

大気—河川—内湾系連成モデルに基づく多摩川
河口域の物質循環解析

—東京湾が多摩川の水質環境に与える影響に着目して—

2006年

八木 宏
東京工業大学大学院
情報理工学研究科情報環境学専攻 助教授

『大気—河川—内湾系連成モデルに基づく多摩川河口域の物質循環解析
—東京湾が多摩川の水質環境に与える影響に着目して—』

目 次

第 1 章	序論	3
1-1	研究の背景と目的	
1-2	既往の研究	
1-2-1	シルテーション問題	
1-2-2	懸濁態物質の輸送機構	
1-3	本論文の構成	
第 2 章	現地観測概要	8
2-1	はじめに	
2-2	一潮汐集中観測	
2-3	水質及び底質観測	
2-4	出水時観測	
2-5	分析概要	
2-5-1	採泥試料	
2-5-2	採水試料	
2-6	六郷橋における長期連続水質データ	
第 3 章	多摩川河口域における流動特性	25
3-1	はじめに	
3-2	各一潮汐観測の特徴	
3-3	潮汐変動による塩分・水温・流速の時空間構造	
3-4	流動特性	
3-4-1	大潮時の流動特性	
3-4-2	潮位振幅や河川出水が流動特性に与える影響	
3-4-3	流動特性のまとめ	
3-5	潮汐変動による底面摩擦速度変化特性	
3-6	本章のまとめ	
第 4 章	多摩川河口域における底質及び懸濁態物質の挙動	89
4-1	はじめに	

- 4-2 潮汐変動による Chl. a・濁度・DO の時空間構造
 - 4-2-1 潮汐変動による懸濁態物質挙動
 - 4-2-2 潮汐変動による Chl. a 量挙動
 - 4-2-3 潮汐変動による有機物量挙動
- 4-3 河口域における水質及び底質環境の季節変化
 - 4-3-1 六郷橋水質データによる水質環境の年間変化
 - 4-3-2 観測結果による河口域水質環境の季節変化
 - 4-3-3 出水時に絞った水質環境の変遷
 - 4-3-4 底質環境の季節変化
- 4-4 本章のまとめ

第 5 章 結論 ----- 142

- 5-1 本研究のまとめ
- 5-2 今後の課題

- ・ 参考文献

Appendix

XML 形式の観測データベース

第1章 序論

1-1 研究の背景と目的

河口域は、河床勾配が水平に近いこと、海水と河川水が接触することによって流速が低下すること、塩水による凝集作用が働くことから、上流から河川流によって運ばれてきた微細な土砂が堆積しやすい領域となっている。そのため、河口域では遠浅の地形や干潟の形成が進みやすく、また、運ばれてくる微細土砂は比表面積が大きいために多量の栄養塩が吸着しやすいということが言われており、河口域に形成される豊かな生態系を維持していく上で、河口域における土砂供給システムは大きな役割を果たしている。

このような河口域では、流れや波浪の影響を受けにくい穏やかな水域と遠浅の地形、豊富な栄養塩に支えられて、多毛類や甲殻類、貝類等の底生生物を中心とした豊かな生態系が形成され、更に漁業も盛んである。

このように河口域は自然環境として重要な場であり、また、近年では環境問題に対する社会の関心の高まりもあって、その環境保全を求める声は勢いを増すばかりである。

本研究で対象とする多摩川河口域は東京湾に面しており、そのため、空港や工業地帯の発達が進められ、これまで多くの干潟が失われてきた。また最近では、羽田空港再拡張工事が進められることとなり、ますます、干潟保全への努力が必要とされている。一方で、少し上流へ上ればまだ干潟が残されており、生物にとって貴重な生息場所となっており、必要不可欠な開発を認めながらも、残されたわずかな干潟を維持管理していくことが重要な課題となっている。

河口域の土砂動態の仕組みとしては、図 1-1-1 に示すように、主に上流からの供給、沈降・堆積、そして、潮汐による巻上げ再移動が考えられ、これらが複雑なサイクルを繰り返しながら底質環境を形成しているものと考えられる。

このような河口域を健全に保全していくためには、河口域での懸濁態物質の輸送や堆積のメカニズム、特に、河口域の大きな特徴であり、輸送や巻き上がりの直接的な要因と考えられる流動場の特徴を把握することが重要であると考えられる。

そこで本研究では、多摩川河口域を対象とした現地観測を行い、河口域の物質輸送に大きな影響を与えていると考えられる、潮汐変動に伴う流動特性を明らかにし、これが底質の巻上げや輸送に与える影響、更に懸濁態物質などに及ぼす影響を把握することを目的とする。また、夏から秋にかけての河口域の水質や底質の季節変化についても考察する。

1-2 既往の研究

1-2-1 シルテーション問題

河口沿岸域での人間活動の活発化に伴う陸水境界での開発が盛んとなってきたことにより、底泥の輸送機構に関する研究が多く行われるようになってきた。

水域には常に陸域から多くの懸濁物質が河川を通じて流入している。輸送される懸濁粒子群は、水中の汚濁物質を吸着させながら水域に滞留したり、あるいは静穏域において底面に堆積したりする。この現象をシルテーションと呼ぶがこれについては立場の違いによりその評価が異なる。

物理的な見方をすれば、シルテーションは航路・泊地の埋没・河口閉塞・河動断面の狭小化といった港湾・河川の維持管理問題をもたらす。一方化学・生物学的見方をすれば、浮遊懸濁物質が底面に堆積するということは、水中の懸濁物質が除去されるために水質学的には浄化されるということになり、また砂質表層部 3cm 程度および底泥表層部から 1cm 程度では好気状態を保っており、有機物の分解が活発に行われる生物活性の高い部分となっている。

このように内湾浅海域に堆積した底泥の巻上げや沈降が水質や生態系に及ぼす影響は物理的・化学的・生物学的なそれぞれの見地から重要な因子である。

1-2-2 懸濁態物質の輸送機構

やわらかい底泥が広く堆積した河口沿岸域や河道側面部において、ある水理条件下、底泥の巻上げが生じ、巻き上げられた懸濁物質が分散・輸送され、フロック形成に続き沈降が可能な静穏な水域あるいはそのような条件のときに沈降する。

二渡は強混合型感潮河川の佐賀県六角川において経時的な懸濁物濃度の鉛直分布を河道方向 20km に渡って調査している。その結果、底泥からの巻上げや懸濁粒子の沈降によって下層部に高濃度水塊 (turbidity maximum) が形成され、潮の干満とともに河道方向数十 km も移動していることが分かった。

また、横山らにより行われた多摩川河口域での調査によれば、SS が塩水フロントの前面に乗って移動し、移動に伴って濃度が高くなる現象が見られた。これは上流から供給された浮遊土砂などが塩淡水境界面でフロックを形成し沈降速度が増大し、塩水フロントの前面に SS が集積するためであると考えられる。

また、河口から 5.5km 地点での定点観測により、大潮時の逆流時に中層から底層にかけて高い濁度が観測されたため、下流の浅い水路で底質が巻き上がっていることが考えられる。

これらの高濁度水塊にはフロックと鉱物粒子の両方が浮遊していることが確認され、高濁度水塊は浮遊粒子のフロック化と生産場所における底質材料の巻上げという二つの機構によっておきていることが予想される。

一般に、河道内における高濁度水塊の輸送については次のような説明がなされている。すなわち、水位昇降の変動パターンが対称的であれば河道方向の物質は正味 0 となるが、実際には潮汐が河川を逆流してくると、流水断面積の減少などから非対称性が生じる。その結果、平均流速の大きい上潮時のほうが下げ潮時よりも粒子の移動量が増加し、水底粒子の遡上が促進される。ま

た、Postma は潮流の非対称性がない場合でも、堆積粒子が上流へ移動しうることを示している(図 1-2-1)。この図の上段における破線は河口から上流へ向かう潮汐流の最大流速線であり実線は水粒子の運動を示している。下段の実線は固体粒子、破線は水粒子の軌道を示しており、正味上流側へ移動する様子が描かれている。

しかし、高濁度水塊の発生機構、特に巻き上げの仕組みについては、上げと下げの非対称性に着目した流動場などについての更なる調査が必要である。

1-3 本論文の構成

本研究ではこれまで述べてきたような懸濁態物質の輸送問題を解明するために、特にこれらを支配する感潮域の流動場に着目した多くの現地観測を行い、そこから得られたデータにより、そのメカニズムの把握を試みた。また長期的に見た多摩川河口域の水質及び底質環境の変遷についても考察した。

本論文は以下のように構成されている。

まず第 2 章で現地観測について説明する。現地観測は主に 2 パターンを計画した。ひとつは潮汐変動に着目した現地観測であり、これにより潮汐変動に伴う流動場の把握と、これに伴う懸濁態物質の挙動を明らかにする。もうひとつは夏から冬にかけての長期変動に着目した現地観測であり、これにより多摩川河口域における底質を含めた懸濁態物質の季節変化を明らかにする。更に季節変化にとって大きなインパクトとなる出水については、出水時の粒径変化等を明らかにするために出水時にあわせた採水調査を行った。

次に第 3 章では、河口域の物質輸送を支配する、潮汐変動に伴う流動場を現地観測から得られたデータにより明らかにする。特にこれまでも述べられてきた上げ潮時と下げ潮時の非対称性について、密度場の検討を中心に明らかにしていく。また、潮汐変動が特に大きかったときや、出水後の河川流量が大きい時との比較考察も加え、河口域流動場を把握する。更に、物質輸送に係る底面摩擦速度についてもその時空間分布特性を明らかにする。

そして第 4 章で懸濁態物質挙動について考察する。はじめに潮汐変動による懸濁態物質の挙動を考察し、一潮汐間の懸濁態物質挙動を流動場との関係から明らかにする。次に夏から冬にかけての多摩川河口域における水質及び底質環境の変遷を出水による影響に着目して考察する。特に底質については、出水前後の変遷を潮汐変動との関係を踏まえて明らかにする。

最後に第 5 章で本研究をまとめる。

河川

海

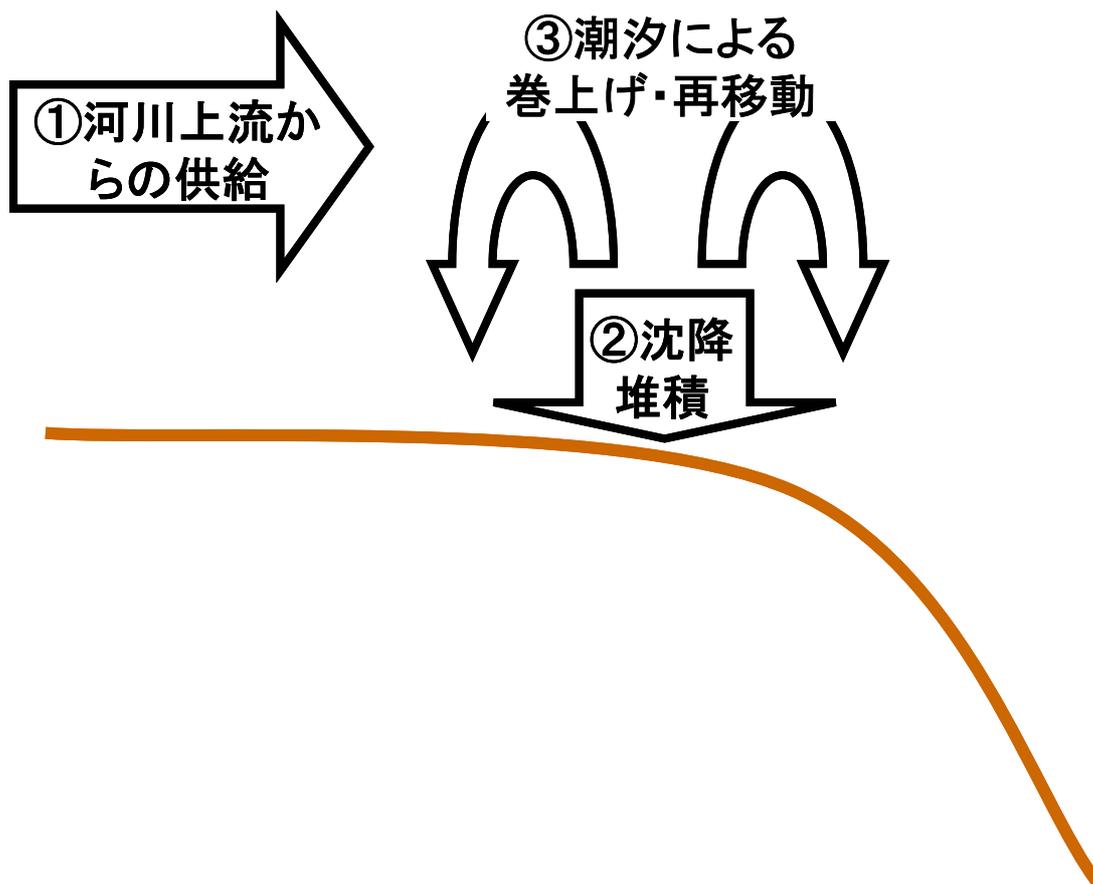
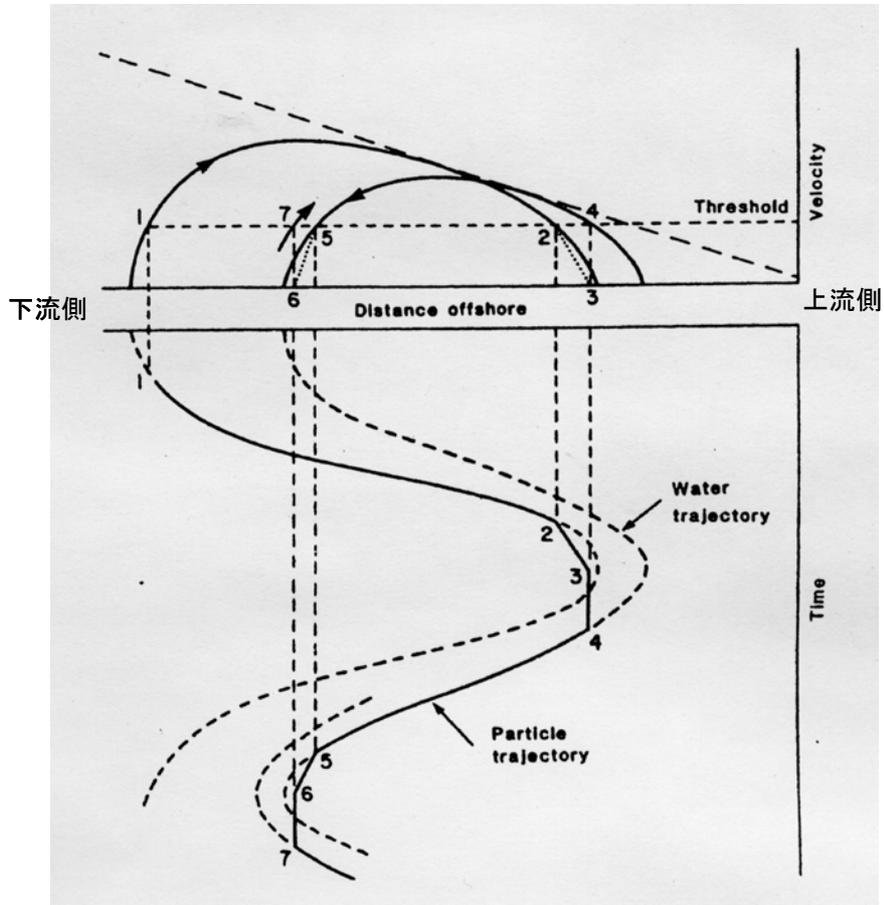


図1-1-1 懸濁物質動態の概念図



Postma,H(1967)

水粒子は正味の輸送が0(破線)であるのに対し、
堆積粒子は上流側への輸送(実線)が生じる。

図1-2-1 堆積粒子の遡上メカニズム

第2章 観測概要

2-1 はじめに

本研究で対象とした多摩川は、源流を山梨県笠取山、河口を羽田沖の東京湾にもつ、全長138km、流域面積は1,240km²、山梨、東京、神奈川県を流れる一級河川である。本章では多摩川河口域において、2002年8月から2002年11月までに行った現地観測について説明する。多摩川河口域の平面図を図2-1-1(a)に、また京浜工事事務所から頂いた多摩川河口域の測量データを基に作成した断面図と、観測点として選んだ地点の横断形状をそれぞれ図2-1-1(b)と図2-1-1(c)に示した。なお横断面図は図の右側が右岸となっている。感潮河道の地形は0km～2km付近は浅く、5km～7km付近は窪地状の地形となっている。多摩川の河口1km付近までは左岸の羽田空港や右岸の工業地帯に物資を運搬するためのタンカーが多く航行しているが、干潮時に濤筋の水深が3m程度になるために船底が着底しそうな状態で走行している。N3(-1km地点)よりも河口側では管理区域の関係で測量をすべての範囲ではできないため、不完全なものとなっている。また、図2-1-2に河川の循環形態図を示し、この中に多摩川をプロットした。これより、多摩川は緩混合型に分類されることが分かる。

観測は大きく分けて2つの目的のもとに行われた。ひとつは潮汐変動を対象とした「一潮汐集中観測」であり、もうひとつは季節変動を対象とした「水質及び底質観測」「出水時観測」である。さらに京浜工事事務所が提供している多摩川水質データも利用させていただいた。図2-1-3に田園調布堰下流側の水位計で記録された流量とともに、観測日を示した。また、現地観測の枠組みを図2-1-4に示し、以下の節で各観測について説明する。

2-2 一潮汐集中観測

一潮汐間の流動特性とそれによる懸濁態物質の挙動を把握するために、多摩川河口域において一潮汐間、広範囲に渡る縦断観測を行った。

一潮汐観測は先に示したように、2002年の8、9、10月の間に4回実施した。観測地点は図2-2-1に示すようにN1で示された河口の地点(-2.5km地点)からN11で示された六郷橋の地点(5.5km地点)までの8km間を図中に示す破線で示された濤筋に沿って11点を設定した。観測は船で移動し、DGPS(マゼラン製:Meridian)や測深器(本多電子製:PS-7FL)を用いて観測地点を同定した。

本調査では一潮汐間の流動特性と懸濁態物質挙動を把握することが目的であるために、大潮の時期を狙って、一潮汐間を6等分し、1回に約2時間かかる縦断観測(以降Runと呼ぶ)を満潮から満潮前までの6回(満潮・下げ潮1・下げ潮2・干潮・上げ潮1・上げ潮2)、図2-2-2に示すように潮汐変動(河口地点での水位変動を示してある。)に対応させて行った。ただし、10/5は潮の関係で下げ潮1から満潮までの6回となっている。

観測項目については図2-2-1に示したとおりで、多項目水質計(アレック電子製:クロロテック

ACL-DK)により水温、塩分、濁度、Chl.a の鉛直分布を測定し、溶存酸素(以下 DO と呼ぶ)計測には多項目水質計(ホリバ社製:U-21)を、流速の計測には超音波ドップラー流速計(以下 ADCP と呼ぶ)(RD-Instruments 社製:DR2400kHz)を使用した。2400kHz の流速計を使用できたことで解像度の高い鉛直プロファイルを測定することが可能となった。また、採水について、表層水はバケツによる採水、その他の水深についてはバンドーン採水器(離合社製)による採水を行い、ポリビンに移し替えたあと、冷凍保存して実験室へ持ち帰り、分析した。なお分析方法についてはまとめて2-5 で述べることとする。

なお、ADCP の測定水深は河床から水面下約 60cm~1mまでであり、鉛直方向の測定間隔は水深が 10m を超える N1 においては 50cm、その他は 20cm に設定した。また、現場では約 3 分間の測定を行い、データをまとめる際にはその平均値を求めることとした。

2-3 水質及び底質観測

多摩川河口域の底質と懸濁態物質の季節変化を把握することを目的に、多摩川河口域において夏から冬にかけて、広範囲にわたる縦断観測を行った。

水質及び底質観測は先に示したように 2002 年 8 月~2002 年 11 月までの間に 6 回実施した。観測地点は図 2-3-1 に示すように N1 で示された河口の地点(-2.5km 地点)から N14 で示された多摩川大橋の地点(8.5km 地点)までの 11km 間を図中に示す破線で示された濤筋に沿って 16 点を設定した。観測は船で移動し、DGPS(マゼラン製:Meridian)や測深器(本多電子製:PS-7FL)を用いて観測地点を同定した。

本調査では、採泥時の安全性と、水質状況に対する潮汐影響のできるだけ小さなときを狙うために小潮時を観測日として選び、N1~N14 まで 1 回ずつの測定を行った。ただし出水直後については潮の条件よりも、なるべく出水直後に、しかし川がある程度落ち着き安全に作業ができるような日を選んだ。

観測項目については図 2-3-1 に示したとおりである。採泥についてはコアサンプラー(離合社製)(図 2-3-2)を使用した。これを用いると、現地の底質を不攪乱状態で柱状採取できるという利点がある。しかし、底質が砂質の場合、コアが十分に貫入できないことが多い。したがって、底質の状況に応じて改良型エクマンバージ(離合社製)(図 2-3-3)を使用した。この採泥器は本来自由落下により底泥を採取する仕組みのため流れの影響を受けやすく、底泥を採泥器が傾いた状態で採取してしまうことがある。そこで船上から河床に採泥器を直接突き刺すことができるように両採泥器に深さ 10m 程度まで対応できる可変金属棒を接続できるように改良した。そのため、コアサンプラーよりも確実に測器を底泥に差し込むことができる利点があるが、底泥を取り込んだ後引き上げる際に水と一緒に細かい泥が流れてしまうことがあるという欠点がある。そこで現場では、水面から引き上げる際に水の入った容器でエクマンバージをまるごと覆うことでこれを克服した。また、採泥時に船が動くとして作業が非常に危険になるためアンカーを打って船を固定した。採取した底質は上下に混合されないように水抜きなどを慎重に行い、取り扱った。エクマンバージで採取した試料については、アクリル管を突き刺しコアサンプラーの試料と同様の形にしてから表層から 3cm ごとにサンプリング

し冷凍保存して実験室へ持ち帰った。

2-4 出水時観測

多摩川河口域の底質と懸濁態物質の季節変化を把握する際に、出水のインパクトが重要である。そこで、出水時の懸濁態物質の量的、質的な変遷を明らかにするために、六郷橋において出水時観測を行った。

本研究では、比較的大きな出水となった 2002 年の台風 13 号と 21 号を対象とし、六郷橋の上からバケツによる表層採水を、天気予報を参考に出水の来る直前から出水後の濁度が平常値に戻るまでの間、1～3時間間隔で行った。

データの取れた時間と観測項目は表 2-4-1、表 2-4-2 に示すとおりである。この観測により出水時の SS 量や、粒径分布、有機物量のピーク量や時間的变化を把握することで平常時との違いを明らかにし、多摩川河口域への影響を評価する。

2-5 分析概要

本節では採水や採泥煮より得られた試料の分析方法について説明する。

2-5-1 採泥試料

採泥試料については粒度分布のみの分析を行った。粒径分析では、まず持ち帰った試料を 110 度の乾燥炉へ入れて乾燥し、その後よくかき混ぜて物性が均一になるようにしてからレーザー回折式粒度分布測定装置(島津製作所製:SALD-3000)を使用した。

2-5-2 採水試料

採水試料については Suspended Solid(以降 SS と呼ぶ)、有機物量(DOC、POC)、粒径の分析を行った。

① SS

SS 分析では孔径 1.2 μm のメンブレンフィルター(MILLIPORE 社製)を使用してろ過を行い、残留物の重さを計った。

② 有機物量

有機物分析ではまず、試水を孔径 1.2 μm の GF/F フィルター(Whatman 社製)でろ過し、残留物、ろ液に分け、TOC-5000、SSM-5000A(ともに島津製作所製)により TOC、POC を測定する。

③ 粒径

試水をレーザー回折式粒度分布測定装置(島津製作所製:SALD-3000)により測定した。ただし、SS 濃度の小さいときには精度に問題があると考えられる。

2-6 六郷橋水質データ

本節では国土交通省が全国の主要河川において行っている観測により得られた雨量及び水位、流量、水質等のデータのうち、京浜工事事務所により管理されまた、ホームページ上で公開されている多摩川河口域の水文データについて説明する。

この観測により多摩川の雨量、水位、そして水質に関しては六郷橋地点における水温、塩分、濁度、DO のデータを毎日 1 時間間隔で手にすることができる。また、期間についてはデータ提供開始が 2002 年 6 月末からであるが、ホームページで公開されていない部分のデータについても提供いただき 2002 年の 1 月から一年間を通したデータを手に入れることができた。

本研究ではここで得られたデータ(観測点については図 2-6-1 参照)を上で述べた現地観測データとあわせて利用し、多摩川河口域の水質の季節変化について考察をしていく。

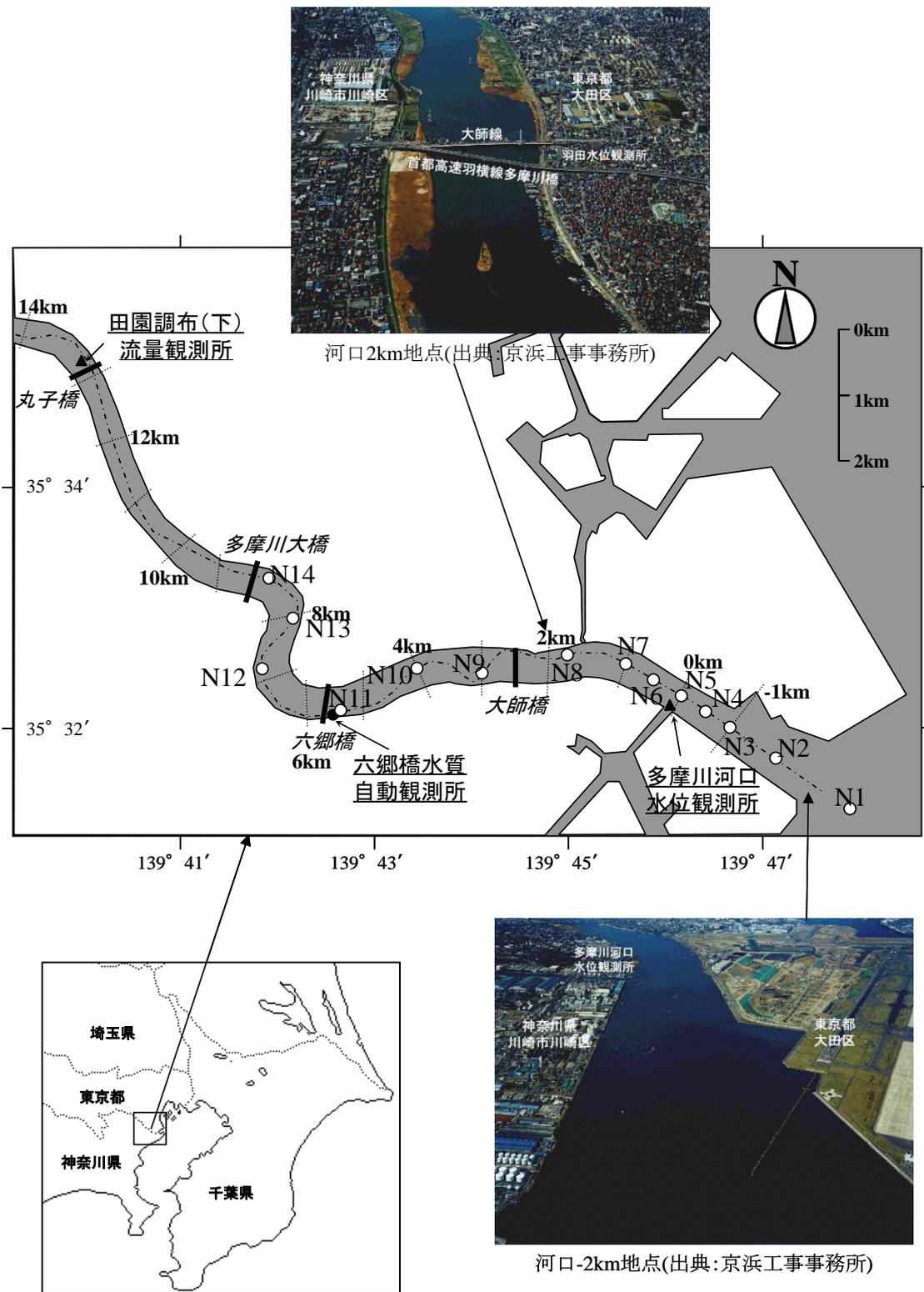


图2-1-1(a) 多摩川河口域平面图

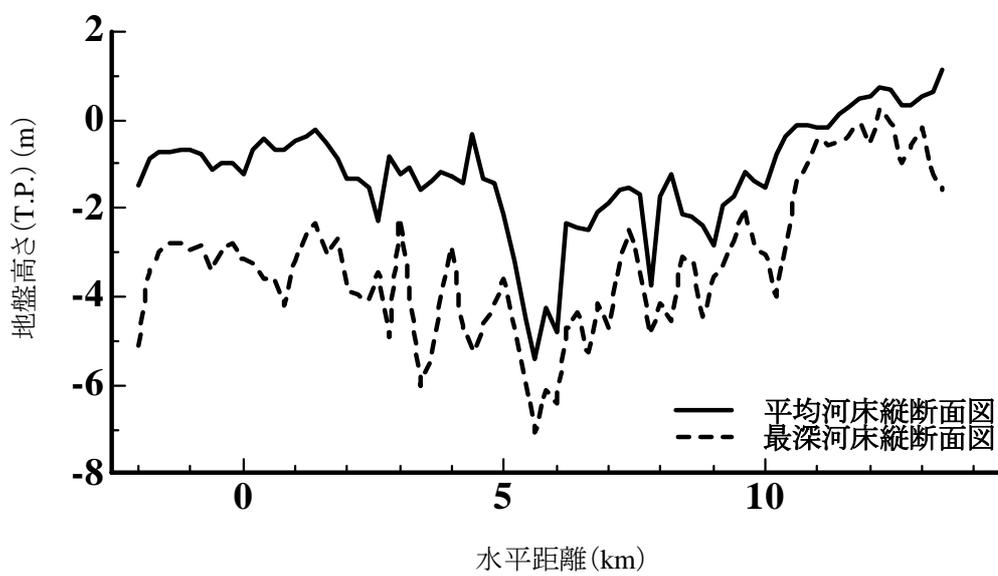


図2-1-1(b) 多摩川河口域縦断面図(出典:京浜工事事務所)

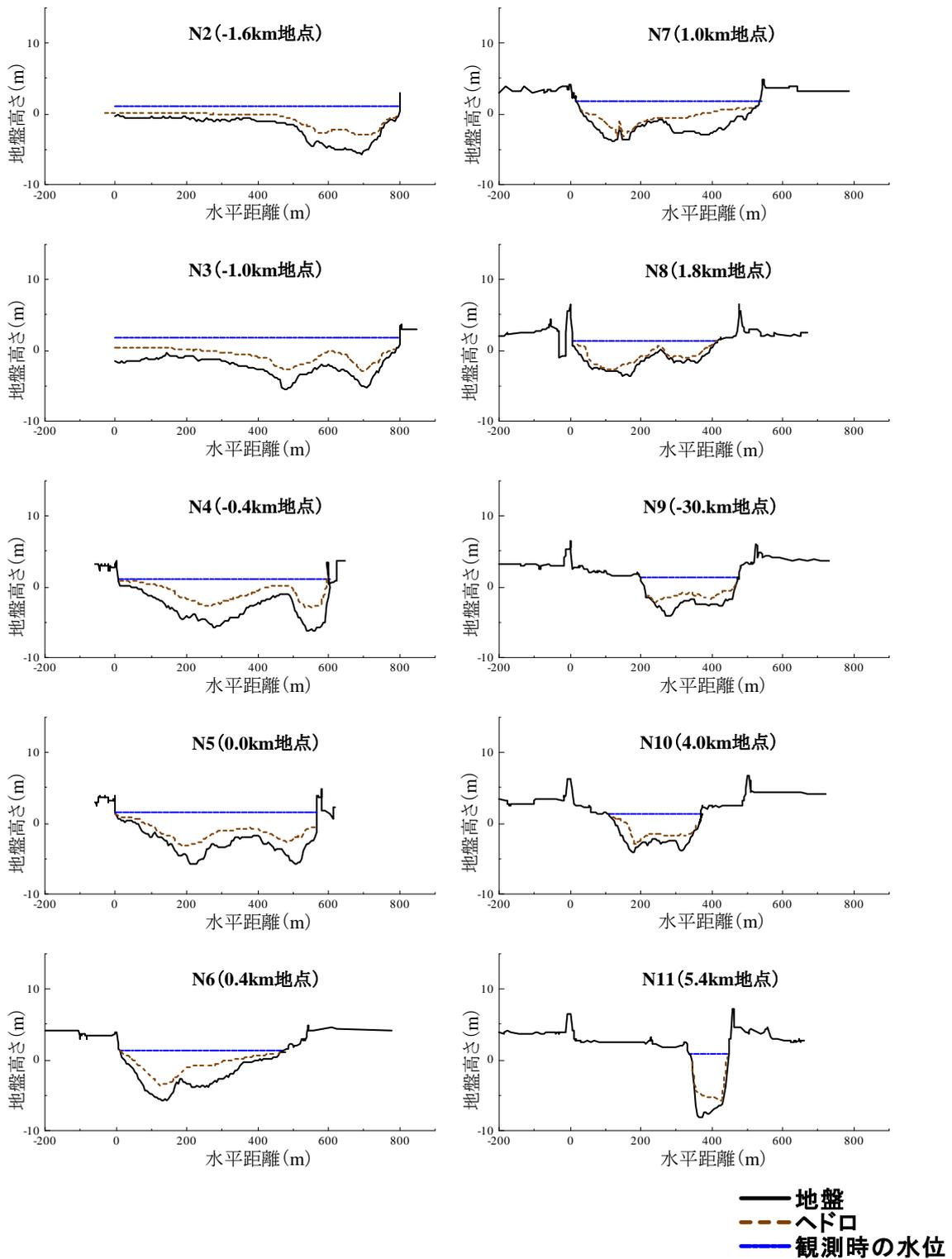


図2-1-1(c) 多摩川河口域の代表的な横断面図(出典:京浜工事事務所)

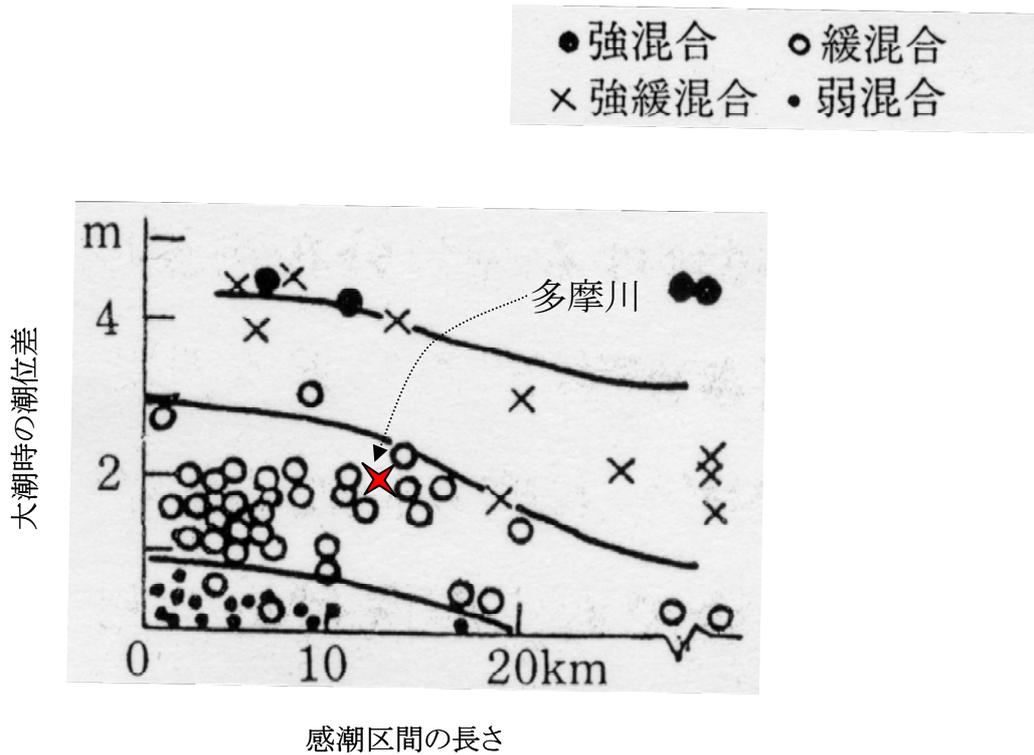


図2-1-2 我が国主要河川河口域の循環形態(出典:須賀(1979)による)

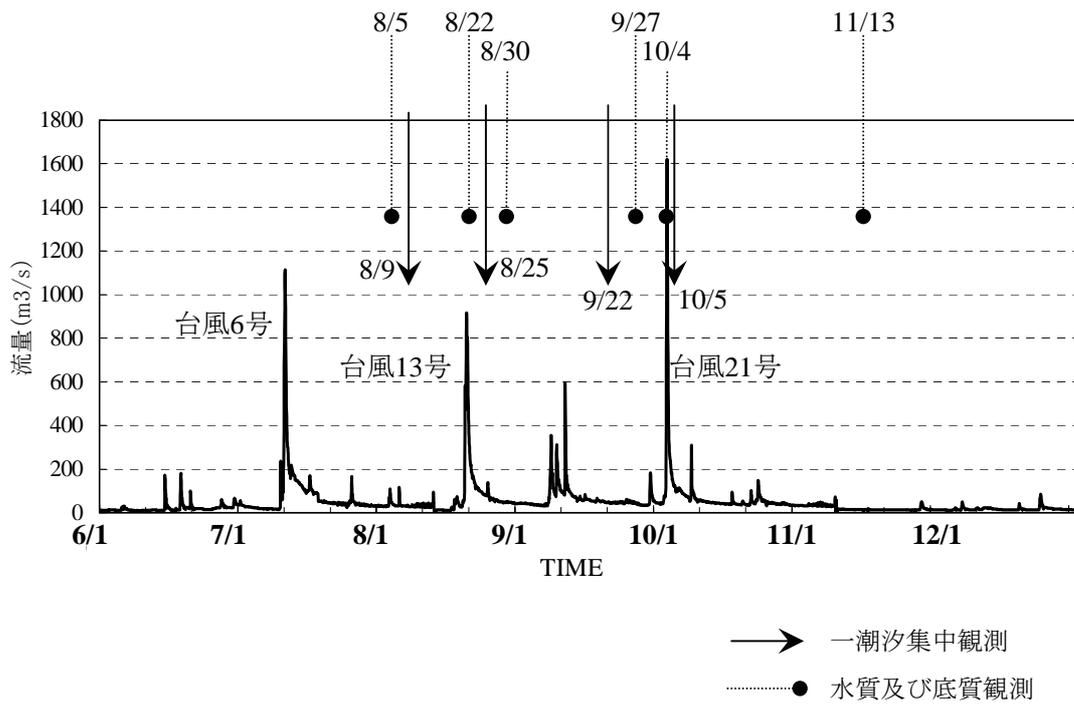
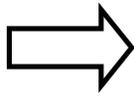


図2-1-3 流量(田園調布堰(下流部))と観測実施日

潮汐変動を対象とした調査

1. 一潮汐集中観測



- ① 潮汐変動に伴う流動特性の把握
- ② 流動場が底質の巻上げと輸送に与える影響の把握
- ③ 潮汐変動に伴う懸濁態物質挙動特性の把握

季節変動を対象とした調査・データ

1. 水質及び底質観測

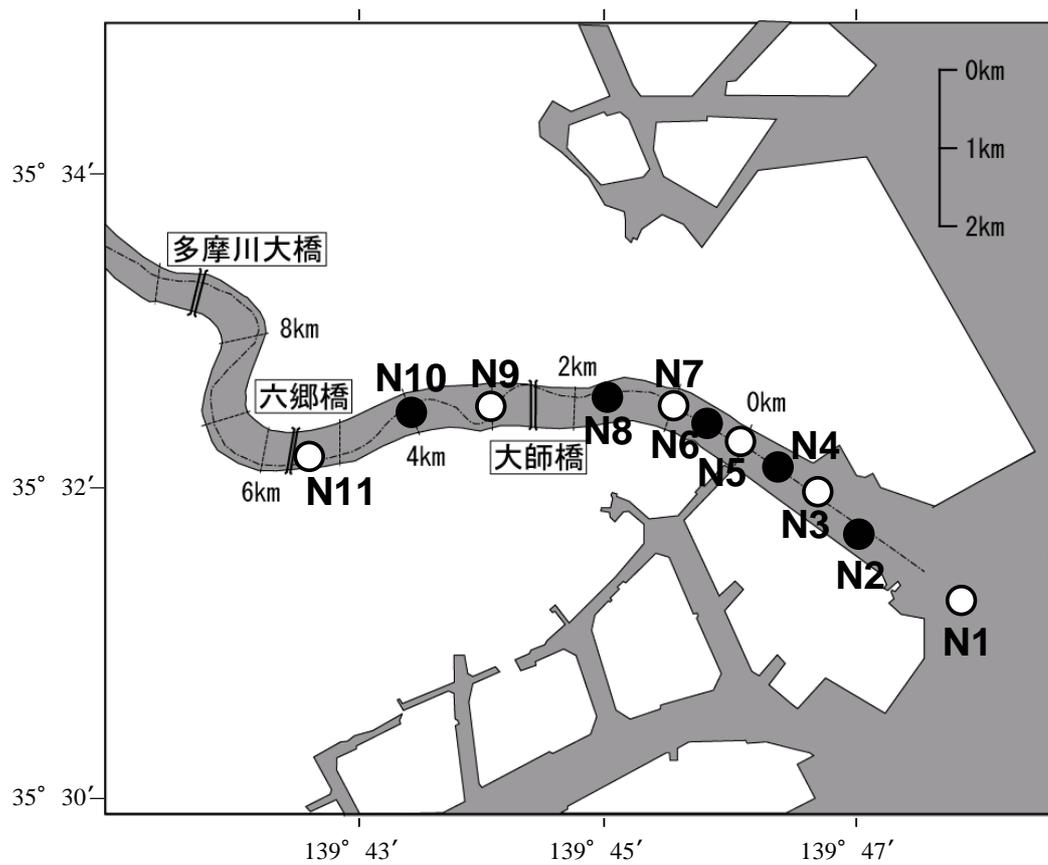
2. 出水時観測

3. 多摩川水質データ



- ① 底質堆積状況の季節変化の把握
- ② 河口域の懸濁態物質(主に有機物)の季節変化の把握
- ③ 出水や東京湾の状態が多摩川河口域に及ぼす影響の把握

図2-1-4 現地観測の枠組み



観測項目

○: センサー

流速・DO・水温・塩分・濁度・蛍光光度

採水

SS・TC・粒径・Chl.a

●: 水温・塩分・濁度・蛍光光度

図2-2-1 一潮汐集中観測観測地点と観測項目

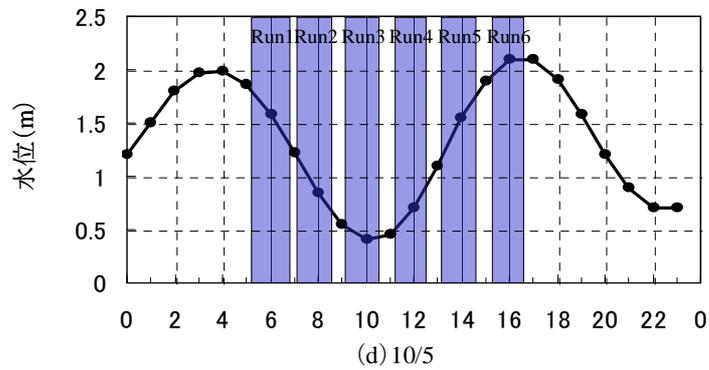
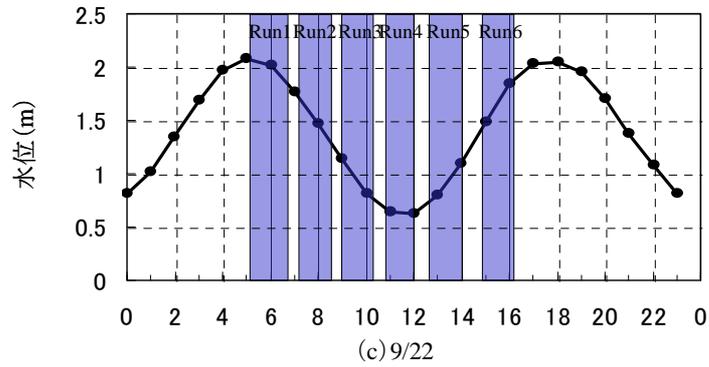
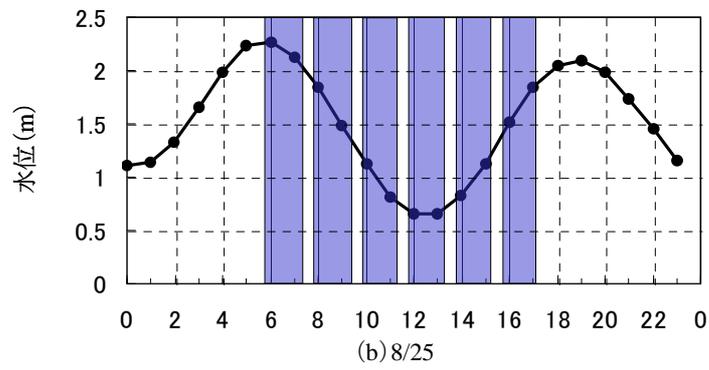
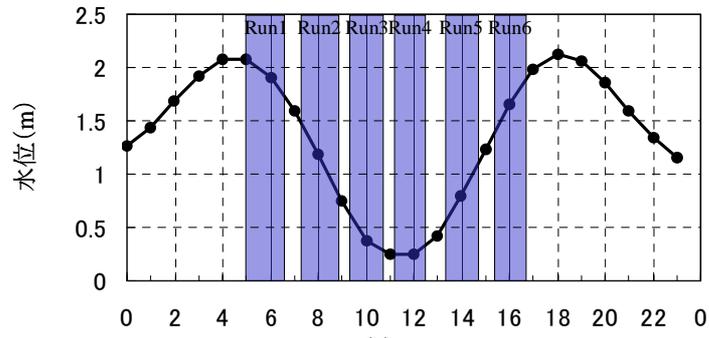


図2-2-2(a) 一潮汐間の潮位(0km地点)とRunの時間配置

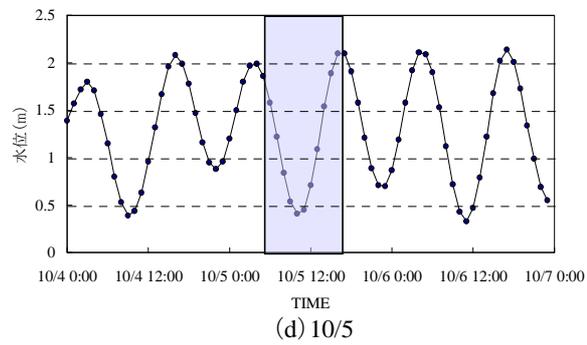
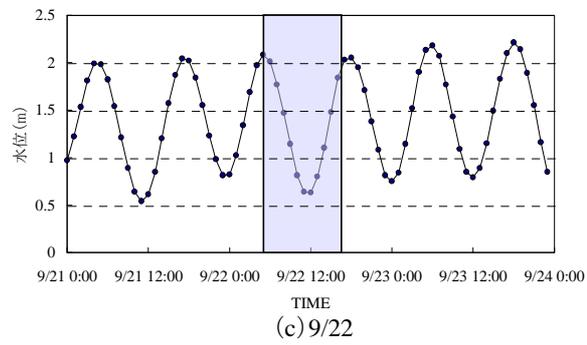
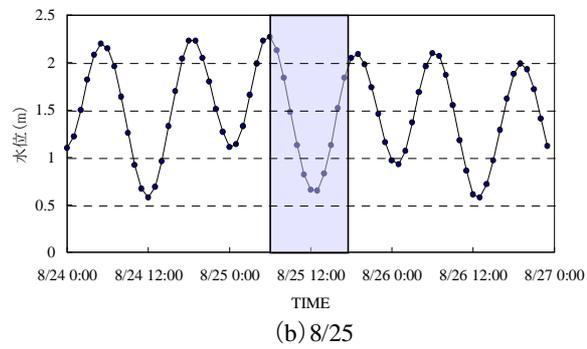
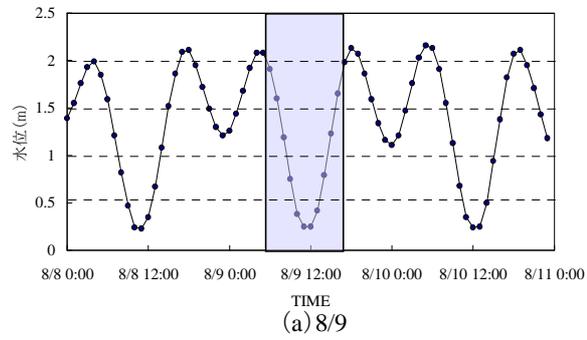


図2-2-2(b) 観測日前後の潮位(0km地点)

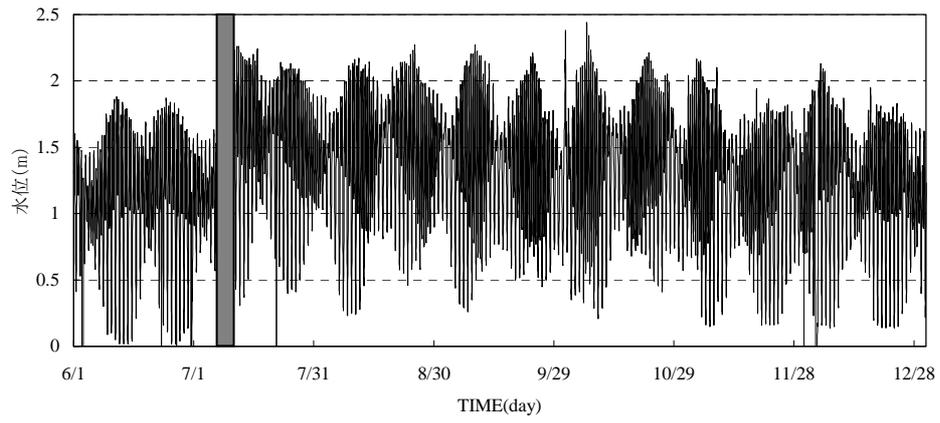
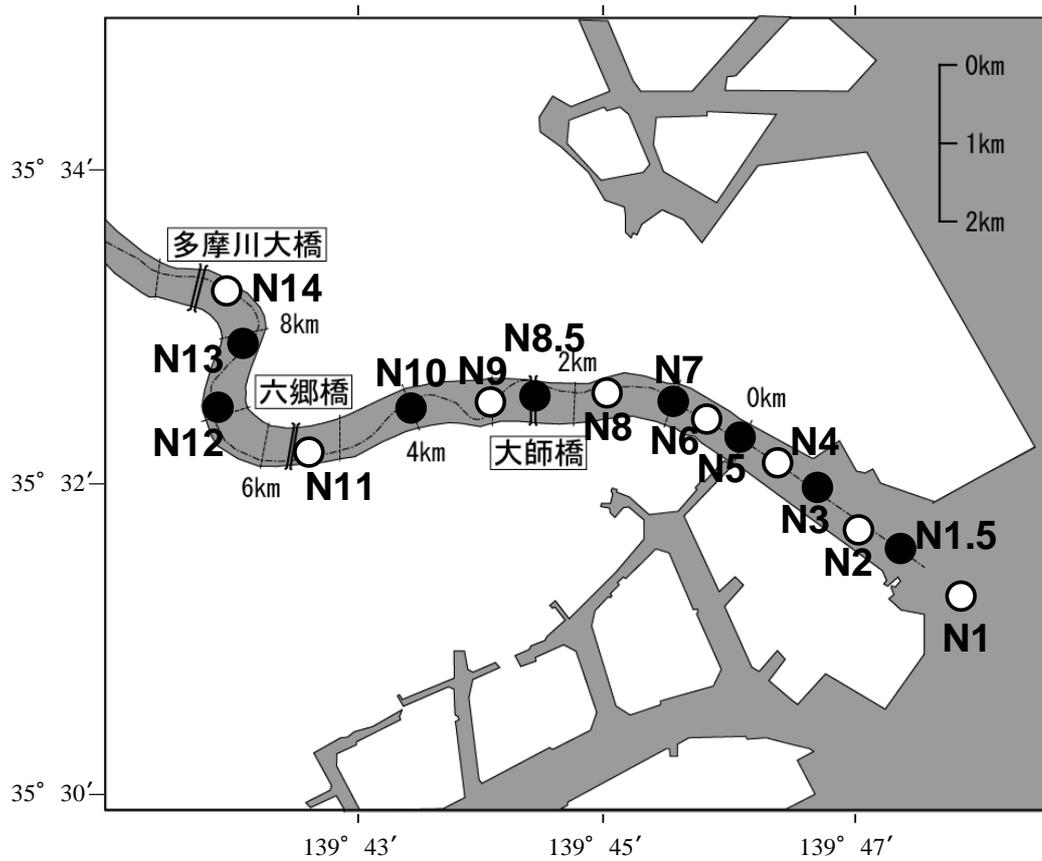


図2-2-2(c) 2002年6月～12月の潮位変化(0km地点)



観測項目

○: センサー

DO・水温・塩分・濁度・蛍光光度

採水

SS・TC・粒径・Chl.a

採泥

粒径

●: 水温・塩分・濁度・蛍光光度

図2-3-1 水質及び底質観測観測地点と観測項目



図2-3-2 コアサンプラー



図2-3-2 改良型エクマンバージ

表2-4-1 出水時観測の観測時間と項目(台風13号)

台風13号		京浜工事事務所	出水時観測					
月日	時間	六郷橋濁度データ	SS	粒径	TC			
8月18日	0:00	○	×	×	×			
8月19日	0:00							
8月19日	1:00							
8月19日	4:00					1時間毎採水	1時間毎採水	3時間毎採水
8月19日	5:00							
8月20日	11:00					欠損	2時間毎採水	
8月20日	12:00							
8月20日	17:00							
8月20日	18:00	○	3-5時間毎採水	3-5時間毎採水				
8月20日	21:00							
8月20日	22:00							
8月20日	23:00							
8月21日	0:00							
8月21日	11:00	×	×	×				
8月21日	12:00							
8月21日	23:00							

表2-4-2 出水時観測の観測時間と項目(台風21号)

台風21号		京浜工事事務所	出水時観測					
月日	時間	六郷橋濁度データ	SS	粒径	TC			
9月30日	0:00	○	×	×	×			
9月30日	23:00							
10月1日	0:00							
10月1日	14:00					3時間毎採水	3時間毎採水	欠損
10月1日	15:00							
10月1日	20:00							
10月1日	21:00					欠損	3時間毎採水	3時間毎採水
10月2日	22:00	○	×	×	×			
10月2日	23:00							
10月3日	0:00							
10月3日	23:00							

