

# 熱応力解析理論に基づくショットピーニング面の 残留応力深さ分布推定<sup>†</sup>

岡野 俊之\* 村田 一夫\* 小栗 泰造\*\*  
田中 努\*\* 川上 洋司\*\*\* 佐藤 嘉洋\*\*\*

## Estimation of Residual Stress Distribution under Shot-Peened Surface by Using Theory of Thermal Stress Analysis

by

Toshiyuki OKANO\* , Kazuo MURATA\* , Taizo OGURI\*\*

Tsutomu TANAKA\*\* , Hiroshi KAWAKAMI\*\*\* and Yoshihiro SATO\*\*\*

In the shot peening process, the residual stress on the shot-peened surface and its distribution under the surface are important evaluation items for the high value-added surface creation. In this paper, it was proposed that the residual stress distribution under the shot-peened surface for a thin plate was non-destructively estimated from the measured value of residual stress on the surface and that of the arc height, by applying the theory of linear thermal stress analysis for a thin plate. The analyzed residual stress profile showed good agreement with that of the experimental results obtained from the surface removal by electro-polishing. From the results of analysis, it was found that the depth of compressive residual stress (the depth which changes from the compressive stress to the tensile stress), the residual stress at the depth of the inherent strain and the residual stress on the opposite surface to the shot-peened surface characterizing the profile of residual stress distribution had a relationship with the ratio of a thickness of plate to an inherent strain depth.

### Key words :

Shot peening, Residual stress distribution, Thermal stress analysis, X-ray stress measurement, Inherent strain, Non-destructive inspection.

## 1 緒 言

ショットピーニングは、目的に応じた材質の球形粒子を圧縮空気や遠心力で部材表面に高速衝突させる冷間加工法の一つである。この手法で導入される圧縮残留応力は、疲労強度向上、応力腐食割れ防止などに貢献できることがよく知られているため、高度な信頼性や耐久性を要求される航空機や自動車部品などを中心に幅広い産業分野で利用されている。

一般に、ショットピーニングの工程管理には、アルメンストリップと呼ばれる板材の変形量と球形粒子による圧痕の被覆率を数値化したアークハイトカバレッジが用いられる。また、品質管理には、導入される表面の残留応力と深さ分布が重要な評価項目として挙げられている。しかし、深さ分布測定では、表面逐次除去を必要とし、非破壊では対応できないこと、多くの時間と手間を要することから通常の品質管理では実施されていないのが現状である。

このような背景の下、ショットピーニングで導入される残留応力深さ分布の推定方法が数多く提案されている。

たとえば、Y. F. Al-ObaidのHertz理論式を利用した解析方法<sup>1)</sup>や、これらを基礎式にして種々のショットピーニング条件を考慮した予測式<sup>2)</sup>、また、基材のたわみ変形量と熱弾性解析プログラムを利用したもの<sup>3)</sup>などが挙げられる。しかし、一般に提案されている推定方法は、ショットピーニングで使用される投射粒子の材質や粒径、さらには、投射装置、投射距離、投射圧力、ノズル径などの影響因子で変動する投射速度も考慮する必要があり、取り扱いが複雑となる。そのため、生産現場ではもっと簡易的な推定方法が望まれている。

そこで、本研究では、はりの熱応力解析理論を援用することで、ショットピーニング面の残留応力深さ分布を板材のアークハイト(変形量)と表面X線応力測定値から非破壊で推定する方法を提案した。得られた解析結果は電解研磨による表面逐次除去で求めた実験結果と比較し、その妥当性について検証した。さらに、残留応力の深さ分布形態に影響を及ぼすと考えられる表面残留応力、圧縮残留応力深さ、裏面残留応力値などと固有ひずみ深さや板厚の関係についても検討をおこなった。

<sup>†</sup> 原稿受理 平成 年 月 日 Received ©2016 The society of Materials Science Japan

\* 正会員 株式会社オカノプラス 〒599-8247 堺市中区東山 648  
Okano Blast Co. Ltd., 648 Higashiyama, Naka, Sakai, Osaka599-8247

\*\* 正会員 (地独) 大阪府立産業技術総合研究所 金属材料科 〒594-1157 和泉市あゆみ野 2-7-1

Metallic Materials Section, Technology Research Institute of Osaka Prefecture, 7-1 Ayumino-2 Izumi, Osaka 594-1157

\*\*\* 大阪市立大学 大学院工学研究科 〒558-8585 大阪市住吉区杉本  
Grad. Sch. Eng., Osaka City Univ., Sumiyoshiku, Osaka, 558-8585

