溶接残留応力測定への音弾性法の適用と疲労き裂進展の評価*

荒居 善雄^{*1}, 小林 英男^{*1}
大沢 靖雄^{*2}, 轟 章^{*3}

Application of an Acoustoelastic Technique to Welding Residual Stress Measurements and Evaluation of Fatigue Crack Growth

Yoshio ARAI, Hideo KOBAYASHI,
Yasuo OHSAWA, and Akira TODOROKI

An acoustoelastic technique using ultrasonic was applied to nondestructive measurements of welding residual stress. Redistributions of the residual stresses in weld joint CT specimens were measured by the acoustoelastic and strain gauge techniques in fatigue crack growth tests. The redistributions of the residual stresses due to saw-cuts were also measured. The acoustoelastic technique is able to successfully measure the redistributions of the residual stresses. The validity of the principle of superposition is confirmed by the measurements of the redistributions of the residual stresses.

Key Words: Experimental Stress Analysis, Acoustoelasticity, Residual Stress, Fatigue Crack Growth, Weld Joint, STS 42 Steel

1. 緒 言

溶接継手と母材の疲労き裂進展特性の差異は、残留応力の効果が大い。残留応力場におけるき裂進展の支配力学因子は、残留応力を考慮した応力拡大係数 K と考えられる。 K は次式で与えられる⁽¹⁾。

$$K = K^L + K^R \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 K^L は負荷の応力拡大係数、 K^R は残留応力の応力拡大係数である。残留応力場を疲労き裂が進展すれば、残留応力の解放によって K^R は変化する。初期残留応力分布が既知であれば、 K^R の変化は重ね合わせの原理により解析的に予測できる^{(1)~(3)}。すなわち、初期残留応力分布を非破壊的に測定しさえすれば、この目的は達成される。ただし、実際の残留応力は負荷の繰返しにより緩和されるから、重ね合わせの原理による K^R の解析的予測の有効性が失われる場合もある。このような場合にも、残留応力の再配分を測定すれば、重ね合わせの原理の成立は検討できる。したが

って、残留応力の初期分布のみならず、再配分を非破壊的に測定する手法の開発が必要である。

一方、応力による超音波速度の変化を横波の複屈折現象により測定する音弾性法は、非破壊的、かつ簡便な残留応力測定法として注目を集め、多くの研究がなされている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。溶接継手に関しては、溶接部以外の母材の残留応力測定は成功を収めている⁽⁶⁾。しかし、音弾性効果に及ぼす材料の組織異方性の影響は著しい⁽⁷⁾。特に溶接部の場合、溶接金属の一方向凝固組織や熱影響部の組織変化に起因する材料の組織異方性が問題となり、残留応力測定は成功を収めていない。

そこで、本研究では音弾性法を用いて、配管用炭素鋼の突合せ溶接継手から採取したコンパクト試験片について、残留応力の初期分布とき裂進展に伴う再配分を測定した。その結果、音弾性法により残留応力が非破壊的、かつ簡便に測定できることを示し、同時に前述した重ね合わせの原理の成立を確認した。

2. 材料および実験方法

2・1 材料および試験片 供試材は原子力用炭素鋼配管 STS 42 である。化学成分および力学的性質をそれぞれ表 1, 2 に示す。外径 508 mm, 肉厚 32.5 mm の大口径管を 900°C, 30 min の焼ならし処理後、長手

* 昭和 62 年 4 月 3 日 第 64 期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和 61 年 5 月 29 日。

^{*1} 正員、東京工業大学工学部 (〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1)。

^{*2} 東京工業大学大学院。

^{*3} 准員、三菱重工業(株) (〒455 名古屋市港区大江町 10)。

方向を管軸と一致させた幅 100 mm, 厚さ 27 mm, 長さ 600 (一部は 700) mm の平板を切り出した。平板 2 枚を X 開先, 表側 5 層で裏はつり後, 裏側 4 層で長手方向にサブマージアーク溶接法により突合せ溶接した。溶接条件は別報と同様である⁽³⁾。溶接継手から図 1 に示すようなコンパクト試験片 (幅 100 mm, 厚さ 7 mm および 15 mm 試験片, 厚さの違いは, 特に目的はなく, 供試材の都合による) を, 溶接線に直角にき裂が進展する方位に作製した。溶接線の位置は切欠が初期圧縮残留応力場に位置する場合と, 初期引張残留応力場に位置する場合の二とおりであり, 前者を C 形, 後者を T 形と呼ぶ。

