

焼なまし炭素工具鋼の研削残留応力

—— 表層部の応力分布 ——

立 花 敏 之*

Residual Grinding Stresses in Annealed Carbon Tool Steel —— Stress Distributions on the Layers Close to the Surface ——

Toshiyuki TACHIBANA

要 旨

焼なまし炭素工具鋼を平面研削することによって生ずる残留応力を曲率法により測定し、その表層部の応力分布・研削油剤の残留応力発生に及ぼす効果および残留応力発生機構について考察した。

Synopsis

Residual stresses resulting from surface grinding annealed carbon tool steel were determined by the curvature method. Stress distributions on the layers close to the surface, the effect of grinding fluids upon the stresses induced and the mechanism of producing stresses were studied.

1 結 言

切削加工や研削加工を行なうと、工作物表層部に加工変質層の形成とともに残留応力が発生することが知られているが、研究の結果によると、その残留応力は材料の組織・熱処理・研削条件等によりかなりの変化があることを示している。

筆者らは先に研削残留応力について報告したが⁽¹²⁾、本稿では試験片の層除去に電解法を、応力測定に曲率法を用いて、焼なまし炭素工具鋼を平面研削することによって生ずる残留応力を測定し、表層部の応力分布・研削油剤の残留応力発生に及ぼす効果および残留応力発生機構について考察した。

2 実 験 方 法

2.1 試 料

試料には、市販の炭素工具鋼帯板 (JISG4401, SK5, 厚さ約 2 mm) を真空電気炉で焼なまししたも

のをを用い、その表面に平面研削を行なった。試料の化学成分を表 1 に、焼なまし条件を表 2 に、機械的性質を表 3 に、研削条件を表 4 に示す。

表－1 試料の化学成分

C	Si	Mn	P	S
%	%	%	%	%
0.80～0.90	～0.35	～0.50	～0.030	～0.030

表－2 焼なまし条件

焼なまし温度	昇温時間	保持時間	冷却速度
750 ℃	1 h	40 min	20℃/h (500℃以上) 炉 冷 (500℃以下)

表－3 機械的性質 (焼なまし状態)

降伏点	引張強さ	破断伸び	紋 り
410 MPa	530 MPa	19.4 %	36.0 %

縦弾性係数	Poisson 比	Vickers かたさ
202 GPa	0.281	168

- (注) 1 引張試験は 5 号試験片 (JISZ2201) によった。
2 弾性ひずみの測定には、ひずみゲージ (KFC-5-D16-11, 共和電業製) を用いた。

表-4 研削条件

研削といし	切込み深さ	研削方式
1号A,205×19×32 WA,46,J,m2,V	60 μ m	乾 式 湿 式

といし周速度	テーブル縦送り	テーブル横送り
1540 m/min	12 m/min	0.15 mm/pass

- (注) 1 研削といしはJISR6212による。
2 湿式研削では、水溶性油剤(JISK2241,W11)を20倍に希釈して使用し、注油量は3.6 L/minとした。

2.2 実験方法

試験片は全長140 mm (うち溶解部の長さ70 mm)幅10 mmの短冊状とし⁽³⁾⁽⁵⁾、長手方向を研削方向またはそれに直角方向とした。

試験片の層除去は電解法⁽²⁾に、残留応力の測定は曲率法⁽²⁾⁽⁴⁾によった。実験装置の略図を図1に示す。

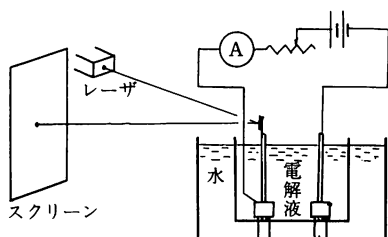


図1 実験装置

試験片には溶解部を残して絶縁塗料(アクリルラッカー)を塗布し、上部に反射平面鏡を取り付け、下部を支持台に固定した。この試験片を陽極とし、下部を支持台に固定した鉛板を陰極として電解槽中に対向させ、一定の直流を流し、試験片の片面から逐次溶解させた。電解液の温度を一定に保つために、電解槽を水槽に入れさらに電解液の攪拌装置を取り付けた。電解条件を表5に示す。

表-5 電解条件

電 解 液 組 成			電解液	陽 極
塩化第一鉄	塩化カルシウム	水	温 度	電流密度
300 g	335 g	1 L	30±0.5℃	15 A/dm ²

曲率の測定はランプと尺度の法によった⁽⁴⁾。光源にHe-Neガス・レーザ(日本電気KK製)を用い、試験片に取付けた反射鏡から5 mの位置にスクリーンを立てた。試験片の片面から逐次溶解しつつ、適当時間ごとにスクリーン上の像の位置の変化を測定した。像の上下方向の位置の変化をs