## 2 解析方法

### 2・1 ショットピーニングによる固有ひずみ分布

はりの1次元熱応力解析では、表層部から内部の温度勾配で発生する熱固有ひずみより深さ方向の応力分布が求められている<sup>4)</sup>。

一方、ショットピーニングでは、多数粒子の衝突で表層部に生じる固有（塑性）ひずみが原因となって変形や残留応力が発生する。ここで生じる応力は、等二軸応力状態であることから<sup>5)</sup>、ショットピーニングによる固有ひずみを熱固有ひずみとして取り扱うことにより、ショットピーニング面に生じる残留応力を求めることができる。そこで、ショットピーニング面を基準とした座標系を Fig.1 に示すように定める。また、固有ひずみを表面  $\varepsilon_s$  から直線分布で深さ  $d$  まで存在すると仮定すれば、板材の中央面に作用する  $x$  方向垂直ひずみ  $\varepsilon_s(z)$  は、式(1)および式(2)で表される。

ショットピーニング部  $0 \leq z \leq d$  では

$$\varepsilon_s(z) = -\frac{\varepsilon_s}{d}z + \varepsilon_s \quad (1)$$

母材部  $d \leq z \leq h$  では

$$\varepsilon_s(z) = 0 \quad (2)$$

### 2・2 ショットピーニング面の残留応力分布

板材の長さが板幅に比べて十分に長いとき、式(1)と式(2)のひずみにより、板幅中央部断面である  $xz$  面で変形が生じ、その  $x$  方向垂直ひずみ  $\varepsilon_x(z)$  は、板材の軸方向ひずみ  $\varepsilon_0$ 、曲率  $1/\rho$  の曲げ変形によるひずみと固有ひずみ  $\varepsilon_s(z)$  から求められ、式(3)および式(4)で表される。

ショットピーニング部  $0 \leq z \leq d$  では

$$\varepsilon_x(z) = \varepsilon_y(z) = \varepsilon_0 + \frac{h-2z}{2\rho} - \varepsilon_s(z) \quad (3)$$

母材部  $d \leq z \leq h$  では

$$\varepsilon_x(z) = \varepsilon_y(z) = \varepsilon_0 + \frac{h-2z}{2\rho} \quad (4)$$

式(3)、式(4)および応力とひずみの関係から深さ  $z$  位置の残留応力  $\sigma_x(z)$  は式(5)と式(6)で求められる。

ショットピーニング部  $0 \leq z \leq d$  では

$$\sigma_x(z) = \frac{E}{1-\nu} \left\{ \varepsilon_0 + \frac{h-2z}{2\rho} - \varepsilon_s(z) \right\} \quad (5)$$

母材部  $d \leq z \leq h$  では

$$\sigma_x(z) = \frac{E}{1-\nu} \left( \varepsilon_0 + \frac{h-2z}{2\rho} \right) \quad (6)$$

ここで  $E$  はヤング率、 $\nu$  はポアソン比である。

また、板材内に生じる合応力と合モーメントそれぞれのつり合い式から、軸方向ひずみ  $\varepsilon_0$  は式(7)で、曲率  $1/\rho$  は式(8)で表される。

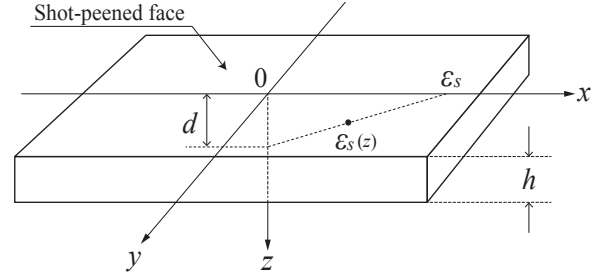


Fig. 1 Coordinate system of a plate and the inherent strain distribution by shot peening.

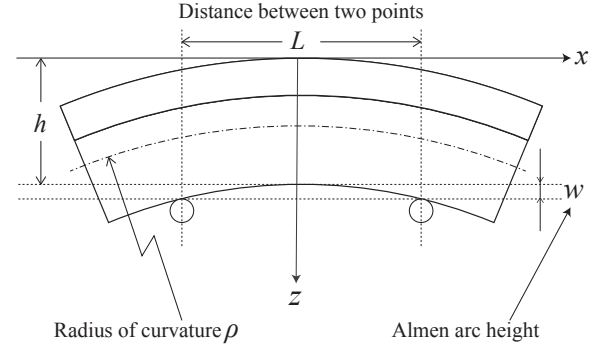


Fig. 2 Schematic illustration of arc height measurement by almen gauge.

$$\varepsilon_0 = \frac{\varepsilon_s d}{2h} \quad (7)$$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\varepsilon_s d (3h - 2d)}{h^3} \quad (8)$$

式(7)および式(8)を式(5)と式(6)それぞれに代入すれば、ショットピーニング面の残留応力深さ分布は式(9)と式(10)で表される。

ショットピーニング部  $0 \leq z \leq d$  では

$$\sigma_x(z) = \frac{\varepsilon_s E}{1-\nu} \frac{1}{h^3} \left\{ \left( \frac{h^3}{d} - 3dh + 2d^2 \right) z + (2dh^2 - d^2h - h^3) \right\} \quad (9)$$

