

重合メッシュ法を用いた理想化陽解法 FEM による溶接変形・残留応力解析

大阪府立大学大学院

○生島 一樹
柴原 正和

Analysis of Welding Distortions and Residual Stresses by Idealized Explicit FEM Using Mesh Overlaying Technique

by Kazui IKUSHIMA and Masakazu SHIBAHARA

1. 緒言

船舶や橋梁をはじめ、化学プラントや原子力プラントといった様々な製品の製造に溶接が幅広く用いられているが、溶接は、その施工に伴い必然的に発生する変形や残留応力が問題となることがある。そのため、溶接の施工前に、製品に生じる溶接変形や残留応力について検討可能な手法が求められている。

非線形有限要素法による熱弾塑性解析を用いることで、溶接変形残留応力を予測可能¹⁾であるが、溶接問題は材料の溶融を含む非線形性の強い問題であることから、その予測には膨大な計算資源を必要とする。また、非線形領域が溶接トーチ周辺の溶融部の近傍に集中することから、溶融部の周辺の詳細なモデル化が必要となる。このようなことから、溶接変形、残留応力の予測は計算時間、メモリ消費量の面で解析規模が限定されており、加えて、解析モデルの作成に人的、時間的コストを要するため困難となっているのが現状である。

溶接変形、残留応力解析の計算規模に関する問題を改善するため、著者らは理想化陽解法 FEM と呼ばれる大規模高速解析手法の開発を進めてきた²⁾。理想化陽解法 FEM は、動的陽解法 FEM³⁾を基に溶接問題に対して効率化を図った手法であり、従来手法とほぼ同等の解析精度を有し、かつ、従来手法に比べて高速、省メモリという特徴を有している。また、理想化陽解法 FEM は動的陽解法 FEM を基にしているため、並列化に対して非常に適しており、近年、並列数値計算の実行環境として注目されている画像処理装置(Graphics Processing Unit: GPU)による並列化を導入することで、一層の高速化を実現し、従来手法では困難な移動熱源を考慮した 3 次元多層溶接残留応力解析を実現してきた⁴⁾。

一方、構造解析における解析モデル作成の高度化に資する手法として重合メッシュ法が提案されている⁵⁾。重合メッシュ法は、解析領域全体の要素分割に対して、詳細な解析を実施したい箇所に詳細な要素分割のメッシュを貼り付けることで解析の高精度化とモデル作成の高度化を達成するために考案された手法である。重合メッシュ法を用いて、これまでに線形弾性解析⁶⁾、弾塑性解析⁷⁾、熱伝導解析⁸⁾、熱弾性解析⁹⁾、き裂進展解析¹⁰⁾などが実施されている。また、構造全体のシェル要素に対して、ソリッド要素を重合させることでゾーミング解析に代わり詳細な解析を実施した事例も報告されている¹¹⁾。溶接問題においては、非線形領域がトーチ周辺に集中することから、非線形領域のモデル化を重合メッシュ法により行うことは有効であると考えられる。しかしながら、重合メッシュ法は要素を重ね合わせるような特殊な処理を実施することから、全体剛性マトリックスの非零成分の分布が一般的な有限要素解析とは異なるため、解析に要する計算時間が膨大となることが報告されている¹²⁾。

そこで、本研究では、解析モデル作成の効率化と解析規模の向上を目的に、重合メッシュ法に対して理想化陽解法を導入した手法の開発を試みる。開発手法について検証するために、基礎的な溶接問題に対して開発手法を適用し、従来手法との比較を行う。また、開発手法の有用性を示すために部材ごとに作成した解析モデルに対して溶接部をモデル化した詳細メッシュを重合させ、部材同士の組立溶接を表現する解析を実施する。

2. 重合メッシュ法による溶接変形・残留応力解析の定式化

2. 1 熱伝導解析の定式化

溶接変形、残留応力は熱弾塑性解析を行うことで予測可能であるが、熱弾塑性解析に先立って温度分布の履歴が必要となる。本節では、まず重合メッシュ法を用いた熱伝導解析の定式化を行う。

熱伝導解析の支配方程式と境界条件は、それぞれ式(1)、(2)で表される。

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\partial T}{\partial x_i} + q \quad \text{in } \Omega \quad (1)$$

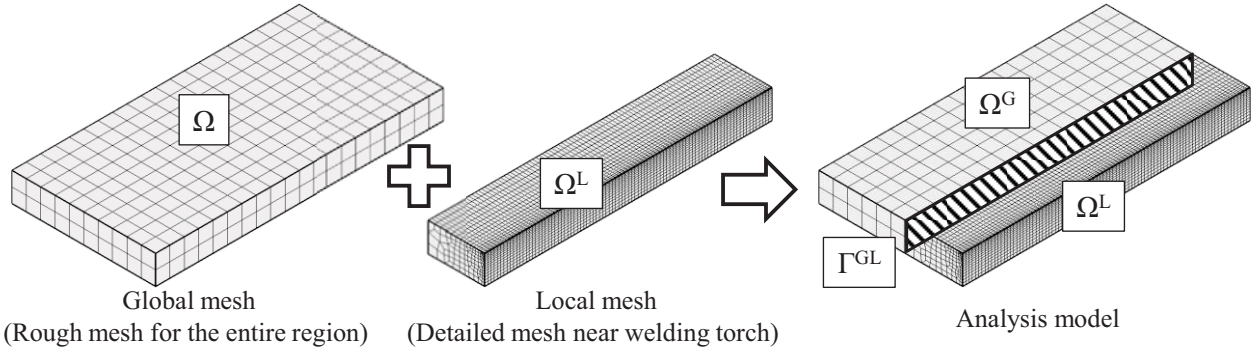


Fig. 1 Schematic illustration of analysis model for mesh overlaying method.

$$\frac{\partial T}{\partial n} = -\alpha_c (T - T_c) \quad \text{on } \Gamma \quad (2)$$

ここで、 c 、 ρ 、 λ 、 α_c はそれぞれ、比熱、密度、熱伝導率、熱伝達係数であり、 T 、 T_c はそれぞれ温度、室温、 q は発熱密度、 Ω は解析領域、 Γ は熱伝達面を表す。

