

工作機械の最近の技術動向

The Latest Technical Trend of a Machine Tool

上出和則 K. UEDE

Since the machine tool is "a machine for making machines," it is so-called the mother machine.

It could be classified into three processing material groups of "ferrous-," "non-ferrous-," and "hard and brittle-" materials while it could be classified into four groups of "automobile," "semiconductor, electric machine," "aerospace," and "die/mold" according to industry. Here, the latest technical trend of grinding machine is described.

Key Words: high accuracy, high efficiency, high productivity, ultra-precision, environment

1. はじめに

近年、生産拠点の海外移転による製造業の空洞化が顕著になり我が国が工作機械の世界的な供給基地として優位性を維持していくため、複合化、超高精度・超高速化などの最高級機へ進む一方、機能を落とさず価格面で対抗できる商品開発や環境対応、省エネ加工素材に着目した技術開発を進め、多様化の方向に活路を見出そうとしている。本報では、主要国工作機械の動向と技術概要を述べた後、固定砥粒を使用した研削盤の技術動向について述べてみたい。

2. 主要国工作機械の動向と技術概要

生産財である工作機械は景気サイクルと密接に連動しながら推移している。生産額の上位は日本、ドイツ、米国などで特に図1のように日本とドイツのシェアが高く2001年では両国が世界の約47%を占めている。

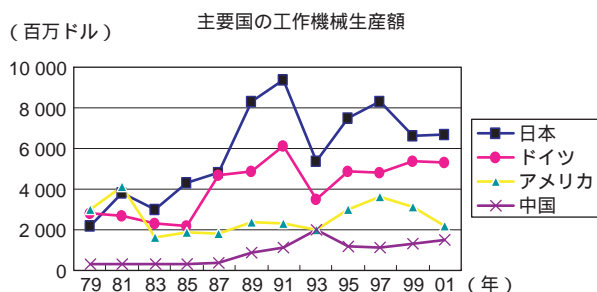


図1 主要国の工作機械生産額²⁾

Yield of machining tools in leading countries

日本は1982年に米国を抜いて世界一となって以来20年間その地位を保ちつづけている。日本が競争優位性を築いた理由としては、汎用機のNC化で先行したことと、家電や自動車産業の急激な拡大に伴って精度や能力などの厳しい要請に答えてきたことが大きな理由と言われている。しかし欧米諸国もNC化で追いついてきており、特にドイツは日本を抜いてトップになる予測もでている。このような背景の中、最近の技術動向を特許出願内容から次世代に求められる要素技術と加工方法についてまとめた。

1) 高精度・高効率な工作機械

- ・高速主軸.....10 000min⁻¹以上長時間高速回転可能な軸受技術
- ・パラレルメカニズム.....目標位置へ直接高速移動できる技術
- ・リニアモータ駆動.....高推力、高加速度で高精度位置決め技術
- ・複合加工.....1チャック複数工程加工技術、グラインディングセンタ

2) 超精密加工が可能な工作機械

- ・半導体ウエハ.....ナノレベルの平坦化技術
- ・金型加工.....非球面レンズ等のナノレベル加工技術
- ・難削材の加工.....水晶、セラミック、サファイヤ等の高精度加工技術

3) 環境負荷に配慮した工作機械

- ・脱鉍油.....ドライ加工(切粉、廃油、廃液処理とミスト拡散)
- ・省エネルギー、騒音防止技術

3. 研削盤の位置づけ

国内工作機械の生産高に占める研削盤の比率は表1のようにおおむね10%である。旋盤，フライス盤，マシニングセンタなどの工作機械で加工するモノづくりにおいて研削盤はアンカーマンとして位置付けられる。研削加工はいろいろな点で切削加工と研磨加工(遊離砥粒)の中間に位置づけられる。しかし最近，ハードターニングやネットシェイプ加工が進歩して研削不要の傾向にある反面cBNやダイヤモンドなど超砥粒ホイールの著しい進歩により鏡面加工(ラップ工程)や旋削加工に対抗できる高能率加工が可能になり研削加工の将来性が拡大しつつある。研削加工の優れた特徴として下記の内容があげられる³⁾。

