

平成 27 年度

修士論文

気仙沼湾の狭水道部における流動と  
植物プランクトンの挙動に関する調査研究

首都大学東京大学院 都市環境科学研究科

都市基盤環境学域

14885416 若生 優紀

指導教授 准教授 横山勝英

## 目次

### 第一章 序論

1-1 研究背景	1
1-2 既往の研究	2
1-2-1 内湾の流動と植物プランクトンに関する研究	2
1-2-2 植物プランクトンとホタテガイに関する研究	4
1-2-3 既往研究のまとめ	5
1-3 本論文の構成	6

### 第二章 研究方法

2-1 研究対象地	7
2-2 現地観測	10
2-2-1 流速観測	10
2-2-2 水質観測	13
2-3 データの解析について	17

### 第三章 大島瀬戸での流速傾向

3-1 流速の観測結果	21
3-2 スペクトル解析	54
3-3 潮汐流と残差流	58

### 第四章 植物プランクトンの輸送

4-1 クロロフィル蛍光値の変換	61
4-2 水質の分布状況	69
4-3 植物プランクトンの輸送状況	98
4-4 考察	110

### 第五章 貝毒プランクトンの輸送

5-1 2013年の貝毒プランクトン発生と被害	127
5-2 貝毒プランクトンの輸送に関する検討	139

### 第六章 まとめ

6-1 結論	149
6-2 今後の課題	150

参考文献	151
------	-----

# 第一章 序論

## 1-1 研究背景

三陸リアス式海岸では、静穏な湾内でカキやホタテガイの垂下養殖が盛んに行われている。農林水産省による平成 26 年漁業・養殖生産統計によると、東日本大震災で漁業生産量に大きな影響を受けた宮城県の海面漁業漁獲量は 16 万 7500 t (国内の 4.5 %), 海面養殖業収穫量は 7 万 3800 t (国内の 7.5 %) で、震災前年に比べるとそれぞれ 25.4 %, 40.1 % の減となっており、まだ完全な回復には至っていない。養殖業収穫量のうち、ホタテガイが 8700 t, カキ類が 2 万 900 t を占め、二枚貝類が宮城県の主要養殖魚種となっている。

一般に三陸沖合では、親潮系水と黒潮系水がぶつかり合い植物プランクトンが豊富に発生するため、濾過摂食性の二枚貝にとって餌料環境がよく、養殖に適した環境であると言われている。一方、沖合は親潮系水・黒潮系水・津軽暖流水の特性が異なる 3 水塊が混合するために流況が複雑であり、またリアス式海岸は地形が複雑であるため、様々な要因で湾内の流動場が変化する可能性がある。しかし、海流や潮汐流の状態と湾内の水質環境、ひいては植物プランクトン分布との関係性は明らかにされていない。

2013 年に宮城県気仙沼湾では、24 年ぶりにホタテガイなどの二枚貝から出荷自主規制値を超える麻痺性貝毒が発生した。重要な養殖種であるホタテガイから 4 月から 9 月上旬まで断続的に規制値を超える麻痺性貝毒が検出され、出荷自主規制措置が 12 月上旬まで長期間にわたって講じられたことで、漁業者は大きな経済的損害を受けた。石川ら (2015) の調査によって、渦鞭毛藻類の有毒プランクトン、*Alexandrium tamarense* (以下、*A. tamarense*) の栄養細胞が湾奥で発生し、なんらかの影響で養殖海域へ流出し大規模な麻痺性貝毒が発生したことが示唆されている。このように、湾内の流動が貝毒原因プランクトンの分布に影響を及ぼす可能性が示されているが、気仙沼湾のように閉鎖的な湾において、流動と植物プランクトンの関係性は明らかにされていない。

したがって、三陸湾内において二枚貝養殖を効率的に行い、あるいは貝毒被害の対策を行うためには、植物プランクトンの分布と輸送メカニズムを湾内流動の観点から明らかにすることが必要である。本研究では、宮城県気仙沼湾を対象として、湾内の狭水道部における流速鉛直分布の特徴を調べ、クロロフィル *a* (Chl-*a*) 濃度の輸送量を月ごとに推算した。また、有毒渦鞭毛藻類の時空間分布に関する公表データを用いて、その移流状況と流速との対応関係を調べた。以上より、気仙沼湾における植物プランクトンの輸送特性について整理した。

## 1-2 既往の研究

### 1-2-1 内湾の流動と植物プランクトンに関する研究

内湾の流動に関する研究は、東京湾や大阪湾など主要な湾では多数行われている。東京湾では鈴木ら（2010）によって、湾内のエスチュアリー循環と対応している年平均流向が明らかにされており、淡水の湾内の滞留日数についてフェリー観測でボックスモデル解析と一致する精度の高い結果が得られている。鈴木ら（2012）は、数値計算により海水交換に季節変化があることや、風と淡水流入を与えた場合の応答特性から、これらの影響について評価を行っている。

大阪湾周辺では中辻ら（2002）が、湾内への栄養塩の輸送を明らかにするため、紀淡海峡で流動と水質の観測を行い、T-N や T-P のフラックスを求め、物質輸送量と流動の関係について考察を行っている。この海峡では、多くの研究事例があり、それらを参考に、大潮期と小潮期の違いによる流速の増大より、水質変化（濃度変化）が物質輸送量に与える影響が大きいことを推測している。

有明海では潮汐と潮流との流動の関係について多くの研究が行われており、田井ら（2008）によって、潮流の大きさと残差流の流向についての研究がなされている。

他の湾でも流動に湾内の流動についても研究事例がある。仁木ら（2005）は、和歌山県田辺湾での水塊構造と水質の関係について考察を行っている。数値モデルによる計算では、湧昇を引き起こす北風が吹くと海底に沿う流れが生じ田辺湾まで侵入するのに対し、表層の黒潮が侵入を制限することもあり、紀伊水道での水塊構造が田辺湾での流動構造と物質循環を決定する最も影響の大きい因子であることが示唆された。

鈴木ら（2010）は、九州の伊万里湾において流速観測と水質観測から、植物プランクトンが潮汐によって湾内を輸送されることを明らかにしている。

三陸沿岸では、気仙沼湾より 20 km ほど北にある岩手県大船渡湾で多く研究が行われており、親潮系冷水や津軽暖流水の流入や、黒潮系水の影響などが指摘されている。

日比野ら（1999）によると岩手県大船渡湾では、3 月頃から 8 月頃に親潮系冷水の流入によるものと考えられる塩分の低下がみられた。低塩分・低水温の水塊は湾内 5~15 m の層に侵入し、温度躍層が形成され始めることが示されている。

日比野（2000）によると、本州東岸沿岸域の内湾の水温変動から、9 月中旬~1 月は並年の水温変動がみられるが、他の月では親潮や津軽暖流水水塊が影響し、年々の変動量が大きくなっていることが確認された。

高杉（1992）によって、養殖や沿岸漁業の主要な生産の場となる岩手県沿岸域において、年最高水温は 100 m 深水温が 10 月~11 月、定地水温は 8 月と 2~3 ヶ月の遅れについて、熱の鉛直拡散で実際の振幅の 60~80%が説明可能であり、残り 20~40%が分布する水塊の水平移流によるということが示されている。また、春~秋季は水深が深くなっている県中部のみ沖合 10 海里まで親潮系水の介入が多くなっており、冬季は津軽暖流が一様に 10 海



里以内に分布する場合が多いことが示されている。また、岩手県南部沿岸域まで黒潮系水が北上している可能性が示唆されている。

佐藤ら（2005）は、大船渡湾で Chl.a 濃度の観測を行い、物質循環モデルを使用して中層における Chl.a 濃度および栄養塩類濃度の変化と湾外水質の関連について報告した。

## 1-2-2 植物プランクトンとホタテガイに関する研究

ホタテガイの良好な成長には、クロロフィル *a* 量が高い環境であること、また流速が 10 cm/s 程度の環境であると良いことが以下の研究で示されている。

蔵田ら（1991）は、ホタテガイの成長が停止する要因として、冬季の低水温や、クロロフィル *a* 量が低くなり、餌濃度が減ったことで摂餌量が減ったことを挙げている。

蔵田ら（1996）によって、北海道常呂海域のホタテガイは 5 月中旬に産卵を行うが、生殖巣の日間成長量が最も大きい時期は 4～5 月で、この時期にエネルギーを貝柱に蓄えていると考えられている。

品田（2006）によって、4～5 月の餌不足が、ホタテガイの摂餌量を減少させて、貝柱にエネルギーを蓄えることができず成長不良が発生すると考察されている。

（三好ら（2015）は、春季の植物プランクトンのブルームと、日本海起源の大型珪藻の来遊と増殖によって沈降粒子量が増加すると、地まきホタテガイにとって好適な餌料環境が形成されることを示唆した。[オホーツクの沿岸海域では、冬期鉛直混合によって下層から表層に回帰した栄養塩を用いて小型珪藻を中心とする植物プランクトンが短期間で大増殖する春季ブルームがあることが知られ、1 度目はこれにあたる。2 度目のブルームは沖合に存在する中冷水が漁場に接近し、中冷水から栄養塩が供給され、植物プランクトンが増殖したと考えられる。]）

櫻井ら（2004）は、ホタテガイの垂下養殖では、流速 10 cm/s 以下の卓越流があるとき、餌料フラックスと貝の摂餌効率が上昇し、高成長に繋がる可能性を示した。

押野（2010）によって、宮城県と岩手県のホタテガイの生産量の年度ごとの実績は同様の傾向にあることが分かっている。また、ホタテガイの成長や生残が海洋の波浪や強風によって影響される可能性が示されている。

### 1－2－3 既往研究のまとめ

以上より、様々な湾で流れの現地観測や数値シミュレーションが行われ、湾内の流動構造は明らかにされている。また、水質や植物プランクトンの調査研究も行われており、生態系モデルを使った高度な解析も行われている。二枚貝の摂食と成長に関する研究や毒化現象についての研究も進められている。特に、ホタテガイの成長や毒化現象を関連づけた研究は主に北海道・オホーツク海で進められている。

一方、三陸沿岸は世界の三大漁場と言われ、黒潮・親潮が混じり合い植物プランクトンの供給が豊富であると言われており、さらに森の養分が川を伝って海に流れ出て、やはり養殖海域への植物プランクトンの成長に貢献していると考えられるなど、豊かな環境と考えられているが、湾内の流動と植物プランクトンの関係はあまり調べられておらず、貝毒については発生時の調査が数例あるだけで、被害を抑制するための知見が不足している状況である。

### 1-3 本論文の構成

本研究では、気仙沼湾内での植物プランクトンの分布と輸送特性について、湾内流動、湾外の水塊分布との関係性を明らかにすることを目的として、多項目水質計によるクロロフィル量の調査を行い、定点で流速の長期モニタリングを行った。さらに、気象庁による沖合水温分布、気仙沼水産試験場による貝毒プランクトンの計数データを用いて、湾内の植物プランクトン分布との関係性について考察した。

第一章では、本研究の目的と既往の研究について説明した。

第二章では、研究対象地である気仙沼湾の概要について説明している。また、研究方法として流速観測方法、水質観測方法、得られた流速データの処理方法について説明した。

第三章では、狭水道部での流速の傾向について説明した。流速のスペクトル解析を行って明らかにされた、流速変動の主な要因である潮汐の成分について、月ごとの成分を比較した。

第四章では、気仙沼湾での水質観測の結果を説明した。また、狭水道部でのクロロフィルの輸送量を計算し、沖合の水塊構造との対応関係について検討を行った。

第五章では、2013年の麻痺性貝毒の発生と原因プランクトンの分布状況について説明した。次に、気仙沼水産試験場の計数データと大島瀬戸での流速観測結果から、貝毒プランクトンの輸送に関する考察を行った。

第六章では、得られた結論と、今後の課題について述べる。

## 第二章 研究方法

### 2-1 研究対象地

研究対象地は宮城県北部の気仙沼湾である（図 2-1）。気仙沼湾は気仙沼市の北東部に位置し、東西に約 8 km、南北に約 10 km の大きさである。湾の中央部には大島が位置し、これによって湾は東湾、西湾、そこを繋ぐ大島瀬戸に分けられている。東湾は唐桑半島と大島にはさまれ、湾口に向かうにつれ水深が深く、幅が広がる地形となっている。平均水深は約 25 m で、その滞筋は大島瀬戸に通じている。西湾は幅が狭く、平均水深も約 10 m と浅くなっている。西湾と大島瀬戸が接続したさらに奥に気仙沼港があり、本研究ではここを湾奥とする。

気仙沼港は、世界三大漁場の一つである三陸沖を作業域とする主要な水揚げ港の一つである。平成 24 年は漁獲量が 4 万 t、養殖業収獲量が 4200 t となっている。そのうち、ホタテガイの収獲量は 280 t、カキ類が 90 t である。

2013 年、気仙沼湾では 24 年ぶりにホタテガイから国の規制値を超える麻痺性貝毒が検出され、出荷自主規制措置が講じられた。麻痺性貝毒はカキやホタテガイなどの二枚貝が貝毒原因となる渦鞭毛藻 *Alexandrium tamarense*（図 2-2）などを濾過摂食することで、二枚貝の体内に毒が蓄積され、この毒化した貝を人が食べることで引き起こされる麻痺性の食中毒のことである。石川ら（2015）によって、2013 年の気仙沼湾には麻痺性貝毒プランクトン *A.tamarense* と *A.catenella* が発生していたことが確認されており、湾中央部における *A.tamarense* の出現ピークと貝類の毒化のピークが一致していたことから、湾奥部から湾中央部へと流出した *A.tamarense* 栄養細胞により大規模な麻痺性貝毒が発生した可能性が示唆されている。

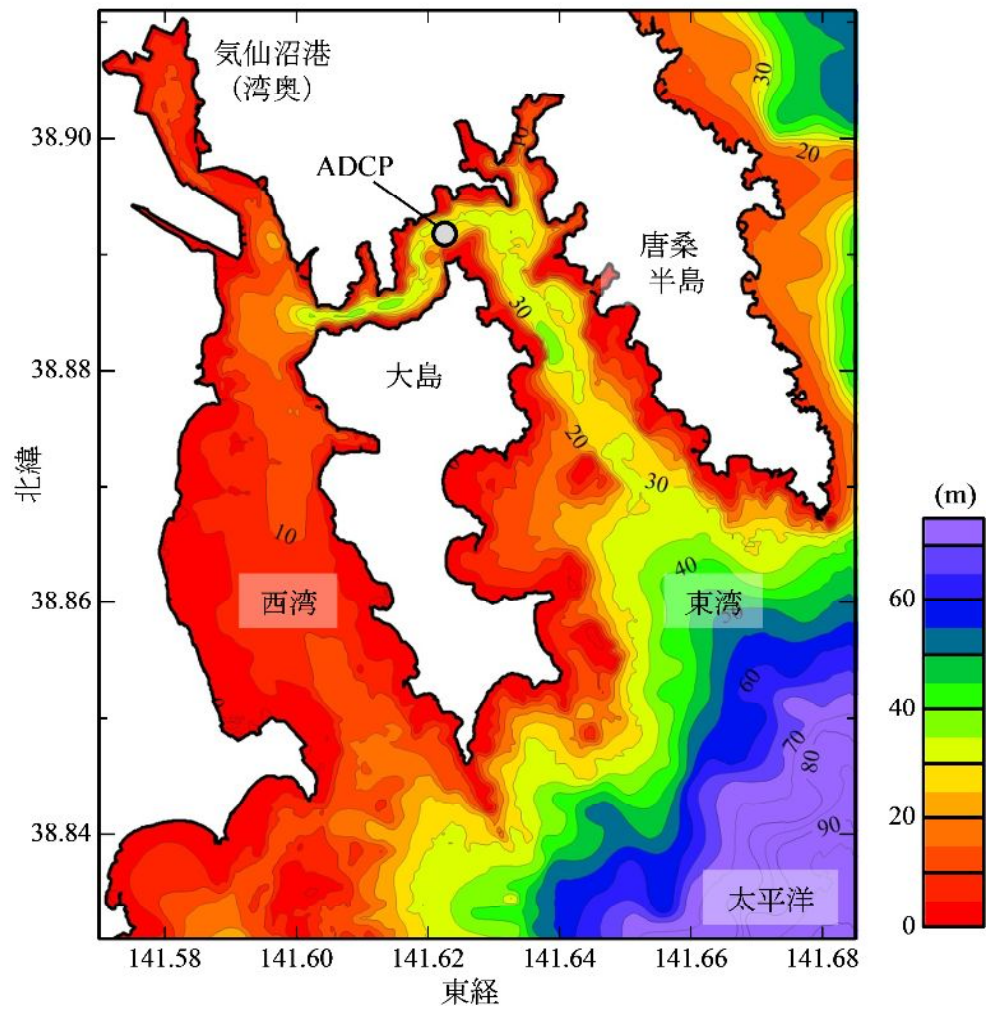


図 2-1 宮城県気仙沼湾の位置と地形

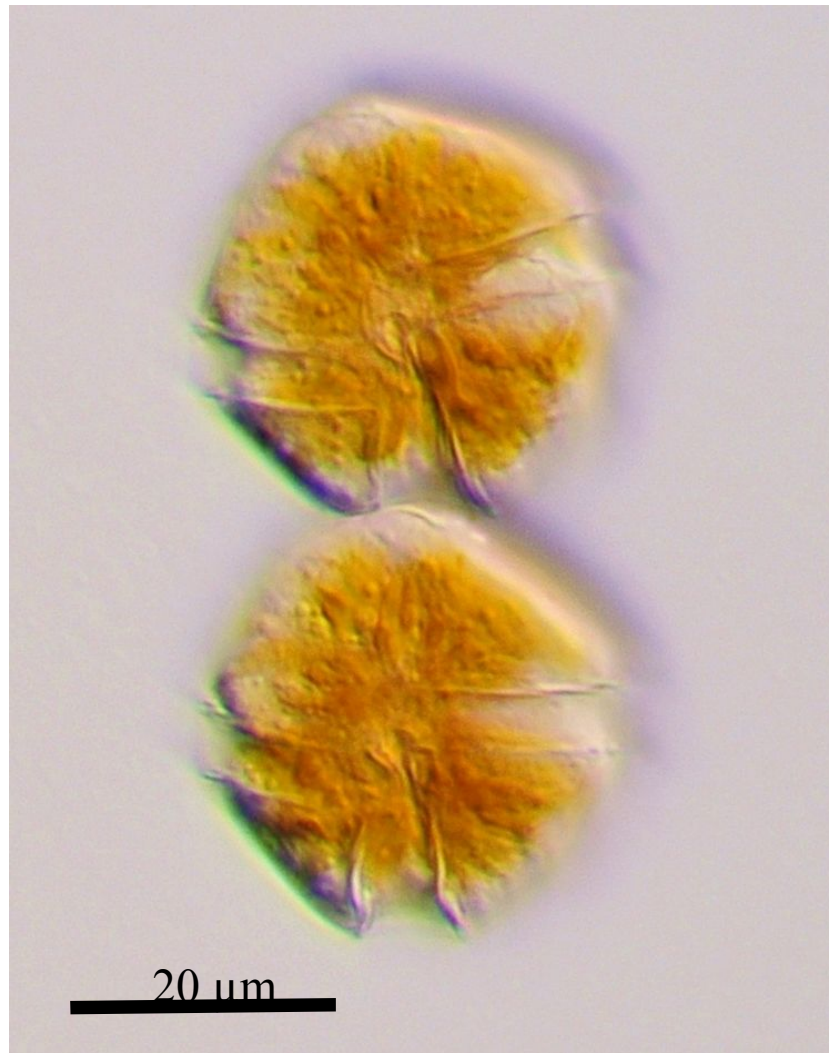


図 2-2 麻痺性貝毒原因渦鞭毛藻 *Alexandrium tamarense* の二連鎖細胞  
(写真提供：夏池真史)

## 2-2 現地観測

### 2-2-1 流速観測

流速の鉛直分布を超音波流速計 Acoustic Doppler Current Profiler (米国 RDI 社製 ADCP-WH600, 図 2-3) を用いて計測した。観測地点は図 2-1 に示した大島瀬戸で、設置水深は 33 m である。

設置図を図 2-4 に示す。ADCP 専用の台を取り付け、アンカーを繋げて海底に沈めた。このとき海底からセンサー面までの高さが 2.6 m、センサー付近で 0.72~1.6 m のブランクとなるため、合計して海底から 3.32~4.2 m 分のデータは測定できない。また ADCP には水中ブイを取り付けて上向きに立ち上げ、水面に向かって計測するようにした。このとき、水面付近では水深の約 10 % の 3.0 m がブランクとなる。その結果水深 33 m のうち 25 m 分のデータを計測できる。

ADCP の諸元を表 2-1 に、計測の設定を表 2-2 に示す。計測期間は 2014 年 3 月から 2015 年 6 月で、その間にデータの回収と再設置を 2 回行った。計測間隔は 10 分間で、層厚 0.5 m、精度は 1.29 cm/s である。

小型水位計 (HOBO-U2 ウォーターレベルロガー) を、ADCP と共に設置して水位を計測し、ADCP の観測データの有効水深を求めた。小型水位計の計測間隔は 10 分間で、計測期間は ADCP と同じである。





図 2-3 超音波流速計

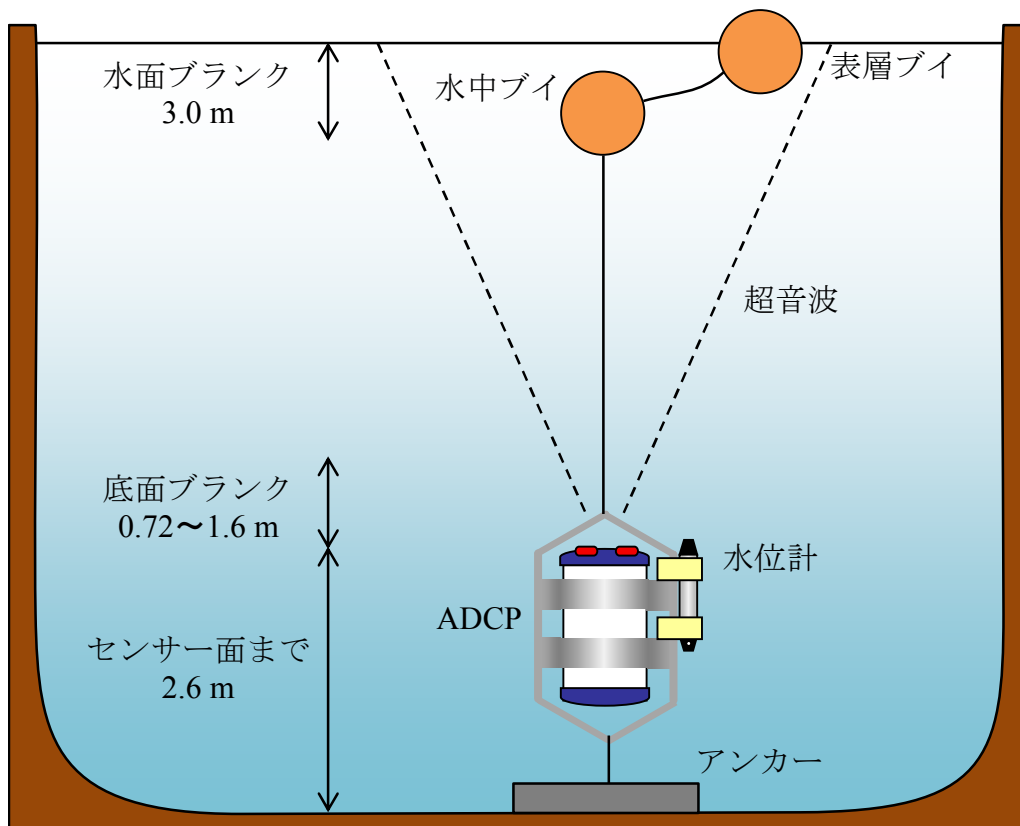


図 2-4 ADCP の設置図

表 2-1 超音波流速計の諸元

製品名	RDI 社製 WorkHorse Sentinel ADCP
周波数	600 kHz
センサー数	4
音波発信角度	中心線より 20 度
外形寸法	直径 228 mm 長さ 405.5 mm
重量	空中 13.0 kg 水中 4.5 kg
計測可能期間	205 日 (85 秒平均で 20 分間隔の場合)
音波到達距離	最大 50 m

表 2-2 超音波流速計の設定

計測期間	2014/3/15,11:20～ 2014/8/12,8:00	2014/8/13,12:00～ 2015/1/16,14:40	2015/1/17,11:00～ 2015/6/19,16:20
計測間隔	10 分	10 分	10 分
1 層目ブランク	0.72 m	0.74 m	1.6 m
層厚	0.5 m	0.5 m	0.5 m
層数	64	64	64
計測距離	32 m	32 m	32 m
Ping 数	100	100	100
水温	10℃	16℃	10℃
塩分	32psu	33psu	33psu
計測精度	1.29 cm/s	1.29 cm/s	1.29 cm/s

## 2-2-2 水質観測

水質の鉛直分布の観測を図 2-5 に示した Stn.1~Stn.15 の 16 地点、2014 年 12 月以降は鹿折河口と大川河口の 2 地点を追加した 18 地点で行った。図 2-6 に示す多項目水質計（JFE アドバンテック社製 AAQ-1183）を用いて計測した。調査項目は水温・塩分・クロロフィル蛍光値である。多項目水質計の諸元を表 2-3 に示す。流速の観測期間中、月に 1 回の頻度で行った（表 2-4）。

観測したクロロフィル蛍光値を Chl-a 濃度に変換するため、Stn.3・Stn.8・Stn.11・Stn.15 の表層・中層・底層で、バンドーン採水器を用いて採水を行った。採水サンプルを口径 0.3  $\mu\text{m}$  のガラス濾紙フィルター（GF/F）を用いて吸引濾過し、GF/F フィルターを DMF 溶液に浸して Chl-a 濃度を分析し、蛍光値との相関式を作成して観測値を変換した。各観測日での変換式については第 4 章に記述する。

2013 年に麻痺性貝毒が発生した際は、図 2-5 に示した湾内 11 地点で採水を行い、共同研究者（東北大学大学院農学研究科 西谷豪助教、北里大学海洋生命科学部 山田雄一郎講師、東京工業大学大学院理工学研究科 夏池真史研究員）に海水中に含まれる *Alexandrium tamarense* の細胞数の計数を依頼した。採水は 2013/4/25, 5/9, 5/23, 6/6, 6/13, 6/20 に 3 水深で行った。

流速観測結果と貝毒プランクトン分布の対応関係について考察するため、気仙沼水産試験場のデータを用いた。気仙沼水産試験場では以前から、貝類の毒化が発生した際に貝毒原因プランクトンの細胞数の調査が行われている。2014 年 3 月 17 日からは湾内の 7 地点で、*Alexandrium* 属の細胞数の計数が週に 1 回の頻度で実施されている。観測地点は図 2-5 に示した。

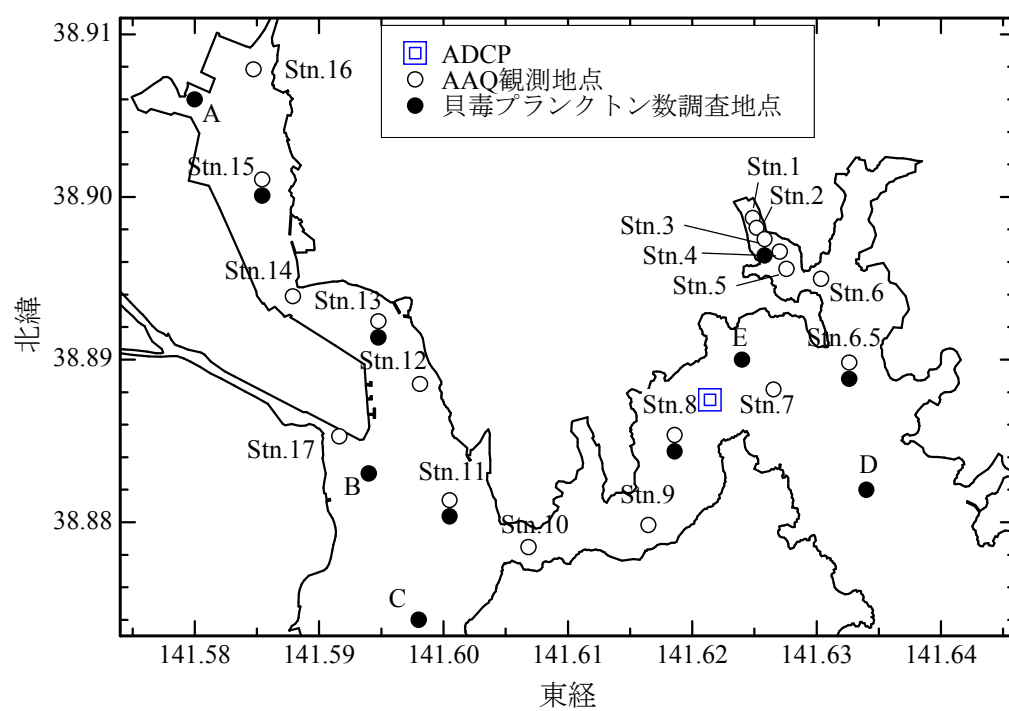


図 2-5 観測地点



図 2-6 多項目水質計

表 2-3 多項目水質計諸元

製品名	JFE アドバンテック社製 AAQ-1183		
	水温	塩分	Chl-a
形式	サーミスタ	実用塩分式	蛍光測定式
測定範囲	-5～40℃	0～40 psu	0～400 µg/l
測定精度	±0.02℃	±0.03 psu	±1%
分解能	0.001℃	0.001 psu	0.01 µg/l

表 2-4 流速観測期間の水質観測日

観測日	2014 年													
	1 月	2 月	3 月	4 月		5 月		6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
	30	28	14	12	27	10	17	9	16	12	25	23	26	11
水質 観測	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
採水	○	○	○	○	×	○	×	○	○	○	○	○	○	○

観測日	2015 年							
	1 月	2 月		3 月		4 月	5 月	6 月
	18	2	17	3	14	17	23	18
水質 観測	○	○	○	○	○	○	○	○
採水	○	×	○	×	○	○	○	○

## 2-3 データの解析について

得られた流速データは、同時に測定した水位データから水面までの距離を算出し、表層ブランク域のデータを除外し有効なデータのみ取り出す処理を行った。流速の観測期間中、水位データの欠測を補間して処理を行った期間については、表 2-3 に示した。

取り出した流速データを水深別に東方流速と北方流速をプロットし、東方流速が正になる場合と負になる場合で分け、それぞれの場合で平均流向を求めた（図 2-7～2-9）。

全ての水深・期間で平均したとき、主流方向は正の場合が東北東（方位角 80 度）、負の場合は西南西（255 度）となった。これは大島瀬戸の滞筋の向きに一致している。

以降は、この角度に沿って主流方向を合成し、東北東を正方向、西南西を負方向とする。

表 2-3 水位データの補間期間と方法

期間	原因	補間方法
2015/1/10,14:40～ 1/16,13:30	Stn.8 の水位計の停止	鮎川潮位から 補間水位を作成
2015/5/12,19:30～ 5/14,6:00	舞根の気圧計の停止	大川の気圧で 水圧データを補正
2015/6/15,21:50～ 6/19,16:20	Stn.8 の水位計の停止	舞根潮位から 補間水位を作成

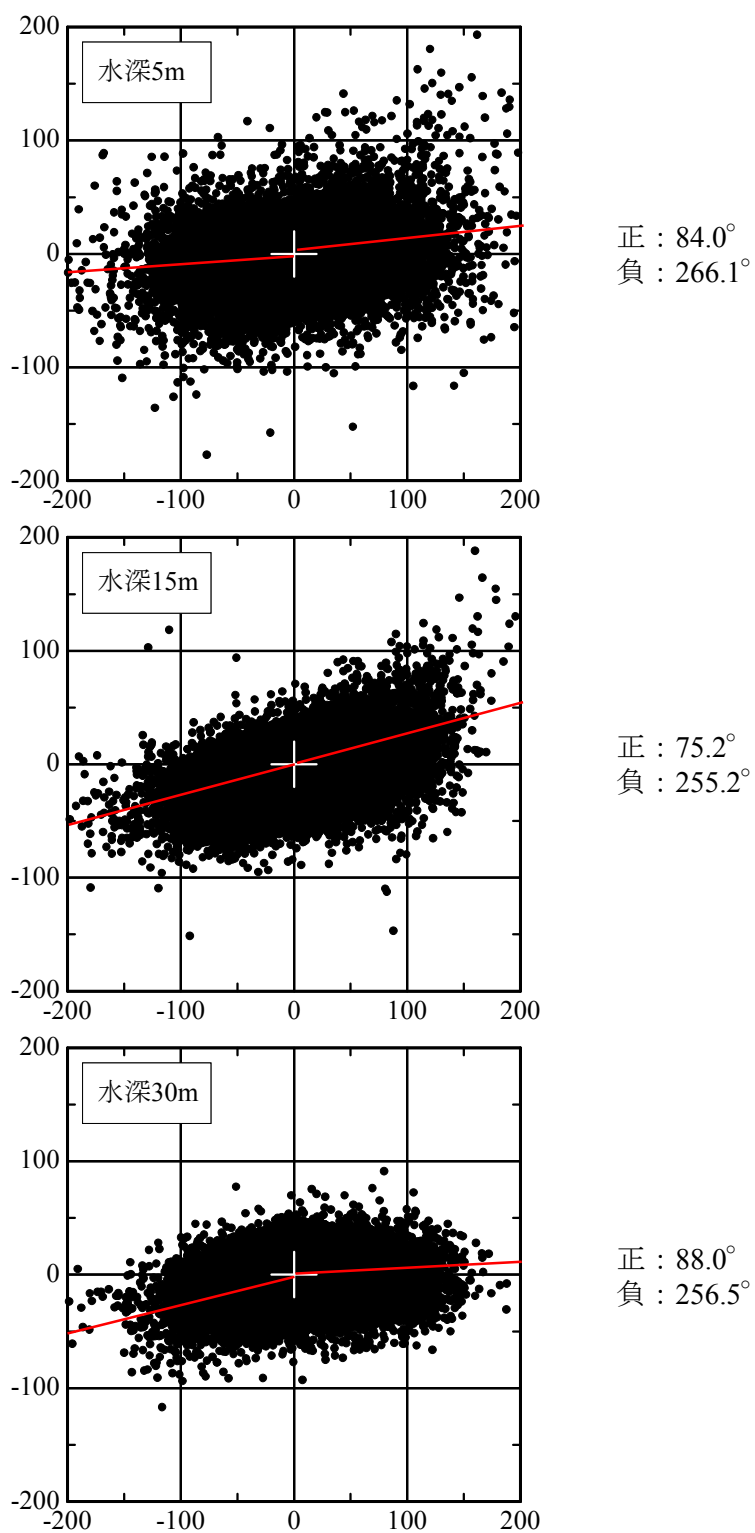


図 2-7 2014/3/15～8/12 の期間の平均流向



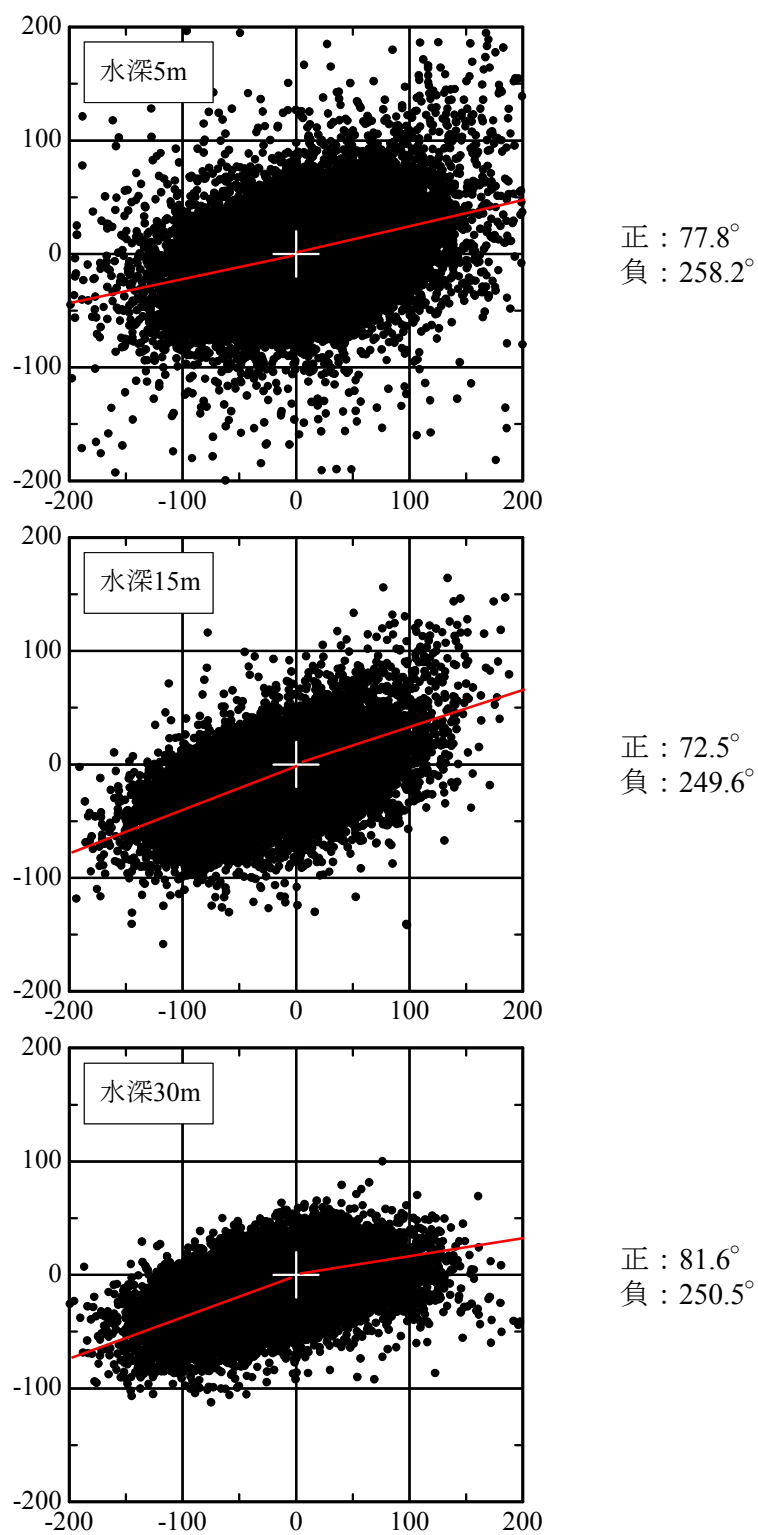


図 2-8 2014/8/13～2015/1/16 の期間の平均流向

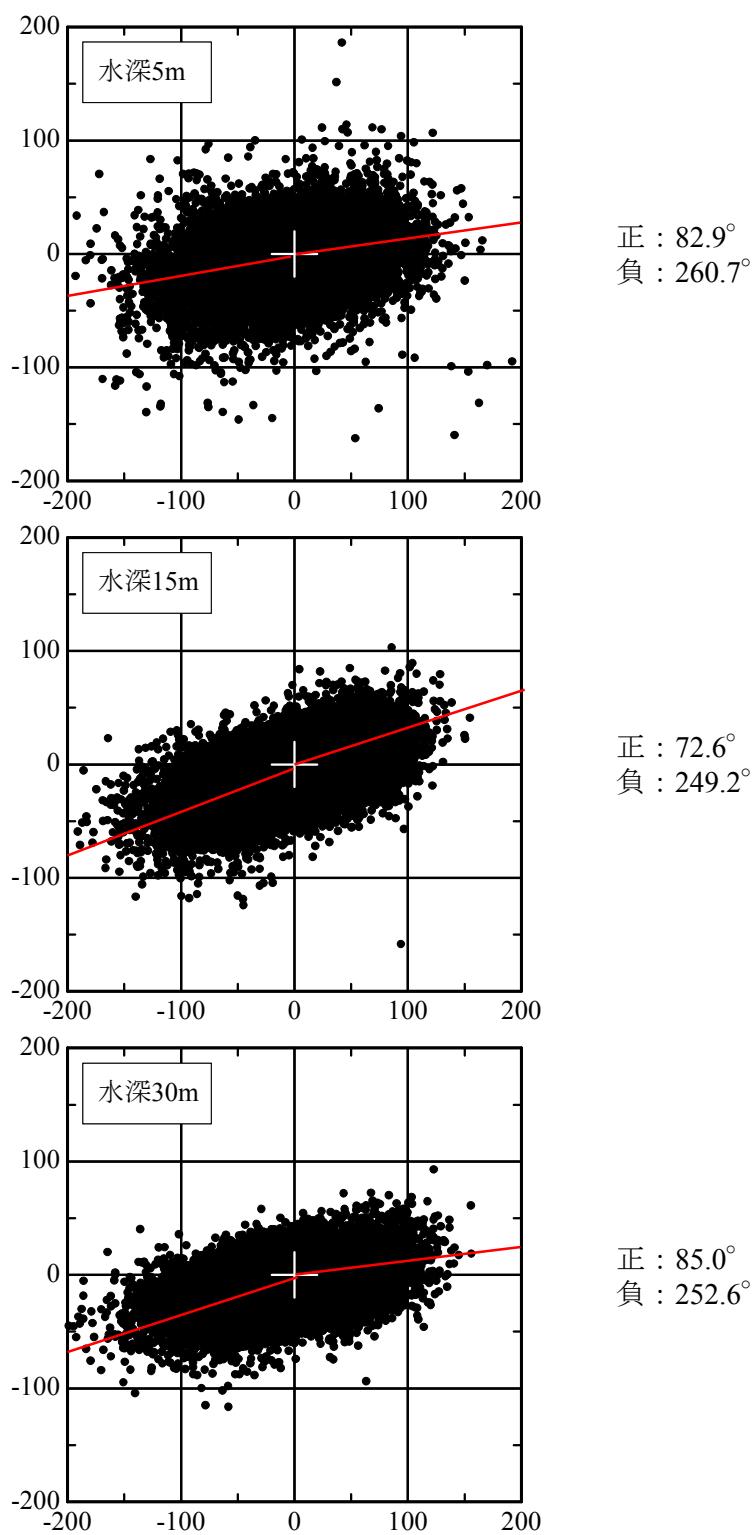


図 2-9 2015/1/17～6/19 の期間の平均流向

## 第三章 大島瀬戸での流速傾向

### 3-1 流速の観測結果

大島瀬戸での 2014 年 3 月から 2015 年 6 月までの 1 月ごとの流速観測の結果を図 3-1-1 ~ 図 3-1-16 に示す。気温、降水量、大気圧、潮位、主流方向流速のコンター図、各水深の流速ベクトルの順で示した。気温、降水量、風速は気象庁の気仙沼アメダスのデータから作成した。コンター図は流速の強さを色の濃さで表しており、赤色部分が正方向（方位角 80 度）、青色部分が負方向（方位角 255 度）、黒塗り部分は空中を示している。白塗り部分は水面でのブランクを示し、水面から 2.5 m の厚さである。海底付近のブランクは、機器から最も近い位置のデータを、海底で 0 になるように線形補完をしている。流速ベクトル図は、表層・中層・底層での流速を表すため、水位 28 m, 18 m, 8 m について示した。

2014 年 3 月に流速観測を開始した時期は、それまで 0℃以下だった気温が 10℃程度まで徐々に上昇し、風速 5 m/s の強い北西の風がよくみられた。

5 月までは水位 20 m 付近を境にして表層と底層で流向の向きが転じる 2 層構造がみられ、どちらも流速は ±50 mm/s 程度の大きさであった。6 月になると中層で、表層・底層と異なる向きの流速がみられるようになり、7 月に入ると流速の大きさが平均的に ±100 mm/s 程度まで増し、8 月に更に強まるうえに、水位 10 m 付近まで一様に正方向の流速が卓越する構造であった。

9 月中旬頃から 10 月にかけて流速が弱まり、負方向への流速が中層でみられるようになった。11 月中旬から、表層の浅い部分でのみ正方向、大部分は負方向の流速を示す構造となり、全層で -100 mm/s 程度の強い流速がみられた。2 月下旬までこの構造が続き、3 月に表層で負方向、底層で正方向となる 2 層構造がみられた。その後は 2014 年と似た構造を示した。

湾の地形は、西湾は水深が浅くて湾口の幅が狭いが、東湾は水深が深く開口部が広がっている。このことから太平洋との海水交換は東湾において積極的に起こり、大島瀬戸を通過して、気仙沼港方向（湾奥）と西湾方向に分岐すると考えられる。そのため観測された流速の負方向は、太平洋から湾奥への海水の流入、正方向の流速は湾奥から太平洋への流出が起こっていると考えられる。

3 月から 10 月は海水の往復による交換が起こり、11 月から 2 月には太平洋からの流入が起こっていることが分かった。また、2014 年 3 月と 2015 年 3 月の構造は類似していることから、以上の流動構造は季節的な流動特性であることが分かった。

季節性の構造と別に、一時的なイベントとして、2014/3/30, 4/3, 5/16, 6/13, 10/14, 11/3, 2015/2/14, 2/27, 3/9, 6/3 には 1000 hPa 程度の低気圧の通過があり、この半日から 1 日後に負方向への流速が強まる傾向がみられた。これは沖合を通過した低気圧の影響で、

太平洋海面が吸い上げられ、西湾に比べ東湾の水深がより深いために、相対的に流入が強まったためであると推測される。

気仙沼湾と同じく、東北地方の陸奥湾（崔ら，1997）と志津川湾（永澤ら，1998）でも、夏期に湾外と湾外水の水温に起因する密度流による流入が起こっていることが確認されており、本研究域でも同様の現象が起こったものと考えられる。また、志津川湾における研究においても、低気圧通過時の湾内の流動構造への影響について言及があるが、小潮時に普段の水平構造が弱まり、低気圧の風による沖合の水塊が運ばれたことが重なった時に湾内の海水交換が起こったと考察がされている。本研究域では、低気圧の通過と大潮時が重なったときに、負方向への流速が強まる傾向にあり、低気圧の通過に対する異なる応答特性がみられた。

また超音波流速計と共に取り付けた濁度計によって観測された、水位 5.6 m における水温、クロロフィル蛍光値、濁度の結果と潮位、流速の結果を図 3-1-1～図 3-1-15 に示す。水温は 0～20℃の間で、ゆるやかに推移していた。クロロフィル蛍光値と濁度は 4 月から 6 月突発的に増加することがあったが、それ以外の期間は低い値で推移していた。

