

機械加工技術の新展開



技術解説

榎 本 俊 之*

Technological Advances in Machining

Key Words : cutting, polishing, minimal quantity lubrication, slurry-free finishing, fixed-abrasive pad

1. はじめに

加工においては高精度化・高能率化・低コスト化さらには環境負荷低減が常に求められ、それらを枕詞とした研究が数多く行われている。筆者自身、現職の前には15年ほど企業の研究所に在籍し超精密加工に関する開発業務に従事していたが、やはり上記の4つの項目を強く意識した加工技術開発を行っていた。

ここで加工技術といっても対象とする技術は工作機械、工具、ジグ、加工方法等々極めて多岐にわたる。その中で、筆者の所属した企業が加工という分野ではユーザメーカという立場にあったため、おもに加工方法に関する研究開発に注力した。というよりも、餅は餅屋といった既成概念があり、工作機械や工具などの開発では仕様は出すものの、基本的には専業メーカに依存するしかなかった。しかしいざ加工技術の開発を行ってみると道具である工作機械や工具の性能が加工技術のレベルを圧倒的に支配してしまうという現実突き当たり、道具の開発を行いたい、行ふべきという健全な欲求不満を抱くようになった。

その道具の中でも、数多くの加工に関する研究開発を通じて、特に切削工具や砥石、研磨パッドといった加工工具が重要であるとの認識を持つようになった。

った。これは当然といえば当然だが、工作物と干渉し、それをまさに除去する要素が加工工具であるため、その良し悪しが加工特性を決定づけることになる。そこで国内外の大学・公的機関そして企業において工具の研究開発が精力的に行われてきたが、実際の加工現場をみると後に詳述するように深刻なdeadlock状況に陥っているところが多々見られるようになった。このことはすなわち、これまで行われてきた工具研究とは異なる着想にもとづき、新たな方向を目指した研究が求められるようになったことを意味する。

そこで本稿では、こうした状況を打開するために筆者らが行っている工具研究として、切削加工分野と砥粒加工分野における2つの加工技術について紹介する。いずれも工具の構造や形状に特徴をもたせることで、従来工具技術の有する課題をブレークスルーすることを目的としている。

2. 切削加工分野：

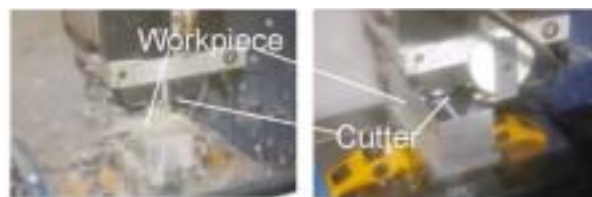
微細な三次元構造を表面に有する切削工具⁽¹⁾

切削加工においては、加工の高能率化のために高速加工が、また環境負荷低減のためにドライ加工や極微量（1時間あたり数～数十mL）切削液供給すなわちMQL（Minimal Quantity Lubrication）加工⁽²⁾の実現が強く求められている。図1には切削液



*Toshiyuki ENOMOTO

1965年2月生
東京大学 大学院工学系研究科 産業機械工学専攻 修士課程修了（1990年）
現在、大阪大学 大学院工学研究科 機械工学専攻、准教授、博士（工学）、精密加工学
TEL：06-6879-7340
FAX：06-6879-7341
E-mail：enomoto@mech.eng.osaka-u.ac.jp



(a) 通常量切削液供給時

(b) MQL供給時

図1. MQL（Minimal Quantity Lubrication）加工の様子

を通常量供給 ((a) ; 1分間あたり13 L供給) している加工とMQL ((b) ; 1時間あたり17 mL供給) 加工の様子を示すが、MQL加工では切削液が目視では確認できない程度に極微量であることがわかる。

しかし、高速加工、MQL加工のいずれにおいても切削工具へ極めて高い機械的・熱的負荷が加わることから、工具の耐摩耗性・耐熱性を高め、あるいは高負荷にならないように工具表面を低摩擦にすることが必要となる。そこでこれまでは工具の母材材質のみならず、工具刃先形状の最適化⁽³⁾や工具表面を平滑にするといった刃先処理⁽⁴⁾、工具表面へのコーティング材料やその方法などについて様々な検討や開発が行われてきた⁽⁵⁾。その結果、高速加工は多くの加工現場にすでに導入され、またMQL加工も自動車メーカを中心に積極的に採用されるようになった。

