

CASE 1

地球温暖化がマリモに与える影響

緑色の丸々とした可愛い天然マリモが、温暖化の影響により深刻なダメージを受けるかもしれないのをご存知だろうか？

1月から3月の冬の間、阿寒湖は一面結氷し、

水温は0℃付近になる。

マリモは、分厚い氷下のほぼ暗黒下で細々と生きている。

しかし、近年温暖化の影響で結氷期間の短縮と

薄氷化が進んでいると言われている。

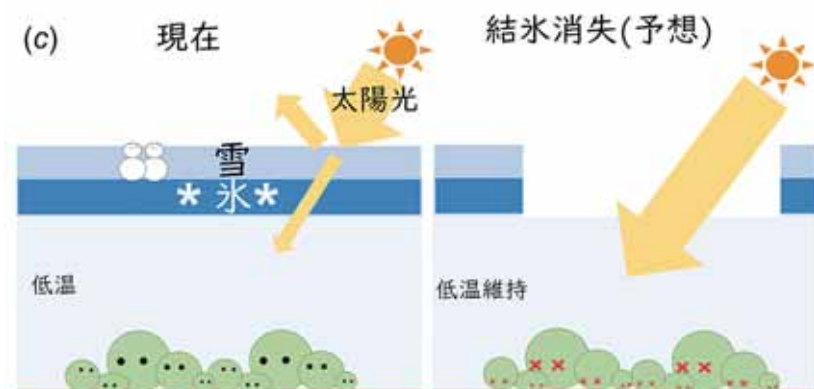
もし冬期の結氷が失われて、

強い光が湖底に差し込むようになったら、

マリモはどう感じるだろうか？

結氷消失を想定して、その影響を検証した。

マリモ（淡水生の糸状体緑藻、学名：*Aegagropila linnaei*）の生活形は、岩などに付着した着生型、水中を漂う浮遊型、そして糸状体が絡まって球状となる集合型をとる。北海道東部に位置する阿寒湖チュウルイ湾は、球状集合型マリモが群生していることで知られている。以前は世界中の多くの湖沼で集合型マリモの生育が確認されていたが、1900年代以降の生育環境の変化により、その多くが消失もしくは減少してしまった。中でも、最大直径30 cmに及ぶ巨大なマリモが観察されるのは世界でも阿寒湖だけであり、その希少性と保護の観点から、国の特別天然記念物に指定されている。



阿寒湖では、冬期の水温は1–4℃にまで低下し、結氷と積雪により太陽光は水中にほとんど届かない。近年、地球規模の環境変化の影響で、阿寒湖の結氷期間が短縮傾向にあり、マリモへの影響が懸念されている。今後、温暖化により冬期の結氷が失われた場合、水中に直接入射する太陽光により光強度は上昇する一方、結氷による断熱効果が失われた湖水の温度は比較的低温のまま維持されると予想される。低温下での強光曝露は、細胞にとって危険な活性酸素の生成を促す。この活性酸素がたくさん生成されてしまうと、光合成系を損傷する可能性がある。しかし、マリモの光合成に着目した研究は少なく、マリモの年間を通した基本的な光合成の動態すら不明な点は多い。今回われわれは、結氷の消失がマリモの光合成系に与える影響を調べるため、低温下の光合成の実態解明に取り組んだ。

阿寒湖が結氷している3月のある晴れた日に、水に約3 m四方の穴を開けて、マリモ群落直上の水温と光強度を測定した。この結果をもとに、文化庁の許可を得て採集したマリモを用いて検証実験を行った。マリモを水温2℃で強光にさらしたところ、光合成は短時間の照射で容易に阻害されたが、この後に比較的低い光を当てることで元のレベルまで速やかに回復した。これまで、光合成系が損傷すると低温下では修復されにくいとされていたことから、マリモには低温ではたらく未知の修復機構が存在することが示された。一方、マリモを結氷消失後の生息地で予想される疑似自然光環境下に置いたところ、枯死してしまった。

マリモは、低温・強光の環境に一定時間は耐えられるが、結氷が失われ場合に予想される長時間の低温・強光には耐えられないことが明らかになった。結氷がマリモの生存に重要であることを示唆した本研究は、湖沼の生物への温暖化の影響に警鐘を鳴らすものである。

