

CASE 1

「宝の山」の博物館標本から
三億年前の「怪物」の正体を探る

現在の地球からは、太古の生物が生きた証である化石が数多く見つかる。

それらの多様な化石の中には、わたしたちがふだんにする生物とは大きく異なる形をしていることから、現代の生物と一体全体どのような関係にあるのか、まったくわからないものもある。

わたしたちは、そうした化石の中でも特に謎が深いことで有名な「タリーモンスター」に注目し、最新の3D計測技術を駆使した結果、タリーモンスターは脊椎動物であると結論付けた

近年の先行研究の根拠の多くが否定され、タリーモンスターはなんらかの無脊椎動物であることが示唆された。

—

アメリカ合衆国・イリノイ州の石炭紀の地層から産出するメゾンクリーク生物群は、硬組織をもたず通常は化石に残らない生物が化石として保存されていることで有名である。メゾンクリーク生物群のみ見つかるタリーモンスターは、約三億年前の海に生息していた生物であり、長い眼柄と頭から生えた細長い構造物の先にある顎状の器官によって特徴付けられる、現在の地球上のどの動物にも似ていないきわめて奇妙な形をしている。先行研究では軟体動物、環形動物、紐形動物など様々なグループと近縁である可能性が指摘されてきたが、いずれの説も決定的な証拠に欠け、その正体ははまだ謎に包まれている。特に近年、タリーモンスターがヤツメウナギに近い脊椎動物だという驚くべき説がNature誌上で提唱され、注目を浴びている。もしこの説が正しければ、脊椎動物の形態的多様性についての私たちの理解は根本的な見直しを迫られる。

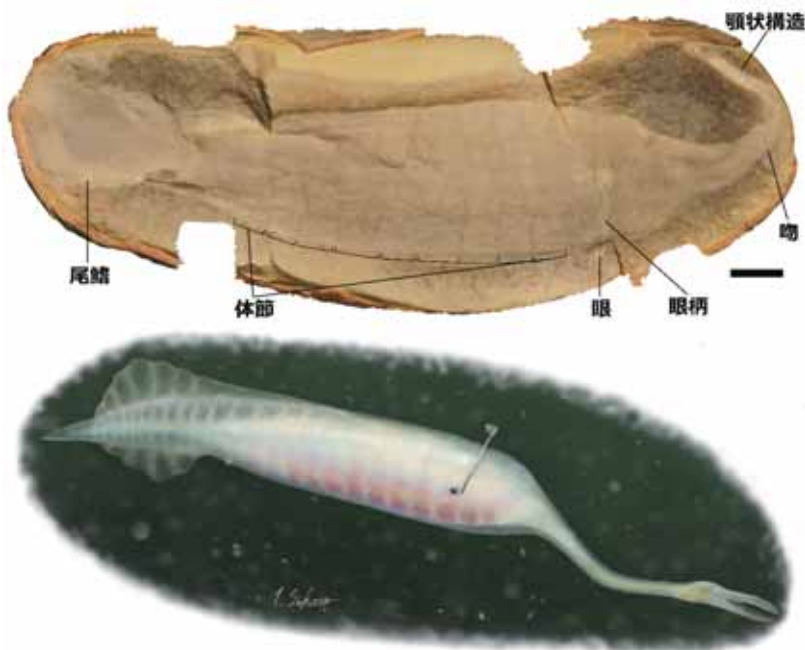
私たちは、他の研究テーマで博物館調査を行っている際に、偶然、この世界的に注目されているタリーモンスターの化石標本が日本の博物館に大量に収蔵されていることに気がついた。これらの標本を詳細に観察したところ、タリーモンスターの化石の表面には、これまであまり注目されてこなかった微細な立体構造があることに気がついた。そこで私たちは、この微細な立体構造を観察すれば、タリーモンスター研究の論争に新たな展開をもたらすことができるのではないかと考え、3Dスキャナーを用いて153点のタリーモンスターの標本の表面形状をデータ化し、解析した。その結果、先行研究でタリーモンスターが脊椎動物である根拠とされた筋節・脳・鰓孔・鰭を支持する構造と同定された構造のそれぞれが、脊椎動物のそれらとは明確に異なる特徴をもっていることから、タリーモンスターは脊椎動物ではないことが示唆された。たとえば、タリーモンスターの頭部には体幹部から連続して分節構造が存在していたが、この構造は、頭部に明瞭な分節構造をもたない脊椎動物の頭部とは形態学的に大きく異なる。さらに本研究では、X線マイクロCTを用いて、タリーモンスターの顎状の器官に見られる「歯」の精密観察も行った。その結果、ヤツメウナギやスタウナギの「歯」に似た形態をしていると主張した先行研究に反して、タリーモンスターの「歯」には、それらと異なるタイプのものもあることが明らかになった。

