

20周年記念号

室戸海洋深層水の栄養塩 ～有効利用, 季節変動, および沿岸生態系への影響～

Inorganic Nutrients in Muroto Deep Seawater: Effective Utilization, Seasonal Variation, and Influence on Coastal Environment

深見公雄
Kimio FUKAMI

1. はじめに

海洋深層水 (DSW: Deep Seawater) は光合成独立栄養生物の増殖に不可欠な無機栄養塩を豊富に含むことから, 早くから植物プランクトン等微細藻類の大量培養への利用が実施されてきた。一方で, その濃度には顕著な季節変動があることもわかってきた。また, そのような高濃度の栄養塩が沿岸域に大量に排水されたときの, 沿岸生態系への影響についても考慮されるべきである。

ここでは, DSW 栄養塩について, 浮遊性および付着性珪藻類の培養とそれを用いたアワビの種苗生産での有効利用, 栄養塩濃度から見た DSW の水質変動と沿岸湧昇との関係, 最後に沿岸海水中に生息する藻類への影響について取りまとめた。

2. 微細藻類の大量培養

2.1 浮遊性珪藻

高知県海洋深層水研究所にて水深約 320 m から汲み上げられた深層水で珪藻類植物プランクトン *Chaetoceros ceratosporum* を培養したところ, 誘導期を示すことなく接種後直ちに対数増殖を開始し, 4 ないし 5 日目には定常期に入ることが明らかになった。深層水を様々な季節において採取し, 同様の実験を行った結果, 倍加時間の逆数すなわち一日あたりの

分裂回数で示した同藻の増殖速度 (μ) は 1.25–2.22 (平均 1.72) 分裂 d^{-1} , また最大細胞収量 (maximum cell yield; MCY) は 2–11 (平均 6) $\times 10^5$ cells mL^{-1} であることがわかった (Fukami *et al.*, 1992)。

栄養塩を十分に含んだ無機栄養培地 ASP₆ 中での本藻類種の μ は 1.92 分裂 d^{-1} 程度, MCY は約 6×10^6 cells mL^{-1} であることがわかっており, 前述のように, DSW によるこれらの値は, ASP₆ 培地で得られた値と比較して, μ で 65–116% (平均 90%), MCY で 3–18% (平均 10%) であった。深層水中の溶存態無機窒素 (DIN) 濃度は 20–25 μM 程度である。それに対して, ASP₆ 培地中には DIN が約 3500 μM 含まれており, その差はおよそ 200 倍である。それに対して, 両者の細胞収量の差はせいぜい 10 倍であった。このことは, 深層水で浮遊珪藻を培養した方が, 栄養塩が過剰に含まれる培地を用いた場合より 10 倍以上効率よく収量に結びついていることを意味している。

2.2 付着性珪藻

同様に, 高知県海洋深層水研究所の DSW を用いて, 付着性珪藻 *Nitzschia* sp. を培養した。太さ 25 mm 長さ 140 mm のガラス管内部に直径約 5 mm のガラスビーズを付着基盤として充填し, 両端をシリコン栓で封をしたものを付着藻類培養容器として使用した。培養容器下側から DSW を, ペリスタルティックポンプを用いて 1–25 回転 h^{-1} の換水率で連続的

に供給し, *Nitzschia* sp.を培養した. 培養開始後10日目の培養容器内部のクロロフィル a 量を測定し, 付着基盤の総面積(ガラスビーズの表面積+ガラス管の内壁面積, 約 377 cm^2)で割ることで, 珪藻の収量を求めた.

DSWを全く通水しないバッチ培養(換水率0)での付着基盤単位面積当たりのクロロフィル量は極めて小さく, せいぜい $0.001\text{--}0.003\text{ }\mu\text{g cm}^{-2}$ であった. それに対し, DSWを連続的に供給すると, 付着珪藻の収量は換水率の上昇とともに大きく増加した(Fukami *et al.*, 1997). しかもDSWを1時間当たり25回というかなり大きな換水率で供給しても, 培養容器から流出してくる珪藻細胞がほとんどないことが明らかになった. このことは, DSWの持つ豊富な栄養塩が連続的に供給されたため付着珪藻が効率よくそれらを利用していること, またDSWをかなり速やかに供給してもガラスビーズという付着基盤上から珪藻細胞が離脱せず, 本装置が一種のバイオリアクターとして利用できることが明らかとなった(Fukami *et al.*, 1997).

2.3 アワビと餌料性珪藻の連続同時培養

DSWを連続的に供給することにより餌料性付着珪藻の効率的な培養が可能であることが明らかとなったため, 珪藻の培養容器内部にアワビ稚貝を収容して, 餌料珪藻とアワビ種苗を同時に培養・飼育することを試みた.

