B03 ISM(反復サブストラクチャー法)を用いた溶接組立構造の変形解析

岩本　拓也　(指導教員 柴原・深沢)

Analysis for deformation of Welding Structure Using Iterative Substructure Method

by　Takuya Iwamoto

Abstract

The welding is necessary at the assembly of the hull block. However, the deformation is always generated. This welding deformation causes the quality loss and the deterioration of strength of the structure. Moreover, the automation is prevented by these problems. On the other hand, recently, Due to development of the structural technology, more light and strong structure is developed. However, the buckling distortion is determined by only on a geometrical condition. As a result, large deformation is generated easily by the bucking distortion in recent years. Therefore, it is important to examine and predict the buckling behavior in detail from the viewpoint on practical use.

Then, thermal-elastic-plastic FEM is used in this research. Using thermal elastic plastic FEM, it is possible to simulate the transient stress and displacement precisely. However, by using the method, it takes large computing time and these are few applications in the practical welding structure problem. So, in this research, Iterative Substructure Method (ISM) is applied to thermal elastic plastic FEM to achievement face computation. In ISM, the analysis is split into weak non-linear problem and strong non –liner problem considering the characteristics of welding phenomena. Then, the method is applied to the analysis of fundamental welding problem (T-joint) and assembly of complex welding structure. And the buckling behavior is examined by comparing the deformation between experiment and analysis.

1. 緒　　言

船体ブロックなどの組み立て時において，溶接は必要不可欠である．しかし，溶接を行うと必ず溶接変形が発生する．この溶接変形から組み立て時のギャップが生じ，製品の品質低下や構造物の強度低下につながり，また自動化の妨げになっている．これらを改善するための溶接変形の矯正は，小さいものであり，熟練した技術があれば，熱処理を行い，溶接残留応力をほぼ完全に除去できた上，溶接変形も人力または機械力により十分矯正が可能である．しかし，船体ブロックや近年の大型化されている溶接構造物においては，技術，経済的観点から見ても困難である．その上，生産コスト削減の観点から短期間で作成するために溶接作業の高能率化が要求され，多電極高速自動溶接等の新しい溶接技術が実用化されている．一方で，近年，材料力学などの研究技術の発達により，良い材料が次々と開発されるようになってきた．同じ材質でも強度が優れたものを使い，軽量化によりスリムな構造物に変化してきている．しかし，溶接を行った際の溶接変形の一つである座屈変形は，材料の強度とは無関係に，棒なら長いもの，板なら薄いものといった幾何学的な条件だけで決まることが分かっている．これらの結果，以前に比べ，座屈変形による大変形が発生しやすくなっており，近年問題となっている．したがって実用上の観点から座屈挙動を詳細に検討し，溶接変形を定量的に予測することによって自動化につなげることが重要となる．

そこで，本研究では，溶接変形の予測法としてよく用いられているものの一つである陰解法FEM熱弾塑性解析を用いる．この手法は，時々刻々と変化する溶接中における温度場・変位場・応力場を忠実に再現できる利点があり，強力な解析ツールとして広く採用されている．しかし，この手法は，計算時間が長く，溶接組立構造などの問題において適用例が少ないのが現状である．そこで，現実的な計算時間で溶接組立構造の解析を行うために，溶接問題の力学的特性を考慮し，線形問題と非線形問題に分離して計算を行い，計算時間の短縮を図る方法であるISM（反復サブストラクチャー法）を導入し，FEM熱弾塑性解析の高速化を図り，溶接継手問題に適用する．

そして，本研究では，以上の手法を基礎溶接継手（T継ぎ手）解析および, 溶接組立構造解析に対して適用し，同条件の実験を行うことにより，本手法の妥当性および有効性について検討を行い，また座屈変形の挙動について検討を行う．

