

入門講座

圧延理論入門-8

管材圧延解析のための3次元圧延理論

Three Dimensional Theory for Tube Rolling Analysis

三原 豊

香川大学 工学部 教授

Yutaka Mihara

吉村英徳

同上 助手

Hidenori Yoshimura

1 はじめに

管を棒材から穿孔・圧延により製造する歴史は古く、1880年代にマンネスマン兄弟により穿孔方法が考案されたことに始まる。それ以来、製造方法も改良されながら進歩してきた。1912年には早くも日本への導入がなされている。管の製造技術者にとって、圧延、穿孔時の負荷解析や、疵発生解析をする道具として、3次元圧延解析方法の開発は、長年の夢であった。しかし、管の穿孔、圧延変形が複雑で、初等解析による解析は困難であった。また、圧延工程ごとにそれぞれ圧延方式が異なり、変形も異なる事から、その解析法の開発は、コンピューターの発達する近年まで待たなければならなかった。

管の製造プロセスは、棒材に孔をあける穿孔工程、穿孔された母管を延伸させる圧延工程、管の外径を成形する定径工程に分類される^{1, 2)}。穿孔にはマンネスマン穿孔法に代表される傾斜ロール穿孔法が一般に用いられている。また、延伸圧延法としては、マンドレル圧延、プラグミルなどが主として用いられている。定径法ではサイザー、ストレッチレデューサー圧延法が用いられている。これら、穿孔、延伸圧延、定径圧延法を、その圧延機構で分類すると大きく二つの方式に分類される。1) 傾斜ロール圧延・穿孔法：2本または3本の太鼓型やコーン型ロールを互いに傾斜させ、ロール軸と同一方向に材料を送り込み、ロールの回転と傾斜角度を利用し材料を引き込んで穿孔、圧延するもので、内部にプラグまたはマンドレルバーを入れるのが一般的である。2) 孔型圧延：上下2または3ロール、による孔型圧延法で、円形の孔型の間に材料を送り込み、ロールと内部のマンドレルやプラグの間で肉厚を圧延するか、または、マンドレルやプラグを用いず、孔型ロールによる外形圧下とスタンド間の張力で延伸を行うものがある。

これらのどの圧延法においても、材料は3次的に複雑な

変形を受ける。特に、傾斜ロール圧延では、管の延伸時に、管のねじり、円周方向への大きなせん断変形が加わると同時に、同一個所が管の半回転毎に繰り返し圧延されるため、さらに複雑な変形になっている。このように、管の圧延負荷や圧延変形の解析を行うには、3次元変形の解析が不可欠であるが、直接にこれらの変形を解析的に求める事は困難であった。これら変形を解析するため、初期には実験的に模様をつけた粘土を穿孔、圧延し、その模様の変化から変形が解析されていた。また、解析的には軸対称を仮定し、2次元変形に置き換える初等解析法が用いられてきた。他方、ブラジンスキーらは、傾斜ロール穿孔、圧延を対象に、エネルギー消費を考え、形状を作り上げる変形と付加的なせん断変形を、実験と理論を併用して分離する事により、圧延負荷の計算を行った。コンピューターと解析プログラムの発展により、大量の数値解析が可能となった近年、やっと解析手法のみにより、3次元や擬似3次元解析が行なえるようになり、単スタンド圧延における変形特性解析、ロール孔型の最適化解析が可能となった。

他方、継目無管の圧延においては、ビレットは1本ごとに圧延される。このため、多スタンドで圧延されるマンドレル圧延やストレッチレデューサー圧延では、連続圧延としての非定常圧延部が大きな問題であり、この解決にも単スタンド圧延特性を正確に計算できる3次元解析手法の出現が待たれていた。

ここでは、これまでに使われてきた3次元圧延解析の方法について解説する。

2 全ひずみ理論による管圧延の3次元解析

孔型圧延の3次元解析に用いられてきた理論である。初期には、ストレッチレデューサーの解析に、Neumannと

Henckeにより提案されたが、岡本らは形状変化係数の考え方を取り入れ、これを発展させた³⁾。特に、レデューサー圧延では、多スタンド圧延における非定常圧延の解析ともリンクし、ロール回転数制御にまで発展させている。その後、マンドレル圧延のオーバーフィル、アンダーフィルの解析や、ピルガーミルの圧延解析にも活用されてきた^{1,4)}。この解析も、数値計算が基本となっており、計算機の発展によりその応用も広がった。

