

マイクロ旋盤を創る

北原 時雄
(機械技術研究所)

要 旨

1991 年に開始された産業技術研究開発プロジェクト「マイクロマシン技術開発」のサブテーマ「マイクロファクトリ技術開発」は 1993 年に開始され、2000 年に終了した。

本稿では、はじめに通商産業省（当時）が「マイクロマシン技術開発」に着手するまでの経緯を紹介している。つぎに、「マイクロファクトリ技術開発」の概要、(財) マイクロマシンセンター（当時）と機械技術研究所（当時）が行った「マイクロファクトリ共同調査研究」、および機械技術研究所が開発した「マイクロ旋盤」とその後の状況について、筆者の感想などを多少織り込みながら述べている。

1. はじめに

IC プロセスはシリコンウェハー上に単に集積回路を作成するだけでなく、ミクロな機構やアクチュエータも作ることができるというレポート¹⁾を、NSF が 1988 年 8 月に報告した。このレポートでは、米国として取り組むべき研究開発の方策まで言及している。IC プロセスによるマイクロメカニカルセンサなどに関する国際会議 Transducers は 1981 年から 2 年毎に開かれていたが、この衝撃的なレポートを契機として、シリコン基板上にメカニズムを構築するという研究が急速に拡大した。そして、この技術分野は MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) と呼ばれるようになった。

年度	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	00
論文発表数													
特許出願件数													
企業研究費													
政府研究費													

図 1-1-10 1988 年以降のシリコンマイクロメカニカル技術の発展状況

図1は機械技術研究所などのマイクロ化技術への取り組みの年次展開を示している。

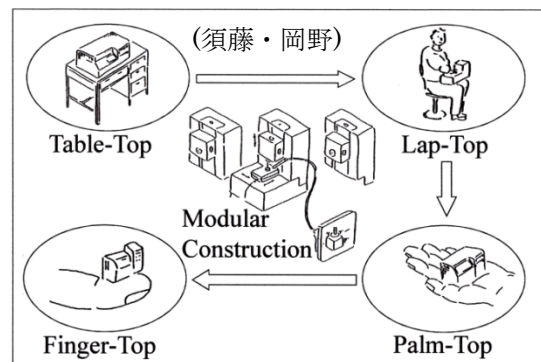
通産省（当時）は機器のマ
イクロ化技術の研究開発が必
要であると考えて、1989年に
日本産業用ロボット工業会
（当時）に調査研究を委託し
た。この調査研究の委員会に
は、大学、企業、工業技術院
そして、この調査研究報告で
の必要性がかなり強調された。

一方、機械技研では、1988年に所内に研究会を設けて、機械システムのマイクロ化を議論した。その中で、工作機械の大幅なダウンサイジングが挙げられ、図2に示すような Finger-Top 型の各種加工モジュールからなる超小型モジュラー型加工システムなどが提案された。

年度	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	00
機械技研				マイクロマシン技術開発に参画									
	マイクロ化技術の調査							マイクロ旋盤の開発			機械加工マイクロファクトリの開発		
通産省				マイクロマシン技術の開発をNEDOに委託 (NEDOはマイクロマシンセンターに再委託)									
マイクロマシンセンター				マイクロマシン技術開発 (マイクロファクトリ技術開発)									

図1 マイクロマシン技術開発の展開

図2 超小型モジュラー型機械加工システム



そこで、これを生産工場規模まで拡張して「マイクロファクトリ」とし、上記の調査研究委員会に提案した。その内容は大方の委員には不評のようだったが、最終報告書には組み込まれた。

この最終報告書の内容に対して、通産省の担当官は、当時は日米間に半導体貿易摩擦が起こっており、米国発の MEMS を研究開発課題とすることは適切でないと判断した。そして、東大の藤正巖教授（当時）が提唱していた「マイクロマシン技術」を研究開発課題とすることに決定した。この「マイクロマシン技術開発」には、部分的に MEMS も含まれるが、その骨格はむしろ機械寄りのマイクロ化技術であった。

この研究開発を実施するために、通産省は（財）マイクロマシンセンターを設立した。私事になるが、私が上述の調査研究に当初より関わっていたとして、財団設立から3年間、意に反してマイクロマシンセンターに休職出向することになった。

