

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 4月 11日現在

機関番号：82641
 研究種目：若手研究（A）
 研究期間：2010～2012
 課題番号：22681004
 研究課題名（和文） 海水中のCO₂濃度の増加が植物プランクトンの増殖と有機物生産に与える影響の解明
 研究課題名（英文） Impact of elevated CO₂ on phytoplankton growth and organic matter production
 研究代表者
 芳村 毅（TAKESHI YOSHIMURA）
 一般財団法人電力中央研究所・環境科学研究所・主任研究員
 研究者番号：20371536

研究成果の概要（和文）：単離株を用いた室内培養実験と現場群集を用いた船上培養実験により、CO₂分圧の上昇が植物プランクトンの比増殖速度と元素組成比や有機物生産に与える影響を調査した。CO₂分圧の上昇に対する応答は種特異的であり、水温・光量の条件によっても変化することが明らかとなった。現場群集への影響は顕著ではないが、CO₂増加に対する明確なトレンドを示すケースがあった。CO₂分圧の上昇は実海域での植物プランクトンの動態を変化させる要因となり得ることがわかった。

研究成果の概要（英文）：Impacts of elevated CO₂ on phytoplankton growth and organic matter production were examined using isolates and in situ plankton communities. Responses to the CO₂ increase were species-specific and were altered in different temperature and light conditions. Although in situ plankton communities did not show major responses to the CO₂ increase, clear trends to the CO₂ increase were observed in some experiments. Future CO₂ increase in seawater can play a significant role on altering the dynamics of in situ phytoplankton communities and organic matters.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	8,500,000	2,550,000	11,050,000
2011年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2012年度	1,900,000	570,000	2,470,000
年度			
年度			
総計	12,900,000	3,870,000	16,770,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：環境学・環境動態解析

キーワード：環境変動，海洋酸性化，植物プランクトン

1. 研究開始当初の背景

大気 CO₂濃度の増加が表層海水中の CO₂分圧を増加させ、その結果として海水の pH を低下させる「海洋酸性化」現象が認識されつつある。産業革命以降の大気 CO₂濃度の増加に伴い、表面海水中の pH はすでに 0.1 低下しており、将来の大気 CO₂濃度の増加は更な

る pH の低下を引き起こす。この海洋酸性化が海洋生態系にどのような影響を与えるのかが強く懸念されている。近年、海洋酸性化に脆弱であると考えられている、サンゴなどの炭酸カルシウムの外骨格や殻を有する海洋生物を対象とした影響評価研究が世界中で実施され、成果が報告されつつある。一方、

海洋食物網の出発点として海洋生態系へエネルギーを供給する役割を担っているだけでなく、海洋へのCO₂吸収量を支配する植物プランクトンに対する影響評価の知見はまだまだ限られている。植物プランクトンの光合成、呼吸、石灰化といった増殖と密接に関連するプロセスは海水中の炭酸物質とのやり取りで成り立っているため、海洋酸性化は植物プランクトンの増殖過程を変化させ、その結果として地球システムに変化をもたらす可能性がある。

研究代表者は先行研究において、2006年夏季にオホーツク海のプランクトン群集を用いて行った実験で、CO₂分圧の増加とともに珪藻類の割合が減少し、同時にプランクトン群集が生産する有機炭素量も減少することを明らかにした。この結果は、植物プランクトングループ毎のCO₂分圧の変化に対する応答の違いを反映したものと考えられるが、現時点においてこれらの結果を解釈するための知見が欠如している。さらなる培養実験により、CO₂分圧の変化に対する植物プランクトンの応答を詳細に把握する必要がある。

2. 研究の目的

本研究は、室内および船上での培養実験により、植物プランクトンに対するCO₂分圧の増加の影響を解明し、実海域で将来起こりうる変化を把握することを目的とする。

(1) 単離培養株を用いた室内実験

種々の植物プランクトン単離培養株を用いた実験室内での海洋酸性化実験により、CO₂分圧の増加に対する植物プランクトンの応答の普遍化につなげるための基礎的データを取得する。植物プランクトンは珪藻類、ハプト藻類、緑藻類、藍藻類など多種類のグループに分類され、海洋生態系における役割が異なる。そこで、異なるグループの単離培養株を選定し、CO₂増加への応答を把握する。最初に、試験管サイズでの培養実験により、CO₂分圧変化に対する比増殖速度の変化を網羅的に明らかにする。次に、複数種を対象に、数リットルサイズでの培養実験を行い、有機炭素生産過程の変化を明らかにする。

