HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	洞海湾の河口循環流と赤潮形成(シンポジウム:内湾環境における河口循環流の役割)
Author(s)	多田, 邦尚; 一見, 和彦; 濱田, 建一郎 他
Citation	沿岸海洋研究, 44(2), 147-155
Issue Date	2007-02-28
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/56489
Type	journal article
File Information	122)montani-engankaiyo-44-147.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

The Oceanographic Society of Japan (OSJ)

沿岸海洋研究　第44巻，第2号，147-155，2007
Bulletin on Coastal Oceanography, Vol. 44, No. 2, 147-155, 2007

洞海湾の河口循環流と赤潮形成*

多田　邦尚**・一見　和彦**・濱田建一郎†・上田　直子†
山田真知子††・門谷　茂#

Estuarine Circulation and Red Tide Outbreaks in the Dokai Bay, Japan

Kuninao Tada, Kazuhiko Ichimi, Kenichiro Hamada, Naoko Ueda,
Machiko Yamada and Shigeru Montani

過度に富栄養化した内湾である北九州市の洞海湾における河口循環流と赤潮形成について，著者らがこれまでの調査・研究から得た知見を総合して考察した．洞海湾においては，年間を通じて栄養塩濃度が極めて高いにもかかわらず，植物プランクトン現存量は珪藻類が優占する夏季に大きく，その他の季節は小さいことが特徴である．即ち，本湾では夏季にのみ珪藻類の赤潮が発生し，鞭毛藻類が卓越しない．洞海湾では河口循環流が周年卓越し，湾奥の表層水は鉛直混合することなく2.0～2.5日で湾外に流出する．そのため，水温，光環境が好適な夏季にのみ増殖速度の大きい珪藻類が卓越でき，一方，鞭毛藻類は夏季の環境条件下にあっても湾外への流出速度を上回る増殖速度を有しておらず，本湾で大きく増殖することはきわめて困難であることが示唆された．なお，鞭毛藻類は鉛直移動することが知られているが，その鉛直移動速度よりも潮汐残渣流の速度の方がはるかに大きい．また，湾内の海水中で高濃度のNH_4が本湾の優占種の*Skeletonema*の増殖を阻害しないのに対し，鞭毛藻類の増殖を阻害することも本湾で鞭毛藻類が卓越しない要因と考えられた．さらに，湾奥の貧酸素環境下において本湾の優占種の*Skeletonema*の休眠期細胞の発芽が影響を受けないのに対し，鞭毛藻類のシストの発芽率が低下することも要因として考えられた．

Dokai Bay, Kitakyusyu City, is the most heavily eutrophic embayment in Japan. Estuarine circulation and red tide outbreak in the bay are discussed based on the knowledge and information obtained from our previous study. Despite sufficient nutrient concentration for phytoplankton growth during the entire year, Dokai Bay is characterized by high phytoplankton biomass dominated by diatoms during summer and low biomass during other seasons. Diatomaceous red tide occurred only in the summer season and flagellate blooms were lacking in this bay. Throughout the year, the surface water mass at the head of the bay was advected out within 2.0 to 2.5 days by a strong estuarine circulation without mixing vertically. Therefore, diatom blooms could form only in summer under high temperature and sufficient irradiance. However, even in summer, the flagellate growth rates were low compared to the flash-out speed of the surface water mass, and therefore they did not form a bloom in this bay. Although it is well known that flagellates can move vertically in the water column, the residual current speed was markedly faster than the daily vertical movement of the flagellates. Moreover, the high concentration of NH_4 in surface waters reduced growth for some phytoplankton species, although the growth of *Skeletonema*, the dominant species in this bay, was not reduced. The germination number of cysts for some flagellates was also reduced under the low oxygen environment in the interior part of the bay. However, germination of the dominant diatom species, *Skeletonema* was not influenced. They were also thought to be the reason why flagellates do not form a seasonal bloom.

キーワード：河口循環流，赤潮，植物プランクトン，洞海湾

1. はじめに

福岡県北九州市の洞海湾は奥行きが約13 km，平均水深は約7 mの水路状の小さな内湾である．湾岸部には製鉄をはじめ化学工場が多数立地し，湾内に流入する河川も湾奥部に集中している．洞海湾では1960年代の高度経済成長期に重工業の発達に伴って海域汚染が高度に進み，かつては『死の海』と呼ばれるまでになった．しかし，その後の様々な環境対策が効を奏し，近年は多くの生

* 2006年8月2日受領，2007年1月4日受理
** 香川大学農学部
† 北九州市立大学国際環境工学部
†† 福岡女子大学人間環境学部
# 北海道大学大学院水産科学研究院
連絡先：多田邦尚，香川大学農学部
〒761-0795 香川県木田郡三木町池戸2393
E-mail : tada@ag.kagawa-u.ac.jp

NII-Electronic Library Service

The Oceanographic Society of Japan (OSJ)

物が湾内で観察されるまで水質環境は回復した（Yamada *et al.*, 1991[1]；山田ほか, 1998[2]；Yanagi, 2000[3]）．しかし，洞海湾は依然として過栄養状態にあり，夏季には毎年赤潮が頻発し，湾奥では貧酸素水塊が発生するなど，現在でも国内では最も富栄養化した内湾とされている（Ueda *et al.*, 1994[4]；梶原・山田, 1997[5]；東ほか, 1998[6]）．

