

富山湾奥部の神通川河口海域における表層クロロフィル *a* 濃度の推移

辻本 良^{*1}・加藤 繭^{*1*2}・小善圭一^{*1*3}・飯田直樹^{*1*3}・
小塚 晃^{*1*4}・北川慎介^{*1*3}・井口直樹^{*5}
(2021年7月5日受理)

Temporal variation of chlorophyll-*a* concentration in surface water in the Jinzu River mouth area, innermost part of Toyama Bay

TSUJIMOTO Ryo, KATO Mayu, SHOZEN Keiichi, IIDA Naoki, KOZUKA Akira,
KITAGAWA Shinsuke and IGUCHI Naoki

Temporal variations of temperature, salinity and chlorophyll-*a* concentration (Chl-*a*) in surface water were investigated in the Jinzu River mouth area, innermost part of Toyama Bay, from April, 2006 to March, 2018. Low salinity was observed at the station near the river mouth, while salinity gradually increased toward the offshore. Mean Chl-*a* in the station near the river mouth was lower than values of the offshore stations. Phytoplankton growth was limited by the low salinity water in the vicinity of the river mouth, while Chl-*a* gradually increased in the process mixing riverine water and seawater by utilizing the nutrients mainly supplied from the river. Medium trophic status indicated by the Chl-*a* ($> 5, \leq 20 \mu\text{g L}^{-1}$) was ranged at temperature 14.8 – 29.3 degree Celsius and salinity 1.4 – 30.1. Medium trophic status was mainly observed from June to September, while low trophic status (Chl-*a* $\leq 5 \mu\text{g L}^{-1}$) in other months. No trend of Chl-*a* in the Jinzu River mouth area was detected during the 12-year period from 2006 to 2018, thus eutrophication or oligotrophication has not progressed in this area. The Jinzu River mouth area is an appropriate trophic status maintaining the feeding habitat and productivity.

Key words: Toyama Bay, Jinzu River, chlorophyll-*a*, temperature, salinity

*1 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 and Fisheries Research Center, Namerikawa, Toyama 936-8536, Japan)

*2 現所属 富山県農林水産総合技術センター (Toyama Prefectural Agricultural, Forestry and Fisheries Research Center, 1124-1, Yoshioka, Toyama, Toyama 939-8153, Japan)

*3 現所属 富山県水産漁港課 (Toyama Prefectural Fisheries and Fishing Ports Division, 5-13, Sakurabashi-dori, Toyama, Toyama 930-0004, Japan)

*4 現所属 公益財団法人環日本海環境協力センター (Northwest Pacific Region Environmental Cooperation Center, 5-5, Ushijimashin-machi, Toyama, Toyama 930-0856, Japan)

*5 国立研究開発法人水産研究・教育機構水産資源研究所新潟庁舎 (Niigata Field Station, Fisheries Resource Institute, Japan Fisheries Research and Education Agency, 1-5939-22, Suido-cho, Chuou-ku, Niigata, Niigata 951-8121, Japan)

富山湾では、日本海で確認されている1,396種の魚類のうち614種が確認され(河野ら 2014), 魚卵では14種, 仔稚魚では75種の季節変化と鉛直分布が示されている(林 1990). このような多種多様な仔稚魚の生育には, 植物プランクトンや動物プランクトンといった餌料環境が整っていることが重要である. 富山湾奥部の神通川河口海域では, マクロサイズの珪藻類が優占することが確認されている(富山県水産試験場 2007). 富山湾中央部における植物プランクトン群集の優占順位は, 種数および細胞数のいずれでみても珪藻, 渦鞭毛藻, 珪質鞭毛藻の順で高かった(谷口ら 1997). 神通川河口海域における動物プランクトンに関しては, 暖水性の橈脚類と枝角類や沿岸性または冷水性の橈脚類が主要種であることが示された(富山県水産試験場 2007, 富山県農林水産総合技術センター水産研究所 2013). また, 湾中央部の動物プランクトンについては, その種組成, 季節変化および生息密度が報告されている(Hirakawa *et al.* 1992, 池田 2001). 若狭湾から能登半島北部の海域では暖水性の, 富山湾では冷水性の動物プランクトンが卓越し(Kodama *et al.* 2018), イワシ類仔魚の胃内容物も両海域の群集組成を反映している(平川・後藤 1996, Hirakawa *et al.* 1997). 動物プランクトンを餌料とする水産上重要種として, 富山湾沿岸では, マイワシ仔魚(平川・後藤 1996), カタクチイワシ仔稚魚(井口・辻本 1997, Hirakawa *et al.* 1997) およびアユ仔魚(田子 2002)のほか, ホタルイカ幼生(林 1995, 林・平川 1997) やシラエビ(Nanjo 2007, Nanjo and Katayama 2014)などが確認されており, これらの生息場や摂餌場となっている.

植物プランクトン現存量の指標として, 海水中のクロロフィル *a* 濃度が一般的に用いられている(Parsons *et al.* 1984). 富山湾奥部には, 神通川から硝酸態窒素, リン酸態リンおよびケイ酸態ケイ素といった栄養塩が供給されている(辻本 2009). これらの栄養塩を吸収して植物プランクトンが増殖し, 夏季を中心にクロロフィル *a* 濃度のピークが観測されている(辻本 2012). 一方, 瀬戸内海では, 陸域由来の栄養塩負荷量を削減した結果, 海域での貧栄養化が進み, 漁業生産量の減少が問題となっている. 持続的な漁業生産量を確保するためには, 陸域から適度な栄養塩負荷量を保ち, 植物プランクトンによる基礎生産量を確保することが重要であることが指摘されている(山本 2014). 柳(2018)は, 瀬戸内海において, クロロフィル *a* 濃度を $4.5 \mu\text{g L}^{-1}$, 透明度を6mとすることで, 生物多様性と生産性を高く保つことができると報じている. 神通川河口海域における植物プランクトン現存量の指標となるクロロフィル *a* 濃度の変動要因を明らかにすることは, 富山湾の基礎生産や沿岸環境の保全を図るうえで重要な知見となる.

本報では, 富山湾に流入する河川のなかで最も流量が大きい神通川が海域に与える影響を考慮し, 基礎生産や富栄養化の指標となるクロロフィル *a* 濃度について, 2006年4月~2018年3月にわたる12年間の中期的な動向について報告する.

材料と方法

調査域の概要 富山湾は日本海中央部の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 $2,120 \text{ km}^2$, 最大水深1,250 m, 全容積約 $1,280 \text{ km}^3$ の外洋性内湾である(今村ら 1985). 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（長田ら 1988, 長田・奈倉 1993, 辻本 2009, 2012）. なかでも神通川は富山県下の全河川流量の 33% を占め, 全窒素や全リンの負荷量はそれぞれ全河川流入負荷量の 57% および 28% を占め（富山湾水質保全研究会 2001）, 富山湾奥部の環境に与える影響が大きい.

湾奥部に流入する神通川は, 岐阜県飛騨市の川上岳（標高 1,626 m）に源を発し, 幹線流路延長 120 km, 流域面積 2,720 km² の一級河川であり, 岐阜県と富山県を貫流し富山湾に流れ込む. 流域の 87% が山地で占められ, 水田・畑地が 9%, 宅地等が 4% となっている（国土交通省河川局 2008）. 神通川の下流域には, 人口 42 万人を擁する富山市があり, 生活排水や工業排水, 周辺の農地からの農業排水として栄養塩や汚濁物質が負荷されている（富山湾水質保全研究会 2001）.

