

# ミニ生産システムとその要素の開発

千葉大学名誉教授 吉田嘉太郎

2002年6月

## 1. はじめに

最近の工作機械の傾向を見ると、昨年(2000年)開催されたハノーバーEMOで、コンパクト化を目標にした工作機械が数多く出品された。一方、国内においても、**ダウンサイジング**という名の工作機械が開発された。小さな加工装置としては、多くの話題を提供した可搬形の**マイクロマシン**も極端なコンパクト化の例として上げられよう。その中で、マイクロマシンでもなく、**ダウンサイジング**でもない実用的な**ミニ工作機械**を作ってみようという企画が検討され、1999年4月より「**小型精密機械部品用高機能ミニ生産システムの開発**」として開発研究を開始した。

この間に、プロジェクトを立ち上げるために、本当に実用的な夢工場となるかについて討議が行われ、いろいろな興味深い現状とその開発の必要性などが明らかになってきた。今回開発研究が終了したのを踏まえて、開発研究の成果と将来についてまとめようと思っている。

なお、この開発研究は、地域コンソ - シアム事業として行われたもので、大学、研究機関及び企業の参加により行われたことを付してお礼申し上げたい。

## 2. その他の開発について

### (DTM、マイクロマシン及びミニ生産システムと)

ミニ生産システムを考える際に、関連するいろいろな生産システム、とくにコンパクト化、デスクトップ化を目指したシステムについて調べる必要がある。その一つが DTM(Desk Top Manufacturing)である。DTM は、かつて多くの研究者により研究されたが、開発当初の DTM は光造形法に代表されるいわゆる積層法による成形技術であった。多分今でも同じと考えてよいであろう。積層法としての DTM は国内でも導入され、いくつかの企業及び大学で研究開発が進み、今までは不可能であったいろいろな複雑な造形が可能になった。

しかし最近では、DTM として机上に加工装置を載せるシステム、あるいは机サイズに加工装置をまとめたシステムをいうようである。これは、当初の DTM の意味とは異なると考えられる。つまり、現在の方向は小さなダウンサイジングである。この概念に基づく DTF(Desk Top Factory)という企業もある。

一方、マイクロマシンは国家的な研究として出発し、ある程度の成果があった。エッチング技術を駆使した加工法、蒸着技術を用いた新しいマイクロ製品の開発やミリオーダの加工装置によるミニサイズの部品生産を目的とした開発もある。これらは目的を絞れば実用的な加工装置として十分利用できると思っている。



しかし、ミニ工作機械は今始まったことではない。実は、時計工場ですでに写真に示すような立派なミニ工作機械が使用されていたのである。しかも、一部の工作機械は全体のサイズが一辺 200mm

の立方体の中に入り、しっかりとベースがあり自立出来るている。つまり工作機械としての基礎は自分自身に用意され、作業中に移動しないように、机上に固定するだけである。工作機械の基礎に別置きの定盤を利用する必要がないのである。この概念は今回の夢工場の加工装置にとり必要な構成であり、構造設計には欠くことの出来ない条件である。

これらに対してミニ生産システムあるいは加工セルは、現在生産されるミリサイズの部品の製造用の新しい装置として、しかも十分実用化できる装置を目的としている。これらを開発するプロジェクトの発足に当たり現状を調査した。次表は、当時開発あるいは試作されたいろいろな製造装置の比較検討を行った結果である。もちろん最近ではこのほかにも開発されている筈である。表に示すように、一部を除いて実用に供されているシステムは少ない。あくまでも、実用的な夢工場の基本セルの構築を主目的として、ミニ生産システムの研究開発は行われたのである。

