切削加工の軌跡*

ミクロンからナノへ、高速から超高速へ、メカニカル制御から情報化・知能化へ

森脇俊道**

Advance in Metal Cutting Technology: From Micron to Nanometer, From High Speed to Ultra-High Speed, From Mechanical Control to Intelligent Control / Toshimichi MORIWAKI

Key words: ultraprecision cutting, ultra-high speed cutting, intelligent control, machine tool, cutting tool, hard-to-cut material

1. ま え が き

切削加工は最も基本的な加工法として有史以前から存在し、現在でも機械加工の中心的存在として揺るぎない地位を保ち続けている。切削加工とは工具と工作物の間に相対的な運動（切削運動）を与えて、工作物から不要な部分を除去する加工法である。したがって切削加工性能は、工具や工作物を保持して必要な運動を与える工作機械、工具およびチャックに代表される付属機器の性能に大きく依存する。このことを前提に、切削加工において重要な加工精度、加工能率、加工情報の処理などの観点から関連の学問、技術の進歩の跡をたどってみたい。

2. 精密・超精密切削

18世紀後半イギリスにおいて起こった産業革命を支えた蒸気機関は、J. ワットによって発明されたが、その実現に貢献したのはJ. ウィルキンソンが開発した中ぐり盤であったという。この機械によって、直径約1フィートのシリンダの加工精度はコインの直径ほどから厚み程度に向上したと言われている。それから200年あまり経った今日、ナノテクノロジーの提唱者である谷口氏¹⁾は、最も高精度である超精密加工の加工限界は西暦2000年には加工精度

で $0.001\ \mu\text{m}$ ($1\ \text{nm}$) に至ると予測している。同氏の予測によれば、この加工精度を実現する加工法は、切削加工ではなく研削加工、ポリッシングあるいはビーム加工となっている。しかし実験室的にはすでに、切込み $1\ \text{nm}$ で切削が行われ²⁾、 nm オーダの切込みにおける切削力も測定されている³⁾。こうした超精密マイクロ切削における加工の限界は、工作機械の運動精度と工具刃先における工具形状の転写精度、すなわち加工プロセスによって決まる。

工作機械についてみれば、超精密エア軸受を具備した主軸の回転精度は、 $10\ \text{nm}$ のオーダであり、運動の再現性すなわち繰返し精度では nm のオーダに至っている。超精密切削に用いられる工具は通常単結晶ダイヤモンドをポリッシングによって仕上げたものであるが、その刃先丸みは特殊な電子顕微鏡で測定した結果、 $10\ \text{nm}$ のオーダであるといわれている。これらの結果として、上述のように実験室で切込み $1\ \text{nm}$ の切削が実現されているが、現在の工作機械、工具の技術ではほぼ加工の限界であろう。今後マイクロ切削の加工限界がどこまで向上するかは、こうした機械、工具などのハードウェアの進歩にかかっている。他方、コンピュータ上のシミュレーションでは、分子動力学を駆使して、分子レベルの切削シミュレーションが盛んに行われており⁴⁾⁵⁾、分子レベルでの切削可能性が示されている。近い将来に、こうした極限に近い切削加工プロセスが、理論的にもまた実験的にも明らかにされることが期待される。

実用に近い超精密切削加工では、工作物の寸法にもよるが、現状の加工精度は $0.1\sim 0.01\ \mu\text{m}$ であり、最大仕上面粗さはその一けた下であると考えられる。ここで、代表的な超精密機械加工である切削加工、研削加工、ポリッシング加工の特徴を比較すると図1のようになる。高精度に仕上げられた単結晶ダイヤモンド工具を用いる超精密切削は、

* 原稿受付 平成10年12月7日

** 正会員 神戸大学工学部（神戸市灘区六甲台町1）

1968年京都大学大学院工学研究科修士課程（精密工学専攻）修了，工学博士。知的生産システム，工作機械（インテリジェント化，動剛性，熱変形，超精密），超精密切削加工，生産における人間工学などの研究。著書：工作機械工学（コロナ社）など

