

東京大学大学院新領域創成科学研究科

環境学専攻自然環境コース

平成 17 年度

修士論文

北部タイランド湾における収束発散場と生物生産の関係

The relationship between divergence/convergence fields
and primary production in the Upper Gulf of Thailand.

2006 年 3 月修了

指導教員 道田 豊 助教授

学籍番号 47-46717

瀧本 良太

目次

	ページ
1. はじめに	
1.1 北部タイランド湾の環境問題	1
1.2 既往研究	
1.3 研究目的	
2. 対象海域	3
3. 観測とデータ	4
3.1 データ項目	
3.2 解析方法	
4. 北部タイランド湾の物理環境	5
4.1 観測期間の風速分布	
4.2 水温・塩分の水平・鉛直分布	
4.3 北部タイランド湾表層水平収束発散場	
5. 北部タイランド湾の生物生産と水平収束発散場	10
5.1 クロロフィル a と溶存酸素の水平・鉛直分布	
5.2 栄養塩(溶存無機態窒素・リン酸塩・ケイ酸塩)の水平・鉛直分布	
5.3 北部タイランド湾表層の水平収束発散場と生物生産の関係	
6. 結論	14
謝辞	16
参考文献	17
図表	20
要旨(和文)	
要旨(英文)	

1. はじめに

1.1 北部タイランド湾の環境問題

北部タイランド湾は、タイ国の重要な経済海域である。湾の沿岸域ではムール貝やエビの養殖が盛んであり、主要な水産海域となっている。特にChaophraya河口域のデルタ地帯は、主要な水産物であり年間約20億USドルの輸出歳入をもたらすブラックタイガーエビの生産域である(Chalermwat and Lutz, 1989)。また、北部タイランド湾は、後背には大都市バンコクを控え、水運としても非常に重要な役割を担っている。

近年北部タイランド湾では、バンコクにおける急速な人口増加や経済発展により、河川を通して湾へ排出される人為起源物質が増加し、窒素、リンなどの栄養塩の過剰供給が起きている。栄養塩は、植物プランクトンの餌であり、植物プランクトンはさらに高次の生物の餌になるために、海洋生態系にとって非常に重要なものである。しかし栄養塩が過剰に供給されると、植物プランクトンの異常繁殖である赤潮が発生する。近年、北部タイランド湾では、赤潮が頻発化し、漁業に大きな被害を与えるため社会問題となっている。

このような背景において、沿岸域の環境変化を正確に予測し的確な対策を講じることが必要であり、そのためには沿岸海域での生物生産や物質循環の現状の把握が緊急課題となっている。

1.2 既往研究

北部タイランド湾の循環場を調べたものとして、潮汐、河川流入、風応力を考慮した数値モデルによる研究がある(Sojisporn et al., 1998; Buranapratheprat et al., 2003)。これによると、雨季の南西風時には大きな時計回りの循環が北部タイランド湾の北部で生じ、また乾季の北東風時には湾南東部から岸に沿って北東部、北西部、南西部へと反時計回りの循環になっていることを示した(図1.3)。Buranapratheprat et al., (2003)は、湾北東部で発生していた植物プランクトンブルームの主な原因の一つとして、湾北西部から北東部に位置する主要な河川から湾へ運ばれる過大な栄養塩と有機汚濁物が、雨季の湾北部での時計回りの循環流によって湾北東部に輸送される可能性を指摘したが、詳しい理由は不明としている。また、湾北東部の海域については、Banpakong河口域の流れ、水温、塩分などの物理的特性が連続的に調査され(Sojisporn et al., 1998)、季節変化に伴った流量が見積もられ(Boonphakdee et al., 1999)、無機栄養塩類収支や淡水の滞留時間の季節変化が示されている(Buranapratheprat et al., 2002)。

一方、北部タイランド湾の生物生産に関しては、クロロフィルa分布の季節変化がSeaWiFSを用いた衛星画像により、雨季に湾北部から湾南東部にかけて他の海域に比べて相対的に高クロロフィルaとなり、乾季には湾北部から湾南西部へかけて他の海域に比べて相対的に高クロロフィルaとなることが示された(図1.4, Singhruck, 2001)。衛星画像のクロロフィ

ルa濃度分布の結果は、生物生産の分布を広範囲でとらえることができる反面、赤潮などの100mスケールの現象を十分に解像しているとは言えず、また、海中の懸濁物質が誤差となってしまうことや、都市に隣接して大気エアロゾル濃度の高い内湾海域では誤差を生じることが指摘されている(例えば、青木, 2001)。そこで、現場観測によって得られるクロロフィルa分布の理解が重要である。

北部タイランド湾の光環境に関しては、湾全体での直接観測が調査されている(Matsumura et al., 2004)。この結果、北部タイランド湾では、表層で懸濁物質濃度が非常に高いにも関わらず光合成のための十分な光が海底まで到達していて、その理由として懸濁物質が太陽光を散乱ためであるとが示唆した。

1.3 研究目的

赤潮や有機汚濁機構の解明には、現象に関与する生化学的諸過程の理解と共に、この過程が行われる舞台の海況特性、すなわち海洋構造、流動、物質分散の諸特性などを把握しておくことが必要である(宇野木, 1978)。

そこで、本研究では以下の三つの目的のもとに研究を行った。一つ目は、季節変化に伴う北部タイランド湾の海洋構造の理解である。北部タイランド湾は、複雑な自然条件による変動要因が結びついて、海洋構造が複雑化しているばかりでなく海況変動の実態やその機構については不明な点が多く、それらの解明が待たれている。二つ目は、北部タイランド湾の収束発散場の見積もりである。既往研究で示された数値モデルの結果は、局所的な収束発散場を計るには空間的に十分な精度があると言えない。そのため、ラグランジュ的な視点からのブイの放流実験により、実測に基づいた収束発散場の見積もりを行う。そして、三つ目の目的は、収束発散場と一次生産場の関係を理解することである。現場で得られたサンプルのChl. aを測定し、この結果とブイ放流実験で得られる収束発散の関係を調べ、北部タイランド湾における収束発散場と一次生産の関係を議論する。

2. 対象海域

北部タイランド湾は、北緯12.5度から13度、東経100度から101度の熱帯域に位置し、湾の北、東、西側は大陸に囲まれて、南側は外洋に開いている(図1.1)。この湾の水平スケールは、約100km×100km程度であり、深さは平均約20mで、最大40mの浅い海である。湾に流れ込む主な河川は、Bangpakong, Chaophraya, Thachin, Maeklongの4つであり、特に、BangpakongとChaophrayaから大量に流れ込む河川水は、北部タイランド湾の水質に対する影響が大きい(Matsumura et al., 2004)。

北部タイランド湾域は、季節風による影響が大きい(図1.2)。乾季(11月から1月)には北東風によってシベリア大陸から冷たく乾いた空気が運ばれ、雨季(5月から8月)には南西風によって湿った空気がインド洋から運ばれる(Sojisuporn, 1994)。このため、湾内へ流入する河川流量は、乾季に比べて雨季ではるかに大きくなる。例えば、Chaophraya川では乾季の終わりの3月で70ton/secであるのに対し雨季の終わりである10月では1150ton/secとなる(Matsumura et al., 2004)。なお、2月から4月と9月から10月は季節風の移行期間である。

3. 観測とデータ

北部タイランド湾において、*Kasetsart* 大学の観測船 *Kasetsart I*, *Chulalongkorn* 大学の観測船 *Chulavichai* そして、地元の漁船による Conductivity-Temperature-Depth profiler (CTD)/採水観測および GPS 搭載漂流ブイの放流実験が、2004 年 5 月(1 回目)、10 月(2 回目)、2005 年 2 月(3 回目)、5 月(4 回目)、7 月(5 回目)の昼間に実施された。1, 2, 5 回目の観測では、湾全域で CTD/採水観測をそれぞれ 16, 17, 17 測点、ブイの放流実験をそれぞれ 3, 4, 5 測点で行った(図 2a, 2b, 2e)。3 回目の観測では、湾の北東海域の 4 点において CTD/採水観測及びブイの放流実験を行った(図 2c)。4 回目の観測では湾中央域から北東域にかけて 4 点で CTD/採水観測およびブイの放流実験を行った(図 2d)。

海底から海面までの水温、塩分、溶存酸素、PH、濁度は、直接読み込み型の CTD(YXI Model 600XL)によって測定された。また、栄養塩(溶存無機態窒素、リン酸塩、ケイ酸塩)とクロロフィル-a(Chl.a)の分布を調べるために、Van Dorn Water sampler を用いて海面、5m、10m の 3 層で海水サンプルを採取した。栄養塩分析に用いたサンプルは、採水後に冷凍庫で保存され、*Chulalongkorn* 大学の実験室において分光光度計により濃度測定が行われた。Chl.a のサンプルは、採水直後に GFF フィルターを通して吸引ろ過された後、アルミホイルで遮光した容器に入れて冷凍庫で保存され、*Chulalongkorn* 大学の規格に校正された分光光度計を用いて濃度測定が行われた。

実験で使用された GPS 搭載漂流ブイは、道田ら(2004)により設計されたもので、ブイの頂上に置かれる GPS データロガーは Fukuda(2004)の設計である。GPS データロガーはブイの頂上に置かれ、ブイの漂流に影響を及ぼす風の抵抗を減らすために、直径 0.6m で長さ 1.1m の円筒のドロッグが自在性のある継ぎ目に結合されている。ドロッグの設置した深度は、全実験において表層下 1m である。また、GPS データロガーの位置精度は約 5 m である(道田ら, 2004)。全ての実験においてデータ取得間隔は 5 分に設定され、ブイの軌跡から計算される流速の精度は 2cm/sec 以下となっている。

漂流ブイの放流実験では、5 から 8 個のブイを、それらが構成する多角形の各辺を数百メートルのスケールとなるように放流した。そして、1 から 3 時間の追跡後、全てのブイを回収した。水平収束発散 Q は、GPS データロガーに記録された位置データから得られた漂流ブイ群が形成する多角形の面積 S とそれらの時間変化 DS/Dt から、以下の式(川合, 1976, 青柳, 2006)によって求めた。

$$Q = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{1}{S} \frac{DS}{Dt}$$

ここで u, v は流速の x, y 成分、 D/Dt は実質微分を表す。 Q の符号は正で発散、負で収束である。

4. 北部タイランド湾の物理環境

4.1 観測期間の風速分布

1回目の観測は南西の季節風が吹きはじめ、雨季の開始時期である2004年5月12-14日に実施され、2回目の観測は、乾季が始まる前の、北東の季節風への移行期である2004年10月7-10日に実施された。3回目の観測は乾季の終わりの時期である2005年2月5-6日に実施された。そして、4回目の観測は、1回目の観測と同様に雨季の開始期である2005年5月17-18日に実施され、5回目の観測は、南西の季節風が吹く雨季の2005年7月26-29日に実施された。

NASA, Physical Oceanography DAAC, POETの風速データを見ると、1回目の観測では、4日間の平均的な風場は、風向は湾全域において西南西でほぼ一定であり、風速は6.7m/sec程度であった。2回目の観測では、平均の風向は東南東、風速は4.1m/sec程度であり、風向と風速は観測日と測点ごとに変化していた。また、3回目の観測の二日間の平均の風場は、湾全域で風向は南風向きでほぼ一定であり、風速は6.3m/secであった。4回目の観測時における二日間平均の風場は、風向は湾全域において南南西でほぼ一定であり、風速は5.8m/secであった。そして、5回目の観測時の4日間平均の風場は、風向は湾全域で一定で西南西、風速は8.2m/secであった。

4.2 水温と塩分の水平・鉛直分布

雨季の始まる5月に湾全域で実施された1回目の観測における海面水温は、湾南部の外洋側で比較的低温で、湾北部の岸側で比較的高温であった(図3.1a)。特にStn. 1から5とStn. mid. 1-17の海面は、30.6°Cを越える暖かい水で覆われていた。海面の塩分分布(図3.2a)は、Stn. 1から4, mid. 1-17の北部で31psuより低塩分で、南に向かって徐々に高塩分となり、外洋側で32psuを越える高塩分となっている。このような水温・塩分の分布は、高温・低塩の特徴を持つ河川から流入した水が、Buranapratheprat(2003)らが数値モデルで示した湾北部の時計回りの循環によって湾北部で循環しているためだと考えられる。また、この観測時における湾全体の水温と塩分の鉛直構造は、ほとんどの海域でほぼ鉛直一様であるが、湾北部ではいくらかの成層が見られた。このような特徴は、水深が浅いために殆どの海域ではよく混合されているが、湾北部では河川から流入する水の影響で成層化しているためである。図3.1b, 3.2bはブイが放流されたStn. 1, 6, 13での水温・塩分の鉛直プロファイルである。水温ではStn. 6以外で若干の成層構造がみられ、塩分は全て鉛直一様であった。

雨季の後半である7月下旬に実施された5回目の観測では、海面水温は湾西部で比較的温暖、東部で比較的低温分布をしていた(図3.1e)。また、海面塩分は湾の南から北に向かい低塩となる分布をしており、特に北東域のStn. 1で29psu以下の非常に低塩な水が

見られた(図 3.2e)。これは、5月に比べて7月は河川流量が増大するため(Boonphakdee, 1999)、河口付近の塩分が一回目の観測時よりも低塩分化したためと考えられる。水温の鉛直分布は、河口域の湾北部(Stn. 1から5)と、島の近くで水深の変化の大きい北東部(Stn. 15から17)で成層がみられ、他の測点ではほぼ鉛直一様であった。また、塩分の鉛直分布も、水深5-10m以浅で成層状態にあった島近くの湾北東部(Stn. 1から3, 16, mid. 1-17)以外では、ほぼ鉛直一様であった。図 3.1f, 3.2f はブイが放流された Stn. 1, 7, 10, 14, mid. 1-17 での水温・塩分の鉛直プロファイルである。水温では湾北東部の Stn. 1, mid. 1-17 の水深5m以深で若干の成層構造がみられ、塩分においても Stn. 1, 14, mid. 1-17 の水深5m以深で成層状態が見られる。

一方、乾季の始まりである10月に湾全域で実施された2回目の観測では、雨季とは大きく異なる水温・塩分分布が見られた。海面の水温分布(図 3.1c)は、北西部と南東部で30.5℃以上の高温水がみられる一方で、30.0℃以下の比較的低温の水が湾南西部から北西部にかけて覆っていた。海面の塩分(図 3.2c)は、26psu以下の低塩分水が湾の西部および北部に広がり、東部では高塩分水が見られた。また、観測中に、塩分フロントが見られる Stn. 1と2の間において、海洋や陸起源と思われる多くのゴミがフロントに沿って浮かんでいる様子が見られた。これらは、河川流量が年間で最大期である10月で、大きく河川流量の影響を受けていると考えられ、Buranapratheprat(2003)らがモデルで示した湾全域での反時計回りの循環を支持している。また、湾全体の鉛直構造に関して、河川水による密度流の影響を受けていると考えられる湾北西部(Stn. 3から8)で、水温・塩分ともに水深5-10m以上の表層において水温差で約2℃、塩分差で約10psu程度の強い成層状態にあった。また、暖水の流入が考えられる湾南東部(Stn. 10, 12, 13)の水深5m以上の表層で水温差約2℃の成層状態にあった。図 3.1d, 3.2d はブイが放流された Stn. 1, 6, 10, 17 での水温・塩分の鉛直プロファイルである。水温では Stn. 6, 10 の水深5m以上の表層で成層がみられ、塩分では、Stn. 6 で強い成層状態がみられる。

乾季から雨季への移行期である2月に実施された3回目の観測と、雨季の5月に実施された4回目の観測は、1, 2, 5回目に比べて湾北東部を中心とした限られた海域で観測を行った。3回目の観測では全測点において水温(図 4.1a)は若干の成層状態が見られ、塩分(図 4.2a)では全測点においてほぼ鉛直一様であった。4回目の観測では、島の近くに位置する湾北東部の Stn. 2, mid. 1-17 で成層状態が見られた以外は、水温塩分(図 4.1b, 4.2b)ともにほぼ鉛直一様であった。

4.3 北部タイランド湾表層の水平収束発散場

GPS搭載漂流ブイの放流実験は、1回目の観測で3回、2回目の観測で4回、3回目の観測で4回、4回目の観測で4回、5回目の観測で5回の合計で20回実施された(表1)。5回の観測ごとの漂流軌跡の結果を図 5.1 から 5.5 に示す。

雨季である1回目の観測(2004年5月12-15日)で実施された3回の実験結果を図5.1に示す。12日の13:30から16:45の約3時間の間Stn.1で放流された4角形のブイの群は、南西方向に流れ、その多角形の重心平均流速は11cm/secでゆっくりとスピードを減少させて、東西方向に変形しながら広がっていった。発散項はゆっくりと変化し、時としてマイナスの値(収束)を示したが、実験時間中の平均値は $1.8(\pm 0.2) \times 10^{-5}$ (1/sec)であった。ここで、±の値はGPSにおける誤差を表している。13日の16:20-17:30の間に湾西部(Stn.6)で放流された4角形のブイの群は、約1時間で重心平均流速8cm/secで徐々に速度を減少させ、ほぼ一定の形を保ちながら南東方向へ流れた。見積もられた発散項は時としてマイナスの値(収束)を示したが、実験時間中の平均値は、 $2.3(\pm 0.6) \times 10^{-5}$ (1/sec)であった。そして、14日の14:50から15:50の間に湾南東部(Stn.17)で放流された4角形のブイの群は、約1時間で重心平均流速12.7cm/secで徐々に速度を減少させ、ほぼ一定の形を保ちながら南東方向の湾口へ漂流した。発散項は時としてプラスの値(収束)を示したが、実験時間中の平均値は、 $-4.6(\pm 0.7) \times 10^{-5}$ (1/sec)であった。

次に、一回目と同様の雨季の5月に実施された4回目の観測(2005年5月17-18日)における実験結果を図5.4に示す。17日の11:45から13:15の約1時間半の間、Stn.14で放流された6角形のブイの群は、南方向に放流して、その多角形の重心平均流速は14.8cm/secでほぼ一定で、形を保ちながら放流した。見積もられた発散項は大きな変化を示さず、実験時間中の平均値は、 $0.9(\pm 0.5) \times 10^{-5}$ (1/sec)であった。また、同日の14:55-16:00約1時間に湾中央部(Stn.3-14の間)で放流された6角形のブイの群は、重心平均流速5.8cm/secで徐々に速度を増加させながら北西方向へと漂流した。見積もられた発散項はほとんど変化を示さず、実験時間中の平均値は、 $-0.4(\pm 0.7) \times 10^{-5}$ (1/sec)であった。そして、18日の9:20から10:45の間に湾北部(Stn.2)で放流された6角形のブイの群は、約1時間半で重心平均流速12.7cm/secでほとんど速度を変化させずに南東方向へと漂流した。実験時間中の発散項の平均値は $1.3(\pm 0.6) \times 10^{-5}$ (1/sec)であった。同日の12:35-15:35の約3時間、湾北東部(Stn.1と17の間)で放流された6角形のブイの群は、重心平均流速6.5cm/secで徐々に速度を増加させながら北西方向へと漂流した。見積もられた発散項は大きな変化を示さず、実験時間中の平均値は、 $0.9(\pm 0.2) \times 10^{-5}$ (1/sec)であった。

雨季の7月に行われた5回目の観測(2005年7月26-29日)の結果を図5.5に示す。26日の11:55-13:30の約1時間半の間、湾北東部(Stn.17)で放流された6角形のブイの群は、南方向に放流し、その多角形の重心平均流速は27.5cm/secではあったが、時として大きなばらつきをみせた。見積もられた発散項は誤差が大きく、実験時間中の平均値は $-3.2(\pm 0.5) \times 10^{-5}$ (1/sec)であった。また、同日の15:00-16:00の約1時間に湾北東部(Stn.1)で放流された6角形のブイの群は、重心平均流速8.5cm/secで徐々に速度を増加させながら北東方向へと漂流した。見積もられた発散項は大きな変化を示さず、実験時間中の平均値は、 $1.6(\pm 0.7) \times 10^{-5}$ (1/sec)であった。そして、27日の17:00から17:55の約1時間に

湾南西部 (Stn. 7) で放流された 6 角形のブイの群は、約 1 時間で重心平均流速 36.2cm/sec で速度を大きく大小に変化させて北方向へと漂流した。実験時間中の発散項の平均値は $3.8(\pm 0.6) \times 10^{-5}$ (1/sec) であった。さらに、29 日の 7:15 から 8:30 の約 1 時間に湾南東部 (Stn. 10) で放流された 6 角形のブイの群は、約 1 時間で重心平均流速 35.3cm/sec で速度を増加させて北方向へと漂流した。実験時間中の発散項の平均値は $5.0(\pm 0.4) \times 10^{-5}$ (1/sec) であった。同日の 10:30-11:55 の約 1 時間半、湾中央部 (Stn. 14) で放流された 5 角形のブイの群は、重心平均流速 4.7cm/sec でゆっくりと速度を増加させながら西方向へと漂流した。発散項はほとんど変化を示さず、実験時間中の平均値は、 $0.4(\pm 0.4) \times 10^{-5}$ (1/sec) であった。