2. ISM(反復サブストラクチャー法)

ISMとは，溶接問題の力学的特性を考慮することにより，高速な解析を実現させるものである．その溶接問題の力学的特性とは,局所的非線形性と移動非線形が挙げられ

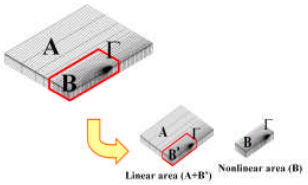

Fig.1 Schematic illustration of ISM

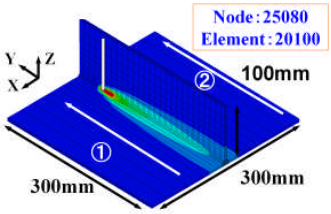

Fig.2 T joint model

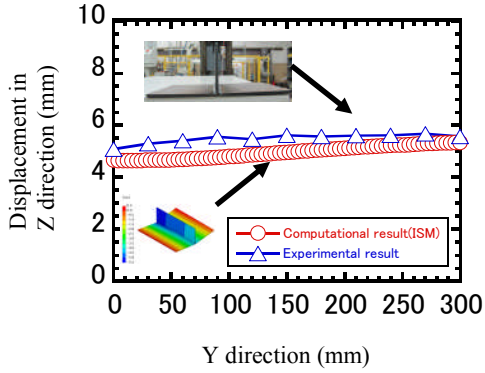

Fig.3 Comparison of displacement between analysis and experiment

る. 一つ目の局所的非線形性とは, 溶接熱源周辺の極めて狭い領域のみ非線形挙動を示し, 大部分を占めるほかの領域では弾性挙動を示すというものである. 大部分を占めるほかの領域では弾性挙動を示すというものである. 二つ目の移動非線形とは, 溶接熱源が移動することで非線形領域も共に移動するというものである. 従来の有限要素法などを利用した溶接シミュレーション法では, ごく一部のみが非線形領域を示す場合においても, モデル全体を非線形領域として解く必要があり, 大規模構造を解く場合においては, 計算時間が非現実的に長くなってしまう.

そこで, 本研究で用いた方法では, Fig.1 のように計算領域を溶接部周辺の非線形領域とその他の領域である線形領域に分けて計算を行う. 線形領域では剛性行列は不変であると仮定し, 前進消去は最初に一度行うだけにし, 後のステップにおける計算は後退代入のみを行う. その結果ステップごとの前進消去の計算時間を短縮する. 一方, 非線形領域では, ステップごとに剛性行列を更新し, 前進消去と後退代入を行い, 熱応力計算を実行する. しかし, 計算領域が従来の方法に比べ小さいため計算時間が短くてすむ. また, 線形領域と非線形領域の境界の変位は, 常に連続するように定義し, 境界における応力の釣り合いは反復計算により満足させる.

次に反復サブストラクチャー法における計算方法を示す. まず, A+B'領域を後退代入のみで計算, これより得られた変位場を境界条件として B 領域に付与し, B 領域の非線形収束計算を行う. これにより得られた B 領域の変位場を B'に移し, A+B'領域での残差を計算. 残差を元にもう一度 A+B'領域での変位解を計算, さらに得られた境界条件を B 領域に付与し, B 領域の非線形収束計算を行う. この過程を繰り返し, 全体が収束するまでの計算を行う.

Table1 Analysis condition

current (A)	voltage (V)	Weld speed (mm/s)	熱効率
180. 0	26. 0	4. 3	0. 7

3. 基礎溶接継手に対する ISM の適用性

3.1 実験・解析モデル及び解析条件

基礎溶接継ぎ手（T 字継手）の溶接実験, 溶接変形解析を行い, 性能評価を行う. 実験・解析条件は, Table1 に示す. またモデルについては, Fig.2 に示すように, 板厚 6.0mm の 300mm×300mm の板に 300mm×100mm の板を継手溶接する T 継手モデルで, 要素分割は 20100 要素, 25080 節点とした. 本モデルを使用し, 左右 2 パス溶接を行ったときの実験結果・解析結果の z 方向変位について検討する.

3.2 実験結果と ISM を用いた溶接変形解析結果の比較

3.2.1 実験結果

横軸に y 方向の距離を始端部を 0 としてとり, 縦軸に実験結果と解析結果を z 方向変位量を示したグラフを Fig. 3 に示す. 実験結果は溶接により溶接線上が少し落ち込み, 両端が浮くような結果が得られ、継手モデルに対して微小な変形であった. また, 計測は片方の端を固定し, 反対側の端をデジタルゲージを用いて z 方向変位を計測した.

3.2.2 解析結果と精度評価

解析結果は溶接始端部に比べ, 溶接終端部で変形量が大きくなっていることが分かる. これは, 溶接線に沿って発生する面外変形である角変形に加え, 溶接速度が比較的遅いことから板の面内変形である回転変形の影響が出ているのではないかと考えられる.

Fig.3 より, 溶接モデルに対して変形量は小さく微小変形であり, 定量的に良好に一致した結果を得た. また計算時間においても 16.7 時間と現実的な解析時間での解析を行うことができた.

