超精密機械加工の研究に関する米国の現状*

E. Ray McClure**
(江田 弘***訳)

Key words: ultraprecision machining, American trend status, polishing, cutting, driving control mechanism

1. ま え が き

米国における超精密機械加工の研究は、その重点が工作機械の設計から工具の挙動に関する理解を深めることと切削加工法自体を向上させることに移りつつある。

この論文は、精機学会の新会員である著者が、精機学会の機関誌向けに書いた最初の論文である。著者は今後も機関誌向けの論文の提出を依頼されるよう切望している。

2. 緒 言

この論文の主題は、米国の超精密機械加工の現状であるが、範囲は、必ずしも切りくずを出しながら加工する方法に関する研究の論議に限られない。

現在の活動を最もよく理解するためには、米国で展開された超精密機械加工技術の歴史を調べる必要がある。紙面が限られており、かつ過去の刊行物に米国で行われた研究の正確・詳細な調査結果が発表されており、また既刊の刊行物(A. Kobayashi 参照)もそうであると私は考えるから、ここでは、この調査については詳しくは述べない。

3. 歴史調査の概要

まず注目すべきことは、米国の超精密機械加工の分野におけるこれまでの主な活動は、市場で得られるダ

イヤモンド工具の特性を利用する機械の開発に向けられていた点である。

一方、最新式の工具自体を進展させたり、切削加工法に関する科学的理解を深める努力は、米国ではあまり行われていなかった。現在、米国では、工具と加工法に重点が移りつつある。

米国の現状に至る展開は、1950年代の初めに民間用と軍用の原子力工学技術における、当時盛んであった高度の技術活動の結果として始まったと思われる。

最初の構想は、主としてオランダから、アイントホーフェンのフィリップス研究所から入って来たと思われる。電子顕微鏡の薄膜の採取の際に問題が起きたため、フィリップス研究所は、超精密加工機械にダイヤモンド工具を使用することに関心を持っていた。またこの時期は、現在の空気静圧軸受や油圧軸受につながった気体軸受が急速に進歩した時期であり、現在の安価なコンピュータ数値制御装置の基本であるデジタルコンピュータの開発の初期でもあった。1960年代の初めに、現在の精密フィードバック制御システムの基本であるレーザが現れた。

1960年代の後半から1970年代の初めにかけて、最新式の機械(これらのすべてが旋盤であった)の設計に、これらの新規技術を利用する試みが、試行錯誤法で着実に進歩した。試行錯誤法は、正確度と精密度に対する固有の障害に関する理解を深めた。米国では、他の国で共通して授業で使用する教科書ではなく、工業で使用される規格書の作成において、習得しつつある技術を成文化することが督励された。

今は、度量衡に関する米国規格協会委員会 B 89 が最も活動している時期である。特にこの委員会は、2編の規格を作り、これらは不正確の原因と非精密(非反復

* 原稿受付 昭和60年3月18日、契約番号 W-7405-ENG-48 により、ローレンスリバモア国立研究所が、米国エネルギー省の援助のもとに行った研究

** 正会員 Lawrence Livermore National Laboratory (Livermore, California, USA)

*** 正会員 宇都宮大学工学部(宇都宮市石井町 2753)

図1 リバモアの大型光学ダイヤモンド旋盤 (LODTM) の概略図
容量は直径 1.625 m, 長さ 0.5 m のものができる

性)の原因の理解を深める結果にもなった。2編の規格は、1972年に初めて出版された ANSI B 89.6.2 “寸法測定に対する温度と湿度の環境”とまだ出版されていない ANSI B 89.3.4 “回転軸”の正確度に関する規格とである。直線すべり案内の運動の真直度の測定などのような超精密機械加工にとって直接重要な、委員会 B 89 によるほかの規格の仕事がまだ続けられている。

4. 現在の最新式超精密工作機械

図1の大型光学ダイヤモンド旋盤 (LODTM) の完成によって、工作機械の設計の進歩は、米国、いや、おそらく世界においても最も新しい方式をもたらした。LODTM の設計の詳細は、参考文献1)および2)において述べられている。

LODTM の建造は1983年に完了し、機械の性能を評価するために1984年1月から12月にかけて、米国規格局 (NBS) が試験を行った。現在、NBS の試験結果は解析されつつあり、完全な報告書は今年出版される予定である(参考文献3))。LODTM は、2.5 nm の最小目盛を持ち、予備試験の結果ではこの機械はほとんどあらゆる面で、現在の測定性能よりもよい性能を発揮する。LODTM は 30 Årms (二乗平均) から 100 Årms (二乗平均) の範囲の仕上面粗さを作り出した。

