

研究報告書

「転送光学に基礎をおく超解像顕微鏡とメゾ機構のその場観察」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 平成 22 年 10 月～平成 26 年 3 月

研究者: 岩長 祐伸

1. 研究のねらい

顕微鏡の解像度の物理的限界は19世紀後半に定式化され、回折限界として知られている。回折限界は照射光の波長の半分のサイズが結像できる最小のサイズであることを意味している。この限界により、光学顕微鏡で観察できるサイズの下限は300ナノメートル程度であることが広く周知されている。この回折限界を厳密に表現すると、「均一な光の媒体を用いて結像すると、得られる最小のサイズは波長の半分程度」ということになる。つまり、均一な光の媒体を用いて、という前提がある。論理的には、この前提に縛られていない状況下で結像を得ると、もっと小さなサイズまで見える(結像できる)可能性がある。

2000年以降、メタマテリアルと呼ばれる新しい光の媒体を研究する分野が急速に発展し、世界中で精力的な研究競争が展開されている。フォトニック・メタマテリアルは人工的なサブ波長構造からなる光の媒体で、「不均一な」光の媒体である。私はこの点に着目し、メタマテリアルを活用したハイパーレンズを創製して、これを組み込むことのみで光学顕微鏡の性能を向上させる超解像顕微鏡を2010(平成22年)年5月に提案し、実現することを目指してきた。具体的には、メゾスコピックスケール(数十ナノメートルから1マイクロメートル程度のスケール、以下メゾスケール)までを観察対象にできるようにすることを目標として設定した。開発する超解像顕微鏡は性能が向上した光学顕微鏡であることから、対象をその場観察でき、なおかつ動的画像も取得できる顕微鏡を構築することも目標とした。これらの点から、既存の電子顕微鏡や走査型顕微鏡等と比べて、対象をその場観察ができる、非接触・非侵食型である、対象の染色が不要などの利点をもつ新たな光学顕微鏡であると特長付けることができる。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究では、最終目標である回折限界を超える性能をもつ超解像顕微鏡の開発を実現するために、つぎの3つのステップに分けて研究を遂行した。

(A) 動作波長を可視光域にもつハイパーモードをもつメタマテリアルの数値的設計

(B) ハイパーレンズアレーの作製

(C) ハイパーレンズの光学超解像性の実証実験。

ここでは、光の回折(広がり)を抑えて伝搬する光のモードをハイパーモードと呼ぶ(図1参照)。ハイパーモードを活用したレンズをハイパーレンズと呼び、それをアレー化したものをハイパーモードアレーと名付ける。各項目については、つぎの詳細を参照願いたい。

本研究では数値的設計、ナノ加工による作製、光学超解像性の実証を、個人研究として一貫して単独で実施したことにより、各工程でのフィードバックが即時にかかり、研究全体の進展を早めることができた。最終的な結果として、回折限界を超える光学像を観測し超解像性

(ハイパー分解能)を実証に成功した(図3参照)。今回、構築した顕微鏡はメゾスケールを光学観察できるもので、本さがけ研究における核心的課題を達成した。

(2) 詳細

研究テーマA「ハイパーモードをもつメタマテリアルの数値的設計」

図1は回折限界より小さいサイズのスリットを光が透過する様子を示す。図1(a)は光の透過側が空気(均一媒体)からなり、そのときの光の伝搬の様子を疑似カラー表示で図1(b)に示している。光はスリット幅程度進行するだけでスリットの2倍程度まで急速に広がる。この図は光の回折現象を数値計算によって可視化したものである。図1(c)はスリットを通った光が金属絶縁体多層構造のメタマテリアルを伝播する配置を示している。図1(d)は光の回折を抑制してスリット幅を維持した光線状の伝播を可能にするハイパーモードを示している。ハイパーモードはメタマテリアル中の光の伝搬モードのうち、波数分散が特別な条件を満たすものによって実現できる[論文 1]。

