最近の超精密機械加工技術*

その役割と研究状況

井川直哉**

Recent Trends in Ultraprecision Machining Technology / Naoya IKAWA

Key words: advanced science and technology, ultraprecision machining, nanometer, diamond cutting, fine polishing, machining mechanism, metrology, machine tool, control technology

1. 緒 論

ここでいう超精密機械加工とは、形状の加工精度数百 nm～数 μm 、仕上面粗さ数百 nm (R_{max}) 以内を目標とし、これを切削加工や研削加工・砥粒加工のように工作機械の創成運動を“工具”を介して工作物上に転写する方法を指すことにする。

このレベルを目標にする加工法としては、超精密機械加工に加えて、エネルギービーム加工に例をみるように各種の物理・化学現象やその複合作用を利用する、いわゆる特殊加工、更には、物質の挙動を原子・分子のレベルで制御して除去を行ったり機能性薄膜を創出する技術など各種のものがある。これらの中で超精密機械加工は永い伝統をふまえて成熟し、各種の形状要求に対してフレキシブルに対応できること、したがって設計や組立により大きな自由度を与えること、そこで開発された個別技術は他の超精密技術の基礎となるという意味で、“超技術”の中核をなすものといえる。

ここでは超精密機械加工のそれぞれの細部にはふれないが、今日の先端科学・技術の中で果たしている役割とトピックス、それを支える個別技術の現状、課題などについて、研究の現状などもふまえながら話題を

提供したい。

2. 超精密加工と先端的科学・技術

超精密加工技術が科学・技術全体の中で大きな意味をもち始めたのは、1960 年以後の電子、電算機、宇宙、エネルギー技術が深くかかわっている。電算機用メモリーディスク基板は面粗さ数十 nm R_{max} 以下、寸法精度数 μm 台であるし、原子力、宇宙関係の制御機器部品でも同様な要求はめずらしくない。さらに光学部品においても赤外用反射鏡、レーザプリンタ用多面鏡、レーザ核融合用大口径曲面鏡では、面粗さ 10 nm R_{max} 、形状精度 1 μm 台、また紫外・X 線宇宙望遠鏡用の放物面・双曲面反射鏡及びその基板では取り扱う波長が短くなるにつれて、より高度な要求がなされる。更に、放射光 (SR 光) を利用する分析、加工技術や高出力エキシマレーザシステムでも、耐損傷性の高い特殊材料の光学部品に対しては特有の高い精度と平滑な表面が要求されようとしている。ここでいくつかのトピックスにふれてみよう。

米国は宇宙、防衛、基礎科学における問題を対象とする点で研究のスケールはやはり群を抜いている。その中でも宇宙望遠鏡 (可視・X 線・紫外線用) の各種大型曲面反射鏡は、いくつかの大学、研究所が NASA などとの共同で開発し、光学メーカーが製作を担当している。1990 年 4 月に打ち上げられたハッブルスペースステレスコプの反射鏡もその一つである。大出力レーザ用曲面鏡の製作技術などは宇宙望遠鏡の場合と共通点が多いといえよう。

基礎科学の分野での超精密加工技術の重要性について最近筆者が感銘をうけたものに、Stanford 大学

* 原稿受付 平成 4 年 11 月 16 日

** 正 会 員 大阪大学工学部 (吹田市山田丘 2-1)

1955 年大阪大学工学部精密工学科卒、工学博士。ダイヤモンドの工学的物性、ダイヤモンドによる超精密切削、超精密機器要素の研究に従事。著書：精密工作法、第 2 版 (共立出版) ほか

—NASA—Lockheed 社の共同による重力プローブ B (Gravity Probe B)¹⁾ 計画がある。これは、一般相対論で予言されている、地球の質量と自転による効果によって生じる“空間の曲がり”を力学的に証明するために、そのプローブとして地球を周回する“理想的ジャイロスコープ”を開発しようとするものである。その中核となる技術の一つは、直径約 35 mm の熔融石英の球体を約 10 nm の真球度で製作する超精密ポリッシングであるといわれ、1995 年の完成をめざして Stanford 大を中心に研究が進められている。超精密加工のもつ役割の重大さをあらためて認識したものである。米国ではおそらく、これに類する基礎科学上のテーマがいくつかあるのではあるまいか。

