

平成 29 年度第 13 回講演会 記録

日 時	平成 29 年 10 月 28 日 (土)
会 場	此花会館梅香殿
講 師	県立広島大学生命環境学部環境学科 准教授 内藤 佳奈子先生
演 題	海の基礎生産－鉄の果たす役割－
備 考	参加者 147 名 (会員 126 名、一般 15 名、聴講 6 名) 記録 飯田正恒

はじめに

【田中克先生】本日はサカナやエビなどの生き物が水の中に生命を育み、いのちを循環させる源のお話しをしていただきます。そのひとつは植物プランクトンですが、これがどうして増えたり、減ったりするかというメカニズムを解説していただきます。内藤先生には有明海の干潟や海水の調査に協力いただき、先生とのつながりができました。内藤先生のご専門は化学であり、水産研究所の研究者とは異なる視点で考察していただいています。多くの女学生とともに有明海の干潟にこられ、NPO 法人 SPERA のメンバーが大喜びしたこともありました。本日はそのような体験も交えてのお話しを、どうぞよろしく願いいたします。



【内藤佳奈子先生】私は三重県出身で、県立広島大学に勤務して 11 年目になります。現在の研究テーマは「水環境における生物地球化学的な循環に関する研究」で、水系の環境で植物プランクトンを中心に、鉄、微量金属、栄養塩、赤潮、アオコ、増殖機構などについて研究しており、本日はこのような内容のお話しをさせていただきます。

【講演要旨】

1. 閉鎖性水域の現況と対策

(1) 閉鎖性水域とはどのようなところか？ 湖沼、内海、内湾など水の出入りの少ない水域を言う。水の出入りが少ないので汚濁物質がたまりやすく、富栄養化の進行で赤潮、アオコ、あるいは異臭などが起こりやすい特色を持つ水域である。代表例に地中海、カスピ海、瀬戸内海、琵琶湖など。富栄養化について、水中にリンやチッソの栄養分が豊富になることで植物プランクトン、海藻類が繁殖し動物プランクトンが豊かになる現象をいうが、栄養分が過剰になると水質の悪化につながる。

(2) 瀬戸内海の概況

日本最大の内海。東西 450 km、南北 15～55 km、面積 23,203 km²、平均水深 38m、容積 8,815 億 m³。内海として独自の長持ちを持つ。半閉鎖水域で浅海域が多く大洋の持つ恒常性がやや弱い。気象や河川流入の影響を受けやすい。このため季節による水温の変化が大きく、降雨による塩分濃度の変化や赤潮などが発生しやすい。

(3) 藻場

大型藻類が繁茂する場場所で、多くの場合水深 40m 以浅の潮下帯（海岸の、低潮線より下の部分。常時、直接海水に浸り、海洋生物にとって安定した環境となる。）に形成され、葉上動物や付着藻類の生活場であり、幼魚の隠れ家となる。

従来藻場であった場所から広範囲にわたり海藻が消失しウニやアワビなど磯根資源が消失することを磯焼けという。

(4) 干潟

河口周辺に形成される。海流や波浪による物理的攪乱が小さく、陸上からの有機物または栄養塩供給の大きい場合が多い。生物の生産性の高い生態系である。一次生産は主に微細藻類（珪藻、渦鞭毛藻、藍藻など）が行い、貝類、甲殻類、多毛類（ゴカイなど）は干潟に生息する魚類、シギ・チドリなどの渡鳥の食物源。細菌による有機物分解も活発に行われ、陸上由来の有機物の負荷を低減する水質浄化機能も高い。

(5) 瀬戸内海の藻場、干潟の消失

藻場：昭和 35 年から平成 2 年の間にアマモ生育海域が 7 割消失した。

干潟：明治 30 年から平成 11 年までに約 5 割消失した。

藻場や干潟は魚介類の生育の場、生態系の維持、水質浄化に重要な役割を担い、生物多様性や繁殖の場が多く失われてきているのが、いまの瀬戸内海の現状である。

(6) 水産業の現況－漁業生産量の推移

藻場や干潟の減少は水産業に影響している。瀬戸内海の漁業生産量を昭和 40 年から平成 26 年までその推移をみる昭和 60 年をピークに減少が続いている。

瀬戸内海は瀬戸（相対した陸地の間、特に幅の狭い海峡。潮汐の干満により激しい潮流が生じる）と灘（海の潮の流れが速い所あるいは風浪が激しい所で航海が困難な海域）が交互に連続する多様な地形を有する閉鎖性海域であり、多数の河川が流入することで栄養塩が比較的豊富なため生産性の高い海域であるが、漁獲高減少の一因に藻場や干潟の減少がある。

