

平板の残留応力測定

— 曲率法およびひずみゲージ法についての考察 —

立 花 敏 之 *
中 津 正 志 **

Determination of Residual Stresses in Plates

— A Research on the Curvature and the Strain Gage Methods —

Toshiyuki TACHIBANA
Masashi NAKATSU

要 旨

曲率法およびひずみゲージ法により、平板の残留応力を測定する場合の応力計算式ならびに実際例における応力計算値を比較検討し、併わせて、電解法により薄層を除去する際に生ずる二三の問題を解明した。

Synopsis

In the determination of residual stresses in plates by the curvature and the strain gage methods, we investigated the formulae for calculation of stresses and their numerical values in some practical examples. Besides, we did some problems resulting from the thin layer removal of plates by the electrolysis method.

1. 緒 言

機械の部品・構造物の部材には、その製造工程中に生じた残留応力が存在する場合が多い。これが原因となつて、部品・部材が変形し、寸法・精度が狂つたり、ときには破損に至ることもあり、また逆に破損が抑制されることもある。

工作においては、既存の残留応力の消滅や新たな残留応力の発生により、工作物が変形したり仕上精度に悪い影響を受けたりする。また設計に際して部品・部材の応力状態を推定するには、残留応力の大きさやその効果を知る必要がある。

残留応力は、有害な場合にこれを除去または軽減するにしても、また有効な場合にこれを積極的に利用するにしても、その種類・大きさ・分布を定量的に知ることが必要である。現在まで多くの研究者により、種々の形状の物体に存在する残留応力の測定法が開発され、各種の加工によって生ずる残留応力の測定結果が報告されている。

本稿では、平板に存在する残留応力を曲率法およびひずみゲージ法によって測定する場合の応力計算式ならびに実際例における応力計算値を比較検討し、併わせて、電解法により薄層を除去する際に生ずる二三の問題を解明した。

2. 理 論

2.1 仮 定

平板の残留応力計算式を導くにあたり、つぎの仮定をおく。

- (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。

* 助教授 機械工学科

** 助 手 機械工学科

2.2 残留応力による曲げモーメントと面内力

図1に示したように、平板の表面上に原点0を、残留主応力軸を x 軸・ y 軸に、厚さ方向を z 軸に取る。また記号をつぎのように定める。

h : 板の厚さ

E : 板材の縦弾性係数

ν : 板材の Poisson 比

残留主応力 $\sigma_x \cdot \sigma_y$ をつぎのように表わす。

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

ここで σ_x, σ_y : 引張を正、圧縮を負とする。

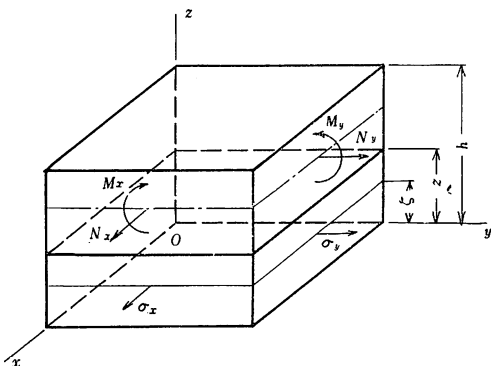


図1 平板素

板の表面から深さ z まで薄層を取り去ると、残っている板に作用する単位幅あたりの曲げモーメント $M_x \cdot M_y$ および面内力 $N_x \cdot N_y$ は、それぞれつぎの式で表わされる。

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

ここで M_x, M_y : 板を上方に凸に曲げるモーメントを正、凹に曲げるモーメントを負とする。

$$\left. \begin{aligned} N_x(z) &= \int_0^z \sigma_x(\zeta) d\zeta \\ N_y(z) &= \int_0^z \sigma_y(\zeta) d\zeta \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここで N_x, N_y : 引張を正、圧縮を負とする。

2.3 曲率法の残留応力計算式

前述の除去されずに残っている板に作用する曲げモーメント $M_x \cdot M_y$ と板の主曲率 $\kappa_x \cdot \kappa_y$ との間に、つぎの関係がある。

$$\left. \begin{aligned} M_x(z) &= \frac{E}{12(1-\nu^2)} (h-z)^3 [\kappa_x(z) + \nu \kappa_y(z)] \\ M_y(z) &= \frac{E}{12(1-\nu^2)} (h-z)^3 [\kappa_y(z) + \nu \kappa_x(z)] \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ここで κ_x, κ_y : 板が上方に凸のとき正、凹のとき負とする。

