

# 超精密機械加工の 現状と展望

Recent Trends of Ultraprecision Machining



## キーワード

先端技術, 先端科学, 超精密加工, ナノメートル,  
超精密切削加工, 超精密研削加工,  
超精密工作機械, 精度限界



大阪大学 工学部  
教授 工学博士  
井川直哉

## 1. はじめに

ここでいう超精密機械加工とは、形状の加工精度数 $\mu\text{m}$ 以内、仕上面粗さ数 $100\text{nm}$  ( $R_{\text{max}}$ )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。

この方法以外でも、 $\text{nm}$ レベルを目標にする加工法としては、各種エネルギービーム加工に例をみるようにある種の物理・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。

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てに、より大きな自由度を与え得ること、そこで開発された個別の基本的な機械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。

超精密機械加工のそれぞれの細部は、本特集号の各論文でふれるので、ここではこの技術が今日の先端的科学・技術の中ではたしている役割とトピックス、国際的動向、個別技術のレベルを概観し、今後の課題などについて話題を提供したい。

## 2. 超精密加工とその役割

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。表1は先端的科学・技術の中で超精密加工がキーとなっている例をまとめたものである。これを全体的にみると、基礎的科学におけるハードウェアの実現や光・電子技術を利用する情報機器の素子製作において超精密機械加工がはたす役割が極めて大きいことがわかる。

今後は、更に高精度化への要求、複雑形状への対応、マイクロ部品への応用、大型部品の加工、特殊機能材料の加工への展開が求められよう。特に光学部品では、用いる光の波長と形状精度・面精度の割合が問題となる（これらでは波長の数分の1以下の誤差しか許されない）ので、紫外線（波長数 $100\sim 10\text{nm}$ ）、X線（同数 $\text{nm}$ ）用の素子では特別

表1. 先端技術においてキーとなる加工技術の例

先端的機器	同 部 品	キーとなる加工技術	精 度 レ ベ ル		そ の 他
			形状精度	面粗さ	
レーザー核融合装置	集光用曲面鏡	超精密切削	1μm以下	10nm台	
宇宙望遠鏡 (可視・紫外・X線)	放物面・双曲面鏡	超精密切削・ポリッシング	1μm以下	nm台	
X線顕微鏡	放物面・双曲面鏡	超精密切削・研削・ポリッシング 極薄多層膜, PVD	100nm台	nm台以下	膜厚制御 nm台
SOR装置	各種曲面鏡	超精密切削・ポリッシング	10nm台	nm台以下	耐損傷材料
エキシマレーザー装置	各種曲面鏡 軟X線多層膜曲面鏡	超精密研削・ポリッシング 極薄多層膜, PVD	0.25μm	nm台	耐損傷特殊材料 膜厚制御 nm台
レーザープリンタ	多面鏡	超精密切削	1μm以下	10nm	1~5°分割角度精度
各種光学機器	各種曲面反射鏡	超精密切削	1μm以下	10nm台	
	マイクロレンズ・型	超精密切削・研削・ポリッシング 精密成形			
電算機関連素子	超LSI	位置決め技術, 低ひずみポリッシング リソグラフィ技術		nm台	10nm位置合せ精度 サブμmパターン
	磁気ディスク基板	超精密切削・ポリッシング	50~100nm	数10nm	
	磁気ヘッド	超精密研削・スライシング ・ポリッシング	100nm	10nm	無ひずみポリッシング
ビデオ機器	磁気ヘッド	超精密切削・ポリッシング・研削		10nm	無ひずみポリッシング
制御機器	制御バルブ ジャイロスコープ	超精密研削・超精密切削	1μm	100nm	

表2. 超精密加工関連の学会・集会

- \* 精密工学会及びその各種委員会 (日) - 学会 -
- \* American Soc. for Precision Engineering (米) ASPE - 学会 -
- \* SPIE-The International Soc. for Optical Engineering (米)  
- 学会 - (超精密技術のトピックスについて適宜シンポジウムを開催)
- \* International Precision Engineering Seminar  
(英及び各国で隔年開催, 過去7回) - IPES -
- \* International Conference in Ultraprecision Manufacturing  
Engineering (独で隔年開催, 過去2回) - UME -
- \* 日-中超精密技術シンポジウム (日, 中)  
(日・中交替でおおよそ隔年開催, 過去4回)
- \* Biennial Nanotechnology Symposium (英, 日)  
(日・英交替で隔年開催, 過去3回)

