

溶接で生じる残留応力，溶接変形の 数値解析手法に関する研究

九州工業大学 寺崎俊夫，○山川大祐

Study on Accurate Numerical Analysis of Welding Residual Stress and Welding Deformation

by Terasaki Toshio, Yamakawa Daisuke

キーワード：有限要素法，固有ひずみ，残留応力

Keywords：FEM, Inherent strain, Residual stress

1. 緒言 溶接により発生する残留応力・溶接変形を数値解析する手法として熱弾塑性有限要素法(FEM)が一般に用いられ，種々の知見が報告されている¹⁾²⁾。しかし，実験値と比較検討を行った数値解析手法での数値解析値の報告は少ない。溶接現象は熔融温度から室温まで温度変化が大きく，材料定数や境界条件の取り扱いなど解析を行う上で注意しなければならない項目が多くあり，それらを明確にする必要がある。これらの問題点を明確にするために，本研究では軟鋼のビードオンプレート溶接を対象とし，実験値と数値解析値を比較検討しながら，高精度な数値解析手法を確立する上での注意点である要素分割の方法，材料定数の温度依存性を検討した。

2. 要素分割の方法 溶接熱源には熱源移動方向にガウス分布，直角方向には一様な熱量を投与した形で近似して熱伝導のFEM解析を行った。溶接線方向の要素分割は力学的熔融温度 θ_M に注目し，移動線熱源による等温度曲線を考察した。溶接熱源とともに原点が移動する移動座標から次式で温度上昇 T が取り扱える。

$$T = \theta - \theta_0 = (Q_{net} / 2\pi\lambda h) \cdot \exp(-vx / 2k) \cdot K_0(vr / 2k)$$

ただし， Q_{net} ：真の溶接入熱， λ ：熱伝導率， v ：溶接速度， k ：熱拡散率， θ_0 ：板の初期温度， K_0 ：第2種変形ベッセル関数， $r^2 = x^2 + y^2$ 溶接熱源後方の溶接線上の温度を $\theta_{y=0}$ とすると， $\theta_{y=0}$ の位置 $|x|_{y=0}$ ($= -x_{y=0}$)は次式となる。

$$|x|_{y=0} = -x_{y=0} = (v / 4\pi\lambda c\rho) \cdot (Q_{net} / h)^2 \cdot \left\{ 1 / (\theta_{y=0} - \theta_0) \right\}^2$$

ただし， c ：比熱， ρ ：密度従って， θ_M 以上になる x 方向の寸法 l_M は上式において $\theta_{y=0} = \theta_M$ とした次式となる。

$$l_M = (v / 4\pi\lambda c\rho) \cdot (Q_{net} / h)^2 \cdot \left\{ 1 / (\theta_M - \theta_0) \right\}^2$$

 l_M は溶接線上の要素が θ_M 以上となるための x 方向の要素分割寸法 l_x の一つの基準となる。溶接線直角方向の温度上昇 T は一般に瞬間平面熱源式で与えられ， y 点と最高温度上昇 T_{max} の関係は次式で与えられる。

$$T_{max} = \theta_{max} - \theta_0 = (0.242 Q_{net} / cph) \cdot 1 / y$$

$$\therefore y = (0.242 Q_{net} / cph) \cdot (1 / T_{max})$$

θ_M と固有ひずみ発生域を決める最高温度上昇 T_p ($=102^\circ\text{C}$)， $2T_p$ を基本にして，830，550，400，300，200，150，125，100 $^\circ\text{C}$ となる位置，100 $^\circ\text{C}$ 以下の温度上昇の位置では隣接節点の長さが2倍以下になるように節点を設けた。なお，溶接は板幅中央断面で行われるため，溶接線に対して対称部分のみ要素分割し，溶接線(x 軸)上は溶接線直角(y)方向に拘束し，原点(左下端)の節点のみ x ， y 拘束とした。

力学的熔融温度の寸法 l_M が5mmとなる溶接条件において，要素の1辺の長さを $l_x = 10\text{mm}$ と $l_x = 3.3\text{mm}$ とし，計算結果の比較検討を行った。Fig.1に溶接線に沿った固有ひずみ g_x の分布