3. 超精密機械加工の基盤技術

ここで問題を機械加工にしばると、超精密加工を実現するには、まず工作機械が高精度計測システムや制御の助けを借りて正確に運動し、その運動が切削工具や砥粒の加工現象を介して正確に工作物に転写されることが必要である。その過程で、それらの挙動にじょう乱を与えない環境がととのえられていること、それに加工ソフトウェアとでもよぶべき全体を総括するストラテジーが求められる。ここではそれぞれの現状について概説する。

3.1 機器要素の高精度化

最も重要な機器要素は創成運動の基本となる軸受及びしゅう動テーブルである。軸受においては、静圧空気・油軸受を利用して $0.1 \mu\text{m}$ 以内の回転精度と $10^2 \sim 10^3 \text{ N}/\mu\text{m}$ の剛性を有するものが多く実用されている。この種の軸受でも回転精度 $0.05 \mu\text{m}$ 以内のものは計測用を除いてそれほど多くはないが、一般に挙動の再現性は短時間内ならば数 nm が得られる²⁾。また低回転速度ならば回転誤差を検出して制御することも可能である³⁾。

しゅう動テーブル、XY ステージでは位置決め精度と直進性が特に問題となる。前者では、基本的には計測装置の分解能まで制御可能であり多くの機器で nm オーダの位置決め分解能が実現されている。テーブルの駆動方法としては物理的に簡潔な構造をもつものを採用しなければならない。nm のレベルにおいては、機構はしばしば特異な非線形挙動⁴⁾を示すからである。駆動機構としては、ボールねじにかわってトラクションドライブがよく用いられるようになっている。

図1 テトラフォーム1 (NPL) の構造断面図

物理的に簡潔とみられるこの方法においてもある種の加工に必要な $\mu\text{m}/\text{min}$ 程度以下の極低速においては不安定な挙動を示すことがある⁵⁾。

最近の精密機器では nm レベルの微動素子としてピエゾアクチュエータの利用が一般化してきた。しかし特有のヒステリシスやクリープがあるので、その改善法⁶⁾や補償法、更には一般に数百 Hz までの低い周波数応答が問題として残されている。

機器を構成する材料においても特別な配慮がなされている。特に線膨張係数の極めて低い (10^{-8} K^{-1}) ガラスセラミックス (例 Zerodur)、スーパーインバ、最近では実用性の高いものとして低熱膨張鋳鉄⁷⁾ (常温付近で 10^{-6} K^{-1} オーダ) への関心が高い。

加工システムの構成についても最近いくつかの新しいアプローチがみられる。図1はテトラフォーム⁸⁾と称される一種の等方的閉鎖構造をもつ工作機械で、その等方的剛性、減衰性に特徴をもつといわれる。また、一種の計測器として構想されている Molecular Measuring Machine (M³, M-Cube)⁹⁾は振動絶縁、温度制御などに意欲的な設計を採用しており、将来のある種の工作機械の方向を示すものとなるかも知れない。わが国においても同様な目的の新しい実験機が試作されている¹⁰⁾。

3.2 計測技術の高精度化

寸法の計測技術としては、干渉計を利用して $0.1 \mu\text{m}$ 台の精度で機械の運動精度を測定・制御することは今や珍しくはない。しかし、実際にはこれらにおいてもドリフトの問題、低い周波数応答、外乱の弁別など目的に応じて解決すべき問題がある。

一方、機械挙動の計測においては、検出器の問題を別にしても、直進や回転の基準の問題がある。真円度や回転精度はある条件下では、たとえばいわゆる三点

図2 精密ダイヤモンド工具の切れ刃稜の一例

図3 設定切込み約1 nmにおける電着銅の切りくず

法¹¹⁾¹²⁾を用いて標準球などの実体基準と比較しないで評価することができるが、真直度や平面度ではその基準となる直定規や定盤の精度が一つの測定精度の限界となる。たしかに、いわゆる反転法¹³⁾は原理的に標準球や直定規の誤差を差動的に消去できるが、反転操作に伴う不確定性の不安が伴うので nm レベルにもう一つの精度限界があるのではないだろうか。新しい試みとして光の直進性を利用する方法¹⁴⁾も報告されているが、nm レベルでは、レーザー管の熱変形や光路上の空気の影響の抑制などについていくつかの技術的問題が残されている。