この解析の特徴は、圧延途中の形状変化は考慮せず、圧延前後の形状で議論を進める点にある。マンドレル圧延の解析例を以下に説明する。マンドレル圧延では、図1に示すごとく内部のマンドレルと外部のロール間において肉厚が主として圧下されるが、マンドレルと材料が接する事の無いフランジ部が存在する。解析ではこれら部分を区別し、各々に対し方程式を立てる必要がある。

圧延部における条件では、以下の式が成立する。ただし、 ϕ は全歪、 σ は応力を表わし、添字 l, r, θ は長手、半径、円周方向を示す。また t_v は肉厚を示す。

(1) 体積一定の条件

$$\phi_l + \phi_r + \phi_\theta = 0 \dots\dots\dots (1)$$

(2) 応力-ひずみの関係式

$$\frac{\sigma_l - \sigma_\theta}{\phi_l - \phi_\theta} = \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{\phi_\theta - \phi_r} = \frac{\sigma_r - \sigma_l}{\phi_r - \phi_l} \dots\dots\dots (2)$$

(3) Misesの降伏条件式

$$(\sigma_l - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_l)^2 = 2k_f^2 \dots\dots\dots (3)$$

(4) 半径方向の力の釣り合い式

$$\sigma_{rb} - \sigma_{ra} = \int_{ra}^{rb} (\sigma_\theta - \sigma_r) \frac{dr}{r} \dots\dots\dots (4)$$

(5) 平均応力 σ_r の近似式

$$\sigma_r = \frac{1}{2} (\sigma_{ra} - \sigma_{rb}) \dots\dots\dots (5)$$

また、フランジ側で成立する式として圧延部と同様に以下の

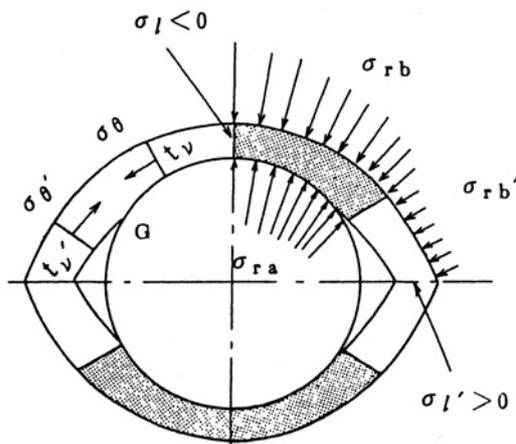


図1 マンドレル圧延における変形中の応力状態¹⁾

式が成り立つ。ただしフランジ部の記号には'をつけて示す。

$$\phi_l' + \phi_\theta' + \phi_r' = 0 \dots\dots\dots (6)$$

$$\frac{\sigma_l' - \sigma_\theta'}{\phi_l' - \phi_\theta'} = \frac{\sigma_\theta' - \sigma_r'}{\phi_\theta' - \phi_r'} = \frac{\sigma_r' - \sigma_l'}{\phi_r' - \phi_l'} \dots\dots\dots (7)$$

$$(\sigma_l' - \sigma_\theta')^2 + (\sigma_\theta' - \sigma_r')^2 + (\sigma_r' - \sigma_l')^2 = 2k_f'^2 \dots\dots (8)$$

$$\sigma_{rb}' = \int_{ra}^{rb} (\sigma_\theta' - \sigma_r') \frac{dr}{r} \dots\dots\dots (9)$$

$$\sigma_r' = \frac{1}{2} (\sigma_{rb}') \dots\dots\dots (10)$$

圧延部の長手方向ひずみとフランジ側の長手方向ひずみは同一の値となるので

$$\phi_l = \phi_l' \dots\dots\dots (11)$$

円周方向の応力の釣り合い式

$$\sigma_\theta = \xi \sigma_\theta' \quad \left[\xi = \frac{t_v'}{t_v} \right] \dots\dots\dots (12)$$

