

---

# 巨大磁気カイラル効果の観測とそのデバイス応用

## Observation of Giant Magnetochiral Effects and Its Applications to Devices

---

M21助自33

代表研究者 黒澤裕之 京都工芸繊維大学 電気電子工学系 助教  
Hiroyuki Kurosawa Assistant Professor, Faculty of Electrical Engineering and Electronics,  
Kyoto Institute of Technology

Broken symmetry brings about novel electromagnetic (EM) phenomena and functionalities. Time reversal symmetry is broken in a magnetized medium. Polarization rotation of EM waves called Faraday rotation occurs in the magnetic medium. Space inversion symmetry is broken in a chiral medium. Polarization rotation also occurs in the chiral medium.

Magnetochiral (MCh) effects known as directional birefringence for unpolarized electromagnetic waves are induced in a system with magnetism and chirality. The MCh effects in natural materials are usually very weak. Moreover, it is necessary to prepare a high dc magnetic field or a very low-temperature environment to enhance the MCh effect. In contrast to natural materials, it is possible to enhance the effects in metamolecules under a low dc magnetic field and at room temperature.

In this study, a numerical and experimental study shows unity-order MCh effects exhibited by a single metamolecule at microwave frequencies. The magnetism is given by the ferromagnetic resonance of ferrite under dc biased magnetic fields. The chirality is given by a spatial arrangement of dielectric cubes with Mie resonance. The interference between the magnetism and chirality results in a large nonreciprocity in power transmittance. The nonreciprocity has a two-order of magnitude enhancement compared with that reported in the previous studies. In addition to the amplitude of transmittance, we focus on the phase characteristics of the transmittance coefficient and evaluate the effective refractive index of the metamolecule. The directional birefringence caused by the MCh effects is nearly unity. We also show that the MCh effects by metamolecules with spontaneous magnetization are two orders of magnitude greater than those of previous studies.

Following the experimental demonstration of unity -order MCh effects, we develop a theoretical model based on electric circuits.

This study paves the way for practical use of the MCh effects.

### 研究目的

近年、メタマテリアルと呼ばれる人工構造を用いることで、室温かつ低静磁場の印加環境下で磁気カイラル (magnetochiral:以下MCh)

効果が大きく増強することが示された。これにより実用的な環境下でMCh効果の発現が実現可能となってきた。しかし、その大きさは未だに実用的な水準に到達していない。

本研究では、メタマテリアルにおけるMCh効

果を実用的な水準にまで高めることを目的とする。これまでの我々の研究から、高いQ値を持つカイラル共鳴と磁気共鳴との相互作用を精密に制御することで巨大なMCh効果が発現することが数値計算により分かっていたが、本研究ではその巨大MCh効果の実験的観測を行う。このような巨大MCh効果をマイクロ波領域と光領域で研究し、周波数横断的研究を行う。マイクロ波と光通信との協調はポスト5G/6G通信で期待される技術要素であり、将来的な両者の融合に資する研究となる。

従来から行われてきた外部からの静磁場印加によるMCh効果の発現に加え、自発磁化を用いた巨大なMCh効果の観測も行う。これにより実用的な環境下でMCh効果を応用することを行う。

これまでのMCh効果の理論では磁性は摂動として扱われていた。これでは巨大なMCh効果が発現することは説明することができない。摂動を前提としない理論モデルを構築することにより、巨大なMCh効果の理論的基礎を構築する。

## 概 要

磁性とカイラリティが同時に存在する系では、無偏光の電磁波に対する方向複屈折が誘起される。これを磁気カイラル (magnetochiral: 以下MCh) 効果という。MCh効果は極めて小さい効果であるとされてきたが、近年メタマテリアルのような人工構造により室温かつ低静磁場の印加下で大きく増強可能であることが示された。しかしながら、その複屈折の大きさは1%程度に留まっており、実用水準に達していなかった。更に、外部から静磁場を印加する必要があるなど、実用的な条件下でのメタマテリアルによる増強も報告されていなかった。

