



UDC 621.771.237 : 62-531 : 531.717.8

## 冷間圧延におけるオフゲージの減少と板厚精度の向上

今井一郎\*

Off-gauge Reduction and Improvement of Thickness Accuracy  
in Cold Rolling

Ichiro IMAI

## 1. 結 言

近年におけるわが国の冷間圧延技術の発展には目ざましいものがある。特に昭和40年以降、設備の大型化、高速化及び高稼働率化が図られ、ロール及び圧延潤滑油などのそれを支える周辺操業技術の開発も進められ、生産性は大幅に向上した。

一方圧延機の各種制御技術の発達、鋼板の板厚精度及び平坦度で代表される品質面の向上に対しても注目すべき進歩をもたらした。冷延鋼板に要求される品質は、その用途が自動車、家庭電気製品及び食品缶などの大衆消費に大半が向けられることから、厳しいレベルにある。特に板厚精度向上に関する目的は、オフゲージ減少による歩留り向上すなわち製造コストダウンと需要家に対する製品々位向上にある。板厚精度は需要家での加工性に影響をもつほか、加工部品の強度を保証する上からも重要である。また板厚の過不足はプレス加工の際に材料の破断や、あるいはダイスの損傷の事故につながるため注文板厚に対して一定の許容差内に収まり、かつ長さや幅方向での変化の少ないことが望まれる。近年この板厚精度への要求は一層厳しいものとなつてきており、たとえば、TMW (Theoretical Minimum Weight) 方式と呼ばれる算定重量売買が行われ、需要家での製品採取長さを保証する注文方式も採用されている。また薄手ぶりき製品についても、DI缶 (Drawing & Ironing) のような厳しい成形性能を満足すべく、ますます高度な板厚品位が要求されている。

これらの厳しい要求に対応して行くため、これまで設備、操業、管理面で多大の努力が払われてきた。特に昭和46年に日本鋼管福山製鉄所にて稼働を開始した完全連続式冷間圧延機は、低速通板、尻抜き作業を解消した画期的な圧延機であり、これによりコイルの頭部及び

尾部のオフゲージを飛躍的に減少できた。また従来方式の圧延機においても、油圧下やミル駆動系のサイリスター制御の導入による応答性、安定性の大幅な改善によつて各種 AGC (Automatic Gauge Control) の制御性能倍加及びバックアップロール軸受のローラーベアリングの採用による油膜変動の解消などの設備技術開発と冷間圧延の過渡特性に関する解析が、各社にて精力的に進められ、オフゲージの減少ならびに板厚精度の向上の効果をもたらしている。以下にこれらの板厚精度向上技術について実施例を中心に述べる。

## 2. 板厚精度要求レベルの変遷

冷延鋼板の板厚は、図1に示すようにコイルの長手方向(圧延方向)の変動と、板幅方向の変動の両者により、製品の総合板厚精度が決定される。

コイルの長手方向の変動は、図2に示すように頭部、尾部及び溶接部において大きく変動し、特に圧延速度の低い頭部及び尾部においてその傾向は大である。一般に

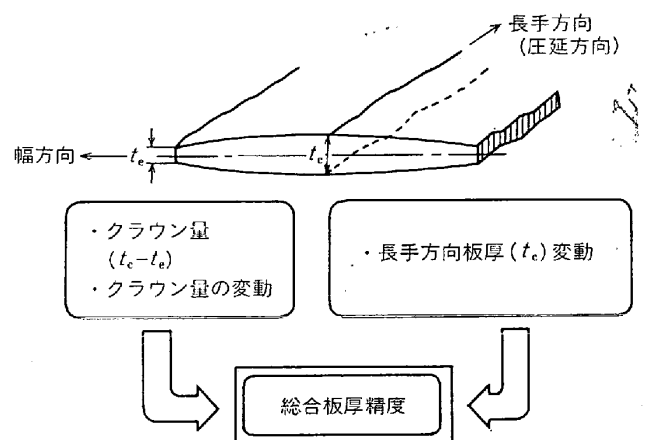


図1 板厚変動の模式図

昭和56年3月20日受付 (Received Mar, 20, 1981) (依頼解説)

\* 本会共同研究会鋼板部会コールドストリップ分科会主査 新日本製鉄(株)八幡製鉄所 (Yawata Works, Nippon Steel Corp., 1-1-1 Edamitsu Yawatahigashi-ku Kitakyushu 805)

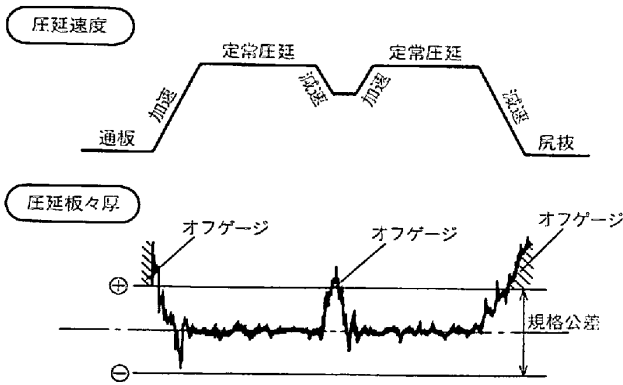


図 2 コイル長手方向の板厚変動パターン

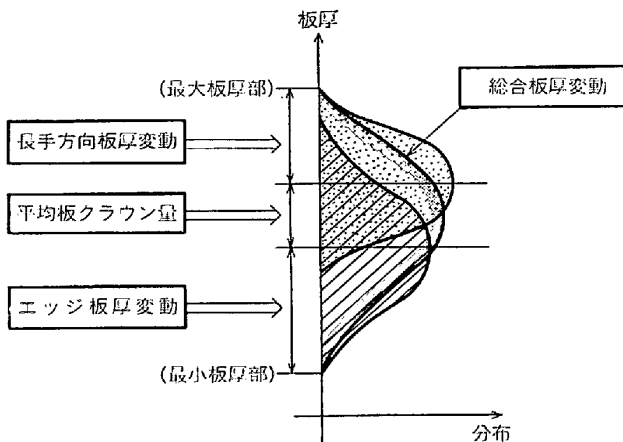


図 3 総合板厚変動の分布

オフゲージと称される規格外の板厚はこの部分に発生する。これらの部分を除く定常速度にて圧延された部分の板厚は、細かく変動している。これを一般に定常部の長手方向板厚精度と称している。また定常部の板厚品位は、この長手方向の変動の他に板幅方向の板厚差に依存する。これを一般にクラウンと称し、また特に板端近傍での板厚差をエッジドロップと称している。定常部の総合板厚変動を図3に示すが、冷間圧延での板厚管理は板幅中央部で実施しており、この部分の長手方向板厚変動と、クラウン量とそのばらつきにより、総合板厚精度は決定される。

板厚品位向上に対して、初期段階では製造コストダウンを目的とした板厚公差外れ、いわゆるオフゲージの減少による歩留り向上に主眼がおかれていた。

図4に ±5% を外れるオフゲージ長さの実績を示すが、従来方式の圧延機の場合、国内平均で薄手 0.23 mm 厚成品で 65 m、厚手 0.8 mm 厚成品で 23 m となっている。特に完全連続圧延機においては、0.23 mm 厚成品にて 17 m で、0.8 mm 厚成品については 1.4 m と著しく減少している。

コイル内の板厚精度については、昭和45年頃までは、ほとんどの向先用途に対して JIS あるいは ASTM 規格の ±10% 公差にて取り引きされていたが、昭和46、47年頃より需要家の要求品位レベルが高度化してきた。

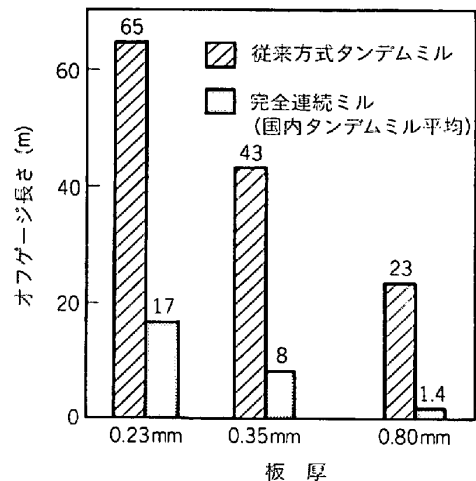


図 4 頭部および尾部オフゲージ長さ<sup>1)</sup>

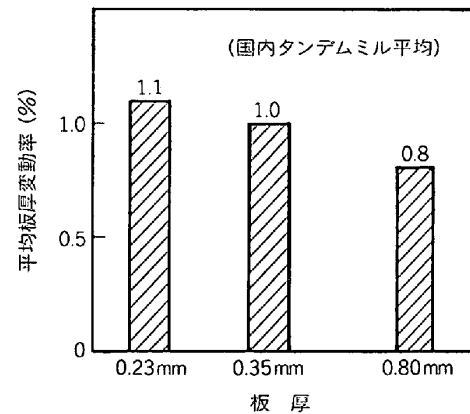


図 5 長手方向板厚精度<sup>1)</sup>

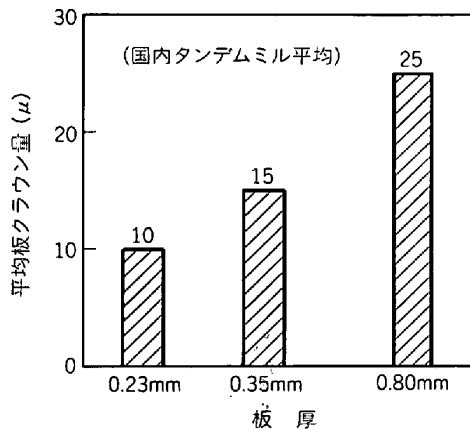


図 6 エッジ 15 mm 点の幅方向板クラウン量<sup>1)</sup>

冷薄製品においては、ミニマムゲージあるいは薄目引きと称される公称板厚に対する薄目狙い、また特に自動車用ではコスト競争のために、TMW方式などの要求により板厚変動減少の必要性はますます強いものとなっている。またぶりき製品においては、アルミニウムと競合しつつ、コスト競争のためスリーピース缶からDI缶と称されるツーピース缶化が昭和48、49年頃より急激に進んでいる。このDI缶では板厚変動が大きいと成形後の缶高さが変動し、DI缶製造ライン内での移送トラブルが

