HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	T型溶接継手の残留応力分布と変形
Author(s)	鵜飼, 隆好; 門崎, 司朗
Citation	北海道大學工學部研究報告, 147, 11-18
Issue Date	1989-07-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/42191
Type	departmental bulletin paper
File Information	147_11-18.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

北海道大学工学部研究報告
第147号（平成元年）

Bulletin of the Faculty of Engineering,
Hokkaido University. No. 147 (1989)

T型溶接継手の残留応力分布と変形

鵜飼隆好　門崎司朗

（平成元年3月31日受理）

Residual Stress Distribution and Distortion in a T-Welded Joint

Takayoshi UKAI and Shiroh MONZAKI

(Received March 31, 1989)

Abstract

In this paper, the residual stresses and distortion of T-welded joint as a reinforcement member are measured by the inherent strain theory based on the finite element method.

Generally, on a welded joint, a residual inherent strain is formed in the weldline and its neighborhood through the thermal elasto-plastic deformation. Applying the inherent strain theory, by measuring of residual inherent strains which are concerned with the residual stresses directly, the residual stresses are computed.

In this study, dividing a T-joint into small pieces, and calculating inherent strains by measuring elastic strains the residual stresses and distortion are computed.

The results are as follows:

(1) The residual stresses of weld line direction are much greater than others. At near the weld line a maximum residual stress appears, and the value of it attains to about 500 MPa.

(2) The inherent strain has maximum value of about -3000 μ, and generally, values at upper side of flange are greater than at lower side.

(3) The longitudinal distortion depends on residual stresses, but the transverse one does not always on it.

1. 緒　　言

溶接構造部材に存在する残留応力分布を知ることは，構造物の破壊の問題と関連して設計上非常に重要である。また，残留応力を除去すれば多かれ少なかれ構造物に変形が生じるから，加工精度の向上のためにも変形量の推定は必要不可欠である。一般に残留応力を知る方法として次に示す二つの方法が考えられる。その一つは溶接アークを熱源として移動させたときの熱弾塑性シミュレーションを行うものであり，他の一つは実際の溶接構造物を用いて直接あるいは間接的に残留応力を測定する方法である。前者は実験を行わずに数値計算によって残留応力を推定する方法であり，変形については残留応力によって生じる弾性変形のみならず，塑性域における変形の

機械工学第二学科機械設計学講座　*現在 トヨタ自動車㈱

推定も可能である。しかしながら，この方法は非定常問題となることに加え，高温度下における物性値の変化を考慮する必要があり，計算は容易ではない。

一方，後者は比較的簡便であり，X線による直接測定法，ひずみゲージを用いた分割法，局部弛緩法など各種の方法が適用できるから，測定例も多くいくつかの文献に発表されている。X線法は測定物を破壊することなしに測定できること，また，最近のX線設備における軽量化高機能化により実用上も簡便で有用ではあるが，溶接部材を対象とする場合には結晶の大きさや組織，さらに部材形状の点から制限があり必ずしも完全とはいえない。分割法や局部弛緩法は計測対象物の一部を切断分割し，それに伴う応力開放によって生じるひずみの変化を測定して，開放された応力を推定する方法である。この方法により物体の任意の点の残留応力を知るためには，分割により開放される応力と部材の任意の位置で弛緩される応力の関係が予め必要であるが，対象物の形状が決まれば有限要素法などによってその対応関係を定式化しておくことが可能であり，少数の点におけるひずみの計測から対象物全体の残留応力分布を推定することができる。

本研究は，溶接構造物の主要部分あるいは付加補強部材としてよく使われながら応力的に未解明な点が多いT型溶接継手を対象とし，分割法を応用した有限要素法に基づく固有ひずみ理論を適用して継手部材に存在する残留応力の分布，および変形を測定したものである。

