

溶射部材に生じる界面端部近傍の残留応力について*

寺崎 俊夫**, 秋山 哲也**, 平居 孝之***, 瀬尾 健二****

Study of Residual Stress in the Vicinity of Interface Corner of Sprayed Coatings*

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

This paper deals with the singularity of residual stress arising at the interface corner of sprayed substrates and the effects of specimen size, mechanical and physical properties on residual stress distributions using the theory of elasticity and a boundary element method (BEM).

The residual stress distribution is not only defined by one singular term, then it is difficult to use a stress intensity factor as the parameter to define the strength of sprayed substrate.

The residual stress distribution of test specimen satisfying following conditions are the same as that of sprayed substrate in a working field: The test specimen is composed of the substrate with the thickness being 4 times, and the length and the width being 8 times as large as a thickness of sprayed coating.

The preheat temperature T^B of substrate in order to make a residual stress zero is given by the temperature of sprayed coating and the ratio of linear thermal expansions of coating and substrate materials.

Key Words: Sprayed coating, Singularity, Residual Stress, Material constant, Specimen size, BEM

1. 緒 言

溶射は大気中で作業が行え、しかも被溶射材（サブストレイトと呼ぶ）の表面の性質を溶射粉末の種類を選ぶことにより簡単に変えることができる¹⁾。最近では、金属にセラミックスなどを溶射して、耐摩耗性、耐食性を向上させる研究が多く行われ、実用化されている²⁾。溶射された溶射皮膜と被溶射材（以後、溶射された溶射皮膜付の被溶射材を“溶射部材”と呼ぶ）に生じる残留応力は耐摩耗性や耐食性等の機械的性質に影響を与える³⁾⁻⁷⁾。このため、残留応力についての研究がなされ、種々の知見が得られている³⁾⁻⁶⁾。しかし、溶射皮膜とサブストレイトの界面近傍に発生する残留応力に注目した研究はほとんどないようである。

溶射部材の強度評価を検討するためには、溶射皮膜の剝離を生じ易い界面端部近傍の残留応力の特徴を把握する必要があると思われる。ところが、現在のところ、実験により界面端部の残留応力分布を明らかにすることは不可能に近い。著者らは異材継手の拡散接合を対象として、異種材料A、Bが同一の温度変化をするときに生じる界面接合上の残留応力分布の特徴を弾性論を用いて明らかにした^{3),8)}。溶射部材は一般には、サブストレイトである材料(Bとする)の表面に、異種材料(Aとする)を溶融吹き付けして、作成される。すなわち、溶射部材と拡散接合材の熱的な相違は接合にともなう材料A、B

の温度変化が同一か否かである。従って、拡散接合継手の残留応力分布について、明らかになった種々の知見が溶射部材の残留応力分布を取り扱う上で参考になる。

本報告では溶射部材の界面端部近傍に生じる残留応力分布の特異性を弾性理論を用いて明らかにすると共に、残留応力分布に及ぼす板寸法、材料定数の影響を境界要素法を利用した数値解析により検討している。

2. 残留応力分布の特異性について

2.1 特異性

Fig. 1に、材料Bのサブストレイトに材料Aの溶射皮膜を溶射した溶射部材の界面端部近傍の形状の例を示

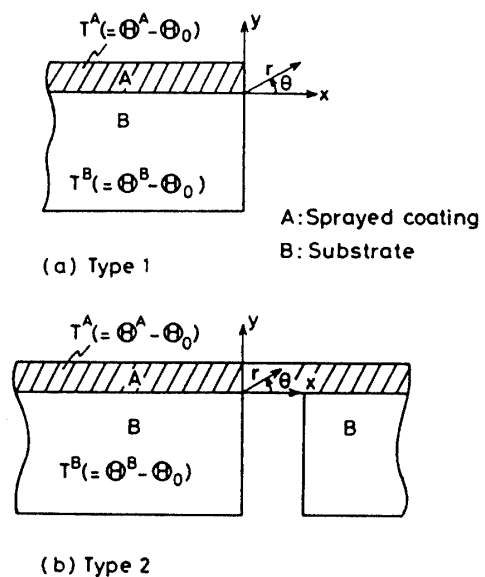


Fig. 1 Singularity positions of sprayed substrate.

*原稿受付 平成2年11月19日 平成2年11月溶接構造研究委員会
会で発表 (WD. W/G Mech BID)

**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 Tech-
nology

す。Fig. 1(a)のタイプ1は溶射部材の端部の界面、Fig. 1(b)のタイプ2は引張強度試験片の端部の界面を示している⁷⁾。この他にも界面端部近傍の形状は種々考えられるが、形状による特異性(固有値の個数および性質)の問題は、後述するように、タイプ1, 2で代表されると考えられる¹⁰⁾。

溶射部材は一般に、溶射直後のサブストレイトの温度 θ^B が室温 θ_0 で、溶射皮膜の温度 θ^A は溶融温度と考えられる。そこで、溶射部材は室温まで冷却する過程において、弾性変形のみを生ずると考えて残留応力の特異性を考察する。著者らは、材料AとBの温度変化 $T^A=(\theta^A-\theta_0)$ と $T^B=(\theta^B-\theta_0)$ がそれぞれの材料内で一定の場合には、残留応力場の応力の特異項の指数は外応力場の特異項の指数に一致することを前報で明らかにした⁹⁾。

溶射部材では、 $T_A=(\theta^A-\theta)$ (一定)、 $T^B=0$ (一定)であるから、前報の結論より、溶射部材の残留応力分布の特異項の指数は外応力場の指数と同じになる。

タイプ1の場合の特異項の指数 $1-t$ は、次の力学の境界条件を満足する固有値 t (1実根)として得られる⁹⁾。(Fig. 1の座標を参照)

