

課題名	D-0803 海洋酸性化の実態把握と微生物構造・機能への影響評価に関する研究		
課題代表者名	濱 健夫（筑波大学 生命環境科学研究科 持続環境学専攻 水圏生態学研究室）		
研究期間	平成20－22年度	合計予算額	123,602千円（うち22年度41,270千円） 上記の22年度予算額には、間接経費8,777千円を含む
研究体制	<p>研究体制</p> <p>(1) 太平洋における海洋pHの高精度各層観測による酸性化の実測（国土交通省気象研究所）</p> <p>(2) 海洋炭酸系データの統合に基づく海洋酸性化の実態評価（（財）日本水路協会海洋情報研究センター）</p> <p>(3) 海洋酸性化が微生物群集構造と機能に及ぼす影響（筑波大学）</p>		
研究概要	<p>研究概要</p> <p>1. はじめに</p> <p>海洋は、地球温暖化を抑制する大きな役割を担っている。18世紀に起きた産業革命以後に人類が化石燃料の消費などによって排出した約300億トン炭素の二酸化炭素（CO₂）のうち、およそ半分は海洋が吸収したと推定されており、これによって海洋は大気CO₂濃度の上昇を約半分に抑制しているのである。ところが、海洋に吸収されたCO₂は炭酸として振舞い、弱アルカリ性の海水を酸性化させる性質を持っている。海洋表層では、pHが産業革命前に比べてすでに0.1ほど低下したと考えられ、今後、CO₂排出量がさらに増加すれば、その傾向に拍車のかかることは間違いないと言ってよい。</p> <p>近年の海洋物質循環モデルを使った計算によれば、南大洋では今世紀半ばにも、石灰質の殻を持つ翼足類などの生物が生息できなくなるなど、海洋酸性化の影響が顕在化すると予想されている。こうした研究成果によって、海洋酸性化は「もうひとつのCO₂問題」としてクローズアップされ、IPCC第4次評価報告書でも取り上げられた。ポスト京都議定書の作成作業などにおいても、地球温暖化抑制の観点からだけでなく、海洋の生態系保全と海洋生物資源の持続的利用の観点からも、国際的なCO₂排出抑制の目標値を検討すべきと認識されはじめている。しかし、海洋酸性化の定量的な予測は困難で、現在の海洋物質循環モデルでは、沿岸域を含むさまざまな海域で信頼性の高い将来予測を行うには至っていない。今後、長期のモニタリングによる酸性化実態の把握と、それらに基づく海洋物質循環モデルの改良を通じて、酸性化予測の信頼性向上を図ることが不可欠である。</p> <p>さらに、海洋酸性化の生態系への影響評価に関する調査・研究に至っては、未だ揺籃期にあって、酸性化の影響を強く受ける生物などについては、わずかな知見しか得られていない。今後、酸性化動向の予測結果をにらみながら、実験・観測・数値モデリングといったさまざまな手法を駆使し、個々の生物種への影響や生物群集の応答、さらに生物群集構造の変化を通じた生元素循環への影響とフィードバック効果についても予測してゆくことが急務となっている。</p> <p>2. 研究目的</p> <p>本課題では、日本近海を含む北太平洋を主な対象として、①酸性化の実態を10年ほどの観測期間で明らかにできる高精度のpH観測手法を開発しながら、②過去10年余りの観測で取得された高精度の海洋炭酸系データを解析して、海洋酸性化の状況を推定する。さらに③高解像度の海洋物質循環モデルの計算結果を実測結果と比較して検証し、モデルの改良を通じて酸性化予測の信頼性向上に資する。また、④pH調整微生物培養系を確立し、⑤沿岸域から採取した微生物群集を用いて①～③で予測される酸性化状況下における培養実験を行い、群集構造や生元素循環の変化を評価するほか、⑥酸性化影響が強く危惧される円石藻を対象に、その代謝機構を詳しく調べ、酸性化の影響を生理レベルで考察する。これらの成果を集約することにより、国際的なCO₂排出削減に向けた政策立案を支援する。</p> <p><u>サブテーマ(1)</u>：進歩の著しい光学技術を応用して、高精度(± 0.001)のpH測定装置を開発する。これを使用して日本近海を含む太平洋でpH観測を行い、そのデータを過去5年間に取得した西部北太平洋のデータと比較・統合し、今後の酸性化動向を評価するための基準とする。</p> <p><u>サブテーマ(2)</u>：北太平洋海洋科学機関の炭素気候分会（PICES CC-S）や米国の二酸化炭素情報解析センター（CDIAC）などとの連携を通じて、内外の研究者と緊密に協力し、太平洋広域における海洋内部の炭酸系データを収集する。データの品質を評価した後にそれらを統合してデータベースを作成し、これに基づいて様々な海域と水深における最近約15年間の酸性化動向を評価する。</p> <p><u>サブテーマ(3)</u>：海洋微生物群集の構造と生元素循環に対する海洋酸性化の影響を評価するため、</p>		

CO₂濃度を調整した空気を導入することによりpHを制御できる培養系を確立し、沿岸微生物群集を用いた酸性化影響の実験的な解析を行う。また、円石藻の石灰化や光合成速度などの酸性化影響について、単独培養系を用いた実験を行う。これらにより、海洋酸性化が海洋微生物群集に与える影響について評価するとともに、生元素循環の変化を通じた地球環境へのフィードバック効果を考察する。