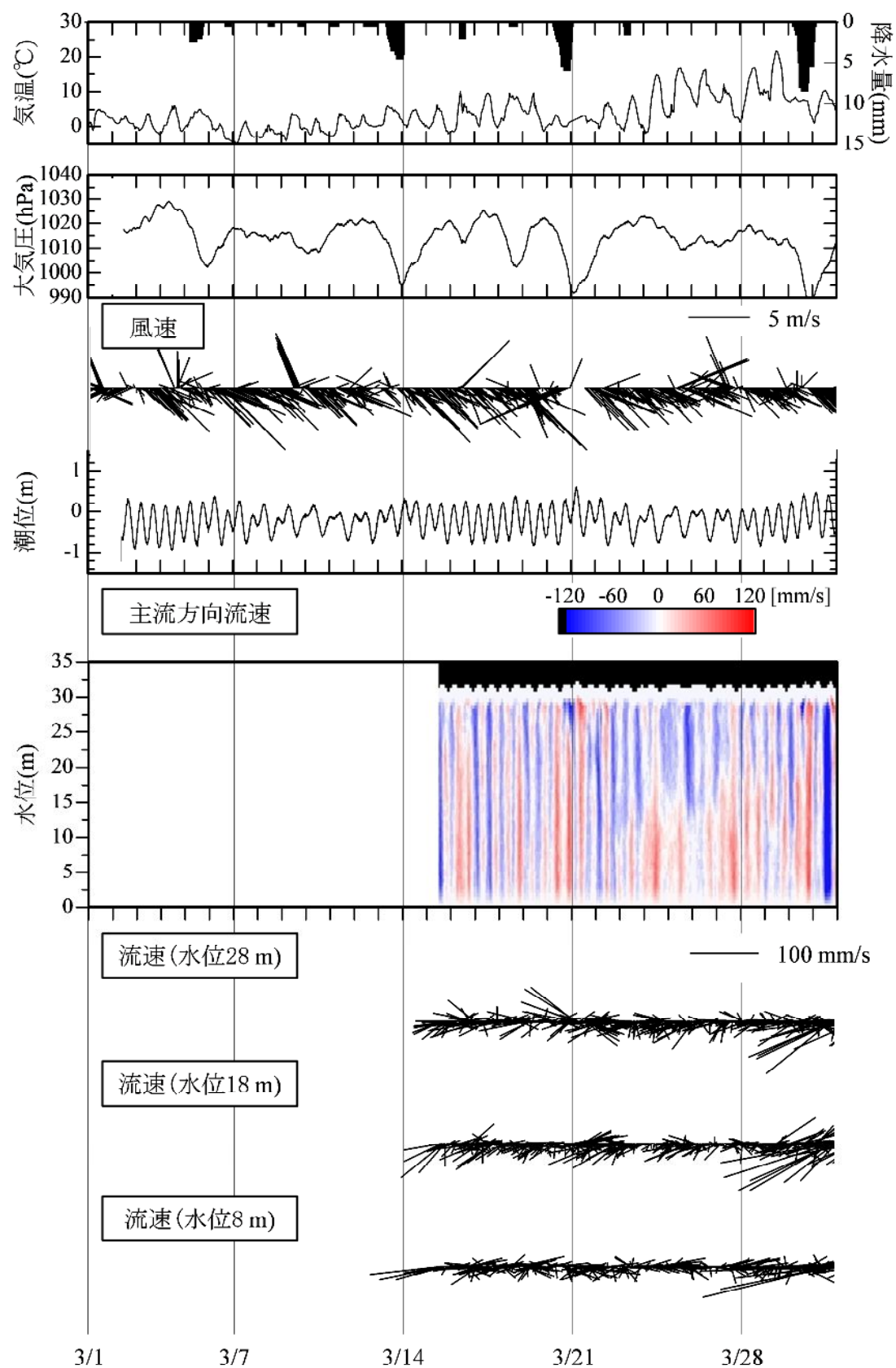


図 3-1-1 2014 年 3 月の気象と流速

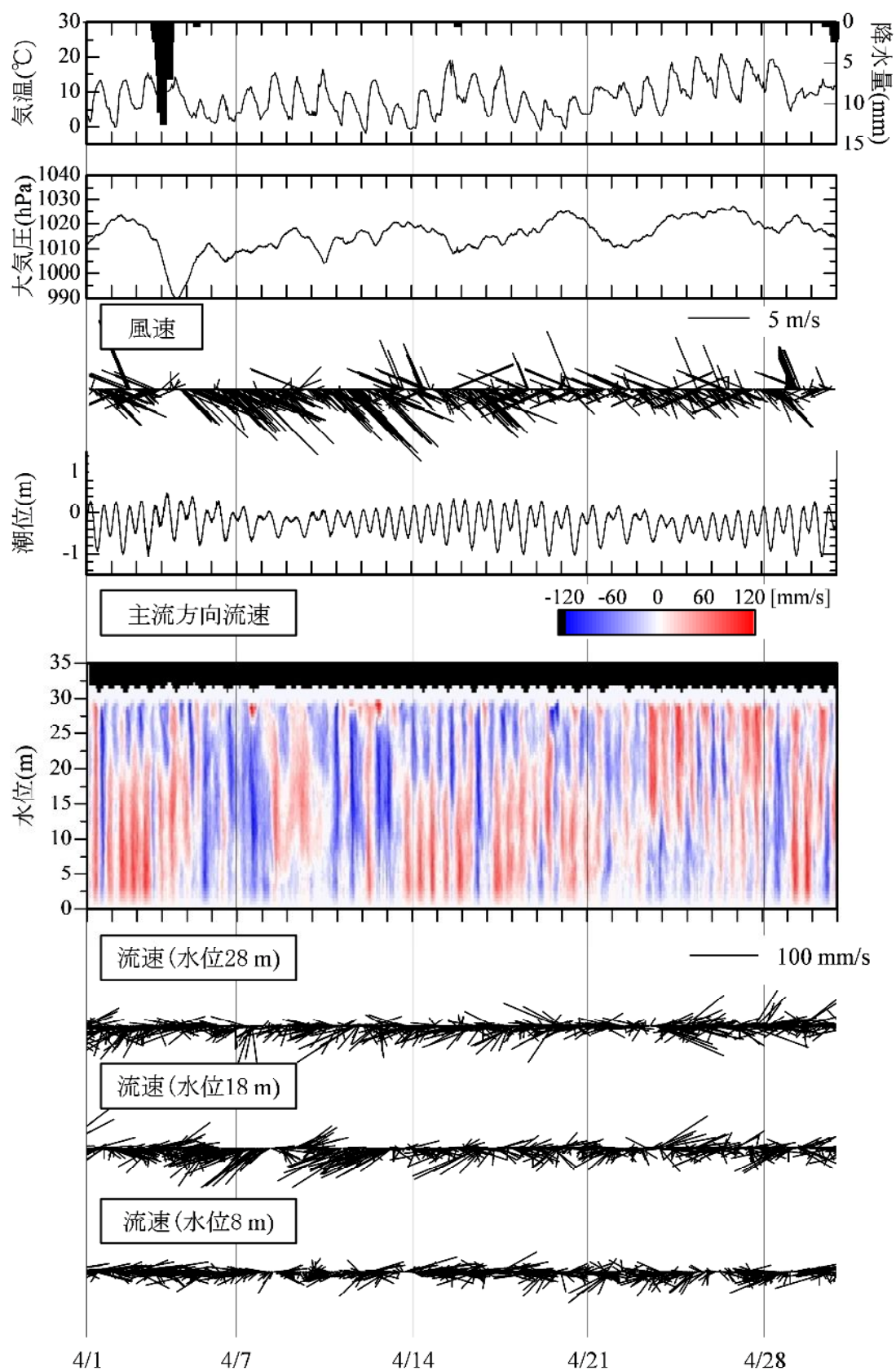


図 3-1-2 2014 年 4 月の気象と流速

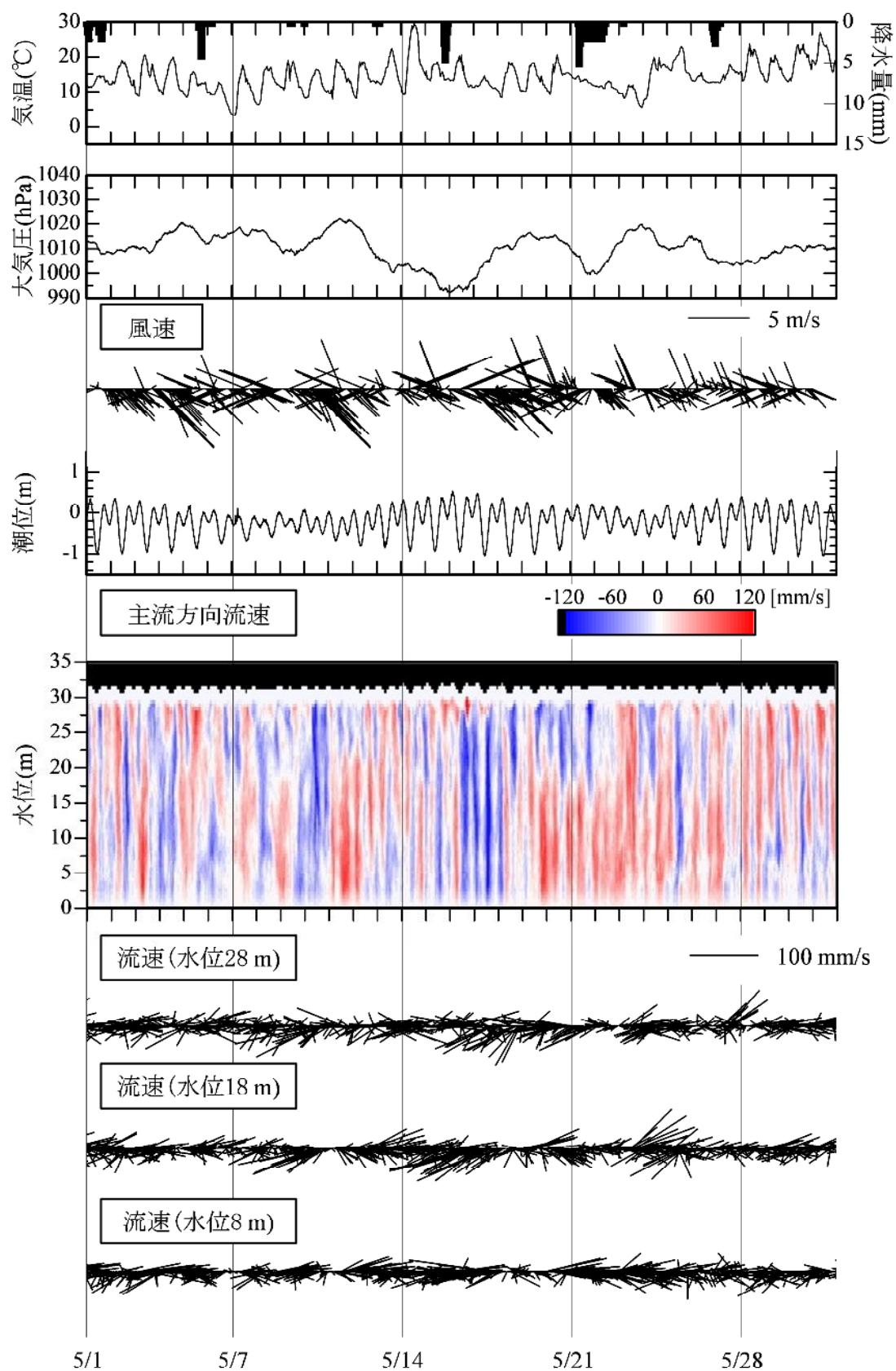


図 3-1-3 2014 年 5 月の気象と流速



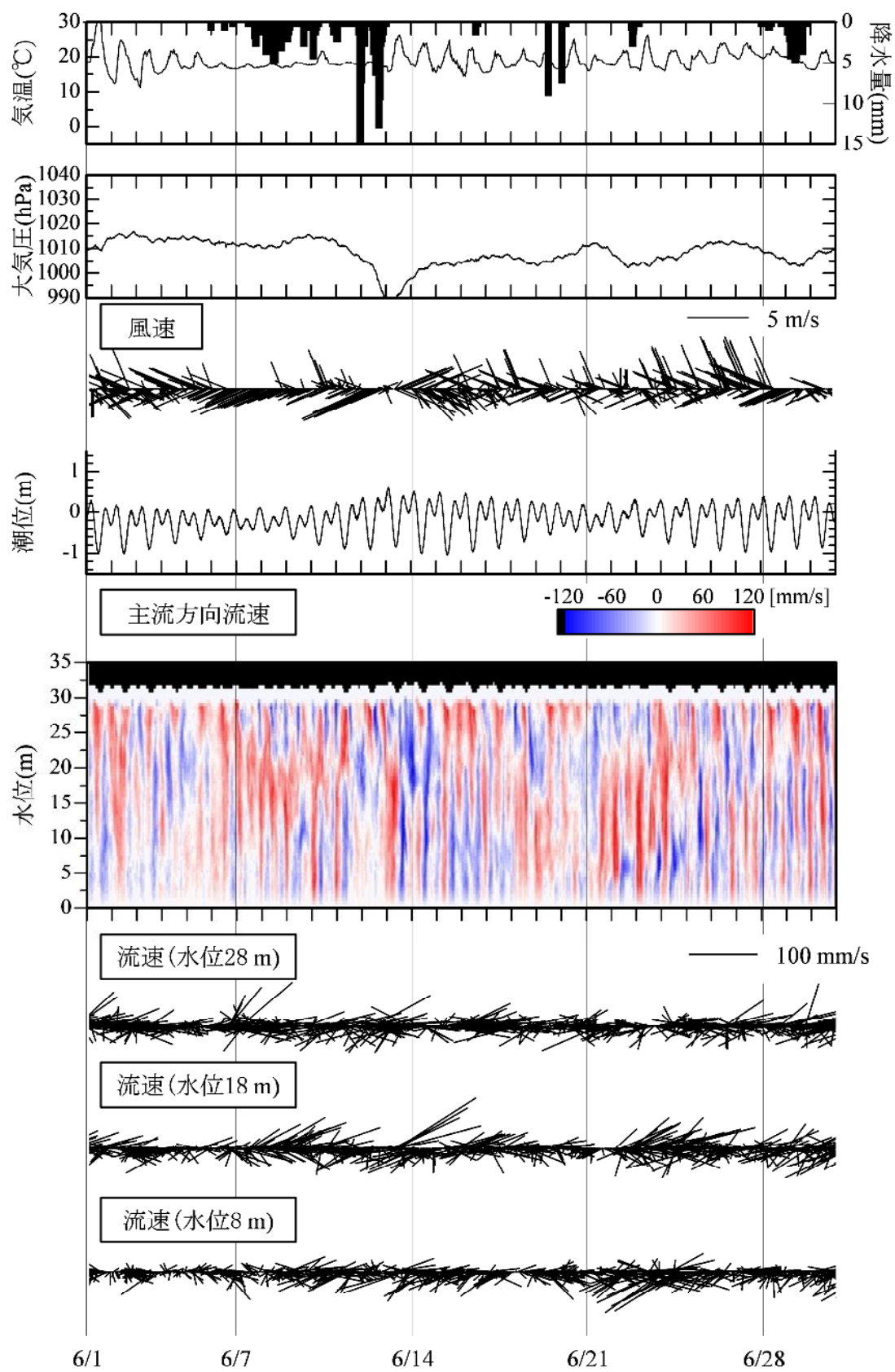


図 3-1-4 2014 年 6 月の気象と流速



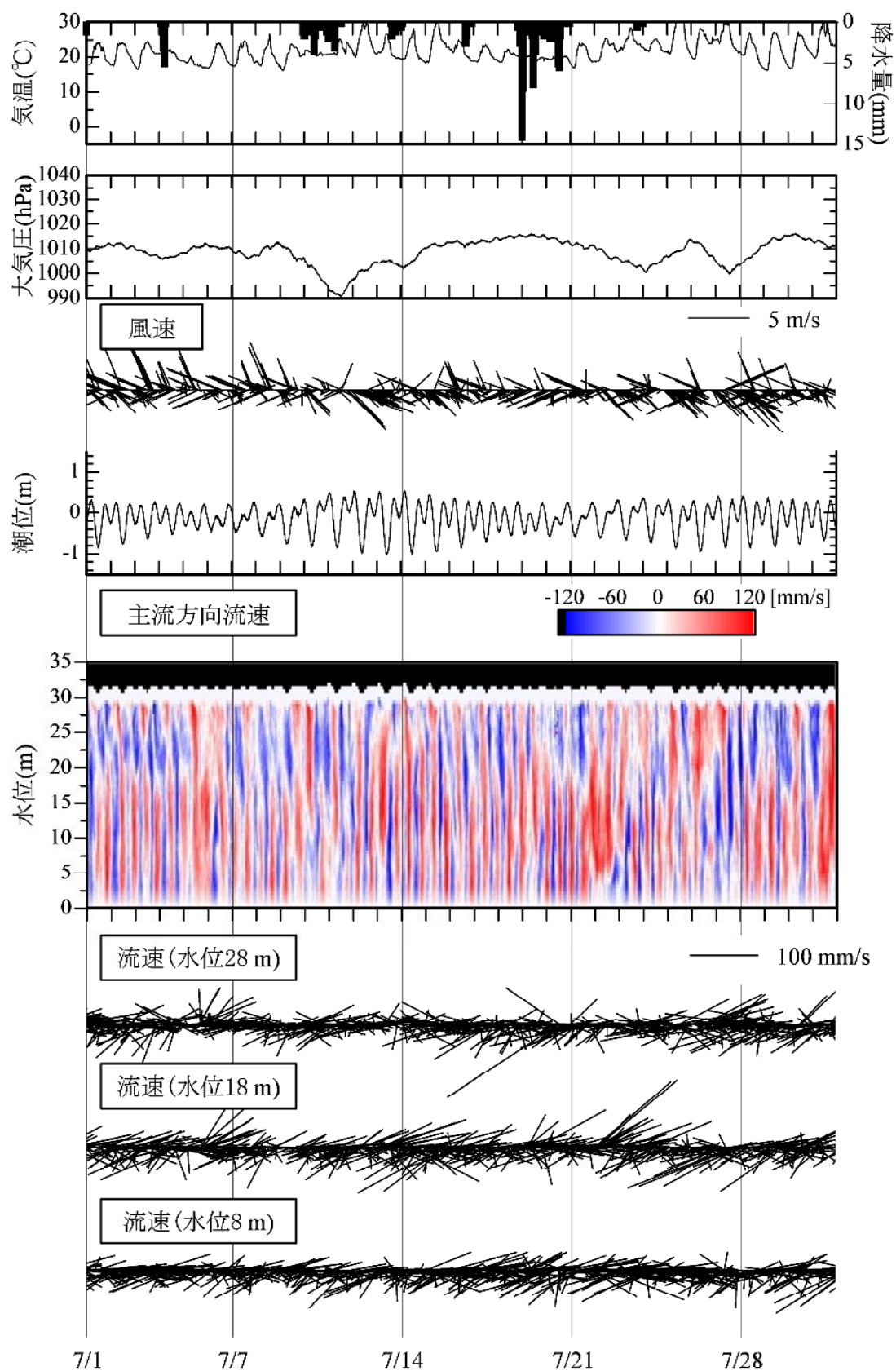


図 3-1-5 2014 年 7 月の気象と流速

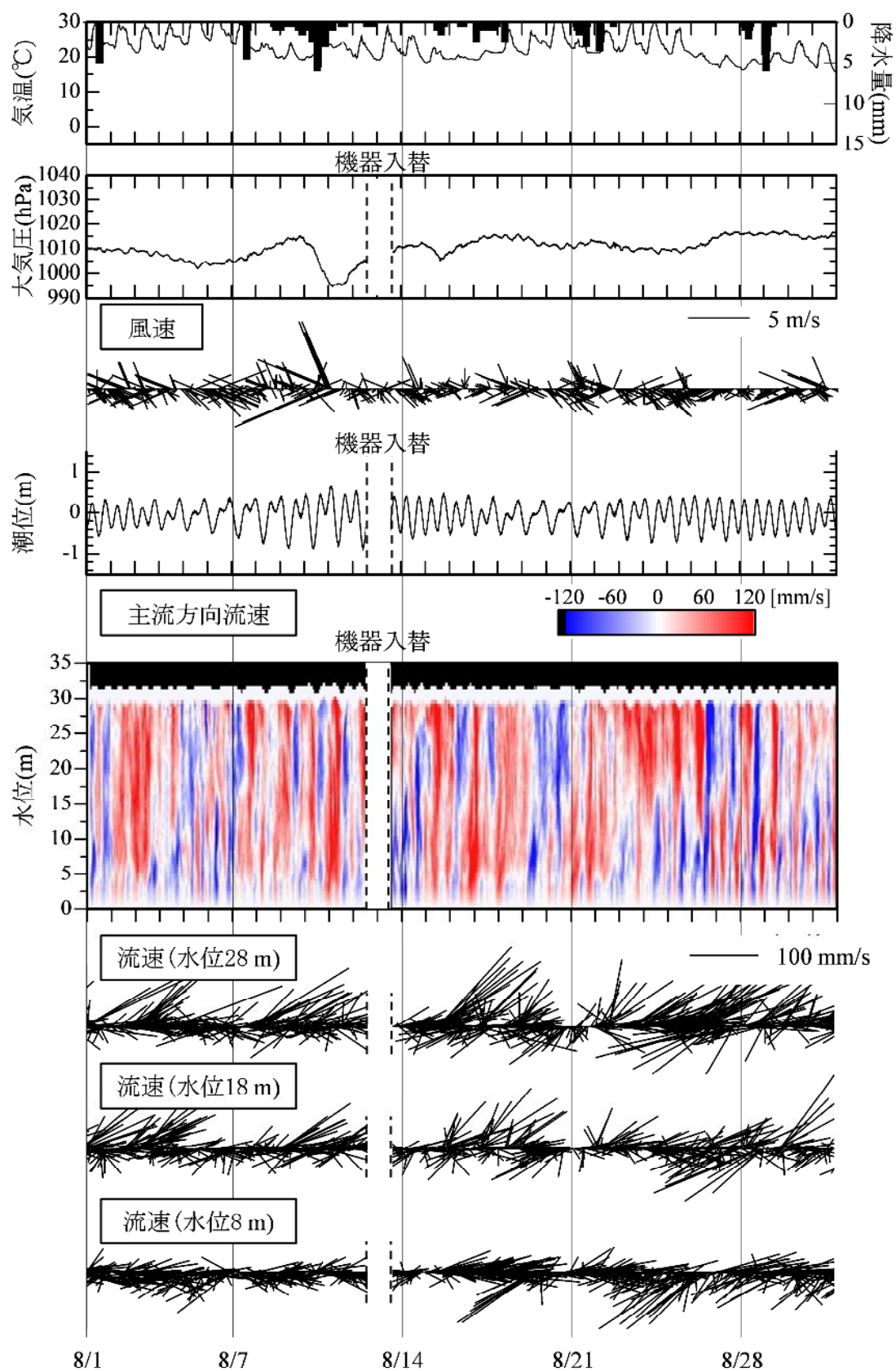


図 3-1-6 2014 年 8 月の気象と流速

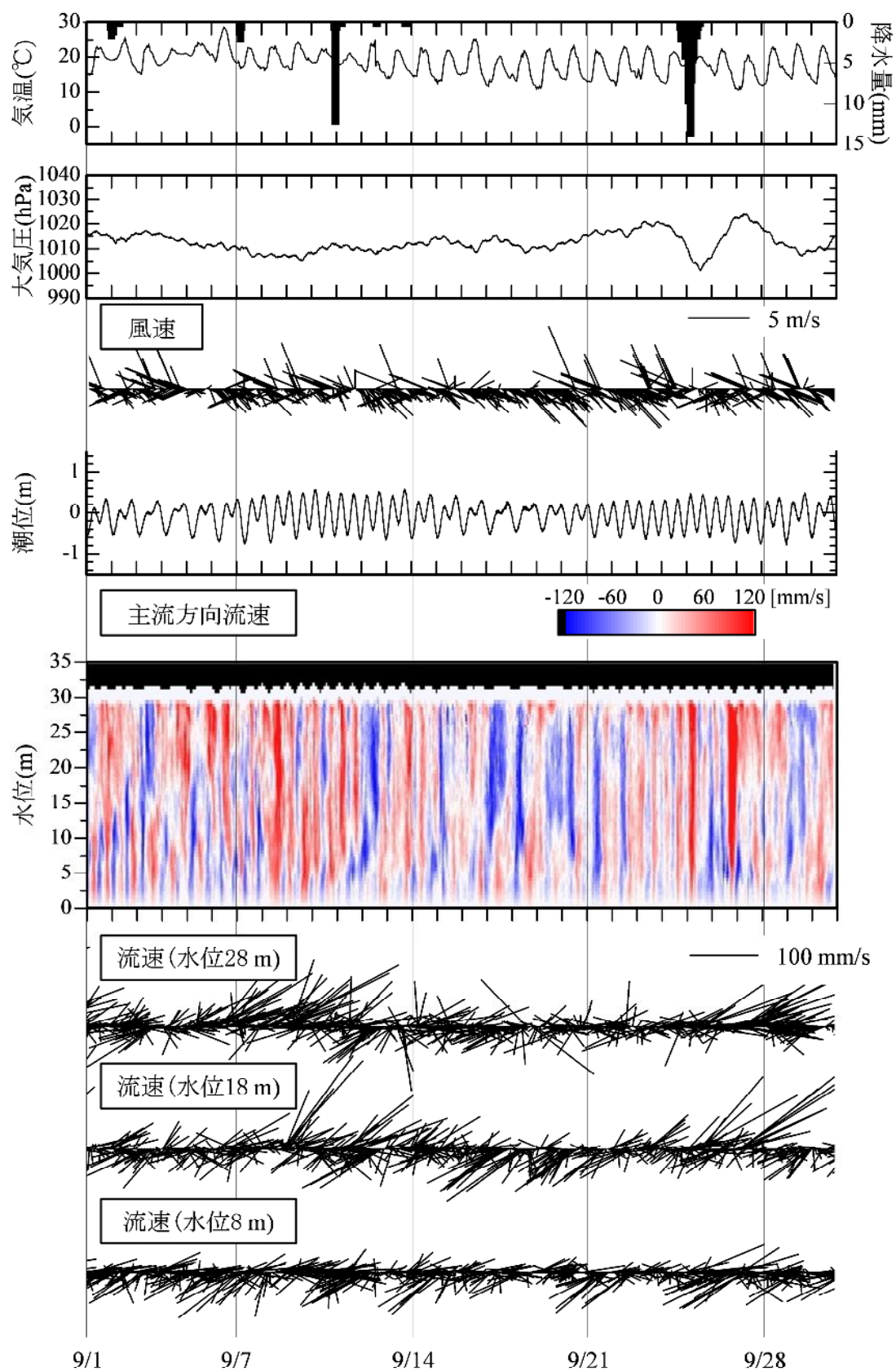


図 3-1-7 2014 年 9 月の気象と流速

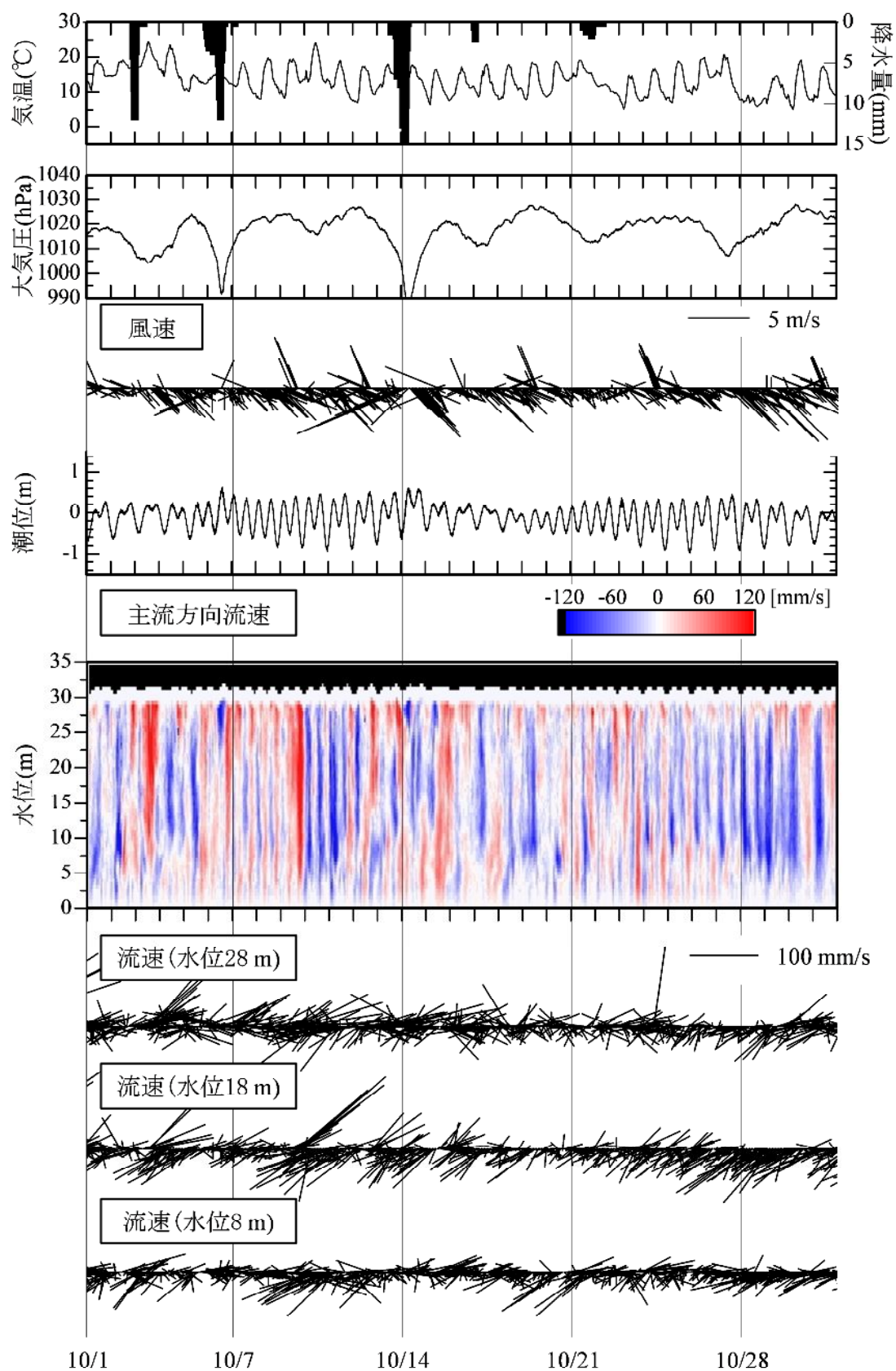


図 3-1-8 2014 年 10 月の気象と流速



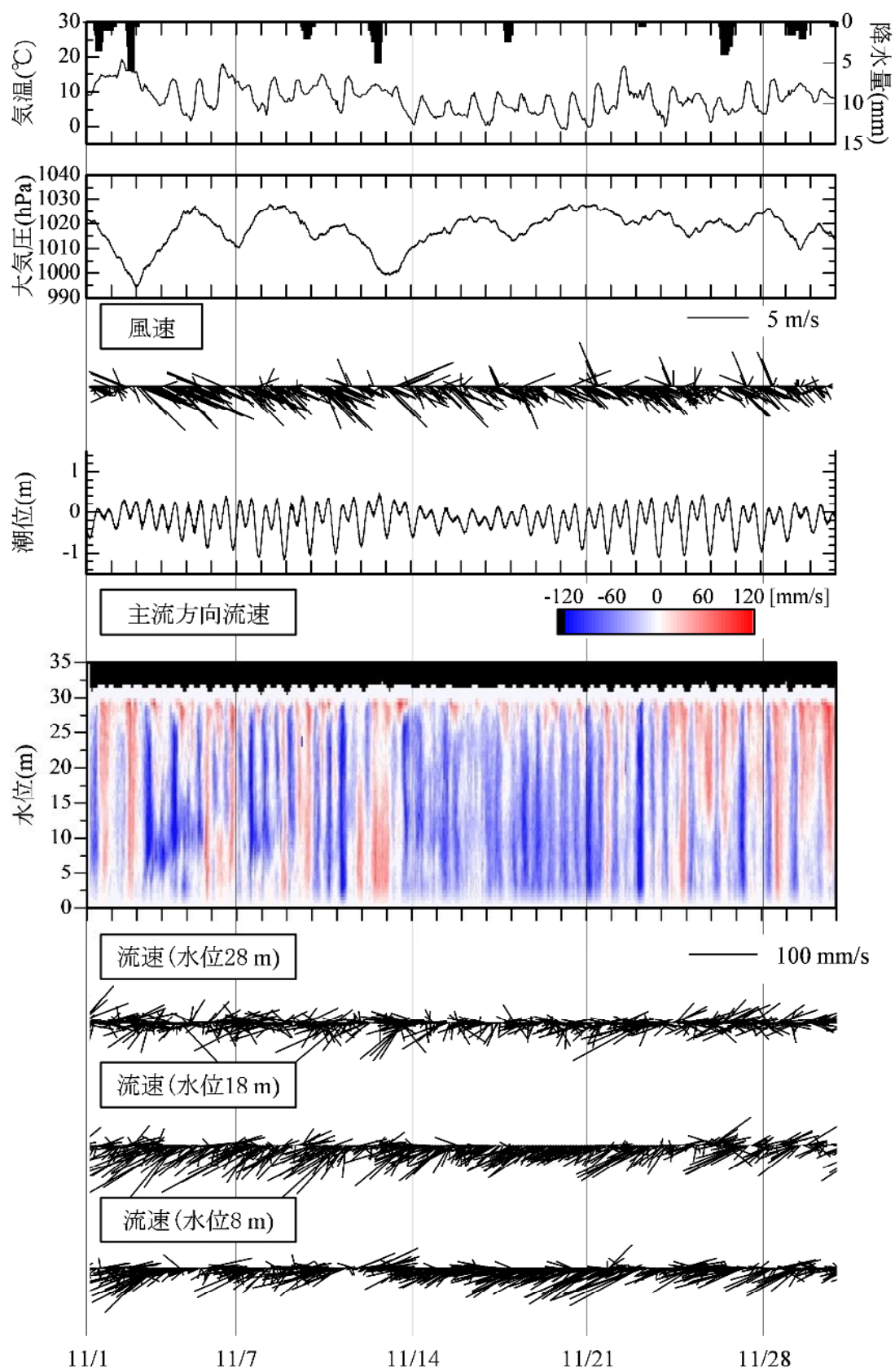


図 3-1-9 2014 年 11 月の気象と流速

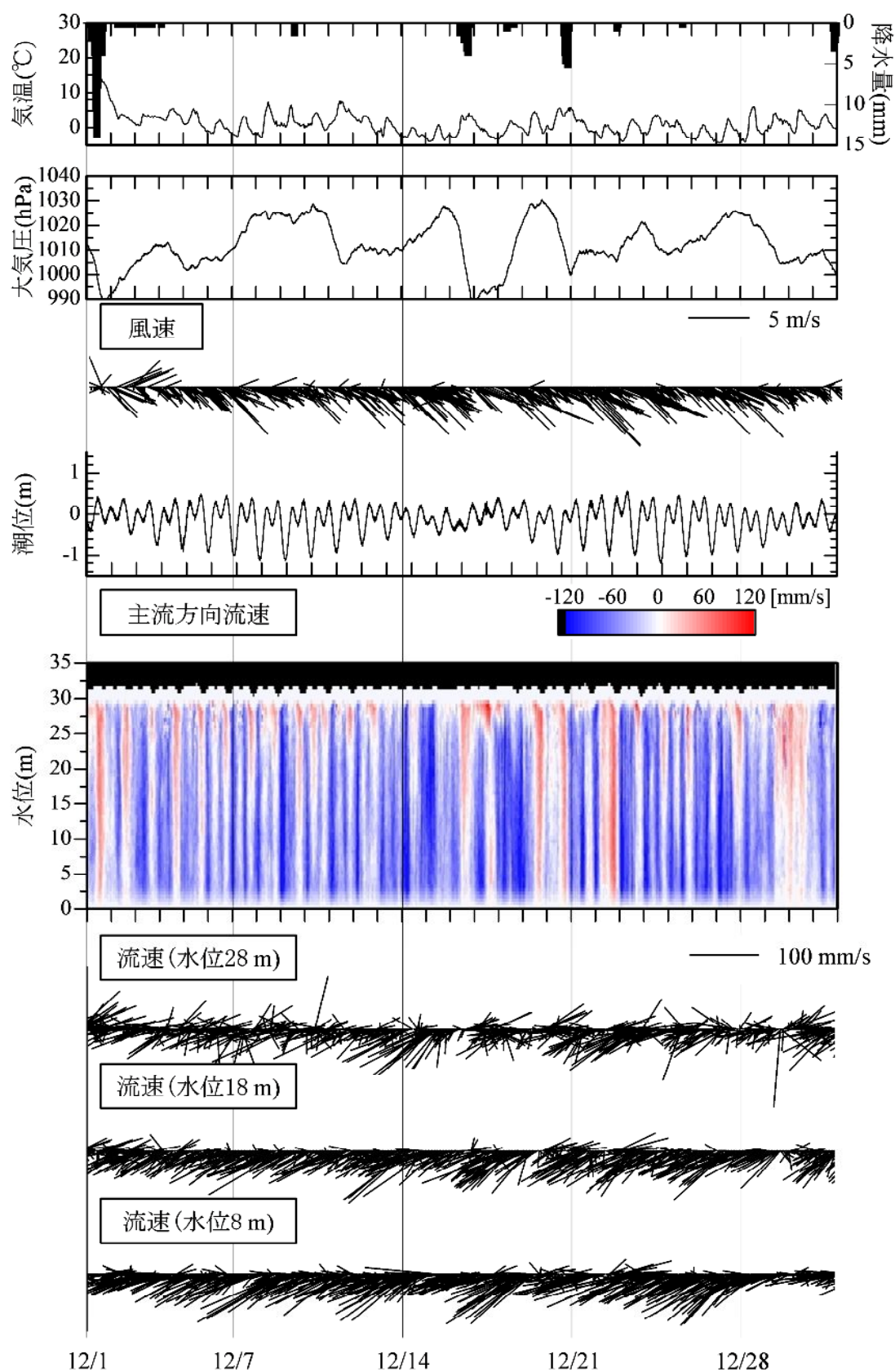


図 3-1-10 2014 年 12 月の気象と流速

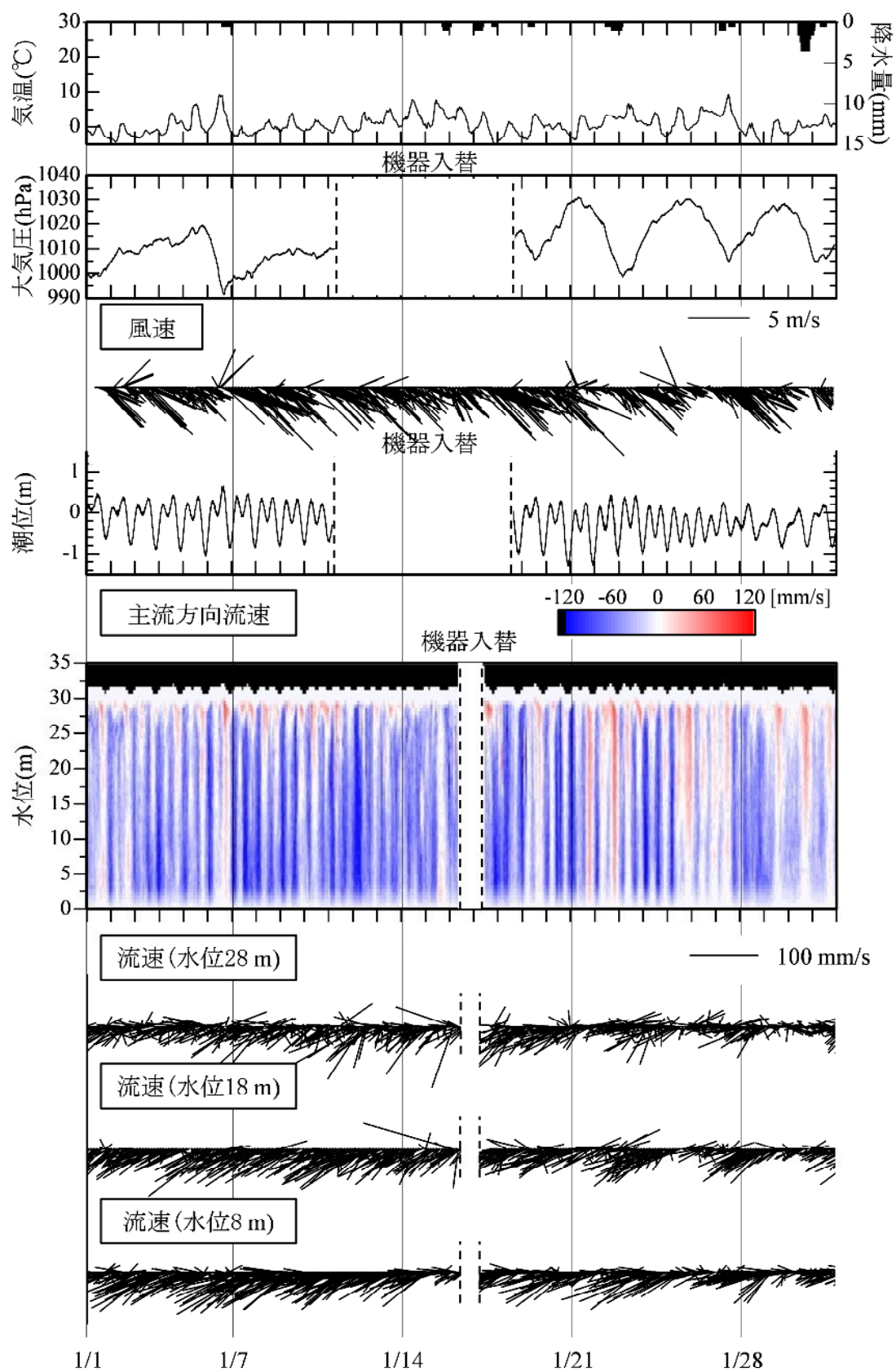


図 3-1-11 2015 年 1 月の気象と流速

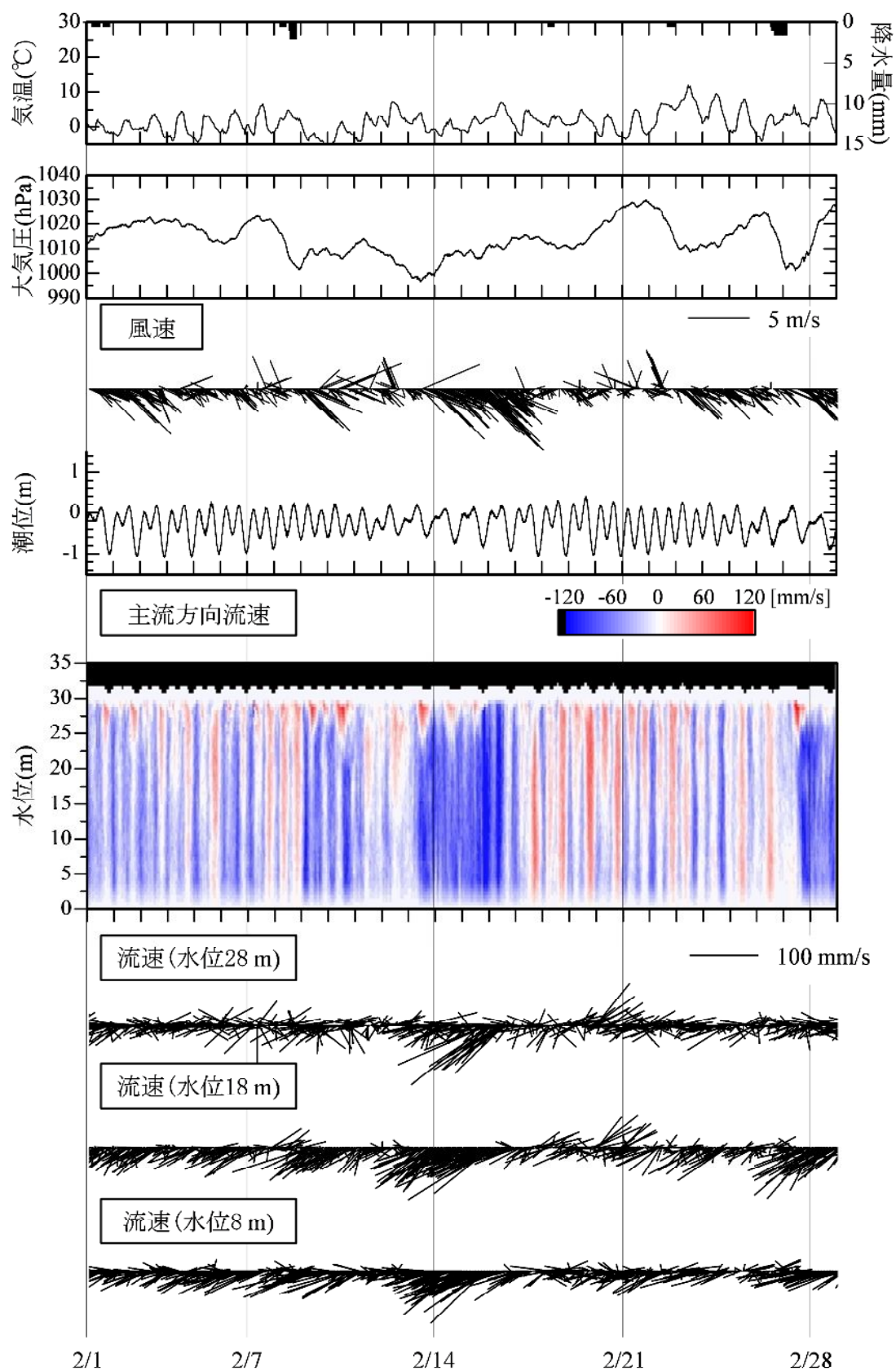


図 3-1-12 2015 年 2 月の気象と流速



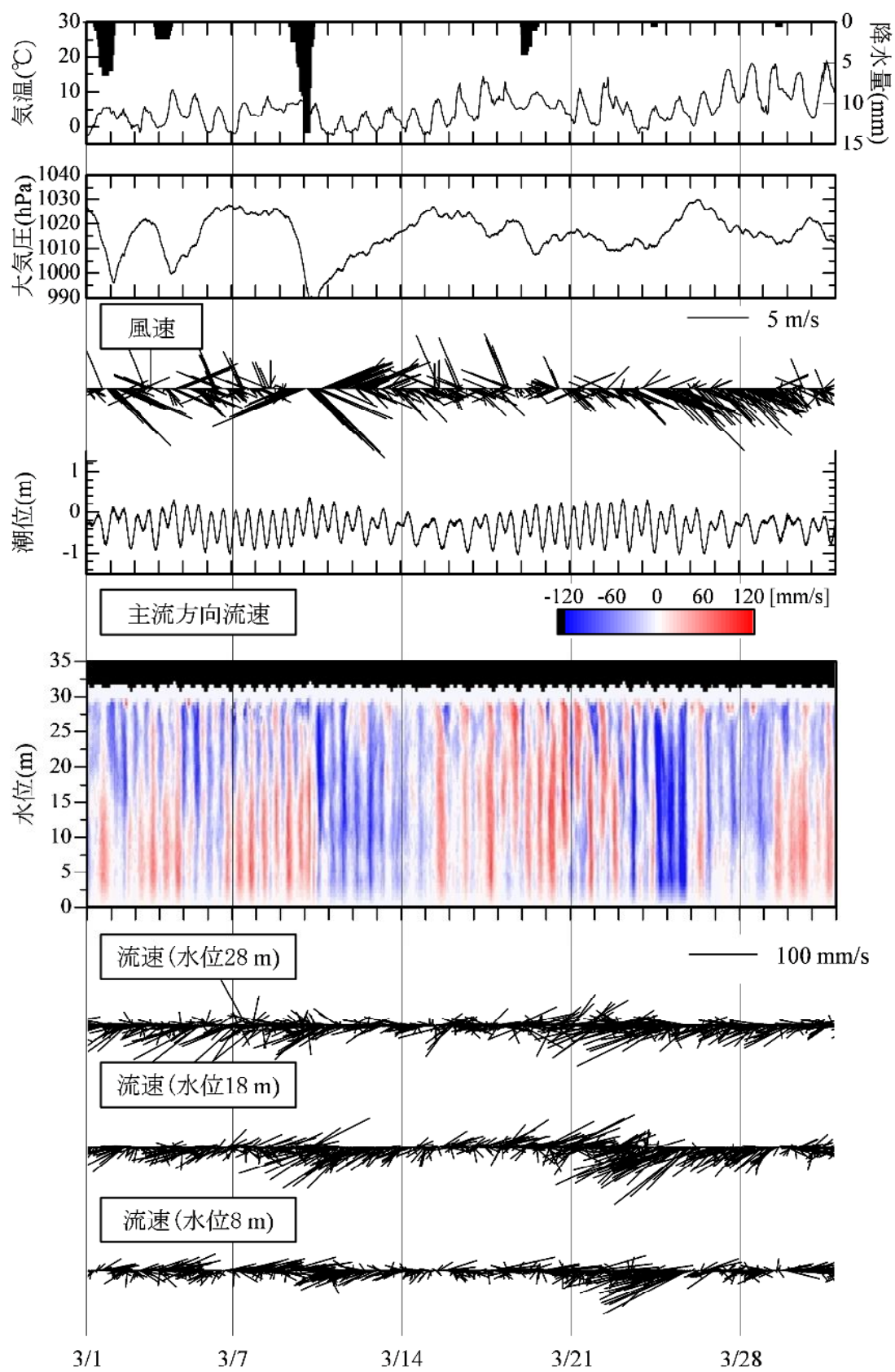


図 3-1-13 2015 年 3 月の気象と流速

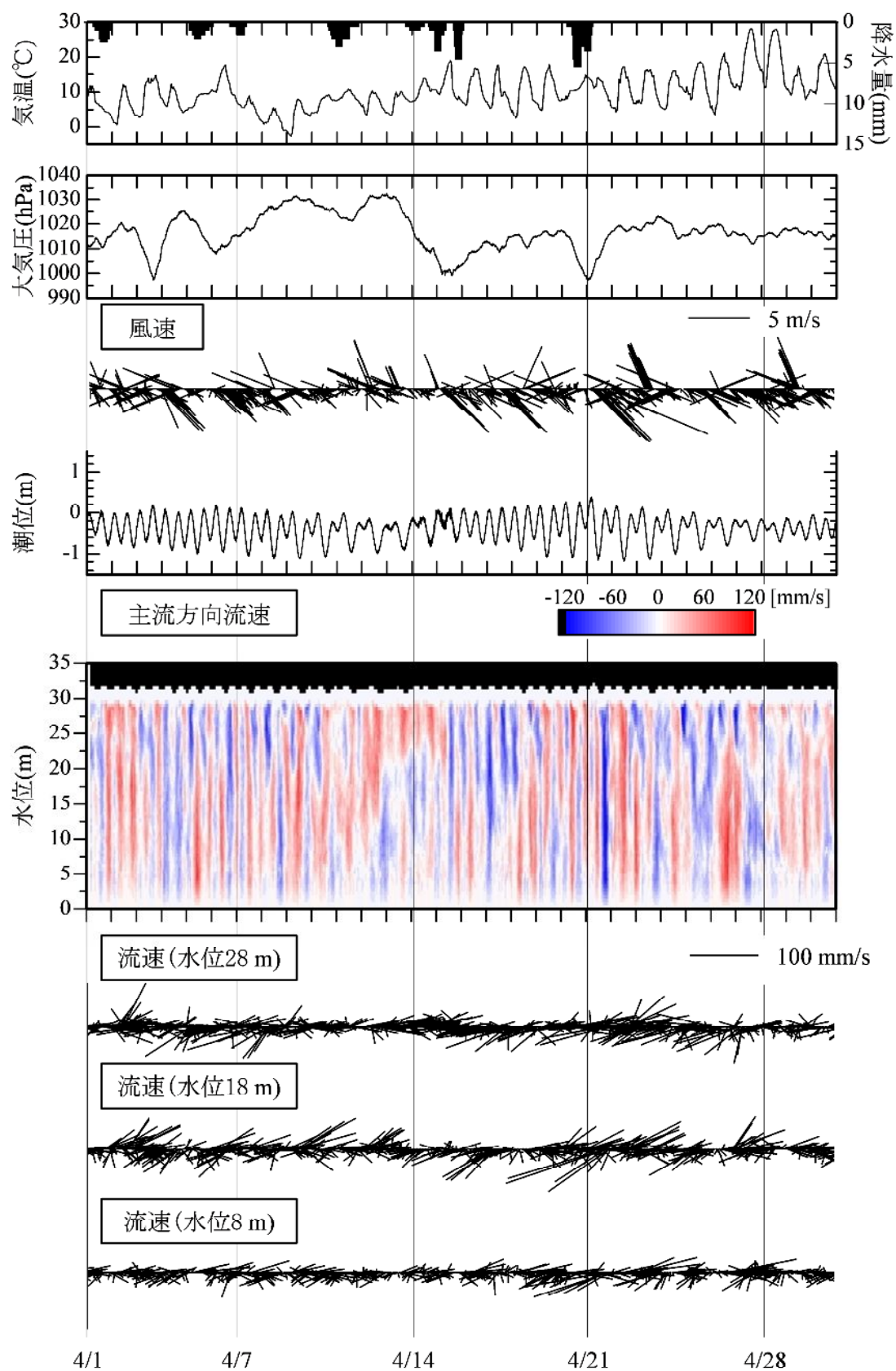


図 3-1-14 2015 年 4 月の気象と流速

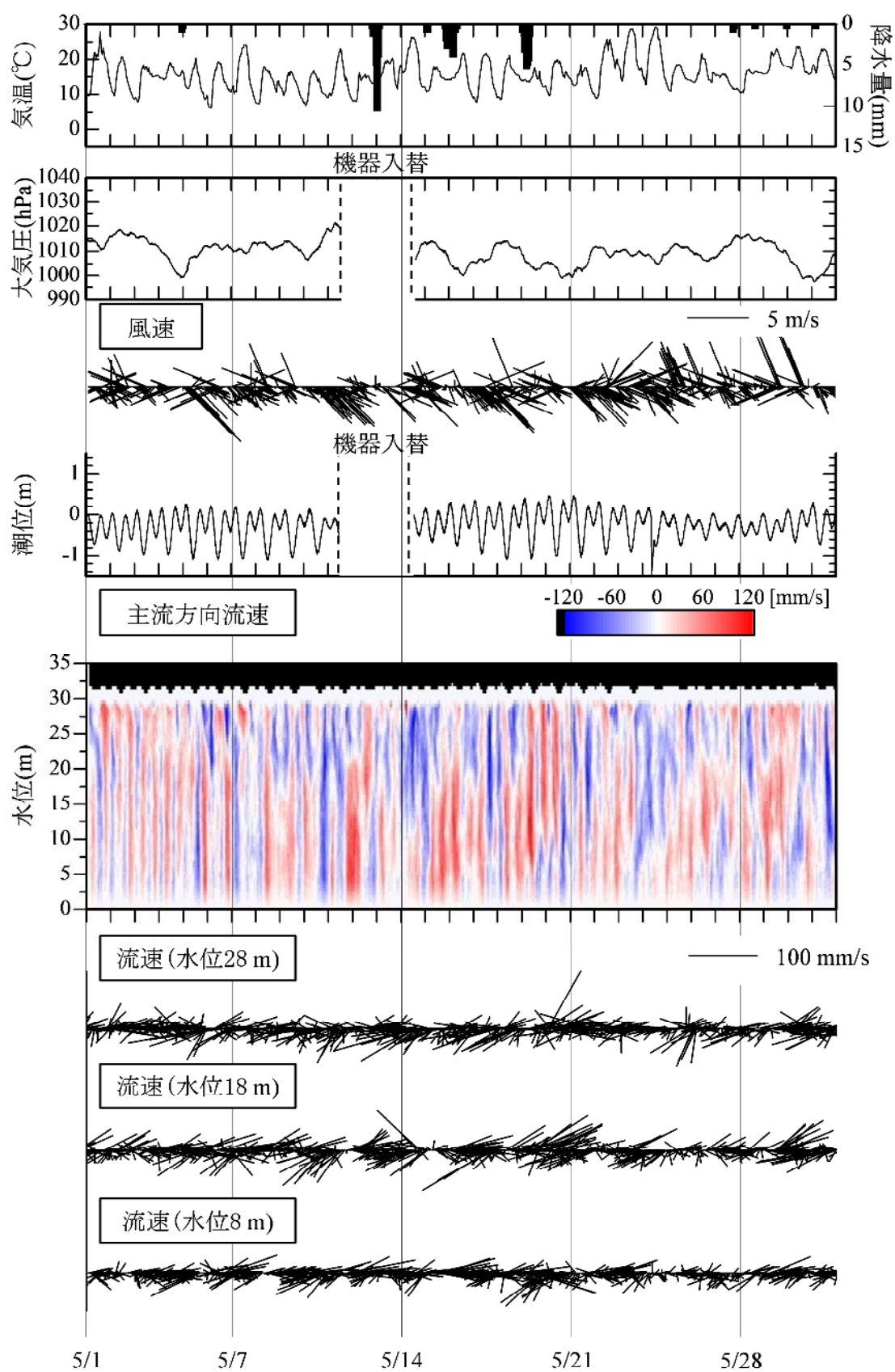


図 3-1-15 2015 年 5 月の気象と流速

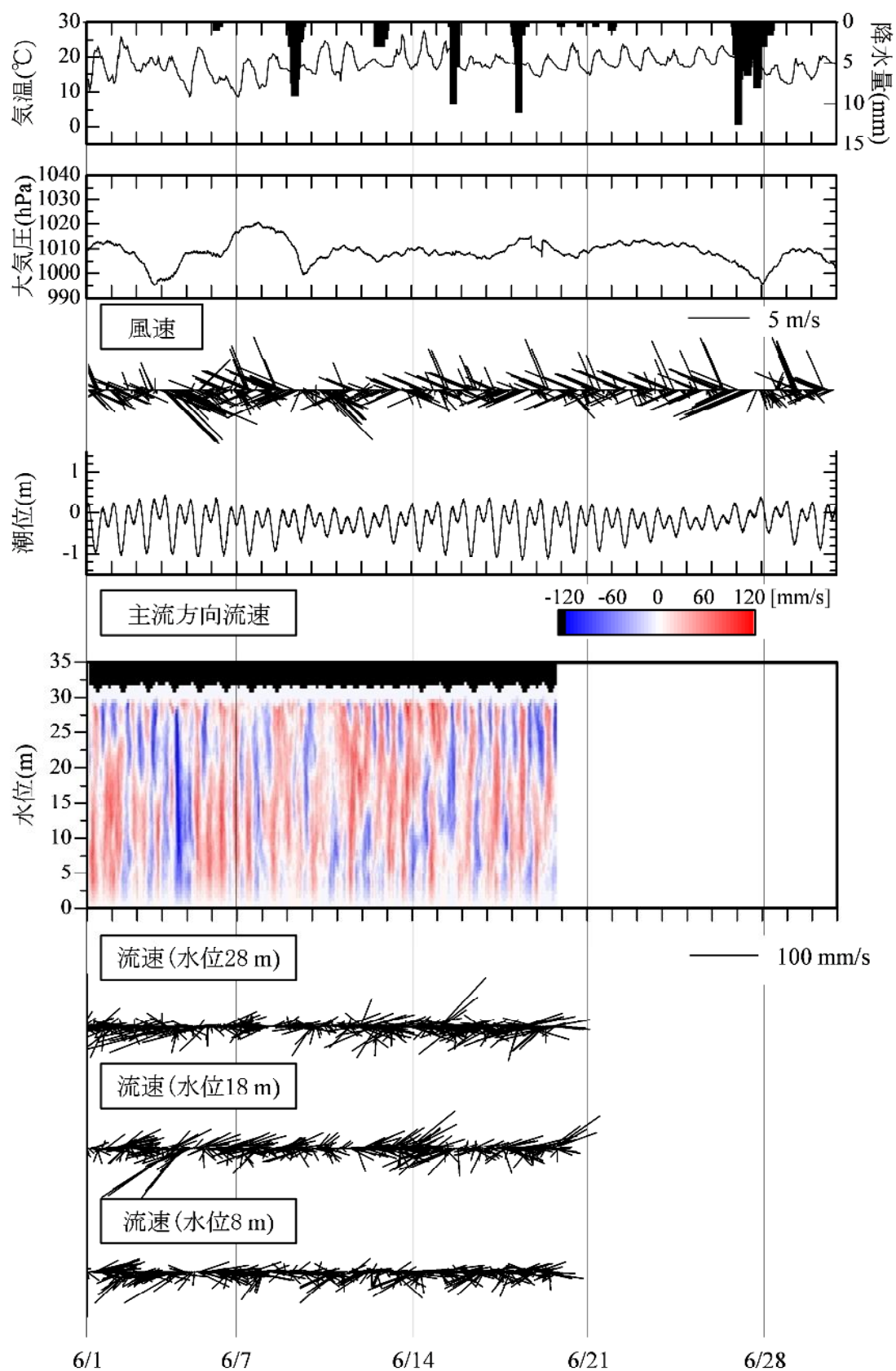


図 3-1-16 2014 年 6 月の気象と流速

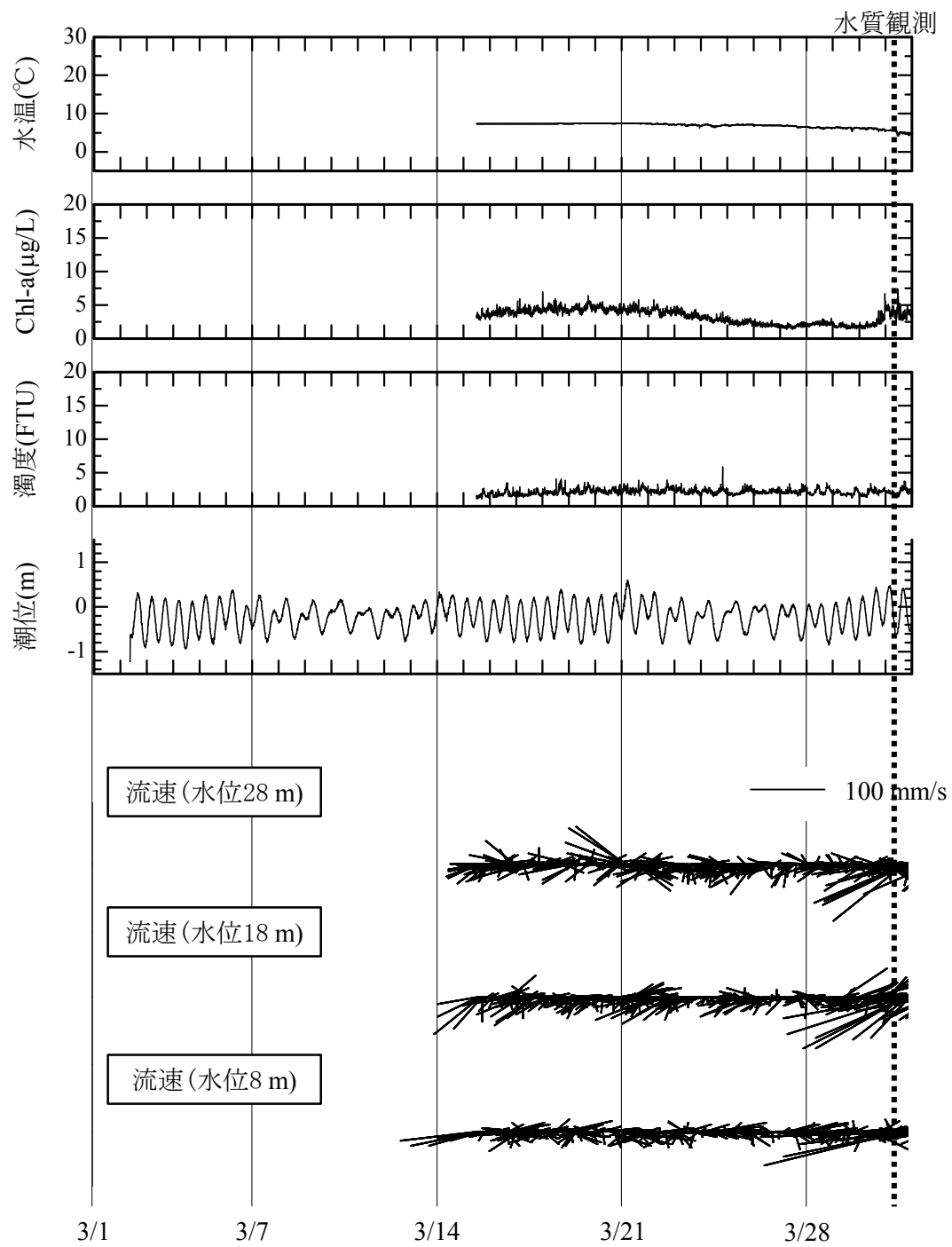


図 3-2-1 2014 年 3 月の流速と水位 5.6m 位置における水温, Chl-a, 濁度

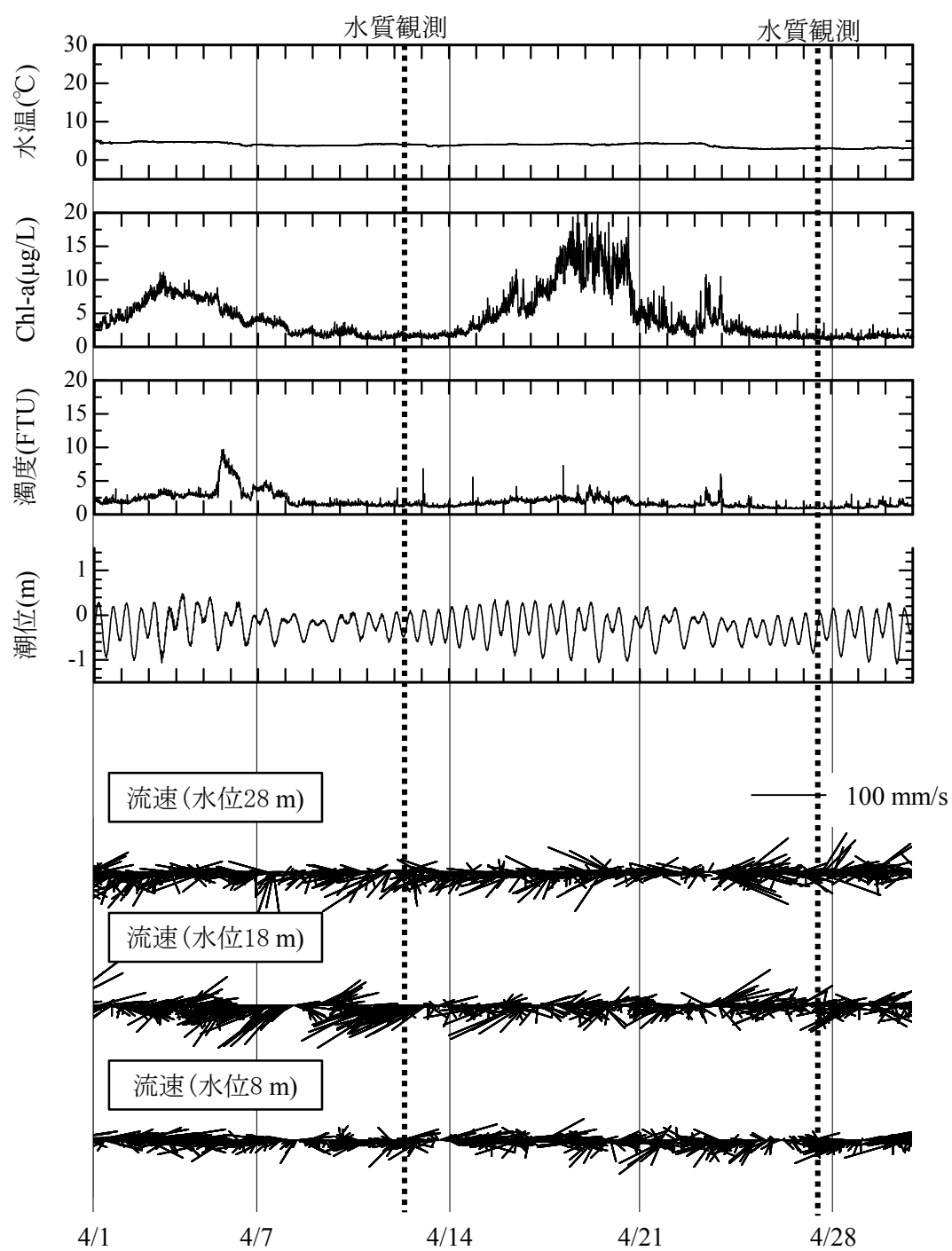


図 3-2-2 2014 年 4 月の流速と水位 5.6m 位置における水温, Chl-a, 濁度

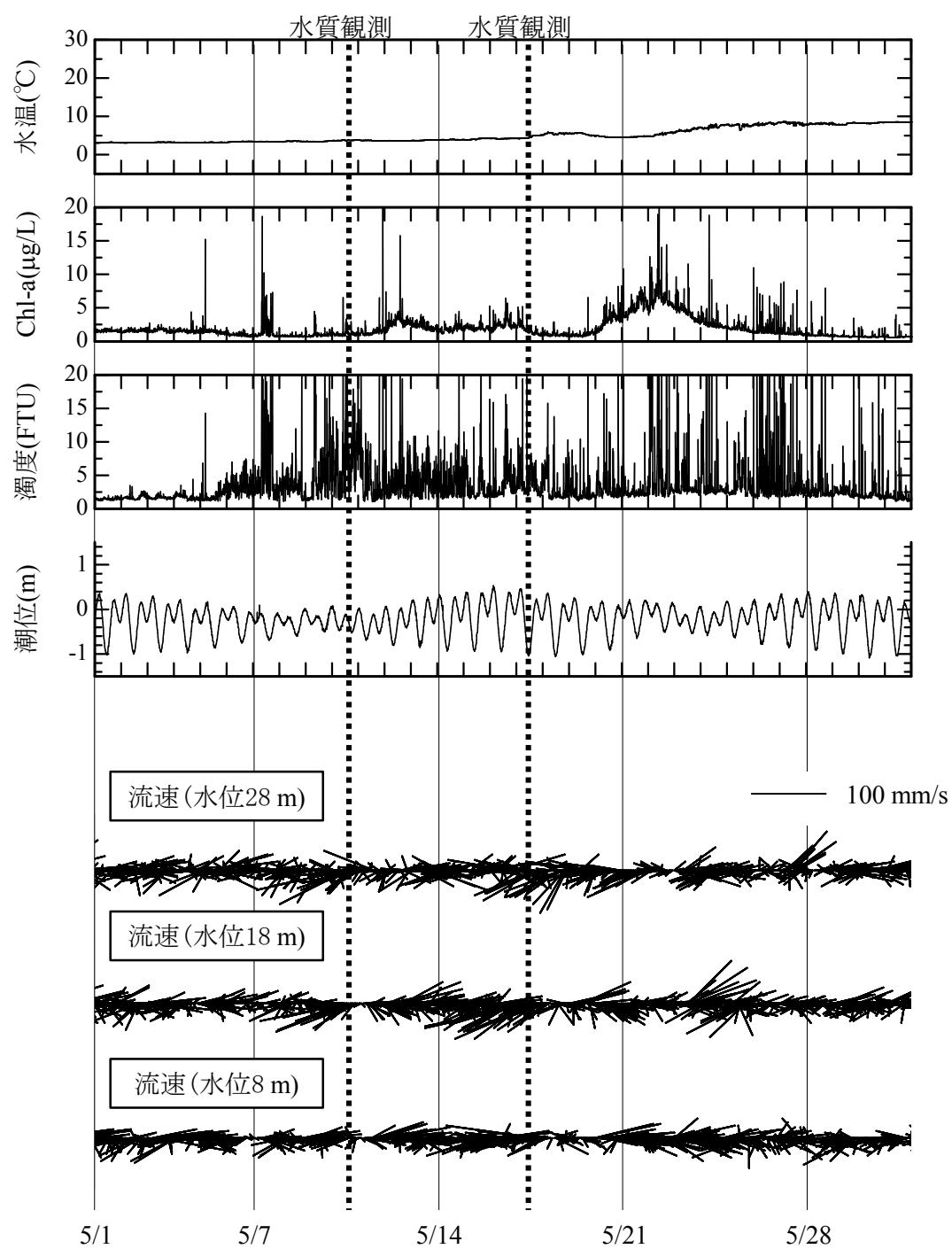


図 3-2-3 2014 年 5 月の流速と水位 5.6m 位置における水温, Chl-a, 濁度

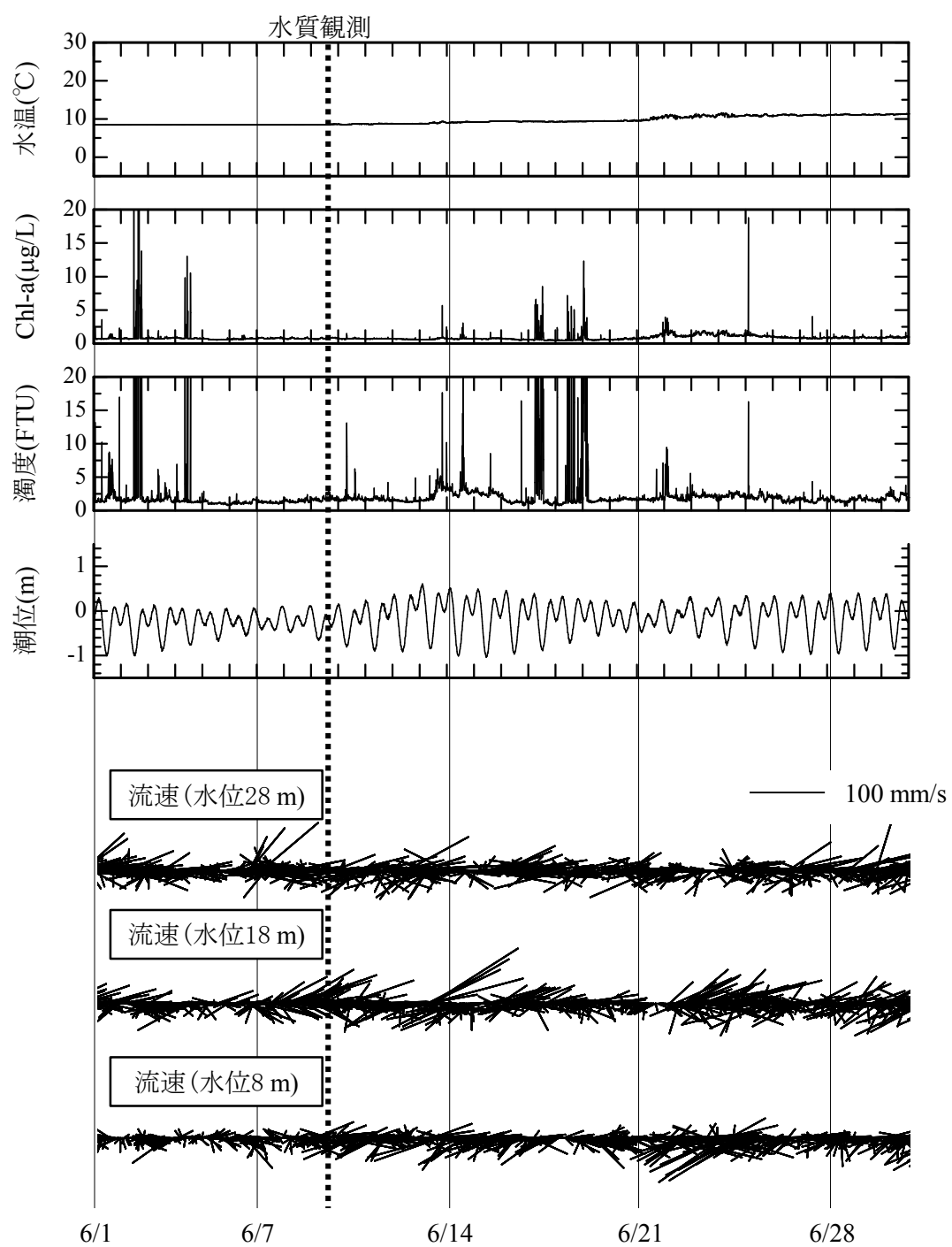


図 3-2-4 2014 年 6 月の流速と水位 5.6m 位置における水温, Chl-a, 濁度



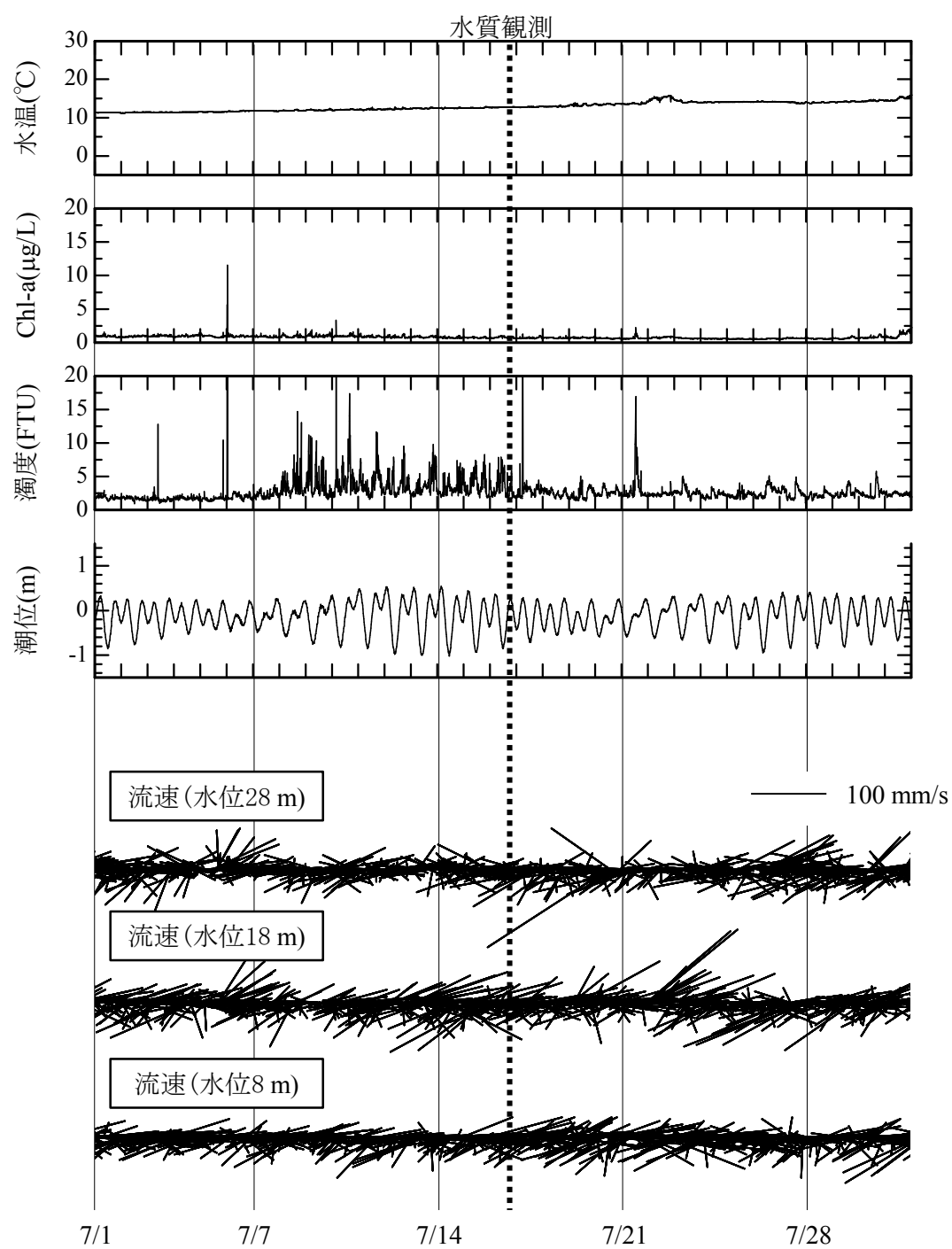


図 3-2-5 2014 年 7 月の流速と水位 5.6m 位置における水温, Chl-a, 濁度

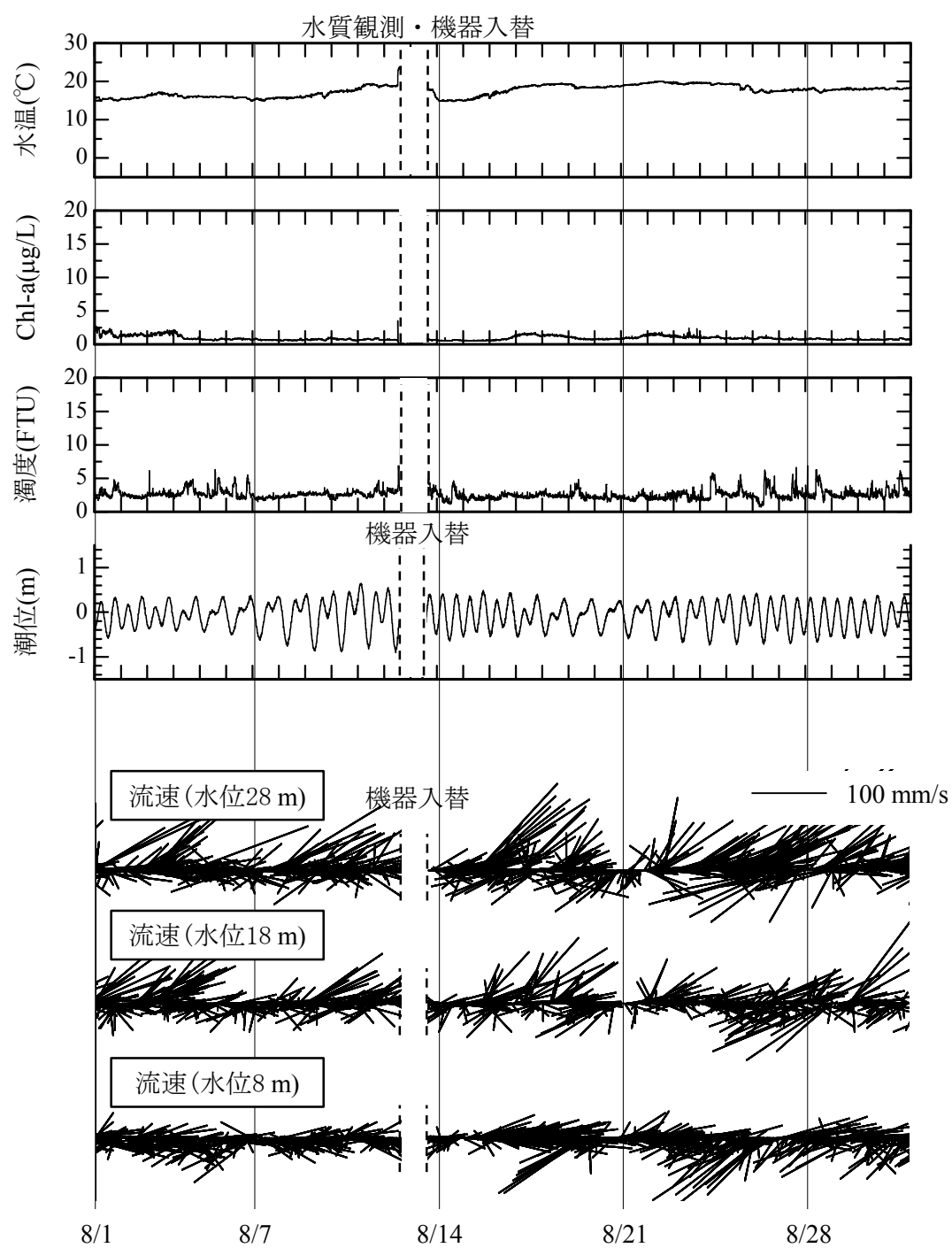


図 3-2-6 2014 年 8 月の流速と水位 5.6m 位置における水温, Chl-a, 濁度

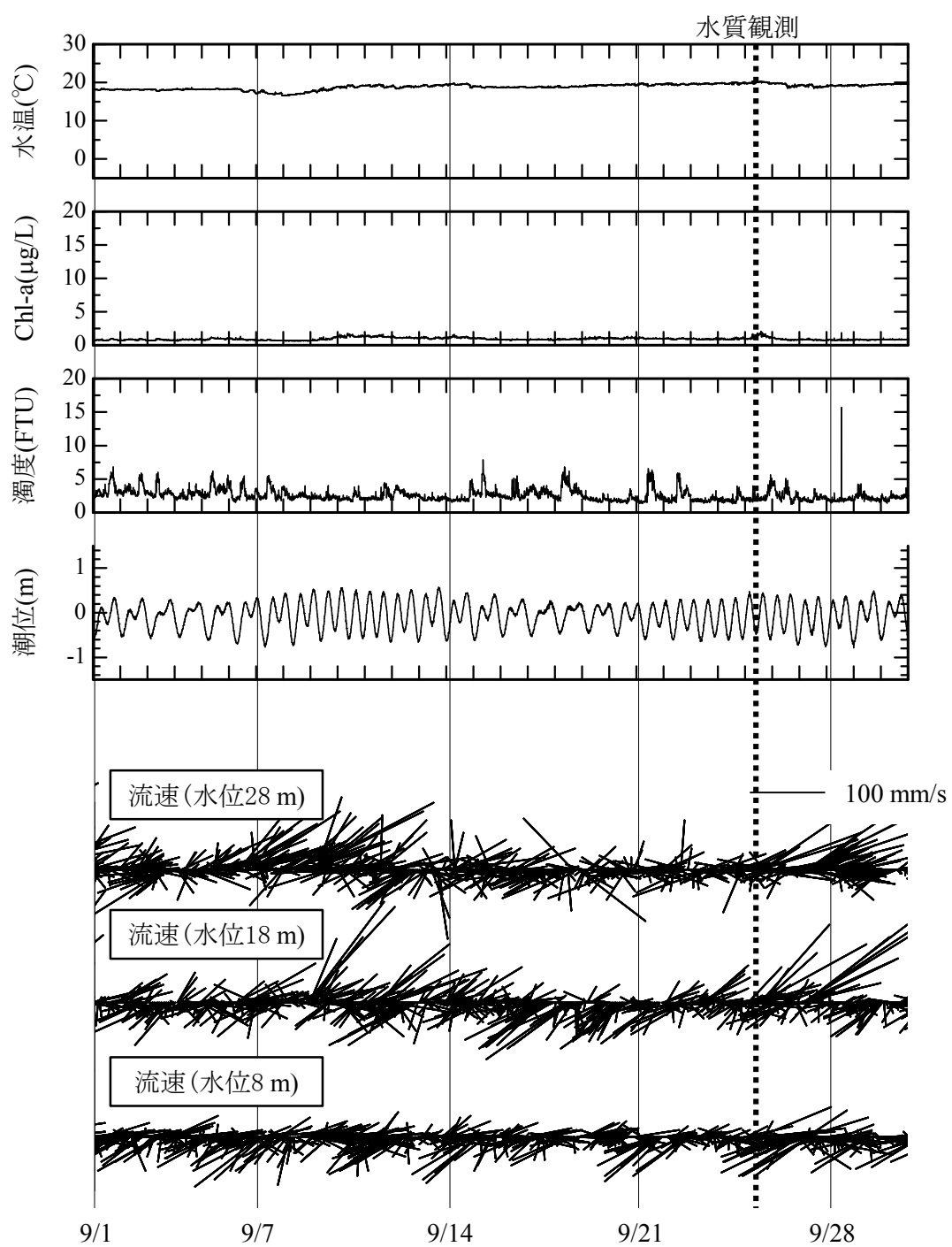


図 3-2-7 2014 年 9 月の流速と水位 5.6m 位置における水温, Chl-a, 濁度

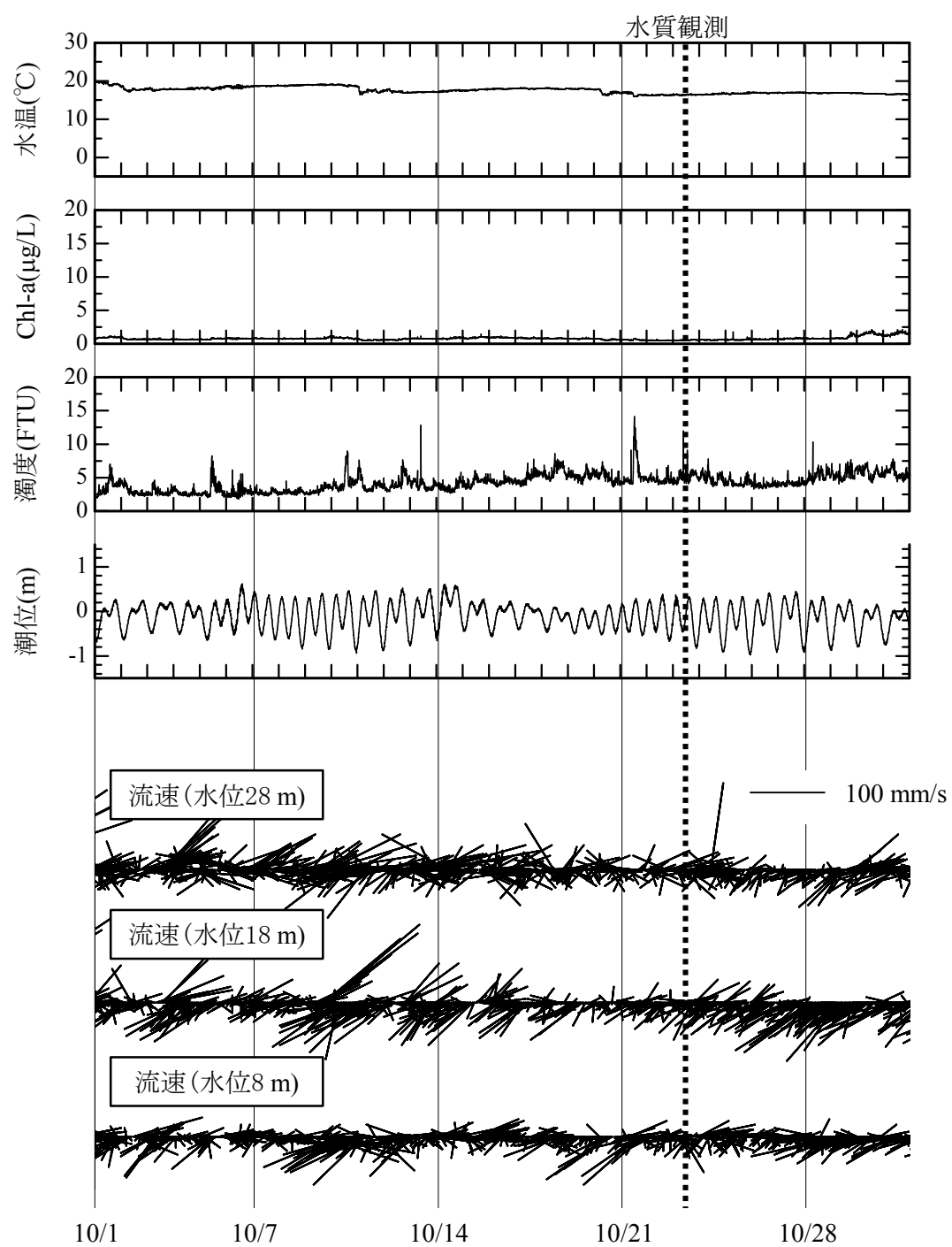


図 3-2-8 2014 年 10 月の流速と水位 5.6m 位置における水温, Chl-a, 濁度

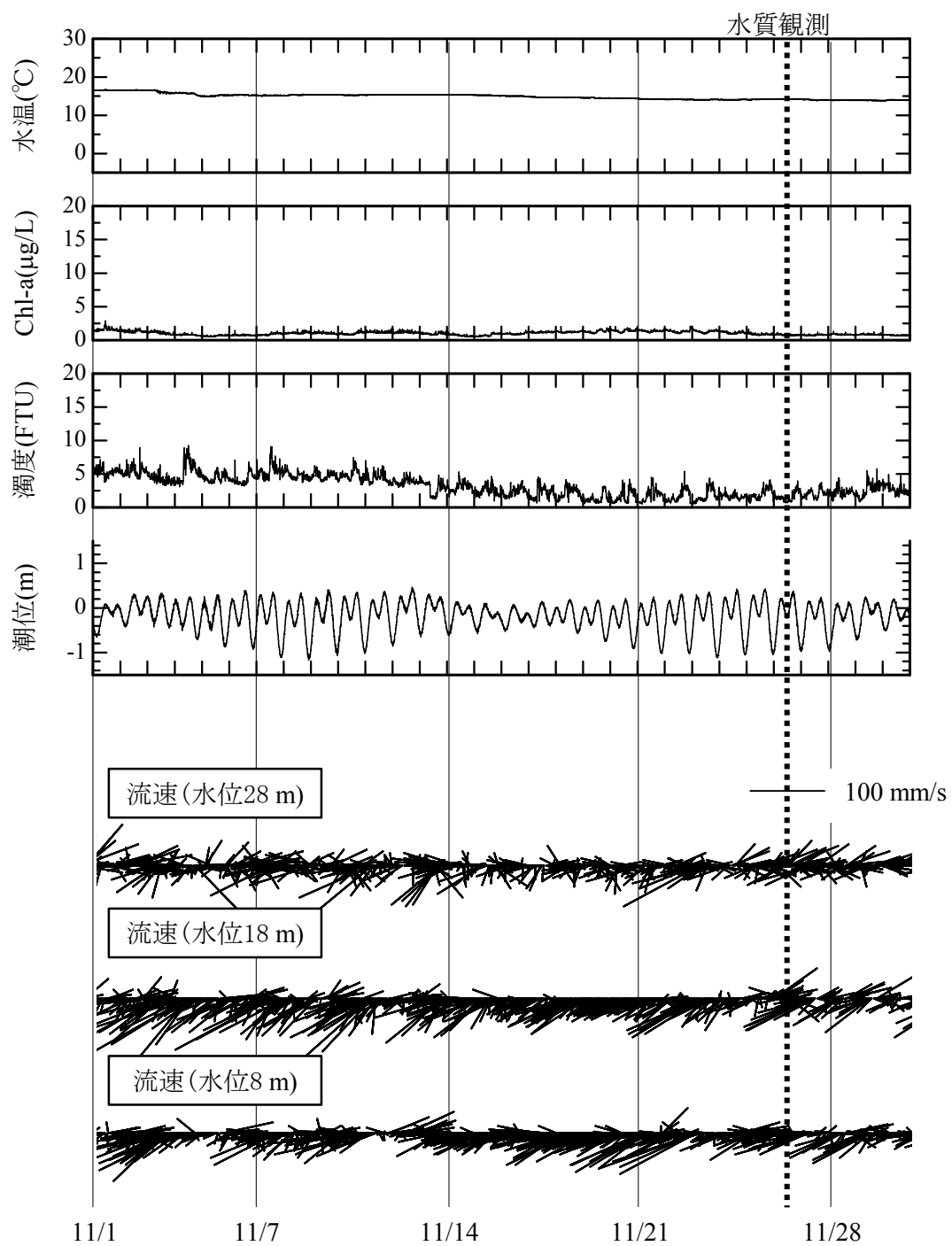


図 3-2-9 2014 年 11 月の流速と水位 5.6m 位置における水温, Chl-a, 濁度

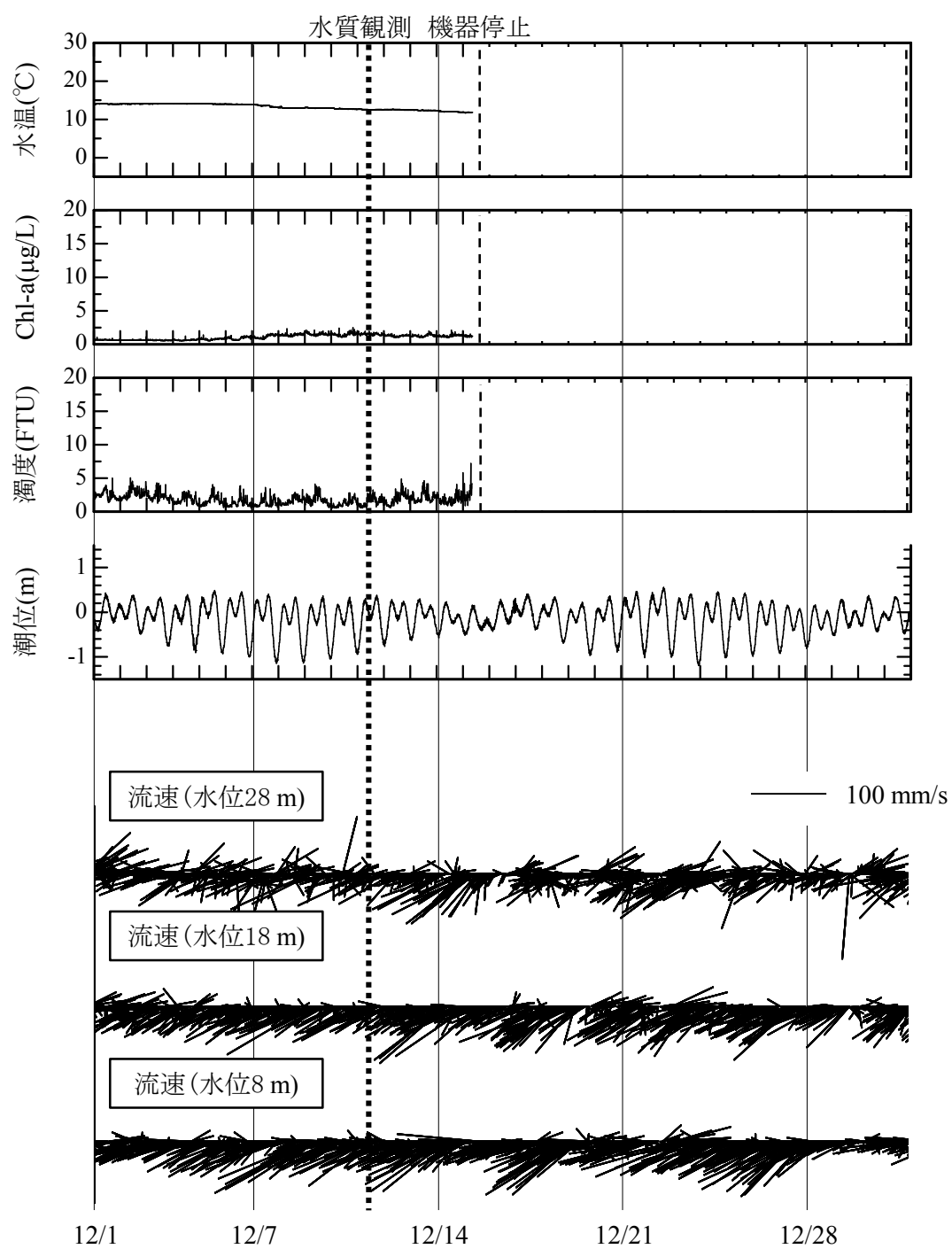


図 3-2-10 2014 年 12 月の流速と水位 5.6m 位置における水温, Chl-a, 濁度

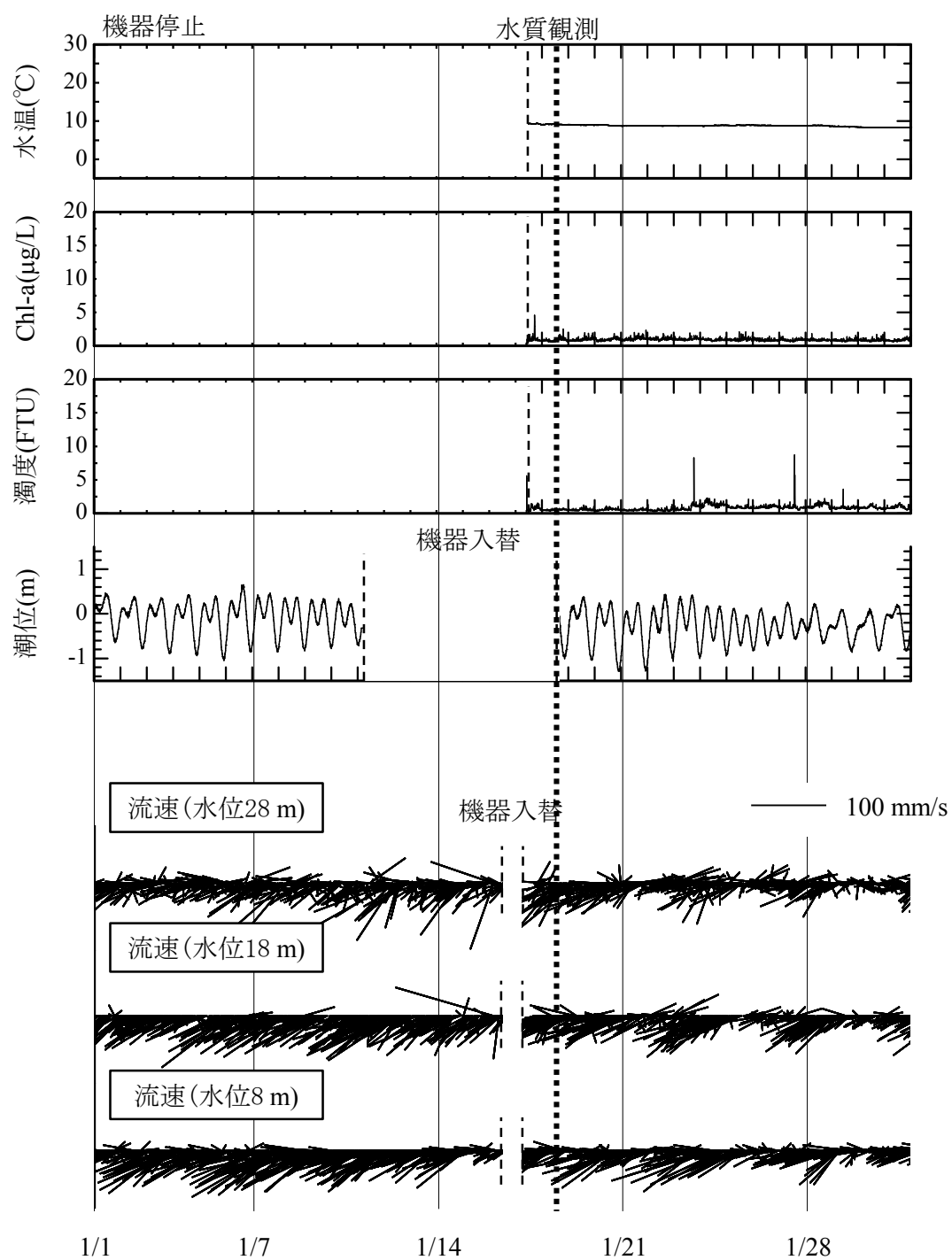


図 3-2-11 2015 年 1 月の流速と水位 5.6m 位置における水温, Chl-a, 濁度

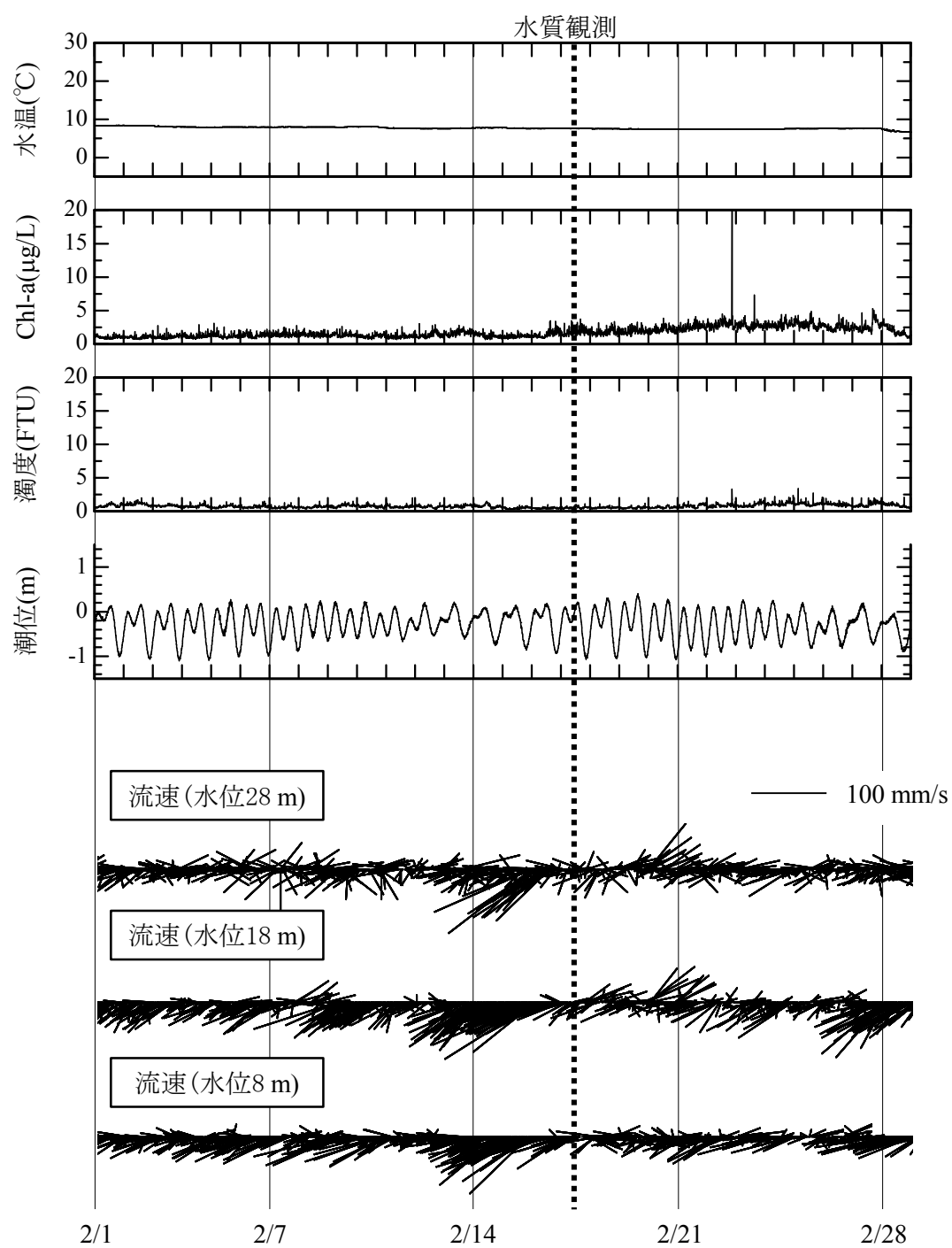


図 3-2-12 2015 年 2 月の流速と水位 5.6m 位置における水温, Chl-a, 濁度



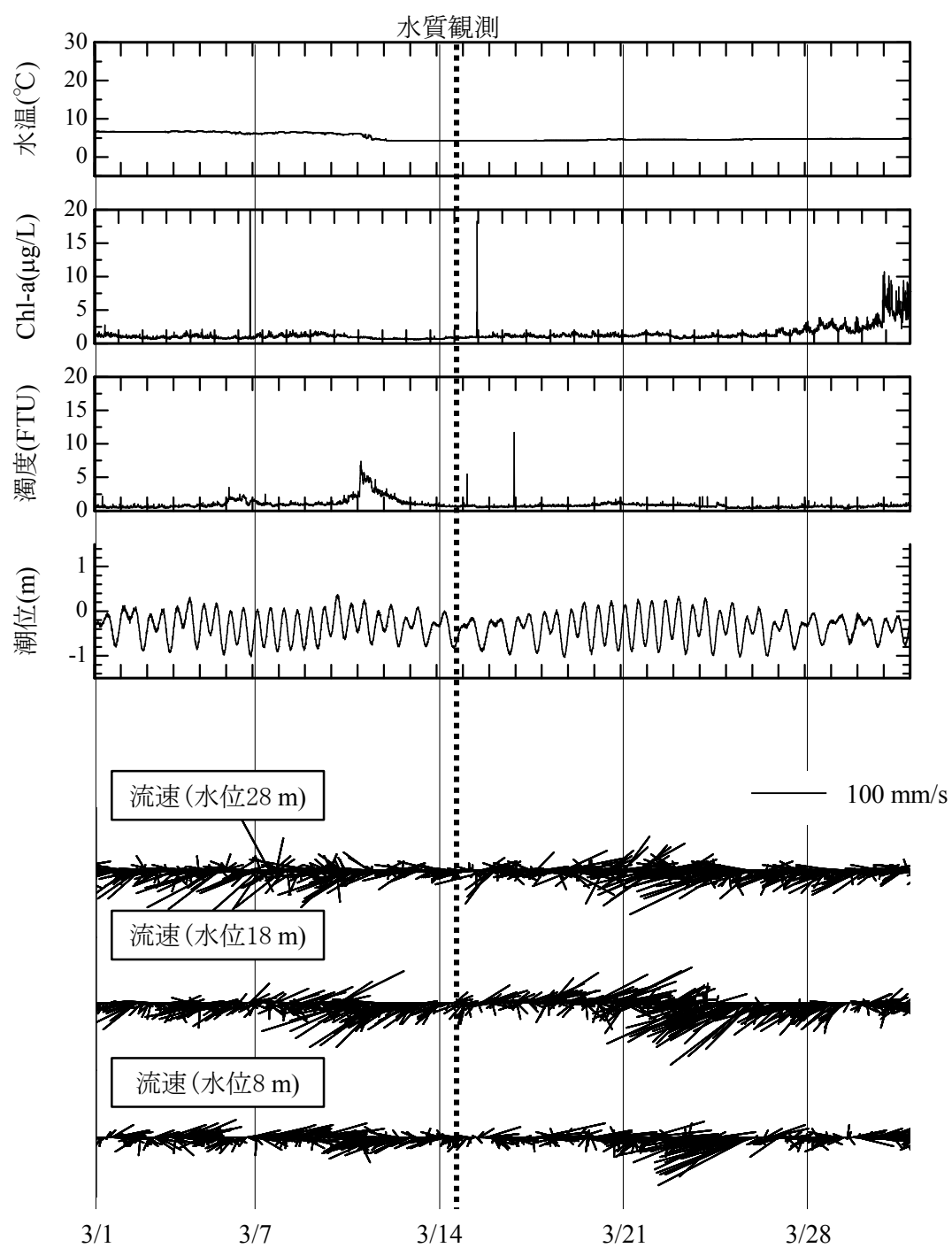


図 3-2-13 2015 年 3 月の流速と水位 5.6m 位置における水温, Chl-a, 濁度

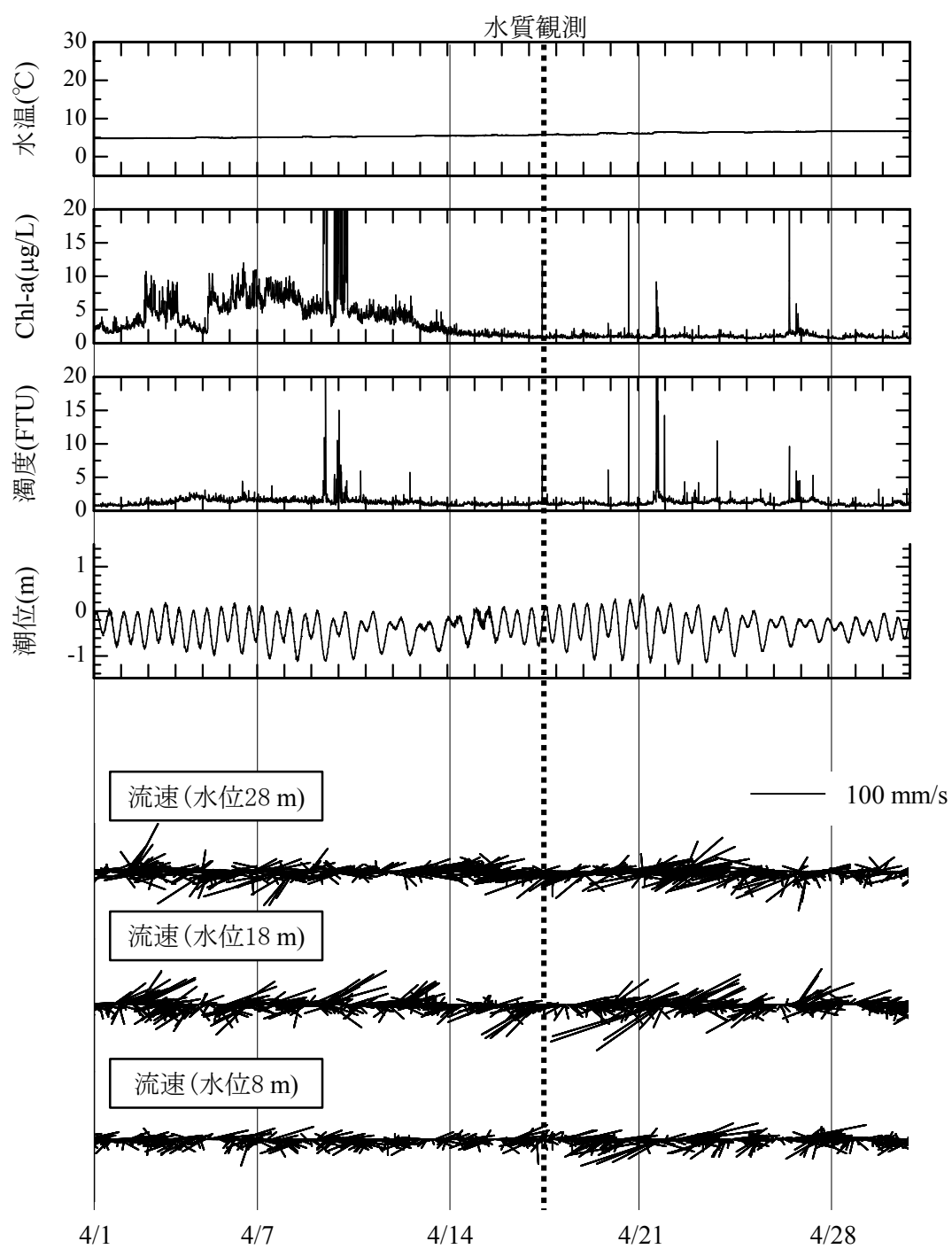


図 3-2-14 2015 年 4 月の流速と水位 5.6m 位置における水温, Chl-a, 濁度

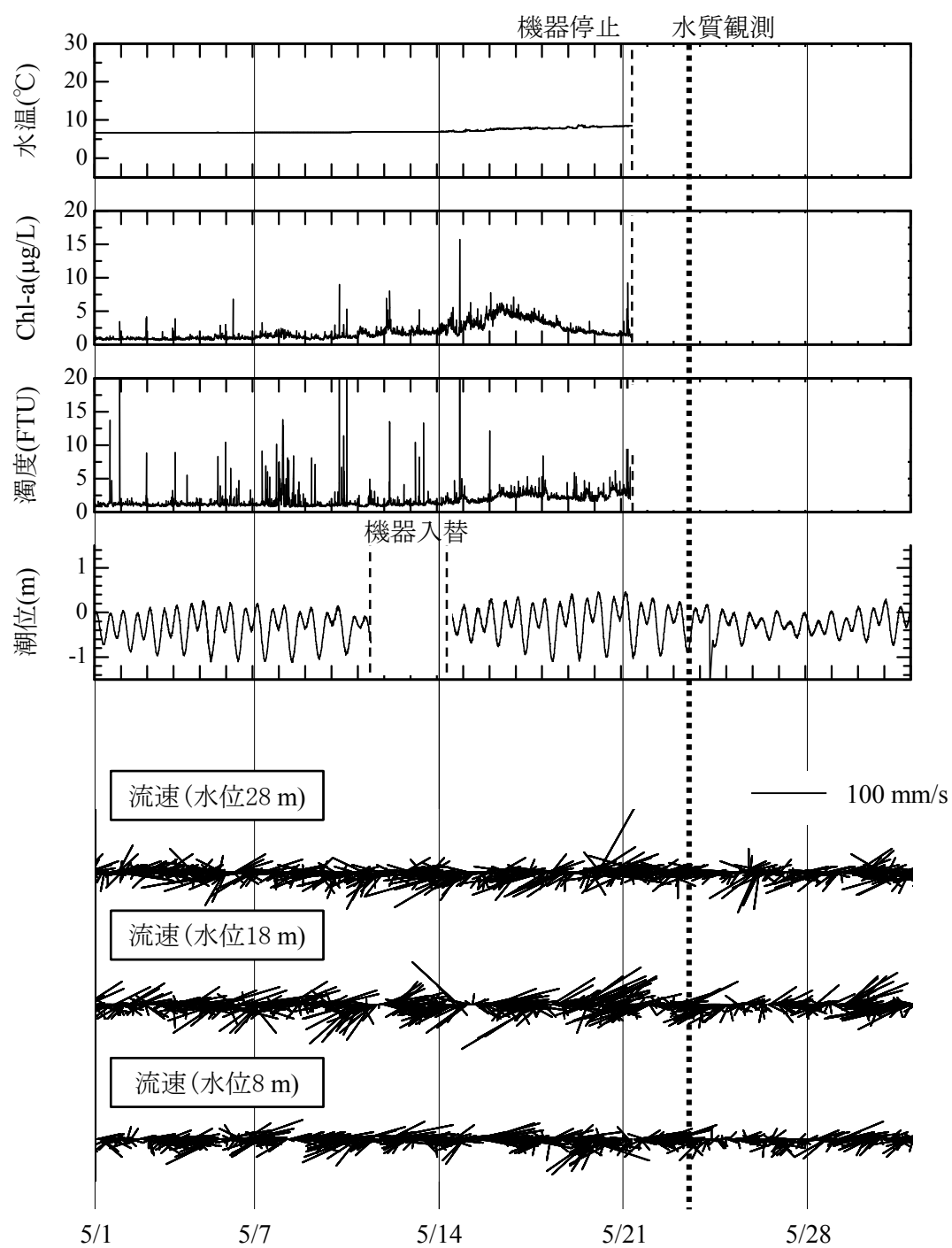