当プロジェクトの仕様と他社における小型開発装置との比較

比較項目	オランパス社製 マイクロファクトリ	三協精機製作所製 デスクトップファクトリ	フダク社製 ECOM自動旋盤	ミニ生産セル ミニ生産システム対応
1. 目的	微細加工技術によるμサイズの部品を利用した微小光学部品の組立	ハードディスクドライブ用セクタ部品の製造装置、研床は組立工場も製作予定	省スペースダウンサイジングを目標にした4軸自動旋盤の小型化(4台分を想定)	省スペース、省エネルギーを目標にした実用的な高精度ミニ生産セル(生産システムを目標)
2. 加工の種類	直径1mmのレンズを含む微小光学部品、装置の組立(工場)	NCによる微細な軸状及び厚物ディスク状部品の切削加工(セクタ軸とセクタケース)	NCによる4軸切削加工(スイス方式による自動切削加工)	NCによる旋削・フライス加工及び円筒・端面研削加工(高精度加工に対応)
3. サイズ	工場サイズ 幅:500mm、奥行:350mm、高さ:約500mm(デスクは含まず)	スペース:1/2、基本ユニットセル:A3サイズ、設置の小型化:1/3(体積比)、作業面積:A2サイズ(将来はA3~A4サイズ)	省スペース:1/6(体積比で、現在の自動盤4台分と比較)、幅:1.2m、奥行:0.8m、高さ:1.1m(従来機械のダウンサイジング)	セル半体:200×200×200mm(研削、切削、フライス各セル共通サイズ、体積比約1/125)生産システムとして、1m <sup>3</sup> の広さに設置可能(体積比)
4. コスト	数百万円(詳細は不明)	社内設備として採用予定(コスト不明)	900万円×4台分以下の予定(詳細は不明)	セルごとに異なるが、研削セルは1000万円を予定、その他の旋削及びフライスセルは未定(数百万円を想定)
5. 実用性の方向と特徴	将来的には実用化の方向、現在は不明、プロジェクトとして各所で開発中のシステムは実用化にはほど近いといわれる。	製品の小型化に見合ったダウンサイジングであり、装置は社内設備として利用する予定であり、実用化は近い。加工組立装置の雰囲気の問題、清浄化には小型化が非常に有利。	見本市に参考出品されたが、実用化にはまだ多くの解決すべき課題があるという。	開発後自動化を進め実用化した後、ユーザによる評価を受ける(事業化予定)。装置設置については、ユーザの要望もあり実用化予定。モジュール化設計であり、加工対象物変化にフレキシブルに対応可能(平時も可能な質量)。

以上、本コンソーシアム開発研究事業の中で昨年及び今年と同連企業などを調査した結果をまとめて比較した。

### 3. ミニ生産システムの開発の背景

ミニ生産システムの開発に至る背景を示そう。

#### (1) 工作機械の大型化・重量化への反省

工作機械のユーザ要求に基づく高精度、高能率、高速化などへの対応により、工作機械は高剛性化を指向し、必要以上に大きくなっている。つまり加工すべき工作物の大きさと比較すると、工作機械の重量・容積が必要以上に大きくなっている。さらに主軸駆動モータをはじめ工作機械用のモータの出力も巨大化している。

#### (2) 総合的なエネルギー効率の向上対策

工作機械が大きくなるに従い、消費エネルギーも次第に大きくなっている。工作機械の製造から廃棄までのライフサイクルを考慮した総合的な消費資源効率、エネルギー効率などは、かなり低下しているといえよう。つまり省資源、省エネルギーなどの面で工作機械のあり方は問題になっている。

#### (3) 国内生産の空洞化対策

生産の空洞化対策として国内生産の強化が叫ばれている。その場合、問題となるのは、いったい国内でどのような商品を生産するのが諸外国メーカーとの競合などを考慮すると好ましいかということであろう。その一つの鍵は、商品の小型化、コンパクト化にあると考えられる。そうなると、それらの商品に使用される部品も同様にミニ化し、それらの部品の製造には、やはりそれらの部品に対するサイズの生産設備が必要になるだろう。

これらの問題を解決するために、省資源、省エネルギー及び省スペース形の工作機械の開発が必要になる。つまり加工対象に適合した合理的な大きさの工作機械、しかも、総合的エネルギー効率を高めた工作機械の開発が必要になる。こうした認識を背景に、エネルギー効率を高め、従来以上の精度を保持する合理的な大きさの工作機械及び生産システムを実現すること

