

論文の内容の要旨

論文題目 3次元微細形状を機械的に製作するマイクロファクトリの設計に関する研究

氏名 石井 和久

通常大の生産システムを、例えば 1/100 の大きさに実現する場合、設計寸法そのものが大きな制約となり、通常大の機構部品の流用が利かなくため、設計で用いる機構や全体の構造を変える必要がある。また、大きさ 1mm 以下と微小な被加工物を一品生産し、組立等の次工程に搬送するためには、例えば加工の監視や被加工物の搬送といった機能の追加が不可欠となる。本論文では、機械加工を用いた微細切削加工装置、微細部品のハンドリングシステム、およびマイクロ工作機械の設計・試作・試用を通して得た知見をフィードバックして、大きさ約 200mm 立方の切削加工を用いたマイクロファクトリを設計・製作した。また、本設計の思考過程と設計結果の評価とを通して、先導的なマイクロファクトリ設計に有効となる設計指針を提示した。

本論文では以下の 3 点を明らかにした。

1. マイクロファクトリの一般的な設計指針を提示した。

設計指針その 1：機能は同じでも機構は小形化に適したものをを用いる。

図 1 に切削加工を用いたマイクロファクトリ設計の思考過程を示す。本設計では、創造設計原理に基づき、3次元微細部品の製作のために本質的に必要となる機能要素の分析からはじめ、単位機能への分解、機構要素への写像、さらに構造への統合までの過程を通して、切削加工を用いたマイクロファクトリを製作した。そこで、寸法の小形化という制約条件のもと、必要となる機能を満たす機構を選択する場合、通常大の機械で用いられているものとは別の機構で、かつ小形化に適した機構を採用するとよいという指針を得た。また、図 1 の設計の単位機能を機構要素に写像する過程では、数ある機構の選択肢の中から、目標とするサイズへの小形化に適した機構を選択した。しかし、寸法の 1/100 の小形化という制約条件に拘泥するあまり、ボイスコイルモータのように通常大の機構でもエネルギー効率が低い、剛性が低い、発熱密度が高い、というような、予め制約条件で規定しないものを用いたので、小形化した時も、通常大の工作機械で用いられたものを仮に小形化して得られると想定した物性よりも小さい値しか得られず、対症的な送風による冷却や粘性体を用いたダンピングの付与などの措置を用いて補償しても不十分であった。