長手方向応力の釣り合い式

$$f = \sigma_l \times A + \sigma_l' \times A' \dots\dots\dots (13)$$

円周方向のひずみの適合条件式

$$g(\phi_\theta, \phi_\theta') = 0 \dots\dots\dots (14)$$

ただし、 g は孔型の幾何学的条件によって決まる。

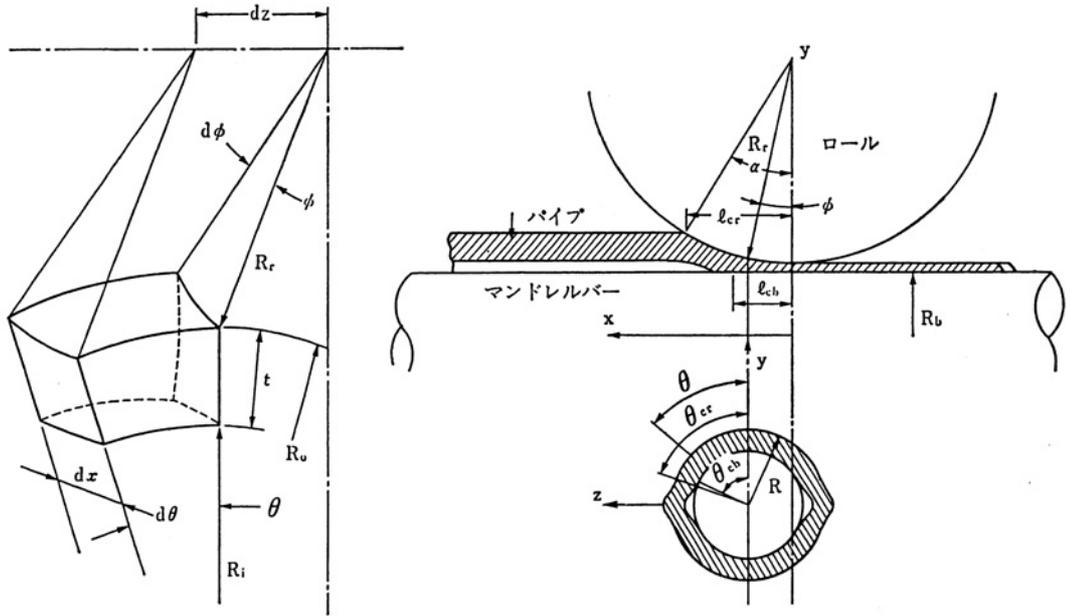
以上の(1)～(14)を連立して数値解析によりひずみと応力を計算することが出来る。ここで、方程式の数は、14式であり、未知数の数は、 ϕ_r, t_v は既知となるため、14となり、解く事ができる。これを、ストレッチレデューサーに適用する場合には、(1)～(5)式にストレッチ係数の式を加え、解析をする事が出来る。

このように、全ひずみ理論による解析は、圧延前後の状態のみを求める解析である。

3 ひずみ増分法による管圧延の差分解析

全ひずみ理論では求められない圧延中のひずみ、応力分布等を計算するため、3次元の基礎式を展開し、これを差分法により解く事で解を求める方法も開発されている。これは、マンドレル圧延時の変形解析に用いられた⁵⁾。

この解析は、図2に示す座標系を使い、図3に示すように、忠実に微小部分の応力、ひずみ、ロールとの接触等の関係式を立てることからはじめられる。用いられる関係式は(1)半径方向の釣り合い方程式、(2)円周方向釣り合い方程式、(3)圧延方向釣り合い方程式、(4)摩擦関係の式、(5)応力-ひずみ増分関係式(Levy-Misesの塑性流れ則)、(6)ひずみ増分-変位増分関係式、(7)降伏条件式(Misesの条件式)、である。これらの関係式を、圧延部、外圧部、自由変形部でたて、各部分の適合条件をいれて解かれている、圧延部では32の式が成立し、32の未知数が有る。外圧部では、



- R_o : パイプ外半径
- R_i : パイプ内半径
- θ : カリバー底からの周方向角度
- ϕ : ロール出側からの圧延方向角度
- α : 嚙込角
- R_b : バー半径
- R_r : ロール半径
- t : 肉厚
- R : 管半径
- η : 外面角
- P_R : ロール面圧
- P_B : バー面圧
- l_{cr} : ロールとの圧延方向接触弧長
- l_{cb} : バーとの圧延方向接触弧長
- θ_{cr} : バーとの周方向接触角
- θ_{cb} : ロールとの周方向接触角