にしたのである。この夢工場は、環境を考慮し、環境にやさしい生産システムとなることも目標としている。

## 4. ミニ生産(加工セル)システムの開発目標

上記の開発目標として、出来るだけ小型化を指向した加工装置であるので、開発装置を“ミニ生産加工セル”という愛称で呼ぶことにした。またシステムも、ミニ生産システムということにした。開発目標として、従来型技術の延長線上の単なる小型化(ダウンサイジング)ではない、新しい設計思想により創造する加工装置であることとした。同時に実用機械としての小型化の限界を探ることも目標としている。その設計仕様は、以下に示す。

### 4.1 ミニ生産加工セルの基本仕様

#### (1) 基本的な構成

標準化された機能ユニットの組合せにより加工機能を変化できるメタボリックな構成とし、生産加工セル単体で定められた機能を発揮すると同時に、システム化に対応できる機能を持つ。

#### (2) 加工の様式

基本的に切削加工及び研削加工用とする。

#### (3) 生産加工セルの大きさ

全体の大きさは、一辺200mmの立方体とし、8リットルを越えない。重さは、30kg程度とし、可搬形とする。

#### (4) 工作物の大きさ

円筒部品：直径10mm(当初15mm)、長さ50mm程度。角物部品：10mm×10mm(当初15mm×15mm)、50mm(長さ)程度とする。

#### (5)加工装置の工作精度

一般精密機械と同等以上の工作精度。ここでは、寸法精度は $1\mu\text{m}$ 、形状精度は同等以上、ただし最終工程では、真円度、円筒度は $0.1\mu\text{m}$ 程度とする。

#### (6)工具・工作物の取付け取外し

将来は自動とするが、今回の開発に当たり手による方式とする。

#### (7)制御方式等

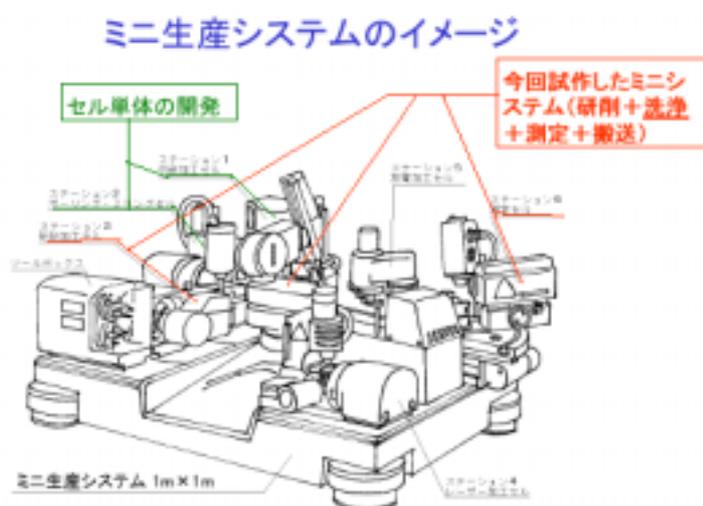
NC制御方式とする。また精度制御機能、位置検出用ミニセンサを開発する。

### 4.2 ミニ生産システムの基本概念

当初3年間で基本設計を行う予定であったが、途中で事業化という計画変更があり、実用的なミニ研削システムに変更した。当初の設計方針は、

#### (1)生産形態

多品種少量生産形態とする。システム構成では量産にも対応可能とする。すべての装置が、 $1\text{m}\times 1\text{m}$ に収まるものとする(下図参照)。