式(1)・(2)・(4)より、つぎの volterra 型第一種積分方程式が得られる。

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

これを解いて、つぎの久野・土肥の計算式⁽¹⁾が得られる。

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

平板の他の表面から深さ z まで薄層を取り去る場合は、式(6)を変形してつぎの式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} u_x(z) &= \frac{E}{6} \left[z^2 \frac{d}{dz} \kappa_x(z) + 4z \kappa_x(z) - 2 \int_z^h \kappa_x(\zeta) d\zeta \right] \\ u_y(z) &= \frac{E}{6} \left[z^2 \frac{d}{dz} \kappa_y(z) + 4z \kappa_y(z) - 2 \int_z^h \kappa_y(\zeta) d\zeta \right] \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

さらに、板の中央平面に原点を移すと、つぎの Treuting & Read の計算式⁽²⁾が得られる。

$$\left. \begin{aligned} u_x(z) &= - \frac{E}{6} \left[\left(\frac{h}{2} + z \right)^2 \frac{d}{dz} \kappa_x(z) \right. \\ &\quad \left. + 4 \left(\frac{h}{2} + z \right) \kappa_x(z) - 2 \int_z^{h/2} \kappa_x(\zeta) d\zeta \right] \\ u_y(z) &= - \frac{E}{6} \left[\left(\frac{h}{2} + z \right)^2 \frac{d}{dz} \kappa_y(z) \right. \\ &\quad \left. + 4 \left(\frac{h}{2} + z \right) \kappa_y(z) - 2 \int_z^{h/2} \kappa_y(\zeta) d\zeta \right] \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

ただし、曲率は板が上方に凹のとき正、凸のとき負とする。

曲板においても、その曲率半径が板の厚さに比しひじょうに大きいときは、

$$\kappa_x(z) = c_x(z) - c_x(0), \quad \kappa_y(z) = c_y(z) - c_y(0)$$

ここで、 c_x, c_y : 板の主曲率 (板が上方に凸のとき正、

凹のとき負とする。)

とおくと、式(4)が近似的に成り立つゆえ、式(6)またはつぎの式が近似的に成り立つ。

$$\left. \begin{aligned} u_x(z) &= -\frac{E}{6} \left[(h-z)^2 \frac{d}{dz} c_x(z) - 4(h-z)c_x(z) \right. \\ &\quad \left. + 2(2h-3z)c_x(0) + 2 \int_0^z c_x(\zeta) d\zeta \right] \\ u_y(z) &= -\frac{E}{6} \left[(h-z)^2 \frac{d}{dz} c_y(z) - 4(h-z)c_y(z) \right. \\ &\quad \left. + 2(2h-3z)c_y(0) + 2 \int_0^z c_y(\zeta) d\zeta \right] \end{aligned} \right\} (9)$$

さらに、板の最初の曲率が極めて小さいときは、つぎの式で近似できる。

$$\left. \begin{aligned} u_x(z) &= -\frac{E}{6} \left[(h-z)^2 \frac{d}{dz} c_x(z) - 4(h-z)c_x(z) \right. \\ &\quad \left. + hc_x(0) + 2 \int_0^z c_x(\zeta) d\zeta \right] \\ u_y(z) &= -\frac{E}{6} \left[(h-z)^2 \frac{d}{dz} c_y(z) - 4(h-z)c_y(z) \right. \\ &\quad \left. + hc_y(0) + 2 \int_0^z c_y(\zeta) d\zeta \right] \end{aligned} \right\} (10)$$

また

$$\kappa_x(z) = c_x(z) - c_x(h), \quad \kappa_y(z) = c_y(z) - c_y(h)$$

とおけば、式(7)・(8)またはつぎの Letner の計算式⁽³⁾が近似的に成り立つ。

$$\left. \begin{aligned} u_x(z) &= \frac{E}{6} \left[z^2 \frac{d}{dz} c_x(z) + 4zc_x(z) \right. \\ &\quad \left. + 2(h-3z)c_x(h) - 2 \int_z^h c_x(\zeta) d\zeta \right] \\ u_y(z) &= \frac{E}{6} \left[z^2 \frac{d}{dz} c_y(z) + 4zc_y(z) \right. \\ &\quad \left. + 2(h-3z)c_y(h) - 2 \int_z^h c_y(\zeta) d\zeta \right] \end{aligned} \right\} (11)$$