(1) 溶射皮膜の自由面 $\theta=\pi/2$ に働く垂直応力とせん断応力が零

(2) サブストレイトの自由面 $\theta=3\pi/2$ に働く垂直応力とせん断応力が零

(3) 溶射皮膜(A材)とサブストレイト(B材)との界面 $\theta=\pi$ に働く垂直応力 σ_y およびせん断応力 τ_{xy} がそれぞれ等しく、xとy方向の変位uとvが連続であること。すなわち、 $\sigma_y^A=\sigma_y^B$ 、 $\tau_{xy}^A=\tau_{xy}^B$ 、 $u^A=u^B$ 、 $v^A=v^B$ 。

得られた特異項の指数 $1-t$ をFig. 2(a)に示す。サブストレイトに鋼を想定してB材のポアソン比 $\nu^B=0.3$ とした。また、溶射皮膜Aのヤング率がバルク材に比べて小さい⁵⁾ことを考慮して、 $E^A/E^B \leq 1$ の範囲について平面ひずみ状態で $1-t$ を計算した。

溶射皮膜の厚さが h^A のとき界面端部近傍の残留応力は次式で与えられる⁹⁾。

$$\sigma_y/E^A \alpha^A T^A = (K_I/E^A \alpha^A T^A)/r^{1-t} \cdot f_1(\theta) \cdot (h^A/h_I)^{1-t} + \sigma_0/E^A \alpha^A T^A \dots (1-1)$$

$$\tau_{xy}/E^A \alpha^A T^A = (K_{II}/E^A \alpha^A T^A)/r^{1-t} \cdot f_2(\theta) \cdot (h^A/h_I)^{1-t} \dots (1-2)$$

ただし、 K_I 、 K_{II} ：溶射皮膜の厚さが h_I のときの特異項の係数(破壊力学の応力拡大係数と同じ性質を持っているため、以後、応力拡大係数と呼ぶ)

E^A ：A材のヤング率

α^A ：A材の線膨張係数

f_1 、 f_2 ： θ の関数

$$\sigma_0 = (C^B/\mu^B - C^A/\mu^A) / \{(\kappa^A - 3)/\mu^A - (\kappa^B - 3)/\mu^B\} \dots (2)$$

$$C = \mu(3\lambda + 2\mu)\alpha T / (\lambda + \mu)$$

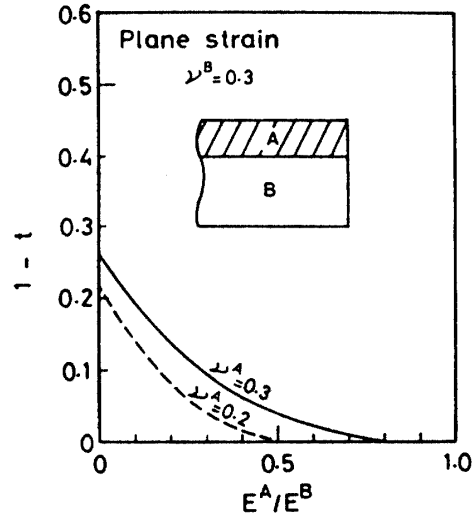
$$\kappa = (\lambda + 3\mu) / (\lambda + \mu)$$

λ 、 μ ：ラーメの定数

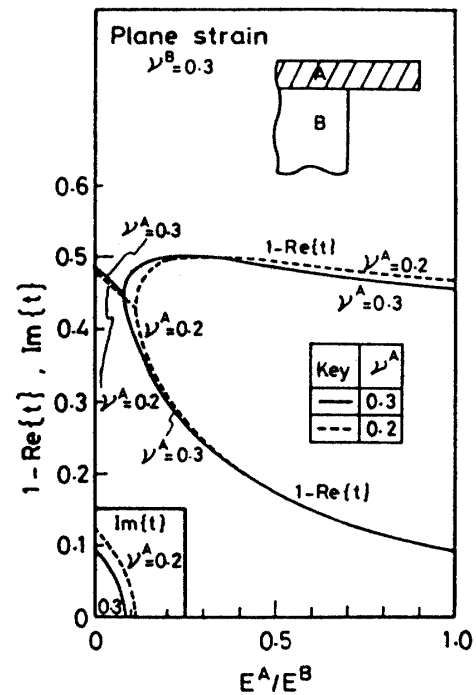
上付の添え字A, Bは、材料A, Bを意味する。

タイプ2の場合の特異項の指数 $1-t$ は、次の力学の境界条件を満足する固有値 t (2実根、または複素根)として得られる。(Fig. 1の座標を参照)

(1) 溶射皮膜の自由面 $\theta=0$ に働く垂直応力とせん断力が零



(a) Type 1



(b) Type 2

Fig. 2 Singularity.

(2) サブストレイトの自由面 $\theta=3\pi/2$ に働く垂直応力とせん断応力が零

(3) 溶射皮膜(A材)とサブストレイト(B材)との界面 $\theta=\pi$ に働く垂直応力 σ_y およびせん断応力 τ_{xy} がそれぞれ等しく、xとy方向の変位uとvが連続であること。すなわち、 $\sigma_y^A=\sigma_y^B$ 、 $\tau_{xy}^A=\tau_{xy}^B$ 、 $u^A=u^B$ 、 $v^A=v^B$ 。

得られた特異項の指数 $1-t$ をFig. 2(b)に示す。縦軸の $Re\{t\}$ と $Im\{t\}$ は、複素根 t の実数部と虚数部を意味する。 E^A/E^B が約0.1以下になると複素根が現れ、約0.1以上で2実根が現れている。サブストレイトを鋼とした場合には、 E^A/E^B は0.1以上となる場合がほとんどである^{1),5)}。そこで、異なる2実根 t_1 、 t_2 ($t_1 < t_2$ とする)が存