調査方法 観測調査は, 富山湾奥部に 3 定点および湾中央部に 1 定点を設けて行った (Fig.1). 定点 1 (36° 46′ 11″ N, 137° 13′ 37″ E), 定点 2 (36° 47′ 11″ N, 137° 13′ 49″ E) および定点 3 (36° 48′ 11″ N, 137° 13′ 49″ E) は, それぞれ神通川河口から 0.8 km, 2.7 km および 4.6 km の距離にあり, 水深は 48 m, 39 m および 162 m であった. また, 河川水の影響が少ない対照区の定点として, 神通川河口から 26.8 km 沖合にある定点 8 (37° 00′ 11″ N, 137° 18′ 49″ E) を選定した. なお, 定点 8 の水深は 1,025 m であった.

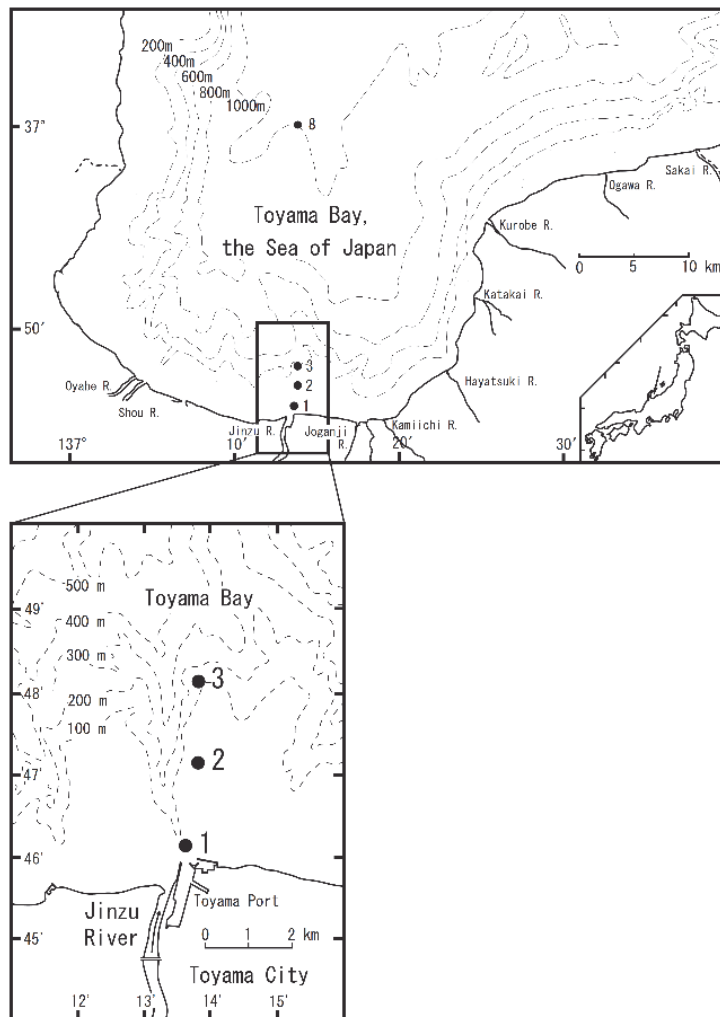


Fig. 1 Upper map shows Toyama Bay, the Sea of Japan and the lower one shows details of the Jinzu River mouth area in the innermost part of Toyama Bay with depth contour. Distances between Stns. 1, 2, 3, 8 and the mouth of the Jinzu River are 0.8 km, 2.7 km, 4.6 km and 26.8 km, respectively. Depths in Stns. 1, 2, 3 and 8 are 48 m, 39 m, 162 m and 1,025 m, respectively.

定点1～3の観測は、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(19トン)」によって実施した。また、定点8の観測は、漁業調査船「立山丸(160トン)」によった。調査データは、2006年4月～2018年3月の12年間とした。ただし、定点1～3のクロロフィル*a*濃度については、2008年4月～2010年3月の2年間は欠測であった。観測は、毎月1回の頻度で年12回行った。表層水の採取は、船上から採水バケツ(口径25cm、高さ30cm)を用いた。

観測項目は、水温、塩分およびクロロフィル*a*濃度とした。水温は水銀温度計、塩分はサリノメーター(YEO-KAL社製601MKII)によって測定した。クロロフィル*a*濃度は、海水を適量ガラスフィルター(Whatman社製GF/F)でろ過し、海洋観測指針(日本気象協会1970)に基づき、定点1～3は吸光法、定点8は抽出蛍光法によって測定した。

神通川から富山湾への流量は、水文水質データベース(国土交通省2019)によって公開されている神通川の最下流に位置する神通大橋の2006年4月1日～2018年3月31日の日流量を用いた。

結 果

神通川河口海域における水温・塩分・クロロフィル*a*濃度の推移 神通川河口海域における水温・塩分・クロロフィル*a*濃度について、2006年4月～2018年3月の推移をFig.2に、この期間における各測定項目の最小値、最大値および平均値(±標準偏差)をTable1に示した。また、観測期間における各測定項目の増減傾向を明らかにするために、Mann-Kendall検定による順位相関分析の結果をTable2に示した。なお、時系列に対する各測定項目の関係式において、*X*の値は2006年4月を1とした積算月数とした。

水温では、8月～9月に最高値、2月～4月に最低値を示す明瞭な季節変動が認められた。定点1～3の最高水温では、2006年～2009年よりも2010年～2017年の方が高かった。一方、最低水温では2006年～2010年よりも2011年～2018年の方が低かった。すなわち、前半の4年間よりも後半の8年間の方が、最高水温と最低水温の差が大きかった。このように段階的な水温変動がみられるが、ここでは12年間の観測期間における直線的な上昇や下降の傾向について解析した。その結果、2006年4月～2018年3月の間には、定点1～3のいずれにおいても水温は低下していたが、それらの傾向は統計的に有意ではなかった(すべて $p > 0.05$, Table 2)。定点1の水温は4.6～26.6℃の範囲、平均±標準偏差 14.5 ± 5.9 ℃であった。定点2では、7.2～29.3℃の範囲、平均±標準偏差 16.3 ± 6.2 ℃であった。定点3では、6.4～30.2℃の範囲、平均±標準偏差 17.1 ± 6.3 ℃であった(Fig. 2(a), Table 1)。周年にわたり、河口に近い定点で水温が低く、沖合の定点で高い傾向がみられた。

塩分では、規則的な季節変動は認められなかった。2006年4月～2018年3月の間に、定点1と定点3で有意な減少傾向が認められた(それぞれ $p < 0.0001$ と $p = 0.0244$, Table 2)。定点1の塩分は0.64～29.00の範囲、平均±標準偏差 11.33 ± 6.77 であった。定点2では、4.00～32.90の範囲、平均±標準偏差 19.08 ± 6.99 であった。定点3では、8.15～33.50の範囲、平均±標準偏差 24.72 ± 6.58 であった(Fig. 2(b), Table 1)。周年にわたり、河口に近い定点で塩分が低く、沖合の定点

