

西部太平洋におけるカツオ当歳魚の成長と  
回遊生態に関する研究

2006

東京大学農学生命科学研究科水圏生物学専攻  
嘉山 定晃

指導教員 東京大学教授  
渡邊 良朗

# 目次

## 第1章 緒論

- 1. カツオ漁業 . . . . . 1
- 2. カツオの生物学的特性と発達段階
- 3. カツオの成長
- 4. カツオの回遊
- 5. 西部太平洋の海洋環境
- 6. 本研究の目的

## 第2章 耳石の標本作成方法と形態変化

- はじめに . . . . . 13
- 材料と方法 . . . . . 15
  - 1. 供試魚の採集・漁獲と保存
  - 2. 耳石の摘出と保存
- 結果 . . . . . 17
  - 1. 耳石標本作成法
  - 2. 成長に伴う耳石の形態変化
- 考察 . . . . . 19
  - 1. 日輪解析のための耳石標本作成手法
  - 2. 耳石の形態と微細輪紋

## 第3章 耳石微細輪紋形成の日周性

- はじめに . . . . . 34
- 材料と方法 . . . . . 35
  - 1. 2000年の飼育実験
  - 2. 2001年の飼育実験
  - 3. 耳石微細輪紋の観察と計測
  - 4. 統計検定

結果	・ ・ ・ ・ ・ 37
1. 2000 年の飼育実験	
2. 2001 年の飼育実験	
考察	・ ・ ・ ・ ・ 39
1. 飼育実験中の成長速度	
2. カツオ耳石における日輪形成の検証	

#### 第 4 章 太平洋各海域で漁獲されたカツオの成長

はじめに	・ ・ ・ ・ ・ 46
材料と方法	・ ・ ・ ・ ・ 46
1. 供試魚	
2. 耳石日輪の計数・計測	
3. Gompertz の成長式の推定	
4. 耳石日輪間隔の海域間比較	
結果	・ ・ ・ ・ ・ 49
1. 耳石半径と尾叉長の関係	
2. 漁法による漁獲個体の体長差の検討	
3. 仔魚期から幼魚期の日齢と尾叉長の関係	
4. 未成魚および成魚の日齢と尾叉長の関係	
5. 日輪間隔の海域間比較	
考察	・ ・ ・ ・ ・ 51
1. 耳石半径と尾叉長の関係	
2. 稚魚期と幼魚期の成長過程	
3. 未成魚期と成魚期の成長過程	
4. 各海域で漁獲されたカツオの日輪間隔の変化	

#### 第 5 章 西部太平洋におけるカツオ当歳魚の回遊と成長・成熟

はじめに	・ ・ ・ ・ ・ 71
材料と方法	・ ・ ・ ・ ・ 72

1. 耳石日輪間隔と日輪半径を測定した標本
2. 北上回遊群と熱帯滞留群の孵化日推定に用いた標本
3. 耳石日輪間隔と日輪半径の測定
4. 肥満度
5. 生殖腺重量指数

結果 . . . . . 75

1. 北上回遊群と熱帯滞留群の成長過程
2. 北上回遊群と熱帯滞留群の孵化時期
3. 北赤道海流域と赤道反流域におけるカツオの初期成長
4. 産卵場における仔稚魚の初期成長と北上回遊群、熱帯滞留群との対応
5. 赤道海域における成魚の初期成長
6. オセアニア温帯海域で漁獲されたカツオの耳石日輪半径と孵化時期
7. 肥満度
8. 生殖腺重量指数

考察 . . . . . 79

1. 北上回遊群と熱帯滞留群の成長過程
2. 北上回遊群と熱帯滞留群の発生海域
3. 熱帯海域の成魚群中における北上回遊群と熱帯滞留群の割合
4. 海域の生産力とカツオの成長、成熟

## 第6章 総合考察

1. 西部太平洋における北上（南下）回遊群と熱帯滞留群 . . . . . 111
2. 西部太平洋におけるカツオの生活史特性
3. カツオの資源評価

要約 . . . . . 116

謝辞 . . . . . 119

文献 . . . . . 121

# 第1章 緒論

## 1. カツオ漁業

カツオ *Katsuwonus pelamis* の漁獲量は、熱帯海域のカツオ漁業に大型まき網が導入された 1980 年代以降増加の一途をたどり、2002 年には約 200 万トンに達した。2002 年のカツオの漁獲量は、ペルー沖のカタクチイワシ *Engraulis ringens*、スケトウダラ *Theragra chalcogramma* に次いで魚種別漁獲量第 3 位であった (FAO 2004)。中西部太平洋における漁獲量は、1970 年代まで約 40 万トンであったが、新規漁業国の参入と漁具の改良に加え、操業機器の開発・改良 (低温活餌槽、海鳥レーダー、ソナー、人工浮漁礁等) と情報収集能力の向上 (衛星情報、インターネット) によって (小倉 2005)、1991 年以降約 100 万トンに増大し (図 1-1)、2003 年には暫定集計値で 129 万トンに達した (Secretariat of the Pacific Community 2004)。現在のカツオ漁業国は、日本を初めとして台湾、韓国、中国、アメリカ合衆国などの遠洋漁業国と、インドネシア、フィリピン、モルジブなどの多数の沿岸漁業国からなる。また、多くの漁法によって漁獲されており、中西部太平洋における 2003 年の漁法別漁獲量は、まき網 95 万トン、竿釣り 25 万トン、その他の漁法 (曳縄・延縄) 7 万トンである (Secretariat of the Pacific Community 2004)。北緯 30~45 度の日本周辺海域における年間漁獲量は、1970 年代以降 15~20 万トンで、そのうち、東北海域 (野島崎南東線、北緯 28 度線、東経 160 度線、北緯 45 度線で囲まれる海域 (東北水研 1957)) が約 10 万トンを占めている。日本周辺海域においても 1980 年代後半からまき網による漁獲量が増加し、この海域の年間漁獲量の半分近くを占める年もある (小倉 2005)。

まき網と竿釣りの CPUE (catch per unit effort) の経年変化から、中西部太平洋のカツオ資源は 1988 年以降比較的安定した状態にあると判断される (Ogura and Shono 1999, Langley *et al.* 2003, Secretariat of the Pacific Community 2003)。年によって加入量に変動があるものの、漁獲量、漁獲努力量、漁獲物の体長組成、標識放流再捕結果から、2003 年のカツオの資源量は 700 万トン以上と推定された (Langley *et al.* 2003)。現在のところ、中西部太平洋のカツオ資源に対する漁獲制限は行われていない。

## 2. カツオの生物学的特性と発達段階

カツオは北緯 45 度～南緯 45 度の西部太平洋、北緯 30 度～南緯 30 度の東部太平洋、南緯 45 度以北の全インド洋の表面水温 15 °C以上の海域に広く分布する (Matsumoto *et al.* 1984, 図 1-2)。太平洋では中西部と東部の熱帯海域および日本周辺海域が主漁場であり、インド洋ではデカン半島周辺海域からモルジブ近海とアフリカ大陸の東の熱帯海域が主漁場である (FAO 2004)。

生物学的最小形は、400～450 mm FL (Fork length : 尾叉長) である (Marr 1948, Brock 1954, Raju 1964, Simmons 1969, 永沼 1979)。西部太平洋に限れば、400 mm FL で成熟を開始し、400～450 mm FL の間に最初の産卵を行うと考えられる (川崎 1965, 永沼 1979, Matsumoto *et al.* 1984, 小倉 2005)。漁獲されたカツオの最大体長としては、1084 mm FL (Miyake 1968) や 1270 mm FL (Yao 1981) などの報告がある。

赤道海域を中心に全世界の表面水温が 25°C以上になる海域で仔魚が採集されることから、カツオの産卵場は表面水温が 25°C以上になる海域であるとされる。インド洋と太平洋では北緯 35 度～南緯 35 度の海域で仔魚が採集されている (Jones and Kumaran 1963, 上柳 1969, 西川ら 1985)。Matsumoto *et al.* (1984) は、カツオの産卵期が太平洋の熱帯海域では周年にわたるのに対し、亜熱帯海域になると春～初秋に限られ、高緯度海域ほど短くなるとしている。また、Brock (1949) と Buñag (1956) がハワイ周辺海域とフィリピン周辺海域で周年採集した雌の卵母細胞径を計測した結果、産卵が周年にわたって行われていることを明らかにした。永沼 (1979) は、西部太平洋で漁獲したカツオ成魚の体長と生殖腺重量の関係から GI (生殖腺指数 = 生殖腺重量 g  $\times 10^6$  / 尾叉長 mm) を推定した。その結果、成熟魚は 4～9 月には北緯 35 度～南緯 15 度の間の海域に分布し、10～3 月には北緯 22 度～南緯 24 度に分布し、季節的に南北に移動することを示した。また、西部インド洋熱帯海域におけるカツオの GSI (生殖腺重量指数 = 生殖腺重量 g  $\times 10^2$  / 体重 g) は、5月中旬～8月中旬の夏の雨季と 10月中旬～3月までの冬の雨季に高い値を示した (Stéquert *et al.* 2001)。1972 年 8 月 19 日に伊豆半島石廊崎南南西 39 海里の北緯 34 度 05 分、東経 138 度 40 分付近の海域で漁獲された成魚から熟卵を得たことから (上柳ら 1974)、日本周辺

海域においてもカツオが産卵していると考えられた（落合・田中 1996）。

以上のように、インド・太平洋におけるカツオの産卵は北緯 35 度～南緯 35 度の広い範囲において行われている。カツオの卵母細胞は非同時発生型の発達様式を示す（浅野・田中 1971）。成熟雌を飼育して個体別に産卵回数を観察した結果、産卵と産卵の間隔は平均 1.18 日であり、自然環境下でも高い頻度で産卵が繰り返されている可能性が示された（Hunter *et al.* 1986）。しかし、1 個体がどれほどの期間にわたって産卵を継続するかは明らかにされていない。日本周辺海域に來遊するカツオの発生海域や発生時期は、表面水温 25℃以上の西部太平洋熱帯海域とされているが（上柳 1969, 西川ら 1985）、その詳細は明らかではない。

人工受精によって得られたカツオの分離浮性卵は、水温 27.1～27.5℃において約 25 時間で孵化した（上柳ら 1974）。受精卵は孵化直前に沈降し、仔魚は頭部で卵膜を破って孵化した（井上ら 1974）。上柳ら（1974）によれば、孵化直後のカツオ仔魚は約 2.6 mm TL（Total length：全長）であり、12 mm TL 前後で背鰭と臀鰭の鰭条数が定数に達して稚魚となる（Matsumoto *et al.* 1984, 落合・田中 1998）。鰓耙数は 100 mm SL（Standard length：標準体長）を超えると定数に達する（青木 1999）。田邊（2002）は、カツオの特徴である紡錘型の体型と背部の色から、幼魚期の始まりは 100 mm SL 前後とするのが適切であると述べ、10 mm SL までを仔魚、100 mm SL までを稚魚、100 mm SL 以上を幼魚とした。Waldron（1963）は 200～250 mm FL で成魚と同様の体色・体型を獲得すると述べている。

以上の知見を考慮して、本研究では、10 mm FL までを仔魚、10～100 mm FL を稚魚、100～250 mm FL を幼魚、250～450 mm FL を未成魚、450 mm FL 以上を成魚と定義した。

### 3. カツオの成長

カツオの成長に関する多くの研究では、群の尾叉長組成の経時的変化によって成長速度を推定する体長組成法が用いられた（Brock 1954, 横田ら 1961, 川崎 1965, Joseph and Calkins 1969, Yoshida 1971, Yao 1981, 田中 1989, 二平 1996）。この手法では漁獲物の尾叉長の変化を追跡できるが、漁獲加入時の年齢を推定することはできないので、漁獲加入時の年齢を仮定し、その後の成長速度を推定

しなければならなかった。1歳時の尾叉長推定値には、東北海域における漁獲加入時の体長モード(450 mm FL)を2歳と仮定して得られた150 mm FLから(川崎 1965)、南西諸島周辺海域、五島列島周辺海域、伊豆小笠原諸島周辺海域、東北海域において漁獲対象となる群の体長モード(420 mm FL)を1歳と仮定して得られた420 mm FLまで(Yao 1981)大きな差があった。

標識放流法(Schaefer 1961, Joseph and Calkins 1969, Josse *et al.* 1979, Bayliff 1988, Hampton 2000)では、放流時と再捕時の体長の差と経過した時間から成長速度を推定する。しかし、放流時の年齢は、他の研究結果に依らなければならないという限界がある。また、300 mm FL未満の未成魚に標識を装着することは技術的に難しく(田邊 2002)、成長が速い300 mm FL未満の個体の成長速度は推定できなかった。

カツオの脊椎骨椎体の内面には、脊索孔を中心に同心円状の輪紋が観察できる。この輪紋を年輪と仮定して、沖縄周辺海域から東北地方の沖合海域に至る北西太平洋の各海域から採集したカツオは、満1歳で260 mm FL、満2歳で340 mm FL、満3歳で430 mm FL、満4歳で540 mm FLに達すると推定された(相川 1937)。また、相川・加藤(1938)は、パラオ周辺海域で採集されたカツオについて同様の手法で年齢査定を行い、満4歳までの成長が日本周辺海域とほぼ等しいと推定した。しかし、Chi and Yang(1973)は、台湾南のバシー海峡で採集されたカツオの脊椎骨椎体には、1年間に2本の輪紋が形成されることを証明し、その結果に基づいて同海域で漁獲されたカツオが満1歳で270 mm FL、満2歳で470 mm FL、満3歳で630 mm FLに達すると推定した。温帯海域に分布するビンナガ *Thunnus alalunga* の脊椎骨椎体には年輪が存在する(Tamio and Uchida 1959)のに対して、熱帯海域から温帯海域の一部に分布するキハダ *Thunnus albacares* の脊椎骨椎体には、1年間に2本の輪紋が形成される(Chong *et al.* 1965)。熱帯海域で発生して温帯海域へ回遊するカツオの脊椎骨椎体の輪紋が年輪であるか否か確認する必要がある。

Batts(1972)は、西部大西洋で採集したカツオの第1背鰭第1棘の横断面に見られる輪紋が年輪である可能性を縁辺成長率の経年変化によって示し、輪紋数と尾叉長の関係から1歳時の体長を410 mm FLと推定した。また、Sosa-Nishizaki *et al.*(1989)は、第2背鰭第1棘の横断面の輪紋についても年輪

である可能性を示した。しかし、Antoine *et al.* (1983) は、第 1 背鰭第 1 棘には 1 年に 2 本の輪紋が形成されることを証明し、さらに 500 mm FL 以上の個体の背鰭棘の中心に近い部分では硬組織が血管に置き換わるため、輪紋が不明瞭になると述べた。また、クロマグロ *Thunnus orientalis* やスマ属のニシヤイト *Euthynnus alletteratus* の高齢魚についても、背鰭棘の中心部が血管化し、中心部の輪紋が不明瞭になることが知られている (Compeán-Jimenez and Bard 1983, Johnson 1983)。これらのことから、背鰭棘の輪紋による年齢査定は信頼性に欠けると考えられる。

多くの硬骨魚類で耳石に日輪が形成されることが知られ、日齢査定法が確立されている (Jones 1986)。Radtke (1983) は、人工孵化によって得た孵化直後から孵化後 5 日までの 3~4 mm TL の仔魚の耳石を光学顕微鏡と走査型電子顕微鏡で観察した結果、孵化後 24 時間以内に第 1 輪が形成され、孵化後 5 日まで 1 日 1 本の割合で微細輪紋が増加したことを報告した。Tanabe *et al.* (2003) は、西部太平洋熱帯海域で採集した 12.9~39.8 mm SL の稚魚の耳石を観察した。Radtke (1983) が観察した耳石核付近の間隔の狭い 5 本程度の微細輪紋の外側には間隔 15~40  $\mu\text{m}$  の微細輪紋が観察され、縁辺成長率の経時的変化を調べた結果、この微細輪紋が日輪であることがわかった。日齢と標準体長の関係から推定した成長速度は、赤道反流域で 2.8 mm/day であったのに対し、北フィジー海盆では 1.7 mm/day であった。田邊 (2002) は、西部太平洋熱帯海域で採集された 3.3~57.7 mm SL の仔稚魚について成長速度を推定した結果、仔魚期の成長速度は 0.55 mm/day であったが、孵化後 10~12 日で稚魚期に移行すると成長速度が 2.5~3.3 mm/day と高くなった。

Uchiyama and Struhsaker (1981) は、ハワイ近海で採集されたカツオ (450~493 mm FL) を水槽内で飼育し、絶食によって耳石にチェックマークを形成させることで、成魚の耳石に形成される間隔 1~3  $\mu\text{m}$  の狭い微細輪紋形成の日周性を調べた。その結果、チェックマークの外側の微細輪紋数は絶食後の飼育日数と統計的には差がなかった。しかし、供試個体数の少なさなどから著者は再実験が必要であると述べている。この結果に基づいて Uchiyama and Struhsaker (1981) は、中部太平洋のライン諸島およびハワイ近海で採集された 51 個体 (37~803 mm FL) の耳石日輪を計数し、孵化後 1 年で 440 mm FL、2 年で 680 mm FL に成

長すると報告している。

Wild and Foreman (1980)、Wild *et al.* (1995)、Adam (1995) は、成魚の耳石に形成される間隔の狭い微細輪紋 (図 2-6) の日周性を検証するために、420～640 mm FL のカツオにオキシテトラサイクリン (OTC) を筋肉注射してから放流した。再捕された個体の耳石に観察される OTC 蛍光帯と縁辺の間の微細輪紋数が放流後の経過日数よりも少なかったことから、成魚に形成される微細輪紋には日周性がないと述べた。

Leroy (2000) は、パプアニューギニア周辺海域においてまき網で漁獲されたカツオ 57 個体 (300～610 mm FL) の耳石微細輪紋を日輪と仮定して微細輪紋数を計数し、孵化後 1 年で 560 mm FL に成長すると推定した。また、成熟体長を 450 mm FL として (Matsumoto *et al.* 1984)、この海域のカツオは孵化後 5～6 ヶ月で成熟すると推定した。

以上述べたように、仔魚期～幼魚期の前半に耳石に形成される間隔 1～4  $\mu\text{m}$  および 15～40  $\mu\text{m}$  の微細輪紋が日輪であることが確認され、知見の蓄積がすすんでいる。しかし、幼魚期の後半以降に形成される間隔 1～3  $\mu\text{m}$  の微細輪紋については形成の日周性に未だ疑問が残っており、太平洋各海域におけるカツオの成長過程や 1 歳時の体長については、一致した見解が得られていない。

#### 4. カツオの回遊

国連海洋法条約においてカツオ・マグロ類、カジキ類、サンマ *Cololabis saira*、クジラ類などは、排他的経済水域や公海を越えて回遊する高度回遊性魚類と位置づけられ、これらの種を漁獲する国は、当該種の資源を管理し永続的に保存、利用するため、国際機関を通じて協力しなければならないと記述されている (財団法人日本海洋協会 1997)。我が国では古くから西部太平洋におけるカツオの回遊に関する研究が行われてきた (川崎 1965, 笠原 1976, 二平 1996)。熱帯海域では周年にわたり仔魚と成熟魚が採集されることから、カツオの産卵海域は亜熱帯から熱帯海域であると考えられた (永沼 1979, Matsumoto *et al.* 1984, 西川ら 1985)。また、西部太平洋の北緯 25 度以南の熱帯海域で標識放流されたカツオが温帯海域の黒潮親潮移行域で再捕されることから、熱帯海域から温帯海域まで北上回遊する北上回遊群の存在が知られている (Langley *et al.* 2003)。二平

(1996)によると、黒潮親潮移行域に北上回遊した群のうち秋までに 450 mm FL の成熟体長に達した個体の多くは、産卵のため熱帯海域に戻る。成熟体長に達しなかった個体は、南日本の太平洋岸の黒潮内側域まで南下して越冬し、翌年の初夏～夏に再び黒潮親潮移行域に来遊する。本研究では、北緯 30 度以北の日本周辺海域に北上回遊した群を北上回遊群と呼ぶ。なお、黒潮親潮移行域とは、黒潮続流前線 (200 m 深 14°C) と親潮前線 (100 m 深 5°C) の間の海域を指し、この海域は黒潮と親潮が混合し渦や前線が複雑に分布する (Kawai 1972)。西部太平洋では、南半球のオセアニア周辺海域の温帯海域でもカツオ未成魚や成魚が漁獲されており (Matsumoto *et al.* 1984)、西部太平洋の熱帯海域や亜熱帯海域で発生した後、オセアニア温帯海域に南下回遊する群の存在も考えられる。

一方、漁獲物の体長組成の経時変化と標識放流の結果から、成魚になるまで熱帯海域に留まる群が存在する (田中 1989, 二平 1996)。田中 (1989) は、西部太平洋熱帯海域において漁獲されたカツオの尾叉長組成の季節変化を調べた結果、未成魚に見られた最頻値は月を追って大きくなり、450 mm FL 以上の成魚に達するまでの成長過程を確認した。

Arai *et al.* (2005) は、黒潮親潮移行域と西部太平洋の赤道反流域で漁獲された未成魚～成魚の耳石の Sr : Ca 比を測定した。その結果、黒潮親潮移行域で漁獲された未成魚～成魚では、耳石核から前方半径 1100～1800  $\mu\text{m}$  の外側において赤道反流域の未成魚より高い Sr : Ca 比が見られ、これは黒潮親潮移行域の低水温の影響によると考えられた。

したがって、西部太平洋熱帯海域で漁獲される 450 mm FL 未満のカツオは、熱帯海域で発生後、北上回遊せずに熱帯海域に留まって成長した群であると考えられる。本研究では、この熱帯海域に留まった群を熱帯滞留群と呼ぶ。

以上のように西部太平洋において、当歳魚が産卵場から黒潮親潮移行域まで移動する北上回遊群と、生活史を通じて産卵場に留まる熱帯滞留群は、生活史の初期に水温や餌料密度などが異なる環境を経験する。したがって、当歳魚の成長や初回成熟年齢に関して北上回遊群と熱帯滞留群は異なる特性を持つと考えられる。

## 5. 西部太平洋の海洋環境

カツオの主な産卵場である西部太平洋熱帯海域では、年平均表面水温が 25°C 未満に低下することはない、カツオの漁獲が最も集中する赤道海域の年平均表面水温は 28°C 以上である。これに対し、分布の縁辺にあたる日本周辺の亜寒帯海域南部から黒潮親潮移行域では、北上回遊群が来遊する晩春から秋の平均表面水温が 15~20°C であり、西部太平洋熱帯海域より約 10°C 低い。

