

要素再分割法を利用した形鋼圧延の3次元FEM解析

Three-Dimensional FE Simulation of Shape Rolling Processes with Inter-Stand Remeshing

柳本 潤*
Jun YANAGIMOTO

1. 緒 言

形材圧延の孔型設計・最適化を行うためには、被圧延材に発生する塑性変形特性を解明し、孔型形状に代表される各種設計変数に対応した変形挙動の変化について検討する必要がある。しかしながら、形材圧延加工時の被圧延材には複雑な3次元塑性変形が生じるため、その理論的な解明は容易ではない。そのため、被圧延材に発生する塑性変形特性の解明は、従来、プラスチックや鉛合金を供試材としたモデル実験を通して行われてきたが、実験に必要なコスト・時間・工数あるい精度などの制約が大きく、このことが形材圧延の孔型設計に対する大きな障害となってきた。筆者らは、圧延加工時の被圧延材の3次元塑性変形特性の解明を目的として、汎用解析システム CORMILL System の開発に関する一連の研究を推進しており、薄板材¹⁾、棒・線材²⁾、アングル材³⁾などへの適用を通して、解析機能の向上をはかってきた。

形材圧延における被圧延材の3次元塑性変形は、1) 各パスロールバイト内にて曲げ/压下複合変形が生じ、2) 各パスでの圧延方向横断面内の変形が著しく不均一である、という特徴を有しており、これらの点が薄板材、棒・線材の圧延加工とは大きく異なる。筆者らは既報³⁾において、CORMILL System をアングル形材圧延に適用し、曲げ/压下複合変形を呈する上下非対称圧延の解析にも本システムが適用できることを示した。しかしながら、チャンネル、H形鋼など一般の形材の圧延加工に用いられている各パスの孔型は、アングル材のそれに比較してより複雑かつ多様であり、圧延方向横断面での変形の不均一性も大きい。従って、CORMILL System を一般の形材の圧延加工に適用するためには、一連の多パス圧延の途中で要素を再分割・細分化する機能を追加することにより、この様な不均

一変形の解析をも可能とする必要がある。

3次元FEM解析における要素再分割・細分化に関する研究は従来ほとんど行われておらず、今後解決すべき課題も多い。たとえば鍛造加工については、要素再分割・細分化が3次元解析を実用化する上で最も重要な研究課題であると考えられるものの、未だ研究そのものが少ない⁴⁾。本報では、形材圧延加工の3次元定常解析を対象とした要素再分割・細分化法を新たに提案する。また、新たに提案した要素再分割・細分化手法を CORMILL System に組み込み、H形鋼ブレードダウン圧延・チャンネル材圧延の多パス圧延加工について解析を行った結果を示す。

2. 解析手法

以後の説明では、幅方向を x 軸、高さ方向を y 軸、圧延方向を z 軸とする。

2.1 フローチャート

形材圧延の多パス3次元定常解析においては、圧延方向横断面内においては著しい不均一変形が生じるものの、圧延方向の変形は比較的均一であり、要素再分割・細分化は圧延方向横断面内について行えば実用上十分であると考えられる。そこで本報では、パス間で要素を圧延方向横断面内に再分割・細分化する手法を新たに提案する。

図1に多パス形材圧延を対象とする場合の、CORMILL System のフローチャートを示す。図中網掛け部分が、本報にて新たに提案する要素再分割・細分化手法に対応している。圧延加工の多パス定常3次元解析では、第 N パスの解析終了後、第 N パス出口面内での幅・高さ方向節点座標ならびに相当ひずみ分布を次パス(第 $(N+1)$ パス)の入口面内での幅・高さ方向節点座標および相当ひずみ分布とし、第 $(N+1)$ パスの解析を実行する。そこで本報では、以下に示す手順により要素再分割・細分化を実行す