一方、2 回目の観測 (2004 年 10 月 7-9 日) は乾季の始まりに実施され、この観測で行われた 4 回の実験結果を図 5.2 に示す。7 日 12:30 から 14:25 の約 2 時間に湾北東部 (Stn. 1) で放流された 5 角形のブイ群は、重心平均流速 5.1cm/sec で流速を増加させながら南西の方向へと漂流した。実験時間中の発散項の平均値は $1.1(\pm 0.5) \times 10^{-5}$ (1/sec) であった。同日の 16:30-17:30 の約 1 時間に湾北東部 (Stn. 17) で放流された 5 角形のブイの群は、重心平均流速 8cm/sec で徐々に速度を減少させながら南東方向へと漂流した。実験時間中の発散項の平均値は $-6.4(\pm 1.1) \times 10^{-5}$ (1/sec) であった。8 日 16:15 から 17:45 の約 1 時間半に湾西部 (Stn. 6) で放流された 4 角形のブイ群は、約 1 時間半で重心平均流速 23.1cm/sec で流速を増加させながら南西の方向へと漂流した。実験時間中の発散項の平均値は $2.7(\pm 0.5) \times 10^{-5}$ (1/sec) であった。また、9 日 17:00 から 17:55 の間に湾南西部 (Stn. 10) で放流されたブイ群は、約 1 時間で重心平均流速 9.6cm/sec で流速をゆっくりと減少させながら南方向へと漂流した。実験時間中の発散項の平均値は $-5.6(\pm 0.9) \times 10^{-5}$ (1/sec) であった。

3 回目の観測 (2005 年 2 月 5-6 日) は雨季と乾季の移行期に行われた。この観測で実施された 4 回の実験結果を図 5.3 に示す。5 日 12:10 から 14:00 の約 2 時間に湾北東部 (Stn. 1) で放流された 6 角形のブイ群は、重心平均流速 12.3cm/sec で流速をゆっくりと増加させながら南の方向へと漂流した。実験時間中の発散項の平均値は $2.4(\pm 0.4) \times 10^{-5}$ (1/sec) であった。同日の 15:45-17:00 の約 1 時間に湾北東部 (Stn. 1-16 の間) で放流された 6 角形のブイの群は、重心平均流速 15cm/sec で徐々に速度を減少させながら南東方向へと漂流した。実験時間中の発散項の平均値は $-3.9(\pm 0.7) \times 10^{-5}$ (1/sec) であった。そして、6 日 11:15 から 13:00 の約 2 時間に湾北東部 (Stn. 16) で放流された 6 角形のブイ群は、約 1 時間半で重心の平均流速 7.9cm/sec で流速を増加させながら南方向へと漂流した。このときの、実験時間中の発散項の平均値は $-1.8(\pm 0.6) \times 10^{-5}$ (1/sec) であった。同日 15:10 から 16:30 の間に湾北東部 (Stn. 1 と 17 の間) で放流された 6 角形のブイの群は、約 1 時間で重心の平均流速 19.7cm/sec で流速をほぼ一定に保ちながら南方向へと漂流した。実験時間中の発散項の平均値は $2.9(\pm 0.5) \times 10^{-5}$ (1/sec) であった。3 回目の観測では 5m/sec 以上の南風が湾全体を卓越している一方で、全 4 回の観測で風の向きとは反対となる南向きの速い流れを示

した。

5回の観測で実施された、全20回のプイ放流実験の結果を表2に示す。表層の収束発散場は、13回の発散場と7回の収束場として見積もられた。1回目の観測のStn. 13、2回目の観測のStn. 10と17、3回目の観測のStn. mid. 1-16, mid. 1-17、4回目の観測のStn. mid. 3-14、5回目の観測のStn. mid. 1-17で収束場と見積もられ、これらは共通して湾東部で起こっていた。13回の発散場は、漂流速度が大きくなるほど大きな発散となり、7回の収束場は全て湾東部において観測され(図5.6)、流速が減少するほど収束する傾向となった(図6.1)。これら収束発散と漂流速度との関係は、有明海で井上ら(1980)が示した結果とおおよそ同じ傾向であった。また、Banpakong河口域である湾北東部(Stn. 1)では、4回の放流実験の全てで発散場であり、流速と発散項は正の相関を示していた(図6.2)。収束発散のオーダーは、全実験で 10^{-5} sec^{-1} であったが、この値は、川合(1970)の黒潮緑辺海域、赤松(1975)の日本海経ヶ岬沖合海域や油良川河口沖、井上(1980)の有明海湾奥河口域での測定で得られた、 $10^{-4} \sim 10^{-5} \text{ sec}^{-1}$ の収束発散量と同程度のものであった。この値はかなり大きな量であり、河口域における淡水と海水の希釈混合や、プランクトンの集積拡散に対して大きく関与していると推測できる。

5. 北部タイランド湾の生物生産と水平収束発散

5.1 クロロフィル a (Chl. a) と溶存酸素の水平・鉛直分布

雨季に実施された1回目の観測で得られた表層における Chl. a の水平分布を図 3. 4a に示す。その結果は、湾北東部 (Stn. 1, mid. 1-17)、湾北部 (Stn. 3)、湾西部 (Stn. 6) で局所的に高濃度であった。この分布は、湾北東部、湾北西部を中心に湾北部で南部に比べて相対的に高酸素であった表層溶存酸素分布と概ね対応している (図 3. 3a)。このような高酸素と高 Chl. a の対応は、植物プランクトンが多い海域では光合成で生成された酸素によって高酸素となっていることが示唆される。溶存酸素の鉛直分布は、沿岸域である湾北部 (Stn. 2, 3, 4) を中心とした測点で、水深 10m 以深で表層より酸素量が減少し、その他の全ての測点において、底層に下がるほど、いくらかの酸素量が減少する傾向にあった。また、Chl. a に関しては、採水層が 3 層のみではあるが、沿岸域の Stn. 1 から 5, mid. 1-17 の湾北部を除いてほぼ鉛直一様であった。図 3. 3b, 3. 4b はブイが放流された Stn. 1, 6, 13 の溶存酸素と Chl. a の鉛直プロファイルである。溶存酸素は、Stn. 1 の表層で成層がみられる以外はほぼ、鉛直一様である。Chl. a は Stn. 1 で不均一であるが、それに比べて他の測点においては若干の差はあるもののほぼ一様であった。

同じ季節である 5 回目の観測の、表層 Chl. a 分布 (図 3. 4e) は、湾北東部 (Stn. 1, mid. 1-17)、北西部 (Stn. 4)、西部 (Stn. 6) で局所的に高濃度であった。この分布は、湾北東部と西部、やや南部で他の測点に比べて相対的に高酸素であった表層溶存酸素分布 (図 3. 3e) と概ね対応している。溶存酸素の鉛直分布は、湾北東部 (Stn. 1, mid. 1-17) と西部 (Stn. 6)、やや南部 (Stn. 11) の表層で底層に比べて高く、水深約 5m 以深で酸素が減少していた。その他の測点では大きな変化が見られず、ほぼ鉛直一様であった。また、Chl. a の鉛直分布は、Stn. 1, mid. 1-17 の湾北東部で鉛直方向に不均一であったか、他の測点では若干の差はあるもののほぼ鉛直一様であった。図 3. 3f, 3. 4f は、ブイが放流された Stn. 1, 7, 10, 14, mid. 1-17 の溶存酸素と Chl. a の鉛直プロファイルである。溶存酸素は、Stn. 1 や mid. 1-17 で成層がみられ、他の測点では鉛直一様であった。また、Chl. a も同様に、Stn. 1, mid. 1-17 で不均一な分布を示している。他の 3 測点に関しては鉛直一様であった。

乾季の始まりの 2 回目の観測の、表層 Chl. a 分布 (図 3. 4c) は、湾北西部 (Stn. 4) と西部 (Stn. 6) で他の海域と比べて、相対的に高濃度分布を示した。それに対応して溶存酸素の水平分布 (図 3. 3c) は、北東部や南東部に比べて湾北西部 (Stn. 4) から西部 (Stn. 6) にかけて相対的に高いという分布を示した。濃度の平均値は、雨季と比較して湾全域で低濃度であった (表 2)。これは、生物循環の過程で高位による捕食がなされた直後によるものか、分析過程上のミスの可能性が考えられる。溶存酸素の鉛直分布は、湾北西部から南西部にかけて (Stn. 5, 6, 7)、底層に比べて表層で高く、底層で溶存酸素が 2.5 (ml/l) 以下の貧酸素状態であった。それに対し、湾北東部や南東部の測点においては、ほぼ鉛直一様であった。ま

た、Chl. a 濃度は、湾北部から南西部にかけて(Stn. 1 から 8)、鉛直方向に変化が見られる一方で、他の測点ではほぼ鉛直一様であった。図 3.3d, 3.4d はブイが放流された Stn. 1, 6, 10, 17 の溶存酸素と Chl. a の鉛直プロファイルである。溶存酸素は、Stn. 6 で水深 10m 以上の表層で顕著な成層がみられたが、他の測点ではほぼ一様であった。また、Chl. a は、Stn. 1, 6 で鉛直方向に変化があり、その他の 2 点では、ほぼ鉛直一様であった。

5.2 栄養塩(溶存無機態窒素・リン酸塩・ケイ酸塩)の水平・鉛直分布

雨季に実施された 5 月の 1 回目の観測結果から、溶存無機態窒素とリン酸塩およびケイ酸塩の表層における水平分布を示す(図 3.5a, 3.6a, 3.7a)。溶存無機態窒素(図 3.5a)、リン酸塩(図 3.7a)は、湾北東部(Stn. 1, mid. 1-17)で他の海域と比べて局所的かつ相対的に高濃度であった。この結果は、同時期の湾北東部(Stn. 1, mid. 1-17)、北部(Stn. 3)、西部(Stn. 6)で局所的に高濃度である Chl. a 分布のうち、湾北東部のみで一致する。また、ケイ酸塩の分布(図 3.6a)は、湾北東部のみに限らず湾北部全域(特に、Stn. 3)で湾南部に比べて相対的に高濃度となった。この分布は、同時期の Chl. a 濃度分布の北部(Stn. 3)を中心に大まかに一致しているが、Chl. a の高濃度分布のひとつである湾西部(Stn. 6)では一致がみられなかった。

溶存無機態窒素、ケイ酸塩の鉛直構造は、おおまかには、Stn. 2 から 6 の湾北部から西部にかけて不均一分布であり、他の Stn. 1, 7 から 14, 16, 17 の湾北東部から南部にかけては、亜表層でわずかに不均一であることを除けば、ほぼ一様であるといえる。図 3.5b, 3.6b はブイが放流された Stn. 1, 6, 13 の溶存無機態窒素、ケイ酸塩の鉛直プロファイルである。Stn. 6 で、それらはともに不均一であり、他の測点ではともに、ほぼ一様であった。なお、リン酸塩の鉛直プロファイルは全ての測点で溶存無機態窒素とケイ酸塩の値に比べて極度に小さく律速要因と考えられないので、図では示していない。

同時期の 7 月に実施された 5 回目の観測では、溶存無機態窒素の水平濃度分布(図 3.5e)は 1 回目とは大きく異なる結果となった。Stn. 3 から 7 を中心とした北西部から南西部にかけて相対的に高く、Stn. 1, mid. 1-17 の北東部で若干他の測点よりも低濃度であった。リン酸塩の分布(図 3.7c)は、Stn. 1, 2, mid. 1-17 を中心とした北東部で、他の測点に比べて相対的に高濃度であり、1 回目とは同様の分布であったが、1 回目の溶存無機態窒素の分布とは大きく異なった。ケイ酸塩の分布(図 3.6e)も同様に、1 回目の分布と異なるとともに、溶存無機態窒素、リン酸塩と異なる分布を示し、他の測点に比べて、湾北西部の Stn. 4 と南西部の Stn. 7, 8 で相対的に高く、湾北東部の Stn. 1, mid. 1-17 で低濃度であった。

溶存無機態窒素、リン酸塩、ケイ酸塩の鉛直構造は、おおまかに湾全域で不均一分布であった。図 3.5f, 3.6f はブイが放流された Stn. 1, 7, 10, 14, mid. 1-17 の溶存無機態窒素、ケイ酸塩の鉛直プロファイルである。Stn. 10 で溶存無機態窒素、ケイ酸塩のともにほぼ一様であり、Stn. 1 では溶存無機態窒素、ケイ酸塩ともに底層で高濃度であった。

一方、乾季の始まりの 2 回目の観測結果では、溶存無機態窒素の表層水平濃度分布(図 3.5c)から、Stn. 2 を中心とした北部で他の測点に比べて相対的に高く、Stn. 6, 8 を中心とした西部で若干他の測点よりも高い濃度であった。リン酸塩の分布(図 3.7b)では、Stn. 2, 3 を中心とした北部、Stn. 5, 6 を中心とした西部で、他の測点に比べて相対的に高濃度であった。そして、ケイ酸塩の分布(図 3.6c)では、Stn. 2, 3 を中心とした北部で他の測点に比べて相対的に高く、残りの測点で若干低濃度となった。

鉛直分布は、おおまかには、河川水の張り出しのあった Stn. 1 から 7 の湾北部から西部にかけて不均一分布であり、外洋水の流入が示唆される Stn. 8 から 17 の湾北東部から南部にかけては、亜表層でわずかに不均一であることを除けば、ほぼ一様であるといえる。

図 3.5d, 3.6d は、ブイが放流された Stn. 1, 6, 10, 17 の溶存無機態窒素, ケイ酸塩の鉛直プロファイルである。Stn. 1 の底層で溶存無機態窒素, ケイ酸塩ともに高栄養塩であり、Stn. 6 では不均一分布を示し、その他の測点ではともにほぼ一様であった。

2004 年 5 月、10 月、2005 年 7 月の観測の溶存無機態窒素、リン酸塩、ケイ酸塩の表層水平分布の結果はそれぞれの季節で一致しなかった。そして、各季節の中で溶存無機態窒素、リン酸塩とケイ酸塩の分布は異なり、必ずしもそれらが局所的に分布する場所で、同時に Chl. a も局所的に分布していなかった。これらのことから、北部タイランド湾での栄養塩分布は時空間的な変動が大きいことが示唆される。また、渦鞭毛藻や珪藻などで性質が異なるように植物プランクトンの組成が海域によって異なる可能性が考えられる。

5.3 北部タイランド湾表層における水平収束発散場と生物生産の関係

各航海において、GPS 搭載漂流ブイの漂流結果から見積もられた収束発散場と Chl. a 濃度の関係を示す。図 6.3a は、全 20 回の実験の発散項と Chl. a の相関図である。この図では、Chl. a は、観測ごとの相対的な空間変化をみるために、観測ごとの平均値で割っている。図中の数字は、観測点番の号であり、青色は、2004 年 5 月、桃色は 2004 年 10 月、赤色は 2005 年 2 月、緑色は 2005 年 5 月、黒色は 2005 年 7 月の実験結果を示す。図 6.3b は、図 6.3a において Sichang 島近くに位置する Stn. mid. 1-17, 17, mid. 1-16 の測点を除いた相関図である。

図 6.3a のみでは、観測ごとに相関がないように見受けられる。これは、季節によって時間的空間的に変動の大きい河口域の測点や島の影響が局地的に表層の流れに影響を引き起こしていることが考えられる島の近くの測点も一緒に捉えていることによるものと考えられる。一方で、Sichang 島の近くであり、かつ Banpakong 河口域の海水変動の大きい Stn. mid. 1-17, Stn. mid. 1-16, Stn. 17 を除いた図 6.3b をみると、異なる季節環境下の実験を通して正の相関傾向が見受けられる。

また、図 6.3a の中で、河口域である Stn. 1 は全て発散場で高 Chl. a である。Stn. 1 の実験は異なる季節段階の異なる季節風の状況下で行われており、もしも Stn. 1 で観測された

4 回の発散場がモンスーン期間を超えて連続的な現象であるなら、Bangpakong 川または Chaopraya 川が維持する長時間スケールの発散によるプルーム拡散である可能性が示唆される。

6. 結論

本研究目的では、北部タイランド湾における海洋構造の季節変動と流動の収束発散場、そして収束発散と生物生産の関係を調べるために、CTD/採水観測およびプイ放流実験を行い、以下のことを明らかにした。

2004年5月、10月と2005年7月の観測から、異なる季節(雨季と乾季)での北部タイランド湾の海洋構造を明らかにした。南西の季節風が卓越する雨季に実施された2004年5月、2005年7月の観測では、湾北部で高温・低塩分、南部で低温・高塩分となっていた。この分布はBuranapratheprat et al. (2003)が数値モデルで示した雨季の湾北部での時計回りの循環を反映したものと考えられる。また、河川流量が年間で最大となる乾季の始まりの2004年10月観測では、河川流量の影響を大きく受け、湾北部と西部で顕著な低塩分水が見られた。また、外洋からの高塩分水は湾東部を占めていた。このような塩分分布は、Buranapratheprat et al. (2003)の示した乾季の湾全域で反時計回りの循環と良く一致する。また、雨季の湾北部から北東部のBanpakong河口域の表層では、いつも低塩分となっていて、これはSojisuporn(1998)と同じ結果となっている。

生物生産に関しては、一次生産を反映するChl. aの分布を実測により明らかにした。その結果は、大まかな湾全体スケールでは、Singhruck (2001)が衛星画像によって示した分布と一致し、雨季で湾北東部で他の海域と比べて高濃度であり、湾口部で低い。乾季の始まりには、湾北西部で高く、湾南東部で低い。これらのことから、高濃度Chl. aの海域では低塩分、高栄養塩、低Chl. aには高塩分低栄養塩という対応が見られるため、河川水が高い一次生産分布をもたらしたと考えられる。しかし、雨季の湾西部でChl. aが高濃度であった場所では低塩分ではなく、より小さな空間スケールでみると、塩分や栄養塩との対応がみられない。これはChl. aの局所的な分布は、海域ごとに異なった要因が影響することを示唆している。今後、動的に変化する栄養塩の供給経路を植物プランクトンの消長スケールと合わせて、明確にするとともに、植物プランクトン組成を明確にする必要がある。

GPS搭載プイを用いた全20回の漂流実験から、ラグランジュ的な視点からの流況(流向, 流速, 収束発散場)が示された。収束発散場は、14回の発散場と6回の収束場が観測された。14回の発散場では、漂流速度が大きくなるほど大きな発散となり、6回の収束場は全て湾東部において観測され、流速が減少するほど大きな収束となった。これら収束発散と漂流速度との関係は、有明海で井上ら(1980)が示した結果とおおよそ同じ傾向であった。

Banpakong河口域である湾北東部(Stn. 1)では、4回の放流実験の全てで発散となっていた。また、流速と発散項は正の相関を示していた。これらから、この河口域での発散場は、Bangpakong川またはChaopraya川が維持する長時間スケールの発散によるプリューム拡散による可能性が示唆される。発散項の値は、全実験で 10^{-5} sec^{-1} のオーダーであり、河口域における淡水と海水の希釈混合やプランクトンの集積拡散に対して大きく関与しうる大き

さであった。

異なる季節環境下の全実験におけるChl. a濃度と収束発散場との関係には、はっきりとした相関傾向は見受けられない。しかし、Sichang島近くの測点を除くと、発散場と高濃度Chl. aの間に正の相関傾向が見られた。北部タイランド湾の多くの海域では、発散が大きければChl. a濃度も高くなるという傾向にあるが、Sichang島近くでは時間的空間的に流動の変化が大きいため、収束発散はChl. a分布に反映しなかった可能性が考えられる。これらから、北部タイランド湾の一次生産分布は、湾全体のスケールで見れば、塩分や栄養塩などの河川水による影響であるものと考えられるが、より小さな空間スケールでみると収束発散などの局所的な流れによる影響が一次生産分布に無関係でないことが示唆された。

謝辞

本論文をまとめるにあたり、多くの方々のご協力を戴いた。終始適切なご指導や助言をして下さった、東京大学海洋研究所海洋科学国際共同研究センター企画情報分野の道田豊助教授に心より深く感謝の意を申し上げる。

本研究は日本学術振興会拠点交流事業「沿岸海洋学」によってサポートされており、特に、その資金援助なくしては本海域の観測航海を行うことができなかった。このような機会を与えて戴いた日本学術振興会に感謝の意を申し上げる。

