

- 2) 田村ら：オーステナイトステンレス鋼溶接金属の低温じん性に及ぼすフェライトの影響，本誌，4-2 (1986)，353-359
- 3) 田村ら：SUS 316 L 溶接金属の透過電子顕微鏡観察及びマイクロ分析，本誌，5-2 (1987)，256-262
- 4) 恩沢ら：SUS 316 L 溶接金属の低温じん性に及ぼす再熱の影響，本誌，5-2 (1987)，262-268
- 5) 恩沢ら：308 L オーステナイトステンレス鋼溶接金属の低温じん性に及ぼすフェライトの影響，本誌，5-4 (1987)，511-515
- 6) 恩沢ら：308 L オーステナイトステンレス鋼溶接金属の低温じん性に及ぼす再熱の影響，本誌，本号
- 7) G. Kurdjumov and G. Sachs : Z. Phys., 64 (1930), 323
- 8) 松本ら：極低温非磁性材料用溶着金属の機械的性質，本誌，4-3 (1986)，621
- 9) E. Szumachowski and H. F. Reid : Cyogenic Toughness of SMA Austenitic Stainless Steel Weld Metals : Part II- Role of Nitrogen, Weld. J., 58-2 (1979), 34 s
- 10) C. E. Whitterell : Welding Stainless Steels for Structures Operating at Liquid Helium Temperature, Weld. J., 59-11 (1980), 326 s
- 11) T. A. Siewert : Predicting the Toughness of SMA Austenitic Stainless Steel Welds at 77 K, Weld. J., 65-3 (1986), 23

残留応力に及ぼす材料定数，試験片寸法の影響*

—異種材料の界面接合部に生ずる残留応力について (第2報)—

寺崎 俊夫**，平居 孝之***，瀬尾 健二****

Effect of Material Constant and Specimen Size on Residual Stress*

—Residual Stress in Bonded Dissimilar Materials (Part II)—

by Toshio Terasaki**, Takayuki Hirai*** and Kenji Seo****

This paper deals with the effect of mechanical and physical properties, and specimen size on residual stress in bonded dissimilar materials using Boundary Element Method (BEM). The sign of residual stress changes when the ratio of linear expansion (α^B/α^A) becomes greater than the unit value. The value of residual stress is chiefly influenced by the ratios of Young's modulus (E^B/E^A) and α^B/α^A , but is little influenced by Poisson's ratio (ν^B, ν^A). When the height of specimen is greater than the width of specimen, the change of height does not affect the residual stress in the neighbourhood of bond line. When the width is greater than the height, the residual stress is not changed by the width.

Key Words: Dissimilar material, Residual stress, Specimen size, Material constant, BEM

1. 結 言

著者等は異材継手を拡散接合などにより高温で接合した後、冷却させた時に生ずる残留応力の整理パラメータを第一報において明らかにした¹⁾。ところで、異材継手の残留応力を取り扱った論文として、接合による割れを防止する立場から接合界面に挿入する中間層の厚さを検討した報告、異種材料の組合せを検討した報告等がある²⁾⁻⁶⁾。しかし、「異材継手に生じる残留応力に材料定数や試験片寸法がどのように影響するのか」というテーマを系統的に明らかにした論文はないようである。本論文では残留応力に及ぼす材料定数，試験片寸法の影響をパラメータを用いて明らかにしている。この研究により残留応力に大きく影響する材料定数が明らかになり、異種材料の組合せに対する情報が提供される。また、試験片寸法と残留応力の関係が明確に成ると思われる。

2. 計 算 方 法

異材継手の界面近傍の残留応力を精度良く解析するために境界要素法を用いた。本論文では平居⁷⁾が作成した境界要素法のプログラムを改良して残留応力を計算し

た。用いたプログラムの精度が良いことは前報で確認している¹⁾。本論文では熱応力という言葉を用いるときは温度上昇 T は正であり、残留応力という言葉を用いるときには温度上昇 T は負である。

Fig. 1 に残留応力の計算手法を示す。図 (a) は異種材料 A, B を x 軸で $\theta_1(K)$ で接合し、 $\theta_2(K)$ まで温度上昇 (温度変化量を T とする) させた時を示している。このとき生ずる熱応力は図 (b) に示す温度変化による変形を完全拘束したときの応力に、図 (c) に示すように図 (b) で必要とされた力 $P_x^A, P_y^A, P_x^B, P_y^B$ の符号を逆向きした外力を作用させたときに生ずる応力を加算することにより得られる。図 (c) の外力による応力の計