- ・ 高能率加工ができる。
- ・ 工具(砥石)自体の成形，再生が機上で容易にできる。
- ・ 工具(砥石)剛性が高く，運動軌跡の転写性が高い。
- ・ 切れ刃が高硬度で耐摩耗性に優れ，硬脆材料の加工にも適している。
- ・ 工具(砥石)剛性や研削剛性を比較的容易に変更できる。

表1 国内工作機械の生産高¹⁾
Yield of machining tools in Japan (億円)

	国内全体	研削盤	比率	備考
1990年	13 034	1 562	11.9%	生産Max
1994年	5 540	680	12.3%	生産Min
2000年	8 146	785	9.6%	
2001年	7 764	830	10.7%	
2002年	5 851	562	10.6%	

4. 次世代研削盤の技術動向

次世代研削盤(固定砥粒)の主要テーマは，

- ・ 高精度・高効率，高能率加工技術.....
自動車製造業のコスト競争力の確保
- ・ 超精密加工技術.....情報通信，半導体分野への対応
- ・ 環境対応技術.....地球環境保護

で特に小型/高精度部品に合わせた機械の開発が必要とされる。

4.1 高速研削について

自動車部品の生産システムは少種大量から変種変量生産に変わりつつあり生産技術からみた研削加工ニーズは計画変動に柔軟に対応でき，その上ミニマムコストを追求できる高い生産性を実現する

加工技術が求められる。

4.1.1 高速研削の研削理論について

研削理論から考える高能率化として高速研削(砥石周速100m/s以上)を考えてみたい。

$$Z' = V_w \times \Delta \dots \dots \dots (1)$$

$$F_t = C_p \left[\frac{V_w \times \Delta \times b}{V_s} \right] + \mu F_n \dots \dots \dots (2)$$

$$F_n = C_p \left[\frac{\pi \times V_w \times \Delta \times b}{2 \times V_s} \right] \tan \alpha \dots \dots \dots (3)$$

- Z' : 単位時間，単位砥石幅あたりの除去体積
 - F_t : 研削抵抗の接線分力
 - V_w : 加工物速度
 - Δ : 砥石半径切込み深さ
 - C_p : 比研削エネルギー
 - b : 研削幅
 - F_n : 研削抵抗の法線分力
 - V_s : 砥石周速度
 - α : 砥粒半頂角
 - μ : 砥石と加工物の摩擦係数
- 上記(2)，(3)式より

・ V_s，V_wを同時に同じ比率で大きくすれば研削抵抗F_t，F_nを増大させずに研削能率Z'(式(1))を向上させることができる。また，研削能率Z'を変えずにV_s(砥石周速度)だけを大きくすると研削抵抗は小さくなる。図2は砥石周速度増大による効果であり面粗さRaも減少している。

研削能率Z'(式(1))を向上させることによりC_p(比研削エネルギー)が減少しエネルギー的に効率的な加工ができる。

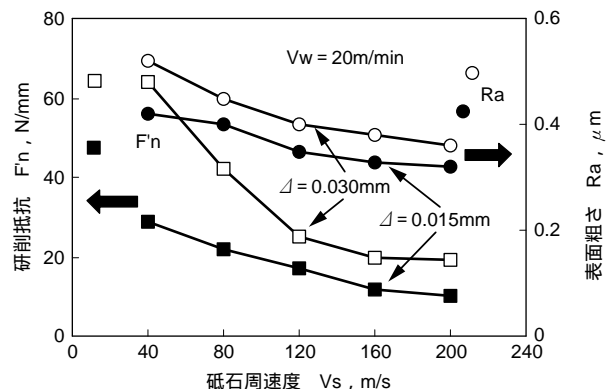


図2 砥石周速度の増大による高速研削の効果⁵⁾

Effect of high-speed grinding by increase in peripheral velocity of grinding stone

4.1.2 高速研削のメリットについて

- ・生産性向上と低コスト化
研削除去率の増加
ドレス間隔の延長(長寿命)
- ・品質向上
面粗さ向上
- ・生材加工ができる
(通常周速では構成刃先により加工不可能)

