



## < 研究紹介 >

研究項目 A02: 計画研究才

「共振型3次元メタマテリアルの作製と機能評価」

研究代表者 田中拓男 (理化学研究所)

研究分担者 彌田智一 (東京工業大学), 藤川茂紀 (理化学研究所)

### ・はじめに

本研究計画班の研究目的は、可視光領域で動作する共振型メタマテリアル (以下共振型光メタマテリアル) を実現することである。共振型光メタマテリアルでは、ナノメートルスケールの金属共振器の自由電子と光波とが局在型プラズモンなどを通して結合し、これが新たな電磁場を作り出す事で、特異な光学特性を得ることができる。共振型光メタマテリアルを実現する上で現在直面している課題は、メタマテリアルを構成する100nm程度の大きさの極微細金属構造体を、mm~cmといったマクロスケールな空間全域に3次的に集積化させる加工技術がないという問題である。この問題を解決するには、トップダウン的な微細加工技術とボトムアップ的な構造形成技術とが密に融合した新しいナノ加工技術の開発が必須である。そこで、本研究では、可視光領域で動作する共振型メタマテリアルの実現を目指して、これまでの研究で得た構造設計技術、トップダウン的レーザー加工技術や電子線加工技術、光学特性評価手法、光デバイスへの応用提案などの研究成果を基礎として、さらにポリマーや金属ナノ粒子などの自己組織化現象を取り入れたボトムアップ技術を取り入れて、ナノスケールの3次的な金属構造を mm~cm 角のサイズで実現し、可視光の周波数で動作する共振型光メタマテリアルの創成に挑戦し、さらに、基礎となる理論構築や特性評価技術の開発、光機能デバイスへの展開を図る。

### ・これまでの研究

共振型メタマテリアルとは、波長より細かな微小共振器をホストとなる材料中に3次的に集積化したものである。すなわちメタマテリアルは、形ある共振器を集めた一種の構造体である。しかし、個々の構造のサイズが波長より小さいので、それらは光には直接感知されず、光にとっては均質な材料として振る舞う。そのため、「メタ構造体」とは呼ばず、「メタマテリアル」と呼ばれる。

このメタマテリアルの研究は、2000年頃から活気を帯びてきた学問分野であるが、その研究は、マイクロ波領域での研究からスタートした。そして、現在も動作周波数を

---

高めて光領域で動作するメタマテリアルの実現がこの分野の研究の1つのトレンドに金属が大きな周波数分散を持ち、マイクロ波領域のように完全導体として取り扱えないことである。

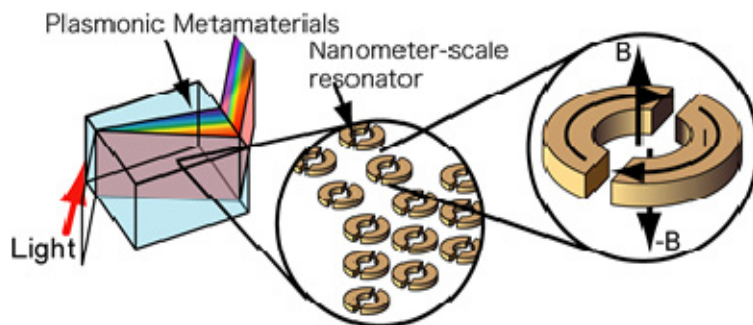


図1 共振型メタマテリアル

我々はこの金属の分散特

性を、複素インピーダンスで記述し、これを用いてメタマテリアルが生み出す実効透磁率の変化を解析した。その結果の一例が図2である。これは銀でできた2重リング Split Ring 共振器(SRR)構造と1重リング Split Ring 共振器が示す透磁率変化の周波数依存性を示したものである。両者を比較すると、100THz 領域より高い周波数領域においては、2重リング型 SRR では大きな透磁率変化を期待することができないのに対し、1重リング型 SRR は大きな透磁率変化を実現でき、可視光域全域をカバーして紫外光領域に到達する範囲で、2.0 を越える透磁率変化を実現できることを確認した。このようにメタマテリアルに最適な形状には周波数依存性があり、光周波数領域においては、インダクタンスが大きく、キャパシタンスが小さな共振器構造が適切であることを明らかにした(表1)。