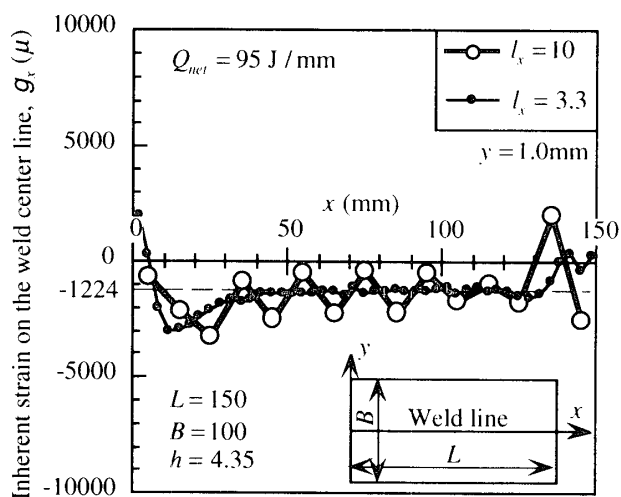


Fig.1 Distribution of inherent strain g_x in the vicinity of weld center line

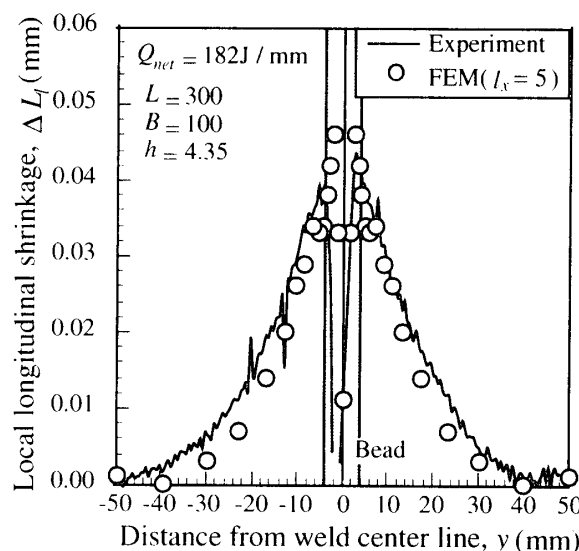


Fig.2 Comparison of numerical results with experimental data of local longitudinal shrinkage

を示す。固有ひずみ g_x の振動の有無から溶接線方向の要素長 l_x は力学的溶融温度の寸法 l_M より小さくする必要がある。次に力学的溶融温度の寸法 l_M が 11 mm となる溶接条件での局部縦収縮について実験値と解析値を比較した。溶接線方向の要素長を l_M の約 1/2 である 5 mm ($l_x = 5$) とした計算結果を Fig.2 に示す。 $l_x = 5$ mm の FEM の計算結果は実験値に良く一致しており、精度良く予測できている。このことから数値解析での l_x は l_M の 1/2 以下にするのが一つの目安となる。

3. 材料定数の温度依存性 FEM を用いて溶接現象の熱弾塑性解析を行う際には種々の材料定数の温度依存性を与えなければならない。そこで溶接の力学的問題を取り扱う際に重要である線膨張係数 α 、ヤング率 E 、降伏応力 σ_y の温度依存性が数値解析結果に与える影響について検討した。線膨張係数 α 、ヤング率 E 、降伏応力 σ_y の温度依存性を変化させ解析を行った結果、横収縮に関しては線膨張係数 α の温度依存性が大きな影響を及ぼした。溶接長断面での固有ひずみ g_x の分布においては、降伏応力の最高温度上昇 T_p 近傍での温度依存性は固有ひずみ発生域に影響を及ぼすことから、解析時には実験により求められる室温、 T_p 、 $2T_p$ での正確な降伏応力の温度依存性を与える必要がある。

4. 結論 本研究では FEM により溶接熱弾塑性挙動を数値解析する際の適切な要素分割方法および解析結果に及ぼす材料定数の温度依存性の影響を検討した。

- (1) 溶接線上の要素は溶接線方向 (x) に関しては、移動線熱源で計算される θ_M の寸法 l_M の 1/2 で分割する。溶接線直角方向 (y) には θ_M 、 T_p 、 $2T_p$ を考慮し、要素分割を行う。
- (2) 線膨張係数 α の温度依存性は横収縮に影響を与えるため重要である。また降伏応力 σ_y の温度依存性は溶接線方向の固有ひずみに影響を与えるため、室温、 T_p 、 $2T_p$ での降伏応力が重要となる。

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, Vol.42 (1973), 567-577 2) 藤田譲, 野本敏治, 熱加工に伴う変形の弾塑性解析について, 溶接学会誌, Vol.45 (1976), 22-28