在する場合について、Fig. 1 (b)の座標原点近傍の残留応力分布を求めると式(1)とは異なり次式となる。

$$\sigma_y/E^A\alpha^A T^A = (A_1/E^A\alpha^A T^A)/r^{1-t_1} \cdot g_1(\theta) \cdot (h^A/h_1)^{1-t_1} + (A_2/E^A\alpha^A T^A)/r^{1-t_2} \cdot g_2(\theta) \cdot (h^A/h_1)^{1-t_2} \quad \dots\dots(3-1)$$

$$\tau_{xy}/E^A\alpha^A T^A = (B_1/E^A\alpha^A T^A)/r^{1-t_1} \cdot g_3(\theta) \cdot (h^A/h_1)^{1-t_1} + (B_2/E^A\alpha^A T^A)/r^{1-t_2} \cdot g_4(\theta) \cdot (h^A/h_1)^{1-t_2} \quad \dots\dots(3-2)$$

ただし、 A_1, B_1 ：特異項の指数 $1-t_1$ の係数(応力拡大係数と呼ぶ)

A_2, B_2 ：特異項の指数 $1-t_2$ の係数(応力拡大係数と呼ぶ)

式(3)より、溶射部材の他の力学上の境界条件により決定される係数 A_1, B_1, A_2, B_2 の大小関係により、残留応力分布は $1-t_1$ に従ったり、 $1-t_2$ に従ったり、混合の応力分布になることが分かる。

式(1), (3)より、溶射部材の残留応力分布について次の結論が得られる。

(1) タイプ1の残留応力分布では、拡散接合継手の残留応力分布⁹⁾と同様に、垂直応力 σ_y は応力拡大係数のみでは決定されず、せん断応力 τ_{xy} は応力係数のみで決まる。

(2) タイプ2の残留応力は2つの応力拡大係数の組合せで決まるため、応力拡大係数を強度評価のパラメータとして使用することは難しい。

2.2 残留応力分布

Fig. 1 (a)のタイプ1について、溶射皮膜の厚さ $h^A=0.5$ mm, サブストレイトの厚さ $h^B=5h^A$, 試験片の幅 $2b=2h^A, 8h^A$ とし、材料定数を $E^A=2000$ MPa, $E^B=5E^A$, $\nu^A=\nu^B=0.3$, $\alpha^A=0.001$ K⁻¹, $\alpha^B=2\alpha^A$ とし、温度変化を $T^A=100$ K, $T^B=0$ K とし、境界要素法のプロシミュレーションした計算結果を Fig. 3 に示す。

Fig. 3 以後の数値解析はすべて、平面ひずみ条件で行っている。界面端部近傍の応力分布の傾きを調べるために、界面に働く垂直応力と界面端部(原点)からの距離 x の関係を両対数のグラフにプロットしている。図中に示す直線の傾きは、Fig. 1 (a)から得られた特異項の指数 $1-t$ の値0.136である。計算結果である○, △, ●, ▲が、原点近傍で直線上に載っている。従って、タイプ1の溶射部材端部に生じる残留応力は式(1)で表せると言える。

Fig. 1 (b)のタイプ2について、 $h^A=0.5$ mm, $h^B=4h^A$,

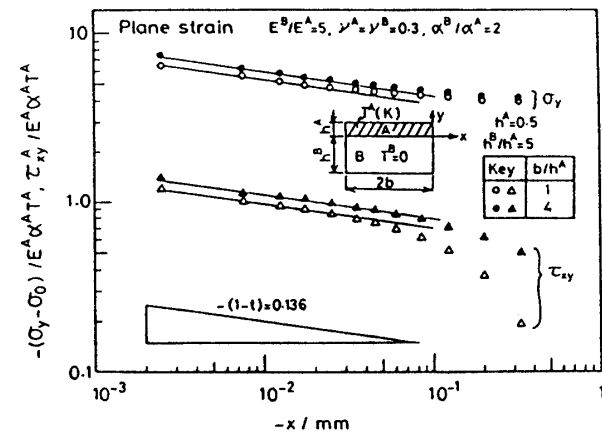
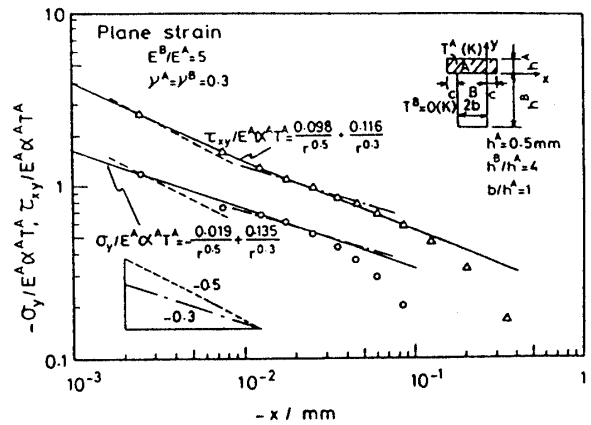


Fig. 3 Residual stress distributions of type 1.