頻発するため、全面  $\pm 3\%$  以内というような高度の要求もでてきている。また非炭酸飲料缶では、溶接缶を指向しており、溶接強度の安定（加圧力の安定）のため板厚品位の向上が要求されている。

このような高度のレベルの要求に対応して行くため、これまで種々の対策をうち、長手方向の板厚変動減少技術については、ほぼ完成の域に達しているが、板幅方向の板厚均一性向上技術が今後の課題である。図5に板幅中央部の長手方向板厚精度を、また図6にクラウン量（エッジ 15 mm 点）の実績を示す。

### 3. 板厚精度向上技術の展開

#### 3.1 頭部および尾部オフゲージ

マスフロー一定則により、成品板厚は No. 1 スタンド出側板厚及びその点の各スタンド通過時の速度比により決定される。従つて頭部及び尾部のオフゲージ発生要因としては、次の点が考えられる。

- (1) 低速時の各スタンドミルモータの速度比が不良。（速度制御精度不良、ドルーピング）
- (2) 原板板厚の影響による No. 1 スタンド出側板厚の変動が大きい。
- (3) 頭部では前方張力 0 のスタンドの先進率が張力確立後に比べ小さい。
- (4) 尾部では後方張力 0 となつたスタンドの先進率が急増する。
- (5) 低速域でのバックアップロール軸受の油膜変化。

通板、戻抜き時の板厚精度向上のためには、マスフロー一定則に基づく各スタンド速度比の一定化、またはプログラム制御による圧下制御が行われている。プロセス計算機による板厚制御としては主に積分制御による速度修正が行われ、プロセス計算機などのソフト方式とハード機器による方式とでは前者の方が効果が大きいという実例がある。この通板、戻抜き作業は完全連続圧延方式の採用により、解消するため、この方式の圧延機ではこれに起因するオフゲージは皆無となる。ただしこの圧延機では走間にて板厚を変更する必要があるため、その実用化には、タンデム圧延機総合特性の解析に基づいた走間板厚変更技術の開発が寄与している。

加減速時のバックアップロール油膜変化に対しては、圧延速度に対する油膜変化量を圧下量にて補正する方式を採っている。この場合、摩擦係数の圧延速度による変化分も加味して制御する方法も採られている。この油膜変化の影響を根本的に解消する手段として、ローラーベアリングが信頼性の向上に伴い導入されるようになった。

#### 3.2 長手方向板厚精度

定常圧延時は頭部または尾部に比べ張力の大幅な変動はないので、板厚変動量は小さい。この板厚変動の要因

は、基本的に頭部、尾部と同様であるが、次の点に起因する。

- (1) 原板板厚変動（特に溶接部、熱延スキッドマーク）
- (2) 原板硬度変動（特に溶接部、熱延スキッドマーク）
- (3) スタンド間張力変動、特に加減速時の揃速性
- (4) バックアップロール偏心によるワークロールギャップ変動

長手方向の板厚変動減少に対して大きく貢献したものは、圧延機の総合特性解析に基づく各種板厚制御方式いわゆる AGC の開発とこの制御効果を倍加させる制御要素技術の著しい進歩である。特に油圧圧下の出現で速い応答性に加えてミル剛性も可変となり、理論的解析に基づいた剛性配列にて効果を挙げている。更に高度の板厚品位要求に従い、バックアップロール偏心の影響も解決する必要があるが、油圧圧下の速応性により、この偏心補償も可能となつた。またサイリスタすなわち SCR (Silicon Controlled Rectifier) 制御のミル駆動系への導入は、応答性及び安定性の大幅な改善をもたらした。一般にタンデム圧延機の AGC は、前段の圧下による粗制御と後段の張力による微細制御から構成されているが、これらの各種制御装置を統括的に制御し、圧延条件の複雑な変化に追従した適切な判断処置を実行するため計算機制御が導入されており、品質の高位安定化を実現している。

#### 3.3 幅方向板厚偏差減少技術

これまで幅方向の板厚偏差は主として圧延後の板形状との関連において着目してきたが、高度の板厚品位要求に従い、幅方向板厚偏差減少にも積極的に取り組むべき段階に来ている。幅方向板厚偏差は熱延時に形成されるボディクラウンと冷延時に形成される板端部のエッジドロップがある。ボディクラウンの減少については、クラウン量の小さな原板をいかに形状を損わずに冷間圧延するかという、いわゆる形状制御によるところであるが、エッジドロップの減少については、その発生要因としてワークロールの偏平変形の影響が最も大きいことから、小径ワークロールの採用による圧延荷重減少の効果が大きい。ワークロールとバックアップロールの間に中間ロールを配して、これを板幅に合わせてシフトさせる。6重圧延機は4重圧延機に比べ優れた形状矯正能力を有しているが、ワークロールの受ける板端部の余分な剪断変形がなくなり、エッジドロップの改善効果もある。

#### 3.4 板厚精度向上技術の総括

近年における板厚精度向上技術の進歩は著しいものがある。図7にこれらの技術の展開の様相を示す。また各ミルの油圧圧下、サイリスタなどの装備状況と板厚精度を図8、図9に示す。個々の技術については次章で改めて述べる。

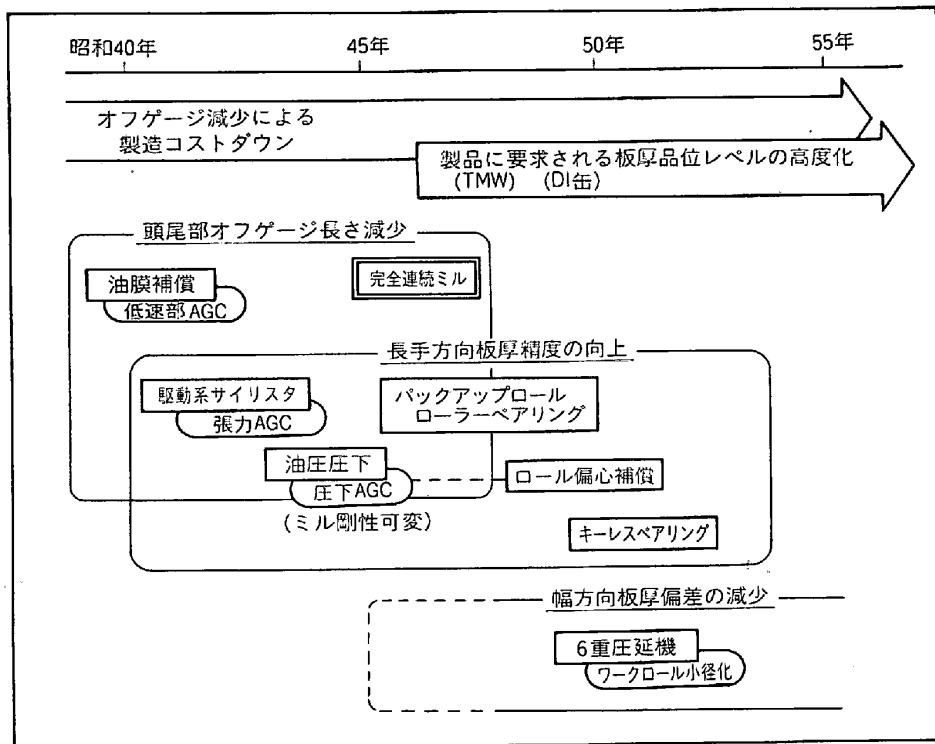


図 7 板厚精度向上技術関連図

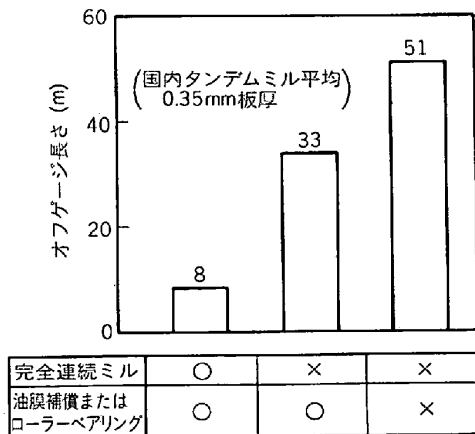


図 8 圧延機設備とオフゲージ長さ<sup>1)</sup>

#### 4. 個別技術<sup>2)~9)</sup>

##### 4.1 完全連続圧延の出現

###### 4.1.1 完全連続圧延機の概要

板厚板幅の異なるコイルを溶接して圧延機を停止することなく異なった圧延スケジュールに移行することを可能とした完全連続圧延機として、世界初の4重5スタンドタンデム圧延機が日本鋼管福山製鉄所にて、昭和46年に稼働を開始した。この圧延機では通板、戻抜き作業を解消できることから、大幅な能率の向上、ロール組み替えの減少による稼働率の向上、及び省力化が可能となると共に、頭部、尾部のオフゲージが大幅に減少<sup>10)</sup>する。

