

焼なまし炭素工具鋼の研削残留応力

立 花 敏 之*
中 津 正 志**

Residual Grinding Stresses in Annealed Carbon Tool Steel

Toshiyuki TACHIBANA
Masashi NAKATSU

要 旨

焼なまし炭素工具鋼板の平面研削によって生ずる残留応力を、曲率法とひずみゲージ法を併用して測定し、応力分布および切込み深さ・研削油剤の影響を検討した。

Synopsis

Applying the curvature and the strain gage methods, we determined the residual stresses in annealed carbon tool steel plates induced by surface grinding, and investigated the stress distributions, the influence of depth of cut and grinding fluids upon the residual stresses.

1. 結 言

切削や研削による加工を行なうと、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は知られているが、この残留応力については、他の加工の場合に比べて十分な検討が行なわれていない。

一般に加工面の残留応力を研究する目的は、部品の疲れ強さや寿命がこれによっていかに変わるかという点と、応力が除去された後の変形がどの程度になるかを知るためである。さらに研削仕上面の残留応力の研究は、と粒の作用が切削作用であるかバニシ作用であるかの考察の根拠を与え、また面の耐磨耗性や耐食性などの原因を知るのに役立つものである。

平面研削によって生ずる鋼板の残留応力の測定は、例えば Frisch 等⁽¹⁾が焼なまし軟鋼について、Letner 等⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾が曲率法により焼なましマンガン工具鋼および熱処理した軸受鋼について、Colwell 等

がX線法と曲率法を併用して熱処理したニッケルクロムモリブデン鋼について、また古元・沖中⁽⁶⁾が曲率法により熱処理した各種の鋼について行なっており、その結果が報告されている。筆者らは、焼なまし炭素工具鋼板について、薄層除去に電解法を、応力測定に曲率法とひずみゲージ法を用いて、平面研削によって生ずる残留応力を測定し、応力分布および切込み深さ・研削油剤の影響を検討した。

2. 実 験 方 法

2. 1 試料・試験片

試料には、市販の炭素工具鋼帯板（JIS G 4401, SK 5, 厚さ約 2 mm）を、真空電気炉で焼なまし、その両面を平面研削したものをを用いた。焼なまし条件を表 1 に、機械的性質を表 2 に、研削条件を表 3 に示す。

表 1 焼 な ま し 条 件

昇 時 間	温 度	焼 な まし 度	保 持 時 間	冷 却 速 度
1 h	750 °C	40 min	20deg/h (500 °Cまで) 炉 冷 (500 °C以下)	

* 助教授 機械工学科

** 助 手 機械工学科

表 2 機 械 的 性 質 (焼なまし状態)

降 伏 点	引 張 強 さ	破 断 伸 び	絞 り	縦 弾 性 係 数	Poisson 比
42 kg/mm ²	54 kg/mm ²	19.4 %	36.0 %	2.66×10^4 kg/mm ²	0.281

- (注) 1. 引張試験は5号試験片 (JIS Z 2261) による。
2. 弾性ひずみの測定はひずみゲージによる。

表 3 研 削 条 件

研 削 と い し	と 周 速 度	テ ー ブ ル 縦 送 り	テ ー ブ ル 横 送 り	切 深 込 み さ	研 削 方 式
1号A, 205×19×32 WA, 46, J, m 2, V	1540 m/min	12 m/min	0.15 mm/pass	0.02 0.04 0.06 mm	乾 式 湿 式

- (注) 1. 研削といしは JIS R 6212 による。
2. 湿式研削では、水溶性油剤 (JIS K 2241, W 11) を25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 の短ざく状とした。

2.2 実験方法

前述の試験片を電解法⁽⁷⁾により片面から逐次薄層を除去しつつ、適当時間ごとに曲率の変化を望遠鏡と尺度の法により、試験片背面のひずみを静ひずみ計により測定した。尺度は半径 1000 mm の円弧状とし、鏡と尺度間の距離を 1000 mm とした。使用したひずみゲージ・接着剤・防水剤および絶縁塗料を表4に、電解条件を表5に、試験片の溶解特性を図1に示す。

表 4 ひずみゲージ・接着剤・防水剤・絶縁塗料

ひずみゲージ	ゲージ箔の厚さ	ゲージベースの厚さ	結 線
箔フェーステルゲージ* (自己温度補償型)	10 μ	25 μ	3 線 式

* KFC-5-C1-11, 共和電業製

接 着 剤	接着剤層の厚さ	防水剤	絶 縁 塗 料
シアノアクリレート系 樹 脂	30 μ	エポキシ 系 樹 脂	ラ ッ カ ペ イ ン ト

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		
300 g	335 g	1000 g	30±0.5℃	0.6 1.7 A/cm ²

