

スイッチバック溶接溶融池の数値シミュレーションと可視化

渡辺正寛 堂森雄平 宮下健 山根敏 金子裕良

埼玉大学 理工学研究科 電気電子システム工学コース 電気機器研究室

目的

溶接トーチを一定速度で前進させるのみの溶接法(従来溶接)は、溶込み形状は常に一定である。これに対してトーチモーションを工夫し、トーチを溶接線に沿って前後に周期的に動かしながら溶接していくスイッチバック溶接法の溶込み形状は、トーチモーションとともに溶込み形状も周期的に変動する。母材裏面に発生する溶融金属(裏溶融池)の幅を同じに保った場合、スイッチバック溶接は従来溶接よりも裏溶融池の長さを短く制御させることが可能であり、従来溶接よりも溶落ちにくく安定した溶接が可能である。しかし、従来溶接よりも多くの入熱を必要とするため、溶接により生じる変形(溶接変形)が従来溶接よりも大きくなると予想されるが、スイッチバック溶接において溶接変形に関する研究はまだ行われていない。

溶接の進行に関わらず溶込み形状が一定の場合は、溶接中(加熱時)に生じる母材の変形の挙動が明らかにされており、入熱・板の形状・トーチの速度から、溶接後(冷却時)に生じる変形の予測式も提案されている。しかし、スイッチバック溶接のような、溶込み形状が常に変化する場合の溶接プロセス中に生じる変形の挙動は明らかにされていない。本研究では、まず、スイッチバック溶接によって形成される母材内部の溶込み形状と母材の変形を数値シミュレーションによって計算し、計算結果をcaveを用いて3次元立体画像に可視化する。これにより、スイッチバック溶接プロセス中に溶込み形状の変化と、それに伴い母材に生じる変形の挙動を明らかにする。次に、スイッチバック溶接と溶接変形量を比較し、変形量が従来溶接と大差なく、矯正等の余分な工程を設けなくとも溶接可能か、スイッチバック溶接の実用性を評価する。

数値シミュレーションによる溶込み形状，母材の変形量の計算

1. 数値シミュレーションモデル

母材の長さ 150mm，板幅 50mm，板厚 3.2mm の軟鋼板(SS400)2 枚を，突合せ継手で片面アーク溶接にて接合する場合について考察する。図 1(a)に示すような数値モデル(母材の長さ 150mm，板幅 100mm，板厚 3.2mm)で，溶接進行方向位置 $x=5\text{mm}$ から $x=105\text{mm}$ まで溶接する場合について解析する。解析モデルを要素分割するとき，幅方向は熱源中心から幅方向両側 20mm の領域の格子点間隔は 1mm とし，その外側の格子点間隔は 10mm とした。板厚方向の格子間隔は 0.8mm とし，溶接進行方向の格子間隔は 1mm とした。