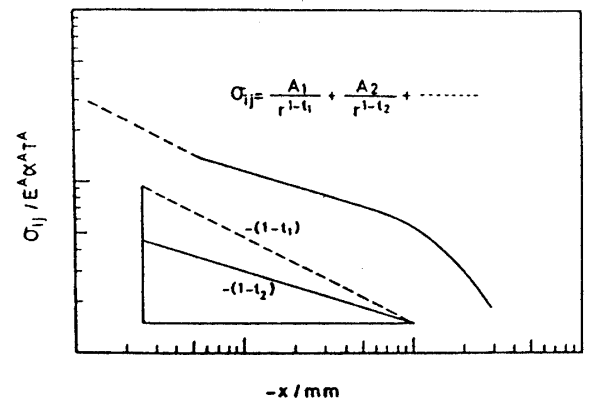
$b=h^A, E^A=200$ MPa, $E^B=5E^A, \nu^A=\nu^B=0.3, \alpha^A=0.02$ K⁻¹, $\alpha^B=2\alpha^A, T^A=100$ K, $T^B=0$ K の条件で数値解析した計算結果を Fig. 4 (a)に示す。図中の一点鎖線と破線の傾き0.3, 0.5は、Fig. 2 (b)で得られた特異項の指数の2実根である。実線は2つの特異項を用いて求めた混合形態の計算値である。計算結果と破線、一点鎖線を比較すると、 x が 5×10^{-3} mm より小さい範囲で指数の大きい $1-t_1$ の破線の傾きに載っており、 7×10^{-3} mm から 3×10^{-2} の範囲で指数の小さい $1-t_2$ の一点鎖線の傾きに載っている。 x が 10^{-1} mm 以上の範囲では、残留応力は応力特異性の領域外にある。 $b=4h^A$ とした計算結果も同じ傾向にあった。Fig. 4 (a)の応力分布の特徴を模式的に示すと Fig. 4 (b)となる。すなわち、残留応力分布は、原点のごく近傍では指数の大きい $1-t_1$ に従い、次に、小さい指数の $1-t_2$ に従う傾向にある。これは、 r を 0 に近づけたときの $(A_1/r^{1-t_1} + A_2/r^{1-t_2})$ の極限值が、 $1-t_1$ の大きい項すなわち A_1/r^{1-t_1} でほとんど占められることから容易に想像されることである。しかし、応力分布は係数 A_1, B_1, A_2, B_2 の大小関係により異なり、応力分布が $1-t_1$ に従う x の範囲も係数 A_1, B_1, A_2, B_2 の大小関係の影響を受ける。従って、タイプ2の残留応力分布は2つの特異項の混合形態であると結論される。

3. 残留応力分布の整理パラメータについて

材料A, Bの温度変化 T^A, T^B が等しい ($T^A=T^B=T$)



(a) Calculated results



(b) Schematic illustration

Fig. 4 Residual stress distributions of type 2.

とき、残留応力 σ_{ij} (総和規約の記号で垂直応力, セン断応力を意味する) を無次元化した $\sigma_{ij}/E^A\alpha^A T$ は, 材料のパラメータ E^B/E^A , ν^A , ν^B , α^A/α^B と寸法のパラメータ b/h^A , h^B/h^A の関数となることを前報⁹⁾で明らかにした。

溶射部材のように, 材料A, Bの温度変化が異なるときには, さらに温度変化の違いを示すパラメータ T^B/T^A が追加される⁹⁾。また, 材料A, Bのポアソン比が等しいときには, 残留応力を $\sigma_{ij}/E^A(\alpha^B - \alpha^A)T$ の形に無次元化すれば, 材料のパラメータから α^B/α^A が減ることを明らかにした⁹⁾。分母の $(\alpha^B - \alpha^A)T$ は, 材料A, Bを界面で切断して温度変化Tを与えたときに生じるクイチガイを意味しており, 残留応力の発生原因である。溶射部材の場合には, 材料A, Bの温度変化がそれぞれ T^A , T^B と異なるため, 材料A, Bの界面でのクイチガイは $(\alpha^A T^A - \alpha^B T^B)$ となる。従って, ポアソン比が材料A, Bで等しい場合の残留応力は, クイチガイを考慮した $\sigma_{ij}/E^A(\alpha^A T^A - \alpha^B T^B)$ の形で整理できる可能性がある。

Fig. 5 (a), (b)にタイプ1, 2の界面上の残留応力分布を示す。計算は図中に示すように, 材料のパラメータ E^B/E^A , $\nu^A = \nu^B = 0.3$ および寸法を一定として, ヤング率, 線膨張係数, 温度変化を2種類選んで行っている。

残留応力を, $\sigma_{ij}/E^A(\alpha^A T^A - \alpha^B T^B)$ で整理すると, 残留応力 σ_y , τ_{xy} の分布は, 図に示すように, 1つの曲線で整理されている。以上より, ポアソン比が材料A, Bで等しいときには, 残留応力分布は次式で表示されることになる。

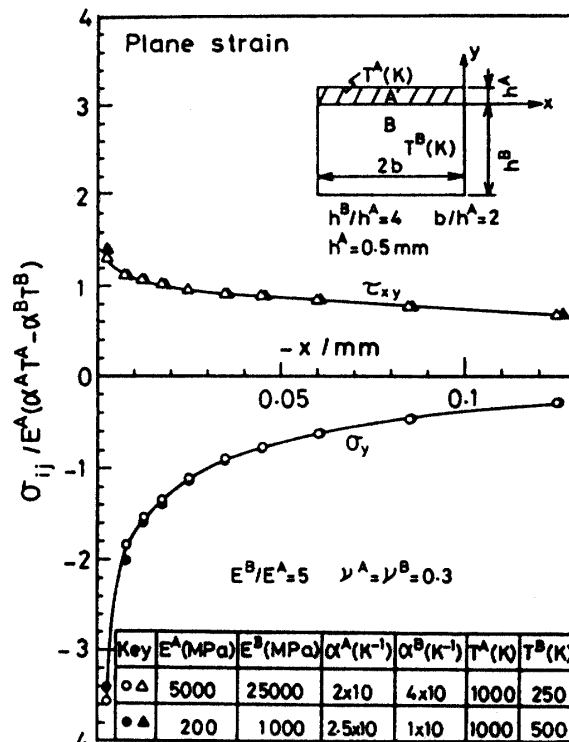
$$\sigma_{ij}/E^A(\alpha^A T^A - \alpha^B T^B) = j(E^B/E^A, \nu, x/h^A, y/h^A, h^B/h^A \text{ などの寸法のパラメータ})$$

