

入門講座

圧延理論入門-7

棒線圧延解析のための3次元圧延理論と幅広がり式

Three-Dimensional Rolling Theory and Width-Spread Modeling for Analysis of Bar and Rod Rolling

浅川基男

Motoo Asakawa

早稲田大学 理工学部機械工学科 教授

1 棒鋼・線材圧延の特徴¹⁾

棒・線圧延はフラットロールに孔型 (caliber または groove) を切削し、ブルーム、ビレット素材を延伸・整形し棒鋼・線材に塑性加工する方法である。薄板圧延では、ロール間隙形状比 m (L_m/h_m : 平均投影接触長さ/平均材料高さ) が大きい、孔型圧延では相対的に小さく、応力・ひずみ分布が板厚・幅方向に不均一になる。さらに孔型圧延は幅方向にはロール径が変化し、一層複雑な変形・負荷となる。材料と孔型の組み合わせにより、投影接触面積の形状がさまざまに変化するが大別して矩型、凸型、凹型の3種に分類される。図1は圧延材断面内のメタルフローの概念図を示す²⁾。Aは薄板圧延のメタルフローで両端エッジ部を除いて板厚・幅方向にほぼ均一な変形をしている。Bは L_m/h_m が1に近くなったスクエア (角) 材のフラット圧延やボックス圧延であり、中心部を除いた断面全体に不均一変形が広がっている。C、Dは孔型圧延の例である。Cは溝底中央部から強く圧下され、両側へ順次幅広がりを生じるが比較的メタルフローが均一になる。スクエア⇄ダイヤ、オーバル⇄ラウンド等のパスである。両端が強く圧下される凹型接触方式のDでは、両側に幅広がりを拡大していくだけでなく、溝底と材料の間隙を埋めるように中心部にメタルが流動するため、極端に不

均一変形となる。スクエア⇄オーバルがその代表である。図2は圧延圧力分布の模式図を示す。Aは薄板圧延の圧力分布で中央部にフリクションヒル (friction hill) を示している。しかしフラット圧延Bでは弾性楔により、入口付近にピーニング (peening) 圧力が生じフリクションヒルが不明瞭となる。また幅方向端部付近でこのピーニングピークは低下する。この圧力ピーニングもロール間隙形状比 L_m/h_m でよく整理でき、ピーニングは $L_m/h_m < 1 \sim 2$ で特に生じやすく、孔型圧延で一般的な領域である。凸型接触方式Cでは特にピーニングピークが大きくなる。一方凹型接触方式Dではやや低下するが、両側では孔型の拘束により逆に高くなる傾向が見られる²⁾。

