

富山湾沿岸域の表層水における塩分と栄養塩濃度の分布

辻本 良

(2009年3月24日受理)

Spatial distribution of salinities and nutrient concentrations in the surface seawater in Toyama Bay coastal area

Ryo TSUJIMOTO*

The spatial distribution of salinity and nutrient concentrations (nitrate + nitrite, phosphate and silicic acid) were seasonally surveyed from June, 2006 to February, 2007 at 36 stations in Toyama Bay coastal area, the Sea of Japan. Low salinity waters in the sea surface were distributed in the area at all seasons. Nutrient concentrations were high in the low salinity area, while these were low in the high salinity area. Significant negative relationships were recognized between salinity and nutrient concentrations. These results suggest that nutrients in the surface seawater in Toyama Bay coastal area were mainly supplied from the rivers. Comparing nutrient concentrations in the seawater with the diatom elemental ratio and the threshold values for diatom uptake to understand the phytoplankton productivity, I found that nitrogen was the primary limiting factor in the relatively high salinity area where is away from the river mouths. Silicic acid was relatively more abundant than nitrate + nitrite and phosphate in the surface seawater, where conditions are considered to be the preferable environment for the siliceous phytoplankton like diatoms.

Key words: nutrient, salinity, spatial distribution, surface seawater, Toyama Bay

富山湾は本州中央の日本海に面して能登半島の東側に位置し、便宜的に石川県長手崎と富山・新潟県境を結んだ線を湾内外の境界とすると、全表面積約2,120km²、最大水深1,250m、全容積約1,280km³の外洋性内湾である(富山県水産試験場 1975)。富山湾は、水深約300mを境にして、それより浅海側は対馬暖流水、深海側は日本海固有水で占められる(内山 2005)。富山湾奥部の富山県沿岸には、小矢部川、庄川、神通川、常願寺川および黒部川の5つの一級河川と29の二級河川が流れ込むため、沿岸海域は河川水の影響を強く受ける(永原 1984, 長田ら 1988, 長田・奈倉 1993)。

富山湾奥部では、富山県が定める公共用水域において、水質の化学的酸素要求量(COD)の基準達成率が1997~2001年にかけて32~60%にまで低下し、それは夏季を中心とした植物プランクトンの増殖によって内部生産CODが増加したことが主な原因と推察されている(富山湾水質保全研究会 2001, 寺内・石坂 2007)。また、大西ら(2007)は、海色衛星データを用い、富山湾に

* 富山県農林水産総合技術センター水産研究所 (Fisheries Research Institute, Toyama Prefectural Agricultural, Forestry & Fisheries Research Center, Namerikawa, Toyama 936-8536, Japan)

おけるクロロフィル a 濃度分布は低塩分域と良く対応し、植物プランクトンの増殖が夏季に増加するのは、河川水などからの栄養塩供給があるためと報告している。

海水中の栄養塩濃度は、植物プランクトンの増殖速度や種組成に大きな影響を与える。ここで栄養塩とは、硝酸態窒素、亜硝酸態窒素、アンモニア態窒素、リン酸態リンおよびケイ酸態ケイ素である。人為活動によって窒素やリンが過剰に供給された海域では、植物プランクトンの増殖が進行する。珪藻類は、動物プランクトンや魚介類の餌となり食物連鎖のなかで重要な役割を果たしており、その増殖にはケイ酸態ケイ素が必要である。一方、ケイ酸態ケイ素が不足した環境では、有害・有毒赤潮を引き起こす種を含む渦鞭毛藻類の卓越を引き起こすことがある (Officer and Ryther 1980)。

富山湾沿岸域の表層水には、窒素、リンおよびケイ素といった栄養が、河川から供給されていることが明らかにされている (永原 1984, 長田・奈倉 1993, 富山湾水質保全研究会 2001)。富山湾沿岸域において栄養塩濃度やその組成比が、植物プランクトンの増殖、赤潮の発生および内部生産CODを規定する要因のひとつと考えられる。富山湾沿岸域における水質環境を保全するためには、河川水の影響範囲と栄養塩濃度分布を把握し、環境基準の維持・達成や漁場環境を保全できる栄養塩負荷量を制御する必要がある。

本報では、富山湾に流入する河川水に注目し、富山湾沿岸域の表層水における栄養塩 (硝酸+亜硝酸態窒素、リン酸態リンおよびケイ酸態ケイ素) の濃度分布を季節ごとに把握することを目的とした。また、各栄養塩の濃度や組成比を基に、植物プランクトンの増殖と栄養塩の関係についても検討した。

材料と方法

観測調査は、富山湾沿岸域に36定点を設け (Fig. 1)、富山県水産試験場 (現富山県農林水産総合技術センター水産研究所) 栽培漁業調査船「はやつき」(19トン) と漁業調査船「立山丸」(160トン) によって実施した。調査は、①2006年6月5, 8日, ②2006年8月31日, 9月4日, ③2006年11月30日, 12月4日および④2007年2月26, 27日の年4回行った。これ以降には、①~④の観測期をそれぞれ6月期, 8, 9月期, 11, 12月期および2月期と称す。船上の左舷前方から採水バケツ (口径25cm, 高さ30cm) を用いて、表層の海水を採取した。採水の際には、船の航行による波によって表層水を攪拌しないように注意した。採取した海水は、栄養塩分析用に直ちにDISMIC-25cs (ADVANTEC社製, 孔径 $0.45\mu\text{m}$) を用いてろ過し、ろ過海水を凍結して保存した。後に研究室で解凍し、硝酸+亜硝酸態窒素は銅・カドミウム還元ナフチルエチレンジアミン吸光光度法、リン酸態リンとケイ酸態ケイ素はモリブデンブルー吸光光度法によって、フローインジェクション分析装置 (アクア・ラボ社製FI-5000V) を用いて測定した。なお、硝酸+亜硝酸態窒素、リン酸態リンおよびケイ酸態ケイ素の検出限界はそれぞれ、 $0.2\mu\text{M}$, $0.01\mu\text{M}$ および $0.2\mu\text{M}$ である。本報では、アンモニア態窒素を測定していないことから、DIN (溶存態無機窒素: Dissolved Inorganic Nitrogen) は硝酸+亜硝酸態窒素 ($\text{NO}_3+\text{NO}_2\text{-N}$) とした。また、リン酸態リン ($\text{PO}_4\text{-P}$) はDIP (溶存態無機リン: Dissolved Inorganic Phosphate), ケイ酸態ケイ素 ($\text{Si}(\text{OH})_4\text{-Si}$) はDSi (溶存態ケイ素: Dissolved Silica) と同義とした。水温は棒状水銀温度計、塩分は試水を持ち帰りサリノメーター (YEO-KAL

601 MK II) によって測定した。

富山湾における河川水の影響範囲を調べるため、一級河川（小矢部川、庄川、神通川、常願寺川および黒部川）の河口の位置をFig. 1に白丸で示した。なお、小矢部川と庄川の河口は隣接しているため、両河川水の起源を分離することが困難であったことから、両河口の中間の位置を起点とした。