しかしながら、環境負荷低減加工の切り札とされたMQL加工では加工点における潤滑性不足により加工不良（例えば工具破損）が突発的に発生してしまう、また自動車部品加工で最も多い穴加工には適用できないといった問題が顕在化してきた。これに対し、MQL用切削液やその供給方法について多くの研究開発がなされてきたが、これらの課題を解決するには至っておらず、MQL加工の普及がほとんど止まった状況となってしまった。

そこで筆者らは工具刃先表面の潤滑性を高めることを目的に、微細表面形状を有する切削工具の開発を行っている。表面に微細形状を形成し潤滑性を高めるものとして軸受が知られており、そこではおもに流体動圧効果を高めることが目的とされている。また古くよりすべり軸受では、そのしゅう動性を良好に保つためにきさが施され微小な油だまりが形

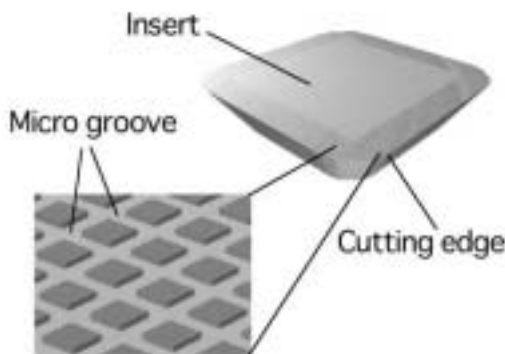


図2. 微細三次元構造を表面に有する切削工具

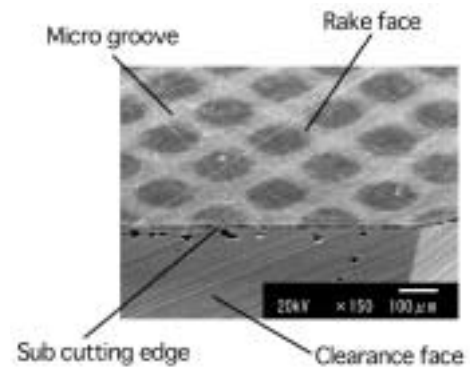
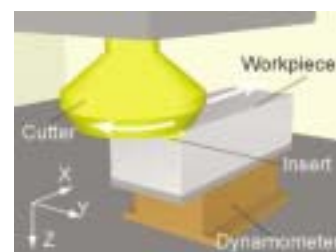


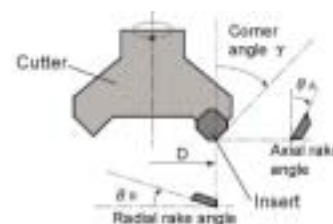
図3. 開発した切削工具の刃先付近表面

成されている⁽⁶⁾。そこで後者の特徴を利用することを考え、図2のような微細溝形状を表面（すくい面）に有する切削工具を考案した。切削加工の分野では、先に述べたように工具表面を平滑化することで加工点における摩擦を低減する研究はなされているが、本工具のように表面にあえて微細形状を形成した例はこれまでにはない。

図3に新たに開発、作製した切削工具の刃先付近のSEM写真を示す。本工具の作製においてはまず、プラズマCVD法を用い切れ刃全面に均一にDLCコーティングを行った。次にその膜の上にメッシュ状の電極を用いさらに成膜することで、その電極によるマスキング効果により微細溝を有するセグメント状のDLC膜を形成した。このセグメントの形状は、サイズ $150 \times 150 \mu\text{m}$ 、間隔（溝幅） $80 \mu\text{m}$ 、膜厚み $0.8 \mu\text{m}$ である。そして未コーティングの超硬工具お