本稿では，過度に富栄養化した洞海湾における河口循環流と赤潮形成について，著者らがこれまで調査・研究から得た知見を総合して考察する．

2. 洞海湾の特徴

2.1. 栄養塩濃度

洞海湾の観測定点をFig. 1に示した．本湾の栄養塩濃度の季節変化の一例として，湾中央部のStn. T（水深約5 m）についての結果をFig. 2に示した．各栄養塩の濃度は一定の季節変化傾向を示さず，無機三態窒素（DIN：$NO_3+NO_2+NH_4$）はしばしば100 μM を超え，さらにDINのなかでNH_4濃度がNO_3+NO_2濃度よりも高いことが特徴的である．また，PO_4濃度とSi（OH）$_4$濃度もそれぞれ1.5 μM，10 μM をしばしば超えていた（Tada *et al.*, 2001[7]）．このように本湾の非常に高い栄養塩濃度は湾奥部の工場からの排出液と河川からの淡水流入によるものである．得られた栄養塩濃度から判断して，本湾では栄養塩類の濃度は年間を通じて植物プランクトンの増殖には充分な量が存在し，栄養塩が植物プランクトンの増殖を制限することはないといえる．本来，富栄養化という用語は，湖沼の水質の遷移現象を示す言葉で，陸水学で用いられてきた．海水中には通常，植物プランクトンの増殖に対して窒素とリンを除いた栄養物質は十分にあり，植物プランクトンの増殖には窒素とリンが制限要因となっている．しかし，人類活動の増大に伴い，窒素やリンなどの栄養塩類の閉鎖性海域への負荷が著しく増加し，その結果として植物プランクトンが大増殖し，またそれに伴って引き起こされる水質の悪化現象に対して『富栄養化』という用語を用いている．しかしながら，洞海湾ではこの富栄養化がさらに進行し，大過剰の必須栄養塩類が常に存在し，もはやこの栄養塩類の増加に対して植物プランクトンがそれに応答して増殖していない状態にあり，この状況は『富栄養』よりは『過栄養』とするほうが適切であると考えられる．

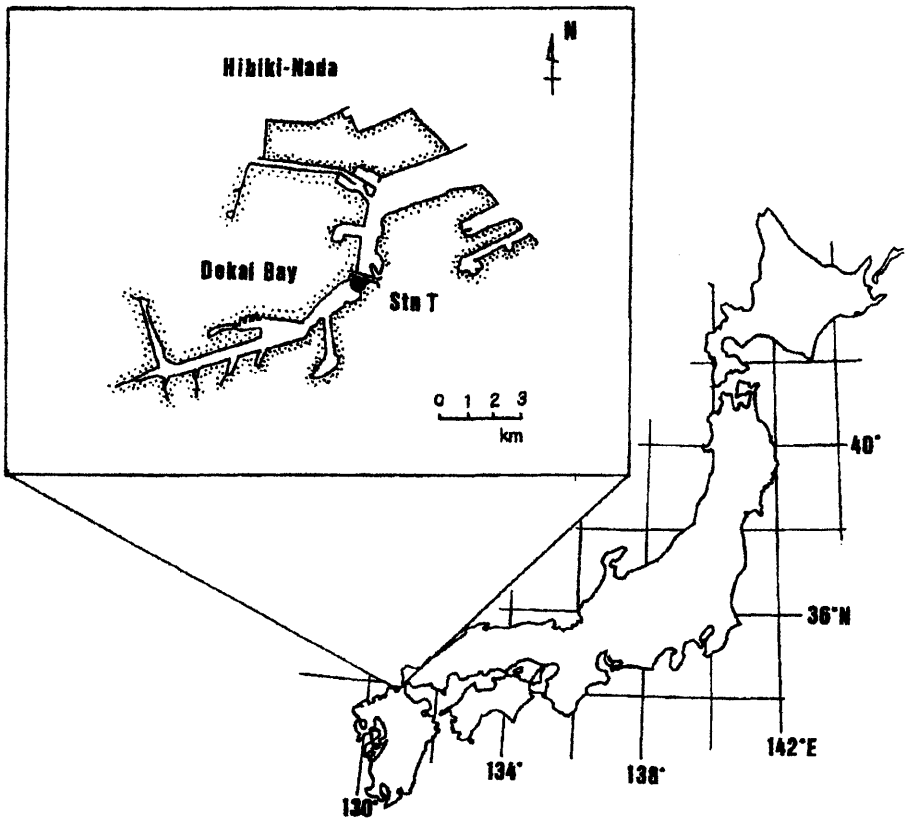

Fig. 1　Dokai Bay and the sampling stations.

NII-Electronic Library Service

The Oceanographic Society of Japan (OSJ)

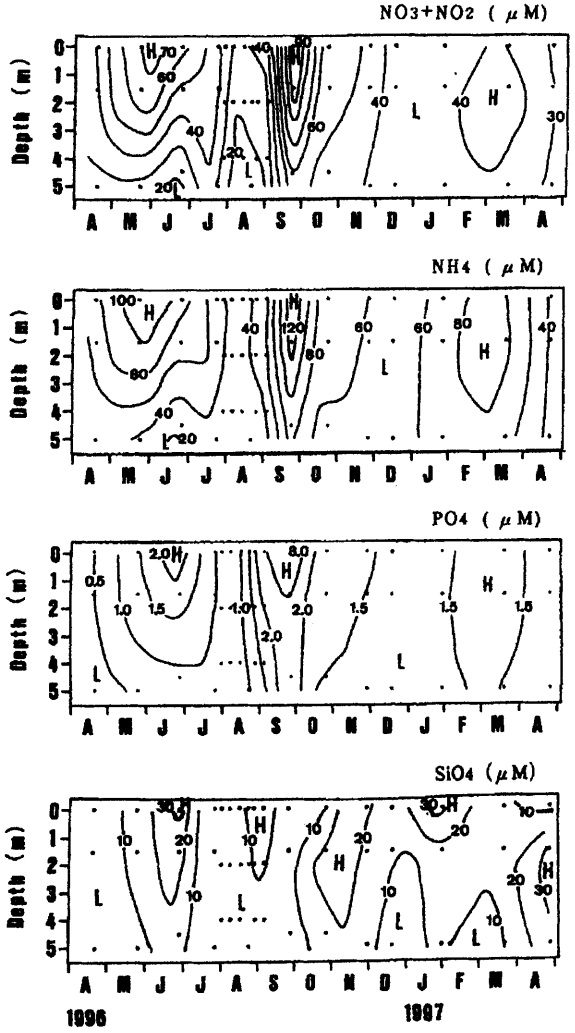

Fig. 2 Seasonal variations in vertical profiles of NO_3+NO_2, NH_4, PO_4 and SiO_4 at Stn. T. (Tada *et al.*, 2001[7])