に高い精度が必要になる。同時に、それらの高エネルギー光によって損傷を受けにくい硬脆材料の超精密加工が非常に重要になる。

### 3. 国際的動向

超精密加工技術に関する研究開発は国際的にも極めて活発である。表2は定常的に、しかも活発に行なわれている学会、研究集会について筆者の知るものをまとめたものである。

日本の研究は量・質ともにすぐれており電子・光学関係での技術は各国の注目をあびている。米国・英国の研究は基礎科学、宇宙科学に貢献する超精密加工・計測という面で特徴がある。ドイツは、光学分野での永い伝統をふまえ、実用的機器の開発が強い。スイスはよく知られているように精密機器では永い伝統と実績を誇っている。その他の欧州諸国でも特徴のある技術が開発されている。中国の拠点

機関での研究も活発なものがあるし、台湾、韓国でも急激にこの技術が注目されている。

これらの情報交換は極めて頻繁に行なわれる。毎年開催の学会は別として、本年から明年にかけて UEM (1994年5月2日~6日, Aachen, 独), 日中超精密加工シンポジウム (1994年7月20日~24日, ハルビン, 中国), Nanotechnology Symposium (1994年9月19日~22日, Coventry, 英), IPES-8 (1995年5月15日~18日, Compiègne, 仏), SPIEシンポジウム (1995年6月6日~8日, 東京) という具合である。

また各国には、国家レベルまたは業界レベルでの研究プロジェクトが組織されている。日本の吉田ナノ機構プロジェクト (科技厅)<sup>(1)</sup>, 超先端加工システム技術研究組合 (通産省大プロ)<sup>(2)</sup>, 英国政府のLINK機構によるナノテクノロジープロジェクト<sup>(3)</sup>, ドイツのAachen工科大に本拠をおく Forschungsgemeinschaft Ultraprecisionstechnik e. V.<sup>(4)</sup>, フランスの産・官・学共同組織 “Club Nanotechnologie” および CNRS (Centre National de Recherche Scientifique) の “Ultimatech”<sup>(5)</sup> などである。

一方米国では、国レベルでまとまったプロジェクトはあまり聞かれませんが、NIST (National Institute of Standards and Technology), LLNL (Lawrence Livermore National Laboratory), LANL (Los Alamos National Laboratory) などの国立研究所や、その他、軍関係の研究

機関や一部の大学における先端的研究が国際的に高い関心を集めている。

## 4. 基盤となる技術の現状

超精密機械加工の大まかな歴史は、一種の“原器”を作る技術としてのラップ仕上げ(またはポリッシング)、精密研磨・研削、超精密切削の順に展開してきた。それぞれの時代に依りて指導的な研究機関、工作機械メーカー、部品メーカーがモニユメント的な加工システムを完成させ、それを契機に数々の技術が開発されてきた。ここでは最近の超精密加工システムの実現のために共通する基盤技術を概観してみよう。

超精密加工を実現するには、まず工作機械が正確に運動し、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が求められる。表3は基盤となる個別の技術とその到達レベルの概略を示す。

### 4.1 機器要素

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ならば数nmが得

られる<sup>(6)</sup>。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<sup>(7)</sup>。

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きている。最近では1nmの分解能をもつ新しいタイプも開発されている<sup>(8)</sup>。また、最近の精密機器ではnmレベルの移動や位置決めを行うため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

