

平成29年度
地球環境『自然学』講座
第13回

テーマ

「海の基礎生産－鉄の果たす役割」

講師

県立広島大学 准教授

内藤 佳奈子 先生

平成29年10月28日

認定NPO法人・シニア自然大学校

講師プロフィール

内藤 佳奈子（ないとう かなこ）



略歴

1. 学歴・職歴

- 2002年 3月 京都大学大学院理学研究科化学専攻博士後期課程 研究指導認定退学
- 2002年 4月 京都大学総合人間学部（基礎化学実験）非常勤講師
- 2002年 4月 京都大学大学院農学研究科応用生物科学専攻 研修員
- 2005年 3月 京都大学理学博士（化学）取得
- 2006年 4月 京都大学高等教育研究開発推進機構 非常勤講師
- 2006年 12月 県立広島大学生命環境学部環境科学科 助手
- 2007年 10月 県立広島大学生命環境学部環境科学科 助教
- 2012年 4月 県立広島大学生命環境学部環境科学科 准教授（現在に至る）

2. 委員歴（現在）

- 2014年 8月 広島県環境影響評価技術審査会委員
- 2015年 10月 環境省有明海・八代海等総合調査評価委員会委員
- 2015年 11月 広島県環境審議会委員
- 2017年 2月 環境省中央環境審議会水環境部会所属専門委員
- 2017年 3月 広島県国土利用計画審議会委員

海の基礎生産—鉄の果たす役割

県立広島大学生命環境学部 准教授 内藤佳奈子

1 はじめに

鉄 (Fe) は、植物プランクトンの増殖や生存にとって必須な微量元素である。地殻中には酸素、珪素、アルミニウムに次いで 4 番目に多く存在する元素であるが、pH 8 付近の海水中では難溶性の水酸化物を形成するため溶存態の Fe 濃度は極めて低い。また、溶存態 Fe の大部分は有機配位子と結合しているため、一般に植物プランクトンが利用可能とされる溶存態の無機 Fe 濃度は極めて低く、外洋域のみならず沿岸域においても一次生産の制限因子と考えられている^{1,2)}。この点に関して、近年の Fe 測定技術の確立³⁾により海水中の精確な Fe 濃度の測定が可能になってきたこと、高栄養塩低クロロフィル (HNLC) 海域における鉄撒布実験¹⁾などから、実際に海水中の溶存態 Fe は極微量にしか存在しておらず、その濃度では植物プランクトンの増殖を支えるには不十分であることが実証されている。

海水中の Fe の存在形態は、サイズにより溶存態、コロイド態、粒子態と大きく 3 つに分けることができる (図 1)。植物プランクトンの増殖を支えるためには、海水中の溶存態の無機 Fe 不足を補うための Fe 取り込み手段として、粒子態 Fe および有機 Fe の利用も視野に入れる必要がある。

例えば、ブルーム (植物プランクトンの大量発生) 期の Fe スペシエーション (化学形態別定量) をサイズ別に測定することにより、各 Fe 濃度とブルームとの関係が示されている⁴⁾。本稿では、筆者らが行ってきた植物プランクトンの Fe 利用能に関する研究を中心に、海の基礎生産に対する Fe の役割について紹介する。