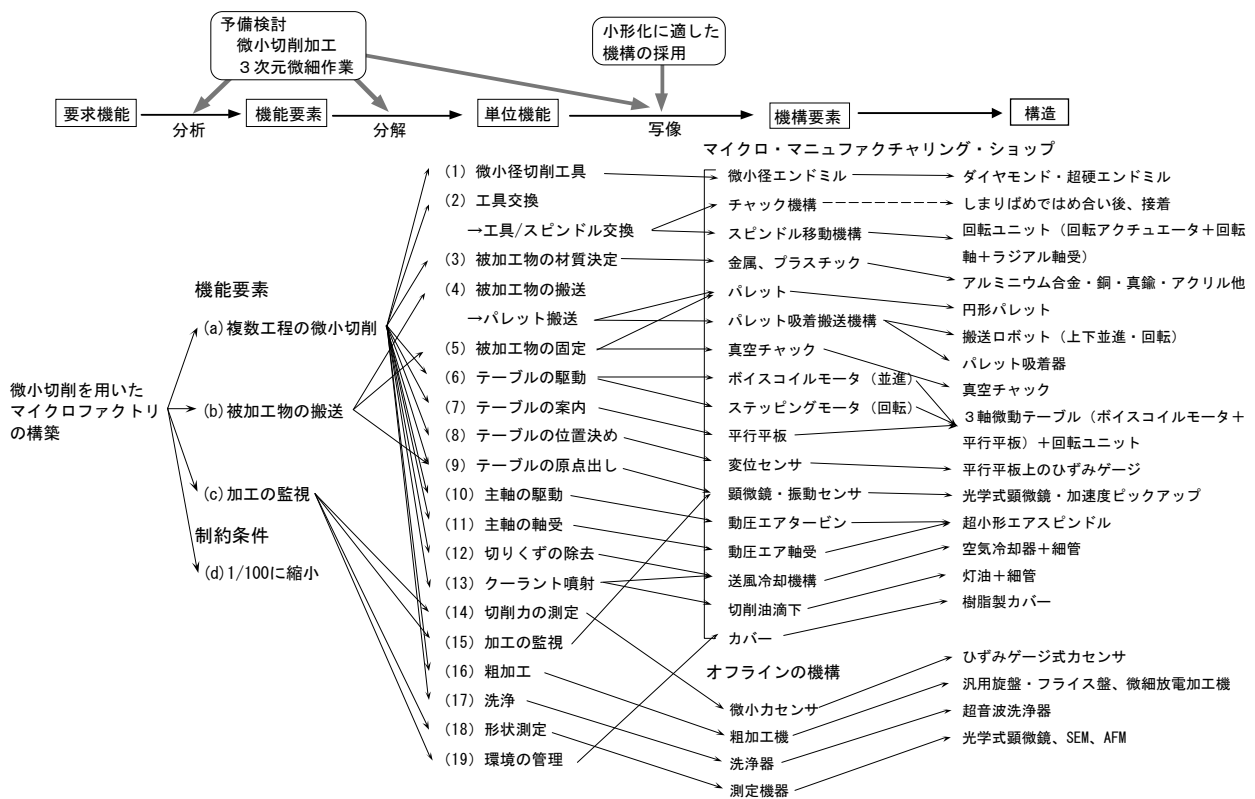


図1 切削加工を用いたマイクロファクトリ設計の思考過程

設計指針その2：小形化した機構を被加工物の周りに集中配置させる。

本設計において、機構要素を全体構造へと統合していく過程では、採用した小形の機構を、被加工物を中心とする空間に集中的に配置し、それぞれの機構が独立して中央の被加工物に働きかけられるようにする必要があります。

マイクロファクトリでは、大きさ 1mm 程度の被加工物に対して、切削加工やその前後工程を実現するための機構を周囲に集中配置することで、1回のチャックでより多くの機能を実現できるようにした。図2に設計・製作したマイクロ・マニファクチャリング・ショップの外観を示す。開発したマイクロファクトリのショップでは、縦形・横形マシニングユニット、搬送ロボット、および光学式顕微鏡を、中央部の被加工物を移動させるテーブルの四方に配することで、一辺 200mm の立方体の中に要求機能を満足する機構を収めることができた。しかし、いずれの機構も電源や制御機器までを含めたすべてを小形化した訳ではなく、小形化した部分は被加工物に働きかけるエンドエフェクタとその駆動機構までである。また、洗浄や形状測定機能のように、技術的には小形化が可能でも小形化しなかったものもある。これらは、開発コストや時間の制約にもよるが、操作に必要なコンピュータや加工の監視のためのテレビモニタは、操作者である人間が小さくならないため小形化できない。今後、システム全体の小形化をすすめるためには、人間の五感を必要とする作業を極力減らすべく、プロセスの完全な自動化とそれを小形の機構で可能にするための要素技術の開発が必要である。

設計指針その3：干渉設計による性能低下を無くすことが必要である。

生産システムの小型化設計においては、寸法上の制約があるなかで設計をすすめていく過程で、設計指針1：小型化に適した機構の採用や、設計指針2：小型化した機構の集中配置が有用であるが、これらの設計指針は干渉設計の要因となり、それが性能低下を引き起こす場合がある。したがって、設計・製作したシステムの評価では、設計方程式を用いて干渉設計を可視化し、それが各機能の性能低下の要因となったかどうかを分析する必要がある。図3に本設計の設計方程式を示す。たとえば、本システムでテーブルに用いた各機構は、単純な構造という意味では小型化に適した機構と言えるが、平行平板の変形に必要な弾性力がコイルの発熱の要因となり、この発熱が、変位計に用いたひずみゲージの変位ドリフトの要因となっていた。次の設計のためにはこの干渉設計の排除が必要となった。

