〈12 回連載 ショートレクチャー〉

若手技術者のための研削工学

(第7回) 研削熱の流入割合と熱の影響

奥山繁樹 (防衛大名誉教授)

1. はじめに

前回のレクチャーで紹介した研削温度に関わる式の 多くに, 研削熱の工作物への流入割合 R_w が導入され ている. R, は, 砥石と工作物の材質や研削条件の影響 を受ける未知数であって,これがわからないと研削温度 のみならず,研削熱の加工精度や仕上面品質への影 響を解析・予測することはできない.

そこで今回は,研削熱の流入割合について 検討した上で,研削熱が工作物の熱変形や仕 上面品質に及ぼす影響について考える.

2. 研削熱の流入割合

図1に示すように、砥石と工作物の接触域で 発生した熱量を Q_0 とし、工作物、切りくず、そし て砥石に流入する熱量をそれぞれ Q_w , Q_c , Q_s と する. 接触域内で輻射や対流によって失われる 熱量を無視すると,

 $Q_0 = Q_w + Q_c + Q_s = Q_0 (R_w + R_c + R_s)$ (1) と書ける. ここで R_w , R_c , R_s はそれぞれ, 研削熱 の工作物, 切りくず, 砥石への流入割合である.

小野は,移動熱源による半無限体の加熱問 題に関するJaegerの解析結果(前回のレクチャー参照) を用いて,研削熱の流入割合を求めているが,この解 析では、接触域における砥石と工作物の平均温度と切 りくず温度は等しいものとしている.

しかし, 熱の授受が行われるのは砥粒研削点であり, 切りくずもその領域から排出されるから、筆者は砥粒研 削点における熱の授受に関する有限要素法解析を行 い, その結果と移動熱源による熱の授受の解析結果と を組み合わせることで、研削熱の流入割合を求めた、ま た,研削直後における工作物の温度分布を測定して工

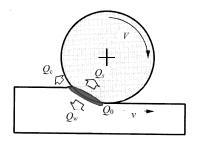


図1 研削熱の流入・拡散モデル

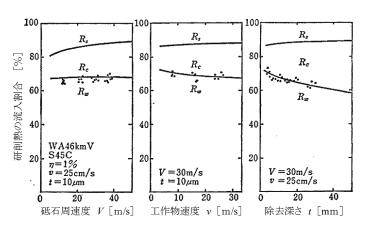


図2 乾式ワンパス研削における研削熱の流入割合 (S45C 焼入れ材, 砥石の逃げ面摩耗面積率η=1%)

作物への流入熱量を求め、 R_w の実験値を得た.

図2はその結果を示したもので、実線は理論値、プロ ットは R_w の実験値である. なお, 本図で t を「切込み深 さ」ではなく、「除去深さ」としているのは、ワンパス研削 では設定切込みと除去深さに開きがあるからである. S45C(焼入れ材)の場合, Rw の理論値と実験値は比較 的良く一致している. R_w には除去深さ t の影響が大きく, 砥石周速度 V や工作物速度 v の影響は比較的小さい ことがわかる. 図は省くが, 砥石の粒度や結合度の影 響も小さいことがわかっている.

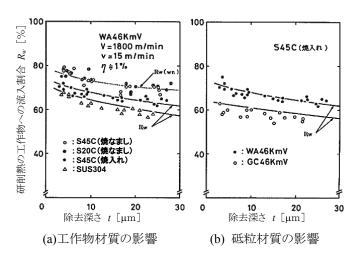


図3 乾式研削における研削熱の工作物への流入割合

図 3 は、 R_w に及ぼす工作物と砥粒の材質の影響を示している。常温での熱伝導率 k [W/(\mathbf{m} ·K)]は、S45C が43~44程度、SUS304が約16であるため、熱伝導率の小さい SUS 材での R_w は小さくなっている。一方、砥粒の熱伝導率は結晶の状態によって変わるが、常温での値は \mathbf{A} 系が 32程度、 \mathbf{C} 系が 200程度、立方晶窒化ホウ素(\mathbf{c} BN)が 1300程度、ダイヤモンドが 2000程度とされている。同図(\mathbf{b})によれば、熱伝導率の比較的大きい \mathbf{C} 系の方が \mathbf{A} 系よりも R_w が小さい。超砥粒の場合には、 R_w が格段に小さくなることが期待されるが、この問題に関する報告を見ない。

なお、図 3(a) の点線 $R_{w(wn)}$ は摩耗した砥粒を想定した解析結果であり、工作物への流入割合がやや大きい、軟鋼や焼なまし材を研削したとき、塑性上滑りが多発するから摩擦熱の影響が大きくなり、結果、摩耗した砥粒を想定した解析結果に近づいたものと考えている。

3. 研削熱による工作物の曲げ変形

① 研削による工作物の平均的な温度上昇は,熱膨張による切り過ぎの原因になる. また,② 砥石と工作物の接触域では工作物の表層だけが加熱されるために局部的に熱膨張し,切り過ぎの原因になる. 一方,③ 板状の工作物を平面研削すると表層部の熱膨張よって曲げ応力が発生し,仕上面が凹状に仕上がる. ①と②については今後の検討にゆだね,ここでは曲げ変形の影響とその抑制策について考える.