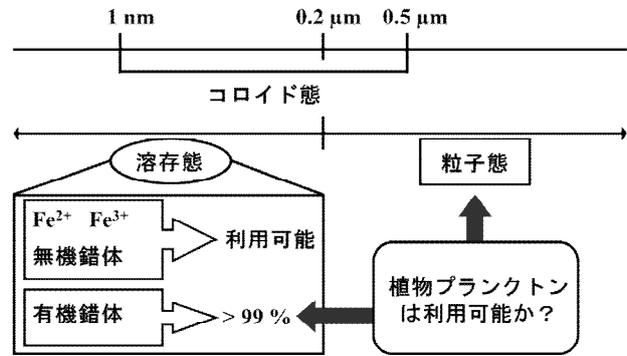


図 1. 海水中の Fe のサイズ分画。

2 植物プランクトンによる Fe 利用特性

植物プランクトンの栄養要求や増殖の動力学的特性等の栄養生理を理解することは、海洋生態系を理解する上で重要な課題である。植物プランクトンが大量発生する海域では、多量栄養素である N や P に対して相対的に Fe が不足しやすくなっている。その Fe 不足は、植物プランクトンによる栄養塩の利用を制限する⁵⁾。したがって、赤潮発生において制限要因となりうる Fe の植物プランクトンによる利用特性を明ら

かにすることは、とりわけ重要な研究課題である。植物プランクトンの Fe 利用能に関する研究では、水溶液中の組成と濃度を完全に把握できる化学合成培地が必須である。しかしながら、これまでに創案された人工海水ベースの合成培地では、赤潮プランクトンの多くは増殖不可能であった。筆者らの研究グループは、海産赤潮プランクトン 17 種に対して良好な増殖を得られる人工合成培地 (IHN 培地) を開発した⁶⁾。

(1) 粒子態 Fe

赤潮が頻繁に発生している沿岸域では、全可溶性 Fe 濃度および懸濁態 (コロイド態+粒子態) Fe 濃度が高く、赤潮形成に懸濁態 Fe が関与している可能性がある。赤潮鞭毛藻の *Chattonella antique* と *Heterosigma akashiwo* は、細胞膜の外側にグリコカリックス層を有しており、その場への吸着によって懸濁態 Fe を利用しているのではないかとの指摘がある⁷⁾。筆者らは、改変 IHN 培地を用いて粒子状 Fe である FeO(OH), α -Fe₂O₃, FePO₄ · 4H₂O, FeS の添加培養実験を行った。その結果、底層水中もしくは海底堆積物表面に存在する難溶性 Fe が、日周鉛直移動ができる鞭毛をもつ植物プランクトンの大量増殖に重大な役割を果たしていると考えられた⁸⁾。

(2) 有機態 Fe

海水中にはフリーリガンドが過剰に存在し、これらの有機配位子は Fe の物理化学的な性状を劇的に変化させる。したがって、有機配位子は海水中の溶存態 Fe をコントロールしており、植物プランクトンによる Fe 利用能に係る重要な因子である。海水中の溶存態 Fe の 99% 以上が有機配位子と結合した有機 Fe 錯体であることが明らかにされている。近年、海水中に存在する有機配位子の回収および検出が可能となっており、その有機配位子の一部にシデロホアの構造を含んでいることが報告されている⁹⁾。シデロホアとは、3 価の Fe との高い錯生成能を持つ有機配位子である。

サリチル酸 (SA), クエン酸 (CA), EDTA, カテコール (Cat), デスフェリオギザミン (DFO, 細菌シデロホア), デスフェリクロム (DFC, 菌類シデロホア) を用いて、有機 Fe 錯体の増殖に対する影響を検討した。実験結果から、植物プランクトンの増殖は、海水中に存在する有機配位子の種類だけではなく、配位子濃度による金属スペシエーションの変化からも影響を受けることが示された⁸⁾。

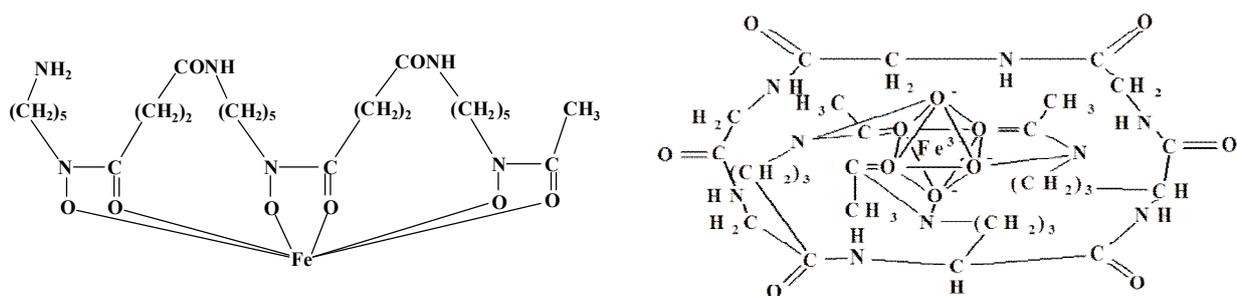


図 2. シデロホアの構造式 (左 : DFO, 右 : DFC) .