*東京大学生産技術研究所 第2部

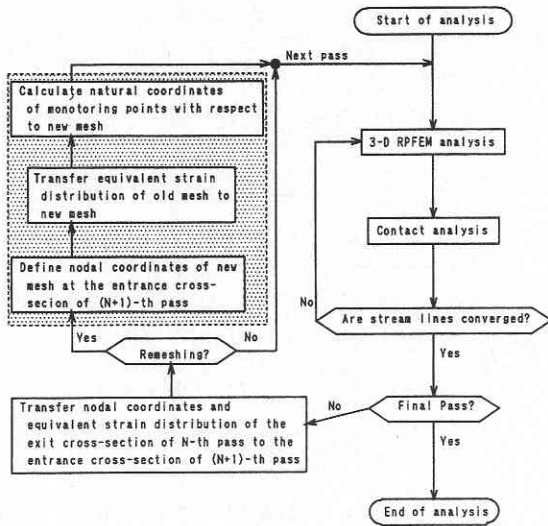


図1 フローチャート

- る。
- a) パス間で要素再分割・細分化を行う（言い換えれば節点座標を新たに定義する）。
 - b) 新たに定義された要素の相当ひずみを、再分割・細分化前の要素の相当ひずみより内挿する。
 - c) 圧延方向横断面内での塑性流動を可視化するために、第1パス開始前に定義した変形追跡点（Monitoring Point）の、新たに定義された要素分割での位置を計算する。
- 以後に、上記手順 a)～c) について詳細に述べる。

2.2 パス間での要素再分割・細分化

(1) 節点座標の定義 従来より、自動要素分割手法、ならびに Adaptive Remeshing 等に代表される要素分割の最適化手法に関する研究が盛んに行われているが⁴⁾、4 節点要素を対象とする場合の自動要素分割には、未だ解決すべき問題も多いものと思われる。そこで本報では、新たな節点座標を手動入力する方法をとった。自動要素分割については、現在検討中である。

(2) 相当ひずみの内挿法 CORMILL System による定常 3 次元解析では 8 節点要素を用いており、体積積分はガウスの 1 点積分により実行している⁵⁾。そのため各要素の相当ひずみ分布は、速度場を積分することにより、各要素の重心 1 点での値として求まる。

再分割・細分化後の要素重心での相当ひずみは、再分割・細分化前の要素の相当ひずみより、双 1 次内挿により求める。そのために、まず、要素再分割・細分化前の第 N パスについて、各節点 (x_i, y_i) での相当ひずみ $\bar{\epsilon}(x_i, y_i)$ を、次式により求める⁶⁾。

$$\bar{\epsilon}(x_i, y_i) = \frac{\sum \bar{\epsilon}^{(i)} V^{(i)}}{\sum V^{(i)}} \quad (1)$$

ただし $\bar{\epsilon}^{(i)}$ 、 $V^{(i)}$ はそれぞれ節点 i を含む要素中心での相当ひずみおよび要素の体積である。式(1)により、第 N パス終了後の各節点の相当ひずみ、すなわち再分割・細分化前の要素（以後旧要素と呼ぶ）節点での相当ひずみが求まり、これをもとに、再分割・細分化後の要素（以後新要素と呼ぶ）の重心 $E(x, y)$ での相当ひずみ $\bar{\epsilon}$ を、図 2 に示す双一次内挿を行うことにより求める。この新要素重心での相当ひずみが、次パス（第 $(N+1)$ パス）変形域入口面での相当ひずみ分布に対応する。なお(1)式はパス間での回復の影響が無視できる場合についてであり、パス間での回復を考慮する場合には(1)式に 0～1 の係数を乗ずることにより、ひずみの累積を行うことができる。