3. 研究の方法

(1) 太平洋における海洋pHの高精度各層観測による酸性化の実測

先行研究で10年前に気象研究所が開発した自動pH測定装置をベースに、近年の新しい光学技術などを導入して、高精度・高効率のpH測定装置を設計し、製作した。測定には、海水試料に比色指示薬m-クレゾールパープルを添加し、海水のpHに応じて変化する比色指示薬の可視領域の吸収スペクトルを測定する分光光度法を応用し、CCDイメージングセンサーによる小型・高感度・高速測定の分光光度計を利用すると共に、光ファイバーを利用した長光路・低体積の分光光度測定セルを組み込むことで、小型化と高感度化を実現した。配管系及び光学系の改良を重ねた結果、陸上実験室での性能試験において、同一海水試料のpHとして繰り返し精度 ± 0.001 以内を達成し、観測船に搭載した洋上試験では、 ± 0.002 の高い繰り返し精度で、海洋表層から深層のpHを観測することに成功した。

過去の海洋酸性化傾向の解析については、気象庁及び気象研究所が北太平洋西部において長期にわたって取得・蓄積してきた海水CO₂分圧などの海洋炭酸系データを利用してpHの長期トレンドを推定することに成功した。より広域の北太平洋、南大洋については、サブテーマ(2)と連携して収集・統合したCO₂データセットを解析して、pHの高精度観測が実施されていない期間の海洋酸性化の進行状況を調査した。また、これらの解析結果に基づいて、将来の酸性化の見通しについて検討を行った。

過去の炭酸系観測データに基づいたpH時系列の見積りは、2つの方法により行った。1990年代前半から実施されたWOCE観測では、頻度は少ないが、北太平洋の全域をカバーする温度、塩分、全炭酸濃度、および全アルカリ度の4要素の観測データが得られている。これらの観測値から Lueker et al. (2000) の平衡定数を用いてDOE (1994) の方法により、pHを算出した。また、ハワイ諸島沖の時系列観測点 (HOT; 22.8°N, 158°W) においても、全炭酸と全アルカリ度が対になった観測時系列が取得されていることから、これらに基づいてpHを計算した。

一方、観測船や篤志船による表面海水中CO₂分圧の観測は、近年観測範囲が広がり、年間の観測頻度の高い海域も多くなってきた。しかし、全炭酸や全アルカリ度と組み合わせて測定されることが少なく、こうしたデータセットだけでは、直接pHの見積りに適用できない。そこで、Lee et al. (2006) による経験的手法を用いて、温度、塩分、経度から全アルカリ度を見積り、これとCO₂分圧観測値から上述の方法により、pHを算出した。

(2) 海洋炭酸系データの統合に基づく海洋酸性化の実態評価

太平洋における海洋酸性化の実態を評価するために、1990年以降に実施された高精度な海洋炭酸系(全炭酸、全アルカリ度、pHなど)および関連物質の測定データを収集し整理した。一次品質管理によってこれらに含まれる異常もしくは測定不良と判定されたデータにフラグを付加して高品質化を図るとともに解析対象から除外し、さらに二次品質管理においては、クロスオーバー解析によって測定海域が隣接する航海間のバイアスを測定項目ごとに計算し、これらを基にインバース法によって航海の測定項目毎に補正值を求めて検証し、値を確定した。この補正值を適用したデータセットから、北太平洋における海洋酸性化の実態を評価した。

(3) 海洋酸性化が微生物群集構造と機能に及ぼす影響

海洋酸性化が微生物に対する影響を評価するため、沿岸微生物自然群集および、酸性化に対する鍵となると予想されるハプト藻の培養種を用いた実験的解析を行った。沿岸自然群集を用いた培養実験は、静岡県下田市の筑波大学臨海実験センターにおいて5回の実験を行った。沿岸から採取した試水を、100 μ mのメッシュを通して大型動物プランクトンを除いた後、500L容の亚克力製培養器に移した。培養器は全体で6基準備し、3種類のpCO₂ (400ppm (大気のみ)、800ppmおよび1200ppm)の空気を、8-40時間導入し、海水のpCO₂およびpHを調整した。調整後、栄養塩を添加し培養を開始し、15日-26日間に渡り試水を採取し、植物プランクトン群集および有機物生産量等に関する測定を実施した。植物プランクトン群集に関する解析では、フローサイトメトリー、植物色素および顕

微鏡観察を実施し、有機物生産に関しては、懸濁態有機炭素・窒素並びに、安定同位体トレーサー法を適用した。この培養実験により、酸性化により増殖が阻害されたハプト藻 *Chrysochromulina* については、培養種を用いて増殖に対するpHの影響を評価した。また、円石藻 *Emiliania huxleyi* の培養種を用いた実験においては、pH8.2~7.2の条件下で培養した細胞に¹⁴Cを添加し、光合成による取り込み実験を行った。光合成産物の合成速度を¹⁴C放射活性を用いたトレーサー実験から算出した。また、Fluorcam(PSI社)を使用してクロロフィル蛍光を測定し、Fv/Fm、 ϕ PSII((Fm-F)/Fm)の各パラメーターから *E. huxleyi* の光合成光化学系に与える酸性化の影響について解析した。さらに、⁴⁵CaCl₂によるトレーサー実験から円石藻 *Emiliania huxleyi* における石灰化(ココリス形成)能力を定量的に評価した。