4. 残留応力分布に及ぼす諸因子の影響

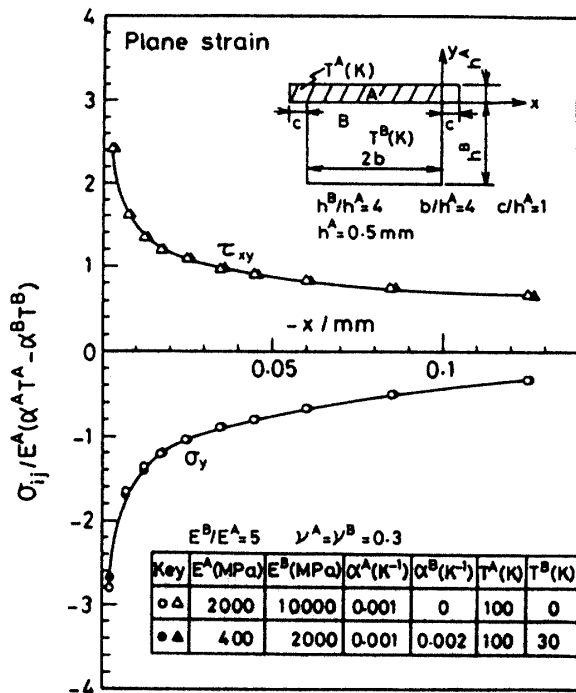
4.1 寸法のパラメータ

溶射部材の強度評価を行うためには, 強度に影響を与える可能性のある界面上の残留応力分布の特異性を再現した試験片で実験を行う必要がある。実際の溶射部材では, 一般に溶射皮膜の厚さに比べサブストレイトの板厚, 板長および板幅は十分に大きい。ここでは, 溶射部材のサブストレイトの板厚が溶射皮膜の厚さに比べて十分に大きい場合を対象として, 残留応力の特異性が一定となる試験片寸法について検討する。溶射皮膜の厚さ h^A を寸法の基準にとり, サブストレイトの厚さとの比 h^B/h^A が応力の特異性に及ぼす影響を調べる。タイプ1の応力分布では, 式(1)に示すように特異項の指数は1つであるため, タイプ2の応力分布よりも取扱やすい。そこで, 式(1)に示す応力拡大係数に及ぼす h^B/h^A の影響を数値解析により検討した。溶射皮膜の厚さ h^A を0.5 mm, 板幅の半幅 $b = 4h^A$, サブストレイトの温度変化 $T^B = 0$, 材料A, Bのポアソン比を0.3, ヤング率の比 $E^B/E^A = 2, 5, 10$ として計算した。応力拡大係数は, まず Fig. 2(a)によりヤング率の比 E^B/E^A から特異項の指数 $1-t$ を求め, 次に Fig. 3に示すような応力分布の $x = -0.0075$ mm での応力値が式(1)を満足するように求めた。Fig. 6より, h^B/h^A が4以上になると応力拡大係数が一定になっていることが分かる。従って, 実物の残留応力を再現するためには, サブストレイトの板厚は溶射皮膜の厚さの4倍以上であればよいことになる。

Fig. 7に, 板幅が応力拡大係数に及ぼす影響を示す。溶射皮膜の厚さ h^A を0.5 mmとし, $h^B/h^A = 5$, サブストレ



(a) Type 1



(b) Type 2

Fig. 5 Residual stress distributions arranged by parameters.

イトの温度変化 T^B を零, 材料A, Bのポアソン比を0.3, ヤング率の比 E^B/E^A を2, 5, 10として計算した。図より, 板の半幅 b が $4h^A$ 以上であれば, すなわち板幅 $2b$ が溶射皮膜の厚さの8倍以上であれば, 応力拡大係数に板幅は影響を与えないことになる。

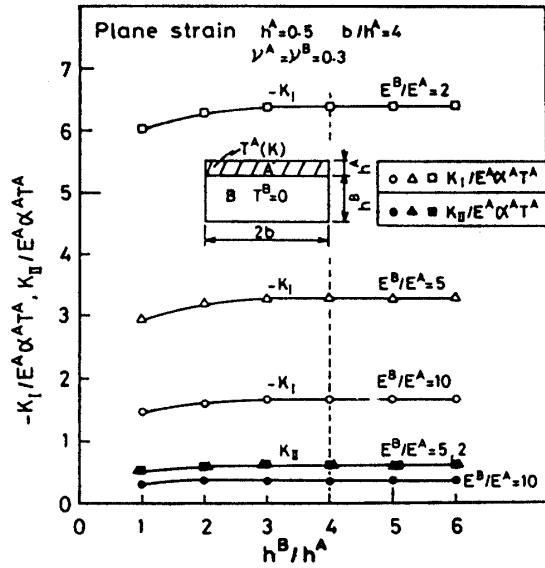


Fig. 6 Effect of thickness-parameter h^B/h^A on stress intensity factors.

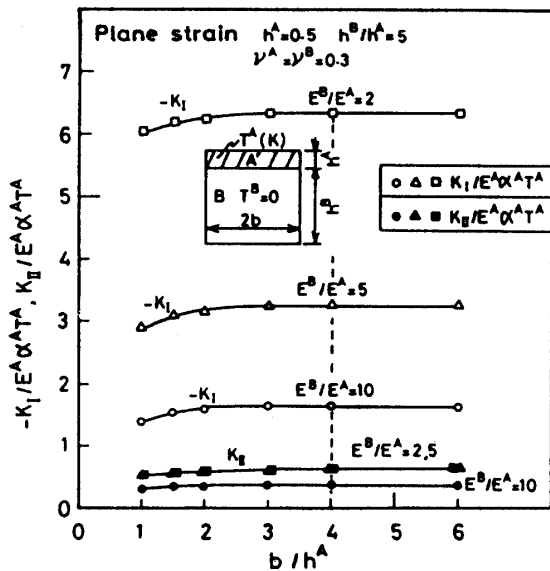


Fig. 7 Effect of width-parameter b/h^A on stress intensity factors.