$$\left. \begin{aligned} u_x(z) &= \frac{E}{6} \left[z^2 \frac{d}{dz} c_x(z) + 4zc_x(z) \right. \\ &\quad \left. - hc_x(h) - 2 \int_z^h c_x(\zeta) d\zeta \right] \\ u_y(z) &= \frac{E}{6} \left[z^2 \frac{d}{dz} c_y(z) + 4zc_y(z) \right. \\ &\quad \left. - hc_y(h) - 2 \int_z^h c_y(\zeta) d\zeta \right] \end{aligned} \right\} (12)$$

2. 4 ひずみゲージ法の残留応力計算式

前述の除去されずに残っている板の背面に接着されたひずみゲージに与えられるひずみ $\varepsilon_x \cdot \varepsilon_y$ は、曲げモーメントによるひずみと面内力によるひずみとの代数和であるゆえ、つぎの式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x(z) &= \left(-\frac{h-z}{2} + d \right) \kappa_x(z) \\ &\quad + \frac{1}{E(h-z)} [N_x(z) - \nu N_y(z)] \\ \varepsilon_y(z) &= \left(-\frac{h-z}{2} + d \right) \kappa_y(z) \\ &\quad + \frac{1}{E(h-z)} [N_y(z) - \nu N_x(z)] \end{aligned} \right\} (13)$$

ここで d : 板の背面とゲージ中心線または中央面間の距離

$\varepsilon_x, \varepsilon_y$: 伸びを正、縮みを負とする。

また、板・接着剤層・ゲージベース・ゲージの各境界にすべりはしないものとし、板以外のものの外力に対する抵抗は無視し得るものとする。式(1)・(2)・(3)・(4)・(13)より、つぎの Volterra 型第一種分方程式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} \int_0^z \left[\left(-\frac{h-z}{2} + d \right) \left(\frac{h+z}{2} - \zeta \right) - \frac{(h-z)^2}{12} \right] u_x(\zeta) d\zeta \\ = -\frac{E}{12} (h-z)^3 \varepsilon_x(z) \\ \int_0^z \left[\left(-\frac{h-z}{2} + d \right) \left(\frac{h+z}{2} - \zeta \right) - \frac{(h-z)^2}{12} \right] u_y(\zeta) d\zeta \\ = -\frac{E}{12} (h-z)^3 \varepsilon_y(z) \end{aligned} \right\} (14)$$

これを解いて、つぎの土肥の計算式⁽⁵⁾が得られる。

$$\left. \begin{aligned} u_x(z) &= -\frac{E}{2} \left[\frac{(h-z)^2}{h-z+3d} \frac{d}{dz} \varepsilon_x(z) - 4 \frac{h-z}{h-z+3d} \varepsilon_x(z) \right. \\ &\quad \left. + 6(h-z+d) \int_0^z \frac{\varepsilon_x(\zeta)}{(h-\zeta+3d)^2} d\zeta \right] \\ u_y(z) &= -\frac{E}{2} \left[\frac{(h-z)^2}{h-z+3d} \frac{d}{dz} \varepsilon_y(z) - 4 \frac{h-z}{h-z+3d} \varepsilon_y(z) \right. \\ &\quad \left. + 6(h-z+d) \int_0^z \frac{\varepsilon_y(\zeta)}{(h-\zeta+3d)^2} d\zeta \right] \end{aligned} \right\} (15)$$

板の背面とゲージ間の距離が板の厚さに比し無視できる程小さいときは、式(15)よりつぎの土肥の計算式⁽⁵⁾が得られる。

$$\left. \begin{aligned} u_x(z) &= -\frac{E}{2} \left[(h-z) \frac{d}{dz} \varepsilon_x(z) - 4\varepsilon_x(z) \right. \\ &\quad \left. + 6(h-z) \int_0^z \frac{\varepsilon_x(\zeta)}{(h-\zeta)^2} d\zeta \right] \\ u_y(z) &= -\frac{E}{2} \left[(h-z) \frac{d}{dz} \varepsilon_y(z) - 4\varepsilon_y(z) \right. \\ &\quad \left. + 6(h-z) \int_0^z \frac{\varepsilon_y(\zeta)}{(h-\zeta)^2} d\zeta \right] \end{aligned} \right\} (16)$$