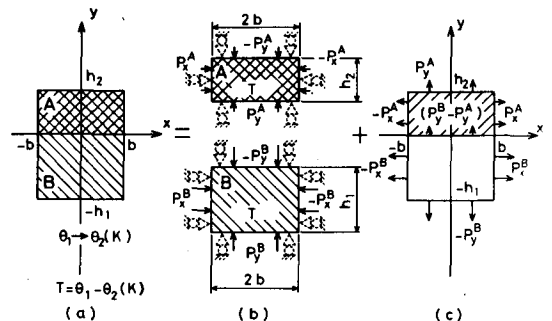


Fig. 1 Method of calculating residual stress

*原稿受付 昭和62年6月8日 昭和63年5月第8回界面接合研究会委員会で発表

**正 員 九州工業大学 Member, Kyushu Institute of Technology

***非 会員 大分大学 Non, Ohita University

****正 員 姫路工業大学 Member, Himeji Institute of Technology

算に境界要素法を用いた。

境界要素法で用いた要素分割例を Fig. 2 に示す。図 (a) は残留応力に及ぼす材料定数の影響を検討したときの要素分割で有り、図 (b) は寸法効果を検討したときの要素分割の一例である。接合界面より上側の材料を A、下側の材料を B とする。

3. 材料定数の影響

前報の研究により残留応力は異材のそれぞれの線膨張係数の比、ヤング率の比および異材のポアソン比の関数として材料定数の影響を受けることが示された。そこで本節では上記のパラメータを用いて残留応力に及ぼす材料定数の影響を検討する。試験片の寸法は Fig. 1 に示す高さ $h_1=h_2=20$ mm, 板幅 $2b=10$ mm である。

3.1 線膨張係数比

材料 A, B のヤング率比 $E^B/E^A=0.5$, ポアソン比 $\nu^A=\nu^B=0.3$ として、残留応力に及ぼす線膨張係数の影響を計算した結果を Fig. 3 に示す。図中の記号○, △, □, ▽ は境界要素法による計算結果である。図 (a) に平面応力の条件での計算結果を、図 (b) に平面ひずみの

条件での計算結果を示す。縦軸の σ_{ij} は垂直応力とせん断応力の代表であり、テンソル記号での応力表示を参考にしている。図中の応力 $|\sigma_x^A|_{\max}, |\sigma_y^B|_{\max}, |\tau_{xy}|_{\max}$ は界面接合部 (Fig. 1 での x 軸) での絶対値の最大値を示しており、 $|\sigma_x^A|_{\max}$ は $x=b$ の断面上での A 材における垂直応力 σ_x の絶対値の最大値を示している。A, B 材のせん断応力は界面では等しいので添え字を付けていない。線膨張係数比 α^B/α^A が 1 の時は残留応力が零となり、1 より大きいか、小さいかにより発生する残留応力の符号が異なっている事、1 より離れると共に残留応力の絶対値が大きくなる事などが分かる。また、残留応力は線膨張係数比 $\alpha^B/\alpha^A=1$ で零となる次の直線で近似できる。