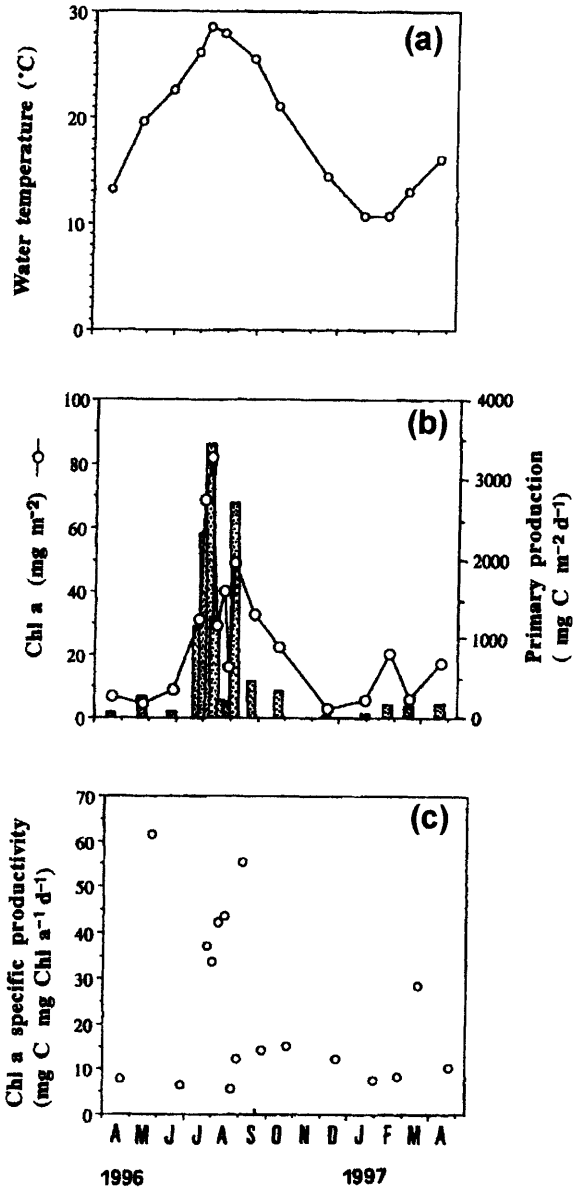

Fig. 3 Seasonal variations in average water temperature (a), depth-integrated Chl*a* and productivity (bars) (b), and depth-integrated Chl*a*-specific productivity (c). (Tada *et al.*, 2001[7])

2.2. 植物プランクトン量と一次生産量の季節変化

本湾のほぼ中央部の観測点（Stn. T）で，毎月定点観測を実施したところ，植物プランクトン量の指標となるChl*a* 濃度は0.11～23.2 μg/l, ^{13}C 法を用いて測定した水柱内の積算一次生産量は33.7～3,450 mgC/m^2/d を変動し，両者は何れも水温が25℃をこえる夏季に高い値を示した（Fig. 3）．また，図には示さないが，湾奥の定点でも同様の観測を実施し，水柱内の積算一次生産量は43.0～3,400 mgC/m^2/d であった．年間一次生産量は湾中央部，湾奥でそれぞれ，180 gC/m^2/y, 295 gC/m^2/y で，その65%および66%が7～9月の3ヶ月間に生産されていると見積もられた．一方，現場の栄養塩濃度は前述のように植物プランクトンの増殖には常に十分な濃度であった．このように，本湾では，栄養塩濃度は周年に渡り非常に高いにもかかわらず，植物プランクトン量とその一次生産量は夏季にのみ高い．湾中央部での光合成活性について見てみると，各水深ごとの光合成効率は0.06～13.6 μgC/μgChl*a*/h，また，水柱内積算光合成効率は5.53～61.7 mgC/mgChl*a*/d の値であった（Fig. 3）．水柱内積算光合成効率は，天空光の光量子量が25 E/m^2/d 以上，表層水温が20℃以上の条件が揃った場合に極端に高い値（>30 mgC/mgChl*a*/d）となった（Fig. 4）．尚，湾奥の定点でも，湾中央部と同程度の値および同様の傾向が得られた．さらに，水柱内積算光合成効率と表層水温の間には相関関係が認められなかったが，

NII-Electronic Library Service

The Oceanographic Society of Japan (OSJ)

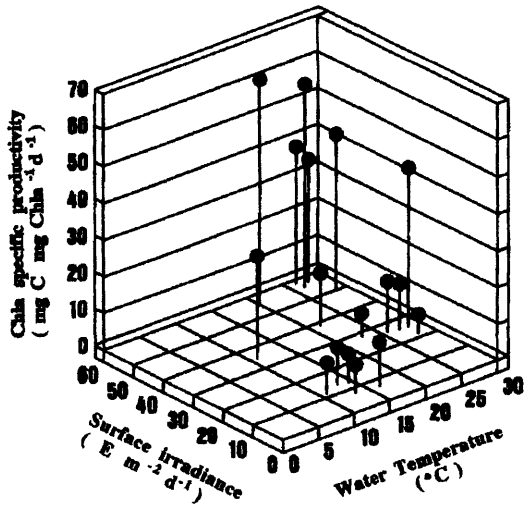

Fig. 4　Correlation between surface irradiance, water temperature and depth-integrated Chl*a*-specific productivity. (Tada *et al.*, 2001[7])

天空光の光量子量との間には有意な相関関係が認められた（Fig. 5）．また，水柱内の Chl*a* 濃度の鉛直分布には明確な増減傾向が認められないものの，各水深ごとの光合成効率および基礎生産速度は深さとともに減少する傾向が認められた（Fig. 6）．これらのことから，本湾の夏季の高い一次生産量は，豊富な栄養塩のもとで光条件と水温条件の整った夏季に高くなり，その生産量は水温よりも光量子量が大きく寄与していることが考えられた（Tada *et al.*, 2001[7]）．

