

平成 30 年 5 月 31 日現在

機関番号：17401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06023

研究課題名(和文) 光デバイス設計援用を目指した貴金属プラズモニクスの計算電磁気学による基礎付け

研究課題名(英文) Laying the Foundation of Noble-Metal Plasmonics Based on Computational Electromagnetics Aiming at Designing Optical Devices

研究代表者

松島 章 (Matsushima, Akira)

熊本大学・大学院先端科学研究部(工)・教授

研究者番号：70157303

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：貴金属粒子や微細加工曲面の近傍に光の電界エネルギーを蓄積するプラズモニクスの分野において、プラズモン共鳴吸収現象に対応する計算電磁気学の技法を駆使し、光デバイスの特性向上を目指した基礎的研究を行った。貴金属の形状と共鳴の効果との関係を知るために、平板、円筒、円板、球体、波状薄膜に対して、一方向または二方向の周期的配置を設定した。解析手法として、厳密解法であるウィーナー・ホッフ法、並びに解の収束が保障されている積分方程式法とモード整合法を用いた。共鳴の物理的な要因を、端部間干渉、周期間干渉、導波路モード形成の三つの観点から検討し、数値計算により共鳴条件のパラメータ依存性を定量的に明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In the research field of the plasmonics, we successively make use of the tools of computational electromagnetics and clarify the characteristics of the surface plasmon resonance absorption. This phenomenon is related with enhancing electric field energy of visible light near noble-metal structures, and is useful for improving the efficiency of optical devices. In order to know the relation between metal geometry and resonance effect, we deal with one- or two-dimensionally periodic structures composed of strips, cylinders, disks, spheres, and corrugated films. The numerical analysis is based on the Wiener-Hopf technique, the integral equation methods, and the mode matching method. The physical cause of resonance is discussed from three viewpoints of interference between edges, interference due to periodicity, and formation of guided wave modes. Numerical computations reveal the dependence of resonance conditions on metal parameters quantitatively.

研究分野：電磁界理論

キーワード：計算電磁気学 数値解析 貴金属 表面プラズモン共鳴 周期構造 ウィーナー・ホッフ法 積分方程式法 モード整合法

1. 研究開始当初の背景

(1) プラズモン共鳴吸収は、可視光またはその周辺の波長をもつ光を金属に入射させたとき、光のエネルギーが電子集団の固有振動にともなうダンピングとして金属内に吸収される現象である。このとき電界エネルギーが金属の表面付近にエバネッセントモードの形で蓄積されるため、そのような作用をもつ素子を装荷することにより、光アンテナの利得やセンサの感度など種々のデバイスの特性を改善する効果が期待されている。この分野での国内外における関心は高く、多数の研究報告があったが、その大部分は特定の構造と設計パラメータにおける現象を示すことに留まっていた。すなわち、広範な構造をもつ貴金属素子に対して、単一の研究組織の中で系統的に特性データを収集し分析したものは極めて少なかった。

(2) 本研究代表者らは計算電磁気学の専門家として、電磁境界値問題を数値解析する手法である積分方程式法やモード整合法などの開発と適用範囲の拡張に携わってきた。従来取り組んだ導波系の材料は、誘電率の実数部が正である通常の誘電体（損失のある金属を含む）と完全導体に限定しており、周波数領域も主としてマイクロ波・ミリ波であった。ところが(1)に記した表面プラズモン共鳴の有用性に鑑み、貴金属を解析の対象とする際には、誘電率の実数部が負であり、かつ誘電率が光の波長に依存することを考慮する必要が生ずるようになった。

2. 研究の目的

(1) 貴金属の粒子や微細加工曲面の近傍に光の電界エネルギーを蓄積するプラズモニクス分野において、プラズモン共鳴吸収現象に対応する計算電磁気学の技法を駆使し、太陽電池の光電変換効率の改善、および多層膜レンズの集光度の上昇を目指した基礎的研究を行う。このように、プラズモニクスの原理を基礎から解明すれば、太陽電池やレンズだけでなく、センサやアンテナなども含め、さまざまな光デバイスの特性向上という効果が期待される。