図1 超精密切削，研削，ポリシングの特徴の比較

工具の形状転写精度が良好であるため、形状創成機能に優れ、高能率で複雑な形状の仕上面を高精度で得ることができる。その一方で単結晶ダイヤモンド工具で加工し得る工作物材質には制約があり、現状では銅、アルミニウムなどの軟質金属、プラスチックを中心に加工の実用化が進んでいる。他方、超精密研削、さらにポリシングでは加工し得る工作物材質を選ばず、しかも良好な仕上面粗さが得られるものの、加工能率が低く、シャープなエッジを有する部品などの加工には適さない。

超精密ダイヤモンド切削が不得意としている鋼類や硬ぜい材料の超精密切削に、新たなチャレンジが試みられている。鋼のダイヤモンド切削が不可能とされる理由として、ダイヤモンドが約600℃において黒鉛化し、ダイヤモンドの炭素が鉄に溶け込むことがあげられている。この問題を解決するため、例えば炭素雰囲気中での切削や、冷凍切削が試みられているが、現在最も有望視されているのは超音波楕円振動切削⁶⁾⁷⁾である。これは図2に模式的に示すように、工具を切削方向と切りくず流出方向を含む面内で楕円（あるいは円）軌跡を描くように振動させながら断続切削する方法である。切りくずが生成される時点で、工具すくい面が切りくずを流出方向に引き上げながら切削するため、工具すくい面における摩擦力が減少（あるいは力の方向が反転）し、結果としてせん断角の増加、切りくず厚さの減少、切削力の低下がもたらされる。実験結果によれば切削力は通常切削に比較して一けた低下し、断続切削による工具の冷却効果もあって、焼入れ鋼の単結晶ダイヤモンド工具による鏡面加工が可能となっている。試算によれば、この場合の切削エネルギーと工具を振動させるために必要なエネルギーを合算した値は、通常切削の切削エネルギーよりもはるかに低くなっており、せん断角の増加によるせん断面積減少の効果が大きくきいていることが理解される。この加工法は切削プロセスを直接制御する方法でもあり、従来の切削加工の常識を覆す可能性を秘めている。

超精密ダイヤモンド切削がチャレンジしている第2の問題として、ガラスや水晶などの硬ぜい材料の超精密切削がある。これまでのところ、切込みを小さくすることによって、ぜい性破壊が主体となるぜい性モード切削から、連続型の切りくずが生成される延性モード切削に移行すること

図2 超音波楕円振動切削の基本原理の模式図

が知られており、硬ぜい材料の延性モード切削の実用化研究が行われている。工作物材質にもよるが、現状では硬ぜい材料の延性モード切削が実現されるのは切込みが1μm以下の範囲であるため、いかに延性モード切削の条件を広げることができるかが重要な点となっている。特に、高速切削ではこの範囲が広がることが知られている。また、硬ぜい材料の延性モード切削を実現するためには、工作機械系の剛性が高くなければならず、そのために高精度で剛性の高い機械、機械要素の開発が求められている。なお、上述した超音波楕円振動切削では、延性モード切削が実現される臨界切込みが通常切削に比較して数倍になることが明らかにされている。

今後超精密切削に期待される分野として、超精密マイクロ切削がある。マイクロマシンに代表されるマイクロ機械、機械要素を製作する手法として、リソグラフィなどのエッチング技術などが幅広く研究開発されているが、工作物の材質を選ばず、複雑な形状を精度よく、しかも高能率で加工し得る加工法としての超精密切削加工のニーズは高い。現在単結晶ダイヤモンドバイトを用いた旋削⁸⁾、フライカッティング、さらに特殊な一枚刃の単結晶ダイヤモンドエンドミルを用いたマイクロ部品のフライス加工⁹⁾が種々試みられている。特に後者では超精密5軸フライス盤を用いて、微小なガラス部品の3次元形状切削を実現している。

