

焼なまし機械構造用炭素鋼の研削残留応力

立 花 敏 之*

Residual Grinding Stresses in Annealed Carbon Steels
for Machine Structural Use

Toshiyuki TACHIBANA

要 旨

焼なまし機械構造用炭素鋼板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ならびに切込み深さ・研削油剤の影響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 steel plates for machine structural use were determined by the curvature method. Stress distributions on the layers close to the surface, the influence of depth of cut and grinding fluid upon the stresses induced, and the mechanism of producing stresses were studied.

1. 緒 言

研削加工を行なうと、工作物表層部に加工変質層が形成されるとともに残留応力が発生することが知られている。研究の結果によると、その残留応力は材料の組成・熱処理・加工条件等によりかなりの変化があることが示されている。

筆者らは先に焼なまし炭素工具鋼の研削残留応力について報告した⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾が、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適用して、焼なまし機械構造用炭素鋼板を平面研削することによって生ずる残留応力を測定し、表層部の応力分布ならびに切込み深さ・研削油剤の影響および残留応力発生機構について考察した。

2. 実 験 方 法

試料には、市販の機械構造用炭素鋼板(JIS G 4051 S35C 厚さ 2 mm)を真空電気炉で焼なまししたものを用い、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
0.32~0.35%	0.15~0.35%	0.60~0.90%	~0.030%	~0.035%

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
850℃	1 h	40min	19.6℃/h (590℃以上) 炉 冷 (590℃以下)

表 3 機械的性質(焼なまし状態)

降伏点 MP _s	引長強さ MP _s	破断伸び %	絞 り %	縦弾性係数 GP _s	Poisson比
273	485	25.0	35.3	218	0.268

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	20 μm 40	乾 式 湿 式
といし周速度	テーブル縦送り	テーブル横送り
1540m/min	12m/min	0.15mm/pass

* 教授 一般教科 (応用数学)
(注) 1. 研削といしはJISR6212による。
2. 湿式研削では水溶性油剤(JIS K2241, W11)を20倍に希釈して使用し、注油量は3.6L/minとした。

試験片は全長 140 mm (うち溶解部の長さ 70 mm) 幅 10 mm 厚さ約 2 mm の短冊状⁽³⁾⁽⁵⁾とし、長手方向を研削方向またはそれに直角方向とした。

試験片の屑除去は電解法⁽²⁾⁽⁶⁾によった。試験片に溶解部を除いて絶縁塗料(アクリルラッカー)を塗布し、上端に反射平面鏡を取り付け下端を支持台に固定した。この試験片を陽極とし、下端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した。電解液の温度を一定に保つため、電解槽を冷却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 温 度	陽 極 電流密度
塩 化 第一鉄	塩 化 カルシウム	水		
300g	335g	1 L	15±0.5°C	1.0 A/cm ²

残留応力の測定は曲率法⁽²⁾⁽⁴⁾によった。曲率の測定にランプと尺度の法⁽⁴⁾を適用し、光源に He-Ne ガスレーザ(日本電気 KK 製)を用い、試験片に取り付けた反射鏡からおおよそ 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。

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

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

実験装置の略図を図 1 に示す。

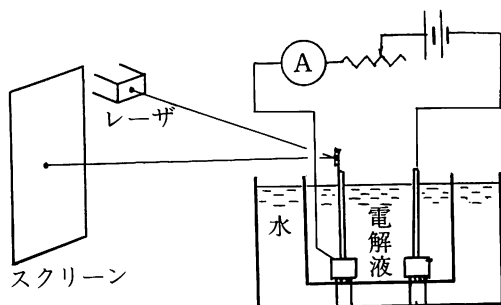


図-1 実験装置

平板の残留応力計算式は次の仮定の下に導かれる⁽¹⁾⁽²⁾⁽⁶⁾。

- (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の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 軸を取る。なお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

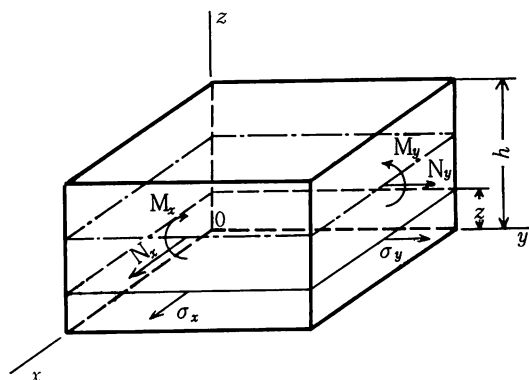


図-2 平板素

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曲げモーメント(単位幅当り) $M_x \cdot M_y$ はそれぞれ次式で表わされる。