本研究提案では、単一メタ分子により方向

複屈折が1を超える巨大なMCh効果を実現した。メタ分子としてYIG (Yttrium Iron Garnet) ロッドの周囲に誘電体共振器をスパイラル状に配置した構造を用いた。YIGに外部から静磁場を印加することで強磁性共鳴による磁化がメタ分子に与えられる。用いた誘電体共振器はその誘電率が100を超え、Mie共鳴を有する。スパイラル状に配置された共振器により、空間的にねじれたMie共鳴が生じ、これによりカイラリティがメタ分子に与えられる。このメタ分子を導波管に挿入し、その透過率の非相反性を数値計算により評価した。数値計算からパワー透過率の差として1のオーダーに達する巨大な非相反性の発現が示された。この非相反性は磁化方向とカイラリティの反転操作に対して線形であり、磁性とカイラリティの積で説明されることが分かった。即ち、この非相反性はMCh効果に起因することが分かった。数値計算結果に基づいてメタ分子を実際に作製し、実験を行った。数値計算と同様に、パワー透過率に巨大な非相反性が観測され、その透過率差は65%に達した。透過係数の位相を評価するために、メタ分子が挿入された領域を有効媒質とみなし、その屈折率を求めた。屈折率差は1のオーダーに達しており、これは先行研究で報告された値よりも2桁も巨大な効果であることが明らかとなった。

巨大MCh効果を実用的な環境下で発現させることにも成功した。表裏に銅からなる分割リング共振器 (Split Ring Resonator: SRR) がパターンニングされたPPE基板を、厚み方向に自発磁化した円柱フェライト磁石 (ストロンチウム・フェライト) で挟み込んだ構造をメタ分子とした。このとき、基板の表裏のSRRのギャップ位置を空間的にねじって配置し、メタ分子にカイラリティを与えた。このMChメタ分子を導波管 (WR-90) に挿入し、透過係数を測定し

た。その非相反性を評価した結果、透過係数のパワー透過率差および位相差はそれぞれ30%および200°以上に達しており、巨大なMCh効果を示した。

以上のような巨大MCh効果の発現を実験的に示すことに成功したことに加え、理論モデルの構築も行った。従来のMCh効果のモデルでは、磁性とカイラリティを摂動として扱っていたためにそれらの積で表されるMCh効果も必然的に小さな効果となり巨大MCh効果を扱うことができない。そこで巨大MCh効果を取り扱い可能な理論モデルの構築を行った。カイラリティを空間的にねじれて積層した共振器対でモデル化した。磁性は磁気モーメントでモデル化した。このとき、直交した共振器対により円電流を記述し、外部から印加した静磁場により電流がLorentz力を受けて共振器対が結合している系でモデル化した。カイラリティと磁性の結合に関しては、同一偏光による電場で駆動される共振器どうしが誘導結合しているとして導入した。これらのモデルを表す回路方程式を解いた結果、磁気光学効果とカイラリティを表す応答関数と相互作用の強さの積により系の固有状態が記述されることが分かった。この際、MCh効果が磁気光学効果と光学活性による2重の偏光のねじれにより偏光無依存性が発現することが明らかになった。このモデルは磁性を摂動としては扱っておらず、巨大MCh効果の発現を記述可能である。

本研究を通じて、単一メタ分子によるMCh効果が1のオーダーに達する方向複屈折を有することが示された。これは先行研究で報告された値と比較して2桁も巨大な効果である。屈折率が電磁波の入射方向によって1のオーダーで変化するということは、MChメタ分子が入射方向によって全く異なる物質として振る舞うということを示している。これはMCh効果をデバ

イス応用するための実用水準に達したことを意味しており、MCh効果の研究におけるマイルストーンと位置づけられる。

## 本 文

### 1. はじめに

反転対称性の破れにより新奇な電磁気現象や高機能が実現される。磁化により時間反転対称性が破れ、磁性体中を伝搬する電磁波はその偏光面が回転する。これをFaraday効果というが、偏光依存かつ非相反である。右手と左手のように互いに空間的に重ならないため空間反転対称性が破れているが、鏡に映した場合に互いに重なる構造をカイラル構造という。カイラル媒質中においても偏光回転が生じ、偏光依存かつ方向依存な効果であるが、相反である。時間と空間が同時に破れている場合には、磁性とカイラリティが結合し、無偏光に対する方向複屈折を誘起する磁気カイラル(magnetochiral:以下MCh)効果が発現する。直感的には、Faraday効果と光学活性の偏光依存性が打ち消され、方向依存性のみが残った帰結として理解することができる。