###### 4.1.2 走間板厚変更技術

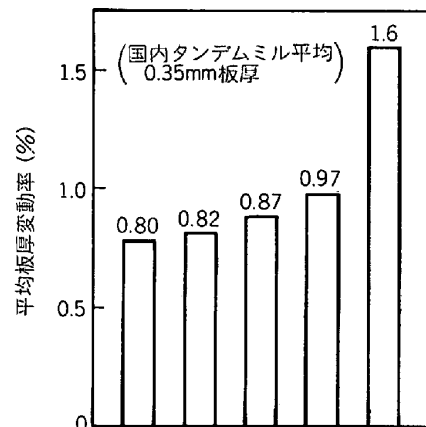


図 9 圧延機設備と長手方向板厚精度<sup>1)</sup>

走間板厚変更は圧延中に板厚変更点の各圧延スタンドへの到達に伴って、圧延速度比率及びロールギャップを逐次変更するもので、タンデム圧延機総合特性解析の基礎のもとに実現された<sup>9)</sup>。この技術は完全連続圧延の実施においては必須のものであり、また製造ロットの過小によつて生ずる小コイルでの非効率的な圧延を解消し、歩留りの向上などを達成するため、1コイル内に異なった板厚を含むコイルの圧延を行う場合にも有効に活用しうる。

わが国では走間板厚変更方法として、マスフロー変更

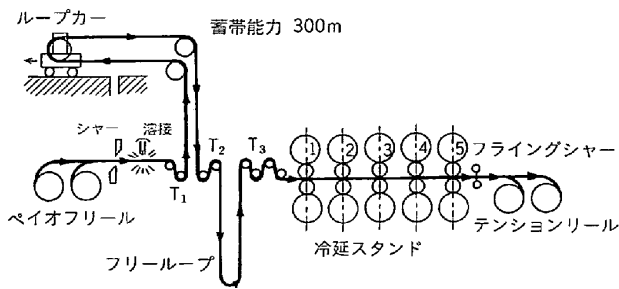


図 10 完全連続式圧延機のレイアウト<sup>29)</sup>

表 1 コイル接続基準例<sup>12)</sup>

|         | 先行コイル原板厚  |           |           |        |     |     |
|---------|-----------|-----------|-----------|--------|-----|-----|
|         | 2.0       | 2.3       | 2.8       | 3.2    | 3.8 | 4.5 |
| 原板厚接続基準 | ○         | ○         | ○         | ○      | ○   | ○   |
| 幅差接続基準  | 最大 30mm   | 幅広がり      | 幅狭まり      |        |     |     |
|         | 70mm      |           |           |        |     |     |
|         | 目 標 厚 範 囲 |           |           |        |     |     |
|         | 0.23未満    | 0.23~0.40 | 0.40~0.65 | 0.65以上 |     |     |
| 目標厚変更基準 | 70μ       | 100μ      | 200μ      | 400μ   |     |     |

主体の方法、圧下変更主体の方法など多数の考案、報告がなされている。走間板厚変更方法の評価指標としてはオフゲージ長さと共に、変更中の張力変動の抑制が重要であり、このため変更前後の圧延スケジュールの中間に遷移のスケジュールを置き、張力変動を軽減するくふうを行っている例<sup>14)</sup>がある。

また安定して大量生産を行うためには、一例として表 1 に示すように、コイルの接続範囲には一定の制限をつける必要がある<sup>12)</sup>。このような制約を緩和して行くことが今後の技術的発展の一方向である。

#### 4.2 圧下、軸受機構の進歩

##### 4.2.1 油圧圧下の採用

電動圧下方式に比べて応答性が速い油圧圧下方式の採用が進んでいる。日立製作所にて開発された油圧圧下圧延機が、昭和 43 年にタンデム圧延機として初めて採用<sup>4)</sup>されて以来、その後国内に新設されたタンデム圧延機は少なくとも入出側スタンドが油圧圧下方式となっており、また既存ミルにおいても特に 1 号スタンドの油圧圧下化改造が広く行われている。電動圧下をサイリスターレオナード方式または界磁サイリスター方式に改造して応答性を上げる試みを行っているミルもある<sup>1)</sup>が油圧

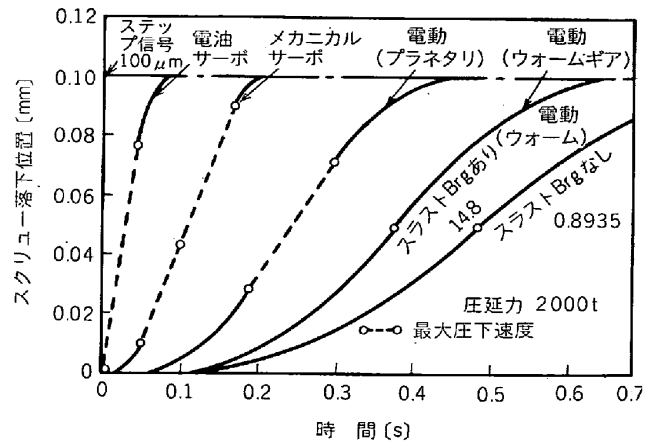


図 11 油圧々下の応答性<sup>7)</sup>

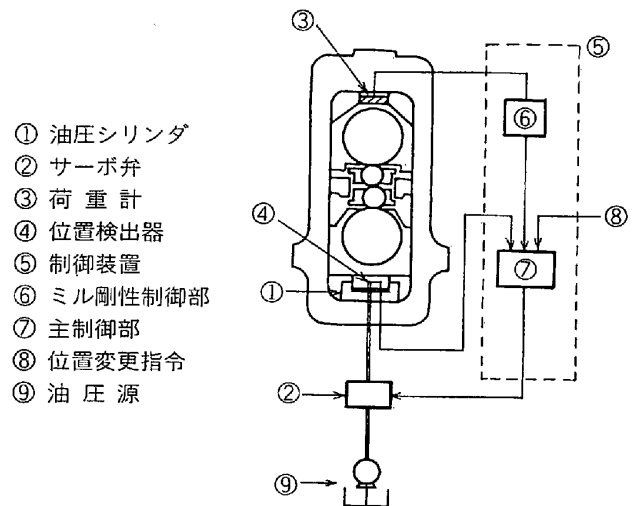


図 12 電気油圧サーボ方式位置検出器型油圧々下装置

圧下化が大勢である。油圧圧下の板厚制御に関する効果は、図 11 に示すような格段に高い応答性を活用することによる強力な圧下 AGC システム、張力制御システム、走間板厚変更システム、偏心補償制御システムの採用が可能になることであり、また圧下位置の検出信号をサーボ弁に演算、フィードバックすることによりミル剛性可変制御が行えることにある。油圧圧下方式は当初のメカニカルサーボ機構からより応答性の高い電気油圧サーボ機構が採用されたようになった<sup>6)</sup>。またロール間隙変位の検出には、従来バー型弾性体方式が採用されていたが、油圧シリンダーなどに位置検出器を取り付ける方式が用いられるようになった。電気油圧サーボ方式位置検出型油圧圧下装置を図 12 に示す。

##### 4.2.2 ミル剛性可変制御

油圧圧下の採用により、ミル剛性の変更が可能となることを活用して、原板の不均一性の影響が強く現れる前段スタンドの剛性を高くして板厚精度を向上させるスティフ制御と、逆に後段スタンドで形状調整を主体として剛性を低くするソフト制御などの圧延方法がいくつかのミルで採用され効果を挙げている。これを表 2 に示す。

表 2 ミル剛性可変制御採用例<sup>1)</sup>

| 区 分            | ミル | スタンド別剛性 (t/mm) |       |       |     |     |     |
|----------------|----|----------------|-------|-------|-----|-----|-----|
|                |    | 1号             | 2号    | 3号    | 4号  | 5号  | 6号  |
| 全スタンド<br>剛性可変  | A  | 3 500          | 3 500 | 2 000 | 700 | 200 | —   |
|                | B  | 4 200          | 3 600 | 800   | 800 | 800 | —   |
|                | C  | 1 500          | 1 600 | 600   | 600 | 600 | 500 |
| 1号スタンド<br>剛性可変 | D  | 5 000          | —     | —     | —   | —   | —   |
|                | E  | 5 200          | —     | —     | —   | —   | —   |
|                | F  | 5 200          | —     | —     | —   | —   | —   |