3.3 加工現象の高精度制御——工具と被削材の問題

多くの精密機械加工においては、極めて正確な工作機械の運動を加工物の上に転写することが基本となる。そのためには、たとえば極めて鋭い切削工具を用いて、指定された量だけ工作物を削り取ることが必要である。図2は極めて鋭利に仕上げられたダイヤモンド工具の切れ刃稜の一例で、これは一般の切削工具と比べて数百倍も鋭い（切れ刃稜の等価的曲率半径で比較）。このようなダイヤモンド工具を nm レベルの精度をもつ特殊な工作機械を用いると極めて精度の高い切りくず除去（加工）が可能である。図3は設定切取り厚さが約1 nmの実験条件で得られた電着銅の切りくずのSEM写真である。これは少なくとも瞬間的にはこのレベルまでの精度での切削加工が原理的には可能であることを示すものである。またこの種の切削では工具の輪郭と機械の運動が極めて正確に加工物上に転写されるので、nmR_{max}レベルの切削面が得られた実験例が多く報告されている。

一方、代表的な超精密加工であるポリシング及び類似の加工法では粒径 μm 以下で、しかも十分に整粒された砥粒または粉末を用い、また例えばEEM法¹⁵⁾

のように極めて安定した粉末の作用状態を実現することによって、仕上面粗さ nm 台で加工変質層の極めて少ない表面を得る各種の方法が展開されている。これらのうちのあるものは原子単位で加工現象の制御が行われているともいわれる。

また比較的最近になって研削加工においても、メタルボンド研削砥石の目直し、形直しを電気化学的溶出を利用して行い、極めて安定した切れ刃整列を得ることによって極く微小な切削作用の集積として nm オーダ R_{max} の研削仕上面を達成する ELID 研削¹⁶⁾が注目されている。更に高精度、高剛性機械と精密な切れ刃によってサブ μm 切込みの微小切削を行うことによって、ガラス、Si などのいわゆるぜい性試料でも“延性モード切削¹⁷⁾”，あるいはその拡張ともいえるセラミックなどの延性モード研削¹⁸⁾なども、加工現象の高精度制御を行うことによって実現した新しい機械加工の展開といえよう。

加工現象の高精度制御はもちろん工具技術のみで達成できるものではない。加工される材料のサブ μm 規模における安定した挙動がもう一つの要因となる。これは工具との相互作用の結果生じるものであるから、被削材そのものの加工現象からみた均一性のほかに工具との親和性——その物理的内容は必ずしも明らかではない——が大きな要因となる。超精密ダイヤモンド切削の対象になる Cu, Al やそれらの合金、ある種のプラスチック、超精密研削や砥粒加工の対象になる高純度 Si などはこれらの観点からすぐれた試料である。

3.4 加工環境

最近の精密機械加工では加工環境にも特別の注意が払われる。温度、振動（音響）、塵埃などの問題である。

温度制御に関しては、1 mK の精度が一応実現され

ている。しかし、このオーダの温度制御は、温度計測の分解能という点からは十分可能であるとはいえ、種々の熱源の存在や環境条件などの問題があり、そう容易に達成できるレベルではない。例えば、軸受などの運動部分や人間からの発熱、人間の移動、室内に存在する高さ方向の温度分布などによって室内の空気に対流を生じ、温度測定に1 K 台の誤差を生じる。また、照明灯からの輻射によって、同じ花崗岩定盤でも黒っぽいものと白っぽいものでは表面温度に0.1 K 程度の差が生じるといわれている¹⁹⁾。最高レベルに温度制御された工作機械においても、加工物を模擬して取り付けられた約1 m の棒の先端では、約16 時間の間の熱変位は0.1 μm 程度におさえるのがやっとであったといわれる²⁰⁾。

