の, 10 月と 11 月には親潮系冷水の観測とともに起こるという海老沢 (1997) の指摘と整合的であった。ところが産卵量による重み付けを施すと, 2 月に位置していた春季の加入粒子数のピークは 4 月以降に移り, 実際の漁獲量のピークと一致するようになった一方で, 夏・秋季には金華山以北の親潮系冷水域由来の粒子が占める割合が減少してピークが消失した。これは, 金華山以北の親潮系冷水域における 7 月と 8 月の産卵量調査の観測点数が少ないことが関係していると考えられ (Fig.

3.2-3), 大洗漁場におけるシラスの資源構造を理解するためには, 親潮系冷水域における産卵量調査の充実が不可欠であると結論づけられる。

親潮系冷水域の沿岸水域の中でも, 三陸中部に位置する宮古湾では対馬暖流系の仔稚魚の来遊が考えられるのに対し, 常磐南部に位置する大洗漁場では黒潮系暖水域由来の仔稚魚の来遊が想定される点で異なっていた。

水温からみた親潮系冷水域発生群の成育環境

亜寒帯の親潮系冷水域で発生したカタクチイワシ仔魚の水温履歴の下限は, 春季における黒潮系暖水域の仔魚と同程度と考えられる。金華山以北の親潮系冷水域に投入され, 宮古湾に加入した粒子の水温履歴を見ると (Fig. 3.2-9), 5月にはカタクチイワシの産卵水温の下限である15°C (靄田, 1992) よりも低水温環境での投入がみられたものの, 粒子の水温履歴は加入に向けて一様に上昇がみられ, 全ての月において粒子の加入時の水温履歴は投入時の水温履歴よりも高かった (Fig. 3.2-10)。これは, 宮古湾以南の沿岸域への加入を想定した場合には, 金華山以北の親潮系冷水域で産み出された卵がより温暖な水域への輸送を経て加入することを意味し, 本海域における産卵水温の下限がほぼ15°Cである (第2.1節, 第2.2節, 第3.1節) ことを踏まえれば, 孵化仔魚の水温履歴は15°C以上に保たれることになる。一方, 7月に金華山以南の親潮系冷水域に投入されて宮古湾に加入した粒子の水温履歴が投入時よりも低下していたことから (Fig. 3.2-10), 中規模渦や暖水波及による南から北への輸送は, 仔魚の水温履歴の低下に繋がると考えられる。経験水温に着目すると, 産卵水温の下限で産み出された卵仔魚の親潮系冷水域北部への加入には, 親潮第一分枝を利用した北から南への輸送が重要である。

粒子の輸送先からみた資源構造

日本海北部におけるカタクチイワシ対馬暖流系群の初期生態はほとんど知られていないが, 対馬暖流域発生群は, 受動輸送を受ける発達段階においてはほとんどが神威岬以南の日本海に留まると考えられる (Fig. 3.2-11)。一方, 天売島に繁殖地を形成するウトウ *Cerorhinca monocerata* では, 近傍水域に分布するカタクチイワシの利用が幼鳥の成育に不可欠であることが知られている (Watanuki and Ito, 2012)。神威岬以北に相当量存在すると考えられるこれらの

カタクチイワシ群は、幼魚あるいは成魚として北海道西岸を北上回遊したであろう。同様に、津軽海峡を経由して太平洋海域へ移入した粒子は全体の 0.5% 以下に過ぎなかったことから、太平洋海域へ移入するカタクチイワシ対馬暖流系群の卵仔魚は、受動輸送を受ける発達段階においては全体のごく一部に過ぎないと判断される。

カタクチイワシ太平洋系群の産卵場で産み出された卵仔魚のうち、投入から 30 日までの間に少なくとも 5 分の 1 は 30 本州東方沖合へ流去し、沖合回遊群 (久保田, 2012) を形成すると考えられる。一方、黒潮親潮移行域沖合で 30 日齢を超える仔魚が高い割合で採集される (第 2.4 節)。投入から 30 日目の時点では東経 146 度 7 分よりも西の太平洋海域に分布した粒子も東への輸送途中であった場合、東方沖合へ流去する粒子の割合は計算期間の延長によって増加すると考えられる。その場合、本研究の方法は沖合回遊群を形成する仔魚の割合を過小評価することになる。カタクチイワシ太平洋系群の資源構造を正しく理解するためには、沿岸資源と沖合資源の構成比について、さらに詳細な検討が必要である。

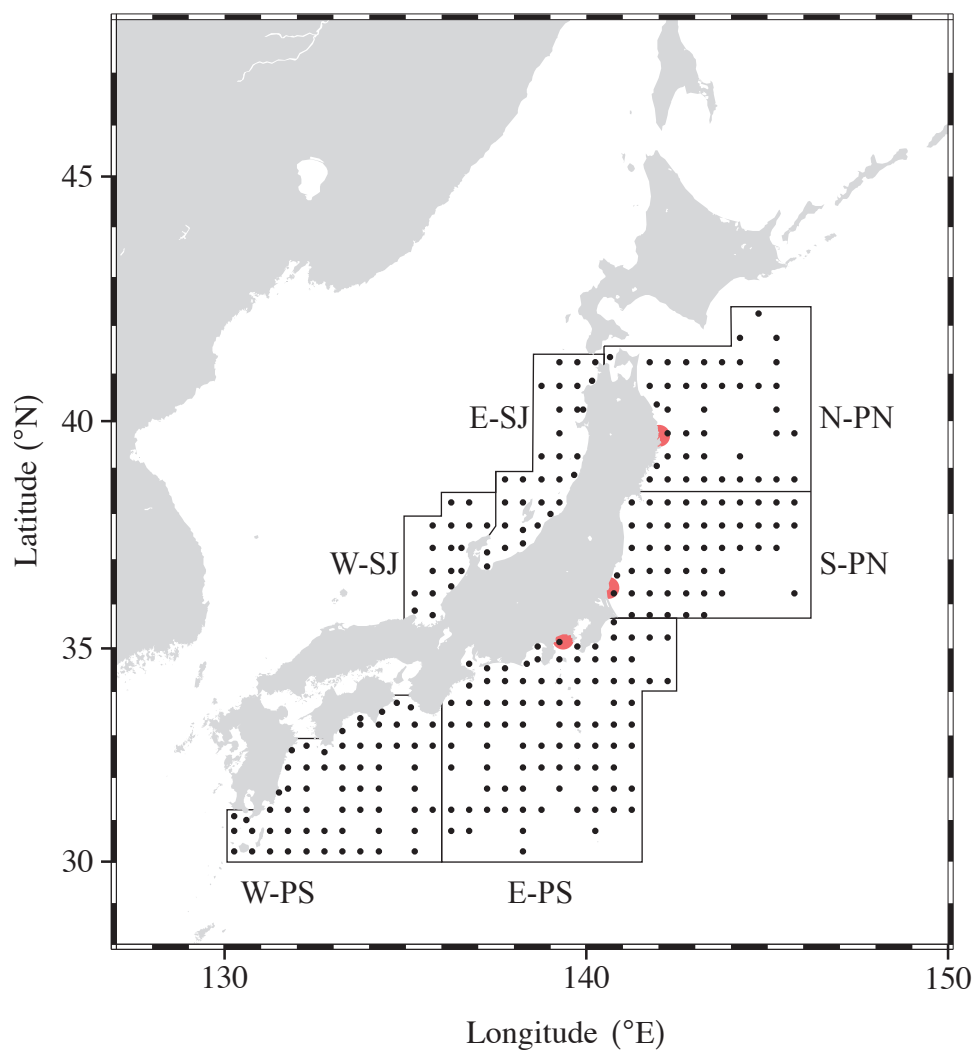


Fig. 3.2-1: Release points (*dot*) and destination areas (*red circle*) of the particle tracking experiment. Lines represents boundaries between each sea area (N-PN, North Pacific North; S-PN, South Pacific North; W-PS, West Pacific South; E-PS, East Pacific South; W-SJ, West Sea of Japan; E-SJ, East Sea of Japan).

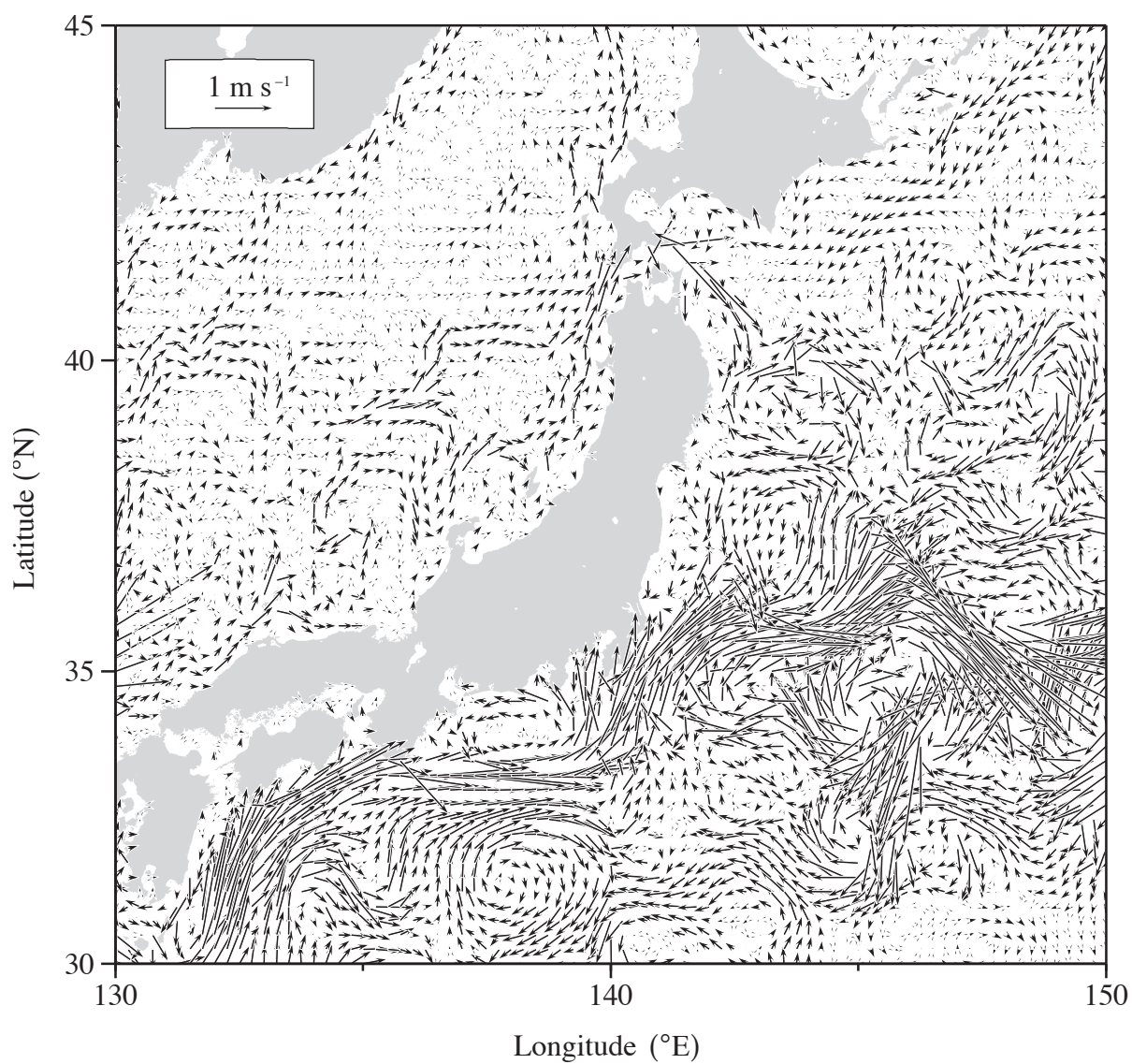


Fig. 3.2-2: An example of the surface flow field of the experimental area. Data on Jun 01 2011 are shown.

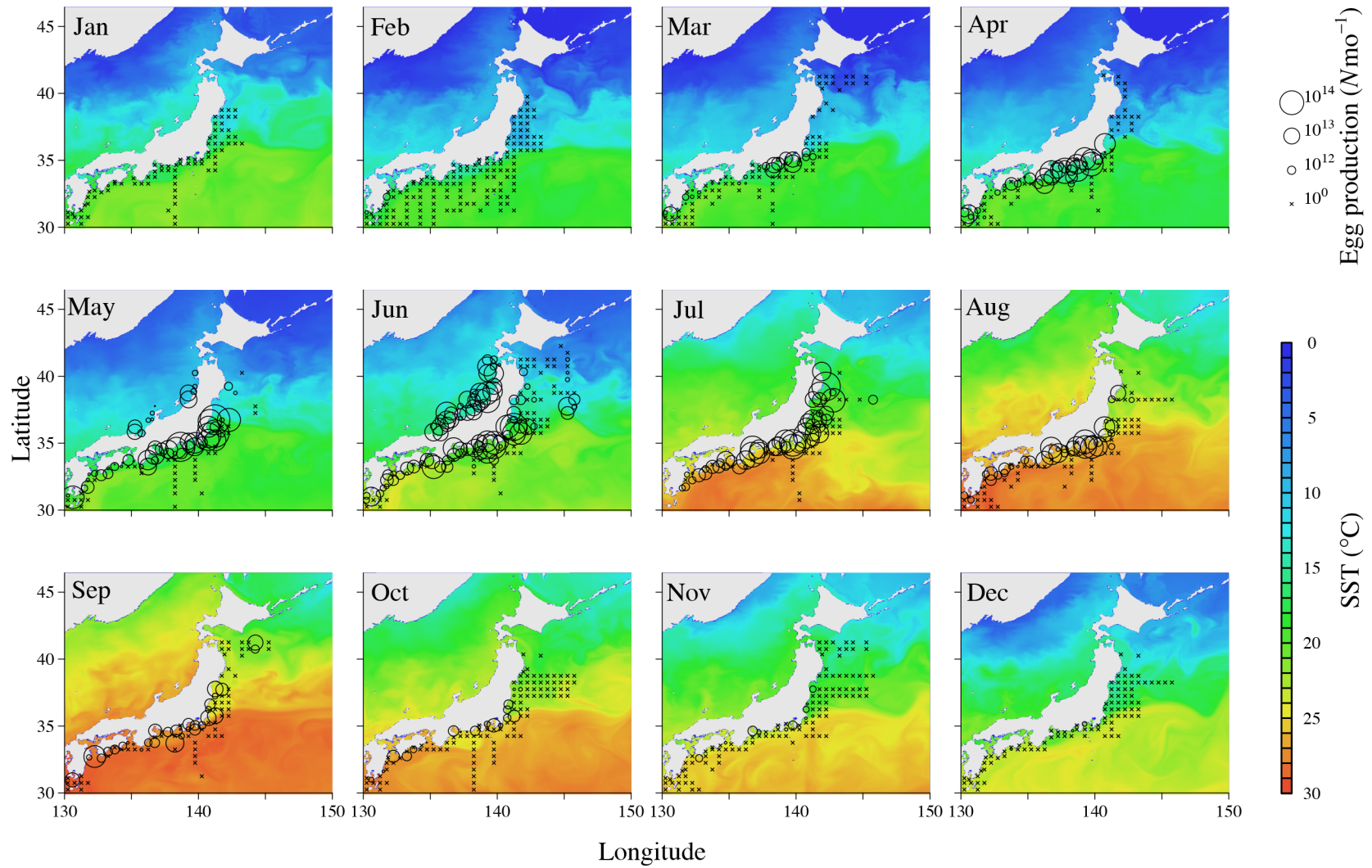


Fig. 3.2-3: Monthly egg production of the Pacific stock and the Tsushima Warm Current stock of Japanese anchovy used for weighting. Color represents the model SST.

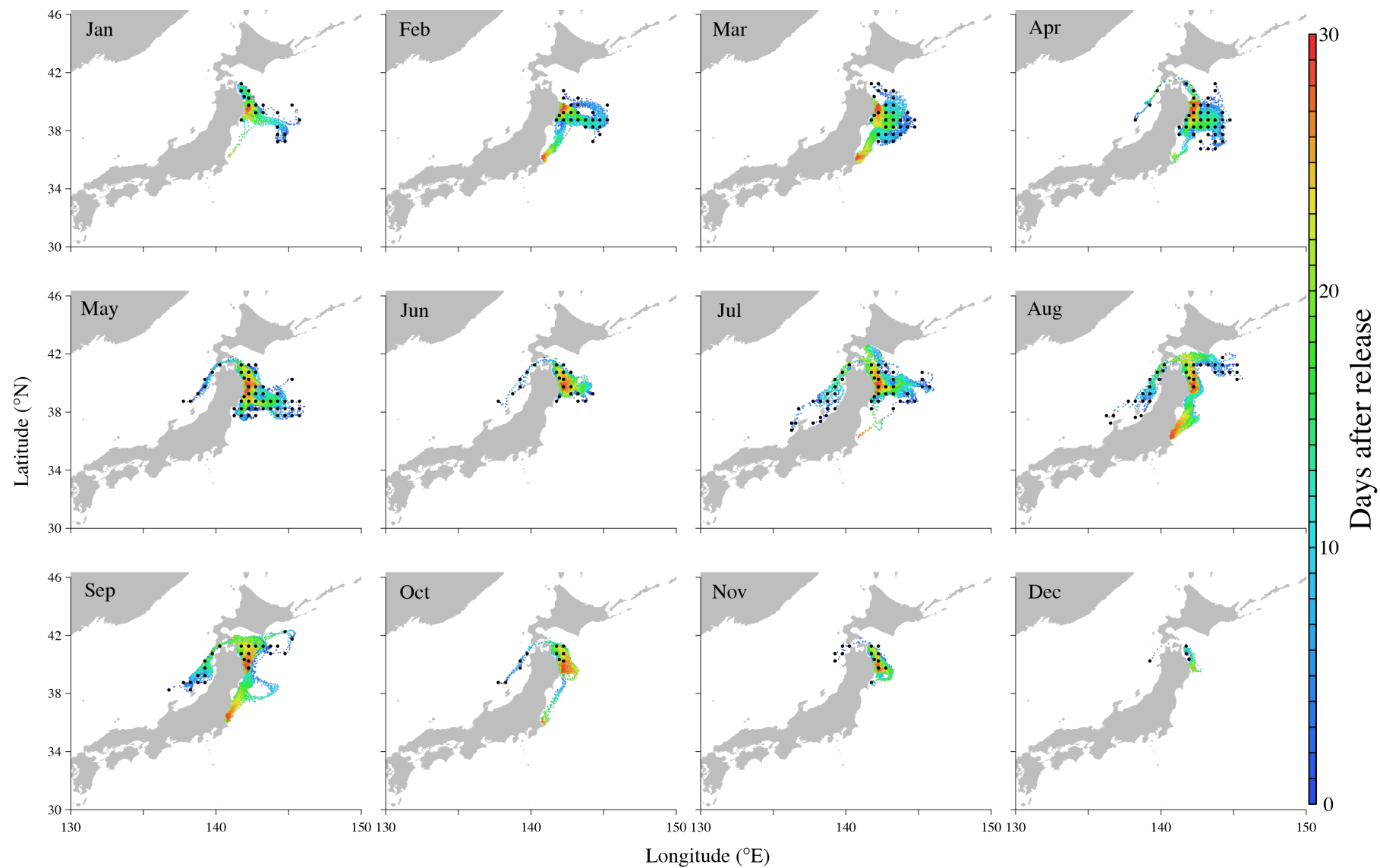


Fig. 3.2-4: Transport trajectory of particles recruited to Miyako Bay by release month. Color indicates elapsed days after the release. Black dot represents the source release point of the particles recruited.

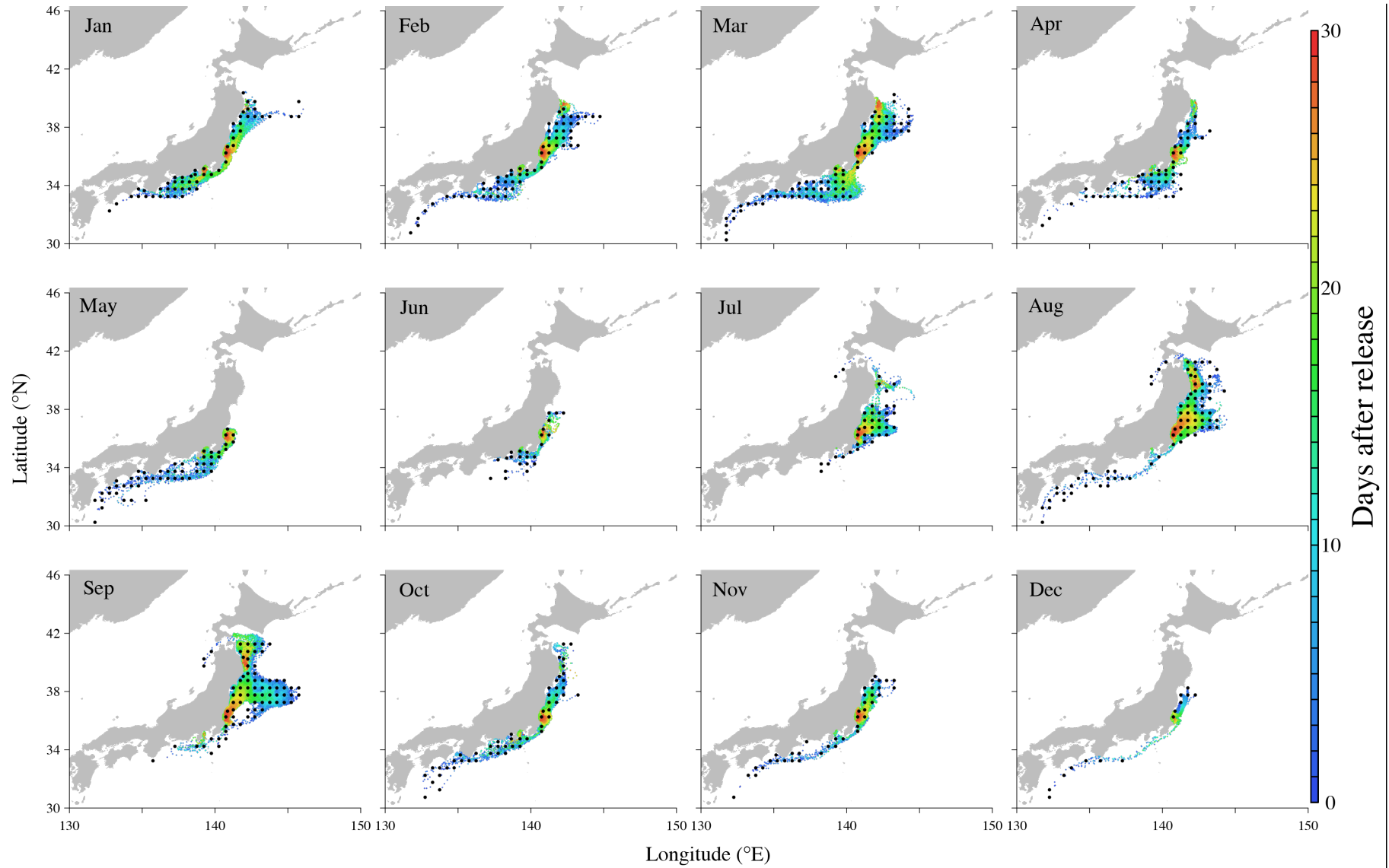


Fig. 3.2-5: Transport trajectory of particles recruited to Oarai coast by release month. Color indicates elapsed days after the release. Black dot represents the source release point of the particles recruited.

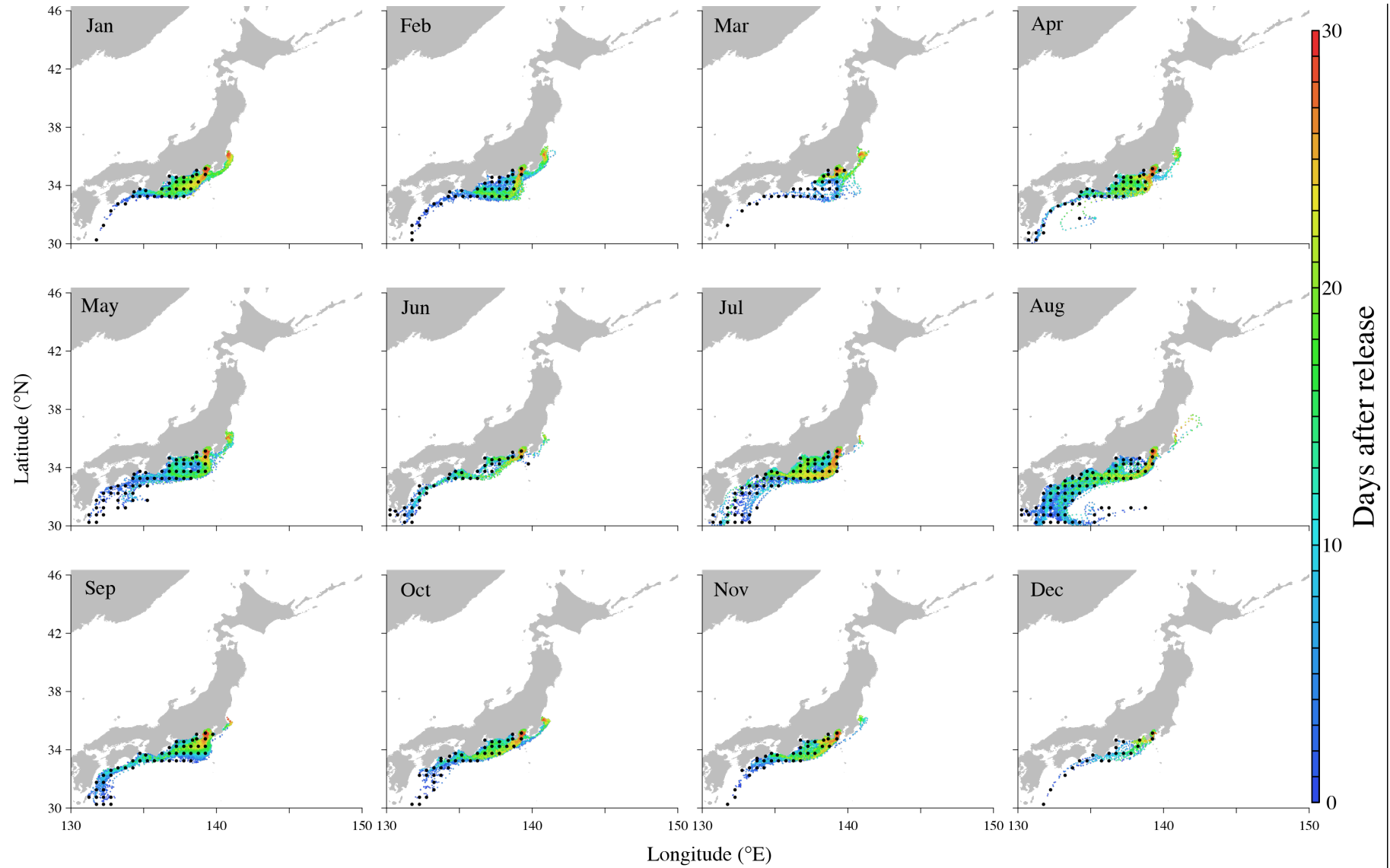


Fig. 3.2-6: Transport trajectory of particles recruited to Sagami Bay by release month. Color indicates elapsed days after the release. Black dot represents the source release point of the particles recruited.

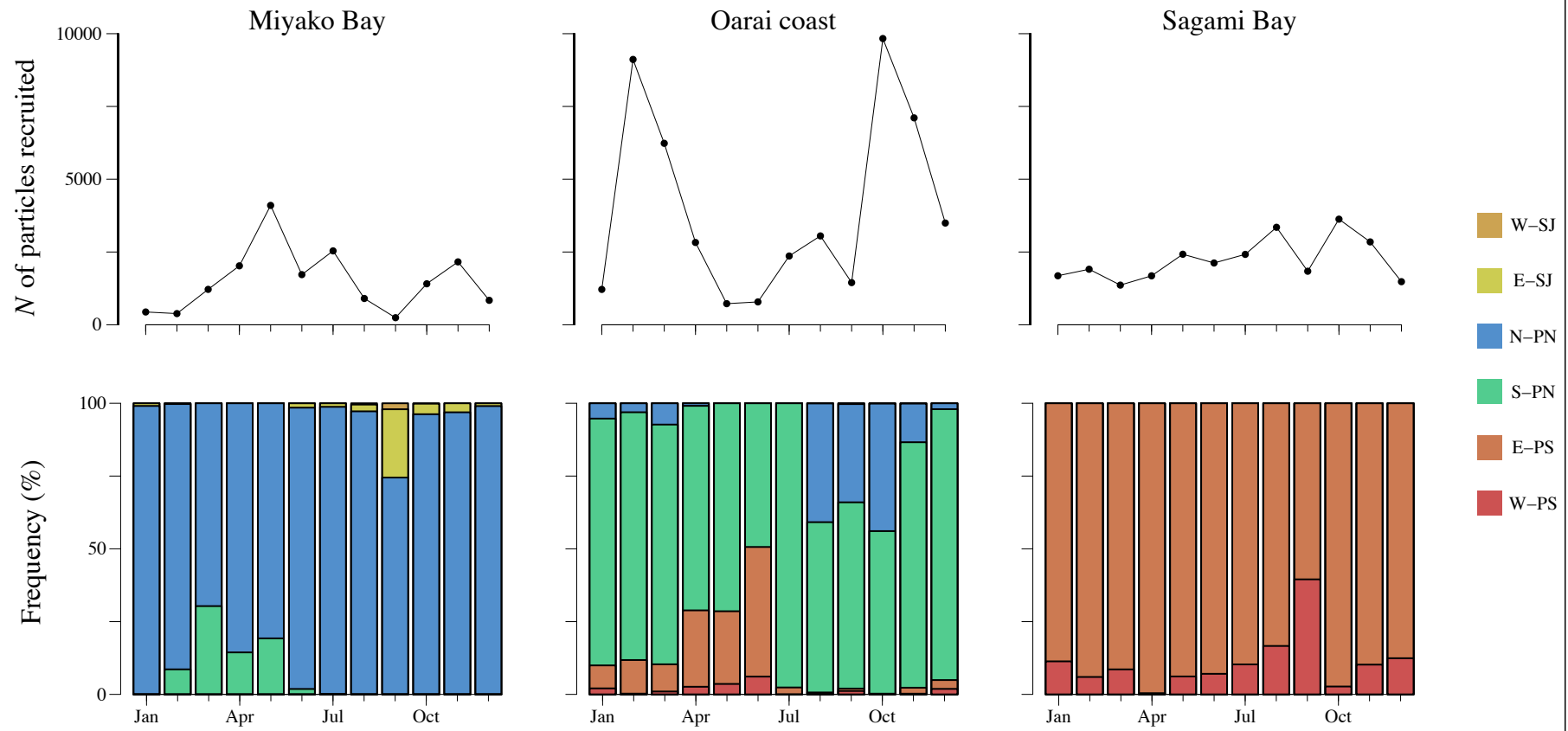


Fig. 3.2-7: Number and the source composition of the particles recruited to Miyako Bay, Oarai coast and Sagami Bay by recruited month.

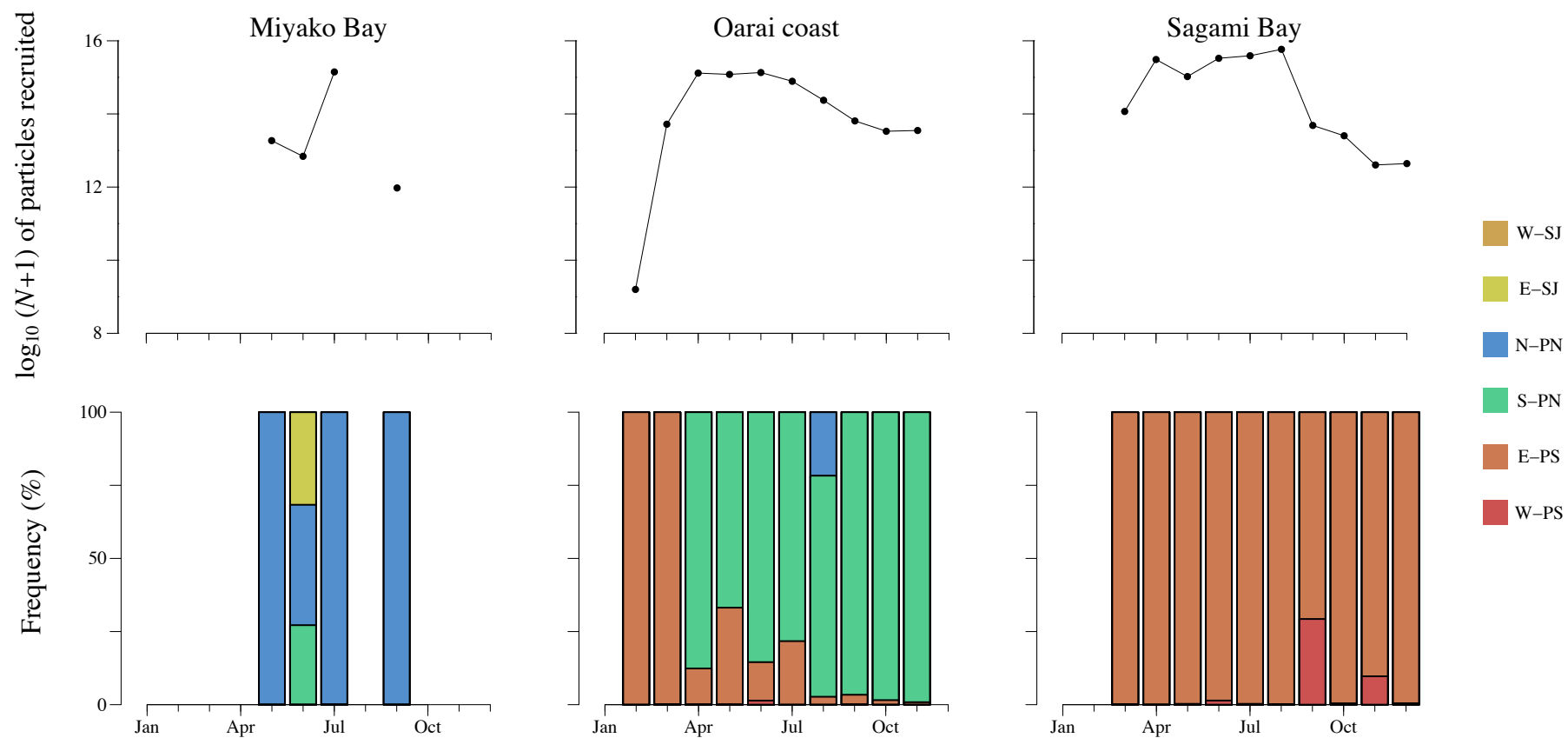


Fig. 3.2-8: Weighted-number and the source composition of the particles recruited to Miyako Bay, Oarai coast and Sagami Bay by recruited month.