(2) 現場群集を用いた船上実験

親潮海域で毎年春季に発生する植物プランクトンの大増殖イベント（春季ブルーム）に与えるCO₂増加の影響を明らかにするため、春季に親潮海域の現場海水を用いた船上での培養実験を行う。また、先行研究において、鉄制限海域である北太平洋亜寒帯外洋域で実施した船上実験で得られたサンプル分析およびデータ解析を行い、CO₂増加に対する鉄制限プランクトン群集の応答を把握する。

3. 研究の方法

(1) 単離培養株を用いた室内実験

①比増殖速度への影響

植物インキュベータを用いた試験管サイズでの実験系を構築し（図1）、単離株を用いた影響評価実験を実施した。蛍光光度計による細胞内クロロフィル蛍光の直接計測により比増殖速度を測定した。珪藻5種およびその他植物プランクトン6種の計11種の単離株を用いた。比較的広範囲のCO₂分圧への生物学的応答を把握するため、180–200,000 μatmのCO₂分圧での比増殖速度の変化を調査した。

②有機炭素生産過程への影響

恒温培養室において2-5リットル培地での珪藻5種を用いた培養実験を実施した（図1）。培養終了時にろ紙上に細胞を捕集し、クロロフィル *a* (Chl-*a*) および炭素、窒素、リン、ケイ素量を測定した。

③CO₂と鉄による複合影響

CO₂分圧および鉄濃度が珪藻の増殖に与える複合的な影響を把握するため、CO₂と鉄の両者を同時に制御する実験システムを構築した（図1）。本システムにより、珪藻 *Pseudo-nitzschia pseudodelicatissima* を用いた培養実験を実施した。比増殖速度を計測するとともに、細胞の有機炭素・窒素・リンを測定し、細胞の生元素組成比の変化を調査した。

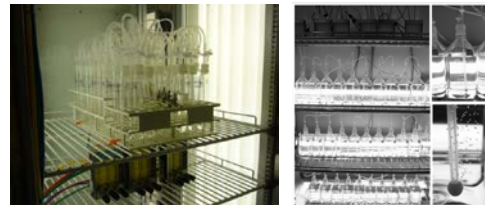


図1 ガラス試験管（左）およびリットル規模（右）での単離株の培養。

(2) 現場群集を用いた船上実験

①親潮域春季ブルームでの実験

海洋開発機構・淡青丸による親潮海域での研究航海（2011年5月、KT-11-7次航海）に参加し、春季ブルーム期の現場プランクトン群集に対するCO₂分圧増加の影響評価実験を実施した（図2）。ブルーム発生前の海水をボトルに採取し、船上においてCO₂分圧を調節しながら培養した。

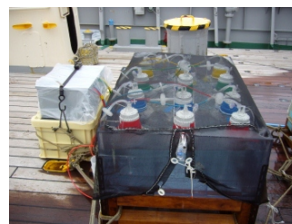


図2 現場プランクトン群集を用いた12リットルタンク×12本での船上培養実験。

②北太平洋亜寒帯域での実験

2007年から2009年にかけて北太平洋およびベーリング海で行った船上実験(図3)の試料を分析し、群集および有機物の挙動を解析した。これらの海域では植物プランクトンの増殖は鉄に制限されている。鉄制限を維持した実験に加えて、鉄添加により植物プランクトンの増殖を促進する実験を実施した。

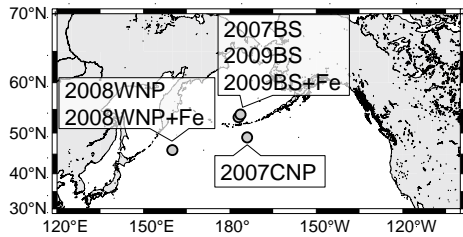


図3 影響評価実験を実施した海域。BS: ベーリング海, WNP: 西部北太平洋, CNP: 中央部北太平洋。

4. 研究成果

(1) 単離培養株を用いた室内実験

①比増殖速度への影響

CO₂増加に対する応答は種により異なった。全ての種について、750 μatm以下での増殖の変化は認められなかった。円石藻 *Gephyrocapsa oceanica* の増殖は1,000 μatmにおいて対照区(380 μatm)の約7割に低下する一方、緑藻 *Dunaliella tertiolecta* の増殖は200,000 μatmにおいても対照区の6割以上を維持した(図4)。また、*Thalassiosira weissflogii* や *Synechococcus* sp. など2,000 μatm以上で増殖が促進される種も認められた。これらの結果から、21世紀中に想定されるCO₂増加の範囲においては、植物プランクトンの比増殖速度の変化は小さいものと考えられた。