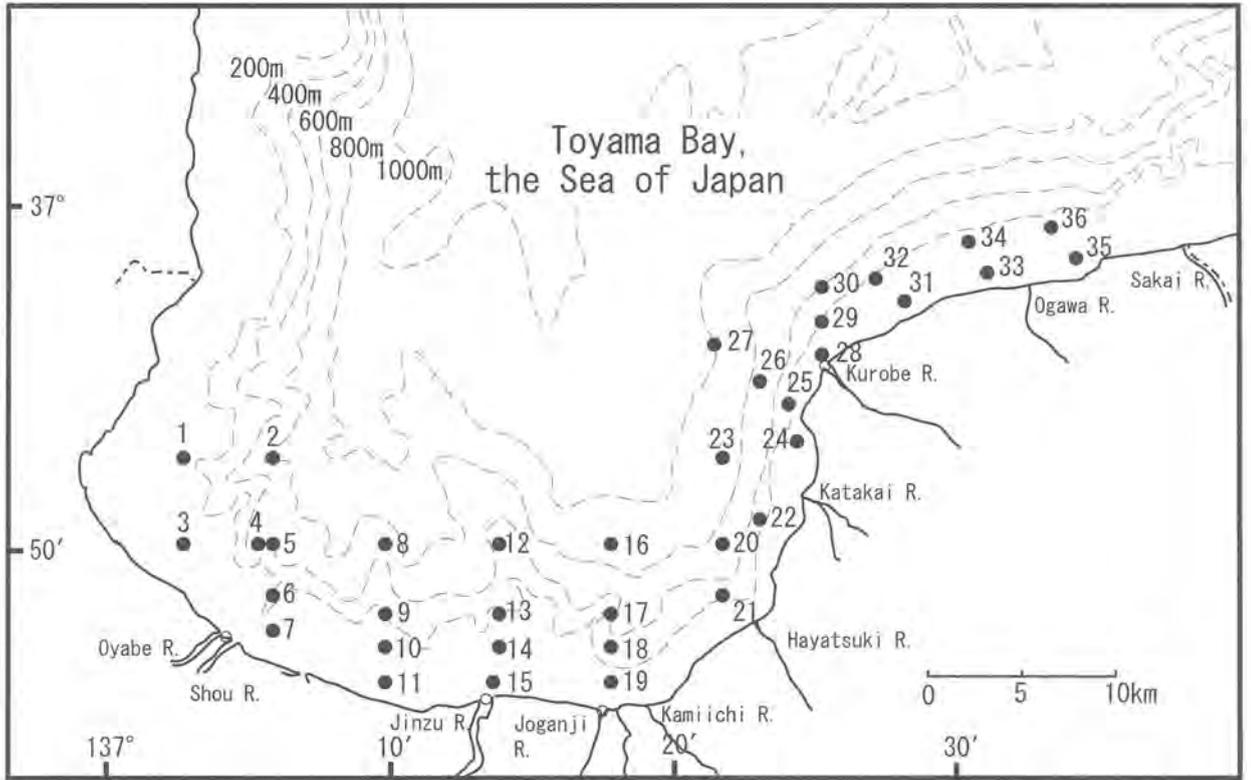


Fig. 1 Map of Toyama Bay showing the sampling stations.

The position of the mouths of the first class rivers (the Oyabe, Shou, Jinzu, Joganji and Kurobe Rivers) were indicated by open circle to survey the spatial distribution of the riverine water in Toyama Bay coastal area. The mouths of the Oyabe and Shou Rivers were merged into a one position because they are neighboring.

富山湾における調査地点

富山湾沿岸域における河川水の分布範囲を調べるため、一級河川（小矢部川、庄川、神通川、常願寺川および黒部川）の河口の位置を白丸で示した。なお、小矢部川と庄川の河口は、近接するためひとつにまとめた。

結 果

塩分と栄養塩濃度の分布 6月期において、塩分は6.84~33.36PSUの範囲、水温は13.9~21.8°Cの範囲であった。黒部川河口海域に位置する定点28において水温が最も低く、次いで小矢部川・庄川河口海域の定点7が16.6°Cで低かった。これら2地点以外は18.0~21.8°Cの範囲にあった。小矢部川・庄川河口海域の定点7、神通川河口海域の定点15および黒部川河口海域の定点28の塩分は、それぞれ6.84PSU、9.42PSUおよび7.32PSUと低く、河川水の影響を強く受けていた。

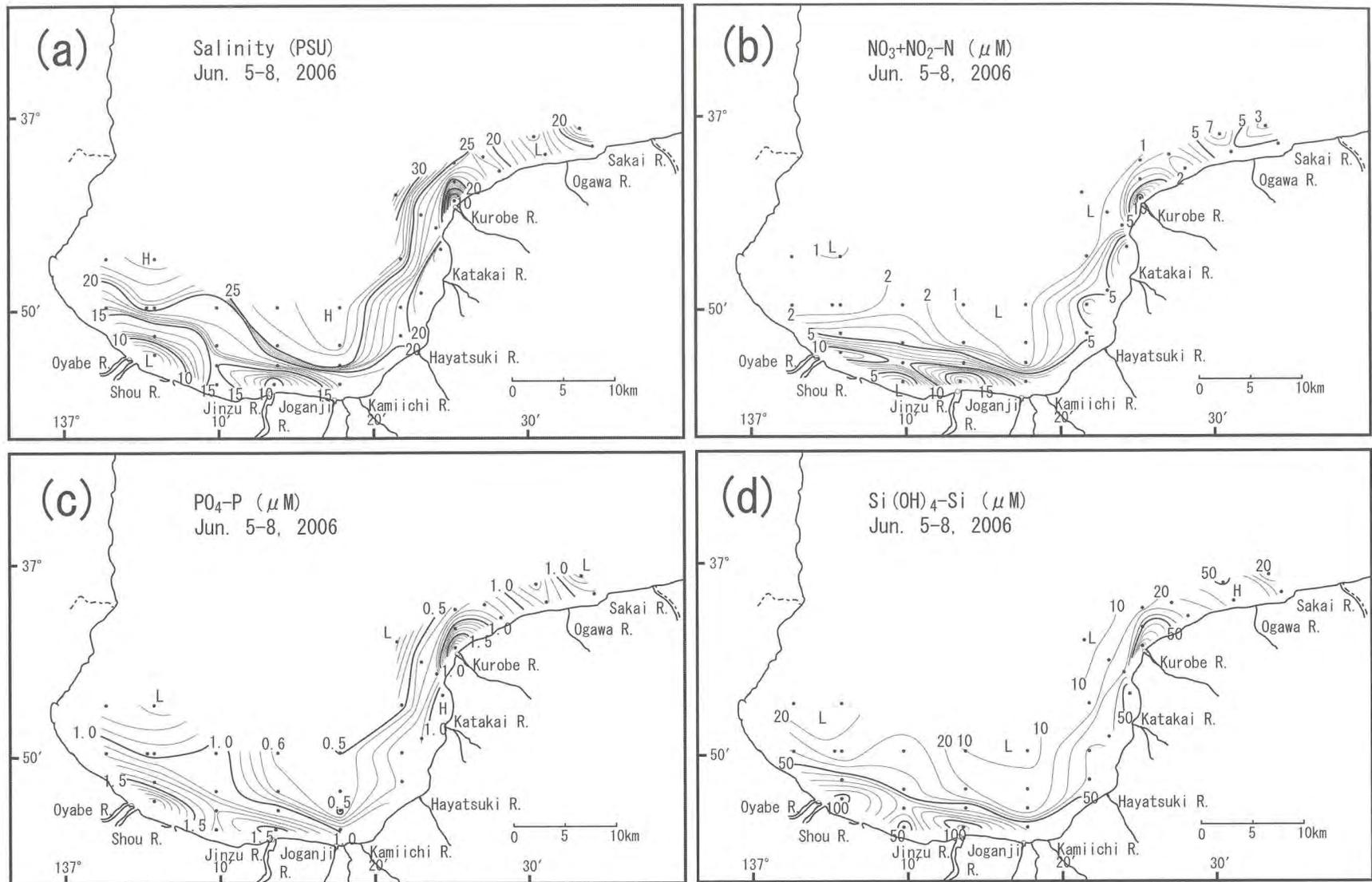


Fig. 2 Horizontal distributions of the concentration in the surface seawater in Toyama Bay coastal area, in June 5-8, 2006, of (a) salinity, (b) nitrate + nitrite, (c) phosphate and (d) silicic acid.