(3) 変形追跡点の計算 形材圧延の工程設計においては、圧延方向横断面内での塑性流動を把握する必要がある。従来プラスチック格子材のモデル圧延実験により検討が行われてきた。剛塑性 FEM による定常 3 次元解析は Updated Lagrange 流の定式化に基づいているため、節点が物質点と 1:1 に対応している。従って、各節点の変位を追跡することにより、圧延方向横断面内での塑性流動を把握することができるが、要素の再分割を行う場合には、要素の再分割後での物質点の位置を新たに計算する必要がある。また、圧延方向横断面内の塑性流動を可視化するための物質点（変形追跡点）は、定常 3 次元剛塑性 FEM 解析に用いる節点とは独立に設定することができる。

本報では、被圧延材横断面内での塑性流動を細部に至るまで可視化するために、変形追跡点を定常 3 次元剛塑性 FEM 解析に用いる節点とは独立に設定した。各変形追跡点 P については、a) 所属する要素、b) 所属する要素内での位置（自然座標 (ξ_p, η_p) ）をデータとして保存しておき、要素の再分割前後では、旧要素分割に関するデータ

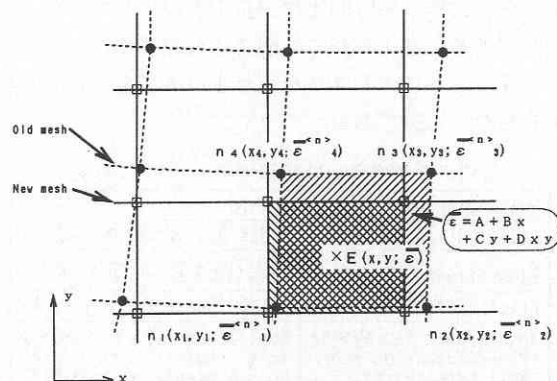


図2 相当ひずみの内挿

研究速報

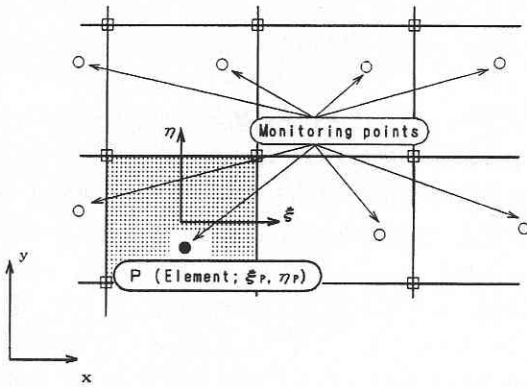


図3 変形追跡点の計算

から新要素分割についてのデータに変換することにより(図3参照), 横断面内塑性流動の可視化を可能とした。

3. 解析結果

以後にH形鋼ブレードダウン圧延およびチャンネル材圧延についての解析結果を示す。

3.1 H形鋼ブレードダウン圧延

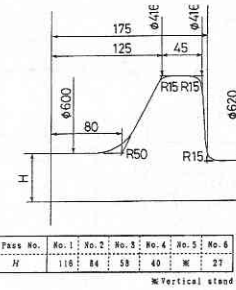
計算条件を表1に, 計算に使用した孔型を図4⁷⁾に示す。なお, 第5パスは平ロールによる幅圧下パスであり, 合計7パスについての解析を, 1/4領域を対象として行った。本圧延条件について, 初期要素分割を用いて第4パスまでの計算を実行した結果, 第3パス以後では要素のゆがみならびにロール肩部での要素長さが大きくなり, 計算精度が悪化したため, 第2パス終了後に図5に示す様な要素再分割・細分化を行い, 計算を継続した。さらに第6パス終了後にも要素再分割・細分化を行っている。図5に, 要素再分割・細分化前後での相当ひずみ分布の比較をあわせて示すが, 両者はほぼ一致している。

図6に圧延方向横断面内の塑性流動を示す。幅方向中央部での圧下に伴う幅方向流動が良く表現されており, 妥当な結果であると考えられる。図7は他の条件について, ブレードダウンパスよりユニバーサルパスに至る合計24パスの解析を行った例である。

表1 計算条件 (H形鋼ブレードダウン圧延)