LODTM の技術は、新しいはるかに小型の機械の設計にまで拡大し、この機械は、現在完成の最終段階に

図2 リバモアの精密工学研究旋盤。容量は直径 100 mm, 長さ 50 mm のものができる

ある。この機械は精密工学研究旋盤 (PERL) と呼ばれる(図2)、切削加工機構と切削工具の特性の研究に使用されるであろう。PERL で行った最初の切削加工実験では、無電解のニッケル及び銅について、約 10 Årms (二乗平均) の仕上面粗さが得られた。PERL の性能の

詳細な試験が、1985年の春から夏にかけて行われるであろう。

5. 切削加工法と工具の挙動に関する新しい研究

現在、無電解ニッケルをダイヤモンド切削加工する時の基本的性質を確認する初期の研究の中で未完成の状態ではあるが、PERLが使用されている。複雑な光学反射鏡、プラスチックレンズ型などの設計において、無電解ニッケルはダイヤモンドで機械加工ができない基板（サブストレート）上に施し、ダイヤモンド機械加工が可能なコーティング材として広く使用されている。無電解ニッケルは、光学研磨の作業者が磨きやすい材料と考えているのではかに考えられるコーティング材よりも好まれることが多い。機械加工の工具のあとが残ってはならない場合、この点は特に重要である。不幸にして無電解ニッケルコーティング材を使用する人々の共通した経験はダイヤモンドの切削能力が発揮されないことが多いか、または部品ごとの繰返し作業が行い難いということである。この問題は無電解ニッケルめっき法の多様性と個々のダイヤモンド工具の摩耗抵抗の変動によると理論上想定されている。

無電解ニッケルの機械加工の不確実性に関する疑問に対して一部の回答を行うために、ローレンスリバモア国立研究所（LLNL）の職員がこの数か月間に実験プロジェクトを実施した。このプロジェクトにおいて、6種類の異なったりん含有量（1.8, 7.3, 8.8, 11.6, 13.0 wt%）を持ち、4種類の異なった熱処理（熱処理なし、または200°C、400°C、600°Cで2h）を受けた無電解ニッケルコーティング材がPERLで機械加工された。りん含有量と熱処理の範囲により、試験片のミクロ組織は結晶質から非結晶質にわたっていた。この研究は未完成で継続されている。予備実験結果は、実験手順の詳細と合わせて参考文献4)で報告する。

ダイヤモンド旋盤にかけられる無電解ニッケルめっき層は、工具の損傷を最小にする（寿命を最大にする）ためには少なくとも11%のりんを含むべきであることを最初の結果が示している。200°Cで2h応力除去処理をすると、11%以上のりんを含む析出層の切削加工特性を更に高めるようであった。図3はダイヤモンド工具の摩耗に対するりんの含有量と熱処理条件の影響を示している。図3で示される曲線は、LLNLのChol Syn博士によって作られ、材料の特性と切削加工法の複雑な関係を目で見ようとするときに非常に役立つことを立証した。

図4（参考文献5）より引用）は、図3のデータを得たのと同じ実験でりん含有量と熱処理の異なる無電解

図3 無電解ニッケルのダイヤモンド旋削における工具摩耗に及ぼすりん含有量と熱処理条件の影響

図4 ダイヤモンド旋削した無電解ニッケルの仕上面粗さ。測定された仕上面粗さ rms は熱処理温度に対してりん含有量がわかるとプロット値から求まる。記述された仕上面粗さ R_{rms} は Å 単位である。実線はいろいろな領域の値を示す。また破線は非結晶、遷移および結晶組織の値を示す

* A. P.: AS-plated

ニッケルのダイヤモンド切削加工で得られた仕上面粗さの測定値から求めた結果を示している。結晶構造または非結晶構造の区域と、非晶質から結晶質への遷移区域とを形の上で分離する線の上に一定仕上面粗さ線が重ねられている。これらのデータから見られる通り、非晶質の区域で最もなめらかであり、結晶質の区域で最も粗い。そして一定表面粗さの線は結晶区域、遷移区域、非結晶区域を分ける線の形に一致している。

無電解ニッケル切削加工の実験で有望なデータが得られつつあるが、これらの実験はこれらの切削加工法の研究のための実験手法の開発の中では、多くの類似の実験のうちの最初の実験にすぎず、かつ最初の試みとみなされる。

ダイヤモンド工具の特性と挙動を評価するための適切な測定方法と診断方法が明らかに欠如しているのが特に問題である。ここで述べた無電解ニッケルの切削加工実験において、観察結果から工具特性の変動の影響をなくすよう実験をできる限り慎重に計画した。6

個の工具が使用され、それぞれが数回使用されたが、各回とも切れ刃の未使用部分を使用した。切れ刃の丸み、鋭さ、摩耗状態、破損したときの破損の模様を確認するため、各機械加工作業の前後に、光学顕微鏡、電子顕微鏡検査及び工具ノーズ半径測定ゲージによって工具が検査され、その特性表示が行われた。