第3章 多摩川河口域における流動特性

3-1 はじめに

本章では、まず一潮汐観測で得られた塩分、水温、流速の結果を簡単に示し、多摩川河口域における一潮汐間での流動場の挙動を示す。その後、多摩川河口域における物質輸送解明のために、その支配要因であると考えられる潮汐変動による流動場について検討する。序論でも簡単に述べたように、河口域では上げ潮時と下げ潮時における流動場の非対称性が、物質、特に底質の輸送に大きな影響を与えていると考えられているのでこれらに着目しながら議論を進める。

3-2 各一潮汐観測の特徴

一潮汐観測は第2章で示したように全部で4回、大潮の時期に実施した。各観測日の潮位差(多摩川河口地点)と観測時間中の平均流量(田園調布(下)(河口から13km地点))を表3-2-1に示す。ここから、4回の観測を分類すると、8/25と9/22は潮位差が150~160cm、流量が $50\text{m}^3/\text{s}$ 前後となっており、これを基準に考えると、8/9は潮位差が大きく、また、流量が小さいケースと考えることができる。一方10/5においては、潮位差はやや大きく、また出水直後だったこともあり、流量が大きくなっているケースとして考えることができる。つまり、8/25と9/22は大潮時期ではあるが比較的潮位差が小さかったのに対し、8/9と10/5は潮位差が大きかったこと、更に10/5は出水直後で流量が大きくなっていたことが特徴として挙げられる。実際に観測結果の一例として、図3-1-1に水深平均流速を一潮汐間にわたりプロットし、またこのプロットから次の形のsin関数

$$f(x) = a \sin(x - b) + c$$

を最小二乗法により求め、実線にて示した。ここでaは潮汐の大きさから決まる流量の振幅の大きさを表し、bは位相のずれを、そしてcは流量の大きさにより決まる、流速の一定量のシフト値を表す。図3-2-2に係数の値を示した。ここからも8/9に潮汐振幅が大きかったこと、10/5に流量が大きかったことが明らかである。後者については、下流側方向に流速がシフトされた状態で潮汐による振幅があるということを示している。また、プロットされた点と近似されたsin関数を比較すると、8/9以外の観測日について、特にN3、N5、N7では、下げ潮時において、sin関数近似よりも急激に下げていることが分かる。つまり、潮汐振幅に上げ潮時と下げ潮時で非対称性があると考えられる。このことは流動場に何らかの影響を与えることがあると考えられる。

そこで図3-2-3に河口水位(0km地点)の時間変化率を合わせて記したが、水位の時間変化率が歪んでいる箇所も見受けられ、特に下げ潮時に勾配が急になっているようなところが、上げ潮時と下げ潮時の非対称性のひとつの要因であると考えられる。

実際に図3-2-4に示したように水深平均流速の時間変化量は非対称性を示している。とくに、干潮時から上げ潮時にかけてその傾向が顕著である。

この他の観測日の条件としては図3-2-5に示すように8/9は特に風が強かったことも観測結果を考察する際に考慮しなければならない。

そこで本研究では、大潮時の流動特性の基本ケースとして 8/25 と 9/22 のケースを検討し、次に潮位振幅が大きいケースとして 8/9 のケースを、更に河川出水の影響のあるケースとして 10/5 のケースを検討していくこととする。

3-3 潮汐変動による流れと物質の空間構造

この節では一潮汐観測から得られた塩分、水温、流速の観測結果を簡単に示し、潮汐変動によってどのような流動場が形成されているのかを把握する。

まず、8/25、9/22 における塩分、水温、流速の空間分布の、潮汐変動に伴う時間変化をそれぞれ図 3-3-1、図 3-3-2 に示す。

塩分の空間分布において、25‰のライン(図中の矢印)に着目すると、一潮汐間に 2~3km ほどの進入後退が見られる。また上げ潮時と下げ潮時を比較すると、上げ潮時においてコンター間隔が広がっていることが分かる。

流速に関しては、下げ潮時は表層で流速が大きいのに対し、上げ潮時には底層で流速が大きくなっていることが見て取れる。

次に、潮位差の大きかった 8/9 における塩分、水温、流速の空間分布の潮汐変動に伴う時間変化を図 3-3-3 に示す。

塩分の空間分布において、25‰のラインに着目すると、一潮汐間に 5km ほど進入後退が見られ、8/25 や 9/22 と比べ潮汐変動が大きかったことが見て取れる。

流速分布については、8/25 や 9/22 と同じように下げ潮時は表層で流速が大きいのに対し、上げ潮時には底層で流速が大きくなっていることが見て取れる。また、潮位差が大きいため、上げ潮時下げ潮時ともに 8/25 や 9/22 に比べ、流速が大きくなっていることが分かる。

続いて、出水直後の 10/5 における塩分、水温、流速の空間分布の潮汐変動に伴う時間変化を図 3-3-4 に示す。

塩分の空間分布において、25‰のラインに着目すると、一潮汐間に 3~4km ほど進入後退が見られ潮汐変動が大きいものの流量が大きいため塩水の遡上が阻まれていることが分かる。

流速分布については、河口側では 8/25 や 9/22 と同じように下げ潮時は表層で流速が大きいのに対し、上げ潮時には底層で流速が大きくなっていることが見て取れる。また、出水が大きかったために、下げ潮時の流速が大きくなっていることが分かり、下げ潮時には、底層でも流速が 8/25 や 9/22 に比べ大きくなっており、上げ潮時には上流の N11 付近の流速が小さくなっていることがわかる。

3-4 流動特性

前節で潮汐変動による流動場の時空間構造を見てきたが、本研究の目的である、潮汐変動による物質挙動を考える上で流動場の把握は必要不可欠である。そこで、本節では潮汐変動による流動特性について議論する。

3-4-1 大潮時の流動特性

ここでは、大潮時の基本流動特性として 8/25 と 9/22 についての流動場の検討を、特に上げ潮時と下げ潮時の非対称性に着目して行う。はじめに流速分布の形状から上げ潮時と下げ潮時の違いを考察し、そのメカニズムを把握するために、流速分布を決定するひとつの要素である密度場について、その上げ下げ非対称性について議論する。

(1) 一潮汐内での流速分布非対称性

8/25 と 9/22 における流速分布を図 3-4-1 と図 3-4-2 にそれぞれ示す。各測点において満潮時の水深を基準に底面を固定し、プロファイルを図示している。このように一覧にして並べてみても 8/25 と 9/22 の流速分布が非常に良く似ていることが分かる。

この図から、下げ潮時は表層で流速が大きく、上げ潮時の特に N3～N7 においては底層で流速が大きくなっていることが、上げ潮時と下げ潮時の非対称性として挙げられる。これは下げ潮時には軽い淡水が表層から流れるのに対し、上げ潮時には重い海水が底層から浸入してくるエスチャリー循環が形成されているためであるが、この上げ下げ非対称性についてより詳細に調べるために、対数速度分布との比較を考えた。そのために、以下のようにして各測点の各 Run における対数速度分布を求めた。

まず、観測から得られた水深平均流速と Manning 公式

$$U = \frac{1}{n} R^{2/3} I^{1/2}$$

からエネルギー勾配 I を求める。ここで粗度係数 n は自然水路の標準値である 0.03 を用いた。この I と対数速度分布式

$$u = \left(\frac{1}{\kappa} \ln \frac{y}{k_s} + A_r \right) \sqrt{ghI}$$

より対数速度分布を求めた。

この対数速度分布を観測より得られた流速分布と比較したものを、図 3-4-3(a) と図 3-4-4(a) に示す。また、上で求めた対数速度と観測より得られた流速の相関係数を図 3-4-3(b) と図 3-4-4(b) に N5 と N7 について示した。これらの図より、対数速度分布と観測結果を比較すると、観測で得られた流速分布は下げ潮時は表層で、流速が大きく出ており、底層で小さくなっているのに対し、上げ潮時は底層で流速の絶対値が大きいことが分かり、一部に表層で絶対値が小さくなる分布も見られるが、概ね対数速度分布と一致する傾向が見られることが分かる。このことは相関係数を見ると、特に N7 で下げ潮時に比べ上げ潮時のほうが、相関係数が大きくなっていることからいえる。

このことから、下げ潮時の流速分布は潮汐運動とエスチャリー循環を形成する傾圧勾配が流速分布の形成に大きく寄与しているバロクリック的な流れであるのに対し、上げ潮時はこれら二つの上に更に、傾圧勾配を緩める仕組みを経て、傾圧勾配の寄与の弱い流速分布が形成されている、どちらかというバロトロピック的な流れであることが考えられる。

(2) 一潮汐内での密度場非対称性

流速分布に対する傾圧勾配の寄与の仕方が、上げ潮時と下げ潮時の流速分布非対称性として表れてくることが示唆されたが、ここでは傾圧勾配の寄与について調べるために、一潮汐間で密度場の空間構造がどのように変化しているのかを考察する。

図 3-4-5 に 8/25 と 9/22 の密度分布の空間構造を示す。この図から、下げ潮時にはコンター間隔が密であることから、成層がついていたと考えられる状況が、上げ潮時になるとコンター間隔が疎になっていることから、混合が起り、成層が崩されているような状況へと変化していることが考えられる。

次にこのことを確かめるために、観測結果を用いて、次の式

$$N = \sqrt{-\frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z}}$$

で表され、成層の安定度を示すバイサラ周波数を算出して、8/25 と 9/22 における空間分布を図 3-4-6 に示した。図に示したのは 50cm 幅でスムージングをかけたものである。ここから明らかなように、下げ潮時にはバイサラ周波数が大きく、上げ潮時にはこれに比べてバイサラ周波数が小さくなっていることから、下げ潮時に比べ上げ潮時には安定度が弱くなったといえることができる。

密度場の不安定性について更に考えるために、密度場を乱すのに必要なエネルギーと、乱れから受け取るエネルギーの比である局所リチャードソン数

$$Ri = \frac{g \partial \rho / \partial z}{\rho (\partial u / \partial z)^2}$$

について考える。観測結果より求められた、各水深の密度と、40cm 幅でスムージングをかけた流速の値から 8/25 と 9/22 の局所リチャードソン数を算出したものを図 3-4-7 と図 3-4-8 にそれぞれ示した。図中の実線は安定と不安定の境界値として考えられている 0.25 の値を示している。ここから、特に、河口付近に近い N3、N5、N7 では上げ潮時に底面付近でリチャードソン数が小さくなっていることが分かり、密度場が上げ潮時に不安定になっていることが推測される。不安定な部分が底層付近に限られているように見えるが、多摩川河口域の水深が浅いことを考えると、この影響が底層だけに限られることは難しいと考えられる。また、このことが、上げ潮時には混合しやすい環境を形成し、傾圧勾配を小さくすることに効いていると考えられる。

バイサラ周波数の空間分布を見ると、上げ潮時の上流側で成層が崩れているのが見えるが、リチャードソン数は、上流側では不安定さを示していない。これについては、河口付近で乱されたあとで移流により上流側へ移動したものと考えられることができる。

また、図 3-4-9 にバルクリチャードソン数の空間分布を示した。これは次のように求めた。すなわち、

$$\overline{Ri} = gH \frac{\Delta \rho / \rho}{U^2}$$

の式により求めた。 ρ は水深平均密度、 U は水深平均流速である。この図からも、上げ潮時の特に Run6 で値が小さくなっており、混合が進んでいることが考えらる。

これまで、潮汐変動による密度場の変化について考えてきたが、この密度場の変化が流れに与える影響について簡単に考察する。

単位堆積あたりの水に働く力 ($-\frac{\partial P}{\partial x}$) (以下流れの駆動力と呼ぶ。) は傾圧成分 ($-\rho g \frac{\partial \zeta}{\partial x}$) と

傾圧成分 ($-g \int_0^z \frac{\partial \rho}{\partial x} dz$) に分けることができるが、ここでは傾圧成分のみに着目して議論をする。

観測結果から求めた 8/25 の N5 (0km 地点) と N7 (1km 地点) における傾圧成分による流れの駆動力 (それぞれ N4 と N6 の密度勾配、N6 と N8 の密度勾配より算出) の一潮汐変化を図 3-4-10 に示した。これより、N5 においては下げ潮時は傾圧成分による駆動力が大きく働いているのに対し、上げ潮時は傾圧成分による駆動力が小さくなっていることが分かる。一方 N7 については、若干上げ潮時に大きくなる傾向が見られるものの、N5 に比べて全体的に小さく、傾圧勾配の比較的小さい領域となっていることが分かる。

このように、混合により傾圧成分が小さくなるのが、下げ潮時の流速分布を決めるひとつの要素になっていることが考えられる。また、混合による、流速分布を一様化させる効果もあると考えられる。

上げ潮時に混合がなぜ起こるのかについては、本観測結果からはまだ明らかにすることができないが、塩水楔が浸入する際の乱れが関係したプロセスがあるのではないかと考えられる。また、上げ潮時には底層流速が大きいことも混合が起こるひとつの要因であることも考えられる。しかし、これについては今後、数値計算等による解明が必要である。

(3) 大潮時における流動場のまとめ

これまで見てきた流動特性を簡単にまとめるために図 3-4-12 に流動場形成の概念図を示した。特に N3~N7 付近の河口域の流動場の形成においては、潮汐運動による往復流と、海水と淡水の密度差から生じる傾圧勾配による流れ (エスチャリー循環) が組み合わされている。これにより下げ潮時は流下方向に表層で大きく、底層で小さい流速分布、バロクリニック的な流れが形成される。一方、上げ潮時は、以上の2つの要素によって上流側に向かって底層で比較的大きい流速が生じるためにシアが大きくなることで、下げ潮時には見られなかった混合が起こる。そのため、2つの要素のほかに、傾圧勾配が小さくなるという要素が組み合わされた流速分布、バロトロピック的な流れが形成される。また、混合の効果は、流速の鉛直方向一様性に寄与していることも考えられる。

3-4-2 潮位振幅や河川出水が流動特性に与える影響

これまでに、大潮時の基本流動特性ということで 8/25 と 9/22 のケースをまとめたが、河口域の流れを考える上で重要な要素として潮汐振幅と河川流量が挙げられ、これらの影響を考慮した考察も必要とされる。そこで次に、この基本ケースと比較して、8/9 の潮汐振幅が大きくなったケース、10/5 の出水後の流量の大きいケースを考察し、流動場がどのように変わるかを、これまでと同様の手順を踏んで検討する。

まず、潮汐振幅の大きかった 8/9 のケースについて考察するために、図 3-4-13 に 8/9 の流速分布を示す。8/9 は潮汐が大きかったことで、上げ、下げ、ともに流速が基本ケースに比べ大きく出ていることが分かる。次に図 3-4-14 に示した、前出の方法で求めた対数速度分布と比較したのを見ると、8/9 は上げ潮時においては、基本ケースと同様に対数速度分布に近い分布を示していることが分かる。一方、下げ潮時においては、基本ケースでは観測結果と対数速度分布は大きく異なっていたのに対し、8/9 のケースでは基本ケースほどの差が無いように見える。つまり、上げ潮時においても対数速度分布に近い分布形を示している。

そこで、先ほどと同様に密度場について調べるために、図 3-4-15 に 8/9 の密度空間分布とバイサラ周波数空間分布を示した。ここから、基本ケースと比べると密度空間分布においては、下げ潮時においてもコンター間隔が広がっており、上げ潮時には更に広がっていることが分かる。また、この傾向がバイサラ周波数にも現れており、下げ潮時においても比較的小さな値となっている。つまり、安定度が比較的小さいということがわかる。

さらに、局所リチャードソン数分布を図 3-4-16 に示す。ここから、確かに 8/9 は特に河口側において上げ潮時だけでなく下げ潮時においても底層付近で局所リチャードソン数が小さくなっていることが分かる。また、上げ潮時においては上流側の N9、N11 においても小さな値が見られることから、潮汐影響が基本ケースに比べて上流側においても大きく作用していたことが考えられる。

図 3-4-17 に示したバルクリチャードソン数でも上げ潮路に小さな値となる傾向が見られるが、基本ケースの 8/25 や 9/22 とくらべて全体的に小さな値となっていることも見て取れる。

図 3-4-18 に示した傾圧成分による駆動力を見ても、上げ潮時、下げ潮時ともに駆動力は小さくなっており、混合により傾圧成分の小さな状況が形成されていることがわかる。

このように、8/9 の潮汐振幅が大きいケースの結果により、潮汐振幅が大きいと、上げ潮時だけでなく下げ潮時においても混合を引き起こすことが唆され、これにより上げ潮時、下げ潮時ともに対数速度分布に近い流速分布形を示すということが考えられる。

このケースにおいて、混合がこれほど進んだのは潮汐の影響が大きいものと考えられるが、図 3-2-5 に示したように風が強かったこともある程度は影響を与えていることを考慮しなければならない。

続いて、基本ケースに比べて潮汐振幅が大きく、更に出水直後のため流量が大きかった 10/5 のケースについてこれまでと同様に考える。10/5 は潮の関係で Run1 が満潮時からではなく下げ潮時の 1 回目から始まっていることに注意されたい。

図 3-4-19 に 10/5 の流速分布を示す。ここから、10/5 は流量が大きいということが大きく影響して、

下げ潮時の流速が大きく出ていることや、塩水が遡上できずに、上流側の N9、N11 では上げ潮時の流速が小さく抑えられていることが分かる。次に、図 3-4-20 で対数速度分布と比較すると、まず下げ潮時においては、下流側の N3、N5 では傾圧勾配が基本ケースに比べ大きく作用し、両者の差が大きく出ていることが分かるのに対し、上流側でも概ね下流側と同様の傾向を示している。しかし、やや異なる傾向を示している点として、干潮時、そして N11 においては一潮汐間に渡って対数速度分布とほぼ重なるほどに一致していることが分かる。一方、上げ潮時においては、河口側では Run4 の時点で対数速度分布と比べて、上流側に向かって底層で流速が大きくなっているが、Run5 の時点になると、これまでのケースの上げ潮時に議論していたような対数速度分布形に近い分布を示していることが分かる。また、上流側では対数速度分布に近い形となっていることが分かる。

そこで、本ケースにおいても密度場を調べるために、図 3-4-21 に 10/5 の密度時空間分布とバイサラ周波数時空間分布を示した。密度分布を見ると、流量が大きいため、潮汐振幅が大きいかかわらず、淡水が海水の遡上を阻んでおり、上流側、特に干潮時においては 1km 付近より上流側で密度がほぼ一様になっている。このため、傾圧勾配力のほとんどかからない状況が形成され、先ほど述べたような下げ潮時においても、上流側で対数速度分布にほぼ一致するような流速分布形が見られたものと考えられる。また、上げ潮時については、Run4 の時点では密度分布を見ると、混合が十分進んでおらず、そのため、流速分布にも傾圧勾配の効果が表れているが、Run5 の時点になると、混合が進み、そのため、流速分布も傾圧勾配の効果が弱くなった傾向が表れている。バイサラ周波数分布を見ても、干潮時から満潮にかけて次第に混合が進んでいく様子が見て取れる。

このことは、図 3-4-22(出水により密度が鉛直方向に一様になってしまっていたため、局所リチャードソン数を算出できず N.D.となっている箇所がある。)に示した局所リチャードソン数や図 3-4-23 のバルクリチャードソン数においても表れており、Run4 の時点では N3(-1km 地点)では底層付近で局所リチャードソン数が小さく、N5(0km 地点)においてはまだ局所リチャードソン数が小さくないのに対し、Run5 の時点になると、N5 においても小さな値となっていることが分かる。また、下げ潮時については、特に N7 において、基本ケースに比べて局所リチャードソン数が小さくなっていることが分かる。これは河川流量が大きく、流れが傾圧成分の小さなものとなっているためであると考えられる。

図 3-4-24 に傾圧成分による流れの駆動力を示したが、N5 においてはこれまで述べてきたような下げ潮時に傾圧成分が大きく寄与した状況が形成されており、上げ潮時には Run4 の時点では傾圧成分が寄与しているものの Run5 の時点になると混合が進み傾圧成分が小さくなっている様子が表れている。一方 N7 については、下げ潮時は下げ潮時に小さく、上げ潮時に大きくなる傾向を示しているが、なぜこのようになるかはまだ把握できていない。

以上のように出水直後は、密度の小さい淡水が海水の遡上を阻むために、潮汐変動が河口近傍に限られるために、その河口付近では傾圧勾配の働き方が基本ケースに比べ大きくなっているものと考えられる。しかしこれも、上げ潮の状態が進むにつれてだんだん緩やかになっていく。一

方上流側では、淡水が支配的なために、傾圧勾配の小さい流動場が形成されている。

図 3-4-25 には先に示した \sin 近似を各層の流速値に対して行い、そこから a と c の値を求めプロファイルを描いた。これより、 a から求まる振幅については $8/9$ が大きく、潮汐西軍が大きかったことが分かる。一方、 c から求まる残差流成分から $N5$ で傾圧勾配が効いている分布形をしているのに対し、 $N7$ では混合が進んで傾圧子倍が小さくなっている様子が見て取れ、 $8/9$ は傾圧成分が小さくつまり、エスチャリー循環成分が小さいことも見て取れる。逆に $8/25$ や $10/5$ は傾圧成分によるエスチャリー循環成分が強かったことも分かる。

3-4-3 流動特性のまとめ

ここで、3-4 節で述べてきた流動特性についてまとめる。先に 3-3-12 でまとめたように、基本的な構造としては、潮汐運動と圧力勾配の重ね合わせにより、上げ潮時、下げ潮時の流動が決定される。つまり下げ潮時はバロクリニック的な流れであることがいえるが、上げ潮時にはこれに加えて、底層流速が大きいことから混合がおきやすく、そのため、傾圧成分が小さくなり、対数速度分布に近い流速分布形、バロトロピック的な流れであるといえることができる。(図 3-4-26(a))

条件の異なるケースとして、潮汐振幅が大きいケースでは、上げ潮時だけでなく下げ潮時においても混合が起きるために、下げ潮時においてややバロトロピック的な流れに近づくようになる。(図 3-4-26 (b))

最後に、流量が増大するケースであるが、このケースは上流側と下流側では全く様子が異なるので、それぞれについてまとめる。下げ潮時においては、河口付近では基本ケースと同様、バロクリニック的な流れであるのに対し、上流側は淡水が海水の遡上を妨げるため淡水が支配的となり、傾圧的な効果が小さくなりバロトロピック的な流れとなる。一方、上げ潮時においては、河口付近では、密度差が急激につくために上げ潮時においてもバロクリニック的な流れになることがある。上流側では、下げ潮時同様、傾圧的な効果が小さくなりバロトロピック的な流れとなる。(図 3-4-26 (c))

このように多摩川河口域の流動場は流量や潮汐の大きさといった条件の違い、さらには、上げ潮時と下げ潮時の違いなどにより、だいぶ様子の違うものとなる。前章の図 2-1-2 に河川の循環形態図を示し、この中に多摩川をプロットしたが、この図より多摩川は緩混合型に分類されるが、これまで観測結果から見てきたように、強混合のときもあれば緩混合のときもあり、それぞれの状況に応じた分類をする必要がある。

3-5 潮汐変動による底面摩擦速度変化特性

これまでに述べてきた潮汐変動による流動特性が、懸濁態物質の挙動を考える上で重要となる底質の巻上げに影響を与えていることが考えられる。そこでこの節では、流速分布から巻上げに寄与する底面摩擦速度を求めて、潮汐変動による底面摩擦速度の変化を把握し、また、空間的な特徴についても考察する。

底面摩擦速度を見る前に、水深平均流速について再び触れておく。図 3-5-1 に 4 回の一潮汐観測において得られたすべての測点における、水深平均流速の一潮汐間の時間変化を示す。こ

から、10/5を除き、上げ潮時、下げ潮時の流速の絶対値はおおよそ、同じであることが分かる。つまり、水深平均流速を見る限りでは、上げ潮時と下げ潮時に非対称性は小さいか、若しくは、無いと言える。また、図 3-5-2 に水深平均流速の空間分布を示したが、ここから、上げ潮時、下げ潮時ともに特に N7 で流速が大きくなっていることが分かる。

水深平均流速がこのような特徴を示していることがわかったところで、次に底面摩擦速度について考える。まず、図 3-5-3 で底面摩擦速度の一潮汐間の時間変化を示す。ここで、底面摩擦速度 U_* は以下のようにして求めた。すなわち、観測結果より得られた底層流速 u (底面から 40cm の流速) を用いて、対数速度式

$$u = \left(\frac{1}{\kappa} \ln \frac{y}{k_s} + A_r \right) U_*$$

により求めた。また

$$k_s = \left(\frac{n}{0.042} \right)^6$$

において $n=0.03$ を代入して得られる k_s を用いた。

この図より、基本ケースとして捉えた 8/25 と 9/22 においては上げ潮時に特に摩擦速度が大きくなり、下げ潮時においても N7 でやや高くなっていることが分かる。また、8/9 においては上げ潮時だけでなく、下げ潮時においても摩擦速度が大きくなっていることが分かる。10/5 においては、下流側の N3 と N5 については上げ潮時に摩擦速度が大きくなっているが、やや上流側へ移った N7 においては下げ潮時において特に大きくなっていることが分かる。いずれも流動特性のところでも述べたように、潮汐変動により形成される流速分布における底面流速の大きさの違いがこのような、水深平均流速では見られなかった非対称性、つまり、底面摩擦速度の上げ潮時と下げ潮時の非対称性を生み出していることが考えられる。また、図 3-5-4 に示した底面摩擦速度の空間分布より、底面摩擦速度が大きいのは水深平均流速が大きかった、N3～N7 であることが分かり、水深平均流速からだけでは読み取れない底面摩擦速度の特徴があることが分かる。

簡単にまとめるために、図 3-5-5 に底面摩擦速度空間分布の概念図を示した。矢印の大きさが底面摩擦速度の大きさを表し、向きに関しては、上げ潮時は上流側を、下げ潮時は下流側を向いている。この図に示すように、底面摩擦速度の特徴は、下げ潮時においては、基本的には底面摩擦速度は小さいが、潮汐振幅の大きいときや、河川流量の影響が大きいときにバロトロピック的に近づくことで、底面摩擦速度が大きくなり、上げ潮時においては、基本的には下流側で底面摩擦速度は大きく、上流側へ移るにつれて小さくなる。

以上のように、潮汐変動により流動場が決定され、ここから物質挙動を考える上で重要な底面摩擦速度を求めると、この底面摩擦速度に潮汐変動に伴った上げ潮時と下げ潮時の非対称性があることが示された。

3-6 本章のまとめ

- 潮汐変動による流動特性に関して以下のことが分かった。

河口域の流動場は河川流、潮汐振幅、傾圧勾配から形成されており、これにより、下げ潮時は傾圧勾配力の効いた、表層で大きく底層で小さい、バロクリニク的な流速分布となるのに対し、上げ潮時には、二つの要素のほかに、混合により傾圧勾配力が弱まり、バロトロピックに近い流速分布となる。

潮汐振幅が大きくなると、強混合状態となるため上げ潮時だけでなく下げ潮時においても、傾圧勾配力が弱まった流速分布となる。

河川流量が大きくなると、上流側では塩水の遡上が抑えられるため、バロトロピック的な流速分布が形成される。一方、下流側では、傾圧勾配が強く働くため、バロクリニク的な流速分布が形成される。

以上の流速分布に対応して、底面摩擦速度は、下げ潮時においては、基本的には底面摩擦速度は小さいが、潮汐振幅の大きいときや、河川流量の影響が大きいときにバロトロピック的に近づくことで、底面摩擦速度が大きくなり、上げ潮時においては、基本的に下流側で底面摩擦速度は大きく、上流側へ移るにつれて小さくなる。

表3-2-1 各一潮汐観測時の潮位差と流量

観測日	平均潮位差 (cm)	満潮時-干潮時-満潮時 (cm)	流量 (m ³ /s)
8/9	199	204-6-206	28.6
8/25	158.5	203-42-198	57.4
9/22	152.5	202-49-201	44.7
10/5	171.5	98-30-205	87.6

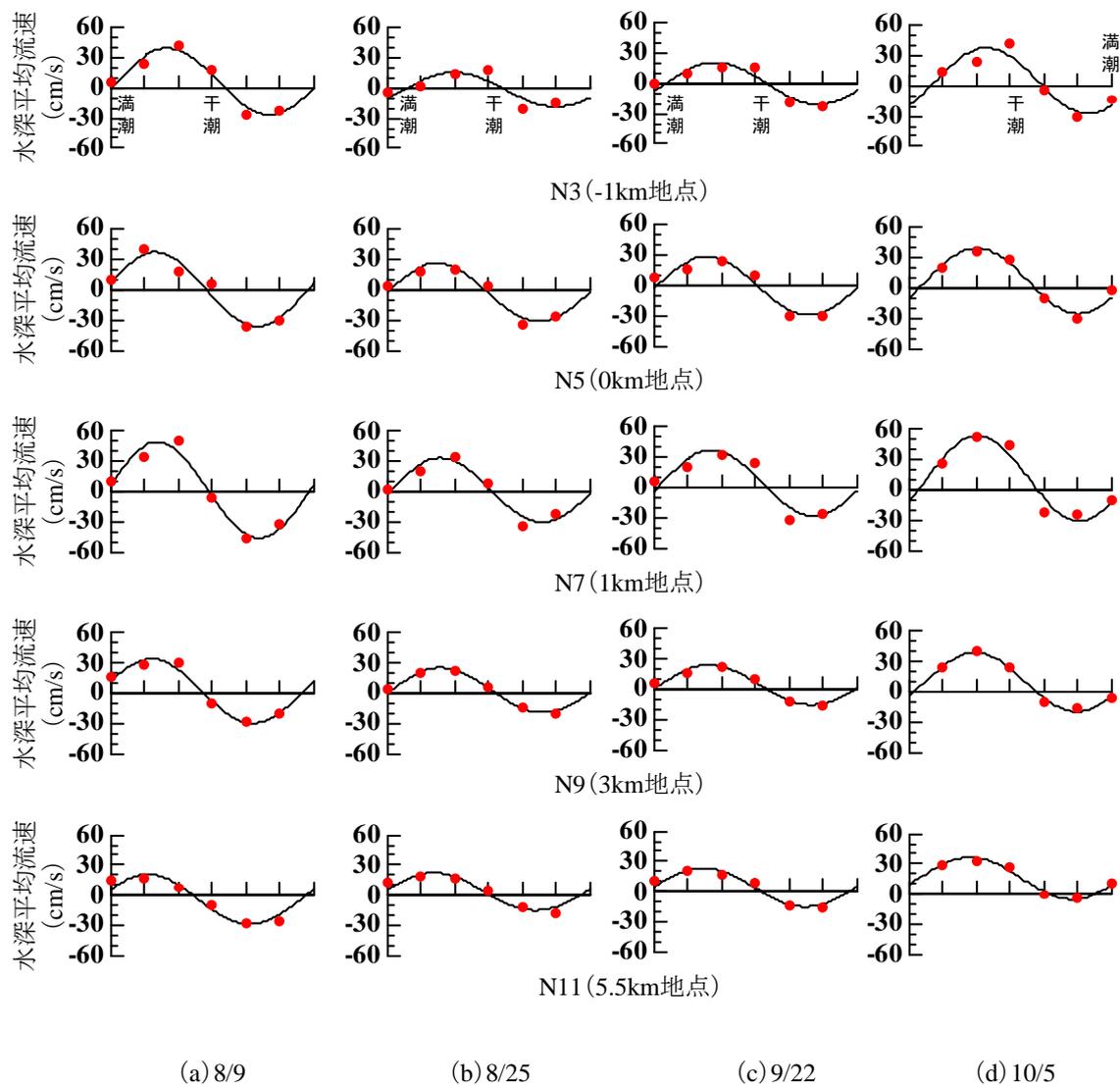
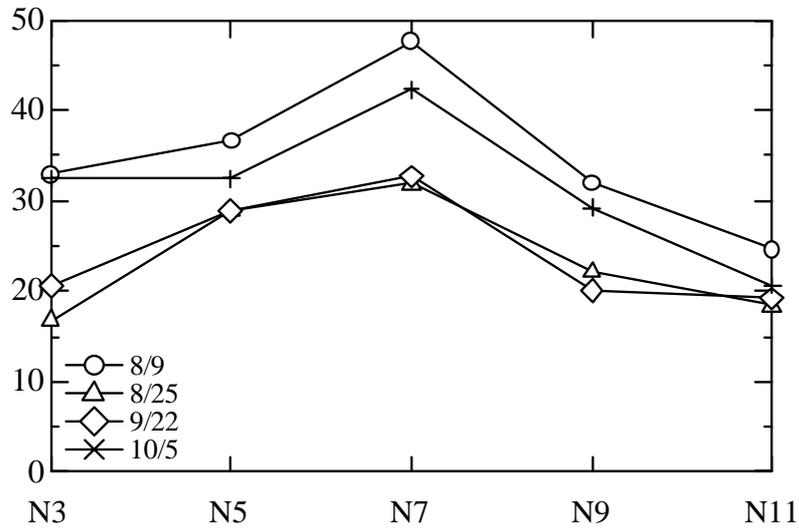
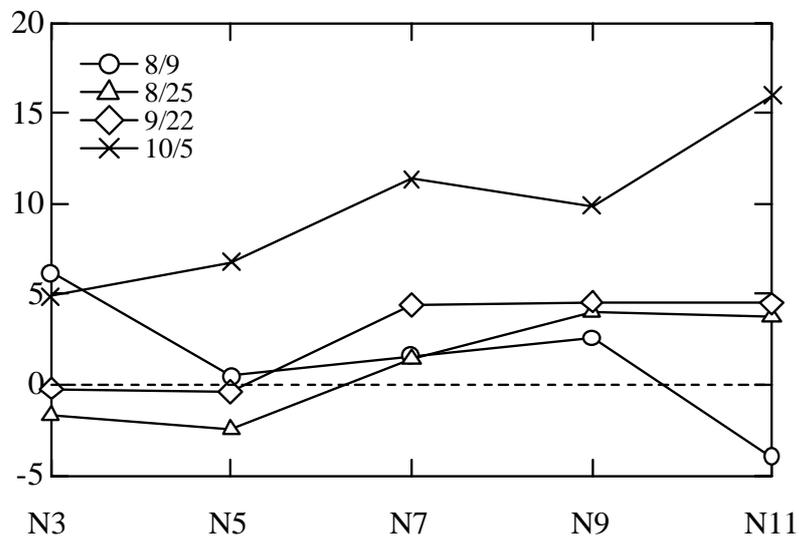


図3-2-1 N3(-1km地点)～N11(5.5km地点)平均水深流速(正が流下方向)

$$f(x) = a \sin(x-b) + c$$



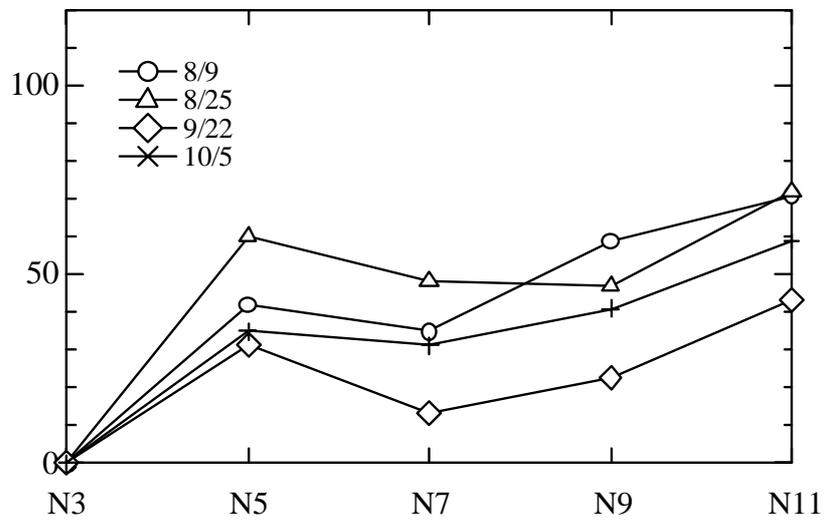
(a) a (流速の振幅(cm/s))



(b) c (河川流量によりシフトした流速(cm/s))

図3-2-2 sin関数近似の係数

$$f(x) = a \sin(x - b) + c$$



(c) b (位相のずれ(min.))

図3-2-2 sin関数近似の係数

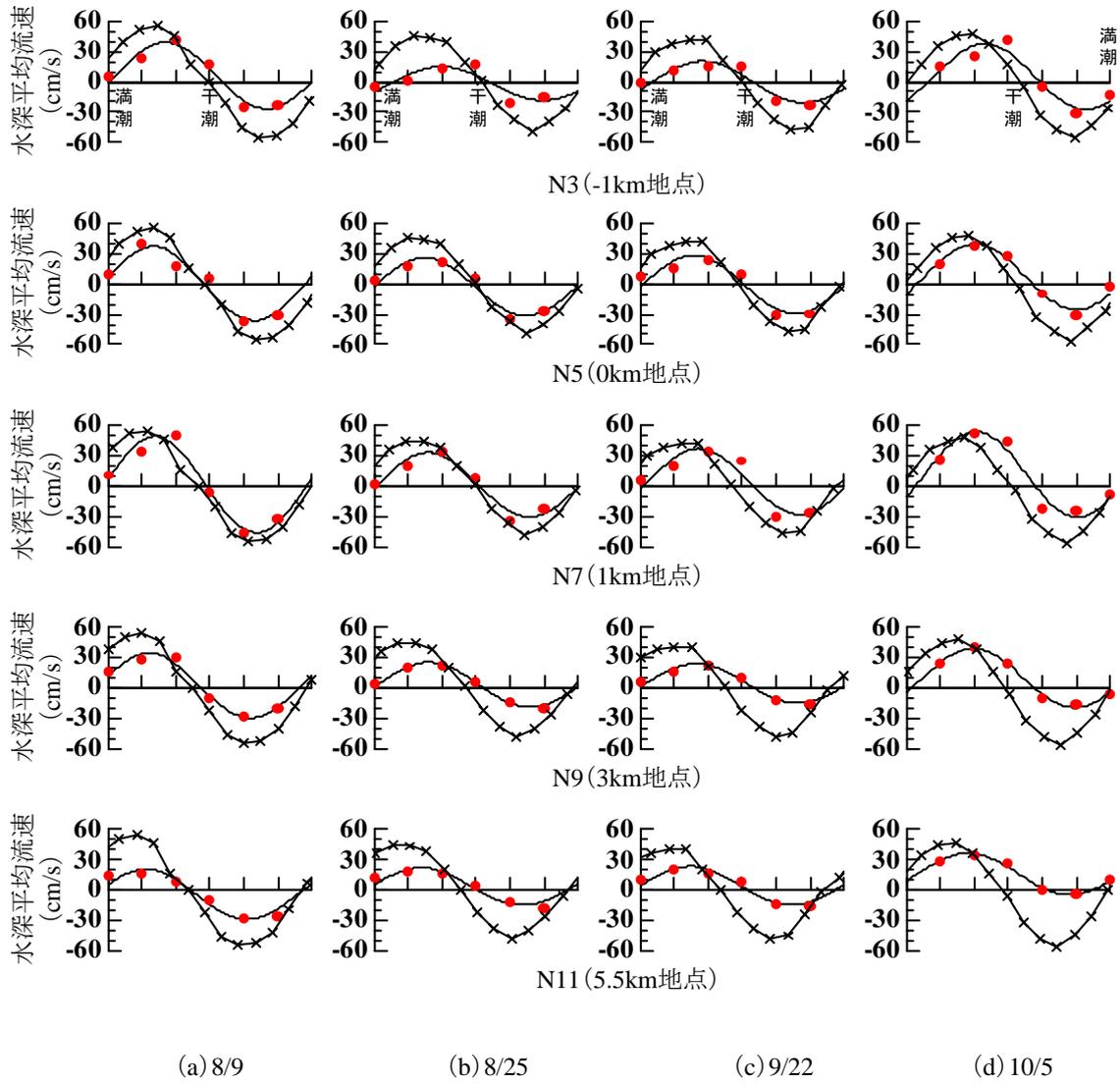


図3-2-3 平均水深流速と水位の時間変化率($\partial\eta/\partial t$)の比較(正が流下方向)

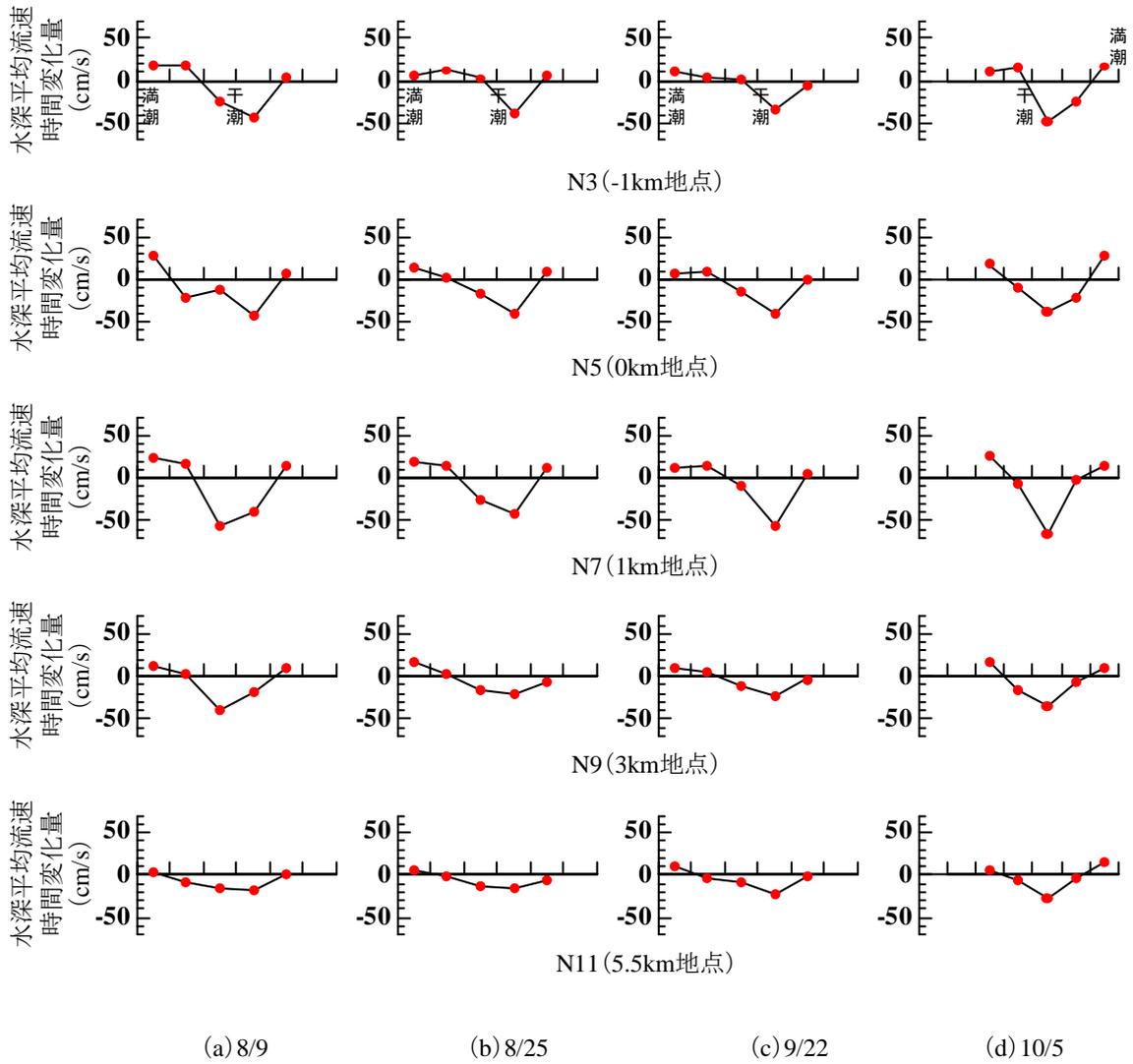
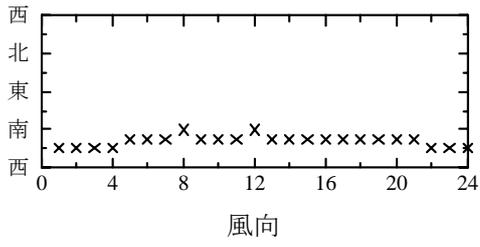
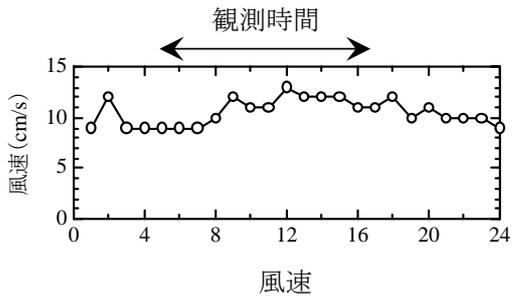
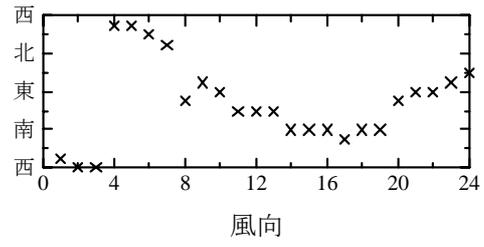
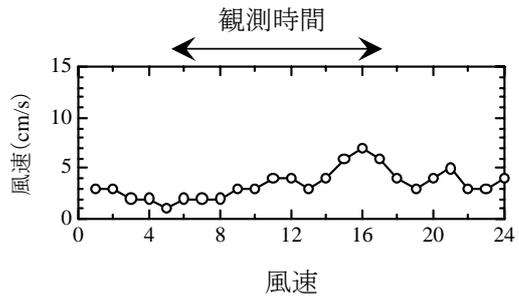


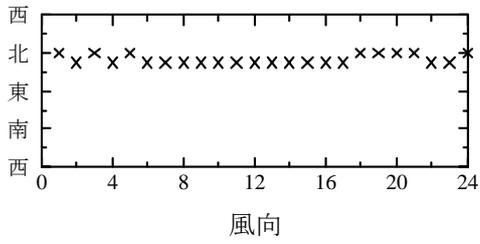
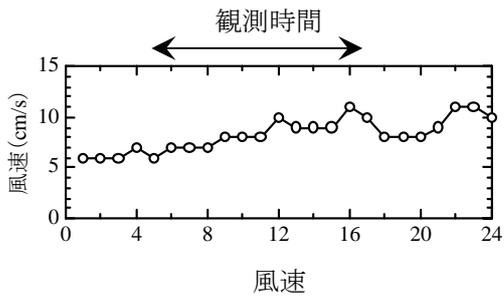
図3-2-4 平均水深流速時間変化量($\partial U/\partial t$) (正が流下方向への増分)



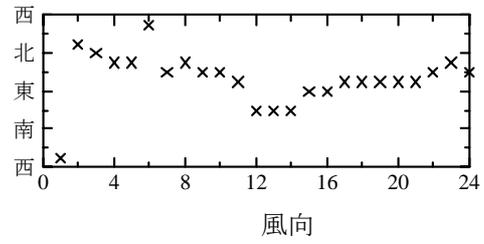
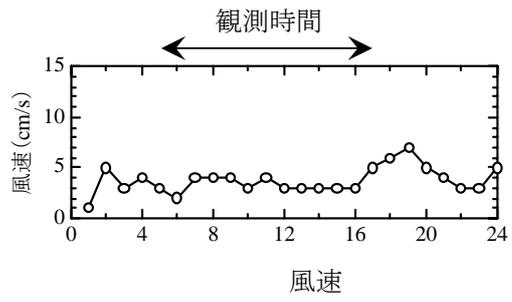
(a)8/9



(b)8/25



(c)9/22



(d)10/5

図3-2-5 各一潮汐観測時の風速

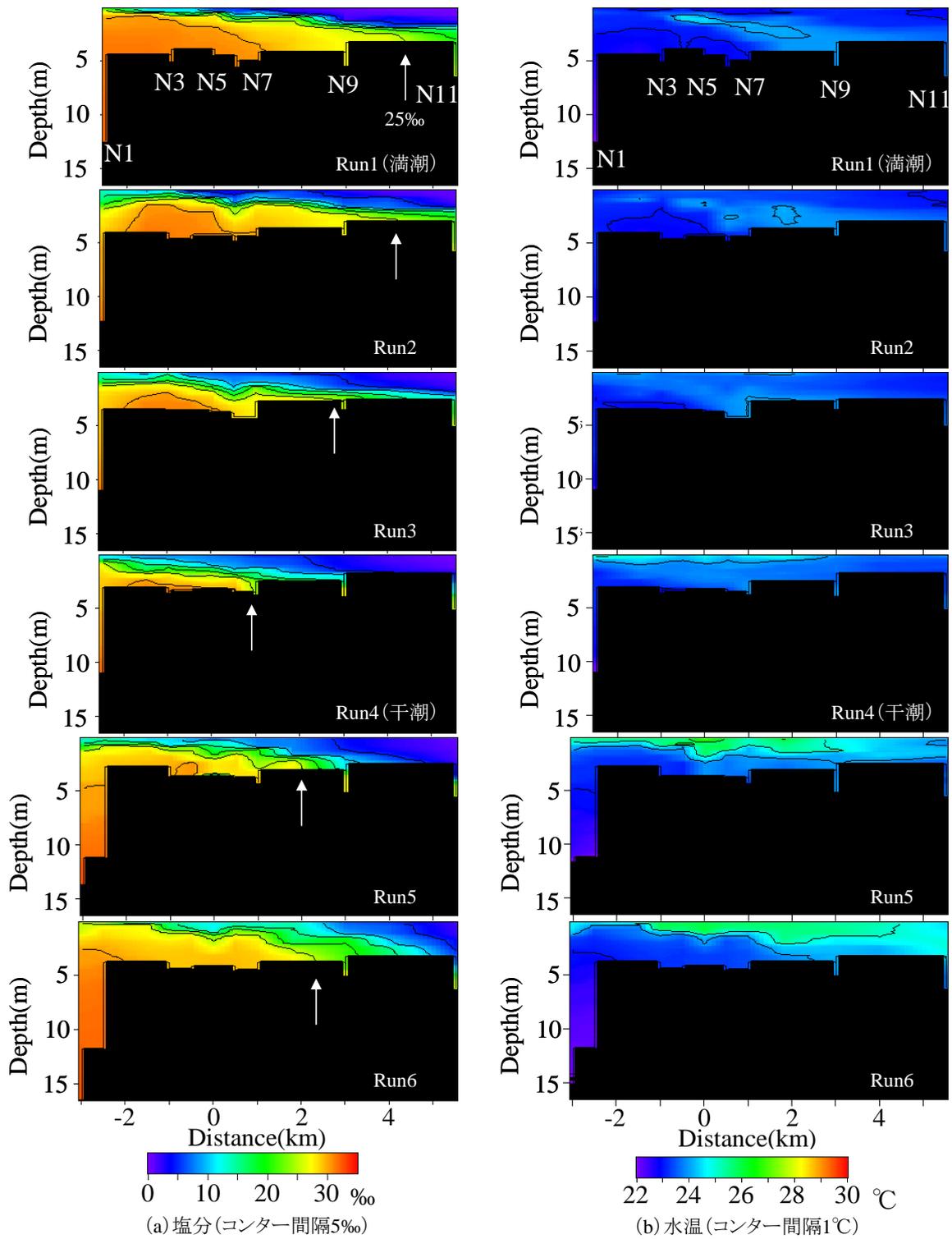
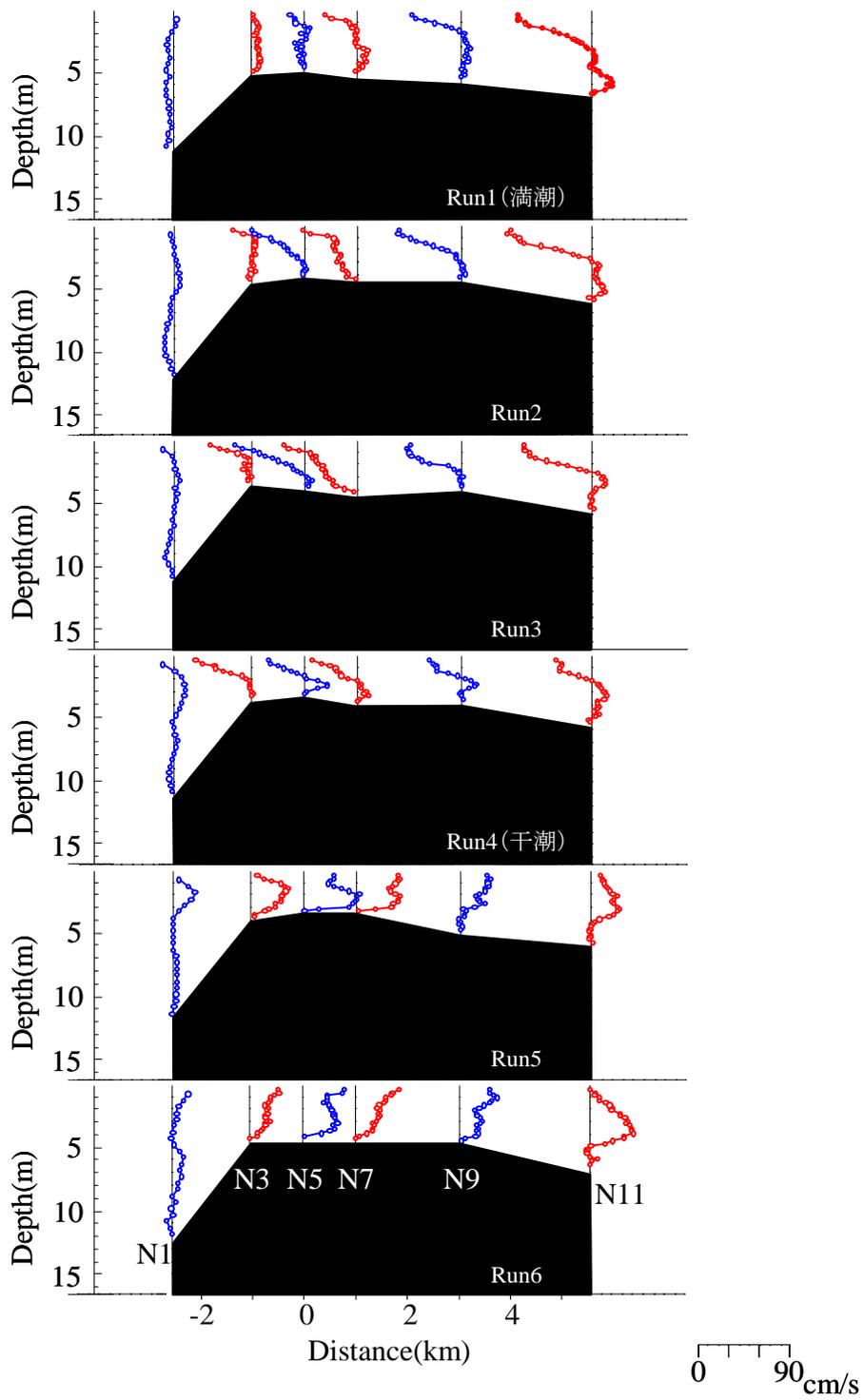