2.2 測定方法 試験片の溶接線に平行な初期残留応力分布およびその再配分は, 超音波横波の複屈折現象を利用する音弾性法により非破壊的に測定した。実際に得られるのは主応力差であるが, 溶接線に垂直な残留応力は無視した。疲労試験終了後, 母材, 溶接部から小片を切り出し, 超音波速度差を測定し, 材料の組織異方性を評価した。測定位置は切り出しの前後で同じ位置となるように留意した。超音波探触子は中心周波数 5 MHz, 直径 12.7 mm の横波垂直形を使用した。同時に, 試験開始前の試験片にひずみゲージをてん付し, 試験終了後の試験片を小片に切断し, 解放ひずみを測定した。超音波およびひずみゲージの測定位置を図 2 に示す。

疲労試験は電気油圧サーボ試験機を用い, 繰返し速

度 $f=10\sim40$ Hz, 負荷応力比 $R^L=0.05$, 負荷応力拡大係数範囲 ΔK^L 一定で行った。き裂長さは 30 倍の読取り顕微鏡を用い, 試験片表面で測定した。試験に際して, ほぼ一定のき裂長さ増分ごとに, 引き算回路を用いた背面ひずみ除荷弾性コンプライアンス法により, き裂開口比 U を測定した。 U は次式で定義される。

$$U = \frac{P_{\max}^L - P_{op}}{\Delta P^L} \dots\dots\dots (2)$$

ここで, $P_{\max}^L$, ΔP^L , P_{op} はそれぞれ, 負荷最大荷重, 負荷荷重範囲, き裂開口荷重である。また, 一部の試験片に機械加工切欠を導入し (saw-cut), 切欠長さ増分 10 mm ごとに残留応力の再配分を測定し, 疲労き裂進展の場合の結果と比較した。

3. 実験結果および考察

3.1 初期圧縮残留応力場におけるき裂進展

3.1.1 実験結果 初期切欠を導入した C 形試験片の初期残留応力分布の測定結果を図 3 に示す。C 形試験片の初期残留応力分布は切欠先端前方で圧縮であ

図 2 超音波およびひずみゲージの測定位置

表 1 化学成分 (重量%)

C	Si	Mn	P	S
0.19	0.26	1.40	0.026	0.013

表 2 力学的性質
(JIS-Z 2201-14 A 号試験片)

σ_{ys} (MPa)	σ_B (MPa)	δ (%)
379	544	33

図 1 試験片形状

図 3 初期残留応力分布 (C 形試験片の場合)

る。音弾性法の結果はひずみゲージ法の結果とほぼ一致しており、音弾性法により溶接残留応力が非破壊的、かつ簡便に測定できることがわかる。ただし、溶接ビード上およびその近傍の測定結果は音弾性法とひずみゲージ法の差が大きく、溶接ビード上およびその近傍の組織異方性の評価には課題を残している。

C形試験片の負荷応力拡大係数範囲 ΔK^L 一定試験におけるき裂進展速度 da/dN とき裂長さ a の関係を図4に示す。き裂進展速度はき裂進展に伴い急激に低下し、停留に至る。その後、 ΔK^L を増加させ、 ΔK^L 一定試験を続けると再びき裂は進展し、き裂進展に伴い減速し、再び停留に至る。き裂開口比 U の測定結果を図5に示す。 U はき裂進展に伴い急激に減少している。すなわち、初期圧縮残留応力場をき裂が進展する場合、除荷時にき裂面は完全に閉口し、圧縮残留応力

はき裂進展に伴い解放されない。

き裂進展に伴う残留応力分布の再配分を、増分 $\Delta\sigma_R(x,a)$ として次式で表示する。

$$\Delta\sigma_R(x,a) = \sigma_R(x,a) - \sigma_R(x,a=a_0) \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 $\sigma_R(x,a)$ はき裂進展に伴う再配分残留応力分布、 $\sigma_R(x,a=a_0)$ は初期残留応力分布、 x は測定位置、 a はき裂長さ、 a_0 は切欠長さである。