(2) 貴金属の形状とプラズモン共鳴の効果との関係を知るために、平板、円筒、円板、球、波状薄膜を採り上げ、一方向または二方向の周期的配置を設定する。共鳴の物理的な要因を、端部間干渉、周期間干渉、導波路モード形成の三つの観点から検討し、数値計算により共鳴条件のパラメータ依存性を定量的に明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 共鳴条件を系統化し、その物理的特性を取り入れて光デバイスの設計指針を構築するために、貴金属の形状および配置法を適切に選択する。形状を薄膜と立体形に二種類に

分類し、前者として平板、中空円筒、円板、正弦波形状板の四通りを選び、後者は球体とする。配置法としては、太陽電池活性層への組込みや多層膜レンズへの応用を考慮し、一方向または二方向に周期性をもたせる。それに加えて、プラズモン表面波の励振メカニズムに着目するために、最も基本的な形状である半無限平板も研究の対象に含める。

(2) 計算電磁気学に基づき、貴金属の形状と配置法に応じて、効率と精度が最良となるような電磁界解析法を選択し、研究開始当初の技術を改善する。解析法は大局的な積分表現に基づくものと、局所的な微分方程式の解であるモード関数を用いるものとの大別される。基本的な半無限平板に対しては積分変換に基づくウィーナー・ホッフ法が適切である。両側に端部をもつ有限幅の平板や有限長の中空円筒、また円形の端部をもつ円板については、その表面電磁流密度を未知関数とする積分方程式を導き、モーメント法を適用して連立一次方程式に離散化する。一方で球体や正弦波状板を取り扱う場合には、電磁界をモード関数の線形結合で表現すれば効果的であり、その展開係数を未知数とする連立一次方程式を解く。

(3) 数値計算により、貴金属の形状と配置法のそれぞれについて構造パラメータを種々に変化させ、広範なデータを収集する。その結果に基づき、プラズモン共鳴吸収が生ずる条件を検討する。平板、円筒、円板には素子の端部間で定在波による干渉が生じ、また、すべての周期構造素子においてエバネッセントモードが伝搬モードに転じる波長で周期間干渉が起こる。さらに積層平板間と中空円筒内には、それぞれ平行平板導波路と円形導波管の遮断波長において伝送モードのパターンが形成される。以上に掲げた共鳴の物理的な要因を、端部間干渉、周期間干渉、導波路モード形成に分類し、パラメータ依存性を調査する。

4. 研究成果

(1) 貴金属薄膜にプラズモン表面波が励振される基本的なメカニズムを知るために、一か所のみで端部をもつ図 1(a)の半無限平板の境界値問題を、ウィーナー・ホッフ法により解析した。この手法はフーリエ変換論に基づいており、設定した境界条件のもとではフーリエ逆変換形式の厳密解を与える。ここでは表面電流と表面磁流の両方を表現できる一般化されたインピーダンス境界条件を採用した。入射波が平板の右端に当たり、そのエネルギーが全方向への回折波と左側に向かう表面波に分配される。計算により、薄膜パラメータ、波長、入射角の表面波励振係数に及ぼす影響を明らかにした。本項目(1)の研究成果は、下記5.の〔学会発表〕において報告済みである。

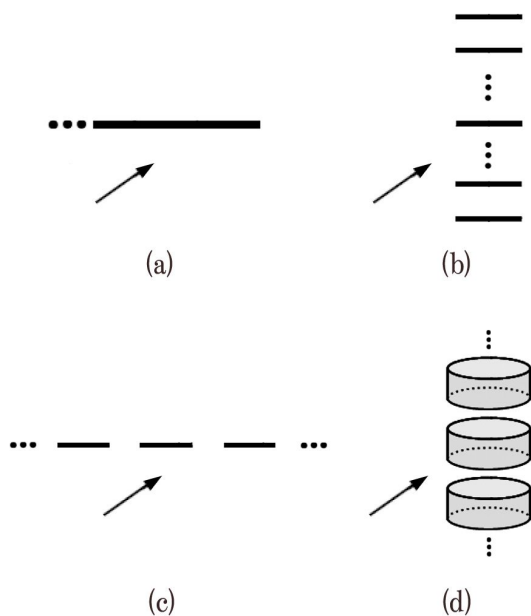


図1 二次元問題の境界形状．矢印は入射波．(a) 半無限平板，(b) 積層された平行平板，(c) 一平面内に配置した周期的平板，(d) 軸方向に周期的な中空円筒．(a)～(c)は紙面垂直方向に一樣な構造をもつ．

