

固有ひずみを用いた弾性計算による溶接変形および 残留応力の推定

——(第1報)溶接における固有ひずみの生成機構——

正員 村 川 英 一* 正員 羅 宇**
正員 上 田 幸 雄***

Prediction of Welding Deformation and Residual Stress by Elastic FEM Based on Inherent Strain
——(First Report) Mechanism of Inherent Strain Production——

by Hidekazu Murakawa, *Member* Yu Luo, *Member*
Yukio Ueda, *Member*

Summary

The welding residual stress and the distortion are considered to be produced by the inherent strain. The plastic strain in a bead welding computed through the thermal-elastic-plastic analysis is an ideal example of the inherent strain, since there is no groove which may introduce additional mismatch. Such inherent strain produced in the welding process is primarily determined by the highest temperature reached and the constraint at each point. Thus, the mechanical phenomena in the bead welding process are closely analyzed by the thermal-elastic-plastic FEM and the mechanism in which the inherent strain is produced is clarified from the aspect of the highest temperature reached and the constraint. Further, based on the knowledge obtained through the study, a simple formula to calculate the inherent strain distribution is proposed. Using the inherent strain given by the formula, the welding residual stress and the distortion can be predicted by elastic FEM analysis.

1. 結 言

近年における計算機の高性能化により、かなり現実に近い溶接問題を熱弾塑性理論に基づくFEM^{1),2)}を用いて詳細に解析することが可能となりつつある。しかし、船舶のように大型で複雑な構造物の建造過程を、非線形問題として忠実にFEM解析することは、まだ現実的には不可能に近く、溶接変形や残留応力を推定し、工作法の改善や、種々の強度評価という工学的目的を果すためには、より簡便な方法の開発が望まれる。一般に、溶接や切断、板曲げなどの熱加工における残留応力および変形については、概念的に固有ひずみが両者の原因と考えることができる^{3)~6)}。し

たがって、与えられた加工条件に対して固有ひずみの大きさと分布が予め分っておれば、弾性のFEM解析により残留応力と変形が推定できる。この時に問題となるのが、固有ひずみの決定法である。

本論文では、ビード溶接を対象に2次元および3次元熱弾塑性解析を実施し、固有ひずみに対応する残留塑性ひずみの生成機構および分布を明らかにするとともに、固有ひずみの生成において最高到達温度と拘束の強さが主要支配因子であることに注目し、現象の整理を行った。さらに、そこで得られた知見に基づき、固有ひずみを決定するための簡潔な手法を提案し、その有効性を3次元熱弾塑性解析の結果および公表されている実験結果との比較を通して検証した。

2. 固有ひずみに基づく変形と残留応力の推定法

残留応力に対応する弾性ひずみを ϵ_{ij}^e 、これ以外の、塑性ひずみ、クリープひずみ、変態ひずみなどから構成される直接応力に関係ないひずみ、すなわち固有ひずみを ϵ_{ij}^* とすると、変形に対応したひずみ ϵ_{ij} は、弾性ひずみ ϵ_{ij}^e と固

* 大阪大学接合科学研究所

** 大阪大学工学研究科

*** 近畿大学生物理工学研究科

原稿受理 平成8年7月10日

秋季講演会において講演 平成8年11月14,15日

有ひずみ ϵ_{ij}^* の和で表される。すなわち、

$$\epsilon_{ij} = \epsilon_{ij}^e + \epsilon_{ij}^* \quad (1)$$

これを、固有ひずみを中心に置いて

$$\epsilon_{ij}^* = \epsilon_{ij} - \epsilon_{ij}^e \quad (2)$$

と書き改めると、固有ひずみ (ϵ_{ij}^*) が、変形 (ϵ_{ij}) と残留応力 (ϵ_{ij}^e) の原因であると解釈することができる。理論的には、このような固有ひずみを有する構造物の変形 u_i および残留応力 σ_{ij} は、次の方程式を、適切な境界条件の下に解くことにより得られる。

[変位-ひずみ関係]

$$\epsilon_{ij} = 1/2 \{u_{i,j} + u_{j,i}\} \quad (3)$$

[応力-ひずみ関係]

$$\sigma_{ij} = 2\mu\epsilon_{ij}^e + \lambda\delta_{ij}\epsilon_{kk}^e \quad (4)$$

$$= 2\mu\epsilon_{ij} + \lambda\delta_{ij}\epsilon_{kk} - 2\mu\epsilon_{ij}^* - \lambda\delta_{ij}\epsilon_{kk}^*$$

ここで、 λ および μ はラーメの定数であり、 δ_{ij} はクロネッカーのデルタを表す。

[釣り合い方程式]

$$\sigma_{ij,i} = 0 \quad (5)$$

従って、何らかの方法により、固有ひずみの分布と大きさ $\{\epsilon_{ij}^*(x, y, z)\}$ が分れば、変形と残留応力は、有限要素法などを用いて計算することができる。

3. 溶接における固有ひずみの生成機構

固有ひずみとは、変形と残留応力を生じさせる原因として理解することができ、その単純な例は、塑性加工における塑性ひずみであり、無応力の初期状態を基準とした塑性ひずみは、固有ひずみそのものである。すなわち、この塑性ひずみにより、変形と残留応力が生じる。また、線状加熱や溶接などにおいては、加熱による熱膨張が周辺の剛性が大きい低温部からの拘束を受け塑性ひずみが生じ、冷却後、熱ひずみは消滅するが、塑性ひずみはそのまま残り、残留変形および残留応力の原因になる。

溶接における固有ひずみの生成機構を検討するために、まず、単純な例としてバネで拘束された棒のモデルについて検討する。

3.1 熱履歴を受けるバネで拘束された棒

Fig. 1 は、バネで拘束された棒が、室温 $\rightarrow T_{\max} \rightarrow$ 室温の熱履歴を受けるという単純なモデルを示す。ここで、バネの相対的強さを表す拘束パラメータ β を導入し、次式で定義す

る。

$$\beta = k^*/(k + k^*) \quad (6)$$

$k = aE/l$: 棒の剛性

k^* : バネの剛性

a : 棒の断面積

E : ヤング率

l : 棒の長さ

バネで拘束された棒が、熱履歴を受けた時の応力・温度曲線を、大きさが異なる四つの最高到達温度 $T_{\max}$ について示したものが Fig. 2 である。バネで拘束された棒が弾性挙動する場合には、応力 σ 、温度 T 、拘束パラメータ β の間に次の関係が成り立つ。

$$\sigma = -\beta\alpha TE \quad (7)$$

ここで、 α は線膨張係数である。一方、材料の降伏応力を σ_Y とすると、加熱過程において最大熱応力が圧縮の降伏応力に丁度一致する加熱温度 T_1 は次式で与えられる。

$$T_1 = \sigma_Y / \beta\alpha E \quad (8)$$

特に、棒が完全拘束されている場合 ($\beta=1$) においては、 T_1 は、材料定数のみで定義され、これを T_Y とすると、

$$T_Y = \sigma_Y / \alpha E \quad (9)$$

ここで、材料定数が温度に依存せず、一定であれば、 T_Y は定数となる。

さらに、冷却段階においても、応力が丁度、引張の降伏応力に達する場合の加熱温度を T_2 と表し、次式で定義する。

$$T_2 = 2T_1 \quad (10)$$

Fig. 2 から明らかなように、棒の挙動は、塑性変形の立場から次のように分類される。

(1) $T_{\max} < T_1$

図中の O-A-O のサイクルが示すように最高到達温度が低い場合には、加熱終了時の熱応力は降伏応力よりも低く、熱履歴による塑性変形は生じない。

(2) $T_1 < T_{\max} < T_2$

O-B-C-D のサイクルが示すように最高到達温度が中程度の場合には、加熱過程において熱応力は降伏応力に達し、塑性変形が B-C の間に生じる。しかし、冷却過程は

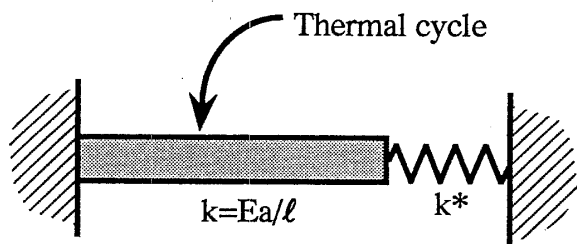


Fig. 1 Bar model with elastic constraint.

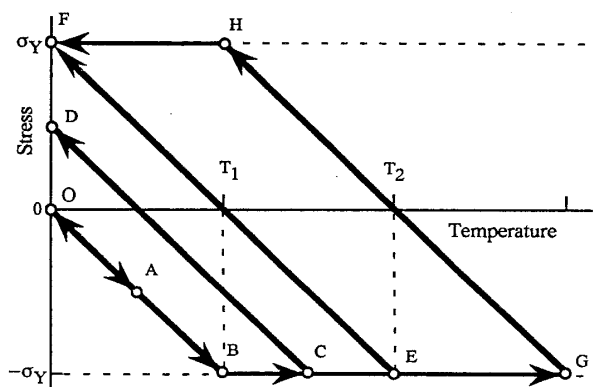


Fig. 2 History of stress under thermal cycle.

