

Professional Report**超高速スピンドルの開発と応用**

Development of Ultra-High Speed Spindle and Application

渡部 和 Kazushi Watanabe 田中 慎治 Shinji Tanaka

近年のPC，デジタル家電，携帯などのモバイル機器，その他の電子機器では超小型化と高機能化が行われている。このような電子回路基板においては，高密度実装が不可欠であり，プリント基板ではより高密度で，効率よく極小径から，太径まで穴をあけることが求められている。筆者らは約10年前から，このための超高速スピンドルの開発を行ってきた。超高速スピンドルの内容と，これを用いた穴あけ性能の結果について述べる。

渡部 和
1971年日立精工株式会社入社
現在，日立ビアメカニクス株式会社
設計本部 所属
超高速スピンドルの開発に従事
日本機械学会会員，精密工学会会員
日本設計製図学会会員
工学博士



田中 慎治
1986年日立精工株式会社入社
現在，日立ビアメカニクス株式会社
設計第1部 所属
超高速スピンドルの開発に従事
日本機械学会会員

**1 はじめに**

およそ20年前からプリント基板業界ではドリルを用いた小径の穴あけ加工が用いられていたが，スピンドルの最高回転数はせいぜい毎分8万～10万回転程度であり，加工可能な最小穴径は 0.3～0.4 mmが限度であった。しかし近年のPC，デジタル家電，携帯電話をはじめとするモバイル機器などの電子回路基板においては，高密度実装が不可欠であり，プリント基板ではより高密度で，極小径から，太径まで効率よく穴をあけることが要求されている。これまでの超高速スピンドルの最高回転数記録は，ヘリウム膨張機，歯科用のスピンドルなどで，毎分40万～50万回転が報告されている^{1),7)}。しかし，工具の自動交換が可能で，回転数を低速から高速まで制御可能で，太径から小径まで加工可能なトルク，剛性，回転精度を必要とするプリント基板用のスピンドルとなると，

難しい課題であった。筆者らは約10年前から工作機械用のさまざまなスピンドルの研究開発を行い，材料の検討，静圧空気軸受解析，回転軸の解析，バルンサーの開発，熱の問題などの難問をクリアし，この業界では世界最高の超高速スピンドルを開発した。この超高速スピンドルを用いた日立製のプリント基板穴あけ機が，現在多くの顧客のもとで稼働しており，小径の高効率穴あけ加工に効果を上げている。ここでは，これまでの開発経緯，最近の超高速スピンドルの内容と，これを用いた穴あけ性能について述べる。

2 超高速スピンドル**2.1 超高速スピンドルの開発経緯**

1997年まではスピンドルの回転数は毎分10万～12.5万回転が主に使用されてきた。超高速スピンドルの開発は

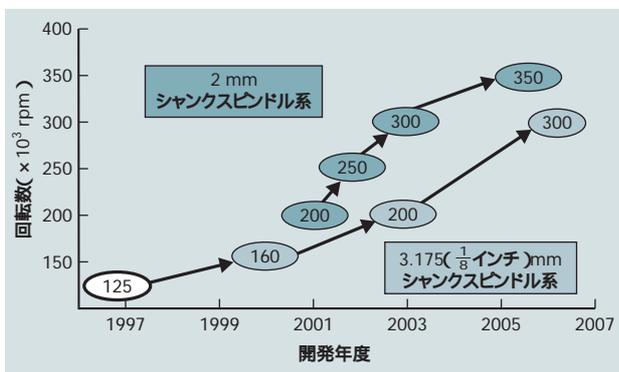


図1 超高速スピンドル開発の経緯

超高速スピンドルの開発は1997年からスタートした。3.175 mmシャンクとは、業界で使用されてきた $\frac{1}{8}$ インチ径ドリルの把持直径であり、2 mmシャンクは回転シャフトを軽量化するために新たに開発した系列である。