- $\tau_{R\theta}, \tau_{Rx}$: ロールと材料間の摩擦応力
- $\tau_{B\theta}, \tau_{Bx}$: バーと材料間の摩擦応力
- $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_x, \tau_{r\theta}, \tau_{rx}, \tau_{\theta x}$: 応力
- $\epsilon_r, \epsilon_\theta, \epsilon_x, \gamma_{r\theta}, \gamma_{rx}, \gamma_{\theta x}$: ひずみ
- $d\sigma_r, d\sigma_\theta, d\sigma_x, d\tau_{r\theta}, d\tau_{rx}, d\tau_{\theta x}$: 応力増分
- $d\epsilon_r, d\epsilon_\theta, d\epsilon_x, d\gamma_{r\theta}, d\gamma_{rx}, d\gamma_{\theta x}$: ひずみ増分
- k_r : せん断変形抵抗
- r, θ, x : 半径方向・周方向・圧延方向座標
- σ_f, σ_b : 前方張力, 後方張力
- i, j : 圧延方向・周方向メッシュ番号
- du_r, du_θ, du_x : 半径方向・周方向・圧延方向変位増分
- $\Delta u_{Rr}, \Delta u_{R\theta}$: ロールと材料との圧延方向・周方向変位増分差
- $\Delta u_{Br}, \Delta u_{B\theta}$: バーと材料との圧延方向・周方向変位増分差
- μ_R, μ_B : ロールおよびバーとの摩擦係数

図2 ひずみ増分解析によるマンドレル圧延解析時の座標系と記号

それぞれ29の式と未知数が、また、自由変形部では、それぞれ19の式と未知数ができる。用いられた基礎方程式を以下に示す。

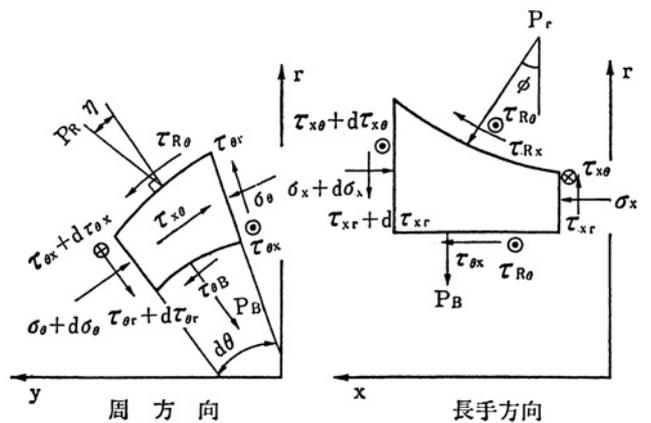
3.1 釣り合い方程式

図3に示すような微小要素を考え、応力の釣り合い式を立てる。

3.1.1 半径方向釣り合い式

管の外表面、内表面、円周方向切断面、圧延方向切断面に働く応力を考慮し、力の釣り合いの計算できるが、ここでは最終の式のみを示す。

$$\begin{aligned}
 & R_o(P_R + \tau_{R\theta} \tan \eta / \cos \phi - \tau_{Rx} \tan \phi) - P_B R_i - \\
 & 2\sigma_\theta t \sin(d\theta/2) / d\theta + \\
 & (\tau_{r\theta} dt + t d\tau_{r\theta}) \cos(d\theta/2) / d\theta - \\
 & (tR d\tau_{xr} + R \tau_{xr} dt + \tau_{xr} t dR) / dx = 0 \dots \dots \dots (15)
 \end{aligned}$$



(圧縮を正とする)

図3 応力の定義

3.1.2 円周方向釣り合い式

$$R_0(P_R \tan \eta + \tau_{R\theta} / \cos \phi) + \tau_{B\theta} R_i - (t d\sigma_\theta + \sigma_\theta dt) \cos(d\theta/2) / d\theta - 2\tau_{\theta r} t \sin(d\theta/2) d\theta + (t R d\tau_{x\theta} + t \tau_{x\theta} dR + \tau_{x\theta} R dt) \cos(\eta/2) / dx = 0 \dots (16)$$