図3-3-1 8/25塩分、水温、流速時空間分布



(c) 流速

图3-3-1 8/25塩分、水温、流速時空間分布

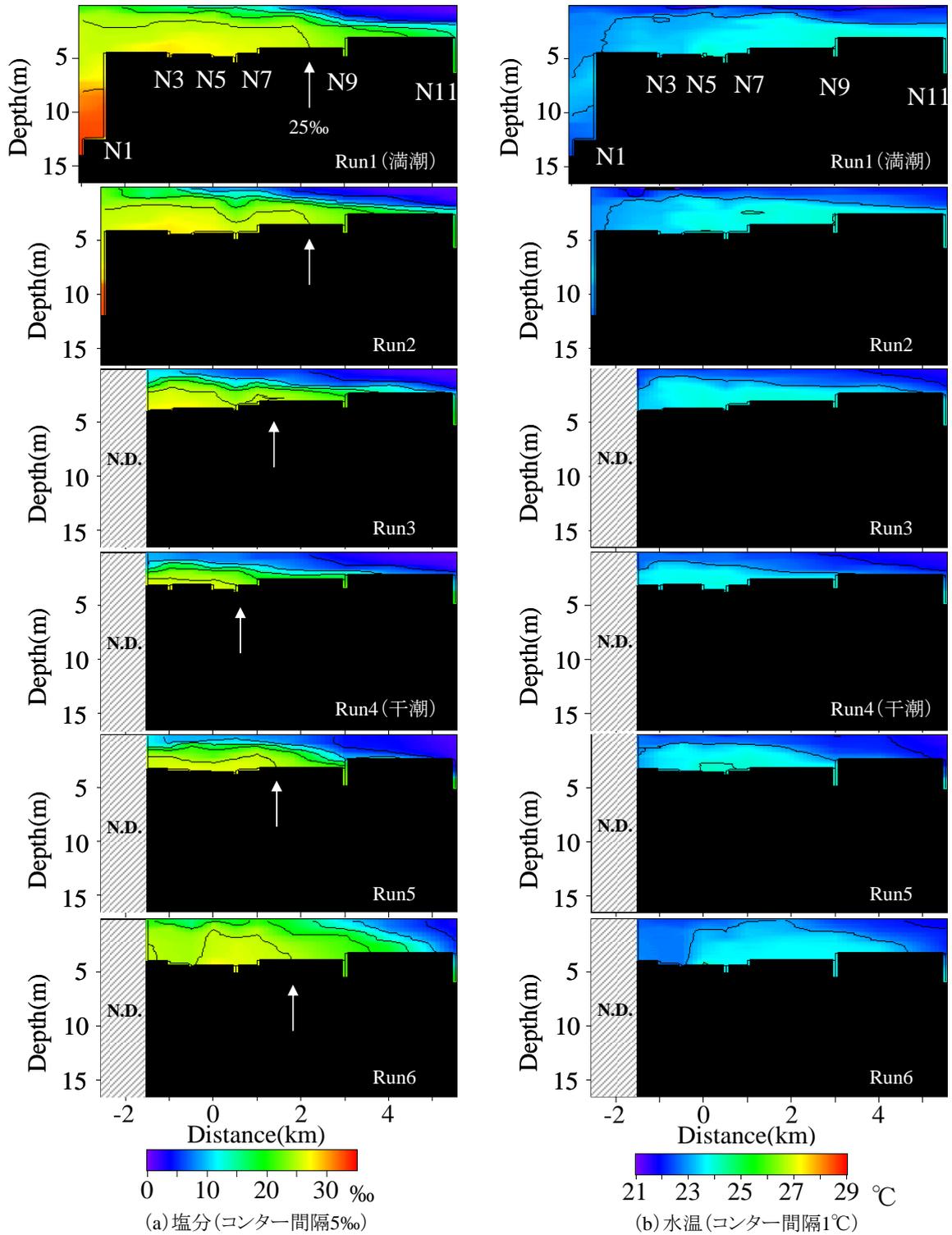
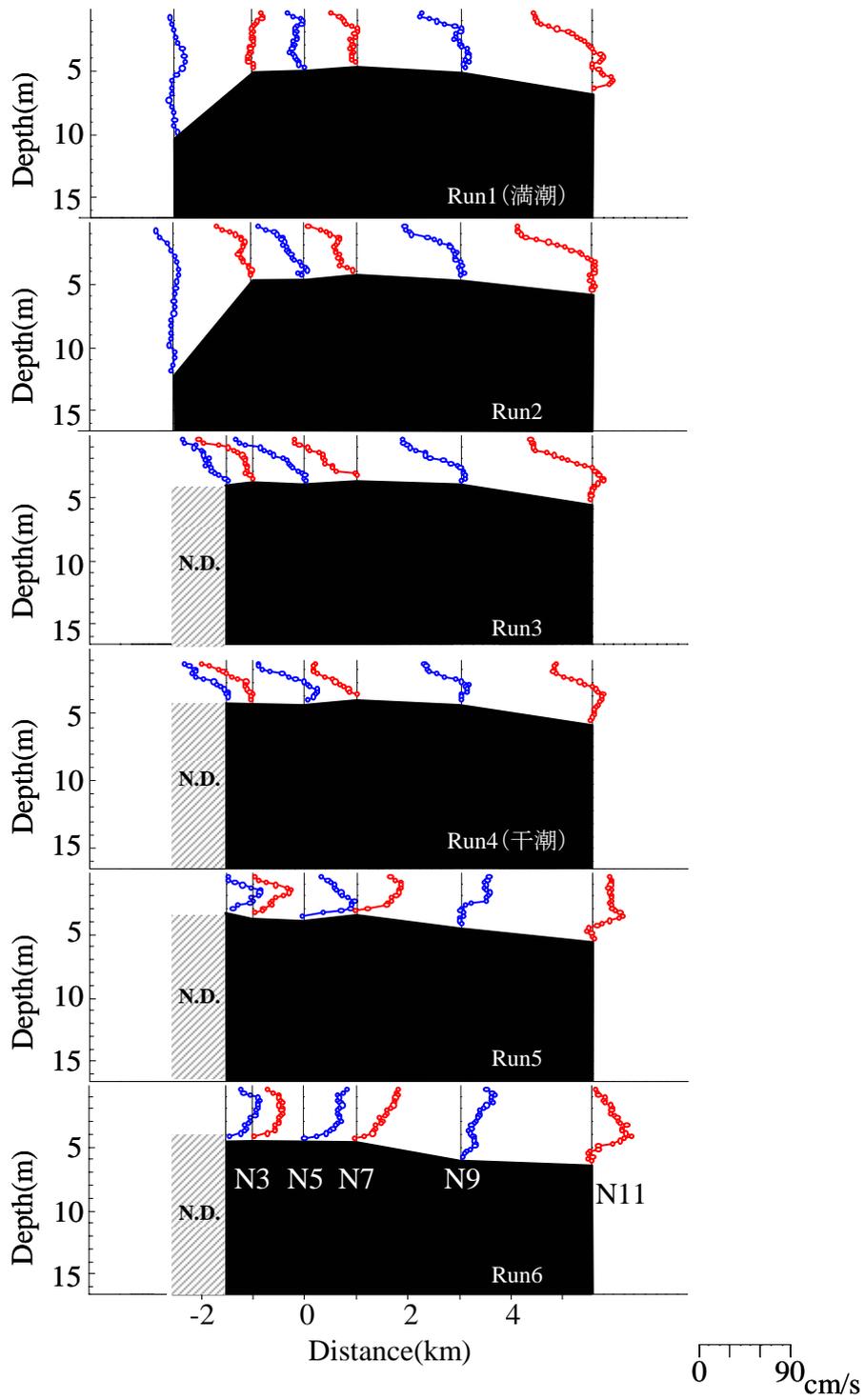


図3-3-2 9/22塩分、水温、流速時空間分布



(c) 流速

图3-3-2 9/22塩分、水温、流速時空間分布

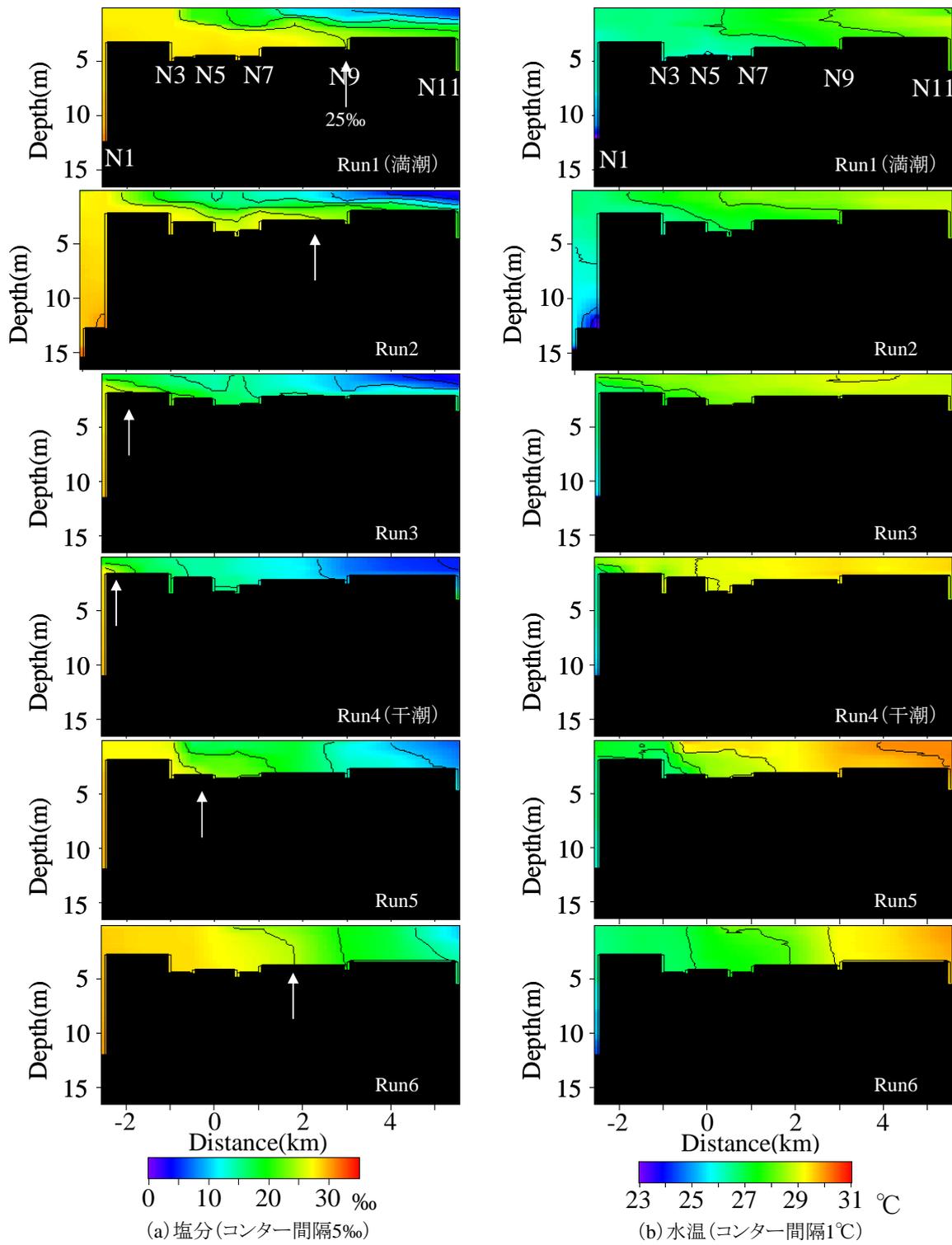
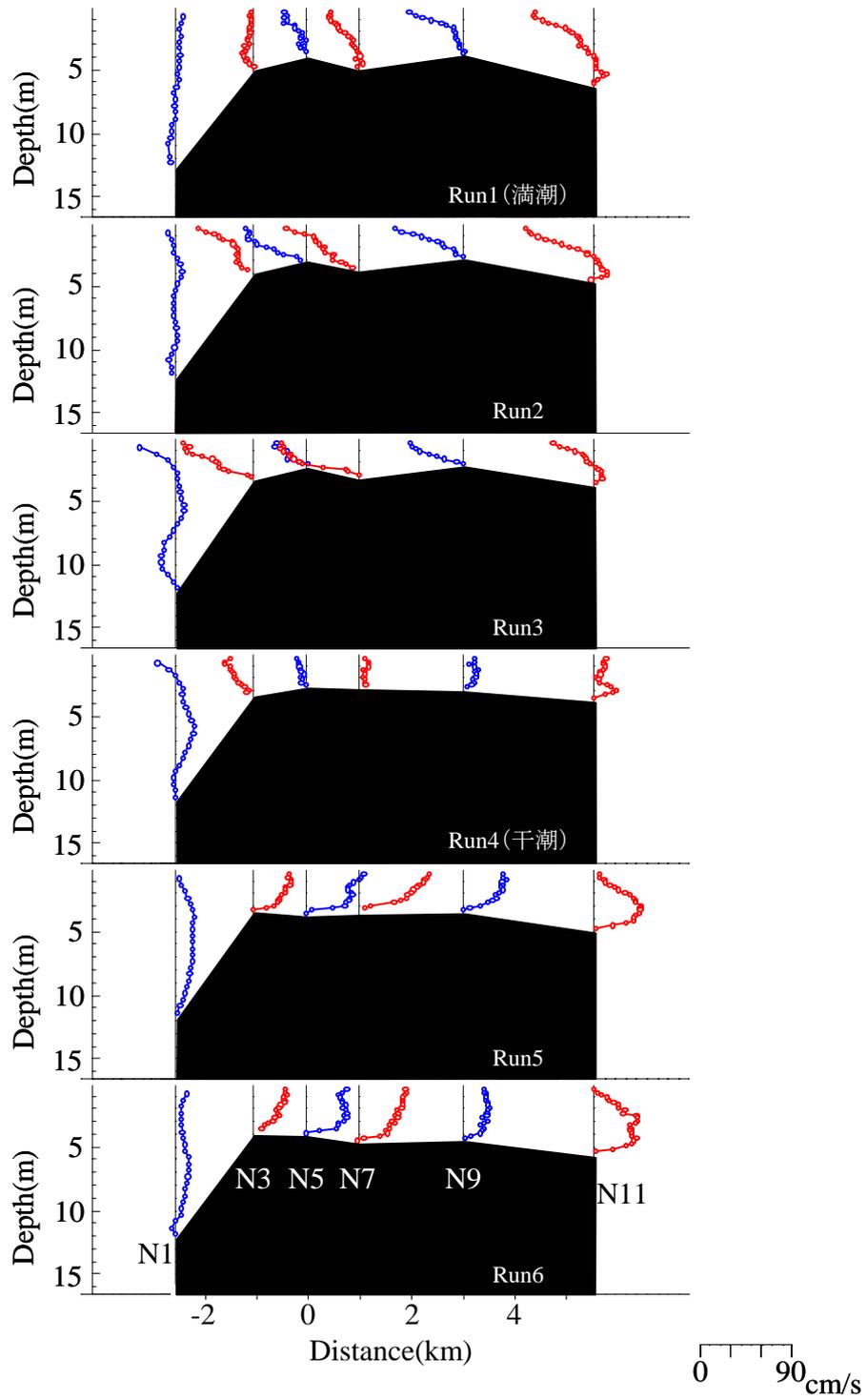


図3-3-3 8/9塩分、水温、流速時空間分布



(c) 流速

図3-3-3 8/9塩分、水温、流速時空間分布

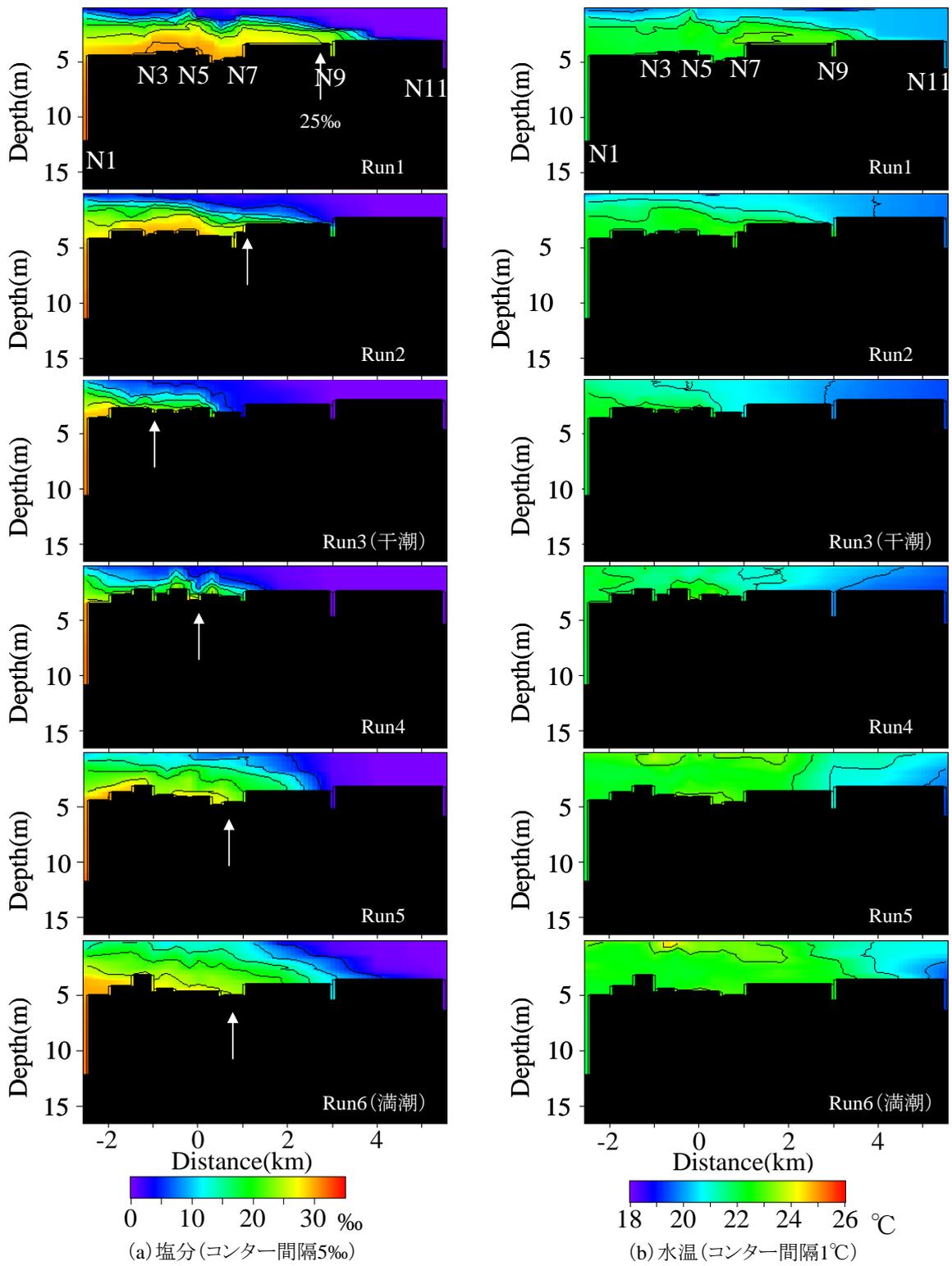
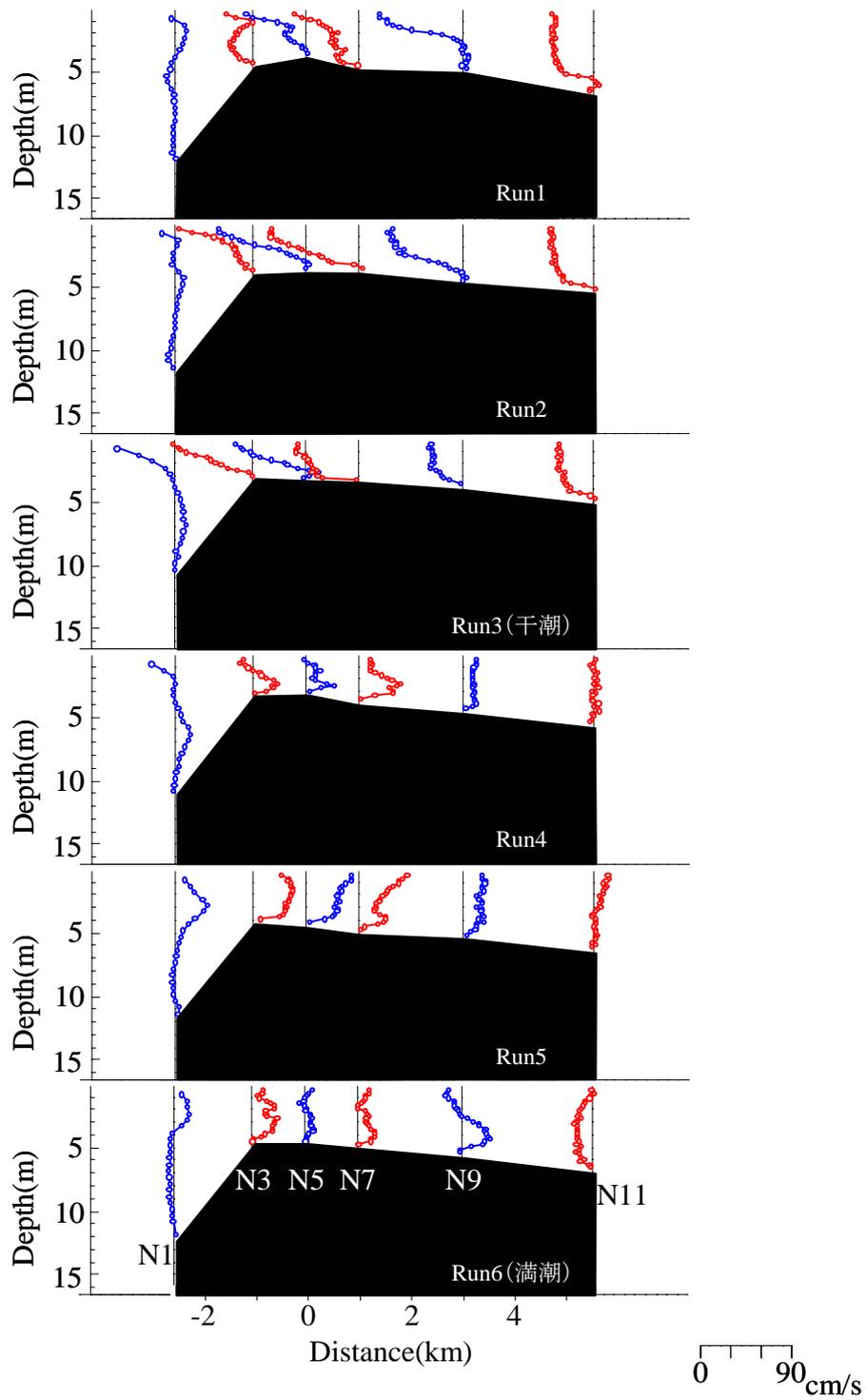


図3-3-4 10/5塩分、水温、流速時空間分布



(c) 流速

図3-3-4 10/5塩分、水温、流速時空間分布

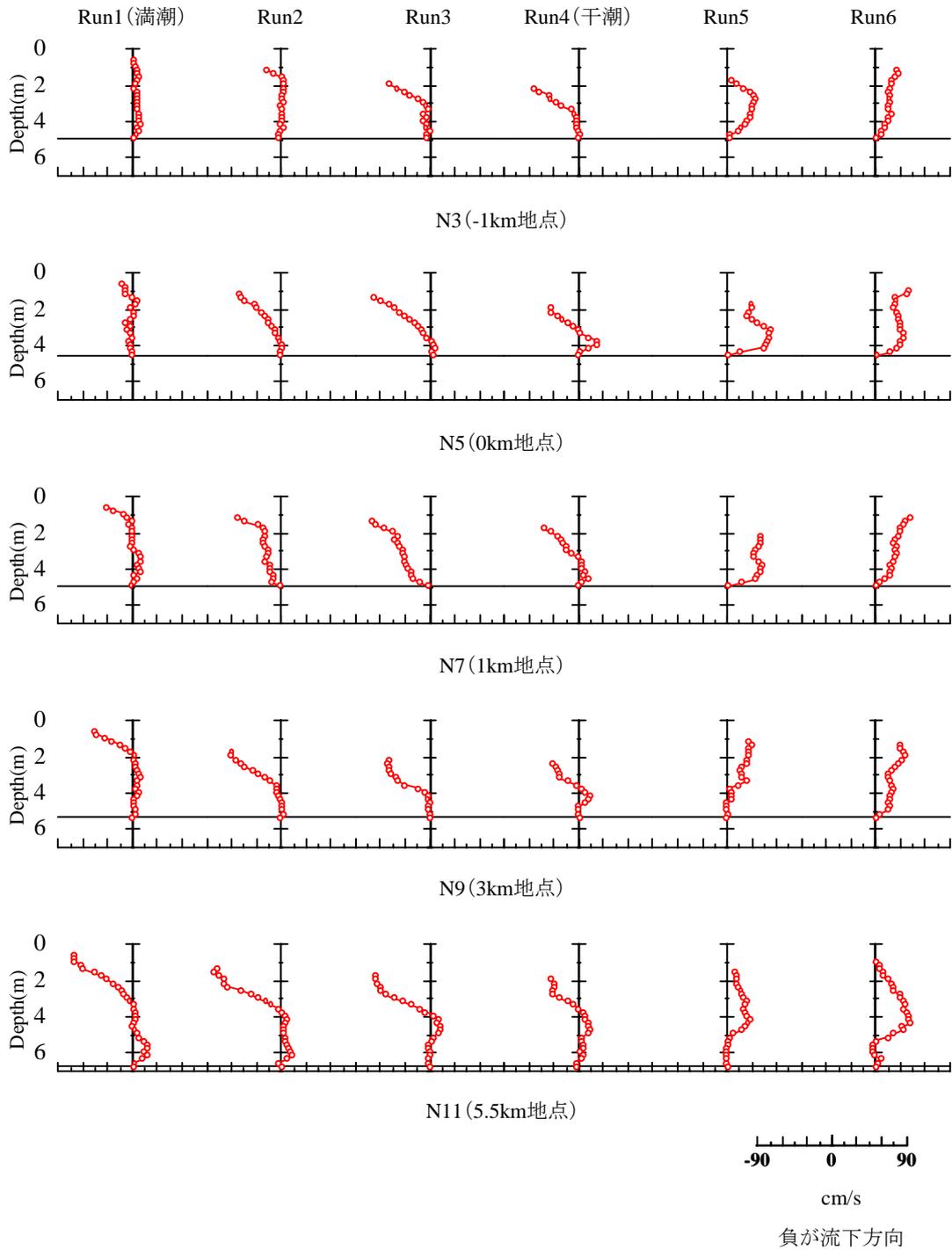


図3-4-1 8/25流速鉛直分布

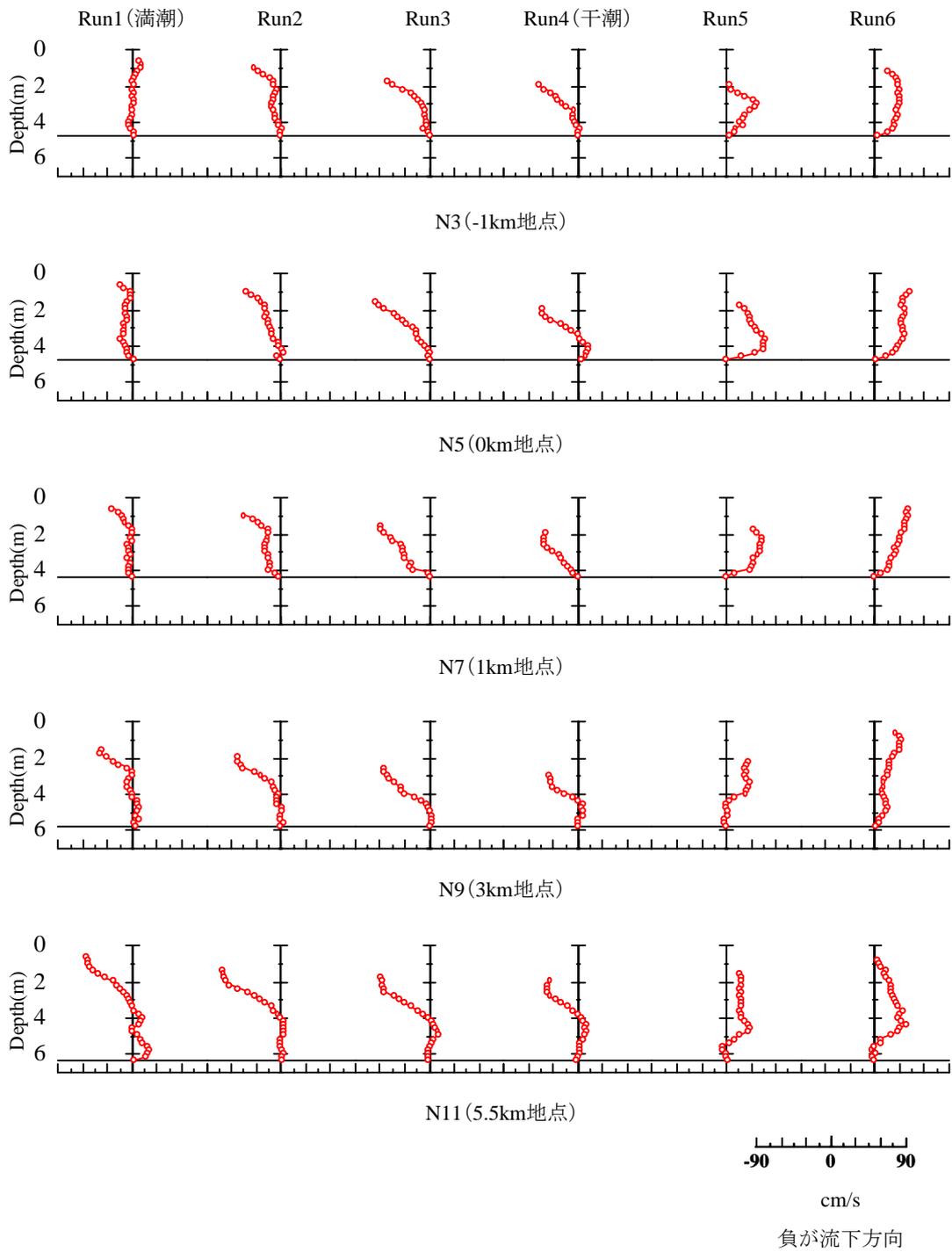


図3-4-2 9/22流速鉛直分布

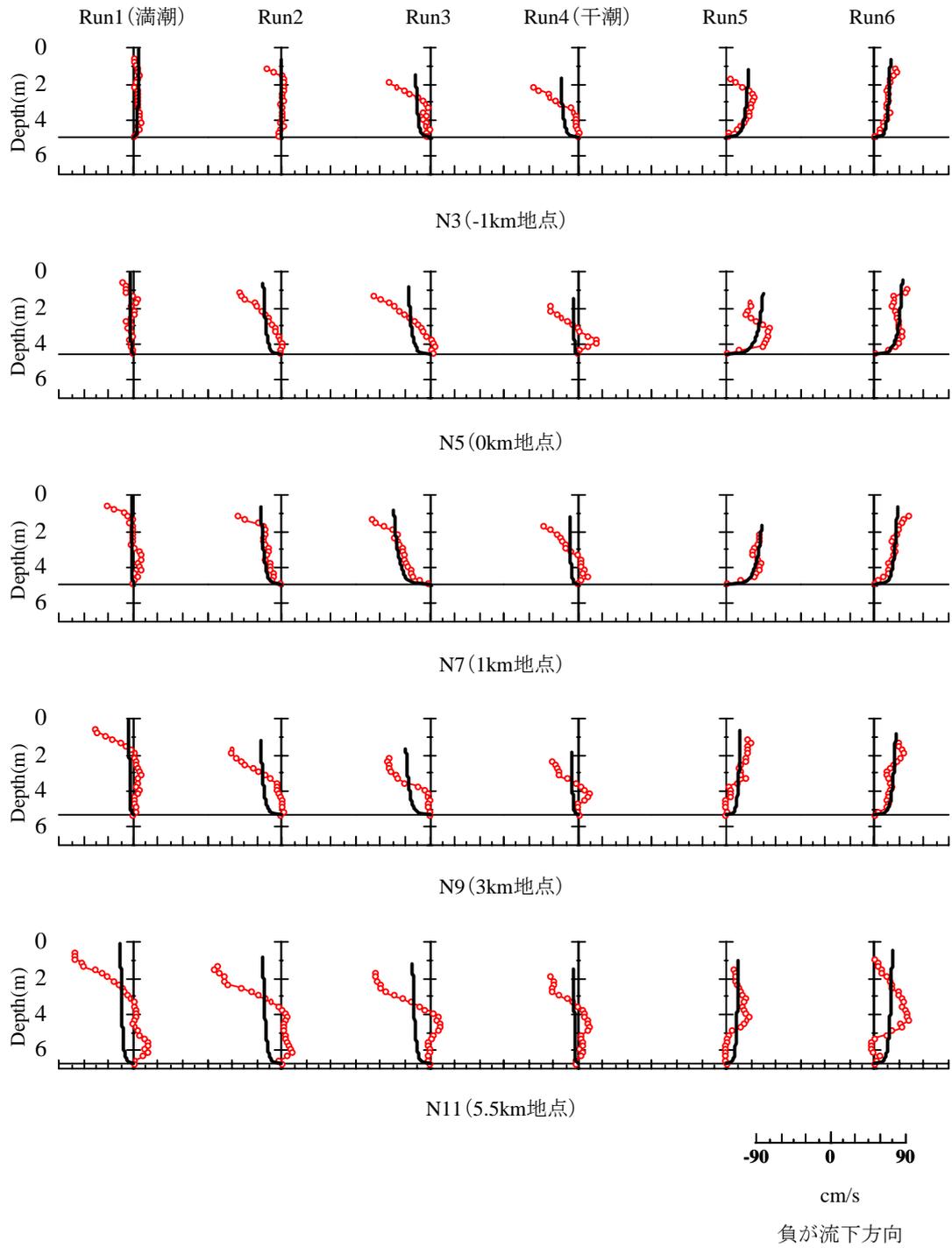


図3-4-3(a) 8/25流速鉛直分布と対数速度分布の比較

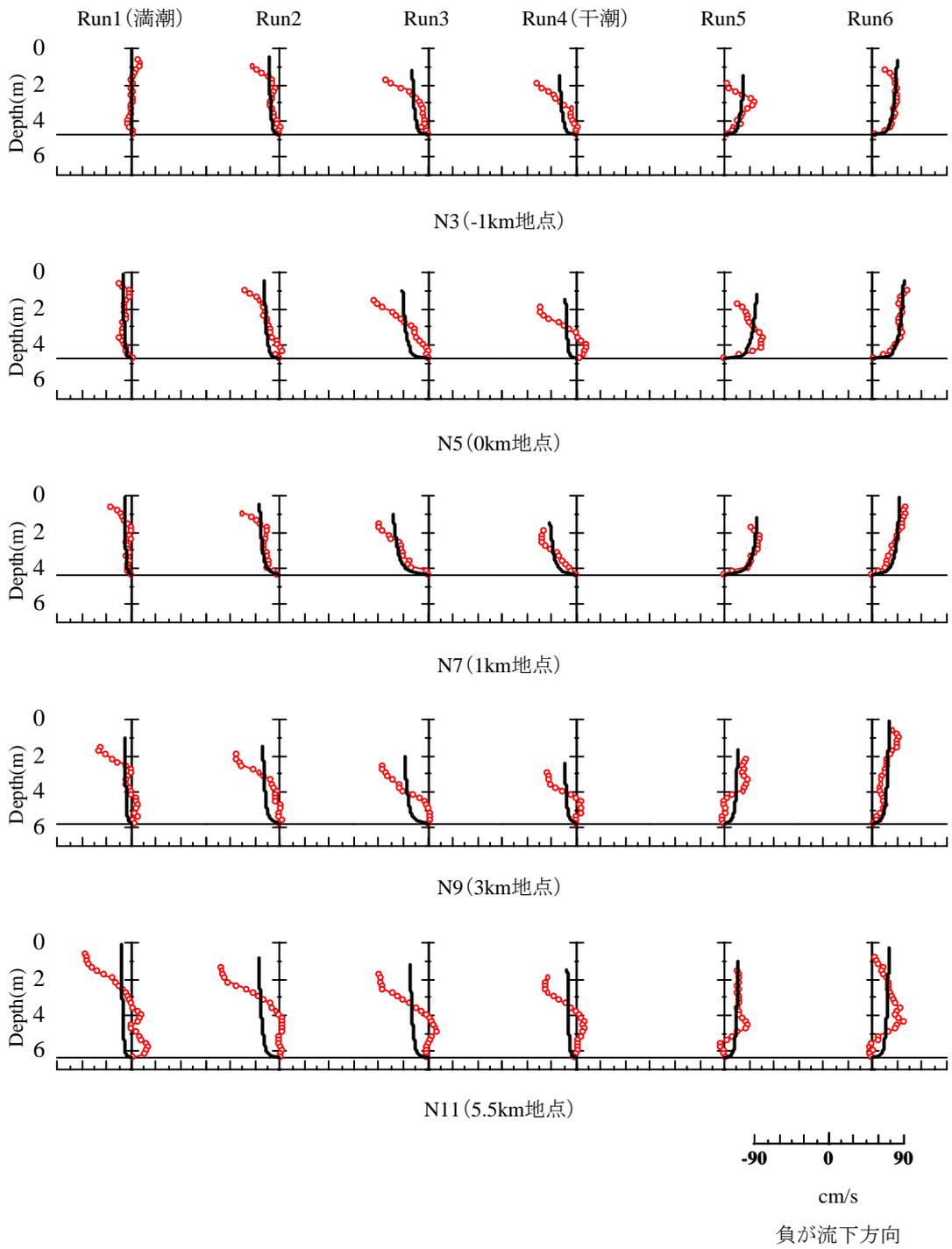


図3-4-4(a) 9/22流速鉛直分布と対数速度分布の比較

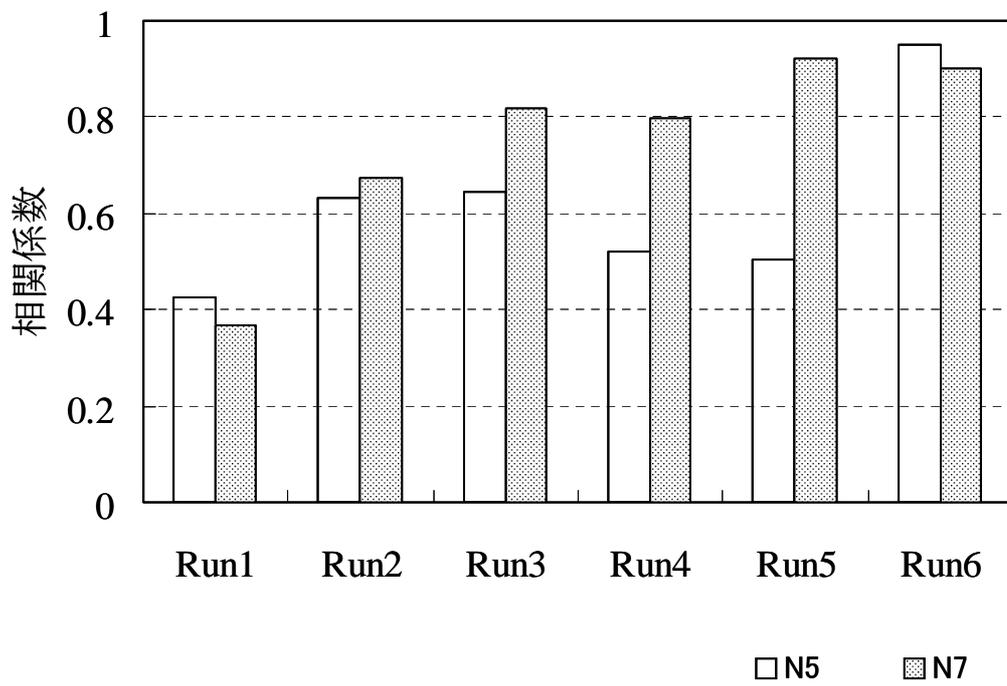


図3-4-4(b) 9/22流速鉛直分布と対数速度分布の相関係数

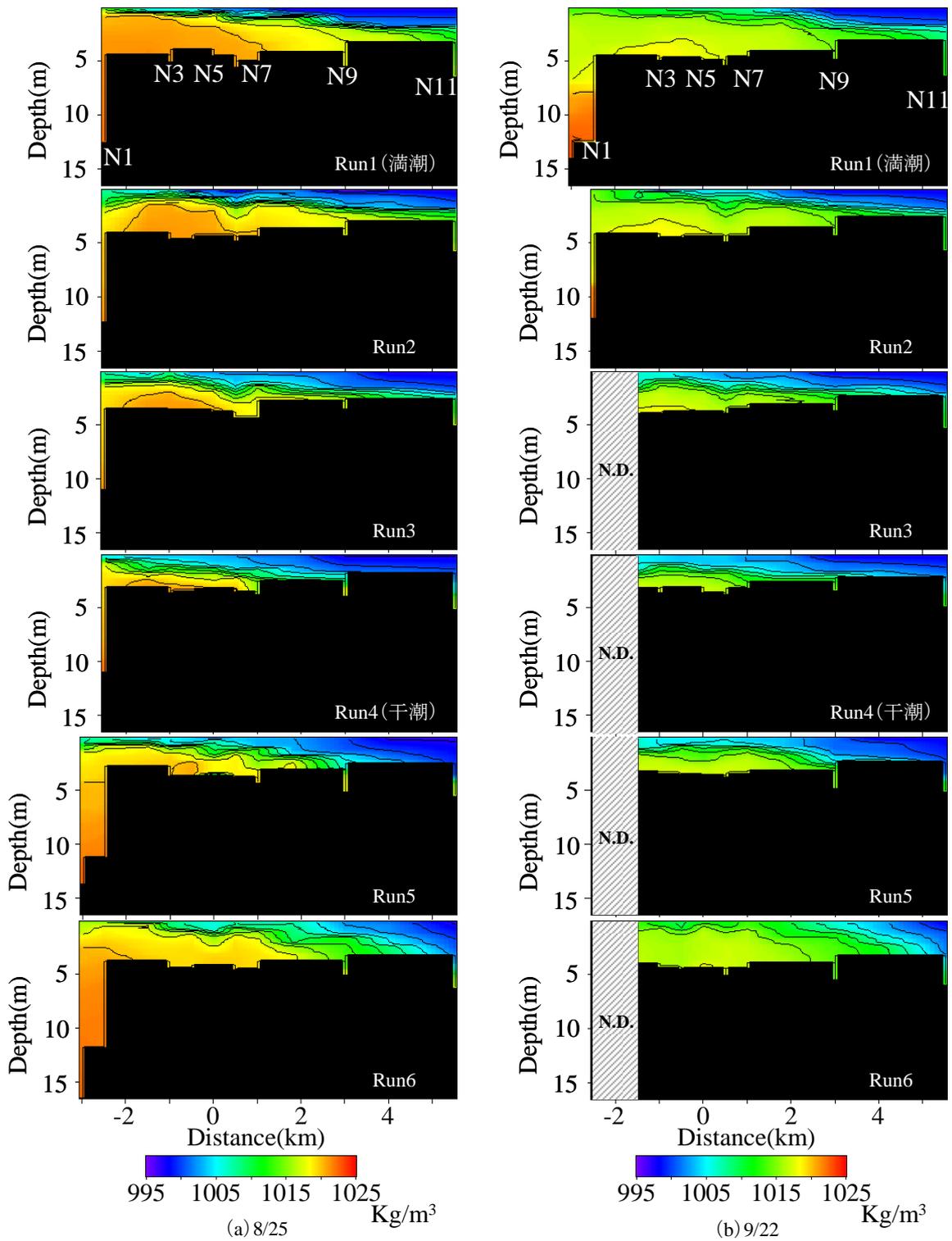


図3-4-5 密度空間分布(コンター間隔5Kg/m³)

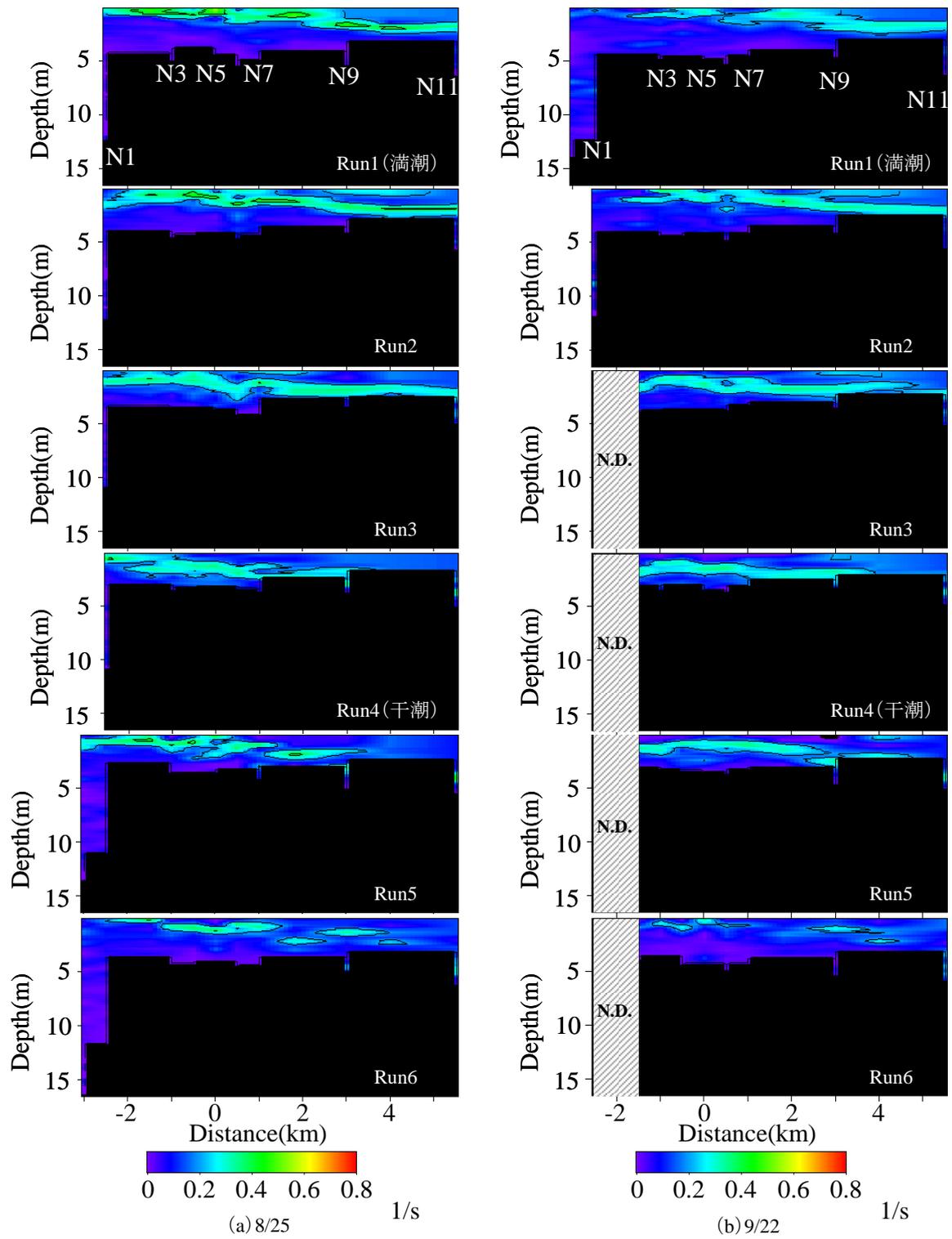


図3-4-6 バイサラ周波数空間分布(コンター間隔0.2/s)

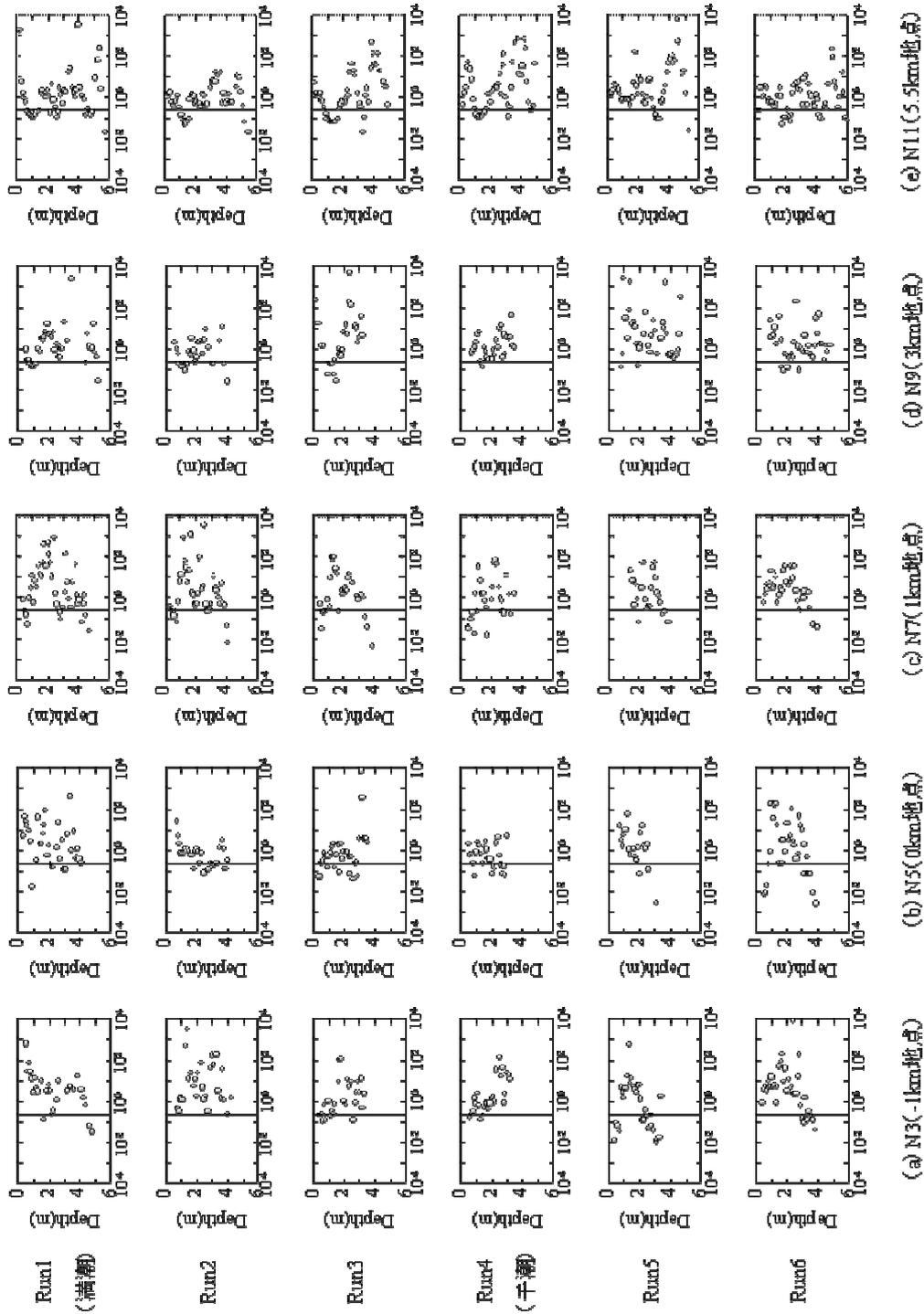


図3-4-7 8/25局所リサーチモードゾンデ鉛直分布

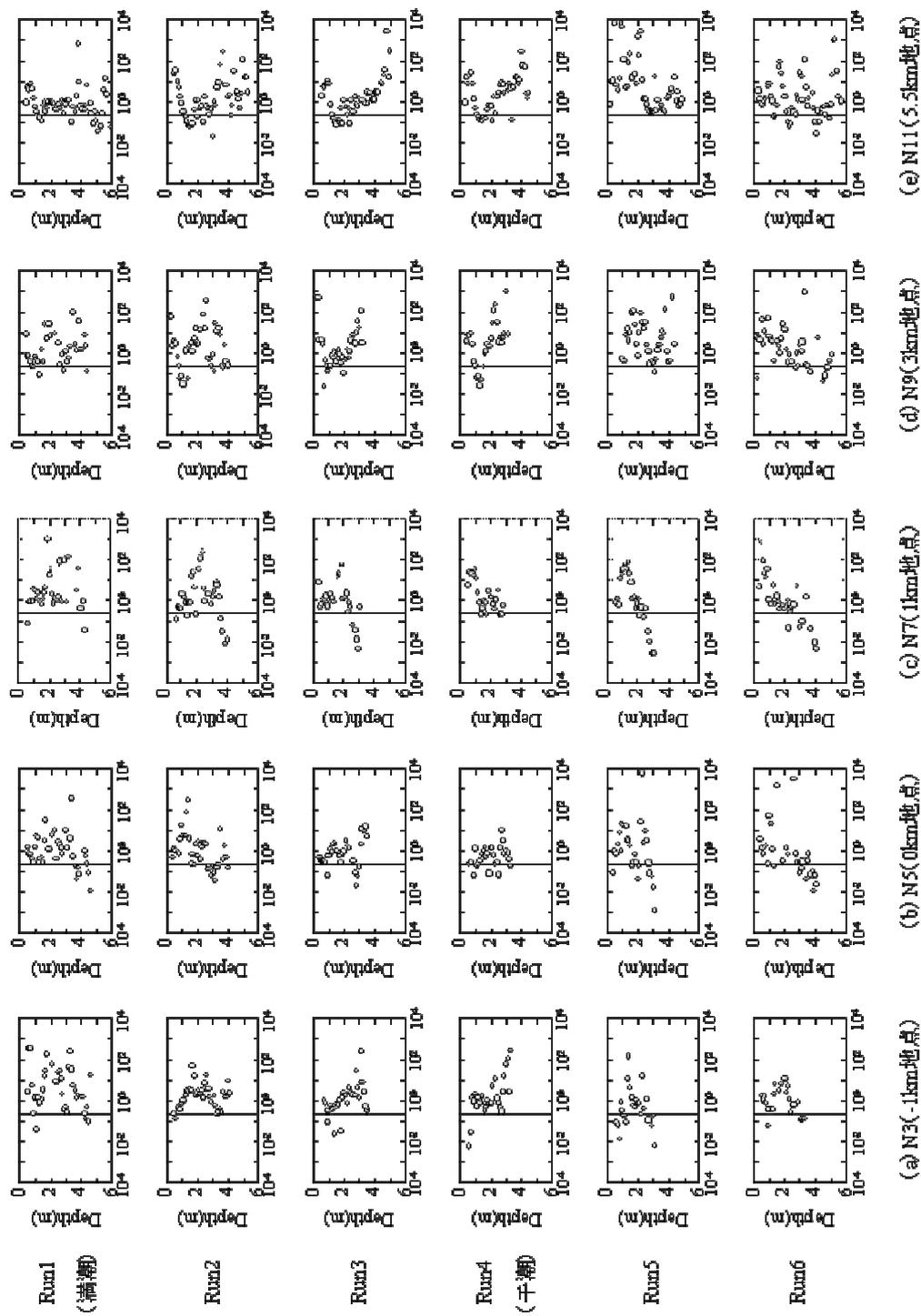
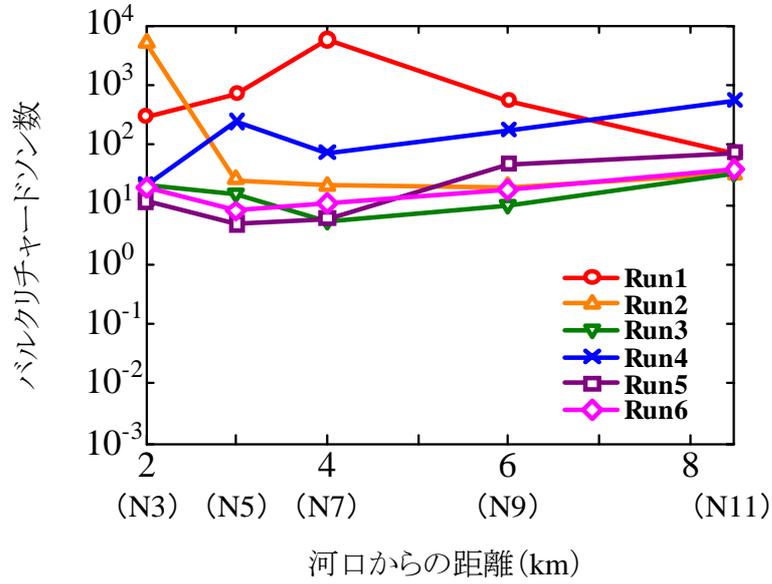
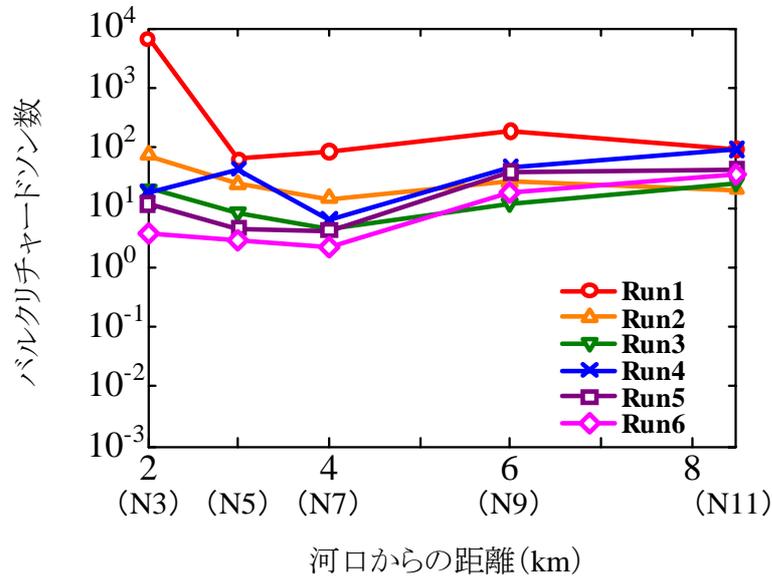