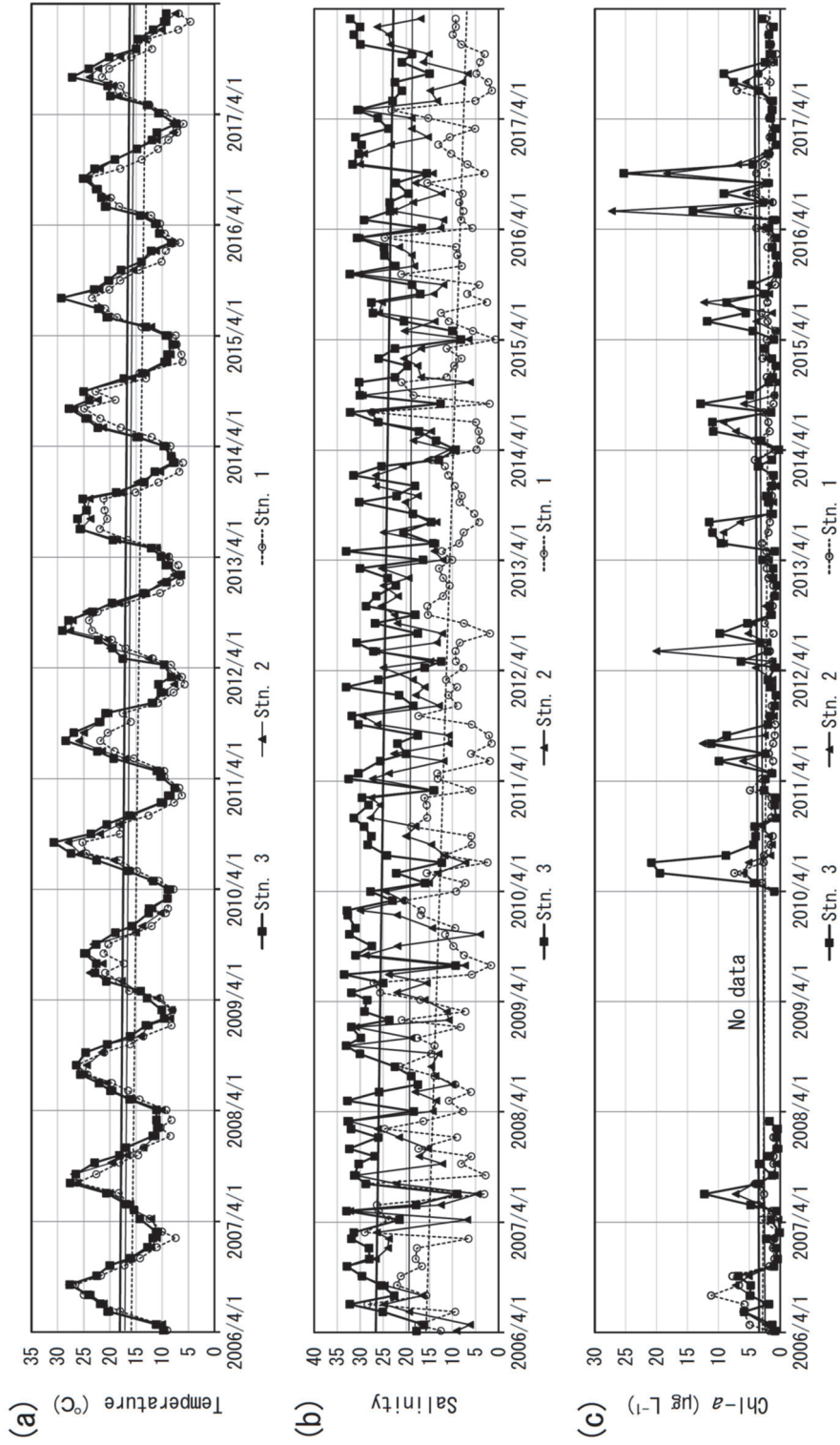


Fig. 2 Temporal changes of variables in surface seawater of the Jinzu River mouth area, the innermost part of Toyama Bay. (a) temperature, (b) salinity and (c) chlorophyll-*a* concentration. The broken, thin and solid linear trends indicate time series regressions from April, 2006 to March, 2018 of Stns. 1, 2 and 3, respectively.

で高い傾向がみられた。

クロロフィル *a* 濃度では、6月～9月に $5 \mu\text{g L}^{-1}$ を超える比較的高い濃度になることが多かった (Fig. 2(c)). 2006年4月～2018年3月の間に、定点1～3のクロロフィル *a* 濃度には中期的な増減傾向は認められなかった (すべて $p > 0.05$, Table 2). 定点1のクロロフィル *a* 濃度は $0.2 \sim 11.2 \mu\text{g L}^{-1}$ の範囲、平均±標準偏差 $2.2 \pm 1.7 \mu\text{g L}^{-1}$ であった。定点2では $0.1 \sim 27.3 \mu\text{g L}^{-1}$ の範囲、平均±標準偏差 $3.1 \pm 3.9 \mu\text{g L}^{-1}$ であった。定点3では $0.1 \sim 25.3 \mu\text{g L}^{-1}$ の範囲、平均±標準偏差 $3.8 \pm 4.5 \mu\text{g L}^{-1}$ であった (Fig. 2(c), Table 1). 河口に近い定点で濃度が低く、沖合の定点で高い傾向がみられた。

Table 1 Minimum, maximum and mean (\pm standard deviation) values of the variables in surface water in Toyama Bay from April, 2006 to March, 2018.

Variables	Station number	Minimum	Maximum	Average \pm SD
Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Stn. 1	4.6	26.6	14.5 ± 5.9
	Stn. 2	7.2	29.3	16.3 ± 6.2
	Stn. 3	6.4	30.2	17.1 ± 6.3
	Stn. 8	9.6	31.8	18.4 ± 6.3
Salinity	Stn. 1	0.64	29.00	11.33 ± 6.77
	Stn. 2	4.00	32.90	19.08 ± 6.99
	Stn. 3	8.15	33.50	24.72 ± 6.58
	Stn. 8	22.87	34.26	32.96 ± 1.48
Chlorophyll- <i>a</i> ($\mu\text{g L}^{-1}$)	Stn. 1	0.2	11.2	2.2 ± 1.7
	Stn. 2	0.1	27.3	3.1 ± 3.9
	Stn. 3	0.1	25.3	3.8 ± 4.5
	Stn. 8	0.03	3.92	0.59 ± 0.71

Table 2 Regressions of the monthly variables in Toyama Bay from April, 2006 to March, 2018.

Variables	Station number	Regression equation	Number of data (<i>n</i>)	Correlation coefficient (τ)	Significance (ρ)
Temperature	Stn. 1	$Y = -0.0006X + 15.91$	144	-0.0913	0.1052
	Stn. 2	$Y = -0.0004X + 17.13$	144	-0.0660	0.2415
	Stn. 3	$Y = -0.0004X + 18.09$	144	-0.0647	0.2507
	Stn. 8	$Y = 0.0001X + 18.21$	144	0.0139	0.8049
Salinity	Stn. 1	$Y = -0.0020X + 15.74$	144	-0.2531	<0.0001 ***
	Stn. 2	$Y = -0.0002X + 19.44$	144	-0.0137	0.8076
	Stn. 3	$Y = -0.0009X + 26.63$	144	-0.1267	0.0244 *
	Stn. 8	$Y = -0.00001X + 32.94$	144	-0.0353	0.5306
Chlorophyll- <i>a</i>	Stn. 1	$Y = -0.0003X + 2.86$	120	-0.0402	0.5164
	Stn. 2	$Y = 0.0003X + 2.45$	120	0.0135	0.8276
	Stn. 3	$Y = 0.0002X + 3.41$	120	0.0255	0.6797
	Stn. 8	$Y = 0.00002X + 0.55$	120	0.1246	0.0276 *