2. 有限要素法に基づく固有ひずみ法

固有ひずみ法では物体各点の弾性ひずみと固有ひずみの関係を用いて残留応力を求めるが，ここでは有限要素法に基づいて解析する。

要素における固有ひずみ$\{\varepsilon^*\}^e$とそれを拘束したときに生じる等価接点力$\{f\}^e$の関係は，ひずみ・変位マトリックスを［B］応力・ひずみマトリックスを［D］とすれば，

$$\{f\}^e=-\int[B]^T[D]\{\epsilon^*\}^e d(vol)=-[L]^e\{\epsilon^*\}^e \tag{1}$$

これを物体全体についてまとめると

$$\{f\}=\sum\{f\}^e=-\sum[L]^e\{\epsilon^*\}^e=-[L]\{\epsilon^*\} \tag{2}$$

ここで肩字eは要素を意味するものとする。物体全体の接点変位を$\{u\}$，剛性マトリックスを$[K]$とすれば

$$[K]\{u\}+\{f\}=0 \tag{3}$$

なる関係があるから

$$\{u\}=[K]^{-1}\{-f\}=[K]^{-1}[L]\{\epsilon^*\} \tag{4}$$

要素の見かけ上のひずみは弾性ひずみと固有ひずみの和で表される。変位とひずみの関係は次のようになる。

$$\{\epsilon\}^e+\{\epsilon^*\}^e=[B]^e\{u\}^e=[B]^e[T]^e\{u\}=[B]^e[T]^e[K]^{-1}[L]\{\epsilon^*\} \tag{5}$$

ここで$[T]^e$は全体の変位から各要素の接点変位への変換を表す。また，全体の固有ひずみから各

要素の固有ひずみへの変換マトリックスを$[U]^e$で表すと
式(5)は変形されて

$$\{\epsilon\}^e=[B]^e[T]^e[K]^{-1}[L]\{\epsilon^*\}-\{\epsilon^*\}^e$$
$$=([B]^e[T]^e[K]^{-1}[L]-[U]^e)\{\epsilon^*\}=[\bar{H}]^e\{\epsilon^*\} \quad (6)$$

要素A，B，・・・・の弾性ひずみを$\{\epsilon\}^e_A$, $\{\epsilon\}^e_B$・・・・として物体全体について一括して表すと

$$\{\epsilon\}=[[\epsilon]^e_A,[\epsilon]^e_B,\cdots]^T=[H^*]\{\epsilon^*\} \quad (7)$$

もし，固有ひずみの成分数と弾性ひずみの成分数が等しく共にnであれば，弾性応答マトリックス$[H^*]$はn×nの正方マトリックスとなる。しかし，一般に溶接構造部材には固有ひずみの存在しない領域があり，このような領域を取り除けば固有ひずみ分布をq(＜n)個の成分からなる列ベクトル$\{\epsilon^*\}$で表すことができる。したがって，弾性応答マトリックスは縮少されて(n×q)のマトリックス$[\bar{H}^*]$となる。

$$\{\epsilon_i\}=[\bar{H}^*_{ij}]\{\epsilon^*_j\} \quad (i=1\sim n, j=1\sim q) \quad (8)$$

ひずみの測定位置を適当に定めてm個の弾性ひずみが測定されれば，$[\bar{H}_{ij}{}^*]$はさらに縮少されて(m×q)のマトリックスとなり，次のような特性方程式が得られる。

$$\{{}_m\epsilon_i\}=[H^*_{ij}]\{\epsilon^*_j\} \quad (i=1\sim m, j=1\sim q) \quad (9)$$

このように応力分布を求める上で媒介となる$\{\varepsilon^*\}$を求めるためには，$m\geqq q$としてこの方程式を解くことが必要である。また，応力についても応力とひずみの関係から

$$\{\sigma\}^e=[D]^e[H^*]^e\{\epsilon^*\} \quad (10)$$

となり，全体についても式(8)と同様に

$$\{\sigma_i\}=[M_{ij}]\{\epsilon^*_j\} \quad (i=1\sim n, j=1\sim q) \quad (11)$$

なる関係が得られる。$\{\varepsilon^*\}$が求められれば残留応力分布は式(11)から未計測部分も含めて求められ，さらに式(4)を用いて物体各点の変位が求められる。

