



# HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	有限要素法による鋼板の溶接時応力解析法について
Author(s)	真柄, 祥吾; Magara, Shogo
Citation	北海道大學工學部研究報告, 100, 1-10
Issue Date	1980-10-31
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/41636">https://hdl.handle.net/2115/41636</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	100_1-10.pdf



## 有限要素法による鋼板の溶接時応力解析法について

真 柄 祥 吾\*

(昭和55年6月30日受理)

### Welding Stress Analysis by Finite Element Method

Shogo MAGARA

(Received June 30, 1980)

#### Abstract

The thermal elastic-plastic behavior of steel plates due to welding are expected to be affected by the temperature-dependent mechanical properties.

In this paper, the thermal stress and deformation of steel plates are analyzed by using the finite element method, in consideration to the effects of changes in modulus of elasticity and yield stress of the steel depending on temperature.

In the case of moving a heat source along a weld line, the temperature distributions of the parent plate are analyzed as an unsteady heat-conduction problem with a two-dimensional finite element method. In the analysis, a new attempt is successively derived to simulate the solidification process of deposited metal as follows; when a heat source was passed along the side of an element and reaches a node, a new element representing the increment of the deposited metal is formed which corresponds to the deformation at the processing portion.

#### 1. 緒 言

本報は、鋼板を溶接する際の力学的諸性状を明らかにすることを目的とした研究である。溶接時の諸性状を理論的に明らかにしようとした既往の研究として、次のようなものがある。すなわち、上田、山川<sup>1)</sup>は平板の中心線を熱源が移動する場合について、また Beer<sup>2)</sup> は矩形鋼板の一辺上を熱源が移動する場合について温度及び応力分布を2次元有限要素法による弾塑性解析を行い、更に辻、小川<sup>3)</sup>は溶接方向に直交する断面について、平面応力状態が成立すると仮定して、板厚方向の温度及び応力分布を有限要素法によって求め、得られた結果を実験値と比較検討している。

以上の研究では、いずれも2枚の鋼板が溶接される際に、溶着金属が鋼板間の間隙を順次埋めていく過程を解析内容に含んでいない。これは、溶接の進行につれて溶着金属が凝固していく過程を取扱う有効な解析方法が開発されていなかったことによるものと考えられる。

本報では、温度分布解析ならびに材料の力学特性の温度依存性を考慮した弾塑性応力解析の2次元有限要素法による定式化に新たな工夫を加え、特に溶接の進行に応じて溶接部に要素が逐次形成されるとすることによって、溶着金属の凝固進行をモデル化し、並列した2枚の鋼板が溶接

\* 建築工学科 建築構造学第一講座

される全過程の解析を試みた。本報では更に、要素分割方式及び時間刻みについて検討し、具体例についての解析結果を考察した。

なお従来の実験的研究（例えば文献<sup>4)</sup>）を参照すれば、大凡厚さ 15~20 mm 以上の厚板の場合は 3次元解析を行うのが妥当と考える。したがって本報の解析対象は比較的厚さの薄い鋼板の溶接に限られる。

## 2. 解 析 法

### 2.1 要素について

溶接部を除いた各節は図-1 の 4 辺形要素で分割した。これによれば、要素内任意点の温度  $\theta$  及び変位  $u, v$  は下式で求められる。

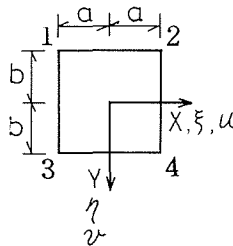


図-1

$$\theta = [N_1 \ N_2 \ N_3 \ N_4] \{\theta_i\} = A_1 \{\theta_i\}$$

$$\{\delta\} = [N_1 I \ N_2 I \ N_3 I \ N_4 I] \{\delta_i\} = A_2 \{\delta_i\}$$

ただし、 $\{\theta_i\} = \{\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3 \ \theta_4\}^T$ : 節点の温度ベクトル

$$\{\delta\} = \{u \ v\}^T$$

$\{\delta_i\} = \{\delta_1 \ \delta_2 \ \delta_3 \ \delta_4\}^T$ : 節点の変位ベクトル

$$N_i = \frac{1}{4} (1 + \xi_i \xi) (1 + \eta_i \eta)$$

$$\xi_i = x_i/a, \ \eta_i = y_i/b, \ i = 1 \sim 4$$

$$\xi = x/a, \ \eta = y/b$$

I:  $2 \times 2$  の単位マトリックス

### 2.2 温度分布計算について

2次元非定常熱伝導微分方程式の汎関数  $\Pi$  は、 $a\dot{\theta}$  ( $a$ : 熱容量係数  $= ch$ ,  $c$ : 単位体積当り熱容量,  $h$ : 板厚,  $\dot{\theta} = \partial\theta/\partial t$ ,  $t$ : 時間) を負の熱源とみなし、熱伝導特性を等方性とする、次式で表わされる。

