

走査トンネル顕微鏡とメカトロニクスに関する研究調査

Research Trends of Scanning Tunneling Microscopy and Mechatronics

川 勝 英 樹*

Hideki KAWAKATSU

1. ま え が き

平成3年度の財団法人生産技術研究奨励会三好助成金の交付を受け、平成3年8月、研究調査のためスイスに渡航した。研究調査内容は2件あり、一件は走査型トンネル顕微鏡の研究調査、2件はメカトロニクスおよび磁器浮上機構の研究調査であった。以下に順を追って報告を行う。

2. 走査型トンネル顕微鏡研究調査¹⁾

1991年8月、スイス、インターラーケンにおいて第6回 STM (scanning tunneling microscopy) 国際学会が行われた。今回はSTMの発明から10年目の記念的行事であり、前回アメリカ合衆国ボルチモアで欠席していたSTMの発明者のBinnigも招待されていた。なお、今回までは毎年STM国際学会が行われていたが、今回を最後に隔年開催になった。以下に、参加を通じて著者が興味を持った発表に言及したい。

2.1 原子間力顕微鏡

原子間力顕微鏡 (atomic force microscope, AFM) はSTMの開発から数年遅れてBinnigらによって発明されたものである。この顕微鏡は鋭利に尖らせた探針で試料表面を走査し、試料表面の形状を測定するものである。走査に際しては探針の押しつけ力を数ナニュートン程度の一定値に保つ。これにより、おおむね非破壊的な像取得が可能となる。当初、探針を支持しているカンチレバーの変位はトンネルジャンクションのトンネル電流の変化から検出していたが、この方式はジャンクションの安定性の点で扱わずらく、現在の光学式変位検出方式にほぼとって代わられている。Binnigがその招待講演で述べていたことで特に興味深いことがある。それは、現在のAFMでは結晶表面の原子オーダーの段差がほとんど観察されず、STMの観察結果との対応がこの点で良くないという報告であった。Binnig自身、現在のAFMでは何を観察しているかが厳密には明らかではなく、その作動中に実際に起こっている現象を明らかにし、作動

原理の見直しを行う必要があると述べていた。

2.1.1 摩擦検出能力のある原子間力顕微鏡

AFMの作動原理の見直しを著者は行っているため、複数方向の力検出能力を持ったAFMの研究報告について特に調査を行った。その結果、3件の研究例を見いだした。

(コンスタンツ大学, Hipp) 光てこ式のAFMはカンチレバーの変形を光てこで拡大し、レーザスポットの変位を分割型フォトダイオードで検出して探針に作用する力を検出、制御する方式である。コンスタンツ大学のHippらはレーザスポットの検出に四分割型フォトダイオードをもちいて試料法線方向と接線方向の力が同時に検出できるAFMを開発している。まだSN比はよくないが、グレーチングについて、法線力図と接線力図の取得に成功しており、接線力図は法線力図を反映したものとなっていた。近い将来原子オーダーの分解能が実現されると報告していた。なお、この方式は先にIBMのAmerらの行った実験に準じるものである。

(Taiyo Yuden, Hamada) 本研究はNTTの金子氏と合同研究で、金子氏が1988年にオックスフォードで行われたSTM国際学会に発表した研究に関連するものである。本機構は、エデンばねでAFMのカンチレバーを支持した構造をしており、エデンばねの変形から試料面方向の力を推定する構造となっている。実験に用いる力の大きさは100 nN程度であった。本研究では、探針で圧痕を残す実験、探針で試料を引っかけて表面の物質を取り除く実験、試料表面の摩擦分布を測定する実験、などが報告されていた。近年ナノ・インデンテーションの実験装置の報告が若干例みられるが、この研究は以前から継続的に行われているものとして注目したい。

(ニューシャテル大学, Buser) 本研究はシリコンのマイクロファブリケーションに関するものである。通常AFMで用いられるカンチレバーはねじれ剛性を高めたものが多く、カンチレバーの変形から接線力を検出することは困難である。本研究では、接線力の積極的な検出を目的として、接線方向のコンプライアンスの高いカンチレバーを試作している。その形は上面からみると3周

*東京大学生産技術研究所 第2部

期分の矩形波状をしている。実際に測定にはまだ用いていないようであった。このカンチレバーはその構造上、接線力による変位がねじれと並進変形の複合したものとなり、Amerらの装置のようにねじれだけで接線力を検出しうる構造とは異なるものであった。そのため、このカンチレバーの変位検出の機構がいかなるものになるのかは著者に想像し難い、なお、受講者のコメントに、このようなカンチレバーはすでに市販されているというものがあつた。

(バーゼル大学, Brodbeck) 本研究はAmerと同様の方式のAFMによって試料走査中の法線力と摩擦力を求めるものである。この研究では、光磁気ディスク、マイカ、LBフィルムの観察を行っている。マイカの観察では原子オーダーの分解能を実現しており、結晶格子構造を反映した摩擦像が得られている。LBフィルムの観察では、法線力像(通常の形状像)には現れない形状が摩擦像に確認される例が報告されている。Brodbeckらは表面の局所的化学組成の変化ではないかとしている。

