

工作機械の高効率加工および主軸と軸受の技術動向

近森 章 浦野寛幸

Technical Trend of High Manufacturing Efficiency of Machine Tools, Main Spindles and Bearings

A. TIKAMORI H. URANO

Various kinds of production systems have been established with high altitude productivity and flexibility in order to response to diversification of consumer needs and cost reduction request from makers. Manufacturing machine, which is considered to be core of these production system, has very important role to achieve high manufacturing capability and efficiency.

Machining centers, which belong to general purpose category of manufacturing machines, are recently rapidly improving to have high efficiency capability.

Main spindle is one of the most important part of machine tool for high efficiency machining, and main spindle bearing is a key part to promote high speed operation.

This paper presents current status and future technical trend of main spindles and bearings.

1. はじめに
2. 高効率加工の変遷
3. 高速主軸の動向
 - 3.1 高速スピンドル
 - 3.2 高速主軸用軸受
4. おわりに

1. はじめに

消費者ニーズの多様化と生産者のコスト低減要求により、生産性と柔軟性の両面で高度化された生産システムが種々構築されてきた。この生産システムの中核をになう加工機械の加工能力・高効率化は非常に重要な要素を占めている。

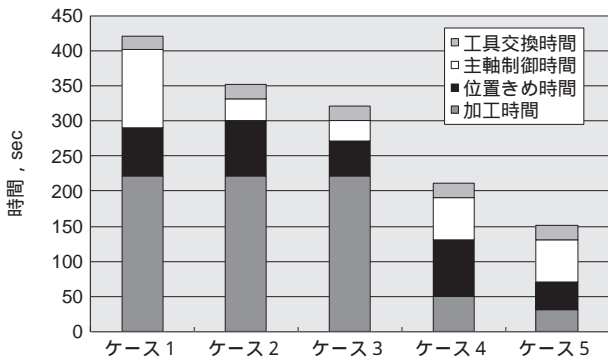
加工機械では、汎用性を考慮するとマシニングセンタがあげられるが、マシニングセンタでの高効率加工は近年、特に進歩が著しい。テーブルや主軸の送り機構には多糸ボールねじリニアモータを使用して60m/min以上の送り速度が実用化され、さらに、80~100m/minの送り速度をもったマシニングセンタも開発され、実用化に向かっている。

一方、ワークを加工する主軸は、MAS規格BT40クラスで高速・高出力化が進んでおり、このサイズの主軸で20 000~30 000min⁻¹が一般的になりつつあり、さらにインバータの進歩もあいまって、定格出力30kW以上のモータが搭載されるようになってきている。また、自動工具交換(ATC)

時間も1秒以下でおこなわれるものもあり、加工サイクル時間の中で実加工時間の割合が増加している。

このような情勢の中、自動車部品の加工シミュレーションを行うと図1¹⁾に示すとおり現在の工作機械のレベルからすると実加工時間に直接かわる主軸の高速化が高効率加工への重要な要素となっている。

今回、工作機械の高効率加工にとって重要な要素の一つとなっている主軸用スピンドルとそこに使用され高速化への推進役となっている転がり軸受について、現状と今後の進むべき方向について述べる²⁾。



	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4	ケース5
加工条件	現状	現状	現状	高速加工	高速加工
テーブル送り速度, mm/min	30	60	60	30	60
テーブル送り速度(加減速), m/s ²	3.4	3.4	12	3.4	12
スピンドル回転数, min ⁻¹	10 000	12 000	12 000	25 000	25 000
スピンドル加減速, sec	3.7	1.5	1.5	3.3	3.3

図1 自動車部品加工サイクルタイムシミュレーション
Machining cycle time simulation of automobile parts

2. 高能率加工の変遷

工作機械は、生産性と柔軟性の要求を満たすべく二つの経路で発達してきた。一つは、NC化され、次に自動工具交換(ATC)によって機能を集約したマシニングセンタへと進化した。もう一つは、いかに経済的に量産するかを命題に単能機、NC専用機を経て、工程分割思想に基づき、安価な加工機で品質保証が比較的容易なTR(Transfer machine)へと発展してきた。量産によるコスト低減を追求したTRは、投資に対する生産性が極めて高い生産システムになった。最近では生産品種が多様化している部品の共通化を図って部品品種の増大を抑える努力はなされているが、品種は着実に増加してきている。これを克服するために、多軸ヘッドの自動交換を可能にするなど、多品種化への対応が工夫されたFTL(Flexible transfer line)が開発され、導入されるようになってきた。それでも、現在の生産システムは生産要求を満足できるだけの十分な柔軟性を有しているとは言えないようである。さらに、現状より高能率の工作機械の開発が望まれていると考える。

