

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：24506

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25390117

研究課題名(和文)量子電磁気力を利用したマイクロメカニズムの固着防止

研究課題名(英文)Adhesion prevention of micromechanisms using quantum electromagnetic forces

研究代表者

乾 徳夫(Inui, Norio)

兵庫県立大学・工学研究科・准教授

研究者番号：70275311

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：微小な部品が密集するマイクロメカニズムでは、部品間の固着により機能が停止する。その要因となる力として真空の電磁場が量子的にゆらぎことで生じるカシミール力が挙げられる。通常、カシミール力は引力であるが、特別な条件を満たす場合は斥力になり得る。そこで、本研究ではこのカシミール斥力で物体を浮揚させることにより、固着の防止と摩擦の低減が実現できることを示した。具体的には、気液界面近傍に存在する金属粒子に作用するカシミール斥力を理論的に解析し、その応用として懸垂液滴に捕獲された単一微粒子の質量計測を行った。

研究成果の概要(英文)：Micromechanisms often stop due to the adhesion between parts. The one of forces that cause the adhesion in micromechanism is the Casimir force, which is generated by the vacuum fluctuations. The Casimir force usually is attractive. However, it can be repulsive if some conditions are satisfied. In this study, we showed that the prevention of the adhesion and the reduction of the friction can be realized using the repulsive Casimir force. In particular, we focused on the levitation of a metallic particle near an air-liquid interface and theoretically investigate the Brownian motion of the levitated particle. Furthermore, we proposed a new method to measure a mass of a single particle levitated within a suspended droplet.

研究分野：量子物理学

キーワード：カシミール効果 カシミール力 固着 浮揚 ブラウン運動 力計測 グラフェン

1. 研究開始当初の背景

微小な部品が多数集積されているマイクロメカニズムでは、部品間の距離が小さいため、しばしば固着が生じ、その機能を失ってしまう。そのため、固着防止はマイクロメカニズムの信頼性向上には不可欠である。固着を防止するには、物体間に斥力を発生させることができれば良い。特に、固着の原因となる表面間力を引力から斥力に反転できれば多くの場合、固着の問題を回避できる。表面間力は静電気力、原子間力など様々な要因で生じる。特に、物体間の距離が数百 nm 程度の場合、カシミール力と呼ばれる力が重要になる[1]。この力はファン・デル・ワールス力と類似した力で、真空の電磁場が揺らぐことで生じる。この揺らぎは量子的な効果によるもので、熱的な揺らぎとは異なる。また、真空が本質的に有するものであり、取り除くことができない。

カシミール力による固着を防止するためには、カシミール力を減少させる必要がある。さらに、カシミール力を斥力に反転することができれば、固着防止の有効な手段となる[2]。さらに、このカシミール斥力を増強し、微小な物体を浮揚させることができれば、固着防止に加えて摩擦の低減効果も期待できる。Cappaso を中心とするハーバード大学のグループは微小な磁性円板を液体内でカシミール斥力により浮揚させたセンサーを QED デバイスと名付け研究を行った [3]。結果として、カシミール斥力による浮揚には成功しなかったが、電気二重層による反発力を用いて、センサーの有効性を示した。

研究開始時、様々なカシミール斥力の発生方法が提案されていたが、実際に物体を浮揚させるには至っていなかった。その理由は第一に、多くの場合、メタマテリアルやナノポアの様新材料を必要とする。第二に発生する力が小さく測定が困難である。第三にカシミール斥力以外に引力が存在し、結果として合力が引力となる場合が多い。このような問題により、カシミール斥力の有効利用は実用には程遠い状況であった。

(参考文献)

[1] E. Buks and M. L. Roukes, “Stiction, adhesion energy, and the Casimir effect in micromechanical systems”, *Phys. Rev. B* 63, 033402(2001).

[2] J. N. Munday, F. Capasso and V. A. Parsegian, “Measured long-range repulsive Casimir–Lifshitz forces”, *Nature* 457, 170(2009).

[3] F. Capasso, J. N. Munday, and Ho Bun Chan in *Casimir Physics*, edited by D. Dalvit, P. Milonni, D. Roberts, and F. Rosa (Springer-Verlag, Heidelberg, 2011).