4. 結果及び考察

(1) 太平洋における海洋pHの高精度各層観測による酸性化の実測

陸上実験室において製作・改良したpH測定装置を観測船に搭載して2度にわたる船上観測を行い、性能試験を行うと共に、海洋表層から深層のpHを観測することに成功した。平成21年度は、本装置を気象庁観測船啓風丸のKS09-10航海に試験的に搭載し、四国沖と本州沖で海面から水深2000 mまでの24層のpH各層観測を行った。船上で行った標準海水のpH分析では、高い繰り返し精度(7.9682 ± 0.0005; n=21)の分析値が得られ、黒潮域をはさむ東経137度の北緯25~30度などの海域の海洋各層で、高い精度のpHデータを得ることができた。

平成22年度には、気象庁観測船凌風丸RF10-5航海において、本州南方の東経137度線の海洋表面から海底までのpHの高密度観測を行った。53観測点から採取した1971本のpHサンプルを船上で測定し、同一海水サンプルの繰り返し精度はおおよそ±0.002であった。また、観測期間中の標準認証参照物質の分析結果は、その全炭酸濃度と全アルカリ度濃度の認証値からの見積ったpH値と±0.003以内で一致した。本高密度観測の航海はおおよそ2ヶ月にわたって行われたが、この間、装置は大きなトラブルもなく順調に作動し、長期の航海観測に耐えうる性能があることが示された。

2010年の観測結果を、1994年に行われた全炭酸等の観測結果から再現したpH分布と比較して、この間のpHの変化について評価した(図1)。人為起源CO₂の吸収によるpHの低下は16年間で0.02-0.04程度と見積られ、西部北太平洋においても酸性化が確実に進行していることが観測から明らかとなった。

過去の炭酸系観測データを利用した海洋酸性化傾向の調査として、北太平洋西部については、東経137度線における気象庁の時系列観測データを解析して、高精度のpH観測が実施されていない期間を含む、1983年から2007年までの表面水のpHの経年変動を見積り、日本周辺の亜熱帯北部から赤道域にわたる海洋酸性化の進行状況に関して取りまとめた。東経137度の各緯度における表面水のpHは、夏季・冬季ともに、すべての緯度で主にCO₂吸収による有意な長期低下傾向を示した(図2)。pHの低下速度は、夏季(-0.0019 ~ -0.0008 yr⁻¹; 平均, -0.0013 ± 0.0003 yr⁻¹) に比べて冬季(-0.0021 ~ -0.0015 yr⁻¹; 平均, -0.0018 ± 0.0002 yr⁻¹) に大きな傾向を

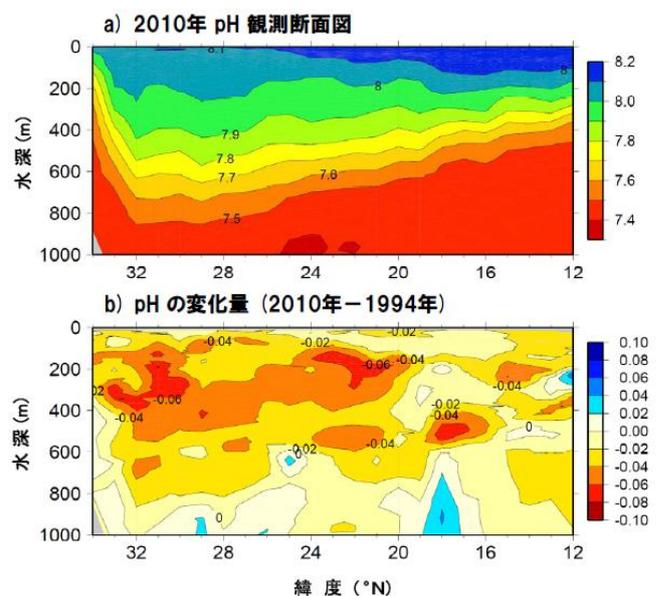


図1 東経137度におけるpH観測結果(2010年7-8月)

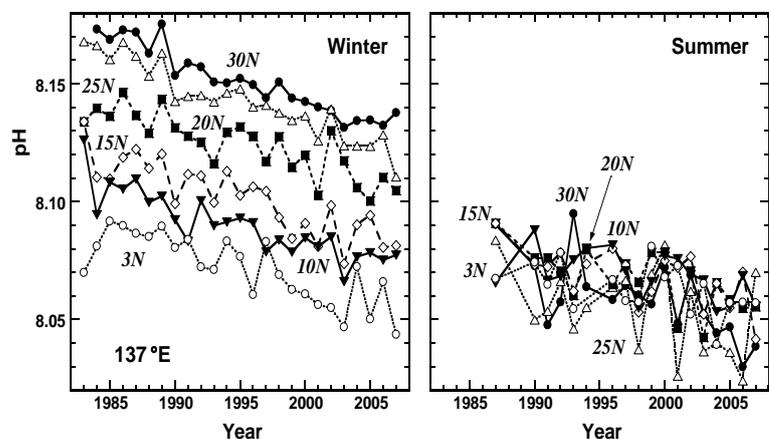


図2 東経137度の各緯度で見積もった表面水中のpHの経年変動(左側が冬季、右側が夏季の解析結果)

示した。その原因は、水温の変化速度の違いによると考えられた。冬季の亜熱帯南部では、統計的に有意ではないものの、水温の上昇が相対的に速く、その熱力学的効果のためにpHの低下を13～44%も加速させている。一方、夏季には、水温の低下傾向がpHの低下傾向を減速させた海域も見られた。