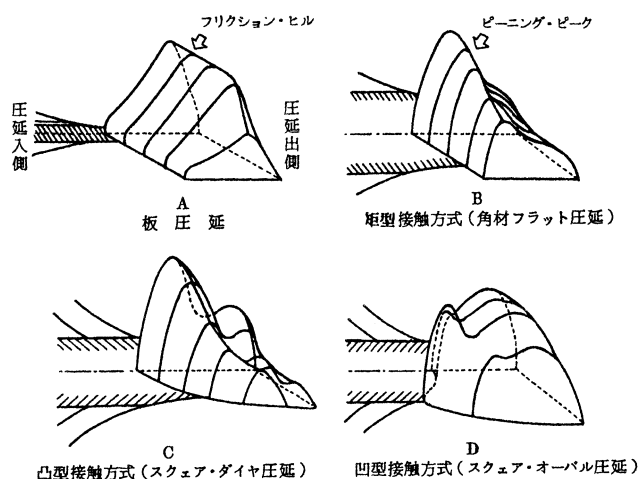


図2 各種圧延方式の圧力分布の概念図

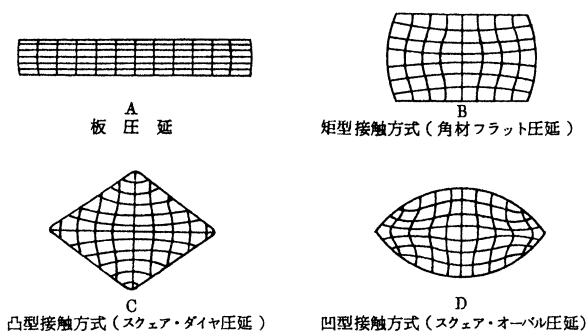


図1 各種圧延方式のメタルフロー概念図

2 孔型圧延の簡易解析理論

2.1 幅広がり実験式

棒線材の変形・負荷特性は新ミルの立上げ、あるいは新たなパススケジュールの設計に必要不可欠であり、1930年代

にドイツで研究が進められた。1950年代、米国では圧延技術が大いに発展したが、主として経験値をデータベース化することが主流であった。1960年代には日本の鉄鋼業が飛躍的な進歩を遂げるに伴い、米国とは異なった理論的・実験的なアプローチが行われ、主としてプラスチックを使用して実験式の模索が続いた。1970年代は企業や大学で実際の熱間鋼を用いてさらに精度の良い実験とモデル式が求められるようになった。1980年代以降はFEMの進歩により数式モデルにより圧延特性が把握されるようになり、モデル式は徐々にその役割を閉じるようになった。しかし、比較的簡便なため、今でも圧延現場では使用されることが多い。変形特性の一つである幅広がりには圧下率の増大とともに増え、ロール間隙形状比が大きくなるほど大になる。孔型側壁の拘束が増すと幅広がりには抑えられる。この複雑な3次元変形を簡易的に解析するため、孔型および材料断面を板圧延では既知の方法である矩形に換算し、幅広がり式を利用する方法が従来から利用されている。使用にあたっては各矩形換算方式の定義の違い、簡易ではあるが誤差も大きいこと等を覚悟しなければならない。以下において b は幅、 h は高さ、添字1は入側、2は出側、 m は平均値(矩形換算値)を示す。この部分は既に、形鋼圧延で詳述されているため、棒線圧延でよく用いられるモデル式の要点のみを記すことにする。Siebel³⁾、Wusatovski⁴⁾らのつぎの実験式により、およその目安を得ることができる。幅広がり係数は幅を γ とすると、Siebelの式として、

$$\gamma = b_2/b_1 = 1 - C_s(1 - h_{m2}/h_{m1})(L_m/b_1) \quad (1)$$

$$C_s = 0.35 \text{ (軟鋼のとき)}$$

Wusatovskiの式として、

$$b_2/b_1 = (h_{m2}/h_{m1})^W \quad (2)$$

$$\log_{10} W = -1.269(h_{m1}/2R_m)^{0.556} \cdot (b_1/h_{m1})$$

柳本⁵⁾、孔型側壁の幅拘束効果を考慮するため側壁の水平軸に対する平均傾斜角 θ を含み摩擦や材料の影響を考慮できる摩擦係数 μ ならびに材料定数 β を含んだ次式を提示している。

$$b_2/b_{m1} = \{h_{m1}/h_{m2} - C(1 - h_{m2}/h_{m1}) \cdot \tan \theta\}^\kappa \quad (3)$$

$$\kappa = \beta^S + \mu S - 1 \quad S = 2L_m/(h_{m1} + 2b_{m1})$$

ただし、 b_{m1} は供試材輪郭線と孔型輪郭線との交点間の幅、 C は圧延方式によって異なり(スクエア、ダイヤ孔型で0.2、ラウンド、オーバル孔型で0.0)、 β は材料(アルミニウム1.14、銅1.10、0.2% Cの熱間鋼1.02)によって与えられる。この式は摩擦係数を正しく評価すれば、ある精度で幅広がり算出可能とされている。

篠倉⁶⁾は、Siebelの式をさらに発展させ、柳本のパラメーター S を用いて

$$b_2/b_1 = 1 + \alpha S \cdot F_H/F_1 \quad (4)$$

を提案した。 F_1 は入口断面積、 F_H はロールによる排除面積、 $S = L_m/(nh_{m1} + b_{m1})$ とし、 $n = 0.5$ 、 $\alpha = 0.83$ とすれば、ほとんどの孔型圧延方式で $\pm 4\%$ の精度で適用できるとした。

齊藤⁷⁾は、この式をさらに多くの孔型方式に拡張し、係数 α を($S \rightarrow D, S \rightarrow O, D \rightarrow S, O \rightarrow R$ は0.83、 $R \rightarrow O$ は0.97、 $O \rightarrow S$ は1.06)のように与えるとさらに良い精度で幅広がり予測が可能であるとしている。幅広がり簡易式の研究・実用化は、ほぼこの段階で終了し、FEM解析へと引き継がれていった。