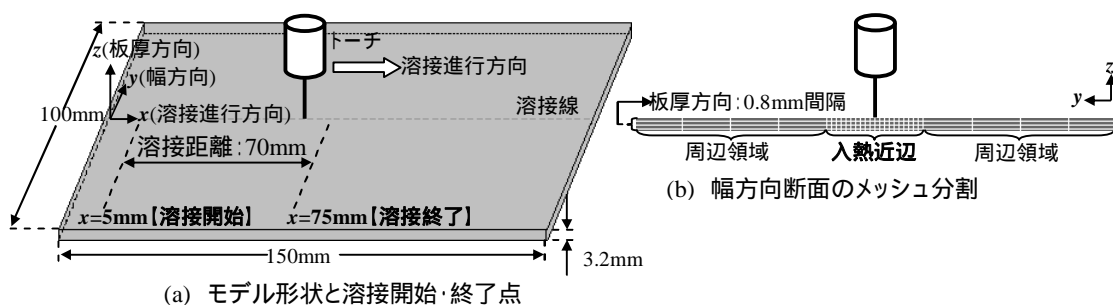


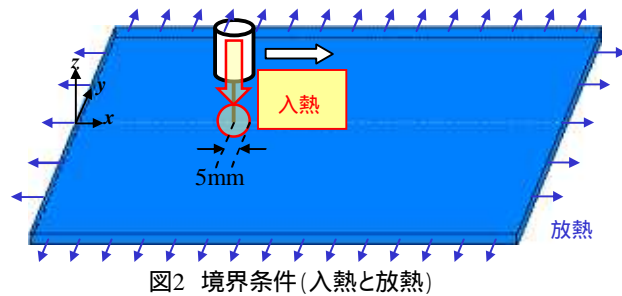
図1 数値シミュレーションモデル

2. 基礎方程式

溶接によって母材にアーク熱が与えられ、板内に生じる温度分布は次式の熱伝導方程式が支配的であるとする。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q \quad (1)$$

ここで、 T は時刻 t 、位置 (x, y, z) における温度を示し、 κ 、 ρ および c はそれぞれ母材の熱伝導率、密度および比熱である。右辺の Q は板に出入りする熱であり、入熱 $Q_h (<0)$ 放熱 $Q_c (>0)$



の和となる。入熱 Q_h と放熱 Q_c は境界条件として与える。図2のように母材に与えるアーク熱を半径5mmの円形熱源として表現し、半径5mmの円形内が入熱領域となり、入熱 Q_h の境界条件はフーリエの熱伝導則を用いて以下のように表される。

$$Q_h = -\kappa \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{\text{surface of model in heat input area}} \quad (2)$$

大気への放熱は入熱領域を除いた表面で行われ、ニュートンの冷却則を用いて次式より境界条件を与える。

$$-\kappa \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0,150} = \beta(T - T_0) \quad -\kappa \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=-50,50} = \beta(T - T_0) \quad -\kappa \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0,3,2} = \beta(T - T_0) \quad (3)$$

ここで、 β および T_0 はそれぞれ大気への放熱係数および大気温度であり $T_0=298\text{K}(=25^\circ\text{C})$ とした。

式(2)および式(3)の境界条件を用いて、式(1)によりモデル各格子点温度を求め、SS400の融点(1807K)以上の領域を溶融池とする。この温度分布から次式によりモデル各格子点に生じる変位 (u, v, w) を求め、溶接変形量を計算する。

$$\nabla^2(u, v, w) + \frac{1}{1-2\nu} \left(\frac{\partial e}{\partial x}, \frac{\partial e}{\partial y}, \frac{\partial e}{\partial z} \right) = \frac{2(1+\nu)}{1-2\nu} \alpha \left(\frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial y}, \frac{\partial T}{\partial z} \right)$$

ただし $e = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$ 、 $\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}$ 、 $\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}$ 、 $\varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}$ である。

ここで、 u, v, w は x, y, z 方向の変位、 e は体積膨張、 ν はポアソン比、 α は線膨張係数である。モデル各格子点の温度分布、変位はMSC社の有限要素法解析ソフト Marc Mentat を用いて3次元FEM解析により数値計算する。

3. 溶接条件

従来溶接、スイッチバック溶接の溶接条件を図3に示す。溶接速度(トーチの平均移動速度)は、いずれの溶接法においても25cm/min(4.17mm/s)とする。スイッチバック溶接のトーチモーションは、前進速度 v_f が後退速度 v_b より速く、スイッチバック1周期で進む溶接距離は5mmとする。母材に与える入熱量は、母材裏面に発生する溶融金属(裏溶融池)の幅を4mmとするように調整した。スイッチバック溶接の方が従来溶接よりも入熱量が多い。数値