Rolling speed /RPM	30
Billet dimension /mm	Width 320 × Height 100
Flow stress /MPa	$\bar{\sigma} = 110.7 \bar{\epsilon}^{0.21} \bar{\epsilon}^{0.18}$
Friction factor	m=1.0 (Shear fric. factor)
Mesh system Nx×Ny×Nz (Pre-deformation zone, Roll byte, Exit)	No. 1-3 pass: 10×4×(3+5+2) No. 4 pass: 12×3×(3+5+2) No. 5, 6 pass: 12×3×(3+5+2)
Remeshing pass number	No. 3-4 pass, No. 4-5 pass

第1~4, 6パス



第7パス

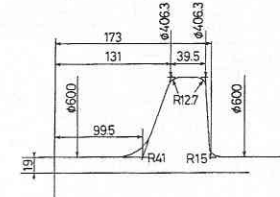
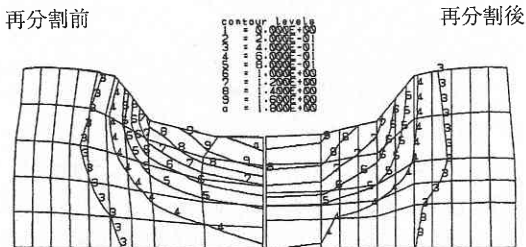


図4 孔型形状 (H形鋼ブレードダウン圧延)

再分割前



再分割後

図5 要素再分割・細分化前後での相当ひずみ分布の比較
第7パス終了後

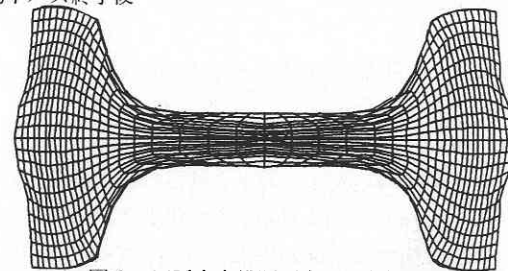


図6 圧延方向横断面内の塑性流動

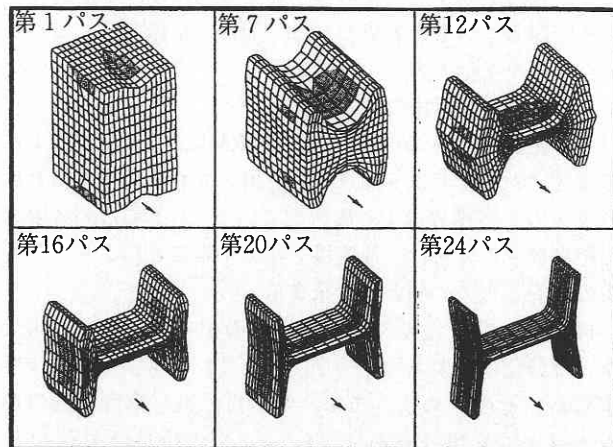


図7 3次元変形形状

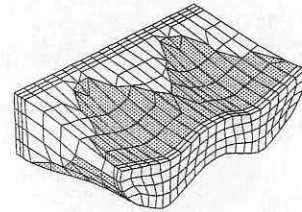
3.2 チャンネル材の圧延

計算条件を表 2 に、計算に使用した孔型を図 8⁷⁾ に示す。解析は合計 6 パスを対象とし、1/2 領域を対象として行っている。本条件については、第 3 パス終了後、第 4 パス終了後に要素再分割・細分化を行った。図 9 に 3 次元変形形状を示す。粗→中間→仕上げに至るまでの 3 次元変形に関する妥当な解析結果が、CORMILL System により得られていることがわかる。