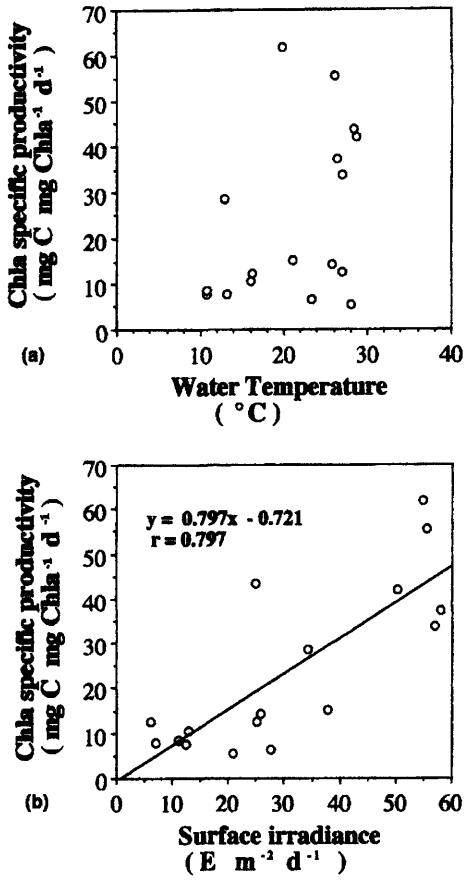

Fig. 5　Correlations between water temperature and depth-integrated Chl*a*-specific productivity (a), surface irradiance and depth-integrated Chl*a*-specific productivity (b). (Tada *et al.*, 2001[7])

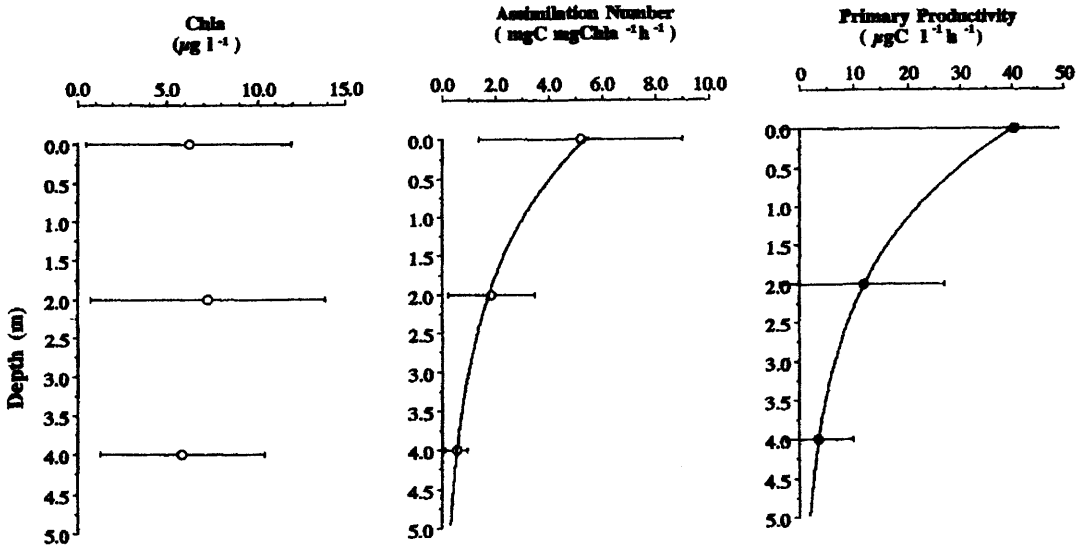

Fig. 6　Vertical profiles of Chl*a* concentration, Chl*a*-specific productivity and primary productivity at Stn. T in the water column.　Each plot shows the average value (n=17).　Error bars show the standard deviation.　(Tada *et al.*, 2001[7])

NII-Electronic Library Service

The Oceanographic Society of Japan (OSJ)

2.3. 植物プランクトン群集の細胞密度と種組成

本湾の中央部において1980年から15年間にわたり観察された表層水中の全植物プランクトンの細胞密度を見ると（Fig. 7），本湾で赤潮が観察される6月から10月にかけての高水温期には10^4 cells/lを超える高密度であるが，それ以外の時期には非常に低密度で推移していた（多田ほか，2004[8]）．また，本湾の植物プランクトン組成については，山田・梶原（2004）[9]が採水法で採取した生海水試料と安達液（安達，1980[10]）で固定・濃縮した試料の両方について同定・計数を行っている．その種組成を見ると，年間を通して珪藻の*Skeletonema costatum*が優占する傾向にあり，全細胞密度が高い盛夏には珪藻類の存在比がとりわけ高く，特に同じ*Skeletonema*属の*S. tropicum*が優占している．すなわち，植物プランクトン現存量が大きい高水温期には珪藻類が常に優占しており，鞭毛藻類が優占することは極めて少ない．また，過栄養状態にある洞海湾では，ピコプランクトンサイズのChl*a*濃度は低く（0～11.7 μg/l），全Chl*a*濃度への寄与も年間を通して低かったことが報告されている（多田ほか，2001[11]）．

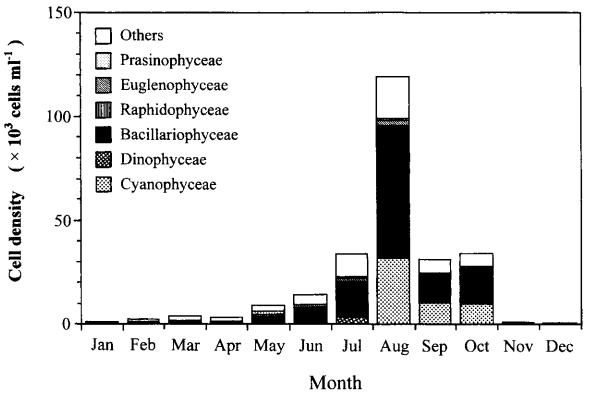

Fig. 7 Annual variation of phytoplankton abundance in surface seawater at a station in Dokai Bay during 1980-1994. (Tada *et al.*, 2004[8])

2.4. 本湾の特徴

以上のことを整理すると次のようになる．本湾の特徴として，まず第一に，栄養塩濃度は周年に渡り非常に高いにもかかわらず，赤潮の発生は高水温期にのみ観察されることが挙げられる．このことは，洞海湾より栄養塩濃度の低い東京湾や大阪湾では冬季にも表層で珪藻類の赤潮が発生することと比較すると非常に興味深い．

