



UDC 621.771.237.016.3 : 621.771.237.011/.014

コールドタンDEM圧延の総合特性の解析

鎌田 正 誠*

Study on Characteristics of Cold Tandem Mills

Masamoto KAMATA

1. ま え が き

戦後順調に拡大して来た日本鉄鋼業も、昭和48年の石油ショック以来、生産量は過去の伸び率を継続できる環境を失っているが、その反面最近の製品の質的進歩は著しいものがある。

冷間圧延プロセスにおいても種々の対策が実施され板厚精度の向上、形状不良の減少、板クラウン量の減少等が達成され大幅な歩留り向上が計られた。

これらの改善の基礎となるものは、冷延プロセスの解明である。冷間タンDEM圧延機の特長はスタンド間張力を利用して圧延を行うことにあり、張力の挙動が重要なポイントとなる。そしてスタンド間張力を媒体として圧延の各因子が相互に影響を与え合うので複雑な現象が生じる。例えばロール間隙変化が製品板厚に及ぼす影響は製品に最も近い最終スタンドのロール間隙変化よりも、最も遠いNo.1スタンドの方が大きい。このような現象はスタンド間張力を媒体として、圧延因子が相互に影響を及ぼし合うことに帰因するものである。コールドタンDEM圧延機の場合具体的な圧延因子としては、各スタンド入・出口板厚、スタンド間張力、摩擦係数、ロール間隙、ロール速度、モータ特性、ロール径、材料特性等があり、これらの圧延因子は全スタンドにわたるので、タンDEM圧延機全体で考えると数十個の圧延因子が張力を媒体として互いに影響を及ぼし合うことになる。よってコールドタンDEM圧延機の特長を定量化するためには、全スタンドを一つの系として総合的に考察する必要がある。全スタンドを一つの系として解析することをタンDEM圧延機の総合特性解析と称しているが、以下総合特性解析がどのように品質向上対策に応用されて来たかという点について具体的事例をもとに解説する。

総合特性解析に関しては本誌において鈴木、阿高の解説¹⁾が発表されており、1955年から1970年にかけて発

表された主要な研究成果についての紹介と論評が行われている。よって本報においては、1970年以降に発表された研究を中心に解説する。

2. 総合特性解析の発展経過の概要

単スタンドの圧延特性をもとにしてコールドタンDEM圧延機全スタンドの圧延因子を連立させて解き圧延機全体の特性を求める手法を総合特性解析と定義する。総合特性解析を機能、手法で分類すると表1のようになる。

総合特性解析を大別すると時間の要素が入らない静的な変数関係を求める静的総合特性解析と、各変数の時間的推移を求める動的総合特性解析の二つに分類できる。

静的総合特性解析に関しては、圧延条件と圧延長手方向板厚分布の関係についての先駆的研究が HESSENBERG and JENKINS²⁾ によつて行われた。その後 COURCOULAS and HAM³⁾、LIANIS and FORD⁴⁾、美坂⁵⁾、山下ら⁶⁾の研究が発表されている。また圧延条件と圧延長手方向板厚分布、幅方向板厚分布の関係についての解析は鎌田ら⁷⁾、鈴木ら⁸⁾、志田ら⁹⁾によつて行われたが、いずれも線形モデルによる解析である。幅方向板厚分布に関して非線形モデルの直接解法を用いた例としては阿高ら¹⁰⁾、河野ら¹¹⁾の解析がある。線形解析法は圧延条件が微少変化したときの変数関係を定量化するときには有効であり、大きな圧延条件変化を論じる場合には適用できないが、多元連立一次方程式を解くことによつて全圧延変数の相互関係がすべて明らかになる点がすぐれている。一方非線形方程式の直接解法の場合にはどのような圧延条件に対しても解を得るメリットはあるが、計算時間が膨大となること、また一度の計算では、その計算を行つたときの圧延変数間の関係しか求められず、全圧延変数の相互関係を一度の計算で求めることはできない。

動的総合特性解析については、PHILLIPS¹²⁾によつて先駆的な研究が行われた。その後 SEKULIC and ALEXA-

昭和56年3月9日受付 (Received Mar. 9, 1981) (依頼解説)

* 日本鋼管(株)福山製鉄所(現:日本鋼管(株)技術研究所)(Fukuyama Works, Now Technical Research Center, Nippon Kokan K. K., 1-1 Minamiwatarida-cho Kawasaki-ku Kawasaki 210)

表 1 コールドタンデム圧延機総合特性解析の分類

項 目	1. タンデム圧延機の静的総合特性解析 [ある定常圧延状態から圧延条件の変化によって新しい定常状態に移行するさいの各種圧延変数の変化量の解析]	2. タンデム圧延機の動的総合特性解析 [ある定常圧延状態から圧延条件の変化によって新しい定常圧延状態に移行するさいの過渡状態の解析]
内 容	(1) 圧延長手方向板厚分布変化と圧延条件変化の関係の解析 [圧延条件の変化と板厚, スタンド間張力, 圧延荷重, 圧延動力変化の関係の解析であり板厚制御システム, 張力制御システムの解析に用いられる.] (2) 圧延長手方向板厚分布, 幅方向板厚分布の変化と圧延条件変化の関係の解析 [圧延条件の変化と長手方向板厚分布, 幅方向板厚分布, 幅方向張力分布変化の関係の解析であり, 板厚制御システム, 形状, 板クラウン制御システムの解析に用いられる]	(1) 定常圧延時の動的総合特性解析 [圧延が安定して行われている状態から圧延外乱, 操作量変更によって新しい安定状態へ移行するさいの過渡状態の解析であり, 板厚制御システム, 張力制御システムの動特性解析に用いられる.] (2) 加減速時の動的総合特性解析 [圧延機の加減速時の動特性解析であり, 加減速時の板厚制御張力制御の解析に用いられる.] (3) 通板, 尻抜け時の動的総合特性解析 [タンデム圧延機においてコイル先・後端部の通板, 尻抜け時, 材料が圧延されるスタンド数が増加・減少する過程の動的特性の解析であり, コイル先・後端部の制御システム解析に用いられる.]
解析手法	具体的数値計算方法として次の二つの方式がある. (1) 非線形モデル直接解法 (2) Taylor 展開による線形解析	(1) 非線形モデル直接解法 (2) Taylor 展開による線形解析