重み関数を T^* と定義し、支配方程式に対して重み付き残差法を適用し、次式を得る。

$$\int_{\Omega} T^* \left(c\rho \frac{\partial T}{\partial t} - \lambda \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) d\Omega = \int_{\Omega} T^* q d\Omega \quad (3)$$

重合メッシュ法では、Fig. 1に示すように、解析領域全体 Ω を表すメッシュ(以降、グローバルメッシュと称す)に対して、詳細な要素分割のメッシュ(以降、ローカルメッシュと称す)を領域 Ω^L に張り付けることで解析領域を表現する。また、グローバルメッシュのみが存在する領域を $\Omega^G (= \Omega / \Omega^L)$ と定義し、 Ω^G と Ω^L の境界を Γ^{GL} とする。それぞれの領域における温度に関して、 Ω^G においては通常の有限要素解析と同様に、式(4)で表される関数を用いて温度場を近似する。一方、 Ω^L においては、式(5)により温度場を近似する。また Ω^G と Ω^L の境界においては、式(6)のようにローカルメッシュの温度に拘束条件を与える。これはグローバルメッシュとローカルメッシュで温度場の連続性を担保するためのものである。

$$T = [N^G] \{T^{Gn}\} \quad \text{in } \Omega^G \quad (4)$$

$$T = [N^G] \{T^{Gn}\} + [N^L] \{T^{Ln}\} \quad \text{in } \Omega^L \quad (5)$$

$$\{T^{Ln}\} = 0 \quad \text{on } \Gamma^{GL} \quad (6)$$

ここで、 $[N^G]$ 、 $[N^L]$ はそれぞれグローバルメッシュの形状関数、ローカルメッシュの形状関数であり、 $\{T^{Gn}\}$ 、 $\{T^{Ln}\}$ はそれぞれグローバルメッシュとローカルメッシュにおける節点温度である。式(5)に示すように、 Ω^L においては、グローバルメッシュの近似関数に対して、ローカルメッシュの近似関数を重ね合わせる形で温度場の近似関数を作成する。また、重み関数に関しても、温度場と同様の関数を用いて次式により近似する。

$$T^* = [N^G] \{T^{*Gn}\} \quad \text{in } \Omega^G \quad (7)$$

$$T^* = [N^G] \{T^{*Gn}\} + [N^L] \{T^{*Ln}\} \quad \text{in } \Omega^L \quad (8)$$

式(4)-(8)を式(3)に代入し、部分積分および境界条件を適用することで次式を得る。

$$[C] \frac{\partial}{\partial t} \{T^{Gn}\} + [K] \{T^{Gn}\} = [A] \{T^{Gn}\} + \{Q\} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} C^{GG} & C^{GL} \\ C^{LG} & C^{LL} \end{bmatrix} \frac{\partial}{\partial t} \begin{Bmatrix} T^{Gn} \\ T^{Ln} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K^{GG} & K^{GL} \\ K^{LG} & K^{LL} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T^{Gn} \\ T^{Ln} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A^{GG} & A^{GL} \\ A^{LG} & A^{LL} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T^{Gn} \\ T^{Ln} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} Q^G \\ Q^L \end{Bmatrix} \quad (10)$$

ここで、式(9)は領域 Ω^G に対応する方程式であり、係数マトリックスおよび定数ベクトルは通常の有限要素法と同等の手順で導出される。一方、式(10)は領域 Ω^L に対応する方程式であり、 $[C^{ab}]$ 、 $[K^{ab}]$ 、 $[A^{ab}]$ 、 $\{Q^a\}$ ($a, b: G, L$) はそれぞれ熱容量マトリックス、熱伝導マトリックス、熱伝達マトリックス、および、発熱量ベクトルであり、以下の積分で与えられる。

$$[C^{ab}] = \int_{\Omega^L} c\rho [N^a]^T [N^b] d\Omega \quad (a, b: G, L) \quad (11)$$

$$[K^{ab}] = \int_{\Omega^L} \lambda \left[\frac{\partial N^a}{\partial x_i} \right]^T \left[\frac{\partial N^b}{\partial x_i} \right] d\Omega \quad (a, b: G, L) \quad (12)$$

$$[A^{ab}] = \int_{\Gamma^L} -\alpha_c [N^a]^T [N^b] d\Gamma \quad (a, b: G, L) \quad (13)$$

$$\{Q^a\} = \int_{\Omega^L} q [N^a]^T d\Omega + \int_{\Gamma^L} \alpha_c T_c [N^a]^T d\Gamma \quad (a: G, L) \quad (14)$$

全体領域 $\Omega(=\Omega^G + \Omega^L)$ における方程式を導出するため、以上の手順で求まる半離散化式(9)および(10)の和を取り、解析領域全体の半離散化式を得る。また、溶接現象においては加熱中の温度変化は急峻であるものの、冷却過程においては数十分から数時間をかけて緩やかに完全冷却に至ることを考慮し、時間増分に関して比較的自由に設定が可能な陰的な離散化を行う。本定式化においては Crank-Nicolson 法を用いるものとした。また、式(11)-(14)の積分は、ガウス積分を用いて数値的に行うが、その際に、ローカルメッシュのガウス積分点におけるグローバルメッシュの形状関数およびその勾配が必要となる。本研究では、文献¹¹⁾を参考に、ローカルメッシュのガウス積分点の全体座標系での位置座標より、ローカルメッシュのガウス積分点のグローバルメッシュにおける要素内座標系を解析の開始前に算出し、積分時に逐次参照することで、ローカルメッシュのガウス積分時にグローバルメッシュの形状関数およびその勾配を決定するものとした。

2. 2 熱弾塑性解析の定式化

熱弾塑性解析においては、前節において定式化を行った熱伝導解析により得られる温度場の履歴を参照し各時刻における変位増分を求める。変位増分に関する仮想仕事の原理は次式で与えられる。なお、本定式化においては、外部荷重は考慮しないものとした。

$$\int_{\Omega^G} \{\delta \varepsilon\}^T (\{\sigma\} + \{\Delta \sigma\}) d\Omega = 0 \quad (15)$$

ここで、 $\{\delta \varepsilon\}$ 、 $\{\sigma\}$ 、 $\{\Delta \sigma\}$ はそれぞれ仮想ひずみ、応力および応力増分である。