振動は工具・工作物間の相対変位をもたらしものが問題になる。たとえば空気軸受のロータとベースの間の相対振動は数 nm 以下の振幅にすることは一般にかなり困難である。機械の運動精度に対する振動の影響を小さくするには防振対策とともに機械各要素の動特性の改善にも注意を払う必要がある。また、モータやカップリングから発生する振動は意外に大きい。理想的には偶力のみを主軸に伝達し、ラジアル方向の力をまったく発生しないものが望ましいが、このような完全な機構の実現は極めて困難である。モータではロータとステータの間に作用する電磁力の不均一が、またカップリングではアライメント誤差や回転振れに基づく振動の発生が問題となる。

空気中の塵埃などの微粒子が軟質材料の超精密機械加工において有害なことがある。このような場合には、超 LSI の製造におけるのと同様なクリーンルームが必要とされている。

機器環境の制御の一つの極限として NIST で構想されている前出の M³ マシン⁹⁾ を挙げることができる。温度制御 $\pm 0.1 \text{ mK}$ 、除振レベル 1 pm、真空度 10^{-7} Pa が目標とされ、図4のように多重のシェル構造を用いて実現を図っている。コア構造は、直径約400 mm の銅製中実球体の上下半球内に互いに直交するトンネル状の案内溝にテーブルを装着し、たとえば STM や AFM のステージとして使用する計画のようである。

3.5 周辺技術

以上にあげた超精密機械加工に共通した技術的問題

図4 分子測定器 M-Cube (NIST) の概念図

のほかにも、それぞれの加工現場では加工対象によって特有の問題が生じるであろう。自重による変形、加工液の影響、加工物の熱ひずみ、切りくず処理の問題その他である。これらに関しては、正確な実測、再現性のチェック、モデル化とそのシミュレーション解析などの利用がオーソドックスな対策法である。

3.6 加工ソフトウェア

ここでいう加工ソフトウェアとは精密加工において必要な加工精度を得るために種々の個別技術を組み合わせる構成する諸方策を指す。いわゆるソフトウェア技術は、それによって超精密加工の物理的精度限界である加工単位（たとえば切りくずの大きさ）の精度や計測精度の壁を越えることはできないにしても、当面各種の実用的限界を打破する手段として試みるべきものである。それらの例として、いくつかの報告が見られる精度補償技術²¹⁾²²⁾の適用などをあげることができる。さらに加工状態の監視にしても、伝統的な仕上面、工具摩耗、切削力、切削温度、加工音、機械振動などに加えて、あるいはそれらとの総合として真に有効な加工パラメータの発見も必要となろう。また、加工結果の評価を含めて超精密加工の特質をふまえた加工システム全体の構成についての新しいコンセプトが必要になるかもしれない。

4. 機械加工現象の制御限界

4.1 工作機械の挙動

工作機械の各要素の運動に再現性があるならば適当な制御によって、その制御限界（分解能）までの創成運動精度が保証できる。計測・制御技術については動的応答性にまだ不十分な面もあるが、比較的短時間内ならばサブナノメートルの分解能はそれほど非現実的な目標とはいえない。したがって工作機械のハード面からみた精度限界は、機械要素の運動再現性ということ

図5 設定及び有効切取り厚さと最小切取り厚さ MTC (Minimum Thickness of Cut) の概念

ができる。すでに述べたように軸受の挙動の再現性は数 nm であり、少なくとも“瞬間風速的”には極めて高い精度が実現されているといえる。問題は、熱変形の問題もふくめてこれらの特性を加工に必要な一定の長い時間にわたって持続できるかである。

一方、このような高い精度を工作機械の X, Y, Z 軸の干渉を考慮に入れた上で、三次元的に実現することは設計上並びに製作上極めて困難な問題として残される。

4.2 最小切取り厚さ

工作機械が仮にナノメータ台の運動精度を保証されたとしても、加工精度はそこまで高められるとは限らない。工作物と工具の相互作用としての加工現象の制御——とくに加工量の制御——がどこまで精細に実行できるかが次に問題となる。

図5は設定切取り量と実切取り量の関係を示す概念図である。実切取り量は確率的に変動するし、ある限界設定量以下では零と有限値の間を変動するであろう——この変動幅を最小切取り厚さと定義できる。この変動幅が加工精度の限界値となる。

微粒子による表面仕上加工における最小切取り厚さは加工機構が、いわゆる機械的除去か物理的・化学的かの議論を別にして、仕上面粗さから判断する限り nm オーダに達することは十分考えられるし、原子・分子の単位であることも推定されている¹⁵⁾。