シミュレーションによって、スイッチバック溶接プロセス中の変形挙動を明らかにし、スイッチバック溶接の溶接変形量が従来溶接と大差ないか解析する。

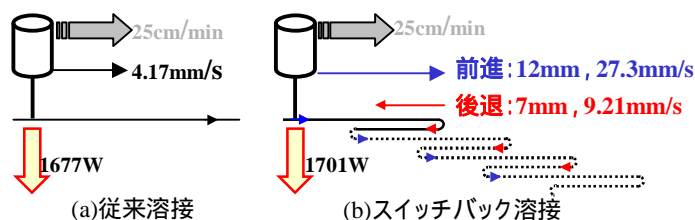


図3 溶接条件

数値シミュレーション結果

1. 一定速度前進溶接(従来溶接法)における溶接変形過程

従来溶接法における溶接プロセス中に生じる溶込み形状および母材の形状の変化を図4に示す。1807K以上の領域が溶融金属(溶融池)となる。溶接線上の進行方向断面図より、従来溶接法によって形成される溶融池は常に一定の形状で、トーチの移動とともに前方に移動する。熱源が $x=55\text{mm}$ 地点に近づくとアーク熱が母材に与えられ、進行方向位置 $x=55\text{mm}$ 地点の幅方向断面図より、加熱された溶接線近傍の表面領域は熱膨張を起こし板厚方向(+z 方向)に変位する。裏面に向かって溶込みが深くなっていくとともに溶接線近傍の裏面領域も熱膨張が起き、母材裏面は-z 方向に変位する。溶込みが始まってから裏溶融池幅が最大となるまで熱膨張が生じ、その後は溶融池の消滅とともに熱膨張量が減り、収縮過程に移る。加熱された高温領域が冷却されて周辺領域を引っ張り、モデル全体が一体となって変形し、徐々に溶接線を軸として折れ曲がった形状となる。従来溶接の場合は、トーチは $x=55\text{mm}$ 地点を1回しか通過しないので、溶込みによる熱膨張は1回のみであり、1度熱膨張したら溶接の前方へ移動するとともに加熱部分は冷却して収縮が始まり、溶接線近傍の領域は-z 方向に、モデル端は+z 方向に変位する。