MCh効果は自然物質を用いて研究がされてきたが、大きな効果を得るためには高磁場の印加や極低温環境が必要となり実用化の壁となっていた。これに対してメタマテリアルと呼ばれる人工構造を用いることにより室温かつ印加する静磁場が100 mT程度の実用的な環境下で1%程度のMCh効果による方向複屈折が生じることが報告されていた。しかし、実際のデバイスに応用するためには未だ十分な大きさに達していない。また、外部から静磁場を印加する必要があり、自発磁化により磁性を与えることが実用化には望ましい。

本研究では、マイクロ波領域において単一メタ分子によるMCh効果が誘起する方向複屈

折が1のオーダーに達することを実験的に明らかにする。更に、外部から静磁場を印加することなく、自発磁化を用いることによっても巨大MCh効果が単一メタ分子に発現することを実証する。このような巨大MCh効果が発現することは従来の理論モデルでは説明ができない。そこでMCh効果を説明する新しい理論モデルを構築した。

## 2. 巨大磁気カイラル効果の観測

まず、磁性とカイラリティを同時に持つメタ分子によりどの程度のMCh効果が発現するのかを数値計算により明らかにする。MCh効果を実験で観測するためには、前進波と後退波に対する透過率の差分を評価すればよい。この際、モードは単一モードであることが重要である。

図1に本研究で用いたメタ分子の模式図を示す。このメタ分子は誘電体宿主媒質に挿入されたフェライト・シリンダーとその周囲にスパイラル状に配置された3つの誘電体キューブから構成される。シリンダーの直径および長さはそれぞれ6 mmと30 mmである。誘電体キューブの1辺は6 mmである。シリンダーの中心線とキューブの中心間の距離は6.5 mmである。誘電体キューブは宿主媒質と接着しており、円柱の高さ方向に沿ってスパイラル状にキューブが配置されることによりメタ分子が右手、左手、アキラルの性質を持つ。この際に、キューブのねじれ角は $120^\circ$ とした。本研究では、+z方向に沿って3つのキューブが時計回りに配置されていた場合にカイラリティが右手であると

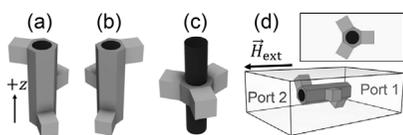


図1 右手 (a)、左手 (b)、アキラル (c) メタ分子の模式図。計算配置図 (d)。

定義した。+z方向はポート1から2への方向と定義した。左手は反時計回りの場合で与えられる。アキラルメタ分子は同一面上にメタ分子が配置されるためにカイラリティを持たない。

このメタ分子を空気で満たされている導波管WR-187に挿入した場合 (図1 (d)) の透過特性を計算する。図2 (a) に印加した静磁場が+155 mTの場合のパワー透過率スペクトルを示す。メタ分子のカイラリティは右手であった。誘電体共振器のMie共鳴に対応する信号がいくつか透過スペクトルに見られる。本研究では、最低次モードである3.93 GHz近傍に注目する。この周波数近傍では、 $|S_{21}|^2 \approx 0.65$  (実線) であり、 $|S_{12}| \approx 0.01$  (破線) となっている。ここで $S_{21}$ および $S_{12}$ はPort1および2からの入射における透過係数である。このパワー透過率の非相反性の起源を明らかにするために、吸収スペクトル $A=1-R-T$ を計算した結果を図2 (b) に示す。ここで、 $R$ および $T$ はパワー反射率およびパワー透過率である。ポート1および2から入射した場合はそれぞれ約20%および84%の吸収率を示す。これは巨大な非相反性により吸収スペクトルに差が生じることを示している。