母材部  $d \leq z \leq h$  では

$$\sigma_x(z) = \frac{\varepsilon_s E}{1-\nu} \frac{d}{h^3} \{ (2d - 3h)z + 2h^2 - dh \} \quad (10)$$

次に、曲率半径  $\rho$  とアークハイト  $w$  の関係を求める。一般に、板材の変形量であるアークハイト  $w$  は、Fig. 2 に示すアルメンストリップ支持点間距離  $L$  と曲率半径  $\rho$  により求められ、近似的に式(11)のように表される。よって、式(11)を式(8)に代入すれば、表面の固有ひずみ  $\varepsilon_s$  とアークハイト  $w$  の関係式(12)が得られる。

$$w \approx \frac{L^2}{8\rho} \quad (11)$$

$$\varepsilon_s = \frac{8h^3 w}{d(3h-2d)L^2} \quad (12)$$

### 2・3 重み付き平均応力

X線により測定される表面残留応力は、内部に分布する残留応力に対してX線侵入深さ $\tau$ 内のそれぞれの深さにおける回折強度の重みを考慮した平均値として式(13)で表される。ただし、X線の侵入深さ $\tau$ は、アルメンストリップの板厚に比べて十分に小さいものとする。

$$\sigma_x(\tau) = \frac{\int_0^h \sigma_x(z) \cdot e^{-z/\tau} dz}{\int_0^h e^{-z/\tau} dz} = \frac{1}{\tau} \int_0^h \sigma_x(z) \cdot e^{-z/\tau} dz \quad (13)$$

ここで、X線応力測定( $\sin^2\psi$ 法)における侵入深さを $\tau$ としたとき、侵入深さ $\tau$ が固有ひずみ深さ $d$ よりも浅い場合は、X線による表面応力測定値 $\sigma_x(\tau)$ は、式(9)と式(12)を式(13)に代入することにより式(14)として表される。また、侵入深さ $\tau$ が固有ひずみ深さ $d$ よりも深い場合において、 $\sigma_x(z)$ は $0 \leq z \leq d$ のショットピーニング部で式(9)、 $d \leq z \leq h$ の母材部では式(10)としてそれぞれ取り扱う必要がある。しかし、式(10)の表面から深い部分の影響は小さいことから考慮しないものとし、ここでは式(14)の $\sigma_x(\tau)$ をX線で測定される表面残留応力値として取り扱うこととする。

$$\sigma_x(\tau) = \frac{8Ew}{dL^2(1-\nu)(3h-2d)} \left\{ \left( \frac{h^3}{d} - 3dh + 2d^2 \right) \tau + (2dh^2 - d^2h - h^3) \right\} \quad (14)$$

式(14)において、 $\sigma_x(\tau)$ は表面X線応力測定値を表すものとして $\langle \sigma_x(\tau) \rangle$ と表記し、固有ひずみ深さ $d$ について整理すると、 $d$ に関する3次方程式が得られる。

$$\left( -2 \langle \sigma_x(\tau) \rangle - \frac{16Ew\tau}{L^2(1-\nu)} + \frac{8Ehw}{L^2(1-\nu)} \right) d^3 + \left( 3h \langle \sigma_x(\tau) \rangle - \frac{24Ehw\tau}{L^2(1-\nu)} + \frac{16Eh^2w}{L^2(1-\nu)} \right) d^2 + \left( \frac{8Eh^3w}{L^2(1-\nu)} \right) d - \frac{8Eh^3w\tau}{L^2(1-\nu)} = 0 \quad (15)$$

式(15)からアークハイト、表面X線応力測定値およびその他、既知の値を代入すれば、固有ひずみ深さ $d$ が求められる。固有ひずみ深さ $d$ が定めれば式(9)、式(10)、式(12)より残留応力の深さ分布が得られる。

## 3 実験方法

### 3・1 試験片

実験の供試材は、炭素工具鋼SK85で、ショットピーニングの工程管理用に市販されている板厚のみ異なる4

種類アルメンストリップT, N, A, C片を用いた。試験片は、長さ76×19mmの短冊形で、615℃2時間保持の真空応力除去焼鈍を施した。化学成分と各板厚をtable1とtable2にそれぞれ示す。

### 3・2 ショットピーニング条件

それぞれのアルメンストリップ片をJIS B 2711に準ずるアークハイト測定用保持具に固定し、片面にTable3に示す加工条件でショットピーニングをおこなった。投射時間は予備実験でフルカバレッジタイムを求め、その2倍の120秒とした。

### 3・3 アークハイトとX線応力測定

ショットピーニング後、EI社製のアルメンゲージにてアークハイトを測定した。X線応力測定は、通常の $\sin^2\psi$ 法で、(株)リガク製のAuto MATE IIを用いた。Table4に測定条件を示す。 $\sin^2\psi$ の値は0~0.5までの7点で並傾法にて測定した。また、残留応力の深さ分布は、試験片中央部直径8mmの範囲を電解研磨で逐次除去することにより求めた。

Table 1 Chemical compositions of almen strip.

