

## 海洋酸性化は単細胞藻類の運動を低下させる

### 研究成果のポイント

1. 海洋酸性化により、単細胞緑藻類<sup>※1)</sup>の運動性や光応答性の著しい低下が見られました。
2. このような運動性の低下は、鞭毛タンパク質の遺伝子発現の低下が原因であることがわかりました。
3. 鞭毛や繊毛<sup>※2)</sup>は、緑藻類のみならず、ヒトを含め多くの生物の活動に重要な構造であることから、海洋酸性化が及ぼす幅広い影響が予測されます。

国立大学法人筑波大学 海外教育研究ユニット招致プログラムのJason Hall-Spencer教授と、同生命環境系 稲葉一男教授(下田臨海実験センター)は、中国水産科学研究院、国立青島海洋科学技術研究所の叶乃好博士、廈門大学海洋地球学院の高光博士の研究チーム、およびモナシュ大学、タスマニア大学との研究チームとの国際共同研究により、海洋生態系に重要な単細胞藻類の運動が海洋酸性化で低下することを明らかにしました。

産業革命以降の二酸化炭素排出増加により、海水のpHが低下する海洋酸性化が、海洋生物の生理生態に深刻な影響を及ぼすことが知られています。これは、地球規模の問題として、国連の掲げる「持続可能な開発目標(SDGs)」でも取り上げられており、世界各国が取り組んでいる研究テーマの一つとなっています。今回、本研究グループは、海洋、汽水、淡水に生息する単細胞緑藻類を、異なる二酸化炭素濃度の条件下で実験室環境、および区画化したフィールドで飼育し、酸性化が及ぼす影響を長期間にわたって調べた結果、運動に必要な鞭毛に異常が生じ、光応答や行動が正常に行えなくなることを証明しました。酸性化により影響を受ける遺伝子を解析したところ、鞭毛の形成や運動調節に関わる遺伝子の発現が著しく低下し、鞭毛を脱離させる遺伝子の発現が有意に増加することがわかりました。単細胞緑藻類は、海洋生態においてエネルギー生産や食物網に重要な役割を果たしています。また、緑藻類の鞭毛は、ヒトの精子鞭毛や、脳、気管などに生えている繊毛とほとんど同じ構造をしています。今回の研究成果は、海洋酸性化が海洋生態に深刻な影響を及ぼすことを示したとともに、ヒトをはじめ、多くの生物の繊毛運動の低下にもつながる可能性を示唆しており、海洋酸性化に起因する新たな問題を提起しました。

本研究は、英国科学誌「Nature Climate Change」に 2020年6月1日付けで公開されました。

## 研究の背景

大気中の二酸化炭素の上昇による海洋酸性化は、生物の発生や行動、生態に深刻な影響を与えます。現在の大気中の二酸化炭素濃度は約 400 ppm で海水の pH は 8.1 ですが、2100 年にはこれらが 1000 ppm 以上、pH 7.8 に達することが予測されています。海洋酸性化は、2005 年に国連が定めた持続可能な開発目標(SDGs)でも触れられており、地球規模の問題の一つとして認識されています。これまでに、海洋酸性化が、炭酸カルシウム骨格をもつ生物に深刻な影響を及ぼすことや、海洋生態系、生物多様性を大きく変化させることは知られていましたが、細胞レベルでどのような変化を与えるのかについては、ほとんどわかっていませんでした。

植物プランクトンである単細胞緑藻類は、光合成と日周鉛直移動<sup>注3)</sup>を行い、水圏食物網の基礎となる一次生産者として、水圏食物網を正常に保つ上で重要な役割を果たしています。日周鉛直移動は、2本の鞭毛の運動により行われます。今回、本研究グループは、海産、汽水産、淡水産の3種類の単細胞緑藻類を用いて、海洋酸性化が鞭毛運動に及ぼす影響について調べました。