図3-4-8 9/22局所)チャート)の鉛直分布

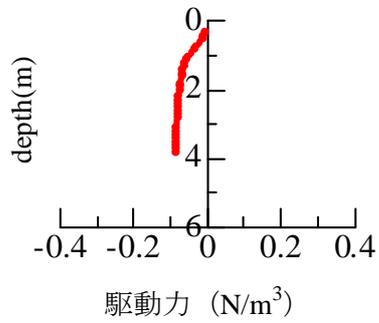


(a) 8/25

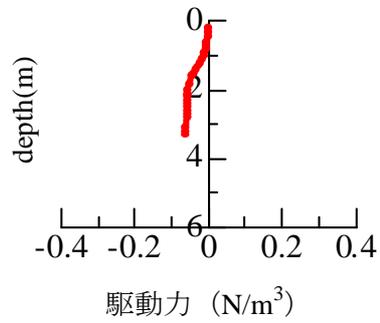


(b) 9/22

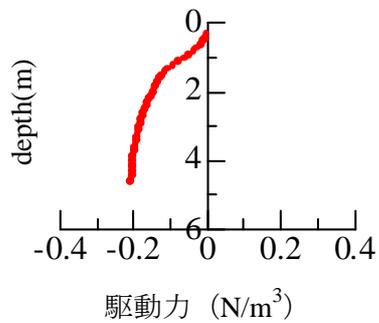
図3-4-9 バルクリチャードソン数空間分布



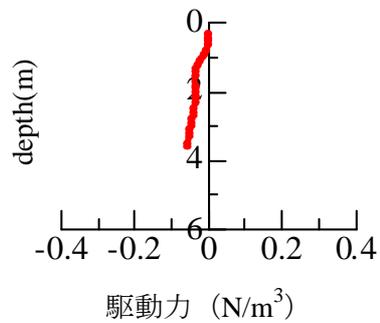
Run1 (満潮)



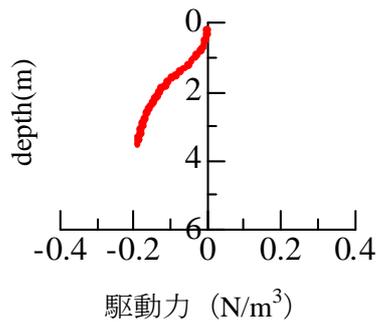
Run4 (干潮)



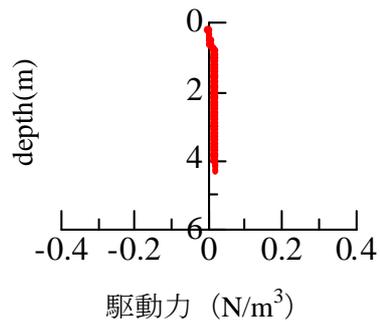
Run2



Run5

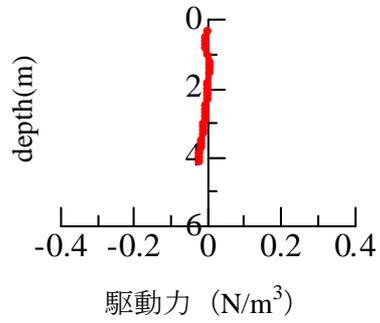


Run3

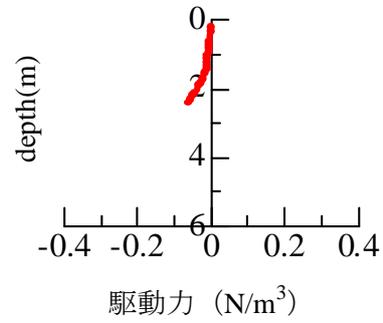


Run6

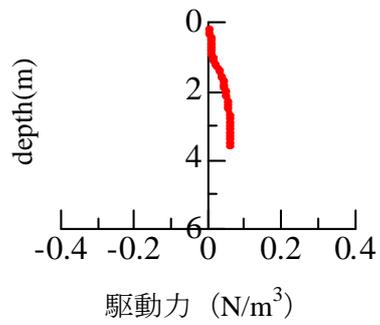
図3-4-10(a) 8/25傾圧成分による流れの駆動力(N5(0km地点))



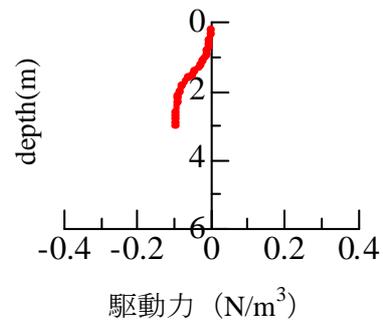
Run1 (満潮)



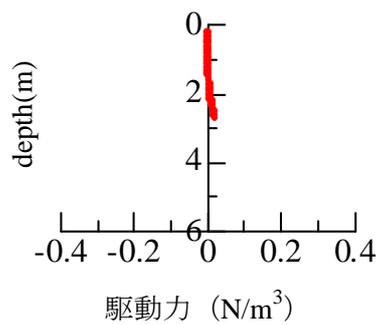
Run4 (干潮)



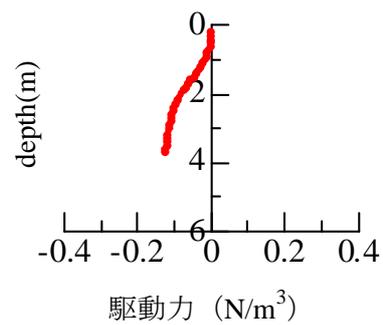
Run2



Run5

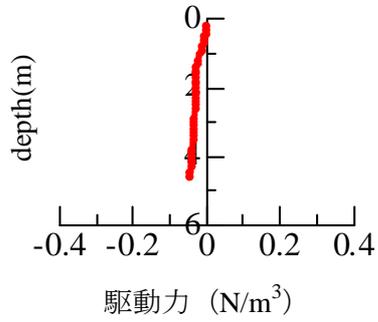


Run3

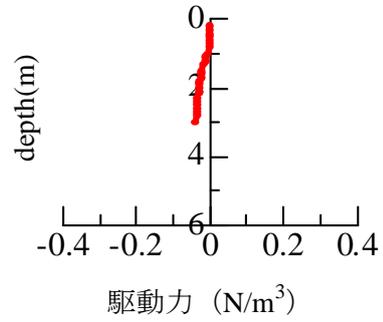


Run6

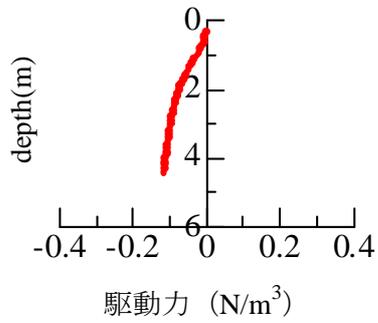
図3-4-10(b) 8/25傾圧成分による流れの駆動力(N7(1km地点))



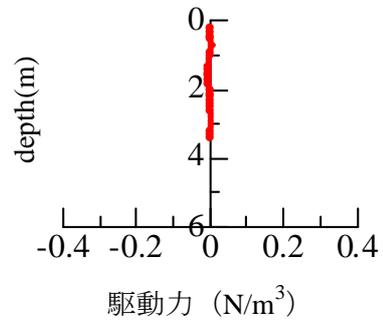
Run1 (満潮)



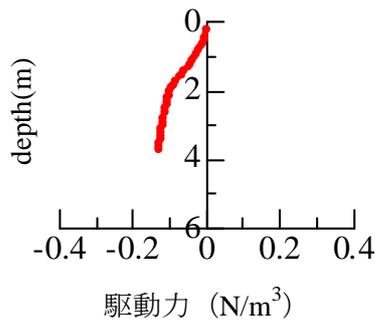
Run4 (干潮)



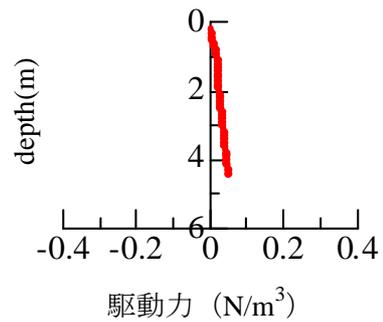
Run2



Run5

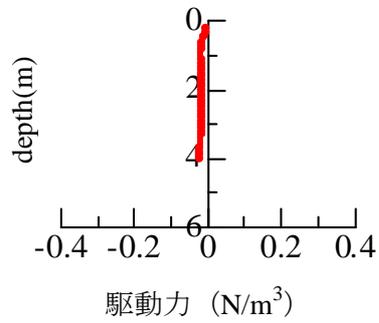


Run3

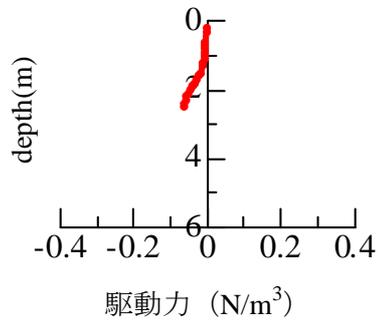


Run6

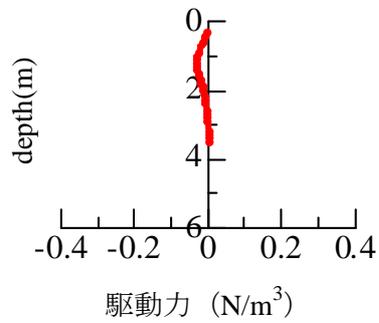
図3-4-11(a) 9/22傾圧成分による流れの駆動力(N5(0km地点))



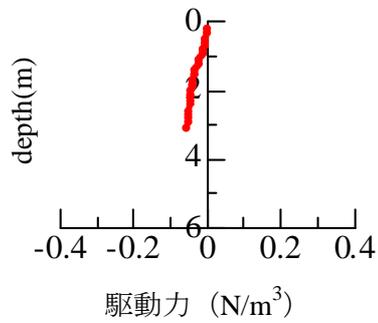
Run1 (満潮)



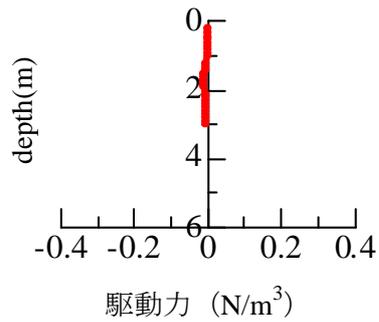
Run4 (干潮)



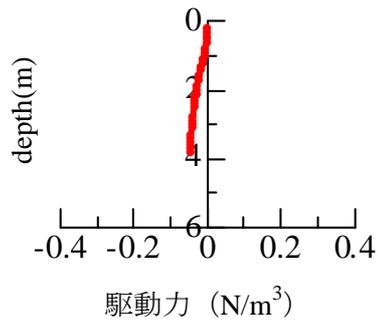
Run2



Run5



Run3



Run6

図3-4-11(b) 9/22傾圧成分による流れの駆動力(N7(1km地点))

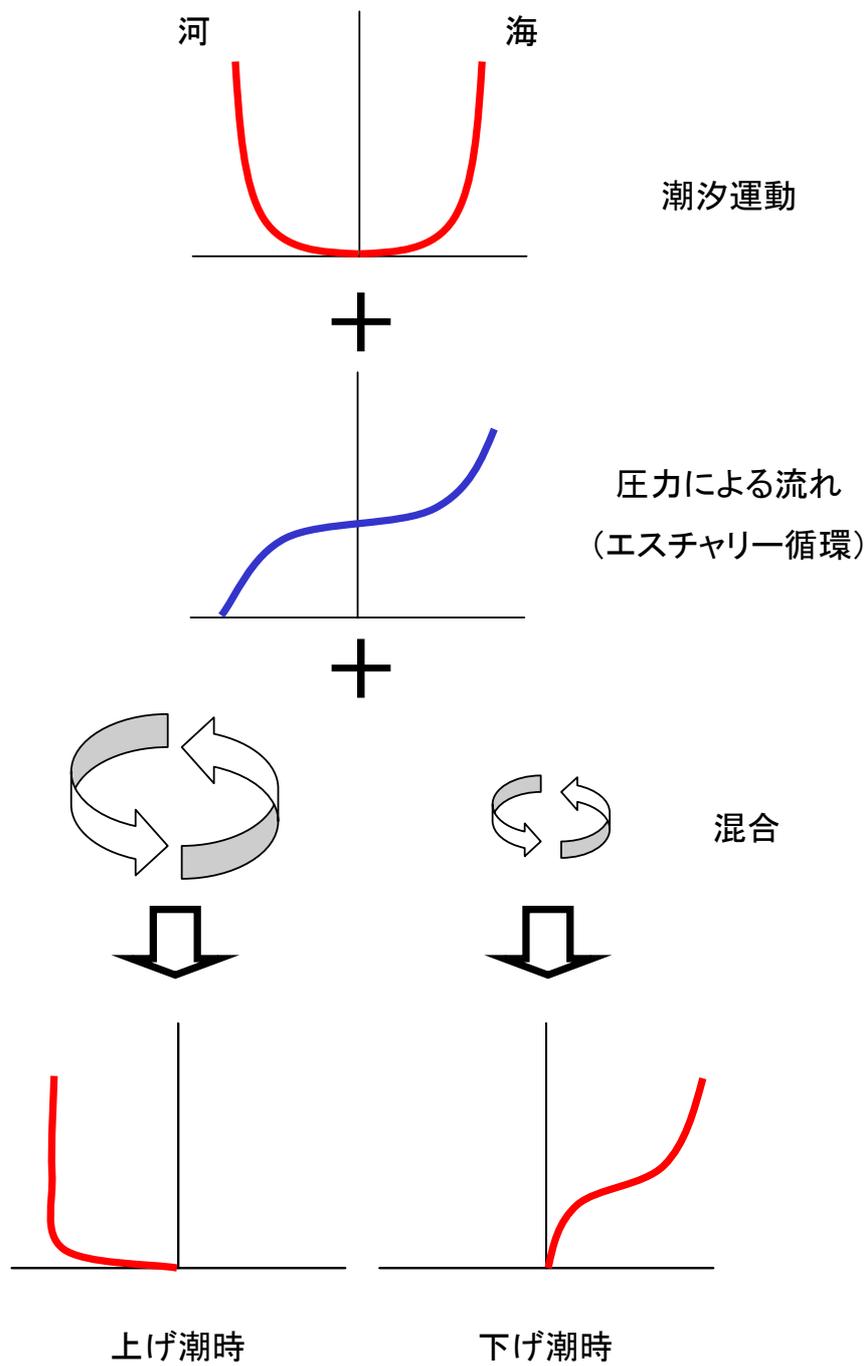


図3-4-12 大潮時流速分布概念図 I

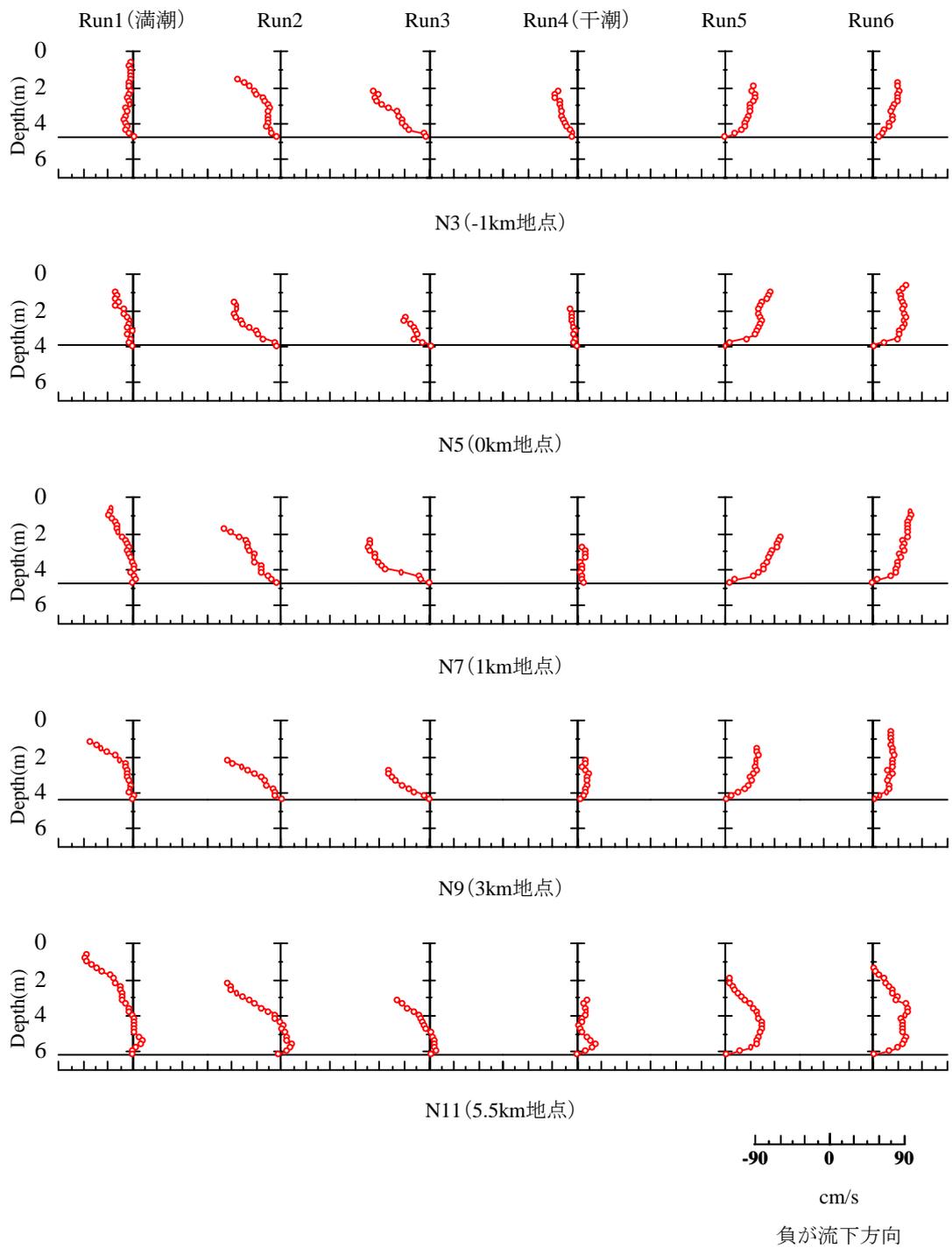


図3-4-13 8/9流速鉛直分布

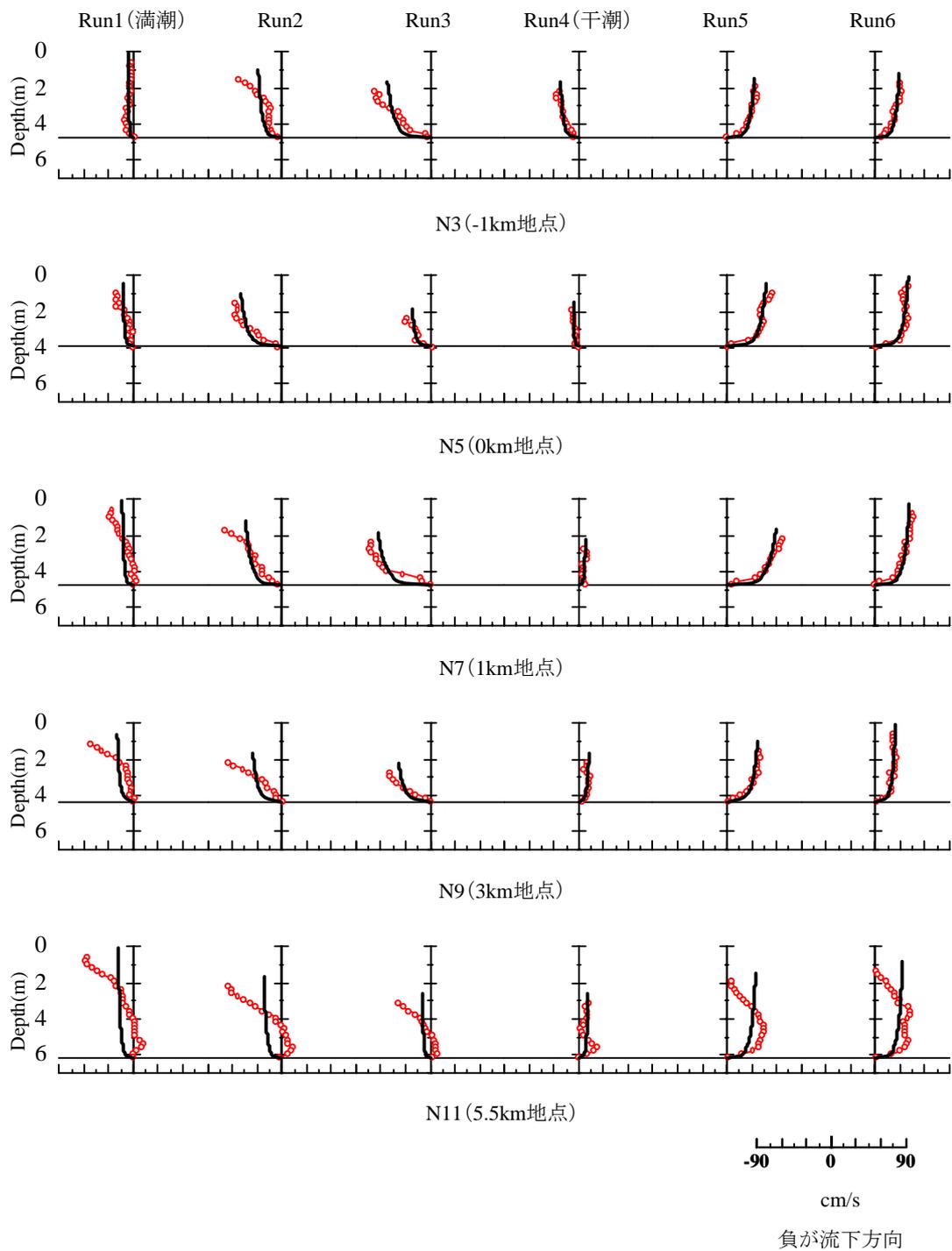


図3-4-14(a) 8/9流速鉛直分布と対数速度分布の比較

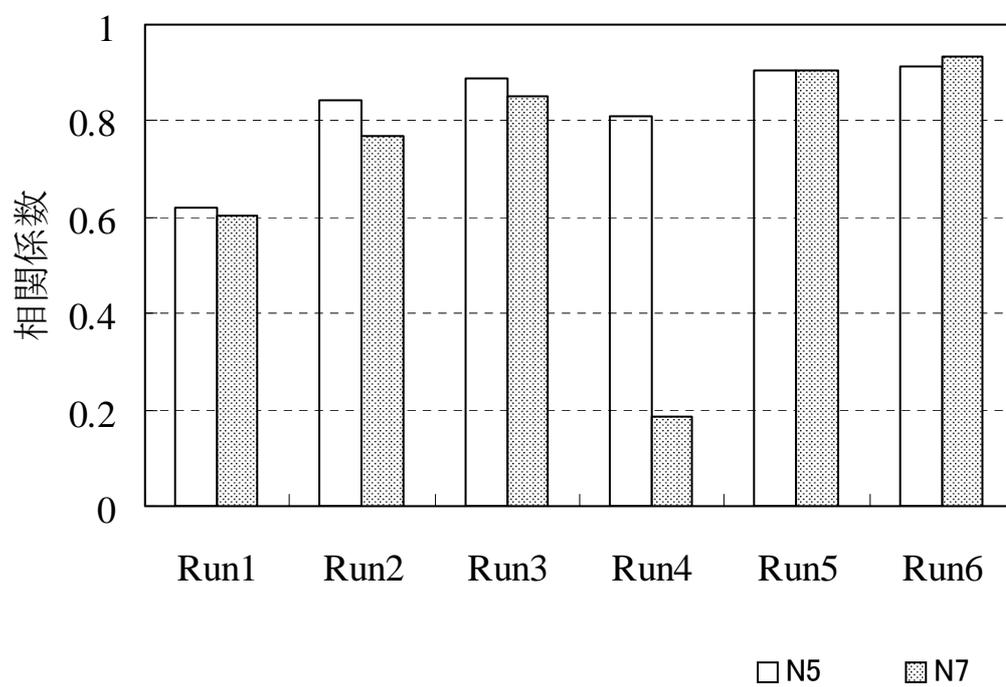


図3-4-14(b) 8/9流速鉛直分布と対数速度分布の相関係数

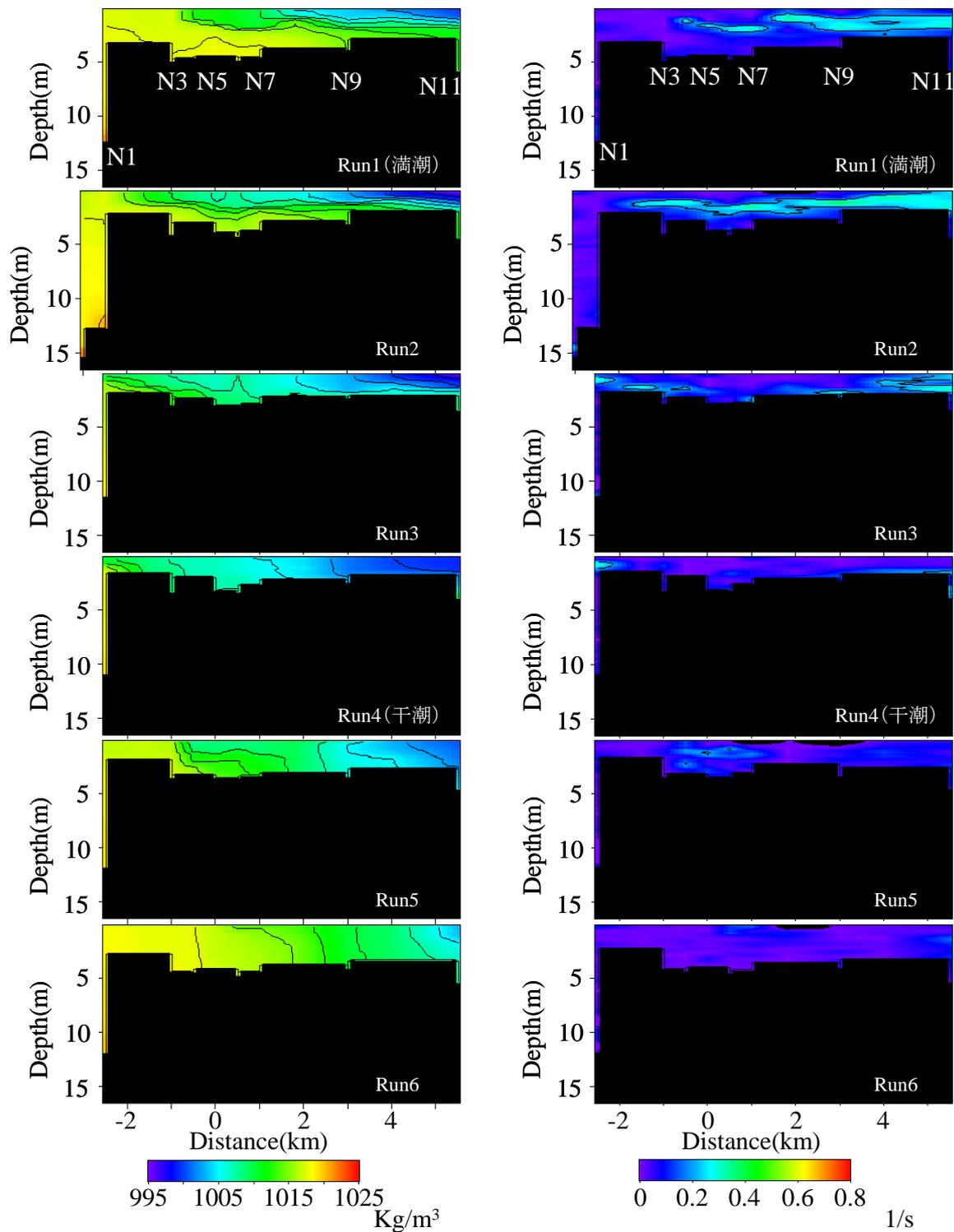


図3-4-15 8/9密度、バイサラ周波数の時空間分布

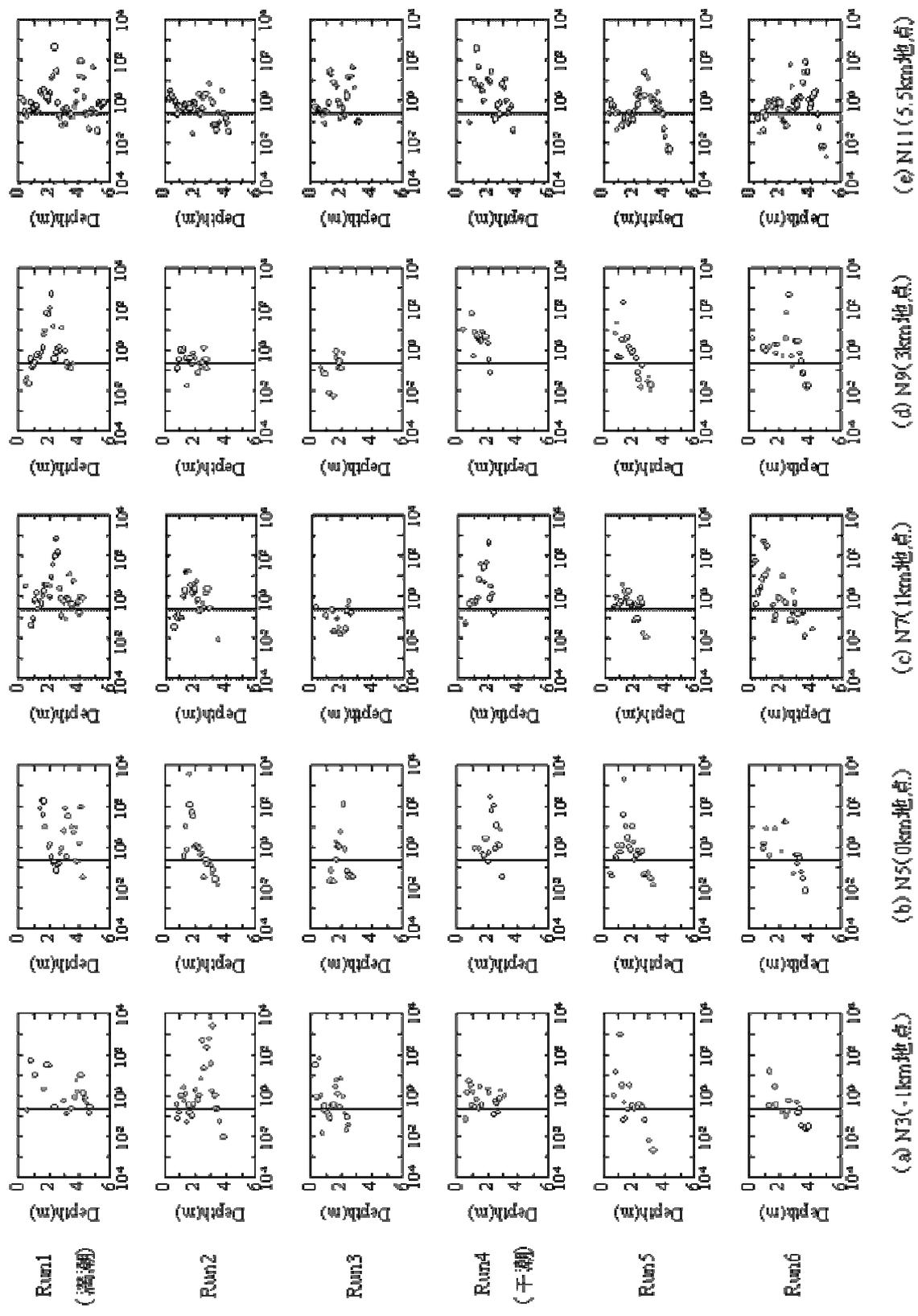


図3-3-16 8/9局所)チャート)ン数鉛直分布

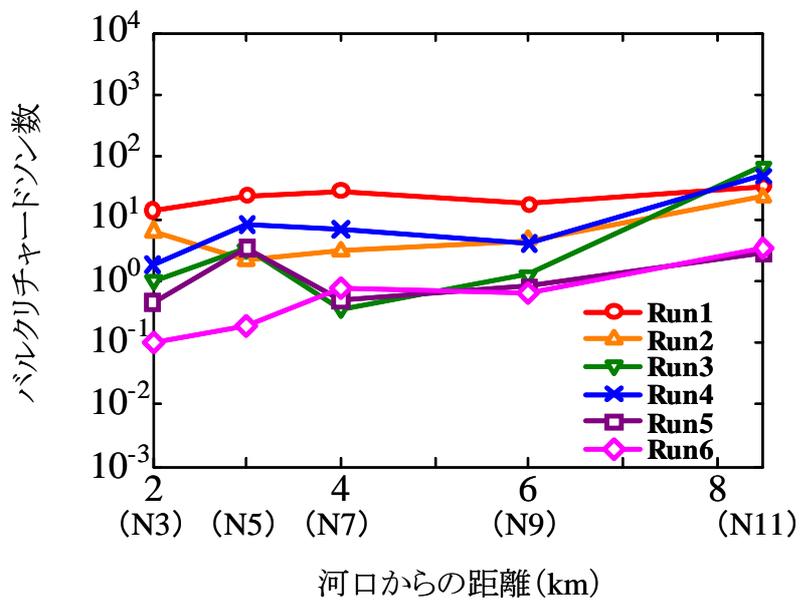
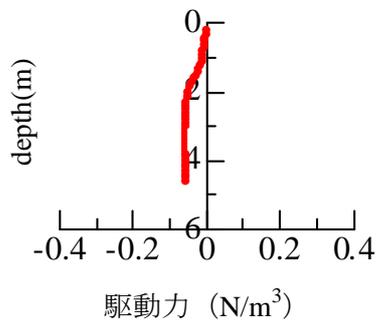
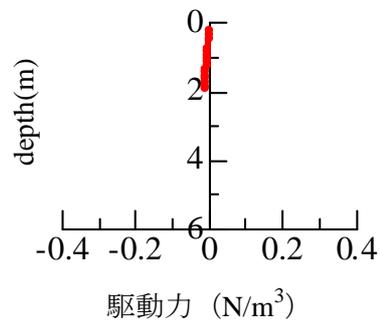


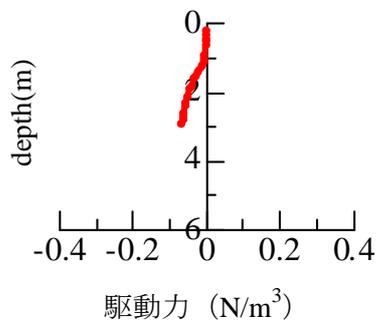
図3-4-17 8/9バルクリチャードソン数空間分布



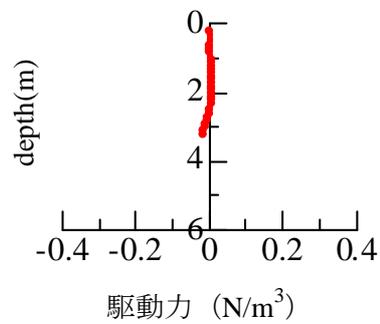
Run1 (満潮)



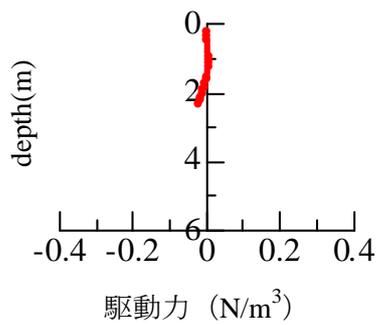
Run4 (干潮)



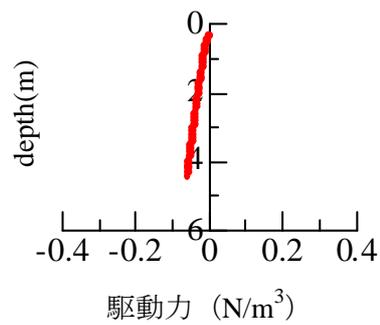
Run2



Run5

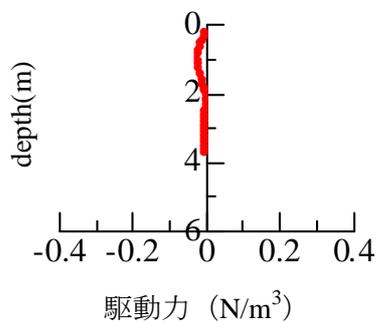


Run3

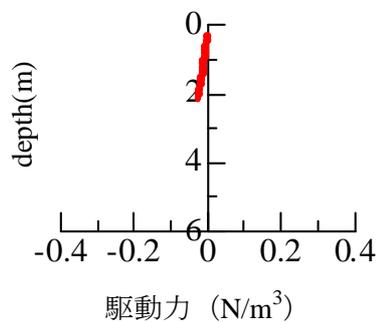


Run6

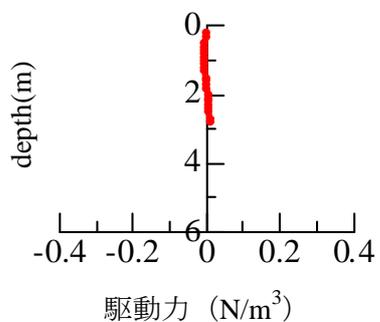
図3-4-18(a) 8/9傾圧成分による流れの駆動力 (N5 (0km地点))



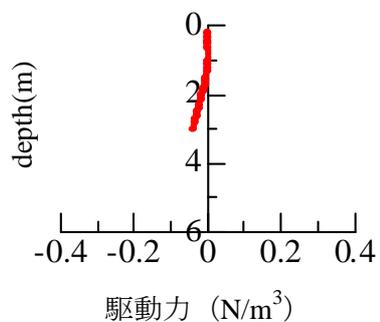
Run1 (満潮)



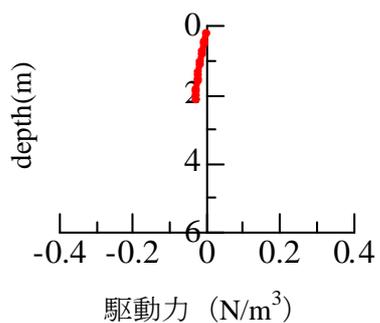
Run4 (干潮)



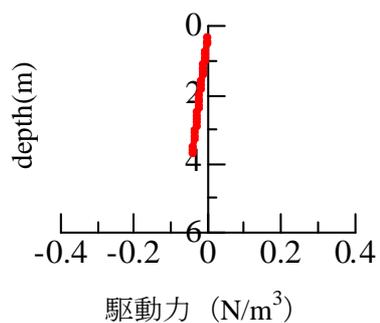
Run2



Run5



Run3



Run6

図3-4-18(b) 8/9傾圧成分による流れの駆動力(N7(1km地点))

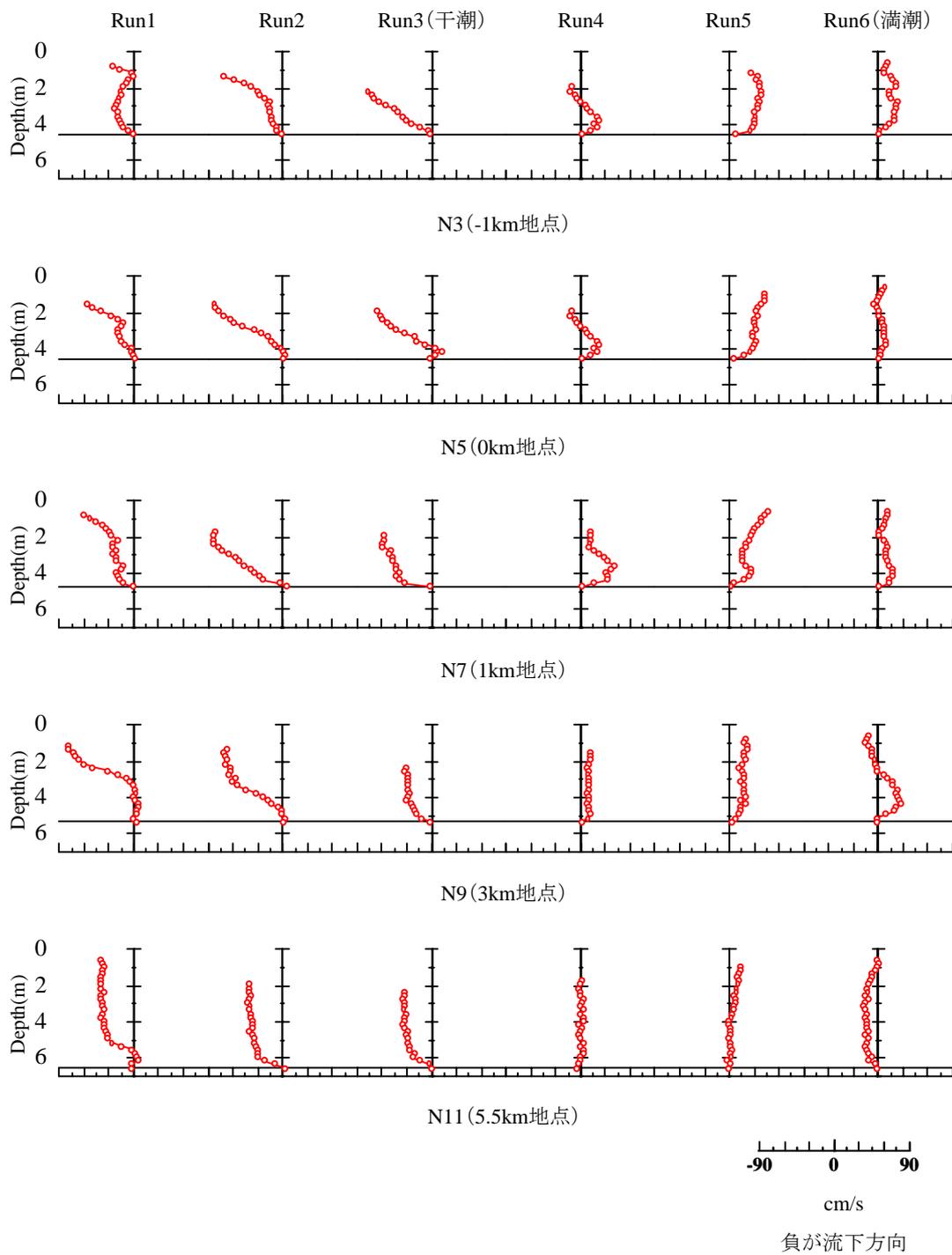


図3-4-19 10/5流速鉛直分布

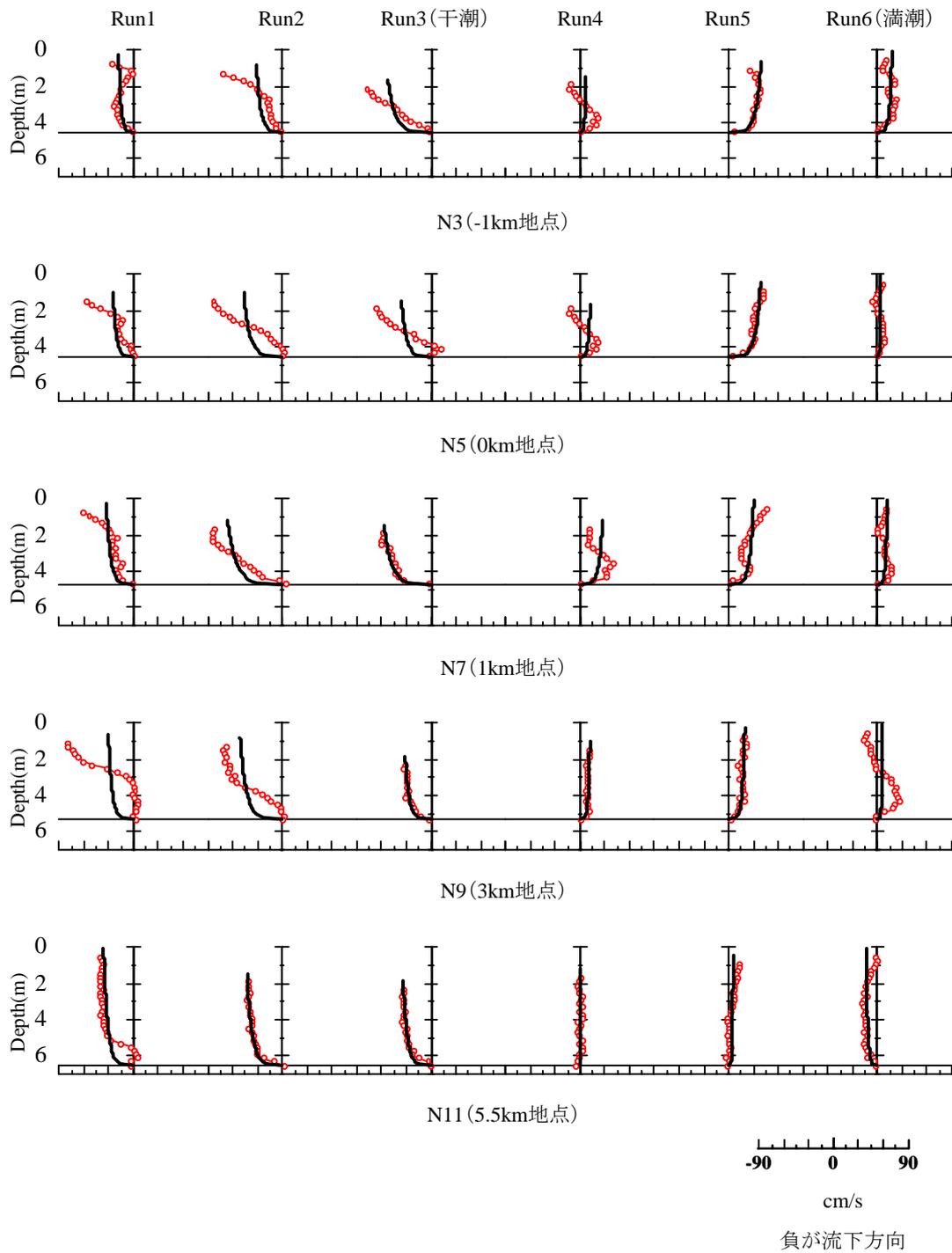


図3-4-20(a) 10/5流速鉛直分布と対数速度分布の比較

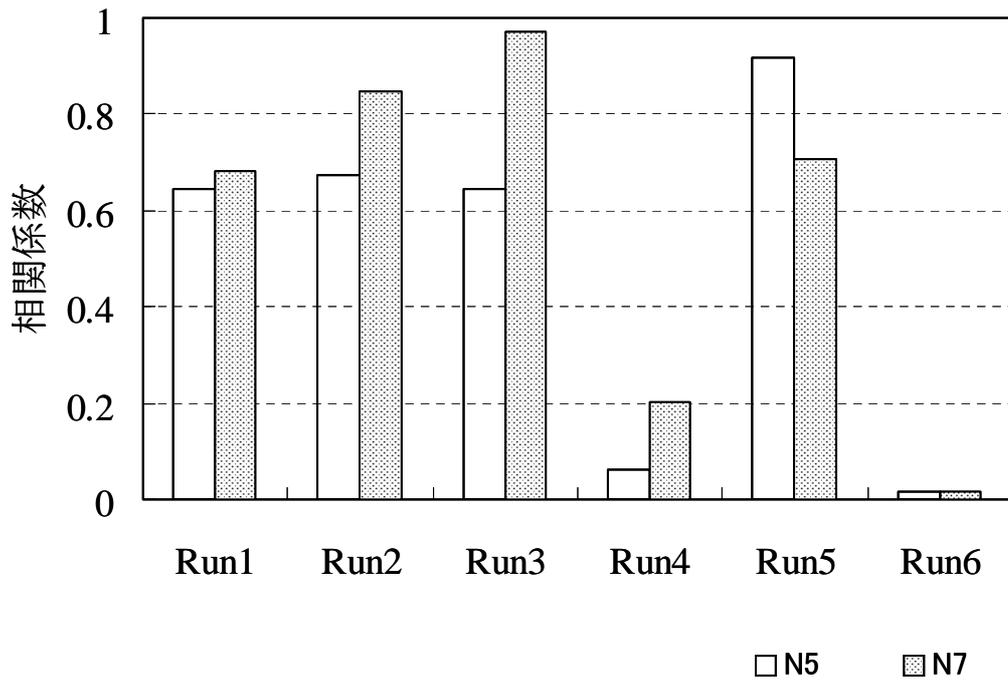


図3-4-20(b) 10/5流速鉛直分布と対数速度分布の相関係数

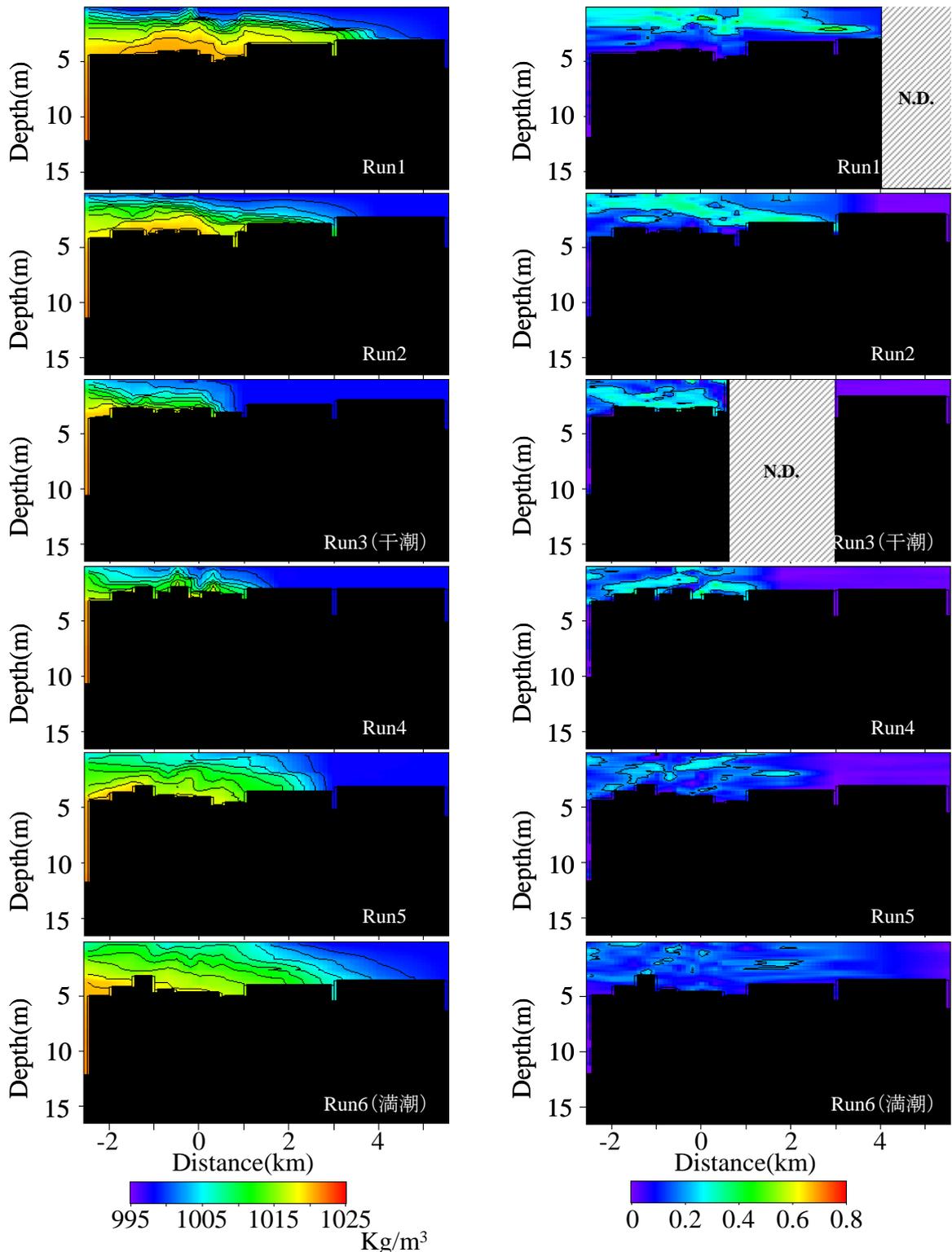


図3-4-21 10/5密度、バイサラ周波数の時空間分布

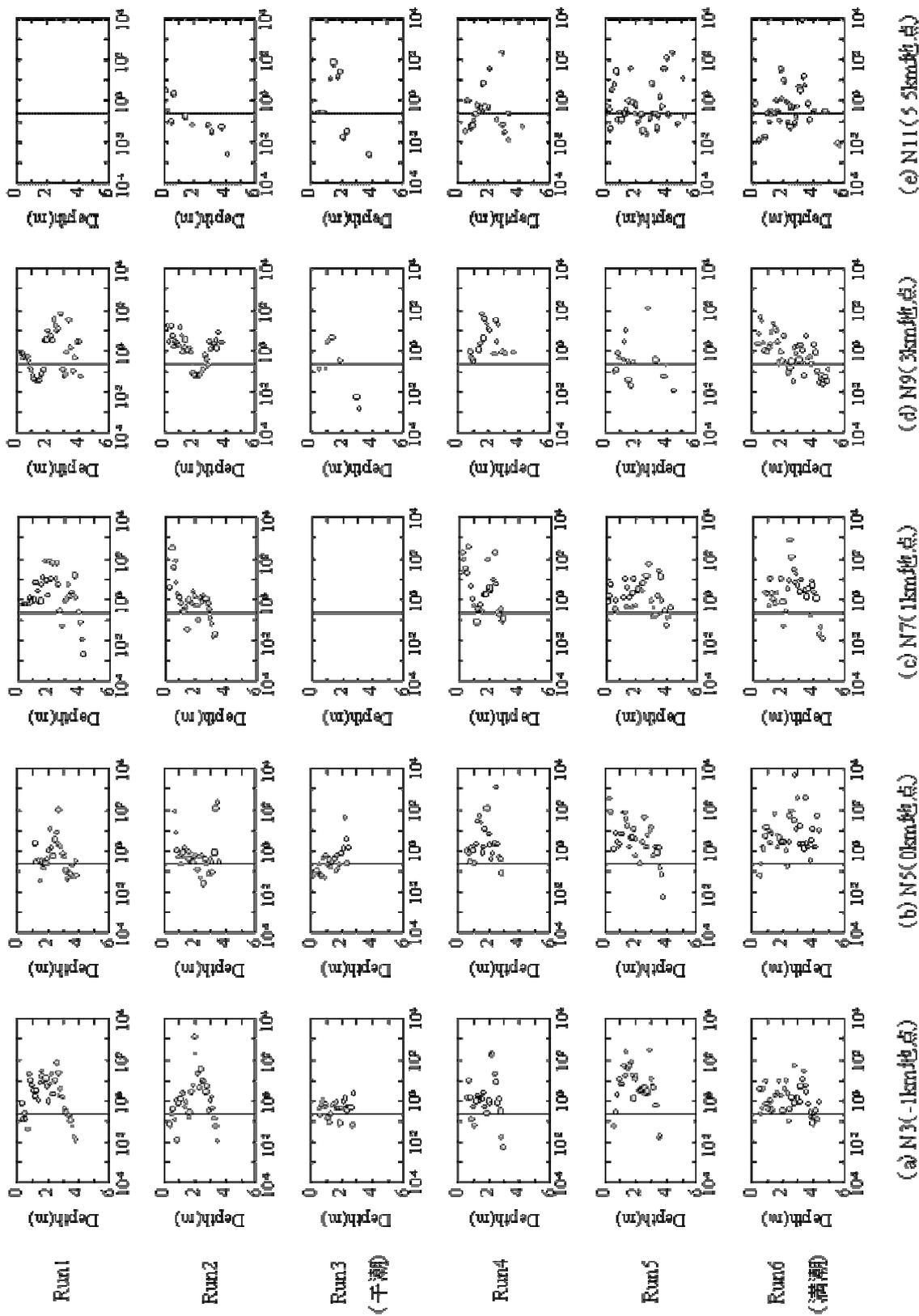


図3-3-22 10/5局群)チャート)ン被始直分布

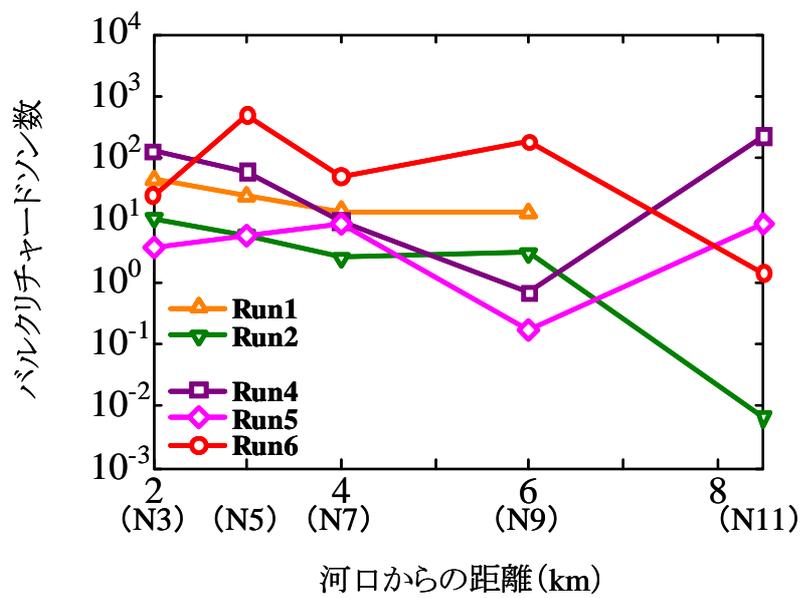
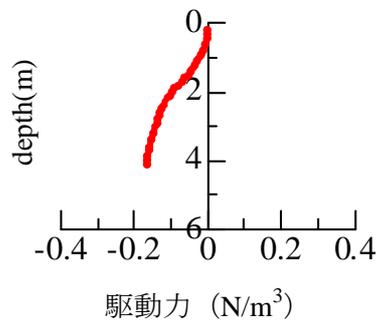
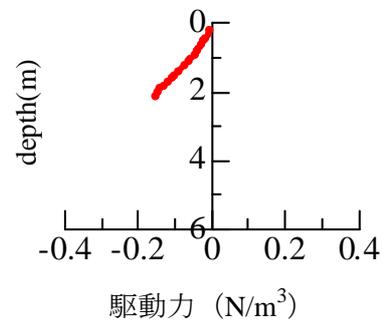


