

## 超精密加工の最前線と技術・技能の伝承

株式会社 マルター 田島 琢二

### 1. 超精密加工

#### 1.1 超精密加工の現状

IT産業の中核を担うLSIに代表される半導体の応用製品、携帯電話や高性能家電の構成部品には高精度加工を要求される部品が多々ある。部品加工における代表的除去加工は、切削と研削加工であるが、いずれの方法においても現状の最高到達表面粗さは、ナノメートル（ $1\text{ nm} = 0.001\text{ }\mu\text{ m}$ ）の領域である。

切削加工適用例ではコンピュータ用メモリーディスクの基板加工，レーザープリンタ用ポリゴンミラーや反射ミラー，回折格子や液晶パネルの導光板等，いずれも単結晶ダイヤモンドを用いた鏡面加工が実施されている。また，研削加工においても，従来はラッピングやポリシングにてのみ達成可能であった各種光学部品，非球面レンズ用金型等の仕上加工がサブミクロン粒径の固定砥粒（砥石）を用いた研削加工により実現され，生産性の向上に大いに寄与している。

#### 1.2 超精密切削加工の変遷

超精密切削加工の代表例としてコンピュータ用メモリーディスク基板の加工の変遷について述べる。ハードディスクメモリー（以下HDM）の基板に対し，高精度な表面が要求される理由を以下に述べる。図1に示すように，HDMの情報の書込み／読取りを行っている磁気ヘッド（小さな電磁石）は，情報のダメージを防止するため，空気軸受の原理に従い，ディスク表面上に一定の間隙を保持して浮かんでいる。この

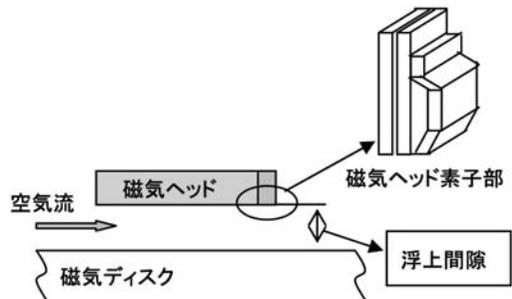


図1 磁気ヘッド浮上イメージ

浮かんでいる電磁石のもれ磁束によりディスク表面の磁性媒体を磁化し小さなNS or SNの磁石を形成し1 or 0のデジタル記録を行っている。もし，この浮上間隙にバラツキがあると情報信号のレベルのバラツキとなり，極端には情報のやり取りが不能となる。従って，ディスク表面の粗さ（微小な凹凸）は浮上量に対応した高精度な表面粗さが要求される事となる。具体的には，開発当初は， $0.1\text{ }\mu\text{ mRa}$  オーダあったが，現在（2010年）は， $1\text{ nmRa}$ 以下と言う，非常に高精度な要求に至っている。

また，この間隙が大きいと，情報のやり取りを行うもれ磁束も大きくせざるを得なくなり，1 or 0の1個のデータの面積も大きくなる。従って，HDM開発当初から今日まで，限られたディスクの面積の中に如何に沢山の情報を入れるか，即ち，ヘッド浮上間隙を如何に小さくできるか，強いては，ディスク表面粗さを如何に高精度に仕上げるかと言う努力が行われてきたし，今日でも継続されている。浮上間隙に付いては，図2に示すように，1950年代開発当初は

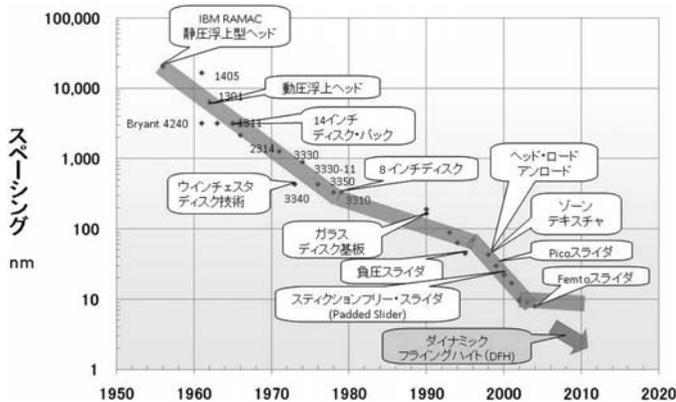


図2 ヘッドディスク間スペースング/浮上量の変遷(出典: IDEMA JAPAN)