6月期（2006年6月5, 8日）における富山湾沿岸域の表層水の(a)塩分, (b)硝酸+亜硝酸態窒素, (c)リン酸態リンおよび(d)ケイ酸態ケイ素の濃度分布

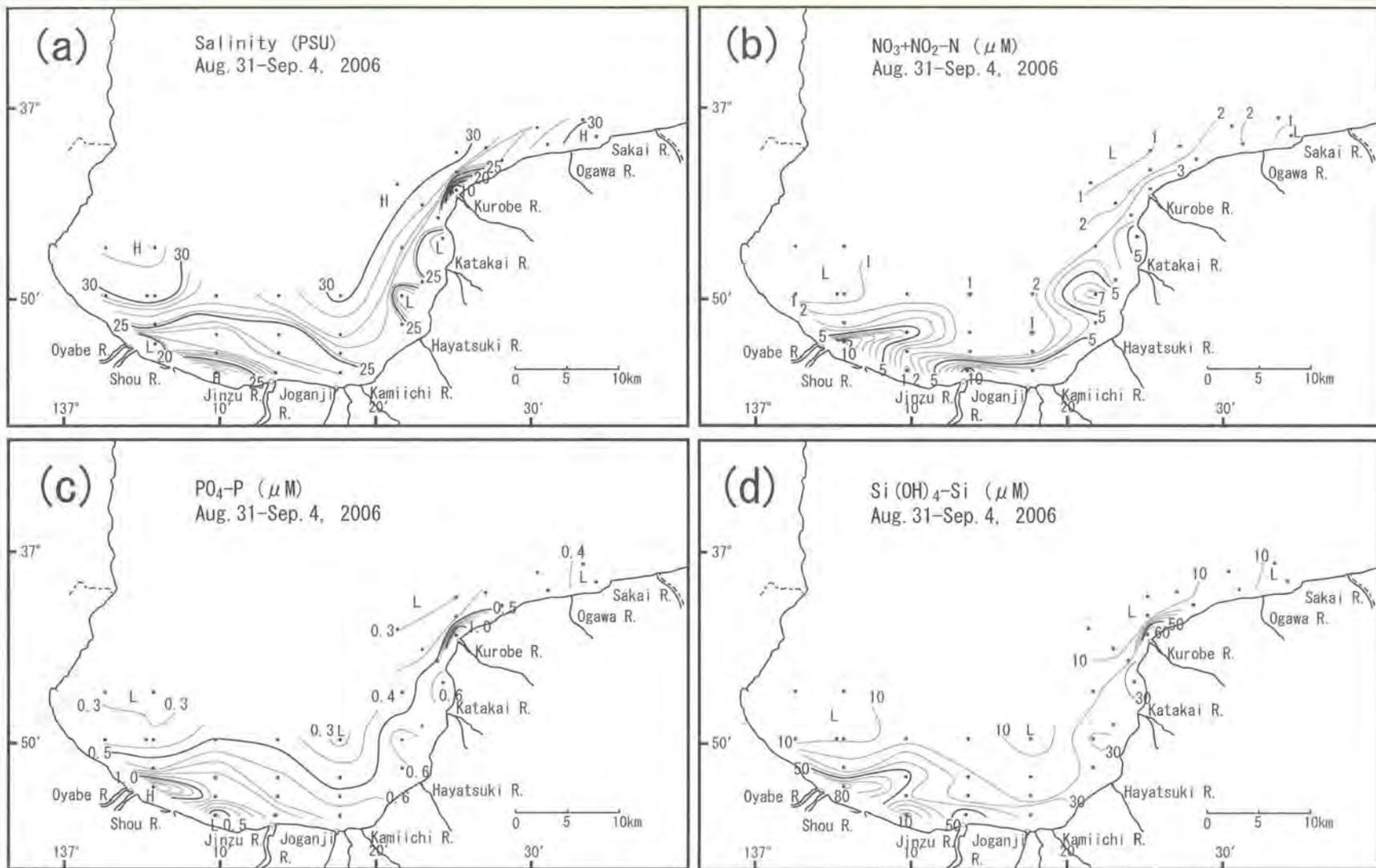


Fig. 3 Horizontal distributions of the concentration in the surface seawater in Toyama Bay coastal area, in August 31 – September 4, 2006, of (a) salinity, (b) nitrate + nitrite, (c) phosphate and (d) silicic acid.

8, 9月期 (2006年8月31日, 9月4日) における富山湾沿岸域の表層水の (a) 塩分, (b) 硝酸+亜硝酸態窒素, (c) リン酸態リンおよび (d) ケイ酸態ケイ素の濃度分布

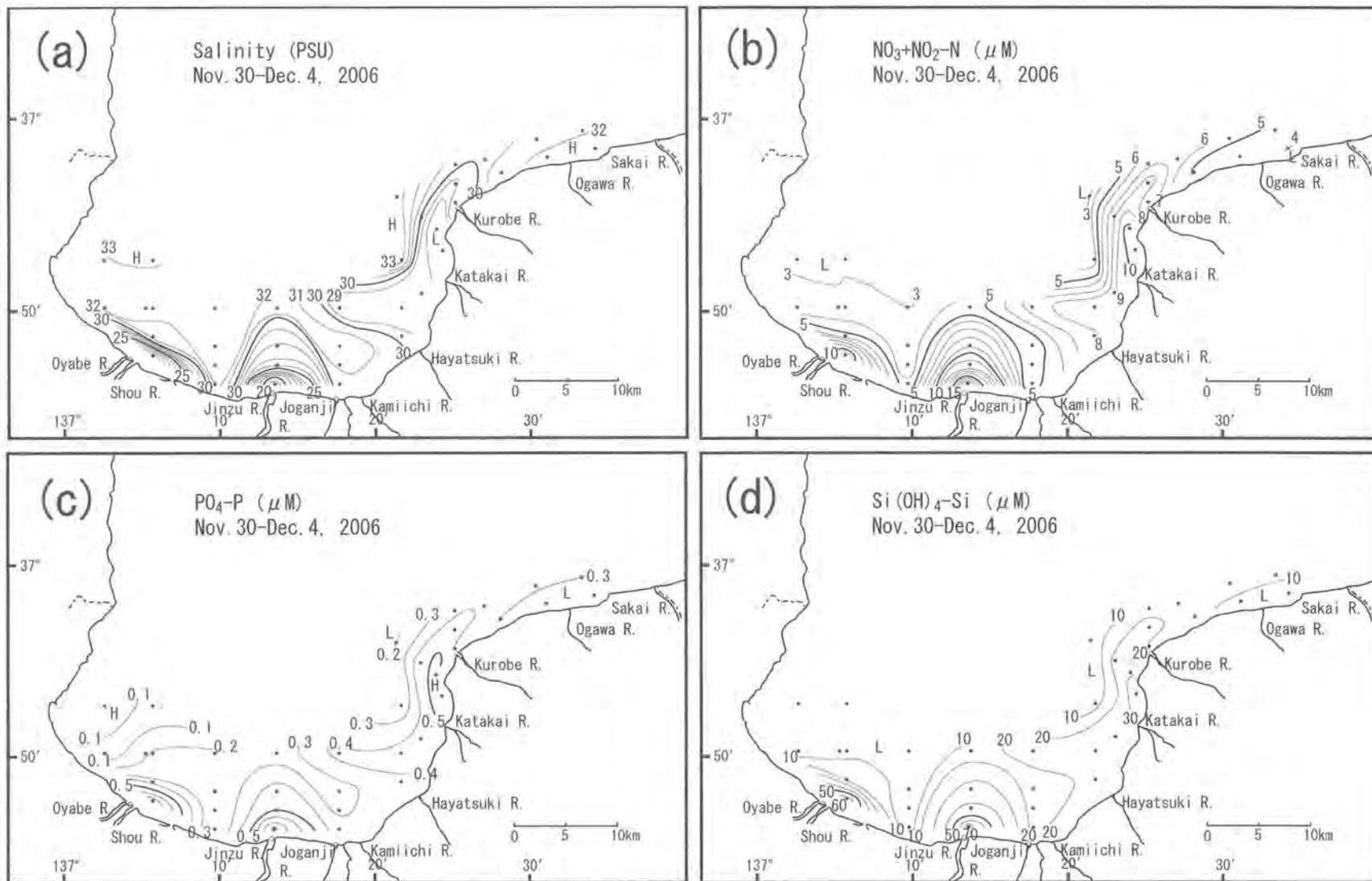


Fig. 4 Horizontal distributions of the concentration in the surface seawater in Toyama Bay coastal area, in November 30 – December 4, 2006, of (a) salinity, (b) nitrate + nitrite, (c) phosphate and (d) silicic acid.

