マイクロ生産機械システム専門委員会 マイクロファクトリの実現に向けて*

Aiming at the Realization of Microfactory

山中 将**

Masashi YAMANAKA

Key words microfactory, machine tools, manufacturing system, assembly, downsizing

1. はじめに

「マイクロファクトリ」という言葉を耳にしてから久しい。文献¹⁾によれば、1988年頃から旧工業技術院機械研究所(MEL)や財団法人マイクロマシンセンター(MMC)を中心に、マイクロマシン研究の一部として、工作機械および生産システムの小型化に関する議論が始まった。当時は「超小型の部品や機械を製造するには機械もそれに合わせて超小型化する必要があるのではないか」という発想から、「デスクトップ工場」、「パームトップ工作機械」、「可搬・移動工場」、「オンサイト生産」などが構想された。これらは、マイクロ旋盤、ポータブルマイクロファクトリとして具現化された。

経済産業省が策定した「技術戦略マップ2006」²⁾に、これに示された技術により実現される将来社会のイメージ図が参考として添付されている。国民生活に直結した5場面のイラストがあり、その中の「工場とモノづくり技術」と題した場面の中央に「マイクロファクトリ」が描かれている。現在も注目されているコンセプトであることは、まちがいない。まだ未来志向が強いが、これを実現するために様々な研究開発が行われている。特定の生産対象を定め、生産ラインを実際に構築している企業もあるが、差別化を図るホットな部分であり公開は難しいようである。

2. マイクロファクトリのメリット

マイクロファクトリのメリット、期待される効果として、第一に省エネルギー、省スペース、省資源が上げられる。次に機械を構成する要素が小型・軽量化するために、高速な移動や回転に有利である。さらに固有振動数が高いこと、

熱容量が小さいことも加工品位の向上に有効である。この他にも配置の自由度の高さから、生産システムの柔軟性が高まり、多様な生産形態への対応が可能である。

これらはわかりやすいものであるが、メリットを活かしたアプリケーションを構築するのは容易でない。ここでは、自動旋盤で大量生産されるIT部品と呼ばれる直径5mm、長さ10mm程度以下の段付きピンのような比較的単純形状の部品生産を例に上げて検討する。図1に示すように、1台の自動旋盤でAとBの2種類の部品を生産すると仮定する。週5日のうち、部品Aは3日分、部品Bは2日分の生産量が必要である。これを5台のマイクロ旋盤から成るシステムで代替する。この場合、マイクロ旋盤1台あたりの生産能力は自動旋盤の1/5とすれば、5台分の占める機械の大きさと5台分の消費動力が、自動旋盤1台より小さければ、代替のメリットが生まれる。図ではA部品用に3台、B部品用に2台を割当てているが、需要に応じた細かな

(a) 従来の自動旋盤×1台

(b) マイクロ旋盤×5台

図1 生産システムのダウンサイジング

*原稿受付 平成18年7月31日

**正会員 東北大学大学院工学研究科(仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-01)

山中 将

1988年東北大学大学院修士課程修了、豊田工機(株)(現(株)ジェイテクト)を経て、1997年東北大学講師、2001年助教授、現在に至る。1995年、博士(工学)、研究分野:工作機械、機械要素、無段変速機の開発、機械設計。

生産量調整は (a) よりも容易である。また (a) の場合は機械が故障すれば生産がストップしてしまうが、(b) では5台が同時に故障する可能性は低く、リスクが低い。

このように書くとメリットを感じるが、問題点も多い。例えば、工作物の着脱・搬送が上げられる。自動旋盤の多くはバー（棒）材を主軸台後方から、主軸の貫通穴経由でチャックに供給するが、マイクロ旋盤ではバランス的にプレカットされた素材を使う。従ってローダでチャックに供給することになるが、この機構はマイクロ旋盤に対して、かなり大きくなると考えられる。旋盤本体のみでは、加工能率 1/3 程度で、体積比 1/100 程度は容易に実現できるが、上述の生産システムとしての周辺装置を含めると省スペースはあまり期待できない。機械が小さくなるとコストダウンも期待されるが、単純に機械の大きさに比例して下がることは期待できない。保全・保守の立場からは、対象となる機械が従来に較べて著しく小さくなるのは、作業性が悪くなり敬遠される。また単純に機械の台数や刃具が増えてしまうこともデメリットである。従って、図1に示したような代替の検討には無理があるといえる。

工作機械は複合化や多機能化がトレンドであり、台数が減る方向への改善しか受け入れられない。最近では工作機械メーカーもダウンサイジングに力を入れている。工作物の大きさを限定し、それに応じてストロークを制限したり、高効率な小型モータを使って小さな機械を開発している³⁾。間口が数 100 mm 程度のもので、マイクロの範囲よりは大きいですが、従来の機械との単独の代替を指向している。