さらに、面内力によるひずみが曲げモーメントによるひずみに比し無視できるほど小さいとすれば、式(14)よりつぎの積分方程式が得られる。

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

これを解いて、つぎの式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} u_x(z) &= -\frac{E}{3} \left[(h-z) \frac{d}{dz} \varepsilon_x(z) - 3\varepsilon_x(z) \right. \\ &\quad \left. + 2 \int_0^z \frac{\varepsilon_x(\zeta)}{h-\zeta} d\zeta \right] \\ u_y(z) &= -\frac{E}{3} \left[(h-z) \frac{d}{dz} \varepsilon_y(z) - 3\varepsilon_y(z) \right. \\ &\quad \left. + 2 \int_0^z \frac{\varepsilon_y(\zeta)}{h-\zeta} d\zeta \right] \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

この式は、式(6)に

$$\varepsilon_x(z) = \frac{h-z}{2} \kappa_x(z), \quad \varepsilon_y(z) = \frac{h-z}{2} \kappa_y(z)$$

を入れても求められる⁽⁶⁾。

平板の他の表面から深さ z まで薄層を取り去る場合は、式(15)・(16)・(17)を変形して、つぎの式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} u_x(z) &= \frac{E}{2} \left[-\frac{z^2}{z+3d} \frac{d}{dz} \varepsilon_x(z) + 4 \frac{z}{z+3d} \varepsilon_x(z) \right. \\ &\quad \left. - 6(z+d) \int_z^h \frac{\varepsilon_x(\zeta)}{(\zeta+3d)^2} d\zeta \right] \\ u_y(z) &= \frac{E}{2} \left[-\frac{z^2}{z+3d} \frac{d}{dz} \varepsilon_y(z) + 4 \frac{z}{z+3d} \varepsilon_y(z) \right. \\ &\quad \left. - 6(z+d) \int_z^h \frac{\varepsilon_y(\zeta)}{(\zeta+3d)^2} d\zeta \right] \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

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	Vicker's か た さ
42 kg/mm ²	54 kg/mm ²	19.4 %	36.0 %	2.06 × 10 ⁴ kg/mm ²	0.281	168

- (注) 1. 引張試験は 5 号試験片 (JISZ 2201) による。
 2. 弾性ひずみの測定はひずみゲージによる。
 3. Vicker's かたさは荷重 50 g による。

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⁽⁵⁾⁽⁷⁾とした。

3.2 実験方法

試験片の背面、溶解部中央位置にひずみゲージをはり、防水剤を塗布した上に、溶解面を残して絶縁塗料で被覆し、さらに上端に小さな平面鏡を取付けた。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 3 に示す。またゲージ箔・ゲージベース・接着剤層の厚さを、マイクロメーターと測微頭微鏡を用いて測定した結果を表 4 に示す⁽⁵⁾。

試験片の薄層除去は電解法⁽¹⁾によった。下端を鉛台に絶縁固定した試験片を陽極に、鉛板を陰極とし、電解そう中に対向させ、一定の直流電流の下で試験片の片面から連続溶解させた。電解液の温度調整のため、

$$\left. \begin{aligned} u_x(z) &= \frac{E}{2} \left[z \frac{d}{dz} \varepsilon_x(z) + 4\varepsilon_x(z) - 6z \int_z^h \frac{\varepsilon_x(\zeta)}{\zeta^2} d\zeta \right] \\ u_y(z) &= \frac{E}{2} \left[z \frac{d}{dz} \varepsilon_y(z) + 4\varepsilon_y(z) - 6z \int_z^h \frac{\varepsilon_y(\zeta)}{\zeta^2} d\zeta \right] \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

$$\left. \begin{aligned} u_x(z) &= \frac{E}{3} \left[z \frac{d}{dz} \varepsilon_x(z) + 3\varepsilon_x(z) - 2 \int_z^h \frac{\varepsilon_x(\zeta)}{\zeta} d\zeta \right] \\ u_y(z) &= \frac{E}{3} \left[z \frac{d}{dz} \varepsilon_y(z) + 3\varepsilon_y(z) - 2 \int_z^h \frac{\varepsilon_y(\zeta)}{\zeta} d\zeta \right] \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

