

審査の結果の要旨

氏名 石井和久

本論文は、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をまとめたものである。

第1章、第2章、第3章では、マイクロファクトリの必要性とその一般的な設計指針を3点提示した。

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。

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設計した。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べきである、という指針を得た。たとえば、本研究ではテーブル駆動のためにボイスコイルモータ、テーブル位置測定のために歪ゲージを用いた。しかし、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、熱の発散性が低い物性の機構を用いると、たとえ小形化が達成できても、通常大の工作機械で用いられる誘導モータの物性から相似則で想定した物性よりもさらに低い値しか得られない。本研究では対症的に、送風による冷却や粘性体を用いたダンピング、などの措置を用いて補償したが、物性は不十分であった。

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。

本設計では、機構要素を全体構造へと統合していく過程において、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べきである、という指針を得た。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し、1回のチャックでより多くの機能が実現できた。

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。

生産システムの小形化設計において、寸法上の制約があるなかで設計をすすめていくと、設計指針1：小形化に適した機構の採用や、設計指針2：小形化した機構の集中配置が有用であるが、これらの設計指針が干渉設計の要因となり、干渉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、干渉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。たとえば、本研究でテーブル駆動に用いた機構は、組立・加工しやすく小形化に適した機構であるが、平行平板の変形に必要な弾性力に抗するためにボイスコイルモータは常時オンとせざるを得ず、コイルが発熱し、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た。ボイスコイルモータがテーブル位置測定の要求機能に干渉したのである。

第4章では、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ことを明らかにした。

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用い、また被加工物にアルミニウム合金やアクリルを用いて、大きさが $500\mu\text{m}$ 程度の形状で加工精度が $5\mu\text{m}$ 程度の3次元微細部品を製作できた。

さらに第5章、第6章、第7章では、マイクロファクトリを構築し、生産システムとしての機能は全て満足できることや、その他の小形化製造装置にもその設計指針が適用できることなどを明らかにした。

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。本研究では、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)微小径工具による切削、(2)工具交換、(3)被加工物への微小切り込み、(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、テーブルの駆動にボイスコイルモータ、テーブルのガイドに平行平板、またテーブル位置測定の変位計にひずみゲージをそれぞれ用いた大きさ $20\times 20\times 40\text{mm}^3$ 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規模工作機械に用いるものの $1/100$ 程度に小形化できた。これらを直径 200mm の面積内に統合して、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。

本論文は工学的・工業的に非常に有用であり、よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。