一方、切削加工では nm オーダの運動精度を保証された実験装置と、nm オーダの構造が明らかなダイヤモンド切れ刃を用いて、すでに図3で示したように、nm レベルの切取り厚さで切りくず生成が可能であることが示されている。問題は、工具摩耗を極小に制御しつつ実用的な長時間にわたってこの状態を

持続できるかである。またすべての加工物でこのような切削が可能であるともいえない。工具と工作物間の親和性の問題である。工具の摩耗の制御という観点からいえば、微粒子仕上は、極めて多数の切れ刃を用いて個々の切れ刃の摩耗を極小にしつつ統計的に均一で安定な加工状態を作り出すという意味において優れた加工法ということができる。したがって切削工具においても切れ刃の超精密配列が可能であるなら多刃化が一つの展開の方向であろう。

4.3 原子モデルによるナノメータ加工のシミュレーション

切取り厚さが nm レベルになる極微小切削においては、切り取られる被削材の厚さは数原子層となり、このレベルの切削現象を従来の連続体モデルを用いて解析するには無理がある。また実証実験も、計測・制御の限界に近く極めて困難である。このような解析には原子モデルを用いる計算機シミュレーションが有力な手段となり、非線形有限要素法や分子動力学を用いる原子配列モデルの切削シミュレーションが報告されている²³⁾²⁴⁾。以下においては、その一例として分子動力学を用いた例を示すことにする。

この手法ではまず被削材及び工具の原子モデルを仮定する。すべての原子の間に働く力は、平衡原子間距離、弾性率、凝集エネルギーなどから導かれている適当なポテンシャルを基礎として、原子間距離の関数として与えられる。工具の微小移動(数 pm)ごとに原子・分子(但し普通は工具は剛体として取り扱われている)について運動方程式をたて、数値積分によって

工具：ダイヤモンド、被削材：銅、切削速度：20 m/s、工具丸味半径：2 nm、切込み：0.5 nm

図6 分子動力学による切りくず生成と切削温度上昇のシミュレーションの一例

その挙動（切りくず挙動）を知ることができる。この際、原子・分子の初速度はマクスウェル分布に従うとする。また切削の各時点での原子・分子の振動速度から等価温度を計算することができる。図6は、銅のダイヤモンド切削についての計算の一例で、nm厚さの切りくず生成、その際の粒子の等価温度が示されている²⁴⁾。現段階では計算速度、記憶容量、計算コストの問題で、真に工学的に有用な情報が整理されるまでには至っていないが、将来、被削材、工具及びその組合せについてより正確で現実的なモデルや、界面現象の適切なモデルが取り扱えるようになると、加工現象の制御限界について明快な解釈が可能になるものと期待される。

5. 結 言——技術的課題

超精密機械加工は現在の先端科学・技術の実用的ニーズにこたえる一定のレベルに達しているのはまぎれもない事実ではあるが、更にリファインし、将来のニーズに対応するためにはまだいくつかの課題がある。それはいずれも nm レベルを意識した次の諸点である。

- ・機械の固有機能の定量化と向上
- ・マイクロ加工現象の定量的記述
- ・計測・制御技術との融合
- ・鉄鋼や特殊材料への対応技術
- ・加工ソフトウェアの整備

さて、この技術は今後どのように展開するであろうか。一般技術ではともかく、すでに先端科学では nm またはそれ以上の精度をもつ部品の要求があるといわれるが、これはその測定法さえ必ずしも確立されていないレベルの問題である。また加工の機構にしても直接観察の困難なレベルの問題で、その物理像は明らかでない。その意味でこれからの超精密加工は、公知の自然則や技術を組み合わせて“力づく”でなしとげられる技術ではなくて、未知の法則や極限条件下での材料挙動の解明をも必要とする“科学”という側面を強くもっているといえる。工学関係者のみならず基礎的学問的分野からの支援が切に要望される。