4. 溶接組立構造に対する ISM の適用性

4.1 実験・解析モデル及び解析条件

溶接組立構造に対して溶接実験を行い, 溶接変形解析し性能評価する. 実験・解析条件は, 基礎溶接継手（T 字継手）と同様のものを使用する. またモデルについては, 板厚 6.0mm の 1200mm×600mm の板に 1000mm×100mm の板を 2 枚, 400mm×100mm を 3 枚, Fig.4 に示すような順序で左右両側溶接全 10 パスを行う. 要素分割は 25064 要素, 32060 節点とした.

本研究では, 実験結果・解析結果の z 方向変位について検討し, 大変形が起こる原因について考察する.

4.2 実験結果と ISM を用いた溶接変形解析結果の比較

4.2.1 実験結果

実験結果を Fig.5 に示す. 溶接 7 パス目において大変形が発生し始め, 最終的に 100mm以上の溶接構造物に対して大きな変形が確認できた. この大変形は, 構造物に対して板厚が薄く, そのために溶接した際に発生する圧縮応力により座屈変形が発生したためであると考えられる.

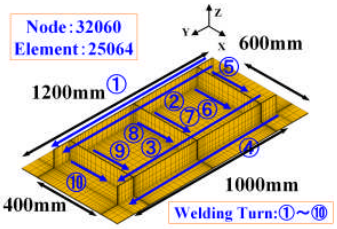

Fig.4 FEmesh division to analized

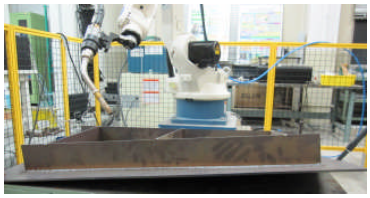

Fig.5 Picture of welding assembly structure after welding

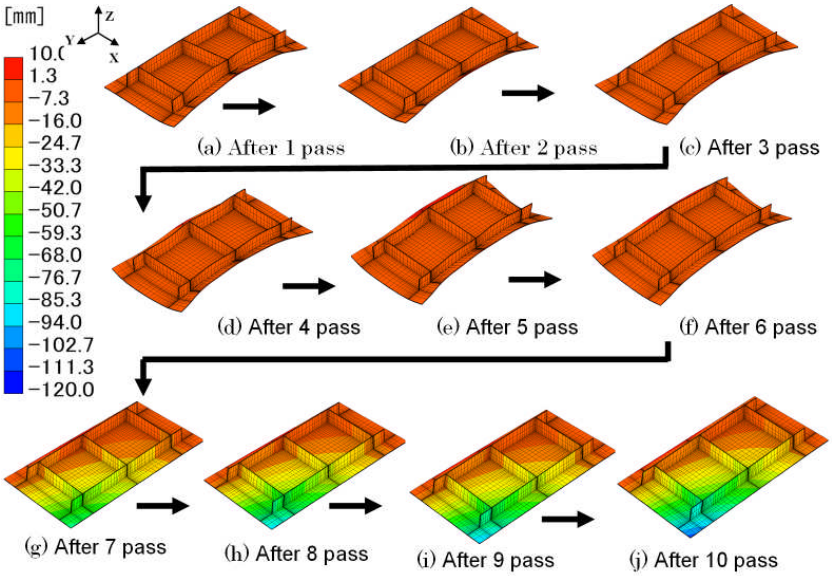

Fig.6 Distribution of displacement in Z direction in each of welding pass

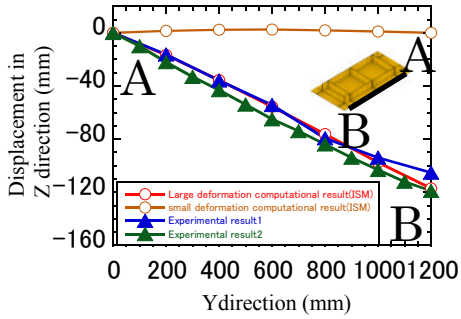

Fig.7 comparison of displacement in z-direction between analysis and experiment

Table2 Analysis condition

	current (A)	voltage (V)	Weld speed (mm/s)
case1	180. 0	26. 0	4. 3
case2	162. 0	26. 0	4. 3
case3	144. 0	26. 0	4. 3
case4	126. 0	26. 0	4. 3
case5	108. 0	26. 0	4. 3
case6	90. 0	26. 0	4. 3

