

学 位 論 文 題 名

Spatial distributions of iron controlling
the primary production in the North Pacific Ocean,
Bering Sea and Japan Sea

（北太平洋、ベーリング海、及び日本海の基礎生産を
コントロールする鉄の空間分布）

学位論文内容の要旨

海洋において、鉄は基礎生産者である植物プランクトンの生長にとって非常に重要な微量栄養素の一つと考えられている。また、植物プランクトンが利用できる鉄は主に溶存態である無機イオン種と考えられており、酸化環境下の海水中における鉄のほとんどは植物プランクトンが利用しづらい3価の水酸化鉄として存在し、その溶解度及び溶解速度は非常に低いと考えられていた。しかしながら、実際の海水中において生物活動の高い表層混合層（およそ50～75 m以浅）で3価鉄の溶解度は高く、100 m付近で極小値をとるものの、有機物の分解層である中深層（およそ100 m以深）で徐々に増加していく傾向にある。このことから溶存鉄（ $< 0.22 \mu\text{m}$ ）は溶存無機イオン態鉄の他に、有機配位子が3価鉄と特異的に錯体を形成する溶存有機錯体鉄として存在することが明らかとなった。最近、表層混合層では一部の植物プランクトンや従属栄養バクテリアが放出する有機配位子が、3価鉄の溶解度をコントロールしていると考えられている。一方、中深層での3価鉄の溶解度、溶存鉄濃度が増加している理由として、表層で作られた有機物（死骸やデトリタスなど）が変性、分解を重ねて生成されたフミン物質的（海洋性腐植様物質）な有機配位子が中深層での3価鉄の溶解度及び溶存鉄濃度をコントロールしていると考えている。しかしながら、これらは一部の海域に限ったものであり、一般的な解釈には未だ至っていない。

そこで本研究は、基礎生物生産にとって必須の微量元素である鉄及び3価鉄の溶解度の表層から深層までの詳細な鉛直分布を様々な海域で示す。更に、それらと対応する各層の海洋性腐植様物質蛍光強度の測定から3価鉄と錯形成する有機配位子の動態を解明

し、表層における基礎生物生産を支える鉄の供給源と挙動を明らかにすることを目的とする。

観測は夏季及び冬季における北西部北太平洋の亜寒帯、亜熱帯及び移行域の0 mから300 m (1)、西部北太平洋の日本海溝付近及び半閉鎖的海域である日本海及びベーリング海での0-5500 m、更に北部北太平洋の西部(165° Eライン上)及び東部(165° Wライン上)における中緯度域(40-50° N)での5-3000 m (2)において鉛直的に海水を採取した。測定項目は栄養塩、クロロフィル *a* 濃度、従属栄養細菌数、海洋性腐植様物質蛍光強度、3価鉄の溶解度、溶存鉄濃度及び全可溶性鉄濃度(未ろ過の鉄濃度)である。

(1) 夏季での北西部北太平洋の亜寒帯、亜熱帯及び移行域の表層混合層において、植物プランクトンによる取り込みのため栄養塩及び溶存鉄は非常に低い値を示した。同様に海洋性腐植様物質蛍光強度も低い値を示し、その要因として光分解によるものと考えられる。また、3価鉄の溶解度は非常に高い値を示した。これは植物プランクトン及び従属栄養細菌の中で、3価鉄と溶存有機錯体鉄を形成する有機配位子を放出する種が存在するとの報告があり、それらの有機配位子が表層での3価鉄の溶解度を高めたためと考えられるが、本研究ではこれらの要因を特定するに至らなかった。

表層混合層以深の中層(100-300 m)では、栄養塩濃度、海洋性腐植様物質蛍光強度及び溶存鉄濃度は増加する傾向にあった。これは、海洋性腐植様物質、溶存鉄及び3価鉄の溶解度は表層由来の沈降粒状有機物質の分解により生成されたためと考えられる。また、栄養塩と溶存鉄、3価鉄の溶解度及び海洋性腐植様物質蛍光強度は、それぞれ相関係数は高いものの、亜寒帯域、亜熱帯域及び移行域によって傾き及び切片が大きく変化した。このことは有機配位子と栄養塩とは違う分解過程を有していることを示している。しかし、海洋性腐植様物質と溶存鉄及び3価鉄の溶解度は、亜熱帯域、亜寒帯域及び移行域に関わらず強い相関関係を示した。このことから、北西部北太平洋中層における3価鉄と有機錯体鉄を形成する有機配位子は海洋性腐植様物質である可能性を示した。

