

# 超精密加工用エアスピンドルの開発

*Development of Air Spindles for  
Ultra Precision Machining.*

## キーワード

空気軸受, エアスピンドル, 超精密加工, 回転精度,  
低熱膨張材, グラファイト, シリコンウエハ,  
シリコンインゴット

工作機ロボット製造所  
精機技術部  
技術課  
川上隆一

## 1. はじめに

工作機械にエアスピンドルが用いられるようになって約20年が経過した。当初物珍しくそしていかがわしく見られたエアスピンドルも現在ではすっかり定着し、超精密加工用の機械要素として常識的なものとなっている。

エアスピンドルの持つ特性は超精密加工用のスピンドルとしては理想に近いものであり、その実用化研究は随所で積極的に行われた。しかし当然のことながら加工はスピンドルの精度だけで決まるものではなく、エアスピンドルの性能を引出すためには機械においては精度・剛性・振動特性などの向上が必要であり、さらに工具や材料、加工技術、計測技術、環境などの周辺技術の進歩も必要であった。そのため当初は空気軸受の欠点だけが目立つ結果となったことも多い。

本当にエアスピンドルの性能を引出すことが可能となったのは最近の10年であり、硬脆材料の精密加工や、アルミニウム合金や無酸化銅などの軟質金属の鏡面切削が、その性能を示す場となった。

空気軸受は確かに他の軸受には見られない優れた性能を持つが、汎用軸受としてころがり軸受のようにどこへでも適用できるものではなく、その性能を引き出すためには充分な検討が必要なことは今でも変わらない。超高速、超精密、長寿命あるいは熱的安定性など従来のころがり軸受では満足できない特別に厳しい要求にたいしてこそ空気軸受の特長を引き出すことができる。

空気軸受も流体潤滑軸受の一種であるから動圧型と静圧型があるが、外部から加圧空気を軸受面に供給する静圧型の方が負荷容量・剛性が大きく取れるので工作機械用には静圧方式が用いられる。ここでは静圧型空気軸受スピンドルを略してエアスピンドルと呼ぶことにする。

本報では当社のエアスピンドルのうち代表的なものを取り上げ、設計の考え方、構造、特長などについて述べてみたいと思う。

その前にまず、空気軸受の特長について簡単にまとめておく。

### (1) 回転精度が高い

軸は空気膜によって軸受から完全に浮上しており、この空気膜によって部品精度が平均化されるため高い回転精度が比較的容易に得られる。

### (2) 摩擦抵抗が小さい

これは、作動流体である空気の粘性がきわめて低いことによる。このため軸受の発熱が小さく、高速回転も容易である。

(3) 清浄運転が可能

潤滑剤が空気のためワーク・環境を汚染することがない。潤滑剤（空気）の回収が不要であり、シールも簡単になる。

(4) 精度寿命が長い

浮上しているため摩耗部分がなく、初期精度を長く維持できる。給気系の管理が適切であれば寿命は半永久的である。

空気軸受の特長として、このほかにも挙げられる項目があるが、工作機械への用途には直接関係ないのでここでは割愛する。

## 2. 非球面加工機用エアスピンドル

超精密加工とは、アルミニウム合金を単結晶ダイヤモンドバイトを用いて鏡面に切削加工することと考えられていた時期があった。不二越では当時すでにエアスピンドルだけでなく静圧油スライド、静圧油ねじの開発も終えており、これら静圧軸受の超精密加工への応用が始まっていた。

すべての摺動部に静圧軸受を適用して工作機械の運動精度を極限にまで高め、それを正確に加工物に転写する。ポリゴンミラー専用加工機はこのような設計思想に基づいて開発されたが、これはまさしくフランクリン研究所のRUNBARGERらの提唱した“夢の工作機械”であった。この設計思想をさらに押し進め、ディスク加工機、ドラム加工機、そして究極の超精密加工機である非球面加工機の開発へと進んでいった。

静圧軸受は、回転精度や真直精度が優れているというだけでなく、がたや不感帯がなく軽負荷の状態から反応するという特性を持ち、これが微小加工を可能としている。つ

まり、止まっていて欲しい方向には止まっており、動いて欲しい方向には確実に動く、という基本的な機能がかなり小さい負荷の状態から適切に働くのである。

図1は非球面加工機用のワークスピンドルである。ポリゴンミラー加工機用に開発したスピンドルがベースとなっているが、非球面加工機ではすべての摺動部が接触部を持たないことをさらに押し進めた設計となっているため、スピンドルも当然接触部を持たないように検討された。つまり、モータをビルトインとし、さらに、真空用の回転継手も空気軸受を応用して非接触に構成している。

本図は誘導モータをビルトインしたもので、1000rpm付近で最も優れた性能を示す。しかし、低速回転が難しく50rpmが下限である。研削用途にはさらに低速回転が求められるため、この場合はACサーボモータをビルトインしている。

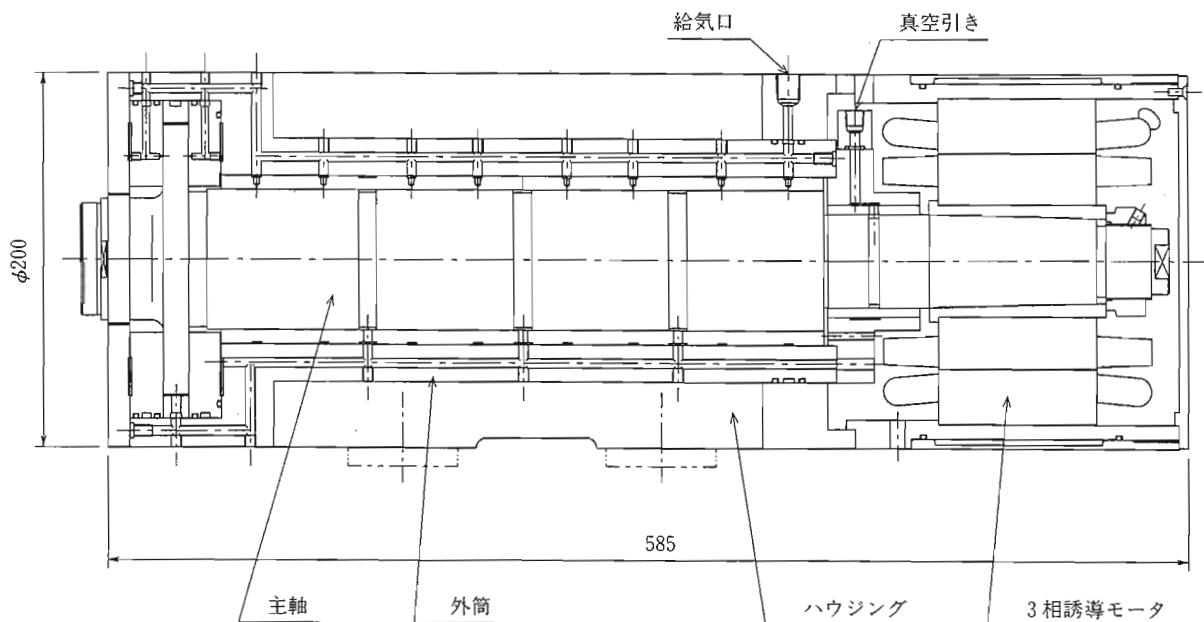


図1. ARC1148M5 主要寸法

## 2.1 モータ起因の振動

スピンドルの回転精度はその駆動方法によって大きく影響を受ける。モータによる駆動法に限っても、ベルトを介したモータ駆動、カップリングを介したモータ駆動、ビルトイン形式のモータ駆動などがある。

