

## 理想化陽解法 FEM を用いた建機構造体モデルの溶接変形解析

大阪府立大学大学院 生島 一樹, 竹内 啓洋  
○貝ヶ石康平, 柴原 正和  
日立建機株式会社 阿部 雄太, 木内 大貴

### Analysis of Welding Deformation of Structure Model for Construction Machinery Using Idealized Explicit FEM

by Kazuki IKUSHIMA, Akihiro TAKEUCHI, Kohei KAIGAISHI, Masakazu SHIBAHARA,  
Yuta ABE and Hirotaka KIUCHI

#### 1. 緒言

船舶や橋梁, 建設機械の鋼構造物の建設における接合方法として主に溶接が用いられている. しかし, 溶接を行うと溶接部近傍に大きな熱ひずみが発生し, 局部的に材料が降伏するため, 冷却後に大きな変形が残る. 工作精度の点において問題となる場合がある. 生産現場において, 溶接変形は手作業により矯正されることが多く, 製造物の寸法精度を公差内に抑えるために多大な作業時間が必要となる場合がある. そこで, 溶接変形量を設計の段階で予測することが出来れば, 溶接変形を考慮した新しい構造の設計および適切な施工方法の検討が可能となり, 製品品質の向上および生産性の向上につながると考えられることから, 溶接変形の定量的な予測は重要であるといえる.

溶接変形や残留応力の予測手法の一つとして, 熱弾塑性解析理論を適用した有限要素法による数値シミュレーション<sup>1)</sup>が挙げられる. しかし, 有限要素法を用いた熱弾塑性解析は溶接の力学現象を忠実に再現するため, メモリ消費量および計算時間の制約によって, 大規模構造物の溶接問題に適用することは困難であった. これは, 解析精度の観点から静的陰解法 FEM が一般的に用いられているためであり, 静的陰解法 FEM では, その解析理論上, 解析領域全体に亘る大規模な剛性方程式を解く必要があるためである. 特に, 構造解析で一般的に用いられている直接法によって剛性方程式を求解する場合, 一般的に解析自由度数の 2~3 乗に比例して計算時間およびメモリ消費量が増加すると言われている.

以上の問題を解決するために, 本研究では, 著者らが開発を進めている理想化陽解法 FEM<sup>2,3)</sup>を用いる. 理想化陽解法 FEM は動的陽解法 FEM<sup>4)</sup>を基に開発された手法であり, 静的陰解法 FEM に比べて, 大規模問題において高速かつ省メモリな点に特長を有する. また, 従来手法では極めて解析困難な, 百万要素を超えるモデルや 100 パスを超える大型厚板構造物の多層溶接の溶接変形や残留応力を, 市販の PC 一台程度のハードウェアを用いて, 現実的な計算時間で解析可能であることが示されている<sup>5)</sup>. 本研究では, 大規模薄板構造物の解析を更に効率化するために, 理想化陽解法 FEM に対してマルチグリッド法<sup>6)</sup>を導入した手法を用いる.

建機構造体のような大規模な実構造物に対して, 熱弾塑性解析の実施は行われてこなかったため, 熱弾塑性解析結果と実験結果の比較は行われていない. そこで, 本研究では, 理想化陽解法 FEM を実大構造物の溶接変形問題の解析に適用し, 実験結果と解析結果を比較することで, 理想化陽解法 FEM の実機における解析精度について検証する. また, 施工条件の選定に関して, 溶接パスごとの溶接変形に及ぼす影響について検討することで, 実機レベルの構造物を解析対象とした際の理想化陽解法 FEM の有用性について示す.

#### 2. 建機構造体の溶接変形解析

建機構造体の溶接では, 1 層~3 層の隅肉溶接が多く存在し, 結果として台座部およびフレームの面外変形が問題となるケースが多い. そこで本章では, 台座部およびサイドフレームの組み立て溶接時に発生する面外変形を対象に解析を実施した.