また、日本とタイの研究者の有益な架け橋となり、継続的に援助して頂いた、タイ国チュラロンコン大学の松村皐月博士に心から感謝の意を表す。また同大学の Pramot 博士や学生の方々には研究面、観測面の両側面で大変お世話になり、心から感謝の意を表す。観測航海においては、多くのサンプルデータ集めに貢献し、継続的にサポートして戴いたカセサート大学の調査船の乗組員や技官の方々に深い感謝の意を申し上げる。

さらに、本研究を進めるにあたり、有益かつ建設的な議論や助言をして下さった東京大学海洋研究所の川辺正樹教授、同藤尾伸三助教授、同柳本大吾助手、同田中潔助手、及び同大学海洋物理学部門海洋大循環分野の加藤史拓さん小牧加奈江に厚く御礼申し上げる。同海洋科学国際共同研究センターの大学院生、卒業された稲田真一さんには公私にわたりたくさんのご協力を賜った。ここに厚く御礼申し上げる。東京大学大学院新領域創成科学研究科自然環境コースの技官や大学院生の方々には、本研究の内容に関して多くの貴重なご意見や励ましを戴いた。ここに感謝の意を申し上げる。

最後に、長年の学生生活を経済的にも精神的にも支えてくれ応援して戴いた両親ならびに姉に深く感謝の意を申し上げる。

瀧本 良太

参考文献

- Aoyagi, H., Y. Michida, M. Inada, H. Ootobe and R. Takimoto (2004) : Experiment of particle dispersion on the sea surface with GPS tracked drifters, Proc. Oceans'04 MTS/IEEE Techno-Ocean'04, 139-145.
- Austin, J.A. and J.A. Barth, 2002: Drifter behavior on the Oregon-Washington Shelf during downwelling-favorable winds, J. Phys. Oceanogr., 32, 3132-3144.
- 青木 伸一・谷口 智紀 (2001) : ランドサット画像を用いた内湾のクロロフィル濃度の推定, 海岸工学論文集, 48,1466-1470.
- 赤松秀雄 (1975) : 日本海における前線付近の海洋構造について (1) 表層の水平収束発散の実測, 海と空, Vol.50, 123-136.
- 有賀 祐勝(1974) : 海洋の基礎生産, 海洋プランクトン, 東京大学出版会, 25-39.
- Boonphakdee, T., Sawangwong, P. and Fujiwara, T. (1999): Freshwater discharge of Bangpakong River flowing into the inner Gulf of Thailand. La mer. 37, 103-109.
- Buranapratheprat, A., M.Bunpapong. (1998) : A two dimensional hydrodynamic model for the Gulf of Thailand. Proc., of the IOC-WESTPAC Fourth International Scientific Symposium, 469-478.
- Buranapratheprat, A., T. Yanagi and P. Sawangwong. (2002): Seasonal Variations in Circulation and Salinity Distributions in the Upper Gulf of Thailand : Modeling Approach, La mer. 40, 147-155.
- Buranapratheprat, A., T. Yanagi, and Boonphakdee, T. (2002): Seasonal Variations in Inorganic Nutrient Budgets of the Bangpakong Estuary, Thailand. J. Oceanogr., 58, 557-564.
- Buranapratheprat, A., T. Yanagi (2002): Seasonal Variations in Circulation and Average Residence Time of the Bangpakong Estuary, Thailand. Proc. The First Joint seminar on Coastal Oceanography, 275.
- Chalermwat, K. and R.A.Lutz (1998) : Farming the green mussel in Thailand, World Aquaculture.20,41-46.
- Fukuda, A., K. Miwa, E. Hirano, M. Suzuki, H. Higuchi, E. Morishita, D.J. Anderson, S.M. Waugh and R.A. Phillips (2004) : BGD-L- II A GPS data logger for birds, Mem.Natl Inst. Polar res., Spec. Issue, 58,234-245.
- 古谷 研 (1996) : 海洋の一次生産. 月刊海洋号外, 10, 146-155.
- 井上 尚文・藤田猛雄 (1979) : 有明海灣奥東部における漂流版追跡結果からみた流れと収束発散, 沿岸環境変動予察方法についての研究報告書. 水産庁・西海区水研・福岡県有明水試・佐賀県有明水試.
- 岩崎 英雄(1974) : 赤潮. 海洋プランクトン, 東京大学出版会, 41-63.
- Kawai,H. (1998): Divergence and Entrainment in River Effluent : the Heartbreak model, J. Oceanogr., 44, 17-32.
- 川合英夫・坂本久雄・百田方子 (1969) : 黒潮表層水の収束発散に関する研究 I .海面における収束発散の実測とその解釈, 南海区水産研究所研究報告, 1, 1-14.

- 川合英夫・坂本久雄 (1970) : 黒潮表層水の収束発散に関する研究Ⅱ.表層混合層層の上部と下部における収束発散の実測, 南海区水産研究所研究報告, 2, 19-38.
- 川合英夫(1976) : 収束・発散と海の粒々物理学, 東京大学出版会, 103-155.
- 川合英夫(1978) : 海洋粒状物に分布過程と収束発散. 海洋物理学Ⅱ, 月刊海洋科学, Vol.10 No.10,841-846.
- 鯉淵 幸生・小倉久子・安藤晴夫・五明美智男・佐々木 淳・磯部 雅彦 (2000) : 東京湾奥部における栄養塩の周年変動に関する現地観測, 海岸工学論文集, 47, 1066-1070.
- 鯉淵 幸生・五明美智男・佐々木 淳・磯部 雅彦 (2000) : 現地観測に基づく春季の東京湾における赤潮発生源機構, 海岸工学論文集, 47, 1071-1075.
- 鯉淵 幸生・佐々木 淳・磯部 雅彦 (2001) : 東京湾における窒素・リンに着目した物質循環機構. 海岸工学論文集, 48, 1076-1080.
- Matsumura, S., A. Siripong, T. Lirdwitayaprasit, and P. Singhruk, (2004): Under water optical survey related to phytoplankton and particles distribution on the Gulf of Thailand, Proc. The First Joint seminar on Coastal Oceanography, 275.
- 丸茂 隆三(1974) : 植物プランクトン, 海洋プランクトン, 東京大学出版会, 1-24.
- Michida, Y., H. Aoyagi, M. Inada, and H. Otobe, (2004) : Development of GPS tracked drifters and application for observation of coastal circulation, Proc. The First Joint seminar on Coastal Oceanography, 1-6.
- 野村英明 (1998) : 1900年代における東京湾の赤潮と植物プランクトン群集の変遷, 海の研究, 7, 3, 159-178.
- 西澤 敏 編 (1996) : 生物海洋学, 恒星社厚生閣, 6-26.
- 西城八束・宇野木早苗 (1977) : 伊勢湾・三河湾の海況特徴と生産力, 沿岸海洋研究ノート 第14巻, 第1・2合併号, 10-18.
- Ozmidov R. (1998) : Phytoplankton Patches in the Ocean under Various Modes of Ocean Turbulence, Oceanology, 38, 1, 3-11.
- 岡田知也・中山恵介・野村宗弘・古川恵太 (2001) : 夏季の東京湾における表層の植物プランクトンに対する底層栄養塩の影響, 海岸工学論文集, 48, 1086-1090.
- Peter J. S. Franks (1997) : Spatial patterns in dense algal blooms, Limnol. Oceanogr., 42, 1297-1305.
- Singhruk. P. (2001): Circulation features in the Gulf of Thailand inferred from SeaWiFS DATA, Proc. ACRS 22nd Asian Conference on Remote Sensing, 923-926.
- Sojisuporn, P., P. Putikiatikajorn (1998) : Eddy Circulation in the Upper Gulf of Thailand from 2-D Tidal Model. Proc., of the IOC-WESTPAC Fourth International Scientific Symposium, 515-522.
- Sojisuporn, P.(1998) : Physical Characteristics of the Banpakong Estuary, Proc., of the IOC-WESTPAC Fourth International Scientific Symposium, 500-514.
- Stocker, R. and J. Imberger, Horizontal transport and dispersion in the surface layer of a

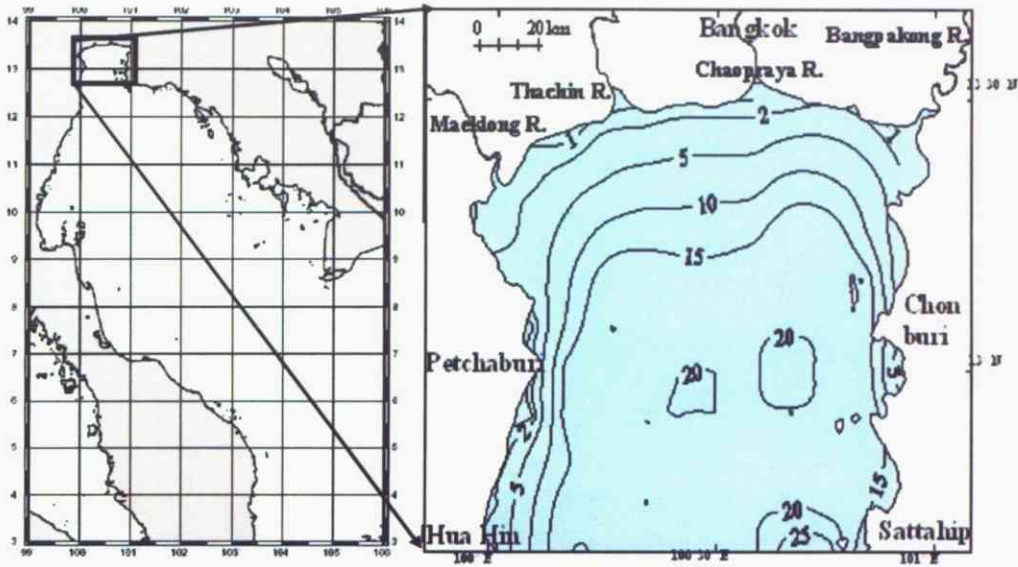
- medium-sized lake (2003), *Limnol. Oceanogr.*, 48, 971-982.
- 斉藤 宏明(2000): 動物プランクトンによる植物プランクトンの摂餌機構, 月刊海洋号外, 21, 185-189.
- 才野 敏郎 (1995): 栄養塩と生物活動, 月刊海洋号外, 8, 20-27.
- 佐々木 淳・磯部雅彦・今井 誠 (1999): 東京湾における赤潮の消長要因に関する考察, 海岸工学論文集, 46, 1021-1025.
- 関 文威 (1996): 生物海洋学入門, 講談社サイエンティフィック, 28-51.
- Tarbuck E.J, Lutgens F.K, (1998): *EARTH SCIENCE*, Prentice Hall.
- The PO.DAAC Ocean ESIP Tool (POET) <http://poet.jpl.nasa.gov/>
- 杜多 哲・小松 輝久 (1992): 生物の分布・生長と流れの測定, 月刊海洋, 24, 8, 461-463.
- 宇野木早苗 (1978): 内湾における海水の交換, 月刊海洋科学, Vol.10, 821-830.
- 宇野木早苗 (1980): 海水交換とその素過程について, 沿岸海洋研究ノート, 第17巻, 第2号, 89-97.
- Wattayakorn, G., King, B. and , Wolanski, E. (1998): Seasonal dispersion of petroleum contaminants in the Gulf of Thailand. *Con. Shelf. Res.* 18, 641-659.
- Yanagi, T., T. Takao (1998): Clockwise Phase Propagation of Semi-Diurnal Tides in the Gulf of Thailand. *J. Oceanogr.*, 54, 143-150.
- Yanagi, T., Takao, T. (1998): Seasonal variation of three-dimensional circulation in the Gulf of Thailand, *La mer.* 36, 43-55.
- Yanagi, T., Sachemar, S. and Takao, T. (2001): Seasonal variation of Stratification in the Gulf of Thailand, *J. Oceanogr.*, 57, 461-470.
- 柳 哲雄・村下耕荘・樋口明生(1981): 沿岸海域の物質分散(II)-浮子拡散実験-. 京都大学防災研究所年報, 第24号, 539-747.
- 柳 哲雄・樋口明生(1982): 現場海域の拡散係数の推定法に関する研究, 海岸工学講演会論文集, 580-583.
- 柳哲雄 編 (1990): 潮目の科学, 恒星社厚生閣, 37-10.
- 柳 哲雄・石丸 隆・佐藤博雄・塚本秀史(1998): 紀伊水道のクロロフィル分布に関する現地観測と衛星画像, 海の研究, 7, 6, 369-374.
- 柳 哲雄・石井大輔・日向博文・石丸 隆 (2005): 植物プランクトンパッチネス構造の生成機構, 日本海洋学会秋季大会講演要旨集, 203.

表1 2004年5月から2005年7月までの全5回の観測の日程と測定項目

Cruise	Date	Vessel(s)	Observation Parameters	Buoy Exp.	CTD Stn.
1	May/12-15/04	Kasetsart I	CTD, Chl.a, Light, Nutrients (Nitrite, Nitrate, Phosphate, Silicate)	3	16
2	Oct/7-10/04	Kasetsart I Fishing boat	CTD, Chl.a, Light, Nutrients (Nitrite, Nitrate, Phosphate, Silicate)	4	17
3	Feb/5-6/05	Fishing boat	CTD, Chl.a	4	4
4	May/17-18/05	ChulaVichai	CTD, Chl.a	4	4
5	July/26-29/05	Kasetsart I Fishing boat	CTD, Chl.a, Light, Nutrients (Nitrite, Nitrate, Phosphate, Silicate)	5	17

表2 北部タイランド湾におけるプイ放流実験及び Chl.a の測定値

Cruise	Exp.	Date	Drifting time (min)	Place	Depth (m)	Scale $\times 10^3 (m^2)$	Scale change (%)	Wind speed (daily mean) (m/sec)	Wind direction (daily mean)	Drifter speed (cm/sec)	Drifter direction (T_o)	Divergence $\times 10^{-3} (1/sec)$	Chl.a ($\mu g/l$)	$\overline{Chl.a}$ ($\mu g/l$)	$Chl.a / \overline{Chl.a}$
1	1	May. 12, 04(13:30-16:45)	195	Stn.1	12.4	2.9	25	4.5	W	11.0	SSW	1.8±0.2	6.0		1.3
	2	May. 13, 04(16:20-17:30)	75	Stn.6	15.4	1.4	10	6.4	SW	8.0	SE	2.3±0.6	6.4	4.5	1.4
	3	May. 14, 04(14:50-15:50)	65	Stn.13	37.7	1.8	-16	6.7	SW	12.7	SE	-4.6±0.7	1.1		0.2
2	4	Oct. 7, 04(12:30-14:25)	115	Stn.1	14.5	1.4	8	4.6	ENE	5.1	SW	1.1±0.5	0.83		1.3
	5	Oct. 7, 04(16:30-17:30)	60	Stn.17	30	0.8	-21	5.1	E	4.7	SSE	-6.4±1.1	0.58	0.6	0.9
	6	Oct. 8, 04(16:15-17:45)	90	Stn.6	17.5	1.9	15	6.4	ESE	9.6	ENE	-5.6±0.9	0.08		0.1
	7	Oct. 9, 04(17:00-17:55)	55	Stn.10	27	1.5	-17	5.9	S	12.3	S	2.4±0.4	44		1.5
3	8	Feb. 5, 05(12:10-14:00)	110	Stn.1	14.9	2.2	15	9.3	S	15.0	SSE	-3.9±0.7	27	29.6	0.9
	9	Feb. 5, 05(15:45-17:00)	75	Mid. Stn.1-16	22	2	-14	7.9	S	7.9	S	-1.8±0.6	9.3		0.3
	10	Feb. 6, 05(11:15-13:00)	105	Stn.16	23.1	3.1	4	19.7	S	19.7	S	2.9±0.5	38		1.3
4	11	Feb. 6, 05(15:10-16:30)	80	Mid. Stn.1-17	13.1	2.6	14	6.4	SW	14.8	SSE	0.9±0.5	6.57		1.0
	12	May. 17, 05(11:45-13:15)	90	Stn.14	21.4	2.9	4	7.1	S	5.8	NW	-0.4±0.7	3.43	6.8	0.5
	13	May. 17, 05(14:55-16:00)	65	Mid. Stn.3-14	16.7	2.4	-2	12.7	S	12.7	SE	1.3±0.6	4.17		0.6
	14	May. 18, 05(09:20-10:45)	85	Stn.2	17.9	2.5	6	6.5	NW	6.5	NW	0.9±0.2	13.14		1.9
5	15	May. 18, 05(12:35-15:35)	180	Mid. Stn.1-17	13.6	3.5	10	7.1	WSW	27.5	S	-3.2±0.5	4.49		2.1
	16	July. 26, 05(11:55-13:30)	95	Mid. Stn.1-17	10.2	1.1	-15	8.5	NE	8.5	NE	1.6±0.7	2.57		1.2
	17	July. 26, 05(15:00-16:00)	60	Stn.1	11.6	1.2	6	8.8	WSW	36.2	N	3.8±0.6	1.39	2.1	0.7
	18	July. 27, 05(17:00-17:55)	55	Stn.7	16.5	2.5	11	8.8	SW	35.3	N	5.0±0.4	1.32		0.6
	19	July. 29, 05(07:15-08:30)	75	Stn.10	19.5	2.1	22	4.70	WSW	4.70	WSW	0.4±0.4	0.75		0.4
	20	July. 29, 05(10:30-11:55)	85	Stn.14	20.2	2.4	2								



Latitude ($^{\circ}N$)	12.5-13.5	Scale	約100km × 100km
Longitude ($^{\circ}E$)	100-101	Depth (average)	20m
Climate	Tropical forest	Depth (max.)	40m
Monsoon	Wet (S-W) : May-Aug. Dry (N-E) : Nov.-Jan.	Main River	Bangpakong, Chao Phraya, Thachin, Maeklong

図 1.1 北部タイランド湾の地理的特徴

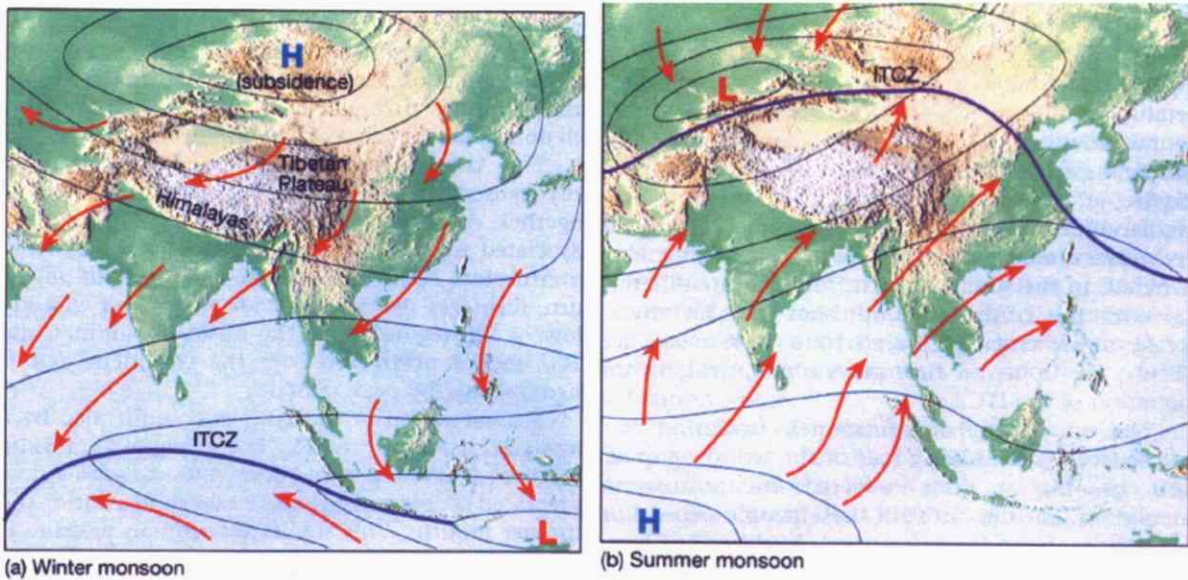


Figure 7-8 Asia's monsoon circulation occurs in conjunction with the seasonal shift in the intertropical convergence zone (ITCZ). (a) In January, a strong high pressure develops over Asia and cool, dry continental air generates the dry winter monsoon. (b) With the onset of summer, the ITCZ migrates northward and draws warm, moist air onto the continent.

