

報道機関 各位

熊本大学

淡水のプランクトンも凍結防止のため
海の磯の香りの元になる双性イオンをつくり出す

(ポイント)

- ロシアのバイカル湖^{*1}にて、氷に覆われた湖で繁殖する植物プランクトンや化学物質を10年にわたり追跡し、本発見につながりました。
- 氷の結晶の間隙や湖水で渦鞭毛藻^{*2}の一種が繁殖します。この淡水プランクトンが海の磯の香りの元となる双性イオン化合物を細胞内に貯えることがわかりました。海洋プランクトンは塩水の浸透圧に対応するためこの化合物を作っていますが、浸透圧調節の必要がない淡水で生成が確認されたのは初めてです。
- 淡水のプランクトンもこの成分を生成する能力を持ち、氷結した湖で繁殖する際、凍結防止のため自身の細胞内にこの硫黄を含む双性イオン^{*3}を作りこんでいると考えられます。

(概要説明)

熊本大学大学院先端科学研究部（理学系）の戸田敬教授ならびにロシア科学アカデミー陸水学研究所の研究グループは、バイカル湖でのフィールド調査を10年間実施し、氷に覆われた湖で繁殖する植物プランクトンが、凍結防止のため、硫黄原子を含む双性イオンをつくり出していることを発見しました。この双性イオン（dimethylsulfoniopropionate: DMSP^{*4}）は、海洋プランクトンが塩水の浸透圧に対応するためにつくる化合物として知られており、その分解物は磯の香りの成分として一般の方にも馴染み深いものです。浸透圧調節の必要が無く、かつ硫黄原子を供給する硫酸イオンが海水の1/500しかないバイカル湖でこの化合物が検出される、しかもその濃度が海水以上になるのは驚くべきことです。淡水のプランクトンもDMSPを生成する能力を遺伝的に持っており、氷の中や0°Cの水の中で生きるためこの双性イオンを利用していることが判明しました。

本研究成果は、令和5年11月25日（日本時間）、Springer Natureが発行する科学雑誌「*Communications Biology*」に掲載されました。

（説明）

[背景]

海洋の植物プランクトンは、海水の高い塩濃度によって生じる浸透圧に対応するため細胞内に化学物質が必要となります。そのためDMSPを生成し細胞内に貯蔵します。DMSPについては、浸透圧調節の他、酸化ストレスの低減などいくつかの効果が提唱されており、北極海や南極海での高いDMSP濃度から凍結防止の役割も議論されています。しかし、海洋では常に浸透圧調節が伴うため、DMSPの凍結防止機能^{*5}の強い証拠は挙げていません。

植物プランクトンは、海水だけでなく、氷雪を伴う陸水環境でも繁殖します。このような極寒の環境で、プランクトンはどのように身を守っているのでしょうか？ 細胞が凍ってしまえば生存できません。

淡水のプランクトンは浸透圧調節の必要が無いため、DMSPをつくりません。しかし、もしDMSPに凍結防止の機能があり、かつ淡水プランクトンもDMSP生成の能力があれば、淡水でも氷結環境下DMSPが検出されるはずで

[研究の内容]

2012年より主に3月や4月にバイカル湖に8回にわたり遠征し、植物プランクトンの繁殖の探索とDMSPやそれに関わる化学物質の分析を実施しました。湖水を採取するため3月に直径70 cmほどの穴を開け、3月末から4月末にかけて観測を続けました。主に表層水の観測を行いました。氷の中に生じたコロニーの水も採取し分析に供しました。DMSPの分析は、熊本大学で開発した分析装置をバイカル湖に持ち込み、現場で行いました。そのため日々の推移をリアルタイムに把握しながら観測が可能でした。

[成果]

植物プランクトンの中でも渦鞭毛藻の一種 *Gymnodinium baicalense* が4月に大繁殖することが見いだされました。特に氷に生じたクラックの断面や氷の穴の壁は、氷の底面より太陽光を浴びやすく、格好の繁殖場になることが確認されました。一連の遠征から、この淡水の渦鞭毛藻は海洋の化学物質として知られるDMSPをつくっていることが判明しました。渦鞭毛藻の数やDMSPの濃度は気温・水温・氷温によって推移し、低温ほどDMSPが生成されていました。氷結湖で渦鞭毛藻が発生してDMSPが観測されるようになり、氷が融解して無くなるに従い減少していくDMSP濃度の推移を把握することができました。また最低気温が0°C以上と暖かい日には、プランクトン内部の