Koblentz-Mishke *et al.* (1970) は、西部太平洋の各海域の 1 日平均一次生産量を推定した。西部太平洋熱帯海域では 0.10 gC/m<sup>2</sup>/day 未満、南西諸島周辺から日本周辺海域では 0.25~0.50 gC/m<sup>2</sup>/day であり、一部の海域では 0.50 gC/m<sup>2</sup>/day より高い値を示した。また、Longhurst *et al.* (1995) は、世界中の海洋を 57 海域に区分し、人工衛星により撮影された海色画像を解析することで各海域における年平均の一次生産量を推定した。その結果、赤道周辺海域では 82 gC/m<sup>2</sup>/year、その北側にあたる亜熱帯反流の北縁の亜熱帯収斂線と赤道無風帯の北縁の間の熱帯海域では 59 gC/m<sup>2</sup>/year、黒潮より南の亜熱帯海域では 109 gC/m<sup>2</sup>/year、南西諸島から黒潮域、黒潮続流域、および黒潮親潮移行域では 193 gC/m<sup>2</sup>/year、親潮域では 264 gC/m<sup>2</sup>/year と推定された。Antoine *et al.* (1996) は、南西諸島周辺海域から黒潮域の年平均の一次生産量を 125~150 gC/m<sup>2</sup>/year、日本列島の東側の海域から黒潮親潮移行域を 150~200 gC/m<sup>2</sup>/year と推定した。これらの推定値から、カツオの主な産卵場である西部太平洋熱帯海域と北上回遊群が来遊する黒潮親潮移行域には、年間一次生産量において約 2 倍の差があることがわかる。

日本周辺海域における動物プランクトンの平均現存量は、親潮域で 17.3 g/m<sup>2</sup>、黒潮親潮移行域で 7.8 g/m<sup>2</sup>、黒潮域では 5.8 g/m<sup>2</sup> と推定されている(小達 1994)。西部太平洋熱帯海域における推定値はないが、一次生産量の差を考慮すると、この海域の動物プランクトン現存量は黒潮域よりさらに低いと考えられる。

カツオの胃内容物組成は海域によって異なり、採集海域の動物群集と一致する(堀田・小川 1955)。このことからカツオは、環境中の摂餌可能な大きさの生物を非選択的に捕食していると考えられる。中西部太平洋熱帯海域においてカツオの主な餌生物と考えられるカタクチイワシ科魚類とアジ科魚類(堀田・小川 1955, Matsumoto *et al.* 1984) の漁獲量は、1990 年以降 10~12 万トンと 3.5~5.5 万トンであるのに対し(FAO 2004)、日本周辺の太平洋海域でカツオの主

要な餌生物であるマイワシ *Sardinops melanostictus* とカタクチイワシ *Engraulis japonicus* の 2003 年の資源量は、マイワシが 12 万トン (石田ら 2004a)、カタクチイワシが約 150 万トン (石田ら 2004b) である。以上のことから、一次生産量の海域差を反映して、カツオの餌生物である小型浮魚類生物量も西部太平洋熱帯海域で低く、黒潮親潮移行域で高いことがわかる。

## 6. 本研究の目的

カツオは国際的に最も重要な水産資源の一つであり、その永続的な保存と利用を目的とした適切な資源管理が求められている。しかし、資源評価の基礎となる年齢と成長については、本論で見たように統一された見解が得られていない。

最近の魚類の資源加入機構に関する研究では、仔稚魚期の累積的な死亡率が加入量を決定すると考えられている (Houde 1987)。産卵期が周年にわたるカツオについて、詳細な資源加入機構に関する研究を行うためには、年級群単位の動態だけでなく季節単位あるいは月単位で発生群の動態を解析することが必要である。そこで本研究では、耳石の微細輪紋構造を用いてカツオの仔魚から成魚の日齢査定を行う手法を確立すること、その手法を基にカツオの成長過程を明らかにすること、ならびに西部太平洋におけるカツオ当歳魚の生態を解明することを目的とした。

緒論に続く第 2 章では、カツオの仔魚から成魚について、日輪解析のための耳石標本作成方法を検討し、既往の耳石標本作成方法が適用できない場合について、簡便で大量処理が可能な方法を新たに確立した。

第 3 章では、幼魚期の後半から成魚期の耳石に形成される微細輪紋について、OTC を投与したカツオを飼育することで微細輪紋形成の日周性を証明した。

第 4 章では、耳石日輪情報を基に稚魚から成魚までの成長過程を解析し、太平洋の各海域で採集されたカツオの成長を比較した。また、日輪間隔によって各海域における成長に伴う成長速度の変化を比較した。

第 5 章では、西部太平洋におけるカツオの産卵場である北赤道海流域および赤道反流域で採集された仔稚魚の耳石日輪半径と、北上回遊群および熱帯滞留群の生活史初期の日輪半径とを比較して、北上回遊群と熱帯滞留群の発生海域

を推定した。また、赤道海域で漁獲された成魚について、12日齢時の日輪半径に基づいて北上（南下）回遊群と熱帯滞留群の成魚群構成比を推定した。

第6章では、西部太平洋における北上回遊群と熱帯滞留群の生活史特性および資源への加入機構を考察し、カツオの資源評価に関する新しい考え方を提案した。

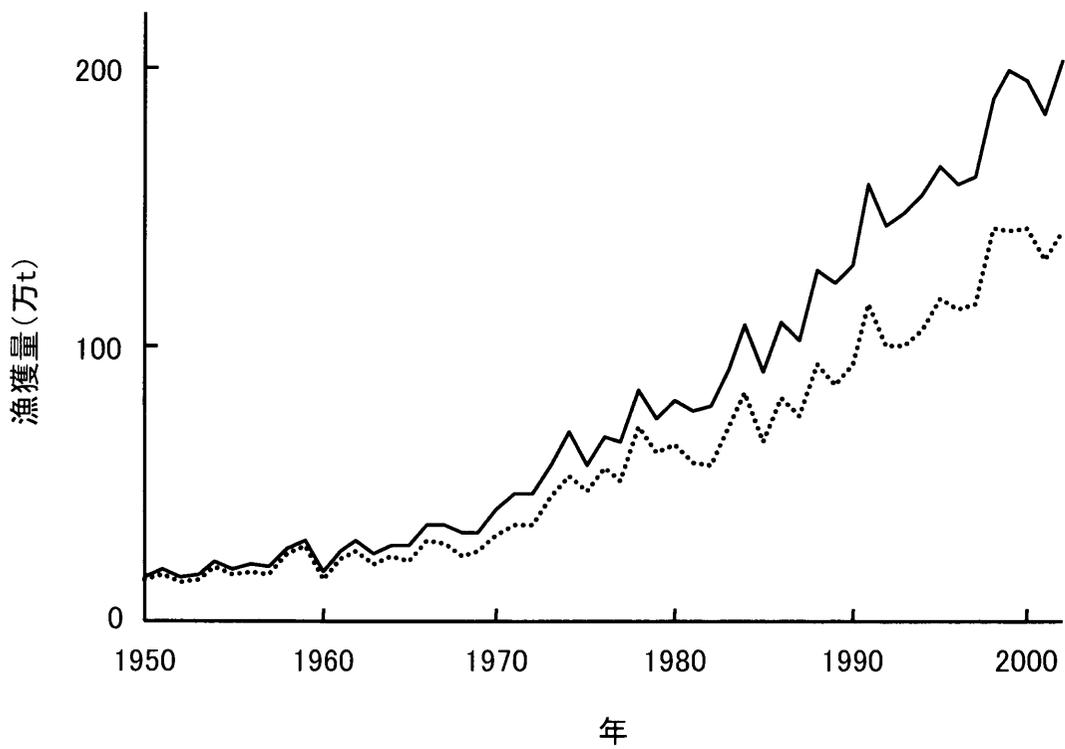


図1-1. 全世界(——)と太平洋(……)におけるカツオ漁獲量の経年変動.

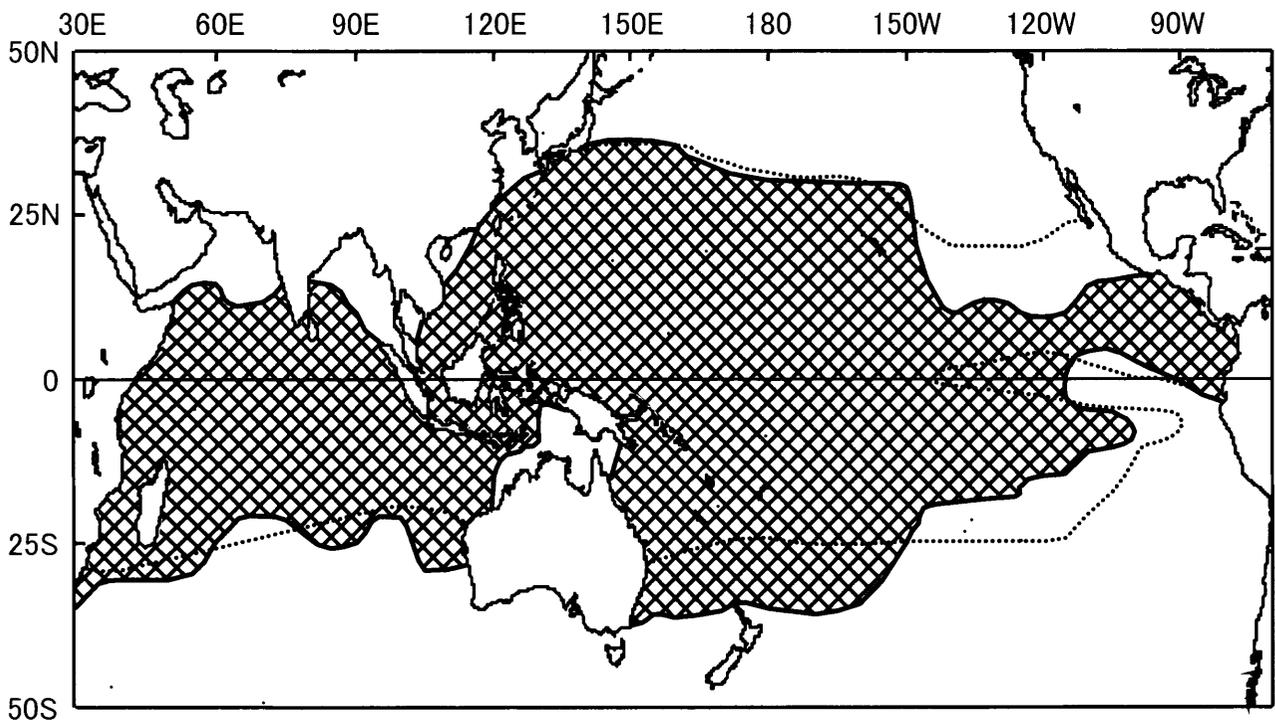


図1-2. 太平洋とインド洋におけるカツオ仔魚の分布域 (XXXX)と夏季の表面水温25°C等温線(.....). Matsumoto *et al.* (1984)を改変.

## 第2章 耳石の標本作成方法と形態変化

### はじめに

魚類の内耳には、扁平石(sagitta)、礫石(lapillus)、星状石(asteriscus)の3種類の耳石がそれぞれ一対存在する。底魚では古くから耳石に年輪が形成されることが知られ、3種類の中で最も大型の扁平石が年齢査定に用いられてきた。Pannella(1971)は、北西大西洋に分布するタラ科の *Merluccius bilineari*, *Urophycis chuss* および *Gadus morhua* について、耳石の年輪と年輪の間に微細な輪紋が多数存在し、それらが1日に1本形成される日輪であることを明らかにした。この報告以来、多くの魚種で耳石日輪の存在が証明され、日輪数から孵化日や日齢を推定することが可能となった。耳石日輪は多くの魚種についてもっとも信頼できる齢形質であると考えられている(Jones 1986)。 *Clupea harengus* の仔魚では、隣接する日輪の間隔が栄養状態や体成長を反映していることが明らかにされ(Moksness *et al.* 1995)、耳石半径と体長の関係式から、各日輪が形成された時点における体長を個体別に逆算することが可能となった(Campana 1990)。また、日輪間隔からは、過去にさかのぼって成長速度を推定することができる。

耳石の形態や微細輪紋構造は魚種によって異なり、また、同じ魚種でも個体の発達に伴って変化する。個体ごとに日齢を推定するためには、耳石核から耳石縁辺までのすべての日輪を計数しなければならない。日輪を正確に計数・計測するためには耳石の構造に応じた標本作成手法を確立すると同時に、微細輪紋形成の日周性を確認しなければならない。

Radtke(1983)は、人工受精によって得た孵化後 1~5 日のカツオ仔魚(3.0~4.0 mm TL)の左右の耳石をそれぞれ光学顕微鏡と走査型電子顕微鏡で観察した。光学顕微鏡による観察には、スライドガラス上に樹脂で封入した耳石を用いた。走査型電子顕微鏡による観察には、0.3  $\mu\text{m}$  のアルミナパウダーで扁平面を研磨し、耳石核を露出させた後に7% EDTA (ethylenediaminetetraacetic acid) で1分間研磨面を腐食させ、白金パラジウムを蒸着した標本を用いた。各個体の耳石微細輪紋数を光学顕微鏡と走査型電子顕微鏡で計数した。その結果、微細輪紋数に左右の耳石間で有

意差は認められなかったことから、4.0 mm TL (全長) までのカツオ仔魚の耳石微細輪紋は、研磨や腐食などの処理なしに光学顕微鏡によって観察可能であることがわかった。

Tanabe *et al.* (2003) は、カツオ稚魚 194 個体 (12.9~39.8 mm SL) の耳石をエナメル樹脂とエナメル薄め液の混合液に封入し、硬化した後にラッピングフィルムで体側がわの扁平面の凹凸部 (図 2-3 参照) がなくなるまで研磨した。次にエナメル薄め液でエナメル樹脂を溶解させた後、耳石を裏返して再びエナメル樹脂に封入した。体軸側扁平面の凸部を同様にラッピングフィルムで研磨し、耳石核から縁辺までの微細輪紋が観察できる標本を作成した後に、研磨面にエナメル樹脂を塗付した。この標本作成方法によって、12.9~39.8 mm SL のカツオ稚魚の耳石微細輪紋をすべて計数することが可能であった。

Uchiyama and Struhsaker (1981) は、450 mm FL 以上のカツオ成魚耳石の扁平面を 1 % 塩酸で 3 分から 5 分間腐食させてから、Euparal でスライドガラスに封入し、透過光によって光学顕微鏡下で微細輪紋数を計数した。Itoh and Tsuji (1996) は、ミナミマグロ *Thunnus maccoyii* 122 個体 (247~820 mm FL) の耳石微細輪紋を走査型電子顕微鏡で計数した。彼らは、光学顕微鏡下で耳石核と耳石後方縁辺間の微細輪紋が観察可能になるまで 5 N 塩酸で扁平面を腐食させた後、2 M EDTA に 3~10 分間浸して、耳石表面の不連続層 (discontinuous zone) を溶解させ耳石表面に凹凸をつけた。乾燥後に白金パラジウムを蒸着して扁平面の走査型電子顕微鏡像を撮影し、耳石核から後方縁辺までの像をつなぎ合わせて微細輪紋数を計数した。

本章では、カツオ耳石の形態的特徴を仔魚から成魚まで観察し、Radtke (1983) および Tanabe *et al.* (2003) の方法によって、微細輪紋を計数・計測できる体長範囲を特定した。また、これらの方法によって日輪が観察できない体長範囲について、Uchiyama and Struhsaker (1981) および Itoh and Tsuji (1996) の報告を参考に標本作成方法を新たに定式化し、簡便で大量処理が可能な微細輪紋計数手法を確立することを目的とした。

## 材料と方法

### 1. 供試魚の採集・漁獲と保存

仔魚(2.5~10.0 mm SL): 本研究には22個体の仔魚を用いた。そのうち10個体は、1994年11月~12月に北緯3~15度、東経147~155度のカロリン諸島周辺海域において、山口県立水産高等学校の漁業実習船青海丸(403 t)により、網口20×20 m、コッドエンドの目合8 mmのTANSYU-2型中層トロール網で採集された(表2-1)。他の12個体は、1997年4~6月に北緯5~21度、東経130~140度のパラオ諸島周辺海域で、岩手県立宮古水産高等学校の漁業実習船新りあす丸(471 t)により、口径700 mmのボンゴネット(網目合335 μm)を2ノット10分間、水深30 m層を曳網して採集された(表2-2)。これらのカツオ仔魚は、80%エタノールに浸漬して保存された。

稚魚(10~100 mm FL): 本研究に用いた稚魚294個体のうち291個体は、1994年11月~12月に北緯3~15度、東経140~157度のカロリン諸島周辺海域で、山口県立水産高等学校の漁業実習船青海丸により、上述したTANSYU-2型中層トロール網で採集された(表2-3)。これらの稚魚は採集直後に80%エタノールに浸漬して保存された。他の3個体は、1999年6月に北緯30度、東経130度の南西諸島周辺海域で、水産庁遠洋水産研究所の漁業調査船俊鷹丸(396 t)により、網口30×30 m、コッドエンドの目合18 mmの中層トロール網の夜間表層曳網で採集された(表2-4)。採集されたカツオ稚魚は、尾叉長を1 mm単位で測定した後に-30℃で保存された。

幼魚(100~250 mm FL): 本研究に用いた幼魚86個体のうち65個体は、1999年6月に北緯25~30度、東経127~130度の南西諸島周辺海域で、水産庁遠洋水産研究所の俊鷹丸により、上述した中層トロール網の夜間表層曳網によって採集された(表2-5)。これらのカツオ幼魚は、尾叉長を1 mm単位で測定した後に-30℃で保存された。他の21個体(180~232 mm FL)は、2003年7月27日に奄美大島近海(北緯27度05分、東経129度58分)で鹿児島県瀬戸内町漁協所属のカツオー本釣り船あるしおんによって竿釣り漁獲され、船上で氷冷保存された後に-30℃で保存された。これらについては研究室において解凍後、尾叉長を1 mm単位で測定した。

未成魚(250～450 mm FL)：本研究に用いた未成魚 107 個体は、2000 年 7 月～2001 年 4 月に、0 度～北緯 40 度、東経 130～172 度の西部太平洋で、竿釣り、まき網、曳縄により漁獲された(表 2-6)。漁獲されたカツオは、 $-30^{\circ}\text{C}$ 以下で保存し、研究室において解凍後、耳石を摘出する前に尾叉長を 1mm 単位で測定した。

成魚( $\geq 450$  mm FL)：本研究で用いた成魚 37 個体は、1997 年 6 月～2004 年 3 月に未成魚と同様に日本周辺海域と北緯 12～40 度、東経 139～151 度の西部太平洋で、竿釣り、まき網、曳縄、流し網で漁獲された(表 2-7)。漁獲された成魚は、 $-30^{\circ}\text{C}$ 以下で保存され、研究室において解凍後耳石を摘出する前に尾叉長を 1 mm 単位で測定した。

これらすべての供試魚の採集・漁獲位置を図 2-1 に、採集年と発達段階別に示した。

## 2. 耳石の摘出と保存

仔魚：アルコール保存された仔魚の標準体長を、万能投影機とデジタルキルビメーターを用いて 0.1 mm 単位で計測した後、偏光フィルターを装着した実体顕微鏡下で扁平石を摘出した。市販の漂白剤を 5%に薄めた水溶液中に約 3 分間浸して扁平石表面の付着物を取り除いた後に、蒸留水ですすいで乾燥させ、エナメル樹脂に封入した。

稚魚：標準体長をデジタルキャリパーで 0.1 mm 単位で計測した後、実体顕微鏡下で扁平石を摘出し、付着物を解剖針で取り除いて蒸留水ですすいだ後に、マイクロウェルプレートに入れて保存した。

幼魚：研究室において室温で解凍した供試魚から扁平石を摘出し、実体顕微鏡下で付着物を解剖針で取り除いた後に蒸留水ですすぎ、乾燥後にマイクロウェルプレートに入れて保存した。採集直後に尾叉長を計測しなかった個体については、室温解凍後に尾叉長を 1 mm 単位で計測した。

未成魚と成魚：研究室で室温解凍後に供試魚の尾叉長を 1 mm 単位で計測し、扁平石を摘出した。市販の漂白剤水溶液中に約 2 時間浸して付着物を取り除いた後に流水で約 3 時間すすぎ、乾燥後にマイクロウェルプレートに入れて保存した。

## 結果

### 1. 耳石標本作成法

7.0 mm SL 以下の仔魚は、エナメル樹脂に封入すると耳石核とその周辺に微細輪紋が明瞭に観察された(図 2-2 左上)。8.0 mm SL 以上の仔魚および稚魚では、成長とともに耳石が肥厚して不透明になり、光学顕微鏡下では耳石核と微細輪紋を観察できなかった。そこで、体側がわ扁平面を上にしてエナメル樹脂とエナメル薄め液の混合液で耳石をスライドグラス上に封入し、常温で 2 日間以上硬化させた。体側がわの扁平面の凸部(図 2-3)がなくなるまでラッピングフィルム(9, 3, 1  $\mu\text{m}$ )を用いて研磨した後、エナメル薄め液でエナメル樹脂を溶解させた。耳石を裏返して同様に封入・硬化させ、耳石核から縁辺までの微細輪紋が観察できるまで体軸側の扁平面をラッピングフィルムで研磨した。研磨後、研磨面にエナメル樹脂を塗付した。この手法で作成した 60 mm SL までの仔稚魚の耳石標本の扁平面には、耳石核から耳石縁辺まで微細輪紋が明瞭に観察された。

60.0 mm SL 以上の稚魚の耳石では、研磨によって体側がわに反り返っている嘴状突起(rostrum)が破損した。また、80.0 mm FL 以上の稚魚の耳石では、扁平面全体が体側がわへ湾曲しているため(図 2-3)、研磨によって耳石周辺部が失われた。この結果、耳石両面を研磨する標本作成方法が適用できるのは、8.0~60.0 mm SL の仔稚魚に限られることがわかった。

60.0 mm SL 以上の稚魚の耳石については、体側がわの扁平面を上にして耳石をスライドグラス上にエナメル樹脂で固定した。硬化後、細く尖らせた研究用ワイパーに 1N 塩酸をしみ込ませ、光学顕微鏡下で耳石核から嘴状突起の縁辺までの扁平面に塩酸を塗布して腐食させた。耳石核から縁辺までの微細輪紋が観察できたら耳石を蒸留水ですすぎ、乾燥後エナメル樹脂に封入した。塩酸で腐食させることで、耳石が薄くなるとともに、耳石表面を平滑にする結果、光の透過性が高くなる。この手法による耳石標本作成は、860 mm FL の成魚でも可能であった。塩酸による腐食処理を行った後に光学顕微鏡下と走査型電子顕微鏡下で同一の耳石を観察した結果、どちらの観察方法でも耳石全体の微細輪紋構造が明瞭に見られた(図 2-4)。

