



平成 27 年 9 月 1 日

報道機関各位

国立大学法人広島大学
国立大学法人筑波大学
国立研究開発法人科学技術振興機構

藻類のもつ微結晶が光を有効利用する原理解明にせまる
～磁場で微結晶の向きを揃える新技術で光反射特性を明らかに～

【本研究成果のポイント】

- 藻類の細胞外被・外殻結晶^{注1}の向きを永久磁石程度の磁場（数百ミリテスラ）で遠隔操作する方法を開発しました。
- この方法を応用して、円石藻^{注2}の円石の向きを磁場で制御しつつ分光計測する新手法を開発し、円石が光を効率的に反射する方向を特定することに成功しました。
- これにより、藻類がバイオミネラリゼーション（生体鉱物形成）^{注3}によって円石のような微結晶^{注4}を細胞表面に配置することの植物生理学的意義の解明が大きく前進するとともに、マイクロメートル・オーダの微結晶を永久磁石程度の磁場で、非接触かつ任意の方向に向けた技術への応用も期待できます。

【概要】

国立大学法人広島大学ナノデバイス・バイオ融合科学研究所の岩坂正和教授、国立大学法人筑波大学生命環境系の白岩善博教授らの研究グループは、藻類の細胞外被・外殻結晶の向きを磁場で遠隔操作する手法を開発し、円石藻のつくる炭酸カルシウムの円盤状の微結晶（円石、ココリス、図1）が光を効率的に反射する方向を特定することに成功しました。

藻類の中には、進化の過程で微結晶を細胞表面に配置するようになったものも多くありますが、その目的は謎にまつまれています。特に、植物プランクトンである円石藻がその光合成機能を有効に使うために円石を利用している可能性が推測されてきたにも関わらず、その実験的証明は技術的に難しく、科学的なアプローチはなされていない状況でした。これを解明するために、実験的に実際の円石での光反射の方向依存性を計測する技術開発が望まれていました。

円石藻 *Emiliania huxleyi*（エミリアニア・ハックスレー）の円石は、方解石型炭酸カルシウム微結晶からなる複数の構造体で形成されています。岩坂教授らの研究グループは、その円石が磁場中でもつ反磁性^{注5}の磁化率異方性^{注6}が駆動力となり、400mT（ミリテスラ）の磁場で円石を回転させて磁力線に対し垂直に並びことを発見しました（図2、3）。そして、マイクロメートルサイズの円石を水中で非接触かつ任意の方向に向かせることを、永久磁石程度（数百ミリテスラ）の磁場で実現しました。さらに、これを応用して、円石の配向と光反射の強度分布を調

べる手法を開発し（図4）、円石が光を効率的に反射する方向を特定することに成功しました。

この微結晶の光学特性と植物生理学的意義^{注7)}の関係が解明できれば、藻類バイオエネルギー生産の効率化につながる可能性もあります。さらには、これら微結晶をマイクロ光学材料としてバイオセンサー等へ活用できる可能性もあります。

本研究は、国立研究開発法人科学技術振興機構の戦略的創造研究推進事業「藻類・水圏微生物の機能解明と制御によるバイオエネルギー創成のための基盤技術の創出」研究領域の個人型研究（さきがけ）＜広島大学の岩坂正和教授＞の一環として行われ、同一研究領域のチーム型研究（CREST）＜筑波大学の白岩善博教授＞と共同で行ったものです。

本研究成果は、平成27年9月1日午後6時（日本時間）、英国科学誌「Scientific Reports」（オンライン版）に掲載される予定です。

＜発表論文＞

著者

Yuri Mizukawa, Yuito Miyashita, Manami Satoh, Yoshihiro Shiraiwa,
Masakazu Iwasaka*

* Corresponding author（責任著者）

論文題目

Light intensity modulation by coccoliths of *Emiliania huxleyi*
as a micro-photo-regulator

（マイクロ光学調整素子としてのエミリアニア・ハックスレーの円石による光強度変調）

掲載雑誌

Scientific Reports

doi: 10.1038/srep13577(2015)