## (2) 全体の構成

各種のセルからなり、搬送装置を備える自動運転可能とする。

## (3) 生産品目

各種製品に用いられる部品の中で、手のひらサイズの大きさの部品に対応する。

## (4) トータルシステムの制御方式

各生産加工セルは独立で制御可能、システムにおいては階層構造方式の制御系とする。

## (5) 自動診断機能

将来的には考慮するが、今回は取り上げない。

ただし、実際には計画変更に伴い、ミニ研削システム以外についてはシステム化については途中で中止した。

## 5. 設計の考え方(とくに剛性)について

大きな工作機械の約1/5に縮小することで、剛性、とりわけ**静剛性**の低下が指摘された。確かに単純な縮小では、縮小比率だけ静剛性は低下する(もちろん加わる負荷は同じ場合)。一方、**動剛性**は縮小率に反比例して大きくなる。そこで、単純に縮小にはせずに、単純縮小では新しい構造設計にはならないので、負荷に合わせて強度を上げる設計、たとえば、負荷が加わる部分の長さを短くすること及び低重心化すること(いずれも0ベース設計であるが)を考慮した結果、梁部分の高さと幅はいずれも単純縮小にはならず、静剛性の低下の抑えることが出来た。また、切削力も工具などに拘束され一般の工作機械と比較すると小さく、自重による負荷も当然小さくなることにより、全体の静剛性は、十分切削に耐えうることが分かった。

逆に全体の質量が大きくなったことで、動剛性は目

標より低下したが、切削には十分耐えうる設計となっている。これらの結果は、各セルの設計製作後の剛性実験により確認された。

むしろ問題は、インタフェースの剛性低下であり、とりわけ工具及び工作物保持部分の剛性が低いことによる精度低下があったことで、今後の課題である。

もう一つの問題は、モータ出力の低下で、モータのサイズが小さくなると出力の低下が生じる。そのために、必要な動力を得るべく、設計上出来るだけ小さくするという要求に応えつつ必要最大限の出力の確保を図った。しかし、まだ十分ということとはできず、モータの小型化と高出力化の問題が残された。

## 6 . 開発の成果

ここで開発した結果について報告しよう。

### 6 . 1 機能要素の開発

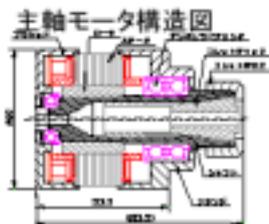
#### (1)小形高速主軸用モータ

機能要素として開発したモータは、小形高速主軸用モータである。工作機械主軸であるために、中空主軸であること、工具及び工作物とのインタフェースがあること(主軸端)であり、小型化を追求するために、ビルトイン形式をとった。一辺 200mm であるために、モータ自身の最大長さを 100mm 以下にする必要がある。この要求に応えられ、しかも高速回転(10,000rpm)の可能なモータは見当たらなかったため、開発することになった。

開発結果は、下図に示すように形状的には十分目標に達している。開発前に測定し設定した必要動力は確保できたが、少し不足したことが分かった。今後の開発には、所要動力を2

倍程度上げる必要がある。とはいえ、フライス削り及び連続切削には十分である。ただ、突っ切りには動力不足が見えた。工具取付けには、今回手締め方式をとったが、自動化に対しては、今後研究する必要がある。

### 小型主軸用モータの開発



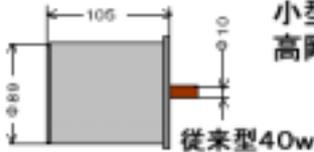
仕様	
種類	ブラシレスDCモータ
出力	30W
最高回転速度	10000min <sup>-1</sup>

#### 特徴

- ◆ビルトイン構造
- ◆φ15mmの中空軸とコレットチャックでの工具保持

#### 技術上のポイント

- ◆主軸前部に組み合わせアンギュラ玉軸受けの使用
- ◆圧鉄損傷板の使用
- ◆部品の高精度化



小型化、高剛性化

## (2) 位置決め小型センサー

光学式的位置決めセンサーは、光の発光部及び受光部の小型化を進め、同時にスケールの小型化を進めた結果、今まで透過方式であったスケールを反射方式とし、発光部及び受光部を一体にしたことで、かなりの小型化に成功した(下図参照)。

### 小型測長センサ

#### 特徴

- ・従来のオープンタイプ透過型スケール比較で 1/4の断面サイズ
- ・小型高分解能・高精度スケール(分解能:0.5μm)

#### 小型化のための技術

- ・オープンタイプスケールの選別  
読取部ガイド機構とカバー省略  
ガラススケールと読取部間隔の広い光学系開発
- ・反射型スケールの開発  
光学系が片側のみ  
新技術開発による新光学系
- ・小型化ガラススケール  
製造工程の変更
- ・ガラススケールの接着取付  
取付金具の省略  
スケールの割れない接着