3.1.3 圧延方向釣り合い式

$$R_0(P_R \tan \phi + \tau_{Bx} / \cos \eta) + \tau_{Bx} R_i + (t d\tau_{x\theta} + \tau_{x\theta} dt) / d\theta - (R t d\sigma_x + t \sigma_x dR + R \sigma_x dt) / dx = 0 \dots (17)$$

3.2 摩擦応力

クーロン摩擦を考え、これがせん断変形抵抗を超えるとき付着摩擦として取り扱う。材料とロール (τ_R)、バー (τ_B) 間に働く摩擦力は、クーロン摩擦領域では

$$\tau_R = \mu_R P_R$$

$$\tau_B = \mu_B P_B \dots (18)$$

付着摩擦領域では

$$\tau_R = k_\tau$$

$$\tau_B = k_B \dots (19)$$

各摩擦応力の圧延方向と円周方向分力は、バーあるいはロールと材料の相対速度差によって決定される。ロールとの成分のみを示すと以下のとおりである。

$$\tau_{Rx} = \tau_R \times (\Delta u_{Rx} / \sqrt{\Delta u_{Rx}^2 + \Delta u_{R\theta}^2})$$

$$\tau_{R\theta} = \tau_R \times (\Delta u_{R\theta} / \sqrt{\Delta u_{Rx}^2 + \Delta u_{R\theta}^2}) \dots (20)$$

3.3 応力とひずみ増分関係式

$$\frac{3d\epsilon_x}{2\sigma_x - \sigma_\theta - \sigma_r} = \frac{3d\epsilon_\theta}{2\sigma_\theta - \sigma_r - \sigma_x} = \frac{3d\epsilon_r}{2\sigma_r - \sigma_x - \sigma_\theta}$$

$$= \frac{d\gamma_{rx}}{2\tau_{rx}} = \frac{d\tau_{x\theta}}{2\tau_{x\theta}} = \frac{d\tau_{\theta r}}{2\tau_{\theta r}} = d\lambda \dots (21)$$

3.4 ひずみ増分と変位増分関係式

$$d\epsilon_x = \frac{\partial(du_x)}{\partial x}$$

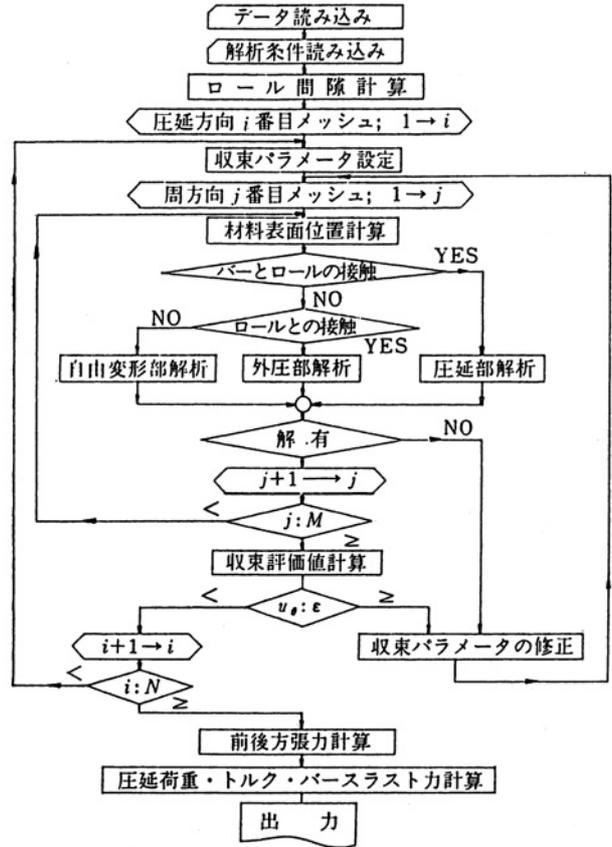
$$d\epsilon_\theta = \frac{1}{r} \frac{\partial(du_\theta)}{\partial \theta} + \frac{du_r}{r}$$

$$d\epsilon_r = \frac{\partial(du_r)}{\partial r}$$

$$d\gamma_{r\theta} = \frac{\partial(du_\theta)}{\partial r} - \frac{du_\theta}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial(du_r)}{\partial \theta}$$

$$d\gamma_{\theta x} = \frac{\partial(du_\theta)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(du_x)}{\partial \theta}$$

$$d\gamma_{xr} = \frac{\partial(du_r)}{\partial x} + \frac{\partial(du_x)}{\partial r} \dots (22)$$