NDER による板厚制御システムの解析¹³⁾が発表された。我が国においても定常時の動的総合特性解析としては有村ら¹⁴⁾, 阿高ら¹⁵⁾, 小西ら¹⁶⁾の研究が発表されている。また具体的板厚制御システムの検討としては吉田ら¹⁷⁾, 近藤ら¹⁸⁾の研究がある。加減速時の動的特性解析に関しては, 才木¹⁹⁾, 阿高ら²⁰⁾, 田沼ら²¹⁾の研究が発表されている。冷延コイル通板, 尻抜き時の動的総合特性解析に関しては田沼²²⁾, 美坂ら²³⁾, 鎌田ら²⁴⁾の研究がある。解析手法としては, 定常圧延時の解析は, 圧延変数の微小変化を取り扱うので圧延の各変数間の関係を線形方程式で表した解析が多く, 加減速時, 通板尻抜き時の解析の場合は圧延変数の大きな変動を計算するため非線形方程式のくり返し演算により解を求める方法が採用されることが多い。

3. 総合特性解析の応用

冷間タンデム圧延機における, 板厚制御, 形状, 板クラウン制御, その他走間板厚変更制御のような新しい圧延法の開発に関して総合特性解析手法がいかに応用されているかを具体的に説明する。

3.1 総合特性解析の板厚制御システムへの応用

まえがきで述べたように, コールドタンデム圧延機の特長は, スタンド間張力を利用して圧延を行うことであり, スタンド間張力の扱い方で圧延特性が大きく変化する。例えば, スタンド間張力を制御しない場合には No. 1 スタンドロール間隙変化の製品板厚への影響は大きい最終スタンドロール間隙変化の製品板厚への影響

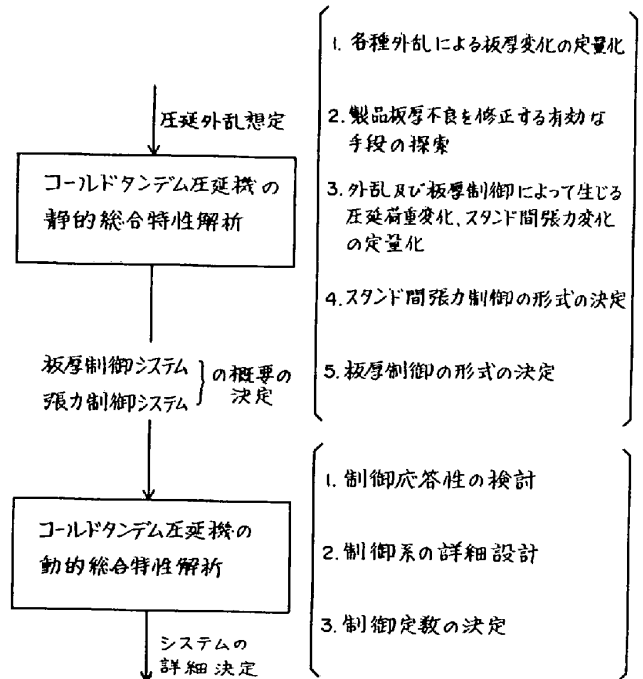


図 1 コールドタンデム圧延機板厚制御系設計手順

は小さい。一方スタンド間張力をロール速度で制御する場合には, 前記現象とは逆に No. 1 スタンドのロール間隙の影響は小さく, 最終スタンドに近い程影響が大きくなる。このように張力制御形式によって圧延特性が変わるので板厚制御系の設計を行う場合, 総合特性解析が重要である。図 1 に板厚制御系を設計するときの標準的手順を示す。このような設計手順により具体的に板厚制

御システムを設計した例としては山下、美坂ら⁶⁾の報告がある。

山下らはロール速度で張力制御を行う場合について解析を行い、次のような結論を得ている。

—ロール速度でスタンド間張力制御を行う場合の圧延特性—

- (1) 各スタンドのロール間隙の製品厚みへの影響
……最終スタンドに近づく程影響が大きくなる。
 - (2) 変形抵抗変化の製品厚みへの影響
……スタンド間張力制御を行わない場合に比べて大きい。
 - (3) 変形抵抗変化のロール速度への影響
……張力を一定にするためには、ロール速度を大きく変化させる必要がある。
 - (4) 板厚制御と張力変化の関係
……最終スタンド精密板厚制御に関し、従来から行われて来た最終スタンドのロール速度で制御する方式を適用した場合、最終スタンドとその前段スタンド間の張力変動が大きくなる。これを防止するためには No. 1～No. 4 スタンド板厚を精密に制御することが必要である。
 - (5) ミル剛性の最適配分
……No. 1, 2 スタンドのミル剛性を大きくすると、製品板厚精度は向上する。
- 以上のような結論に基づき、山下らは図2に示すような板厚制御系を設計している。また制御系の種々の制御定

数については、動的総合特性解析を行うことにより定めている。

以上の結果は、スタンド間張力を制御しない場合の特性（製品板厚に対しては No. 1 スタンドロール間隙の影響が大きく、最終スタンドのロール間隙の影響は小さい、等々）とは大幅に異なる。図3にスタンド間張力制御を行わない場合の一般的板厚制御システムを示すが、特性の差によつて板厚制御システムは必然的に変わることがわかる。

またタンデム圧延機の前段スタンドのミル剛性を大きくすることにより板厚精度が向上するという結論は鈴木、阿高らが総合特性解析⁶⁾を行うことにより理論的に予測した結果を裏づけている。以上板厚制御システムを設計する場合、総合特性解析がいかに活用されているかという点について具体的に解説した。

文献⁶⁾及び筆者の検討によれば、タンデム圧延機の特性は次のようにまとめられる。スタンド間張力制御を全く行わない場合及びロール間隙を制御することによつて間接的にスタンド間張力を制御する場合の両者についてはほぼ同じ圧延特性となるが、ロール速度で張力制御を行う場合には前記2ケースとは異なる特性を示す。

コールドタンデム圧延機においては、スタンド間張力制御を行わない場合、外乱が発生したスタンドの後方張力が板厚変動を抑制する方向に変化して板厚変化を自動的に減少させる自己修正機能が存在するが、張力制御を完全に行うとこの自己修正機能が失われる。ロール速度