$\Delta\sigma_R(x,a)$ のき裂進展に伴う変化を図6に示す。図中の矢印および記号は、き裂先端の位置および対応する残留応力分布の再配分 $\Delta\sigma_R(x,a)$ を表す。初期圧縮残留応力場をき裂が進展する場合、圧縮残留応力の再配分は極めて小さいことがわかる。音弾性法の結果はひずみゲージ法の結果とほぼ一致している。ただし、音弾性法の溶接ビード上およびその近傍の測定結果は変動が大きく、組織異方性の評価には課題を残している。

$\Delta\sigma_R(x,a)$ の切欠長さ増分に伴う変化を図7に示す。初期圧縮残留応力場に機械加工切欠を導入した場合、圧縮残留応力の再配分は大きく、特に切欠先端で絶対値 $|\Delta\sigma_R(x,a)|$ は最大を示し、切欠長さ増分に伴い最大値は増大している。この場合にも、音弾性法の結果はひずみゲージ法の結果とほぼ一致している。

3・1・2 重ね合わせの原理の検討 初期圧縮残留応力場をき裂が進展する場合、 ΔK^L 一定試験におい

図4 き裂進展速度とき裂長さの関係 (ΔK^L 一定, C形試験片の場合)

図5 き裂開口比とき裂長さの関係 (C形試験片の場合)

図6 き裂進展に伴う残留応力分布の再配分 (C形試験片の場合)

図7 切欠長さ増分に伴う残留応力分布の再配分 (C形試験片の場合)

てき裂進展速度はき裂進展に伴い急激に低下した。上記の結果について、重ね合わせの原理を残留応力の再配分の測定結果に基づき検討する。Parker は残留応力場におけるき裂の応力拡大係数 K を式(1)で与え、重ね合わせの原理により初期残留応力分布と逆向きの分布力をき裂面に負荷すれば、残留応力の応力拡大係数 K^R が得られることを示した⁽¹⁾。

前述した音弾性法の測定結果によれば、除荷時にき裂面は完全に閉口するから、最小応力拡大係数 $K_{\min}$ および応力比 R に関して次式が成立していると判断される。

$$K_{\min} = K_{\min}^L + K^R < 0 \quad (4)$$

$$R = \frac{K_{\min}^L + K^R}{K_{\max}^L + K^R} < 0 \quad (5)$$

ここで、 $K_{\min}^L$ は負荷最小応力拡大係数、 $K_{\max}^L$ は負荷最大応力拡大係数、 K^R は残留応力の応力拡大係数である。疲労き裂の場合、 $K_{\min} < 0$ は $K_{\min} = 0$ 、 $R < 0$ は $R = 0$ とみなすことができる。したがって、式(1)に対応する応力拡大係数範囲 ΔK は次式となる。

$$\Delta K = K_{\max}^L + K^R \quad (6)$$

き裂進展速度 da/dN と ΔK の関係として、次式の成立を仮定する。

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^m \quad (7)$$

ここで、 m, C は材料定数である。式(6)を式(7)に代入すれば、次式が得られる。

$$K^R = \left(\frac{1}{C} \cdot \frac{da}{dN} \right)^{1/m} - K_{\max}^L \quad (8)$$

一般に、母材と溶接継手のき裂進展特性の差異は、残留応力の効果と考えられる。そこで、式(8)の m, C に STS 42 母材の $R=0$ 、 $da/dN > 5 \times 10^{-9}$ m/cycle の

実験結果⁽³⁾、 $m=3.91$ 、 $C=2.46 \times 10^{-13}$ (単位は da/dN : m/cycle, ΔK : $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$) を用いて、 ΔK^L 一定試験の $da/dN (> 5 \times 10^{-9}$ m/cycle) から K^R を推定した。結果を K^R - a 関係として図8に示す。 K^R - a 関係は ΔK^L に無関係に一義的に定まる。すなわち、この手法による K^R の推定は正しいと判断される。 K^R は負であり、絶対値 $|K^R|$ はき裂進展に伴い増大する。したがって、 ΔK はき裂進展に伴い減少することになる。

