

鉄で防ぐ海の砂漠化

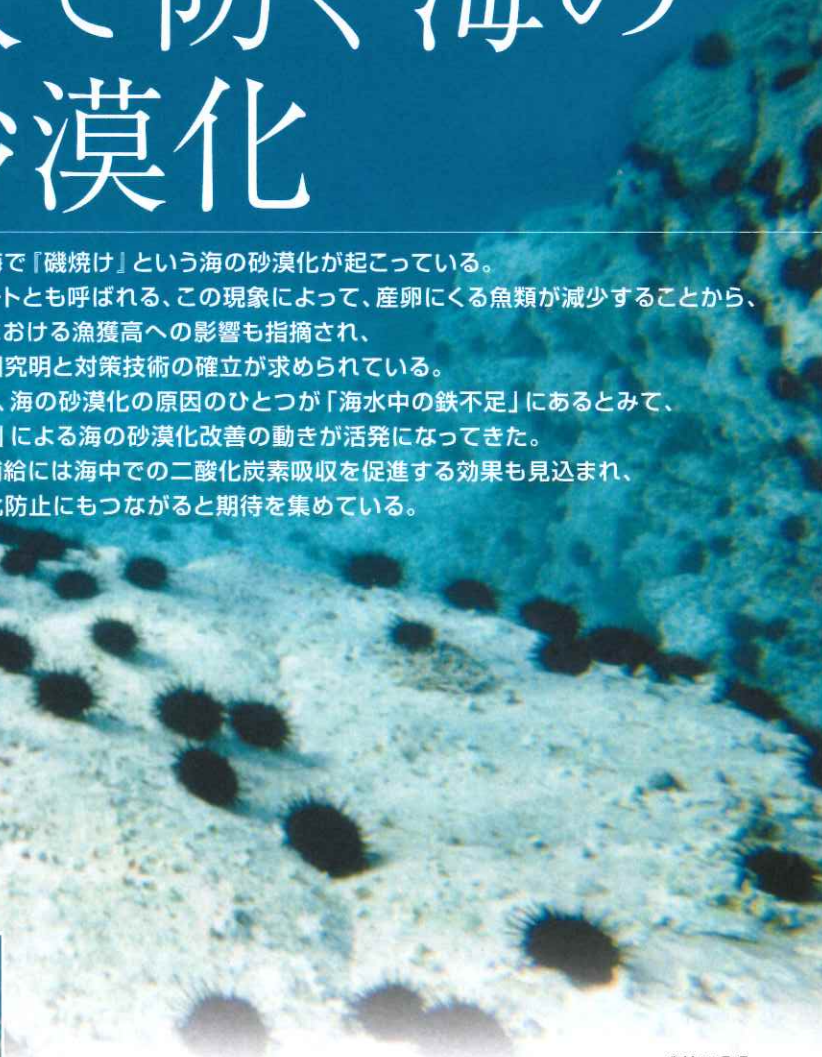
日本の近海で『磯焼け』という海の砂漠化が起きている。シーデザートとも呼ばれる、この現象によって、産卵にくる魚類が減少することから、日本近海における漁獲高への影響も指摘され、迅速な原因究明と対策技術の確立が求められている。こうした中、海の砂漠化の原因のひとつが「海水中の鉄不足」にあるとみて、「鉄の補給」による海の砂漠化改善の動きが活発になってきた。この鉄の補給には海中での二酸化炭素吸収を促進する効果も見込まれ、地球温暖化防止にもつながると期待を集めている。



通常海藻群落 (北海道松前町にて99年9月撮影)

鉄不足が引き金に

海の砂漠化とは、岩礁地帯の岩肌が石灰藻に覆われ、コンブやワカメなどの大型海藻類が生育できない現象のことであり、北海道南部の日本海側沿岸を始め全国の海に広がっている。一方、日本近海の漁獲量は10年前に比べて約半分の500万トンまで落ち込んでおり、海の砂漠化と大きな関連性があるとみられる。



磯焼け現場
(北海道熊石町にて99年8月撮影)