(2) 複数の平板間の相互作用を解明するために，**図1(b)**の積層された平行平板の境界値問題を，特異積分方程式法により解析した．平板層の間で表面電流と表面磁流が結合する要因を，積分方程式の核関数の形式により示した．表面電磁流の近似法として，展開法と選点法の二種類を比較した結果，数値解の収束性に関して両者はほぼ等価であることが判明した．近傍界の計算により，共鳴時には平行平板導波路モードが形成されることを確認し，多層膜レンズの効果を与える構造パラメータを探索した．本項目(2)の研究成果は，下記5.の〔雑誌論文〕¹⁾，〔学会発表〕²⁾において報告済みである．

(3) 基本的な周期間干渉を解明するために，**図1(c)**の一平面内に配置した周期的平板の境界値問題を，特異積分方程式法により解析した．フロッケのモード関数を用いて無限周期の場合を別途解析し，有限枚数の場合と比較した．その結果，配列周期を一定に保ちながら平板の枚数を増やしていくと，次第に格子モードのビームが形成され，20枚程度で格子共鳴が明瞭になることを確認した．貴金属と同様に近年，表面プラズモン共鳴の応用が関心を集めているグラフェンまで解析対象を拡張した．本項目(3)の研究成果は，下記5.の〔雑誌論文〕³⁾，〔学会発表〕⁴⁾において報告済みである．

(4) 基本的な空洞共鳴現象を把握するために，**図1(d)**の軸方向に周期的な中空円筒の境

界値問題を，特異積分方程式法により解析した．ただし構造の立体性により定式化が格段に難しくなるため，材料を理想的な完全導体に限定した．平板解析の場合と同様の効率的な数値スキームを構築することに成功し，将来貴金属に発展させるための基礎データが得られた．数値計算により，共鳴時には円筒導波管モードが形成されること，周期間干渉も存在することを確認した．本項目(4)の研究成果は，下記5.の〔雑誌論文〕⁵⁾，〔学会発表〕⁶⁾において報告済みである．

(5) 局在形表面プラズモン共鳴と二次元の周期間干渉を調べるために，**図2(a)**の二方向に周期的な円板配列構造の境界値問題を，積分方程式法により解析した．二次元問題における特異積分方程式とは異なり，本問題の積分方程式は核関数の特異性を積極的に利用できないため，数値解の収束性を損ねないように，未知関数の展開項数と核関数の打ち切り項数の関係を注意深く選択した．数値計算により，入射電力が反射電力，透過電力，吸収電力に分配される状況を調べた．円板上の表面電磁流が，共振時にウィスパーリングギャラリーモードの形をもつことも確認した．本項目(5)の研究成果は，下記5.の〔雑誌論文〕⁷⁾，〔学会発表〕⁸⁾において報告済みである．

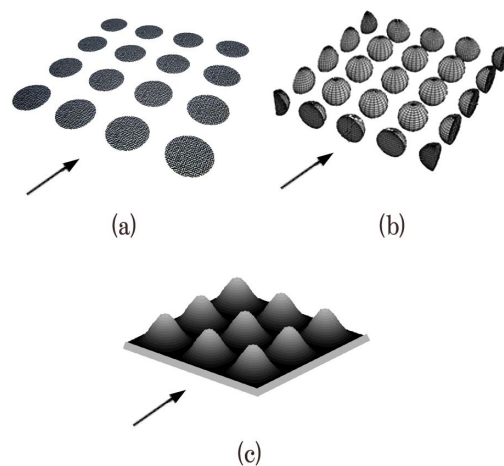


図2 二方向に周期的な構造をもつ三次元問題の境界形状．矢印は入射波．(a) 円板配列，(b) 球体配列，(c) 正弦波状薄膜．

(6) 二次元の周期間干渉を解明するために，**図2(b)**の二方向に周期的な球体配列構造の境界値問題を，モード展開法により解析した．球間の多重回折は，ベクトル球波動関数の遷移係数を用いて表現することができた．ベクトル形フロッケのモード関数を用いて無限周期の場合を別途解析し，有限個の場合と比較した．その結果，配列周期を一定に保ちながら球の個数の枚数を増やしていくと，次第に格子モードのビームが形成され，25個程