## 2. 成長に伴う耳石の形態変化

7.0 mm SL 以下の仔魚の耳石(扁平石)は円形で、エナメル樹脂に封入した標本では中心に耳石核があり、その周辺には間隔 1~4  $\mu\text{m}$  の同心円状の微細輪紋が観察された(図 2-2)。8.0 mm SL 以上の仔魚および稚魚の耳石には、耳石前方の腹側に嘴状突起と呼ばれる突出部が形成された(図 2-2)。体成長とともに耳石が肥厚して不透明になるため、光学顕微鏡下で耳石核と微細輪紋を観察できなくなった。

稚魚から成魚の耳石の形態を図 2-3 と図 2-5 に示した。各部の名称については大泉(2001)に従った。体側がわの扁平面は中央部がわずかに隆起するのに対し、体軸側の扁平面には裂溝(sulcus)と呼ばれる溝が縦断していた(図 2-3)。約 30 mm SL 以上の稚魚の耳石には、扁平面の腹側の縁辺から中心域に向かって亀裂構造が複数認められた(図 2-3)。これらの亀裂構造の形態や数は、個体によって異なっていた。60 mm SL 以上の稚魚の耳石は、突出した嘴状突起を持ち、体側がわに凹型の形態をしていた(図 2-3)。100 mm FL 以上の幼魚では、体軸側の裂溝が深くなり、耳石核付近が円形に窪んでいた(図 2-2)。300 mm FL 以上の未成魚の耳石の嘴状突起は、さらに体側がわに湾曲した。嘴状突起は、耳石後部の背側や腹側と比較して薄く、間隔の狭い微細輪紋が観察された。耳石後部には、溝状の構造が観察され(図 2-5)、この部位では微細輪紋数を連続的に計数することが不可能であった。500 mm FL 以上の成魚では、耳石後部の溝状構造が未成魚より微細になっており、微細輪紋は観察されなかった(図 2-5)。扁平面の腹側には鋸歯状の鈍鋸歯(crenulate)が観察された(図 2-2, 図 2-5)。成魚では、耳石核の前方部に比較して後方部がより肥厚して不透明であった。嘴状突起の縁辺域は薄かったため、エナメル樹脂に封入しただけで間隔の狭い微細輪紋が観察される個体があった。

幼魚~成魚の耳石において、耳石核周辺には間隔 1~4  $\mu\text{m}$  の微細輪紋が 5 本前後見られた。その外側には間隔が 15~40  $\mu\text{m}$  と広い微細輪紋が存在し、さらにその周辺域には間隔 1~3  $\mu\text{m}$  の微細輪紋が見られた。本研究では、仔魚期に形成される核周辺の間隔 1~4  $\mu\text{m}$  の微細輪紋が形成される部分を中心域、その外側の間隔 15~40  $\mu\text{m}$  の微細輪紋が仔魚期末~稚魚期前半に形成される部分を中間域、その外側から縁辺までの間隔 1~3  $\mu\text{m}$  の微細輪紋が幼魚期後半~成魚期に形成される部分を縁辺域と名づけて区分した。

## 考 察

### 1. 日輪解析のための耳石標本作成手法

本研究では、既往の耳石標本作成手法(Uchiyama and Struhsaker 1981, Itoh and Tsuji 1996)を参考に、封入剤や観察部位を改良した耳石標本作成方法を確立した。すなわち、8.0 mm SL 以下の仔魚では、耳石を樹脂に封入する方法、8.0～60.0 mm SL の仔稚魚では耳石の両面を研磨する方法、60 mm SL 以上の稚魚から成魚では耳石の扁平面を塩酸により腐食させる方法である。これらの方法によって仔魚から成魚まで全発達段階のカツオの耳石微細輪紋を観察することが可能となった。塩酸で腐食させた後にEDTAによって凹凸をつけて、走査型電子顕微鏡で観察するというクロマグロ(Itoh *et al.* 2000)、ミナミマグロ(Itoh and Tsuji 1996)、ビンナガ(Bigelow *et al.* 1995)の耳石で行われている方法や、耳石横断面(transverse section)を作成するキハダ(Stéquert *et al.* 1996)やメバチ(Lehodey *et al.* 1999, Stéquert and Conand 2004)で行われている方法に比べて、稚魚～成魚の耳石標本作成と微細輪紋の計数・計測に要する時間が短縮され、多数の耳石処理が可能になった。

### 2. 耳石の形態と微細輪紋

200 mm FL 以上の幼魚から成魚の耳石には、3種類の異なる微細輪紋構造が観察された(図 2-6)。耳石中心域に5本程度存在する間隔1～4  $\mu\text{m}$ の微細輪紋は、Radtke (1983)により日輪であることが確認された構造と一致した。また、その外側の中間域に見られる間隔15～40  $\mu\text{m}$ の微細輪紋は、Tanabe *et al.* (2003)により日輪であることが証明された構造と一致した。中間域の外側の縁辺域に観察される間隔1～3  $\mu\text{m}$ の微細輪紋は、Wild and Foreman(1980)とUchiyama and Struhsaker(1981)が観察した構造と一致した。

300 mm FL 以上のカツオの耳石では、耳石後部の中間域から縁辺方向に溝状構造が伸長していた(図 2-5)。マグロ類では一般に耳石後部の腹側で微細輪紋の計数・計測が行われる(Bigelow *et al.* 1995, Itoh and Tsuji 1996, Itoh *et al.* 2000)。しかし、カツオ耳石にはこの溝状の構造が存在するため、この部位で微細輪紋を計数・計測することはできない。これに対し、耳石核と嘴状突起の縁辺の間は、耳石後部より薄く微細輪紋を観察しやすかった。

Fitch and Craig(1964)は、サバ科魚類の耳石を種の同定に用いることは不可能であると述べている。仔魚期から稚魚期のカツオの耳石は、クロマグロ *Thunnus thynnus* (Brothers *et al.* 1983, Itoh *et al.* 2000)、ミナミマグロ(Jenkins and Davis 1990, Itoh and Tsuji 1996)、スマ属の一種の *Euthynnus lineatus* (Wexler 1993)の耳石と類似していた。しかし、300 mm FL 以上のカツオの耳石は、耳石後部の腹側に溝状構造が発達する点で、他のマグロ類の耳石やマサバ *Scomber japonicus*、ゴマサバ *Scomber australasicus*、サワラ *Scomberomorus niphonius* などのサバ科魚類の耳石とは形態的に異なることが本研究によってわかった。また、他のサバ科魚類の耳石の嘴状突起は先端が鋭角なのに対し、カツオ成魚の耳石の嘴状突起先端は半円形である。したがって、300 mm FL 以上のカツオの耳石は、カジキ類の胃内容物からカツオを同定する際の同定形質として利用できる可能性がある。

表2-1. 1994年に青海丸によるカツオ仔魚の採集記録.

年/月/日	投網時刻	投網位置		曳網速度(kt)	曳網水深(m)	標本数	標準体長(mm)
	揚網時刻	揚網位置					
		緯度(北緯)	経度(東経)				
1994/11/23	12:25	11° 00′	147° 30′	4.5-5.0	40-60	1	9.2
	13:25	11° 00′	147° 25′				
11/30	12:25	3° 00′	155° 00′	4.5-5.0	40-60	4	8.6-9.9
	13:25	3° 00′	154° 56′				
12/1	0:35	3° 00′	155° 00′	4.5-5.0	40-60	3	9.1-9.5
	1:35	3° 00′	154° 56′				
	6:25	3° 00′	155° 00′				
	7:25	3° 00′	154° 56′				
12/7	14:50	14° 57′	154° 56′	3.5-4.0	80-100	1	8.9
	15:50	14° 59′	154° 58′				
合計						10	8.6-9.9

表2-2. 1997年に新りあす丸によるカツオ仔魚の採集記録.

年/月/日	投網時刻	投網位置		曳網速度(kt)	標本数	標準体長(mm)
		緯度(北緯)	経度(東経)			
1997/4/30	6:54	15° 00′	130° 00′	2	1	3.9
5/5	12:02	6° 00′	132° 00′	2	2	4.0-6.3
5/6	0:05	5° 00′	132° 30′	2	1	4.4
	20:00	5° 00′	135° 00′	2	2	6.9-7.6
5/14	23:55	7° 00′	140° 00′	2	1	5.4
5/25	15:24	16° 00′	140° 00′	2	1	3.8
5/26	2:40	18° 00′	140° 00′	2	1	4.5
5/27	4:00	19° 30′	140° 00′	2	1	3.4
	8:12	20° 00′	140° 00′	2	1	3.3
	12:38	20° 30′	140° 00′	2	1	3.5
合計					12	3.3-7.6

表2-3. 1994年に青海丸で採集されたカツオ稚魚の採集記録.

年/月/日	投網時刻	投網位置		曳網速度(kt)	曳網水深(m)	標本数	標準体長(mm)
	揚網時刻	揚網位置					
		緯度(北緯)	経度(東経)				
1994/11/9	6:30	2° 59'	140° 00'	4.0-4.5	80-100	1	24.0
	7:30	2° 55'	140° 00'				
11/10	14:55	4° 56'	141° 00'	3.5-4.0	80-100	16	59.9-77.2
	15:55	5° 01'	141° 00'				
11/11	13:25	6° 59'	140° 59'	4.0-4.5	40-60	13	13.2-27.9
	14:25	6° 56'	140° 57'				
	14:48	6° 57'	140° 58'	4.0-4.5	80-100		
	15:48	7° 01'	141° 01'				
	19:35	7° 01'	141° 00'	4.0-4.5	40-60		
	20:35	6° 57'	140° 58'				
	11/23	12:25	11° 00'	147° 30'	4.5-5.0		
13:25		11° 00'	147° 25'				
11/29	13:25	3° 00'	152° 30'	4.5-5.0	40-60	23	10.7-16.3
	14:25	3° 00'	152° 26'				
11/30	12:25	3° 00'	155° 00'	4.5-5.0	40-60	53	10.1-16.2
	13:25	3° 00'	154° 56'				
	18:25	3° 00'	155° 01'	40-60			
	19:25	3° 00'	154° 56'				
12/1	0:35	3° 00'	155° 00'	4.5-5.0	40-60	41	10.3-16.4
	1:35	3° 00'	154° 56'				
	6:25	3° 00'	155° 00'	4.5-5.0	40-60		
	7:25	3° 00'	154° 56'				
12/3	19:35	7° 00'	157° 00'	4.5-5.0	40-60	8	32.6-40.3
	20:35	7° 00'	156° 56'				
	21:00	7° 00'	156° 57'	4.5-5.0	80-100		
	22:00	7° 00'	157° 01'				
12/7	14:50	14° 57'	154° 56'	3.5-4.0	80-100	2	10.9-12.5
	15:50	14° 59'	154° 58'				
	21:05	14° 57'	154° 55'	4.0-4.5	80-100		
22:05	14° 59'	154° 58'					
合計						291	10.1-77.2

表2-4. 1999年に俊鷹丸によるカツオ稚魚の採集記録.

年/月/日	投網時刻	投網位置		曳網速度(kt)	標本数	尾叉長(mm)
	揚網時刻	揚網位置				
		緯度(北緯)	経度(東経)			
1999/6/23	2:13	29° 31′	130° 01′	4.9	1	89
	3:13	29° 35′	130° 01′			
6/29	3:12	29° 29′	129° 59′	5.0	2	89-97
	4:12	29° 31′	130° 02′			
				合計	3	89-97

表2-5. 1999年に俊鷹丸によるカツオ幼魚の採集記録.

年/月/日	投網時刻	投網位置		曳網速度(kt)	標本数	尾叉長(mm)
	揚網時刻	揚網位置				
		緯度(北緯)	経度(東経)			
1999/6/20	2:08	25° 02'	127° 02'	5.0	2	102-111
	3:08	25° 06'	127° 03'			
6/21	2:19	27° 03'	129° 01'	4.9	1	127
	3:19	27° 04'	129° 03'			
	20:45	27° 18'	130° 00'			
	21:45	27° 24'	129° 59'			
6/22	20:23	28° 48'	129° 59'	4.8	1	121
	21:23	28° 53'	130° 00'			
6/23	2:13	29° 31'	130° 01'	4.9	15	110-167
	3:13	29° 35'	130° 01'			
	3:14	28° 39'	129° 02'			
	4:14	28° 44'	129° 02'			
	21:11	29° 13'	129° 02'			
	22:11	29° 18'	129° 02'	5.0	2	103-109
6/29	3:12	29° 29'	129° 59'	5.0	5	102-118
	4:12	29° 31'	130° 02'			
				合計	65	102-171

表2-6. 当業船によるカツオ未成魚の漁獲記録.

年/月/日	漁獲位置		漁法	標本数	尾叉長(mm)
	緯度(北緯)	経度(東経)			
2000/7/22	33° 38′	136° 00′	曳縄	12	250-268
8/22	31° 29′	130° 02′	曳縄	18	252-271
9/14	35° 10′	139° 26′	竿釣り	25	328-406
9/15	00° 08′	171° 56′	まき網	16	273-322
9/16	40° 20′	145° 30′	竿釣り	19	340-420
2001/4/5	26° 00′	138° 20′	竿釣り	17	362-442
			合計	107	250-442

表2-7. 当業船によるカツオ成魚の漁獲記録.

年/月/日	漁獲位置		漁法	標本数	尾叉長(mm)
	緯度(北緯)	経度(東経)			
1997/6/24	33° 43′	143° 33′	まき網	1	836
2001/5/28	34° 03′	139° 26′	曳縄	12	476-518
7/10	39° 36′	148° 50′	竿釣り	8	500-570
2002/2/3	12° 09′	150° 56′	竿釣り	5	658-710
8/22	35° 09′	139° 28′	竿釣り	9	465-529
2004/3/16	35° 48′	142° 26′	流し網	2	830-860
			合計	37	465-860

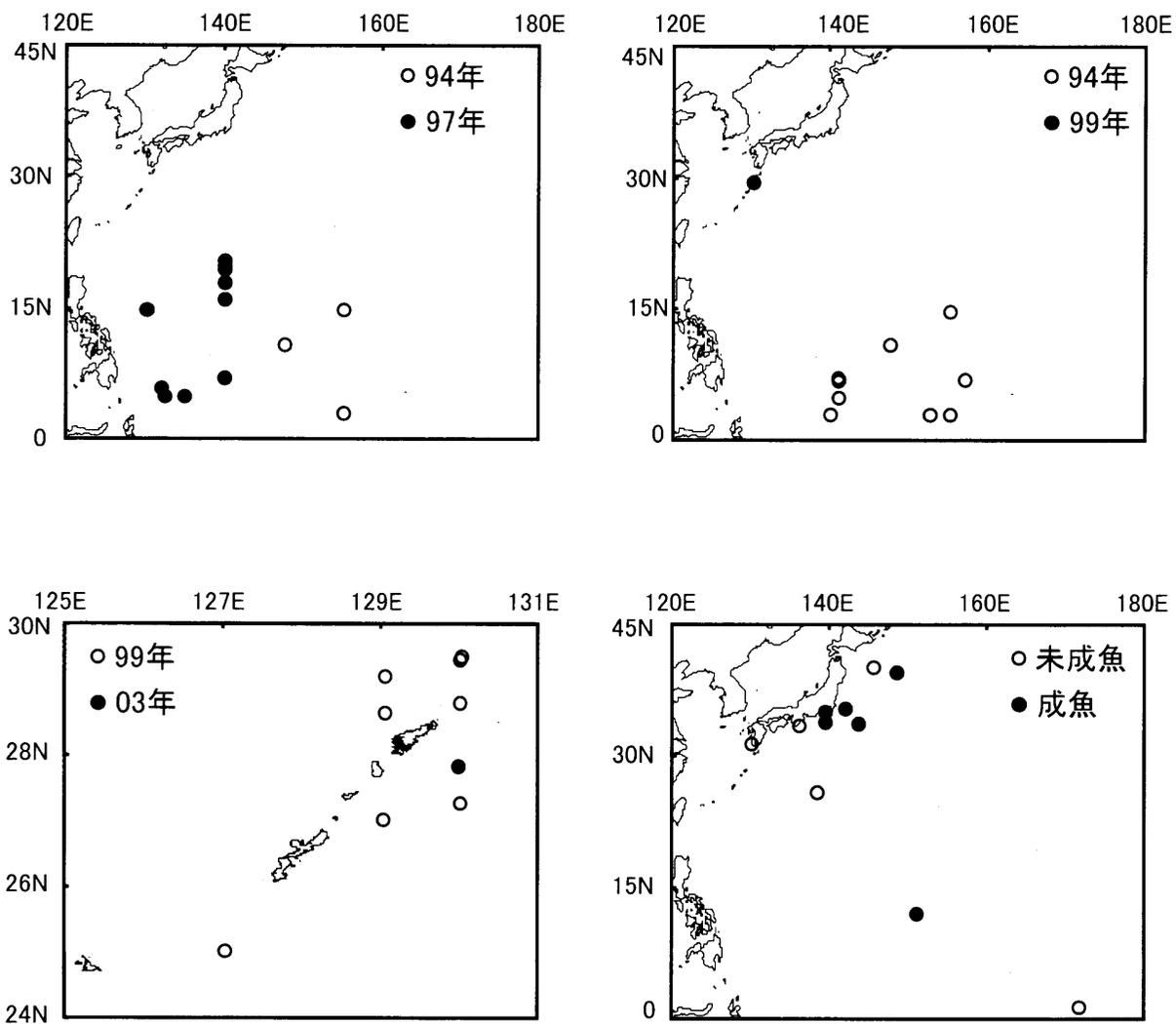


図2-1. 本章で用いたカツオの採集・漁獲位置. 仔魚(左上)、稚魚(右上)、幼魚(左下)、未成魚・成魚(右下).

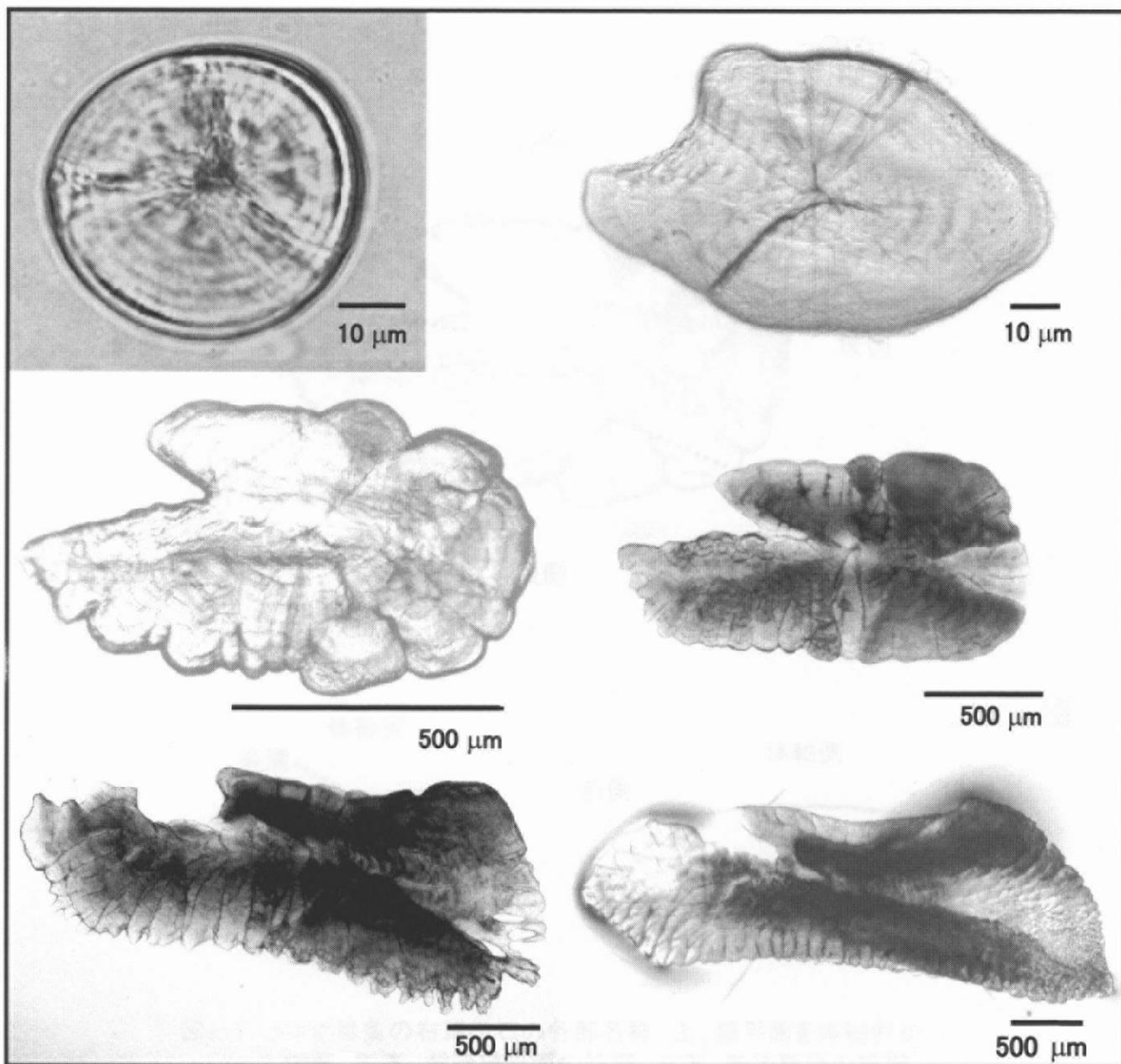


図2-2. カツオの仔魚(4.5 mm SL, 左上)、稚魚(16.7 mm SL, 右上)、稚魚(52.9 mm FL, 左中)、幼魚(120 mm FL, 右中)、未成魚(271 mm FL, 左下)、成魚(578 mm FL, 右下)の扁平石.