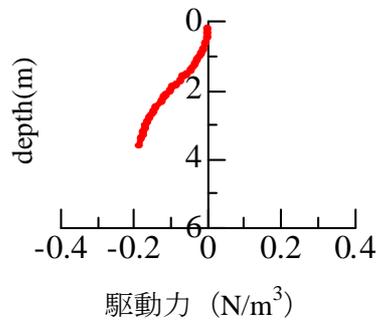
図3-4-23 10/5バルクリチャードソン数空間分布



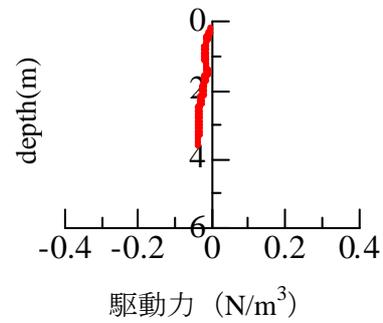
Run1



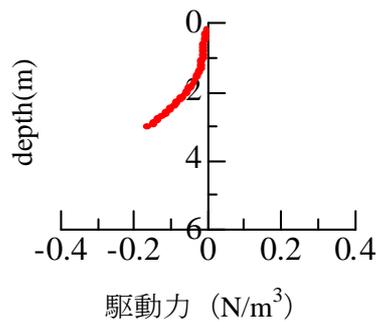
Run4



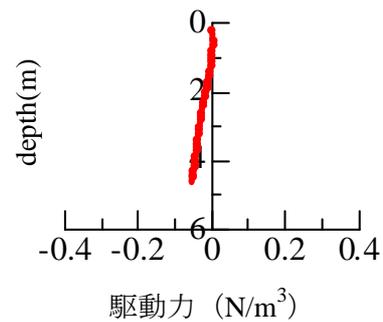
Run2



Run5

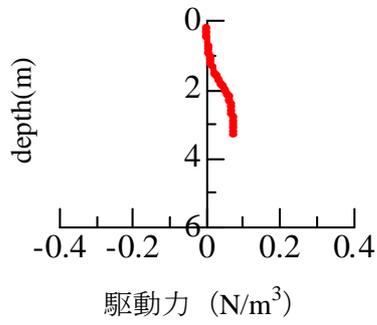


Run3(干潮)

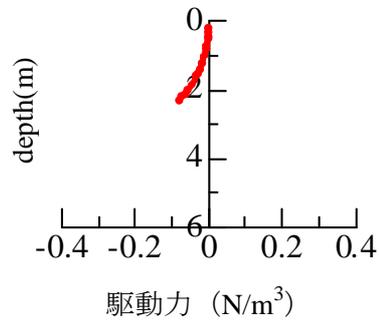


Run6(満潮)

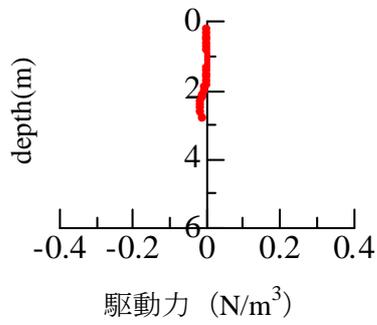
図3-4-24(a) 10/5傾圧成分による流れの駆動力(N5(0km地点))



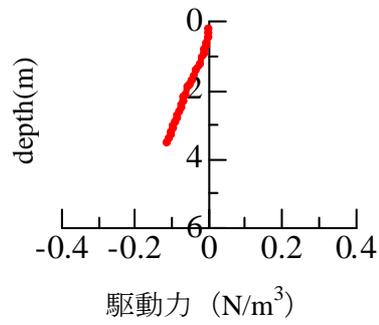
Run1



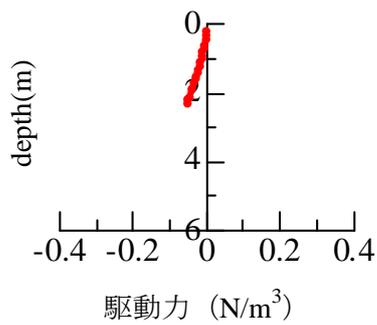
Run4



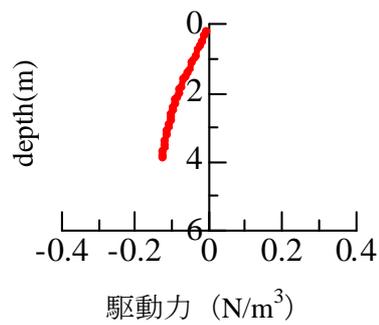
Run2



Run5



Run3(干潮)



Run6(満潮)

図3-4-24(b) 10/5傾圧成分による流れの駆動力(N7(1km地点))

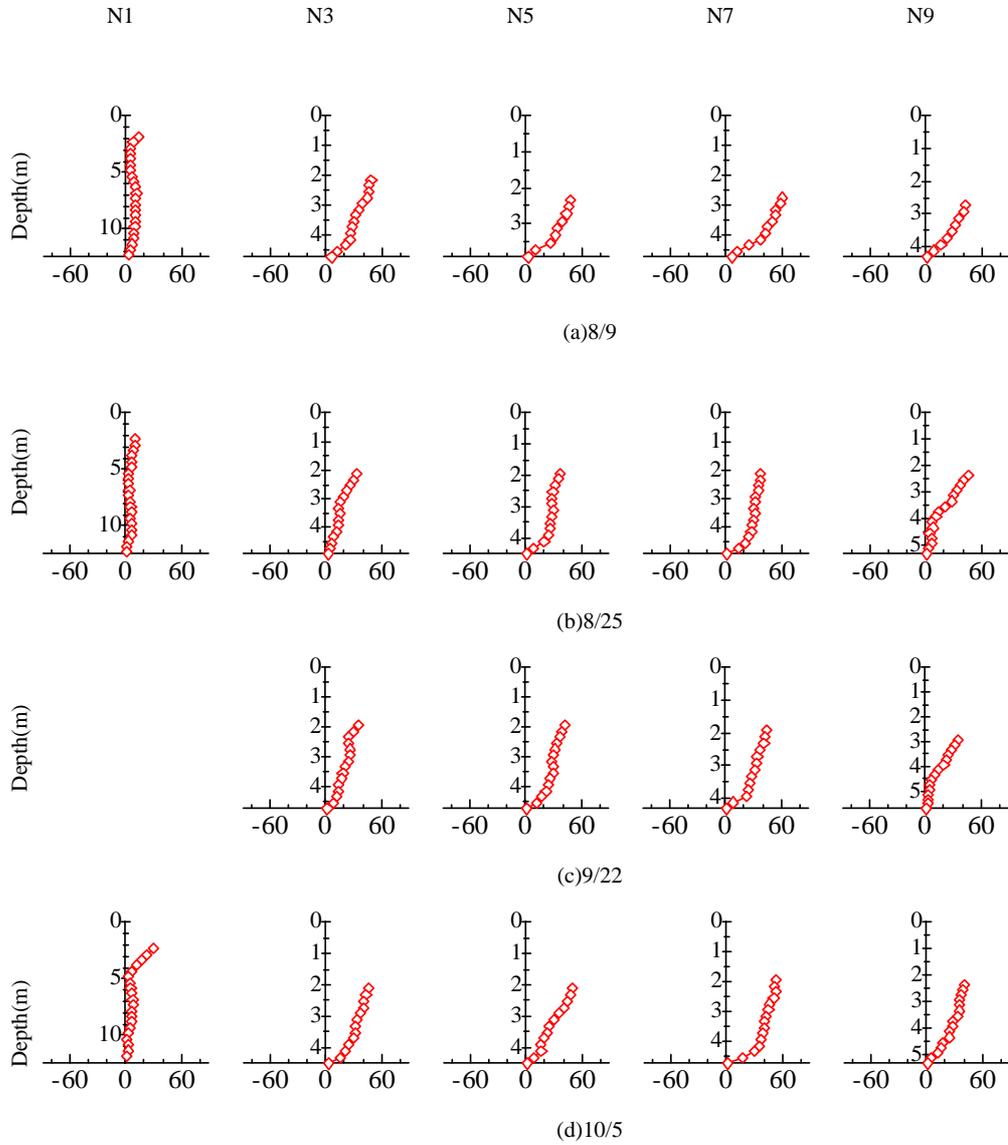


図3-4-25(a) 流速の周期変動成分(cm/s)

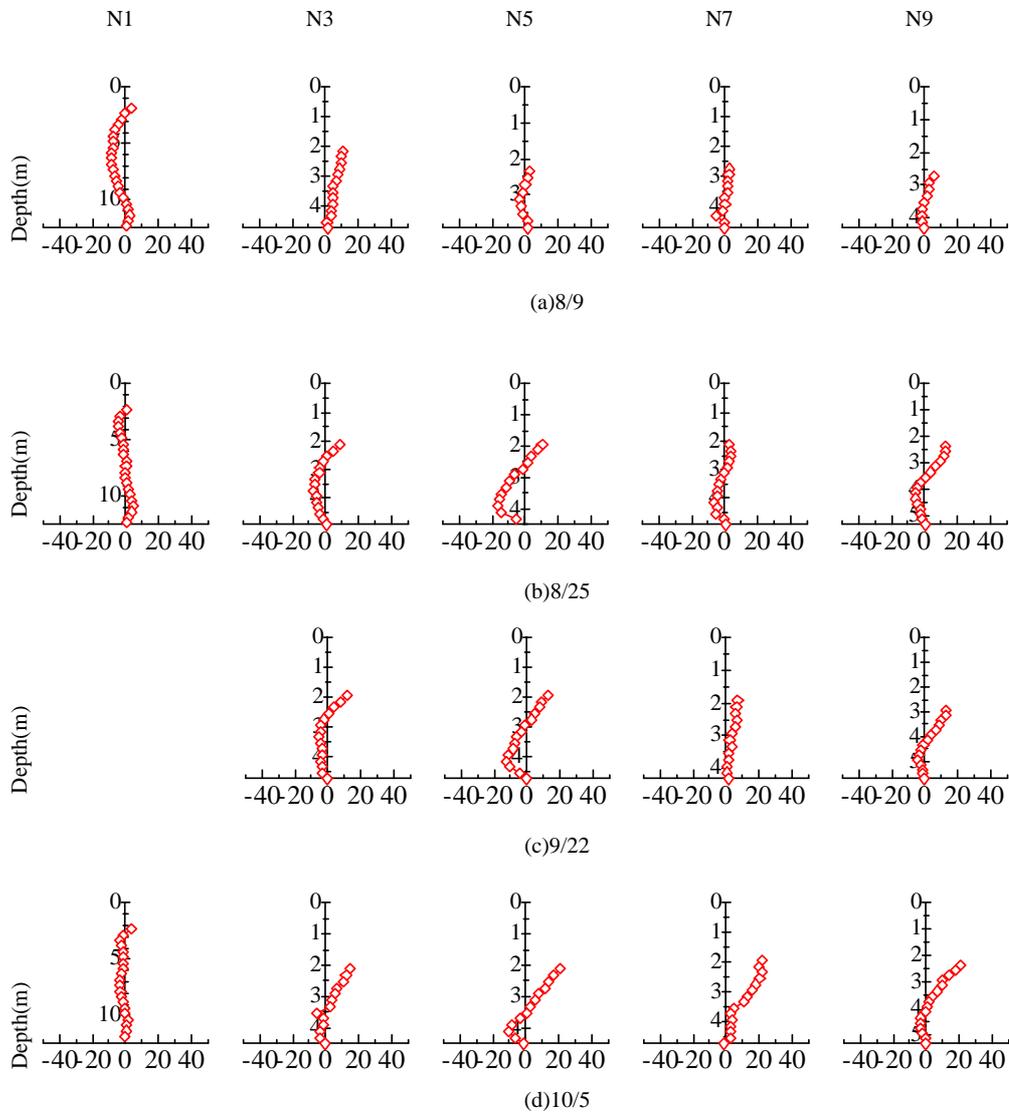


図3-4-25(b) 流速の定常成分(正が流下方向)(cm/s)

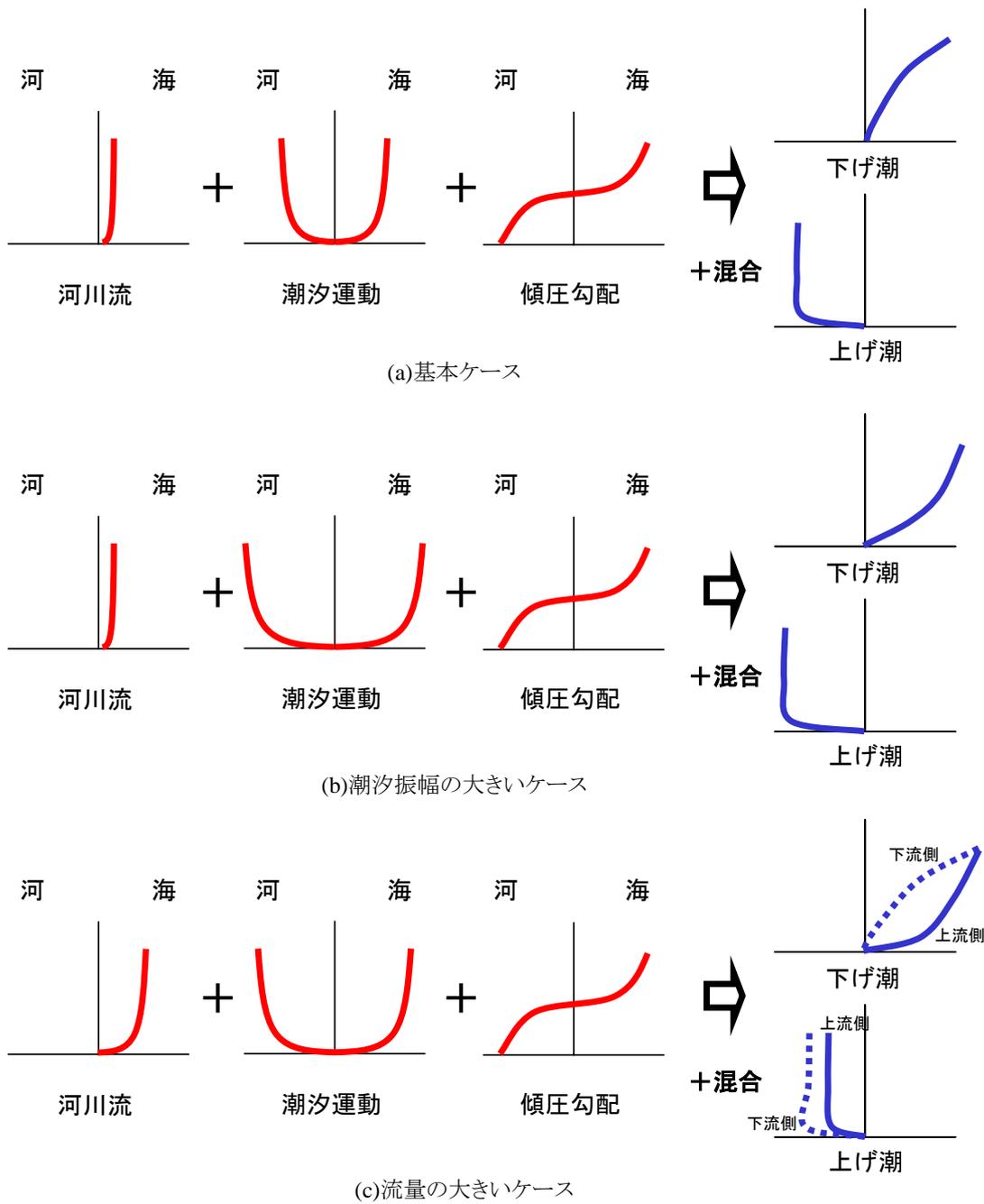


図3-3-26 大潮時流速分布概念図Ⅱ

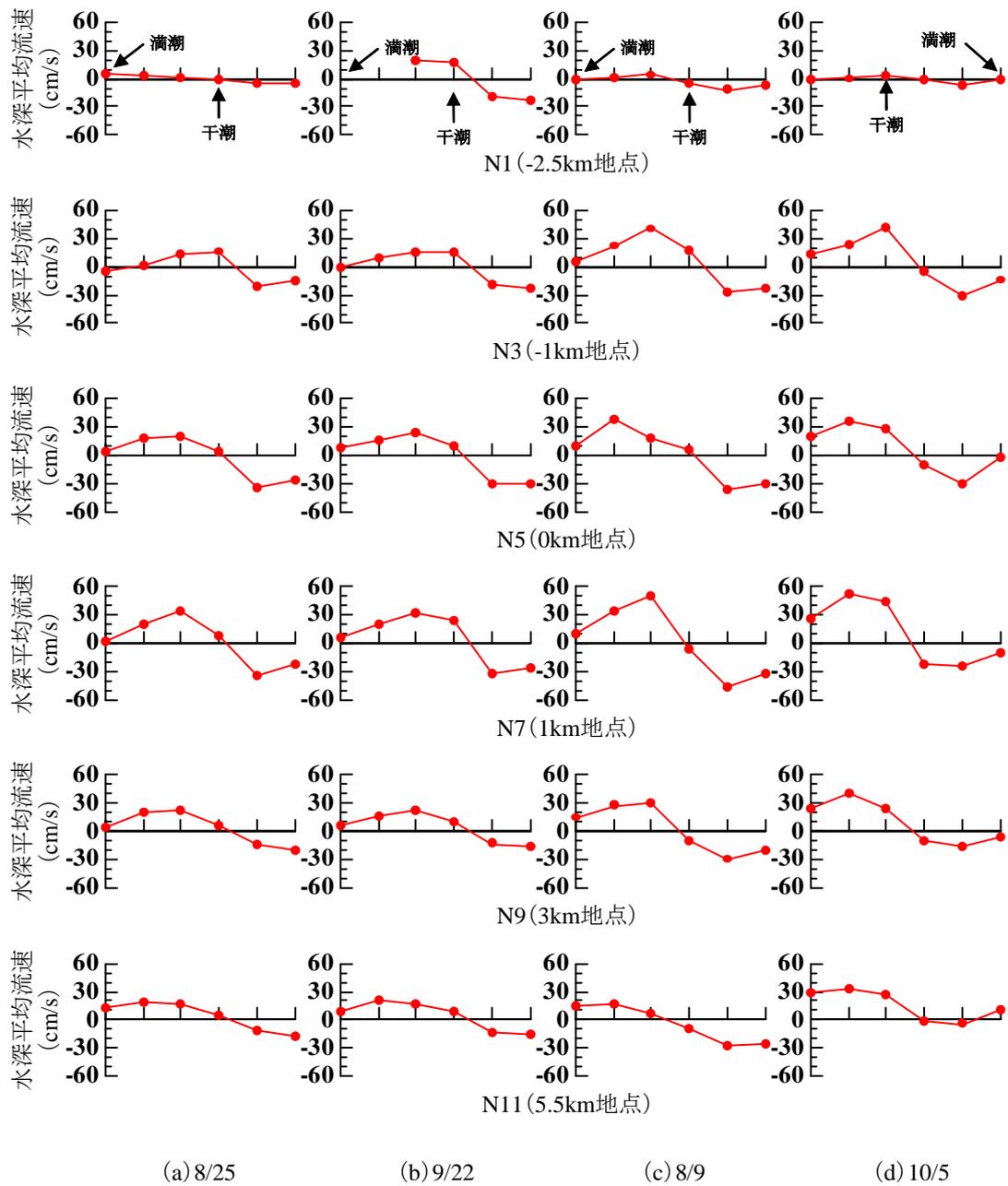


図3-5-1 一潮汐間での水深平均流速時間変化

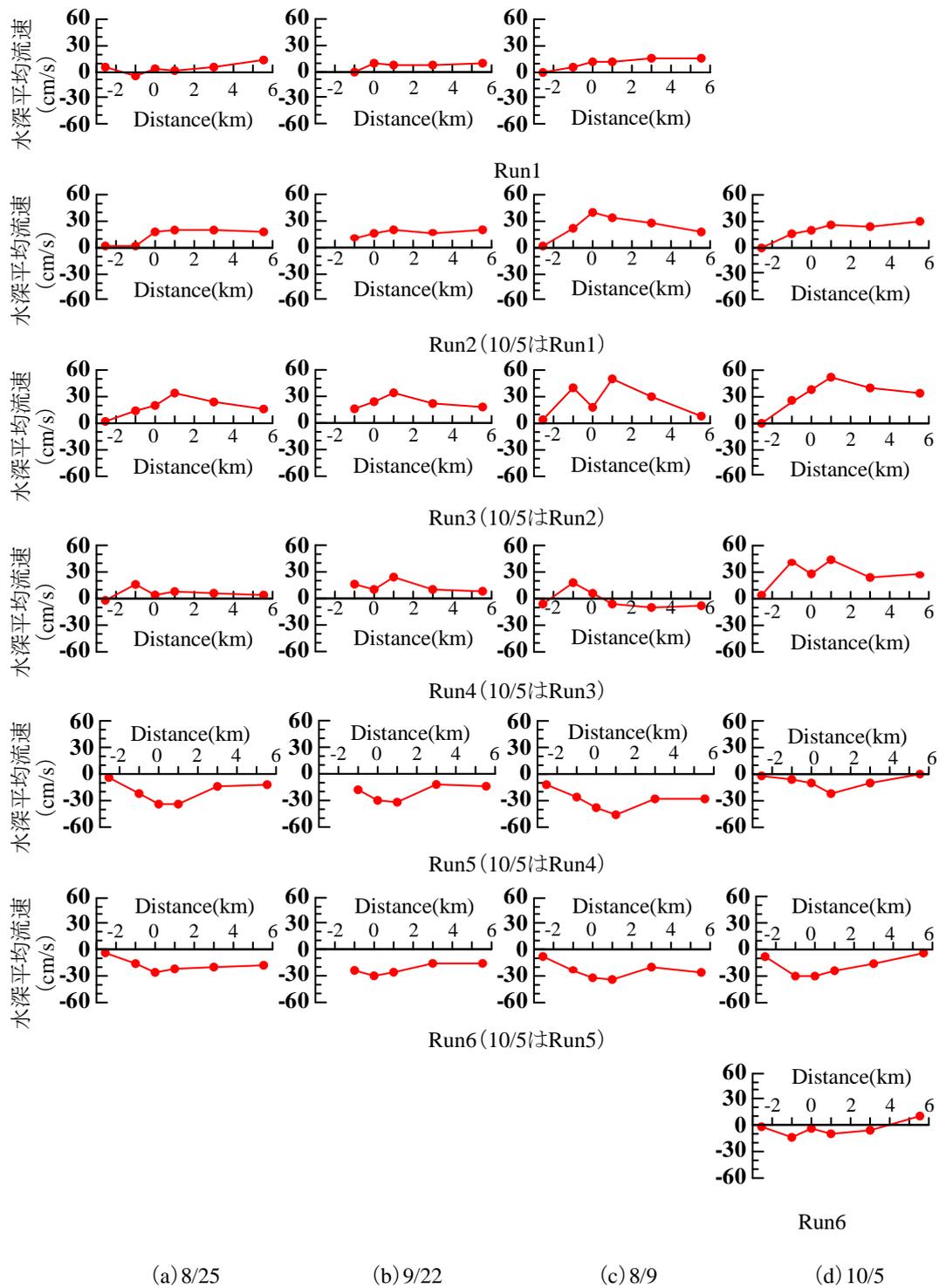


図3-5-2 水深平均流速空間変化

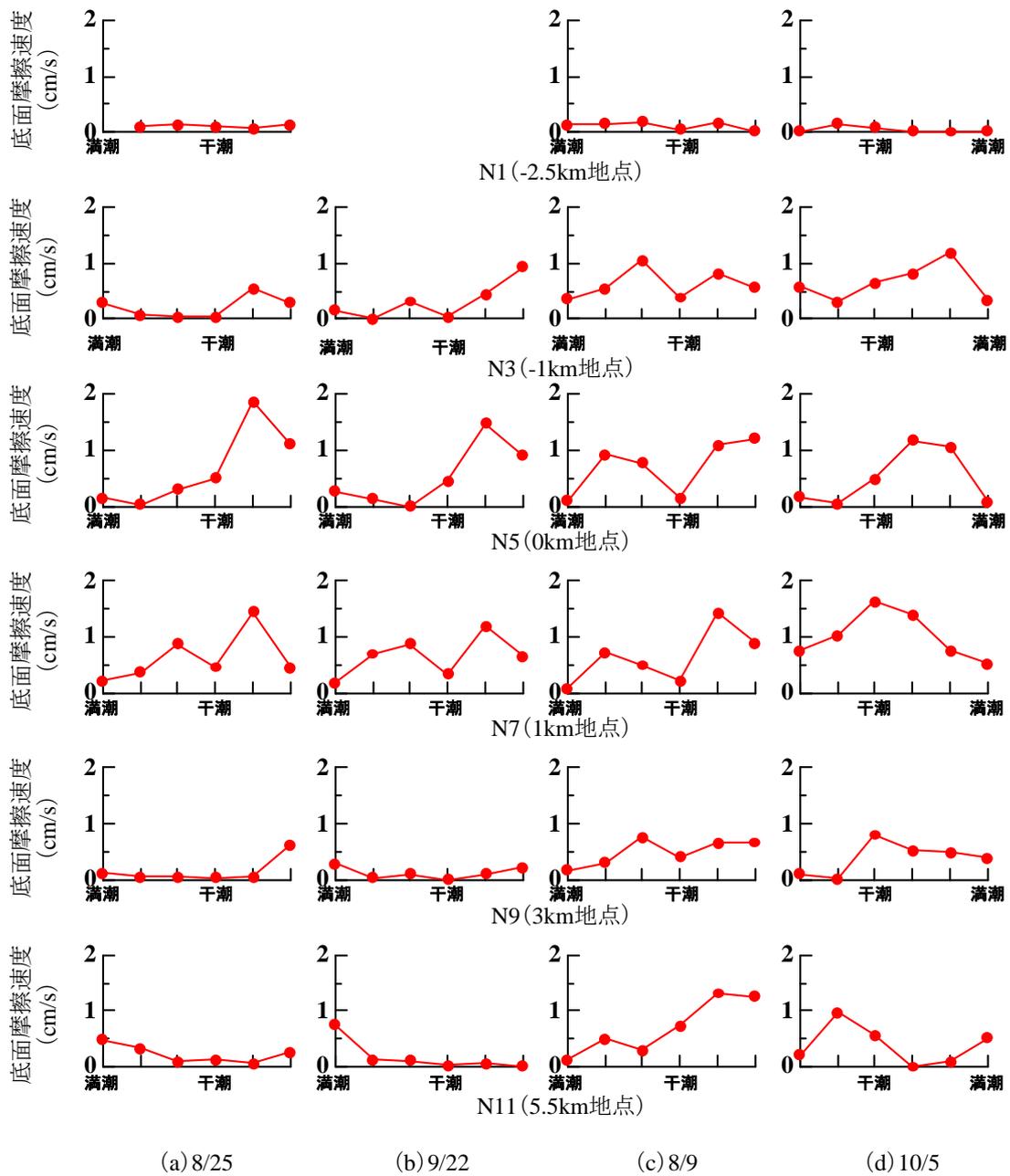


図3-5-3 一潮汐間での底面摩擦速度時間変化

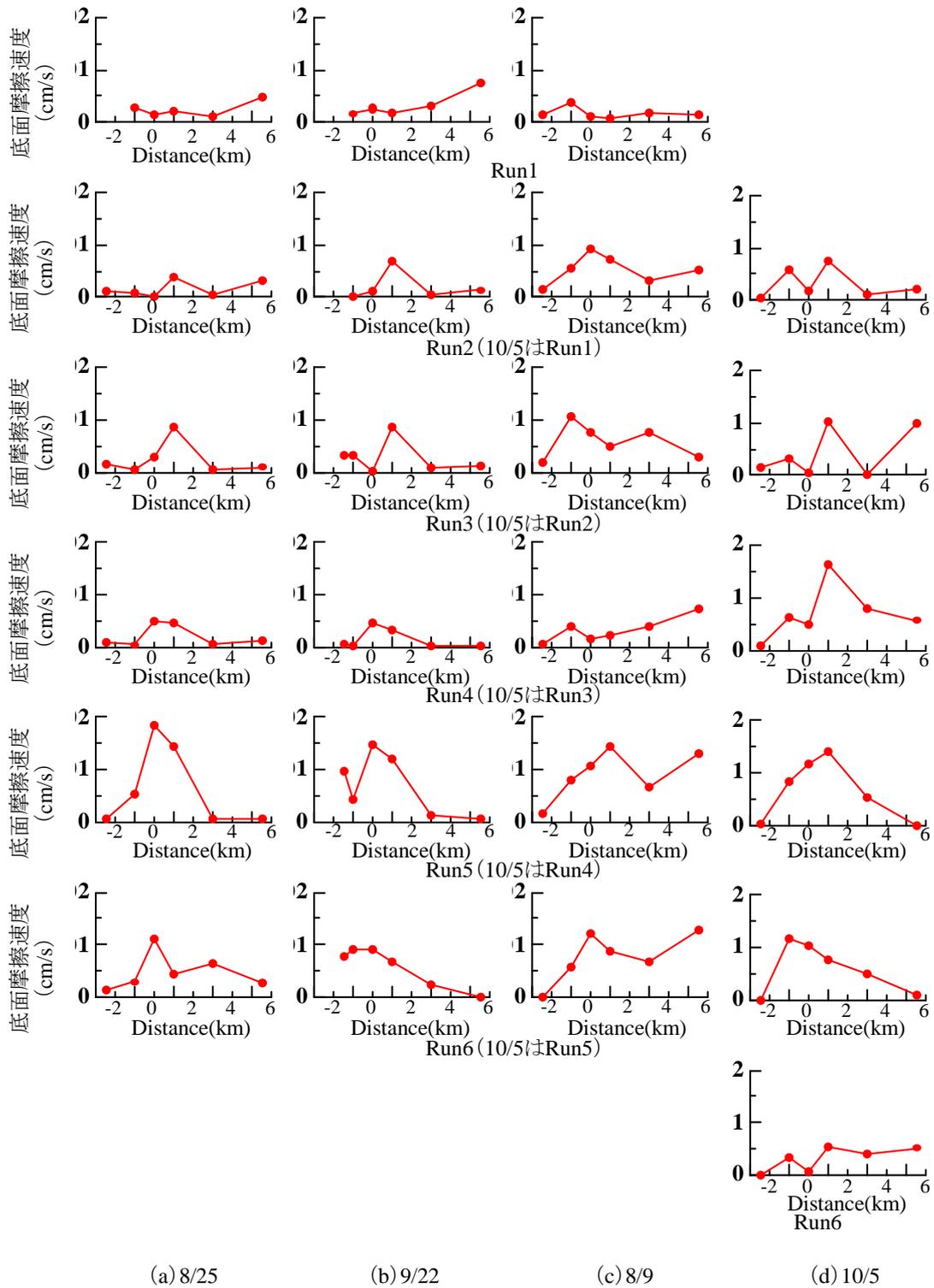
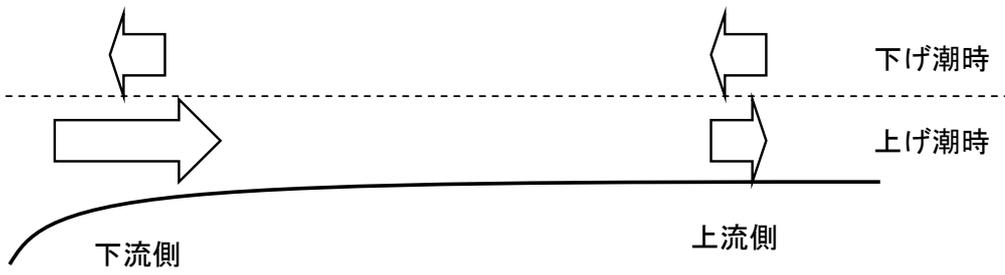
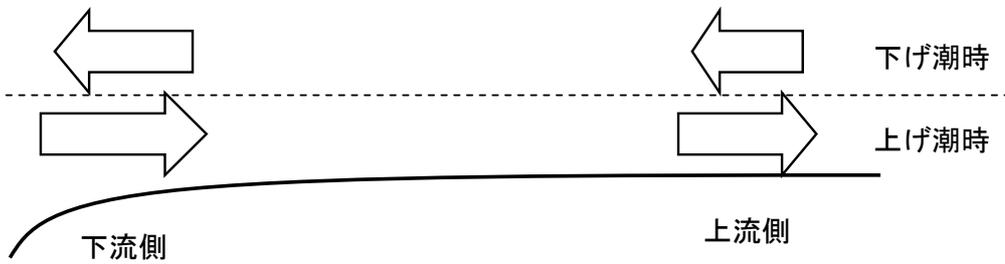


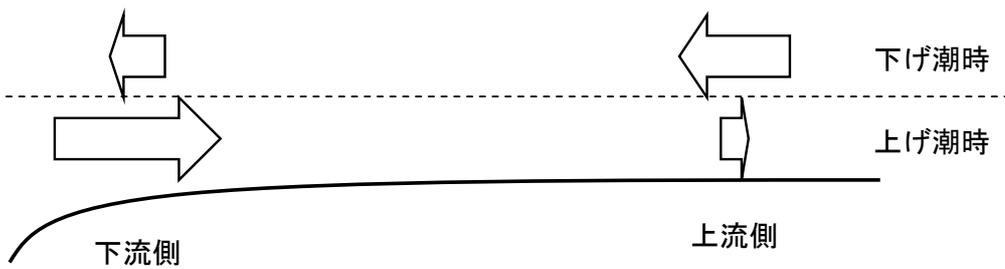
图3-5-4 底面摩擦速度空间变化



(a)基本ケース



(b)潮汐振幅の大きいケース



(c)流量の大きいケース

図3-5-5 底面摩擦速度の時空間分布概念図

第4章 河口域における懸濁態物質挙動と水質底質環境の季節変化

4-1 はじめに

前の章では、潮汐変動による上げ潮時と下げ潮時の非対称性を持つ流動特性とそれに対応した底面摩擦速度特性を把握した。このような流動場において、今度は物質がどのような挙動を示すのかが重要な課題となる。そこで、本章でははじめに、潮汐変動に対する懸濁態物質の挙動について考察する。特に懸濁態物質については観測結果から求められるシールズ数を用いてそれらの関係を把握する。

潮汐変動という、スケールの短い懸濁態物質挙動を捉えた後で、スケールを長く捉えた変化について考える。まず、1年間分の六郷橋水質データから年間変化を大まかに把握した後で、観測結果より空間的に捉えた河口域の水質及び底質環境の長期変遷を出水のインパクトや潮汐変動の及ぼす影響を中心に考察する。

4-2 Chl.a・濁度・DO の空間構造

ここでは、一潮汐観測から得られた、Chl.a、濁度、DO の観測結果を簡単に示し、潮汐変動に対するこれらの挙動を把握する。そのあと、濁度については流動場との関係を、シールズ数を用いて巻き上がりなどの面から検討する。

まず、8/25、9/22 における Chl.a、濁度、DO の空間分布の潮汐変動に伴う時間変化をそれぞれ図 4-2-1、図 4-2-2 に示す。

Chl.a に関しては、赤潮で有名な東京湾に面しているということもあり、河口付近で濃度が高く、下げ潮時に東京湾へ押しやられ、上げ潮時に流入している様子が良く分かる。

濁度に関しては、8/25 には上げ潮時に 0~1km 付近の底層を中心に濃度が高くなっている様子が見て取れる。9/22 にも上げ潮時に-1.5~0km 付近で若干濃度が高くなっているように見えるが、8/25 と比べると非常に濃度が小さい。

DO に関しては、河口付近で濃度の高い水塊が潮汐変動により移動しているが、これは Chl.a が酸素を生産していることが原因であると考えられる。9/22 は Chl.a 濃度レベルが特に高かったこともあり DO 濃度の高い範囲が広範囲に渡っている。また、上流側でも濃度が高いがこれは河川水が高い DO レベルであることを示しているものと考えられる。

次に 8/9 における Chl.a、濁度、DO の空間分布の潮汐変動に伴う時間変化を図 4-2-3 に示す。

Chl.a に関しては、8/25 における結果と同様、東京湾との関連も見られるが、全体的に濃度が高く、特に上げ潮時には、その傾向が顕著である。これは日射量が増加した事と関連しているものと考えられる。

濁度に関しては、8/25 における結果と同様に上げ潮時に高くなっていることが分かり、濃度レベルは 8/25 に比べて高くなっている。また、濃度レベルの高い範囲が広範囲に及んでいることが見て取れる。

DO に関しては、8/25 や 9/22 と同様の傾向が見られるが、河川上流では Chl.a 濃度が高かったこともあり、DO 濃度も高くなっていることが分かる。

続いて 10/5 における Chl.a、濁度、DO の空間分布の潮汐変動に伴う時間変化を図 4-2-4 に示す。

Chl.a に関しては、8/25 における結果と同様、東京湾との関連が見られる。一方、出水の影響で、河川内では濃度が非常に小さくなっていることが分かる。

濁度に関しては、8/25 における結果と同様に上げ潮時に高くなっていることが分かり、また、出水の影響により上流側で濁度が高くなっていることが分かる。

DO に関しては、8/25 や 9/22 と同様の傾向が見られるが、さらに河口付近で貧酸素水塊が潮汐変動に伴い輸送されていることが見て取れる。

4-2-1 潮汐変動による懸濁態物質挙動

一潮汐観測での濁度の挙動を簡単に示したが、懸濁態物質の挙動を検討する際、その濃度を説明するには移流の効果や巻上げの効果を考えなければならない。ここでは、潮汐変動による濁度の挙動を把握した後で、巻上げの起こる可能性を示す指標としてシーلز数を用いて、濁度濃度をどの程度説明できるかを考察した。

前章の最後に、流動場の特性ということで、潮汐変動による底面摩擦速度の変化を調べたが、それに対応させて、ここでまず、潮汐変動による濁度の挙動を把握するために、一潮汐観測より得られた濁度の底層 1m の平均値をもとめ、これを両隣の値との移動平均をとったものの空間分布を図 4-2-5 に、一潮汐間時間変化を図 4-2-6 にそれぞれ示した。ここから、下げ潮時においては 8/25 と 9/22 を見ると、濁度レベルは低いままであるのに対し、8/9 と 10/5 は 2km～1km 付近で濁度レベルが高くなっており、底質の巻上げがあった可能性が考えられる。一方、上げ潮時については、9/22 を除いていずれも 1.5km～1km 付近で濁度レベルが上がっていることが分かり、これについても底質の巻上げがあった可能性が考えられる。

このような濁度の挙動を説明するために、シーلز数を考える。シーلز数 τ_* は砂礫に作用する流体力と静止摩擦力の比であり、次のように表される。

$$\tau_* = \frac{\rho u_*^2}{(\rho_s - \rho)gd}$$

ここで、 ρ_s 、 d はそれぞれ砂礫の質量密度、粒径であり、質量密度については 2.65 とした。砂礫の粒径については、一潮汐観測を行った日に最も近い日の水質底及び質観測より得られた粒径データのうち、中央粒径 (D_{50}) を用いることとした (8/25→8/30、9/22→9/27、10/5→10/4)。ただし、8/9 については 8/5 の採泥方法が統一されていなかったため、流量の時系列から判断して最も 8/9 に近いデータを示しているであろう 9/27 のデータを用いた。図 4-2-7 と図 4-2-8 にそれぞれシーلز数の一潮汐間での空間変化と時間変化を示す。これらより、シーلز数は 8/25 と 9/22 については上げ潮時の N5 (0km 地点) と N7 (1km 地点) で、また、若干ではあるが下げ潮時の N7 (1km 地点) で大きくなるのが分かる。また、8/9 については上げ潮時の N3 (-1km 地点)～N7 (1km 地点) で大

きくなっていることが分かる。下げ潮時についても値は小さくはなるが、基本ケースの 8/25 や 9/22 に比べてもシールズ数が大きくなっていることが分かる。10/5 については、後で示すようにデータとして用いた中央粒径が出水後であったために大きくなり、これによりシールズ数は小さくなっている。

このように評価したシールズ数が、どの程度濁度の挙動を評価できるのかを調べるために、図 4-2-9(a) に濁度とシールズ数の空間変化を示した。濁度濃度とシールズ数の空間解像度が異なるためにピークがびたりと一致することは難しいということ考慮しなければならない。この図から、濁度は空間的にある一定のレベルが存在していて、それより大きくなっている部分が、シールズ数の大きくなっている部分と概ね対応していることが、8/25 や 8/9 については見受けられる。しかし、9/22 については、流動場、そしてシールズ数はほぼ 8/25 と同様の傾向を示していたにもかかわらず、ほとんど濁度が高くならなかった。また 10/5 については、シールズ数は小さくなっているが濁度レベルは高くなっている。これについては代表粒径として選んだ中央粒径が大きすぎたことが考えられる。一応 10/5 についてはシールズ数を求める際の粒径に D_{10} を用いて同様の図を図 4-2-9(b) に示した。シールズ数のピークに対して濁度も大きくなっていることを表せるようになった。さらに、8/30 のデータから得られた D_{50} をすべてに対して用いて求めたものを図 4-2-9(c) に示した。10/5 についても巻き上がっているものは細粒であることを考えればこのような評価も可能であると考えられる。これを見ても 9/22 を除けばピークがずれてしまっているものも見受けられるが、概ねシールズ数の大きいところで濁度濃度も高くなっている傾向が見られる。

このように、上げ潮時や、下げ潮時にも底面摩擦速度の大きくなる時には濁度レベルが高くなることは、流動場と粒径から大まかに説明できるものもあるが、9/22 のように説明できないものもある。これについては移流やフロック化、沈降、巻上げのより詳細な仕組みなど、濁度レベルを左右するその他の仕組みについて、更なる調査が必要であることを物語っている。また、シールズ数においてもどの粒径を用いるかにより大きく傾向を変えることがあるので注意が必要である。巻き上がるのは小さい粒径であることを考えれば小さい粒径を採用するのも妥当であると考えられるが、一方でそれは巻き上がりやすさの指標としてはその役割を果たせないようにも思われる。

これまでの考察から、濁度レベルが上げ潮時に高くなることが分かったが、このことは上げ潮時に濁度が上流側へ輸送される可能性のあることを示している。そこで、一潮汐観測において調査した範囲内で、どの程度の濁度輸送量があるのかを流速データと濁度データから、時間解像度が 12 時間で 6 個と少ないながらも次の式により各測点における濁度フラックスと濁度の一潮汐間輸送量を求めてみた。

$$\text{濁度flux} = \int_c^h c \cdot u dz$$

$$\text{濁度輸送量} = \int_{run1}^{run6} \int_c^h c \cdot u dz dt$$

図 4-2-10 に 8/25、8/9、10/5 の 3 回の一潮汐観測より得られた、N5(0km 地点)と N9(3km 地点)

における単位幅当たりの濁質輸送量を示した。これをみると、基本ケースとして捉えた 8/25 は下流側の N5 では上流側への輸送があるのに対し、上流側の N9 では下流向きの輸送となっていることが分かる。一方潮汐振幅の大きかった 8/9 は、N5 では輸送がほぼ 0 となっている。これは 8/25 に比べ下げ潮時にも底面摩擦速度が大きいために下流向きの輸送が生じるためである。一方 N9 では上流側への輸送となっていることが分かる。これは 8/25 に比べ上げ潮時の巻上げがより上流側まで伝わり、これに対し下げ潮時の輸送はこれと比べ小さかったことが原因である。また、10/5 については、N5、N9 ともに下流側への輸送となっており、出水直後は濁質の輸送は下流側に向いていることが分かる。

ここで、底層 1m に限ってそのフラックスに着目するために、図 4-2-11 に底層 1m の N5(0km 地点)と N9(3km 地点)における単位幅当たりの濁度フラックスを示した。これを見ると、8/25 は N5 の下流側の輸送量は N9 に比べ大きくなっており、潮汐による巻上げ効果が下流側で大きいことを示している。図 4-2-11 (b) に、このフラックスの時間変化を示しているが、この図からも明らかである。8/9 については、N5 では上げ潮時にも下げ潮時にも混合があるために両方において輸送が生じていることがフラックスの時間変化により良く分かる。このため両者が打ち消しあうために、一潮汐間の輸送量は小さいものとなっている。また N9 の結果から、上流側へ行くと上げ潮時のほうが輸送量が大きいことが分かるが、これは摩擦速度に大きな差は無いものの、下げ潮時に濁度レベルが上げ潮時ほど上がらなかったためであると考えられ、移流など他の効果の寄与も考えられる。10/5 については、全水深で見ると全く異なった様子を示しており、N5 においては、下げ潮時は底層では濁度レベルは上がらないために流下方向への輸送は少なく、底面摩擦速度の大きくなる上げ潮時に上流側への輸送があり、一潮汐間では上流側への輸送が多くなっている。N9 では上げ潮の効果が弱まり、下流向きのフラックスは小さくなる。

この潮汐変動による濁質の輸送により、底質環境への影響が予想されるが、これについては 4-3 節で述べることとする。

4-2-2 潮汐変動による Chl.a 量挙動

次に、Chl.a について、潮汐変動による挙動を調べる。先に示したように、多摩川は赤潮に悩まされることの多い東京湾と接しているため、潮汐による Chl.a の輸送量は多いものと考えられる。

図 4-2-12 に N3(-1km 地点)と N9(3km 地点)における Chl.a の水深平均値の時間変化を示した。河口に近い N3 では満潮時に Chl.a 濃度が高くなっていることが多く、逆に干潮時には濃度が低くなっているのに対し、上流の N9 では N3 ほど濃度変化が見られないことから、河口付近で Chl.a 量がダイナミックに変動していることが考えられる。

河口域全体での Chl.a 量の変動を評価するために、N1~N11 までのすべての観測点(ただし 9/22 については N2~N11)における Chl.a 濃度の平均値を求めることで、その時点での Chl.a 量を評価し、一潮汐の間にどれだけの変動があるのかを図 4-2-13 に示した。これより特に 8/9 や 9/22 では河口内の Chl.a 量がダイナミックに変動していることが分かる。また、9/22 以外はこの一潮汐の間で東京湾や上流側からの流入量があったことが示され、8/25 や 10/5 については図 4-2-1、図

4-2-4 の空間分布から判断して東京湾からの流入が大きかったことが考えられる。いずれにせよ、多摩川河口域は東京湾や河川内の状態により Chl.a 量の流入の激しいところであることが分かる。

また、図 4-2-14 に、4 回の観測での N3 における一潮汐間での Chl.a の単位幅当たりの輸送量を濁度のときと同じように求めた。8/9 を除きいずれも東京湾から河口内への輸送があることを示している。このように東京湾から多くの場合に Chl.a が入ってくるということは有機物供給の面で多摩川河口域の生態系にとって重要であると考えられる。

4-2-3 潮汐変動による懸濁態物質挙動

ここでは懸濁態濁質の中身について、有機物に着目して調べることにする。図 4-2-15、図 4-2-16、図 4-2-17 に N3(-1km 地点)と N9(3km 地点)における、懸濁態有機炭素(POC)、溶存態有機炭素(DOC)、全有機物炭素(TOC)の一潮汐間での時間変化を示した。そして図 4-2-18 に TOC に占める POC の割合を示した。これらの図から N3 においては、9/22 を除いて表層と底層で差が大きいことが分かる。これは 9/22 以外は河口付近で底質の巻き上げによる POC への寄与があったため、これが影響しているものと考えられる。本研究では、底質の有機物量を測定しなかったため、底質の巻き上げりが水質にどのような影響を与えるのかを評価できないが、これらの図より底質の巻き上げりが水質に与える影響があることが示唆される。

一方、上流側の N9 では表層と底層で N3 ほどの差が見られず、これは N3 に比べて異質の巻き上げりが少ないために、水質への影響も小さいためであると考えられる。

4-3 河口域における水質及び底質環境の季節変化

これまでは潮汐変動に着目してきたが、ここからは季節変動に着目して河口域を捉えることとする。まず、六郷橋における一年間を通じたデータから河口域の水質環境の特徴を把握する。次に観測結果より得られたデータから空間的な特徴についても考察する。また、季節変化を考えるうえで最もインパクトの大きい出水について、出水時観測からその特徴を把握する。最後に底質の季節変化について議論する。

4-3-1 六郷橋における水質環境の季節変化

2-6 節で述べたように河口より 5.5km 地点のところで水質データが 1 時間間隔で記録されており、ここではそれを用いて 2002 年の水質の特徴を把握する。図 4-3-1 に 2002 年の一年間にわたって記録された六郷橋の塩化物イオン濃度、水温、濁度、DO の時系列データについて 24 時間幅でスムージングをかけたものを示す。また、参考のため、田園調布堰における流量と河口における水位もあわせて示す。

塩化物イオン濃度をみると、流量の増える 7 月から 10 月にかけて低塩分化していることが分かる。また、大潮の時期に海水がより上流まで浸入するために、低塩分化していることが分かり、大潮、小

潮のサイクルにあわせて塩化物イオン濃度変化の周期が形成されていることが分かる。水温については、日射量の増える夏季に上昇する傾向が見て取れる。

濁度についても、流量の増える7月から10月にかけて、高濃度となる傾向がみられ、また、11月以降は、一年のうちでもっとも低濃度になっていることが分かる。最後にDOについては、出水に対応して高濃度となることが分かるが、これとは別に、特に9月以降に周期的な変動がみられることが分かる。これについては、塩化物イオン濃度との相関を図4-3-2に示したが、両者に負の相関関係があることから、海水の浸入により、DO濃度が下がり、逆に海水の後退とともにDO濃度が上がるということが分かる。

