

金属テーパー構造における光ナノ超集束の数理解析
とその実験応用(2)

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2012-12-26 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 栗原, 一嘉 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10098/6986

福井大学平成22年度重点研究「競争的配分経費（若手研究者支援）」
**金属テーパ構造における光ナノ超集束の数理解析と
その実験応用（2）**

研究代表者： 栗原 一嘉（教育地域科学部・准教授）

概 要	回折限界を超えて光のエネルギーを閉じ込める光ナノ超集束の構造として、金属テーパ構造が注目されている。今まで、金属テーパ構造として、円錐や楔の構造が解析的に詳しく調べられてきたが、実験的に重要なテーパ構造の先端曲率を考慮することは非常に困難であった。しかし、私が提案した不完全な変数分離法を使えば、このような困難は回避できる。このことを実証するものとして、昨年度に放物体の構造を解析し、本年度は、放物筒の構造を解析した。その結果、放物筒の構造でも、放物体の構造と同じように、光ナノ超集束が起こらないことが数理解析から明らかになった。また、光ナノ超集束を実験的に実証するために、V溝構造での超集束に関して、テラヘルツ波を用いて調べた。
関連キーワード	ナノ光学、表面プラズモン、超集束、テーパ構造、金属導波路

研究の背景および目的

小学校の理科でミジンコなどの小さな生物を観察するために光学顕微鏡を使うが、光学顕微鏡が小さい物を観察できると言っても原子1つひとつまで観察できるわけではない。そこには観察できる空間分解能の限界があり、光学顕微鏡では約200nm (= 0.2 μ m = 0.0002mm)であり、それより約1000倍も小さい原子（水素原子は0.1nm程度）を観察することは不可能である。この空間分解能の限界は「回折限界」として知られており、波動としての光の回折現象が本質的に関係している。回折限界は、理論的に、光の波長の約半分である。

回折限界を乗り越えようとする試みは、1928年のSyngéによる微小開口を利用した顕微鏡の研究にまでさかのぼることができるが、近年の研究は、表面プラズモンと呼ばれる金属表面を伝搬する光を利用したものである。表面プラズモンは、金属中の自由電子と光が強く結合した状態であり、物理学的にはポラリトンと呼ばれる準粒子である。プラズモンという用語が入るのは、金属中の自由電子が、正の電荷と負の電荷が自由に動けるプラズマ状態にあるからである。この表面プラズモンが回折限界を乗り越えることに利用できる理由は、表面プラズモンの波長が自由空間を伝搬する光の波長よりも短くなるためである。特に、テーパ（先細りする）構造の金属では、先端に近づくにつれて表面プラズモンの波長が小さくなり、先端ではゼロになることが1997年に理論的に導かれている。このことは、テーパ構造の金属を伝搬する表面プラズモンを使えば、回折限界を超えて小さなナノ寸法の領域に光エネルギーを集束させることができることを意味しており、この現象を称して光ナノ超集束と本稿では言っている。

表面プラズモンによる超集束の研究は、1997年に発表された2つの理論的な論文が重要な役割をしている。この理由は、光などを扱う電磁気学は、理論的な完成度が非常に高く、電磁気学の方程式によって導かれた解には、必ず、それに対応する現象を実験的に観察できると確信されているからである。金属テーパ構造に関して、電磁気学の方程式を解く試みが行われているが、現在においても、厳密な解を求める方法はなく、近似的な方法しか知られていない。しかし、近似の精度を上げることにより、今まで議論できなかったような問題を扱えることが可能になる。

本研究は、不完全な変数分離法を使って金属テーパ構造を伝搬する表面プラズモンに対する電磁気学の方程式を解くことが一つの目的である。不完全な変数分離法は、2007年に私が提案したものであり、それまでに知られていた解析的な手法と比較して近似の精度が非常に高い。そのオリジナルな方法で、現在までに円錐構造と楔構造を解いており、昨年度の福井大学重点研究成果2010では放物体構造を解いたことを報告した。不完全な変数分離法が優れている点は、近似的な解を求めているにも関わらず、実験的に重要なテーパ角や先端の曲率を考慮したテーパ構造を扱えることにある。昨年度に報告した放物体構造は、先端の曲率を考慮したテーパ構造として初めての例であった。放物体構造は、テーパ構造にも関わらず、超集束しないという意外な結果が得られた。本年度は、昨年の研究を拡張させて、放物筒構造に関して議論した。本研究のもう一つの目的は、超集束を実験的に実現することにある。この目的に関しては、V溝構造を利用し、超集束と呼べる実験結果を得ることができた。

研究の内容および成果

本研究の成果は、金属テーパー構造における光の伝搬に関して、解析的な手法を使って放物筒構造に関して詳しく調べたこと（発表論文[1]）、及び、金属 V 溝構造でテラヘルツ電磁波の超集束を実験的に観測したこと（発表論文[2]）である。

