

原著論文

化学量論式を用いた栄養塩再生比の推定 ～広島湾への適用～

阿部和雄*・松原 賢*・阿保勝之*

Estimation of nutrient regeneration ratios by stoichiometry - application to Hiroshima Bay-

Kazuo ABE, Tadashi MATSUBARA and Katsuyuki ABO

As one of the nutrient environmental factors related to the transition of species composition of phytoplankton, the nutrient regeneration proportions were estimated in Hiroshima Bay in summer. A plot of silicic acid, phosphate and dissolved total inorganic nitrogen against the apparent oxygen utilization (AOU) showed that an increase (dissolution) in nutrient concentrations was accompanied by dissolved oxygen consumption, and it was suggested that Redfield stoichiometry could be applied to the estimation of the nutrient regeneration proportions. The nutrient regeneration proportions (N:P:Si = 10:1:59) calculated based on the relationship between nutrients and AOU deviated significantly from the canonical Redfield-Brzezinski proportions (16:1:15). We suggest that these deviations indicate regional characteristics of the nutrient remineralization pattern.

キーワード：化学量論, 栄養塩再生, 広島湾, 瀬戸内海
2020年6月15日受付 2020年10月30日受理

瀬戸内海は我が国西部に位置し, スサビノリ *Pyropia yezoensis* やマガキ *Crassostrea gigas* 等の養殖漁業が盛んに行われている海域であるが, 海洋環境保全対策が施された結果, 養殖場近くの沿岸域では貧栄養化が進行して, 養殖ノリの色落ちや漁獲量の減少を引き起こしていると考えられている (阿保ら 2015)。広島湾は瀬戸内海西部に位置する平均水深約30mの半閉鎖的内湾である (図1)。厳島と西能美島間的那沙美瀬戸を境に大きく北部と南部に分けられるが, 湾北部には一級河川である太田川 (流域面積 1,700km²) が流入し, この湾に流入する全淡水量の約50%を担っている (山本ら 1996)。この河川水の影響により周年にわたる密度躍層が約5m深に見られ, 一般に成層構造が発達し躍層を挟んで上下固有の水塊構造を形成している。また, 淡水と海水が交じり合うことによる河口循環流が発達し, 湾下層を通して湾奥および湾

奥上層へ向かう流れが生じている (山本ら 2000)。橋本ら (2006) は生態系モデルを用いて湾北上層への下層からのリン供給が河川からの負荷の約3.8倍に達することを見積もり, 河口循環流による上層への栄養塩供給の重要性を指摘した。また, この湾はカキ養殖が盛んに行われている海域の一つであり (Hirata and Akashige 2004), その餌料生物である珪藻等の植物プランクトンや栄養塩の動向は重要な研究分野と考えられる。

海洋における栄養塩: ケイ酸 (Si(OH)₄), リン酸塩 (PO₄), 硝酸塩 (NO₃), 亜硝酸塩 (NO₂), およびアンモニア (NH₄) は植物プランクトン等による基礎生産を制限する要因の一つである。一般に, 内湾等の沿岸域や河口域への主な供給源は河川等を通しての陸起源, 外洋からの流入, 現場で生成された植物プランクトン等の有機物からの分解再生等である (Takeoka 2002)。

* 国立研究開発法人水産研究・教育機構水産技術研究所廿日市拠点
〒739-0452 広島県廿日市市丸石2丁目17番5号
Fisheries Technology Institute, Hatsukaichi Branch, Japan Fisheries Research and Education Agency
2-17-5 Maruishi, Hatsukaichi, Hiroshima 739-0452, Japan
abek@fra.affrc.go.jp