(7) 水産業の現況－魚種別生産量の推移

昭和 60 年代以降、マイワシ、カタクチイワシ、イカナゴ、アサリの漁獲高が激減している。

(8) 水質汚濁の現況－三海域の COD の推移

3 海域（大阪湾、東京湾、伊勢湾）の COD 環境基準の達成状況を表しているもの。平成 27 年度の瀬戸内海の達成率は 77% で、概ね横ばいで推移している。

(9) 水質の現況－全チッソの分布

チッソやリンの栄養分については、大阪湾においては少し高い結果となっており、今後水環境改善を進めると報じられている。大阪湾以外では現在の水質が悪化しないよう対策を講じるとしている。（平成 27 年 12 月中央環境審議会）

広島大学の山本民次教授は瀬戸内海の「貧栄養化」を指摘されており、瀬戸内海の水質が問題になってきています。

(10) 赤潮の発生状況

昭和 45 年から平成 27 年までの赤潮発生件数の推移をみると、昭和 51 年をピークに年々減少している。昭和 51 年にチッソ、リンの排出規制をしたことによるが、なお現在年 100 件を超える発生がみられ、今後も赤潮対策が必要であるが、一方、貧栄養化の問題もあり赤潮対策は容易ではない。

(11) 赤潮の発生に伴う漁業被害

大きな被害が発生した事例。

① 昭和 47 年、播磨灘でシャットネラ、ユーカンピア、コスキノディスカスが大発生して養殖ハマチに 71 億円の被害。

② 平成 16 年、同上種発生、養殖ノリの被害 58 億円。

③ 平成 10 年、広島湾安芸灘では養殖カキの被害 38 億円。

④ 平成 24 年から、豊後水道で養殖のカンパチ、マダイに 15 億円の被害。

有害な植物プランクトンが水産業に多大な影響を与えている。

(12) 閉鎖性海域の水質保全対策－富栄養化と有機汚濁

富栄養化はチッソ、リンが閉鎖性海域に流入して増大し、これを利用する藻類が大量に増殖すると赤潮が発生する。結果、魚介類の変死や悪臭が発生する。一方、有機物が流入するとその分解に酸素が消費されて貧酸素水塊や青潮が発生し、透明度の低下、魚介類の死、悪臭発生などがおこる。いずれもレジャーの障害や景観が悪化し環境問題につながってくるので、この対策を進めている。

(13) 閉鎖性海域の水質保全対策

- 1) COD 総量削減の推進：東京湾、伊勢湾、瀬戸内海の 3 水域を対象に昭和 54 年以来 8 次にわたり生活排水、産業排水など全ての汚濁発生源について削減対策を総合的に進める。
- 2) 富栄養化対策の実施：閉鎖性水域では平成 5 年からチッソ、リンの環境基準を設定し排水規制を実施。
- 3) チッソ、リンを含めた総量削減の実施。
COD 削減率は 77% で満足できる状況ではなく、赤潮や貧酸素水塊の問題が続いているところから新たに総合的な対策を実施している。
- 4) 海域の状況に応じた総量削減の実施：平成 27 年 10 月に大阪湾や水環境改善、瀬戸内海の現在の水質が悪化しない対策を実施する。

(14) 瀬戸内環境保全特別措置法

昭和 48 年に制定された同法を平成 27 年に改正し、「瀬戸内海の有する価値や機能が最大限に発揮された「豊かな海」とする考え方が明確にされ、基本理念の新設や具体的施策が追加されることになった。ここで重要なのは、田中克先生が以前からいつも言われる“豊かな海”とすることを、国が法律にして示したことである。

2. 植物プランクトンについて

見た目にきれいということだけでなく、“豊かな海”とはなにか、注目するのは基礎生産者のプランクトンである。植物プランクトンとはなにか。京都大学中谷先生、今井先生の指導により、植物プランクトンを利用し環境問題に対応しようではないかということになった。京大理学部中井先生は、大気中の二酸化炭素を吸収するには、植物プランクトンがよいのではないかと考えられ、私も植物プランクトンを扱うことになり、農学部の先生方との協同研究を通じて田中先生とのつながりができた。

(1) 微生物

微生物とは肉眼では見えないか、あるいは見えても詳細に識別できないものをいう。微生物を分類すると、「菌類」、「藻類」、それに「原生動物」といわれる“真核”を持つもの、「細菌」、「ウイルス」のような“原核生物”など多様な生物群が含まれている。

(2) 藻類

藻類 (algae) とは、酸素発生型光合成を行う生物のうち、主に地上に生息するコケ植物、シダ植物、種子植物を除いたものの総称である。藻類は 11 門 23 綱に分類され、約 4 万種が記載されている。毎日のように新種が発見され、未記載の種を含める少なくとも 30 万種、多ければ 1 千万種を超えるという。