(mass%)				
C	Si	Mn	P	S
0.8~0.9	≤0.35	≤0.95	≤0.04	≤0.05

Table 2 Thickness of each almen strip.

(mm)			
Type T	Type N	Type A	Type C
0.527	0.780	1.295	2.373

Table 3 Condition of shot peening.

Projection Method	Shot Particle			Coverage
	Material	Diameter	Hardness	
Direct air Pressure	SKH59	100μm	HV1200	200%

Table 4 X-ray conditions for stress measurement.

X-ray stress analyzer	Auto MATE II (Rigaku)
Characteristic X-ray	Cr-Kα
Tube voltage, current	40kV, 20mA
Diffraction	αFe211
Diffraction angle 2θ	156.4 deg
Detector	Linear semiconductor detector (D/teX Ultra1000)
Scanning method	Iso-inclination, fixed ψ <sub>0</sub>
Peak determination	Half-value breadth method
Correction	Lorentz's polarization, absorption
ψ angle	0, 16.8, 24.1, 30.0, 35.3, 40.2, 45.0
Stress constant	-318MPa/deg
Collimator	2 mm in diameter

Table 5 Surface residual stress and arc height of shot-peened specimens.

Type	Residual Stress of surface (MPa)	Arc Height (mm)
T	-407.74	0.523
N	-428.28	0.211
A	-455.80	0.072
C	-503.61	0.021

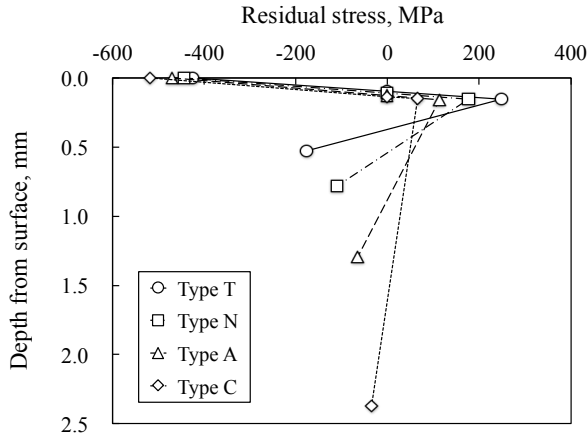


Fig. 3 Theoretically predicted stress distribution for each almen strip.

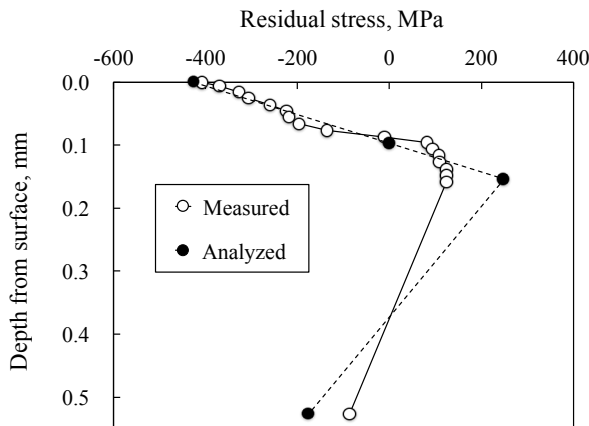


Fig. 4 Comparison of analysis and experiment in residual stress distribution for almen strip type T.

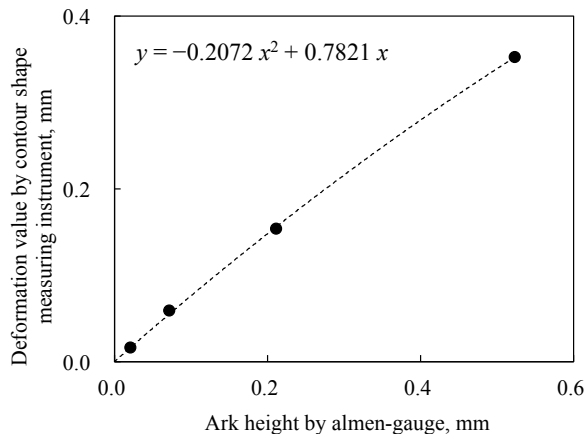


Fig. 5 Relation between arc-heights measured by almen-gauge and contour shape measuring instrument.

