

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 4 日現在

機関番号：24506

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560054

研究課題名（和文）メタマテリアルで作製されたマイクロマシンのカシミア効果による量子浮揚

研究課題名（英文）Quantum levitation of micromachines made of metamaterials by using Casimir effect

研究代表者

乾 徳夫（NORIO INUI）

兵庫県立大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：70275311

研究成果の概要（和文）：

金の誘電関数が周波数ゼロの近傍でプラズマモデルに従う場合、金平板と磁性誘電体である Yttrium Iron Garnet (YIG) 平板の間にカシミール斥力が発生し得ることを見出した。更に、YIG を薄膜化することで斥力が増大することを理論的に示した。薄膜化による質量の低減と組み合わせることにより真空中における量子浮揚の可能性が高まった。加えて、磁性絶縁体であるナノコンポジットと超伝導メタマテリアル間にもカシミール斥力が発生し得ることを見つけた。

研究成果の概要（英文）：

We found that the Casimir force between a gold plate and a Yttrium Iron Garnet (YIG) plate, which is magnetic dielectric material can be repulsive, if the dielectric function of gold obeys plasma model near zero frequency. Furthermore, we showed that the magnitude of the repulsive force can be increased by decreasing the thickness of the YIG plate. Combined with the effect of decreasing the weight of the plate, this might enable a thin plate to levitate in vacuum. Additionally, we found that the Casimir force between dielectric magnetic nanocomposite and superconductive metamaterial can also be repulsive.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2010年度 | 2,200,000 | 660,000 | 2,860,000 |
| 2011年度 | 400,000 | 120,000 | 520,000 |
| 2012年度 | 500,000 | 150,000 | 650,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,100,000 | 930,000 | 4,030,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理・工学基礎・応用物理一般

キーワード：マイクロマシン・カシミア力・メタマテリアル

1. 研究開始当初の背景

通常、真空とは何も存在しない空間と考えられているが、量子力学の不確定性原理によれば真空中であっても、短時間であれば粒子の生成と消滅が可能である。この効果は素粒子の世界では重要であっても、日常生活には無縁のように思われる。しかし、Casimirはこの真空の電磁揺らぎにより力が発生することを予言し[1], 1997年にその予言が正しいことが実験により検証された[2]。完全導体に作用するカシミア力は間隔が減少すると急激に増大する力であり、間隔が $1\mu\text{m}$ であれば 1mPa まで上昇する。現実の物体は電気抵抗があるため、このように大きな値にはならないがマイクロマシンを浮揚する力にはなり得る。

申請者はカシミア効果をマイクロマシンに応用する研究を行ってきたが、そこで、常に問題となっていたのは、カシミア力が引力のみであり斥力にすることができない点であった。電気力のように簡単に力の符号を変えることができれば応用範囲は著しく増大する。その方法として誘電率と透磁率が同時に負となるメタマテリアルの使用が提案された [3]。もし、カシミア斥力が実現できれば、物体を空中に浮揚させることができる。マイスナー効果や古典的な電磁力による浮揚とは異なり、低温環境も制御も不必要である。物体表面をメタマテリアルで覆うだけで空中浮揚が可能となる。
(参考文献) [1] H. B. G. Casimir: Proc. Kon. Ned. Akad. Wet. **51**, (1948) 793. [2] S. K. Lamoreaux: Phys. Rev. Lett. **78** (1997) 5. [3] F. S. S. Rosa, D. A. R. Dalvit, and P. W. Milonni, Phys. Rev. Lett. **100**, (2008) 183602.

2. 研究の目的

二つの物体間に作用するカシミア力は、それら物体の誘電率・透磁率とその形状ならびに配置により決まる、したがって、本研究の主たる目的は、強い斥力を生じるような誘電率と透磁率を決定するという逆問題を解くことになる。問題の一部は既に解かれている。二枚の誘電体の誘電率がそれぞれ ϵ_1 と ϵ_2 であり、その間の誘電率が ϵ_3 であったとする。そのとき、 $\epsilon_1 > \epsilon_3 > \epsilon_2$ であればカシミア力は斥力となり、ごく最近、実験でも観測された[4]。しかし、残念ながら、誘電体間が真空であれば、この条件を満たすことはできないのでメタマテリアルが候補となる。申請研究ではメタマテリアルが主たる研究対象となるが、通常物質に作用するカシミア斥力についても研究を進めることが目標である。

[4] J. N. Munday, Federico Cappasso and V. Adrian Parsegian: Nature, 457 (2009) 170.