塑性誘起き裂閉口を無視し、疲労き裂を理想き裂とみなす。 K^R は負であるから、負荷応力拡大係数が $K^L < |K^R|$ ならばき裂面は完全に閉口しており、 $K^L = |K^R|$ で閉口する。このき裂閉口が背面ひずみ除荷弾性コンプライアンス法により検出されていると考えられる。すなわち、式(2)のき裂開口比 U は、次式の表示にほかならない。

$$U = \frac{\Delta K}{\Delta K^L} \quad (9)$$

したがって、き裂進展に伴う $|K^R|$ の増大 (図8) と U の減少 (図5) の対応が理解できる。

図9を参照して、き裂長さ a_0 から a までのき裂進展に伴い残留応力 $\sigma_R(a_0 \leq x \leq a, a_0)$ が解放される場合を考える。 $-\sigma_R(a_0 \leq x \leq a, a_0)$ をき裂面に負荷すれば、残留応力の応力拡大係数 K^R の増分 ΔK^R が得られる。これが重ね合わせの原理である。一方、 $-\sigma_R(a_0 \leq x \leq a, a_0)$ と釣り合うように、リガメントの残留応力分布が再配分する。この増分が式(3)に示した $\Delta \sigma_R(x, a)$ にほかならない。疲労き裂の場合、除荷時にき裂面は完全に閉口しているから、図6に示した $\Delta \sigma_R(x, a)$ は上記の $\Delta \sigma_R(x, a)$ と異なる。しかし、負荷時に $K^L = |K^R|$ でき裂面が開口すれば、 $\Delta \sigma_R(x, a)$ は機械加工切欠の場合と等しくなる。したがって、 $|K^R|$ の増大 (図8) と機械加工切欠の場合の $|\Delta \sigma_R(x, a)|$ の増大 (図7) の対応が理解できる。

以上の結果から、 K^R が正しく解析され、 U および

図8 残留応力の応力拡大係数とき裂長さの関係

図9 K^R と $\Delta \sigma_R(x, a)$ の関係

$\Delta\sigma_R(x,a)$ が正しく測定されるならば、三者は一義的な対応関係にあることが結論される。本研究の結果でもそれが確認された。すなわち、音弾性法により初期残留応力分布を非破壊的に測定すれば、 K^R を解析的に予測できる。ただし、 K^R の解析は特定の試験片形状に限定され、加えて実際の残留応力は負荷の繰返しにより緩和（減衰）し、 K^R の解析結果と $\Delta\sigma_R(x,a)$ あるいは U の測定結果が対応しない場合もある。このような場合にも、音弾性法は非破壊的、かつ簡便な残留応力測定法として有用だと考えられる。残留応力の初期分布とき裂進展に伴う（解放と緩和の）再配分を音弾

性法により測定すれば、重ね合わせの原理の成立状態を検討できる。なお、ひずみゲージ法は破壊的測定であるから、同一の試験片についてこのような測定はできない。

3・2 初期引張残留応力場におけるき裂進展

3・2・1 実験結果 T 形試験片の初期残留応力分布の測定結果を図 10 に示す。T 形試験片の初期残留応力分布は切欠先端前方で引張りである。この場合にも、音弾性法の結果はひずみゲージ法の結果とほぼ一致しており、音弾性法により溶接残留応力が非破壊的、かつ簡便に測定できることがわかる。ただし、溶接ビード上およびその近傍の測定結果は音弾性法とひずみゲージ法の差が大きく、溶接ビード上およびその近傍の組織異方性の評価に課題を残していることも、C 形試験片の場合と同様である。また、この差が C 形試験片よりも T 形試験片のほうが大きいことについて、明確な理由は不明である。

T 形試験片の負荷応力拡大係数範囲 ΔK^L 一定試験

図 10 初期残留応力分布 (T 形試験片の場合)

図 11 き裂進展速度とき裂長さの関係 (ΔK^L 一定, T 形試験片の場合)

図 12 き裂開口比とき裂長さの関係 (T 形試験片の場合)

図 13 き裂進展に伴う残留応力分布の再配分 (T 形試験片の場合)

におけるき裂進展速度 da/dN とき裂長さ a の関係を図 11 に示す。き裂進展速度はき裂進展に伴い急激に増大し（初期切欠の影響）、母材の結果（一定値）に一致する。き裂開口比 U の測定結果を図 12 に示す。 U はき裂進展に伴い急激に増加し、1 となる。すなわち、初期引張残留応力場をき裂が進展する場合、除荷時にき裂面は完全に開口しており、引張残留応力はき裂進展に伴い解放される。

