

大型褐藻マコンブ (*Laminaria japonica* Areschoug) の
生長、増殖に及ぼす鉄の効果に関する研究

学位論文内容の要旨

近年、エネルギーの需要は著しい増加を示し、それに伴い、原料とする化石燃料(石炭、石油)の消費が増大している。これらの使用は、地球温暖効果の主原因といわれている二酸化炭素(CO_2)の放出を意味し、大気中の CO_2 濃度は年々急速に増加の一途をたどっている。更に、森林開発による樹木の伐採によって CO_2 の吸収能力は減少し、伐採により逆に CO_2 の増加に拍車をかけ、温暖化は深刻な地球環境問題となっている。最近、国際的規模で植林事業が開始され森林による CO_2 の吸収能力の回復を図る試みがなされているが、森林の復元には数十年から数百年かかると考えられる。しかし、人類がエネルギー源として化石燃料を使用していく限り、大気中の CO_2 濃度は増加を続けることになる。従って、現在この対策として放出される CO_2 ガスの回収、再利用方法が検討されてきている。しかし、エネルギー収支やコストの面でまだ不明な点が多く、排出される CO_2 ガスの回収、削減方法に関する工学的な研究はまだ多くの課題が残されている。

自然界において、植物は光合成によって CO_2 を固定する能力を有しており、大気の CO_2 濃度の調節(吸収、固定)は、全ての植物(陸上、海洋)によって行われてきた。 CO_2 濃度を一定に保ち、温暖化を防ぐ為には、地球全域にわたるの生産力の増

大（緑化）が必要である。現在、陸上の森林は大気中の CO_2 の2/3を貯蔵しているが、陸上の有効面積並びに森林伐採と植林事業を相互に見ると、今後の著しい生産力の増大、即ち、陸上の植物相のみに CO_2 吸収能力の向上を求めるのは困難であると考えられる。

海洋植物の一次生産の総量は陸上の50%程度を占めていることから、将来に向けて海洋の生物生産の増大による CO_2 吸収固定に期待が高まってきている。海洋の一次生産の90%は植物プランクトンによるものであり、生産力は水温及び、光照度等の物理的要因と、栄養塩を初めとする化学成分による化学的要因との相互作用によって支配されている。化学的観点から見ると栄養塩である窒素、リンが藻類のバイオマスを制限していることは以前から数多く報告されている。また、海水中の微量金属濃度の信頼性が高まり、海洋の生物生産と栄養塩並びに微量金属が密接に関係していることも次第に明らかにされてきた。

微量金属中、鉄は、全ての生物の生命維持に不可欠な元素であり、特に光合成生物にとって栄養塩と並び重要である。それゆえ、鉄と植物プランクトン増殖に関する研究が多数報告されている。最近では、栄養塩の枯渇しない高緯度海域では、鉄が生物生産を制限している要因であることが報告され、外洋に鉄を散布し生産力を高め、大気中の CO_2 濃度を減少させる考えもある。

一方、沿岸域の生物生産は、主に海産の大型藻類（海藻、海草）によるものであり、生産量は全海洋の10%であるが、全海洋のバイオマスの2/3を占め、海藻の単位面積当りの生産力は潮下帯のコンブ林では極めて高く、これは最も生産力の高い陸上植物に匹敵する。また、植物プランクトンと比較して海藻はライフサイクルの周期が長く、藻体組織の分解も受けにくいことから、海洋において CO_2 の吸収固定には海藻は極めて重要

な存在であると考えられる。これらのことから、海藻の生長増殖機構を知ることは地球環境の観点からも意義のあることである。

しかし、現在に至るまで海藻の生長、増殖に関する基礎的研究は少なく、特に化学的なアプローチは、植物プランクトンと比較し極めて少ない。鉄は全ての植物に必須の元素であり、海洋の植物プランクトンの増殖を鉄が制限していることを先述したが、同じ海産の光合成植物である海藻にとっても鉄は不可欠な元素であることは明らかである。

本研究では海藻増殖に関する基礎研究として、北海道の沿岸海域において主要なバイオマスであり、かつ、有用海藻の代表である大型褐藻マコンブ (*Laminaria japonica* Areschoug) について、その生長増殖に及ぼす鉄の果たす役割及びその増殖法に関する研究を行い、以下の知見を得た。