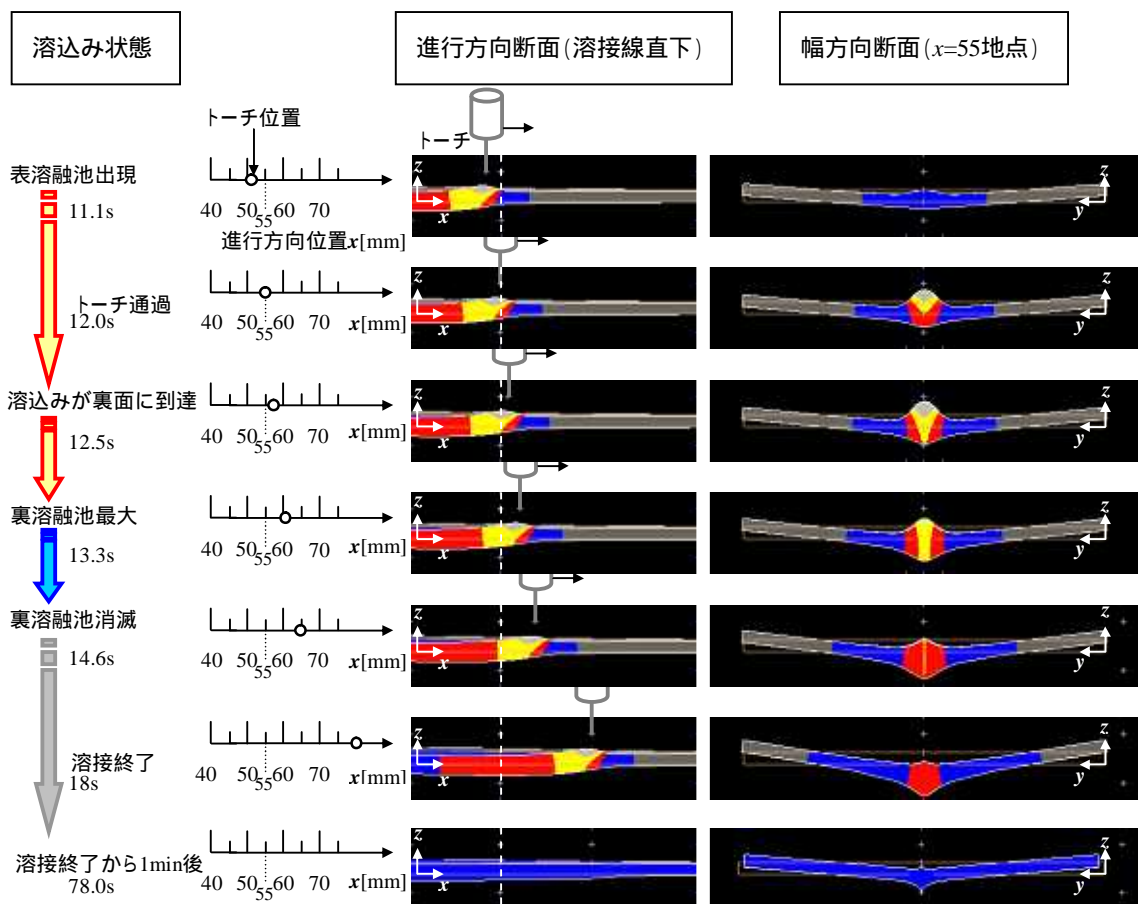


図4 溶接プロセス中の変形(従来溶接)

2. スイッチバック溶接における溶接変形過程

スイッチバック溶接法における溶接プロセス中に生じる溶込み形状および母材の形状の変化を図 5 に示す。スイッチバック溶接はトーチモーションとともに溶融池が周期的に変動し、裏溶融池は発生と消滅を繰り返す。トーチは前進・後退を周期的に繰り返すので、同一箇所を熱源が複数回通過する。裏面まで完全に溶込む周期の 2 周期前から熱源が $x=55\text{mm}$ 点を通り、溶込みが始まる。以下に、スイッチバック溶接による溶込み過程を示す。

(1) 完全溶込み周期から 2 周期前(9 周期目)

この周期に初めてトーチが $x=55\text{mm}$ 点を通り、表溶融池が発生する。前進時に少し溶込み(予熱)を与える。後退時には熱源トーチが $x=55\text{mm}$ の後方に移動するので溶込み部分は小さくなるが、 $x=55\text{mm}$ 地点周辺が熱伝導により加熱されて 800°C 以上となり、安定した溶込みを得やすい状態になる。

(2) 完全溶込み周期から 1 周期前(10 周期目)

前進時、再び熱源が $x=55\text{mm}$ 地点を通り。前の周期であらかじめ熱を与えておいたので、この周期の後退動作時には $x=55\text{mm}$ 地点の裏面近くまで溶込みが得られる。

(3) 完全溶込み周期(11 周期目)

この周期の前進動作時に、前の周期である程度の深さまで得られた溶込み部分が熱伝導によって裏面まで到達し、前進終了時には $x=55$ 地点の裏溶融池が最大となる。後退時にはこの周期で形成された裏溶融池は消滅し、次の周期で裏溶融池を形成するために、 $x=55$ 地点より前方の部分が裏面近くまで溶込みが得られている。

スイッチバック溶接は周期的に溶込みを発生させるのと同期して、母材も周期的に板厚方向に上下しながら変形していく。モデル端は前進時に $+z$ 方向に変位し、後退時に $-z$ 方向に変位している。溶接終了後に 1min 経過した後の幅方向断面図より、溶接終了後の冷却過程で生じる変形の傾向は従来溶接と同じであり、溶接線近傍領域は $-z$ 方向に変位し、モデル端は $+z$ 方向に変位している。