図1に示されているように、「マイクロファクトリ技術開発」は「マイクロマシン技術開発」開始の2年後に、そのサブテーマとしてスタートした。これは、上記の最終報告書を読んだ工業技術院の担当官がマイクロファクトリ技術は石油特会の「省エネルギー勘定」との相性が良いと判断したことによるもので、私はこれに即座に同意した。

図1には記入されていないが、マイクロマシンセンターと機械技術研究所は1992～1994年にマイクロファクトリに関する共同調査研究を行い、マイクロファクトリの多様な応用分野や適用効果などを明らかにした²⁾。そして、後述の「マイクロ旋盤開発」は、上記の機械技術研究所における研究会やマイクロマシンセンターとの共同調査研究から導かれた取り組みであった。

「秘話」を依頼されたと理解して、ここまでマイクロ旋盤とは直接の係わりが薄い「マイクロマシン技術開発」の立ち上げに至る過程、いわば裏話に類する様な内容について長々と述べた。

以下では、まず上記の共同調査研究などで検討したマイクロファクトリの有用性について述べ、つぎにマイクロ旋盤の開発と性能の実証結果などを紹介する。

2. マイクロファクトリ

本章では、マイクロマシンセンターのマイクロファクトリ技術開発、およびマイクロマシンセンターと機械技術研究所が共同で行った調査研究について、その概要を述べる。

2-1. マイクロファクトリ技術開発^{3),4)}

マイクロファクトリ技術開発は1993年に開始された。そして、1993～1995年では要素技術の開発、1996～2000年は開発した要素技術によりシステムを試作し、評価するとした。

この技術開発では、図3に示すマイクロ部品の加工・組立を行うデスクトップ型の工場を想定した。このシステムは、①加工ユニット、②搬送ユニット、③組立ユニット、の3ユニットで構成されている。

①には、電解加工デバイス、液送ポンプ、検査デバイスおよび環境認識デバイスが組み込まれている。加工は除去加工と付加加工ができ、加工精度は $\pm 20\ \mu\text{m}$ 、加工可能寸法は $5\times 5\text{mm}$ である。

②では2次元搬送方式を採用し、 $1\times 1\text{mm}$ のプレーナコイルを1600個配列したコイルダイオードモジュールを8枚連結している。そして、プレーナコイルのon-offにより、マイクロ部品を入れた搬送パレットを運ぶ。搬送状況は画像認識デバイスで監視・制御する。パレットの搬送速度は 30mm/sec である。

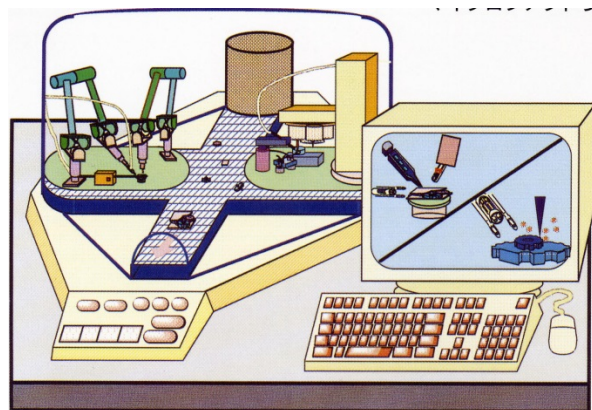


図3 マイクロファクトリのシステムイメージ

③には、組立ステージ、2組の多自由度アームと把持デバイス、接着剤塗布デバイス、検査デバイスが組み込まれ、位置決め精度は $\pm 10\ \mu\text{m}$ である。

このマイクロファクトリを使って、外形が $10\times 10\times 10\text{mm}$ のマイクロ歯車減速機の部品加工・組立を行った。この場合の総工程は53工程で、所要時間は4506sec（12.5時間）であった。

2-2. マイクロファクトリ調査研究^{2),5),6)}

(1) マイクロファクトリの産業応用

機械技術研究所とマイクロマシンセンターの共同調査研究で得られたマイクロファクトリの産業応用を表1に示す。

表1 マイクロファクトリ応用の分類

方式	生産・利用場所	応用例
分散型	移動体内生産	トラック内部品製造システム 輸送船内製造システム
	特殊環境下生産	宇宙実験システム クリーンルームレス真空中間製造システム
	店先・オフィス内生産	貴金属製品製造自動販売機 三次元モデリング（教材、都市構想モデル） パーソナル小物品製造
	オンサイト生産	マイクロ部品製造 交換部品製造
	一般生産	化学合成マイクロファクトリ 細胞クローン培養機
集中型	*多数のマイクロマシンの協調による	装置内生産（自動車修理） もぐら型生産（鉱物探査、地下ケーブル工事） 地球環境保全（害虫駆除、流出オイル回収）