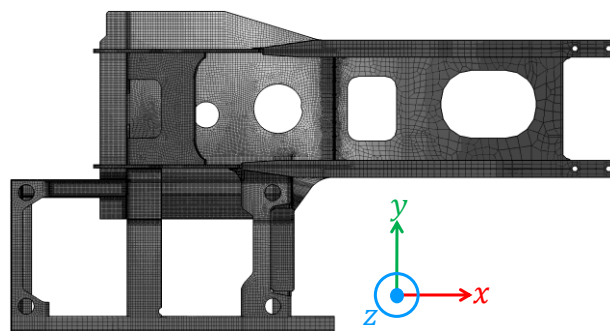


Fig. 1 Analysis model.

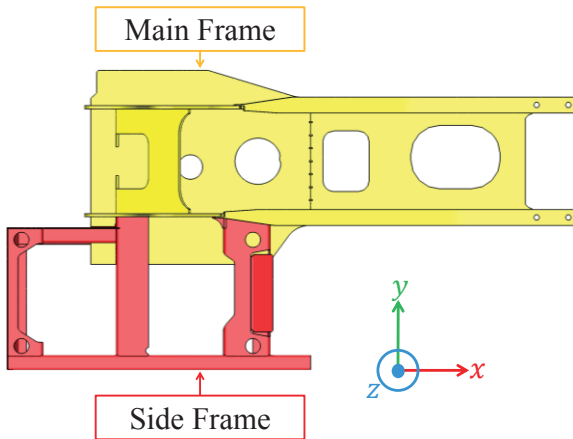


Fig. 2 Structure of analysis model.

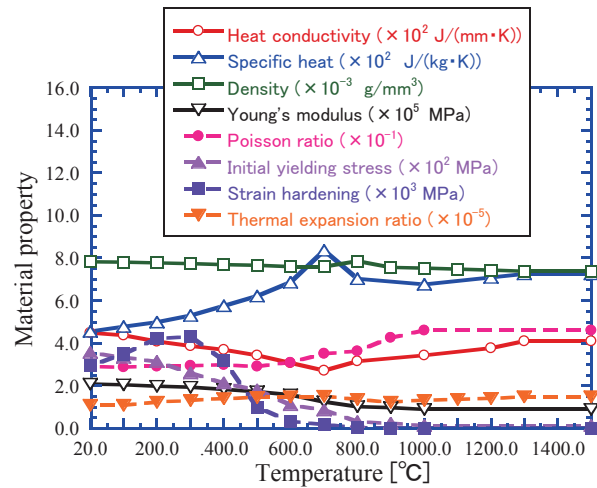


Fig. 3 Material property of SM490.

## 2. 1 建機構造体の解析モデルおよび解析条件

解析モデルに用いた要素分割を Fig. 1 に示す。同図は、建設機械台座部およびサイドフレームの組み立てを模擬したものであり、全 28 パスの溶接に対して移動熱源を用いて解析する。寸法は全長が約 4000 mm、幅が約 2000 mm、高さが約 500 mm である。節点数は 608,394、要素数は 502,308 である。また、本解析モデルは、Fig. 2 に示すとおり、メインフレームに対して、サイドフレームが付加された構造であり、長手方向に X 軸、幅方向に Y 軸、高さ方向に Z 軸を定義する。本解析では、最も工作精度を必要とする台座部の裏面の溶接変形に注目する。

本構造体は SM490 材を用いて製作される。解析に使用した SM490 材の温度依存性を Fig. 3 に示す。また、解析時のアニール温度を 800 °C と設定し、要素の温度がアニール温度を上回る場合、当該の要素の相当塑性ひずみをゼロとすることで、それまでの塑性変形に伴う加工硬化の影響を取り除くものとした。

溶接条件を Table 1 に示す。同表より、施工は 3 つの溶接ステージに分かれており、溶接ステージ 1 は平均入熱量 1560J/mm で 1-4 パスの溶接を実施する。同様に、溶接ステージ 2 は平均入熱量 1230J/mm で 5-22 パス、溶接ステージ 3 は平均入熱量 1560J/mm で 23-28 パスの溶接を実施する。