曲板においても、その曲率半径が板の厚さに比しひじょうに大きいときは、式(4)・(19)が近似的に成り立つゆえ、式(15)~(20)が近似的に成り立つ。

3. 実 験

3.1 試料・試験片

試料には、市販の炭素工具鋼帯板 (JIS G4401, SK 5, 厚さ約 1 mm および 2 mm) を、真空電気炉で焼なまししたものを用いた。焼なまし条件を表 1 に、機械的性質を表 2 に示す。

表 1 焼 な ま し 条 件

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

表 3 ひずみゲージ・接着剤・防水剤・絶縁塗料

ひずみゲージ	接 着 剤	防 水 剤	絶縁塗料
箔フェステル ゲージ* (自己温度 補償型)	シアノアクリ レート系 樹 脂	エポキシ系 樹 脂	ラ ッ カ ペイント

* KFC-5-C1-11, 共和電業製

表 4 ゲージ箔・ゲージベース・接着剤層の厚さ

ゲ ー ジ 箔	ゲージベース	接 着 剤 層
10 μ	25 μ	30 μ

かくはん装置を用い、かつ電解そうを冷却水そうに入れた。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		
300 g	335 g	1000 g	30±0.5°C	0.6 1.7A/cm ²

応力測定に曲率法とひずみゲージ法を併用し、試験片の片面から溶解しながら、適当時間ごとに曲率の変化とひずみの変化を測定した。ひずみの変化の測定にはひずみゲージ・スイッチボックス・静ひずみ計を用い、結線は3線式とした。また曲率の変化の測定は望遠鏡と尺度の法により、尺度は半径 1000 mm の円弧状とし、鏡と尺度間の距離は 1000 mm とした。この方法によると、曲率の変化 $\kappa_x \cdot \kappa_y$ と尺度の読みの変化 $s_x \cdot s_y$ との間に

$$\kappa_x = \frac{s_x}{2Ll}, \quad \kappa_y = \frac{s_y}{2Ll}$$

ここで l : 試験片の溶解部の長さ

L : 鏡と尺度間の距離

s_x, s_y : 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。

なる関係があるゆえ、式(6)からつぎの式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} u_x(z) &= -\frac{E}{12Ll} \left[(h-z)^2 \frac{d}{dz} s_x(z) \right. \\ &\quad \left. -4(h-z)s_x(z) + 2 \int_0^z s_x(\zeta) d\zeta \right] \\ u_y(z) &= -\frac{E}{12Ll} \left[(h-z)^2 \frac{d}{dz} s_y(z) \right. \\ &\quad \left. -4(h-z)s_y(z) + 2 \int_0^z s_y(\zeta) d\zeta \right] \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

3. 3 試験片の溶解量

前述の試験片を一定の直流電流の下で片面から溶解し、溶解量(厚さ)と通電時間との関係を求めた。その結果を図2に示す。

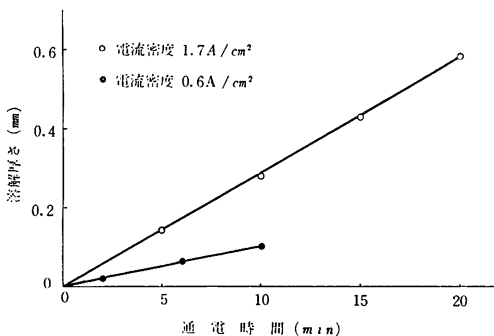


図 2 溶 解 特 性

この結果によると、溶解厚さ h_r (mm) はつぎの式で表わすことができる。

$$h_r = 0.0171Jt$$

ここで J : 陽極電流密度 (A/cm²)

t : 通電時間 (min)

Faraday の法則によると、陽極金属の溶解量(容積) v はつぎの式で表わされる。

$$v = \eta KIt$$

ここで I : 通過電流

η : 電流効率

K : 電解定数

この試験片では、電解定数は $0.0369 \times 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{C}$ なるゆえ、電流効率は 77.4 % である。

3. 4 試験片の温度変化

試験片の温度変化を、はり付型温度ゲージ (KTB-7-50-A 1, 共和電業製)・アダプタ (TA-50 UA, 共和電業製)・スイッチボックス・静ひずみ計を用いて測定した。接着剤・防水剤・絶縁塗料は表3による。