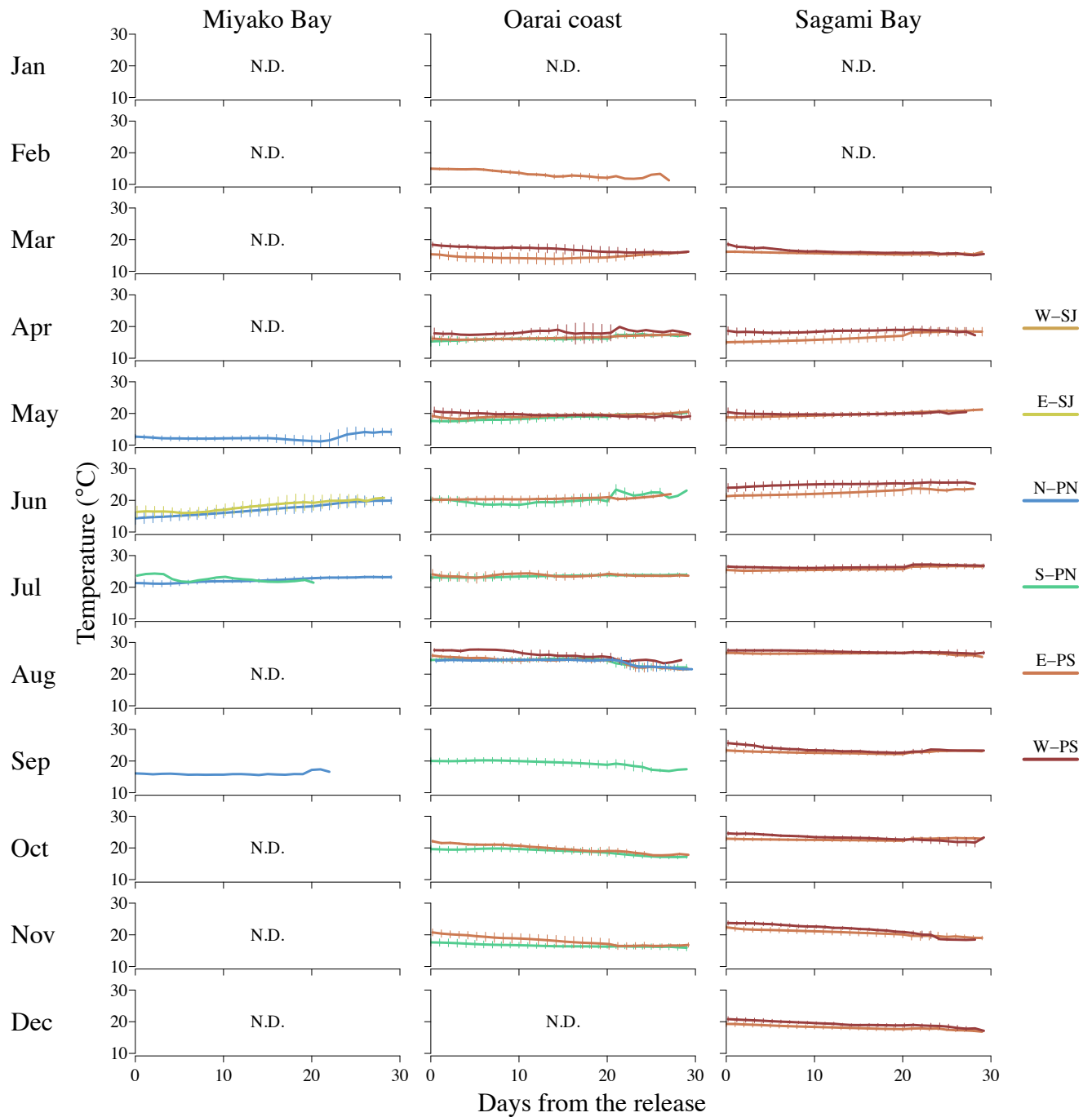


Fig. 3.2-9: Temperature history experienced by particles recruited to Miyako Bay, Oarai coast and Sagami Bay by released month and the released area. Vertical line represents standard deviation among the particles.

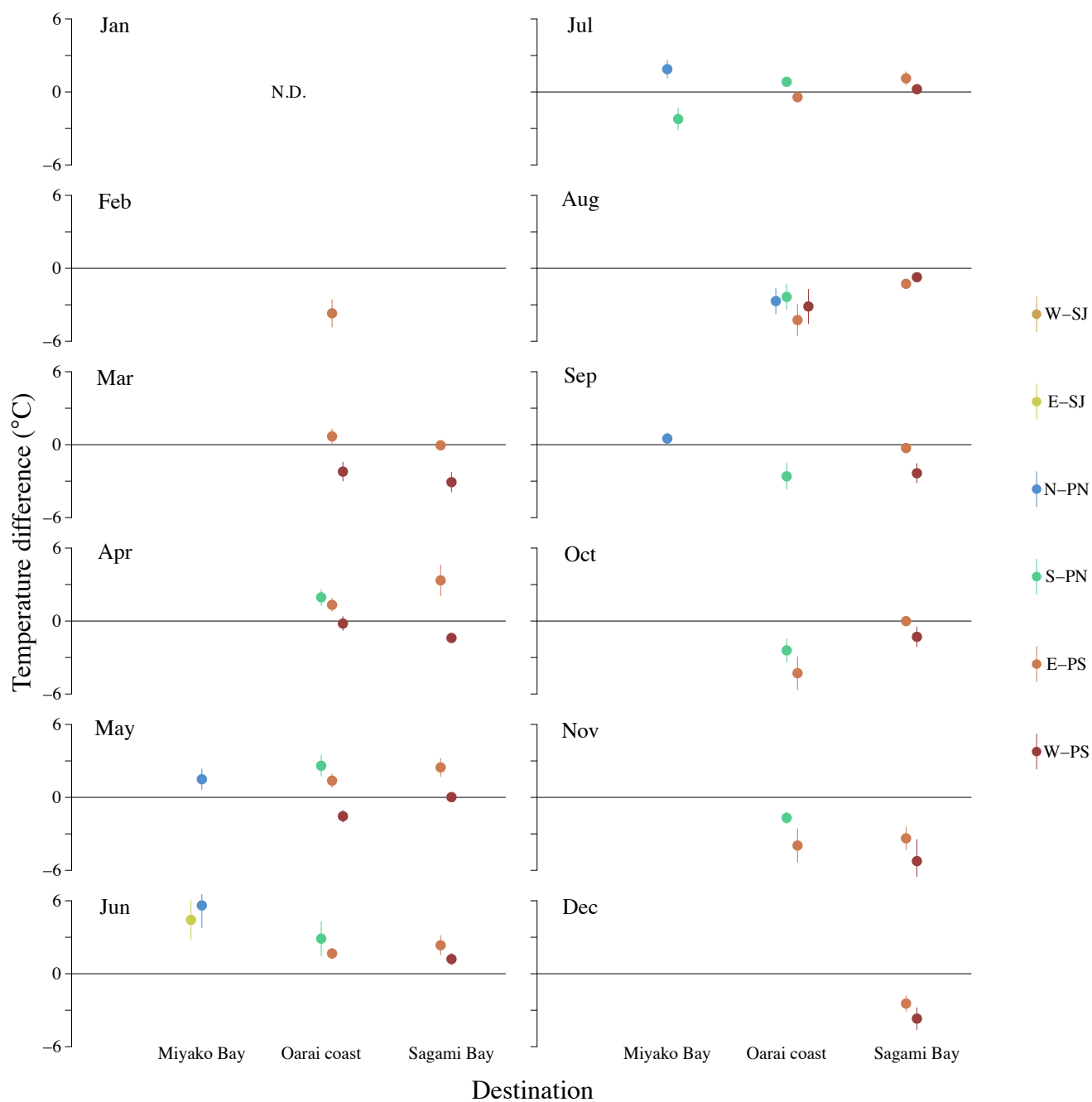


Fig. 3.2-10: Temperature-history difference of particles recruited to Miyako Bay, Oarai coast and Sagami Bay by released month and the released area. The difference was calculated by subtraction of the temperature at the release point from that of the destination. Vertical line represents standard deviation calculated by temperature history of the particles.

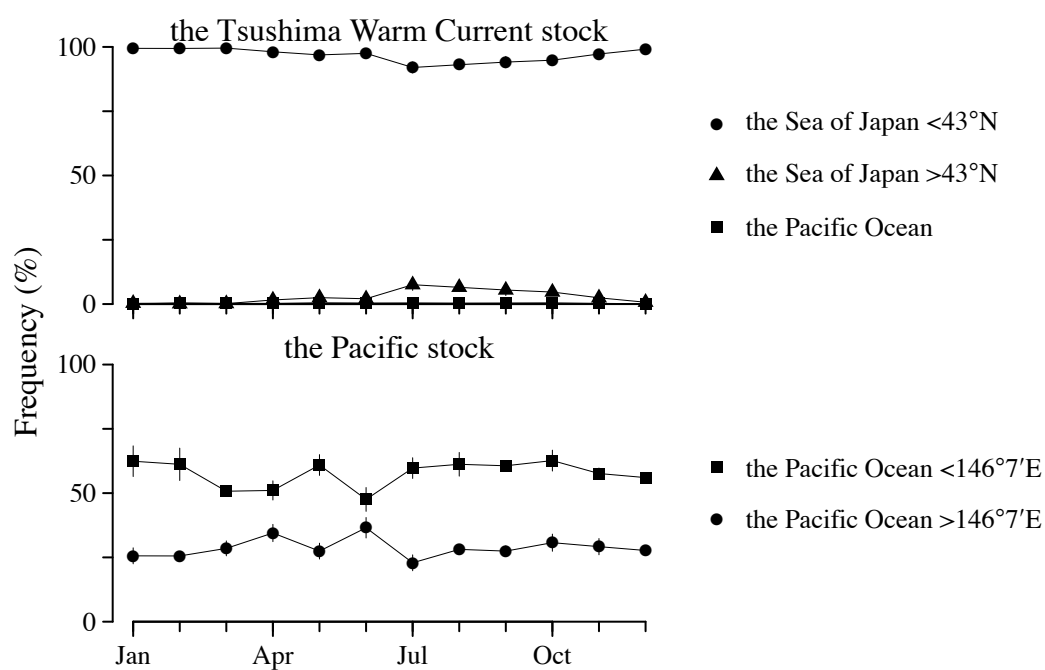


Fig. 3.2-11: Proportions of the location of the particles on the 29th day from the day released from the spawning area of the Tsugaru Warm Current stock (*top*) and the Pacific stock (*bottom*) of Japanese anchovy.

3.3 成長速度と変態過程の海域間比較

3.3.1 はじめに

魚類の生活史初期において、仔魚期の高い死亡率は、変態の後に大きく低下することが知られており (Houde, 1987), 変態時の日齢や体長を知ることは加入動態を理解する上で重要である。カタクチイワシでは、腹腔内や体表へのグアニン色素の沈着の程度が仔魚と稚魚の判別基準として用いられてきた (Takahashi and Watanabe, 2004c; 富永・二平, 1999a)。グアニンの沈着度は鰭条形成などの形態発達過程とよく対応することが確認されている (Yasue et al., 2015)。

深道 (2010) は、カタクチイワシの変態時の体長・体重・肥満度・日齢を仔魚の最大値と稚魚の最小値の中央値として求め、相模湾における変態時の体長・体重・日齢が季節的に変動したこと、それとは対照的に、変態時の肥満度は周年ほぼ 7.3 で季節変動しなかったことを見出した。即ち、相模湾では肥満度 7.3 が変態の閾値となっていると考えられるのである。

親潮系冷水域では大洗漁場において、本種の変態時における体長と日齢を仔魚と稚魚の平均値として求め、これが水温と有意に負相関することを報告した例があるが (富永・二平, 1999a), 変態動態の精査には至っていない。

カタクチイワシ資源量高水準期における常磐—三陸沖合海域は、本種の加入の場として重要である。日本の黒潮域の沿岸域で生まれた仔魚は、年変動はあるものの概ね 60% 以上が移行域へ輸送されると見積もられており (Itoh et al., 2009), 移行域への輸送に続く資源加入と北上回遊は、本種太平洋系群の生活史としてほぼ定式化されている (久保田, 2012)。

本節では、カタクチイワシの変態動態を考える上で重要となる肥満度に着目し、黒潮系暖水域と親潮系冷水域との間で比較することで、本種の変態動態および資源量増加に伴う初期生活域の拡大機構について考察した。また沿岸域と沖合域における成長・変態動態を比較し、両者の資源加入への貢献度を質的観点から考察した。

3.3.2 材料と方法

沿岸域の宮古湾と大洗漁場で採集してそれぞれ測定した（第 2.2, 2.3 節）カタクチイワシ仔稚魚データに加え、黒潮系暖水域の相模湾で 2008 年 3 月–2009 年 9 月に、船曳網を用いて採集されたカタクチイワシ仔稚魚の測定データを解析に用いた^{*i}。沖合域のデータとして、常磐–三陸沖合域で採集され、測定された（第 2.4 節）仔稚魚のデータを用いた。

個体の発達段階を第 2.2 節と同様にグアニン沈着に基づいて仔魚と稚魚に分け (Takahashi and Watanabe, 2004c), 仔魚を 0, 稚魚を 1 として体長 (L , mm), 体重 (W , mg), 肥満度 (C), 日齢 (d) をそれぞれロジスティック回帰して, 仔魚の半数が変態する体長 (L_{m50}), 体重 (W_{m50}), 肥満度 (C_{m50}) および日齢 (d_{m50}) を求めた。

耳石日輪解析によって, 第 2.2 節と同様に体長を逆算した。また体長と同様に, 各日齢時の体重も耳石半径–体重関係を用いた Biological intercept method によって逆算した。カタクチイワシの孵化体重の報告はないため, 岩手丸によって採集された仔魚（第 2.2 節）の体長–体重関係に孵化体長 2.7 mm (Fukuhara, 1983) を代入して得られた 0.00046 mg を用いた。各日齢時における逆算体長と逆算体重を式 2.13 に当てはめ, 各日齢時の肥満度を逆算した。逆算した体長・体重・肥満度について, 前日の値からの増分を体長・体重・肥満度の成長速度とし, 40 日齢時における値を式 2.15 と同様に算出して, それぞれ $G_{L-d40} \cdot G_{W-d40} \cdot G_{C-d40}$ とした。採集前 5 日間における体長・体重・肥満度の成長速度を 2.16 と同様に算出してそれぞれ $G_{5L} \cdot G_{5W} \cdot G_{5C}$ とし, 採集時の水温との関係を比較した。

宮古湾では第 2.2 節で, 大洗漁場では第 2.3 節で用いた表面水温 (T , °C) を解析に用い, 相模湾では操業中にポータブル水温塩分計^{*ii}を用いて計測された表面水温を解析に用いた。

仔稚魚の体長–頭長関係の両対数グラフの傾きを, 宮古湾, 大洗漁場, 常磐–三陸沖合域との間で比較した。宮古湾では, 体長時における頭長が明らかに小さい個体が含まれた 6 月と 7 月採集群を解析から除外した。

^{*i} 深道絹代氏提供

^{*ii} ACT20-D2, アレック電子株式会社

3.3.3 結果

成長・変態動態の沿岸域における比較

相模湾では仔魚の L_{m50} , W_{m50} , d_{m50} には明瞭な季節変動がみられ、いずれも夏季に小さく、冬季に大きい傾向にあった (Fig. 3.3-1). 一方, C_{m50} には明瞭な季節変動は認められなかった. 仔稚魚の採集時期が初夏から秋季に限られたため、宮古湾 (Fig. 3.3-2) と大洗漁場 (Fig. 3.3-3) では、半数変態特性値の周年にわたる季節変動は検討できなかった. 採集年月や採集期間が異なるこれら 3 海域間で比較する目的で、半数変態特性値と各採集日の水温との関係を調べた. 相模湾における L_{m50} と W_{m50} は水温と有意に負相関し (線形モデル, $P < 0.01$), これらにみられた季節変化は水温の季節変動と対応していたことがわかった (Fig. 3.3-4). 相模湾と同様に、宮古湾と大洗漁場における L_{m50} と W_{m50} も水温と有意に負相関した (線形モデル, $P < 0.05$). 水温に対する L_{m50} と W_{m50} の関係は、海域による差はみられなかった (ANCOVA, $P > 0.05$). ところが、いずれの海域においても C_{m50} は水温とは無関係であった. C_{m50} の幾何平均を海域別に求めると、相模湾と大洗漁場では 7.4 であったのに対し、宮古湾では 5.7 と他の 2 海域よりも有意に低かった (Steel Dwass, $P < 0.001$). d_{m50} は相模湾においてのみ水温と有意に負相関した (線形モデル, $P < 0.05$).

各海域において、肥満度が C_{m50} に達する日齢を d_{m50} と比較した. 相模湾では変態時日齢が水温と負相関していたため、日齢と肥満度の関係を 3°C 間隔に区切った水温区ごとに検討した (Fig. 3.3-5). 日齢と肥満度の関係は、 24°C 以上 27°C 未満の水温区を除く全ての水温区で有意に Gompertz 曲線に回帰された. 肥満度が C_{m50} に達する日齢は低水温区ほど高齢化し、いずれの水温区においても d_{m50} との差は 3 日齢以内であった.

宮古湾と大洗漁場では変態時日齢は水温と無関係であったため、海域ごとに標本をプールして肥満度が C_{m50} に達する日齢と d_{m50} とを比較した (Fig. 3.3-6). 肥満度が C_{m50} に達する日齢は宮古湾では 47.7 日齢、大洗漁場では 52.1 日齢で、これらは d_{m50} と比べると宮古湾では 4.6 日、大洗漁場では 6.9 日遅かった. 宮古湾と大洗漁場で採集された仔魚の肥満度が相模湾の C_{m50} (7.4) に達する日齢を調べると、大洗漁場では 51.4 日齢と当該海域の C_{m50} (7.4) に達す

る日齢（52.1 日齢）とほぼ同じであった。これに対し、宮古湾では 78.9 日齢となり、当該海域の C_{m50} （5.6）に達する日齢（47.7 日齢）はこれよりもおよそ 30 日早かった。

各海域で採集された仔稚魚の肥満度成長履歴を孵化月ごとに調べ、肥満度が当該海域の C_{m50} に達する日齢を調べた（Fig. 3.3-7）。相模湾では、1 月孵化群の加齢に伴う肥満度の増加速度は緩やかで、80 日齢時までに C_{m50} に達しなかった。2 月孵化群と 3 月孵化群の肥満度増加速度は 1 月孵化群と比べて大きく、それぞれ 69 日齢と 61 日齢で C_{m50} に達した。8 月以降の孵化月群では肥満度増加が緩やかになり、肥満度が C_{m50} に達しなくなった。宮古湾では、4 月孵化群と 5 月孵化群の肥満度がそれぞれ 58・59 日齢と、比較的早く C_{m50} に達した。宮古湾の 6 月孵化群の肥満度が C_{m50} に達したのは、63 日齢時とやや高齢であった。大洗漁場では、逆算肥満度が C_{m50} に達した日齢が 6 月孵化群（53 日齢）と 7 月孵化群（50 日齢）よりも 8 月孵化群（88 日齢）で高齢であった。

加齢に伴う仔稚魚肥満度の日成長速度の変化をみると（Fig. 3.3-8）、相模湾と大洗漁場で採集された仔稚魚では、肥満度成長速度の加速度や極大値が孵化月群間で大きく変動したが、宮古湾ではこれらの値の孵化月群間での変化は小さかった。いずれの孵化月群においても、宮古湾で採集された仔稚魚の肥満度成長速度は他の 2 海域と比べて低かった（Steel Dwass, $P < 0.001$ ）。

加齢に伴う仔稚魚の体長成長速度の変化を Fig. 3.3-9 に示した。大洗漁場で採集された仔稚魚は、3・5・6 月孵化群にみられるように、長い期間にわたって相模湾の仔稚魚の成長速度を大きく上回ることがあった一方で（Steel Dwass, $P < 0.001$ ）、2・4・7・9 月孵化群のように相模湾の仔稚魚の成長速度との間に傾向的な差が見られないこともあった。これに対して、宮古湾の 3—6 月孵化群は、いずれも 30 日間以上と長期間において、相模湾の 3—6 月孵化群の体長成長速度を上回った（Steel Dwass, $P < 0.001$ ）。しかし 7・8 月孵化群では、相模湾で採集された仔稚魚の体長成長速度が加速することによって、両海域の成長速度はほぼ同等になった。これを反映して、仔稚魚の日齢時体長は体長成長速度が大きかった宮古湾の 3—6 月孵化群や大洗漁場の 3・5・6 月孵化群で相模湾よりも大きかったが（Steel Dwass, $P < 0.01$ ）、これらの孵化群では相模湾の仔稚魚の方が早く C_{m50} に達していた（Fig. 3.3-10）。

加齢に伴う仔稚魚の体重成長速度の変化を Fig. 3.3-11 に示した。大洗漁場で採集された仔

稚魚の体重成長速度は、3月孵化群（6–38日齢時）、5月孵化群（18–32日齢時）、6月孵化群（26–44日齢時）において相模湾の仔稚魚よりも有意に大きかったが（Steel Dwass, $P < 0.001$ ）、2・4月孵化月群と7月以降の孵化月群では有意差は見られなかった（Steel Dwass, $P > 0.05$ ）。宮古湾で採集された仔稚魚の体重成長速度は3月孵化群では相模湾の仔稚魚との間に有意差はみられなかったが（Steel Dwass, $P > 0.05$ ）、その他の孵化月群では相模湾の仔稚魚よりも有意に小さかった。宮古湾と相模湾で採集された仔稚魚の体長成長速度の間に有意差がみられた日齢範囲は、4月孵化群では13–14日齢時、5月孵化群では5–18日齢時、6月孵化群では5–33日齢時、7月孵化群では7–43日齢時、8月孵化群では5–23日齢時であった（Steel Dwass, $P < 0.001$ ）。

各海域で採集された仔稚魚の日齢時体重は、体重成長速度の変化を反映した変化様式を見せ（Fig. 3.3-12）、大洗漁場で採集された仔稚魚は3–6月孵化群において相模湾の仔稚魚よりも日齢時体重が有意に大きかったが（Steel Dwass, $P < 0.001$ ）、7月孵化群からは関係が逆転して相模湾の仔稚魚の日齢時体重が有意に大きかった（Steel Dwass, $P < 0.001$ ）。宮古湾の仔稚魚の日齢時体重は、3・4月孵化群では相模湾の仔稚魚の日齢時体重との間に有意差は見られなかったが、5月以降の孵化群では相模湾よりも有意に小さかった（Steel Dwass, $P < 0.001$ ）。

各海域について、採集前5日間における体長（ G_{5L} ）・体重（ G_{5W} ）・肥満度（ G_{5C} ）の成長速度と、採集時の水温を比較した（Fig. 3.3-13）。相模湾で採集された仔稚魚の G_{5L} と G_{5C} は共に水温と有意に正相関したのに対し（線形モデル）、宮古湾と大洗漁場で採集された仔稚魚ではこれらの成長速度は水温と無関係であった（線形モデル）。いずれの海域においても、 G_{5W} は水温と無関係であった。

仔稚魚の肥満度成長速度の変化履歴と日齢時肥満度を、3℃間隔に区切った水温区ごとに調べた（Fig. 3.3-14）。相模湾で採集された仔稚魚では、24℃未満の水温区において24℃以上の水温区と比べて肥満度成長速度が低下し、肥満度が C_{m50} に達する日齢も高齢化した。一方、宮古湾と大洗漁場で採集された仔稚魚の肥満度成長速度は水温が低下しても比較的高く維持され、大洗漁場では24℃未満の水温区で、宮古湾では18℃未満の水温区で相模湾を上回った。宮古湾の仔稚魚の日齢時肥満度は、18℃未満の水温区では解析対象が比較的若齢であったため C_{m50} に達しなかったものの、18℃以上24℃未満の水温区では相模湾よりも若齢で C_{m50} に達した。

体長 (Fig. 3.3-15) と体重 (Fig. 3.3-16) について同様に解析しても、相模湾では仔稚魚の各成長速度が水温の低下とともに低下したのに対し、宮古湾と大洗漁場ではこのような傾向は認められなかった。宮古湾と大洗漁場の 15°C 以上 18°C 未満の水温区では、体長 (Fig. 3.3-15) と体重 (Fig. 3.3-16) の成長速度は共に相模湾を大きく上回った。

成長・変態動態の沿岸・沖合間での比較

常磐—三陸沖合海域では、 L_{m50} は沿岸域と同様に水温と有意に負相関した一方で (線形モデル)、 W_{m50} の傾きは水温とは無関係で、切片の有意性も小さかった (線形モデル)。常磐—三陸沖合海域の C_{m50} は水温とは無関係であったが切片の有意性は高く (線形モデル, $P < 0.001$)、その幾何平均は 7.6 であった。常磐—三陸沖合海域の C_{m50} は宮古湾 (5.7) よりも有意に高かったが (Steel Dwass, $P < 0.001$)、大洗漁場と相模湾との間に有意差はみられなかった。

仔稚魚の体長—頭長関係の両対数プロットは、宮古湾・大洗漁場・常磐—三陸沖合域のいずれにおいても有意に線形回帰された (線形モデル)。宮古湾における回帰線の傾きは大洗漁場 (ANCOVA, $P < 0.05$) と常磐—三陸沖合域 (ANCOVA, $P < 0.001$) のどちらよりも有意に小さかった。

常磐—三陸沖合域では、採集時水温に対して G_{5L} と G_{5C} は有意に正相関したが (線形モデル)、 G_{5W} には有意な相関はみられず (線形モデル)、この傾向は相模湾と同様であった。常磐—三陸沖合域の採集時水温に対する G_{5L} 関係の傾きは、相模湾よりも有意に大きかった (ANCOVA, $P < 0.001$)。 $T-G_{5C}$ 関係に着目すると、回帰式の傾きには常磐・三陸沖合域と相模湾との間で有意差はみられなかったが (ANCOVA, $P > 0.05$)、切片は常磐・三陸沖合域で有意に大きかった (ANCOVA, $P < 0.01$)。

仔稚魚の 40 日齢時における体長・体重・肥満度成長速度を海域間比較した。 G_{L-d40} に着目すると、沿岸域の中で宮古湾が他の 2 海域よりも高く (Steel Dwass, $P < 0.001$)、常磐—三陸沖合海域は宮古湾とは有意差はみられなかったものの、大洗漁場と相模湾よりも有意に高かった (Steel Dwass, $P < 0.01$)。 G_{W-d40} と G_{C-d40} に着目すると、沿岸域の中で大洗漁場が最も高く、宮古湾が次に高かった (Steel Dwass, $P < 0.01$)、常磐—三陸沖合海域は宮古湾と相模湾よりも有意に高かった (Steel Dwass, $P < 0.001$)。 G_{C-d40} に着目すると、沿岸では大洗漁場が他の 2 海域よりも

高く (Steel Dwass, $P < 0.01$), 常磐—三陸沖合海域は宮古湾と相模湾よりも有意に高かった (Steel Dwass, $P < 0.001$).

3.3.4 考察

成長・変態動態の緯度間差異と成育場の北方拡大

宮古湾・大洗漁場・相模湾の沿岸3海域では、半数変態体長 (L_{m50}) と半数変態日齢 (d_{m50}) は水温と負相関した (Fig. 3.3-4). 同様の現象は大洗漁場や紀伊水道で採集されたカタクチイワシ仔稚魚においても報告されている (富永・二平, 1999a; Yasue et al., 2015). 水温上昇に伴う変態時体長の小型化および変態時日齢の若齢化は、異体類を始め (e.g. Laurel et al., 2014; Liewes, 1984), スズキ目のヒメジ科, テンジクダイ科, チョウチョウウオ科, スズメダイ科, ハゼ科, ベラ科, カワハギ科魚類 (e.g. Benoît et al., 2000; McCormick and Molony, 1995) でも知られており、魚類に一般的な現象と考えられる. 一方、半数変態肥満度 (C_{m50}) と水温との間には有意な関係性は認められず (Fig. 3.3-4), 深道 (2010) の指摘と同様に、肥満度がカタクチイワシの変態の閾値となっていると考えられた. カタクチイワシが、細長い「シラス型体型」(沖山, 1979) から成魚の体型へと肥満度の増加を伴うイワシ型変態を行うことから、半数変態肥満度を変態の閾値として用いることは合理的と考えられ、それは仔稚魚の肥満度が半数変態値に達する日齢が半数変態日齢とほとんど変わらなかったことから (Figs. 3.3-5, 3.3-6) 妥当であると考えられた. 変態の調節要因としての閾値の概念は両生類において古くから提唱され、具体的な閾値としては甲状腺ホルモン濃度の累積値が知られている (Kollros, 1961). 魚類の変態も甲状腺ホルモンによって制御されていることが明らかとなっているが (Power et al., 2001), 本研究の結果は、仔魚の体組織における甲状腺ホルモン濃度を計測しなくとも、体長と体重から求めた肥満度によって変態の進行度を知ることができることを示している. 本研究では、肥満度がこの C_{m50} に達するまでの日齢およびその成長過程の比較によって、カタクチイワシの成長と変態動態を緯度間比較した.

水温の南北差を考慮して水温区ごとに比較を行うことで、仔稚魚の G_{5C} と採集時水温との関係の違いに起因した成長・変態動態の緯度間差異が如実に表れた. 相模湾では、24℃未満の水

温区において ΔC の低下によって仔魚期の延長が起こったが、大洗漁場では ΔC が水温によってほとんど変化しなかったことによって、24°C 未満で相模湾よりも早く変態が起こった (Fig. 3.3-14). 宮古湾では、 G_{5C} が採集時水温と無関係であることに加えて、変態の閾値となる C_{m50} の値が低いことも変態の早期化につながっていた (Fig. 3.3-14). 相模湾の仔魚が加齢に伴って ΔL を低下させて (Fig. 3.3-15) より多くのエネルギーを ΔW へ振り分け (Fig. 3.3-16), 変態に向けて肥満度を急速に増加させていた一方 (Fig. 3.3-14), 宮古湾の仔魚では加齢に伴う ΔL の低下の度合いは緩やかで (Fig. 3.3-15), 18°C 以上 24°C 未満の水温区では相模湾よりも日齢時肥満度が低いにも関わらず早く変態した (Fig. 3.3-14).