参 考 文 献

- 1) NASA, Stanford Univ. and Lockheed : A Brochure, Gravity Probe B.
- 2) N. Ikawa, S. Shimada and H. Morooka : Nano-Performance of Machine Tool Elements, Proc. 6th ICPE, Osaka, (1987) 64.
- 3) A. Shimokohbe, O. Horikawa and K. Sato : An Active Air Journal Bearing with Ultraprecision, Infinite Static Stiffness, High Damping Capability and New Functions, Ann. CIRP, **40**, 1, (1991) 563.
- 4) S. Futami, A. Furutani and S. Yoshida : Nanometer Positioning and Its Micro-Dynamics, Nanotechnology, **1**, (1990) 31.
- 5) R. R. Donaldson : Private Communication.
- 6) H. Kaizuka and B. Siu : A Simple Way to Reduce Hysteresis and Creep When Using Piezoelectric Actuators, Jap. J. Appl. Physics Letter, **27**, 5, (1988) L 773.
- 7) 榎本新一 : 低熱膨張鋳鉄（ノビナイト）について、鋳物, **61**, 9 (1989) 628.
- 8) NPL : Tetraform System Revolutionizes Machine Design, Prec. Eng., **13**, 1, (1991) 58.
- 9) E. C. Teague : National Institute of Standards and Technology Molecular Measuring Machine Project, Metrology and Precision Engineering Design, J. Vac. Sci. Technol., B **7**(6), Nov/Dec (1989) 1898.
- 10) H. Shinno, H. Hashizume and Y. Ito : Structural Configuration and Performances of Machining Environment-Controlled Ultraprecision Diamond Turning Machine 'Capsule', Ann. CIRP, **41**, 1, (1992) 425.
- 11) 青木保雄, 大園成夫 : 3点法真円度測定法の一展開, 精密機械, **32**, 12 (1966) 831.
- 12) 三井公之 : 精密診断技術の研究 (3点式主軸回転精度測定装置の開発), 日本機械学会論文集 (C編), **48**, 425 (1982) 115.
- 13) R. R. Donaldson : A Simple Method for Separating Spindle Error from Test Ball Roundness Error, Ann. CIRP, **21**, (1972) 125.
- 14) N. Ikawa, S. Shimada and H. Morooka : Laser Beam as a Straight Datum at nm Level, Ann. CIRP, **37**, 1, (1988) 523.
- 15) Y. Mori, K. Yamauchi and K. Endo : Elastic Emission Machining as Evaluated by Atomistic Techniques, Proc. 6th ICPE, Osaka, (1987) 58.
- 16) H. Ohmori and T. Nakagawa : Mirror Surface Grinding of Silicon Wafer with Electrolytic In-Process Dressing, Ann. CIRP, **39**, 1, (1990) 329.
- 17) K. E. Puttick, M. R. Rudman, K. J. Smith and A. Franks : Single-Point Diamond Machining of Glasses, Proc. R. Soc. Lond., **A 426**, (1989) 19.
- 18) 宮下政和 : ぜい性材料の延性モード研削技術—ナノ研削技術への道, 精密工学会誌, **56**, 5 (1990) 782.
- 19) W. R. Moore : Foundation of Mechanical Accuracy, The Moore Special Tool Co., Bridgeport, (1970) 119.
- 20) D. B. De Bra, R. A. Victor and J. B. Bryan : Shower and High Pressure Oil Temperature Control, Ann. CIRP, **35**, 1, (1986) 359.
- 21) S. Moriyama, F. Uchida and E. Seya : Development of a Precision Diamond Cutting Machine for Fabrication of Asymmetrical Aspheric Mirrors, Proc. SPIE, **830**, Grazing Incidence Optics for Astronomical and Laboratory Applications, (1987) 98.
- 22) 河野嗣男, 面田 学, 岡崎祐一, 小沢則光, 三井公之 : インプロセス計測加工精度補償の研究 (第1報)——加工面基準制御加工法の原理と基礎実験, 精密工学会誌, **54**, 8 (1988) 1463.
- 23) 稲村豊四郎, 鈴木裕幸, 武沢伸浩 : 銅とダイヤモンドの原子配列モデルによる計算機内での切削実験, 精密工学会誌, **56**, 8 (1990) 1480.
- 24) S. Shimada, N. Ikawa, H. Tanaka, G. Ohmori and J. Uchikoshi : Molecular Dynamic Analysis as Compared with Experimental Results of Micromachining, Ann. CIRP, **41**, 1, (1992) 117.