11, 12月期 (2006年11月30日, 12月4日) における富山湾沿岸域の表層水の (a) 塩分, (b) 硝酸+亜硝酸態窒素, (c) リン酸態リンおよび (d) ケイ酸態ケイ素の濃度分布

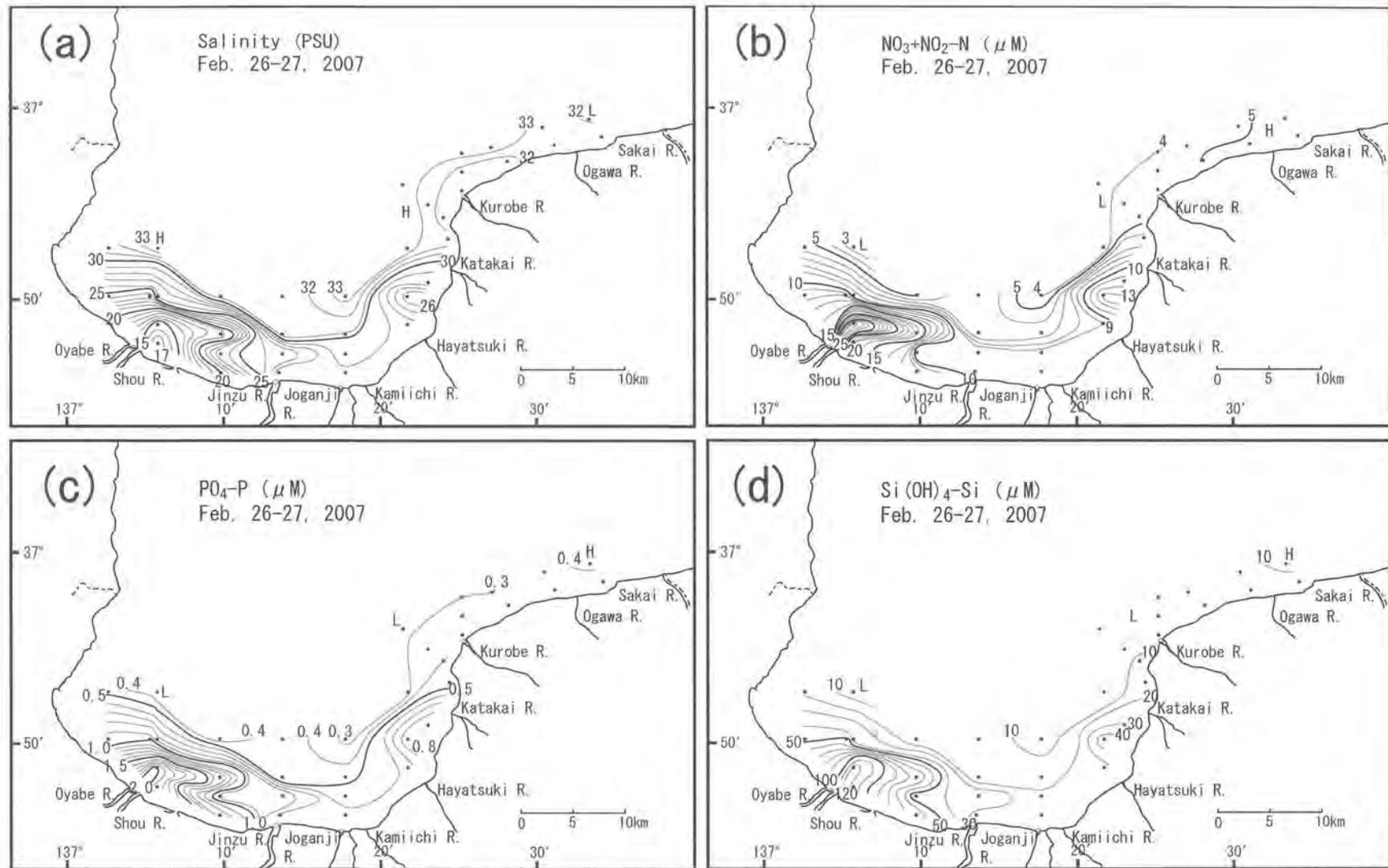


Fig. 5 Horizontal distributions of the concentration in the surface seawater in Toyama Bay coastal area, in February 26–27, 2007, of (a) salinity, (b) nitrate + nitrite, (c) phosphate and (d) silicic acid.
 2月期（2007年2月26、27日）における富山湾沿岸域の表層水の(a)塩分、(b)硝酸+亜硝酸態窒素、(c)リン酸態リンおよび(d)ケイ酸態ケイ素の濃度分布

さらに、小矢部川・庄川、神通川および黒部川を起源として、塩分15PSU等濃度線で示される河川水ブルーム（舌状の張り出し）がみられ、それぞれの河口から8km、6kmおよび2km沖にまで分布した。塩分20PSU以下の海域が、富山湾奥部のやや西よりに広く分布し、片貝川河口や小川河口海域の沿岸にもみられた（Fig. 2(a)）。硝酸+亜硝酸態窒素濃度は、河川水ブルームの分布と対応しているが、リン酸態リンやケイ酸態ケイ素と比べて沖合における濃度の低下が大きかった（Fig. 2(b)）。リン酸態リンとケイ酸態ケイ素の濃度分布は、河川水ブルームの分布と良く対応し、低塩分水の広がる沿岸で濃度が高く、沖合にかけて低下した（Fig. 2(c, d)）。

8, 9月期において、塩分は9.08~31.44PSUの範囲、水温は24.3~28.3°Cの範囲であった。黒部川河口海域の定点28において水温が最も低く、それ以外の定点は26.4~28.3°Cの範囲であった。小矢部川・庄川、神通川および常願寺川を起源とした河川水が一体となり、湾奥部には塩分25PSU以下の海域が広がっていた。さらに、早月川、片貝川および黒部川の河口海域にも、それぞれ25PSU以下の河川水ブルームがみられた（Fig. 3(a)）。硝酸+亜硝酸態窒素濃度では、小矢部川・庄川および神通川を起源として5.0 μ Mの等濃度線を指標とするブルームが、それぞれの河口から東側に広がっていた（Fig. 3(b)）。リン酸態リン濃度では、湾奥部に0.5 μ M以上の海域が広がっていた（Fig. 3(c)）。ケイ酸態ケイ素濃度では、小矢部川・庄川、神通川および黒部川を起源とする50 μ M等濃度線を指標とするブルームがみられた（Fig. 3(d)）。リン酸態リンと塩分の分布は良く一致したのに対し、硝酸+亜硝酸態窒素やケイ酸態ケイ素濃度分布は塩分分布との対応はリン酸態リンほど良くなく、沖合での濃度低下が顕著であった。