とすると、試験片の曲率 κ は次式で表わされる。

$$\kappa = s/2 lL \quad (1)$$

ここで l : 試験片の有効長さ

L : 反射鏡とスクリーン間の距離

予備実験として、試験片を一定電流の下で溶解させ、溶解速度の略一定となることを確認した。次に焼なまししたままの試験片について測定を行ない、スクリーン上の像の位置の変化の小さいことを確かめ、無応力状態であることを確認した。また研削加工をした試験片について測定を行ない、スクリーン上の像の左右方向の位置の変化の小さいことを確かめ、主応力方向が研削方向およびそれに直角な方向であることを確認した。

2.3 残留応力計算式

平板の残留応力計算式は、次の仮定の下に導かれる。

- (1) 平板は等方等質性の材料より成り、その厚さは一様である。
- (2) 平板に存在する残留応力は、板の中央平面に平行な平面間に相互応力が存在しない平面応力状態にある。
- (3) 残留主応力は、板の表面からの深さのみの関数である。
- (4) 板の中央平面に立てた垂線は、板が曲がった後もその中央面に垂直な直線である。
- (5) 板の材料はHookeの法則に従い、かつ引張と圧縮の縦弾性係数は相等しい。

図2に示したように、平板の一表面上に原点 O を、主応力方向に x 軸・ y 軸を、厚さ方向に z 軸を取り、記号を次のように定める。

h : 板の厚さ

E : 板材の縦弾性係数

ν : 板材のPoisson比

σ_x : x 方向残留主応力

σ_y : y 方向残留主応力

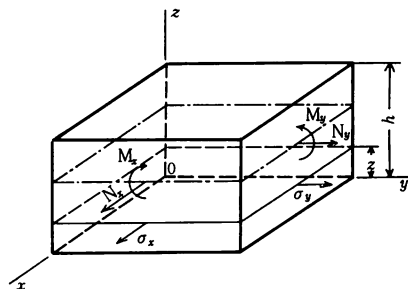


図2 平板素

板の表面 ($z = 0$) から z までの層を除去すると、その層に存在した残留応力が消滅する故、残っている板に生ずる単位幅当りの曲げモーメント $M_x \cdot M_y$ は、それぞれ次式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} M_x(z) &= - \int_0^z \left(\frac{h+z}{2} - \xi \right) \sigma_x(\xi) d\xi \\ M_y(z) &= - \int_0^z \left(\frac{h+z}{2} - \xi \right) \sigma_y(\xi) d\xi \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

曲げモーメント $M_x \cdot M_y$ と板の主曲率 $\kappa_x \cdot \kappa_y$ との間に、次の関係がある。

$$\left. \begin{aligned} M_x(z) &= \frac{E}{12(1-\nu^2)} (h-z)^3 [\kappa_x(z) + \nu \kappa_y(z)] \\ M_y(z) &= \frac{E}{12(1-\nu^2)} (h-z)^3 [\kappa_y(z) + \nu \kappa_x(z)] \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここで

$$\left. \begin{aligned} u_x(z) &= \sigma_x(z) - \nu \sigma_y(z) \\ u_y(z) &= \sigma_y(z) - \nu \sigma_x(z) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

とおくと、式(2)・(3)・(4)より、次の Volterra 型第一種積分方程式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} \int_0^z \left(\frac{h+z}{2} - \xi \right) u_x(\xi) d\xi &= - \frac{E}{12} (h-z)^3 \kappa_x(z) \\ \int_0^z \left(\frac{h+z}{2} - \xi \right) u_y(\xi) d\xi &= - \frac{E}{12} (h-z)^3 \kappa_y(z) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

これを解いて、次式が得られる⁽¹⁾⁽²⁾⁽⁶⁾。

$$\left. \begin{aligned} u_x(z) &= - \frac{E}{6} \left[(h-z)^2 \frac{d}{dz} \kappa_x(z) \right. \\ &\quad \left. - 4 (h-z) \kappa_x(z) + 2 \int_0^z \kappa_x(\xi) d\xi \right] \\ u_y(z) &= - \frac{E}{6} \left[(h-z)^2 \frac{d}{dz} \kappa_y(z) \right. \\ &\quad \left. - 4 (h-z) \kappa_y(z) + 2 \int_0^z \kappa_y(\xi) d\xi \right] \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式(1)により変形すると、次式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} u_x(z) &= - \frac{E}{12lL} \left[(h-z)^2 \frac{d}{dz} s_x(z) \right. \\ &\quad \left. - 4 (h-z) s_x(z) + 2 \int_0^z s_x(\xi) d\xi \right] \\ u_y(z) &= - \frac{E}{12lL} \left[(h-z)^2 \frac{d}{dz} s_y(z) \right. \\ &\quad \left. - 4 (h-z) s_y(z) + 2 \int_0^z s_y(\xi) d\xi \right] \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