$$\sigma_{ij} \frac{E^A \alpha^A T}{1 - \nu^A} = m(\alpha^B / \alpha^A - 1)$$

ただし、 m : 直線の傾き; 材料定数 $E^B/E^A, \nu^A, \nu^B$ の関数

上式より、

$$\sigma_{ij} = \{m(\alpha^B - \alpha^A)\} E^A T / (1 - \nu^A)$$

となり、残留応力は線膨張係数の差に比例することになる。

3.2 ヤング率比

Fig. 4 に線膨張係数比 $\alpha^B/\alpha^A=2$, ポアソン $\nu^A=\nu^B=0.3$ として、ヤング率比 E^B/E^A が残留応力に及ぼす影響を示した。記号および図 (a), (b) の意味は Fig. 3 と同じである。A 材を一定として図を眺めると界面接合部の残留応力 $|\sigma_x^A|_{\max}, |\sigma_y^B|_{\max}, |\tau_{xy}|_{\max}$ は E^B/E^A が大きくなると大きくなっていることが分かる。 $x=b$ の断面上での A 材中における垂直応力 $|\sigma_x^A|_{\max}$ は $E^B/E^A=0.5$ 付近でピーク値を示し、 $E^B/E^A=0 \sim 2$ の領域で変化しているが、それ以外の領域ではおおむね一定値を示していると近似しても良いと思われる。A 材を材料定数 $E^A=400$ GPa, $\alpha^A=5 \times 10^{-6} K^{-1}$, $\nu^A=0.3$ をもったセラミックス材 (SiC がこの条件に近い材料である) とし、B 材を材料定数 $E^B=200$ GPa, $\alpha^B=10 \times 10^{-6} K^{-1}$, $\nu^B=0.3$

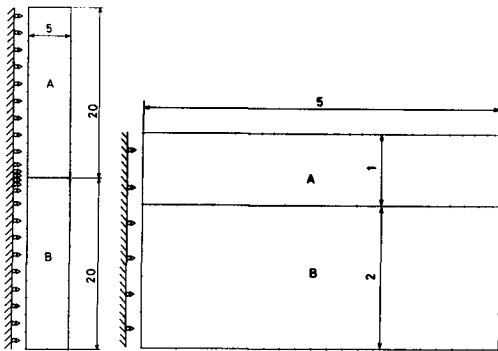
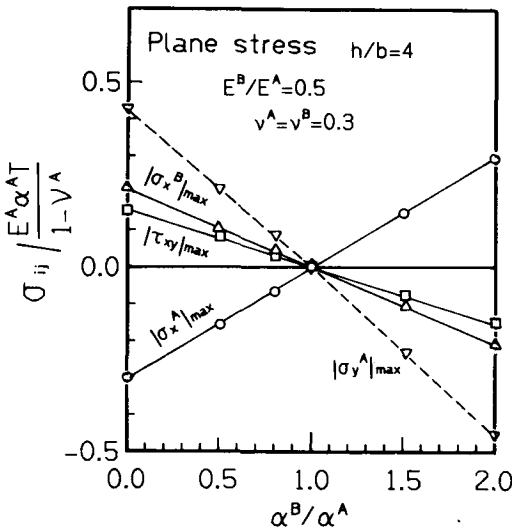
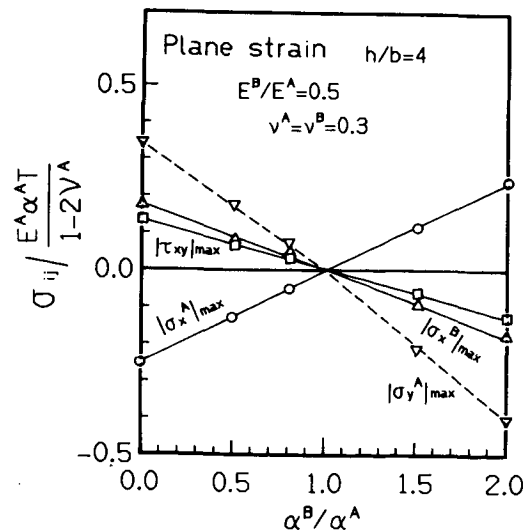


Fig. 2 Mesh division



(a) Plane stress



(b) Plane strain

Fig. 3 Effect of linear expansion on residual stress

をもった金属（軟鋼がこの条件に近い材料である）とすると、 $E^B/E^A=0.5$ 、 $\alpha^B/\alpha^A=2$ 、 $\nu^A=\nu^B=0.3$ となる。図より残留応力 $|\sigma_y^A|_{\max}$ は大きな引張応力となり（縦軸の符号が負であること、冷却過程では温度変化量 T が負である事より、残留応力は正となる）、 $|\sigma_x^A|_{\max}$ は圧縮応力となる。

従って、上記のセラミックスと鋼を接合した場合には

最大主応力説で割れが生じると考えると割れは $x=b$ の断面上では $|\tau_{xy}|_{\max}$ が小さいため、ほぼ σ_y^A に垂直な方向に生じる。また、残留応力の符号は Fig. 3, 4 より線膨脹係数比で決定されている事が分かる。

