

氏 名	Shan 単	Xue 学	Chuan 伝
授 与 学 位	博 士 (工 学)		
学位授与年月日	平成 4 年 3 月 27 日		
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項		
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 精密工学専攻		
学 位 論 文 題 目	STM/AFM による機械加工面形状の超精密測定に 関する研究		
指 導 教 官	東北大学教授 江村 超		
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 江村 超	東北大学教授 箱守京次郎	
	東北大学教授 庄司 克雄	東北大学教授 江刺 正喜	
	東北大学助教授 清野 慧		

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 緒 論

STM (走査型トンネル顕微鏡) と AFM (原子間力顕微鏡) は, 精密加工面の微細な表面形状や粗さの測定への適用が期待されている。本研究では, STM/AFM を機械加工面の超精密測定に応用するための基礎技術の構築を中心に研究を進め, 従来の粗さ計と同様の環境の中で同程度の大きさの試料を高速度, 高分解能で測定する STM (AFM) 装置を開発することを主な目的とした。

第 2 章 STM の原理及び通常型 STM の試作

本章では, 微細形状や粗さ測定のための STM に関する基礎データを得るため, 通常のトライポッド型 STM 装置を試作し, その動作を確認することを目的とする。後に試作するスキッド式 STM との比較データを得る目的にもこれらの STM を使う。

第 3 章 探針先端形状の影響

STM を用いて精密加工面の微細形状や粗さを測定するとき, 探針の先端形状の影響は複雑である。本章では, 探針先端の影響を考察するために, 探針先端形状と被測定形状ともを離散化して,

計算の所要時間を短縮できるシミュレーションの方法を導入した。これに基づき、様々の被測定形状を対象として、探針の先端形状の影響を検討し解明した。また、実験結果からも考察した。

第4章 スキッド式 STM の開発

精密加工面の計測に STM を使用する場合、大走査領域の STM を必要とする。しかし、STM 装置の走査域を拡大すると同時に装置が大がかりになるため、振動、長時間測定時のドリフトに敏感になるという欠点がある。従ってこれらの誤差を装置自ら補正しながら測定できるような STM の開発が重要である。本章では従来のスキッドの概念を発展し、平滑トンネル深針を用いたスキッド式 STM 装置を提案する。

スキッド式 STM においては、測定トンネル深針の両側に、二本の平滑トンネル深針が等間隔対称的に配置されている (図1)。平滑深針が振動や熱ドリフトなどの影響、ステージの上下動誤差などだけを検出し、電気回路の差動計算によって、これらの誤差成分を取り除く。これは本 STM の大きな特長である。

周波数が約50Hzで、最大振幅が約 $0.1\mu\text{m}$ の強制振動に対して、差動出力では振動成分がほぼ完全に除去され、差動出力の二乗平均誤差は 0.2nm である。また本研究では、単独の深針に対して 1°C 当たりのドリフトをドリフト係数と定義することを提案し、STM 装置のドリフトを実験と計算の両方から考察し、差動出力ではドリフトの影響が除去された。更にスキッド式 STM を用いた測定結果から判断すると、走査中のステージの上下動誤差 (約 60nm) がほとんど除去され、 $220\mu\text{m}$ の走査範囲での安定した測定が出来た。よって、スキッド式 STM の有効性を確認した。

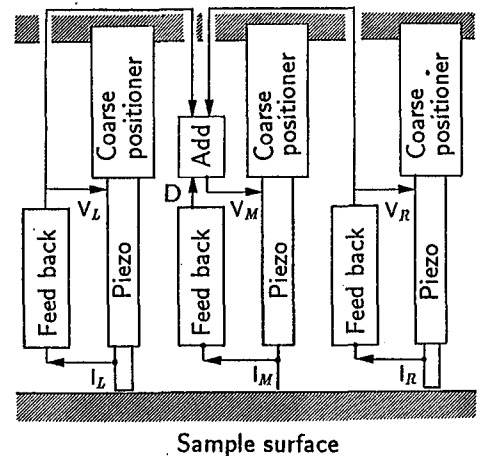


Fig. 1 Principle of skid type STM

第5章 ミリスケール STM の開発

ミリメートルの走査域を高速で測定し、長時間かけて測定する時でも、ドリフトや外乱振動、ステージによる誤差などの影響を補正しながら高分解能、しかも大きな加工物をそのまま測定できるようにするために、本章では、ミリスケール STM 装置を構成した (図2)。装置は主にスキッド式 STM ユニット、X-Y ステッピングモータステージとX方向の位置決め機構から成り立っている。

X-Y 方向の走査を停止した状態で本 STM の出力の周波数分析を行った結果により、 80Hz は測定深針の共振点で、 80Hz 以下の振動成分は約 20dB 程度減衰されている。また、振幅が約 10nm の外乱振動を与えた場合、差動出力では外乱振動がほぼ完全に除去され、差動出力の最小二乗平均誤差は 0.6nm である。