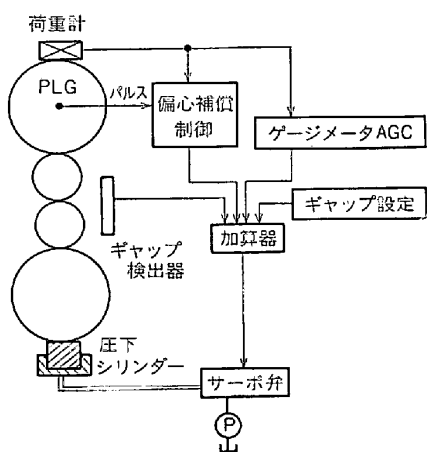


図 13 ロール偏心補償制御ブロックダイアグラム<sup>14)</sup>

前段スティフ、後段ソフトとするミル剛性配分を傾斜配分と呼んでいるが、この考え方はタンデムミル総合特性理論に基づく解析から示唆されたものであり<sup>3)</sup>、石川島播磨重工業によって初めて発表されたミル剛性可変油圧圧下装置の出現により可能となった<sup>5)</sup>。

通常のミル剛性可変制御では、ロール系の変形の影響は、位置制御の対象外となるため圧延材料幅が狭い場合、全体としてのミル剛性の低下現象が発生する。この材料幅の効果を油圧圧下回路で補償することにより、スティフ制御の板厚精度を向上させる試みも行われている<sup>13)</sup>。

#### 4.2.3 偏心補償ロールギャップ制御

通常の方法としては、ロール1回転の偏心パターンに基づいて、圧下位置をこの偏心を補償するように制御するものであり、高度の圧下応答性を必要とするため、油圧圧下圧延機にて採用される。図 13 はこの制御装置の例であるが、圧延荷重の変動量に含まれる周期性のあるロール偏心荷重からフーリエ解析により偏心量を検出するようになっている<sup>14)</sup>。

またこのように直接ロール偏心の補償を行わない場合でも、ゲージメータ AGC の検出信号から、ロール偏心

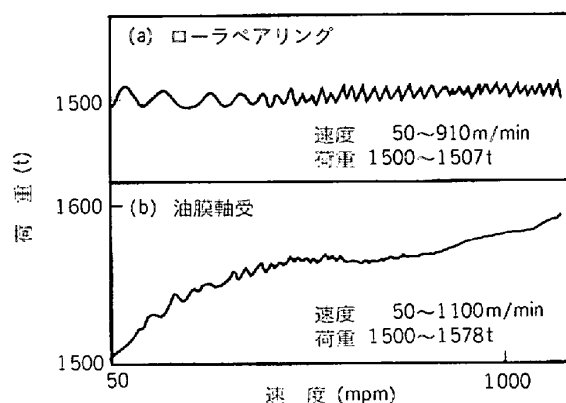


図 14 圧延速度による油膜厚変化<sup>1)</sup>

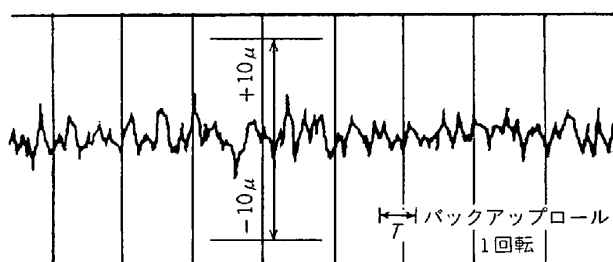
成分のみをフィルターにて除去することにより、AGC 効果を増大させる方法も提案されている。この方法は電動圧下圧延機においても有効である<sup>14)</sup>。

#### 4.2.4 ローラーベアリングの採用

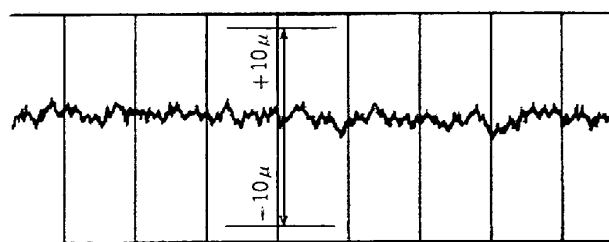
ローラーベアリングの信頼性向上に伴い、昭和 46 年稼動を開始した新日本製鉄君津製鉄所の 6 スタンド圧延機以来、国内の多くの新設タンデム圧延機の前段にはローラーベアリングが用いられている。昭和 47 年に稼動を開始した神戸製鋼加古川製鉄所の 5 スタンド圧延機 (最高速度 1 680 mpm) は全スタンドに採用しており、またレバース圧延機においてもこの傾向は顕著である<sup>10)</sup>。

ローラーベアリング採用の利点は次のようなものであり、板厚精度向上に関しては(1)及び(3)に大きな意義を有する<sup>4)9)</sup>。

(1) 油膜軸受と異なり、圧延速度によるロール軸心の変化は非常に少ない。(図 14 参照)

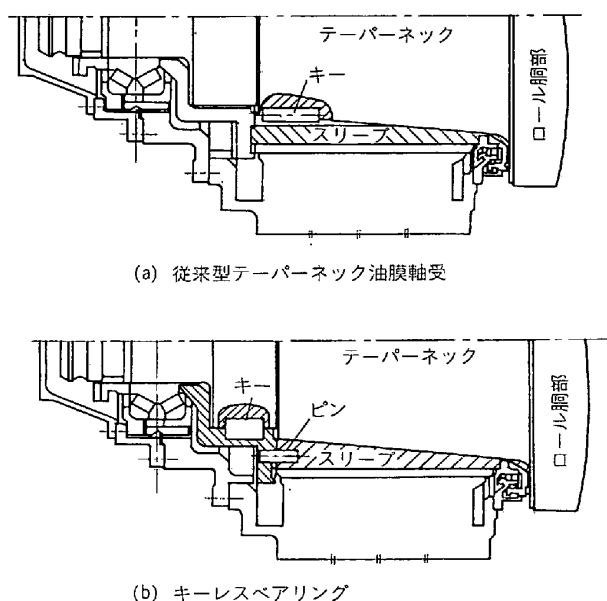


(a) 従来型油膜軸受



(b) キーレスベアリング

図 15 キーレスベアリングによる板厚変動減少効果<sup>15)</sup>

図 16 キーレスベアリング<sup>15)</sup>

(2) 荷重下での起動及び低速での回転も油膜軸受に比べ円滑である。

(3) 内輪を焼ばめしてロールと共研削をすれば、運転中のロール偏心を小さくできる。

(4) 潤滑はオイルミスト潤滑により、油消費量を削減できる。

#### 4.2.5 キーレスベアリング

テーパーネック油膜軸受において発生する急峻なピーク状を有する板厚変動の原因が、ロールのテーパー部に嵌合するスリーブの回り止めキーに起因し、キー部が受圧位置にきた時、キー溝の空隙部のため剛性が低下することによるものであることが、川崎製鉄千葉製鉄所の解析により明らかとなった。これにより受圧位置からキーを除去し、板厚精度を向上させた油膜軸受（キーレスベアリング）が開発され実用化されている<sup>15)</sup>。このキーレスベアリングによる板厚変動減少効果を図 15 に、またその構造を図 16 に示す。

### 4.3 駆動系・制御系の進歩

#### 4.3.1 サイリスターの採用

昭和 42 年以降、国内で稼動したタンデム圧延機はすべて主機駆動にサイリスターレオナードセットを使用している<sup>16)</sup>。主機駆動方式の選定は、設備費、保守性、効率及び応答性などを衡量して行われるものであるが、サイリスターの速応性は、板厚精度向上に関して、特にタンデム圧延機において大きな効果を発揮している。

一方、既存の MG セットを用いた圧延機においても、応答性を高めるため、界磁制御装置を従来の磁気増幅器（マグアンプ）からサイリスターに改造する傾向にある<sup>1)</sup>。

サイリスターの採用に伴い、速度制御方式として、

従来の AVR (Automatic Voltage Regulation) + IR 補償方式に代わつて自動界磁弱め制御を設けた ASR (Automatic Speed Regulation) 方式が一般化している。この方式は通板及び低速時には強め界磁状態にてモーターの最大トルクが利用でき、またタンデム圧延機のスタンド間の揃速性を高めることができる<sup>2)</sup>。特に加減速時の揃速性向上は、マスフロー安定域を拡大し、頭部、尾部のオフゲージを大きく減少させる。

ASR 方式において必ずしも 100%IR 補償せず、0~10% 程度の垂下率を与えることにより、張力変動に対する緩衝効果を得る操業方法が広く用いられているが、垂下率を過度に与えるとオフゲージ増大の要因となるため適正な垂下率設定を行うことが、特にタンデム圧延機において重要である。一方、保守性、効率などの面から交流可変速のサイリスターモータを圧延主機に適用する試みがあり<sup>16)</sup>、冷間圧延機においては未だ実例はないが、今後適用されて行くものと思われる。

#### 4.3.2 頭部及び尾部板厚制御

油膜軸受の圧延速度の変化に伴う油膜厚み変化の影響は特に低速部で大きく、これを除くため油膜補償装置が普及している。この機能は速度に応じた圧下のパターン制御を行うものであり、摩擦係数の速度効果の補償も含めて行う場合もある。

定常圧延中と異なり通板戻抜き時は前後方張力がなく、速度制御系の精度も低く、板厚精度が著しく低下しオフゲージが発生する。この対策のため特別に用いられる方法として次のようなものがある。