1997年からスタートし、図1に示す経過をたどり現在に至っている。図中の3.175 mmシャンクとは、ドリルの把持直径を示しており、これは業界で伝統的に使用されてきた $\frac{1}{8}$ インチ径である。それに対して2 mmシャンクは、回転シャフトを軽量化するために新たに開発した系列である。

2.2 最小穴径と必要なスピンドルの回転数

最近よく使用されるプリント基板の穴径と、それをドリルで穴あけするのに必要な超高速スピンドルの回転数を表1に示す。車載用やPC用の基板では小径が0.3~0.4 mm、太径が6.35 mmまであり、1本のスピンドルで、小径か

表1 プリント基板の穴径と必要な回転数の関係

一般的なプリント基板の穴径と超高速スピンドルの回転数を示す。

基板の種類	最も多い径 (mm)	最大径 (mm)	必要回転数 ($\times 1,000$ rpm)
車載用	0.4~0.8	6.35	最高160
PCマザーボード	0.3~0.4	6.35	最高200
サーバルータ	0.25~0.4	6.35	最高200
携帯電話	0.15~0.25	3	最高200
携帯音楽プレーヤ	0.25以下	3	最高200
パッケージ関係基板			
パッケージ	0.25~0.3	3	最高200
インターポーザ	0.08~0.15	1.5	200~350
CSP	0.08~0.15	1.5	200~350

注：略語説明ほか CSP(Chip Size Package)
インターポーザ(半導体集積回路とプリント基板の間に置く基板)

表2 超高速スピンドルの回転数範囲

日立ピアメカニクス株式会社では、顧客の要望に応じたプリント基板穴あけ機を提供している。

スピンドルの種類	最低回転数 ($\times 10^3$ rpm)	最高回転数 ($\times 10^3$ rpm)	適用ドリルシャンク径(mm)
16万回転SP	20	160	3.175
20万回転SP	20	200	3.175
30万回転SP	20	300	3.175
30万回転SP	30	300	2
35万回転SP	30	350	2

注：略語説明 SP(Spindle)

ら太径まで加工可能でなければならない。CSP(Chip Size Package)では、小径は0.08 mmまで使用されており、毎分30~35万回転のスピンドルが必要とされている。小径加工のときは、ドリルの周速が低下するので、適正な切削速度にするために、太径の加工能力を維持しながら、より高速なスピンドルが必要となる。したがって、日立ピアメカニクス株式会社では表2に示すスピンドルを用意しており、顧客の要望に応じたプリント基板穴あけ機を提供している。毎分35万回転スピンドルの写真を図2に示す。

2.3 超高速スピンドルの構造

超高速スピンドルの断面構造図を図3に示す。

回転シャフトは、中央部にAC(Alternating Current)モータのロータがあり、その両端をラジアル静圧空気軸受で支持し、軸方向はスラスト静圧空気軸受で支持されている。したがって空気の静圧により、完全に浮いた状態で回転する構造となっている。ドリルはコレットと、さらばねによりクランプされ、シャフトの停止時に、プッシュロッドを前側に押し出すことで、コレットを開いて工具を交換可能としている。

ラジアル静圧空気軸受は、軸を囲むように1列当たり8~12の給気ノズルを設ける。一般的に使用される静圧空気軸受の給気ノズル部分の拡大を図4(a)(b)に示す。この給気ノズルにはオリフィス絞りと、自成絞りがある。