今後の研究については、切削方法が切削工具に及ぼす影響やその性質を測定することに重点がおかれるであろう。現在、LLNLで行われている仕事に性格の似た切削加工研究が、この数年間、カリフォルニア州チャイナレークのマイケルソン研究試験所の米国海軍兵器センターにおいて、Donald Decker 博士の指導のもとで行われた。Decker 博士とその仲間は、工具と加工材料の適合性を確認するために、いろいろな材料と種々の提供元からのダイヤモンド工具について実験した(参考文献 6))。問題が似ているので LLNL とチャイナレークは現在、ダイヤモンド工具の選択手順の開発を目ざして共同研究を行っている。

ダイヤモンド工具の特性とそれらの測定は、主として米国以外の研究所での研究課題であったという事実から鑑みて、LLNL の実験計画に工具の諸特性とそれらの測定に関するこれまでの研究結果を組み入れたり、それらの結果に基づき、わかってくる補足の工具の特性づけ手法を調査するために、現在、LLNL は、国際共同研究を提案している。このような協力の一つに、ダイヤモンド工具の特性の測定と切りくず生成過程の理論についていくつかの優れた論文を発表した大阪大学の Naoya Ikawa 博士が加入されることを我々は希望している。

切削加工法は複雑であるため、過程を理解するのに、ただ単に実験にたよることは、極めて費用がかかり、長たらく意気の上がらない仕事と思われる。そこでノースカロライナ州立大学(NCSU)の精密工学技術研究所の John Strenkowski 教授は、切削加工法のモデル化に適用される進歩したコンピュータベースの解析方法の適用研究を始めた。本来 LLNL で開発された二次元有限要素コード NIKE 2D は切りくず生成過程の最初の試作モデルを提供するために、Strenkowski 博士とその助手によって修正され補足されつつある。処理されるべき主要な問題の一つは、工具の先端または切れ刃での作用を説明する現実的な材料分離基準の選択である。現在、有効な塑性ひずみ基準と J 積分に基づく臨界破壊切削パラメータが検討されている。現在の J 積分ポストプロセッサを NIKE 2D コードに組み

入れるため、LLNL の Robert Riddle 博士は、上記ポストプロセッサを修正しつつある。NIKE 2D を使用する研究から有望な結果が得られれば、NIKE の三次元版 NIKE 3D が利用できる。

モデル化に関する NCSU と LLNL の仕事が進むにつれて、結果として得られる解析工具が、切削試験を計画し解析するのに使用されるであろう。更にその結果がコンピュータコードの再修正を示唆することになろう。実験と解析がまとまるには、5 年から 10 年かかると予想され、結局は多数の研究所での多数の研究者の仕事が必要になる。

6. む す び

機械の設計、切削加工法の性質や工具の性能について述べる仕事のほかに、部品の度量衡や、より精密で予測できる器具のための新しい方法の調査を含む超精密加工技術全体について、他の局面を改善させる仕事が行われている(たとえば参考文献 7) 参照)ことを述べた。

参 考 文 献

- 1) R. R. Donaldson and S. R. Patterson: Design and Construction of a Large, Vertical Axis Diamond Turning Machine, in *Contemporary Methods of Optical Manufacturing and Testing*, SPIE Proc., Vol. 433, Bellingham, Washington, (1983).
- 2) H. K. McCue: The Motion Control System for the Large Optics Diamond Turning Machine, in *Contemporary Methods of Optical Manufacturing and Testing*, SPIE Proc., Vol. 433, Bellingham, Washington, (1983).
- 3) W. T. Estler and E. B. Magrab: Validation Metrology of the Large Optics Diamond Turning Machine, Center for Manufacturing Engineering, National Bureau of Standards, Gaithersburg, MD, (1985).
- 4) C. K. Syn, J. W. Dini, J. S. Taylor, G. L. Mara, R. R. Vandervoort and R. R. Donaldson: Influence of Phosphorus Content and Heat Treatment on the Machinability of Electroless Nickel Deposits, presented to Electroless Nickel Conf. IV, Chicago, Illinois, April 23-24, 1985.
- 5) C. K. Syn, T. T. Saito, J. S. Taylor and R. R. Donaldson: Material Properties Influence on Smoothness of Diamond-turned Electroless Nickel, Spring Conf. on Applied Optics, June 10-13, Cherry Hill, N. J.
- 6) D. L. Decker, H. Hurt, C. Fountain and J. Dancy: Preselection of Diamond Single Point Tool, in *Production Aspects of Single Point Machined Optics*, SPIE Proc., Vol. 508, Bellingham, Washington, (1984).
- 7) J. W. Roblee, D. W. Stillman & S. R. Patterson: Precision Support of Annular Optics, SPIE Proc. Contemporary Methods of Optical Manufacturing and Testing, SPIE Proc., Vol. 433, Bellingham, Washington, (1983).