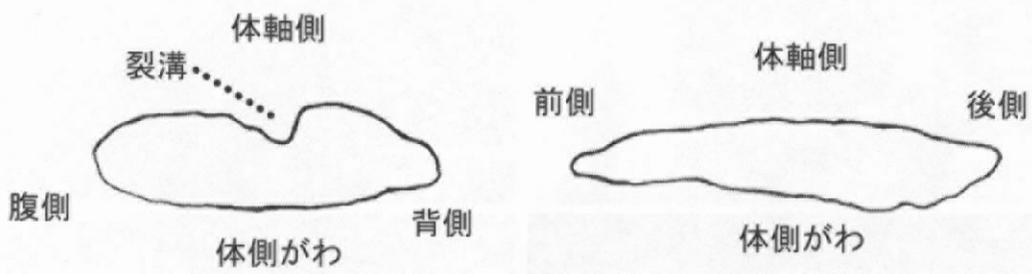
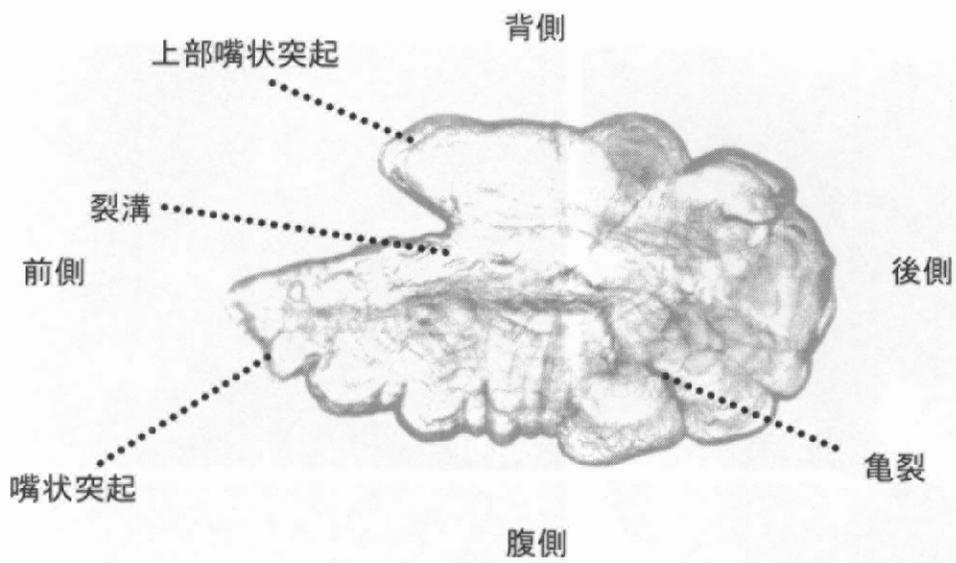


図2-3. カッオ稚魚の右扁平石の各部名称. 上、扁平面を体軸側から観察. 左下、背腹横断面の輪郭. 右下、前後断面の輪郭.

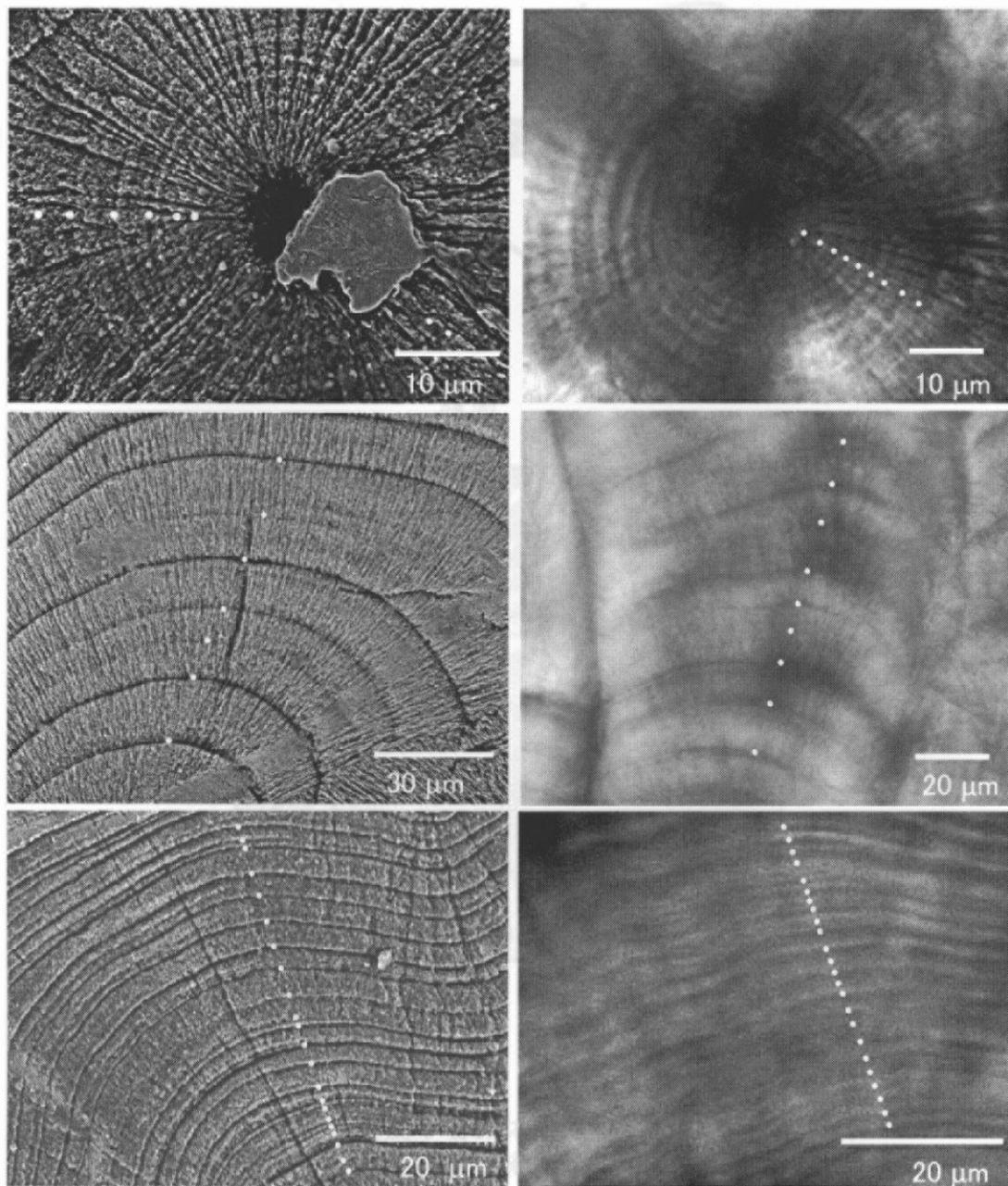


図2-4. 走査型電子顕微鏡(左)で観察された成魚(490 mm FL)の耳石の3種類の微細輪紋構造と、それに対応する光学顕微鏡像(右). 中心域の核と微細輪紋(上). 中間域の微細輪紋(中). 縁辺域の微細輪紋(下). 白丸は日輪位置.

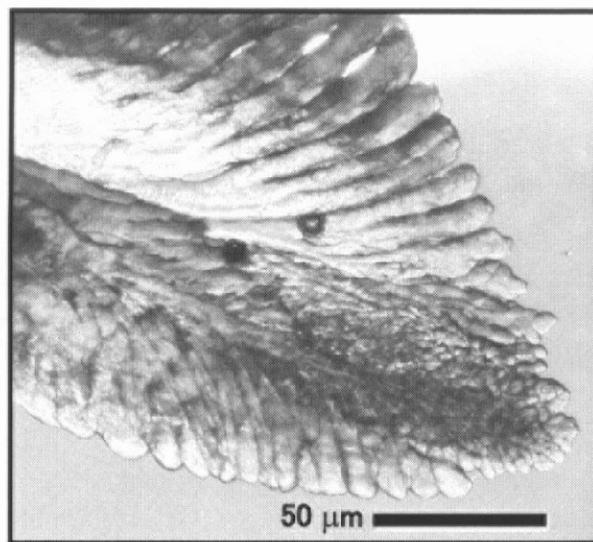
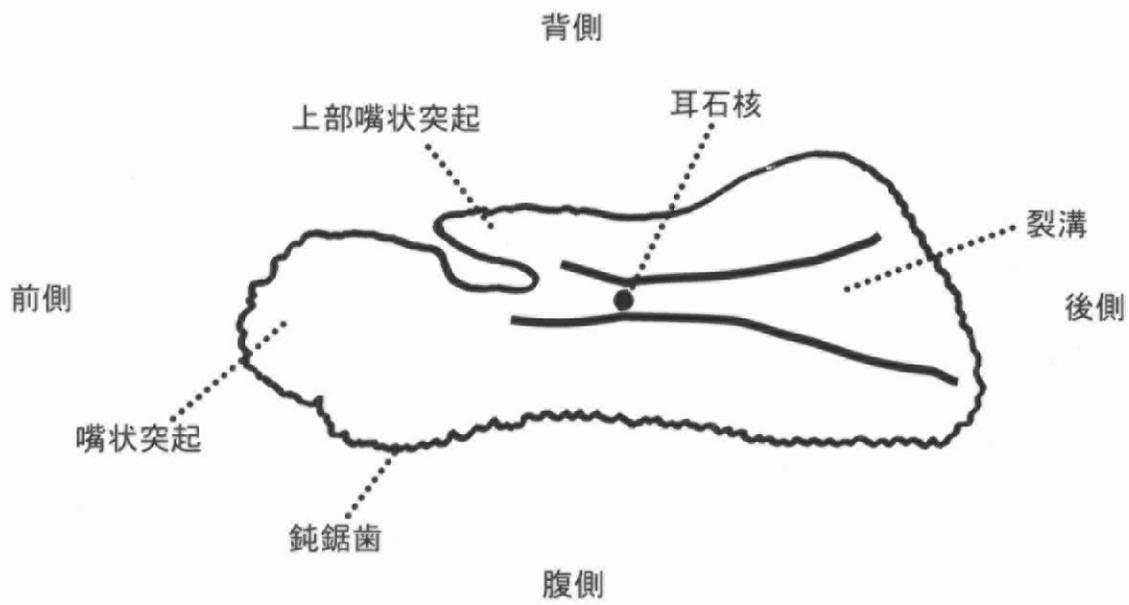


図2-5. カツオ成魚の右扁平石の体軸側扁平面の各部名称と、成魚(507 mm FL)扁平石後縁部分に見られる溝状の構造.

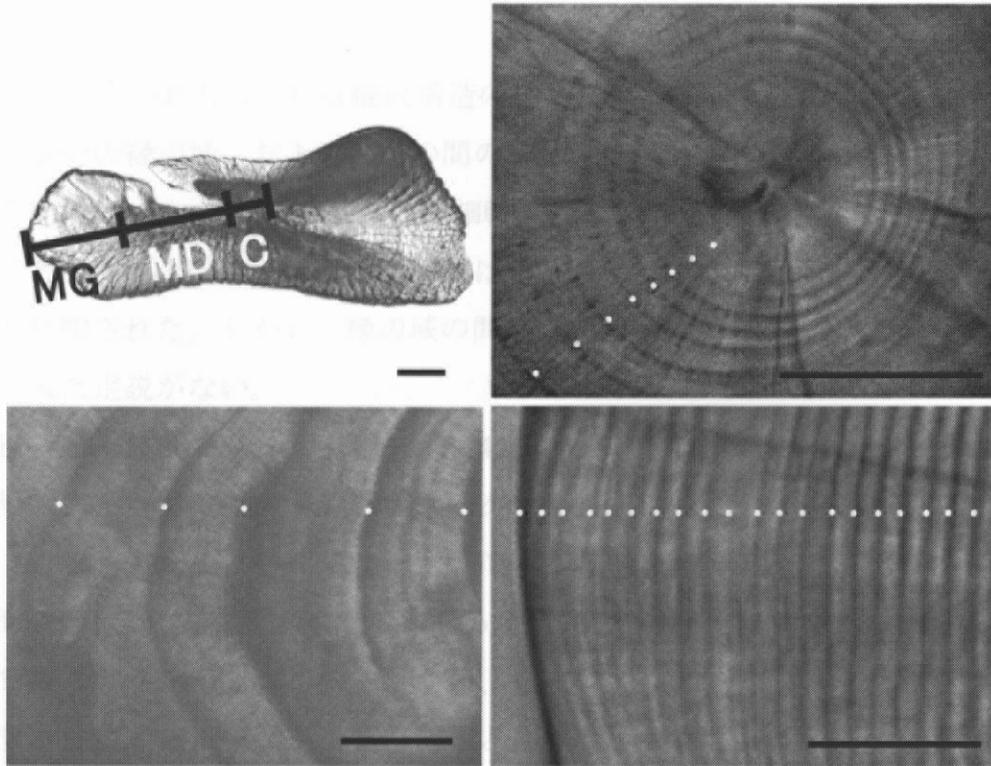


図2-6. 成魚(477 mm FL)の耳石に見られる3種類の微細輪紋構造. 中心域(C)の間隔の狭い輪紋(右上)、中間域(MD)の間隔の広い輪紋(左下)、および縁辺域(MG)の間隔の狭い輪紋(右下). Barはそれぞれ20  $\mu\text{m}$ . 白丸は日輪位置を示す.

### 第3章 耳石微細輪紋形成の日周性

#### はじめに

カツオ成魚の耳石は、微細輪紋構造の違いによって耳石核周辺の中心域、嘴状突起部分の縁辺域、および両者の間の中間域に区分される（図 2-6）。中心域にある間隔 1~4  $\mu\text{m}$  の 5 本前後の微細輪紋は Radtke (1983) により、また、中間域にある間隔 15~40  $\mu\text{m}$  の微細輪紋は Tanabe *et al.* (2003) により日輪であることが証明された。しかし、縁辺域の間隔 1~3  $\mu\text{m}$  の微細輪紋形成の日周性について未だ定説がない。

Uchiyama and Struhsaker (1981) は、450~493 mm FL のカツオ成魚 4 個体を 1 週間無給餌で飼育して、耳石にチェックマークを形成させた。その後、給餌して 5、7、11、30 日間飼育した後に、再び無給餌で飼育した。給餌期間に形成された微細輪紋数は 7、8、14、33 本であり、4 個体全てについて、微細輪紋数が給餌日数より多かった。このことから、彼らはより多くの供試魚について厳密な実験方法による再実験が必要であると述べた。飼育実験下において耳石にチェックマークを形成させる方法は、天然で起こりうるチェックマークとの識別が困難な場合もある (Campana 1984)。また、成長が停止した後も一定期間は耳石が成長するために (Hovenkamp 1990)、絶食期間中のどの時点でチェックマークが形成されたのか不明であり、日単位の標識として適切でないと言われる (渡邊 1997)。

Wild and Foreman (1980)、Wild *et al.* (1995) は東部太平洋、Adam (1996) はモルジブ周辺海域において、350~640 mm FL のカツオに OTC を筋肉注射してから放流し、再捕個体の耳石を調べた。OTC による蛍光帯と耳石縁辺の間に形成された微細輪紋数は放流後の経過日数よりも少なかったことから、彼らはカツオ成魚の耳石縁辺域に形成される微細輪紋は日輪ではないと結論している。一方、Wild and Foreman (1980)、Wild *et al.* (1995) は、カツオと同時に放流再捕したキハダについては、耳石縁辺域の微細輪紋が日輪であることを確認した。彼らは、表面に付着する組織を取り除くために、取り出した耳石を家庭用の漂

白剤に浸し、蒸留水とアセトンですすいで標本を作成した。カツオ耳石の嘴状突起部分はキハダより薄いため、漂白剤に浸す時間が長いと、耳石縁辺が溶解して失われることがある。また、Adam (1996) は、縁辺域の蛍光帯位置を画像上で記録した後、蛍光帯があると思われる位置から耳石縁辺までの微細輪紋数を金属顕微鏡下で計数した。この方法では、蛍光帯から縁辺までの間隔 1~3  $\mu\text{m}$  の微細輪紋数を正確に計数できたか疑問である。

クロマグロ (Itoh *et al.* 2000)、キハダ (Wild *et al.* 1995)、メバチ (IATTC 2001)、ビンナガ (Laurs *et al.* 1985) など他のマグロ類では、耳石縁辺域の間隔の狭い微細輪紋が日輪であることが確認されている。カツオ成魚の耳石縁辺域に見られる間隔の狭い微細輪紋の日周期的形成については、より厳密な方法で検討する必要がある。本研究の第 2 章のように、縁辺域の間隔の狭い微細輪紋は約 200 mm FL 以上の幼魚~成魚の耳石で観察された。そこで 200 mm FL 以上のカツオ幼魚~未成魚に OTC を筋肉注射した後、海上生簀において 48 日間飼育し、OTC による蛍光帯の外側に形成された微細輪紋数と飼育日数を比較することにより、輪紋形成の日周性を検討した。

## 材料と方法

### 1. 2000 年の飼育実験

飼育実験に用いたカツオは、2000 年 8 月 23 日に鹿児島県野間岬沖（北緯 31 度 29 分、東経 130 度 02 分）（図 3-1）の表面水温 29.8°C の海域において、笠沙漁業協同組合所属の漁船により曳縄で採集され、直ちに漁船の活魚槽（2 t）中で鹿児島県片浦湾内（図 3-1）に運搬された。Wild and Foreman (1980) と Wild *et al.* (1995) の方法にしたがって、供試魚 137 個体に OTC 水溶液を筋肉注射した後、湾内の表層に設置された網生簀（8 m×8 m×7 m）に放流した。OTC 水溶液は、SIGMA Aldrich 社製の粉末状 OTC を蒸留水 100 ml に 27 mg の割合で溶かして作成し、OTC 投与量が体重 100 g あたり 2.7 mg になるように注射量を調整した。飼育実験に用いた 137 個体のうち 15 個体（260~270 mm FL）については、注射直後に 10 mm 単位で尾叉長を測定し、個体識別用の T バーアンカー型標識

を装着後、網生簀に放流した。注射から網生簀へ放流するまでの作業時間は、約 10 秒間であった。

網生簀へ放流した翌日（8 月 24 日）の夕方から餌としてナンキョクオキアミ *Euphausia superba* を与えたが、24 日には摂餌する個体はいなかった。翌 25 日の朝以降は摂餌行動が観察されたので、1 日 2 回朝夕にナンキョクオキアミを与えた。

注射後 8 月 26、27、28 日に網生簀から斃死魚を取上げて計数した。9 月 22 日午前に生存個体をすべて取り上げて $-30^{\circ}\text{C}$ の冷凍庫に保管した。

## 2. 2001 年の飼育実験

2001 年 8 月 24 日に鹿児島県野間岬沖（北緯 31 度 28 分、東経 130 度 06 分）（図 3-1）の表面水温  $29.0^{\circ}\text{C}$  の海域において、笠沙漁協所属の漁船により 328 個体（235～330 mm FL）のカツオを採集し、直ちに漁船の活魚槽中で鹿児島県片浦湾内に運搬した。2000 年と同様、全てのカツオに OTC 水溶液を筋肉注射し、T バーアンカー型標識を装着後に尾叉長を 5 mm 単位で測定して網生簀に放流した。8 月 26 日から、朝夕 2 回ナンキョクオキアミ、マアジ *Trachurus japonicus*、カタクチイワシ、キビナゴ *Spratelloides gracilis* を与えた。9 月 3 日、13 日、25 日にそれぞれ 5 個体を網生簀から採集し、 $-30^{\circ}\text{C}$  の冷凍庫に保管した。これとは別に、9 月 25 日午前に 50 個体を網生簀から取り上げ、再び OTC 水溶液を筋肉注射し、隣接する同じ大きさの網生簀に放流した。10 月 10 日に隣接した 2 ヶ所の網生簀から生存個体をすべて取り上げ、 $-30^{\circ}\text{C}$  の冷凍庫に保管した。

## 3. 耳石微細輪紋の観察と計測

実験魚を研究室において自然解凍し、尾叉長を 1 mm 単位、体重を 1g 単位で計測した。OTC による蛍光帯は紫外線によって失活する恐れがあるため、耳石の摘出と後述する微細輪紋の計測を日没後に行った。耳石（扁平石）を摘出し、附着物を解剖針とピンセットで除去して蒸留水ですすいだ後、完全に乾燥させてスライドガラス上のエナメル樹脂に封入した。蛍光装置付光学顕微鏡（OLYMPUS BX50 または BX60）を用いて蛍光帯を観察した。OTC の最大励起波長は 390 nm、蛍光最大波長は 560 nm であるため、蛍光キューブには励起フィ

ルター (BP 400-440 nm)、吸収フィルター (BA 475 nm)、ダイクロイックミラー (DM 445 nm) がセットになった WBV (wide blue violet) を使用した。対物レンズには OLYMPUS UMPlanFl ×50 を使用した。落射蛍光と透過光を同時に照射した耳石の蛍光帯と微細輪紋の光学顕微鏡画像をデジタルファイルとして保存した。

OTC を 1 回注射した個体の左右の耳石について、蛍光帯の 1 番内側の微細輪紋から縁辺の微細輪紋までを画像解析ソフト (Corel Corporation 製 Corel photo paint 8 J または RATOC システムエンジニアリング社製 耳石日輪計測システム) を用いて計数した。2001 年の飼育実験において OTC を 2 回注射した個体の耳石については、第 1 回の注射による蛍光帯の 1 番内側の微細輪紋から第 2 回の注射による蛍光帯の内側までの微細輪紋を耳石日輪計測システムで計数した。

#### 4. 統計検定

2000 年の飼育実験で OTC を 1 回注射した個体の耳石と 2001 年の飼育実験で OTC 注射を 2 回行った個体の耳石について、計数された微細輪紋数の左右の耳石での差を Wilcoxon の符号付順位和検定によって、また、飼育期間中に形成された微細輪紋数と飼育日数との差を Mann-Whitney の U 検定によって統計的に検定した。2001 年に OTC を 1 回注射し、注射後 10 日、20 日、32 日、47 日後に取り上げた個体について、計数された微細輪紋数の左右での差を Wilcoxon の符号付順位和検定によって検定した。また、耳石の蛍光帯から縁辺までの微細輪紋数と注射後の経過日数の関係をプロットし、一次式に回帰した。Zar (1999) に従って、共分散分析 (ANCOVA) を行い、回帰式の傾きが 1、切片が 0 と有意差があるかどうか検定した。

## 結果

### 1. 2000 年の飼育実験

OTC を投与した 137 個体のカツオは、注射した翌日の 8 月 24 日までに 32 個体、25 日に 14 個体、26 日に 2 個体が死亡した。実験を終了した 9 月 22 日まで

生存したのは OTC 投与個体数の 45%にあたる 62 個体 (262~310 mm FL) であった。このうち、左右の耳石とも OTC による蛍光帯が観察できたのは 58 個体であった (図 3-2)。蛍光帯と耳石縁辺の間の微細輪紋は、嘴状突起の縁辺域で最も鮮明に観察できた。蛍光帯が観察できた 58 個体のうち、試験的に蛍光帯の形成を観察した 1 個体は微細輪紋数を計数しなかった。57 個体の蛍光帯から縁辺までの微細輪紋数は、左の耳石で 27~32 ( $29.8 \pm 1.0$ ; 平均値  $\pm$  標準偏差) 本、右の耳石で 27~31 ( $29.7 \pm 0.9$ ) 本であった (図 3-3)。左右の耳石の微細輪紋数には、有意差は認められなかった (Wilcoxon の符号付順位和検定,  $P = 0.71$ )。また、注射後に形成された微細輪紋数と飼育日数の間にも、有意差はなかった (Mann-Whitney の  $U$  検定, 左  $P = 0.15$ , 右  $P = 0.051$ )。

OTC 注射時に T バーアンカー型標識を装着した 15 個体のうち、10 個体 (262~310 mm FL) が飼育実験終了時に取り上げられた。これら 10 個体の飼育開始時と終了時の尾叉長の差は、2~29 ( $22 \pm 11$ ) mm であった。飼育期間中の平均成長速度は  $0.74 \pm 0.35$  mm/day であった。

