



入門講座

素材を形に～素材の加工方法～2

連続的な圧縮加工が特徴の圧延

Rolling ; Continuous Compressive Plastic Forming

木村幸雄

Yukio Kimura

JFEスチール（株） スチール研究所

圧延・加工プロセス研究部

主任研究員

1 はじめに

圧延は回転するロールの間で材料を伸ばす塑性加工法のひとつである。工具であるロールが回転するという、鍛造やプレス成形などとは異なる特徴をもつ。鉄鋼製品のほとんどは、最終製品として使用されるまでの間に、一度は圧延工程を経ている。ロールを回転させるという極めてシンプルな手段であり、圧延機を直列に配置することで連続化が容易である。また、ロールの回転速度を上げることによって高速化を図れることから、大量生産に適した加工法として発展してきた。

圧延によって造られる形状も、フラットなロールを用いた薄板・厚板などの板圧延だけでなく、棒鋼・線材は溝形状を付与したロールによって圧延される。また、H形鋼や山形鋼、レールなどの複雑な断面形状の製品も圧延によって造られる。さらに、継目無鋼管のせん孔や延伸にも、ロールの回転方向を工夫するなど圧延によって製造されている。

このように様々な形を造ることができる圧延に関しては、優れた書籍や入門書が発行されている^{1,3)}。本誌でも入門講座として連載されているので、ご一読いただきたい^{4,5)}。本稿では、板圧延を対象として、ロールが回転するという単純な加工法を、可能な限り平易に紹介しながら、この加工法の奥深

さの一端を紹介できればと考えている。

2 ロール回転により発生する内部の力

圧延の特徴は、工具であるロールが回転しながら材料を減厚する点にあり、その過程を図1に示す。材料は板厚方向に圧縮されることで減厚され、長手方向に延伸する。これにより加工域で材料の進行速度が増加する。一方、ロールの周速は一定であり、加工域で材料の進行速度と一致する点が存在する。これを中立点と呼ぶ。中立点を境として、ロールと材料の相対的な速度が反転することになる。中立点よりも入口側では、材料の進行速度よりもロール周速の方が大きいため、材料を中立点に向かって引込む方向の摩擦力が作用する。一方、中立点よりも出口側では材料の進行を妨げる方向に摩擦力が作用する。

そのため、図2に示すように、中立点に向かって加工域に材料を閉じ込めようとする方向の摩擦力が作用することになる。材料の長手方向に圧縮力が作用する条件下で、塑性変形を継続させるためには、より高い圧力が板厚方向に発生する必要がある。その結果、加工域内部では中立点に向かって板

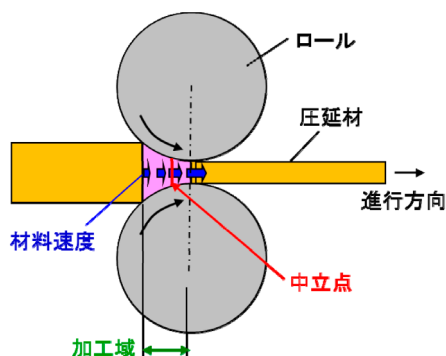


図1 板圧延の模式図

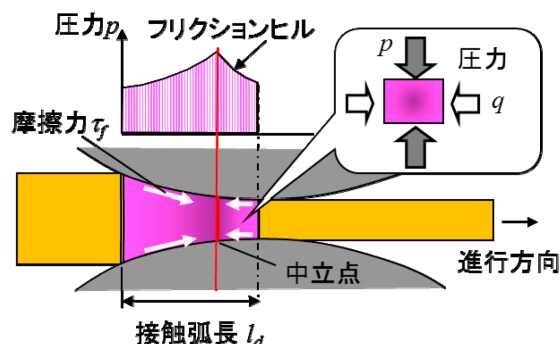


図2 加工中の摩擦力と圧力

厚方向の圧力が上昇するフリクションヒル（摩擦丘）と呼ばれる圧力分布が発生する。

圧延荷重を予測するためには、ロールと材料とが接触する長さ（接触弧長）と、材料の応力-ひずみ関係の他に、フリクションヒルによる圧力上昇の影響を考慮する必要がある。このフリクションヒルの形状を求めるのが圧延理論の基本的な目的となる。