石灰藻とは石灰質の硬組織を持つ藻類の総称で、海中ではコンブなどの大型海藻類と競合しているが、さまざまな要因で石灰藻が優位になると海の砂漠化が起きると考えられている。

石灰藻が異常繁殖した原因としては、ウニやアワビなどの藻食動物がコンブなどの芽を食べてしまったという食害説、水温の上昇で暖水系の藻類である石灰藻が増えるという説や、栄養塩が少なくなり海藻の発育が阻害されたという説がある。今のところ、発生原因としては高水温・貧栄養などの海洋条件説が、持続原因としては食害説がそれぞれ有力となっている。

貧栄養の原因には、フルボ酸鉄などの鉄分の不足がなんらかの影響を与えているという見方がある。

海の砂漠化と森との関係を研究している北海道大学の松永勝彦教授は、石灰藻の異常繁殖は、陸から海へのフルボ酸鉄の供給が減少したことが原因と指摘している。大型

海藻類は石灰藻よりも鉄分を多く必要とするが、大型の開発事業などで、森の腐葉土層が削られたことなどからフルボ酸鉄が少なくなり、石灰藻は育つが大型海藻類は育たない状態になったという。

森林と海洋の深いつながり

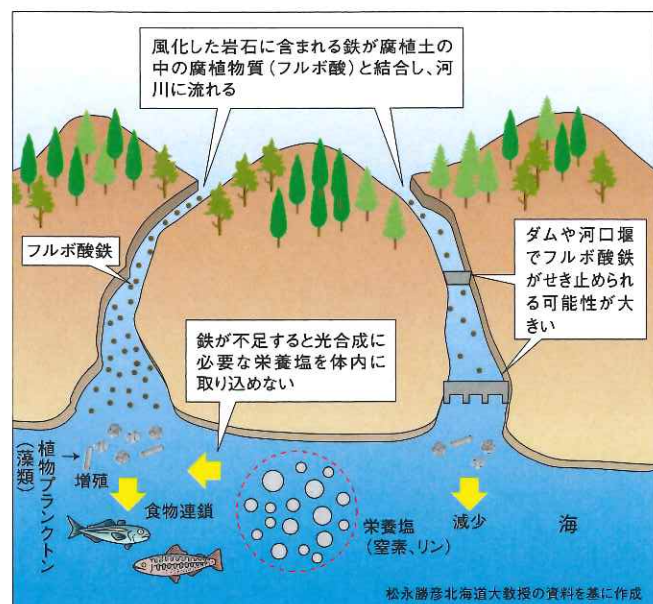
フルボ酸鉄とは、森の落ち葉を微生物が分解する時に作り出すフルボ酸と、土壤に含まれる二価の鉄イオンが無酸素結合した物質で、川を下って海に到達した際に窒素やリン、カリウムなどの栄養分と一緒に海藻に吸収される。

食物連鎖の出発点となる有機物・無機物が川から供給されることで、海の生命の栄養としての機能を果たす。海の生態系と山の健全さは深く関係しているのである。

川から供給される栄養分の中で、フルボ酸鉄には石灰藻の生長を抑制する力があり、その因果関係によってコンブやワカメなどの大型海藻類を増やす働きがあるというのが、松永説だ。

ただ、研究者の間では、石灰藻の生育を抑制する要因はフルボ酸鉄そのものではなく、「フルボ酸鉄や鉄分が増えることによって増殖したバクテリアや他の藻類との関係が影響している」という考えもある。フルボ酸鉄を始めとする鉄イオン（化合物）が海中のバクテリアや植物プランクトンなどを増殖させて、コンブやワカメなどの石灰藻以外の藻類を増やし、結果的に海の砂漠化解消に効果があるというのである。