(3) 藻類の分類

核を持つ「真核生物（膜に囲まれた細胞内小器官がある）」と、核のない「原核生物（細胞内には膜を持つ器官はない）」に大別される。

(4) 微細藻類

微細藻類とは顕微鏡サイズの藻類で、酸素発生型の光合成を営む生物のこと。1mm より小さい小型浮遊

生物、0.05mmより小さい微小浮遊生物に分けられる。植物プランクトンは1mmより小さい、珪藻、緑藻、藍藻のなかまをいう。世界で数万種が記載されていて、珪藻類だけでも2万種以上ある。その生態や生活史は多種多様であり、どういうプランクトンなのかを見極めはかなり大変な仕事になる。

毛髪の太さは0.1mm、微細藻類はそれよりはるかに小さく、1/5の大きさです。この微小な植物プランクトンが海の基礎生産者として重要な役割を果たしている。このマイクロな生物が私たちが食べる水産物をいかにささえているかということは後ほど説明する。

(光学顕微鏡で撮影した髪の毛と微細藻類の大きさを比較写真で説明あり)

(5) 水中の生物 (生活形態による)

巨大浮遊生物	肉眼で見える	クラゲの仲間
大型浮遊生物	2~20 cm	オキアミの仲間
中型浮遊生物	200~20,000 μ m	ミジンコ、ケンミジンコの仲間
小型浮遊生物	20~200 μ m	珪藻、緑藻、藍藻の仲間
微小浮遊生物	2~20 μ m	藍藻の仲間
極微浮遊生物	2 μ m以下	細菌の仲間、ピコプランクトン

浮遊生物 (プランクトン)、遊泳生物 (ネクトン)、底生生物 (ベントス) の3つに区別される。

プランクトンには光合成を行う微細藻類 (植物プランクトン) が含まれる。

一般にプランクトンと呼ばれるものの大きさは1 μ m~1000 μ m程度で、微細藻類は200 μ mよりも小さなサイズに区分される。

(6) 微生物ループと食物連鎖

植物プランクトンが動物プランクトンに食べられ、これを小型のさかなが食べる。これを大きなさかなが食べる。この食物連鎖の一番底辺にいるのが食物プランクトン。

(7) 食物プランクトン

水圏生態系の基礎生産の担い手

水圏における物質循環の出発点

一次生産者としてCO₂の固定を行う。最近ではバイオ燃料の生産者

(8) 有害有毒プランクトン

赤潮やアオコを発生させるプランクトンを有害有毒プランクトンといい、人や海洋生物に悪影響を与え、4つに分けることができる。

- ① 基本的には無害であるが、増殖することで海水中の酸素を奪う「大量増殖赤潮」
- ② 有害ブルーム (強力な毒を発生)
- ③ 有害赤潮 (魚介類の大量斃死を与える)
- ④ 珪藻赤潮 (ノリよりも先に栄養分をとってしまい、ノリの色落ち被害を引き起こす)

3. 微量な鉄の重要性について—植物プランクトンと鉄

(1) 植物プランクトンと栄養元素

植物プランクトンが鉄とどのように関わっているかをみる。植物プランクトンは一次生産者である。これが増えるためには、チッソ、リン、ケイ素などの栄養塩といわれるものが必要で、これに加え微量ではあるが必要なものに鉄、亜鉛、マンガンなどの金属類がなければ増殖はできない。

(2) 微量元素

微量元素とは1 ppb (10億分の1) 以下の成分を指す。

(3) 植物プランクトンと鉄

Fe の不足は植物プランクトンの増殖を制限する。

(4) 溶存 Fe 濃度による渦鞭毛藻の増殖変化 (グラフで説明)

FeCl₃ (塩化第 2 鉄) を 0、50、100、200、2000 nM (ナノホルム) 与えたとき、鉄が充分あると増殖するが、鉄がない場合、増殖していない。チッソやリンが多くあっても鉄がないと増殖しないことを示している。1ppb の濃度でしか存在しない鉄がプランクトンの増殖に大きくかかわっていることがわかる。

(5) HNLC 海域

この言葉は現在中学、高校の教科書に掲載されている。アメリカの科学者マーチンが栄養分 (チッソ、リン) が多いが植物プランクトンが少ない海域では、鉄濃度が低く植物プランクトンの増殖を制限しているのではないかという説を最初に出した。

1980 年代にジョン・マーチンらが北太平洋において汚染なく海水中の鉄濃度を測定し、鉄添加培養実験を行うことによって鉄の添加が植物プランクトンの増殖をもたらすことを初めて確認した。これをもとに彼は HNLC 海域への鉄供給 (おもに大気からのエアロゾル) の変化が植物プランクトンの生産の変化を通じて大気中の二酸化炭素分圧を変動させ、地球規模の気候変動を駆動するといういわゆる鉄仮説を提唱した。