中立点が加工域内でどのような位置をとるかは、図3に示すような加工域での力のバランスによって決定される。材料に生じる進行方向の分力に着目すると、外部からの張力が無い場合には、中立点よりも入口側の摩擦力のみが材料を進行させる力となる。そのため、ロールと材料との間の摩擦力が小さすぎると、スリップにより圧延が進行しないため、適度な摩擦力を必要とするのも圧延の特徴である。

また、図3に示すように張力を前後から付与することで中立点の位置は変化する。圧延機出側から前方張力を付与すると、材料の進行を助ける作用により、材料を進行させる摩擦力が小さくても力のつり合いを保つことができる。そのため、前方張力を付与すると、中立点は加工域の入口側に移動する。逆に、圧延機入側から後方張力を付与すると、材料の進行を妨げる作用により中立点が加工域の出口側に移動することによって力のつり合いが保たれる。なお、中立点の位置は、後述するように加工域の入口側での材料の流入速度と、出口側での流出速度を決定づける点で重要である。

以上のように、ロールの回転を利用した圧延は、材料に生じる摩擦力の方向が反転することで、加工圧力を増加させる側面がある。しかし、内部に高い圧力が発生することは、材料を破断させずに延伸させられるという利点を伴う。例えば、鉄鋼材料を引張によって延伸させようとすると、高々50%程度の伸びに留まる。これに対して、圧延では90%以上の延伸が可能であり、ロールの回転に伴う摩擦力が内部に高い圧力を発生させるためである。

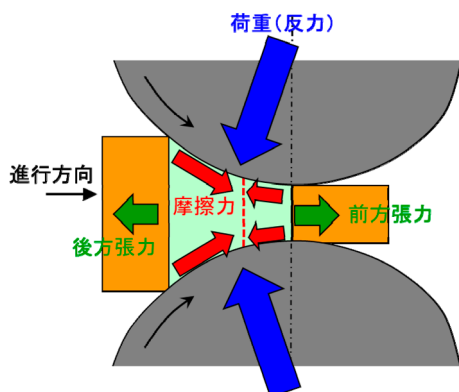


図3 加工域に作用する力の関係

3 圧延理論の基礎^{6,7)}

圧延現象を定量的に把握するためには、2次元圧延理論の概要を理解しておく必要がある。圧延理論は、材料の加工力や内部の応力状態、さらに圧延中に現れる種々の現象を理論的に予測することを目的とする。初期の理論は1925年にKarmanによって提示され⁸⁾、近似式としてBland & Fordの冷間圧延理論⁹⁾などに展開されていった。近年はコンピュータおよび数値解析技術の発展によって複雑な問題を取扱うことができるが、古典的な理論を理解しておくことは圧延の基本的な特徴を知る上で極めて重要である。

ここでは代表的な2次元圧延理論として、Karmanによるものを挙げる。板材の幅方向には変形が生じない平面ひずみ変形を前提に、板厚方向には均一に圧縮変形する状態を仮定する。図4に示す加工域での微小要素に作用する力のつりあから、以下の式が導かれる。

$$\frac{d}{dx}(hq) = 2(s \tan \theta \pm \tau) \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 h は板厚、 q は進行方向の圧力、 s はロールとの接触面に作用する垂直圧力であり、 τ は摩擦応力を表す。なお、同式の符号は、中立点より入口側の範囲では負、中立点より出口側の範囲では正となり、加工域で摩擦力の方向が反転することを表す。

均一変形を仮定したKarmanの理論では、垂直圧力 s と板厚方向の圧力 p を同じとみなし、摩擦応力としてアモントン・クーロン則が成り立つとして、摩擦係数 μ を用いて、