博物館はわたしたちの身近なところにある一方で、思いもしないような貴重な研究サンプルを収蔵している。博物館を訪問する機会があれば、受け身な姿勢で展示物を眺めることに留まらず、どのようにすれば展示物から学術的に重要な情報を取り出せるか考えを巡らせながら観察すると、新発見につながるかもしれない。

本研究は、T. Mikami *et al.*, *Palaeontology*, 66, e12646 (2023) に掲載された。

(2023年4月17日プレスリリース)

タリーモンスターの化石と、本研究の結果に基づき描かれた復元画。スケールバーは1 cm



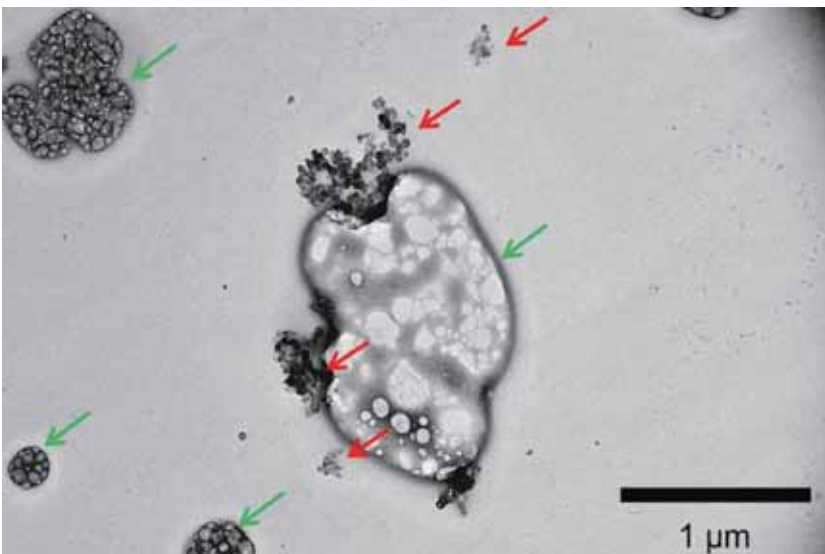
CASE 2

気候にかかわる
光吸収率を正しく測る
微粒子の

飛行機の窓から外を眺めると大気の下層が霞んで見える。大気中にはエアロゾルと呼ばれる微粒子が漂っており、それらが太陽光を散乱するからだ。地球大気エアロゾルには可視光を吸収する物質「黒色炭素」が含まれており、太陽光による大気の加熱の一因となっている。本研究では、微粒子による光の吸収率を支配する物性値「複素屈折率」を、大気中の黒色炭素について初めて測定することに成功した。この成果は、気候変動の理解と予測に貢献することが期待される。

2021年ノーベル物理学賞に気候モデリングの創始者である真鍋淑郎博士が選出されたのは記憶に新しい。計算機を使って気候を理解・予測するというアプローチが物理学として受け入れられるまでには、理論モデルを検証しうる膨大な観測データの蓄積が必要であった。現在の気候研究手法の枠組みを構築した真鍋博士が受賞されたことは、観測に携わる研究者の一人として筆者も大いに励まされる。他の多くの理学研究と対比した気候研究の特徴は、系の境界条件を実験的に制御できないありのままの複雑な自然現象を扱うことである。たとえば、大気海洋の蓄熱量を決めている宇宙空間と地球表層の間のエネルギーのやりとりは、水蒸気や二酸化炭素などの気体、エアロゾルや雲などの微粒子、地表面の特性などの寄与の重ね合わせで決まっている。気候研究では、これらを含めた多数の境界条件を、その場観測やリモートセンシングに基づいて明らかにし、適切な形でモデルに与える必要があるのだ。