残留主応力 $\sigma_x \cdot \sigma_y$ は、式(4)より次式で求められる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x(z) &= \frac{1}{1-\nu^2} [u_x(z) + \nu u_y(z)] \\ \sigma_y(z) &= \frac{1}{1-\nu^2} [u_y(z) + \nu u_x(z)] \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

3 実験結果

前述の実験方法により、平面研削した試験片について、その残留主応力（研削方向）を測定した結果を図3および図4に示す。

図3は乾式研削を行なった場合で、研削面に大きな引張応力が生じ、研削面からの深さと共に急降下し、深さおよそ $5 \mu\text{m}$ で極小値に達し、さらに反転上昇しおよそ $25 \mu\text{m}$ で極大値に達し、以後ゆるやかに下降しおよそ $125 \mu\text{m}$ で圧縮応力に転じ、次第に極限圧縮応力に近付く、残留応力層の深さはおよそ $200 \mu\text{m}$ である。

図4は湿式研削を行なった場合で、研削油剤の冷却効果・潤滑効果により研削抵抗・研削熱量が減少し、その結果研削面の引張応力・内部の極大引張応力は共に乾式研削の場合に比しかなり小さく、また応力値の顕著な反転現象は認められない。併し極大引張応力に達する深さ（およそ $30 \mu\text{m}$ ）・残留応力層の深さ（およそ $300 \mu\text{m}$ ）は深くなっている⁽¹²⁾。切り込み深さが小さく、研削油剤の効果の大きい時は、研削面に圧縮応力が生ずることもあり得ると考えられる。

いずれの場合も残留応力層の深さは、切込み深さに比べてかなり深く、また加工硬化層の深さと比べてもより深い⁽¹²⁾、試料の厚さに比べると極めて浅い。

4 考察

研削加工によって発生する残留応力は、Glickmann 等⁽⁸⁾によると、焼入れ焼戻しをした高クロムステンレス鋼についての実験結果から、研削時に局部的に高温となった表面が変態点を越えたのち熱伝導により急冷されるが、研削面からの深さによって温度・冷却速度が異なる故、深さにより組織も異なり、それぞれの組織間の相対的膨張収縮によって生ずる変態応力である。これに対し Letner 等⁽⁷⁾は焼なまししたマンガン工具鋼についての実験において変態の生じないことを確かめ、残留応力は研削熱による応力と機械的作用による応力の合成応力であると述べている。

Henriksen⁽⁹⁾によると、Letner 等⁽⁷⁾の実験結果から、残留応力は図5(a)に示したように、と粒の切削作用による応力・と粒のバニシ作用による応力・研削熱による応力の合成応力である。しかし高沢⁽¹¹⁾は図5(b)に示したように、と粒の切削作用による応力の影響は小さく、研削熱による応力の影響はもっと大きくなり、焼入鋼等の場合にはさ

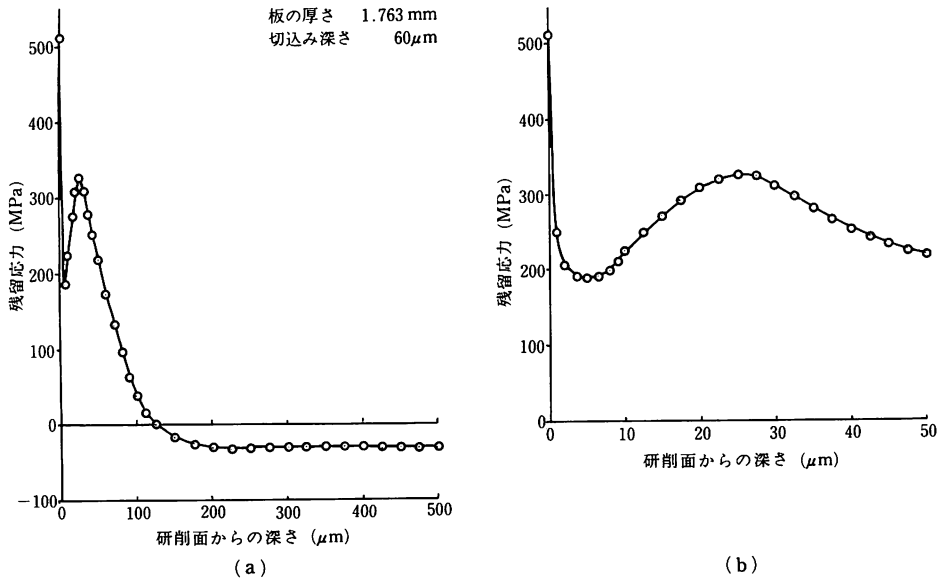


図3 乾式研削による残留主応力(研削方向)

