超砥粒砥石による薄板の研削変形（第3報）*

——温度分布と変態が反りに及ぼす影響——

柴原 秀樹** 松尾 哲夫*** 里 中 忍***

Curvature of Thin Workpiece in Surface Grinding with Superabrasive Wheels (3rd Report)
-Influence of Temperature Distribution and Transformation on Curvature-

Hideki Shibahara, Tetsuo Matsuo and Shinobu Satonaka

It is important to know the temperature distribution in a workpiece to understand the curvature of thin plate in surface grinding. In this paper, the relationship between curvature and calculated temperature distribution by FEM was clarified. As a result, it is evident that the steeper temperature gradient the larger concave curvature is induced. This can be understood as an effect of thermal stress. In the case of gentle temperature gradient, the effect of thermal stress is not clear, and consequently burnishing by cutting edge becomes effective. Summarizing these results, the curvature is well explained with temperature gradient and burnishing effect. The transformation of 304 stainless steel is confirmed by means of X-ray diffraction test, and the influence of transformation on curvature is studied. Key words: surface grinding, superabrasive wheels, thin plate, curvature, temperature distribution, force ratio, transformation.

1. 緒 言

筆者らは、これまで炭素鋼やSUS304ステンレス鋼の薄板の研削において工作物に発生する反りと研削加工条件について報告してきた¹⁾²⁾。反りの方向や値は加工条件によって異なっているが、反りの発生原因は残留応力であることはいうまでもない。残留応力の発生原因としては、引張残留応力は研削熱が影響し、圧縮残留応力は砥粒によるバニッシュ作用であることを述べたが、特に熱に関して詳細な検討を行うには至らなかった。また、反りを考える上で研削抵抗比が一つの目安になることを報告してきた。

本報では、研削熱の反りに対する影響を調べるために工作物内部の温度分布を非定常熱伝導問題として有限要素法によって求め、この温度分布と反りの関係を明らかにした。その結果、工作物内部の温度分布から推測される反りと実験による反りには良い対応が見られた。すなわち、温度勾配が大きいほどプラス（凹）の反りが発生しやすく、温度勾配が小さいときにはマ

イナスの反りが現れやすいことが分かった。以上の結果をもとにして、反りを研削熱と機械的作用（バニッシュ作用）から説明した。また、304ステンレス鋼の研削においては加工変態の発生が知られており、この変態が反りに影響すると考えられる。そこで、X線回折により変態の有無を測定し、この変態がマイナスの反りに影響することを実験的に確かめた。

2. 有限要素法による温度分布解析

研削中の工作物内部の温度分布を求めるために、移動熱源による非定常熱伝導問題として有限要素法を使った³⁾。時間微分項を含む3次元熱伝導問題の微分方程式と周辺における境界条件は物体表面の外向き法線方向をnとすると

$$c\rho\frac{\partial T}{\partial t}=K\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+K\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+K\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (1)$$

$$K\frac{\partial T}{\partial n}+\bar{q}-q+\alpha T=0 \quad (2)$$

となる。ここで、T：温度上昇、t：時間、q：工作物への流入熱流束、 $\bar{q}$ ：周辺境界の熱流速、c：比熱、 ρ ：密度、K：熱伝導率、 α ：熱伝達係数とする。

* 原稿受付 平成4年12月4日

** 正 会 員 西日本工業大学（福岡県京都郡苅田町新津1633）

*** 正 会 員 熊本大学工学部（熊本市黒髪町2-39-1）

Fig.1 FEM model

この式に変分法を適用し、また時間領域での解を求めるため時間増分を Δt として中央差分法により整理すると式(3)が得られる。式中の $[S]$ 、 $[P]$ 、 $\{F\}$ は各節点において組み立てられるマトリックスとベクトルである。

$$\left\{ \left[S \right] + \frac{2}{\Delta t} \left[P \right] \right\} \{ T \}_t = \left\{ - \left[S \right] + \frac{2}{\Delta t} \left[P \right] \right\} \{ T \}_{t-\Delta t} - 2 \{ F \} \quad (3)$$