X denotes the number of month multiplied from April, 2016

* $p < 0.05$

** $p < 0.01$

*** $p < 0.001$

富山湾中央部における水温・塩分・クロロフィル *a* 濃度の推移 神通川河口海域の対照区として、富山湾中央部の定点8における2006年4月～2018年3月の水温・塩分・クロロフィル *a* 濃度の推移を Fig. 3 および Table 1 に示した。神通川河口海域と同じく、Mann-Kendall 検定による順位相関分析の結果を Table 2 に示した。

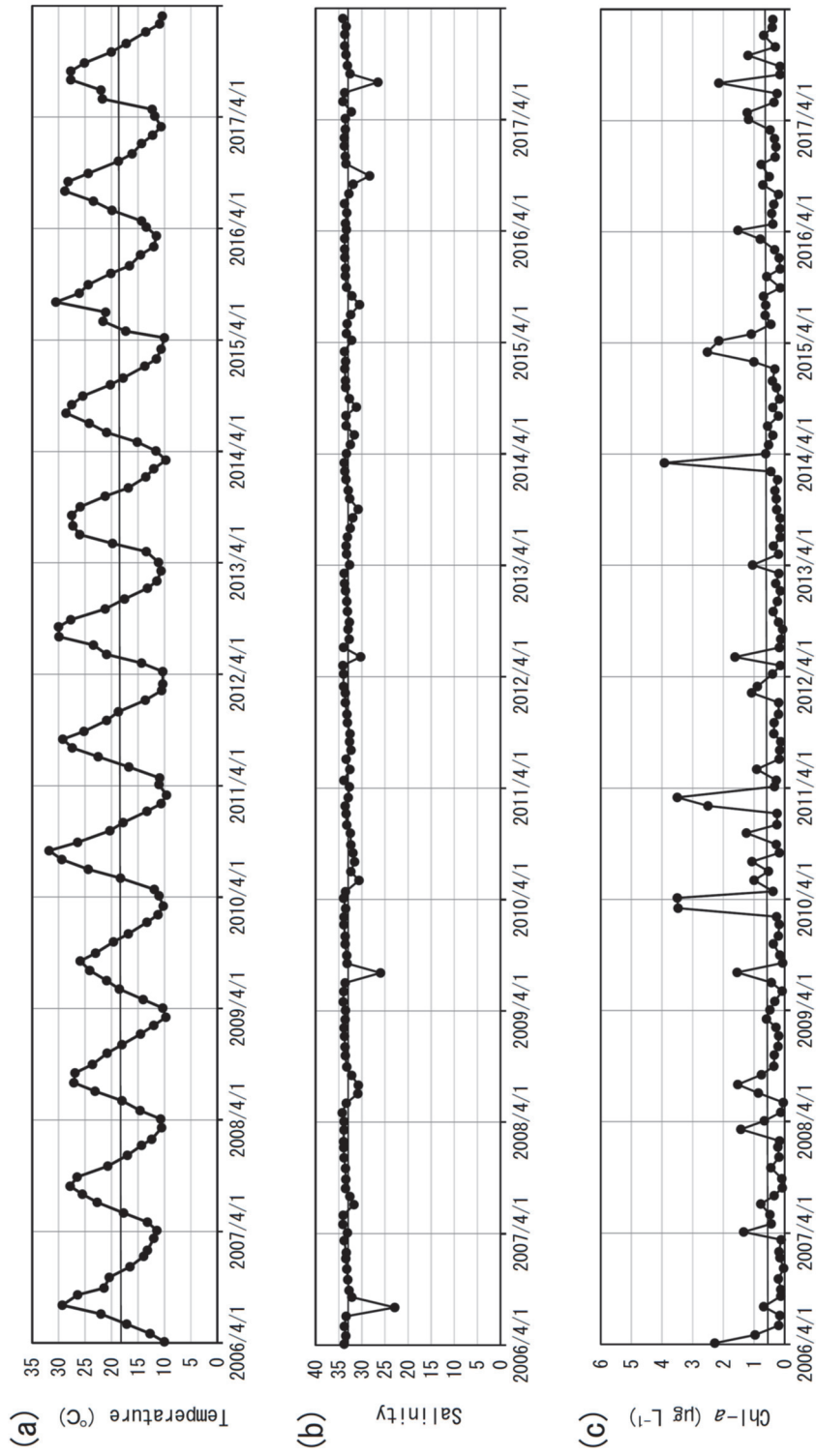


Fig. 3 Temporal changes of variables in surface seawater of the central part of Toyama Bay, (a) temperature, (b) salinity and (c) chlorophyll-*a* concentration. The solid linear trend indicates time series regression from April, 2006 to March, 2018 of Stn. 8.

水温では、7月～9月に最高値、2月～4月に最低値を示す明瞭な季節変動が認められた。定点8の最高水温では、2006年～2009年よりも2010年～2017年の方が高く、定点1～3の変動と類似した。一方、最低水温では、この期間に明瞭な傾向はみられなかった。2006年4月～2018年3月の定点8において、直線的な水温の上昇や下降の傾向を解析したところ、それらの傾向は認められなかった ($p=0.8049$, Table 2)。定点8の水温は9.6～31.8°Cの範囲、平均±標準偏差 18.4 ± 6.3 °Cであった (Fig. 3(a), Table 1)。周年にわたり、神通川河口海域の定点1～3よりも水温が高かった。

塩分では、規則的な季節変動が認められず、周年にわたって32以上であることが多かった。また、6月～8月において一時的に塩分32を下回ることがあった。2006年4月～2018年3月の間に、定点8の塩分に増減傾向は認められなかった ($p=0.5306$, Table 2)。定点8の塩分は22.87～34.26の範囲、平均±標準偏差 32.96 ± 1.48 であった (Fig. 3(b), Table 1)。

クロロフィル *a* 濃度では、8月～9月に $2 \mu\text{g L}^{-1}$ 以下、3月～4月に $2 \mu\text{g L}^{-1}$ を超える場合が多かった。2006年4月～2018年3月の間に、定点8のクロロフィル *a* 濃度には増加傾向が認められた ($p=0.0276$, Table 2)。定点8のクロロフィル *a* 濃度は $0.03 \sim 3.92 \mu\text{g L}^{-1}$ の範囲、平均±標準偏差 $0.59 \pm 0.71 \mu\text{g L}^{-1}$ であった (Fig. 3(c), Table 1)。2月～4月の塩分は32以上であり、春季ブルームは塩分低下と対応がなかった。一方、夏季にみられたブルームは、塩分30以下の出現とよく一致していた (Fig. 3(b), (c))。

神通川の流量 神通川における2006年4月～2018年3月の月間平均流量を、Fig. 4に示した。月間平均流量は $84.4 \sim 623.7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ の範囲にあり、平均値は $194.9 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ であった。3月～5月には、融雪による河川流量の増加がみられる場合が多かったが、2007年や2016年のように流量が少ない年もあった。この期間に、神通川の月間平均流量は1ヶ月あたり $0.1174 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 増加していたが、統計的に有意ではなかった ($p > 0.05$, Table 3)。

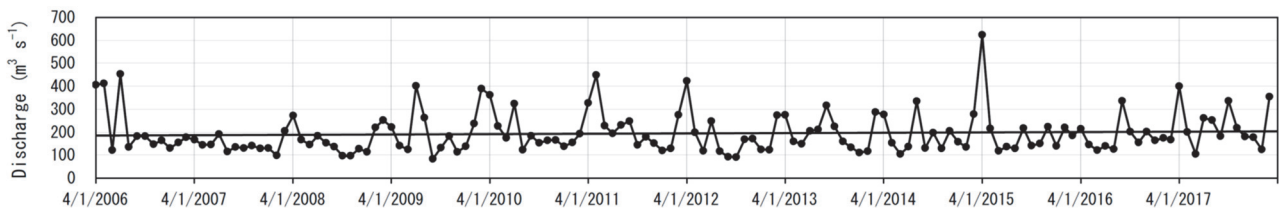


Fig. 4 Monthly mean discharge of the Jinzu River from April, 2006 to March, 2018. The solid linear line indicates time series regression from April, 2006 to March, 2018 of the Jinzu River discharge.