$$\tau = \mu p \dots\dots\dots (2)$$

とする。これにより、式(1)は以下のように表すことができる。

$$\frac{d}{dx}(hq) = 2p(\tan \theta \pm \mu) \dots\dots\dots (3)$$

さらに、図4の板厚方向と進行方向を主応力方向と考えて、材料の平面ひずみ状態での降伏応力を k とすると、加工域で

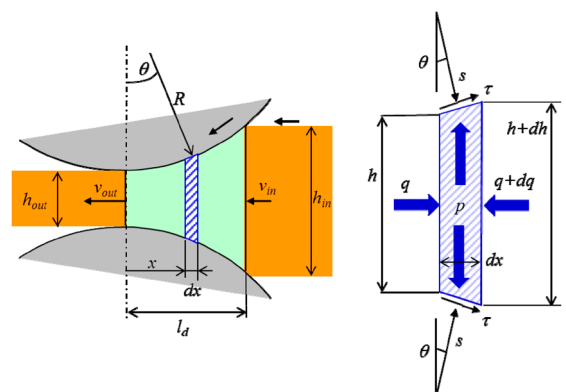


図4 加工域内部の微小要素にかかる力

塑性変形が生じる条件（降伏条件）は、

$$p - q = k \quad (4)$$

となる。

ところで、図4における加工域の長さ（接触弧長 l_d ）は以下で表される。圧延荷重を算出する際の重要な因子である。

$$l_d = \sqrt{R(h_{in} - h_{out})} \quad (5)$$

また、接触角 θ および板厚 h と進行方向座標 x の関係は以下で近似できる。

$$x \approx R \sin \theta \approx R \tan \theta \quad (6)$$

$$h = h_{out} + 2R(1 - \cos \theta) \quad (7)$$

以上から式(3)中の幾何学的な因子を表す変数 x , h , θ の関係が得られる。摩擦係数 μ および材料の降伏応力 k が既知であれば、式(3)、(4)の未知数は板厚方向の圧力 p と進行方向の圧力 q の2つとなり、両式から加工域内部の応力状態を求めることができる。

具体的には、式(4)の関係を式(3)に代入すると、進行方向の圧力 q に関する以下の微分方程式を得る。

$$h \frac{dq}{dx} = 2k(\tan \theta \pm \mu) + 2\mu q \quad (8)$$

ただし、式(8)において摩擦力が反転する中立点の位置は分かっていないため、加工域全域での圧力分布を求めるため2つの境界条件を用いる。一つは、加工域入口での後方張力を t_b として、

$$q = -t_b \text{ at } x = l_d \quad (9)$$

他方は、加工域出口での前方張力を t_f として、

$$q = -t_f \text{ at } x = 0 \quad (10)$$

である。その際、圧力 p , q は圧縮応力を正としているため、上記のように張力を負の値にしている点に注意が必要である。計算結果の例を図5に示す。

式(8)の微分方程式から、加工域の入側の境界条件を使って得られる圧力 q^- と、出側から解いて得られる圧力 q^+ の分布を示しており、その交点が中立点となる。その際の板厚方向圧力 p は、式(4)により計算することができ、図5に示すフリクションヒルが得られる。

圧延荷重 P は、この圧力分布を加工域で積分することにより計算できる。また、圧延トルクは圧延ロールの偏平変形を無視すれば、板厚方向圧力 p のロール中心周りのモーメントを、加工域で積分すると共に、外部からの張力によるモーメントを加えることで求めることができる。ただし、後述する圧延ロールの偏平変形が生じる場合のトルクは、ロールの回転中心と、偏平後の曲率中心とがずれるため、その補正が必要となる。

一方、図5から中立点の座標 x_n が決まると、式(6)、(7)により中立点の接触角 θ_n と板厚 h_n を求めることができる。塑性変形では体積一定則が成り立つため、ロールの周速 v_R を用いて、

$$v_R h_n = v_{out} h_{out} = v_{in} h_{in} \quad (11)$$

が成立する。なお、厳密には中立点におけるロールの水平方向速度は v_R ではなく、 $v_R \cdot \cos \theta_n$ であるが、角度 θ_n が小さいことから同一とみなす場合が多い。先進率 f_s は以下で定義され、出側板厚 h_{out} と中立点の板厚 h_n 、およびロール周速 v_R が分かれば、式(11)から算出できる。

$$f_s = (v_{out} - v_R) / v_R \quad (12)$$

この先進率の値により、ロール周速と材料の流出速度との差異を定量的に判断できる。

4 圧延機の構造と変形⁶⁾

4.1 ロールの偏平変形

加工域では非常に高い圧力が発生するため、ロールの弾性変形を考慮しないと圧延荷重を過小評価する場合が多い。ロール表面に力が加わる際の偏平変形については、変形後もロールは円弧形状を保つと仮定したHitchcockのロール偏平式¹⁰⁾が使われる。これは半楕円状の圧力分布に対する弾性変形として、ロールの縦弾性係数 E 、ポアソン比 ν を用いて、以下で表される。

$$R' = R \left\{ 1 + \frac{16P(1-\nu^2)}{\pi E(h_{in} - h_{out})} \right\} \quad (13)$$