3 藻類増殖ポテンシャル (AGP) 試験

水域の水質を評価する方法として、AGP (Algal Growth Potential) 試験がある¹⁰⁾。AGP 試験とは、Liebig の最小律に基づいた生物検定法であり、窒素・リンなどの栄養塩類を含め、試水のもつ潜在的な藻類の増殖能力を測定するものである。この試験は、海域における植物プランクトン増殖に対する制限栄養元素を推定するための検定方法としても有効である。筆者らは、有明海における代表的な植物プランクトンである3種 (小型珪藻 *Skeletonema* sp., ラフィド藻 *Chattonella antiqua*, *Heterosigma akashiwo*) と有害渦鞭毛藻 *Heterocapsa circularisquama* の計4種を用いた AGP 試験を行い、2011年の有明海における干潟域の水質評価および増殖制限物質を推定した¹¹⁾。

春季の干潟表層水は *Heterosigma akashiwo* の増殖に対してリン制限であった。夏季の干潟表層水については、検討4藻種全てに対してリンが増殖の制限栄養塩と考えられた。また、夏季の干潟底層水は *Skeletonema marinoi-dohrnii* complex の増殖に対して Fe 制限、*Heterocapsa circularisquama* に対しては窒素制限との結果が得られた。さらには、検討した表層水の全てにおいて、上記3藻種に加え *Chattonella antiqua* に対しても、栄養塩類と Fe の同時添加により増殖の有意な促進効果が確認された。有明海の再生に深く関わる植物プランクトンの増殖にとって、沿岸域における栄養塩と Fe など微量元素のバランスが重要な鍵になるといえる。

4 植物プランクトン増殖に及ぼす鉄溶出施肥材の影響

瀬戸内海は、本州と四国および九州によって囲まれる総面積 23,203 km²、平均水深 38 m の日本最大の内海である¹²⁾。多くの湾・灘を有しており、その大部分が浅海域であるため、気象や河川流入の影響を受けやすく、多数の河川から栄養塩が供給される生産性の高い海域である。しかし近年、沿岸域における貧栄養化や藻場・干潟の減少等によって、アサリなどの漁獲量の減少や養殖ノリの色落ちなど新たな問題が浮き彫りとなってきている¹³⁾。

各地の干潟環境の改善策として、基礎生産力となる植物プランクトン増殖に必要な鉄を供給する鉄溶出施肥材を利用した沿岸域再生技術の開発が行われている¹⁴⁾。キレート剤としてクエン酸を用い Fe と竹炭を混合した鉄溶出施肥材 (キレートマリン) は、持続的に環境水中に溶出する溶存態 Fe が、干潟上の底生微細藻類の増殖を促し、また Fe を要求する微生物の増殖や活性を高めて堆積した有機物を分解し、干潟環境の改善とアサリの食物環境を改善すると考えられている。これまでに、各沿岸海域における数多くの実証実験が行われ、アサリの収穫量の増加やヘドロの減少など干潟環境の再生が確認されている¹⁴⁾。筆者らは、広島湾沿岸海水を用いた鉄溶出施肥材による海水中の植物プランクトン増殖への影響を検討した¹⁵⁾。