11, 12月期において、塩分は18.01~33.14PSUの範囲、水温は14.0~17.5°Cの範囲であった。小矢部川・庄川および神通川を起源として、塩分30PSU等濃度線で示される河川水ブルームがみられ、ともに河口から7kmの距離まで分布した。また、早月川、片貝川および黒部川の3河川の河川水が合わさった形で30PSU以下の低塩分域が湾東部に分布した（Fig. 4(a)）。硝酸+亜硝酸態窒素濃度では、小矢部川・庄川および神通川を起源として5.0 μ M等濃度線を指標とするブルームがみられ（Fig. 4(b)）、塩分分布と良く対応していた。リン酸態リンやケイ酸態ケイ素濃度も、それぞれ0.4 μ Mと20 μ M以上の濃度が塩分30PSU以下の分布域と良く対応していた（Fig. 4(c, d)）。

2月期において、塩分は12.50~33.57PSUの範囲、水温は8.8~12.5°Cの範囲であった。小矢部川・庄川を起源とする塩分25PSU等濃度線で示される河川水ブルームが、河口から東北東12km沖にまで広がっていた。河川水ブルームの分布が他の調査期と比べて小矢部川・庄川河口海域に限られ、塩分30PSU以下の海域が湾奥部に広く分布していた（Fig. 5(a)）。硝酸+亜硝酸態窒素濃度では、小矢部川・庄川を起源として10 μ M等濃度線を指標とするブルームがみられ（Fig. 5(b)）、塩分分布と良く対応していた。リン酸態リンやケイ酸態ケイ素濃度でも、それぞれ1.0 μ Mと50 μ M等濃度線が塩分25PSU等濃度線と良く対応していた（Fig. 5(a, c, d)）。

塩分と栄養塩濃度の関係 富山湾において河川水が沖合の対馬暖流水と混合しながら拡散しており、この過程において塩分と栄養塩（硝酸+亜硝酸態窒素、リン酸態リンおよびケイ酸態ケイ素）濃度がどのような関係にあったかをFig. 6に示した。また、塩分と栄養塩濃度のスピアマンの順位相関関係をTable 1に示した。

塩分と硝酸+亜硝酸態窒素濃度の関係（Fig. 6(a)）では、11, 12月期と2月期において、塩分が高くなるにしたがって硝酸+亜硝酸態窒素濃度が直線的に低下する傾向が認められ、それらの順

位相開け強かった(それぞれ
 び-0.976, -0.958, いずれも
 ダ0.01) . 一方, 6月期と8,9
 月期では, 塩分が高くなるに
 したがって硝酸+亜硝酸態窒素
 濃度が低下する傾向は認めら
 れるものの, 11,12月期や2月
 期と比べると直線関係は弱く
 なり(それぞれら=-0.888,
 -0.773, いずれも <0.001),
 刊こふくらんだ曲線関係を示
 した.

塩分とリン酸態リン濃度の
 関係(Fig.6(b))では, 全て
 の観測期において塩分が高く
 なるにしたがってリン酸態リン
 濃度が直線的に低下する傾
 向が認められ, それらの順位
 相関は強かった(乙=-0.974 ~
 -0.987, いずれもダ0.001).

塩分とケイ酸態ケイ素濃度
 の関係(Fig.6(c))では, H, 12
 月期と2月期において, 塩分が
 高くなるにしたがってケイ酸
 態ケイ素濃度が直線的に低下
 する傾向が認められ, それら
 の順位相関は強かった(それ
 ぞれら=-0.996, -0.992, いず

れら=-0.996, -0.992, いず
 001). 一方, 6月期と
 8,9月期では, 塩分が高くなる
 にしたがってケイ酸態ケイ素濃
 度も低下するが, 11,12月期や
 2月期と比べると直線関係は
 若干弱くなり(それぞれ
 び-0.955, -0.980, いずれも
 ダ0.001), やや下にふくらん
 だ曲線関係を示した.

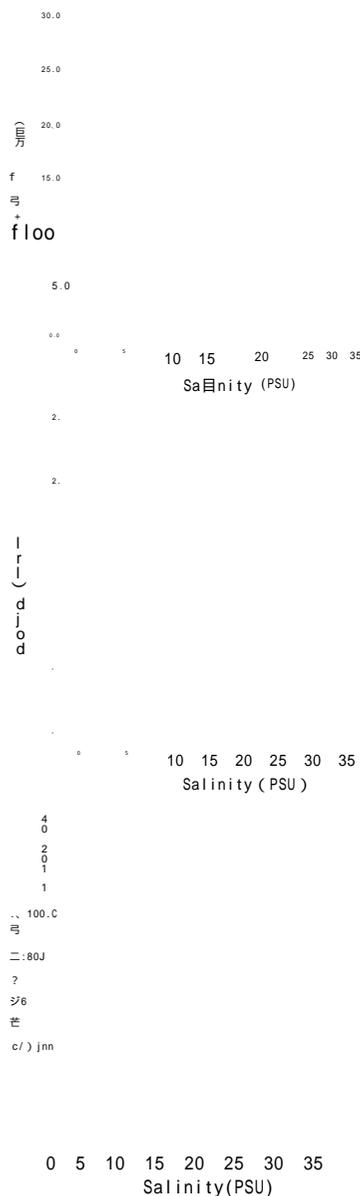


Fig. 6 Relationship between salinity and nutrient concentrations in the surface seawater in Iyama Bay coastal area, (a) salinity vs. nitrate+nitrite, (b) salinity vs. phosphate and (c) salinity vs. silicic acid. Symbols represent () June 5-8, 2006, () August 31 - September 4, 2006, () November 30 - December 4, 2006 and () February 26-27, 2007. Broken lines indicate the threshold values for diatom uptake based on Justic d (1995).

富山湾沿岸域の表層水における塩分と栄養塩濃度の関係
 (a) 塩分と硝酸+亜硝酸態窒素, (b) 塩分とリン酸態リンおよび(c) 塩分とケイ酸態ケイ素
 () 6月期(2006年6月5, 8日), () 8,9月期(2006年8月31日, 9月4日), () 11,12月期(2006年11月30日, 12月4日)および() 2月期(2007年2月26, 27日)
 点線は, Justic d (1995)に基づく珪藻類の栄養塩取り込みに関する下限濃度を表す.

Table 1 Spearman's rank correlation matrix of salinity and nutrient concentrations(nitrate + nitrite, phosphate and silicic acid) in the surface seawater in Toyama Bay coastal area at ①Jun. 5-8, 2006, ②Aug. 31-Sep. 4, 2006, ③Nov. 30-Dec. 4, 2006 and ④Feb. 26-27, 2007.