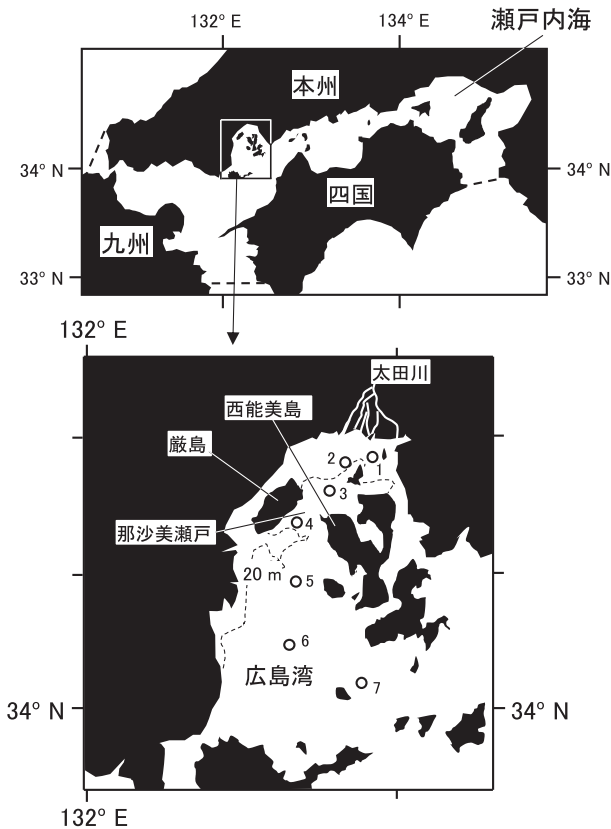


図1. 広島湾調査点
下図の北側が湾奥，南側が湾口に当たる

植物プランクトン元素組成比としてはいわゆる Redfield 比で炭素 (C) : 窒素 (N) : リン (P) = 106 : 16 : 1 が提案された (Redfield 1958)。元来この比は外洋性植物プランクトンの平均元素組成比を表すものであるが、海洋において、特に主水温躍層以深の海水で、溶存全無機炭素、NO₃、PO₄ 比がこれに近いこともあり、植物プランクトン生体への取り込み、これらの分解再生等と海水中元素比の相互関係等が論じられるようになった。外洋域で植物プランクトンの N : P 比が 16 になるのは元素組成比が深層水中の NO₃ と PO₄ 比に依存しているからであり (田口 2016)、また、深層水に対する有機物のソースは外洋表層で生産された Redfield 比を持つ植物プランクトンが起源である (山本ら 2002b)。さらに、これに珪藻外殻の主成分であるケイ素 (Si) を加えて Redfield-Brzezinski 比が C : N : P : Si = 106 : 16 : 1 : 15 で表されるようになった (Gonçalves-Araujo *et al.* 2012)。

しかしながら、Redfield (1958) が提唱したいわゆる Redfield 比は、長期にわたる生物および海洋全体での生物地球化学的プロセスに起因するものであり、時空間的には比較的一定と考えられる (Falkowski 2000, Klausmeier *et al.* 2004)。さらにこの比は異なった生息環境や成長戦略で育った海洋植物プランクトン群集の平均値を表わしているものと考えられる (Arrigo 2005)。よって Redfield 比は全地球レベルでの化学量論を示すものであり、異なった海洋環境や生物組成下では海域間で変動

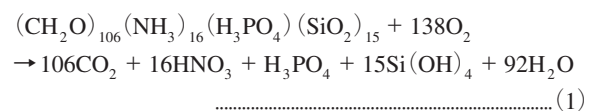
することを意味するものである。植物プランクトン中の最適 N : P 比は生態学的条件に応じて 8.2 ~ 45 で変動することも報告されており (Klausmeier *et al.* 2004)、標準的な Redfield 比の 16 : 1 はすべての植物プランクトンにとっての生物地球化学的最適値ではなく、単に平均値を示しているのみである (Falkowski 2000)。このことは、標準的な Redfield-Brzezinski 比はすべての異なった海域で普遍的な値ではないことを意味する。内湾や沿岸域では栄養塩の負荷は外洋と異なり非定常であり、植物プランクトン群集や元素組成比は一定とは限らず、実際に広島湾の植物プランクトン態 C : N : P 比は栄養塩環境等に対応して Redfield 比からの乖離が報告されている (山本ら 2002b)。

本報告は、広島湾における植物プランクトン等の生物起源物質からの栄養塩分解再生比が、どの程度標準的な Redfield-Brzezinski 比から逸脱するのかの検証を目的の一つとする。Redfield-Brzezinski 比を有する標準的な植物プランクトン (珪藻) 1 モルが完全に酸化分解されると 106 モルの二酸化炭素 (CO₂)、16 モルの硝酸 (HNO₃)、15 モルの Si(OH)₄、および 1 モルのリン酸 (H₃PO₄) が生成され、138 モルの酸素 (O₂) が消費されることになる。この際、生成された N、P、Si と O₂ の関係が分かれば、残りの C を含めて再生される C : N : P : Si 比が算出できることになる。消費される酸素量との関係から求めた栄養塩再生比は、実際に現場で生産された植物プランクトン等の生物起源物質の元素組成比に依存し、生物生産で使われた栄養塩比を反映していると考えられる。

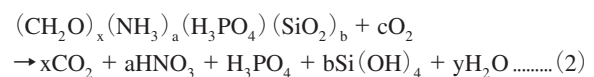
ここでは、化学量論式を用いて現場で消費される O₂ と再生される N、P、Si の関係から分解再生される C : N : P : Si 比の推定手順について記した。さらに、モデル海域として広島湾を設定し、10m 以深の中・下層水における栄養塩再生比の Redfield-Brzezinski 比からの乖離に関して若干の知見を得たのでこれを報告する。

方 法

Redfield-Brzezinski 化学量論式 Redfield-Brzezinski 比 (C : N : P : Si = 106 : 16 : 1 : 15) を用いると珪藻の分解再生は次式で示される。



一般的には、



となる。

両辺の酸素原子の収支から、

$$x + 4 + 2b + 2c = 2x + 3a + 4 + 4b + y \dots\dots\dots(3)$$

さらに水素原子収支から、

$$2x + 3a + 3 = a + 3 + 4b + 2y \dots\dots\dots(4)$$

(3), (4) より $x = c - 2a$, $y = c - a - 2b$ が得られる。ここで、海水中の O_2 が c モル消費されると、 HNO_3 , H_3PO_4 , および $Si(OH)_4$ はそれぞれ a , 1 , および b モル再生することになる。 HNO_3 , H_3PO_4 , および $Si(OH)_4$ を O_2 に対してプロットした時の傾き (a/c , $1/c$, および b/c) を $1/c$ で除すことにより、係数 a と b を求めることが出来る。また、係数 c は $H_3PO_4 - O_2$ プロットの傾きの逆数として求められる。このようにして求めた係数 a , b , および c から係数 x と y が決定できる。