この巨大な非相反性がMCh効果に起因していることを確かめるために、差分信号のカイラ

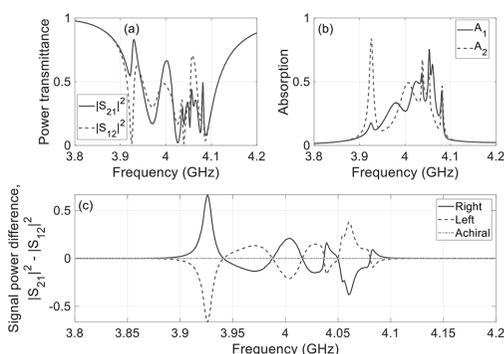


図2 パワー透過率スペクトル (a) および吸収スペクトル (b)。差分スペクトルのカイラリティ依存性 (c)。

リティと磁化方向依存性を計算した。カイラリティを右手から左手に切り替えたところ、差分信号の極性が反転した(図2(c))。更に、アキラルメタ分子では差分信号が消失した。磁化方向についても、磁化方向を反転させると差分信号の極性が反転し、ゼロ静磁場下では非相反性が消失した(図2(c)と同様のグラフとなる)。これらの結果は、パワー透過率の差分信号がカイラリティと磁化方向に関して、線形の関数であることを示しており、MCh効果が非相反性の起源であることが示された。

以上の数値計算結果に基づいて、実験を行った。図3に示すように、カイラリティとして右手(向かって左)、左手(向かって右)、そしてアキラル(中央)なメタ分子を作製した。誘電体ホスト媒質(tough1500、Formlabs、米国)は3Dプリンター(Form3、Formlabs、米国)により作製した。フェライト・シリンダー(オリエンタマイクロウェーブ、日本)をホスト媒質に挿入し、その周囲に3つの誘電体共振器をカプトンテープで接着した。作製したメタ分子を発泡スチロールに埋め込み、導波管WR187(Pasternack Enterprises、米国)に挿入した。発泡スチロールの屈折率はほぼ1とみなすことができるため、実験結果にはほとんど影響がない。この導波管を電磁石中に設置し、高周波ケーブルによりベクトルネットワークアナライ

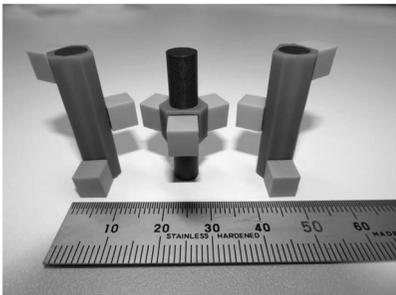


図3 作製したメタ分子の写真。

ザー(ZVA67、Rohde&Schwarz、ドイツ)と接続した。以上のような条件下で、反射係数( $S_{11}$ ,  $S_{22}$ )及び透過係数( $S_{21}$ ,  $S_{12}$ )を測定した。

図4(a)に+60 mTの外部静磁場の印加下における $S_{21}$ と $S_{12}$ のパワー透過率の測定結果を示す。測定に用いたメタ分子のカイラリティは右手であった。誘電体共振器の共鳴モードに起因する信号がいくつか観測されているが、周波数3.93 GHz付近の最低次モードに注目する。この周波数の近傍においては、 $|S_{21}|^2 \approx 0$ ,  $|S_{12}|^2 \approx 0.65$ ほどであり、パワー透過率の差が1のオーダーに達する巨大な非相反性が観測されている。図4(b)にこのメタ分子の吸収スペクトルを示すが、ポート1からの入射波は80%以上吸収され、ポート2からの入射波は30%程度以下の吸収に抑制されていることに、この巨大な非相反性が起因していることが分かる。

この巨大な非相反性がMCh効果に起因していることを確認するために、パワー透過率の差分スペクトルのカイラリティ及び印加静磁場の極性依存性を調べた。その結果を図5に示す。図5(a)は右手メタ分子、(b)は左手メタ分子に対する測定結果である。差分スペクトルは印加静磁場の値によってオフセットをつけて表示している。図5(a,b)において、外部静磁場の印加強度を上げるに従って、周波数シフトするモードの存在が確認できる(灰色でシェードされた領域)。この信号はYIGの強磁性共鳴に起因している。この信号に加えて、周波数4 GHz