鉄制限の根拠をより確かなものにするため、現場海水に高濃度の鉄溶液を撒布するという大規模実験を計画し、日本人グループも実験に参加した。現在は生態系への影響があるので中止されているが、東京大学津田先生の実験結果でも、鉄を与えてやることにより、珪藻を中心とした植物プランクトンが増え、栄養塩を利用できるようになる。その光合成作用により二酸化炭素が減少する結果を得ている。チッソやリンがあっても鉄がなければ 1 次生産者の植物プランクトンは増えず、いかに鉄が重要かということを理解しておいてほしい。

二酸化炭素の吸収過程は 3 つあげられる。その一つの生物ポンプは生物海洋学において、海洋表層から海洋内部へ生物学的に炭素を輸送する。地球表層の炭素循環を考える際に、生物による二酸化炭素の海洋への取り込みが一つの重要な過程を構成しており、植物プランクトンは重要である。

(6) 植物プランクトンと鉄

鉄はチッソ同化や酸素代謝など生存や増殖に必要な微量金属で生物活動に不可欠であるが、HNLC 海域、すなわち栄養塩は多いがクロロフィルが少ない海域、沿岸域においても植物プランクトンの増殖を制限する例が様々に報告されている。そのようなところで、植物プランクトンの側からすれば、生理的に鉄の不足によるストレスを感じているのではないか、鉄の不足が栄養塩の利用をできなくしていることになる。そこで、藻場や干潟が少なくなることで、魚介類が減少しているがこのような場所に海水中の鉄が関わってきているかを鉄に注目して見ていきたい。

専門的なことや専門用語が多く難しいように思われるかも知れない、要は植物プランクトンが基礎生産者として重要でかつ小さいか、かつそれを維持するために鉄という微量であるが重要な元素があることを理解していただければと思う。

(7) 海水中の鉄の存在形態

- ① 存在形態をサイズにより分類できる。①溶存態、②コロイド態、③粒子態
- ② 海水に溶け込んでいる溶存体は 1ppb と、極く微量である。一般的に植物プランクトンは溶存体を利用しているといわれている。溶存体はイオン体として存在するもの、無機として溶けているものがある。

この形であればプランクトンは直接利用できるといわれている。

- ③ 有機物と結びついている鉄を有機鉄という。海水中に溶けている鉄の 99% は有機鉄であるということが知られているが、これを植物プランクトンが利用できるかどうかは分かっていなかった。
- ④ 粒子体の鉄とは粒状であり豊富に存在するが、植物プランクトンが利用できるかということも知られていない。
- ⑤ 植物プランクトンが生存するには、海水中の鉄の濃度だけでなく、形も重要な条件である。

(いくつかの植物プランクトンを写真で説明)

- ・(シャットネラ アンティーカー) : 勾玉のような形をしており、有明海で猛威をふるっている。
- ・(ヘテロシグマ アカシオ) : 広島湾で赤潮を起こす
- ・(ヘテロカプサ サーキュラリスカーマ) : 真珠貝に悪影響を及ぼす
- ・珪藻類の (ディティラム ブライトウェリー)

植物プランクトンと一言で言っても、いろいろな種類があり、形と大きさもさまざまであることがわかっていただけだと思う。

これらを培養器で培養し、その結果を簡単に示す。

- ⑥ 粒子態の鉄を利用しないのは、勾玉のグループ
- ⑦ 無機態の鉄を利用するのはユーグレナのグループ
- ⑧ 粒子態の鉄の中でもリン酸鉄を利用するのが (ヘテロシグマ アカシオのグループ)
- ⑨ 海底でできる硫化鉄を利用するのは (ヘテロカプサ サーキュラリスカーマ)
- ⑩ 近年豊後水道で猛威をふるう (カレニア ミキモトイ) も粒状の鉄を利用。
粒子態の鉄も利用できるということを実験で証明した。
- ⑪ 有機物と結合している鉄、有明海で被害を及ぼす (シャットネラ アンティーカー) は有機態の鉄をサリチル酸、クエン酸で処理して試してみたが利用していなかった。
- ⑫ 真珠貝に悪さする (ヘテロカプサ サーキュラリスカーマ) はどの有機態も利用することがわかった。
無機物とくつつく鉄よりも、有機物とくつつく鉄のほうが増殖しやすいということがわかった。
- ⑬ 鉄と有機物の濃度を変えてやると、その比により増殖率に違いがあることが分かった。
有機体と結合する鉄を利用するのは種により、また濃度によっても変化することが分かった。

(8) 植物プランクトンの鉄の取り込み

植物プランクトンが鉄を取り込むため、どのような物質を生産しているのか、実験した。

まず、ボトルで培養する。培養したら細胞を濾紙の上に集め、細胞を洗浄して鉄を取り出す。

次に細胞を培養器にいれてぼこぼこ鉄不足の状況で培養する。培養液を注射器で採取し増殖用と、鉄が不足しているときに、いかに鉄を捕ろうとするのかという物質との反応 (CAS 反応という) を化学的に検定する。この作業はクリーンベンチ内で無菌状態で実施。その結果。