3. 高速主軸の動向

3.1 高速スピンドル

生産の高能率化を進めるに当たって、主軸の高速化は重要な要素の一つである。高速スピンドルの動向を調査するために、1998年11月に開催された第19回JIMTOFにおいてマシニングセンタを中心に軸受に関する調査を実施した。この中から高速スピンドルに該当するものを抜粋して表1に示す。

表1から15 000~30 000min⁻¹の回転数をもったものが多いことがわかる。この回転数域になると、ベルトやギア駆動では出力、振動と発熱等の問題から対応が困難なため、高出力モータを内蔵したビルトインタイプのスピンドルが多いようである。また、マシニングセンタの軸は単に高速回転が可能だけでなく、高能率加工を狙いとして、ツール性能の向上により、切削量4 000cc/min以上の加工が可能になってきている。例を表2に示す。

表2 アルミ切削加工(例)
Milling of aluminum (an example)

<p>80, 4枚刃</p>	切削量	4 000cc/min
	主軸回転数	11 500min ⁻¹
	送り速度	18 400mm/min
	加工幅	50mm
	加工深さ	40mm
<p>32, 2枚刃</p>	切削量	3 000cc/min
	主軸回転数	20 000min ⁻¹
	送り速度	12 000mm/min
	加工幅	20mm
	加工深さ	12mm

表1 第19回JIMTOF(1998大阪)出展機械調査結果(抜粋)
Machine tools exhibited in the 19th Machine Tool Trade Fair 1998 in Osaka