弾性的で塑性変形は生じない。

(3) $T_2 < T_{\max}$

O-B-G-H-F のサイクルが示すように最高到達温度が高い場合には、加熱過程のみならず冷却過程においても、塑性変形が生じる。

3.2 熱履歴を受ける3次元拘束モデル

3.2.1 3次元拘束モデル

前節では1次元応力状態である単純な棒のモデルを例に、熱履歴の下での塑性ひずみ生成の機構を概念的に説明し、固有ひずみ生成の主要因子は、最高到達温度と拘束の強さであることを示した。しかし、現実の溶接継手における力学現象は3次元現象であり、拘束も3次的である。そこで、この節では、Fig. 3 に示されるような、一辺の長さが s である微小な立方体が、 x, y, z の3方向に剛性が k^*_x, k^*_y, k^*_z のバネで拘束されているというモデルを想定し、これが熱履歴を受ける際に生じる固有ひずみに対する最高到達温度および拘束の影響について検討する。なお、棒のモデルと同様、 x, y, z の3方向に対する拘束パラメータ $\beta_x, \beta_y, \beta_z$ を次式に従って定義する。

$$\beta_i = k^*_i / (k + k^*_i) \quad (i = x, y, z) \quad (11)$$

ここで、

$k = Es$: 立方体の剛性

s : 立方体の一辺の長さ

k^*_i : i 方向のバネの剛性

一般に、ヤング率や降伏応力は温度依存性を示し、温度の変化とともに値が変わる。このような温度依存性の影響を考慮するため、ヤング率と降伏応力について Fig. 4 に示されるような3種類のモデルを想定した。material-3 は、現実の状態に対応しており、ヤング率と降伏応力の両者が温度依存性を示す場合である。これに対して、material-1 は、両者がともに温度依存性を示さない場合であり、material-2 は、降伏応力のみが温度依存性を示す。なお、線膨張係数などの物理定数は、いずれの場合においても温度依存性を考慮し、Fig. 5 に示される値を用いた。同図において、 c : 比熱、 ρ : 密度、 λ : 熱伝導率、 γ : 熱伝達率である。また、前述の拘束パラメータ $\beta_x, \beta_y, \beta_z$ は、室温での値を用いて定義され、定数である。

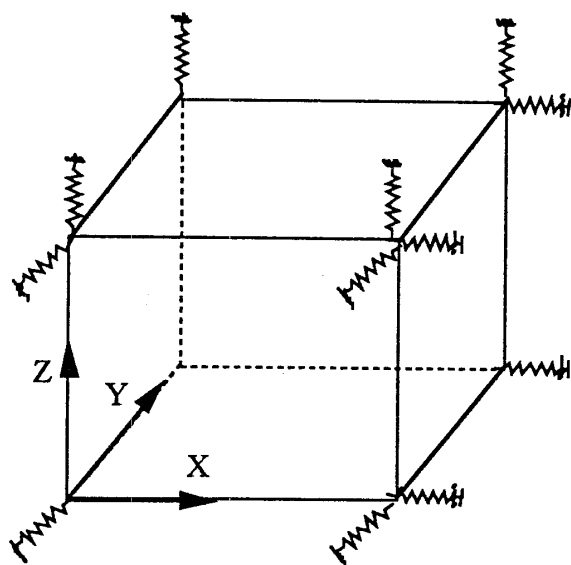


Fig. 3 Three dimensional constraint model.

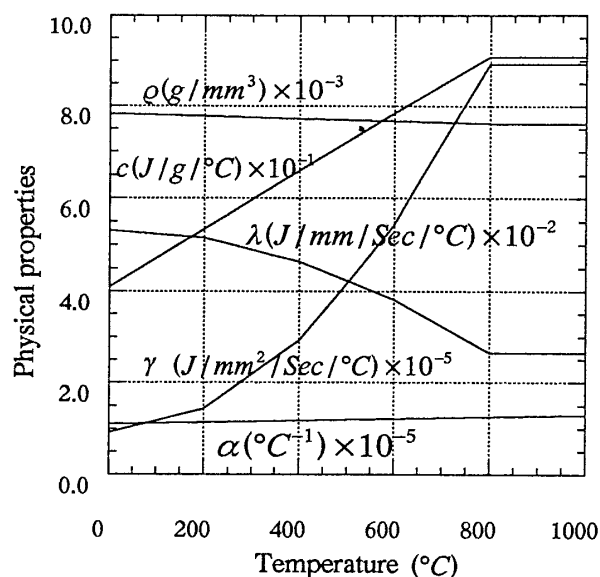


Fig. 5 Temperature dependent thermal and physical constants.

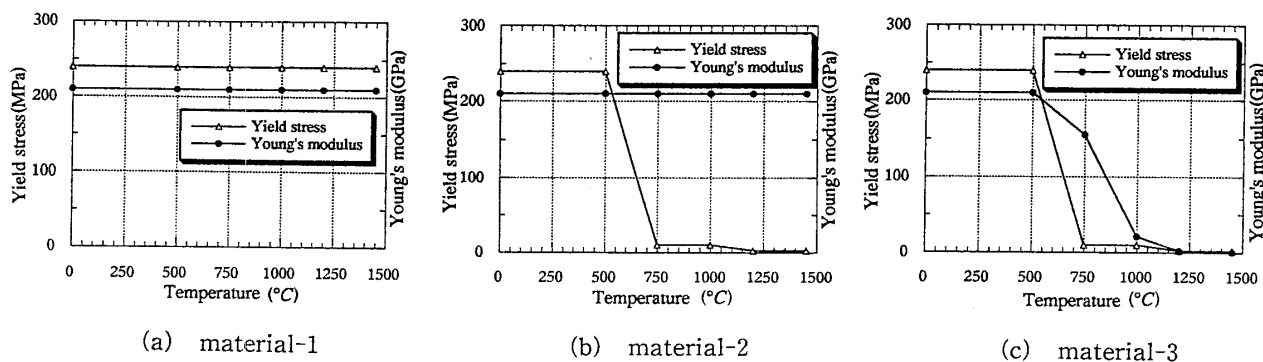


Fig. 4 Temperature dependent mechanical properties.

ここで現実の溶接継手を考えると、固有ひずみ生成の支配要因である溶接時の最高到達温度および拘束の強さは、位置によって異なる。これら二者のうち、与えられた溶接条件と継手形状・寸法に対して工学的に十分な精度で最高到達温度を予測することはそれ程困難なことではない。一方、拘束については系統的な検討を詳細に行ったという報告は見あたらない。そこで、有限要素法を用いて Fig. 3 で示された3次元的に弾性拘束されたモデルの挙動を熱弾塑性解析し、固有ひずみ生成機構の解明を試みた。

3.2.2 最高到達温度と残留応力の関係

溶接と対応づけるという意味で、 x 方向を溶接線方向、 y, z 方向を溶接線に垂直な板幅方向および板厚方向とすると、4.7 節で示すように溶接線方向の拘束は完全拘束に近く、 $\beta_x \approx 1.0$ であり、板厚方向の拘束は非常に小さく、 $\beta_z = 0$ とみなすことができる。そこで、material-1 について、 $\beta_y = 0$ 、 $\beta_z = 0$ の場合を例に、最高到達温度 $T_{\max}$ と溶接線方向の残留応力成分 σ_x の関係を検討し、図示したものが Fig. 6 である。なお、 $\beta_y = 0$ 、 $\beta_z = 0$ の場合は一軸応力状態となり、前述の棒のモデルに対応する。例えば、 $\beta_x = 0.2$ の場合に注目すると、最高到達温度が $T_{1x} = 500^\circ\text{C}$ 以下の場合には、残留応力は生じない。また、温度が $T_{2x} = 1,000^\circ\text{C}$ 以上の場合には、残留応力は降伏応力に等しく最高到達温度に関係無く一定であり、残留応力が最高到達温度に依存するのは、 $T_{1x} < T_{\max} < T_{2x}$ の領域のみである。一方、拘束パラメータ β_x に注目すると、式(8)、(10)に示されたように、拘束が小さくなるに従い現象を区分する温度 T_{1x} 、 T_{2x} は高くなる。

3.2.3 固有ひずみに対する最高到達温度および拘束の影響

同様な計算を実施し、溶接線に直角方向の拘束状態が、自由 ($\beta_y = 0$) および完全拘束 ($\beta_y = 1$) の場合について、溶接線方向の拘束と最高到達温度が溶接線方向の固有ひずみに及ぼす影響を検討したものが Fig. 7 である。Fig. 6 に

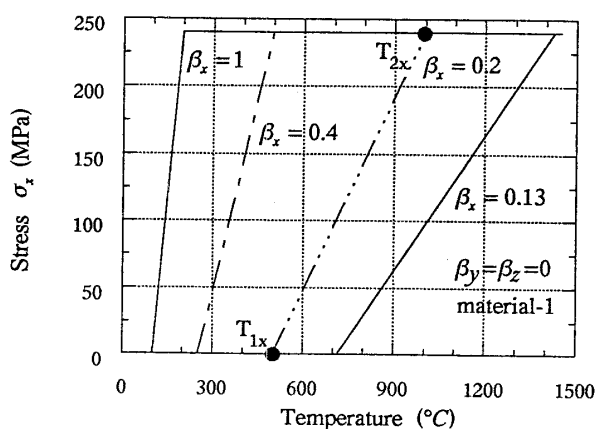


Fig. 6 Relation between residual stress and maximum temperature ($\beta_y = \beta_z = 0$, material-1).