Table 3 Regression of the monthly mean discharge from the Jinzu River from April, 2006 to March, 2018.

Variable	Regression equation	Number of data (<i>n</i>)	Correlation coefficient (τ)	Significance (p)
Jinzu River Discharge	$Y = 0.1323X + 185.3$	144	0.0749	0.1830

X denotes the number of month multiplied from April, 2006

水温・塩分とクロロフィル *a* 濃度の関係 神通川河口海域の定点 1～3 および湾中央部の定点 8 における水温・塩分に対するクロロフィル *a* 濃度の関係を Fig. 5 に示した. 神通川河口に近い定点 1 では, 水温 4.6～26.6℃, 塩分 0.64～29.00 の範囲において, クロロフィル *a* 濃度が 0.2～11.2 $\mu\text{g L}^{-1}$ にあった. このうち, 中栄養な環境に相当するクロロフィル *a* 濃度が $> 5, \leq 20 \mu\text{g L}^{-1}$ (Bricker *et al.* 2003) にあった水温と塩分は, それぞれ 14.8～26.6℃および 1.4～28.4 であった. 定点 1 では, 塩分 10 を下回る時は水温が 15℃以上でもクロロフィル *a* 濃度は 10 $\mu\text{g L}^{-1}$ を超えることがなかった. 次に, 中間の位置にある定点 2 では, 水温 7.2～29.3℃, 塩分 4.00～32.90 の範囲において, クロロフィル *a* 濃度が 0.1～27.3 $\mu\text{g L}^{-1}$ にあり, このうちクロロフィル *a* 濃度が $> 5, \leq 20 \mu\text{g L}^{-1}$ にあった水温と塩分は, それぞれ 16.3～29.3℃および 4.6～30.1 であった. また, 沖側の定点 3 では, 水温 6.4～30.2℃, 塩分 8.15～33.50 の範囲において, クロロフィル *a* 濃度が 0.1～25.3 $\mu\text{g L}^{-1}$ にあり, このうちクロロフィル *a* 濃度が $> 5, \leq 20 \mu\text{g L}^{-1}$ にあった水温と塩分は, それぞれ 16.7～29.3℃および 9.0～29.6 であった. 定点 2 や定点 3 では, 塩分 10 以上および水温 15℃以上の時に, クロロフィル *a* 濃度が 10～20 $\mu\text{g L}^{-1}$ になることが多かった. 対照区とした湾中央部の定点 8 では, 水温 9.6～31.8, 塩分 22.87～34.26 の範囲にあったが, クロロフィル *a* 濃度は最高でも 3.92 $\mu\text{g L}^{-1}$ であり, 四季を通じて 5 $\mu\text{g L}^{-1}$ を超えることはなかった.

考 察

神通川河口海域における中期変動 本研究では, 神通川河口海域に 3 定点を設け, 2006 年 4 月～2018 年 3 月の 12 年間にわたる中期的なクロロフィル *a* 濃度を観測した. その結果, 河口から 0.8 km の距離にある定点 1 よりも, 2.7 km 沖合の定点 2 や 4.6 km 沖合の定点 3 の方で, クロロフィル *a* 濃度の平均値が高くなることが明らかとなった (Fig. 2(c), Table 1). 神通川河口海域の表層水に

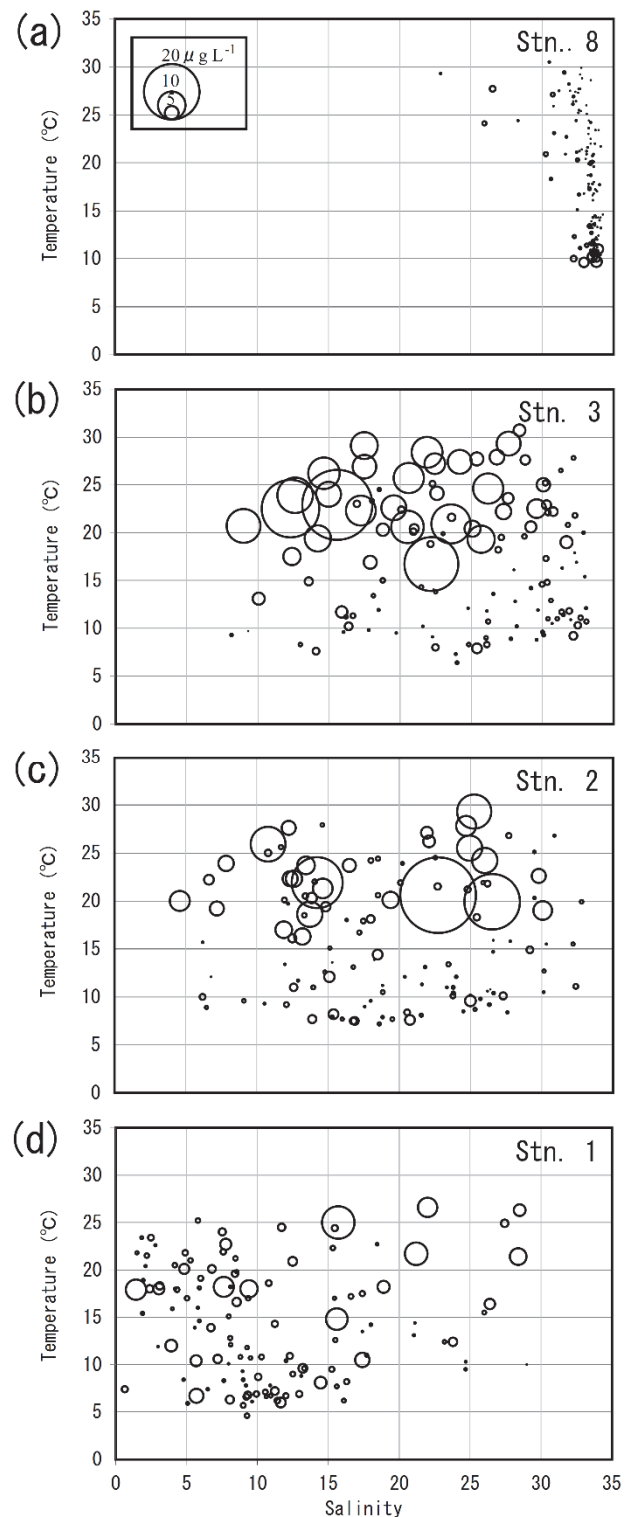


Fig. 5 Bubble plots between temperature, salinity and chlorophyll-*a* concentration in surface seawater of Toyama Bay in 2006–2018. (a) Stn. 8, (b) Stn. 3, (c) Stn. 2, and (d) Stn. 1 indicated in Fig. 1.