しかし、ベルトやカップリングを介した場合、駆動系が大型となり、また駆動側の持つ振動や駆動側と被駆動側とのミスアライメントによる擾乱も同時に伝達されてしまうという欠点がある。特に問題なのはモータや中間軸に用いられる転がり軸受で、回転非同期の振動や長周期のうなりの発生源となり、その対策は非常に難しくなる。モータや中間軸まで静圧化することは可能であるが、駆動系がさらに大型化するため適用範囲は限られてしまう。

モータをビルトインする方式は、構造が単純でコンパクトとなり、ベルトや転がり軸受などの振動源を抱えないという点で有利である。超精密用の駆動方法としては最も適していると考ええる。

モータをビルトインした場合は、当然モータの影響がそのままスピンドルの回転精度に現われることになり、モータの選定・組付けが非常に重要となる。モータの発生する振動と対策方法について事前に十分検討しておく必要がある。当社の非球面加工機では誘導モータをビルトインすることが多いが、誘導モータからは表1に示す振動が発生する。この振動が加工面に現われた例を図2に示す。この例

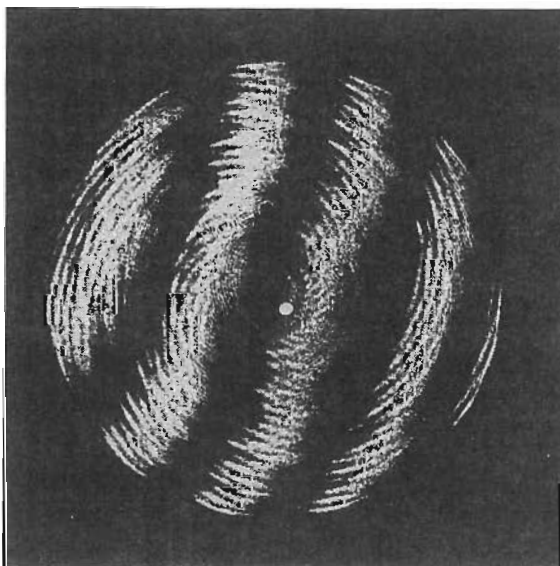
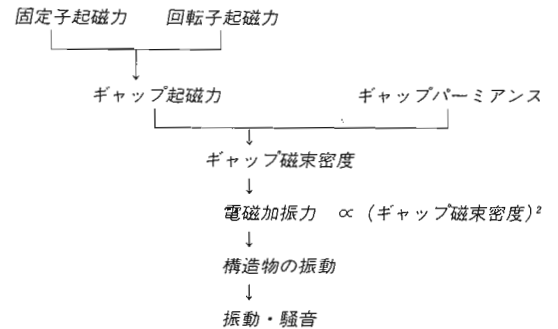
では、溝高調波によるもの（外周から右回りで中心へ向かうスパイラル）とギャップアンバランスによるもの（外周から左回りで中心へ向かうスパイラル）とが重なって現れている。これらの振動の大きさは電圧（磁束密度）に比例しており電圧を低くしていけば影響は小さくできるが、溝高調波などはモータ設計の時点で解決すべき問題である。

表1. モータ起因の振動（三相誘導モータ）

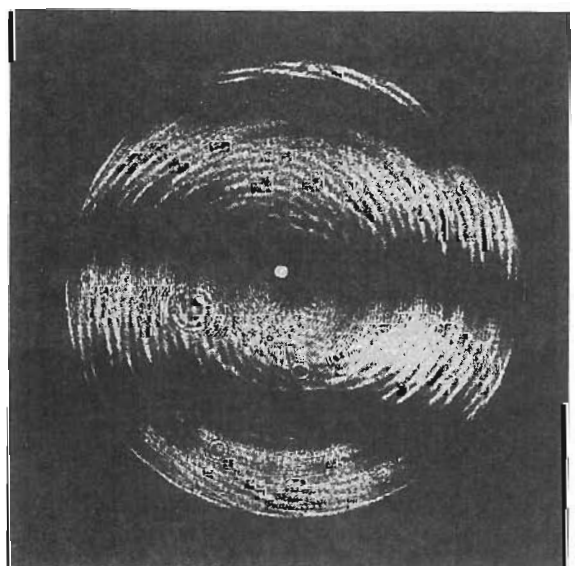
要因	周波数	倍波
不平衡電源	$2 \cdot f_1$	$p$
二次回路不平衡 (バー切れ)	$f_1 \pm 2 \cdot S \cdot f_1 (2 \cdot f_1)$	$(p)$
ギャップアンバランス (ステータが回転中心に対して偏心)	$2 \cdot f_1$	$p$
回転子の曲がり・偏心 (ギャップアンバランスが回転と共に変化する)	$2 \cdot f_1 / p$ $2 \cdot f_1 (l \pm 1 / p)$	$l$ $p \pm l$
溝高調波	$2 \cdot f_1 \cdot \{Nr \cdot (l-S) / p + n\}$	$Nr \cdot (l-S) + p \cdot n$

ここで、 $f_1$ :基本波成分,  $Nr$ :回転子の溝数,  $p$ :極数,  $S$ :スリップ,  $n$ :整数 ( $\dots, -1, 0, +1, \dots$ )

### 振動発生メカニズム



凹球面切削  
ワーク径  $\phi 50$   
曲率半径 R50



FUJINON FA-05による測定結果

右回りのスパイラルが強く現われているが、左回りのものも重なっている。

図2. 加工例

## 2.2 軸受自身が発生する振動

空気軸受の振動というと通常はニューマチックハンマや自励ホワールなどを言うが、超精密加工用のスピンドルではこのような振動は発生しないように設計されており、ここでは考えない。ここで問題としたいのは、回転数に同期した高調波である。

エアスピンドルの回転精度を周波数成分で見た場合、ころがり軸受のように回転数の分数倍の成分やバンドスペクトルを含まず、回転数の整数倍の成分しか含まないという特徴を持つ。これが、空気軸受の優れた回転精度を示す一つの表現方法であり、非常に素直な、単純な回転を示している。

回転数の整数倍の成分を含むということは、回転中心から離れた点の軌跡が円ではなく、多角形(の重なったもの)となるということであり、整数倍成分の大ききでスピンドルの回転精度を表現することができる。

整数倍成分は軸の形状精度が原因であることは明らかである。そしてそれが軸・軸受系の共振点に乗り上げた場合、空気軸受が発生する振動を空気軸受で増幅することになり、対策が非常に難しくなる。共振点を避けて使用することが原則であるが、空気軸受の共振点は広い裾野を持ち、他の共振点も多数存在するため、整数倍波が共振点に乗り上げないように回転数を選ぶことが難しくなる。特に低速になるほどスピンドルに要求される回転精度は厳しいものとなる。

高精度なスピンドルとするには整数倍成分を低減することが必要であり、そのためには軸の形状精度を上げることが必要となるが、問題はどこまで精度を上げればよいのか、軸の形状精度とスピンドルの回転精度とにはどのような量的な対応があるかである。従来、空気軸受の平均化効果という言い方で、軸の形状精度よりも良い回転精度が得られる(1/10程度に小さくなる)と言われてきた。しかし、その理論的な根拠がどこにあったのか筆者は知らない。

非球面加工機用のスピンドルと関るようになって、加工面からもスピンドルの回転精度についての情報が得られるようになった。その結果、やはり空気軸受においても軸の形状精度は重要であり、平均化効果に過剰に期待するべきではないと考えるようになった。