この表から、マイクロファクトリはシステムサイズが極めて小さいという特徴を活かすことによって、多様な応用が可能になることがわかる。

例えば、数mmに満たない機械部品などは、大幅に小型化した加工機械をトラック内に設置すれば、配送中に生産することも可能になる。また、通常の工作機械の加工精度には、外部振動が大きな影響を及ぼすが、小型化により慣性質量が小さくなるので、配送中であっても従来型の工場内生産と変わらない加工精度が得られると考えられる。

マイクロファクトリは店やオフィスに設置できるので、小物の装身具などはお客の注文に応じて、その場で製造することも可能になる。その先には、自動販売機での製造も可能であろう。類似のシステムは、すでに写真プリントなどで実現している。さらに、携帯機器などの修理がオンサイトでできるようになる。

このように、マイクロファクトリには、「工場は固定」という従来の概念を変革させ、また利用領域を大幅に拡大させる可能性がある。

(2) 工場の消費動力⁷⁾

1992年、機械技術研究所はエコファクトリの研究で工場の消費動力を調査した。図4は、あるOA機器製造工場の消費動力の内訳を示しており、空調が総消費動力の1/2以上を占め、生産・搬送設備は1/6程度である。したがって、動力削減の観点からは工場容積を小さくすることが最も効果的であり、これには生産機械のダウンサイジングが必要になる。

筐体大きい工業製品でも、軽量化するために

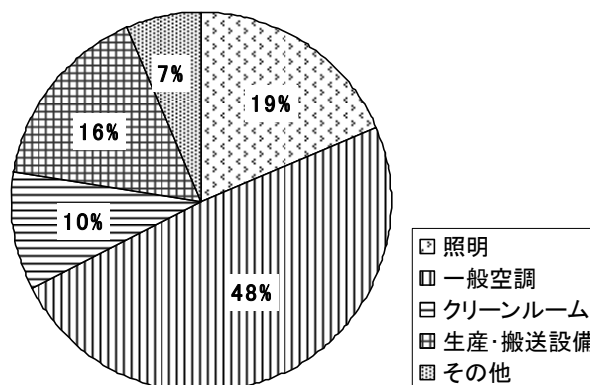


図4 OA機器製造工場の消費動力

小さな部品やデバイスを数多く使っている。このような場合には、在来の工場にマイクロファクトリを組み込んだ複合工場とも呼ぶべき生産形態が有効と考えられる。

そこで、この生産方式を各種工業製品製造に適用した場合の省エネルギー効果を試算した（表 2）。この試算では、工業製品の種類によってマイクロファクトリの導入率が異なるとした。その結果、工場の総消費動力は大型家電製品では 81%に、腕時計では 24%に低減されることがわかった。

表 2 マイクロファクトリの導入効果

工業製品	導入率(%)	動力低減率(%)
大型家電	20	81
OA 機器	40	62
カメラ	60	43
時計	80	24

3. マイクロ旋盤の開発⁸⁾

既述したように、所内の研究会で Finger Top 型の工作機械が提案されていた。そこで、私は研究所に復帰した最初の所長ヒアリングでマイクロ旋盤の開発を提案し、松野所長（当時）の了解が得られた。

当時、腕時計などで使う数 mm 未満のミニチュア機構部品は等身大の工作機械で加工していた。そして、工作機械関係者からの聞き取りでは、工作機械の小型化は剛性を低下させ、十分な加工精度が得られないとの考えが支配的であった。また、工作機械の製造では、部品のおよそ 80%を購入しており、精度や耐久性に優れた小型部品の入手が困難であるとの指摘もあった。さらに、大幅な小型化は機器の操作性やメンテナンスに支障が生じる懸念も挙げられた。そこで、マイクロ旋盤の開発はこのような疑念を払拭することを目的とし、小型化による省エネルギー効果と加工精度の実証を取り上げた。