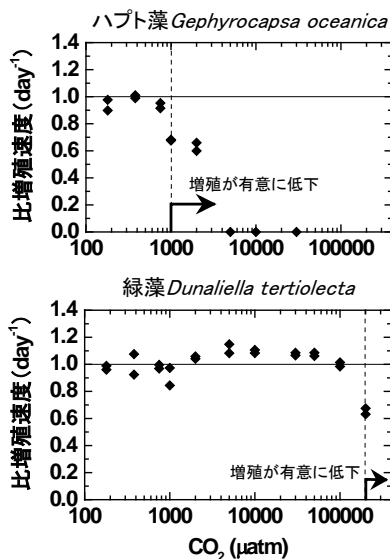


図4 CO₂分圧に対する比増殖速度(380 μatmでの比増殖速度に対する相対値)のプロット。

②有機炭素生産量への影響

180 μatmから800 μatmもしくは1000 μatmへのCO₂分圧の増加はおおむね(5種中4種)珪藻の比増殖速度を10%程度促進することが明らかとなった(図5)。この結果は①の実験で得られた、1000 μatm以下では比増殖速度は変化しないという結果と矛盾する。その理由として、二つの実験において水温および光量の条件が異なることが挙げられる。これは光量の強弱が植物プランクトンに与えるCO₂の影響を変化させるとするGao et al. (2012)の結果と整合するものである。

CO₂濃度の増加に伴う細胞の元素組成比の変化は種毎に異なった。炭素:窒素比は *T. weissflogii* においてのみ9%減少した(図5)。炭素:リンおよび窒素:リンは *T. weissflogii* では減少(24および17%)するのに対して(図5)、*P. pseudodelicatissima* では増加(44および45%)した。*Chaetoceros* sp. においても窒素:リン比が28%増加した。ケイ素:窒素比は *P. pseudodelicatissima* で減少傾向(24%)が見られた。これらの結果は、CO₂増加に対する珪藻細胞の元素組成比の応答は種特異性が高いことを示しており、応答の普遍化は難しいことが明らかとなった。

本実験結果からは、海洋酸性化に対する実環境の植物プランクトン群集の応答は群集の種組成によって異なることが予測される。将来のCO₂増加に伴う植物プランクトンや生元素の動態を予測するためには、該当海域の物理・化学環境の変化に伴う生物環境の変化を考慮した影響評価実験の結果を蓄積することが有効であると結論される。

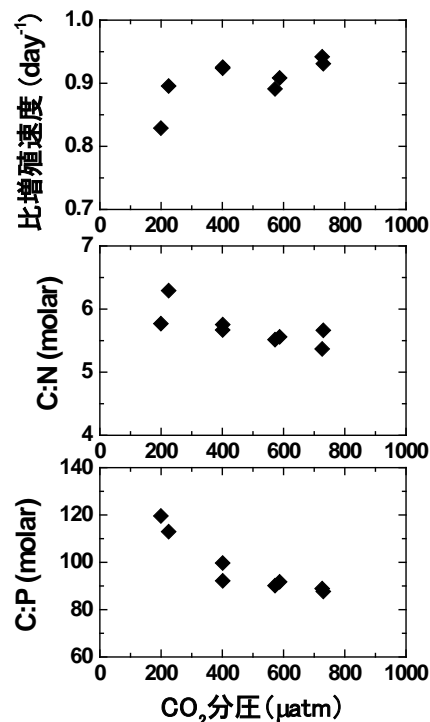


図5 *Thalassiosira weissflogii* の結果。

③CO₂と鉄による複合影響

細胞の C:N 比は鉄濃度の増加と共に減少, C:P 比は CO₂濃度の上昇に伴い増加, N:P 比および Si:N 比は CO₂と鉄濃度の両者の上昇により, それぞれ増加および減少することが明らかとなった (図 6)。細胞成分毎に CO₂ 依存, 鉄依存, および両者依存的に変化することから, 将来の CO₂ および鉄濃度が変化する環境下では生元素の物質循環が受ける影響は成分毎に異なることが明らかとなった。