広島湾における観測 モデル海域として広島湾を設定し、湾内の7観測点において瀬戸内海区水産研究所（現水産技術研究所廿日市拠点）所属しらふじ丸により海洋観測調査を2016年7月3～4日、および2017年7月5～6日に行った（図1）。塩分、海水温、および溶存酸素（DO）は直読式総合水質計AAQ-RINKO177（JFEアドバンテック社）を用いて表面から海底直上まで連続的に測定した。本機器に搭載されている燐光式DOセンサーは5%亜硫酸ナトリウム溶液で0補正、および気泡水により100%補正を行った。また、ウインカラー法による溶存酸素測定値の検定を行い、概ね $\pm 5\%$ 程度の誤差範囲であった。また、見かけの酸素消費量（AOU）は、DOの飽和値から測定された酸素濃度を差し引いて求めた。

栄養塩分析用海水試料は5Lニスキン採水器を用い深度別に鉛直的に採水した。採水深度は、測点1, 2, 3, 4, 6では10mと海底上1m、測点5, 7はこれらに20mを加えた。得られた試料は0.45 μ mミリポアフィルターでろ過後、船内の冷凍庫（ -20°C ）で保存した。陸上実験室において解凍後試料中の $Si(OH)_4$, PO_4 , NO_3 , NO_2 , および NH_4 を栄養塩自動分析装置TRAACS2000（ブランルーベ社）により定量した。栄養塩の繰り返し分析精度

はそれぞれ6.40 μ M, 0.42 μ M, 2.27 μ M, 0.48 μ M, 1.69 μ M程度程度の濃度レベルでは、 $\pm 2.4\%$, $\pm 2.5\%$, $\pm 1.9\%$, $\pm 1.6\%$, $\pm 2.5\%$ 程度である。分析精度としては各々総じて数%程度が報告されており（Zhang *et al.* 2013）、本報における分析精度は十分な精度を有していると考えられる。また、1mと3m深においてプランクトン検鏡用海水を5Lニスキン採水器で採水し、船内の実験室において主な植物プランクトンの同定を行った。

結 果

2016年7月および2017年7月の塩分、水温、および塩分・水温から計算された密度（以下、 σ_t ；密度 [kg/m^3]）の値から1000を差し引いた値で海水の密度の指標）の表面から海底までの鉛直断面を示したが（図2）、これら成分の分布傾向はそれぞれ両観測年で似通っていた。塩分は表面付近で低く、水深の増加に伴って増加する傾向を示し、最小値6.9（2017年測点3：0m）から最大値で33.1（2017年測点5：海底上1m）の範囲であった。水温は表面付近で高く深度とともに低下する傾向であり、最高は25.6 $^\circ\text{C}$ （2016年測点1：0m）、最低は17.8 $^\circ\text{C}$ （2016年測点1：海底上1m）であった。また、塩分・水温ともに表面から約5m深にかけて大きな躍層が観測された。 σ_t は概ね、特に沿岸寄りの地点において塩分と同様の分布傾向を示し、最小値2.9（2017年測点3：0m）から最大値で23.7（2017年測点5：海底上1m）の範囲であった。

躍層により上層水から隔離され、河川水等の影響を受けない水深10m以深のDO, $Si(OH)_4$, PO_4 , および溶存全無機窒素（DIN； $NO_3 + NO_2 + NH_4$ ）の鉛直断面を σ_t の断面とともに示した（図3）。DOは概ね深度増加と