2.1.2 AFMを用いた微細加工

AFMは探針に加わる力を検出する機構を有するため、加工の力を制御しながら試料に圧痕や溝を作ることができる。研究としては、探針のZ軸に意図的に振動を加えて溝を加工する方法が紹介されていた。これは一定圧で制御を行うとスティックスリップによって安定した加工ができないことに対する対策である。加工例として、コンパクトディスクのピットの間に文字をかけたものが報告されていた。

2.2 走査型トンネル顕微鏡

走査型トンネル顕微鏡(scanning tunneling microscope, STM)は鋭利に尖らせた探針を試料表面から数ナノメートルの位置に近接させ、探針と試料の間に流れるトンネル電流を検出して走査を行うものである。それによって試料表面の形状や、電気的特性をサブナノメートルの水平分解能で求めることが可能となる。今回の学会では講演参加者が数百を越える数で、発表内容も多岐に渡っていた。ここで紹介するのはそのごく一部に過ぎない。

2.2.1 DNAの観察に関する研究

STMの応用分野で注目を集めているものの一つにバイオテクノロジーがある。その中でも特に注目されているものにDNAなどの生体関連物質の観察が挙げられる。その大きな目標はDNAのシーケンシングである。STMによるシーケンシングが可能となれば、捕捉したDNAを探針で直読することが可能となり、大幅な省力化が実現されると考えられている。

現在、STMによるシーケンシングはまだ実現されていない。関連のある発表としては、同種類の塩基をサブストレート上に固定し、STMで観察を行うという報

告があつた。原子オーダーの観察の行われていた各像では、塩基ごとに特徴のある配列が確認されていた。直接シーケンシングを行うまでには至っていないが、少なくとも大量の同種類の塩基の同定はほぼ可能となっている。

2.2.2 STMによる加工

STMを用いた加工の方法は数種類ある。今までに機械的、電気的、科学的方法が試みられている。機械的方法は探針で圧痕や引っかき傷を試料につける方法で、タングステン探針と金の試料の組み合わせが報告されている。電気的方法としては、探針側の金を試料側に飛ばす方法や、単にバイアス電圧にパルス状の電圧を重ね合わせるという方法がとられている。Fuchsらの研究では、WSe₂を試料として探針による加工を行っていた。この方法では、特に特殊な気体の雰囲気を用いなくても原子オーダーの加工が機械的方法や電圧のパルス印加で可能であつた。広い応用の考えられる材料である。招待講演のあつたIBMのアイグラーの研究はゼノン原子をニッケルサブストレート上に規則正しく配列させるものや、原子一個とトンネルギャップを用いた“世界最小のスイッチ”に関するものであつた。いずれの研究も新聞等で注目を集めた研究である。アイグラーの研究と比べて、他の研究はやや“とにかくやってみた”という印象のものもあつた。ただし、実現される隆起やへこみはいままでに例のない数百ピコメートルから数ナノメートルオーダーのものなので、その応用の可能性は少なくない。

3. スイス連邦工科大学(Eidgenössische Technische Hochschule, ETH)におけるメカトロニクスと磁気軸受に関する研究調査

スイス・インターラーケンで行われたSTM国際会議の終了後、列車で2時間半ほどのところにあるチューリッヒに移動した。ここでは、スイス連邦工科大学ETHのシュバイツァー先生の研究室を数日間にわたり訪問した。訪問先の研究室では現在第2部の客員助教授をされているプロイレレル先生と、埼玉大学助教授の水野先生(以前、第2部助手)にお会いすることができ、研究室の詳しい説明を受けることができた。以下にシュバイツァー研究室のInstitute for Mechatronicsの組織、および研究テーマを報告する。

3.1 研究組織

シュバイツァー先生は1990年からInstitute for Roboticsを組織された。その構成メンバーは、博士が6名、博士コースが15名、学部生が40名である。このすべてが一研究室に属している。博士取得者はシニアリサーチアシスタントで、その内の数名はレクチャラー(授業担当、講師)でもある。博士コースの学生はアシスタントと呼ばれ、大学卒業後、5年以上を掛けて博士号を取得する。大学生は6カ月かかる学期プロジェクト

(semesta project) を 2 個と、4 カ月かかる卒業論文を書かなければいけない。日本との大きな違いは、教授を頂点とした組織の大きさと、博士コースのアシスタントが職員であり、給料をもらい、大学生の教育を一部援助しながら博士論文の研究を行っている点である。よく指摘されている点ではあるが、日本でも博士コースでは給料を支払い、研究者としてのプロ意識と責任をもたせても良いのではないかと思う。