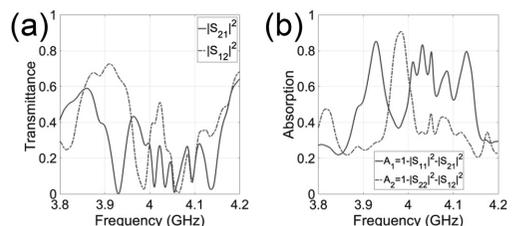


図4 パワー透過率(a)および吸収スペクトル(b)の測定結果。

付近にいくつかのモードが存在しているが、これは誘電体共振器のMie共振に起因する。図5(a)の信号極性は(b)と比べて反転しており、差分信号がカイラリティの反転操作に関して奇であることが分かる。更に、印加する静磁場の極性を反転させると差分信号の極性が反転しており、印加する静磁場の極性の反転操作についても奇であることが分かる。これらの結果は、観測されたパワー透過率の差分信号がカイラリティと静磁場の反転操作についての線形の積で表されることを示しており、MCh効果に起因すると結論づけられる。

これまでの測定結果は強度差によるものであったが、位相を含めた非相反性を評価するために、基本波であるTE<sub>10</sub>モードに対する有効屈折率を算出した。この計算を行うにあたり、メタ分子が挿入されている領域を有効媒質とみなした。この媒質からの反射が十分小さいと近似可能である場合、Sパラメータと有効屈折率 $\tilde{n}_{ji}$ との関係は次の式で与えられる：

$$S_{ji} = e^{i\tilde{n}_{ji}k_0d} \dots \dots \dots (1)$$

ここで $k_{10} = \sqrt{(\omega/c)^2 - (\pi/a)^2}$ はTE<sub>10</sub>モードの伝搬定数、 $c$ は真空中の光速であり、 $d$ はメタ分子の長さである。下付きの添え字 $j, i$ はポート・ナンバーを示す。Sパラメータから屈折率を求め、

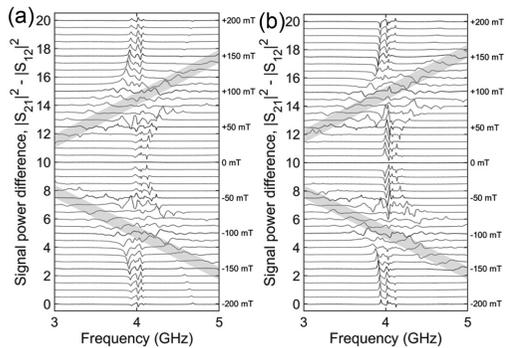


図5 右(a)及び左(b)カイラルメタ分子におけるパワー透過率差分スペクトルの印加磁場依存性。

その差分を求めた結果を図7に示す。メタ分子のカイラリティは右手であり、外部から印加する静磁場は+60 mTであった。図7において、3.85-3.95 GHzの帯域に注目する。Kramers-Kronigの関係から屈折率差の実部が分散構造を示す一方で虚部はピーク構造を示す。屈折率差の実部が方向複屈折を示しているが、周波数3.96 GHzにおいて位相差 $\arg(S_{21}) - \arg(S_{12}) \approx -62.2^\circ$ を示し、パワー透過率は $|S_{21}|^2 \approx |S_{12}|^2 \approx 0.42$ であった。パワー透過率がほぼ等しい条件下で大きな位相差がついていることから、屈折率差の実部の大きさ $|\Delta n'|$ が約0.7まで増大し、虚部 $|\Delta n''|$ はほぼ0である。これは1のオーダーで方向複屈折が生じていることを示している。次に方向2色性を示している虚部に注目する。周波数3.93 GHzにおいて位相差 $\arg(S_{21}) = \arg(S_{12}) \approx 280^\circ$ を示し、強度差 $|S_{21}|^2 \approx |S_{12}|^2 \approx 0.65$ であった。位相がほぼ等しい条件下で大きな強度差が生じたことに伴い、屈折率差の実部 $\Delta n'$ はほぼ0となり、虚部 $|\Delta n''|$ は約2.21で最大値をとる。これは1のオーダーで方向2色性が生じていることを示している。これらの方向複屈折並びに方向2色性は先行研究で報告された値よりも2桁も大きな値であり、メタ分子が電磁波の入射方向によって全く異なる物質として振る舞っていることを示している。これはメタ分子によるMCh効果が実用水準に達したことを意味している。