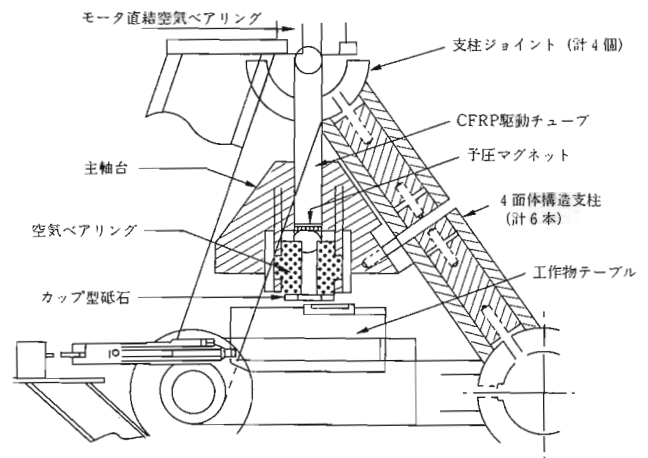


図1. テトラフォームI (NPL)の構造断面図 (カップ砥石による平面研削システム)

表3. 超精密加工の技術基盤

項目	機器要素または技術	到達レベルまたは備考
機器要素の高精度化	新構造原理 静圧空気・油軸受 静圧空気・油浮上テーブル トラクションドライブ機構 微動機構 (ピエゾ式, 弾性素子) 精度誤差補償, 運動誤差補償	等方構造, 閉鎖構造 回転精度25nm 直進精度25nm/250mm 分解能2.5nm 分解能nm
計測技術の高精度化	レーザ計測 微小変位計 (容量形, 差動変圧器, 光電形) 温度センサ 力センサ	空気のゆらぎ・屈折率補正, 分解能1.25nm 分解能0.5~1nm 分解能0.0005°C 1gf (実用剛性において)
加工現象の高精度制御	ダイヤモンド切削工具 微細粉末技術 荷電粒子技術 (リソグラフィ) 被加工物	切刃稜精度 10nm 数nm粒径, 均一粒径 サブ $\mu\text{m}$ のパターン形成 高純度, 欠陥・不純物管理, 特殊処理
加工環境	温度制御 防振 防塵	室温制御0.005°C 機器上の相対振幅nmレベル, 能動制御
加工ソフトウェア	加工状態センシング 制御アルゴリズム 誤差補償	10nm台

ので、その改善法<sup>(9)</sup>や補償法、更には一般に数100Hz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。特に熱変形が問題になる高級な工作機械や計測器においては、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)、スーパインバ、最近では実用性の高いものとして低熱膨張鋳鉄<sup>(10)</sup> (常温附近で $10^{-6}K^{-1}$ オーダー)を採用する傾向がみられる。また制振性や経年変化を考慮して石材を利用することも多くなっている。

加工システムの構造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Tetraform<sup>(11)</sup>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。図2はこの考え方の実用的展開として構想され、Ingersoll社から発表されたOctahedral-Hexapod工作機である<sup>(12)</sup>。主軸ヘッドは合計6本のボールねじの伸縮によって3次元空間を移動できるようになっている。わが国においても超精密加工を目的とする新しい構想の実験機が試作されている<sup>(13)</sup>。

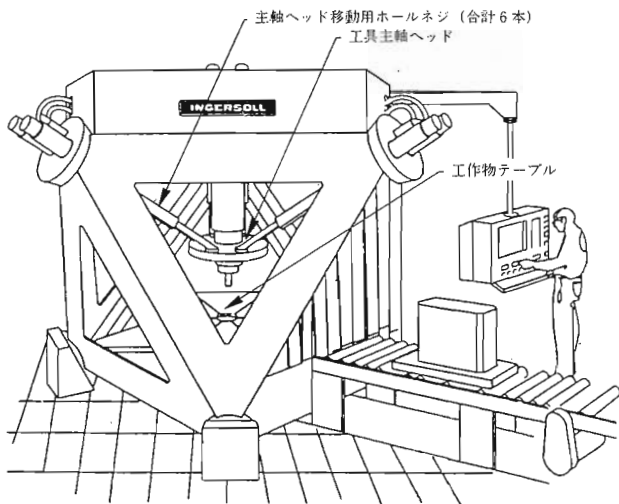


図2. Octahedral Hexapod 5面加工実験機

#### 4.2 計測技術

寸法の計測技術としては、干渉計を利用して $0.1\mu m$ 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実用的な時間内でのドリフト (零点漂動) 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。軸の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法<sup>(14)(15)</sup>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<sup>(16)</sup>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、反転操作にともなう不確定性の不安がともなうのでnmレベルに一つの精度限界があるのではないだろうか。新しい試みとして直線の基準として光の直進性を利用する方法<sup>(17)</sup>も報告されているが、nmレベルでは、レーザ管の熱変形や光路上の空気流の影響による光の方向変動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。