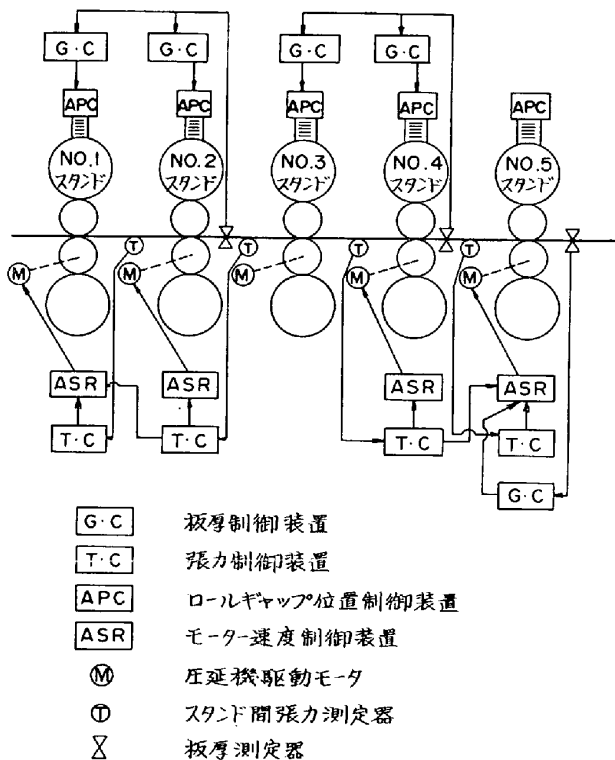


図2 ロール速度でスタンド間張力を制御する場合の板厚制御システム

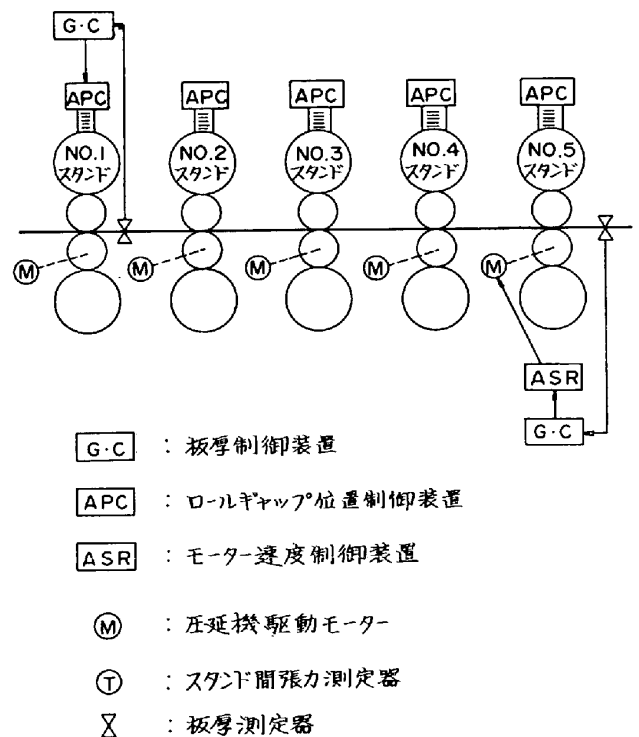


図3 スタンド間張力制御を行わない場合の板厚制御システム

で張力を制御する場合には、板厚変動が大きくなり、ロール間隙で張力を制御する場合は荷重変動が大きくなる。コールドタンDEM圧延機においては張力、荷重、板厚のすべてを制御することは不可能であり、三変数のうち、二変数を完全に制御すれば他の一変数の変動は大きくなることを考慮して制御系を設計する必要がある。板厚制御を行うとき荷重変動を小さい範囲に納めたいスタンド（例えば最終スタンド）は圧延が安定に行われる範囲の張力変動を容認する張力制限制御（張力変動がある範囲を越えたときのみ張力制御を行い、張力値を制限値以内に入れる制御）が有効であり、厳密に張力制御を行うことは得策でない。逆に荷重変動が容認できるスタンドについては、スタンド間張力を厳密に制御することが可能である。結論としてコールドタンDEM圧延機の場合板厚、張力、荷重のすべてを制御することは不可能であり、板厚制御系を設計する場合にも総合特性解析を行うことにより、荷重変動、張力変動を圧延目的に応じた最適の組み合わせとすることが重要である。

以上が板厚制御に関する基本的考え方であるが、実機の板厚制御システムに対しては、種々の板厚精度向上対策が提案されている。まず第1はタンDEM圧延機全スタンド出口板厚変動を把握して制御を行う全スタンドAGCシステムである。本制御は新日鉄広畑製鉄所にて最初に実用化された板厚制御方法²⁵⁾であり、各スタンド出口板厚変化を各スタンド出口板速の実測値からマスフロー関係式を用いて求め、板厚変動をトラッキングし後段スタンドロール速度をフィードフォワード制御することに特長がある。また同様の制御システムについて吉田、伊藤らの研究報告¹⁷⁾も発表されている。吉田らの研究の特長は、張力変動の実測値から先進率を理論計算し各スタンド出口板厚を計算することである。またNo.1スタンドロール速度を制御する板厚制御システムについて近藤、田島の報告¹⁸⁾がある。具体的にはNo.1スタンド出口板厚を測定し、この情報により、No.1スタンドロール速度を制御することにより1~2スタンド間張力を調整しNo.2スタンド出口板厚を一定にするフィードフォワード制御を行う方法である。そしてこの制御を実機へ適用することによってNo.1スタンドロール偏心による板厚変動を除去することができるとしている。この場合にも張力制御システムとの関連が重要であり、この制御システムが有効なのは、スタンド間張力制御を行わない場合であり、スタンド間張力をロール速度で制御する場合には余り有効でないことを把握しておく必要がある。

3.2 総合特性解析のクラウン、形状制御への応用

圧延長手方向板厚分布と圧延条件の関係については、理論体系が確立し、実際の板厚制御システム設計等に利用され効果をあげていることについては3.1項で解説したが、冷間タンDEM圧延機における圧延条件と板幅方向

板厚分布（板幅方向板厚分布は製品クラウン、形状と密接な関係がある）の関係については現時点では完全に解明されているとは言えない。

圧延長手方向板厚分布、幅方向板厚分布と圧延条件の関係をタンDEM圧延機全スタンドにわたって解析する最初の試みは鎌田、鈴木⁷⁾によつて行われた。鎌田らは圧延圧力のロール軸方向の分布は圧延機へ流入する板のプロファイルと圧延機出口板プロファイルによつて定まり、その圧力分布によつて生じるロール変形がちょうど圧延機出口板プロファイルに等しいとする、ロールすき間形状とロール出口板断面形状の幾何学的適合条件を導入して、圧延条件と圧延長手方向板厚分布、幅方向板厚分布の関係を求めている。計算の結果ロールベンダ効果については、最終スタンドベンダー力が最も製品形状修正に効果があること、最終スタンドロール間隙は板厚には余り影響を与えないが製品形状に対しては大きな影響を与える等何らの制御も加えぬ冷間タンDEM圧延機固有の特性を定性的に説明する結果を得ているが、精密な定量的検討を行うためには改良の余地が残っている。

板幅方向板厚分布と圧延条件の関係を正確に定量化する場合問題となるのは次の四項目である。

- (1) 圧延ロール変形の正確な計算方法
 - (2) ロールバイト中での材料の板幅方向流動の定量化
 - (3) 材料の圧延方向、板幅方向への流動及びスタンド間張力の幅方向分布を考慮した圧延圧力分布計算方法
 - (4) スタンド間張力の板幅方向分布計算方法
- (1)項については鈴木、鮫島²⁶⁾、SHOHETら²⁷⁾、戸沢、上田²⁸⁾らの研究結果が発表されておりほぼ解明されて来た段階である。
- (2)~(4)項については戸沢、中村らの詳細な検討結果²⁹⁾が発表されてはいるが、完全な解は得られていない。よつて現時点において板幅方向板厚分布と圧延条件の関係を定量化するためには、実験によつて得られた実験式と今までに明らかにされた理論式を組み合わせる方法に頼るほかない。冷延における幅方向板厚分布に関する鎌田、北村³⁰⁾ら、辻、平野³¹⁾らによる実験から明らかにされている知見を以下にまとめる。