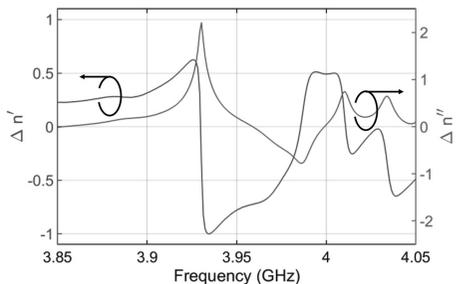


図7 有効屈折率差スペクトルの実部(左軸)及び虚部(右軸)。

### 3. 自発磁化をもつメタ分子による巨大磁気カイラル効果

以上で示したMCh効果の発現には外部から静磁場を印加する必要がある。MCh効果を実用で用いるためには磁性材料として自発磁化を持つ材料を用いることが望ましい。そこで自発磁化をもつメタ分子による巨大MCh効果の発現を実証する。図8の挿入図に調べたメタ分子の模式図を示す。表裏に銅からなる分割リング共振器がパターンニングされたPPE基板を、厚み方向に自発磁化した円柱フェライト磁石で挟み込んだ構造を有する。このとき、基板の表裏の分割リング共振器のギャップをねじって配置し、系にカイラリティを与えた。このメタ分子を導波管(WR-90)に挿入し、透過係数を測定した。その非相反性を評価した結果を図8に示す。透過係数のパワー透過率差および位相差はそれぞれ30%および200°以上に達しており、巨大MCh効果を示した。

### 4. 磁気カイラル効果の理論モデルの構築

これまでの理論では磁性を摂動として扱っていたため巨大MCh効果を扱うことができない。そこで、磁性とカイラリティを摂動として扱わないモデルを構築した。カイラリティを、互いに直交して積層し、相互インダクタンス $M$ を介して結合した共振器対で表した。磁性の存在は磁気モーメントにより特徴づけられるが、磁

気モーメントによる円電流を互いに直交した共振器で表した。この際に共振器対が、電流に働くローレンツ力 $\vec{l} \times \vec{B}_0$ を介して結合している。これら磁性とカイラリティを表す共振器対の間の結合によりMCh効果が発現する。 $x$ および $y$ 偏光に対応する共振器どうしが誘導結合(インダクタンス $L_M$ )しているとして、磁性とカイラリティの間の結合を導入した。このような4つの共振器の運動方程式を書き下すと次のようになる：

$$L_1 \frac{d^2 q_{x,MO}}{dt^2} + R_1 \frac{dq_{x,MO}}{dt} + \frac{q_{x,MO}}{C_1} - s B_0 \frac{dq_{y,MO}}{dt} + L_M \frac{d^2 q_{x,Ch}}{dt^2} = E_x d_1, \dots \dots \dots (2)$$

$$L_1 \frac{d^2 q_{y,MO}}{dt^2} + R_1 \frac{dq_{y,MO}}{dt} + \frac{q_{y,MO}}{C_1} + s B_0 \frac{dq_{x,MO}}{dt} + L_M \frac{d^2 q_{y,Ch}}{dt^2} = E_y d_1, \dots \dots \dots (3)$$

$$L_2 \frac{d^2 q_{x,Ch}}{dt^2} + R_2 \frac{dq_{x,Ch}}{dt} + \frac{q_{x,Ch}}{C_2} + M \frac{dq_{y,Ch}}{dt} + L_M \frac{d^2 q_{x,MO}}{dt^2} = E_x e^{-i\phi} d_2, \dots \dots \dots (4)$$

$$L_2 \frac{d^2 q_{y,Ch}}{dt^2} + R_2 \frac{dq_{y,Ch}}{dt} + \frac{q_{y,Ch}}{C_2} + M \frac{dq_{x,Ch}}{dt} + L_M \frac{d^2 q_{y,MO}}{dt^2} = E_y e^{+i\phi} d_2, \dots \dots \dots (5)$$