変位増分とひずみ増分を次式の通り定義する。

$$\{\Delta u\} = [N^G] \{\Delta u^{Gn}\} \quad \text{in } \Omega^G \quad (16)$$

$$\{\Delta u\} = [N^G] \{\Delta u^{Gn}\} + [N^L] \{\Delta u^{Ln}\} \quad \text{in } \Omega^L \quad (17)$$

$$\{\Delta u^{Ln}\} = 0 \quad \text{on } \Gamma^{GL} \quad (18)$$

$$\{\Delta \varepsilon\} = [B^G] \{\Delta u^{Gn}\} \quad \text{in } \Omega^G \quad (19)$$

$$\{\Delta \varepsilon\} = [B^G] \{\Delta u^{Gn}\} + [B^L] \{\Delta u^{Ln}\} \quad \text{in } \Omega^L \quad (20)$$

ここで、 $[N^G]$ 、 $[N^L]$ 、 $[B^G]$ 、 $[B^L]$ はそれぞれグローバルメッシュおよびローカルメッシュにおける形状関数および変位ひずみマトリックスであり、 $\{\Delta u^{Gn}\}$ 、 $\{\Delta u^{Ln}\}$ はそれぞれグローバルメッシュおよびローカルメッシュにおける節点変位増分である。

グローバルメッシュおよびローカルメッシュにおける節点仮想変位をそれぞれ $\{\delta u^{Gn}\}$ 、 $\{\delta u^{Ln}\}$ とし、ひずみ増分と同様の形で次式により仮想ひずみを定義する。

$$\{\delta \varepsilon\} = [B^G] \{\delta u^{Gn}\} \quad \text{in } \Omega^G \quad (21)$$

$$\{\delta \varepsilon\} = [B^G] \{\delta u^{Gn}\} + [B^L] \{\delta u^{Ln}\} \quad \text{in } \Omega^L \quad (22)$$

応力増分は次式により定義する。

$$\{\Delta \sigma\} = [D^G] (\{\Delta \varepsilon^G\} - \{\Delta \varepsilon_T^G\}) \quad \text{in } \Omega^G \quad (23)$$

$$\{\Delta \sigma\} = [D^L] (\{\Delta \varepsilon^G\} + \{\Delta \varepsilon^L\} - \{\Delta \varepsilon_P^L\} - \{\Delta \varepsilon_T^L\}) \quad \text{in } \Omega^L \quad (24)$$

ここで、 $[D^G]$ 、 $[D^L]$ はそれぞれグローバルメッシュ、ローカルメッシュにおける応力ひずみマトリックス、 $\{\Delta \varepsilon^G\}$ 、 $\{\Delta \varepsilon_T^G\}$ はそれぞれグローバルメッシュにおける幾何学ひずみ増分、温度ひずみ増分、 $\{\Delta \varepsilon^L\}$ 、 $\{\Delta \varepsilon_P^L\}$ 、 $\{\Delta \varepsilon_T^L\}$ はそれぞれローカルメッシュにおける幾何学ひずみ増分、塑性ひずみ増分、熱ひずみ増分を表す。なお、本定式化では、非線形の塑性変形は Ω^L のみで生じるものとし、 Ω^G においては弾性変形と熱変形のみを考慮した。

式(19)-(24)を式(15)に代入し次式を得る。

$$[K] \{\Delta u^{Gn}\} = \{\Delta F\} - \{f\} \quad (25)$$

$$\begin{bmatrix} K^{GG} & K^{GL} \\ K^{LG} & K^{LL} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta u^{Gn} \\ \Delta u^{Ln} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta F^G \\ \Delta F^L \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} f^G \\ f^L \end{Bmatrix} \quad (26)$$

ここで、式(25)は領域 Ω^G に対応する方程式であり、前節の熱伝導解析と同様に、通常の有限要素解析と同じ手続きにより剛性マトリックス $[K]$ 、荷重増分ベクトル $\{\Delta F\}$ および節点内力ベクトル $\{f\}$ を求める。一方、式(26)は領域 Ω^L に対応する方程式であり、各項は以下の積分により計算される。

$$[K^{ab}] = \int_{\Omega^L} [B^a]^T [D^L] [B^b] d\Omega \quad (a, b: G, L) \quad (27)$$

$$\{\Delta F^a\} = \int_{\Omega^L} [B^a]^T [D^L] \{\Delta \varepsilon_T^L\} d\Omega \quad (a: G, L) \quad (28)$$

$$\{f^a\} = \int_{\Omega^L} [B^a]^T \{\sigma^L\} d\Omega \quad (a: G, L) \quad (29)$$

全体剛性方程式は式(25)、(26)の和を取ることで得られ、全体が静的平衡状態に収束するまで求解を繰り返す。

2. 3 理想化陽解法の導入

前節の通り、熱伝導解析に関しては式(9)および式(10)、熱弾塑性解析に関しては式(25)、(26)の連立方程式を時間ステップ毎に逐次求解することで解が得られる。しかしながら、重合メッシュ法においては、通常の有限要素法とは異なり、連立方程式の係数行列の非零成分の分布が Fig. 2 に示すような形となるため、構造解析において用いられることの多い直接法を用いて連立方程式を求解する際に Fill-in が生じやすく、計算時間やメモリ消費量の増大につながる。この問題に対して、全体剛性マトリックスの疎性を利用してスパースソルバー¹³⁾を使用する方法、Fill-in が少なくなるよう節点番号を最適化する方法¹⁴⁾や、グローバルメッシュとローカルメッシュを別々に求解し最終的に領域全体が収束するまで反復するような手法¹⁵⁾が考えられるが、本研究においては、理想化陽解法を適用することで計算時間とメモリ消費量の削減を試みる。

理想化陽解法 FEM による熱伝導解析および熱弾塑性解析はそれぞれ文献^{2,16)}において詳細に述べられている。しかしながら、理想化陽解法を適用する場合、収束するまでの時間ステップの計算において式(26)右辺の積分操作を繰り返す必要があり、収束するまでに数百ステップ程度を要する。式(26)右辺の積分はローカルメッシュ内の要素においてグローバルメッシュ内の要素の変位ひずみマトリックスを参照するような複雑な操作を伴うため、通常の積分に比べて計算量の増加が見込まれる。そのため、重合メッシュ法に対して理想化陽解法をそのまま適用する場合、非効率な解析になる恐れがある。