富山湾沿岸域の表層水における塩分と栄養塩（硝酸+亜硝酸態窒素，リン酸態リンおよびケイ酸態ケイ素）濃度に関するスピアマンの順位相関関係
 調査期は，①2006年6月5～8日，②2006年8月31日～9月4日，③2006年11月30日～12月4日および④2007年2月26～27日

	Salinity			
	①Jun. 5-8, 2006.	②Aug. 31-Sep. 4, 2006.	③Nov. 30-Dec. 4, 2006.	④Feb. 26-27, 2007
Nitrate + nitrite	-0.888***	-0.773***	-0.976***	-0.958***
Phosphate	-0.985***	-0.987***	-0.974***	-0.983***
Silicate	-0.955***	-0.980***	-0.996***	-0.992***

*** : $p < 0.001$

栄養塩間の関係と制限栄養塩 富山湾沿岸域の表層水における植物プランクトンの増殖に及ぼす栄養塩の影響を評価するため，各栄養塩濃度間をFig. 7に示した．なお，ここでは植物プランクトンの増殖を制限している栄養塩を推定する指標として，Justic *et al.* (1995) が提案した濃度と組成比(窒素制限; $DIN < 1 \mu M$, $DIN/DIP < 10$, $DSi/DIN > 1$ ，リン制限; $DIP < 0.1 \mu M$, $DIN/DIP > 22$, $DSi/DIP > 22$ ，ケイ素制限; $DSi < 2 \mu M$, $DSi/DIP < 10$, $DSi/DIN < 1$) を用い，図中に点線で示した．

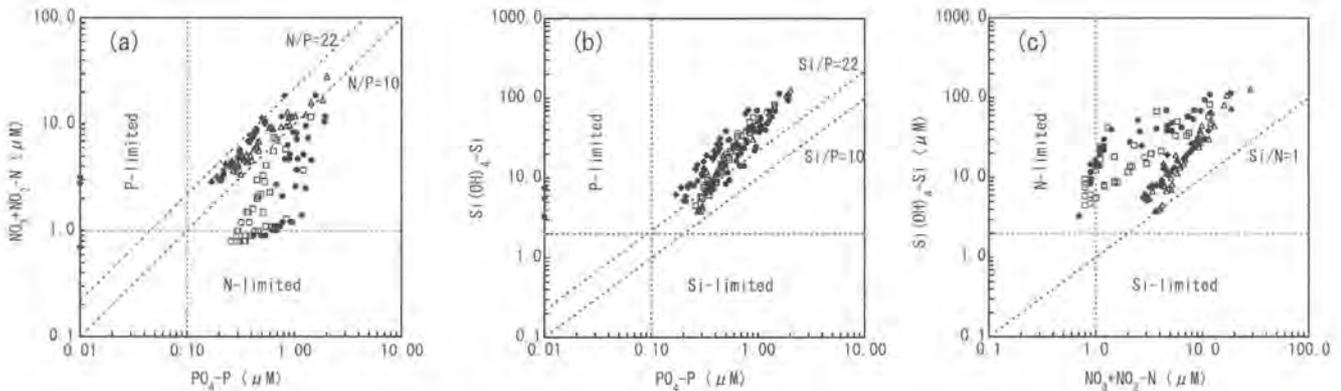


Fig. 7 Relationship on each nutrient concentration in the surface seawater in Toyama Bay coastal area, (a) phosphate vs. nitrate + nitrite, (b) phosphate vs. silicic acid and (c) nitrate + nitrite vs. silicic acid. Symbols represent (●) June 5-8, 2006, (□) August 31 – September 4, 2006, (◆) November 30 – December 4, 2006 and (△) February 26-27, 2007. Broken lines represent the diatom elemental ratios and threshold values for diatom uptake based on Justic *et al.* (1995).

富山湾沿岸域の表層水における各栄養塩の関係

(a) リン酸態リンと硝酸+亜硝酸態窒素，(b) リン酸態リンとケイ酸態ケイ素および(c) 硝酸+亜硝酸態窒素とケイ酸態ケイ素

(●)6月期 (2006年6月5, 8日)，(□)8,9月期 (2006年8月31日, 9月4日)，(◆)11,12月期 (2006年11月30日, 12月4日) および(△)2月期 (2007年2月26, 27日)

点線は，Justic *et al.* (1995) に基づき珪藻類の元素組成比と栄養塩取り込みに関する下限濃度を表す．

リン酸態リンと硝酸+亜硝酸態窒素濃度の関係 (Fig. 7(a)) をみると、DIN/DIP<10の範囲にあったのは6月期の34定点、8、9月期の33定点および2月期の2定点であったが、そのうちDIN<1 μMであったのは6月期の6定点と8、9月期の8定点であった。これらの定点における塩分はそれぞれ26および29PSU以上であった (Fig. 6(a))。一方、DIN/DIP>22であったのは6月期の1定点と11、12月期の4定点で、このうち6月期の1定点と11、12月期の2定点におけるDIP濃度は下限濃度の指標である0.1 μMを下回った。

リン酸態リンとケイ酸態ケイ素濃度の関係 (Fig. 7(b)) では、DSi/DIP<10の範囲にある定点は認められなかった。一方、多くの定点がDSi/DIP>22の範囲にあったが、そのうちDIP<0.1 μMであったのは、DIN/DIP>22であった6月期の1定点と11、12月期の2定点であった。

硝酸+亜硝酸態窒素とケイ酸態ケイ素濃度の関係 (Fig. 7(c)) では、全定点でDSi/DIN比が1以上であった。そのうちDIN<1 μMであったのは6月期の6定点と8、9月期の8定点であり、これらの定点におけるDIN/DIP比は6月期の1定点を除きいずれも10以下であった。

硝酸+亜硝酸態窒素、リン酸態リンおよびケイ酸態ケイ素について、それぞれの栄養塩濃度間のスピアマンの順位相関関係をTable 2に示した。全ての観測期において、それぞれの栄養塩濃度間には有意な正の相関がみられた (すべてp<0.001)。なかでも11、12月期と2月期では、全ての栄養塩濃度間にr_s=0.96以上の強い相関がみられた。一方、6月期における硝酸+亜硝酸態窒素とリン酸態リン濃度、8、9月期における硝酸+亜硝酸態窒素とリン酸態リン濃度および硝酸+亜硝酸態窒素とケイ酸態ケイ素濃度の順位相関は、やや弱くなる傾向があった。

Table 2 Spearman's rank correlation matrix of nutrient concentrations (nitrate + nitrite, phosphate and silicic acid) in the surface seawater in Toyama Bay coastal area at ①Jun. 5-8, 2006, ②Aug. 31-Sep. 4, 2006, ③Nov. 30-Dec. 4, 2006 and ④Feb. 26-27, 2007.

富山湾沿岸域の表層水における栄養塩 (硝酸+亜硝酸態窒素、リン酸態リンおよびケイ酸態ケイ素) 濃度間に関するスピアマンの順位相関関係
調査期は、①2006年6月5～8日、②2006年8月31日～9月4日、③2006年11月30日～12月4日および④2007年2月26～27日

①Jun. 5-8, 2006.

	Nitrate + nitrite	Phosphate
Phosphate	0.855***	
Silicate	0.949***	0.922***

②Aug. 31-Sep. 4, 2006.

	Nitrate + nitrite	Phosphate
Phosphate	0.776***	
Silicate	0.780***	0.978***

③Nov. 30-Dec. 4, 2006.

	Nitrate + nitrite	Phosphate
Phosphate	0.986***	
Silicate	0.980***	0.974***

④Feb. 26-27, 2007.

	Nitrate + nitrite	Phosphate
Phosphate	0.966***	
Silicate	0.973***	0.985***

*** : p<0.001

考 察

本研究では、富山湾沿岸域の表層水における塩分と栄養塩濃度の分布を季節ごとに調べた。長田・奈倉 (1993) は、富山湾における河川水の及んだ水域を対馬暖流水の最低塩分である33PSU以下の水域として“低塩分域”と定義している。本研究においても、全ての観測期で富山湾沿岸域の表層に低塩分域が広く分布することを確認した。栄養塩（硝酸+亜硝酸態窒素、リン酸態リンおよびケイ酸態ケイ素）濃度の分布は、塩分分布と非常に良く対応しており、栄養塩濃度が低塩分域で高く、高塩分域で低かった (Figs. 2~6)。富山湾沿岸域の表層水には、河川から多くの栄養塩が供給されていると考えられる。富山湾における塩分や栄養塩濃度の分布は、これまで永原 (1984)、長田ら (1988) および長田・奈倉 (1993) によって、沿岸域には低塩分で高濃度の栄養塩が分布することが明らかにされてきた。今回の研究では、観測定点を多く配置したことにより、富山湾沿岸域において河川水が広い範囲で表層に広がっていることが明らかとなった。