$$\begin{aligned} \Pi = & \int_{b_1} \left( \frac{1}{2} \alpha' \theta^2 - \beta' \theta \right) ds + \int_{b_2} (\theta - \theta) k \frac{\partial \theta}{\partial n} ds \\ & + \iint \left[ \frac{1}{2} k \left\{ \left( \frac{\partial \theta}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \theta}{\partial y} \right)^2 + \alpha \theta^2 \right\} - (\beta - a\dot{\theta}) \theta \right] dx dy \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 $\alpha' = h\alpha_b$ ,  $\beta' = h(\alpha_b\theta_b + q_b)$ ,  $\alpha_b$ : 平板の自由境界縁に接する空気 (温度  $\theta_b$ ) との間の熱伝達率,  $q_b$ : 自由境界縁の単位面積当り発生熱源,  $S$ : 境界縁に沿った長さ,  $\theta$ : 固定境界縁の温度,  $k = \lambda h$ ,  $\lambda$ : 平板の熱伝導率,  $\alpha = 2\alpha_a$ ,  $\alpha_a$ : 平板の表裏面に接する空気 (温度  $\theta_a$ ) との間の熱伝達率,  $\beta = q_a h + \alpha\theta_a$ ,  $q_a$ : 平板内の熱源の単位体積, 単位時間当りの発生熱量,  $\int_{b_1}$  は自由境界

縁,  $\int_{b_2}$  は固定境界縁に沿っての積分を表わす。

以上の汎関数に図-1の要素を適用して温度計算式を導くと下式のようになる。

$$[K]\{\theta\} + [P]\{\dot{\theta}\} = \{H\} \quad (2)$$

ここで,  $[K] = \sum K_i^e$ ,  $K_i^e = \iint \left\{ k^e \left( \frac{\partial A_1}{\partial x} \frac{\partial A_1^T}{\partial x} + \frac{\partial A_1}{\partial y} \frac{\partial A_1^T}{\partial y} \right) + \alpha^e A_1 A_1^T \right\} dx dy$ ,  $[P] = \sum P_i^e$ ,  $P_i^e = \iint \alpha^e A_1 A_1^T dx dy$ ,  $\{H\} = \sum H_i^e$ ,  $H_i^e = \iint \beta^e A_1^T dx dy$ , なお要素の辺が境界縁である場合は,  $K_i^e$  に  $\int_{b_1} \alpha^e A_b A_b^T ds$ ,  $H_i^e$  に  $\int_{b_1} \beta^e A_b^T ds$  を加える。  $A_b$  は  $A$  に境界の辺の座標を代入したマトリックス。上付添字  $e$  は各要素についての値を表わす。

(2) 式の数値計算は, Wilson と Clough の方法<sup>5)</sup>を参照して導いた次の漸化式によって行った。

$$\left( [K] + \frac{2}{\Delta t} [P] \right) \{\theta\}_t = [P] \left( \frac{2}{\Delta t} \{\theta\}_{t-\Delta t} + \{\dot{\theta}\}_{t-\Delta t} \right) + \{H\}_t \quad (3)$$

ここで,  $\Delta t$ : 時間刻み,  $\{\theta\}_t$  等は時間  $t$  における節点温度等。

温度計算に際しては総入熱量の 1/2 の熱量を有する火点が, 片側母板の溶接部に沿った一辺上を移動するとした。この場合凝固後の溶着金属の影響は無視した。溶接部の温度は以上で求めた母板の節点温度の平均値として求めた。

### 2.3 応力解析について

応力度—ひずみ度曲線を図-2のような bi-linear 型と仮定し, 文献<sup>6)</sup>及び図-2を参照しながら降伏点応力度, 弾性係数の温度依存性を考慮して弾塑性応力計算式を導いた。なお以下の式の展開は, 材料は等方性とし, 平面応力場における von Mises の降伏条件に従うと仮定して行った。その結果, 弾性係数が変化する, 塑性ひずみおよび温度ひずみが生じた状態における時刻  $t$  の応力度増分  $d\sigma_t = \{d\sigma_{xt} \ d\sigma_{yt} \ d\tau_{xyt}\}^T$  は次式で求められる。

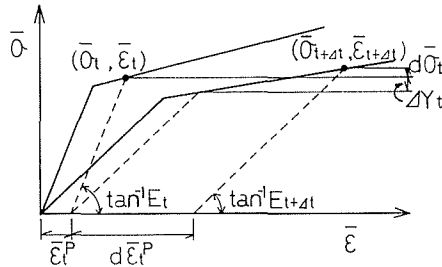


図-2

$$\begin{aligned} d\sigma_t &= D_{t+\Delta t} d\epsilon_t - D_{t+\Delta t} dC_t \sigma_t - D_{t+\Delta t} d\epsilon_t^e - D_{t+\Delta t} d\epsilon_t^p \\ &= D_{t+\Delta t} d\epsilon_t - D_{t+\Delta t} dC_t \sigma_t - D_{t+\Delta t} d\epsilon_t^e \\ &\quad - D_{t+\Delta t} H_t \left\{ \frac{H_t^T}{S_t} (D_{t+\Delta t} d\epsilon_t - D_{t+\Delta t} dC_t \sigma_t - D_{t+\Delta t} d\epsilon_t^e) + \frac{\Delta Y_t}{S_t} \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