図 3-2-15 2015 年 5 月の流速と水位 5.6m 位置における水温, Chl-a, 濁度

### 3-2 スペクトル解析

流速の構成成分について調べるため、2014/3/15～8/12、2014/8/13～2015/1/16、2015/1/17～2015/6/15 の 3 つの観測期間ごとにスペクトル解析を行った。結果を図 3-2-1～図 3-2-3 に示す。

12.5 時間の周期がいずれの期間、水深でも卓越して現れた。25 時間の周期も 2014/3/15～8/12 の期間は水深 10 m まで、2014/8/13～2015/1/16 の期間は全ての水深で、2015/1/17～2015/6/15 の期間は水深 15 m までの層で、卓越して現れており、表層から中層にかけて内部潮汐波が起こっていたことが考えられる。いずれも潮汐の周期であり、流速の変動に最も強く影響を与えているのは月の引力によって起こる M2 分潮であることが分かった。

仙台湾では（八木ら，2012）19.5 時間の慣性周期がみられるが、東湾と西湾を繋ぐ位置にある本調査地点では慣性振動のような周期はみられなかった。

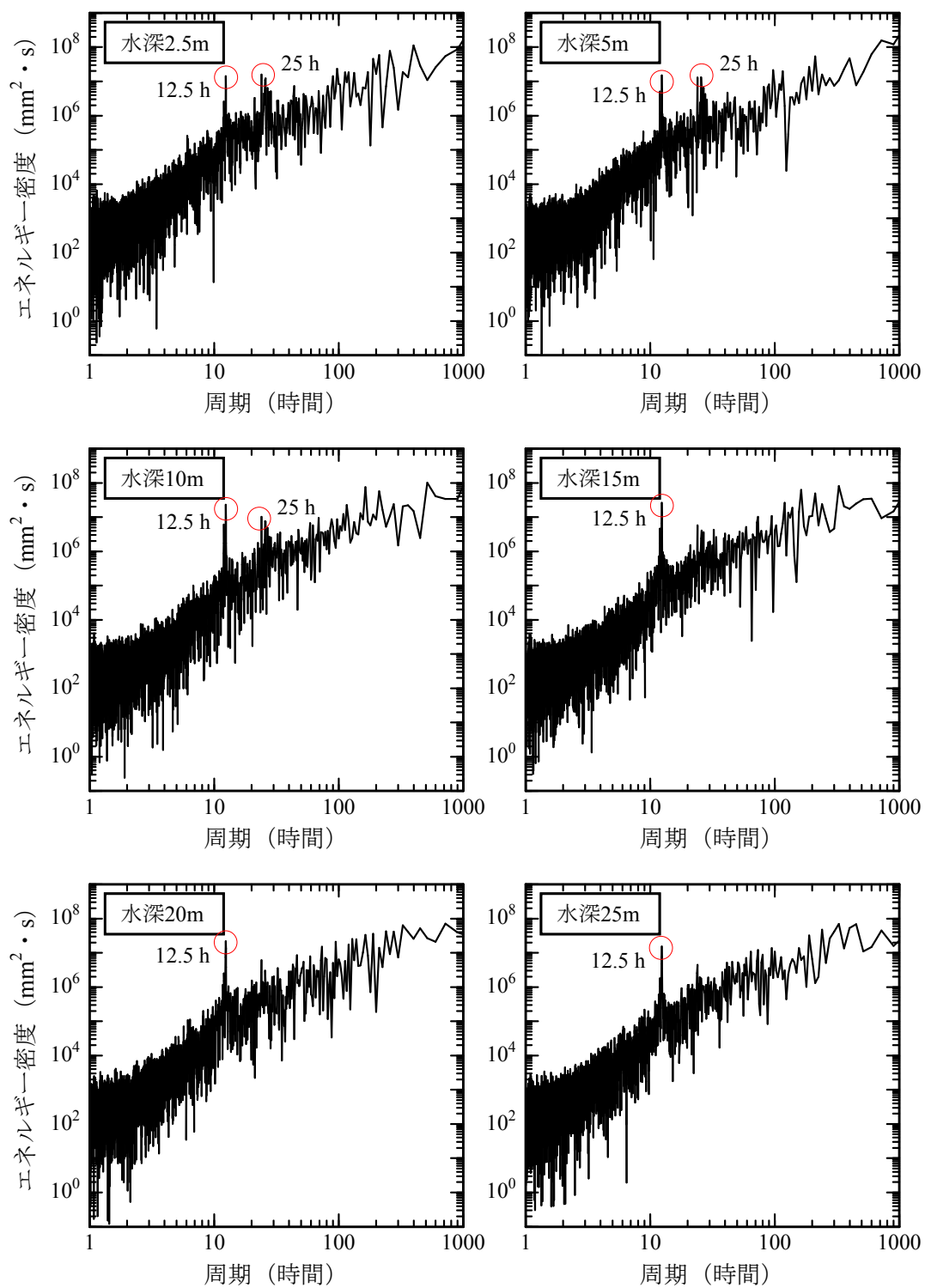


図 3-2-1 2014/3/15～2014/8/12 のスペクトル解析結果

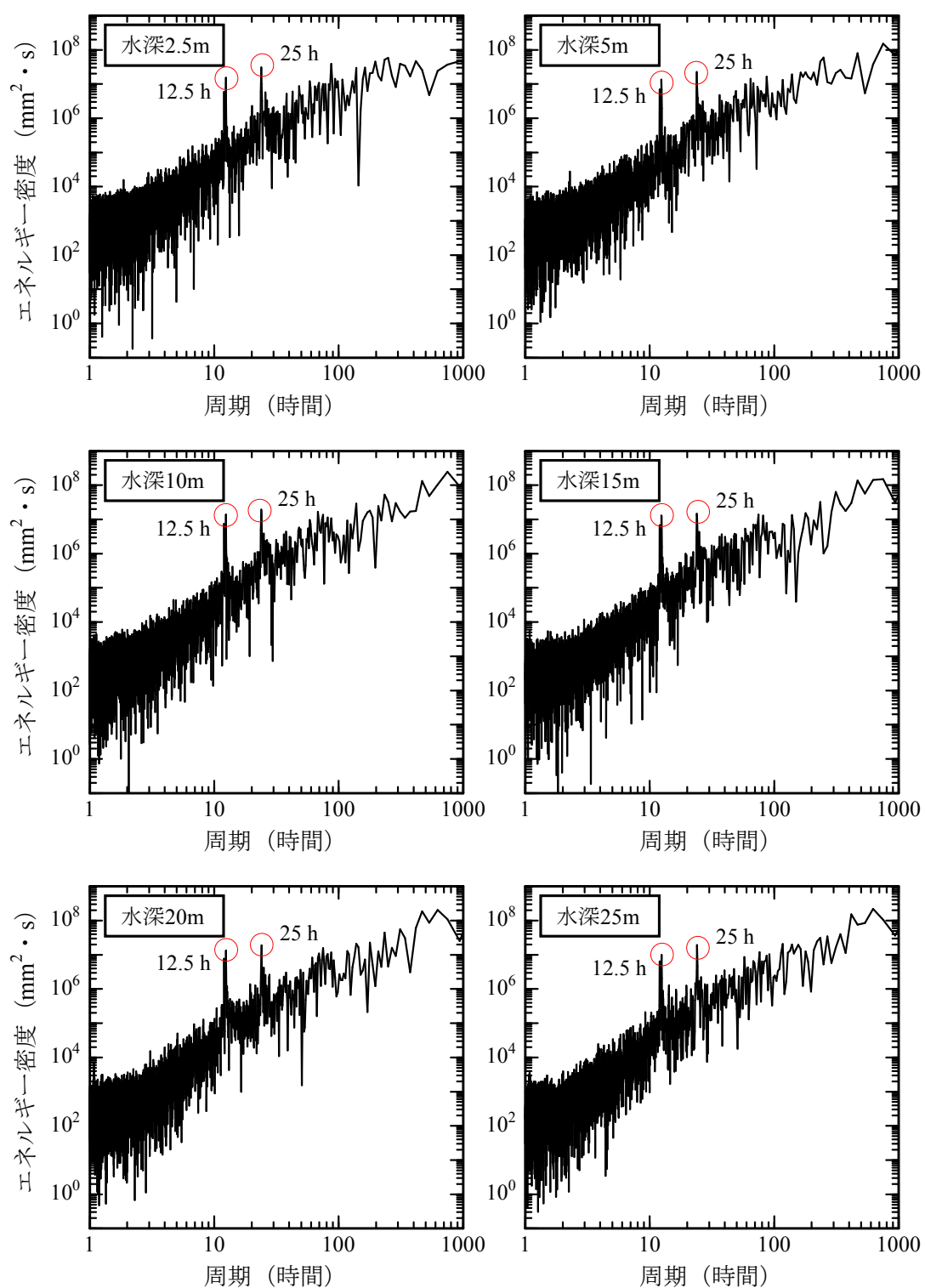


図 3-2-2 2014/8/13～2015/1/16 のスペクトル解析結果

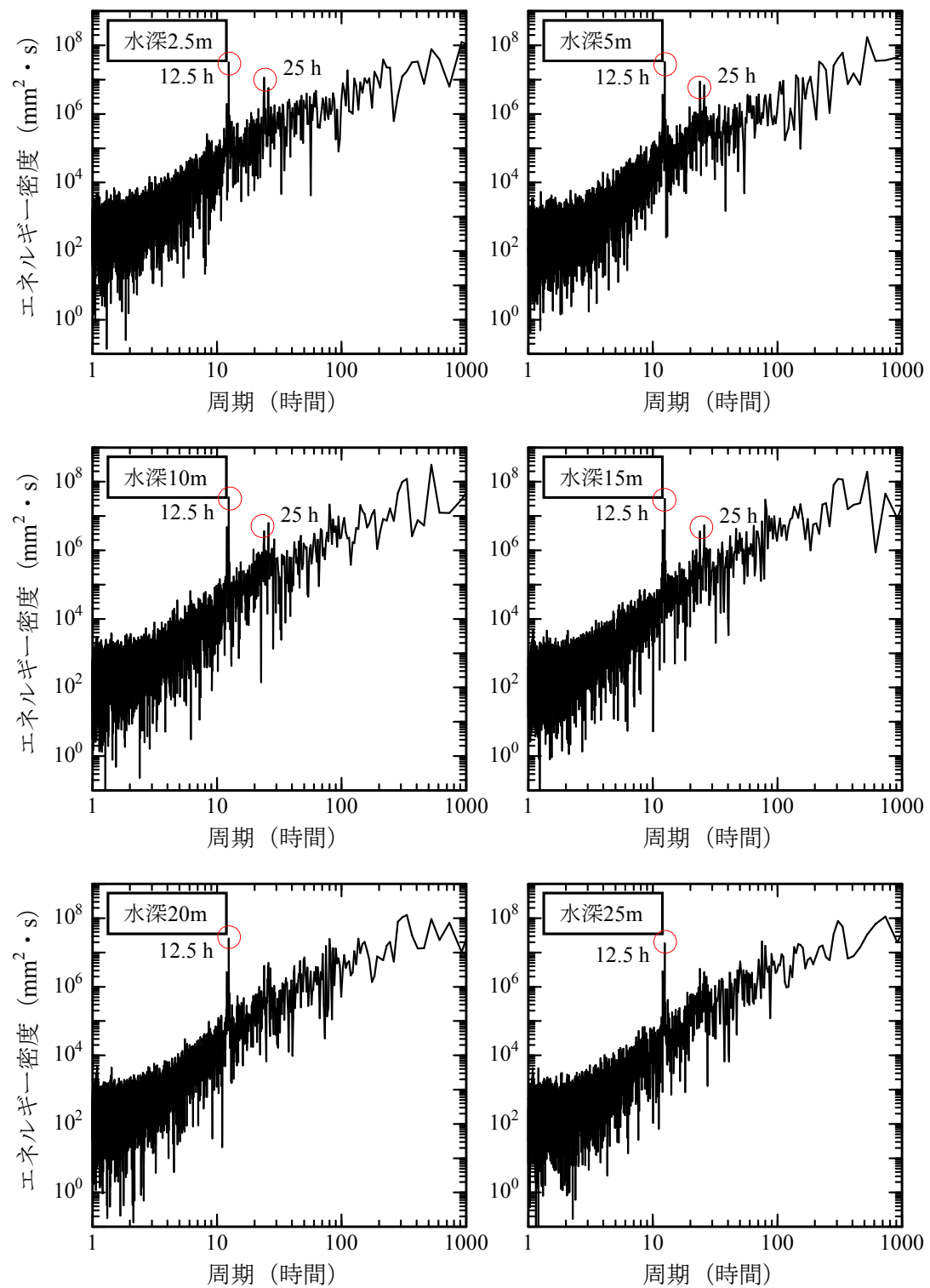


図 3-2-3 2015/1/17～2015/6/15 のスペクトル解析結果

### 3-3 潮汐流と残差流

流速を潮流成分と残差流成分に分解した。残差流は生データを 25 時間の移動平均をかけた値であり、流速から残差流成分を除いたものが潮流成分となり、以下の式で表される。

$$v = v' + \bar{v}$$

$v$ は流速、 $v'$ は潮流成分、 $\bar{v}$ は残差流成分である。

潮流成分、残差流成分についてそれぞれ正方向と負方向に分けて層別に月平均流速を求めた（図 3-3～図 3-4）。潮流成分は、底層より表層で大きくなる傾向があり、7 月と 12 月にわずかに大きくなるものの、1 年を通じてほぼ  $\pm 20$  mm/s の範囲で推移していた。

残差流成分は月ごとに変動があり、また表層と底層でそれぞれ違う傾向がみられた。全体の傾向として 4 月から 9 月は正方向成分が卓越し、8 月に最大値をとり、表層では 32.3 mm/s となった。10 月から 3 月は負方向が卓越し、12 月に最大値をとり、底層では -43.2 mm/s となった。

層別にみると、2014 年 3 月から 5 月は表層で負方向、底層で正方向が卓越する 2 層構造がみられ、6 月から 9 月に全層で正方向が卓越していた。10 月から 11 月は表層で正方向、底層で負方向が卓越する 2 層構造がみられ、12 月から 3 月は全層で負方向が卓越していた。2015 年 4 月から 5 月は表層で負方向、底層で正方向が卓越する 2 層構造となり、6 月に全層で正方向が卓越していた。これより、正方向が卓越する 6 月から 9 月と、負方向が卓越する 12 月から 3 月の間は、底層から流向の変化が起き、2 層構造を示していると考えられる。



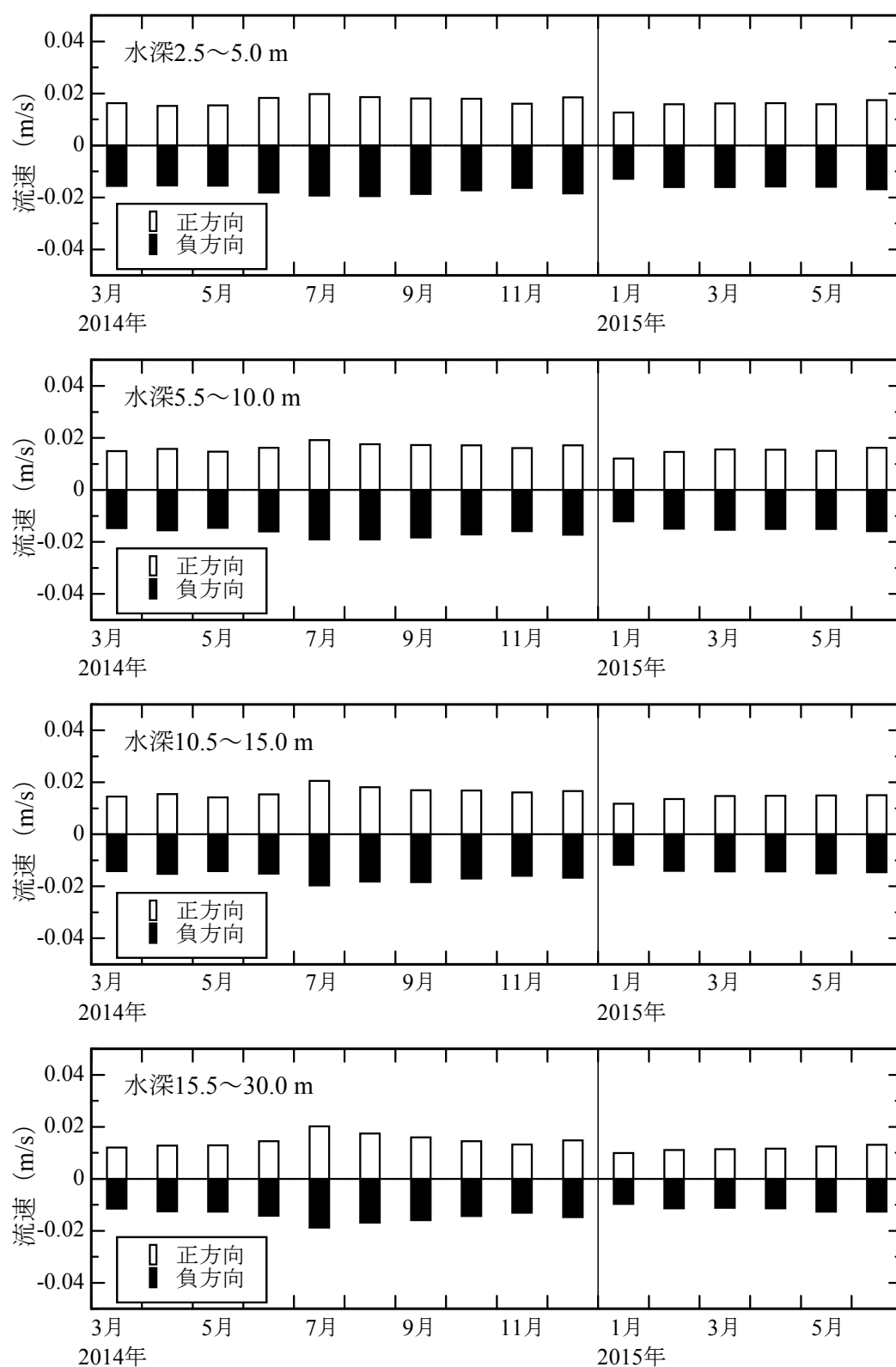


図 3-3 潮流成分の層別月平均流速

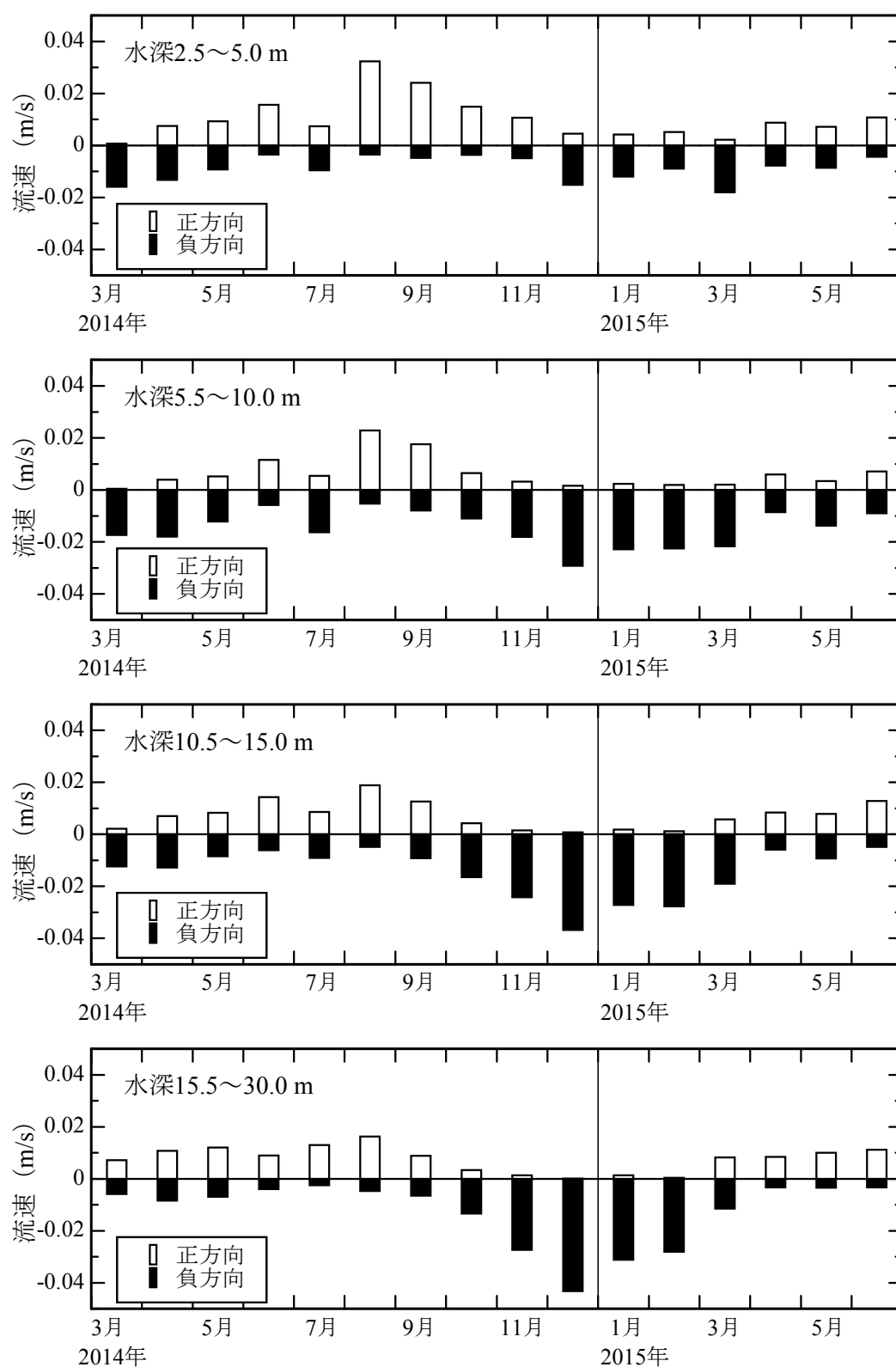


図 3-4 残差流成分の層別月平均流速

## 第四章 植物プランクトンの輸送

### 4-1 クロロフィル蛍光値の変換

多項目水質計で得られたクロロフィル蛍光値は、発生している植物プランクトンの種類や優占種によって影響を受けるため、信頼性のあるクロロフィル濃度に変換するために、現場で採水を行い、検量線を作成する必要がある。各調査日に 4 地点・3 水深で採水分析したクロロフィル濃度とそのときの多項目水質計のクロロフィル蛍光値の相関を調べた（図 4-1-1～図 4-1-4）。これより、相関関係は年間を通じて 1 つに統一されるわけではなく、概ね 4 つの傾きに分類されることが分かった。採水を行っていない観測日については、同じ月のグループ分けに準ずるか、前後の月のグループ分けからグループを決定した。どのグループに属するかは季節的な特徴はみられなかったが、1 つのグループが 6 ヶ月続くこともあり、植物プランクトン分布に関わる水質環境の変化周期は数ヶ月単位である可能性を示していた。

そこで、相関の傾きが類似している日付のデータを重ね合わせて、4 分類すると図 4-2 が得られた。さらに、相関関係は次式で表され、それぞれの式の対応日は表 4-1 のようになった。ここで、 $y$  がクロロフィル濃度、 $x$  がクロロフィル蛍光値である。

$$y = 1.0x \quad \dots (1)$$

$$y = 1.3x + 0.04x^2 \quad \dots (2)$$

$$y = 2.0x + 0.02x^2 \quad \dots (3)$$

$$y = 2.4x + 0.17x^2 \quad \dots (4)$$

式 (1) の決定係数  $R^2$  は 0.57、式 (2) は 0.25、式 (3) は 0.97、式 (4) は 0.81 であった。以上の式 (1) ～ (4) を用いて、多項目水質計のクロロフィル蛍光値をクロロフィル濃度に変換し、鉛直分布データを作成した。