## 4 解析結果

### 4・1 残留応力深さ分布の解析結果

各アルメンストリップのアーカイトおよび表面X線応力測定の結果を Table 5 に示す. この結果を式 (15) に適用し固有ひずみ深さ  $d$  を算出した. なお, X 線の侵入深さ  $\tau$  は鉄鋼材料における代表値として  $4\ \mu\text{m}$  とした. 得られた固有ひずみ深さ  $d$  を式 (9), 式 (10) および式 (12) に代入することにより, 最表面の残留応力値  $\sigma_x(0)$ , 圧縮残留応力深さ  $d'$ , 得られた固有ひずみ深さ  $d$  における残留応力値  $\sigma_x(d)$ , 裏面残留応力値  $\sigma_x(h)$  をそれぞれ求めた. これら4点を結ぶことで得られるアルメンストリップ T, N, A, C 片の残留応力深さ分布を Fig. 3 に重ねて示す. なお, 応力の符号マイナスは圧縮応力を示す.

### 4・2 解析結果の妥当性検証

本解析の妥当性検証のため, アルメンストリップ T 片の解析と実験結果の深さ分布を比較した. その結果を Fig. 4 に示す. 図によれば, 解析結果は実験結果で得られた深さ分布とほぼ同様の形態となっている. しかし, 最大引張残留応力と裏面残留応力の値に差が生じている. この原因の一つとして, アークハイトの測定精度に注目した. 前節に示したように, アークハイト測定にはアルメンゲージを使用しており, この手法では4個の鋼球でアルメンストリップ片を支持しているため, 変形後は鋼球との接触点に変形前とは異なり, 測定結果に誤差が生じていると考えられる.

そこで, この影響誤差を確認するため, (株) 東京精密製の輪郭形状測定機で高精度にアークハイト測定をおこなった. 得られた輪郭形状測定機とアルメンゲージ測定値の関係を Fig. 5 に示す. 測定結果によれば, 両者は一定の関係式 (図中に記載) で表されることから, この近似式を用いてアークハイトを補正し, 再度解析をおこなった. Fig. 6 (a)~(d) に各アルメンストリップ片の補正による解析と実験結果を重ねて示す. これら図中では, 固有ひずみ深さ  $d$  における引張残留応力値に少し差が生じている. しかし, 表面の圧縮残留応力値  $\sigma_x(0)$ , 圧縮残留応力深さ  $d'$  と固有ひずみ深さ  $d$ , 裏面の圧縮残留応力値  $\sigma_x(h)$  はほぼ一致しており, 残留応力深さ分布の解析結果の妥当性を示すものとなっている.

## 5 考察

前述のように熱応力解析理論に基づくショットピーニング面の残留応力深さ分布解析結果は, 実験結果とほぼ一致することが判明した. また, アルメンストリップ片における中央部断面全体の深さ分布形態は, 固有ひずみを直線分布と仮定した場合, 表面における圧縮残留応力が内部方向に急激に減少し, 圧縮残留応力深さ  $d'$  でゼロとなり引張残留応力に転じる. さらに, 固有ひずみ深さ  $d$  で最大となる引張残留応力値を示したあと, 直線的に漸減し裏面では小さな圧縮残留応力を示すものとなる.