4.1.3 高速研削の要素技術について

- ・超砥粒砥石のツルueing/ドレッシング
- ・高速,高精度砥石軸
- ・安全性,騒音,動バランスなど

この中で研削性能に一番影響を及ぼすのが超砥粒砥石のツルueing/ドレッシング技術である。角柱のダイヤモンドロータリドレッサを用いた場合砥石との周速比が重要で下記の手順となる。

- ・ドレッシング速度比1.0でアップツルueingを行い,ホイール表面形状精度を出す。
- ・ドレッシング速度比0.9でダウンツルueingを行い微細破碎を生じさせ切れ刃を生成させる。

ところが高速研削の場合,砥石周速100m/s~200m/sでありダイヤモンドロータリドレッサを同周速で回転させる場合ツルueの外径を砥石径と同等にするか回転速度を上げる必要がある。たとえば砥石径45(砥石周速100m/s)に対しツルue径100の場合約20000min⁻¹のスピンドルが必要で下記の課題がある。

- ・限られたスペースでスピンドル剛性の確保が困難
- ・ツルue径を大きくしたり,高周波モータなど使用するとコストアップになる。

この課題を簡易的に解決する手段として砥石周速を下げてツルueingを実施した後高速回転(砥石周速100m/s)で研削する方法があるが,条件の違いにより研削時に下記の問題が発生する。

- ・cBN砥石の遠心膨張による振れの増大で加工精度不良

結論としてツルueing条件は必ず研削条件で行う必要性があり,解決法として放電ツルueingが有力である。放電ツルueingの内容については,ここでは省略する。

表2 実験データ

Experimental data

(砥石:cBN80 0 150VN1E)

砥石回転速度, min ⁻¹	膨張半径, μm	振れ, μm
500 2 500	5	変化なし
500 5 000	23	7

4.1.4 技術の複合化.....
高速研削と放電ツルueing

放電ツルueingの利点は,

- ・非接触ツルueing方式のためスピンドル剛性の考慮不要
- ・砥石周速に拘束されない。
- ・メタルボンドホイールのツルueingができる。

以上高速研削について述べたが,cBN砥石(455×205mm)の価格は数百万円と高価である。しかし,小径砥石(例えば305mm)で高速研削により大きい砥石と同等の研削能率が確保されれば機械の小型化にもなりトータルコストも上昇しない。今後,高速研削による高能率加工が自動車産業などのコスト競争力に貢献できると考える。

4.2 超精密加工技術について

電子,光学部品の超精密加工技術は遊離砥粒を用いる加工技術の進歩によるところが大きい。しかし昨今では固定砥粒への転換の機運が高まっている。

- 主な理由は
- ・環境問題の改善要求
 - ・生産性向上
 - ・加工量の制御が容易

シリコンウエハ,LED用サファイヤ基板に代表される硬脆材料は今後ますます需要が拡大される。特にLEDは信号機,車載用と拡大し2010年に一般照明用に普及すると予測されている。図3の生産予測では2010年に200万枚/年の見込みである。

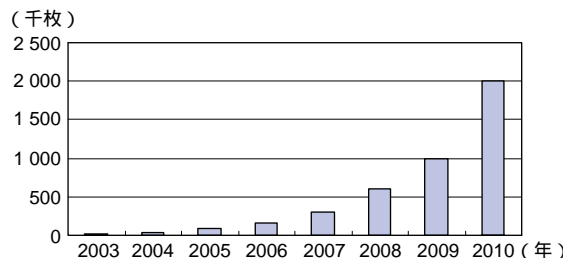


図3 LED用ウエハの生産量予測(2インチ換算)
Yield prediction of LED wafers (in terms of 2 inches)

4.2.1 延性モード研削について

材料除去加工における表面創成原理には圧力転写と運動転写がある。

圧力転写.....遊離砥粒によるラッピング，ポリッシング加工と固定砥石を用いたホーニング，超仕上げ加工

運動転写.....固定砥粒を用いた延性モード研削

通常の固定砥粒を用いた研削は脆性モード研削で切残し率の存在によるスパークアウト研削が存在し運動転写と圧力転写の2領域が混在する。

硬脆材料の研削における課題はダメージ層すなわちクラックによる加工品質低下である。ダメージを発生させる表面エネルギーは砥粒切込み深さ d_g の2乗に比例する。硬脆材料をクラックのない滑らかな面に加工することを延性モード加工と呼ぶ。個々の砥粒による切込み深さ d_g は切削作用の基本であり延性モード研削の条件は、