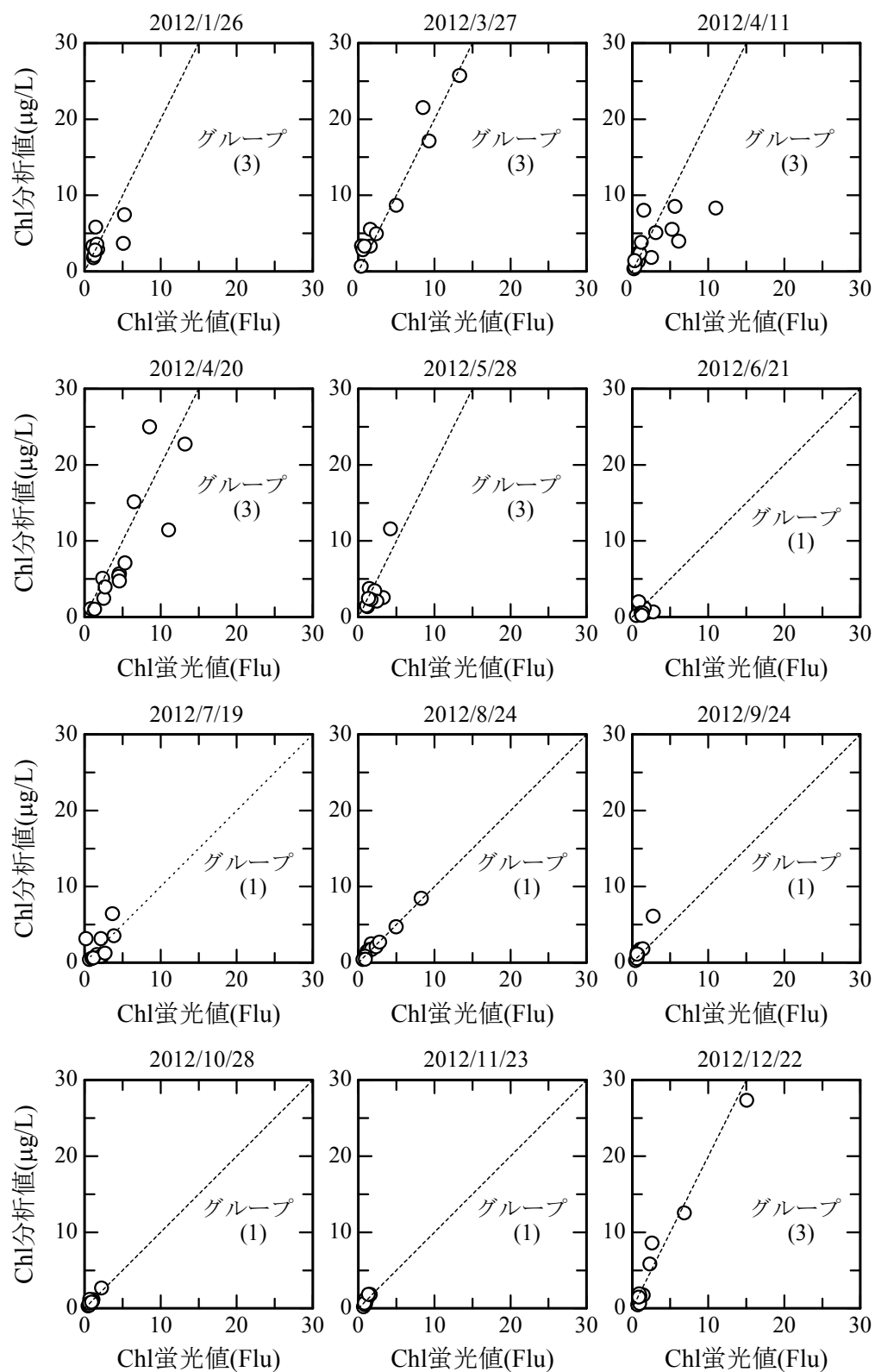


図 4-1-1 クロロフィル蛍光値とクロロフィル濃度分析値の相関（2012 年）

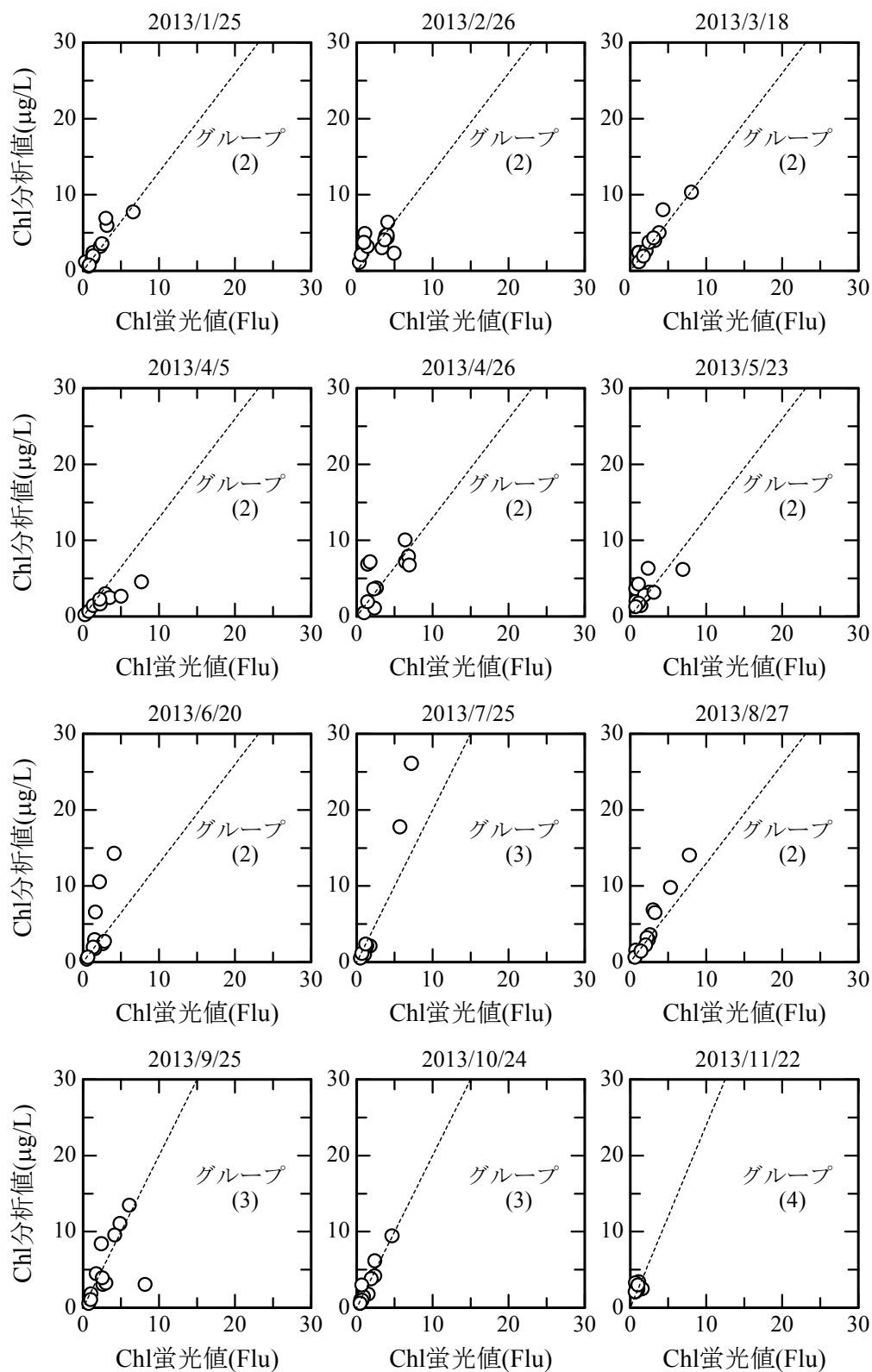


図 4-1-2 クロロフィル蛍光値とクロロフィル濃度分析値の相関 (2013 年)

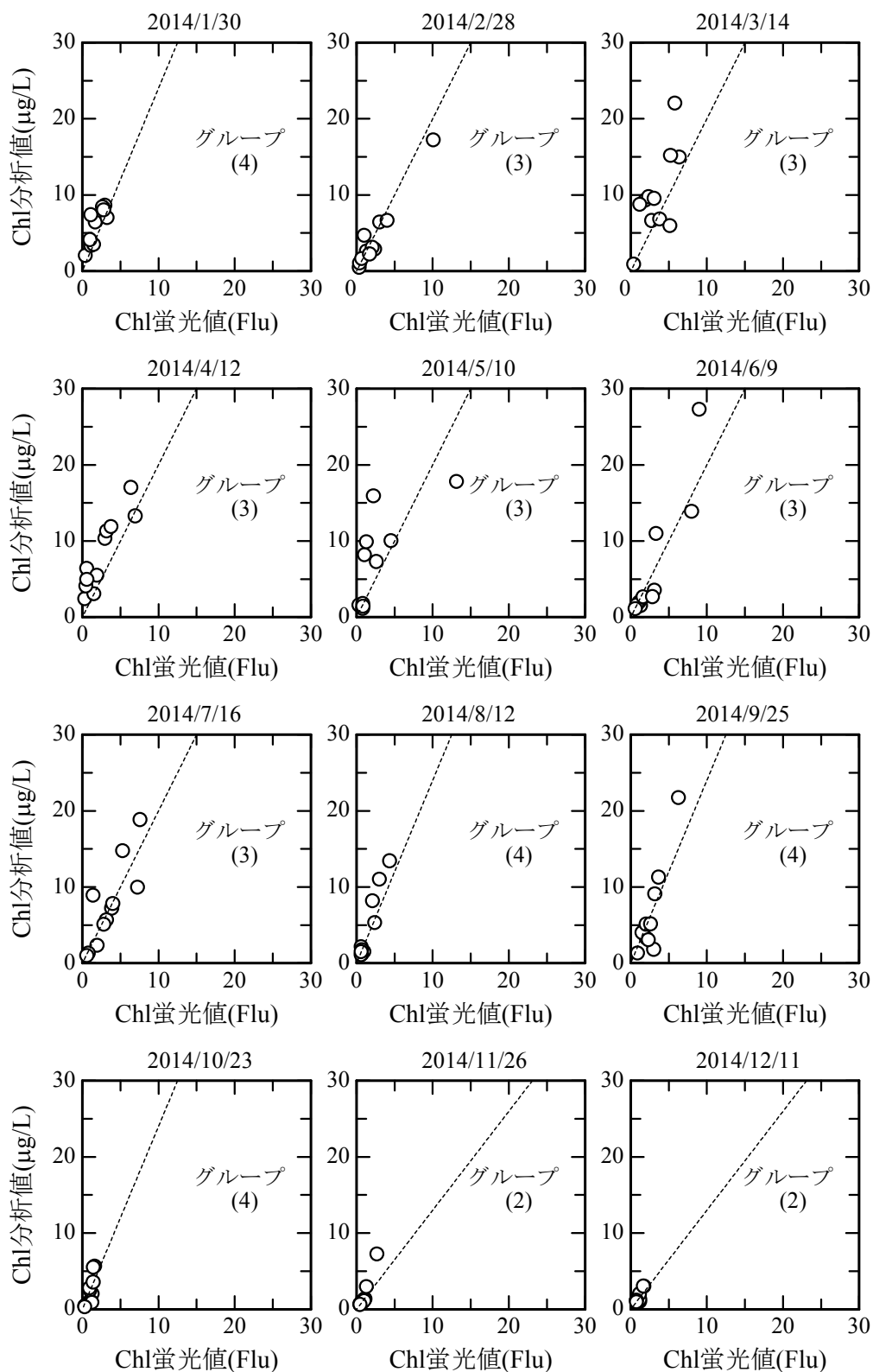


図 4-1-3 クロロフィル蛍光値とクロロフィル濃度分析値の相関 (2014 年)

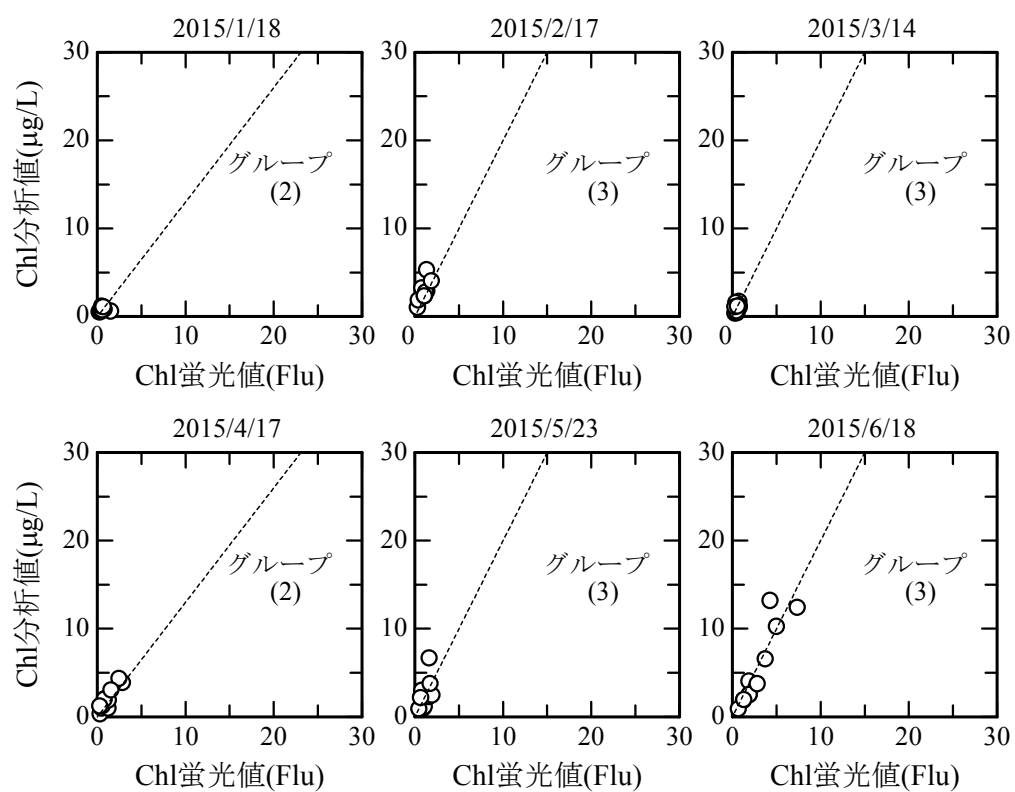


図 4-1-4 クロロフィル蛍光値とクロロフィル濃度分析値の相関（2015 年）

表 4-1 観測日とクロロフィル変換式の一覧

観測日	グループ	クロロ変換式	備考
2012/1/26	(3)	$y=2.0x+0.02x^2$	採水分析
2012/3/14	(3)	$y=2.0x+0.02x^2$	2012/3/24 と同グループ
2012/3/27	(3)	$y=2.0x+0.02x^2$	採水分析
2012/4/11	(3)	$y=2.0x+0.02x^2$	採水分析
2012/4/20	(3)	$y=2.0x+0.02x^2$	採水分析
2012/5/4	(3)	$y=2.0x+0.02x^2$	2012/5/28 と同グループ
2012/5/28	(3)	$y=2.0x+0.02x^2$	採水分析
2012/6/21	(1)	$y=1.0x$	採水分析
2012/7/18	(1)	$y=1.0x$	採水分析
2012/8/24	(1)	$y=1.0x$	採水分析
2012/9/25	(1)	$y=1.0x$	採水分析
2012/10/28	(1)	$y=1.0x$	採水分析
2012/11/23	(1)	$y=1.0x$	採水分析
2012/12/22	(3)	$y=2.0x+0.02x^2$	採水分析
2013/1/24	(2)	$y=1.3x+0.04x^2$	採水分析
2013/2/26	(2)	$y=1.3x+0.04x^2$	採水分析
2013/3/18	(2)	$y=1.3x+0.04x^2$	採水分析
2013/4/6	(2)	$y=1.3x+0.04x^2$	採水分析
2013/4/25	(2)	$y=1.3x+0.04x^2$	採水分析
2013/5/9	(2)	$y=1.3x+0.04x^2$	2013/5/23 と同グループ
2013/5/23	(2)	$y=1.3x+0.04x^2$	採水分析
2013/6/6	(2)	$y=1.3x+0.04x^2$	2013/6/20 と同グループ
2013/6/20	(2)	$y=1.3x+0.04x^2$	採水分析
2013/7/19	(3)	$y=2.0x+0.02x^2$	2013/7/25 と同グループ
2013/7/25	(3)	$y=2.0x+0.02x^2$	採水分析
2013/8/2	(2)	$y=1.3x+0.04x^2$	2013/8/2 と同グループ
2013/8/27	(2)	$y=1.3x+0.04x^2$	採水分析
2013/9/25	(3)	$y=2.0x+0.02x^2$	採水分析
2013/10/24	(3)	$y=2.0x+0.02x^2$	採水分析
2013/11/22	(4)	$y=2.4x+0.17x^2$	採水分析
2013/12/18	(4)	$y=2.4x+0.17x^2$	2013/11/22・2014/1/30 と同グループ



表 4-1 観測日とクロロフィル変換式の一覧（続き）

観測日	グループ	クロロ変換式	備考
2014/1/30	(4)	$y=2.4x+0.17x^2$	採水分析
2014/2/28	(3)	$y=2.0x+0.02x^2$	採水分析
2014/3/14	(3)	$y=2.0x+0.02x^2$	採水分析
2014/4/12	(3)	$y=2.0x+0.02x^2$	採水分析
2014/4/27	(3)	$y=2.0x+0.02x^2$	2014/4/12 と同グループ
2014/5/10	(3)	$y=2.0x+0.02x^2$	採水分析
2014/5/17	(3)	$y=2.0x+0.02x^2$	2014/5/10 と同グループ
2014/6/9	(3)	$y=2.0x+0.02x^2$	採水分析
2014/7/16	(3)	$y=2.0x+0.02x^2$	採水分析
2014/8/12	(4)	$y=2.4x+0.17x^2$	採水分析
2014/9/25	(4)	$y=2.4x+0.17x^2$	採水分析
2014/10/23	(4)	$y=2.4x+0.17x^2$	採水分析
2014/11/26	(2)	$y=1.3x+0.04x^2$	採水分析
2014/12/11	(2)	$y=1.3x+0.04x^2$	採水分析
2015/1/18	(2)	$y=1.3x+0.04x^2$	採水分析
2015/2/2	(3)	$y=2.0x+0.02x^2$	2015/2/17 と同グループ
2015/2/17	(3)	$y=2.0x+0.02x^2$	採水分析
2015/3/3	(3)	$y=2.0x+0.02x^2$	2015/3/14 と同グループ
2015/3/14	(3)	$y=2.0x+0.02x^2$	採水分析
2015/4/17	(2)	$y=1.3x+0.04x^2$	採水分析
2015/5/23	(3)	$y=2.0x+0.02x^2$	採水分析
2015/6/18	(3)	$y=2.0x+0.02x^2$	採水分析

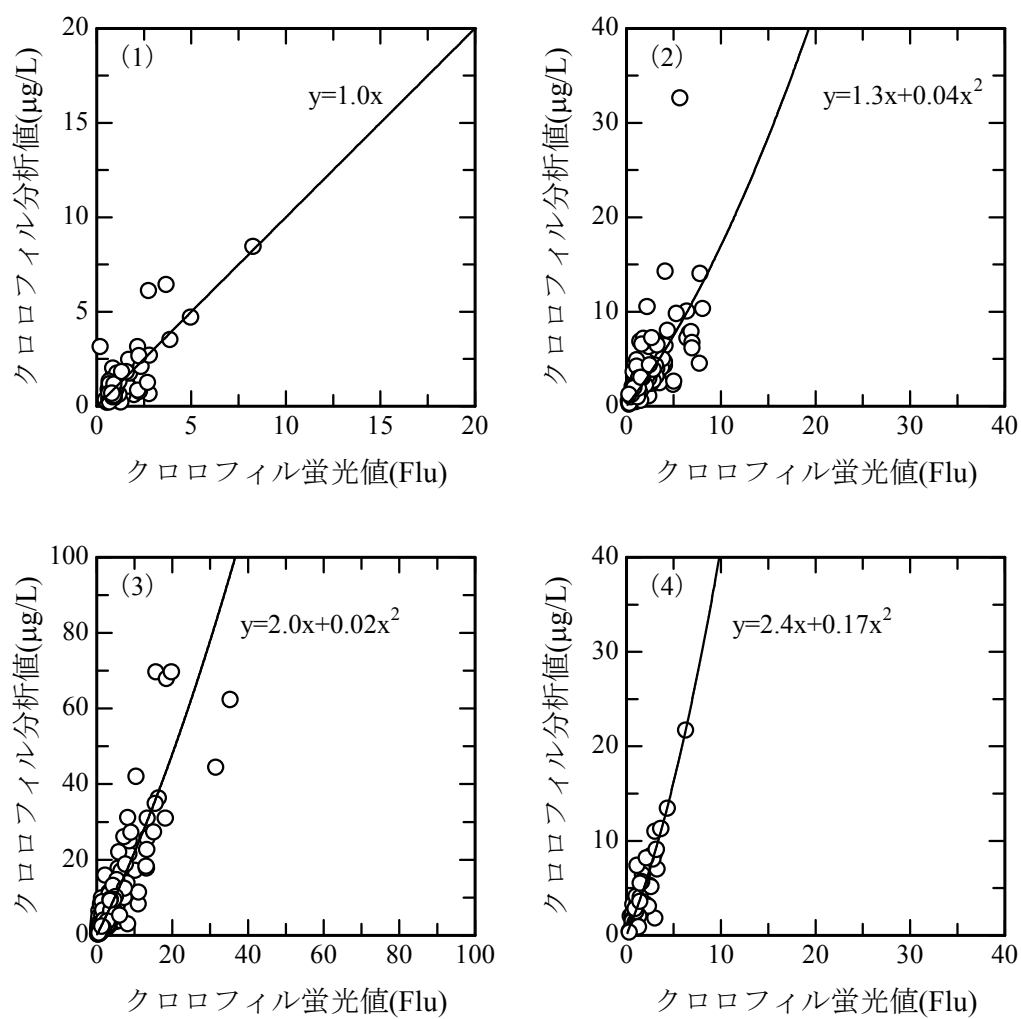


図 4-2 クロロフィル蛍光値と分析値の相関の傾きからの 4 分類

## 4-2 水質の分布状況

多項目水質計による水質観測結果を用いて、塩分・水温・クロロフィル濃度の気仙沼湾における分布状況を整理した。

図 4-3-1～図 4-3-20 は Stn.15（気仙沼港）と Stn.8（大島瀬戸）における調査日ごとの鉛直分布であり、図 4-4-1～図 4-4-18 は水深 0 m, 5 m, 10 m, 20 m の平面分布図である。また、図 4-5-1～図 4-5-3 は水深層ごと（0～5 m, 5～15 m, 15 m～海底）の平均値の時系列である。

まず、鉛直分布図から次のことが分かる。Stn.8 において水温躍層はほとんど発達せず、2014 年 6 月と 7 月のように、表層と底層の温度差は最大でも約 10℃である。塩分は表層の約 5 m で低下することが多かった。3 月から 9 月までの期間には、底層塩分が約 33 psu であるのに対して、表層塩分は 29～32 psu になる。10 月から 2 月までは全層の塩分が約 34 psu でほぼ一定になる。クロロフィルについては、Stn.15 では水深 5～7 m 層に、Stn.8 では水深 5～15 m 層で多く発生していた。Stn.15 は浅いため分布層が浅くなっており、Stn.8 での目立った発生がない場合でも Stn.15 ではみられることがあった。

次に平面分布図からは次のことが分かる。水温は 3 月～6 月に湾奥より東湾の方が高い場合が多く、塩分は表層で分布の傾向が明瞭であり、大川河口の前面で低く、東湾に向かって高くなってゆく。クロロフィルは気仙沼港から大川河口域にかけて高くなることが多い。

さらに季節変動としては、水温が 2014 年 5 月から上昇、2014 年 9 月から下降、2015 年 3 月から上昇している。塩分は 2014 年 5 月から上昇、2014 年 10 月から 2015 年 1 月はほぼ一定で、2015 年 2 月から下降し、2015 年 3 月から上昇していた。

以上より、表層は大川から河川水が流入することで塩分の低下が生じており、その影響範囲は東湾まで及んでおり、季節的には春によくみられる。また、塩分の季節性という点では、11 月から 2 月の冬季に全層一様で塩分濃度が最大となり、春・夏は塩分濃度が全体的に低下して鉛直分布も生ずる。

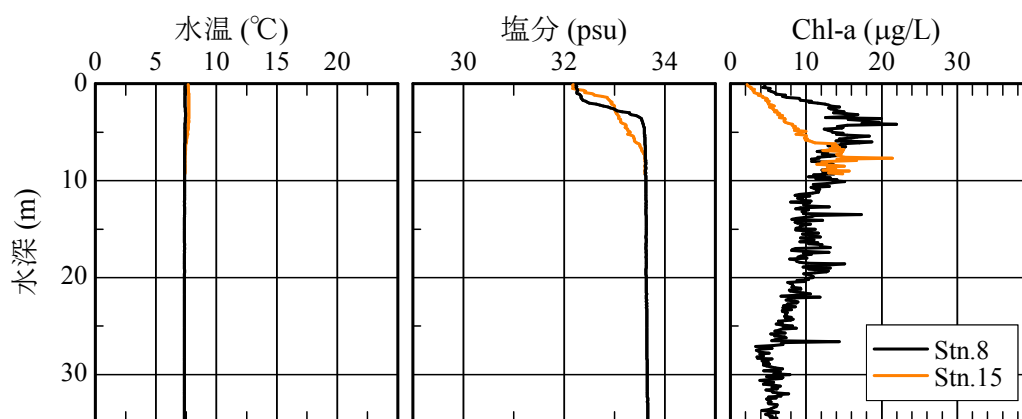


図 4-3-1 水温・塩分・Chl-a の鉛直分布 (2014 年 3 月 14 日)

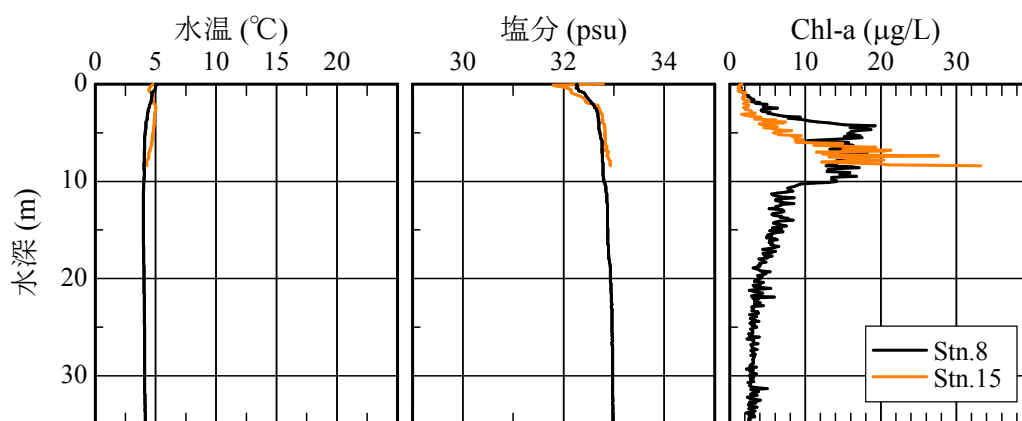


図 4-3-2 水温・塩分・Chl-a の鉛直分布 (2014 年 4 月 12 日)

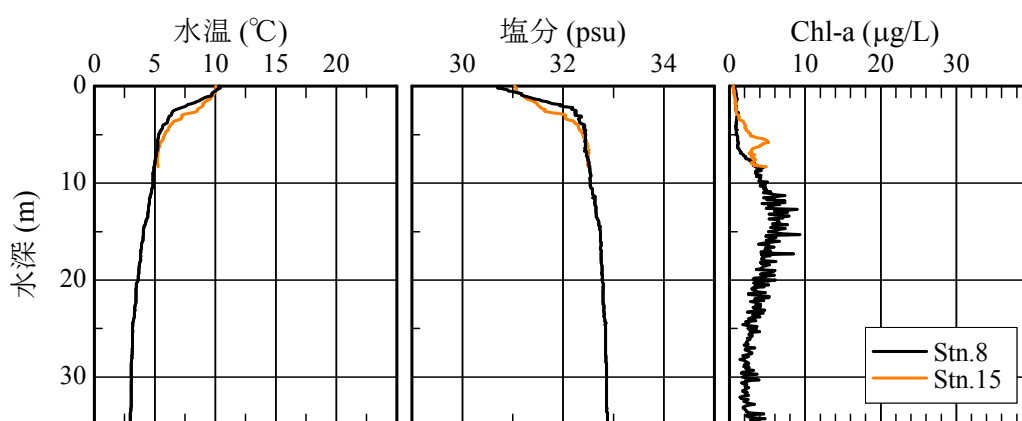


図 4-3-3 水温・塩分・Chl-a の鉛直分布 (2014 年 4 月 27 日)

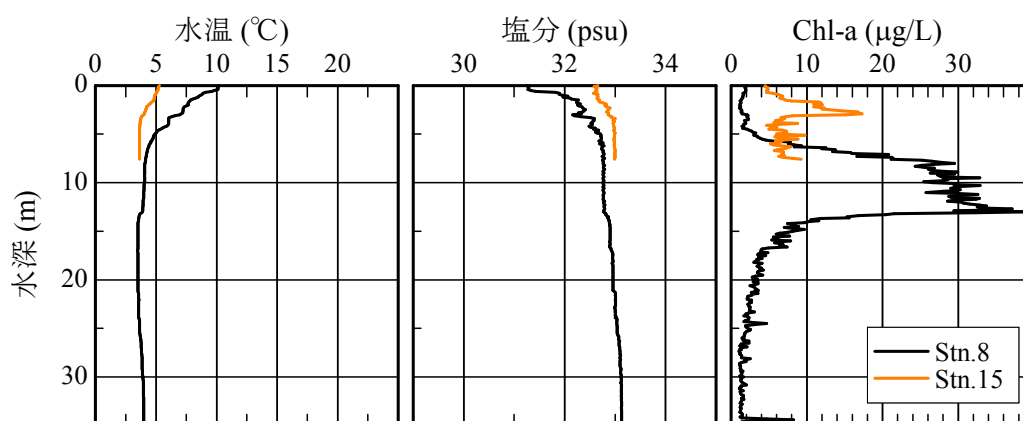


図 4-3-4 水温・塩分・Chl-a の鉛直分布 (2014 年 5 月 10 日)

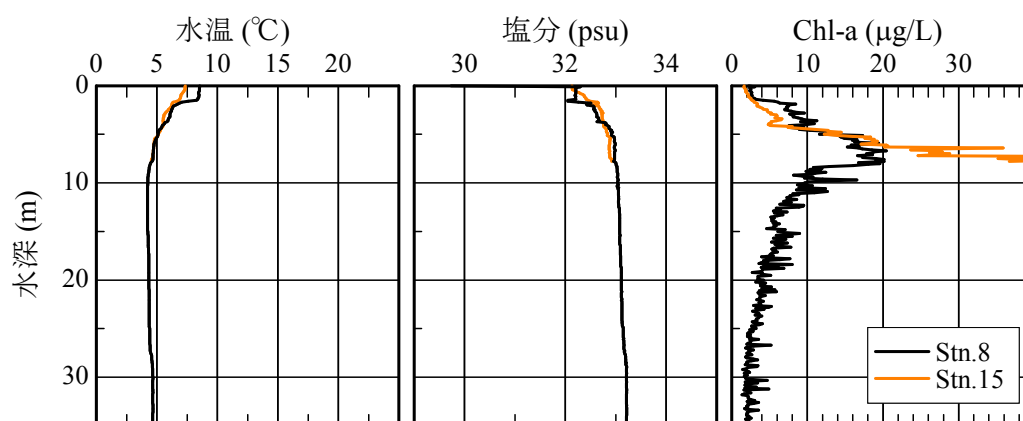
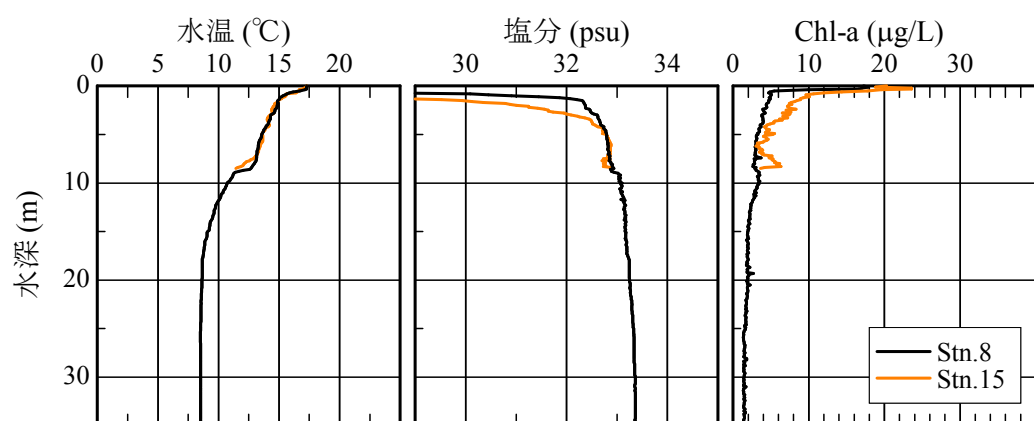


図 4-3-5 水温・塩分・Chl-a の鉛直分布 (2014 年 5 月 17 日)



図

図 4-3-6 水温・塩分・Chl-a の鉛直分布 (2014 年 6 月 9 日)

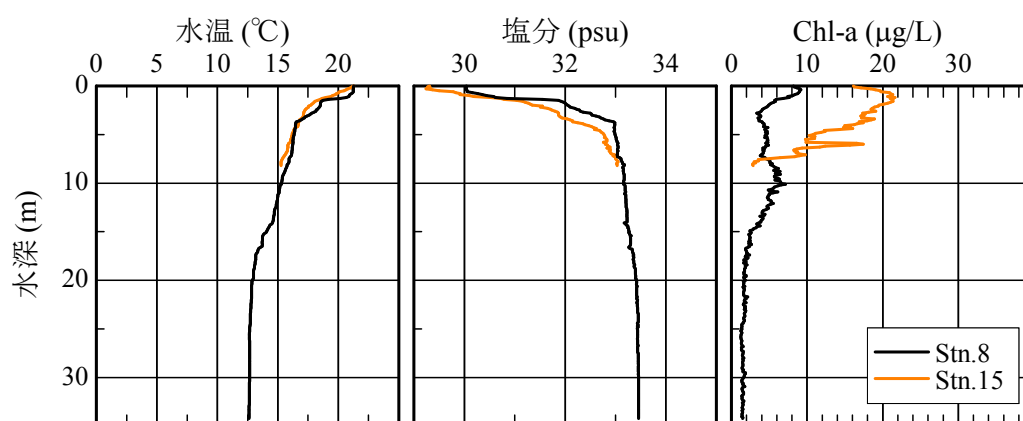


図 4-3-7 水温・塩分・Chl-a の鉛直分布 (2014 年 7 月 16 日)

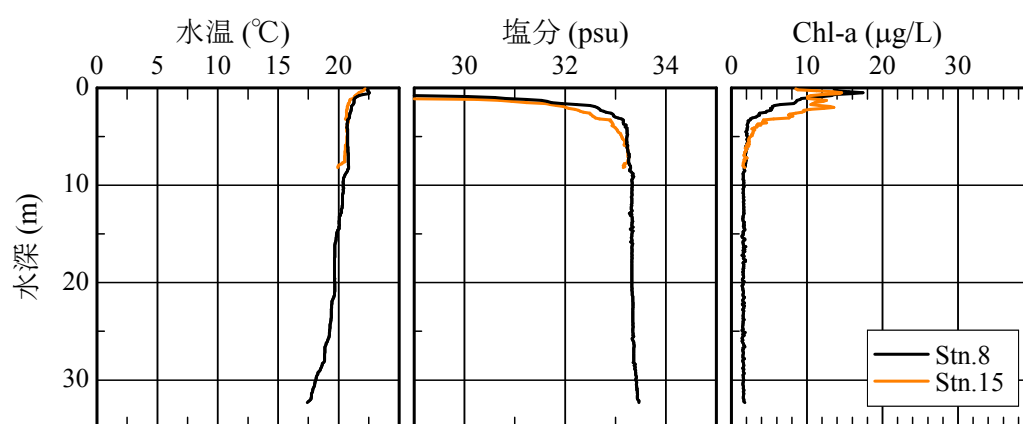


図 4-3-8 水温・塩分・Chl-a の鉛直分布 (2014 年 8 月 12 日)

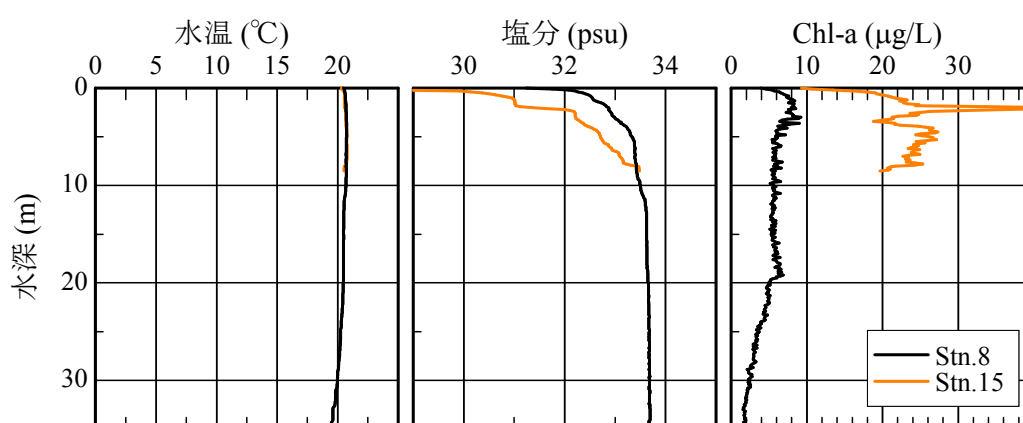


図 4-3-9 水温・塩分・Chl-a の鉛直分布 (2014 年 9 月 25 日)

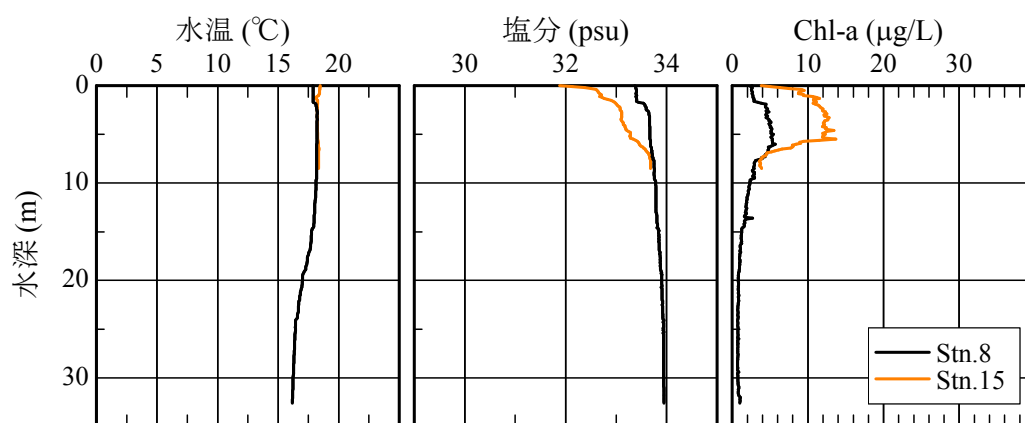


図 4-3-10 水温・塩分・Chl-a の鉛直分布 (2014 年 10 月 23 日)

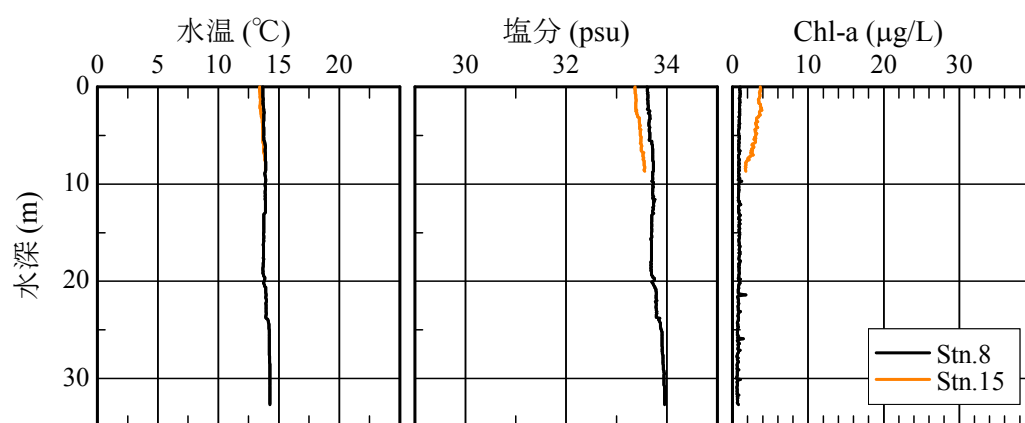


図 4-3-11 水温・塩分・Chl-a の鉛直分布 (2014 年 11 月 26 日)

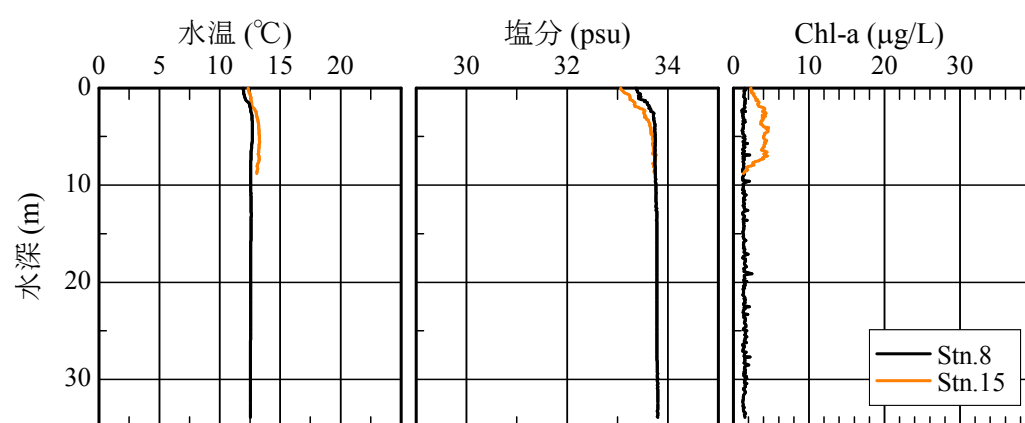


図 4-3-12 水温・塩分・Chl-a の鉛直分布 (2014 年 12 月 11 日)

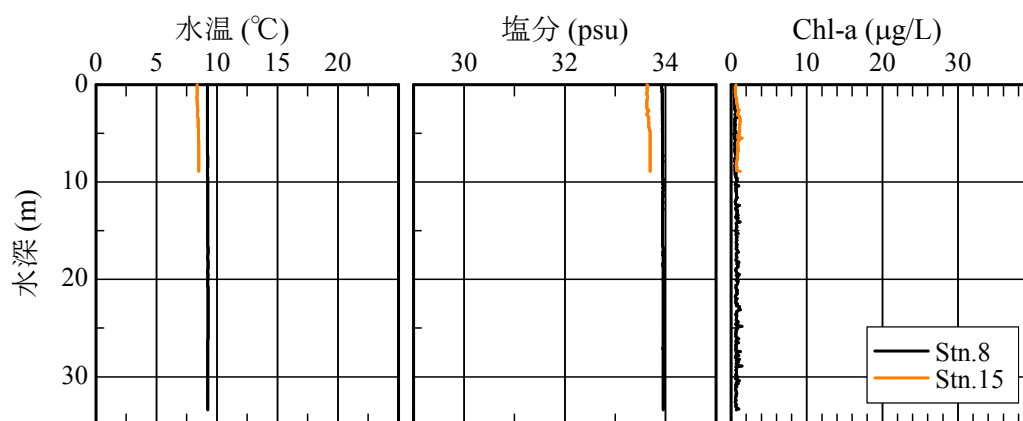


図 4-3-13 水温・塩分・Chl-a の鉛直分布 (2015 年 1 月 18 日)

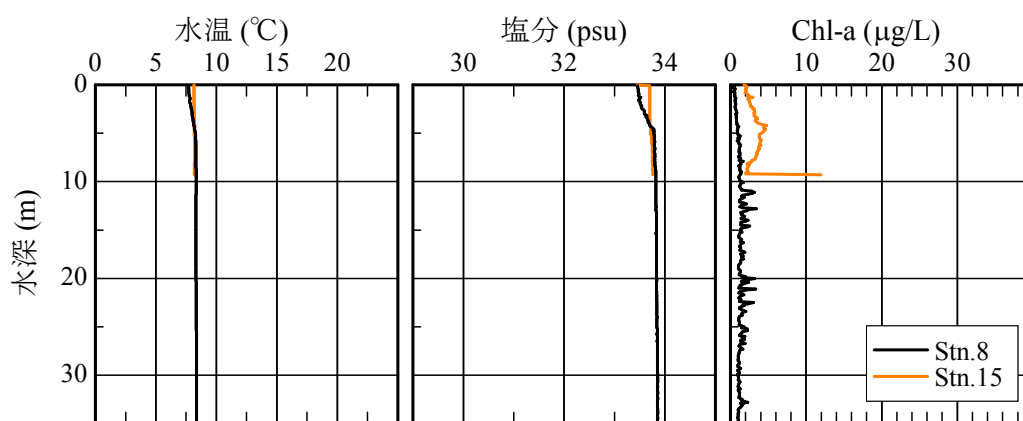


図 4-3-14 水温・塩分・Chl-a の鉛直分布 (2015 年 2 月 2 日)

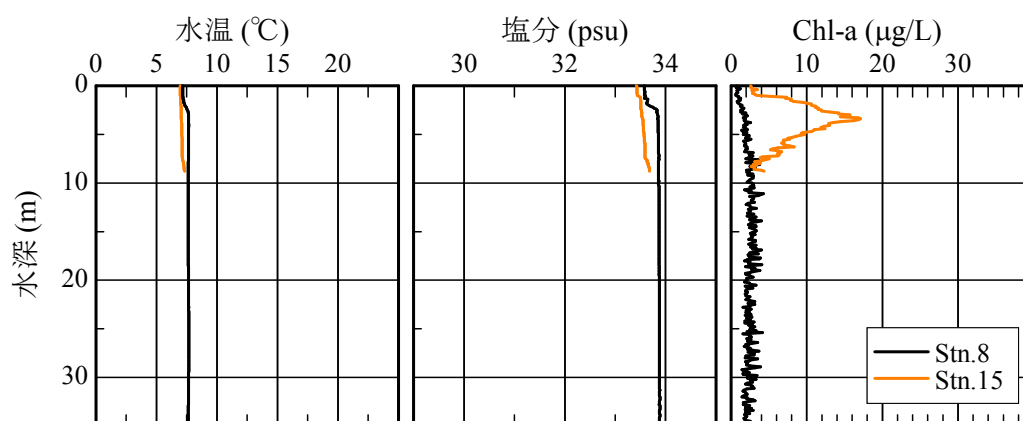


図 4-3-15 水温・塩分・Chl-a の鉛直分布 (2015 年 2 月 17 日)



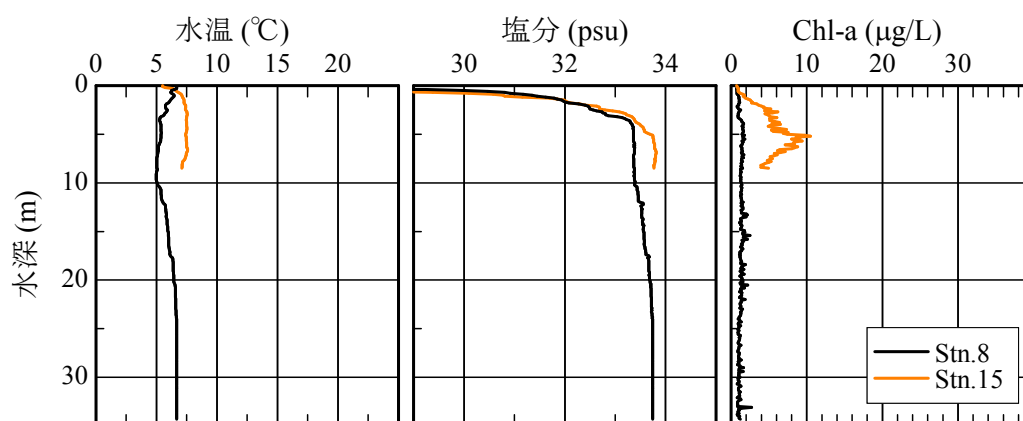


図 4-3-16 水温・塩分・Chl-a の鉛直分布 (2015 年 3 月 3 日)

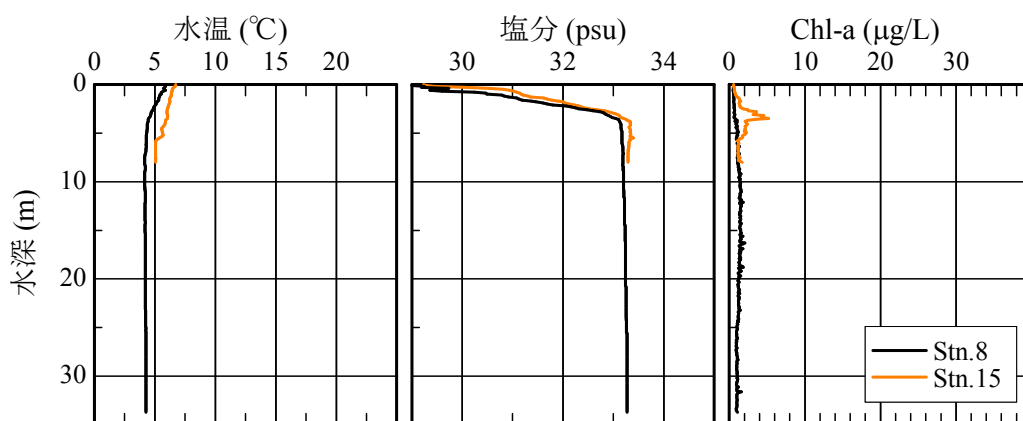


図 4-3-17 水温・塩分・Chl-a の鉛直分布 (2015 年 3 月 14 日)

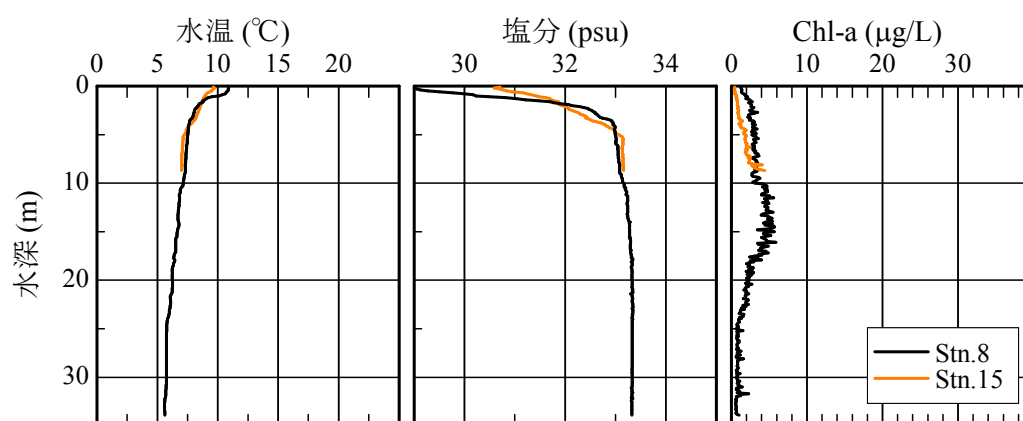


図 4-3-18 水温・塩分・Chl-a の鉛直分布 (2015 年 4 月 17 日)

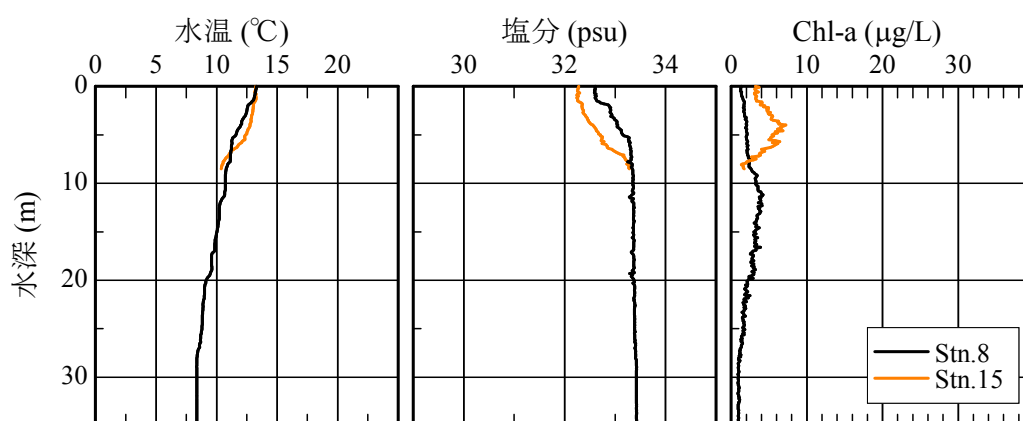


図 4-3-19 水温・塩分・Chl-a の鉛直分布 (2015 年 5 月 23 日)

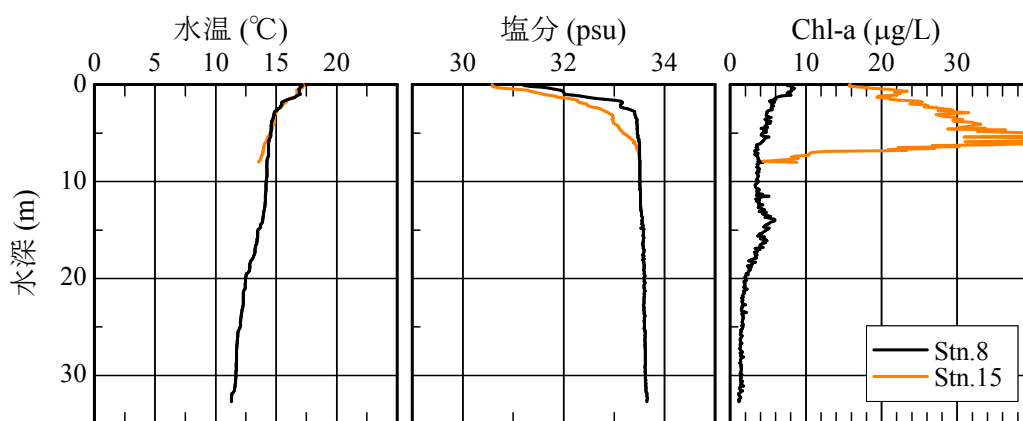


図 4-3-20 水温・塩分・Chl-a の鉛直分布 (2015 年 6 月 18 日)