今後超精密切削技術の研究開発が望まれている代表的な分野をまとめて表1に示す。

3. 高 速 切 削

切削加工にとってより早く削ること（高速切削）は、高精度加工と並んで、いつの時代にも最重要の研究開発課題

表1 今後研究開発が望まれる超精密切削加工の分野

超精密加工の分野	応 用 事 例	背 景
超高精度化（超超精密化）	X線関連機器（SOR関連） 超超精密光学部品	X線関連の需要増大 光学機器の短波長化
複雑な形状の超精密加工	各種レンズ，ミラー 大型フレネルレンズ	非球面光学系の需要増
大型化	X線天体望遠鏡 大型SOR用ミラー	特殊大型部品の要求
マイクロ化	マイクロマシン	部品の微小化，複雑形状化
難削材の超精密高速加工	超精密金型 特殊レンズ，ミラー	鋼系難削材，硬ぜい材料の超精密加工の要求

図3 工具材種の硬さと強度

であった¹⁰⁾¹¹⁾。特にサロモンが、切削速度の増加に伴って切削温度は上昇するが、ある臨界速度を超えると低下するという仮説を打ち出したことから、今世紀後半に入って、高速・超高速切削の研究が精力的に行われた時期があった。研究としては爆薬を使って工作物を飛ばして極めて高い切削速度を得る、といった実用から遠く離れた実験も試みられている。これに関して最近の実験研究結果から、切削速度の増加に伴って切削温度は上昇し、ほぼ工作物の融点温度で飽和することが明らかになってきている。

実用的観点からは、工作機械の高速化と高速切削に耐え得る工具材の開発が進み、これまで考えられなかったような高速で切削が行われている。まず工具材に関しては、今世紀初頭にテイラーとホワイトが開発し、それまでの炭素鋼工具よりはるかに高速で切削が可能になったとして命名した高速度鋼に端を発し、様々な工具材が開発され実用に供されている。図3は工具材の硬度とじん性をもとに、各種工具材の相対的な位置付けを示すもので、工具材の特性比較によく用いられるものである。

これまで開発されている代表的な工具材としては、超硬工具、セラミック、サーメット、CBNなどがあげられる¹²⁾。各種の工具材の特性などについてはここでは詳細に立ち入らないが、近年特に注目を浴びている工具として、コーテッド工具をあげることができる。これは超硬合金や高速度鋼などの比較的じん性の高い工具の表面を、各種セラミックスなどの高硬度耐摩耗材で、数 μm 程度の厚さの

コーティングを施すもので、じん性と硬度を兼ね備えた工具として現在最も広く用いられている。

最近におけるコーテッド工具の研究開発は目をみはるものがあり、従来から行われている Al_2O_3 などの単層セラミックのコーティングから、 AlTiN などの多相セラミックのコーティング¹³⁾、nmオーダの厚さのTiN層とAlN層を交互にコーティングした超多層コーティング¹⁴⁾など、さらにはサーメットの表面から超硬母材までの間で組成が連続的に変化する傾斜合金のようなコーティングなど、従来では考えられなかったようなコーティング技術が開発され、実用に供せられている。工具母材として考えられる材質に新しい材料が開発される可能性が薄くなりつつある現在、コーティング技術は新たな可能性を秘めており、今後の研究開発が期待される。

高速切削の速度限界は、当然のことながら工作物材質によって異なり、最適な工具材質と工具形状、加工条件を選択する必要がある。一般的に、アルミニウム合金に代表される軟質金属では、現状の工具で切削速度の限界はないとされており、工作機械の速度が制約になっているといわれている。他方、最近では普通鋼から焼入れした金型鋼、さらにはチタン合金、耐熱・耐摩耗合金などのいわゆる各種難削材の高速切削が注目され、ハードウェア、ソフトウェア両面からの研究開発が進められている。難削材の高速切削では、工作機械よりも工具が制約となっている場合が多い。最近実用化された高速・超高速切削の例をまとめて表2に示す。