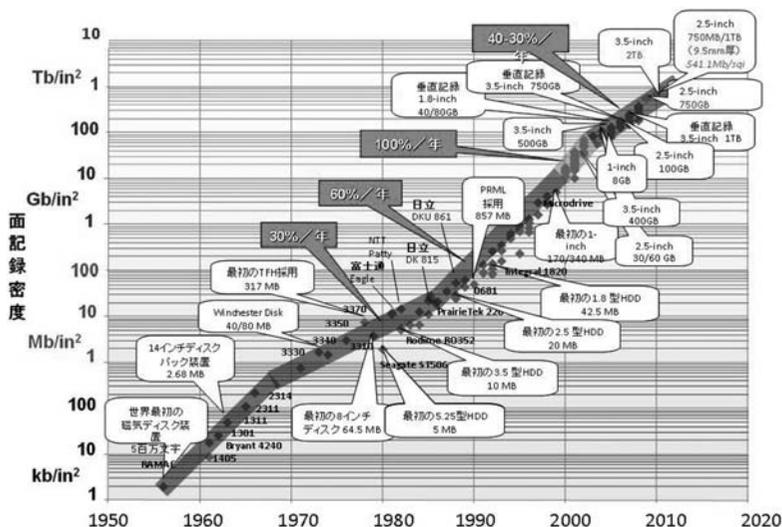


図3 HDD面記録密度の進化(出典: IDEMA JAPAN)

20  $\mu\text{m}$ 程度であったものが、2010年には10nm (0.010  $\mu\text{m}$ ) 以下となり、また、単位面積当たりの記録情報量は、図3に示すように、2 Kbit/in<sup>2</sup>から700Gbit/in<sup>2</sup>へと約3億倍となった。結果として、HDMの小型化、大容量化が可能となった訳である。

## 2. 超精密加工機械の開発

### 2.1 超精密加工システム

前述の如き高精度加工に必要とされる機械は、いわゆる超精密加工機であるが、超精密加工とは、高精度な加工機械があれば即達成可能な訳ではなく、他の種々の要因を含んでいる。すなわち超精密加工とは、図4に示す如き一種のシ

ステムであると考えるべきである。

このシステムの構成要素のどこか一箇所でもネックがあると、最終目標達成は不可能となる。すなわち全ての構成要素を同じレベルで向上させる必要がある。しかしながら、このシステム中大きなウェートを占めるのは、加工機械（超精密加工機）であり、以下に超精密加工機の具現化のポイントについて述べる。

### 2.2 超精密加工機

高精度加工の実現は、加工機械の精度を加工対象物に反映させる運動精度転写形式と、加工力を制御する力転写形式（ラッピングやポリシング等）に分類される。加工機械による超精密

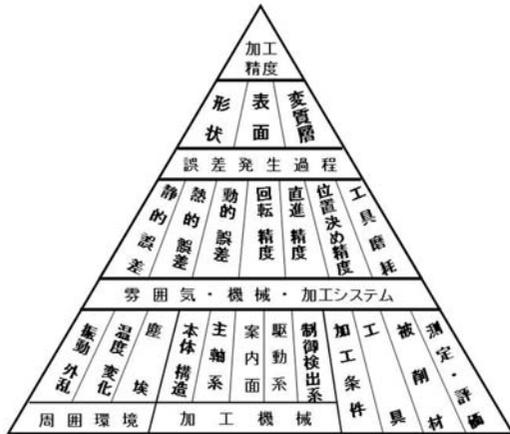


図4 超精密加工システム要因ピラミッド

加工は、運動精度転写形式の方法である事から、加工部品の高精度化は、加工機の運動精度の向上に帰着する。

加工速度を与える回転体（例えば、旋盤における主軸）や送り速度を与える直線運動体をいかにして誤差を極小にして運動させるかがポイントとなる。回転運動でも直線運動でも要求される運動方向以外の方向を拘束する軸受により、その精度の大半は決定されると言っても過言ではない。