(1) 張力の消失、発生の際板厚変動効果を補償するため、通板戻抜き時に圧下操作を行う方法で通常フィードバックループをもち圧下プログラム制御と呼ばれている<sup>17)</sup>。(図 17 参照)

(2) 通板時に 1 号スタンド速度を低下させる方法。一時的に目標板厚を下げ通板中のオフゲージ（板厚増大）の悪影響を緩和させることをねらつたものである。

(3) 可能な限りマスフローを安定化させる考え方によつて垂下率を低下させ、これによつて生じる張力変動の圧下操作による抑制、あるいは圧下による張力制御を行う方法。

(4) 通板戻抜き時に板厚計の検出信号に基づいた圧下修正を行う方法（通板戻抜き自動制御）で、最終スタンド入側にも板厚計を設置して実用されている<sup>17)</sup>。

この他、より体系的に圧下及び、速度を頭部または尾部の移動に伴い逐次制御する頭尾部板厚制御の試み<sup>18)</sup>もあり、低速部も含めてなるべく広範囲での AGC の使用と合わせて今後体系的な制御システムが発達するものと思われる。

圧下プログラム制御の一例として、戻抜きにおいて任意スタンドのメタルオフ（スタンド抜け）時に、次スタンドの圧下操作（ロールギャップ縮小）を行う従来法で

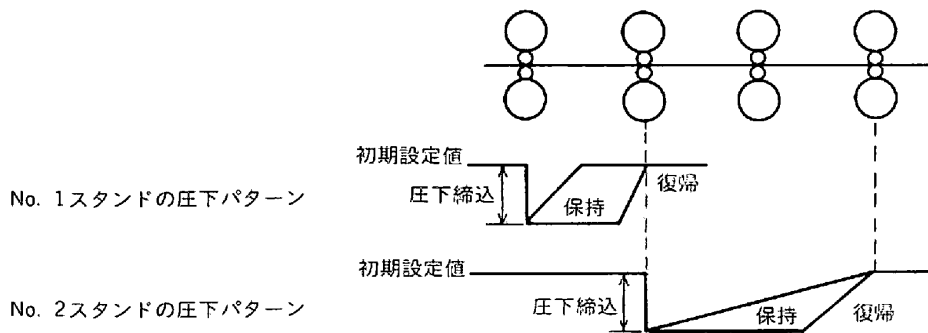
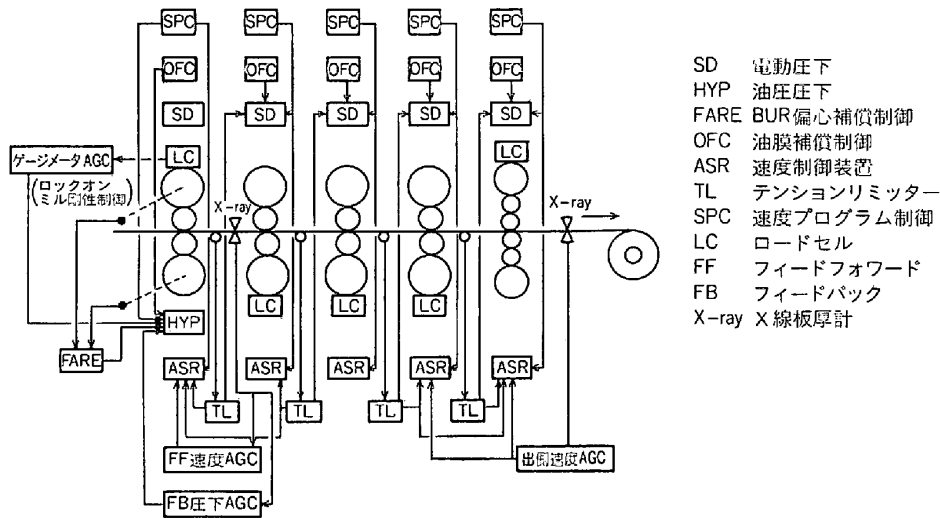


図 17 通板時圧下プログラム制御概念図



- SD 電動圧下
- HYP 油圧圧下
- FARE BUR偏心補償制御
- OFC 油膜補償制御
- ASR 速度制御装置
- TL テンションリミッター
- SPC 速度プログラム制御
- LC ロードセル
- FF フィードフォワード
- FB フィードバック
- X-ray X線板厚計

図 18 板厚制御系構成例<sup>1)</sup>

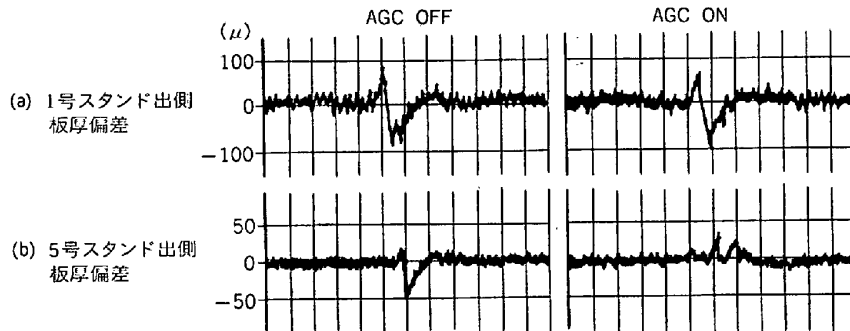


図 19 非対称フィルターを用いた AGC の効果<sup>16)</sup>

なく、メタルオフ前に次スタンドの圧下操作を行つて張力を低下させる方法により、尾部オフゲージ長さを50%減少できるとの報告がなされている<sup>19)</sup>。

マスフローに準拠した制御を有効とするためには、低速部の速度検出精度の確保、マスフローを維持するための適切な先進率補償が重要である。

4.3.3 定常圧延部 AGC

通常の AGC 系は、1号ないし2号スタンド出側及び最終スタンド出側に板厚計を備え、前段スタンドにおける圧下変更系または速度変更系、後段スタンドの速度変更系の2系統で構成されており、このようなモデルは初期の AGC より受け継がれているが、その応答性は大き

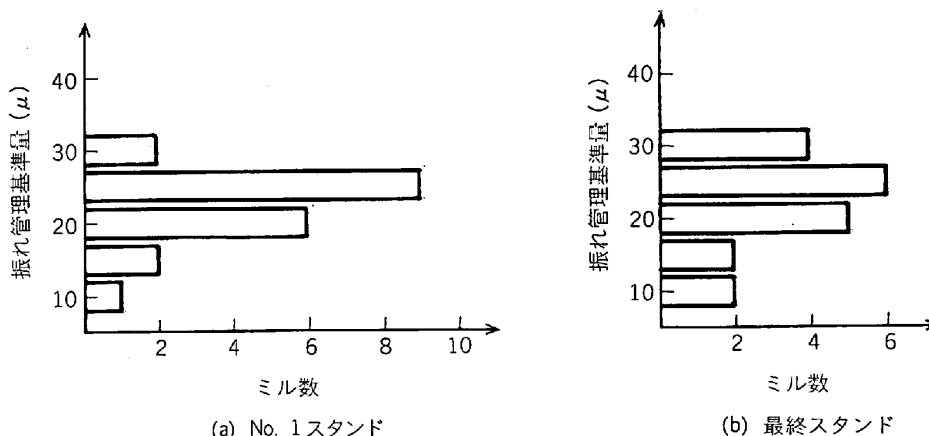
く改善されている。時定数 0.01s の高度の応答性を有する板厚計が採用<sup>1)</sup>されていることも、これに寄与している。

フィードバック圧下 AGC は、板厚計の取り付け位置から生ずるむだ時間があるためサンプリング制御が適用されていたが、油圧圧下による応答性の改善があり連続制御が採用されて制御系の応答および安定性が改善された<sup>2)</sup>。スティフ制御またはゲージメータ AGC の安定的偏差を防止するモニターとして、圧下フィードバックが用いられる場合もある。

前段の板厚制御は油圧圧下圧延機の圧下変更系を主体とするが、電動圧下の場合にはフィードフォワード速度



表 3 バックアップロール偏心管理基準



AGCの比重が大きく、このAGCにより1号スタンドで発生したロール偏心による板厚変動の除去を行う方法もある<sup>20)</sup>。

また最近では前段および後段で別系統の制御を行う方法でなく、各スタンドの板厚予測に基づく総合的なAGCなどの新しい考え方が出現しており(後述)、またTMW材の圧延において特にマイナス側の板厚変動が問題であることに着目して、非対称フィルターを用いたフィードフォワードにより、これを取り除く方法<sup>18)</sup>が実用化されている。図19にその効果を示す。

#### 4.3.4 プロセス計算機制御

最近のタンデム圧延機はプロセス計算機を備えており、圧延機のセットアップを行つている。プロセス計算機の板厚精度、オフゲージに関する機能は次のものがある<sup>7)8)</sup>。