測定に先立ち、この温度ゲージにより既知の温度差とひずみ計の読みの変化との関係を求め、ヒステリシスのないことを確めた。その結果を図3に示す。この結果によると、温度差 $\Delta\theta$ (deg) はつぎの式で表わすことができる。

$$\Delta\theta = \Delta\varepsilon/94.9$$

ここで $\Delta\varepsilon$: ひずみ計の読みの変化

したがって

$$\Delta\theta = \Delta\varepsilon/100$$

で、温度差を求めると約 5.3 % の誤差が生ずることが解った。

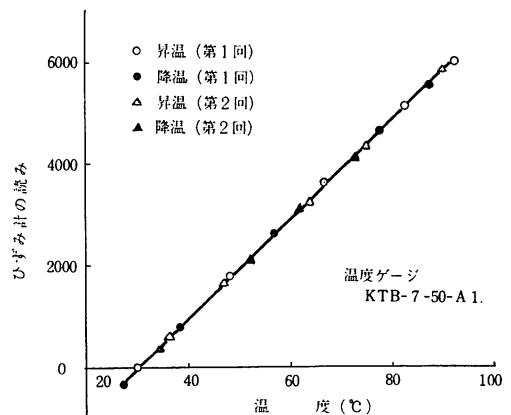


図 3 温度ゲージの検定

試験片の背面、溶解部中央位置に温度ゲージをはり、防水・絶縁処理をして、鉛台に溶けたタールを流

し込み固定した。このときの温度上昇は、室温 24℃ でおおよそ 20 deg であった。つぎに電解による温度上昇を測定した。その結果を表 6 に示す。なお電流を切った後おおよそ 1 min で液温と等しくなることが解った。

表 6 溶解時の温度上昇

陽極電流密度	通電時間	温度上昇	電解液温度
0.6	1	9	30±0.5℃
1.7	1	35	
A/cm ²	2 min	39 deg	

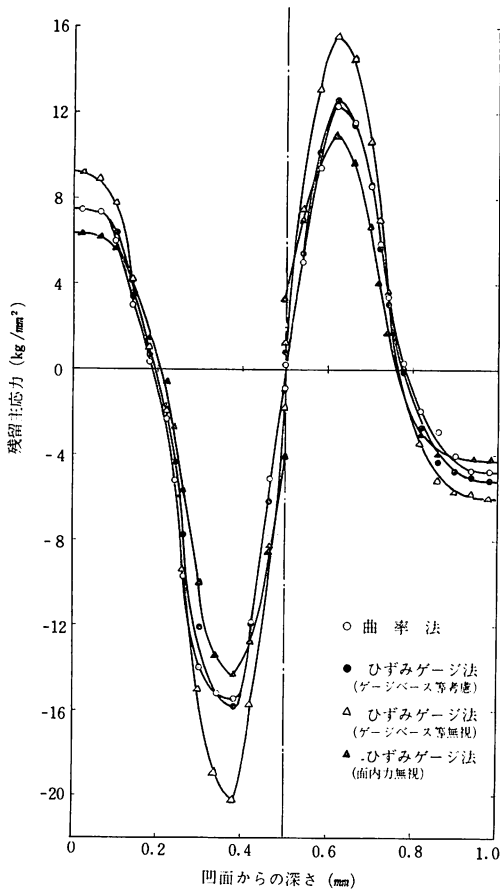


図 4 曲げ加工による残留主応力分布

3.5 ブランクテスト

先ず、前述のひずみゲージを接着した試験片により、温度範囲 20℃～90℃で熱ヒステリシスのないことを確めた。

ついで、焼なました試験片により、前述の実験方法で曲率の変化・ひずみの変化を測定し、尺度の読みの変化・ひずみ計の読みの変化のないことを確めた。

3.6 残留応力の測定例

(1) 曲げ加工による残留応力

前述の焼なました試料(厚さ約 1 mm)より作った試験片を、曲率半径約 240 mm に成形し、その残留応力を先に述べた方法により測定した。その結果を図 4 に示す。

この結果によると、残留応力の分布状況は、図 5 に示した久野・土肥の理論解析の結果⁽¹⁾とよく一致しており、内部に最大応力が、ついで表層部に高い応力が現われ、中央面附近は応力値が 0 となっている。

