

形鋼圧延 FEM 解析に対する適応型自動要素生成手法

—形鋼圧延汎用解析システムの自動化・高精度化に関する研究・1—

Adaptive Remeshing Scheme for the FE Analysis of Shape Rolling Processes

柳 本 潤*・久保田 寛**

Jun YANAGIMOTO and Hiroshi KUBOTA

1. 緒 言

形鋼圧延における新規パススケジュールの設計・孔型設計あるいはそれらの最適化は、従来、孔型設計者によるモデル実験を通じた試行錯誤により実施されてきており、現在もこの状況は大きく変化していない。しかし、プラスチック・鉛を用いたモデル実験はコスト・時間に問題があり、精度も疑問視されている。すなわち、プラスチック実験では摩擦係数が大きい幅広がりや過大評価し、さらにロールとの接触部近傍での局所変形が大きいといった問題があり、鉛実験では逆に摩擦係数が小さいために熱間鋼実験を模擬するためにはロールを粗面にする等の特別な配慮が必要である。近年、計算機の進化に伴い精度も良く比較的成本のかからない有限要素法（以下 FEM）解析が始まり¹⁾、形鋼圧延におけるプラスチックモデル実験を FEM による数値実験に代替しようとの試みもなされている²⁾。FEM による 3 次元変形解析を形鋼圧延時のパススケジュールの設計・孔型設計に利用するためには、非対称形鋼圧延時の FEM 解析方法についての理論的な研究も必要であるが³⁾、H 形鋼圧延（ブレードダウン、ユニバーサルパス）、アングル材、チャンネル材、I 形鋼他の形鋼圧延の 3 次元変形解析が可能となった今日では、形鋼圧延における孔型設計・パススケジュール設計に役立つ FEM 解析システムを構築することが重要な位置を占めている。

FEM においては材料非線形を含む 3 次元大変形問題を取り扱うために、解析を実行する為には適正な要素分割方法（要素の生成）、収束条件の設定方法などの FEM 特有の知識を必要とする。ところが形鋼圧延の孔型設計・パススケジュールの設計を実施する実務者は FEM 解析の知識を有しない場合が多い。FEM 解析の結果・精度を評価する際には当然 FEM 解析の知識が必要であり、これを

孔型設計実務者に課するとの考え方も成り立ち得るが、一連の検証試験を経て解析精度について評価がある程度定まっている FEM 解析システム、たとえば筆者らが開発した CORMILL System を、検証試験を実施したパスについて用いる場合には、FEM に関する知識を有しない実務者の使用についてもさほど問題は生じず、むしろ孔型設計者が日常孔型設計時に注視しているパラメータとその塑性変形・負荷特性への影響度に重点を置いた解析が可能なシステムを構築することが必要となる。また、要素生成を自動化することにより、パス間でのリメッシュも同じ方法で自動化できるので、多パス圧延の自動解析を実施することもでき、またその際に使用する要素数を最小限にとどめることにより、計算時間の短縮を同時にはかることができる。

本研究では、圧延加工汎用 FEM 解析システムによる孔型設計の高度化・自動化・高精度化技術についての検討を目的としており、個別の研究項目は以下の通りである。

1) 形鋼圧延時の自動要素生成技術

- ・孔型形状の複雑さ、材料入側 C 断面形状の複雑さを考慮した適応型自動要素生成手法
- ・解析しようとするパスの C 断面内変形を考慮した適応型自動要素生成手法

2) 形鋼・棒線材解析システムのユーザインタフェース (GUI) の改良

- ・ Visual C++ による GUI の構築
- ・ FEM 解析に必要なパラメータの自動入力

本報では、1) について検討した結果を述べる。次報では、一般の異形形鋼の要素生成適用例と、解析システムの GUI を紹介する。

2. 形鋼圧延 FEM 解析に対する適応型自動要素生成手法

形鋼圧延解析に用いる C 断面（長手方向横断面）内の要素を適正且つ自動的に生成する為には、(1) 孔型形状の幾何学的特性、及び (2) 材料断面形状の幾何学的特性に配慮し、例えば、孔型曲率が大きい部分や、材料の孔