3.3 ポアソン比

Fig. 5 に線膨脹係数比 $\alpha^B/\alpha^A=2$ 、ヤング率比 $E^B/E^A=0.5$ 、ポアソン比 $\nu^A=0.3$ 、 0.2 として、B材のポアソ

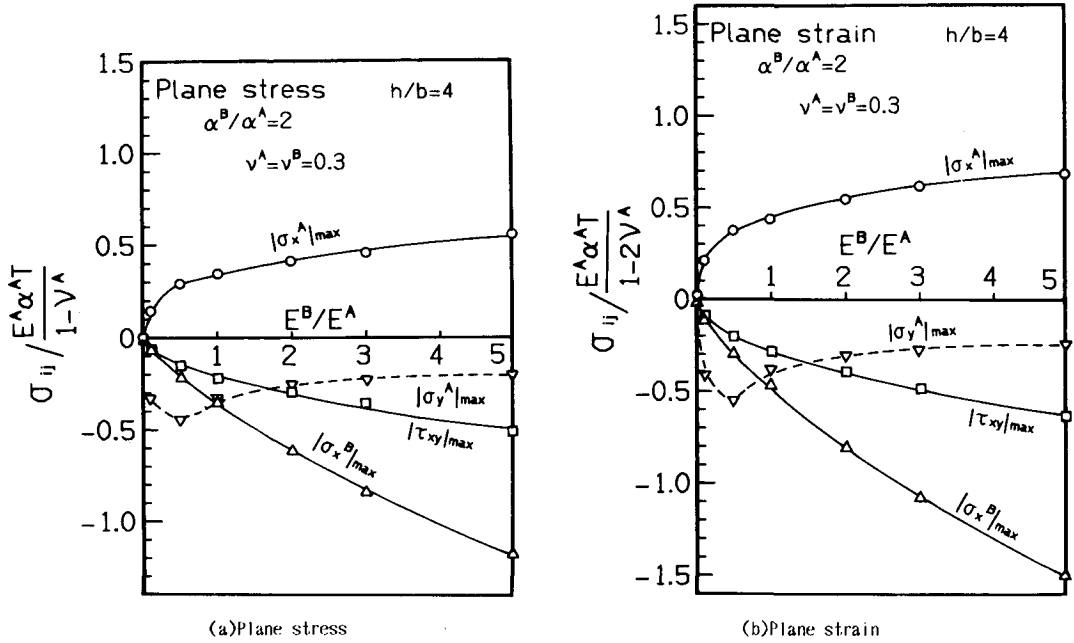


Fig. 4 Effect of Young's modulus on residual stress

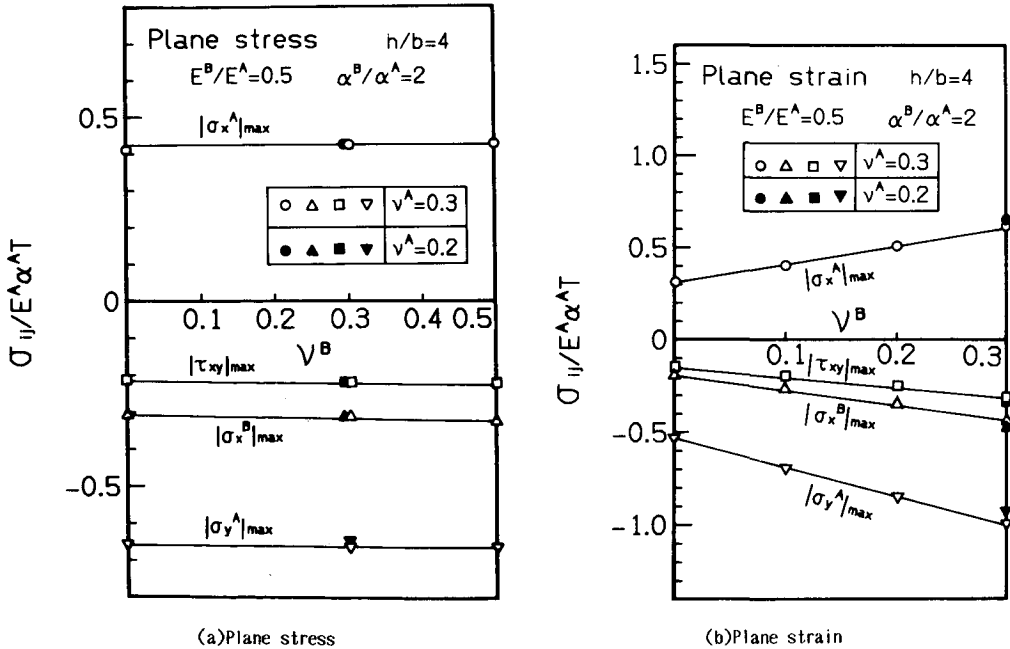


Fig. 5 Effect of Poisson's ratio on residual stress

ン比 ν^B を変化させたときの残留応力を示す。

記号の意味は Fig. 3 と同じである。図 (a) の平面応力条件の場合、ポアソン比 ν^B は残留応力にわずかしこ影響していない、また、図中の黒丸印の記号は $\nu^A=0.2$ での計算結果であり、白丸印の $\nu^A=0.3$ の計算結果とほぼ一致している。以上より、平面応力状態では残留応力にポアソン比はほとんど影響を与えないと結論できる。

図 (b) は平面ひずみ条件での計算結果であり、残留応力にポアソン比 ν^B は少し影響を与えている。Fig. 3, 4, 5 を比較すると残留応力に及ぼすポアソンの影響はあまりないと考えても良いようである。

4. 試験片寸法の影響

前報の結論として残留応力分布は相似則に従うことが示された。そこで、相似則のパラメータを用いて残留応力に及ぼす試験片寸法の影響を検討する。計算条件としてセラミックスと鋼を接合する場合を想定して、A 材に $E^A=400\text{ GPa}$, $\alpha^A=5 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$, $\nu^A=0.3$ (SiC セラミックス), B 材に $E^B=200\text{ GPa}$, $\alpha^B=12 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$, $\nu^B=0.3$ (鋼) の材料定数を設定した。残留応力として接合割れに関連した $x=b$ の断面上での垂直応力 σ_y を選んだ。計算は平面応力条件で行なった。