相模湾と比較すると、親潮系冷水域に属する宮古湾と大洗漁場は、比較的低水温域において好適な餌料環境によると考えられる肥満度の高成長がみられる点で共通したが、利用可能エネルギーの体長成長と体重成長への分配比率が両群間で異なっていると考えられる。 C_{m50} が相模湾とほぼ等しい大洗漁場では、仔魚は肥満度を急速に増加させることによって早く変態しており、これが優れた変態戦術であることは、仔魚期の累積的な死亡に着目した "Stage duration 仮説" が主張するところである。一方、宮古湾の仔魚は 15°C 以上 24°C 未満の水温区では、大洗漁場と比べて体重成長および肥満度成長では劣っていたものの、体長成長は近似していた。宮古湾の仔稚魚は大洗漁場や相模湾と比較して肥満度成長速度が低くても変態の閾値となる C_{m50} が低いために、体長成長へのエネルギー配分量が少なくても変態可能であり、体長成長へより多くのエネルギーを配分できる変態戦術と解釈できる。

このような変態動態の緯度間差異を、冬季に経験する生残過程の緯度間差異から説明を試みた例がある。冬季の主な死亡要因を考える場合、ある魚種の分布域のうち、低緯度域では代謝がある程度高く維持されるために飢餓死亡のリスクが大きく、一方高緯度域では低水温が代謝活性を抑制するために飢餓よりも体サイズ依存的な捕食死亡の影響がより重要であることが指摘されている (Hurst, 2007). 宮古湾の仔稚魚は C_{m50} が低いことによって "Stage duration" を短くしているが、さらに C_{m50} が低いことによって節約できるエネルギーを体長成長へ配分することによって体サイズを大きくでき、"Bigger is better 仮説" が主張する捕食死亡確率を低下させる変態戦術であるとも解釈できる。

親潮系冷水域へのカタクチイワシの初期生活域拡大は、本種の仔魚期後期から稚魚期の低温適応的な成長によって可能になっていたと考えられた。

沿岸資源からみた沖合資源

C_{m50} の幾何平均値および仔稚魚の体長-頭長関係から判断すると、常磐-三陸沖合海域の仔稚魚は宮古湾よりも相模湾や大洗漁場の仔稚魚により近い群と考えられるが、沖合海域では稚魚の耳石解析個体が少ないため d_{m50} を算出できておらず、 C_{m50} を沿岸域と同様に変態の閾値として用いることの妥当性が確認できていない。常磐-三陸沖合域の仔稚魚の半数変態特性値が沿岸域と比べてばらつきが大きいことを考えると、本海域の C_{m50} を一様に平均することには議論の余地があると考えられる。

常磐-三陸沖合海域で採集された仔魚では、水温に対する体長と肥満度の成長速度が水温と正相関した点で相模湾と同様であったが、成長速度の水準は相模湾を大きく上回った (Fig. 3.3-19)。成長速度依存的な選択が強い水域では、成長速度の小さい群が死亡することによって、群全体の成長速度の平均値が大きくなることが知られているが (e.g. Itoh et al., 2011; Robert et al., 2007)、常磐-三陸沖合域の仔稚魚の体長と肥満度の成長速度が相模湾の仔魚とほとんど重複しなかったことは (Fig. 3.3-19)、本海域が相模湾と比べて餌料環境に優れていることの表れであると考えられる。Takahashi and Watanabe (2004a) は、黒潮親潮移行域では、体長成長速度の高い稚魚は水温が高く餌料生物のカイアシ類の分布密度が高い南西部に多かったことを報告し、この移行域の南西部がカタクチイワシの加入の場として重要であることを指摘した。常磐-三陸沖合域の仔稚魚の G_{5C} が水温と正相関するという本研究の結果は (Fig. 3.3-19)、Takahashi and Watanabe (2004a) が指摘した移行域南西部における高加入のメカニズムとして、急速な肥満度増加による速やかな変態が起きていたと考える根拠となる。常磐-三陸沖合域に分布する仔稚魚は相模湾の仔稚魚と同様に、主に黒潮系暖水域で発生した群と考えられる (Itoh et al., 2009; Takahashi et al., 2001)。成長速度に依存した加入 (Takahashi and Watanabe, 2004b) を考えれば、本海域の仔稚魚の成長速度が相模湾よりも著しく高かったことは (Fig. 3.3-19)、黒潮系暖水域発生群が相模湾よりも本海域へ輸送されることの重要性を示している。

魚類の仔稚魚期には様々な生残過程が考えられるが、常磐-三陸沖合域では、 G_{L-d40} はほと

んどの個体で資源加入の最低水準として知られる 0.25 mm day^{-1} を上回り (Fig. 3.3-20), 成長速度依存的な死亡率は低いと考えられた。またこれら沖合域の仔稚魚は, 体長成長へのエネルギー配分の比重が大きい変態過程を見せた宮古湾の仔稚魚に匹敵するほど体長成長速度が大きいため, 体サイズ依存的な死亡率も低いと考えられた。さらに肥満度成長へのエネルギー配分の大きい大洗漁場の仔稚魚に匹敵するほど肥満度成長が大きいため, 仔魚期間が短縮される結果, 仔魚期における累積的な死亡率も低いと考えられた。以上から, 常磐・三陸沖合域に分布する仔稚魚は親潮系冷水域資源への新規加入の貢献度が高いと考えられた。

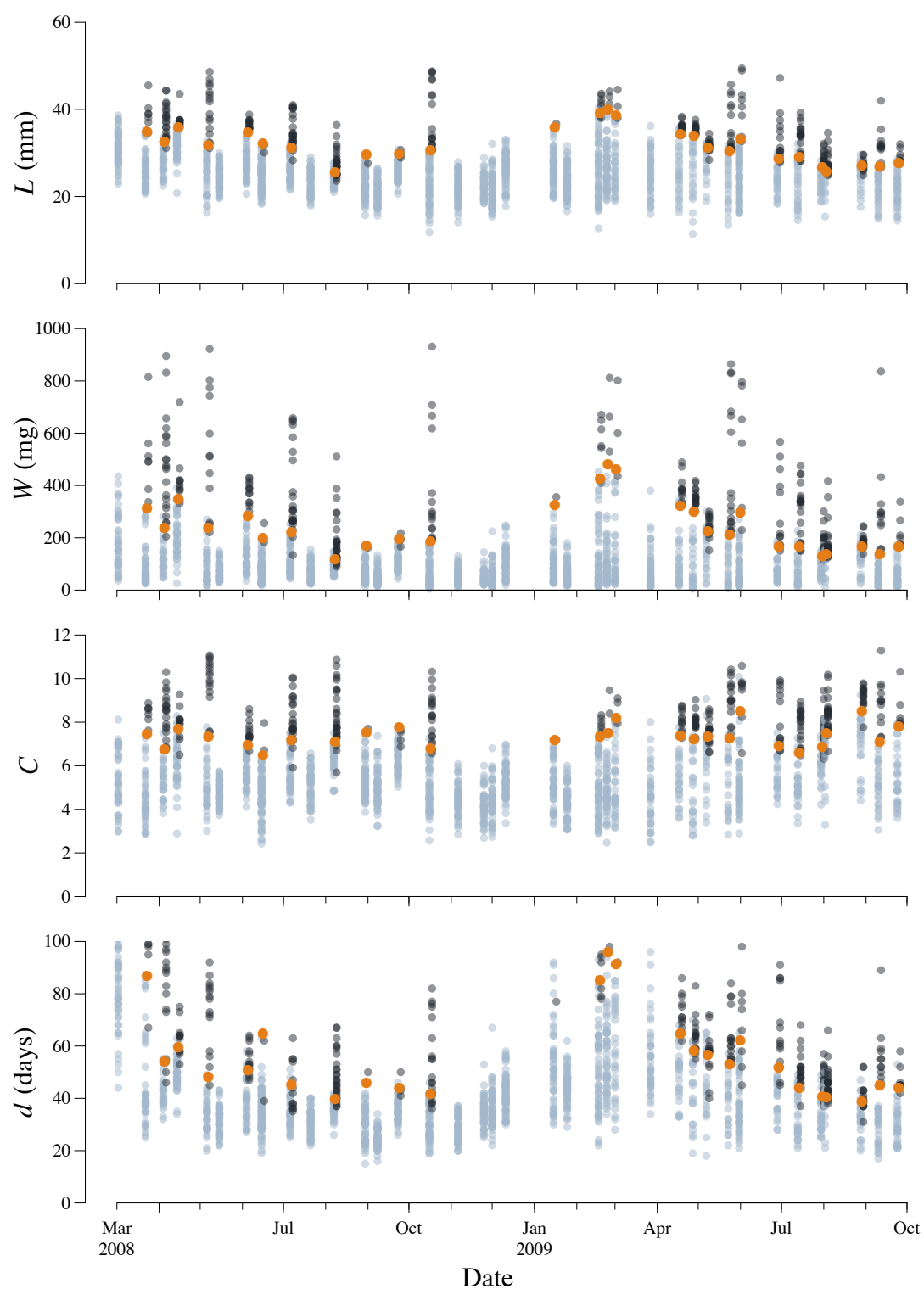


Fig. 3.3-1: Seasonal changes in L - (top), W - (second row), C - (third row) and d - (bottom) at-metamorphosis (red dot) of Japanese anchovy in Sagami Bay. Gray and black dot represent a datum of larva and juvenile, respectively.

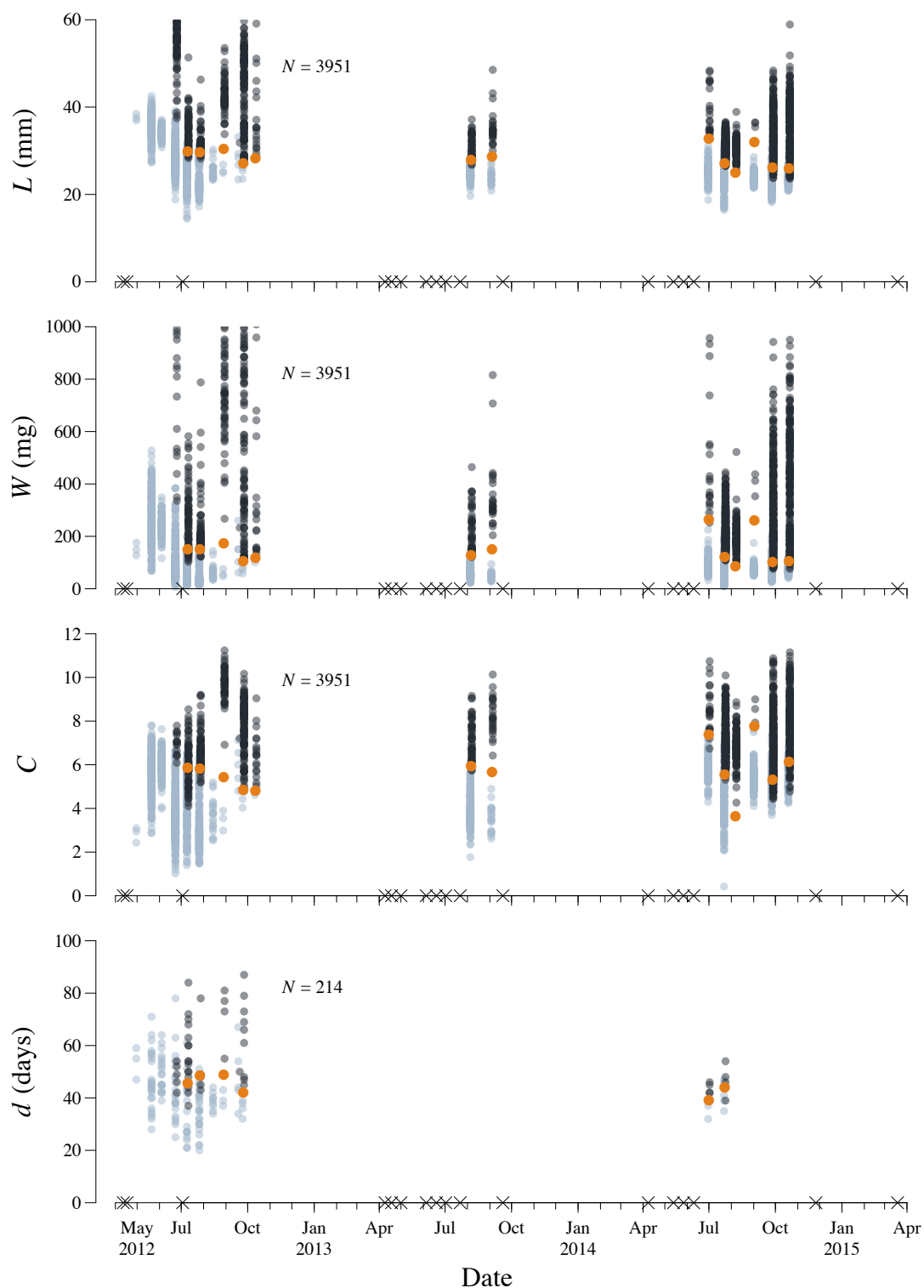


Fig. 3.3-2: Seasonal changes in L - (top), W - (second row), C - (third row) and d - (bottom) at-metamorphosis (red dot) of Japanese anchovy in Miyako Bay. Gray and black dot represent a datum of larva and juvenile, respectively. Cross indicates no collection of anchovy larvae and juveniles.

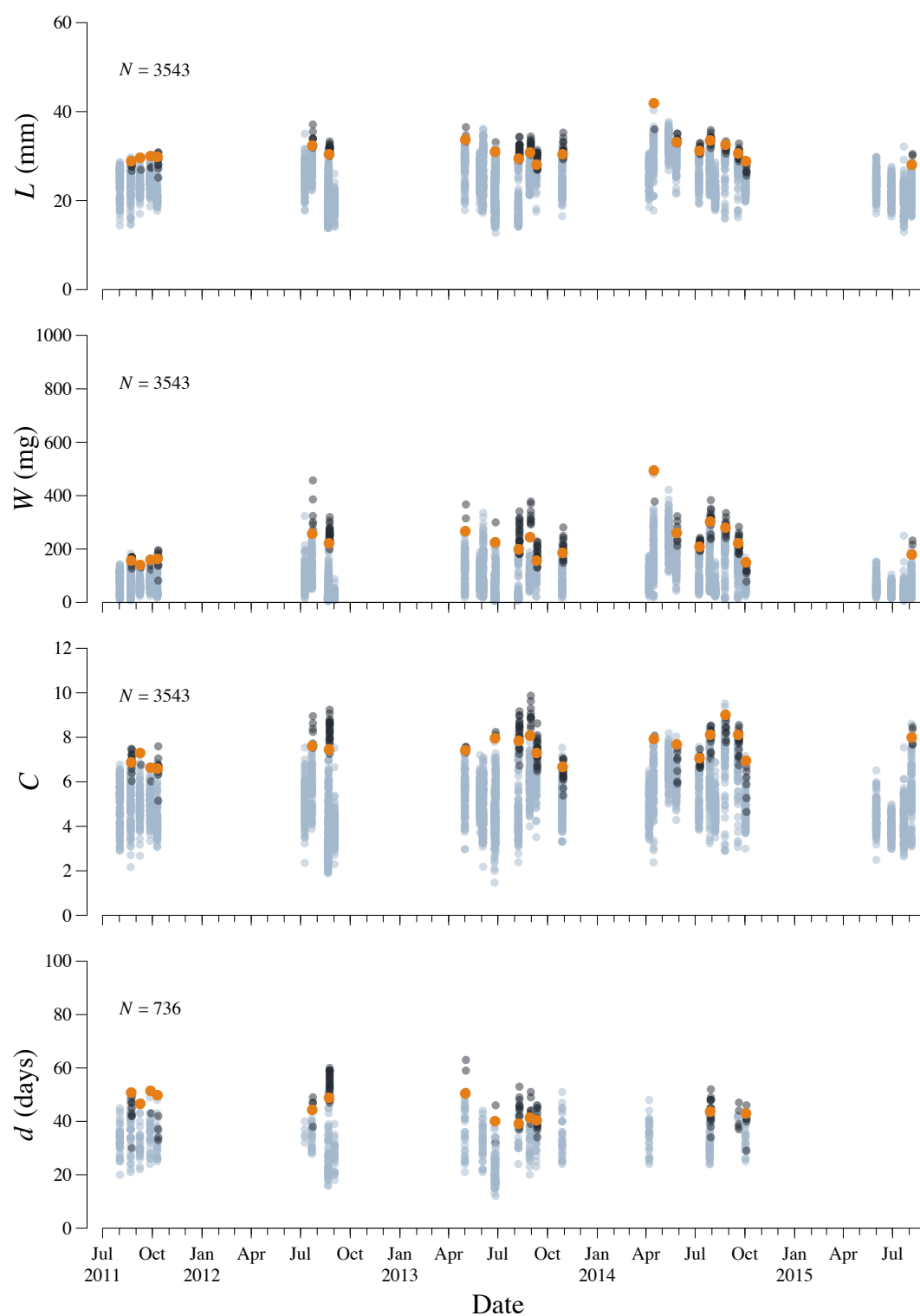


Fig. 3.3-3: Seasonal changes in L - (top), W - (second row), C - (third row) and d - (bottom) at-metamorphosis (red dot) of Japanese anchovy in Oarai coast. Gray and black dot represent a datum of larva and juvenile, respectively.

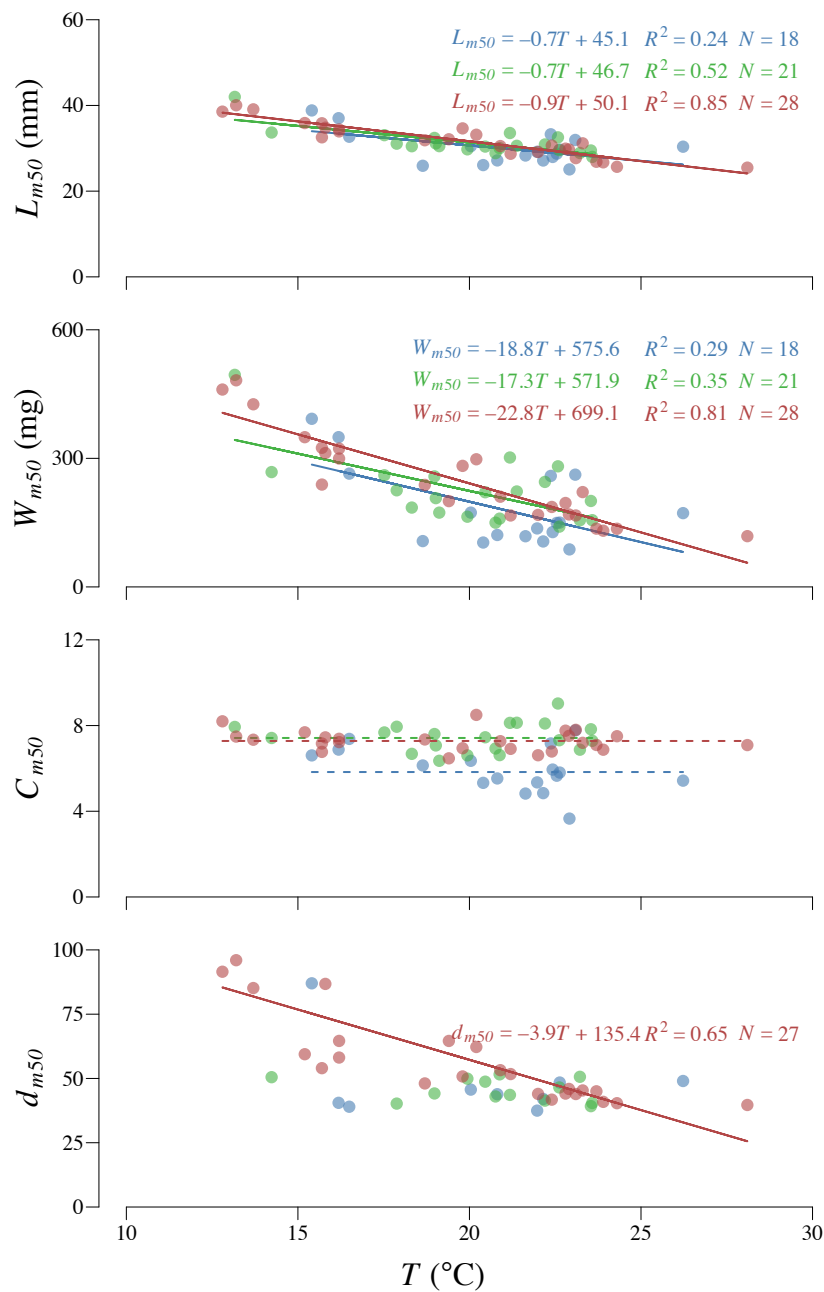


Fig. 3.3-4: Relationships between SST and L - (top), W - (second row), C - (third row) and d - (bottom) at-metamorphosis of Japanese anchovy in Miyako Bay (blue), Oarai coast (green) and Sagami Bay (red). Dashed horizontal line in the third row represents geometric mean of C_m (5.7, Miyako Bay; 7.4, Oarai coast; 7.4, Sagami Bay).

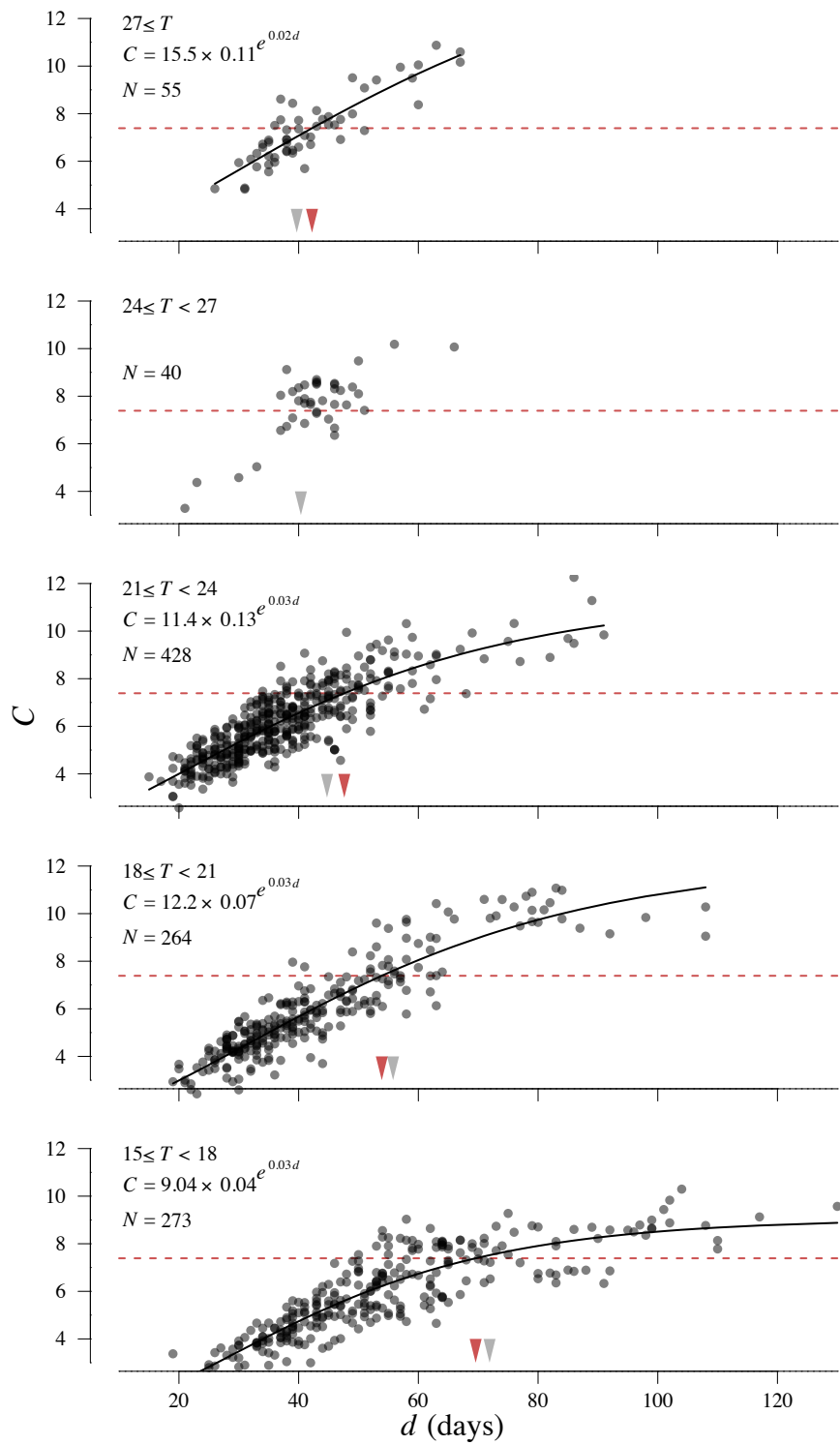


Fig. 3.3-5: Relationships between d (days) and C of anchovy larvae in Sagami Bay by SST classes. Dashed horizontal line represents C_{m50} (7.4). Red arrowhead points the age at intersection of d - C regression line and the C_{m50} . Gray arrowhead points the d_{m50} .

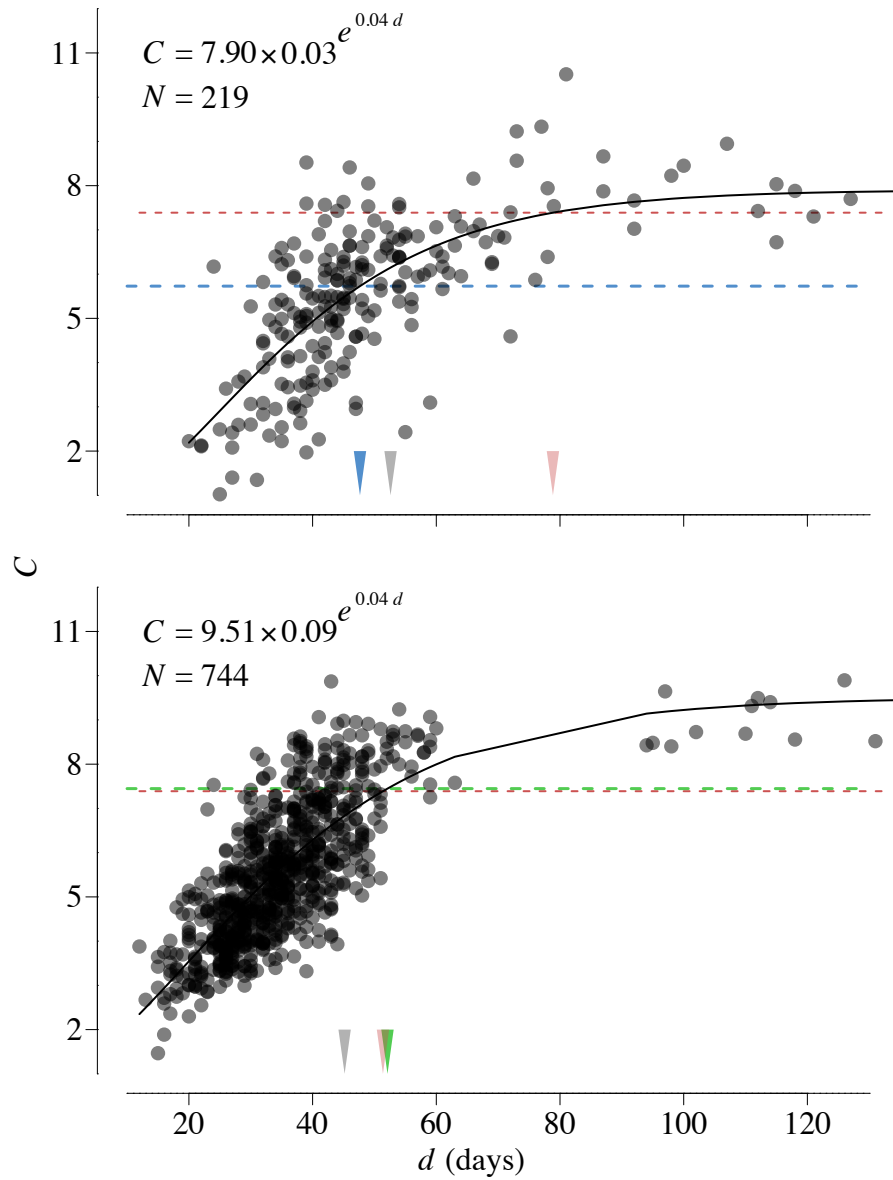


Fig. 3.3-6: Relationships between d (days) and C of anchovy larvae in Miyako Bay (*top*) and Oarai Coast (*bottom*). Dashed horizontal line represents C_{m50} in Miyako Bay (5.7, *blue*) and Oarai Coast (7.4, *green*). The age at intersection of d – C regression line and the C_{m50} of a given area is pointed by an arrowhead in the same color as C_{m50} of the area. Red arrowhead points the age at the intersection calculated from the C_{m50} in Sagami Bay (7.4, *red dashed line*). Gray arrowhead points the d_{m50} of the area.

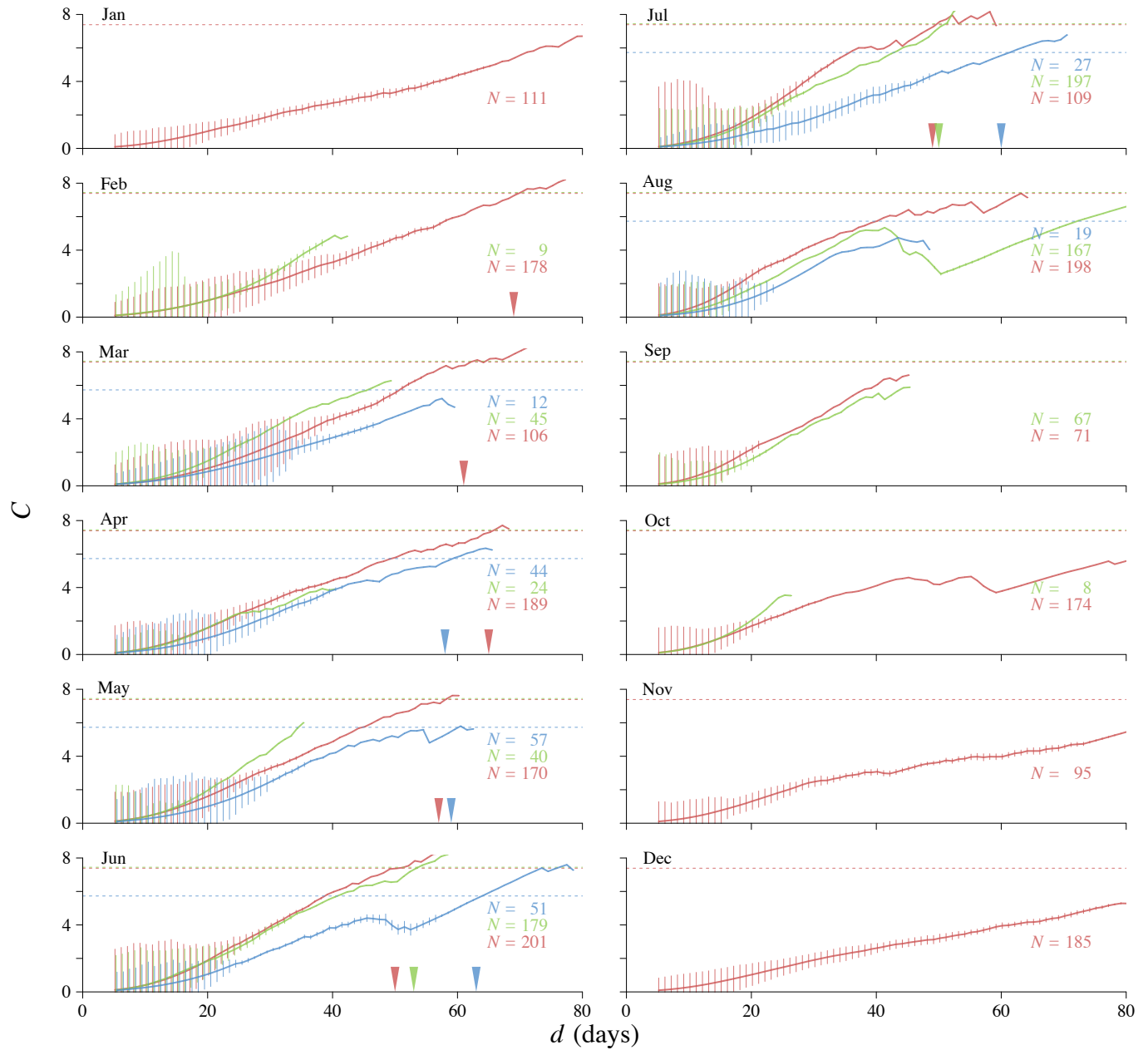


Fig. 3.3-7: C-growth trajectory of anchovy larvae in Miyako Bay (blue), Oarai coast (green) and Sagami Bay (red) by hatch month cohorts. Vertical line represents standard deviation. The C_{m50} of a given area is shown in dashed horizontal line. Arrowhead points the d at which cumulated ΔC exceeded the C_{m50} of the area (5.7, Miyako Bay; 7.4, Oarai coast; 7.4, Sagami Bay).

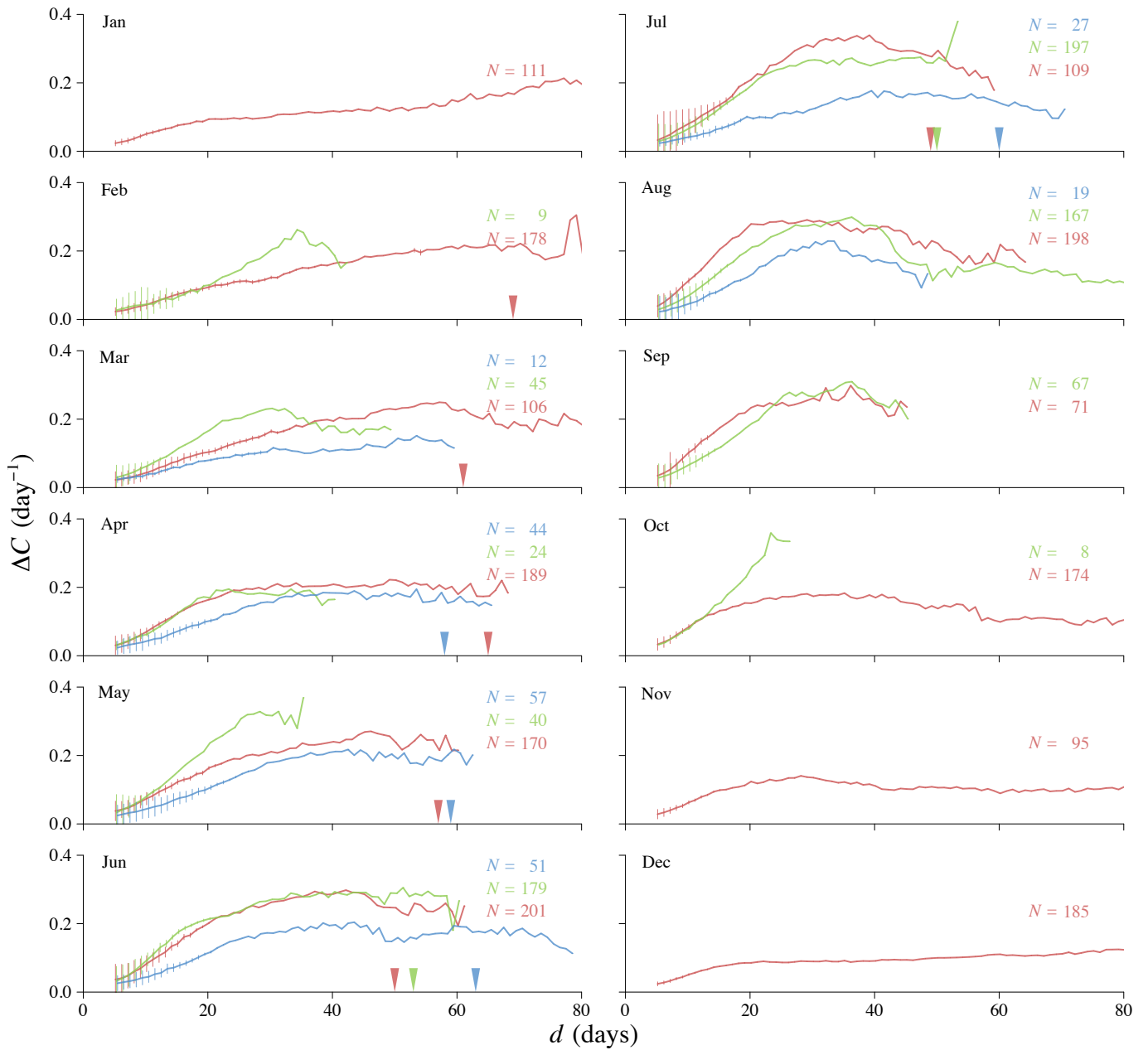


Fig. 3.3-8: Daily C-growth increment of anchovy larvae in Miyako Bay (blue), Oarai coast (green) and Sagami Bay (red) by hatch month cohorts. Vertical line represents standard deviation. The C_{m50} of a given area is shown in dashed horizontal line. Arrowhead points the d at which cumulated ΔC exceeded the C_{m50} of the area (5.7, Miyako Bay; 7.4, Oarai coast; 7.4, Sagami Bay).