- ① ある種の植物プランクトンは、鉄と結合する物質の濃度は、増殖するとともに鉄を放出していることがわかった。このことからそのメカニズムをこのように考えている (図で説明)
- ② 鉄にはいろんな種類がある。無機物質と結合している鉄、それから有機物質と結合している鉄。無機物質の鉄と、フリーの鉄は直接細胞に取り込まれていくと考えられている。しかし有機物質と結合している鉄は、直接利用できないので、鉄と結合する物質を細胞が出すことにより、大量に増殖するというメカニズムを考えている。

(9) ここまでのまとめ

- ① 食物連鎖の底辺にいる植物プランクトンは基礎生産者として重要である。
- ② 微細な植物プランクトンが必要なのはチッソやリンだけでなく、微量であるが鉄も必要である。
- ③ 鉄にはいろんな種類があるが、植物プランクトンの種類により利用できる鉄の種類が異なる。

(休憩)

後半は実際上の問題への対処「赤潮」、「干潟」に研究例紹介する。

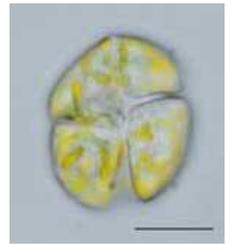
4. 有害赤潮

(1) 赤潮・貧酸素水塊対策推進事業—カレニア

平成 24 年、瀬戸内海の西部・豊後水道の生け簀でサカナの養殖をしているが、ここに有害な植物プランクトン・カレニア（右写真：Karenia mikimotoi）が大発生した。

1985 年以來の大規模な赤潮により数十億円の被害となった。

このプランクトンがどのように豊後水道で発生したのか、そのメカニズムを解明し、豊後水道の危機を乗り越えなくてはならないと、船を借り、1 週間かけて調査、研究を始めた。



1) 調査方法

- ① 定期的な調査も必要であるが、このように赤潮が大発生したときの調査も大切なことなので、愛媛県、大分県のいくつかの地点で海水を採取した。
- ② 調査項目は水質、植物プランクトン、栄養分 (N, P, Si, Fe) である。
- ③ 海水を特殊な採水器で採取、プランクトンは海底の泥のなかにもいるので、泥も採取した。
(採水、採泥の様子などをビデオで説明された。容器はテフロンコーティングされ、鉄が海水中以外のところで容器に付着しないように作られている。)
- ④ 採取した海水をクリーン BOX のなかでろ過・酸処理する。大気中には鉄などの金属が微量ではあるが舞っているのでこの装置で遮断し、海水中の真の値を測定するようにしている。
- ⑤ 測定器具は酸炊き洗い済の器具を使用する。海水に 1ppb しかない、鉄の真の濃度を正確に測定するためこのような処理が大切である。
- ⑥ 粒状の鉄分を測定するため、酸炊き洗い済石英管に海水を分注し、UV 分解装置にて 2 時間かけて海水中の有機物を分解する。

(海水中の鉄分測定装置を写真で説明された)

2) 結果を説明する。

海水検体を表層、中層（海面から 5m 下から採取）、低層から採取した。カレニアは見ただけでも黄色くなるので赤潮とわかるが、細胞の数を計測することでその程度を客観化する。

① カレニアの細胞の数

一番大きいのは 1m³ の海水の中に、1 万個より多い。同様に 1 千個まで、百個までと円の大きさを比較すると、愛媛県の沿岸部の表層、中層（5m 層）に多く、低層はそれほど多くなかった。

つまりカレニアは光合成に光を必要とするが、海面から 5m 下の層でも多く存在したので、このようなところでも増殖する特徴を持っている。

② 栄養分について。

チッソ、リン、ケイ素の濃度を測定した。Redfield 比（注）と比べてみると、豊後水道ではチッソ

が不足しているということが分かった。

(注) Redfield比：プランクトンは海水から 106 : 16 : 1 の比で C : N : P を摂取し、同じ比の体組成を維持する。その生息場である海水中に栄養塩として存在する N と P の比をみると、やはり 16 : 1 であり、それは世界の海洋の表層から深海までに共通している。この現象を発見した米国の研究者レッドフィールド (Alfred C. Redfield) の名をとって、このような原子比をレッドフィールド比という。