本研究は A. Obara et al., *Int. J. Mol. Sci.* 24 (1), 60 (2023) に掲載された。

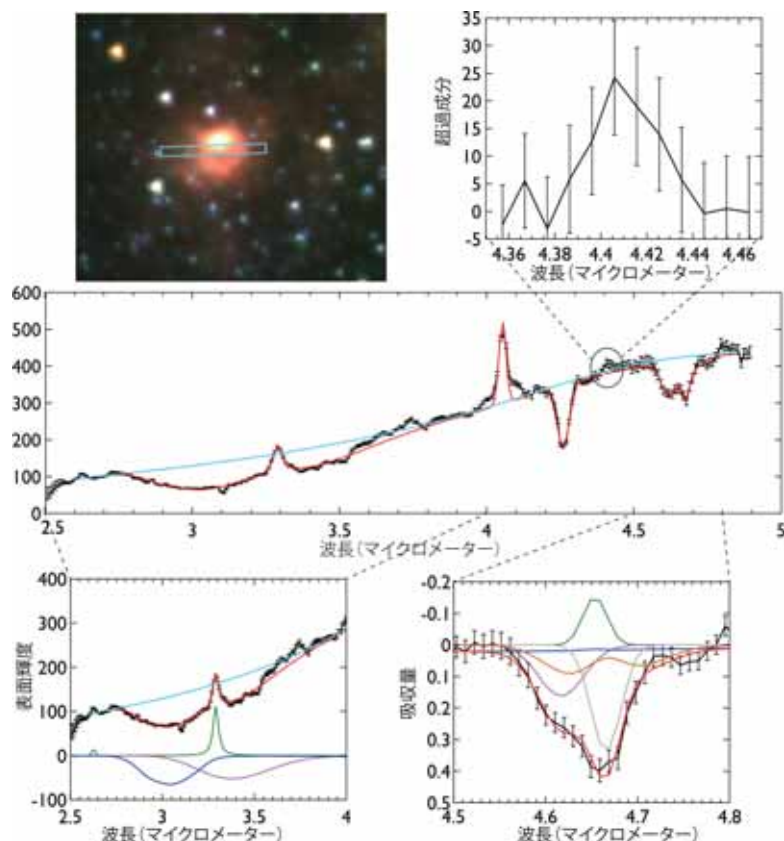
(2022年12月23日プレスリリース)

(a) 阿寒湖のマリモ、(b) 結氷後の阿寒湖、(c) 結氷と積雪により強い太陽光から保護されている場合（左）と、結氷が消失し低温・強光にさらされた場合（右）のイメージ

CASE 2

現世に至る
元素の流転

AFGL 2006 の「あかり」衛星による赤外線スペクトル。左上に AFGL 2006 の赤外線画像と観測領域（水色の長方形）を示す。長方形の中のほぼ中央の位置のスペクトルが中段に示されている。下に 2.5–4 ミクロンメートルのスペクトルを分解した図（青が水の氷の吸収、紫がその長波長側の過剰吸収成分、緑が PAH の炭素と水素による伸縮振動輝線を示す）と 4.5–4.8 ミクロンメートルに見られる複雑な吸収構造を分解した図（紫が OCN⁻、灰色、橙が一酸化炭素のガスと氷の吸収、緑が水素の遷移輝線）を示す。右上の図は炭素と重水素の伸縮振動による 4.4 ミクロンメートルの過剰成分を示す



生まれたばかりの宇宙には水素やヘリウムなどの、わずかな種類の軽い元素しか存在していなかったが、いまの世界では我々の体を形作る炭素、酸素、窒素をはじめ、多くの元素が存在している。このような天文学で「重元素」と呼ばれる元素達は、恒星のエネルギー源となっている核融合反応で主に作られている。重元素が宇宙の進化とともにどのように作られ、どのような形態で流転してきたかは、宇宙の歴史を紐解く重要な鍵である。ここでは、その中の重水素の流転と窒素を含む物質の形成について、新しく得られた観測結果を紹介する。

宇宙空間では、炭素、酸素などの重元素は半分程度が 0.1 ミクロンメートル程度の小さな固体微粒子になっている。これに対して、生命体の基本要素のアミノ酸を構成する元素である窒素は、宇宙空間では 9 割以上が原子やイオンの気体として存在している。採集された小惑星リュウグウのサンプルには太陽系の外側の温度が低い領域で作られたと考えられる多数の種類のアミノ酸が検出されているが、どのように作られてきたかは十分にはわかっていない。窒素を含む有機物が宇宙空間の中で生まれてくる過程は、生命の誕生に結びつく重要な課題である。今回我々のグループは、ひとまわり以上前に打ち上げられた日本の赤外線衛星「あかり」による AFGL2006 というあまり有名

でない大きな質量の若い星の周りの赤外線スペクトルの詳細解析を行い、シアネートイオン (OCN⁻) の氷が示す 4.62 ミクロンメートルの幅広い吸収バンドが紫外線強度とよい関係があることをみつけた。シアネートイオンの氷は低温で窒素を含む有機物の最小単位とも考えられ、この結果は窒素を含む低温物質の生成に紫外線が強く関わっていることを示唆する初めての観測的証拠になる。

一方重水素は、水素の同位体として宇宙の最初に生成される元素の一つで、その後の核融合反応でじわじわと減少していくはずだが、これまでの観測は、宇宙空間での存在量が大きくばらつき、予想より少ないことを示していた。行方不明の重水素はなんらかの星間物質に取り込まれていると考えられる。宇宙空間には、水素を多量に含む多環式芳香族炭化水素（通称 PAH）と呼ばれるベンゼン環を構成要素とする物質が普遍的に存在している。低温では PAH 中の水素が重水素に置き換わり、重水素の隠れ家となっている可能性がある。PAH の炭素と水素の伸縮振動は 3.3 ミクロンメートルに観測されるが、水素が重水素に置き換わるとこの振動は 4.4 ミクロンメートルあたりに移動するはずである。しかし、4.4 ミクロンメートルのバンドはこれまでの観測ではほとんど検出されていなかった。今回我々はシアネートイオンを検出したデータの中に 4.4 ミクロンメートルの過剰放射を見つけ、3.3 ミクロンメートルの炭素と水素の振動とよい相関を示すことを明らかにした。重水素が PAH に取り込まれていることを明確に示す観測的証拠である。