ついて見られたのと同様に、曲線は三領域に分けられ、 $\beta_y = 0$ の場合では、それぞれの領域における固有ひずみの値は次式で与えられる。

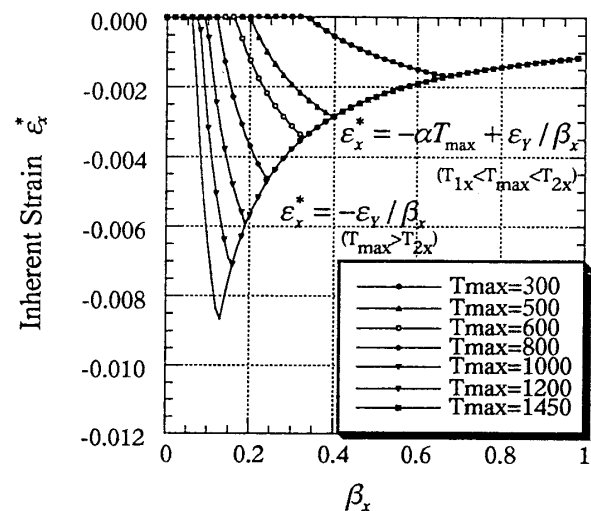
$$\begin{aligned} \varepsilon_x^* &= 0 & T_{1x} > T_{\max} \\ \varepsilon_x^* &= -\alpha T_{\max} + \varepsilon_y / \beta_x & T_{1x} < T_{\max} < T_{2x} \\ \varepsilon_x^* &= -\varepsilon_y / \beta_x & T_{\max} > T_{2x} \end{aligned} \quad (12)$$

ただし、

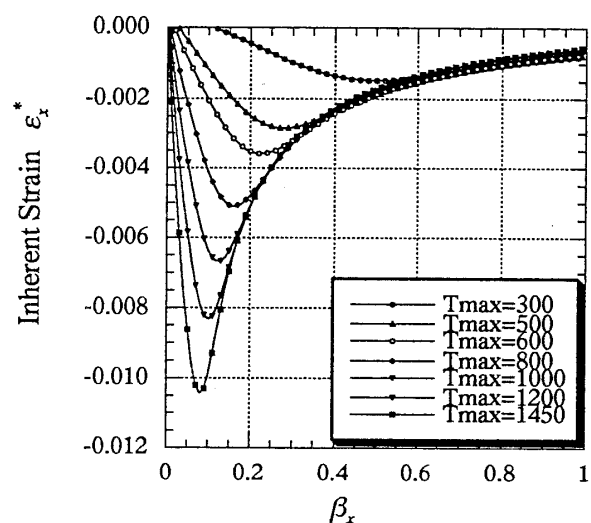
$$\varepsilon_y = \sigma_y / E$$

$$T_{1x} = \sigma_y / E \alpha \beta_{1x}, \quad T_{2x} = 2 T_{1x}$$

この結果より、最高到達温度が固有ひずみ ε_x^* に影響を及ぼす領域は $T_{1x} < T_{\max} < T_{2x}$ の範囲、あるいは、拘束パラメータで表すと、 $\beta_{2x} < \beta_x < \beta_{1x}$ の範囲であることが分る。また、 $\beta_y = 0$ および $\beta_y = 1$ の場合を比較すると、溶接線に対して直角方向の拘束 β_y が、溶接線方向の固有ひずみ ε_x^* に与える影響が定量的な差として認められるが、現実の溶



(a) ($\beta_y = 0$, $\beta_z = 0$)



(b) ($\beta_y = 1$, $\beta_z = 0$)

Fig. 7 Effect of maximum temperature and constraint on inherent strain in welding direction.

接継手では、板幅方向の拘束は非常に小さく、 $\beta_y \ll 1$ であるので、 β_y が ϵ_x^* に与える影響は小さいことが予想される。

また、最高到達温度が同じ場合において、拘束の強さと固有ひずみの値の関係に注目すると、拘束が比較的小さい領域で固有ひずみの絶対値が最大になる点があり、拘束の増加とともに絶対値が減少し、拘束パラメータの値が最大の 1.0 では、固有ひずみの値は、降伏ひずみに等しい。従って、拘束が強く、パラメータの値が 1.0 に近い溶接線方向では、固有ひずみの絶対値が小さく、拘束が小さい板幅方向ではその値が大きいと予想される。

さらに詳細な検討を行うため、 $\beta_y = 0.01$, $\beta_z = 0$ (ビード溶接を想定した値) の場合について、溶接線方向の固有ひずみ ϵ_x^* および溶接線に直角な方向の固有ひずみ ϵ_y^* と最高到達温度の関係を検討した図が、Fig. 8, 9 である。なお、材料は温度依存性を示すと仮定し、material-3 について計算を行った。Fig. 8 に示された溶接線方向の固有ひず

み ϵ_x^* に注目すると、式(12)が示すように、温度が T_{2x} 以上の場合に相当する高温領域では、固有ひずみの値は、拘束パラメータ β_x により定まり、最高到達温度にあまり依存しない。これに対して、溶接線に直角な方向の固有ひずみ ϵ_y^* は逆の傾向を示し、拘束パラメータ β_x にはほとんど依存せず、最高到達温度に強く依存している。さらに、詳細に見ると、降伏応力が非常に小さくなる力学的溶融温度である 750°C 以下においては ϵ_y^* がほぼゼロであり、力学的溶融温度を越えると、温度上昇にともなって固有ひずみの絶対値が大きくなる。このような特徴は、溶接部における固有ひずみの分布特性を理解する上で非常に参考になる。

3.2.4 材料定数の影響

ヤング率および降伏応力の温度依存性が固有ひずみ ϵ_x^* に与える影響を $\beta_y = \beta_z = 0$ の場合について検討した。Fig. 10, 11, 12 は、最高到達温度が 600°C, 800°C, 1200°C

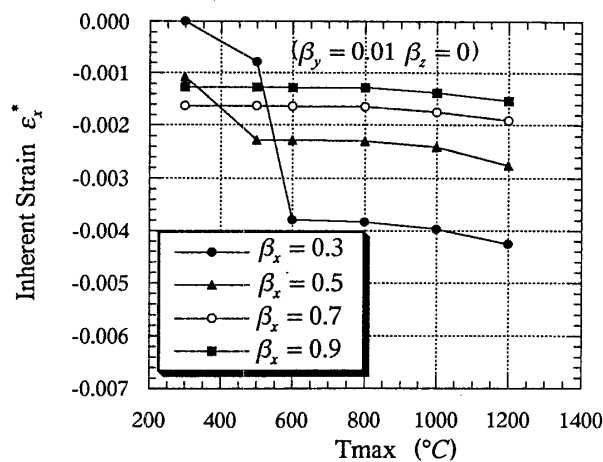


Fig. 8 Relation between maximum temperature and inherent strain in welding direction ($\beta_y = 0.01$, $\beta_z = 0$).

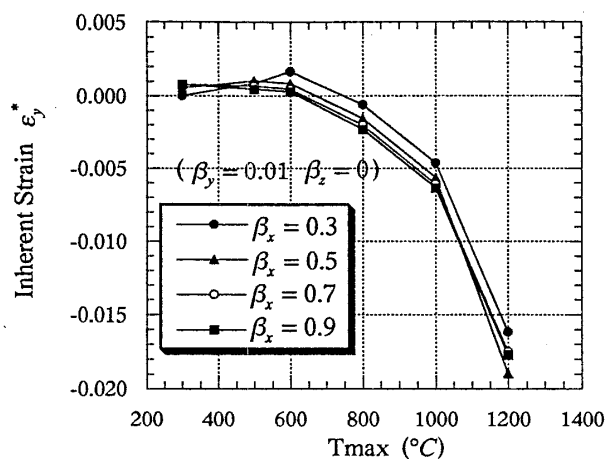


Fig. 9 Relation between maximum temperature and inherent strain in transverse direction ($\beta_y = 0.01$, $\beta_z = 0$).