ここで、 $L_1, R_1, C_1, L_2, R_2, C_2$ は磁性および光学活性を担う回路のインダクタンス、抵抗、およびキャパシタンスである。 $s$ はローレンツ力による結合係数、 $M$ は光学活性を表す回路同士の相

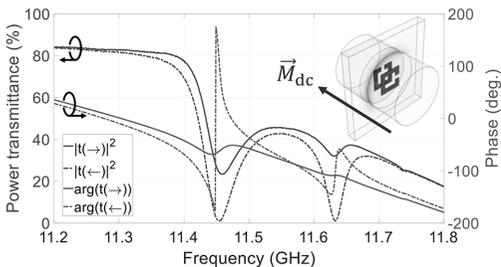


図8 透過スペクトルの測定結果。

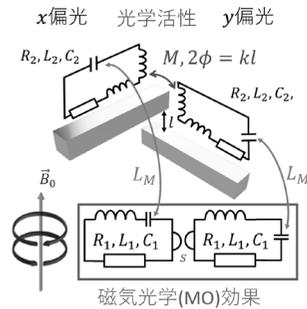


図9 磁性とカイラリティを表す回路モデルとそれらの結合系の概念図。

互インダクタンス、 $L_M$ は光学活性および磁気光学効果を表す回路間の相互インダクタンスである。 $E_x, E_y$ は入射電場であり、 $d_1, d_2$ は容量素子のギャップを表す。光学活性を表す回路は空間的に離れているため位相差 $2\phi$ が回路間に導入されている。これらの方程式から磁性を担う電荷 ( $q_{x,MO}, q_{y,MO}$ ) について解くと

$$\begin{pmatrix} q_{x,MO} \\ q_{y,MO} \end{pmatrix} = \left\{ f_{MO} \begin{pmatrix} \Omega_1^2 e^{-i\phi} & -i\omega \bar{s} B_0 e^{i\phi} \\ i\omega \bar{s} B_0 e^{-i\phi} & \Omega_1^2 e^{i\phi} \end{pmatrix} - \frac{\Omega_1^2}{\bar{d}_1} f_{MO} f_{Ch} \begin{pmatrix} \Omega_1^2 & -i\omega \bar{s} B_0 \\ i\omega \bar{s} B_0 & \Omega_1^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Omega_2^2 e^{-i\phi} & \omega^2 \bar{M} e^{i\phi} \\ \omega^2 \bar{M} e^{-i\phi} & \Omega_2^2 e^{i\phi} \end{pmatrix} \right\} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} \dots \dots \dots (6)$$

となった。ここで

$$\begin{aligned} \Omega_j &= \sqrt{\omega_{LC(j)}^2 - \omega^2 - i\gamma_j \omega}, (j = 1, 2), f_{MO} = \\ \bar{d}_1 / (\Omega_1^2 - (\omega \bar{s} B_0)^2), f_{Ch} &= \bar{d}_2 / (\Omega_2^2 - (\omega^2 \bar{M})^2), \omega_{LC(j)} = \\ 1 / \sqrt{L_j C_j}, \Omega_j &= \omega \sqrt{L_M / L_1}, \bar{s} = s / L_1, \bar{M} = \\ M / L_2, \bar{d}_1 &= d_1 / L_1, \bar{d}_2 = d_2 / L_2 \end{aligned}$$

である。入射電場の変調を表す式 (6) の中括弧内の行列の固有値を求めたところ次の結果を得た：

$$\Lambda_{MO} = f_{MO} (\Omega_1^2 \pm \omega \bar{s} B_0) \left\{ 1 - \frac{\Omega_1^2}{\bar{d}_1} f_{Ch} (\Omega_2^2 \mp \omega^2 \bar{M} \phi) \right\} \dots \dots \dots (7)$$

