

足利工大 ○宮下政和、稲葉文夫、金井 彰、戸部省吾

要旨

超精密研削精度を実現するために必要な研削機械および研削砥石の設計仕様を運動転写原理と高い転写精度を保障する研削工程パラメータの設計を通して設定する設計手順を提示する。

1. 運動転写原理と超精密研削工程の設計

材料除去加工における運動転写原理を図1に示す。工具・工作物間の相対運動が入力で、工作物加工面が出力であるが、材料の破壊モードが転写精度を支配し、いわゆる流れ形切屑の発生が望まれる。超精密研削工程の設計手順は図2のように示される。

2. 超精密研削工程の必要条件

2.1. 延性モード研削加工 ぜい性材料の場合、延性モードの切り厚さ限界が金属のそれに比べ、 $10^{-5}$ ないし $10^{-6}$ 倍の微量となる。

2.2. 研削除去率  $Z'$  [ $\text{mm}^3/\text{mm}\cdot\text{s}$ ] または  $\text{MRR}$  - Material Removal Rate. 寸法、形状誤差を10nmオーダーで修正除去加工するには、これに対応した微小研削除去率研削工程を実現する必要がある。

2.3. 自励びり振動の除去

2.4. 研削工程の一次遅れ系としての運動転写誤差の減小 従来、切残し率といわれている運動転写誤差を10nmオーダー以下に抑えるために、剛性設計上格段の改善が必要である。

2.5. 出力としての目標加工精度に対応した入力としての工作物・研削砥石間相対運動創成機械

3. 超精密研削工程のキーパラメータと必要条件

3.1. 延性モード研削加工 T.Bifanos<sup>(1)(2)</sup>らによれば、押し込みテストにおける延性・ぜい性遷移点深さから推定した延性・ぜい性遷移切り厚さ  $d_c$  は

$$d_c = 0.15 (E/H) (K_c/H)^2 \quad (1)$$

金属およびぜい性材料の  $d_c$  の計算例を表1に示す。

3.2. 研削除去率  $Z'$  [ $\text{mm}^3/\text{mm}\cdot\text{s}$ ] または  $\text{MRR}$  の分解能

超精密研削加工は、圧力転写型のラッピングあるいはポリッシングに代わる新しい運動転写型研削加工といわれる。このことを  $\text{MRR}$ -Chart 上で示すと図3のようになる<sup>(3)</sup>。 $Z'$  の限界を材料除去分解能と呼ぶ。これに関する概念として R.S.Hahn による研削開始圧力があるが、焼入鋼およびガラスの心なし研削実験例を図4<sup>(4)</sup>に示す。研削開始圧力  $F_{th}$  は約2Nである。ここで、寸法、形状誤差修正限界  $\Delta_{min}$  は

$$\Delta_{min} = F_{th}/K_m \quad (2)$$

ただし、

$K_m$  : 工作物、砥石間の総合剛性

$k_{ms}$  : 砥石支持剛性、 $k_{mw}$  : 工作物支持剛性

$k_m$  : 研削機械総合剛性、 $k_{con}$  : 砥石の接触剛性

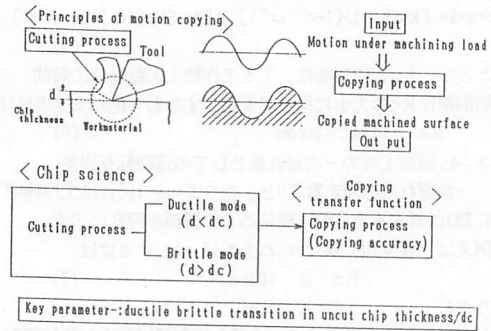


図1. 機械除去加工における運動転写原理と転写精度

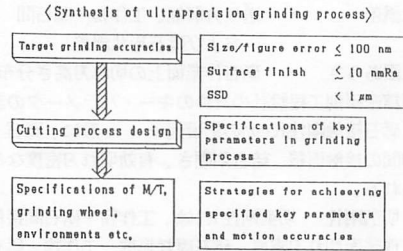


図2. 超精密研削工程の設計手順

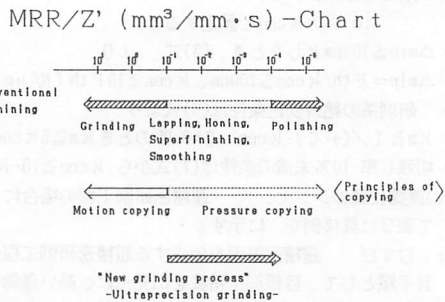


図3.  $\text{MRR}$ -chart上の従来砥粒加工と超精密研削加工技術の領域

$1/Km=1/km+1/kcon$ ,  $1/km=1/kms+1/kmw$   
 $km \gg kcon$  のとき、

$$\Delta min = F th / kcon \quad (3)$$

また  $\Delta min <$  寸法、形状公差 (4)

ガラス研削の場合には、 $F th$  の存在は認められない。これは、 $dc$  値の比較からぜい性材料研削の一般的特性と考えられる。

3.3. 研削加工系の絶対安定条件 図5に、外径円筒プランジ研削系のブロック線図、安定判別線図およびキーパラメータを示す。安定判別式は、  
 $Neg \cdot Re [km/Kc \cdot 1 / (1 - e^{-j\omega T})] \geq Re \cdot [Gm(j\omega) + km/kcon]$  (5)