そこで、本研究では、Fig. 3 に示すような手法を採る。まず、質量マトリックス、減衰マトリックスを計算し、合わせて剛性マトリックスを算出する。ここで、剛性マトリックスに関しては、圧縮行格納方式の疎行列の形で保存する。続いて、動的陽解法に基づき時間ステップを進めることで変位を求め、式(25)、(26)の右辺の積分の代わりに、求めた変位と剛性マトリックスの積より残差力ベクトルを算出する。指定した時間ステップ数の分(N 回)だけ変位の算出と残差力の算出を繰り返したのち、式(25)、式(26)の右辺の積分を実行し正確な残差力ベクトルを算出し、領域全体が静的平衡状態に達しているかを確認する。ここで、静的平衡状態が得られた場合、次の温度ステップの計算に移り、静的平衡状態が得られていない場合、残差力ベクトルを荷重ベクトルとして負荷し、再度時間ステップの計算を行う。以上の手法を用いることで、複雑な積分を行う回数を削減し、計算の効率化を図る。なお、Fig. 3 では熱弾塑性解析について示したが、熱伝導解析においても式(9)、(10)を基に同様の手順で解析を実施する。

3. 基礎的溶接問題への適用による開発手法の検証

3. 1 解析モデルおよび条件

開発手法を Fig. 4 に示す基礎的なビードオンプレート問題に対して適用し、従来手法による解析と比較することで、開発手法の検証を行う。本解析モデルは板長 100 mm、板幅 100 mm、板厚 10mm の板材を模擬しており、溶接線は板幅方向の中央線を仮定し、問題の対称性より板幅方向に半分のみをモデル化した。溶接条件は、電流 120 A、電圧 10 V、溶接速度 4.0 mm/s、熱効率 0.5 を仮定した。平板は軟鋼材を仮定し、Fig. 5 に示す材料定数の温度依存性データを解析に使用した。解析に用いた要素分割を Fig. 6 に示す。同図(a)はグローバルメッシュの要素分割であり、は比較的粗い要素分割を行い 400 要素とした。また、ローカルメッシュの要素分割を同図(b)に示す。ローカルメッシュにおいては非線形挙動を解析するため詳細な要素分割を行い 10,620 要素とした。従来手法の解析に用いた要素分割は Fig. 7

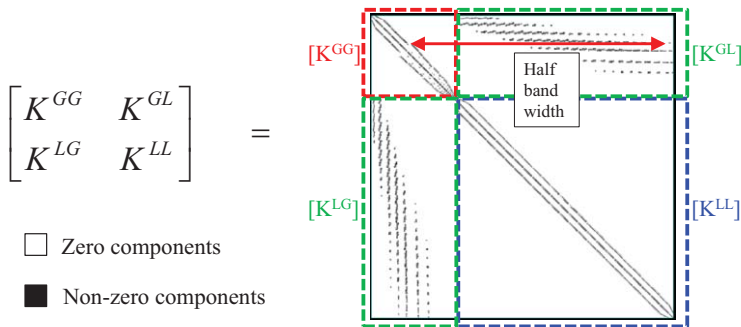


Fig. 2 Schematic illustration of non-zero components of stiffness matrix in mesh overlaying method.

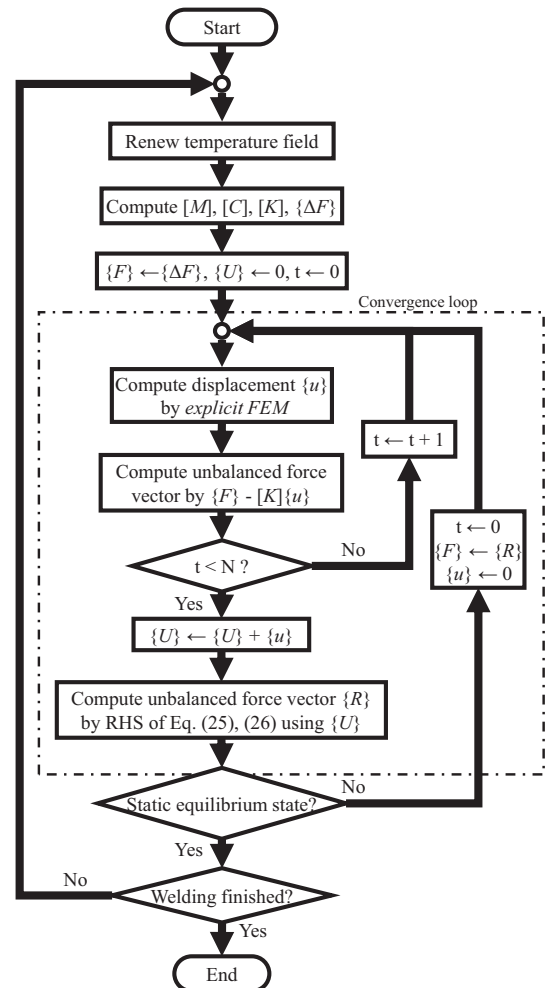


Fig. 3 Flow of developed method.

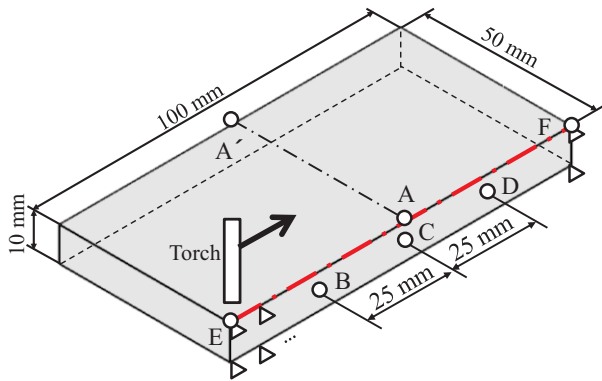


Fig. 4 Bead-on-plate analysis model.