3. 研究の方法

2008年代にメタマテリアルを用いたカシミール斥力の発生方法が多数発表された。メタマテリアルの多くは人工的な格子構造をもっており、空間的には不均一である。その離散性は、通常の結晶が有している原子・分子の不連続性と比較して格段に大きい。しかし、当時、このような離散性を考慮してカシミール力を計算する手法が開発されていなかった為、近似的な誘電率と透磁率を仮定して計算が行われた。その後、計算機を用いた数値計算ならびに詳細な理論計算により、複雑な微細構造をもつ物体間でも、カシミール力が計算できるようになった。その結果、金属スプリット・リング共振器を使ったようなメタマテリアル間のカシミール

力は斥力になり得ないという否定的な結果が報告されるようになった。カシミール斥力で重要な点は磁気効果であり、前述のメタマテリアルでは電磁誘導によりそれを実現しようとしている。しかし、金属は通常、電気伝導率が高く、カシミール力を引力にする効果がある。したがって、その効果を上回る磁気効果を発揮させることが容易でないことが分かってきた。そこで、本研究では磁性絶縁体に注目し、新しいカシミール斥力発生方法を探索した。

4. 研究成果

(1) 磁性誘電体を用いたカシミール斥力の発生方法

カシミール力を斥力にするには磁性を有効に用いることが重要と考えられる。もし、すべての周波数で透磁率が無限大でかつ比誘電率が1になる物質（完全磁性体）が存在すればその物体でできた平板と完全導体平板に作用するカシミール力は任意の間隔で斥力となることが分かっている。しかし、完全導体も完全磁性体も実際には存在しない。特に完全導体は金属の比較的良好な近似になっているのに対して、完全磁性体に該当する物質は現在のところ全く存在しない。自然界に存在する物質は高周波数の磁場に対しては比透磁率が1になってしまう。つまり、振動数が大きくなると磁性を失うのである。

本研究では Yttrium Iron Garnet (YIG) に注目した。YIG は磁性体でありながら誘電率の低い物質である。図1は 300 K における金平板と YIG 平板に作用するカシミール力 ($F_{YIG-Au}(a)$) を完全導体間に作用するカシミール力 ($F_C(a)$) で割った値 ($F_{YIG-Au}(a)/F_C(a)$)、すなわち二つの力の比を示している。

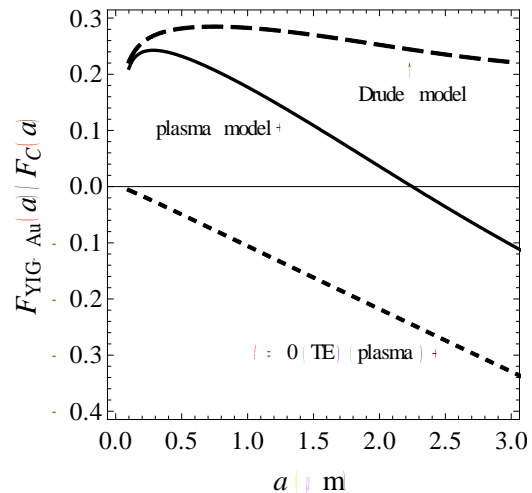


図1 YIG と金に作用するカシミール力

完全導体（電気伝導度が任意の振動数に対して無限大）間に作用するカシミール力は引力であるから、比が正であれば金と YIG 間のカシミール力は引力であり負であれば斥力となる。実線は金の誘電関数がプラズマモデルに従うと仮定した場合、破線はドルーデモデルに従うと仮定した場合の結果を示している。プラズマモデルの場合、平板間隔が $2.3 \mu\text{m}$ より大きいところでカシミール力が斥力になっていることが分かる。一方、ドルーデモデルの場合、任意の間隔でカシミール力は引力である。要するに、YIG と誘電関数がプラズマモデルに従う金属の間に作用するカシミール力は斥力になる。

通常、誘電率は周波数に依存し、金属の場合、振動数を小さくしていくと、振動数がゼロの極限で無限大になる。金属のゼロ近傍における誘電関数はしばしば、プラズマモデルやドルーデモデルで表される。前者では振動数の 2 乗に反比例して誘電関数は増大すると考える。一方、ドルーデモデルでは振動数の 1 乗に反比例して発散する。カシミール力の符号を考える上で、この違いは極めて重要である。もし、金の誘電関数がドルーデモデルに従うならば、金と YIG の間に作用するカシミール力は引力になる。金の誘電関数がど