北太平洋亜熱帯域の中央部・東部については、サブテーマ(2)のCO₂データ統合活動の中で収集した炭酸系観測データを活用して、各海域のpH時系列を推定し、亜熱帯の広域において過去10年から20年間にわたるpHの長期的な低下傾向を検出した。すなわち、海洋酸性化が海盆規模で進行している実態を把握することができた。さらに、北太平洋各海域の海洋CO₂分圧の増加速度が大気と同程度であり、これに伴う炭酸系の変化がpH低下速度を規定していることから、海洋酸性化が主に大気CO₂の吸収に起因することや、海洋表層の温暖化が酸性化を加速させている可能性を示すことができた。

人為起源CO₂の蓄積に伴って起きる酸性化が最も早く進む海域の1つとして注目されている南大洋についても、統合した観測データを活用して、観測頻度が高い西太平洋セクター(東経140～160度)におけるpH時系列を推定し、その長期的変化傾向について調査した。南大洋亜熱帯から極域にわたる広範囲において、海水中pHの0.001～0.002 yr⁻¹の低下傾向が見出された。その進行の状況が海域によって異なり、特に、季節海氷域に近い南大洋南部(南極域)で海水中pHの低下速度が大きいことがわかった。その原因として、当該域における風速が強まって、下層からの全炭酸の供給量が増加している可能性が示唆された。

また、先行研究観測の1969年と1970年に取得された炭酸系観測データを解析してpHの分布を推定し、1983年以降のpHトレンドとの比較を行った。1969年と1970年のCO₂分圧の観測データから推定したpHは、多くの緯度で1983年以降のトレンドより低めの値となっており、1970～1983年の低下速度が小さかった可能性を示唆した。さらに、これらの調査結果を活用して、今後のCO₂排出シナリオに基づいた海洋酸性化の見通しについても解析することができた。各年代ごとの解析結果は表1のようにまとめられ、冬季の北太平洋西部亜熱帯域における表面海水中のpHの低下傾向が長期的に加速してきている状況が明らかとなった。

表1. 冬季の北太平洋西部亜熱帯域(9～30°N)における表面海水中のpHトレンドの経時変化

トレンド	1969年～1983年	1983年～2007年	2040年～2060年
現場水温でのpH	-0.0006 ± 0.0006 yr ⁻¹	-0.0018 ± 0.0002 yr ⁻¹	—
水温の寄与を除いた 25°CでのpH	-0.0009 ± 0.0005 yr ⁻¹	-0.0015 ± 0.0003 yr ⁻¹	-0.0026 ± 0.0005 yr ⁻¹

(2) 海洋炭酸系データの統合に基づく海洋酸性化の実態評価

昨年度に引き続き気象庁・気象研究所、海洋研究開発機構、カナダ海洋研究所から提供されたデータを追加もしくは更新して、最終的に259航海分のデータを統合・整理し、一時品質管理を実施した(図3)。これに米国二酸化炭素情報解析センター(CDIAC)と気候変動・予測可能性研究計画および炭素観測データオフィス(CCHDO)に登録されているWOCE/CLIBAR繰り返し観測航海データ、およびハワイ沖時系列観測地点(HOT)データを加えた計511航海のデータセットを構築し、二次品質管理を実施した：最初にクロスオーバー解析によって測

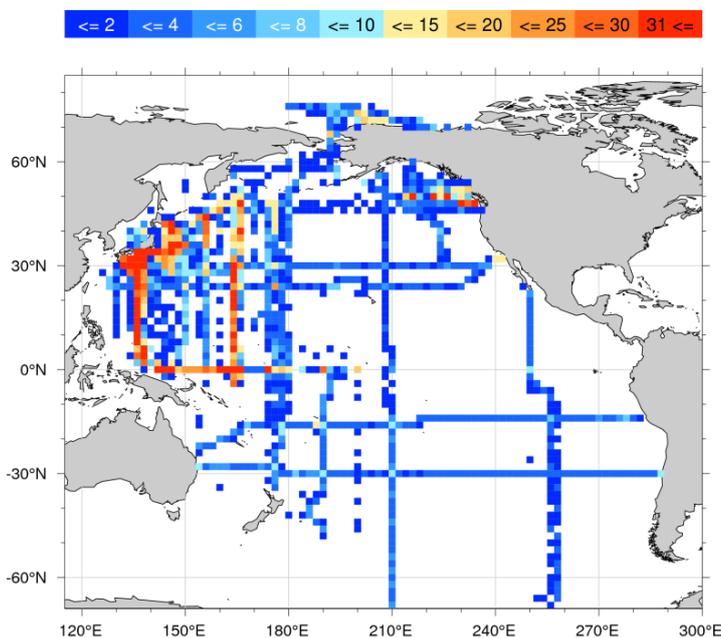


図3 緯度経度二度格子毎に集計した国内海洋調査研究機関およびカナダ海洋研究所による海洋炭酸系観測航海の測点分布図

定海域が隣接する航海間のオフセット値を計算し、次にインバース法によってこのオフセット値が最小となる航海毎の補正值を推定した。二次品質管理においては、一次品質管理において判明した測定不良または海況の季節変動が大きいデータや海域を二次品質管理の対象外とするなどして推定値を比較検証し、最終的に確定した値で補正したデータセットを構築し「PACIFICA」と命名した。

図4にPACIFICAの全炭酸(DIC)、全アルカリ度(ALK)からpHを計算し、北緯47度、東経175度周辺における1990～2008年の経年変化を示す。この海域では300～500m深付近にpHの極小層が形成され、深層に至るまで数年周期での変動が見られる。ポテンシャル密度に対するpHの経年変化をみると、 $\sigma_0=26.5\sim 27$ 間では数年周期の変動を伴った低下傾向が認められたことから、この海域では等密度面に沿って海洋酸性化が進行していると考えられる。一方、北緯30度、東経165度周辺では等密度面に沿ったpHの著しい低下傾向は見られず、西部北太平洋の海洋中における酸性化の進行は南北間で異なることが示唆される。