おける植物プランクトンは、主に神通川から供給される栄養塩を利用して増殖し（辻本 2012）、2006年4月～2007年3月において、定点1に出現した全細胞数に占める割合が高かった種は、*Chaetoceros* spp. (28.5%)、*Skeletonema costatum* s.l. (sensu lato, 広義種) (23.2%) および Thalassiosiraceae (15.6%) で、上位3種はすべて珪藻類であった（富山県水産試験場 2007）。したがって、神通川河口海域では、珪藻類を主体とした植物プランクトンが増殖しているが、河口直前海域では増殖が始まったばかりでクロロフィル *a* 濃度が低く、河川由来水が沖合に拡散し海水と混合するにしたがって植物プランクトンが増殖し、クロロフィル *a* 濃度が高くなっていくと考えられる。辻本（2012）は、2006年4月～2008年2月に同海域で調査し、2006年では河口に近い定点で表層のクロロフィル *a* 濃度が高くなったが、2007年では沖合側で高くなり、年によって濃度が高くなる海域が異なったことを報告している。しかし、本研究の12年間にわたる観測結果から、神通川河口前の定点1よりも沖合側の定点2や定点3の方でクロロフィル *a* 濃度が高くなる頻度が高いことが判明した。

神通川河口海域でのクロロフィル *a* 濃度の季節変化については、6月～9月に植物プランクトンのブルーミングが認められた（Fig. 2(c)）。この結果は、大西ら（2007）、辻本（2012）および Terauchi *et al.* (2014a) とよく一致しており、神通川から栄養塩が常に供給され、暖水期に植物プランクトンが活発に増殖していることを示唆している。

湾中央部における中期変動 神通川河口海域の対象区として、河川水の影響の少ない湾中央部において観測した。神通川河口海域と湾中央部のクロロフィル *a* 濃度（それぞれ Fig. 2(c) および Fig. 3(c)）の範囲を比較すると、前者が $0.1 \sim 27.3 \mu\text{g L}^{-1}$ 、後者が $0.03 \sim 3.92 \mu\text{g L}^{-1}$ であり、湾中央部の方が低濃度で推移した。湾中央部のクロロフィル *a* 濃度は3月～4月にピークを示すことが多く、冬季の鉛直混合により深層から供給された栄養塩を利用して、水温の上昇と光量の増加が起こる春季に植物プランクトンが増殖していると考えられる。一方、湾中央部における夏季のクロロフィル *a* 濃度は低濃度であることが多かったが、2006年8月、2009年8月、2012年6月および2017年8月にみられたように、夏季にクロロフィル *a* 濃度の上昇が認められた時は低塩分水の出現とよく対応していた（Fig. 3(b), (c)）。夏季の表層では栄養塩が枯渇状態にあるが、河川由来の低塩分水が一時的に供給されることによって河川水に含まれる栄養塩を利用して植物プランクトンが増殖したと考えられる。大西ら（2007）は、湾中央部の衛星クロロフィル *a* 濃度は $0.1 \sim 6.4 \mu\text{g L}^{-1}$ であり、春季と秋季に $1 \mu\text{g L}^{-1}$ 以上と他の季節より高濃度となり、夏季には $0.3 \mu\text{g L}^{-1}$ 以下の低濃度であったことを報じており、本研究の結果と一致している。

河川流量との関係 神通川河口海域では、神通川の月間平均流量（Fig. 4）とクロロフィル *a* 濃度（Fig. 2(c)）との間に明瞭な関係はみられなかった。神通川河口海域のクロロフィル *a* 濃度は月単位よりも短い期間で変動しており（寺内・石坂 2007）、月1回の観測頻度では月間流量との関係を明らかにすることは難しい。2006年4月～2018年3月において、神通川月間平均流量は、統計的に有意ではないが増加していた（Fig. 4, Table 3）。この期間に、神通川河口海域の定点1～3において塩分低下が認められたことは（Fig. 2(b), Table 2）、神通川から流入した河川水の増加に起因していると考えられる。河川水量が増加した場合、海域への栄養塩負荷量は増大するが、神通川河口海域のクロロフィル *a* 濃度は、定点1～3ともに有意な増減傾向は認められなかった（Fig. 3(c), Table 2, すべて $p > 0.05$ ）。辻本（2012）は、神通川河口海域の表層には神通川から絶えず

栄養塩が供給されているため、塩分 25 以下では栄養塩濃度によって植物プランクトンの増殖が制限されていないと報じている。このため、2006 年～2018 年の観測定点では、神通川河口海域の植物プランクトン現存量の指標となるクロロフィル *a* 濃度に中期的な変動がみられず、流量の増大は高クロロフィル濃度分布域を沖合側に広げる可能性を示唆している。しかし、本研究では定点 3 と定点 8 の間に定点を配置していなかったため、高クロロフィル *a* 濃度の沖合への影響範囲を把握できなかった。

富山湾中央部では、3 月～4 月の春季にクロロフィル *a* 濃度のピークがみられる一方、先述したとおり夏季の 2006 年 8 月、2009 年 8 月、2012 年 6 月、2017 年 8 月では塩分低下とクロロフィル *a* 濃度の増加するタイミングが一致する現象が捉えられた (Fig. 3(b), (c))。これらのクロロフィル *a* 濃度の増加と塩分の低下は、1 ヶ月前の神通川月平均流量の増大 (Fig. 4) とタイミングは一致していたが、神通川月平均流量と塩分・クロロフィル *a* 濃度との関係は明瞭ではなかった。Terauchi *et al.* (2014a) は、富山湾に流入する 5 つの一級河川の月間平均流量と富山湾のエリアごとの月平均衛星クロロフィル *a* 濃度の関係を調査した結果、海岸から約 5 km 沖合までの沿岸域では流量と衛星クロロフィル *a* 濃度の間に有意な相関がみられなかったが、沖合域では、5 月～10 月には両者に有意な相関があったと報じている。本研究において、夏季を中心に湾中央部の表層水におけるクロロフィル *a* 濃度が増加する現象は、神通川をはじめとする河川水の栄養塩供給を受けて植物プランクトンが増殖した結果と考えられる。また、人工衛星によって富山湾のクロロフィル *a* 濃度を広域的に捉えた場合には河川流量との関係が認められるが、本研究のように定点観測した場合は、河川由来水の影響度合いによって河川流量に対するクロロフィル *a* 濃度の対応が明瞭に現れないと推察される。

水温・塩分とクロロフィル *a* 濃度の関係 神通川河口に近い定点 1 では、塩分 10 を下回る時は水温が 15°C 以上でもクロロフィル *a* 濃度は 10 $\mu\text{g L}^{-1}$ を超えることがなかった。沖合側の定点 2 や定点 3 では、塩分 10 以上および水温 15°C 以上の時に、クロロフィル *a* 濃度が 10～20 $\mu\text{g L}^{-1}$ になることが多くみられた (Fig. 5)。これらの現象は、河川水の影響が強い海域では低塩分のため海産植物プランクトンの増殖が活発でないためにクロロフィル *a* 濃度が低くなっており、河川水と海水が混合する過程でクロロフィル *a* 濃度が高くなっていくためと考えられる。