## 2. 2001 年の飼育実験

OTC を 2 回注射した 50 個体のうち、実験終了時の 10 月 10 日まで 29 個体 (265~341 mm FL) が生存した。このうち OTC による 2 本の蛍光帯が観察できたのは 26 個体であった。2 本の蛍光帯とその間の微細輪紋は、2000 年の飼育個体と同様に耳石前方の嘴状突起の縁辺域で最も鮮明に観察できた。2 回の注射間隔 32 日間に形成された微細輪紋数は、左の耳石で 31~33 ( $32.0 \pm 0.7$ ) 本、右の耳石で 30~34 ( $32.1 \pm 0.65$ ) 本であった (図 3-4)。左右の耳石の微細輪紋数には、有意差は認められなかった (Wilcoxon の符号付順位和検定,  $P = 0.46$ )。微細輪紋数と飼育日数の間には有意な差は認められなかった (Mann-Whitney の  $U$  検定, 左  $P = 0.64$ , 右  $P = 0.32$ )。

1 回注射した後、9 月 3 日、13 日、25 日に採集した各 5 個体と飼育実験終了時に取り上げた 13 個体の左右の耳石について、注射後の飼育日数と注射による蛍光帯から縁辺までの微細輪紋数には、左右の耳石で差がなかった (Wilcoxon の符号付順位和検定,  $P = 0.40$ )。蛍光帯から縁辺までの微細輪紋数 ( $n$ ) を注射後の飼育日数 ( $d$ ) に回帰させた結果、左の耳石では  $n = 0.996 d + 0.006$ 、 $R^2$

= 0.993、右の耳石では  $n = 0.997d + 0.48$ 、 $R^2 = 0.985$  の関係が求められた (図 3-5)。いずれの傾きにも 1 と有意な差は認められず (ANCOVA, 左  $P = 0.81$ , 右  $P = 0.91$ )、切片についても 0 と有意な差は認められなかった (ANCOVA, 左:  $P = 0.92$ , 右:  $P = 0.58$ )。

9月13日、25日、10月10日に採集した51個体について、飼育開始時と採集時の尾叉長の差から成長速度を求めた。9月13日と9月25日に採集した5個体については、それぞれ  $0.44 \pm 0.05$  mm/day、 $0.75 \pm 0.04$  mm/day であった。10月10日の飼育終了時に取り上げた OTC を 1 回注射した 13 個体は  $0.49 \pm 0.03$  mm/day であり、同時に取り上げた OTC を 2 回注射した 28 個体では、 $0.63 \pm 0.29$  mm/day であった。

## 考 察

### 1. 飼育実験中の成長速度

2000年と2001年の飼育実験期間中の平均成長速度  $0.44 \sim 0.75$  mm/day は、第4章で推定された日本周辺海域で漁獲された未成魚と成魚の成長速度 ( $0.54$  mm/day)、西部太平洋熱帯海域で漁獲された未成魚の成長速度 ( $0.49$  mm/day) と近似した。したがって、本飼育実験は成長速度に関して天然とほぼ同様の条件であったと考えられた。

### 2. カツオ耳石における日輪形成の検証

OTC 投与後の経過日数と形成された微細輪紋数が一致するとともに、経過日数に対する形成輪紋数の回帰直線の傾きが 1、切片が 0 と差がないことから、カツオの幼魚から未成魚 (260~340 mm FL) の耳石縁辺域に見られる間隔  $1 \sim 3 \mu\text{m}$  の微細輪紋が日輪であることが確認された。カツオ成魚の耳石の中心域に見られる間隔  $1 \sim 4 \mu\text{m}$  の微細輪紋が Radtke (1983) によって、その外側の中間域に見られる間隔  $15 \sim 40 \mu\text{m}$  の微細輪紋が Tanabe *et al.* (2003) によって、その外側の縁辺域にみられる間隔  $1 \sim 3 \mu\text{m}$  の微細輪紋が本研究によって日輪と確認され、カツオ耳石に見られる構造の異なる 3 種類の微細輪紋は、全て日輪である可能

性が示された。第 2 章で述べた耳石標本作成方法を用いることで、仔魚期～未成魚期のカツオの日齢を査定することが可能となった。また、成魚期に形成される耳石縁辺域の微細輪紋についても、未成魚期の微細輪紋とよく微細構造が類似していることから日輪であると考えられる。

一般に耳石縁辺では、透過光が曲面で屈折して微細輪紋が重なって見えることがあり、微細輪紋数に計数誤差を生じ易い。2000 年の飼育実験では、計数された微細輪紋数と飼育日数に有意な差は認められなかったが、微細輪紋数の分散が比較的大きかった。これは縁辺部の微細輪紋の計数誤差によると考えられる。2001 年の飼育実験では、第 2 回の OTC 注射後 10 日間飼育を継続し、第 1 回の注射による蛍光帯から第 2 回の注射による蛍光帯までの微細輪紋数を計数した。この方法によって耳石縁辺における微細輪紋計数を避けた結果、微細輪紋数の分散は 2000 年の結果より小さくなった (図 3-3、図 3-4)。

Wild and Foreman (1980) , Wild *et al.* (1995) および Adam (1996) では、縁辺域の微細輪紋は日輪でないとされ、本研究の結論と異なった。これらの研究では耳石標本作成時に漂白剤によって耳石に付着する粘膜などの組織を除去したが、その過程でカツオ耳石の薄い嘴状突起の一部が溶解されて失われた可能性が高い。また、これらの報告では耳石を樹脂に封入することなく観察したが、一般に研磨標本を樹脂に封入することで、研磨面が平滑化され光の散乱を減少させる結果、微細輪紋をより鮮明に観察できるようになる。本研究で示した耳石標本作成方法の改良により、微細輪紋の計数がより正確に行えるようになり、カツオ耳石の縁辺域における日輪形成が実証された。

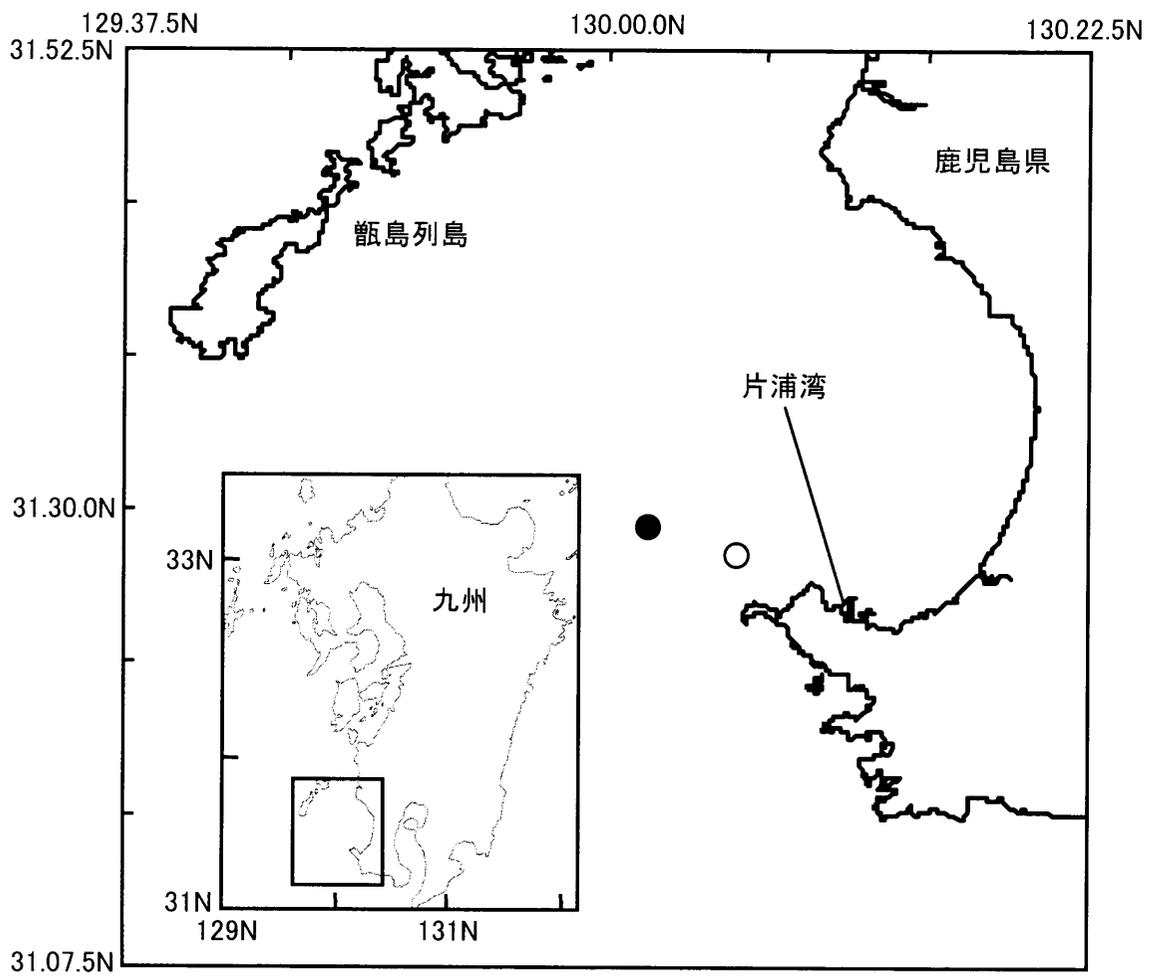


図3-1. 2000年(●)と2001年(○)におけるカツオの採集地点と飼育実験を行った片浦湾.

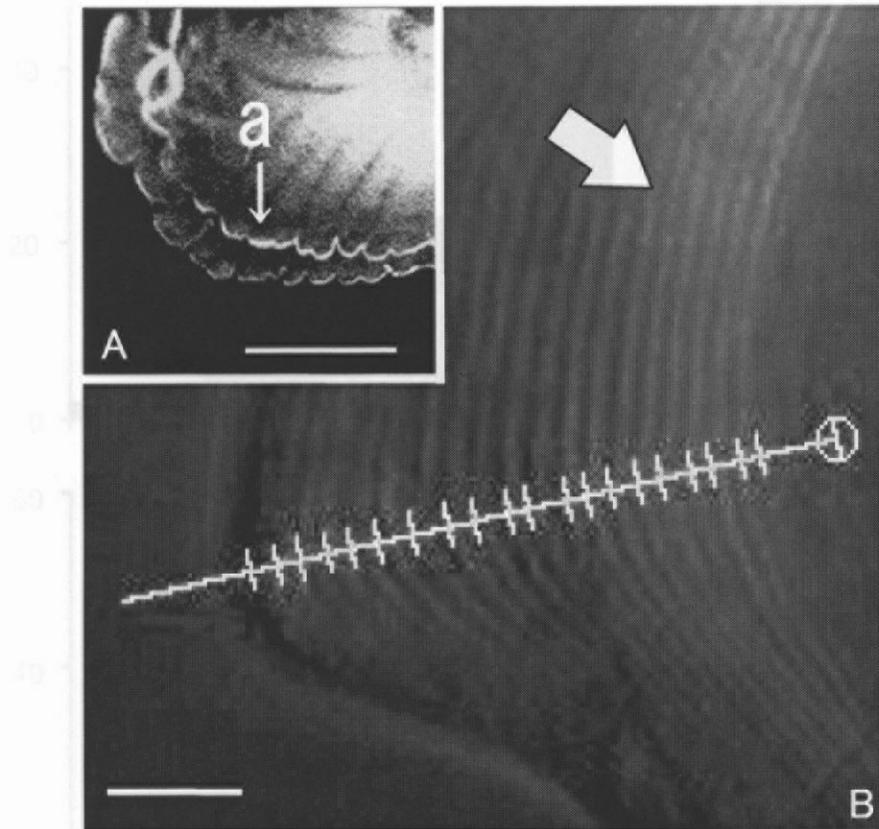


図3-2. OTCを注射したカツオ耳石嘴状突起部の蛍光光学顕微鏡写真. Aでは細い蛍光帯が明瞭に見える(白線は500  $\mu\text{m}$ ). 縁辺部を拡大したBでは蛍光帯( $\Sigma$ )の中に6~7本の微細輪紋が確認され、その外側に同じ構造の微細輪紋が耳石縁辺まで連続している(白線は20  $\mu\text{m}$ ).

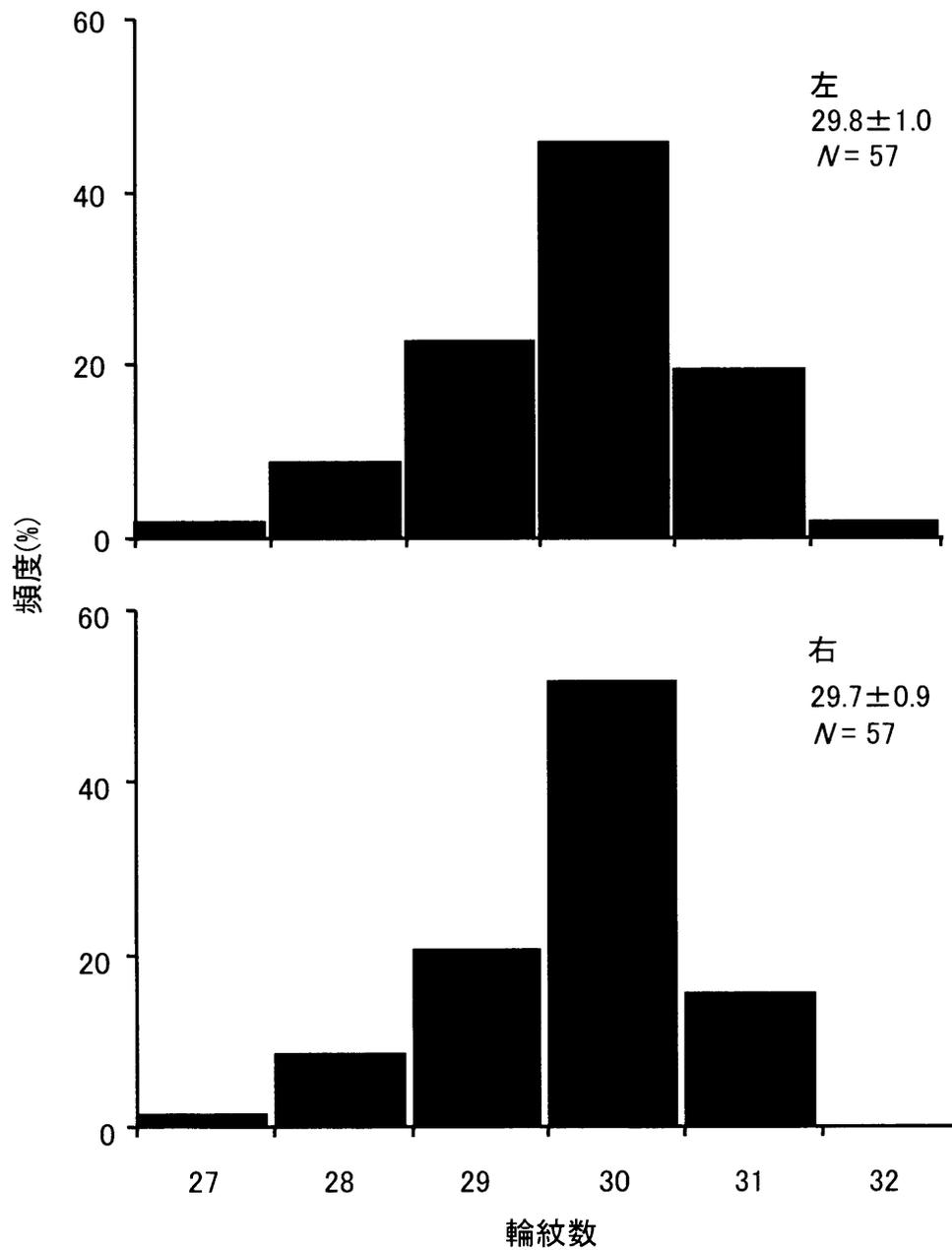


図3-3. 2000年の飼育実験におけるOTC蛍光帯から耳石縁辺までの輪紋数の頻度分布.

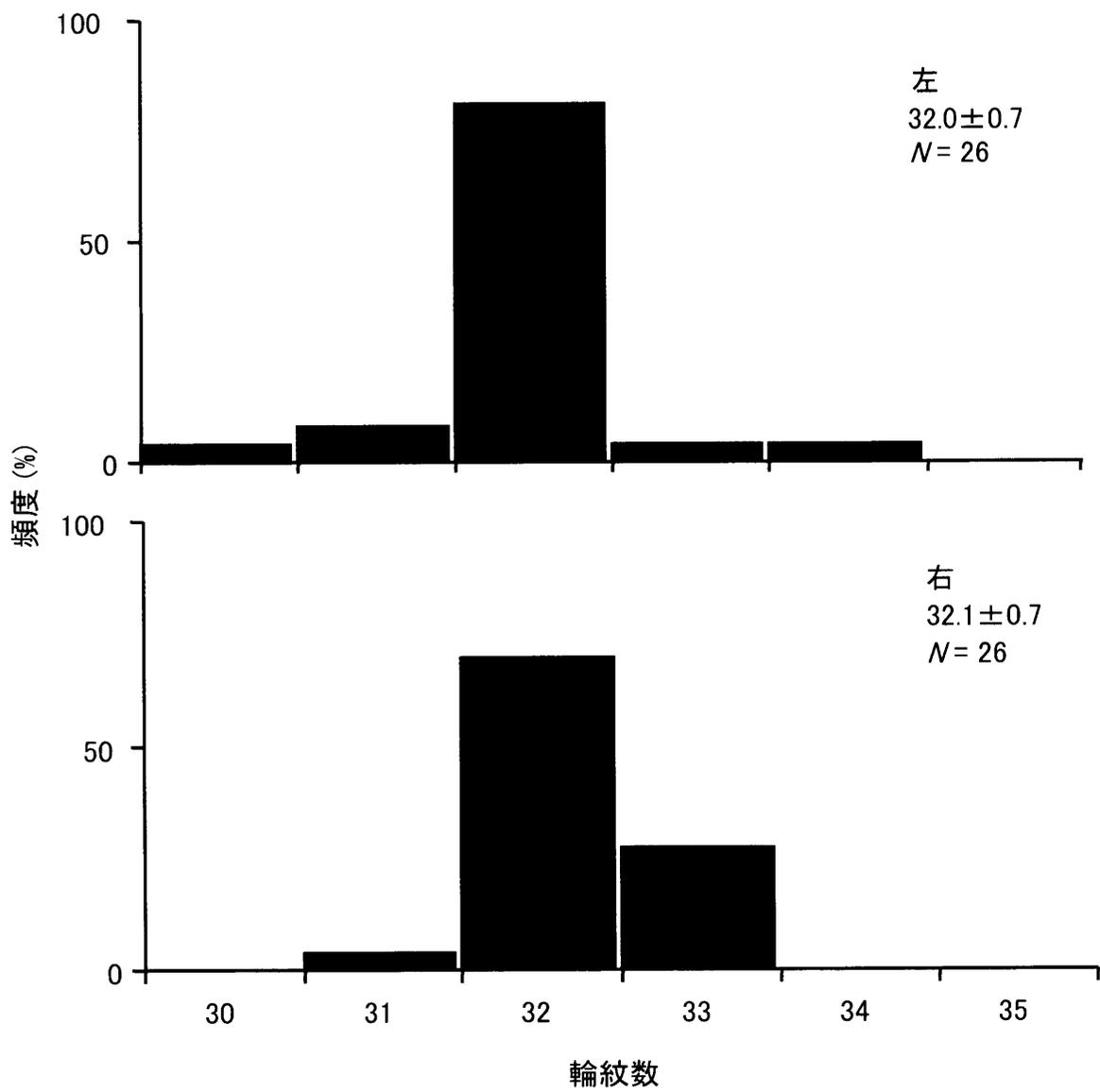


図3-4. 2001年の飼育実験における2本のOTC蛍光帯間の輪紋数の頻度分布.