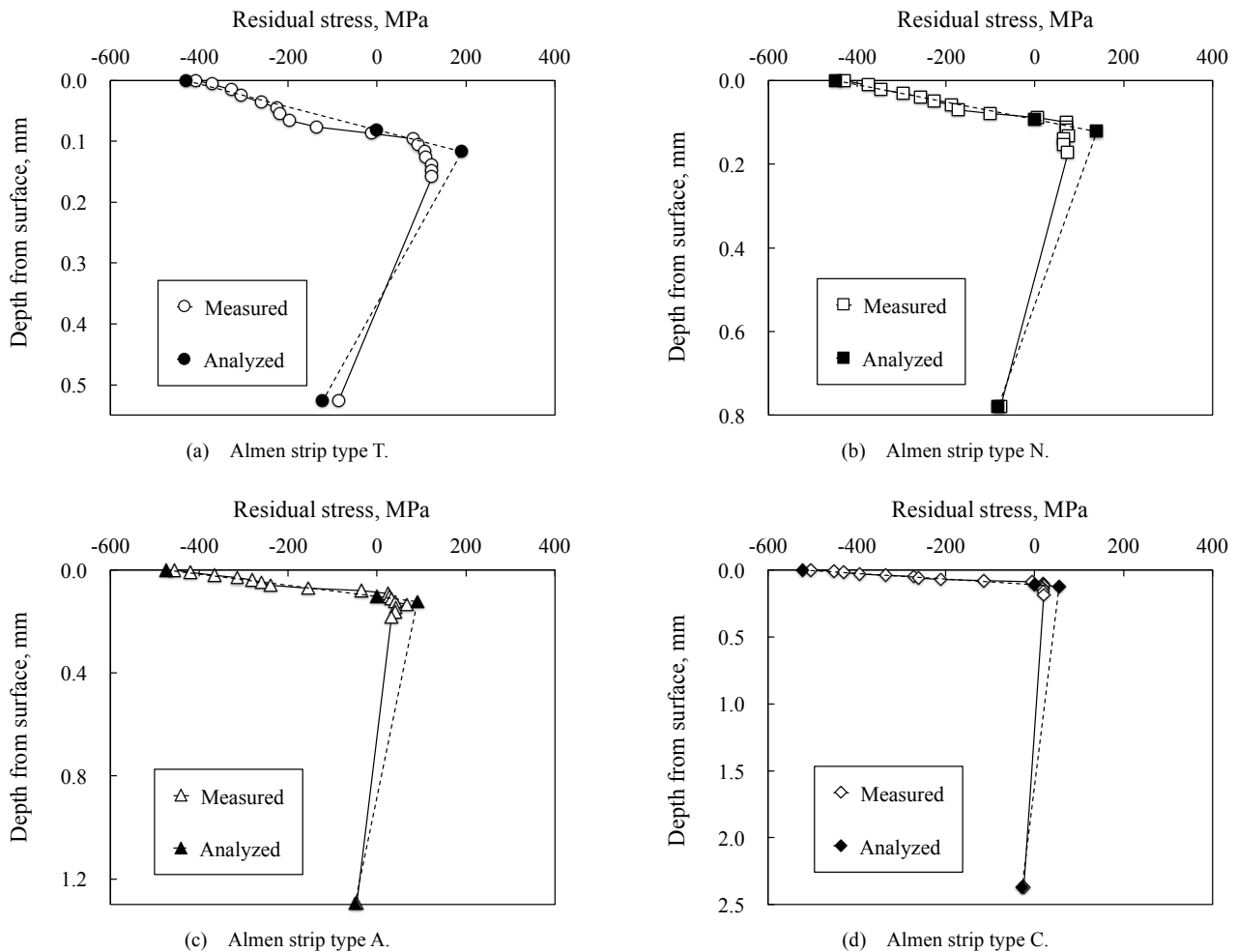


Fig. 6 Comparison of analysis and experiment in residual stress distribution for the each almen strip.

したがって、この深さ分布形態は、表面の残留応力値  $\sigma_x(0)$ 、圧縮残留応力深さ  $d'$ 、固有ひずみの深さ  $d$ 、固有ひずみ深さ  $d$  における残留応力値  $\sigma_x(d)$ 、裏面の残留応力値  $\sigma_x(h)$  によって定められる。そこで、これらの分布形態に影響する各種要因について、Fig. 6(a)~(d) のグラフをもとに各アルメンストリップ片の板厚との関係で整理し、再度実験結果と比較することにより、残留応力の深さ分布の詳細を考察した。

### 5・1 表面残留応力と板厚の関係

表面の残留応力値と板厚の関係を Fig. 7 に示す。実験結果は X 線侵入深さ領域内の重み付き平均で評価されているため、解析結果より 20 MPa 程度小さくなっている。また、解析および実験結果は板厚増加にともない表面の圧縮残留応力が漸増している。これは、アルメンストリップ片の剛性が高くなることで変形が小さくなり、表面残留応力の解放が少なくなることが原因と考えている。

### 5・2 圧縮残留応力深さと板厚の関係

圧縮残留応力深さと板厚の関係を Fig. 8 に示す。解析および実験結果は板厚増加にともない存在位置が深くなる傾向にある。ここで、本解析で得られた式 (9) の深さ  $z$  に圧縮残留応力深さ  $d'$  を代入すれば、固有ひずみ深さ  $d$ 、

板厚  $h$  との関係が求められ、式 (16) のように表される。

$$\frac{d'}{d} = \frac{1}{2(d/h+1)} \quad (16)$$

この式において、固有ひずみ深さ  $d$  が一定の値 (後述) で板厚  $h$  のみ増加することを考慮すれば、上述の結果は妥当であると考えられる。なお、実験と解析結果に生じる誤差は、実験では、圧縮残留応力ゼロが明確に定められないこと、電解研磨による深さ測定において誤差が生じることなどが影響していると考えている。

### 5・3 固有ひずみの深さと板厚の関係

固有ひずみ深さと板厚の関係を Fig. 9 に示す。図中の黒丸印は解析結果、四角印は解析において、固有ひずみ深さ  $d$  と最大引張残留応力深さが一致するため、測定で得られた残留応力深さ分布より最大となる引張残留応力の位置を固有ひずみ深さとして抽出した実験結果、菱形印は残留応力測定における X 線回折曲線半価幅 (各  $\psi$  角における平均値) が深さ方向に一定となる位置で固有ひずみは消滅すると仮定して求めた実験結果である。この図より、解析および実験結果は、板厚増加に影響を受けることなく、いずれもほぼ一定の値となっている。