神通川河口海域には神通川から栄養塩が供給され、硝酸態窒素やリン酸態リンのほかケイ酸態ケイ素が豊富であるため、珪藻類の増殖に有利な環境となっている (辻本 2009, 2012)。Yamada *et al.* (2013) および山田ら (2017) は、電子顕微鏡を用いた微細構造観察と遺伝子マーカーの LSU rDNA 解析から、神通川河口海域で *Skeletonema* 属 4 種 (*S. costatum* s.s. (sensu stricto, 狭義種), *S. dohrnii*, *S. japonicum* および *S. menzeli*) を確認し、低塩分に最も適合した種である *S. costatum* s.s. が優占したことを報告している。また、Kaeriyama *et al.* (2011) は、*Skeletonema* 属の水温に対する増殖特性を調査し、*S. costatum* s.s., *S. japonicum* および *S. marinoi-dohrnii* complex は水温 20～30°C で比増殖速度が 1 以上となり、*S. japonicum* と *S. marinoi-dohrnii* complex は水温 10°C で比増殖速度が 1 以上と冬季の温帯域に適応した種であることを示した。さらに、Balzano *et al.* (2011) は、*Skeletonema* 属の塩分に対する増殖特性を調査し、本属は塩分 10～35 の間でよく増殖する広塩性種であり、*S. costatum* s.s. は塩分 5 以下でも比増殖速度が 1 以上となることを明らかにした。神通川河口海域の表層では、河川水の流入により塩分が 0.64～33.5 と勾配が大きく、水温も 4.6

～30.2°Cの変動が観測された (Fig. 2(a), (b), Table 1). このような環境に適応して, 神通川河口海域では広塩性と広温性を兼ね備えた *Skeletonema* 属が優占種となって, 概ね水温 15～30°Cおよび塩分 10～30 の範囲で活発に増殖していると考えられる.

富山湾の富栄養化評価 Bricker *et al.* (2003) は, 河口海域の富栄養化を評価するため, クロロフィル *a* 濃度を指標とし, 貧栄養 ($> 0, \leq 5 \mu\text{g Chl-}a \text{ L}^{-1}$), 中栄養 ($> 5, \leq 20 \mu\text{g Chl-}a \text{ L}^{-1}$), 富栄養 ($> 20, \leq 60 \mu\text{g Chl-}a \text{ L}^{-1}$) および過栄養 ($> 60 \mu\text{g Chl-}a \text{ L}^{-1}$) と定義した. 本研究では, 神通川河口海域において, クロロフィル *a* 濃度は水温 14.8～29.3°C, 塩分 1.4～30.1 の範囲で中栄養な環境に相当する $> 5, \leq 20 \mu\text{g L}^{-1}$ になることが明らかとなった. クロロフィル *a* 濃度を指標として, 神通川河口海域における富栄養化の状況を評価すると, 6月～9月は中栄養, それ以外の月は貧栄養な環境にあった. 一方, 湾中央部では, クロロフィル *a* 濃度の最大値は $3.92 \mu\text{g L}^{-1}$ であり, 四季を通じて貧栄養な環境にあった.

本研究では, 神通川河口海域のクロロフィル *a* 濃度平均値は, Stn. 1 で $2.2 \mu\text{g L}^{-1}$, Stn. 2 で $3.1 \mu\text{g L}^{-1}$, Stn. 3 で $3.8 \mu\text{g L}^{-1}$ でいずれも $5 \mu\text{g L}^{-1}$ 以下となっていた (Table 1). また, Stns. 1～3 のクロロフィル *a* 濃度は, 2006年～2018年の12年間に増減傾向は認められなかった (Table 2). これらの結果は, 調査期間中に, 富栄養化や貧栄養化が進行していないことを示している. 柳(2018)は, 瀬戸内海において生物多様性と生産性を高く保つことのできるクロロフィル *a* 濃度を $4.5 \mu\text{g L}^{-1}$ と報じている. 富山湾奥部に位置する神通川河口海域は, 年平均では $4.5 \mu\text{g L}^{-1}$ よりもやや低い濃度にあるが, 夏季を中心に $20 \mu\text{g L}^{-1}$ を超えることもあった. 神通川由来の栄養塩負荷量が増加すると暖水期に珪藻赤潮の発生を促す可能性があり, 珪藻類をはじめとする植物プランクトンの大増殖は, その死骸が沈降して海底に堆積することにより底質の有機汚濁を招くことにつながるため, 植物プランクトンが過度に増殖しないような栄養塩管理が求められる.

Terauchi *et al.* (2014b) は, 1997年～2009年の富山湾における富栄養化状況について, 衛星クロロフィル *a* 濃度の全期間平均値が $5 \mu\text{g L}^{-1}$ 以上のエリア (High status) と $5 \mu\text{g L}^{-1}$ 未満のエリア (Low status) に分類し, 衛星クロロフィル *a* 濃度の年最大値の増減傾向から増加 (Increasing), 増減なし (No trend), 減少 (Decreasing) とし, レベルとトレンドの組み合わせにより富栄養化の状況を 6つのエリア (Low-Decreasing(LD), Low-No Trend(LN), Low-Increasing(LI), High-decreasing(HD), High-No Trend(HN), High-Increasing(HI)) に分類した. その結果, 湾奥部は HN と HI に, 湾中央部は LN に分類された. 本研究で示した 2006年～2018年の平均値と増減傾向に Terauchi *et al.*(2014b)と同じ手法をあてはめると, 神通川河口海域における富栄養化状況は LN, 湾中央部のそれは LI となる. 本研究と Terauchi *et al.* (2014b) の間で評価が異なった要因として, 衛星クロロフィル *a* 濃度は懸濁物質や有色溶存有機物の影響を受けてばらつきが大きく, 沿岸域で衛星クロロフィル *a* 濃度が $5 \mu\text{g L}^{-1}$ 超えて検出されたことが要因と考えられる. また, クロロフィル *a* 濃度の増減傾向では, 湾中央部における回帰直線から, 2006年～2018年の間に $0.03 \mu\text{g L}^{-1}$ の増加が認められたのみであり, この増加傾向によって評価が異なったと考えられる.

瀬戸内海では, 陸域由来の全リン (TP) 負荷量が, 1972年の約 $80 \text{ ton P day}^{-1}$ から 1994年には約半分の $40 \text{ ton P day}^{-1}$ にまで減少した. その結果, 海水中の TP 濃度が $30 \mu\text{g L}^{-1}$ から $25 \mu\text{g L}^{-1}$ に減少して海域の貧栄養化が進み, 漁業生産量が低下したことが問題となっている (Yamamoto 2003, 山本 2014). 富山湾奥部の神通川河口海域では, 植物プランクトン現存量の指標となるクロロフ

イル *a* 濃度に中期的な変動は認められず、貧栄養から中栄養な環境にあったことから、今後とも、陸域からの栄養塩供給量を保ち、水産生物の餌料環境を維持していくことが重要と考えられる。

要 約

2006年4月～2018年3月にかけて、富山湾奥部に位置する神通川河口海域において、表層の水温・塩分・クロロフィル *a* 濃度について調査した。この海域では、河口に近い定点で塩分が低く、沖合にかけて塩分が高くなった。クロロフィル *a* 濃度の平均値は、河口に近い定点で低く、沖合側の定点で高くなる傾向がみられた。河川水が流入して間もない海域では、塩分が低く植物プランクトンが増殖せず、河川水と海水が沖合側に向かって混合する過程で、主に河川から供給される栄養塩をもとに植物プランクトンが増殖したと考えられる。クロロフィル *a* 濃度は、水温 14.8～29.3°C、塩分 1.4～30.1 の範囲で中栄養 (Chl-*a* > 5, ≤ 20 μg L⁻¹) な環境になっていた。中栄養な環境は主に6月～9月にみられ、それ以外の月では貧栄養 (Chl-*a* ≤ 5 μg L⁻¹) であった。2006年～2018年に、神通川河口海域の表層海水中におけるクロロフィル *a* 濃度に増減傾向は認められず、富栄養化や貧栄養化の進行はみられなかった。富山湾沿岸における餌料環境や生産性の観点から、神通川河口海域は、クロロフィル *a* 濃度からみて適度な環境にあると考えられる。