図2 毎分35万回転スピンドル
毎分35万回転スピンドルの外観を示す。

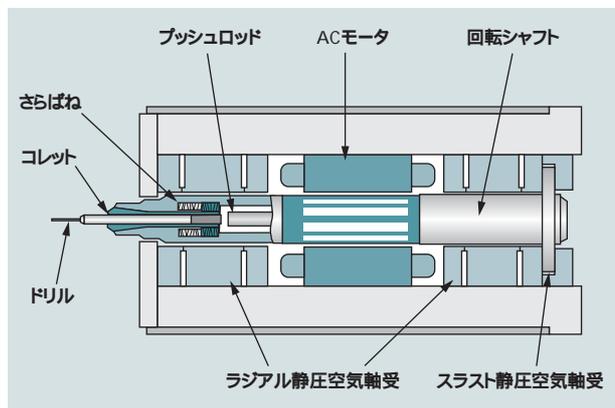


図3 超高速スピンドルの構造
空気の静圧により、完全に浮いた状態で回転する構造となっている。

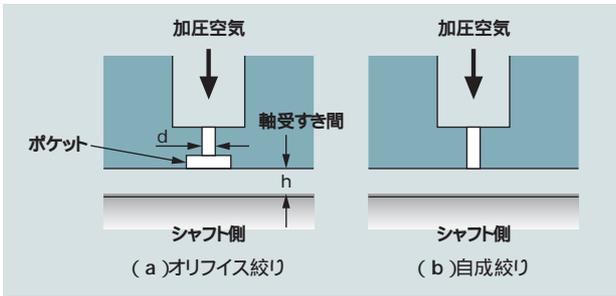


図4 静圧空気軸受の給気方式
軸受すき間を変えた場合のラジアル軸受の剛性計算結果例を示す。

図4(a)のオリフィス絞りでは、すき間が狭くなると、ポケット部の圧力が高くなり剛性が発生する。図4(b)に示す自成絞り方式の静圧空気軸受は、負荷容量や剛性がオリフィス絞り方式に比べてかなり低下するが、安定性がよい特長がある。適切な設計を行えば、オリフィス絞りにおいても、静圧空気軸受が不安定になることはないのので、負荷容量、剛性に有利なオリフィス形の給気方式を用いている。空気で浮かしたシャフトを、毎分35万回転させるには、1秒間に5,833回転もしなければならず、静圧空気軸受剛性の問題、固有振動の問題、静圧空気軸受であっても空気との摩擦抵抗も無視できないので、発熱の問題、シャフトに発生する応力の問題なども解決する必要がある。

超高速スピンドルでは、最高回転数が低ければ回転シャフトとスラストプレートの径を大きく設計でき、剛性や負荷容量で有利となるが重くなる。一方、最高回転数を高くしようとすれば、回転シャフトや、スラストプレートのサイズを小型軽量化して、固有値を高くすることが不可欠である。超高速化と負荷容量や剛性は、常にトレードオフの関係となる。したがって、設計を行うには、すべての項目について設計パラメータを最適化する必要がある。表2に示したスピンドルは、最高回転数に見合った負荷能力と剛性が最大限に得られるように配慮している。

2.4 静圧空気軸受の解析

超高速スピンドルの開発には、静圧空気軸受の解析が必須である。使える汎用の解析ソフトウェアを検討した結果、独自のソフトウェアを開発し、設計に応用した。軸受内の圧力分布の解析には(1)で示されるレイノルズ方程式を解けばよく、これには、従来差分法や有限要素法が使用されている。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(PH^3 \frac{\partial P}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left(PH^3 \frac{\partial P}{\partial Y} \right) &= \Lambda \frac{\partial}{\partial \theta} (PH) \\ \partial &= x/R, Y=y/R, H=h/C_r, P=p/P_a \\ \Lambda &= 6\mu UR/P_a C_r^2 \end{aligned} \right\} (1)$$

ここで各記号は以下のとおりである。

- R:シャフトの半径, x:周方向距離, y:軸方向距離
- C_r:軸受隙間, h:任意の角度位置の隙間, μ:空気の粘性係数
- U:軸の相対速度, p:任意の軸受位置の圧力, P_a:周囲の圧力

境界条件として、図4(a)に示すポケット部の圧力さえ決まれば(1)の偏微分方程式の解は差分法でも、有限要素法でも精度よく解ける。しかし、ポケット部の圧力は、給気ノズルの流量と、軸受から外部に流失する総流量が等しいという「連続の式」を満足して、ポケット圧力を求めなければならない。この流量と圧力の関係は、非線形性が強く、しばしば解析を困難にする要因となっていた。筆者はこの非線形特性を含めた解法に、差分法を適用しつつ、誤差ノルムを最小化する特殊な方法を開発し、軸受の圧力分布を精度よく解析することを可能とした。