2.3 残留応力計算式

平面研削によって平板に生ずる残留主応力の方向は、研削方向に平行な方向とそれに垂直な方向である⁽²⁾。この残留主応力は、平面応力状態にあり、かつ板の表面から深さのみの関数であるとして、つぎの式 (1)・(2)・(3)により計算した。ここで、記号をつぎのように定める。

x : 研削方向に平行な方向

y : 研削方向に垂直な方向

z : 板の深さ方向

h : 板の厚さ

E : 板材の縦弾性係数

ν : 板材の Poisson 比

残留主応力 σ_x ・ σ_y を、それぞれつぎのように表わす⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

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

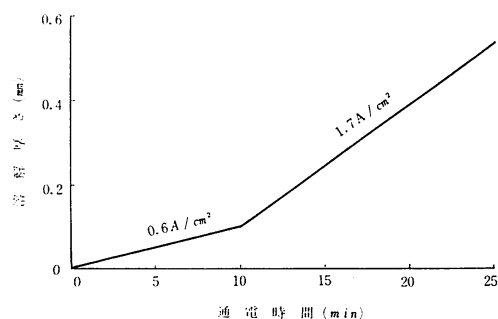


図 1 溶 解 特 性

ここで σ_x, σ_y : 引張を正, 圧縮を負とする。

曲率法(望遠鏡と尺度の法)によると, $u_x \cdot u_y$ はそれぞれつぎの式で表わされる⁽⁷⁾。

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

ここで ℓ : 試験片溶解部の長さ

L : 鏡と尺度間の距離

s_x, s_y : 尺度の読みの変化(試験片背面が凸に曲がるとき正, 凹に曲がるとき負とする)。

ひずみゲージ法によると, $u_x \cdot u_y$ はそれぞれつぎの式で表わされる⁽⁸⁾。

$$\left. \begin{aligned} u_x(z) &= -\frac{E}{2} \left[\frac{(h-z)^2}{h-z+3d} \frac{d}{dz} \varepsilon_x(z) - 4 \frac{h-z}{h-z+3d} \varepsilon_x(z) \right. \\ &\quad \left. + 6(h-z+d) \int_0^z \frac{\varepsilon_x(\zeta)}{(h-\zeta+3d)^2} d\zeta \right] \\ u_y(z) &= -\frac{E}{2} \left[\frac{(h-z)^2}{h-z+3d} \frac{d}{dz} \varepsilon_y(z) - 4 \frac{h-z}{h-z+3d} \varepsilon_y(z) \right. \\ &\quad \left. + 6(h-z+d) \int_0^z \frac{\varepsilon_y(\zeta)}{(h-\zeta+3d)^2} d\zeta \right] \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここで d : 試験片背面とひずみゲージ中央面間の距離

$\varepsilon_x, \varepsilon_y$: ひずみ計の読みの変化(伸びを正, 縮みを負とする)。

3. 実験結果

3.1 乾式研削による残留応力

前述の実験方法により, 両面を乾式研削した試験片について, その残留主応力を測定した結果を図2に示す。

この結果によると, 表面に引張応力が生じ, 表面からの深さとともに増大し, 深さおよそ0.02mmで極大値に達し, ついで漸減し深さおよそ0.15mm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0.25~0.35mmである。また極大引張応力は, 研削方向に平行方向の応力値が垂直方向の応力値より約3 kg/mm² 高い。

3.2 湿式研削による残留応力

両面を湿式研削した試験片について, その残留主応力を測定した結果を図3に示す。

この結果によると, 表面に圧縮応力が生じ, 表面からの深さとともに急減し, 深さおよそ0.015mmで引張応力となり, 深さおよそ0.05mmで極大値に達し, ついで漸減し深さおよそ0.22mm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0.3~0.4mmである。また極大引張応力は研削方向に平行方向の応力値が垂直方向の応力値より約3 kg/mm² 低い。