- $d_g < d_c$ d_g : 砥粒切込み深さ(図4)
- d_c : 延性 / 脆性遷移点($0.1 \mu\text{m}$ 以下 材料により異なる)
- $d_g > d_c$ の場合脆性モードでクラックなど脆性破壊による加工

均一化された砥粒が十分多数存在する砥石
超精密，高剛性運動を満足し熱変位が少ない機械
延性破壊モードでの砥石のツールイング
砥石の摩耗形態が延性モード摩耗になる研削条件

であるが問題点として

- ・生産性が低い
- ・生産ラインで延性モード研削を維持できない。
- ・運動転写を実現する要素技術レベルが高い

と言われており課題も多い。

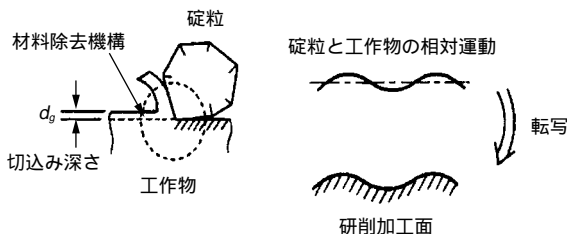


図4 延性モードによる運動転写⁴⁾
Motion transcription by ductile mode

4.2.2 定圧送り研削について

延性モード研削は新しい研削理論に基づく超精密加工であるが4.2.1項で述べた研削の条件を実現する一例としてELID研削法などがあるが克服すべき技術課題が多くある。これから述べる定圧送り研削も硬脆材料をクラック無しで加工できる，新しい発想の研削技術と考える。図5のとおり研削方向に，定圧機構を仕上げ面方向に定寸機構を適用した。送り推力を一定制御(最大200g)にして削られる材料の立場で機械の動きを制御し砥石の切れ味に合わせて加工が進行する。理想的には研削法線方向の力はゼロである。

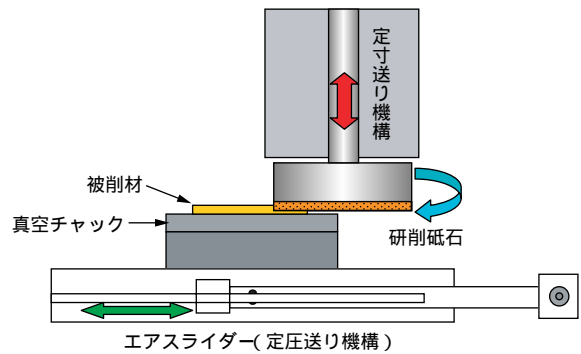


図5 定圧送り機構⁶⁾

Constant-pressure feeding mechanism

技術的課題として

- ・定圧送り機構の力制御(エアまたはモータ式で送り推力のムラなし機構)
- ・高能率新型砥石の開発

などがあげられるが今後有望な加工技術と考えられる。

4.2.3 その他について

詳細技術内容を省略してその他の主なアイテムをあげると

- ・金型用広角非球面レンズ加工
- ・ガラスディスク用固定砥粒ラッピング加工

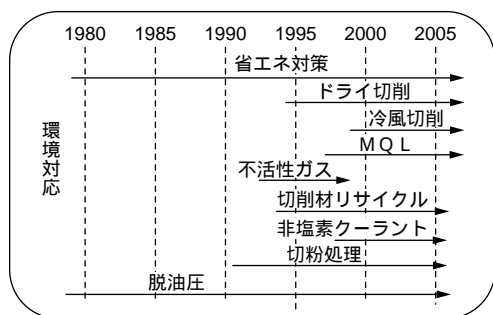
4.3 環境にやさしい工作機械について

工作機械は製造時と廃棄時は環境負荷が少ないのが特徴で，リサイクル率も高く有害な要素を含んでいないため環境にやさしい製品であるといえる。一方代表的な生産財でかつ長寿命であるため使用時における環境負荷が95%以上であるといわれており産業界全体に及ぼす影響は大きくこの課題に今まで以上に取り組む必要がある。