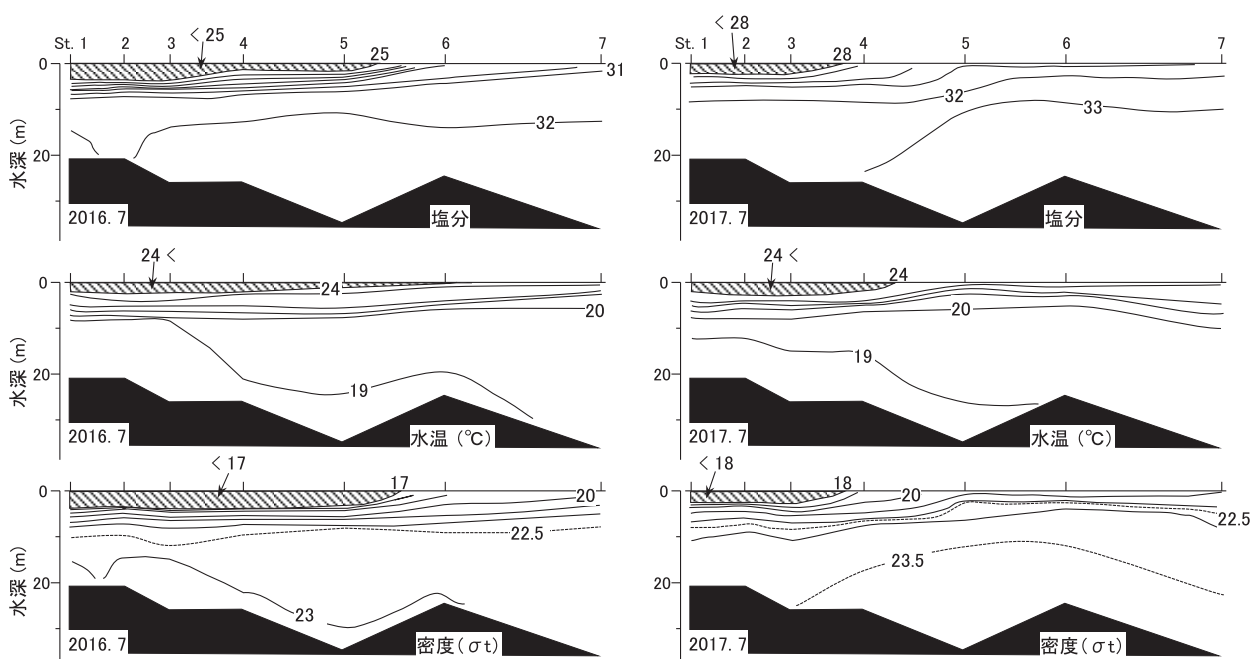


図2. 2016年および2017年7月の塩分、水温および密度 (σ_t) の鉛直断面

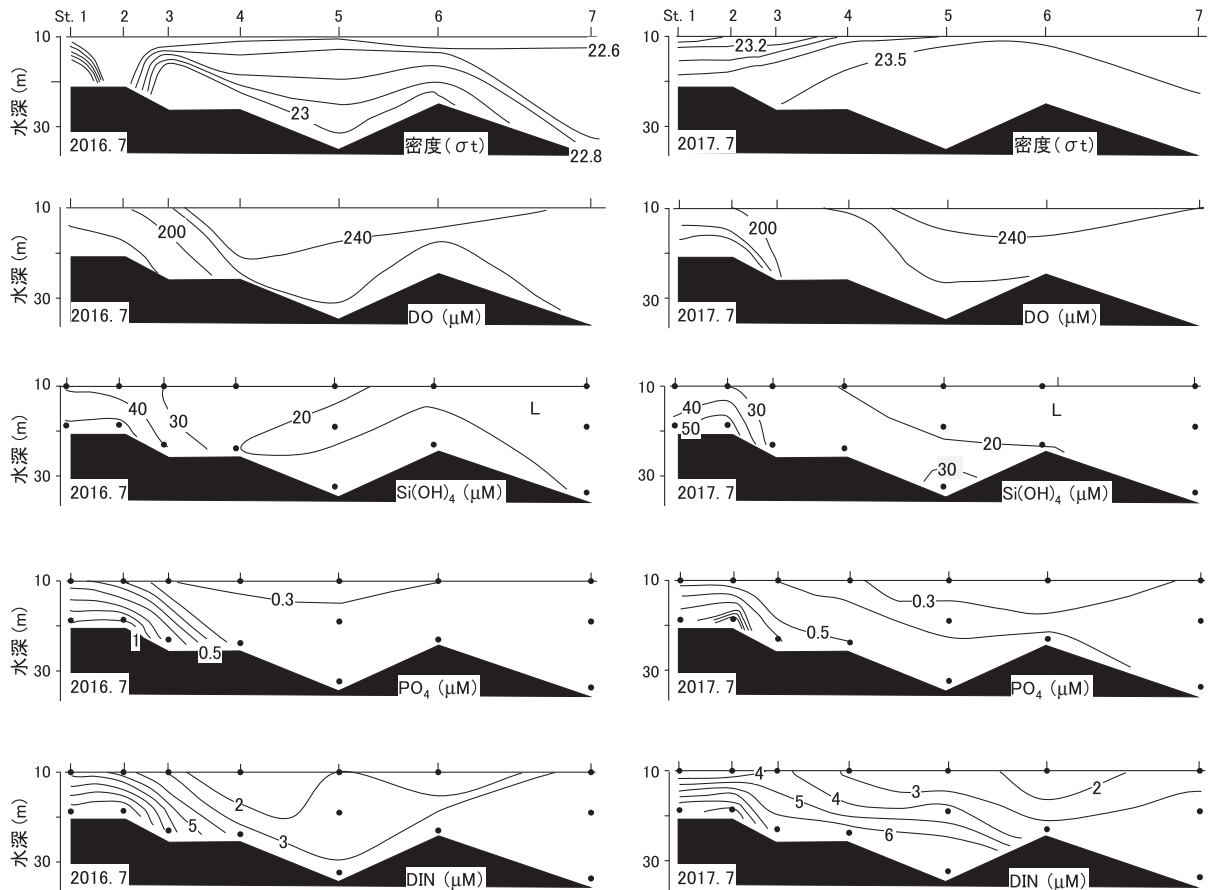


図3. 2016年および2017年7月の密度 (σ_t), DO, $\text{Si}(\text{OH})_4$, PO_4 , およびDINの鉛直断面 (10m以深)

もに海底へ向かいその濃度が減少する傾向を示し、116~367 μM の濃度範囲で変動した。栄養塩成分は深度と共にそれらの濃度が増加する傾向であり、概ね $\text{Si}(\text{OH})_4$ が13~60 μM 、 PO_4 は0.2~1.1 μM 、DINは1.1~10 μM の濃度範囲で変動し、河口付近の測点2の底層(海底上1m)で最高値を観測した。

検鏡により確認された植物プランクトンは珪藻類が多くを占め、特に河口近くの測点で高密度であった。2016年は珪藻類の*Leptocylindrus danicus*, *Pseudo-nitzschia* spp., *Skeletonema* spp., *Leptocylindrus minimus*が優占しており、その他*Heterosigma akashiwo*, *Prorocentrum* spp., *Ebria* spp.等の鞭毛藻類が認められた。2017年は*Skeletonema* spp., *Chaetoceros* spp., *Leptocylindrus danicus*, *Nitzschia* spp.の珪藻類が優占であり、その他クリプト藻類の出現が認められた。出現した珪藻の個体数の割合を測点別に示した(図4)。また、全個体数中の珪藻類の個体数の割合(%)は2016年、2017年でそれぞれ98.9%および86.6%であった。