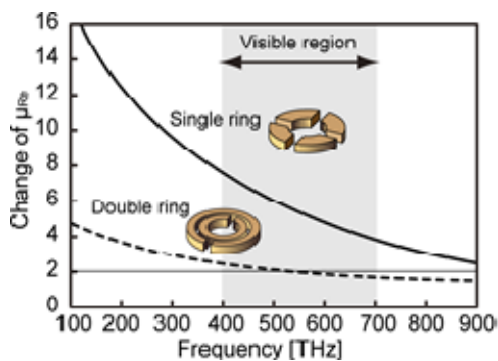


図2 SRR の形状と透磁率変化

表1 メタマテリアル共振器素子の設計指針

周波数	<100THz	100THz<
構造	多重リングSRR	単リングSRR
要求	大きなこと幅広のリング	小さなこと大きなL
共振周波数	スケーリングに対して線形 $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{CL}}$	スケーリングに対して非線形 $f_0 < \frac{1}{2\pi\sqrt{CL}}$
磁気応答減少の原因	Rsの増加	スケーリングに伴うLの減少

また、3次元的な構造をもつメタマテリアルを実現する加工技術として、レーザーを使ってナノメートルスケールの構造を持つ金属構造体を直接加工できる手段を開発した。これは2光子還元法と呼ばれる手法で、図3に示すように金属イオンを含む材料にフェムト秒レーザーを集光照射して、そのレーザースポット部において局所的に金属イ

オンを還元して金属化させる手法である. この手法では, レーザースポットを3次元的に走査するだけで, 任意形状をもつ3次元金属構造体を直接作り出すことが可能となる.  
 図5 ポリマーフィルム上に作製した金二重ナノピラー配列.

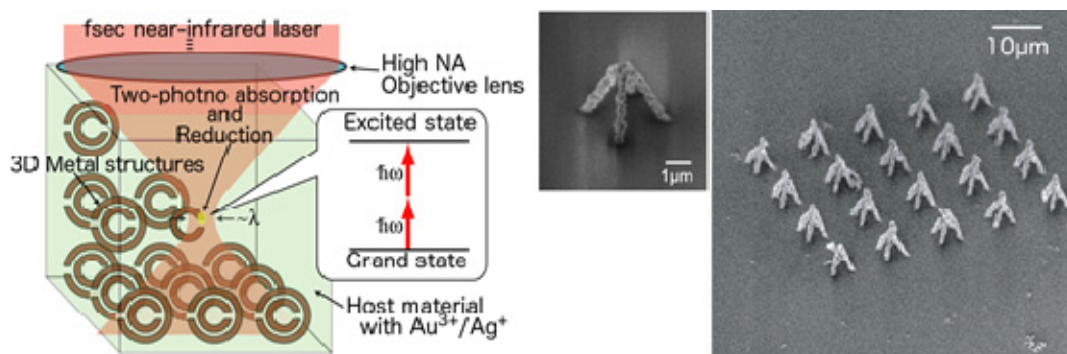


図3 二光子還元法で作成された3次元銀ナノ構造

### ・本研究の計画

本研究では, 上で述べた, 田中が持つ共振型光メタマテリアルの構造設計プロトコルを基本として, これにボトムアップ手法が潜在的に持つ構造の揺らぎを許容しながらも高い Q 値を得るための最適な構造を探る. トップダウン的な加工技術としては, 田中が開発した2光子還元法を中核技術に据え, この手法の高速化と量産化を進めながら, 3次元金属ナノ共振器構造の基本形成技術確立する. また化学的に配列した金属ナノ粒子を自己組織的に配列させて, メタマテリアル構造を構築する技術についても研究を行う.