室内培養実験における鉄溶出施肥材 200 mg l⁻¹ 添加によって、2015年7月海水では

コントロール値の3.3倍、11月海水ではコントロール値の10.7倍までクロロフィル *a* 量が増加し、植物プランクトン増殖の有意な促進効果が確認された。また、鉄溶出施肥材の添加は、海水中の珪藻類の細胞密度を高める傾向が認められ、とくに羽状目珪藻を卓越させることが明らかとなった。これらの結果から、クエン酸を用いた鉄溶出施肥材は、珪藻類の栄養元素供給源として沿岸域の基礎生産力を高めることができるといえる。

5 おわりに

適用する環境水域を十分に把握、考慮した上で、鉄溶出施肥材などの活利用を行うことによって、沿岸海域の環境改善に大いに貢献できるものと期待される。平成27年10月に瀬戸内海環境保全特別措置法（瀬戸内法）が改正された。「豊かな海域環境」を目指して、沿岸生態系の改善メカニズムを明らかにするために、今後、更なる科学的な詳細データの蓄積が必要である。

参考文献

- 1) Boyd, P.W., *et al.*: Mesoscale iron enrichment experiments 1993–2005: Synthesis and future directions, *Science*, **315**: 612–617, 2007.
- 2) Hutchins, D.A. and K.W. Bruland: Iron-limited diatom growth and Si:N uptake ratios in a coastal upwelling regime, *Nature*, **393**: 561–564, 1998.
- 3) 小畑元：海水中の微量元素（とくに鉄）に関する海洋分析化学的研究, *海の研究*, **12**: 449–460, 2003.
- 4) Gobler, C.J., *et al.*: Physicochemical speciation of iron during coastal algal blooms, *Marine Chemistry*, **77**: 71–89, 2002.
- 5) Takeda, S: Influence of iron availability on nutrient consumption ratio of diatoms in oceanic water, *Nature*, **393**: 774–777, 1998.
- 6) Imai, I., M. Hatano and K. Naito: Development of a chemically defined artificial medium for marine red tide-causing raphidophycean flagellates, *Plankton Biology and Ecology*, **51**: 95–102, 2004.
- 7) Okaichi, T. and T. Honjo: Red-Tide Species and the Environmental Conditions, *In*: Okaichi, T. (Ed.), Red Tides, Terra Scientific Publishing Company, Tokyo, 2003, pp. 323–345.
- 8) 内藤佳奈子：有害赤潮プランクトンによる鉄の利用特性, *有害有毒プランクトンの科学* (今井一郎, 山口峰生, 松岡数充 編), 恒星社厚生閣, 東京, 2016, pp. 73–81.

- 9) Macrellis, H.M., C.G. Trick, E.L. Rue, G. Smith and K.W. Bruland: Collection and detection of natural iron-binding ligands from seawater, *Marine Chemistry*, **76**: 175–187, 2001.
- 10) 李英植, 向井徹雄, 瀧本和人, 岡田光正: 現場の植物プランクトンを用いた AGP 試験による制限栄養塩推定方法の検討, *水環境学会誌*, **19**: 373–380, 1999.
- 11) 内藤佳奈子, 酒井翔太, 藤永承平, 吉永郁生, 田中克: 有明海干潟域の藻類増殖ポテンシャル試験による水質評価, *県立広島大学生命環境学術誌*, **6**: 17–28, 2014.
- 12) 公益社団法人瀬戸内海環境保全協会: 平成 28 年度 瀬戸内海の環境保全 資料集, 神戸, 2017.
- 13) 山本民次, 花里孝幸 編著: 海と湖の貧栄養化問題-水清ければ魚棲まず, 地人書館, 東京, 2015.
- 14) NPO 法人 SPERA 森里海・時代を拓く 編, 森里海連環による有明海再生への道 心の森を育む, 花乱社, 福岡, 2014.
- 15) 内藤佳奈子, 檀上志帆, 清田忠志, 河尻義孝, 坂本節子, 阿部和雄, 吉永郁生: 広島湾海水中の植物プランクトン増殖に及ぼす鉄溶出施肥材の影響, *県立広島大学生命環境学術誌*, **9**: 1–7, 2017.