3-1 マイクロ旋盤の構造

1996 年に開発したマイクロ旋盤は、外形寸法が 32mm（長さ）×25mm（奥行）×31mm（高さ）、重量 1N である。その外観を図 5 に示す。その部品加工はセイコーインスツルの試作工場に依頼した。数年後、同社のショールームに行ったところ、ショーケースにマイクロ旋盤が置かれていた。

マイクロ旋盤の構造では、考案した積層型ピエゾ素子を内蔵したインチワーム式直動機構（日、米、欧、中国で特許取得）を直交させて 2 個積み重ね、x-y 駆動デバイスを構成させ、これを旋盤のベースの上面に固定した。さらに、x-y 駆動デバイスの上面には、主軸と DC マイクロモータからなる主軸デバイスを取り付けた。ワークを把持するコレットチャックは主軸と一体構造になっている。刃物台はベースに固定した。

なお、主軸は中空になっており、直径 2mm のワークを主軸の後部から挿入する方式を採用している。主軸駆動用 DC マイクロモータの定格出力は 1.5W で、主軸を 10,000rpm で回転させる。

このマイクロ旋盤の諸元を市販の汎用旋盤のそれと比較すると、表 3 に示すように、マイクロ旋盤の外形寸法は汎用旋盤の約 1/50 である。また、重量は 1/5000 未満、主軸駆動用モータの定格動力

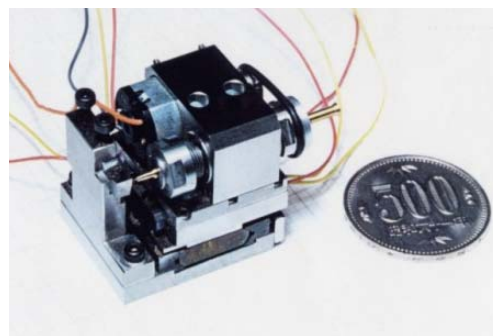


図 5 開発したマイクロ旋盤

表 3 マイクロ旋盤と汎用旋盤の比較

		単位	マイクロ旋盤 (A)	実用旋盤 (B)	A/B
寸法	幅	m	0.032	1.5	1/50
	奥行	m	0.025	0.5	
	高さ	m	0.031	1.5	
重さ		N	1.0	5000～	<1/5000
動力(定格)		kW	0.0015	3.0～	<1/2000

は 1/2000 未満である。

このマイクロ旋盤の外形寸法は、開発した時点では世界最小の値であった。余談になるが、機械技研がこの旋盤をプレス発表したところ、翌日に NHK の「おはよう日本」で放映された。その後、ほぼ 1 年間にわたって見学者が絶えず、研究の継続にかなりの支障を生じた。

3-2 性能の評価

マイクロ旋盤の開発の目的は、工作機械の大幅な小型化についての実用可能性を実証することであった。そこで、開発したマイクロ旋盤による旋削実験を行い、旋盤の主軸デバイスの消費動力と旋削した面の品質を調べた。

被削材には、主として快削黄銅を用いた。図 6 は旋削した試料の写真を示している。図中の左端はアセタールレジン（商品名：デルリン）である。中央の 2 つは快削黄銅で、最も細い部分は直径 0.1mm である。右端は寸法比較のために添えたシャープペンシルの先端である。

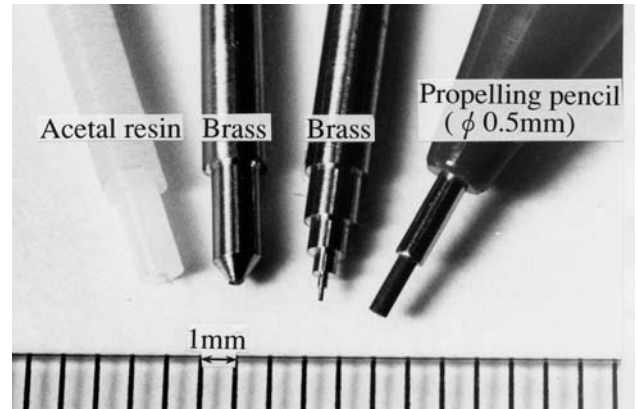


図 6 旋削した試料

(1) 消費動力

図 7 はマイクロ旋盤の旋削時における主軸デバイスの消費動力を測定した結果を示している。この旋削ではダイヤモンドバイトを使用し、主軸回転速度 10,000 rpm、旋削直径 1.8mm、送り速度 15 μ m/s とした。被削材は快削黄銅である。そして、切り込み量を 0~200 μ m とした。図では、主軸の空転時（切り込み量 0mm）における消費動力は 1.52W となっており、この値は主軸デバイス自体が消費した動力である。そして、切り込み量が大きくなると、消費動力も比例して増加するが、200 μ m においてもわずか 1.59W に過ぎない。