全ての観測期において共通してみられた分布の特徴として、河川から供給された栄養塩を多く含む低塩分水は、湾奥部海域から東部海域の沿岸に沿って分布することが挙げられる。富山湾の海洋構造は3つの水塊から構成されており、水深300m以深には水温2~3°Cの日本海固有水、その上には温暖な対馬暖流水があり、さらに岸近くの表層には河川水の影響で塩分の低くなった沿岸表層水がある (内山 2005)。富山湾の流動環境は、平均的には反時計回りの流動パターンの存在が指摘されており、能登半島側から対馬暖流水が入り込み、新潟県側から湾外に出ることが多い (今村ら 1985, 内山 1993)。また、富山湾には5つの一級河川と29の二級河川が流入する。一級河川の年平均流量(1993~2002年平均)は、小矢部川60.37m³/s、庄川33.05m³/s、神通川172.77m³/s、常願寺川19.31m³/sおよび黒部川86.48m³/sであり (日本河川協会 2004)、小矢部川、庄川および神通川から湾奥部に多くの河川水が供給されている。河川水は、海水よりも低密度であるため表層付近に留まりやすく、さらに、日本海の潮汐は約0.3mと小さく (長沼 2000)、潮汐による対馬暖流水との混合が少ないことが、低塩分水が表層に広く分布する要因と考えられる。また、コリオリの力によって、北半球における河川水は海域に出ると岸を右側にみて流れる (Takano 1955)。したがって、対馬暖流水が富山県沿岸では反時計回りに西から東に流れることが多いこと、潮汐による混合が小さいことおよびコリオリの力が合わさることによって、小矢部川・庄川河口海域から東側の湾奥部海域、東部海域および黒部川以東海域にかけて低塩分度高栄養塩濃度の分布がみられることが多いと考えられる。

季節的な分布の違いとして、春季 (6月期) ~秋季 (11,12月期) は、主要な流入河川の河口を基点として低塩分水の分布がみられたが、冬季 (2月期) には小矢部川・庄川河口周辺海域に低塩分水の分布に限られた。北陸に位置する富山県において、冬季には雪が陸地に積もるため河川水の大出水が少なくなることや、海域では冬型の気圧配置によって波浪が強く海水との混合が強まることにより、低塩分水の分布が限定されると考えられる。今回の観測において小矢部川・庄川河口海域にみられた低塩分水の分布は、冬季の塩分分布の一例と考えられる。

塩分と硝酸+亜硝酸態窒素濃度との関係を見ると、11,12月期と2月期には両者の間に強い負の相関が認められたが、6月期と8,9月期には直線関係は弱まり下にふくらんだ曲線関係を示した (Fig. 6(a))。直線関係は、栄養塩が低濃度の沖合海水と高濃度の低塩分水が単純希釈しているこ

とを表し、下にふくらんだ曲線関係は低塩分水が沖合海水と混合しながら希釈・拡散し、さらに植物プランクトンによって生物的に利用されて除去されていることを意味している（佐々木 1998）。富山湾沿岸域において、6月期と8,9月期では、硝酸+亜硝酸態窒素濃度の低い対馬暖流水と濃度の高い低塩分水が混合希釈しながらも植物プランクトンによって硝酸+亜硝酸態窒素が効率的に利用されていたと考えられる。一方、11,12月期と2月期は植物プランクトンによる栄養塩の取り込みは6月期や8,9月期よりも小さく、河川水は主に単純希釈しながら拡散したと考えられる。

塩分と硝酸+亜硝酸態窒素の関係では、リン酸態リンやケイ酸態ケイ素の関係よりも6月期と8,9月期における低塩分域でのばらつきが大きかった（Fig. 6）。また、塩分とケイ酸態ケイ素濃度との関係では、栄養塩の塩分に対する減少傾向が硝酸+亜硝酸態窒素と類似していた。一方、リン酸態リン濃度については、全ての観測期において塩分との間に強い負の相関が認められ、保存的な分布を示していた（Fig. 6(b)）。2006年の6月期や8,9月期には富山湾の神通川河口海域において珪藻類の*Chaetoceros* spp.や*Skeletonema costatum*が優占し、クロロフィルa濃度が5~7 $\mu\text{g/L}$ であったことが報告されている（富山県水産試験場 2007）。したがって、河川から供給された硝酸+亜硝酸態窒素やケイ酸態ケイ素は、6月期や8,9月期において植物プランクトンに利用され水中から除去される割合が大きかったのに対し、リン酸態リンはその割合が小さかったと考えられる。

塩分と各栄養塩濃度との関係では、8,9月期の塩分が9.08PSUと低い定点において、他の定点よりも栄養塩濃度が低い所がみられた（Fig. 6）。これは、黒部川河口の定点28における観測値であり、主要河川からの人為的な栄養塩負荷量が異なっていることを反映した結果と考えられる。富山県内の河川の水質を調べた高倉（1989）は、小矢部川と神通川では長い流路延長上に上流域まで人間活動の場があるため清浄さが劣っており、黒部川ではその場が狭く県内で最も清浄であるとしている。各河川の栄養塩濃度の違いが、それぞれの河口海域の濃度差を生ずる要因のひとつと考えられる。

栄養塩は植物プランクトンの増殖を支配する重要な環境要因のひとつであることから、海水中に存在する栄養塩濃度や組成比を基に、植物プランクトンの増殖を制限している栄養塩を推定する試みがなされてきた。本報では、既往知見を基にJustic *et al.* (1995) が提案した指標を用いて、富山湾沿岸域の表層において、(1) 栄養塩が植物プランクトンの増殖を制限している可能性および(2) 栄養塩が植物プランクトンの増殖を制限している場合に制限となっている栄養塩、の2点について検討した。各季節ともほとんどの定点において、硝酸+亜硝酸態窒素濃度は下限濃度である1 μM を上回ったが、6月期および8,9月期には、比較的高塩分の定点、すなわち河口域から離れた定点において植物プランクトンが窒素により制限されている可能性が示唆された。一方、リン酸態リンとケイ酸態ケイ素については、いずれの季節においても、ほぼ全定点で下限濃度を上回っていたことから、富山湾沿岸域の表層において、リンやケイ素が植物プランクトンの増殖を制限している可能性は低いものと推定された。

長田（1994）は、信濃川や阿賀野川の影響下にある新潟県沿岸域において、窒素が植物プランクトンの制限要因となっていることを報告している。富山湾沿岸域の表層水においても、新潟県沿岸域と同様に窒素が制限要因である場合が多いことが示唆される。

本研究ではDINとして硝酸+亜硝酸態窒素のみを取り上げ、アンモニア態窒素を考慮していな

い。富山県水産試験場 (2007) には、本調査と同時期における神通川河口海域 (Stns.13~15)、常願寺川河口海域 (Stns.17~19) および黒部川河口海域 (Stns.28~30) の9定点でのみアンモニア態窒素の分析値が報告されている。これによると、神通川河口海域ではアンモニア態窒素濃度は $<0.1\sim 15.8\mu\text{M}$ の範囲でDINに占める割合は $0\sim 45.9\%$ (平均 26.5%)、常願寺川河口海域では同様に濃度が $<0.1\sim 8.8\mu\text{M}$ で割合が $0\sim 51.2\%$ (平均 20.3%) および黒部川河口海域では濃度が $<0.1\sim 1.9\mu\text{M}$ で割合が $0\sim 31.7\%$ (平均 9.5%) であった。DINに占めるアンモニア態窒素の割合は平均的に低く、主体は硝酸+亜硝酸態窒素であることが多かった。また、アンモニア態窒素は、硝酸+亜硝酸態窒素よりも沖合での濃度低下が顕著であり、硝酸+亜硝酸態窒素濃度が $1\mu\text{M}$ 未満で窒素制限となった高塩分域ではアンモニア態窒素の影響は非常に小さいと考えられる。一方、各河川の河口に近い定点ではDINに占めるアンモニア態窒素の割合が高かったため、低塩分域ではより窒素源が豊富にあり、窒素源の不足を過大評価している可能性がある。