また，第二に，その高水温期に大増殖した植物プランクトン群集は常に珪藻類によって構成されており，鞭毛藻類が優占することはほとんどないことが挙げられる．例えば，有害赤潮を形成する*Chattonella antiqua*や有毒プランクトンである*Alexandrium catenella*などは，我が国沿岸で夏季に出現する鞭毛藻類の代表種であるが，洞海湾において，*Heterosigma akashiwo*や*Prorocentrum minimum*等の種について極めて稀に観察される程度か，あるいはまったく観察されていない．

3. 洞海湾で夏季にのみ赤潮が観察される理由

洞海湾の水塊の流動パターンは典型的なエスチュアリー循環であり，表層では湾口に向かう流れが，底層では湾奥に向かう流れが年間を通して卓越している．従って，湾奥の表層水は鉛直混合することなく，表層をすべるように2.0～2.5日で湾口に達するとされている（柳ほか，1996[12]；柳・山田，2000[13]）．つまり，本湾では1日で40～50%に当たる表層水が湾外に除去（Flush out）されていることになる．即ち，理論上は植物プランクトンが1.0分裂（div.）/d以上の速度で増殖しなければ，湾外へと排出され見かけ上は増加できないと考えられる（Fig. 8）．柳・山田（2000）[13]は，本湾では夏季には高い日射量と高水温のために植物プランクトンは高密度となることができるが，それ以外の時期では植物プランクトンの増殖速度が低くおさえられ，赤潮密度に達する以前に湾外に輸送されるとしている．また，1.8 div./d以上の分裂速度で増殖すれば赤潮形成は可能と推測している．一方，著者らは，^{13}C法を用いて測定した一次生産速度から下記の計算式（Harrison *et al.*, 1982[14]）を用いて，植物プランクトンの分裂速度を算出した．

$$\mu_2\ (\text{div./d}) = \log_2 [(\text{PC} + \Delta\,\text{PC})/\text{PC}]$$

ここで，PCは植物プランクトン態のCであり，一次生産測定に用いた海水のChl*a*濃度とPOC濃度をプロットして得た直線式（POC＝37.9 Chl*a*＋501, r^2＝0.624）から見積もった．また，⊿PCは1日の光合成C量である．この計算式により算出された表層水中の分裂速度μ_2

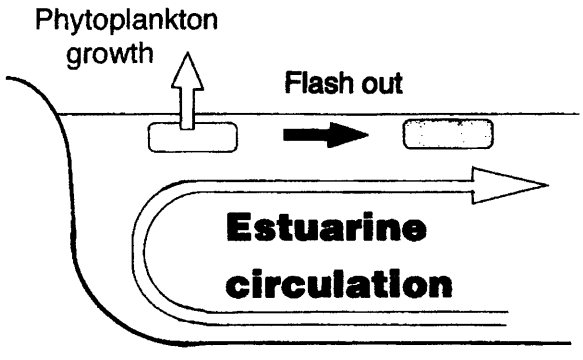

Fig. 8 The scheme of water mass movement and phytoplankton growth in this bay. (Tada *et al.*, 2001)

NII-Electronic Library Service

The Oceanographic Society of Japan (OSJ)

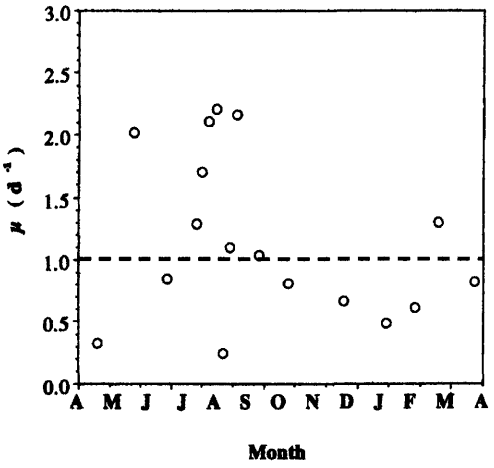

Fig. 9　The estimated phytoplankton growth rate in surface water at Stn. T. The broken line shows the growth rate of 1.0 div./day. (Tada *et al.*, 2001[7])

は，0.26～2.35 div./d であり，おもに7～9月の3ヶ月間に1.0 div./d を超える値となった（Fig. 9）．この結果は，1.0分裂（div.）/d 以上の増殖速度の7～9月の間には，湾外に除去（Flush out）されることなく植物プランクトンが湾内で見かけ上増殖できることを示している．即ち，本湾では豊富な栄養塩のもとで，夏季の高光量子量と高水温の条件が揃った時期にのみ植物プランクトンが高密度となることができることを示している（Tada *et al.*, 2001[7]）．

4.　洞海湾で鞭毛藻類が大増殖しない理由

本湾の植物プランクトン組成については，前述のように，その種組成をみると年間を通して珪藻の *S. costatum* が優占し，夏季には *S. tropicum* が優占している．さらに，植物プランクトン現存量が高い高水温期には珪藻類が優占し，鞭毛藻類が優占することは極めて少ない．そこで，本湾において高水温期に鞭毛藻類が大増殖しない理由について実験的に検証を行った．洞海湾において常に珪藻類が優占する理由については次のような理由が考えられる．①洞海湾の海水中には鞭毛藻類の増殖を阻害する何らかの物質が含まれている，②鞭毛藻類の増殖速度は珪藻類のそれに比べて小さいことから，湾外への海水の除去速度に打ち勝って増殖することができない，③湾内の高濃度の NH_4 が鞭毛藻類の増殖を選択的に阻害する，④貧酸素環境下における植物プランクトン群集の応答の違い．

理由①を検証するために，本湾の夏季の優占種である *S. tropicum* と本湾ではほとんど観察されない *C. antiqua*（ラフィド藻）を洞海湾の表層ろ過海水を用いて培養実験を行った．その結果，この2種については単一培養，混合培養にかかわらず，何れもよく増殖した．このことは，少なくとも現在の洞海湾海水中に鞭毛藻類の増殖を阻害する物質はないこと，および，両者の共存下において少なくとも *S. tropicum* が *C. antiqua* の増殖を阻害することはないことを示唆しており，理由の①は否定できる（多田ほか，2004[8]）．なお，山田ほか（1982a[15]，1982b[16]）は，洞海湾に放出される染料排水やクロメイト処理排水などの工場排水の中には，増殖を促進するものだけでなく，最大増殖量を低下させるものもあることを報告している．従って，洞海湾が過度に汚染されていた1980年頃の海水には鞭毛藻類の増殖を阻害する物質が存在していた可能性は否定できない．しかし，少なくとも現在の洞海湾において，増殖阻害物質によって鞭毛藻類が大増殖できないとする理由①は否定できる．