(a) 加工装置



(b) カッタおよびインサート

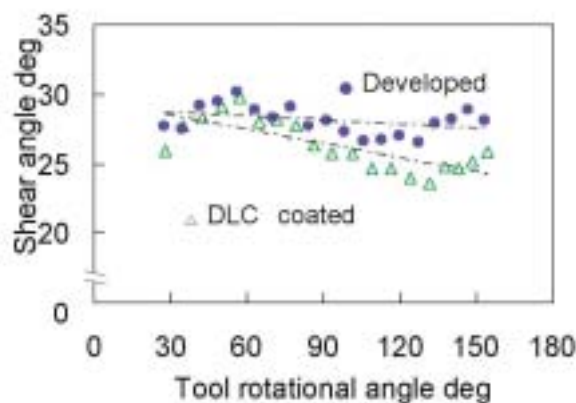
図4. 切削加工実験の概要

Workpiece	A5052	W 75 mm - L 210 mm
Tool	Cemented carbide K10 SEKN42M, Sumitomo Electric Hardmetal	
Cutting speed	380 m/min (1500 rpm)	
Depth of cut	3 mm	
Feed rate	0.12 mm/rev.	
Cutting fluid	-Emulsion type, 12.6 L/min Finecut CFS-100, NEOS -MQL cutting fluid, 17 mL/h MFF, Nippon Oil Corporation	

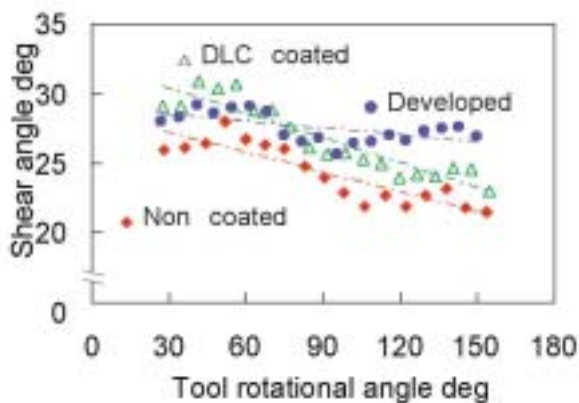
表1 切削加工条件

よび均一にDLCコーティングした切削工具と比較評価を行った。

加工実験には図4示す立形マシニングセンタ（ヤマザキマザック製AJV-18）および切削工具（カッタおよびインサート：交換式工具）を用いた。おもな加工条件を表1に示す。被削材にはアルミニウム合金A5052を用い、1枚刃にて中心削りで正面フラ



(a) 通常量供給切削実験



(b) MQL切削実験

図5. カッター一回転中のせん断角の変化

イス切削した。そして通常切削液（エマルジョンタイプ）供給による切削実験とオイルミスト供給装置

（TACO製L32-300）を用いたMQL用切削液（新日本石油製ユニカットジネンMFF）を噴霧供給（17 mL/h）した切削実験を実施した。

切削特性としては、おもにカッター一回転中の切りくずせん断角の変化を評価した。切削工具表面の潤滑状態を良好にする、すなわち工具すくい面と切りくず間の摩擦力を小さくすると、切りくずせん断角が増大し、せん断面積が減少することで切削に要するエネルギーを減少させることができる。

図5に切りくずせん断角の結果を示す。同図からわかるように、微細溝を有さない切削工具（◆ Non coated, ▲ DLC coated）では通常量切削液供給時およびMQL加工実験時とも、カッタが一回転するわずかの時間内においてもせん断角が減少、つまり切削液による潤滑効果が低下している。なお切削液を供給しないドライ加工実験ではほぼ一定のせん断角となった。これに対して開発した切削工具（● Developed）を用いることで、せん断角の低下を大幅に抑制することができ、良好な潤滑特性を持続することができた。

このように切削工具の表面に微細溝を形成することでマイクロトライボロジー効果を発現することができ、従来の工具に対して優れた工具潤滑性を実現することができた。

3. 砥粒加工分野：

複数の構造からなる固定砥粒研磨パッド⁽⁷⁾

切削加工に続いて、ここでは研磨加工に関する技術について述べる。研磨剤スラリー、すなわち遊離砥粒を用いる研磨加工は、比較的単純な構成の工具（研磨パッド）と加工機械（研磨盤）を使用し、容易に高い加工面品位が得られることから多くの加工現場で用いられている。例えば、ダメージフリーかつ平坦度約40nmという極めて高い精度が求められるシリコンウェーハは年間7500万枚以上（300mmウェーハ換算；SEMI 2007.2より）もの大量生産が行われており、この生産プロセスでは最終仕上げ工程として研磨加工が必須となっている。また十数年前からはデバイスウェーハのデバイス側の平坦化にも研磨加工が適用されるようになり、現在ほぼすべてのデバイス製造において用いられるようになった。