図 1.2 アジアのモンスーン (Lutgens & Tarbuck, 1998)

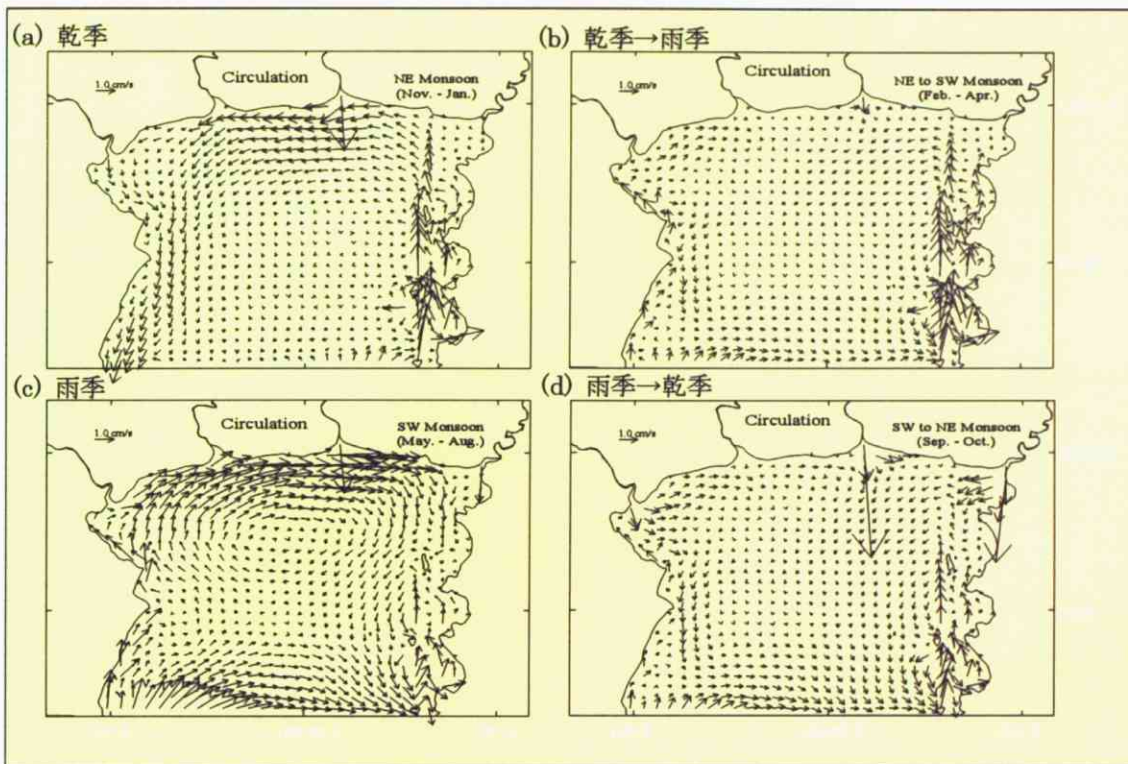
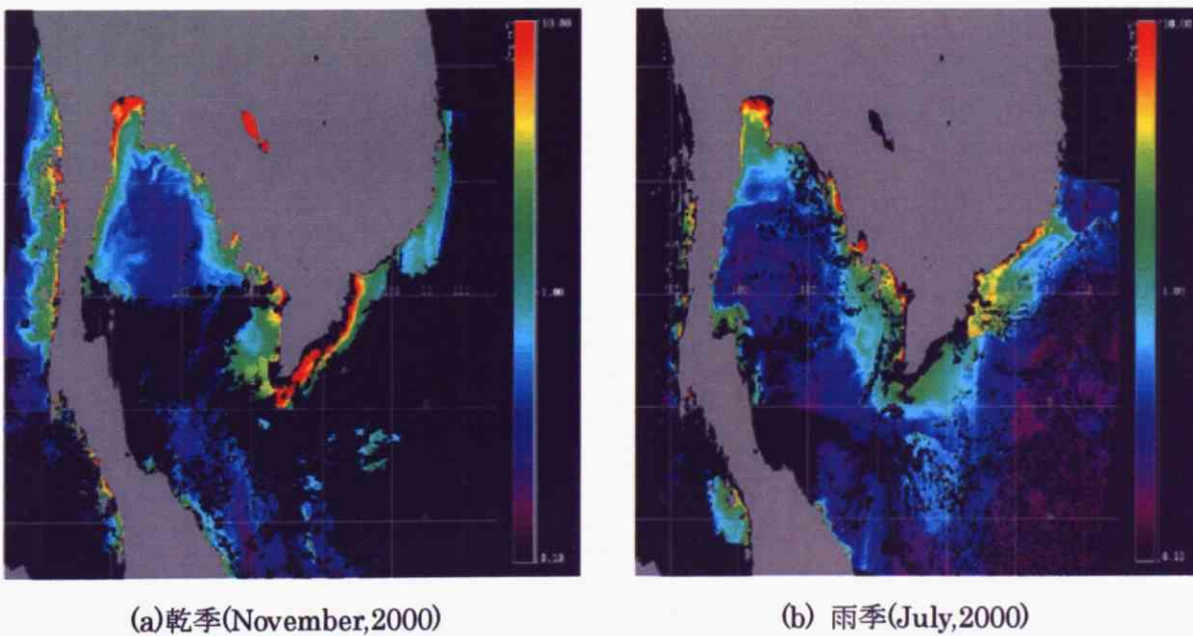


図 1.3 北部タイランド湾における各季節の循環場 (Buranapratheprat et al., 2003)

(a) 乾季 (b) 乾季から雨季への移行期 (c) 雨季 (d) 雨季から乾季への移行期



(a) 乾季(November,2000)

(b) 雨季(July,2000)

図 1.4 (a)乾季と(b)雨季におけるクロロフィル a 濃度の衛星画像(暖色ほど高濃度を表す) (Patama shinghruck 2001) .

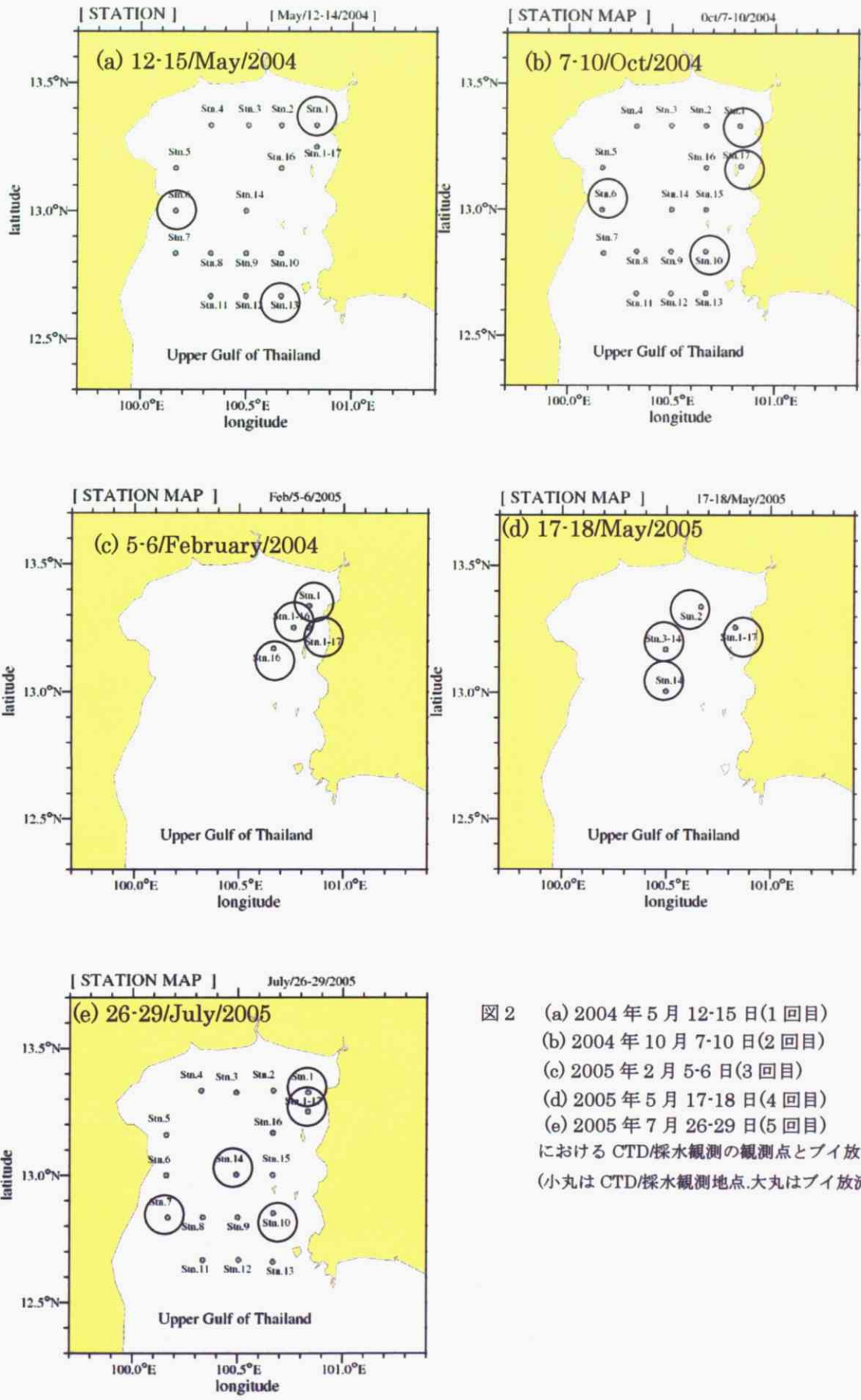


図2 (a) 2004年5月12-15日(1回目)
 (b) 2004年10月7-10日(2回目)
 (c) 2005年2月5-6日(3回目)
 (d) 2005年5月17-18日(4回目)
 (e) 2005年7月26-29日(5回目)
 におけるCTD/採水観測の観測点とブイ放流地点。
 (小丸はCTD/採水観測地点.大丸はブイ放流地点.)

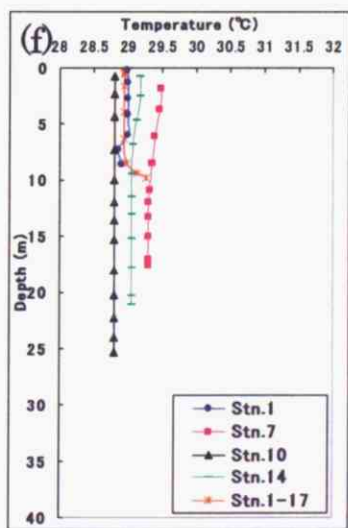
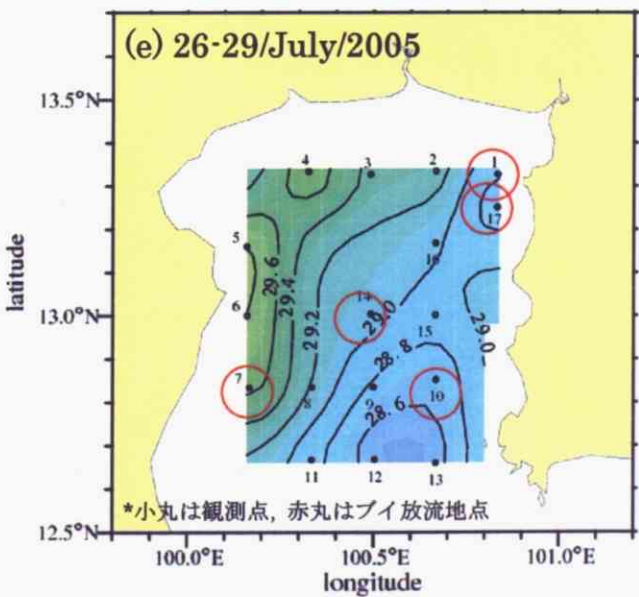
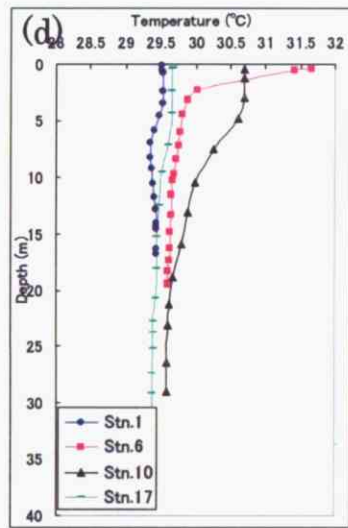
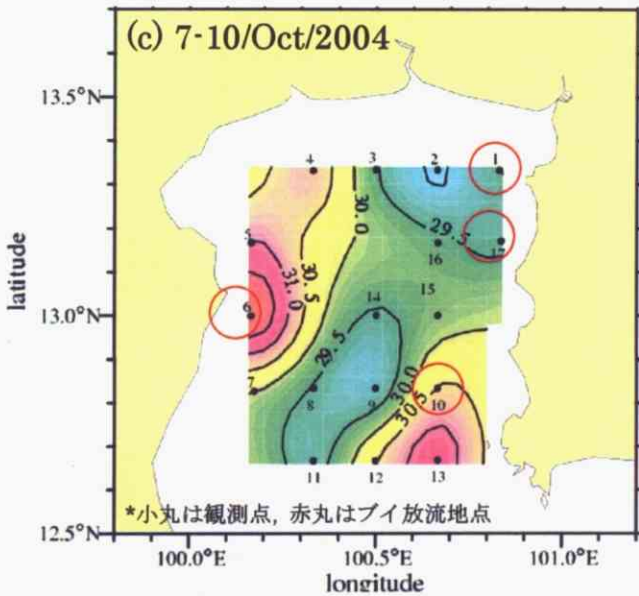
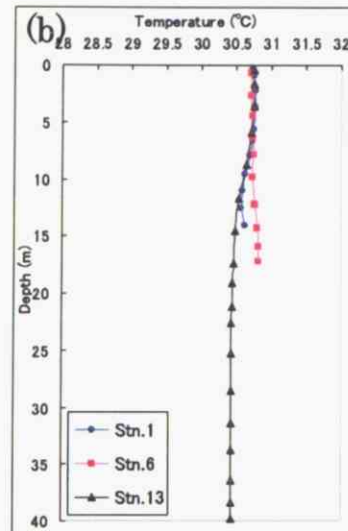
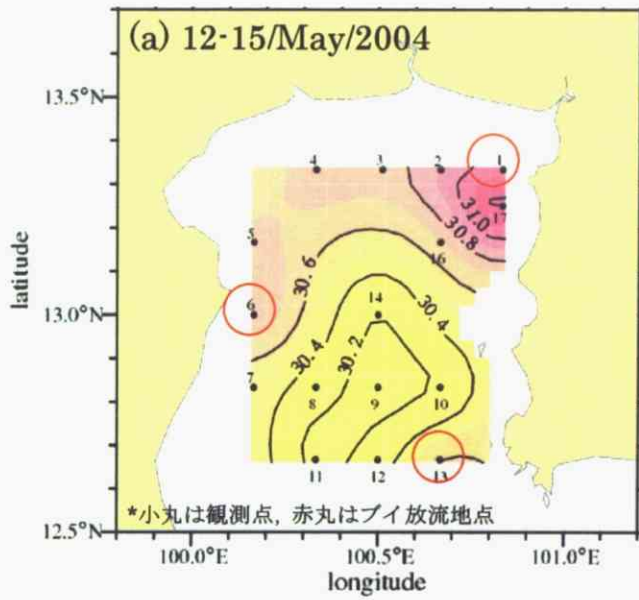


図 3.1 表層の水温(°C)の水平分布とパイ放流地点での鉛直プロファイル。

(a),(b) 2004年5月12-15日(1回目) (c),(d) 2004年10月7-10日(2回目) (e),(f) 2005年7月26-29日(5回目)

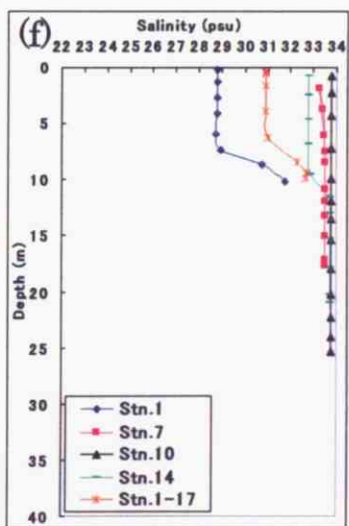
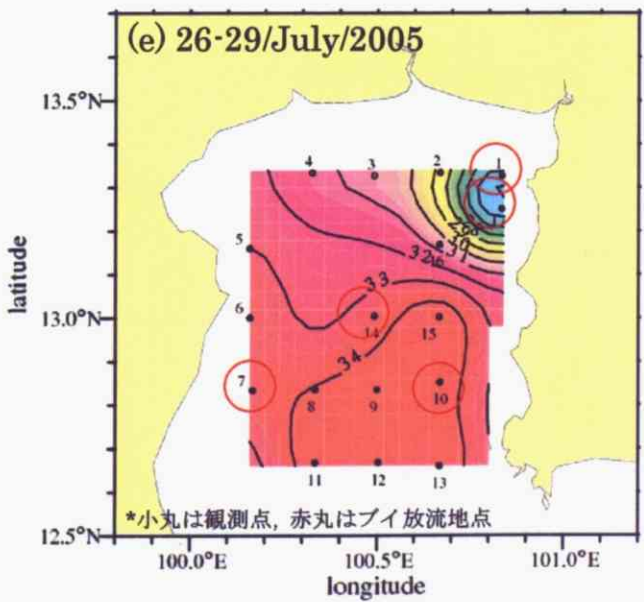
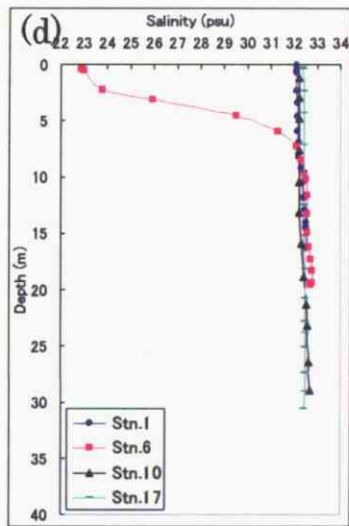
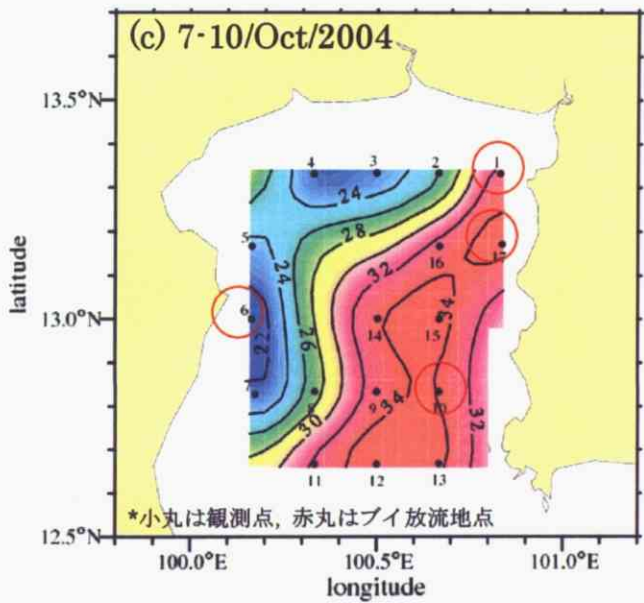
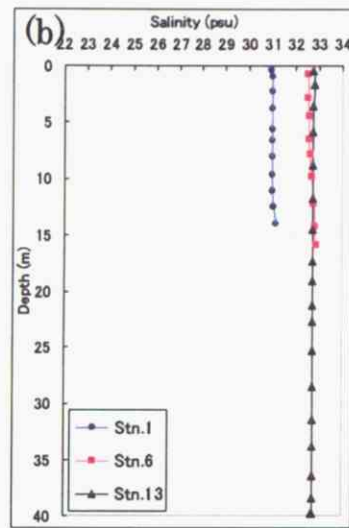
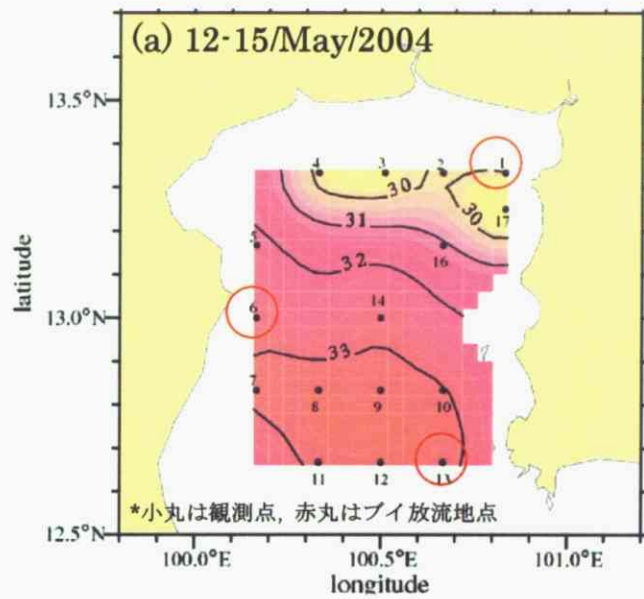


図 3.2 海面塩分(psu)水平分布とプイ放流地点での鉛直プロファイル.