- ③ 海水に溶けている鉄は沿岸域で高く、沖合で低い傾向を示めした。
表層、中層 (5m層)、低層では表層の鉄濃度が比較的高いようである。
- ④ 植物プランクトンが必要な栄養バランスというのがあり、リンを 1 としたときに鉄は 0.005、チッソは 16 必要だということがわかっている。これと比較すると、すべての調査ポイントで表層、5m層、低層をみるとチッソ、リン、鉄の栄養バランスで不足しているものは調査全域で、ほぼチッソが不足していることがわかった。リンと鉄についてはところどころ不足するところがある。
- ⑤ まとめ
 - ・ 栄養のバランスは植物プランクトンにとり重要であり、カレニアとの関係をみたときチッソとの関係が高いということが分かった。
 - ・ 豊後水道で鉄の役割を始めて明らかにした。鉄濃度は表層で高く、低層で低いが全体的にみると、チッソは不足するもリンと鉄が十分にあったのでカレニアが増殖した。
 - ・ カレニアの発生のメカニズムを解明して対策につなげ、水産資源を守る研究をしていく。

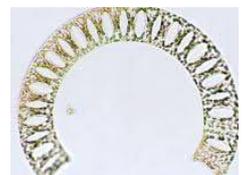
(2) 播磨灘における養殖ノリの色落ち問題

明石のノリも有明海のノリと日本の一、二を争うノリで、おいしくて価値が高いが、海の貧栄養化により栄養分が少なくなると色落ちして出荷できないことになる。現在もこのような状況が続いている。色落ちの原因は珪藻類 (*Eucampia zodiacus*, *Coscodiscus wailesii*) の競合により栄養塩不足が一因と考えられている。このプランクトンは、有明海とは異なる種である。

1) 研究目的：

播磨灘の珪藻類は *Eucampia zodiacus* で 50 μ m と大きい。シャトレナなどはせいぜい 10 μ m である。

Eucampia というプランクトン (右写真) はブレスレットのように連なった形であるがその 1 個々が細胞である。



最近の研究では、このような大型の珪藻が養分を奪うことで色落ちするのではなく、播磨灘にチッソがすくなく、貧栄養化しているということも問題視されている。

私は植物プランクトンの研究者なので、ノリの色落ちの原因になるプランクトンがどのように増えるかに関心があり、その発生機序の解明は極めて重要と考える。

生物活性元素の鉄などの微量元素に着目し、播磨灘の赤潮藻類の出現状況と微量元素の分布動態の関連性を、以前は兵庫県水産研究所と協同で、現在は神戸大学・川井先生の協力をいただいて調査をしている。

2) 調査方法

播磨灘の北部沿岸と中央部域で、海面の表層と低層の定期的な採水調査及び水質分析を行った。

調査項目

- ・ 水温、塩分、DO (溶存酸素)、

- ・クロロフィル α 量、
- ・植物プランクトン種組成、
- ・栄養塩（チッソ、リン、ケイ酸）
- ・微量元素（鉄、マンガン、ニッケル、銅、亜鉛、モリブデン）

3) 調査結果

- ① ノリの色落ちの原因になっている *Eucampia zodiacus* が増えてきているときに、チッソがぐっと下がっており、*Eucampia* がチッソを多く消費していることがわかった。
- ② 2015年10月から2016年5月、*Eucampia* の細胞密度が上がると海水中の鉄濃度が下る関連性があると思われた。

両者の関係はさらに検討が必要であるが、鉄などの微量元素の濃度変化に影響を与えているのではないかということが次第にわかってきたところである。

5. 沿岸域再生への取り組み

(1) 鉄鋼スラグの有用性

鉄鋼スラグとは鉄や鋼を生産時に副次的に生成されるもので、一般的にはセメント用原料、路盤材など資源として利用している。これを藻場の造成や干潟の環境改善材として使用している。

私たちの研究グループは、基礎生産者の植物プランクトン光合成性能を利用し地球環境への取り組みとして、珪藻類を増やすケイ素、鉄、マンガン、アルミ、リンを含有している鉄鋼スラグを利用し、藻場の再生、環境再生への途を検討した。

(2) 植物プランクトンの増殖

鉄鋼スラグを加えない場合、鉄鋼スラグ A、B を使用した場合の 3 水準での植物プランクトンの増殖を観察した結果、鉄鋼スラグを添加すると、添加しない場合との比較で基礎生産量が増えた。

(3) 鉄鋼スラグを利用した海域環境改善

協同研究している鉄鋼会社の協力で藻場造成技術開発による海の森づくりは全国約 20 か所の海域に広がっている。

(4) 鉄と腐食物質が藻類に与える影響

海水中の鉄は、森林の広葉樹の葉が腐り、フルボ酸など鉄と結合する物質がつくられ、フルボ酸鉄となって川を通じて海に供給されると考えられ、森里海連環の世界になる。

私たちは腐食物質と結びついた鉄を植物プランクトンが利用可能かどうか、確認が重要と考えた。

(5) 鉄溶出施肥材キレートマリンによる海域再生

- 1) キレートマリンと腐食物質を組み合わせた海域再生の取り組みは、キレートマリンを鉄源として利用するものである。
- 2) キレートマリンの成分は、鉄、高炭素セラミック、ケイ酸鉄、クエン酸や微量元素など。広島で製造している。
- 3) キーワード：植物プランクトンが二酸化炭素を吸収し、食物連鎖により大きなサカナが育つ。ヘドロを分解する微生物が育ち、ヘドロをなくす。