図5は毎分35万回転スピンドルにおいて軸受すき間の圧力分布の解析例であり、円周方向を平面に展開して表示している。この場合、片側すき間が10 μmで、偏心率が0.5のときの圧力分布である。軸受すき間を変えたときの、ラジアル軸受の剛性計算結果の例を図6に示す。オリフィスの径dによって、剛性が変化するが、すき間が大きい範囲では、dが大きいときのほうが剛性が高く、一方dを小さくすると、すき間の狭いほうで剛性が高くなる傾向を示す。しかしすき間hを狭くすると、hに反比例して空気による摩擦抵抗が増え、発熱が増加する問題があり、適切なすき間が必要である。このような関係から、スピンドルの回転数範囲の仕様によって、適切なオリフィスの径dとその数、給気ノズルの位置、最適な軸受すき間を設計することが不可欠である。軸受解析結果に基づいてスピンドルの静変形を計算した結果を図7に示す。解析と実験値がほぼ一致することが示されている。

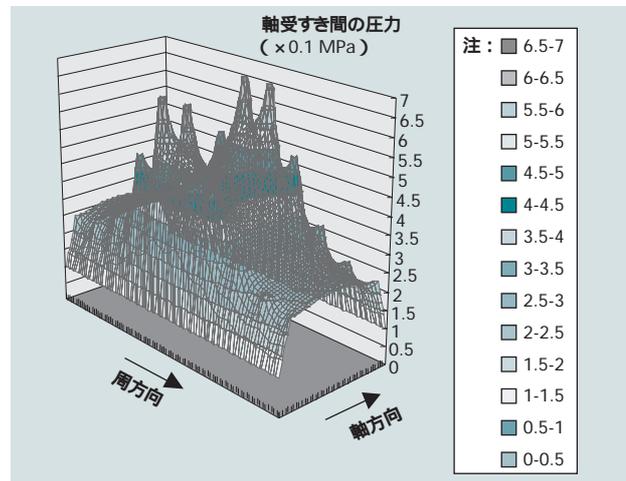


図5 軸受すき間の圧力分布解析例
350 × 10³ rpmスピンドル、すき間10 μm、偏心率0.5における軸受すき間の圧力分布の解析例を示す。

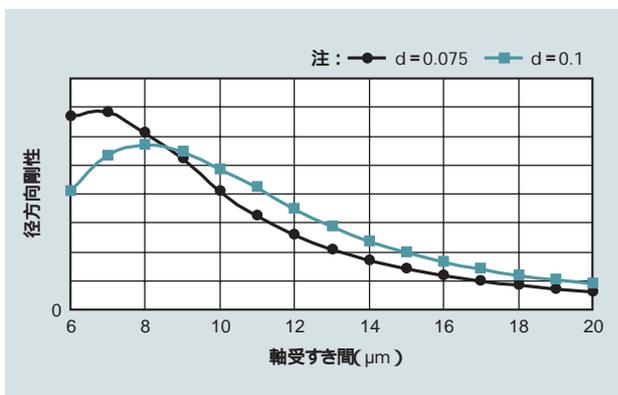


図6 静圧空気軸受剛性の解析例
軸受すき間を変えた場合のラジアル軸受の剛性計算結果例を示す。

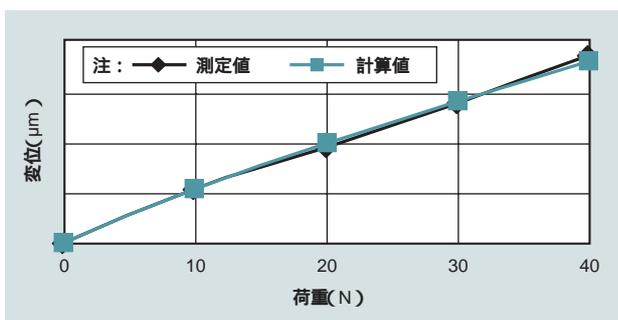


図7 スピンドル静剛性測定と解析の例
解析と実験値がほぼ一致している。

2.5 回転シャフトの固有値と限界の最高回転数

スピンドルの回転シャフト系は(2)に示す有限要素法^{5),6)}を用いて固有値、振動モード、不釣合いがあるときのふれまわりなどの解析を行う。通常の運動方程式と異なる部分は、ジャイロ効果行列 $[G]$ があることで、これは非対称行列になることに注意を要する。

$$[M]\{\ddot{V}\} + ([G] + [C])\{\dot{V}\} + [K]\{V\} = \{F\} \quad (2)$$