## 2.3 軸の形状精度とスピンドルの回転精度

ここで軸の形状精度とスピンドルの回転精度との関係について少し考えてみたい。

軸が形状誤差を持つ場合、回転角(軸と軸受の組合せ位相)によって軸受すきまの分布が異なるため、すきま内の圧力分布、したがってそれを積分して得られる空気膜力が異なる。軸心の位置はこの空気膜力が釣り合うように定まるため、結局、回転角によって軸心の位置が異なることになる。スピンドルが非常にゆっくりと回転すれば、軸心は各回転角での釣り合いの位置をトレースすると考えられるため、この軸心の変動を回転精度と考えることができる。このような準静的な回転精度は静的回転精度と呼ばれるが、ここでは、軸の形状精度と静的回転精度との関係を調べることにする。

空気軸受の回転精度の解析には、通常レイノルズ方程式と運動方程式を連立させて解くという方法が採られ、それに正面から取組んだ研究もある(1)~(4)。しかし、そのような厳密な扱いはここでの目的ではなく、また数値解析に頼るしかないのが、定性的な議論が難しい。そこで、ここでは空気軸受をかなり単純化したモデルで扱い、回転精度を軸の形状精度を用いて表現することによって定性的な議論を行うことにする。

さて、ここで扱う軸受だが、自成絞り多数孔1列給気のラジアル軸受を考え、各給気孔の位置に線形ばねを配置したモデルとして扱うことにする。(図3)

回転精度の議論は微小な変位について行われるので平均すきまの近傍では独立な線形ばねとして近似できると考えられ、このように単純なモデルでも空気軸受の回転精度の

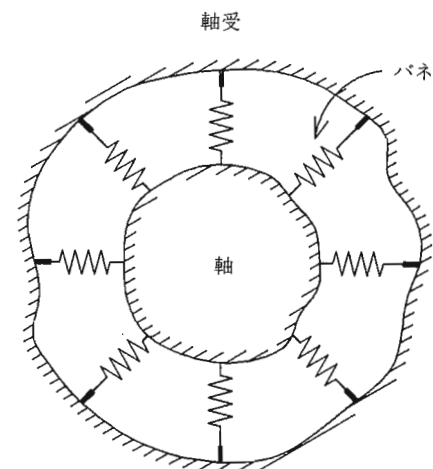


図3. 軸受モデル

議論が可能と思う。

また、このばねは給気孔位置でのすきま変化に比例して反力が発生すると考える。自成絞りのように絞り面積が給気孔位置の軸受すきまによって決まる場合は、平均すきまの変化よりも給気孔位置のすきまの変化の方が大きく圧力分布に影響するので、結局、給気孔位置でのすきまの変化に応じて反力が発生すると考えられるからである。

図4は給気孔位置での断面である。Oを軸受の中心とし座標軸の原点とする。また、O'で軸の中心を表し、その座標を(x(φ), y(φ))とする。さらに、軸外径の形状、軸受内径の形状をそれぞれ次のように表す。

$$r(\phi) = r_0 + \sum r_1 \cdot \cos(i \cdot \phi - \alpha_i)$$

$$R(\phi) = R_0 + \sum R_1 \cdot \cos(i \cdot \phi - \beta_i)$$

給気孔数をnとし、給気孔の位相をφ<sub>j</sub>、平均すきまの近傍でのばね定数をk<sub>j</sub>で表す。j = 1, ..., n。軸がθ回転したときの位相φでの軸受すきまCr(φ, θ)は

$$Cr(\phi, \theta) = R(\phi) - \{r(\phi - \theta) + x(\theta) \cdot \cos\phi + y(\theta) \cdot \sin\phi\}$$

と表される。このとき軸受の反発力のx, y成分F<sub>x</sub>(θ), F<sub>y</sub>(θ)は

$$F_x(\theta) = -\sum k_j \cdot Cr(\phi_j, \theta) \cdot \cos\phi_j$$

$$F_y(\theta) = -\sum k_j \cdot Cr(\phi_j, \theta) \cdot \sin\phi_j$$

と表されるが、軸心はこの反発力が釣り合う位置となるため

$$F_x(\theta) = 0$$

$$F_y(\theta) = 0$$

をx, yについて解けばよいことになる。もう少し計算を進めると、この方程式は

$$\begin{pmatrix} \sum k_j \cdot c_j^2 & \sum k_j \cdot c_j \cdot s_j \\ \sum k_j \cdot s_j \cdot c_j & \sum k_j \cdot s_j^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x(\theta) \\ y(\theta) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum k_j \cdot (R(\phi_j) - r(\phi_j - \theta)) \cdot c_j \\ \sum k_j \cdot (R(\phi_j) - r(\phi_j - \theta)) \cdot s_j \end{pmatrix}$$

となる。ここで、c<sub>j</sub> = cos φ<sub>j</sub>, s<sub>j</sub> = sin φ<sub>j</sub>

軸受側が完全であれば、k<sub>j</sub> = k, φ<sub>j</sub> = 2 · π · (j - 1) / n, R = R<sub>0</sub>であるので、結果は次のように簡単に表せる。

$$x(\theta) = -\sum r_1 \cdot \cos(i \cdot \theta + \alpha_i) \cdot \delta_n^{\pm 1}(i)$$

$$y(\theta) = -\sum r_1 \cdot \sin(i \cdot \theta + \alpha_i) \cdot \epsilon_n^{\pm 1}(i)$$

ここで、

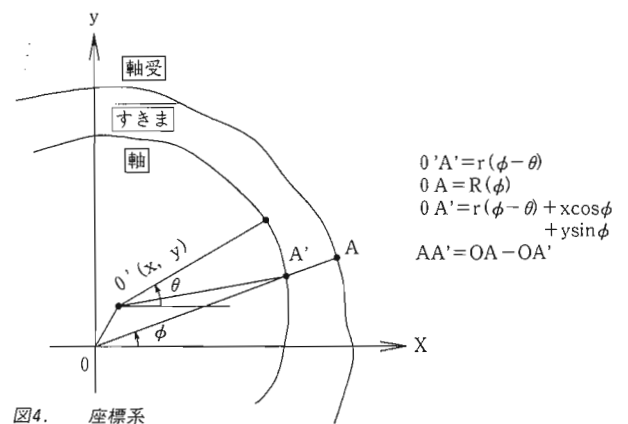
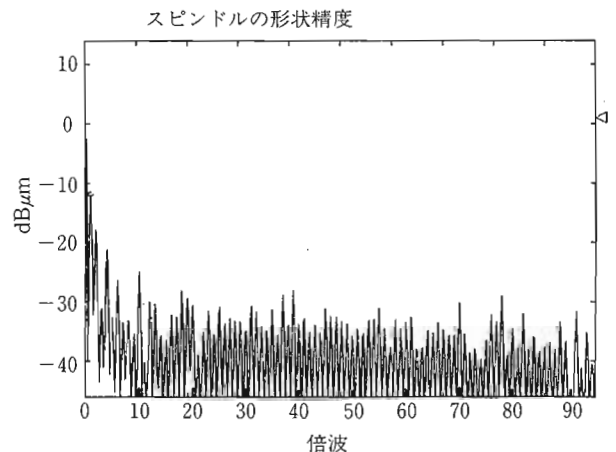


図4. 座標系



各回転数でのスピンの振動スペクトル (給気孔数 n=36)