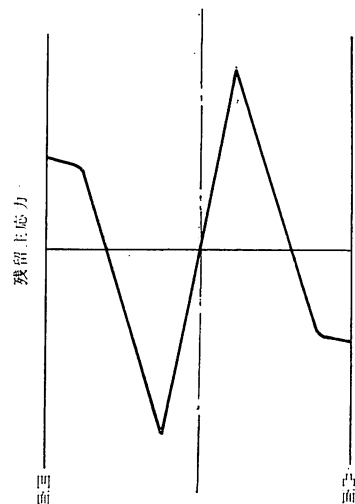


図 5 曲げ加工による残留主応力の理論的分布

(2) 研削加工による残留応力

前述の焼なました試料(厚さ約 2 mm)の両面を平面研削し、その残留応力を先に述べた方法により測定した。研削条件を表 7 に、測定結果を図 6 に示す。

この結果によると、表面に圧縮応力が生じ、急激に

表 7 研削条件

研削といし	といし周速度	テーブル縦送り	テーブル横送り	切込深さ	研削油剤	注油量
1号A, 205×19×32 WA, 46, J, m2, V	1540 m/min	12 m/min	0.15 mm/pass	0.04 mm	W 11 (20倍に希釈)	3.6 l/min

(注) 1. 研削といしは JIS R 6212 による。

2. 研削油剤は JIS K2241 による。

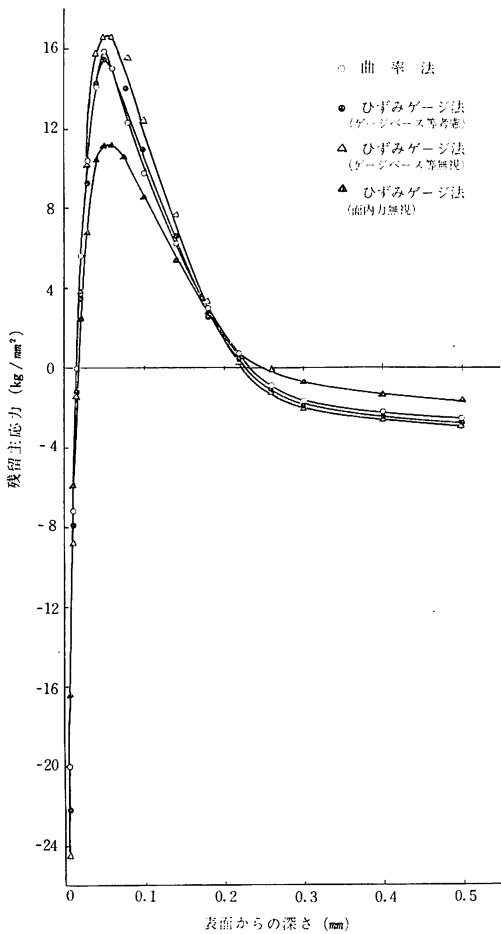


図 6 湿式研削による研削方向残留主応力分布

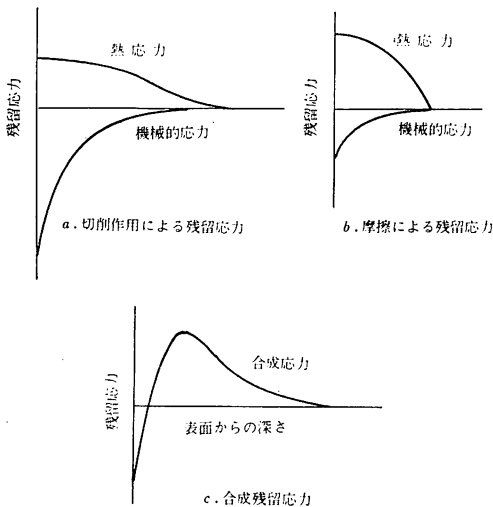


図 7 研削による残留応力発生機構

上昇して深さおよそ 0.05 mm で極大引張応力が現われ、ついで漸減し極限圧縮応力に近づく。残留応力層の深さはおよそ 0.35 mm である。この残留応力分布状況は、図 7 に示した Colwell 等の残留応力発生機構説明図⁽⁸⁾とよく一致している。

以上の測定例について応力値を検討すると、曲率法による値とひずみゲージ法による値とは、ゲージベース等の厚さを考慮した場合はよく一致しているが、これを無視したり、または面内力を無視すると、かなりの差の生ずることが確かめられた。