(1) 板幅方向端部から30~50mm入つた内側ではクラウン比率一定の圧延 ($Cr(\text{クラウン量})/h(\text{板厚}) = \text{一定}$) が行われており、熱延原板のクラウン比率と冷延製品クラウン比率はほぼ等しくなる。この場合圧延条件が不適合のときは、クラウン比率一定の条件が維持できなくなり形状が不良となるが、板厚自体は余り変化しない。よつて冷延板の中央部のクラウンを冷延プロセスで制御することは困難であり熱延側の改善を必要とする。

(2) 板端から内部30~50mmの間はクラウン比率一定の条件が厳密には成り立つておらず、板幅方向への塑性流動が存在する。よつてエッジドロップは冷延プロ

セスの改善によつて軽減できる可能性はある。

(3) スタンド間張力はクラウン比率を一定に保つ方向に作用し、張力値が大きい板幅方向の各位置における伸び率を均一化しようとする効果がある。

これらの実験結果から得られた知見を実験式に整理し、またロール変形の精密モデルを適用した報告が種々行われている。

志田、粟津原ら⁹⁾は、鎌田らのモデルを拡張して、複合伸びに対する制御方式について検討し複合伸びの場合、ロールベンダーとロールギャップ変更だけでは修正はきわめて困難であり、ロールベンディングと異なる傾向をもつ形状修正機構が必要であるとの結論を得ている。その後ロールベンダ機構とは異なる傾向をもつ形状修正装置として、四段ロール圧延機のワークロールとバックアップロールの間にロール軸方向に移動可能な中間ロールを配する六重式冷間圧延機が開発され、中延び、耳波、クォーターバックル等の組み合わせによる複合伸びを中間ロールシフト量とロールベンダー圧力を操作することにより、制御するシステムについて今井、中島らの報告^{23)~24)}が発表されている。また六重式圧延機には、圧延機内で発生する外乱(摩擦係数変化、変形抵抗変化等)に対してロール変形を抑制する効果があり形状安定化に効果がある。

冷延においては、板幅(方向)中央部の板幅方向のメタルフローはほとんどないので、クラウン量を変えることは本質的に困難であり、熱延原板クラウン比率を冷延中にも維持することにより形状を確保することが肝要である。このためには次の諸点を考慮する必要がある。

(1) 形状安定化のための圧延機運転条件の検討

3.1 項で述べたように板厚制御、スタンド間張力制御を厳密に行うと圧延荷重変動が大きくなり、形状安定性が損われる。よつて板厚、形状制御が必要なスタンドについては、ある程度の張力変動を許容する張力制限制御を行うなどの配慮が必要である。またスタンド間張力の設定値を大きくすることにより板幅方向の伸び率を均一化する効果があるとの報告³¹⁾もあり圧延条件の検討も必要である。

(2) 形状制御性のよい圧延機構造の検討

総合特性解析及び実験結果から圧延機に要求される性能は次の三項目である。

(イ) 圧延機入口板クラウンに相似のロール変形が発生すること。

(ロ) 圧延機での外乱(摩擦係数、変形抵抗変化等)に対してロール変形が起りにくいこと。

(ハ) 形状不良が発生したときには、ロールを任意のプロフィールに変形できること。

これらの性能をすべて満足することは圧延機の機構上むずかしいが、六重式圧延機はロ項とハ項を改善した点が評価できる。

以上板幅の中央部については、クラウン量をコントロールすることは本質的に困難であることを述べたが、板端部のプロフィール(板端から0~50mm程度内部へ入った範囲のプロフィール:エッジドロップと称している部分)については冷延中にコントロール可能な領域であり、種々の検討結果が発表されている。鎌田、北村ら³⁰⁾はタンデム圧延機の後段2スタンドの合計圧下率を低くすることおよび、スタンド間張力を高くすることによりエッジドロップが軽減されるとの実験結果を得ている。河野、長谷ら¹⁴⁾はロール変形モデルとして精密モデルを適用し、タンデム圧延機全スタンドにわたつて非線形方程式をくり返し法で解くことにより、各スタンド出口の板プロフィールを求める理論計算法を報告している。

すなわちロール変形モデルとしてSHOHETの提案したロールパレルを細分割し、各分割内での応力は一樣と考える分割型モデル²⁷⁾を適用し、ワークロールと材料の接触変位は、弾性半無限体中に円柱を想定したモデルで求めている。圧延荷重は各分割ごとに数値積分して求め、板幅方向のメタルフローについては粟津原ら³⁵⁾の提案した塑性流れ係数を導入して実験的に定めている。またスタンド間張力の幅方向分布については板幅方向の伸び率偏差とヤング率から応力・歪み関係式を用いて求めている。現在までに発表されている冷間圧延機の形状クラウンに関する総合特性解析については、河野のモデルが最も精密なものであるが、種々の実験式、簡易式(塑性流れ係数、圧延圧力分布計算に材料の幅方向のメタルフローが考慮されていない等)が用いられており、完全に理論的手法で計算することは現段階では困難である。河野らは本モデルを用いてタンデム圧延機前段スタンドに段付バックアップロールを適用することにより製品エッジドロップが軽減できるとの結論を得ている。また今井、浅村ら³⁶⁾はタンデム圧延機 No. 1, No. 2 スタンドを六重式圧延機に改造した結果エッジドロップが減少するとの実験結果を得ている。この結果は河野らの報告と一致しておりエッジドロップは冷延で、ある程度軽減できる可能性を示唆している。

エッジドロップに関しては上記のような種々の実験結果、解析結果が断片的に報告されているが、今後は圧延条件の最適化(圧下率パターン、張力設定値等の最適化)、設備の最適化(例えばタンデム圧延機列内の六重式圧延機の最適配置の問題、ワークロール径の最適値の検討等々)をタンデム圧延機の総合特性解析により定量化することが重要である。

3.3 総合特性解析のその他の応用

3.1, 3.2 項では、圧延長手方向板厚分布、圧延幅方向板厚分布に関する総合特性解析について述べたが本項においては、総合特性解析により導かれた圧延法について解説する。