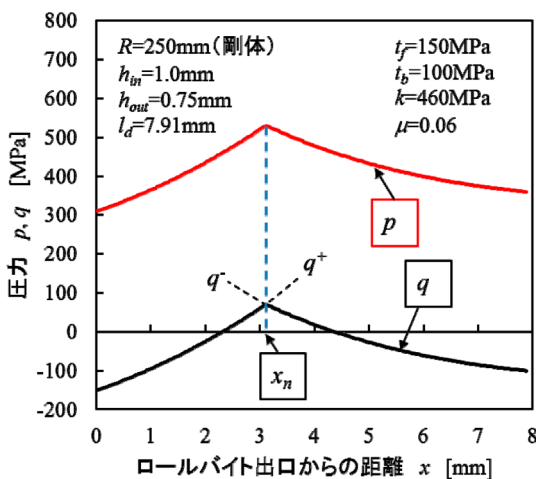


図5 加工域での圧力の計算例

ロールの偏平変形を考慮した加工域の圧力分布は、前章におけるロール半径 R を R' に置き換えて計算すればよい。その際、式(5)において R' から新たな接触弧長を算出し、式(6)、(7)の幾何学的関係を求めた後に、式(8)の微分方程式を改めて解くことになる。さらに、この計算により得られた圧延荷重から再度式(13)によりロール偏平半径を計算し、ロール偏平または圧延荷重が一定値に収束するまで繰り返し計算を行う。

特に、鋼板の降伏応力が大きく、圧下量に対する圧延荷重の比が大きい場合には、ロール偏平を考慮しないと圧延荷重を過小評価してしまう。

4.2 圧延機の弾性変形

一般的な圧延機の構造を図6に示す。これは1対のワークロール（作業ロール）とそれらを支えるバックアップロールから構成される4段式圧延機である。バックアップロール（支えロール）はワークロールを介して圧延荷重を受け、軸受箱を介してハウジングに力を伝達する。また、圧延ロールは駆動モーターによって所定の速度で回転され、圧延に必要なトルクを伝達する。

このとき、圧延荷重によって圧延機全体が縦方向に変形して、ロール間隙を広げる作用が生じる。所定の板厚を得るためには、圧延を行う前に、圧延荷重と圧延機の弾性変形量を予測して、その分だけ予めロール間隙を狭く設定しなければならない。

図7は、圧延機の変形を考慮した板厚制御の考え方を示したものである。圧延機の変形は弾性変形であるため、圧延荷重に対して概ね線形にロール間隙が広がる。この特性を弾性特性曲線という。一方、圧延荷重はある入側板厚に対して、出側板厚を変更しながら前章の圧延理論によって求められ、その関係を塑性特性曲線と呼ぶ。実際の圧延では、それらの荷重が釣り合う条件から出側板厚が決定される。

圧延機の設定計算では、ロールの熱膨張や摩耗などの影響も考慮しながら、弾性特性曲線を推定し、目標とする板厚を得るために必要なロール間隙を求めることになる。

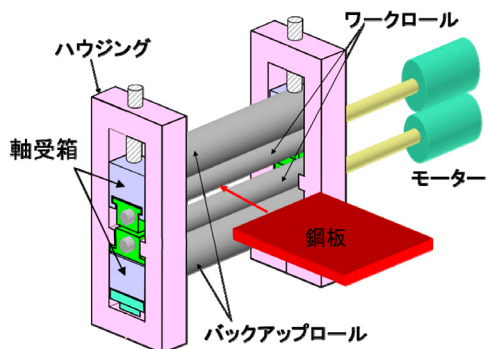


図6 一般的な圧延機の構造

ところで、圧延荷重はロール端部の軸受箱で支えられるため、ロールにはたわみ変形が発生する。ロールの軸たわみは、ロール隙間の分布を生じさせ、板幅方向の圧下量を不均一にする原因となる。一般に鋼板は板幅方向に山形の板厚分布を有しており、板幅中央と板端部との板厚差をクラウンと呼ぶ。また、板幅方向で圧下率の差が生じると、圧延方向の伸びが不均一となり、板の形状不良の原因となる。