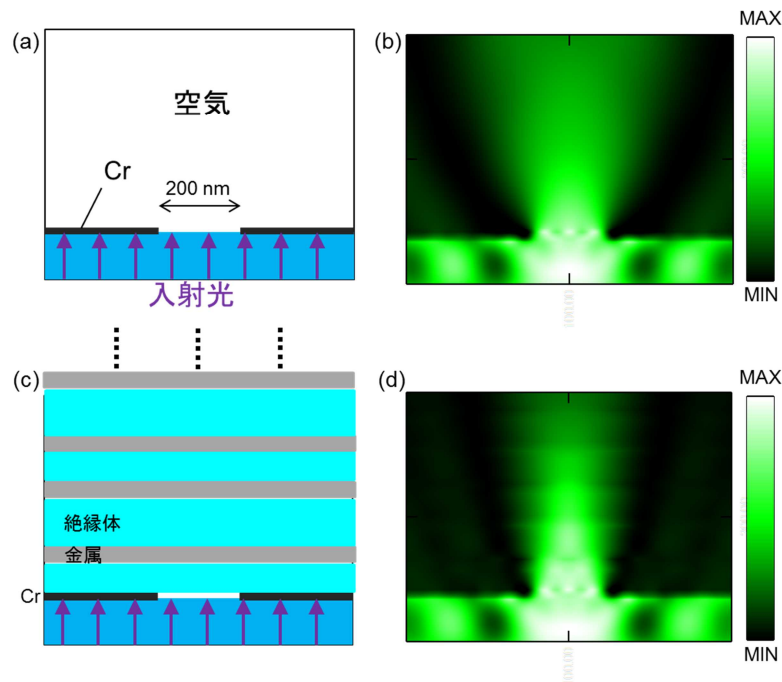


図1. (a) 回折限界未満の幅のスリットに下から光を照射する配置。
 (b) 配置(a)で光を照射したときの伝搬光の上向き成分(疑似カラー表示)。
 (c) 回折限界未満の幅のスリットを透過した光が金属絶縁体多層構造のメタマテリアルを伝播する配置図。
 (d) 配置(c)で光を照射したときの伝搬光の上向き成分(疑似カラー表示)。

メタマテリアルの光の伝搬を固有モードから第一原理的に解析する方法を確立したことで[1-4]、メタマテリアルで常用されているモデルによって設計と実際のメタマテリアルの間に意図せぬ不一致が生じないように細心の注意を払った。金属絶縁体多層構造のメタマテリアルの厳密解析としてフォトニック・ブロッホ状態を求め[1]、ハイパーモードが可視光でも現れる構造パラメータを新たに発見し、ハイパーレンズの設計に取り込むことができた。