(a),(b) 2004年5月12-15日(1回目) (c),(d) 2004年10月7-10日(2回目) (e),(f) 2005年7月26-29日(5回目)

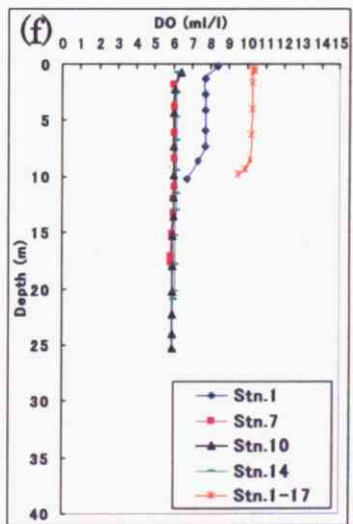
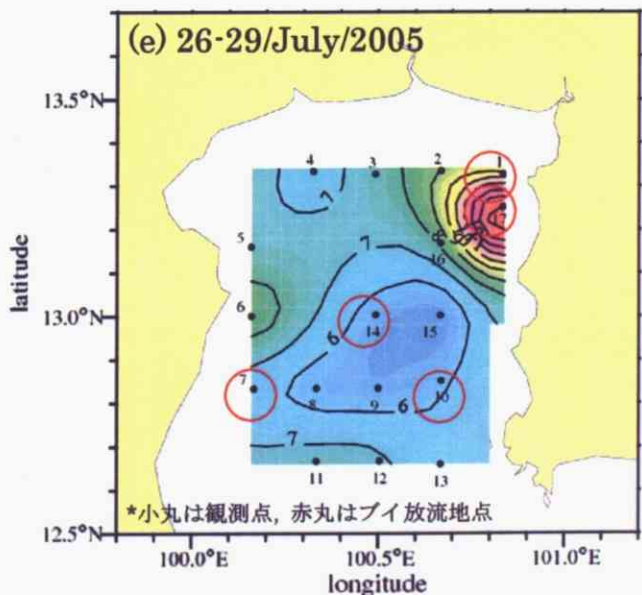
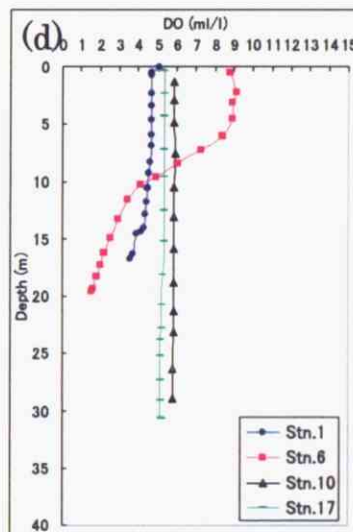
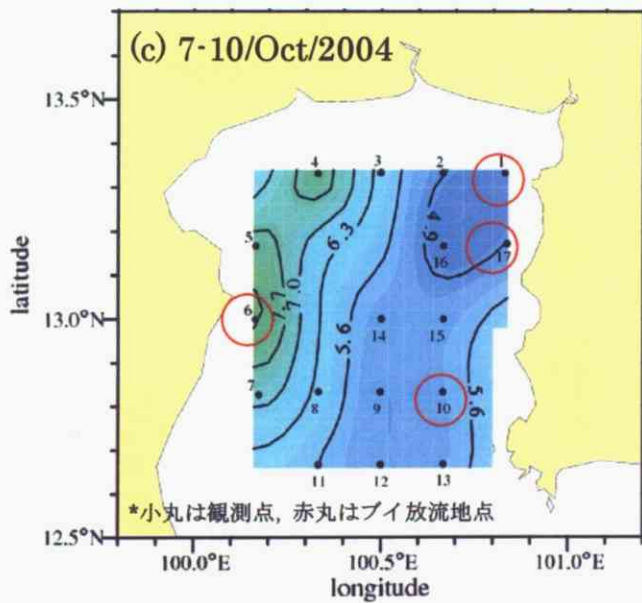
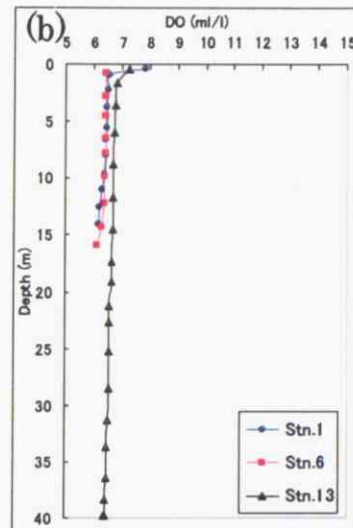
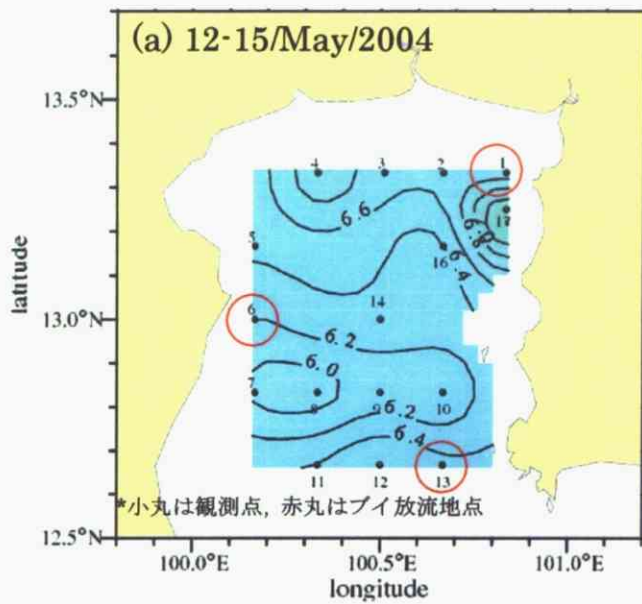


図 3.3 海面溶解酸素(ml/l)の水平分布とパイ放流地点での鉛直プロファイル。

(a),(b) 2004年5月12-15日(1回目) (c),(d) 2004年10月7-10日(2回目) (e),(f) 2005年7月26-29日(5回目)

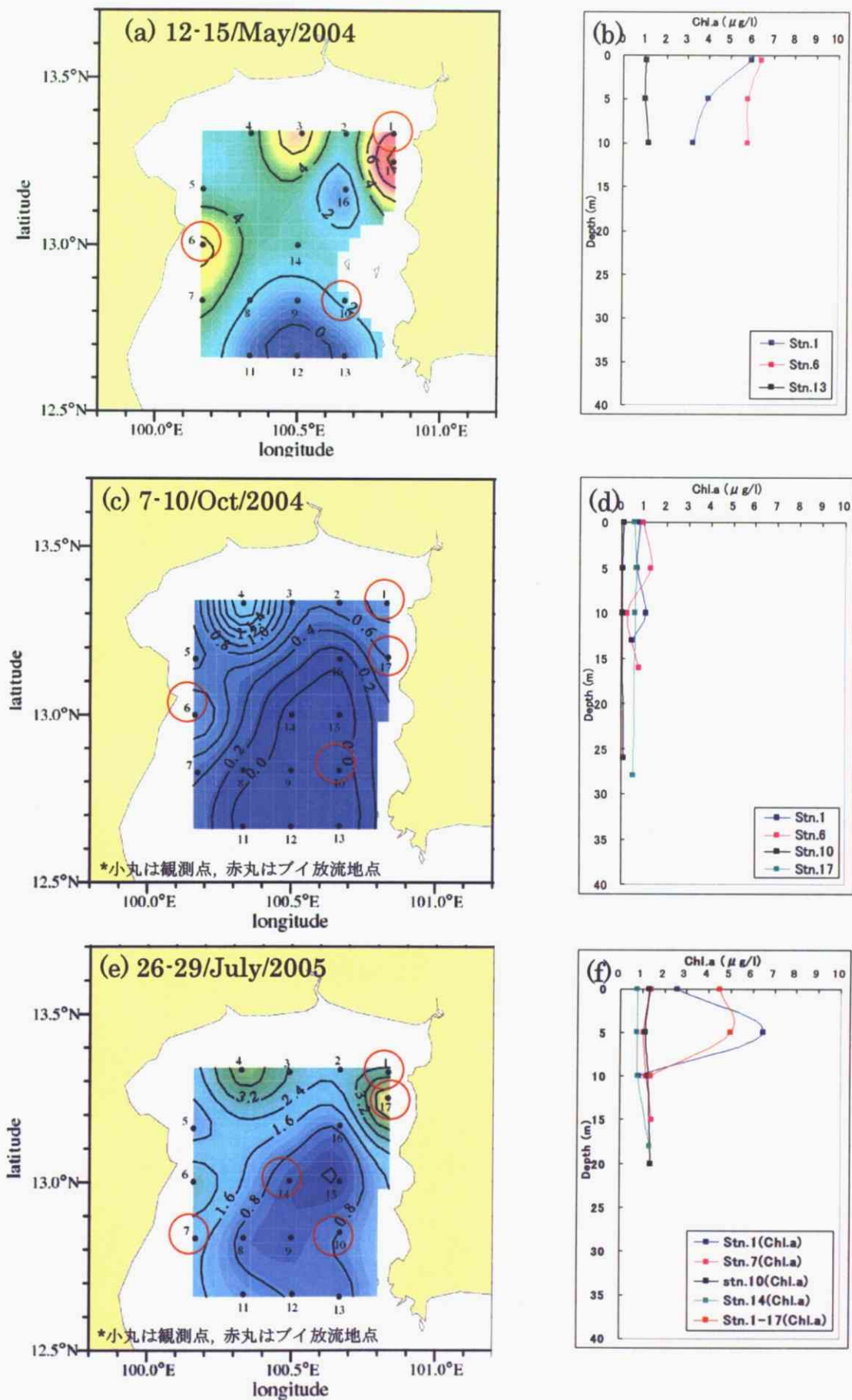


図 3.4 海面 Chl.a ($\mu\text{g/l}$) 水平分布とパイ放流地点での鉛直プロファイル。

(a),(b) 2004 年 5 月 12-15 日(1 回目) (c),(d) 2004 年 10 月 7-10 日(2 回目) (e),(f) 2005 年 7 月 26-29 日(5 回目)

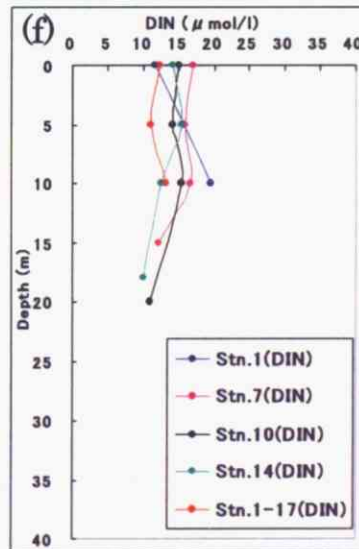
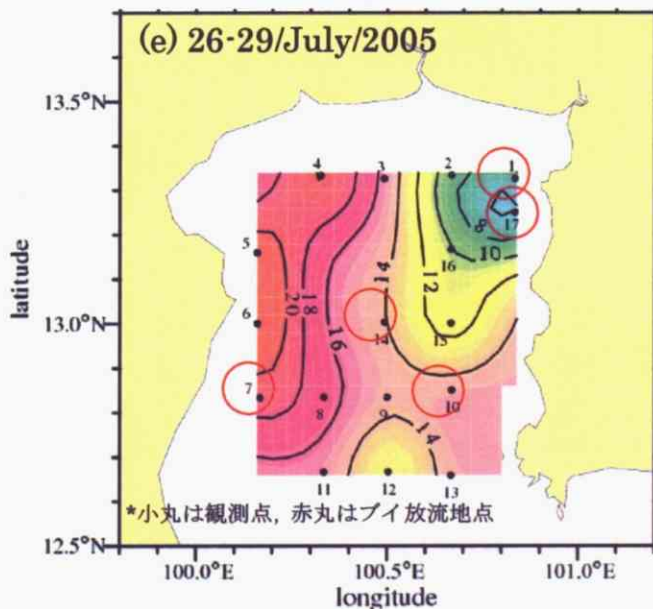
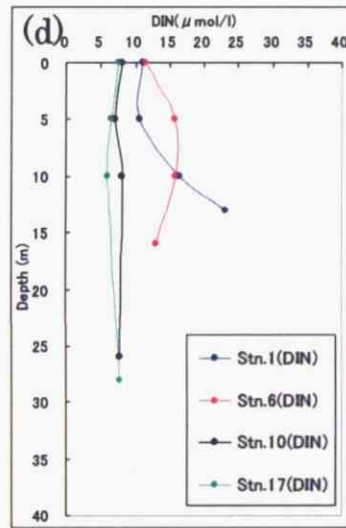
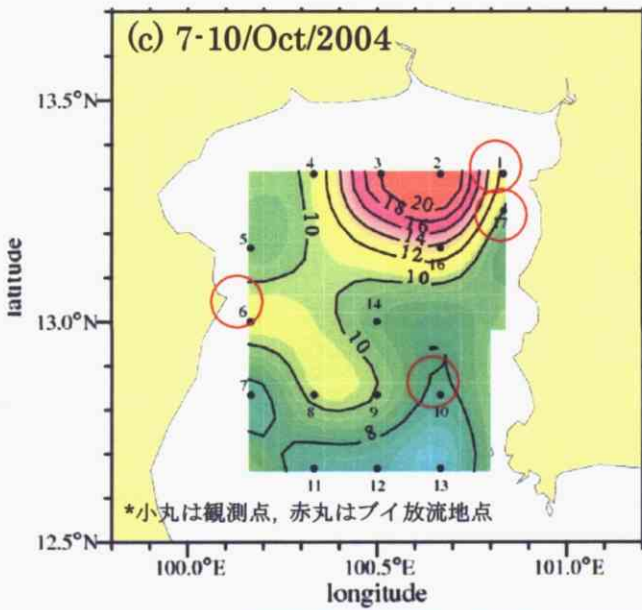
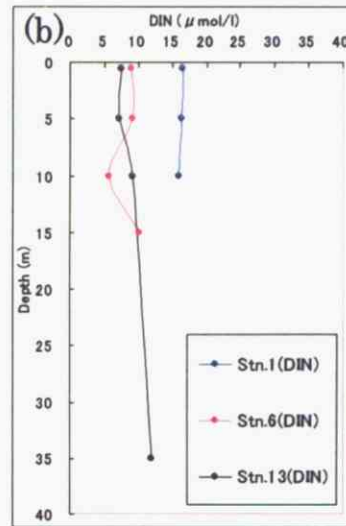
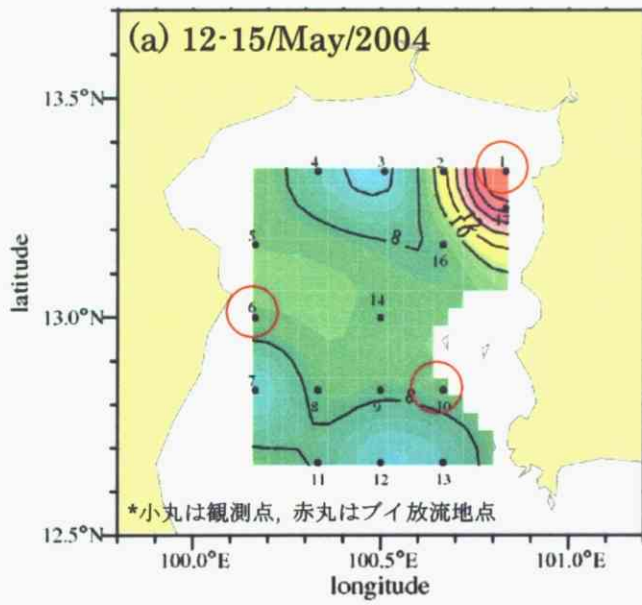


図 3.5 海面における溶存無機態窒素 ($\mu\text{mol/l}$) の水平分布とパイ放流地点での鉛直プロファイル。

(a),(b) 2004 年 5 月 12-15 日(1 回目) (c),(d) 2004 年 10 月 7-10 日(2 回目) (e),(f) 2005 年 7 月 26-29 日(5 回目)

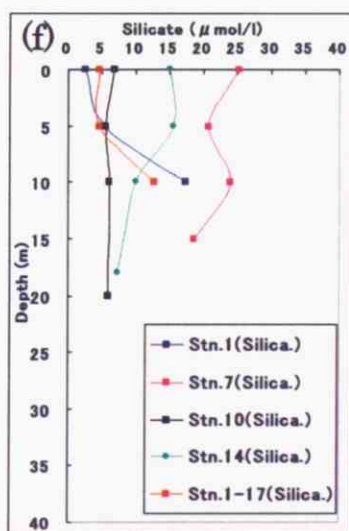
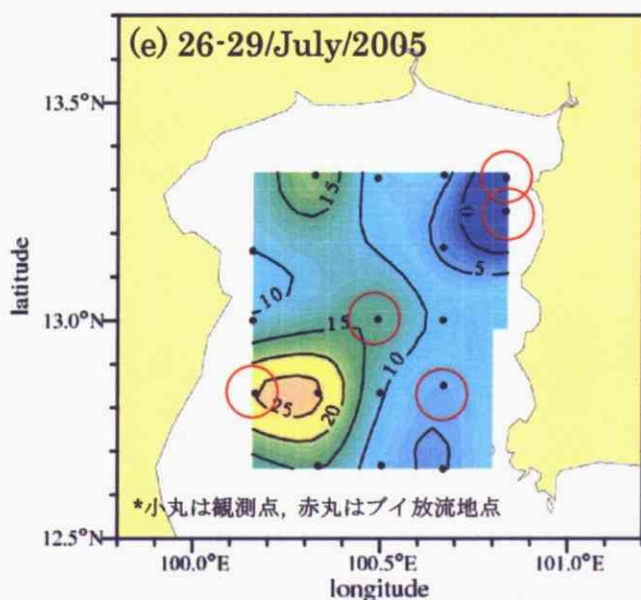
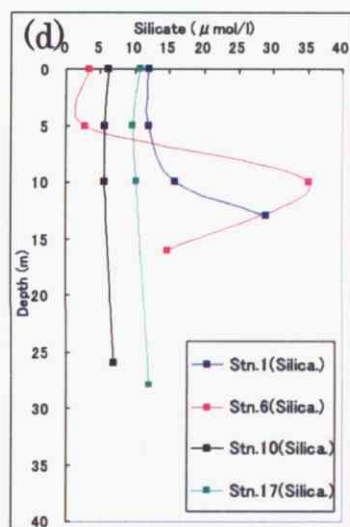
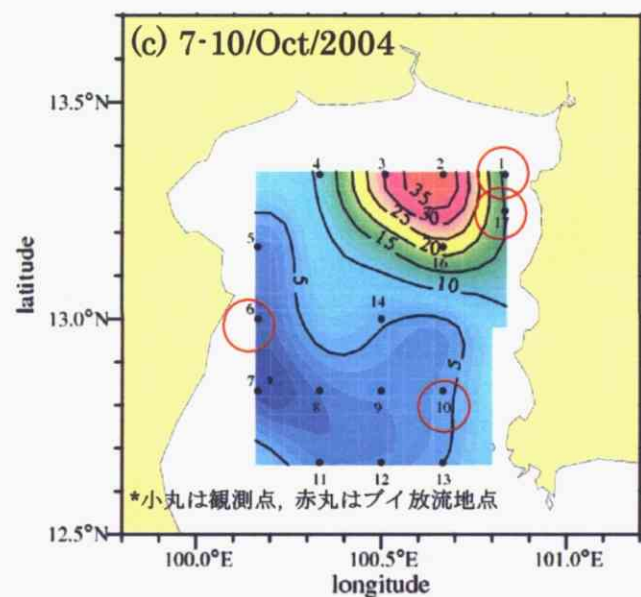
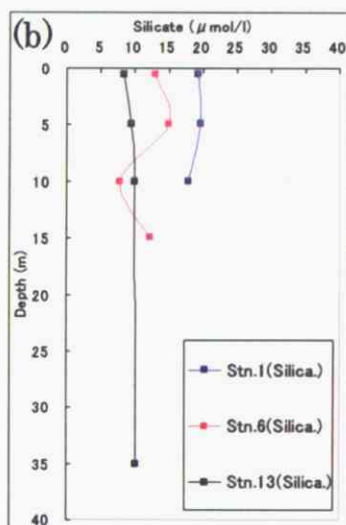
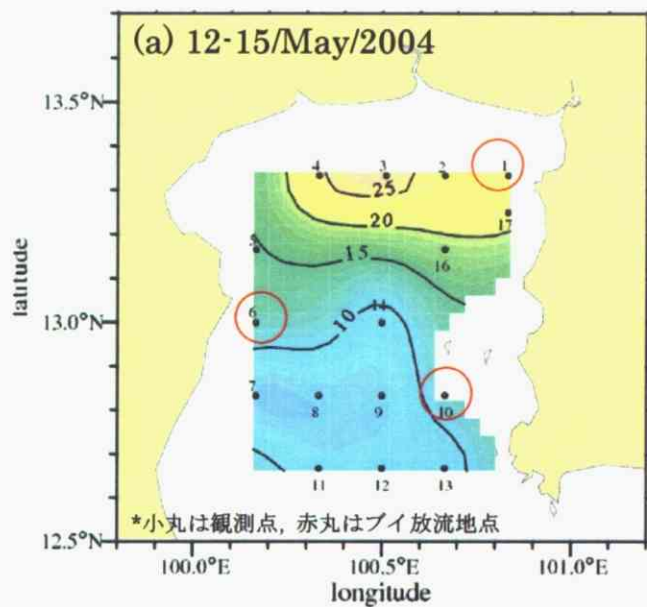