高速切削を実現するためには、工具と並んで工作機械の高速化対応が必要となる。この意味で、最近の工作機械技術の進歩はめざましい¹⁵⁾。最近における工作機械の高速化を支える機械要素技術とその具体例をまとめて表3に示す。高速主軸については、利用する軸受の種類とその潤滑・冷却方法が問題であり、転がり軸受では軽量で遠心力が小さく、耐摩耗性の高いセラミックボール軸受と、極く少量の潤滑油を空気と混ぜて供給するオイル・エア潤滑法の組合せが最も広く利用されている。機械的な摩擦の無い軸受として、エア軸受や能動型磁気軸受も一部では利用されつつある。現在の高速度マシニングセンタの最高主軸回転

表 2 最近における高速・超高速切削の例

高速・超高速切削の事例	工 具	加工技術など
アルミニウム的高速エンドミル加工 (航空機用)	超硬エンドミル	多量の水溶性切削油
焼入れ鋼の旋削	CBN	ドライ加工
鋳鉄のフライス加工	セラミック	
鋼の旋削, フライス加工	コーテッド工具	高圧水溶性切削油
焼入れ金型鋼のエンドミル加工	特殊コーテッド工具	冷風, ドライ加工, MQL 切削油
アルミニウム合金の高速加工 (シリ ンダブロック)	焼結ダイヤモンド	

表 3 工作機械の高速化を支える機械要素技術とその具体例

工作機械要素	基 本 要 素	具 体 例	備 考
主 軸	軸 受 駆動装置	エア軸受 セラミック製ボール軸受 流体軸受 磁気軸受	軸受の冷却・潤滑
送り駆動系	案内面 駆動装置	転がり案内 静圧案内 ハイリッドボールねじ リニアモータ	駆動系の冷却 切りくずからの保護
構 造	軽量・高剛性構造 新しい工作機械の構造	パラレルリンク機構	
制御装置	高速 CNC	64 ビット制御装置 ナーブス補間	
付属装置	高精度チャック 高速回転対応チャック	HSK シャンク 二面拘束チャック	アンバランス力の問題 遠心力による把持力の低下

数は $10\,000\text{ min}^{-1}$ を越えるものが大半であり, 中には $60\,000\sim 70\,000\text{ min}^{-1}$ に至るものも実用されている。

単位時間あたりの金属除去量を増やし, 高能率切削を行うためには, 単に主軸の回転数を増大させるだけでは不十分で, 送り速度を増加させることが重要である。直線送り駆動においては, ボールねじのリードを大きくして高速送りを実現する方法と, リニアモータ駆動による方法が注目されている。それぞれに利点・欠点があり, またコストの問題もあって, 一概にどちらが良いか決められない。現状ではテーブル送り速度は最高 100 m/min 近くまで至っている。

最高速度と並んで重要な要因は, 加速, 減速における加速度の大きさである。短い距離を往復運動する場合, 最高速度に至るまでに減速し, 反転することになるので, いかに早く最高速度に到達するか, すなわち加速度が移動に要する時間を決定することになる。最近このことが注目され, 技術開発の 1 項目となっている。通常の送り装置では, 加速度は 0.5 G 以下であるが, 最近では $1\sim 2\text{ G}$ の加速度を有する送り装置も開発されている。

主軸やテーブルの送り速度を増加させるためには, 運動部分の質量を減らすことが重要となる。そのため多くの工夫が凝らされているが, 最近パラレルメカニズムを用いた駆動機構の採用が注目されている。例えばスチュアートブ

ラットフォームに主軸を搭載したパラレルメカニズム工作機械も種々開発されている。パラレルメカニズムは従来方式の運動機構を積み重ねるシリアルメカニズムに比較して, 制御が複雑になるなどの問題があるが, 高速性, 運動の自由度が大きいなどの特徴があり, 今後における研究開発対象の一つである。