度で格子共鳴が明瞭になることを確認した。本項目(6)の研究成果は、下記5.の〔雑誌論文〕、〔学会発表〕において報告済みである。

(7) 波形の周期構造におけるプラズモン表面波の形成を調べるために、**図2(c)**の二方向に周期的な正弦波状薄膜の境界値問題を、最小二乗法に基づくモード整合法により解析した。数値計算により、共鳴時には薄膜近傍の電界振幅が入射波の数十倍にも達すること、周期間干渉も存在することを確認した。また、薄膜の境界条件を両面とも厳密に考慮した場合と、薄膜を等価的なインピーダンスシートに置き換えた場合を比較した結果、後者が少ない計算量で精度よい解を与えることが判明した。本項目(7)の研究成果は、下記5.の〔学会発表〕〔図書〕において報告済みである。

(8) 前項までで取り扱ってきた周期構造をメタマテリアルと見なし、これらをアンテナ、センサ、通信路に装荷して特性改善に役立てるための基礎的な検討を行った。アンテナ利得や通信路容量の向上を示した研究成果は、下記の5.〔雑誌論文〕、〔学会発表〕において報告済みである。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計8件)

Hongchang An, Akira Matsushima, Plane wave scattering from an axially periodic array of perfectly conducting circular tubes, Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics, 査読有, 2018, Total 3 pages
<http://www.emrc.uestc.edu.cn/iccem2018/>

Tatiana L. Zinenko, Akira Matsushima, Alexander I. Nosich, Surface-plasmon, grating-mode, and slab-mode resonances in the H- and E-Polarized THz wave scattering by a graphene strip grating embedded into a dielectric slab, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 査読有, Vol. 23, No. 4, 2017, Total 9 pages
DOI: 10.1109/JSTQE.2017.2684082

Akira Matsushima, Effect of periodicity in the light scattering from infinite and finite arrays of silver nanospheres, Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics, 査読有, 2017, pp. 236-237

DOI: 10.1109/COMPEM.2017.7912819

Takahiro Koga, Takeshi Fukusako, A design of sensor antenna for non-destructive testing, Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics, 査読有, 2017, pp. 179-181

DOI: 10.1109/COMPEM.2017.7912781

Yujiro Kai, Takeshi Fukusako, Gain characteristics improvement of broadband circular polarized patch antenna using artificial ground structure, Proceedings of 2016 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation, 査読有, 2016, Total 4 pages

<https://ieeexplore.ieee.org/document/7821144/>

Akira Matsushima and Yusuke Naori, Collocation and expansion methods in the numerical treatment of singular integral equations for light scattering from a noble metal strip, Proceedings of 11th Asia-Pacific Engineering Research Forum on Microwaves and Electromagnetic Theory, 査読無, 2016, pp. 34-37

http://apmet.fit.ac.jp/previous_forums/Program_2016.pdf

Akira Matsushima, Integral equation method of the expansion type applied to light scattering from nano-metal strips, Proceedings of 2016 International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, 査読有, 2016, pp. 54-47

<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7544091/>

Xiaowei Ji, Daiki Sakomura, Akira Matsushima, Taikei Suyama, Light scattering from two-dimensional periodic arrays of noble-metal disks and complementary circular apertures, Progress In Electromagnetics Research M, Vol. 43, 査読有, 2015, pp. 119-133
DOI: 10.2528/PIERM1504020

〔学会発表〕(計18件)

松島 章, 吉 暁偉, 貴金属円板の三次元周期配列格子による光波の散乱, 2018年電子情報通信学会総合大会, 2018.3.20, 東京電機大学(東京都)

Ryuji Kuse, Takeshi Fukusako, Akira Matsushima, Improvement of channel

capacity in short range MIMO by using meta-surface reflector, 第 8 回電磁マテリアル講演会, 2018.3.16, 東京農工大学 (東京都)

松島 章, 横山 祥太, 貴金属半無限板による光波散乱のウィーナー・ホッフ法による解析, 電気学会電磁界理論研究会, 2017.11.10, 天童ホテル (山形県天童市)

久世 竜司, 福迫 武, 松島 章, 2x2 近距離 MIMO へのメタ表面反射板の適用, 電子情報通信学会アンテナ・伝播研究会, 2017.11.10, 福岡大学 (福岡市)