ちらのモデルに従うかは現在のところ未解明であり、どちらのモデルも支持する実験結果が存在する。換言すれば、カシミール力を測定することによりこの問題を決着できると言える。

関連論文：③，⑦

(2) YIG に作用するカシミール斥力の増強

金がプラズマモデルに従う場合、YIG と金に作用するカシミール力は、その間隔が大きいところでは斥力になる。しかし、物体の間隔が大きくなるとカシミール力は減少し、得られるカシミール斥力も小さくなってしまう。そこで、より狭間隔でもカシミール斥力が発生することが望まれた。この問題について簡単な解決方法を見出した。それは、YIG を薄膜化することで実現できる。平板間に作用するカシミール力は通常、その板厚が小さくなると減少する。しかし、これまでの常識と異なり、薄膜化によりカシミール斥力は増大した。その理由はカシミール力が、引力成分と斥力成分の合成になっており、板厚を薄くすると共に小さくなるが、その減少率が前者の方が大きく、実質的に斥力が増大することになった。この結果は、2012年の5月に米国応用物理学会 (AIP) の News Highlights において "Raising the Prospects for quantum Levitation" という表題で研究結果がインターネット上で紹介された。その後、様々なサイトで再掲載された。

関係論文：⑦

(3) 反磁性効果を用いたカシミール斥力の発生方法

磁性体の一部は反磁性効果を示す。通常、その大きさは小さいが超伝導体は例外的に大きな反磁性効果を示す。そこで、Pendry らが提案している超伝導体メタマテリアルを用いると磁性誘電体との間にカシミール斥力が発生できることを見出した。

関係論文：②，③

(4) 2次元円板散乱体間に作用するカシミール力の計算

研究目的でも述べたように、メタマテルのような微小な構造体から構成された誘電体に作用するカシミール力を計算することは困難である。特に、薄膜の場合には近似法が制限される。そこで、正方格子上に双極子が配列している誘電体が平行に配置されている場合についてカシミール力を計算し、その間隔依存性を求めた。

関連論文：⑩

(5) カシミール引力を用いた光トラップ

現状では、発生可能なカシミール斥力は極めて小さい。そこで視点を変えて、カシミール引力で物体を浮揚させる方法について考察した。誘電体を懸垂することで、カシミール力と重力を釣り合わせる事が可能であるが、平衡点は不安定であるため、制御が必要となる。そこで、誘電体の誘電率が光照射により変化することを利用して、安定にトラップできることを理論的に示した。

関連論文：⑨

(6) 液中におけるカシミール斥力

真空中でカシミール力を斥力にする事は困難であるが、液中では比較的容易に発生させることができる。カップソらにより、金とシリカに作用するカシミール力はブロモベンゼン中で斥力になることを実験的に確かめた。愛知教育大学の三浦浩二教授との共同研究により、この系の再現実験を行った。加えて、ブロモベンゼン分子の離散性が狭間隔では重要であることが分かった。

関連論文：④

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 11 件)

- ① Norio Inui, Kouji Miura, Kensuke Akamatsu and Makoto Ishikawa, Numerical calculation of the Casimir forces between a gold sphere and a nanocomposite sheet, J. Phys.: Conf. Ser., 査読有, Vol. 258, 2010, 012002.1 -012002.8
- ② Norio Inui, Diamagnetic effect on the Casimir force, Physical Review A, 査読有, Vol. 83, 2011, 032513.1-032513.5
- ③ Norio Inui, Thickness dependence of the Casimir force between a magnetodielectric plate and a diamagnetic plate, Physical Review A, 査読有, Vol. 84, 2011, 052505.1-052505.6
DOI:10.1103/PhysRevA.84.052505
- ④ Makoto Ishikawa, Masaya Ichikawa, Kouji Miura, and Norio Inui, Repulsive Casimir Force in Liquid, Journal Physical Society of Japan, 査読有, Vol. 80, 2011, 114601.1-11460.5
DOI: 10.1143/JPSJ.80.114601
- ⑤ Norio Inui, Kozo Mochiji and Kousuke Moritani, Trapping of a Conducting Nanoparticle by Long-Range Surface Forces, e-Journal of Surface Science and Nanotechnology, 査読有, Vol.9, 2011, 301-305
DOI: 10.1380/ejsnt.2011.301
- ⑥ Norio Inui, Numerical Regularization Procedures for Estimating the Casimir Energy of a Massless Scalar Field in a Square, Journal Physical Society of Japan, 査読有, Vol. 80, 2011, 094002.1-094002.7