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

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。

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

ここで

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

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⁽¹⁾⁽²⁾⁽⁶⁾。

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

これを解いて次式が得られる。

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

式(1)により変形すると次式が得られる。

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

残留主応力 σ_x ・ σ_y は式(4)より次式で求められる。

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

予備実験として、試験片を一定電流の下で溶解し溶解速度の一定なることを確めた。次に焼なま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からほぼ無応力状態なることを確めた。また研削加工を行なっ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が小さいことから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めた。

3. 実験結果

前述の実験方法により、平面研削を行なった試験片について、その残留主応力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の残留主応力分布図である。研削方向では研削面に大きな引張応力が生じ、研削面からの深さとともに下降し、およそ $150 \mu\text{m}$ で圧縮応力となり、次第に極限圧縮応力に近づく。残留応力層の深さはおよそ $200 \sim 250 \mu\text{m}$ である。研削方向に直角な方向では内部(深さおよそ $50 \mu\text{m}$)に極大引張応力が現われている。炭素工具鋼⁽¹¹⁾や Letner 等のマンガン工具鋼⁽⁷⁾の研削残留主応力分布に見られる応力値の顕著な反転現象は現われていない。

図4は湿式研削を行なった場合の残留主応力分布図で、残留応力の分布は乾式研削の場合と同じ傾向であるが、応力値は小さく、研削方向に直角な方向では研削面に圧縮応力が現われている。

いずれの場合も、残留応力層の深さは切込み深さに比べかなり深い(およそ $6 \sim 10$ 倍)が、試験片の厚さに比べると極めて浅い(およそ $1/8 \sim 1/10$)。

4. 考 察

研削残留応力は、と粒の切削作用による引張応力・と粒のバニシ作用による圧縮応力・研削熱による引張応力の合成応力で⁽⁸⁾、焼入鋼ではさ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されている⁽⁹⁾。

本実験において得られた結果を見ると、この場合はと粒の切削作用の効果・研削熱による効果が優先して現われている。切込み深さが大きくなると、研削抵抗・研削熱量が増大し残留応力値が高くなり残留応力層の深さが深くなる。研削油剤を使用すると、その潤滑効果・冷却効果により研削抵抗・研削熱量が減少し応力値が低くなる。切込み深さが小さく研削油剤の効果が十分であると、バニシ作用による効果が優先して現われ研削面に圧縮残留応力が生ずることが考えられる。また焼なましたままの試験片がほぼ無応力状態なることから、極限圧縮応力は主として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⁽⁸⁾、研削加工による一次的応力でないと考えられる。