2.2 圧延荷重・トルク実験式

次に、孔型圧延の負荷特性についても触れておこう。

圧延荷重 P は一般に

$$P = F p_m = F k_m Q \quad (5)$$

と表わされる。ただし、 F : 投影接触面積、 p_m : 平均圧延圧力、 k_m : 平均変形抵抗、 Q : 圧延荷重係数、である。

1) 投影接触面積 F

孔型圧延の投影接触面積を正確に求めることは困難なため、通常は矩形換算による平均幅と平均投影接触長の積で求める。このほか直接、投影接触長 L を幅方向に積分する方法⁸⁾は下式ようになる。ここで y は幅方向座標である。

$$F = \int b_2 \sqrt{R(y) \Delta h(y)} dy \quad (6)$$

また圧延方式ごとに修正係数を示した実験式

$$F = L_m b_m k_p \quad (7)$$

(k_p はスクエア・オーバル法で1.03、オーバル・スクエア法で0.95、ダイヤ・スクエア法で0.72)などがある。いずれもその精度、適用範囲の広さ、簡便さの点で一長一短があり適宜使い分ける必要がある。

2) 平均変形抵抗 k_m ⁹⁾

ロール間隙における平均変形抵抗 k_m は、ひずみ ϵ 、ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ 、温度 T の関数 $k_m(\epsilon, \dot{\epsilon}, T)$ である。炭素鋼に対しては k_m の実験式が与えられている。孔型圧延の場合圧延速度を v_2 とすると矩形換算の諸値を用いて、

$$\epsilon = \ln(h_{m2}/h_{m1})$$

$$\dot{\epsilon} = v_2/L_m(1 - h_{m2}/h_{m1}) \quad (8)$$

で与えられる。

3) 平均圧延圧力 p_m

孔型圧延の圧延圧力は相等板圧延での圧延圧力に比べ若干高くなる。 Q_P を相等板圧延の荷重係数、 Q_k を孔型補正係数とすると

$$p_m = k_m Q = k_m Q_P Q_k \quad (9)$$

Q_k の値は各孔型によって異なり1.1から1.3の範囲にある¹⁾。 Q_P の値はピーニングの効果のロール間隙形状比 m を考慮し、

$$Q_P = 0.75 + 0.25m \quad (m = L_m/h_m \geq 1)$$

$$=0.75+0.25/m \quad (m < 1)$$

より計算できる¹⁰⁾。この他 $Q=Q_F Q_k=-0.731+0.771M+1.61/M$ が提案されている⁶⁾。 M はロール間隙面積比で $M=2F/(F_1+F_2)$ とする。 F_1 、 F_2 は入り口、出口断面積である。

4) 圧延トルク G

圧延トルクは、トルクアーム a またはトルクアーム係数 ψ が評価できれば圧延荷重 P から求まる。

$$G=2aP=2\psi L_m P \cdots \cdots (10)$$

ψ は接触面内の圧力分布の形状に左右される。つまりロール間隙形状比 ($m=L_m/h_m$) によって決まり、 $\psi=C_1+mC_2+C_3/m$ の形で整理できる。孔型圧延での ψ と m の関係を図3に示す¹¹⁾。孔型圧延では、先進域と後進域の平均ロール半径に差があるため付加的摩擦トルクを生じ、接触面の凹凸が圧力分布の重心を出口から遠くするため、一般にフラット圧延より ψ が高い。さらにロール間隙面積比 M で整理した $\psi=0.705-0.108M+0.083/M$ が提案されている⁶⁾。

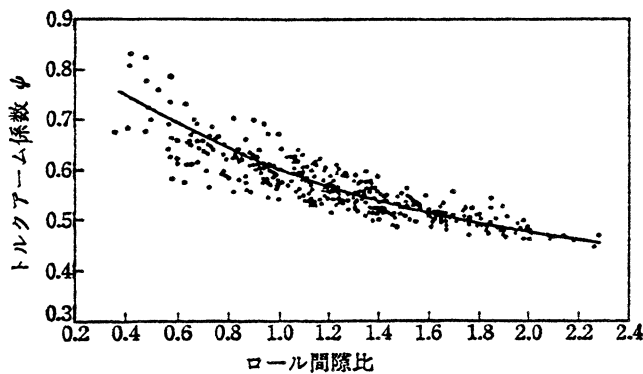


図3 各種圧延方式のトルクアーム係数とロール間隙比の関係 (軟鋼, 950~1150℃)