- (6) 広島湾の干潟「深江の濱」の管理者が、「私が子供だったころ、潮干狩りをよくしたものだ。けれども今はアサリが全然とれない。この現状を何とかしたい」というので、キレートマリンの散布を勧め、2015年7月に干潟に設置した。

100 平方メートルあたり 10 kg 設置し、1 か月後、3 か月後、半年後と定期的に確認をつづけ 1 年後、

その個体数は、非散布区域 3 個に対し設置区域は 21 個となり、粒も明らかに大きかった。

このようにキレートマリンは全国各地でよい成績を収めている。

(7) キレートマリンを散布するとなぜアサリが増えるのか、このメカニズムを科学的に解明するのが私の仕事である。そこで、

1) 干潟から泥を回収し、アンモニア体とケイ酸塩を測定するとその濃度が減少していた。これはアンモニア体のチッソをプランクトンが捕ること、珪藻類が増えることでケイ酸塩が減少したと考えている。

2) 植物プランクトンが増えることによって食物連鎖が活発になったということを証明するために、培養実験を行った。

3) 広島湾海水を 7 月、11 月に採取し、キレートマリン 0.2 g をボトルに入れたものと無添加の検体を作り、人工気象室に入れて 20℃、湿度 50% の条件下で培養し、チッソ、リン、ケイ素、鉄の栄養バランスを測定すると、

① 7 月検体はリンが相対的に低かった。

② 11 月検体はチッソと鉄が相対的に低かった

4) この海水を使用し、キレートマリンの有無によるクロロフィル α 量の差を測定した。その結果、キレートマリンを添加した海水は、無添加の海水に対し 7 月検体では 3.3 倍、11 月検体では 10.7 倍多く、どちらの海水においてもキレートマリンの添加によって植物プランクトン増殖の有意な促進効果を確認した。

5) もう一つ、科学的に解明したデータを紹介する。

珪藻類、鞭毛藻類と分けてキレートマリン添加による細胞密度の差を測定した。珪藻類はアサリのエサになる有用な植物プランクトン、鞭毛藻類はアサリなどに有害なプランクトンである。

結果、キレートマリンを添加するとアサリのエサになる珪藻類を増やすことが確認できた。

6) 次にキレートマリンが栄養分をどのように溶かしてくるのかを人工海水を用いて 30 日間その濃度の推移を確認した。結果、ケイ酸ではキレートマリン添加の場合、0.99→13.2 まで上昇した。鉄も有意に高い結果であった。

この結果から、竹炭からのケイ素供給が珪藻類を増殖させる要因の一つであること、キレート材のクエン酸は魚介類に有害なラフィド藻類の増殖には利用できず、種別の増殖効果に大きく影響していると考えている。

(8) まとめ

1) キレート材としてクエン酸を用いた竹炭混合のキレートマリンは、植物プランクトンの増殖における栄養供給源として有効で、ケイ素と鉄がポイントである。

2) 魚介類に無害で重要な飼料になる珪藻類の増殖に効果がある。

3) 一方、有害な鞭毛藻類に対し、増殖抑制効果がある。

4) 適用する環境水域を十分に把握、考慮したうえで CM を設置することで、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。

6. 有明海の干潟および沿岸域研究

キレートマリンを佐賀県太良の干潟に設置し、県立広島大学、鳥取環境大学が調査に参加した。

(1) 有明海の植物プランクトンの量を、キレートマリンを設置した海域と設置していない沖合の、海水中のクロロフィルの量を測定するとキレートマリン設置個所では高値を示した。

(2) 8 月と 12 月、海水の栄養バランスを測定すると、8 月の海域はリンの濃度が低く、12 月の海域では鉄と

チッソが相対的に少なく、季節的な変動があることが分かった。

(3) 植物プランクトンの増殖には栄養バランスが必要であるということが、水質の分析の結果からも分かる。

(4) AGP 試験

植物プランクトンは種により、人にとり有用なもの、あるいは悪さをするものがある。「藻類増殖ポテンシャル試験」というのがある。これは水域の水質を評価する方法で、チッソ、リンなどの栄養塩類を含め、試水の持つ潜在的な藻類の増殖能力をするもので、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検定方法で、「AGP 試験」という。