図 3.6 海面におけるケイ酸塩($\mu\text{mol/l}$)の水平分布とパイ放流地点での鉛直プロファイル。

(a),(b) 2004年5月12-15日(1回目) (c),(d) 2004年10月7-10日(2回目) (e),(f) 2005年7月26-29日(5回目)

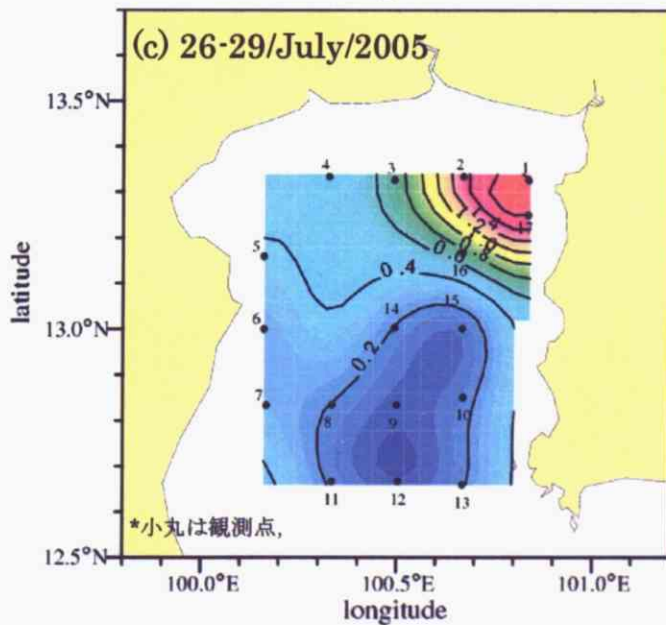
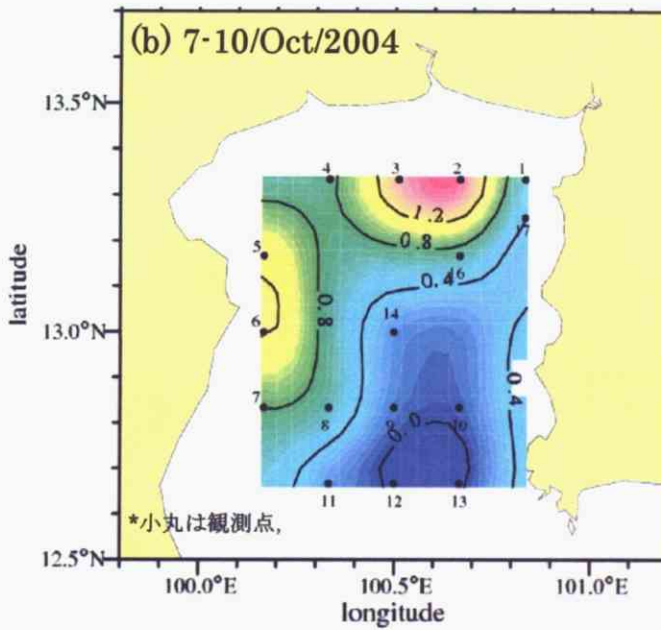
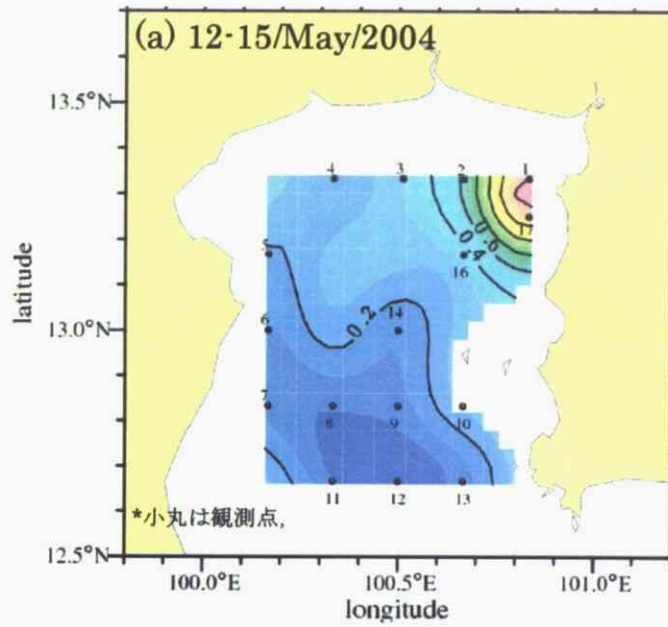


図 3.7 海面におけるリン酸塩($\mu\text{mol/l}$)の水平分布.

(a) 2004年5月12-15日(1回目) (b) 2004年10月7-10日(2回目) (c) 2005年7月26-29日(5回目)

(a) 5-6/Feb/2005 at Stn.1, 1-16, 16, 1-17

(b) 17-18/May/2005 at Stn.14, 3-14, 2, 1-17

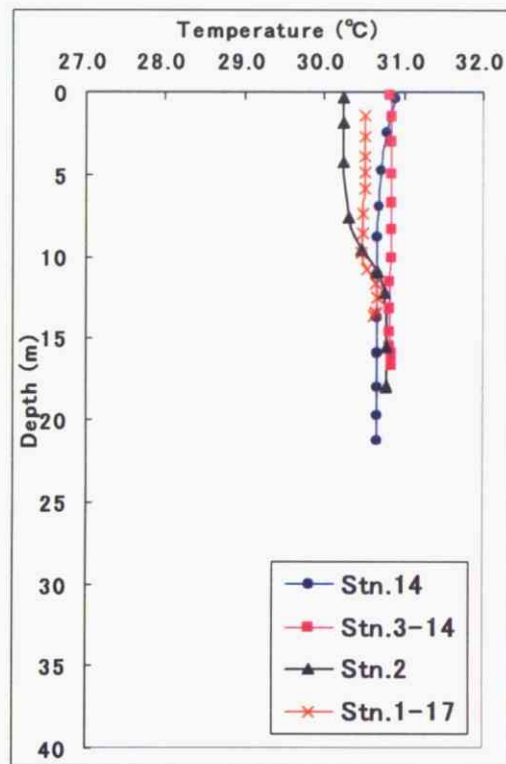
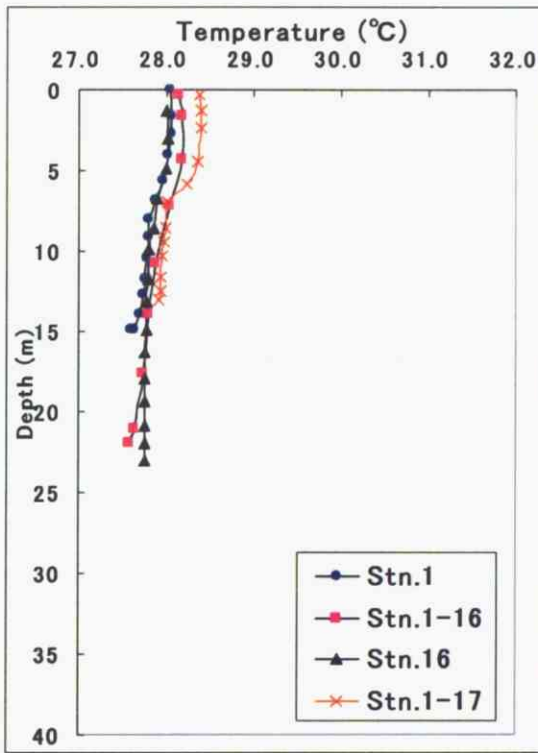


図 4.1 水温 (°C)の鉛直プロファイル(2005年2月,5月)

(a) 5-6/Feb/2005 at Stn.1, 1-16, 16, 1-17

(b) 17-18/May/2005 at Stn.14, 3-14, 2, 1-17

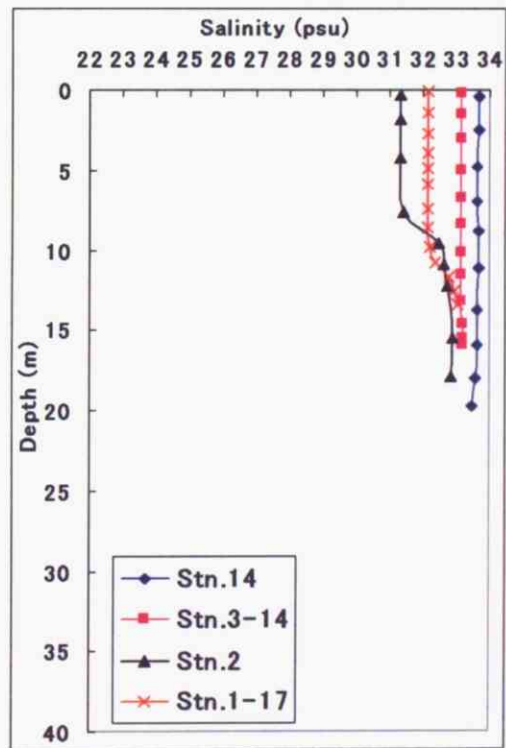
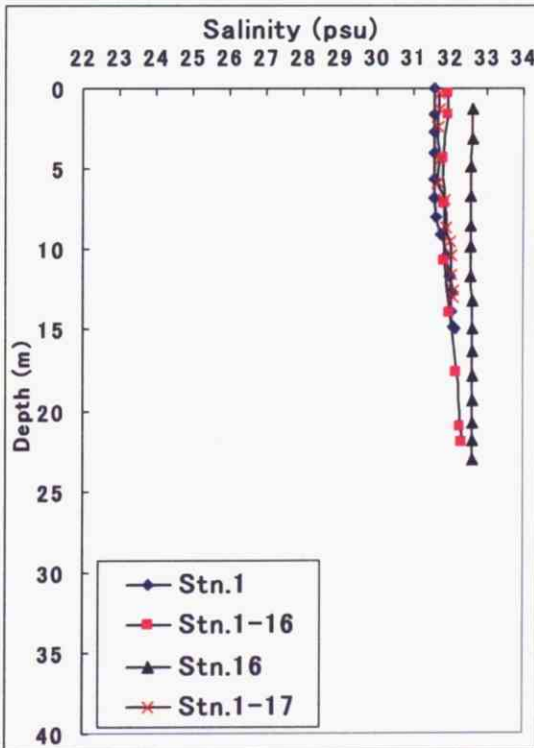


図 4.2 塩分 (psu)の鉛直プロファイル(2005年2月,5月)