$[M]$: 質量行列, $[G]$: ジャイロ効果行列, $\{F\}$: 荷重ベクトル
 $[C]$: 減衰行列, $[K]$: 剛性行列, $\{V\}$: 変位ベクトル

表示を簡単にするために、二次元で表したシャフトの固有振動モードを図8に示す。1次の振動モードは円筒状

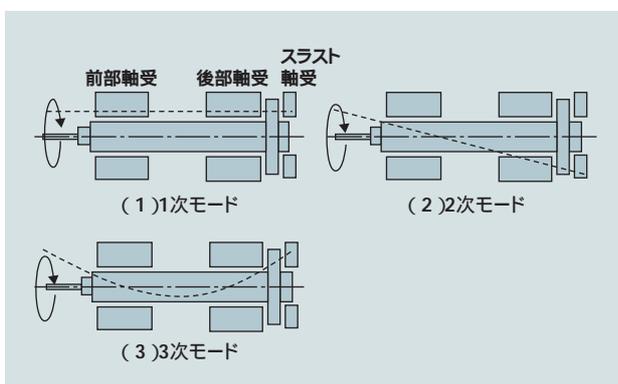


図8 スピンドルの固有振動モード
二次元で表したシャフトの固有振動モードを示す。

に、2次の振動モードは円錐(すい)状に、3次、またはそれ以上の振動モードは、シャフトの曲がりを含んで回るモードである。不釣合いなどの実際の応答では、これらの振動モードを含んだ形として現れる。シャフトが回転すると、円板のジャイロ効果により、回転時と非回転時とでは固有値が変わることが知られているが、実際のスピンドルでは、円板の極慣性モーメントはさほど大きくなく、非回転時としても1次、2次の固有値はほとんど変わらない。

静圧空気軸受は、超高速回転に伴う軸受の動圧発生によってホワール不安定現象(自励振動)がしばしば発生し、これが振動としての最高速度の限界を与える。この安定限界は、十合¹⁾、多々良³⁾、森⁴⁾、Powell⁷⁾らにより研究されており、1次固有値の2倍以上の速度で発生することがわかっている。したがって最高回転数を上げるには、軸受剛性とシャフトの設計を最適化して、1次固有値を上げることが重要である。また1次と2次の固有値を越えて回すことは、高精度なバランス修正により容易に可能である。

最高速度の限界は、振動以外にもシャフトに発生する応力、温度上昇などがあるが、これについても考慮している。

2.6 回転シャフトのバランスと軸振れ

超高速スピンドルでは、回転シャフトのバランス修正は不可欠である。バランス修正による残留不釣合いが小さいほど、回転シャフトの動的な振れが小さくなる。回転機械の不釣合いのよさを示す等級はISO1940/1-1986EやJISB0905で定められている(図9参照)。規格で定められた最高回転数は毎分10万回転までしか定義されていない。