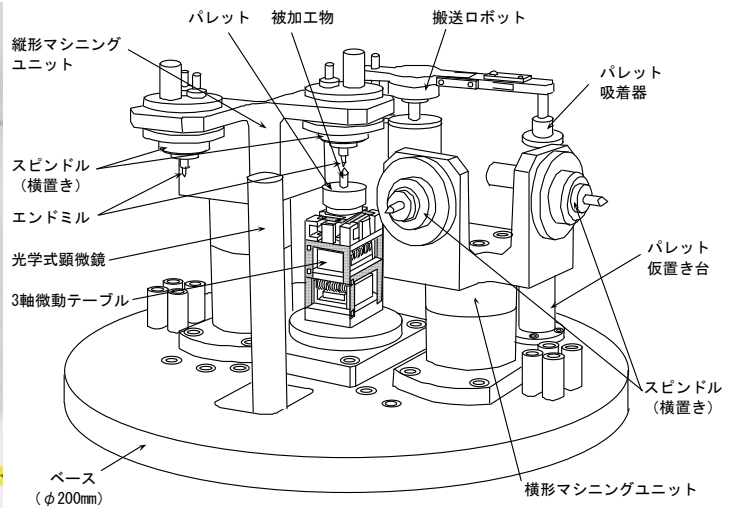


図2 マイクロ・マニュファクチャリング・ショップの外観

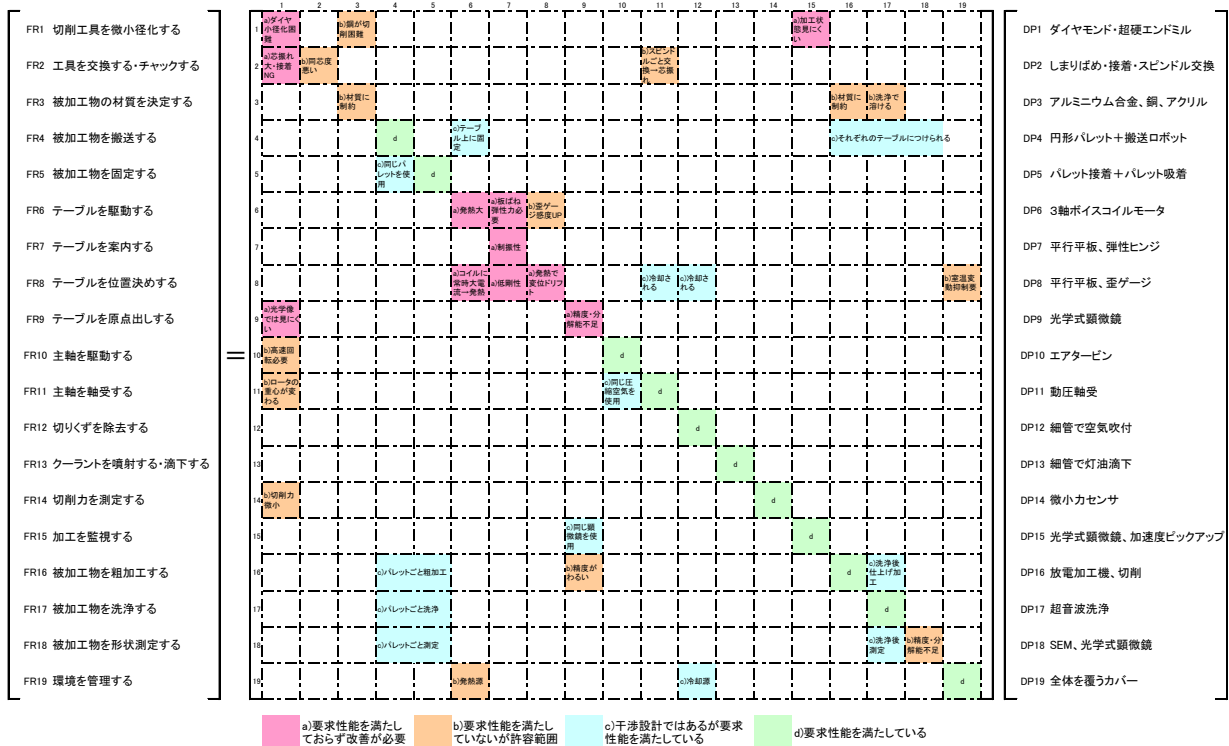


図3 マイクロファクトリの設計方程式

2. マイクロファクトリにおいて、工作機械による微小切削加工を用いると、上述の3次元微細部品が加工できる。

次の3つのもの、つまり、刃先が $0.1\mu\text{m}$ と鋭利なダイヤモンド工具、工具・被加工物間の $1\mu\text{m}$ と高精度の3次元相対運動を創生する機構、切り込み量 $1\mu\text{m}$ の微小切削に適した被削材、を用いることで、数 μm 程度の寸法精度を持つ3次元微細部品の製作が実現できた。たとえば、工具に直径 $300\mu\text{m}$ のダイヤモンドエンドミルや直径 $100\mu\text{m}$ の超硬エンドミルを、被加工物にアルミニウム合金やアクリルをそれぞれ用いて、大きさ $500\mu\text{m}$ 程度で加工精度が $5\mu\text{m}$ 程度の3次元微細部品を製作できた。

