

工作機械の機能と性能の向上に向けて

稲崎一郎

Performance Enhancement of Machine Tools

Ichiro Inasaki

Abstract: Some important issues to be considered for improving the performance of machine tools, such as machining accuracy and productivity, are discussed. Form shaping theory for creating the new machine tool structure, directional factor for increasing the rigidity, thermal constant for reducing the thermal error, and environmental issues are discussed.

Keywords: Machine tools, Form shaping theory, rigidity, Thermal deformation, Ergonomics, Energy reduction

1. はじめに

生産活動の基盤である工作機械は、加工部品の形状を材料除去によって創成することを機能として、その精度と能率面での性能を顕著に向上させてきた。これら基本性能に加えて、新たな性能評価項目も加わって、工作機械の付加価値は益々高いものとなっている。我が国の工作機械技術が高い競争力を持って世界を先導し続ける上で必要と考えられる技術課題を纏める。

2. 工作機械の機能と性能

工作機械は、母なる機械と呼ばれているとおり各種の機械部品を生産しているが、その核となる機能は部品形状の創成である。加工物と工具との間に、直線と回転運動を基本とする相対運動を与えて形状を創成する。この運動を創成運動と呼ぶ。正確な創成運動の達成には、工作機械を構成する部品の精度と組立精度が高いことが必須である。加えて、遂行する加工プロセスで生ずる加工抵抗と加工熱による変形を極力小さくすることが加工精度と加工能率向上の上で最も重要な性能である。

上述した高精度、高能率加工は、工作機械の 1 次性能と呼ぶことができ、これら性能を高めるためには、工作機械の静的剛性、動的剛性、加えて熱的剛性が高くなければならない。1 次性能に加えて、2 次性能としての安全性、操作性等の人間工学的側面、環境親和性も重要な評価項目となっている。1990 年以降、特に環境負荷の低減が重要性を増し、消費エネルギーと廃棄物の低減が関心事となっている。

3. 新構造工作機械創出の可能性

工作機械の形状創成理論は、D. N. Reshetov と V. T. Portman が 1986 年に著した”Accuracy of Machine Tools”に纏められている⁽¹⁾。各種工作機械の創成運動を、同時座標変換行列を使用した数学モデルで記述することを可能としたもので、多様な工作機械の開発や加工シミュレーション等、その応用範囲は計り知れない。

図 1 に示したように、工作機械の構成要素それぞれに直角座標系を与え、要素間の相対運動（X, Y,

Z 軸方向の直線運動と各軸周りの回転運動)を考慮して加工物座標系から見た工具切れ刃のベクトルを誘導することによって形状創成関数を誘導することができる. 相対運動のそれぞれに 1 から 6 までの数字を与えると, これら数字のコード化によって工作機械の創成運動を表現することができ, 数字コードの順列組み合わせを考えることによって多様な工作機械構造を系統的に創出することができる. これによって, ある特定の目的に対してより優れた性能を発揮する工作機械が生み出される.