Figs. 6, 7 より、残留応力分布の特異性が一定となる為の試験片寸法の条件は、板厚が溶射皮膜の厚さの4倍以上、板幅が8倍以上であることが分かる。

Fig. 8 は、タイプ2 についての残留応力の特異性を示している。 $h^B/h^A > 4$ 、 $2b/h^A > 8$ の条件で、残留応力分布が一定になっている。

溶射皮膜の厚さ h^A が残留応力分布に及ぼす影響は次のように考えられる。実際の溶射部材ではサブストレイトの板の寸法は十分に大きいため、 $h^B/h^A > 4$ 、 $2b/h^A > 8$ の条件を満足している。このとき、残留応力に影響を与える寸法は溶射皮膜の厚さのみになり、式(1)、(3)の応力拡大係数は材料のパラメータと寸法 h^A のみの関数となる。材料のパラメータのヤング率の比、ポアソン比の値が一定であれば、特異項の指数 $1-t$ は変化しないため、

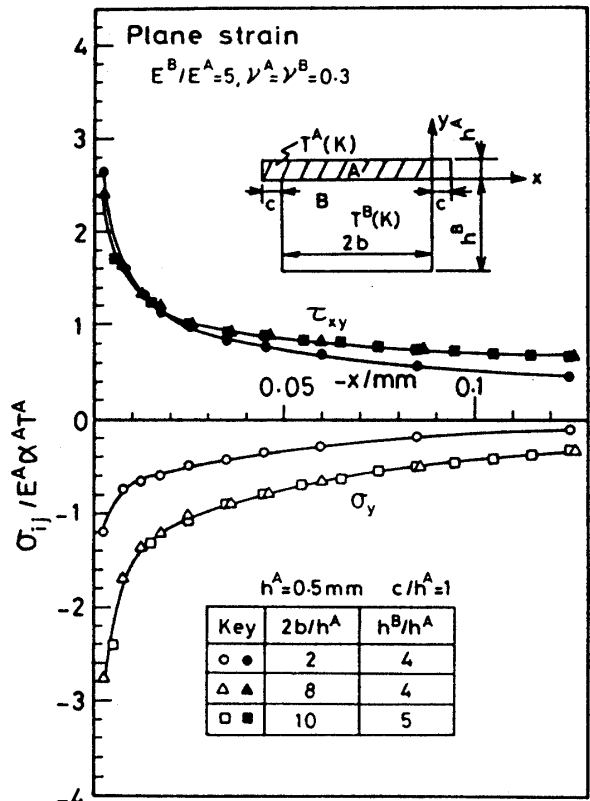


Fig. 8 Relationship among stress distribution, thickness-parameter h^B/h^A and width-parameter b/h^A .

残留応力分布の形は溶射皮膜の厚さの影響を受けず、絶対値のみ h^A の影響を受ける。タイプ1 では特異項は1つであるため、式(1)に示すように、基準となる溶射皮膜の厚さ h_1 ($h_1 = 0.5 \text{ mm}$ とすれば、Fig. 6 の結果が利用できる) と残留応力を求めたい溶射皮膜の厚さ h^A の比 h^A/h_1 を $1-t$ 乗すれば、残留応力値が式(1)より得られる。

タイプ2 では、式(3)より特異項が2つあるため、溶射皮膜厚さ h^A の溶射部材の残留応力を、基準の試験片の残留力値と溶射皮膜厚さから求めることは困難である。しかし、Figs. 4 (a), (b)に見られるように、原点近傍に現れる残留応力分布が特異項の指数の大きい $1-t_1$ に従う領域を取り扱う場合には、 h^A が残留応力に及ぼす影響は (h^A/h_1) の $(1-t_1)$ 乗で取り扱える。さらに、Fig. 2 (b)より、 $1-t_1 \approx 0.5$ を利用すれば、 $(h^A/h_1)^{1/2}$ で溶射皮膜の厚さが残留応力に及ぼす影響を大略に評価できる。

4.2 材料のパラメータ

材料のパラメータであるヤング率の比、ポアソン比が残留応力に及ぼす影響を検討する。溶射部材では、溶射皮膜のヤング率 E^A がサブストレイトのヤング率 E^B より小さい場合が多いため⁵⁾、 E^B/E^A が1より大きい場合について、残留応力に及ぼすヤング率の比の影響を Fig. 9 に示す。溶射皮膜の厚さ $h^A = 0.5 \text{ mm}$ 、サブストレイトのポアソン比 $\nu^B = 0.3$ 、サブストレイトの板幅、板厚が残留応力に影響しない条件 $b/h^A = 4$ 、 $h^B/h^A = 4$ 、サブストレイトの温度変化 $T^B = 0(K)$ として残留応力を数値解析した。図中の実線は溶射皮膜のポアソン比 $\nu^A = 0.3$ の計算結果である○、●印を通る曲線である。また $\nu^A = 0.2$ の計

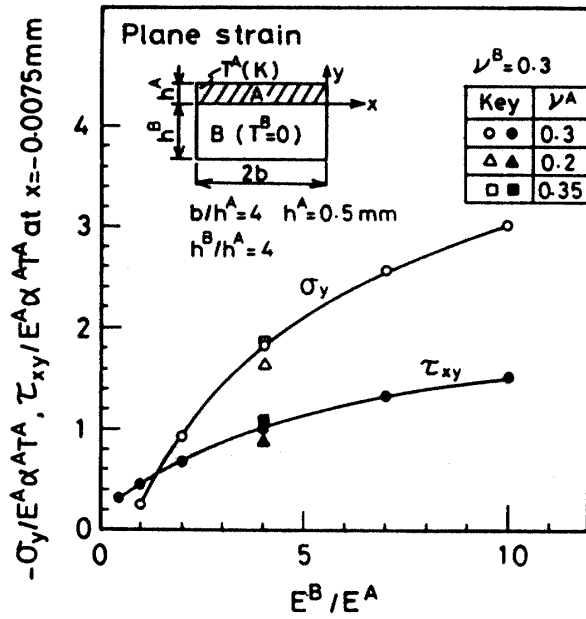


Fig. 9 Effect of Young's modulus and Poisson's ratio on residual stress.