3. 実　　験

試験片寸法として，フランジ部が溶接長さL＝300mm，板幅B＝150mm ウェブ部がL＝300mm，B＝75mmで板厚はともにt＝6 mmである。試験材には溶接用高張力鋼(WEL-TEN60RE)を用いた。化学成分は表1に，機械的性質は表2に示す。表3の溶接条件で図1に示すようなT型形状に半自動溶接を行った。

まず試験片をウェブ部と左右のフランジ部の3枚の板に切断する。切断によって新たに塑性変形が生じなければ，弾性ひずみの値が変化しても固有ひずみ分布は変らない。次に平板について要素分割し，それぞれ弾性応答マトリックス$[\bar{H}^*]$を求めておく。固有ひずみ分布領域とその近傍の測定点にひずみゲージを貼付して小片に切断し，それ以上細かくしてもひずみが変化しないような大きさまで分割して消滅した弾性ひずみを測定する。この測定値から弾性ひずみと固有ひずみ分布の関係式(9)を用いて固有ひずみ分布の最確値を求める。なお，最確値の決定には最小二乗

表 1 化学成分

C %	Si	Mn
0.08	0.19	1.08
P	S	Ti
0.15	0.07	0.12

表 2 機械的性質

降 状 点	520 MPa
引張強さ	600 MPa
伸 び	27 %
熱 処 理	圧延のまま

表 3 溶接条件

溶 接 法	CO_2半自動	溶接電圧	29 V
溶接の種類	下向すみ肉	溶接電流	280 A
母材角度	45°	溶接速度	45 cm/min
ルート間隔	1 mm	理論入熱	10830 J/cm

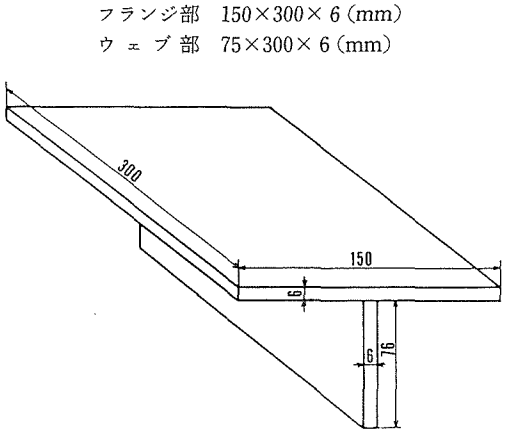


図 1 試験材の形状

法を使った。

図 2 に固有ひずみ分布算出のための要素分割を示す。フランジ部における溶接入熱は板の片側からしか与えられないから，固有ひずみ分布も板厚方向には一様でないと考えられる。従って，