#### 4.3 加工現象の高精度制御

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。最近の高級なダイヤモンド工具の切刃稜は一般の切削工具とくらべても数百倍も鋭い(切刃稜の等価的曲率半径は数10nmともいわれる)。このようなダイヤモンド工具と、nmレベルの運動精度をもつ特殊な工作機械を用いる実験によれば、極めて精度の高い切屑除去(加工)が可能である。およそ数nmの切り厚さの切削ならば可能であるという実測例<sup>(18)(19)</sup>や、nmRmaxレベルの切削面粗さ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ッシングおよび類似の加工法では粒径 $\mu m$ 以下で、しかも十分に整粒された砥粒または粉末を用い、またたとえばEEM法<sup>(20)</sup>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、仕上げ面粗さ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、メタルボンドダイヤモンド砥石の目直し、形直しを電気化学的溶出を利用して行い、極めて安定した切刃整列を得ることによって極微小な切削作用の集積としてnmオーダーRmaxの研削仕上げ面を達成するELID研削<sup>(21)</sup>が注目されている。更に高精度、高剛性機械と精密な切刃によってサブ $\mu m$ 切り込みの微小切削を行うことによって、ガラス、Siなどのいわゆる脆性試料でも“延性モード切削<sup>(22)(23)</sup>”，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。これらは高エネルギー光による損傷に対して強い硬脆材料、特殊な機能を持つ脆性材料の加工法として有望視されよう。

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 $\mu\text{m}$ 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（これをマイクロシナビリティとよぶこともできる）—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。今後の問題は、より広い範囲の各種材料に適用できる超精密加工の指導原理を確立することであろう。

#### 4.4 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はらわれる。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、1mK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ず、いろいろ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。たとえば、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1K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0.1K程度の差が生じるといわれている<sup>(24)</sup>。定温の油シャワーによって最高レベルに温度制御された工作機械においても、1m程度の工作物先端での16時間中の熱変位変動は0.1 $\mu\text{m}$ 程度になるという実測例も報告されている<sup>(25)</sup>。

振動は工具・工作物間の相対変位をもたらすものが問題になる。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。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。また制振性のよい構造材料を採用することも今後重要となるであろう。

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。

#### 4.5 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。加工物の取付け、取りはずしにおける変形、自重による変形、熱歪、加工液の影響、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、正確な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。

#### 4.6 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いろいろの個別技術を組み合わせで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<sup>(26)(27)</sup>（加工誤差を予め測定しておくか、またはオンラインで推定し、それに応じて工具に補正のための微小切入を与えて行なう）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、あるいはそれらの総合として真に有効な加工制御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。

## 5. 機械加工精度の制御限界

### 5.1 工作機械の挙動

工作機械の各要素の運動は適当な計測・制御によって、その制御限界（分解能）までの機械の創成運動の精度が保証できる。また一般に制御困難なものでも、挙動の再現性が確認されておればその限界内での運動精度があるといえる。計測・制御技術については動的応答性やドリフト補償にはまだ不十分な面もあるが、比較的短時間内ならば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えることができる。たとえば空気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”にはこのレベルまでの機械的挙動の制御は実現されているといわれる<sup>(6)</sup>。問題は、熱変形も含めてこれらの特性を、加工に必要な長い時間にわたって持続できるかである。

一方、この様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。

### 5.2 最小切取り厚さ

工作機械が仮にナノメートル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。実切取り量はいろいろの原因によって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げ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オーダー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。

切削加工ではnmオーダーの運動精度を保証された実験装置と、nmオーダーの構造が明らかなダイヤモンド切刃を用いて、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<sup>(18)(19)</sup>。しかし問題は、工具摩耗を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

