

学位論文題名

Effects of CO₂ and iron availability on the community composition and photosynthetic physiology of natural phytoplankton

（CO₂と鉄の利用可能性が天然植物プランクトンの群集構造および
光合成生理機能に与える影響）

学位論文内容の要旨

人間活動によって大気中に排出されたCO₂の約1/4は海洋によって取り込まれ、海水中のpHを低下させる。これは海洋酸性化とよばれ、石灰化生物の外骨格形成阻害など、細胞レベル、延いては生態系や物質循環過程への影響が懸念される。海洋は陸域に匹敵する人為起源CO₂の吸収源であり、その生物過程の大部分を植物プランクトンによる光合成（基礎生産）が担っている。先行研究から、CO₂の増加に対する植物プランクトンの応答は系統群や種レベルで異なることが指摘されており、海洋酸性化の進行は海洋植物プランクトンの群集構造や生理活性に影響を与え、海域の基礎生産力を変化させる可能性がある。そのため、将来的な気候変動の規模を正確に予測するために、CO₂増加による植物プランクトンへの影響解明が重要であるが、現場海水を用いた群集レベルでの影響評価に関する研究は乏しい。そこで本研究は、高緯度域を主体とする計4つの海域で船上培養実験を行い、今後予測されるCO₂の増加に対する天然植物プランクトンの応答を評価することを目的とした。

現場群集を用いたCO₂添加培養実験は、北太平洋亜寒帯循環域（2008年8月）、ベーリング海（2009年9月）、北太平洋親潮域（2011年5月）、および南大洋（2011年12月-2012年1月）で行った。親潮域を除く海域はHNLC海域に属し、海水中の低い鉄濃度が植物プランクトン現存量の制限要因の一つとして考えられる。同海域では今後陸域からのダスト供給増加に伴い、

鉄制限が緩和される可能性があることから、鉄濃度の増加が植物プランクトン群集に与える影響も同時に評価した。植物プランクトンの群集組成は、主にHPLC色素分析と群集解析プログラムCHEMTAXを用いて推定した。さらに、本研究では炭素循環への観点から海洋の基礎生産の約40%を担うとされる珪藻類に着目し、光合成カルビン-ベンソン回路にてCO₂固定を担う酵素、RubisCOの大サブユニットをコードする*rbcL*遺伝子のmRNA発現を指標とし、珪藻類の光合成炭素固定活性を評価した。

結果、親潮域を除く全ての海域で、CO₂の増加に伴いハプト藻類の指標色素である19'-ヘキサノイロキシフコキサンチンの増加率の低下、およびハプト藻類に属する石灰化種である円石藻類の細胞数減少が観察された。一方、北太平洋亜寒帯域を除く海域で、CO₂の増加に伴い珪藻類指標色素フコキサンチンの増加率が低下した。さらに、親潮域とベーリング海では、高いCO₂条件下で珪藻類の*rbcL*転写率が減少したことから、現場の珪藻類がCO₂濃度の増加に応じて*rbcL*のmRNA発現を下方制御した可能性が示された。珪藻類は海洋における生物ポンプの主要な駆動者であることから、本研究で観察された珪藻類の現存量および光合成活性の低下は、大気CO₂の増加に対して正のフィードバックをもたらす可能性がある。一方、円石藻類の減少は石灰化過程で生じる海水中的アルカリ度の低下やCO₂の排出を減少させるため、大気CO₂の増加に対して負のフィードバックとして働く可能性がある。本研究から、海水中的CO₂濃度増加は天然植物プランクトン群集に対し、群集構造や光合成活性を変化させる可能性が示されたが、その影響の規模と性質は海域により異なっていた。一方で、鉄濃度の増加は、調査を行った全ての海域において、珪藻類を主体とした植物プランクトンの増殖および光合成活性を促進した。このことから、今後HNLC海域への鉄供給量が増加すれば、同海域における基礎生産の増加が見込まれ、大気CO₂濃度の増加に対して、負のフィードバックが期待される。

本研究から得られた知見は、今後、気候変動に対する将来予測モデルの構築や政策決定を行う上で重要であると考えられる。しかしながら、遺伝子転写応答の生理メカニズムや海域特異性の解釈は未だ理解が乏しいことから、室内実験による生理応答の検証や捕食効果を含めた生態的影響の評価など、更なる知見の蓄積が求められる。

学位論文審査の要旨

主査	准教授	鈴木	光次
副査	教授	田中	俊逸
副査	教授	吉川	久幸
副査	准教授	沖野	龍文
副査	助教	藏崎	正明
副査	主任研究員	芳村	毅（一般財団法人電力中央研究所 環境科学研究所）

学位論文題名

Effects of CO₂ and iron availability on the community composition and photosynthetic physiology of natural phytoplankton