それでは、マイクロファクトリの出番はどこにあるかといえば、やはりニッチなところにあると考えている。従来、工場（生産システム）が入っていけないようなところに工場を出現させる可能性がある。大型船には船用旋盤と呼ばれる旋盤が搭載され、航海中に機関部品を修理することがある。近未来では、有人宇宙ステーションやスペースシャトルのような宇宙船での使用が想像しやすい。早乙女は SEM 内で稼働できる成形加工用と材料試験用の各種マイクロファクトリ・セルを開発している。これらにより開発中の材料の加工性の評価をしている⁴⁾。またクリーン度が要求される環境での使用にも好適である。機械本体を密閉する構造が取りやすいからである。セル生産と呼ばれる、一人の作業者が必要な部品を集めて組立てまで行う生産方式が多く取入れられ、U 字形の作業台にいくつかの工程が配置されている光景が見られる。生産台数の多くない高級機の組立てに際し、洗浄後の軸部品をすぐに組付けたいという要求があり、超小型の洗浄機を U 字ラインに配置した。さらに軸径の仕上げ加工後に速やかに洗浄を行い組付けの方が、性能安定に効果があることがわかり、U 字ラインの先頭に仕上げ用の小型工作機械を導入したい要求がある。ラピッドプロトタイプ（RP）装置が3次元プリンタとしてオフィスに進出したように、開発・研究部隊のオフィスにも進出可能かもしれない。大学などの教育機関での実習用途として教室での使用なども考えられる。このよ

図2 マイクロ放電加工機⁵⁾

うな進出がマイクロファクトリの用途としては有望であると考えている。

3. マイクロ生産機械システム専門委員会の活動

精密工学会では、平成 14 ～ 16 年度に「加工機械のマイクロ化分科会」を設置し、マイクロファクトリに初期から関わりのある北原時雄先生が主査を務めた。そこでは、マイクロ加工・組立機器の用途と適用効果、関連技術の現状や研究開発状況などについて調査を行い、今後の実用化研究に必要な課題を明らかにした。その調査・研究結果を 2005 年度精密工学会春季大会・シンポジウム「マイクロファクトリの実用化技術動向」で報告し活動を終了した。この活動を引き継ぎ、最新の研究成果や製品開発事例を紹介し、本分野に関わる開発・研究者の方々に情報交換の場を提供して、技術レベルの向上と人的ネットワーク拡大を図ることを目的として、「マイクロ生産機械システム専門委員会」が発足した（平成 17 年 2 月より 5 年間）。委員長は北原時雄（湘南工大）、副委員長は三井公之（慶応大）、幹事は岡崎祐一（産総研）、山中 将（東北大）、木村広幸（湘南工大）、会計監事は林 亮（ナノ）である。本委員会では、1) 関連情報の収集、2) 関連技術データの整備、3) 応用分野における課題の明確化を行い、生産技術の新たな展開を通して精密工学に進歩に寄与することを目指して活動を行っており、現在 31 名の会員にて構成されている（法人 8 社、個人 14 名）。2005 年度は 4 回の委員会を開催し、研究紹介および施設見学を行った。またマイクロ生産機械に関する製品データと関連する装置・技術データの調査を行い、統一されたフォーマットにまとめる作業を行い、約 30 件の情報を収集した。また 2005 年度に国内外で行われた学会、国際会議などにおいて発表された講演論文、学術誌に発表された学術論文について調査し、本会に関連する文献リストを作成した。これらは会員限定で公開している。本年度以降もアップデートを継続する計画である。会の名称の通り、加工機械に限らず組立てなどを含めた広い範囲の生産機械を調査・研究対象としている。特に生産技術の観点からマイクロ部品を製造する際の問題点、要望などの情報を広く得たいと考えている。興味のある企

図3 回転精度測定装置⁸⁾

図4 マイクロマシニングセンタ MTS5, 6の外観

業・研究者のご参加を歓迎する。問い合わせは同委員会の山中幹事 (yamanaka@elm.mech.tohoku.ac.jp) までお願いしたい。

4. 最近の研究動向

本委員会は2005年度精密工学会春季大会より、オーガナイズドセッションを開催している。これまで3回にわたり「加工機械のマイクロ化」と題して開催した。2005年度春は9件、秋は7件、2006年度春は7件の発表があった。これまで発表されたいくつかの研究について紹介したい。

三井らは直径300 μm の真ちゅう線を用いた測定用プローブを加工対象にマイクロ放電加工の研究を行っている。電極は10×10×1.2 mmの銀タングステン板であり、これを図2に示すように圧電素子を使って加振しながら加工を行う。これにより表面粗さ、電極消耗の増大なしに、加工時間を1/3程度に短縮することに成功している^{5) 6)}。また、板厚0.2 mmの各種材料に対して直径1 mmのプレス穴あけ加工する場合の、切り口面形状と穴寸法を測定し、加工精度に及ぼすパンチとダイのクリアランスの影響を画像処理を用いて評価している⁷⁾。さらにマイクロ加工機で用いられるマイクロスピンドルの回転精度を測定するために、直径3 mmの微小鋼球を測定ターゲットとして取付け、図3に示す測定装置にて測定を行っている⁸⁾。分解能は7 nmである。

図5 段付きピン (材質: SKD4) の加工例¹¹⁾

図6 マイクロ旋盤の外観 (ナノ製 MTS2)