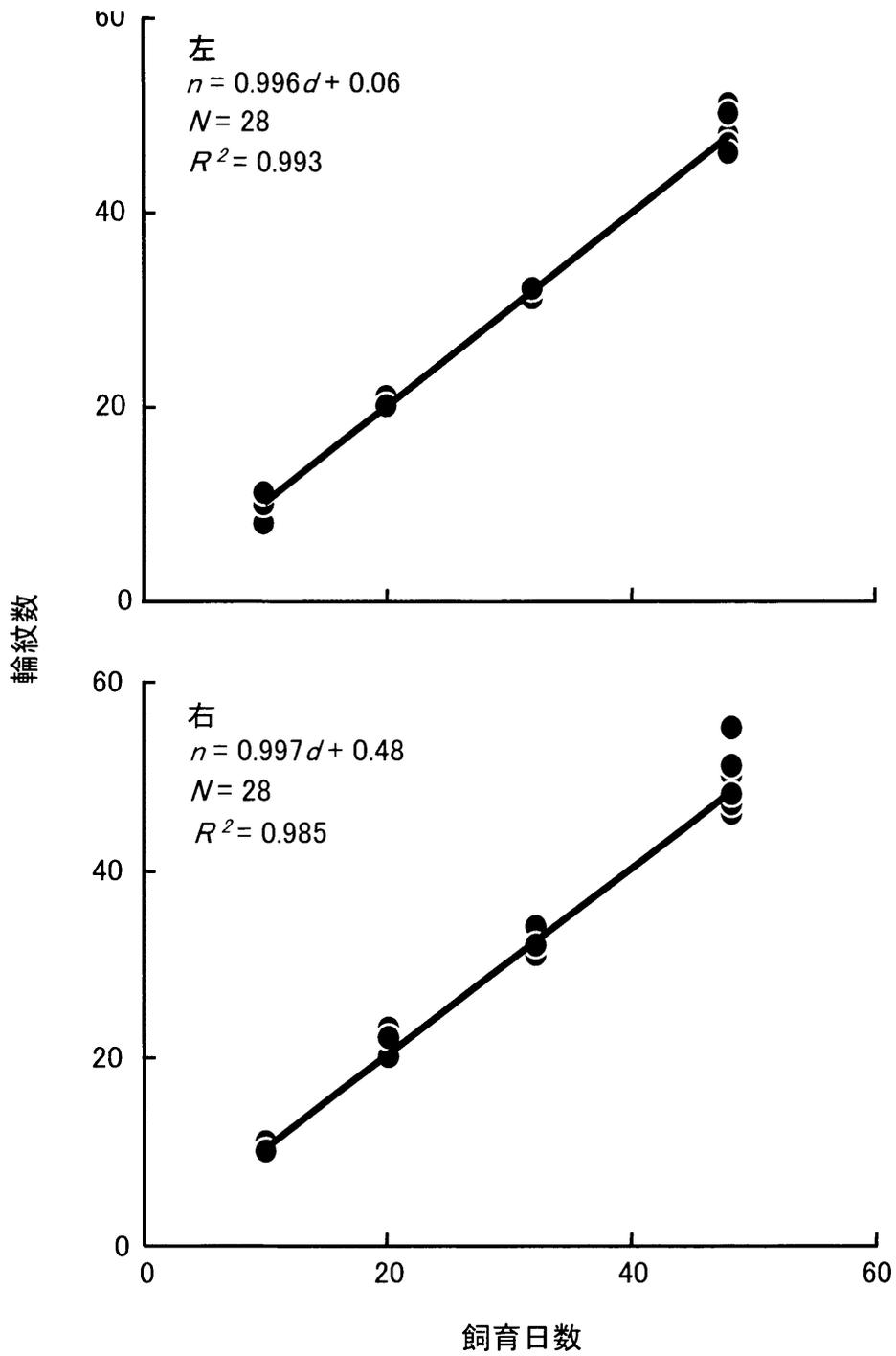


図3-5. 飼育日数 ( $d$ ) とOTC蛍光帯から耳石縁辺までの輪紋数 ( $n$ ) との関係。

## 第4章 太平洋各海域で漁獲されたカツオの成長

### はじめに

高度回遊性魚類であるカツオには、国際的な資源管理が必要である。しかし、第1章で見たように、資源管理の基礎知見として最も重要なカツオの年齢と成長については、現在でも定説が得られていない。

本研究では、前章までにカツオの発達段階に応じた3種類の耳石標本作成方法を定式化し、耳石微細輪紋が全発達段階を通して日周期的に形成される可能性が示された。耳石日輪は信頼性の高い齢形質として、多くの硬骨魚類の生態研究に用いられる (Jones 1992, Secor *et al.* 1995)。本章では、太平洋各海域で採集された稚魚～成魚のカツオの日齢査定を行い、海域ごとに日齢-尾叉長関係と日輪間隔の経日変化を求め、海域間比較を行った。

### 材料と方法

#### 1. 供試魚

本研究に用いたカツオ仔稚魚129個体(3.4~97.0 mm FL)のうち、114個体は1994年11~12月に青海丸により(表4-1)、他の12個体は1997年4~5月に新りあす丸により(表2-2)、残りの3個体は1999年6月に俊鷹丸により採集された標本である(表2-4)。

本研究に用いた幼魚99個体(102~249 mm FL)のうち、65個体は1999年6月に俊鷹丸(表2-5)、残りの34個体は1998年8月~2003年8月に曳縄、まき網、竿釣りで漁獲された(表4-2)。これらの幼魚は、船上で氷冷保存して漁港に持ち帰り、その後-30℃で保存された。

本研究には未成魚623個体を用いた。このうち620個体(250~449 mm FL)は、1997年8月~2003年10月に日本周辺海域と西部太平洋熱帯海域において、竿釣り、まき網、曳縄で漁獲された(表4-3)。他の3個体(446~448 mm FL)

は、2004年3月に東部太平洋熱帯海域（北緯18度57分，西経109度01分）においてまき網で漁獲された。これらの未成魚は、船上で $-30^{\circ}\text{C}$ に保存もしくは氷冷保存して漁港に持ち帰り、その後 $-30^{\circ}\text{C}$ で保存された。

本研究に用いた成魚408個体のうち、369個体（450～860 mm FL）は1997年6月～2004年3月に日本周辺海域と西部太平洋熱帯海域において竿釣り、まき網、曳縄、流し網で漁獲された（表4-4）。他の成魚25個体（450～590 mm FL）は、2003年3～4月にオセアニア周辺海域において竿釣りで漁獲された（表4-5）。また、残る13個体（456～568 mm FL）は、2004年3月に東部太平洋熱帯海域（北緯18度57分，西経109度01分）においてまき網で漁獲された。これらの成魚は、船上で $-30^{\circ}\text{C}$ に保存もしくは氷冷保存して漁港に持ち帰り、その後 $-30^{\circ}\text{C}$ で保存された。

これらの供試魚の漁獲位置を図4-1に発達段階別に示した。標準体長のみが測定された一部の稚魚については、稚魚～成魚（ $N=373$ ，18.1～598.0 mm SL，19.4～614.0 mm FL）から求めた以下の標準体長（ $L_{st}$ ）と尾叉長（ $L$ ）の関係を用いて尾叉長を求めた。

$$L = 1.02 L_{st} + 0.03 \quad (R^2 = 0.9996)$$

## 2. 耳石日輪の計数・計測

稚魚～成魚の耳石標本を第2章で述べた方法によって作成した。日輪の計数・計測には、耳石日輪計測システム（RATOC システムエンジニアリング社）を用いた。このシステムでは、CCDカメラによって取り込んだ耳石の光学顕微鏡画像上の日輪をJISEKIソフトウェア（RATOC システムエンジニアリング社）によって計数・計測する。耳石核と耳石前方嘴状突起の間の日輪の接線に対して垂直に計測線を設定した。耳石の成長方向の変化に伴って日輪の接線の角度が変化するため、複数の計測線を設定し、各計測線上の日輪位置を、耳石核と嘴状突起の縁辺までの最大距離である耳石半径に対応する線分上に投影した。耳石半径上で、隣接する日輪間の距離（日輪間隔）を $0.1 \mu\text{m}$ 単位で測定した。

## 3. Gompertz の成長式の推定

1998～2003年に西部太平洋で採集された仔魚から幼魚（ $N=228$ ，3.4～249 mm

FL) の日齢と尾叉長の関係から、MS-Excel の Solver を用いて、非線形最小二乗法により Gompertz の成長式パラメータを推定した。

$$L_t = L_\infty \exp[-\exp\{-k(t-t_0)\}]$$

$L_t$  : 日齢時の尾叉長 (mm)

$t$  : 日齢

$k$  : 成長係数

$L_\infty$  : 極限体長 (mm)

$t_0$  : 時間軸上の定数

#### 4. 耳石日輪間隔の海域間比較

硬骨魚類では、一般に耳石半径と体長との間には直線式あるいはアロメトリー式で表わされる関係がある。カツオにおいても、耳石半径と尾叉長の関係はアロメトリー式で表され (図 4-2)、日輪間隔は体成長速度を表わす指標となることがわかった。

2000~2004年に北緯30度以北の日本周辺海域で漁獲された北上回遊群の未成魚と成魚 ( $N = 209, 282 \sim 860$  mm FL) について、加齢に伴う日輪間隔の変化を調べた。25度より低緯度の西部太平洋熱帯海域で漁獲されたカツオについては、熱帯滞留群である未成魚 ( $N = 126, 257 \sim 443$  mm FL) と、熱帯滞留群と北上回遊群が混在すると考えられる成魚 ( $N = 204, 466 \sim 628$  mm FL) に分けて日輪間隔の変化を求めた。また、2003年に南緯30度以南のオセアニア温帯海域で漁獲された成魚 ( $N = 18, 450 \sim 545$  mm FL) と南緯27度の亜熱帯海域で漁獲された成魚 ( $N = 7, 470 \sim 590$  mm FL)、2003年に東部太平洋熱帯海域において漁獲された成魚 ( $N = 13, 456 \sim 568$  mm FL) について、日輪間隔の変化を求めた。これらの個体の漁獲記録は表 4-3、4-4 および表 4-5 に示した。ただし、2002年6月18日、11月12日、2003年10月5日に漁獲した未成魚のうち5個体と、2002年3月15日、4月29日、6月12日、6月18日、2003年5月11日、9月23日に漁獲した成魚17個体は、耳石嘴状突起の一部が破損したため日輪間隔を測定できなかった。

## 結果

### 1. 耳石半径と尾叉長の関係

1994～2004年に、日本周辺を含む西部太平洋で採集された20 mm FL未満の仔魚～稚魚 ( $N = 80$ , 3.5～19.1 mm FL) と20 mm FL以上の稚魚～成魚 ( $N = 1112$ , 20.0～860.0 mm FL) の耳石半径 ( $r$ ) と尾叉長 ( $L$ ) の関係は、それぞれアロメトリー式で表わされた (図4-2)。

$$20 \text{ mm FL 未満の仔魚～稚魚} : L = 0.567 r^{0.629} \quad (R^2 = 0.92)$$

$$20 \text{ mm FL 以上の稚魚～成魚} : L = 0.005 r^{1.485} \quad (R^2 = 0.96)$$

### 2. 漁法による漁獲個体の体長差の検討

竿釣り、まき網、曳縄の漁獲物から共通してデータが得られた152～161日齢範囲について、漁法別に平均体長±SDを見ると、竿釣りが $321.7 \pm 31.6$  mm FL ( $N = 17$ )、まき網が $300.4 \pm 15.7$  mm FL ( $N = 11$ )、曳縄が $302.2 \pm 23.5$  mm FL ( $N = 9$ )であった。これらの3漁法間では尾叉長に有意差がなかった (Kruskal-Wallisの検定,  $P = 0.053$ )。この結果から、以下の成長過程の解析には、漁法に係わりなく漁獲されたすべての個体を1群として用いた。

### 3. 仔魚期から幼魚期の日齢と尾叉長の関係

3.4～249 mm FLの仔魚期から幼魚期の日齢 ( $t$ ) と尾叉長 ( $L_t$ ) は、Gompertzの成長式で表された。

$$L_t = 227.61 \exp[-\exp\{-19.21(t - 0.09)\}], \quad N = 228$$

稚魚から幼魚への移行期にあたる100 mm FL前後 (95～105 mm FL) の個体は37～44日齢 ( $40 \pm 2.7$ ; 平均±SD) であった。100 mm FLを超えると日齢とともに尾叉長は急激に増大し、55日齢では164 mm FLに達した。また、80～100日齢の12個体 (187～240 mm FL) の平均体長は $207.5 \pm 17.0$  mm FLであった (図4-3)。

### 4. 未成魚および成魚の日齢と尾叉長の関係

1997～2003年に北緯30度以北の日本周辺海域で漁獲された未成魚と成魚 ( $N =$

276, 250~860mm FL, 98~1077 日齢) と 2000~2003 年に北緯 25 度以南の西部太平洋熱帯海域で漁獲された未成魚 ( $N = 129$ , 257~443mm FL, 112~417 日齢) の日齢 ( $t$ ) と尾叉長 ( $L_t$ ) の関係は一次式で表された (図 4-4)。

$$\text{日本周辺海域 (未成魚と成魚)} : L_t = 0.54t + 244.64 \quad (R^2 = 0.85)$$

$$\text{西部太平洋熱帯海域 (未成魚)} : L_t = 0.49t + 232.21 \quad (R^2 = 0.65)$$

日本周辺海域の未成魚と成魚の一次式の傾きは、西部太平洋熱帯海域の未成魚より有意に大きかった (F 検定,  $P < 0.001$ )。150 日齢前後 (145 - 155 日齢) の平均尾叉長  $\pm$  SD は日本周辺海域で  $332.6 \pm 21.1$  mm FL ( $N = 8$ )、西部太平洋熱帯海域では  $300.8 \pm 17.4$  mm FL ( $N = 27$ ) であり、300 日齢前後 (295~305 日齢) の平均尾叉長は日本周辺海域で  $395.1 \pm 29.5$  mm FL ( $N = 14$ )、西部太平洋熱帯海域では  $364.4 \pm 39.3$  mm FL ( $N = 7$ ) であった。どちらの日齢も日本周辺海域の群の尾叉長が有意に大きかった (Mann-Whitney の  $U$  検定,  $P < 0.001$ )。

2003 年に東部太平洋熱帯海域で漁獲された 16 個体 (446~568mm FL, 346~450 日齢) とオセアニア周辺海域で漁獲された 25 個体 (450~590mm FL, 354~578 日齢) の日齢と尾叉長の関係を図 4-5 に示した。400 日齢前後 (380~420 日齢) の平均尾叉長は、東部太平洋熱帯海域が  $473.4 \pm 19.4$  mm FL ( $N = 10$ )、オセアニア周辺海域が  $486.1 \pm 23.6$  mm FL ( $N = 9$ ) で、日本周辺海域の平均値  $461.3 \pm 29.4$  mm FL ( $N = 81$ ) より有意に大きかった (Kruskal-Wallis の検定,  $P < 0.05$ )。

## 5. 日輪間隔の海域間比較

太平洋各海域で漁獲された成魚または未成魚群の 25 日齢時までの日輪間隔の変化を図 4-6 に、200 日齢時までの日輪間隔の変化を図 4-7 と 図 4-8 に示した。いずれの海域で漁獲された群とも孵化後 5 日前後から日輪間隔が急増し、16~28 日齢で極大値に達した後に単調減少し、150 日齢以降は  $1 \sim 3 \mu\text{m}$  でほぼ一定となった。日本周辺海域で漁獲された未成魚と成魚 (北上回遊群) の日輪間隔の変化傾向は類似していた。熱帯滞留群と北上回遊群を含むと考えられる西部太平洋熱帯海域で漁獲された成魚の日輪間隔の変化は、日本周辺海域で漁獲された未成魚と成魚に近かった。これに対して西部太平洋熱帯海域で漁獲された未成魚 (熱帯滞留群) の日輪間隔の極大値 ( $30.0 \mu\text{m}$ ) は他の 3 群より有意に大きかった (Kruskal-Wallis の検定,  $P < 0.001$ )。しかし、50 日齢以降の日輪間隔

の減少は他の3群より急で、75日齢時の間隔(9.3  $\mu\text{m}$ )はこれら3群より有意に小さかった(Kruskal-Wallisの検定,  $P < 0.001$ )。

オセアニア亜熱帯海域で漁獲された成魚の日輪間隔の極大値(32.8  $\mu\text{m}$ )は、日本周辺海域の未成魚・成魚や西部太平洋熱帯海域で漁獲された成魚より有意に大きかった(Kruskal-Wallisの検定,  $P < 0.001$ )。産卵場から南下回遊したと思われるオセアニア温帯海域で漁獲された成魚の日輪間隔の変化傾向は、25日齢まで西部太平洋熱帯海域の未成魚と類似したが、25日齢以降は日本周辺海域の未成魚と成魚に類似した。東部太平洋熱帯海域の成魚の日輪間隔の変化は、日本周辺海域の未成魚と成魚、および西部太平洋熱帯海域の成魚と類似した。

日輪間隔の極大値とその日齢、日輪間隔20  $\mu\text{m}$ 以上の日齢範囲、日輪間隔10  $\mu\text{m}$ 以上の日齢範囲を図4-9に示した。日本周辺海域で漁獲された未成魚と成魚(北上回遊群)は、日輪間隔の極大値とその日齢、日輪間隔20  $\mu\text{m}$ 以上の日齢範囲、日輪間隔10  $\mu\text{m}$ 以上の日齢範囲、すべてにおいてほぼ一致した。西部太平洋熱帯海域の成魚(熱帯滞留群と北上回遊群を含む)は、日輪間隔極大値とその日齢、間隔20  $\mu\text{m}$ 以上の日齢が日本周辺海域の未成魚と成魚に近かった。西部太平洋熱帯海域の未成魚(熱帯滞留群)では最も若齢(11日)で20  $\mu\text{m}$ を超え、最も高齢の52日齢まで20  $\mu\text{m}$ 以上を維持した。オセアニア温帯海域の成魚(南下回遊群)は、間隔10  $\mu\text{m}$ 以上の日齢範囲が日本周辺海域と近かった。日輪間隔が10  $\mu\text{m}$ 未満に低下する日齢は、西部太平洋熱帯海域で漁獲された未成魚(熱帯滞留群)が73日齢と若かったのに対し、同海域の成魚および他の海域の未成魚と成魚では83~87日齢に集中した。

## 考 察

### 1. 耳石半径と尾叉長の関係

20 mm FL未満のカツオ仔稚魚では、耳石半径と体長の関係が劣成長のアロメトリー式で表された。ニシン科魚類の仔魚の耳石半径-体長関係も劣成長のアロメトリー式で表される。この相対成長様式は、加齢とともに耳石成長量が体成長量より相対的に大きくなることを示している。その結果、20 mm FL未満の

カツオでは、尾叉長が大きい稚魚の方が相対的に大きい耳石を持つ。

これに対して、20 mm FL 以上の稚魚～成魚の耳石半径と体長の関係は優成長のアロメトリー式で表わされた。これは、パラメータ 1.485 が 1 以上であり、耳石成長に対する体成長の割合が日齢とともに大きくなることを表している。その結果、耳石半径／体長の比は日齢とともに小さくなる。サンマ *Cololabis sira* でも、耳石半径に対する体長の関係は優成長のアロメトリー式で表された (Watanabe *et al.* 1988)。マグロ族魚類やサンマなどの外洋性の回遊魚の耳石が体の大きさに比して小さいのは、このような耳石の成長様式によると考えられる。ニシン科魚類の稚魚期以降の耳石半径－体長関係は直線関係で表される (Butler 1987, 白藤 2004)。この場合、稚魚期以降は体長に対する耳石半径の比は一定である。ニシン科魚類の耳石がマグロ族魚類より相対的に大きいのは、両分類群におけるこのような耳石成長様式の違いによって説明できる。

耳石成長に対する体成長の関係がアロメトリー式で表されると、同じ日齢範囲内では日輪半径をその日輪が形成された日の体長の指標として、また、日輪間隔を成長速度の指標として用いることができる。カツオの耳石半径－体長関係は 20 mm FL を境界として 2 つのアロメトリー式で表わされることがわかったので (図 4-2)、仔魚期から成魚期の成長過程を日輪半径や日輪間隔に基づいて詳細に解析することが可能になった。

## 2. 稚魚期と幼魚期の成長過程

マグロ族魚類では、未成魚や成魚が仔稚魚を捕食する共食いが知られている (堀田 1953, 須田 1953, King and Ikehara 1956, Nakamura 1965, Dragovich 1970, Yoshida 1971, Dragovich and potthoff 1972, 森 1972, 飯塚ら 1989, 青木 1999, 田辺 2002)。本研究の過程で、西部太平洋熱帯海域で漁獲されたカツオ成魚の胃内容物として 26.5～214.0 mm FL のカツオ 67 個体が得られた。1998 年 4 月 26 日にカロリン諸島周辺海域 (北緯 10 度 22 分、東経 156 度 12 分) で曳縄を用いて漁獲された 489 mm FL のカツオ成魚の胃内容物からは、カツオ稚魚 5 個体 (28.0～50.0 mm FL) が得られ、そのうち 1 個体 (43.0 mm FL) の稚魚の胃内容物中には、16.0 mm FL の稚魚が含まれていた (嘉山 未発表)。Nakamura (1965) は、カツオ成魚の胃内容物中におけるマグロ族仔魚の出現率は、西部太平洋熱

帯海域で 3.8~6.2%、中部太平洋熱帯海域で 24.8~44.2%と、熱帯海域で高いことを報告している。これらのことから、カツオの産卵海域である熱帯海域では、共食いがカツオ仔稚魚の重要な減耗要因であると考えられる。約 10 日間の仔魚期の後に稚魚期に入って成長を加速し、仔稚魚期 ( $\leq 100$  mm FL) を 1 ヶ月あまりで通過するカツオの成長様式は、生活史初期の累積的な被食減耗を低くする要因となっていると考えられる。

稚魚期~幼魚期のカツオの日齢と尾叉長の関係を見ると、日齢とともに尾叉長がほぼ直線的に増加し、約 200 mm FL 以上の幼魚期では、日齢に対する尾叉長の増加割合が漸減した (図 4-3)。200 mm FL はおよそ 80 日齢に相当し、日輪間隔が最も急激に低下した時期にあたる (図 4-7, 図 4-8)。この時期は本研究の第 2 章で明らかになった耳石中間域の間隔の広い微細輪紋から縁辺域の間隔の狭い微細輪紋に移行する時期と一致していた。

150~200 mm FL のカツオ幼魚の採集記録は、Yoshida (1971) と森 (1972) が延縄で漁獲されたマグロ・カジキ類の胃内容物中から得たものに限られる。森 (1972) によると、マグロ・カジキ類に捕食されていたカツオの体長範囲は 60~200 mm FL に集中しており、200 mm FL を超えると胃内容物からの出現頻度が減少し、300 mm FL 以上の未成魚の出現はまれであった。このことから、200 mm FL を超えるカツオはマグロ・カジキ類に捕食されにくくなると考えられた (森 1972)。200~250 mm FL になるとカツオは成魚的な体色・体形を獲得する (Waldron 1963)。益田 (2005) はマサバ、カタクチイワシ、マアジの 3 魚種について、仔稚魚期の行動特性から生残過程を比較した。その結果、マサバはマアジより捕食者からの逃避能力が劣っているが、著しく速い成長で被食を回避していると考察した。上述した知見から、カツオが捕食されやすい時期を 200 mm FL 以下と考えると、これは 80 日齢未満に相当し、生活史の中で最も成長速度が大きい時期にあたる。カツオは稚魚期から幼魚期の著しく速い成長により、捕食されやすい時期を短時間で通過することによって、被食減耗を回避していると考えられた。

### 3. 未成魚期と成魚期の成長過程

未成魚から成魚への移行時期にあたる約 450 mm FL に達する年齢の推定値には、過去の研究報告によって差があり、最短で孵化後半年 (Leroy 2000) から最長で孵化後 3 年 (相川・加藤 1938) と推定された。本研究の結果、日本周辺海域と西部太平洋熱帯海域、東部太平洋熱帯海域、オセアニア周辺海域で漁獲された個体はいずれも孵化後 1 年で 400~500 mm FL に達すると推定された。この結果は、これまで様々な方法によって推定された 1 歳時体長の不一致が齢査定方法の問題に起因したことを示している。

### 4. 各海域で漁獲されたカツオの日輪間隔の変化

熱帯滞留群と考えられる西部太平洋熱帯海域で漁獲された未成魚と、北上回遊群と考えられる日本周辺海域で漁獲された未成魚、成魚と比較すると、前者はより若齢 (11 日齢) で日輪間隔が 20  $\mu\text{m}$  を超え、より若齢 (16 日齢) でより大きい (30.0  $\mu\text{m}$ ) 日輪間隔の極大値に達した。これらは、熱帯滞留群の初期成長が北上回遊群より大きいことを示す。熱帯滞留群では、日輪間隔 10  $\mu\text{m}$  に低下するのが 73 日齢と、北上回遊群の 85~87 日齢より早く、尾叉長が 200 mm に近づいて以降の成長低下が北上回遊群より若齢でおこっていることがわかる。

西部太平洋熱帯海域で漁獲された成魚は、日輪間隔の極大値やそれに達した日齢、日輪間隔が 20  $\mu\text{m}$  以上の日齢範囲などで、北上回遊群に類似した値を示した。これは、この成魚群が熱帯滞留群とそれより大きな割合の北上回遊群によって構成されているためと考えられる。

東部太平洋熱帯海域で漁獲された群を見ると、日輪間隔が極大値に達した日齢 (28 日齢) がやや高齢であることを除くと、日本周辺海域で漁獲された北上回遊群と類似した初期成長を示すと考えられる。オセアニア亜熱帯海域で漁獲された成魚は、日輪間隔極大値の日齢と、日輪間隔が 10  $\mu\text{m}$  以下になる日齢がやや高齢であることを除くと、西部太平洋熱帯海域の未成魚と同様に初期成長が速いと考えられる。以上のように、1 歳時の尾叉長で見ると太平洋の海域間の差は小さいと考えられたが、それに至る成長過程には海域間で違いがあることがわかった。

表4-1. 西部太平洋熱帯海域におけるカツオ仔稚魚の採集記録.