*東京大学生産技術研究所 第2部

** (株)東芝

型への充填が発生する部分などに多くの要素を適用しなければならない。また、上記 (1) (2) の影響を正確に考慮することに加え、(3) パス内にて発生する C 断面内塑性流動を考慮した自動要素生成を行うことにより、C 断面内の要素分割数を最小限にとどめた上で、精度を損なうことなく解析を実施することができる。本章では、まず、孔型・被加工材の幾何学的特性を考慮した要素生成手法を述べ、ついで H 形鋼ブレークダウン・ユニバーサル圧延を対象とした、要素自動生成のための簡易変形予測手法について述べる。以下の説明では、幅方向を x 、厚さ方向を y とする。

2.1 孔型形状・被加工材断面形状の複雑さを考慮した適応型自動要素生成手法

1) 外表面の領域分割

孔型形状・被加工材断面形状の複雑さを考慮しつつ、入口側被加工材 C 断面外表面に節点を発生させるために、まずは Fig. 1 に従いつつ領域分割を行う。それぞれの領域を分ける点 (以後分割点と称する、Fig. 1 中○印) には、FEM 解析の節点を必ず配置するものとし、また孔型形状・被加工材断面形状の複雑さは、後述の方法により各領域毎に評価する。外表面領域は、まず被圧延材入側 C 断面形状と下死点での孔型プロフィールをもとに、自由表面と孔型との接触面とに分割し、さらに、孔型との接触面については、孔型 R 部に接触している部分を別の領域に分割する。なお、孔型 R 部の領域として、R 部端点にて R 部に接する外接線の長さ W の 1.3 倍を取ることとした (Fig. 1 参照)。また、被加工材表面の折れ曲がり点も、入側被加工材の形状を保持するために分割点とする。従って Fig. 1 の場合には、被加工材は合計 7 個の領域に分割されたことになる。

2) 各領域に発生させる節点数の決定方法

各領域に発生させる節点数を決定するために、要素密度を導入する。なお、この要素密度は、FEM のための自動要素生成のためにしばしば用いられる Adaptive remeshing における誤差評価関数と同じく、補間誤差を基本として導かれたものである。

Fig. 2 に示す円弧を n 個の長さが等しい直線線分にて表現した場合の補間誤差は、以下の式により表される。

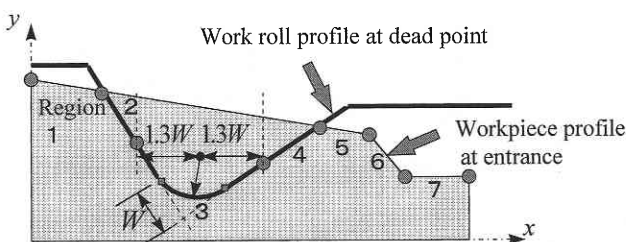


Fig. 1 Division into elements for the generation of surface nodes.

$$Error = \frac{r\theta - \sum_{i=1}^n l_i}{y\theta} = 1 - \frac{2n}{\theta} \sin\left(\frac{\theta}{2n}\right) \approx \frac{1}{6} \left(\frac{\theta}{2n}\right)^2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、上式の導出には $\sin x \approx x - \frac{1}{6}x^3$ なる近似式を用いた。この領域における単位長さあたりの表面要素密度を D とすれば、 $n = Dr\theta$ と表されるので、設定した補間誤差に対応した要素密度 D を式 (1) より求めることができる。従って、孔型半径を r_R 、孔型形状に関する許容補間誤差を K_R 、孔型形状に対応する表面要素密度を D_R とすれば、

$$D_R = \frac{1}{2r_R \sqrt{6K_R}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

各領域に属する被加工材入側 C 断面の表面を円弧にて近似した場合の曲率半径を r_w 、被加工材断面形状に関する許容補間誤差・表面要素密度をそれぞれ K_w 、 D_w とすれば、

$$D_w = \frac{1}{2r_w \sqrt{6K_w}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