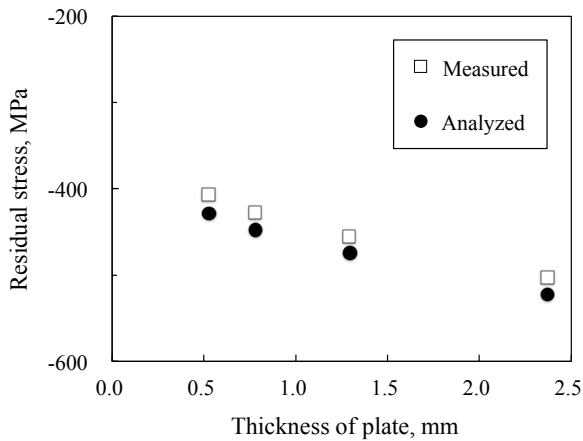


Fig. 7 Relation between thickness of plates and the surface residual stress : comparison of the experimental and analytical results for the surface residual stress.

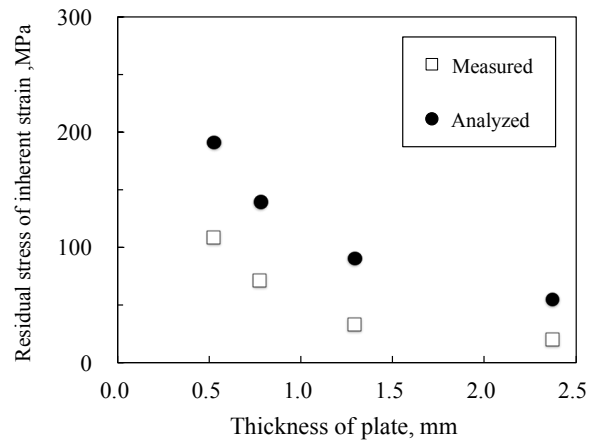


Fig. 10 Relation between thickness of plates and the residual stress at the depth of inherent strain : comparison of the experimental and analytical results for the residual stress at the depth of inherent strain.

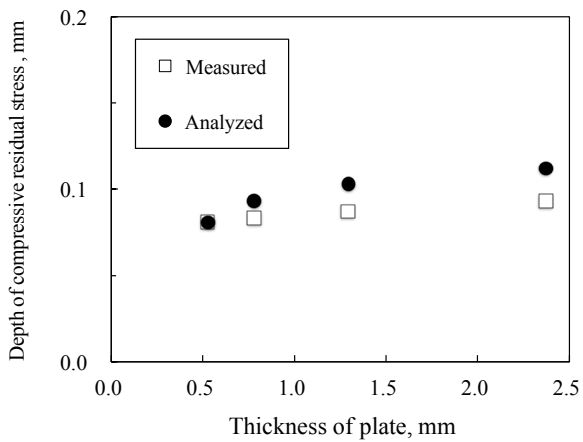


Fig. 8 Relation between thickness of plates and the crossing point : comparison of the experimental and analytical results for the crossing point.

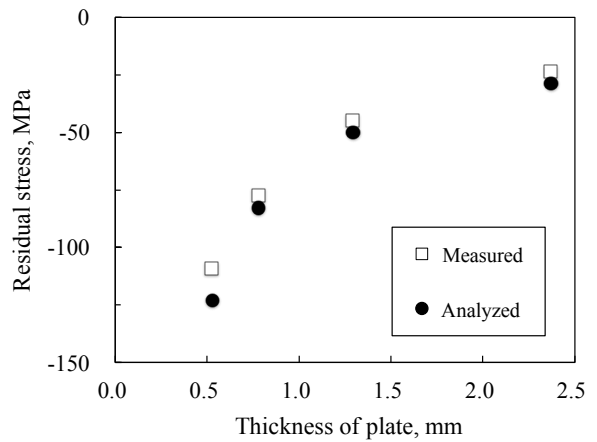


Fig. 11 Relation between thickness of plates and the residual stress on the opposite surface to the shot-peened surface : comparison of the experimental and analytical results for the residual stress on the opposite surface to the shot-peened surface.

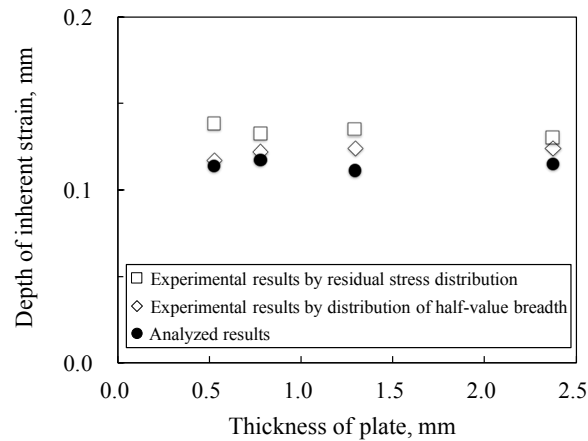


Fig. 9 Relation between thickness of plates and the depth of inherent strains: comparison between inherent strain depth of analysis, that of experimental results obtained from the residual stress distribution and that of experimental results obtained from the distribution of half-value breadth in X-ray stress measurement.