4. 考察

4.1 残留応力層と加工硬化層

試料のかたさを, Vicker's 微小かたさ試験機により荷重50gで測定した結果を図4に示す。

この結果によると, 研削面が硬化し, 表面からの深さとともに漸減し, 次第に内部素地のかたさに近づく。表面のかたさは, 湿式の場合が乾式の場合より若干高い。加工硬化層の深さは乾式研削でおよそ0.12mm, 湿式研削でおよそ0.08mmである。したがって残留応力層の深さは加工硬化層の深さに比しはるかに深く, その2.5~4.5倍である。

4.2 残留応力におよぼす切込み深さの影響

切込み深さの増大に伴って, 研削抵抗・発熱量が増大し, その結果研削熱による応力・と粒の切削作用による応力が増大し, 図5に示したように, 極大引張応力値が高くなり, 残留応力層の深さが深くなる。

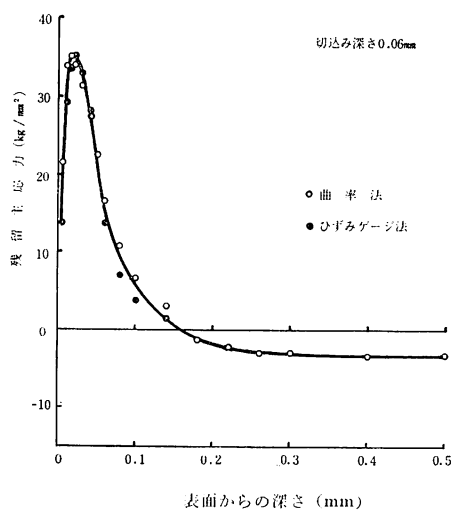
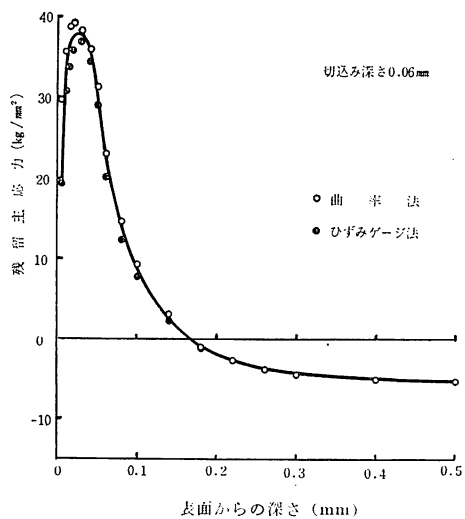
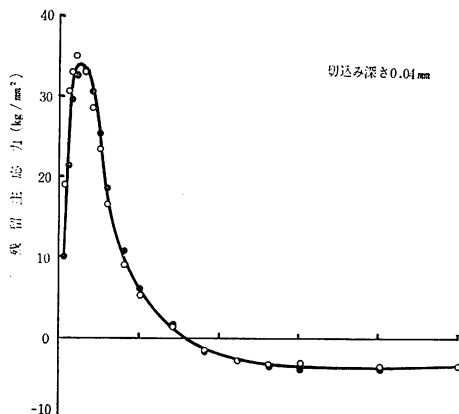
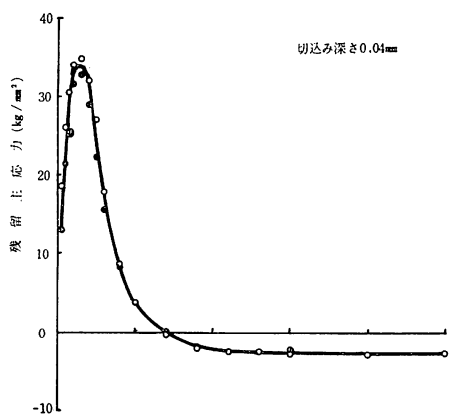
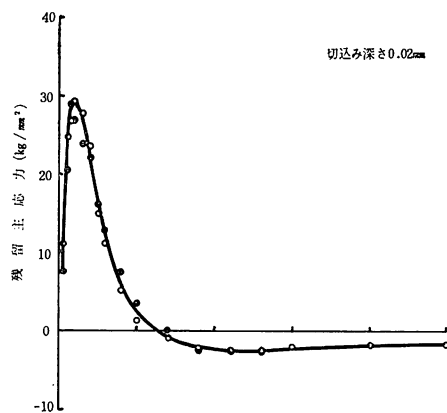
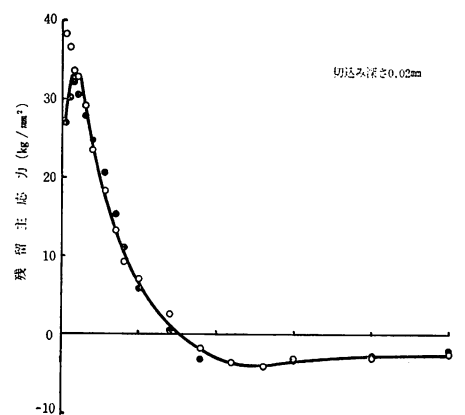
4.3 残留応力におよぼす研削油剤の影響