ここで,  $D_{t+\Delta t}$ : 時刻  $t + \Delta t$  における弾性係数マトリックス,  $dC_t$ : 時刻  $t$  における弾性ひずみ—応力度マトリックスの増分,  $d\epsilon_t$ : 時刻  $t$  における全ひずみ増分,  $\sigma_t$ : 時刻  $t$  における応力度,  $d\epsilon_t^p$ : 時刻  $t$  における塑性ひずみ増分,  $d\epsilon_t^e$ : 時刻  $t$  における温度ひずみ増分,  $\Delta Y_t$ : 降伏点応力度の増分,  $H_t = 3\bar{\sigma}_t [(2\sigma_{xt} - \sigma_{yt})/3 \ (2\sigma_{yt} - \sigma_{xt})/3 \ 2\tau_{xyt}] / 2$ ,  $\bar{\sigma}_t = (\sigma_{xt}^2 - \sigma_{xt}\sigma_{yt} + \sigma_{yt}^2 + 3\tau_{xyt}^2)^{1/2}$ ,  $S_t = H'_{t+\Delta t} +$

$H_t^T D_{t+\Delta t} H_t$ ,  $H_{t+\Delta t}$ : ひずみ硬化率。

(4) 式を図-1 の要素にそのまま適用しようとする、この要素内ではひずみおよび応力度は一定値でないため、極めて複雑になる。このため次のように仮定して簡単化した。すなわち弾性、塑性の判定は要素中央点の応力度について行い、さらに弾性係数マトリックス  $D_t$ 、ひずみ—応力度マトリックス  $C_t$ 、塑性ひずみ  $d\varepsilon_t^p$ 、温度ひずみ  $d\varepsilon_t^g$  も全て要素内で一定で要素中央点における値に等しいと仮定した。その結果、(4) 式は次のように書き改められる。サフィックス  $o$  を付した諸値は、要素中央点にのみ関係する値である。

$$\begin{aligned} d\sigma_t = & \left( D_{t+\Delta t} B - \frac{D_{t+\Delta t} H_{ot} H_{ot}^T D_{t+\Delta t}}{S_{ot}} B_o \right) \{d\delta_t\} \\ & - \left( D_{t+\Delta t} dC_t D_t B - \frac{D_{t+\Delta t} H_{ot} H_{ot}^T D_{t+\Delta t}}{S_{ot}} dC_t D_t B_o \right) \{\delta_t\} \\ & + \left( D_{t+\Delta t} dC_t D_t - \frac{D_{t+\Delta t} H_{ot} H_{ot}^T D_{t+\Delta t}}{S_{ot}} dC_t D_t \right) (\varepsilon_{ot}^p + \varepsilon_{ot}^g) \\ & - \left( D_{t+\Delta t} - \frac{D_{t+\Delta t} H_{ot} H_{ot}^T D_{t+\Delta t}}{S_{ot}} \right) d\varepsilon_{ot}^g - \frac{D_{t+\Delta t} H_{ot} dY_{ot}}{S_{ot}} \end{aligned} \quad (5)$$

ただし、 $H_{ot}$ ,  $S_{ot}$ :  $H_t$ ,  $S_t$  を要素中央点の応力度  $\sigma_{oxl}$ ,  $\sigma_{oyl}$ ,  $\tau_{oxyl}$  から求めたもの、 $B$ : 節点変位と要素内任意点のひずみとの関係を表すマトリックス、 $B_o$ : 節点変位と要素中央点のひずみの関係を表すマトリックス、 $\{\delta_t\}$ : 節点変位ベクトル、 $\{d\delta_t\}$ : 同ベクトルの増分、 $\varepsilon_{ot}^p$ : 要素中央点の塑性ひずみ、 $\varepsilon_{ot}^g$ : 要素中央点の温度ひずみ、 $d\varepsilon_{ot}^g$ : 同増分。