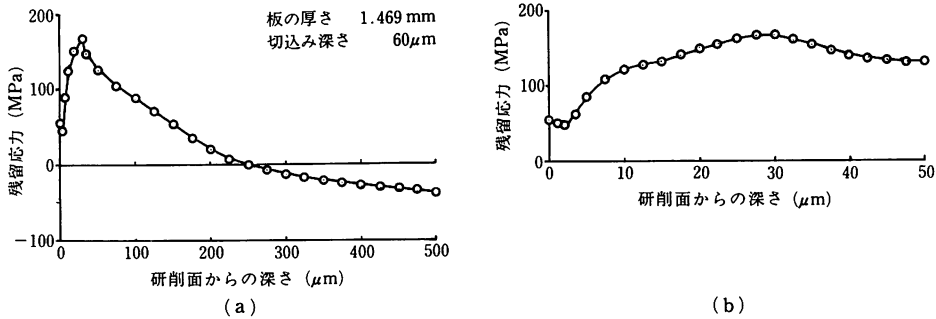


図4 湿式研削による残留主応力(研削方向)

らに研削熱による組織変化に伴う変態応力を考えねばならないと述べている。これに対し Colwell⁽¹⁰⁾等は焼入れ焼戻しをしたニッケルクロモリブデン鋼についての実験結果から、図5(c)に示したようにと粒の切削作用による応力は機械的作用による応力と熱的作用による応力との重合したもので、と粒の摩擦作用による応力も同様であり、研削残留応力はこれらの合成応力で、研削条件により種々の応力分布を取り得ると述べている。

本実験において得られた残留応力分布曲線は Letner 等⁽⁷⁾の実験結果と形状的にはよく一致しており、定性的には Henriksen 説⁽⁹⁾によりその発生機構を説明し得るものである。湿式研削ではと粒の切削作用による応力・研削熱による応力が小さくなったものと考えられる。然し残留応力層が深くなった原因については不明である。極限圧縮

応力は表層部の引張応力と平衡を保つように生じた弾性的応力で、研削加工による一次的応力ではないと考えられる。

研削残留応力発生機構についての説明はいずれも定性的範囲を出ていないので、今後定量的に明らかにすることが必要である。

5 結 語

この実験結果から次の結論が得られる。

- (1) 研削残留応力の主応力方向は、研削方向とそれに直角な方向である。
- (2) 乾式研削では研削面に大きな引張応力が生じ、供試材料の残留応力分布曲線は Letner 等⁽⁷⁾の実験結果と形状的にはよく一致している。
- (3) 供試材料の研削残留応力の発生は、定性的には Henriksen 説⁽⁹⁾により説明し得る。
- (4) 研削油剤を使用すると、表層部の引張応力値