理由②を要約すると，以下のようになる．即ち，湾内の植物プランクトンは表層水中で増殖はするが，本湾では河口循環流が強く，湾外へと押し流されてしまい，豊富な栄養塩のもとで，夏季の高光量子量と高水温の条件が揃った時期にのみ植物プランクトンが高密度となることができる．一方，鞭毛藻類は珪藻類に比べてその増殖速度は遅く，高光量子量と高水温の条件が揃った夏期でさえ表層水の湾外への Flush out の速度にうち勝って高密度になることはできないということである．この理由②を検証するため，*S. tropicum* と *C. antiqua* の2種について，水温25℃，光量子約100 μE/m^2/sec の条件下で，毎日、培地内の海水をそれぞれ0，20，40%交換しながら培養を行った．これは，前述のように洞海湾の表層水がエスチュアリー循環により，1日で40～50%に当たる表層水が湾外に除去されていることを試験管内で模擬的に再現したものである．実験の結果，*S. tropicum* は40%海水交換区においても細胞密度が増加したが，*C. antiqua* は20%海水交換区においてはわずかに増加しただけで，40%区では増加が認められなかった（Fig. 10）．前述のように本湾では，植物プランクトンがその現存量を増加させるためには，理論上1.0 div./d を上回る増殖速度が必要となる．増殖速度の報告値については，培養条件がそれぞれの文献で異なっていることから，単純に比較することはできない．しかし，過去，*Skeletonema* 属については1.0 div./d を大きく上回る増殖速度が多数報告されているが，その一方で鞭毛藻類の増殖速度の報告値は1.0 div./d 程度か，あるいはそれを下回るものが多い．これらのことは，鞭毛藻類は，夏季の環境条件下にあっても湾外への流出速度を上回る増殖速度を有しておらず，洞海湾で大きく増殖することはきわめて困難であることを示している（多田ほか，2004[8]）．なお，鞭毛

NII-Electronic Library Service

The Oceanographic Society of Japan (OSJ)

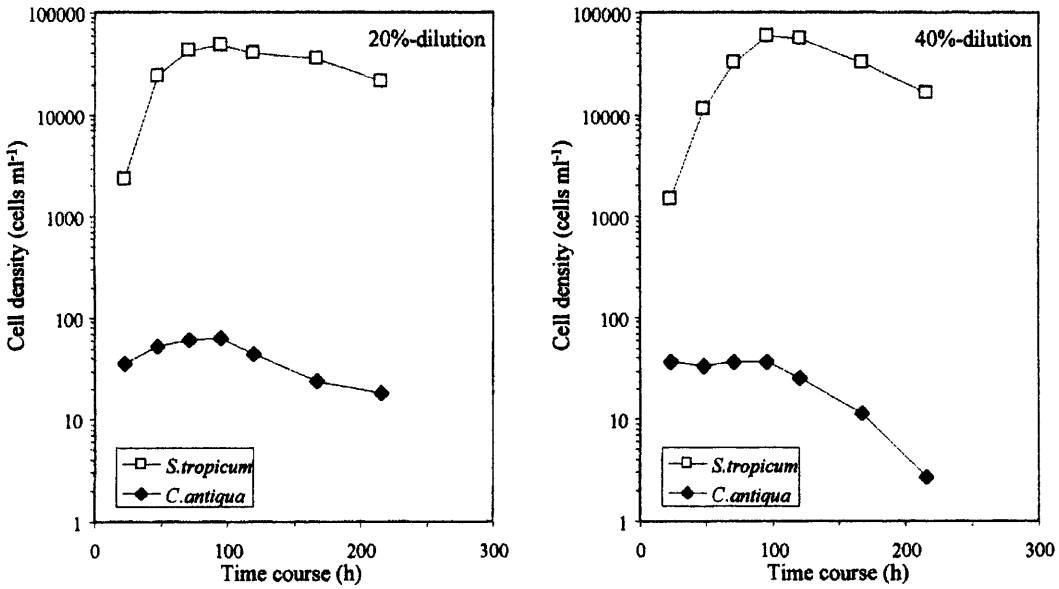

Fig. 10 Growth of *S. tropicum* and *C. antiqua* in cultures of 20% and 40% dilution. (Tada *et al.*, 2004[8])

藻類は鉛直移動することが知られているが，鞭毛藻類が鉛直方向に遊泳したとしても，それは数 m/d（数千分の 1 cm/sec）の速度である．柳ほか（1996）[12]によれば，湾内表層の残渣流は湾口に向かい，その速度は 1 ～ 3 cm /sec 程度で，湾内表層水は約 2 日で湾外に排出される．残渣流は湾口に向かう表層で速く，湾奥に向かう中層・底層で遅いので，鞭毛藻が鉛直移動しても，その速度は残渣流に比べて数桁低く，表層での湾口方向への移動距離は，中層・底層での湾奥方向への移動距離より大きく，結果的に鞭毛藻も数日間で湾口から排出されることになる．

理由③を検証するため，0 ～500 μM までの NH_4 濃度下で，*S. costatum* や *C. antiqua* などの数種の珪藻類，鞭毛藻類の増殖速度を測定した．その結果，本湾の優占種である，*S. costatum* は NH_4 濃度に影響を受けず，ほぼ一定の増殖速度（1.8～2.0 div./d）を示したが，*C. antiqua* は150 μM までの NH_4 濃度下では0.8 div./d の速度で増殖したものの200 μM 以上の NH_4 濃度下では増殖できなかった（Fig. 11）．本湾の表層水の NH_4 濃度は，特に湾奥部でしばしば200 μM をこえており，本湾で鞭毛藻類が大増殖しない理由のひとつとして高 NH_4 濃度も影響している可能性が考えられた（Suksomjit *et al.*, 2005[17]）．