## 研究内容と成果

本研究グループは、海産(ミクログレナ属; 南極にも生息)、汽水産(ドナリエラ属; 広塩性)、淡水産(クラミドモナス属)の3種類の単細胞緑藻類を用いました。400 から 2000 ppm の濃度で二酸化炭素を含む海水中で、実験室およびフィールドに近い区画化した容器の中で、ミクログレナを 5 年間、培養しました。蛍光灯光、太陽光(自然光)、青色光の3種類を用いて、それぞれの条件下での運動性と光に対する反応を調べました。その結果、いずれの飼育条件下でも、高い二酸化炭素濃度環境下で飼育した藻類の運動性が減少していました。また、光に向かう運動(正の走光性)、光から遠ざかる運動(負の走光性)の速度が著しく低下することがわかりました。これらの運動性の異常は、二酸化炭素の濃度というよりは、二酸化炭素の増加によって起こる酸性化が原因で起こることを見出しました。さらに、酸性化により脱鞭毛が促進されること、その後の鞭毛再生の速度が遅くなることも明らかになりました。これらは3種の藻類で共通して見られました。

細胞内のカルシウム濃度は、通常は正の走光性の時には低く、負の走光性の時には高いことが知られています。本研究では、二酸化炭素濃度が高くなると、正の走光性の時のカルシウム濃度が高まり、負の走光性の時にはカルシウム濃度が著しく減少していることもわかりました。このような運動性の低下を引き起こす原因を探るために、ミクログレナのゲノム配列情報を新たに決定するとともに、すでに決定されているドナリエラとクラミドモナスのゲノム配列情報を利用して、高濃度の二酸化炭素環境下で飼育したときの、遺伝子発現の変化を調べました。運動に重要な12種類の遺伝子発現について解析したところ、鞭毛を駆動する役割をもつタンパク質ダイニンの成分や、鞭毛の形成に関わる遺伝子、および運動を活性化させる酵素の遺伝子の発現が、高濃度二酸化炭素環境下での飼育により、著しく低下しました。一方、鞭毛を脱離させるのに必要な遺伝子や、運動を負に制御する鞭毛成分の遺伝子の発現は増加しました。また、5年間にわたって高い二酸化炭素濃度の条件下で飼育すると、運動に関わる遺伝子周辺の SNP(一塩基多型)<sup>注4)</sup>が増加する傾向にあることもわかりました。

地球温暖化により南極大陸の氷が溶け、今世紀末までには露岩域の占める割合が南極大陸の25%にまで増加すると予測されています。そこで、今回得られたの運動性に関するデータをもとに、南極におけるミクログレナの日周鉛直移動への影響を計算しました。その結果、光に向かう鉛直移動において、海水の二酸化炭素濃度 280 ppm では 15 時間から2日弱かかるところが、2000ppm では3日から6日かかってしまうこともわかりました。

## 今後の展開

鞭毛や繊毛の運動性が酸性化により著しく低下することは、酸性化が水環境に与える影響を地球規模で考える上で重要な基礎知識となります。また、今後は、鞭毛や繊毛を持つプランクトンなど、海洋生態系を底辺で支えている多くの生物がいかに変化するかを包括的に調べることで、海洋酸性化が生物の生態に及ぼす影響がさらに

明らかになると期待されます。また、鞭毛や繊毛はヒトを含め、多くの生物の体の維持に重要な役割を果たします。今回の研究成果は、酸性化問題が細胞レベルで及ぼす影響を予測する上で基礎となるとともに、我々も含め、地球生物圏の広い範囲での影響を評価する上で、極めて有益な知見となります。