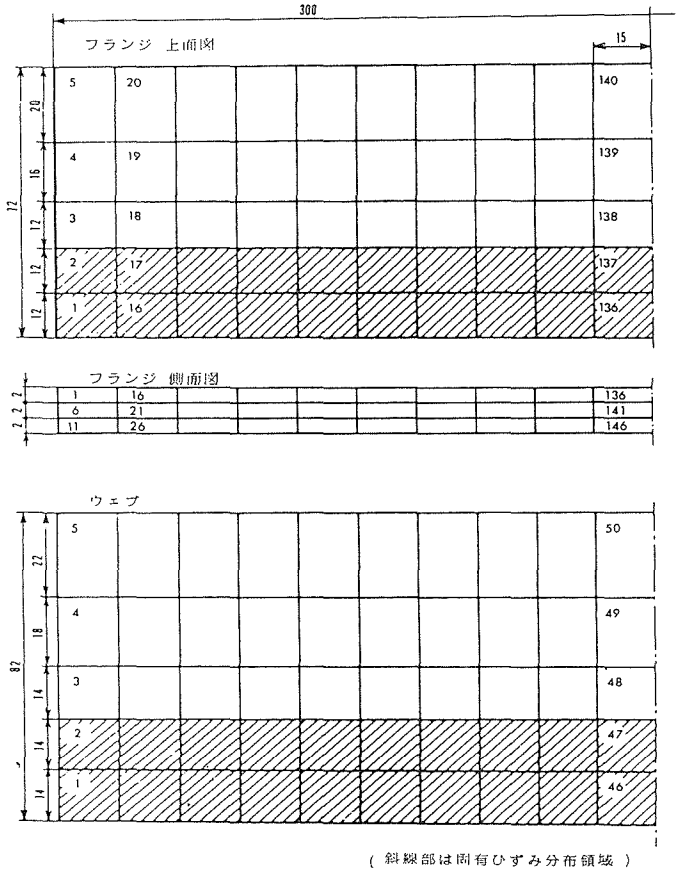
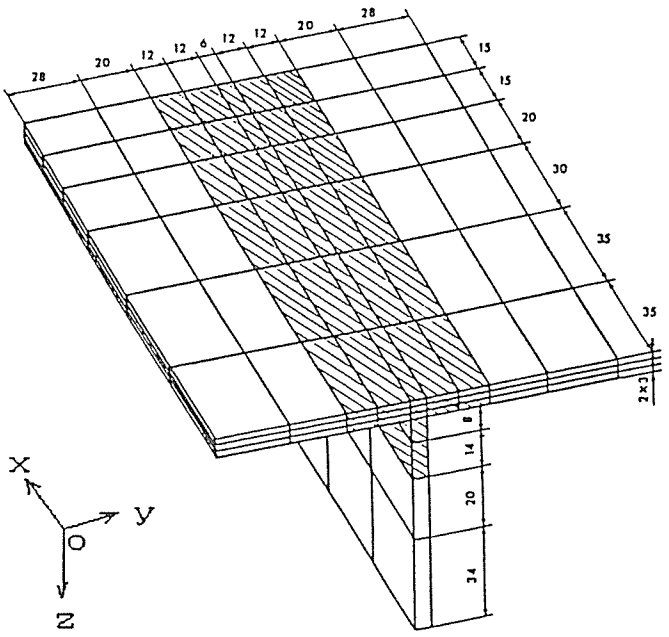


図 2 固有ひずみ算定のための要素分割図

この部分は板厚方向にも要素分割した3次元要素を用いて計算した。なお，内部の要素における弾性ひずみ測定値としては板の表裏の測定値の平均を用いた。

各板の固有ひずみ分布を加え合わせて全体の固有ひずみ分布とすることができる。全体の固有ひずみ分布から式(8)，および式(4)を用いて全体の残留応力分布，ならびに変形が求められる。応力分布計算のために用いた要素分割は図3の通りであり，要素数，節点数を図中に示す。

図4はフランジ部(片側のみ)溶接線方向の固有ひずみ分布を示す。■，▲は板厚方向で溶接線側の要素を，また，□，■は板幅方向で溶接線側の要素を表している。横軸は溶接線方向の長さであり，原