【背景】

藻類の中にはその進化の過程で微結晶を細胞表面に配置するようになったものも多くあり、この微結晶が水中において太陽光を有効利用するために使われているという仮説に興味をもちました。しかし、この微結晶が太陽光を遮光するのか、レンズのように集光するのかに関しては藻類研究分野での長年の議論にも関わらず、実験によりその謎に迫った研究はなく、いまだ決着がついていません。

一方、岩坂教授らの研究グループは、これまでに、魚のうろこに含まれるグアニンという核酸塩基の結晶（これにより魚のうろこがキラキラと光を反射する）が磁場に応答することを見だし、グアニン結晶板（長さ20 μ m）の光反射特性を磁気で制御することに成功していました。

そこで、この技術を藻類のさらに小さな外被結晶へ応用できるのではないかと着想し、円石藻が身に付けている炭酸カルシウムの微結晶ココリス（図1）が、はたして日傘の役割を持つのか、太陽光の届きにくい海中で光を集めるのか、あるいは両方の機能をもつのか、その光学機能解明に挑みました。

【研究成果の内容】

今回の手法開発のヒントとなった原理は、万物が磁場にさらされた際にもつ磁性、すなわち反磁性です。一般的に反磁性は非常に弱いため、この特性を利用するには数テスラ以上の強磁場が必要と考えられてきました。しかし、前述の魚のグアニン結晶の光反射の計測原理をヒントに、マイクロメートルサイズの円石を水中で任意の方向に向かせることができるのではないかと考え、円石藻の円石の光反射特性を明らかにするための新手法開発を進めました。

この結果、円石藻 *E. huxleyi* が形成する円盤状の炭酸カルシウム結晶複合体である円石が、その円盤面の法線方向が磁力線に対し主に垂直となる磁場配向を起こすことを世界で初めて発見しました（図2、図3）。また、微結晶一個が水中で適度なブラウン運動を行う自由度のある条件下では、炭酸カルシウムのカルサイト結晶のc軸^{注8}が磁力線に垂直になるような磁気回転運動が400mT以上の磁場下で生じること（図3）を明らかにしました。

これまでの後方光散乱の原理による分光手法では、円石集団の中でランダムな配向状態にある円石の解析しかできませんでした。それに対して、本手法では直径約3 μmの円石一個を磁場で回転させることにより、光反射の強度分布を明らかにすることができます（図4）。その結果、円石の円盤面に平行に入射した光は側方散乱が抑制され、円石の円盤面に垂直に入射した光は強く散乱されることが明らかとなり、円石が光を効率的に反射する方向を特定することに成功しました。

【今後の展開】

今回の研究成果により、円石藻の表面付近の円石が光を遮蔽する配向角と光を細胞内へ導入しやすくする配向角について、その光波長依存性を検討することが可能となりました。その結果として、外被・外殻結晶をもつ藻類が、その微結晶をどのように利用しているのかを解明する道を開き、研究が大きく前進しました。さらに、マイクロメートル・オーダの微結晶を永久磁石程度（数百ミリテスラ）の磁場で、非接触かつ任意の方向に向ける技術を、マイクロ光学素子の部品として応用することも期待できます。