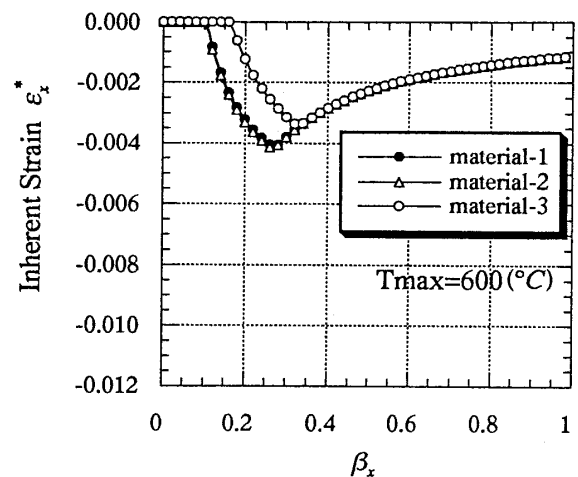


Fig. 10 Relation between β_x and ϵ_x^* for three materials at 600°C.

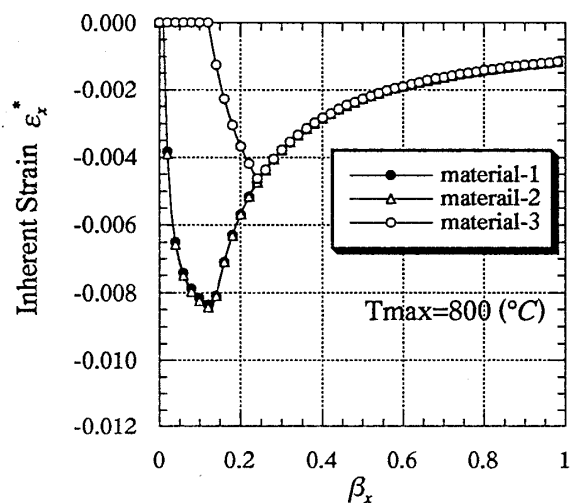


Fig. 11 Relation between β_x and ϵ_x^* for three materials at 800°C.

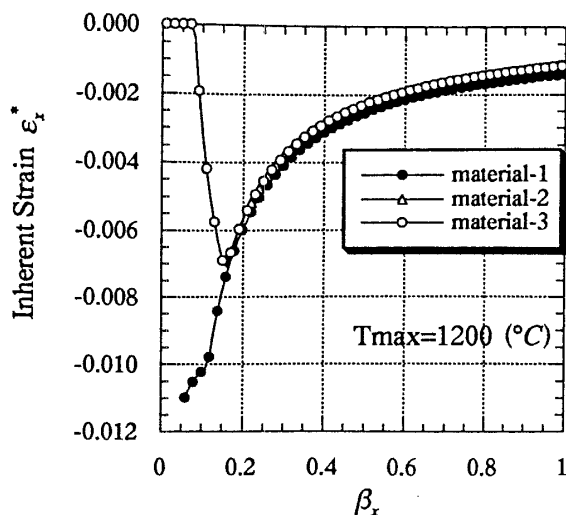


Fig. 12 Relation between β_x and ϵ_x^* for three materials at 1, 200°C.

の場合について、material-1, -2, -3 を比較したものである。最高到達温度が 600°C の場合に注目すると、拘束パラメータ β_x が、0.1~0.3 の領域において材料定数の温度依存性の影響が顕著に現れ、このような領域は、最高到達温度が上昇するのに従って拘束パラメータ β_x が小さい方向に移動する。なお、前述のように、溶接線方向の拘束はほぼ $\beta_x=1.0$ であるから、 ϵ_x^* については材料定数の温度依存性は考慮する必要が無いことが分る。しかし、溶接線に直角な方向では拘束が非常に小さいので、温度依存性の影響が現れると予想されるが、この点についての詳細な検討は、今後の課題とした。

4. 固有ひずみを用いた溶接変形および残留応力の計算例

4.1 平面ひずみモデル

ここではビード溶接の問題を、平面ひずみ問題および 3 次元問題として FEM を用いて熱弾塑性解析し、溶接が完了して完全に冷却した状態における詳細な塑性ひずみ分布を明らかにする。さらに、棒および 3 次元拘束モデルについて得られた固有ひずみの生成に関する特徴との対応関係を検討し、ビード溶接における固有ひずみ分布を入熱条件と継手の寸法のみから推定するための具体的方法を示す。有限要素法による解析の対象は Fig. 13 に示されている、板厚：16 mm、半幅：200 mm、長さ：200 mm の板に、ビード溶接を施すという問題であり、単位長さ当たりの入熱量 Q が異なる 4 ケース、すなわち、

case(1) : $Q=533$ J/mm, ($Q^*=5.0$)

case(2) : $Q=800$ J/mm, ($Q^*=7.5$)

case(3) : $Q=1067$ J/mm, ($Q^*=10.0$)

case(4) : $Q=1333$ J/mm, ($Q^*=12.5$)

について、平面ひずみ問題あるいは 3 次元問題として解析

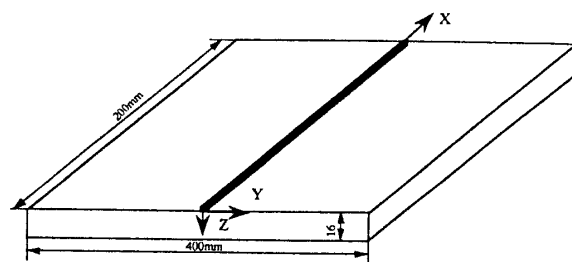
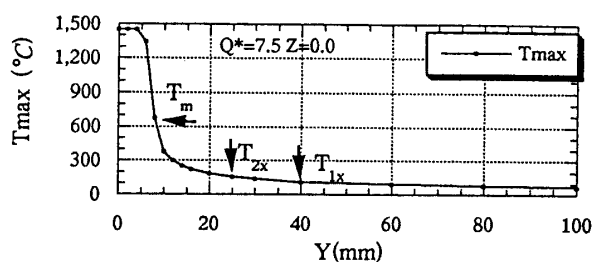
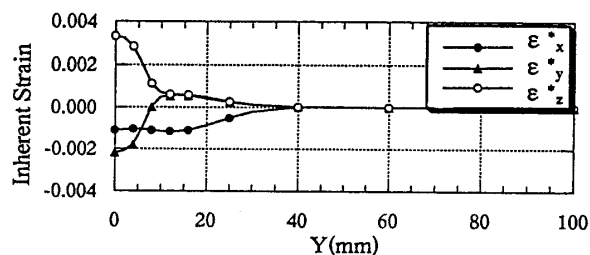


Fig. 13 Bead welding model.



(a) Distribution of temperature



(b) Distribution of inherent strains

Fig. 14 Distribution of temperature and inherent strains in transverse direction.

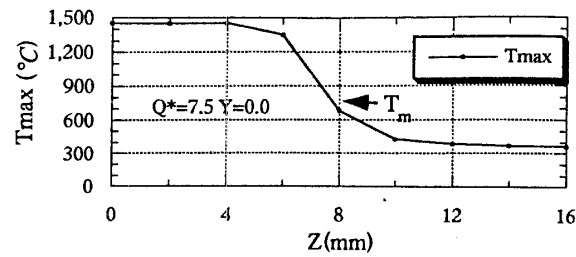
した。なお、 Q^* は、入熱量の相対的大きさを表す無次元パラメータで、次式で定義される。

$$Q^* = Q / h^2 c \rho T_Y \quad (13)$$

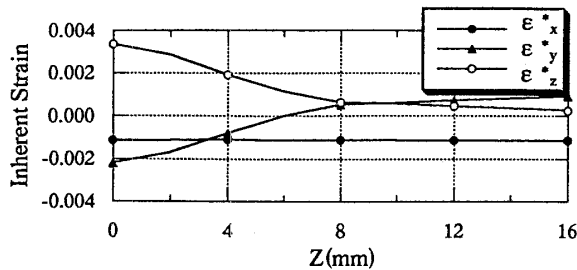
ここで、 h ：板厚、 c ：比熱、 ρ ：密度である。また、温度解析で直接得られる最高到達温度は、入熱部近傍において局部的に鋼の溶融温度を超えるので、現実の溶接現象との対応を取るため、応力解析では、最高到達温度の上限を鋼の溶融温度である 1,450°C に制限した。一方、材料は、Fig. 4-(c)および Fig. 5 に示された温度依存性を有すると仮定した。

4.2 平面ひずみモデルにおける固有ひずみの特徴

まず、平面ひずみモデルにおける固有ひずみ分布を把握するために FEM 熱弾塑性解析を行って得られた塑性ひずみ、すなわち固有ひずみの、ビード側表面の板幅方向の分布および溶接線上の板厚方向の分布を最高到達温度 T_{max} とともに、case(2) の場合について示したものが Fig. 14, 15 である。これらの図を分析することにより次の特徴が確認できる。



(a) Distribution of temperature



(b) Distribution of inherent strains

Fig. 15 Distribution of temperature and inherent strains in thickness direction.