同式により時刻 $t - \Delta t$ の節点値を与えると、時刻 t の節点値を解くことができる。なお、境界は対流熱伝達の条件で求めた。

計算モデルの例を図1に示す。接触弧長さや工作物速度を変化させるためX方向の要素長さDXが異なり節点数1632~3232、要素数750~1500となった。モデルの熱伝導率、密度、比熱および熱伝達係数等の物性値は温度依存性を考慮し⁴⁾、各要素の温度変化に応じて $[S]$ 、 $[P]$ 、 $\{F\}$ 中に現れる物性値を変えた。熱源となる接触弧長さは2つの要素に対応させるものとしてX方向に移動させる。すなわち、熱量の配分割合の比重を時間の経過とともに熱源の移動速度に応じて後ろの要素から少しずつ前の要素に移してゆき、熱源の移動がなめらかになるようにした。なお、計算精度は周辺が断熱の条件で $X=0$ の面が時刻0で500℃となった以後の物体内部における温度分布に関する解析解⁵⁾と比較して確認した。

次に工作物への熱流入割合を求めるために、温度の測定実験を行い、流入割合を変えて求めた計算値と実験値の比較を行った。温度の測定実験は次のようにして行った。S50C(幅×長さ×高さ=11×50×9mm)の内部にアルメル・クロメルの熱電対をスポット溶接し、熱電対が表面に現れるまでCBN砥石で乾式研削を行い、研削抵抗と工作物内部の温度変化を調べた。なお砥石切込み量は研削溝をダイヤルゲージ

Fig.2 Comparison between experimental and calculated temperature distribution for estimating R_w

で測定した。図2に工作物内部での温度変化の実験値と計算値の比較を示す。なお、計算値は流入割合を60%として行った。両者を比較すると、研削温度のピークが研削表面から離れるにつれて減少するとともにピークに達する時間が遅れる傾向など両者は類似した変化を示している。なお計算値と実験値に完全な一致は見られないが、定性的に温度分布の影響を検討するという目的から工作物への熱の流入割合を60%と推定した。

3. 温度分布から考えられる反りの傾向

薄板の研削実験において測定された接線研削抵抗によって発生熱量を求め、前述の有限要素法を使って工作物内部の温度分布を計算した。そして計算された温度分布と実験により測定された反りとの検討を行う。なお加工条件により工作物への流入割合は変化することが報告されており^{6,7)}、それによると砥石切込み量や工作物速度の増加に伴って減少する傾向であるが、その減少の割合は小さいようである。従って、本報では研削熱の定性的影響を求めるため工作物への流入割合は60%とし、加工条件による変化はないとして計算した。

図3に砥石切込み量を変化させたときの熱源近傍における板厚方向の温度分布の計算結果を示す。図より接触弧の中央あるいは後ろ側において研削表面と裏面の温度差が最も大きくなりやすいことが分かる。また、(a)、(b)、(c)と砥石切込みが増加するとともに、研削表面と裏面の温度差が大きくなるとともに、表面近傍での温度勾配も大きくなることが分かる。なお、実験における反りは砥石切込みの増加にともないプラスの反りが増加しており、計算で得られる温度差

Fig.3 Calculated temperature distribution in workpiece for different wheel depth of cut

や温度勾配の増加に対応している。

図3と同様にして工作物速度の影響を求め、板厚方向の温度差が最大となる場合の温度分布を砥石切込みの影響とともに図4に整理した。工作物速度の増加により接線研削抵抗が増加するため流入熱量は増すが、熱源の移動速度も増すため表面での温度には工作物速度の影響はあまり現れないようである。しかし、温度勾配は、工作物速度が増すと大きくなる傾向にあることが分かる。

以上の計算結果より、砥石切込みや工作物速度の増加によって熱応力の影響が大きくなりプラスの反りが発生しやすい傾向にあることが考えられる。確かに、実験での反りは砥石切込みや工作物速度の増加に伴いプラスの反りが増加する傾向にあり、計算された温度分布から考えられる傾向と対応している。

図5は材料の相違による影響を調べるため、SUS304に関して行った計算結果である。加熱条件が同じ場合での温度分布を比較するために図3(b)と同じ熱量が流入し、熱源の移動速度も同じ場合について

Fig.4 Calculated temperature distribution for different depth of cut and work speed

Fig.5 Calculated temperature distribution for SUS304 stainless steel

計算した。SUS304は炭素鋼に比較して熱伝導率が小さいために炭素鋼よりも表面層が高温になる傾向があり、さらに表面層の温度勾配においても非常に大きくなる事が分かる。つまり、SUS304では工作物に大きな熱応力が生じやすく、炭素鋼よりプラスの反りが発生しやすい傾向にあることが分かる。なお、実験における反りはSUS304の乾式研削では研削焼けのため炭素鋼とはまったく比較にならないほど大きなプラスの反りが発生しており、温度の計算結果により推測される反りの傾向と同様である。