次に、拘束条件を Fig. 4 に示す。同図は建機構造体モデルを Z 軸正方向から見た図であり、同図(a)は溶接ステージ 2 の 5-22 パスの溶接時における拘束位置を表しており、図中の赤色斜線部で示す合計 3 箇所の表面を Z 方向（面外）方向に拘束した。同様に(b)は、溶接ステージ 3 の 23-28 パスの溶接時における拘束位置を表しており、図中の赤色斜線部で示す 4 箇所の表面を Z 方向に拘束した。溶接ステージ 1-4 パスの溶接時は治具等による外的拘束が無い状態で溶接を実施するため、解析では剛体拘束のみを考慮した。

以上の解析条件のもと、全 28 溶接パスの 3 次元移動熱源モデルを用いた熱伝導解析を実施し、得られた温度データを基に理想化陽解法 FEM を用いて熱弾塑性解析を実施した。

Table 1 Welding conditions.

	Stage 1	Stage 2	Stage 3
Pass Sequence	1-4	5-22	23-28
Average heat input (J/mm)	1560	1230	1560

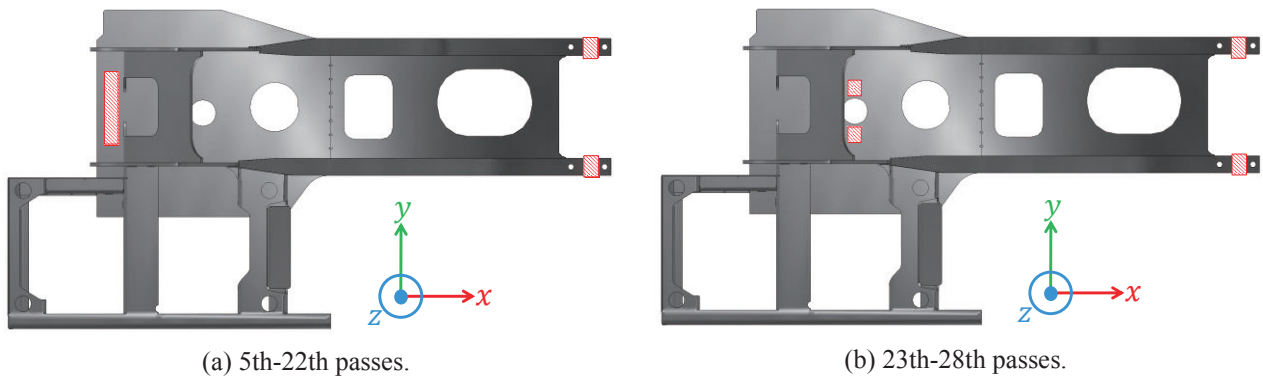


Fig. 4 Constraint conditions.