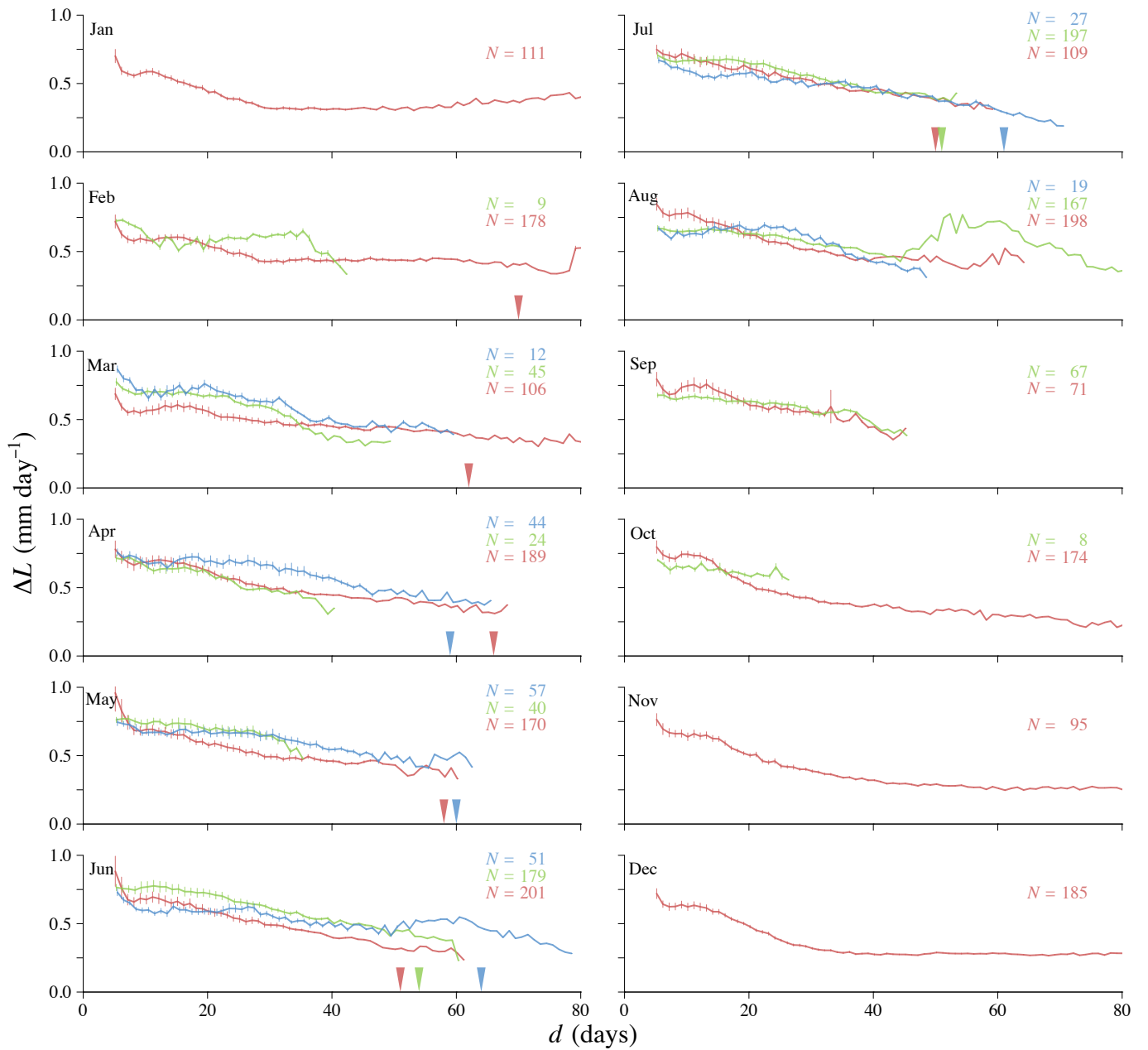


Fig. 3.3-9: Daily L -growth increment of anchovy larvae in Miyako Bay (blue), Oarai coast (green) and Sagami Bay (red) by hatch month cohorts. Vertical line represents standard deviation. Arrowhead points the d at which cumulated ΔC exceeded the C_{m50} of the area (5.7, Miyako Bay; 7.4, Oarai coast; 7.4, Sagami Bay).

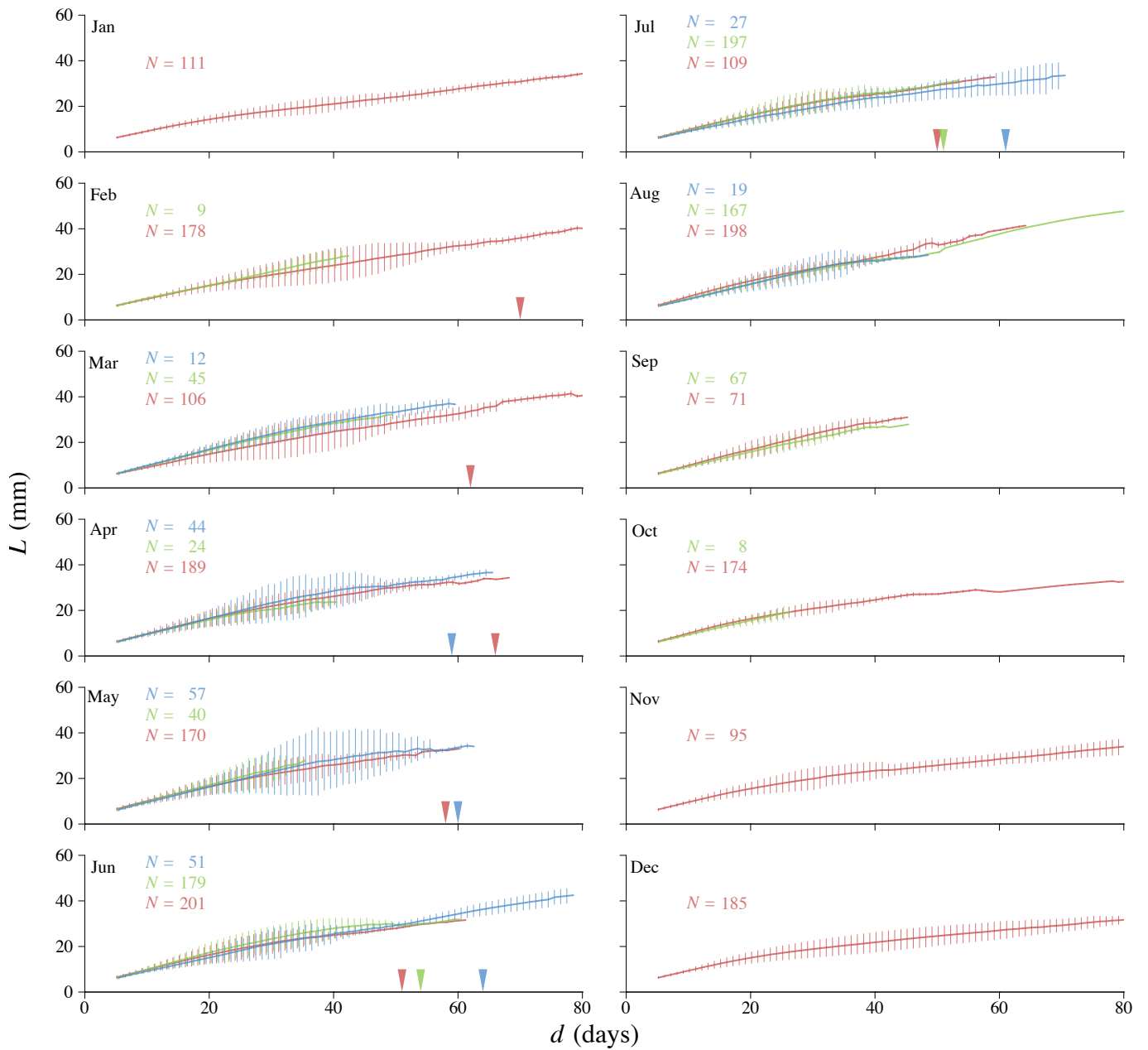


Fig. 3.3-10: L -growth trajectory of anchovy larvae in Miyako Bay (blue), Oarai coast (green) and Sagami Bay (red) by hatch month cohorts. Vertical line represents standard deviation. Arrowhead points the d at which cumulated ΔC exceeded the C_{m50} of the area (5.7, Miyako Bay; 7.4, Oarai coast; 7.4, Sagami Bay).

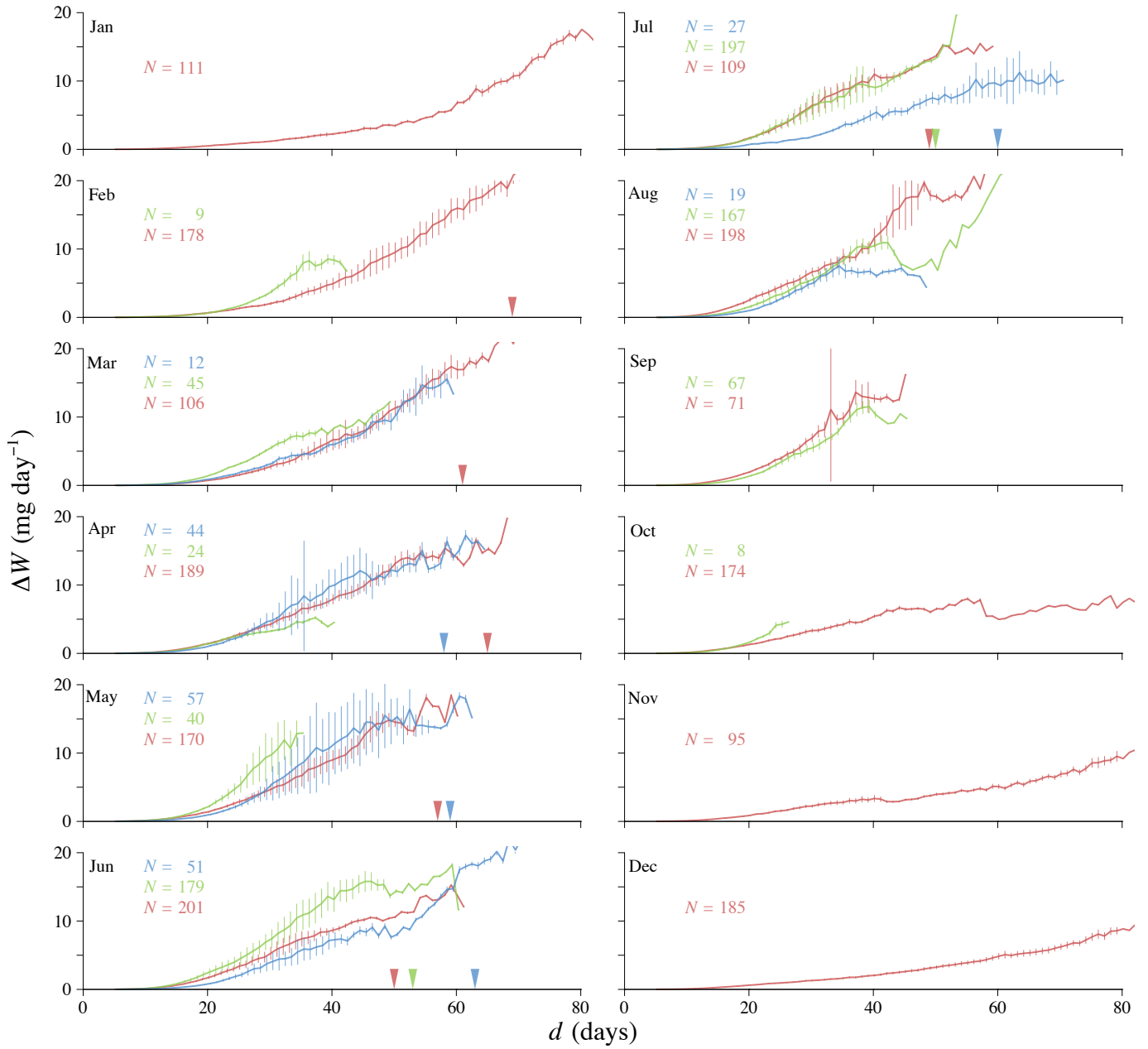


Fig. 3.3-11: Daily W -growth increment of anchovy larvae in Miyako Bay (blue), Oarai coast (green) and Sagami Bay (red) by hatch month cohorts. Vertical line represents 0.1 standard deviation. Arrowhead points the d at which cumulated ΔC exceeded the C_{m50} of the area (5.7, Miyako Bay; 7.4, Oarai coast; 7.4, Sagami Bay).

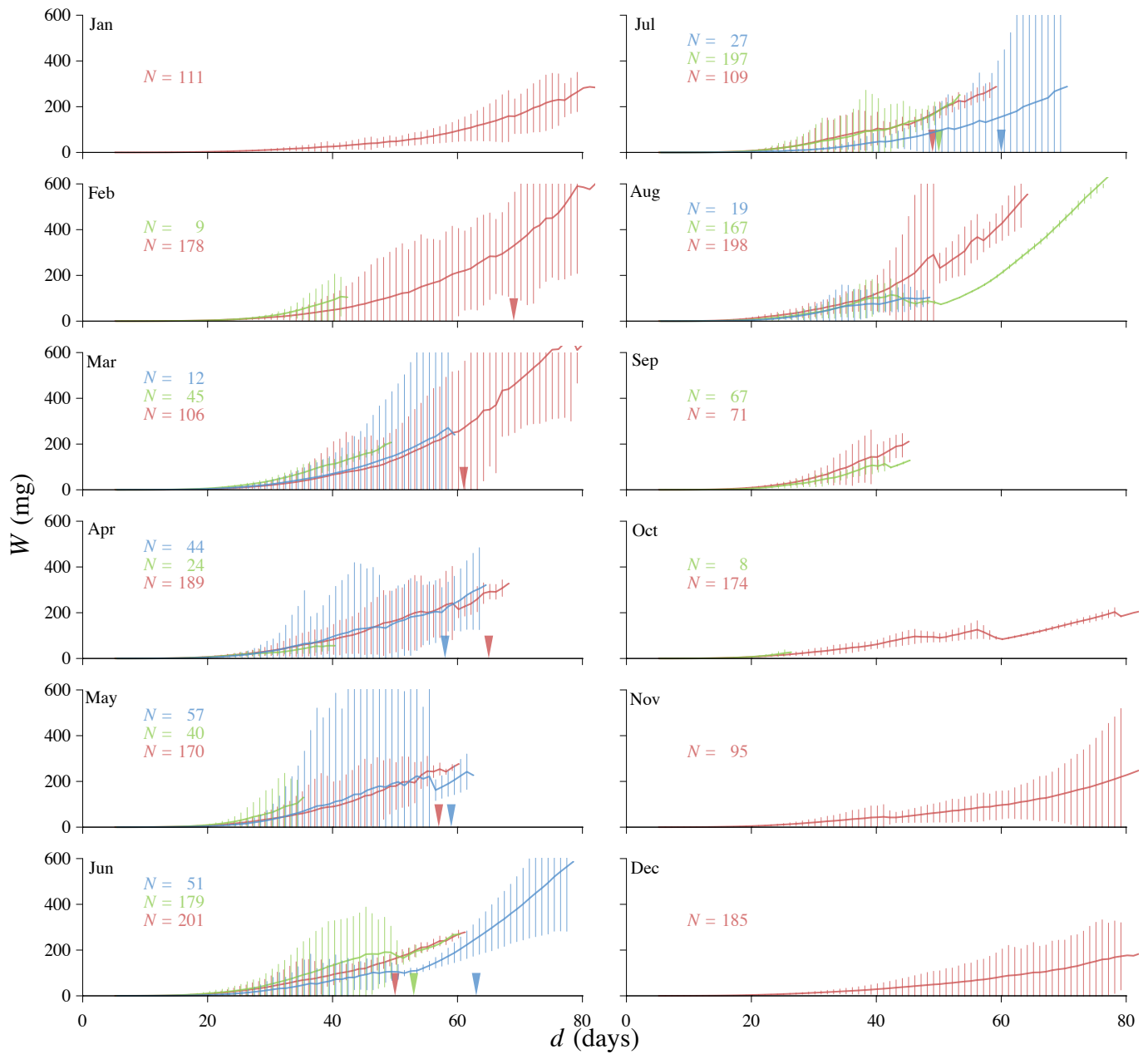


Fig. 3.3-12: W -growth trajectory of anchovy larvae in Miyako Bay (blue), Oarai coast (green) and Sagami Bay (red) by hatch month cohorts. Vertical line represents 0.1 standard deviation. Arrowhead points the d at which cumulated ΔC exceeded the C_{m50} of the area (5.7, Miyako Bay; 7.4, Oarai coast; 7.4, Sagami Bay).

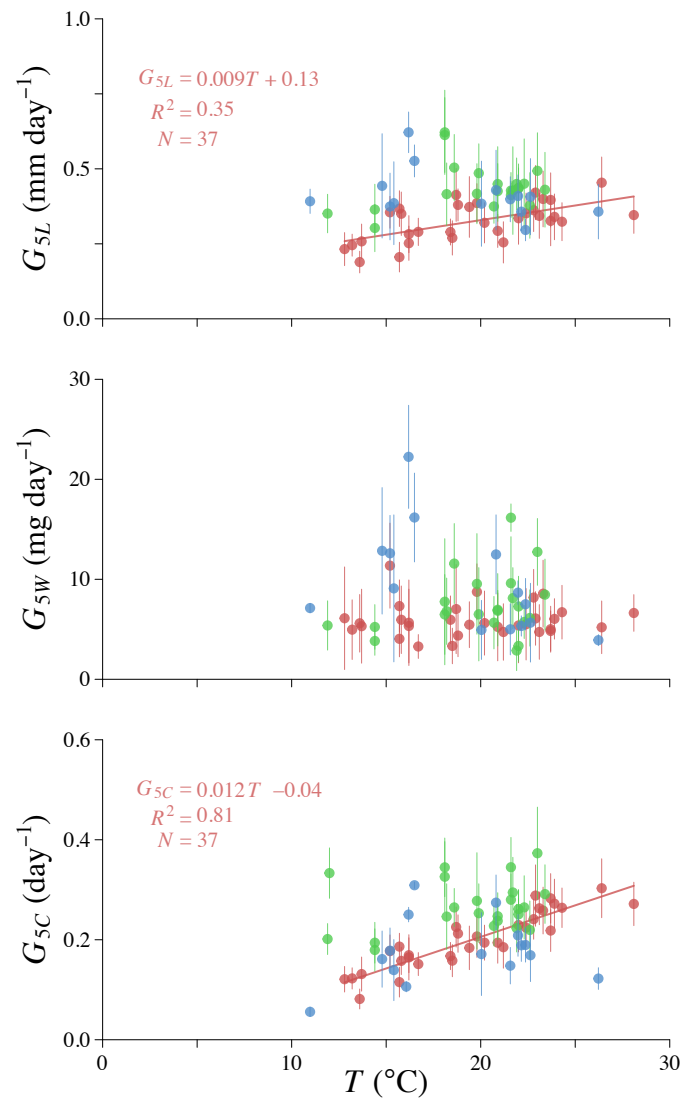


Fig. 3.3-13: Relationships between recent 5-day growth in L (G_{5L}), W (G_{5W}) and C (G_{5C}) of anchovy larvae and SST in Miyako Bay (blue), Oarai coast (green) and Sagami Bay (red). Vertical line represents standard deviation. Significant regression equation and the R^2 are shown.

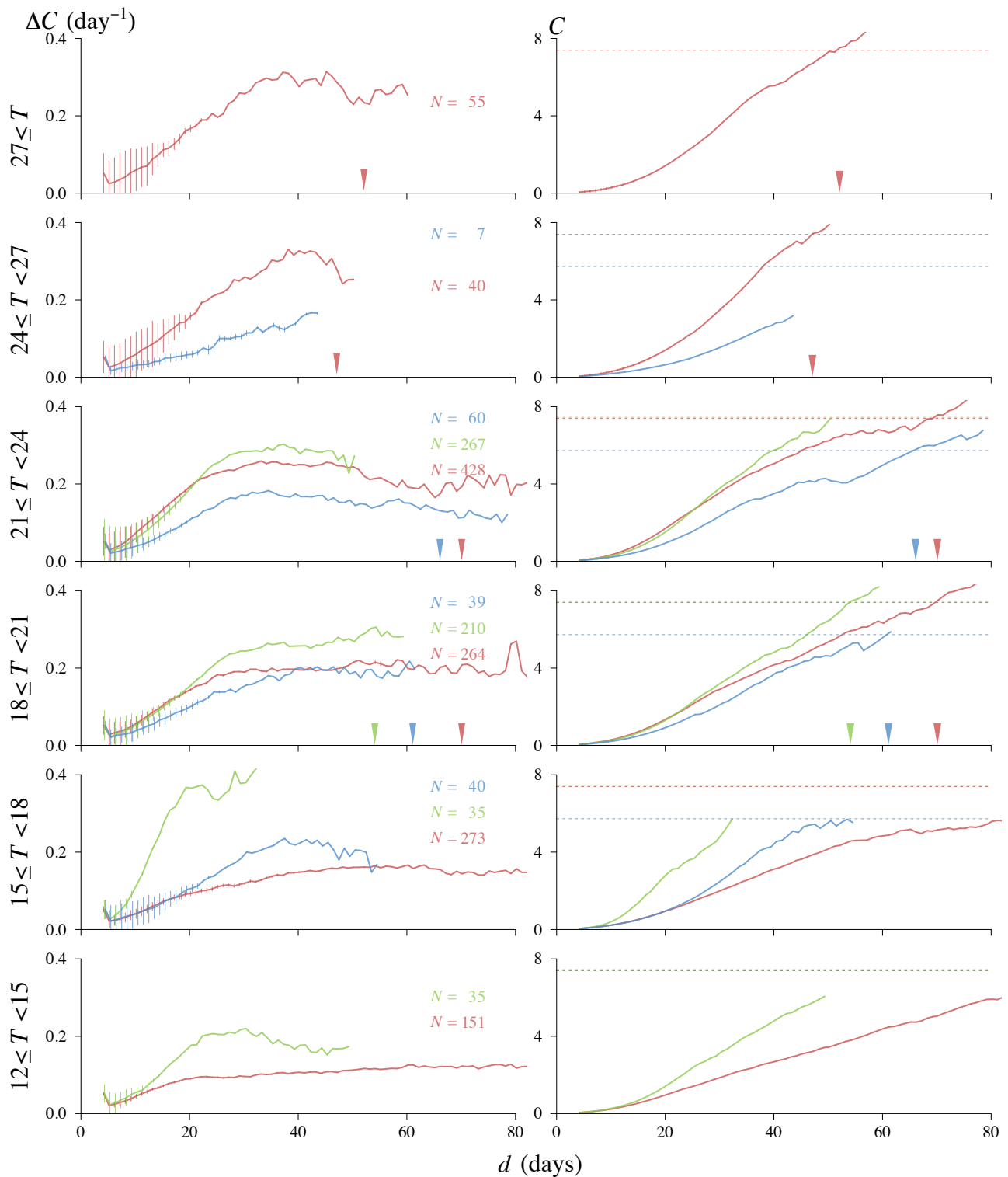


Fig. 3.3-14: Daily C -growth increment (left) and C -growth trajectory (right) of anchovy larvae in Miyako Bay (blue), Oarai coast (green) and Sagami Bay (red) by catch-temperature classes. Vertical line represents standard deviation. Arrowhead points the d at which cumulated ΔC exceeded the C_{m50} of given area (5.7, Miyako Bay; 7.4, Oarai coast; 7.4, Sagami Bay).

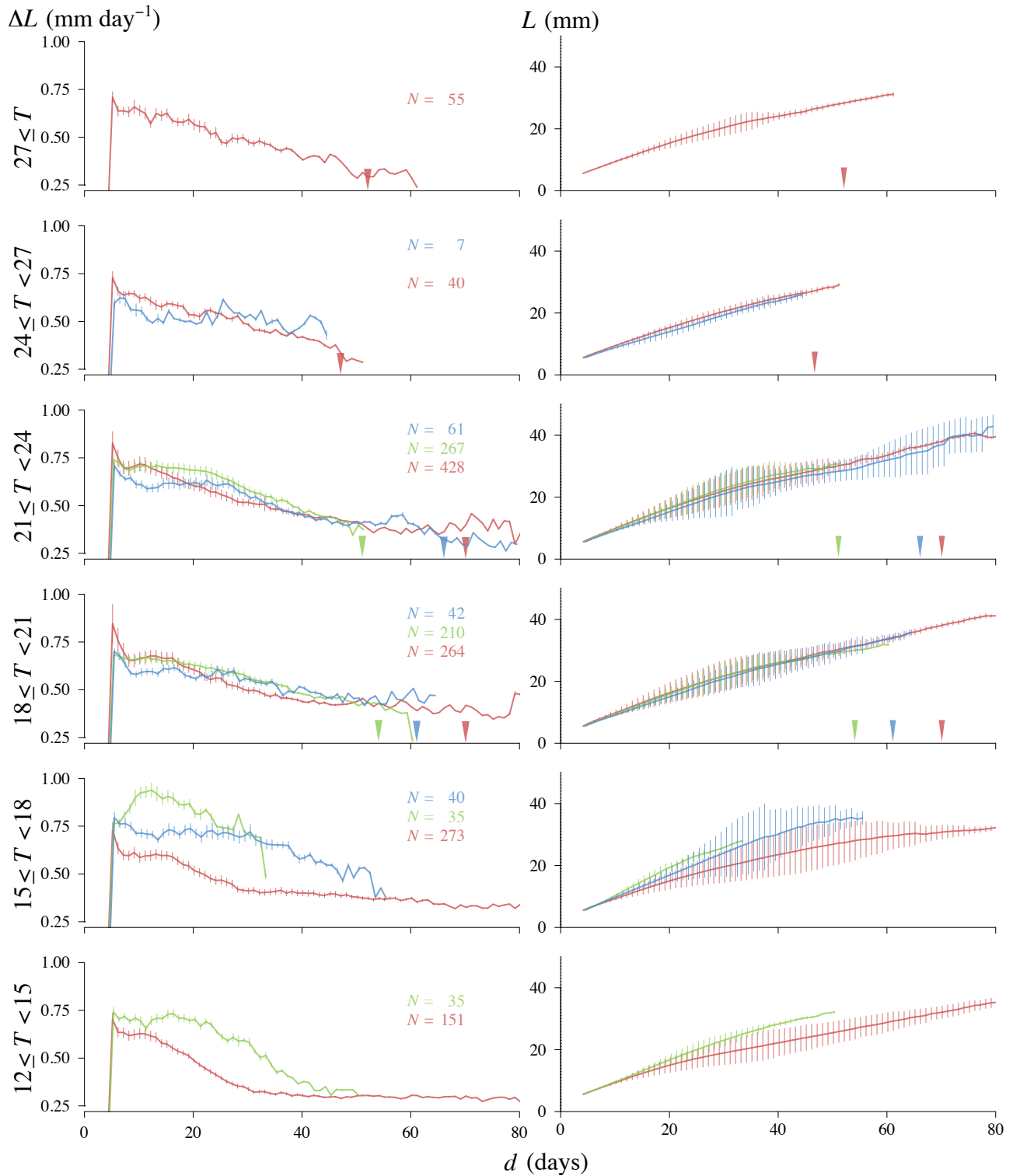


Fig. 3.3-15: Daily L -growth increment (left) and L -growth trajectory (right) of anchovy larvae in Miyako Bay (blue), Oarai coast (green) and Sagami Bay (red) by catch-temperature classes. Vertical line represents standard deviation. Arrowhead points the age at which cumulative value of ΔC exceeded the C_{m50} of given area (5.7, Miyako Bay; 7.4, Oarai coast; 7.4, Sagami Bay).

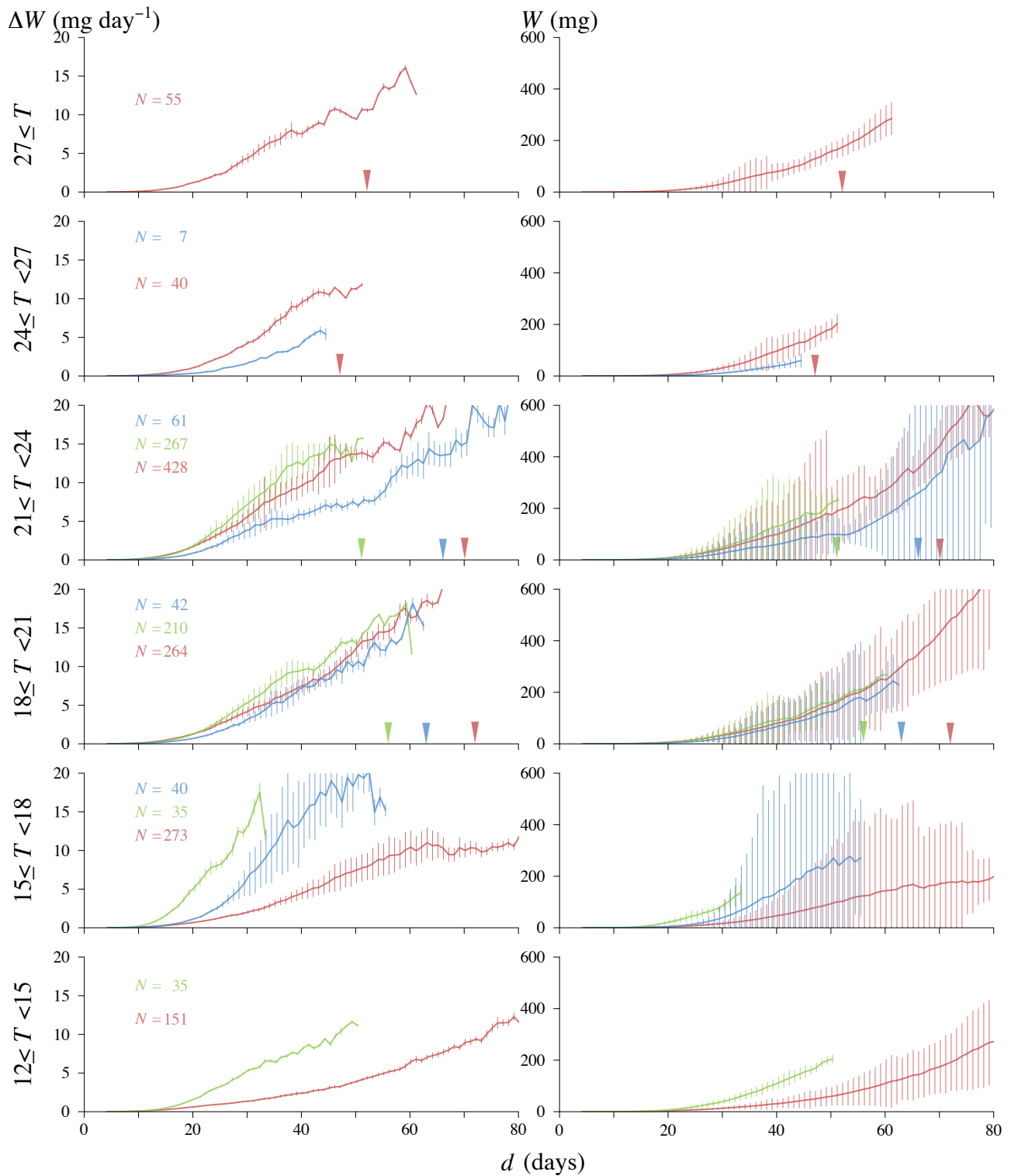


Fig. 3.3-16: Daily W -growth increment (*left*) and W -growth trajectory (*right*) of anchovy larvae in Miyako Bay (*blue*), Oarai coast (*green*) and Sagami Bay (*red*) by catch-temperature classes. Vertical line represents 0.1 standard deviation. Arrowhead points the age at which cumulative value of ΔC exceeded the C_{m50} of given area (5.7, Miyako Bay; 7.4, Oarai coast; 7.4, Sagami Bay).