Fig. 6 は残留応力に及ぼす試験片高さ h の影響を示している。寸法の基準として試験片の幅 $2b$ の半幅 b を用いている。横軸の $y=0$ は接合界面 (Bond line) であり、 $y>0$ の領域は材料 A であり、 $y<0$ の領域は材料 B である。残留応力は接合面の近傍で急激に変化している。高さ h が $0\sim 2b$ の範囲で大きくなると残留応力 σ_y は界面から離れた領域 ($|y|$ が大きくなること) まで生じるようになり、 σ_y の絶対値も少し大きくなっている。残留応力は前報で証明したように相似則に従う。

一方、残留応力は図中に示す x 軸界面の上下の A, B 材の材料定数の相違により発生している。このため、残留応力は発生原因である x 軸界面の上下での熱膨張ひずみの相違と $x=\pm b$, $y=\pm h$ の自由境界面の存在により決定されている。Saint-Venant's の原理によると $y=\pm h$ の境界面は $h \geq 2b$ で x 軸近傍の応力分布に影響を与えなくなる⁸⁾。従って、 $h/b \geq 2$ で界面近傍の残留応力は高さ h の影響を受けなくなる。Fig. 6 の結果は考察したようになっている。図より残留応力に及ぼす高さ h の影響は h が幅 $2b$ より小さいときに顕著であり、 h が $2b$ より大きいときほとんどない事が分かる。

Fig. 7 に残留応力に及ぼす試験片幅 $2b$ の影響を示す。Fig. 7 は寸法の基準として試験片の高さ h を用いて、残留応力を整理している。板幅 $2b$ は $2b=0\sim 2h$ 範囲で残留応力に影響しているが、 $2b>2h$ では残留応力に影響していない。Saint-Venant's の原理によると $2b \geq 2h$ のとき、 $x=-b$ の自由境界面は $2h$ 離れた $x=b$ の近傍の残留応力に影響しなくなる。すなわち、 $b/h \geq 1$ の条件を満足するとき、 $x=b$ の断面上の残留応力に板幅 $2b$ は影響しないことになる。Fig. 7 の計算結果は以上の考えを支持している。