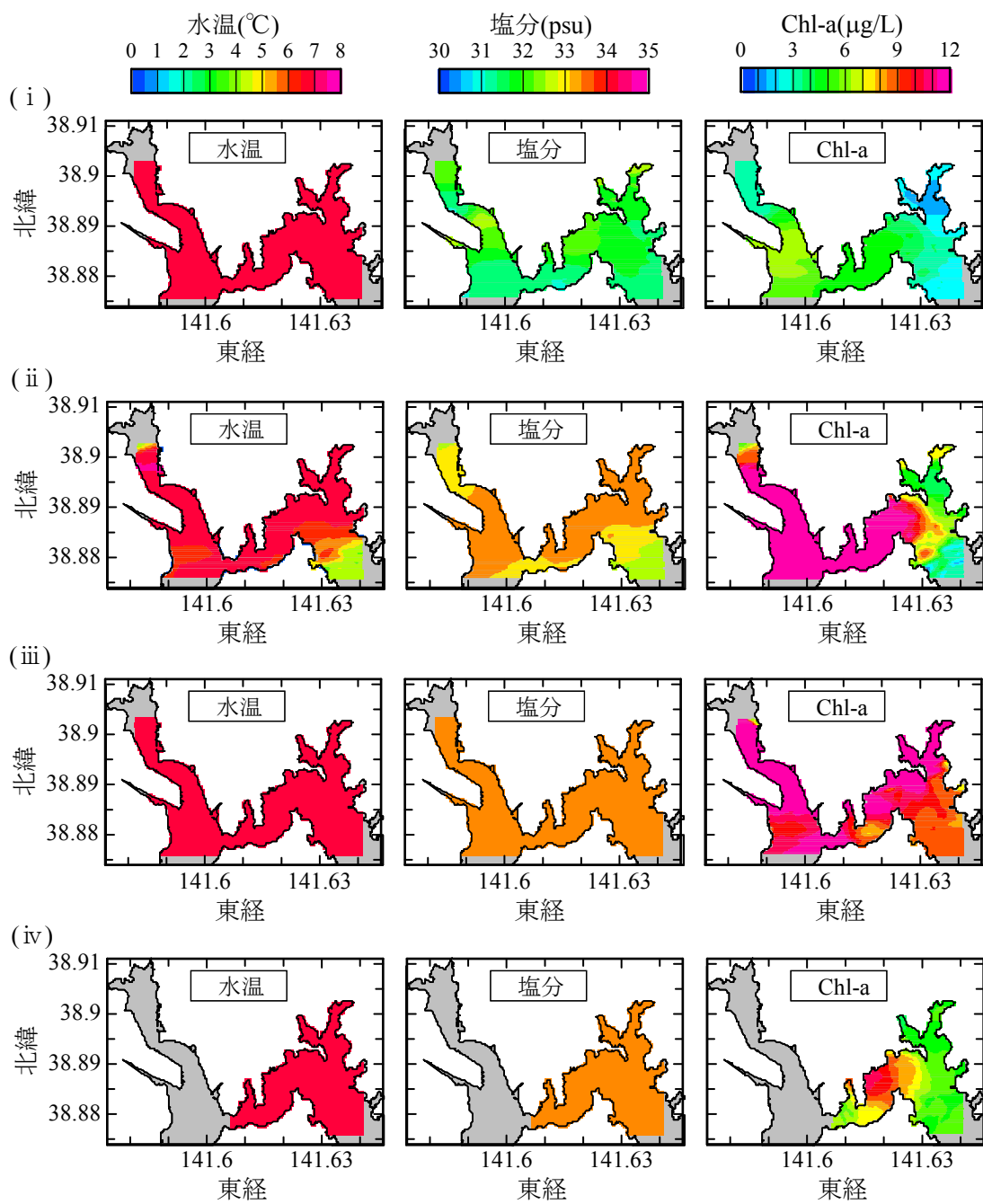


図 4-4-1 2014 年 3 月 14 日 水温，塩分，Chl-a 濃度の平面分布図（低水温時）

(i) : 水深 0 m, (ii) : 水深 5 m, (iii) : 水深 10 m, (iv) : 水深 20 m

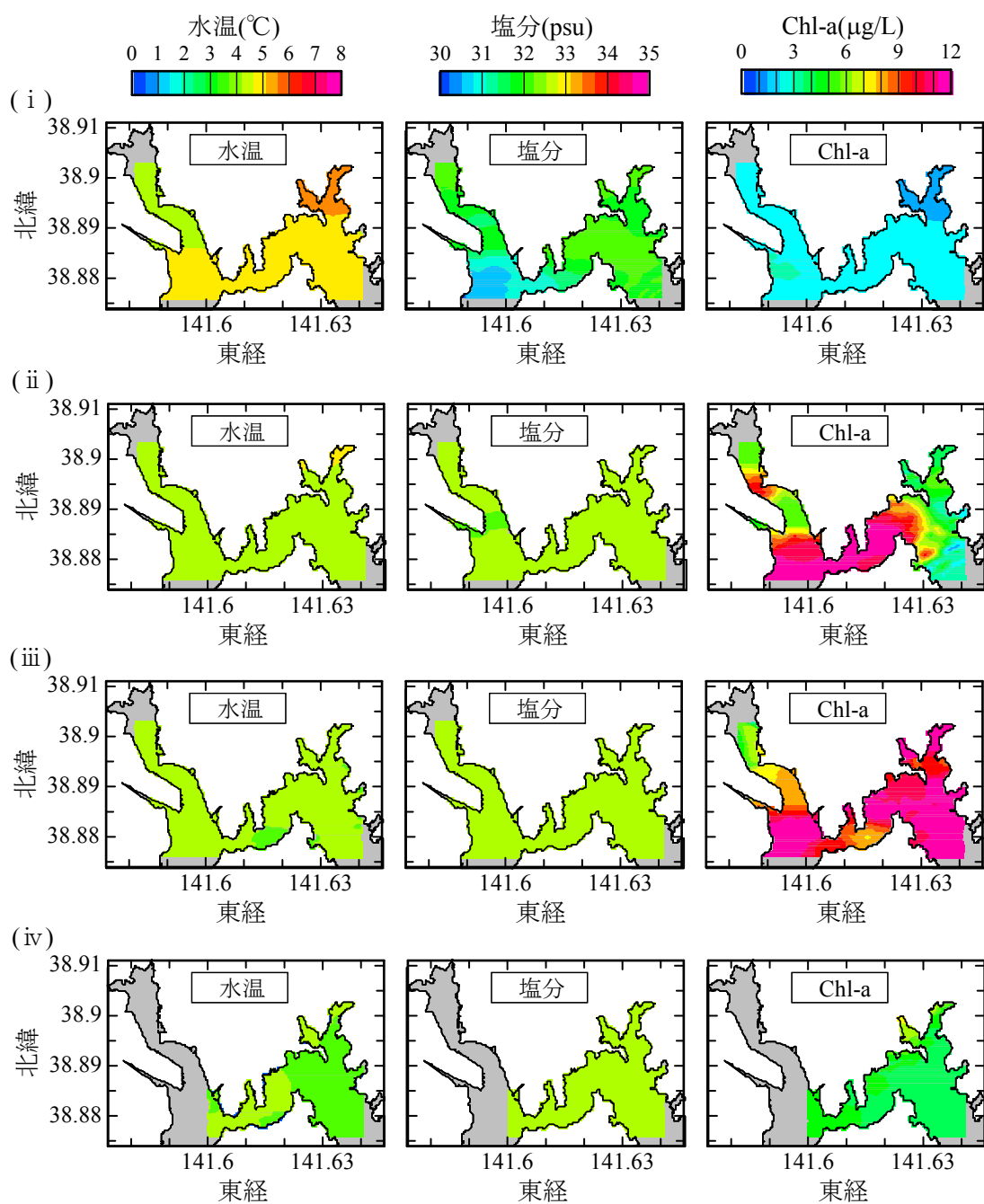


図 4-4-2 2014 年 4 月 12 日 水温，塩分，Chl-a 濃度の平面分布図（低水温時）

(i) : 水深 0 m, (ii) : 水深 5 m, (iii) : 水深 10 m, (iv) : 水深 20 m

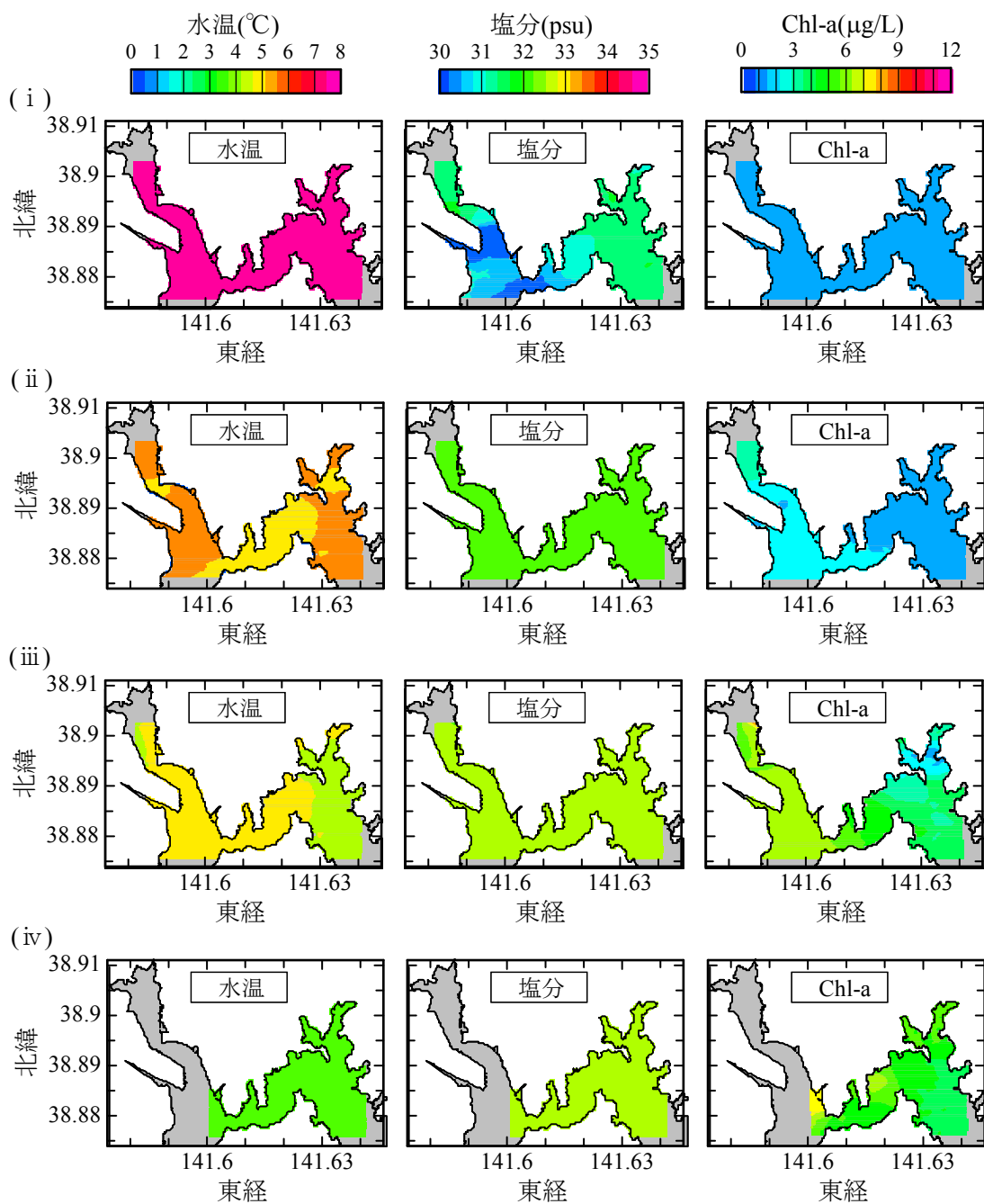


図 4-4-3 2014 年 4 月 27 日 水温，塩分，Chl-a 濃度の平面分布図（低水温時）

(i) : 水深 0 m, (ii) : 水深 5 m, (iii) : 水深 10 m, (iv) : 水深 20 m

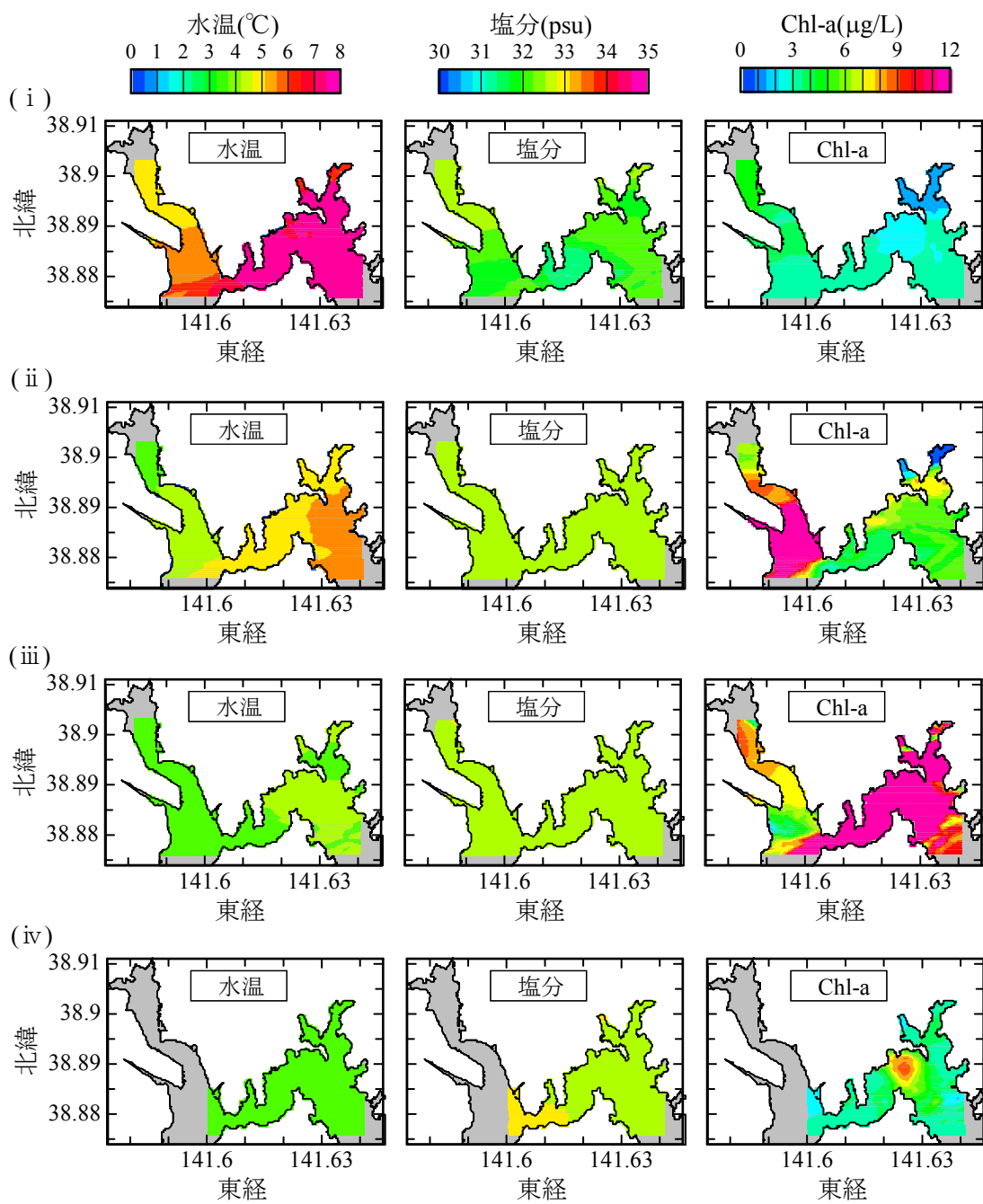


図 4-4-4 2014 年 5 月 10 日 水温，塩分，Chl-a 濃度の平面分布図（低水温時）

(i) : 水深 0 m, (ii) : 水深 5 m, (iii) : 水深 10 m, (iv) : 水深 20 m

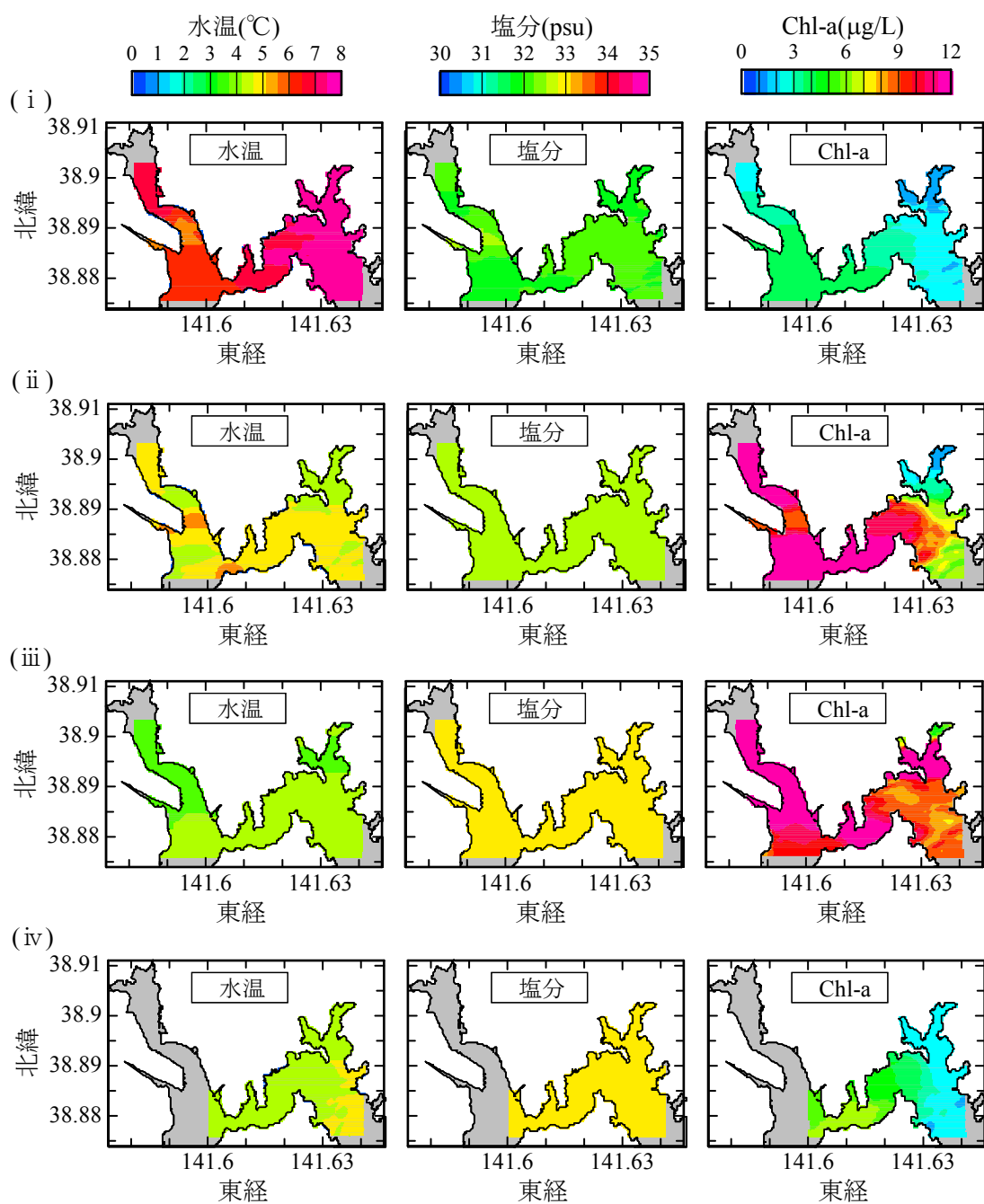


図 4-4-5 2014 年 5 月 17 日 水温，塩分，Chl-a 濃度の平面分布図（低水温時）

(i) : 水深 0 m, (ii) : 水深 5 m, (iii) : 水深 10 m, (iv) : 水深 20 m

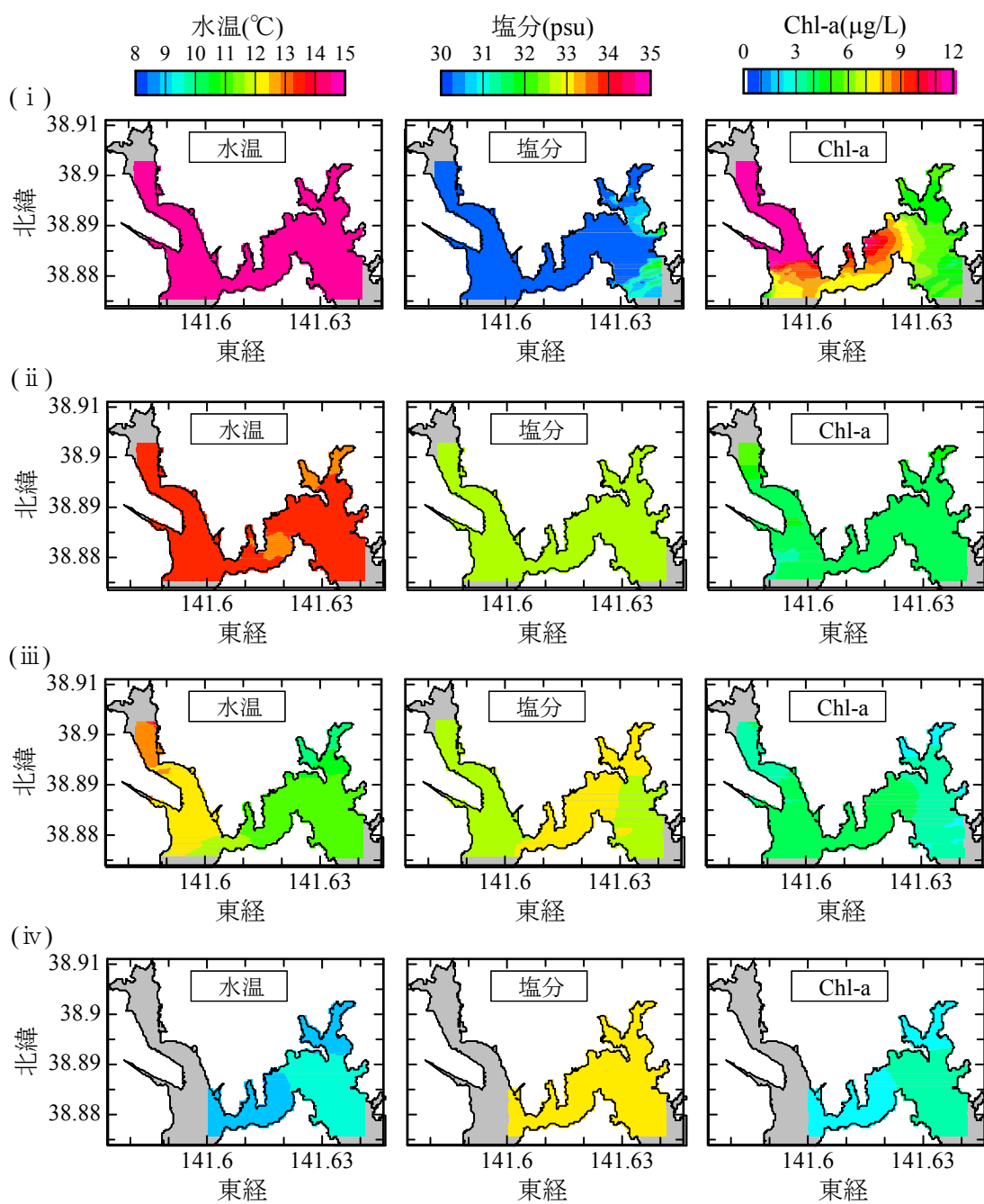


図 4-4-6 2014 年 6 月 9 日 水温，塩分，Chl-a 濃度の平面分布図（中水温時）

（i）：水深 0 m，（ii）：水深 5 m，（iii）：水深 10 m，（iv）：水深 20 m



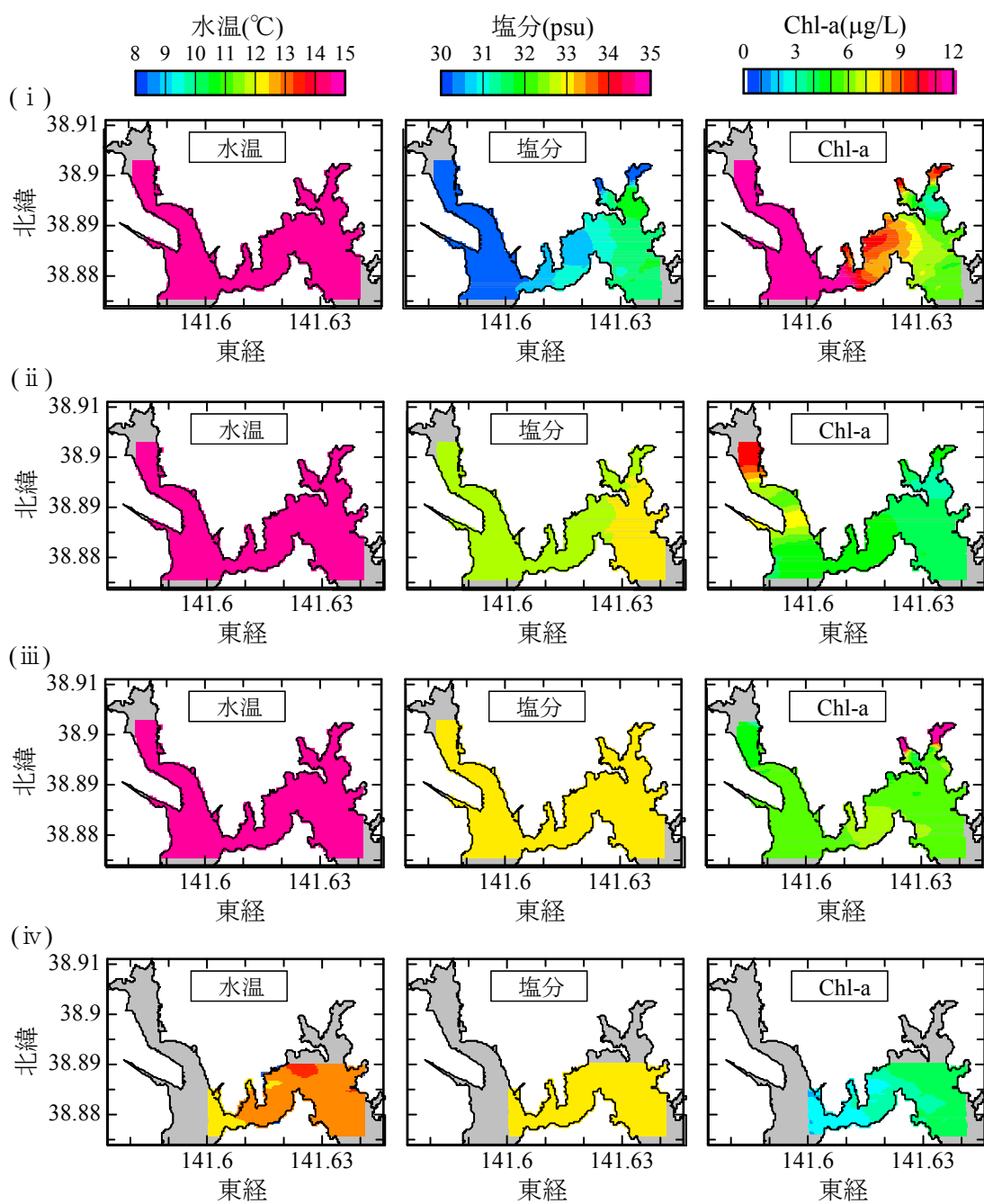


図 4-4-7 2014 年 7 月 16 日 水温，塩分，Chl-a 濃度の平面分布図（中水温時）

(i) : 水深 0 m, (ii) : 水深 5 m, (iii) : 水深 10 m, (iv) : 水深 20 m

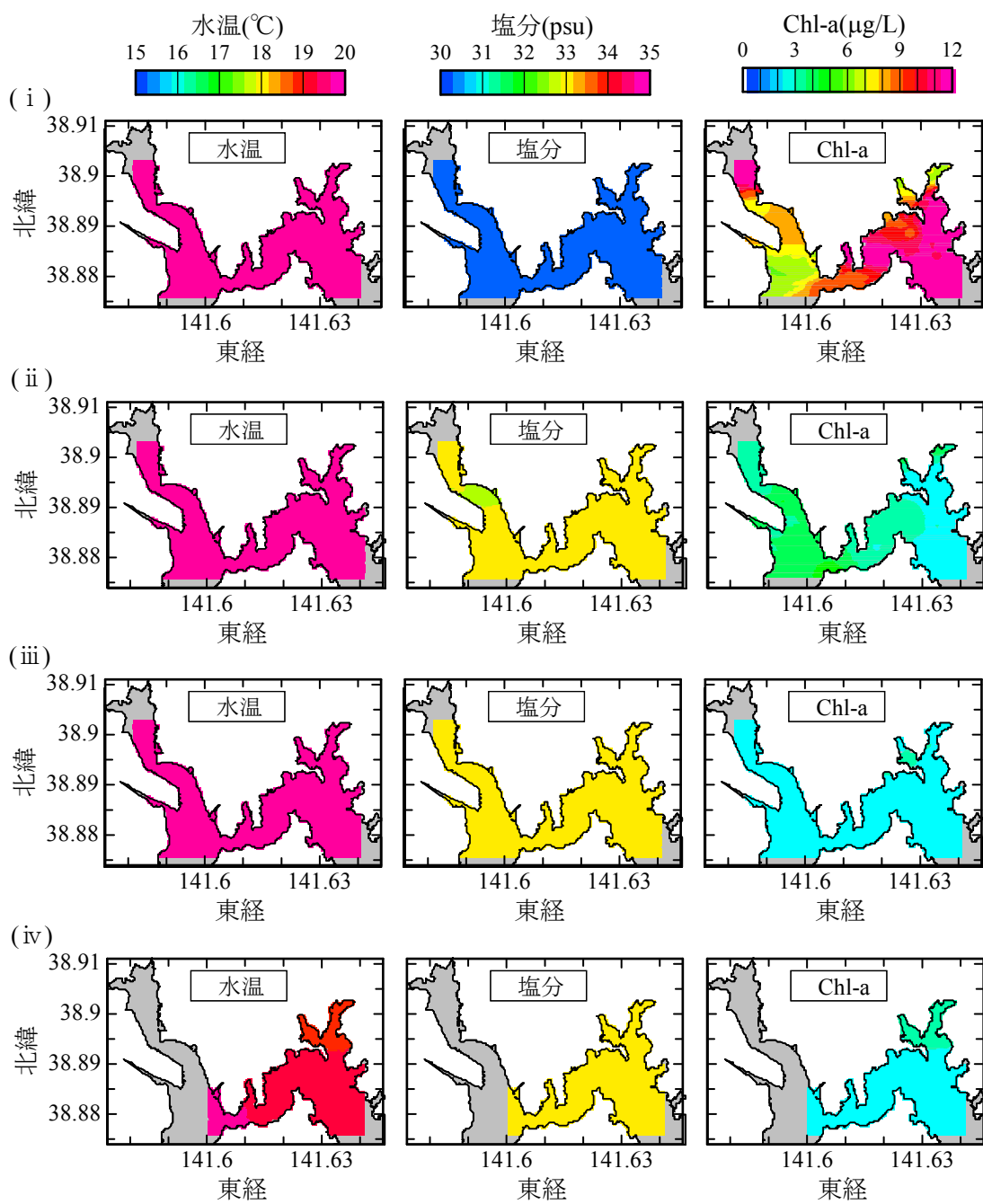


図 4-4-8 2014 年 8 月 12 日 水温，塩分，Chl-a 濃度の平面分布図（高水温時）

(i) : 水深 0 m, (ii) : 水深 5 m, (iii) : 水深 10 m, (iv) : 水深 20 m

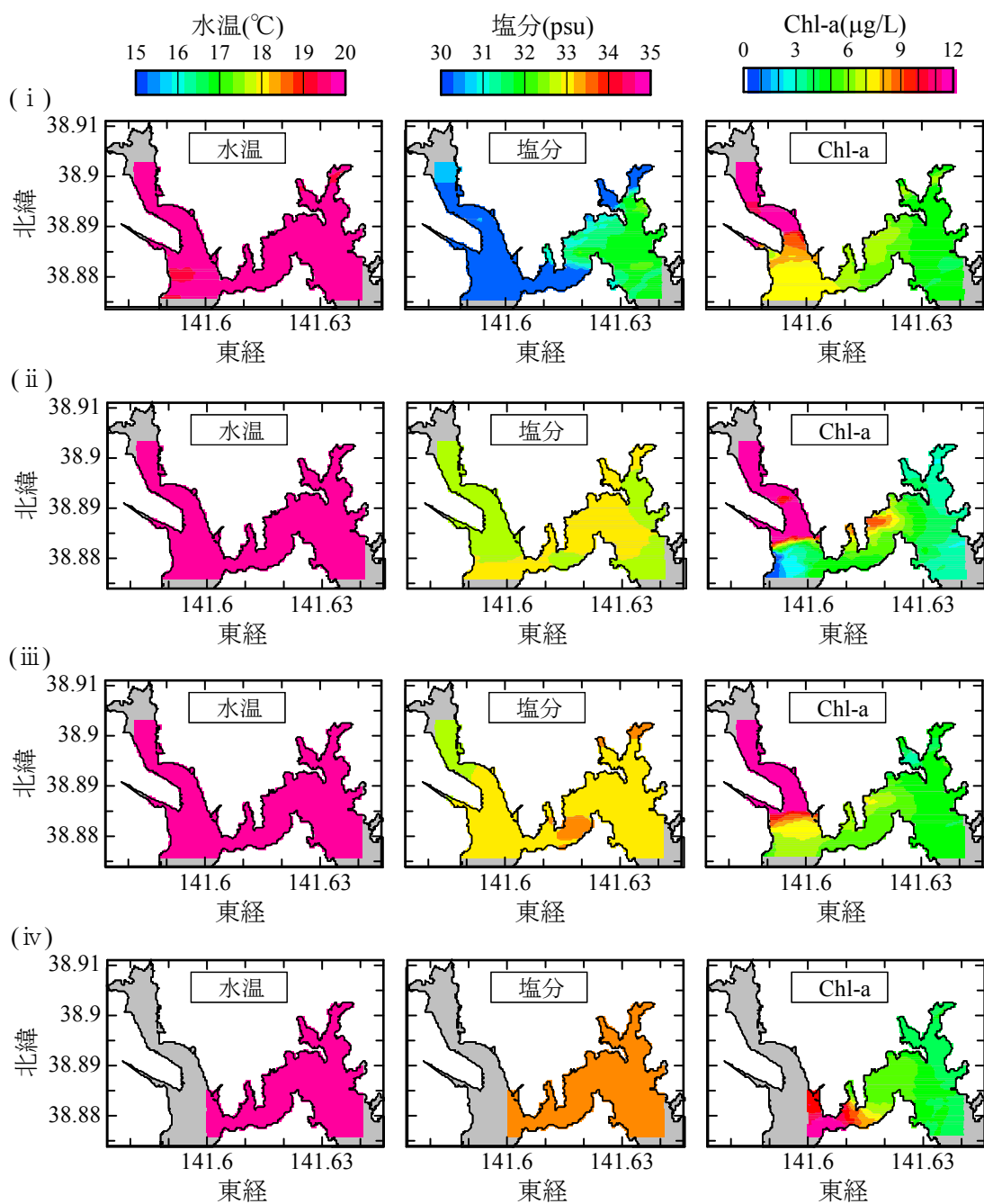


図 4-4-9 2014 年 9 月 25 日 水温，塩分，Chl-a 濃度の平面分布図（高水温時）

(i) : 水深 0 m, (ii) : 水深 5 m, (iii) : 水深 10 m, (iv) : 水深 20 m

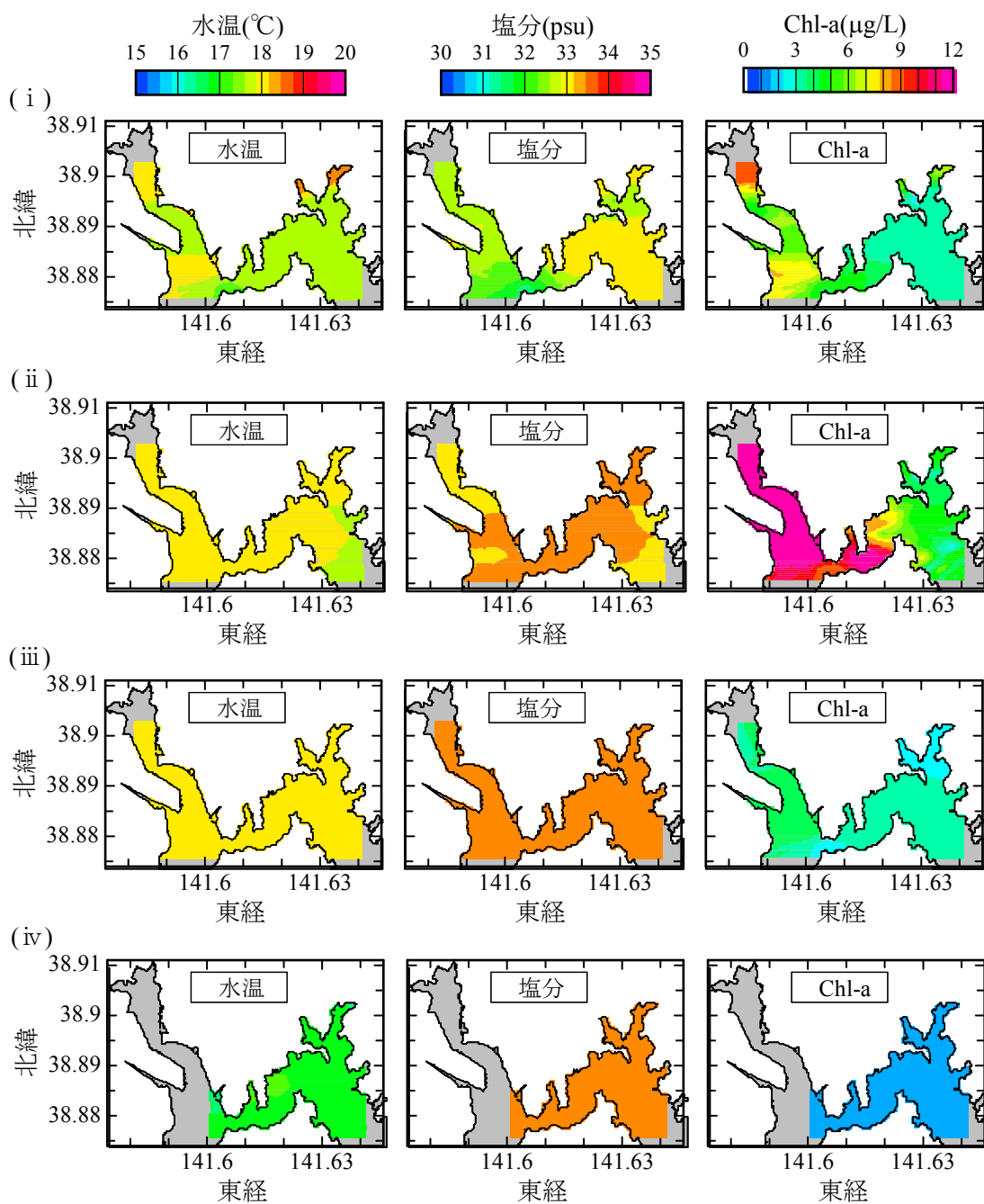


図 4-4-10 2014 年 10 月 23 日 水温, 塩分, Chl-a 濃度の平面分布図 (高水温時)

(i) : 水深 0 m, (ii) : 水深 5 m, (iii) : 水深 10 m, (iv) : 水深 20 m

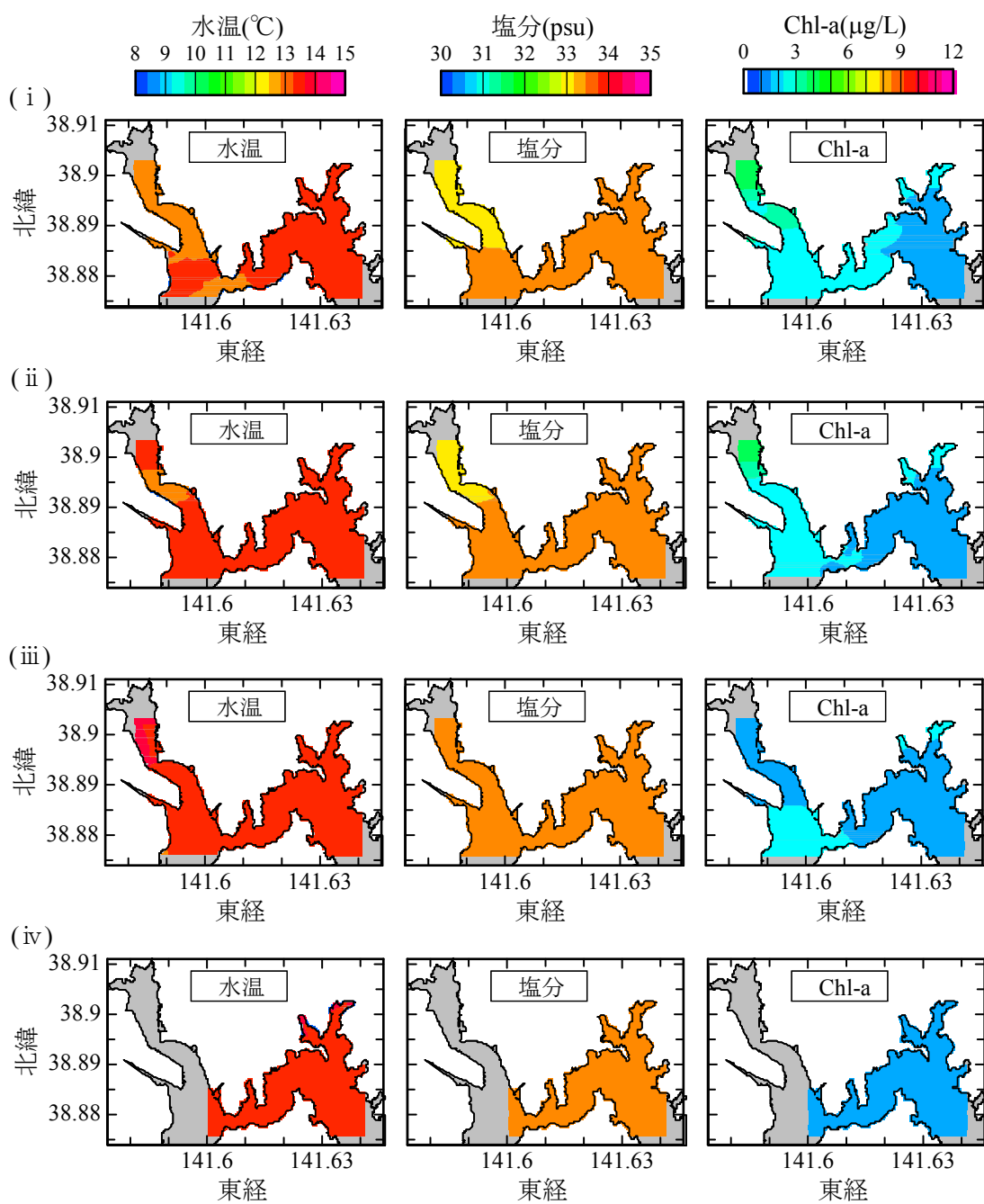


図 4-4-11 2014 年 11 月 26 日 水温, 塩分, Chl-a 濃度の平面分布図 (中水温時)  
 (i) : 水深 0 m, (ii) : 水深 5 m, (iii) : 水深 10 m, (iv) : 水深 20 m

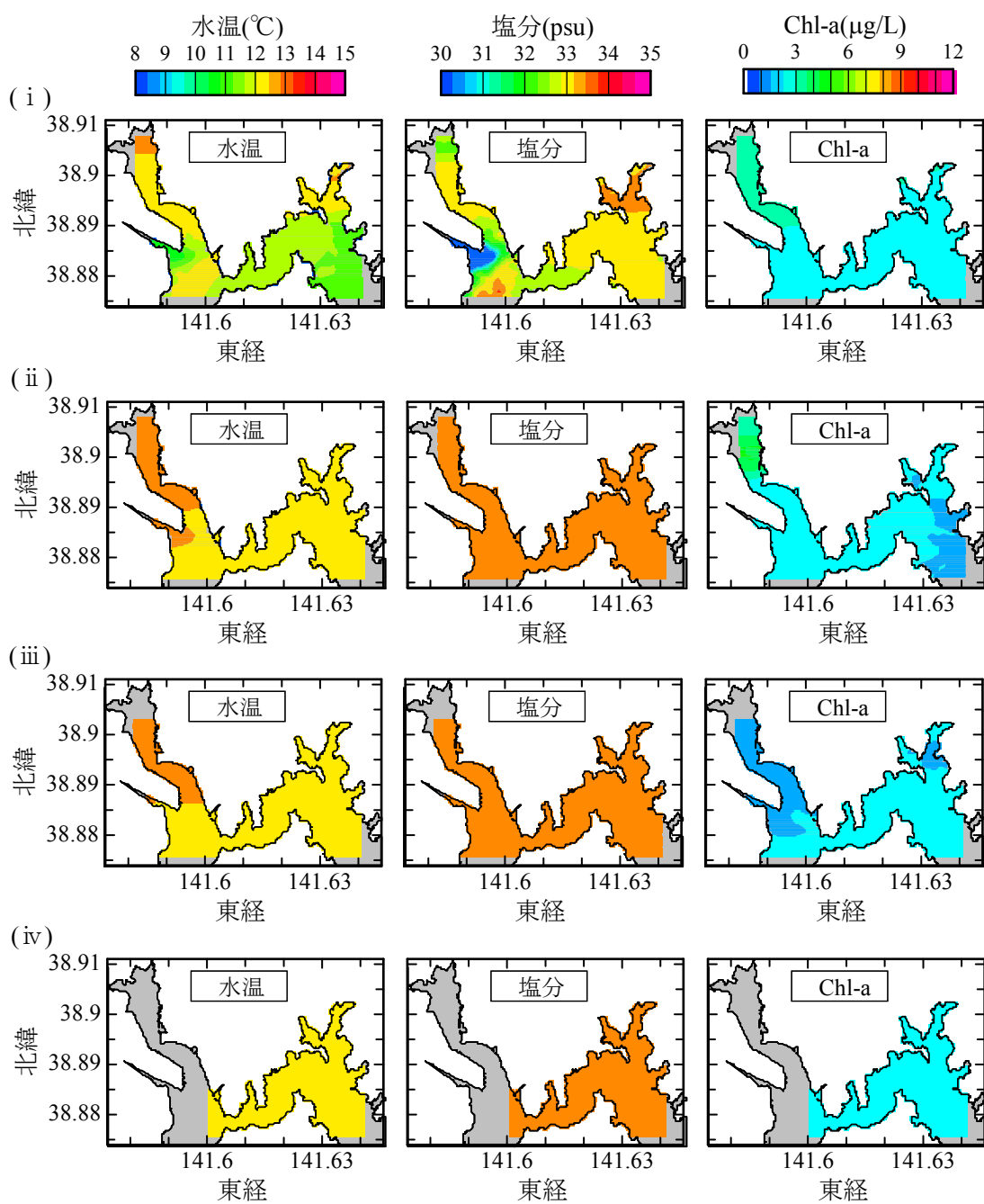


図 4-4-12 2014 年 12 月 11 日 水温, 塩分, Chl-a 濃度の平面分布図 (中水温時)

(i) : 水深 0 m, (ii) : 水深 5 m, (iii) : 水深 10 m, (iv) : 水深 20 m

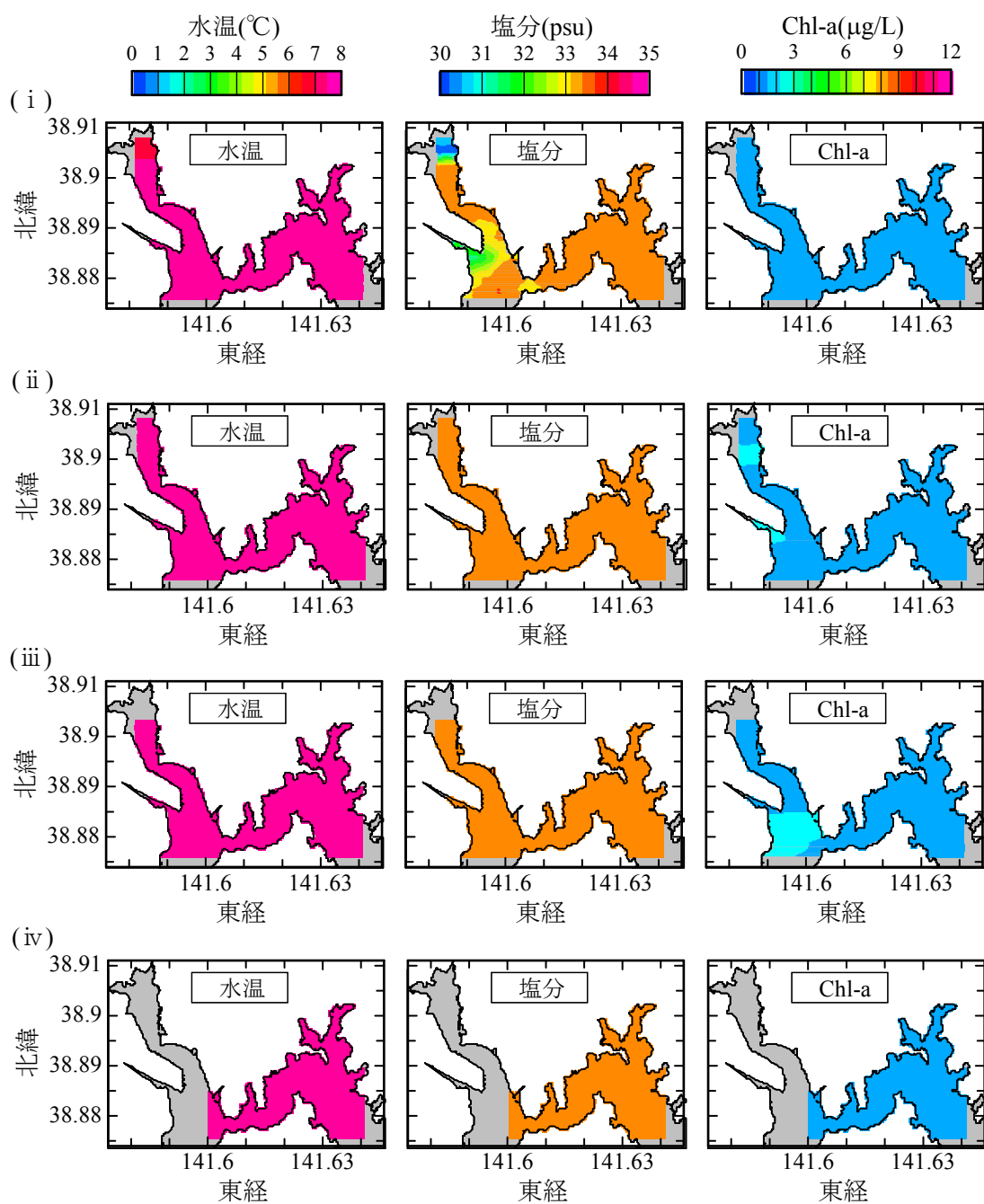


図 4-4-13 2015 年 1 月 18 日 水温，塩分，Chl-a 濃度の平面分布図（低水温時）

(i) : 水深 0 m, (ii) : 水深 5 m, (iii) : 水深 10 m, (iv) : 水深 20 m

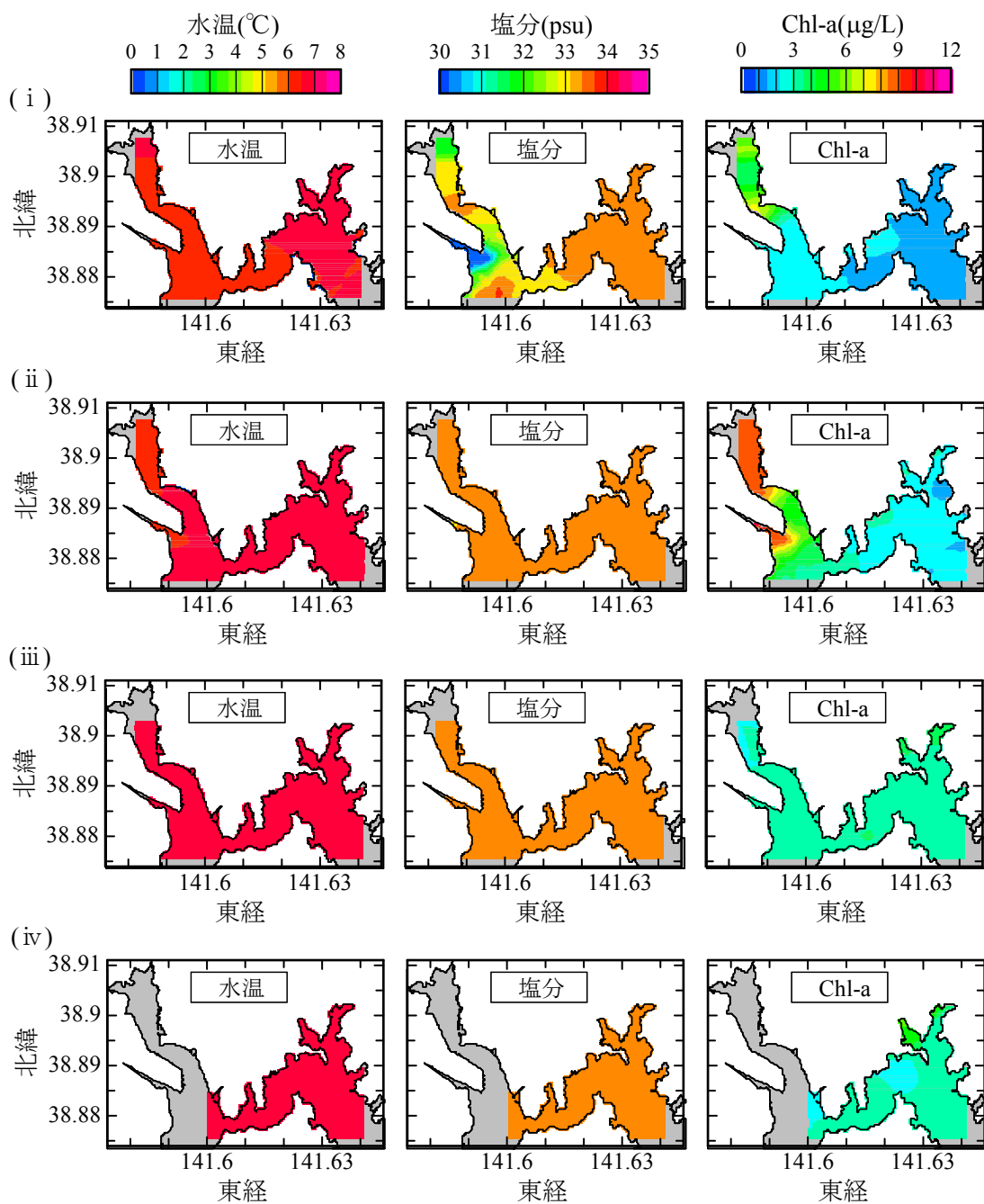


図 4-4-14 2015 年 2 月 17 日 水温，塩分，Chl-a 濃度の平面分布図（低水温時）

(i) : 水深 0 m, (ii) : 水深 5 m, (iii) : 水深 10 m, (iv) : 水深 20 m



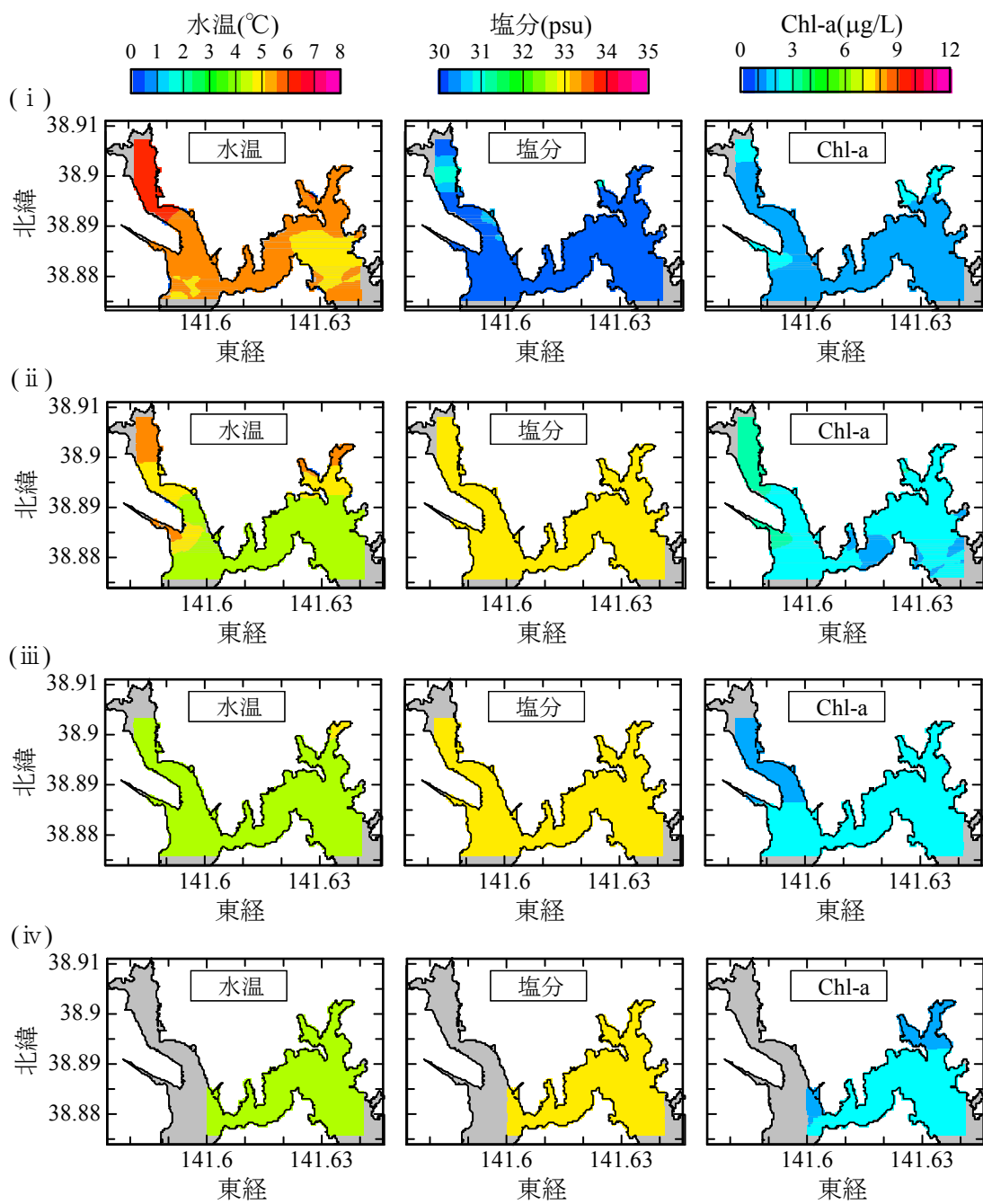


図 4-4-15 2015 年 3 月 14 日 水温，塩分，Chl-a 濃度の平面分布図（低水温時）

(i) : 水深 0 m, (ii) : 水深 5 m, (iii) : 水深 10 m, (iv) : 水深 20 m

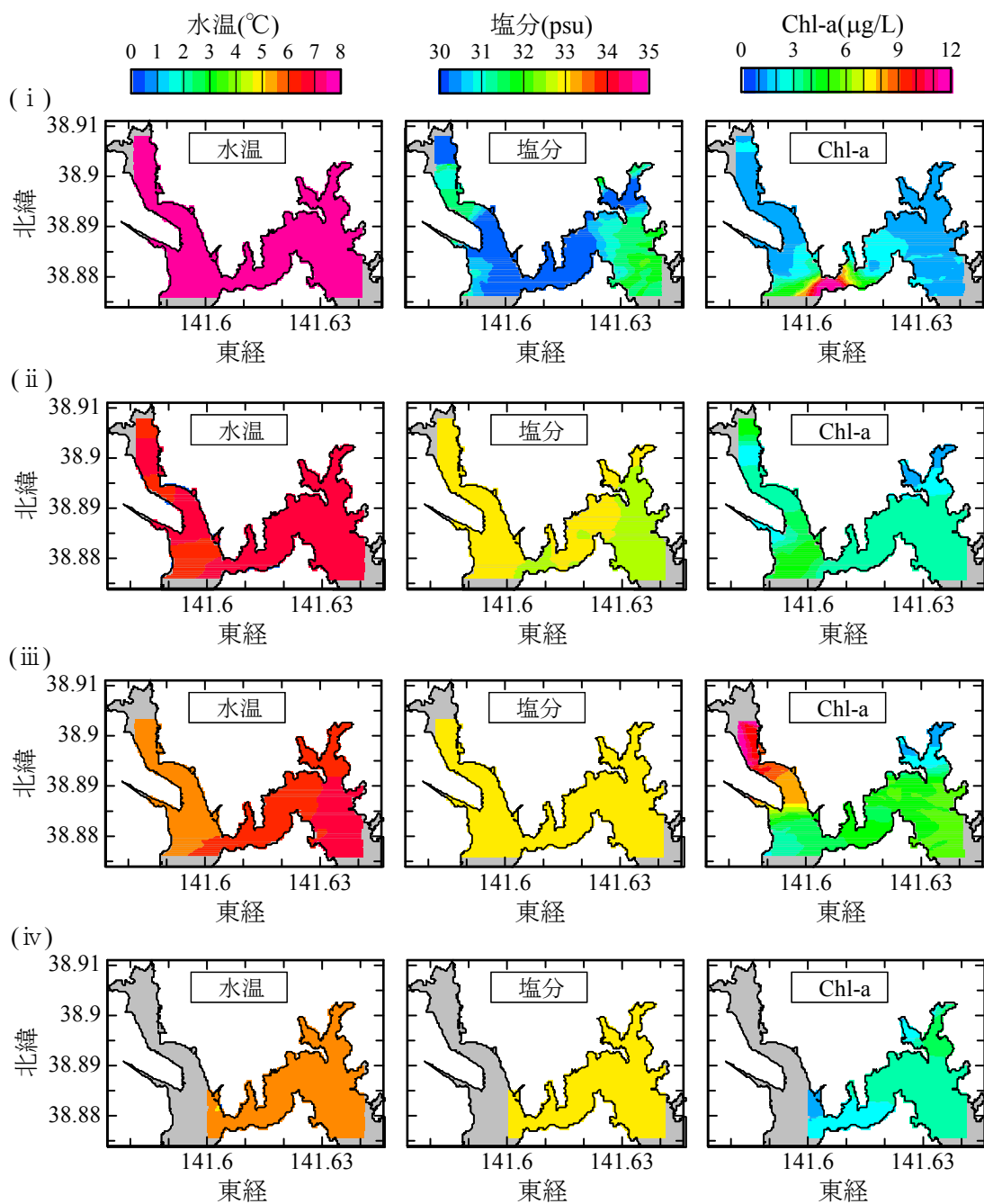


図 4-4-16 2015 年 4 月 17 日 水温，塩分，Chl-a 濃度の平面分布図（低水温時）

(i) : 水深 0 m, (ii) : 水深 5 m, (iii) : 水深 10 m, (iv) : 水深 20 m

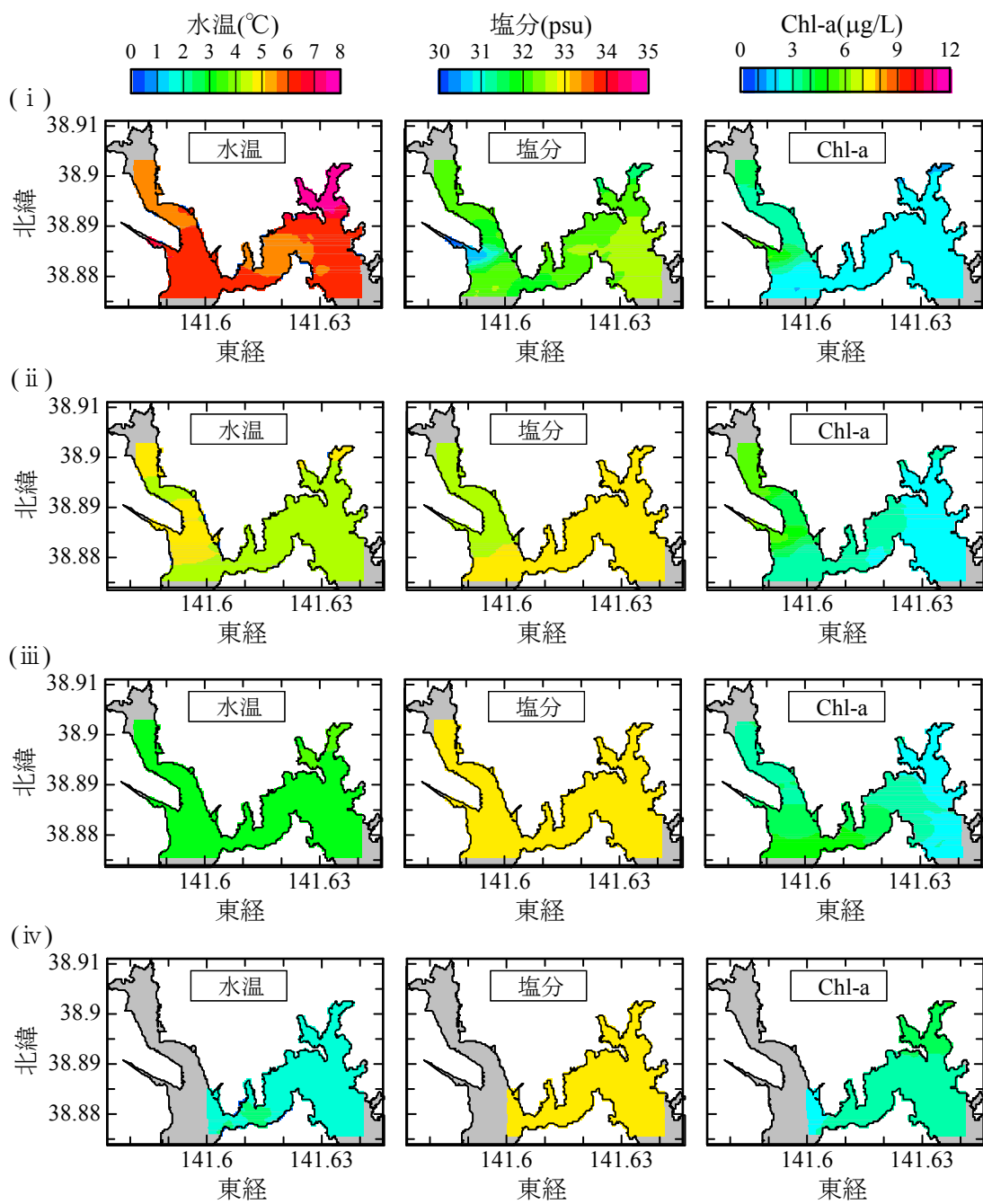


図 4-4-17 2015 年 5 月 23 日 水温，塩分，Chl-a 濃度の平面分布図（中水温時）

(i) : 水深 0 m, (ii) : 水深 5 m, (iii) : 水深 10 m, (iv) : 水深 20 m

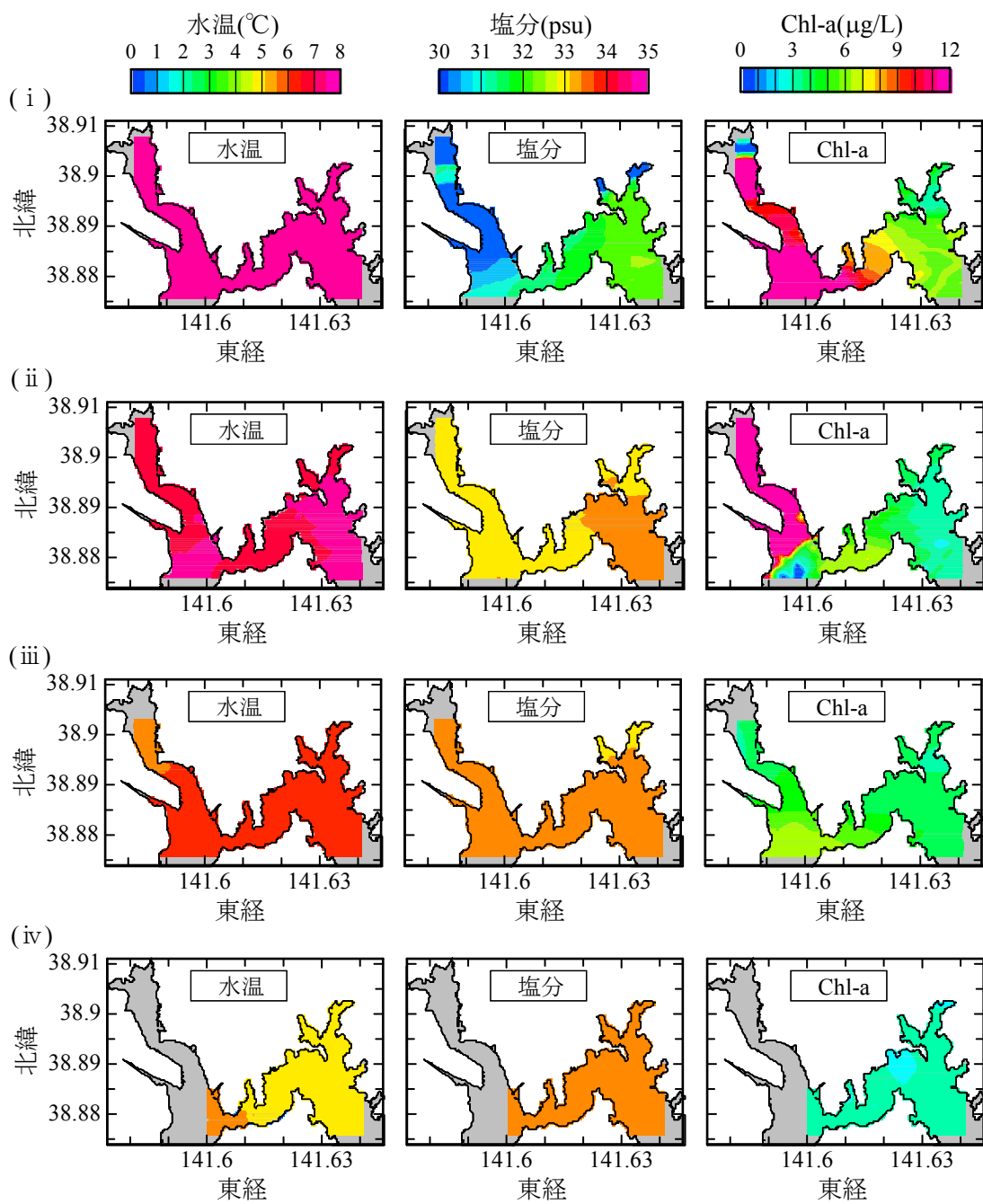


図 4-4-18 2015 年 6 月 18 日 水温，塩分，Chl-a 濃度の平面分布図（中水温時）

(i) : 水深 0 m, (ii) : 水深 5 m, (iii) : 水深 10 m, (iv) : 水深 20 m

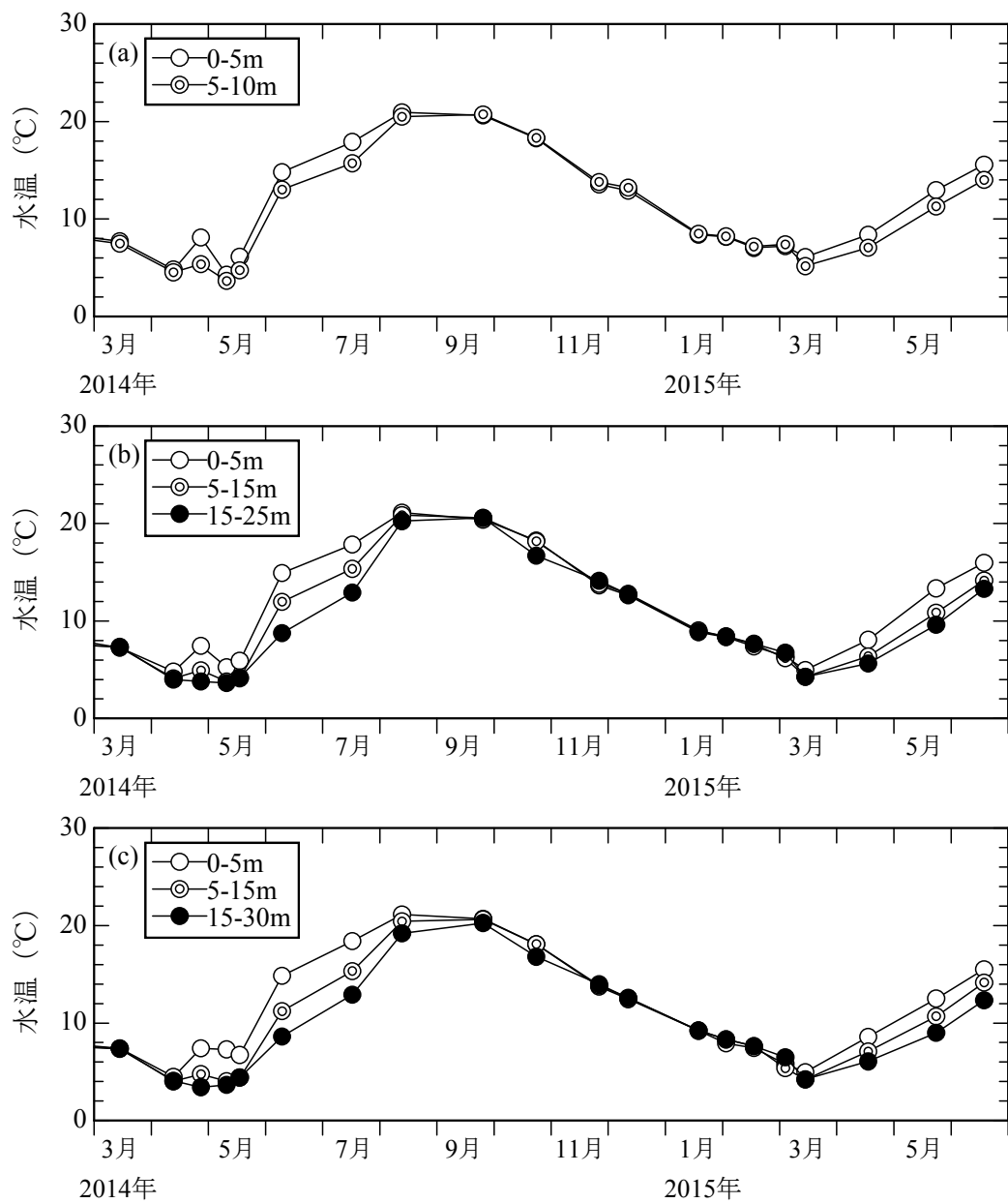


図 4-5-1 Stn. 15 (a), Stn. 11 (b), Stn. 8 (c) における水温の季節変化

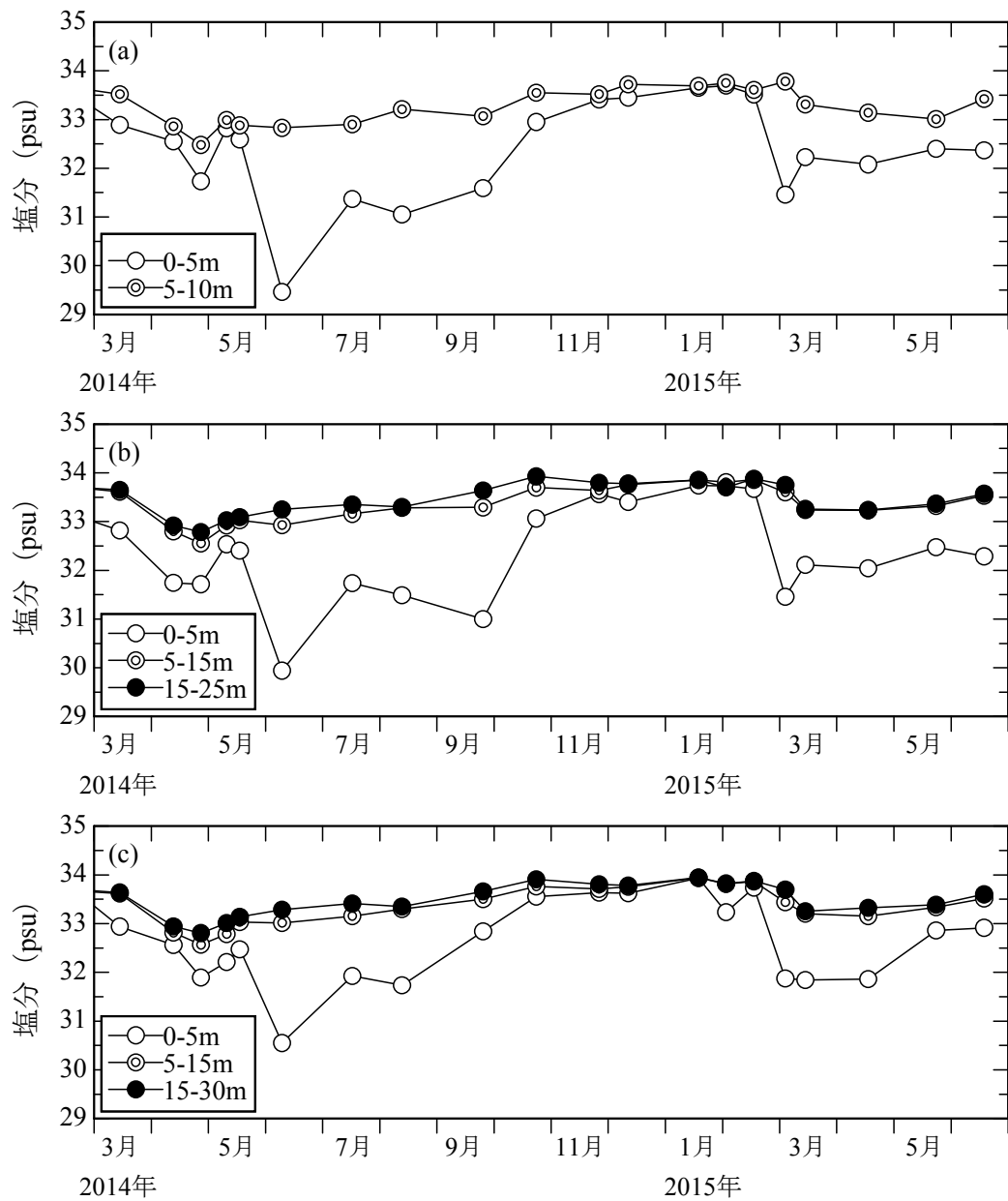


図 4-5-2 Stn. 15 (a), Stn. 11 (b), Stn. 8 (c) における塩分の季節変化

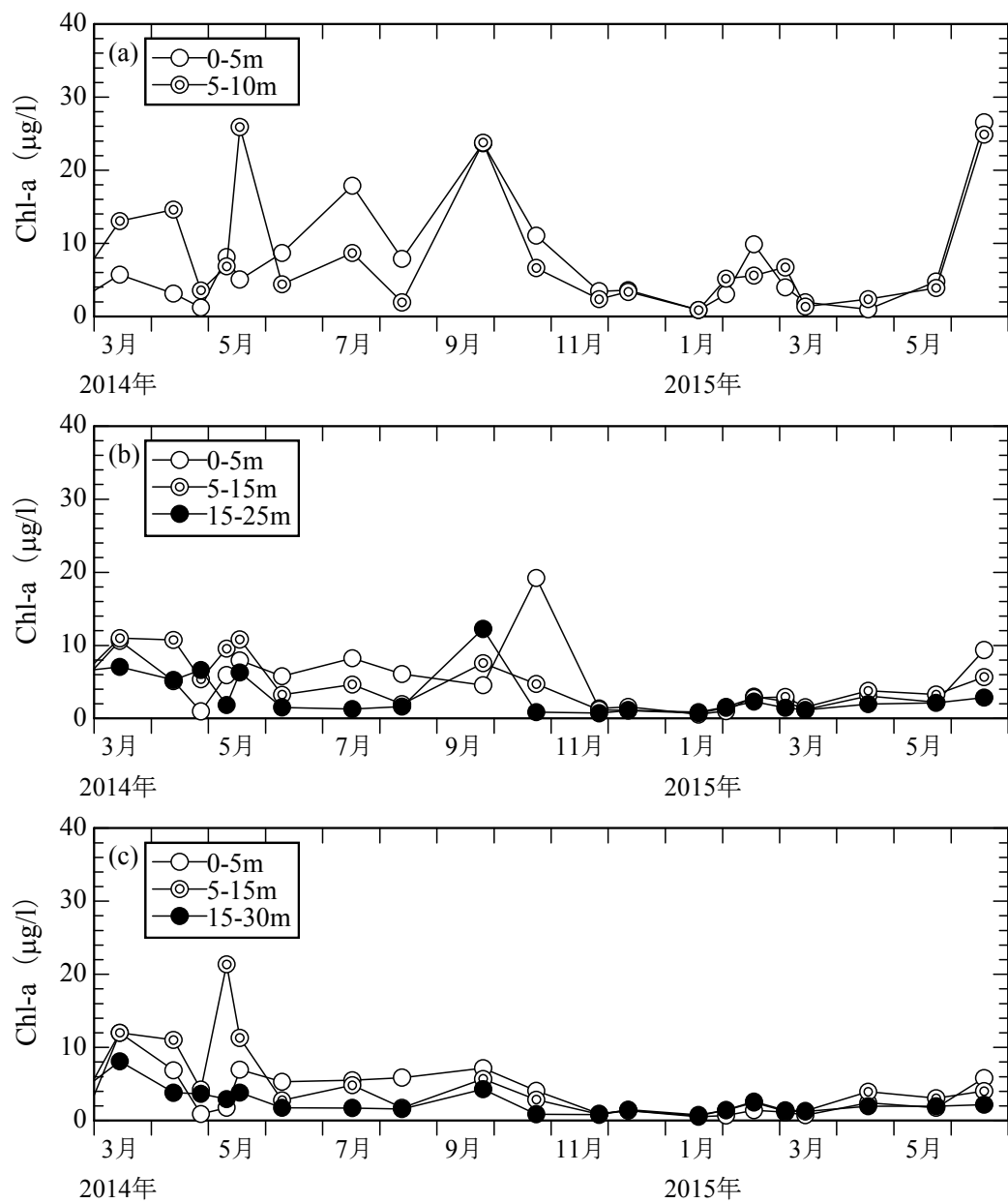


図 4-5-3 Stn. 15 (a), Stn. 11 (b), Stn. 8 (c) における Chl-a 濃度の季節変化

### 4-3 植物プランクトンの輸送状況

Stn.8 におけるクロロフィルの輸送特性を調べるために、クロロフィル輸送量を計算した。輸送量は流速、Chl-a 濃度と各水深層の断面積を乗じて求めた。計算期間は図 3-2-1~3-2-15 に示したように、観測日前後の水位 5.6 m における流速、水温、Chl-a 蛍光値、濁度に変動がないことから、計算期間を観測日とその前後 2 日間として、5 日間の平均流速を求め、計算期間中、Chl-a 濃度は一定であると仮定した。