直径7 cm長さ50 cmの透明のアクリルの筒の中に, 直径2 cmの透明のビニールホースを約2 cmの長さに切ったものを珪藻の付着基盤として多数収容した培養装置を作成した. これに, 高知県海洋深層水研究所で汲み上げられたDSWを連続的に供給し, 室内自然光で付着性珪藻*Nitzschia* sp.を培養するとともに, メガイアワビ*Haliotis sieboldii*の幼貝を培養装置内に収容し, その成長を調べた.

培養容器内にあらかじめ*Nitzschia* sp.を接種して数日放置したのち, DSWを換水率20~40回転 h^{-1} で培養装置に連続通水すると, 約1週間で, 付着基盤として用いているビニールチューブが見えなくなるほどに付着珪藻が増殖してくることが明らかとなった.

付着藻類が培養装置内に十分増殖したところで, この培養装置に孵化後約7カ月経過した平均殻長 $12.4(\pm\text{SD } 0.2)\text{ mm}$ のメガイアワビ稚貝(付着基盤単位面積当たりの密度は 130 個体m^{-2})を収容し, 成長の様子を調べた. DSWを40回転 h^{-1} の速度で培養装置内に供給し, 約3カ月放置した. その結果, アワビ稚貝の平均殻長は $19.4(\pm 1.7)\text{ mm}$ に成長していた(Fukami *et al.*, 1998). したがってこの期間での日間平均成長率は $71.4\text{ }\mu\text{m d}^{-1}$ と計算された. この値は, 海藻破片を給餌しながら表層水を用いて行われている現在のアワビ種苗生産における成長率とほぼ同程度の数値である. しかしながら, 後半の2カ月間の成長率は $100\text{ }\mu\text{m d}^{-1}$ を超えていた. このことは, アワビが本研究で用いた培養・飼育装置内で極めて順調に成長していることを示すものである(Fukami *et al.*, 1998).

このように, 本研究で用いたような培養・飼育バイオリアクターを使用してDSWを連続的に供給すれば, アワビ種苗と餌料珪藻を同時に混合培養・飼育可能であることが示された. 一般に, 現在広く行われている表層水を用いたアワビの種苗生産では, 付着珪藻のみで飼育が可能なのは殻長が10 mm以下の稚貝のみであり, それより大型のアワビ幼貝では大形海藻を小さく裁断した餌料が不可欠だとされている. しかしながら, DSWを供給する本バイオリアクターを用いて, アワビの殻長に応じた適正密度で飼育すれば, 付着性微細藻類の餌料のみで特に大形海藻破片等を給餌することなく, 放流サイズまでアワビを飼育できることが示唆された.

表層水を用いてアワビを飼育する場合には, 夏場の高水温期にしばしば種苗の大量斃死が問題となっている. この点, 陸上に揚水されたDSWは年間を通して $13\text{--}15^\circ\text{C}$ 程度であり, 夏季の気温が最も高い時期においても, 水温が 17°C を超えることはない. したがって, 海洋深層水を用いた餌料性微細藻類の培養とそれに続くアワビの種苗生産は, 深層水の特性を十二分に活用した利用法として注目すべきであろう(深見, 1998).

3. 栄養塩濃度の季節変動とその要因

これまで述べてきたように、深層水を用いて浮遊性および付着性の珪藻を培養すると、深層水の採取時期により藻類の細胞収量、すなわち増殖ポテンシャル (AGP: Algal Growth Potential) に比較的大きな季節変動のあることがわかった。そこで藻類の AGP と深層水の水質との関係について知るために、高知県海洋深層水研究所に揚水された深層水の水質と浮遊性珪藻 *Skeletonema costatum* の増殖との関係について解析した。

飢餓培養した *S. costatum* をろ過 DSW に接種して一定期間培養し、深層水の同藻に対する AGP を調べた。その結果、*S. costatum* の最大細胞収量は $5.1\text{--}10.5 \times 10^4$ cells mL⁻¹ の範囲で変動しており、AGP の値には比較的大きな季節変動がみられた (深見ら, 2000)。深層水の *S. costatum* に対する AGP の変動が何に起因するのかを明らかにするために、AGP と深層水中の栄養塩濃度との比較を行った。その結果、海洋深層水研究所に揚水された深層水中の DIN は 11–30 (平均 24.9) μM と比較的大きく変動しており、しかも *S. costatum* に対する深層水の AGP は DIN 濃度の変動傾向との間に、相関係数 0.835 と極めて明瞭な正の相関関係を示すことが明らかとなった (深見ら, 2000)。このことから、深層水の微細藻類に対する AGP の季節変動は DIN 濃度の変動が大きな原因の一つであると考えられた。