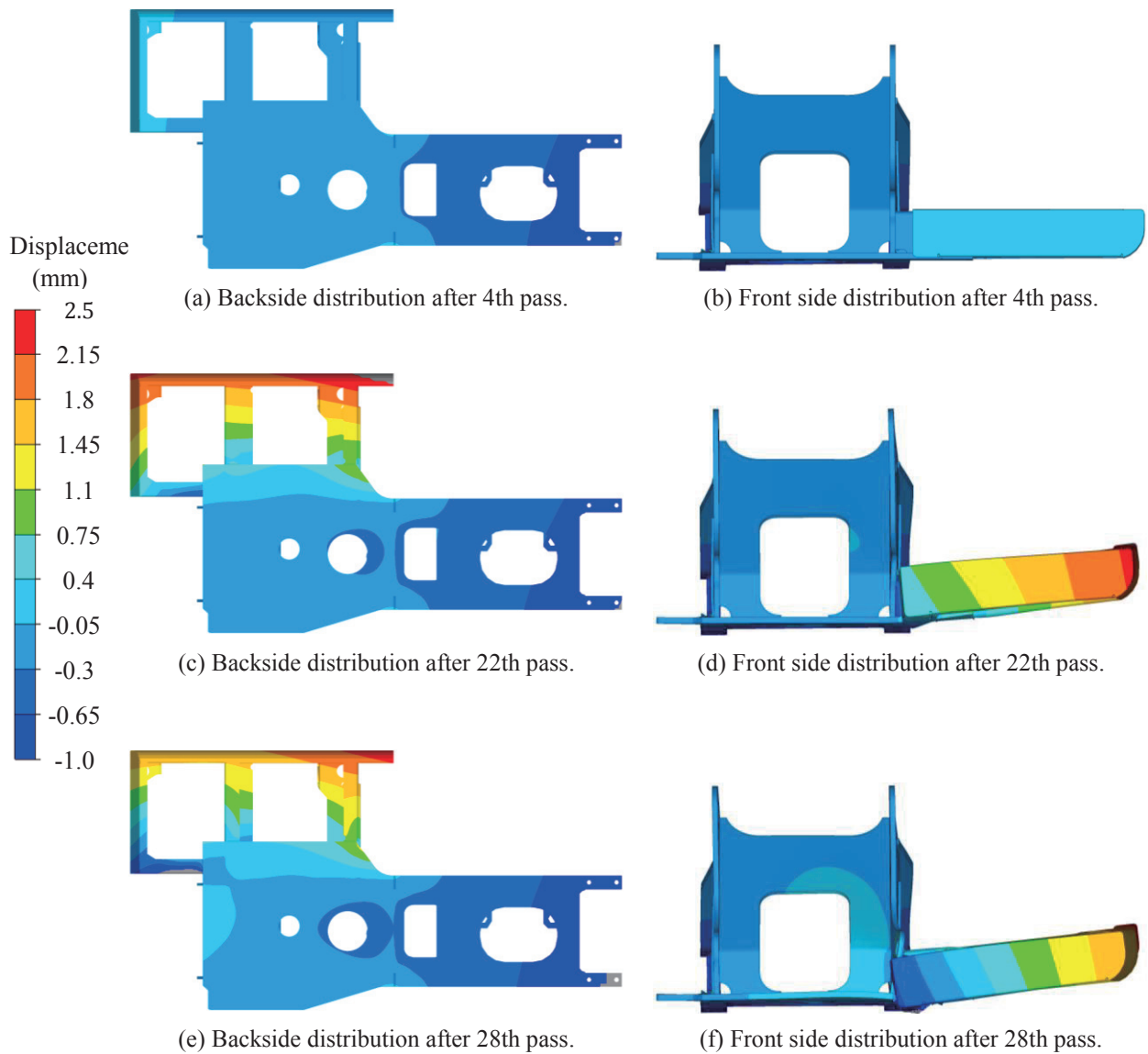


Fig. 5 Distribution of displacement in Z direction.

## 2. 2 解析結果

Fig. 5 に解析結果を示す. 溶接ステージ 1 終了(4 パス)後の裏面の Z 方向変形量を(a)に, 正面の Z 方向変形量を(b)に示す. 同様に, 溶接ステージ 2 終了(22 パス)後の裏面の Z 方向変形量を(c)に, 正面の Z 方向変形量を(d)に, また, 溶接ステージ 3 終了(28 パス)後の裏面の Z 方向変形量を(e)に, 正面の Z 方向変形量を(f)に示す. 同図の(b), (d), (f)は変形倍率を 50 倍としている. 同図(a), (c)より, 溶接ステージ 1 による溶接変形は溶接ステージ 2 による溶接変形に比べて小さいことが分かる. また, 溶接ステージ 1 においてはメインフレームに変形を生じており, 溶接ステージ 2 においてはサイドフレームに大きな変形が生じている. 同図(b), (d)からわかる通り, ステージ 2 の溶接は, メインフレームとサイドフレームの間を溶接するため, サイドフレームが角変形形式の変形により大きな変形を生じている. 同図(e), (f)は, 全 28 パスの溶接後, 治具による拘束を解放した後の残留変形量を示しており, 全パス溶接後の裏面における最大の Z 方向変形量は最大で 2.5mm 程度であることが分かる. 本解析は CPU に Intel Core i7 3930K, GPU に GeForce GTX-TITAN を使用し, 全 28 パスの解析に要した時間は 68 時間であった.