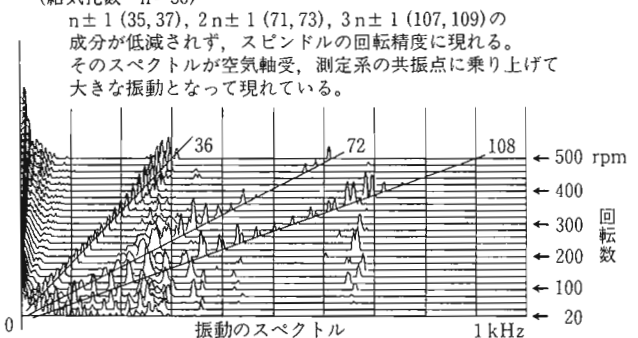


図5. 軸の形状精度とスピンドルの回転精度

$$\delta_n^{\pm 1}(i) = \begin{cases} 1 & \text{if } i \equiv \pm 1 \pmod{n} \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

$$\varepsilon_n^{\pm 1}(i) = \begin{cases} 1 & \text{if } i \equiv 1 \pmod{n} \\ -1 & \text{if } i \equiv -1 \pmod{n} \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

つまり、 $\delta_n^{\pm 1}$ は*i*が $m \cdot n \pm 1$ のときだけ1であり、他の場合は0となる関数、 $\varepsilon_n^{\pm 1}$ は*i*が $m \cdot n - 1$ のとき-1、 $m \cdot n + 1$ のとき1、他の場合は0となる関数である。(mは任意の自然数)

この結果より、軸の形状成分のうち給気孔数の整数倍±1の成分はそのままの振幅で回転精度に現われ、他の成分は回転精度にはまったく現われないことがわかる。このような特性を空気軸受の平均化効果と呼ぶことになるが、この結果は従来イメージしていた平均化効果とかなり異なっている。つまり従来は、現われる成分の数が少なくなるのではなく、各成分の振幅が小さくなることを期待していたと思う。しかし今回の解析結果は、特定の成分については低減されることなくそのままの振幅で回転精度に現われることを示している。確かに軸の形状精度よりも成分の数が少なくなるという点では回転精度は向上していると言えるが、残った成分が許されない場合も多い。(たとえばワークスピンドルとして用いた場合は、ワークに鮮明な縞模様を残すことになる。)この残った成分を消そうとすれば、現実的には特定の成分だけを0とするような加工や修正は困難なので、結局、軸を真円とすることが必要となる。つまり、空気軸受といえども、高い回転精度を得ようとすれば、それと同程度の部品精度が必要だということになる。

今回の解析結果から以下のことも推測できる。

- (1) 回転精度は、軸の精度に強く依存し、軸受の精度の影響は軸の精度が悪い場合に現われる。つまり、軸の形状が良ければ軸受の精度が悪くてもスピンドルの回転精度は良いが、軸の形状が悪ければ軸受の精

度が良くても回転精度は悪い。

- (2) 軸、軸受双方の精度が悪い場合はさらに多くの成分が回転精度に現れる。特に、給気孔数の整数倍±1以外の成分が現われる場合は軸の精度だけでなく軸受の精度も悪いことを示している。
- (3) レイノルズ方程式から圧力分布をもとめて静的回転精度の議論を行うなど近似精度を高めていけば、レイノルズ方程式が非線形であるため、給気孔数の整数倍±1以外の成分も0とはならず、回転精度に現れてくることが予想される。しかし、給気孔数の整数倍±1が支配的であるという状況は変わらないだろう。
- (4) オリフィス絞りの場合は、給気孔位置のすきまが変化しても絞り面積の変化は小さいので、より高い回転精度が期待できる。また、点給気ではなく線給気、面給気であれば同じ軸であってもより高い回転精度が得られるだろう。

同様の解析はスラスト軸受にたいしても可能であり、この場合は給気孔数の整数倍の成分がそのままの振幅で回転精度に現れることになる。

実測データを図5に示す。上のデータは軸形状のパワースペクトルであり、2倍波以上が形状精度を表す。

1倍波は測定用スピンドルへの取付偏心である。これを給気孔数*n*=36のラジアル軸受に組込んだ場合の回転精度を下に示している。軸形状はとくに*n*、2*n*などの成分が大きいわけではなく、ほぼすべての成分が同程度の振幅を持つが、回転精度に現れるのは*n*、2*n*、3*n*付近の成分である。

2、3などの低次の成分もあらわれているが、これは軸受の精度が悪いため軸の形状精度がそのまま現われたと考えられる(軸受剛性のばらつき、給気孔ピッチのばらつきが主な原因と考えられる)。

また、この結果では1kHzまで振幅はほぼ一定であり、回転が速くなると慣性のため形状精度の影響は出にくくなるという期待についても、否定的な結果となっている。

### 3. マイクログライнда用エアスピンドル

マイクログライндаは当部門の主力製品であり、その主な対象ワークはHDDやVTRに用いられる磁気ヘッドである。

磁気ヘッドの加工には、幾何学的加工精度すなわち面粗

さ、平面度を厳しく要求されるだけでなく、加工変質層が小さいことが要求される。加工時に発生する微細なクラックはヘッドの磁気特性を劣化させてしまうからである。この分野の加工機械には、ほとんどの場合エアスピンドルが

採用されているが、それはワークに与えるダメージが非常に小さいという優れた振動特性を持つことが一つの大きな理由となっている。硬脆材料の精密加工はエアスピンドルの適用例として最も成功したものの一つである。

HDDは今まで10年に10倍の割合で面記録密度が向上してきたが、最近ではこの勢いはさらに加速され、2年に2倍という速度で進んでいるという。この高密度化の流れの中で磁気ヘッドもフェライト、MIG、薄膜、MRと変遷し、材質もフェライトから $Al_2O_3$ -TiCなどの難削セラミックスへと変わった。加工機械そしてスピンドルに求められる性能もこれに同期して年々厳しくなっている。

スピンドルに要求されるのは主として高速、高剛性、高精度、高出力などであるが、その要求を満たすために常に新しい試みが必要であった。いくつか例を挙げると、

- (1) 振動対策として、フィールドバランス修正の本格的な実施。
- (2) 焼付対策として、耐摩耗性の銅合金を用いたり、軸表面への硬質クロムメッキ、固体潤滑材のコンポジットメッキ、セラミックスや耐摩耗性金属の溶射、そしてグラファイト化。
- (3) 熱変位対策としてスーパーインバー材の採用。

などがある。

HDD用の磁気ヘッドが動圧効果によって微小すきまを保持していることを合せ考えると、空気軸受の性能向上と実用化は磁気記録の高密度化技術の発展によるところが非常に大きい。

図6にマイクログラインダ用エアスピンドルの一例を示す。高速回転、高出力が要求されることから三相誘導モータをビルトインしている。軸にはスーパーインバー材を使用し、表面に硬質クロムメッキ、軸受にはグラファイト材を使用している。また、モータ部だけでなく、軸受部も水冷構造とし、スピンドルが発生する熱が機械本体へ伝わることを防いでいる。

タをビルトインしている。軸にはスーパーインバー材を使用し、表面に硬質クロムメッキ、軸受にはグラファイト材を使用している。また、モータ部だけでなく、軸受部も水冷構造とし、スピンドルが発生する熱が機械本体へ伝わることを防いでいる。

### 3.1 エアスピンドルの熱変形

空気軸受の特長の一つとして低摩擦を挙げたが、空気軸受といえども周速が大きくなればその発熱は無視できなくなる。軸、軸受ともに温度上昇し熱変位を生ずる。

発熱は機械精度、加工精度に影響を与えるだけでなく、温度が安定するまで暖気運転が必要となるため作業能率を低下させ、さらにエアスピンドル自身にとっても軸受すきまの減少という形で現れ、危険な状態となる。一般に軸の温度上昇が軸受のそれよりも大きくなるため、軸受すきまが減少し、最悪の場合すきまがなくなり接触・焼付という事態も生じる。

空気膜は膜厚が $10\sim 15\mu m$ 程度であれば熱伝導も鉄と同程度となり、軸受側を冷却することによって軸を間接的に冷却することは可能である。しかし軸と軸受とはやはり温度差が生じるため、軸受すきまの減少は避けられない。