図 4-5 に全ての観測日の輸送量をまとめた。水深 2.5~5 m の層、水深 5~10 m の層、水深 10~15 m の層、水深 15~30 m の層に分割し、層内の平均 Chl-a 濃度、平均流速、層内の輸送量の合計を示した。

水深 2.5~5 m 層は、Chl-a の平均濃度があまり高くなく、高濃度となる 3 月から 6 月の期間は平均流速もおおよそ -10 mm/s で、クロロフィル輸送量の合計は約 -100 kg であった。8 月から 11 月は流速の正方向成分が他の層よりも大きくなるが、この時期は Chl-a 濃度が低いので、クロロフィル輸送量の合計は約 100 kg であった。以上より、この水深帯はクロロフィルの輸送にはあまり貢献しない層であることが分かった。

水深 5~10 m 層は、Chl-a 濃度が最も高くなる層である。3 月の濃度のピーク時の平均流速は -12 mm/s で、このときの輸送量の合計は -506 kg であった。4 月前半に Chl-a 濃度は下がったが、平均流速が -30 mm/s で、このとき輸送量の合計は -493 kg であった。以上より、この水深帯は 3 月から 5 月に、Chl-a 濃度の増加、または平均流速が強まることで、クロロフィルが大きく負方向へ輸送される層であることが分かった。

水深 10~15 m 層は、3 月から 5 月に Chl-a 濃度が高いとき、平均流速が -2 mm/s 程度で小さく、クロロフィルの輸送はあまり起こっていなかった。水深 15~30 m 層では、3 月に他の層とは異なる正方向に 375 kg のクロロフィルの輸送が起こっていた。これらの水深帯では、いずれも 12 月に約 -40 mm/s の強い負方向の平均流速が生じているが、この時期は Chl-a が低濃度であり、輸送量は層全体を合わせて -200 kg 程度であった。この水深帯は、表層と異なる輸送傾向があることが分かった。



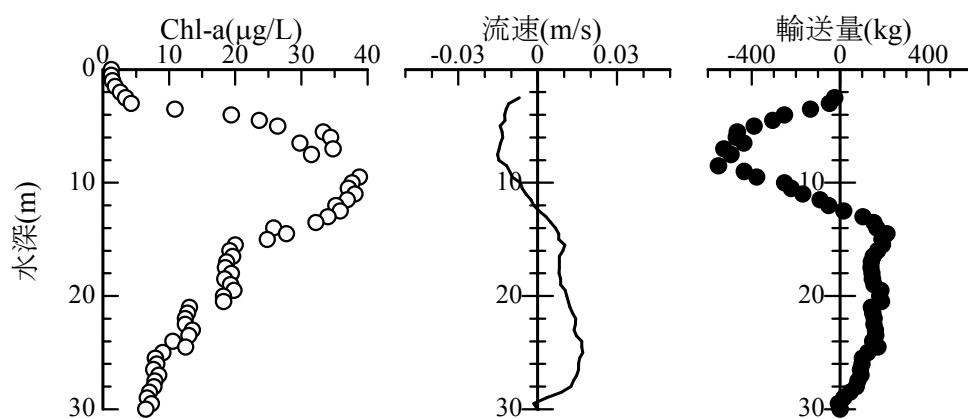


図 4-6-1 クロロフィル・5 日間平均流速・輸送量の鉛直分布  
(2014 年 3 月 31 日)

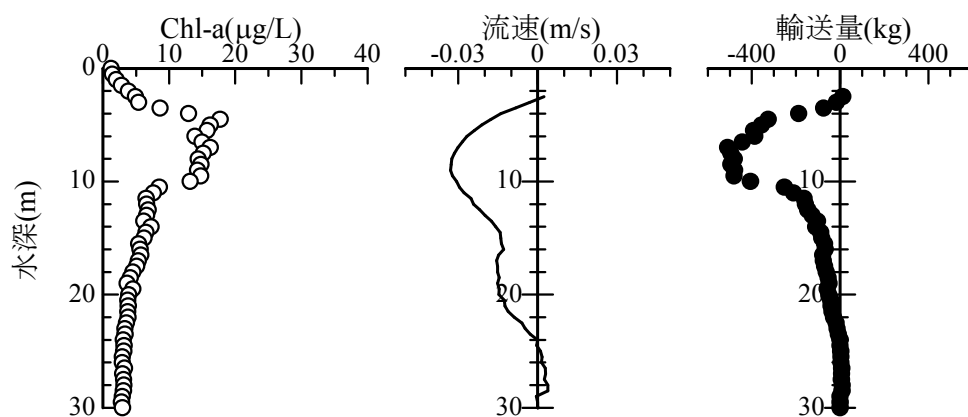


図 4-6-2 クロロフィル・5 日間平均流速・輸送量の鉛直分布  
(2014 年 4 月 12 日)

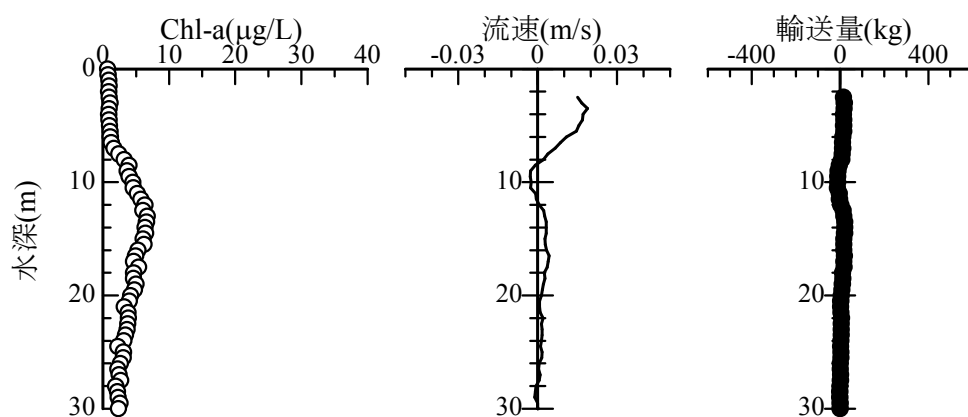


図 4-6-3 クロロフィル・5 日間平均流速・輸送量の鉛直分布  
(2014 年 4 月 27 日)

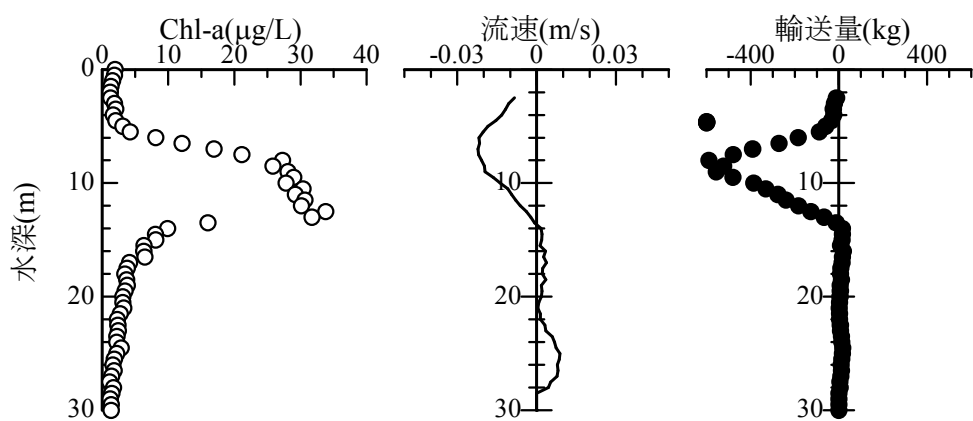


図 4-6-4 クロロフィル・5 日間平均流速・輸送量の鉛直分布  
(2014 年 5 月 10 日)

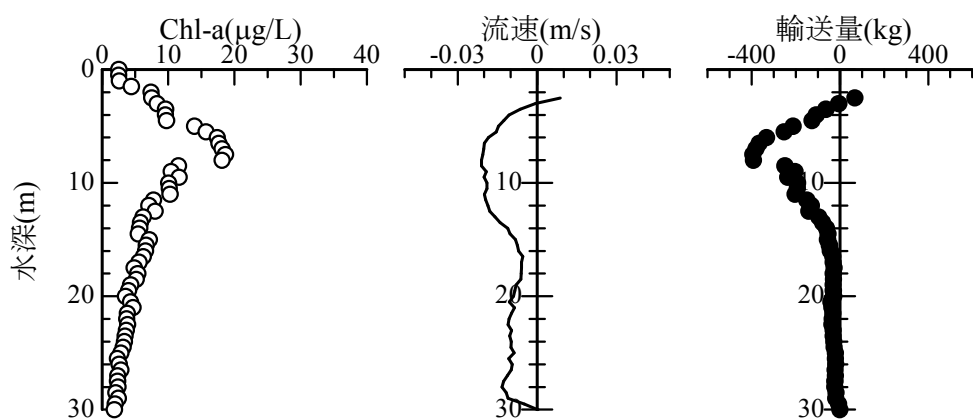


図 4-6-5 クロロフィル・5 日間平均流速・輸送量の鉛直分布  
(2014 年 5 月 17 日)

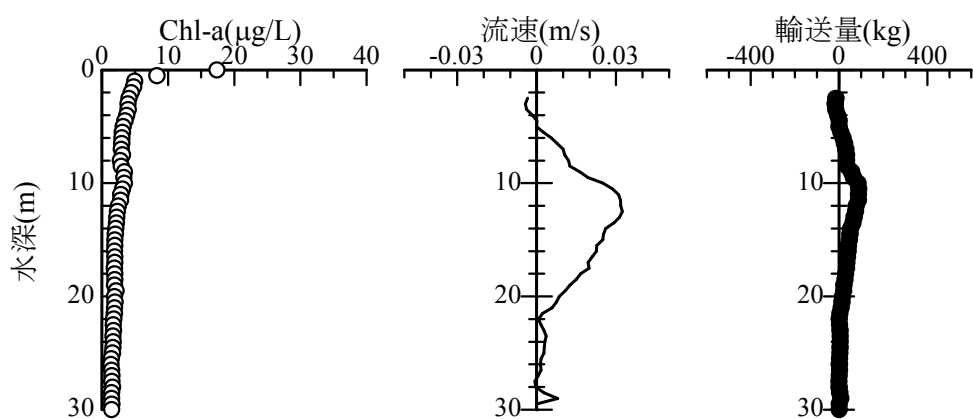


図 4-6-6 クロロフィル・5 日間平均流速・輸送量の鉛直分布  
(2014 年 6 月 9 日)

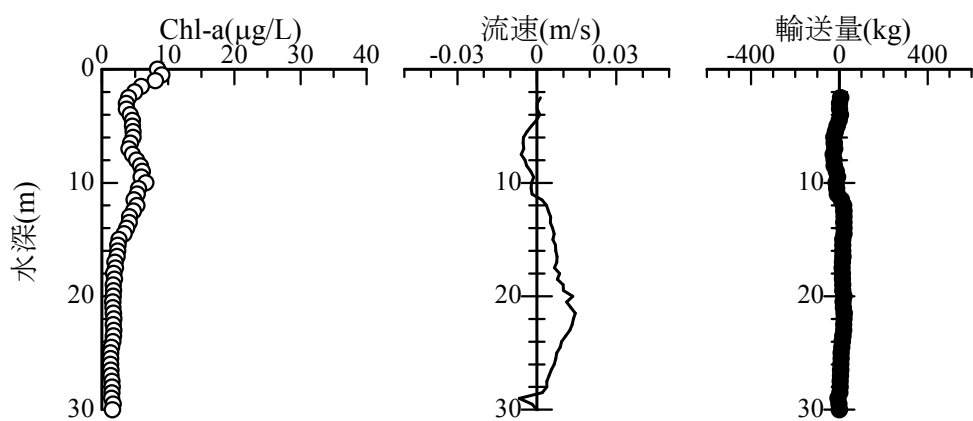


図 4-6-7 クロロフィル・5 日間平均流速・輸送量の鉛直分布  
(2014 年 7 月 16 日)

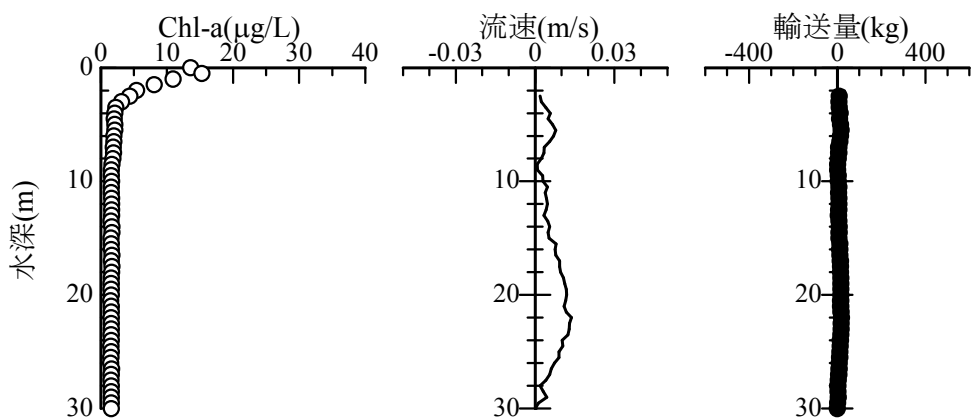


図 4-6-8 クロロフィル・5 日間平均流速・輸送量の鉛直分布  
(2014 年 8 月 12 日)

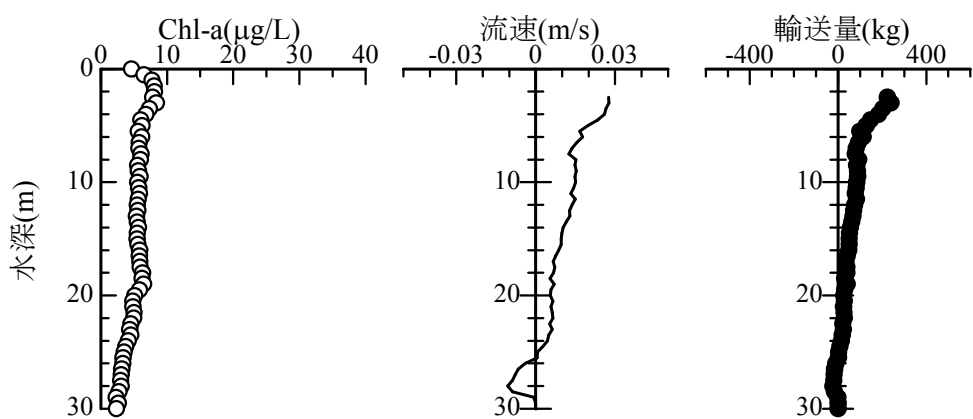


図 4-6-9 クロロフィル・5 日間平均流速・輸送量の鉛直分布  
(2014 年 9 月 25 日)

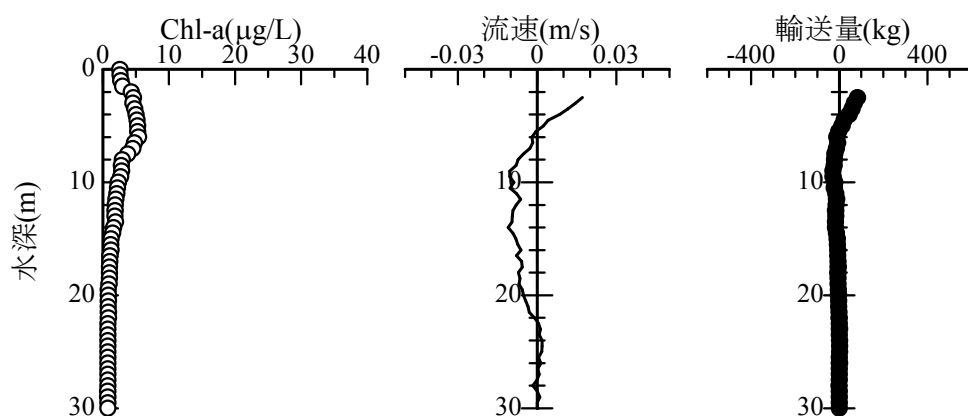


図 4-6-10 クロロフィル・5 日間平均流速・輸送量の鉛直分布  
(2014 年 10 月 23 日)

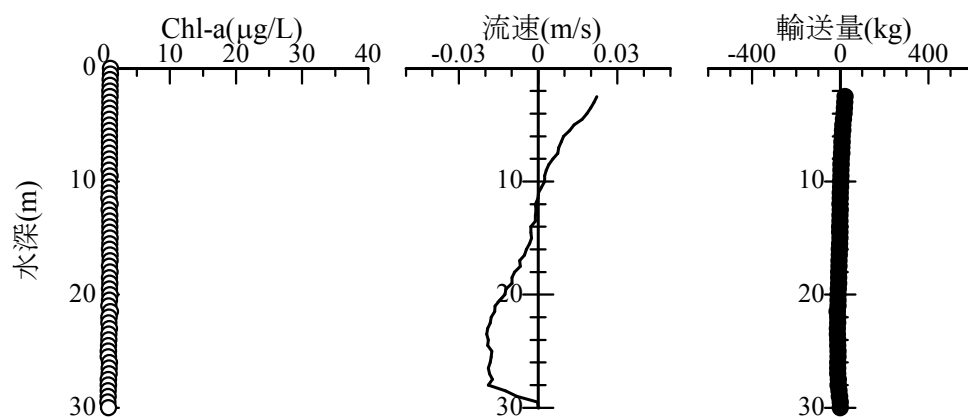


図 4-6-11 クロロフィル・5 日間平均流速・輸送量の鉛直分布  
(2014 年 11 月 26 日)

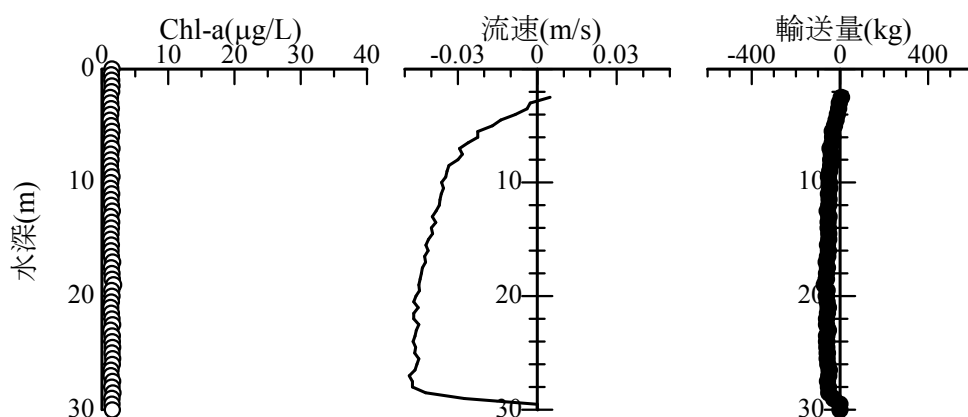


図 4-6-12 クロロフィル・5 日間平均流速・輸送量の鉛直分布  
(2014 年 12 月 11 日)

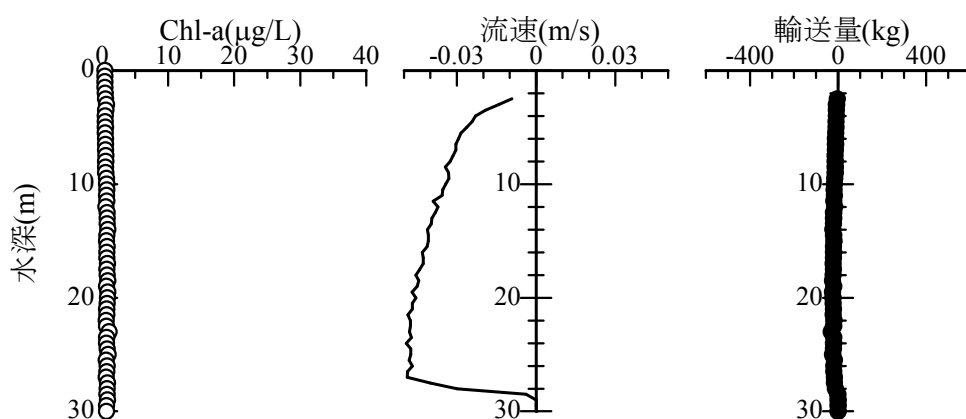


図 4-6-13 クロロフィル・5 日間平均流速・輸送量の鉛直分布  
(2015 年 1 月 18 日)

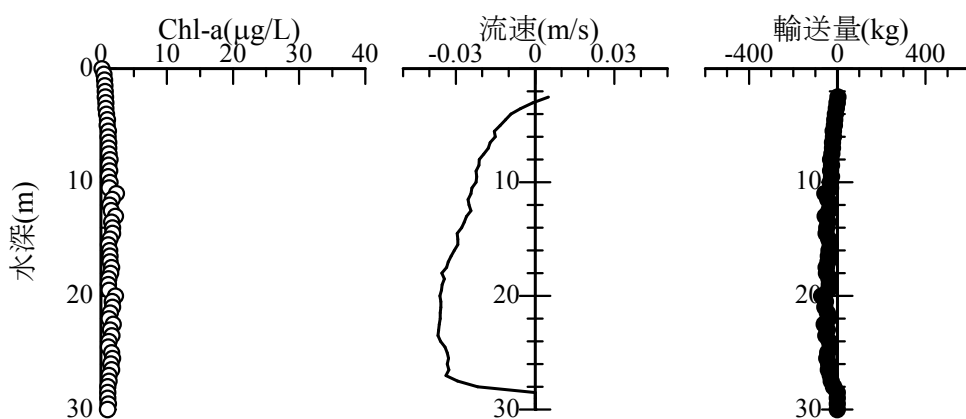


図 4-6-14 クロロフィル・5 日間平均流速・輸送量の鉛直分布  
(2015 年 2 月 2 日)

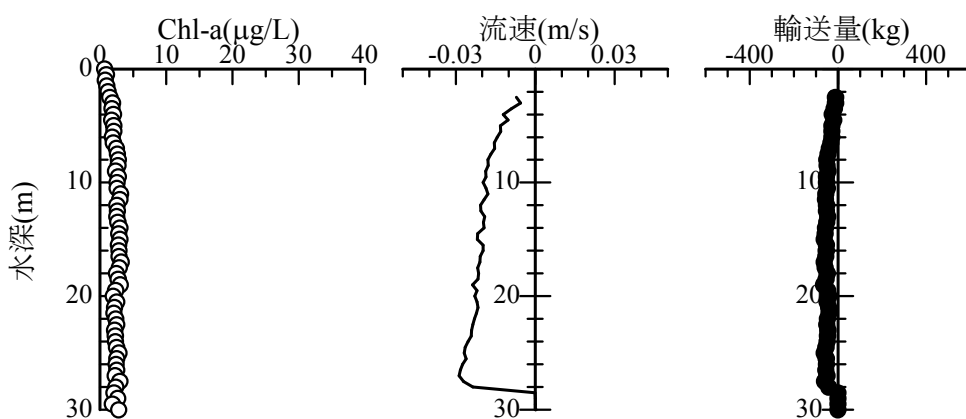


図 4-6-15 クロロフィル・5 日間平均流速・輸送量の鉛直分布  
(2015 年 2 月 17 日)

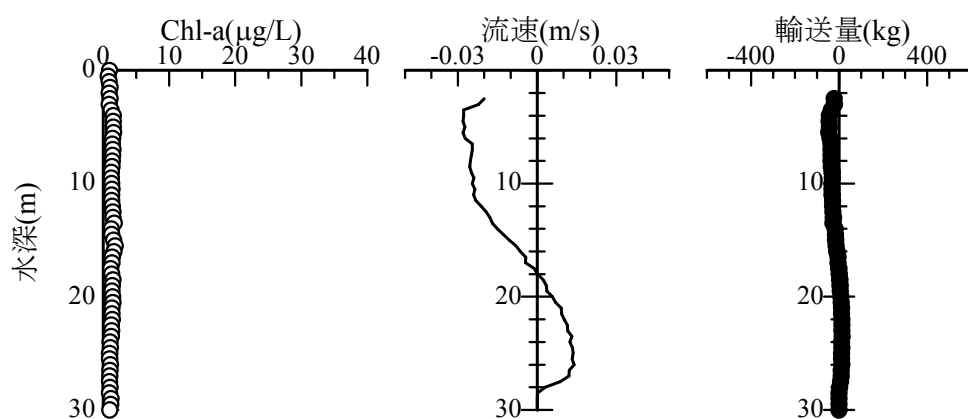


図 4-6-16 クロロフィル・5 日間平均流速・輸送量の鉛直分布  
(2015 年 3 月 3 日)

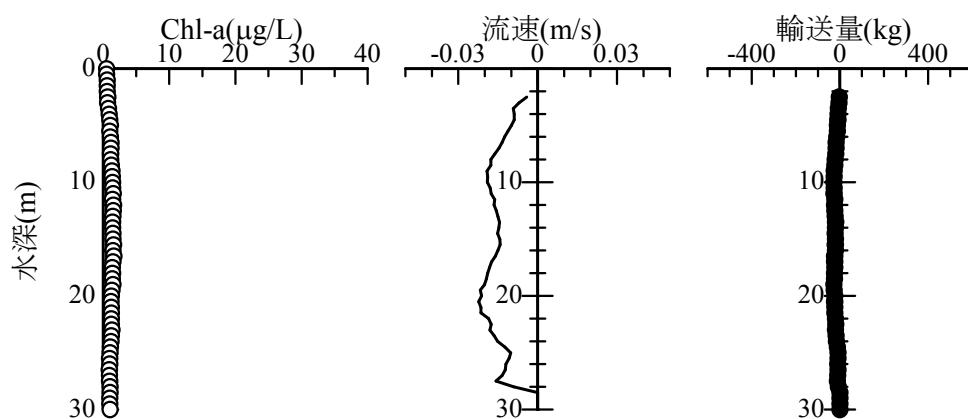


図 4-6-17 クロロフィル・5 日間平均流速・輸送量の鉛直分布  
(2015 年 3 月 14 日)

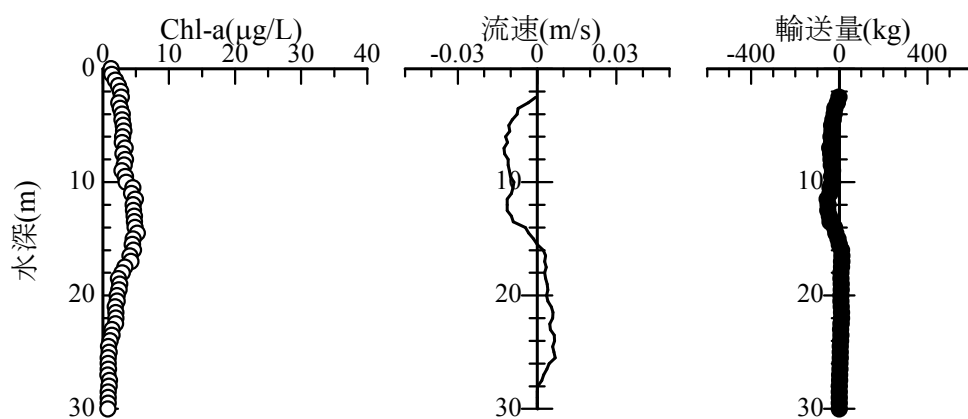


図 4-6-18 クロロフィル・5 日間平均流速・輸送量の鉛直分布  
(2015 年 4 月 17 日)

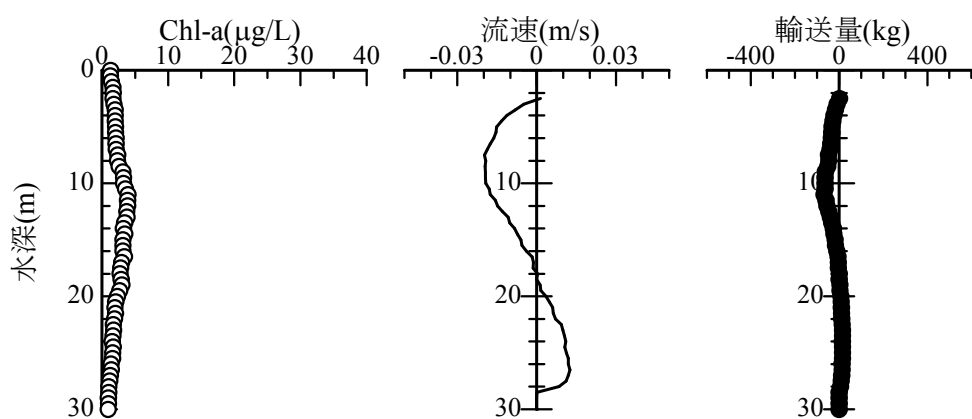


図 4-6-19 クロロフィル・5 日間平均流速・輸送量の鉛直分布  
(2015 年 5 月 23 日)

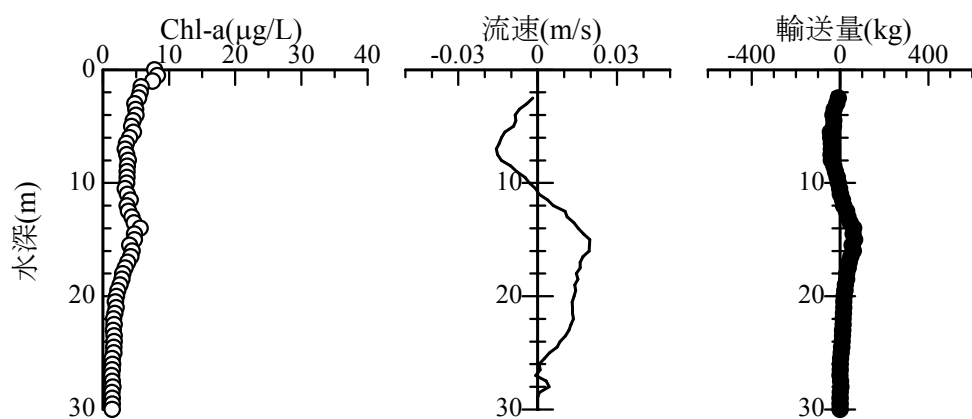


図 4-6-20 クロロフィル・5 日間平均流速・輸送量の鉛直分布  
(2015 年 6 月 18 日)

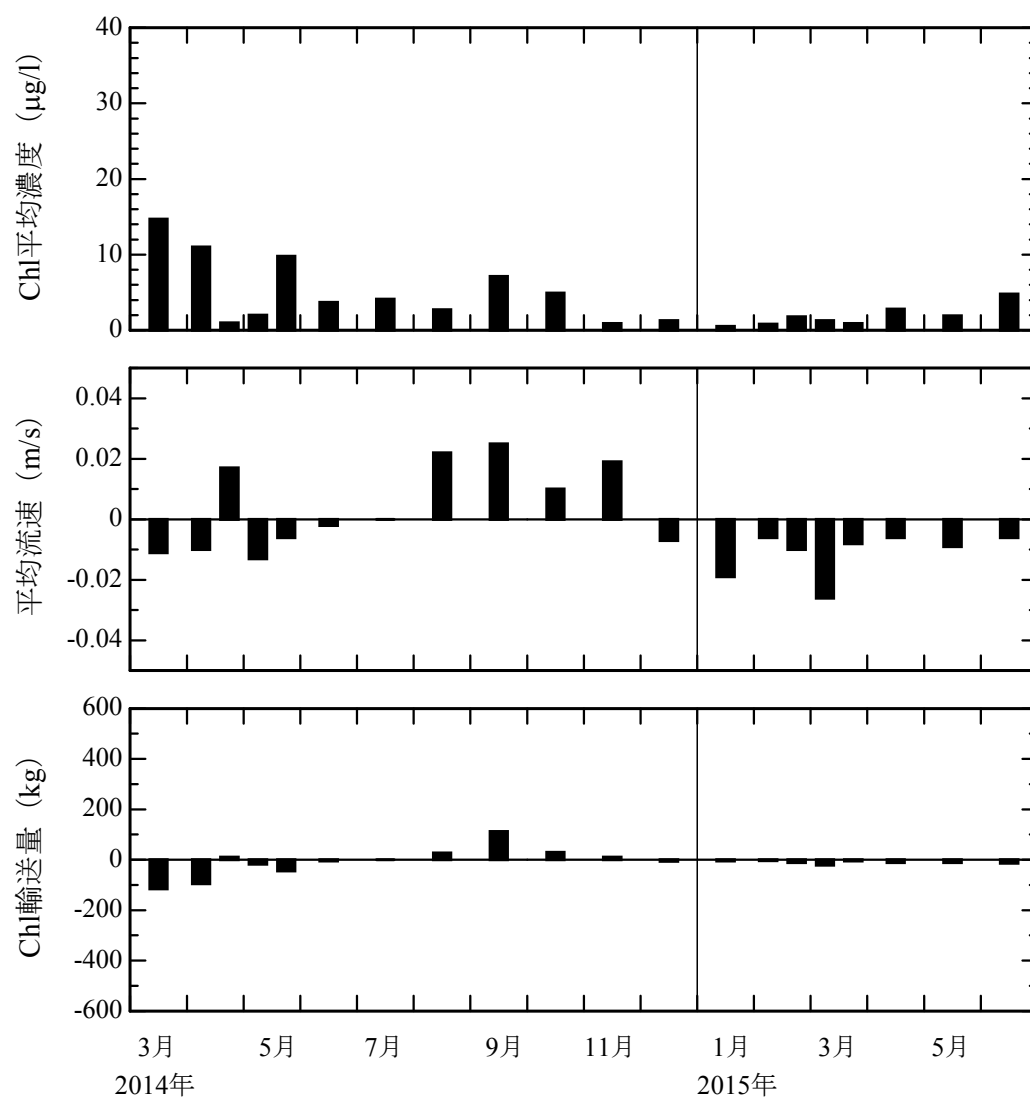


図 4-7-1 Chl-a 濃度の平均値, 5 日間平均流速, クロロフィル輸送量の季節変化  
(水深 2.5~5m 層)



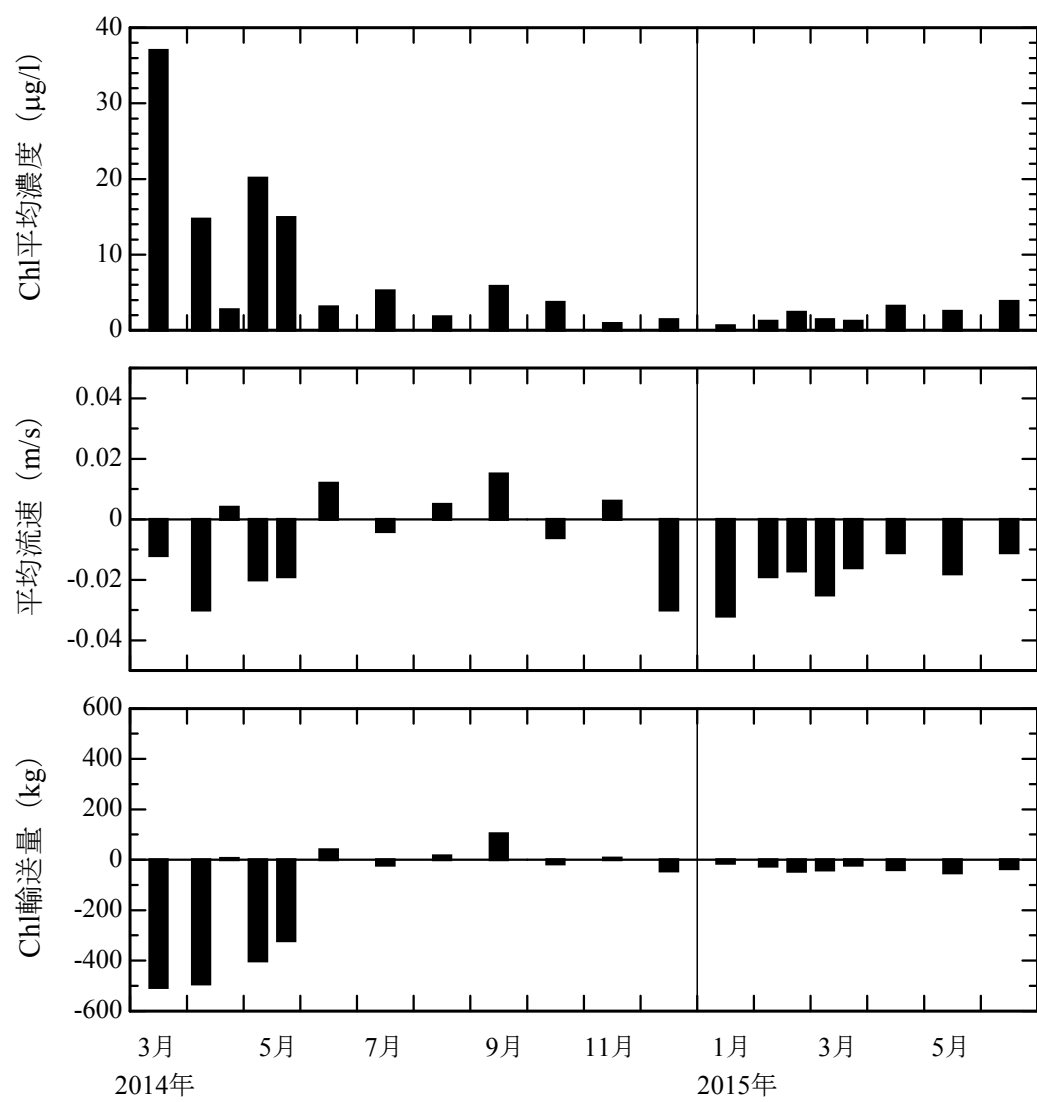


図 4-7-2 Chl-a 濃度の平均値, 5 日間平均流速, クロロフィル輸送量の季節変化  
(水深 5~10m 層)

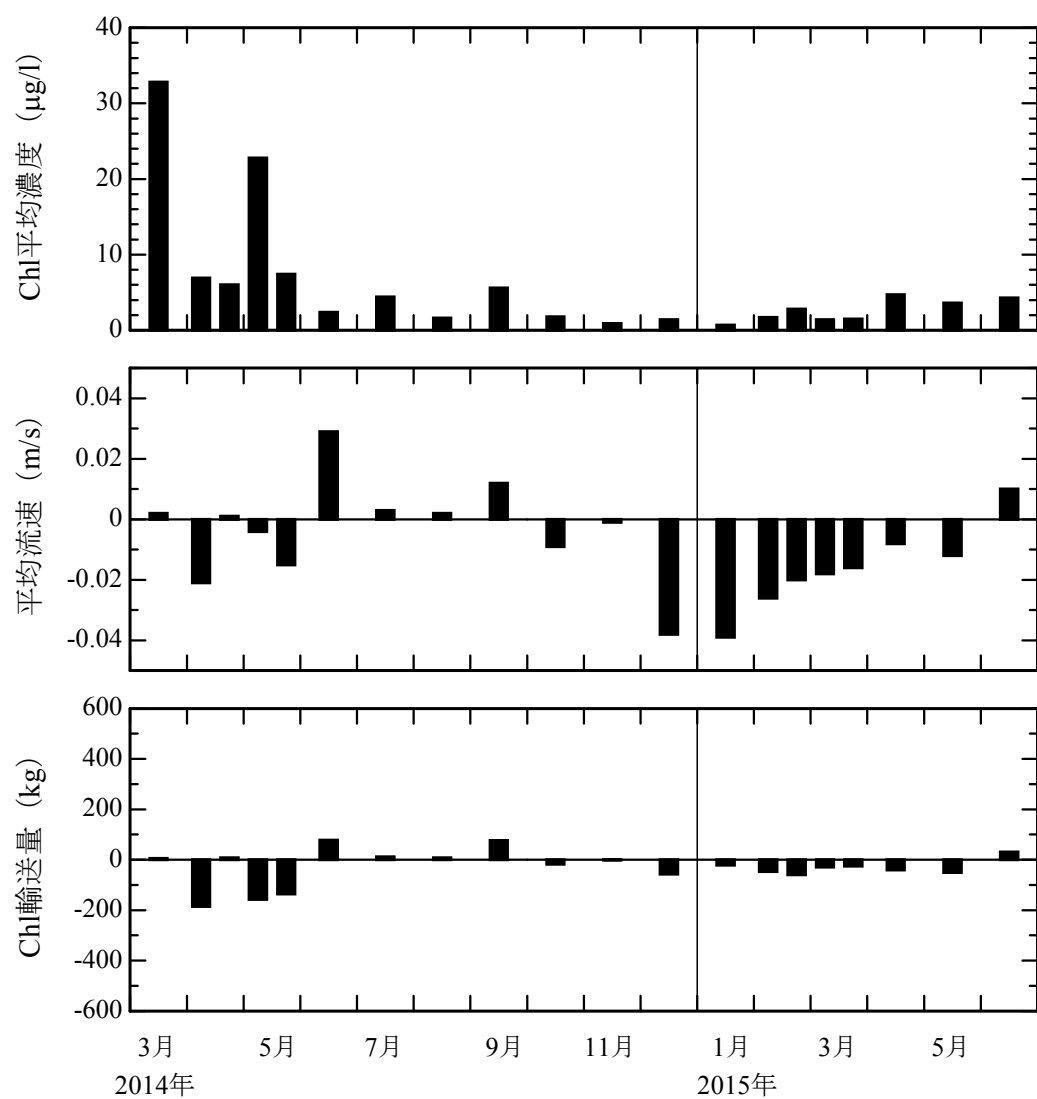


図 4-7-3 Chl-a 濃度の平均値, 5 日間平均流速, クロロフィル輸送量の季節変化  
(水深 10~15m 層)

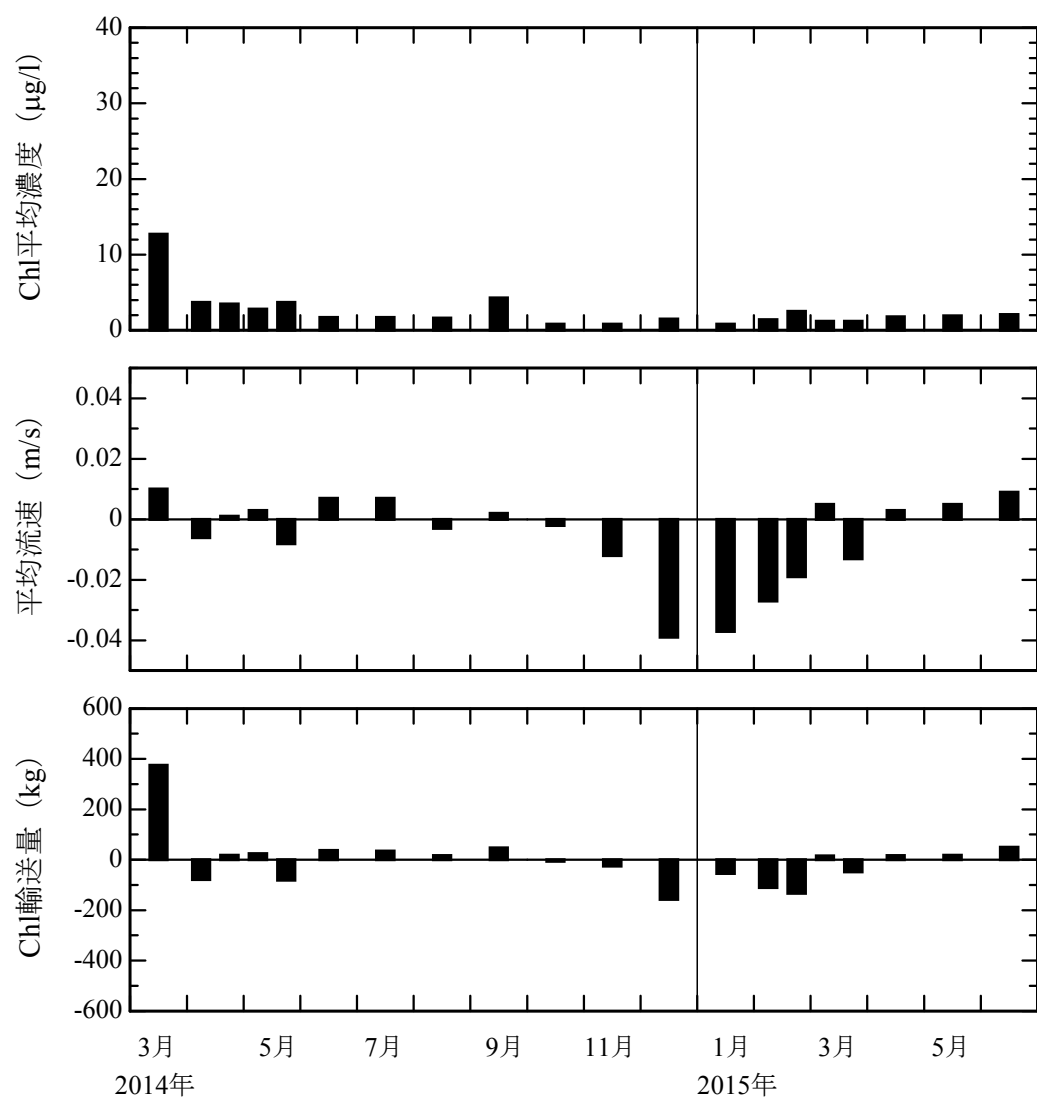


図 4-7-4 Chl-a 濃度の平均値, 5 日間平均流速, クロロフィル輸送量の季節変化  
(水深 15~30m 層)

#### 4-4 考察

三陸沖の海水と気仙沼湾の海水の交換を考察するため、T-S ダイアグラムと太平洋の水温分布図を参考にした。T-S ダイアグラムは水温と塩分の関係をプロットしたもので、Hanawa ら（1987）の研究により三陸沖の海水の由来が、親潮水、表層水、津軽暖流水、沿岸親潮水、下層冷水の 5 つに分類されている。本来は水塊の特徴を表すものであり、潮汐がある場所には不適當であるが、図 3-1-1~3-1-15 より、水位 5.6 m における水温変動は 1 日の間ではわずかであるので、下層については T-S ダイアグラムより判断できると考えた。また、気象庁が公開している水温分布図は観測とシミュレーションを組み合わせたデータ同化手法により作成されており、水深 100m の水温により海流の様子を把握できるとされている。

図 4-8-1~図 4-8-3 に Stn.8 の T-S ダイアグラムを示し、図 4-9-1~4-9-6 に気象庁による太平洋の水温分布図（水深 100m）を示す。

両者を比較すると以下のようなことが分かる。2014 年 3 月から 5 月中旬までは親潮水が南下してきて気仙沼湾の底層に侵入している。6 月から 9 月にかけて、T-S ダイアグラムでは「表層水」の分類になり、沖合水温分布図でも明確な海流は見られない。10 月になると T-S ダイアグラムでは津軽暖流水の分類に移行し、沖合水温分布図では津軽海峡から温暖な海水が三陸海岸に沿って南下してきていることが分かる。その勢力は 11 月から 12 月に最大となり、2015 年 2 月上旬まで継続する。2 月下旬になると親潮水が南下してきて 4 月までその影響が気仙沼湾内に現れており、5 月・6 月は表層水になる。また、黒潮の北上が強まるのは 2014 年 8 月から 12 月にかけてであった。

以上をまとめると、2014 年 3 月~5 月は親潮、6 月~9 月は表層水、10 月~2015 年 2 月は津軽暖流水、3 月~4 月は親潮、5 月~6 月は表層水となる。また、2014 年 8 月~12 月は黒潮の北上が三陸沖の水塊構造に影響を与えているが、必ずしも高水温になるわけではなく、親潮・津軽暖流水・黒潮が接近することで複雑な水温分布になっている。

次に、Stn.8 における月平均流速と植物プランクトン輸送量、および沖合の海流状況との関係を整理した（図 4-10-1~4-10-16）。これより、親潮が南下した 2014 年 3 月~5 月は流速と植物プランクトンの輸送方向が負であり、東湾から大島瀬戸にかけて植物プランクトンが多量に輸送されていることが分かる。6 月~9 月は表層水であり、このときは流速・植物プランクトンの輸送方向は概ね正で、値は小さい。そのため、活発な輸送は生じていないと考えられる。10 月から津軽暖流水が接岸し、輸送方向は再び負に転じ、12 月から 2015 年 2 月にかけて東湾からの流速・植物プランクトン輸送量が大きくなる。3 月・4 月は親潮が南下して輸送は負方向であるが、その大きさは小さい。これは親潮の勢力が 2014 年の方が強かった（三陸沿岸に冷水が広範囲に接岸していた）ことが原因と推測される。5 月・6 月は表層が正方向、底層が負方向であった。

以上より，親潮・津軽暖流水が南下してくると東湾から気仙沼湾内に沖合水が流入し，植物プランクトンが湾内に輸送されてくる可能性が示された．特に，親潮が沿岸に接岸したときに植物プランクトン輸送量が大きくなると考えられる．

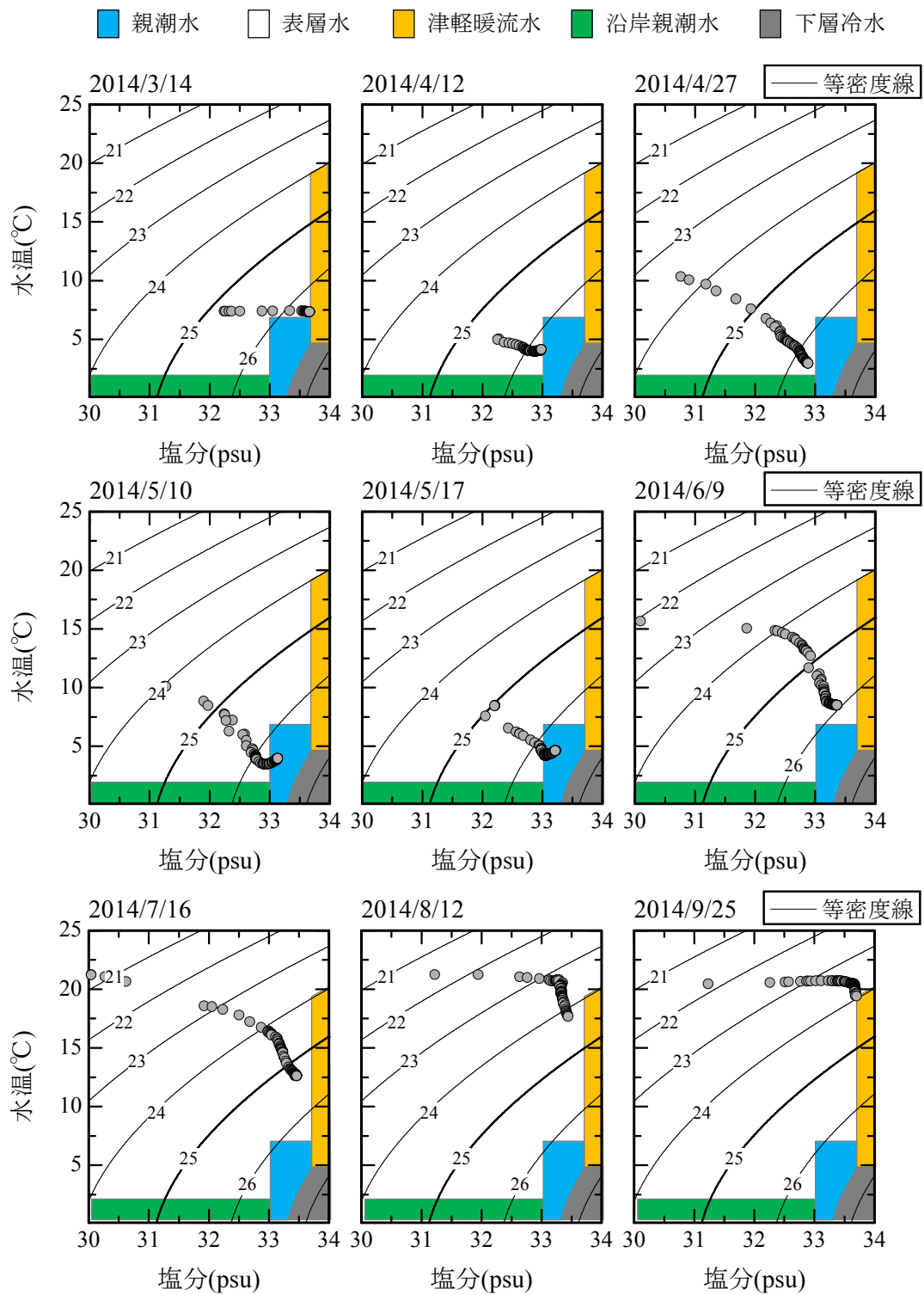


図 4-8-1 Stn. 8 における水温と塩分の関係 (2014 年 3 月 14 日～9 月 25 日)