参考図

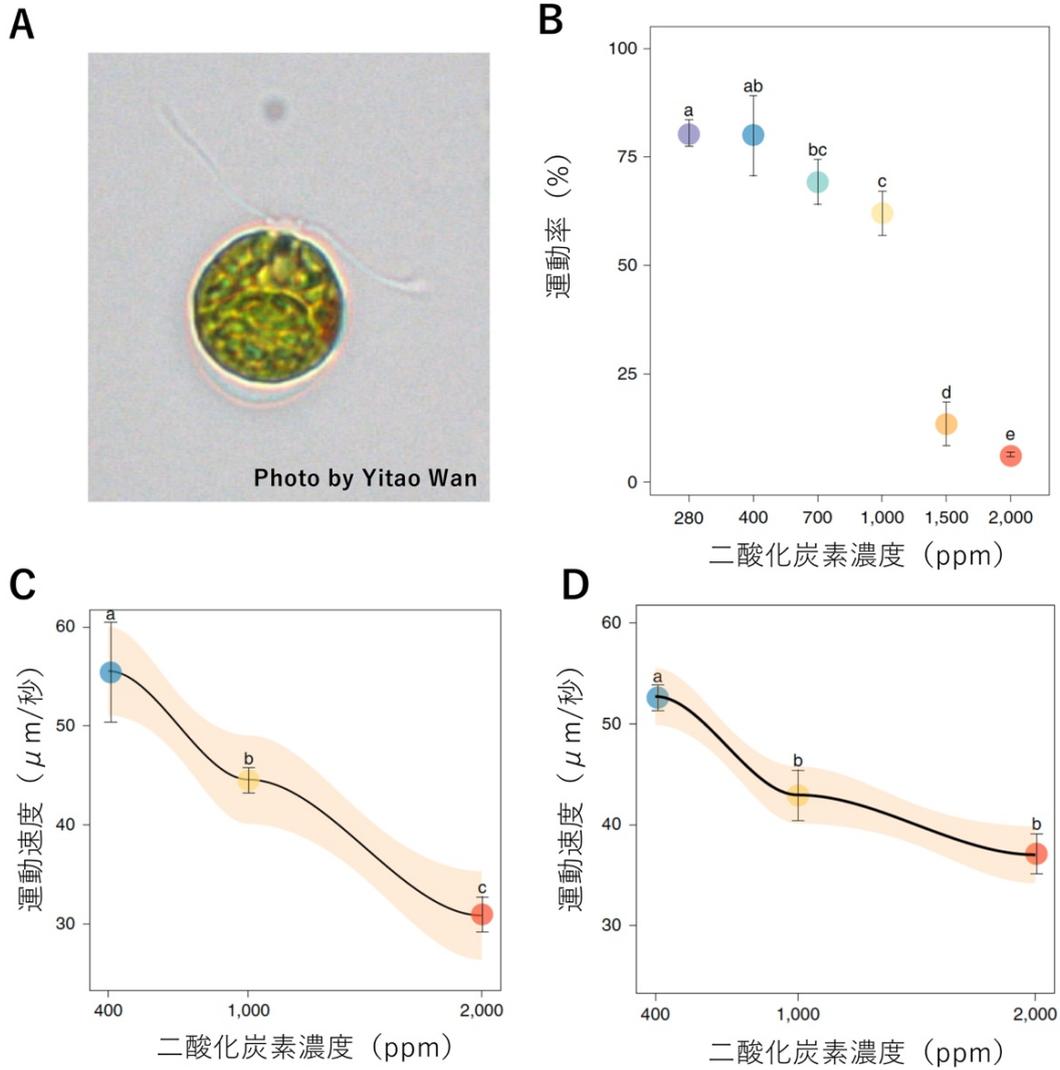


図1. 海洋酸性化が海産単細胞緑藻類ミクログレナの運動に及ぼす影響

- A. 単細胞緑藻類の1種 *Microglena sp.*    B. 光に向かう速度(水平方向)    C. 光から遠ざかる速度(鉛直方向)  
 D. 運動性の変化