広い回転数範囲で軸受性能を安定させるためには、その回転数範囲において軸受すきまを一定に維持することが必要であり、高速スピンドルでは熱膨張率の異なる材料を組合せるなどの工夫が必要となる。

### 3.2 スーパーインバー材

マイクログラインダ用のスピンドルにおいては、軸に熱

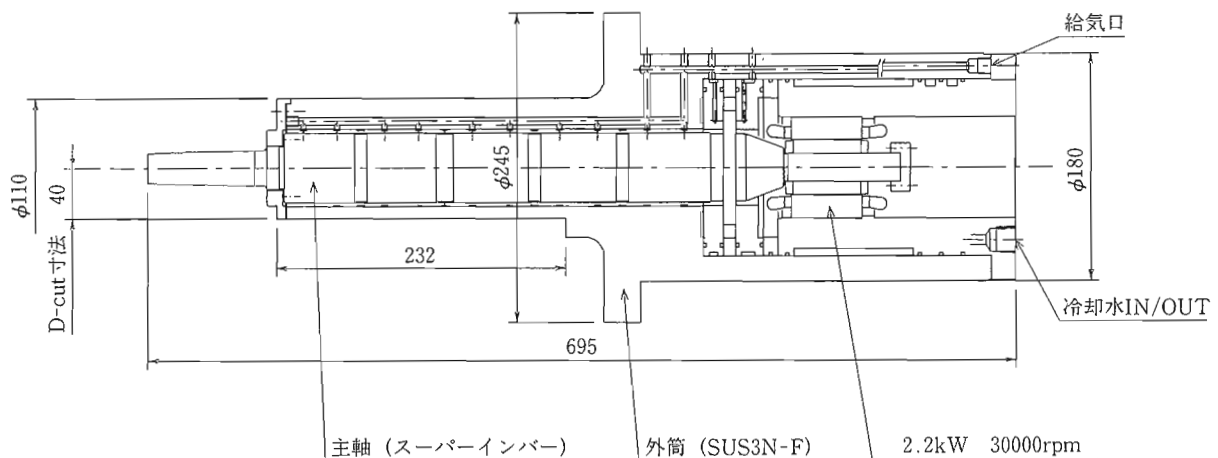


図6. NASGM85SGI 主要寸法

膨張率が鉄の約1/20であるスーパーインバー材 (Ni 32%, Co 5%, 残 Fe, 熱膨張率 $0.5\sim 0.7\times 10^{-6}$ )を用いている。この材料をもちいることによって次のような特長を持たせることが可能となった。

- (1) 工具位置の熱変位、特に一番大きい軸方向の伸びが1/20程度まで減少し、サチレートをするまで機械を暖気運転する必要がなくなり、起動と同時に加工が可能となる。  
ただし、スーパーインバーといえども若干の熱膨張をするため、回転中に徐々に軸方向に伸びる。伸びの基点であるスラスト軸受の位置をうまく設定することによって工具の刃先の位置が変化しないようにしている。
- (2) 0~30000rpmの範囲で一定のすきま、つまり一定の軸受特性を維持する。
- (3) スピンドル冷却水の温度変化に対しても伸びの変化が小さい。スピンドル全体を水冷するのは、研削液が掛かることによるスピンドルの温度変化を小さく抑さえ、姿勢変化を避けることが目的であり、これによって安定した切り込み深さが得られている。つまり、研削液やスピンドル冷却水の温度変化に強いスピンドルである。

ただ、ヤング率がステンレス鋼 (SUS420J2) の約2/3であるため、遠心膨張が若干大きくなり、そのため軸方向に縮みをおこす。砥石の刃合わせの場合には、注意すべき点である。

スーパーインバーには当初、軸表面にセラミックスを浴射していた。これは耐焼付性能の向上を期待したものであったが、誤操作などの過負荷に対してはまだまだ不満足な

## 4. コニカルエアスピンドル

### 4.1 スライシグマシン用エアスピンドル

半導体デバイスの基礎となるシリコンウェハの製造工程の中で、インゴットからのスライス工程は、後工程に及ぼす影響が大きく、重要な工程となっている。インゴット材料をウェハ状にスライスするといってもいろいろな方法があるが、半導体材料のように硬脆材料で、材料価格も高く、高精度を要求されるとなると、内周刃による切断加工が最も優れていると言われている。

内周刃ブレードの外径は標準ワーク径の4~6倍であ

ものであった。逆に膜圧のばらつきがアンバランスを発生させるという問題もあった。最近ではグラファイトを用いる方法に変更し、耐焼付性能を著しく向上させることに成功している。

### 3.3 インバータ

スピンドルには三相誘導モータをビルトインしているため、その駆動にはインバータを用いる。インバータはその制御方式により、PAM方式とPWM方式とに分類されるが、通常500Hz (2極モータで30000rpm) が必要なため当初はPAM方式を用いていた。

しかし、PWMの方が、機能、価格、回転数域の広さ、操作性の点でPAMよりも優れており、PWMでも専用のROMに交換すれば800Hzまで出力可能というインバータメーカーも多かったため、今まで何度も採用を検討した。しかし、PWMで無理に周波数を上げると電流波形が大きく乱れ、スピンドルの回転が安定せず、温度上昇も非常に大きくなるという現象が見られた。軸材にスーパーインバーを用いているスピンドルにおいてロータの過大な発熱は、軸との焼ばめ代を減少させ、最悪の場合、ゆるみ、空回りを生じさせるため、非常に重要な問題である。

PWM方式のインバータでは、キャリア周波数の1/10~1/20が実用上の上限というメーカーもあり、インバータ選定に当たっては最高周波数だけで選ぶのは危険である。

最近になってようやく500HzまでならPAMと同等の性能を示すものが現れ、標準インバータとして採用した。この変更によって、従来から要望の強かった低速回転が可能となり、砥石のドレッシングであれば200rpm付近から可能となった。また、豊富な機能を利用してインバータだけで停電時の非常停止動作を行わせることも可能となった。

り、それを取付けるチャックも同程度の大きさとなる。この大きく重いチャックを精度よく回転させる必要がある。従来のスピンドルは比較的小型のころがり軸受を用いてこの大きなチャックを回転させていたが、精度寿命の問題があり、軸受の定期的な交換を必要とした。また、中空軸としてスピンドルを挟んでインゴットとウェハの回収装置を配置したいという要望に応えることは、転がり軸受にとっては難しい問題であった。

空気軸受とすればこれらの問題が解決できる。もちろん、



転がり軸受を用いたスピンドルと同じ設計をしては負荷容量の点で無理がある。軸受自体を大型とすることによって対応するしかない。空気軸受は、大型だからといって急に潤滑やシールが難しくなったり、振動が大きくなったりするわけではない。浮上しているため、良好な振動特性を持ち、精度寿命が長いという特徴は変わらない。また大型にすることによって中空軸とすることも容易となる。

図7はφ150mmまでのシリコンウェハの内周刃スライシング用に開発したスピンドルである。コニカル軸受の採用により外径φ470mmに対して幅寸法が約120mmと薄形とすることができ、スライスしたウェハの取り出し装置を中空軸部(φ275mm)へ装着することを容易にしている。φ460mmの外周部がそのままプーリとなっており、ベルト駆動にて2300 rpmまでの回転数で使用できる。縦形、横形のいずれのタイプのスライサにも使用できる。空気軸受の特徴をうまく利用した、他の軸受形式では真似のできない、エアスピンドルの代表例の1つである。