切削加工の観点からは, 工具, 工作機械だけでなく, ツーリング, 加工法の選択, 切削油の供給法, 加工条件の設定など加工技術からみた高速化も重要である。これらは多くの場合いわゆるノウハウに属する事項であり, ここではこれ以上触れないことにする。工作機械, 工具, ツーリングの高速化対応に触発されて, 近年各種材料の高速, 超高速切削が進められているが, 加工に必要なエネルギー, コスト, 資源の消費などの観点から見た場合, 最適な切削速度, 切削条件はどこにあるのか, 今一度再検討する必要がある。その意味で, 今後高速切削を見直す時期に来ているともいえる。

4. 加工の知能化・情報化

切削加工を行う工作機械の歴史は古いが, その発展過程をまとめると図 4 のようになる。工作機械は産業革命のころにおける機械化という最初の革命を経験し, 現在の工作

図4 歴史的な工作機械発展の流れ

機械の基礎が築かれた。NC（数値制御）という第2の革命では、デジタル制御部とアクチュエータが分離してそれぞれ独立に発展することによって、制御の高度化をもたらした。現在進行中の革命は、情報化、知能化である¹⁶⁾。なお、この間に適応制御を入れているのは、これまでの機械が工具と工作物の相対的な関係のみを制御していたのに対し、現実には最も重要な加工プロセスの情報を制御系に組み入れたことを評価していることによる。

知能化工作機械あるいはインテリジェント工作機械の概念は、まだ十分固まってははいない。ここでは基本的な概念として、これまでの工作機械が他から与えられた指令を忠実に実行することを求められていたのに対し、工作機械自身あるいはそれに直結した情報処理装置が、自ら行うべきことを決定することに本質的な相違があると考えている。具体的には、例えば加工に先立ちCAD情報があたえられると、機械自身に最も適したCAM情報を生成して加工を行う、加工中に不測の事態が発生した場合に適切に対処する、加工後に得られた結果をもとに学習を行って自らの機能を高める、といった機能を有するものが知能化工作機械の本質であると考えられる。

NC工作機械において制御部と実行部が独立したのに対し、ここでは新たに情報処理機能が追加されている。従来このような情報処理は、主として経験を積んだ技能者の経験やノウハウに頼っていたが、これからは工作機械自身が行うことになろう。こうした過程において、またそれが実現された後においても、作業者と工作機械が情報を共有し、協調して加工を行うことが重要であり、そのためにもヒューマン・マシンインタフェースが大切であると考えられる。知能化工作機械の概念を図5に示す。工作機械の知能化が可能となった背景として、最近におけるコンピュータをは

図5 工作機械と加工プロセスの知的制御

じめとする情報処理機器の進歩、インターネットなどの通信インフラの整備が大きく貢献している。

今後は工作機械やロボット、AGVなどの関連機器、作業者が互いに通信によって情報交換しながら加工が行われることになろう。それが実現されるためには、切削プロセスのモデル化¹⁷⁾、CAD/CAM、データベースや知識ベースの整備、加工プロセスのモニタリング技術¹⁸⁾、高度な制御技術、意志決定のための情報や知識処理、通信などについての研究開発が必要となろう。

5. 新たな問題点

人間の活動範囲が広がる中であって、地球における資源の有限性、地球環境の保護、PLに代表される安全の問題などに対する認識が高まり、このことは生産の現場にも大きく影響を及ぼしつつある。具体的には、資源節約の立場から、ネットシェイプあるいはニアネットシェイプ加工が注目され、切削加工によって除去される取り代が減少する傾向にある。また、作業環境にとって有害である切削油の使用も問題視され、切削油を用いない、いわゆるドライ切削、切削油の使用量を極限まで減らして空気と一緒にミストとして供給するMQL切削、冷却した空気や窒素ガスなどを切削点に吹き付けて冷却する冷風切削などが脚光を浴びている。

特に切削液に関しては、単にその購入費用だけでなく、ポンプ、配管などの関連設備とその運転費用、液の処理・管理費用を総合すると、部品製造コストの7~17%を占

め、工具費の2~4%よりもはるかに大きな割合を占めるというドイツの報告もある¹⁹⁾。同じ報告によれば、切削・研削液は全潤滑油消費の約7%を占めており、切削・研削液の不使用は資源の節約につながる。