年/月/日	投網時刻	投網位置		曳網速度(kt)	曳網水深(m)	標本数	尾叉長(mm)
		緯度(北緯)	経度(東経)				
1994/11/9	0:40	2° 59'	140° 00'	4.0-4.5	80-100	3	64.6-84.2
11/10	14:55	4° 56'	141° 00'	3.5-4.0	80-100	19	50.1-79.2
11/10	19:40	4° 59'	141° 00'	4.5-5.0	40-60	7	51.7-70.6
11/11	13:35	6° 59'	140° 59'	4.0-4.5	40-60	4	13.5-20.6
11/11	14:48	6° 57'	140° 58'	4.0-4.5	80-100	5	12.5-20.8
11/11	19:35	7° 01'	141° 00'	4.0-4.5	40-60	3	16.5-20.9
11/23	12:25	11° 00'	147° 30'	4.5-5.0	40-60	21	9.4-18.7
11/29	13:25	3° 00'	152° 30'	4.5-5.0	40-60	13	11.0-13.8
11/30	12:25	3° 00'	155° 00'	4.5-5.0	40-60	20	10.7-16.5
12/3	19:35	7° 00'	157° 00'	4.5-5.0	40-60	3	33.7-36.4
12/3	21:00	7° 00'	156° 57'	4.5-5.0	80-100	2	45.9-47.2
12/7	14:50	14° 57'	154° 56'	3.5-4.0	80-100	2	11.1-12.8
12/7	21:05	14° 57'	154° 55'	4.0-4.5	80-100	2	12.6-19.1
合計						104	9.4-84.2

表4-2. 西部太平洋におけるカツオ幼魚の漁獲記録.

年/月/日	漁獲位置		漁法	標本数	尾叉長(mm)
	緯度(北緯)	経度(東経)			
1998/8/10	33° 28′	136° 49′	曳縄	1	228
2000/7	34° 16′	136° 42′	曳縄	3	230-246
7/22	33° 38′	136° 00′	曳縄	3	211-247
8/22	31° 29′	130° 02′	曳縄	3	236-249
2001/4/25	3° 05′	163° 51′	まき網	1	235
8/9	35° 52′	140° 59′	竿釣り	1	249
2003/7/27	27° 05′	129° 58′	竿釣り	21	180-232
8/22	28° 12′	128° 52′	竿釣り	1	215
			合計	34	180-249

表4-3. 西部太平洋におけるカツオ未成魚の漁獲記録.

年/月/日	漁獲位置		漁法	標本数	尾叉長(mm)
	緯度(北緯)	経度(東経)			
1997/8/27	37° 08′	149° 30′	竿釣り	13	298-355
1998/6/20	35° 00′	139° 30′	竿釣り	2	252-280
9/1	33° 28′	136° 49′	曳縄	1	314
10/2	33° 28′	136° 49′	曳縄	1	328
10/9	33° 28′	136° 49′	曳縄	2	336-356
1999/8/29	35° 00′	139° 30′	竿釣り	2	341-368
9/13	33° 45′	136° 03′	曳縄	2	278-282
9/30	33° 28′	136° 49′	曳縄	6	308-314
2000/7	34° 16′	136° 42′	曳縄	13	250-342
7/19	33° 29′	135° 56′	曳縄	1	294
7/21	33° 39′	136° 00′	曳縄	1	276
7/22	33° 38′	136° 00′	曳縄	12	250-294
7/25	37° 47′	145° 47′	竿釣り	1	320
7/30-1	39° 18′	148° 24′	竿釣り	7	303-348
7/30-2	34° 01′	139° 01′	竿釣り	2	265-292
8/22-1	31° 29′	130° 02′	曳縄	21	252-271
8/22-2	35° 10′	139° 30′	竿釣り	6	271-311
9/10	35° 09′	139° 31′	竿釣り	22	328-375
9/14	35° 10′	139° 26′	竿釣り	25	328-406
9/15	0° 08′	171° 56′	まき網	39 ※	257-341
9/16	40° 20′	145° 30′	竿釣り	19	340-420
9/27	40° 29′	145° 41′	竿釣り	9	335-367
2001/4/5	26° 00′	138° 20′	竿釣り	17	362-442
4/15	29° 20′	139° 00′	竿釣り	12	327-377
4/21	32° 20′	140° 55′	竿釣り	16	380-408
5/8	33° 05′	135° 51′	曳縄	11	308-354
5/15	35° 40′	143° 35′	竿釣り	15	408-433
6/5	34° 40′	143° 00′	竿釣り	12	429-448
6/17	35° 30′	144° 22′	竿釣り	4	352-401
6/19	34° 00′	144° 21′	竿釣り	1	370
8/9	35° 52′	140° 59′	竿釣り	1	250
8/24	31° 29′	130° 06′	曳縄	13	263-295
9/5	35° 15′	139° 15′	竿釣り	7	374-418
9/17	40° 15′	146° 16′	曳縄	1	336
9/23	35° 10′	139° 31′	竿釣り	9	294-412
9/24	35° 11′	139° 30′	竿釣り	3	273-311
2002/5/15	26° 45′	149° 38′	竿釣り	15	340-421
6/12	36° 18′	153° 34′	まき網	3 ※	440

※: 日輪間隔を推定した標本.

表4-3 (つづき). 西部太平洋におけるカツオ未成魚の漁獲記録.

年/月/日	漁獲位置		漁法	標本数	尾叉長(mm)
	緯度(北緯)	経度(東経)			
2002/6/18-1	35° 40'	151° 00'	まき網	3 ※	430-440
6/18-2	0° 30'	179° 28'	まき網	22 ※	306-443
7/8	36° 40'	146° 49'	竿釣り	1 ※	395
7/14-1	36° 41'	146° 46'	竿釣り	3 ※	368-397
7/14-2	35° 42'	146° 04'	竿釣り	1 ※	397
7/20-1	38° 27'	147° 34'	竿釣り	1 ※	412
7/20-2	38° 27'	147° 23'	竿釣り	2 ※	390-406
7/20-3	38° 26'	147° 25'	竿釣り	1 ※	407
7/20-4	38° 22'	147° 21'	竿釣り	1 ※	380
7/20-5	38° 19'	147° 22'	竿釣り	1 ※	392
7/21	38° 04'	144° 52'	竿釣り	1 ※	381
8/2	35° 09'	139° 28'	竿釣り	10 ※	381-442
8/22	35° 09'	139° 28'	竿釣り	9 ※	396-440
9/3	38° 00'	148° 00'	竿釣り	11 ※	363-448
9/12	3° 11'	167° 20'	まき網	10 ※	319-359
10/4	35° 00'	139° 38'	竿釣り	5 ※	308-327
10/5	35° 05'	139° 30'	竿釣り	3 ※	282-396
10/8	28° 25'	129° 03'	竿釣り	10	314-357
10/16	40° 21'	149° 07'	竿釣り	11 ※	360-406
10/23	35° 08'	139° 38'	曳縄	2 ※	322-348
11/6	27° 54'	129° 35'	竿釣り	6	370-415
11/12	33° 57'	145° 15'	竿釣り	9 ※	394-422
12/2	28° 15'	129° 30'	竿釣り	10	336-363
2003/3/19	27° 54'	129° 35'	竿釣り	7	375-391
4/13	27° 52'	128° 31'	竿釣り	9	364-390
5/6	33° 43'	136° 15'	曳縄	1	419
5/8	27° 48'	129° 27'	竿釣り	11	313-346
5/27	36° 00'	148° 00'	竿釣り	3 ※	430-443
6/4	36° 10'	148° 30'	竿釣り	2 ※	428-440
6/14	35° 31'	152° 39'	竿釣り	4 ※	440-449
6/24	27° 54'	129° 35'	竿釣り	9	354-376
7/16-1	36° 44'	151° 36'	竿釣り	1 ※	430
7/16-2	36° 44'	151° 38'	竿釣り	1 ※	440
7/23	38° 00'	145° 00'	まき網	1 ※	445
7/26	27° 52'	128° 31'	竿釣り	11	342-366
8/22	28° 12'	128° 52'	竿釣り	7	250-266
8/25	38° 00'	149° 00'	竿釣り	13 ※	322-445
9/13	1° 54'	151° 41'	まき網	18 ※	361-426
10/5	0° 03'	175° 24'	まき網	6 ※	417-434
10/16	38° 55'	145° 05'	まき網	2 ※	422-440
10/17	2° 15' S	175° 24'	まき網	34 ※	270-385
			合計	620	250-449

※: 日輪間隔を推定した標本.

表4-4. 西部太平洋におけるカツオ成魚の漁獲記録.

年/月/日	漁獲位置		漁法	標本数	尾叉長(mm)
	緯度(北緯)	経度(東経)			
1997/6/24	33° 43′	143° 33′	まき網	1	836
2000/9/14	35° 10′	139° 26′	竿釣り	1	452
2001/5/28	34° 03′	139° 26′	曳縄	12	476-518
6/5	34° 40′	143° 00′	竿釣り	4	453-455
6/17	34° 28′	145° 40′	竿釣り	3	506-540
7/10	39° 36′	148° 50′	竿釣り	9	500-570
7/11-1	39° 32′	152° 12′	竿釣り	2	470-487
7/11-2	39° 37′	151° 56′	竿釣り	2	484-486
7/11-3	39° 45′	151° 34′	竿釣り	1	553
7/11-4	39° 40′	151° 27′	竿釣り	5	490-496
7/19	37° 13′	147° 31′	竿釣り	1	486
7/20	37° 29′	146° 23′	竿釣り	1	475
2002/1/31	11° 52′	151° 26′	竿釣り	1	692
2/2	12° 05′	151° 03′	竿釣り	1	679
2/3	12° 09′	150° 56′	竿釣り	4	658-710
3/15	2° 56′	146° 37′	まき網	12 ※	488-556
4/29	5° 35′	166° 12′	まき網	8 ※	500-584
5/9	3° 45′	159° 56′	まき網	14 ※	501-605
6/12	36° 18′	153° 34′	まき網	6 ※	480-560
6/16	1° 48′	179° 45′	まき網	10 ※	525-568
6/18	35° 40′	151° 00′	まき網	4 ※	485-540
6/27	4° 41′	167° 20′	まき網	10 ※	518-574
7/8	35° 53′	146° 15′	竿釣り	1 ※	462
7/20	39° 20′	151° 50′	まき網	6 ※	485-555
7/26	1° 09′	170° 57′	まき網	9 ※	517-560
7/29	39° 00′	153° 00′	まき網	9 ※	450-575
2002/8/2	35° 09′	139° 28′	竿釣り	4 ※	460-488
8/10	2° 44′	172° 06′	まき網	10 ※	524-560
8/13	3° 32′	171° 51′	まき網	12 ※	530-628
8/22	35° 09′	139° 28′	竿釣り	9 ※	465-529
9/2	39° 10′	150° 10′	まき網	1 ※	535
9/27	4° 24′	164° 59′	まき網	10 ※	525-568

※: 日輪間隔解析に用いた標本.

表4-4(つづき). 西部太平洋おけるカツオ成魚の漁獲記録.

年/月/日	採集位置		漁法	標本数	尾叉長(mm)
	緯度(北緯)	経度(東経)			
10/5	35° 05'	139° 30'	竿釣り	9 ※	456-556
11/6	27° 54'	129° 35'	竿釣り	1	462
11/8	5° 09' S	171° 10'	まき網	6 ※	515-578
11/9	7° 30' S	170° 00'	まき網	10 ※	513-567
2003/1/14	0° 32'	158° 53'	まき網	9 ※	508-580
1/26	35° 30'	142° 00'	流し網	2	777-806
2/14	2° 04'	152° 46'	まき網	13 ※	512-550
2/26-1	3° 13'	153° 19'	まき網	4 ※	534-569
2/26-2	3° 23'	153° 09'	まき網	8 ※	526-559
3/21	6° 26'	140° 48'	まき網	9 ※	531-567
5/11	5° 30'	137° 35'	まき網	11 ※	516-597
5/27	36° 00'	148° 00'	竿釣り	7 ※	470-630
6/3	5° 58'	141° 00'	まき網	12 ※	533-604
6/4	36° 10'	148° 30'	竿釣り	7 ※	460-542
6/14	35° 31'	152° 39'	竿釣り	3 ※	509-560
7/16-1	36° 44'	151° 36'	竿釣り	3 ※	480
7/16-2	36° 44'	151° 38'	竿釣り	4 ※	450-470
7/23	38° 00'	145° 00'	まき網	8 ※	450-538
7/24	39° 25'	150° 19'	竿釣り	1 ※	500
7/26	37° 24'	152° 41'	竿釣り	5 ※	460-534
2003/8/5	0° 23'	161° 48'	まき網	8	539-570
8/25	38° 00'	149° 00'	竿釣り	10 ※	460-493
9/23	1° 22'	167° 30'	まき網	14 ※	506-598
10/3	38° 17'	146° 25'	竿釣り	3 ※	521-582
10/5	0° 03'	159° 12'	まき網	3 ※	466-524
10/16	38° 55'	145° 05'	まき網	5 ※	464-570
11/5	2° 33'	172° 56'	まき網	8 ※	540-572
2004/3/10	36° 04'	142° 47'	流し網	1	730
3/16	35° 48'	142° 26'	流し網	2	830-860
			合計	369	450-860

※: 日輪間隔解析に用いた標本.

表4-5. オセアニア周辺海域におけるカツオ成魚の漁獲記録.

年/月/日	漁獲位置		漁法	標本数	尾叉長(mm)
	緯度(南緯)	経度(東経)			
2003/3/11	36° 40′	156° 25′	竿釣り	8 ※	450-480
3/25	40° 27′	172° 58′ W	竿釣り	10 ※	490-545
4/4	27° 03′	159° 17′	竿釣り	7 ※	470-590
			合計	25	450-590

※: 日輪間隔解析に用いた標本.

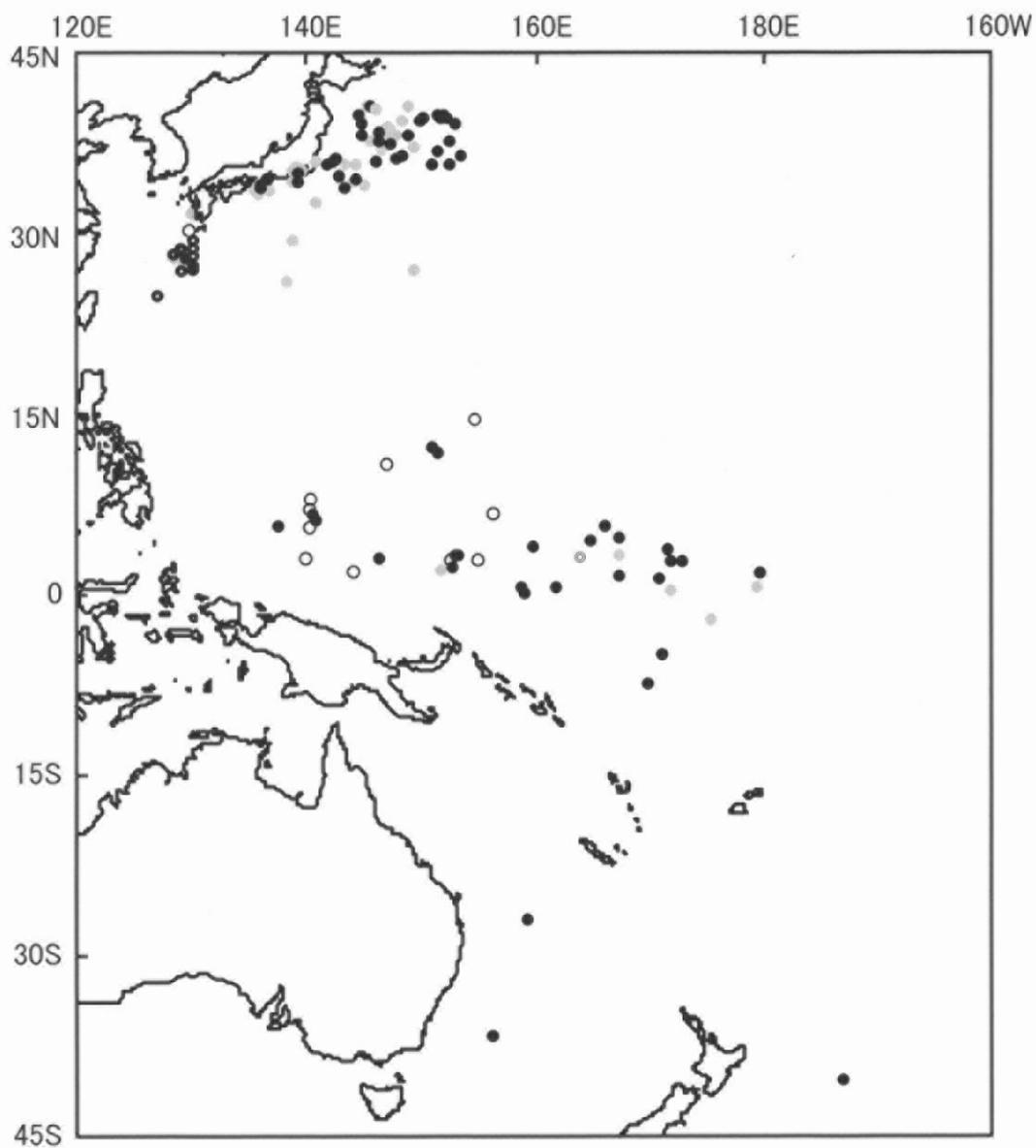


図4-1. 日齢査定に用いたカツオの漁獲位置.  
○仔稚魚, ◐幼魚, ◑未成魚, ●成魚.

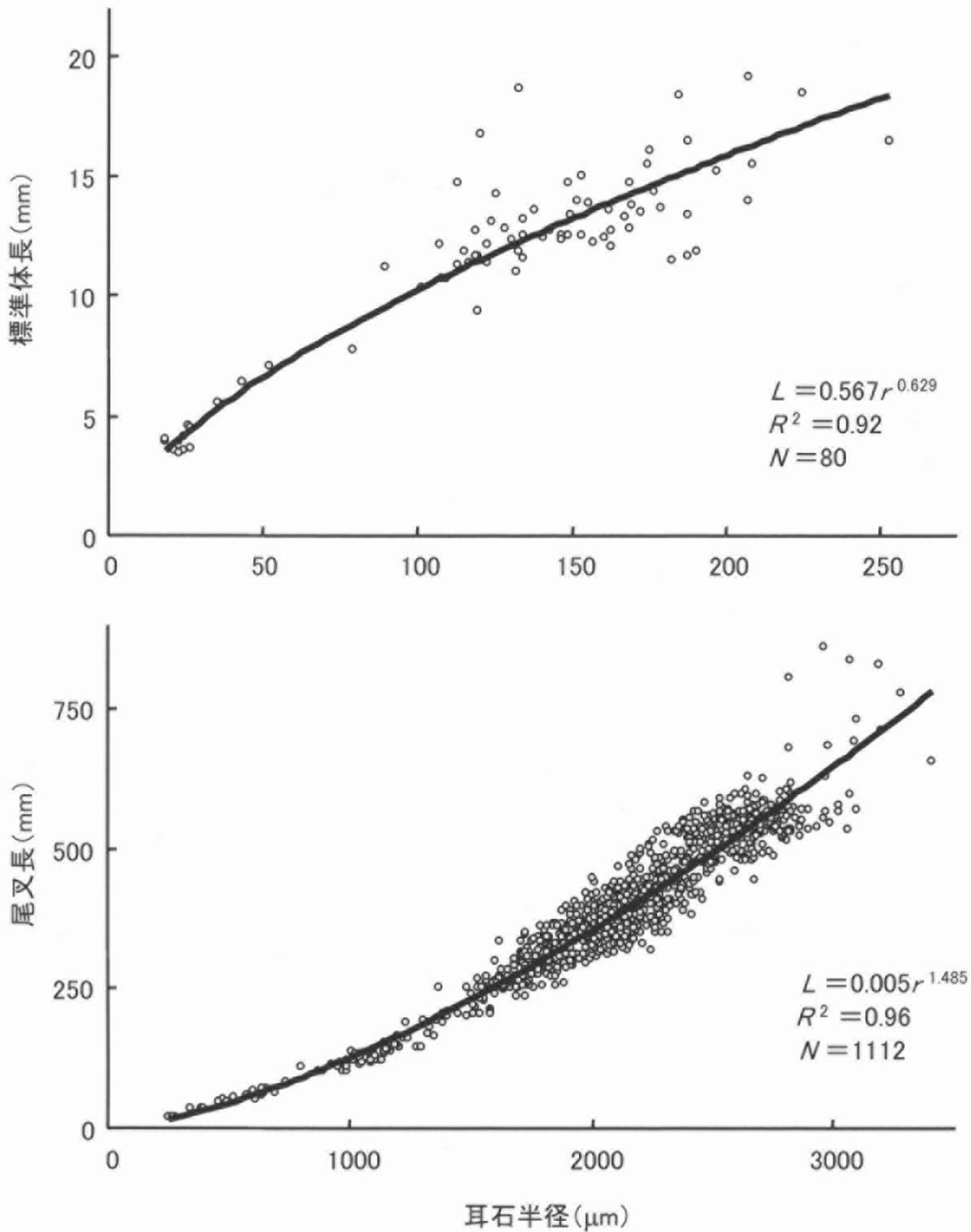


図4-2. 西部太平洋で漁獲された20 mm FL未満(上)と20 mm FL以上(下)のカツオの耳石半径( $r$ )と体長( $L$ )の関係.