3.3.1 走間板厚変更制御

ロール組み替え時以外は圧延機をとめることなく、圧延を継続する完全連続式冷間タンデム圧延機は 1971 年日本鋼管福山製鉄所において完成した。完全連続式タンデム圧延機は同条件の通常形式のタンデム圧延機に比べて約 1.5 倍の能率向上が計られたまた通板作業や尻抜き作業がないのでコイルの先後端部でロールを疵つけることがなく、ロール疵が激減する。またコイル前後端で発生するオフゲージ量が大幅に少なくなり歩留りが向上するなどのメリットが得られている。同圧延機で用いられている走間板厚変更技術（圧延を停止することなく板厚を変更する技術）に関しての筆者らの報告³⁷⁾をもとにして、動的総合特性解析の応用の一例を紹介する。走間板厚変更で重要なことは次の三点である。

(1) 走間板厚変更中にスタンド間張力変動を最小に保つこと。

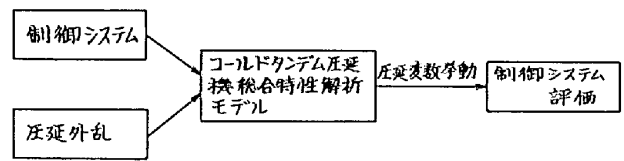
(2) 板厚変更前後でオフゲージ量を最小とするためステップ的に板厚を変更する必要がある。

(3) 板厚変更前後の材料の圧下スケジュールはおの最適圧下率配分を満たしている必要があり、板厚変更後圧下バランスが乱れるのは望ましくない。

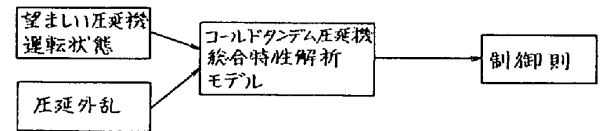
板厚変更を行うときには、特定のスタンド（例えば最終スタンド）の設定変更のみで対処するといった安易な方法を採用すべきでない。このような方法では、大きな板厚変更の場合には、板厚変更後の圧下バランスが乱れ圧延が不能となる。また小さい板厚変更を行う場合にも、除々に圧下バランスが乱れるので得策とは言えない。よつてサイズ変更は全スタンドのロールギャップ、ロール速度を変更して、板厚変更前材料に対する最適圧下スケジュールから板厚変更後材料に対する最適圧下スケジュールへ円滑に移行する必要がある。

以上の条件を満足する走間板厚制御則が動的総合特性方程式を用いて次のような検討を行うことにより求められている。

一般に制御方式を検討するとき用いられる手法は、種々の制御則をあらかじめ仮定しておき、動的総合特性方程式を用いて、制御則を適用したときの圧延機挙動を計算し、張力変動ならびに板厚変動を評価し、最適の制御則を選ぶというものである。しかしこの方法では相当回数の試行錯誤を行う必要があり、また求められた制御則が本当に最適であるとの保証もない。総合特性方程式が完全に記述されているということは、圧延機系各変数の関係が明らかにされているということなので、圧延が必要とする運転条件を入力として総合特性方程式を解くことにより、そのような運転が可能となる圧延機制御則が一義的に求められる。(図 4 参照) もちろんこの場合運転条件として制御則が一義的に定められるための必要十分条件が与えられる必要があり、条件が多すぎる場合は解を得ることが不能となり、条件が少ない場合には制御則は一義的には定まらない。



(1) 制御システムを仮定しておき、そのときの圧延挙動を評価することにより制御方式を決定する方法



(2) 総合特性モデルに望ましい圧延機運転状態を入力することにより制御則を求めする方法

図 4 総合特性モデルを用いた制御則の導出方法

文献 37) においては図 4 の手法により走間板厚制御則が求められているが、具体的な方法について以下簡単に紹介する。各スタンド間張力が一定の条件で走間板厚変更を行うためには、図 5 より

$$\Delta t f_i = 0 \dots\dots\dots (1)$$

この条件をいかなる時点でも満足するためには、

$$\Delta V_{in,i+1} = \Delta V_{out,i} \dots\dots\dots (2)$$

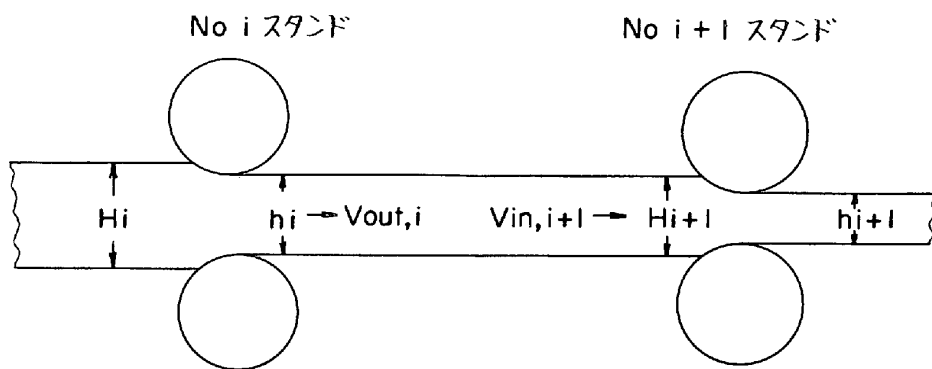
となり、(2)式が成り立つていれば、走間板厚変更中においても張力が変動することはない。(2)式より次の制御則が求められる。

$$\begin{aligned} \Delta V_{i+1} = & \left\{ \left(\frac{\partial f}{\partial H} \right)_i \cdot \Delta H_i + \left(\frac{\partial f}{\partial h} \right)_i \cdot \Delta h_i \right\} \\ & \cdot \frac{V_i}{(1 + \epsilon_{i+1})} + \frac{(1 + f_i)}{(1 + \epsilon_{i+1})} \cdot \Delta V_i \\ & - \left\{ \left(\frac{\partial \epsilon}{\partial H} \right)_{i+1} \cdot \Delta H_{i+1} + \left(\frac{\partial \epsilon}{\partial h} \right)_{i+1} \cdot \Delta h_{i+1} \right\} \\ & \frac{V_{i+1}}{(1 + \epsilon_{i+1})} \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

(3)式より、当該スタンドのロール速度は次の三項目の変化を補償するように変化させればよいことがわかる。

1. 当該スタンドの前段スタンドへ板厚変更点が到達したときに生じる先進率変化分
2. 当該スタンドへ板厚変更点が到達したときに生じる後進率変化分
3. 前段スタンドのロール速度変化分