また (5) 式中の各マトリックスは以下に示すとうりである。

$$\begin{aligned} D_{t+\Delta t} = \frac{E_{t+\Delta t}}{1-\nu^2} \begin{pmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{pmatrix} & \quad dC_t D_t = \left( \frac{1}{E_{t+\Delta t}} - \frac{1}{E_t} \right) \begin{pmatrix} 1 & -\nu & 0 \\ -\nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2(1+\nu) \end{pmatrix} \frac{E_t}{1-\nu} \begin{pmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{pmatrix} \\ & = \frac{E_t - E_{t+\Delta t}}{E_{t+\Delta t}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

$$D_{t+\Delta t} H_{ot} H_{ot}^T D_{t+\Delta t} = \frac{1}{4\delta_{ot}^2} \begin{pmatrix} S_1^2 & S_1 S_2 & S_1 S_6 \\ & S_2^2 & S_2 S_6 \\ \text{SYM.} & & S_6^2 \end{pmatrix}$$

$$S_1 = \frac{E_{t+\Delta t}}{1-\nu^2} (\sigma'_{xl} + \nu \sigma'_{yl}), \quad S_2 = \frac{E_{t+\Delta t}}{1-\nu^2} (\nu \sigma'_{xl} + \sigma'_{yl}), \quad S_6 = \frac{E_{t+\Delta t}}{1-\nu^2} \tau'_{xyl}$$

$$\sigma'_{xl} = (2\sigma_{oxl} - \sigma_{oyl})/3, \quad \sigma'_{yl} = (2\sigma_{oyl} - \sigma_{oxl})/3, \quad \tau'_{xyl} = 2\tau_{oxyl}$$

#### 2.4 溶接部の取り扱いについて

溶接が進行するにしたがって、溶着金属が順次凝固して行くと、応力解析の境界条件が連続的に変化する。この解析に当り、当初、溶接部には最初からヤング係数が0の要素があって、溶着金属が凝固するまで塑性変形し、溶着金属が凝固するにしたがって応力が生じるとして計算した。これは現象的には進行過程が逆であるが、ひび割れの発生を考慮した鉄筋コンクリート部材の解析法<sup>3)</sup>の一つを応用したものである。この方法によると溶着金属の凝固までに生じる変形が非常に大きいため、変形前の変位関数を凝固後にも適用すると溶接部要素の剛性が一般に極めて過大に計算されることが明らかになった。このため以下に述べる方法を工夫し本解析はこれによ

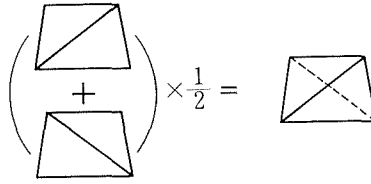


図-3 a)

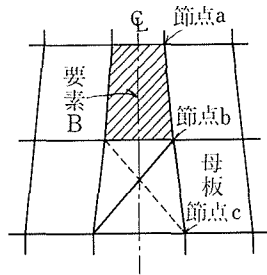


図-3 b)

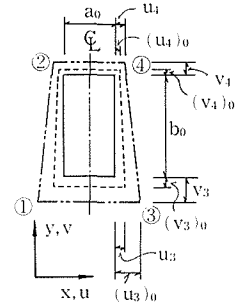


図-3 c)

ることとした。即ち、溶接部において溶接前は要素がなく、溶接が進行して溶接部の溶着金属が温度低下し、凝固温度に達すると同時に、そのときの溶接部の形状と同形の要素ができるとして解析した。この部分には図-3 a) に示すような、周知の要素内ひずみ一定の3角形要素4個を組み合わせて平均した4辺形要素とした。3角形要素を用いたのは、溶着金属が凝固して溶接部に要素が形成される時、図-3 b) に示すように変形している溶接部の形状に上記のように対応させるためである。また4個の3角形要素を用いたのは、要素の節点力を等方性化して対称条件を満たすためである。なお溶接金属凝固後のひずみ度は図-3 c) を参照して以下のように求めた。

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{1}{(a_j - a_k)b_k} \begin{Bmatrix} b_k & 0 & b_k & 0 \\ 0 & -(a_j - a_k) & 0 & (a_j - a_k) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} u_3 - (u_3)_0 \\ v_3 - (v_3)_0 \\ u_4 - (u_4)_0 \\ v_4 - (v_4)_0 \end{Bmatrix}$$

ただし、

$a_0, b_0$ : 溶接開始時の要素辺長

$(u_3)_0, (u_4)_0, (v_3)_0, (v_4)_0$ : 凝固時の節点変位

$u_3, u_4, v_3, v_4$ : 凝固後の節点変位

$a_j: a_0 + 2(u_3)_0$

$a_k: a_0 + 2(u_4)_0$

$b_k: b_0 - (v_3)_0 + (v_4)_0$

溶着金属の凝固の判定は、要素中央点の温度について行ったが、図-3 b) において火点通過中の要素 B については、火点が節点 a, b の中間にある間は、凝固温度以下になっても要素は形成されないとし、火点が b 点に達すると同時に要素が出来るとした。これに対し、b, c 間を火点が移動中に B 部の中央点温度が凝固温度以下になったときは直ちに要素が出来るとした。