一般に、板材の材質とショットピーニング条件が同じであれば、板材のうける負荷は板厚に関係なく同等と考えられる。したがって、固有ひずみ深さは板厚に影響を受けないことが予想される。Fig.9の結果は、多少の誤差を生じているが、このことを示す結果となっている。

#### 5・4 固有ひずみ深さにおける残留応力と板厚の関係

固有ひずみ深さにおける残留応力値と板厚の関係を Fig.10 に示す。この図より、固有ひずみ深さでは、すべての板材において引張残留応力となり、板厚増加にともないその値は小さくなる。この固有ひずみ深さにおける残留応力  $\sigma_x(d)$  は、本解析で得られた式 (9) または式 (10) により固有ひずみ深さ  $d$ 、板厚  $h$  との関係で式 (17) のように表される。

$$\sigma_x(d) = \frac{2\varepsilon_s E}{1-\nu} \frac{d}{h} \left(1 - \frac{d}{h}\right)^2 \quad (17)$$

この式において 前述同様に固有ひずみ深さ  $d$  が一定で、板厚  $h$  のみ増加することを考慮すれば Fig. 10 は妥当な結果と考えられる。なお、実験結果の引張残留応力値が解析結果よりも小さく評価されている。この原因は、電解研磨による部分逐次除去で求めた実験結果に補正を適用していないこと、逐次除去時の残留応力測定はX線の重み付き平均として評価され、解析ほどには顕著にピークが捉えられないことなどによる誤差が影響しているものと考えている。

### 5・5 裏面残留応力の大きさと板厚の関係

アルメンストリップ裏面の残留応力値と板厚の関係を Fig.11 に示す。解析と実験結果はすべての板材においてよく一致している。また、板厚増加に応じて裏面の圧縮残留応力が漸減している。ここで、裏面残留応力 $\sigma_x(h)$ は、本解析で得られた式 (10) より固有ひずみ深さ  $d$  と板厚  $h$  との関係で式 (18) のように表される。

$$\sigma_x(h) = \frac{\varepsilon_s E}{1-\nu} \frac{d}{h} \left( \frac{d}{h} - 1 \right) \quad (18)$$

この式において、本実験のショットピーニング条件では、固有ひずみ深さ  $d$  と板厚  $h$  の比  $d/h$  は 0.04~0.24 の範囲に存在する。したがって、裏面残留応力は圧縮となること、また、前述のように固有ひずみ深さ  $d$  が一定で、板厚  $h$  のみ増加することを考慮すれば、板厚増加にともない裏面の圧縮残留応力が漸減する傾向は妥当な結果と考えられる。

## 6 結 言

熱応力解析理論を援用することで、ショットピーニング面の残留応力深さ分布をアークハイト値と表面 X 線応力測定値から非破壊で求める方法を提案した。得られた結果は以下の通りである。

1) はりの 1 次元熱応力解析において、熱による固有ひずみをショットピーニングによる固有ひずみに置き換えることにより、ショットピーニング面の残留応力深さ分布が推定できることを示した。

- 2) 固有ひずみを直線分布と仮定し、熱応力解析理論を援用した残留応力の深さ分布解析結果は、電解研磨による逐次除去で求めた実験結果とよく一致した。
- 3) 残留応力の深さ分布形態は、表面で最大となる圧縮残留応力を示したあと、内部方向で急激に減少し、圧縮残留応力の深さ位置で引張残留応力に転じる。その後、固有ひずみ深さ位置で最大の引張残留応力となり、そこから直線的に漸減し裏面では小さな圧縮残留応力となる。
- 4) 残留応力の深さ分布形態に及ぼす圧縮残留応力深さ、固有ひずみ深さ位置における残留応力値、裏面残留応力値は、固有ひずみ深さと板厚の比に関連することが判明した。

## 参 考 文 献

- 1) Y.F.AI-Obaid, "A rudimentary analysis of improving fatigue life of metals by shot-peening", Trans action of the ASME, Journal of Applied Mechanics, Vol.57, pp.307-312(1990).
- 2) Y.Itoh and S.Suyama, "Evaluation of residual stress for plasma sprayed member using inherent strain method", Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.73, No.726, pp.189-194(2007).
- 3) Y.Watanabe, N.Hasegawa and Y.Matsumura, "Simulation of residual stress distribution on shot peening", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.44, No.496, pp.110-115 (1995).
- 4) Y.Takeuchi, "Analyses of thermal stresses", Nisshin-syuppan (1981).
- 5) T.Shoubu, J.Mizuki, K.Suzuki, H.Suzuki, Y.Akiniwa and K.Tanaka, "Application of strain scanning method to stress measurement of austenitic stainless steel", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.55, No.7, pp.647-653(2006).