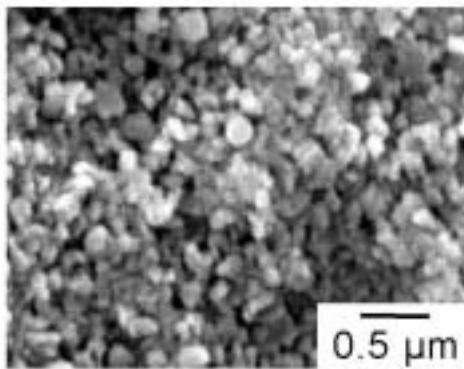


図6. 高砥粒密度からなる固定砥粒研磨パッドの表面

た.

しかし近年、遊離砥粒に起因する劣悪な作業環境や廃液処理による環境への高負荷および高ランニングコスト、また軟質な研磨パッドを用いることによる工作物の形状精度劣化といった問題が顕在化し、固定砥粒研磨加工への置き換えが強く望まれるようになった⁽⁸⁾。ここで固定砥粒研磨加工とはあまり聞き慣れない用語ではあるが、これは文字通り、研削砥石のように砥粒を固定した工具により研磨加工相当の高品位な仕上げを行う加工を指す。この加工では研磨剤スラリーではなく水のみで加工を行うことができ、また砥粒を内包することで工具は一般に硬質となるため良好な工作物平坦度を得ることができる。

こうして砥粒を研磨パッド内に固定した固定砥粒研磨パッドが多方面で研究・開発されるようになった。しかし実は現行の遊離砥粒研磨加工に比べ加工能率が著しく低下してしまうという問題があり、実用化に至った例は極めて少ない。これには様々な理由が挙げられるが、固定砥粒研磨加工では同時に作用する砥粒数が過多になり加工点圧力が低くなりすぎることや研磨パッドの基材樹脂が砥粒を被覆してしまい砥粒の機械的・化学的除去作用が抑制されてしまう⁽⁹⁾ ことなどが考えられる。

そこでまずは特殊な製法を用いて結合剤である基材樹脂量を5wt%以下と極めて少量にした高砥粒密度の固定砥粒研磨パッドを試作した。なおガラス研磨への適用を考慮し、砥粒には酸化セリウム（平均粒径0.2μm）を用い、樹脂には通常の研磨パッドで用いられるウレタン樹脂よりも硬く脆いアクリル樹脂を使用した。その結果、図6に示すように、結合剤樹脂による砥粒被覆が極めて少ない研磨パッドを

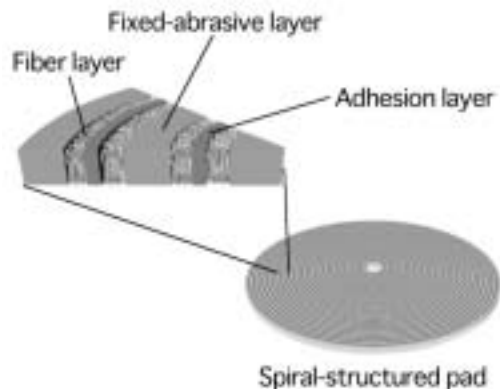


図7. スパイラル構造を有する固定砥粒研磨パッド

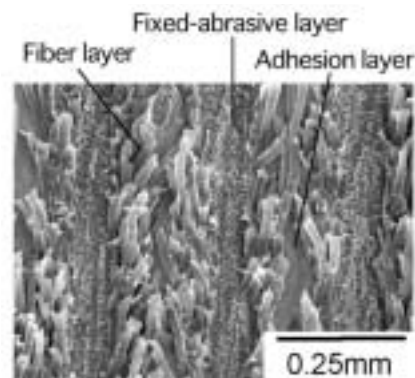


図8. 開発した固定砥粒研磨パッドの表面

作製することができた。しかしながら基材樹脂量が少なくなりすぎ、研磨パッドとして極めて脆くなり加工時の摩耗が激しいという問題が新たに生じた。

この問題を解決する方法としては、結合剤樹脂種類の変更、樹脂の硬化条件の変更・調整、またフィラの添加といったことが考えられる。しかしいずれの方法を採用しても、研磨パッド摩耗を抑制しようとするとパッド内部から放出される砥粒量が減少するため加工能率が低下してしまい、一方、加工能率を高めるためにパッド内部からの砥粒の放出量を増