き裂進展に伴う $\Delta\sigma_R(x,a)$ の変化を図 13 に示す。初期引張残留応力場をき裂が進展する場合、引張残留応力の再配分は大きく、特にき裂先端で $\Delta\sigma_R(x,a)$ は最大を示し、最大値はき裂進展に伴い増大している。この場合にも、音弾性法の結果はひずみゲージ法の結果とほぼ一致している。なお、機械加工切欠を導入する測定は実施していないが、結果は疲労き裂の場合と同様だと考えられる。

3.2.2 重ね合わせの原理の検討 初期引張残留応力場をき裂が進展する場合、 ΔK^L 一定試験においてき裂進展速度はき裂進展に伴い母材の結果と一致した。上記の結果について、重ね合わせの原理を残留応力の再配分の測定結果に基づき検討する。

前述した音弾性法の測定結果によれば、除荷時にき裂面は完全に開口しているから、最小応力拡大係数 K_{min} に関して次式が成立していると判断される。

$$K_{min} = K_{min}^L + K^R > 0 \quad (10)$$

したがって、式 (1) に対応する応力拡大係数範囲 ΔK および応力比 R は次式となる。

$$\Delta K = K_{max}^L - K_{min}^L = \Delta K^L \quad (11)$$

$$R = \frac{K_{min}^L + K^R}{K_{max}^L + K^R} > 0 \quad (12)$$

STS 42 母材の $R^L=0$ および 0.6 の実験結果を参照すれば⁽³⁾、 $\Delta K^L=27 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ においてき裂進展速度は応力比に依存していない。したがって、 $\Delta\sigma_R(x,a)$ の増大（図 13）と da/dN の一致（図 11）の対応が理解できる。また、実験結果および式 (9) から、 $U=1$ である。したがって、 $\Delta\sigma_R(x,a)$ の増大（図 13）と U の増大（図 12）の対応が理解できる。

以上の結果により、初期引張残留応力場をき裂が進展する場合、前述した初期圧縮残留応力場をき裂が進展する場合と同様に、音弾性法の測定結果より重ね合わせの原理の成立が確認された。また、き裂進展速度が正の応力比 ($R>0$) に不敏感な場合、引張残留応力

の影響を受けないことが明らかとなった。

4. 結 言

超音波横波の複屈折現象を利用する音弾性法を用いて、配管用炭素鋼の突合せ溶接継手から採取したコンパクト試験片について、残留応力の初期分布とき裂進展に伴う再配分を測定した。得られた結果を要約すれば、以下のとおりである。

(1) 残留応力の初期分布およびき裂進展による再配分の測定結果は、音弾性法とひずみゲージ法でほぼ一致した。すなわち、音弾性法により溶接残留応力を非破壊的、かつ簡便に測定できる。

(2) 初期圧縮残留応力場をき裂が進展する場合、疲労き裂と機械加工切欠の結果を比較して、残留応力の応力拡大係数 K^R をき裂進展速度から推定した。 K^R は負であり、絶対値はき裂進展に伴い増大する。

(3) 初期引張残留応力場をき裂が進展する場合、応力比は正であり、き裂進展速度は残留応力の影響を受けない。

(4) 音弾性法の測定結果により、残留応力に関する重ね合わせの原理の成立が確認できた。したがって、負荷の繰返しにより残留応力が緩和する場合にも、音弾性法は重ね合わせの原理の成立を検討する有効な手法となる。

本研究の一部は日本原子力研究所の委託により、日本溶接協会原子力研究委員会 TFC-83 小委員会（主査、飯田國廣 東京大学名誉教授）が実施した「軽水炉機器疲労強度の実験解析法に関する研究」の一環として行われた。関係各位に謝意を表する。また、ひずみゲージ法による残留応力測定についてご指導いただいた労働省産業安全研究所 橋内良雄博士、研究の実施に際してご助言をいただいた東京工業大学 中村春夫博士に謝意を表する。

文 献

- (1) Parker, A. P., *ASTM Spec. Tech. Publ.*, 776, (1982), 13.
- (2) 仁瓶・尾野・恒成, 日本造船学会論文集, 152, (昭 58), 390.
- (3) 小林・森, 材料, 35-391 (昭 61), 401.
- (4) 福岡・戸田・中, 材料, 30-330 (昭 56), 261.
- (5) Okada, K., *J. Acoust. Soc. Jpn.*, (E) 1 (1980), 3.
- (6) Fukuoka, H., Toda, H. and Yamane, T., *Exp. Mech.*, 18-7 (1978), 277.
- (7) 荒居, 小林, 中澤, 機論, 51-471, A (昭 61), 2544