- (1) 平面ひずみ問題においては溶接線方向の変形は完全に拘束されるので、この方向の拘束パラメータは $\beta_x = 1.0$ であり、溶接線方向の固有ひずみ成分 ϵ_x^* の分布に注目すると、3次元拘束モデルに認められたのと同様、

($T_{\max} < T_{1x}$) に対応する低温領域では、溶接熱履歴による塑性変形は生じない。

($T_{1x} < T_{\max} < T_{2x}$) に対応する中温域では、温度の上昇とともに固有ひずみの絶対値の増加が見られる。

($T_{2x} < T_{\max}$) に対応する高温域では、固有ひずみ成分 ϵ_x^* の絶対値は、ほぼ降伏ひずみに等しく一定である。すなわち、 $\beta_x = 1.0$ を考慮すると、

$$\epsilon_x^* = -\sigma_Y / \beta_x E = -1.14 \times 10^{-3} \quad (14)$$

- (2) 溶接線に直角な方向の固有ひずみ成分については、

($T_{\max} < T_{1x}$) に対応する低温領域では、

$$\epsilon_y^* = 0 \quad (15)$$

($T_{1x} < T_{\max} < T_m$) に対応する中温域では、溶接線に直角な方向の拘束 β_y が非常に小さく、

$$\beta_y = \beta_z \ll \beta_x \quad (16)$$

であるので、 y および z 方向の固有ひずみが等しい。すなわち、

$$\epsilon_z^* = \epsilon_y^* \quad (17)$$

ここで、 T_m は、力学的融融温度を

表す。

$$(T_m < T_{\max})$$

に対応する力学的溶融領域では、最高到達温度の上昇とともに ϵ_y^* の絶対値が増加する。

- (3) 溶接線方向の固有ひずみと比較して、板幅方向および板厚方向の固有ひずみの絶対値は大きい、塑性ひずみの非圧縮性が FEM 解析の結果にも認められる。すなわち、

$$\epsilon_x^* + \epsilon_y^* + \epsilon_z^* = 0 \quad (18)$$

4.3 固有ひずみの計算式

3次元拘束モデルおよびビード溶接の FEM 解析結果から得られた知見を活用することにより、ビード溶接における固有ひずみを単純な式を用いて算定することが可能となる。まずここでは、平面ひずみという理想的な仮定条件の下での固有ひずみについて算定法を示す。

固有ひずみは最高到達温度および拘束に支配されるといえる考え方に基づき固有ひずみの算定を行う。そのために、最高到達温度については FEM による温度解析の結果あるいは対象とする問題に対応した解析解を用いるものとし、本報告では、前者を採用した。最高到達温度 $T_{\max}$ が与えられると、各固有ひずみ成分の値は、以下のような方法で算定することができる。

溶接線方向(x 方向)の固有ひずみ

平面ひずみの場合、溶接線方向に完全拘束されているので、拘束パラメータ β_x が 1.0 になり、式(12)より、

$$\begin{aligned} \epsilon_x^* &= 0 & T_{1x} > T_{\max} \\ \epsilon_x^* &= -\alpha(T_{\max} - T_{1x}) & T_{1x} < T_{\max} < T_{2x} \\ \epsilon_x^* &= -\alpha T_{1x} = -\epsilon_Y & T_{\max} > T_{2x} \end{aligned} \quad (19)$$

なお、固有ひずみの算定においては、室温での材料定数を用いる。すなわち、

$$\sigma_Y = 240 \text{ MPa}$$

$$\alpha = 1.14 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$E = 210 \text{ GPa}$$

$$T_{1x} = \sigma_Y / \alpha E = 100 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{2x} = 2T_{1x} = 200 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_m = 750 \text{ } ^\circ\text{C}$$

板幅方向(y 方向)の固有ひずみ

固有ひずみの板幅方向成分 ϵ_y^* についても、最高到達温度により三つの場合に分けられ、式(15)~(17)より、

- a) $T_{1x} > T_{\max}$ の領域

$$\epsilon_y^* = 0 \quad (20)$$

- b) $T_{1x} < T_{\max} < T_m$ の領域

この領域では、板幅方向と厚さ方向の拘束はともに非常に小さいので、これらの方向の固有ひずみは等しいと仮定できる。すなわち、

$$\epsilon_y^* = \epsilon_z^* \quad (21)$$

また、塑性ひずみの非圧縮性より、

$$\epsilon_x^* + \epsilon_y^* + \epsilon_z^* = 0 \quad (22)$$

したがって、

$$\varepsilon_y^* = \varepsilon_z^* = -\varepsilon_x^*/2 \quad (23)$$

$$= \alpha(T_{\max} - T_{1x})/2 \quad (T_{\max} < T_{2x} \text{ の時})$$

$$= \varepsilon_Y/2 \quad (T_{\max} > T_{2x} \text{ の時})$$

c) $T_{\max} > T_m$ の領域

3次元拘束モデルについて Fig. 9 で示したように、板厚方向の拘束パラメータ β_y が非常に小さく、最高到達温度が力学的溶融温度を越える場合には、固有ひずみ ε_y^* は $T_{\max}$ の上昇にともなって増加するので、その関係を次式のように線形関数として近似する。

$$\varepsilon_y^* = -A\alpha T_{\max} + C \quad (24)$$

ここで、 $T_{\max} = T_m$ の時には、式(23)より、

$$\varepsilon_y^* = \varepsilon_Y/2 \quad (25)$$

であり、この条件を用いることにより、式(24)に含まれる定数 C が定まり、固有ひずみを与える式として、 A のみを未定定数とする次式が求まる。すなわち、

$$\varepsilon_y^* = -A\alpha(T_{\max} - T_m) + \varepsilon_Y/2 \quad (26)$$

未定定数 A は、残留応力の実測データ、あるいは熱弾塑性解析結果に基づき定めることができる。たとえば、case (2)の解析結果を用いると、溶接線上の板表面 ($y=0, z=0$) では、

$$T_{\max} = 1,450^\circ\text{C}$$

$$\varepsilon_y^* = -0.00225$$

であるので、 A の値として、 $A=0.35$ が得られる。

板厚方向(z 方向)の固有ひずみ

塑性ひずみの非圧縮性により、

$$\varepsilon_z^* = -(\varepsilon_x^* + \varepsilon_y^*) \quad (27)$$

剪断の固有ひずみ

熱弾塑性解析結果および剪断固有ひずみの対称性により、剪断の固有ひずみは座標 y の奇関数として次式の形の分布を仮定する。

$$\gamma_{yz}^* = B\alpha(T_{\max} - T_{2x})(y/h) \quad (T_{\max} > T_{2x} \text{ の時}) \quad (28)$$

ここで、 B は未定定数であり、FEM による解析結果に基づき、 $B=1.7$ の値を採用した。このように、最高到達温度が既知であれば、固有ひずみを算定する際に決定しな

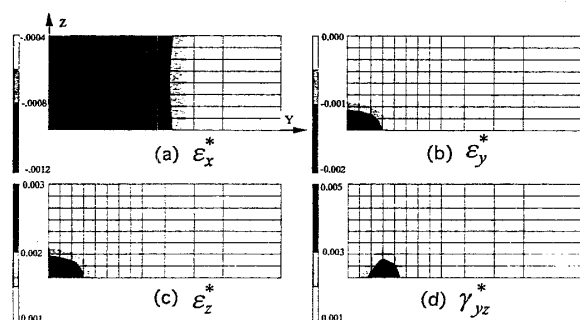


Fig. 16 Distribution of inherent strain computed by thermal-elastic-plastic analysis (case(2)).