4-3-2 観測結果による6-12月の水質環境の変遷

ここでは一潮汐観測、水質及び底質観測より得られたデータを用いて多摩川河口域の空間的な水質環境特性の季節変化について考察する。

図4-3-3に塩分、水温、Chl.a、濁度、DOの空間分布を示した。水質底質観測では干潮時に調査を行ったので、一潮汐観測のデータを用いる際は干潮時のものを示している。これらのデータを考える際に、出水が8/21と10/1にあったことが重要となる。

塩分については、六郷橋のデータについて検討した際にも述べたように、出水後には塩水が遡上できず、河口付近に押し込められていること、また、小潮時の干潮時には塩水が上流のほうまで差し込んでいるのに対し、大潮時の干潮時には海水が河口付近まで引いていることが分かる。

水温については、夏に高く、冬に低くなるという当然の結果とともに、夏は河川水のほうが海水よりも水温が高かったのに対し、9/27以降、河川水に比べ海水の方が、水温が高くなっているということが見て取れる。

Chl.aについては、9月くらいまでは高いレベルを維持しており、特に東京湾からの流入が大きな特徴としてあげられるが、一方、出水により濃度が著しく下がり、8/21の出水の後、濃度の低かった状態が、東京湾からの流入などにより、徐々に回復していく様子も見て取れる。

濁度については、出水直後に河川内全体で濃度が高くなっていることが分かる。また河口付近の、-2km地点から2km地点の範囲では、これまで見てきたように巻き上がりがおきやすいと考えられるために、季節に寄らず、高濃度である傾向がみられる。

DOについては、上流側では季節に寄らず、高いDOレベルを維持しているのに対し、河口付近では、夏季はChl.a濃度が高いためにプランクトンが放出する酸素のために表層付近でDO濃度が高くなっていることが分かる。しかし、8/5や8/9にみられるように、低層付近では貧酸素化している様子も見受けられる。10月以降になると、Chl.a濃度が低くなるために、DO濃度が上流側よりも低くなる。これ

は東京湾の貧酸素水塊がまだ残っていることの影響もあるものと考えられる。
続いて、懸濁態物質の中身についてであるが、これについては巻末の Appendix
に載せる。

4-3-3 出水時に絞った水質環境の変遷

季節変化を考えるうえで出水時のインパクトは大きい。そこで、本研究では出水時観測を8/19～8/21(台風13号)と10/1～10/2(台風21号)に行った。ここではこの観測で得られたデータから出水時の水質変化を把握する。

図4-3-4に最大流量 $917\text{m}^3/\text{s}$ の台風13号にあわせて行った出水時観測により得られたSS、粒径、炭素量の時間変化を示す。また参考データとして図4-3-5に粒度分布図を示した。この出水は流量のピークの前に小さなピークがあり、この小さなピークのときにSSが高くなり、これにあわせて大きな粒径の粒子が流出していることが分かる。様々な大きさの粒子が混合している様子が粒度分布の図からもわかる。そして、約48時間後には平常時の状態に戻っている様子がわかる。また、炭素量についても同様の傾向がみられ、出水中に上がった懸濁態、溶存態の濃度が48時間後には通常時に戻っていることが分かる。

続いて図4-3-6に最大流量 $1607\text{m}^3/\text{s}$ の台風21号にあわせて行った出水時観測により得られたSS、粒径、炭素量の時間変化を示す。また参考データとして図4-3-7に粒度分布図を示した。このときの出水は最大流量が大きかったこともあり、SS量が13号のときよりも大きくなっている。しかし、粒径については流量のピークにあわせて粒径のピークも表れているものの、その値は台風13号の時よりも小さくなっている。PC、DCについてはピークがずれるなどこちらに関しては13号と全く異なった挙動を取っており、今後色々な出水について調べる必要があるのかもしれない。

4-3-4 底質環境の季節変化

これまで水質の季節変化について述べてきたが、最後に底質の季節変化について述べる。図4-3-8～図4-3-11に8/30～11/13までに行われた水質底質観測により得られた底質の粒径データを示した。

8/30の(a)表層3cm粒径分布をみると、N1(-2.5km地点)～N8(1.8km地点)まではシルトの多い分布となっているのに対し、N9より上流側では砂の多い分布となっていることが分かる。また、H1で示したのは、N8の河岸近くに存在する干潟で採取した底質を分析したものであるが、これもシルト分の多い分布となっている。(b)には代表粒径空間分布を示した。代表粒径は D_{10} 、 D_{50} 、 D_{90} を用いた。これをみても2km～3km付近で大きく底質の様子が変わっていることがわかる。

続いて、9/27の底質の様子について考える。9/27は10/1に台風21号があることを考えれば出水前の状態として考えることができる。9/27の底質の様子は8/30と余り変わらないが、N11においては8/30に砂が多かったのに対し、9/27になると細かい粒子が増えたことがみられる。N11は水深が大きくなっている部分であり、一度沈降したものがたまりやすい場所であるため4-2節でみてきたように上げ潮時に濁質が輸送されてN11にたまったことが考えられる。

この後 10/1 に台風 21 号のため出水があり、10/4 の底質状況は大きく変わった。出水時観測の結果にも示したように水中の粒径が大きくなり、これらが堆積した後としての結果である。10/4 の結果をみると明らかなように、N4(0.5km地点)まで砂が覆うような状況へと変化していることが分かる。また、干潟のH1 においても砂が多く占めるようになっていて、ところで出水時観測で採水した粒子に比べ、今回底質に堆積した粒子の粒径はだいぶ大きい。これは出水時観測では表層水しか取ることができず今回堆積したような砂はもっと底層を流れてきたためであると考えられる。

最後に、出水後 43 日後の 11/13 のデータについて考える。粒度分布をみると、だいぶ出水直後の状況とは異なり、砂の割合の多いのはN11(5.5km地点)より上流側であり、それよりも下流側ではシルト分が多くを占めるようになっていくことが分かる。これは、潮汐により細かい粒子が上流側へ運ばれたことによる結果であることが考えられる。しかし、出水前とは違い、粒径の分布範囲が広くまだ、出水の影響が残っていることも見受けられる。

図 4-3-12 に河川内及び干潟の中央粒径の季節変化を示した。ここからも明らかなように出水前から出水後にかけて底質の粒径が大きく変わっていることが分かった。つまり、平水時は河口から 2 km付近まではシルトや泥が多くを占め、それよりも上流側では砂が支配的であるが、出水後には 0.5km地点まで砂が支配的となる。そしてこの状況が潮汐変動による上流側への懸濁態物質輸送により、徐々に出水前の状態へと戻していくという仕組みが存在していることがわかった(図 4-3-13)。

4-4 本章のまとめ

- 潮汐変動による濁度の挙動については、シールド数の大きいところで濁度も大きくなるという関係が見られた。
- 潮汐変動による上流側への懸濁態物質の輸送があることが確認された。基本的には河口 0km 付近で上流側への輸送が大きく、上流へ移るにつれて、輸送量は小さくなる。また、潮汐変動場合には、下げ潮時にも輸送が大きくなるため、正味の輸送量は小さくなる。出水直後の流量の大きい場合には、上流側では、下流側への流出が大きく、上流側への輸送は抑えられる。しかし、河口付近では底層で上流側への輸送があるため、上流側ほど輸送量は大きくない。
- 底質の巻上げが、水質へ与える影響があることを有機態炭素データから示した。
- 水質環境については、六郷橋の連続データにより、大潮時に海水が上流側まで浸入することで DO 濃度が高くなることが分かった。
- 底質環境については、平水時は河口から 2km付近まではシルトや泥が多くを占め、それよりも上流側では砂が支配的であるが、出水後には上流から供給された土砂が堆積し、0.5km地点まで砂が支配的となる。そして、この状況が上で示した潮汐変動による上流側への懸濁態物質輸送により、平水時の状況へと戻っていく。

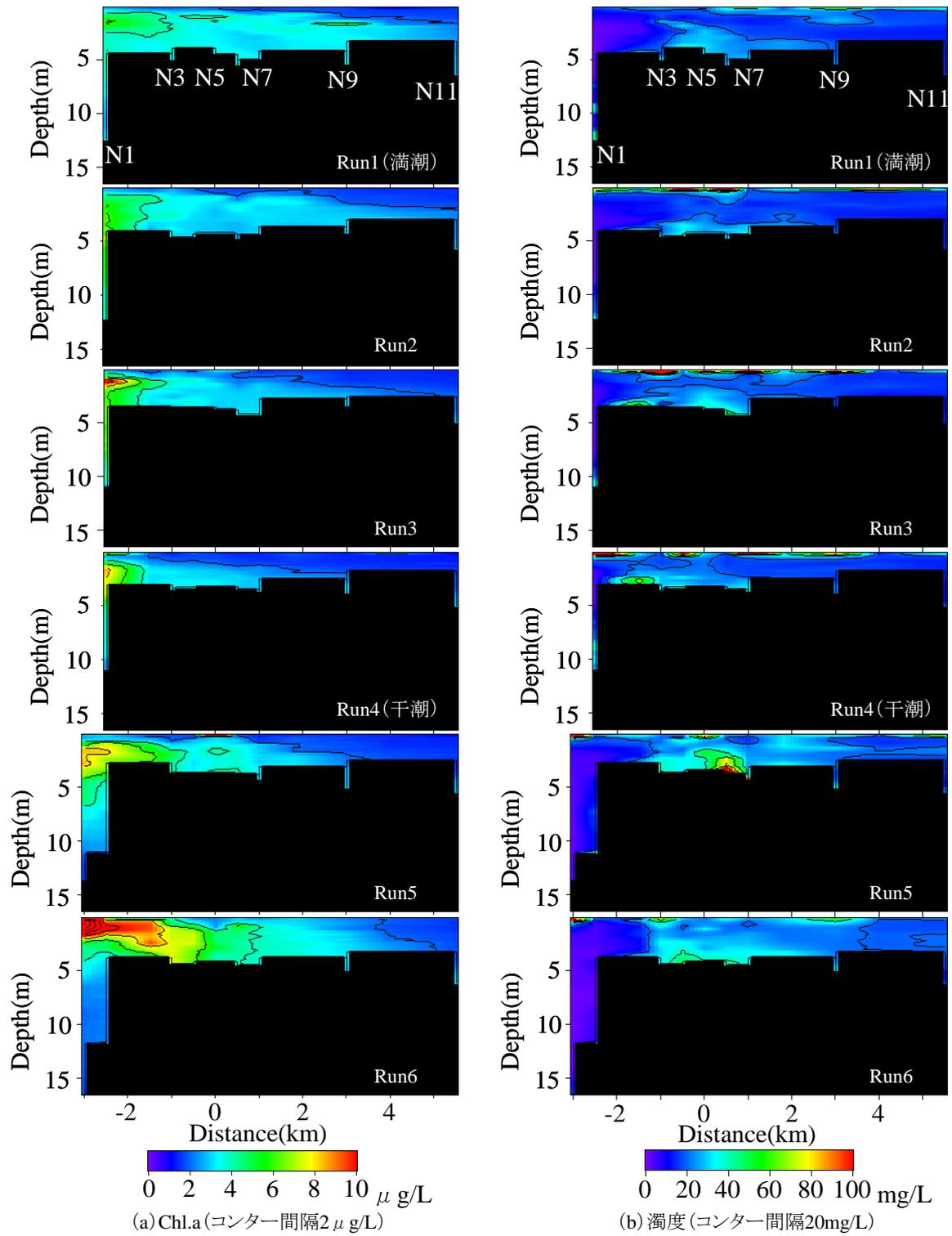


図4-2-1 8/25Chl.a、濁度、DOの時空間分布

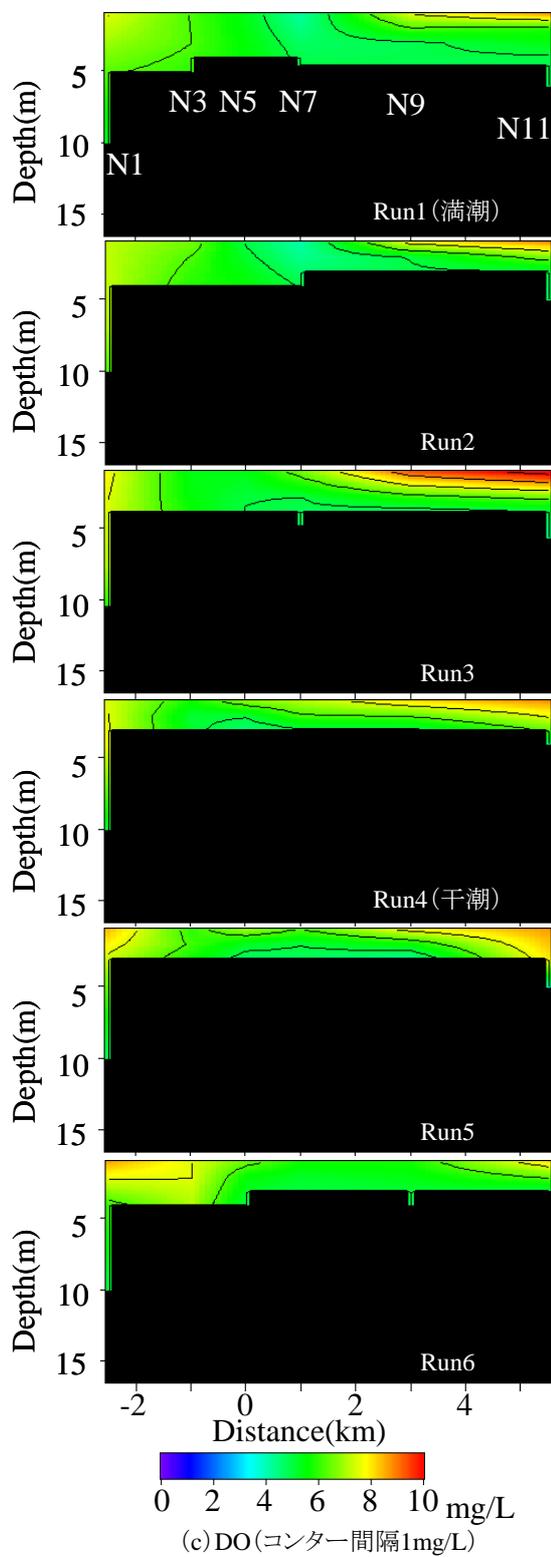


図4-2-1 8/25Chl.a、濁度、DOの時空間分布

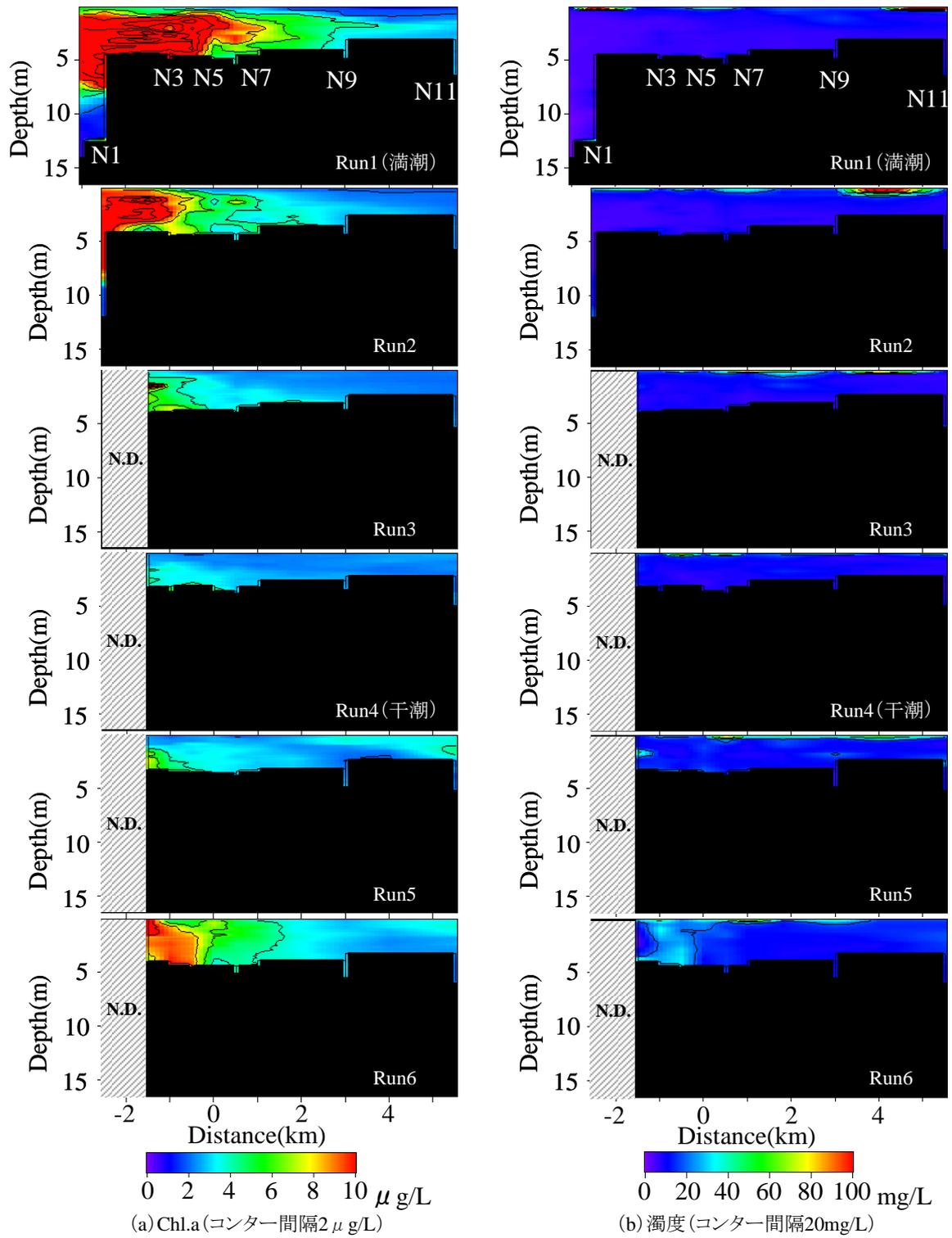


図4-2-2 9/22 Chl.a、濁度、DOの時空間分布

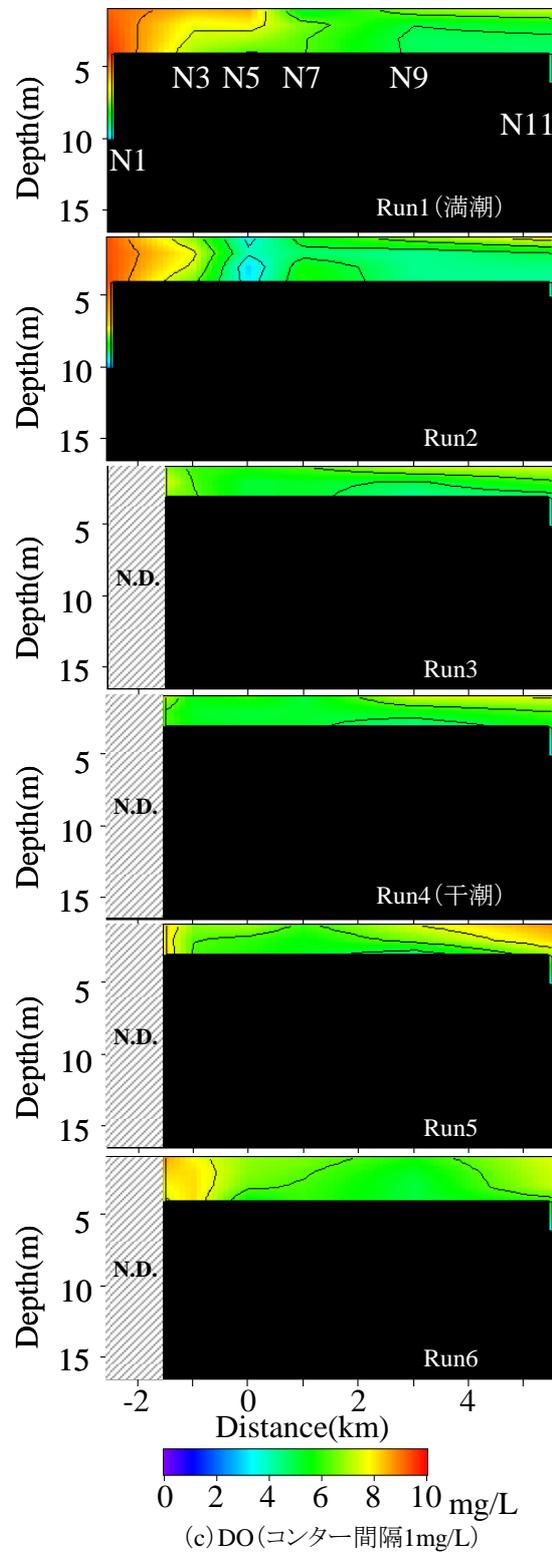


図4-2-2 9/22Chl.a、濁度、DOの時空間分布

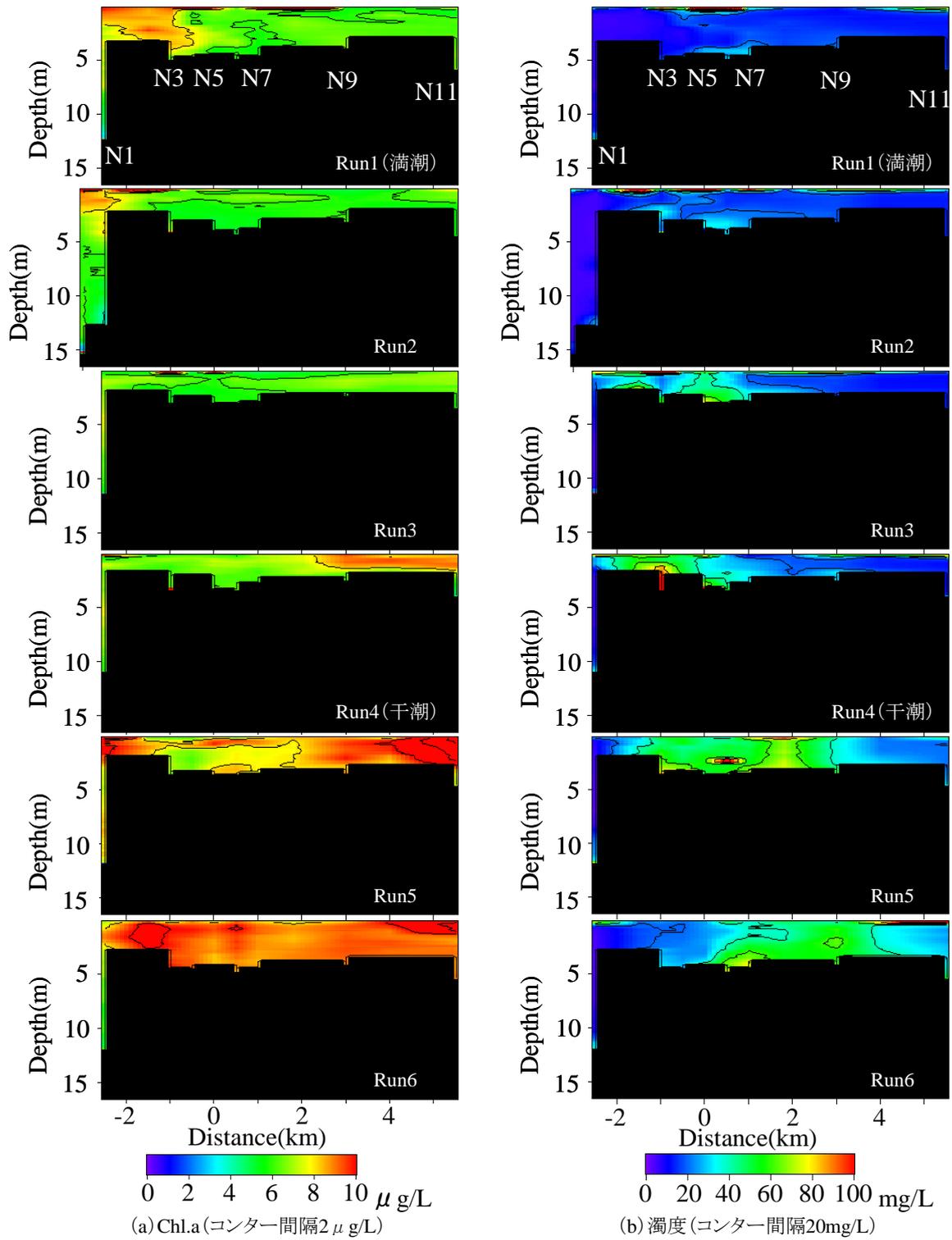


図4-2-3 8/9Chl.a、濁度、DOの時空間分布

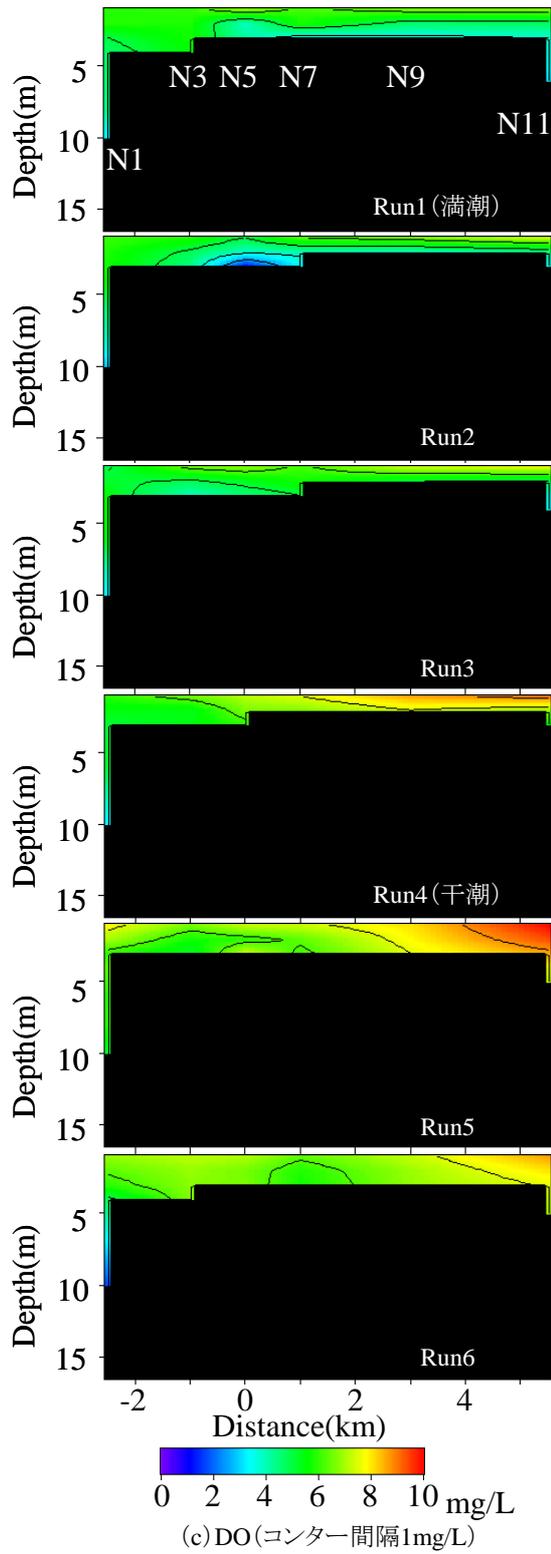


図4-2-3 8/9Chl.a、濁度、DOの時空間分布

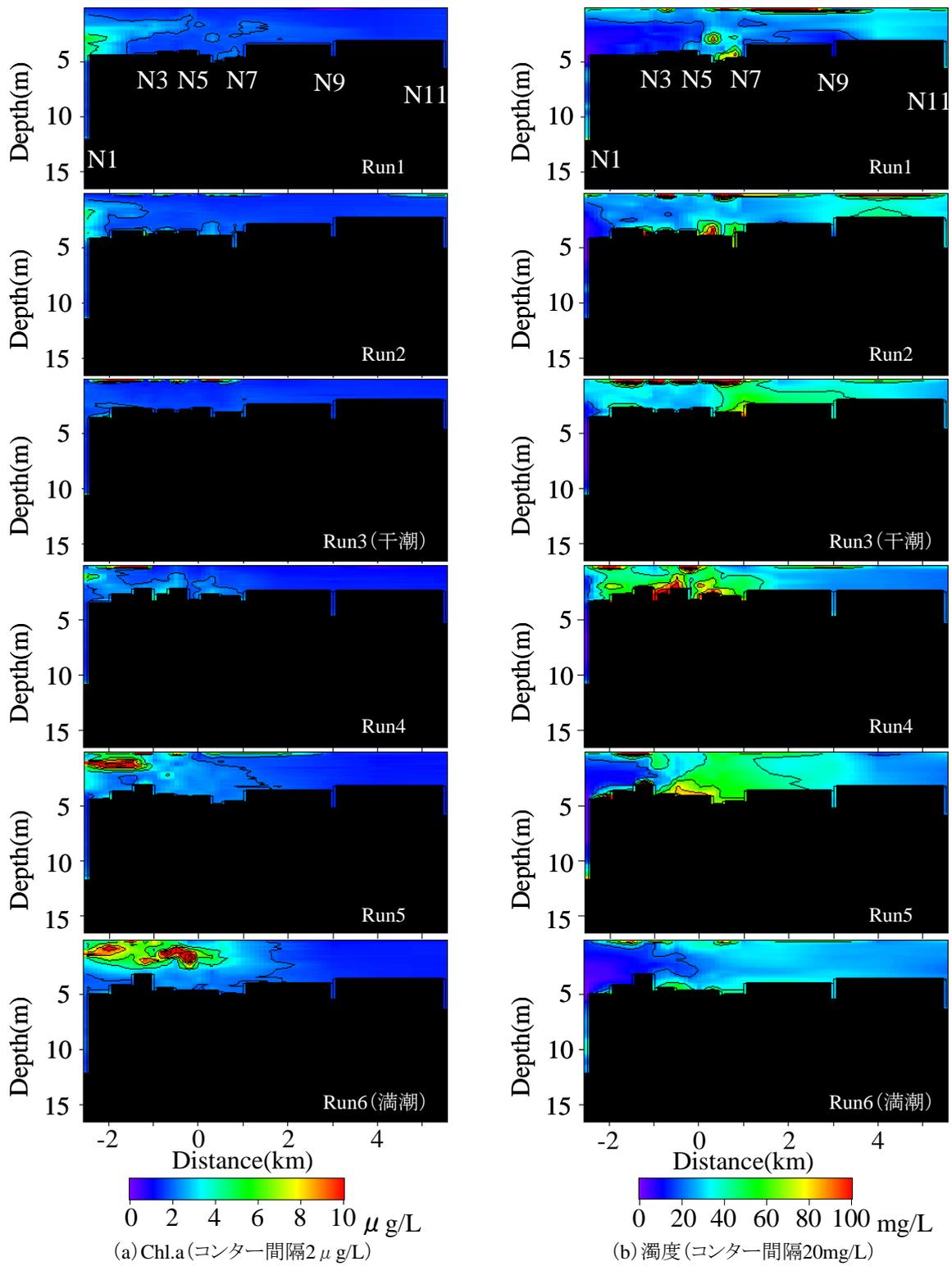


図4-2-4 10/5Chl.a、濁度、DOの時空間分布

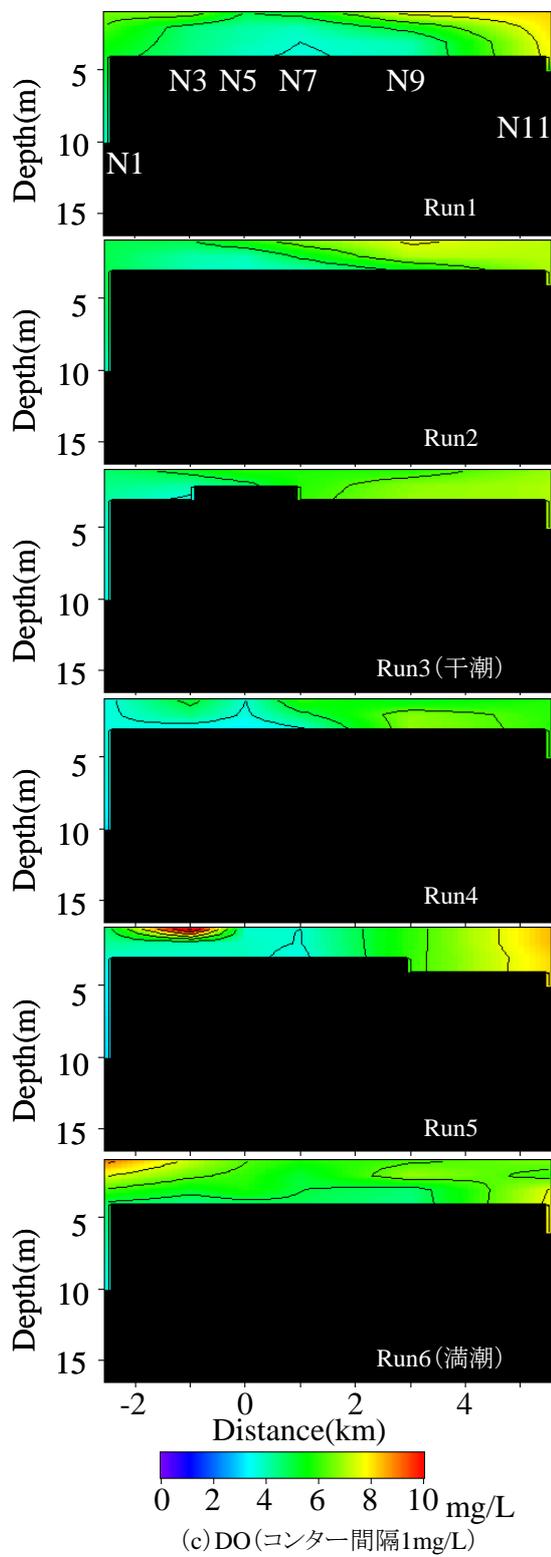


図4-2-4 10/5Chl.a、濁度、DOの時空間分布

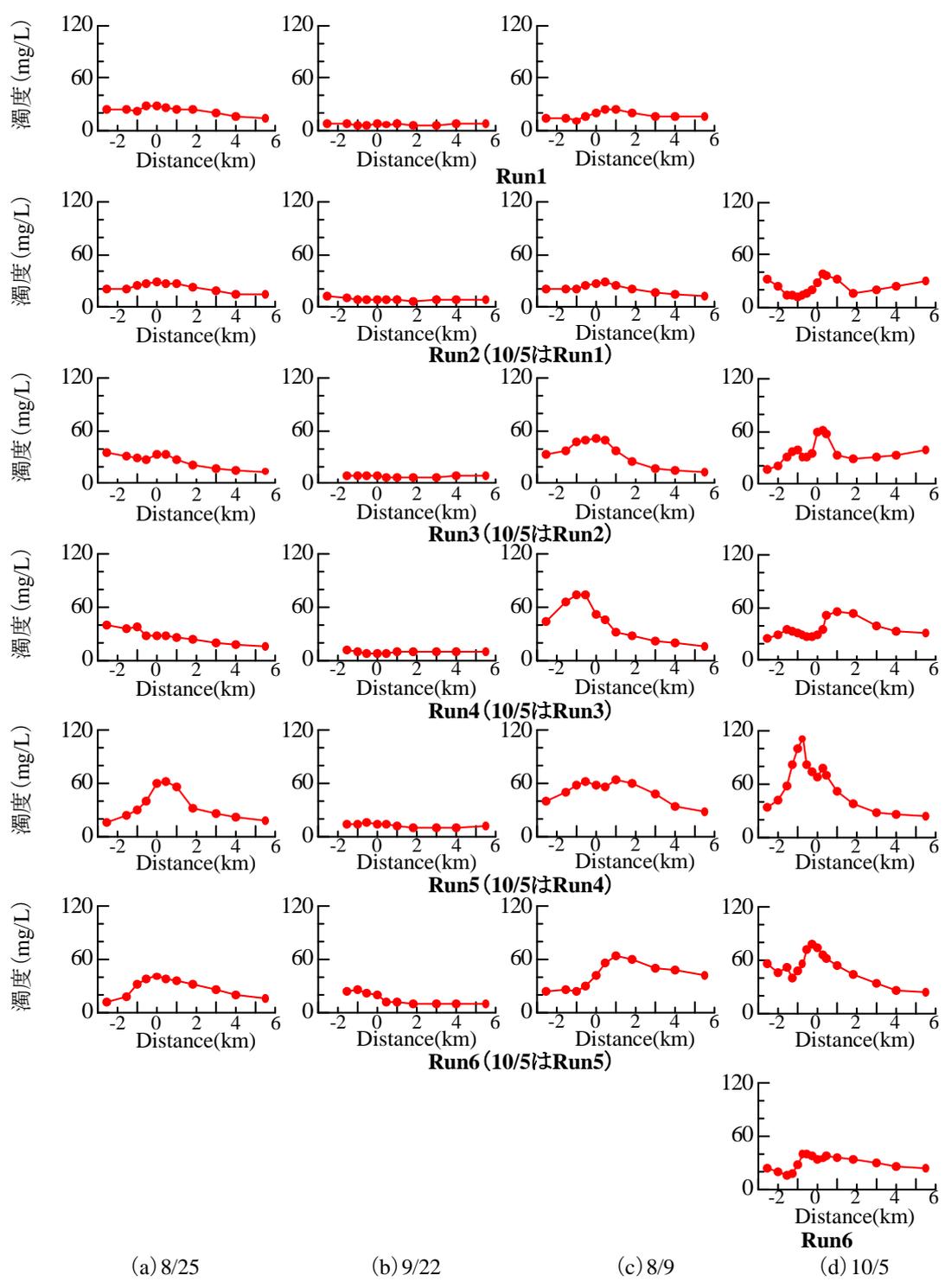


図4-2-5 底層1m濁度空間変化(両隣の値を用いた移動平均値)