討 論

〔質問〕 太田 昭彦〔金属材料技術研究所〕

質問者らは疲労き裂伝ば速度の主支配因子は再配分後の残留応力に起因する応力比効果であることを指摘(付1)して以来、引張残留応力場での伝ば挙動に関する研究が続けているが、本研究の圧縮残留応力場の伝ば特性については特に関心を持ったので以下の質問をさせていただく。

(1) 初期残留応力分布がモーメントの釣合いを満たしていないように見受けられるが、これについてご説明いただきたい。

(2) 本論文の考え方では、初期残留応力 σ_R が0の点より a が大きくなると式(1)における $|K_R|$ は漸減し、したがって ΔK が漸増する。図3では上記の条件より大きな a でも da/dn が a とともに減じており、理論と実験結果に整合性がないようにも見受けられる。式(1)の K^R を σ_R の分布から解析的に求めた $K_{\max}^L$ に加算した値と式(8)により実験的に求めた K^R の関係図を示していただきたい。

(3) 図4において $a=55$ 付近の da/dn がひとけたほどばらついている。また、図12の $a=25\sim35$ 程度での U がばらついている。このばらつきの原因についてのお考えをお示し願いたい。

(4) $\sigma_R=0$ 以上の a ではき裂先端は開口する一方、き裂後方は閉口する現象を示す。この挙動は実測される K_{op} に大きな影響を与える。図5の測定における $P-\epsilon$ 関係に P_{op} を明示した図を $a=60$ 程度のものについてご提示願いたい。

〔回答〕 (1) 溶接ビードが試験片背面に近いので、残留応力分布は試験片背面近傍で大きく圧縮に変化する。しかし、残留応力測定的位置単位が大きく(切り出し小片の寸法 10~15 mm 程度)、この変化を検出できない。図示した範囲の残留応力分布はモーメントの釣合いを満足している結果と考える。

(2) K^R に及ぼすき裂先端後方の初期圧縮残留応力場の影響は、き裂進展に伴い大きくなる。したがって、き裂先端が初期引張残留応力場に達しても、 $|K^R|$ はただちに漸減を開始しない。いずれにせよ、き裂進展に伴う $|K^R|$ の増減は初期残留応力分布で一義的に定まる。詳細な解析結果については、別報(付2)を参照されたい。

付図1 荷重と背面ひずみの関係

(3) 図4の da/dn の変動は、荷重制御の変動と き裂長さ増分 Δa が小さいことを反映した結果である。背面ひずみ除荷弾性コンプライアンス法では、 $U=1$ 近傍の P_{op} を決定することが S/N 比の問題でかなり難しい。図12の U の変動はそれに起因している。

(4) CT 試験片の場合、そのような現象はない。付図1に $P-\epsilon$ 関係を示す。 P_{op} は明確に定まっている。

〔質問〕 寺田 博之〔航空宇宙技術研究所〕

以下の点についてご教示いただきたい。

時として溶接線に直交した残留応力の大きさが溶接線方向の値と同程度となることも多いが、図3などにおける溶接線近くのひずみゲージと音弾性法による測定値の差は主としてこのことによるものであるか。また、X 開先のボンド部などでは板厚方向の材料組織が微妙に異なるがそのような場合でも音弾性法は十分な精度で残留応力を測定しうるか。

〔回答〕 (1) ひずみゲージ法による測定結果によれば、この場合の溶接線に直交した残留応力の大きさは 10 MPa 程度と小さく、ひずみゲージ法と音弾性法の差の主な原因とは考えられない。本文中にも記したとおり、この差は組織異方性の評価手法に問題があると考えられる。

(2) 音弾性法の組織異方性による速度差は、試験片厚さ方向の平均である。したがって、材料組織の試験片厚さ方向の変化が音弾性法の精度に及ぼす影響は小さいと考えられる。

(付1) 太田・ほか6名、溶接学会誌、50-2 (昭56)、161。

(付2) 藤・小林、機論、投稿中。