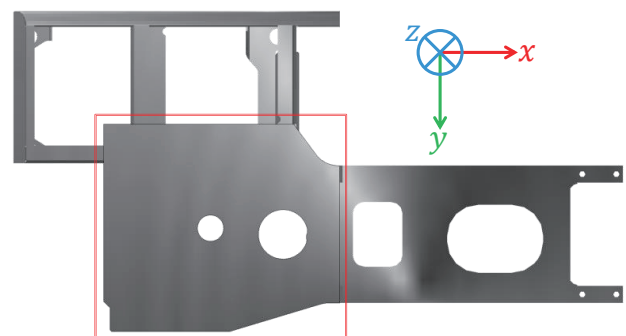


Fig. 6 Measuring part on backside of structure.

### 3. 建機構造体台座部の溶接変形計測

解析結果の妥当性を検証するために、解析と同様の試験体で実験を行い、溶接変形について解析結果と計測結果を比較する。本試験体は建機台座部とほぼ同寸法であり、本実験は実大試験である。実験においては、メインフレームに溶接変形が発生し、平面度が保持できなくなると、他の部材と接合を行う際にギャップが生じ、変形量が大きい場合は接合を実施できなくなる場合がある。そこで、本実験では、構造物裏面の溶接変形に注目し、溶接変形を計測した。実験において計測を行った部分を Fig. 6 に示す。同図は構造物を Z 軸負方向から見たものであり、図中の実線で示すメインフレームの裏面を計測対象とした。

#### 3. 1 計測方法

実験は、構造物を定盤に取り付けて溶接ステージ 1(1-4 パス)の溶接を実施した。続いて、構造物を支持台に取り付けて溶接ステージ 2(5-22 パス)の溶接を実施し、拘束を変えて溶接ステージ 3(23-28 パス)の溶接を実施した。

計測は、Fig. 7 に示すように 3 次元測定器 FARO<sup>7)</sup> を裏面に取り付け、構造物裏面の Z 方向変位量を計測した。溶接変形量に関しては、まず、1 パス目の溶接を始める前に初期形状を計測し、最終 28 パスの溶接が終了し、完全に冷却した段階で支持台から外し、再び形状の計測を実施し、初期形状との形状の差を変形量として算出した。Fig. 6 の赤枠に示す部分において設定した測定点を Fig. 8 に示す。同図に示すように、X 軸方向に 16 点(1-16)、Y 軸方向に 14 点(A-N)とり、各交点の合計 224 点を格子状に計測した。続いて、同図に示す赤色の○印で囲んだ 3 点 (D-2, L-2, L-15) を基準点とし、溶接施工前および溶接施工後において、この 3 点の Z 方向変位をゼロとし、この 3 点から作られる面を基準面からの距離を変形量として算出した。

#### 3. 2 実験計測結果および解析結果の比較

計測結果および解析結果との比較を Fig. 9 に示す。同図(a)は、実験計測結果であり、最終計測結果から初期変形を除いた、全 28 パス溶接による変形量を示して



Fig. 7 Photograph of measurement using FARO.