またロールギャップについては、板厚変更をステップ的に行うために板厚変更点各スタンドへ到着したときに、当該スタンドのロール間隙を変更すればよい。その場合ロール速度は(3)式に従って変更すれば、張力変動を最小にしかつステップ的な板厚変更が可能となる。このようにして圧延理論から導出した制御則を日本鋼管福山製鉄所で 1971 年に完成した完全連続式冷間圧延機



$$\Delta t f_i = \frac{E}{L} \int_0^t (\Delta V_{in,i+1} - \Delta V_{out,i}) dt$$

$$\Delta V_{out,i} = \left[\left(\frac{\partial f}{\partial H} \right)_i \Delta H_i + \left(\frac{\partial f}{\partial h} \right)_i \Delta h_i \right] V_i + (1 + f_i) \Delta V_i$$

$$\Delta V_{in,i+1} = \left[\left(\frac{\partial \epsilon}{\partial H} \right)_{i+1} \Delta H_{i+1} + \left(\frac{\partial \epsilon}{\partial h} \right)_{i+1} \Delta h_{i+1} \right] V_{i+1} + (1 + \epsilon_{i+1}) \Delta V_{i+1}$$

記号

- Hi : No i スタンド入口板厚
- hi : No i スタンド出口板厚
- Vi : No i スタンドロール速度
- Vout,i : No i スタンド出口材料速度
- t fi : No i スタンド前方張力
- Δ : 変化分を表わす添付号
- fi : No i スタンド材料先進率
- εi+1 : No i+1 スタンド材料後進率
- E : ヤング率
- L : スタンド間距離
- t : 時間

図 5 コールドタンデム圧延機の圧延変数関係

へ適用し満足な結果を得た。その後走間板厚変更技術に関して種々の研究³⁸⁾³⁹⁾が発表されているが、余り大きな差はない。

3.3.2 加減速時板厚制御

コールドタンデム圧延機においては、定常圧延時の板厚は比較的安定しているが、ライン速度を加減速するときには、圧延状態が変化し板厚精度が低下する。この現象は次の二項目に帰因する。

(1) 圧延速度変化によるロールと材料間の摩擦係数変化

(2) 圧延速度変化による油膜軸受の油膜厚み変化
以上二つの原因により圧延機を加速することにより製品板厚が減少する。この現象は、タンデム圧延機各スタンドで単独に発生するものであり、それ自体各スタンド出口板厚を減少させる方向の圧延外乱であるが、タンデム圧延機の場合は、スタンド間張力を介して各スタンドに影響が伝播するので加減速時の板厚変化を定量化するためには、タンデム圧延機全体を総合的に解析する必要がある。加減速時の解析は才木¹⁹⁾、阿高、鈴木²⁰⁾、田沼、大成²¹⁾らによつて行われている。才木は圧延変数間の関

係を線形の関係式を用いて記述しているが、阿高ら、田沼らは圧延の変数間の関係を非線形方程式で記述し、くり返し計算をすることにより解を得ている。阿高らは摩擦係数変化、油膜厚み変化によつて生じる板厚変化をロールギャップで制御することにより、板厚、スタンド間張力とも安定に制御されることをシミュレーションにより求めている。田沼らもほぼ同じ結論を得ている。

筆者の検討によれば、加速時に全スタンド間張力、全スタンド出口板厚を制御することは全スタンドのロールギャップ及び(スタンド数-1)個のロール速度を制御することにより可能であり、またこの方法が唯一の方式である。そして最終スタンド出口板厚のみを制御する方式については他のスタンドの板厚、スタンド間張力をいかにとり扱うかによつて種々の制御方式が存在する。板厚、スタンド間張力、圧延荷重は互に関連しているので、板厚制御を検討するときにも板厚のみを検討象にするのではなく、スタンド間張力、圧延荷重変化を同時に検討することが必要である。タンデム圧延機の加速中、圧延各変数が安定していない状態では、スタンド全体にわたつてマスフロー一定の条件が成立しないので、動的

総合特性方程式を用いて計算を行う必要があるが、加速終了後圧延変数の挙動が安定した時点では、マスフロー一定則が成り立つ。よって加速前圧延状態と加速後圧延状態の関係は、静的総合特性方程式を用いて解析可能である。タンデム圧延機の場合制御可能な変数は各スタンドロール間隙及び(スタンド数-1)個のロール速度であるが、これらの組み合わせから得られる程々の制御システムに関して、板厚、張力、圧延荷重の挙動を定量化する作業は複雑な動的総合特性式を用いなくても、静的総合特性解析で定量化できる。よって加減速時制御を検討する場合にも図1で示した方法が適用できる。すなわち、静的総合特性解析により圧延荷重変動、板厚変動、張力変動、及びロール間隙、ロール速度の制御量を定量化し制御方式の概略を決定し、制御の詳細設計時に動的総合特性解析を行うことにより、複雑な動的総合特性式を計算する回数を大幅に低減できる。

3.3.3 コールドタンデム圧延機におけるコイル先端部板厚制御

通板、戻抜きを行う通常のコールドタンデム圧延機においては、通板時には前方無張力また戻抜き時には後方無張力となることにより、板厚が目標板厚よりも数十〜数百マイクロンも厚いオフゲージ部が数メートルから数十

メートルにわたって発生し、歩留り低下の一つの原因となつている。コイル先後端部板厚制御に関しては、田沼、大成²²⁾、美坂、大橋ら²³⁾の研究が発表されているが、本項においては、総合特性解析により制御方式を求める例として、筆者らの行つた手法²⁴⁾を紹介する。

具体的には図4に示す方法で制御則が求められている。すなわち通板、戻抜き時の望ましい運転状態(例えば各スタンド出口板厚、張力目標値等)を動的総合特性方程式へ入力し、方程式を解くことにより、板厚、張力等を目標値に保つための制御則が求められる。通板、戻抜き時の解析の特長は、圧延の進行に伴つて圧延に関与するスタンド数が増減し、解くべき方程式の数、圧延変数の数が変化することである。図6に通板時において各スタンド出口板厚、スタンド間張力を目標値に保つための制御則を求める場合の入力変数と出力変数を示す。このような手法で具体的に制御則を求めた例として、各スタンド板厚、スタンド間張力を一定に制御するためのロール間隙、ロール速度制御則を図7に示す。図7からわかるようにコイル先端部がNo.1スタンドに噛み込んでからNo.2スタンドに噛み込むまではNo.1スタンド前方張力は無張力となるが、これはNo.1スタンドロール間隙の締め込みにより補償され、No.1スタン