規格で定義されたバランス等級(G)はG0.4~G4000までであるが、通常の工作機械の主軸では、G2.5~G6.3が適用されている。さらばねの部分に0.005 gmmの不釣合いがあるとき、毎分35万回転したときのふれまわりの解析結果を図10に示す。振れの片振幅は0.55 μm となることからわかる。このような解析の結果も検討し、 balan

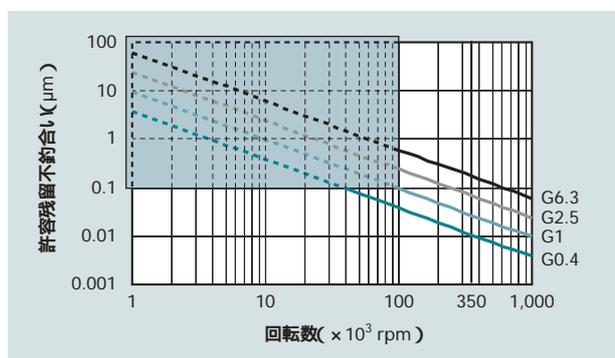


図9 釣合いよさの等級規格ISO1940/1-1986E (JISB0905)
回転機械の不釣合いのよさを示す等級を示す。規格の範囲はハッチング部分である。

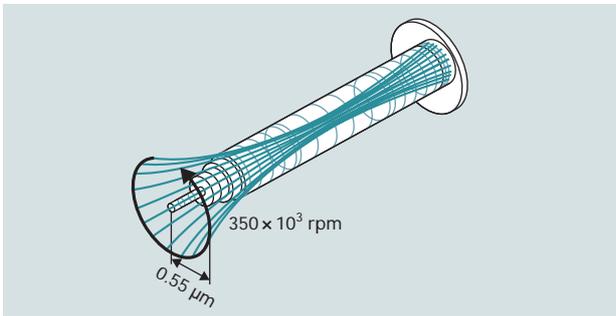


図10 アンバランスがあるときのふれまわり解析
さらばねの部分に不釣合いがあるときのふれまわりの解析結果を示す。

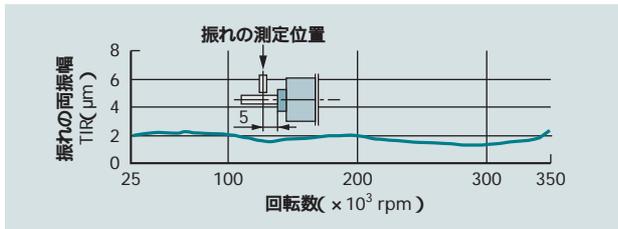


図11 スピンドルの振れ測定結果の例(350×10³ rpm)
バランス修正したときの振れ測定結果の例を示す。

ス調整では規格よりも精度がよいG0.4以下を目標とし、最終的に振れの基準値を満たすように調整している。市販のランサーを調査した結果、性能が不十分であることがわかり、独自の高精度ランサーとランサー治具を開発し、これに適用している。

良好にバランス修正したとき、ドリルに相当するテストバーの振れ測定結果を図11に示す。超高速スピンドルの実際の使用にあたっては、使用によるコレット部への塵(ちり)の侵入や汚れなどにより、バランス精度が低下するので、定期的な清掃などの保守が不可欠である。

3 超高速スピンドルの応用

日立ピアメカニクスで生産される超高速スピンドルは、すべて日立製のプリント基板穴あけ機に使用されている。また、一部のプリント基板外形加工機にも低速の静圧空気軸受スピンドルが搭載されている。日立製プリント基板穴あけ機の外観を図12に示す。