ただし、 $k_c$ : 切削剛性、 $T$ : 工作物1回転当りの時間  
 切削剛性  $k_c$  の大小に拘らず安定、すなわち絶対安定条件は  
 $km > 1/4 \zeta \cdot kcon$  (6)

3.4. 研削工程の一次遅れ系としての運動転写誤差  
 一次遅れ系の時定数  $T_0$  と、送り  $f = a \cdot n$  ( $n$  は工作物回転数) に対する定常転写誤差  $\Delta f$  の関係を図6に示す。

例えば、 $a = 100 \text{ mm/rev}$ 、 $\Delta f \leq 10 \text{ nm}$  とするには、  
 $Km \geq 10kc$  (7)

ただし、 $T_0 = kc/Km$   
 3.5. 目標加工精度達成に必要な研削機械および研削砥石加工精度仕様 研削機械・砥石仕様

- 寸法誤差 → 工作物・砥石間の送り分解能
- 形状誤差 → 送り分解能、工作物・砥石間および砥石形状誤差
- 仕上げ面あざ → 砥石作業面上の切れ刃高さ分布

4. 超精密研削工程設計のためのキー・パラメータの設計  
 4.1. 砥石接触剛性  $Kcon$  の影響因子 一般に、砥石・工作物間の接触面積、結合剤硬さ、有効切れ刃密度などに支配される。

4.2. 切削剛性 切削剛性  $k_c$  は、工作物・砥石間接触面積、作業面切れ刃密度、砥石摩耗形態、工作物・砥石間振動、工作物材料、砥石材料などの種々の因子があり、十分な資料が整っていない。

4.3. 研削機械の設計仕様のシンセシス  
 (1) 剛性仕様のシンセシス

- $km \gg kcon$  と仮定すると、
- $\Delta min \leq 100 \text{ nm}$  としたとき、(3)式 より  
 $\Delta min = F th / kcon \leq 100 \text{ nm}$ ,  $kcon \geq 10 F th [N/\mu m]$
- 研削系の絶対安定条件は(6)式より  
 $km \geq 1 / (4 \cdot \zeta) \cdot kcon$ ,  $\zeta = 0.05$  のとき  $km \geq 5 kcon$
- 切残し率 10%未満の条件は(7)式から  $kcon \geq 10 \cdot kc$

(2) 運動仕様のシンセシス 超精密研削工程の場合について表2に具体例を、に示す。

5. むすび 超精密表面を創成する超精密研削工程の設計手順として、目標加工精度を出発点に、高い運動転写精度を有する研削工程のパラメータを設計し、これに必要な工作物・砥石間相対運動という入力信号を与える研削機械および研削砥石の設計仕様の設定に至る考え方を示した。

表1 延性・ぜい性遷移切り取り厚さ  $dc$  値の計算値

Materials	Toughness $k_{10}$ ( $\text{N} \cdot \text{m}^{-3/2}$ )	Hardness $H_v$ ( $\text{GN} \cdot \text{m}^{-2}$ )	Young's modulus $E$ ( $\text{GN} \cdot \text{m}^{-2}$ )	$dc$ ( $\mu\text{m}$ )
Vitreous glass	0.8	6	82.2	0.037
Silicon carbide	4	19	360	0.125
Steel	235	2.5	200	$15 \times 10^3$

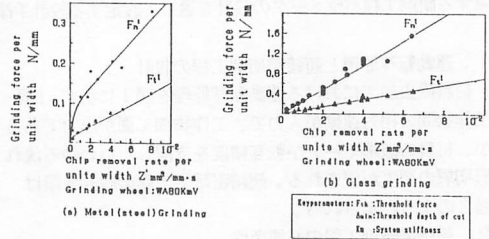


図4 微小研削除去能率の領域における鋼とガラスの心無研削の比較

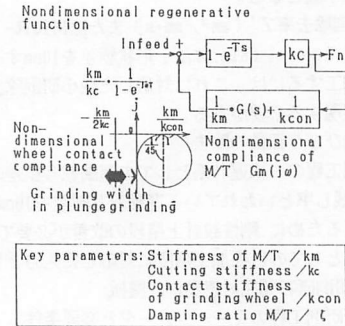


図5. 再生びり振動の安定条件

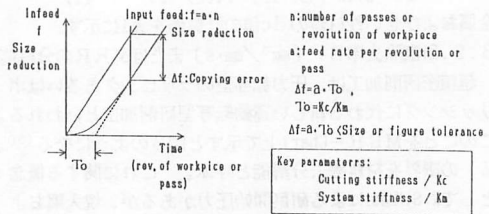


図6. 研削工程の一次遅れ系としての運動転写誤差

表2. 運動転写原理に基づき超精密・高剛性研削機械および研削砥石に求められる設計仕様

Target grinding accuracies	Specifications of M/T and grinding wheel
Size error $\leq 100 \text{ nm p-v}$	$\Rightarrow$ Feed resolution $\leq 10 \text{ nm}$
Figure error $\leq 10 \text{ nm rms}$	$\Rightarrow$ Motion errors of WP and GW support systems, wheel runout etc $\leq 10 \text{ nm}$
Surface finish $\leq 10 \text{ nm Ra}$	$\Rightarrow$ Height distribution of cutting grains $\leq 10 \text{ nm}$