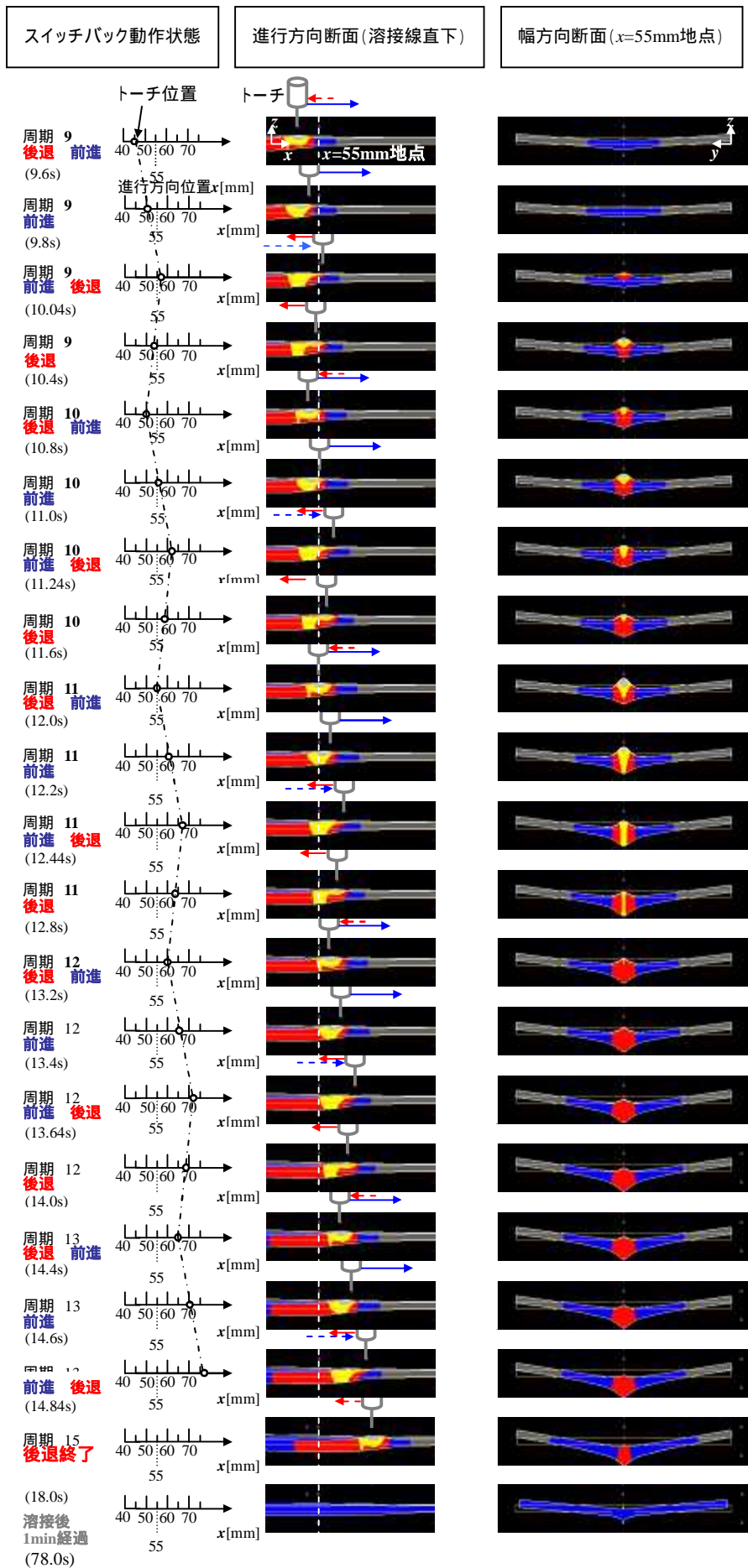


図5 溶接プロセス中の変形(スイッチバック溶接)

3. 溶込み状態の比較

図6のように溶込み過程を4つの状態に分け、それぞれの状態へ移るまでの時間を比較する。スイッチバック溶接は従来溶接に比べ溶込み期間が長い。これは、同一箇所に熱源が複数回通過させることで入熱と放熱を繰り返しながら熱を分散させて与えているので、ゆるやかに溶込まれていると考えられる。また、裏ビード形成期間がスイッチバック溶接の方が短いことは、スイッチバック溶接の方が裏溶融池を小さく形成できるので裏面の冷却が早く、外乱により入熱が増大しても溶落ちにくいことを示している。