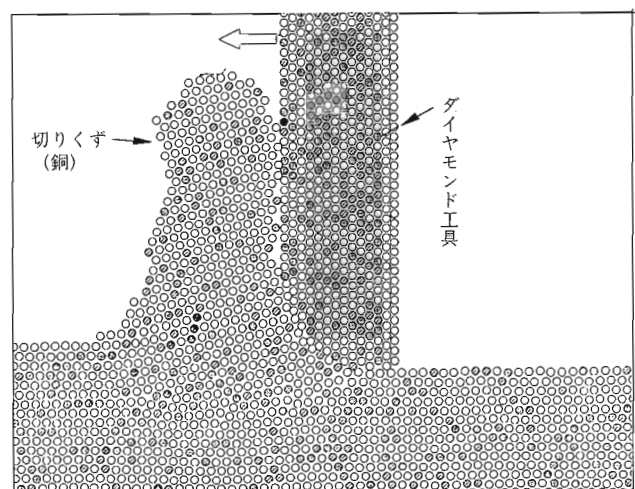
ともいえない。工具と工作物間の親和性の問題である。

工具の摩耗の制御という観点からいえば、微粒子仕上げは、極めて多数の切刃を用いて個々の切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えることができる。したがって切削工具においても切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。

### 5.3 原子モデルによるナノメートル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ことは不自然である。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。しかし実用性はともかくとして技術の限界を見通しておくことは学問的には非常に重要であるといえよう。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、非線型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<sup>(28)(29)(30)</sup>。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、被削材および工具の原子モデルを仮定する。すべての原子の間で相互に働く力は、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



切削速度 : 20 m/s  
 切取り厚さ : 0.5 nm  
 切刃稜丸味半径 : 2.0 nm  
 ● : 2000 K ≤ T      ● : 1500 K ≤ T  
 ● : 1000 K ≤ T ≤ 1500 K  
 ○ : 500 K ≤ T ≤ 1000 K      ○ : T ≤ 500 K

図3. 超精密切削における切りくず挙動、切削温度Tに関する分子動力学シミュレーションの一例（温度は、ある瞬間の粒子の振動速度から求めた換算値、総粒子数は約8,000個）

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。工具の数pmの微小移動( $\text{pm}=10^{-12}\text{m}$ )毎に原子・分子について運動方程式をたて、数値積分によって各原子およびその塊としての切りくずの挙動を知ることができる。また工具内の各原子の挙動も同様に求まる。この際、原子・分子の格子振動の初速度はマッ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3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<sup>(29)</sup>。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(規模の大きな切削、現実的な欠陥をふくむ被削材のモデル、現実的な切削条件下での情報、加工変質層、工具摩耗など)が取り扱われるまでには至っていないが、将来、被削材、工具およ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。

## 6. むすび

nm精度を目指す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応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。それはいづれもnmレベルを意識した次の諸点である。

- ・機械の固有機能のnmレベルでの定量化と向上
- ・マイクロ加工・摩擦・各種界面現象の定量的記述(シミュレーションの活用)
- ・計測・制御技術との融合
- ・鉄鋼や特殊硬脆材料への対応技術の開発
- ・複雑・マイクロ・大型形状への対応技術の開発
- ・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。一般技術としてはともかく、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合せて“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分野からの支援が切に要望される。

たしかにそのニーズは今に限られたものではあろう。しかし現今のいわゆるハイテクは“超精密”を目指した物作りを通じて実用化されたものも多いはずである。現実的にも、来たるべき21世紀に向かっての基礎科学で求められる“物作りの技術”では必ずやnmレベルが問題にされよう。その意味で、この技術は単に短期的な経済効果だけで判断