研究テーマB「ハイパーレンズアレーの作製」

図2はハイパーレンズアレー作製の工程を模式的に示している。多段階のナノ加工を単独で実施して、最終的にハイパーレンズアレーを得た。

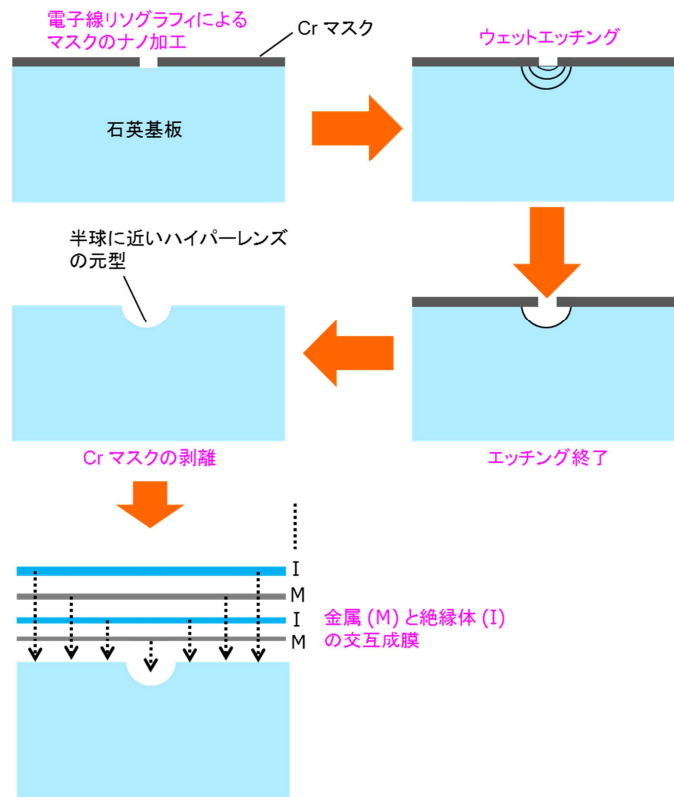


図2. ハイパーレンズアレー作製の工程(模式図)。モールドのナノ加工から、ハイパーレンズの完成まで。

研究テーマC「ハイパーレンズの光学超解像性の実証実験」

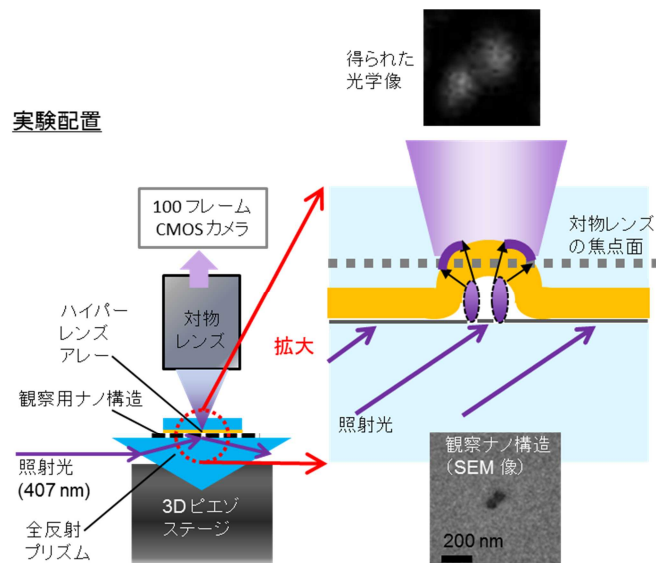


図3. ハイパー分解能の実証実験配置(模式図)と観察像の一例。

図3はハイパー分解能の実証実験配置を模式的に示している。照射光は全反射プリズムによって暗視野配置で観察対象を照らし、ハイパーレンズで対象の散乱像を回折限界以上にまで拡大して通常の光学顕微鏡で観察する系を構築した。

図3の右側ではハイパー分解能の実証実験として、円形のナノ構造が2つ隣接した像を2つの光学像として分離して見ることができるかどうか検証を行った。隣接距離は約 70 nm であり、照射光の波長 405 nm の 5.7 分の 1 に相当する。回折限界は波長の2分の1であることから、得られた光学像は回折限界未満の対象観察に成功したことを示している。なお、観察光学像は CMOS カメラで一括取得されたもので、走査イメージではない。

このように構築した観察系はハイパー分解能をもつ超解像顕微鏡であることを実証できた。ハイパーレンズを含めたこの超解像顕微鏡の倍率から観察サイズの下限を見積もると、さらに小さいもの、50 nm を切るサイズまで観察可能である。従来の光学顕微鏡の観察サイズの下限(約 300 nm)より1桁下のメソスケールまで観察することを今回の超解像顕微鏡は可能にしている。

3. 今後の展開

従来の光学顕微鏡の性能を向上させた超解像顕微鏡は汎用的であるため、多様な観察対象のその場観察に有用である。今後観察の実例が増えていくことで、その有用性が広く認知されていくと予見され、将来的にはメソスケールの現象をその場観察した結果をもとに現象を解明する新規の研究分野(「メソスケール科学」)の基本ツールとなることが期待される。メソスケールには細胞内ダイナミクス、細胞間ダイナミクスなどの未解明現象が多く存在する。これらの問題が今回の超解像顕微鏡の1つの応用先と考えられる。

4. 評価

(1) 自己評価

本さがけ研究を通じて、ハイパーレンズを活用して回折限界未満の対象の観察光学像を得るという未踏の試みに成功した。ナノ構造からなるメソスケール構造の光学像を直接その場観察し、顕微鏡として対象の結像を得た今回の成果は、光学顕微鏡の分解能を1桁上げた成果である。回折限界は定式化から140年以上経つが、その物理限界のために多くの補完技術を取り込んだ顕微イメージング技術開発を科学者に課してきた側面がある。今回のハイパーレンズを用いた超解像顕微鏡は回折限界を超える多くの努力のなかでも最も直接的に光学顕微鏡の性能向上を実証したもので、光のみで前処理・後処理なく「見える」世界を1桁広げた先駆的成果であると自己評価している。