4. 研削抵抗比と反り

これまでの報告¹⁾²⁾において研削抵抗比 (F_n/F_t) が工作物の反りと強い関係があることを述べてきた。また、研削抵抗比が残留応力に影響することを有限要素法により解析した報告³⁾も見られる。ここでは研削中に砥石切込みが変動するような場合について研削中の抵抗比を求めるとともに工作物内部の温度分布を調べ、研削抵抗比につき検討を加えた。実験は次のようにして行った。すなわちS50Cの工作物の両側に45°のエッジを作り、そこを押え込むようにして工作物台

Fig.6 Grinding force and temperature measured in grinding thin steel plate

に固定する。工作物には裏面から直径0.5 mmの穴を開け、上面から約240 μ mの位置に直径0.26 mmのコンスタン線をスポット溶接した。また穴から研削方向に5 mm離れた位置の工作物裏面にもコンスタン線をスポット溶接し、材料とコンスタンにより熱電対を構成した。

図6に研削中の研削抵抗と温度の測定結果を示す。図において(a)は107 μ mのプラスの反りが発生する場合で、研削抵抗比は1.94から2.17で変動し、その平均値は2.04となる。以下(b), (c)となるにつれ研削抵抗比は変動しているが、比の値は次第に大きくなる傾向にある。そして(b)における反りは36 μ m、そして(c)においては-12 μ mとなる。

図7は変動する研削抵抗比の平均値によって反りを整理した結果である。両者の関係は前報¹⁾において報告した傾向と同じとなった。すなわち研削抵抗比が大きくなるとマイナスの反りが発生しやすい。そこで、研削抵抗比と反りの関係を工作物内部の温度分布の状

Fig.7 Relationship between force ratio and curvature

Fig.8 Experimental and calculated temperature in grinding thin steel plate

態も含めて検討するため図7中のp, q, rの3点について研削温度の実験値と有限要素法による計算値の比較を行い、工作物内部の温度分布を推定した。その結果p, q, rにおける熱流入割合は55, 50, 50%で近似された。なお点p, q, rでは同様の傾向を示すため紙面の都合で点pについて温度の測定結果と計算結果の比較を図8に示す。まず研削裏面における測定値と計算値の温度変化のパターンはほぼ一致していることが分かる。一方、研削表面から約240 μ mでの温度変化について見ると、最高温度に達した後の温度降下は実験結果の方が計算結果より小さい傾向がみられる。この計算値と実験値との相違の原因としては熱電対側の原因なのか計算方法に起因するものなのかは断定できないが、ここでは研削熱の反りへの効果を定性的に検討するという目的から図8により工作物内部の温度分布を近似し、板厚方向の温度分布を求めた。

図9に計算結果を示す。同図より接線研削抵抗の値によって温度分布に違いのあることが分かる。すなわち、接線研削抵抗が大きいときには研削表面と裏面の

Fig.9 Calculated temperature distribution for different force ratio

温度差が大きくなるとともに表面層における温度勾配も大きくなっている。なおこのとき、実験では砥石切込みは増加し反りの値もプラスで大きくなる傾向にある。また接線研削抵抗が大きいときには抵抗比が小さく、逆に接線研削抵抗が小さいときには抵抗比が大きくなる傾向がみられた。このように、今回行った実験の範囲では図7のp, q, rにおける温度分布は定性的に図9によって表される。

また、図10は研削抵抗比の違いによる残留応力分布を示す。研削抵抗比が小さくなるとプラスの反りが発生することに対応して、表面層には引張残留応力を生じる傾向が見られる。

以上、温度分布と残留応力の結果を総合して単純化した反りの発生機構を図11のように考えた。図中O, A, B, Cはそれぞれ、研削点の前方で研削の影響を受けていない点、接触弧の前方付近、接触弧の出口付近および研削点後方をおおまかに示している。Oにおいて、研削方向に元の長さ L_0 である要素を考え、この要素の長さが研削過程につれてどのように変形するかを定性的に述べてゆく。まずAにおいて材料は研削抵抗と熱応力により研削方向に圧縮塑性変形され L_a だけ短くなる。そしてAからBにいたる間では熱応力による圧縮や法線方向研削抵抗による研削方向の引張りなどが複雑に影響し合いながら、最終的には砥粒切れ刃の直後に作用するバニッシュ作用に基づく引張変形を受け L_b だけ伸ばされる。なおA, B段階における塑性変形 L_a , L_b の大きさは加工条件によっても変化する。その後、Cにおいては研削熱による温度上昇が常温まで降下するのに対応する収縮 L_c が起きる。図中 L_c では温度の高低によって3通りの収縮を示している。以上の考察において研削熱はA, B, Cの各段階において影響しており、温度勾配が大きいときには圧縮の変形を促進すると考えられる。その結果、引張残留応力が発生し凹方向に反りやすい。一方、温度