2. 研究の目的

カシミール斥力を利用して固着の防止を行い、さらに、物体を浮揚させ摩擦を低減させるには、強いカシミール斥力を発生させるのと同時に、他の引力源を排除する必要がある。そこで、本研究では Cappaso らの実験で問題となった点を改善し、新たなカシミール斥力による物体の浮揚方法を提案することを第一の目標とした。加えて、浮揚した物体の安定性について理解することを第二の目標とした。既に理論的な研究から、カシミール斥力だけでは、物体を安定に保つことができないことが知られている。従って、重力や静電気力と組み合わせて安定化を図る必要がある。また、液中の浮揚ではブラウン運動による揺らぎの知見が重要となる。第三の目標として、浮揚技術が確立した場合のアプリケーションを考案することである。

3. 研究の方法

量子力学によれば、物質も光も全く存在しない空間であっても、その最低エネルギーはゼロではないと考えられている。特に電磁場の最低エネルギーは電磁場の角振動数を ω とするとゼロではなく、 $1/2\hbar\omega$ である。ここで \hbar はプランク定数を 2π で除した値である。このゼロ点エネルギーと呼ばれるエネルギーは任意の角振動数 ω に対して存在し、全エネルギーは各振動のゼロ点エネルギーが加算されたものである。ここで、図1に示す様に、誘電体1と誘電体2が誘電体3を介して対面している系を考える。



図1 誘電体の多層構造

これら物体の存在により電磁場が変化する。例として、誘電体1と誘電体2の誘電率が無限大であるような場合（完全導体平板）を考える。この場合、誘電体3の内部に存在できる電磁場には制限が課せられ、板に垂直な方向の波長を整数倍した値は誘電体3の厚み a に等しくならなければならない。このような制限により、誘電体がない状態のエネルギーより、誘電体がある状態の方が、エネルギーが下がる。さらに、そのエネルギー低下は間隔 a に依存し、間隔が小さくなると急激にエネルギーが減少する。これにより誘電体1と誘電体2の間には引力が発生する。このカシミール力と呼ばれる力は古典力学では説明できない力である。通常、量子効果は原子サイズや極低温で顕著になるが、カシミール力は身近に存在する量子効果の稀有な例である [4]。

さて、通常は引力であるカシミール力は、虚数軸上の誘電率に関して次の条件を満たすとき、斥力になる [5].

$$\epsilon_1(i\xi) < \epsilon_3(i\xi) < \epsilon_2(i\xi)$$

この条件が任意の周波数で満たされるならば、任意の間隔 a でカシミール力は斥力となる。もし、一部区間のみで条件が満たされる場合、特定の間隔のみで斥力になり得る。なお、虚数軸上の誘電関数は次のクラマース・クローニツヒの関係式より計算される [5].

$$\epsilon(i\xi) = 1 + \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \frac{x\epsilon''(x)}{x^2 + \xi^2} dx$$

ここで、 ϵ のダブルプライムは、誘電率の虚数部分である。カシミール斥力が起こり得る系を具体的に考える。まず、誘電体 2 を金属とし、誘電体 3 を水とする。金属の誘電率は低周波数では非常に大きいため、先の不等式を満たす。よって残るは誘電体 3 と誘電体 1 の関係である。水の誘電率はほとんどの固体に比べて小さいため、不等式を満たさない。そこで、本研究では誘電体 1 を空気とした。空気の誘電率はほぼ 1 と最低であるため、不等式を満たす。つまり、気液界面を利用すれば、容易にカシミール斥力を発生させることができる。

研究目的でも述べたように、カシミール斥力だけでは、安定に物体を浮揚させることはできない。そこで、図 2 の様な懸垂液滴を考えた。

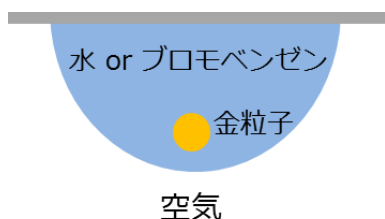


図 2 懸垂液滴

懸垂液滴内に入れられた金粒子は重力により最下点に向けて沈降する。最下点では、金属-水-空気の順序関係となり、先の不等式を満たすことになり、カシミール斥力が発生する。最下点は力学的平衡位置になり、平衡点から垂直および垂直に変位すると重力に平衡点へ戻す力が作用する。その結果、液滴最下点は安定点となる。

懸垂液滴には以下の特徴がある。

(1) 球面が極めて滑らかであり、理論と比較しやすい。

(2) 固体表面と比較して、表面を清浄に保つことが容易で、大きなコンタミの流入を防ぐことができる。

(3) 固体表面に接触させることで、金粒子を移動させることができ、顕微鏡観察等の可

観察を行うことができる。

(4) 浮揚した微粒子に対して様々な方向から光を照射することで粒子の運動を観察することができる。

(参考文献)

[4] P. W. Mionni, *The Quantum Vacuum*, (Academic Press, San Diego 1994).