(1) 圧下系セットアップ。この精度は頭部、尾部オフゲージの長さにな大きな影響を与える<sup>17)</sup>。

(2) 圧延機によつてはプロセス計算機により、直接頭部、尾部の板厚制御を行つている例もある<sup>7)</sup>。

(3) AGC その他の制御のゲインの設定などをプロセス計算機で行うことにより、材料条件も加味したきめ細かな制御が実現できる。

(4) 走間板厚変更におけるスケジュール計算及び設定の機能<sup>10)</sup>。

#### 4.3.5 DDC (Direct Digital Control) の採用

近年のデジタル制御の発達に伴い、主機制御機能やAGC機能を直接小型計算機によつて演算制御するDDC方式が普及している<sup>21)</sup>。信頼性の高いプロセスマイナー制御用小型計算機が開発され広範囲の総合的な制御系の構成が容易であること、制御系の変更が容易であることなどから、DDCの板厚制御系の機能向上に対する寄与は大きい。

#### 4.3.6 総合的なAGC

最近のAGCの技術進歩の方向としては張力制御の導入、全スタンドAGC、板厚予測による制御の導入など

表 4 圧延時の振動現象と対策<sup>8)</sup>

|       |       | チャターマーク<br>(軽度の振動)                                 | チャタリング<br>(強度の振動)                           |
|-------|-------|----------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| 現象    | 形態    | 板厚変動は数 $\mu$<br>ピッチは短い(数10mm)                      | 板厚変動は数10 $\mu$<br>ピッチは長い(数10mm~200mm)       |
|       | 発生の特徴 | 厚手材(0.5mm以上)                                       | 薄手材(0.3mm以下)および硬質材。高圧下圧延時に多発                |
|       | 弊害    | 製品外観不良                                             | 製品板厚均一性不良<br>板破断による圧延作業中断                   |
| メカニズム | 振動系   | 各種 { ぎず入バックアップロールの固有振動<br>駆動系のねじり振動<br>ワークロールの振動など | 主として、上下ワークロールおよびバックアップロールの4自由度振動系における第2次モード |
|       | 起振力   | バックアップロールきず入り<br>ロール研磨ビビリ跡<br>駆動系のバランス不良など         | ロールバイトの潤滑状態の変動など                            |
| 対策    | 応急策   | 原因と思われる部品(ロール、スピンドル)の交換<br>各部クリヤランスの規制など           | 減速圧延など                                      |
|       | 根本策   | オンライン振動解析によるモニタリングなど                               | 圧延油の改善(潤滑性能、乳化安定性)など                        |

の総合的なAGCシステムの開発が進められている。これに関しては国外での実施例もあり、特にInland Steelでは、各スタンド間に板厚計を設置し、全スタンドマスフローAGCを実施している<sup>22)</sup>。

国内では住友金属鹿島製鉄所タンデム圧延機(全スタンド油圧圧下)にて、従来の張力リミット制御ではな

表 5 国 内 冷 間 圧 延 機 の

| 会 社                        | 工 場          | 基 名             | 型 式    | 稼 動 開 始 年 月                | 最 高 圧 延 速 度 (mpm)       | 処 理 材    |           | 駆 動 電 源 供 給 方 式 |                   |                          |
|----------------------------|--------------|-----------------|--------|----------------------------|-------------------------|----------|-----------|-----------------|-------------------|--------------------------|
|                            |              |                 |        |                            |                         | 板 厚 (mm) | 板 幅 (mm)  |                 |                   |                          |
| タ<br>ン<br>デ<br>ム<br>ミ<br>ル | 川崎製鉄         | 千葉              | 4 T    | 4重4スタンド                    | S47.9                   | 1 220    | 0.3 ~3.2  | 600~1 677       | SCR               |                          |
|                            |              |                 | 5 T    | 4重(1~4号)5スタンド              | 33.5                    | 1 372    | 0.23~3.2  | 508~1 270       | MG                |                          |
|                            |              |                 | 6 T    | 4重6スタンド                    | 38.5                    | 2 282    | 0.1 ~1.0  | 508~1 295       | MG                |                          |
|                            | 神戸製鋼<br>日本鋼管 | 水島<br>加古川<br>福山 | No. 1  | 4重5スタンド                    | 同上                      | 44.10    | 1 500     | 0.15~3.2        | 600~1 600         | SCR                      |
|                            |              |                 |        | 同上                         | 同上                      | 47.4     | 1 680     | 0.15~3.2        | 600~1 600         | SCR                      |
|                            |              |                 |        | 同上                         | 同上                      | 41.6     | 1 676     | 0.3 ~3.4        | 762~1 880         | MG                       |
|                            |              |                 |        | 同上                         | 同上                      | 46.6     | 1 870     | 0.15~1.6        | 610~1 270         | SCR                      |
|                            |              |                 |        | 同上                         | 同上                      | 36.4     | 1 830     | 0.15~1.6        | 508~1 305         | MG                       |
|                            | 日新製鋼         | 堺               | 5 タンデム | 同上                         | 38.5                    | 1 678    | 0.2 ~2.3  | 630~1 300       | 1~4号 5号<br>MG SCR |                          |
|                            |              |                 | 2 タンデム | 4重2スタンド                    | 43.6                    | 750      | 0.6 ~2.3  | 600~1 300       | SCR               |                          |
|                            | 新日本製鉄        | 八幡              | No. 1  | 4重4スタンド                    | 15.9                    | 910      | 0.5 ~2.5  | 508~1 245       | MG                |                          |
|                            |              |                 | No. 2  | 4重5スタンド                    | 29.9                    | 1 300    | 0.15~1.2  | 500~ 950        | MG                |                          |
|                            |              |                 | No. 4  | 6重(1, 2号)6スタンド<br>4重(3~6号) | 37.5                    | 2 170    | 0.1 ~1.0  | 508~1 280       | MG                |                          |
|                            | 住友金属<br>東洋鋼板 | 広畑<br>名古屋       | TCM    | 4重5スタンド                    | 同上                      | 29.1     | 1 567     | 0.15~1.6        | 630~1 270         | 1, 2, 4, 5号 3号<br>MG SCR |
|                            |              |                 |        | No. 1                      | 4重(1~4号)5スタンド<br>6重(5号) | 36.10    | 1 430     | 0.18~3.2        | 600~1 270         | MG                       |
|                            |              |                 |        | No. 2                      | 4重5スタンド                 | 42.11    | 1 500     | 0.5 ~3.2        | 700~1 600         | SCR                      |
|                            |              | 君津              | No. 2  | 6重(1, 6号)6スタンド<br>4重(2~5号) | 同上                      | 46.1     | 2 300     | 0.15~1.0        | 508~1 070         | SCR                      |
|                            |              |                 |        | 4重5スタンド                    | 同上                      | 43.5     | 1 800     | 0.25~3.2        | 500~2 080         | SCR                      |
|                            |              |                 |        | 4重(1~5号)6スタンド<br>6重(6号)    | 同上                      | 46.3     | 2 300     | 0.18~1.6        | 500~1 280         | SCR                      |
|                            |              |                 |        | 4重5スタンド                    | 同上                      | 46.11    | 1 812     | 0.25~3.2        | 600~1 625         | SCR                      |
| 鹿島<br>和歌山                  | No. 1        | 同上              | 同上     | 38.4                       | 1 790                   | 0.15~2.3 | 610~1 270 | MG              |                   |                          |
|                            |              | No. 2           | 同上     | 34.4                       | 1 440                   | 0.15~2.3 | 475~1 219 | MG              |                   |                          |
| 下松                         | No. 2        | 同上              | 同上     | 51.3                       | 2 130                   | 0.15~2.3 | 508~1 270 | SCR             |                   |                          |
|                            |              | 同上              | 同上     |                            |                         |          |           |                 |                   |                          |
| レ<br>パ<br>ー<br>ス<br>ミ<br>ル | 大同鋼板         | 尼崎              | No. 1  | 4重                         | S31.9                   | 1 000    | 0.19~1.6  | 635~1 265       | SCR               |                          |
|                            |              |                 | No. 2  | 同上                         | 34.10                   | 670      | 0.15~1.6  | 508~ 980        | MG                |                          |
|                            | イゲタ鋼板        | 堺               | No. 3  | 同上                         | コンピネーション                | 41.4     | 885       | 0.12~1.2        | 610~1 050         | MG                       |
|                            |              |                 |        | 同上                         | 同上                      | 40.11    | 580       | 0.4 ~3.2        | 800~1 880         | MG                       |
|                            |              |                 |        | 同上                         | 同上                      | 35.3     | 800       | 0.11~0.6        | 610~1 040         | SCR                      |
|                            | 川崎製鉄         | 千葉              | No. 3  | 同上                         | 同上                      | 29.8     | 460       | 0.15~1.6        | 620~ 970          | MG                       |
|                            |              |                 |        | 同上                         | 同上                      | 29.8     | 460       | 0.15~1.6        | 620~ 970          | MG                       |
|                            | 中山鋼業         | 見阪              | RCM    | 同上                         | 同上                      | 34.3     | 500       | 0.5 ~3.2        | 650~1 880         | MG                       |
|                            |              |                 |        | 同上                         | 同上                      | 33.11    | 410       | 0.5 ~3.1        | 630~1 880         | MG                       |
|                            | 日新製鋼         | 大室              | No. 1  | 同上                         | 同上                      | 40.12    | 900       | 0.05~3.2        | 560~1 270         | MG                       |
|                            |              |                 |        | 同上                         | 同上                      | 42.3     | 762       | 0.4 ~3.2        | 610~1 880         | MG                       |
|                            | 新日本製鉄        | 八幡              | No. 1  | 同上                         | 同上                      | 39.7     | 780       | 0.16~1.6        | 645~1 050         | MG                       |
|                            |              |                 |        | 同上                         | 同上                      | 51.8     | 1 200     | 0.15~2.3        | 610~1 320         | SCR                      |
|                            | 住友金属<br>大洋製鋼 | 和歌山<br>船橋       | No. 2  | 6重                         | 同上                      | 29.5     | 1 000     | 0.11~2.0        | 620~1 260         | SCR                      |
|                            |              |                 |        | 4重                         | 同上                      | 29.5     | 1 000     | 0.11~2.0        | 620~1 260         | SCR                      |
| 同上                         |              |                 |        | 同上                         | 35.4                    | 1 000    | 0.14~3.2  | 700~1 260       | MG                |                          |
| 淀川製鋼                       | 呉            | No. 2           | 同上     | 同上                         | 47.5                    | 1 100    | 0.13~2.3  | 610~1 270       | SCR               |                          |
|                            |              |                 | 同上     | 同上                         |                         |          |           |                 |                   |                          |