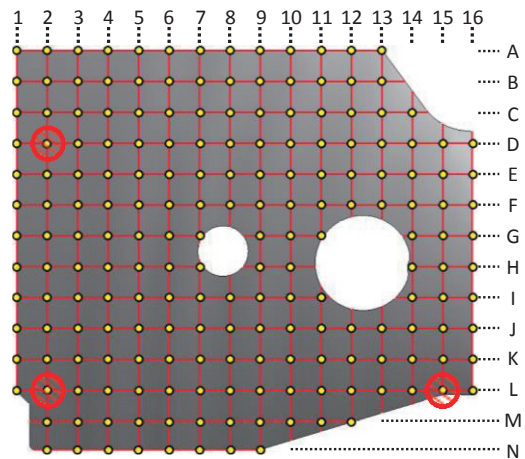
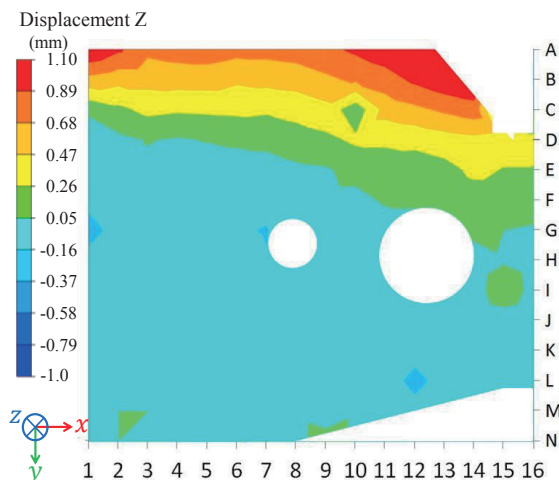
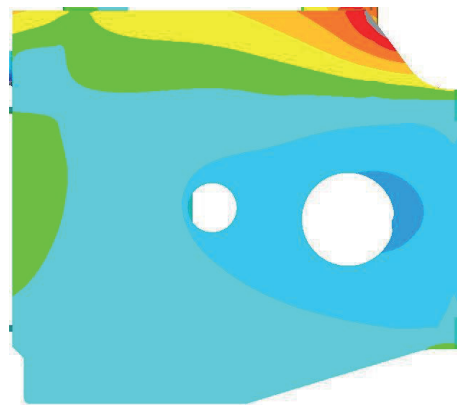


Fig. 8 Measuring points.



(a) Measurement results.



(b) Analysis results.

Fig. 9 Comparison of displacement in Z direction between measurement and analysis results.

いる。(a)より、サイドフレーム近傍の変形量が大きくなっていることがわかる。この理由としては、溶接部が測定ライン A 付近に多数あり、その溶接による影響が大きいためであると考えられる。同図(b)に解析結果を示す。同図より、解析結果と計測結果は定性的に一致しており、計測結果と解析結果はともにサイドフレーム付近の変形量が大きいという点で一致している。なお、計測結果は解析結果よりも全体的に変形量が大きく、測定点 H-15 付近においては変形傾向に差が見られる。これは、解析時における立板と底板との接具合の違いが原因として考えられる。その根拠としては、Fig. 9 (a)より、計測結果において計測ライン D 付近に立板があるにも関わらず、計測結果では立板の影響がそれほど見られないが、同図(b)に示す通り、解析結果では測定ライン D 付近で立板の影響により、Z 方向変位がほぼゼロになっている点が挙げられる。

Fig. 11 に Fig. 10 中の A-A'線、B-B'線、C-C'線上の解析結果と計測結果の変位分布の比較を示す。Fig. 11 において、●印は解析結果、□印は計測結果を示している。また、同図(a)は Fig. 10 における A-A'線上、(b)は B-B'線上、(c)は C-C'線上の Z 方向変位分布を比較したものである。Fig. 11 (a), (b)より、解析結果と計測結果はおおむね定量的によく一致していることが分かる。ただし、前述したとおり、C-C'線付近には立板が存在し、その影響によって、解析結果における Z 方向変形量がほぼゼロとなっていることが分かる。

以上より、建機構造体の溶接変形問題について解析結果と実験結果を比較した。その結果、解析結果と実験結果の傾向はよく一致しており、実大構造物の溶接変形解析において理想化陽解法 FEM の妥当性を示すことができたと言える。

### 3. 3 溶接パスごとの変形履歴

解析結果と計測結果の比較を通して、理想化陽解法 FEM を用いた実大構造物の溶接変形解析の妥当性を示した。本検討のような実大構造物の実験においては、1 回の実験に多大な費用・時間・労力が必要となるため、溶接パスごとに変位測定を行うことは非常に手間のかかる作業となる。一方、解析シミュレーションを用いることが出来れば、溶接パスごとの変形履歴を可視化することが可能となる。そこで、理想化陽解法 FEM を用いた溶接施工条件の検討として、各溶接パスが残留変形に及ぼす影響について検討した。Fig. 12 に、溶接による変形履