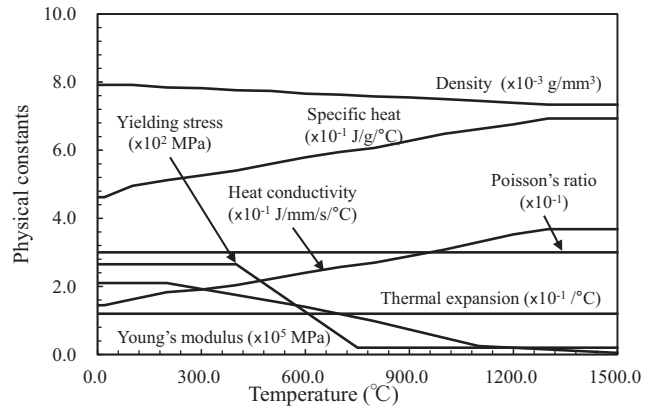


Fig. 5 Temperature dependent material properties.

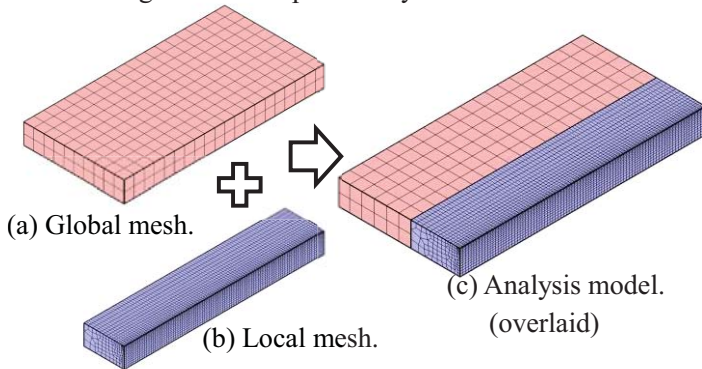


Fig. 6 FE mesh divisions for developed method.

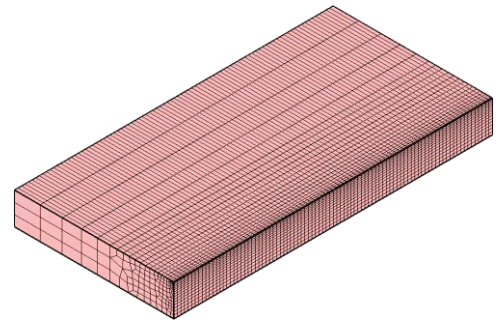


Fig. 7 FE mesh divisions for existing method.

に示す通りであり、要素数は 11,970 である。比較対象として、熱伝導解析に関しては、陰解法 FEM，熱弾塑性解析に関しては、静的陰解法 FEM を用い、それぞれの手法において、連立方程式の求解にはスカイライン法を用いた。なお、前章で示した積分操作により残差ベクトルを算出する時間ステップ数 N に関して、本解析では $N = 200$ とした。熱弾塑性解析において、残差力ベクトルの 2 乗ノルムと節点反力ベクトルの 2 乗ノルムの比が 10^{-3} 以下になった場合に収束したものとした。

3. 2 従来手法との比較による熱伝導解析の検証

Fig. 8 に最高到達温度分布を示す。同図より、両手法による最高到達温度分布が定性的に一致していることが確認できる。また、Fig. 9 に平板上面の溶接線中央横断面における A-A' 線上の最高到達温度分布の比較を示す。同図より、本手法と陰解法 FEM の最高到達温度分布は、定量的に一致していることが確認できる。特に、グローバルメッシュとローカルメッシュの境界においても、連続的な温度分布となっていることが分かる。Fig. 10 に溶接開始から 50 秒後までの Fig. 4 に示す点 B, C, D における過渡温度履歴を示す。Fig. 10 より、温度履歴に関しても、開発手法と従来手法の解析結果はほぼ一致していることが分かる。

3. 3 従来手法との比較による熱弾塑性解析の検証

Fig. 11 に開発手法と従来手法による横収縮分布の比較を示す。Fig. 11 より、開発手法と従来手法の横収縮はほぼ同等の分布を有していることが確認できる。同様に、Fig. 12 に、溶接線方向中央横断面上における面外方

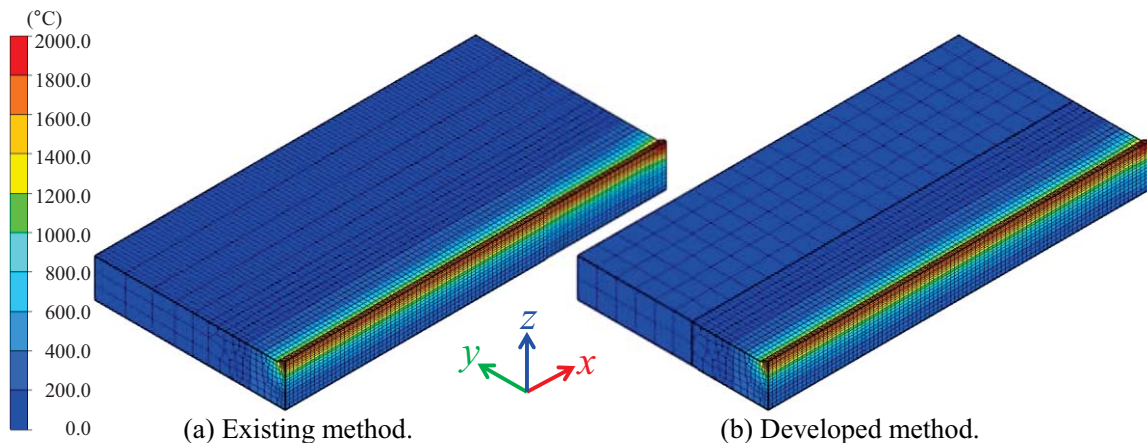


Fig. 8 Maximum temperature distribution.