植物プランクトンが増えれば、大気中のCO₂を吸収できる。海の砂漠化防止と大気中CO₂の海洋への固定は、いずれも海洋への鉄分補給で改善できる可能性があるのである。



森から海に運ばれるフルボ酸鉄

フルボ酸鉄の供給・吸収→バクテリア等の増加→大型藻類の増加メカニズム

マーチンの鉄仮説

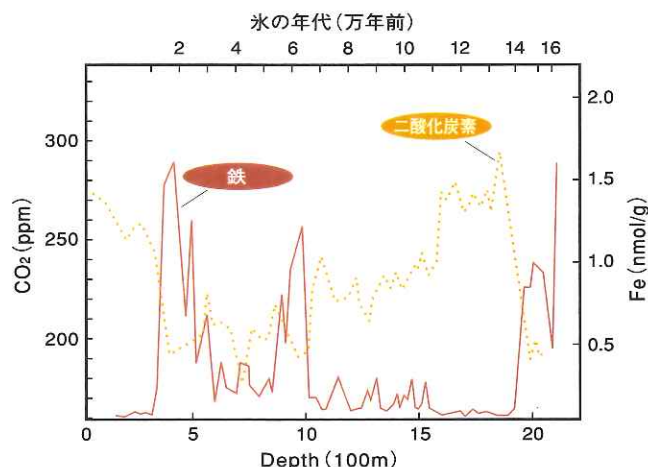
森林から供給されるフルボ酸鉄を始めとする、鉄イオンが植物プランクトンを増殖させる働きは、海洋による二酸化炭素吸収メカニズムの研究の中でも実証されている。

たとえば米国の学者マーチンが1980年代末に唱えた「鉄仮説」がある。海洋は過去から大気中二酸化炭素濃度の変動を支配してきたと考えられており、地球が過去に経験した氷河期に海洋が二酸化炭素を吸収したメカニズムについては、さまざまな議論がある。「鉄仮説」はその中で最も有力な説である。

南極海などの海域では、植物プランクトンの増殖に必要な窒素やリン、ケイ素といった栄養分が豊富に存在しているにもかかわらず、植物プランクトンの存在量（光合成量）が少ない。その理由としてマーチンらは「南極海では鉄の供給量が低いからだ」と考えた。鉄は、二価の鉄イオンを含む、黄砂のような塵として大気経由で外洋へ供給されるが、南極海域は大陸から遠く離れているため、鉄の供給量が低いと考えたのである。

マーチンらは、南極大陸ヴォストーク基地で採取されたヴォストーク氷柱試料の分析によって得られた過去16万年の大気経由の鉄降水量と大気中二酸化炭素濃度を比較することにより、氷河期には鉄を含む塵が南極海に大量に降り、南極海の植物プランクトンが大増殖して、大気中二酸化炭素を吸収したと推定した。このことから、現在、鉄が不足している海域の鉄濃度を調節すれば、人工的に二酸化炭素を固定できると主張したのである。

マーチンは、この仮説を確かめるために、アラスカ湾、南極海や赤道太平洋の海水を用いて、鉄イオンを添加した場合と添加しない場合とで植物プランクトンの増殖の違いを比較する船上実験を行った。1992年のことである。その結果、鉄イオンを添加した場合は植物プランクトン、特に大型の珪藻類の増殖速度が有意に速いことがわかった。



南極ヴォストーク基地氷柱試料に基づく、過去16万年の大気経由鉄降水量と大気中二酸化炭素濃度

地球温暖化と鉄

海水中では、二酸化炭素は水と反応し、炭酸水素イオンや炭酸イオンとして溶解する。海洋深層は、大気中の二酸化炭素全量の60倍に達する炭酸物質を擁している巨大な炭素貯蔵庫となっている。海洋表層で発生した植物プランクトンなどの有機物が深層に沈降し、そこで炭酸水素イオンなどに分解される。このような炭酸物質は数100年間深海に隔離されることになる。海洋には深さ75～100メートルの所に温度躍層という分離帯があって、表層部とそれより深い部分との海水とは容易には混ざらないようになっているためである。水に溶けやすい硫酸鉄などを南極海に毎年数十万トン散布し、植物プランクトンを増殖させることにより海洋深層の炭酸物質濃度を上昇させることができるならば、大気中二酸化炭素の抑制に効果があると期待される。

すでに世界各地の海域で硫酸鉄 (FeSO_4) などの鉄散布実験が行われている。赤道太平洋ガラパゴス沖での実験における追跡調査によると、大型植物プランクトンの増殖速度が倍加し、魚介類の量が20倍に増加したとの結果もあり、鉄散布がプランクトン増殖に寄与することが確かめられた。