Fig. 8(a) に A, B 材の試験片の高さ h^A , h^B が残留応力に及ぼす影響を示している。記号○印の $h^A=h^B=2\text{ mm}$ よりも記号△, □印の $h^A(=2\text{ mm}) < h^B$ の寸法の方が界面近傍に生じる引張りの残留応力 σ_y^A は小さくなっており、A 材すなわちセラミックスの残留応力が少し小さくなっている。この原因として次の事が考えられる。

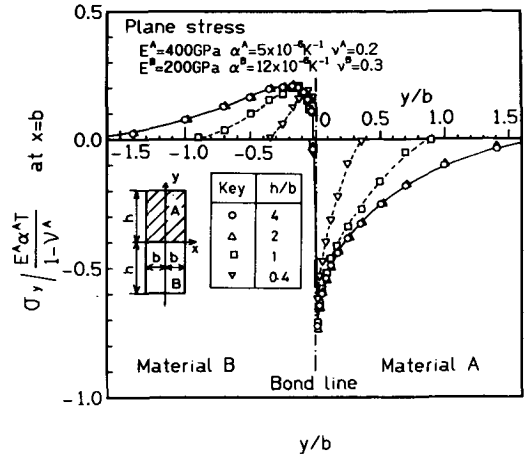


Fig. 6 Effect of specimen height on residual stress distribution

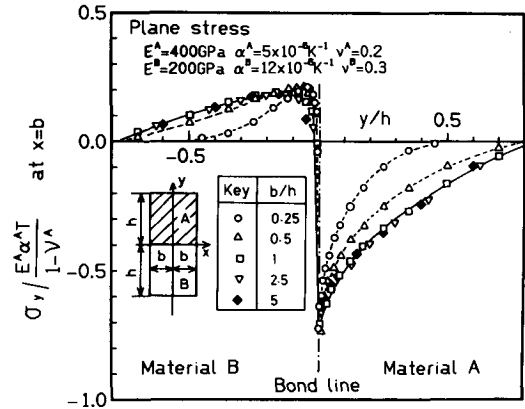


Fig. 7 Effect of specimen width on residual stress distribution

Fig. 8(b) に x 軸すなわち接合界面の端部の y 方向の変位 v を示すように、B 材の高さ h^B が大きくなると Fig. 8(b) の図中に示すように界面に沿うせん断応力 τ による B 材の変形 (破線で表示) が小さくなり、 v が小さくなるため、 y 方向の変位 v により生じる残留応力 σ_y^A が小さくなったと考えられる。Fig. 8 より本節で使用する材料定数を持つ (セラミックスと鋼の組合せがこの場合である) A, B 材を拡散接合したとき、 $h^B \geq h^A$ の範囲では割れは h^A が一定の時、 $h^A=h^B$ の条件で最も生じ易いことが残留応力より理解できる。

5. 結 論

本論文では第一報で明らかになった残留応力の整理パラメータを使用して材料定数、試験片寸法が残留応力に及ぼす影響を境界要素法を用いて検討した。得られた結論を要約すると次のようになる。

(1) 線膨張係数は A 材, B 材の線膨張係数の比 α^B/α^A で残留応力に大きな影響を与え、 α^B/α^A が 1 より大

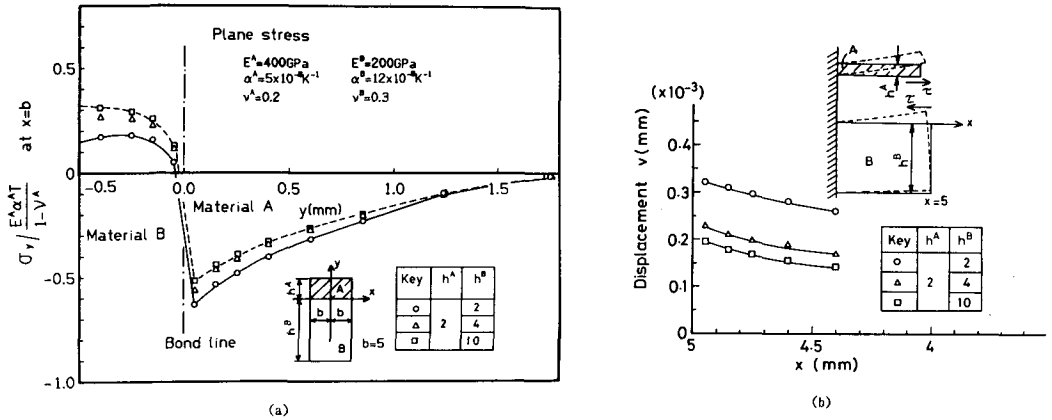


Fig. 8 Effect of height of material B on residual stress distribution and displacement