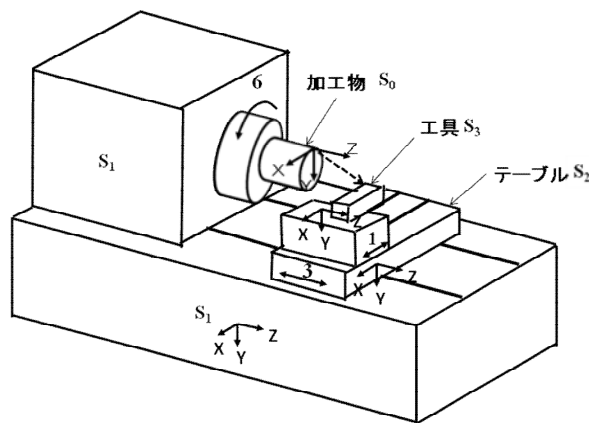


図1. 旋盤の形状創成モデル

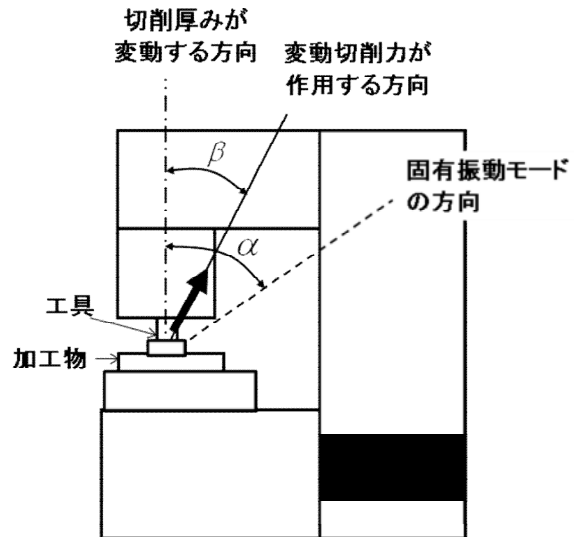


図2. 剛性の異方性

4. 1 次性能向上への方策

自励びり振動の発生は, 加工精度の低下のみならず加工能率の低下をも引き起こすため, 工作機械の動的安定性の向上は強い要望である.

動的安定性を高める上で重要なことの一つは, 機械系の減衰性を高めることである. 構造要素結合部での減衰を高めることも考えられるが, 剛性の低下につながる恐れもある. そこで高減衰材料の使用がもっと積極的に考えられても良いと思われる. 近年種々の分野で使用が増えている複合材料は, 高強度である上に材料減衰も高く, 比重も軽いため高速運動する構造要素部分に効果的に使用できる.

安定性向上の上で, 構造剛性の異方性にもっと注目する価値がある. 工作機械構造を簡略化して静剛性 \$k\$ で代表させる場合が多いが, 実際には機械構造の固有振動モードの方向, びり振動発生の原因である再生効果が切削厚みの変動方向に依存すること等を考慮に入れた剛性を考えなければならない. 図2はこれらの関係を示している. 切削厚みが変動する方向に対して, 機械構造の固有振動モードの方向を \$\alpha\$, 動的な切削抵抗が作用する方向を \$\beta\$ とすると, 励振点における入力 (変動切削力) と出力 (切削厚みが変動する方向の振動応答) 間の相互コンプライアンスは

$$\frac{y(j\omega)}{F(j\omega)} = \frac{1}{k} G(j\omega) \quad (1)$$

$$g = \cos(\alpha - \beta) \cos \alpha \quad (2)$$

である. ここで \$g\$ を方位係数と名付けると, 方位係数を減少させる構造設計は, 静剛性 \$k\$ を増大させるのと同じ効果を持つことになる. 動的安定性の向上対策として工作機械構造の改良余地はまだあるように思われる.

加工誤差発生の原因として工作機械の熱変形が重要視されている．熱変形の抑制を図るための工作機械構造を考える上で，時定数の考慮が重要である．工作機械構造の変形は時間の関数でもある．ある構造部材が置かれている周囲温度が階段状に $\Delta\theta$ 上昇したとき，部材の温度上昇 $\theta(t)$ は1次遅れ系の挙動を示し

$$\theta(t) = \Delta\theta \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \quad (3)$$

となる．ここで T は時定数で，

$$T = \frac{\rho c V}{\alpha S} \quad (4)$$

ρ ：密度， c ：比熱， V ：体積， α ：熱伝達率， S ：表面積 などは部材に関する定数である．時定数が小さければ周囲温度の変化による変形の応答速度は速い．熱伝導による部材の温度変化もその熱容量($\rho c V$)の関数で，熱容量が大きければ温度変化は緩慢となる．時定数を小さくして定常変形状態に早く到達するようにするか，時定数を大きくして周囲温度の変化や熱伝導に対する応答を鈍感にするかは，工作機械を設計する際にその大きさ，作業状況，環境条件を考慮して決定する必要がある．

図3において，工具側（コラム，主軸頭）の時定数を T_1 ，加工物側の時定数を T_2 とする．周囲の温度が $\Delta\theta$ だけ上昇したとき図（7(b)）， $T_2 < T_1$ であると，加工物側の方が早く定常変形状態に達する．熱変形が起こる前の加工物のある点Aと工具の先端位置Bのベッド上面からの高さが L で等しく，かつ全構造部材の線膨張係数が等しいとすると，十分に時間が経過した後では温度上昇による変形量は等しく，AB間には y 方向における相対変位は無い．しかし，定常状態に至る途中では，時定数の違いによって相対変位が生じているのである(図3(c))．