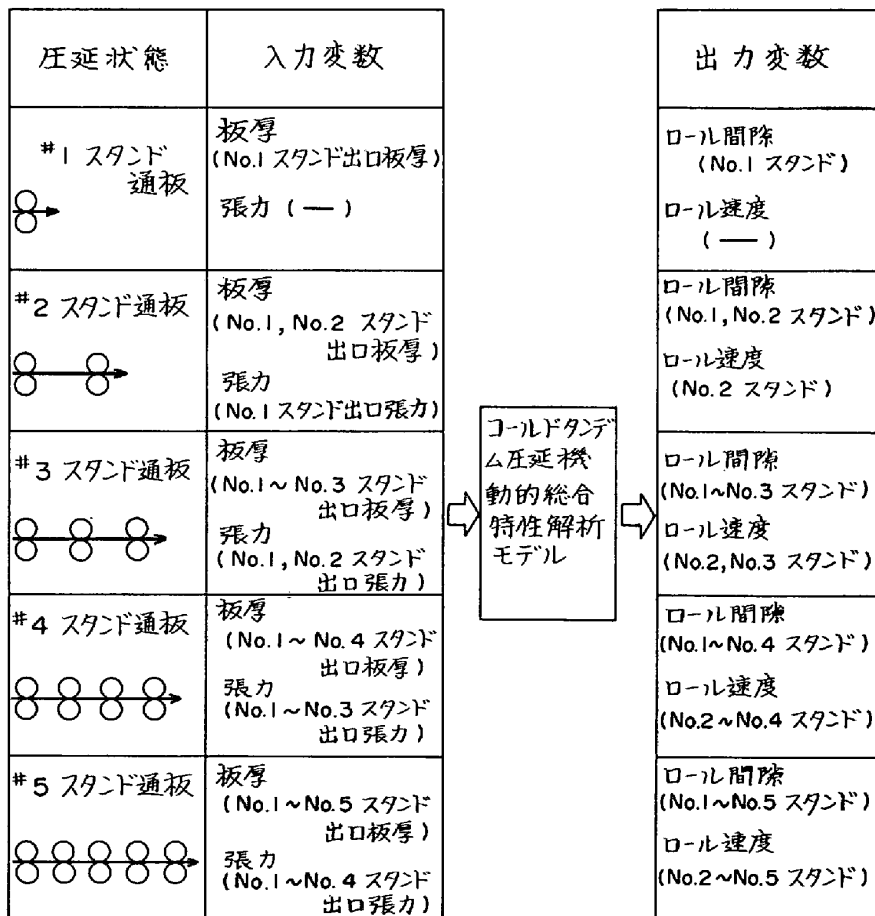


図 6 コールドタンデム圧延機通板時制御則導出方法

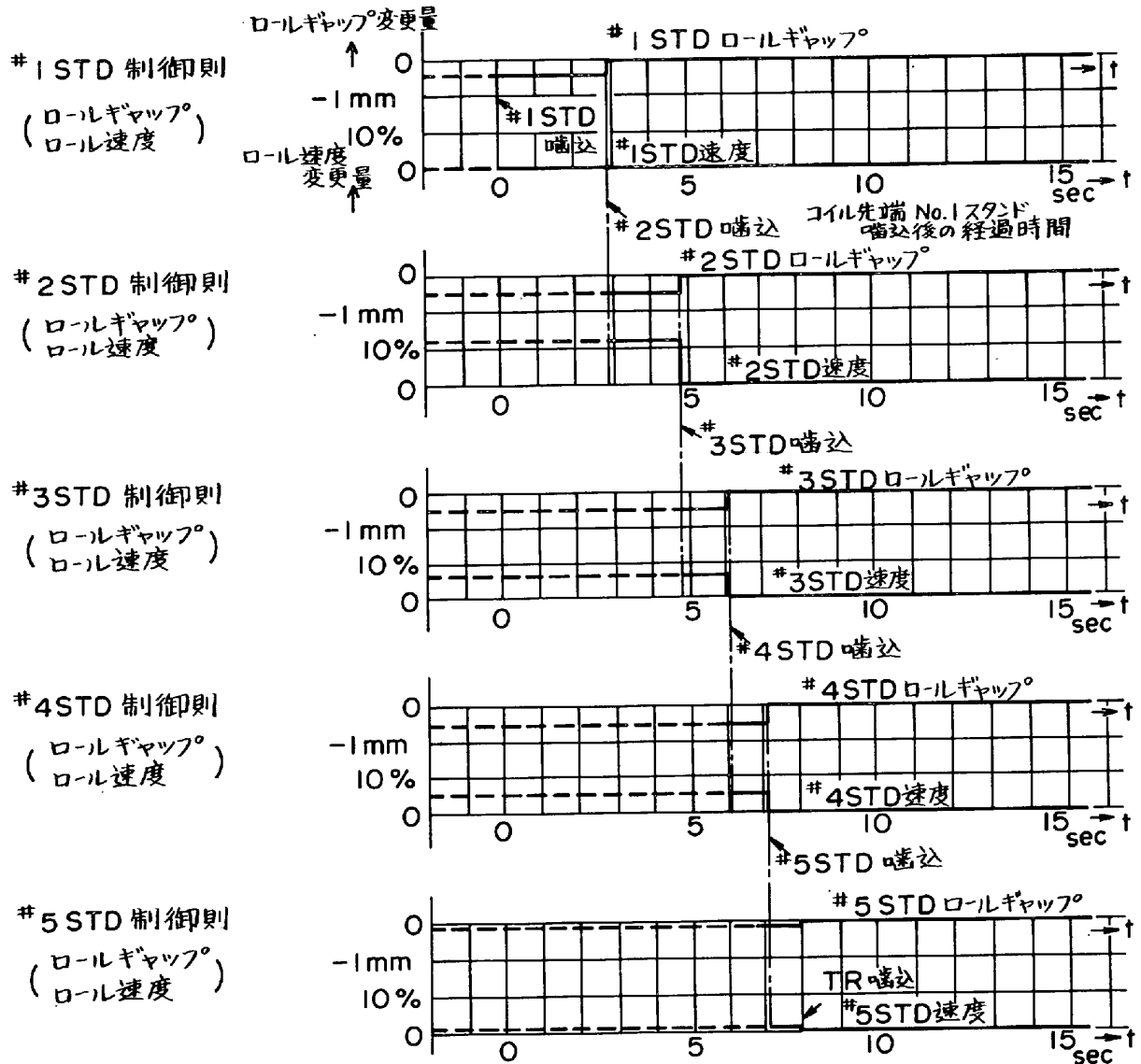


図 7 通板時のロールギャップ速度制御則

ド出口板厚は目標値に保たれる。次にコイル先端部が No. 2 スタンドに噛み込むと No. 2 スタンドを増速することにより、No. 2 スタンド後進率変化、及びモータ垂下率特性による速度低下が補償され No. 1～No. 2 スタンド間張力は目標値に保たれる。このとき No. 1 スタンドロール間隙は定常値に戻されるため No. 1 スタンド出側板厚は目標値に保たれる。No. 2 スタンド前方無張力は No. 2 スタンドロール間隙締め込みにより補償され、No. 2 スタンド出側板厚も目標値に保たれる。以降テンションリール噛み込みまで同様の制御が行われる。

重要なことは総合特性方程式を用いて、このような手段で求めた制御則は、入力として与えた運転目標を達成する唯一の解であり、他の方法は存在しないということである。もちろんスタンド間張力、板厚を通板中に任意の値に変更する場合の制御則、またスタンド間張力を一定にする代わりに各スタンドの荷重を一定にする場合の