大気から採取したエアロゾル試料の透過型電子顕微鏡写真の例。黒色炭素（赤色矢印）が硫酸塩（緑色矢印）と共存している



本研究「大気中の黒色炭素の光学的物性の測定」は、大気中での電磁波の伝搬・吸収（放射伝達）の計算においてこれまで不確定だった境界条件の一つを定める観測データを提供するものであり、気候モデリングの土台となる基礎研究として位置づけられる。黒色炭素は、地球大気エアロゾルの質量のうち高々1～2%程度に過ぎない（硫酸塩、有機物、海塩、鉱物などが地球大気エアロゾルのほとんどを占める）が、大気中および雪氷中における太陽光の吸収に大きな寄与をもつ物質である。産業革命以前から現在までの気候系の加熱において、黒色炭素は、二酸化炭素・メタンについて3番目に大きな寄与を持つと考えられている。今回筆者らは、新たに開発した粒子の光学特性を測定する手法「複素散乱振幅センシング」を用いて、大気中の黒色炭素の複素屈折率の実部・虚部の代表値と変動範囲を絞り込むことに初めて成功した。複素屈折率の実部・虚部はそれぞれ物質中の光の伝搬速度・吸収率を表す物性値である。気候モデルでこれまで採用されていた室内実験に基づく仮定値 $1.95+0.79i$ に比べて、虚部が少なくとも0.17は大きいことがわかった。このことは、これまでの気候モデリングにおいて黒色炭素の光吸収率が少なくとも16%過小評価されており、大気中や雪氷中の放射伝達計算ではその分の系統誤差が生じていたことを示唆する。このように、新たな測定法の開発とそれを用いた観測データの更新が、気候モデリングの精密化のために重要な役割を果たしているのである。

本研究成果は、N. Moteki *et al.*, *Aerosol Science and Technology*, 678, 57 (2023) に掲載された。

(2023年4月26日プレスリリース)

CASE 3

量子センサを自在に並べる！

量子力学の原理に基づいて物理量を精密に測定することを量子センシングと呼ぶ。

その代表例が、透明な結晶中に存在する不純物由来の結晶欠陥を

量子力学的な測定器(量子センサ)として用いる磁場測定である。

わたしたちは、窒化ホウ素の結晶中の狙った場所に量子センサを作り出す技術を開発した。

この技術を用いると1 μm 以下の高い空間分解能で微小磁場の測定ができる。

これは、磁石の研究などに幅広く適用可能な新技術である。

わたしたちが原子・分子やそれらが集まってできた物質の性質を理解できるのは量子力学のおかげである。近年、理解するための手段としてだけでなく技術として量子力学を利用しようという量子技術の研究が進んでいる。量子センシングはその一つである。

皆さんはピンクダイヤモンドというピンク色のダイヤモンドをご存知かもしれない。その正体は、ダイヤモンド中に不純物として含まれる窒素由来の結晶欠陥(NV中心)である。ピンク色を呈するのはその内部に量子力学的なエネルギー単位が存在するためである。一般に、このような独特の色を呈する結晶欠陥を色中心(いろちゆうしん)と呼ぶ。

数ある色中心のなかでもNV中心は特殊な性質をもつため、量子センサとして利用できる。緑色の光を照射した際に出てくる赤色の発光量がNV中心の感じている磁場によって変化するのである。この事実を用いると磁場を精密に(たとえば地磁気の百分の一程度であれば容易に)決定できる。いわば原子サイズの超精密な方位磁針である。

NV中心量子センサは過去10年以上にわたって研究されてきたが、実用には課題がある。正確な磁場測定のためには、センサをできるだけ測定対象に近づける必要があるが、硬いダイヤモンドではそれが難しい。また、狙った場所にセンサを作ることや小型のセンサをつくることも容易ではない。ところが、最近、透明結晶である六方晶窒化ホウ素(hBN)に存在するホウ素欠陥と呼ばれる色中心が量子センサとして利用できることが発見され、状況が変わった(図左)。hBNはファンデルワールス結晶であるため数nm程度の薄さで剥がすことができ、加工も容易である。そのため色中心量子センサの適用範囲が格段に広がると期待されているのである。

わたしたちはhBN量子センサをさらに便利に使うための新技術を開発した。具体的には、ヘリウムイオンをビーム状にして物質にぶつけることのできるヘリウムイオン顕微鏡を用いることで、ナノメートルの精度で狙った場所にホウ素欠陥を作り出すことに成功した。図右はそのようにしてhBN結晶中に配列させた量子センサの発光像である。各スポットはホウ素欠陥の集合体であり、イオンビームの照射スポット(100nm)と同程度の広がりしか持たない。この技術を利用すれば、高い空間分解能を持つ磁場イメージングができる。実際、わたしたちは光学顕微鏡を用いながらも回折限界を超える空間分解能が得られることを示した。

この研究は量子センシングの新しい方向性を生み出すものである。ダイヤモンドと異なりhBN量子センサは微小薄片として安価に大量に作りだせる。近い将来、この技術をもとに汎用のディスプレイ量子センサによる磁場測定技術を確立できれば、量子技術実用化の好例となる。それがわたしたちの願いである。

本研究成果はK. Sasaki *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, 122, 244003 (2023)に掲載された。

(2023年6月14日プレスリリース)

(左) 六方晶窒化ホウ素の結晶の概念図。中央のホウ素が抜けた部分が色中心であり、ここに存在する電子のスピンの量子センサとして機能する。(右) 結晶中に斜め格子状に配列させた量子センサ