4.2.2 解析結果と精度評価

幾何学的非線形性を考慮することができる大変形理論を用いて，大変形解析を行い，そのパス毎に溶接終了時の z 方向変位分布を示したものを Fig.6 に示す． Fig. 6 より大変形解析結果において 100mm以上の大変形を得た． Fig.6 より，1 パスから 6 パスまでの溶接の際には構造物に対して大変形は起こっていない．ここまでの変形は，縦収縮，横収縮，回転変形などの面内変形，また，面外変形でも角変形や縦曲がり変形によるもののみの変形であると考えられる．しかし，短手方向の板の 7 パス溶接後には 6 パス目までの変形モードとは大きく異なる変形が確認できる．この変形は，実験と同様に 7 パス目において座屈変形が発生したために起こったと考える．そして最終的には，最大 110mm 程度の変形結果になった．この解析結果の z 方向変位と実験結果を比較したものを Fig.7 に示す．二つの実験結果と解析結果が定量的に一致している．この結果より座屈を伴い大変形が発生するような溶接組立構造の解析において大たわみ解析が重要であり，本手法の有効性を示した．

4.2.3 入熱量の違いによる座屈変形挙動についての検討

残留応力や変形は熱量の増加に従って増加するものであるので，ここで，入熱量を変化させその影響評価を行う．その条件を Table2 に示す．その解析結果の溶接終了後の z 方向変位分布を Fig.8 に示す．また，横軸に溶接時間，縦軸に z 方向変位量を示したグラフ Fig.9 に示す．

Fig.8，9 からも分かるように入熱量が大きい 3case において，小さい 3case に比べ変形が格段に大きくなっている．また，Fig.9 より case1 では，7 パス目，case2 では 8 パス目，case3 では 9 パス目において変形モードも大きく異なっており，それまでは面内変形，また，面外変形でも角変形や縦曲がり変形によるもののみの変形であったが，変形モードが大きく変わったところで，面外変形である座屈変形が発生したと考えられる．次に，座屈の原因とされている圧縮応力について考察する．板全体にかかる長手方向の収縮力について数値化して評価する． Fig.10 に横軸に時間，縦軸に Tendon Force を取ったグラフを示し，Fig.11 には，横軸に Tendon Force，縦軸に z 方向変位量を取ったグラフを示す．Tendon Force とは，固有ひずみを応力に変換した固有応力源を利用したもので，式(1)に示す．

$$F_T = \int_{-B/2}^{B/2} E g_x h dy \qquad (1)$$

ここで，B は固有ひずみの存在範囲，E はヤング率， g_x は固有ひずみ量， h は板厚を示す．

Fig.12 より Tendon Force は，長手方向溶接時と短手方向溶接時の 2 つの過程で異なる線形変化していることが分かる．また，Fig.11 より大変形が発生していない 4～6case においては，全溶接終了後においてもその力まで達していない．したがって，座屈の発生は，圧縮力が一定値に達したときに発生し，それは入熱量の関数であることが分かった．また，塑性限界座屈荷重を示した．

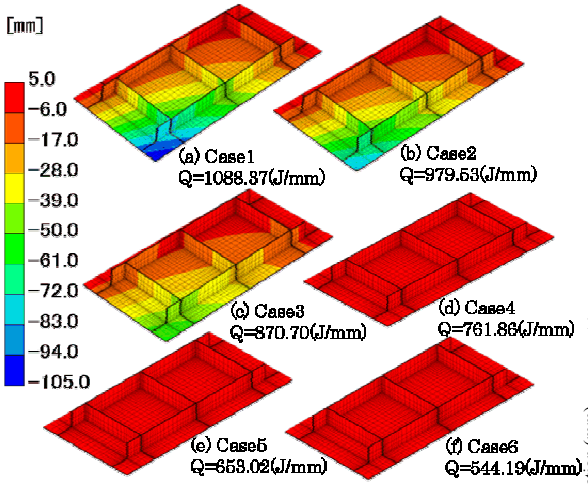

Fig. 8 Distribution of residual displacement in Z direction

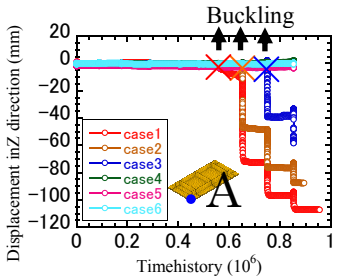

Fig.9 Comparison of displacement in Z direction between analysis and experiment in each of welding pass