水深10m以深の $\text{Si}(\text{OH})_4$, PO_4 , およびDINをAOUに対してプロットした。2016年および2017年のプロットは概ね同じ傾向を示し、各成分のプロットはAOUの増加に伴う濃度増加が認められた(図5)。2016、2017年両年の全プロットデータを用い回帰分析により区間推定を試みた結果、95%信頼区間は $\text{Si}(\text{OH})_4$, PO_4 ,

およびDINでそれぞれ10.5%, 15.5%, および17.9%程度であった。図中の直線は回帰直線を表わしているが、それぞれの傾きは0.355 $\mu\text{M}/\mu\text{M}$ ($\text{Si}(\text{OH})_4/\text{AOU}$),

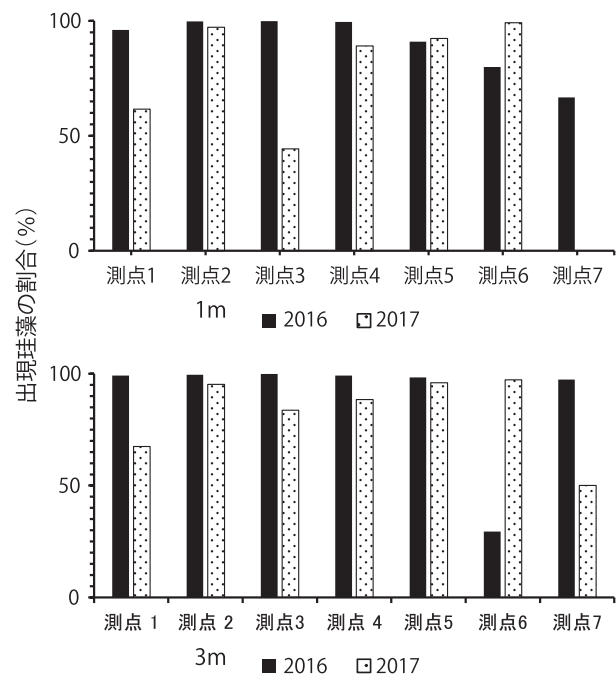


図4. 植物プランクトン全個体数に対する珪藻類の割合(%) (2016年および2017年の1mと3m)

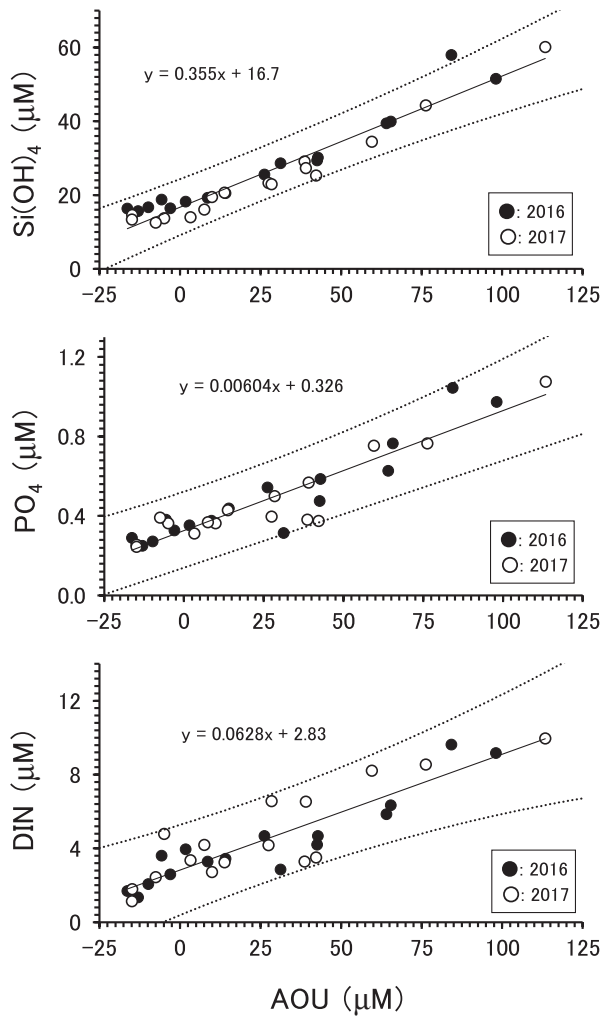


図5. Si(OH)_4 , PO_4 , および DIN の AOU に対するプロット (2016年および2017年10m以深の全データ)
各図中の直線および点線は、両調査年すべてのプロット点の回帰直線 (回帰分析), および95%信頼区間の上限・下限ばらつき幅を示す

0.00604 $\mu\text{M}/\mu\text{M}$ (PO_4/AOU), 0.0628 $\mu\text{M}/\mu\text{M}$ (DIN/AOU) として求められた。 $\text{Si(OH)}_4/\text{AOU}$ と DIN/AOU を PO_4/AOU で除し、1モルの PO_4 が再生する時の Si(OH)_4 と DIN の再生がそれぞれ58.8モル (係数b) および10.4モル (係数a), さらに PO_4/AOU の逆数よりこの時に消費される DO として165.6モル (係数c) が求められた。また、これらの係数より生成される CO_2 と H_2O がそれぞれ144.8モル (係数x), 37.6モル (係数y) として算出された。