表1に、軸受の形式とその性能に付き定性的比較を示す。

超精密加工機にとって、最重要項目は精度であるので、表に示すように、選択されるべき軸受は空気或いは油の静圧軸受である。

結論的に、近年の大半の超精密加工機械の回

項目	形式		空気軸受		油 軸受		ころがり軸受
	動	静	動	静	動	静	
回転精度	○	◎	○	◎	○	◎	△
負荷容量	×	○	○	◎	○	◎	◎
剛性	×	○	○	◎	○	◎	◎
減衰能	△	△	◎	◎	◎	◎	×
高速回転	○	◎	×	△	△	△	△
駆動力(発熱)	○	◎	×	△	△	△	○
軸心制御	×	○	×	◎	◎	◎	×
加工難易	×	×	○	○	○	○	○
保守	○	△	○	○	○	○	○
寿命	○	◎	○	◎	◎	◎	×
価格	単	×	×	○	○	○	◎
	補機	◎	×	○	×	×	◎

◎:優 ○:良 △:普通 ×:劣る

表1 軸受形式とその性能比較

回転軸受及び直線運動ガイドには、空気軸受（作動流体として空気を用いたすべり軸受）が採用されている。開発当初、空気軸受は、空気の粘性係数が油等の液体に比べ極めて小さい（油の約1/1000）ことから、加工変動力を受ける工作機械には不適（機械の振動抑制能力が低く、所謂ビビリ振動が発生して加工不能となる）と考えられていた。しかしながら、近年のコンピュータ数値解析により、機械の動剛性解析が高精度に可能となり、理論的に適用可能と判断されるに至り、応用が急速に展開された。ただ、高精度で且つ比較的高負荷容量を要求される平面研削盤、或いは円筒研削盤においては、設計許容範囲の広い油静圧軸受が採用されているケースも見うけられるが、前述のように粘性係数が高いことが、発熱に繋がることから、採用に当たっては、充分なる設計検討が必要である。

加工機械の運動高精度化の第一ステップは、高精度な性能を有する軸受を高精度に製作することであるが、例えば、実際に回転運動を行う主軸に、外乱振動を与えること無く、必要トルクのみを伝達する駆動系の構築は、第二ステップとも言える大きな課題である。

表2に、各種駆動形式の問題点とその対応策を示す。

何れの形式においても、それぞれ問題点があり、これがベストと断言できる形式は無いが、敢えて私見を述べさせていただくならば、ビルトインモータ形式が、最も高い潜在性能を有していると考えられる。結果的に、現在達成されている回転体の振れ精度は0.01 $\mu$ m以下である。

直線運動の高精度化についても、案内形式の選択は、回転運動と同様であり、結果的に、大半の超精密機械においては、空気或いは油の静圧案内方式が採用されている。しかしながら、直線運動駆動に関しては、特有の課題があり、その克服策に付き以下に述べる。

一般に、直線運動駆動力伝達要素として広く

形 式	問 題 点	対 策
ビルトイン モータ	1.モータの発熱 2.磁気振動 1) 磁束密度のばらつき 2) ロータとステータの偏芯	1.冷却 2. 1) 巻線の適正化 2) 加工組立精度向上
カップ リング	1.駆動軸被駆動軸の芯ずれ 2.モータの機械本体への振動	1.加工組立精度向上 2.防振ゴム、モータ別置き
ベルト	1.ベルトの張力変動と振動  2.モータの振動	1.ベルト両面研磨 シームレス平ベルト 高精度プーリ軸併用 2.機械本体とモータ別置き
エア タービン	1.扇動トルク小 2.振動及び騒音	1.タービン大径化 2.排気に消音器