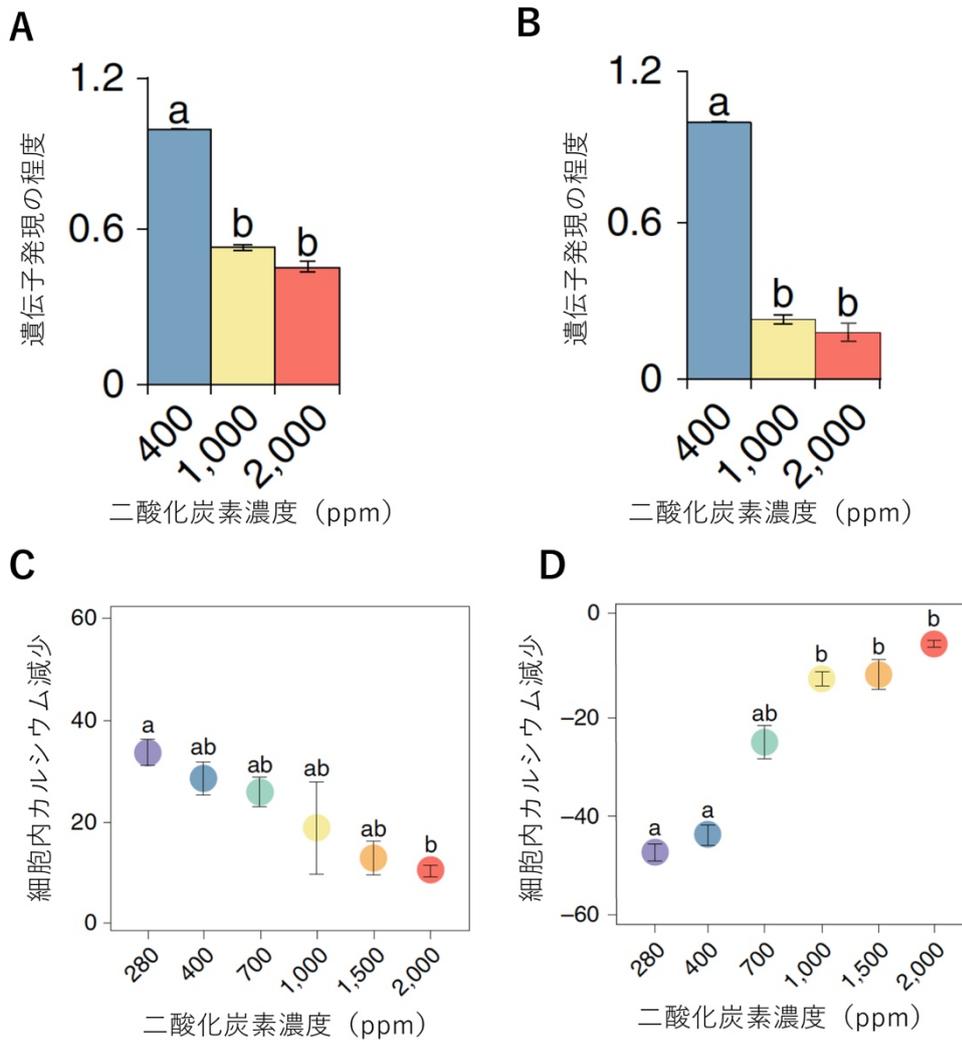


図2. 海洋酸性化が海産単細胞緑藻類ミクログレナの遺伝子発現とカルシウム調節に及ぼす影響

A. 分子モーター成分の遺伝子 B. 鞭毛形成に必要な遺伝子 C. 光に向かう時の細胞内カルシウム減少  
 D. 光から遠ざかる時の細胞内カルシウム減少(注:D では光から遠ざかる時のカルシウム濃度の上昇が小さくなることを示す)

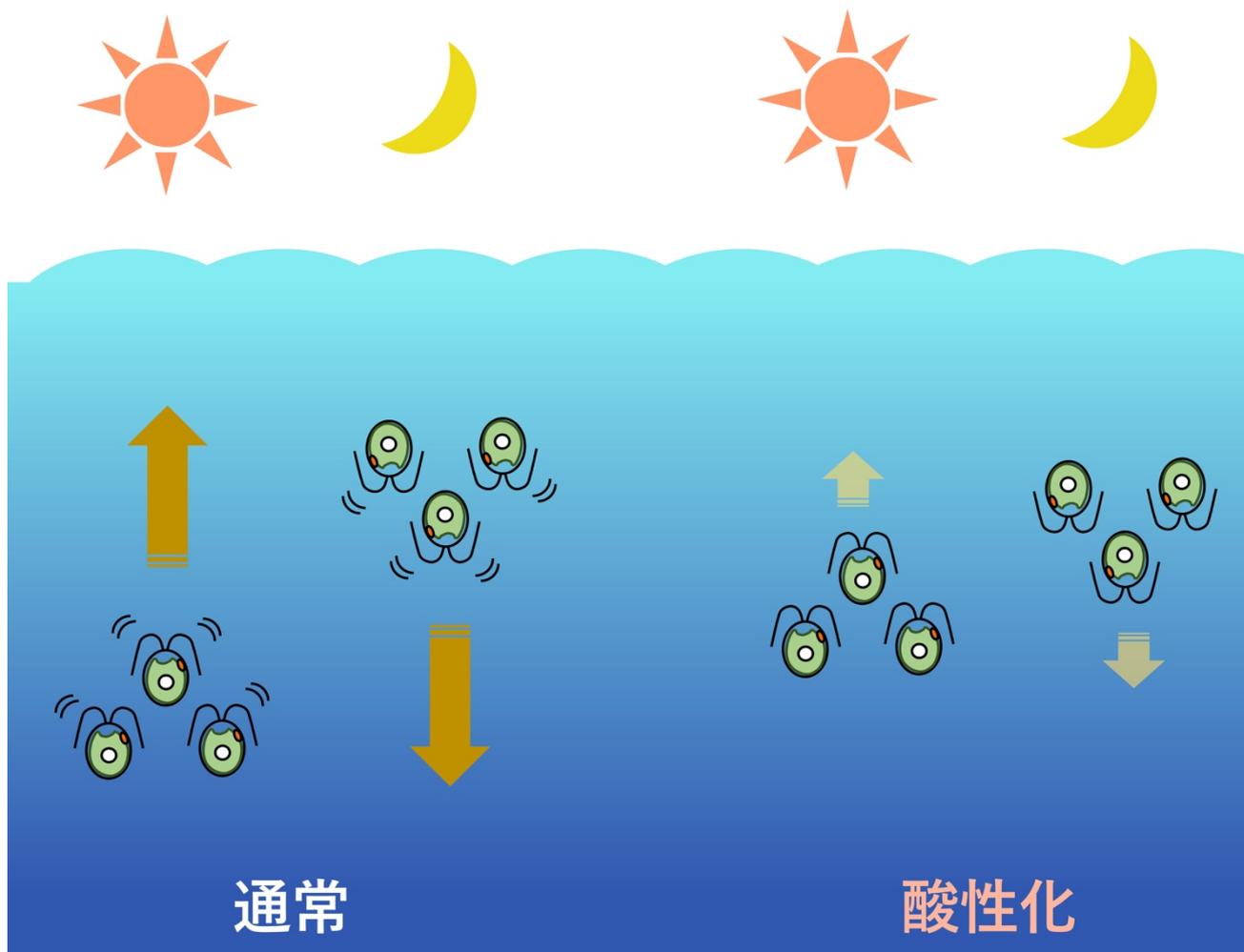


図3. 海洋酸性化により、海産単細胞緑藻類の運動が低下し、日周鉛直移動が異常になる

#### 用語解説

##### 注1) 単細胞緑藻類

アオサなど、緑色の光合成色素をもつ海藻は緑藻類に属する。緑藻類は種子植物の祖先にあたると考えられている。緑藻類のうち、単細胞のものが単細胞緑藻類で、クラミドモナスやクロレラなどがよく知られている。

##### 注2) 鞭毛・繊毛

真核生物の細胞に生えている毛状の小器官。鞭毛、繊毛と長さや細胞あたりの数によって呼び方は異なるが、基本的には同じ構造である。ゾウリムシの繊毛、動物の精子の鞭毛や気管の繊毛などは高速で波打ち運動する。運動は、内部にある分子モーター(ダイニン)と微小管の相互作用によって起こる。

##### 注3) 日周鉛直移動

海洋や湖沼などの生物が、昼と夜で垂直方向に移動すること。光合成を行う緑藻類や渦鞭毛藻だけでなく、動物プランクトンなど運動能力のある多くの生物で見られる。光合成や呼吸の効率を高めたり、捕食者から逃れるなど、食物網においても重要である。