考 察

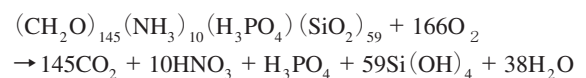
広島湾の海況および DO , 栄養塩分布 塩分は表面付近の河口に近い測点で2017年に著しく低い値 (10未満) が観測された。広島湾北部海域では、降雨後表面でしばしば塩分10未満の低塩分値が観測され、降雨による河川からの淡水流入の影響であると報告されている (李ら1996)。広島地方では2017年調査の前日から調査日朝に

かけて70mmを超える降雨が観測され (気象庁2020), 2017年調査における表面付近の10未満の低塩分は、降雨後の太田川からの河川水流入の影響であると考えられる。 σ_t は塩分および水温の分布を反映した結果、概ね、特に沿岸寄りの地点において塩分と同様の分布傾向を示したと考えられる。塩分と σ_t の断面図 (図2) から、25~30m深の湾口付近から沖合の高塩・高密度水の流入が認められるが、これは南部からの下層水の流入を反映したものと考えられる。水深約10m以深では塩分、水温、および σ_t はほぼ均一の分布傾向を示し、この層では塩分と σ_t は概ねそれぞれ1程度の範囲内の変動であった。これらの結果から、水深約10m以深は発達した密度躍層により上層水とは異なる性質の水塊が配置されている状況であったと考えられる。この層では河川からの淡水の影響を受けていない水塊が存在し、分解再生理論式の適用が可能である。

広島湾では太田川河川水による淡水の流入により成層が形成され、上層の低塩分水塊は密度流として沖合へ拡がり、底層では沖合の海水が河口域へ供給される、いわゆるエスチュアリー循環が形成されている。この循環流によって、隣接する南部海域から下層を通して河川流入量の約7倍もの海水が広島湾北部海域へもたらされている (山本ら2000)。この流れとともに栄養塩等の溶存物質は湾内へと侵入し、一部は上層へ湧昇し植物プランクトン等に利用される (山本2011)。結果的には、閉鎖性の強い広島湾北部海域においてもエスチュアリー循環流による海水交換により、間接的に湾外水の影響を受けていることになる (橋本ら2006)。

本調査時の DO は海底へ向かってその濃度が減少する傾向を示し、特に河口付近の測点の海底上1mで低い値が観測され、海底近傍での酸素消費を伴う有機物分解が盛んに行われていたことが示唆された。これに対して栄養塩は、水深の増加に伴ってこれらの濃度が増加する傾向であり、海底近傍での栄養塩の再生と上層への拡散の結果であると考えられる。 PO_4 と DIN の再生は、植物プランクトン等起源の有機物分解に起因するものと考えられる。 Si(OH)_4 の再生は珪藻等の生物起源 Si の溶解に起因するものと考えられるが、生物起源 Si は非結晶であるため比較的溶解しやすい (池田2015)。この際、珪藻の被殻を覆っている有機物の分解が生物起源 Si の溶解を促進するものと考えられる (Bidle and Azam 1999)。

推定された広島湾の栄養塩再生比とその特徴 広島湾における栄養塩 - AOU プロット (図5) から算出された各係数を用い、次式のように化学量論式が導かれる (小数点一桁を四捨五入)。



よって、現場海域で分解再生される C, N, P, Si, および消費される DO の比は145 : 10 : 1 : 59 : 166として求められ、推定された N : P : Si の分解再生比は10 : 1 : 59

であった。さらに、本報告で試みた区間推定の95%信頼区間は $\text{Si}(\text{OH})_4$ 、 PO_4 、およびDINでそれぞれ10.5%、15.5%、および17.9%であった。また、 $\text{Si}(\text{OH})_4/\text{AOU}$ 、 PO_4/AOU 、およびDIN/AOUの傾きはそれぞれ0.355 ($\mu\text{M}/\mu\text{M}$)、0.00604 ($\mu\text{M}/\mu\text{M}$)、および0.0628 ($\mu\text{M}/\mu\text{M}$)であり、信頼区間のばらつきを考慮するとSi、P、およびNの傾きはそれぞれ0.318~0.393 ($\mu\text{M}/\mu\text{M}$)、0.00510~0.00698 ($\mu\text{M}/\mu\text{M}$)、および0.0516~0.0740 ($\mu\text{M}/\mu\text{M}$)となる。ここでPの最大値に対するN、Siの最小値、およびPの最小値に対するN、Siの最大値を求めると分解再生比は(7~15):1:(46~77)の範囲で求められ、標準的なRedfield-Brzezinski比の16:1:15とは異なりPに比べてSiの割合が高くNの割合は若干低く、特にSiの偏りが大きい結果となった。特にSiの割合が大きいのは珪藻の増殖に有利であることを示唆するが、本調査での珪藻類の優占性を示す結果とも整合性がある。