算結果を△, ▲印で, $\nu^A=0.35$ の計算結果を□, ■印で示す. 縦軸は, 界面上の点で残留応力の特異性を十分に示す $x=-0.0075$ mmでの応力値である. 図より, ヤング率の比が大きくなると応力の絶対値が大きくなっていることが分かる. $E^B/E^A=4$ において, 垂直応力 σ_y の○, △, □の比較および, せん断応力 τ_{xy} の●, ▲, ■の比較より, ポアソン比 ν^A は残留応力値に少し影響を与えていることが分かる.

4.3 温度変化のパラメータ

溶射部材の付着強度を増加させるために, サブストレイトをプラズマ炎により予熱してから, 溶射が行われることが多い. そこで, サブストレイトの温度変化 T^B と溶射皮膜の温度変化 T^A の比である温度変化のパラメータ T^B/T^A が残留応力に及ぼす影響を検討した. 溶射皮膜の厚さ $h^A=0.5$ mm, サブストレイトの寸法が残留応力値に影響しない条件 $h^B/h^A=4$, $b/h^A=4$ を用い, 材料のパラメータを $\alpha^B/\alpha^A=2$, $\nu^A=\nu^B=0.3$, ヤング率の比 E^B/E^A を2と4に変化させて, 数値解析した結果を Fig. 10に示す. 縦軸は, 界面上の点で残留応力の特異性を十分に示す $x=-0.0075$ mmでの応力値である. 図より, 応力値は温度変化のパラメータの値により正負に大きく変化しており, しかも応力の変化は直線上に載っている. ところで, 残留応力が生じなくなる予熱温度上昇は3章の考察より, 材料A, Bの温度変化によるクイチガイ $\alpha^A T^A - \alpha^B T^B$ が零になる温度変化 $T^B/T^A = \alpha^A/\alpha^B$ である. Fig. 10の計算条件では, $T^B/T^A = \alpha^A/\alpha^B = 0.5$ となる. 図では $T^B/T^A \approx 0.45$ で残留応力 σ_y が零になり, τ_{xy} は $T^B/T^A = 0.5$ で零になっている. クイチガイが零になる温度で応力 σ_y がある値を持っている原因として, 次のことが考えられる. 数値解析は平面ひずみ条件で行っているために z の方向のひずみが強制的に零にされたため, この効果が σ_y を生じたと考えられる. 平面応力条件でこの点を検討したところ, クイチガイが零になる温度変化で残留応力が発生しなかった. また, 実際に溶射部材を作成すると

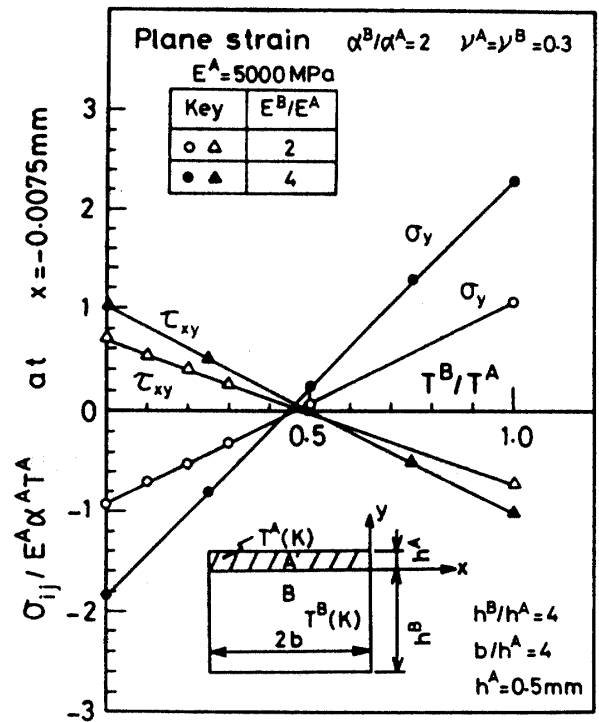


Fig. 10 Effect of temperature-parameter T^B/T^A on residual stress.

きには, 強制変位を与えることはほとんどないため, クイチガイが零になる温度変化が, 残留応力が零になる温度変化となるものと考えられる. 計算を弾性論で行っているため少し問題があるが, 残留応力を生じさせなくなるサブストレイトの予熱温度変化 T^B はクイチガイが零になる温度変化 $T^A \cdot \alpha^A/\alpha^B$ で与えられる.

5. 結 論

本論文で得られた結論を要約すると以下のようになる.