ければならない係数は、 A, B の2個のみである。

4.4 弾性解析と熱弾塑性解析との比較

入熱量 Q^* が、5.0, 7.5, 10.0, 12.5 の4ケースに対して、前節で示した計算式に従って求めた固有ひずみを用いて、弾性有限要素法により変形と残留応力を解析した。

case (2) を例に、熱弾塑性解析で求めた塑性ひずみ(固有ひずみ)と、最高到達温度および拘束の考え方に基づいて定めた固有ひずみの溶接線近傍の断面上における分布を比較のために示したものが Fig. 16, 17 である。熱弾塑性解析で得られた塑性ひずみの分布は成分毎に異なっているが、提案式を用いて計算した固有ひずみの分布は、これと良く対応している。さらに、case (1) および case (3) について、溶接側の表面における固有ひずみの分布を詳細に比較したものが、Fig. 18, 19 であり、入熱量が異なった場合につい

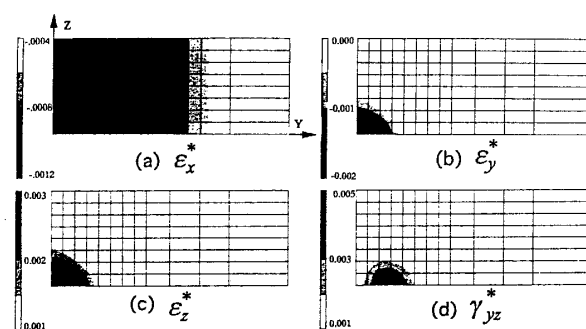
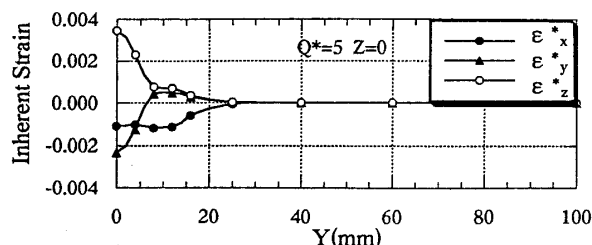
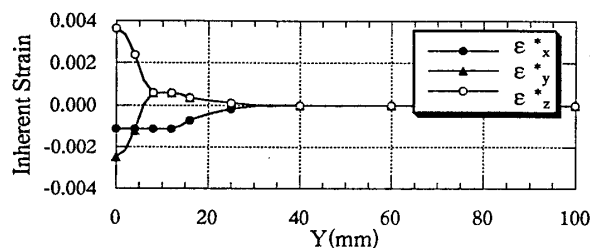


Fig. 17 Distribution of inherent strain computed by proposed formula (case(2)).



(a) T.E.P



(b) Elastic

Fig. 18 Comparison between inherent strain computed by thermal-elastic-plastic analysis and proposed formula (case(1)).

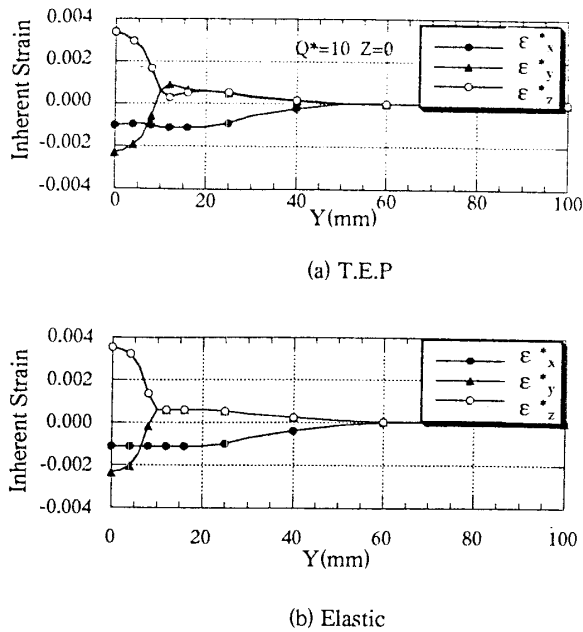


Fig. 19 Comparison between inherent strain computed by thermal - elastic - plastic analysis and proposed formula (case(3)).

ても、提案式によって固有ひずみの分布が忠実に再現されることが分る。

提案式に従い定められた固有ひずみを用いて FEM 弾性解析 (Elastic) を行い求められた残留応力と、FEM 熱弾塑性解析 (T.E.P.) で得られた残留応力について、case(2) を例に、断面上での分布を比較したものが Fig. 20, 21 であり、表面での分布を詳細に比較したものが Fig. 22 である。さらに、熱弾塑性解析および固有ひずみを用いた弾性解析の両者について角変形を比較したものが Fig. 23 であり、両者はほぼ量的に対応している。これらの計算結果を総合すると、提案法により算定した固有ひずみを用いて残留応力および変形が十分な精度で再現できることが分る。

4.5 3次元移動熱源ビード溶接モデル

平面ひずみ問題として検討したものと同一ビード溶接について立体要素を用いた 3 次元熱弾塑性解析を行った。板の寸法は、板厚が：16 mm、板の半幅：200 mm であり、長さについては、想定した入熱量の範囲で板の長さの影響を受けない最小の値として、200 mm を採用した。また、熱源の移動速度 v は、4.3 mm/sec と仮定し、入熱量 $Q=533$ J/mm, ($Q^*=5$), $Q=800$ J/mm, ($Q^*=7.5$), $Q=1067$ J/mm, ($Q^*=10$), $Q=1333$ J/mm, ($Q^*=12.5$) の 4 ケースについて、熱弾塑性解析を実施した。

4.6 3次元モデルにおける固有ひずみの特徴

3次元モデルの場合は拘束条件が平面ひずみの場合と異なる。平面ひずみの場合には溶接線方向に完全拘束の状態であり、溶接線垂直方向がほぼ自由である、すなわち、

$$\beta_x=1, \beta_y=\beta_z=0$$

これに対して、3次元移動熱源の場合は、溶接線方向の拘束

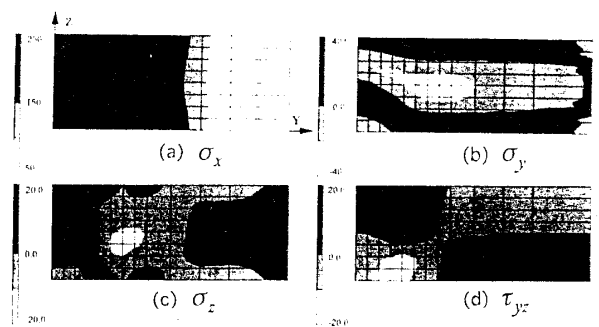


Fig. 20 Stress distribution computed by thermal-elastic-plastic analysis (case(2)).

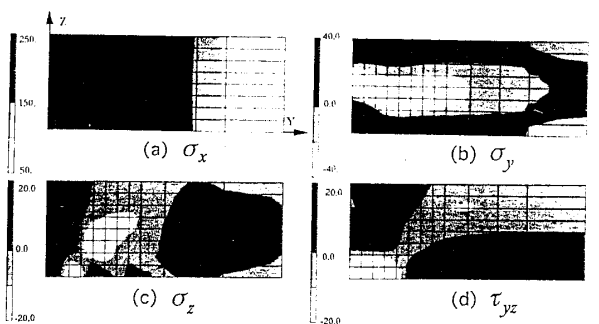


Fig. 21 Stress distribution computed by elastic analysis using proposed formula (case(2)).

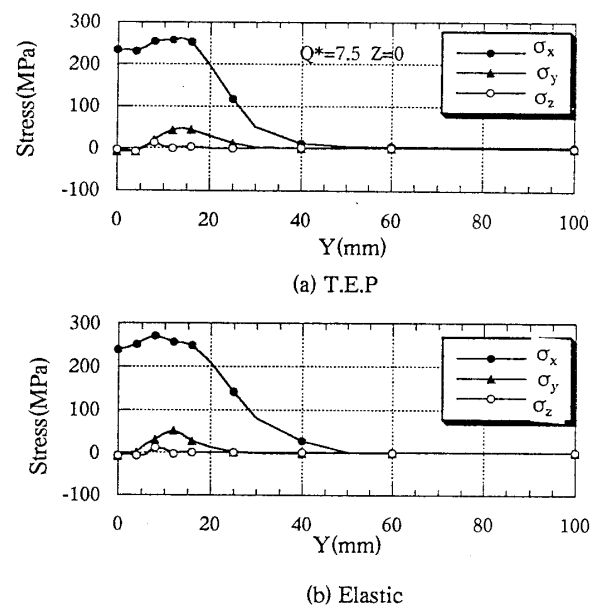


Fig. 22 Comparison between residual stress distribution in transverse direction computed by thermal-elastic-plastic analysis and proposed elastic analysis (case(2)).

は完全拘束よりは弱く、板幅方向の拘束は、溶融部が板の前後の部分から拘束される効果が加わるために拘束は強くなる。すなわち、

$$\text{板幅方向の拘束： (平面ひずみ) < (3次元移動熱源)}$$

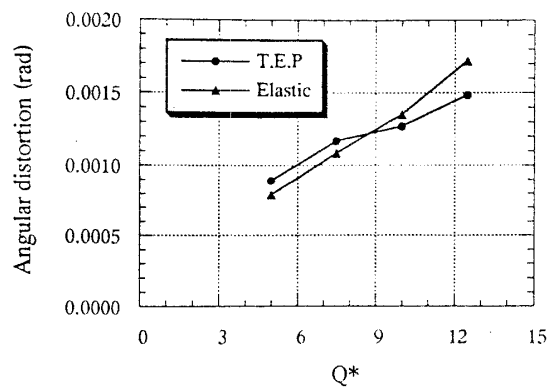


Fig. 23 Comparison between angular distortion computed by thermal-elastic-plastic analysis and proposed elastic analysis.