図9. 研磨加工実験の概要

Workpiece	Optical glass BK7 75 mm × 75 mm × 1.1 mm
Diameter of pad	420 mm
Finishing pressure	10 kPa
Rotation of workpiece	40 rpm
Rotation of pad	40 rpm
Rotation of dresser	50 rpm
Finishing time	10 min
Finishing fluid	Pure water
Supply rate	10 mL/min

表2 研磨加工条件

やすとパッド摩耗を促進させてしまうという問題から逃れることができない。

そこで筆者らは砥粒放出性のみならず放出された砥粒のパッド上における保持・滞留性に着目し、それを高めることで加工能率の向上を実現することを目的に、図7に示すような砥粒層と繊維層の二つの層から構成されるスパイラル構造固定砥粒研磨パッドを提案した。砥粒層は樹脂にほとんど被覆されていない砥粒を放出する機能を有し、繊維層はその放出された砥粒を良好に保持・滞留し、工作物に適切に作用させる機能を有する。そしてこれらの異なる機能を研磨パッドの各構造で発現させることで、少ない砥粒放出量においても高い加工能率を実現することが期待できる。実際に作製した固定砥粒研磨パッドの表面SEM写真を図8に示す。これまで開発されてきた固定砥粒研磨パッドでは、いかに高均質なパッドを作製するかを追求してきたが、それとは

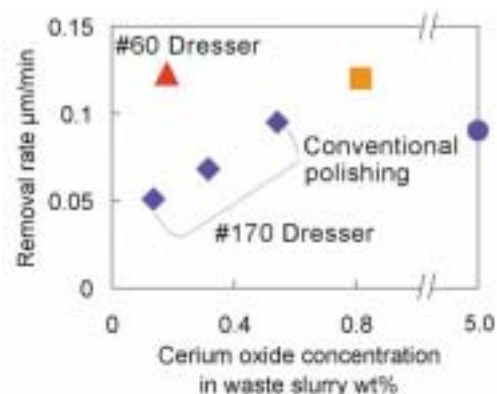


図10. 廃液スラリー内砥粒濃度と加工能率の関係

方向性が大きく異なるものとなっている。

加工実験には図9に示すように片面研磨盤(Lapmaster製LP-15F)を用いた。おもな加工条件を表2に示す。工作物には74mm角の光学ガラス

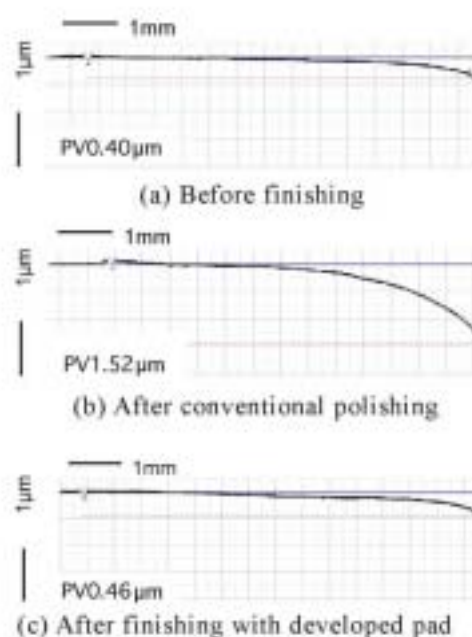


図11. 加工前後の工作物エッジ形状

BK7を用い、スエードパッドを用いた水貼りによりホルダに保持し強制駆動で自転させた。また比較のため、一般的なガラス仕上げ加工法である、酸化セリウムスラリーと酸化セリウムを含浸させた発泡ウレタン系研磨パッドを用いた研磨加工を行った。スラリーとしては開発した研磨パッドで用いた砥粒と同じ酸化セリウムを純水に添加(5wt%)し作製した。加工中はダイヤモンドドレッサ(ダイヤモンド粒度#60, #170)により研磨パッドをin situでコンディショニングした。

加工特性の一例を図10に示す。同図からわかるように、ダイヤモンドドレッサを適切に選択する(▲: #60ドレッサ)ことで通常のスラリーを用いる研磨加工(●)に比べ、1/30以下の砥粒消費量で、より高い加工能率を達成することができた。この時の研磨パッド摩耗率は $0.15 \mu\text{m}/\text{min}$ と十分に実的な値となった。

