

## CASE 1

### ナノサイズの人工構造が生み出す新しい光

現代の微細加工技術の進歩によって、光の波長よりもはるかに小さなナノサイズの構造を人工的に作製することが可能になった。このような、微細形状が精緻に制御された構造体は、これまでにない光機能を発現する人工材料として注目されている。われわれは、構造の回転対称性と光機能の関係に着目し、人工ナノ薄膜に回転対称性を有する周期状の穴を空け、これまで発生が難しかった真空紫外と呼ばれる短波長領域の円偏光を簡便に発生できることを実証した。

約60年前に集積回路が発明されてから今日に至るまでの、現代のスマートフォンに代表されるプロセッサの急速な進化は、半導体微細加工技術の進歩に支えられてきた。その結果、トランジスタのゲート長は現在10 nm以下となっている。一方、われわれが目にする可視光の波長は、およそ350 nm～750 nmである。すなわち人類は、光の波長よりもはるかに小さな構造体、金属や半導体で自在に作製する手法をすでに手にしている。

分子や原子がその種類に応じて様々な光学応答を示すのと同様に、光の波長より小さな人工構造に入射した光は多様な振る舞いを見せ、吸収、散乱、

偏光などの特性が変化する。ここで、人工構造の光学応答を決める鍵となるのは、その形と配列である。すなわち、ナノレベルで形状とその配列構造を適切に設計・作製することによって、新たな特性を有する人工光材料を生み出すことができる。このような考え方に基づく光の制御は、近年ではメタマテリアル・メタサーフェスと呼ばれ、光学の新たな研究分野となっている。

作製可能なナノ構造は無限にある中で、どのよ

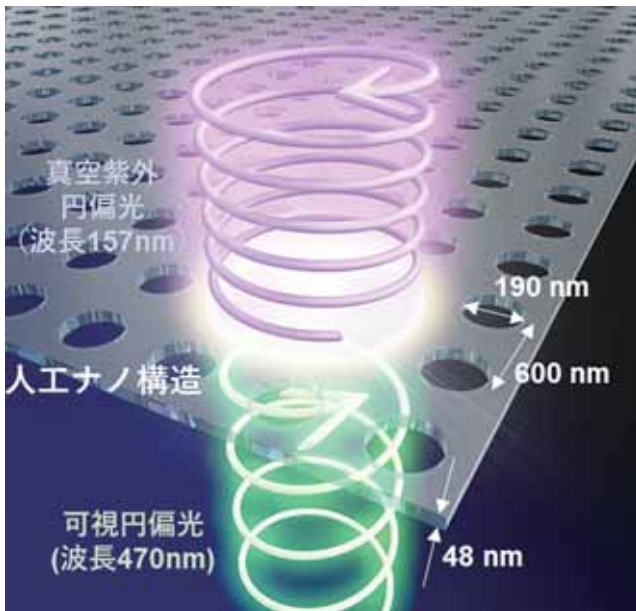
うな形や配列にすれば、所望の光学応答が得られるのであろうか。物理学は、このような問いに大きな指針を与えてくれる。そのひとつが、構造の回転対称性の活用である。「N回回転対称性」とは、ある

軸の周りに構造を360/N度回転させた場合に、もとの形と一致する性質のことである。光の進む方向を軸として回転対称性を有する人工ナノ構造は、電場の波が光の進行方向に対して、らせんのように回転する光である円偏光の波長変換を可能にする。波長変換とは、物質が、入射した光のn分の1の波長の光を放出する現象であるが、これを光の量子であるフォトンの描像で考えると、入射したn個のフォトンが、そのn倍のエネルギーを持つフォトン1個に変換される。ここで、円偏光の角運動量の保存について考えてみよう。円偏光フォトン1個あたりの角運動量の大きさは $\hbar$ と決まっているため、フォトンの総数がn個から1個に減少すると、波長変換の前後で光の角運動量の総和が保存せず、このような物理現象は生じない。しかしながら、構造に(n+1)回回転対称性があると、あたかも構造が光の角運動量の変化分を相殺するように回転したかのように光が錯覚し、構造に余分な角運動量に移ることができるため、円偏光での波長変換が可能になる。