そこで、深層水中に含まれる DIN 濃度がなぜ季節変動するのかについて考察するため、室戸沖定点における水温の鉛直・季節変動を調べたところ、季節により 8℃ 以下の冷たい海水が水深 400 m 付近まで、また 12℃ の等温線も 200 m 付近まで上昇していたことから、この季節には湧昇が起こっていた可能性が考えられた (Yoshimoto and Fukami, 2009)。そして、深層水中に含まれる DIN 濃度の上昇時期は水温の鉛直断面図で得られた湧昇の時期とおおむね一致していることがわかった (Yoshimoto and Fukami, 2009)。このことから、室戸地先で揚水される深層水中に含まれる栄養塩濃度の季節変動は、室戸沖で見られる沿岸湧昇がその原因の一つである可能性が示唆さ

れた。

4. 大量排水が沿岸生態系へ与える影響への懸念

無機栄養塩が豊富に含まれている深層水が沿岸に排水されると、周囲の海岸における磯焼けの防止に効果があるといわれている。しかしその一方で、富栄養な深層水が、大量かつ長期間沿岸海域へ排水されると、周囲の海域が富栄養化され、赤潮発生や有害・有毒プランクトンが増殖する可能性も考えられる。

そこで我々は、高知県海洋深層水研究所および同地先から取水された深層水・表層水、および両者を 1:1 で混合した海水 (以下混合水とする) を、ろ過することにより、あらかじめ天然の植物プランクトン群集を除去したものを調製した。これらに、飢餓培養をほどこした有害プランクトンの 1 種である *Heterosigma akashiwo* を接種してその増殖を調べた。その結果、当然ながら *H. akashiwo* は表層水ではほとんど増殖せず、最もよく増殖したのは深層水中であった (Yoshimoto and Fukami, 2009)。また混合水中では、深層水ほどには増殖しなかったものの、表層水よりはるかによく増殖することが明らかとなった (Yoshimoto and Fukami, 2009)。そこで、有害プランクトン *H. akashiwo* 以外の天然植物プランクトンが多数混在する 100 μm メッシュのプランクトンネット濾過混合水での *H. akashiwo* の増殖を調べ、同藻の動態を明らかにしようとした。天然のプランクトン群集を除去したろ過混合水中での同藻の増殖は、2 日間の誘導期の後、急激にその細胞密度が増加していったのに対し、天然植物プランクトン群集が混在する 100 μm ネット濾過混合水中では、同藻は増殖がほとんど観察されなかった (Yoshimoto and Fukami, 2009)。同様の実験を各月ごとに実施した結果、ほとんどの場合で *H. akashiwo* は、天然植物プランクトン群集の混在する条件では、濾過海水を用いて同藻が単独で存在する場合ほどには増殖せず、有害プランクトン *H. akashiwo* は他のプランクトンとの競合に弱いことがわかった。しかしながら、海水の採取時期、すなわち表層水中の植物プランクトン優占種が *Coscinodiscus* sp. であったときには *H. akashi-*

*wo*は比較的よく増殖するものの、それ以外の種類が優占していたときには同藻は競合に負けることが示された (Yoshimoto and Fukami, 2009). このことは、有害プランクトン *H. akashiwo* が深層水と表層水の混合海水中で、競合により排除されるかそれとも増殖してくるかは、現場海水中の植物プランクトンの群集組成に左右されることを意味している。

これらの結果は、深層水の排水される沿岸海域において、もし有害プランクトンの種 (たね) が存在していた場合には、その海域に生息する植物プランクトンの優占種によっては競合に負けずに増殖が促進される可能性のあることを示唆するものであり、今後は深層水取水施設の周辺環境における植物プランクトン群集の長期的な変化に注意を払う必要があることが示された (Yoshimoto and Fukami, 2009).

参考文献

Fukami, K., T. Nishijima and Y. Hata (1992) Availability of deep seawater and effects of bacteria isolated from deep seawater on the mass culture of food microalga

Chaetoceros ceratosporum. Nippon Suisan Gakkaishi, 58, 931-936.

Fukami, K., S. Nishimura, M. Ogusa, M. Asada and T. Nishijima (1997) Continuous culture with deep seawater of a benthic food diatom *Nitzschia* sp. Hydrobiologia, 358, 245-249.

Fukami, K., A. Kawai, M. Asada, M. Okabe, T. Hotta, T. Moriyama, S. Doi, T. Nishijima, M. Yamaguchi and M. Taniguchi (1998) Continuous and simultaneous cultivation of benthic food diatom *Nitzschia* sp. and abalone *Haliotis sieboldii* by using deep seawater. J. mar. Biotech., 6, 237-240.

深見公雄 (1998) 海洋深層水の特性を利用した餌料性珪藻の培養およびそれを用いたアワビ種苗の生産. 海洋深層水利用研究会ニュース, 2, 9-12.

深見公雄・松本 純・門田 司・中野雄也・西島敏隆 (2000) 海洋深層水の水質変動と微細藻類に対する増殖ポテンシャルの関係. 海洋深層水研究, 1, 27-31.

Yoshimoto, N. and K. Fukami (2009) Growth of harmful phytoplankton, *Heterosigma akashiwo*, in the mixture of surface and deep seawater. Deep Ocean Wat. Res., 10, 1-8.