【参考資料】

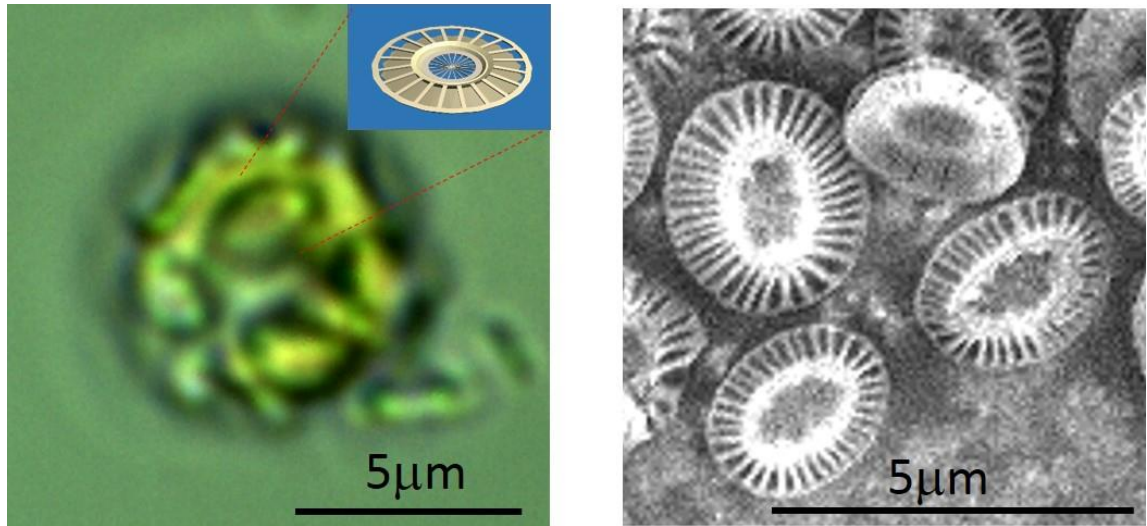


図1 円石藻 *Emiliana huxleyi* の藻体と円石（ココリス：coccolith）
 左図：光学顕微鏡写真でみられる藻体表面の円石の様子（写真の右上にモデル図を示す）。
 右図：電子顕微鏡（SEM）で得られた円石。炭酸カルシウム製の微結晶の複合体である円石の直径は2~3マイクロメートルであり、その立体的な微細構造を人工的な微細加工技術で作製することは（現時点では）困難である。

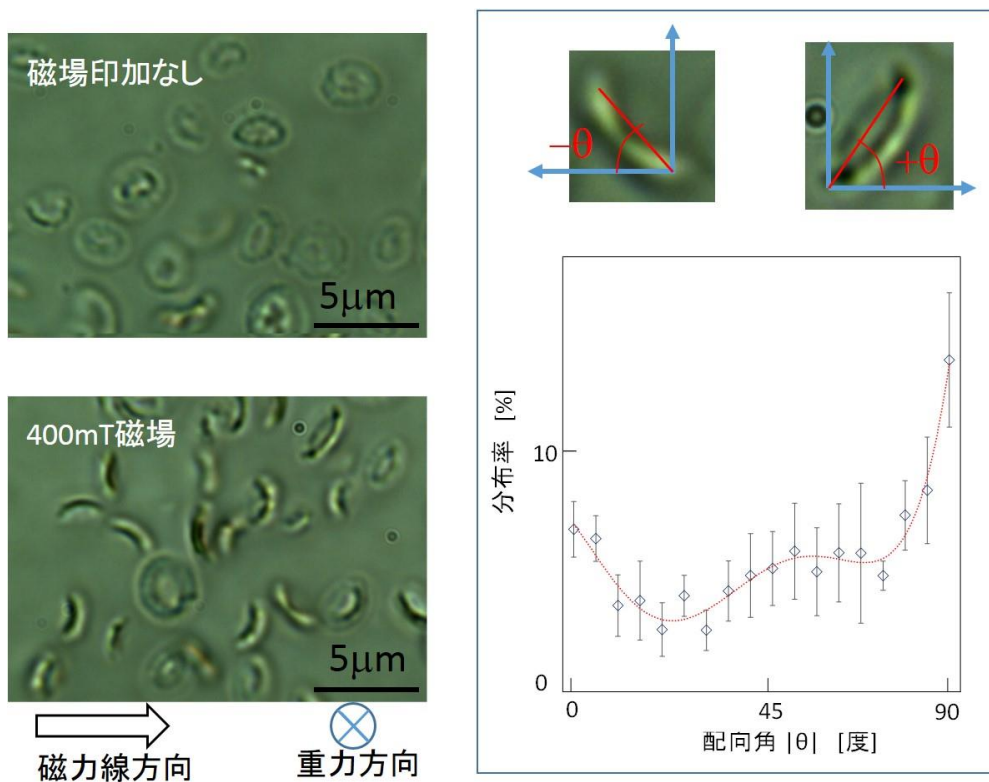


図2 円石藻 *Emiliana huxleyi* から遊離した円石の磁場配向
 左図：磁場印加なしでは円盤状の円石が多いが、400mT 磁場では磁力線（左下写真の左右方向）に対し円石の半径方向（radial 方向）が垂直となる円石が増加した。
 右図：円石集団の配向角度分布を示し、磁力線に垂直な磁場配向が生じていることを示す。