3.2 研究テーマ

以下に同研究室で行われている研究テーマを紹介する。内容的には大きく分けてロボティクス関係の研究と、磁気軸受関係の研究が挙げられる。

3.2.1 ロボティクス関係

環境に対する適応力のあるロボット

同研究室ではこのようなロボットのことを“cooperative robot”と呼んでいる。具体例としては、カフェテリアでの使用を想定したロボットで、皿やナイフ、フォークのハンドリングを行う機能を有するものと、郵便局での使用を想定したロボットで、小包のハンドリング、宛名の書かれた面を上にする作業、郵便番号を読みとって仕分けを行う、などの機能を有するロボットがある。見学当日は前者を見ることができた。このロボットはアーム、ニューラルネットワークで制御された 3 本指のハンド、対象物の認識のための視覚としてのカメラ、超音波センサ、光ファイバを有する。ハンド、画像処理、電気系、などの研究グループがこのプロジェクトのために構成されており、すでに博士論文が 4 編もこのテーマで書かれているということであった。皿の上の残飯も想定しなければならないため、かなり適応力のある装置となっているということであった。

ロボトラック (roboTRAC)

このロボットは不整地の移動を想定した一種のビークルである。使用場所は工事現場や森林を想定している。その構成は 2 個の後輪と 2 本の“前足”からなる。車輪は非駆動輪であり、ビークルは前足で地面をかきながら前進する。一見不可思議な格好をしたものではあるが、工事現場などでショベルカーがショベルを使って車両全体の姿勢制御や移動を行っていることを考えると、実用性のある構成であるといえる。最終目的としては、オペレータの行きたい方向に移動が行われ、不整地表面への車輪および足の追従は自動的に行われるというものを想定している。現在は転倒防止のための研究と平行して、実際に人間の乗車できるものが試作されているという。ただし、後者に関してはまだユーザフレンドリーとはいえず、オペレータは数多くの制御棒を巧みに操作しなければならない。現時点ではその操作はヘリコプターの操縦よりも困難であるということである。

ピンポンロボット

同研究室では直交型のピンポンロボットを数年前から開発している。その性能は高く、1988年にはスイスで、1992年には香港での国際ピンポンロボット競技会で優勝しているということであった。デモンストレーションを拝見したが、恐怖感が生じるほどの俊敏かつマッシブな動きであった。数年前までは強いサーブで逃げきるパターンが多かったそうだが、最近ではラリー戦に勝敗が持ち込まれるケースが多いということであった。

3.2.2 磁気軸受関係

シュバイツァー研究室では以前から磁気軸受の研究を精力的に行ってきた。1988年開催の第 1 回国際磁気軸受シンポジウムも同先生の呼びかけでチューリッヒ ETH で開かれたものである。その当時と比べると、ロボティクス関係の研究が増え、磁気軸受関連の研究は見かけ上減ったという印象を受けた。以下に主要な研究を紹介する。

高速回転形磁気軸受

ロータを高速で回転させると、ロータの弾性による変形や、不釣り合いによるふれ回りの制御を積極的に行うことが必要となってくる。このような問題に対するアナログ制御での研究ではフランスの SMM がよく知られている。一方、同研究では、かなり早い磁気からデジタルシグナルプロセッサの導入を行っており、デジタル制御による各種制御を磁気軸受に適應している。具体的応用分野としては、ミリングスピンドル、ターボ分子ポンプなどが挙げられる。

センサーレスの磁気軸受

通常の磁気軸受では、浮上ギャップの検出を行って各電磁石の電流や電圧を制御する必要がある。この研究では、センサーを用いずに磁気浮上の安定化を行っている。1 自由度の実験装置を見た。その挙動は、浮上体に負荷を掛けると負荷と反対側の浮上ギャップが縮まるというもので、一種のゼロパワーコントロール型磁気軸受に似た挙動を示すものであった。

浮上体への給電

本研究は、浮上体への給電に関するものである。一種のトランスを用いて非接触に電力の供給を浮上体に行う。これにより、浮上体に積まれた制御回路や電磁石の駆動を行う。この方式は浮上用のステータコイルを省ける点、ギャップセンサ信号を浮上体からステータ側に伝える必要のない点、などの利点を有する。

モジュール形ニア磁気浮上システム

本システムは、磁気浮上システムの工場などへの導入の簡便性を向上する目的で開発された。同形態のステータユニットを案内方向に並べることによって任意の距離の非接触搬送を可能とするものであった。

4. あとがき

今回の海外渡航では、走査トンネル顕微鏡、磁気軸受、ロボティックスの研究調査を行うことができた。走査形トンネル顕微鏡の学会は10周年記念学会と、最後の毎年開催の学会ということもあって、招待講演を中心として、かなり聞きごたえのある講演が揃っていた。次回は1993年、中国の北京で開催される予定である。

ETHの見学では、その研究内容もさることながら、研究組織のあり方に興味を覚えた。学術的研究調査という点でも、研究組織の調査という点でも実りある渡航であった。

謝 辞

本研究調査は財団法人生産技術研究奨励会の三好助成金によって可能となりました。深く御礼申し上げます。

また、スイス連邦工科大学(ETH)のシュバイツァー先生、当時ETHに居られたプロイレル先生と埼玉大学の水野毅先生にはETHの研究内容や組織について詳しくご説明を頂きました。御礼申し上げます。

(三好研究助成報告書 1992年11月27日受理)

参 考 文 献

- 1) Ultramicroscopy, 42-44 (1992).