ゲージに与えられるひずみのうち、曲げモーメントによるひずみ ε_b は、試験片背面の曲げひずみ ε_{b0} より拡大される。その拡大率 α は

$$\alpha = \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_{b0}} = 1 + \frac{2d}{h-z}$$

で表わされるゆえ、第一例では $z=0 \sim h/2$ に対して $\alpha=1.12 \sim 1.24$ であり、第二例では $z=0 \sim h/4$ に対して $\alpha=1.06 \sim 1.08$ である。このためゲージベース等の厚さを無視すると、応力値は高く現われ、その差の最大は第一例では 30 % に達しており、第二例では 10 % 以内である。したがって、薄板においてはゲージベース等の厚さを無視することはできないが、板の厚さが 2 mm 以上の場合はかなりよい近似値を示すといつてよい。

ゲージに与えられるひずみ ε は、試験片背面の曲げモーメントによるひずみ ε_{b0} より一般に縮小される。その縮小率 β は

$$\beta = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{b0}} = \alpha - \frac{1}{3} \left(1 - \frac{z}{h} \right)$$

で表わされるゆえ、第一例では $z=0 \sim h/2$ に対して $\beta=0.79 \sim 1.07$ であり、第二例では $z=0 \sim h/4$ に対して $\beta=0.73 \sim 0.83$ である。このため面内力を無視すると、応力値は一般に低く現われ、その差の最大は第一例で約 15 %、第二例では 30 % を超えている。また

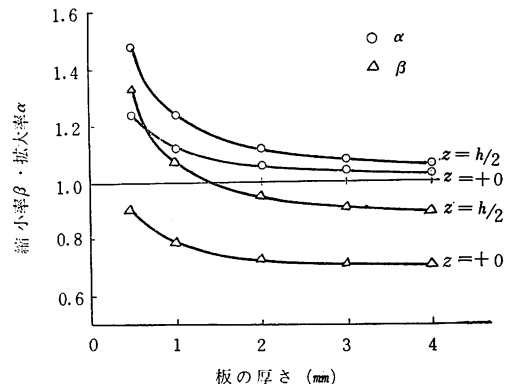


図 8 ひずみの拡大率・縮小率

第一例でみられるように中央面における応力値の不齊合がいちじるしい。したがって、一般に面内力を無視することはできない。

拡大率 α ・縮小率 β を図 8 に示す。

4. 結 語

以上の理論および実験から、つぎの結論が得られた。

(1) 平板に存在する残留応力の久野・土肥の計算式・Treuting & Read の計算式・Letner の計算式は、いずれも同じ積分方程式から導かれるもので一致する。

(2) 曲率法による残留応力値とひずみゲージ法による応力値とは、ゲージベース等の厚さを考慮した場合はよく一致する。

(3) 薄板では、ゲージベース等の厚さを無視すると、応力値が高く現われかなりの差を生ずるので、これを考慮しなければならぬ。しかし、板の厚さが 2 mm 以上の場合にはかなりよく近似する。

(4) 面内力を無視してひずみゲージ法を適用すると、応力値が一般に低く現われ相当大きな差が生ずるので、これを無視することはできない。

(5) 箔フェステルゲージ・シアノアクリレート系接着剤を使用すると、板の表面とゲージ間の距離をかなり小さくする (約 0.06 mm) ことができる。また 70 deg 程度の温度変化に対して、熱ヒステリシスを生じない。

(6) 電解法による試験片の温度上昇は、電流密度・通電時間を適当にとるとあまり大きくならない。また

電流を切ると、かなり速かに安定状態にもどる。

(7) 電解法による試験片の溶解量は、電流密度と通電時間に比例する。

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) 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)
- (2) 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)
- (3) Letner, H. R. & Snyder, H. J.: "Grinding and lapping stresses in Manganese oil-hardening tool steel" Trans. ASME, Vol. 75 (1953)
- (4) Letner, H. R.: "Residual grinding stresses in hardened steel" Trans. ASME, Vol. 77 (1955)
- (5) 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)
- (6) 大下隆章：『圧延された鋼板の粒度と残留応力』苫小牧工業高等専門学校研究報告第 6 巻第 2 号 (1971)
- (7) 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)
- (8) Colwell, L. V., Sinnott, M. J. & Tobin, J. C.: "The determination of residual stress in hardened, ground steel" Trans. ASME, Vol. 77 (1955)

(昭和 47 年 1 月 10 日受理)