Fig.10 Residual stress distribution after grinding for different force ratio

Fig.11 Schematic diagram for generating curvature

勾配が小さいときには圧縮変形は小さくなるとともにBにおけるバニッシュ作用を主とする引張変形が結果的に現れ圧縮残留応力が発生し凸方向への反りになると考えられる。なお、研削抵抗比は反りや残留応力の結果から考えると反りの方向を定める一つの目安になっていることが分かる。

5. 304鋼における変態が反りに及ぼす影響

前報²⁾で、SUS304の薄板の研削における反りについて報告したが、この材料ではMd点以下における機械加工では加工による変態を起こすことが知られており³⁾、これが反りに影響すると考えられるが未検討であったのでここで報告する。

図12に湿式研削および低温研削（研削直前までドライアイスにより冷却して研削する）した場合の研削表面のX線回折結果を示す。いずれの場合もオーステ

Fig.12 X-ray diffraction pattern measured on ground surface of SUS304

ナイト相を示すピークとともに回折角 44.7° にマルテンサイト相を示すピークが現れ、加工変態していることが分かる。このとき、湿式研削ではマイナスの反りが発生するが、乾式の低温研削ではプラスの大きな反りとなっている。後者の研削においては研削砥石の表面では大きな摩耗や砥粒の脱落が起きていたことから高い研削熱が発生したと考えられ、このような場合には変態を起こしてもマイナスの反りが発生しないと推測される。

次に、変態による反りへの影響を検討するため表面だけを瞬間的に液体窒素に浸して表面と裏面に変態の違いを起こす実験を行い、冷却前後での反りの変化を調べた。図13に表面と裏面のX線回折結果を示す。同図より表面ではマルテンサイト相のピークが強く現れ、明らかに表面と裏面に変態の差があることが分かる。そしてこの場合、冷却前後での形状の測定を行うと確かにマイナス方向に約 $20 \mu\text{m}$ の反りが現れる。これはオーステナイト相からマルテンサイト相への変態による膨張の影響であり、SUS304の研削におけるマイナスの反りの原因として変態の影響も考えられる。

6. 結 論

工作物内部の温度分布を非定常熱伝導問題として有限要素法により求め、その分布から反りへの定性的影響を検討した。またSUS304について変態の影響をX線回折によって調べ以下の結論を得た。

Fig.13 X-ray analysis on surface of SUS304 obtained from experiment about transformation

- (1) 温度分布の計算結果によると、砥石切込みや工作物速度を増加させた場合に研削表面と裏面の温度差や温度勾配が大きくなり、また炭素鋼とSUS304では加熱条件が同じであれば後者の場合に大きな温度勾配を生じる。
- (2) 計算された温度分布から定性的に推測されるプラス（凹）の反りの傾向は実験による反りの傾向と良い対応を示す。
- (3) 研削抵抗比 (F_n/F_t) は反りを考える上で一つの目安になり、温度勾配が大きくプラスの反りが発生するとき比の値は小さくなる傾向にある。
- (4) SUS304の研削ではマイナス（凸）の反りの原因として変態の影響も考えられる。

参 考 文 献

- 1) 柴原秀樹, 松尾哲夫: 超砥粒砥石による薄板の研削変形 (第1報), 精密工学会誌, 54, 5 (1988) 947.
- 2) 柴原秀樹, 松尾哲夫: 超砥粒砥石による薄板の研削変形 (第2報), 精密工学会誌, 58, 3 (1992) 471.
- 3) 川井忠彦 監訳: 応用有限要素解析, 丸善, (1987) 203.
- 4) K. Masubuchi: Analysis of Welded Structures, Pergamon Press, New York, (1980) 66.
- 5) 川下研介: 熱伝導論, 生産技術センター新社, (1975) 54.
- 6) 高沢孝哉: 研削熱の加工物への流入割合, 精密機械, 30, 12 (1964) 914.
- 7) 長谷川嘉雄, 奥山繁樹: 研削熱の流入割合の理論, 精密機械, 47, 7 (1981) 83.
- 8) 江田 弘, 貴志浩三, 大久保昌典: 有限要素法による研削加工層の残留応力のシミュレーション解析, 精密機械, 45, 11 (1979) 1347.
- 9) 宮川大海: 基礎鉄鋼材料学, 朝倉書店, (1971) 72.