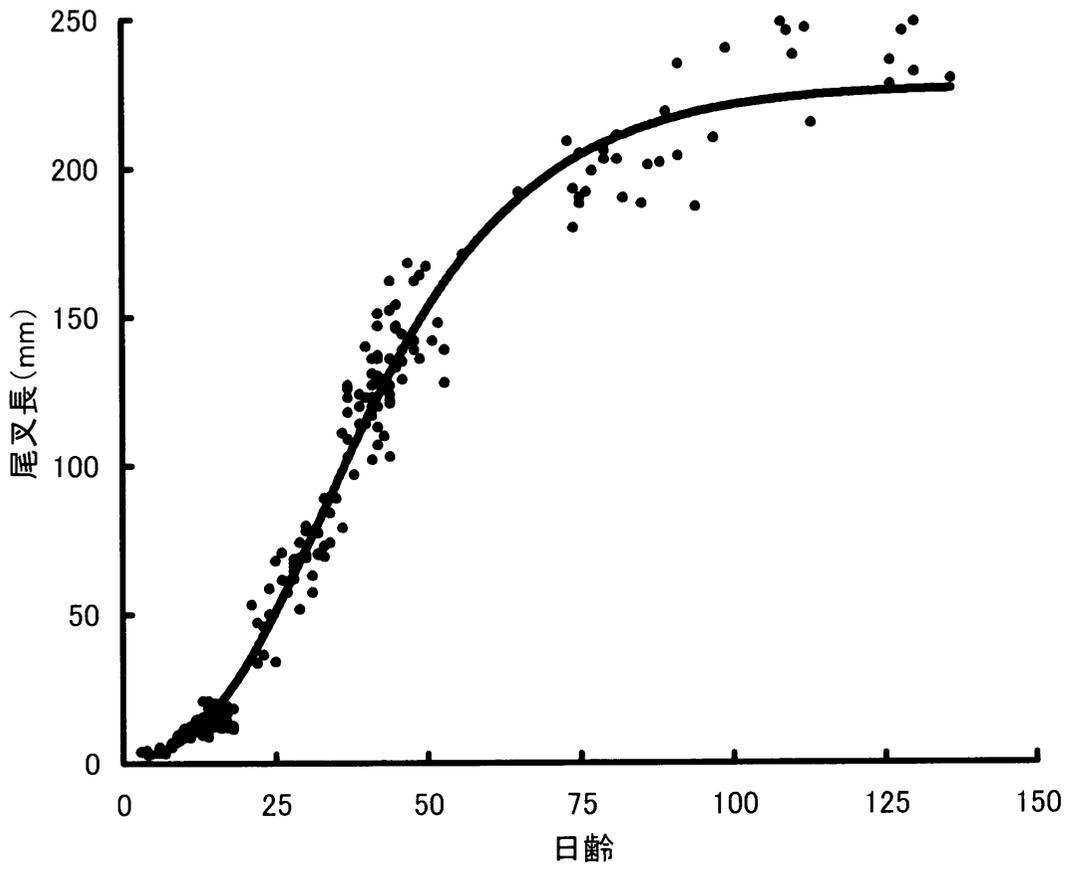


図4-3. 仔魚から幼魚の日齢 ( $t$ ) と尾叉長 ( $L_t$ ) の関係.

— :  $L_t = 227.61 \exp[-\exp[-19.21(t-0.09)]]$

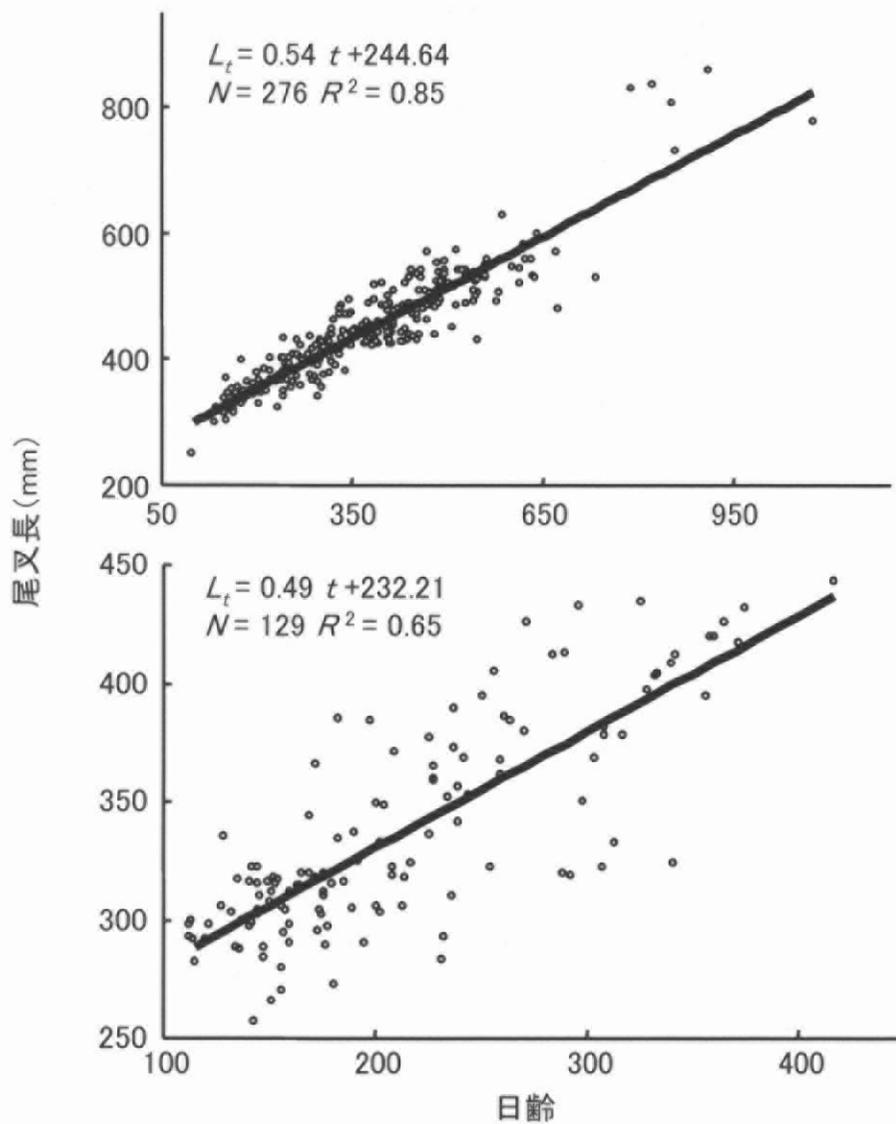


図4-4. 日本周辺海域で漁獲されたカツオ未成魚と成魚(上)と西部太平洋熱帯海域で漁獲されたカツオ未成魚(下)の日齢( $t$ )と尾叉長( $L_t$ )の関係.

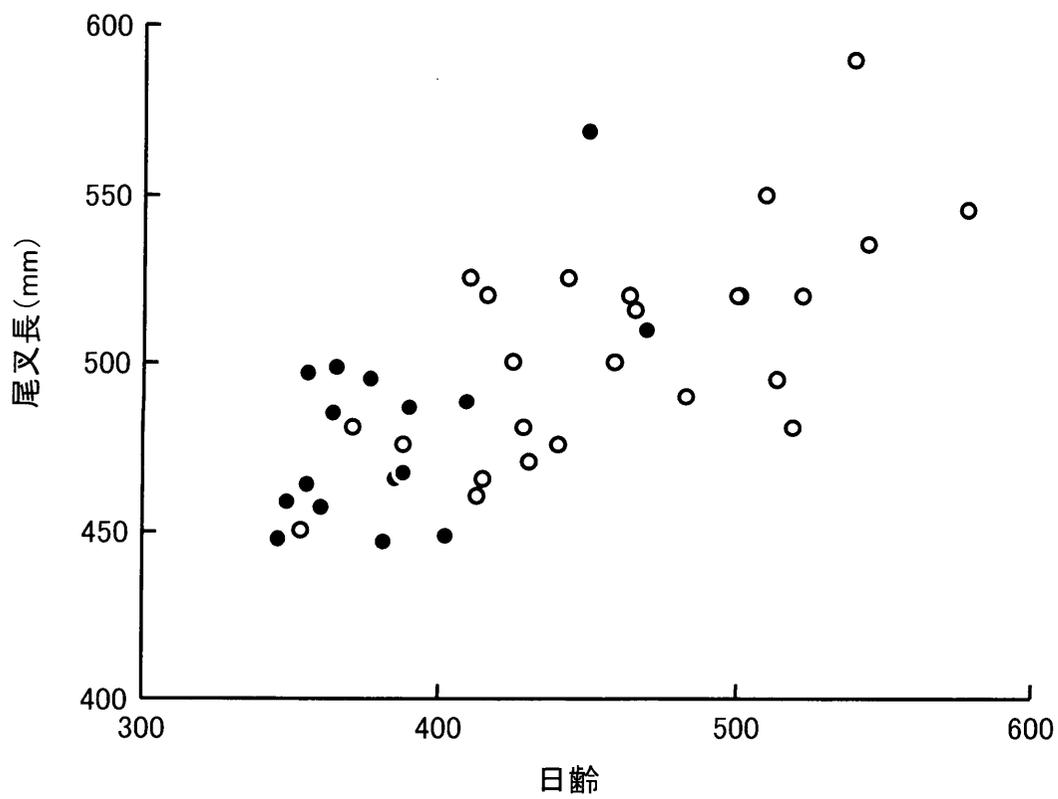


図4-5. オセアニア周辺海域(○)と東部太平洋熱帯海域(●)で漁獲された未成魚と成魚の日齢と尾叉長の関係.

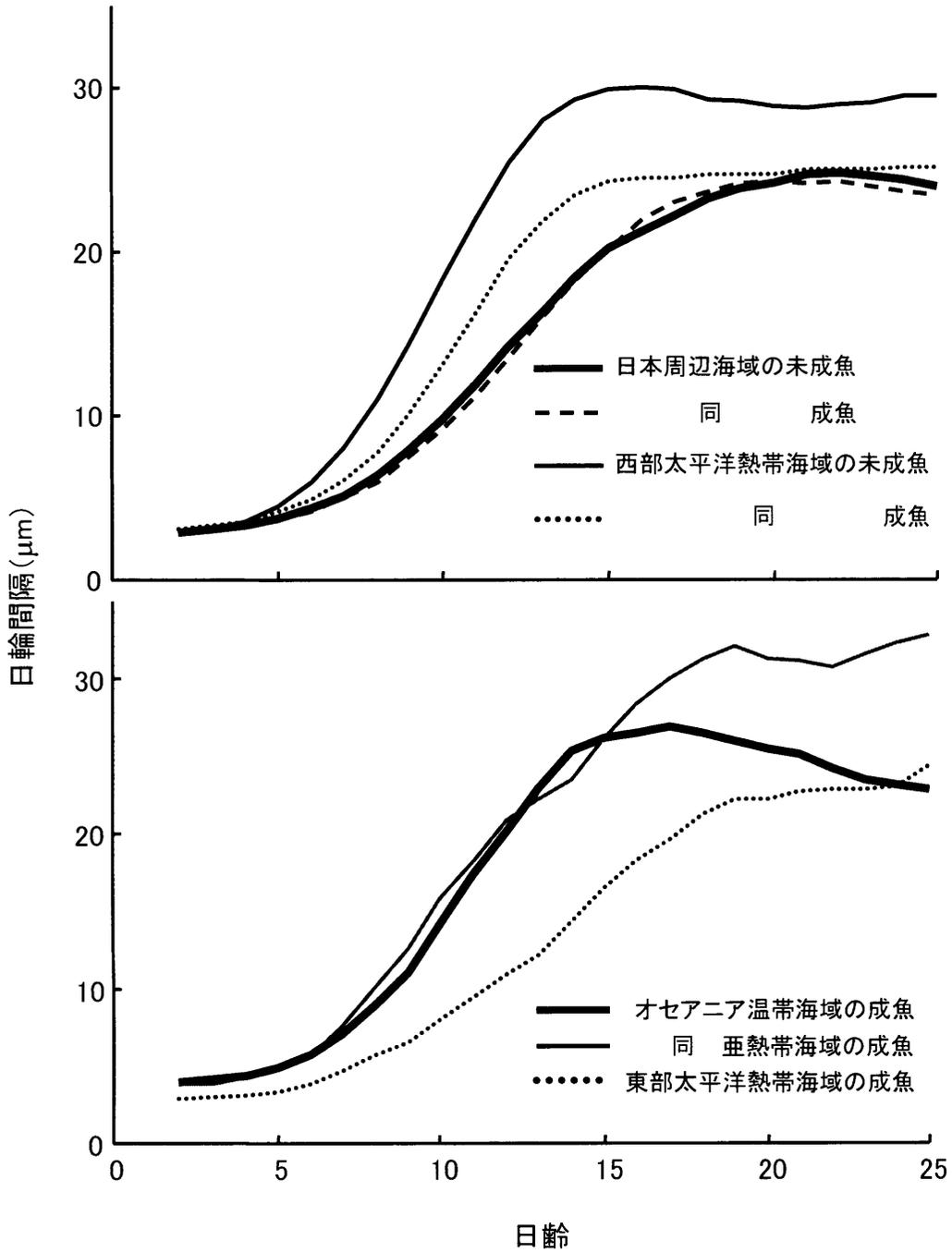


図4-6. 太平洋各海域で漁獲された未成魚と成魚の25日齢までの日輪間隔.

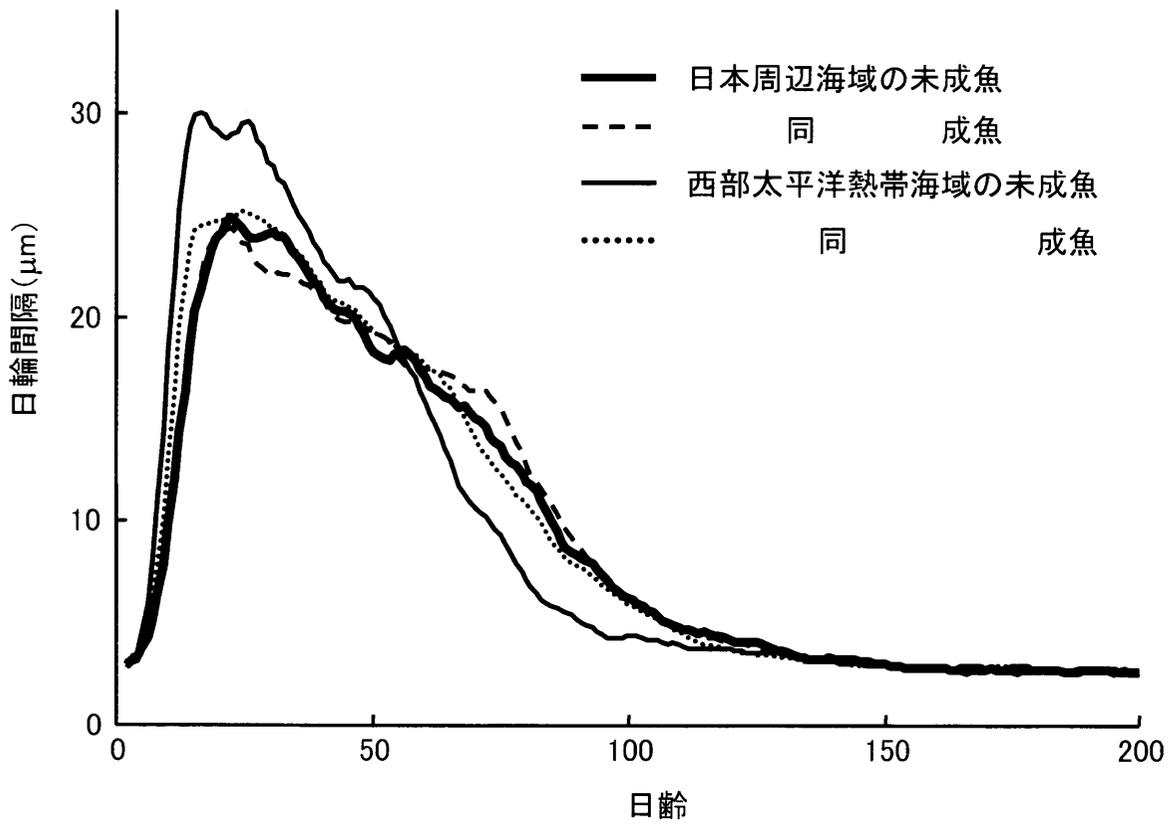


図4-7. 日本周辺海域と西部太平洋熱帯海域で漁獲された未成魚と成魚の耳石日輪間隔.

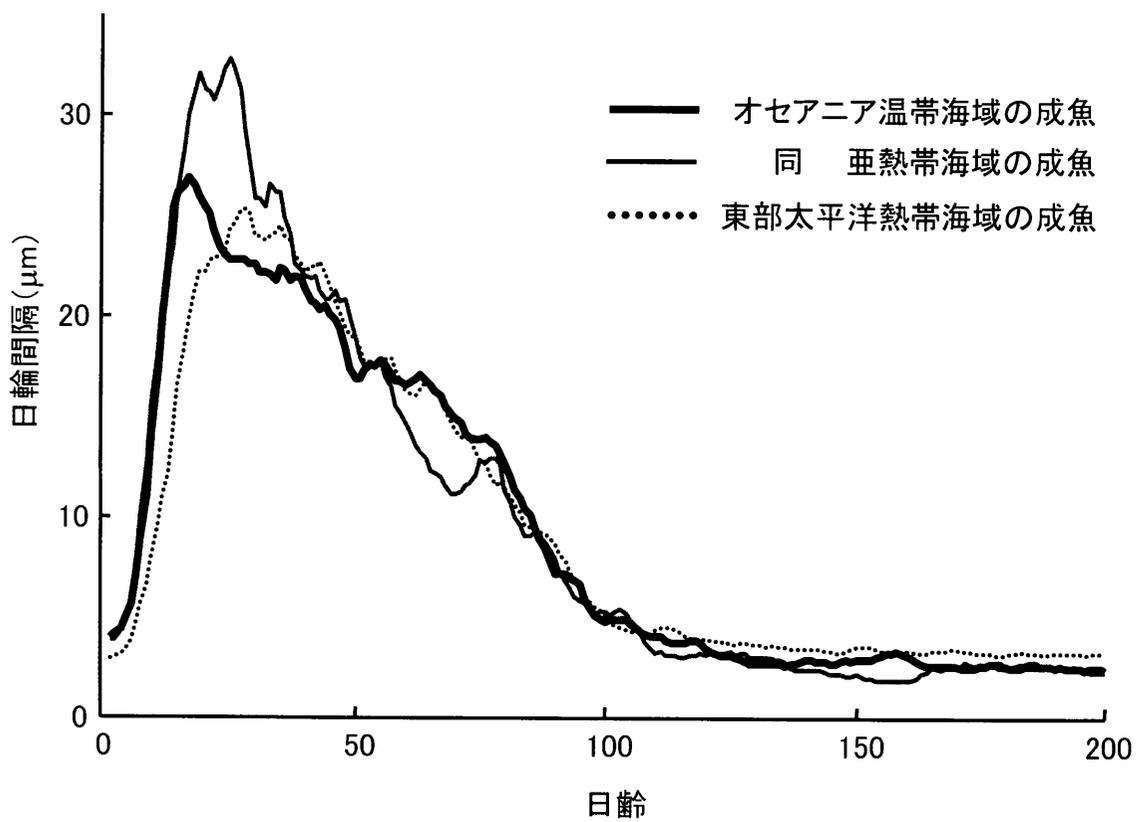


図4-8. オセアニア周辺海域と東部太平洋熱帯海域で漁獲されたカツオの耳石日輪間隔.

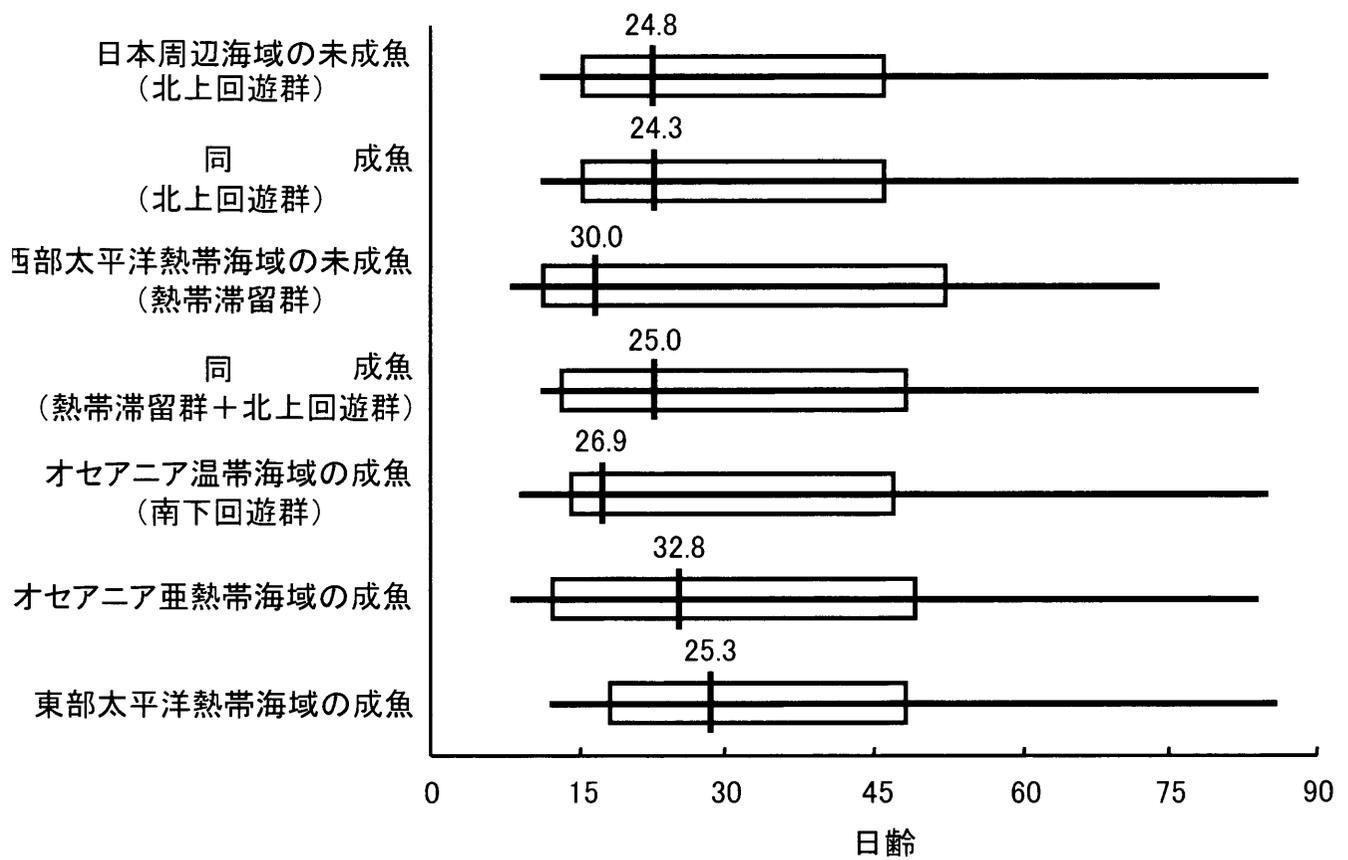


図4-9. 太平洋各海域で漁獲された未成魚と成魚における耳石日輪間隔10 μm以上(—)、20 μm以上(□)の日齢範囲、日輪間隔極大値(数字 μm)とそれに達した日齢.