表2 各種駆動形式の問題点と対応策

用いられているのはネジである。一言でネジと言っても種々の形式があるが、この要素には、共通する運動精度を阻害する要因がある。

- 1 ネジの通りと案内の平行誤差
  - 2 ネジの振れ回り(ネジの曲がり精度も含む)
- これらの阻害要因を克服する手法を、次に述べる。

- 1 ナットと移動体のフレキシブル締結
    - 1) 板バネ応用方式
    - 2) 静圧軸受カップリング
  - 2 静圧ネジ(理想ネジ歯形は矩形)
  - 3 リニアモータ(高速送りに適しているが、コイルの発熱対策は必須)
- これらの対策を実施した結果、現在その案内

精度は、 $0.2\mu\text{m}/200\text{mm}$ 以下が達成されている。

以上、超精密機械に特有な、運動の高精度化技術について述べた。

超精密加工の具現化にとっては、運動の高精度化のみならず、他に種々の要因があることは、図1にて述べた通りである。それらの要因を一つずつ克服して構築された現在の超精密加工機の一例を図5に示す。本機は、静圧空気軸受を採用した高精度砥石軸とワーク軸を水平対向に配置し、カップ型砥石を用いてインフィード切込みにより研削を行う機械形態とした。また、砥石軸とワーク軸は共に静圧空気案内でガイドされた移動テーブル(Z軸、X軸)上に配置され、超精密ラップネジ、超高精度のエンコーダの採用により、10nm分解能の微細位置決めの実現した。

さらに、ワーク軸とX軸テーブルの間に超磁歪素子(アクチチュエータ)と弾性変形プレートを組み合わせた1nm分解能超微細送り機構と、秒オーダーのアライメント調整機構を配置し、鏡面加工と高平坦度加工を可能としている。また、これらの超高精度ユニットを支える本体ベッドには、剛体に近い石定盤を採用し複雑な振動モ

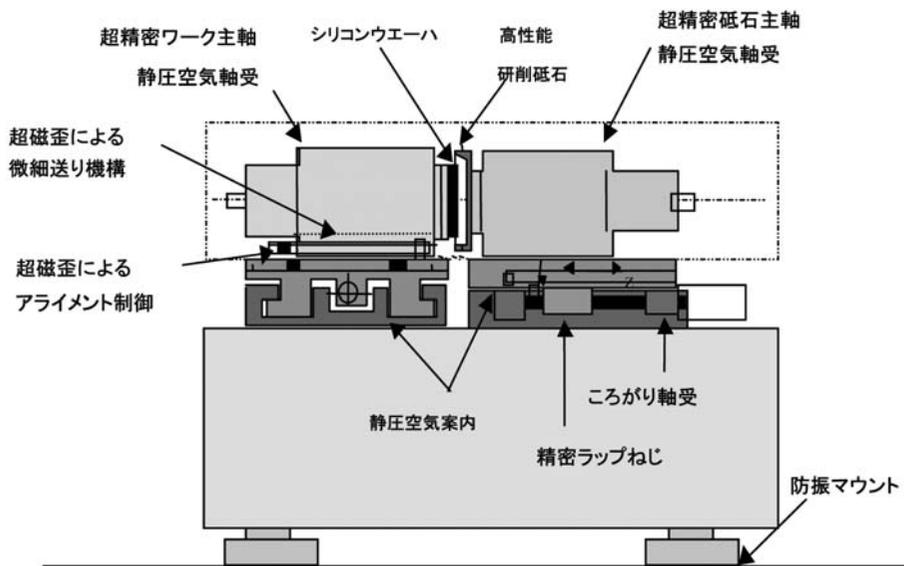


図5 超精密加工機の概略構造

ードの要因を避ける構造とすると共に、下部には防振エアマウントを配置し、地盤からの振動を吸収して安定した超精密加工実現への配慮を行った。この結果、本機によるシリコンウエハの加工例では、極めて高いレベルの表面粗さ0.59nmRaを達成した。