- (1) 有明海のキレートマリン設置区に、設置 1 か月後の表層水について AGP 試験をすると、アサリのエサになる有用な珪藻類においては、チッソ、リン、ケイ素、鉄などを加えても何らコントロールと差がなかった。このことは、栄養塩が十分にあったということの意味する。これに対し、有害なプランクトンに対しては、リン、チッソ等が増えているが、藻類がキレートマリンから溶出されるチッソ、リンなどを摂取しなかったことを意味する。
- (2) 主要な植物プランクトン 4 種に対し、制限物質を調べたところ、春と夏の表層水ではチッソが増殖の制限因子と考えられる。全体的には夏の低層水は鉄が増殖制限因子と考えられる。この結果から沿岸域の干潟再生を「考える上で非常に重要な基礎生産、植物プランクトンの増殖、藻場の回復をするためには栄養バランスが重要であり、さらには鉄とのバランスが重要であることが AGP 試験からもいえることである。

【総括】

「きれいで、かつ豊かな水域環境」を目指すためには、有害有毒プランクトンの発生予察や被害軽減に向けてのモニタリングを継続し、対象とする水域環境の地域性と多様性をしっかり考慮して生態系構造などを的確に把握する必要がある。この上でキレートマリンなどを有効活用し再生に役立てていければと思う。

マイクロな世界（微細藻類や微量元素）から環境問題に対して考えることも必要である。

【Q&A】

Q1: 微量な鉄が必要ということがよく理解できましたが、過剰にあるとどうなるのでしょうか。

A1: 鉄の過剰はプランクトンの増殖を制限します。ただし自然海水の pH は弱アルカリ性の場合が多く、鉄はコロイド状になり水酸化鉄になり水に溶けずに沈殿する。ですから自然界で鉄の過剰状態を見ることはあまりありません。キレートマリンを設置するとき、鉄が過剰になることに注意しなければならないが、設置した直後は高い値を示すがすぐに低下し、バランスのよい状態に収まるのでキレートマリンのよい点であると考えています。

Q2: 森から供給されるフルボ酸鉄と鉄鉍スラグからの鉄は植物プランクトンにどの程度の有用性があるのでしょうか

A2: 鉄鉍スラグからの鉄は鉄そのものなので沈殿してしまい、有効な形で溶けだす鉄の量は極めて少ないです。一方、腐食物質がフルボ酸を利用すると鉄と結合し、溶けたまま海水中に存在するので栄養塩として効果的であろうと思われます。

Q3: 環境問題で二酸化炭素を減らす方策として、鉄を利用して海藻など海の植物を増やし二酸化炭素を吸収させることは可能ですか。

A3: 先ほどのまとめで述べましたが適材適所ということもあり、海の生態系への影響をきちんと把握した上で対処することが大切だと思います。

【田中先生のコメント】

田中先生：最初に鉄が大事である、鉄が不足すると植物プランクトンが増えないという筋書きはよくわかるのですが、例えば鉄があり、植物プランクトンがチッソやリンを吸収する。その時に鉄がどういう役割をするのか、そのあと鉄はどうなるか、新たに補給しないといけないのか、このあたりのことを少しご説明いただくと理解が進みます。

内藤先生：チッソ等の栄養塩を細胞内に取り込むときに鉄が必要であり、鉄がないと細胞を作るチッソやリンの代謝ができないこととなります。鉄の細胞内での挙動は解明されていませんが、生物ですので摂取後の不足分は、新しい鉄を補給することが必要です。

田中先生：鉄にはいろいろな形態があり、利用する側の植物プランクトンにしてもいろんな種類があり、自然界では微妙なバランスのもとにそれぞれの営みがある。このあたりのことを内藤先生が解明されつつあります。私が面白いと思ったのは、プランクトンも生き物であり、生き物ゆえに環境に適応していろいろな知恵や工夫をする。鉄をどうすれば効率よく取り込めるか？取り込みやすい鉄もあればそうでない鉄もある。

陸上植物で、土壌中に鉄が豊富にあっても植物は直接利用できない。イネ科植物はムギネ酸で代表されるキレート化合物類を生合成し、根から土壌に分泌して鉄錯体を形成させ、その鉄錯体のままトランスポーターを介して取り込むという合理的な鉄獲得機構をもっている。今日は生物学としてもとても面白いお話をいただいたと思います。

もしここにおられ、内藤先生のお話を聞いて一番喜ぶのは畠山重篤さんではないか。

11月23日に大阪で講演される予定です。関西国際空港を建設するとき海底地盤を固めるため、鉄鉱石を大量に海中に入れたことにより、そこから鉄のエキスがじわじわと染み出し、広大な海藻の森が出来ているということを話されると思います。この海域は関空の管理下にあるので立ち入りできませんが、地盤沈下を防ぐために行ったことではあるが、結果として自然回復の大実験を行っています。内藤先生の研究でこのことを取り上げ、そのプロセスを解明していただくととても面白い研究になるのではないかと。

研究対象が大阪湾であっても今日の内藤先生のお話につながってきますので、会場の皆さんにとって、いろいろなことを考えるきっかけになればと思います。

以上