一般に河川水中の $\text{Si}(\text{OH})_4$ 濃度は海域に比べて高く、全国平均で約220 μM 程度である(森本ら2016)。本調査域へ流入する太田川河川水では100~200 μM 程度との報告例がある(環境科学部2010)。一方、 PO_4 については1.5 μM 程度であり(山本ら2002a)、 $\text{Si}(\text{OH})_4$ との比は100程度である。太田川は広島湾の水質環境に大きく影響を及ぼす河川であると考えられるが、陸起源 $\text{Si}(\text{OH})_4$ は河川を通して広島湾へ比較的多量に供給され、特に夏場では高い傾向を示している(山本ら2002b)。湾内で珪藻類、放散虫、珪質鞭毛藻やセレウス菌(Hirota *et al.* 2010)等に利用され、多様な物質循環過程を経て、結果として比較的大きなSiの分解再生比が生じているものと思われる。

また、広島湾では前述の通りカキ養殖が盛んで、その際海底への糞粒等の有機物負荷が多い(川口ら2011)。珪藻等の餌生物がカキを通して糞粒へ移行する際にPはカキ生体内へ取り込まれ、カキを介した元素分別の結果、見かけの分解基質中Si含量が増加することも一要因として考えられるが、詳細については不確かな面が多い。

推定されたNの割合が標準比よりも小さい(N:P比で7~15)のも本調査海域の特徴である。これは湾内での脱窒の効果が考えられ(山本2000, 山本ら2002b, 清木ら2008)、分解再生されたNが系内より除去されることが考えられる。また、脱窒作用による窒素不足から窒素取り込みが不足し、その結果基質となる植物プランクトン中のN:P比が小さくなることも考えられる(山本ら2002b)。広島湾におけるプランクトン態元素組成比として2000年のデータではあるが、N:P比として16が報告された(山本ら2002b)。本調査結果では再生比は7~15と山本ら(2002b)のプランクトン態に比べると平均で63%と低い傾向にあり、脱窒が影響している可能性が考えられる。

栄養塩(N, P)再生比の海域特性 半閉鎖性海域である大阪湾と伊勢湾において、DIN・ PO_4 の再生とAOU

の関係が報告されている。大阪湾では、DINは1本の直線関係であったが、 PO_4 はAOU約2~4mL/L(63~125 μM)を境として勾配が大きくなる2本の直線として示された(城ら1984)。これは、AOUが約2~4mL/L以上の貧酸素状態では、分解再生した PO_4 に底質から溶出した量加わったためとしている。DINと PO_4 の比はAOU約2~4mL/Lの前後でそれぞれ約12、および2が算出された。伊勢湾においては季節による相違はあるが、夏場にこれらの比は約5程度であった(筧・藤原2007)。伊勢湾で標準比(16)よりも著しく小さな比となるのは、再生したDINが脱窒により窒素ガスに転換され系外へ除去されたためとし、伊勢湾は窒素循環における脱窒の効果が大きい海域であることを述べている。本調査海域の広島湾ではN:P比が7~15として示された。このように、栄養塩とAOUの関係から導き出されるNとPの関係は2例の報告ではあるが、海域による明確な違いが示され、他成分のSiやCを含め、それぞれの地域特性を表わしているものと考えられる。

栄養塩再生比と水産業の関わり 昨今、環境要因の変動と生物種の応答が問題となっているが、水産有用種の変遷に影響を及ぼすと考えられる要因の一つとして、栄養塩比に関する情報は重要な意味合いを持つものと考えられる。N、P、Si等の親生物元素の分解再生比は、現場海域の有光層内において生産された植物プランクトン等の元素組成比を強く反映するものと考えられる。広島湾における植物プランクトン群集や植物プランクトン態元素組成比は、河川やエスチュアリー循環に伴う南部下層からの流入等、非定常的に負荷される栄養塩類現存比に呼応して時間スケールで変遷する(山本ら2002b)。植物プランクトン優占種の変遷は餌生物としての意味合いから水産有用種の消長に大きく影響を与える可能性がある。親生物元素の分解再生比をモニターすることにより、非定常的に変動する栄養塩負荷や、植物プランクトン種の変遷等に関する情報を統合的かつ平均的に把握することができ、水産有用種の消長要因解明や変動予測、さらには新たな探索へ向けた情報源になると考えられる。

また、養殖魚介類へ漁業被害をもたらす有害赤潮生物の消長にも栄養塩類現存比の動向が関連している。瀬戸内海では環境保全特別措置法等の施行によりPやN等の排出規制や水質管理が行われ、その結果環境水中の栄養塩類の比率は変動し、生物群集組成に影響を及ぼしている。例えば、リン制限下環境では上昇したN:P比の影響により、細胞内リンプールの大きい種が優占する現象も報告されている(山本ら1999)。赤潮に限ると1980年代の*Gymnodinium mikimotoi*(現*Karenia mikimotoi*)などの渦鞭毛藻、*Chattonella antiqua*などのラフィド藻、1990年代の*Alexandrium tamarense*、*Heterocapsa circularisquama*などの渦鞭毛藻が発生するなどプランクトン組成に変化が現れている(山本ら1999)。

以上、広島湾における栄養塩濃度の増加とAOUの相

関性から植物プランクトン起源物質からの栄養塩再生比を推定した。また、水柱内での栄養塩成分の濃度増加は、DO消費を伴う有機物分解以外に海底堆積物間隙水からの拡散、貧酸素状態における堆積物からの溶出、および脱窒による系内からの除去も考えられるため、これらの寄与の影響も考慮され得べき要因の一つであり、今後の検討課題でもある。さらに、栄養塩分析に限らず定量分析では、測定値が「真の値」にどれだけ近いかという正確度が重要である。このために海水標準物質等を用いた栄養塩濃度の検定等も今後の検討事項と考えられる。

謝 辞

本報告をまとめるにあたり海洋調査および試料採取において、瀬戸内海区水産研究所（現水産技術研究所廿日市拠点）所属漁業調査船しらふじ丸日中隆介船長はじめ乗組員の方々にご協力を頂いた。記して謝意を表す。さらに有益なご指摘を頂いた査読者ならびに編集委員に感謝の意を表す。

文 献

阿保勝之・中川倫寿・阿部和雄・樽谷賢治（2015）東部瀬戸内海における栄養塩の動態とノリ養殖などのための栄養塩管理。海洋と生物, **37**, 274 - 279.