されるべきではなくて、大袈裟に言えば人類が共有する“文化”として位置付けられることを期待したい。

## 文献

- (1) 吉田ナノ機構プロジェクト(インタビュー):精密工学会誌, 57, 1 (1990) 81.
- (2) Suzuki, H.: AMMTRA Activities in Ultraprecision Machining, Special Pre-Conference Day Proceedings, 7-IPES, May 17, 1993, Kobe P.5.
- (3) Franks, A.: UK National Initiative on Nanotechnology, 同上, p. 41.
- (4) Weck, M.: Activity at IPT in Precision Engineering, 同上, p.18.
- (5) Bonis, M.: The French Association Club Nanotechnologie and CNRS Programme Ultimatch, 同上, p.56.
- (6) Ikawa, N., Shimada, S. and Morooka, H.: Nano-Performance of Machine Tool Elements, Proc. 6th ICPE, Osaka, 1987, p.64.
- (7) Shimokohbe, A., Horikawa, O., Sato, K.: An Active Air Journal Bearing with Ultraprecision, Infinite Static Stiffness, High Damping Capability and New Functions, Annals of the CIRP, 40, 1 (1991) 563.
- (8) Mizumoto, H., Yamada, K., Shimizu, T.: A Twist-Roller Friction Drive System for Nanometer Positioning, International Progress in Precision Engineering, Proc. 7 IPES., Kobe (1993) 850.
- (9) Kaizuka, H. and Siu B.: A Simple Way to Reduce Hysteresis and Creep When Using Piezoelectric Actuators, Jap. J. of Appl. Physics Letter, 27-5 (1988) L 773.
- (10) 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.
- (11) NPL: Tetraform System Revolutionizes Machine Design, Precision Engineering 13, 1 (1991) 58.
- (12) Linden, T. J.: Development of the Ingarsol Octahedral-Hexapod Machine Tool for Five Axis Metal Cutting, Proc. of 7th IPES, Kobe May 1993, p.149.
- (13) Shinno, H., Hashizume, H., Ito, Y.: Structural Configuration and Performances of Machining Environment-Controlled Ultraprecision Diamond Turning Machine 'Capsule', Annals of the CIRP, 41, 1 (1992) 425.
- (14) 青木保雄, 大園成夫: 3点法真円度測定法の展開, 精密機械 32, 12 (1966) 831.

- (15) 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（昭57-1）115.
- (16) Donaldson R. R. : A Simple Method for Separating Spindle Error from Test Ball Roundness Error, Annals of the CIRP, 21 (1972) 125.
- (17) Ikawa, N., Shimada, S., Morooka, H. : Laser Beam as a Straight Datum at nm Level, Annals of the CIRP, 37, 1 (1988) 523.
- (18) Ikawa, N., Shimada, S., Tanaka, H. : Minimum Thickness of Cut in Micromachining, Nanotechnology 3 (1992) 6.
- (19) 井川直哉, 島田尚一, Donaldson, R. R., Syn, C. K., Taylor, J. S., 大森義市, 田中宏明, 吉永博俊：極微小切削における切りくず形態と最小切取り厚さ, 精密工学会誌, 59, 4 (1993) 141.
- (20) Mori, Y., Yamauchi, K. and Endo, K. : Elastic Emission Machining as Evaluated by Atomistic Techniques, Proc. of the 6th ICPE, Osaka 1987, 58.
- (21) Ohmori, H., Nakagawa, T. : Mirror Surface Grinding of Silicon Wafer with Electrolytic In-Process Dressing, Annals of the CIRP, 39, 1 (1990) 329.
- (22) Puttick, K. E., Rudman, M. R., Smith, K. J., Franks, A. : Single-Point Diamond Machining of Glasses, Proc. R. Soc. Lond. A426 (1989) 19.
- (23) 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.
- (24) Moore, W. R. : Foundation of Mechanical Accuracy, The Moore Special Tool Co., Bridgeport (1970) 119.
- (25) De Bra, D. B., Victor, R. A. and Bryan, J. B. : Shower and High Pressure Oil Temperature Control, Annals of the CIRP, 35, 1 (1986) 359.
- (26) Moriyama, S., Uchida, F., Seya, E. : 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, p98.
- (27) 河野嗣男, 面田学, 岡崎祐一, 小沢規光, 三井公之：インプロセス計測加工精度補償の研究(第一報)—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.
- (28) 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.
- (29) Shimada, S., Ikawa, N., Tanaka, H., Ohmori, G., Uchikoshi, J. : Molecular Dynamic Analysis as Compared with Experimental Results of Micromachining, Annals of the CIRP, 41, 1 (1992) 117.
- (30) 島田尚一, 井川直哉, 田中宏明, 大森義市, 打越純一：分子動力学を用いた極微小切削における切削力および切りくず生成機構の解析, 精密工学会誌, 5, 12 (1993) 2015.



井川直哉