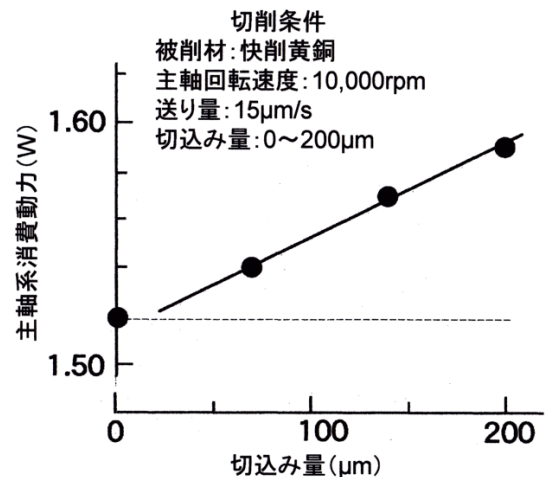


図 7 旋削時の主軸デバイスの消費動力

実用旋盤は定格出力 3kW クラスのモータを使っているので、マイクロ旋盤における消費動力は実用旋盤のそれに比べて極めて小さい値になっているといえる。これはまた、工作機械の大幅なダウンサイジングによって、大きな省エネルギー効果が期待できるということを実証している。

なお、旋削自体に消費される動力は、例えば切り込み深さ 200 μ m における動力から空転時の動力を差し引くことにより得られ、その値はわずか 0.07W である。そしてこの値は、旋削時の主軸デバイスの消費動力 1.59W のわずか 4.5% に過ぎない。なお、この値は被削材の比切削抵抗の値に基づいて計算した旋削動力の値とほぼ一致している。

(2) 加工部品の品質

図 8 は快削黄銅を直径 1.8mm に旋削した面について、送り方向表面粗さと 3 箇所真円度を測定した

例を示している。表面粗さの測定例では、最大高さは $R_{\max}=1.6\mu\text{m}$ となっている。また、真円度の測定例では、 $2.5\mu\text{m}$ となっている。そして、これらの測定値は汎用旋盤で得られる値よりも小さい値である。

そしてこの測定例から、マイクロ部品の旋削加工の場合、旋盤の大幅なダウンサイジングは加工部品の品質をむしろ向上させること可能性があることがわかった。これはまた、工作機械の加工精度は構造剛性に大きく依存するという従来の考え方が、マイクロ部品加工には必ずしも適用されないということを示している。

なお、この測定例は直径 1.8mm に旋削したものであり、腕時計で使われている直径 0.2mm 程度のマイクロ歯車軸などの旋削加工では、表面粗さが低下してしまい、十分な品質の旋削面が得られない。そして、この点に対処するには、主軸回転速度を 1 桁程度高める必要がある。この点について検証した結果は後述する。