富山湾沿岸域の表層水には、河川由来のケイ酸態ケイ素が多く存在することが明らかとなった (Figs. 2~6)。Officer and Ryther (1980) は、ケイ酸態ケイ素が豊富な海洋環境は、珪藻類の増殖にとって有利に働き、動物プランクトンや魚類への生産に結びつきやすいが、ケイ酸態ケイ素が少なく人為起源の窒素やリンが過剰に供給された海域では、しばしば有害・有毒な種を含む渦鞭毛藻類が増殖しやすくなることを報告している。したがって、富山湾の漁場環境を健全に保つためには、人為的に排出される窒素やリンの過剰な負荷を削減することが必要であり、さらに、河川におけるダム等による水の停滞や用水への取水を制御し、河川流量を維持することでケイ酸態ケイ素の海域への供給量を保つことが重要であると考えられる。

本研究では、富山湾沿岸域における表層水の塩分や栄養塩濃度の分布を季節ごとに調べ、河川水が及ぼす影響が大きいことを明らかにした。また、栄養塩濃度比や下限濃度の観点から、河口域から離れた比較的塩分の高い海域において、窒素が植物プランクトンの増殖を制限する可能性が高いことが示唆された。富山湾の水質を管理していくためには、河川水の影響を強く受けた海域における栄養塩や汚濁物質などの負荷を制御することが重要である。さらに、藤原 (2007, 2008) や山本・橋本 (2007) は、河川の流入に伴うエスチャリー循環によって、下層からの栄養塩供給が生物生産に寄与していることを指摘している。また、張・佐竹 (2002) や八田ら (2005) は、富山湾において地下水が海底から湧き出る海底湧水によっても多くの栄養塩が供給されていることを報じている。今後は、各水深帯の水質調査によって、富山湾全体の物質循環や基礎生産を明らかにすることが期待される。

要 約

富山湾沿岸域の表層水における栄養塩 (硝酸+亜硝酸態窒素、リン酸態リンおよびケイ酸態ケイ素) 濃度と塩分の分布を調べた。富山湾に36地点を設定し、2006年6月から2007年2月にかけて、季節ごとに年4回の調査を実施した。全ての調査において、富山湾沿岸域の表層には低塩分水が広く分布していた。栄養塩濃度は、低塩分域で高く、高塩分域で低かった。いずれの季節においても塩分と栄養塩濃度の間には強い負の相関がみられたことから、富山湾沿岸域の表層水における栄養塩は主に河川から供給されていると考えられる。富山湾沿岸域の表層水における植物プラン

クトンの増殖を制限している栄養塩を明らかにするために、栄養塩濃度と珪藻類の元素構成比や栄養塩取り込みに関する下限濃度と比較したところ、窒素が主な制限要因であることが明らかとなった。また、富山湾沿岸域の表層水には硝酸+亜硝酸態窒素やリン酸態リンに対し、相対的にケイ酸態ケイ素が豊富に存在していることから、珪藻類の増殖に適した栄養塩環境にあると考えられる。

謝 辞

本研究を実施するにあたり、富山県水産試験場（現富山県農林水産総合技術センター水産研究所）の栽培漁業調査船「はやつき」と漁業調査船「立山丸」の乗組員の方々にご協力いただきました。論文をとりまとめるにあたり、独立行政法人水産総合研究センター瀬戸内海区水産研究所樽谷賢治博士にはご指導とご助言を賜りました。ここに記して感謝の意を表します。

文 献

- 張 勁・佐竹 洋 2002. 富山湾における海底湧水. 海洋と生物 141: 294-301.
- 藤原建紀 2007. 河口域および内湾域におけるエスチュアリー循環流. 沿岸海洋研究 44: 95-106.
- 藤原建紀 2008. 日本海とその流入河川 pp. 222-233, 川と海 流域圏の科学 (宇野木早苗・山本民次・清野聡子編). 築地書館, 東京.
- 八田真理子・張 勁・佐竹 洋・石坂丞二・中口 譲 2005. 富山湾の水塊構造と河川水・沿岸海底湧水による淡水フラックス. 地球化学 39: 157-164.
- 今村 明・石森繁樹・川崎賢一 1985. 富山湾Ⅱ物理 pp. 990-1000, 日本全国沿岸海洋誌 (日本海洋学会沿岸海洋研究部会編). 東海大学出版会, 東京.
- Justic D., N. N. Rabalais, R. E. Turner and Q. Dortch 1995. Changes in nutrient structure of river-dominated coastal waters: Stoichiometric nutrient balance and its consequences. Estuarine, Coastal and Shelf Science 40, 339-356.
- 永原正信 1984. 富山湾の栄養塩類とクロロフィル-aの季節変動 pp. 183-204. 海洋生物資源の生産能力と海洋環境に関する研究, 北陸沿岸地域調査成果報告, 日本海区水産研究所.
- 長沼光亮 2000. 生物の生息環境としての日本海. 日本海区水産研究所研究報告 50: 1-42.
- 長田 宏・木谷浩三・広田祐一 1988. 富山湾奥部における表層水連続測定結果-1987年5月-. 日本海区水産研究所研究報告 38: 1-8.
- 長田 宏・奈倉 昇 1993. 富山湾における河川水の流入とクロロフィルa濃度の季節変動. 日本海区水産研究所研究報告 43: 55-68.
- 長田 宏 1994. 新潟県沿岸における河川水起源の栄養塩分布の季節変動. 水産海洋研究 58: 1-9.
- 日本河川協会 2004. 日本河川水質年鑑. 838pp. 東京.
- Officer, C. B. and J. H. Ryther 1980. The possible importance of silicon in marine eutrophication. Marine Ecology Progress Series 3: 83-91.
- 大西美奈・石坂丞二・笠原一世・長田 宏・白山 肇・内山 勇・寺内元基 2007. 海色衛生によ

- って観測された富山湾における1998年と1999年のクロロフィルa濃度分布. 海の研究 16: 7-22.
- 佐々木克之 1998. 沿岸生態系における酸素, 窒素, 炭素およびリンの循環 pp. 275-281, 沿岸の環境圏 (平野敏行編). フジ・テクノシステム, 東京.
- 高倉盛安 1989. 富山県内代表河川の中流部における平均水質とそれらの特徴. 富山県立技術短期大学研究報告 23: 53-65.
- Takano, K. 1955. A complementary note on the diffusion of seaward river flow off the mouth. Journal of the Oceanographical Society of Japan 11: 147-149
- 寺内元基・石坂丞二 2007. 衛星データを用いた富山湾における富栄養化のモニタリング. 沿岸海洋研究 45: 43-49.
- 富山県水産試験場 1975. 伏木外港建設に伴う漁業関係調査報告書. 173pp.
- 富山県水産試験場 2007. 富山湾の漁場環境 (2006) -水質・底質・藻場・餌料環境-. 平成18年度富山湾漁場環境総合調査報告書. 204pp.
- 富山湾水質保全研究会 2001. 平成12年度富山湾水質保全研究会報告書-富山湾の水質汚濁について- pp. 3-37-3-43, 富山県生活環境部環境保全課, 富山.
- 内山 勇 1993. 富山湾及び周辺海域の平均的流動パターン. 富山県水産試験場研究報告 4: 11-30.
- 内山 勇 2005. 富山湾の構造 pp. 22-23. 富山湾を科学する (富山県水産試験場編). 北日本新聞社, 富山.
- 山本民次・橋本俊也 2007. エスチュアリー循環と一次生産. 沿岸海洋研究 44: 137-145.