ここで複合 $\mp$ は左右円偏光を示す。最初の因子 $f_{MO} (\Omega_1^2 \pm \omega \bar{s} B_0)$ は磁気光学効果の応答関数、 $\Omega_1^2 / \bar{d}_1$ は相互作用の強さ、そして $f_{Ch} (\Omega_2^2 \mp \omega^2 \bar{M} \phi)$ は光学活性の応答関数を表す。これは系の応答が磁気光学効果と光学活性、そしてそれらの相互作用の強さの積で記述されるという極めて単純な理解が可能であることを示している。式 (7) の中で、MCh効果を表す項は

$$\Lambda_{MCh} = (\Omega_1^2 / (2\bar{d}_1)) f_{MO} f_{Ch} \omega^3 \bar{s} B_0 \bar{M} l k, \dots \dots \dots (8)$$

と書け、複合が相殺され偏光無依存かつ方向依存 ( $k$ ) であり、磁性とカイラリティとの単純な積で与えられることが分かった。また、光領域においてこのモデルの妥当性を検証した。

## 5. まとめ

単一メタ分子を用いてMCh効果による1のオーダーに達する方向複屈折を実現することに成功した。数値計算を用いて巨大MCh効果をもつメタ分子を設計し、実験的に実証した。このような巨大な効果は磁性体の強磁性共鳴とスパイラル状に配置され、カイラリティを持つMie共鳴との干渉により誘起される。外部から静磁場を印加することなく自発磁化をもつメタ分子によっても同様の巨大MCh効果の実証に成功した。このような巨大なMCh効果を説明する理論モデルの構築を行い、磁気光学効果と光学活性、そしてそれらの相互作用の大きさの単純な積でMCh効果が記述可能であることを示した。

本研究を通じて、マイクロ波領域のMCh効果による方向複屈折が1のオーダーに達することを示すことに成功し、自発磁化を用いたメタ分子でも同様の巨大な効果が示された。これにより実用水準に達したといえる。実験的研究だけでなく理論研究も行い、MCh効果を単純なモデルで説明することに成功し、そのデバイス応用に重要な指針を与えた。

## 今後の研究の見通し

本研究により、マイクロ波領域で方向複屈折が1を超える巨大な磁気カイラル効果の観測に成功した。更に、外部から静磁場を印加せずとも自発磁化により巨大な磁気カイラル効果が発現することを実証した。これらの成果によりマイクロ波領域における磁気カイラル効果のデバイス応用の目途がついたと言える。実際に小型非相反デバイスとして基礎技術のシーズの応用先を探ることが必要となる。

今後の展開としては、光領域で巨大な磁気カイラル効果を実証することが挙げられる。マイクロ波領域では低損失な磁性材料が利用可

能であるが、光領域では損失が大きく本研究のメタ分子を光領域へ単純にダウンスケーリングしたのでは巨大磁気カイラル効果を発現することはできない。しかし、マイクロ波領域で巨大化に成功したような高Q値をもつ共鳴との干渉を緻密に制御することで実現できる可能性がある。実際に数値計算ではあるが、本研究においても磁性体から成る導波路共鳴で高いQ値と大きな光学活性が同時に実現した結果、光領域としては4%ほどの増強した磁気カイラル効果が得られている。実用化するためにはもう1桁増強する必要があり、この壁を突破する

ことができれば大きな波及効果があるといえる。

#### 本助成金による主な発表論文、著書名

- 1) Hiroyuki Kurosawa\*, Satoshi Tomita, Kei Sawada, Toshihiro Nakanishi, and Tetsuya Ueda, “Unity-order magnetochiral effects exhibited by a single metamolecule” *Optics Express* **30**, 37066 (2022).
- 2) 黒澤裕之, 富田知志, 澤田桂, 中西俊博, 上田哲也, “自発磁化をもつメタ分子による巨大磁気カイラル効果” 第69回応用物理学会注目講演Editor’s Picks, 応用物理学会(フォトンクス分科会), 2022.
- 3) 黒澤裕之, 澤田桂, 中西俊博, 富田知志, 上田哲也, 第83回 応用物理学会 秋季学術講演会 Poster Award.