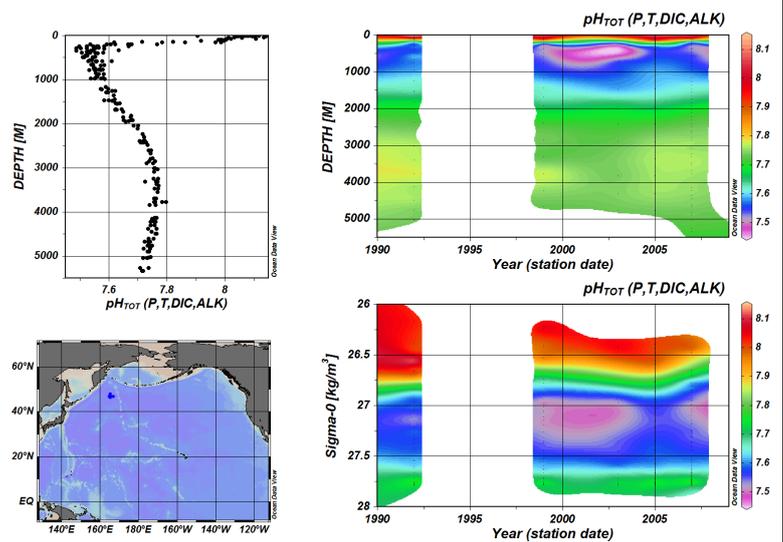


図4 北緯47度、東経175度におけるpHの鉛直分布図(左上)および深度に対する経年変化(右上)とポテンシャル密度に対する経年変化(右下)

(3) 海洋酸性化が微生物群集構造と機能に及ぼす影響

海洋に生息する微生物に対する海洋酸性化に対する影響を実験的に評価するため、沿岸水に含まれる自然微生物群集および、海洋酸性化への応答が注目される炭酸カルシウムの殻を有する円石藻 *Emiliania huxleyi* を用いた実験的解析を実施した。

沿岸微生物群集の海洋酸性化に対する応答を評価するための実験は、筑波大学下田臨海実験センターにおいて合計5回の実験を実施した。沿岸微生物群集を含む海水試料を500L容の大型培養器に入れ、現在(400ppm)、現在の2倍(800ppm)および3倍(1200ppm) CO_2 分圧(pCO_2)に設定したガスを通気することにより、海水試料の pCO_2 およびpHを調整した。その後、栄養塩を添加した後11-26日間にわたり培養を継続し、その間の植物プランクトン色素濃度、有機炭素、窒素濃度、栄養塩濃度等の追跡を行った。

従来の自然微生物群集を用いた実験では、数L程度の小型培養系を用いたものが主体であった。また、大型のメソコム(27 m^3)を用いた実験も実施されているが、 pCO_2 およびpHの調整が困難であり、実験中に両者の値が大きく変化することも報告されている。本研究においては、 CO_2 濃度の異なったガスを通気する事により、500Lの海水の pCO_2 およびpHを調整する手法を確立することができた。

5回の実験において、植物プランクトン現存量が低い場合には、 pCO_2 およびpHの変動は少なく、設定値近くの値を示した。しかしながら、植物プランクトンの現存量が増大した際には、 pCO_2 の低下が認められた(図5)。これは、光合成により CO_2 が植物プランクトンに

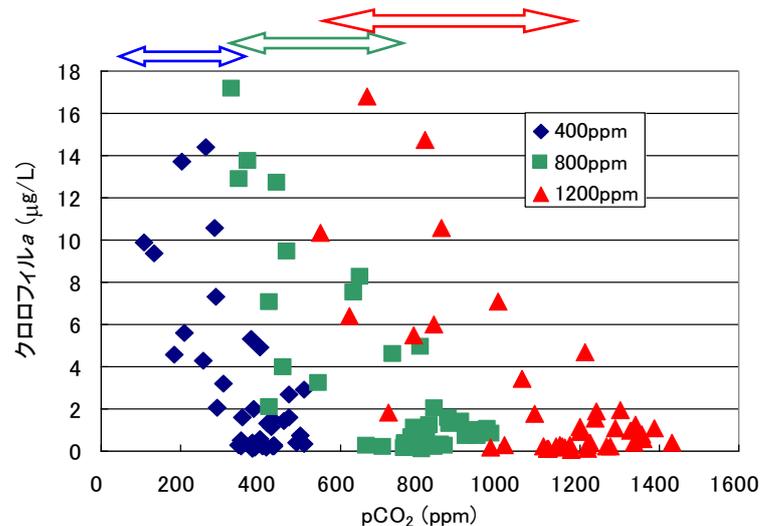


図5 5回の実験を通して得られた pCO_2 とクロロフィルa濃度との関係 矢印は設定値と最低値との差を示す

より取り込まれたことによる。400ppm培養器において認められた植物プランクトンの現存量が増加した際の $p\text{CO}_2$ と設定値の差(約300ppm)は、1200ppmの培養器の場合(約600ppm)と比較して、かなり少ないものであった。この結果は、400ppmの $p\text{CO}_2$ 条件下では、光合成の基質である CO_2 濃度の減少により、植物プランクトンの光合成が律速されている可能性を示唆する。このため、海水の $p\text{CO}_2$ の増加は、 CO_2 濃度の低下による光合成の律速を緩和し、植物プランクトンの豊富な沿岸域、湧昇域などでは、光合成量が増加する可能性も予測される。