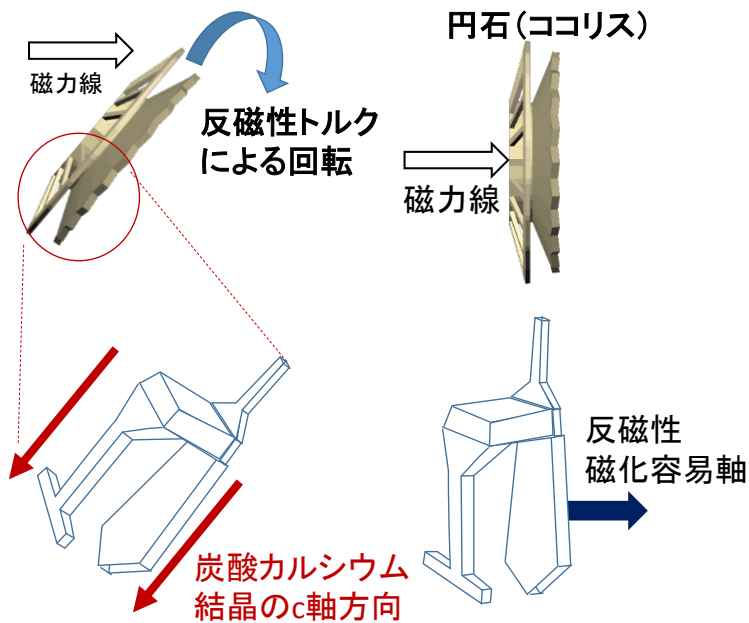


図3 円石の磁場配向のメカニズム
 円石を構成する炭酸カルシウム結晶のパーツのうち、Rユニットとよばれる円盤の半径方向（結晶のc軸方向）に伸びた板の反磁性磁化率異方性に起因する磁気トルクによって、磁場中で回転力が作用する。このc軸に垂直な方向が磁化容易軸と考えられる。