く、張力一定制御が採用された<sup>23)</sup>。この圧延機は板厚制御を圧下変更により行い、張力制御を速度変更により行う、従来にならな体系的な AGC 方式を導入した。

また新日本製鉄広畑製鉄所では、マスフロー則により各スタンドの出側板厚を予測する全スタンド AGC 方式

の実用化を行つた<sup>24)</sup>。この AGC の考え方は、予測した出側板厚に基づいて各スタンドの後方張力を変更するものである。更にこれらの考え方を総合して川崎製鉄、日立製作所では、予測板厚に基づいて各スタンド出側の板厚偏差の 2 乗和の時間的な積分が最小になるよう制御す

板厚制御機器装備状況

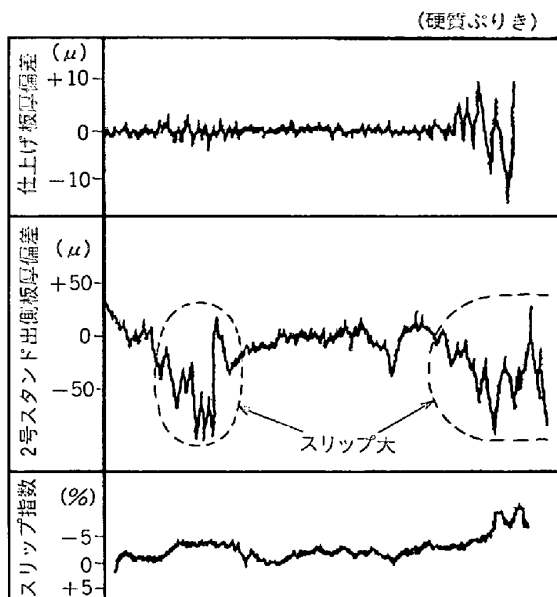
| 系                  | 圧下系    |        | 板厚制御系 ○全スタンドに有り, 一無し |           |         |           |         |          |      |      | バックアップロール軸受方式       |
|--------------------|--------|--------|----------------------|-----------|---------|-----------|---------|----------|------|------|---------------------|
|                    | 圧下方式   | ミル剛変性  | 張力 AGC               |           | 圧下 AGC  |           | 頭部・尾部制御 | 油膜補償     | 偏心補償 |      |                     |
|                    |        |        | フィードバック              | フィードフォワード | フィードバック | フィードフォワード |         |          |      |      |                     |
| SCR                | 1号油圧   | 2~4号電動 | 1号                   | 3,4号      | 1号      | 1号        | —       | ○        | 3,4号 | —    | 1,2号 3,4号<br>ローラー油膜 |
| ポートトロール            | 電動     | —      | —                    | 5号        | —       | 1号        | —       | —        | 1号   | —    | 油膜                  |
| SCR                | 1号油圧   | 2~6号電動 | 1号                   | 5,6号      | 1号      | 1号        | —       | 1号       | 1号   | —    | 油膜                  |
| SCR                | 油圧     | 1号     | 1号                   | 1~4号      | 1~3号    | 1~4号      | 1号      | 1~4号     | 1~4号 | —    | 油膜                  |
| SCR                | 油圧     | 全スタンド  | —                    | 5号        | —       | 1~2号      | —       | —        | —    | 1,2号 | ローラー油膜              |
| SCR                | 電動     | —      | —                    | 4,5号      | 1号      | 1号        | —       | ○        | ○    | —    | 油膜                  |
| SCR                | 電動/油圧  | 1,5号   | —                    | 4,5号      | —       | 1号        | —       | (走間板厚変更) | ○    | 1号   | 油膜                  |
| マグアンプ              | 1,5号油圧 | 2~4号電動 | 1,5号                 | 1,5号      | —       | 1号        | —       | —        | 1,5号 | —    | 油膜                  |
| 1,4号 5号<br>ポートトロール | 1号油圧   | 2~5号電動 | 1号                   | ○         | —       | ○         | 1号      | ○        | ○    | 1号   | 油膜                  |
| SCR                | 油圧     | —      | —                    | —         | —       | —         | —       | —        | —    | —    | 油膜                  |
| SCR                | 電動     | —      | —                    | 1,3,4号    | 1号      | 1号        | 1号      | 1,2号     | —    | —    | 油膜                  |
| ポートトロール            | 電動     | —      | —                    | 5号        | 1号      | —         | —       | —        | 1,2号 | —    | 油膜                  |
| SCR                | 電動     | —      | —                    | 5,6号      | 1,2号    | 1,2号      | —       | ○        | ○    | —    | 油膜                  |
| SCR                | 1号油圧   | 2~5号電動 | 1号                   | 5号        | 1~4号    | 1号        | —       | ○        | ○    | —    | 油膜                  |
| SCR                | 1号油圧   | 2~5号電動 | 1号                   | 4,5号      | 1号      | 1号        | —       | ○        | ○    | 1号   | 油膜                  |
| SCR                | 1号油圧   | 2~5号電動 | 1号                   | 4,5号      | 1号      | 1号        | —       | ○        | 1号   | 1号   | 油膜                  |
| SCR                | 油圧     | 全スタンド  | —                    | 5,6号      | —       | —         | —       | ○        | ○    | 1号   | 油膜                  |
| SCR                | 電動/油圧  | —      | —                    | 5号        | 1号      | 1号        | —       | 1~4号     | —    | —    | 油膜                  |
| SCR                | 油圧     | —      | —                    | ○         | 1号      | 1号        | 1号      | ○        | —    | —    | 1,2号 3~6号<br>ローラー油膜 |
| SCR                | 油圧     | 全スタンド  | —                    | 1,4,5号    | —       | 1~4号      | —       | 2~5号     | ○    | —    | 油膜                  |
| SCR                | 電動     | —      | —                    | 4,5号      | 1号      | 1号        | —       | 1~4号     | ○    | 1号   | 油膜                  |
| マグアンプ              | 電動     | —      | —                    | 5号        | —       | 1号        | —       | —        | —    | —    | 油膜                  |
| SCR                | 油圧     | 全スタンド  | —                    | 4,5号      | —       | 1号        | 1号      | —        | 4,5号 | —    | 1~3号 4,5号<br>ローラー油膜 |
| SCR                | 電動     | —      | ○                    | —         | —       | —         | —       | —        | —    | —    | 油膜                  |
| マグアンプ              | 電動     | —      | —                    | ○         | —       | —         | —       | —        | —    | —    | 油膜                  |
| SCR                | 電動     | —      | —                    | ○         | —       | —         | —       | —        | —    | —    | ローラー油膜              |
| マグアンプ              | 油圧     | —      | —                    | —         | —       | —         | —       | —        | ○    | —    | 油膜                  |
| SCR                | 電動     | —      | —                    | —         | —       | —         | —       | —        | ○    | —    | 油膜                  |
| ポートトロール            | 電動     | —      | —                    | —         | —       | —         | —       | —        | —    | —    | ローラー油膜              |
| SCR                | 電動     | —      | —                    | —         | —       | —         | —       | —        | —    | —    | 油膜                  |
| マグアンプ              | 電動/油圧  | —      | —                    | —         | —       | —         | —       | —        | —    | —    | 油膜                  |
| SCR                | 油圧     | —      | —                    | —         | —       | —         | —       | —        | —    | —    | 油膜                  |
| SCR                | 電動     | —      | —                    | —         | —       | —         | —       | —        | —    | —    | 油膜                  |
| マグアンプ              | 油圧     | —      | —                    | —         | —       | —         | —       | —        | —    | —    | 油膜                  |
| SCR                | 油圧     | 有      | —                    | —         | —       | —         | —       | ○        | ○    | —    | ローラー油膜              |
| SCR                | 電動     | —      | —                    | —         | —       | —         | —       | —        | —    | —    | 油膜                  |
| マグアンプ              | 油圧     | —      | —                    | —         | —       | —         | —       | —        | —    | —    | 油膜                  |
| SCR                | 油圧     | 有      | —                    | —         | —       | —         | —       | —        | ○    | —    | ローラー油膜              |

る AGC システムの開発を行っており、この考え方により圧下変更と速度変更による制御を併設した AGC が低速部の板厚制御に効果があることを報告している<sup>25)</sup>。このような板厚予測の考え方が今後の AGC の主流になると思われる。