#### 適用対象

- ・読取セル移動台およびミニフライス移動台位置制御用

従来型スケール

開発したスケール



この装置は、将来事業化を行う予定になっている。この装置は、ミニ切削加工セル及びミニフライスセルに搭載され、実用に供された。

## 6.2 ミニ生産加工セルの開発

### (1) ミニ切削加工セル

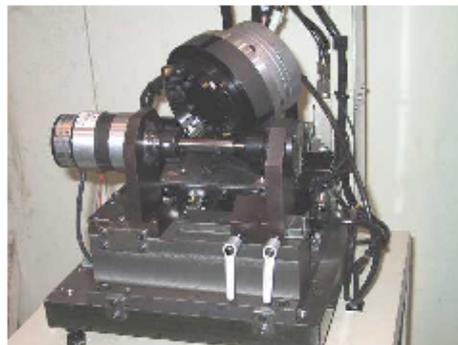
下図は、ミニ切削加工セルの概観である。十分な事前の検討がなされなかったにもかかわらず、ミニ化に成功している。ただ、全体的にアンバランスな箇所があり、今後検討する予定である。主軸モータを保持する部分の剛性低下が見られたので、この部分についても箱形構造にするなどの検討が必要である。剛性実験、精度検査及び切削実験が行われ、実用的に十分な結果が得られた。もちろん先に示した検討も必要であることも指摘された。また、このセルにおいて、各軸の駆動用モータに、十分な剛性を確保でき、小形化に適するサイズのものがなく、案内面、送り機構及びモータを含む案内機構の検討が必要であることも分かった。

### 旋削セル 仕様

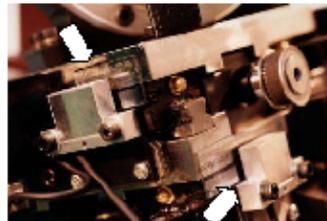
仕様	
ワークサイズ	φ15mm×50mm
加工能力	0.1mm×0.1mm/rev 切り込み×送り
主軸モータ	50Wビルドイン方式
回転数	400~10,000min <sup>-1</sup>
軸ストローク	X軸20mm, Z軸50mm
早送り速度	5000mm/min
刃物台割り出し	6位置任意近回り
工具	8mm角バイト
重量	25Kg

#### 小型化のための主な技術

- ・小型主軸モーター
- ・小型測長センサ



大きさ 250横×230奥行×248mm高



位置決め用  
小型測長センサ

### (2) ミニフライスセル

下図は、ミニフライスセルの概観である。図示のように、このセルもダウンサイジングに近い形状である。もちろ

ん、いろいろな箇所に小形化のための工夫が成されているが、コラム形式の工作物支持ユニットは、やはり音叉形の振動が発生しやすく、検討する必要がある。今後、再設計に当たりこの部分及び主軸台の構成についても検討することを考えている。



また、ミニフライセルはモジュール構成となっており、基本設計にあるように、一部の変更でミニ切削加工セルに変身できる構成になっている(下図参照)。切削実験、精度測定の結果、十分実用化に耐えうることが分かった。



### (3)ミニ研削セル

下図は、第2フェーズ(事業化向け)ミニ研削セルの概観である。光通信用小型部品のミニ研削システムを構成する外周研削加工用のミニ研削セルである。



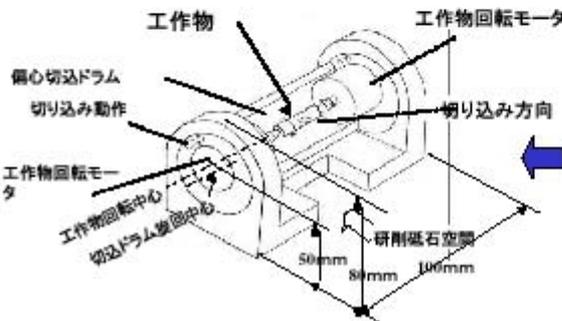
これには新しい形式の工作物支持装置及び切り込み装置(次図)を装着した。偏心機構による切込みを行う方式であり、直線運動を全く利用していない新しい設計(特