4.3.1 環境関連特許出願動向

環境対応技術は表3のように大きく2つに大別される。

表3 環境対応技術²⁾
Technology coping with environment protection



- ・ 脱鉍油
- ・ 省エネルギー

特許出願の動向でみると省エネルギー技術は1992年以降ほとんどなかったが、1997年より再度増加している。また脱鉍油に関するものが近年増加しておりその中でもドライ加工，MQL加工，冷風加工が顕著である。また研究難度は高いが作動油，潤滑油，加工液の3つを統合する取組みが始まっている。

4.3.2 省エネルギーについて

工作機械の電力消費はおおむね(表4)の比率である。一方加工時間以外のエネルギーとして待機エネルギーが40～50%もあるといわれている。待機エネルギーは機械が稼動していない時のエネルギーで主軸の空転など(図6)の固定分を含んでおり、この待機時間はなくすることはできないため、待機エネルギーを低減するよりはなくす技術開発が重要となる。主軸のON/OFFによる熱変位など解決すべき技術課題は多いが削減アイテムとして表5に内容をまとめた。一方実稼動(加工時)において加工時間の短縮と加工エネルギーの低減が考えられる。これらについて表6にまとめた。

また研削盤は切削機に比べ冷却水のドライ化，セミドライ化が難しくクーラントの量を削減する技術開発が遅れているが今後取り組むべきアイテムである。

表4 工作機械の電力消費
Power consumption of machining tool

主軸などの加工部位	40%
クーラント供給装置	20%
加工物移動体/搬送	20%

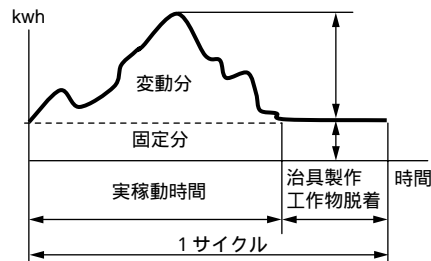


図6 工作機械のエネルギー消費⁷⁾
Energy consumption of machining tool

表5 待機エネルギー削減アイテム
Items for reducing standby energy

- ・ 必要時のみ加工液，エアなどの供給
- ・ コンベアの無負荷時停止
- ・ 動力不要バランス
- ・ 不要時のオートパワーカット(動力遮断)
- ・ 制御盤冷却構造(冷却フィン，形状最適化)
- ・ 主軸など停止

表6 研削時のエネルギー低減
Reduction of energy when grinding

- ・ 低動力，低発熱の砥石軸
- ・ 移動体の軽量化
- ・ 微量冷却水+微量潤滑油による冷却水の削減
- ・ スライド摩擦損失低減技術.....静圧など
- ・ 駆動効率の向上.....ダイレクトドライブ
- ・ 高効率機器の使用.....モータなど

5. 次世代研削盤のまとめ

高能率加工で切削機に対抗し，超精密加工でラップ領域を超える加工技術を発展させ，切削工具と遜色ない研削のデジタル化を砥石の革新(夢の砥石)で実現させることが重要である。

6. おわりに

日本の工作機械はNC装置と工具の深化で飛躍的に発展してきたが，最近ニーズの多様化でその方向性を模索している。産業界が中国に勝つためには生産性の高い機械を求める一方，超精密加工技術に対抗する機運も高い。また，これらを総括してIT技術が重要とする考えもある。すなわち需要変動に対応するフレキシブルシステムや技能者不足をカバーする知能化技術である。いずれにしても自動車，電子，半導体などの動向を注視して選択と集中で技術開発を行う必要がある。

参考文献

- 1) 工作機械統計要覧(社団法人 日本工作機械工業会).
- 2) H14年 特許出願技術動向調査分析 報告書(特許庁).
- 3) 生産財マーケティング(2003. 8).
- 4) 精密加工の最先端技術(日本学術振興会 第136委員会)
- 5) 太田 稔：機械と工具，工業調査会(2000. 8).
- 6) 松丸幸司：IDEMA Japan News no. 48(2002. 5, 6).
- 7) 岡本政弘：砥粒加工学会誌(2002. 9).

筆 者



上出和則*
K. UEDE

* 光洋機械工業株式会社
取締役 開発技術部