4.4 操業面での技術

4.4.1 バックアップロール偏心の防止

バックアップロールにはソリッド式ロールとスリーブ式がある。スリーブ式は芯部（アーバー）とスリーブにそれぞれ適した材質を選ぶことができ、またアーバーは



$$\text{スリップ指数 } f(\%) = (f_1 - f_6) \times 100 = \left( \frac{h_6 v_6}{h_1 v_1} - 1 \right) \times 100$$

$f_1, h_1, v_1$ :  $i$  号スタンド先進率, 出板厚, ロール周速  
 図 20 スリップ現象<sup>27)</sup>

繰返し使用できるなど経済性に優れるため広く採用されている。しかしスリーブ式は焼ばめ部の影響で偏心が大きいため、振れの小さいソリッド式を用いて操業する圧延機が最近多くなっている<sup>1)8)</sup>。

操業上の重要な項目として偏心による振れの管理が各圧延機にて実施されている。表 3 はその基準を示したものであるが、一般に  $30 \mu$  以内として管理されている。

#### 4.4.2 圧延振動の防止

圧延中の振動現象は製品の表面外観をそこなう程度の板厚変動を生じる振動・板厚の大幅な変動を生じ、時には板破断に至る強度の振動がある。従来この振動現象発生原因の解明は必ずしも十分ではなかつたが、圧延機を振動系として把えた理論的解析と実測データとの対応が進められてきている<sup>9)</sup>。

特に薄手材圧延における強度の振動に関しては圧延油性能の影響が大きく、潤滑性の変動が振動源である<sup>26)</sup>とする報告も行われておりこの面での改善、管理が重要である。

一方、特に圧減量が大である圧延または硬質材の圧延の場合に潤滑性過多、ワークロール粗度の低下に伴って板厚精度の低下現象が発生することがある<sup>12)27)</sup>。この現象はワークロールと圧延材料間の摩擦力が不十分であるために、先進率が異常に小さくなることから発生するものである。これに対しては圧延油の油性低下、ワークロール粗度増加および摩耗組み替え周期の短縮などの対策がとられる。またスタンド間の先進率差の監視が発生予測方法として有効である<sup>27)</sup>。

#### 4.5 エッジドロップ改善技術

エッジドロップはロールのたわみ変形・圧延材料の端

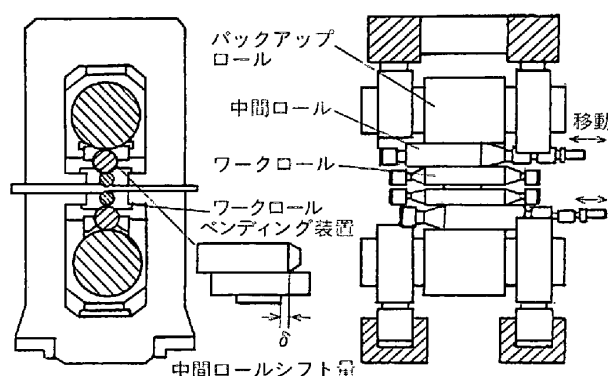


図 21 6 重式圧延機

部での 3 次元の変形、ロール表面偏平の開放効果などが相加して生じるものであり、その減少にはワークロール小径化、圧延荷重低下、ロールベンダーなどの操作手段による板端部圧力低下などが効果がある。しかしこれらの方法はいずれもエッジドロップ制御の目的のみで簡単に採用しうるものでなく、目立つた改善は見られなかつたが、近年優れた形状制御能を有する圧延機が開発され、そのエッジドロップ防止効果が報告されるなどの進展を見ている。

日立製作所で開発され、実機レバース圧延機として新日本製鉄八幡製鉄所に昭和 49 年建設された、6 重圧延機は形状制御性に優れ、その後タンデム圧延機にも採用されている<sup>28)</sup>。

この圧延機において中間ロールの位置を適切に選ぶことにより、エッジドロップを改善することができ<sup>28)~30)</sup>、また一般に 4 重圧延機に比べ小径のワークロールを用いるのでこの効果も期待できる。これらによる板端 15 mm 点相対クラウン改善量は一例では 1% 程度である<sup>1)</sup>。

一方、住友金属工業にて開発、実用化された VC (Variable Crown) ロールはスリーブとアーバー間に油圧を加え、この油圧圧力の変更により圧延中ロールクラウンを変化させることにより大きな形状制御性を有するが、この性能の活用によりエッジドロップを減少できるという解析結果の報告がある<sup>31)</sup>。

また最近検討が進められている異周速圧延法が圧延荷重減少と、剪断力によるメタルフロー特性によりエッジドロップを改善するとの報告<sup>32)</sup>がなされており、今後の実用化が期待される。

## 5. 結 言

以上冷間圧延におけるオフゲージと板厚精度の問題、特に、板厚精度要求レベル、オフゲージ防止技術、板厚精度向上技術の展開と現況、更に今後の展望などについて紹介した。これらの技術は操業関係者、設備関係者、研究関係者などの協力によって開発され、実用化したものである。紙数の関係もあり論旨の至らぬ点もあるが、御了承をお願いしたい。

## 文 献

- 1) 日本鉄鋼協会共同研究会：鋼板部会コールドストリップ分科会幹事会 (1981.2) (私信)
- 2) 久能一郎：鉄と鋼，59 (1973) 13, p. 1764
- 3) 鈴木 弘：鉄と鋼，61 (1975) 7, p. 1078
- 4) 梶原利幸，藤野伸弘：鉄と鋼，59 (1973) 13, p. 1863
- 5) 横手義胤：塑性と加工，14 (1973) 154, p. 920
- 6) 福田宣雄：塑性と加工，14 (1973) 154, p. 934
- 7) 日本鉄鋼協会編：鉄鋼便覧，(1980) [丸善]
- 8) 日本鉄鋼協会：特別報告書 No. 26 わが国における最近のコールドストリップ設備および製造技術の進歩 (1977)，[日本鉄鋼協会]
- 9) 鈴木昭男：第 57・58 回西山記念技術講座 (1979)，p. 97
- 10) T. OKAMOTO, Y. KAWASOKO, S. FUJII, and T. ARIMURA: Iron Steel Eng. Year Book (1972), p. 79
- 11) 待留 誠，直井孝之，藤原高矩，吉田昭茂，吉田博，諸岡泰男：塑性加工連合講演会講演論文集，29 (1978) 130
- 12) 神馬照正，岩藤秀一：塑性加工学会第 1 回中国九州地方懇談会資料，(1980)，p. 1
- 13) 日本鉄鋼協会共同研究会：第 29 回鋼板部会コールドストリップ分科会 (1979.6) (株)神戸製鋼所 (私信)
- 14) 今井 功，鈴木孝治：石川島播磨技報，13 (1973) 2, p. 189
- 15) 柳島章也，菅沼七三雄，碓石孝一，近藤桓次，手柴東光：川崎製鉄技報，8 (1976) 4, p. 449
- 16) 森野信幸，神山健三，高橋潤一，奥山俊昭：日立評論，61 (1979) 9, p. 37
- 17) 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
- 18) 日本鉄鋼協会共同研究会：鋼板部会コールドストリップ分科会幹事会 (1981.2) 日本鋼管(株) (私信)
- 19) 日本鉄鋼協会共同研究会：第 30 回鋼板部会コールドストリップ分科会 (1979.12) 新日本製鉄(株) (私信)
- 20) 近藤勝也，美坂佳助，森田憲二，田島 滋：塑性加工連合講演会講演論文集，30 (1979) 124
- 21) 山下弘雄，山本 修，川崎宗男：三菱電機技報，48 (1974) 2, p. 163
- 22) G. G. LAPHAM: Iron Steel Eng. Year Book (1972), p. 577
- 23) 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
- 24) 日本鉄鋼協会共同研究会：第 57 回計測部会 (1974.7) 新日本製鉄(株) (私信)
- 25) 江藤孝治，藤原高矩，小松富夫，佃一二三，待留誠：塑性加工学会第 1 回中国九州地方懇談会資料，(1980)，p. 24
- 26) 古川九州男，鎌田征雄，清野芳一，滝本高史，中野嘉夫，中川吉左衛門，福永一朗：川崎製鉄技報，8 (1976) 1, p. 60
- 27) 今井一郎，井上直温，蔵田喜輝：塑性加工学会第 1 回中国九州地方懇談会資料，(1980)，p. 12
- 28) 梶原利幸，奏和 宜，西 英俊，芳村泰嗣：日立評論，61 (1979) 9, p. 13
- 29) 中島浩衛，梶原利幸，北島聰幸，志田 茂，平尾隆，芳村泰嗣，池田忠弘：塑性加工連合講演会講演論文集，26 (1975) 116
- 30) 日本鉄鋼協会共同研究会：第 29 回鋼板部会コールドストリップ分科会 (1979.6) 大洋製鋼(株) (私信)
- 31) 益居 健，広岡栄司，滝川敏二：塑性加工春季講演会講演論文集，(1981) 113
- 32) 塩崎宏行，太宰啓至，今井 功，岩波紀夫，木崎皖司，宮坂清人：石川島播磨技報，20 (1980) 2, p. 87