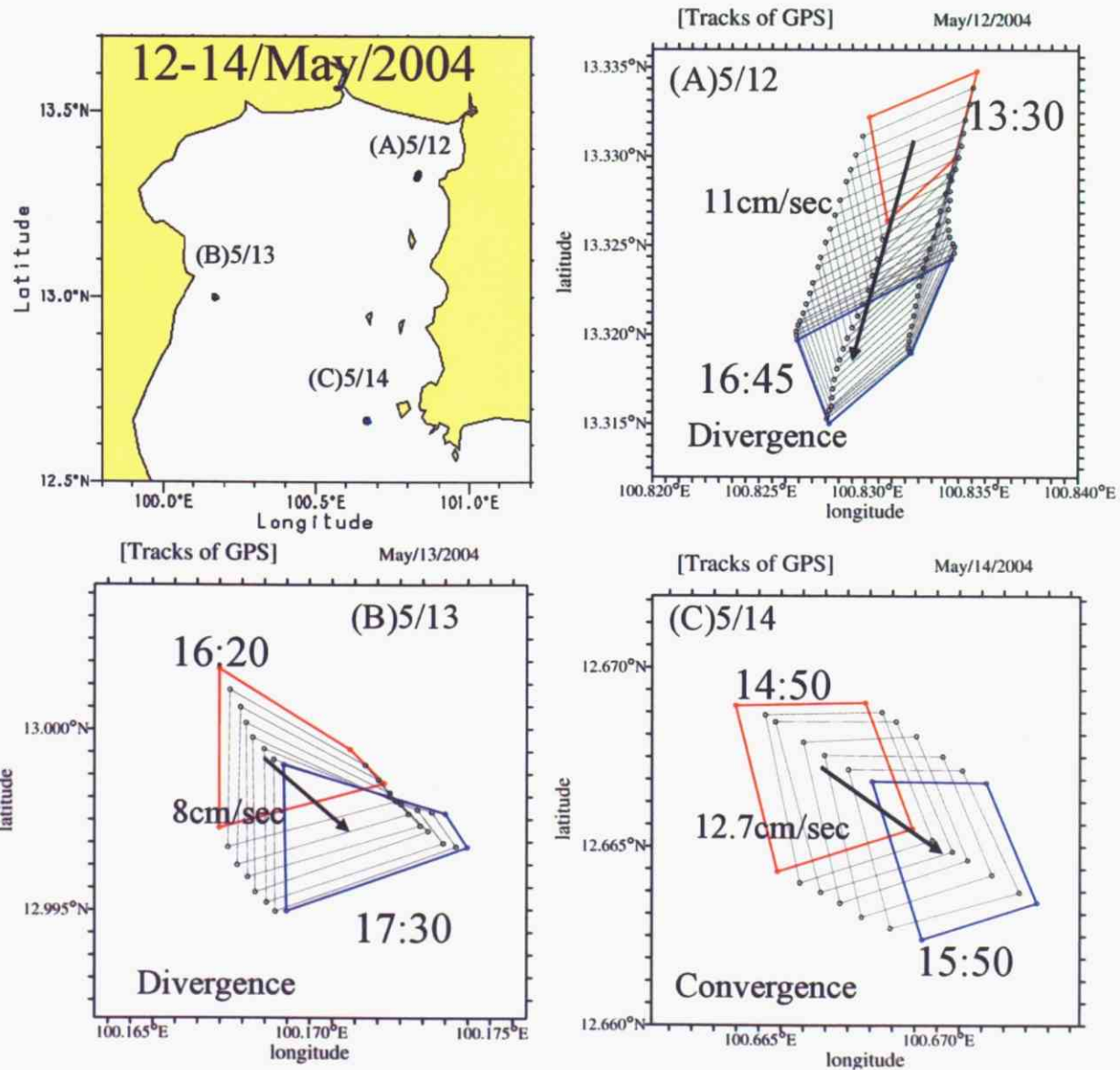


図5.1 2004年5月12-14日の実験における漂流ブイ群の軌跡

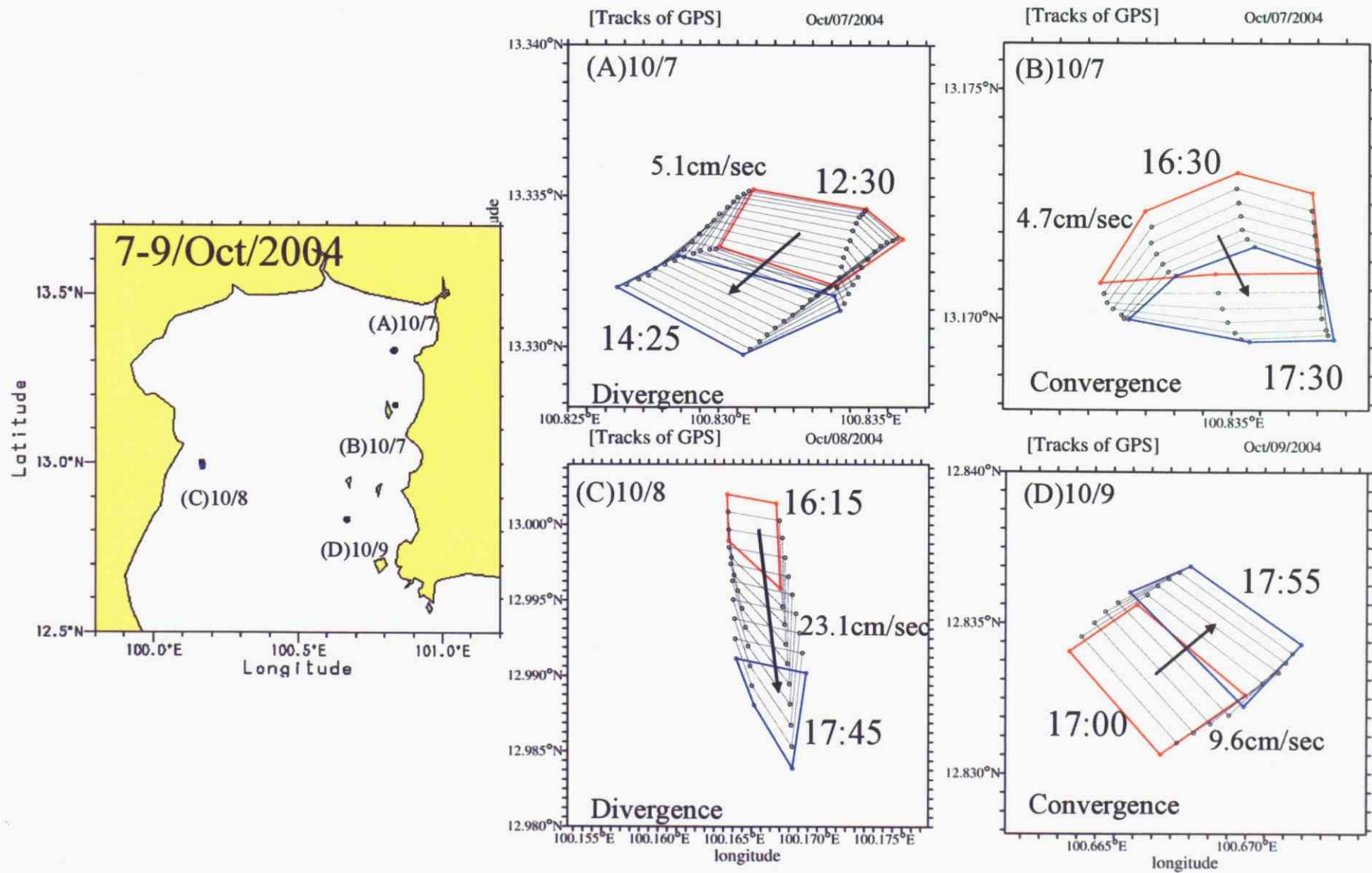


図5.2 2004年10月7-9日の実験における漂流ブイ群の軌跡

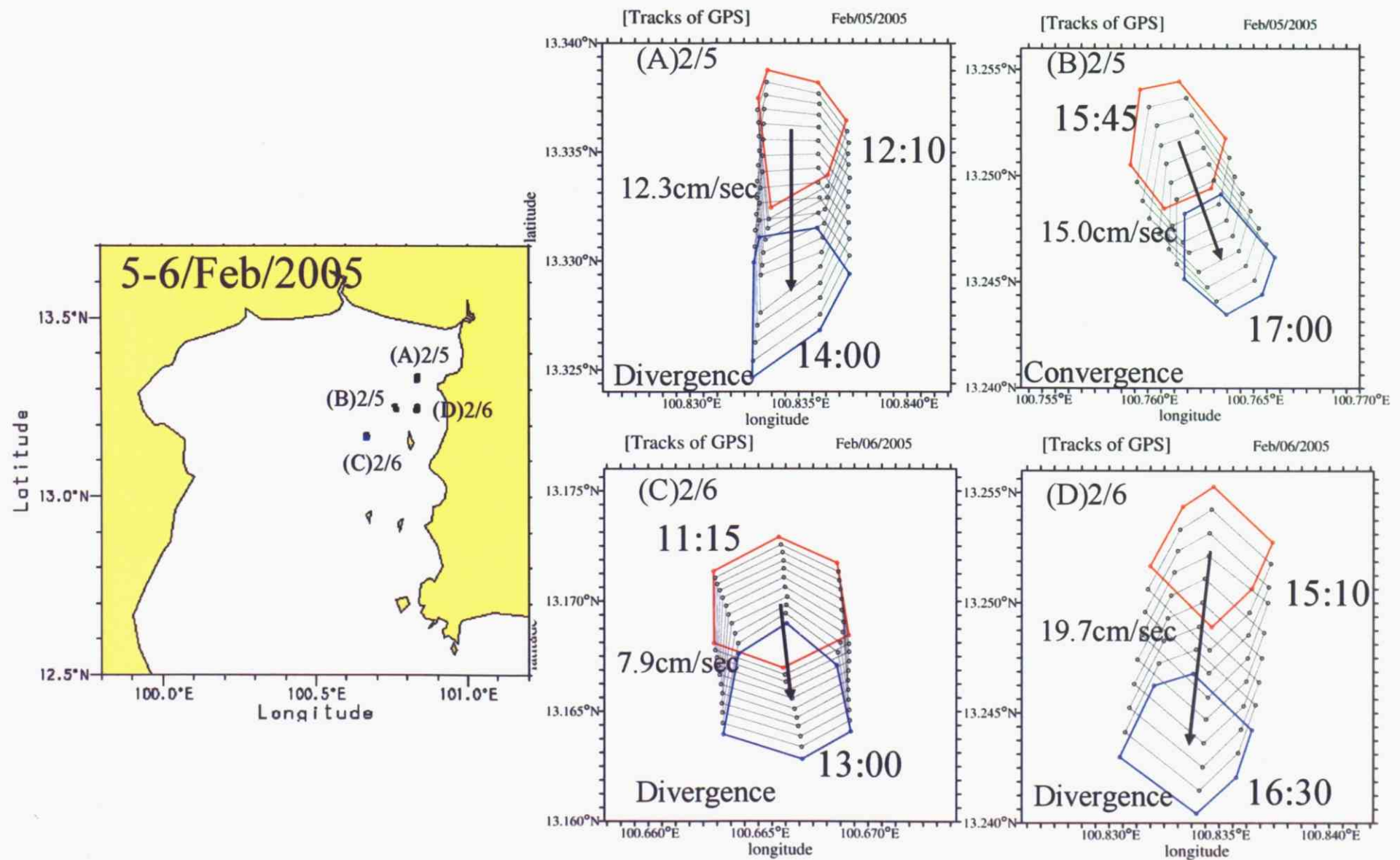


図5.3 2005年2月5-6日の実験における漂流ブイ群の軌跡

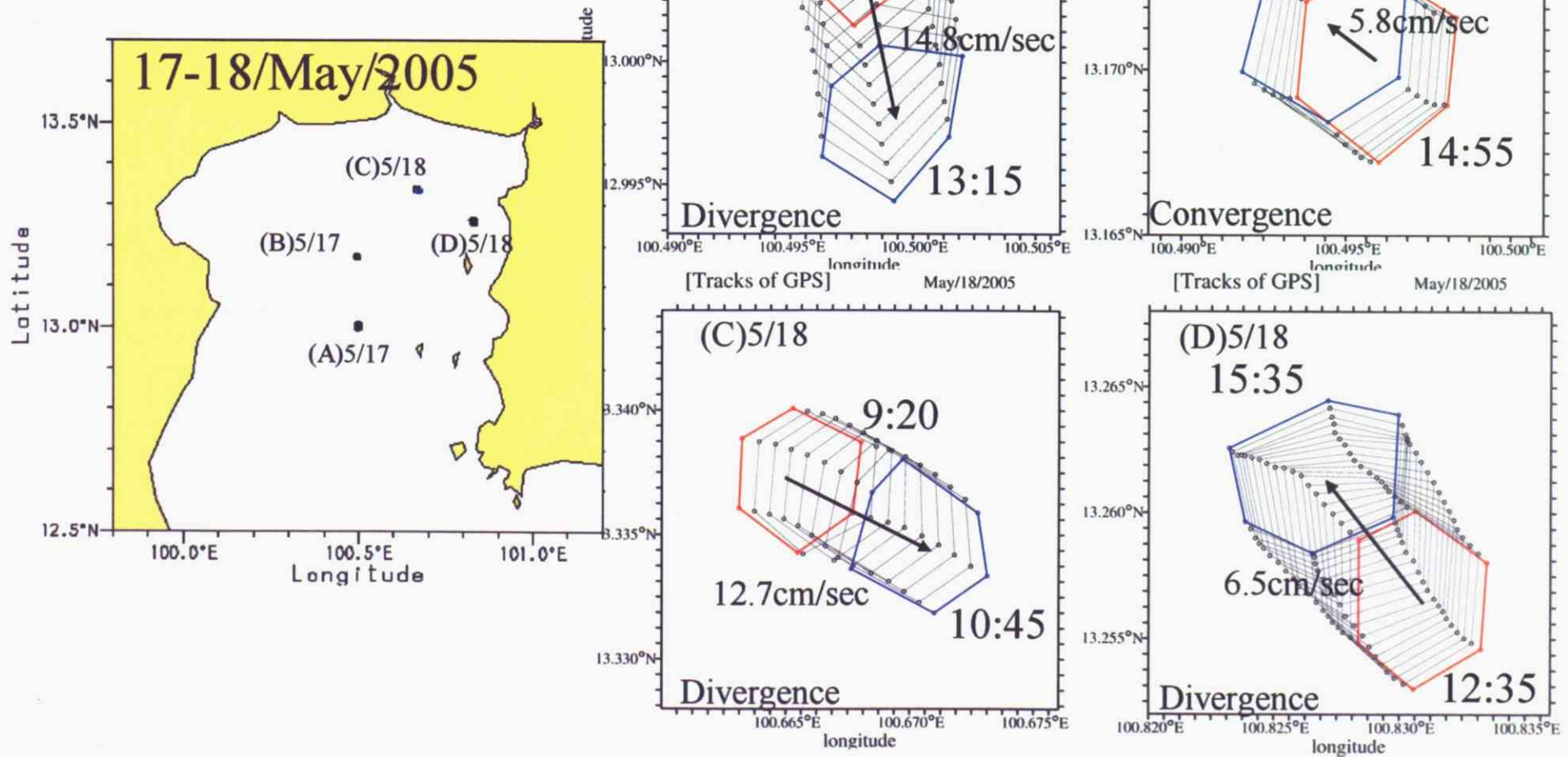


図5.4 2005年5月17-18日の実験における漂流ブイ群の軌跡

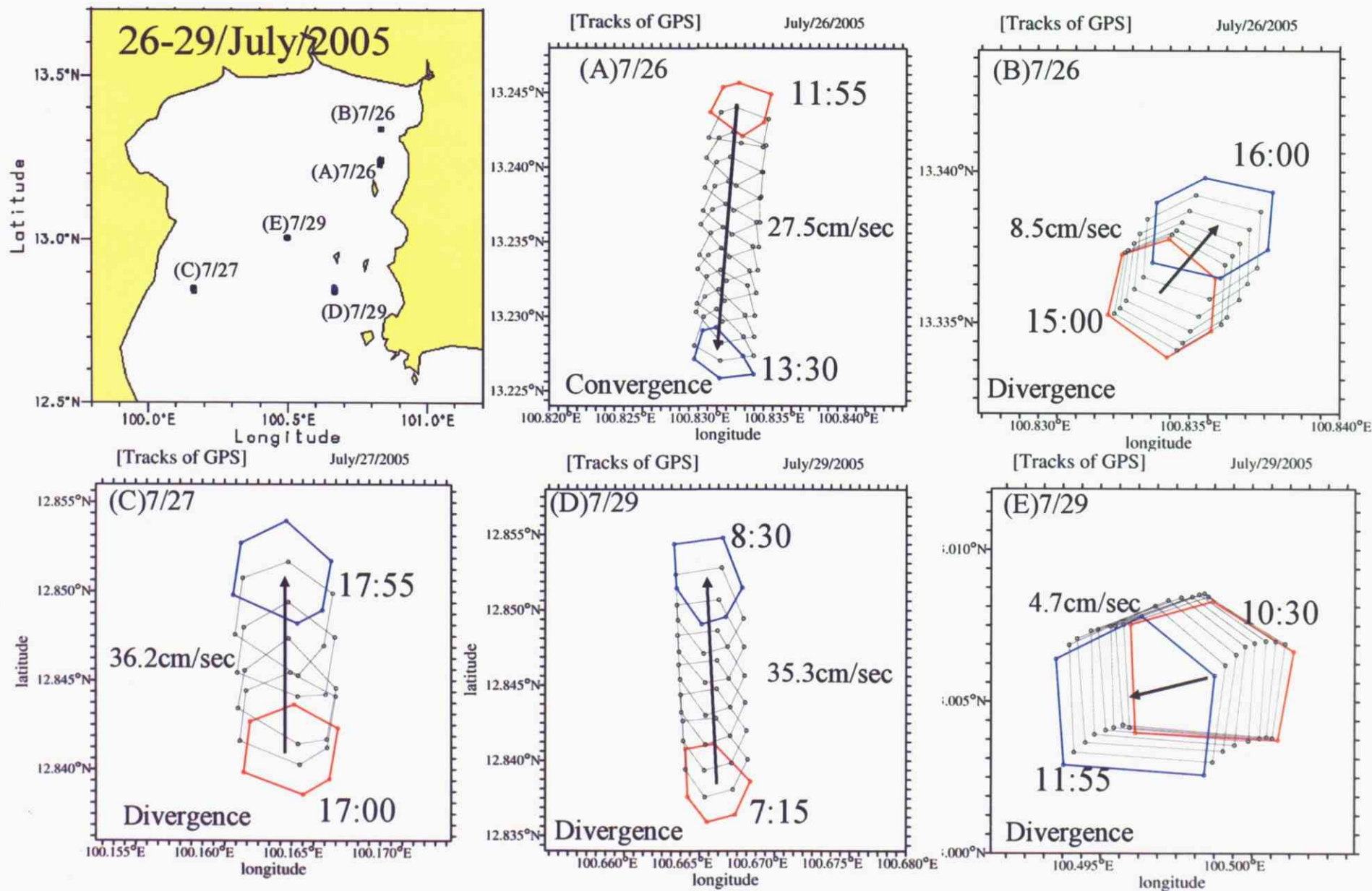


図5.5 2005年7月26-29日の実験における漂流ブイ群の軌跡

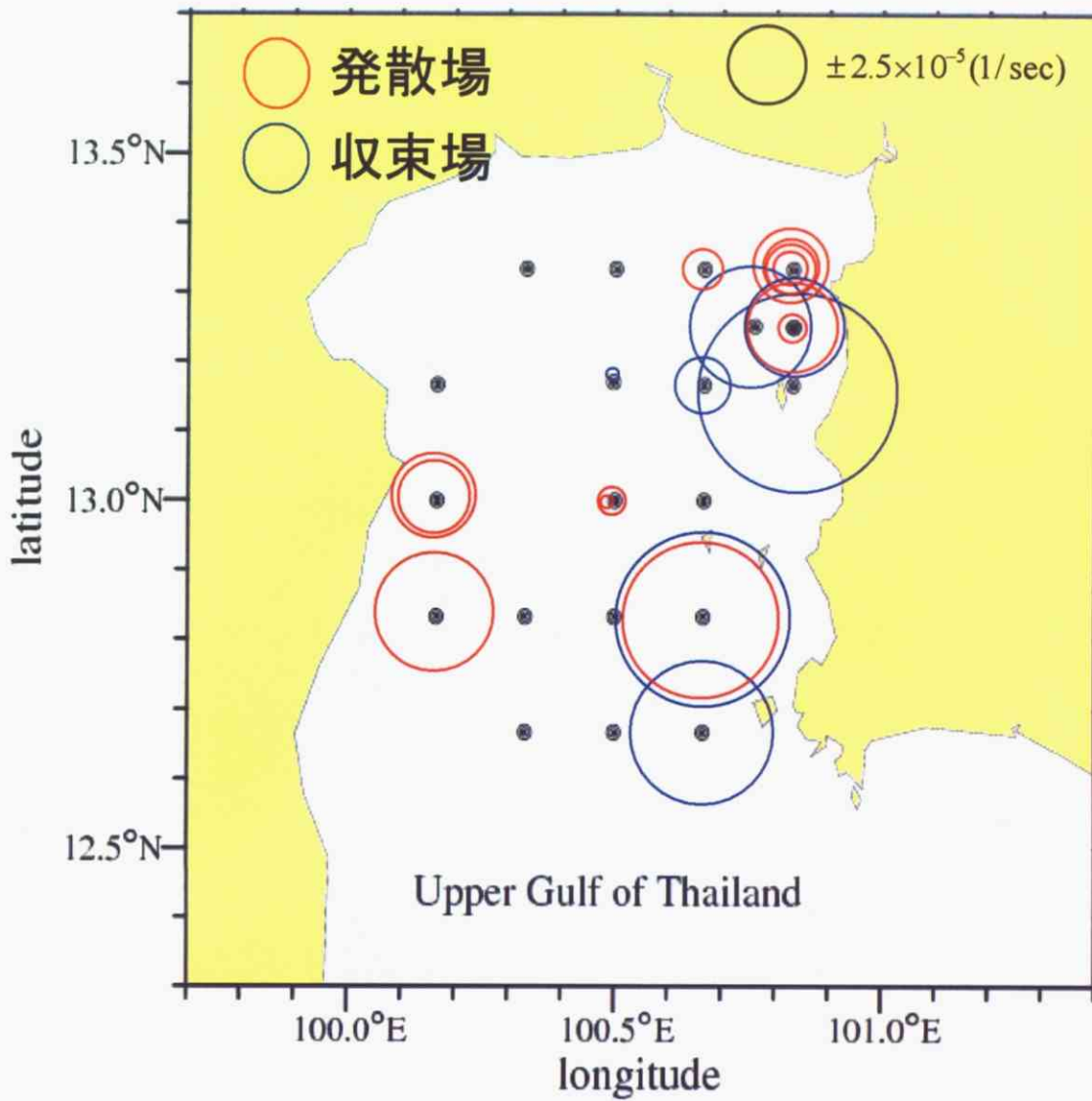


図 5.6 全 20 回の収束発散場の観測結果. 赤丸が発散場で青丸が収束場を示す.

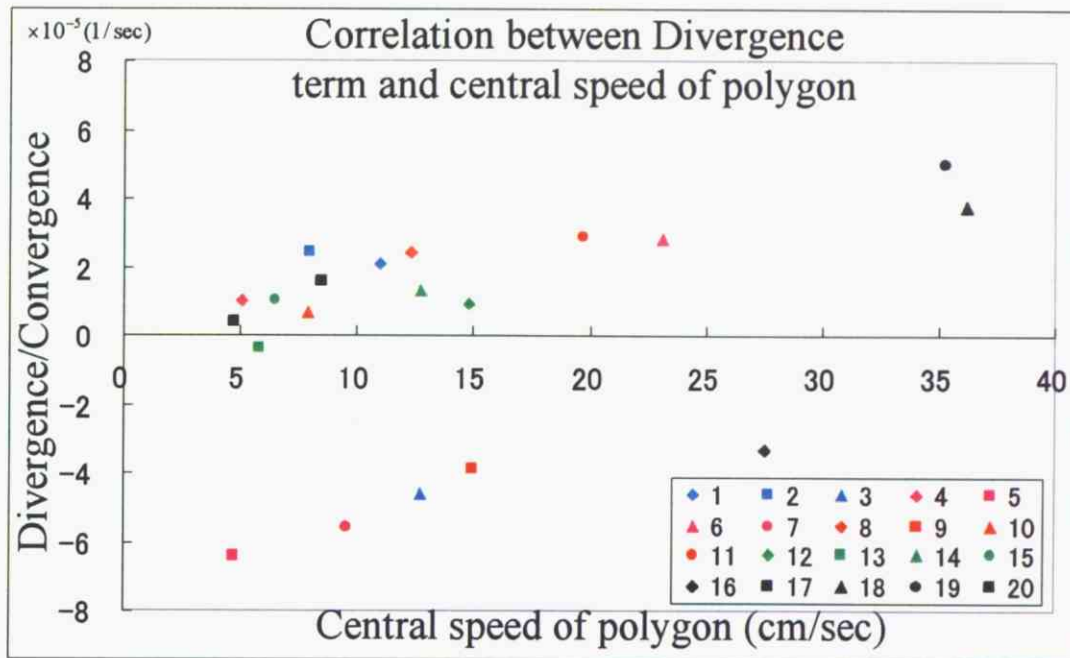


図 6.1 全 20 回の観測の収束発散場と平均流速の相関図

青色 1,2,3 は 2004 年 5 月の観測点 Stn.1,6,13 に対応
 桃色 4,5,6,7 は 2004 年 10 月の観測点 Stn.1,17,6,10 に対応
 赤色 8,9,10,11 は 2005 年 2 月の観測点 Stn.1,mid 1-16,16,17 に対応
 緑色 12,13,14,15 は 2005 年 5 月の観測点 Stn.14,mid.3-14,16,17 に対応
 黒色 16,17,18,19,20 は 2005 年 7 月の観測点 Stn.17,1,7,10,14 に対応

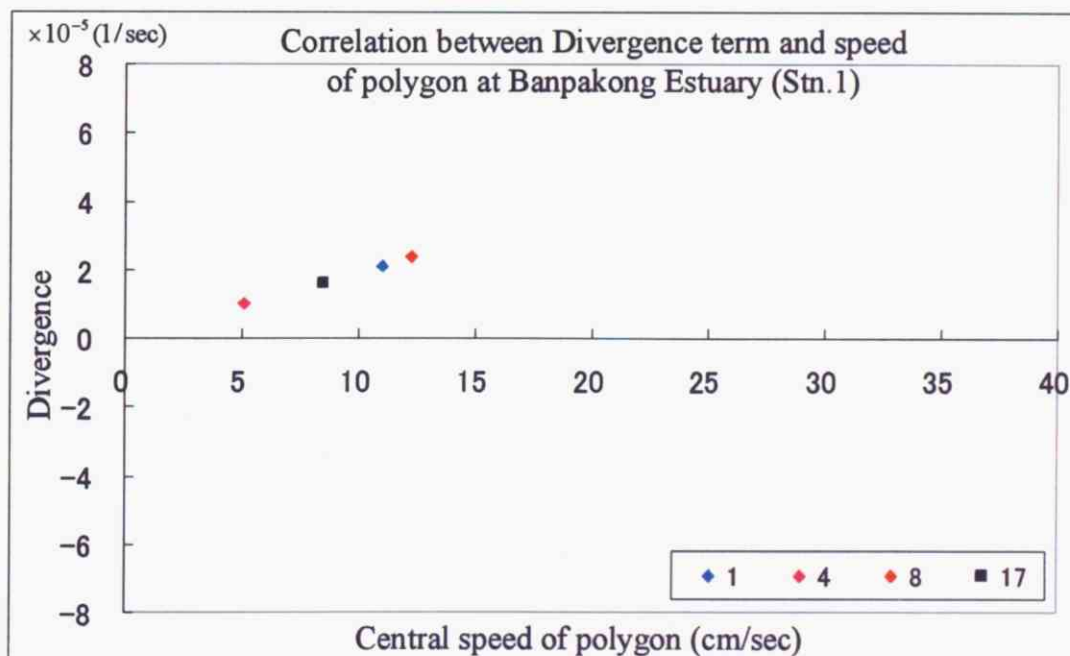
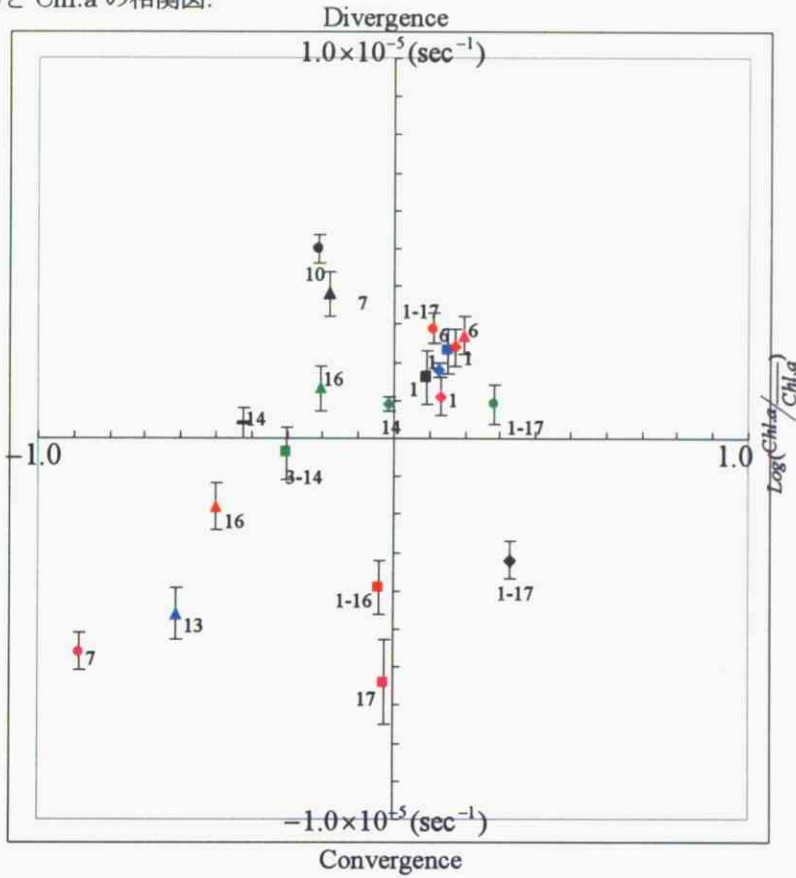


図 6.2 Banpakong 河口域 (Stn.1) の平均流速と発散場の相関図

図中の 1,4,8,17 は、2004 年 5 月,10 月,2005 年 2 月,7 月の Stn.1 における観測点

(a) 収束発散場と Chl.a の相関図.