湿式研削では, 研削油剤の冷却効果・潤滑効果により, 研削抵抗・発熱量が減少し, その結果研削熱による応力・と粒の切削作用による応力が減少し, 図3に示したように表面に圧縮応力が生じ, かつ極大引張応力値が乾式研削の場合に比し低下する。この実験結果では, 図5に示したように研削方向に平行方向で約23~17kg/mm², 垂直方向で約16~10kg/mm² 低下している。この低下量が切込み深さの増大によって小さくなるのは, 研削油剤の冷却効果が低下することによる。しかし, 極大値の生ずる深さおよび残留応力層の深さは, とともに深くなる。

4.4 研削残留応力発生機構

研削加工による残留応力は, Colwell⁽⁹⁾ 等によると, 切削作用による機械的応力と熱応力および摩擦による機械的応力と熱応力との合成応力であり, その応力分布は図6のようになり, この実験結果とよく一致する。

Henriksen⁽¹⁰⁾ によると, 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力であり, その応力分布は図7のようになる。これによると, 表面の引張応力



a. 研削方向に平行方向

b. 研削方向に垂直方向

図 2 乾式研削による残留主応力分布

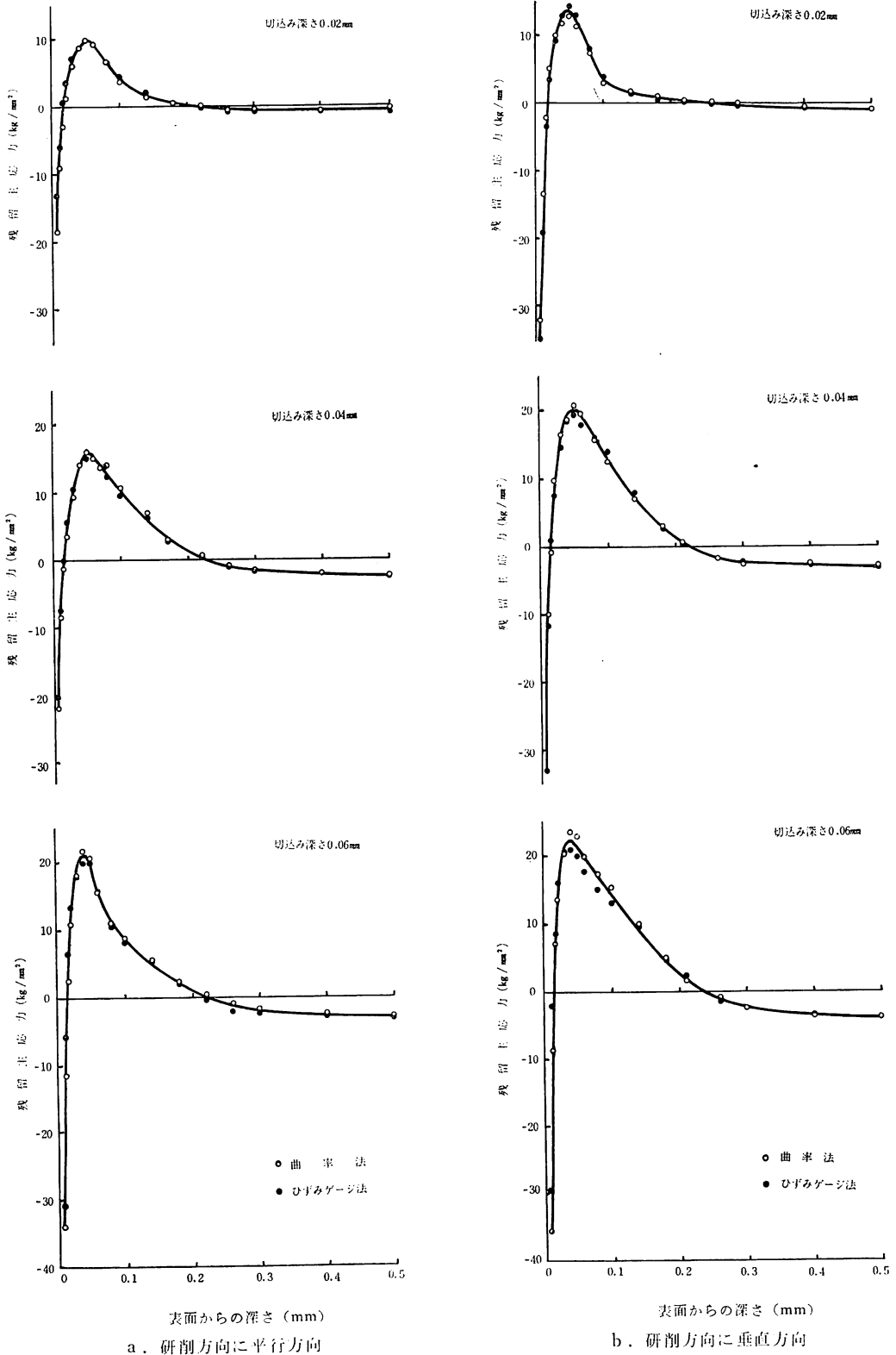