1. *L. japonica*の生長増殖に及ぼす鉄の効果

*L. japonica*の配偶体の成熟、受精に関して鉄は制限元素として働き、培地中のFeイオン濃度に成熟率は依存し増加したのに対し、無鉄培地中の配偶体は栄養増殖をするのみであった。異性配偶体世代 (n) から孢子体 ($2n$) に発達する段階においてFeは不可欠であることが明かとなった。更に孢子体期 (芽胞体以上のステージ) おけるFeは生長速度、並びに光合成色素の生合成を支配する要因であった。従って、鉄は *L. japonica* 生活史の各ステージにおける発達を制限する必須元素であることを明らかにした。また、全ステージにおいて粒状態Fe (無定形水和酸化鉄: amFe) は溶存態Fe-EDTAと比較して、生長等に果たす鉄の効果が高いことから細胞内に直接摂取できる形態はFeイオンであり、この供給量の差異が各ステージの発達を制限すると推測された。

2. *L. japonica*のFe摂取速度及び、摂取できるFeの化学形態

Fe-EDTAによる摂取速度は、ミカエリスメンテンの酵素反応式モデルを示した。このことからFe-EDTAによるFe摂取においては、他の栄養素と同様の挙動を示し、生物側の要求により支配されていた。鉄要求量として最大摂取速度(V_m)並びに半飽和定数(K_s)を求めた結果、各々 $8.2 \text{ pmol-Fe/cm}^2 \text{ hr}$ 、 $0.1 \text{ } \mu\text{M}$ となった。しかし、最大摂取速度は採取した時期によって異なる値をとったことから、同海域で生育した藻体においてもFeの要求は、季節的に変動する傾向があると推測された。また、Fe摂取速度は、光量、藻体の部位によって、大きく影響を受けた。EDTA以外のキレートFeにおけるFe摂取速度の結果から藻体は、Fe-EDTA自身を摂取しているのではなく、キレートと遊離しているFeイオンを摂取しており、キレート剤はFeをイオンとして保持する働きをしているだけであることが明らかとなった。一方、 amFe による摂取速度は極めて低く、Fe-EDTAの V_m の5%以下の値を示し、藻体に摂取されたFe量は極微量であり、Fe摂取が制限されていた。 amFe を摂取させた場合、藻体に摂取されたFe量は、 amFe と平衡にあった $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$ と溶解してくるFe量の合計量と良い相関を示した。即ち、天然海水中においては、粒状Fe(固相)と平衡に存在する $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$ と、この摂取によって生じる平衡のずれによって、固相から溶解してくるFeイオンを摂取していることが明らかとなった。しかし、 $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$ は微量しか存在出来ず、固相からの溶解速度が極めて遅いことから天然海水中で生育する海藻はFeが不足する傾向にあることが明らかとなった。また、 amFe の形態中には、孔径 $0.025 \text{ } \mu\text{m}$ のフィルターを通過し得る超微細有機Feコロイドの存在が確認されたが、この形態も直接生体内には摂取されないことが判明した。

3. 海藻の化学的増殖法の試作---鉄増殖礁の沈設

海域に沈設した鉄増殖礁からFe(II)が溶出し、潮流により拡散し付近のFe(II)の濃度を高めていた。鉄増殖礁によって人為的にFeイオンを絶えず天然海水中に供給することが可能になった。その効果として、鉄増殖礁にコンブを初めとする海藻の群落形成が確認され、鉄増殖礁の藻体は天然と比べFe摂取速度が低く、また、藻体中のFe含有量は必要十分量(Subsistence)以上の値を示したのに対し、日本海沿岸のごく岸辺に生育している天然のそれは必要最低量(Critical)に近い値を示した。光合成色素も鉄増殖礁コンブが有意に高かった。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 松 永 勝 彦
副 査 教 授 米 田 義 昭
副 査 教 授 齋 藤 讓
副 査 教 授 山 本 弘 敏
副 査 教 授 角 皆 静 男

学位論文題名

大型褐藻マコンブ (*Laminaria japonica* Areschoug) の 生長、増殖に及ぼす鉄の効果に関する研究

沿岸域の生物生産は、主に海産の大型藻類（海藻、海草）によるものであり、生産量は全海洋の10%である。しかし、現在に至るまで海藻の生長、増殖に関する基礎的研究は少なく、特に化学的なアプローチは、植物プランクトンと比較し極めて少ない。鉄は全ての植物に必須の元素であり、海洋の植物プランクトンの増殖を鉄が制限していることから、同じ海産の光合成植物である海藻にとっても鉄は不可欠な元素であることは明らかである。

本研究では海藻増殖に関する基礎研究として、北海道の沿岸海域において主要なバイオマスであり、かつ、有用海藻の代表である大型褐藻マコンブ (*Laminaria japonica* Areschoug) について、その生長増殖に及ぼす鉄の果たす役割及びその増殖法に関する研究を行い、以下の研究成果を得た。