この考え方に基づいてわれわれは、真空紫外光と呼ばれる波長200 nm以下の円偏光を、回転対称性を有する人工ナノ構造を用いて発生させることに成功した。実験に用いた試料は、図に示したように、直径190 nmの開口が正方格子状に周期600 nmで開いた、厚さ48 nmの薄い誘電体自立膜である。この構造は、面に垂直な方向を回転軸として90度回転させると元の形と同じになるため、4回回転対称性を有している。このため、構造の垂直方向から波長470 nmの円偏光のレーザーを照射すると、その3分の1の波長(157 nm)の円偏光に波長変換されることを明らかにした(図)。真空紫外の円偏光は、生体分子の立体構造や物質の電子状態などを検出できる有用な光であるが、発生が非常に難しいという問題があった。本手法は、人工構造にレーザー光を当てただけという簡便な手法であり、真空紫外円偏光を用いた新たな分光技術開発の幕開けとなる可能性を有している。

本研究成果は、K. Konishi *et al.*, *Optica* **7**, 855 (2020)に掲載された。

(2020年7月21日プレスリリース)



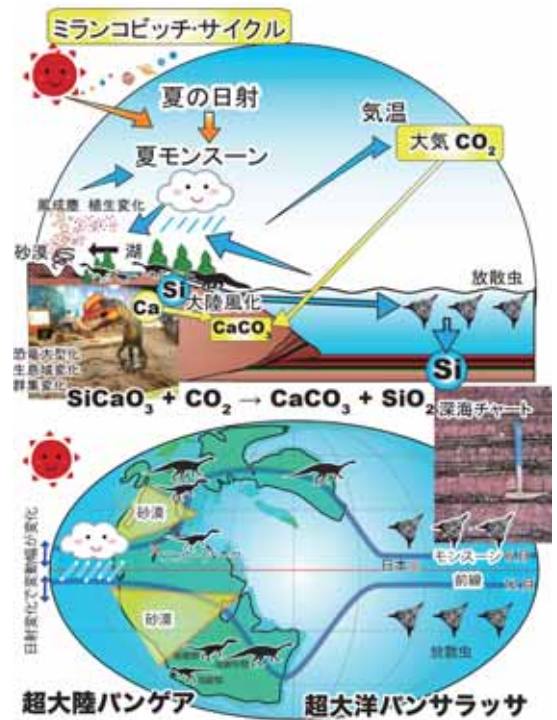
4回回転対称人工ナノ薄膜構造を用いた、可視光円偏光から真空紫外円偏光への波長変換の概念図

## CASE 2

### 恐竜の初期進化を促した 超大陸のメガ・モンスーン

恐竜時代のはじめ、いまから2億年以上前の三畳紀には、恐竜は地上の覇者ではなかった。恐竜は日陰の存在で、生態系の頂点にはワニの祖先達が君臨した。超温暖な環境下で、恐竜はどのように繁栄の準備を進めたか？ われわれは、日本や世界各地の化石や地層に残された証拠から、当時の地球環境や生態系のダイナミクスを解説し、恐竜の初期進化に関する新たなシナリオを提示した。超大陸で活発化したメガ・モンスーンの恵の雨は、恐竜の大型化や生息地の拡大を促したが、メガ・モンスーン自体については完全な理解は得られていない。

養塩を供給する。その結果、放散虫などのシリカの殻を作るプランクトンの堆積速度が変化し、日本のチャートの縞模様が形成された。



風化は地質学的時間スケールでの大気CO<sub>2</sub>変動の主要因でもある。世界各地の地質記録を比較した結果、メガ・モンスーンによる風化は大気CO<sub>2</sub>を消費し、寒冷化を引き起こしたことが明らかになった。