不要なDMSPの湖水への放出も観測されました。

すなわち、バイカル湖の初春に繁殖する渦鞭毛藻はDMSPを生成する能力を有しており、凍結防止のためこの双性イオンを利用していることが判明しました。バイカル湖にわずかしかない硫酸イオンの硫黄原子を利用しDMSPに変換していますが、その効率は海水の代表値と比べると実に2,000倍に上ります。

[展開]

DMSPは淡水のバイカル湖でも氷結時に繁殖するプランクトンにとって重要な化学物質であることが判明しました。バイカル湖だけでなく、高緯度帯にある数多くの湖沼や、高山に残る雪渓、ならびに氷河に繁殖するプランクトンにとっても、氷点付近で生存するための重要な化学物質であることが予想されます。様々な自然環境における凍結防止機能の存在を明らかにしていくとともに、培養実験によるDMSP生成要因の定量化など実験室レベルの研究が待たれます。また、どうしてこのような防御機構を持つようになったか、遺伝的な解明にも発展していくと考えられます。

本成果は化学、生物学、陸水学、海洋学、雪氷学など広い科学分野と関連し、多様な発展が期待されます。

(論文情報)

論文名：

Abundant production of dimethylsulfoniopropionate as a cryoprotectant by freshwater phytoplanktonic dinoflagellates in ice-covered Lake Baikal

著者：Kei Toda、Vladimir Obolkin、Shin-Ichi Ohira、Kentaro Saeki

掲載誌：*Communications Biology*, 6, no.1194 (2023)

doi: 10.1038/s42003-023-05573-9

【語句説明】

1. バイカル湖

最大幅 80 km、長さ 700 km でほぼ瀬戸内海と同じ大きさ。世界で最も深く (1,642m)、地球の淡水の実に 2 割を保持している。また世界で最も透明度が高い湖としても知られ、その生物多様性から世界自然遺産に登録されている。冬は全面が氷結し 4 月まで氷で覆われている (下の写真)。



写真： 氷結したバイカル湖でサンプリング地点に向かう調査隊と氷の隙間に生じた渦鞭毛藻のコロニー

2. 渦鞭毛藻（うずべんもうそう）

珪藻やシアノバクテリアとともに代表的な植物プランクトン。渦鞭毛藻は珪藻とは異なりシリカの殻を持たず、また、鞭毛を使って泳いで移動することができる。珊瑚と共生している褐虫藻も渦鞭毛藻の仲間である。大きさは $30 \mu\text{m}$ 程度。今回氷の中にコロニーを形成していることが確認された（上写真の枠内）。

3. 双性イオン（zwitter ion）

分子内にプラスの電荷とマイナスの電荷双方を持つ。双性イオンは生体細胞内でも負荷無く保持することができる。アミノ酸も pH によっては双性イオンとなる。

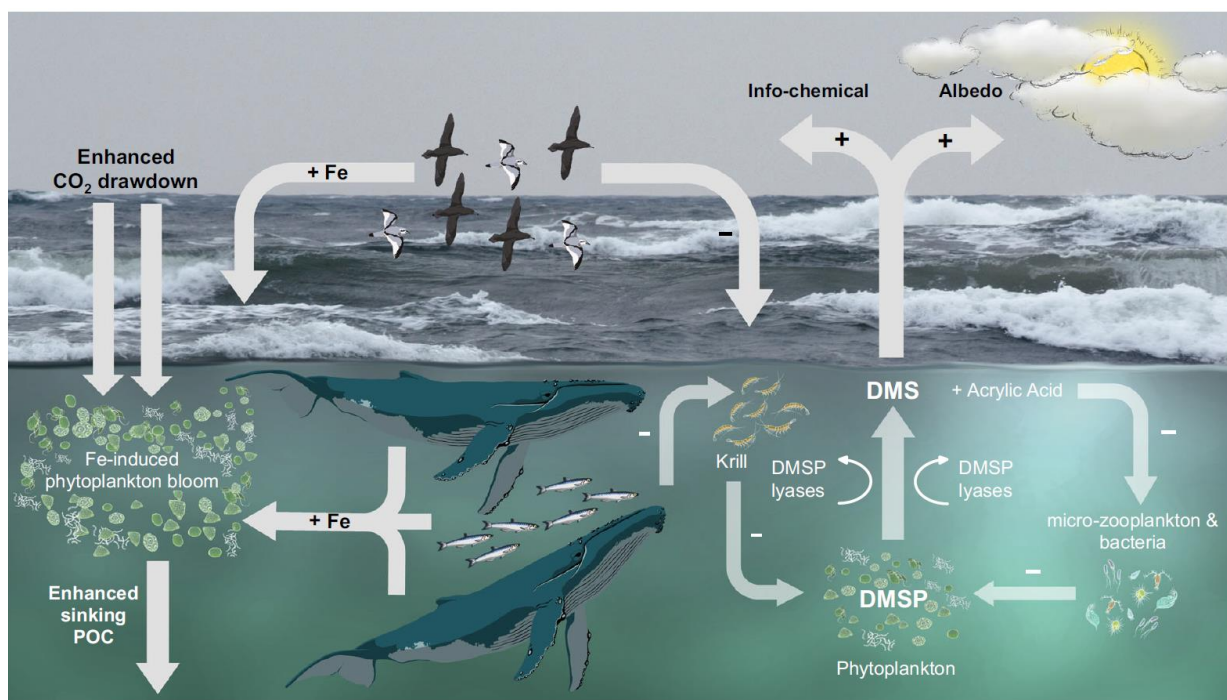
4. ジメチルスルフォニオプロピオネート（dimethylsulfoniopropionate: DMSP）