このほか製品の生産、使用から回収、再生産、再利用を考えたLCA(ライフ・サイクル・アセスメント)が注目されており、こうした中において今後切削加工がどのように位置付けられ、発展していくべきか考えることは多い。

6. ま と め

機械生産の最も基本ともいえるべき切削加工について、関連する工学・技術を含めてその発展の跡をたどり、今後進むべき道について考察した。切削加工の研究は、加工プロセスの本質を明らかにして新たな展開を図るだけでなく、工作機械や工具といった関連分野における研究開発と提携して進めることが重要である。また今モノ作りのあり方そのものが問われていることを考えると、これからはトータルのコスト、加工の意義とその効果、周囲に及ぼす影響を含め、加工の原点に帰って見つめ直す必要があろう。

参 考 文 献

- 1) 谷口紀男：ナノテクノロジーの基礎と応用，工業調査会，(1988)。
- 2) N. Ikawa, R. R. Donaldson, R. Komanduri, W. Koenig, P. A. McKeown and T. Moriwaki : Ultraprecision Metal Cutting - The Past, the Present and the Future, Ann. CIRP, 40, 2, (1991) 587.
- 3) T. Moriwaki and K. Okuda : Machinability of Copper in Ultra-Precision Micro Diamond Cutting, Ann. CIRP, 38, 1, (1989) 115.
- 4) T. Inamura, N. Terazawa, Y. Kumatori and T. Sata : On a Possible Mechanism of Shear Deformation in Nanoscale Cutting, Ann. CIRP, 43, 1, (1994) 47.
- 5) S. Shimada, N. Ikawa, H. Tanaka and J. Uchikoshi : Structure of Micromachined Surface Simulated by Molecular Dynamics Analysis, Ann. CIRP, 43, 1, (1994) 51.
- 6) T. Moriwaki and E. Shamoto : Ultrasonic Elliptical Vibration Cutting, Ann. CIRP, 44, 1, (1994) 31.
- 7) 社本英二，森本祥之，森脇俊道：精円振動切削加工法（第1報）——加工原理と基本特性，精密工学会誌，62，8（1996）1127.
- 8) 山形 豊，樋口俊郎：精密切削による微細形状創成，精密工学会誌，61，10（1995）1361.
- 9) Y. Takeuchi, K. Sawada and T. Sata : Ultraprecision 3D Micromachining of Glass, Ann. CIRP, 45, 1 (1996) 401.
- 10) H. Schulz and T. Moriwaki : High-Speed Machining, Ann. CIRP, 41, 2 (1992) 637.
- 11) J. Thusty : High Speed Machining, Ann. CIRP, 42, 2 (1993) 733.
- 12) 鳴瀧則彦：切削工具概論，精密工学会誌，61，6（1995）751.
- 13) 山田保之：コーテッド工具，精密工学会誌，61，6（1995）778.
- 14) M. Setoyama, A. Nakayama, M. Tanaka, N. Kitagawa and T. Nomura : Formation of Cubic-AlN in TiN/AlN Superlattice, Surface and Coatings Technology, 86-87, (1996) 225.
- 15) 堤 正臣：工作機械の高速化を実現する重要技術，日本機械学会論文集，C，60，577（1994）2894.
- 16) 森脇俊道：工作機械のインテリジェント化，日本機械学会誌，96，901（1993）1010.
- 17) 白樫高洋：切削加工学の現状・将来・夢，精密工学会誌，60，1（1994）5.
- 18) G. Byrne, D. Dornfeld, I. Inasaki, G. Ketteler, W. Koenig and R. Teti : Tool Condition Monitoring (TCM) - The Status of Research and Industrial Application, Ann. CIRP, 44, 2 (1995) 541.
- 19) F. Klocke and G. Eisenblatter : Dry Cutting, Ann. CIRP, 46, 2, (1997) 519.