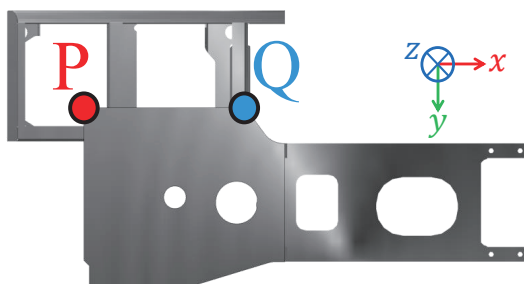


Fig. 12 Evaluation points for displacement

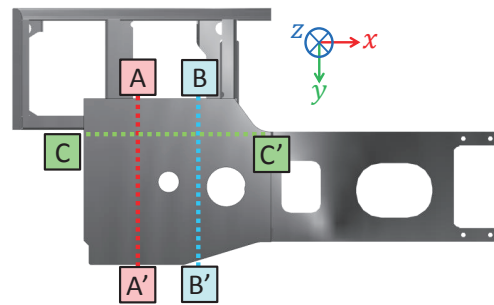
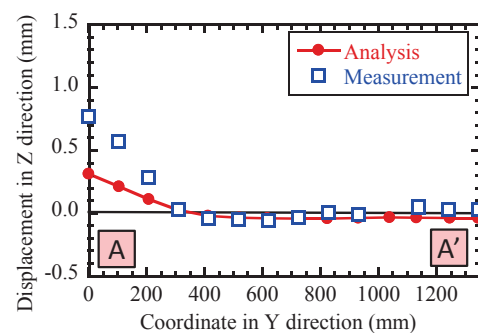
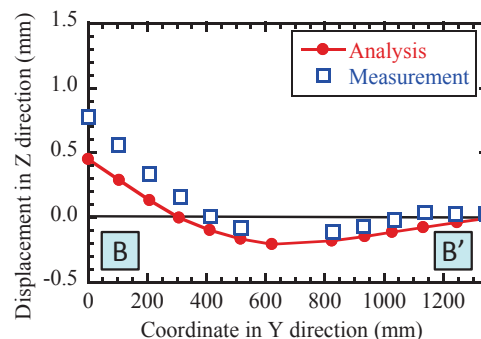


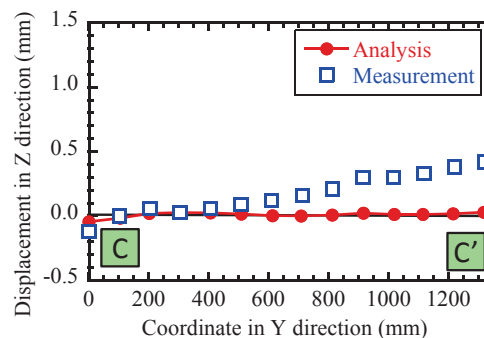
Fig. 10 Comparing Lines.



(a) Line A-A'.



(b) Line B-B'.



(c) Line C-C'.

Fig. 11 Comparison of displacement in Z direction between measurement and analysis results.

歴の評価点を示す。同図に示す点P,点Qは、本解析で注目しているメインフレームの平面度の計測結果において、最も大きな変形量が見られた点である。この2点について、パスごとのZ方向の残留変形量に注目し、各溶接パスが溶接変形に及ぼす影響を検討する。Fig. 13に溶接変形履歴を示す。同図における横軸は進