このようなロールの変形に対して、所定のクラウンを実現し、フラットな形状を得るために、各種のクラウン形状制御ミル¹¹⁾が開発されており、図8に代表例を示す。

ペアクロスミルは、上下のロールをクロスさせることでロール間隙の分布を変更する方式であり、HCミルは6段式圧延機において中間ロールを軸方向にシフトさせることで、ロールのたわみを減少させるものである。その他にも、ロールの形状を曲線形状に加工して、軸方向にシフトさせるCVCミルなども広く用いられている。

5 連続圧延¹²⁾

圧延機を直列に複数台配置するタンデム圧延は、生産能力の面で有利である。タンデム圧延では、圧延動力や圧延荷重

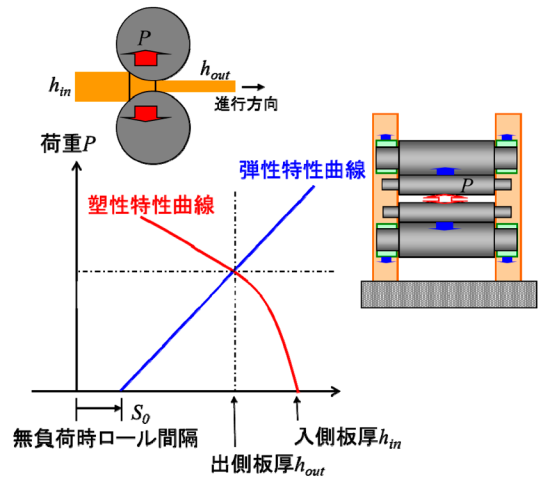


図7 圧延機の弾性変形

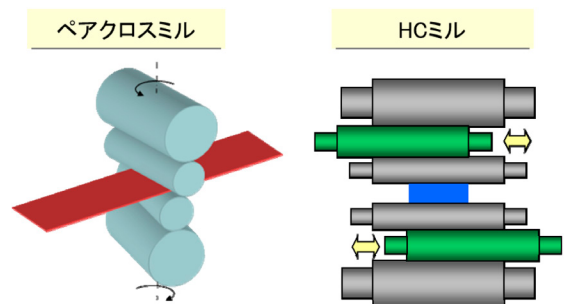


図8 代表的なクラウン制御方式

のバランスを考慮して設定されたパススケジュール（圧下量設定）に対して、各スタンドのロール間隙とロール周速を決定する必要がある。

ロール間隙は、前章で述べたように各スタンドでの圧延荷重と圧延機の弾性変形の予測値に基づいて設定する。一方、各スタンドの材料速度 v_{in} 、 v_{out} は、圧延理論から計算される先進率を用いて、式 (11)、(12) からロール周速と関係づけられる。このとき、図9に示すように、任意のスタンド出側の材料速度が下流側のスタンドにおける入側の材料速度と一致しなければ、材料の速度バランスが崩れることになる。そのため、スタンド間での材料速度がバランスを保持できるように、各スタンドのロール周速を決定する。

連続圧延の特徴は、特定スタンドの圧延状態の変化が、スタンド間張力を介して、他のスタンドに影響を与える点にある。例えば、図9の (i) スタンドのロール間隙を定常状態から変化させた場合、(i) スタンドでの圧延荷重、出側板厚、入出側の材料速度がすべて変化する。(i) スタンドの出側板速度が変化すると、(i) - (i+1) 間のスタンド間張力が変化して、(i+1) スタンドの圧延荷重、出側板厚、入出側の材料速度を変化させることになり、この影響は他の全スタンドの圧延状態に及ぶ。

連続圧延における板厚制御では、板厚の測定結果に基づくフィードフォワード制御やフィードバック制御が行われる。また、図7に示す弾性特性曲線を用いて実測の圧延荷重から板厚を推定する方法や、式 (11) を用いて板速度の測定結果に基づいて板厚を推定して、ロール間隙やロール周速を修正する方法などを組合せることで高精度な制御が実現されており、上記のようなスタンド間での相互作用を考慮した制御が行われる¹³⁾。