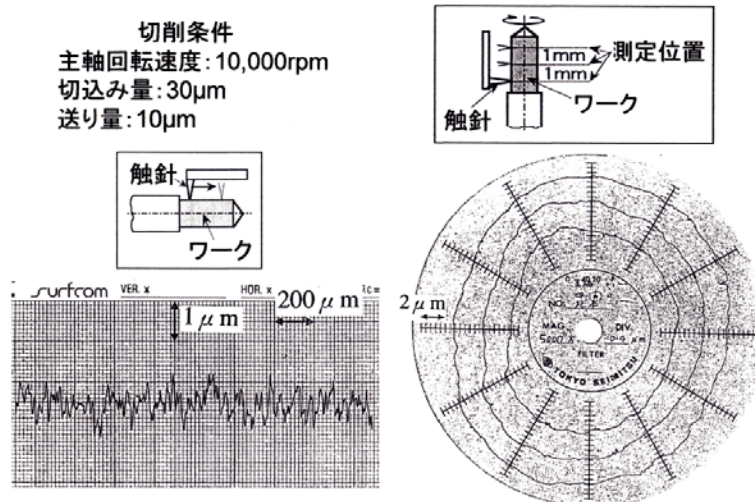


図 8 旋削面の表面粗さと真円度の測定例

4. その後の展開

4-1 機械加工マイクロファクトリ⁹⁾

機械技研は 1989 年に、上述のマイクロ旋盤に加えて、マイクロフライス盤、マイクロプレスおよびマイクロロボットを開発し、部品の加工からデバイスの組み立てまで行う製造工程を構築した。電源は AC100V、消費電力はわずか 60W である。これをスーツケース ($625\times 490\times 380\text{mm}$) に収納した場合の総重量はわずか 340N で、キャスターによる運搬が可能である。

この製造システムを使って、マイクロ動力伝達軸（外径 0.9mm 、長さ 3mm 、伝達軸径 0.1mm ）を製作し、加工・組立精度と省エネルギー効果を検証した。

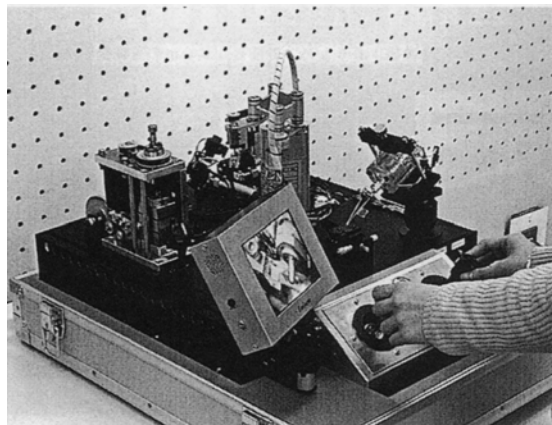


図 9 機械加工マイクロファクトリ

4-2 高品位マイクロ部品の旋削加工¹⁰⁾

マイクロ旋盤での旋削では、旋削直径が 0.1mm 程度になると良好な旋削面が得られなかった。これは、主軸回転速度が $10,000\text{rpm}$ では、旋削速度 3m/min 程度であることに起因していると推測された。そこで、日本精工（株）に回転速度 $20\times 10^4\text{rpm}$ のマイクロ主軸デバイスの開発と提供を依頼した。この主軸（main shaft）はモータビルトイン型である。これを組み込んだ旋削実験装置を図 10 に示す。

この実験装置で、快削黄銅を直径 0.1 及び 0.2mm に旋削

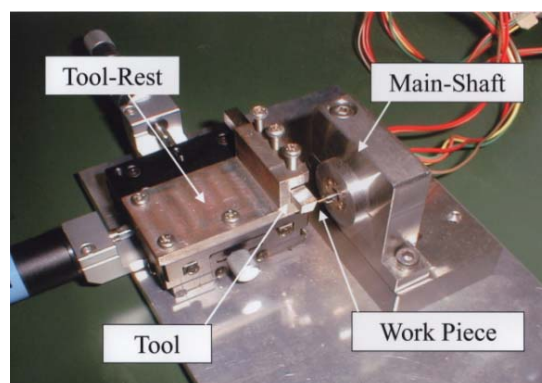


図 10 高回転速度旋削実験装置

した。実験における主軸回転速度の範囲は $1 \times 10^4 \sim 16 \times 10^4 \text{rpm}$ とした。この条件では、旋削直径 0.2mm 場合、100m/min の最高旋削速度が得られる。

旋削実験で得られた、回転速度と送り方向表面粗さの関係を図 11 に示す。算術平均粗さ Ra の値は回転速度の増加に伴って減少し、 $5 \times 10^4 \text{rpm}$ (31m/min) では $Ra \approx 40 \text{nm}$ となり、これ以上の回転速度での Ra はほぼ一定の値になっている。そして、この Ra の値は精密研削で得られる表面粗さのレベルであり、これは旋削加工後に通常置かれる研削工程を省くことができることを示している。