以上に記した計算式に基づき、図-4 のフローチャートにしたがって計算用プログラムを作成した。

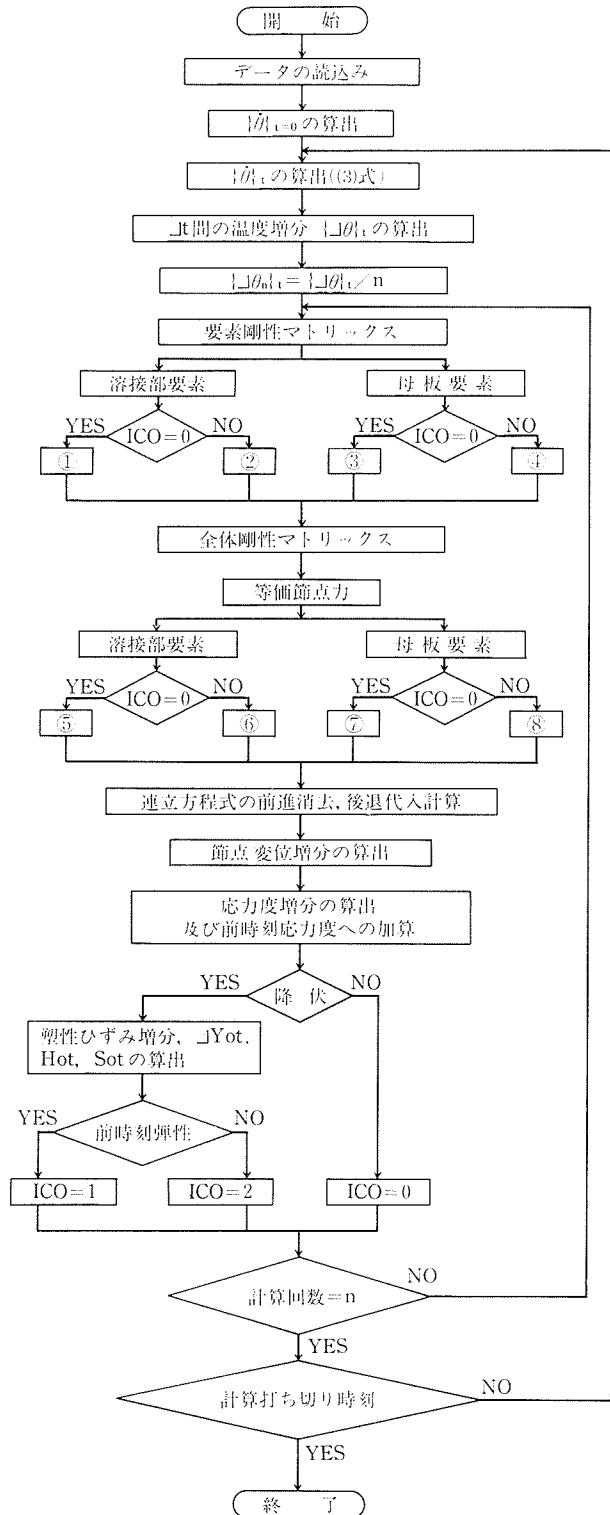


図-4

- ①  $[K] = \int B_1^T D B_1 d \text{ vol}$
- ②  $[K] = \int B_1^T (D - D') B_1 d \text{ vol}$
- ③  $[K] = \int B_2^T D B_2 d \text{ vol}$
- ④  $[K] = \int B_2^T D B_2 d \text{ vol} - \int B_2^T D' B_{20} d \text{ vol}$
- ⑤  $[F] = \int B_1^T D D_c B_1 d \text{ vol} \{ \delta_t \} - \int B_1^T D D_c (\varepsilon_{ot}^p + \varepsilon_{ot}^e) d \text{ vol} + \int B_1^T D (d\varepsilon_{ot}^e) d \text{ vol}$
- ⑥  $[F] = \int B_1^T (D - D') D_c B_1 d \text{ vol} \{ \delta_t \} - \int B_1^T (D - D') D_c (\varepsilon_{ot}^p + \varepsilon_{ot}^e) d \text{ vol} + \int B_1^T (D - D') (d\varepsilon_{ot}^e) d \text{ vol} + \int B_1^T P d \text{ vol}$
- ⑦  $[F] = \int B_2^T D D_c B_2 d \text{ vol} \{ \delta_t \} - \int B_2^T D D_c (\varepsilon_{ot}^p + \varepsilon_{ot}^e) d \text{ vol} + \int B_2^T D (d\varepsilon_{ot}^e) d \text{ vol}$
- ⑧  $[F] = \left( \int B_2^T D D_c B d \text{ vol} - \int B_2^T D' D_c B_{20} d \text{ vol} \right) \{ \delta_t \} - \int B_2^T (D - D') D_c (\varepsilon_{ot}^p + \varepsilon_{ot}^e) d \text{ vol} + \int B_2^T (D - D') (d\varepsilon_{ot}^e) d \text{ vol} + \int B_2^T P d \text{ vol}$