このスピンドルは開発よりすでに10年を経過し、約300台の納入実績を持つが、その間、加工・組立技術の向上によりスピンドルの回転精度が向上しており、最近ではスライシングだけでなく、薄型・中空という特徴を生かして光学部品の加工機・測定機用のスピンドルとしても用いられるようになった。

エアスピンドル用エアラインの推奨例

4.2 グラファイト化

エアスピンドルの優れた性能にもかかわらず、現実にはいまだに転がり軸受スピンドルと比較検討されることが多い。これは、一つはエアスピンドルにはいまだに負荷容量が小さく焼付きやすいという悪いイメージがあるためであり、もう一つはユーザにコンプレッサ、ドライヤなどクリ

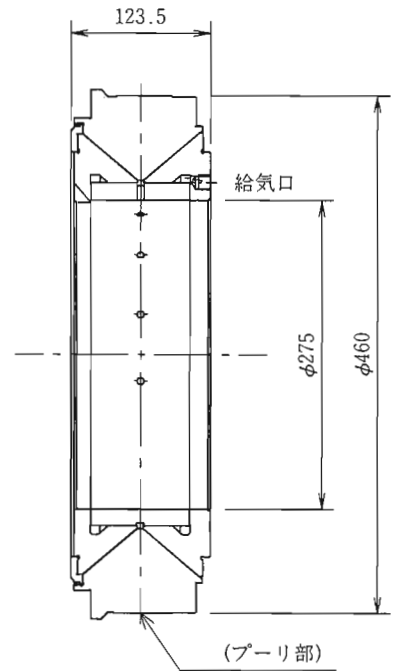


図7. NAS100 主要寸法

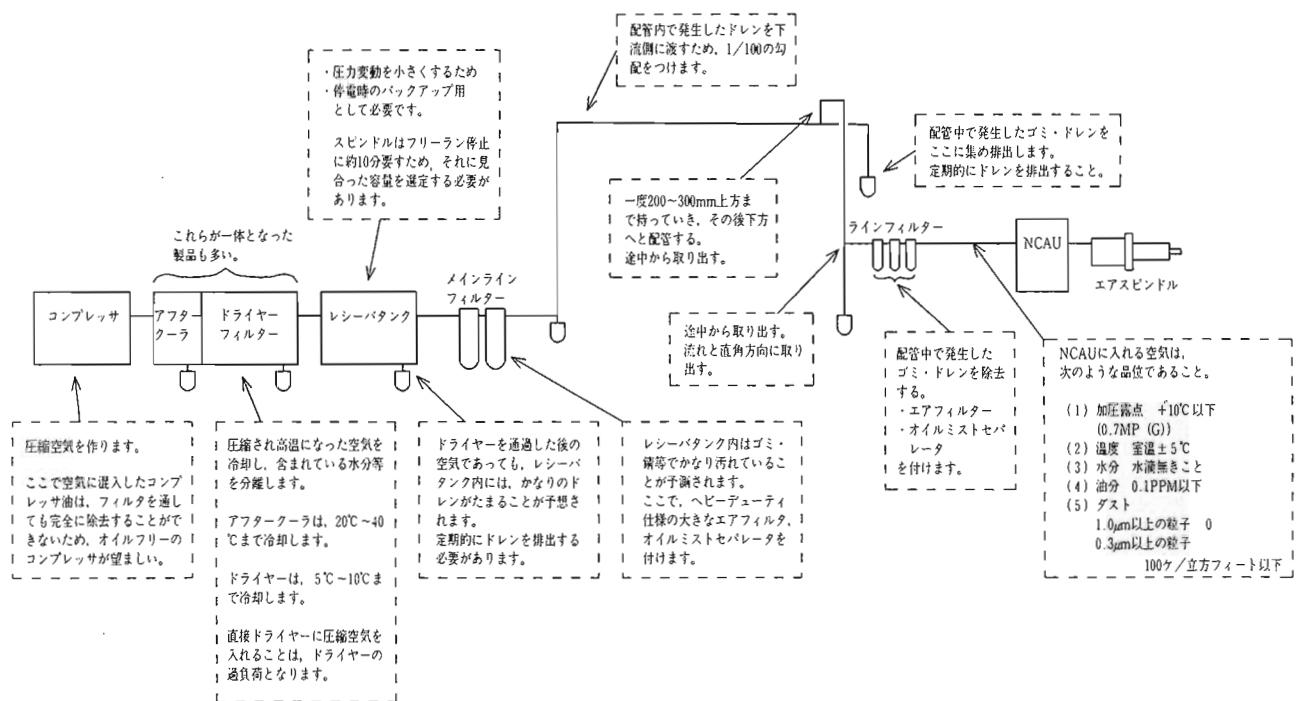


図8. エアスピンドル用エアラインの推奨例

ーンエアの供給設備を要求するためである。

現実にはこれだけのサイズの空気軸受となれば、負荷容量も十分にあり、ワーク脱落、ブレード破断などの非常事態においてもスピンドルが焼付くことは少ない。エアスピンドルの焼付の原因のほとんどは、空気の品位と無給気時の取り扱いにある。エアスピンドルは内部から壊れるのである。汚れた空気、湿った空気、油分を含んだ空気はエアスピンドルの寿命を縮める。規定以下の給気圧で使用するなど、論外である。焼付はすべて負荷容量不足が原因と考えられたり、空気軸受の負荷容量が過小に評価されているのは非常に残念である。図8にエアスピンドル用エアラインの推奨例を示す。

しかし、エアスピンドルの取り扱いが面倒なのは確かであり、スピンドルの耐焼付性能を向上させるために根本的な対策が必要であった。そして、転がり軸受に対抗するためにも空気消費量を小さくすることが必要であり、スピンドルの大幅な改造を行うことになった。

まず軸受部にはグラファイト材を用いることにした。これは後にも述べるように、焼付にたいしては絶大な効果を示す。そして、軸受すきまを従来の約1/2にまで小さくする。従来はこのスピンドルを理論的に最適なすきまで組み立てることが難しかった。軸受すきまを小さくすると焼付のトラブルが多くなるため、大きめの値に設定しなければならなかった。大型部品のため加工精度が劣っていたこと、そして、組立中に軸受面に、がじりが発生しやすかったことなどが原因と考えられた。そのため軸受すきまは現実的な値を用いることになり、剛性や空気消費量などの特性はどうしても犠牲となっていた。

しかし最近では先にも述べたように測定機としても用いられるほどに加工精度も向上しており、また、軸受面をグラファイト材にて構成したため、がじりの発生はなくなり、軸受すきまを最適値にまで縮めることが可能となった。図9に示すとおり、従来機と比較して剛性は約3倍、空気消費量は約1/3と大幅な改善となっている。

#### 4.3 グラファイトの効果

グラファイトの耐焼付性能を評価するために行なったタッチダウンテスト(回転中に給気off, インバータ電源offとして軸受面を接触させ、慣性回転で放置するテスト)の結果を紹介する。2000rpmにて十数回実施。負荷は外輪自重の

370 Nだけである。その結果、いずれの回転数においても、異音・振動を発生することなく静かに減速・停止し、停止後に給気onとすれば滑らかに回転した。回転精度・剛性・空気消費量・振動など試験前の結果との差は認められない。分解して軸受面を観察したが、ステンレス面にはグラファイト粉が付着しているだけで焼けなどは見られない。一方、グラファイト面は接触部に光沢が生じているだけで、摩耗もほとんどなく、欠けや割れは全くなかった。スピンドルは試験前と同じ状態と考えてよい。