他方で、メソスコピックスケールの動的現象をその場観察するという発展的目標は研究期間内に達することができなかった。一番大きな原因は回折限界の壁が極めて厚く、超解像光学像を得るまでに多くの時間と努力を要したからであった。もう一つには保持方法も含めたメソスコピックスケールの観察対象に相当の準備が必要であることも原因となった。

3年半にわたる本さがけ研究の終了時点では、空間分解能だけを捉えて、前処理または後処理の必要な他の超解像技術との差異があまりないと見る向きもあるかもしれないが、光のみで動的その場観察できる今回の超解像顕微鏡は、今後観察応用が進むにつれて、その真価が明らかになると考えている。

(2) 研究総括評価(本研究課題について、研究期間中に実施された、年2回の領域会議での評価フィードバックを踏まえつつ、以下の通り、事後評価を行った)。

光学顕微鏡には、空間分解能に固有の原理的限界が存在する。これを打開するため、これまで共焦点顕微鏡や微分干渉顕微鏡、各種超解像顕微鏡が開発されてきた。しかしながら、メソスコピックスケールにおける動的現象を観察し解明する事は容易でなかった。

岩長研究者は、この問題を解決する手法としてメタマテリアルを活用することにより、回折限界以下の分解能で観察できる光学顕微鏡の開発を目指した。キーポイントはハイパーレンズで、絶縁体と金属膜からなる多層膜からなる半円球状のレンズである。使用する光の波長に対して最適化した多層膜を設計し、実際に作製して分解能を評価した。その結果、作製したハイパーレンズと通常の光学顕微鏡との組み合わせで、約 70 nm(波長の 5.7 分の1)の分解能が得られる事を示した。また、ハイパーレンズを2次元に配列する事で、観察領域の制限を解決できる事も示した。

アイデアやシミュレーションで得られる結果を実現するために微細加工が必要な場合、アクセスできる装置や技術に依存するが、さらに加工技術のレベルにも依存する。このさきがけ研究で得られた分解能は、現在のところ他の超解像顕微鏡と同程度まで向上しているが、結果は決して限界ではなく、新たな加工技術の導入や開発により将来さらなる高分解能が期待できる。また走査することなく一括してイメージ観察できる利点を生かして、今後その場観察を動的に行うデモンストレーションを実現し、このユニークな超解像顕微鏡のポテンシャルを示していくことを期待する。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1. M. Iwanaga, "Photonic Metamaterials: a new class of materials manipulating light waves," Science and Technology of Advanced Materials, 2012 年, Vol. 13, No. 5, 053002. *Editor's choice for Highlight 2012*
2. M. Iwanaga, "First-Principle Analysis for Electromagnetic Eigen Modes in an Optical Metamaterial Slab," Progress In Electromagnetics Research, 2012 年, Vol. 132, p. 129-148.
3. M. Iwanaga, "Enhancement of local electromagnetic fields in plasmonic crystals of coaxial metallic nanostructures," Physical Review B, 2012 年, Vol. 85, No. 4, 045427.
4. M. Iwanaga, "In-plane plasmonic modes of negative group velocity in perforated waveguides," Optics Letters, 2011 年, Vol. 36, No. 13, p. 2504-2506.

(2) 特許出願

研究期間累積件数: 1件
(平成 26 年 3 月末現在是非公開)

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

招待講演7件(登壇分):

- 岩長祐伸「フォトニック・メタマテリアル: 現状と展望」日本フォトニクス協議会定例会、

2013年7月。

- M. Iwanaga, “Transmission-Enhanced Bloch States in Stacked Uniaxial Metamaterials,” The First International Conference on Emerging Advanced Nanomaterials (ICEAN 2012), October 2012.
- 岩長祐伸 「フィッシュネット・メタマテリアルにおける面内プラズモン伝搬」日本学術振興会光エレクトロニクス第130委員会、2011年12月。

ほか4件

受賞1件:

- コニカミノルタ画像科学奨励賞: 岩長祐伸 「ハイパーレンズからなる大面積・超解像プレートの研究」(2013年3月11日)

著作物: 日本語解説4件、分担著書3件(内訳日本語2件、英語1件)

プレスリリース1件:

- 「負の屈折現象を生み出す逆進的な光の流れ解明」(2011年6月7日)
日刊工業新聞「逆方向の光が要因」(2014年7月掲載)
科学新聞「負の屈折現象を可能にする逆進的な光の流れ解明」(2014年6月掲載)