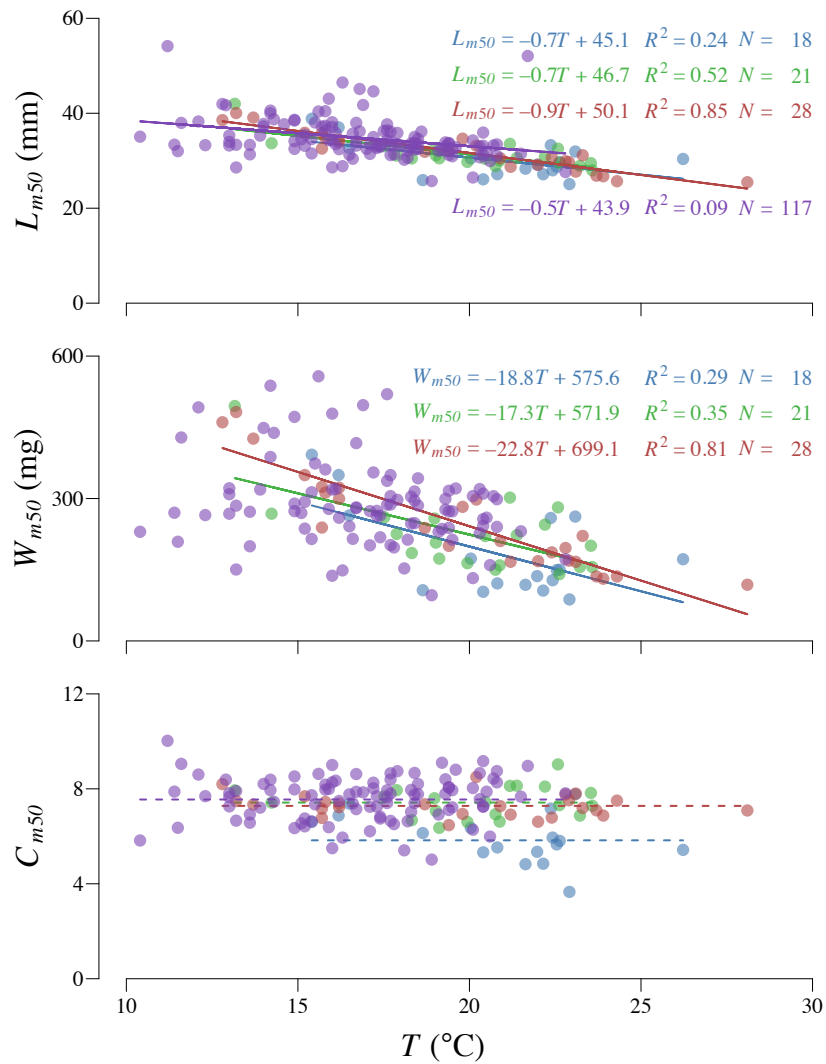


Fig. 3.3-17: Relationships between SST and L - (top panel), W - (second panel) and C - (third panel) at-metamorphosis of *Engraulis japonicus* in Miyako Bay (blue), Oarai coast (green), Sagami Bay (red) and off northern Japan (purple). Horizontal line in the third panel represents geometric mean of C_m (5.7, Miyako Bay; 7.4, Oarai coast; 7.4, Sagami Bay; 7.6, off northern Japan).

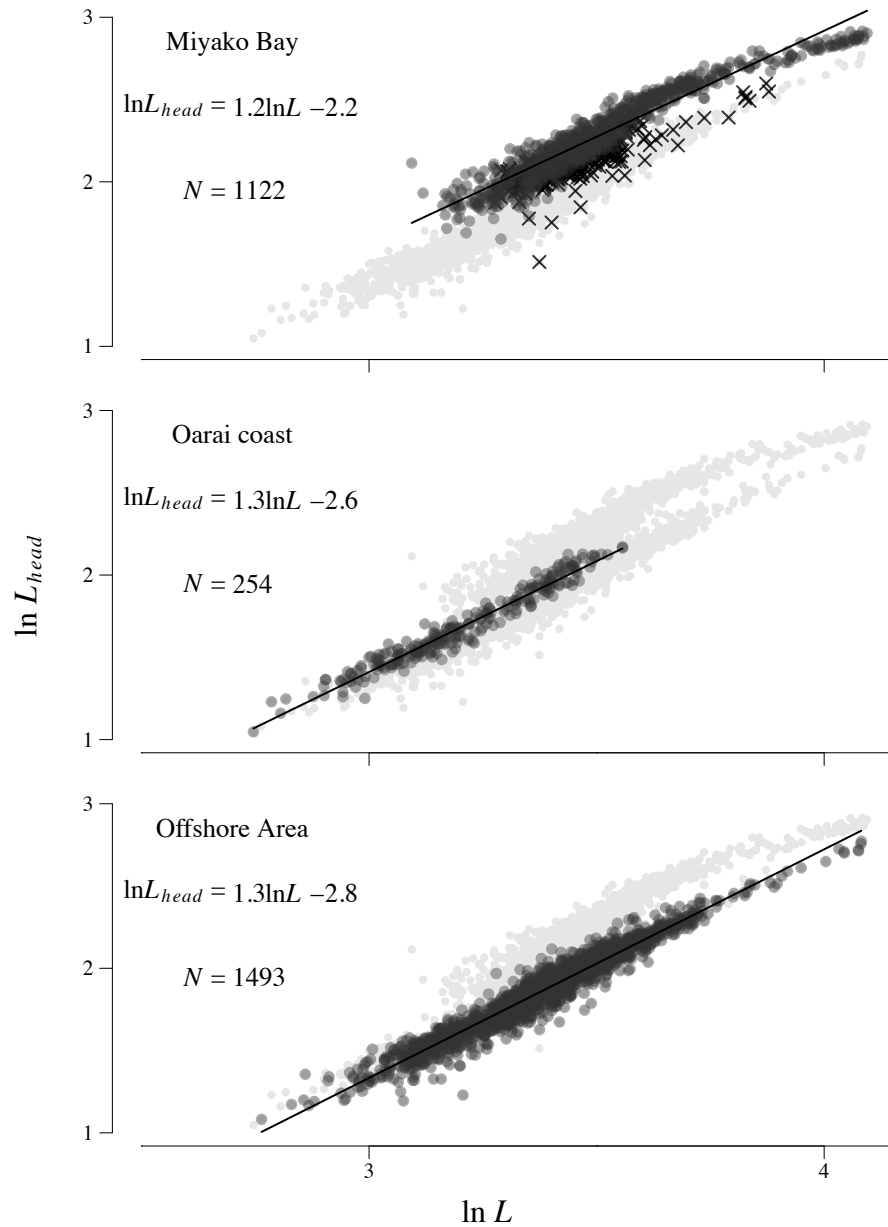


Fig. 3.3-18: $L-L_{head}$ of anchovy larvae in Miyako Bay (*top*), Oarai coast (*middle*) and off northern Japan (*bottom*). Gray dots are of other areas. Cross in the top panel indicates individual collected in June and July, omitted from the regression analysis.

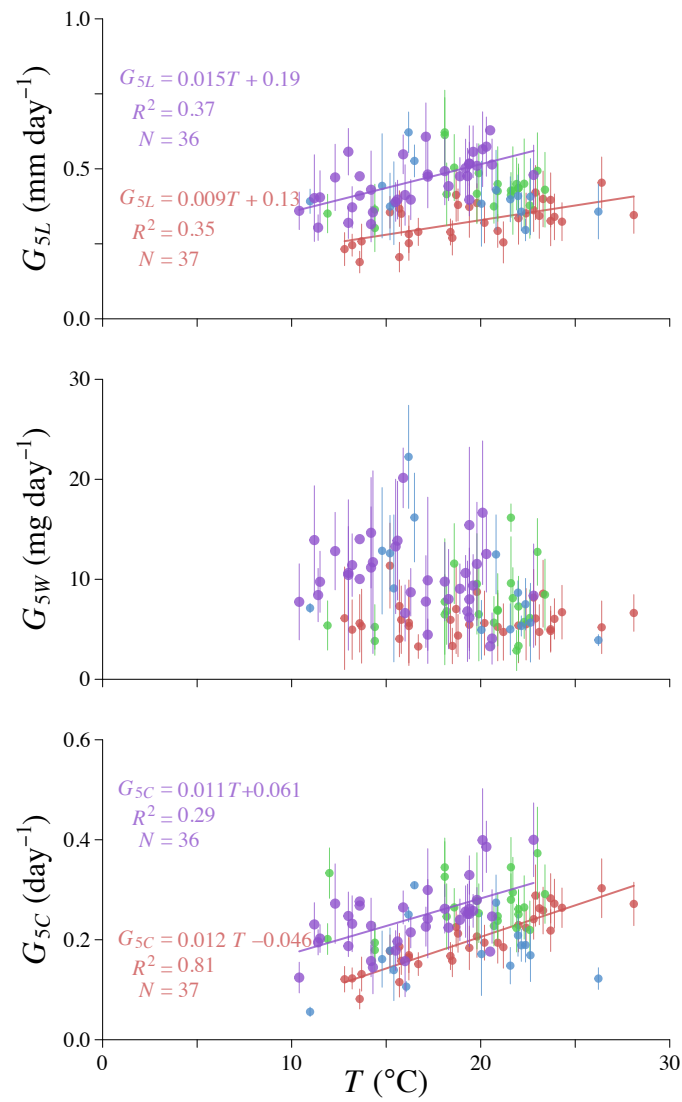


Fig. 3.3-19: Relationships between recent 5-day growth in L (G_{5L}), W (G_{5W}) and C (G_{5C}) of anchovy larvae and SST in Miyako Bay (blue), Oarai coast (green), Sagami Bay (red) and off northern Japan (purple). Vertical line represents standard deviation. Significant regression equation and the R^2 are shown.

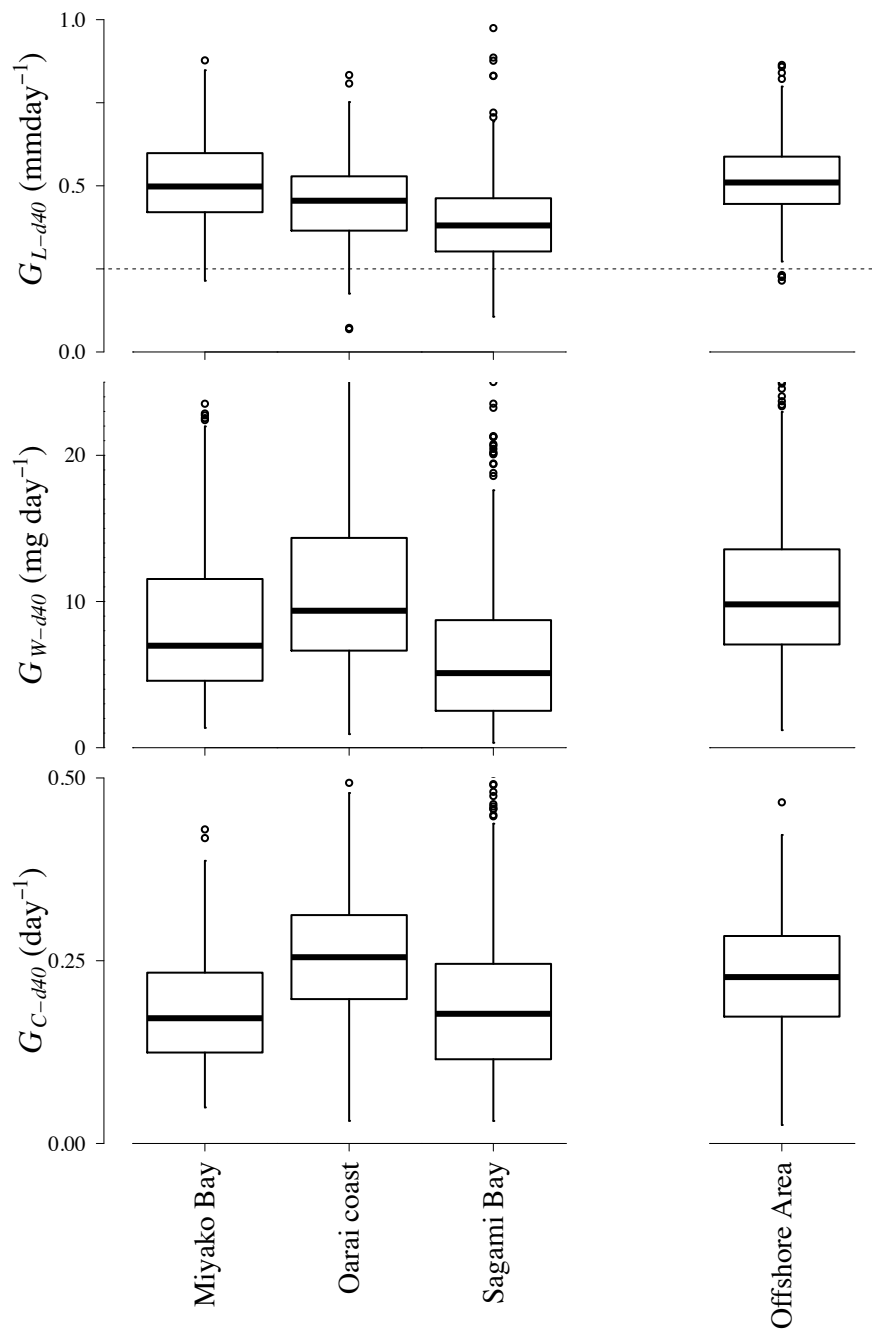


Fig. 3.3-20: Comparison of G_{L-d40} (top), G_{W-d40} (middle) and G_{C-d40} (bottom) of anchovy larvae and juveniles between Miyako Bay, Oarai coast, Sagami Bay and off northern Japan. Top and bottom ends of a box represent the third and the second quartiles and thick horizontal line in the box represents the median. Upper and the lower ends of a hinge represent the first and the fourth quartiles. Dot represents an outlier. Horizontal dashed line in the top panel represents the slowest possible growth rate for survival (0.25 mm day⁻¹) reported by Takahashi and Watanabe (2004b).

3.4 黒潮親潮移行域における仔魚成長速度の変動と加入量

3.4.1 はじめに

黒潮親潮移行域は、カタクチイワシのみならずマイワシ *Sardinops melanostictus*, サバ類（マサバ *Scomber japonicus*, ゴマサバ *Sc. australasicus*), サンマ *Cololabis saira* など小型浮魚類資源の重要な加入の場と考えられており, 本海域の海洋環境と加入量との関係を調べた研究は多い (e.g. Nishikawa and Yasuda, 2008; Noto and Yasuda, 1999). 黒潮系暖水域の産卵場から本海域までの卵仔魚の輸送を再現した粒子追跡実験では, 粒子の経験水温を組み込んだモデルが, 本種太平洋系群の再生産成功率をよく説明した (Itoh et al., 2009). 黒潮親潮移行域におけるカタクチイワシの加入は, 成長速度依存的な生残過程を経ることが知られており (Takahashi and Watanabe, 2004b), 1996–2002 年に黒潮親潮移行域で採集されたカタクチイワシ仔稚魚の体長成長速度の年変動が当該期間における加入量変動とよく対応したことが報告されている (Takahashi et al., 2009). 黒潮親潮移行域は海洋環境変動の大きい海域として知られ, 1996–2002 年におけるカタクチイワシ仔稚魚の成長速度の年変動も黒潮親潮移行域の水温変動によって説明されている (Takahashi et al., 2009). カタクチイワシ太平洋系群の加入量は 2003 年以後減少傾向にあり (Fig. 2.4-1), 本海域の成育環境の劣化がその原因として想定される. 本節では, 加入量減少年代にあたる 2011–2013 年に採集されたカタクチイワシ仔魚の分布と成長を加入量増加年代にあたる 1996–2002 年と比較することで, 本種太平洋系群の資源量変動機構を考察した.

3.4.2 材料と方法

仔魚の分布を年代間比較する目的で, 1996–2002 年の 5–6 月に常磐–三陸沖合海域で採集された仔魚と^{*i}, 本研究によって同じ海域で 2011–2015 年の 5–6 月に採集された仔魚のデータとを比較した. 調査海域を第 2.4 節と同様に経度 5 度ごとの 4 海区に分け, 仔魚が採集された有漁点の割合と 30 分間の曳網あたりの CPUE ($N \text{ haul}^{-1}$) を海区ごとに求めて比較した. 第 2.4 節と同様に, 1996–2002 年における調査海域の海洋環境を体長成長に好適な水温 ($\geq 17.3^{\circ}\text{C}$) に基

^{*i} 西海区水産研究所 高橋素光博士提供採集データ

づいて評価し、水温が好適な水域における仔魚の CPUE が総 CPUE に占める割合を算出した。

変態動態を年代間比較する目的で、各年において仔魚と同時に採集された稚魚について、仔魚と同様に体長 (L , mm) と体重 (W , mg) から肥満度 (C) を算出した。第 3.3 節と同様に仔魚と稚魚の肥満度をロジスティック回帰して、半数変態肥満度 C_{m50} を年ごとに求めた

仔魚の成長を年代間比較する目的で、1996–2002 年に採集された仔魚のうち、体長成長速度が最も高かった 2001 年と最も低かった 1996 年 (Takahashi et al., 2009) の耳石日輪計測データ^{*i}を再解析し、本研究によって得られた 2011–2013 年の結果と比較した。仔魚の体長と体重を第 3.3 節と同様に逆算し、各日齢時において、体長と体重から肥満度を算出した。第 3.3 節と同様に、各日齢時における体長・体重・肥満度の成長速度を得る目的で、前日からの増分を ΔL (mm day^{-1}), ΔW (mg day^{-1}), ΔC (day^{-1}) として求めた。体長 20 mm 以上 30 mm 以下の仔魚について、5–40 日齢時における逆算体長・体重・肥満度およびこれらの前日からの増分を、5 日齢間隔で年間比較した。

3.4.3 結果

仔魚の分布

1996–2002 年と比較すると、2011–2015 年には CPUE が低い傾向にあったが、有漁点の割合は低くはなかった (Fig. 3.4-1)。年ごとの総計をみると、1996–2002 年における CPUE の中央値は 1999 年に 4.5 と最も高かったが、1999 年には有漁点の割合は 37.9% と低く、仔魚が集中的に分布した。2011–2015 年の中で最も CPUE の中央値が高かったのは 2012 年の 3.2 で、これは 1999 年を下回ったが、有漁点の割合は 68.3% と 1999 年を大きく上回り、1999 年に比べて仔魚が分散的に分布していた。海区ごとに比較してもこの傾向は同様で、西区では、CPUE の中央値が 5.1 と高かった 1998 年の有漁点が 50% と低かったのに対し、2011 年には CPUE の中央値が 4.2 と 1998 年に及ばなかったものの有漁点の割合は 100% であった。同様の傾向がみられた中区-1 から東区について、資源量増加年代 (1996–2002 年) と資源量減少年代 (2011–2015 年) それぞれにおける、CPUE の中央値が最も高かった年 (その年の CPUE の中央値, 有漁点

^{*i} 西海区水産研究所 高橋素光博士提供計測データ

の割合)を整理すると、中区-1では1998年(5.1, 50.0%)と2013年(3.9, 63.1%), 中区-2では2000年(4.4, 27.7%)と2012年(3.4, 62.5%), 東区では1999年(4.7, 46.4%)と2012年(3.1, 89.4%)であった。採集された仔魚のうち、好適な水温範囲に分布した仔魚の割合は2011–2015年には安定的に70.6–94.7%と高かったのに対し(Fig. 2.4-13), 1996–2002年には1.7–83.2%と変動的であった(Fig. 3.4-2)。

仔魚の成長・変態動態

半数変態肥満度 C_{m50} の中央値は、1996–2002年には5.3–7.9の間で、2011–2015年には7.4–8.0の間で変動した(Fig. 3.4-3)。2012–2014年の C_{m50} は1998–2002年よりも有意に高かった(Steel Dwass, $P < 0.05$)。

加齢に伴う仔魚の肥満度の成長速度と日齢時肥満度を年間比較した(Fig. 3.4-4)。いずれの年においても、仔魚の日齢時肥満度はその年の C_{m50} の幾何平均値(1996年: 6.9; 2002年: 6.7; 2011年: 7.2; 2012年: 7.4; 2013年: 7.8)に到達しなかったものの、肥満度成長速度は2011–2013年の方が1996年および2001年よりも高い傾向にあり、20・30・40日齢時における2011–2013年の平均値はそれぞれ $0.17 \cdot 0.24 \cdot 0.23 \text{ day}^{-1}$ であったのに対し、1996年と2002年の平均値はそれぞれ $0.10 \cdot 0.15 \cdot 0.16 \text{ day}^{-1}$ と有意に小さかった(Steel Dwass $P < 0.001$)。2011–2013年の20–30日齢時における体長と体重の成長速度および逆算値は、1996年および2001年に近似していた(Fig. 3.4-5, 3.4-6)。一方、5–10日齢時における体長成長速度には顕著な差異がみられ、2011–2013年が $0.69\text{--}0.78 \text{ mm day}^{-1}$ と、1996年および2001年の $0.69\text{--}1.20 \text{ mm day}^{-1}$ を大きく下回った。

体長20–30 mmの仔魚について、体長(Fig. 3.4-7)・体重(Fig. 3.4-8)・肥満度(Fig. 3.4-9)の成長速度および逆算値を、5日齢時から40日齢時まで、5日齢間隔で比較した。2011–2013年に採集された仔魚の5日齢時における体長成長速度は、1996年および2001年よりも有意に低かった(Steel Dwass, $P < 0.01$)。2011–2013年に採集された仔魚の体長成長速度は10日齢時には1996年および2001年に近似するまで上昇したが、日齢時体長は2011年では30日齢時まで、2012年では20日齢時まで有意に2001年よりも小さかった。40日齢時における体長成長速度には年による差異はみられず、いずれの年も75%以上の個体が加入最低水準0.25

mm day⁻¹ (Takahashi and Watanabe, 2004b) を上回った。体重と肥満度の成長速度に着目しても、2011–2013 年に採集された仔魚は孵化後間もない時期において 1996 年と 2001 年に採集された仔魚に劣っていた (Figs. 3.4-8, 3.4-9)。2011 年に採集された仔魚は、体重では 30 日齢時まで、肥満度では 15 日齢時まで、2001 年に採集された仔魚よりも有意に成長速度が低かった (Steel Dwass, $P < 0.01$)。2012 年と 2013 年に採集された仔魚は、体重では 10 日齢時まで、肥満度ではそれぞれ 10 日齢時と 5 日齢時まで、2001 年に採集された仔魚よりも有意に成長速度が低かった (Steel Dwass, $P < 0.01$)。2011–2013 年に採集された仔魚は、日齢時体重ではそれぞれ 25 日齢時・20 日齢時・25 日齢時まで、日齢時肥満度ではそれぞれ 25 日齢時・15 日齢時・10 日齢時まで 2001 年よりも有意に小さかったが (Steel Dwass, $P < 0.01$)、以後は 2001 年に匹敵した (Steel Dwass, $P > 0.05$)。

3.4.4 考察

本研究を行った 2011–2013 年における加入量低下は、仔魚期後期ではなく、孵化後間もない時期における成長速度の低下によって説明された。2011–2013 年に採集された仔魚でみられた仔魚期前期における低成長は (Figs. 3.4-7–3.4-9)、黒潮系暖水域の産卵場周辺の成育環境の劣化を示唆する。黒潮系暖水域から長距離の輸送を経て黒潮親潮移行域に移入するこれらの群では環境履歴の復元が難しく、水温と餌料環境の復元には粒子逆追跡実験を行う必要があるが、仔魚期前期の成長速度から判断すると (Figs. 3.4-7–3.4-9)、1996 年と 2002 年の産卵場周辺の成育環境は好適であったと考えられた。

一方、本海域で 1996–2002 年に行われた既往研究は (Takahashi et al., 2009)、カタクチイワシとマイワシ *Sardinops melanostictus* の加入量変動を、仔魚期後期の成長速度の変動によって説明した。1996–2002 年には黒潮親潮移行域の成育環境の変動が大きかったことで、本種の加入量変動が本海域を利用する仔魚期後期の成長速度によって説明されたと考えられる。1996–2002 年には、成長好適水温 ($\geq 17.3^{\circ}\text{C}$) に分布した仔魚の割合は 2% 未満 (1996 年) から 83% 以上 (2002 年) まで大きく変動した (Fig. 3.4-2)。これに対して、2011–2015 年にはいずれの年においても 70% 以上で安定しており (Fig. 2.4-13)、この結果から推察される黒潮親潮移行域の安定

的な成育環境が、近年の加入量低下を仔魚期後期における成長速度から説明出来なかった要因として想定される。

以上の考察から導かれる、1996–2002 年と 2011–2015 年における仔魚の減耗・輸送過程は、黒潮親潮移行域における両年代の仔魚の分布様式と整合的である。産卵場周辺域の成育環境が好適であった 1996–2002 年には卵から仔魚期前期における減耗量が小さかったため、移行域への仔魚の移入量が大きく、これが当該期間の CPUE の高さ (Fig. 3.4-1) につながったと考えられる。一方で 2011–2015 年における CPUE の低さは (Fig. 3.4-1)、産卵場周辺域の水温が低かったことによって卵から仔魚期前期に大量減耗が起こり、移行域への仔魚の移入量が小さかったと考えると理解できる。仔魚の移入量が大きかったものの移行域の成育環境が不安定であった 1996–2002 年には、成長に不適な低水温の水域に輸送されることによって死亡する仔魚の割合が高く、これが当該期間の有漁点率の低さ (Fig. 3.4-1) に表れていると考えられる。これに対して 2011–2015 年にみられる安定的な有漁点率は (Figs. 3.4-1)、移入量が小さかったものの移行域の水温が安定的であったため、低水温の水域へ輸送されることによって死亡する仔魚の割合が低かったことによって説明される。

これまで、カタクチイワシを始めとする浮魚類の加入量変動の要因として、仔魚期後期の成育場、つまり黒潮親潮移行域の海洋環境変動に注目が集まってきた。本研究は、カタクチイワシの加入量変動を考えるうえで、仔魚期後期の成育場に加えて、産卵場および仔魚期前期の成育場、つまり黒潮系暖水域の重要性を明らかにした。2011–2013 年の資源量減少過程における加入量の低下は、黒潮親潮移行域の成育環境の劣化による仔魚期後期の成長速度減少ではなく、産卵場周辺水域の成育環境の劣化による初期減耗を経て、黒潮親潮移行域への移入量が減少したことによって起こったと考えられる。

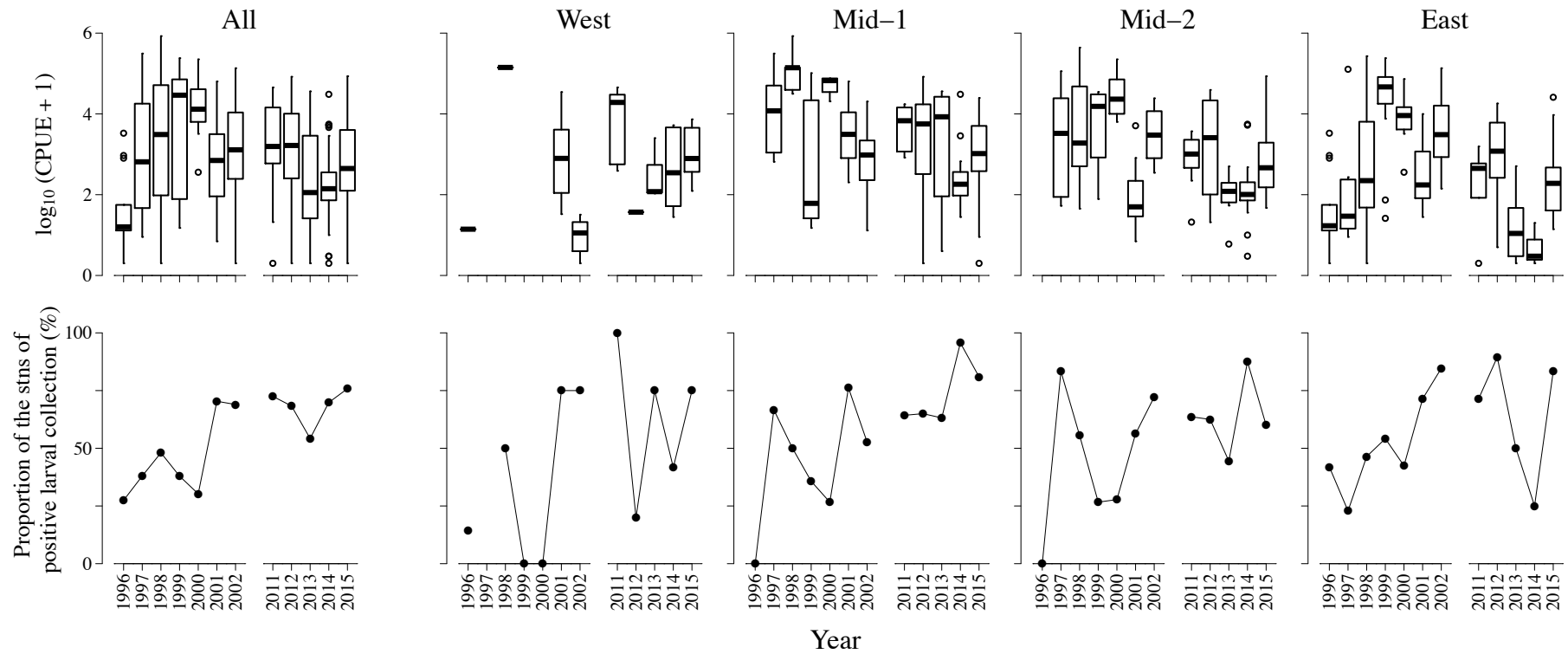


Fig. 3.4-1: CPUE (*top row*) and proportion of stations of positive collection (*bottom row*) of anchovy larvae off northern Japan in 1996–2002 and 2011–2015. Top and bottom ends of a box in the top row panels represent the third and the second quartiles and thick horizontal line in the box represents the median. Upper and the lower ends of a hinge in the top row panels represent the first and the fourth quartiles. Dot in the top row panels represents an outlier.

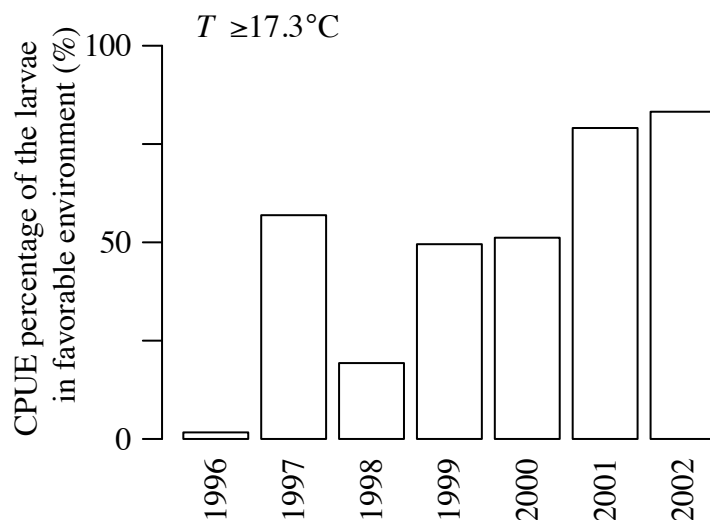


Fig. 3.4-2: Proportion of anchovy larvae in the area with favorable temperature higher than 17.3°C off northern Japan.

Favorable temperature are defined according to Takahashi et al. (2009)

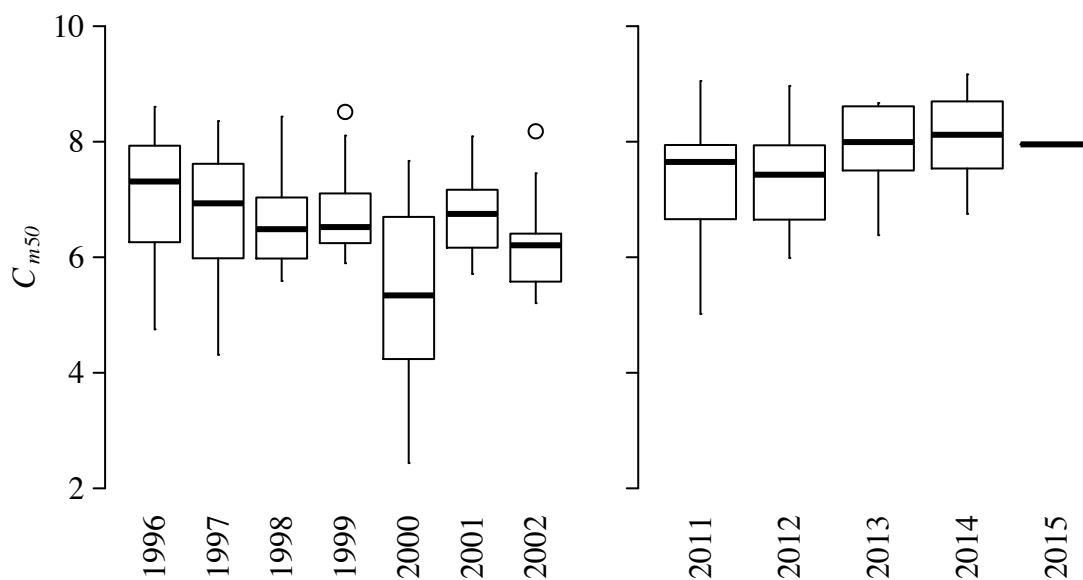


Fig. 3.4-3: Difference in C_{m50} of anchovy larvae between years off northern Japan. Top and bottom ends of the box represent the third and the second quartiles and thick horizontal line in the box represents the median. The ends of the upper and the lower hinge represent the first and the fourth quartiles. Dot represents an outlier.