[5] M. Bordag, G. L. Klimchitskaya, U. Mohideen, and V. M. Mostepanenko, *Advances in the Casimir Effect*, (Oxford University Press, New York, 2009).

4. 研究成果

(1) カシミール斥力により懸垂液滴内で浮揚している金粒子のブラウン運動に関する研究結果 [論文 6-8]

研究方法で述べたように、カシミール斥力を発生し得る系として、気液界面が有望である。しかし、気液界面で発生するカシミール斥力については十分に理解されていなかったため、まず理論的な考察を行った。解き明かすべき課題を列挙する。

(1) 気液界面近傍に存在する金属球に作用するカシミール力の大きさはいくらか。

(2) 金属球と気液界面の距離に対して、カシミール力はどのように変化するのか。

(3) 浮揚できる物体の大きさと浮揚距離はいくらか

(4) 浮揚粒子はどのような運動をおこなうのか

(5) 熱揺らぎは浮揚の安定性に影響をあたえるのか

これらの問題を解決するモデル系として、ブロモベンゼン内の金粒子を考えた。ブロモベンゼンは無極性の溶媒であり、電気二重層の形成に伴う静電気力が小さい。また、Cappaso らの実験により、ブロモベンゼンに浸されたシリカ平板と金粒子間のカシミール斥力が測定されている [2]。そこで、まず、シリカ表面上に浮揚している金粒子の運動について調べた。図 3 のように、半径 R の金粒子がブロモベンゼン (液体) を挟みシリカ表面から距離 d だけ離れた位置に置かれているとする。金粒子に作用する力は Lifshitz 理論により求めることができる。その際必要となる物理量は、物体間距離、金、ブロモベンゼン、シリカの誘電関数、そして温度である。また、物体の形状にも依存する。ここで、考えている球と平板の場合、物体間隔 d が半径 R に比べて十分小さい場合、近接場近似が適用でき、カシミール力は

$$F(d) = 2\pi RE(d)$$

と求められる。

ここで、 $E(d)$ は金平板とシリカ平板間の単位面積あたりのエネルギーである。

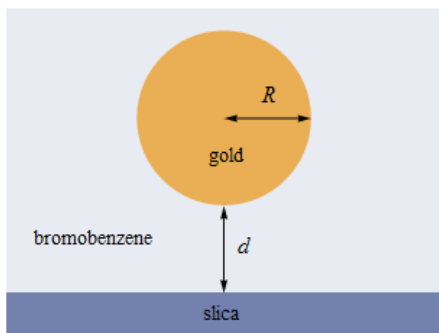


図3 シリカ表面を浮揚する金粒子

図4は、298.15 Kにおける金粒子の浮揚距離を半径の関数として表したものである。半径 $1 \mu\text{m}$ の金粒子であれば、およそ 45 nm 浮揚することがわかる。

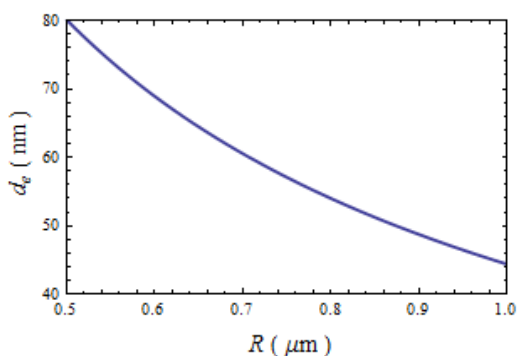


図4 ブロモベンゼンの浸漬したシリカ表面上を浮揚する金粒子の浮揚距離

金粒子は液体中に存在するため、常にブロモベンゼン分子の衝突を受けブラウン運動をする。浮揚距離が小さいため、金粒子の拡散係数 D はシリカが存在しない場合の値 D_0 と異なる。

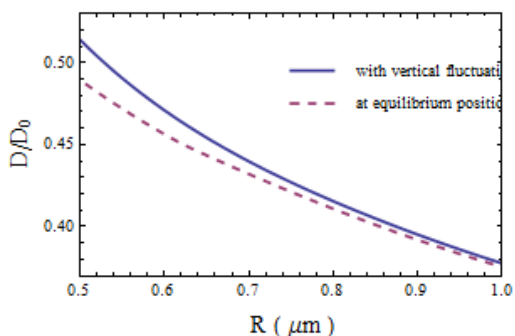


図5 拡散係数の比 D/D_0

図5より半径が $0.5 \mu\text{m}$ であれば浮揚中の拡散係数は自由空間と比べて半分程度であることが分かる。これは、ブロモベンゼンがシリカ表面で滑り難くなっている影響を受け