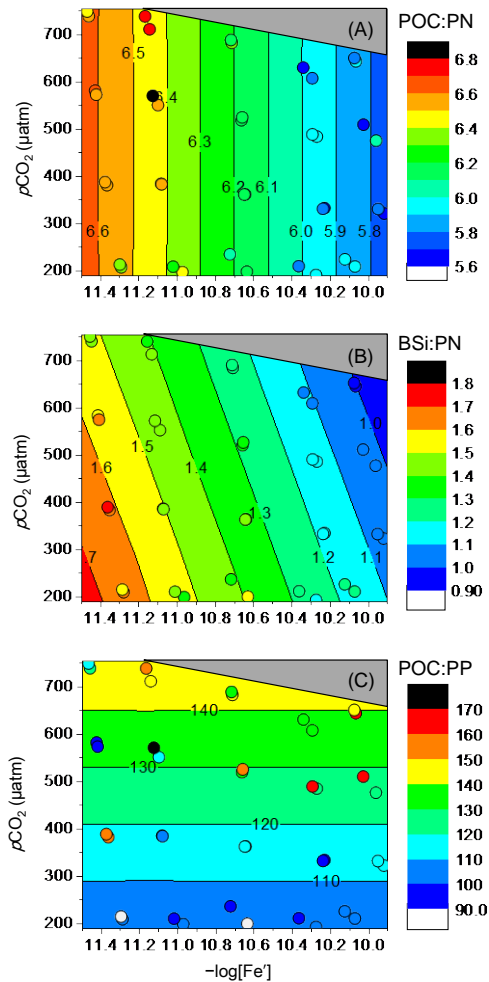


図 6 異なる溶存無機態の鉄濃度および CO₂ 分圧において培養された珪藻 *Pseudo-nitzschia pseudodelicatissima* の (A) 炭素:窒素, (B) 炭素:リンおよび (C) ケイ素:窒素の組成比。図中の○は CO₂ 分圧と鉄濃度の実測値における, それぞれの比の値を色で表し, コンターは重回帰分析の結果を表す。灰色のハッチは実験範囲外。

(2) 現場群集を用いた船上実験

①親潮域春季ブルームでの実験

震災による航海日数の削減および荒天による観測日数の低減のために, 植物プランクトンが大増殖するために十分な培養期間を確保することができなかった。植物プランク

トン生物量の増加がほとんど見られなかったことから (図 7), 植物プランクトンの増殖および有機炭素生成過程に対する CO₂ 分圧増加の影響を把握するに至らなかった。

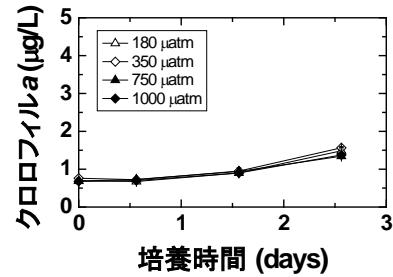


図 7 親潮海水の実験でのクロロフィル a 濃度の経時変化。

②北太平洋亜寒帯域での実験

CO₂ 増加は植物プランクトンの生理状態を変化させる可能性があることを明らかにした。いずれの実験においても CO₂ 分圧の上昇は植物プランクトン群集の増殖量や, サイズおよび主要分類群の組成に顕著な影響を与えなかった。プランクトン群集が生成する有機炭素の 70-90%は粒子態で構成され, いずれの実験においても, CO₂ 分圧の上昇はその比率を変化させず, 粒子態画分の炭素:窒素比も変化させなかった (図 8)。一方, ベーリング海の鉄制限実験ではクロロフィル a 当りの炭素量が CO₂ 増加に伴って減少した。この結果は CO₂ 増加に伴って植物プランクトンの鉄制限状況が改善されたことを示すと推測された。CO₂ 増加による pH 低下が鉄の溶解度を高めるため, 鉄の利用性が高まったと考えられる。本実験から, CO₂ 分圧はプランクトン群集による有機物生産過程を変化させる要因となる場合があることがわかり, より詳細なメカニズムの解明が必要である。

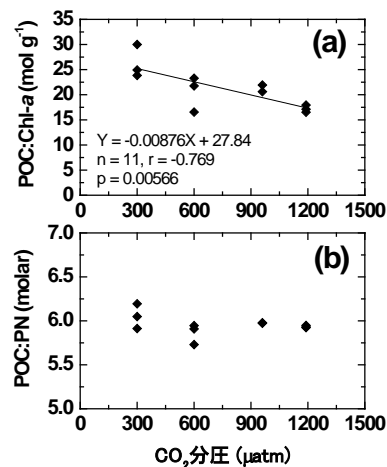


図 8 2007 年ベーリング海実験での CO₂ 分圧に対する (a) 炭素:クロロフィル a 比 (b) 粒子態有機物の炭素:窒素比の変化。

(3) まとめ

単離株を用いた培養実験により、CO₂分圧増加の影響は種特異性が高いことが明らかとなった。藻類グループ毎の明確な違いを見出すことはできなかった。また、水温および光量の条件が異なることにより同一種においても異なる影響が示されたことから、CO₂分圧は植物プランクトンの種々の生理過程に複雑な効果をもたらしていることが推測された。