加工精度に関しては、仕上げ面粗さについて通常研磨加工時と同程度の 20nm P-Vとなり、一方、工作物エッジ形状については大きく改善することができた(図11)。これは開発したパッドが通常研磨法で用いられる研磨パッドに比べ、1.7倍も硬度が高かったことによると考えられる。

この工作物エッジ形状の平坦化研磨ということでは、現在、シリコンウェーハ(ベアウェーハ)にお

いてそのエッジ形状を極めて高平坦にすることが求められている⁽¹⁰⁾。これはシリコンウェーハを基板として製造されるデバイスチップの取得歩留まりにエッジ平坦度が大きく影響を及ぼすためである。他にはハードディスク用のガラスディスクなどにおいてもエッジ形状の高平坦化が強く望まれている。

これに対して、より硬質な研磨パッドを適用するなどの工夫が加工現場では行われているが、このままでは加工能率が急減してしまうといった問題が生じ、解決策がないのが現状である。そこで筆者らはこれまでの研磨パッドとは異なる特殊な構造を有する研磨パッドの研究開発⁽¹¹⁾を行っており、シリコンウェーハやガラスディスク研磨においてその優れた有効性を見いだすに至っている。これはやはり工具構造に着目した研究例ではあるが、詳細は別稿にゆずる。

4. おわりに

機械加工においてはこれまで対象としてきた製品、部品を低コスト、低環境負荷のもとに、より高精度、高能率に加工することが常に要求され、さらには新たな対象としてデバイスウェーハなどのような最先端デバイスを極めて高い精度で加工することが求められている。これらに对应していくためには従来の加工技術研究とは一線を画する、すなわちそれらの研究では常識と考えられていたこととは異なる発想にもとづく研究が必須となっている。

本稿ではそうした中で筆者らが行っている加工工具研究について紹介した。今後は加工工具のみならず、それらを用いた加工システムの構築についても鋭意検討を行い、早期の実用化を目指す。

文 献

- (1) Enomoto, T. et al., Development of a Cutting Tool with Micro Structured Surface, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.73, No.729 (2007), pp.1560-1565. (in Japanese)
- (2) Min, S. et al., A Study on Tribology in Minimal Quantity Lubrication Cutting, *Annals of the CIRP*, Vol.54, No.1 (2005), pp.105-108.
- (3) Hanyu, H. et al., Optimization of Cutting Edge Shapes for the Development of High Performance Diamond Coated Drills, *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol.68, No.3 (2002), pp.415-419. (in Japanese)
- (4) Hanyu, H. et al., Dry and Semi-Dry Cutting with Diamond Coated Tools, *Proceedings of Autumn Conference of the Japan Society for Precision Engineering*, (2003), p.125. (in Japanese)
- (5) Ochi, A., New Trend of Coated Tools, *Proceedings of Spring Conference of the Japan Society for Precision Engineering*, (2004), pp.601-602. (in Japanese)
- (6) DeVries, M. F. et al., Relationship of Surface Roughness and Surface Integrity to Functional Properties, *Annals of the CIRP*, Vol.25, No.2 (1976), pp.569-573.
- (7) Enomoto, T. et al., Development of a Structure-Controlled Fixed-Abrasive Pad (Application to Finishing of an Optical Glass), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.73, No.726 (2007), pp.639-644. (in Japanese)
- (8) Kim, H. et al., Development of Abrasive Capsulation Pad Using Water Swellable Polymer, *Proceedings of 6th International Chemical-Mechanical Planarization for ULSI Multilevel Interconnection Conference*, (2001), pp.197-203.
- (9) Hirokawa, K. et al., Polishing Tool, *United States Patent Application*, No.2004 / 0033771 (2004).
- (10) *International Technology Roadmap for Semiconductors 2006 Update, Front End Processes*, (2006), p.4.
- (11) Enomoto, T. et al., Development of a New Type of Polishing Pad for Achieving Precise Workpiece Edge Shape-Application to Silicon Wafers and Glass Plates, *Proceedings of Spring Conference of the Japan Society for Precision Engineering*, (2007), pp.1139-1140. (in Japanese)