このようにグラファイトは焼付にたいして非常に優れた特性を持ち、エアスピンドルの最大の短所であった焼付が

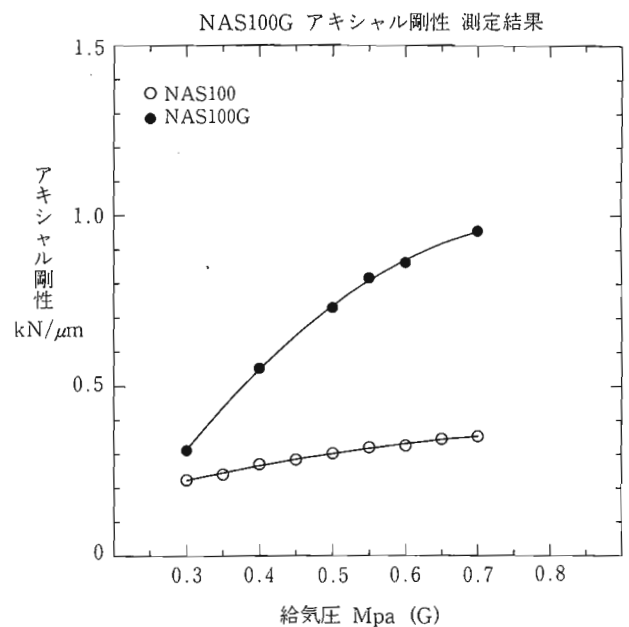


図9 (a). NAS100G アキシヤル剛性

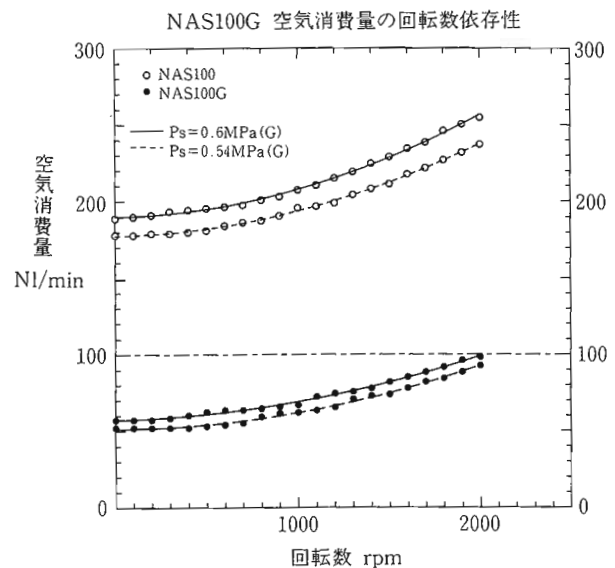


図9 (b). NAS100G 空気消費量

かなり解決できる。

しかし、グラファイトは硬脆材料であるため、硬い異物が侵入すれば深く傷つけられることが予想され、軸受面に傷が入れば軸受特性の劣化は避けられない。また、グラファイトには若干の膨潤性があるため、多量の水や油が軸受内部に侵入した場合は変形することが懸念される。グラファイト化によって耐焼付性能が向上したからといって空気の品位を落とすことはできない。長期間性能を維持するためには空気の品位は今までと変わらず重要である。

#### 4.4 内周刃切断機用スピンドル

ウェハの製造工程の中には、先に述べたスライシング工程の前にインゴットのブロック化工程がある。引き上げられた長尺のインゴットの両端を切落とし、サンプルウェハを採取し、スライサーで加工できる長さに切断する工程である。この工程は半導体用材料の加工の中で最もラフな工程とされ、従来は外周刃やバンドソーで切断されていた。しかし、この工程においても、切断代を小さくし、切断面の精度を高め、加工能率を上げることが要求されるようになり、 $\phi 150\text{mm}$ 以下のSiインゴットの切断には内周刃切断機が使用されるようになった。

$\phi 200\text{mm}$ ウェハがいよいよ本格化しようとする現在、 $\phi 200\text{mm}$ 用の内周刃切断機が求められるのは当然のことである。

図10に見られるようにインゴットを切断するにはスライスする場合と異なり、スピンドルの内径は内周刃ブレードの外径に相当する大口径を必要とし、ブレードを挟んで両側が大きく開放された構造にしなければならない。たとえば、 $\phi 150\text{mm}$ 用のスピンドルの内径は $\phi 680\text{mm}$ であり、 $\phi 200\text{mm}$ 用には $\phi 860\text{mm}$ の内径を要求された。

当社では $\phi 200\text{mm}$ 用の内周刃切断機の開発を計画し、まずスピンドルの開発を先行することになった。スピンドル寸法は、外径 $\phi 1100\text{mm}$ 、内径 $\phi 860\text{mm}$ 、幅 $190\text{mm}$ とし、約 $2\text{ kN}$ のチャックを取付けて $1100\text{rpm}$ まで回転可能なこと、が目標であった。開発は、空気静圧軸受と転がり軸受の両者で検討されたが、起動・運転トルク、軸受の潤滑方法、環境・ワークの汚染、振動、発熱、騒音という点で空気静圧の方が有利であり、また可能性も高いと考えられ、空気静圧だけで進めることとなった。

幅を $190\text{mm}$ とするため当然コンカル軸受を採用する。次

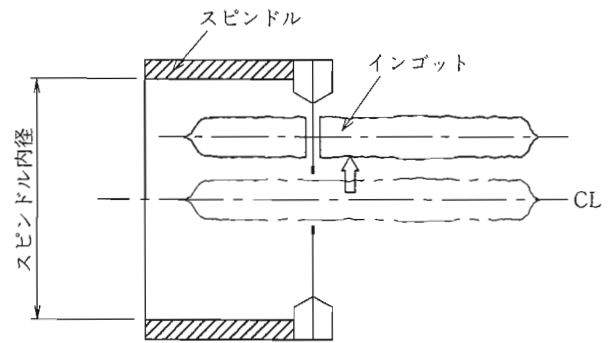


図10. インゴット切断用大型スピンドル

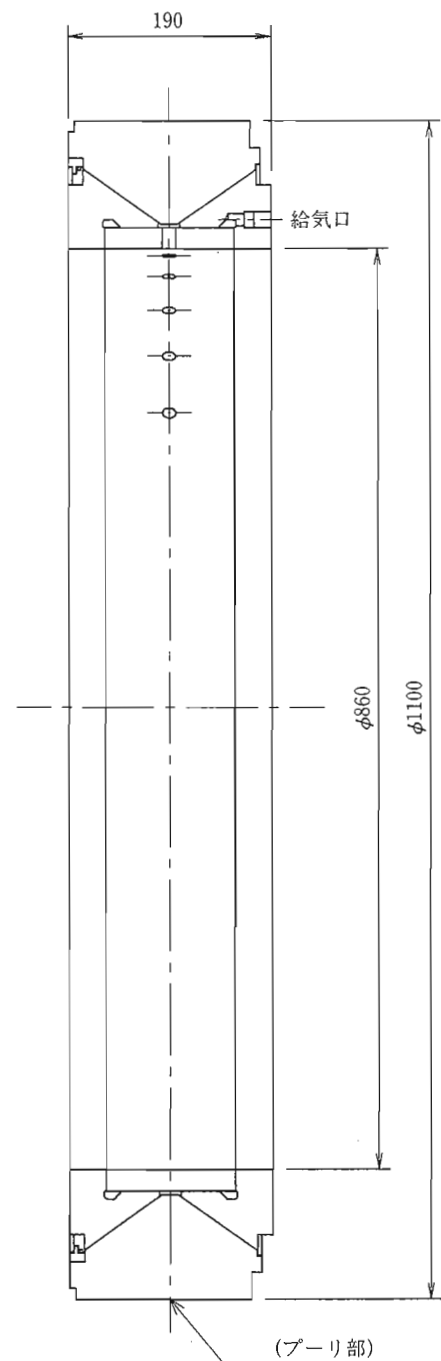


図11. NAS115 主要寸法

に、内輪回転とするか外輪回転とするかであるが、このスピンドルでは外輪回転とすることにした。このような大型スピンドルでは回転部の遠心膨張のため軸受すきまが大きく変化する。さらに回転部は、チャックの取付けや、内周刃ブレードの張り上げによって変形することが予想され、それがばらつく可能性もあるため、変形量の予測は難しい。内輪回転として定格回転時に最適すきまとなるように初期すきまを設定するという考えは難しく危険と判断した。図11にスピンドルNAS115の主要寸法を示す。外輪重量は約3 kNとなり、チャック重量が約2 kNなので回転部の重量は計5 kNとなる。