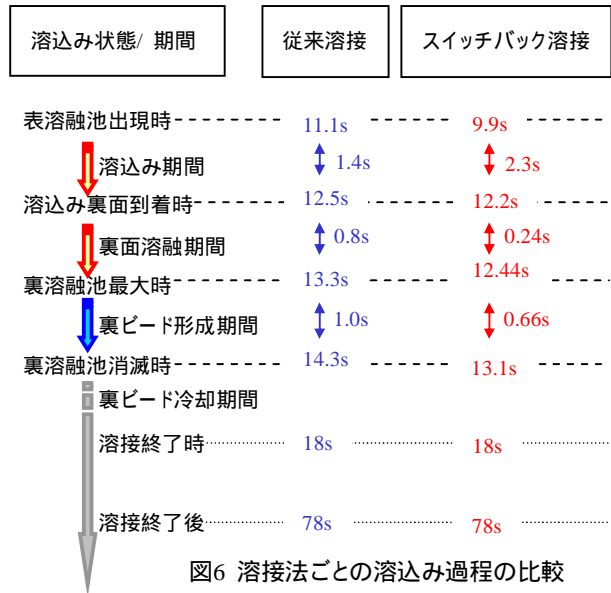


図6 溶接法ごとの溶込み過程の比較

4. 時間変化の比較

(1) 温度時間変化(溶接線上)

図7に示すような進行方向位置 $x=55\text{mm}$ 地点の溶接線上の点 A(55, 50, 3.2), B(55, 50, 0)における温度時間変化は図8(a), (b)のようになる。スイッチバック溶接の表面は熱源の通過とともに温度が上下するが、裏面は徐々に加熱されていくことから、安定して裏面を発生させるために熱が分散されて与えられていることがわかる。

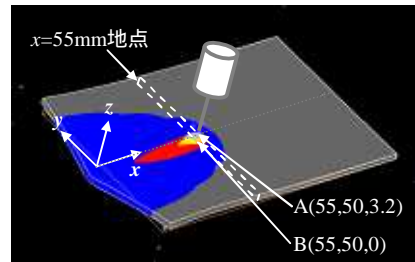
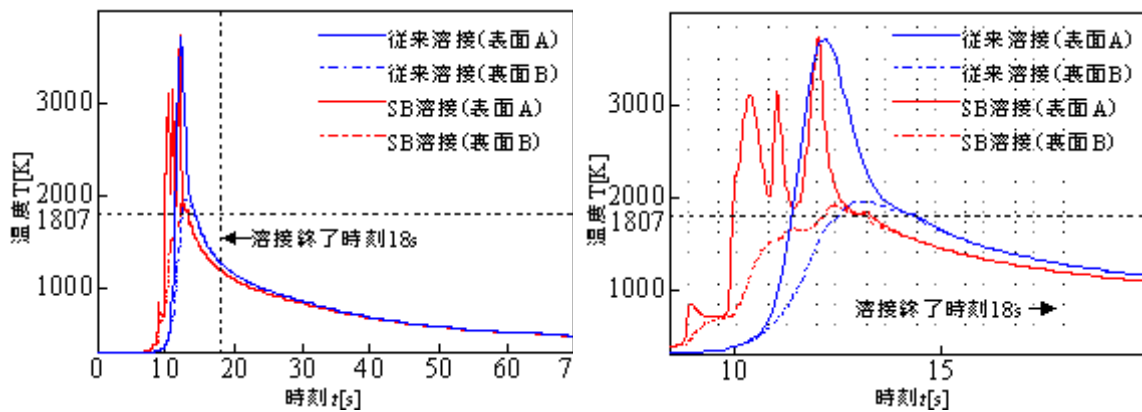


図7 温度時間変化観測点



(a) 冷却過程も含めた時間変化

(b) 加熱時の拡大図

図8 温度時間変化の比較

(2)板厚方向変位時間変化(モデル端)

