HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Study on the analytical and experimental method to evaluate Casimir force excluding the effect of roughness and electrostatic force [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	吉田, 尚樹
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第14134号
Issue Date	2020-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/78378
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Naoki_Yoshida_abstract.pdf, 論文内容の要旨

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学　位　論　文　内　容　の　要　旨

博士の専攻分野の名称　　博士（工学）　　氏名　吉田　尚樹

学　位　論　文　題　名

Study on the analytical and experimental method to evaluate Casimir force excluding the effect of roughness and electrostatic force

（静電気力と表面粗さの影響を低減したカシミール力の解析及び測定法に関する研究）

近年の微細加工技術の発展に伴い、ナノ電気機械システム (Nano Electro Mechanical Systems: NEMS) への応用としてナノスケール以下の領域で働く力の研究が重要となっている。特に注目を集めている力の一つにカシミール力がある。カシミール力は真空中の電磁界の揺らぎに起因して物体間に働く相互作用力であり、1948 年に H. B. G. Casimir によって理論的に予測されていた。量子論の発展により、この力は、真空中の電磁場が基底状態においてもゼロ点エネルギーと呼ばれる有限のエネルギーを有することと関連していることが明らかとなり、Casimir はこの真空における電磁場の揺らぎに着目し、電磁場の持つゼロ点エネルギーを計算している。理想金属の平行平板間では, 平板間の領域に電磁場が制限され、平板間とその外部の領域で電磁場のモード数と零点エネルギーの密度に差が生じることから平行平板間に力が働き、これがカシミール力のひとつの表れである。

カシミール力は静電気力と比較して距離の依存性が大きいため、ナノスケール以下の近距離で顕著となる相互作用力であり、遠距離では静電気力と比較して小さくなる。さらに後述する実験上の困難さから、相互作用が予測されてからおよそ半世紀に渡りカシミール力の測定報告はなされなかった。しかし 1997 年、S. K. Lamoreaux によって実験的に初めて Au-Au 間のカシミール力が確認された。この実験結果を皮切りに、複数の研究グループから金属-金属間に働くカシミール力の測定が報告された。当初、理論計算により金属-金属間に働くカシミール力が予測されていたため、Au や Al や Cu といった試料が広く用いられた。しかし、2007 年になると Si 等の半導体を用いることで光照射によりカシミール力の大きさを変化できることが Chen らによって報告されたため、金属-半導体間に働くカシミール力の研究が近年盛んに行われるようになった。また、最近では測定用の装置として原子間力顕微鏡が広く用いられており、探針と試料の間に働くカシミール力を測定する手法が報告されている。また、カシミール力はナノスケール以下において他の相互作用力に対して支配的であるため、摩擦低減や量子浮遊や熱伝導への応用が期待され、研究の領域が広まりつつある。

しかしながら一般に、このようなナノスケール以下の近距離では物体の表面粗さと吸着物の影響が顕著となるため、短距離になればなるほどカシミール力の定量的な評価が困難となる。加えて、原子間力顕微鏡を用いたカシミール力の測定では、カシミール力の距離依存性だけを測定することはできず、静電気力や capillary force といった他の力との合力が測定されることになる。Capillary force は物体表面の水吸着層によって生じるため、超高真空中での表面処理と測定を行うことでカシミール力に対して十分無視できるようになる。このため、ナノスケール以下の近距離でのカシミール力測定では超高真空環境が求められる。一方、静電気力は物体間の接触電位差によって生じるため、接触電位差相当の電圧を印加することで打ち消す必要がある。しかし、接触電位差に

距離依存性がある場合、従来の原子間力顕微鏡を用いた測定方法 (Kelvin Probe Force Microscopy: KPFM) では、正しい接触電位差の値が得られないことが明らかになっている。よって、カシミール力の定量評価には、従来の手法とは異なる接触電位差の測定手法、またはカシミール力と静電気力を分離して測定する手法を見出すことが求められている。本研究では単原子層レベルで平坦かつ清浄な表面を持つ試料を利用したナノスケール以下の近距離でのカシミール力測定法、さらには物体間の接触電位差を正しく評価しカシミール力と静電気力の距離依存性を個別に求める手法の提案を行った。

本論文は以下の 5 章から構成されている。第 1 章では、量子論で扱われる調和振動子における零点エネルギーの概要と導出、場の量子化を経て空間の零点エネルギー密度を計算し、金属平行平板を置いた場合の密度差からカシミール力の距離依存性を導出する。また、これまでのカシミール力測定の背景を述べ、カシミール力測定における課題として表面粗さと接触電位差による静電気力が挙げられることを示し、本論文で測定・解析手法を提案する必要性を論ずる。

第 2 章では、以降の第 3、4 章で行った測定の基本原理の説明と実験系を解説する。探針振動の周波数シフトの距離依存性及び電圧依存性を、探針振動を強制振動系としてモデル化した視点からの解析方法について述べる。

第 3 章では、カシミール力測定における表面粗さの問題を解決するため超高真空中で作製した単原子層レベルで平坦かつ清浄な試料を用いたカシミール力測定について述べる。超高真空中における加熱処理により作製した Si(111) 基板の (7×7) 再構成表面を利用することで、Au-Si 間に働くカシミール力を 50 nm 以下の近距離で初めて測定した。測定結果と理論計算を比較した結果、50 nm 以下の近距離において金属-半導体間のカシミール力の理論が適用可能であることを明らかにした。

第 4 章では、接触電位差に距離依存性がある場合においても、正しい接触電位差の値を得ることができる手法を提案する。この手法を用いてカシミール力と静電気力の距離依存性をそれぞれ得ることができた。得られたカシミール力と静電気力の距離依存性を理論と比較した結果、カシミール力と静電気力それぞれが良い一致を示しており、本手法が正しくそれぞれの力を評価できていることを確認した。本手法はカシミール力測定だけでなく、静電気力など他の相互作用力の測定においても活用できるものであると考えられる。

第 5 章では、学位論文全体の本研究を総括し本研究における提案手法の有用性およびそれにより得られたカシミール力の測定結果についてまとめ、今後の展望とともに結論を述べた。