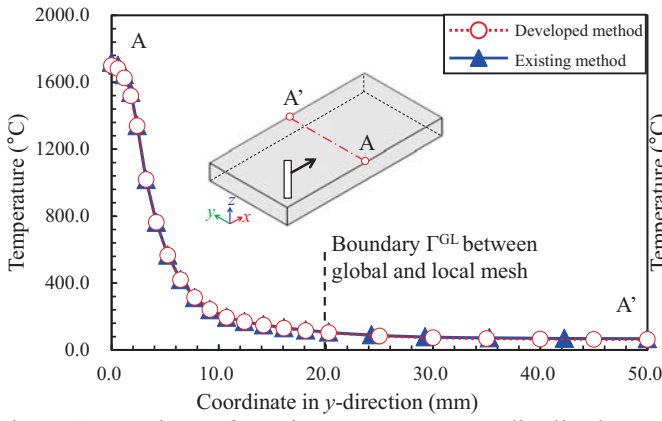


Fig. 9 Comparison of maximum temperature distribution.

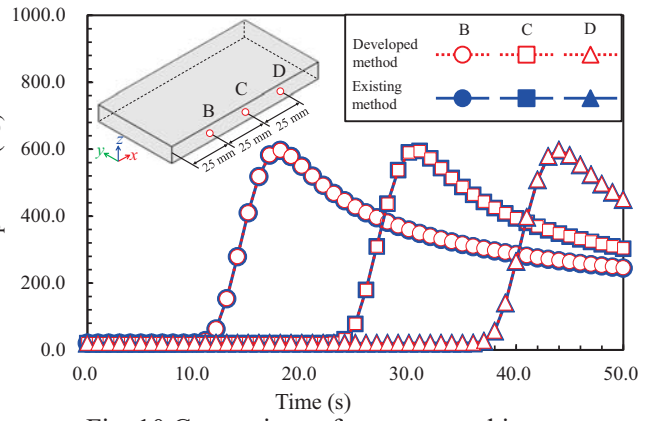


Fig. 10 Comparison of temperature history.

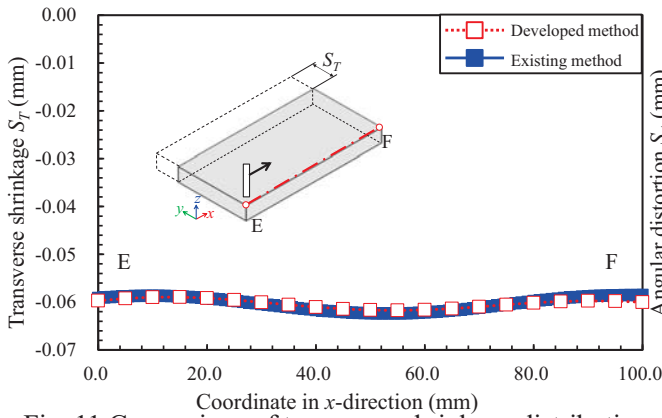


Fig. 11 Comparison of transverse shrinkage distribution.

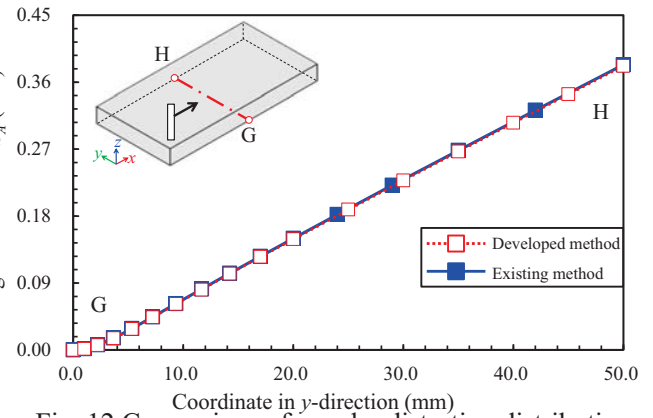


Fig. 12 Comparison of angular distortion distribution.

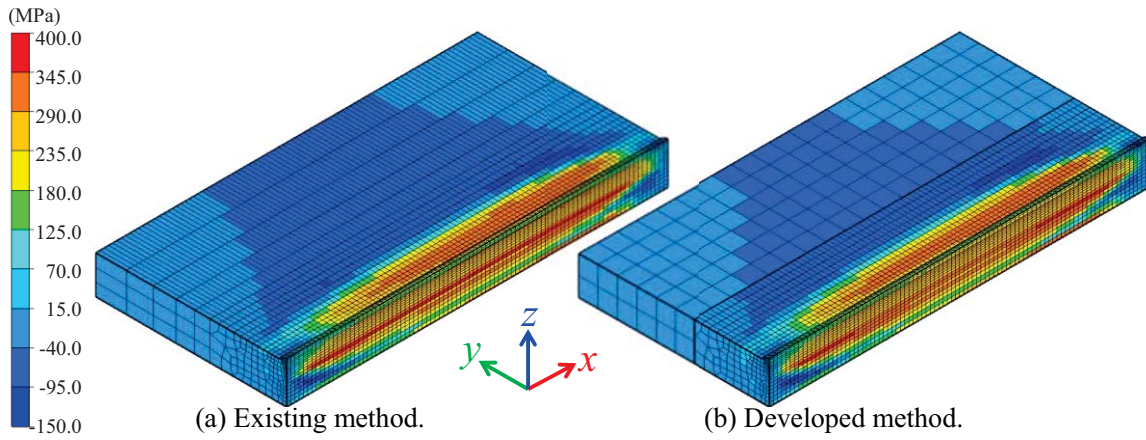


Fig. 13 Distribution of residual stress in x direction (σ_x).

向の変位分布を示す。同図より、面外方向の変位に関しても、開発手法は従来手法とほぼ同等の精度で解析可能であることが分かる。

Fig. 13 に x 方向の残留応力分布を示す。また、Fig. 14 に A-A' 線上の残留応力分布の比較を示す。これらの図より、開発手法と静的陰解法 FEM の解析結果と十分に一致していることが分かる。特に、ローカルメッシュとグローバルメッシュの境界部においても不連続を生じることなく解析できている。

以上の結果より、基礎継手問題において、熱伝導解析、熱弾塑性解析ともに開発手法は、従来手法である陰解法 FEM とほぼ同等の解析精度であることが確認できた。

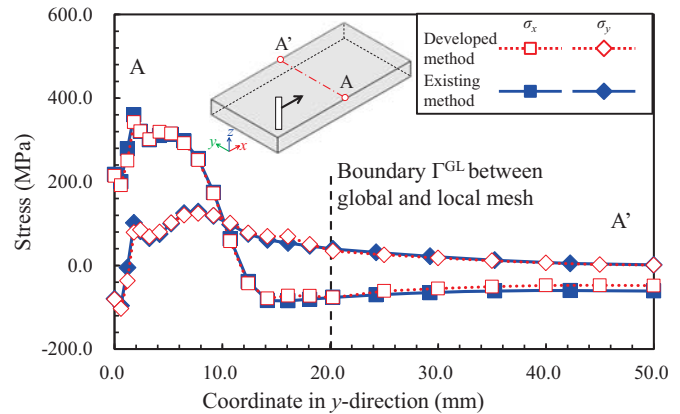


Fig. 14 Comparison of residual stress distribution.