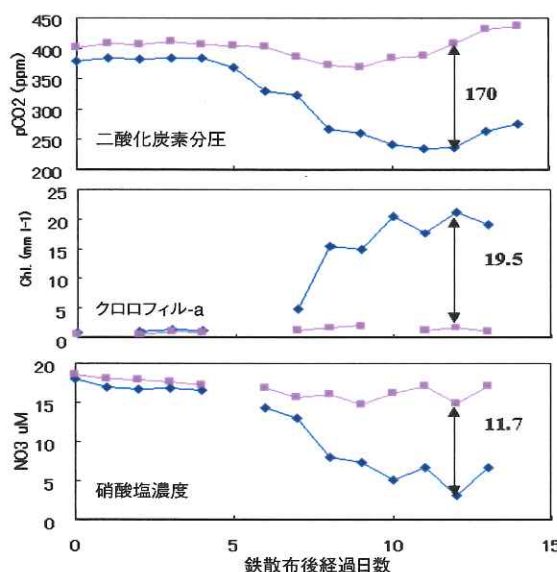
最終的に有力な大気中二酸化炭素の削減策となるかどうかは、まだまだ議論があるところだが、将来、地球温暖化対策として大規模な海洋鉄散布が行われる可能性が出てきた。これに先だて、鉄濃度調節が海洋環境・海洋生態系へ与える影響を事前に明らかにすることも必要となっている。

鉄濃度調節実験

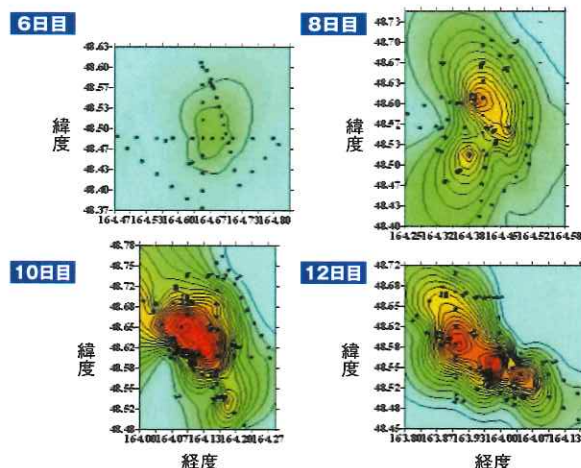
「北太平洋の海洋科学に関する政府間機構」において、鉄濃度調節実験に関するパネル(研究委員会)が1997年に設立された。パネルでの議論を経て、カナダと日本の研究

者が中心となって、2001年度から亜寒帯北太平洋における鉄濃度調節実験が進んでいる。まず、北太平洋のアリューシアン列島沖の海域で鉄濃度調節実験を行い、海洋表層二酸化炭素分圧の変動と植物プランクトン量の関係を明らかにした。同海域の8km×10km規模で、硫酸鉄を散布してその濃度を高める実験を行った結果、実験海域では植物プランクトン量の指標となる葉緑素濃度が、海水中1リットル当たり0.7マイクロ・グラムから18マイクロ・グラムに増加し、極めて大幅な植物プランクトンの濃度増加が見られた。2002年度は、水産庁の研究船、開洋丸のアラスカ湾海域への航海で、カナダの研究チームと共同で鉄濃度調節実験を行っている。アラスカ湾海域の結果を解析し、2001年度の西部北太平洋の実験結果と比較することにより、鉄濃度調節の二酸化炭素吸収に及ぼす効果が、太平洋の東西でどの程度相違するかを明らかにすることが一つのねらいとなっている。