図 3 湿式研削による残留主応力分布

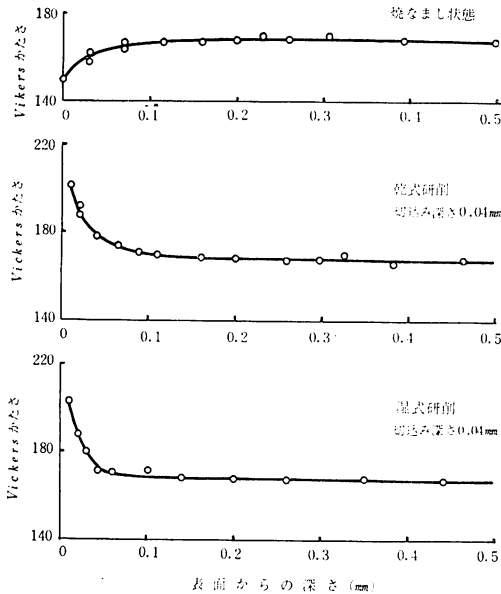


図 4 かたさ分布

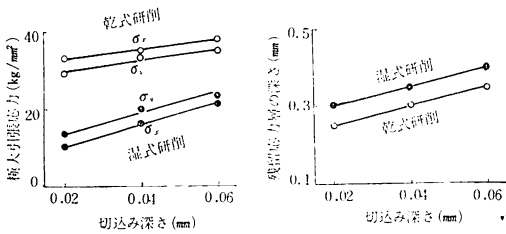


図 5 切込み深さ・研削油剤の影響

が深さともに急激に低下、圧縮応力となり、さらに反転して上昇し引張応力となるが、この反転する深さは、Letner 等⁽²⁾によるとおよそ $2 \sim 3 \mu$ である。しかし、高沢⁽¹⁰⁾は、と粒の切削作用による応力層の深さは浅く、研削熱による応力層の深さはもっと深くなり、研削油剤による急冷効果が作用した場合には表面近くに圧縮応力が生ずると述べている。これらの点を明らかにするには、さらに表面直下の応力分布を検討する必要がある。またこれらの説明は定性的範囲を出ていないので、定量的に明らかにすることが今後必要である。

5. 結 語

以上の実験結果から、つぎの結論が得られた。

- (1) 研削残留応力分布は、Colwell 等の説明をよく一致する。
- (2) 残留応力層の深さは、加工硬化層の深さに比しはるかに深い。
- (3) 切込み深さの増大とともに、極大引張応力値が

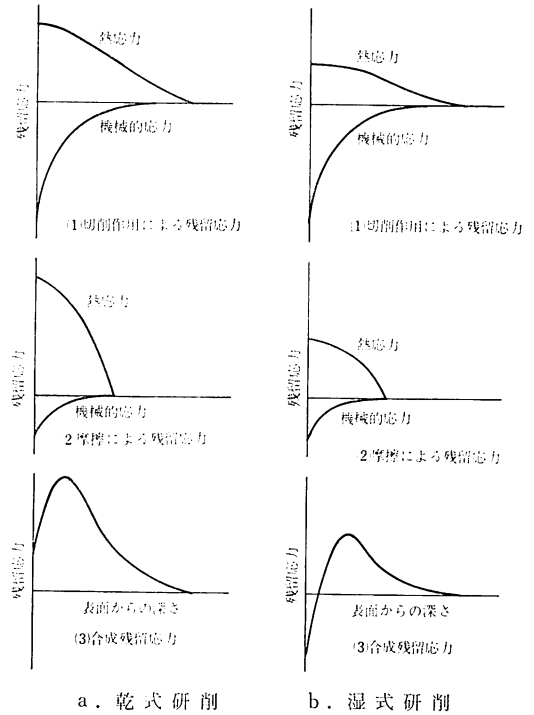


図 6 残留応力発生機構 (Colwell 等)