	WEB	FLANGE	全体
節点数	66	264	336
要素数	50	150	186

図 3 応力計算のための要素分割図

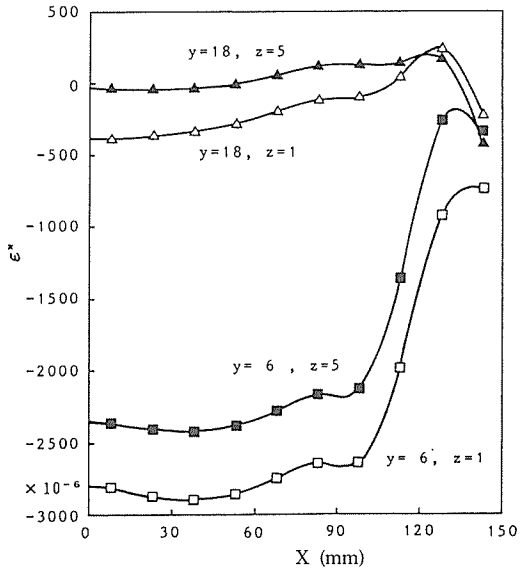


図 4 フランジ部の固有ひずみ分布

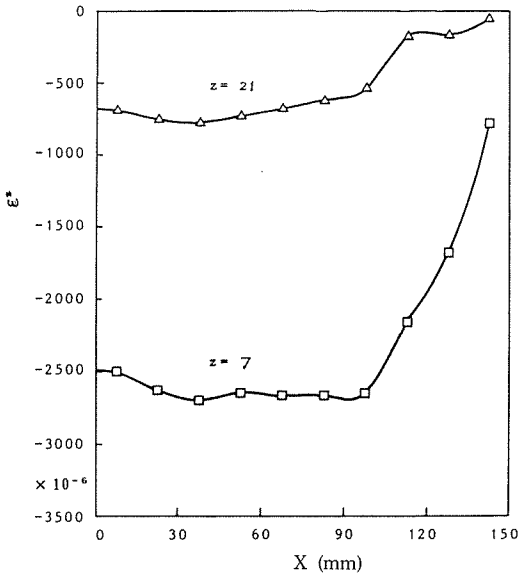


図 5 ウェブ部の固有ひずみ分布

点は試験片中心にとった。図から固有ひずみが板の端部で急激に減少する様子がよく分かる。反対側のフランジも同様に求められる。図5はウェブにおける溶接線方向の固有ひずみ分布を示す。

図6(a)はフランジ部の溶接線中心からx＝17.5mm離れた断面における溶接線方向残留応力 σ_x，ならびに溶接線直角方向残留応力 σ_y の分布を示したものであり，(b)はウェブ部について同様に σ_x，σ_z の分布をそれぞれ示したものである。フランジ部の応力分布として中央要素の値を示したが，これは板の両面で大きな差がなかったからである。溶接線直角方向(板幅方向)の残留応力は溶接線方向に較べて非常に小さい。図7，8はそれぞれ x＝85，127.5mmにおける応力分布を示す。

図に示す通り，いずれも溶接線近傍で最大の引張残留応力が生じており，最大は約500 MPaにも達し，降伏応力に匹敵する値であることがわかる。

図9はフランジ部のy＝9，21 mmにおける溶接線方向残留応力 σ_x と直角方向 σ_y の分布を，図10はウェブ部のz＝10，38 mmにおける σ_x，σ_z の分布を示したものであり，いずれも溶接始端で応力は減少している。

図11は溶接線方向残留応力の分布を立体的に表したものである。

図12は残留応力によって生じている変形の様子をフランジ部上面を例にして示した。このように溶接線方向に弓なりになる縦曲がり変形がみられるが，一般にすみ肉溶接の場合顕著にみられる溶接線直角方向の角変形は認められない。これは角変形が熱的に安定になる前の塑性域において生じた変形であるため，本解析法では解析できな