N: 圧延方向分割数
 M: 周方向分割数
 ε: 収束を判定するための微小量

図4 ひずみ増分解析法による解析フローチャート⁵⁾

3.5 降伏条件式

$$(\sigma_x - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xr}^2 + \tau_{r\theta}^2 + \tau_{\theta x}^2) = 6k_\tau^2 \dots (23)$$

以上の基礎式とロールのカリバー形状、バーの直径等、幾何学的な条件を考慮する事により、解を差分法により求めることが出来る。計算のフローチャートを図4に示す。膨大な計算が必要であり、特に収束させるための条件を見つけるには、技量の要る計算となっている。

このように、3次元圧延解析において忠実に基礎式を立てることにより、数値解析で解を求める事が出来る。

4 管圧延の3次元FEM解析

本項では、管圧延の3次元解析手法として、剛塑性有限要素法を用いた方法を説明する。FEM解析において、3次元理論構成部分はどの圧延方式についても共通であり、計算条件の違いを各穿孔圧延法で如何に与えるかが課題である。計算例として、ここでは、マンネスマン穿孔圧延、マンドレル

ミル圧延、ストレッチレデュサ圧延の3次元シミュレーションモデルについて説明する。

4.1 3次元剛塑性FEM

まず、解析手法として用いられる剛塑性FEMについて説明する。剛塑性FEMでは、次式のエネルギー汎関数の最小化によって、定式化を行う。

$$\Phi = \int_v \left[\int_0^{\dot{\epsilon}} \bar{\sigma} d\dot{\epsilon} \right] dV + \int_{s_f} |\tau_f| |\Delta v| dS - \int_{s_f} F^T \cdot v dS \quad \dots\dots\dots (24)$$

ここで、 $\bar{\sigma}$ は相当応力で、 $\dot{\epsilon}$ は相当ひずみ速度、 τ_f は摩擦せん断応力、 Δv は工具と節点との相対すべり速度、 F は表面力ベクトル、 v は節点速度ベクトルである。式(24)の第1項は物体内部で消費される塑性変形によるエネルギー消散率、第2項は摩擦損失に関する項、第3項は物体が外力に対してなす仕事率である。体積一定条件と速度の境界条件を満足する速度場(動的可容速度場)が正解と一致した時、この汎関数が最小になる。

管圧延のFEM解析の多くは圧縮特性法に基づいた剛塑性FEMによって行われている⁶⁾。これは非常にわずかな圧縮性を考え、通常非圧縮性金属の変形挙動を近似するものであり、相当ひずみ速度は次式で表される。

$$\dot{\epsilon}^2 = \frac{2}{9} \left\{ (\dot{\epsilon}_x - \dot{\epsilon}_y)^2 + (\dot{\epsilon}_y - \dot{\epsilon}_z)^2 + (\dot{\epsilon}_z - \dot{\epsilon}_x)^2 + \frac{3}{2} (\dot{\gamma}_{xy}^2 + \dot{\gamma}_{yz}^2 + \dot{\gamma}_{zx}^2) \right\} + \frac{1}{g} \dot{\epsilon}_v^2 \quad \dots\dots\dots (25)$$

ここで、 $\dot{\epsilon}_v$ は体積ひずみ速度、 g は圧縮性に関する非常に小さい正の定数(0.001~0.0001)である。

式(24)を節点速度の変数によって偏微分し、次式の剛性方程式が得られる。

$$[K] \{v\} = \{F\} \quad \dots\dots\dots (26)$$

これに、境界条件を与えて解くことによって、正解の速度場が得られる。 $[K]$ は節点速度 v の関数であり、式(26)は非線形方程式であるため、繰り返し計算し、収束解が正解となる。

圧延加工においては、摩擦の影響が無視できないが、式(24)では摩擦エネルギーとして取り扱っており、工具と材料の相対すべりの向きを考慮することなく、定式化に導入することができる。正解の速度場より、ロール表面での相対すべり速度の向きの異なる節点間で、摩擦の中立軸を計算することができる。