張力の圧延トルクに及ぼす影響は、前方張力はロールの回転を助け、後方張力はロールの回転を妨げる方向に働く。実際の圧延動力は、ロールによる圧延材の変形に必要な動力のほか、各種の動力損失が含まれる。以上の各項目を総合すると必要動力量は

$$G=G_1+G_2+G_3+G_4 \cdots \cdots (11)$$

で求められる。ここで

$$\text{変形に必要な動力} \quad G_1=2aP$$

$$\text{ロール軸受損失} \quad G_2=P_\mu d$$

(μ : 軸受の摩擦係数、 d : ネックの直径)

$$\text{動力伝達損失} \quad G_3=0.1(G_1+G_2)$$

$$\text{空転トルク} \quad G_4$$

となる。ロール周速 v_R 、ロール半径 R 、ロール回転数を N_R [rpm]、角速度 $\omega=v_R/R=2\pi N_R/60$ とすると必要動力 W は以下のようにして求められる。

$$W=G\omega[\text{kgf}\cdot\text{m}]$$

$$=G\omega/75[\text{HP}]$$

$$=G\omega/9.85[\text{kW}]$$

$$=GN_R/974[\text{kW}] \cdots \cdots (12)$$

3 孔型圧延の3次元FEMシミュレーション

以上の経験則による簡易式は精度・汎用性の点で限界があり、ロールバイト内でのメタルフロー、特に孔型への充満状態やひずみ・応力などの分布を任意の圧延案件に対して定量的に予測することは不可能である。しかし最近急速に発展しているコンピュータシミュレーション技術はまさにこれらを可能にしつつある。例えば、3次元の有限要素法 (FEM)¹²⁾、FEMの手法を利用した3次元のエネルギー法¹³⁾、横断面内の変形を一般化平面ひずみ変形で近似し、そのFEM解を利用する方法¹⁴⁾ などがある。

その一例として「棒鋼・線材圧延3次元FEM解析システムの開発」研究会 (日本鉄鋼協会) による棒鋼・線材圧延用FEM解析システムを紹介する。このシステムはWindows系OS (Windows95/98、WindowsNT、Windows2000) を搭載したパソコン上で動作し、Visual C++による専用GUI (Graphical User Interface) とCORMILL¹⁵⁾ を基本要素としている。GUIには、①CORMILLを操作するために必要な入力情報の作成、②CORMILLにより得られた解析結果の表示・可視化の機能が備わっている。使用者の負担・労力を極力低減するために、入力として与える情報は圧延プロセス条件に限定し、これを常に画面上に表示できるようにしている。例えば孔型の形状・素材の形状、温度、摩擦係数など