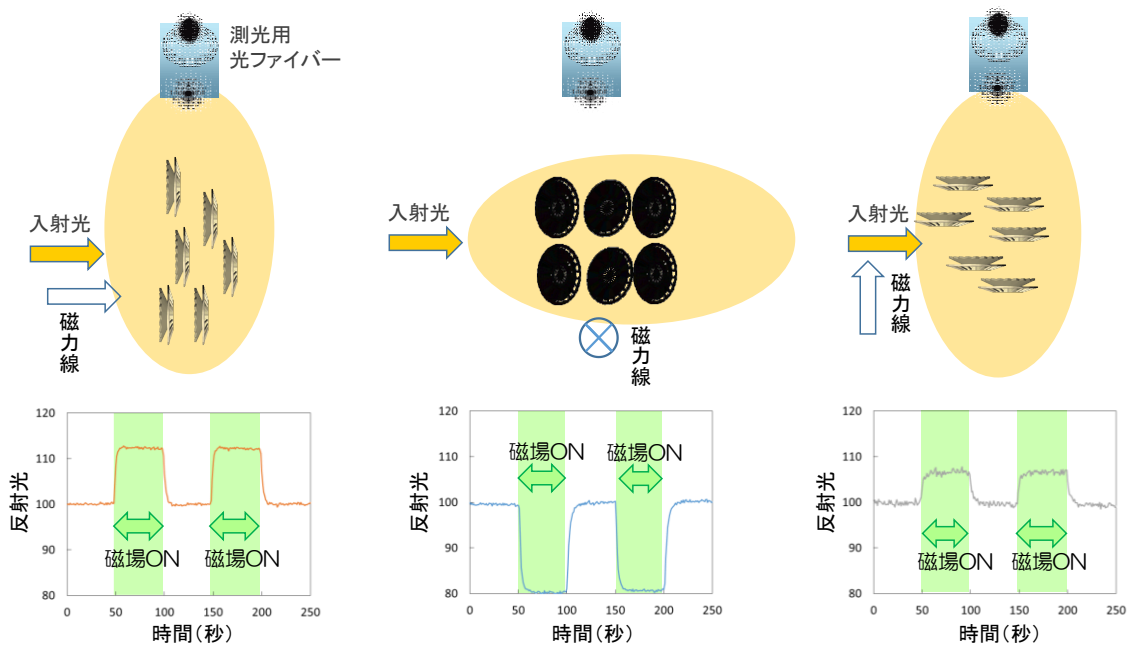


図4 磁場配向した円石集団に対し光を照射し、その反射光の分布を計測する手法。入射光、磁力線、そして観察方向（反射光を測光する向き）の3通りの組み合わせでの測定例を示す。

（用語の解説）

注1) 細胞外被・外殻結晶

藻類の中でも珪藻や円石藻は藻体（藻類の細胞）の表面にケイ酸成分の殻や炭酸カルシウムの結晶を生成する。この細胞表面の殻や結晶のことをいう。

注2) 円石藻

藻類の一種でハプト植物門に属する直径5ミクロン程の植物プランクトン。人類が現在用いている原油・天然ガス・オイルシェールのもととなるバイオマスやドーバー海峡の白い崖に代表される石灰岩をつくった光合成生物と考えられている。また、方解石型炭酸カルシウム結晶製の複雑かつ巧妙な構造の円石(ココリス)を細胞内でのバイオミネラリゼーション機構により形成し、それを細胞表面へと輸送してそれを身につけることで知られる。

注3) バイオミネラリゼーション（生体鉱物形成）

生物を構成する細胞のなかで、生物学的な目的に沿って固体成分・結晶がつくられるプロセスのことをいう。

注4) 微結晶（生体由来微結晶）

物理化学的に形成するだけでなく、生物が細胞の遺伝情報にもとづいて微細な構造が制御された結晶のことを、ここでは微結晶と呼ぶ。構造ならびに結晶サイズが揃っており、まだ人為的に作成することの困難な構造・サイズの生体由来微結晶も多く存在する。

注5) 反磁性

すべての物質は電子をもっており、その電子が外部から侵入する磁場を遮蔽する挙動を示すことにより、反磁性の性質が生まれる。いわゆる磁石の強磁性が磁場に引き寄せられるのとは対照的に、磁場からはじかれる性質をもつ。本研究では微結晶の反磁性が観察されやすい条件を見いだしている。

注6) 磁化率異方性

与えられた磁場（外部磁場）に対し、電子のスピン向きなどが揃い易い方向（磁化が最大となる方向）のことを磁化容易軸という。反対に、磁化が最小となる方向は磁化困難軸と呼ばれる。この2方向における磁化率の違いのことをいう。反磁性の場合、電子による外部磁場の遮蔽効果が最大になる分子内の方向と、最小になる方向での磁化率の相違のことを指す。

注7) 植物生理学的意義

生物のもつ特定のしくみが、光合成活性およびバイオマス産生等の植物細胞内の生化学的プロセスとどのように関連し、それがその生物にとってどのような役割を果たすのかという観点からの説明。

注8) カルサイト結晶のc軸

方解石の英語名をカルサイトといい、結晶学で結晶軸のひとつをc軸と呼ぶ。

【お問い合わせ先】

国立大学法人広島大学ナノデバイス・バイオ融合科学研究所
教授 岩坂 正和（いわさか まさかず）

国立大学法人筑波大学生命環境系 教授 白岩善博（しらいわ よしひろ）

国立研究開発法人科学技術振興機構戦略研究推進部
松尾 浩司（まつお こうじ）、川口 哲（かわぐち てつ）、松丸 健一（まつまる けんいち）