メーカー	機械	スピンドル 姿勢	回転数 min ⁻¹	主軸径 mm	テーパ	潤滑方法	転動体材質	軸受予圧 方式	駆動方式	dn値 ×10 ⁴
A	マシニングセンタ	立型	20 000	65	NC5-63	アンダーレースオイルエア	セラミックス	定圧	ビルトイン	130
A	マシニングセンタ	立型	8 000	100	NC5-85	オイルエア	セラミックス	定圧	ギヤ	80
A	マシニングセンタ	横型	14 000	70	40	オイルエア	セラミックス	定圧	ビルトイン	98
B	マシニングセンタ	横型	10 000	110	50	オイルエア	セラミックス	定圧	ビルトイン	110
B	マシニングセンタ	横型	25 000	60	HSK63A	オイルエア	セラミックス	切り替え	ビルトイン	150
B	マシニングセンタ	立型	35 000	60	KM6350	オイルエア	セラミックス	定圧	ビルトイン	210
C	マシニングセンタ	横型	15 000	65	40	オイルエア	セラミックス		ギヤ	98
C	マシニングセンタ	横型	10 000	100	50	オイルエア	セラミックス		ギヤ	100
C	マシニングセンタ	立型	15 000	65	40	オイルエア	セラミックス		ギヤ	98
D	内面研削盤	横型	100 000	20		オイルミスト	セラミックス		ビルトイン	200
D	内面研削盤	横型	50 000	40		オイルミスト	セラミックス		ビルトイン	200
D	内面研削盤	横型	29 000	35		グリース	セラミックス		ベルト	102
D	内面研削盤	横型	60 000	40		オイルミスト	セラミックス			240
E	マシニングセンタ	横型	15 000	70	40	オイルミスト	セラミックス			105
F	マシニングセンタ	立型	25 000	70	40	オイルエア	セラミックス	定圧	ビルトイン	175
F	マシニングセンタ	立型	10 000	90		オイルエア	セラミックス			90
F	マシニングセンタ	横型	15 000	55		オイルエア	軸受鋼			83
G	マシニングセンタ	横型	15 000	90	BIG50+	オイルエア	セラミックス		直結	135
G	マシニングセンタ	立型	10 000	100	50	オイルエア	セラミックス	定位置	直結	100
G	マシニングセンタ	立型	20 000	65	40	オイルエア	セラミックス	定位置	直結	130
H	マシニングセンタ	立型	12 000	80	40	アンダーレースオイルエア	セラミックス	定位置	ビルトイン	96
H	マシニングセンタ	横型	12 000	100	50	アンダーレースオイルエア	セラミックス	定位置	ビルトイン	120
H	マシニングセンタ	横型	12 000	80	40	アンダーレースオイルエア	セラミックス	定位置	ビルトイン	96
I	マシニングセンタ	横型	12 000	100	50	オイルミスト	セラミックス	定位置	ビルトイン	120
I	マシニングセンタ	立型	12 000	100	50	オイルミスト	セラミックス	定位置	ビルトイン	120
I	マシニングセンタ	立型	12 000	70	40	グリース	セラミックス	定位置	ビルトイン	84
J	マシニングセンタ	立型	60 000	25	20	オイルエア	セラミックス	定位置	ビルトイン	150
J	マシニングセンタ	立型	8 000	100	50	オイルエア	セラミックス	定位置	直結	80
J	マシニングセンタ	立型	12 000	80	40	グリース	セラミックス	定位置	直結	96
K	マシニングセンタ	立型	12 000	80	40	オイルミスト	セラミックス		ビルトイン	96
L	マシニングセンタ	横型	20 000	100	50	アンダーレースオイルエア	セラミックス		ビルトイン	200
L	高速加工機	横型	50 000	50	コレット	静圧軸受				250
L	マシニングセンタ	立型	12 000	90	50	オイルミスト	セラミックス		ビルトイン	108
M	マシニングセンタ	立型	20 000	75	40	オイルエア	セラミックス	定位置	ビルトイン	150
N	マシニングセンタ	横型	25 000	65	HSK6350	オイルミスト	セラミックス	切り替え	ビルトイン	163
O	マシニングセンタ	横型	20 000	70	HSK63A	オイルエア	セラミックス	定圧	ビルトイン	140
O	高速加工機	横型	40 000	65	KM5040	ジェット	セラミックス	定圧	ビルトイン	260
O	マシニングセンタ	横型	15 000	100	50	オイルエア	セラミックス		ビルトイン	150
P	マシニングセンタ	横型	16 000	75	HSKA63	アンダーレースジェット	セラミックス	定位置	ビルトイン	120
P	マシニングセンタ	立型	20 000	90	40	アンダーレースジェット	セラミックス	定位置	ビルトイン	180
Q	マシニングセンタ	立型	36 000	30	20	オイルエア	セラミックス	定圧	ビルトイン	108