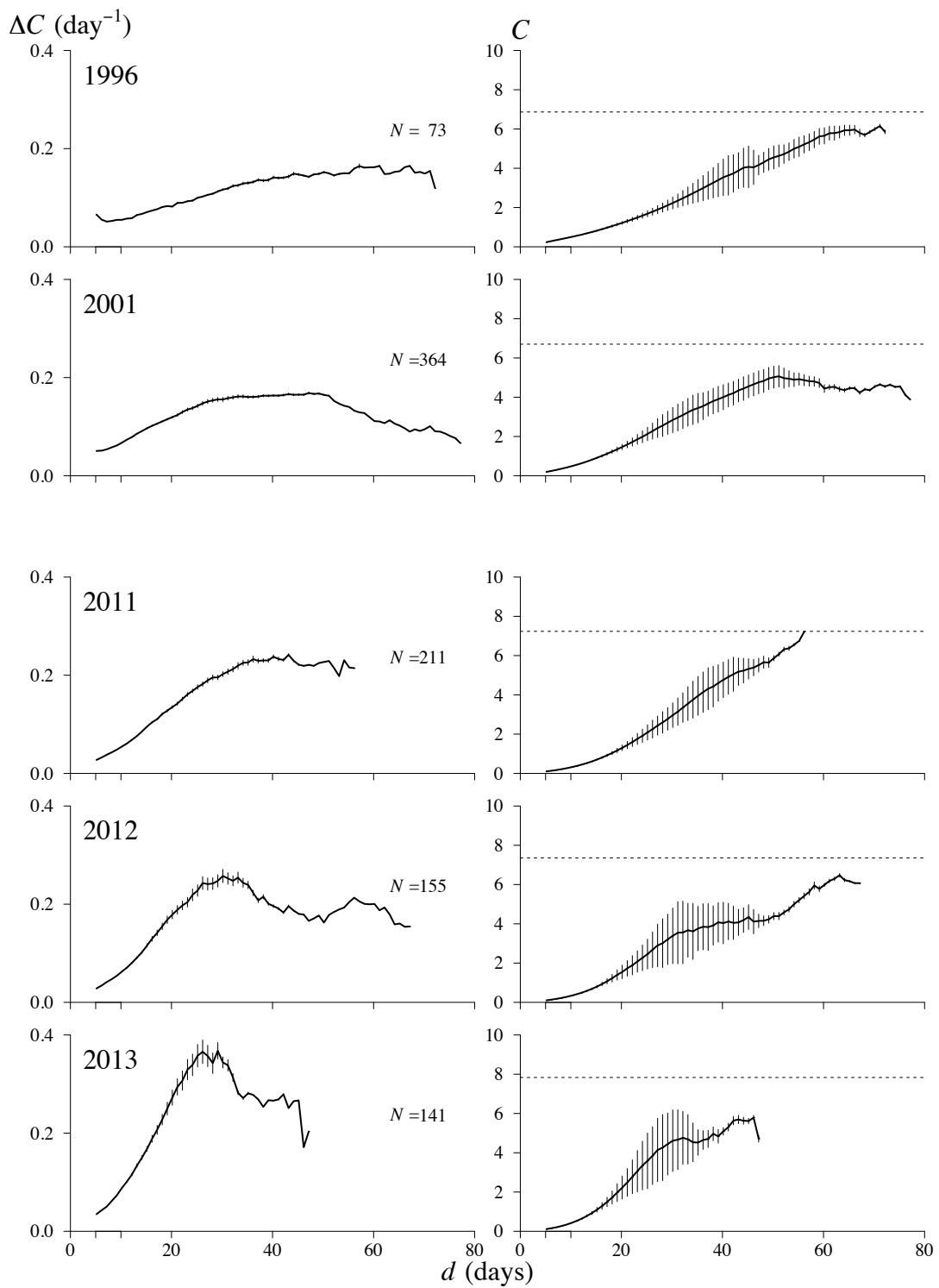


Fig. 3.4-4: Daily C -growth increment (*left*) and C -growth trajectory (*right*) of anchovy larvae off northern Japan. Vertical line represents standard deviation. Horizontal dashed line represents geomean of C_{m50} of a given year.

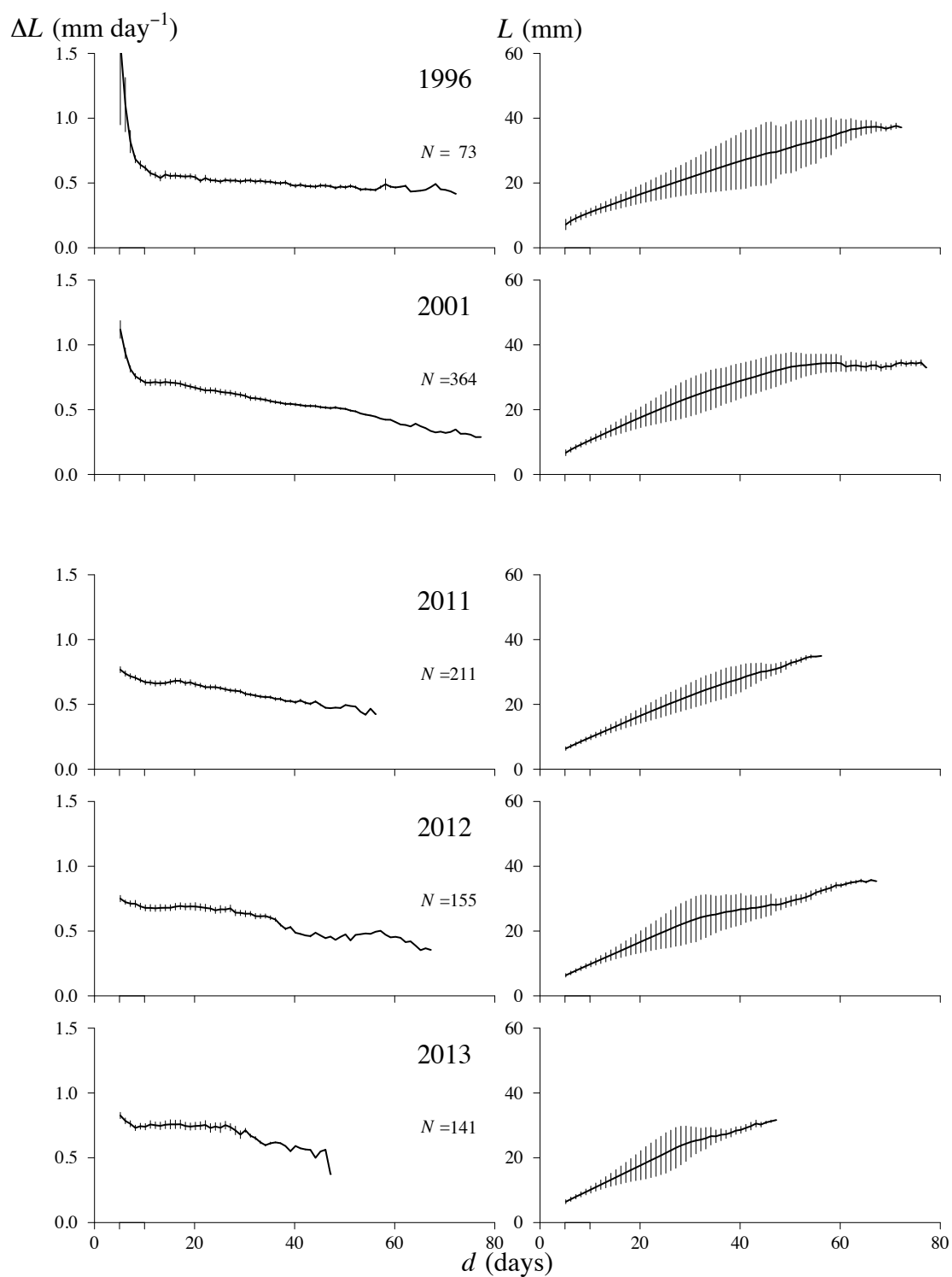


Fig. 3.4-5: Daily L -growth increment (*left*) and L -growth trajectory (*right*) of anchovy larvae off northern Japan. Vertical line represents standard deviation.

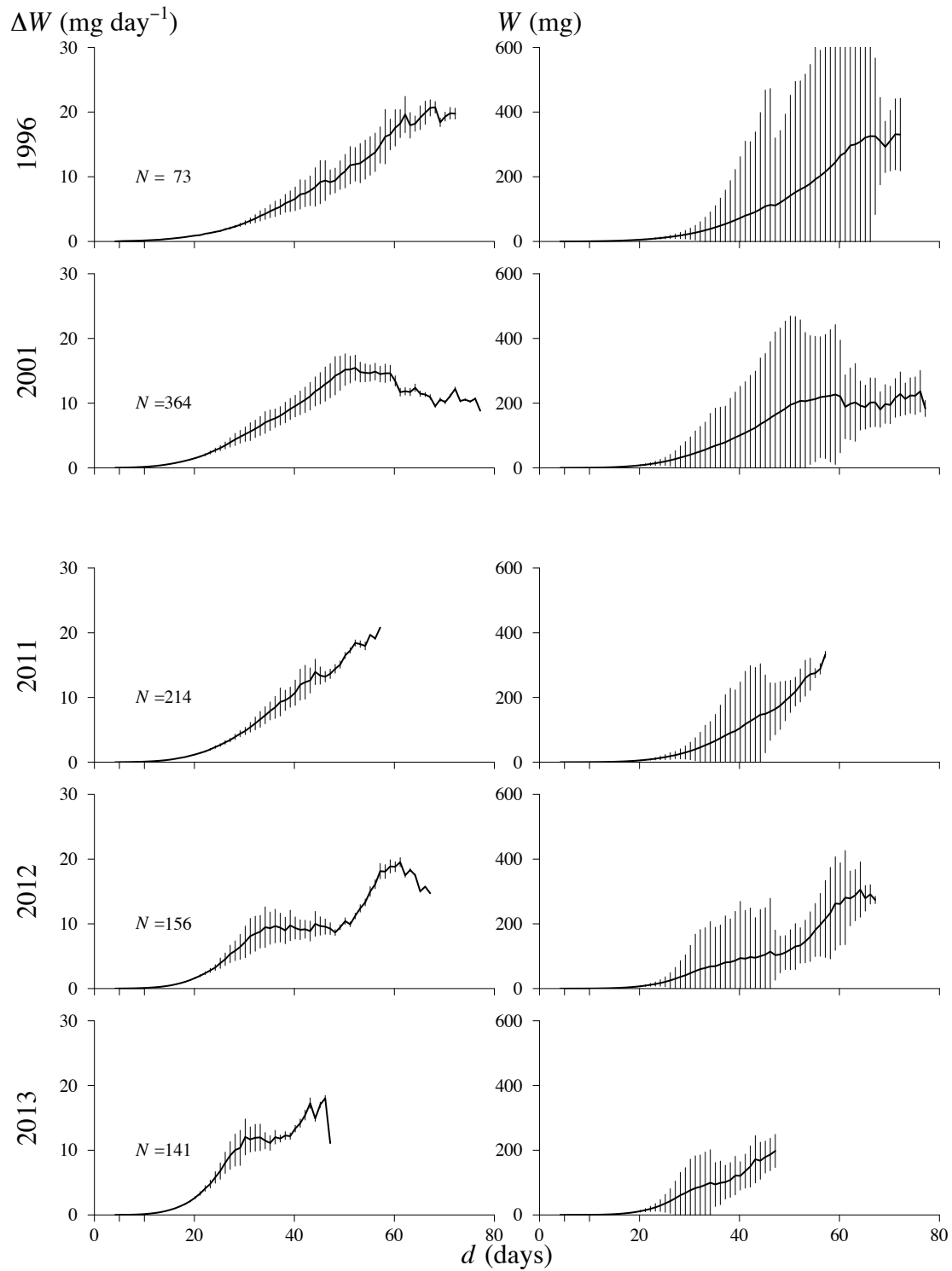


Fig. 3.4-6: Daily W -growth increment (left) and W -growth trajectory (right) of anchovy larvae off northern Japan. Vertical line represents 0.1 standard deviation.

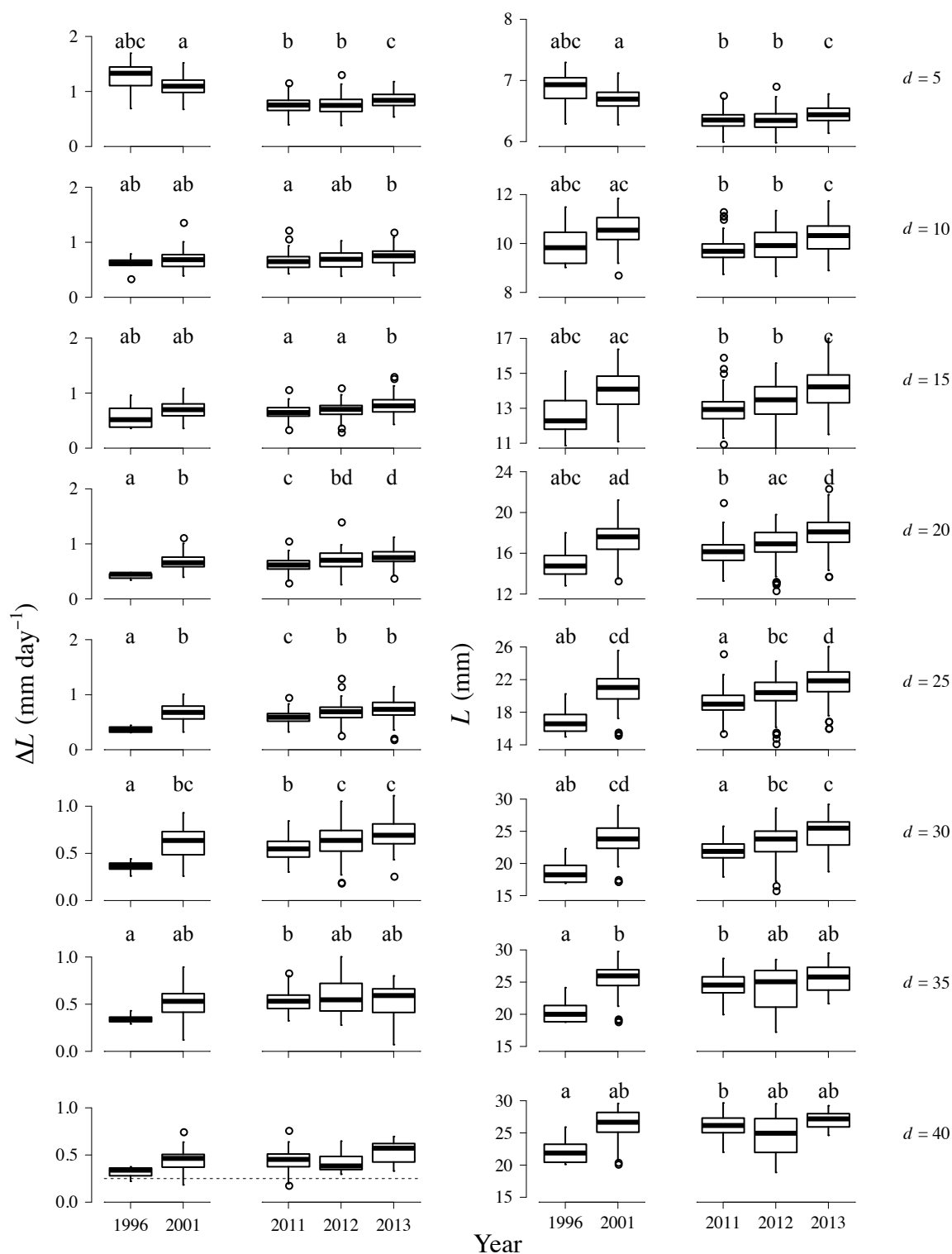


Fig. 3.4-7: Between-year comparison of daily L -growth increment (*left*) and back-calculated L (*right*) at ages of anchovy larvae off northern Japan. Top and bottom ends of the box represent the third and the second quartiles and thick horizontal line in the box represents the median. The ends of the upper and the lower hinge represent the first and the fourth quartiles. Dot represents an outlier. Years with different letters are significantly different.

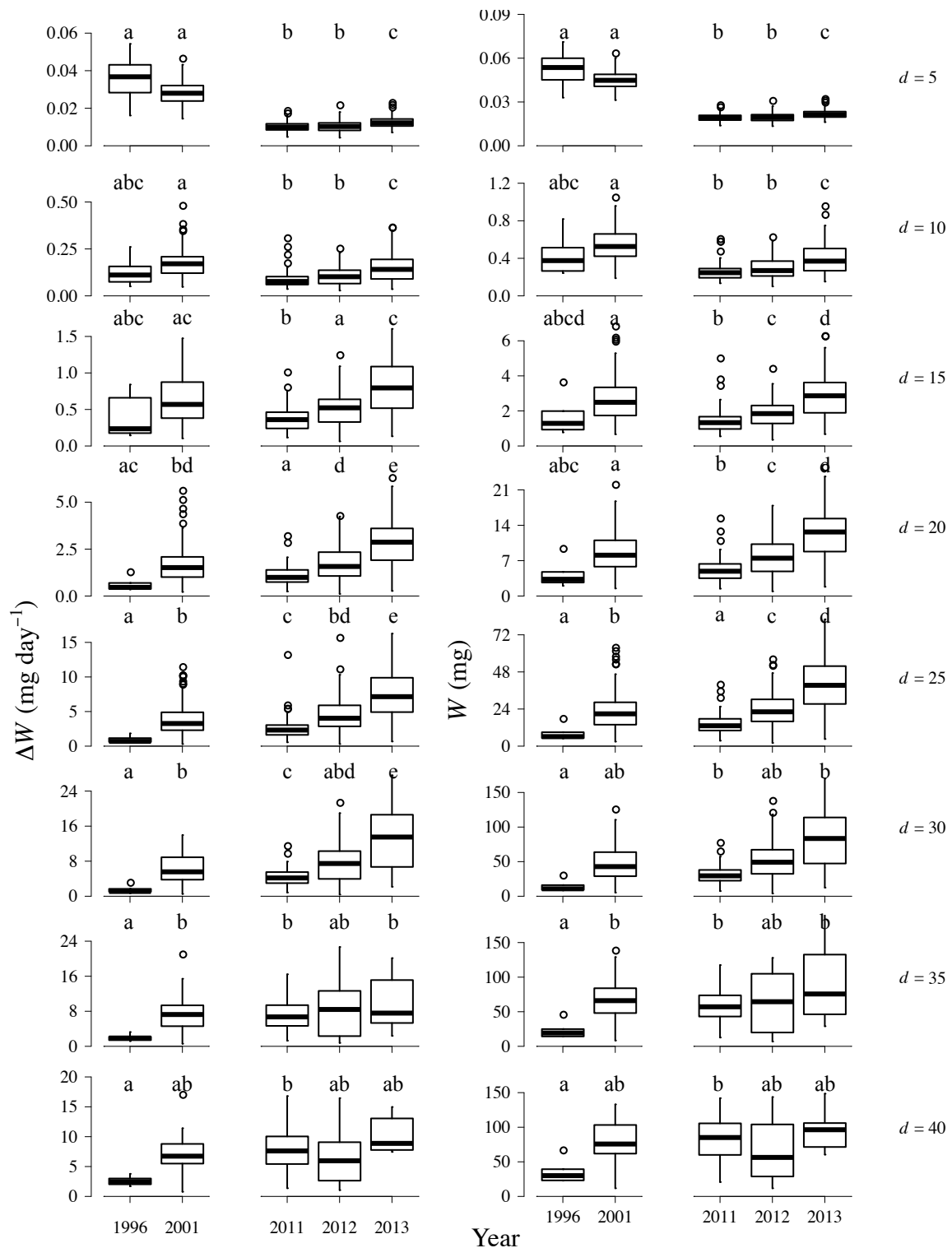


Fig. 3.4-8: Between-year comparison of daily W -growth increment (*left*) and back-calculated W (*right*) at ages of anchovy larvae off northern Japan. Top and bottom ends of the box represent the third and the second quartiles and thick horizontal line in the box represents the median. The ends of the upper and the lower hinge represent the first and the fourth quartiles. Dot represents an outlier. Years with different letters are significantly different.

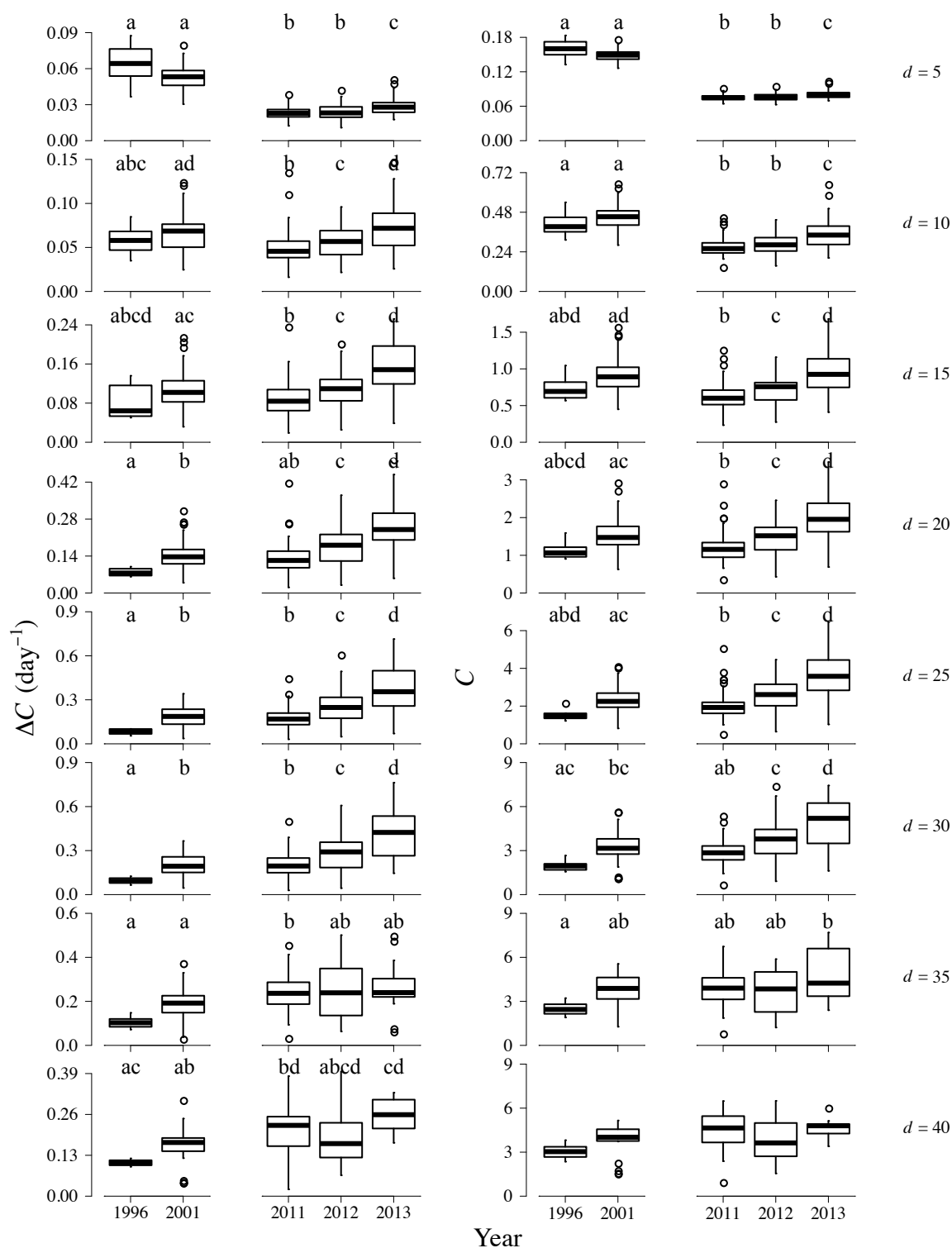


Fig. 3.4-9: Between-year comparison of daily C -growth increment (*left*) and back-calculated C (*right*) at ages of anchovy larvae off northern Japan. Top and bottom ends of the box represent the third and the second quartiles and thick horizontal line in the box represents the median. The ends of the upper and the lower hinge represent the first and the fourth quartiles. Dot represents an outlier. Years with different letters are significantly different.

第 4 章

総合考察

カタクチイワシ太平洋系群の資源構造

日本の太平洋岸の海洋構造と対応して、カタクチイワシ太平洋系群の資源構造も犬吠埼を境に南北で大きく異なることがわかった。単一年における結果ではあるが、第 3.2 節で実施した粒子追跡実験の結果から、犬吠埼以南の黒潮系暖水域におけるカタクチイワシ仔魚の資源は、黒潮系暖水域で発生した群のみからなる単純な構造であると考えられる (Fig. 3.2-8)。一方、犬吠埼以北の親潮系冷水域における仔魚の資源は、資源内部における量的貢献度が少ないと考えられる地付き群 (永島, 2007) を除いても、親潮系冷水域で発生した群に加えて黒潮系暖水域と対馬暖流域で発生した群からなる複雑な構造と考えられる (Fig. 3.2-8)。本研究では、親潮系冷水域資源を構成する発生海域の異なるこれら 3 つの仔魚群について、初期生態と量的変動のしくみの解明を試みた。温暖な黒潮系暖水域ではほぼ周年にわたって本種の産卵が認められるため (Fig. 3.1-6)、春季から初夏に顕著な黒潮系暖水域発生群の親潮系冷水域南部への来遊は (Fig. 3.2-8)、輸送環境の季節変化、つまり物理的要因によって起こっていることが粒子追跡実験の結果からわかった。一方で親潮系冷水域では、水温が低いために産卵が初夏まで起こらず、さらに夏季の短日化によって産卵が終息するため、産卵期が黒潮系暖水域よりも短い (Fig. 3.1-6)。親潮系冷水域北部における初夏から秋季に限定された親潮系冷水域発生群の来遊は (Fig. 3.2-8)、初夏の集中産卵、つまり生物的要因によって起こっていることがわかった。対馬暖流系水の太平洋海域への流入は周年にわたって認められ、流入量は夏季から秋季に大きくなる。7 月以降におけるカタクチイワシ対馬暖流暖流系群の産卵生態は未解明であるものの、4–6 月の産卵量

を用いた粒子追跡実験からは少なくとも6月発生群の来遊が想定された (Fig. 3.2-8). 以上の3群が混合して親潮系冷水域資源が形成されることによって, カタクチイワシ仔魚は黒潮系暖水域から親潮系冷水域まで, 南北に広範囲に分布するようになる.

仔稚魚の生態を分布域間で比較すると, 明瞭な南北差が見られた. カタクチイワシ仔稚魚の体長成長速度は相模湾では水温と正相関したのに対し, 親潮系冷水域の宮古湾と大洗漁場では水温と無関係であった (Fig. 3.3-13). 同様の傾向は変態時期を制御する肥満度成長速度にも表れ, 結果的に変態動態の南北差異につながっていた (Fig. 3.3-14). 相模湾において同所的に分布したカタクチイワシ・ウルメイワシ *Etrumeus teres*・マイワシ *Sardinops melanostictus* 仔魚の体長成長速度を比較した研究によると (Watanabe et al., 2014), ウルメイワシでは水温と成長速度の相関係数が 0.84–0.93 と高かった一方で, マイワシでは成長速度は水温によって説明できず, カタクチイワシの成長速度は両者の中庸をとるように相関係数 0.57–0.69 で水温と相関した. ニシン目魚類3種の成長速度の水温依存性に認められた種間差異は, 日本周辺水域を利用する態様が異なるこれら3種の生態学的差異の現れと考えられる. ウルメイワシは, 餌料要求量が小さいために, 小規模ながら安定的に生産が起こる亜熱帯水域内で生活史を完結して安定的に資源変動する. これに対してマイワシは, 餌料要求量が大きいため, 大規模な生物生産に特徴づけられる亜寒帯水域に進出して資源量を爆発的に増加させることができるが, 海域生産力の変動に伴って大きな資源量変動をみせる. カタクチイワシの生態的特性はウルメイワシとマイワシの中間的位置にあると理解されるが, 本研究が黒潮系暖水域と親潮系冷水域の間において見出したカタクチイワシ仔稚魚の成長・変態動態の南北差は, 分布域の異なるニシン目魚類の種間において認められた南北差と対応的であった.