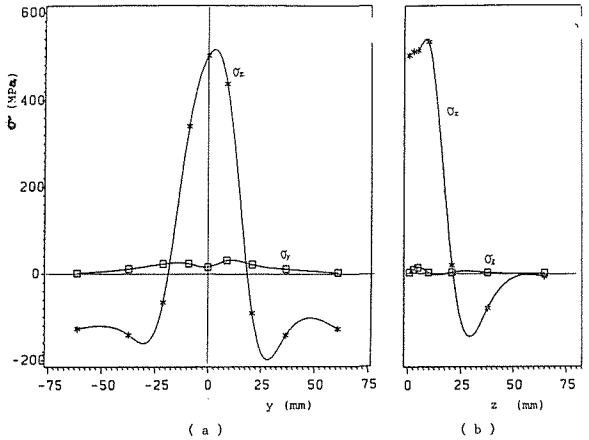


図6 残留応力の溶接線直角方向分布(1) x＝17.5

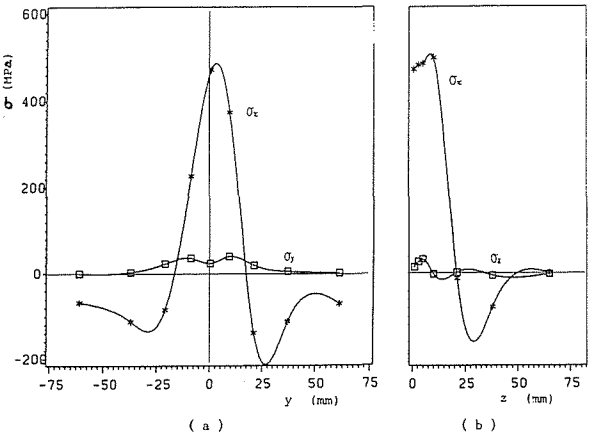


図7 残留応力の溶接線直角方向分布(2) x＝85

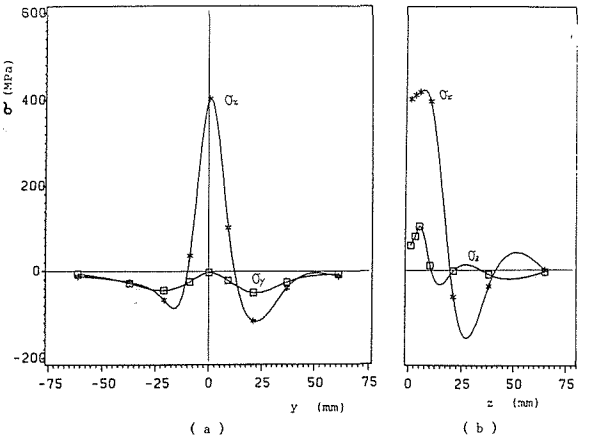


図8 残留応力の溶接線直角方向分布(3) x＝127.5

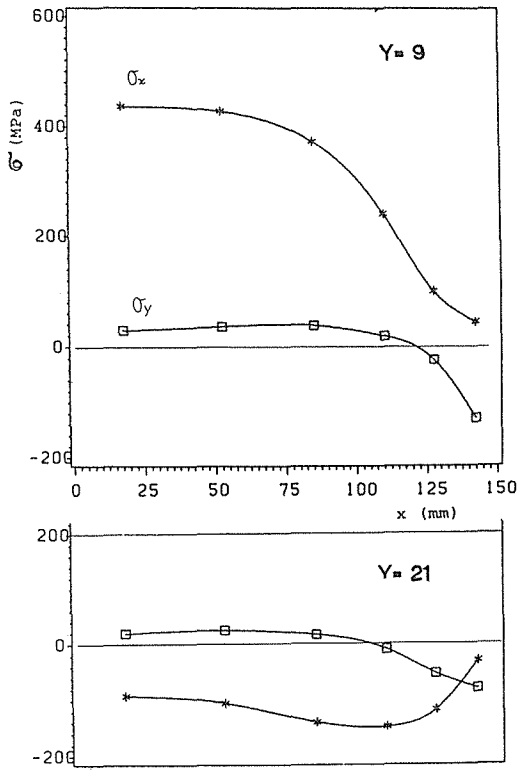


図 9 残留応力の溶接線方向分布（フランジ部）

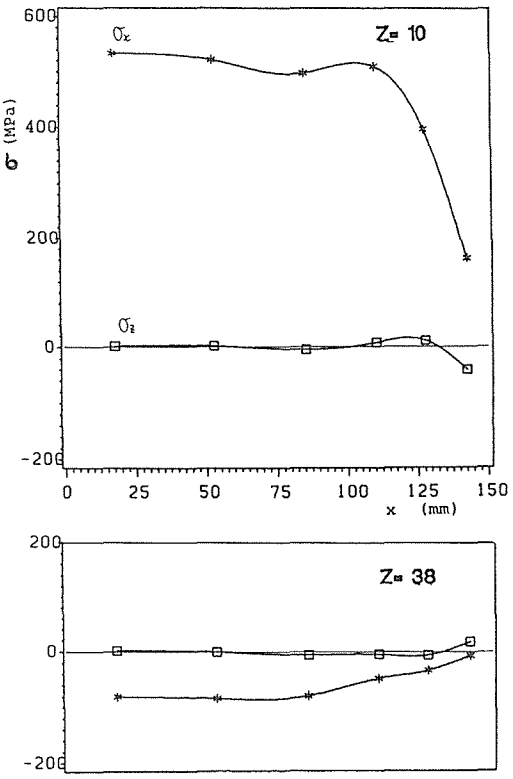


図10 残留応力の溶接線方向分布（ウェブ部）

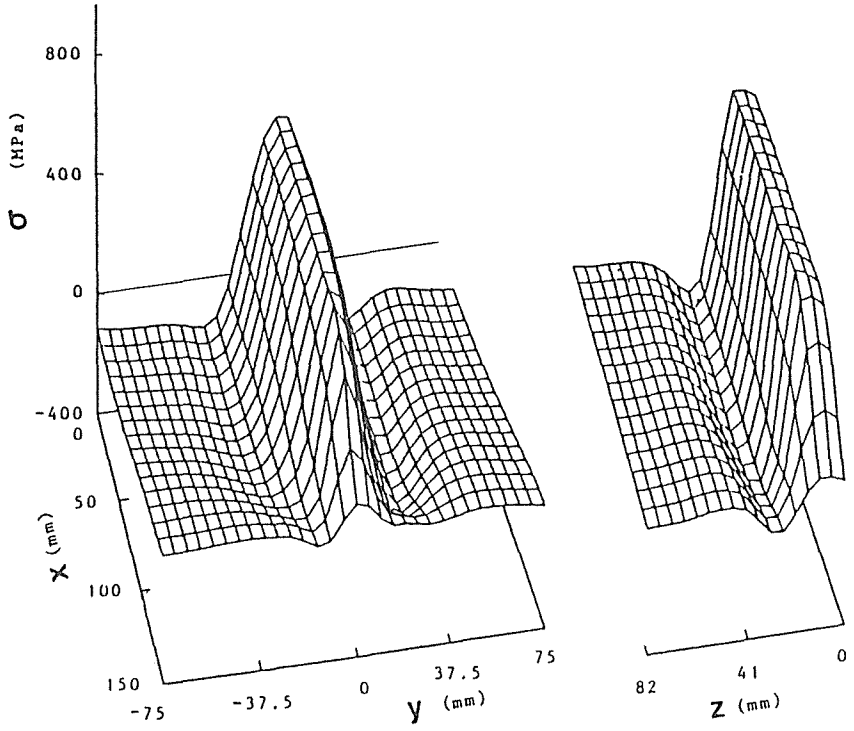


図11 溶接線方向残留応力の分布状態

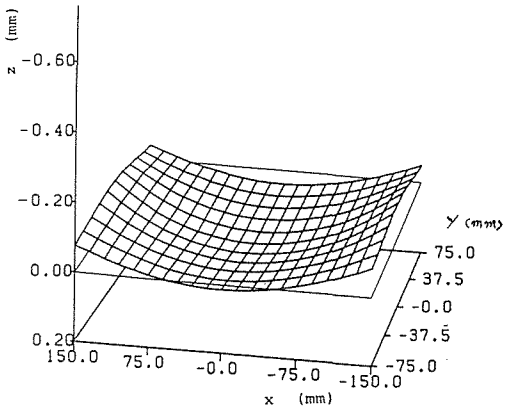


図12 フランジ部分の面外変形

いものと考えられる。

4. 結　　論