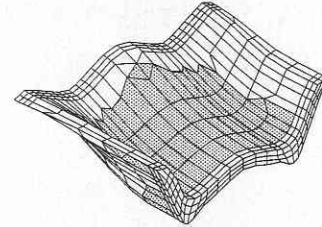
表 2 計算条件

Rolling speed /RPM	30
Billet dimension /mm	Width 330 × Height 300
Flow stress /MPa	$\bar{\sigma} = 110.7 \bar{\epsilon}^{0.21} e^{-0.13}$
Friction factor	m=1.0 (Shear fric. factor)
Mesh system Nx×Ny×Nz (Pre-deformation zone, Roll byte, Exit)	No. 1, 2 pass: 9×5×(3+5+2) No. 3-7 pass: 11×5×(3+5+2)
Remeshing pass number	No. 2-3 pass, No. 6-7 pass

第 1 パス



第 4 パス



第 7 パス

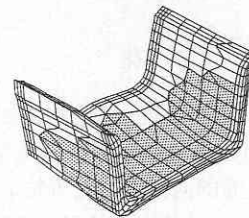
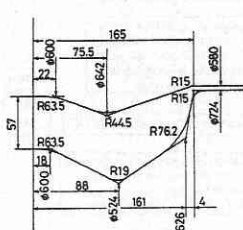
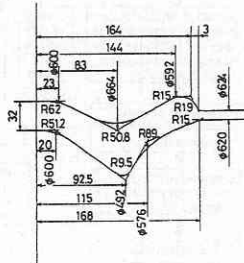


図 9 3次元変形形状

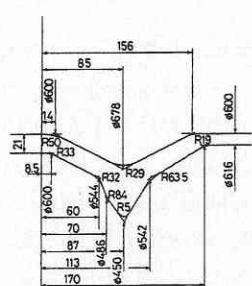
第 1 パス



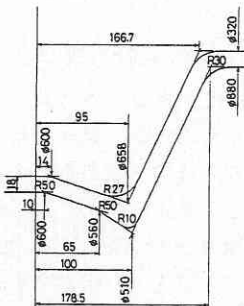
第 2 パス



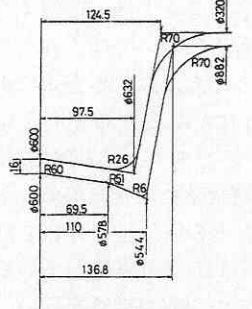
第 3 パス



第 4 パス



第 5 パス



第 6 パス

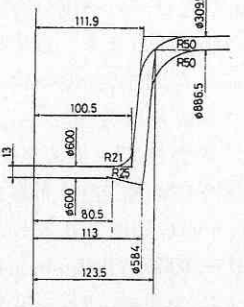


図 8 孔型形状 (チャンネル材圧延)

4. 結 言

CORMILL System の開発に関する研究の一環として、パス間での要素再分割・細分化手法ならびに H 形鋼ブレークダウン圧延、チャンネル材圧延についての解析結果を示した。本報にて提案した要素再分割手法を用いることにより、多様な孔型を用いた形鋼圧延の定常 3 次元解析が可能となり、形材圧延の孔型設計・最適化のための数値実験装置としての CORMILL System が、より実用化に近づいたものと考えられる。

なお本研究は、天田金属加工機械技術振興財団より(社)日本塑性加工学会塑性力学分科会が受けた「3次元シミュレーションの高度化」に関する研究助成の一部により行われたものであり、この場を借り深甚の謝意を表す。

(1995年12月26日受理)

参 考 文 献

- 1) 柳本ほか：塑性と加工, 33-383 (1992), 1406.
- 2) 柳本ほか：同上, 34-384 (1993), 75.
- 3) 柳本ほか：同上, 36-414 (1995), 713.
- 4) たとえば湯川ほか：43回塑加連講論 (1992), 249.
- 5) 柳本：生産研究, 43-11 (1991), 512.
- 6) Oh, S.I. et al. : Proc. 1st ICTP, (1984), 1051.
- 7) Beynon, R.E. : Roll Design and Mill Layout, (1956), 133. & 142. AISE.