図 9 に示すような進行方向位置 $x=55\text{mm}$ 地点のモデル端の点 A(55, -50, 3.2), B(55, -50, 0)における板厚方向変位 Δz の時間変化は図 10(a), (b)のようになる。いずれの溶接法においてもモデル端は、溶接中は板厚方向(+z 方向)変位が上昇していき、溶接終了後は変位が減少して最終的に一定の変形量に収束すると考えられる。スイッチバック溶接では前進時に+z 方向に変位し、後退時に-z 方向に変位する。前進時にモデル形状が反り上がり(V 字型に近づき)、後退時に反り上がりが弱まる(水平に近づく)ような変形過程であることがわかった。周期的に変位が上下していくが、変位の平均的な上昇は従来溶接とほぼ同じである。従来溶接とスイッチバック溶接において、溶接終了直後と溶接終了から 1min 経過後の板厚方向変形量を比較すると表 1 のようになる。溶接法の違いによる板厚方向変形量の差は、溶接終了直後よりも溶接終了から 1min 経過後の方が小さくなっていることから、母材が十分冷却したあとの最終的な板厚方向変形量はスイッチバック溶接の方が従来溶接よりも大きい、ほぼ大差ないことが考えられる。

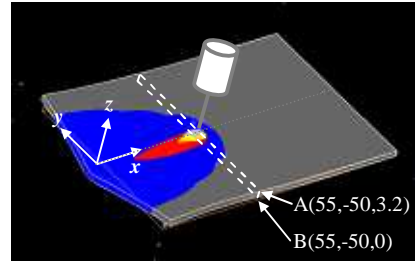
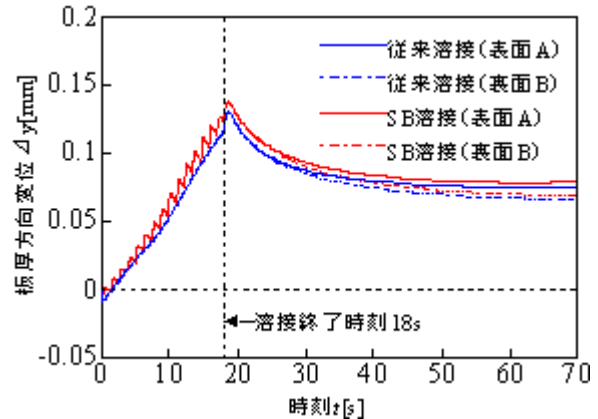
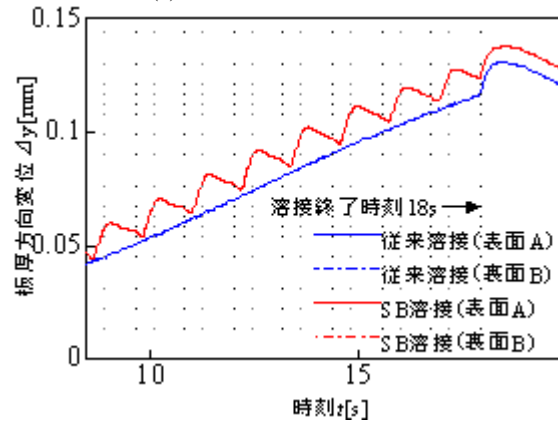


図9 板厚方向変位 y時間変化観測点



(a)冷却過程も含めた時間変化



(b)加熱時の拡大図

図8 温度時間変化の比較

表 1 進行方向位置 $x=55\text{mm}$ 地点のモデル端における溶接変形量(板厚方向変位 y)の比較

	溶接終了時(t=18s)			溶接終了から 1min 経過後(t=78s)		
	従来溶接	SB 溶接	変形量の差	従来溶接	SB 溶接	変形量の差
表面の変形比較【観測点:(55,50,3.2)】	0.116mm	0.123mm	0.007mm	0.0745mm	0.0790mm	0.0045mm
裏面の変形比較【観測点:(55,50,0)】	0.117mm	0.124mm	0.007mm	0.0658mm	0.0695mm	0.0037mm

結論

シミュレーションによる計算結果を、cave を用いて 3 次元立体画像に投影して可視化した結果、スイッチバック溶接によって形成される板内の溶込み形状の周期的な変化が理解でき、さらに溶接プロセス中に生じるモデル形状の変形の挙動が理解できた。また、スイッチバック溶接によって生じる溶接変形(板厚方向)においては、溶接プロセス中は周期的に変動しながら上昇していくが、最終的な変形量は従来溶接と大差ないことがわかった。