### 3. 技術・技能の伝承

超高精度加工機の加工方式は機械の運動精度を反映させる運動精度転写形式であることは前に述べた。すなわち使用する機械の精度により加工された部品の精度が決定されることから、工作機械はものづくり産業のマザーマシンと言われている。しからば、現在存在する高精度加工機を用いて部品を加工し、それよりもさらに高精度な機械を構築するには如何になすべきか。マザーマシンを上回る精度のマザーマシンを構築するには、如何になすべきか。

これを解決するのが、人間の知恵と技(ワザ)である。技術者(エンジニア)の知恵(コンピュータ解析やシミュレーション, 工学理論に基づく創意工夫)と技能者(テクニシャン)のワザが合致したとき、はじめて従来の精度の壁を超えることが可能となる。

技術者の技術伝承については、過去の文献による伝承や工学理論を学び、さらに本人の経験と努力により、かなり積み上げが可能ではないかと考えられるが、技能者の技の伝承はそう単純ではない。もちろん先輩より残された手順書、或いは、VTR等による視覚教材により、初歩的段階をクリアするのは可能と思われるが、高度な優れた技を体得するには、ある種の感性が求められる。

感性に溢れた若い時に、適切な指導者による適切な頃合いでの感覚的伝承が不可欠である。適切な指導者とは、言うまでも無く、匠といわれる熟練技能者であるが、技能習得の重要なポイントは、適切な頃合いにあるらしい。ある種の適性を有する者が、基礎的段階をクリアした

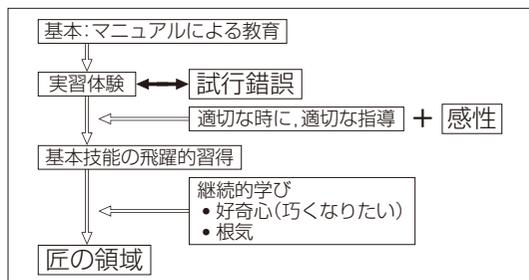


図6 技能(ワザ)の習得

後、次のレベルへ向上する過程は飛躍的であると言われている。手順書により技の骨格を理解し、それを実践しても、匠の領域からは程遠い。しかし、根気と上手になりたいと言う好奇心の旺盛な若者は、少しでもその領域に近づこうとして試行錯誤を繰り返す。この試行錯誤の過程が極めて重要であり、また、その過程を陰ながらに見ていて、極めて適切な頃合いに“一寸した指導(ヒント)を与えてくれることが重要である”と筆者が過去に一緒に仕事をしたある匠は語っていた。粘り強い試行錯誤の過程があったればこそ、一寸した感覚的(手順書には書き表す事のできない)ヒントで飛躍的に向上した技を体得できたのである。その後は、本人の努力次第で、5~10年の歳月を経て、匠と言われる領域へ近づいて行くものらしい。

以上述べた内容を、図6に示す。育成の参考としていただきたい。

「玉磨かざれば光らず」とは、周知のことであるが、感性に裏打ちされた技能の玉は、粘り強く磨くことにより益々光り、輝きを増すと同時に、その大きさも増大するものらしい。

これまで以上に知的付加価値の高い、創造性豊かなものづくりが、これからの日本の目指すべきものであるとするならば、より優れた人材の育成と、技術・技能の伝承は不可欠と思われる。今日まで日本のものづくりを支えてきた団塊の世代が、完全にリタイヤしてしまう前に、効果的に引き継ぐべきシステム作りが急務と考える。