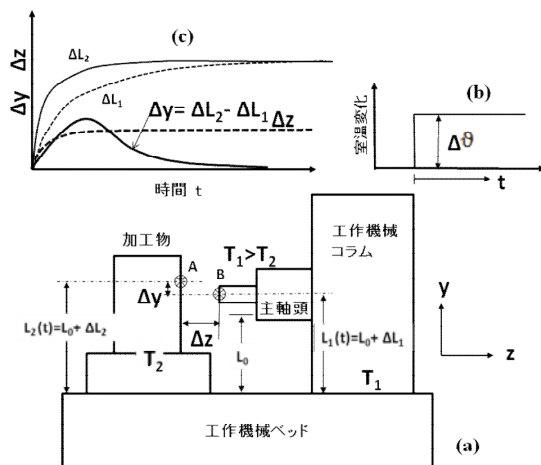


図3．熱変形の時間経緯

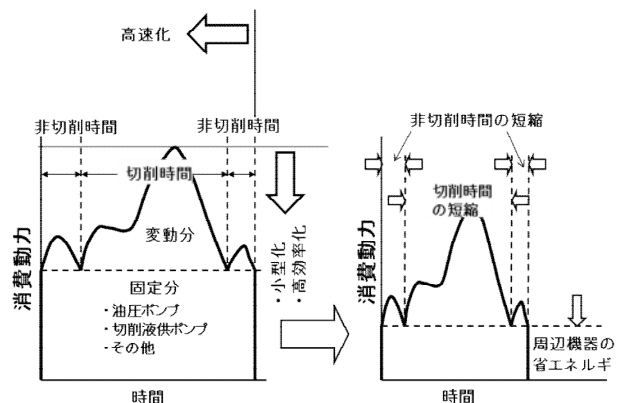


図4．工作機械の電力消費

5. 2次性能向上への方策

工作機械の自動化が進んだとは言え，安全性と操作性に代表される人間工学的な性能は依然として重要である．特に高速化に伴う事故の発生に対する安全対策は万全でなければならない．

1990年代にはいつて，各種製品が使用される段階だけではなく，製造される過程での環境負荷も

重要視されるようになってきた。工作機械は、自身においては使用段階での環境負荷が評価されることになるが、これによって加工される部品にとっては生産段階での環境負荷を左右するのでその対環境性能向上が重要である。

工作機械運転時の環境負荷として重要なのは、エネルギー消費と切削液の使用に伴う問題である。図4は工作機械運転時の電力消費を示したものである。切削液供給ポンプ等の固定分と、切削に伴う変動分とに分けられるが、固定分が占める割合が多い。消費エネルギーを低減するには、動力消費を減らす工夫と加工時間を減らす工夫が必要である。動力消費の低減には、切削液供給ポンプなど周辺機器の減エネルギー化と工作機械の小型化、また注意深い節電に努力が払われている。切削液供給ポンプは多くの割合の動力を消費しており、これを低減するためのニアドライ切削に大きな関心が寄せられている。ニアドライ切削を成功させる上で切屑処理は重要課題である。

加工時間の短縮には高速切削が有効で、主軸の高速化とテーブル運動の高速化が進められている。工作機械技術者が最も力を注いでいる領域である。駆動用モータの発熱を抑えた小型化は最重要課題の一つである。モータメーカ、軸受けメーカ、工作機械メーカの協力による小型・低発熱・高速主軸の開発は、間違いなく競争力ある高性能工作機械としての評価に繋がるであろう。

サイクルタイムの短縮には切削時間だけではなく、工具交換、加工物交換等に伴う非切削時間の短縮も重要である。特に工具交換が頻繁なマシニングセンタにおいては、主軸の高速化だけではなく、高加速度化、高減速度化が必須で、これには回転主軸の質量低減が効果的である。複合材料などの軽量高強度材料の使用がもっと積極的に考えられても良い。複合材料は材料減衰性も大きくびびり振動の抑制にも効果があると考えられるからである。

6. あとがき

工作機械の機能と性能の向上を図る上での重要な技術課題を述べた。これまで、工作機械の性能向上は長時間をかけて達成されてきた。ここで述べた技術課題に真摯に取り組み、地に足のついた技術開発を確実に進めることが、長期に亘って競争力ある工作機械の製造に繋がると考えている。

謝辞

本研究は中部大学総合工学研究所教育研究費 平成23年度の援助を受け遂行されたものであり、ここに謝意を表します。

参考文献

- (1)D.N.Reshetov, V.T.Portman: Accuracy of Machine Tools,ASME Press, 1988
- (2)W.Redeker,J.Herbst: Konzeption von Aussenrund-schleifmaschinen unter Beruecksichtigung der Ergonomie, Schleifen, Honen, Laeppen und Polieren, Vulkan-Verlag, (1977) 280