このスピンドルは大負荷と遠心膨張により偏心率で0.3~0.6と大きく偏心することが予想される。空気軸受は偏心率が大きくなるほど剛性は小さくなるため、従来の設計資料(偏心率0.1程度での解析結果)から大偏心の特性を推定することは危険である。そこで新たに大偏心軸受の特性計算から始めることになった。また、従来のように剛性を最大にするすきまを探すのではなく、一定以上の軸受すきまが維持できる条件を探すことにした。NAS115では浮上量の下限値を40 $\mu\text{m}$ と設定した。図12はその計算結果の一部である。

計算結果を見ると、浮上量は最初回転数とともに増大していき、ある回転数で最大となり、その後減少することが分かる。この挙動は次のように考えると理解しやすい。つまり、このスピンドルは回転時の遠心膨張量が大きいため、空気軸受として働く面積が回転数とともに減少していく。回転体は自重のため下方に偏心しており、最初は下方の軸受が働かなくなる。そのため下方に押し下げる力が減少し外輪は浮上する。しかし、さらに回転数が上がると上方の軸受部にも軸受として働かない面積が増えてくるので浮上量はある回転数で最大となり、それ以上の回転数では浮上量は減少しはじめる。遠心膨張は回転数の二乗に比例するため、浮上量の減少は急激に起こる。

このスピンドルの場合は約900rpmで浮上量が最大となり、1000rpmまで40 $\mu\text{m}$ の浮上量を維持できると考えられた。図13に回転試験結果を示す。出力5.5kwのモータでベルト駆動したが、ベルトにて回転体を1~1.5 kNの力で上方に引っ張り上げているので、実際の軸受への負荷は小さくなり、当初予想したよりも浮上量が大きくなっている。1400rpmまで問題なく回転することを確認した。当初の考

えのように浮上量の下限値を40 $\mu\text{m}$ とすればさらに回転数を上げることも可能と思えるが、試験結果のように1400 rpmでの浮上量は停止時の値まで減少しているためこれを限界回転数とすることにした。これは当初の目標をかなり上回る結果であった。図13にはベルト張力を1 kNと考えた場合の計算値も載せてある。ベルト張力はもう少し大きいと考えられ、実測値と計算結果とはよい一致をしていると思う。

このスピンドルには変位センサを埋めこんでおり、浮上量もこのセンサで読み取ったが、その他にもフィールドバ

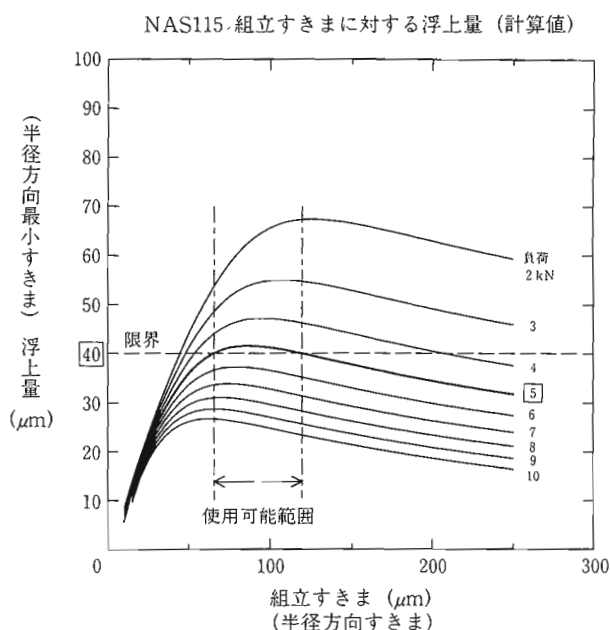


図12. NAS115 組立すきまに対する浮上量 (計算値)

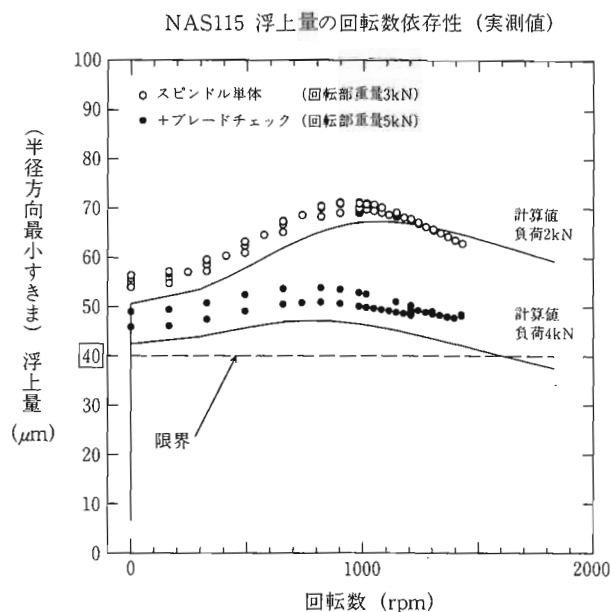


図13. NAS115 浮上量の回転数依存性 (計算結果および実測値)

ランス修正や回転時の変形解析、ブレード張上げによる変形解析などにも利用している。

エアスピンドルは従来は高精度を得るために採用されることが多かったが、このスピンドルではそれ以外の空気軸

受の特徴（低トルク、清浄運転など）も本質的であり、他の軸受形式では実現が難しいだろう。まさしく空気静圧だからこそ実現できたスピンドルと考えている。

## 5. おわりに

この10年でエアスピンドルに対するイメージもかなり変わってきたと思う。半導体・電子産業や光関連産業の要求に答えるためにエアスピンドルは多くの改良を加えられ、現在では超精密加工を支える重要部品としてその地位を確立したと言える。しかし現状の性能にはいくつもの不満があり、まだまだ多くの改良が必要と感じている。

本報では当社のエアスピンドルのうち代表的なものを探り上げ、その用途、要求される性能と空気軸受であることが本質的な点、開発・改良の経緯や考え方になどついて述べた。かなり偏った内容となってしまったが、いささかでも参考となれば幸いである。

## 文 献

- (1) 矢部寛, 渡部尚紀. 静圧気体スラスト軸受の回転精度特性に関する研究(第1報). 日本機械学会論文集(C編). 53(495), p.2360(1987-11)
- (2) 矢部寛, 山本稔. 静圧気体スラスト軸受の回転精度特性に関する研究(第2報). 日本機械学会論文集(C編). 55(510), p.443(1989-2)
- (3) 矢部寛. 静圧気体ジャーナル軸受の回転精度特性に関する基礎的研究(第1報). 日本機械学会論文集(C編). 58(548), p.1170(1992-4)
- (4) 矢部寛. 静圧気体ジャーナル軸受の回転精度特性に関する基礎的研究(第2報). 日本機械学会論文集(C編). 58(548), p.1177(1992-4)



川上隆一