（CO₂と鉄の利用可能性が天然植物プランクトンの群集構造および
光合成生理機能に与える影響）

植物プランクトンは、海洋における主要な基礎生産者であり、海洋の生態系や炭素循環の起点となっている。このため、植物プランクトンの基礎生産を支配する因子を同定し、その影響を評価することは、海洋の炭素循環過程を理解する上で極めて重要である。現在、人間活動によって大気中に放出された二酸化炭素（CO₂）の約30%は海洋により取り込まれ、海水中のpHを低下させている。この現象は海洋酸性化と呼ばれており、その進行は、海洋植物プランクトンの群集構造や生理活性に影響を与え、基礎生産を変化させる可能性がある。このため、将来的な気候変動に対する海洋生態系への影響を評価する上で、海水中のCO₂増加に対する植物プランクトン群集への影響を評価することは喫緊の課題の一つである。しかしながら、現場植物プランクトン群集を対象に、CO₂影響の評価を実施した研究は未だ非常に限られている。このため、申請者は、海洋の二酸化炭素吸収域として重要な高緯度外洋域を研究対象として選び、今後予測されるCO₂濃度の増加に対する天然植物プランクトン群集の応答を評価することを試みた。また、近年、高緯度外洋域に生息する植物プランクトンの増殖が海水中の低い鉄利用度により制限されていることが指摘されているが、今後、地球温暖化に伴う水柱の成層化の強化や陸域からのダスト供給増加により、これらの海域では海水中の鉄濃度が変化する可能性がある。このため、申請者は、植物プランクトン群集のCO₂応答のみならず、鉄添加応答についても調査した。

現場植物プランクトン群集を用いた船上CO₂添加培養実験は、北太平洋亜寒帯循環域および親潮域、ベーリング海、南大洋で実施した。親潮域を除くこれら海域では、植物プランクトンの海水中の鉄利用度が極めて低いことが知られている。植物プランクトンの群集組成の評価には、主に高速液体クロマトグラフィー（HPLC）による植物プランクトン色素分析とそのデータを用いた多変量解析により行った。さらに、申請者は、海洋基礎生産の約40%を

担う珪藻類に着目し、光合成カルビン・ベンソン回路において、CO₂固定を行う酵素 RubisCOの大サブユニットをコードする珪藻*rbcL*遺伝子の転写量を指標に、珪藻類の光合成炭素固定活性を評価した。

これら船上培養実験の結果、親潮域を除く全ての海域において、海水中のCO₂濃度の増加に伴い、ハプト藻類の現存量指標である19'-ヘキサノイロキシフコキサンチン濃度の相対的な低下が確認された。また、顕微鏡観察結果から、ハプト藻類の内、炭酸塩骨格を持つ円石藻類の細胞数の減少が見られた。一方、北太平洋亜寒帯循環域を除く全ての海域で、海水中のCO₂濃度の増加に伴い、珪藻類の現存量指標であるフコキサンチンの濃度の相対的な低下が確認された。また、珪藻*rbcL*遺伝子のコピー数を評価した親潮域、ベーリング海、南大洋の培養実験において、フコキサンチン濃度と珪藻*rbcL*遺伝子コピー数との間に有意な相関関係が見られたことから、珪藻*rbcL*遺伝子コピー数も珪藻現存量の指標になり得ることを発見した。さらに申請者は、親潮域とベーリング海では、高いCO₂濃度下において、珪藻*rbcL*遺伝子の転写率が低下したことから、現場の珪藻類が、CO₂濃度の増加に応じて、その遺伝子発現を下方制御していたことを明らかにした。上記で観察された珪藻類の現存量および光合成活性の低下は、大気CO₂の増加に対して正のフィードバックをもたらす可能性があるのに対し、円石藻類の減少は石灰化過程で生じる海水中のアルカリ度の低下やCO₂の排出を減少させるため、大気CO₂の増加に対して負のフィードバックとして働く可能性がある。本研究結果から、海水中のCO₂濃度増加は植物プランクトンの群集構造や光合成活性を変化させることが示唆されたが、そのCO₂影響の規模は海域により異なることが判明した。興味深いことに、海水中の鉄濃度を増加させた全ての実験において、珪藻類を主体とした植物プランクトンの群集の増殖および光合成活性が促進した。この結果は、今後、調査海域への鉄供給量が増加した場合、同海域における基礎生産の増加が見込まれ、大気CO₂濃度の増加に対して、負のフィードバックが期待されると考えられた。

上記の研究成果は大変貴重なものであり、申請者は、在学中、第2回北海道大学サステナビリティ学生研究ポスターコンテストにおいて、北海道大学総長賞（最優秀賞）を獲得するなど、多くの受賞をした。

審査委員一同は、これらの成果を高く評価し、また研究者として誠実かつ熱心であり、大学院博士課程における研鑽や修得単位などもあわせ、申請者が博士（環境科学）の学位を受けるのに十分な資格を有するものと判定した。