理由④については，門谷（2005）[18]に詳しく述べられている．植物プランクトンの多くは，その生活史の一部に休眠期を持ち，生存に不適な環境を耐久性のある休眠期細胞で過ごすことが知られている．鞭毛藻類の休眠細胞は一般にシスト（cyst）と呼ばれ，このシストは環境条件が整うまで海底泥中で過ごし，条件がよくなると発芽し再び栄養細胞となり，海水中で増殖を始める．

しかし，過度に富栄養化が進行した海域の海底泥中には，夏期の貧酸素化に伴い，高濃度の硫化物が形成される．硫化水素は生物にとっては呼吸阻害剤として働く猛毒である．理由④を要約すると，海底泥中の休眠細胞は貧酸素や高い硫化物濃度のもとではその環境条件に耐性を持たないものや発芽できないものが海底で淘汰され，その結果，鞭毛藻類が優占性を失うという考え方である．事実，0 ～2.1 mgS/g の硫化物濃度下で発芽試験を行った結果，鞭毛藻類の *Scrippsiella, Peridinium, Gymnodinium, Alexandorium, Heterosigma* のシストの発

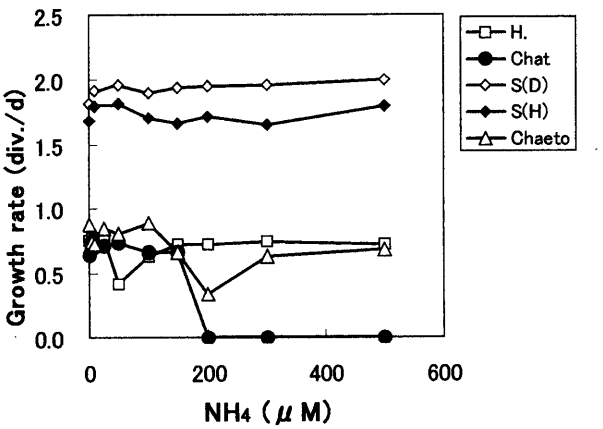

Fig. 11 Growth rate of test species exposed to various ammonium concentrations.
H : *Heterosigma*, Chat : *Chattonella*, S(D) : *Skeletonema* (Dokai Bay clone), S (H) : *Skeletonema* (Harima-Nada clone), Chaeto : *Chaetoceros* (Suksomjit *et al.*, 2005[17])

NII-Electronic Library Service

The Oceanographic Society of Japan (OSJ)

芽数は海底堆積物中の硫化物濃度の増加にともない減少する傾向が認められ，特に，*Scrippsiella* と *Alexandorium* のシストは1.4 mgS/g 以上の硫化物濃度下では発芽しなかった(Fig. 12)．一方，珪藻類の *Skeletonema*, *Chaetoceros*, *Thalassiosira* は硫化物による影響を受けなかった．また，本湾の底泥中の硫化物濃度は湾口部をのぞき湾内で0.2～1.5 mgS/g であり，しばしば1 mgS/g を超える値が観測されている(Montani *et al.*, 1995[19])．このように，珪藻類と鞭毛藻類では貧酸素環境下における植物プランクトンシストの発芽応答が異なり，このような貧酸素，高硫化物濃度下に弱い鞭毛藻類が淘汰され，結果的に珪藻類が優占する可能性が考えられる．

以上を総合して考えると，本湾に鞭毛藻類赤潮が発生しない理由としては以下のように考えられる．即ち，本湾では河口循環流が強くて鞭毛藻類は湾外へと押し流されてしまい，湾内では高密度となることはできないことが主要因として考えられる．また，湾内の海水中で高濃度の NH_4 が鞭毛藻類の増殖を阻害することがあること，および，湾奥の貧酸素環境下において鞭毛藻類のシストの発芽率が低下することがあることも要因として考えられる．

謝　辞

本研究をすすめるにあたりご協力頂いた北九州市環境科学研究所アクア研究センターの皆様に深く感謝いたします．また，洞海湾で著者らと苦労をともにしつつ頑張ってくれた森下政和氏（農学修士，現大分キヤノンマテリアル）をはじめとする香川大学農学部海洋環境学研究室専攻生の皆さんに感謝します．最後に，著者らがこの洞海湾の研究を進めるうえで常に励まして下さるとともに，貴重な議論をして下さった九州大学応用力学研究所柳哲雄教授に深く感謝いたします．

引　用　文　献

1) Yamada, M., K. Kido and T. Hori (1991) : Recovery of aquatic animals in Dokai Bay, northern Kitakyushu, Japan. Mar. Poll. Bull., **23**, 201-207.