1) *L. japonica* の配偶体の成熟、受精に関して鉄は制限元素は極めて遅く、Fe-EDTA の V_{50} の5%以下の値を示し、藻体に

摂取されたFe量は極微量であり、Feの摂取が制限されていた。amFeを摂取させた場合、藻体に摂取されたFe量は、amFeと平衡にあった $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$ と溶解してくるFe量の合計量と良い相関を示した。即ち、天然海水中においては、粒状Fe(固相)と平衡に存在する $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$ と、この摂取によって生じる平衡のずれによって、固相から溶解してくるFeイオンを摂取していることが明かとなった。しかし、 $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$ は微量しか存在出来ず、固相からの溶解速度が極めて遅いことから天然海水中で生育する海藻はFeが不足する傾向にあることが明かとなった。また、amFeの形態中には、孔径 $0.025\mu\text{m}$ のフィルターを通過し得る超微細有機Feコロイドの存在が確認されたが、この形態も直接生体内には摂取されないことが判明した。

3) 海藻の化学的増殖法の試作として鉄増殖礁を海洋に沈設した。その結果、海域に沈設した鉄増殖礁からFe(II)が溶出し、潮流により拡散し付近のFe(II)の濃度を高めていた。鉄増殖礁によって人為的にFeイオンを絶えず天然海水中に供給することが可能になった。その効果として、鉄増殖礁にコンブを初めとする海藻の群落形成が確認され、鉄増殖礁の藻体は天然と比べFe摂取速度が低く、また、藻体中のFe含有量は必要十分量(Subsistence)以上の値を示したのに対し、日本海沿岸のごく岸辺に生育している天然のそれは必要最低量(Critical)に近い値を示した。光合成色素も鉄増殖礁コンブが有意に高かった。

以上を要約すると、大型褐藻マコンブの生長、増殖に鉄が不可欠な元素であるり、生体内に直接摂取できる鉄の形態はFeイオンであり、生長速度並びに光合成色素の生合成はこのイオンとして働き、培地中のFeイオン濃度に成熟率は依存し増加したのに対し、無鉄培地中の配偶体は栄養増殖をするのみであった。異性配偶体世代(n)から胞子体($2n$)に発達する段階にお

いて、Feは不可欠であることが明かとなった。更に胞子体期（芽胞体以上のステージ）におけるFeは生長速度、並びに光合成色素の生合成を支配する要因であった。従って、鉄は *L. japonica* 生活史の各ステージにおける発達を制限する必須元素であることを明らかにした。また、全ステージにおいて粒状態Fe（無定形水和酸化鉄：amFe）は溶存態Fe-EDTAと比較して、生長等に果たす鉄の効果が低いことから、細胞内に直接摂取できる形態はFeイオンであり、この供給量の差異が各ステージの発達を制限すると推測された。

2) Fe-EDTAによる摂取速度と基質濃度は、ミカエリスメンテンの酵素反応式モデルを示した。このことからFe-EDTAによるFe摂取においては、他の栄養素と同様の挙動を示し、生物側の要求により支配されていた。鉄要求量として最大摂取速度(V_m)並びに半飽和定数(K_s)を求めた結果、各々8.2pmol-Fe/cm²hr, 0.1μMとなった。しかし、最大摂取速度は採取した時期によって25%程度異なる値をとったことから、同海域で生育した藻体においてもFeの要求は、季節的に変動する傾向があると推測された。また、Fe摂取速度は、光量、藻体の部位によって、大きく影響を受けた。EDTA以外のキレートFeにおけるFe摂取速度の結果から藻体は、Fe-EDTA自身を摂取しているのではなく、キレートと遊離しているFeイオンを摂取しており、キレート剤はFeをイオンとして保持する働きをしているだけであることが明かとなった。一方、amFeによる摂取速度の供給量に依存することを明らかにした。天然の海水中において、藻類が摂取できる鉄の化学形態はFe(OH)₂⁺であるが、この量は極めて微量であり鉄は不足する傾向にあることを示した。また、鉄製の増殖礁を沿岸海域に沈設することによって、人為的に海水中にFeイオンを供給することができ、鉄から見て、生

産性の高い海域を形成することが可能となった。

本研究は、海藻の生長、増殖に果たす鉄の役割及び、藻類が摂取できる鉄の化学形態を解明し、海洋の生物化学的知見を与えた。更に海藻の化学的増殖法の確立に寄与するところが大きく、よって博士（水産学）の学位を受けるにふさわしいものと審査員一同は認めた。