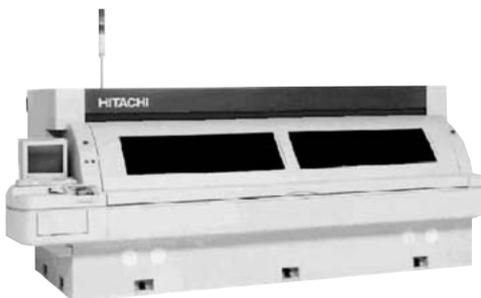


図12 日立製プリント基板穴あけ機
高速スピンドルで小径の高速・高精度加工を実現するプリント基板穴あけ機「ND-Q SERIES」の外観を示す。

標準仕様のプリント基板穴あけ機はスピンドルが6本搭載されており、多軸で同時加工することで生産性を高めている。一般的にドリルの寿命は2,000～5,000穴であり、ドリル寿命に到達したら、自動的に工具を交換する装置を各軸に備えている。機械搭載時のスピンドルと基板の構成を図13に示す。

ドリルによる穴あけ加工は乾式で行われるため、加工時に排出される基板材の切粉の処理が問題となる。プリント基板穴あけ機では、スピンドル先端にプレッシャフットと呼ばれるカップ状の部品を装着し、加工時に発生した切粉をプレッシャフットに接合した集じん機により吸い上げ、機外へ排出する。また、プレッシャフットは加工時に基板がずれないように、スピンドルの上下動に連動して、基板を押さえる機能を兼ねている。生産性を向上するため、通常、基板は2～6枚を重ねて加工する。プレッシャフットの接触による基板上面の傷を防止する目的で、基板の一番上にはアルミ製の上板を配置する。基板の最下層には下板と呼ばれる樹脂製の板を配置し、基板を貫通したドリルが下板の途中で止まるよう、軸の送り量を決めている。

0.1 mm以下の極小径ドリルでは、強度がもともと少ないので、切粉の排出が悪くてわずかなスラスト負荷の増大があってもドリルが折れやすくなる。

極小径(0.08 mm)ドリルで加工したときの切粉付着状況の比較を図14に示す。毎分30万回転の加工では溝部に切粉が付着しているが、毎分35万回転では切粉付着が低減している。極小径加工では、このように超高速回転が有利なことがわかっており、これはドリル折れなどの信頼性の面でも大きな効果である。

超高速スピンドルで加工した穴の断面写真を図15に示す。ドリルで加工した穴は曲がり少なく、基板の上面と下面で位置ずれが少ないのが特長である。

0.1 mmドリルによる穴あけ加工の生産性の比較を図16に示す。加工条件として、スピンドルの回転数が向

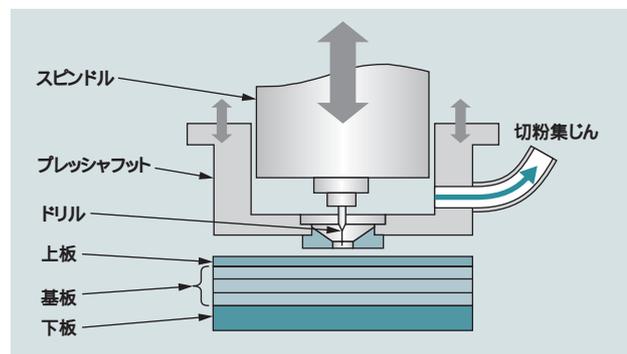


図13 機械搭載時のスピンドルと基板の構成

標準仕様はスピンドルを6本搭載して同時加工することにより、生産性を高めている。

上すれば、それに伴ってドリルの送り量も上げることができるので、結果として加工時間の短縮が可能である。特に極小径ドリルではスピンドルの超高速回転が生産性向上に効果がある。

毎分20万回転スピンドルを基準に比較すると、毎分35万回転スピンドルは0.1 mmドリルの加工において、約1.5倍の生産能力がある。生産性の基準となるのは基板の重ね枚数と毎分当たりのヒット数であるが、最近の0.1 mmドリルのヒットレートは1軸当たり600~700 hit/分で推移している。