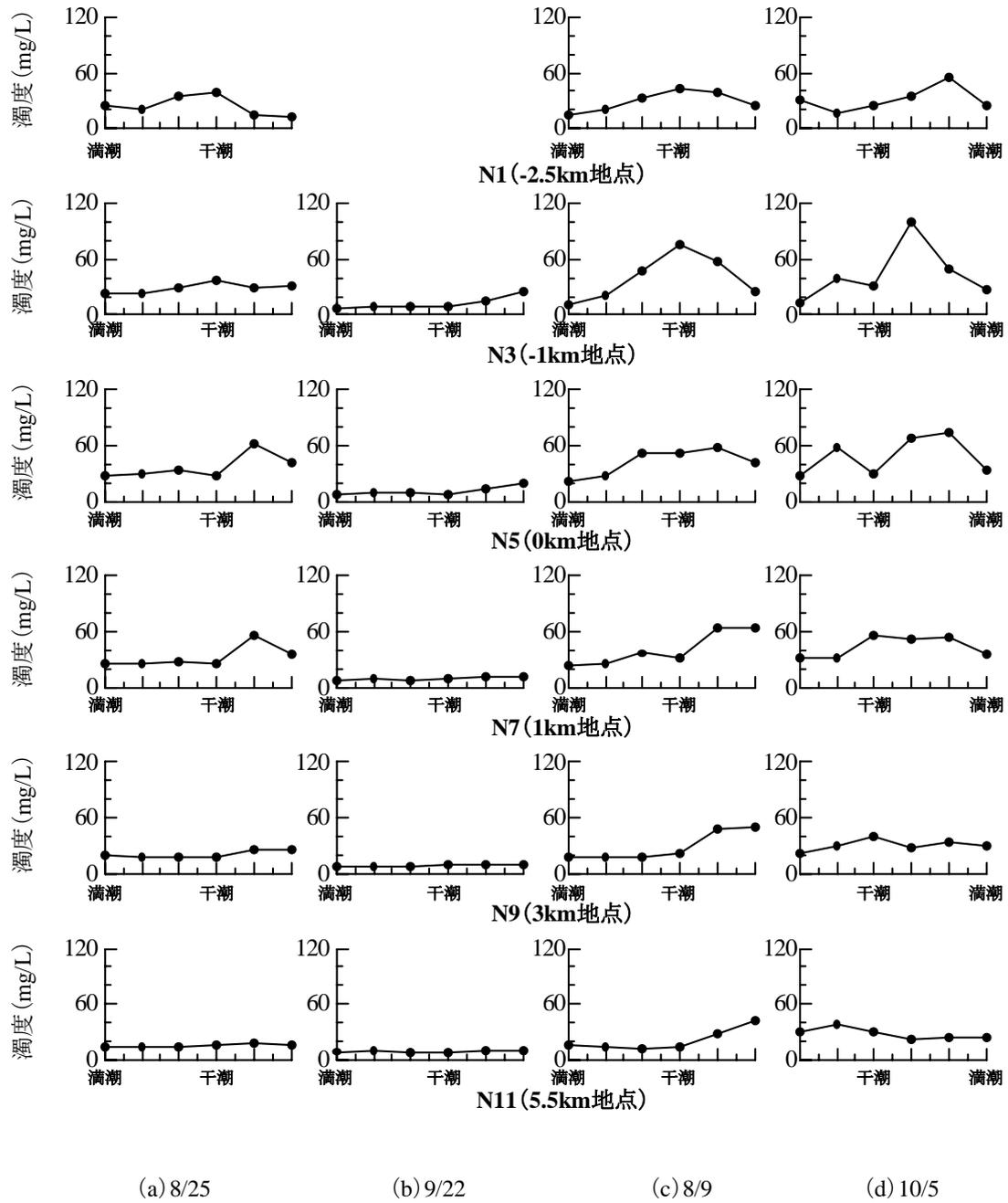


図4-2-6 底層1m濁度時間変化

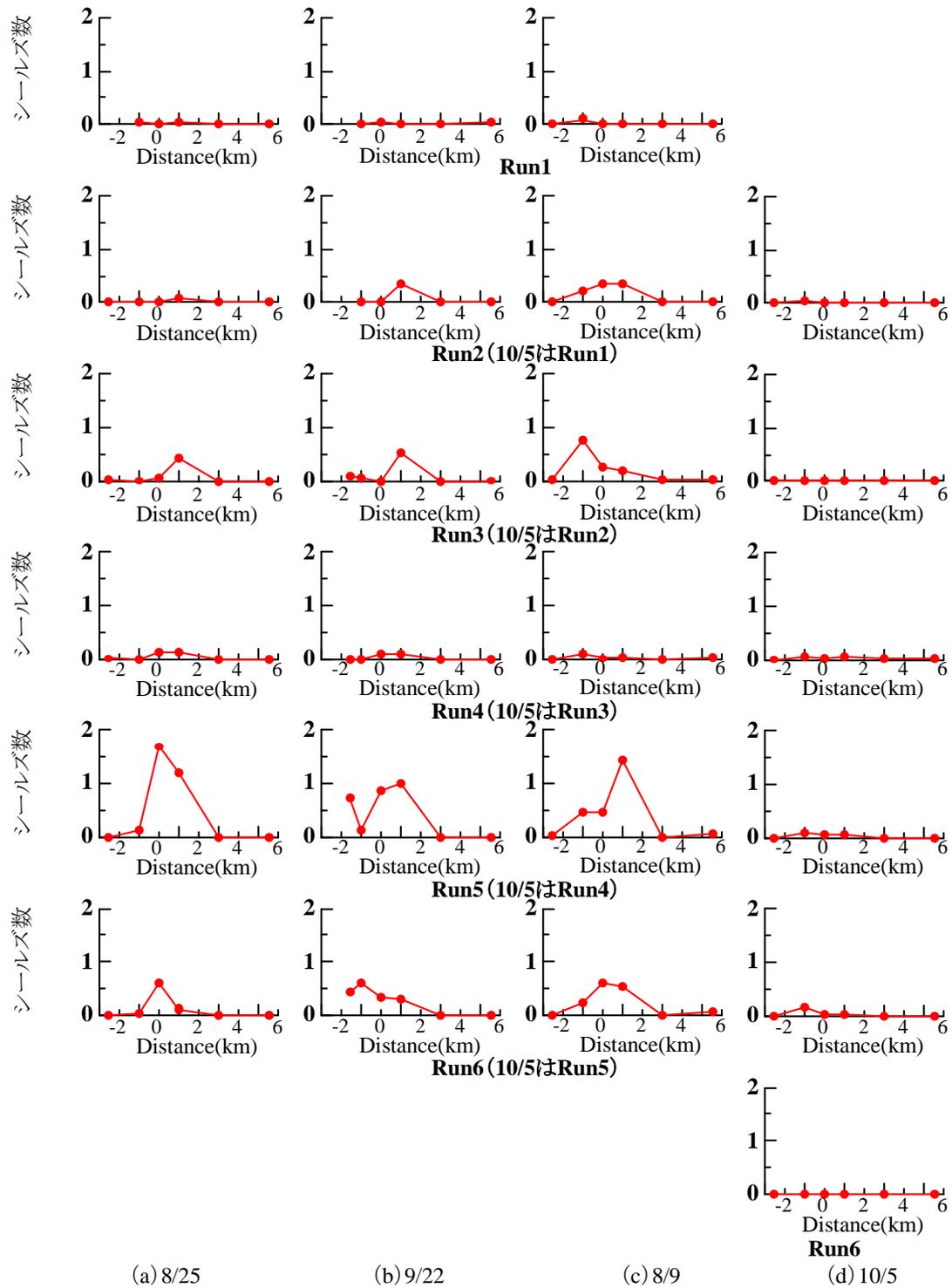


図4-2-7 シールズ数空間変化

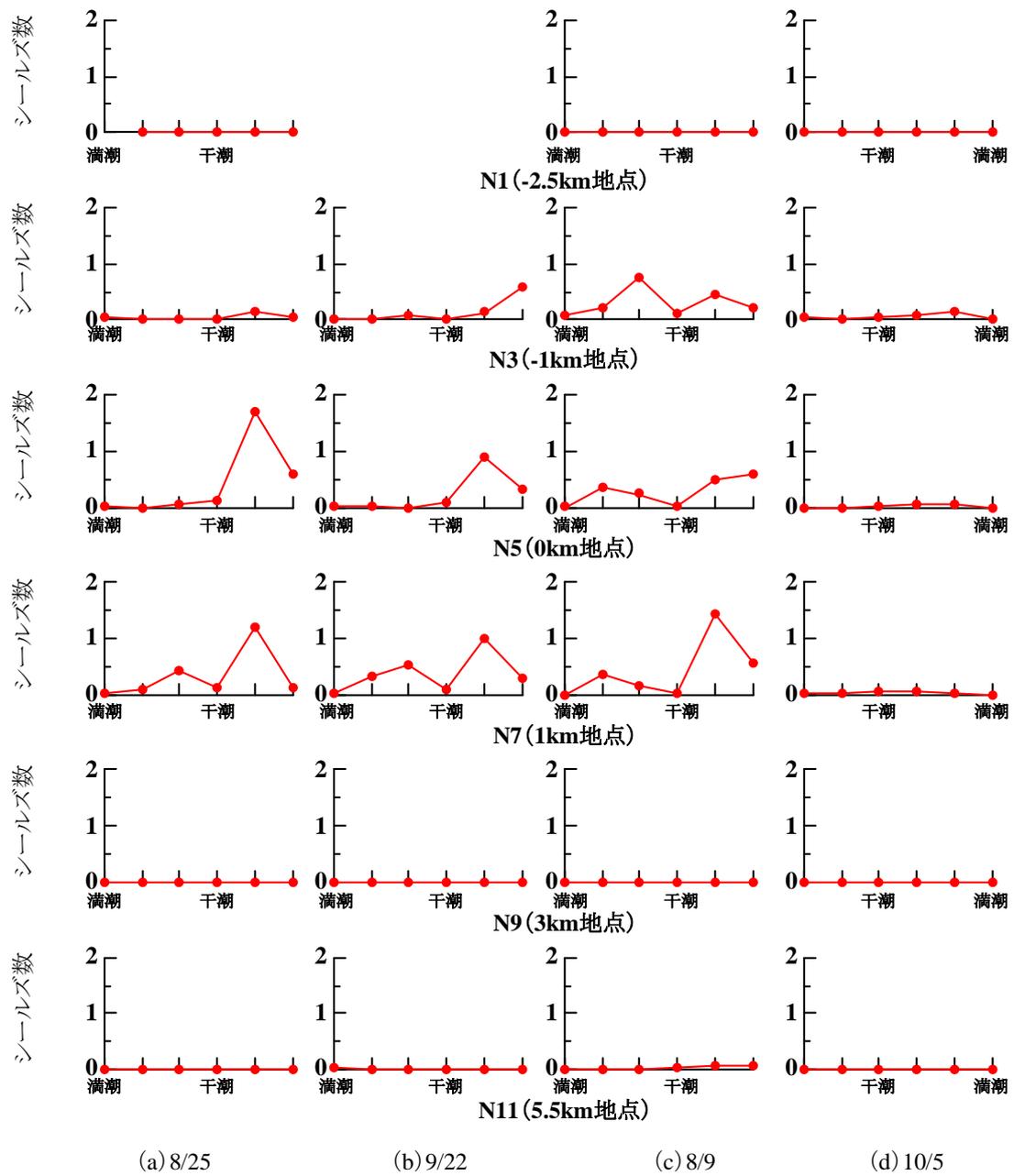


図4-2-8 一潮汐間でのシールズ数時間変化

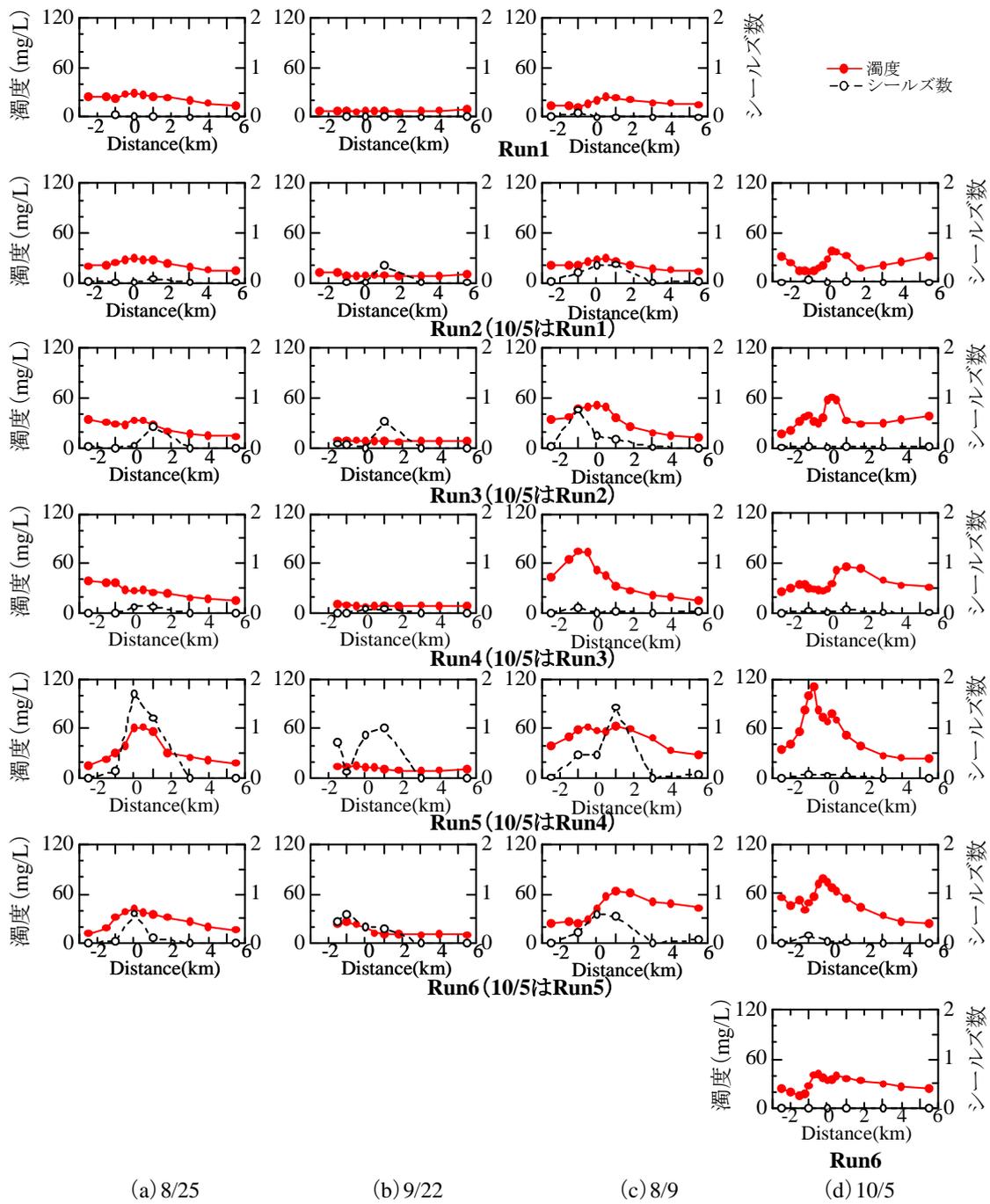


図4-2-9(a) 濁度とシールズ数(D₅₀採用)空間変化

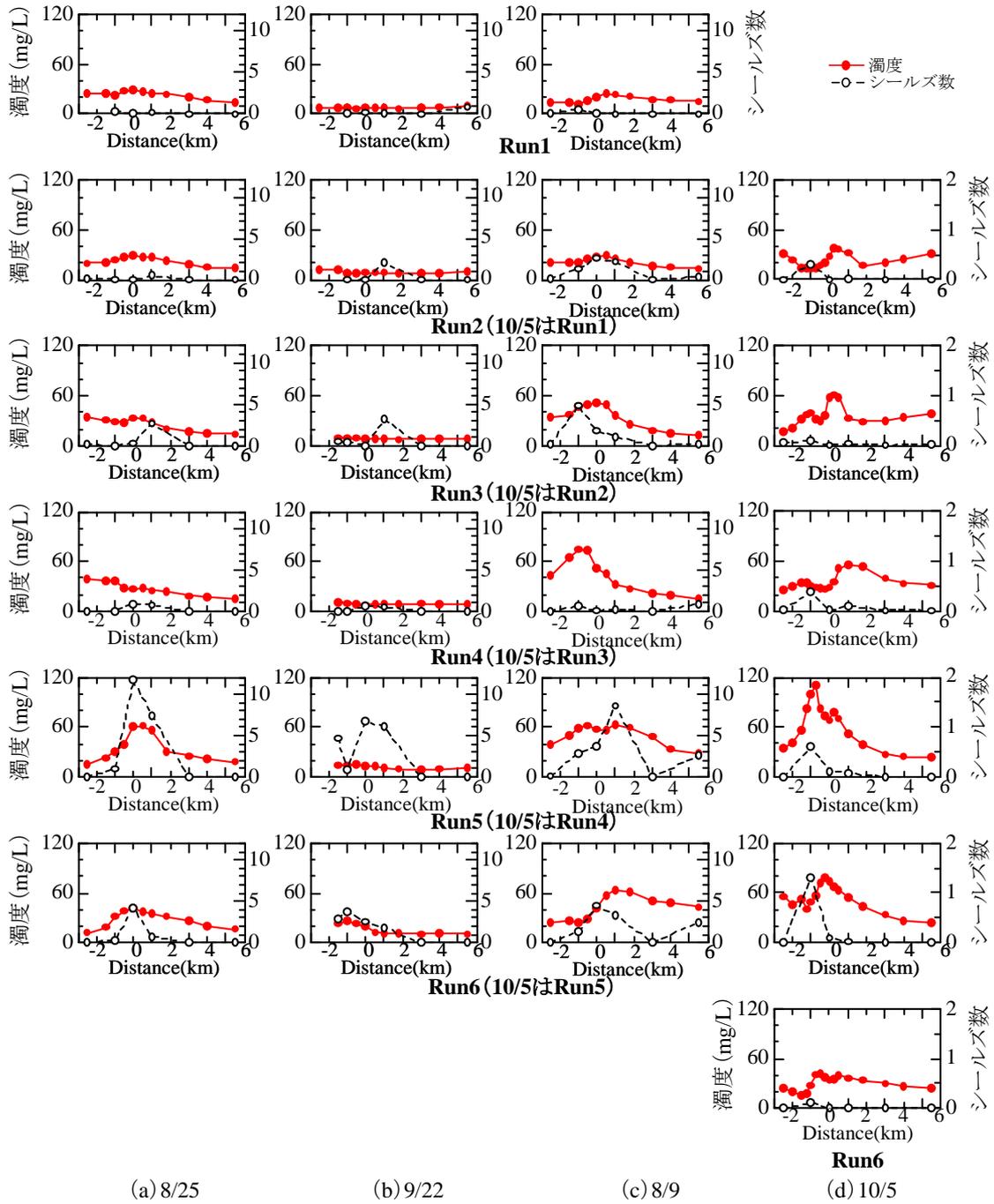


図4-2-9(b) 濁度とシールズ数(D₁₀採用)空間変化

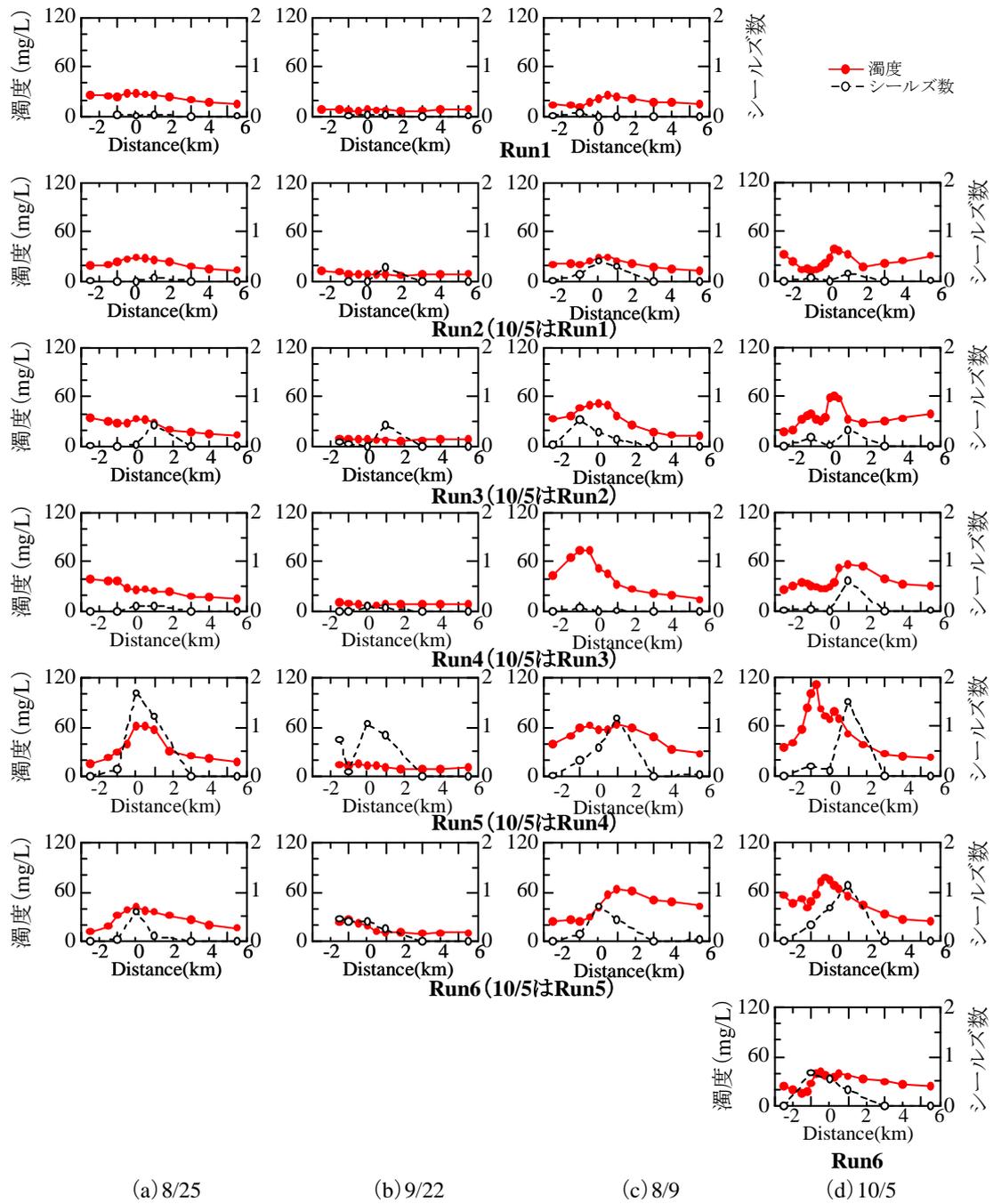


図4-2-9(c) 濁度とシールズ数 (8/30のD₅₀採用) 空間変化

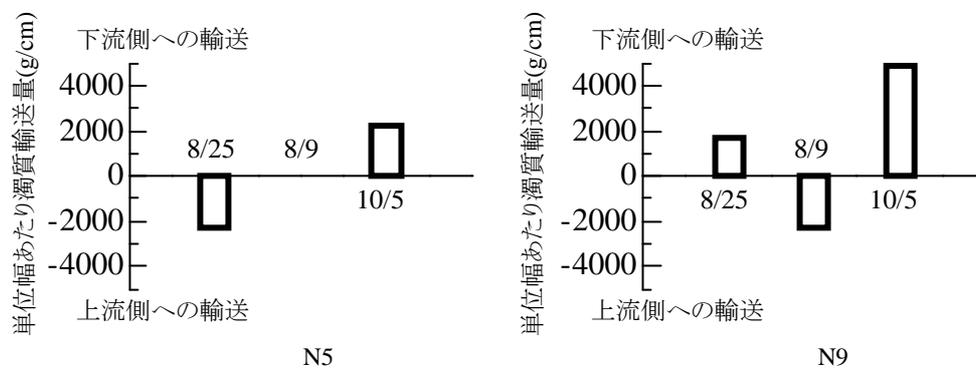


図4-2-10(a) 一潮汐間の全水深単位幅あたり濁質輸送量

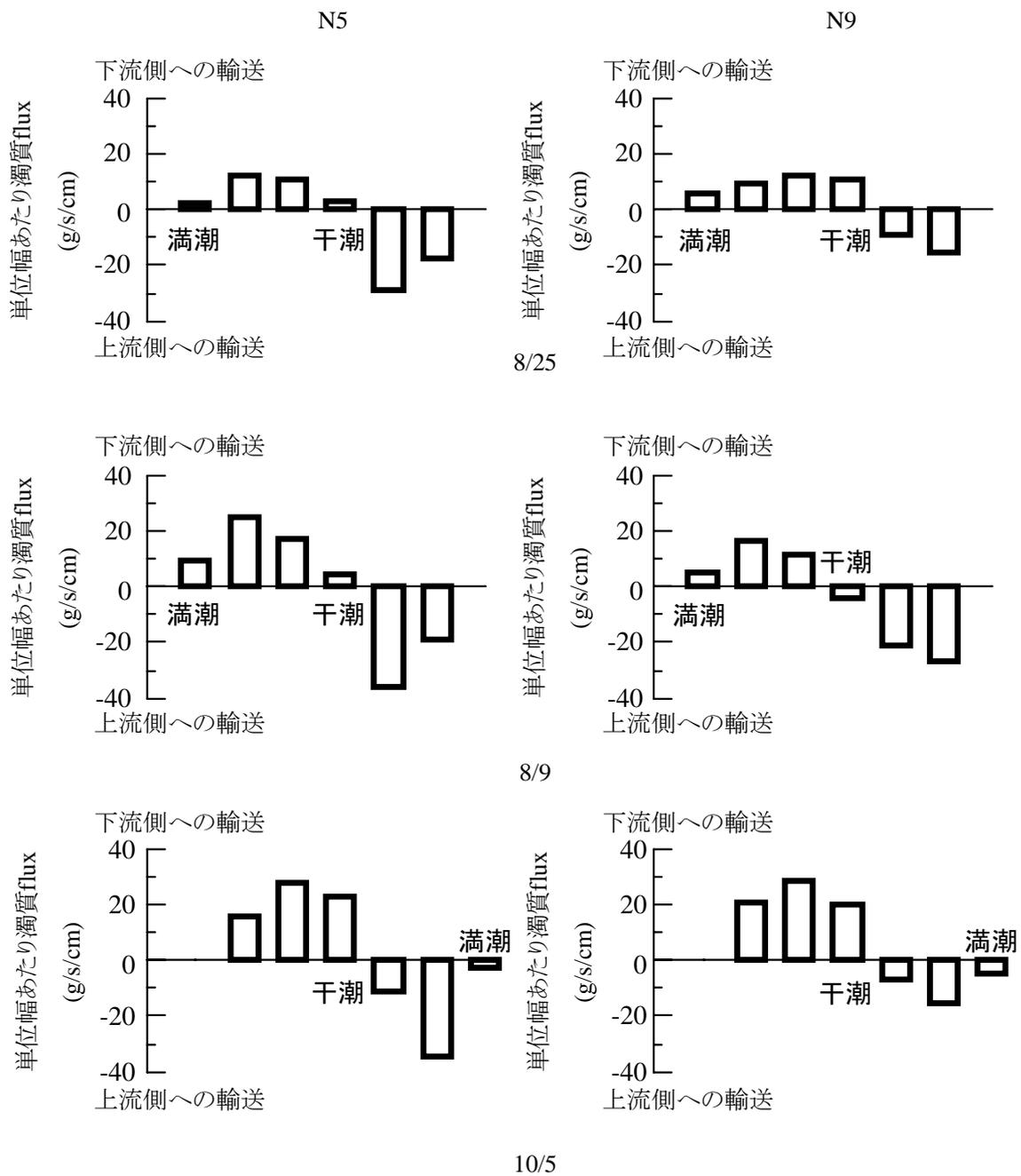


図4-2-10(b) 全水深単位幅あたり濁質flux時間変化

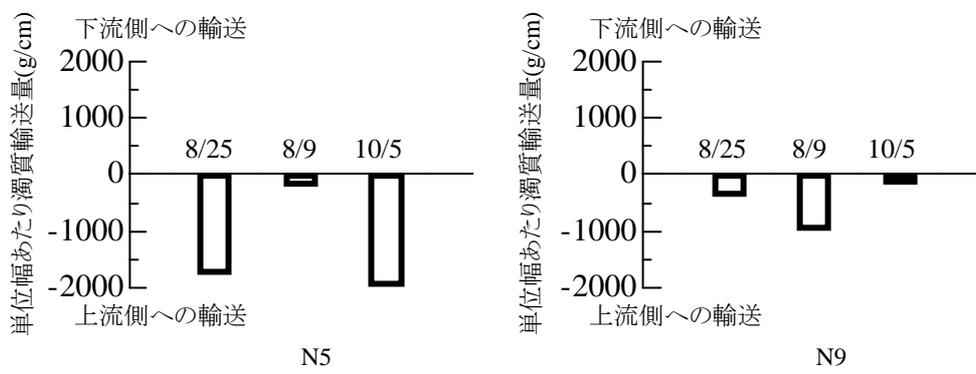


図4-2-11(a) 一潮汐間の底層1mの単位幅あたり濁質輸送量

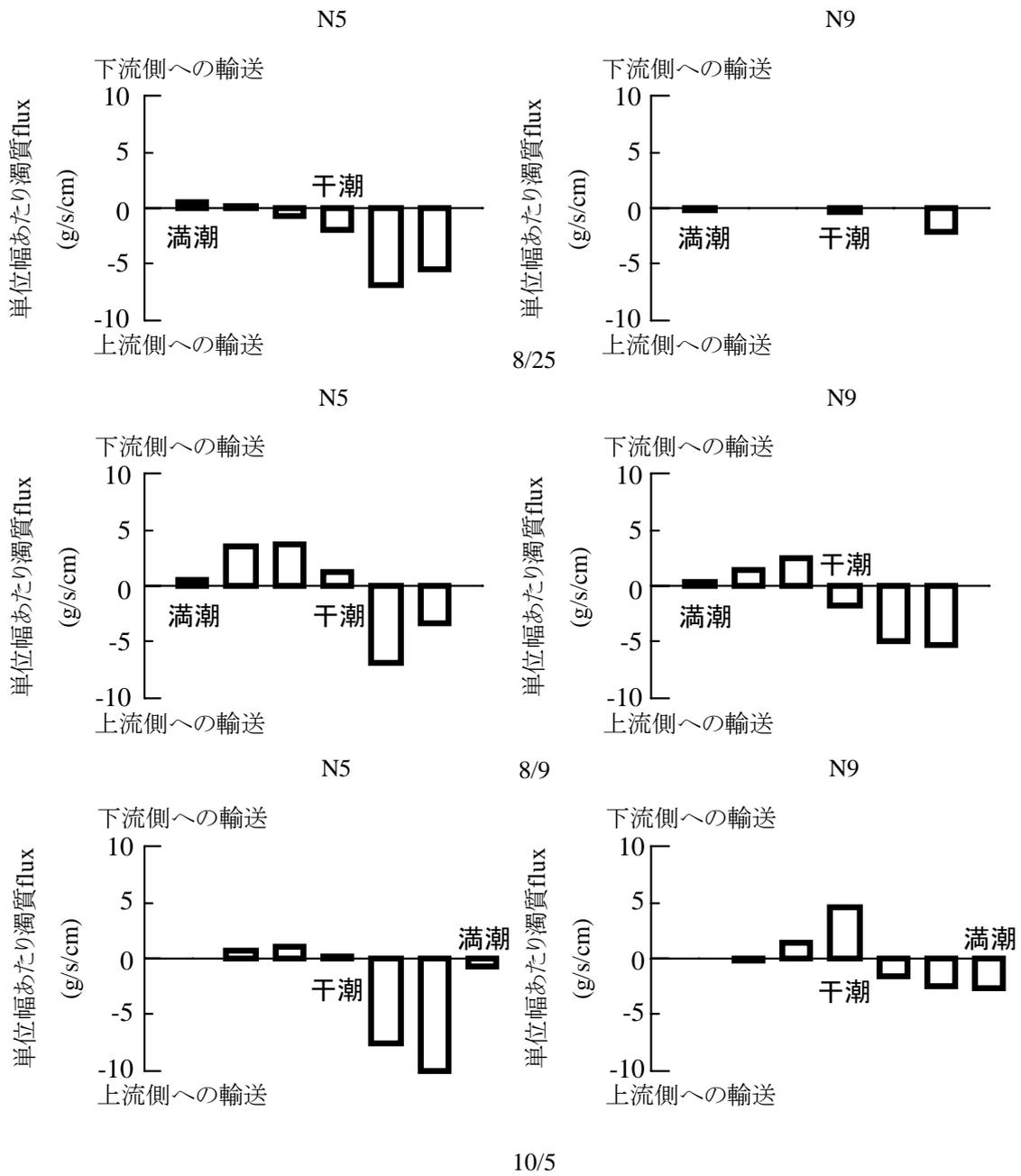


図4-2-11(b) 底層1mの単位幅あたり濁質flux時間変化

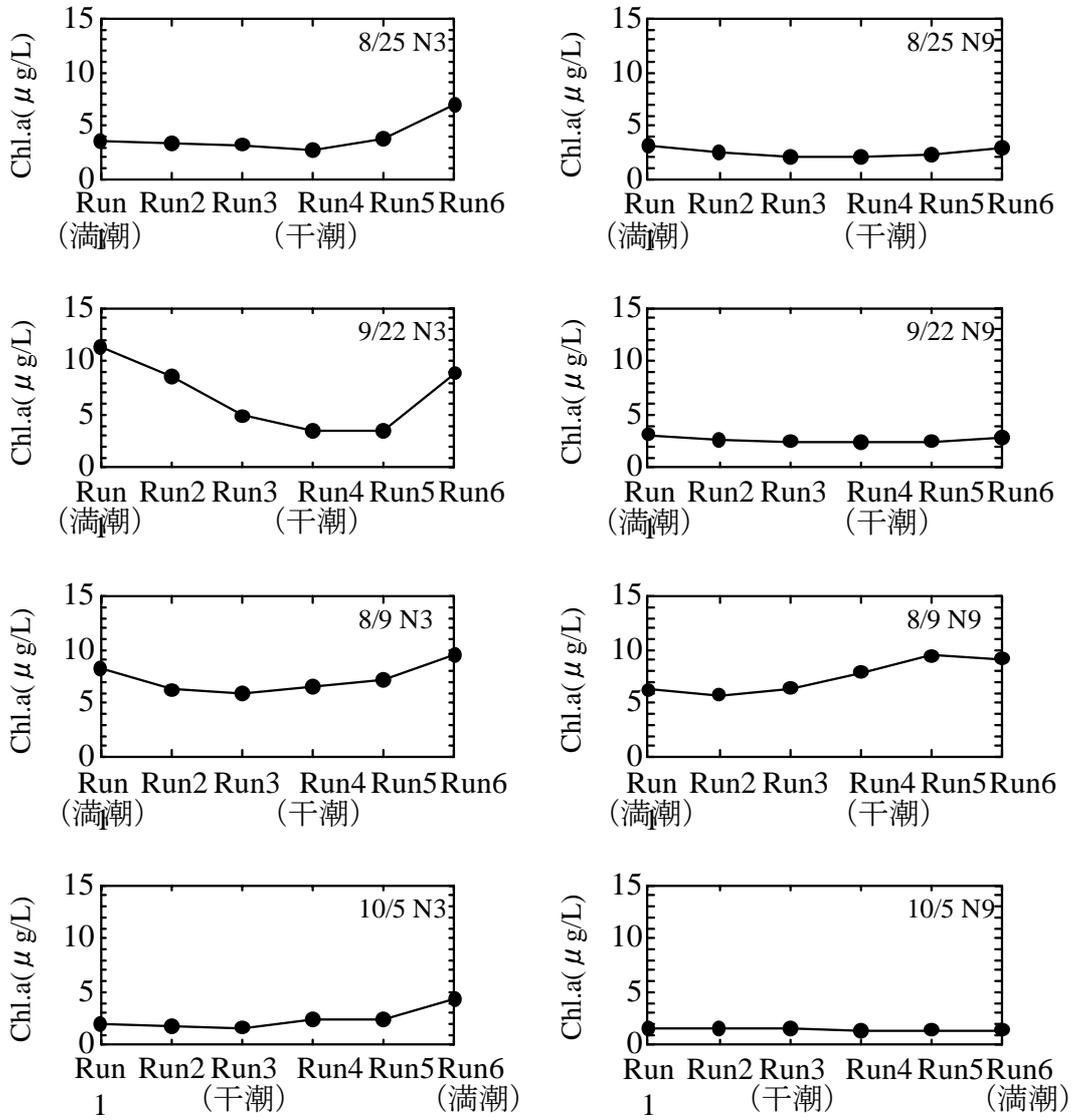


図4-2-12 水深平均Chl.aの一潮汐間推移

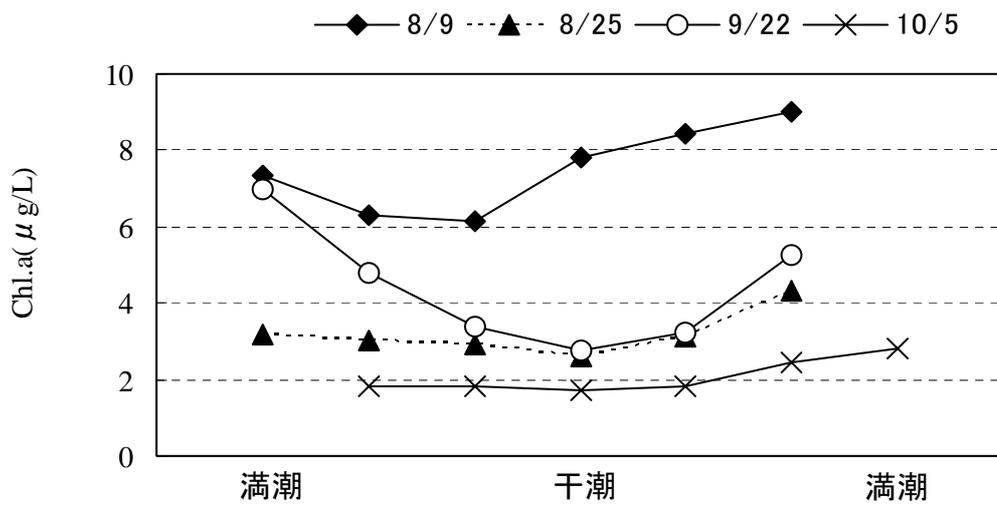


図4-2-13 河口域内のChl.a量平均値一潮汐間推移

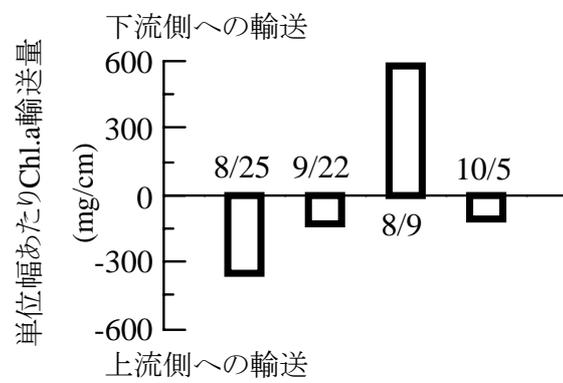


図4-2-14(a) N3における一潮汐間の単位幅あたりChl.a輸送量

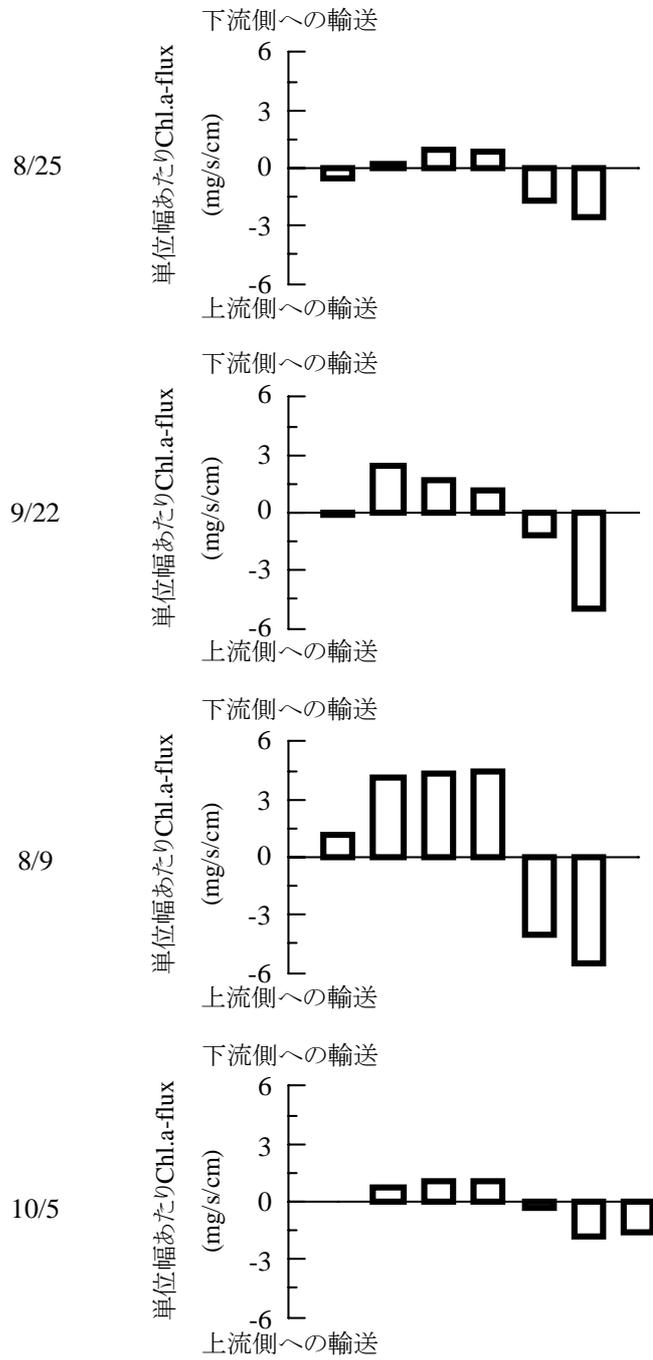


図4-2-14(b) N3における単位幅あたりChl.a-flux時間変化

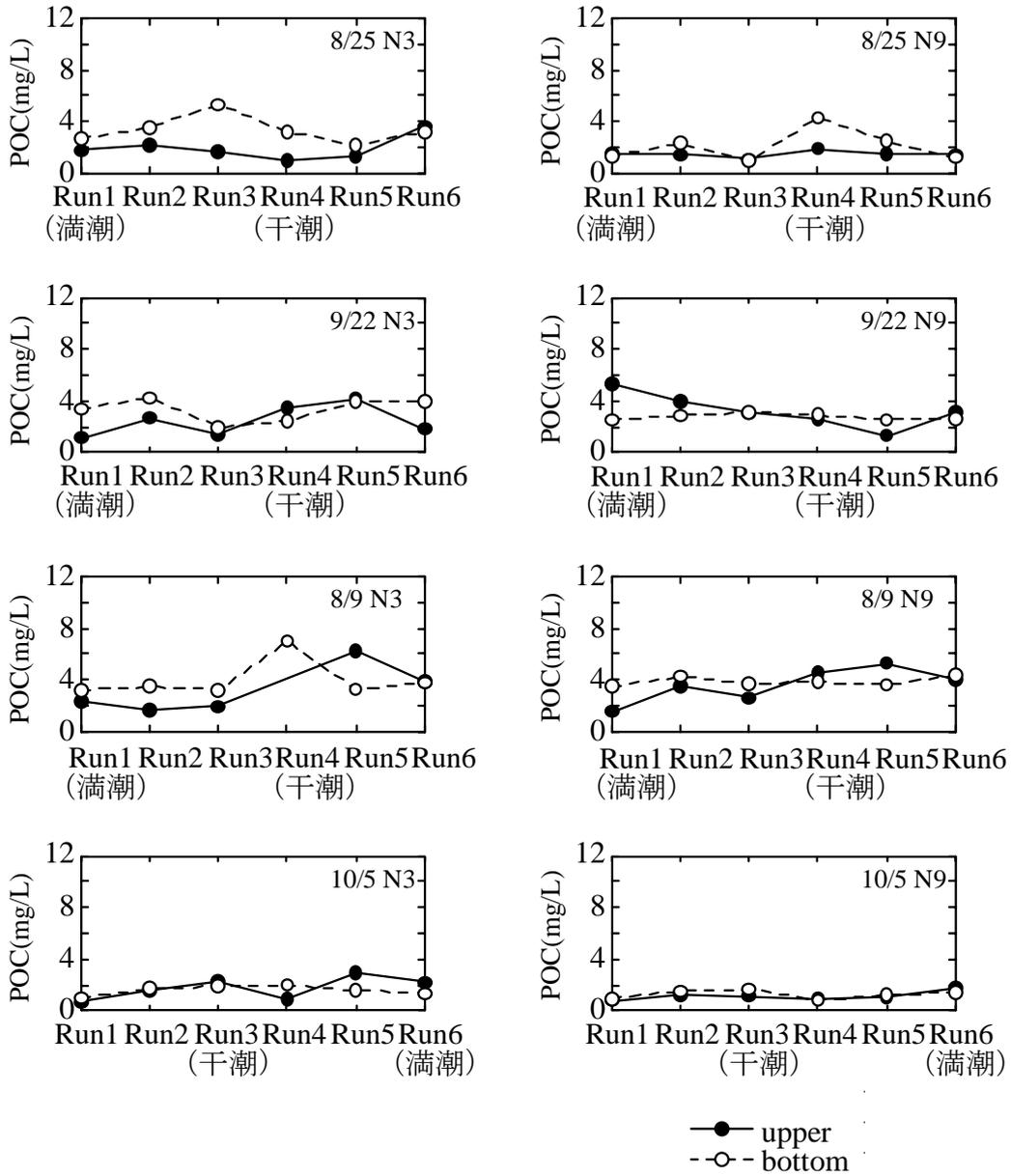


図4-2-15 POCの一潮汐間推移

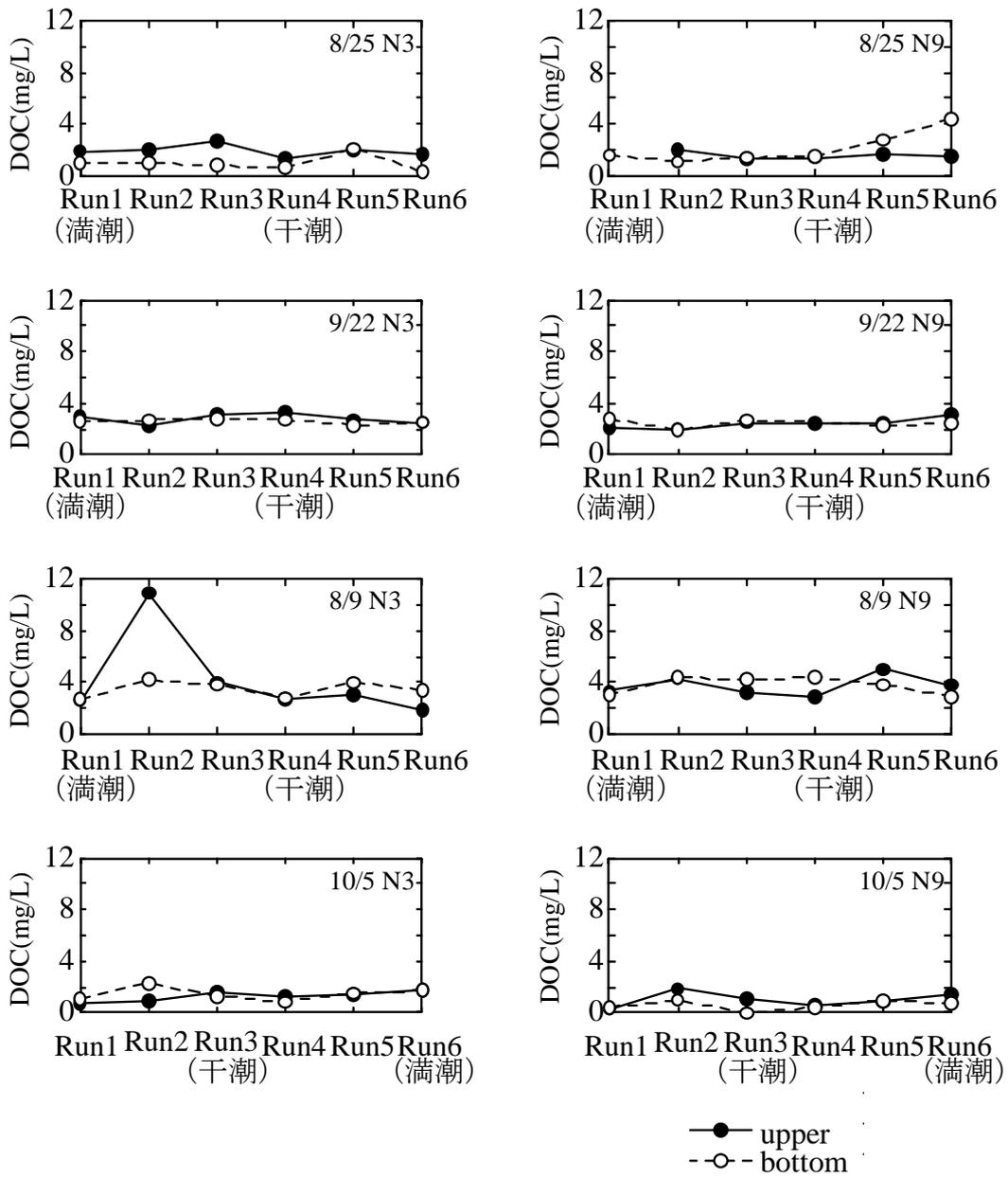


図4-2-16 DOCの一潮汐間推移

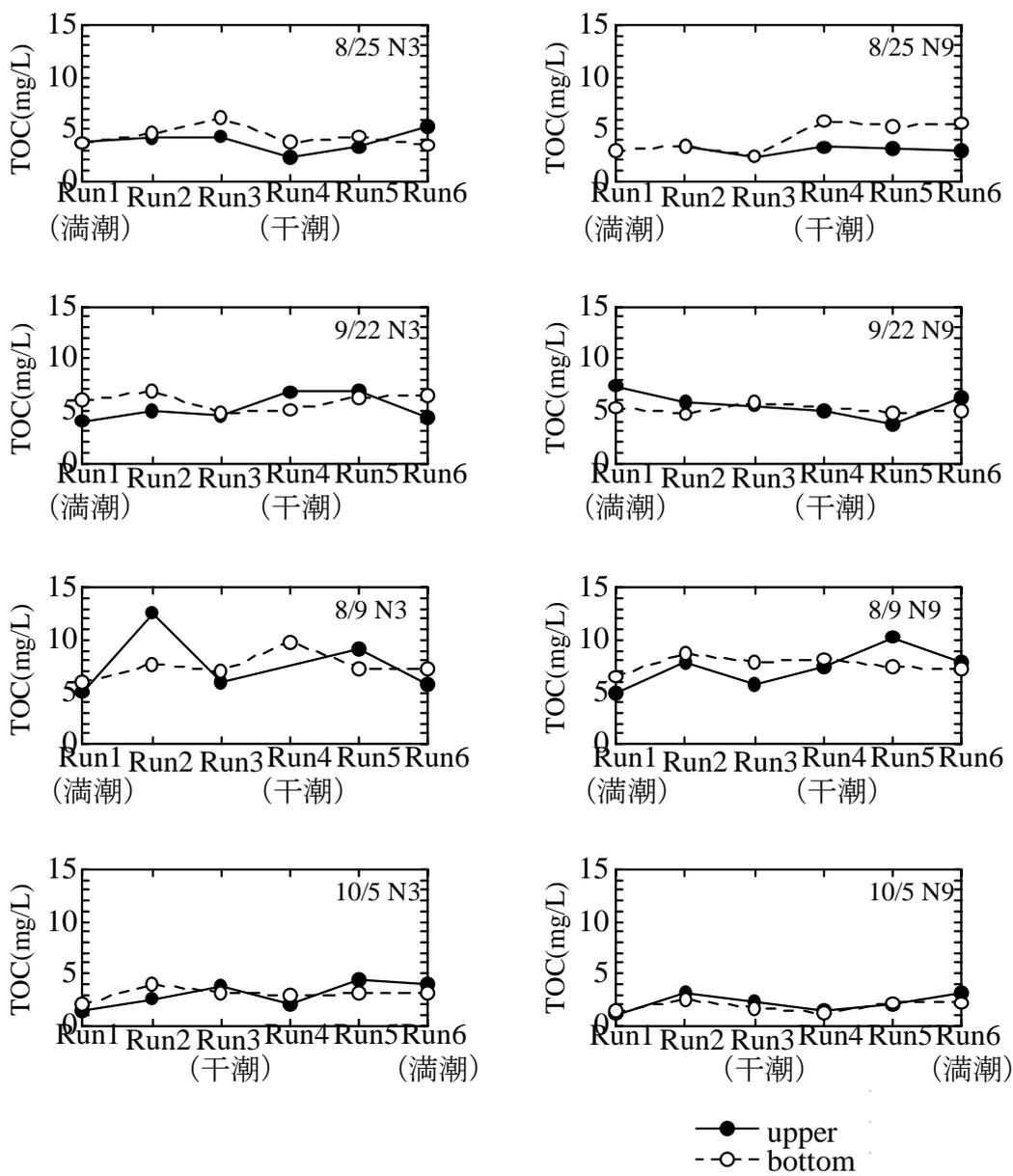


図4-2-17 TOCの一潮汐間推移

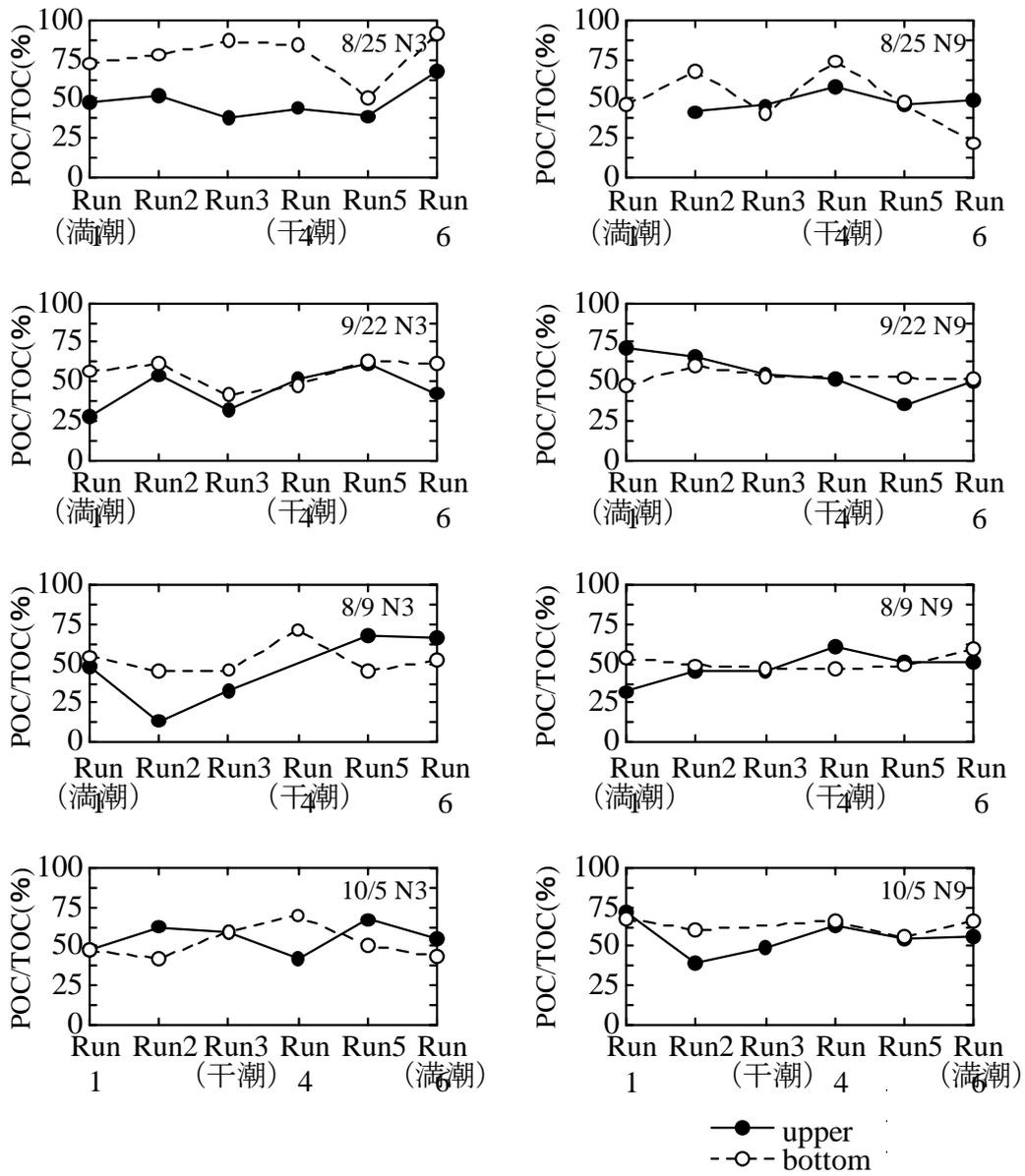
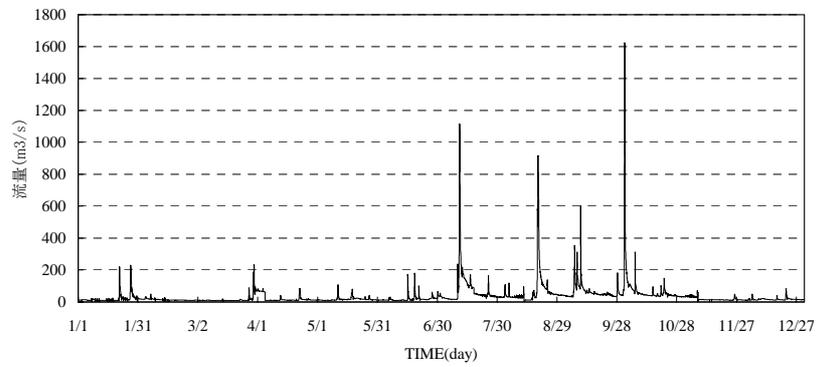
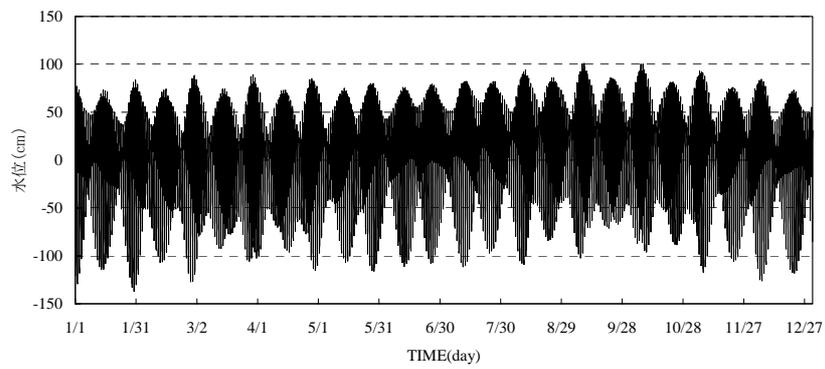


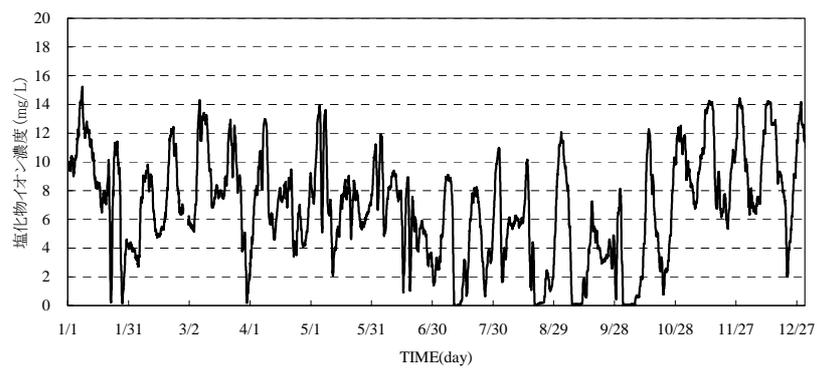
図4-2-18 POC/TOCの一潮汐間推移



(a) 流量(田園調布堰下流部)

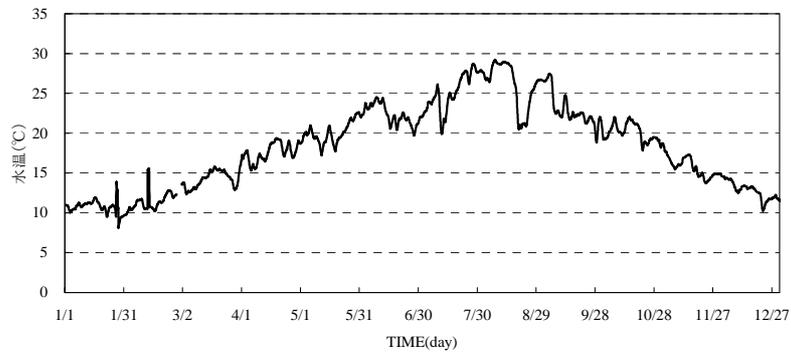


(b) 水位(東京晴海)

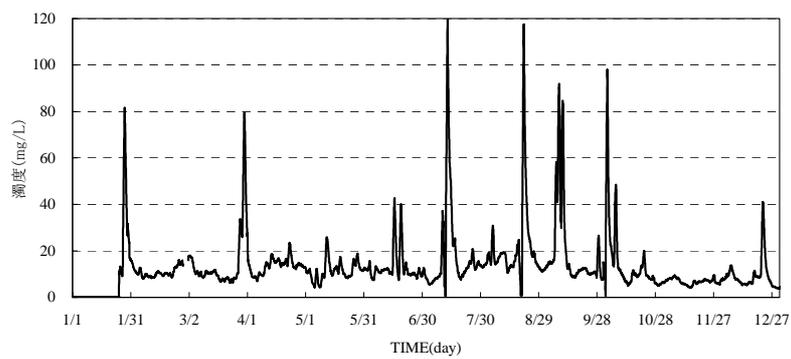


(c) 塩化物イオン濃度

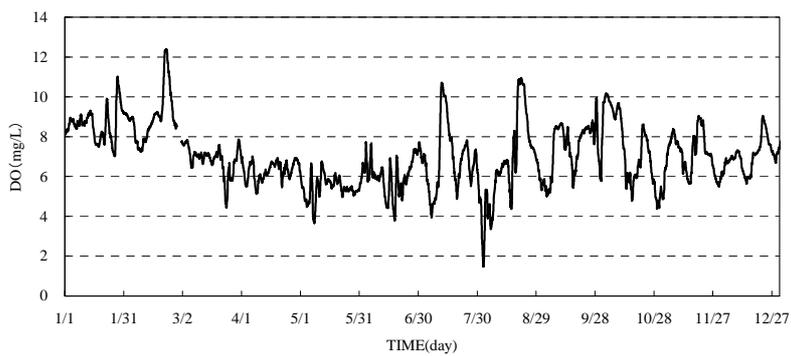
図4-3-1 六郷橋データによる水質季節変化



(d) 水温



(e) 濁度



(f) DO

図4-3-1 六郷橋データによる水質季節変化

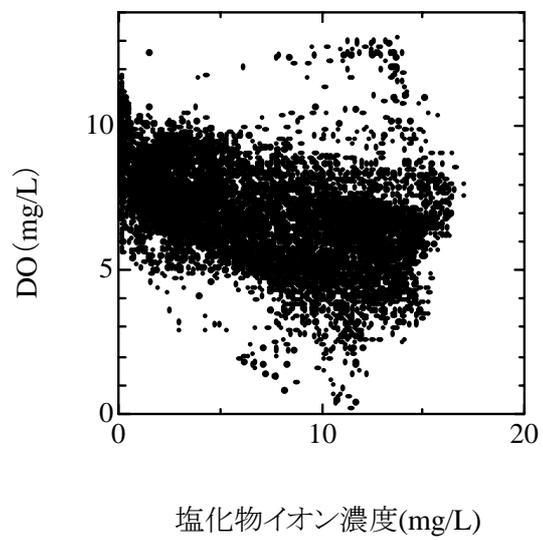


図4-3-2 塩分とDOの相関図

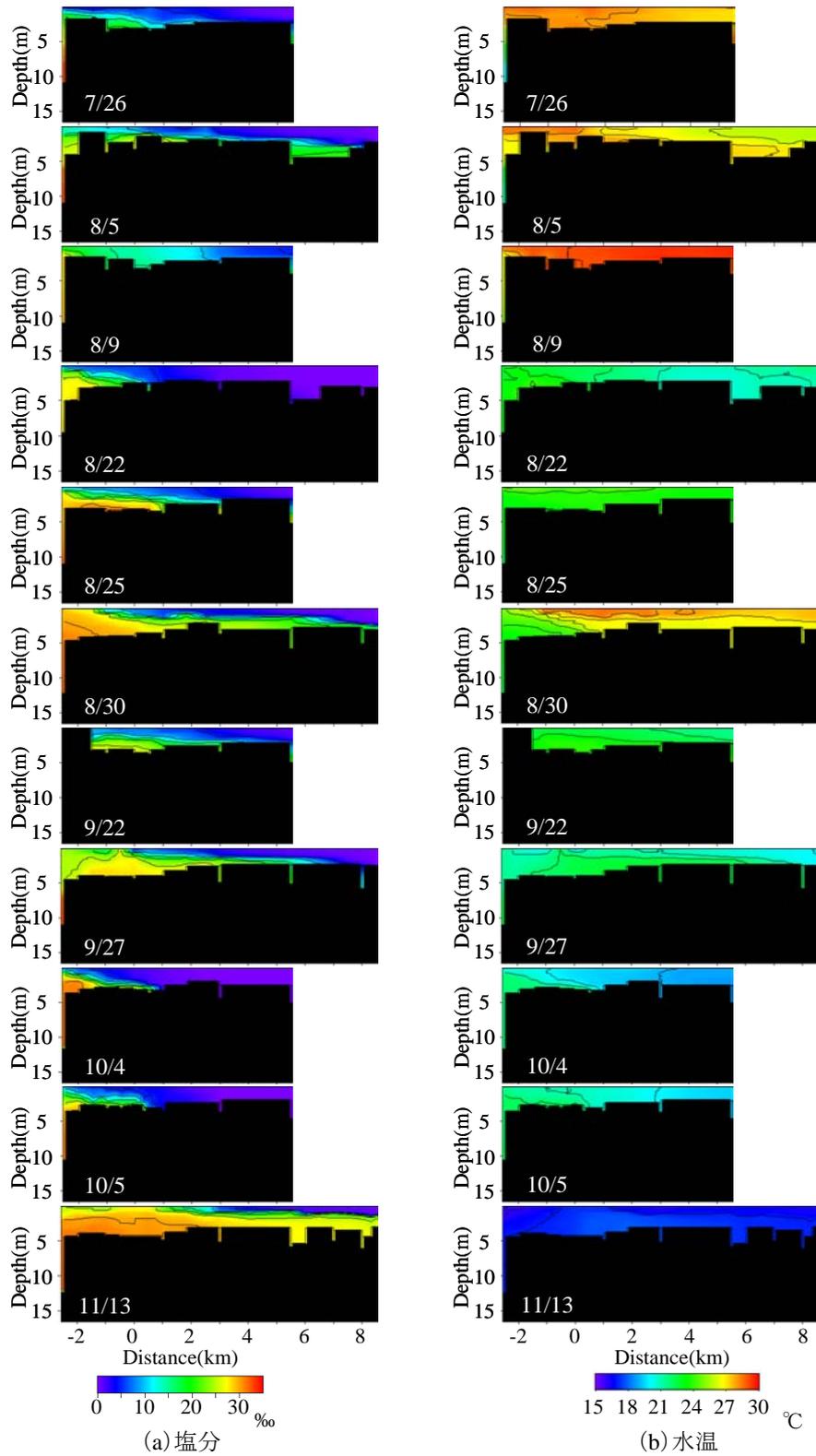


図4-3-3 多摩川河口域の水質環境季節変化

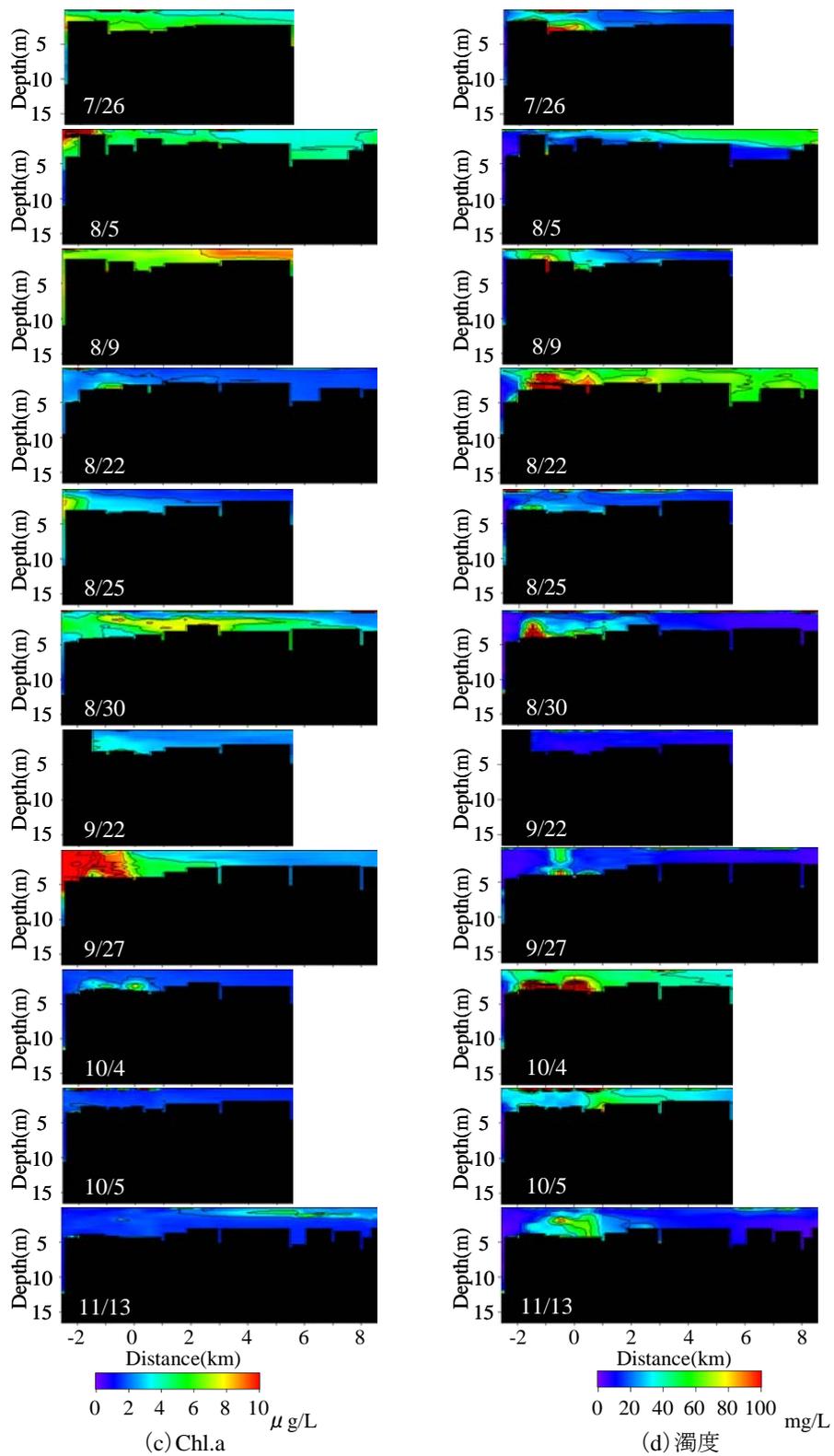
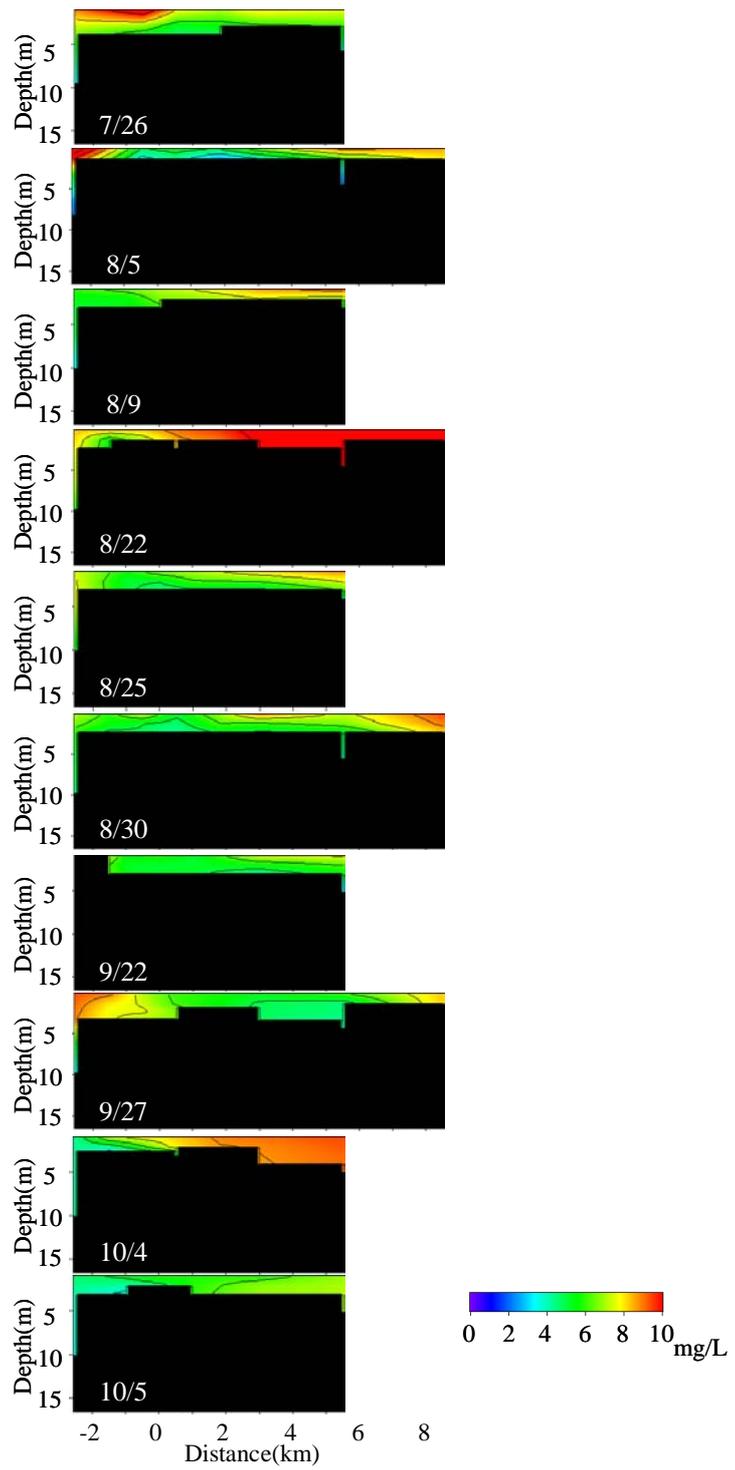


