

Title	Qコントロール法による溶液中位相変調方式原子間力顕微鏡の高感度化・高分解能化
Author(s)	小林, 成貴
Citation	大阪大学, 2010, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/57538
rights	
Note	著者からインターネット公開の許諾が得られていないため、論文の要旨のみを公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、 〈a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed"〉 大阪大学の博士論文について 〈/a〉 をご参照ください。

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

氏名	小林成貴
博士の専攻分野の名称	博士(工学)
学位記番号	第 23793 号
学位授与年月日	平成22年3月23日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当 工学研究科精密科学・応用物理学専攻
学位論文名	Qコントロール法による溶液中位相変調方式原子間力顕微鏡の高感度化・ 高分解能化
論文審査委員	(主査) 教授 菅原 康弘 (副査) 教授 井上 康志 教授 小林 慶裕 准教授 松本 卓也(産業科学研究所)

論文内容の要旨

本論文は、Qコントロール法による溶液中位相変調方式原子間力顕微鏡 (AFM) の高感度化・高分解能化に関する研究成果をまとめたものである。

第1章では、溶液中AFMに関するこれまでの研究の経緯と現状を概論し、その重要性や課題に言及した。そして、Qコントロール法による溶液中位相変調方式AFMの高感度化・高分解能化の目的と意義を明らかにした。

第2章では、AFMの原理について述べた。まず溶液中AFM測定に関わる探針-試料間相互作用力について記述した。続いて、AFMの空間分解能について議論し、原子分解能を得るための要因について述べた。続いて、位相変調方式を中心に、ダイナミックモードの原理と各種方式の力検出感度の議論をした。次に、溶液中でのカンチレバーの共振周波数とQ値を得る式を記述した。その後、高感度測定手法である小振幅モードについて記述した。最後に、Qコントロール法の原理について述べた。

第3章では、本研究で用いた溶液中AFMの装置構成について述べた。まず、AFMユニットを構成するカンチレバーホルダー、チューブスキャナー、アプローチ機構に関して記述した。続いて、光てこ方式の変位検出計の動作原理と低ノイズ化のための要点を紹介した。また本研究で作製した光てこ変位検出計を紹介し、変位ノイズ密度が従来より1桁以上低い $16.7 \text{ fm}/\sqrt{\text{Hz}}$ まで実現したことを示した。次に、本研究で用いたAFMの装置構成について、カンチレバー励振方法、フィードバック制御、ロックインアンプの原理、XY平面の走査機構、DCモータによるアプローチ方法について説明した。最後に、本研究で用いたカンチレバーの形状や選択理由について説明した。

第4章では、Qコントロール法を位相変調方式AFMに用いることで、力検出感度を改善することが可能かどうか、理論と実験の両面から検証した。理論的解析では、ノイズ源を考慮したQコントロールの正帰選フィードバックを含むカンチレバーの伝達関数に基づいて、位相ノイズ密度および位相ノイズを表す理論式を導出した。そこから、力検出感度の指標となる検出可能な最小の相互作用力と実効的なQ値 (Q_{eff}) の関係を明らかにした。その結果、検出可能な最小の相互作用力は、 Q_{eff} がカンチレバー固有のQ値に近い値では Q_{eff} に依存しないのに対し、さらに Q_{eff} を高めていくことで、 $Q_{\text{eff}}^{-1/2}$ に依存して低減させることができることが分かった。実験的に測定した位相ノイズ密度の周波数特性やそこから評価した検出可能な最小の相互作用力は、理論とほぼ一致した結果が得られたことから、理論の正当性を実証した。また、ある程度の Q_{eff} では、従来のAFMの検出感度の限界を超えることも可能であることも明らかにした。

第5章では、 Q コントロール法による位相変調方式AFMの高分解能化を示すために行った、溶液中での原子分解能イメージングの結果について述べた。 Q コントロール法で Q 値を1桁以上高めることにより得られたイオン結晶であるカルサイト(101-4)面の超純水中での原子構造観察について記述した。

第6章では、本論文についてまとめた後、本研究および溶液中AFMの今後の展望について記述した。

論文審査の結果の要旨

溶液中で反応・機能している最中の固体表面の結晶構造や物理化学的性質の変化を高分解能に観察することは、固体表面の反応や機能の解明にとって極めて重要である。本論文では、溶液環境下で動作する原子間力顕微鏡の高感度化・高分解能化を目的とし、カンチレバーの共振の Q 値を実効的に高めることのできる Q コントロール法を用い、力学的に溶液中の固体表面を高感度・高分解能に探る手法について理論的・実験的に検討している。

本論文における主な成果を要約すると以下のとおりである。

(1) 振動振幅一定モードの位相変調原子間力顕微鏡に Q コントロール法を適用する新しい方式の原子間力顕微鏡を提案している。この方式は、カンチレバーの振動振幅を常に一定に保持するため、力測定に対する溶液の体積変化や温度変化の影響を受けにくいという特長を持っている。この方式に対する検出可能な最小の探針・試料間相互作用力を与える関係式を理論的に導出し、検出可能な最小の相互作用力が、 $Q_{\text{eff}}^{1/2}$ （ここで、 Q_{eff} はカンチレバーの実効的 Q 値）に反比例して減少するため、 Q コントロール法を用いることにより、力の検出感度を大幅に向上させることができることを見出している。

(2) 振動しているカンチレバーに対する位相ノイズ密度の周波数スペクトル測定から、検出可能な最小の相互作用力を実験的に検討している。その結果、 Q コントロール法を用いることにより、位相ノイズ密度の増加が、低周波数領域に比べて高周波数領域が抑えられるため、力の検出感度が大幅に向上することを見出している。また、 Q コントロール法を用いることにより、カンチレバーの熱振動ノイズだけで決まる力の検出感度の限界を超えられることを初めて明らかにしている。

(3) Q コントロール法を適用した振動振幅一定モードの位相変調原子間力顕微鏡を用いて、イオン結晶であるカルサイトの(1014)表面を超純水中で観察を行っている。その結果、表面に突出した CO_3 イオンによると考えられる構造を原子分解能で観察することに成功している。

以上のように、本論文は溶液環境下で動作する原子間力顕微鏡の高感度化・高分解能化に関して理論的・実験的に研究したものであり、基礎的な面のみならず、応用の面でも有益な知見を得ており、応用物理学、特にナノ計測学に寄与するところが大きい。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。