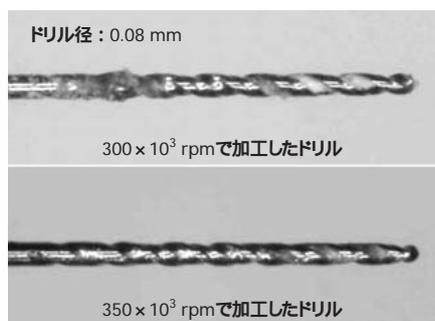


図14 超高速回転による極小径加工後のドリル
切粉の排出が悪いとわずかなスラスト負荷の増大があってもドリルが折れやすくなる。

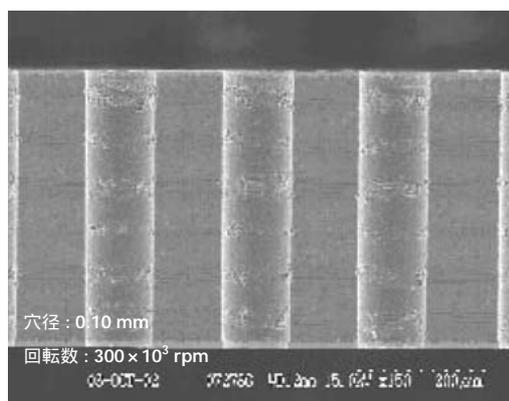


図15 プリント基板に加工した穴の断面
超高速スピンドルで加工した穴は曲がり少なくて、基板の上面と下面で位置ずれが少ない。

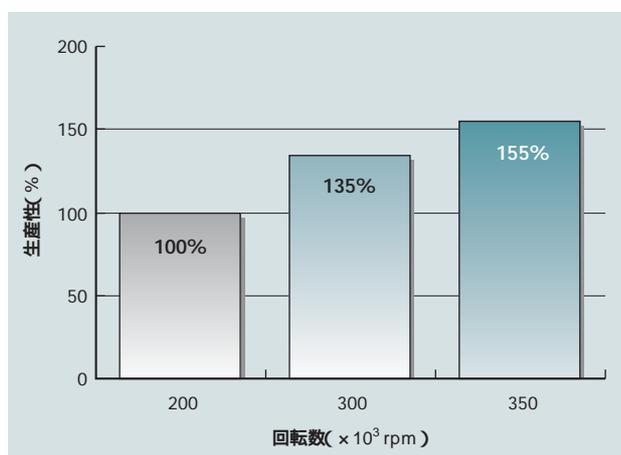


図16 超高速回転による0.1 mmドリルの生産性比較
スピンドルの超高速回転は生産性向上に効果的である。

4 おわりに

静圧空気軸受を用いた、プリント基板用穴あけ機用の超高速スピンドルについて述べた。

この超高速スピンドルにより、従来困難とされていた0.1 mm以下の穴あけにおいても、高能率、高品質の穴あけが可能となった。最近では、さらなる超高速化が必要とされている一方で、太い径の穴あけにおける低速域トルク性能の向上も要求されており、今後両面から積極的に開発を進める予定である。このような開発が他社に先駆けて可能となったのは、いち早くコアになる解析ソフトウェアやバランサーなどを開発し、製品に応用できたことが大きい。

なお本開発を行うにあたり、日立製作所 日立研究所 モータイノベーションセンタの三上浩幸氏にはACモータの解析と改良、機械研究所ソリューションセンタの吉富雄二氏には、材料の疲労強度評価でそれぞれご協力いただいた。本製品に携わった関係者各位に深く感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 十合：気体軸受，共立出版(1984)
- 2) 十合：気体軸受設計ガイドブック，共立出版(2002)
- 3) 多々良：静圧気体ジャーナル軸受のふれまわり安定性，日本機械学会論文集，34巻259号，p.560(1968)
- 4) 森，外：静圧ジャーナル軸受におけるホワール解析，機械学会論文集，36巻283号，p.494(1970)
- 5) 山本，外：回転機械の力学，コロナ社(2001)
- 6) F.F.Ehrich：HANDBOOK OF ROTOR DYNAMICS，KRIEGER PUBLISHING COMPANY(2004)
- 7) J.W.Powell：aerostatic bearings，The Machinery Publishing(1970)