図4は、その下に付記した形状・寸法の工作物の 両端中央(点Aと点B)を固定してワンパス研削した場 合における工作物の熱変形を筆者が解析した結果で

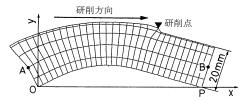


図 4 研削熱による矩形工作物の曲げ変形 [S45 焼入れ材,工作物の高さH:20mm, 長さL:80mm,幅 B:8mm,V=1800m/min,v=15m/min, F_t/B =5.9N/mm(t=10 μ m 相当)]

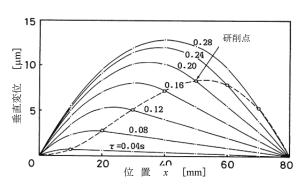


図 5 工作物表面形状の推移と研削点(O印)の軌跡

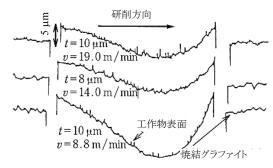


図 6 両端中央を固定した矩形工作物の仕上面 形状(A80M6V, S45C 焼入れ材, V=1800m/min)

ある. 本図では、研削点が▼印の位置に達したときの工作物形状を、変位を 1000 倍に拡大して示している. また図5は、研削時間τの経過に伴う工作物表面形状の推移を示しており、研削点(本図では O印)の垂直変位は工作物を 2/3 ほど研削したときにピークに達している.

研削点での垂直変位分が砥石によって完全に削り取られると仮定すると、仕上面形状は研削点の運動軌跡(O印を結んだ破線)を上下反転させた凹状になることが予想される.図6は、工作物の両端中央を固定して乾式・ワンパス研削した結果であり、仕上面は予想通りの形状に加工されている.

図7は、上記と同じ形状の工作物を汎用の電磁チャ

ックに吸着して乾式あるいは湿式(ノズル出口流速 V_{cl} =5m/s)でワンパス研削したときの、最大凹み量 ΔZ と除 去深さt または流入熱量Oとの関係を、筆者が調べた 結果である. 乾式研削の場合, チャックで吸着しても t が約 3um を上回ると凹みが生じており、汎用の電磁チ ャックの吸引力では、曲げ変形を抑制しきれていない.

図中の破線は、乾式研削での計算値であり、t≒ 10μm までは実験値と比較的良い対応を示している. $R_{\rm w}$ の値には諸説あるが、 ΔZ の計算には図 2 に示した $R_{\rm w}$ を用いているから、筆者が求めた $R_{\rm w}$ の値が正しかっ たことを示しているとも言える. 一方, 除去深さがある値 を超えると, 熱応力によって工作物表層が降伏し始め, 計算値との差は大きくなる.

図7に示した湿式の上向き(図1のように,砥粒の切 削方向とテーブルの運動方向が対向する)研削の場合, 高温になりやすい砥石と工作物の接触域後端にフレッ シュな研削液が直接供給されるため, 曲げ変形は抑制 されやすい.一方,湿式・下向き研削では,高温になり やすい接触域後端に研削液が直接かからないため, t =13um 付近で冷却効果が急減し、乾式での値に近づ いている.この結果は、3回目のレクチャーで触れた 「研削液の膜沸騰」によって、冷却効果が急速に失わ れたためと考えている.

4. 研削仕上面の熱損傷

焼入鋼を研削した場合, 砥石と工作物の接触面の最 高温度上昇 θ_m は普通の加工条件でも数百 $^{\circ}$ Cに達し、 さらに加工条件を過酷にすると,被削面に研削焼け, 引張残留応力, 熱変態, さらには研削割れが発生し, 仕上面品質を劣化させる.

4.1 研削焼け

研削焼けとは,研削熱によって加工面が酸化して着 色する現象を言う. 着色現象そのものは問題にならな い場合もあるが,工作物表層の加熱によるダメージの 程度を表しているとも言える.

焼けの色は,軽度な場合,薄いわら色であるが,研 削条件が苛酷になるにしたがって、褐色、赤褐色、紫、 青へと変化して行く.これは、焼戻し処理における着色 現象(テンパーカラー)に近いが、研削焼けの場合には、 ごく短時間で発生するところに特徴がある.

研削焼けの発生条件を調べるために、 $V \ge t$ (本図で は切込み深さ)を変えて研削し,研削焼けの発生状態

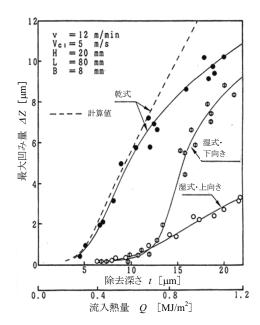


図7 電磁チャックに吸着した工作物を乾式あるいは 湿式でワンパス研削したときの最大凹み量AZ

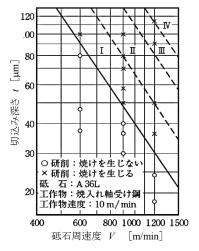


図8 研削条件と研削焼けの発生限界

を小野らが調べた結果を図8に示す、図中のO印は焼 けが発生せず、×印は焼けが発生したことを示す. また 領域 I~IV は、焼けの色によって区分したもので、それ ぞれ、わら色、褐色、赤褐色および紫色であることを示 す. 斜めの実線で示した境界線は、研削焼けの発生限 界であって、これより右上部分では焼けが発生する.