分担者の彌田は, 自己組織化材料や植物・生物がつくり出す 3 次元微細構造をテンプレートとして捉え, 光メタマテリアル構造のあたらしいボトムアップ型作製技術への応用を目指す. このような手法の利点は, 大面積・大量生産が挙げられるが, 一方で潜在的に構造揺らぎをもつため, 高い Q 値の実現が難しいという問題を抱えている. そこで, ブロックコポリマーのナノ相分離による自己組織化構造と藻類のらせん構造をテンプレートに用い, 共振計測セットアップに適した金属ナノ構造の作製法を開発する. これまでに, 藻類スピルリナへの表面金属めっきを検討し, 微細マイクロコイルの大量作製に成功している(図4). 今後は, 高 Q 値を目指した作製法の改良と構造探索・設計を行う. 学術的には, 構造揺らぎ特有の共振特性の発現も同時に検討する.

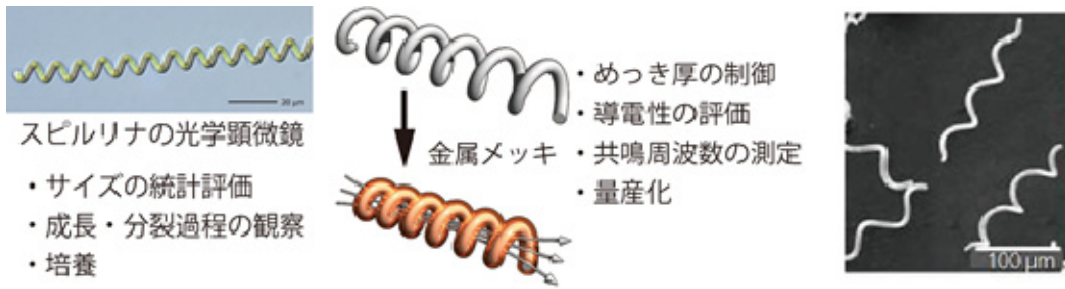


図4「スピルリナ」をテンプレートとしたメタマテリアルの作製

藤川は、ナノコーティングをベースとする独自に開発した微細加工技術を基に、円柱型鋳型上への薄膜積層と、被膜の一部を選択的に除去する方法によって、ナノメートルレベルでギャップの幅を制御した金二重ナノピラー配列を簡単に、均一かつ短時間で大量作製する技術を確認した(図5)．そして作製されたこの金二重ナノピラー配列が超高感度プラズモンセンサーとしての機能を見出している．この手法は、コーティング技術やエッチング技術といった、大面積で均一に処理できる技術を基本としているため、ナノギャップ構造体を、精密に制御しながらウェハーサイズの基板上に簡便に並べることができるという画期的な特徴を持っている．本研究では、この技術を最大限に活用し、形状・サイズ制御された金属ナノ構造体アレイを作製し、特異な光学的特性を有する金属ナノ構造アレイの大面積・大量作製を目指した研究を行う．

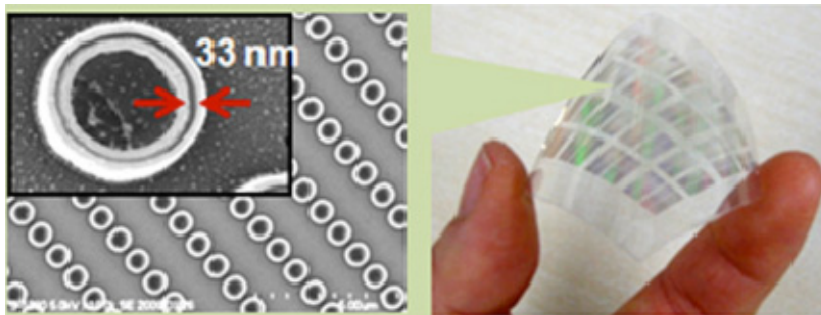


図5 ポリマーフィルム上に作製した金二重ナノピラー配列