と表される。そこで、C 断面内についての各領域の要素密度を、次式で与える。

$$D = \text{Max}(D_R, D_w, D_{\min}) \quad \dots\dots\dots (4-1)$$

ただし D_{\min} は、最小要素密度である。本研究において使用した許容誤差の値は、 $K_R = 0.03$ 、 $K_w = 0.05$ である。

以上は C 断面に関係して求められる要素密度であるが、さらに L 方向 (圧延方向) に関係した要素密度として、各領域内の接触弧長の差を考えねばならない。接触弧長の差に起因する要素密度の修正係数を C_L とすれば、各領域の要素密度は以下の式により与えられる。

$$D = \text{Max}(D_R, D_w, D_{\min}) \cdot C_L \quad \dots\dots\dots (4-2)$$

C_L は以下の通り求めることができる。各領域の端点をそれぞれ A、B とし、この領域を n 分割した場合の各分割区間の平均接触弧長差を規格化すると、

$$Error = \frac{1}{n} \frac{\left| \sqrt{2R\Delta h} \right|_A - \left| \sqrt{2R\Delta h} \right|_B}{\left(\left| \sqrt{2R\Delta h} \right|_A + \left| \sqrt{2R\Delta h} \right|_B \right) / 2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

が得られる。上式にて与えられる許容誤差を K_L とすれば、接触弧長差を考慮した要素密度の修正係数 C_L は、次式に

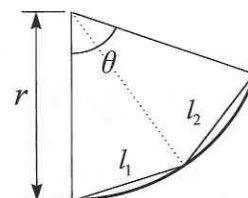


Fig. 2 Discretization error to calculate node density.

研 究 速 報

て求まる。

$$C_L = \frac{1}{K_L} \frac{\left| \frac{\sqrt{2R\Delta h}}{\sqrt{2R\Delta h}} \Big|_A - \frac{\sqrt{2R\Delta h}}{\sqrt{2R\Delta h}} \Big|_B \right|}{\left(\frac{\sqrt{2R\Delta h}}{\sqrt{2R\Delta h}} \Big|_A + \frac{\sqrt{2R\Delta h}}{\sqrt{2R\Delta h}} \Big|_B \right) / 2} \dots\dots\dots (6)$$

なお、接触弧長差を考慮した要素密度の修正係数 C_L に関係する許容誤差は $K_L = 2.0$ とし、さらに C_L は、 $1.0 \leq C_L \leq 2.0$ の範囲の値を取るものとした。

3) 表面要素の配置方法

被加工材 C 断面が矩形分割様式、すなわち幅方向分割数 N_x と厚さ方向分割数 N_y により規定される場合を考える。矩形分割を構成する頂点の位置の定め方を Fig. 3 に示す。まずは、幅方向中心線上にある 2 つの節点を選択し (Fig. 3 中○印)、これを基準頂点 (頂点 1, 頂点 4) とする。つぎに、上/下/垂直ロールとの接触端点にある節点、対称面上の端点にある節点、自由表面上で折れ曲がり点に位置する節点などの、頂点の候補となり得る節点 (Fig. 3 中☆印) を抽出し、以下の評価式を最小とする候補点の組を、残りの頂点 (頂点 2, 頂点 3) とする。

$$F = g \left(\frac{L_s^{3-4}}{l_s^{3-4}} \cdot \frac{l_s^{1-2}}{L_s^{1-2}} \right) \cdot \left(\frac{L_s^{3-4}}{L_s^{1-2}} \right) \cdot (L_s^{1-2} + L_s^{3-4}) \\ + g \left(\frac{L_s^{2-3}}{l_s^{2-3}} \cdot \frac{l_s^{1-4}}{L_s^{1-4}} \right) \cdot g \left(\frac{L_s^{2-3}}{L_s^{1-4}} \right) \cdot (L_s^{2-3} + L_s^{1-4}) \dots (7)$$

ただし、は以下の式により規定される関数である。

$$g(v) = \begin{cases} v & (v \geq 1) \\ \frac{1}{v} & (v \leq 1) \end{cases} \dots\dots\dots (8)$$

また、Fig. 3 中にも示されている通り、 L_s は被加工材表面に沿った長さ、 l_s は直線距離である。式 (7) に基づき頂点を選択し、自動要素分割を実施して解析を行うことにより、例えば H 形鋼ブレードダウン圧延よりユニバーサル圧延に至るまでの一連の解析を自動化することができる。