単離株の結果を反映するように、現場プランクトン群集を用いた船上実験では、実験毎に異なる CO₂ 影響が認められた。ただし、CO₂ 分圧の増加が植物プランクトンの増殖量や有機物生産量を劇的に変化させることはなかった。鉄を添加し植物プランクトン量が大きく増加する環境下では CO₂ 影響は認められなかった一方、鉄制限下では CO₂ 分圧の増加が鉄の利用性を増加させ、植物プランクトンの生理状況が改善された実験例が認められた。

これらの実験から、実環境での植物プランクトンに対する CO₂ 分圧の増加の影響は海域や季節の違いにより変化することが推測された。将来の CO₂ 分圧の増加に対するプランクトン生態系の応答を予測するためには、水温、光量、群集組成などの環境変化を考慮した影響評価実験を重ね、蓄積された結果を活用することが望まれる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計6件)

- ① Yoshimura, T. (2013) Appropriate bottles for storing seawater samples for dissolved organic phosphorus (DOP) analysis: A step towards the development of DOP reference materials. *Limnology and Oceanography: Methods* 11: 239-246. 査読有
- ② Sugie, K., Yoshimura, T. (2013) Effects of pCO₂ and iron on the elemental composition and cell geometry of the marine diatom *Pseudo-nitzschia pseudodelicatissima* (Bacillariophyceae). *Journal of Phycology*. doi:10.1111/jpy.12054. 査読有
- ③ Endo, H., Yoshimura, T., Kataoka, T., Suzuki, K. (2013) Effects of CO₂ and iron availability on phytoplankton and eubacterial community compositions in the northwest

subarctic Pacific. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 439:160-175. 査読有.

doi:10.1016/j.jembe.2012.11.003

- ④ 杉江恒二, 芳村毅 (2011) 海洋酸性化が植物プランクトンの動態および物質循環に及ぼす影響. *海の研究* 20:101-148. 査読有.

<http://ci.nii.ac.jp/naid/110008750605>

- ⑤ 杉江恒二, 遠藤寿, 鈴木光次, 芳村毅 (2011) pCO₂ と鉄濃度の違いが夏季ベーリング海の植物プランクトン群集による Si と N の利用比に与える影響. *月刊海洋* 43:735-741. 査読無

- ⑥ Yoshimura, T., Nishioka, J., Suzuki, K., Hattori, H., Kiyosawa, H., Watanabe, Y. W. (2010) Impacts of elevated CO₂ on organic carbon dynamics in nutrient depleted Okhotsk Sea surface waters. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 395:191-198. doi:10.1016/j.jembe.2010.09.001. 査読有

[学会発表] (計19件)

- ① Yoshimura, T., Sugie, K., Endo, H., Suzuki, K. (2012) Impacts of ocean acidification on iron-deficient phytoplankton assemblages and organic matter production in open subarctic waters. The Third International Symposium on the Ocean in a High-CO₂ World, Monterey, California, USA, September
- ② 芳村毅, 杉江恒二, 津旨大輔 (2012) 珪藻類の増殖に対する CO₂ 分圧増加の影響の評価. 日本海洋学会秋季大会, 清水, 静岡, 9月
- ③ Yoshimura, T., Sugie, K., Endo, H., Suzuki, K. (2012) Impacts of ocean acidification on iron-deficient phytoplankton assemblages and organic matter production in open subarctic waters. 2012 Aquatic Sciences Meeting, Otsu, Shiga, Japan, July
- ④ Yoshimura, T., Suzuki, K., Nishioka, J. (2011) Impacts of ocean acidification on the plankton community production and stoichiometry of organic matter. Side Event of the IPCC Workshop, Okinawa, Japan, January

[その他]

ホームページ等

http://www8.plala.or.jp/tak_yoshi/percom/percom.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

芳村 毅 (TAKESHI YOSHIMURA)

一般財団法人電力中央研究所・環境科学研
究所・主任研究員

研究者番号：20371536