制御則等も総合特性方程式を解くことによつて求めることが可能である。この場合制御目標値の選び方が不適当であると解が存在しない場合があるが、これはそのような目標値を満足させる圧延方式は存在しないことに対応している。

4. む す び

以上コールドタンデム圧延機の総合特性解析について現在まで得られている知見及び総合特性解析が、コールドタンデム圧延機の実際の操業にどのように利用されているかについて具体的事例をもとにして解説した。コールドタンデム圧延の場合スタンド間張力が圧延上重要な役割を果たしており、張力を介して圧延変数が相互に影響を及ぼし合い、単スタンドの現象とは異なる特性が現れるので総合特性解析が重要となる。

ここで注意すべきことは、総合特性解析結果から得られる圧延挙動の評価を行う場合ハードウェアの性能を考

慮する必要があることである。例えば本文でも述べたが、現在は形状修正装置の性能が完全ではないので最終スタンドについては、荷重変動を制限し、張力変動を許容する圧延システムが望ましいとしたが、今後形状制御装置が理想的なものに改善されれば、張力変動を制限し、荷重変動を許容するシステムも意味をもつものとなる可能性もある。このように総合特性解析結果の評価は技術の進歩とともに変化することを認識しておく必要がある。

総合特性解析手法としては、圧延長手方向板厚分布については理論体系はほぼ完成しているが、材料幅方向板厚分布に関しては明らかにされていない部分もあり、今後の研究が望まれる。

文 献

- 1) 鈴木 弘, 阿高松男: 鉄と鋼, 56 (1970) 7, p. 1236
- 2) W. C. F. HESSENBERG and W. N. JENKINS: Proc. Inst. Mech. Eng., 169 (1955), P. 1051
- 3) J. H. COURCOULAS and J. M. HAM: Amer. Inst. Elect. Eng., (1957) 1, P. 363
- 4) G. LIANIS and H. FORD: Proc. Inst. Mech. Eng., 171 (1957) 26, P. 757
- 5) 美坂佳助: 塑性と加工, 8 (1967) 75, p. 188
- 6) 山下了也, 美坂佳助, 川上義弘, 近藤勝也: 塑性と加工, 14 (1973) 155, p. 976
- 7) 鎌田正誠, 鈴木 弘: 塑性と加工, 9 (1968) 89, p. 395
- 8) 鈴木 弘, 阿高松男: 塑性と加工, 10 (1969) 101, p. 309
- 9) 志田 茂, 粟津原博, 安田健一, 津村右文: 圧延理論部会 20 周年記念シンポジウム前刷 (1974-6) p. 185
- 10) 阿高松男, 鈴木 弘: 塑性と加工, 13 (1972) 143, p. 320
- 11) 河野輝雄, 長谷 登, 西野隆夫: 住友金属, 32 (1980) 3, p. 277
- 12) R. A. PHILLIPS: Amer. Inst. Elect. Eng., (1957) 1, P. 355
- 13) M. R. SEKULIC and J. M. ALEXANDER: J. Mech. Engng. Sci, 4 (1962) 4, P. 301
- 14) 有村 透, 鎌田正誠, 斎藤森生: 塑性と加工, 10 (1969) 96, p. 29
- 15) 阿高松男, 鈴木 弘: 塑性と加工, 11 (1969) 111, p. 676
- 16) 小西正躬, 鈴木 弘: 塑性と加工, 13 (1972) 140, p. 689
- 17) 吉田 博, 伊藤 庸, 江藤孝治, 北尾齊治, 藤原高矩: 昭和 53 年度塑性加工春季講演会講演論文集 (1978-5) p. 17
- 18) 近藤勝也, 田島 滋: 昭和 53 年度塑性加工春季講演会講演論文集 (1978-5) p. 13
- 19) 才木 孝: 製鉄研究, 251 (1965) p. 48
- 20) 阿高松男, 鈴木 弘: 塑性と加工, 10 (1969) 104, p. 672
- 21) 田沼正也, 大成幹彦: 塑性と加工, 13 (1972) 133, p. 122
- 22) 田沼正也, : 塑性と加工, 14 (1973) 148, p. 358
- 23) 美坂佳助, 大橋保威, 渡辺和彦, 近藤勝也: 塑性と加工, 15 (1974) 159, p. 309
- 24) 鎌田正誠, 後藤桂三, 伏見直哉, 谷口照美, 岡見雄二, 坂本章, : 鉄と鋼, 66 (1980) 11, p. 329
- 25) 中安 斌: 特公昭50-21312
- 26) 鈴木 弘, 鮫島一郎: 日本機械学会論文集 (1969) 205, p. 25
- 27) K. N. SHOHET and N. A. TOWNSEND: JISI, 206 (1968) 11, P. 1088
- 28) 戸沢康寿, 上田雅信: 塑性と加工, 11 (1970) 108, p. 29
- 29) 戸沢康寿, 中村雅勇, 加藤 隆, 石川孝司: 昭和 52, 53 年度科学研究費補助金研究成果報告書
- 30) 鎌田征雄, 北村邦雄, 片岡健二, 中川吉左衛門: 川崎製鉄技報, 11 (1979) p. 78
- 31) 辻 邦夫, 平野 坦, 小久保一郎, 大池美雄, 大川佳明: 神戸製鋼技報, 30 (1980) p. 20
- 32) 今井一郎, 古谷 尚, 真柄正昭, 梶原利幸, 北島聰幸: 第 29 回塑性加工連合講演会講演論文集 (1978-11) p. 94
- 33) 中島浩衛, 井上直温, 菊間敏夫, 志田 茂, 松本紘美: 第 29 回塑性加工連合講演会講演論文集 (1978-11) p. 103
- 34) 中島浩衛, 大矢 清, 松本紘美, 板摺康宏: 昭和 55 年度塑性加工春季講演会講演論文集 p. 101
- 35) 粟津原博, 安田健一, 志田 茂, 梶原利幸: 昭和 52 年度塑性加工春季講演会講演論文集 p. 25
- 36) 今井一郎, 浅村 峻, 沢井繁之, 北島聰幸, 井上直温, 蔵田喜輝: 昭和 55 年度塑性加工春季講演会講演論文集 (1980-5) p. 77
- 37) 有村 透, 鎌田正誠: 圧延理論部会 20 周年記念シンポジウム前刷 (1974-6) p. 73
- 38) 吉田 博, 伊藤 庸: 船越督己, 藤原高矩, 佃一二三, 江藤孝治: 川崎製鉄技報, 11 (1979) p. 156
- 39) 北尾齊治, 江藤孝治, 松香茂道, 満仲俊夫, 諸岡泰男: 日立評論, 61 (1979) 9, p. 645