溶接線方向の拘束：(平面ひずみ) > (3次元移動熱源)

Fig. 24 は、熱弾塑性解析で得られた塑性ひずみ分布(固有ひずみ分布)を、case(2)を例に示したものである。この図より、塑性ひずみ分布の特徴として次のような点が認められる。

(1) 溶接線方向の固有ひずみ ϵ^*_x に注目すると、平面ひずみの場合と同様、最高到達温度の大小により、三つの領域に分けられる。すなわち、

($T_{\max} < T_{1x}$) に対応する低温領域では、溶接熱履歴による塑性変形は生じない。

($T_{2x} < T_{\max} < T_{2x}$) に対応する中温域では、温度の上昇に従い、固有ひずみの絶対値の増加が見られる。

($T_{2x} < T_{\max}$) に対応する高温域では、固有ひずみ成分 ϵ^*_x の絶対値は、降伏ひずみよりやや大きく、ほぼ一定である。

(2) 溶接線に直角な方向の固有ひずみ成分については、

($T_{\max} < T_{2x}$) に対応する低・中温域では、

$$\epsilon^*_y = 0$$

その理由としては、3方向の拘束の大小関係は、

$$\beta_x > \beta_y > \beta_z \approx 0$$

であるため、 y 方向の塑性変形が生じるための限界温度 T_{1y} が大きくなり、

$$T_{1y} > T_{2x}$$

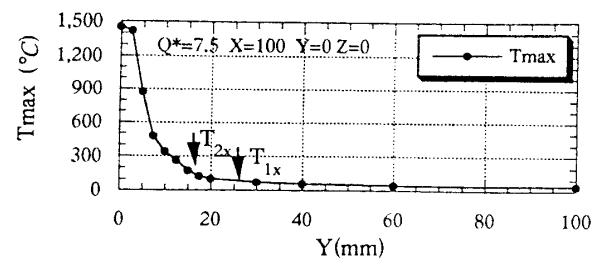
となったためと考えられる。

($T_{2x} < T_{\max}$) に対応する高温域では、最高到達温度の上昇とともに ϵ^*_y の絶対値が増加する。

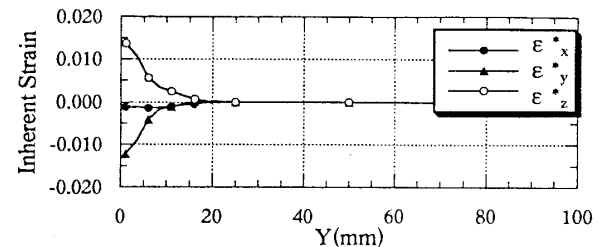
(3) 塑性ひずみの非圧縮性が認められる。すなわち、

$$\epsilon^*_x + \epsilon^*_y + \epsilon^*_z = 0$$

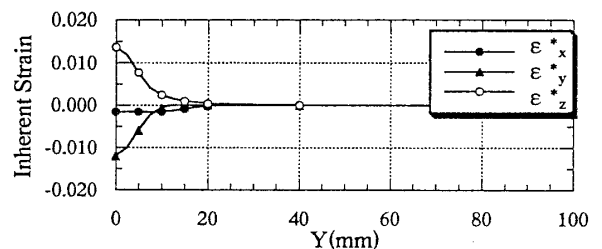
以上の特徴を用いることにより、固有ひずみの計算式が



(a) Temperature



(b) T.E.P



(c) Elastic

Fig. 24 Distributions of temperature and inherent strain computed by thermal-elastic-plastic analysis and proposed formula (case(2)).

導かれる。

4.7 固有ひずみの計算式

ここでは十分長い溶接を想定しているので、固有ひずみの剪断成分 γ^*_{xy} , γ^*_{zx} の影響は無視できると考え、

$$\gamma^*_{xy} = \gamma^*_{zx} = 0 \quad (29)$$

と仮定する。その他のゼロでない成分については最高到達温度 $T_{\max}$ の T_{1x} , T_{2x} に対する大小関係に基づき次のように定められる。なお、詳細を見ると、溶接線の始末端では温度分布や拘束条件が変化するため、固有ひずみもその影響を受けると考えられるが、溶接長が長い場合を対象とする時には、近似的に溶接線方向に固有ひずみは一様であると仮定する。

[$T_{\max} < T_{1x}$ の時]

$$\epsilon^*_x = \epsilon^*_y = \epsilon^*_z = \gamma^*_{xy} = \gamma^*_{yz} = \gamma^*_{zx} = 0 \quad (30)$$

[$T_{1x} < T_{\max} < T_{2x}$ の時]

$$\epsilon^*_x = -\alpha T_{\max} + \epsilon_y / \beta_x \quad (31)$$

$$\epsilon^*_y = 0$$

$$\epsilon^*_z = -\epsilon^*_x$$

$$\gamma^*_{yz} = 0$$

[$T_{2x} < T_{\max}$ の時]

$$\varepsilon_{*x}^* = -\varepsilon_y / \beta_x \quad (32)$$

$$\varepsilon_{*y}^* = -A'\alpha(T_{\max} - C')$$

$$\varepsilon_{*z}^* = -(\varepsilon_{*x}^* + \varepsilon_{*y}^*)$$

$$\gamma_{*xz}^* = B'\alpha(T_{\max} - T_{2x})(y/h)$$

上記のように固有ひずみの分布を表した場合、最高到達温度が既知であれば、残された未知数は、 β_x 、 A' 、 C' 、 B' となる。

まず、 β_x に注目すると、 $\beta_x = 1.0$ である平面ひずみの場合とは異なり、溶接線方向の拘束の強さは入熱量の相対的大きさに依存すると考えられる。そこで、無次元入熱量 Q^* と拘束パラメータ β_x の関係について検討した。既に述べたように、 T_{1x} と β_{1x} は次の関係を満足する。

$$T_{1x} = \sigma_y / E\alpha\beta_{1x} \quad (33)$$

一方、 T_{1x} は、Fig. 24 において、 ε_{*x}^* が値を持ち始めた点の最高到達温度として求めることができる。そこで入熱量の異なる 4 ケースについて T_{1x} を求め、 Q^* との関係として表したものが Fig. 25 であり、両者の関係を線形近似すると次式が得られる。

$$T_{1x} = 100 + 5Q^* \quad (34)$$

さらに、式(33)を用いると β_x と Q^* の関係が求められる。すなわち、

$$\beta_x = 1 / (1 + 0.05Q^*) \quad (35)$$

したがって、ここで対象としている入熱の範囲 $5 < Q^* < 12.5$ においては、 β_x の値は、 $0.8 < \beta_x < 0.615$ の範囲にあり、入熱量が小さくなるに従って、その値は 1.0 に近づく。

次に、式(32)に含まれる未定定数 A' 、 C' について検討する。まず、一つの条件として、式(31)との連続性より、 $T_{\max} = T_{2x}$ の時、 $\varepsilon_{*y}^* = 0$ であるという条件から、定数 C' が定まり次式が得られる。

$$\varepsilon_{*y}^* = -A'\alpha(T_{\max} - T_{2x}) = -A'\alpha(T_{\max} - 2T_{1x}) \quad (36)$$

さらに、定数 A' を定めるために、熱弾塑性解析により計算された、板中央の溶接線上 ($x=100$ mm, $y=0$, $z=0$) での塑性ひずみ ε_y^* と無次元入熱量 Q^* との関係を示したも

のが Fig. 26 であり、次式で近似できる。

$$\varepsilon_y^* = -0.0035(1 + 0.4Q^*) \quad (37)$$

ここで、溶接線直上 ($x=100$ mm, $y=0$, $z=0$) では最高到達温度が冶金学的溶融温度の 1450°C に等しい事および式(34)を考慮しながら式(36)、(37)を比較することにより、係数 A' が次のように定まる。

$$A' \approx 0.25(1 + 0.4Q^*) \quad (38)$$

剪断ひずみ γ_{*xz}^* に含まれる係数 B' についても同様に定める事ができ、次式が得られる。

$$B' \approx 3.6 + 1.28Q^* \quad (39)$$

4.8 弾性解析と熱弾塑性解析との比較

入熱条件が異なる case(1) と case(3) を例に、熱弾塑性解析および提案式に基づいて定められた固有ひずみを用いた弾性解析で得られた残留応力の板幅方向分布を比較した図が、Fig. 27, 28 である。また、解析した 4 ケース全てについて、板の中央断面における横収縮量と角変形量を比較した図が Fig. 29, 30 である。なお、図中の実線は佐藤らが、板の長さ： L および、幅： W の板厚： h に対する比が、

$$200/20 < (L/h, W/h) < 200/6$$

である板に対して実施した実験結果⁷⁾ を部分的に取り出し、線形近似した直線である。一方、計算モデルは、 $L/h = 200/16$, $W/h = 400/16$ であり、実験の対象範囲に含まれている。

これらの図より、残留応力および溶接変形のいずれにおいても、熱弾塑性解析結果と弾性解析結果が良く対応していることが分る。特に、溶接変形については、FEM 解析の結果と実験データの間に良好な一致が見られる。また、角変形について、Fig. 23 に示された平面ひずみ問題として解析した結果と、3次元問題として解析した結果を比較すると、平面ひずみ解析で得られた角変形量は 3次元解析の約 1/5 と小さく、正しい変形量が求められていないことが分る。これは、既に説明したように、平面ひずみモデルでは、板幅方向の拘束が正しく反映できないことが原因である。

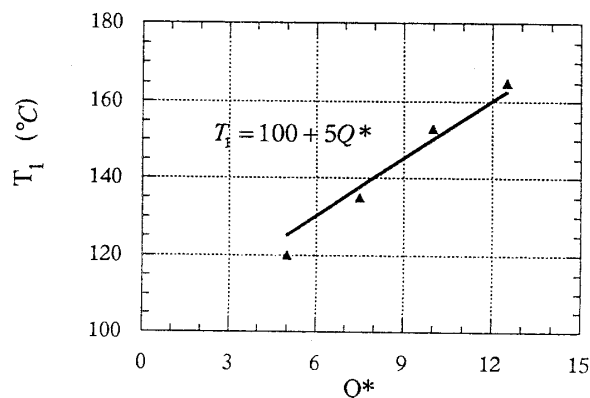


Fig. 25 Relation between heat input Q^* and temperature T_1 .