親潮系冷水域におけるカタクチイワシ卵の分布特性にも, マイワシに類似した傾向がみられる. 黒潮系暖水域において周年産卵する本種の産卵生態は, 資源量高水準期に2・3月に集中産卵するマイワシと対照的に理解されており, 太平洋岸のデータセットを解析した先行研究は (Takasuka et al., 2008a), 卵の出現水温範囲が 13.2–20.2°C と狭く, 16.2°C に鋭い卵分布指数のピークがみられたマイワシに対し, カタクチイワシの卵は 15.6–27.8°C と広い水温範囲に出現し, 分布指数に明瞭なピークがみられないことを報告している. ところが, 本研究におい

て三陸沿岸海域で採集されたカタクチイワシ卵について同様に解析した結果、卵の分布指数は 15.0–16.5°C に鋭いピークを示した (Fig. 3.1-1)。高緯度域における分布指数の低下は、産卵が短日化によって終息した結果であるものの、この海域のカタクチイワシの卵分布は狭温的なマイワシの卵分布と類似している。海洋環境に対する初期生態の応答にみられるこのような南北差は、どのような意味を持っているのだろうか。

西部北太平洋を利用するニシン科魚類 3 種の漁獲量変動の規模と生態とを関連付けて解析した先行研究は (Watanabe, 2007)、資源量の変動幅は亜熱帯域で生活史を完結するウルメイワシで小さいのに対し (CV: 26%)、亜寒帯域に生息するニシン *Clupea pallasii* (CV: 118–178%) や亜熱帯域で生まれて亜寒帯域へ索餌回遊するマイワシ (CV > 120%) で大きく、資源量変動様式にみられるこれらの差異が、それぞれの種の繁殖投資戦略や生活史初期の成長速度と対応的であることを指摘した。カタクチイワシの漁獲量はしばしばマイワシと対比され、一般的に安定的と理解されているが、犬吠埼を境に南北に分けることで、ここにも安定的な黒潮系暖水域 (CV: 32.9%) と変動的な親潮系冷水域 (CV: 81.4%) という同様の傾向が見えてくる (Fig. 1.0-1)。道東・千島列島海域で採集されたカタクチイワシの産卵親魚が、暖流域の親魚に比べて非常に多くの成熟卵母細胞を持っていたことを考え併せると (須原ら, 2013)、本種の初期生態と繁殖生態にみられる緯度間差異は、低緯度域に起源を持ち、次第に高緯度域へと進出したニシン目 (Whitehead, 1985) の種間でみられる海域適応の過程とよく対応する。本種が親潮系冷水域で見せる生態は、本海域でみられる爆発的な資源量増加の生態的基礎となっていることが考えられる。

資源構造の変化

カタクチイワシ太平洋系群の資源構造は、資源の量的変動と並行して大きく変化すると考えられる。太平洋系群の資源量が低水準にあった 1980 年代には、親潮系冷水域資源はほとんど存在しなかった (Fig. 1.0-1)。1990 年代になると親潮系冷水域の資源は急増し、太平洋系群全体の半分を占めるまでになった (Fig. 1.0-1)。資源量高水準期における親潮系冷水域資源は、本研究で明らかにしたように発生海域の異なる 3 群から構成されと考えられる (Fig. 3.2-8)。2011 年の卵分布密度を基礎とした粒子追跡実験の結果から、親潮系冷水域資源に占めるこれら 3 群

の構成比率は季節変動していることがわかった (Fig. 3.2-8). 親潮系冷水域南部の資源は、2・3月には黒潮系暖水域発生群のみからなっており、4月以降には黒潮系暖水域発生群の継続的な移入があるものの80–90%が親潮系冷水域発生群からなっている (Fig. 3.2-8). 初夏から秋季に限って形成される親潮系冷水域北部の資源は、ほとんどが親潮系冷水域発生群からなっているが、6月以降には少なくとも30%程度が対馬暖流域発生群からなっていることがわかった (Fig. 3.2-8). しかしこの構成比率は、太平洋系群の資源量水準が中程度と評価されている2011年の結果であり、本系群の資源量水準の変動が起これば、親潮系冷水域における資源量の変動、およびこの水域における資源構造の変化が並行して起こると考えるべきである。

親潮系冷水域資源の消長

カタクチイワシ太平洋系群の資源量が低水準であった1980年代にも、表面水温15℃以上の産卵場となり得る海域が親潮系冷水域内に存在した (Fig. 3.1-4). しかし、三陸沿岸海域において卵分布が急増したのは、太平洋系群資源量急増後の1992年であったことから (Figs. 2.2-9, 2.2-16), 親潮系冷水域への産卵場拡大は、太平洋系群の資源量増加の結果として起こったと考えられる。この考えに基づけば、太平洋系群の資源量増加過程は次のように想定される。

資源量低水準期においても、黒潮続流によって黒潮系暖水域発生群が黒潮親潮移行域の沖合へ供給されていた (Itoh et al., 2009). PDO変動に伴う黒潮親潮移行域沖合の水温上昇によって、まず仔稚魚の成長速度が増大した (Takahashi et al., 2009). 移行域沖合で加入した群は親潮域へ回遊して成長した後に黒潮系暖水域に産卵回遊するため (久保田, 2012), 成長速度増大に伴う加入量増加 (Takahashi and Watanabe, 2004b) が数年単位で連続して起こり、黒潮系暖水域における個体数密度が上昇した。マイワシに比べて1個体当たりにより広い索餌空間を必要とするカタクチイワシでは (Barange et al., 2009), 黒潮内側域における資源密度の増加をマイワシと同様な黒潮流軸へ向かう分布域拡大 (Zenitani and Kimura, 1997) のみでは緩和できず、親潮系冷水域への北上回遊群 (三原, 1998, 2000) を発生させるに至ったと考えられる。このような資源量増加の過程の中で親潮系冷水域資源が形成され、黒潮系暖水域に匹敵する資源量を形成するに至った。

カタクチイワシ太平洋系群の資源量および加入量は2003年以降、継続して減少過程にある (上村ら, 2014). 本種の北上回遊を黒潮系暖水域における分布密度増加の結果と考えるならば、

資源量減少に伴って北上回遊群は消滅するはずである。近年、北上回遊群の消滅の兆候が散見されるようになってきた。道東沖合海域では 2013 年夏季に (森ら, 2014), 道東・千島列島海域では 2015 年秋季に (国立研究開発法人水産総合研究センター, 2015) 実施された調査において、それぞれ本種成魚の CPUE 低下が報告されている。本研究によって 2011–2013 年に採集された仔魚の成長速度を 1996 年と 2002 年の成長速度と比較した結果、近年の加入量低下は仔魚期後期ではなく、仔魚期前期における成長速度の低下から説明され则认为とされた (Figs. 3.4-7–3.4-9)。これは、1996–2002 年の資源量増加過程における加入量増加が仔魚期後期の成長速度の増加によって説明されたこと (Takahashi et al., 2009) と対称的であった。親潮系冷水域発生群の消長は、黒潮系暖水域における過密を回避して北上回遊する産卵群の消長と連動していると考えられるが、北上回遊群の規模を決定する加入量を駆動する要因は、資源量増加過程には黒潮親潮移行域に、減少過程には黒潮系暖水域にあると考えられる。

本研究を実施した 2011–2015 年以降にも資源量減少が進行し、産卵親魚の回遊範囲が資源量低水準期にあった 1980 年代のように黒潮系暖水域まで退縮すれば、親潮系冷水域発生群は消滅し、親潮系冷水域の仔稚魚資源は黒潮系暖水域と対馬暖流域で発生して移入した群のみから構成されるようになると考えられる。沿岸資源に占める親潮系冷水域発生群の割合を考えれば、資源量低水準期における親潮系冷水域の仔稚魚の資源量は、春季の常磐南部海域 (Fig. 3.2-8) を除き、ほとんど無視できる水準まで低下するだろう。資源量の減少に伴い、黒潮系暖水域発生群と対馬暖流域発生群の親潮系冷水域への来遊量はどのように変化しうるだろうか。1970–1980 年代に起こったカタクチイワシの資源量減少過程において、黒潮系暖水域における 2–3 月の産卵量の減少が報告されている (森ら, 1988)。また、1980 年代には、黒潮系暖水の常磐南部沿岸域への波及頻度が減少したことがわかっている (海老沢, 1997)。このように、資源量低水準期における黒潮系暖水域発生群の親潮系冷水域への来遊量は、産卵量のような生物的要因と暖水波及のような物理的要因のどちらから判断しても減少が見込まれる。一方、対馬暖流域発生群の供給過程である津軽暖流の太平洋海域への張り出し強度には、4–5 年周期の経年変動が認められることが知られている (磯田・鈴木, 2004)。カタクチイワシ太平洋系群の資源量が数十年周期で変動することを考えれば、対馬暖流域発生群の物理的供給過程は安定的といえる。1990–2012

年3–6月の日本海におけるカタクチイワシ対馬暖流系群の産卵量は、多くの年で700兆粒を超え、数千兆粒を超える年も散見される一方、1979–1989年における産卵は低水準で、600兆粒を超える年はなかった(黒田ら, 2014)。カタクチイワシ対馬暖流系群の資源量は、太平洋系群に近似して2001年以降減少傾向にある。今後、対馬暖流域発生群の移入量は、輸送環境の変化ではなく、対馬暖流系群の産卵量減少によって減少すると考えられる。

カタクチイワシ太平洋系群の資源評価

本研究の結果示された、資源量水準の変動に伴う資源構造の変化は、浮魚類の資源研究における概念として全く新しいものである。この視点に立つと、本種の資源量評価はどのように改善される必要があるだろうか。カタクチイワシ太平洋系群の資源量評価は、単に太平洋海域全域の年齢別漁獲尾数を用いたコホート解析によって行われており、親潮系冷水域発生群の量を左右すると考えられる北上回遊群の規模などは考慮されていない。本研究で得られた知見に基づけば、資源量の低下により移行域を北上回遊する1・2歳魚の量が減少した場合、親潮系冷水域発生群の消滅によって資源量の減少が一気に進行することが考えられる。また、本種のように寿命の短い魚種では、コホート解析の精度が原理的に低くなってしまうことを考えれば、親潮系冷水域における産卵場調査を充実させ、資源量を卵数法(渡部, 1983)に基づいて推定する方が適切かもしれない。本種の漁獲係数は、年齢別漁獲尾数の地理的变化や親潮系冷水域における産卵量など、親潮系冷水域産卵群の動向に着目した上で設定することが望ましいだろう。親潮系冷水域北部では、夏・秋季に津軽暖流が渦モードに移行することによって、対馬暖流域発生群が流入しやすい輸送環境となることがわかった(Fig. 3.2-4)。親潮系冷水域北部の資源構造の把握には、対馬暖流系群の産卵場調査を7月以降も継続することが不可欠である。対馬暖流域で発生した卵のうち、津軽海峡を経由して太平洋海域に流入するものはごくわずかであるが(Fig. 3.2-11)、これらが7月以降の親潮系冷水域資源のうちの相当量を占めると判断された場合には、現在独立して実施されている太平洋系群と対馬暖流系群の資源量評価の枠組みを再編する必要がある。

謝辞

本研究を進めるにあたり、日々ご指導とご鞭撻をいただいた東京大学大気海洋研究所資源生態分野 渡邊良朗教授に謹んで感謝の意を表する。同資源生態分野の岩田容子講師と同生物資源再生分野の河村知彦教授には、修士・博士課程を通じて日常的に多くのご指導とご助言をいただいた。東京大学大学院 農学生命科学研究科 水産資源学研究室の大竹二雄教授には本稿を校閲いただき、貴重なご意見をいただいた。東京大学大気海洋研究所 海洋生態系変動分野の伊藤幸彦准教授には、粒子追跡プログラムを作成いただき、本稿を校閲し、貴重なご意見をいただいた。

三陸・道南・道東海域における調査を円滑に進行できたのは、淡青丸の井上孝道船長、吉田力太船長および乗組員の方々、株式会社マリン・ワークジャパンの竹友翔平氏、片山健一氏による多大なるご協力のお陰である。

岩手県水産技術センター漁業資源部の後藤友明博士には三陸沖定線調査で得られた標本および海洋観測データを提供頂き、本研究に関して多くのご助言をいただいた。また同部の方々には、標本処理・測定作業にご協力いただき、多くの励ましをいただいた。

岩手県宮古湾における調査は宮古漁業協同組合の山根幸伸氏を始め、山根広大博士、白藤徳夫博士と東北区水産研究所宮古庁舎の方々のご協力によって継続することができた。また大洗漁場における調査を継続できたのは茨城県水産試験場部長の海老沢良忠氏、須能紀行氏のご理解・ご協力と、同部の所高利氏と柴口怜佳氏、大洗漁協の方々による標本採集へのご協力のお陰である。また稚魚の採集は、開南丸の関根正一氏と関根吉次氏のご協力なしには不可能であった。

東京大学大気海洋研究所 沿岸生態分野の西部裕一郎准教授と同国際協力分野の佐野雅美博士には、動物プランクトンの同定をご指導いただき、データの解釈について幾度と無くご助言をいただいた。同環境動態分野の伊藤進一教授には、水温データの解釈について幾度と無くご助

言をいただいた。

黒潮親潮移行域における調査は中央水産研究所の川端淳博士，渡邊千夏子博士，阪地英男氏，高須賀明典博士，久保田洋博士，上村泰洋博士，また北海道区水産研究所の山下紀夫博士，加賀敏樹博士，中村好和博士のご理解とご協力によって継続することができた。蒼鷹丸の寺田靖船長，澤田石城船長，石森良史船長および乗組員の方々，元北海道教育庁船実習管理官の荘司勇氏と古川敏廣氏には，調査の円滑な進行にご協力いただただけでなく，船内生活に関するご指導や多くの励ましをいただいた。

東京大学大気海洋研究所 生物海洋学分野の竹茂愛吾博士には，産卵可能水域の推定に関するデータ処理について幾度となくご指導いただいた。また中央水産研究所の高須賀明典博士と日本海区水産研究所の後藤常夫博士には産卵量データを提供いただき，本研究に関して有益なご助言もいただいた。

西海区水産研究所の高橋素光博士には，修士課程から継続して本研究に関するご助言をいただき，また 1996—2002 年に黒潮親潮移行域で採集されたカタクチイワシ仔魚の計測データを提供いただいた。大気海洋研究所資源生態分野の深道絹代氏には仔稚魚の生物測定と耳石標本作製の方法をご指導いただき，また 2008—2009 年に相模湾で採集されたカタクチイワシ仔稚魚の計測データを提供いただいた。同須原三加氏には耳石日輪解析法をご指導いただいた。同佐々木由華氏には，1985—2011 年の岩手丸時系列標本からカタクチイワシ卵仔魚を選別し，計数・計測いただいた。

大気海洋研究所資源生態分野の猿渡敏郎助教，入江貴博助教，杵雅利博士，元南一博士，勝川木綿博士，今孝悦博士，南條楠土博士，錢本慧博士，張輝博士，張愷氏，刑曉曦氏，武邑沙友里氏，村瀬偉紀氏，岩崎美香里氏，織田愛氏，三田友美氏および生物資源再生分野の北川貴士准教授，早川淳助教，廣瀬雅人助教，大土直哉博士，中村乙水博士，伯耆匠二博士，青木良徳氏，Carlos Andres Satizabal 氏，中本健太氏，龍微鑫氏，福田介人氏，宮木純子氏，福井美沙氏には，淡青丸による調査航海，蒼鷹丸における調査や宮古湾における調査において多大なるご協力をいただくとともに，多くの励ましをいただいた。

本研究の遂行を支えて下さった以上の方々に深く感謝申し上げる。

また修士・博士課程 5 年間の研学生活は、両親の理解なしには継続できなかった。深く感謝申し上げる。

表目次

2.1.1	Summary of principal component analysis on the environmental factors in Hokkaido and Sanriku-Hokkaido Areas.	23
2.1.2	Sampling results of anchovy eggs and larvae in Hokkaido Area in 2012	23
2.1.3	Sampling results of anchovy eggs and larvae in Sanriku-Hokkaido Area in 2011	24
2.1.4	L , d , and date of hatch of anchovy larvae collected in Hokkaido Area in 2012	25
2.1.5	L , d , and date of hatch of anchovy larvae collected in Sanriku-Hokkaido Area in 2011	26
2.1.6	L , d , G , and L_{inc} of the normal distributions of larval L in Hokkaido Area in 2012 and Sanriku-Hokkaido Area in 2011.	27
2.1.7	Model coefficient of each parameters in generalized linear model on larval $G_{50tolith}$	27
2.2.1	L , d , and date of hatch of anchovy larvae and juveniles collected in Miyako Bay in 2012.	66
2.2.2	L , d , and date of hatch of anchovy larvae and juveniles collected in Miyako Bay in 2013.	67
2.2.3	L , d , and date of hatch of anchovy larvae and juveniles collected in Miyako Bay in 2014.	68
2.3.1	L , d , and date of hatch of anchovy larvae and juveniles collected in Oarai coast in 2011.	140
2.3.2	L , d , and date of hatch of anchovy larvae and juveniles collected in Oarai coast in 2012.	140
2.3.3	L , d , and date of hatch of anchovy larvae and juveniles collected in Oarai coast in 2013.	141
2.3.4	L , d , and date of hatch of anchovy larvae and juveniles collected in Oarai coast in 2014.	142
2.3.5	L , d , and date of hatch of anchovy larvae and juveniles collected in Oarai coast in 2015.	142
2.4.1	Sampling results of anchovy larvae off the Pacific coast of northern Japan in 2011.	189
2.4.2	Sampling results of anchovy larvae off the Pacific coast of northern Japan in 2012.	190
2.4.3	Sampling results of anchovy larvae off the Pacific coast of northern Japan in 2013.	191
2.4.4	Sampling results of anchovy larvae off the Pacific coast of northern Japan in 2014.	192
2.4.5	Sampling results of anchovy larvae off the Pacific coast of northern Japan in 2015.	193

2.4.6	<i>L</i> , <i>d</i> , and date of hatch of anchovy larvae collected off northern Japan in 2011.	194
2.4.7	<i>L</i> , <i>d</i> , and date of hatch of anchovy larvae collected off northern Japan in 2012.	195
2.4.8	<i>L</i> , <i>d</i> , and date of hatch of anchovy larvae collected off northern Japan in 2013.	196
2.4.9	<i>L</i> , <i>d</i> , and date of hatch of anchovy larvae collected off northern Japan in 2014.	197
2.4.10	<i>L</i> , <i>d</i> , and date of hatch of anchovy larvae collected off northern Japan in 2015.	198

目次

1.0-1	Annual catch of Japanese anchovy in the Pacific waters around Japan north and south of the Cape Inubo.	6
2.1-1	Sampling stations in Hokkaido and Sanriku-Hokkaido Areas.	28
2.1-2	d - L relationships of anchovy larvae collected in Hokkaido and Sanriku-Hokkaido Areas.	29
2.1-3	Water temperatures in Hokkaido and Sanriku-Hokkaido Areas.	30
2.1-4	T-S diagrams in Hokkaido Area.	31
2.1-5	T-S diagrams in Sanriku-Hokkaido Area	32
2.1-6	Current fields in Sanriku-Hokkaido and Hokkaido Areas.	33
2.1-7	Rose diagrams of the currents in Sanriku-Hokkaido and Hokkaido Areas.	33
2.1-8	Correlation plot of environmental factors and oceanographic characters of the sampling stations in Hokkaido and Sanriku-Hokkaido Areas obtained by principal component analysis.	34
2.1-9	Distribution densities of anchovy eggs and larvae in Hokkaido and Sanriku-Hokkaido Areas.	35
2.1-10	L frequency distributions of anchovy larvae by Areas.	36
2.1-11	L frequency distributions of anchovy larvae by stations in Hokkaido Area.	37
2.1-12	L frequency distributions of anchovy larvae by stations in Sanriku-Hokkaido Area.	38
2.1-13	Between-transect comparison of larval L in Hokkaido Area.	39
2.1-14	Between-transect comparison of larval L in Sanriku-Hokkaido Area.	40
2.1-15	d frequency distributions of anchovy larvae.	41
2.1-16	Hatch-date frequency distributions of anchovy larvae.	41
2.1-17	G frequency distributions of anchovy larvae.	42
2.1-18	R - L relationship of anchovy larvae.	42
2.1-19	Comparison of R -growth history of anchovy larvae between Hokkaido and Sanriku-Hokkaido Areas. . . .	43

2.1-20	Comparison of R -growth history of anchovy larvae between cohorts in Hokkaido and Sanriku-Hokkaido Areas.	43
2.1-21	Pearson residuals of the growth model against fitted values and each explanatory variable.	44
2.1-22	Effect of explanatory values on larval $G_{50tolith}$ in Hokkaido and Sanriku-Hokkaido Areas.	44
2.2-1	Sampling stations in Coastal Sanriku Area and Miyako Bay.	69
2.2-2	d – L relationship of anchovy larvae collected in Coastal Sanriku Area.	70
2.2-3	R – L relationship of anchovy larvae in Coastal Sanriku Area.	70
2.2-4	Annual fluctuations of water system composition in Coastal Sanriku Area.	71
2.2-5	Monthly change of water system composition in Coastal Sanriku Area.	72
2.2-6	Results of cluster analysis on environmental variables of Coastal Sanriku Area.	73
2.2-7	Spatial distribution of anchovy eggs in Coastal Sanriku Area in 1980–1990.	74
2.2-8	Spatial distribution of anchovy larvae in Coastal Sanriku Area in 1980–1990.	75
2.2-9	Spatial distribution of anchovy eggs in Coastal Sanriku Area in 1991–2000.	76
2.2-10	Spatial distribution of anchovy larvae in Coastal Sanriku Area in 1991–2000.	77
2.2-11	Spatial distribution of anchovy eggs in Coastal Sanriku Area in 2001–2010.	78
2.2-12	Spatial distribution of anchovy larvae in Coastal Sanriku Area in 2001–2010.	79
2.2-13	Spatial distribution of anchovy eggs in Coastal Sanriku Area in 2011–2015.	80
2.2-14	Spatial distribution of anchovy larvae in Coastal Sanriku Area in 2011–2015.	81
2.2-15	Annual variations in mean distribution density of anchovy eggs and larvae in Coastal Sanriku Area by months from May to October.	82
2.2-16	Monthly variations in mean distribution density of anchovy eggs and larvae in the 5 stations in Coastal Sanriku Area by years from 1980 to 2015.	83
2.2-17	Annual variations in mean distribution density of anchovy eggs from May to October in Coastal Sanriku Area by stations.	84
2.2-18	Annual variations in mean distribution density of anchovy larvae from May to October in Coastal Sanriku Area by stations.	85
2.2-19	Monthly variations in mean distribution density of anchovy eggs in 35 years from 1980 to 2015 in Coastal Sanriku Area by stations.	86

2.2-20	Monthly variations in mean distribution density of anchovy larvae in 35 years from 1980 to 2015 in Coastal Sanriku Area by stations.	87
2.2-21	Cluster analysis on distribution density of eggs and larvae in each year and month in Coastal Sanriku Area by stations.	87
2.2-22	Annual variations in mean T_{egg} and T_{larva} from May to October in Coastal Sanriku Area by months. . .	88
2.2-23	Within-year difference in mean T_{egg} and T_{larva} from May to October in Coastal Sanriku Area by years. .	89
2.2-24	Annual variations in mean T_{egg} and T_{larva} from May to October in Coastal Sanriku Area by stations. . .	90
2.2-25	Among-station difference in T_{egg} and T_{larva} in Coastal Sanriku Area.	91
2.2-26	Difference in density-weighted SST between egg and larva in Coastal Sanriku Area by stations.	91
2.2-27	Monthly variations in mean T_{egg} and T_{larva} in the 5 stations in Coastal Sanriku Area by years.	92
2.2-28	Annual variations in L frequency distribution of anchovy larvae collected in the 5 stations in Coastal Sanriku Area by months.	93
2.2-29	Annual variations in L frequency distribution of anchovy larvae collected from May to October in Coastal Sanriku Area by stations.	94
2.2-30	Monthly variations in L frequency distribution of anchovy larvae collected from 1980 to 2015 in Coastal Sanriku Area by stations.	95
2.2-31	Cluster analysis on larval L frequency distribution in Coastal Sanriku Area by stations and months. . . .	95
2.2-32	Variation in L frequency distribution of anchovy larvae between stations collected from 1980 to 2015 in Coastal Sanriku Area by months.	96
2.2-33	L – W relationship of anchovy larvae by years in Coastal Sanriku Area.	97
2.2-34	L – W relationship of anchovy larvae by months in Coastal Sanriku Area.	98
2.2-35	L – W relationship of anchovy larvae by stations in Coastal Sanriku Area.	99
2.2-36	d frequency distribution of anchovy larvae in Coastal Sanriku Area.	99
2.2-37	Hatch-date frequency distribution of anchovy larvae in Coastal Sanriku Area.	100
2.2-38	Frequency distribution of estimated date of hatch of anchovy larvae by stations and years in Coastal Sanriku Area.	101
2.2-39	Annual variations in presence/absence patterns between eggs and larvae in Coastal Sanriku Area.	102
2.2-40	G frequency distribution of anchovy larvae in Coastal Sanriku Area.	102

2.2-41	<i>L</i> -growth history of anchovy larvae by hatch months in Coastal Sanriku Area.	103
2.2-42	Monthly variations in SST in Miyako Bay.	104
2.2-43	Monthly variations in Chlorophyll- <i>a</i> concentration in Miyako Bay.	104
2.2-44	Monthly variations in density of planktonic organisms and their composition in Miyako Bay.	105
2.2-45	Monthly variations in CPUE of anchovy larvae and juveniles in Miyako Bay.	106
2.2-46	Monthly variations in <i>L</i> frequency distributions of anchovy larvae and juveniles in Miyako Bay in 2012.	107
2.2-47	Monthly variations in <i>L</i> frequency distributions of anchovy larvae and juveniles in Miyako Bay in 2013.	108
2.2-48	Monthly variations in <i>L</i> frequency distributions of anchovy larvae and juveniles in Miyako Bay in 2014.	109
2.2-49	Monthly variations in <i>W</i> frequency distributions of anchovy larvae and juveniles in Miyako Bay in 2012.	110
2.2-50	Monthly variations in <i>W</i> frequency distributions of anchovy larvae and juveniles in Miyako Bay in 2013.	111
2.2-51	Monthly variations in <i>W</i> frequency distributions of anchovy larvae and juveniles in Miyako Bay in 2014.	112
2.2-52	Monthly variations in <i>C</i> frequency distributions of anchovy larvae and juveniles in Miyako Bay in 2012.	113
2.2-53	Monthly variations in <i>C</i> frequency distributions of anchovy larvae and juveniles in Miyako Bay in 2013.	114
2.2-54	Monthly variations in <i>C</i> frequency distributions of anchovy larvae and juveniles in Miyako Bay in 2014.	115
2.2-55	Monthly variations in <i>L</i> – <i>W</i> relationships between larvae and juveniles in Miyako Bay.	116
2.2-56	Monthly variations in <i>L</i> – <i>L_{head}</i> relationships between larvae and juveniles in Miyako Bay.	117
2.2-57	Monthly variations in <i>R</i> – <i>L</i> relationships between larvae and juveniles in Miyako Bay.	118
2.2-58	Monthly variations in daily-age frequency distribution of anchovy larvae and juveniles in Miyako Bay in 2012–2014.	119
2.2-59	Monthly variations in hatch-date frequency distribution of anchovy larvae and juveniles in 3 years in Miyako Bay.	120
2.2-60	<i>G_{d40}</i> of anchovy larvae and juveniles by hatch month cohorts in Miyako Bay.	121
2.2-61	Monthly variations in <i>G</i> frequency distribution of anchovy larvae in Miyako Bay in 2012–2014.	122
2.2-62	Monthly variations in <i>L</i> -growth history of anchovy larvae collected in Miyako Bay in 2012–2014.	123
2.2-63	Monthly variations in <i>L</i> -growth history of anchovy juveniles collected in Miyako Bay in 2012–2014.	124
2.2-64	Comparison between larval and juvenile <i>L</i> -growth history in Miyako Bay by month.	125
2.2-65	Comparison of <i>L</i> -growth trajectories between larvae collected in Coastal Sanriku Area and Miyako Bay.	125
2.2-66	Relationships between SST and <i>G₅</i> of anchovy larvae and juveniles in Miyako Bay.	126

2.2-67	G_5 of anchovy larvae and juveniles on changes in density of food organisms and SST in Miyako Bay. . . .	127
2.3-1	Annual fluctuations in the <i>shirasu</i> fishery landings in Ibaraki prefecture.	143
2.3-2	<i>Shirasu</i> fishing ground along Oarai coast.	144
2.3-3	Monthly landings of <i>shirasu</i> fishery in Oarai coast.	144
2.3-4	Seasonal variation in SST in Oarai coast.	145
2.3-5	Monthly variations in L frequency distributions of anchovy larvae and juveniles in Oarai coast in 2011. . .	146
2.3-6	Monthly variations in L frequency distributions of anchovy larvae and juveniles in Oarai coast in 2012. . .	147
2.3-7	Monthly variations in L frequency distributions of anchovy larvae and juveniles in Oarai coast in 2013. . .	148
2.3-8	Monthly variations in L frequency distributions of anchovy larvae and juveniles in Oarai coast in 2014. . .	149
2.3-9	Monthly variations in L frequency distributions of anchovy larvae and juveniles in Oarai coast in 2015. . .	150
2.3-10	Monthly variations in W frequency distributions of anchovy larvae and juveniles in Oarai coast in 2011. . .	151
2.3-11	Monthly variations in W frequency distributions of anchovy larvae and juveniles in Oarai coast in 2012. . .	152
2.3-12	Monthly variations in W frequency distributions of anchovy larvae and juveniles in Oarai coast in 2013. . .	153
2.3-13	Monthly variations in W frequency distributions of anchovy larvae and juveniles in Oarai coast in 2014. . .	154
2.3-14	Monthly variations in W frequency distributions of anchovy larvae and juveniles in Oarai coast in 2015. . .	155
2.3-15	Monthly variations in C frequency distributions of anchovy larvae and juveniles in Oarai coast in 2011. . .	156
2.3-16	Monthly variations in C frequency distributions of anchovy larvae and juveniles in Oarai coast in 2012. . .	157
2.3-17	Monthly variations in C frequency distributions of anchovy larvae and juveniles in Oarai coast in 2013. . .	158
2.3-18	Monthly variations in C frequency distributions of anchovy larvae and juveniles in Oarai coast in 2014. . .	159
2.3-19	Monthly variations in C frequency distributions of anchovy larvae and juveniles in Oarai coast in 2015. . .	160
2.3-20	Monthly variations in L – W relationships between larvae and juveniles by sampling years and months in Oarai coast.	161
2.3-21	Comparison of slope of L – W relationships between larvae and juveniles stages in Oarai coast.	162
2.3-22	Monthly variations in L – L_{head} relationships between larvae and juveniles by sampling years and months in Oarai coast.	163
2.3-23	Comparison of slope of L – L_{head} relationships between larvae and juveniles in Oarai coast.	164
2.3-24	Monthly variations in R – L_{head} relationships between larvae and juveniles by sampling years and months in Oarai coast.	165

2.3-25	Monthly variations in daily-age frequency distribution of anchovy larvae and juveniles in Oarai coast. . .	166
2.3-26	Monthly variations in hatch-date frequency distribution of anchovy larvae and juveniles by sampling month in Oarai coast.	167
2.3-27	G_{d40} of anchovy larvae and juveniles by hatch cohorts in Oarai coast.	168
2.3-28	Monthly variations in G frequency distribution of anchovy larvae in Oarai coast.	169
2.3-29	Monthly variations in frequency distributions of L_{d10} and L_{d20} of anchovy larvae and juveniles by sam- pling year and month in Oarai coast.	170
2.3-30	Monthly variations in L -growth history of anchovy larvae by hatch month cohorts in Oarai coast.	171
2.3-31	Monthly variations in L -growth history of anchovy juveniles by hatch month cohorts in Oarai coast. . . .	172
2.3-32	Comparison between larval and juvenile L -growth history by hatch month cohorts in Oarai coast.	173
2.3-33	Relationships between G_5 of anchovy larvae and juveniles on SST in Oarai coast.	173
2.4-1	Annual fluctuations of egg production and number of recruits of the Pacific stock of Japanese anchovy. . .	199
2.4-2	Trawl- and CTD- stations off northern Japan in 2011–13.	200
2.4-3	Trawl- and CTD- stations off northern Japan in 2014 and 2015.	201
2.4-4	R – L relationship of anchovy larvae collected off northern Japan by years.	202
2.4-5	d – L relationship of anchovy larvae collected off northern Japan in 3 years from 2011 to 2013.	203
2.4-6	L – d relationship of anchovy larvae collected off northern Japan in 3 years from 2011 to 2013.	203
2.4-7	Geographical distribution of anchovy larvae and SST off northern Japan in 2011–13.	204
2.4-8	Geographical distribution of anchovy larvae and SST off northern Japan in 2014 and 2015.	205
2.4-9	Geographical distribution of anchovy larvae and T_{100m} off northern Japan in 2011–13.	206
2.4-10	Geographical distribution of anchovy larvae and T_{100m} off northern Japan in 2014 and 2015.	207
2.4-11	Relationship between SST or T_{100m} and CPUE of anchovy larvae by years off northern Japan	208
2.4-12	Distribution of anchovy larvae in relation to SST (x -axis) and prey density (y -axis) off northern Japan by years.	209
2.4-13	CPUE percentage of anchovy larvae in favorable environment off northern Japan.	210
2.4-14	L frequency distribution of anchovy larvae off northern Japan in 2011.	211
2.4-15	L frequency distribution of anchovy larvae off northern Japan in 2012.	212
2.4-16	L frequency distribution of anchovy larvae off northern Japan in 2013.	213

2.4-17	<i>L</i> frequency distribution of anchovy larvae off northern Japan in 2014.	214
2.4-18	<i>L</i> frequency distribution of anchovy larvae off northern Japan in 2015.	215
2.4-19	Geographical distributions of larval mean <i>L</i> by years off northern Japan in 2011–2015.	216
2.4-20	<i>C</i> frequency distribution of anchovy larvae off northern Japan in 2011.	217
2.4-21	<i>C</i> frequency distribution of anchovy larvae off northern Japan in 2012.	218
2.4-22	<i>C</i> frequency distribution of anchovy larvae off northern Japan in 2013.	219
2.4-23	<i>C</i> frequency distribution of anchovy larvae off northern Japan in 2014.	220
2.4-24	<i>C</i> frequency distribution of anchovy larvae off northern Japan in 2015.	221
2.4-25	Geographical distributions of larval mean <i>C</i> by years off northern Japan in 2011–2015.	222
2.4-26	<i>L</i> – <i>W</i> relationship of anchovy larvae off northern Japan by years.	223
2.4-27	<i>L</i> – <i>L_{head}</i> relationship of anchovy larvae off northern Japan by years.	224
2.4-28	<i>d</i> frequency distribution of anchovy larvae by years off northern Japan.	225
2.4-29	Hatch-date frequency distribution of anchovy larvae by years off northern Japan.	226
2.4-30	<i>G</i> frequency distribution of anchovy larvae by years off northern Japan.	227
2.4-31	<i>L</i> -growth increment of anchovy larvae off northern Japan by stations, areas and years.	228
2.4-32	<i>G_{d40}</i> of anchovy larvae off northern Japan by years.	229
2.4-33	<i>L</i> -growth history of anchovy larvae off northern Japan by years, areas and stations.	230
2.4-34	Relationship between SST and <i>G₅</i> of anchovy larvae off northern Japan in 2011–2013.	231
2.4-35	<i>G₅</i> of anchovy larvae under unfavorable and favorable <i>T</i> and unfavorable and favorable density of food organisms off northern Japan in 2011–2013.	232
3.1-1	Quotient value of anchovy larvae and eggs on <i>T</i> - frequency distribution in Coastal Sanriku Area.	241
3.1-2	Quotient value of anchovy eggs on day-length frequency distribution in Coastal Sanriku Area.	242
3.1-3	Annual fluctuation in frequency of the potential spawning range (15–28°C) in the offshore Tohoku region from 1950 to 2007.	243
3.1-4	Annual fluctuation in the area of the potential spawning area in the offshore Tohoku region from 1950 to 2007.	244
3.1-5	Monthly change in <i>T</i> and day length in Coastal Sanriku Area from 1980 to 2015.	245

3.1-6	Monthly change in T and day length among waters with different latitudes and spawning season of anchovy in the adjacent waters.	246
3.2-1	Release points and destination areas of the particle tracking experiment.	256
3.2-2	An example of the surface flow field of the experimental area.	257
3.2-3	Egg production data used for weighting.	258
3.2-4	Transport trajectory of particles recruited to Miyako Bay by release month.	259
3.2-5	Transport trajectory of particles recruited to Oarai coast by release month.	260
3.2-6	Transport trajectory of particles recruited to Sagami Bay by release month.	261
3.2-7	Number and the source composition of the particles recruited to Miyako Bay, Oarai coast and Sagami Bay by recruited month.	262
3.2-8	Weighted-number and the source composition of the particles recruited to Miyako Bay, Oarai coast and Sagami Bay by recruited month.	263
3.2-9	Temperature history experienced by particles recruited to Miyako Bay, Oarai coast and Sagami Bay by released month and the released area.	264
3.2-10	Temperature-history difference of particles recruited to Miyako Bay, Oarai coast and Sagami Bay by released month and the released area.	265
3.2-11	Proportions of the location of the particles on the 29th day from the release.	266
3.3-1	Seasonal changes in biological variables at metamorphosis of Japanese anchovy in Sagami Bay.	277
3.3-2	Seasonal changes in biological variables at metamorphosis of Japanese anchovy in Miyako Bay.	278
3.3-3	Seasonal changes in biological variables at metamorphosis of Japanese anchovy in Oarai coast.	279
3.3-4	Relationships between SST and biological variables at metamorphosis of Japanese anchovy.	280
3.3-5	Relationships between d and C of anchovy larvae in Sagami Bay by SST classes.	281
3.3-6	Relationships between d and C of anchovy larvae in Miyako Bay and Oarai Coast.	282
3.3-7	C -growth trajectory of anchovy larvae in Miyako Bay, Oarai coast and Sagami Bay by hatch cohorts.	283
3.3-8	Daily C -growth increment of anchovy larvae in Miyako Bay, Oarai coast and Sagami Bay by hatch cohorts.	284
3.3-9	Daily L -growth increment of anchovy larvae in Miyako Bay, Oarai coast and Sagami Bay by hatch cohorts.	285
3.3-10	L -growth trajectory of anchovy larvae in Miyako Bay, Oarai coast and Sagami Bay by hatch cohorts.	286
3.3-11	Daily W -growth increment of anchovy larvae in Miyako Bay, Oarai coast and Sagami Bay by hatch cohorts.	287