発表論文[1]では、金属放物筒と空洞放物筒の 2 構造に対して、詳しく伝搬モードを調べた結果を報告している。昨年度、放物体の構造 (K. Kurihara et al., *J. Phys. A*, 42 (2009) 185401) で、内側が金属の放物体では伝搬モードが存在できず、外側が金属の放物体だけが、超集束でない伝搬モードが存在できることを明らかにしたが、本年度の結果は、昨年度の結果に非常に似通ったものとなった。すなわち、本年度に調べた放物筒構造では、内側が金属の放物筒では伝搬モードが存在できず、外側が金属の放物筒では、超集束でない伝搬モードが 2 つ存在できることを明らかとなった。昨年度と本年度の理論的検討より、放物体と放物筒の両形状に共通して、内側が金属の場合は伝搬モードが存在できないこと、外側が金属の場合だけに伝搬モードが存在できること、伝搬モードは超集束の特徴が無いことの特性を持つことが明らかになった。今回の報告で、第一に重要な点は、空洞放物筒には伝搬モードが存在するが、金属放物筒に対しては伝搬モードが存在しないことである。第二に重要な点は、空洞放物筒の伝搬モードは、ナノ集束の振る舞いを示さないことである。第三に重要な点は、空洞放物筒の伝搬モードはナノ集束を示さないものの、放物筒の頂点付近内側で電場増強が起こることである。図 1 に、空洞放物筒に対する伝搬モードを電気力線表示で示す。

発表論文[2]は、光ナノ超集束を実験的に実現したことに係る国内学会での報告である。観測に成功した波長は、可視光領域ではなく、光と電波の両方の性質を持ったテラヘルツ波（遠赤外線）

領域である。テラヘルツ波領域では、技術的に回折限界を超えて超集束させることは難しいと理論的に議論されていたので、発表論文[2]の研究が進み、豊富な実験データが得られ、理論的なメカニズムが解明された時には、大きなインパクトを与えると期待される。

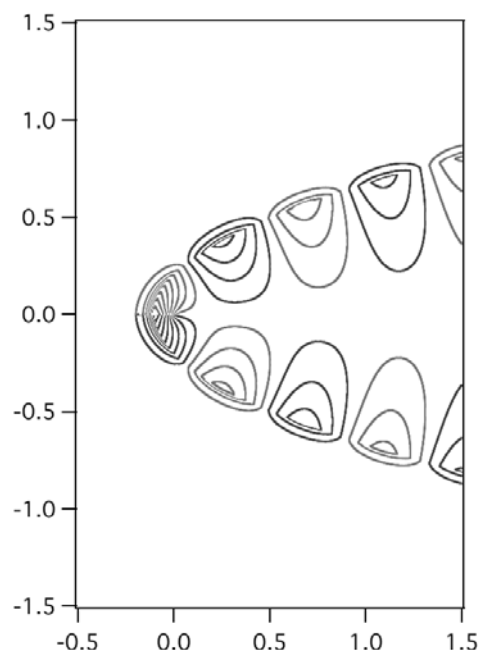


図 1. 空洞放物筒に対する表面プラズモンのモードの電気力線表示。線の間隔が狭いほど、電場強度が強い。放物筒の頂点付近内側で電場増強が起きていることがわかる。長さは、波長で規格化してある。

本助成による主な発表論文等、特記事項および競争的資金・研究助成への申請・獲得状況

「主な発表論文等」

1. Kazuyoshi Kurihara, Akira Otomo, Kazuhiro Yamamoto, Junichi Takahara, Masahiko Tani and Fumiyoshi Kuwashima “Identification of plasmonic modes in parabolic cylinder geometry by quasi-separation of variables” *submitted*.
2. 都築聡, 栗原一嘉, 桑島史欣, 古屋岳, 山本晃司, 谷正彦, 「金属 V 溝構造におけるテラヘルツ波の集束効果」, 2011 年春季第 58 回応用物理学関係連合講演会、27p-BX-5.

「競争的資金・研究助成への申請・獲得状況」

1. 日本学術振興会・科学研究費補助金・基盤 (C)・平成 21 年～24 年・金属テーパー構造における光ナノ超集束の数理解析・代表・4680 千円。
2. 福井県・大学連携リーグ連携推進事業・平成 22 年～23 年・テラヘルツ波のプラズモンを用いた極細有機物検査装置の基礎研究・分担・2000 千円。
3. 科学技術振興機構・産学イノベーション加速事業・産学共創基礎基盤研究プログラム・2 年間・テラヘルツ波新時代を切り拓く革新的基盤技術の創出・分担・申請中。