上式により 4 頂点が定まったので、幅方向・厚さ方向分割数 N_x , N_y を規定することにより、頂点の間の各領域 i に配置すべき表面要素の数 $N_{se}(i)$ を、各領域の要素密度 $D(i)$ (式 (4-2) 参照)、各領域の長さ $L(i)$ を用いて、例えば幅方向については以下の式により定めることができる。

$$N_{se}(i) = \frac{D(i)L(i)}{\sum_j D(j)L(j)} N_x \dots\dots\dots (9)$$

2.2 要素自動生成のための簡易変形予測手法

前節において、入口側被加工材 C 断面形状および孔型形状の幾何学的特性に着目した自動要素生成手法を述べた。この手法では、Fig. 1 および式 (4-2) にて示されているとおり、各領域での被加工材・孔型形状について

個別に求められる要素密度のうち大きな値を与えるものを使用している。ところが圧延時には被加工材 C 断面に複雑な塑性流動が生じるため、圧延前には孔型ストレート部に対応する位置にあった被加工材が、圧延後 R 部に流入する等の問題 (Fig. 4 参照) が発生する。従って、孔型形状の幾何学的特性の FEM 解析における再現精度を損なわないためには、被加工材 C 断面形状としては入口側ではなく出口側の形状を用いて要素を生成する方が望ましい。すなわち、これから解析しようとするパスの塑性変形を予測の上、要素を自動的に生成しなければならない。

あるパスの塑性変形を正確に予測するためには、FEM 解析を実施しなければならないが、これは適応型要素自動生成を行う利点と相反する。幸いなことに、要素生成のために必要な変形に関する情報にはさほどの精度が要求されないので、実験式あるいは簡易式に基づく変形予測で十分であり、特に H 形鋼ブレードダウン、ユニバーサル圧延では 2 枚板モデル + 平均延伸法により、要素の適応型自動生成に必要なほぼ全ての情報を得ることができる。なお、H 形鋼圧延を対象とした簡易変形予測式は各種提案されているが、CORMILL System により各種の変形予測式を評価した結果、Tafel & Sedlaczek の幅広がり式⁴⁾が H 形鋼圧延の条件範囲で最も良い近似解を与えたので、この式を Web, Flange に適用して延伸を求め、これらをそれぞれの部分の断面積比で補正して平均延伸を求めることとした。すなわち、平均延伸 ϵ_L^{ave} は、

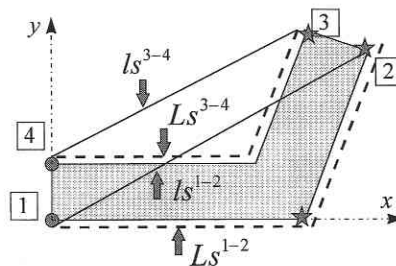


Fig. 3 Definition of corner points.

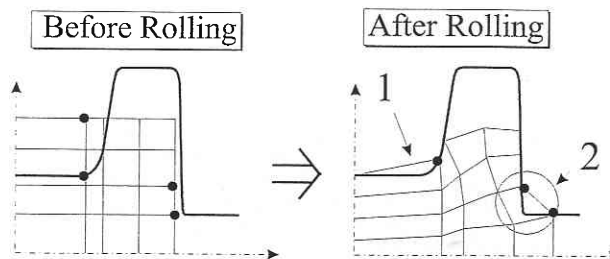


Fig. 4 Cross-sectional deformation of mesh with/without prediction of deformation.

$$\varepsilon_{L\text{ ave}} = \frac{1}{A_w + A_f} (A_w \varepsilon_{Lw} + A_f \varepsilon_{Lf}) \quad \cdots \cdots (10)$$

にて評価する。ただし、 ε_{Lw} 、 ε_{Lf} は Web, Flange それぞれ 1 枚の板とした場合に求められるそれぞれの部分の延伸、 A_w 、 A_f は入口断面における Web, Flange の面積である。なお、ユニバーサル圧延時には、Web, Flange の圧下量配分の変化に伴い、Web もしくは Flange のみが圧下されている部分と、同時に圧下されている部分を分ける圧延方向横断面が存在する。この面の圧延方向位置は、「x, y 方向ひずみ増分比が等しい」という仮定を置き、さらに体積一定条件を考慮した上で、ロールとの接触を判定して求める。