#### 注4) SNP(一塩基多型)

Single Nucleotide Polymorphism の略。スニップあるいは複数形でスニップスとよばれる。生物の集団内に、ある頻度以上で一塩基が変化して生じる DNA 変異のこと。すべてが遺伝的な性質と関連づけられるわけではないが、ヒトでは、アルコール耐性(飲酒の強さ)や病気の発症率と関連しているものも知られている。本研究では、SNP が運動に関係する遺伝子領域に多かったことから、これらが二酸化炭素濃度の増加と関係する変異である可能性がある。

#### 掲載論文

- 【題名】 Decreased motility of flagellated microalgae long-term acclimated to CO<sub>2</sub>-induced acidified waters (鞭毛性微細藻類の運動性は二酸化炭素によって酸性化した水環境で低下する)
- 【著者名】 Yitao Wang(中国水産科学研究院、国立青島海洋科学技術研究所), Xiao Fan(中国水産科学研究院), Guang Gao(厦門大学), John Beardall(厦門大学、モナシュ大学), Kazuo Inaba(筑波大学), Jason M. Hall-Spencer(プリマス大学、筑波大学), Dong Xu(中国水産科学研究院), Xiaowen Zhang(中国水産科学研究院), Wentao Han(中国水産科学研究院), Andrew McMinn(タスマニア大学), Naihao Ye(中国水産科学研究院、国立青島海洋科学技術研究所)
- 【掲載誌】 Nature Climate Change (DOI: 10.1038/s41558-020-0776-2)

#### 問合わせ先

稲葉 一男(いなば かずお)

筑波大学 生命環境系 下田臨海実験センター 教授