(b) (a)において Stn.1-17,17,1-16 を除いた相関図

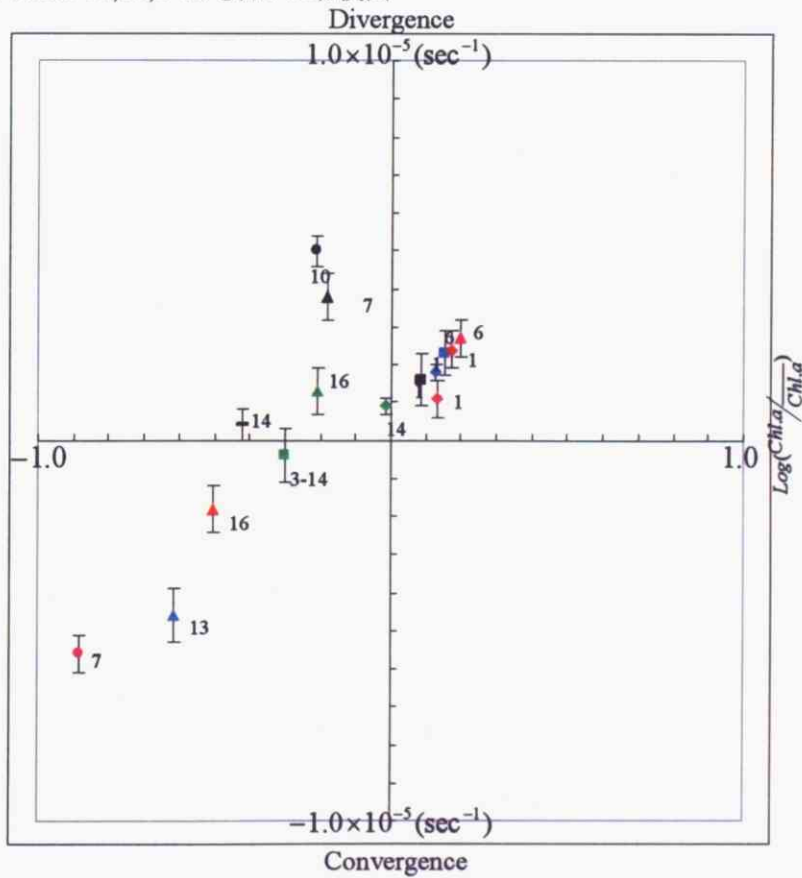


図 6.3 収束発散場と Chl.a 濃度(値は観測毎の平均値で除している)の相関図

図中の数字は観測点(Stn.)番号. 青色は2004年5月、桃色は2004年10月、赤色は2005年2月、緑色は2005年5月、黒色は2005年7月の観測を示す.

北部タイランド湾における収束発散場と生物生産の関係

2006年3月 環境学専攻自然環境コース 46717 瀧本 良太

指導教官 道田 豊 助教授

キーワード；収束発散、GPS、漂流ブイ、一次生産、北部タイランド湾

1. はじめに

北部タイランド湾は後背に発展途上の大都市バンコクを控え、河川を通して大量の人為起源物質が湾に流入し、それによってもたらされる湾内の富栄養化や赤潮の発生等の環境問題が深刻化している。このような状況に効果的な対策を講じるには沿岸域の環境変化を正確に予測することが必要であり、そのためには沿岸海域での一次生産場や物質循環の現状の把握が緊急課題となっている。赤潮や有機汚濁機構を把握するためには、これらの現象に関与する生化学的諸過程の理解と共に、この過程が行われる舞台の物理環境（海洋構造、流動、物質分散の諸特性など）を把握しておくことが必要である。これまでに、北部タイランド湾の循環場は数値シミュレーションモデルで、表層一次生産場は衛星画像によって大まかな分布が示されているが(Buranapratheprat et al., 2002; Singhruck, 2001)、これらの空間解像度は十分とは言えず、より局所的な流動場や生物場の情報が必要である。

そこで本研究では、北部タイランド湾の現場観測に基づいた、1)季節変化に伴う海洋構造、2)ラグランジュ的な視点からの収束発散場、3)表層の水平収束発散場と一次生産場の関係を理解することを目的とした。

2. 観測・データ

Kasetsart大学の観測船 *Kasetsart I*、Chulalongkorn大学の観測船 *Chulavichai*そして、地元の漁船による Conductivity-Temperature-Depth profiler (CTD)/採水観測および GPS搭載漂流ブイの放流実験が、2004年5月(1回目)、10月(2回目)、2005年2月(3回目)、5月(4回目)、7月(5回目)の昼間に実施された。1, 2, 5回目の観測では、湾全域でCTD/採水観測をそれぞれ16, 17, 17測点、ブイの放流実験をそれぞれ3, 4, 5測点で行った。3回目の観測では、湾北東海域の4点、4回目の観測では湾中央から北東海域を中心に、それぞれ4点のCTD/採水観測およびブイ放流実験を行った(表1)。また、各採水サンプルからは栄養塩(溶存態無機窒素, リン酸塩, ケイ酸塩)とクロロフィル *a*(Chl. *a*)の濃度が測定された。

3. 結果・考察

3.1 表層水温・塩分・Chl. *a* 分布

北部タイランド湾の物理環境は、南西の季節風が卓越する雨季の2004年5月は、湾北部で暖かく南部で冷たい。また、湾南部から中央部にかけて外洋から流入した高塩分水が分布しており、湾北部では低塩分の沿岸水が蓄積された。そして、湾北部の沿岸域付近はいくらか成層状態にあった。一方、雨季から乾季の移行期である2004年10月は、暖水塊が湾北西部と南東部で局所的に存在し、極端な低塩分水が湾北西部半分が存在し高塩分水が残り半分を覆っていた。また、低塩分水と対応した海域で成層状態がみられた。2005年

7月の雨季では、湾北西部で暖かく、残りの南東部は冷たい。また、極端な低塩分水が湾北東部に局所的に分布しており、残りの海域では高塩分水が確認された。

Chl. aの分布に関しては、雨季で湾北東部、湾北部、湾西部で他の海域と比べて高濃度であり、乾季の始まりには湾北西部、西部で他の海域と比べ高濃度であった。湾全体のスケールでは、Chl. aの高濃度の海域では概ね塩分と栄養塩と対応がよいため、河川水がChl. aの分布に大きく影響していることが考えられる。しかし、小さな空間スケールでは、Chl. aが高濃度であった海域では塩分や栄養塩との対応は見られず、海域ごとに異なった要因により局所的なChl. a分布をもたらすことが示唆される。今後、植物プランクトンの消長スケールと合せて動的に変化する栄養塩の供給経路を明確にするとともに、植物プランクトンの組成を明確にする必要があることが示唆された。

3.2 収束発散場

GPS搭載ブイを用いた全20回の漂流実験から、ラグランジュ的視点からの流況(流向・流速・収束発散場)が示された。収束発散場では13回の発散場と7回の収束場が観測された。13回の発散項は漂流速度と正の相関を示し、7回の収束場は全て湾東部において観測され、漂流流速と収束項は負の相関を示した。また、Banpakong河口域である湾北東部においては異なる環境下で実施された4回の実験の全てで発散場であり、BanpakongやChaoprayaなどの河川水によるプルーム拡散である可能性が示唆される。

見積もられた発散項の値は、全実験で 10^{-5} sec^{-1} のオーダーであり、河口域における淡水と海水の希釈混合や、プランクトンの集積拡散に対して大きく関与しうる大きさであった。

3.3 表層水平収束発散場と表層Chl. a濃度の関係

異なる環境下で実施された全観測結果で示された表層の収束発散とChl. a濃度の相関関係は、一見相関がないように見受けられるが、Sichang島近くの測点を除いて考慮すると、そこには発散場で高濃度Chl. aという相関傾向にあった。このような相関傾向は、表層の水平収束発散などによって植物プランクトンが局所的に集積している可能性を示唆している。

表1 観測日程とブイ放流実験及びChl. aの測定値

Cruise	Exp.	Date	Drifting time	Place	Depth (m)	Scale $\times 10^5 (m^2)$	Scale change (%)	Drifter speed (cm/sec)	Drifter direction (To)	Divergence $\times 10^{-5} (1/sec)$	Chl. a ($\mu g/l$)	Chl. a / Chl. a	Chl. a / Chl. a
1	1	May. 12, 04(13:30-16:45)	75	Stn.1	12.4	2.9	25	11.0	SSW	1.8 ± 0.2	6.0		1.3
	2	May. 13, 04(16:20-17:30)	75	Stn.6	15.4	1.4	10	8.0	SE	2.3 ± 0.6	6.4	4.5	1.4
	3	May. 14, 04(14:50-15:50)	65	Stn.13	37.7	1.8	-16	12.7	SE	-4.6 ± 0.7	1.1		0.2
2	4	Oct. 7, 04(12:30-14:25)	115	Stn.1	14.5	1.4	8	5.1	SW	1.1 ± 0.5	0.83		1.3
	5	Oct. 7, 04(16:30-17:30)	60	Stn.17	30	0.8	-21	4.7	SSE	-6.4 ± 1.1	0.58	0.6	0.9
	6	Oct. 8, 04(16:15-17:45)	90	Stn.6	17.5	1.9	15	23.1	SSE	2.7 ± 0.5	0.97		1.6
	7	Oct. 9, 04(17:00-17:55)	55	Stn.10	27	1.5	-17	9.6	ENE	-5.6 ± 0.9	0.08		0.1
3	8	Feb. 5, 05(12:10-14:00)	110	Stn.1	14.9	2.2	15	12.3	S	2.4 ± 0.4	44		1.5
	9	Feb. 5, 05(15:45-17:00)	75	Mid. Stn.1-16	22	2	-14	15.0	SSE	-3.9 ± 0.7	27	29.6	0.9
	10	Feb. 6, 05(11:15-13:00)	105	Stn.16	23.1	3.1	4	7.9	S	-1.8 ± 0.6	9.3		0.3
	11	Feb. 8, 05(15:10-16:30)	80	Mid. Stn.1-17	13.1	2.6	14	19.7	S	2.9 ± 0.5	38		1.3
4	12	May. 17, 05(11:45-13:15)	90	Stn.14	21.4	2.9	4	14.8	SSE	0.9 ± 0.5	6.57		1.0
	13	May. 17, 05(14:55-16:00)	65	Mid. Stn.3-14	16.7	2.4	-2	5.8	NW	-0.4 ± 0.7	3.43	6.8	0.5
	14	May. 18, 05(09:20-10:45)	85	Stn.2	17.9	2.5	6	12.7	SE	1.3 ± 0.6	4.17		0.6
	15	May. 18, 05(12:35-15:35)	180	Mid. Stn.1-17	13.6	3.5	10	6.5	NW	0.9 ± 0.2	13.14		1.9
5	16	July. 26, 05(11:55-13:30)	95	Mid. Stn.1-17	10.2	1.1	-15	27.5	S	-3.2 ± 0.5	4.49		2.1
	17	July. 26, 05(15:00-16:00)	60	Stn.1	11.6	1.2	6	8.5	NE	1.6 ± 0.7	2.57		1.2
	18	July. 27, 05(17:00-17:55)	55	Stn.7	16.5	2.5	11	36.2	N	3.8 ± 0.6	1.39	2.1	0.7
	19	July. 29, 05(07:15-08:30)	75	Stn.10	19.5	2.1	22	35.3	N	5.0 ± 0.4	1.32		0.6
	20	July. 29, 05(10:30-11:55)	85	Stn.14	20.2	2.4	2	4.70	WSW	0.4 ± 0.4	0.75		0.4

The relationship between divergence/convergence fields and primary production in the Upper Gulf of Thailand

Mar. 2006, Institute of Environmental Studies

Course of Natural Environmental Studies, 46717 Ryota TAKIMOTO

Supervisor; Assistant Professor, Yutaka MICHIDA

Keywords; divergence/convergence, GPS, drifter, primary production, Upper Gulf of Thailand

1. Introduction

The upper gulf of Thailand (UGOT) is one of the key areas for the coastal zone management in Thailand. It is the northern part of the Gulf of Thailand, it has been made eutrophicated due to anthropogenic inputs mainly from metropolitan area of Bangkok with rapid economic development. As the relationship between the primary production and water circulation is one of the important topics, studies on basic mapping of the primary production (Singhruck,2001) and simple modeling of the circulation of UGOT (Buranapratheprat et al., 2002) were carried out. With regard to the primary production, it shows inhomogeneous distribution in space and seasonal changes based on the maps of ocean color derived from satellite images. The spatial distribution of the primary production is strongly influenced by the circulation field as well as other oceanographic conditions such as temperature, salinity and nutrient distribution. The objectives of the present study are to understand the seasonal oceanographic condition, to estimate divergence/convergence fields, to understand the relationship between divergence/convergence fields and primary production.

2. Data & Method

Conductivity-Temperature-Depth profiler (CTD)/water sampling and buoy experiment with GPS were carried out 5 times in May, October 2004, February, May and July 2005 by observational cruises on board *R/V Kasetsart I* of the Kasetsart University, *Chulavichai* of the Chulalongkorn University, and a fishing boat. These observations were implemented only during the daytime. In the first, second and last cruises, the CTD and water sampling were made in 16, 17, and 17 stations, respectively, in the entire UGOT, and buoy experiments in 3, 4, and 5 stations, respectively. For the third and fourth cruises, CTD, water sampling and buoy experiments were made at 4 stations each at northeastern area of the UGOT, and middle to northeastern area, respectively (Table.).

3. Results & discussion

3.1 Surface Temperature/ Salinity/ Chl.a

In May 2004, during the southwest monsoon season, water temperature was warm in the UGOT, and cold in the lower part. High salinity water which came from the open sea were seen from the lower to the center part of the UGOT, and low salinity coastal water accumulated in the northern part. On the other hand, in October 2004 at the beginning of the dry season, warmer water were observed at the northwest and southeast corners, while extremely low salinity were observed in the northwestern half of the UGOT, and high salinity covered the rest of the UGOT. In July 2005

during the wet season, it was warm in the northwestern part of the UGOT, and the rest was cold. Water of extremely low salinity existed in the northeastern UGOT, and water of high salinity was seen in the rest.

The distribution of the Chl.a showed high concentration in northeast, upper, and west in UGOT during the wet season compared to the other areas. During the beginning of the dry season, high concentration was seen in northwest and west in UGOT. In large scale, the area with high Chl.a concentrations basically have water with low salinity and high nutrient, it is suggested that the fresh water influences the distribution of the Chl.a roughly. In small scale, however, the area with high Chl.a concentrations does not have low salinity and high nutrient necessarily, which suggests that the local distributions of Chl.a are caused by inherent factors in each area. Therefore, it is important to clarify the dynamically changing nutrient supply route together with the existence scale of the phytoplankton, and to determine the composition of the phytoplankton.

3.2 Surface divergence and convergence field

From the total of 20 buoy experiments, currents (direction, speed, divergence/convergence) were shown by lagrangian point of view. The 13 divergence and the 7 convergence were shown. The 13 divergence term showed positive correlation with the drifting speed, the 7 convergence fields were seen in the east of the UGOT, and the convergence term showed negative correlation with the drifting speed. At the northeast of UGOT, where it is a Banpakong estuary, the divergent field which was observed four times is a continuous phenomenon over the monsoon periods, we could speculate that river plumes from Banpakong or Chaopraya River maintain the divergence of long time scale. Since the orders of the estimated divergence term were 10^{-5} sec^{-1} in all experiments, it could be speculated that it influences the mixture of the fresh and sea water, the accumulation and diffusion of plankton.

3.3 The Relationship divergence /convergence field and primary production

There seems to be no correlation between surface divergence/convergence fields and Chl.a concentrations shown by the observation under different environment, but if you consider without the points near Sichang island, a positive correlation between divergent field and high Chl.a concentration was seen. This correlation suggests the possibility that phytoplankton accumulates locally by divergence and convergence.

Table. Summary of the buoy experiments and Chl.a concentrations in the Upper Gulf of Thailand.

Cruise Exp.	Date	Drifting time	Place	Depth (m)	Scale $\times 10^5 (m^2)$	Scale change (%)	Drifter speed (cm/sec)	Drifter direction (To)	Divergence $\times 10^{-3} (1/sec)$	Chl.a ($\mu g/l$)	$\overline{Chl.a}$ ($\mu g/l$)	$Chl.a/Chl.a$
1	May. 12, 04(13:30-16:45)	75	Stn.1	12.4	2.9	25	11.0	SSW	1.8 ± 0.2	6.0		1.3
	May. 13, 04(16:20-17:30)	75	Stn.6	15.4	1.4	10	8.0	SE	2.3 ± 0.6	6.4	4.5	1.4
	May. 14, 04(14:50-15:50)	65	Stn.13	37.7	1.8	-16	12.7	SE	-4.6 ± 0.7	1.1		0.2
2	Oct. 7, 04(12:30-14:25)	115	Stn.1	14.5	1.4	8	5.1	SW	1.1 ± 0.5	0.83		1.3
	Oct. 7, 04(16:30-17:30)	60	Stn.17	30	0.8	-21	4.7	SSE	-6.4 ± 1.1	0.58	0.6	0.9
	Oct. 8, 04(16:15-17:45)	90	Stn.6	17.5	1.9	15	23.1	SSE	2.7 ± 0.5	0.97		1.6
	Oct. 9, 04(17:00-17:55)	55	Stn.10	27	1.5	-17	9.6	ENE	-5.6 ± 0.9	0.08		0.1
3	Feb. 5, 05(12:10-14:00)	110	Stn.1	14.9	2.2	15	12.3	S	2.4 ± 0.4	44		1.5
	Feb. 5, 05(15:45-17:00)	75	Mid. Stn.1-16	22	2	-14	15.0	SSE	-3.9 ± 0.7	27	29.6	0.9
	Feb. 6, 05(11:15-13:00)	105	Stn.16	23.1	3.1	4	7.9	S	-1.8 ± 0.6	9.3		0.3
	Feb. 6, 05(15:10-16:30)	80	Mid. Stn.1-17	13.1	2.6	14	19.7	S	2.9 ± 0.5	38		1.3
4	May. 17, 05(11:45-13:15)	90	Stn.14	21.4	2.9	4	14.8	SSE	0.9 ± 0.5	6.57		1.0
	May. 17, 05(14:55-16:00)	65	Mid. Stn.3-14	16.7	2.4	-2	5.8	NW	-0.4 ± 0.7	3.43	6.8	0.5
	May. 18, 05(09:20-10:45)	85	Stn.2	17.9	2.5	6	12.7	SE	1.3 ± 0.6	4.17		0.6
	May. 18, 05(12:35-15:35)	180	Mid. Stn.1-17	13.6	3.5	10	6.5	NW	0.9 ± 0.2	13.14		1.9
5	July. 26, 05(11:55-13:30)	95	Mid. Stn.1-17	10.2	1.1	-15	27.5	S	-3.2 ± 0.5	4.49		2.1
	July. 26, 05(15:00-16:00)	60	Stn.1	11.6	1.2	6	8.5	NE	1.6 ± 0.7	2.57		1.2
	July. 27, 05(17:00-17:55)	55	Stn.7	16.5	2.5	11	36.2	N	3.8 ± 0.6	1.39	2.1	0.7
	July. 29, 05(07:15-08:30)	75	Stn.10	19.5	2.1	22	35.3	N	5.0 ± 0.4	1.32		0.6
	July. 29, 05(10:30-11:55)	85	Stn.14	20.2	2.4	2	4.70	WSW	0.4 ± 0.4	0.75		0.4