た結果である。従って、半径 R が大きくなると、浮揚距離が小さくなり、シリカ表面の影響を大きく受けるようになる。そのため、拡散係数も小さくなる。このような挙動を利用すれば、拡散係数から測定が困難な浮揚距離が推測できる。

研究目的でも述べたが固体表面上の浮揚には技術的困難がある。まず、表面粗さの問題である。図3の系では誘電関数に関する不等式が高周波数では成り立たない。そのため、 d がおよそ 3 nm 以下ではカシミール力になる。表面が平坦でない場合、局所的に引力となる場合があり、それが浮揚を不安定化させると予想される。また、固体表面を清浄に保つことが困難であるため、コンタミ等の付着物に、粒子がブラウン運動で近づいた際、引力で引き寄せられ表面に固着する。そこで、図2に示すような、ブロモベンゼン-空気界面近傍の浮揚について考えた。この場合、図3の系と比べて、カシミール斥力が大きくなり、浮揚距離も大きくなる。そのため、近接場近似が有効でなくなる。そこで、最近開発されたより正確な計算方法である散乱行列方法を用いた。

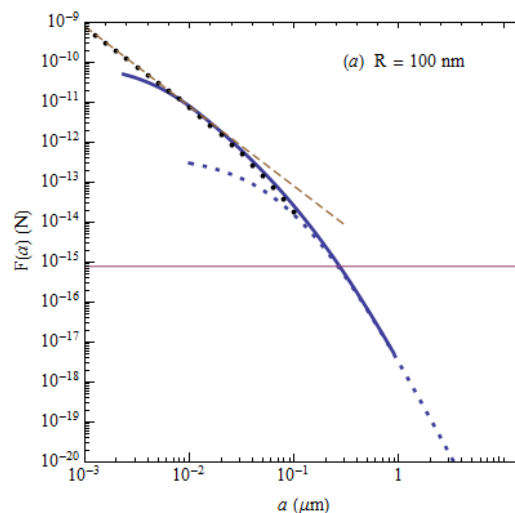


図6 ブロモベンゼン-空気界面上に浮揚する金粒子に作用するカシミール力

図6は半径 100 nm の金粒子をブロモベンゼンに分散させた場合、空気との界面で発生するカシミール斥力の距離依存性を示したもので、太線が散乱行列方法で求めた値で、点線は各種近似法で計算した値である。水平線は金粒子に作用する重力を表している。およそ $a = 271 \text{ nm}$ で交差しており、この値が浮揚距離となる。つまり半径の2倍以上浮揚している。ここで、重要なのは空気の誘電率が小さいため、間隔が小さくてもカシミール力が引力になることはなく、その点において固体表面の浮揚より安定である。

(2) 懸垂液滴内に捕獲された単一微粒子の質量測定 (論文 2, 4)

(1) では気液界面近傍でカシミール斥力による物体の浮揚が実現できることを理論的に示した. 浮揚状態ではわずかな力の変化に対して, 粒子の平衡位置が変化する. つまり, 浮揚粒子は高感度の力センサーと成り得る. そこで, 図 2 に示す様な懸垂した水滴内に直径 $0.3 \mu\text{m}$ の金粒子を 1 個だけ入れ, その重力の測定から金粒子の質量を推定する実験を行った. 実験装置の概略図を図 7 に示す. 液滴は撥水処理をしたスライドガラスに懸垂させてあり, 周囲は揮発を防ぐために密閉されている. 金粒子は暗視野顕微鏡で観察され, ブラウン運動は CCD により記録される.

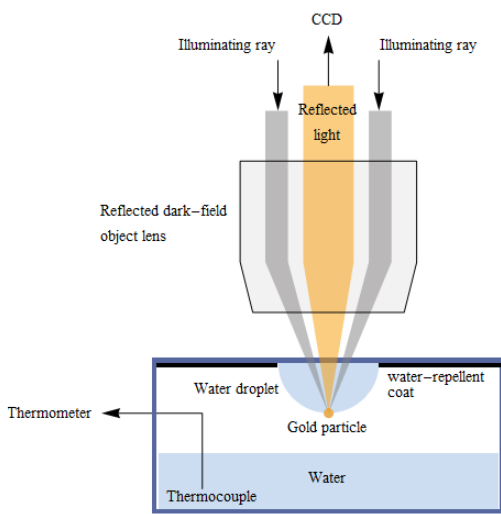


図 7 懸垂液滴内ブラウン運動の観察装置

粒子は液滴表面に沿ってブラウン運動をするが, 液滴の最下点から離れる程, 重力ポテンシャルが大きくなる. 従って, 重い粒子程, 水平方向に移動できる距離は小さくなる. 統計力学に基づく, 簡単な計算により, 最下点からの平均変位半径と質量の関係は