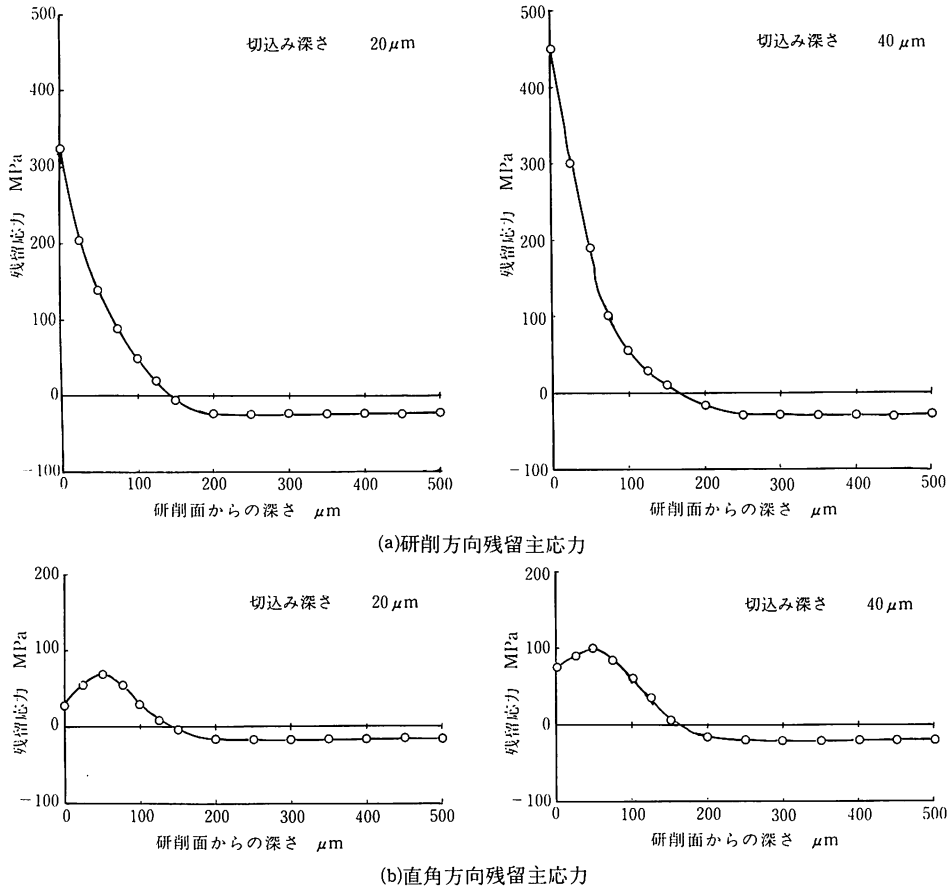


図-3 乾式研削による残留主応力

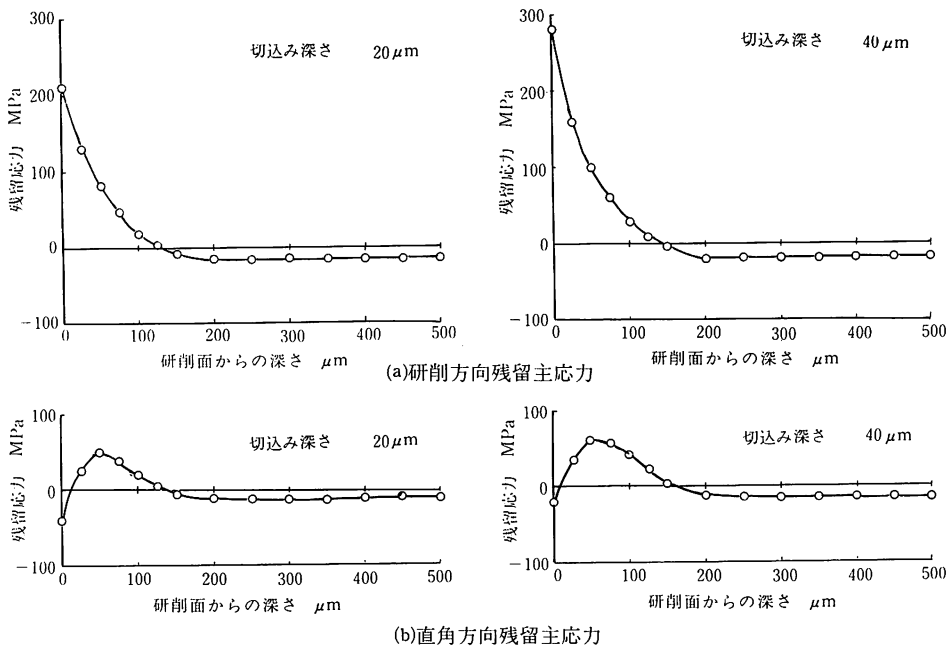


図-4 湿式研削による残留主応力

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) 供試材料の研削残留応力の発生には、と粒の切削作用の効果・研削熱の効果が優先している。
 - (3) 乾式研削では研削面に大きな引張応力が生じ、供試材料の残留主応力分布図には応力値の顕著な反転現象は見られない。
 - (4) 切込み深さが大きくなると残留応力値が高くなり残留応力層の深さが深くなる。
 - (5) 研削油剤を使用すると残留応力値が低くなる。
 - (6) 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。
 - (7) 極限圧縮応力は、主として表層部の引張応力と平衡を保つために生じた弾性的応力である。
- 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・鶴飼助教授に深く感謝する。本実験には本校機械工学科ならびに実習工場の各位および卒業研究残留応力班の学生諸君にご協力いただいた。また本稿の計算は本校電子計算機によった。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 residual 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) Henriksen, E. K. : 文献(7) Discussion
- (9) 高沢孝哉 : "研削加工変質層" 精密機械第27巻第6号(1961)
- (10) 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)
- (11) 立花敏之 : "焼なまし炭素工具鋼の研削残留応力—表層部の応力分布—" 苫小牧工業高等専門学校紀要第17号(1982)

(昭和58年11月28日)