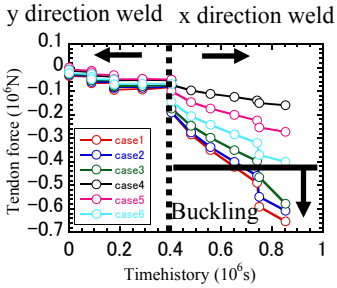

Fig.10 Timehistory of tendon force

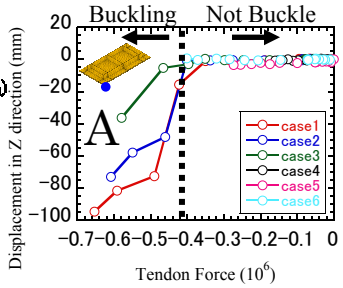

Fig.11 Relation between tendon force and displacement in Z direction

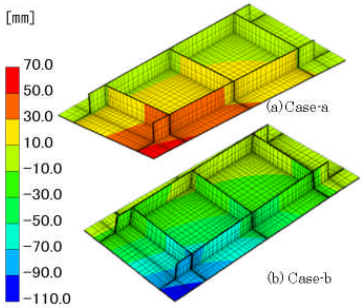

Fig. 12 Distribution of residual displacement in Z direction

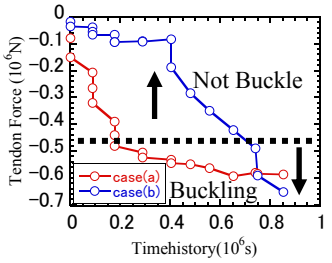

Fig.13 Timehistory of tendon force

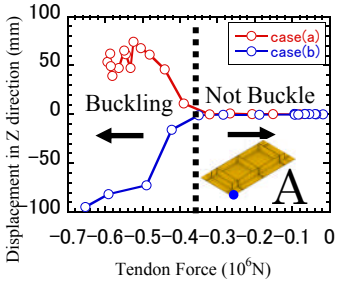

Fig.14 Relation between tendon force and displacement in Z direction

4.2.4 溶接順序の違いによる座屈変形挙動の検討

長手方向の板を先に溶接する case-a と短手方向の板を溶接する case-b の z 方向変位量を比較する．その解析結果の z 方向変位分布を Fig.12 に示す. また，4.2.3 節同様に，板全体にかかる長手方向の収縮力について数値化して評価する． 4.2.3 節同様にそのグラフを Fig.13，Fig.14 に示す． case-a では，まず短手方向を溶接し，次に長手方向を溶接することで，収縮を自由端へ逃がすようなかたちになっている．それとは対照的に case-b は, まず長手方向を溶接し，短手方向を溶接することで，外側を拘束してから内側の溶接をするようなかたちになっている．以上の違いにより Fig.13 のように作用する力が異なっていると考えることができる．また， Fig.12 のように両方の case において座屈変形が発生している． Fig.14 より座屈の発生が起こる圧縮力は同等である．しかし，座屈とは，不安定現象であり，同一の溶接継手に対しても，いくつもの平衡な変形様式が存在している．この 2case において，溶接順序の違いにより上で述べたように作用する力が異なり，別の平衡な変形様式に飛び移ったと考えることができる．したがって，座屈を考える上で，溶接順序は大きく影響することが確認できた．

5．結言

本研究では， T 継手溶接モデルおよび溶接組立構造に対し ISM（反復サブストラクチャー法）を適用し，ISM の適用可能性について検討し，大変形の発生の原因について考察した結果以下の知見を得た．

1. T 継手隅肉溶接モデルの解析結果は，同条件における実験結果と定量的に一致することが分かった．
2. 溶接組立構造の解析結果は，同条件における実験結果と定量的に一致することが分かった．
3. 溶接組立構造の解析において，大たわみ解析は重要であることが分かった．
4. ISM（反復サブストラクチャー法）は，溶接変形予測法として十分な精度で解析可能であることを示した．
5. 座屈変形は，塑性限界座屈荷重に達したときに発生し，それまでの変形モードとは異なり，格段に大きい変形を示す．またその圧縮力は入熱量の関数であることが分かった．
6. 座屈は不安定現象であり，溶接順序の違いにより大きく変形モード，変形量が異なることを示した．

参考文献

1)村川，尾田，伊藤，芹澤，柴原，西川：反復サブストラクチャー法を用いた溶接熱弾塑性解析の高速化，関西造船協会論文集，243，2010，pp.67-70,
2)寺崎：溶接変形の支配因子と定量化，溶接学会誌，72-4, 2003，234-237
3)佐藤，寺崎：構造用材料の溶接変形に及ぼす溶接諸条件の影響，溶接学会誌, 45-4, 1976, pp.302-308
4)西川,芹澤,村川：大規模溶接シミュレーションの実機適用,溶接学会論文集,24-2, 2006,pp.168-173