きいか、小さいかにより残留応力の符号が異なる。残留応力に及ぼす線膨張係数比の影響は $\alpha^B/\alpha^A=1$ で残留応力が零となる直線で近似できる (Fig. 3 参照)。

残留応力は線膨張係数の差 ($\alpha^B-\alpha^A$) に比例する。

(2) ヤング率は A 材, B 材のヤング率の比 E^B/E^A で残留応力に影響を与える。界面接合部の残留応力は E^B/E^A により大きく変化するが、接合界面の端部に生じる残留応力 σ_y^d (Fig. 1 の $x=b$ の断面) は $E^B/E^A=0\sim 2$ の範囲で大きく変化し、 $E^B/E^A=0.5$ でピーク値をもつが、 $E^B/E^A>2$ の範囲ではあまり変化しない (Fig. 4 参照)。

(3) ポアソン比は平面応力状態では残留応力にほとんど影響を与えないが、平面ひずみ状態では残留応力に影響を与える (Fig. 5 参照)。

(4) A 材, B 材の試験片高さ h は試験片幅 $2b$ より小さい範囲で割れに関連した残留応力 σ_y に影響を及ぼすが、 $h>2b$ では h は σ_y に影響しない (Fig. 6 参照)。

(5) 試験片幅 $2b$ は試験片高さ h の二倍よりも小さい範囲で σ_y に影響するが、 $b/h>1$ の範囲で幅 $2b$ は σ_y に影響しない (Fig. 7 参照)。

(6) セラミックスと鋼を接合した場合には、鋼の高さ h^B がセラミックスの高さ h^A より大きい時よりも

$h^B=h^A$ のときの方が割れに関連した応力 σ_y は最大値を示す。

謝辞 本研究の一部は福岡県地域システム技術開発事業の補助金および文部省の科学研究費一般 (C) の補助金で行なわれた。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 溶接学会に投稿中, 界面接合委員会, IJ-29-86, (1987)
- 2) 山田武海, 岡本寛己, 関口英男, 北村昭: Nimonic 80 A と Sic および Si_3N_4 の拡散接合, 日本金属学会, 秋期大会シンポジウム講演予稿, (1985), p.174
- 3) 山田武海, 関口英男, 岡本寛己, 北村昭, 東祥三: セラミックス中に生ずる熱応力の最小化にむけて 日本金属学会会報, 第25巻第5号, (1986), p.435
- 4) 山田俊宏, 河野顕臣: 熱応力の緩和 日本金属学会会報, 第25巻第5号, (1986), p.424
- 5) W. T. Chen, C. W. Nelson: Thermal Stress in Bonded Joints, IBM, J. Res. Develop., Vol.23, No.2, March (1979), p.178
- 6) 岡本平, 菅沼昭: セラミックスと金属の接合技術開発, IONICS, (1985), 7, p.7-14
- 7) 平居孝之: 弾性解析プログラムとその使い方, 理工図書, (1984)
- 8) S. Timoshenko, J. N. Goodier: Theory of Elasticity, McGraw-Hill, p.52

低強度部を含む丸棒継手の降伏強さの評価手法に関する検討*

松本俊美**, 佐藤 宏**, 和田山芳英***

Investigations on Evaluation Method for Yield Strength of Round bar Undermatched Joint

by Toshimi Matsumoto**, Hiroshi Satoh** and Yoshihide Wadayama

The objective values of the yield strength and fracture toughness are respectively more than 1200 MPa and 200 MPa \sqrt{m} at 4K on the structural material for the superconducting magnet container in the Fusion Reactor. It should be desirable to assure the above value for the properties of the weld metal used for

*原稿受付 昭和62年7月2日 昭和62年5月溶接構造研究委員会にて発表

**正 員 (株)日立製作所 Member, Hitachi, Ltd.

*** (株)日立製作所 Hitachi, Ltd.