4. 複雑モデルの解析への適用

4. 1 解析モデルおよび条件

本章では、開発手法の複雑モデルにおける適用性、並びに有効性を確認するために、Fig. 15 に示すモデルの解析に対して開発手法を適用する。同図に示す通り、本解析では、外径 200 mm、内径 160 mm、高さ 500 mm のパイプと、幅、長さ 1000 mm、厚さ 50 mm の鋼板の溶接をモデル化している。グローバルメッシュの要素数、節点数はそれぞれ、1,440、2,379 であり、ローカルメッシュの要素数、節点数はそれぞれ、47,872、41,984 である。また、本モデルにおいては、Fig. 15 (a) に示すように、パイプと板材はグローバルメッシュにおいて個別にモデルを作成しており、パイプと板材を接合する箇所をローカルメッシュにおいてモデル化している。これにより、グローバルメッシュにおいてモデル化された各部材に対して、ローカルメッシュにおいてモデル化された接合部を重ね合わせることで、それぞれの部材を結合する。なお、グローバルメッシュの各部材同士は節点を共有していないため、全く個別の部材となっている。ローカルメッシュにおいては、Fig. 15 (b) の斜線部に示す通り、板材とローカルメッシュの境界、パイプとローカルメッシュの境界の変位を拘束し、パイプの内面に相当する節点は変位を拘束しないことで、板材、パイプとローカルメッシュの変位の連続性を確保し、パイプによる板材の貫通を表現する。パイプと板材の材質は、軟鋼材を仮定し、Fig. 5 の材料定数を用いた。

4. 2 解析結果

Fig. 16 に、完全冷却後の x 方向の変位分布を示す。Fig. 16 より、溶接線垂直方向に収縮の変形が分布していることが確認できる。また、本解析モデルは、板材のグローバルメッシュとローカルメッシュの境界部において、メッシュ分割が完全に一致していないが、境界部において、連続的な変位分布となっていることが分かる。これは、ローカルメッシュの境界条件として、グローバルメッシュとの境界部に完全拘束を与えたことによる。同様に、Fig. 17 に完全冷却後の z 方向の変位分布を示す。z 方向の変位分布に関しては、角変形により、中央部に対して周辺部が持ち上がるような変形となっていることが分かる。また、z 方向に関しても、グローバルメッシュとローカルメッシュの境界で連続した変位分布となっている。

以上示したように、溶接組立のような複雑なモデルの解析において、重合メッシュ法を用いることで、部材ごとに作成したモデルに対して、溶接部の詳細なモデルを重ね合わせることで解析モデルを構築することが可能であり、解析モデルの作成を大幅に簡略化できる可能性があることが分かった。

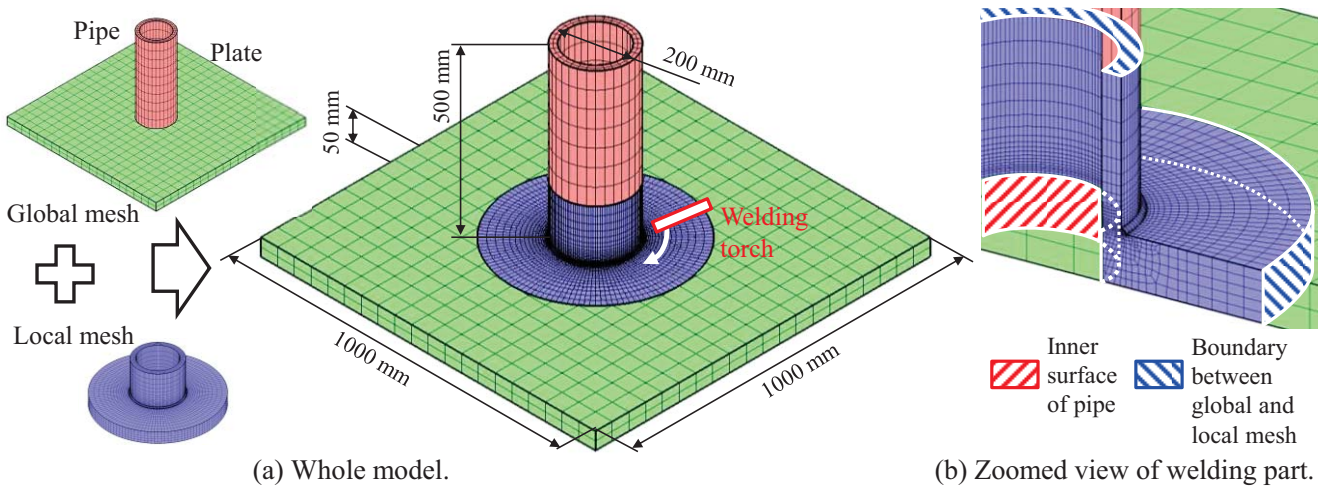


Fig. 15 Welding assembly analysis model.

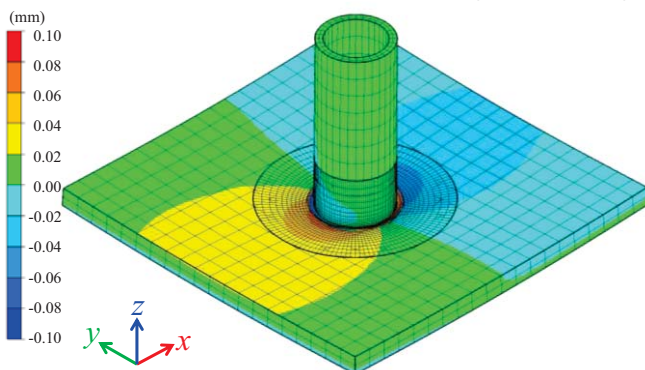


Fig. 16 Distribution of displacement in x-direction.