ただし,  $D = D_{t+\Delta t}$ ,  $D_c = dC_t D_t$ ,  
 $D' = \frac{D_{t+\Delta t} H_{ot} H_{ot}^T D_{t+\Delta t}}{S_{ot}}$ ,  
 $P = \frac{D_{t+\Delta t} H_{ot} \Delta Y_{ot}}{S_{ot}}$

$B_1$ : 3 角形要素内の任意点のひずみと節点変位の関係を表わすマトリックス。

$B_2$ : 4 辺形要素内の任意点のひずみと節点変位の関係を表わすマトリックス。

$B_{20}$ : マトリックス  $B_2$  に要素中央点の  $x, y$  座標を代入して得られたマトリックス。

- ICO 0: 弾性要素
- 1: 遷移要素(弾性→塑性)
- 2: 塑性要素

### 3. 要素分割方式及び時間刻みについて

具体例について要素分割方式および時間刻みを検討した。

計算に用いたヤング係数  $E$ 、降伏点応力度  $\sigma_Y$  は図-5 に点線で示した実験結果<sup>7)</sup>を参照し、実線のように仮定した。なお、700°C 以上では、計算用プログラムの都合で温度によらず母板の  $\sigma_Y$  は 25 kg/cm<sup>2</sup>、溶着金属の  $\sigma_Y$  は 35 kg/cm<sup>2</sup>、各材の  $E$  は 2100 kg/cm<sup>2</sup> とした。また、等価応力-ひずみ関係はひずみ硬化を無視した完全弾塑性型を仮定した。その他、計算に用いた諸値は温度によって変化しないとして、次の値を用いた。

母板の熱伝導率 0.117 cal/cm<sup>2</sup>·sec·°C、単位体積当り熱容量 0.866 cal/cm<sup>3</sup>·°C、

空気の熱伝達率  $0.166 \times 10^{-3}$  cal/cm<sup>2</sup>·sec·°C、空気及び母板の初期温度 0°C、ポアソン比 0.3

1) 温度分布計算について：図-6 の 300×600 mm、厚さ 10 mm の板の AB 間を、A から 0.3 cm/sec の速度で熱量  $Q=700$  cal/sec の火点が移動する場合について、時間刻みを 1 秒として、次の 4 種の分割方式で計算を行った。

- I) 図-6 の分割方式。
- II) 火点が移動する縁に沿った要素の X 方向辺長を I) の 1/3、Y 方向辺長は I) に同じ。
- III) X 方向は II) に同じ、Y 方向辺長を II) の 1/2 とした場合。
- IV) X 方向辺長は II) に同じ、Y 方向辺長を II) の 1/3 とした場合。

表-1 は得られた結果のうち、火点が B 点に達したときの B 点の温度及び図-6 でハッチしてある部分の全平均温度を掲げたものである。表によると B 点の温度は分割方式により異なるが、同一面積内の平均温度の差は比較的小さい。

表-2 は、図-6 の分割について時間刻み  $\Delta t$  を 20、10、5 秒と変えて解析したときの図-6 ハッチ部の要素中央点の温度である。 $\Delta t=20$  秒は、節点に火点が到達したときのみ温度計算した場合である。 $\Delta t=1$  秒として計算した表-1 の I) の結果も含めて比較すると、 $\Delta t=20$  秒は不適當で

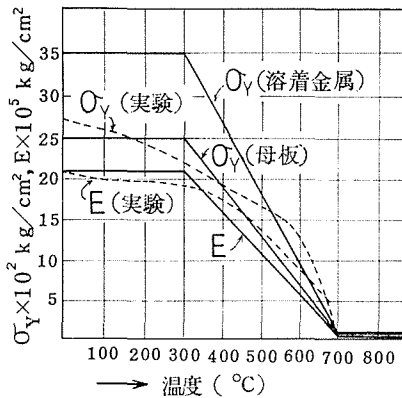


図-5

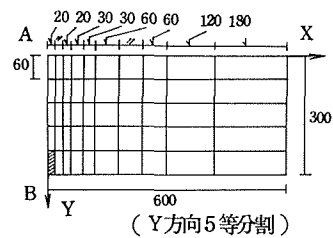


図-6

表-1 (°C)

	I	II	III	IV
B点の温度	3256	3636	5194	7132
平均温度	1194	1140	1113	1117

表-2 (°C)