硫黄原子を含む双性イオン。海洋プランクトンは海水の浸透圧に対応するため DMSP を生成している。DMSP はプランクトンの外に出ると分解され磯の香りの成分である DMS となり大気へ放出される。



DMSP は、生物の営みの中で重要な役割を担うとともに、地球の大気・海

をめぐる物質循環や地球環境・気候にも大きく関わっている。DMSP は、分子内にプラスとマイナス双方の電荷を持つ、いわゆる双性イオン（zwitter ion）である。DMSP はバクテリアや酵素による分解を受け硫化メチル（dimethyl sulfide：DMS）となる。DMS は水に溶解しないため、海洋から大気へ放出される。DMS は磯の香りの成分で、海岸に行くと私達もその匂いを感じることができる。すなわち、海洋プランクトンが生成する DMSP や DMS が海の香りをもたらしている。DMS は海洋大気において雲の凝結核となり、雲の発生や雨をもたらす。負の温室効果を持ち、地球温暖化を抑える役割も持っている。また、DMSP や DMS の匂いは、海獣や海鳥が餌を探す際に利用していると言われ、世界中で研究が進められている（下の図参照）。米国ウッズホール海洋研究所と熊本大学が共同ですすめているクジラの捕食行動と DMS の関係を実証する南極海での海洋調査は今年の日経サイエンス 9 月号に紹介されている。ウミガメなどが海洋の浮遊プラスチックを誤食してしまうのも、表面に生えた藻によって DMS 臭がするためと言われている。



図： 海洋プランクトンが生成する DMSP の生態系や地球環境における役割（Scova、*Biogeochem.* 2018）

5. 浸透圧調節と凍結防止機能

浸透圧は、膜を介して内側と外側の化学物質の濃度が異なると、双方が同じ濃度になろうとして生じる圧力。海洋プランクトンの場合、海水と同じだけ体内に化学物質が無いと、浸透圧によって膜を介して水が外に排出され、細胞が縮んでしまう。海水の塩濃度と同等の化学物質が細胞内に存在すること

によって浸透圧を 0 に調節することができる。

水が氷になる温度は純水の場合 0°C ですが、化学物質が溶解している場合その濃度に応じて凝固点が低下し、0°C では凍らなくなる。イオン性の化学物質は水に多く溶け込むことができ、双性イオンのような水溶性物質の生成は凝固点降下を利用した凍結防止機能と言える。

浸透圧 π も凝固点効果 ΔT も以下のように化学物質のモル濃度 (M (mol/L)、 m (mol/kg)) で決まる (水溶液では $M \approx m$)。

$$\pi = M R T, \quad \Delta T = K_f m$$

R は気体定数、 T は絶対温度、 K_f はその溶媒によるモル凝固点効果 (水の場合 1.85 K kg/mol)

すなわち細胞内に化学物質が存在することにより、内部の浸透圧を上げ塩水に対応できるようにもなるし、凝固点を 0°C 以下にすることができる。

【お問い合わせ先】

熊本大学大学院先端科学研究部 (理学系)

担当： 教授 戸田 敬

電話： 096-342-3389

e-mail : todakei@kumamoto-u.ac.jp