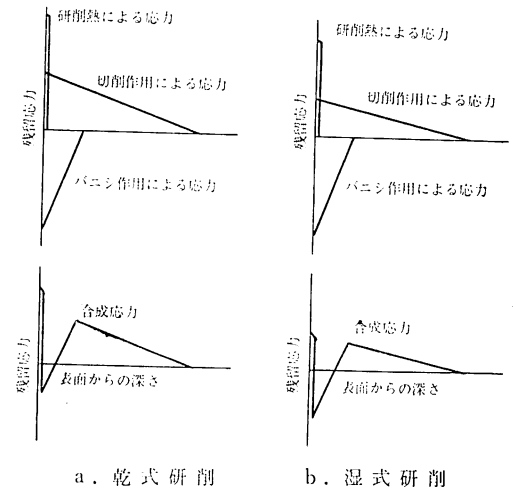


図 7 残留応力発生機構 (Henriksen)

高くなり、残留応力層の深さが深くなる。

(4) 研削油剤を使用すると、表面に圧縮残留応力が生じ、極大引張応力値が低下する。この低下量は切込み深さの増大とともに減少する。極大値の生ずる深さおよび残留応力層の深さは深くなる。

(5) 研削残留応力発生機構を明らかにするには、さらに表面直下の応力分布の検討を必要とし、また定量

的に明らかにすることが今後必要である。

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・鶴飼助教授ならびに実験に協力していただいた卒業研究残留応力班の学生諸君に深く感謝する。

文 献

- (1) Frisch, J. & Thomsen, E. Q.: "Residual grinding stresses in mild steel" Trans. ASME, Vol. 73(1951)
- (2) Letner, H. R. & Snyder, H. J.: "Grinding and lapping stresses in Manganese oil-hardening tool steel" Trans. ASME, Vol. 75 (1953)
- (3) Letner, H. R.: "Residual grinding stresses in hardened steel" Trans. ASME, Vol. 77 (1955)
- (4) Letner, H. R.: "Influence of grinding fluids upon residual stresses in hardened steel" Trans. ASME, Vol. 79 (1957)
- (5) Colwell, L. V., Sinnott, M. J. & Tobin, J. C.: "The determination of residual stresses in hardened, ground steel" Trans. ASME, Vol. 77 (1955)
- (6) 古元隆生・沖中進: "焼入鋼の残留応力におよぼす研削の影響" 日本金属学会誌第25巻第6号(1961)
- (7) 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)
- (8) 土肥修: "抵抗線歪計による平板の残留2主応力測定法" 北海道大学工学部研究報告第27号(1961)
- (9) Henriksen, E. K.: 文献(2) Discussion
- (10) 高沢孝哉: "研削加工変質層" 精密機械第27巻第6号(1961)

(昭和47年1月10日受理)

1. The first part of the report discusses the importance of maintaining accurate records of all transactions. It emphasizes that proper record-keeping is essential for the company's financial health and for providing reliable information to stakeholders. The report also highlights the need for transparency and accountability in all financial dealings.

2. The second part of the report provides a detailed overview of the company's current financial position. It includes a summary of the company's assets, liabilities, and equity. The report also discusses the company's revenue and expenses for the reporting period, as well as its net income. This information is presented in a clear and concise manner, allowing stakeholders to easily understand the company's financial performance.

3. The third part of the report discusses the company's financial goals and objectives for the upcoming year. It outlines the strategies and initiatives that the company plans to implement to achieve these goals. The report also discusses the potential risks and challenges that the company may face and provides recommendations for how to mitigate these risks.

4. The fourth part of the report provides a summary of the company's financial performance and a conclusion. It reiterates the importance of maintaining accurate records and provides a final assessment of the company's financial health. The report also includes a list of recommendations for how the company can improve its financial performance in the future.