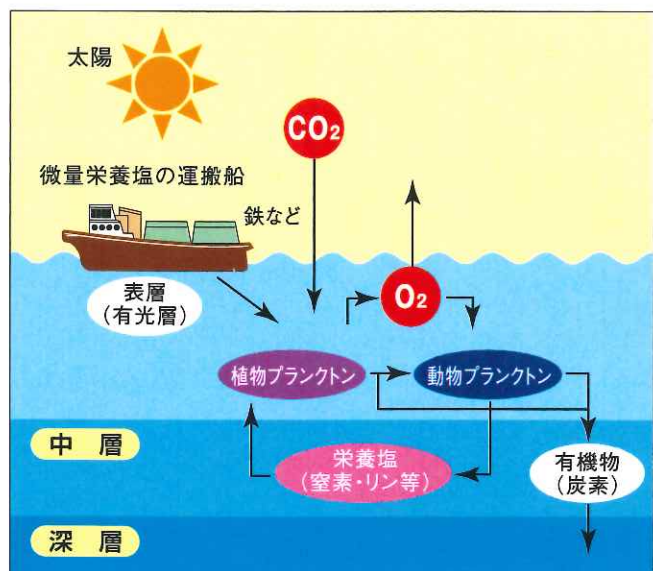
■サハリン東部海域における鉄濃度調節実験結果。海水中の二酸化炭素分圧、クロロフィル濃度、栄養塩(硝酸塩)濃度の鉄散布後の経時変化。鉄散布後1週間程度経過すると光合成が活発になるため、海水中の二酸化炭素と栄養塩が減少する一方でクロロフィル濃度が増加する。
赤:鉄散布域外 青:鉄散布域内(実験時期 2001年6月下旬～8月上旬)



■同海域における鉄散布後の海水中クロロフィル濃度水平分布の変化



北海道水産研究所水環境研究所
「海洋鉄散布による二酸化炭素固定化と生物群集の応答に関する研究」より転載



植物プランクトンによるCO₂固定

2003年度にはこれらの実験結果のまとめを行い、太平洋高緯度海域における鉄濃度調節が環境へ及ぼす影響を定量化する計画である。

鉄濃度調節実験の研究責任者を務める東京大学海洋研究所の津田敦助教授は「生物地球工学としての大規模な鉄濃度調節には、二酸化炭素の吸収や付随して期待されている魚類生産の増加といった正の側面と、底生生物やプランクトン群集に対する人為的関与といった未知または負の側面を有している」とし、生態系への負の影響の把握も視野に入れている。鉄不足状態に適応して進化してきた生態系に多量の鉄を与えることの危険性はまだまだ未解明というわけである。「表層での生物量の増加は、一酸化二窒素やメタンのようなより温室効果の大きいガスの発生を促進するかも知れないし、深層への有機物供給量の急激な増加は、深海に酸素欠乏を生じる恐れもある」（京都大学化学研究所・宗林由樹教授）との指摘もある。鉄散布が物質循環や生態系へ及ぼす影響について、正確な科学的知見を得ることが緊急かつ重要な課題となっている。

鉄濃度調節が環境に及ぼす負の影響が小さいことがわかれば、鉄散布によってプランクトンを増殖させ藻類を増やすことで海の砂漠化を防止する大規模な対策も実用化できそうだ。

製鋼スラグや石炭灰による 海の砂漠化と地球温暖化の防止

日本の大学では、海の砂漠化の改善や海洋による大気中CO₂固定につながる研究が活発になっている。その主役は鉄を含んだ産業副産物である。

東北大学大学院工学研究科の日野光元教授は、(社)日本鉄鋼協会のプロジェクト「製鋼スラグを栄養源として利用した海洋植物プランクトン増殖によるCO₂固定化研究会」の主査として、鉄鋼の生産工程で発生する製鋼スラグを用い、藻類プランクトンを増殖させ大気中のCO₂の固定化を図る研究を1999年度から進めている。(社)日本鉄鋼協会の論文誌「鉄と鋼」4号(2003年)では、「製鋼スラグを栄養源として利用した海洋植物プランクトン増殖によるCO₂固定化」の特集が組まれ研究成果が公表されている。

製鋼スラグには、鋼中の不純物であるリンが濃縮されていると同時に、鉄やシリコンの酸化物も含まれている。一部が路盤材などに再利用されているものの、大部分は埋め立て処理されているのが現状で、用途開発が課題となっている。

日野教授の研究は、製鋼スラグ中の鉄イオン、リン、シリコンを栄養源とし、海洋植物プランクトンを繁殖させて、CO₂を固定化しようという取り組みだ。製鋼スラグの状態分析と人工海水中への成分溶出挙動について研究を進めた結果、鉄イオンの溶出挙動は、溶鉄予備処理スラグ、転炉スラグの