冬季において、塩分及び水温は0 mから150 mまで均一な値を示すことから、冬季鉛直混合が見られた。これらの混合層での栄養塩、溶存鉄、3価鉄の溶解度及び海洋性腐植様物質蛍光強度の値は夏季に比べ高い値を示したものの、3価鉄の溶解度及び従属栄養細菌数との相関関係はほとんど見られなかった。また、植物プランクト

ンにとって必須の微量栄養元素である溶存カドミウムも溶存鉄と同様に高い値を示した。混合層でのカドミウムの高い要因をリン酸塩との関係より、中深層と同様のカドミウム：リン酸塩のモル比を得たことから、冬季鉛直混合によって中深層のカドミウムが表層に供給されたことが示された。このことから、冬季における表層での高い溶存鉄濃度もカドミウム同様、冬季鉛直混合によって中深層の溶存鉄が供給されと考えられる。よって、冬季鉛直混合による栄養塩及び鉄の供給が春季植物プランクトンブルームを引き起こすと考えられる。

(2) 西部北太平洋、日本海及びベーリング海における表層付近での高い3価鉄の溶解度は植物プランクトン及びバクテリアなどの有機配位子の放出が考えられ、一方、溶存鉄濃度、全可溶性鉄濃度（未ろ過鉄濃度）及び栄養塩濃度が低い要因として、植物プランクトンの取り込みによるものと考えられる。それ以深では海域に関係なく、栄養塩、溶存鉄濃度、海洋性腐植様物質蛍光強度及び3価鉄の溶解度は中深層（およそ1000 m）で極大値をとり、その後緩やかな減少傾向であった。一方、全可溶性鉄濃度においては、溶存鉄濃度とは異なる鉛直分布を示した。西部北太平洋では4000 m以深で急激な増加が見られ、深層での懸濁粒子の存在が考えられる。また、日本海においては2000 m付近までは溶存鉄と同様の分布を示したものの、2500 m以深で急激に減少し、底層まで一定の値を示した。これは2500 m以深で異なる水塊が移流したためと考えられる。更に、北部北太平洋での西部及び東部における水温及び塩分は表層から中深層（～1000 m）にかけて亜熱帯、亜寒帯及び移行域の違いが見られるものの、深層（>1000 m）における東西での違いは見られなかった。しかしながら、西部における溶存鉄濃度及び全可溶性鉄濃度は東部に比べ高い値を示した。これらの要因として、西部では大気からの鉄供給量が東部より非常に多いためと考えられる。また、西部（165°E）及び東部（165°W）の中緯度域（40－50° N）は北太平洋循環流に位置するため、西部の高い鉄濃度を含んでいる水塊は東向きに流れると考えられ、西部から東部にかけて水塊が移動する間に、溶存鉄及び全可溶性鉄が除去され、東部では鉄の溶解平衡値（3価鉄の溶解度）に近づいたと考えられる。

これらの西部北太平洋、日本海及び以前報告された北西部北太平洋及びオホーツク海の様々な海域の中深層において、3価鉄の溶解度と海洋性腐植様物質蛍光強度は、海域に関わらず強い相関関係を示した。このことから、海洋における中深層での3価鉄と有機錯体鉄を形成する有機配位子は海洋性腐植様物質であることが明らかとなった。

以上より、冬季鉛直混合、湧昇及び大気により表層に供給される鉄が海洋における基礎生物生産を支える重要な役割を果たしていることが明らかとなった。

学位論文審査の要旨

主査	教授	久万健志
副査	教授	志賀直信
副査	教授	築田満
副査	助教授	工藤勲
副査	助教授	磯田豊

学位論文題名

Spatial distributions of iron controlling the primary production in the North Pacific Ocean, Bering Sea and Japan Sea

(北太平洋、ベーリング海、及び日本海の基礎生産を
コントロールする鉄の空間分布)

海洋において、鉄は基礎生産者である植物プランクトンの生長にとって非常に重要な微量栄養素の一つと考えられている。しかしながら、海洋における鉄の供給源及びその挙動については、未だ明らかになっていない。本研究は、基礎生物生産にとって必須の微量元素である鉄及び3価鉄の溶解度について、様々な海域の表層から深層までの詳細な鉛直分布を測定し、海洋における鉄の挙動を明らかにする。更に、それらと対応する各層の海洋性腐植様物質蛍光強度及び化学・生物成分の測定から3価鉄と錯形成する有機配位子の動態を明らかにし、表層における基礎生物生産を支える鉄の供給源とその挙動を解明するために行われたものである。得られた成果は以下のよう