一方、酸性化によりその増殖が阻害される種の存在も明確となった。ハプト藻の*Chrysochromulina* sp.は5回の実験中3回において出現が確認されたが、その全てにおいて $p\text{CO}_2$ の増加(pHの低下)が同種の現存量の低下を招いた。特に、実験2において”400”ppm培養器において同種の増殖が認められた際には、”800”および”1200”ppm培養器でのクロロフィル a 濃度は”400”ppmの10%程度であった。フローサイトメーターによる植物プランクトン群集を解析では、”400”ppmでは明確に認められた*C.sp.*に相当する細胞群が、”800”ppmでは減少し、さらに”1200”ppmタンクにおいてはわずかに認められるだけであった(図6)。*C.*属はハプト藻としては普遍的に分布するグループであり、近年の報告によると、*C.*属を中心としたハプト藻は、珪藻やシアノバクテリアを上回る重要性を有するとされる。このハプト藻の*C.*属が海洋酸性化に対して、高い感受性をもつことは、酸性化の進行が、植物プランクトン群集の変化等を通して、一次生産量や食物連鎖等に大きな影響を与える可能性を示唆する。また、*C.*属は沿岸域から外洋域まで広く分布していることから、海洋酸性化の海洋生態系への影響を評価するための「指標種」として用いることを提言する。

さらに、自然微生物群集を用いた実験的解析により、海洋酸性化は微生物のサイズ組成にも影響を与えることを見いだした。”1200”ppmに調整した培養系では、 $6\mu\text{m}$ 以下、特に $2\mu\text{m}$ 以下の植物プランクトンの細胞数が”400”ppmの培養系に比較して高く、逆に $6\mu\text{m}$ 以上の植物プランクトン細胞数は他の培養系に比較して低い傾向にあった。この結果は、酸性化の進行により、植物プランクトン群集が、よりサイズの小さい群集組成へシフトする可能性を示唆する。植物プランクトンのサイズの変化は、食物連鎖における栄養段階の数、食物連鎖を通じた有機物の無機化の割合、さらに生物ポンプによる炭素の鉛直的輸送量など、海洋物質循環の基本的過程に密接に関係していることから、今後の海洋酸性化の影響評価において、重要な課題となる。

円石藻は光合成の基質として培地中の溶存 CO_2 を消費する。そのような藻類(CO_2 userと称する)は、光合成の際に吸収した培地中の CO_2 分子の濃度低下を引き起こす。したがって、その不足を補うため $\text{HCO}_3^- \rightarrow \text{CO}_2 + \text{OH}^-$ の反応が生じ、培地のアルカリ化が引き起こされることは既に報告されている(Shiraiwa et al. Plant Cell Physiol. 34: 649-657, 1993)。本研究において、円石藻*Emiliania huxleyi*を用いた生理学的実験の結果、*E. huxleyi*には酸性化が進行した場合、それに対抗して周囲の環境のアルカリ化(alkalization)を引き起こす能力を向上させる機能、すなわち、円石藻細胞がpH変化に対する恒常性(補償)機能を有することを初めて明らかにした。実施した実験においては、塩酸添加によるpH低下を人工的に引き起こし、その際の海水培地のアルカリ化速度と細胞の光合成活性を独自に開発した測定装置で同時に測定した結果、現海水pH付近(pH8.2)では両者の比は約1.0であったが、pH7.2では1.26となり約3割のアルカリ化能の向上が確認された。

次に、円石藻*Emiliania huxleyi*の光合成活性がどのように酸性化に応答するかを精査した。海水に溶存する溶存無機炭素濃度(Dissolved Inorganic Carbon: DIC)条件で光合成には律速となっている条件、すなわち2 mM DIC、で実験を行ったところ、酸性化に伴う顕著な光合成酸素発生活性の増加が観察され、pH7.2では8.2に比べ5倍の高い活性を示した。次に、光合成に対する飽和濃度、すなわち10 mM DICで測定したところ、pH7.8を最大値とする山型のpH応答曲線が得られた。これらの結果は、海洋条件では円石藻の光合成は酸性化の影響により活性化されることを示すものである。しかし、光化学系は酸性化の影響を受けず、pH7.7では、 F_v/F_m 、 $(F_m' - F)/F_m'$ 共にほとんど減少が見られなかった。この結果から、今世紀末までに予想される0.3程度のpH低下では、*E. huxleyi*の光化学系にはほとんど影響が無いと結論付けた。

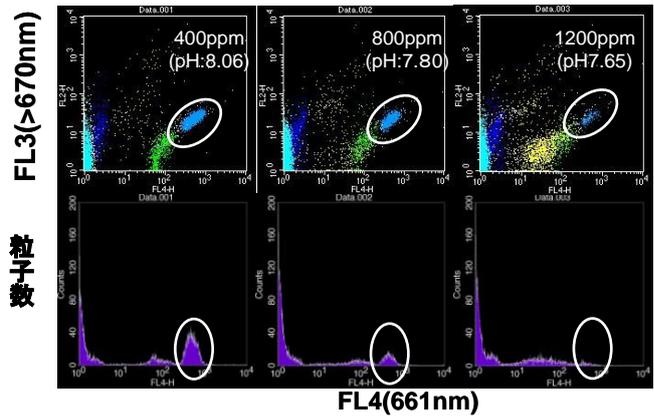


図6 実験2の15日目におけるフローサイトメーターによる植物プランクトン群集の解析。○内がハプト藻 *Chrysochromulina* sp.