なお、旋削面の真円度については、直径が 0.2mm 以下のような細径を測定する装置がなかったため、その評価は断念せざるを得なかった。

なお、この高回転速度旋削の研究は、機械技研を定年退職後に赴任した湘南工科大学で行ったものである。

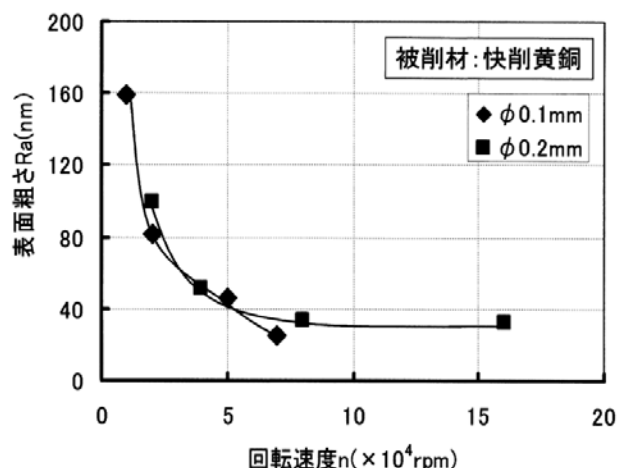


図 11 高回転速度旋削の実験結果

5. おわりに

マイクロ旋盤の開発に至るまでの経緯と開発結果を中心に紹介した。

この開発が工業製品の製造システムに及ぼした影響については、現時点では、はなはだ心もとない。うがった見方をするならば、工作機械のほとんどは専門メーカーが製作しているが、超小型工作機械は大幅に安く作ることができるので、メーカーにとってはそれほどまい話にはならない。

しかしながら、日本の腕時計メーカーが初期に自ら小型工作機械を開発したように、2000 年以降、ユーザーによる加工・組立システムなどの内製に対しては、マイクロ旋盤の開発がそれなりの影響を及ぼしたと思っている。例えば、2000 年頃に三協精機（当時）は、マイクロ部品の加工・熱処理・洗浄・検査・組立の工程の夫々を同一サイズの小型モジュールに収めることで、マイクロデバイスの製造ラインの長さや容積を大幅に縮小した。また、デンソーは燃料噴射ポンプの組立・検査を行うミニ組立工場 CAC (2280×2300×1800mm) を開発し、実用に供した¹¹⁾。

地球温暖化対策では、メーカーにも省エネルギーへの取り組みが強く要請されている。マイクロ部品やデバイスのメーカーは、現在の生産システムの省エネルギー化が限界に達したとき、ステップアップの有力な方法として、生産システムの大幅な小型化を図ることになるであろう。マイクロファクトリを提案し、マイクロ旋盤を開発したメンバーの一人として、そのような流れが生まれることに大きな期待を寄せている。

参考文献

- (1) NSF Report : Small Machines, Large Opportunities – A Report on the Emerging Field of Microdynamics (May 1988)
- (2) マイクロファクトリ共同研究会：マイクロファクトリ、機械の研究（養賢堂、第 49 巻、第 6 号、619-625
- (3) 北原時雄、石川雄一（監修）：マイクロマシン技術、シーエムシー出版（2007）、268-274
- (4) 機械技術研究所報告第 196 号：マイクロマシンプロジェクトにおける研究開発（2001）、87-94

- (5) マイクロファクトリ共同研究会；調査研究報告書（マイクロマシンセンター、1998）
- (6) T.Kawahara, et al: Microfactories; New applications of micromachine technology to manufacture of small products, J. Microsystem technology, Vol.3, No.2(1997), 37-41
- (7) 文献(5)の 38 頁
- (8) 北原時雄ほか：マイクロ旋盤の開発、機械技術研究所所報、50,5(1996),117-162
- (9) 田中誠ほか：機械加工マイクロファクトリ、機械技術研究所所報、54,6(2000),247-253
- (10) 佐藤孝博ほか：マイクロ部品的高速旋削、マイクロメカトロニクス、Vol.48、No.3(2004)、13-21
- (11) 瀧口昌之ほか：ミニ組立工場 CAC、デンソーテクニカルレビュー、9,1(2004)

略歴

1963 年に中央大学理工学部精密機械工学科を卒業。東京大学生産技術研究所を経て、1965 年に工業技術院機械試験所（後に機械技術研究所）に出向。1975 年に主任研究官。1988 年に工学博士（東京大学）。1998 年に同研究所を定年退職。この間、1991-1994 年は(財)マイクロマシンセンターに休職出向。1998 年に湘南工科大学教授。2006 年に同大学を定年退職。

1997 年に工業技術院長賞および機械技術研究所長賞。

受理日：2016年4月28日