3. 適応型自動要素生成の効果

Fig. 5 に適応型要素生成手法の効果を確認するために実施した解析条件を示す。対象としたのは、 $\square 300 \times 300$ のピレットのオープンカリバーによる 4 パス圧延であり、降伏応力式は美坂の式 (1000°C, 0.15 % C)、摩擦定数は 1.0 である。Table 1 は要素分割条件であり、Case1 は本報で示した方法で要素生成をした場合 (標準条件)、Case2 は Case1 で得られた最小の要素幅により等分割した場合 (細分割条件)、Case3 は標準条件と同じ要素分割数にて等分割した場合、Case4 は Case1 と同じ条件であるが変形予測を行わないで要素を生成した場合である。Fig. 6 に示す幅広がり解析結果からわかるとおり、Case3, Case4 と Case2 (細分割条件) との差は大きい、Case1 (標準条件) は Case2 と非常に近い結果が得られている。すなわち、1) 孔型形状・被加工材断面形状の幾何学的特性を考慮し、さらに、2) 次パスの変形を予測した適応型自動要素生成を実施することにより、少ない要素数にて精度良い解析を実施することができることがわかる。

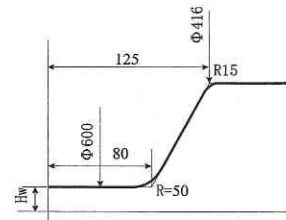
4. 結 言

本報では、形鋼圧延についての適応型要素自動生成手法を提案した。さらに、本報で提案した手法を H 形鋼圧延に適用し、少ない要素数でも良い解が得られ、計算時間の短縮・計算精度の向上に効果があることを示した。また、適応型自動要素生成手法を適用することにより、多パス形鋼圧延の自動解析を実施することも可能となった。

(1997 年 6 月 19 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：塑性と加工, 36-414 (1995), 713.
- 3) 柳本ほか：塑性と加工, 36-408 (1995), 41.
- 4) Tafel, W. and Sedlaczek, H.: Stahl u. Eisen, 45 (1925), 190.



Pass No.	1	2	3	4
Hw(mm)	116	84	58	40
Redw(%)	22.7	27.6	31.0	31.0

Fig. 5 Employed rolling conditions for case studies.

Table 1 Mesh system used for numerical tests.

Pass number	1	2	3	4	Note
Case 1	11	11	11	11	Presented method
Case 2	20	20	19	17	Fine mesh as a reference condition
Case 3	11	11	11	11	Coarse mesh
Case 4	11	11	11	11	Without prediction of width spread

$N_y = 5$

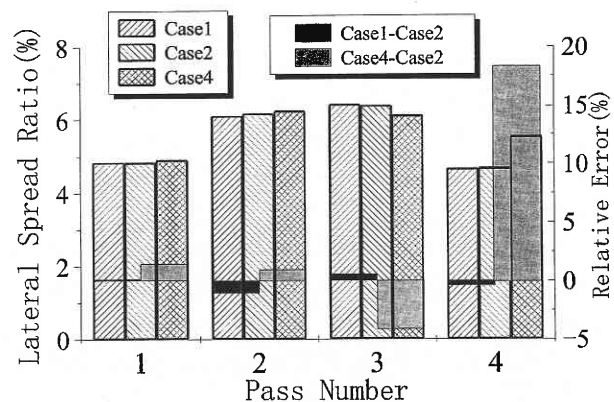
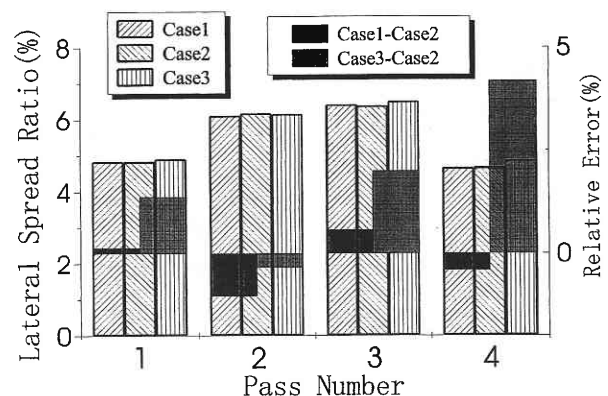


Fig. 6 Width spread for each pass.