4.2 マンネスマン穿孔圧延の近似3次元解析

マンネスマン穿孔圧延の解析は、傾斜ロール、プラグ、ガイドシューによるパス形状の複雑さ、回転加工であることか

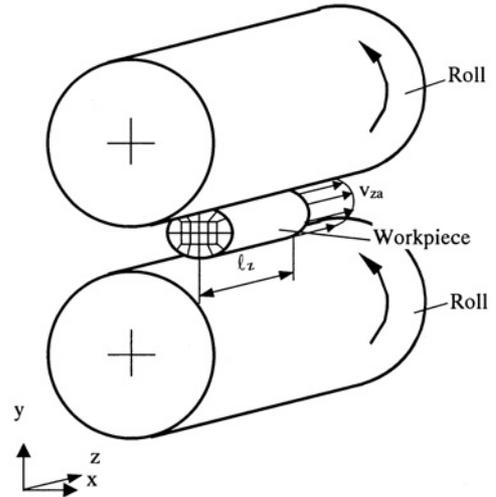


図5 剛塑性有限要素法による穿孔圧延の近似3次元モデル

ら、完全3次元の解析は行われていない。FEM解析としては、筆者の一人が近似3次元解析を行っている⁷⁾。この方法では、図5のように、穿孔圧延を円柱状もしくはパイプ状素材の回転圧縮として取り扱っており、穿孔圧延での各断面形状を計算することになる。傾斜ロールはたる型形状をしており、ロールおよびプラグは各断面で直径と中心座標が変化するため、それにあわせて図5のロールも直径、中心座標を変更することによって、工具の境界条件を与える。ただし、工具面の接触節点への速度境界条件は、ロールの表面速度の x 、 y 方向成分であり、 z 方向成分は素材の伸びに影響しない。

各断面の形状を計算するわけだが、圧延方向(z 軸方向)への棒状スラブの伸びを考慮するため、断面内で伸びが均一であるとした一般化平面ひずみモデルを使用し、ひずみ速度は以下の式で表される。

$$\dot{\epsilon}_z = \dot{u}_z / l_z \quad \dots\dots\dots (27)$$

ここで、 \dot{u}_z は素材の z 軸方向の伸び速度であり、 l_z は素材とロールの接触長さである。また、管のねじり変形も無視できないため、 z 軸方向せん断ひずみ速度成分を近似的に次式にて与える。

$$\begin{aligned} \dot{\gamma}_{yz} &= 2(v_y - v_y^*) / l_z \\ \dot{\gamma}_{zx} &= 2(v_x - v_x^*) / l_z \quad \dots\dots\dots (28) \end{aligned}$$

ここで、 v^* は剛体的に回転する速度であり、繰り返し計算ごとに得られる全節点の回転速度の平均値で与える。その他のひずみ速度成分、 $\dot{\epsilon}_x$ 、 $\dot{\epsilon}_y$ 、 $\dot{\gamma}_{xy}$ は通常の2次元問題と同様にして取り扱う。式(27, 28)の元で式(24)の汎関数を最小化することによって得られる剛性方程式は、2次元問題に比べて、式(27)の1変数のみが増えるだけなので、一回の計算時間が約半時間と非常に短い。また、この方法は断面のみの形状で計算しており、リメッシュも容易である。