海洋酸性化が円石藻 *E. huxleyi* の石灰化に与える影響について、これまでは全く異なる2つの見解が存在する。Riebesellら（2000）は *Nature* 誌において酸性化によって石灰化の抑制が起こると報告し、Iglesias-Rodriguezら（2008）は酸性化によるココリス体積の増大を *Science* 誌に発表している。Riebesellら（2000）は酸添加によって酸性化条件を再現しているのに対し、Iglesias-Rodriguezら（2008）は高濃度の CO_2 を通気することで低 pH の状態を作り出している。この状況において、我々はこのような酸性化影響の相反する結果がなぜ起こったのかを生理学的手法を用いて実験的に解明した。その成果は以下のとおりである。

前者の酸添加実験では炭酸平衡のずれによって増加した CO_2 が気相に放出される為全溶存無機炭素（DIC）量の減少が起こる。実測の結果、酸添加後 24h で pH7.7 条件では 80%、pH7.2 では実に 95% もの溶存無機炭素が失われていることが分かった。一方、 CO_2 通気による実験では DIC の低下は起こらず実験期間を通じてほぼ一定に保たれていた。炭酸化学種の一つである重炭酸イオンは *E. huxleyi* における石灰化の基質である（Sekino & Shiraiwa 1994）。Riebesellら（2000）の酸添加実験では同基質の欠乏が起こっているものと推測された。そこで、本研究において、様々な重炭酸イオン濃度下における細胞への $^{45}\text{CaCl}_2$ 吸収を調べる実験を行った。その結果、酸性化の如何に関わらずカルシウムイオンの取り込みが重炭酸イオンの濃度に依存していることを明らかにし、石灰化速度が海洋中の重炭酸イオンに規定されることを実験的に証明した。

我々の研究結果は、論争を引き起こした両者の実験結果が違ったことの原因が重炭酸イオン濃度の違いにあることを明確に示した。それと同時に、現在、懸念されている大気中の CO_2 増加による海洋酸性化では、*E. huxleyi* のココリス形成は影響を受けないことを実験的に証明した。

実際、本研究において、異なる CO_2 濃度（400、800、1200 ppm）の空気を通気して炭酸平衡状態を達成した条件下で *E. huxleyi* の培養を行った結果、 CO_2 濃度が高くなり pH の低下が起こっても増殖速度、ココリス形成能は変化せず、光合成活性は高 CO_2 条件ほど高いレベルを維持した。pH 7.7 であっても CO_2 濃度が高ければ石灰化が阻害されない理由は、石灰化の基質となる HCO_3^- が十分供給されたためであることを明らかにした。

海洋酸性化については今世紀末までに pH が 7.7 程度まで低下すると予測するレポートもある。その中で、本研究は、海洋において膨大なブルームを引き起こし、海洋における一次生産に貢献する円石藻 *E. huxleyi* の増殖、光合成、石灰化（ココリス形成）に対して、「大気中 CO_2 濃度上昇による海洋酸性化は大きなダメージを与える可能性は少ない」ことを実験的に証明したものである。

5. 本研究により得られた成果

（1）科学的意義

先行研究で取得された海水中 CO_2 分圧等の観測データの解析から、pH の高精度観測が実施されていない期間の北太平洋亜熱帯広域や南大洋における海洋酸性化の進行状況に関して取りまとめることができた。このように広域の酸性化を評価した研究はこれまで行われていなかったが、観測データに基づいて過去40年間の pH の長期的な低下傾向を評価し、それが主に大気 CO_2 の吸収に起因することや、1980年代以降 pH 低下が加速してきている状況を明らかにした。今後、本研究の成果が、各海域の海洋酸性化の評価におけるベンチマークになると考えられる。また、これらの知見を活用して、より現実的な海洋酸性化のシミュレーションが可能になると期待される。

本研究では、これまで機関毎あるいはプロジェクト毎にまとめられてきた海洋炭酸系データを、国内外を問わず一元的に統合し、かつ高度な品質管理処理を施したデータベースを構築した。このデータは本研究のみならず、全球レベルで統合されて海洋酸性化の実態評価ならびに海洋中における人為起源二酸化炭素の蓄積動向の把握などに供される。さらにこれらの現象の長期変動の解明および数値シミュレーションによる予測精度の向上のための貴重な資料として蓄積され継承されるものである。

海洋酸性化が海洋微生物群集に与える影響に関する実験的評価法は、まだ確立したとは言えない状況である。本研究では、サブテーマ（1）と（3）の密接な協力により、培養液の pCO_2 および pH の調整に必要な気体の通気量について検討し、実験に用いる海水試料容量の50倍程度が目安となることを明らかにした。酸性化の進行により、ハプト藻 *Chrysochromulina* 属など、特定の分類群の増殖が阻害的な影響を受けることを明らかにした。近年、*Chrysochromulina* 属は、海洋における一次生産者として非常に重要なグループであることが報告された。本研究で得られた結果から、海洋酸性化の進行は、海洋の微生物群集構造に対する影響を通して、一次生産量さらには、海洋生物による炭素隔離過程として注目される「生物ポンプ」および「微生物炭素ポンプ」の両過程にも影響を与える可能性を強く示唆する。