6 圧延に関連した周辺技術¹⁴⁾

圧延技術は、種々の周辺技術と組み合わせることで実操業に供される。代表的なものを記載する。

(1) 圧延ロール

工具としてのロールは、高い圧力と摩擦力を繰り返し受

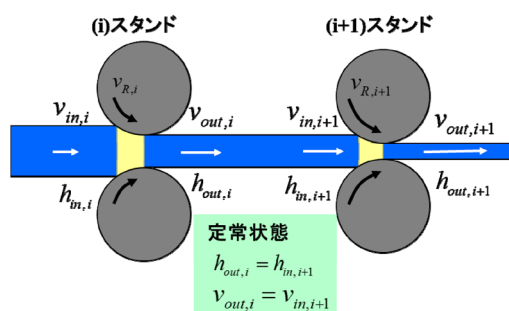


図9 連続圧延の模式図

け、熱的な負荷も大きい。そのため、ロールには高強度でじん性に優れたものが使用され、優れた耐摩耗性や表面粗さの維持性、耐熱衝撃性など、圧延条件に応じて種々の特性が要求される。今後、高強度材の圧延が増加するにしたがって、より高度なロールが求められてくる。

(2) 潤滑技術

冷間圧延を中心として、圧延動力を低減させ焼付き等の欠陥を防止するために潤滑剤が用いられる。タンデム圧延機では、油による潤滑性と水による冷却性能を兼ね備えたエマルションが用いられる。潤滑油の成分も天然油脂主体のものからエステル系の合成油へ移行してきている。より高速で安定な圧延を実現する上で重要となる。

(3) 制御技術

高精度で高能率な圧延を実現するために、板厚計、速度計、温度計等を含む各種計測装置が配置され、測定結果に基づく制御が行われている。最近ではそれらのデータを大量に収集してビッグデータとして活用する動きも盛んになっている。

7 圧延に関わる課題

前章までの議論のように、基本的な圧延現象については理論的な検討が進んでいるため、圧延ラインの操業においてもコンピュータ制御との組み合わせにより、ある程度の精度で現象の予測が可能である。しかし、実際には2次元圧延理論のみでは十分な取扱いができない数多くの課題に直面する。改めて、Karmanの理論での代表的な仮定を記載する。

- (1) 材料は板幅方向に変形が生じない。
- (2) 材料の変形は板厚方向で均一である。
- (3) 定常変形であり、内部で力のつり合いを満足する。
- (4) ロールは偏平変形後も円弧形状を保つ。
- (5) 界面はすべり摩擦とし、摩擦係数は変化しない。

現実の圧延技術においては、これらの仮定から外れた条件で問題が顕在化することも多い。

(1) 材料の3次元変形¹⁵⁾

圧延によって材料の板幅が変化するの周知である。板幅の変化は、圧延中の塑性流動が板幅方向にも生じていることを示している。特に、板厚が厚く、ロールが大径で、圧下量が大きい条件では、板幅方向の変形が大きくなる。

また、板クラウンを積極的に制御する場合や、板端部近傍のプロフィールを変更するエッジドロップ制御では、材料の3次元変形を利用して制御が行われるため、3次元圧延理論¹⁶⁾や有限要素法などの解析手段を用いた検討が行われてきている。

(2) 板厚方向での不均一変形

材料の変形が板厚方向で均一と仮定できるのは、板厚が薄く、摩擦係数も小さい冷間圧延のような条件に限られる。熱間

圧延のような条件では、ロールと材料間のせん断変形の影響が無視できない場合が多い。せん断変形の影響を考慮した2次元圧延理論としては、Orowan¹⁷⁾によるものが挙げられる。

しかし、変形状態に一定の仮定を設けており、直接的に変形の不均一性を求めるものではない。板厚方向の材質の不均一性を予測するような場合には、さらに厳密な解析が必要となる。

(3) 非定常変形

材料の先端部や尾端部の変形は、定常部とは異なる挙動を示す。また、実操業における先端部の通板における曲がりや、尾端部で生じやすい蛇行や絞りと呼ばれるトラブルは非定常現象が対象となる¹⁸⁾。非定常現象は従来から問題とされてきたが、高強度材や極薄材の増加に伴って、より顕在化しつつあり、今後の研究に対する期待も高い。

(4) ロールの非円弧偏平¹⁹⁾

式(13)で示したHitchcockのロール偏平式は、偏平後もロールは円弧形状を維持することが前提となる。しかし、高強度材の高圧下率での圧延に対する要求が高まるにつれて、その仮定が妥当ではない場合もみられる。圧延の圧力分布からロールの弾性変形を直接的に解く方法もあるが、安定した解を得ることが難しいという課題がある。