$\Delta t$ (sec)	20	10	5
平均温度	1165	1187	1193

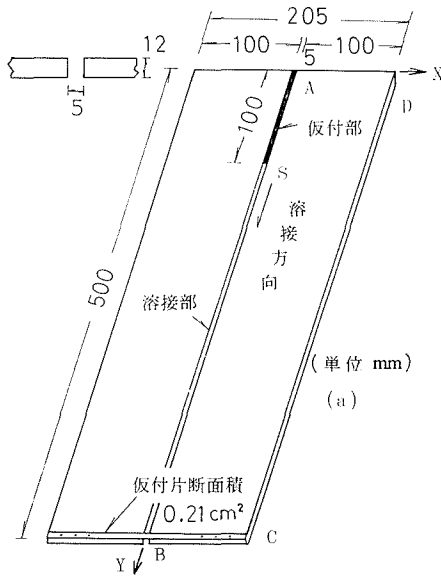


図-7

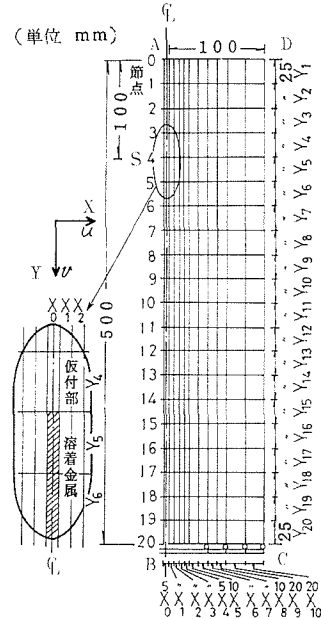


図-8

あることがわかる。

以上より、要素中央点の温度計算を目的とするときは、表-1のⅢ)の分割、表-2の  $\Delta t=5$  秒で概ね妥当な結果が得られるものとする。

2) 応力計算について：図-7に示す試験片を想定し、前記1)の検討結果を参考にして図-8に示すように要素分割し、SB間を  $S$  から  $0.25 \text{ cm/sec}$  の速度で  $Q=700 \text{ cal/sec}$  の火点が移動

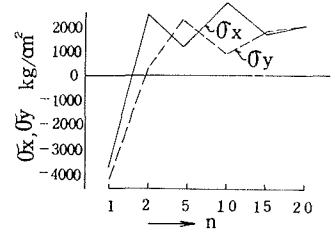


図-9

するとし、時間刻み  $\Delta t=5$  秒として温度計算を行った。一方、弾性計算結果は大凡温度分布の精度に支配されるのに対し、弾塑性解析の場合は塑性ひずみが蓄積されていってその後の応力計算結果に影響を与える。このため温度計算は前記のように  $\Delta t=5$  秒で行うが、この5秒間の要素内温度変化を線型と仮定し、 $\Delta t=5$  秒を  $n=1, 2, 5, 10, 20$  等分した時間を応力計算の時間刻みとした。溶着金属の凝固温度は  $1900^\circ\text{C}$  とした。得られた結果のうち、火点が点6に達したときの  $(X_0, Y_4)$  要素の応力度  $\sigma_x, \sigma_y$  の  $n$  による変化をみると図-9のようになった。要素の位置によって応力計算の時間刻みの影響は若干異なるが、図-9によると時間刻みを小さくすると応力度は一定値に収束する傾向を示すものの、なお応力度は  $n$  によって変動するようである。また別に検討した結果によると、入熱量が大きい場合は、小さい場合に比べて要素内の温度変化が大きいので時間刻みを小さくする必要がある。

#### 4. 解析例

解析は図-8のモデルについて、表-3に示すように入熱量を2通りに変え、比較のため弾性解析も併せて行なった。なお凝固温度は  $1450^\circ\text{C}$  と仮定した。

図-10に、得られた結果のうち EA 25-1 と PA 25-1 の母板の変形状態を、溶接開始後80秒及び160秒について示す。仮付部及び80秒までに凝固した溶着金属の部分の変形は、160秒にな