観測対象の AFGL2006 の周りが氷の低温の領域と星からの強い紫外線が共存する特殊な環境であることが、今回の結果に結びついたと考えられる。稼働中の James Webb Space Telescope で同様の天体の観測が進めば、今後さらに研究が発展することが期待される。

本研究成果は新潟大学の下西隆准教授との共同研究として T. Onaka *et al.*, *The Astrophysical Journal*, 941, 190 (2022) に掲載された。

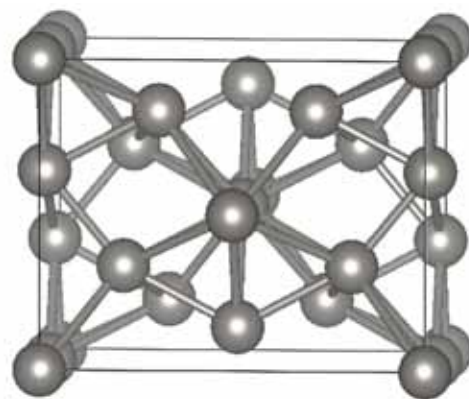
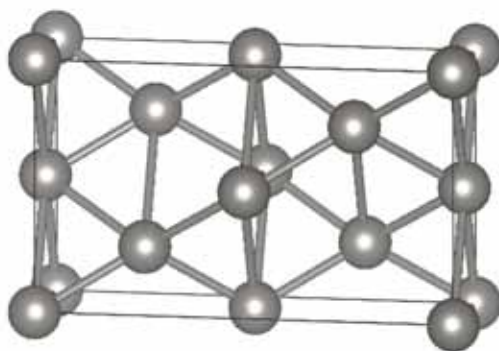
(2022 年 12 月 24 日プレスリリース)

CASE 3

大きなスピ
ン流を生み出す
直方晶タン
グステン

進化的アルゴリズムと第一原理電子状態計算によって直方晶タングステンが予言された。

これまでに知られている立方晶タングステンよりも大きな電子スピンの流れを生み出すことがコンピュータ・シミュレーションから明らかになり、情報伝達や磁気メモリなどへの応用が期待される。



進化的アルゴリズムと第一原理電子状態計算を用いて予測したタングステンにおける2種類の直方晶構造。球はタングステン原子を示す。枠線で示した直方格子が周期的に並んで結晶を作る。両者ともこれまでに知られている立方晶構造よりも大きなスピン流を生み出す

電子は「電荷」と「スピン」という二つの性質を持っている。電荷の流れ（電流）を制御して様々な機能を引き出す技術はエレクトロニクスとしてよく知られているが、近年はこれに加えてスピンの自由度も積極的に利用することで新しい機能を引き出す「スピントロニクス」という技術が注目されている。電子は上向きスピンと下向きスピンという二つの状態をとる。これらが互いに逆方向に流れる「スピン流」という物理現象は情報伝送や磁気メモリなどに応用できると考えられており、実験・理論・計算による研究が精力的に行われている。

スピン流は重い元素を含む物質で得られ、その大きさは結晶構造に大きく依存するため、大きなスピン流を生み出すことができる新物質の探索が行われている。スウェーデン語で「重い石」の意味を持つタングstenはこれまでにふたつの立方晶構造（単位格子の形が立方体の構造）が観測されており、一種類の元素でできている物質の中では最大級のスピン流を生み出すことが知られている。我々は、このタングstenに注目し、スピン流が更に増大する結晶構造の探索に取り組んだ。結晶構造は格子の形状や原子位置などひじょうに多くの自由度を持つため、低エネルギーを示す

安定構造を見つけ出すためには多大な労力を要する。そこで本研究では、チャールズ・ダーウィンの進化論に着想を得て考案された、最適解を発見するための手法である「進化的アルゴリズム」を使用した。これを、実験結果を参照せずに量子力学の原理に基づいて系の物性を予言できる第一原理電子状態計算と組み合わせてタングstenに適用させた結果、図のような異なる2種類の直方晶構造（単位格子の形が直方体の構造）が得られ、両者とも立方晶構造よりも大きなスピン流を生み出すことを見出した。また、モリブデンやタンタルなど他の重金属でもこれらの直方晶構造をとることによってスピン流が増大することも確認した。

直方晶タングstenはコンピュータ・シミュレーションで予測した理論上の物質であるが、原子層ごとに薄膜を積層して人工物質を作り出す現代の成膜技術を利用すればこれらの直方晶構造の作成は十分に可能であり、スピン流の増大を実証できると考えている。これが実現できれば更なる革新的なスピン流発生材料の開発にもつながると期待される。

本研究は T. Ishikawa *et al.*, *Phys. Rev. Materials* **7**, 026202 (2023) に掲載された。

(2023年2月15日プレスリリース)