許出願中)で、外形寸法測定装置、テーパ補正機能なども備えた新しいミニ研削セルである。本体は、規定のサイズに収納できる大きさである。

### 偏心切込機構

**従来の円筒研削盤**

研削砥石スピンドルユニットが移動  
 工作物側へ切込み動作(ネジ送り等)  
 移動部の重量約200kg  
 研削点の高さ: 250mm



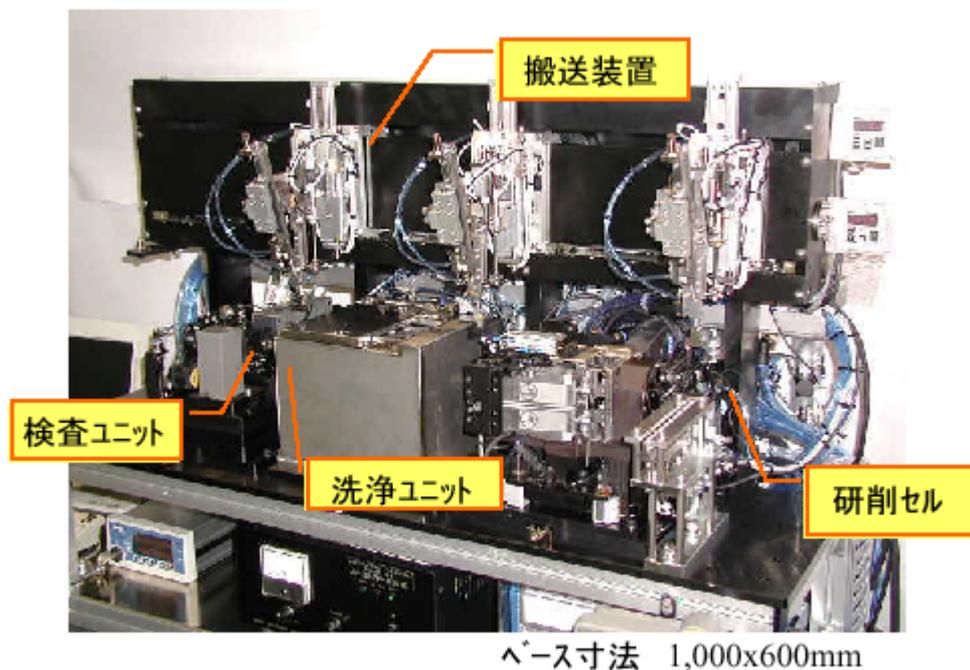
**偏心切込機構**

研削砥石スピンドルユニットは固定  
 工作物支持回転センタユニットはビルトインモータごと切込ドラムに組み込み  
 回転センタは切込ドラム中心から偏心  
 工作物は切込ドラムを中心に旋回切込  
 工作物回転と切込動作を一体ユニット化  
 研削点高さ: 50mm

### 6.3 開発した事業化システム

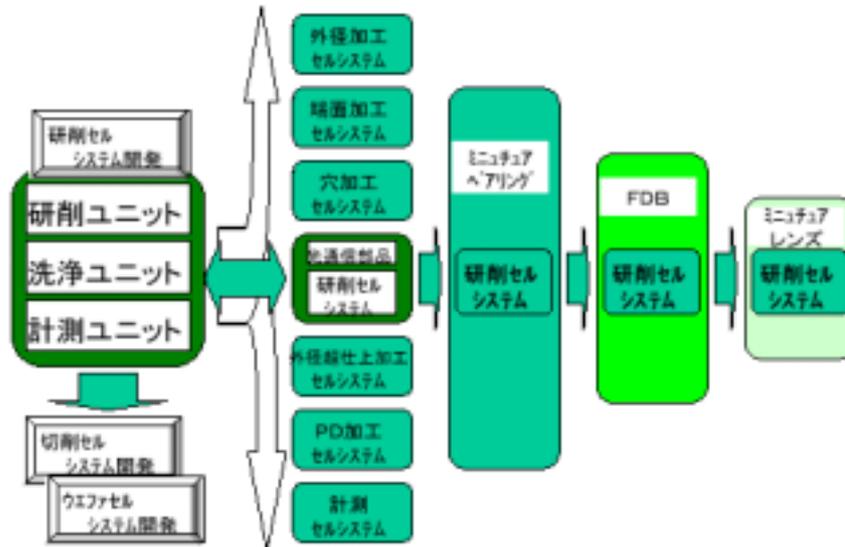
このプロジェクトの大きな課題である事業化を目指して、ミニ研削セルを中心に、洗浄ユニット及び検査ユニットからなるミニ検査システムの開発が行われた。今回開発したシステムは、プロトタイプであり、現在商品化のために設計変更中である。次図に概念図を示す。いずれのセル及びユニットは、規定の大きさに収まり、部品の搬送を加えて、一辺約1mの矩形の中に入るサイズのシステムである。