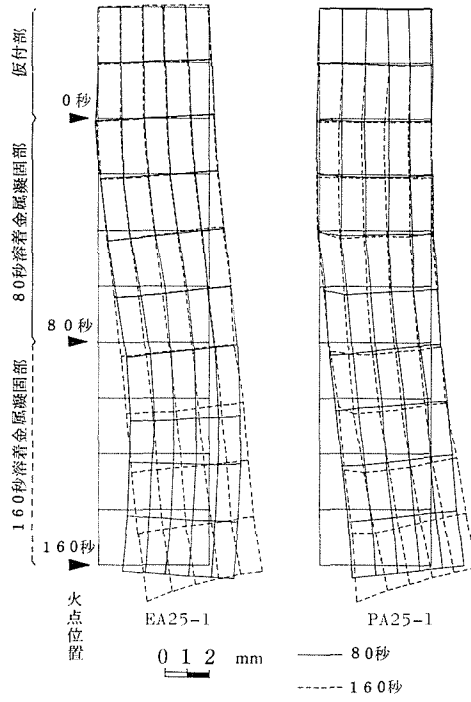


図-10

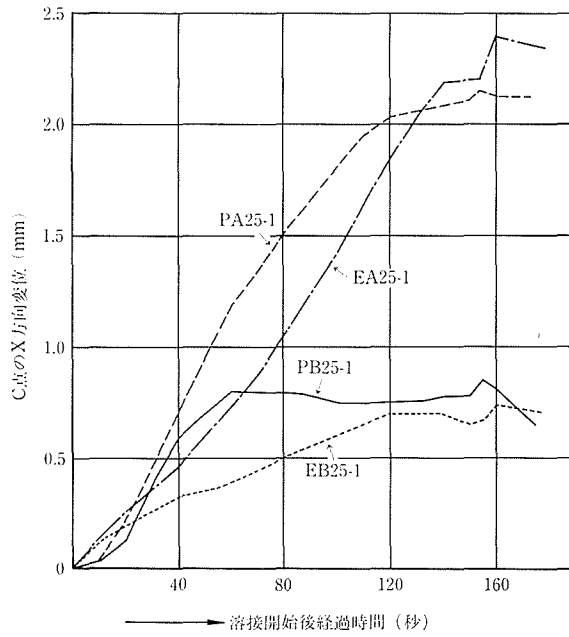


図-11

表-3

解析仮定	記号	入熱量 (cal/sec)
弾性	EA 25-1	535.7
	EB 25-1	625.0
弾塑性	PA 25-1	535.7
	PB 25-1	625.0

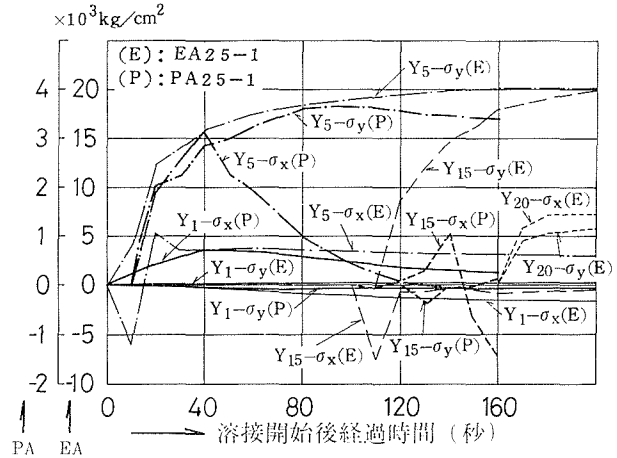


図-12

っても余り変化はないが、80秒で溶着金属が凝固していない終点B側の各点の変位は80秒と160秒とは異なる。またPA 25-1には溶接辺に沿って塑性ひずみの影響とみられる変位が生じていて、その結果溶着金属が凝固していないB端側の母板の変形が、EA 25-1のそれと違った傾向を示している。

図-11は、C点のX方向変位の変化を示したものである。図からEA 25-1とEB 25-1、PA 25-1とPB 25-1とを比べると、夫々入熱量の少ない前者の変位が大きい。

一方、図-12にEA 25-1とPA 25-1の溶接部における $Y_{1,5,15,20}$ 各要素中央点の応力度 $\sigma_x, \sigma_y$ の火点移動に伴う変化を示す。図に示すように弾性解析と弾塑性解析の相違として応力度の変化の態様が著しく異なる形で現われている。

### 5. 結 言

以上、有限要素法による溶接時応力解析法について述べるとともに、要素分割の方式及び時間刻みが解析結果に及ぼす影響について若干の検討結果と解析例を示した。今後、実験との比較を行って計算法の検証を行うとともに、種々の周辺条件を与えた場合の解析を行い検討していきたいと考える。

最後に、本研究は柴田拓二教授、小幡守教授の御指導によるものであることを記し、感謝の言葉に代える次第です。

### 参 考 文 献

- 1) 上田幸雄, 山川武人: 溶接学会誌, 42 (昭和48), 6, pp. 61-69.
- 2) Beer, G.: DER STAHLBAU, 9 (1976), pp. 263-268.
- 3) 辻 勇, 小川量也: 溶接学会誌, 45 (1976), 1, pp. 36-41.
- 4) 佐藤邦彦・他: 日本造船学会論文集, (昭和44), 126, pp. 445-458.
- 5) Zienkiewicz, O. C., Cheung, Y. K. (吉識雅夫監訳): マトリックス有限要素法 (1970), 培風館.
- 6) Cyr. N. A., Teter. R. D., Stocks. B. B.: Proc. of ASCE, St. 7 (1972), pp. 1585-1603.
- 7) 渡辺正紀: 溶接学会誌, 19 (昭和25), 3, pp. 24-35.
- 8) 小幡 守, 土屋 勉, 佐藤勝次: 日本建築学会大会梗概集, (1975), pp. 773-774.