$$\langle r \rangle = \sqrt{\frac{\pi k_B T R}{2mg}}$$

となることを示される. ここで, T は温度, R は液滴の半径, g は重力加速度, k_B はボルツマン定数である. ブラウン運動の軌跡を十分長い時間観測することにより $\langle r \rangle$ が推定できるので, その値を用いると m が推定できる. 図 8 は, t 秒間観察されたブラウン運動の軌跡から推定された平均変位半径を用いて推定した金粒子の質量である. 水平線は半径を $0.3 \mu\text{m}$ と仮定し, バルクの密度を用いて計算した質量である. 推定値が計算値に近づいていることが分かる. ハッチした部分はランジュバン方程式を解くことで求めた不確かさである.

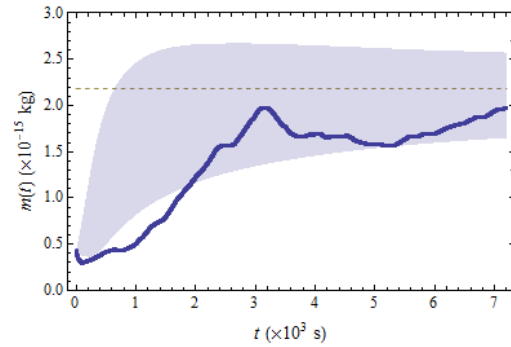


図 8 単一金粒子の質量推定値

ここで, 強調すべきは, 金粒子に作用する重力がおおよそ 20 fN と極めて微小な値であることである. 従って, 僅かな力の変化に対して平均変位半径は敏感に変化すると考えられる.

(3) グラフェン共振器に及ぼすカシミール効果 [論文 1, 3]

カシミール力が引き起こす固着が問題とマイクロメカニズムは数多く存在するが, 本研究では最近注目されているグラフェン共振器について考察した. 図 9 に示す様にグラフェンが完全導体から距離 a_0 離れて配置されているものとする. グラフェンはカシミール力により引き寄せられ変形する. 変形量 A は a_0 の現象に伴い増大する. やがて, カシミール力がグラフェンの復元力を凌駕し, グラフェンは完全導体に固着する.

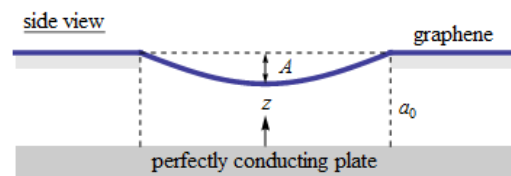


図 9 グラフェン共振器の構造

この問題を複雑にしているのは, 第一にグラフェンに作用するカシミール力が特異であること, 第二にカシミール力がグラフェンの形状に依存することである. つまり, カシミールエネルギーはグラフェン形状の汎関数となっている. 本研究では一辺が $1 \mu\text{m}$ のグラフェン膜について数値計算を行い, おおよそ間隔が 17 nm 以下となると凝着が起こることを示した (論文 3). また, グラフェンの動力学をシミュレーションする場合, 基板との相互作用をレナード・ジョーンズポテンシャルで近似する場合がある. しかし, グラフェンの 2 次元性のため, 補正が必要となる. 場の量子論に基づいた計算と対和法と呼ばれる従来法を比較して補正式を導いた. (論文 1)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 8 件)

(1) Norio Inui, Sho Iwasaki, Interaction energy between graphene and a silicon substrate using pairwise summation of the Lennard-Jones potential, e-Journal of Surface Science and Nanotechnology, 査読有, Vol. 15, 2017, 40-49.

DOI: 10.1380/ejsnt.2017.40

(2) Kousuke Goto, Shinya Sakata, Kousuke Moritani, Norio Inui, Mean distance of two Brownian particles trapped in a suspended droplet and its dependence on the Debye length, Physica A, 査読有, Vol. 466, 2017, 511-520

DOI: 10.1016/j.physa.2016.09.037

(3) Norio Inui, Casimir effect on a graphene resonator, Journal of Applied Physics, 査読有, Vol. 119, 2016, 1045021(7). DOI: 10.1063/1.4943588.