メガ・モンスーンが強化し寒冷化した時期には、恐竜の足跡も大型化した。寒冷地の恒温動物は温暖な地域より熱の放散を防ぐため、大型化傾向がある。超温暖な三畳紀には熱を放散するために小型化する必要があったが、風化による寒冷化は大型化を促す。恵みの雨は食物も増加するため、大型化に拍車を掛けた。湿潤化による砂漠の縮小により、恐竜は生息域を拡大し、パンゲアの南から北まで分布を広げた。恐竜は新天地に順応しながら多様化し、繁栄の準備を進めただろう。

ただし、日射変化の振幅は僅かであり、数値計算によれば大規模な気候変化を起こすには何らかの増幅機構が必要だ。モンスーンは、砂漠化や植性変化を介し水循環のフィードバックを加速する。超大陸パンゲアは砂漠も広大で、被子植物ではなく裸子植物が繁栄するなど、現在と異なる気候と生態系の相互作用が働いた可能性がある。しかし、何がモンスーンを強化したかは未解明である。モンスーンは現在を含め地球史を通じて、地球環境や生態系に多大な影響を与えてきた。恐竜の初期進化の謎解きからも、気候システムの挙動に関する新たな一面の理解が進むことが期待される。

本研究結果は、M. Ikeda *et al.*, *Scientific Reports* **10**, 11984 (2020) に掲載された。

(2020年7月23日プレスリリース)

ミランコビッチ・サイクルに伴う超大陸パンゲアのメガ・モンスーン強度変化がケイ酸塩風化を介して大気CO<sub>2</sub>濃度、ひいては気候を変え、恐竜の大型化や生息域などを与えた。

中生代は「恐竜の時代」とよばれるが、最近の研究によると、最初の5000万年間の三畳紀は恐竜にとって試練の時代だった。ペルム紀／三畳紀境界の天変地異で荒廃した大地にはワニの祖先が繁栄し、彼らが三畳紀末に大量絶滅するまで、恐竜は脇役に過ぎなかった。当時の大気CO<sub>2</sub>濃度は現在より倍以上高く、しかも1000万年スケールで倍近く変動していた。これに合わせるように、降水量や海水温が激しく変動したが、そのメカニズムの解明には至っていなかった。

メカニズムのヒントは日本の地層にあった。日本には、超大洋パンサラッサ深海の地層（チャート）がプレートテクトニクスの結果、陸上に露出している。このチャートの縞模様が地球軌道要素の変化（ミランコビッチ・サイクル）に関連したことが示された。ミランコビッチ・サイクルは4万年から10万年周期の氷期-間氷期サイクルの要因として有名であるが、数1000万年スケールでも変化し、モンスーンなど地球環境にさまざまな影響を与える。この周期性がチャート層の厚さの周期から検出された。

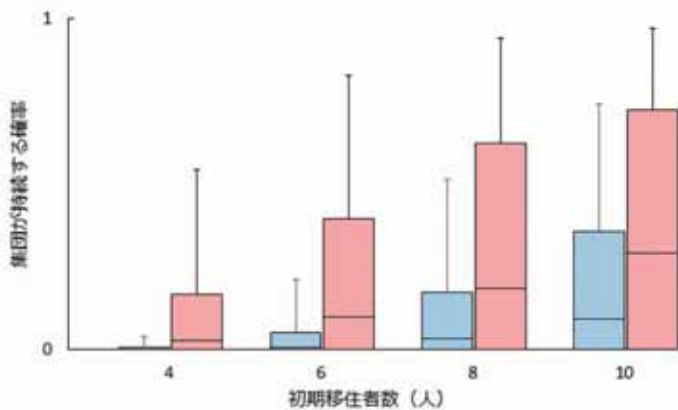
モンスーンは、日射に伴う陸と海の熱容量差から生じる季節風である。海から陸への風は、日本の梅雨のように、陸域に降雨をもたらす。温暖で氷床がない三畳紀にも、広大な超大陸パンゲアではモンスーンが活発化したため、メガ・モンスーンとよばれる。メガ・モンスーン地域が日射変化によって増減し、陸域の風化を促して、海洋へ栄