- 1) 溶射部材の界面上に生じる残留応力分布の特異性を明らかにした. そして1つの応力拡大係数のみでは残留応力を評価できないため, 強度評価のパラメータとして応力拡大係数を用いることに問題があることを指摘した.
- 2) 溶射皮膜とサブストレイトのポアソン比が等しいときには, 残留応力 σ_{ij} は次の形で材料のパラメータ, 寸法のパラメータの関数となる.

$$\sigma_{ij}/E^A(\alpha^A T^A - \alpha^B T^B) = j$$
 (材料のパラメータ $E^B/E^A, \nu$; 位置のパラメータ $x/h^A, y/h^A$; 寸法のパラメータ $h^B/h^A, b/h^A$ など)
- 3) 溶射部材のサブストレイトの板厚が溶射皮膜の厚さに比べて十分に大きい場合を対象としたとき, 溶射部材の強度評価に用いる試験片に生じる残留応力値を実際の溶射部材の残留応力値と一致させるためには, 次の条件を満足すればよい.
 試験片の板厚は溶射皮膜の厚さ h^A の4倍以上, 板長, 板幅は h^A の8倍以上であること.
- 4) 溶射部材に生じる残留応力を零にするためには, サブストレイトの予熱温度変化 T^B をクイチガイが生じ

なくなる温度変化 $T^A \cdot \alpha^A / \alpha^B$ にすればよい。

参考文献

- 1) 蓮井：溶接工学，養賢堂，1969
- 2) 岡根，福本，上山：漸変溶射皮膜の耐熱衝撃性に及ぼす皮膜積層形態の影響，溶接学会論文集，6-4 (1988)，514-519
- 3) 蒲地，速水，谷，石田：溶射部材の応力測定による研究，日本溶射協会誌，21 (1984)，779
- 4) S. Kuroda, T. Fukushima, S. Kitahara: SIMULTANEOUS MEASUREMENT OF COATING THICKNESS AND DEPOSITION STRESS DURING THERMAL SPRAYING, Thin Solid Films, 164 (1988), p. 157
- 5) 納富，児玉，小野，井上，川原，谷：プラズマ溶射皮膜の残留応力測定に関する研究，溶接学会論文集，6-3 (1988)，341-347
- 6) 蓮井，北原：プラズマジェット溶射皮膜における残留応力について，金属材料技術研究所報告，11-1 (1968)，79-88
- 7) 溶射ハンドブック，日本溶射協会編，p. 586
- 8) 寺崎，瀬尾，平居：残留応力の整理パラメータ，溶接学会論文集，5-4 (1987)，533-537
- 9) 寺崎，秋山，瀬尾，平居：異種材料の界面接合部に生ずる残留応力について (第3報)，溶接学会論文集，8-4 (1990)，487-492
- 10) A.K. Rao: Stress Concentrations and Singularities at Interface Corners, ZAMM51 (1971), p. 395

局部予熱における冷却時間 $t_{8/5}$ と熱因子の予測式の検討*

寺崎 俊夫**，石本 憲司***

Estimation of the Cooling Time $t_{8/5}$ and Thermal Factor of Weldments with Local Preheating*

by Toshio Terasaki** and Kenji Ishimoto***

Preheating is performed to prevent cold cracking in steel constructions. Preheating produces a good effect on cooling times, which are $t_{8/5}$ (cooling time from 800°C to 500°C) related to the maximum hardness at HAZ, or which are t_{200} , t_{150} , t_{100} (t_θ : cooling time from the solidification to θ) connected with the thermal factor. In the welding field, a whole member can not be preheated uniformly, and then local preheating near the weld line is generally performed.

This report deals with local preheating and welding procedures of a butt joint and a corner joint. Predicted values of cooling times have been compared with the experimental data. The predicted values have been obtained by theoretical formulae. The results are summarized as follows:

- (1) Relation between cooling time and thermal factor, $(\sum D \cdot \Delta t)_{100}$ has been investigated. The thermal factor is correlated most closely with cooling time t_{150} .
- (2) The predicted values of cooling time $t_{8/5}$ and thermal factor $(\sum D \cdot \Delta t)_{100}$ have given good agreement with the experimental values.

Key Words: Local preheating; Butt joint; Corner joint; Cooling time from 800°C to 500°C; Cooling time from solidification to 200, 150, 100°C

1. 緒 言

鋼構造物を溶接した場合には溶接部に低温割れが生じることがある。低温割れの3大因子として拡散性水素濃度，じん性値としての硬化組織及び拘束応力が挙げられ，主な割れ防止対策として低水素系溶材の使用，炭素当量の低い鋼材の使用，拘束応力が小さくなるような継手設計の採用及び予熱施工などがある。これらの中で予熱施工は溶接後の熱サイクルに影響を与え，熱影響部(HAZ)の硬さに関連した800°Cから500°Cまでの冷却時間 $t_{8/5}$ ^(1,2) や熱因子に関連した凝固から200°C, 150°Cあるいは100°Cまでの冷却時間 t_{200} , t_{150} , t_{100} ^(1,2) が長くなるため^(2,3)，実

用的でかつ効果的な割れ防止方法として広く用いられている。構造物を予熱する場合，構造物全体を予熱することはまれで，溶接線の両側の領域を予熱して溶接線を目的の温度にする局部予熱方法が広く採用されている。

局部予熱した後に溶接する場合の溶接部の冷却過程は，溶接による冷却過程と局部予熱による冷却過程との重畳とみなすことができる。佐藤^(4,5)は局部予熱した後に溶接を行う場合を検討し，入熱，板厚，溶接長，加熱幅，予熱温度及び加熱速度と t_{100} の関係を解析した。百合岡⁽⁶⁾，稲垣⁽⁷⁾は t_{100} と各施工因子との関係を実施工に使用しやすいようにグラフやノモグラフで示した。以上の研究では前報⁽⁸⁾でも指摘したが，溶接線を含んだ矩形領域を局部加熱しており，実施工で用いられるような，溶接線から離れた(例えば50 mm)矩形領域を局部加熱する場合を取り扱っていない。また，局部予熱した後の溶接冷却時間の推定を主に取り扱っており，実継手を模擬した継手の測定値と推定値を比較検討していない。一方，熱因子と局部予熱した後の溶接冷却時間との関連性を調べた報告はないようである。

*原稿受付 平成2年12月21日 平成2年8月溶接冶金研究委員会で発表

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

***正 員 日本鉄塔工業(株) Member, Japan Steel Tower Co., Ltd.