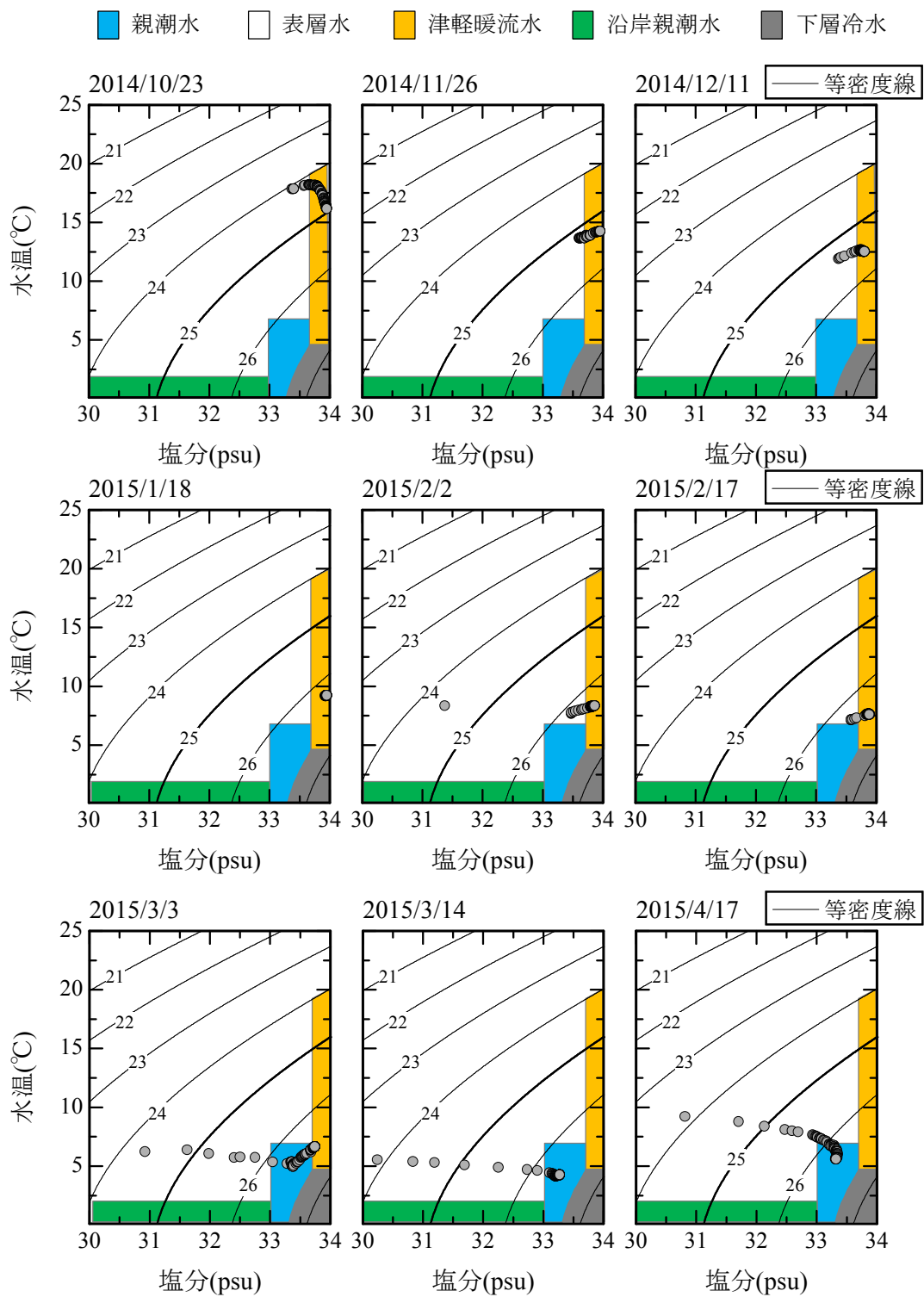


図 4-8-2 Stn. 8 における水温と塩分の関係 (2014 年 10 月 23 日~2015 年 4 月 17 日)

親潮水    
  表層水    
  津軽暖流水    
  沿岸親潮水    
  下層冷水

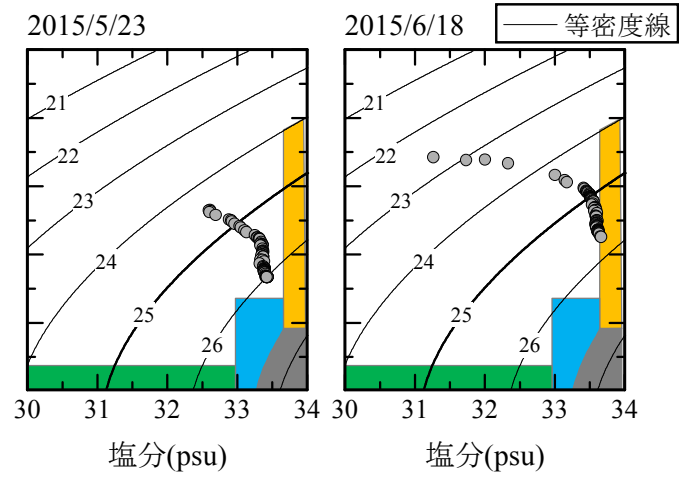


図 4-8-3 Stn. 8 における水温と塩分の関係 (2015 年 5 月 23 日～2015 年 6 月 18 日)



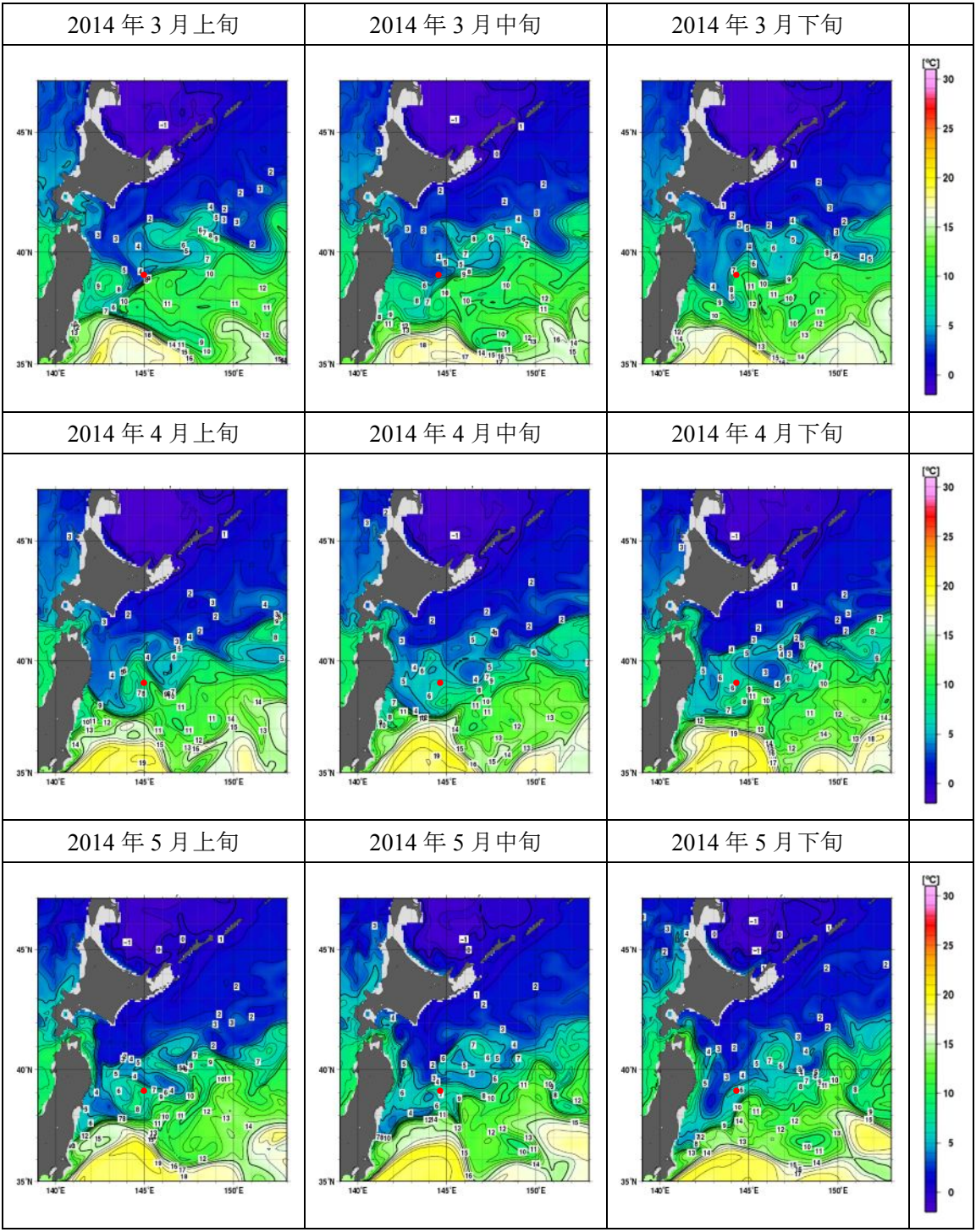


图 4-9-1 旬平均表層水温（親潮域，水深 100 m，2014 年 3 月～5 月）

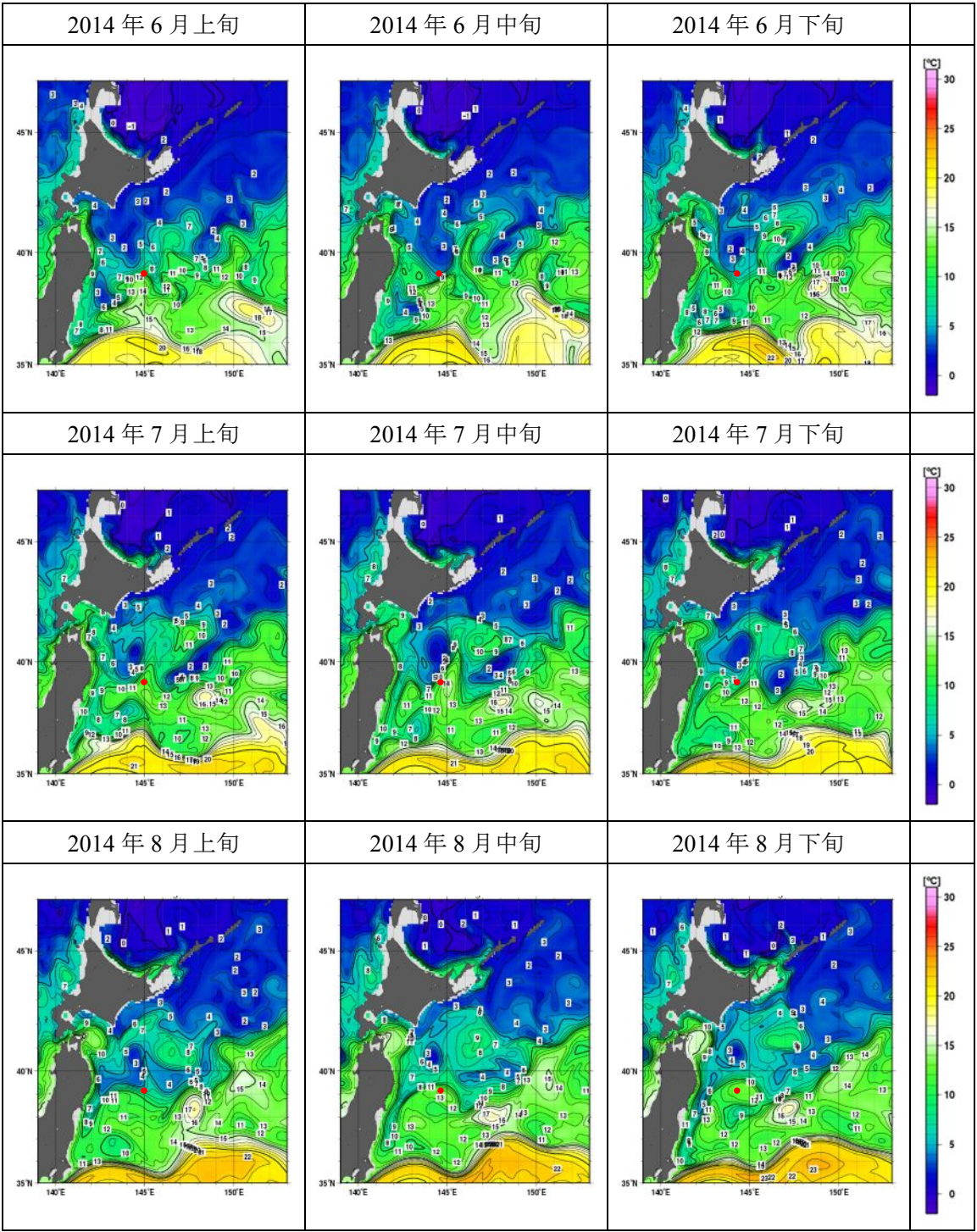


图 4-9-2 旬平均表層水温（親潮域，水深 100 m，2014 年 6 月～8 月）



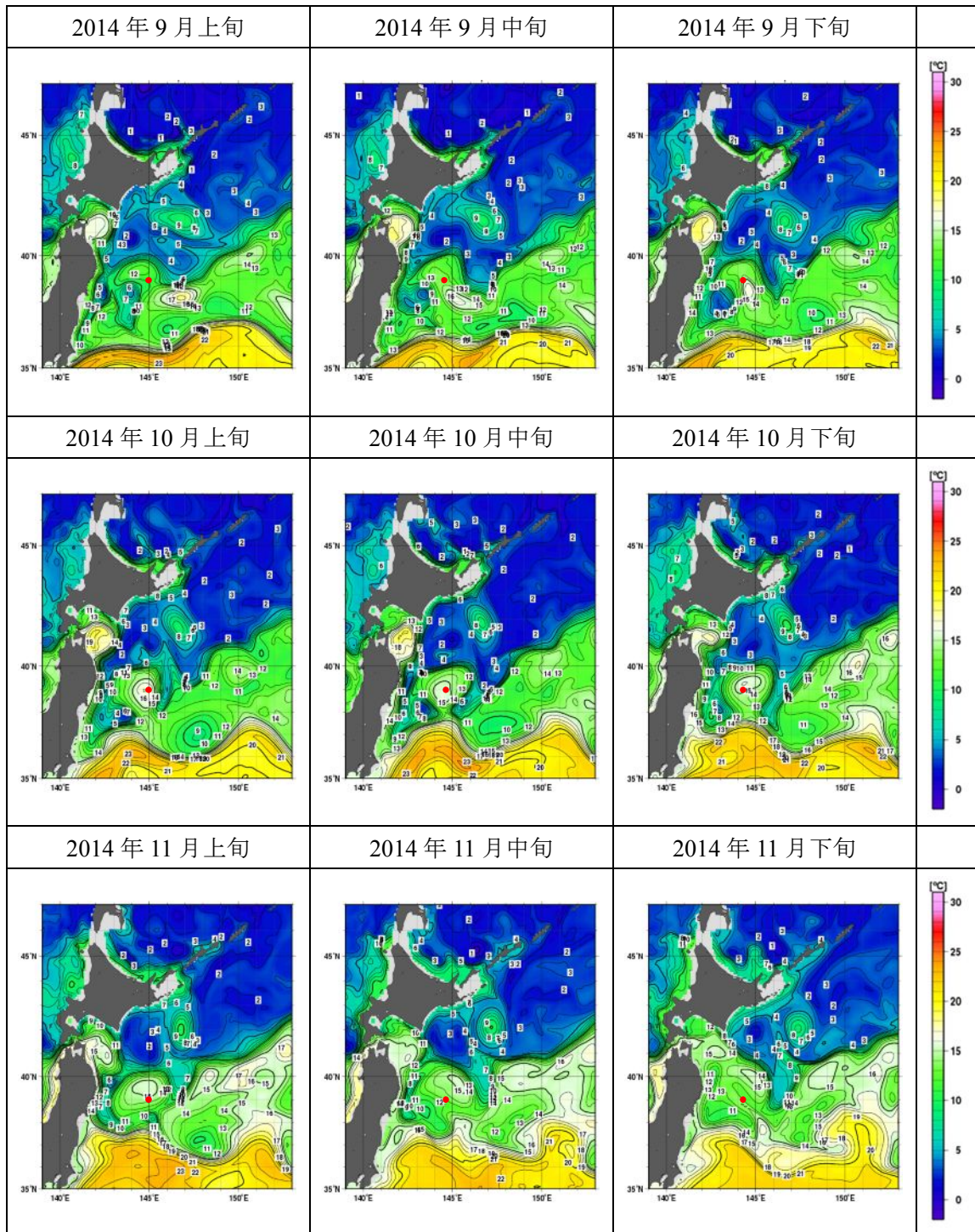


図 4-9-3 旬平均表層水温（親潮域，水深 100 m，2014 年 9 月～11 月）

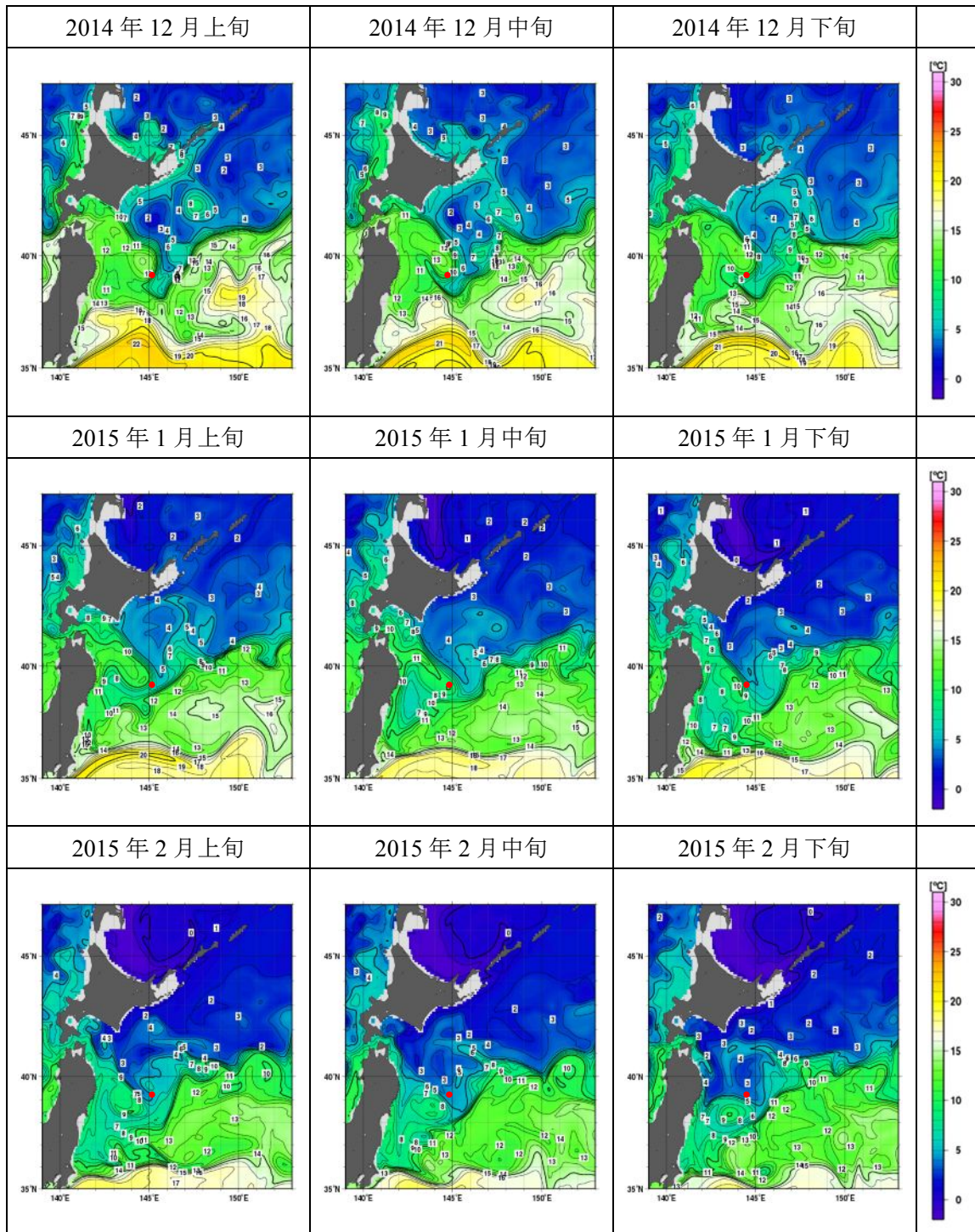


図 4-9-4 旬平均表層水温（親潮域，水深 100 m，2014 年 12 月～2015 年 2 月）



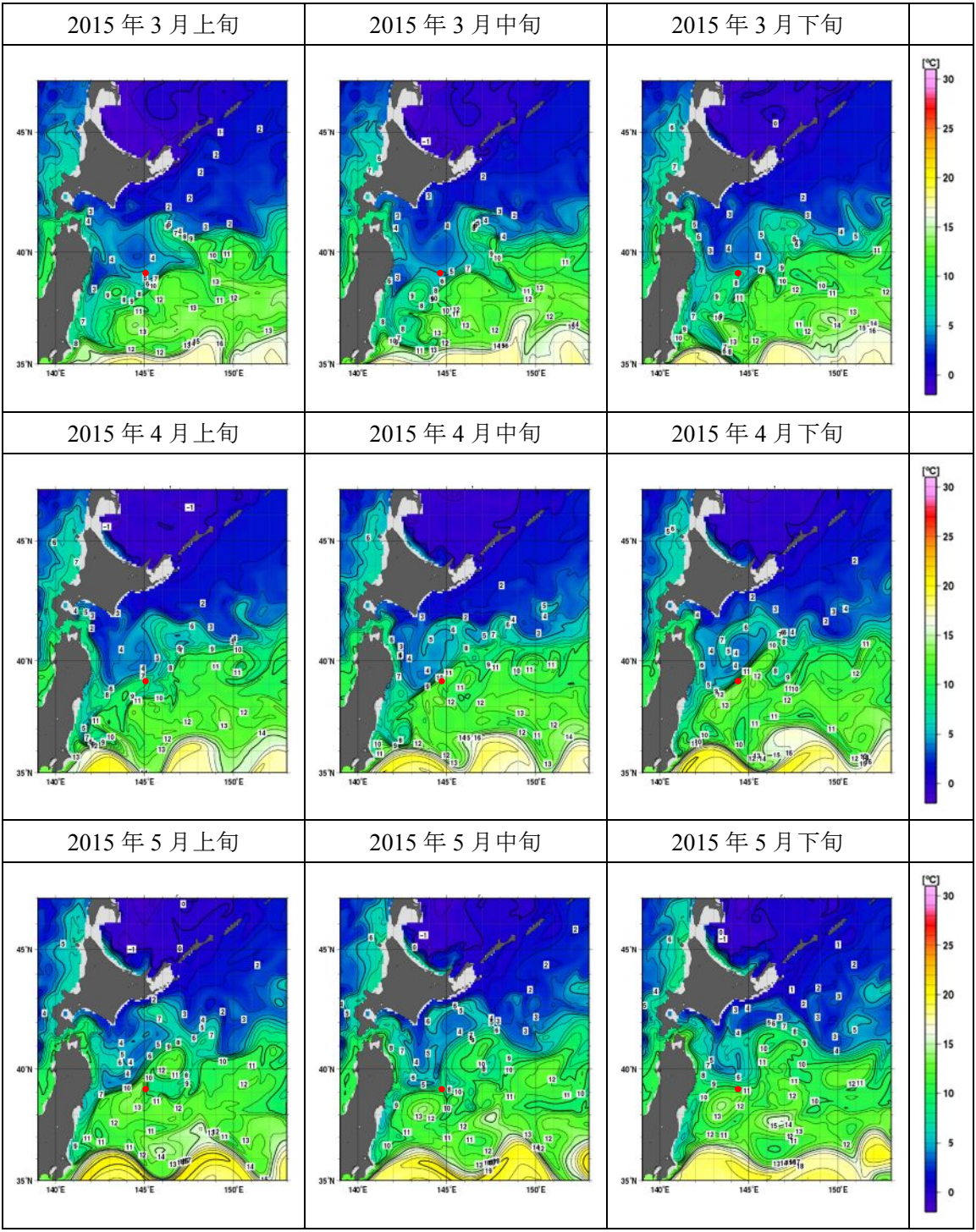


图 4-9-5 旬平均表層水温（親潮域，水深 100 m，2015 年 3 月～5 月）

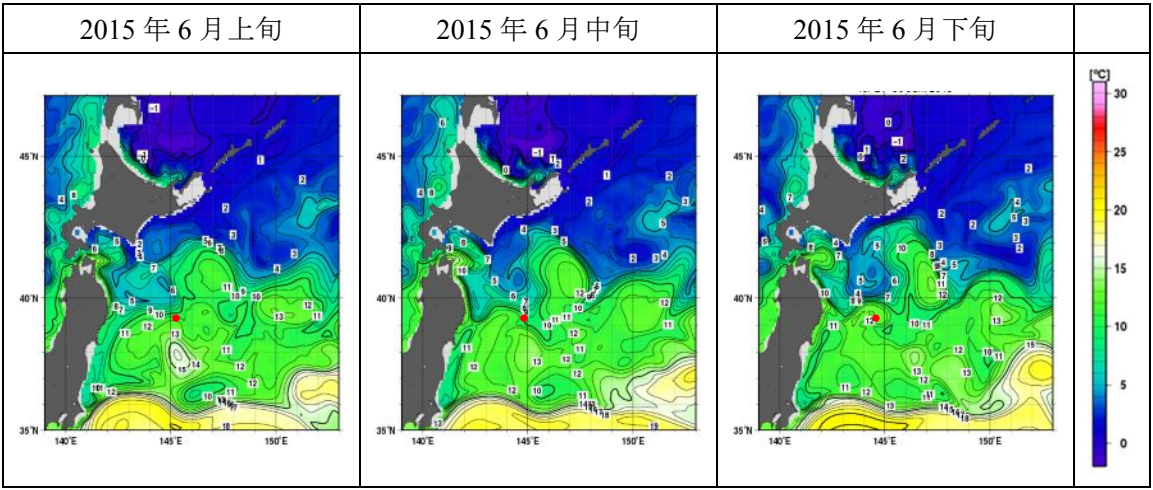


图 4-9-6 旬平均表層水温（親潮域，水深 100 m，2015 年 6 月）

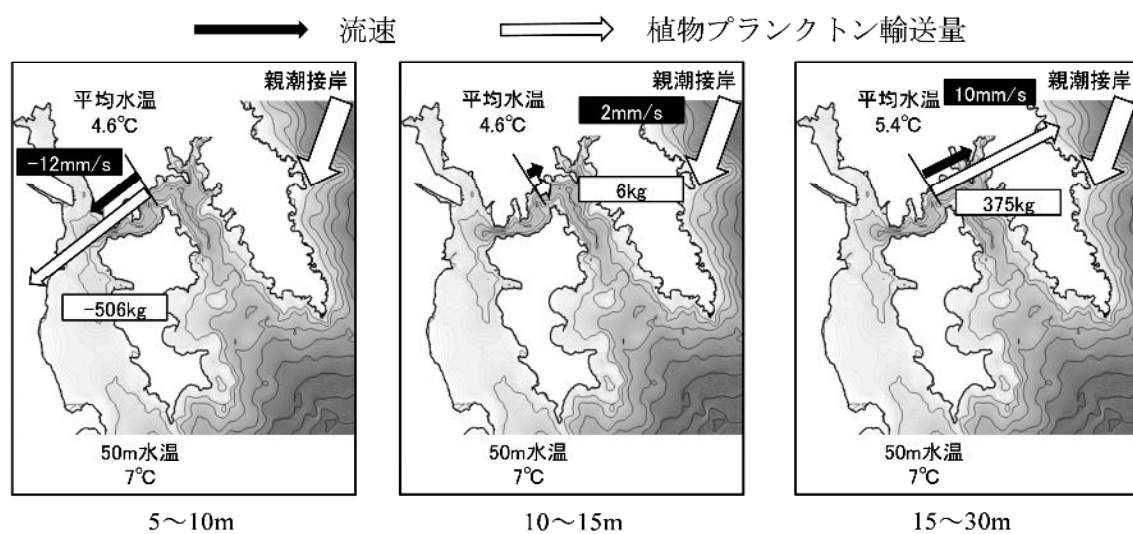


図 4-10-1 水深別の流速・植物プランクトン輸送量と海象 (2014 年 3 月 31 日)

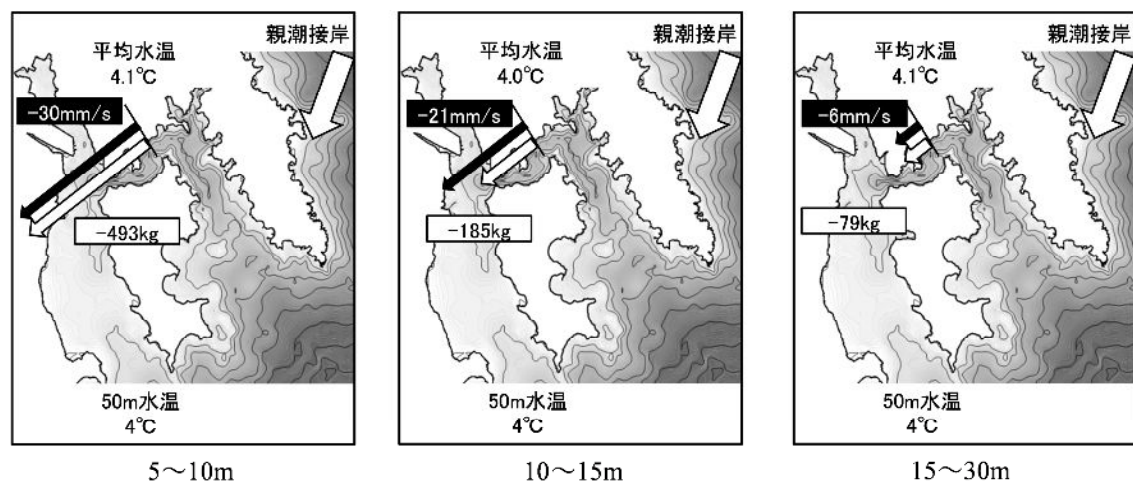


図 4-10-2 水深別の流速・植物プランクトン輸送量と海象 (2014 年 4 月 12 日)

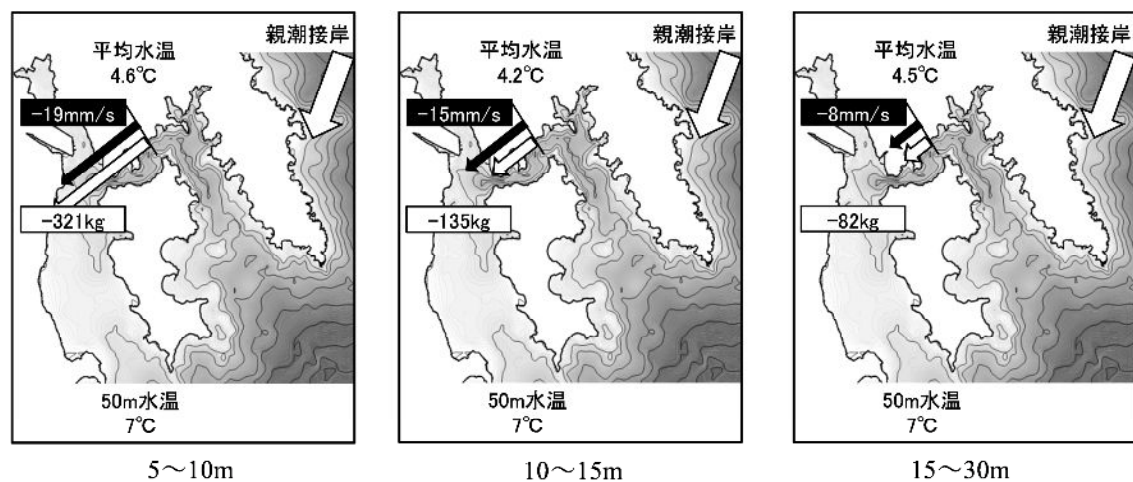


図 4-10-3 水深別の流速・植物プランクトン輸送量と海象 (2014 年 5 月 17 日)



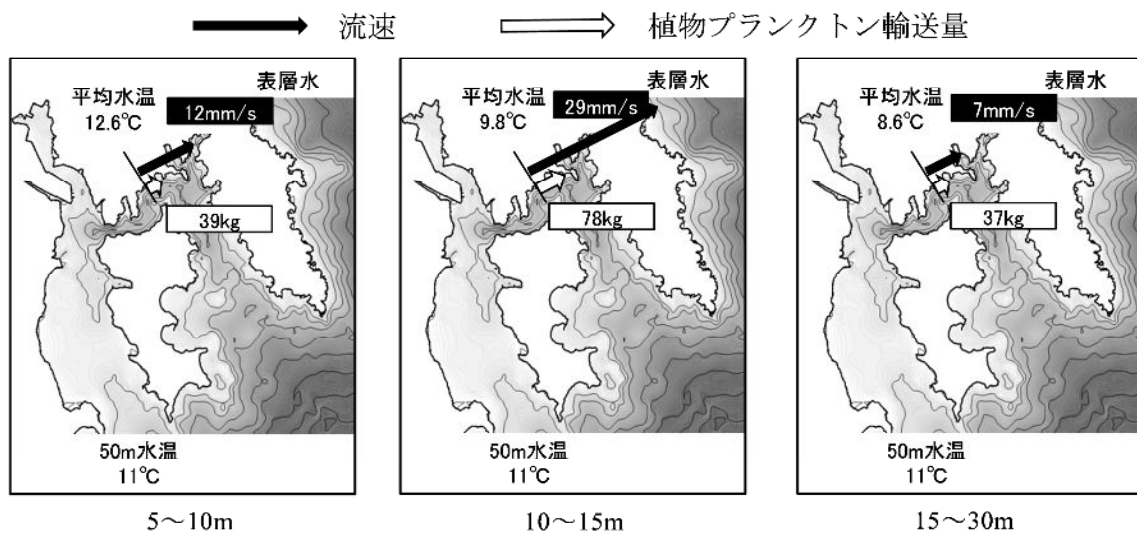


図 4-10-4 水深別の流速・植物プランクトン輸送量と海象 (2014 年 6 月 9 日)

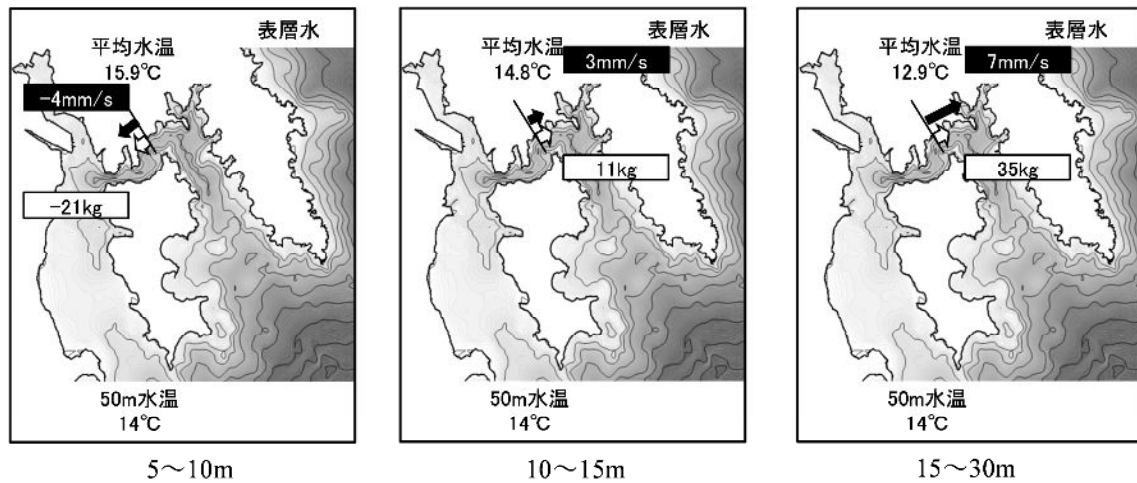


図 4-10-5 水深別の流速・植物プランクトン輸送量と海象 (2014 年 7 月 16 日)

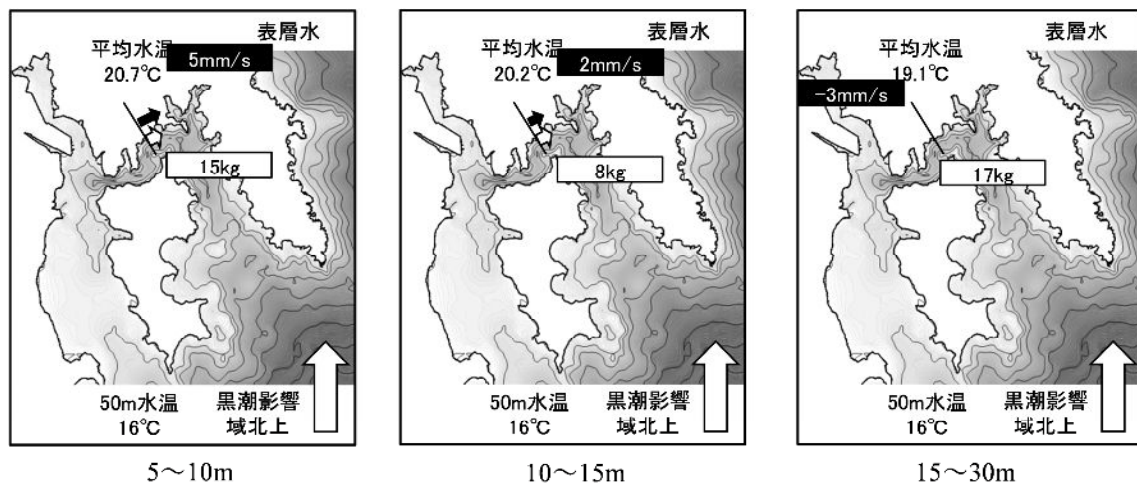


図 4-10-6 水深別の流速・植物プランクトン輸送量と海象 (2014 年 8 月 12 日)



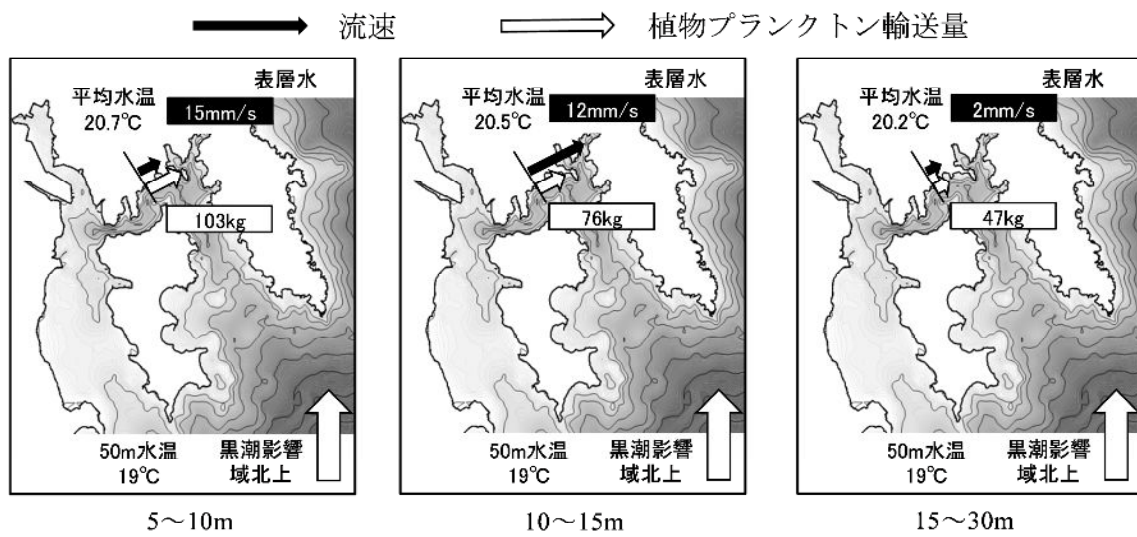


図 4-10-7 水深別の流速・植物プランクトン輸送量と海象 (2014 年 9 月 25 日)

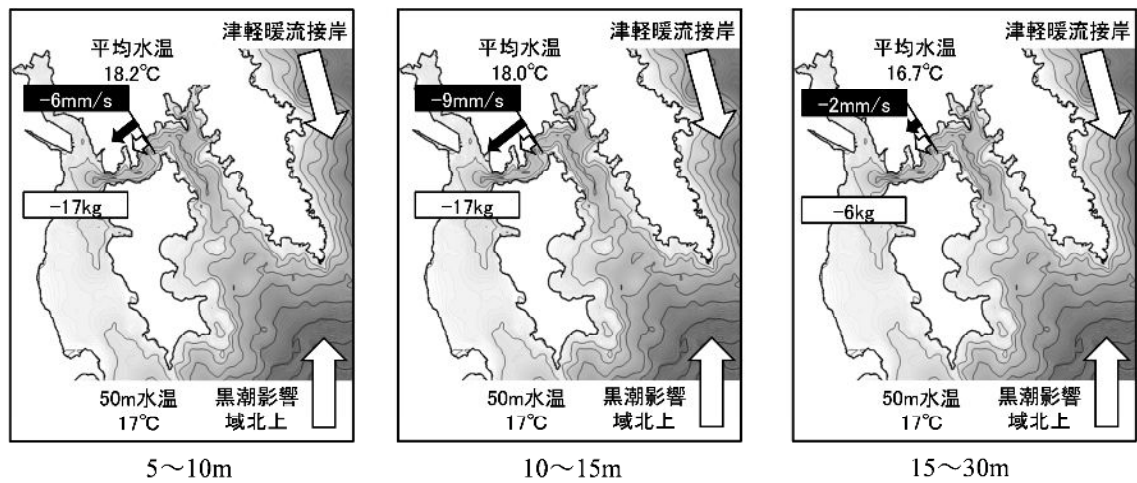


図 4-10-8 水深別の流速・植物プランクトン輸送量と海象 (2014 年 10 月 23 日)

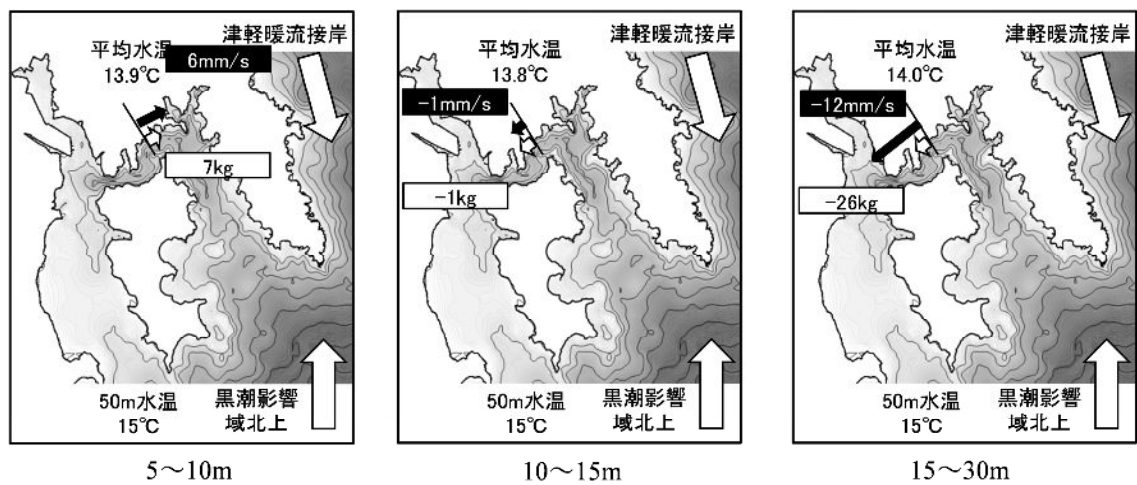


図 4-10-9 水深別の流速・植物プランクトン輸送量と海象 (2014 年 11 月 26 日)

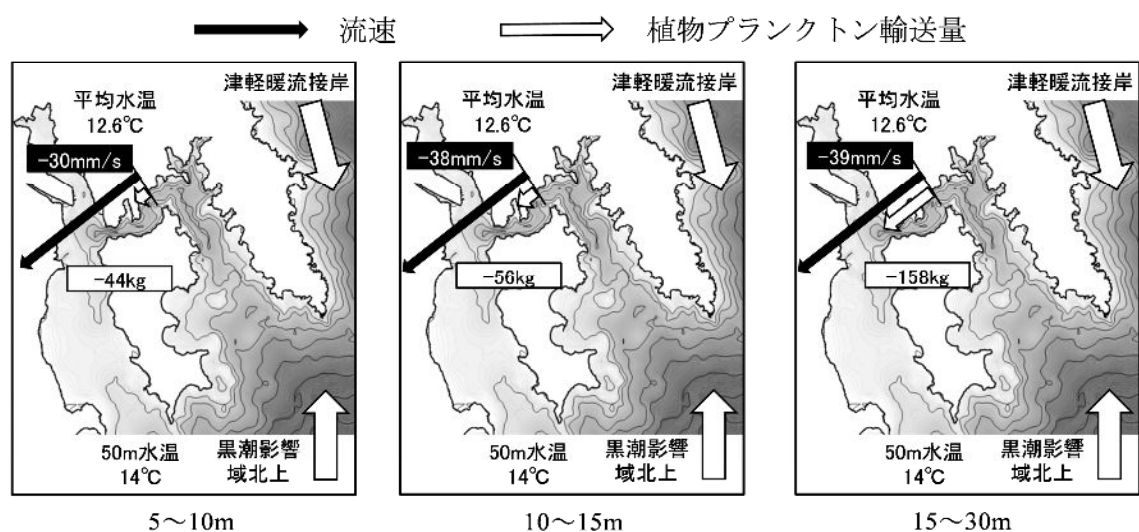


図 4-10-10 水深別の流速・植物プランクトン輸送量と海象 (2014 年 12 月 11 日)

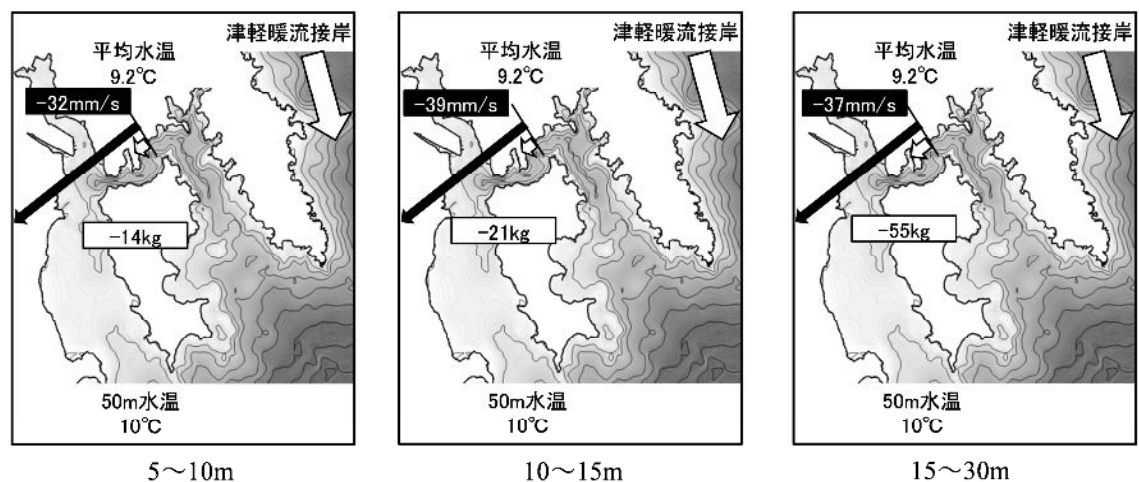


図 4-10-11 水深別の流速・植物プランクトン輸送量と海象 (2015 年 1 月 18 日)

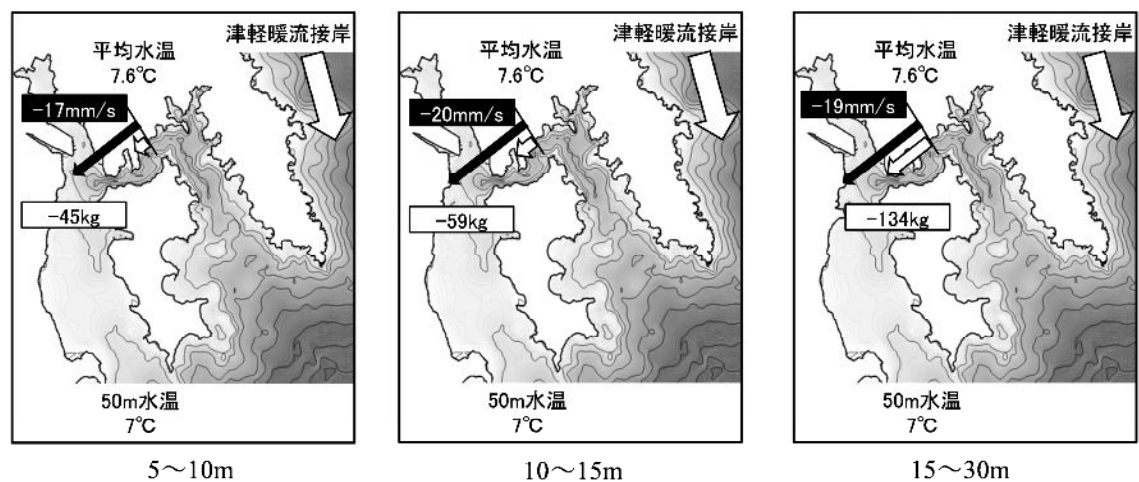


図 4-10-12 水深別の流速・植物プランクトン輸送量と海象 (2015 年 2 月 17 日)



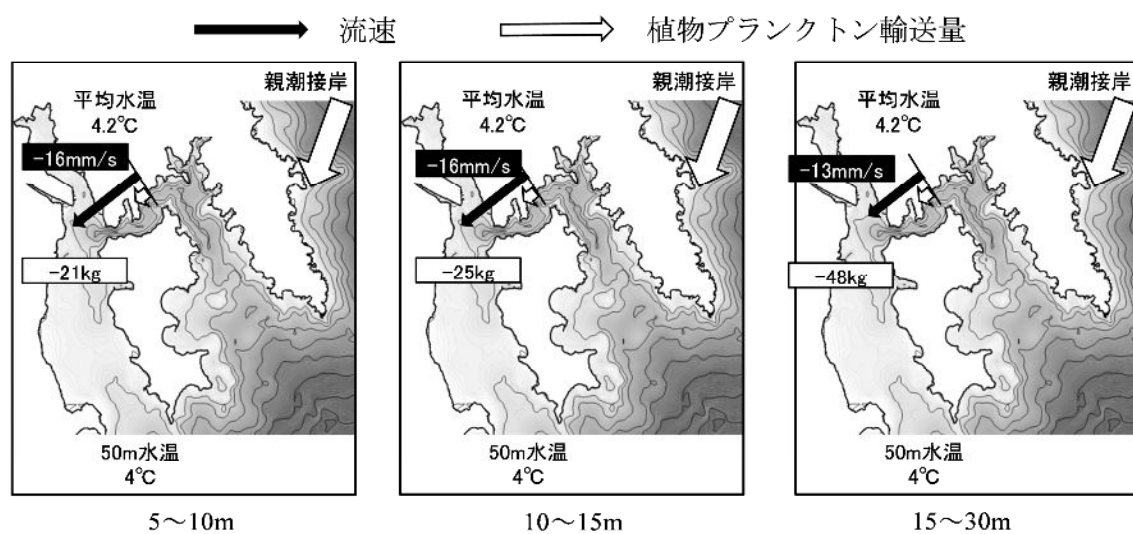


図 4-10-13 水深別の流速・植物プランクトン輸送量と海象 (2015 年 3 月 14 日)

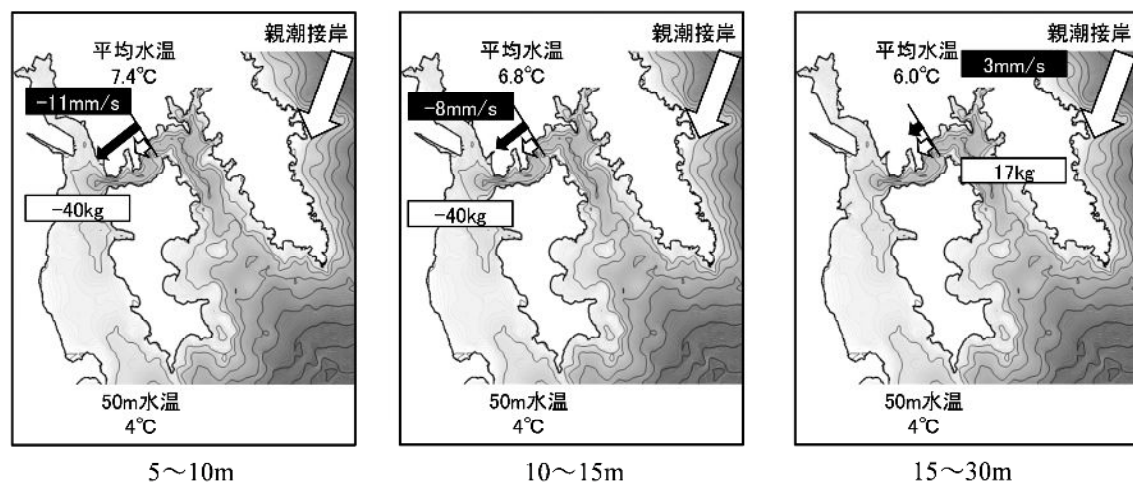


図 4-10-14 水深別の流速・植物プランクトン輸送量と海象 (2015 年 4 月 17 日)

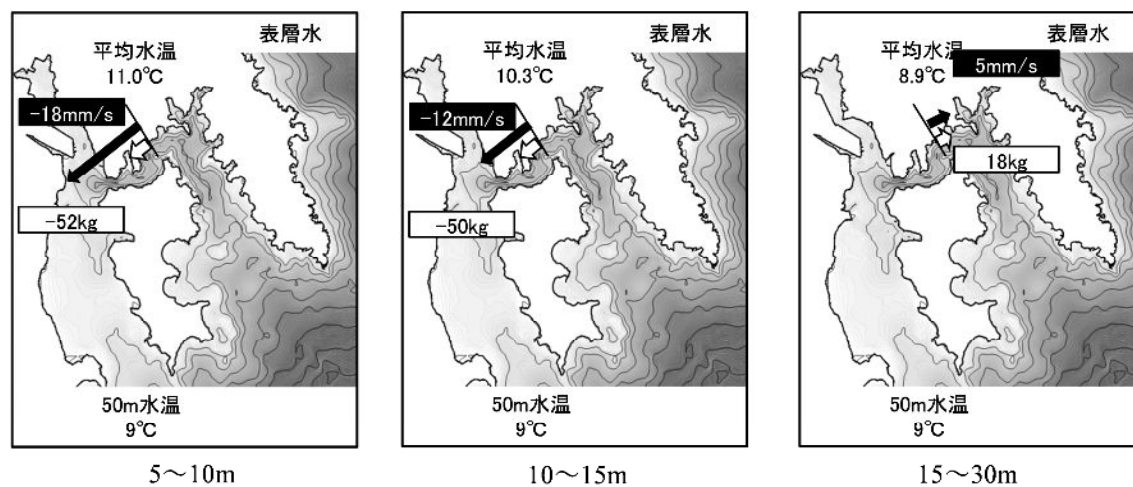


図 4-10-15 水深別の流速・植物プランクトン輸送量と海象 (2015 年 5 月 23 日)

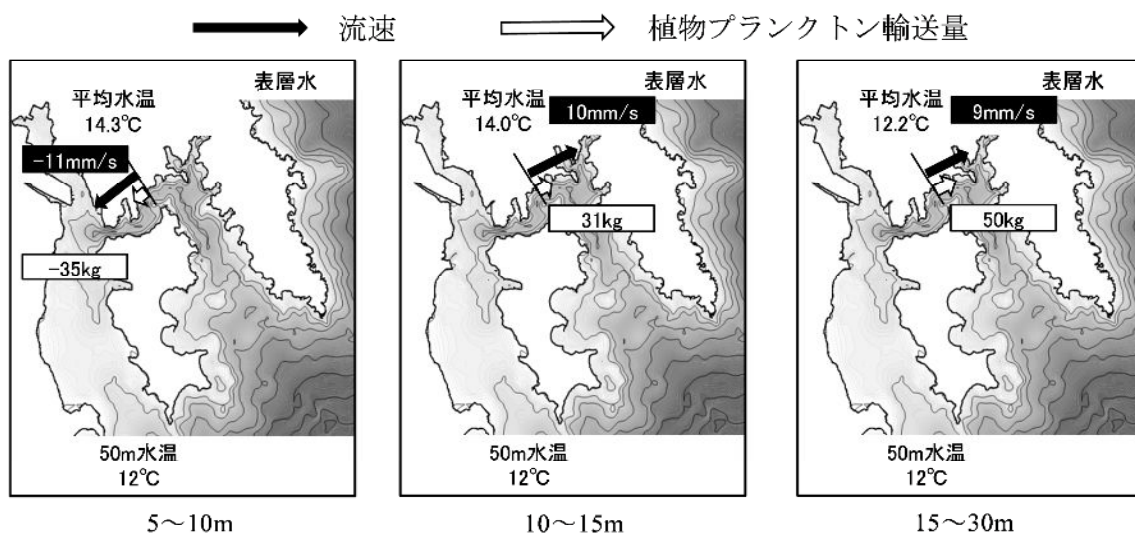


図 4-10-16 水深別の流速・植物プランクトン輸送量と海象（2015 年 6 月 18 日）

## 第五章 貝毒プランクトンの輸送

### 5-1 2013 年の貝毒プランクトン発生と被害

2013 年の貝毒プランクトンの調査結果の一覧を表 5-1 に示す。そのうち、Stn.15, Stn.8, Stn.3 における鉛直分布を図 5-1-1～図 5-1-6 に、水深 10m における平面分布を図 5-2-1～図 5-2-6 示す。

鉛直分布から、貝毒プランクトンは水深 5～10 m に多く分布していることが分かる。平面分布から、4/25 に Stn.15 で 1.2 万 cell/L の高密度の貝毒プランクトンが見られ、約 2 週間後の 5/9 には同地点で 23 万 cell/L になり、20 倍に増えたことが分かる。そして、西側水域を中心に高密度となり、さらに 2 週間後の 5/23 には高密度域が大島瀬戸から東湾にまで拡大している。6/6 には湾奥では検出されなくなり、東湾でも細胞数が低下している。その後さらに東側へと移動していき、湾奥での発生数が収束した。

表 5-2-1～表 5-1-4 に麻痺性貝毒の毒性試験結果を示す。麻痺性貝毒とは貝毒プランクトンを摂食した二枚貝の身に毒素が蓄積するものであり、二枚貝の生育には影響がないが、それを食べる人間が食中毒を起こすというものである。図 5-3 に貝毒プランクトンの細胞数の時間変化を Stn.15 (湾奥)、Stn.11 (大川河口沖)、Stn.8 (大島瀬戸) の順に並べ、また Stn.E でのホタテガイの毒性量の時間変化を示す。

これより、貝毒プランクトンは Stn.15 と Stn.11 において 2013 年 5 月 9 日にピークになり、Stn.8 では 5 月 23 日にピークとなった。また、Stn.8 に近い Stn.E におけるホタテガイの毒性量は 5 月 24 日に最大であった。貝毒プランクトンの調査間隔は 2 週間であり、毒性量の間隔は 1 週間であるため、その間の変化を捉えることができないが、石川ら (2015) の研究を参考にすると、貝毒プランクトンは Stn.15 で発生してから約一週間をかけて Stn.8 まで拡散し、さらに数日から一週間後に麻痺性貝毒の値が最大になると推測された。

表 5-1 2013 年の貝毒原因プランクトン調査結果

地点	水深(m)	4/25	5/9	5/23	6/6	6/13	6/20
Stn.A	0	-	11,500	6,567	-	-	-
	3	-	257,600	14,333	-	-	-
	5	-	229,787	10,333	-	-	-
Stn.15	0	182	1,300	1,380	0	-	0
	4	-	301,206	-	0	-	20
	7	9,249	154,953	10,749	10	-	0
Stn.13	0	-	1,967	2,000	-	-	-
	7	-	5,167	4,750	-	-	-
Stn.B	0	-	284	1,033	-	-	-
	8	-	1,705	833	-	-	-
Stn.11	0	236	633	1,222	-	-	0
	10	629	5,267	370	-	-	0
	20	0	933	93	-	-	0
Stn.C	0	-	106	2,100	-	-	-
	7	-	150	6,633	-	-	-
	13	-	1,856	600	-	-	-
Stn.8	0	0	0	0	20	-	0
	10	286	0	4,198	220	150	180
	20	0	0	164	0	-	0
Stn.E	0	0	0	0	10	-	0
	10	136	0	2,100	290	50	60
	20	0	67	2,067	20	-	0
Stn.D	0	-	0	0	80	-	0
	10	-	299	3,900	110	-	40
	20	-	106	167	30	-	0
Stn.65	0	0	0	0	0	-	0
	10	204	167	10,714	250	50	30
	25	0	100	200	0	-	-
Stn.3	0	0	0	0	-	-	-
	7	57	0	0	-	-	-
	13	0	0	0	-	50	-

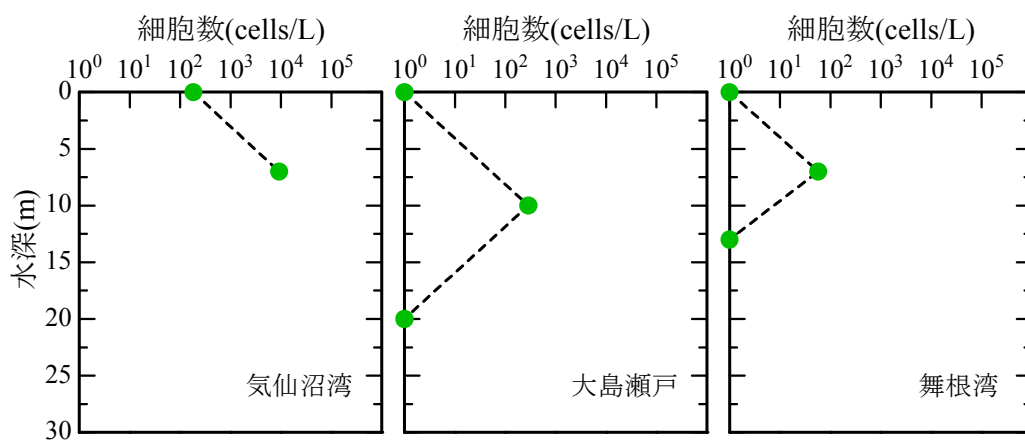


図 5-1-1 貝毒原因プランクトンの鉛直密度分布 (2013 年 4 月 25 日)

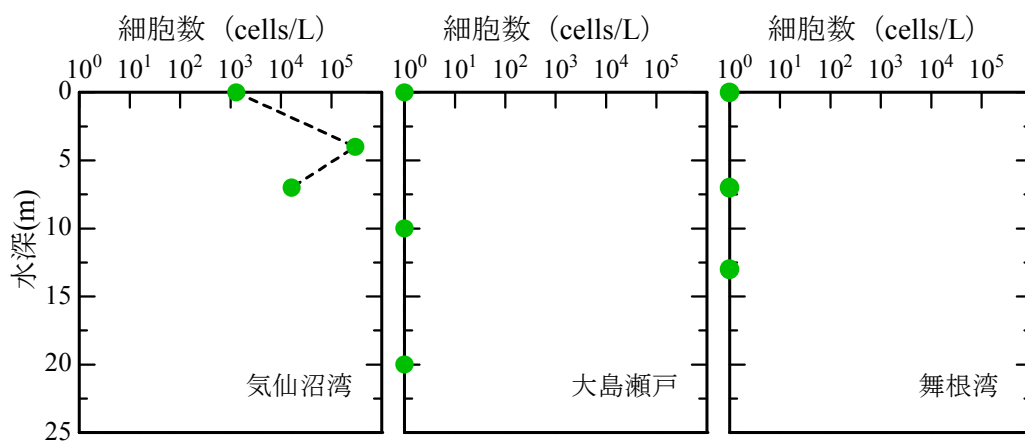


図 5-1-2 貝毒原因プランクトンの鉛直密度分布 (2013 年 5 月 9 日)

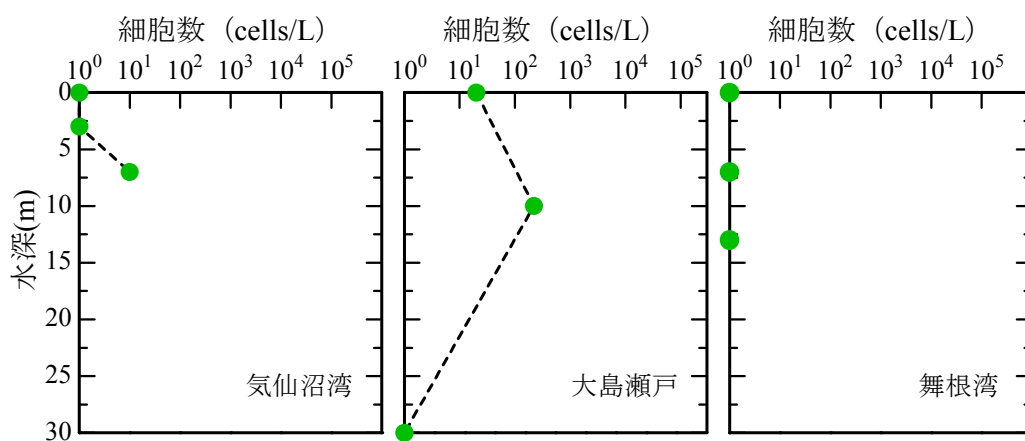


図 5-1-3 貝毒原因プランクトンの鉛直密度分布 (2013 年 5 月 23 日)