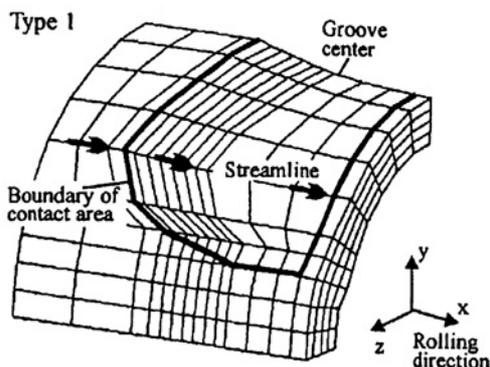


図6 剛塑性有限要素法によるマンドレル圧延初期要素形状⁸⁾

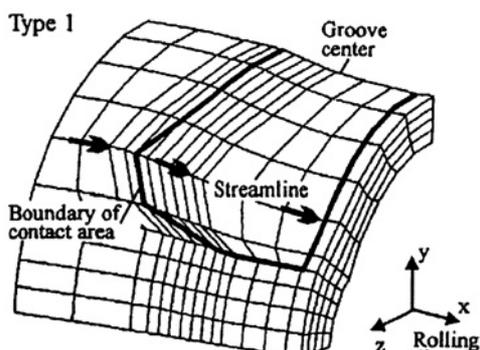


図7 剛塑性有限要素法によるマンドレル圧延計算後要素形状⁸⁾

4.3 マンドレルミル圧延およびストレッチレデューサ圧延の3次元解析

マンドレルミル圧延、ストレッチレデューサ圧延の3次元FEM解析は、これらの圧延が基本的にマルチスタンドで行われること、管端部の不均一変形よりもむしろ管断面の寸法精度（フランジ部の非接触部の自由変形、内面6角張り等）が優先課題であったことから、各スタンドでの定常圧延領域を対象にした定常解析法が行われている^{8,9)}。定常解析法は、定常状態の流線を仮定して流線に沿った初期の要素分割を行って速度分布を計算し、得られた速度場を用いて流線を修正する過程を解が収束するまで繰り返す方法である（図6、7）。すなわち流線に沿って、ひずみが積分される。この繰り返し計算において、比較的少ない要素数においても、工具への接触面形状を正確に表すため、管材表面の要素線も入出側の境界線に沿うよう、リメッシュが行われている。また、計算時間の面から、対称性を考慮して、その横断面において2ロールは90°、3ロールは60°のみを計算している。

マンドレルミル圧延において、フルフロート方式の場合、摩擦力だけでマンドレルを自由にフロートさせるが、計算前にその速度はわからないため、基本的にマンドレルの移動速度を変えた計算を行うことで対応している。

また、ストレッチレデューサでは、ロール孔形により縮径するだけでなく、減肉するために降伏応力の約70%とい

った大きなスタンド間張力を負荷している。実際の計算においては、大きな張力を負荷すると、収束解が得にくいため、張力が作用している前・後端の境界面で速度を適当に仮定して張力を計算し、その速度を調節して幾らかのパターンを計算して、所定の張力を与えた場合の結果を得るといった方法を用いている。

この手法によって、管材の応力分布、ひずみ分布が計算され、フランジ部よりもカリバー底部の方が圧延方向の引張り力が大きくなっていることがわかり、内面6角張り現象が解明され、張力、摩擦係数の変更により、これの解決が図られ、製品精度向上に3次元FEM解析が大いに寄与した。

5 まとめ

管の圧延においては、複雑な3次元変形を伴うため、解析的な手法での現象説明は困難であった、特に、傾斜ロール穿孔、圧延においては、現在のFEM解析を用いても完全な3次元解析には多くの困難を伴うのが現状である。

ここでは、古典的な全ひずみ理論による解析法、ひずみ増分理論による解析法、FEMによる解析法について説明を加えた、それぞれの解析の特徴を生かし、目的にあった解析手法を選択し、これらの解析手法が利用されていく事を望んでいる、また、今後、さらにこれら解析手法、プログラムが発展し、管の製造技術向上につながることを祈っている。

参考文献

- 1) 林千博：鋼管の製造法，日本鉄鋼協会，(2000)，123.
- 2) 塑性加工シリーズ8，日本塑性加工学会編，棒線・形・管圧延，(1991)，181.
- 3) T.Okamoto and C.Hayashi: Proc. Intern. Conf. Sci. Tech. Iron&Steel, 11, (1971) 655.
- 4) 林千博, 山田建夫, 宇多小路勝, 平尾文樹：塑性と加工, 6 (1983) 273, 1078.
- 5) 平川智之, 藤田文夫, 鎌田正誠, 岡戸克, 三原豊, 沼野正睦：塑性と加工, 24 (1983) 273, 1063.
- 6) 森謙一郎, 鳥進, 小坂田宏造：日本機械学会論文集A編, 45 (1979) 396, 965.
- 7) 吉村英徳, 小坂田宏造, 森謙一郎：日本機械学会論文集A編, 64 (1998) 622, 1515.
- 8) 山田健二, 小川茂, 濱渦修一, 菊間敏夫：塑性と加工, 36 (1995) 411, 384.
- 9) 森謙一郎, 小坂田宏造, 三原豊, 平川智之, 福田正成：塑性と加工, 28 (1987) 321, 1054.

(2002年8月15日受付)