謝 辞

調査を実施するにあたり、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」および漁業調査船「立山丸」の船長をはじめとする乗組員各位に多大なるご協力をいただきました。原稿に対して、公益財団法人環日本海環境協力センター寺内元基博士、水産研究所の編集委員2名および査読者1名から有益な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

- Balzano, S., D. Sarno and W. H. C. F. Kooistra 2011. Effects of salinity on the growth rate and morphology of ten *Skeletonema* strains. *Journal of Plankton Research*, **33**: 937-945.
- Bricker, S. B., J. G. Ferreira and T. Simas 2003. An integrated methodology for assessment of estuarine trophic status. *Ecological Modelling*, **169**: 39-60.
- 林 清志 1990. 富山湾に出現する魚卵及び仔稚魚の季節変化と鉛直分布. 富山県水産試験場研究報告, **2**: 1-17.
- 林 清志 1995. 富山湾産ホタルイカの資源生物学的研究. 富山県水産試験場研究報告, **7**: 1-128.
- 林 清志・平川和正 1997. 富山湾産ホタルイカの餌生物組成. 日本海区水産研究所研究報告, **47**: 57-66.
- Hirakawa, K., A. Imamura and T. Ikeda 1992. Seasonal variability in abundance and composition of zooplankton in Toyama Bay, Southern Japan Sea. *Bulletin of the Japan Sea National Fisheries*

Institute, **42**: 1-15.

- 平川和正・後藤常夫 1996. 日本海南部富山湾におけるマイワシ (*Sardinops melanostictus*) 仔魚の餌料. 日本海区水産研究所研究報告, **46** : 65-75.
- Hirakawa, K., T. Goto and M. Hirai 1997. Diet composition and prey size of larval anchovy, *Engraulis japonicus*, in Toyama Bay, Southern Japan Sea. Bulletin of the Japan Sea National Fisheries Research Institute, **47**: 67-78.
- 井口直樹・辻本 良 1997. 富山湾におけるカタクチイワシ仔魚餌料としてのカイアシ類群集の季節変化. 日本海区水産研究所研究報告, **47** : 79-94.
- 池田 勉 2001. 動物プランクトンの生活史と生産量の総合研究—日本海富山湾でのケース・スタディー—. 月刊海洋/号外, **27** : 25-31.
- 今村 明・石森繁樹・川崎賢一 1985. 富山湾Ⅱ物理. p. 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.
- Kaeriyama, H., E. Katsumi, M. Otsubo, M. Yamada, K. Ichimi, K. Tada and P. J. Harrison 2011. Effects of temperature and irradiance on growth of strains belonging to seven *Skeletonema* species isolated from Dokai Bay, southern Japan. European Journal of Phycology, **46**: 113-124.
- 河野光久・三宅博哉・星野 昇・伊藤欣吾・山中智之・甲本亮太・忠鉢孝明・安澤弥・池田 怜・大慶則之・木下仁徳・児玉晃治・手賀太郎・山崎 淳・森俊郎・長濱達章・大谷徹也・山田英明・村山達朗・安藤朗彦・甲斐修也・土井啓行・杉山秀樹・飯田新二・船木信一 2014. 日本海産魚類目録. 山口県水産研究センター研究報告, **11** : 1-30.
- Kodama, T., T. Wagawa, N. Iguchi, Y. Takada, T. Takahashi, K. Fukudome, H. Morimoto and T. Goto 2018. Spatial variations in zooplankton community structure along the Japanese coastline in the Japan Sea: Influence of the coastal current. Ocean Science, **14**: 355-369.
- 国土交通省河川局 2008. 神通川水系河川整備基本方針. p. 1-14.
- 国土交通省 2019. 水文水質データベース. <http://www1.river.go.jp>
- 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.
- Nanjo, N. 2007. Feeding habits of the glass shrimp *Pasiphaea japonica* in Toyama Bay of the Sea of Japan. Crustacean Research, **36**: 45-51.
- Nanjo, N. and S. Katayama 2014. Distribution of *Pasiphaea japonica* larvae in submarine canyons and adjacent slope areas in Toyama Bay, Sea of Japan. Journal of Marine Systems, **137**: 28-34.
- 日本気象協会 1970. 海洋観測指針. 気象庁. 東京, 427pp.
- 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. 海色衛星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.
- Parsons, T. R., Y. Maita and C. M. Lalli. 1984. 4.1. Determination of chlorophylls and total carotenoids: Spectrophotometric method. pp. 101-107, A manual of chemical and biological methods for

seawater analysis. Pergamon Press.

- 田子泰彦 2002. 富山湾の河口域およびその隣接海域表層におけるアユ仔魚の出現・分布. 日本水産学会誌, **68** : 61-71.
- 谷口 旭・中島羊二・鈴木利一・平川和正・今村 明・池田 勉 1997. 富山湾における植物プランクトン群集の季節的消長. 日本海区水産研究所研究報告, **47** : 33-55.
- 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.
- Terauchi, G., R. Tsujimoto, J. Ishizaka and H. Nakata 2014a. Influence of river discharge on seasonal and interannual variability of remotely sensed chlorophyll-*a* concentration in Toyama Bay, the Sea of Japan. *La mer*, **52**: 49-60.
- Terauchi, G., R. Tsujimoto, J. Ishizaka and H. Nakata 2014b. Preliminary assessment of eutrophication by remotely sensed chlorophyll-*a* in Toyama Bay, the Sea of Japan. *Journal of Oceanography*, **70**: 175-184.
- 富山県農林水産総合技術センター水産研究所 2013. 富山湾の漁場環境 (2011) -水質・底質・藻場-. 平成 23 年度富山湾漁場環境総合調査報告書, 飯田直樹・瀬戸陽一・若林洋編, 富山, 178pp.
- 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, 辻本良・浦邊清治・小谷口正樹編, 富山, 204pp.
- 富山湾水質保全研究会 2001. 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-. p. 4-49.
- 辻本 良 2009. 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. 富山県農林水産総合技術センター水産研究所研究報告, **1** : 7-22.
- 辻本 良 2012. 富山湾奥部における表層水中の栄養塩と植物プランクトン現存量の季節変動. 沿岸海洋研究, **49** : 127-137.
- Yamada, M., M. Otsubo, Y. Tsutsumi, C. Mizota, N. Iida, K. Okamura, M. Kodama and A. Umehara 2013. Species diversity of the marine diatom genus *Skeletonema* in Japanese brackish water areas. *Fisheries Science*, **79**: 923-934.
- 山田真知子・大坪繭子・多田邦尚・中野義勝・松原 賢・飯田直樹・遠藤宜成・門谷 茂 2017. 亜熱帯から亜寒帯に及ぶ我が国の 5 海域における珪藻 *Skeletonema* 属の種組成. 日本水産学会誌, **83** : 25-33.
- Yamamoto, T. 2003. The Seto Inland Sea - eutrophic or oligotrophic? *Marine Pollution Bulletin*, **47**: 37-42.
- 山本民治 2014. 瀬戸内海西部海域における貧栄養化. 沿岸海洋研究, **52** : 49-58.
- 柳 哲雄 2018. 持続可能な沿岸海域管理法開発プロジェクトの概要. 沿岸海洋研究, **56** : 3-11.