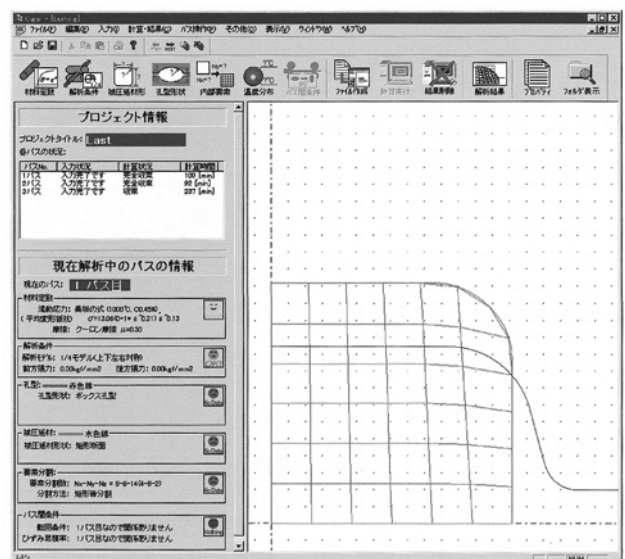


図4 棒鋼・線材圧延用FEM解析システムによるGUI上の入力データ

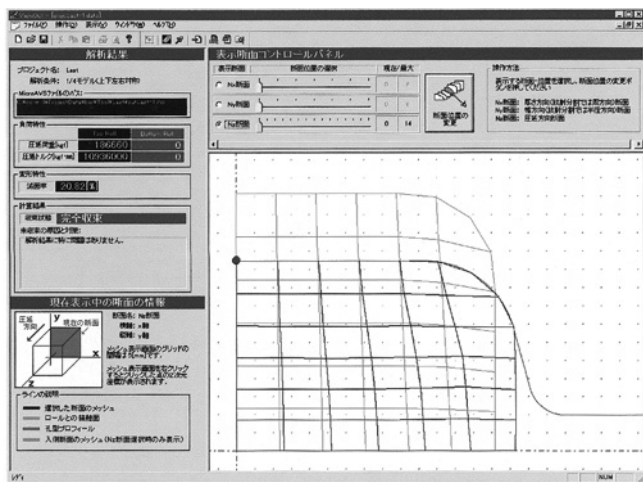


図5 棒鋼・線材圧延用FEM解析システムによるGUI上の出力データ

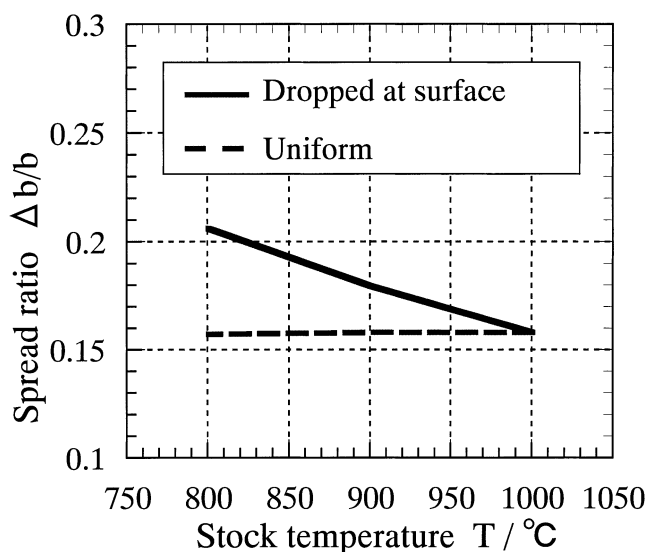


図7 孔型圧延による材料の内外温度差と幅広がりとの関係

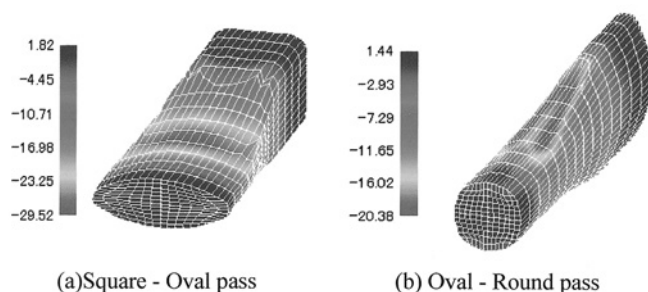


図6 棒鋼・線材圧延用FEM解析システムによる3次元圧延圧力分布の可視化状況

の圧延条件を入力すると(図4)、数十分の間に幅広がり・圧延荷重・トルクのみならず各要素の応力・ひずみ量が定量的(図5)あるいは可視化(図6)されて出力される。現在、圧延の現場で実用化され始めている¹⁶⁾。

シミュレーションの一例として、温度と幅広がりとの関係を見てみよう。図7の実線は内部を1000℃に保ったまま表層の温度を低くした場合、破線は内部・表層とも均一に温度が降下したときの幅広がりを示す。表層と内部の温度差が大きくなるにつれ、幅広がりが大きくなることを示している。これは現場で「表面温度が下がると充満気味になる」との観察結果とよく一致している。すなわち、断面内温度分布の変化が幅広がり大きく影響し、材料温度の観察がより幅広りの精度高める点で重要なことが示唆される。

今回割愛したが連続圧延の特性もほぼ把握されつつあり、将来は圧延材の組織・機械的性質まで予測しうる創形・創質シミュレータとして発展することが期待されている。

参考文献

- 1) 日本塑性加工学会：第82回塑加講座，(2001-1)，67.，同：棒線・形・管圧延，コロナ社(1991)
- 2) 五弓勇雄，斎藤好弘：鉄と鋼，53(1967) 6,599.
- 3) Siebel, E. et al. : Mi KWL Eisenforschung, 12 (1930) , 225.
- 4) Wusatowski, Z. : Fundamentals of Rolling, Pergamon Press (1969) 89,275.
- 5) 柳本左門：塑性と加工，5 (1964) , 315.
- 6) 篠倉恒樹，高井耕一：鉄と鋼，67 (1981) 15, 2477. ; 塑性と加工，34 (1993) 384,18.
- 7) 斎藤好弘，森賀幹夫，加藤健三：鉄と鋼，63 (1977) 12, 37.
- 8) 中島浩衛，渡辺和夫：塑性と加工，13 (1972) 141, 751.
- 9) 日本鉄鋼協会：圧延理論とその応用，誠文堂(1969). 144.
- 10) 斎藤：日本鋼管技報，(1973) 59, 1.
- 11) 斎藤好弘，高橋洋一，加藤健三：鉄と鋼，64 (1978) 2, 66.
- 12) 森謙一郎ほか：昭63春塑加講論，(1988) , 703. ; 機論，56 (1990) 525, 268.
- 13) 小森和武ほか：機論，53 (1987) 488,848. ; 53 (1987) 494, 1938. ; 54 (1988) 504, 1571.
- 14) 小坂田宏造：昭63春塑加講論，(1988) , 451.
- 15) 柳本潤ほか：塑性と加工，34 (1993) 384, 75.
- 16) 宮澤英之，浅川基男，柳本潤：塑加春季講演，(2000) 5, 227.

(2002年7月16日受付)