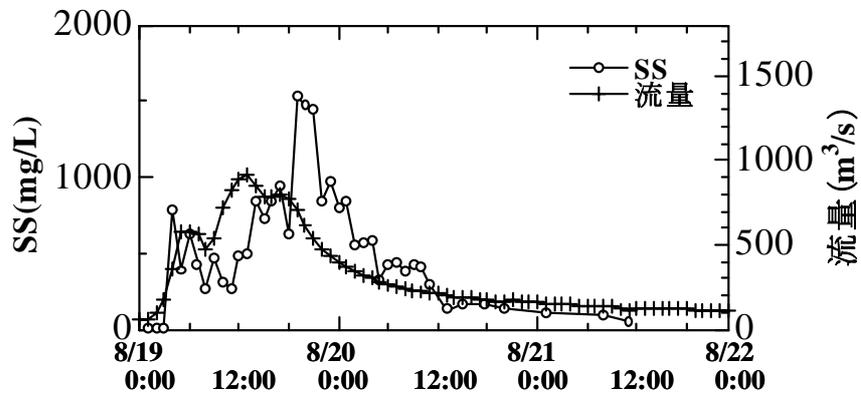
図4-3-3 多摩川河口域の水質環境季節変化

11/13については欠損

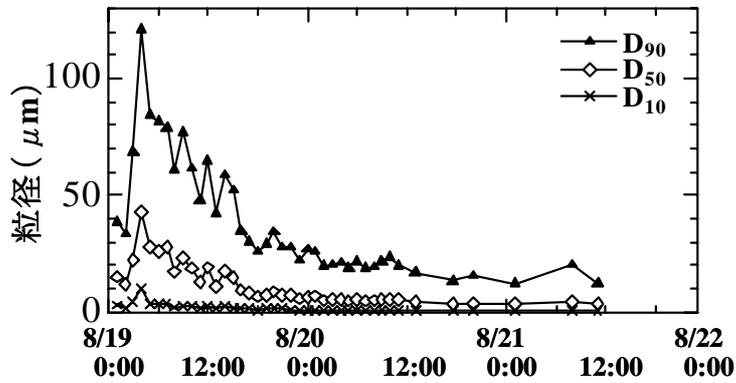


(e) DO

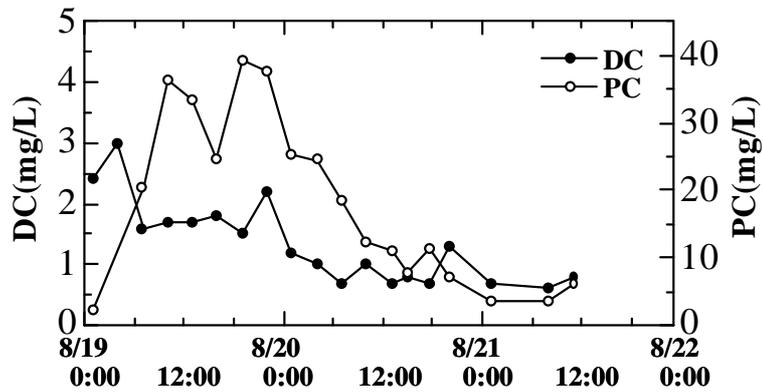
図4-3-3 多摩川河口域の水質環境季節変化



(a) 流量、SS



(b) 粒径



(c) 炭素量

图4-3-4 出水時水質・粒径時間变化(台風13号)

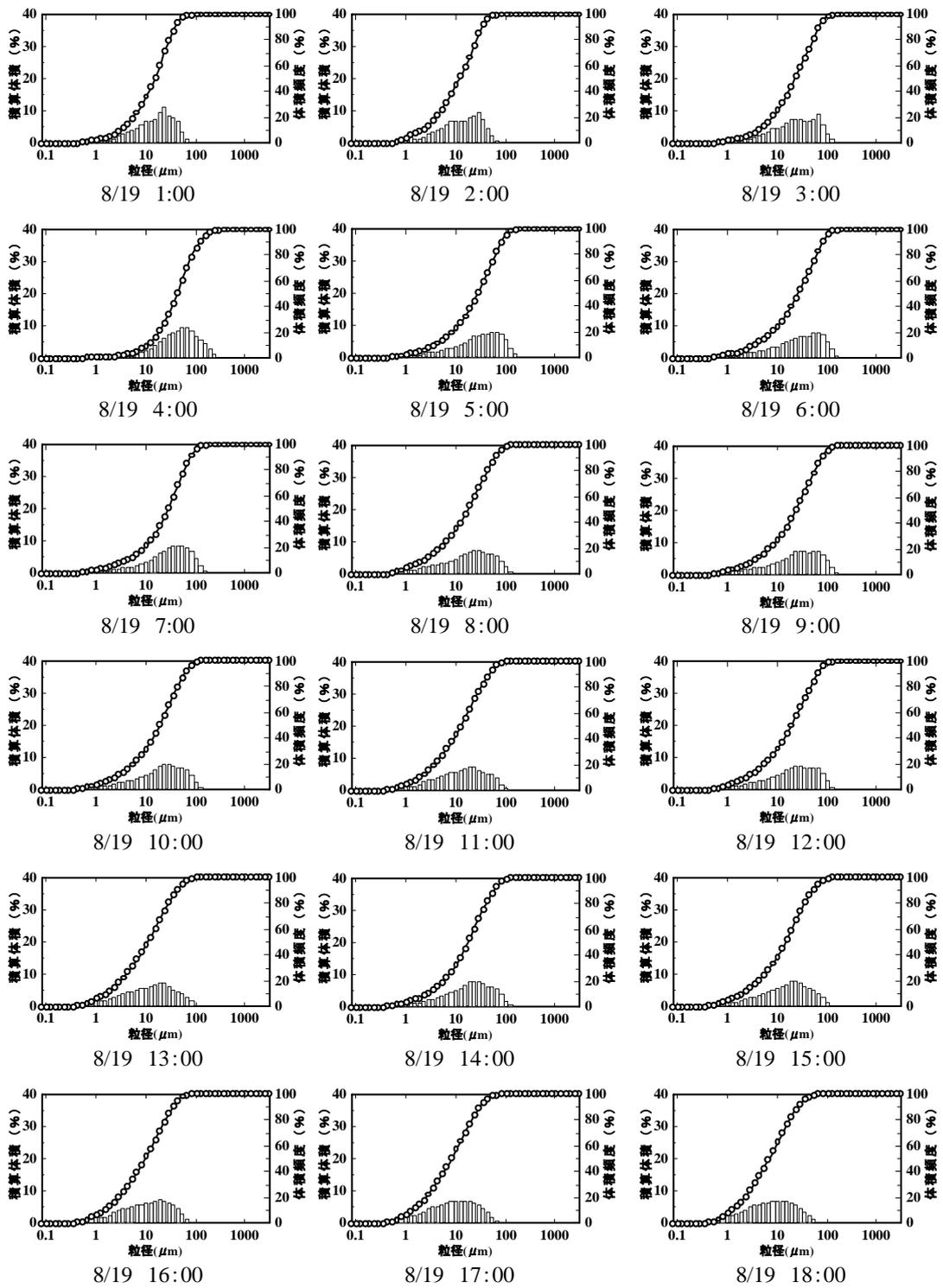


圖4-3-5 出水時水質粒徑分布(台風13号)

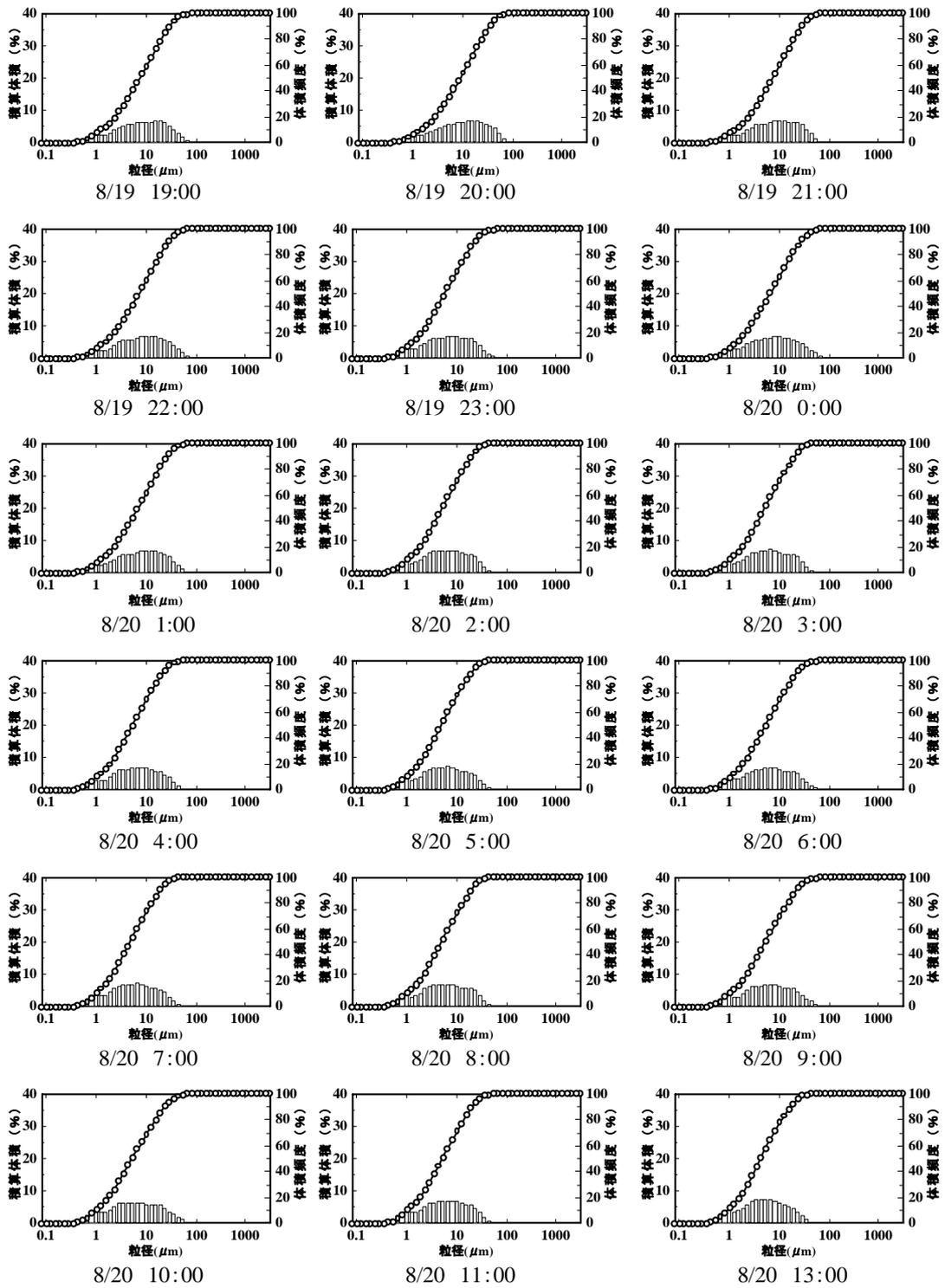


图4-3-5 出水時水質粒径分布(台风13号)

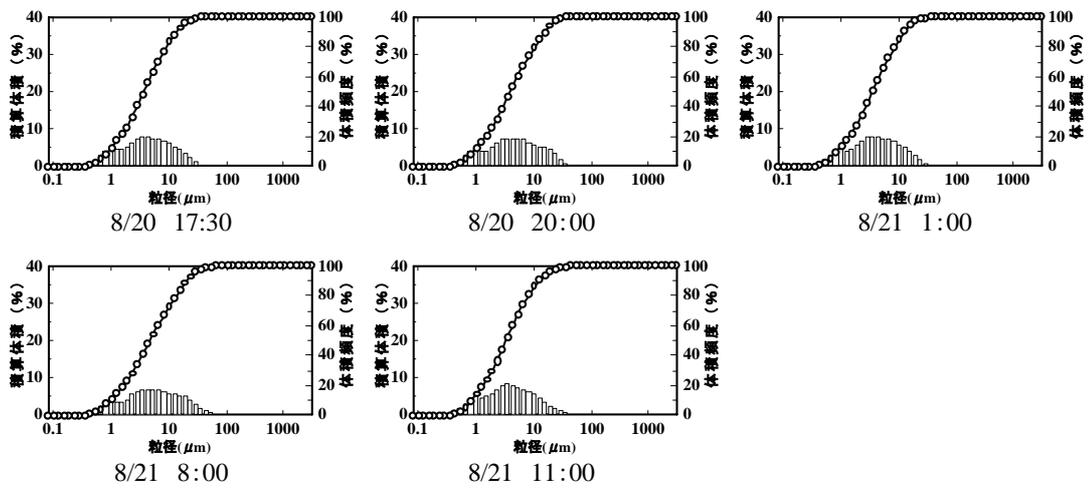
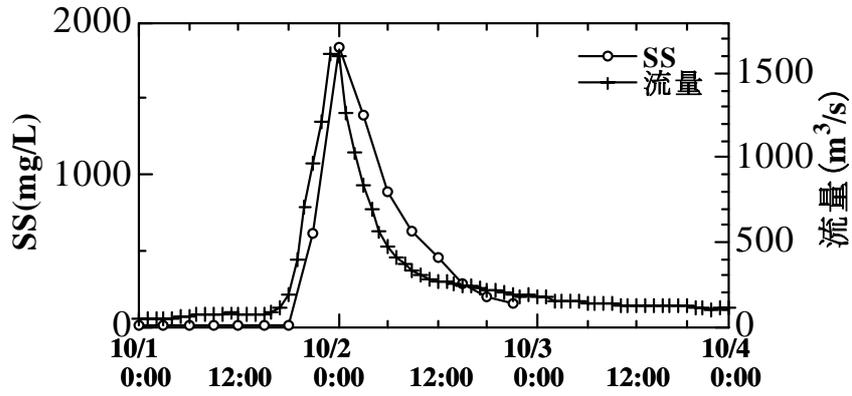
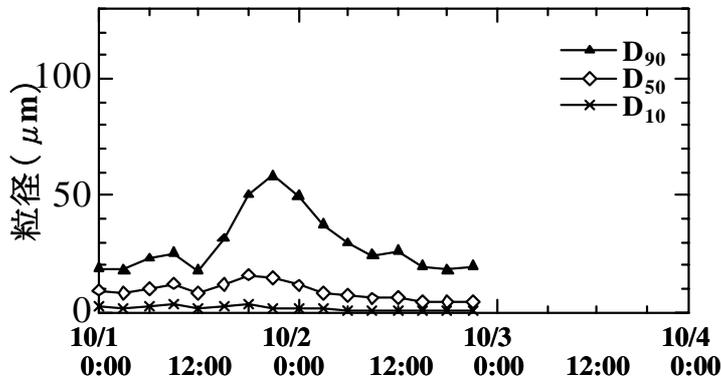


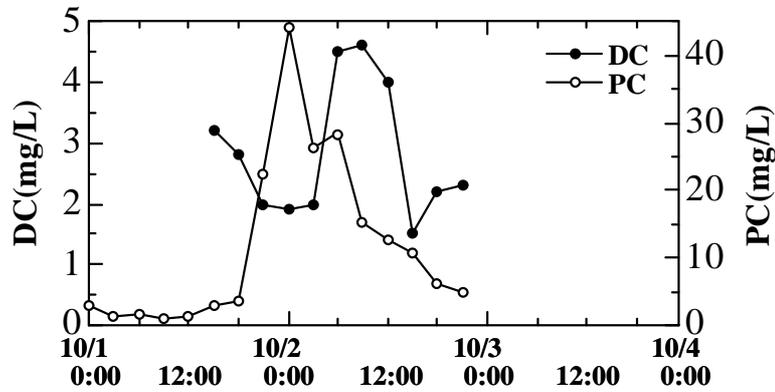
圖4-3-5 出水時水質粒徑分布(台風13号)



(a) 流量、SS



(b) 粒径



(c) 炭素量

图4-3-6 出水時水質・粒径時間变化(台風21号)

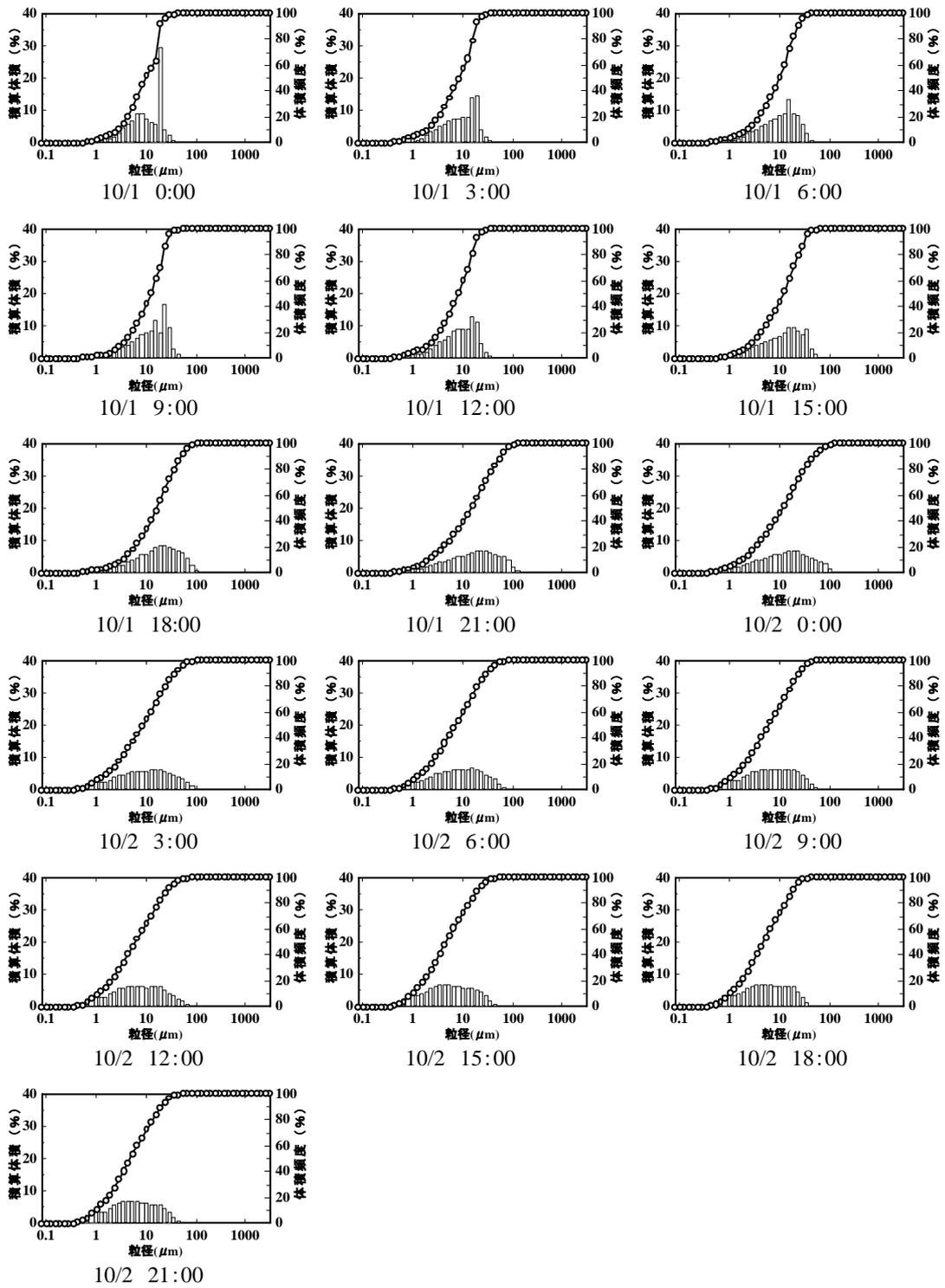
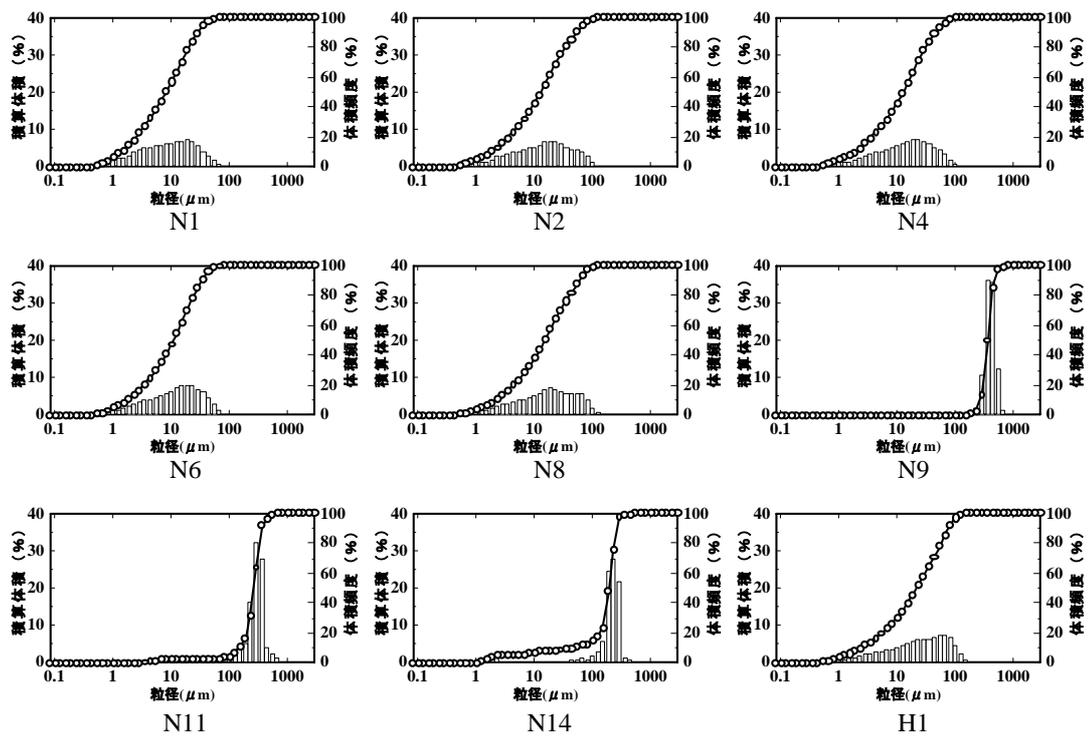
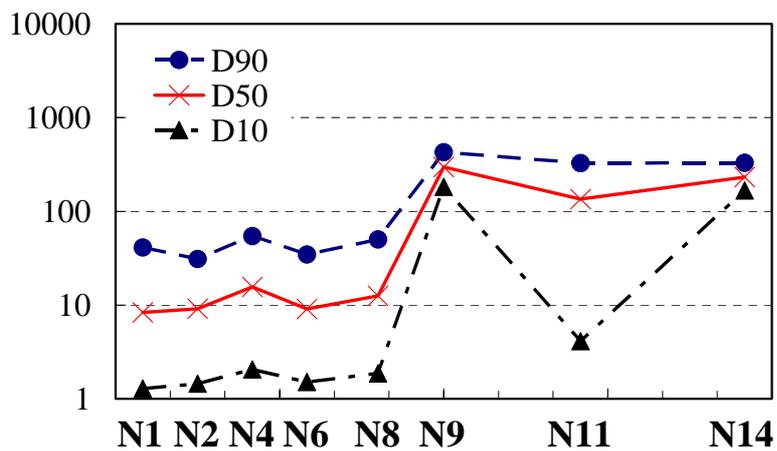


圖4-3-7 出水時水質粒徑分布(台風21号)

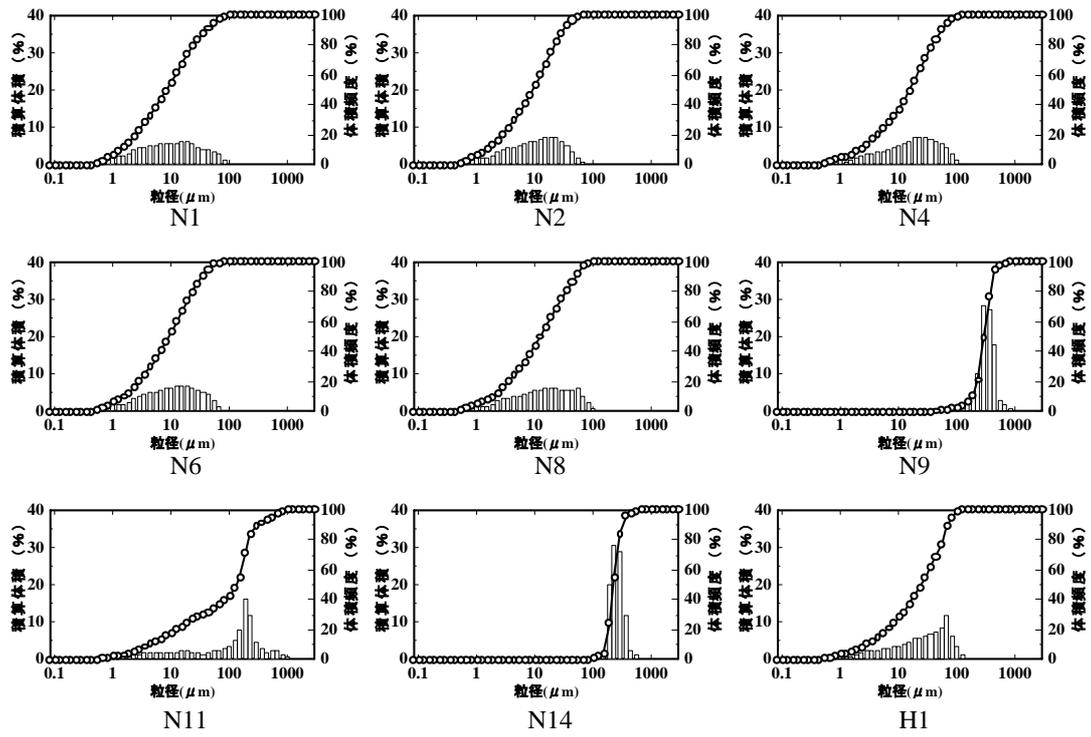


(a) 表層3cm粒径分布

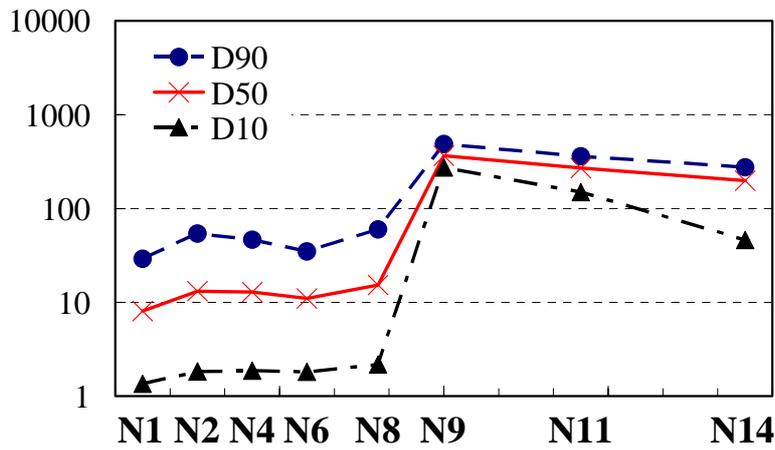


(b) 代表粒径空間分布

圖4-3-8 縱斷方向底質調查結果(8/30)

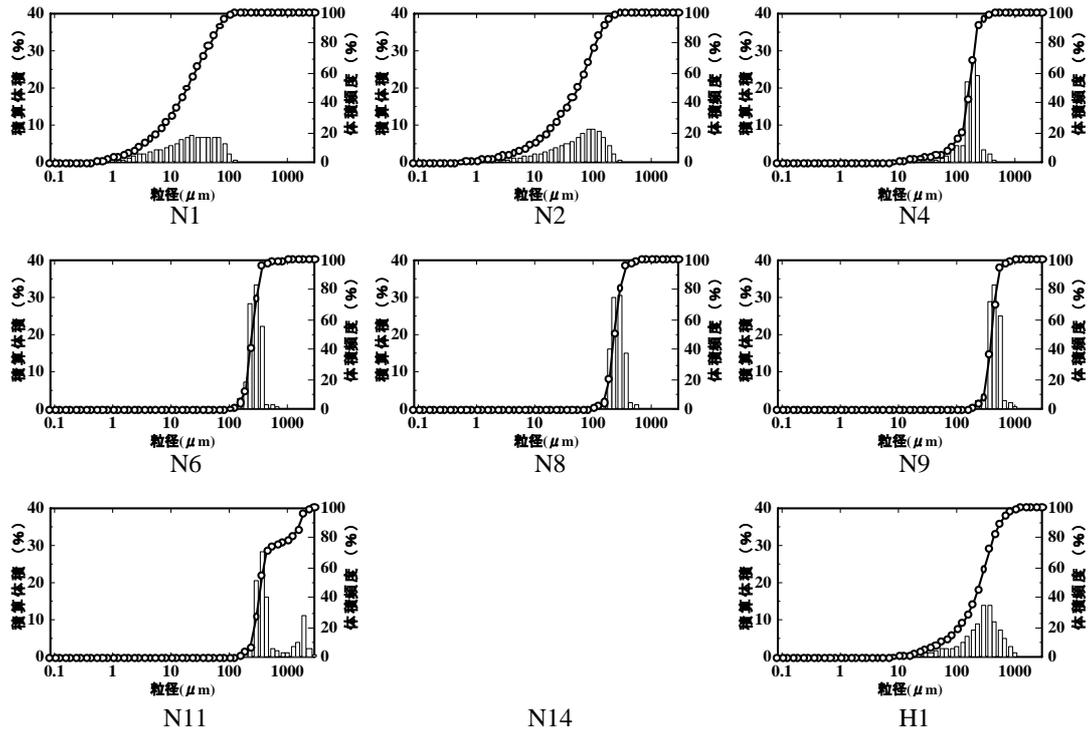


(a) 表層3cm粒径分布

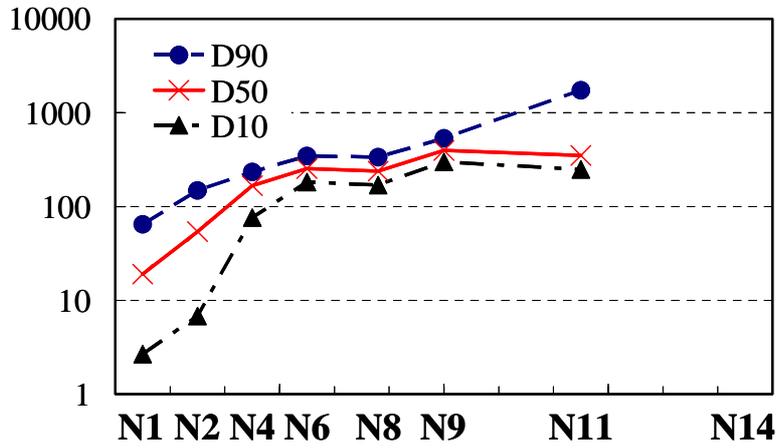


(b) 代表粒径空間分布

圖4-3-9 縱斷方向底質調查結果(9/27)

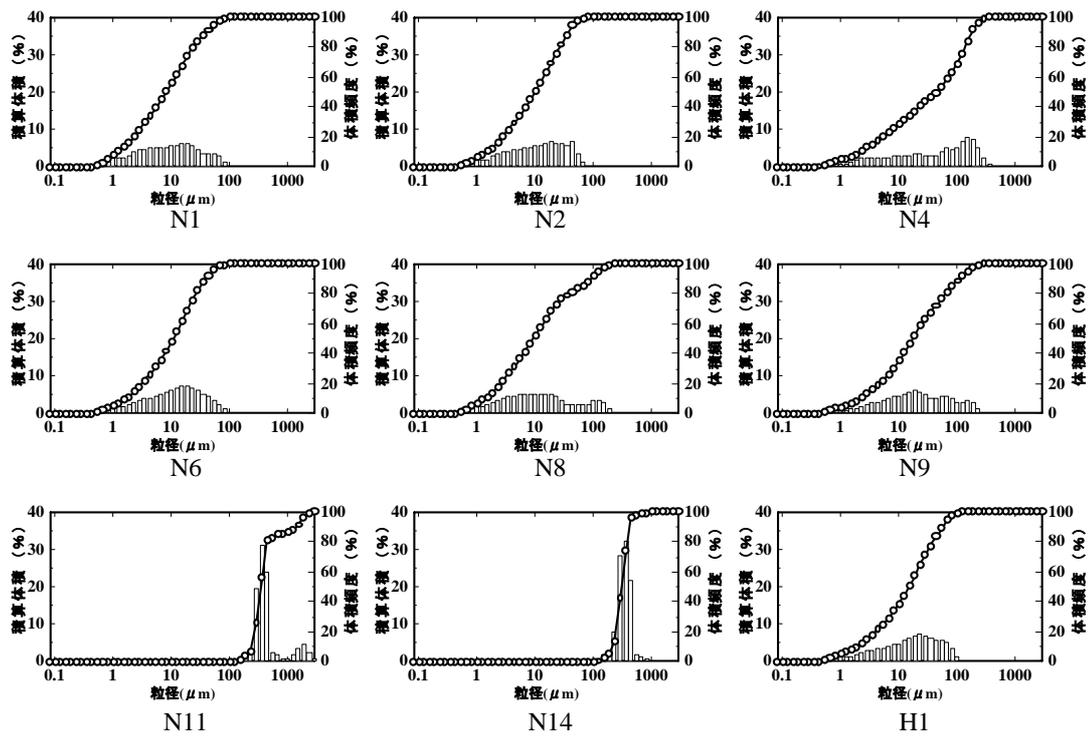


(a) 表層3cm粒径分布

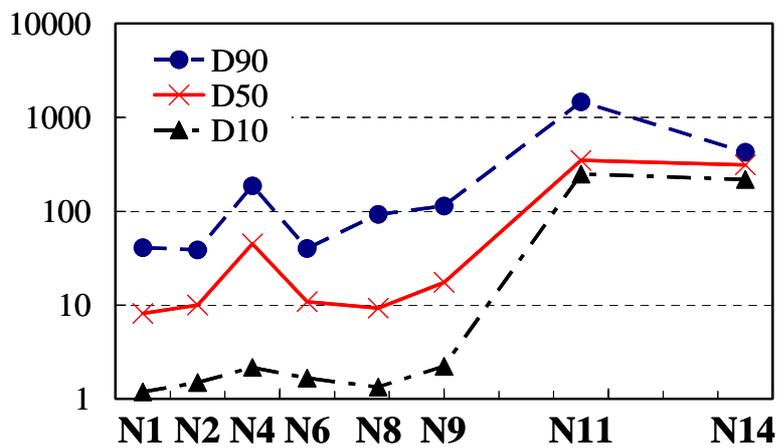


(b) 代表粒径空間分布

圖4-3-10 縱斷方向底質調查結果(10/4)

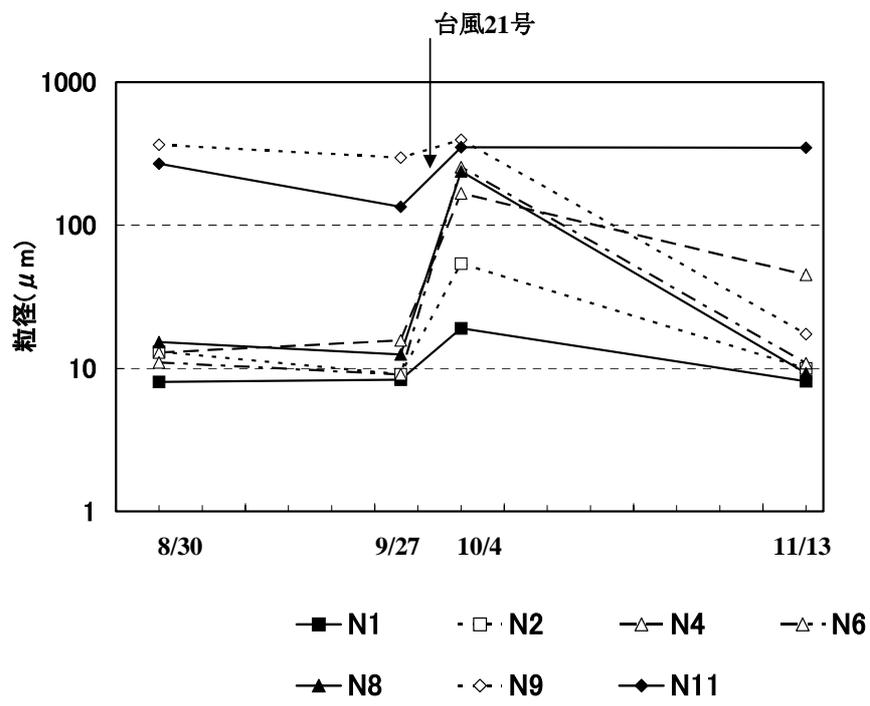


(a) 表層3cm粒径分布

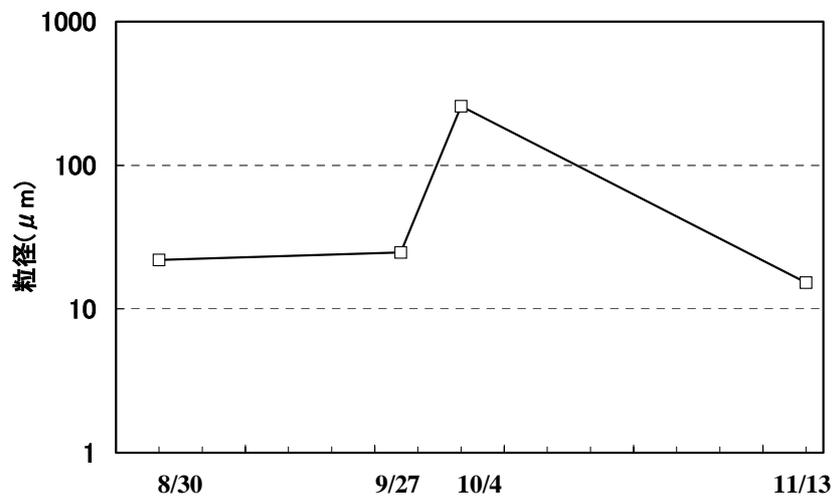


(b) 代表粒径空間分布

圖4-3-11 縱斷方向底質調查結果(11/13)



(a) 河川内底質



(b) 干渴底質

圖4-3-12 中央粒徑 (D50) 季節變化

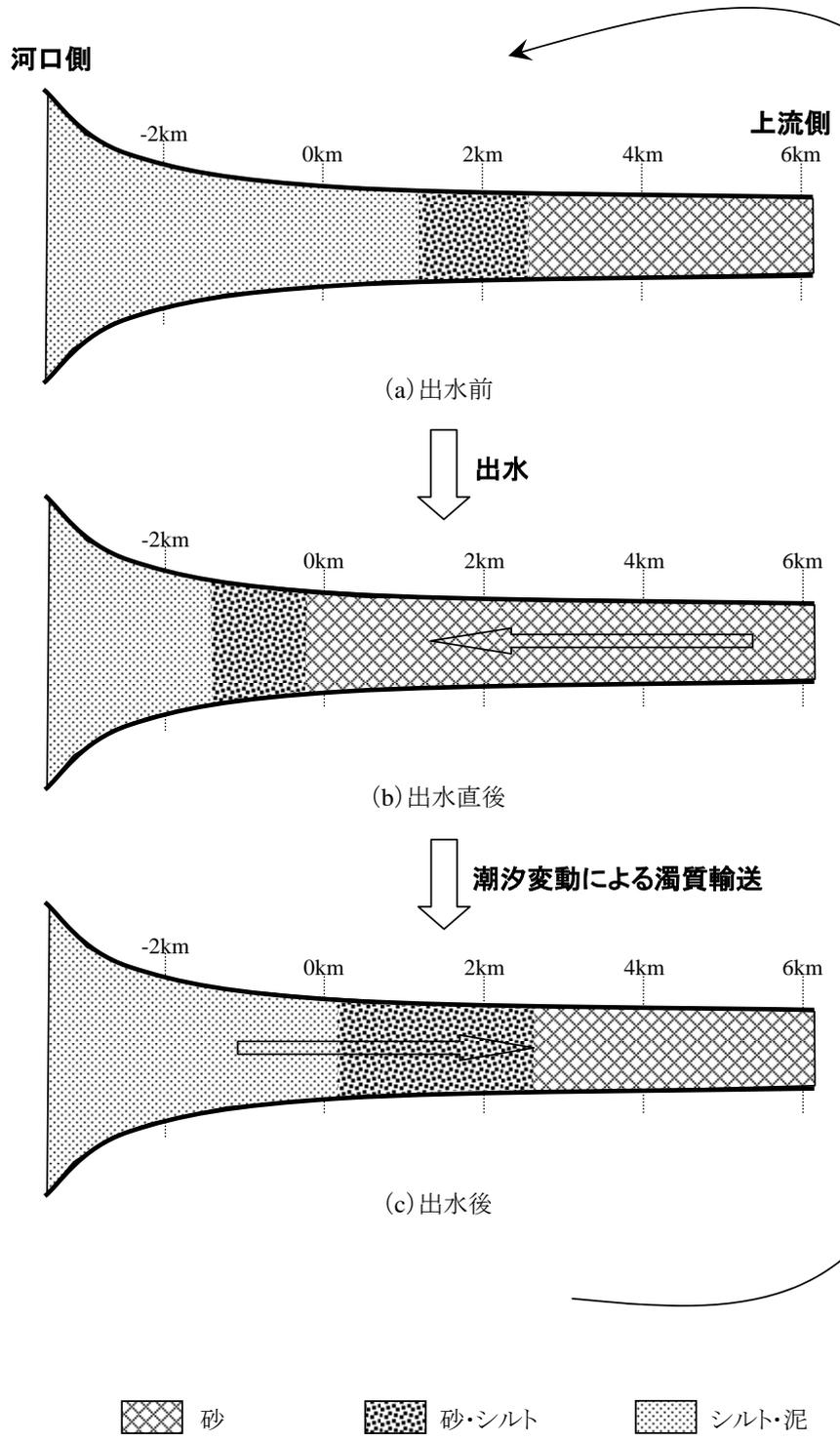


図4-3-13 底質環境の季節変化概念図

第5章 結論

5-1 結論

本研究では、多摩川河口域を空間的に捉えた様々な現地調査を実施することで、潮汐変動に対する物質の挙動を把握するために重要となる流動場の把握と、それに伴う懸濁態物質の挙動、更に河口域の水質底質環境の季節的な変遷を把握することを試みた。以下に本研究で得られた主要な結論を示す。

① 流動場について

河口域の流動場は河川流、潮汐振幅、傾圧勾配から形成されており、これにより、下げ潮時は傾圧勾配力の効いた、表層で大きく底層で小さい、バロクリニック的な流速分布となるのに対し、上げ潮時には、三つの要素のほか、混合により傾圧勾配力が弱まり、バロトロピックに近い流速分布となる。

潮汐振幅が大きくなると、強混合状態となるため上げ潮時だけでなく下げ潮時においても、傾圧勾配力の弱まった流速分布となる。

河川流量が大きくなると、上流側では塩水の遡上が抑えられるため、バロトロピック的な流速分布が形成される。一方、下流側では、傾圧勾配が強く働くため、バロクリニック的な流速分布が形成される。

以上の流速分布に対応して、底面摩擦速度は、下げ潮時においては、基本的には底面摩擦速度は小さいが、潮汐振幅の大きいときや、河川流量の影響が大きいときにバロトロピック的に近づくことで、底面摩擦速度が大きくなる。上げ潮時においては、基本的には下流側の河口・1.5km から1km 付近で底面摩擦速度が大きくなり、上流側へ移るにつれて小さくなるのに対し、潮汐振幅の大きいときや河川流量の大きいときには、河口付近で底面摩擦速度がさらに大きくなる。

② 潮汐変動による流動場と濁質挙動について

潮汐変動による濁度の挙動については、シールズ数の大きいところで濁度も大きくなるという傾向が見られた。

またこの結果、潮汐変動による上流側への懸濁態物質の輸送があることが確認された。

③ 底質環境について

平水時は河口から2km付近まではシルトや泥が多くを占め、それよりも上流側では砂が支配的であるが、出水後には上流から供給された土砂が堆積し、0.5km地点まで砂が支配的となる。そして、この状況が、上で示した潮汐変動による上流側への懸濁態物質輸送により、平水時の状況へと戻っていく。

5-2 今後の課題

- ① 本研究で得られた現象を数値計算により再現することが望まれる。その際、上げ潮時になぜ混合が起きるのかを解明する必要がある。
- ② 底層付近の流動場をより詳細に調べ、濁質の巻き上がりを正確に把握するために底面付近の乱れを連続的に測る長期的な調査が望まれる。
- ③ 底質調査においては、表層に堆積している浮泥が採取する際に流出してしまうことを完全に防ぐ手段が望まれる。また、底質の巻き上がりが水質へ及ぼす影響を評価するためにも、底質の栄養塩量を求める必要がある。

参考文献

第1章 序論

- ・ 二渡 了(1993):強混合河川感潮部における物質輸送と水質交換に関する研究、九州大学学位論文
- ・ 横山勝英・宇野誠高(2001):河川感潮域における高濁度水塊の挙動、海岸工学論文集、第48巻、pp.631-635.
- ・ 横山勝英・藤田光一(2001):多摩川感潮域の土砂動態に関する研究、水工学論文集、第45巻、pp.937-942.
- ・ Postma,H.(1967):Sediment transport and sedimentation in the estuarine environment in G.H.Lauff, Estuaries., pp.158-179.

第2章 観測概要

- ・ 西篠八束・奥田節夫編(1996):河川感潮域、名古屋大学出版会
- ・ 日本海洋学会編(1986):沿岸環境調査マニュアル(水質・微生物編)、恒星社厚生閣
- ・ 日本海洋学会編(1986):沿岸環境調査マニュアル(底質・生物編)、恒星社厚生閣
- ・ 大作和弘(2002):利根川河口堰下流部における潮汐流動に伴う濁質運動について、平成13年度東京工業大学修士論文
- ・ 国土交通省水文水質データベース(<http://www1.river.go.jp/>)

第3章 多摩川河口域における流動特性

- ・ 池田駿介(1999):詳述水理学、技報堂出版
- ・ 鶴野木早苗(1993):沿岸の海洋物理学、東海大学出版会
- ・ 藤原建紀・佐々倉諭・高橋鉄哉・山田佳昭(2000):東京湾における害用水の進入深度の算定法とその季節変化、海岸工学論文集、第47巻、pp.431-435

第4章 多摩川河口域における底質及び懸濁態物質の挙動

- ・ 中川康之(2002):東京湾での底泥巻上げとその粒度分布特性について、海岸工学論文集、第49巻、pp.1046-1050.
- ・ 鷲見栄一・鋤崎俊二(2001):沿岸海域の懸濁態粒子の粒径分布の現地測定とデトリタス分布、海岸工学論文集、第48巻、pp.1101-1105.
- ・ 宇野誠高・横山勝英・森下和志・高島創太郎・大角武志(2002):熊本県白河河口域における土砂動態、海岸工学論文集、第49巻、pp.561-565
- ・ 山下俊彦・森田真郷・杉原幸樹・斉藤大作・山崎真一(2002):石狩川河川水中の懸濁粒子の海水混合による凝集過程に関する研究、海岸工学論文集、第49巻、pp.1016-1020.
- ・ 中川康之・今林章二・末次広児(2002):有明海の底泥輸送現象に関する現地データの解析、海岸工学論文集、第49巻、pp.566-570.

- 大作和弘(2002):利根川河口堰下流部における潮汐流動に伴う濁質運動について、平成13年度東京工業大学修士論文
- 国土交通省江戸川工事事務所(2003):江戸川放水路からの出水による三番瀬の環境変化について

Appendix XML 形式の観測データベース

本調査結果については、多摩川河口域に数少ない流動・塩分水温構造・懸濁物質等の観測データであることから羽田空港再拡張事業のアセスメントの評価データとして用いられた。再拡張事業前の比較データとして今後様々な検討に用いられる可能性があるために今回は、全データを標準データ形式 (XML 型) にし、データベースとしてまとめた。なお、参考までにエスセル形式のデータもデータベース中に収めている。

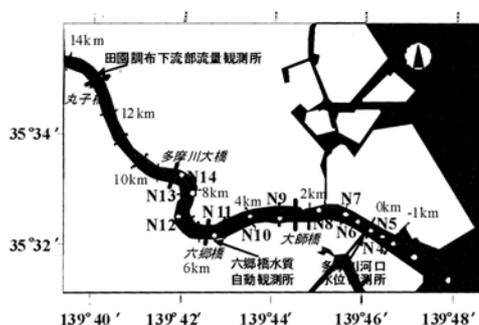


図 6-8-2.15 八木ら (2003) による多摩川河川内の調査地点図

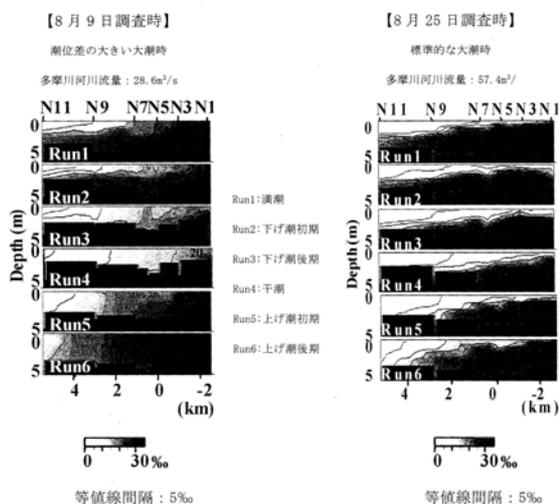
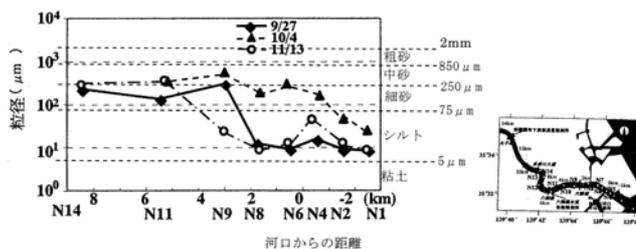


図 6-8-2.16 多摩川河川内の塩分縦断面分布の時間変化

水後 (10月4日) に河口付近で底質の粗粒化が認められる。また、その後の調査では (11月13日)、底質の細粒化が認められ、出水前 (9月27日) とほぼ同じ底質粒径となっている。

先に示した濁質輸送量と合わせて考察すると、出水時には上流からの底質輸送 (主として砂分) が、平常時には潮汐 (河口密度流) に伴う河口付近から上流向きの底質輸送 (主としてシルト・粘土分) が生じていると考えられる。



注: 9/27: 出水直前、10/4: 出水直後、11/13: 出水の43日後
資料: 八木宏・大森義勝・高橋亜依: 「多摩川河口域における流れと懸濁物質輸送特性について」(2003年、海岸工学論文集、第50巻 pp.461-465.)

図 6-11-1.24 底質の中央粒径(表層 3cm)の縦断分布

国土交通省関東地方整備局・東京航空局: 東京国際空港再拡張事業に係わる環境影響評価準備書, 第二分冊より抜粋.

たいきーかせんーないわんけいれんせい もと たまがわかこういき ぶっしつじゅんかんかいせき
「大気—河川—内湾系連成モデルに基づく多摩川河口域の物質循環解析」

とうきょうわん たまがわ すいしつかんきょう あた えいきょう ちゃくもく
—東京湾が多摩川の水質環境に与える影響に着目して—

(研究助成・学術研究 VOL. 35-N0. 259)

著者 やぎ ひろし
八木 宏

発行日 2007年3月31日

発行者 財団法人 とうきゅう環境浄化財団

〒150-0002

東京都渋谷区渋谷1-16-14 (渋谷地下鉄ビル内)

TEL (03) 3400-9142

FAX (03) 3400-9141