(5) 加工域での摩擦係数変化

冷間圧延におけるロールと材料界面への潤滑油の導入挙動や、表面粗さレベルのミクロな接触挙動に関する研究も進められている^{20,21)}。圧延の前後で材料表面の粗さや光沢などが変化するの、加工域での接触状態が変化していることを示唆している。したがって、アモントン・クーロン則における摩擦係数は、現実には加工域内で変化していると考えられる。

その他にも、材料特性は等方的であり異方性を持たないとする仮定や、材料の弾性変形の影響を無視している点などは、集合組織の発達や残留応力を予測しようとする場合などでは課題も多い。

以上のように、圧延現象については古くから理論的アプローチが盛んに行われ、圧延の自動化、高精度化、高能率化を大きく進展させてきた。しかし、鉄鋼材料の高強度化、薄ゲージ化(薄板化)などのニーズが高まるにつれて、従来の理論で仮定した条件では対処が困難な課題も顕在化してきている。したがって、現実の圧延現象を理解する上では、理論的な予測結果と実際の現象とを比較して、その差異が上記のような仮定に起因したものかどうか、という視点で現象を把握する姿勢が大切である。

8 結言

本稿では、板圧延を中心とした圧延の基本的な機構と2次元圧延理論の初歩的な部分について述べた。圧延は、工具で

あるロールが回転するという特徴がある点で、他の塑性加工法とはやや異なる側面を有する。また、加工時の塑性力学的な側面だけでなく、圧延機という機械自体の変形も同時に考慮しなければ所定の機能を発揮させることができない。さらに、実際の操業では各種の周辺技術との組合せによる総合的な技術に立脚している。また、圧延理論は一見完成されたもののように思われる場合もあるが、現実の問題に対しては未完成な部分も多く、今後の発展が期待される分野である。

参考文献

- 1) 板圧延—世界をリードする圧延技術, 日本塑性加工学会編, コロナ社, 東京, (1993)
- 2) 棒線・形・管圧延—世界をリードする圧延技術, 日本塑性加工学会編, コロナ社, 東京, (1991)
- 3) JFE スチール圧延技術研究会: トコトンやさしい圧延の本, 日刊工業新聞社, 東京, (2015)
- 4) 戸澤康壽: ふえらむ, 1 (1996), 423.
- 5) 戸澤康壽: ふえらむ, 7 (2002), 24.
- 6) 板圧延の理論と実際, 日本鉄鋼協会生産技術部門圧延理論部会編, 日本鉄鋼協会, 東京, (2010)
- 7) 阿高松男: 鉄と鋼, 100 (2014), 94.
- 8) T.Karman: Z. Math. Mech., 5 (1925), 139.
- 9) D.A.Bland and H.Ford: Proc. Inst. Mech. Engr., 159 (1948), 144.
- 10) J.Hitchcock: ASME, Research Publication, (1935), 1.
- 11) 藤田文夫, 山口慎也: 鉄と鋼, 100 (2014), 1434.
- 12) 鎌田正誠: 薄板連続圧延—世界を目指した技術者達の記録, 地人書館, 東京, (1997)
- 13) 北村章, 西野都: 鉄と鋼, 100 (2014), 1448.
- 14) 第221・222回西山記念技術講座, 鋼板圧延技術の系譜(圧延品質に影響を与える周辺技術), 日本鉄鋼協会, 東京, (2015)
- 15) K.Nakajima, T.Kikuma, H.Matsumoto, H.Awazuhara, T.Kimura, S.Shida and T.Kajiwar: J. Jpn. Soc. Technol. Plast., 23 (1982), 1172.
- 16) Y.Tozawa, Y.Nakamura and K.Ishikawa: J. Jpn. Soc. Technol. Plast., 17 (1976), 37.
- 17) E.Orowan: Proc. Inst. Mech. Engr., 150 (1943), 140.
- 18) 木村智明, 田川昌良: 日立評論, 65 (1983), 25.
- 19) N.A.Fleck, K.L.Johnson and L.C.Zhang: Proc. Inst. Mech. Eng., Part B, 206 (1992), 119.
- 20) 小豆島明: 鉄と鋼, 78 (1992), 1768.
- 21) 小豆島明, 宇都宮裕: 鉄と鋼, 100 (2014), 1456.

(2017年6月16日受付)