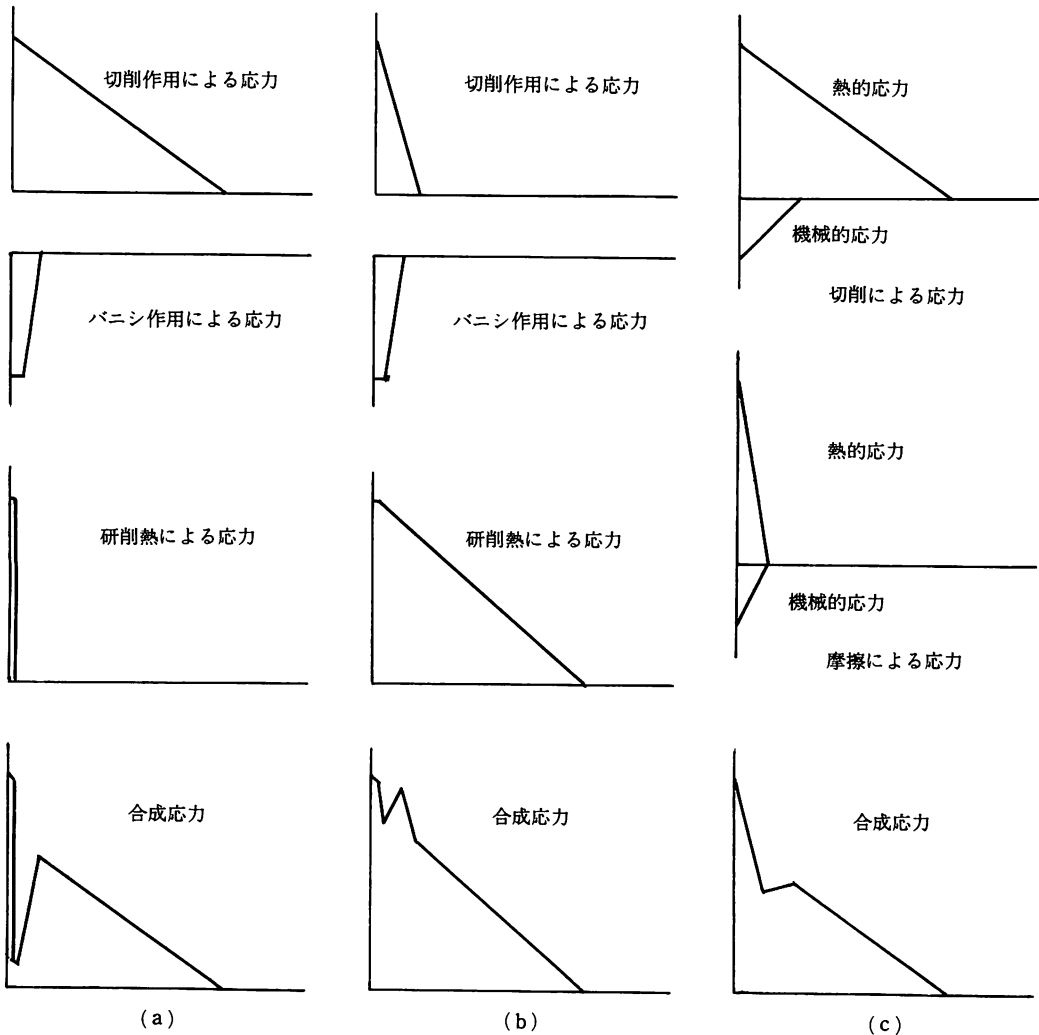


図5 残留応力発生機構

は低下するが、この実験では残留応力層の深さは却って深い。また表層部の応力値の顕著な反転現象は認められない。

- (5) 残留応力層の深さは、切込み深さに比しかなり深い、試料の厚さに比べると極めて浅い。
- (6) 極限圧縮応力は、表層部の引張応力と平衡を保つように生じた弾性的応力で、研削加工による一次的応力ではない。

終りに、平板の残留応力測定について指導助言を賜った北海道大学工学部土肥教授・鶴飼助教授、実験に多大の労をわずらわせた本校中津助教授、実験にご協力いただいた機械工学科ならびに実習工場の各位ならびに卒業研究残留応力班の学生諸君に深く感謝する。なお、本稿の計算は本校

電気計算機によったものである。ここに記して関係各位に感謝の意を表わす。

文 献

- (1) Treuting, R. G. & Read, Jr., W. T. : "A mechanical determination of biaxial stress in sheet materials" J. Appl. Phys., Vol. 22, No. 2 (1951)
- (2) 久野陸夫・土肥 修 : "金属板の残留内力測定" 北海道大学工学部研究報告第9号 (1953)
- (3) 土肥 修 : "抵抗線歪計による平板残留2主応力測定法" 北海道大学工学部研究報告第27号 (1961)
- (4) 土肥 修 : "主応力方向が未知の場合の平板の残

- 留主応力測定法”日本機械学会論文集第30巻第215号(1964)
- (5) 土肥 修: “平板及び薄肉円管の残留応力測定理論”金属材料第6巻第2号(1966)
- (6) 立花敏之・中津正志: “平板の残留応力測定”苫小牧工業高等専門学校紀要第7号(1972)
- (7) Letner, H. R. & Snyder, H. J.: “Grinding and lapping stresses in manganese oil-hardening tool steel” Trans. ASME, Vol. 75 (1953)
- (8) Glickman, L. A., Sanfirova, T. P. & Stepanov, V. A.: 文献(7) Results
- (9) Henriksen, E. K.: 文献(7) Discussion
- (10) Colwell, L. V., Sinnot, M. J. & Cobin, J. C.: “The determination of residual stresses in hardened ground steel” Trans. ASME, Vol. 77 (1955)
- (11) 高沢孝哉: “研削加工変質層”精密機械第27巻第6号(1961)
- (12) 立花敏之・中津正志: “焼なまし炭素工具鋼の研削残留応力”苫小牧工業高等専門学校紀要第7号(1972)

(昭和56年12月1日受理)