試料間の差はほとんど認められず、どの試料も微量で溶出速度が非常に遅かったものの、溶出は確認された。リンやケイ素の溶出挙動は、製鋼スラグ中でのリンやケイ素の存在形態によって大きく異なるものの、海洋植物プランクトンの増殖に必要な栄養分は十分に溶出可能と結論づけている。

また、東京大学工学部の定方正毅教授は、石炭火力発電所で発生する副産物に含まれる鉄イオンを利用し、海の砂漠化を改善する研究を続けている。副産物はフライアッシュと呼ばれる、三価の鉄イオンを多く含む石炭灰である。三価の鉄イオンは未処理では鉄溶出は少ないが、溶融することで二価の鉄イオンに変化し、鉄の溶出が増えると考えられる。フライアッシュのほか、都市ゴミ焼却灰などについて鉄の溶出量などの物性を比較し、海の砂漠化改善のための適性を評価するとともに、海中における鉄溶出のモデルを構築するのが研究の狙いだ。1300℃と1500℃で溶融処理した溶融灰と未処理灰の物性を比較したところ、フライアッシュは溶融処理を行うことで、鉄の溶出は促進され、未処理灰に比べ2倍になることがわかった。この結果をもとに、岩手県大槌町沖の海中にて、2002年3月から比較実験を行った結果、藻類の増殖に大きな違いが出たという。研究成果はまもなく発表され、フライアッシュによる鉄イオンの供給が海の砂漠化防止に有効だということが証明されそうだ。



岩手県大槌町で行われた東大の比較実験



溶融灰未使用



溶融灰使用

産官学の知恵を結集

四方を海に囲まれた日本。今、産官学の知恵の結集により、鉄がプランクトンの増殖に大きな役割を果たし、藻類の増殖によって海の砂漠化の改善につながることを科学的に確かめられようとしている。地球温暖化防止対策としても期待は高まっている。生態系に多量の鉄を与えることの影響についての研究は始まったばかりだが、影響調査がまとめられれば、鉄散布などによって漁場の回復が一気に進む可能性もありそうだ。鉄によって海の砂漠化を防ぐ取り組みは、これから本番を迎える。

民間企業の取り組み(事例研究)

1 鉄鋼メーカーの人工藻礁

JFEグループは、藻場・漁礁用に利用可能な大型炭酸固化体(商標:マリンプロック)を製造する技術を開発し、本格的な実証試験に入っている。

マリンプロックは、鉄鋼製造プロセスの副産物である鉄鋼スラグと排ガス中の二酸化炭素だけを原料として製造する完全リサイクル素材。鉄鋼スラグに二酸化炭素を吸収させて炭酸カルシウムとして固定する。炭酸カルシウムにより、鉄鋼スラグ粒子間が強固に結合され、粒子表面も被覆されている。炭酸カルシウムはサンゴ、貝殻の主成分と同じで、海中および大気中で非常に安定している。膨張して崩壊することや、アルカリ性を強めたりすることもない。セメントや天然骨材をまったく使わない、世界で初めての新材料なのである。

藻場・漁礁として活用可能で、沿岸環境の修復、海域の海洋資源の育成に寄与する。1997年11月からの実証試験では、マリンプロックを瀬戸内海の中に沈設し、海藻の植生変化を観察したところ、翌年1月末には、表面に緑藻類やサザエが付着し、その夏には、緑藻類のアナオサがブロック全体を覆う

うになった。

1998年4月からはマリンプロックとかこう岩、コンクリートブロックとの比較試験を瀬戸内海で行い、マリンプロックにはホンダワラ類の初期の着生が多く、コンクリートブロックより優れていることが明らかになった。翌1月の最終調査時に採取したホンダワラ類の湿重量はマリンプロックがもっとも多い結果となった。「マリンプロックが多孔質のため、これらの藻類が強固に付着したため」とみている。



マリンプロックとコンクリートブロックの
海藻着生比較実験
(左がマリンプロックを使用した場合)