用いたステージはピッチ $2\mu\text{m}$ で、振幅 $3\sim 6\text{nm}$ の大きな振動が発生している。このような上

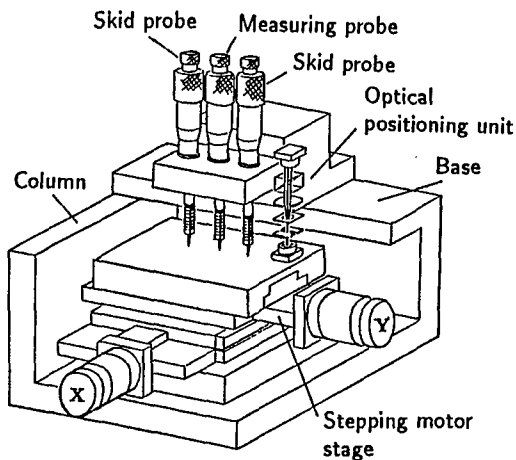


Fig. 2 Structure of millimeter-scale STM

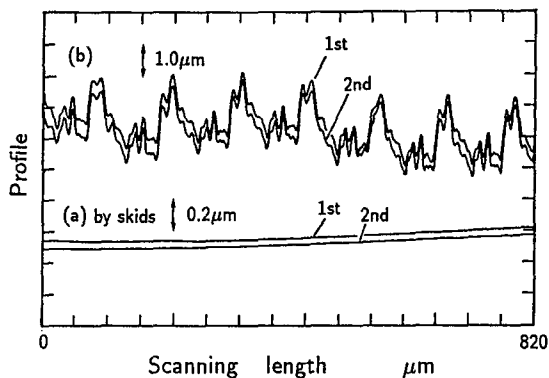


Fig. 3 Results of millimeter-scale scanning

下シフトによる移動誤差も平滑深針の効果で 0.5nm 以下に抑えられることが確認された。図3に長さ $820\ \mu\text{m}$ の領域を二回測定した結果を示す。(a)は平滑深針の出力で、ドリフトやステージの振動による影響が含まれている。(b)は差動出力の結果である。二回の測定はよい再現性($<50\text{nm}$)があると言える。

第6章 角変位検出型 AFM の開発

AFMは、主にカンチレバーと、その変形量の検出系から構成される。検出系としては、従来からSTM、光干渉法、光てこ法などが代表的である。これらの検出法を用いた従来のAFMでは、カンチレバーの先端の変位を検出している。このため、X、Y、Z方向の駆動を全て試料側にさせる構造になっている。従って、測定範囲の拡大や、試料の寸法と重量、走査速度などに対する制限が生じてくる。

また、上述のAFMの構造により、AFM像は、①カンチレバーと試料の間のドリフト、②カンチレバーと検出系との間のドリフトの両方に影響される。特に②のドリフトは測定誤差になるばかりでなく、フィードバックを介して走査中の原子間力にも影響を及ぼす。このため、走査中の力が変化してしまうという欠点も上げられる。微小力での測定が必要な場合、このドリフトによる力の変化が無視できなくなる。

本章では、従来の検出法の弱点を克服するために、カンチレバーの角変位を検出する新しいAFMを提案する。提案した角変位検出型AFM(図4)は臨界角角度センサを用いる。角度センサは、主に半導体レーザ、臨界角プリズムとフォトダイオードから構成される。カンチレバーから反射された平行ビームは、臨界角プリズムの中で二回反射した後、フォトダイオードで受光される。プリズム内部の境界面での反射率は、臨界角付近でカンチレバーの角度の微小な変化によって大きく変わる。

提案したAFMは次の様な特長を有している。

1) 臨界角角度センサはコンパクトで、高い分解能を有している。

2) 角度センサで角変位を検出することにより、カンチレバー駆動型 AFM ができた。走査速度の制約、試料の大きさや重さの制限などがなくなる。

3) ②のドリフトは AFM 像に影響しない。

4) 角度センサは優れたドリフト特性を持つ。温度の変化が 0.2°C に対して、角度センサのドリフトは 0.1 秒以内で、これはカンチレバー先端の 0.02nm の変位に相当する。