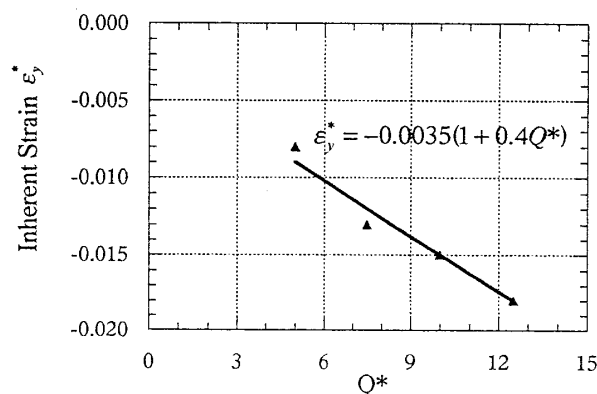
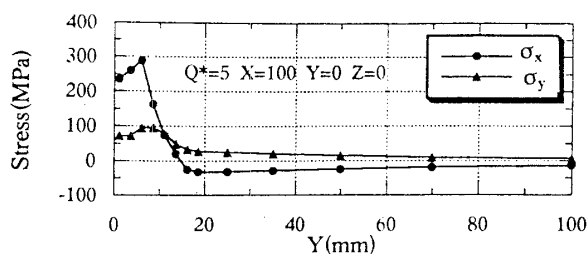
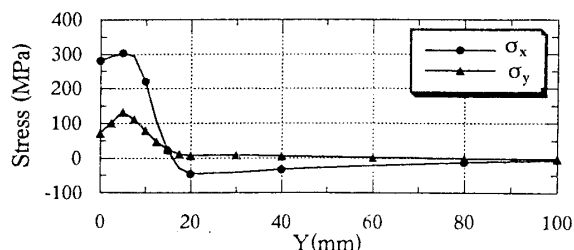


Fig. 26 Relation between heat input Q^* and inherent strain ε_y^* on welding line.

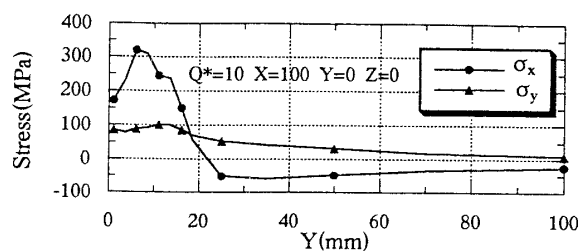


(a) T.E.P

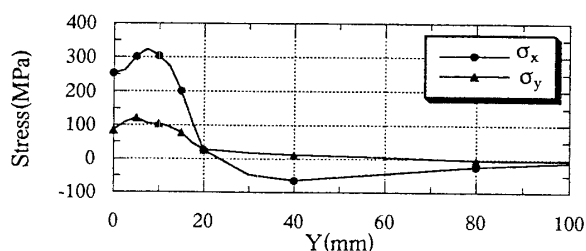


(b) Elastic

Fig. 27 Comparison between stresses computed by T. E. P. and elastic analyses (case(1)).



(a) T.E.P



(b) Elastic

Fig. 28 Comparison between stresses computed by T. E. P. and elastic analyses (case(3)).

5. 結 言

溶接による残留応力や残留変形は、非適合ひずみである固有ひずみが原因で生じていると理解することができる。特に、溶接前に開先の食い違い等が存在しないビード溶接では、溶接現象を熱弾塑性問題として解析した時に得られる塑性ひずみは、固有ひずみそのものである。一方、熱履歴により金属内に生じる固有ひずみは、最高到達温度と拘

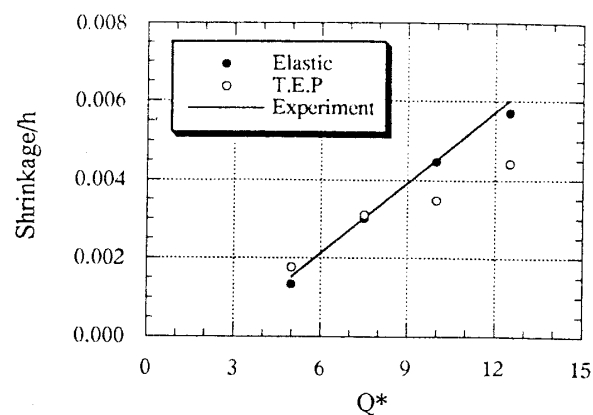


Fig. 29 Comparison between transverse shrinkage computed by thermal-elastic-plastic analysis and proposed elastic analysis.

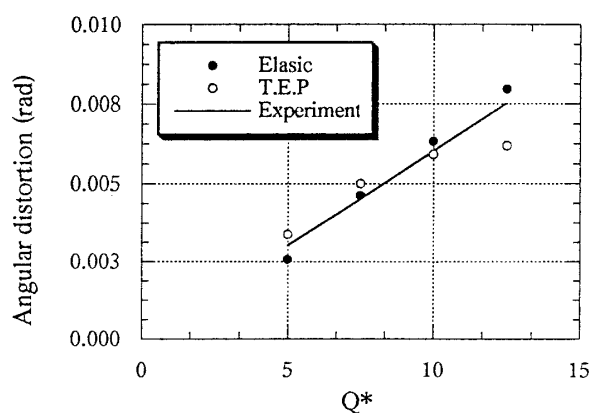


Fig. 30 Comparison between angular distortion computed by thermal-elastic-plastic analysis and proposed elastic analysis.

束の二大要因に支配される。そこで、本研究では、ビード溶接を対象に、詳細な FEM 熱弾塑性解析を実施し、塑性ひずみの生成機構を最高到達温度と拘束の視点から明らかにした。さらに、得られた知見に基づき、最高到達温度が既知である場合における固有ひずみの算定式を提案し、これを用いた弾性解析が溶接残留応力および溶接変形の予測法として有効であることを示した。

謝 辞

本研究の一部は、日本造船研究協会第 225 研究部会における「残留応力の計測法・推定法の研究」の一環として実施したものであり、研究部会の各委員から貴重な御討論を頂いたことを付記し、謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 上田幸雄, 山川武人: 有限要素法による熱弾塑性挙動の解析, 溶接学会誌, 42-6 (1973), 567-577.
- 2) 上田幸雄, 村川英一, 顧斯美, 奥本泰久, 石山隆庸:

- 高精度組立のための溶接変形シミュレーション (第3報) - 板継溶接時の面外変形 -, 日本造船学会論文集, 176 (1994), 341-350.
- 3) 増淵興一: 分布した不適合度による応力について, 日本造船学会論文集, 88 (1955), 189-200.
- 4) 藤本二男: 固有ひずみの概念による溶接残留応力および溶接変形の解析法 - 溶接残留応力および溶接変形の解析 (第1報) -, 溶接学会誌, 39-4 (1970), 236-252.
- 5) 上田幸雄, 袁敏剛, 望月正人, 梅沢貞夫, 榎本邦夫: 残留応力の生成源を用いた残留応力推定法, (第4報) - T型及びI型継手の溶接残留応力の固有ひずみによる推定法 -, 溶接学会論文集, 9-3 (1991), 19-25.
- 6) 上田幸雄, 麻寧緒: 固有ひずみ分布の関数表示による残留応力の推定法と測定法 (第4報) - すみ肉溶接における関数表示とその精度 -, 溶接学論文集, 12-4 (1994), 553-560.
- 7) 佐藤邦彦, 寺崎俊夫: 構造用材料の溶接変形におよぼす溶接諸条件の影響, 溶接学会誌, 45-4 (1976), 302-308.
-