また、我々は本プロジェクトを通じて円石藻 *Emiliania huxleyi* の酸性化に対する応答のメカニズム

の解明に注力してきた。海洋酸性化研究は現在までの所、Iglesias-Rodriguezら（2008）やRiebessellら（2000）の例でも分かるように現象論に終始しているきらいがある。確かに海洋酸性化の影響を一般に警告する意味ではそのような研究も重要であるが、それだけでは海洋酸性化の真の理解に至ることは難しい。本研究で実施したような円石藻の生理に対する海洋酸性化影響のメカニズムの解明がより重要になることは確実である。本研究は海洋酸性化によって大きなダメージを受けると予測される石灰化生物の酸性化応答メカニズムの研究全体に重要な知見を提供するものであり、海洋生物学的に非常に大きな意義を持つものである。

（2）環境政策への貢献

光ファイバー及び小型・高性能の分光光度計を利用して、高効率・高精度のpH測定装置を製作することができた。国土交通省が実施する「今後の地球環境業務の重点施策」に基づいた観測業務の強化施策の一環として、本研究で開発した高精度pH測定装置が、平成21年度に気象庁海洋気象観測船に装備され、気象庁の観測業務において活用された。本研究の成果が認められ、現業観測による定期的な海洋酸性化の監視体制の構築に貢献することができた。

PICES CC-S（北太平洋海洋科学機関-炭素気候部会）の枠組みで進めているデータ統合活動により、太平洋における海盆規模での炭酸系の変動や大気からのCO₂吸収に伴う長期的な海洋酸性化の進行状況を評価するためのデータベース構築の基盤が整備され、生態系への影響評価等に大きく貢献することができる。本研究で構築したデータベースに基づいた、もしくは全球レベルで統合された後に実施される研究による成果はIPCC報告書に反映され、したがって二酸化炭素排出削減などの地球環境政策の推進に資するところが大きい。

海洋酸性化が海洋生態系に及ぼす影響を評価し、地球環境政策に反映させるためには、pHやpCO₂などの化学的パラメーターに加えて、生物学的なパラメーターの利用は非常に有意義である。本研究では、沿岸域から外洋域にかけて普遍的に見いだされるハプト藻*Chrysochromulina*属が、海洋酸性化に対して感受性が高いことを見いだした。このグループの分布を広域かつ長期的に監視することを、酸性化への影響を評価する基準の一つとすることを提唱する予定である。さらに、円石藻*Emiliana huxleyi*が海洋酸性化という事態に対して、一般に懸念されるような大きなダメージを受ける可能性は低いことを実験的に証明する事ができた。円石藻という海洋の一次生産に対して膨大な寄与がある植物プランクトンがもつ酸性化に対する抵抗性や酸性化抑制力を全地球規模で見積もることで、海洋酸性化モデルに生物学的影響という新たなファクターを加えることが可能となった。それによって酸性化予測の精度向上に大きく貢献できると考えられる。

6. 研究者略歴

課題代表者：濱 健夫

1952年生まれ、名古屋大学大学院理学研究科博士課程修了、理学博士、現在、筑波大学大学院生命環境科学研究科 教授

主要参画研究者

（1） 1）：緑川 貴

1953生まれ、名古屋大学大学院理学研究科博士課程前期修了、博士(理学)、現在、気象庁気象研究所地球化学研究部長

2）：石井雅男

1961生まれ、名古屋大学大学院理学研究科博士課程後期修了、博士(理学)、現在、気象庁気象研究所地球化学研究部第二研究室長

（2） 1）：鈴木 亨

1966年生まれ、東京水産大学大学院水産学研究科博士後期課程修了、博士(水産学)、現在、財団法人日本水路協会海洋情報研究センター研究開発部長

（3） 1）：濱 健夫

1952年生まれ、名古屋大学大学院理学研究科博士課程修了、理学博士、現在、筑波大学大学院生命環境科学研究科 教授

2）：井上 勲

1950年生まれ、筑波大学大学院博士課程生命科学研究科修了、理学博士、現在、筑波大

学大学院生命環境科学研究科、教授、学長補佐特命環境担当

3) : 白岩善博

1951年生まれ、東京大学大学院理学系研究科博士課程修了、理学博士、現在、筑波大学大学院生命環境科学研究科 研究科長、教授

7. 成果発表状況（本研究課題に係る論文発表状況。）

(1) 査読付き論文

- 1) Midorikawa, T., M. Ishii, S. Saito, D. Sasano, N. Kosugi, T. Motoi, H. Kamiya, A. Nakadate, K. Nemoto and H. Y. Inoue, 2010: *Tellus*, 62B, 649–659, DOI: 10.1111/j.1600-0889.2010.00474.x,. “Decreasing pH trend estimated from 25-yr time series of carbonate parameters in the western North Pacific”
- 2) Fukuda, S., I. Suzuki, T. Hama and Y. Shiraiwa, 2010: *J. Oceanogr.*, 67, 17-25. “Compensatory Response of the Unicellular-Calcifying Alga *Emiliania huxleyi* (Coccolithophoridales, Haptophyta) to Ocean Acidification”
- 3) Midorikawa, T., M. Ishii, D. Sasano, N. Kosugi, H. Sugimoto, N. Hiraishi, S. Masuda, T. Suzuki, T. R. Takamura and H.Y. Inoue, 2011: *Pap. Meteorol. Geophys.*, 62, 47-56. “Ocean acidification in the subtropical North Pacific estimated from accumulated carbonate data”
- 4) Ishii, M., N. Kosugi, D. Sasano, S. Saito, T. Midorikawa, and H. Y. Inoue, 2011: *J. Geophys. Res.*, 116, C06022, doi:10.1029/2010JC006831. “Ocean acidification off the south coast of Japan: A result from time-series observations of CO₂ parameters 1994 to 2008”