(4) Junya Tamura, Masasaki Hasegawa, Kosuke Goto, Kozo Mochiji, Kousuke Moritani, Norio Inui, Weighing a single Brownian particle in a droplet, Journal of Physical Society of Japan, 査読有, Vol. 84, 2015, 084001(6).

DOI: 10.7566/JPSJ.84.084001

(5) Kosuke Goto, Kozo Mochiji, Kousuke Moritani, Norio Inui, Roughness dependence of the Casimir force between fractal surfaces, e-Journal of Surface Science and Nanotechnology, 査読有, Vol. 12, 2014, 313-321.

DOI: 10.1380/ejsnt.2014.313

(6) Norio Inui, Levitation of a metallic sphere near gas-liquid and liquid-liquid interfaces, Physical Review A, 査読有, Vol. 89, 2014, 62506(8).

DOI: 10.1103/PhysRevE.89.062506

(7) Norio Inui, Kosuke Goto, Thermal fluctuations and stability of a particle levitated by a repulsive Casimir force in a liquid, Physical Review E, 査読有, Vol. 88, 2013, 05233(7).

DOI: 10.1103/PhysRevE.88.052133

(8) Norio Inui, Kosuke Goto, Diffusion constant of a gold particle levitated by a repulsive Casimir force near a silica plate immersed in bromobenzene, Journal of the Physical Society of Japan, 査読有, Vol. 82, 2013, 114003(6).

DOI: 10.7566/JPSJ.82.114003

〔学会発表〕(計 15 件)

(1) 乾 徳夫, 後藤 宏介, 盛谷浩右, 懸垂液滴中に捕獲された二体金粒子間距離のデバイ長依存性, 日本物理学会第 72 回年次大会 (2017 年 3 月, 大阪大学, 豊中市)

(2) 乾 徳夫, カシミール効果による自立グラフェンの変形, 日本物理学会 2016 年秋季

大 (2016 年 8 月, 金沢大学, 金沢市)

(3) S. Iwasaki and N. Inui, "Van der Waals Interaction between a Graphene Sheet and Silicon Dioxide Substrate Using Pairwise Summation of the Lennard-Jones Potential", Symposium of Surface Science & Nanotechnology -25 th Anniversary SSSJ Kansai. Kyoto (Japan), January 24 (2017)

(4) K. Goto, K. Moritani, and N. Inui, "Mass measurement of a single particle trapped in a water droplet", The Scientific International Symposium on SIMS and Related Techniques Based on Ion-Solid Interactions Abstracts, P-5/p.27, Tokyo (Japan), July 21 (2016)

(5) K. Goto, K. Moritani, and N. Inui, "Mass measurement of single nanoparticle by trapping in water droplet", IEEE NANO 2016, 16th International Conference on Nanotechnology, TuPo1.44, Sendai(Japan), August 23 (2016)

(6) 乾 徳夫, 田村純也, 長谷川雅章, 後藤 宏介, 持地広造, 盛谷浩右, 懸垂水滴内に捕獲された単一金粒子の質量測定, 日本物理学会第 71 回年次大会 (2016 年 3 月 21 日, 東北学院大学, 仙台市)

(7) N. Inui, Optical mass measurement of a single particle trapped in a suspended droplet: The 6th Asian Particle Technology Symposium, September 16, 2015, Coex, Seoul, Korea

(8) N. Inui, Thermal fluctuations and stability of a metallic particle levitated by the Casimir effect near a solid-liquid interface, SigmaPhi2014 - International Conference on Statistical Physics 2014, Greece July 11(2014).

(9) 乾 徳夫, カシミール斥力により液液界面近傍で浮揚する金属円板の熱揺らぎ, 日本物理学会第 70 回年次大会 (2014 年 3 月 22 日, 早稲田大学, 新宿区)

(10) 乾 徳夫, 後藤宏介, カシミール斥力で液中に浮揚している金粒子の浮揚距離と拡散係数, 2013 年真空・表面科学合同講演会, (2013 年 11 月 28 日, つくば国際会議場, つくば市)

(11) 乾 徳夫, 液液界面近傍における金粒子のカシミール斥力による浮揚, 日本物理学会 2014 年秋季大会 (2014 年 9 月 21 日, 中部大学, 春日部市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

乾 徳夫 (INUI NORIO)

兵庫県立大学・工学研究科・准教授

研究者番号: 70275311