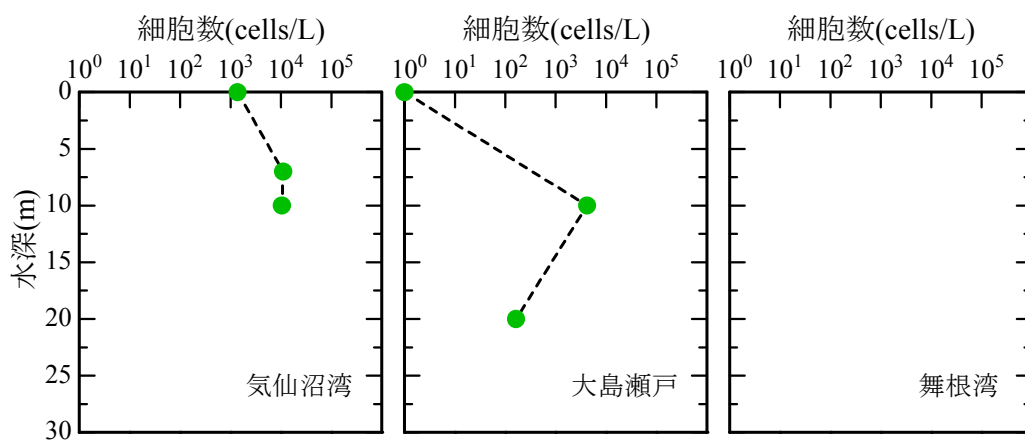


図 5-1-4 貝毒原因プランクトンの鉛直密度分布 (2013 年 6 月 6 日)

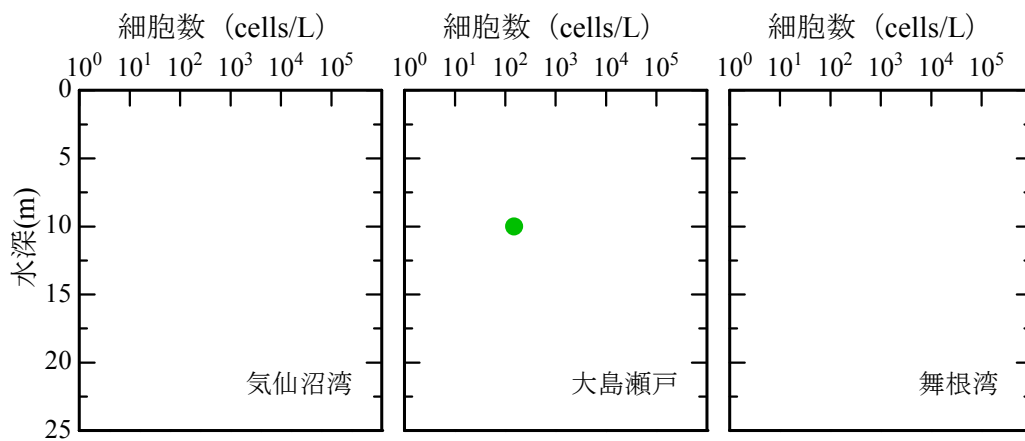


図 5-1-5 貝毒原因プランクトンの鉛直密度分布 (2013 年 6 月 13 日)

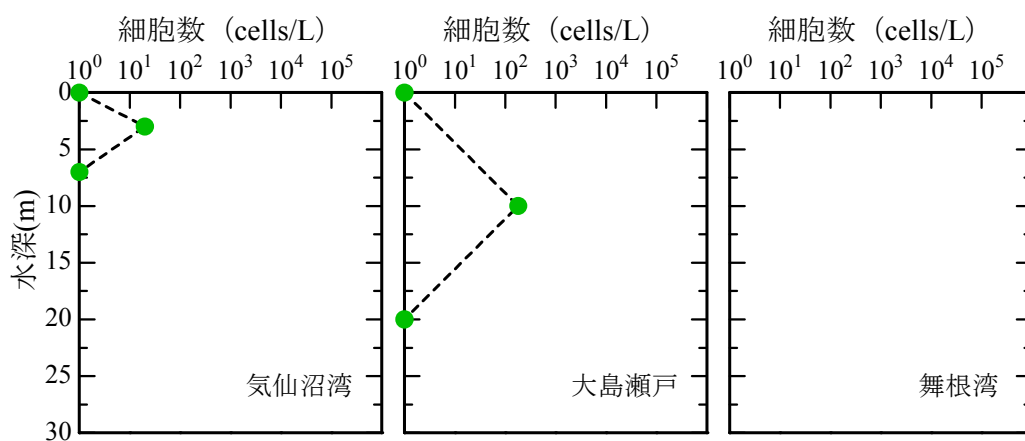
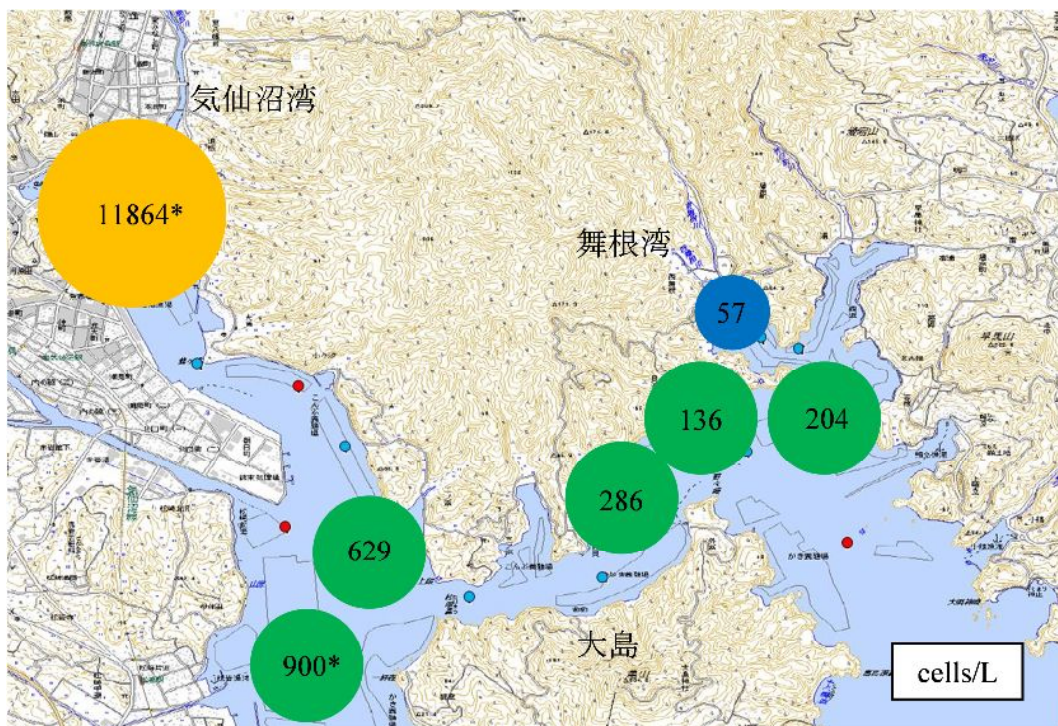


図 5-1-6 貝毒原因プランクトンの鉛直密度分布 (2013 年 6 月 20 日)





\*は気仙沼水産試験場の 4/25 のデータ

図 5-2-1 貝毒原因プランクトンの分布図（水深 10m, 4 月 25 日）

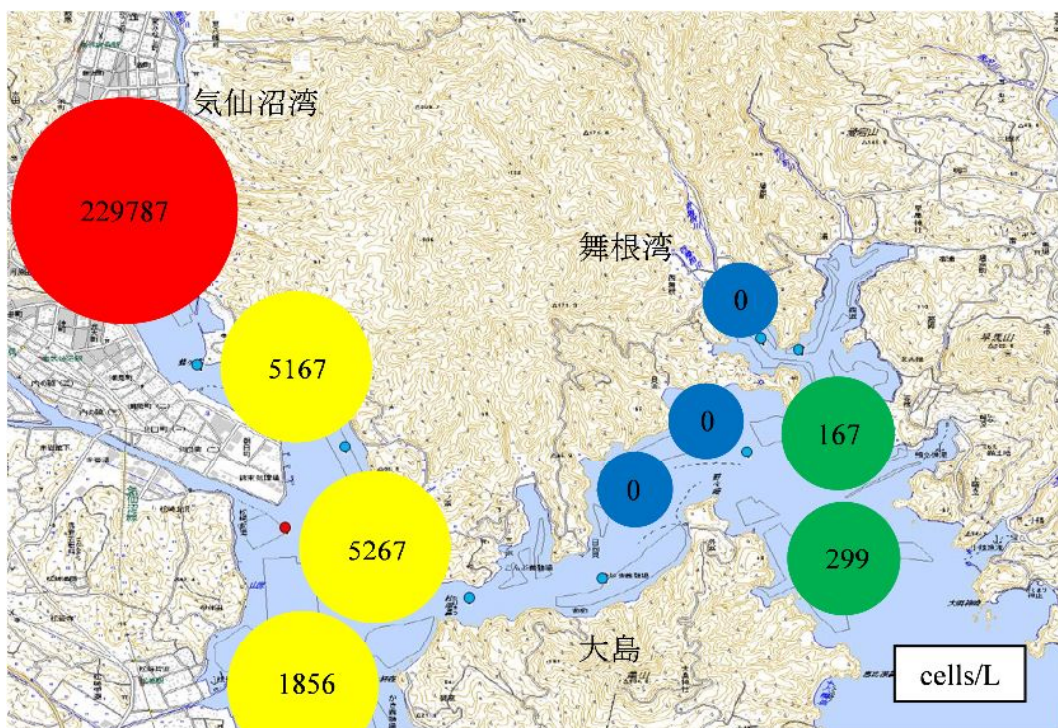


図 5-2-2 貝毒原因プランクトンの分布図（水深 10m, 5 月 9 日）



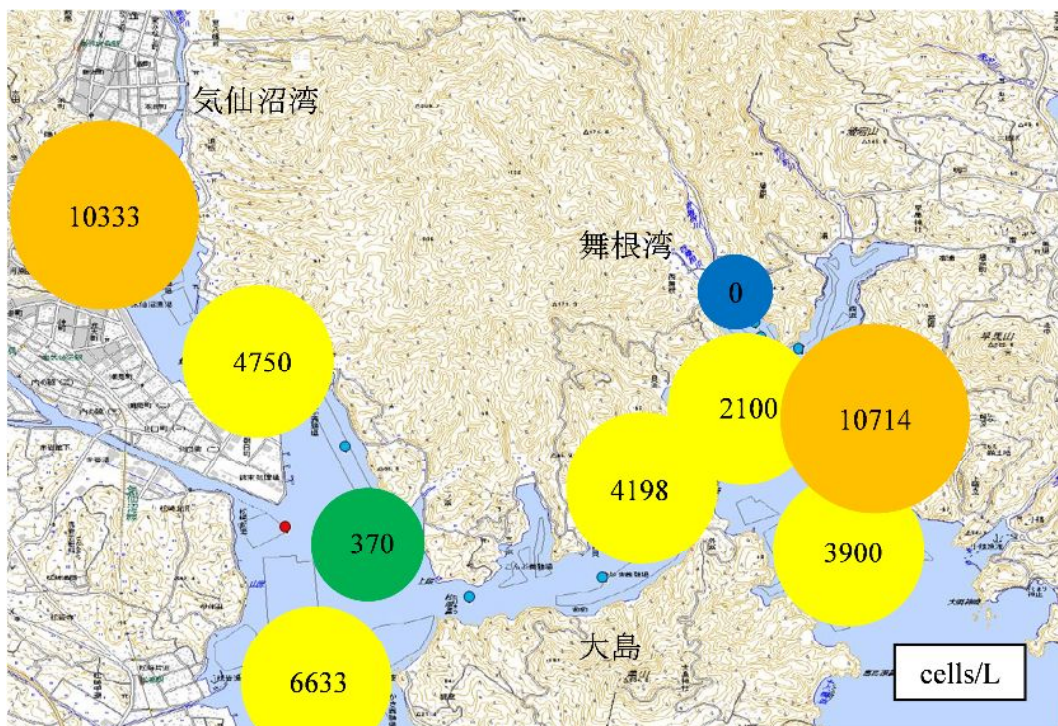
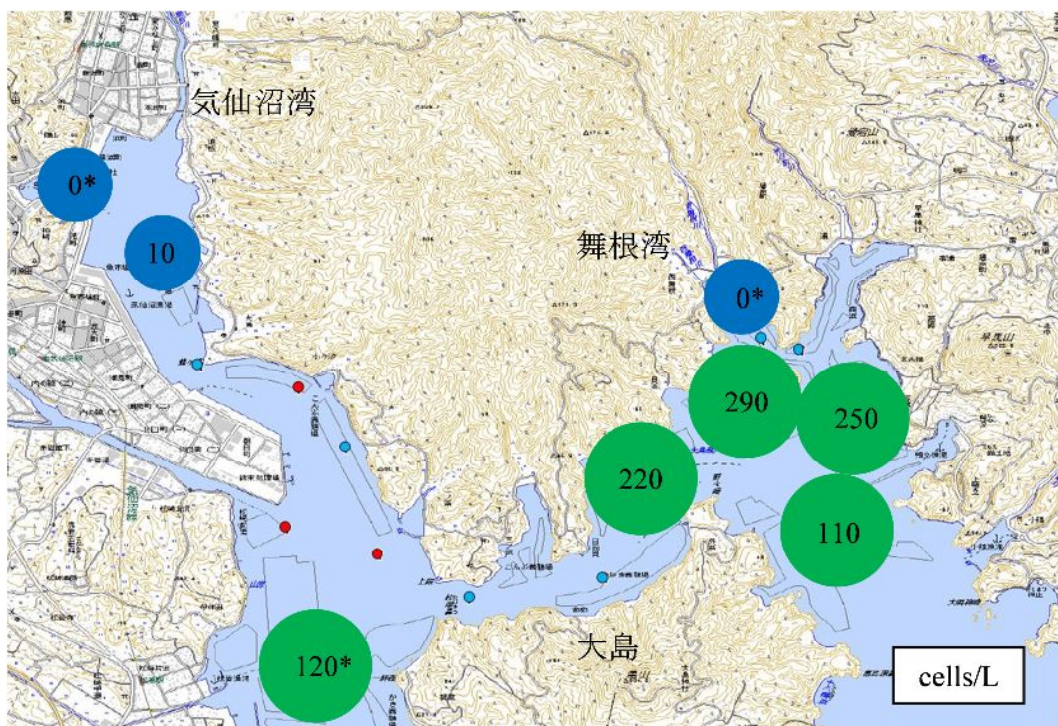


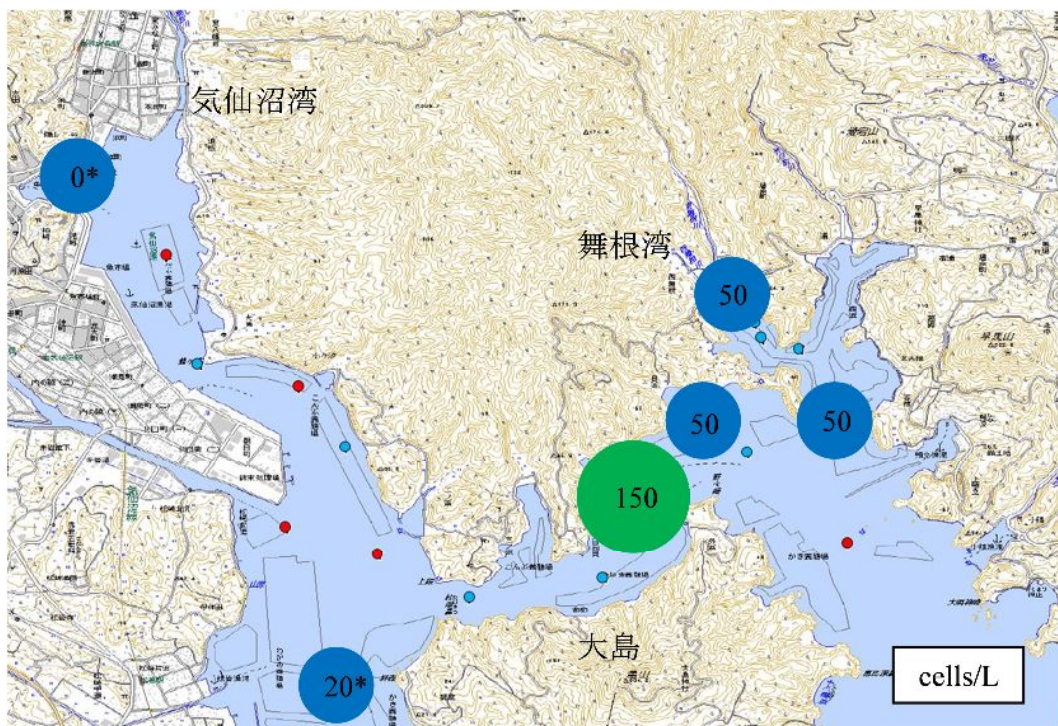
図 5-2-3 貝毒原因プランクトンの分布図（水深 10m, 5 月 23 日）



\*は気仙沼水産試験場の 6/4 のデータ

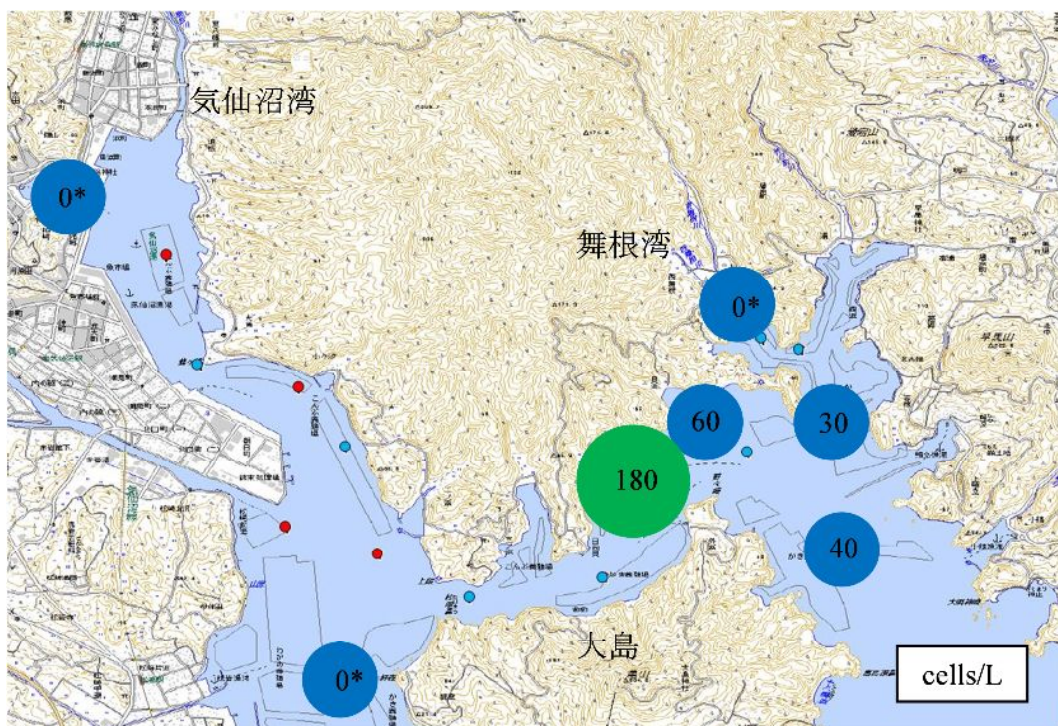
図 5-2-4 貝毒原因プランクトンの分布図（水深 10m, 6 月 6 日）





\*は気仙沼水産試験場の 6/11 のデータ

図 5-2-5 貝毒原因プランクトンの分布図（水深 10m, 6 月 13 日）



\*は気仙沼水産試験場の 6/18 のデータ

図 5-2-6 貝毒原因プランクトンの分布図（水深 10m, 6 月 20 日）

表 5-2-1 麻痺性貝毒試験結果 (Stn. 8 採取, 2013 年 4 月～6 月)

単位 : Mu/g

試験 実施日	水深 (m)	ホタテ 全体	ホタテ ヒモ	貝柱	洗浄 貝柱	ホタテ 中腸腺	カキ	5/16 採捕 ホタテ	5/30 採捕 カキ
4/24	不明	-	-	<2.0	-	-	-	-	-
4/25	不明	-	-	-	-	-	-	-	-
5/10	3	5	-	-	-	-	-	-	-
	10	37	14	<2.0	-	-	<2.0		
	16	30	-	-	-	-	-		
5/17	3	45	-	-	-	-	-	75	-
	10	130	-	<2.0	-	-	-		
	16	97	-	-	-	-	-		
5/24	3	62	-	-	-	-	-	28	-
	10	200	47	<2.0	-	-	3.3		
	16	180	-	-	-	-	-		
5/31	3	83	-	-	-	-	-	26	21
	10	190	-	<2.0	<2.0	-	21		
	16	150	-	-	-	-	-		
6/7	3	29	-	-	-	-	-	18	2.3
	10	160	64	<2.0	-	-	2.2		
	16	91	-	-	-	-	-		
6/14	3	38	-	-	-	-	-	27	-
	10	110	-	<2.0	-	-	<2.0		
	16	77	-	-	-	-	-		
6/21	3	51	-	-	-	-	-	-	-
	10	64	-	<2.0	-	-	-		
	16	51	-	-	-	-	-		
6/28	3	28	-	-	-	-	-	-	-
	10	72	72	<2.0	-	-	-		
	16	44	-	-	-	-	-		

表 5-2-2 痺性貝毒試験結果（Stn. 8 採取，2013 年 7 月～8 月）

単位：Mu/g

試験 実施日	水深 (m)	ホタテ 全体	ホタテ ヒモ	貝柱	洗浄 貝柱	ホタテ 中腸腺	カキ	5/16 採捕 ホタテ	5/30 採捕 カキ
7/5	3	13	-	-	-	-	-	-	-
	10	56	70	<2.0	-	-	-		
	16	34	-	-	-	-	-		
7/12	3	17	-	-	-	-	-	-	-
	10	62	53	<2.0	-	-	-		
	16	30	-	-	-	-	-		
7/19	3	34	-	-	-	-	-	-	-
	10	44	53	<2.0	-	-	-		
	16	22	-	-	-	-	-		
7/26	3	34	-	-	-	-	-	-	-
	10	34	37	<2.0	-	-	-		
	16	15	-	-	-	-	-		
8/9	3	28	-	-	-	-	-	-	-
	10	33	36	<2.0	-	-	-		
	16	22	-	-	-	-	-		
8/16	3	16	-	-	-	-	-	-	-
	10	35	33	<2.0	-	-	-		
	16	17	-	-	-	-	-		
8/23	3	15	-	-	-	-	-	-	-
	10	30	25	<2.0	-	-	-		
	16	15	-	-	-	-	-		
8/30	3	17	-	-	-	-	-	-	-
	10	26	19	<2.0	-	-	-		
	16	11	-	-	-	-	-		

表 5-2-3 麻痺性貝毒試験結果 (Stn. 8 採取, 2013 年 9 月~10 月)

単位 : Mu/g

試験 実施日	水深 (m)	ホタテ 全体	ホタテ ヒモ	貝柱	洗浄 貝柱	ホタテ 中腸腺	カキ	5/16 採捕 ホタテ	5/30 採捕 カキ
9/2	3	-	-	-	-	-	-	-	-
	10	-	-	-	-	-	<2.0		
	16	-	-	-	-	-	-		
9/6	3	3.0	-	-	-	-	-	-	-
	10	30	24	<2.0	-	-	-		
	16	12	-	-	-	-	-		
9/13	3	3.7	-	-	-	-	-	-	-
	10	25	32	<2.0	-	-	-		
	16	11	-	-	-	-	-		
9/20	3	5.6	-	-	-	-	-	-	-
	10	19	25	<2.0	-	-	-		
	16	11	-	-	-	-	-		
9/27	3	2.9	-	-	-	-	-	-	-
	10	12	18	<2.0	-	110	-		
	16	18	-	-	-	-	-		
10/4	3	3.7	-	-	-	-	-	-	-
	10	20	22	<2.0	-	150	-		
	16	13	-	-	-	-	-		
10/18	3	4.8	-	-	-	-	-	-	-
	10	10	18	<2.0	-	91	-		
	16	7.2	-	-	-	-	-		

表 5-2-4 麻痺性貝毒試験結果（Stn. 3/Stn. E 採取，2013 年 5 月～10 月）

単位：Mu/g

試験実施日	水深(m)	Stn.3 ホタテ	Stn.3 ムール貝	Stn.E ホタテ
5/24	10	20	-	-
6/21	10	-	-	92
6/28	10	8.7	<2.0	62
7/5	10	7.6	-	56
7/12	10	5.3	-	37
7/19	10	10	-	41
7/26	10	9.3	-	37
8/9	10	6.2		30
8/16	10	5.1	-	34
8/23	10	6.6	-	23
8/30	10	3.3	-	26
9/6	10	2.7	-	29
9/13	10	3.0	-	13
9/20	10	2.4	-	21
9/27	10	2.4	<2.0	11
10/4	10	3.0	<2.0	17
10/18	10	3.7	-	2.2

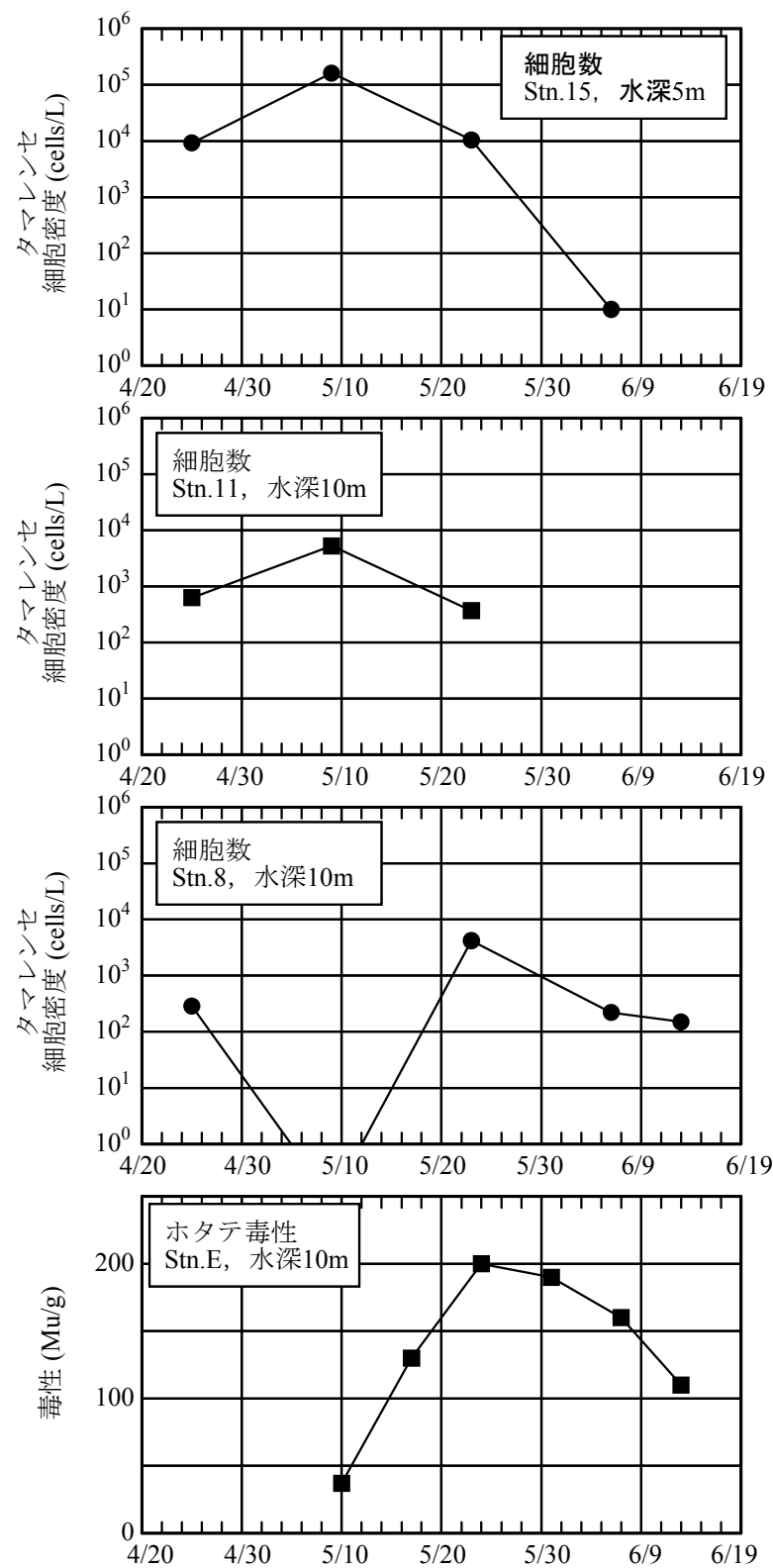


図 5-3 貝毒原因プランクトン細胞数とホタテガイの毒性の時系列変化



## 5-2 貝毒プランクトンの輸送に関する検討

計数した *A.tamarensis* の細胞数と多項目水質計のクロロフィル蛍光値（クロロフィル濃度に換算）をプロットすると（図 5-4），両者の間に相関関係はみられなかった．このことより，渦鞭毛藻類は多項目水質計で使用してクロロフィル蛍光センサーでは正しく検出できないことが分かった．

つまり，4 章まで使ってきた多項目水質計による植物プランクトン濃度は貝毒プランクトンの解析に使えない．また，貝毒プランクトンを計数した 2013 年には流速観測を実施しておらず，流速観測を実施した 2014 年・2015 年は貝毒プランクトンを計数していない．そこで，2014 年・2015 年について本研究で取得した超音波流速計のデータと，気仙沼水産試験場が公表している貝毒プランクトンの計数データ（表 5-3-1～5-3-3）を引用し，両者を比較した．

図 5-5-1～図 5-5-2 に Stn.15，Stn.11，Stn.8 の付近で 1 週間ごとに計数された貝毒プランクトンの細胞数と，計測日の前 1 週間の平均流速との対応を示す．2014 年 3 月から 2015 年 6 月まで，Stn.15 では全ての月で発生が確認されており，他の地点より基本的に高かった．このことから，貝毒プランクトンの休眠細胞は湾奥の海底に存在しており，水深が 5 ～7m と浅くて光や温度の関係で発芽しやすく，かつ波浪や潮流により浮上しやすい環境にあることで，湾奥が発生源になっていると考えられている．St.11 や St.8 では細胞数が 1 ～2 オーダー低い．

次に，細胞数の地点間の変化と流れの関係について調べた．前章で述べた「湾奥から大島瀬戸まで約 1 週間かけて移動する」という仮説に基づき，ある週の Stn.8 の細胞数と，その 1 週間前の Stn.15 の細胞数を比較した．このとき，細胞数は指数的に増減するため，生データの引き算では変動が大きすぎて分かりにくいいため，対数を取った．これを移動指数  $M$  として次式で表した．ここで， $C$  は細胞数， $t$  は時間（日）である．

$$M = \log C_{\text{Stn.8}(t=t)} - \log C_{\text{Stn.15}(t=t-7)}$$

また，移動期間の Stn.8 における平均流速を超音波流速計のデータから求めた．このとき，細胞数が多い水深として 2.5～12.5 m までの平均値を求めた．図 5-6 に移動指数と平均流速の相関を示す．このとき，2 地点で細胞数が 0 だった日は除外している．これらの相関を調べると（図 5-7），相関係数は 0.47 を示した．移動指数が 0 は 2 点間の細胞数が同じだった場合，移動指数が -1 だと Stn.8 の細胞数が Stn.15 の 1/10 に減少した場合であるが，-1～0 の範囲は 2 点間で有意な変化がないと考えられる．

これより，平均流速（潮汐残差流）が正のとき *A.tamarensis* が養殖海域に拡散し，負のときは湾奥に留まっている可能性が示された．流速が正のときは，流れが大島瀬戸の西から東に向かっており，すなわち湾奥 Stn.15 で発生した *A.tamarensis* が大島瀬戸 Stn.8 に運ばれやすいと考えられる．流速が負のときは，流れが大島瀬戸の東から西に向かっており，湾奥 Stn.15 で発生した *A.tamarensis* がその場に押しとどめられると考えられる．

Stn.15 と Stn.8 の間は約 5 km あり，この間を粒子が 1 週間で移動するには，潮汐残差流は 0.0085 m/s (8.5 mm/s) となる．Stn.8 での流速は±0.02m/s であったが，これは狭水道での値であるため，海域の平均値としてはもう少し低くなることが予想される．そのため，流速と貝毒プランクトンの輸送の関連性の説明は妥当であると考えられる．

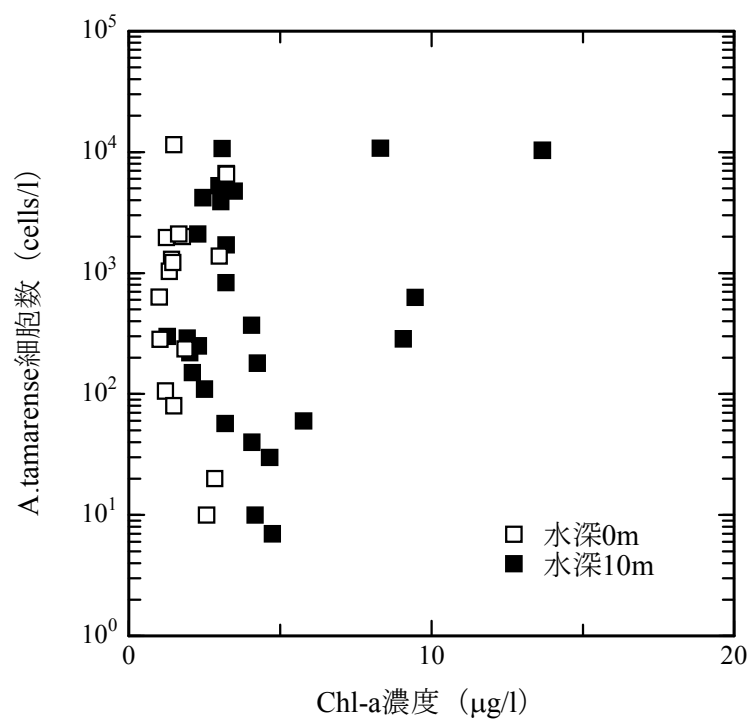


図 5-4 Chl-a 濃度と貝毒原因プランクトン細胞数の相関

表 5-3-1 気仙沼水産試験場によるアレキサンドリウム属の計数結果  
(Stn. 15 付近)

日付	cells/L	日付	cells/L	日付	cells/L
2014/3/17	210	2014/8/25	60	2015/2/9	7,190
2014/3/24	90	2014/9/1	20	2015/2/16	1,750
2014/3/31	0	2014/9/8	180	2015/2/24	1,310
2014/4/9	0	2014/9/16	190	2015/3/3	180
2014/4/14	10	2014/9/22	130	2015/3/9	170
2014/4/21	0	2014/9/30	50	2015/3/16	10
2014/4/27	0	2014/10/5	10	2015/3/23	10
2014/5/6	320	2014/10/15	0	2015/3/30	0
2014/5/12	160	2014/10/20	20	2015/4/6	0
2014/5/19	130	2014/10/27	10	2015/4/13	30
2014/5/26	120	2014/11/3	0	2015/4/20	0
2014/6/2	420	2014/11/10	20	2015/4/27	0
2014/6/9	20	2014/11/17	50	2015/5/7	20
2014/6/16	0	2014/11/25	40	2015/5/11	610
2014/6/23	10	2014/11/30	0	2015/5/18	310
2014/6/30	0	2014/12/8	0	2015/5/25	20
2014/7/7	10	2014/12/16	0	2015/6/1	60
2014/7/14	190	2014/12/22	10	2015/6/8	250
2014/7/22	20	2015/1/5	130	2015/6/15	20
2014/7/28	70	2015/1/13	410	2015/6/22	330
2014/8/4	30	2015/1/19	360	2015/6/29	70
2014/8/12	480	2015/1/26	1,180	2015/7/6	20
2014/8/18	760	2015/2/2	1,430		

表 5-3-2 気仙沼水産試験場によるアレキサンドリウム属の計数結果  
(Stn. 11 付近)

日付	cells/L	日付	cells/L	日付	cells/L
2014/3/17	0	2014/8/25	100	2015/2/9	90
2014/3/24	0	2014/9/1	140	2015/2/16	0
2014/3/31	0	2014/9/8	60	2015/2/24	940
2014/4/9	0	2014/9/16	20	2015/3/3	20
2014/4/14	0	2014/9/22	10	2015/3/9	170
2014/4/21	0	2014/9/30	220	2015/3/16	0
2014/4/27	0	2014/10/5	20	2015/3/23	0
2014/5/6	0	2014/10/15	0	2015/3/30	0
2014/5/12	120	2014/10/20	20	2015/4/6	10
2014/5/19	0	2014/10/27	50	2015/4/13	20
2014/5/26	20	2014/11/3	20	2015/4/20	0
2014/6/2	0	2014/11/10	30	2015/4/27	0
2014/6/9	110	2014/11/17	0	2015/5/7	0
2014/6/16	0	2014/11/25	10	2015/5/11	0
2014/6/23	10	2014/11/30	0	2015/5/18	10
2014/6/30	0	2014/12/8	0	2015/5/25	10
2014/7/7	0	2014/12/16	10	2015/6/1	10
2014/7/14	50	2014/12/22	0	2015/6/8	10
2014/7/22	0	2015/1/5	0	2015/6/15	0
2014/7/28	0	2015/1/13	10	2015/6/22	10
2014/8/4	0	2015/1/19	0	2015/6/29	20
2014/8/12	70	2015/1/26	30	2015/7/6	0
2014/8/18	310	2015/2/2	10		

表 5-3-3 気仙沼水産試験場によるアレキサンドリウム属の計数結果  
(Stn. 8 付近)

日付	cells/L	日付	cells/L	日付	cells/L
2014/3/17	10	2014/8/25	170	2015/2/9	0
2014/3/24	0	2014/9/1	100	2015/2/16	0
2014/3/31	0	2014/9/8	80	2015/2/24	210
2014/4/9	0	2014/9/16	10	2015/3/3	0
2014/4/14	0	2014/9/22	80	2015/3/9	0
2014/4/21	0	2014/9/30	60	2015/3/16	0
2014/4/27	0	2014/10/5	20	2015/3/23	0
2014/5/6	0	2014/10/15	0	2015/3/30	0
2014/5/12	10	2014/10/20	10	2015/4/6	0
2014/5/19	0	2014/10/27	10	2015/4/13	0
2014/5/26	0	2014/11/3	10	2015/4/20	0
2014/6/2	20	2014/11/10	10	2015/4/27	0
2014/6/9	10	2014/11/17	0	2015/5/7	0
2014/6/16	0	2014/11/25	0	2015/5/11	0
2014/6/23	0	2014/11/30	0	2015/5/18	0
2014/6/30	0	2014/12/8	0	2015/5/25	0
2014/7/7	0	2014/12/16	0	2015/6/1	10
2014/7/14	80	2014/12/22	0	2015/6/8	0
2014/7/22	30	2015/1/5	0	2015/6/15	0
2014/7/28	80	2015/1/13	0	2015/6/22	0
2014/8/4	10	2015/1/19	0	2015/6/29	0
2014/8/12	30	2015/1/26	0	2015/7/6	0
2014/8/18	390	2015/2/2	0		

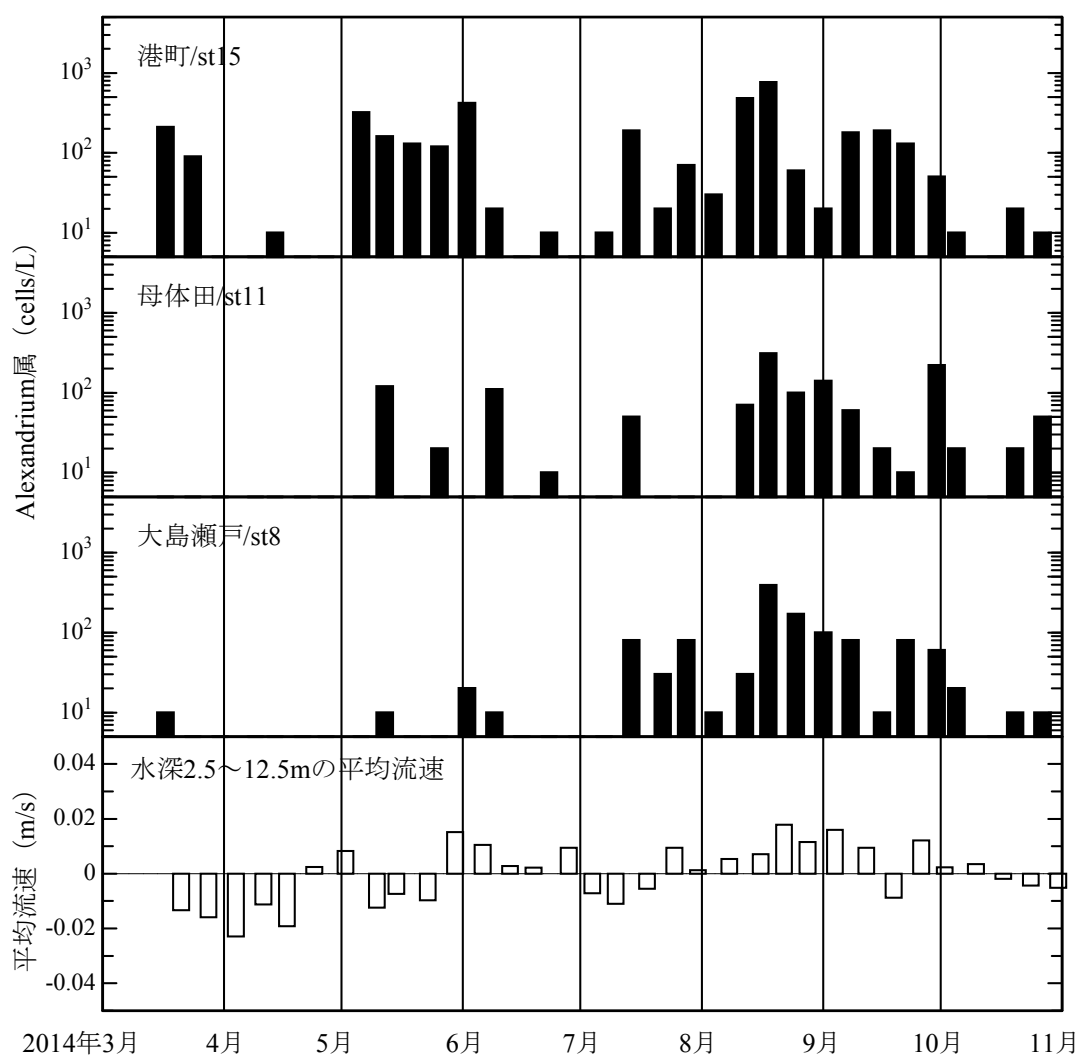


図 5-5-1 2014 年 3 月～10 月の貝毒原因プランクトンの発生数と  
Stn. 8 における水深 2.5～12.5m 層の平均流速

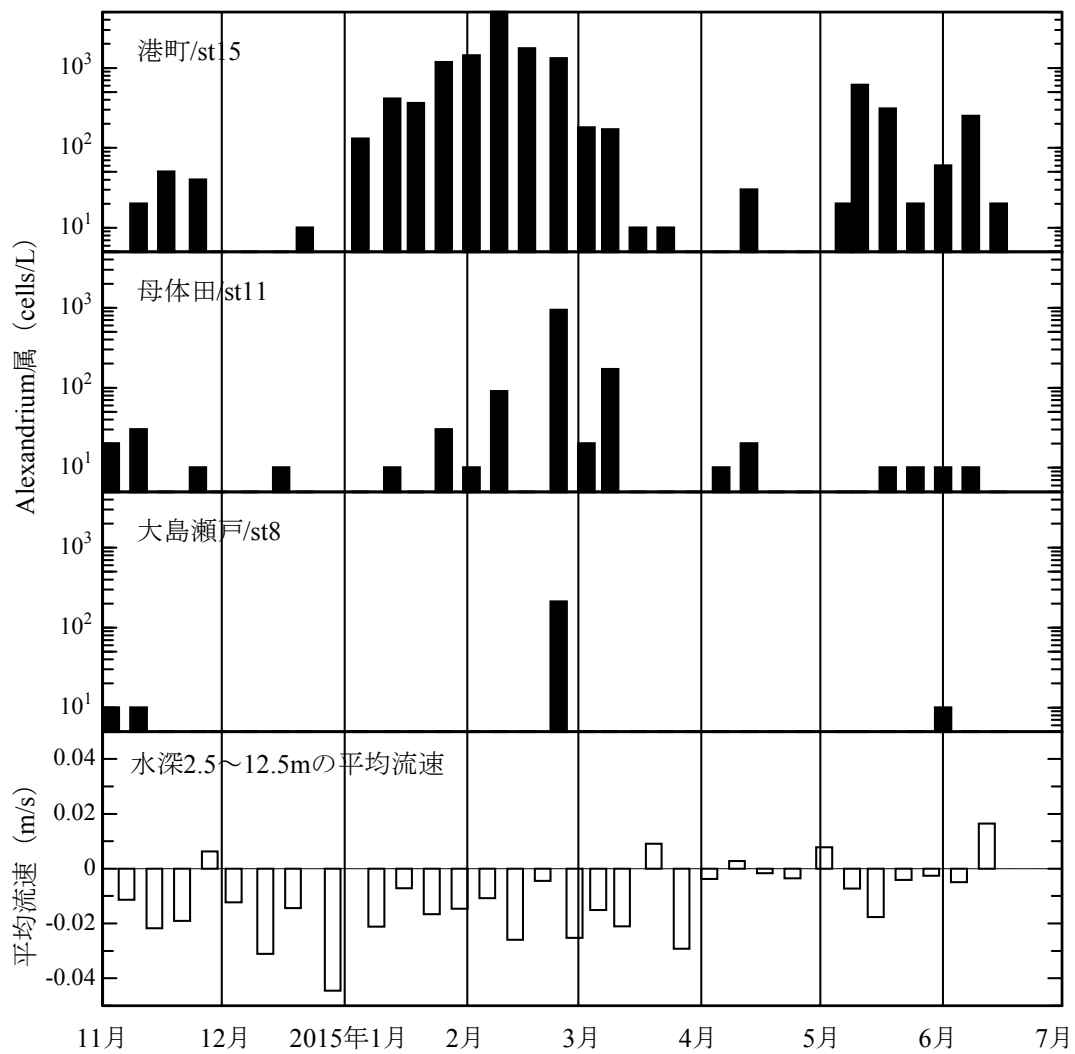


図 5-5-2 2014 年 11 月～2015 年 6 月の貝毒原因プランクトンの発生数と  
Stn. 8 における水深 2.5～12.5m 層の平均流速



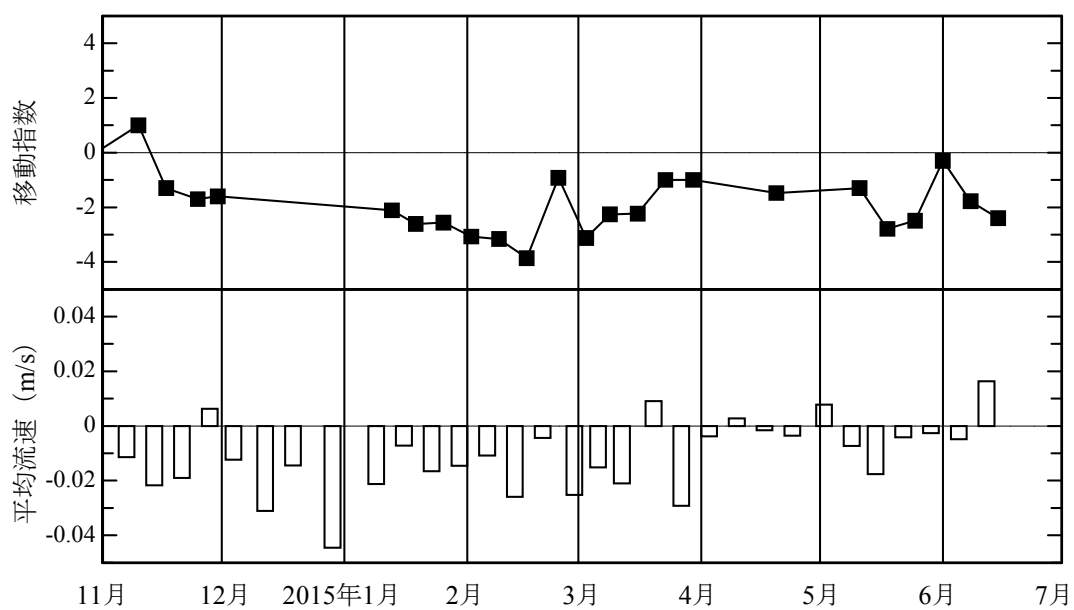
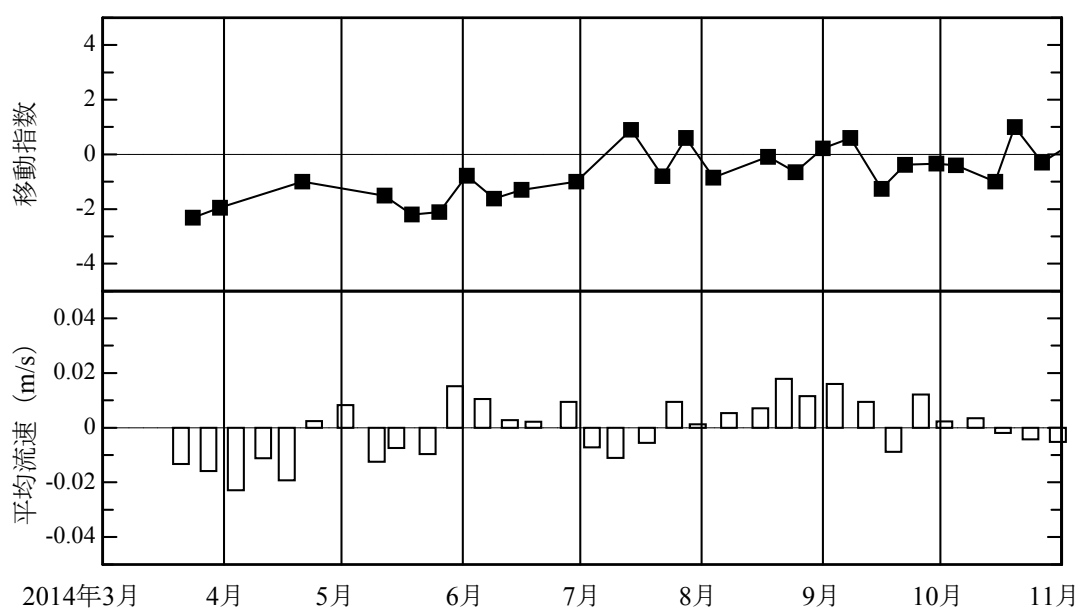


図 5-6 細胞数の移動指数と平均流速の推移

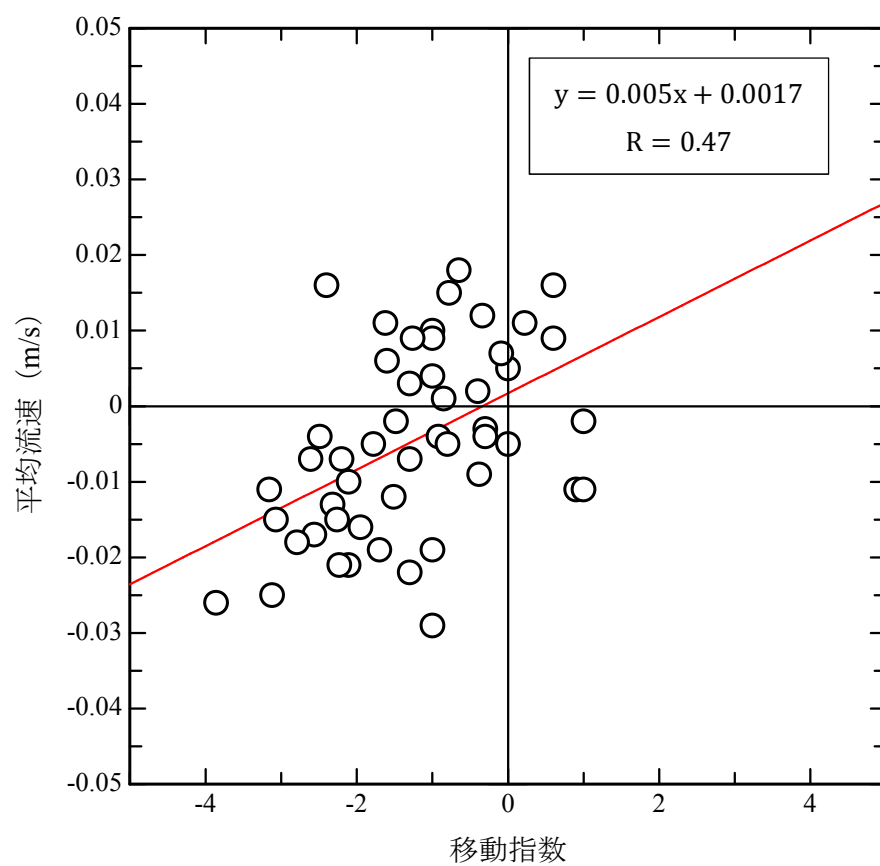


図 5-7 細胞数の移動指数と平均流速の相関

## 第六章 まとめ

### 6-1 結論

本研究では、気仙沼湾での植物プランクトンの分布と輸送メカニズムを湾内流動の観点から明らかにするために、湾内狭水道部での流速鉛直分布のモニタリングと、湾内複数箇所での水質調査を行った。また、気仙沼水産試験場の貝毒プランクトンの計数データを用いて、その移流状況と流速との対応関係を調べた。得られた結論は以下の通りである。

#### (1) 大島瀬戸での流速傾向

2014 年 3 月から 2014 年 10 月は海水の往復による交換が起こり、2014 年 11 月から 2015 年 2 月は太平洋からの海水の流入が起こっていることが分かった。2014 年 3 月と 2015 年 3 月の流速構造が類似しており、季節的な特徴であると考えられる。また、スペクトル解析の結果から、流速の変動に最も大きな影響を与えるのは M2 分潮であり、流速の成分を分解すると、潮流成分は 1 年を通して  $\pm 20$  mm/s 程度、残差流成分は 8 月に正方向に最大で、表層でおよそ 40 mm/s、12 月に負方向に最大でおよそ -40 mm/s となることが分かった。

#### (2) 植物プランクトンの輸送

採水分析結果から、クロロフィル蛍光値をクロロフィル濃度に変換した。流速とクロロフィル濃度の鉛直分布から植物プランクトン輸送量を計算した。3 月から 5 月の水深 5~10 m 付近で負方向への輸送量が大きくなっており、この時期のクロロフィルの輸送に大きく貢献する水深帯であることが分かった。T-S ダイアグラムからは親潮水と津軽暖流水の流入が確認された。月平均流速と植物プランクトン輸送量、および沖合の海流状況について整理し、親潮・津軽暖流水が南下してくると東湾から沖合水が気仙沼湾内に流入し、植物プランクトンが湾内に輸送されてくる可能性が示された。特に親潮水が沿岸に接岸したときに輸送量が大きくなると考えられる。

#### (3) 貝毒プランクトンの輸送

気仙沼湾では、貝毒プランクトンは Stn.15 で発生してから約一週間をかけて Stn.8 まで拡散し、さらに数日から一週間後に麻痺性貝毒の値が最大になることが推測された。水産試験場の公表データから、細胞数の地点間の変化と流れの関係について調べるため、細胞数の移動指数 M を作成した。これより、平均流速が正のとき *A.tamarense* が養殖海域に拡散し、負のときは湾奥に留まっている可能性が示された。

## 6-2 今後の課題

本研究より、気仙沼湾内の流動に対する基礎的な情報が得られたので、それらの普遍性を確認し、風や気温の変化などの外部要因の影響の大きさを評価していくために、今後も流速観測を継続していくことが重要である。

植物プランクトンの輸送特性と、湾外の水塊構造との関係性について親潮が接岸するときに大きく輸送される可性が示唆されたが、不明な点が多く残された。これについても今後の継続的な流速観測と水質観測によって明らかにすることが重要であると考えられる。また、植物プランクトンの分布や増殖には、栄養塩の存在量や動態が重要である。流動構造を合わせて考察していくことで、植物プランクトンの分布をより詳細に把握できると考えられる。

## 参考文献

- 鈴木高二朗，磯部雅彦，下迫健一郎（2010）：東京湾口での海水交換の季節変化について，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.66，No.1，pp.986-990.
- 鈴木高二朗，磯部雅彦，米山治男（2012）：東京湾の海水交換と湾表層流速に及ぼす淡水流入と風の影響，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.68，No.2，pp.946-950.
- 中辻啓二，西田修三，金漢九，山中亮一（2002）：紀淡海峡における残差流と物質輸送の現地観測，海岸工学論文集，第 49 巻，pp.1071-1075.
- 田井明，齋田倫範，矢野真一郎，川村嘉広，野口敏春，小松利光（2008）：有明海湾奥における近年の潮流の変化と残差流の変動特性，海岸工学論文集，第 55 巻，pp.371-375.
- 仁木将人，山下隆男，芹澤重厚，福神和興（2005）：内部潮汐卓越型の湾内海水交換過程に及ぼす外洋水の影響，海岸工学論文集，第 52 巻，pp.866-870.
- 鈴木誠二，多田障秀，平智樹，坂口誠人，坂本健太郎，西田渉（2010）：現地観測および流動水質モデルを用いた伊万里湾における流動・水質特性の把握，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.66，No.1，pp.1021-1025.
- 日比野忠史，豊田政史，深和岳人（1999）：大船渡湾での貧酸素水塊の形成と消滅機構，水工学論文集，第 43 巻，pp.1073-1078.
- 日比野忠史（2000）：海流の内湾域水質に及ぼす影響－三陸沿岸域を中心として－，水工学論文集，第 44 巻，pp.939-944.
- 高杉知（1992）：岩手県沿岸域における津軽暖流水の分布と定地水温への影響，水産海洋研究，第 56 巻，第 4 号，pp.434-448.
- 崔成烈，入江政安，福島博文，西田修三，中辻啓二（1997）：陸奥湾湾口部における流動・密度構造－1996 年夏の観測－，海岸工学論文集，第 44 巻，pp.381-385.
- 永澤豪，田中仁，松村勝之，山路弘人（1998）：ADCP を用いた志津川湾内流動の観測，海岸工学論文集，第 45 巻，pp.396-400.
- 王琦，北出裕二郎，根本雅生（2013）：相模湾大島東水道の中深層における水温・流速変動

の特性, 海の研究, Vol.22, No.1, pp.1-18.

八木宏, 杉松宏一, 西敬治, 中山哲巖, 藤井良昭, 伊藤進一, 笥茂穂 (2012) : 2011 年成層期における仙台湾沿岸域の流れと水質変動, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.68, No.2, pp.1106-1110

Hanawa.K. and H.Mitsudera (1987) : Variation of Water System Distribution in the Sanriku Coastal Area, J.Oceanogr. Soc. Japan, 42, 435-446.

農林水産省 HP (2015) : 農林水産統計, 平成 26 年漁業・養殖業生産統計  
[http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/kaimen\\_gyosei/pdf/gyogyou\\_seisan\\_14.pdf](http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/kaimen_gyosei/pdf/gyogyou_seisan_14.pdf)

東北農政局 HP (2015) : 第 61 次宮城農林水産統計年報 (平成 25, 26 年), 海面漁業・養殖業, [http://www.maff.go.jp/tohoku/stinfo/toukei/nenpo/61\\_miyagi.html](http://www.maff.go.jp/tohoku/stinfo/toukei/nenpo/61_miyagi.html)

蔵田護, 干川裕, 西浜雄二 (1991) : サロマ湖における垂下養成ホタテガイの摂餌量, 北海道立水産試験場研究報告, 37 号, pp.37-57.

蔵田護 (1996) : オホーツク海における放流ホタテガイの呼吸量, 北海道立水産試験場研究報告, 49 号, pp.7-13.

品田晃良 (2006) : 地まきホタテガイの成長不良に対する水温および餌濃度の影響, 日本ベントス学会誌, 61 巻, pp.41-44.

三好晃治, 品田晃良, 宮園章, 栗原康裕, 多田匡秀, 照本昂之, 工藤勲 (2015) : 2013 年オホーツク海沿岸域における地まきホタテガイの高成長と餌料環境, 日本水産学会誌, Vol.81, No.3, pp.468-470.

櫻井泉, 下野学, 今野繁基, 水野勝彦, 成田伝彦 (2004) : 養殖ホタテガイの成長に及ぼす流れの影響, 日本水産学会誌, Vol.70, No.1, pp.1-7.

# 謝辞

本研究を進めるにあたり、指導教官である首都大学東京大学院都市環境科学研究科都市基盤環境学域の横山勝英准教授には三年間、現地観測から解析、論文執筆に至るまで幅広くご指導、ご鞭撻を賜り、卒業まで導いていただきました。心より感謝申し上げます。

同大学院の稲貝とよの教授、梅山元彦教授には、本論文の副査を引き受けて頂き、貴重なご助言を頂きました。深く感謝いたします。また、特任助教の福島慶太郎先生には、同じ部屋でいつも気にかけてくださり、質問に丁寧に対応していただきました。心より感謝いたします。

畠山信さんを始めとした、NPO 法人森は海の恋人の皆様には、気仙沼観測にご協力いただいたり、貴重な貝毒試験のデータを頂いたり、様々なご協力をいただきました。心より感謝致します。

東北大学の西谷豪先生、北里大学の山田雄一郎先生、東京工業大学の夏池真史さんには、貝毒原因プランクトンの測定に関してご協力いただきました。心より感謝申し上げます。

ADCP の現場設置、回収に関しては、いであ株式会社の皆様にご協力いただきました。厚く御礼申し上げます。

研究室生活においては、まず 3 年間共に頑張ってきた上田博茂君、亀井桂佑さん、富田遼平君に深く感謝したいと思います。普段の生活から最後の追い込みの時期まで、本当に多くの力を頂きました。M1 の安部真央さん、松村健史君、穂刈健太郎君は、授業などで忙しいときにも、研究室を支えてくれました。学部 4 年の芝崎麗央君、橋本和磨君、松永真弥君、柳亮輔君へはこちらが教えているつもりで、逆に教わることも多かったように思います。事務員の舩崎由美子さんには、観測に行くたびに会計作業など、様々な面で大変お世話になりました。学生生活の最後を一緒に過ごせた研究室の皆様には、改めて感謝申し上げます。

多くの方々のご協力の上で、本研究を完成させることができました。深く感謝いたします。最後にこれまでの学生生活を支えてくれた家族に感謝し、本研究の謝辞と致します。