Arrigo KR (2005) Marine microorganisms and global nutrient cycles. *Nature*, **437**, 349 - 355.

Bidle KD, Azam F (1999) Accelerated dissolution of diatom silica by marine bacterial assemblages. *Nature*, **397**, 508 - 512.

Falkowski PG (2000) Rationalizing elemental ratios in unicellular algae. *J. Phycol.*, **36**, 3 - 6.

Gonçalves-Araujo R, de Souza MS, Mendes CRB, Tavano VM, Pollery RC, Garcia CAE (2012) Brazil-Malvinas confluence: effects of environmental variability on phytoplankton community structure. *J. Plank. Res.*, **34**, 399 - 415.

橋本俊哉・上田亜希子・山本民次（2006）河口循環流が夏季の広島湾北部海域の生物生産に与える影響。水産海洋研究, **70**, 23 - 30.

Hirata Y, Akashige S (2004) The present situation and problems of oyster culture in Hiroshima Bay. *Bull. Fish. Res. Agen. Supplement*, **1**, 5 - 12.

Hirota R, Hata Y, Ikeda T, Ishida T, Kuroda A (2010) The silicon layer supports acid residence of *Bacillus cereus* spores. *J. Bacteriol.*, **192**, 111 - 116.

池田 丈（2015）地球上のケイ素の循環と生物の関わり。バイオミディア, **93**, 95.

城 久・矢持 進・安部恒之・河合 章（1984）大阪湾の貧酸素底層水における無機栄養塩濃度について。日本水産学会誌, **50**, 1693 - 1700.

寛 茂穂・藤原建紀（2007）伊勢湾の栄養塩動態：非保存的変化の季節変動。海の研究, **16**, 437 - 453.

環境科学部（2010）公共用水域における溶存ケイ酸調査（第2報）。広島市衛研年報, **29**, 126 - 127.

川口 修・平田 靖・若野 真・山本民次・陸田秀実（2011）カキ養殖の実施形態別有機物負荷特性の評価。日本水産学会誌, **77**, 1043 - 1050.

気象庁（2020）過去の気象データ検索。http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php, 2020年11月5日

Klausmeier CA, Litchman E, Daufresne T, Levin SA (2004) Optimal nitrogen-to-phosphorus stoichiometry of phytoplankton. *Nature*, **429**, 171 - 174.

李 英植・山田崇央・清木 徹・向井徹雄・滝本和人・岡田光正（1996）広島湾における植物プランクトンの増殖に対する集中降雨に伴う陸水の影響。水環境学会誌, **19**, 995 - 1003.

森本優希・中本健二・中下慎也・日比野忠史（2016）堆積泥への灰分（ミネラル）の供給と消費機構。土木学会論文集B3（海洋開発）, **72**, 658 - 663.

Redfield AC (1958) The biological control of chemical factors in the environment. *Am. Sci.*, **46**, 205 - 221.

清木 徹・伊達悦仁・岡田光正（2008）干潟および沿岸海底における脱窒と窒素固定。日本水産学会誌, **74**, 678 - 687.

田口 哲（2016）レッドフィールド比：研究の歴史と現状、今後の展望。海の研究, **25**, 123 - 132.

Takeoka H (2002) Progress in Seto Inland Sea Research. *J. Oceanogr.*, **58**, 93 - 107.

山本民次（2011）閉鎖性海域における物質循環と環境管理に関する研究。水産海洋研究, **75**, 54 - 62.

山本民次・北村智顕・松田 治（1996）瀬戸内海に対する河川流入による淡水、全窒素および全リンの負荷。生物生産学研究, **35**, 81 - 104.

山本民次・橋本俊哉・松田 治・多田邦尚（1999）瀬戸内海における植物プランクトン態N:P比とその変動要因。水産海洋研究, **63**, 6 - 13.

山本民次・芳川 忍・橋本俊哉・高杉由夫・松田 治（2000）広島湾北部海域におけるエスチュアリー循環過程。沿岸海洋研究, **37**, 111 - 118.

山本民次・石田愛美・清木 徹（2002a）太田川河川水中のリンおよび窒素濃度の長期変動-植物プランクトン種の変化を引き起こす主要因として。水産海洋研究, **66**, 102 - 109.

山本民次・橋本俊哉・辻 けい子・松田 治・樽谷賢治（2002b）1991～2000年の広島湾海水中における親生物元素の時空間的変動、特に植物プランクトン態C:N:P比のレッドフィールド比からの乖離。沿岸海洋研究, **39**, 163 - 169.

Zhang L, Wang L, Yin K, Lu Y, Zhang D, Yang Y, Huang X (2013) Pore water nutrient characteristics and the fluxes across the sediment in the Pearl River and adjacent waters, China. *Estuar., Coast. Shelf Sci.*, **133**, 182 - 192.