林らは、超小型の精密工作機械「マイクロターニングシステム (MTS)」シリーズを開発している。はがき大のマイクロ旋盤からスタートし、ツーリング、ワークの着脱などの作業性、工作主軸の出力などのバランスを検討した結果、A4 ファイルサイズ (220×320 mm) が実用的な最小サイズとの結論に達している。さらに図4に示したマイクロマシニングセンタの開発も行った⁹⁾。CNCソフトウェアはPCベースの自社開発であり、簡易CAM機能も有する¹⁰⁾。これらを用いた加工事例についても多く報告している¹¹⁾。例えば、図5に示したSKD4の10 mmの段付きピンの加工が可能である。マイクロ工作機械で、どのような加工ができるかという事例の集積は極めて重要である。

山中らは、(株)ナノと共同で開発したマイクロ旋盤 (図6、ベッドサイズ: 100×150 mm) を用いて、機械特性と加工品質の関係について研究を行っている。図6に示したマイクロ旋盤の工作主軸にはトラクションドライブ (TD) 減速機が用いられている。φ16 mmのDCモータ直結では、切削に必要なトルクを得られないため、1/4減速をし

図7 主軸台の方式による振動特性の違い¹⁴⁾

てトルクを増大させている。図7にTD式、歯車式の各主軸台に取付けた加速度ピックアップ出力のパワースペクトルの測定例を示す。空転時に測定した。図中の f_m はモータの回転速度、 f_z は減速後の出力回転速度を示す。両者ともに f_m のピーク値が高い。TD式の方が歯車式の主軸台に較べて、振動レベルが低く、真円度、粗さも良好である¹²⁾。図6のベッドは厚さ40 mmの鋳物のむく板を使用しているが、この厚さを10 mmまで薄くして振動特性、加工品位を比較し、大差ないことを確認した¹³⁾。マイクロ化により加工能率が低下することは避けられないが、高能率加工として切削断面積72 mm²/minを実現した¹⁴⁾。これは主軸の性能に制限されるものであり、改良すべき構成要素が明らかになった。

このほかにマイクロ張出し成形、マイクロアクチュエータによる工具デバイスの試作、工具クランプ装置の開発、チョッピング機構、微小ねじ頭の形状、高速旋削、小型複合加工機、マイクロ放電加工機、アプレシブ・ジェット加工装置の研究発表がされた。

2006年度秋季大会よりは、委員会名と同じ「マイクロ生産機械システム」と題してOSを開催する。マイクロ工作機械を設計する上で欠かせない、軸受やスライドなどの機械要素を小型化した場合の特性変化、組立てや搬送の小

型化に関する研究など、より広い成果の発表を期待している。マイクロ工作機械を設計する上では、寸法効果を考慮しなければならない¹⁵⁾。小さくすることでどのようなメリット・デメリットがあるかを知り、工作物の大きさに応じた最適設計法の構築が期待される。

5. おわりに

マイクロ生産機械システム専門委員会による、マイクロファクトリ実現に向けての取組みについて紹介した。現状は、どんなことができるのかという模様眺めの状況にあると思う。委員会では、できるだけ多くの事例の蓄積を目指している。機会があるごとに啓蒙を行い、関わる方々を増やしていきたいと考えている。

参考文献

- 岡崎祐一: マイクロファクトリ, 精密工学会誌, **68**, 4 (2002) 491.
- http://www.meti.go.jp/policy/kenkyu_kaihatu/
- 例えば, 高松機械工業のWEBサイト, <http://www.takamaz.co.jp/2product/seihin/usl300.html>
- 早乙女康典: 精密工学会誌, **78**, 6 (2006) 701.
- 遠藤隆史, 三井公之: マイクロ放電加工における振動付加の影響に関する研究, 2005年度精密工学会春季大会講演論文集, B30, (2005) 135.
- 遠藤隆史, 辻本隆之, 三井公之: マイクロ放電加工における振動付加の影響に関する研究, 2005年度精密工学会秋季大会講演論文集, P67, (2005) 1251.
- 木部義幸, 森田雅秋, 三井公之: 金属薄板に対するプレス穴あけ加工における加工精度, 文献⁶⁾のP68, 1253.
- 藤巻研吾, 佐藤浩史, 三井公之: マイクロスピンドル用光学式回転精度測定装置の開発, 2006年度精密工学会春季大会講演論文集, L78, (2006) 969.
- 林亮 他: MTS6の開発と加工精度, 文献⁶⁾のP64, 1247.
- 林亮, 飯島大典, 山中将: 超小型精密旋盤のためのCNCソフト開発, 文献⁵⁾のB37, 147.
- 林亮 他: 超小型CNC加工機「MTS」による加工例, 文献⁸⁾のL79, 971.
- 山中将 他: マイクロ旋盤の機械特性と加工品質の関係, 文献⁵⁾のB39, 151.
- 山中将 他: マイクロ旋盤の機械特性と加工品質の関係, 文献⁶⁾のP62, 1243.
- 山中将 他: マイクロ旋盤の機械特性と加工品質の関係, 文献⁸⁾のL80, 973.
- 三島望: 工作機械の設計評価の研究, 精密工学会誌, **67**, 11 (2001) 1787.