2 ガラスメーカーの水溶性ガラス

東洋ガラスはテトラと共同で、ミネラルをイオンの形で溶出させ藻類を増殖させる水溶性ガラスを開発した。ガラスは水に溶けない材料として知られているが、実は目に見えないミクロなところでアルカリ金属が溶け出ている。この性質を利用し、構成元素と濃度比を変えることで水溶性ガラスを実現した。

藻類に必要なリン、ケイ素、鉄等をガラス化した。水に入れると、これらの元素がイオンの状態で溶け出し、ガラス構造の強弱で溶解スピードをコントロールできる。光合成を促進する鉄分は、藻類の細胞に吸収されやすい2価の鉄イオンであり、これを10年の長期にわたり安定して溶出できる。溶出するイオンは海水に含まれる成分と同じで安全だという。形状は、ガラスの溶出性と施工性を考慮しプレートとした。モルタルプレートの表面に粒径5mmのガラス粒を埋め込み、モルタル

の硬化前に、水で表層のモルタルを洗い出し、ガラス粒が表面に露出する構造だ。

北海道日本海側の乙部(おとべ)地区で実施した実証実験では、水溶性ガラス板を消波ブロック(右下写真)等の構造物に貼り付け海底に沈設したところ、海藻類がガラスから栄養を摂取して成長し、約1年後には海藻が繁茂した。

ガラス板を貼り付けなかったブロックとの比較試験では、5年後の段階で、ガラス板を貼り付けた方の海藻着生重量が20-50%増となり、増殖効果が確認された。採取したコンブの葉体中の鉄濃度も増えており、ガラスから溶出した鉄がコンブに吸収されていることがわかった。今後、海の砂漠化など環境修復分野に大きな期待が寄せられている。



3 鉄イオンで土壌改良光合成

愛知製鋼は、たまねぎ、白菜、にんじんなどの成長を促進し、出荷時期を一ヶ月程度はやめることができる土壌改良剤「鉄力めぐり」を開発、製品化した。植物の光合成に必須といわれる鉄の二価イオンを自然界では存在しにくい酸化第一鉄(FeO)という形で供給するのが特徴だ。試験栽培の結果、農作物中のマグネシウム、カルシウム、ビタミンなどの含有量が未使

用の場合と比較し、60%から2倍に増加したという。

開発主体は技術本部生産技術部エコロジー事業室。特殊鋼製造技術をベースに、FeOの量産化技術、土壌中での酸化防止技術などを開発する中から生まれた。海水に「鉄力めぐり」を入れた場合と入れない場合についての実験を行って、藻の成長を比較したところ、大きな差が出ている。今後、実際の海洋実験でも差が出ると考えられ、用途開発は広がる見通しだ。

●参考文献

- 「鉄濃度調節が炭素循環に及ぼす影響に関する研究」(独立行政法人国立環境研究所・野尻幸宏総合研究官)
- 「海水中の微量金属と生物生産」(京都大学化学研究所・宗林由樹教授)
- 「溶融灰からの鉄イオン供給による海の砂漠化改善」(東京大学工学部・定方正毅教授)
- 「製鋼スラグを栄養源として利用した海洋植物プランクトン増殖によるCO₂固定化」(東北大学工学部・日野光元教授)
- 「地球温暖化とその対応策」一温暖化防止への新たな試み 海と陸でのCO₂の吸収—久田安夫(財団法人沿岸開発技術研究センター会報から)
- 「水界から陸界へ、植物の上陸と海への回帰」(中央大学理工学部・西田治文教授)
- 「鉄濃度調節による海洋二酸化炭素吸収機能の強化と生態系への影響に関する研究」(環境省、研究代表者:津田 敦)
- 「鉄イオンで土壌改良光合成」(日刊日本金属通信4月16日)

●写真提供

- 「磯焼け現場」・「海藻群落」:NPO法人小笠原自然文化研究所・一木重夫氏
- 「溶融灰の比較実験」:東京大学工学部定方研究室
- 「海藻着生比較実験」:JFEグループ ■「水溶性ガラスを貼り付けた消波ブロック」:東洋ガラス㈱