5) ①のドリフトの影響を低減するために、スキッド導入した方が有効だと考えられる。

回折格子の繰り返し測定結果により、本 AFM はよい再現性があり、広い領域での安定な測定もできることを確認した。

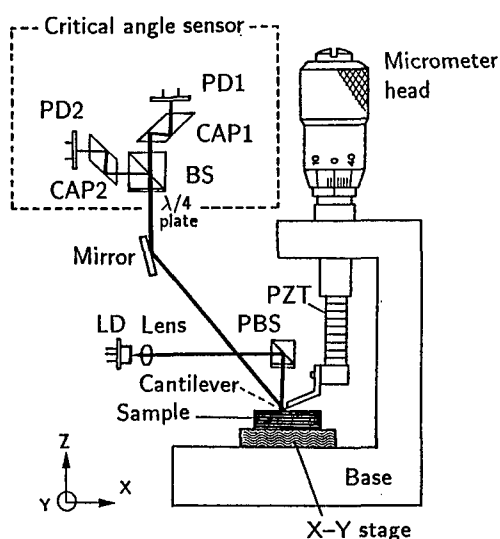


Fig. 4 Structure of the developed AFM

第7章 原理の違うセンサによる比較測定

本章では、ミリスケール STM と光触針センサを同一装置の中に組み込んで、新しい比較測定システムを構成した。同じ支持体の右側にスキッド式 STM、左側に光触針が固定される。マークの付いた試料（例えば回折格子の m 番目の格子）を両センサで測ることによって、STM の深針と光ヘッドの相対位置を 20nm 程度の精度で決めることができる。

このシステムを用いてはじめて、試料を外すことなく両センサで同一領域での比較測定が実現できた。従来機械触針と光触針に言われた同様の一致と不一致が STM でも確認され、従来の比較測定で識別できないエッジ部での立ち上がりの微小変化が、本システムによって明瞭に分かる。したがって、光触針における傾斜の影響、エッジ部での影響などの詳細を明らかにし、測定精度の向上を図るために、大きな意味があるといえる。

第8章 結論

本研究で得られた主な結果は次のようにまとめた。

1) STM による形状測定シミュレーションの方法を提案し、STM 深針の先端形状の測定結果への影響について検討した。

2) 形状平滑特性の高い2本のスキッド深針を追加したスキッド式 STM を提案した。それにより測定中の外乱振動、ドリフトの影響及びステージの上下シフトによる誤差が除去できることを示した。

3) その上で、 1mm 四方以上の領域を観察できる STM (ミリスケール STM) を開発し、その有効性を確認した。

4) カンチレバーの角変位を通して原子間力を検出する新しい型の AFM を開発した。走査方法とドリフト特性を改善して、AFM によって機械加工面の大きな領域を精度良く観察できることと、スキッド法の導入も期待できることを示した。

5) STM/AFM と光触針など他の原理のセンサを用いて、厳密に同一カ所を比較測定するシステムを構築し、光触針の形状検出特性の詳細などを明らかにした。

審査結果の要旨

機械加工表面の微細形状の測定手段に要求される性能が厳しくなり、従来からの機械触針や光触針では対応できない場合が増え、STM/AFMへの期待が高まっている。しかし、小さな試料の1 μm 四方程度を観察するための従来のSTM/AFMを、大きな試料の広い表面領域の観察用に発展させるためには、工学上で克服すべき多くの問題が生じる。

本論文はこの様な観点で機械加工面の微細形状測定を実現するためのSTM/AFMを提案し、試作によりその有効性を実証した結果について述べたもので、全編8章からなる。

第1章は緒論で、本研究の背景と目的を述べている。

第2章では、従来型のSTMの試作を通して、試料の大型化と観察領域の拡大の際に生じる、温度ドリフトの増大、走査基準の形成の困難さなどの問題の所在を明らかにしている。

第3章では、深針先端形状と測定結果形状の関係と太い深針による形状平滑特性を検討している。

第4章では、第2章で明らかになった問題を克服する手段として、形状成分を平滑除去するトンネル深針を2本追加したスキッド式STMと呼ぶ新しい方式のSTMの原理を提案し、試作機でその特性を評価している。試作機では、温度ドリフト、外乱振動及び走査のための試料の移動誤差の影響を除去し、200 μm 以上の長さ測定を数nmの精度で実現している。この方式は機械加工面の測定用STM実現のために重要な提案になっている。

第5章では、第4章での試作機をさらに改良し、直径100mm以上の試料を搭載し、1mm四方以上の領域を連続観察できるSTMを実現し、スキッドの効果で走査の基準の誤差を0.5nm以下に保つ殊に成功している。これは優れた成果である。

第6章では、マイクロカンチレバーの変位を直接検出して原子間力を観察していた従来型AFMに代えて、その角度変位を検出する方法のAFMを提案し、その試作結果を述べている。この方式によって、今まで困難であったAFMでの試料の大型化と走査領域の拡大がSTMと同じ様に実現できることなど、工学上の重要な知見を得ている。

第7章では、異なる原理のセンサによる結果の違いを究明するために第3のセンサとして本STMを使用した例などを述べている。STMと光触針を互いに10nm以下の誤差で設定するシステムに組み込み、同一箇所の比較測定を行い、今まで曖昧であった光触針特有の形状角部での立ち上がり現象の詳細を吟味している。この様な応用は各種形状センサの性能研究に寄与するところが大きい。

第8章は結論である。

以上要するに本論文は、機械加工面の測定にSTM/AFMを利用する際に生じる測定工学上の種々の問題点を明らかにし、その解決法を提案し、試作機でその提案の有効性を実証したもので、精密工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。