

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 吳 安安

本論文は「Interaction of angular momentum between light and plasmonic nanostructure (光とプラズモニックナノ構造間の角運動量の相互作用)」と題して、光とナノ構造間の角運動量のやり取りに関して、スピン角運動量と軌道角運動量を分離して考える計算法を定式化し、さらに発展して、ねじれの位置にある近接した2本の金属ナノロッドペアに生じる光トルクおよびキラルな光学応答に関して、論文提出者が行った研究の成果をまとめたもので、英文で執筆されている。

光とナノ構造の間の角運動量のやり取りにより、スピン角運動量と軌道角運動量の相互変換、ナノ構造に生じる光トルクによる物体の回転運動の誘起、物質のキラルな反応など、様々な興味深い現象が起こることが知られている。この時ナノ構造の材質が金属の場合、プラズモンが誘起され、このプラズモンを介して、光と物質間の相互作用が増強され、上記の諸現象もより強く表れる。しかしながら、スピン角運動量と軌道角運動量を分離して扱うことができるのは、これまでのところ、比較的単純な波面を持つラゲール=ガウスビームが、球体などの比較的単純な構造により散乱される場合などに限定されていた。これに対し本論文では複雑なナノ構造、複雑な散乱光の場合でも、光と物体の間の角運動量のやり取りを、スピン角運動量と軌道角運動量に分離して計算する理論式を定式化した。また光とプラズモニックナノ構造の間の角運動量のやり取り、およびキラルな光応答に関しては、構造のキラリティを利用したにも報告例があるが、2つのナノ構造間にプラズモンカップリングが生じている場合については研究例がなかった。本研究では、プラズモンカップリングが生じている場合にナノ構造と光の角運動量のやり取りの増強について解析し、さらにプラズモンカップリングにより、ナノ構造によるキラルな光学特性が増強できることを実験的に示した。

論文は6章からなり、第1章では研究の背景と動機が述べられている。光のスピン角運動量と軌道角運動量の分離の問題、ねじれの位置にある1対の金属ナノロッドでのプラズモンカップリングによる光トルクの解析、及びキラルな光応答の増強という、本研究の狙いが述べられている。

第2章は従来理論のまとめが述べられている。光の持つ角運動量の保存則に関して、ポインティングの定理から出発して、運動量の保存則、角運動量の保存則と、順に整理されている。また、局在表面プラズモンの基礎についてもまとめられており、金属微小球のプラズモン応答についても述べられている。

第3章からが本論文でのオリジナルな成果となる。第3章は、光と物質間の角運動量のやり取りを、スピン角運動量と軌道角運動量に分離して計算する方法の導出が示されている。これまではこの分離は不可能であり、本論文の重要な成果の一つとなっている。ここでは1964年にLipkinらによって導入された光キラリティ密度という量を、第2章で示した角運動量保存則の式、及びマクスウェルの式と組み合わせることにより、光の持つスピン角運動量が物質に及ぼすトルクを分離して計算する方法を導いている。光キラリティ密度は、その物理的な意味が不明確な量であったが、本研究では光キラリティ密度の保存則から、光キラリティの流れが光のスピン角運動量

由来の成分と物質内の電流由来の成分の和であることを示し、ここから、光のスピン角運動量が物体にもたらすトルクを求める式を導いた。光の全角運動量が物体にもたらすトルクはマクスウェルの応力によって求められることは従来から知られており、この2つの差から光の軌道角運動量が生むトルクが計算できる。これによりいかなる複雑な物体、複雑な散乱光の場合でも2つの成分を分離して求められる式が得られた。この結果はラゲール=ガウスビームの場合で検証され、また従来は分離計算が不可能だったケースに適用して、分離が可能であることを示している。

第4章はねじれの位置にある2本の金属ナノロッドでのプラズモンカップリングと発生するトルクの増強に関して述べられている。ナノロッド間の距離とねじれの角度を変化させた場合の入射光に対する消衰スペクトルを計算し、そこからプラズモンカップリングの様子を解析した。これは結合した2つの電気双極子のモデルによりうまく説明でき、2つの電気双極子が逆位相で結合状態にあるときは低エネルギーに、同位相で半結合状態にあるときには高エネルギーにシフトするという、わかりやすい結果が得られた。またそれぞれのロッドが受ける光トルクも計算し、波長によって結合状態と半結合状態を切り替え、2本のロッドの相互配置を平行、直交の状態にスイッチ可能であることも示した。

第5章では、プラズモンカップリングによるキラルな光特性の一つであるg因子（規格化された円二色性）の増強が可能であることを実験的に示した。第3章、第4章の結果から、ねじれ位置にある金属ナノロッド対は大きな光と物質間に大きなスピン角運動量のやり取りがあることが分かった。このことから左右の円偏光に対する特性の大きな違いがあるのではないかと推測した。このことは数値シミュレーションでも確かめられ、また実際に構造を電子線リソグラフィ技術を用いて作製し、g因子を実験的に計測した。この結果、実験的に求められた消衰スペクトルは計算と良い一致を見、さらに実験的に求められたg因子は、これまでの報告例での最大値0.31を大きく上回る1.03という値となった。

本論文は、光と物質の相互作用において発生するトルクを、スピン角運動量由来の成分と軌道角運動量由来の成分に分離する一般式を初めて定式化した。また、ねじれの位置にある一対の金属ナノロッドにプラズモンカップリングが起こっている場合での光由来のトルクの解析を行い、さらにその結果から得た着想に基づき、従来にない大きな光キラリティを持ったナノ構造を考案、実証した。これらの成果は、光と金属ナノ構造間の角運動量相互作用に関する新たな解析法を世に提供し、また大きな光キラリティを持つ人工物質の設計に対する指針を与えており、物理工学の発展に寄与するところ大である。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。