ここで、このようなビルトインタイプの高速主軸例を図2に示す。

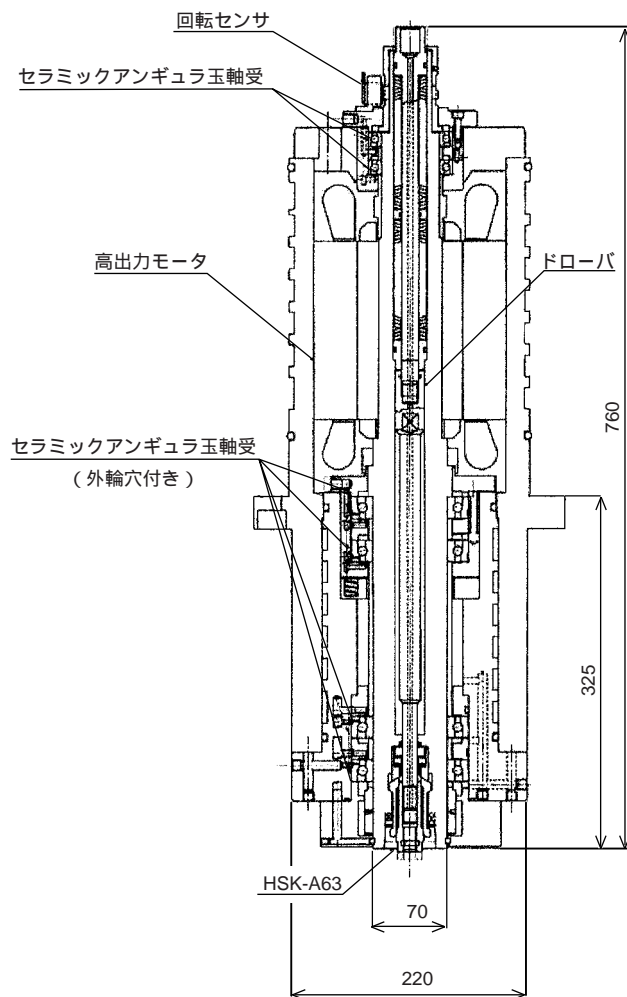


図2 ビルトインタイプ高速主軸(例)
Built-in-type high speed spindle (an example)

軸は、ツールを把持するツールホルダーを取り付けるテーパ形状を先端部に設けているが、最近ではテーパ部だけの保持方式から軸内径のテーパ部と軸端面の2箇所で保持する2面拘束方式のものに変わりつつある。この軸を支持する軸受は、ツール側は、軸剛性を高めるため4列のセラミックアンギュラ玉軸受(転動体がセラミックスの軸受)で、後部に2列の同じくセラミックアンギュラ玉軸受が使用されている。高速回転のスピンドルの軸受は、軸受内部損失が少なく、高精度が得られるアンギュラ玉軸受が通常多く使用され、転動体には比重が小さく高速回転時の遠心力の影響が小さいセラミックスの玉が多く使用されている。また、図2の軸受予圧方式は、予圧バネで軸方向に一定の負荷を与える定圧予圧方式であるがこの他、軸受のアキシャルすきまを管理した定位

置予圧方式がある。低速回転でのスピンドルでは定位置予圧方式が多く使用されるが、高速回転では定圧予圧方式が多く使用されている。それぞれ剛性、昇温、振動等の面での特徴を持ち両方式とも使用条件に合わせて使用されている。

また、マシニングセンタの主軸は、単に高速回転するだけでなく、下記機能等が要求されていると考える。

ツール自動着脱のためのドロバ、スルークーラント、主軸熱変位小、オリエンテーション、高出力、高剛性、主軸組立が容易

3.2 高速主軸用軸受

軸受に関する動向について表1をもとにまとめると以下となる。

dn値(軸受内径mm × 回転数min⁻¹)100万を越えた主軸の多くに転動体がセラミックスの軸受が使用されていた。転動体にセラミックスを使用することは一般的になってきたといえる。また、転動体にセラミックス、潤滑方法にオイルエアを使用しdn値200万(d_mn値：約250万、d_mn値は軸受PCDmm × 回転数min⁻¹)、転動体にセラミックス、潤滑剤にグリースを使用しdn値100万(d_mn値：約125万)が実用されるようになってきた。潤滑方式はオイルエア、オイルミスト潤滑が主流である。多量の潤滑油を必要とするジェット潤滑では複雑な付帯設備が必要であり、潤滑油の攪拌抵抗による動力損失が大きいため敬遠されがちと考えられる。

工作機械用スピンドルを支持する軸受として転がり軸受、静圧空気軸受、磁気軸受があるが静圧空気軸受は負荷容量小、剛性小、磁気軸受は低速で剛性小、高価格といった難点があり、転がり軸受が市場の大半を占めている。磁気軸受や静圧空気軸受を採用した機種も見られたが、両者を一体化し、性能の弱点をカバーした軸受の展示もあった。

転がり軸受の高速化では軸受メーカーが擬似スピンドルを用いて定圧予圧、転動体にセラミックス、潤滑方法にオイルエア、軸心冷却を使用しdn値300万(d_mn値：360万)を実演し転がり軸受の可能性を示していた。

転がり軸受の高速化の課題は遠心力、剛性、発熱、寿命、潤滑方法等にある。玉の遠心力の低減について軸受の内部諸元の面から考える。玉径を小さくすれば遠心力の影響が低減され(セラミックスの玉を使用すればさらに良い)³⁾、玉の滑りが小さくなり発熱が押さえられる。また、図3の