小野らは, 幅広い加工条件について詳細な実験を 行った結果,研削焼けの発生条件は次式で表せること を見出した.

$$VI = V \sqrt{t / \left(\frac{1}{D} + \frac{1}{d}\right)} \ge C_b \tag{2}$$

ここで、I は砥石と工作物の接触長さ、D は砥石直径、d は工作物径である。上式は、I (mm) と V (m/min) の積がある値 C_b 以上になると焼けが発生することを示している。 C_b は、砥石の種類と工作物の材質によって決まる定数(研削焼け定数)であって、その値は砥石の粒径が小さいほど、結合度が高いほど小さくなる。したがって研削焼けを防止するには、粒径の大きい、結合度の低い砥石を用い、V および I を必要以上に大きくしない加工条件を選ぶ必要がある。

表 1 は各種鋼材の研削実験を行い、 C_b の値を小野らが調べた結果である。 表から $\sqrt{k\rho c}$ (ここで、k: 熱伝導率、 ρ : 密度、c: 比熱)の小さい材料ほど C_b が小さくなる、つまり焼けが発生しやすくなることがわかる。

4.2 残留応力

工作物表層の加熱による熱応力が,被削材の降伏応力を上回ると,冷却後に寸法不足が生じ,表層に引張残留応力が発生ずる.また,熱変態に起因する寸法減も同様の作用があり,疲労強度の低下に繋がる.逆に,鈍化した切れ刃の通過に伴う表層の塑

性流動(バニッシング作用)によって、表層部が押し広げられると、圧縮残留応力が生ずる.

図9は、クロム・モリブデン鋼(SCM435)をA系砥石または cBN ホイールで研削した場合における残留応力分布を、横川らが測定した結果である。A系砥石を用いた軽研削では、ごく表層にバニッシング作用による圧縮残留応力が生じているが、前術のようにA系砥石の場合には、研削熱の工作物への流入割合が大きいから、切込みが大きくなると熱の影響が支配的となり、大きな引張残留応力が生じている。

一方,同図(b)に示すように熱伝導率の非常に大きいcBMホイールを用いた場合には、熱の影響は小さく圧縮残留応力が生じやすい.この結果は、鈍化した超低粒の刃先が無理やり工作物に食い込むことが、バニッシング効果を顕在化させているとも言えよう.

4.3 研削割れ

被削面の引張応力が材料の破断強度を上回ると, 表面に亀裂(研削割れ)が生じる.割れは,不規則な網 目状あるいは研削方向に直交した微細クラックとして表

表1 各種鋼材の研削焼け定数値 Cb (砥石 A60P)

工作物材質	C_b [mm·m/min]	$\frac{\sqrt{k\rho c}}{\left[kJ/(m^2s^{0.5}K)\right]}$
軸受鋼 (焼入れ)	890	8.4
1.2%C 鋼(焼入れ)	940	9.6
0.6%C 鋼(焼入れ)	990	11.3
1.2%C鋼(焼なまし)	1440	13.0
0.6%C 鋼(焼なまし)	1550	13.8
0.2%C 鋼(焼なまし)	1770	14.6

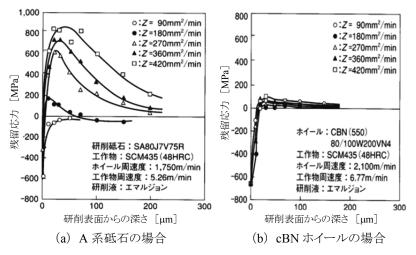


図9 研削残留応力の分布

れ, 表面から 0.5mm 程度に達することもある.

研削割れを生じやすい材料には、焼入れした高炭素鋼、浸炭鋼などがある。割れを誘発する内部応力の原因は工作物表層の過度な熱膨張と、熱変態に起因する体積収縮である。よって、研削割れを防ぐには軽研削を行う必要があるが、熱変態の影響が危惧される場合には、事前に適当な温度で焼戻しておく必要がある。

5. おわりに

今回のレクチャーは、筆者の思い入れのせいでややこだわった内容になった。これは、筆者が若く多感であった頃の研究成果を含んでいるためでもある。納得できない所もあったかと思うが、本稿の内容は研削を科学するうえで重要なので、ぜひ記憶にとどめていただきたい。一方、未だ議論を残している部分も含んでいるので、読者諸兄には疑問を持ち続けてもらいたい。

次回は、研削による工作物の熱変形の影響を直接受ける寸法の創成プロセスと、仕上面の寸法・形状精度について考えることにする.