研削システム



システムの対応部品は、通信用小形部品を考えているが、将来はいろいろな部品に対応するべく検討している。次図にその適用範囲を示す。

## 他分野への応用・発展性



## 7. おわりに - 夢多き展望 -

1999年からこのプロジェクトに携わり、いろいろな開発を行いこの3月にプロジェクトが終了した。終了に当たり感想をまとめてみた。

今回開発したミニ生産加工セルは、当初の目標通りの大きさに収めることができた。新しい構想の機構部分も開発できた。しかし、まだ開発すべき課題も多い。とくに制御装置及び電気装置の小型化、配管・配線の省配線・配管化、自動化のためのいろいろな要素の開発などがある。しかし、各生産加工セルがかなり小形化でき、しかも実際に工作可能であることを考えると、今後の工作機械を含む加工装置の先駆となり、一つの方向を示した成果と考えている。

今後の展望を考えると、加工される工作物の大きさに最適な大きさの工作機械があるべきである、加工される工作物の大きさにより、最適な総合的エネルギー効率を持つ加工装置を今後検討する必要がある、世界に先駆けて新しいコンセプトの加工装置を開発するが日本の将来のためには重要な課題となり、これらの目標の実現させることが是非とも必要であろう。このコンセプトに沿ったものが、今回提案した小形の工作物に適したサイズのミニ生産加工セルの開発であった。提案のミニ生産加工セルとしてのミニ切削セル、ミニ研削セル及びミニフライス加工セルなどを含む加工装置のミニ化は実現したが、関連する付帯装置についてもミニ化を指向せねばならないと考えている。

基本的な大きさとして、一辺 200mm の立方体 (8 リットルの容積) に収納できることを目指した。その結果、ミニ生産加工セルの大きさはほぼ所定の大きさに収めることが出来た。しかし、新しい構想、つまりゼロベースからの構想によるセルの設計については、必ずしも十分ではなかったように思う。ダウンサイジングではない新しいミニの構想は、検討不十分であったといえる。また、さきに示したように、まだ開発すべき課題が多いことも事実である。とりわけ制御装置関係の小型化については、パソコン NC で一部成功したけれども、特定な用途につてのみ成功しただけであり、一般的な用途向きにはこれからである。

とは言っても、このように実際に機械加工の可能なミニ

生産加工セルの開発に成功したことは、今後の新しい加工装置の一つの方向を示したと信じている。今や世界はコンパクト化、あるいはダウンサイジング化に進んでいる。実用的なミニ生産システムが実現できれば、たとえば各家庭に数台のミニ生産加工セルからなるミニ工場を設置し、情報はインターネットを介して伝えられ、材料及び完成部品は宅急便などで配送するという家庭内工場を中心とする生産システムを構築することも可能になる。このことは、当然環境対応でなければならず、今回開発した夢工場は、この目的に十分適っていると考えている。地域振興を目指す今回の計画の目標が達成できると考える。

また、開発したミニ生産加工セル及びシステムの機能として、室内の壁面から天井までの空間を自由に利用できるという特徴をも備えており、省スペースにも役立つと考えている。このように、ミニ生産加工セル及びシステムは、いろいろな発展を可能にすると共に“ものづくり”に対するいろいろな夢の実現にも役立つものと考えている。