山口 智仁, 大崎 なつ美, 松島 章, 有限枚の貴金属平板格子による光波散乱の積分方程式を用いた数値解析, 電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会, 2017.10.27, 桜の馬場城彩苑 (熊本市)

Xiaowei Ji, Yuki Kishita, Takao Taguchi, Akira Matsushima, Light scattering from three-dimensional periodic arrays of noble-metal disks, 平成 29 年電気・情報関係学会九州支部連合大会, 2017.9.27, 琉球大学 (沖縄県)

Hongchang An, Daichi Yahata, Shunsuke Imamura, Akira Matsushima, Electromagnetic wave scattering by an infinite grating composed of conducting circular cylinders of finite length, 平成 29 年電気・情報関係学会九州支部連合大会, 2017.9.27, 琉球大学 (沖縄県西原町)

松島 章, 安 鴻昌, 周期的にスリットを入れた完全導体円筒による平面電磁波の散乱, 電気学会電磁界理論研究会, 2017.7.21, 帯広商工会議所 (帯広市)

松島 章, 横山 祥太, 福迫 武, 薄い貴金属半無限板による光波の散乱, 2017 年電子情報通信学会総合大会, 2017.3.23, 名城大学 (名古屋市)

松島 章, 平川 貴啓, 南田 健, グラフェン平板無限格子によるテラヘルツ平面波散乱の数値解析, 電気学会電磁界理論研究会, 2016.11.19, 白浜古賀の井リゾート&スパ (和歌山県白浜町)

松島 章, 杉山 成也, 貴金属球の 2 次元周期配列構造における光波の格子共鳴, 平成 28 年電気・情報関係学会九州支部連合大会, 2016.9.30, 宮崎大学 (宮崎市)

釜井 瑞基, 安 鴻昌, 松島 章, 有限長導体円筒による平面波散乱の積分方程式を用いた数値解析, 2016 年電子情報通信学会総合大会, 2016.3.16, 九州大学 (福岡県)

直理 優介, 松島 章, 積層した貴金属ストリップによる光波散乱の積分方程式を用いた数値解析, 2016 年電子情報通信学会総合大会, 2016.3.15, 九州大学 (福岡市)

小田 侑大, 松島 章, 貴金属層をもつ二次元周期的正弦波状格子による光波の散乱と吸収, 電気学会電磁界理論研究会, 2015.10.30, ANA ホリデイ・インリゾート宮崎 (宮崎市)

小森 洋紀, 釜井 瑞基, 松島 章, 貴金属ナノ球の二次元周期格子による光波の散乱と吸収, 電気学会電磁界理論研究会, 2015.10.30, ANA ホリデイ・インリゾート宮崎 (宮崎市)

Xiaowei Ji, Akira Matsushima, Numerical simulation of light scattering from two-dimensional periodic arrays of noble-metal apertures, 平成 27 年度電気・情報関係学会九州支部連合大会, 2015.9.27, 福岡大学 (福岡市)

直理 優介, 松島 章, 山口 智仁, 積層した貴金属平板におけるプラズモン共鳴の数値解析, 平成 27 年度電気・情報関係学会九州支部連合大会, 2015.9.26, 福岡大学 (福岡市)

平川 貴啓, 南田 健, 松島 章, 貴金属ストリップの無限格子による電磁波散乱の数値解析, 平成 27 年度電気・情報関係学会九州支部連合大会, 2015.9.26, 福岡大学 (福岡市)

[図書] (計 1 件)

Akira Matsushima, Toyonori Matsuda, Yoichi Okuno, Introduction to Yasuura's Method of Modal Expansion with Application to Grating Problems (Thomas Wriedt, Yuri Eremin 編, The Generalized Multipole Technique for Light Scattering, Chap. 8 分担執筆), Springer, 2018, pp. 169-220

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松島 章 (MATSUSHIMA, Akira)
熊本大学・大学院先端科学研究部・教授
研究者番号: 7 0 1 5 7 3 0 3

(2) 研究分担者

福迫 武 (FUKUSAKO, Takeshi)
熊本大学・大学院先端科学研究部・教授
研究者番号: 9 0 2 9 5 1 2 1