図4にマイクロファクトリで製作した3次元微細部品”マイクロポリゴンミラー”のSEM写真を示す。粗加工には微細放電加工を用い、仕上げ加工ではショップ内でダイヤモンドエンドミルを用いた切削加工を実施した。材質はアルミニウム合金で、対辺の長さは約 $200\mu\text{m}$ である。

3. マイクロファクトリでは生産システムとしての機能は全て満足できる。

微小切削で3次元微細部品を作る生産システムを構築するには、通常大の工作機械が持つ形状創成機能に加え、被加工物が微細なため加工の監視や前後工程への部品の搬送機能が不可欠である。そしてこれらを目標とする寸法内にすべて収めなければならない。本研究では、図1に示すように、はじめに通常大の2種類の微小切削加工の装置と3次元微細作業システムとの設計・試用の知見を通して、マイクロファクトリの機能を分析し、19の単位機能へと分解した。すなわち、(1)微小径切削工具、(2)工具交換、(3)被加工物材質、(4)被加工物の搬送、(5)被加工物の固定、(6)テーブルの駆動、(7)テーブルの案内、(8)テーブルの位置決め、(9)テーブルの原点出し、(10)主軸の駆動、(11)主軸の軸受、(12)切りくずの除去、(13)クーラント噴射、(14)切削力の測定、(15)加工の監視、(16)粗加工、(17)洗浄、(18)形状測定、および(19)環境の管理である。そして、機構要素へと写像する過程では各単位機能を小形化するもの(単位機能(1)～(13)、(15))と小形化しないもの(単位機能(14)、(16)～(19))とに分け、1/100の大きさに縮小することを制約条件にして機構を選択した。たとえば、回転駆動源に1辺20mm立方程度の超小形エアタービン、駆動にボイスコイルモータ、ガイドに平行平板、また変位計としてひずみゲージを用いた大きさ20×20×40mm³の3軸微動テーブル、回転軸と直動の空気圧シリンダー一体形の直径20mm、長さ150mmの2自由度アクチュエータ、などを用いることで、要求される機能と性能を満足する機構を通常の大工作機械に用いるものの1/100程度に小形化できた。そして、これらを統合して、約1/100の大きさのマイクロ工作機械と称するミリングマシンを試作した。このマイクロ工作機械の試作・試用を基にして、小形化した機構を被加工物周辺に集中配置した、マイクロ・マニファクチャリング・ショップを製作し、その制御機器や粗加工機、寸法測定機などからなるマイクロファクトリを構築した。この結果、19の機能が定性的にほぼ満足することがわかった。

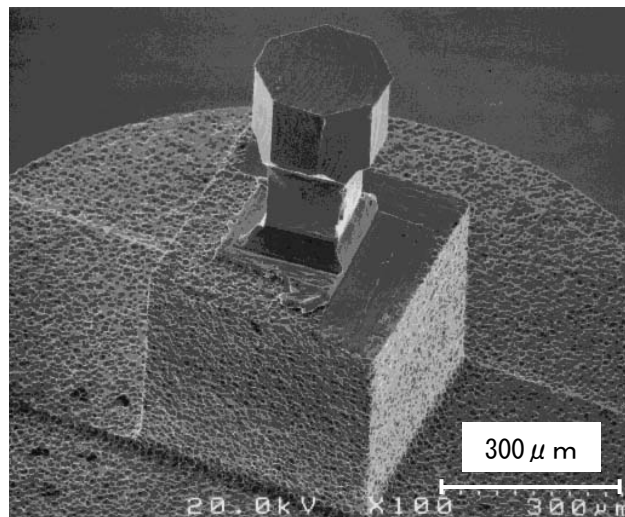


図4 マイクロファクトリで加工した3次元微細部品のSEM像