3.3-12	W growth-trajectory of anchovy larvae in Miyako Bay, Oarai coast and Sagami Bay by hatch cohorts.	288
3.3-13	Relationships between G_5 of anchovy larvae and SST in Miyao Bay, Oarai coast and Sagami Bay.	289
3.3-14	Daily C -growth increment and C -growth trajectory of anchovy larvae in Miyako Bay, Oarai coast and Sagami Bay by catch-temperature classes.	290
3.3-15	Daily L -growth increment and L -growth trajectory of anchovy larvae in Miyako Bay, Oarai coast and Sagami Bay by catch-temperature classes.	291
3.3-16	Daily W -growth increment and W -growth trajectory of anchovy larvae in Miyako Bay, Oarai coast and Sagami Bay by catch-temperature classes.	292
3.3-17	Relationships between SST and biological variables at metamorphosis of <i>Engraulis japonicus</i>	293
3.3-18	$L-L_{head}$ of anchovy larvae in Miyako Bay, Oarai coast and off northern Japan.	294
3.3-19	Relationships between G_5 of anchovy larvae and SST in Miyao Bay, Oarai coast, Sagami Bay and off northern Japan.	295
3.3-20	Comparison of G_{L-d40} , G_{W-d40} and G_{C-d40} of anchovy larvae and juveniles between Miyako Bay, Oarai coast, Sagami Bay and off northern Japan.	296
3.4-1	CPUE and proportion of stations of positive collection of anchovy larvae off northern Japan in 1996–2002 and 2011–2015.	302
3.4-2	Proportion of anchovy larvae in the area with favorable temperature off northern Japan.	303
3.4-3	Difference in C_{m50} of anchovy larvae between years off northern Japan.	303
3.4-4	Daily C -growth increment and C -growth trajectory of anchovy larvae off northern Japan.	304
3.4-5	Daily L -growth increment and L -growth trajectory of anchovy larvae off northern Japan.	305
3.4-6	Daily W -growth increment and W -growth trajectory of anchovy larvae off northern Japan.	306
3.4-7	Between-year comparison of daily L -growth increment and back-calculated L at ages of anchovy larvae off northern Japan.	307
3.4-8	Between-year comparison of daily W -growth increment and back-calculated W at ages of anchovy larvae off northern Japan.	308
3.4-9	Between-year comparison of daily C -growth increment and back-calculated C at ages of anchovy larvae off northern Japan.	309

引用文献

- Aoki I and Miyashita K (2000) Dispersal of larvae and juveniles of Japanese anchovy *Engraulis japonicus* in the Kuroshio Extension and Kuroshio-Oyashio transition regions, western North Pacific Ocean. *Fish Res* **49**, 155–164.
- Aoki I and Murayama T (1993) Spawning pattern of the Japanese sardine *Sardinops melanostictus* off southern Kyushu and Shikoku, southwestern Japan. *Mar Ecol Prog Ser* **97**, 127–134.
- Barange M, Coetzee J, Takasuka A, Hill K, Gutierrez M, Oozeki Y, van der Lingen C, and Agostini V (2009) Habitat expansion and contraction in anchovy and sardine populations. *Prog Oceanogr* **83**, 251–260.
- Bellier E, Planque B, and Petitgas P (2007) Historical fluctuations in spawning location of anchovy (*Engraulis encrasicolus*) and sardine (*Sardina pilchardus*) in the Bay of Biscay during 1967-73 and 2000-2004. *Fish Oceanogr* **16**, 1–15.
- Benoît H P, Pepin P, and Brown J A (2000) Patterns of metamorphic age and length in marine fishes, from individuals to taxa. *Can J Fish Aquat Sci* **57**, 856–869.
- Bertalanffy, von L (1957) Quantitative laws in metabolism and growth. *Q Rev Biol* **32**, 217–231.
- Blaxter J H S (2009) Fish Reproduction. In: B Miller and A W Kendall (eds), *Early Life History of Marine Fishes* University of California Press, 425–431.
- Blaxter J H S and Hunter J R (1982) The Biology of the Clupeoid Fishes. In: J H S Blaxter, F S Russell, and M Yonge (eds), *Advances in Marine Biology*, volume 20 Academic Press, 1–223.
- Buckingham C E, Cornillon P C, Schloesser F, and Obenour K M (2014) Global observations of quasi-zonal bands in microwave sea surface temperature. *J Geophys Res Ocean* **119**, 4840–4866.
- Campana S E (1990) How reliable are growth back-calculations based on otoliths? *Can J Fish Aquat Sci* **47**, 2219–2227.
- Campana S E and Jones C M (1992) Analysis of otolith microstructure data. In: D K Stevenson and S E Campana (eds), *Otolith microstructure examination and analysis*, volume 117 Can Spec Publ Fish Aquat Sci, 73–100.
- Checkley D M J, Ayon P, Tim R B, Bernal M, Coetzee J C, Emmett R, Guevara-Carrasco R, Hutchings L, Ibaibarriaga L, Nakata H, Oozeki Y, Planque B, Schweigert J, Stratoudakis Y, and van der Lingen C D (2009) Habitats. In: D M

- Checkley, J Alheit and C Roy (eds), *Climate Change and Small Pelagic Fish* New York: Cambridge University Press, 12–45.
- 千村昌之 (2004) 宮古湾におけるニシンの初期生態に関する研究. 東京大学博士論文.
- Chimura M, Watanabe Y, Okouchi H, Shirafuji N, and Kawamura T (2009) Hatch-period-dependent early growth and survival of Pacific herring *Clupea pallasii* in Miyako Bay, Japan. *J Fish Biol* **74**, 604–620.
- Conlon D M (1982) On the outflow modes of the Tsugaru Warm Current. *La mer* **20**, 60–64.
- Conover D O and Present T M C (1990) Countergradient variation in growth rate: compensation for length of the growing season among Atlantic silversides from different latitudes. *Oecologia* **83**, 316–324.
- Conover D O (1992) Seasonality and the scheduling of life history at different latitudes. *J Fish Biol* **41**, 161–178.
- Corten A (2002) The role of "conservatism" in herring migrations. *Rev Fish Biol Fish* **11**, 339–361.
- Cotano U, Irigoien X, Etxebeste E, Álvarez P, Zarauz L, Mader J, and Ferrer L (2008) Distribution, growth and survival of anchovy larvae (*Engraulis encrasicolus* L) in relation to hydrodynamic and trophic environment in the Bay of Biscay. *J Plankton Res* **30**, 467–481.
- Cushing D H (1975) *Marine Ecology and Fisheries*. Cambridge University Press 1–275.
- Cushing D H (1982) *Climate and Fisheries*. Academic Press 1–373.
- Detwyler R and Houde E D (1970) Food selection by laboratory-reared larvae of the scaled sardine *Harengula pensacolatae* (Pisces, Clupeidae) and the bay anchovy *Anchoa mitchilli* (Pisces, Engraulidae). *Mar Biol* **7**, 214–222.
- Dittman A and Quinn T (1996) Homing in Pacific salmon: mechanisms and ecological basis. *J Exp Biol* **199**, 83–91.
- 海老沢良忠 (1997) 鹿島灘海域におけるカタクチイワシシラスの漁況変動について. 茨城水試研報 **35**, 25–31.
- 海老沢良忠 (1999) 重回帰分析による茨城県シラス水揚げ量の予測について. 茨城水試研報 **37**, 71–75.
- Favorite F, Dodimead A J, and Nasu K (1976) Oceanography of the Subarctic Pacific region. *Bull Int North Pacific Community* **33**, 1–187.
- Fey D P (2001) Differences in temperature conditions and somatic growth rate of larval and early juvenile spring-spawned herring from the Vistula Lagoon, Baltic Sea manifested in the otolith to fish size relationship. *J Fish Biol* **58**, 1257–1273.
- Fey D P (2006) The effect of temperature and somatic growth on otolith growth: the discrepancy between two clupeid species from a similar environment. *J Fish Biol* **69**, 794–806.
- Fraley C and Raftery A E (2002) Model-based clustering, discriminant analysis, and density estimation. *J Am Stat Assoc* **97**, 611–531.

- 深道絹代 (2010) 相模湾におけるカタクチイワシ仔稚魚の成長と発達. 東京大学修士論文, 1–32.
- Fukuhara O (1983) Development and growth of laboratory reared *Engraulis japonica* (Houttuyn) larvae. *J Fish Biol* **23**, 641–652.
- Fukuhara O (1992) Study on development of functional morphology and behaviour of the larvae of eight commercially valuable teleost fishes. *Contributions to the Fisheries Researches in the Japan Sea block* **25**, 1–17.
- Funamoto T and Aoki I (2002) Reproductive ecology of Japanese anchovy off the Pacific coast of eastern Honshu, Japan. *J Fish Biol* **60**, 154–169.
- Funamoto T, Aoki I, and Wada Y (2004) Reproductive characteristics of Japanese anchovy, *Engraulis japonicus*, in two bays of Japan. *Fish Res* **70**, 71–81.
- Furuya K, Hasegawa O, Yoshikawa T, and Taguchi S (1998) Photosynthesis-irradiance relationship of phytoplankton and primary production in the vicinity of Kuroshio warm core ring in spring. *J Oceanogr* **54**, 545–552.
- Gompertz B (1825) On the nature of the function expressive of the law of human mortality, and on a new mode of determining the value of life contingencies. *Philos Trans R Soc London* **115**, 513–583.
- Hanawa K and Mitsudera H (1987) Variation of water system distribution in the Sanriku coastal area. *J Oceanogr Soc Japan* **42**, 435–446.
- Heath M, Zenitani H, Watanabe Y, Kimura R, and Ishida M (1998) Modelling the dispersal of larval Japanese sardine, *Sardinops melanostictus*, by the Kuroshio Current in 1993 and 1994. *Fish Oceanogr* **7**, 335–346.
- Hewitt R (1980) Distributional atlas of fish larvae in the California Current region: northern anchovy, *Engraulis mordax* (Girard), 1966–1979. *CalCOFI Atlas* **28**, 1–101.
- Hirota R (1981) Dry weight and chemical composition of the important zooplankton in the Setonaikai (Inland Sea of Japan). *Bull Plankt Soc Japan* **28**, 19–24.
- 堀義彦 (1971) 茨城県のしらす漁業について. 昭和 45 年度茨城水試研報, 10–25.
- Houde E D (1987) Fish early life dynamics and recruitment variability. *Am Fish Soc Symp* **2**, 17–29.
- Houde E D and Schekter R C (1981) Growth rates, rations and cohort consumption of marine siph larvae in relation to prey concentrations. *Early Life Hist Fish*, 441–453.
- Hurst T P (2007) Causes and consequences of winter mortality in fishes. *J Fish Biol* **71** 315–345.
- 茨城県水産試験場 (1977) 茨城県の漁具漁法. 茨城県水産試験場, 1–187.
- 茨城県農林水産部漁政課 (2014) 平成 26 年度 茨城の水産. 茨城県農林水産部漁政課, 1–100.

- 石田実・三谷卓美・上原伸二 (2002) 中央ブロック卵・稚仔, プランクトン調査研究担当者協議会研究報告. **22**, 1–213.
- 磯田豊・鈴木銅治 (2004) 津軽暖流水張り出しの経年変化. 北大水産彙報, **55**, 71–74.
- Itoh S and Kimura S (2007) Transport and survival of larvae of pelagic fishes in Kuroshio system region estimated with Lagrangian drifters. *Fish Sci* **73**, 1295–1308.
- Itoh S, Saruwatari T, Nishikawa H, Yasuda I, Komatsu K, Tsuda A, Setou T, and Shimizu M (2011) Environmental variability and growth histories of larval Japanese sardine (*Sardinops melanostictus*) and Japanese anchovy (*Engraulis japonicus*) near the frontal area of the Kuroshio. *Fish Oceanogr* **20**, 114–124.
- Itoh S, Yasuda I, Nishikawa H, Sasaki H, and Sasai Y (2009) Transport and environmental temperature variability of eggs and larvae of the Japanese anchovy (*Engraulis japonicus*) and Japanese sardine (*Sardinops melanostictus*) in the western North Pacific estimated via numerical particle-tracking experiments. *Fish Oceanogr* **18**, 118–133.
- Buckel J A Steinberg N D and Conover D O (1995) Effects of temperature, salinity, and fish size on growth and consumption of juvenile bluefish. *J Fish Biol* **47**, 696–706.
- 上村泰洋・渡邊千夏子・川端淳・亘真吾・水戸啓一 (2014) 平成 26 年度カタクチイワシ太平洋系群の資源評価. 水産庁増殖推進部・独立行政法人水産総合研究センター (編) 平成 26 年度我が国周辺水域の漁業資源評価. 737–767.
- Kasai A, Sugimoto T, and Nakata H (1997) The Dependence of Yearly Recruitment of Japanese Sardine *Sardinops melanostictus* on Survival in the Kuroshio-Oyashio Transition Region. *Fish Sci* **63**, 372–377.
- Kawai H (1969) Statistical estimation of isotherms indicative of the Kuroshio axis. *Deep Sea Res Suppl to* **16**, 109–115.
- Kawai H (1972) Hydrography of Kuroshio Extension. In: H Stommel and K Yoshida (eds), *Kuroshio: its physical aspects* Tokyo: University of Tokyo Press, 235–352.
- 菊地弘・森慶一郎・中田薫 (1992) 潮岬以東海域におけるマイワシ卵・仔魚の出現域の沖合化. 日水誌 **58**, 427–432.
- Kimura R, Watanabe Y, and Zenitani H (2000) Nutritional condition of first-feeding larvae of Japanese sardine in the coastal and oceanic waters along the Kuroshio Current. *ICES J Mar Sci* **57**, 240–248.
- 木下哲一郎 (1962) 津軽海峡および噴火湾におけるカタクチイワシ群について. 北大水産彙報 **13**, 63–81.
- 木下哲一郎 (1977) 鰓耙数からみた北日本産のカタクチイワシ群-2-地域間の比較. 北大水産彙報 **28**, 127–136.
- 木下泉 (2006) 浮魚資源・生態研究におけるシラス漁場調査の重要性. 黒潮の資源海洋研究 **7**, 3–12.
- 気象庁 (1981) 海洋生物 気象庁 (編) 海洋観測指針 第 9 章, 211–268.
- 気象庁 (1999) プランクトンの観測 気象庁 (編) 海洋観測指針 第 6 章, 105–122.

- 小林喜雄・阿部晃治 (1962) 北海道南東海区における潮境の幼稚魚. 北大水産彙報 **8**, 165–179.
- 国立研究開発法人水産総合研究センター (2015) 平成 27 年度 第 2 回 太平洋いわし類・マアジ・さば類長期漁海況予報. 1–23.
- Kollros J J (1961) Mechanisms of amphibian metamorphosis: Hormones. *Am Zool* **1**, 107–114.
- Kramer D and Zweifel J R (1970) Growth of anchovy larvae (*Engraulis mordax* Girard) in the laboratory as influenced by temperature. *CalCOFI Reports* **14**, 84–87.
- Kreiner A, Yemane D, Stenevik E K, and Moroff N E (2011) The selection of spawning location of sardine (*Sardinops sagax*) in the northern Benguela after changes in stock structure and environmental conditions. *Fish Oceanogr* **20**, 560–569.
- 久保治良 (1988) 常磐南部から鹿島灘海域の海況特性. 茨城水試研報 **26**, 1–98.
- 久保田洋 (2003) 黒潮親潮移行域における小型浮魚類仔稚魚を取り巻く群集生態に関する研究. 東京水産大学博士論文.
- 久保田洋 (2012) カタクチイワシ太平洋系群の長期的な資源動向から推測される生態特性. 黒潮の資源海洋研究 **13**, 27–32.
- 黒田啓行・大下誠二・安田十也 (2014) 平成 25 年度カタクチイワシ対馬暖流系群の資源評価. 水産庁増殖推進部・独立行政法人水産総合研究センター (編). 我が国周辺水域における漁業資源評価. 803–822.
- 黒山忠明・八角直道・二平章 (2006) 鹿島灘海域におけるカタクチイワシシラスの来遊機構の検討. 黒潮の資源海洋研究 **7**, 43–48.
- Lasker R (1981) The role of a stable ocean in larval fish survival and subsequent recruitment. In: *Marine Fish Larvae: Morphology, Ecology and Relation to Fisheries* 79–87.
- Laurel B J, Danley C, and Haines S (2014) The effects of temperature on growth, development and settlement of northern rock sole larvae (*Lepidopsetta polyxystra*). *Fish Oceanogr* **23**, 495–505.
- Liewes E W (1984) *Culture, Feeding and Diseases of Commercial Flatfish Species*. CRC Press.
- Lluch-Belda D, Lluch-Cota D B, Hernandez-Vazquez S, Salinas-Zavala C A, and Schwartzlose R A (1991) Sardine and anchovy spawning as related to temperature and upwelling in the California Current system. *CalCOFI Reports* **32**, 105–111.
- 松尾精彦 (2004) Vuong test とその正規線形モデルへの適用法. 関西大学経済論集 **54**, 39–60.
- Mantua N J, Hare S R, Zhang Y, Wallace J M, and Francis R C (1997) A Pacific Interdecadal Climate Oscillation with Impacts on Salmon Production. *Bull Am Meteorol Soc* **78**, 1069–1079.

- McCormick M and Molony B (1995) Influence of water temperature during the larval stage on size, age and body condition of a tropical reef fish at settlement. *Mar Ecol Prog Ser* **118**, 59–68.
- Michel S, Treguier A-M, and Vandermeirsch F (2009) Temperature variability in the Bay of Biscay during the past 40 years, from an in situ analysis and a 3D global simulation. *Cont Shelf Res* **29**, 1070–1087.
- 三原行雄 (1994) 道東太平洋海域におけるカタクチイワシの卵・仔魚の分布. 北水試研報 **44**, 1–8.
- 三原行雄 (1998) 道東太平洋海域におけるカタクチイワシの分布. 北水試研報 **53**, 9–14.
- 三原行雄 (2000) 道東太平洋およびその周辺海域におけるカタクチイワシの成熟. 水産海洋研究 **64**, 10–17.
- 三谷勇 (1990) 相模湾におけるカタクチイワシシラスの漁業生物学的研究. 神奈川水試論文集 **5**, 1–140.
- Miyazawa Y, Zhang R, Guo X, Tamura H, Ambe D, Lee J S, Okuno A, Yoshinari H, Setou T, and Komatsu K (2009) Water mass variability in the western North Pacific detected in a 15-year eddy resolving ocean reanalysis. *J Oceanogr* **65**, 737–756.
- 森慶一郎・黒田一紀・芳信小西 (1988) 日本の太平洋岸（常磐-薩南海域）におけるマイワシ, カタクチイワシ, サバ類の月別, 海域別産卵状況: 1978 年 1 月-1986 年 12 月. 東北水研業績 D **12**, 1–321.
- 森泰雄・稲川亮・佐藤充 (2014) マサバ・マイワシ平成 25 年度 道総研釧路水試事業報告, 釧路水産試験場, 47–66.
- Moser H G, Charter R L, Smith P E, Ambrose D A, Watson W, Charter S R, and Sandknop E M (2002) Distributional atlas of fish larvae and eggs from Manta (surface) samples collected on CalCOFI surveys from 1977 to 2000. *CalCOFI Atlas* **35**, 2–94.
- 村上眞裕美 (1993) 東北海区近海における黒潮続流流軸を指標する 100 m 深水温について. 海の研究 **2**, 343–349.
- Nagasawa K and Azuma T (1992) A record of the Japanese anchovy *Engraulis japonicus* from the stomachs of salmonids in offshore waters of the north Pacific Ocean. *Bull Biogeographic Soc Japan* **47**, 123–125.
- 長沢工 (1999) 日の出・日の入りの計算. 東京: 地人書館.
- 永島宏 (2007) 宮城県沿岸域におけるカタクチイワシの資源構造. 宮城水産研報 **7**, 1–8.
- 中村元彦 (2002) 2001 年夏季の伊勢湾におけるカタクチイワシの産卵場からシラス漁場への仔魚の輸送と流動. 黒潮の資源海洋研究 **3**, 69–74.
- Nishibe Y, Isami H, Fukuda H, Nishida S, Nagata T, Tachibana A, and Tsuda A (*in press*) Impact of the 2011 Tohoku earthquake tsunami on zooplankton community in Otsuchi Bay, northeastern Japan. *J Oceanogr*.
- Nishikawa H and Yasuda I (2008) Japanese sardine (*Sardinops melanostictus*) mortality in relation to the winter mixed layer depth in the Kuroshio Extension region. *Fish Oceanogr* **17**, 411–420.

- Noto M and Yasuda I (1999) Population decline of the Japanese sardine, *Sardinops melanostictus*, in relation to sea surface temperature in the Kuroshio Extension. *Can J Fish Aquat Sci* **56**, 973–983.
- 農林水産省大臣官房統計部 (2011). 漁業養殖業生産統計年報.
- 小達繁 (1957) 東北海区に於けるカタクチイワシに就いて. 東北海区水産研究所研究報告 **94**, 111–128.
- 小達和子 (1994) 東北海域における動物プランクトンの動態と長期変動に関する研究. 東北水研研報 **56**, 115–173.
- 沖山宗雄 (1979) 稚魚分類学入門 III: イワシ型変態と近似現象. 海洋と生物 **3**, 61–66.
- Okunishi T, Ito S, Ambe D, Takasuka A, Kameda T, Tadokoro K, Setou T, Komatsu K, Kawabata A, Kubota H, Ichikawa T, Sugisaki H, Hashioka T, Yamanaka Y, Yoshie N, and Watanabe T (2012) A modeling approach to evaluate growth and movement for recruitment success of Japanese sardine (*Sardinops melanostictus*) in the western Pacific. *Fish Oceanogr* **21**, 44–57.
- Oozeki Y, Kimura R, Kubota H, and Ishida M (2001) Modified neuston net for collecting larvae and juveniles of Pacific saury, *Cololabis saira*. *Bull Jpn Soc Fish Oceanogr* **65**, 1–5.
- Oozeki Y, Watanabe Y, and Kitagawa D (2004) Environmental factors affecting larval growth of Pacific saury, *Cololabis saira*, in the northwestern Pacific Ocean. *Fish Oceanogr* **13**, 44–53.
- Palomera I, Moralesnin B, and Lleonart J (1988) Larval Growth of Anchovy, *Engraulis encrasicolus*, in the Western Mediterranean-Sea. *Mar Biol* **99**, 283–291.
- Power D M, Llewellyn L, Faustino M, Nowell M A, Bjornsson B T, Einarisdottir I E, Canario A V M, and Sweeney G E (2001) Thyroid hormones in growth and development of fish. *Comp Biochem Physiol C* **130** 447–459.
- Robert D, Castonguay M, and Fortier L (2007) Early growth and recruitment in Atlantic mackerel *Scomber scombrus*: Discriminating the effects of fast growth and selection for fast growth. *Mar Ecol Prog Ser* **337**, 209–219.
- Rodionov S N (2004) A sequential algorithm for testing climate regime shifts. *Geophys Res Lett* **31**, No. L09204.
- 清水昭男 (2006) 魚類の生殖周期と水温等環境条件との関係. 水研センター研報 別冊 4, 1–12.
- 須原三加・森泰雄・三原行雄・山本昌幸・川端淳・高橋素光・勝川木綿・片山知史・山下洋・河村知彦・渡邊良朗 (2013) カタクチイワシの繁殖特性の海域間比較. 日水誌 **79**, 813–822.
- 鈴木達也・富永敦 (1993) 近年の常磐～房総海域におけるカタクチイワシの漁況動向. 水産海洋研究 **57**, 8–11.
- Takahashi M and Watanabe Y (2004a) Developmental and growth rates of Japanese anchovy *Engraulis japonicus* during metamorphosis in the Kuroshio-Oyashio transitional waters. *Mar Ecol Prog Ser* **282**, 253–260.
- Takahashi M and Watanabe Y (2004b) Growth rate-dependent recruitment of Japanese anchovy *Engraulis japonicus* in the

- Kuroshio-Oyashio transitional waters. *Mar Ecol Prog Ser* **266**, 227–238.
- Takahashi M and Watanabe Y (2004c) Staging larval and early juvenile Japanese anchovy based on the degree of guanine deposition. *J Fish Biol* **64**, 262–267.
- Takahashi M, Watanabe Y, Kinoshita T, and Watanabe C (2001) Growth of larval and early juvenile Japanese anchovy, *Engraulis japonicus*, in the Kuroshio-Oyashio transition region. *Fish Oceanogr* **10**, 235–247.
- Takahashi M and Watanabe Y (2005) Effects of temperature and food availability on growth rate during late larval stage of Japanese anchovy (*Engraulis japonicus*) in the Kuroshio-Oyashio transition region. *Fish Oceanogr* **14**, 223–235.
- Takahashi M, Watanabe Y, Yatsu A, and Nishida H (2009) Contrasting responses in larval and juvenile growth to a climate-ocean regime shift between anchovy and sardine. *Can J Fish Aquat Sci* **66**, 972–982.
- Takasuka A, Kubota H, and Oozeki Y (2008a) Spawning overlap of anchovy and sardine in the western North Pacific. *Mar Ecol Prog Ser* **366**, 231–244.
- Takasuka A, Oozeki Y, and Kubota H (2008b) Multi-species regime shifts reflected in spawning temperature optima of small pelagic fish in the western North Pacific. *Mar Ecol Prog Ser* **360**, 211–217.
- 高須賀明典・英男坂地・久保田洋 (2011) 2010～2011 年春季の我が国太平洋岸におけるカタクチイワシ卵仔魚の分布. 中央ブロック卵・稚仔・プランクトン調査研究担当者協議会研究報告, No. 31 独立行政法人水産総合研究センター中央水産研究所, 平成 23 年 10 月, 109–123.
- 高須賀明典 (編) (2012) 中央ブロック卵・稚仔、プランクトン調査研究担当者協議会研究報告, No. 32 独立行政法人水産総合研究センター中央水産研究所, 平成 24 年 10 月, 1–179.
- 高須賀明典 (編) (2015) 中央ブロック卵・稚仔、プランクトン調査研究担当者協議会研究報告, No. 35 国立研究開発法人水産総合研究センター中央水産研究所, 平成 27 年 10 月, 1–179.
- Theilacker G H (1980) Changes in body measurements of larval northern anchovy, *Engraulis mordax*, and other fishes due to handling and preservation. *Fish Bull* **78**, 685–692.
- 富永敦 (1994) 鹿島灘海域に來遊する夏秋季発生のカタクチイワシシラス漁獲量と親魚群の量について. 茨城水試研報 **32**, 93–99.
- 富永敦・二平彰 (1997) 鹿島灘におけるカタクチイワシシラスの魚群分布と海洋環境. 茨城水試研報 **35**, 13–18.
- 富永敦・二平彰 (1999a) カタクチイワシ仔稚魚における変態時体長および日齢の季節発生群間の相違. 茨城水試研報 **37**, 47–53.
- 富永敦・二平彰 (1999b) 鹿島灘におけるカタクチイワシシラス春季発生群の成長履歴. 茨城水試研報 **37**, 61–69.

- Tsuji S and Aoyama T (1984) Daily growth increments in otoliths of Japanese anchovy larvae *Engraulis japonica*. *Bull Japan Soc Sci Fish* **50**, 1105–1108.
- Tsukamoto K, Chow S, Otake T, Kurogi H, Mochioka N, Miller M J, Aoyama J, Kimura S, Watanabe S, Yoshinaga T, Shinoda A, Kuroki M, Oya M, Watanabe T, Hata K, Ijiri S, Kazeto Y, Nomura K, and Tanaka H (2011) Oceanic spawning ecology of freshwater eels in the western North Pacific. *Nat Commun* **2**, 179.
- 辻祥子 (1983) 日齢を指標とした相模湾におけるカタクチイワシ稚仔のシラス漁場への加入機構の研究. 東京大学博士論文.
- 鶴田義成 (1992) カタクチイワシの成熟・産卵と再生産力の調節に関する研究. 水工研研報 **13**, 168–192.
- 鶴田義成・高橋章策 (1997) 黒潮続流域および混合水域におけるカタクチイワシ *Engraulis japonicus* H の産卵生態. 北水研報告 **61**, 9–15.
- 内田恵太郎・道津喜衛 (1958) 対馬暖流域の表層に現われる魚卵・稚魚概説. 対馬暖流開発調査報告書 第2輯, 3–65.
- Uehara K, Miyake H, and Okazaki M (1997) Characteristics of the Flows in the Oyashio Area off Cape Erimo, Hokkaido, Japan. *J Oceanogr* **53**, 93–103.
- 魚谷逸朗・岩川敬樹・川口弘一 (1993) イワシシラス漁場形成機構に果たす濁度の重要性. 日水誌 **60**, 73–78.
- Uye S (1982) Length-weight relationships of important zooplankton from the Inland Sea of Japan. *J Oceanogr Soc Japan* **38**, 149–158.
- Uye S, Nagano N, and Tamaki H (1996) Geographical and seasonal variations in abundance, biomass and estimated production rates of microzooplankton in the Inland Sea of Japan. *J Oceanogr* **52**, 689–703.
- van der Lingen C D (1994) Effect of particle size and concentration on the feeding behaviour of adult pilchard *Sardinops sagax*. *Mar Ecol Prog Ser* **109**, 1–13.
- van der Lingen C D, Hutchings L, and Field J G (2006) Comparative trophodynamics of anchovy *Engraulis encrasicolus* and sardine *Sardinops sagax* in the southern Benguela: are species alternations between small pelagic fish trophodynamically mediated? *African J Mar Sci* **28**, 465–477.
- 渡部泰輔 (1977) カタクチイワシ本州太平洋系群の再生産と環境. 関東・東海ブロック水産海洋連絡会報 **3**, 33–39.
- 渡部泰輔 (1983) 卵数法. 水産資源の解析と評価. 恒星社厚生閣, 9–29.
- Watanabe Y, Zenitani H, and Kimura R (1995) Population decline of the Japanese sardine *Sardinops melanostictus* owing to recruitment failures. *Can J Fish Aquat Sci* **52**, 1609–1616.
- Watanabe Y, Zenitani H, and Kimura R (1996a) Offshore expansion of spawning of the Japanese sardine, *Sardinops melanost-*

- tictus*, and its implication for egg and larval survival. *Can J Fish Aquat Sci* **53**, 55–61.
- Watanabe Y, Zenitani H, and Kimura R (1996b) Causes of population decline in the Japanese sardine (*Sardinops melanostictus*): Overfishing or early mortality? In: Watanabe Y, Yamashita Y, and Oozeki Y (eds), *Survival Strategies in Early Life Stages of Marine Resources* CRC Press, 83–94.
- Watanabe Y and Kuroki T (1997) Asymptotic growth trajectories of larval sardine (*Sardinops melanostictus*) in the coastal waters off western Japan. *Mar Biol* **127**, 369–378.
- Watanabe Y (2007) Latitudinal variation in the recruitment dynamics of small pelagic fishes in the western North Pacific. *J Sea Res* **58**, 46–58.
- Watanabe Y, Suzuki T, and Tsuno K (2013) Temperature determines growth rates of larval round herring *Etrumeus teres* in the Pacific coastal waters off southern Japan. *Fish Sci* **79**, 757–766.
- Watanabe Y, Ochiai S, and Fukamichi K (2014) Larval growth rates differ in response to seasonal temperature variations among clupeoid species inhabiting the Pacific coastal waters of Japan. *Fish Sci* **80**, 43–51.
- Watanuki Y and Ito M (2012) Climatic effects on breeding seabirds of the northern Japan Sea. *Mar Ecol Prog Ser* **454**, 183–196.
- Whitehead P J P (1985) King Herring - His Place Amongst the Clupeoids. *Can J Fish Aquat Sci* **42**, 3–20.
- 八木宏・身崎成紀・灘岡和夫・中山哲蔵・二平章 (2001) 夏季鹿島灘沿岸域におけるメソスケールの外洋環境に関する現地観測. 茨城水試研報 **39**, 85–98.
- Yasue N and Takasuka A (2009). Seasonal variability in growth of larval Japanese anchovy *Engraulis japonicus* driven by fluctuations in sea temperature in the Kii Channel, Japan. *J Fish Biol*, **74**, 2250–2268.
- Yasue N, Takasuka A, and Shirakihara K (2011) Interspecific comparisons of growth and diet among late larvae of three co-occurring clupeoid species in the Kii Channel, Japan. *Mar Biol* **158**, 1709–1720.
- Yasue N, Harada S, and Takasuka A (2015) Seasonal variability in development of Japanese anchovy *Engraulis japonicus* during the transition from larval to juvenile stages in the Kii Channel. In: symposium abstracts of *Growth-survival paradigm in early life stages of fish*, p 59.
- 八角直道 (2011) 冬春季常磐・房総海域に来遊するカタクチイワシ大型成魚の資源水準と太平洋岸域における春シラスの資源豊度との関係. 茨城水試研報 **42**, 15–20.
- Zenitani H and Kimura R (1997) Increase in late winter egg production of the Japanese anchovy as related to recovery of the stock size along the Pacific coast of Japan. *Nippon Suisan Gakkaishi* **63**, 665–671.

- Zenitani H, Kono N, Tsukamoto Y, and Masuda R (2009) Effects of temperature, food availability, and body size on daily growth rate of Japanese anchovy *Engraulis japonicus* larvae in Hiuchi-nada. *Fish Sci* **75**, 1177–1188.