2) 山田真知子・東輝明・濱田建一郎・上田直子・江口征夫・鈴木学 (1998)：富栄養化した水域の生態学的環境修復．環境

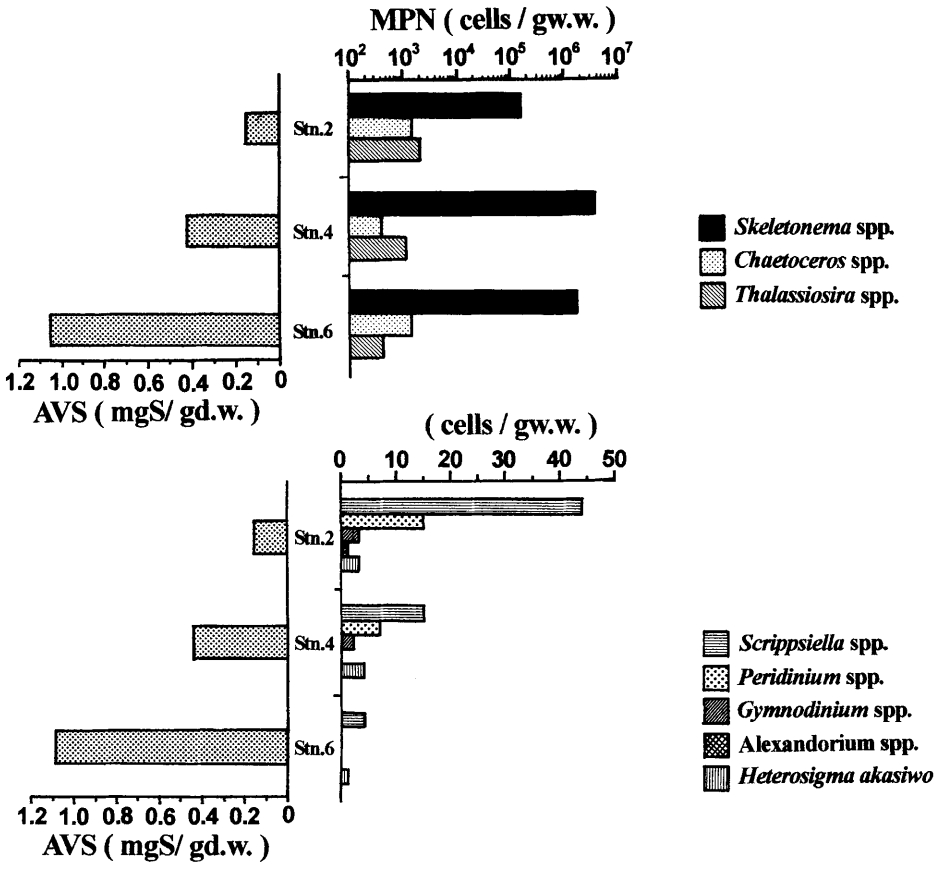

Fig. 12　Sulfide concentration at the surface of sediment and germination number of three diatoms and five flagellates in Dokai Bay.

NII-Electronic Library Service

The Oceanographic Society of Japan (OSJ)

科学会誌, **11**, 381-391.
3) Yanagi, T. (2000) : A Challenge of water purification in Dokai Bay, Japan. Mar. Poll. Bull., **38**, 1063-1069.
4) Ueda, N., H. Tsutsumi, M. Yamada, R. Takeuchi and K. Kido (1994) : Recovery of the marine bottom environment of a Japanese bay. Mar. Poll. Bull., **28**, 676-682.
5) 梶原葉子・山田真知子 (1997) : 洞海湾における付着動物の出現特性と富栄養度の判定. 水環境学会誌, **20**, 185-192.
6) 東輝明・山田真知子・門谷茂・広谷純・柳哲雄 (1998) : 過栄養な内湾洞海湾における貧酸素水塊の形成過程とその特性について. 日水誌, **64**, 204-210.
7) Tada, K., M. Morishita, K. Hamada, S. Montani and M. Yamada (2001) : Standing stock and production rate of phytoplankton and red tide outbreak in a heavily eutrophic embayment, Dokai Bay, Japan. Mar. Poll. Bull., **42**, 1177-1186.
8) 多田邦尚・一見和彦・横田隼人トニ・山田真知子・門谷茂 (2004) : 洞海湾で鞭毛藻類が大増殖しない理由. 海の研究, **13**, 271-279.
9) 山田真知子・梶原葉子 (2004) : 著しく富栄養化の進行した洞海湾の植物プランクトン出現特性. 海の研究, **13**, 281-293.
10) 安達六郎 (1980) : 4－2固定液, p169. 赤潮マニュアルⅠ試料の採集・処理・観察法. 安達六郎, 入江春彦編, 赤潮研究会分類班, 三重.
11) 多田邦尚・濱田健一郎・門谷茂・山田真知子 (2001) : 過栄養海域 (北九州市・洞海湾) における植物プランクトン群集のサイズ組成. 海と空, **77**, 9-15.
12) 柳哲雄・井上康一・門谷茂・山田真知子 (1996) : 洞海湾の潮流と残渣流. 愛媛大学工学部紀要, **15**, 141-148.
13) 柳哲雄・山田真知子 (2000) : 洞海湾で冬季赤潮が発生しない理由. 海の研究, **9**, 125-132.
14) Harrison, W. G., T. Platt and B. Irwin (1982) : Primary production and nutrient assimilation by natural phytoplankton populations of the Eastern Canadian Arctic. Can. J. Fish. Aquat. Sci., **39**, 335-345.
15) 山田真知子・武居薫・鶴田新生 (1982a) : 数種海産植物プランクトンの増殖に及ぼす染料排水の影響. 日水誌, **48**, 1453-1456.
16) 山田真知子・武居薫・鶴田新生 (1982b) : 数種海産植物プランクトンの増殖に及ぼすクロメイト処理水などの影響. 日水誌, **48**, 1457-1461.
17) Suksomjit, M., K. Ichimi and K. Tada (2005) : The effect of high ammonium concentration on phytoplankton growth of coastal water. The 4th Asian Pacific Phycological Forum, 30th Oct.-4th Nov., 2005, 209, Bangkok.
18) 門谷茂 (2005) : 無 (貧) 酸素環境下における植物プランクトン群集の応答. 月刊海洋, **37**, 835-841.
19) Montani, S., K. Ichimi, S. Meksumpun and T. Okaichi (1995) : The effects of dissolved oxygen and sulfide on germination of cysts of some different phytoflagellates. Harmful Marine Algal Blooms, (P. Lassus *et al.*, eds.), 627-632, Lavoisier.

質 疑 応 答

問：洞海湾株の *Skeletonema* は播磨灘株の *Skeletonema* より NH_4 を使いやすくなっているのか.

（九大・総理工, 柳　哲雄）

答：過去の *Skeletonema* に関する報告によると, この種の増殖速度や栄養要求性は株によって変動幅が大きく, 現在の我々の手持ちのデータだけからでは, 何とも言えない. 今後, 検討したい.

問：洞海湾のアンモニア濃度が極端に高いが, 排出源はどこか. また排出規制はかかっていないのか.

（京都大学・農, 藤原　建紀）

答：排出源は主に湾奥部の工場である. 現在, 窒素に関して化学工場の排水は,「水質汚濁防止法」により排水規制されている. 湾奥の化学工場は総量規制の対象になったことから, 窒素系の排出量を3割近く削減し, その結果, 平成13年度に洞海湾の窒素の環境基準 (1 mg/l) を達成した.

NII-Electronic Library Service