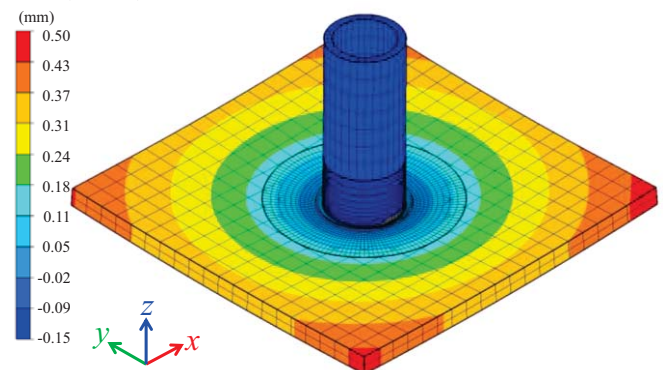


Fig. 17 Distribution of displacement in z-direction.

5. 結言

本研究では、溶接力学解析における解析手法の高度化を目的に、重合メッシュ法を用いて熱弾塑性解析、熱伝導解析の定式化を行った。重合メッシュ法を用いた溶接力学解析手法の構築に当たり、重合メッシュ法の特長から、計算時間、メモリ消費量が膨大になる可能性があるため、著者らが開発を進めている理想化陽解法 FEM に基づく手法を導入した。開発手法の性質について確認するために、基礎的なビードオンプレート溶接問題の解析に対して開発手法を適用し、従来手法による解との比較を行った。また、開発手法の有用性を示すために、厚板とパイプを溶接により組立てる問題の解析に対して開発手法を適用した結果、以下の知見が得られた。

- 1) 開発手法をビードオンプレート溶接問題の熱伝導解析に対して適用し、陰解法 FEM との比較を行った。その結果、開発手法は温度履歴、温度分布共に陰解法 FEM とほぼ同等の解析精度であることを確認した。また、グローバルとローカルメッシュの境界部においても温度分布が連続的となっていることを確認した。
- 2) ビードオンプレート溶接問題の熱弾塑性解析に対して開発手法を適用し、静的陰解法 FEM の解析結果との比較を行った。その結果、開発手法は変位分布、応力分布共に静的陰解法 FEM とほぼ同等の解析精度であることを確認した。また、グローバルメッシュとローカルメッシュの境界部においても、変位、応力共に連続的な分布が得られていることを確認した。
- 3) パイプと厚板を溶接により組立てる問題において、パイプと厚板を個別にモデル化し、溶接部を表すローカルメッシュによりそれぞれの部材を結合させた解析モデルを用いて、開発手法により解析を実施した。その結果、開発手法は複数の部材をローカルメッシュにより結合するような問題においても溶接力学解析を行うことができ、開発手法は複雑構造物のモデル化に対して効果的であることを示した。

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 JWS, Vol.42, No.6 (1973), pp.61-71.
- 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, Quart. J. JWS, Vol.29, No.1 (2011), pp.1-9.
- 3) G. Yagawa: Structural engineering handbook, Maruzen (2004), p.302.
- 4) K. Ikushima, S. Itoh and M. Shibahara: Development of Parallelized Idealized Explicit FEM Using GPU, Quart. J. JWS, Vol.31, No.1 (2013), pp.23-32.
- 5) T. Belytschko, J. Fish, A. Bayliss: The spectral overlay on finite elements for problems with high gradients, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 81 (1990), pp.71-89.
- 6) K. Suzuki, H. Ohtsubo, S. Min and T. Shiraishi: Multi Scale Analysis of Ship Structure Using Overlaying Mesh Method, Trans. JSCES, Vol.1 (1999), Paper No.19990020.
- 7) S. Nakasumi, K. Suzuki, D. Fuji and H. Ohtsubo: An Elastic and Elasto-Plastic Mixed Analysis Using Overlaying Mesh Method, Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng., Vol.66A, No.668 (2002), pp.603-610.
- 8) M. Zako, T. Kurashiki and F. Kubo: Multi-Scale Heat Transfer Analysis by Mesh Superposition Method, Proc. of Jpn. Soc. Mech. Eng., (2004), pp.329-330.
- 9) M. Zako, S. Hayashi, T. Kurashiki and F. Kubo: Thermal Stress Analysis by Mesh Superposition Method (1st Report, Formulation of Mesh Superposition Method for Thermal Stress Analysis), Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng., Vol.69, No.685 (2003), pp.1325-1330.
- 10) M. Kikuchi, Y. Wada, M. Takahashi, Y. Li: Fatigue Crack Growth Simulation Using S-Version FEM (2nd Report, Study on Interaction of Two Parallel Cracks), Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng., Vol.74, No.745 (2008), pp.1243-1248.
- 11) S. Nakasumi, K. Suzuki, H. Ohtsubo and D. Fujii: Mixed analysis of shell and solid elements using overlaying mesh method, J. Soc. Naval Architects Jpn. Vol.189 (2001), pp.219-224.
- 12) S. Nakasumi: Structural Analysis Using Mesh Superposition Technique, Journal of JWS, Vol.75, No.2 (2006), pp.129-132.
- 13) P. R. Amestoy, L. S. Duff and J. Y. L'Excellent: Multifrontal parallel distributed symmetric and unsymmetric solvers, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., Vol.184 (2000), pp.501-520.
- 14) Y. Okuno, Y. Takano and M. Zako: Microscopic Stress Analysis by Multi-scale Computational Method at Crack Tip in Heterogeneous Media, Proc. JSME 16th Comput. Mech. Conf., (2003), pp.603-604.
- 15) K. Suzuki, H. Ohtsubo, S. Nakasumi and D. Shinmura: Global Local Iterative Analysis Using Overlaying Mesh Method, J. Soc. Naval Architects Jpn. Vol.192 (2002), pp.691-696.
- 16) K. Ikushima, S. Itoh and M. Shibahara: Heat Conduction Analysis of Welding Using Idealized Explicit FEM, Quart. J. JWS, Vol.31, No.4 (2013), pp.153s-157s.