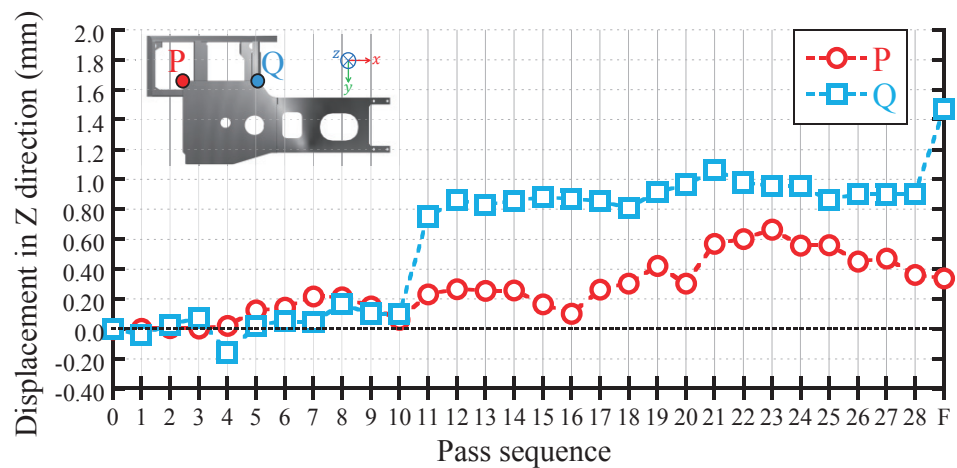


Fig. 13 History of displacement in Z direction.

行パス数を、縦軸はZ方向変形量を示している。図中の○印は点Pにおける変形履歴を、□印は点Qにおける変形履歴をそれぞれ示す。また、29パス目は28パス終了後に拘束を外した時の変形量を示している。同図より、最終変形量は29パス目の値であり、点Pが0.34mm、点Qが1.47mmであり、点Qの最終変形量には、11パス目およびF（拘束を外した時）の変形の寄与が大きいことが分かる。なお、11パス目の溶接線は、長手方向の溶接線であり、メインフレームの立板とサイドフレームを直接溶接するパスである。

#### 4. 結言

本研究では、大規模薄板構造物の溶接に伴う変形や残留応力の解析を効率的に実施することが可能なマルチグリッド法を導入した理想化陽解法 FEM を用いて、実大構造物である建機構造体モデルの溶接組み立ての溶接変形の解析に対して適用し、実験計測結果との比較を行った。その結果、以下の知見を得た。

1. 建機構造体を模擬した実機モデルの解析に対して理想化陽解法 FEM を適用した結果、全溶接パスを考慮した実大構造物の溶接変形解析を市販の PC を使用して現実的な計算時間で実施できることを確認した。
2. 実機モデルを使用した実験結果と理想化陽解法 FEM による解析結果を溶接変形について比較した。その結果、実験結果と解析結果は良好に一致することを確認した。また、この結果より、理想化陽解法 FEM が実大構造物の溶接変形解析においても適用可能であることを示した。

#### 5. 参考文献

- 1) Y. Ueda and T. Yamakawa : Analysis of Thermal Elastic-Plastic Behavior of Metals during Welding by Finite Element Method, Journal of The Japan Welding Society, vol. 42-6(1973), pp.61-71 (in Japanese)
- 2) M. Shibahara, K. Ikushima, S. Itoh and K. Masaoka : Computational Method for Transient Welding Deformation and Stress for Large Scale Structure Based on Dynamic Explicit FEM, Journal of The Japan Welding Society, vol. 29-1(2011), pp.1-9 (in Japanese)
- 3) K. Ikushima, T. Yagi, S. Itoh and M. Shibahara : Development of Parallelized Idealized Explicit FEM Using GPU, 溶接構造シンポジウム 2011 講演論文集, 2011.11, pp.313-320 (in Japanese)
- 4) M. Tuda and I. Hagiwara : Dynamic-Explicit Finite Element Analysis Methods for Large-deformation Quasi-Static Problems (1st Report, Presentation of Research Theme), Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers, 54(622), 114-121, (1998)
- 5) K. Ikushima and S. Itoh, M. Shibahara : Fast Computation of Welding Transient Stress and Deformation Analysis by Idealized Explicit FEM Using Iterative Substructure Method, 溶接構造シンポジウム 2011 講演論文集, 2011.11, pp.321-328 (in Japanese)
- 6) K. Ikushima and M. Shibahara : Development of Idealized Explicit FEM for the Efficient Analysis of Welding Deformation of Thin Plate, Prep.Nat.Meet.JWS, 2011.04, pp.204-205
- 7) FARO JAPAN : <http://www.faroasia.com/home/jp/>, accessed at 2014.10.02