ように荷重に対する変位量も小さくなる。玉径と玉数に注目し(玉径を大きくすれば軸受内に入る玉数は減り、玉径を小さくすれば玉数は多くなり自然と玉径にあった玉数が決定される)剛性との関係を図3に示す。

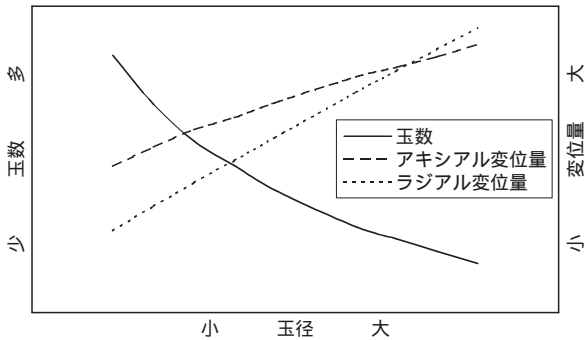


図3 玉径と玉数および変位量の関係
Relationship among diameter of ball and number of balls and displacement

玉径を小さくし玉数を多くすれば剛性があがることが分かる。ただし、玉径が小さくなると基本動定格荷重が減り計算寿命が低下する。そこで、寿命向上対策として軌道輪または転動体の材料としてセラミックス、浸炭鋼、高纯净度軸受鋼等を使用したり、浸炭や浸炭窒化等の表面処理を施す方法がある。とくに、軌道輪に浸炭や浸炭窒化品を用いると、限界円周応力値が向上するため、遠心破壊に対しても効果がある。潤滑方法は、軸受の潤滑の信頼性向上策として、側面からの給油に加え外輪側からの給油(図4)やアンダーレース潤滑等がある。

以上のような高速化の課題として考えられる項目があり、これらを考慮することで転がり軸受として $d_m n$ 値400万程度が見えてくるのではないかと考えられる。

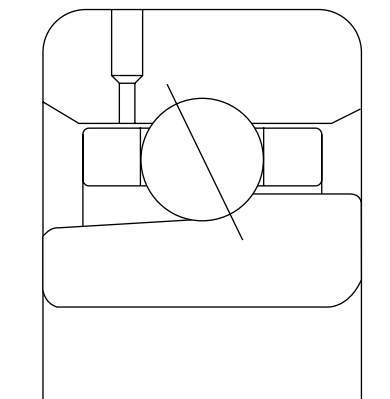


図4 外輪油穴付き軸受(例)
Bearing with an oil inlet hole

4. おわりに

高効率加工に対しては、切粉の排出量、主軸の移動速度、ワークの移動速度、刃物の交換速度、主軸の加減速時間などが考えられるが、その中で主軸速度の高速化が大きな要因を占めている。

この高速主軸用軸受として転動体にセラミックス、潤滑方法にオイルエアを使用し $d_m n$ 値200万($d_m n$ 値: 約250万)、転動体にセラミックス、潤滑剤にグリースを使用し $d_m n$ 値100万($d_m n$ 値: 約125万)が実用的となってきたおり、さらに定圧予圧、軸心冷却を使用することにより $d_m n$ 値300万($d_m n$ 値: 360万)の可能性が示されていた。

今後ますます高速化が進むと思われるが、実用化においては遠心力による影響(遠心破壊等)、剛性、振動、アンバランス、発熱、寿命、駆動方法、潤滑方法、潤滑装置の簡略化等総合的な取り組みが必要となる。

そして、相反する項目の克服が今後の課題であると考えられる。

参考文献

- 1) 高田 芳治, 山岡 義典, 鈴木 賢司, 水本 洋: 1996年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集.
- 2) 近森 章, 浦野 寛幸: 月刊トライボロジ, vol. 139, no. 3(1999) 43.
- 3) 川上 善久, 浦野 寛幸: 月刊トライボロジ, vol. 118, no. 6(1997) 30.

筆者



近森 章*
A. TIKAMORI



浦野 寛幸**
H. URANO

* 光洋機械工業株式会社 精密機器技術部
** 軸受事業本部 製品技術センター
航空・精密機器技術部