有限要素法に基づく固有ひずみ理論を適用し，T型溶接継手の残留応力分布と変形を測定した。結論は次の通りである。

(1) 溶接線方向の残留応力は溶接線付近で最大値を持ち，その値は引張応力で約500 MPaである。一方，溶接線直角方向の応力はこれに較べて非常に小さい。

(2) 本実験において測定された固有ひずみの値は最大$-3000\,\mu$程度であった。固有ひずみはフランジ部の板厚方向にも分布しており，溶接線の反対側の面でより大きな値をもつことがわかった。

(3) 固有ひずみの板厚上下面における差は，角変形を生じる程の大きさではなく，また拘束も小さいので，残留応力による変形の大部分は縦曲がり変形に寄与している。

(4) 溶接における固有ひずみの値は，溶接母材の形状と熱拡散条件の下にほぼ定量化できるから，特別に入り組んだ補強材の配置でない限り，Π型，箱型などに配置される一般的な補強部材近傍の溶接残留応力分布を推定することは可能と思われる。

参 考 文 献

(1) 佐藤邦彦，向井喜彦，豊田政男：溶接工学(1981)，p 65
(2) 井川　博ら：溶接便覧(1977)，p 147
(3) 上田幸雄，福田敬二，中長啓治，円道節夫：日本造船学会論文集 No 138(1975)