- (1) 夏季での北西部北太平洋の亜寒帯、亜熱帯及び移行域の表層混合層において、植物プランクトンによる取り込みのため栄養塩及び溶存鉄は非常に低い値を示したが、3価鉄の溶解度は非常に高い値を示した。これは植物プランクトン及び従属栄養バクテリアの中で、3価鉄と溶存有機錯体鉄を形成する有機配位子を放出する種が存在し、それらの有機配位子が表層での3価鉄の溶解度を高めと推論した。表層混合層以深の中層(100-300m)では、栄養塩濃度、海洋性腐植様物質蛍光強度、溶存鉄濃度及び3価鉄の溶解度は深度とともに増加する傾向にあり、表層由来の沈降粒状有機物質の分解により生成されたためと考えられる。しかしながら、溶存鉄及び3価鉄の溶解度を支配する有機配位子と栄養塩とは違う分解過程を有していることを示した。一方、海洋性腐植様物質と溶存鉄及び3価鉄の溶解度は、亜熱帯域、亜寒帯域及び移行域に関わらず強い相関関係を示し、北西部北太平洋中層における3価鉄と溶存有機錯体

鉄を形成する有機配位子は海洋性腐植様物質である可能性を示した。

冬季において、表層混合層の栄養塩、溶存鉄、3価鉄の溶解度及び海洋性腐植様物質蛍光強度の値は夏季に比べ高く、冬季鉛直混合より中深層の栄養塩、溶存鉄及び海洋性腐植様物質が表層に供給されたと考えられ、冬季鉛直混合によるこれらの表層への供給が春季植物プランクトンブルームを引き起こすと推定した。

- (2) 西部北太平洋、日本海及びベーリング海における表層付近での高い3価鉄の溶解度は植物プランクトン及びバクテリアなどの有機配位子の放出が考えられ、一方、溶存鉄濃度、全可溶性鉄濃度（末ろ過鉄濃度）及び栄養塩濃度が低い要因として、植物プランクトンの取り込みによるものと考えられる。それ以深では海域に関係なく、栄養塩、溶存鉄濃度、海洋性腐植様物質蛍光強度及び3価鉄の溶解度は中深層（およそ1000m）で極大値をとり、その後緩やかな減少傾向であった。一方、全可溶性鉄濃度においては、溶存鉄濃度とは異なる鉛直分布を示した。西部北太平洋では4000m以深で急激な増加が見られ、深層での懸濁粒子の存在が考えられる。また、日本海においては2000m付近までは溶存鉄と同様の分布を示したものの、2500m以深で急激に減少し、底層まで一定の値を示した。これは2500m以深で異なる水塊が移流したためと考えられる。更に、北部北太平洋での西部及び東部における水温及び塩分は表層から中深層（～1000m）にかけて亜熱帯、亜寒帯及び移行域の違いが見られるものの、深層（>1000m）における東西での違いは見られなかった。しかしながら、西部における溶存鉄濃度及び全可溶性鉄濃度は東部に比べ高い値を示した。これらの要因として、西部では大気からの鉄供給量が東部より非常に多いためと考えられる。また、西部（165°E）及び東部（165°W）の中緯度域（40-50°N）は北太平洋循環流に位置するため、西部の高い鉄濃度を含んでいる水塊は東向きに流れると考えられ、西部から東部にかけて水塊が移動する間に、溶存鉄及び全可溶性鉄が除去され、東部では鉄の溶解平衡値（3価鉄の溶解度）に近づいたと考えられる。これらの西部北太平洋、日本海及び以前報告された北西部北太平洋及びオホーツク海の様々な海域の中深層において、3価鉄の溶解度と海洋性腐植様物質蛍光強度は、海域に関わらず強い相関関係を示した。このことから、海洋における中深層での3価鉄と溶存有機錯体鉄を形成する有機配位子は海洋性腐植様物質であり、海洋における溶存鉄濃度及びその分布を決める重要な因子であると結論づけた。

以上の成果は、海洋における鉄の挙動を支配する化学因子並びに冬季鉛直混合、湧昇及び大気により表層に供給される鉄が海洋における基礎生物生産を支える重要な役割を果たしていることを明らかにしたものであり、審査員一同は申請者が博士（水産科学）の学位を授与される資格のあるものと判定した。