DOI: 10.1143/JPSJ.80.094002

- ⑦ Norio Inui, Quantum levitation of a thin magnetodielectric plate on a metallic plate using the repulsive Casimir force, Journal of Applied Physics, 査読有, Vol. 111, 2012, 07304.1-07304.5
DOI: 10.1063/1.3698619
- ⑧ Norio Inui, Temperature dependence of the Casimir force between a superconductor and a magnetodielectric, 査読有, Physical Review A, Vol. 86, 2012, 022520.1 -022520.8
DOI: 10.1103/PhysRevA.86.022520
- ⑨ Norio Inui, Optical Trapping of Nanoparticle near Metallic Plate by the Casimir Effect, Journal of the Physical Society of Japan, 査読有, Vol. 81, 2012, 054401.1-054401.6
DOI: 10.1143/JPSJ.81.054401
- ⑩ Norio Inui, Asymptotic Behavior of the Casimir Force between Arrays of Planar Scatterers in the Large Separation Regime, Journal of the Physical Society of Japan, 査読あり, Vol. 82, 2013, 054004.1-054002.7
DOI: 10.7566/JPSJ.82.054002
- ⑪ 乾 徳夫, カシミール斥力を利用した量子浮揚, トライポロジスト, 査読無, Vol. 58, 2013, 65-70

[学会発表] (計 13 件)

- ① Norio Inui, Numerical calculation of the Casimir force between a gold sphere and a nanocomposite sheet, The International Conference on Science of Friction 2010, 平成 22 年 9 月 14 日, 三重県伊勢市 (合歓の郷)
- ② 乾 徳夫, 三浦 浩治, 石川 誠, カシミール効果を用いた量子浮揚, 表面科学学術

- 講演会, 2011年12月15日, タワーホール船堀 (東京都)
- ③ 石川 誠, 乾 徳夫, 三浦 浩治, 液中モード原子間力顕微鏡によるカシミール斥力の計測, 表面科学学術講演会, 2011年12月15日, タワーホール船堀 (東京都)
- ④ N. Inui, K. Miura, and M. Ishikawa, Quantum Levitation by Using Repulsive Casimir Force, International Tribology Conference, 2011年11月1日, 広島国際会議場 (広島県)
- ⑤ 乾 徳夫, 反磁性体に作用する Casimir 力, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 2011年9月21日, 富山大学 (富山県)
- ⑥ 乾 徳夫, 金と YIG との間に作用するカシミール斥力, 日本物理学会第 67 回年次大会, 2012年3月26日, 関西学院大学 (兵庫県)
- ⑦ 三浦浩治, 市川真也, 石川誠, 乾 徳夫, 液中の Casimir 斥力 II, 日本物理学会第 67 回年次大会, 2012年3月26日, 関西学院大学 (兵庫県)
- ⑧ 市川真也, 石川誠, 乾 徳夫, 川勝英樹, 佐々木成朗, 三浦浩治, ダイナミックモード原子間力顕微鏡による液中カシミール力の測定, 日本物理学会第 67 回年次大会, 2012年3月26日, 関西学院大学 (兵庫県)
- ⑨ Norio Inui, Dynamical Response of Suspended Graphene by Impact with a Gas Cluster and Quantum Levitation, Nano Sciences & Technologies 2012, 2012年10月26日~2012年10月28日, Kempinski Hotel・中国 (チンタオ)
- ⑩ 乾 徳夫, 浮かせてまさつを減らすー量子浮揚の可能性を探るー, 市民講座「やさしい表面科学」, 2012年07月28日~2012年07月28日, 名城大学 名駅サテ

ライト(名古屋)

- ⑪ 乾 徳夫, 超伝導体と磁性誘電体に作用するカシミール力の温度依存性, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 2012年09月19日~2012年09月19日, 横浜国立大学(神奈川県)
- ⑫ 市川真也, 石川誠, 乾徳夫, 川勝英樹, 佐々木成朗, 三浦浩治, 液中カシミール力の測定 II, 日本物理学会第 68 回年次大会, 2012年09月18日, 横浜国立大学(神奈川県)
- ⑬ 乾 徳夫, 2次元金属円板配列間に作用するカシミール力, 日本物理学会第 68 回年次大会, 2013年03月26日, 広島大学(広島)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

米国応用物理学会による紹介記事掲載

<http://www.aip.org/aip/research/PNH-4-18-2012.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

乾 徳夫 (NORIO INUI)

研究者番号 : 70275312