## CASE 3

先史人類の行動を  
人口シミュレーションで探る

アフリカを起源とする現生人類(ホモ・サピエンス)は、5万~3万年前頃から海を渡り、オーストラリアやニューギニア、日本の琉球列島などに進出した。意図的な移住だったとすれば当時の人類の高度な航海技術が示唆されるが、移住の一部が偶然の漂流の結果だった可能性も否定できない。島に到達した移住者の子孫が人口を維持できるかどうかは、初期移住者の数や年齢・性別構成に依存する。私たちは、移住者の子孫が集団として持続する可能性を人口シミュレーションにより評価し、計画的移住と偶然の漂流という二つのシナリオを比較した。

現生人類による渡海の開始時期については議論がある。考古学的証拠によれば、サフル大陸(現在のオーストラリア、ニューギニアを含む陸塊)には遅くとも3万5千年前(もしかすると6万5千年前)には人類が到達していた。日本では、3万5千~3万年前に琉球列島の全域にホモ・サピエンスが出現している。琉球列島には比較的小さな島が互いに離れて配置されているうえ、黒潮を含む複雑で強い海流があることから、航海は容易ではなかったはずだ。移住の成否の鍵を握るのは



偶然の漂流(ブルー)と計画的移住(ピンク)に由来する集団が持続する確率。49通りの死亡率・出生率の組合せのそれぞれについて確率を求め、その分布を初期移住者数ごとに箱ひし図で示した。

航海技術だけではない。屈強な男たちが力を合わせて舟を漕げば航海の成功は近づくかもしれないが、彼らだけでは子孫を残すことができない。集団の持続のためには、舟に乗る移住者の数や年齢・性別構成が適切でなければならないのだ。

私たちは、島に到達した十人程度の移住者とその子孫が誕生、結婚、死亡する過程を計算機上で繰り返しシミュレーションし、集団が持続する確率(絶滅する前に500人に達した割合とした)を計算した。当時の人類の年齢別死亡率や出生率に関する情報がなく、現実的な死亡率と出生率の範囲を近現代の狩猟採集民の記録から特定し、

それらを網羅的に組み合わせた7×7通りの仮定のもとでシミュレーションを行った。狩猟採集民が主として家族単位で移動することから、偶然の漂流のシナリオでは複数の家族(それぞれ成人男女一組と数名の子からなる)を乗せた舟が島に流されることを想定した。一方、到達した島に定住することを前提とした計画的移住では、男女同数の非血縁の若者(18~22歳)が舟に乗ることを仮定した。

シミュレーションの結果から、(1)十人程度の男女による計画的移住には、現実的な死亡率・出生率の範囲内で集団持続の十分な見込みがあること、(2)同人数でも複数の家族による偶然の漂流では集団持続の見込みが大きく減少すること、(3)しかしながら、死亡率と出生率の組合せによっては、偶然の漂流にも無視できない程度の集団持続の可能性があることなどが示された。図は、7×7通りの死亡率・出生率の組合せのそれぞれについて、偶然の漂流(ブルー)と計画的移住(ピンク)に由来する集団が持続する確率を求め、その分布を初期移住者数ごとに示したものである。

これらの結果は、後期更新世の現生人類による島への進出が、ごく少数の移住者により計画的に開始されたという仮説に理論的根拠を与えるものである。一方で、仮に漂流による島への到達が可能だったとしても、その後の集団の持続が困難であることから、偶然の漂流のシナリオは積極的に支持されない。また、きわめて好適な条件下では少数の漂流者由来する集団の持続もあり得たという知見から、より古い時代のホモ属によるインドネシア・フローレス島への進出は偶然の漂流で説明できるかもしれない。

本研究成果はY. Ihara *et al.*, *Journal of Human Evolution* **145**, 102839 (2020)に掲載された。

(2020年8月5日 UTokyo FOCUS)