

高精度・高性能冷延鋼板圧延技術の開発

重松 健二郎*・金子 亨*²・松重 武彦*²・西村 文生*²・富澤 淳*
江藤 学*³・大井 俊哉*⁴・鷺北 芳郎*⁴

Development of Cold Rolling Technology for High Thickness Accuracy and Excellent Tensile Property Sheet

Kenjiro SHIGEMATSU, Toru KANEKO, Takehiko MATSUSHIGE, Fumio NISHIMURA, Atsushi TOMIZAWA,
Manabu ETO, Toshiya OOI and Yoshiro WASHIKITA

Synopsis : In order to meet customer's growing demand for thickness accuracy of cold rolled strip, it becomes more important to minimize the thickness deviation in the transverse direction as well as in the longitudinal direction. Through our research work, it was revealed that strip edge profile can be controlled by changing a roll crown and the control range is large when a reduction in thickness is large. A Pair Cross (PC) mill has been introduced in stands 1-3 of the new 5-stand tandem cold strip mill at Kashima Steel Works of Sumitomo Metal Industries, Ltd. Using the PC rolling technology and a newly developed automatic gage control (AGC) system, a production system for a high thickness-uniformity sheet has been developed.

Excellent tensile property sheet is also required recently by automobile companies. By rolling ultra-low carbon steel with high reduction excellent tensile property has been obtained.

Key words : rolling; cold rolled product; tandem mill; pair cross mill; thickness accuracy; edge-drop; high reduction; tensile property; automation.

1. 緒言

近年、冷延鋼板に対する需要家のニーズは工業製品の信頼性や高品質という観点からますます厳格化、多様化して来た。特に、鋼板加工メーカーの生産ラインでは製造プロセスの自動化が進み、ライントラブル防止、生産性向上および組立積層製品の寸法精度向上の目的から、素材となる冷延鋼板には全長・全幅にわたる高板厚精度が要求されている。

また自動車メーカーからは、軽量化のための高強度材とともに、ボディ外板など複雑な形状の部品の一体成形を目的に成形性の良い素材の供給が求められている。成形性、特に深絞り性が良好な冷延鋼板として、CをNbやTiで固定した極低炭素鋼が開発されているが、さらに深絞り性を向上させるため、高圧下の冷間圧延が望まれている¹⁾。一方で自動車の大型化に伴う広幅材の需要も多く、広範な製品サイズと圧下条件に対応できる圧延技術が強く求められている。

以上の要求を満たすべく、住友金属工業(株)鹿島製鉄所の第2冷間圧延設備を建設し、新たな冷延鋼板圧延技術を開発した。

2. エッジドロップ制御技術の開発

2・1 エッジドロップ制御手段

冷間圧延では板幅端部でのワークロールの偏平変形の回復と圧延材の幅方向流れによってエッジドロップが生じ、幅方向板厚精度の悪化要因となっている。エッジドロップ低減手段として、近年、小径ワークロールを使用する方法^{2,3)}、バレルの片端にテーパ部を有するワークロールを板幅に合わせてシフトさせる方法⁴⁻⁸⁾が提案され、実用化されている。これらの特殊圧延法とは別に、冷間タンデム圧延機の前段で2次曲線状ロールクラウンの制御を行えばエッジドロップが軽減されることが報告されている⁹⁾。

2・2 エッジドロップ制御の特性解析

圧延方向と板幅方向の応力の釣合を厳密に考慮した3次元スラブ法解析モデル¹⁰⁾を用いてエッジドロップ制御の特性を検討した¹¹⁾。解析において、ロールの弾性変形のうち軸心たわみはロールクラウンで補償されるものとし、偏平変形のみを考慮した。計算条件をTable 1に示す。なお入側母材の断面プロフィールは矩形としている。

板クラウン C_5 (板幅中央の板厚-板端5mm位置の板厚)

平成8年5月17日受付 平成8年11月12日受理 (Received on May 17, 1996; Accepted on Nov. 12, 1996)

* 住友金属工業(株)和歌山製鉄所 (Wakayama Steel Works, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

* 2 住友金属工業(株)鹿島製鉄所 (Kashima Steel Works, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

* 3 住友金属工業(株)総合技術研究所 (Corporate Research and Development Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 3 Hikari Kashima 314)

* 4 住友金属工業(株)システムエンジニアリング事業部 (System Engineering Division, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

Table 1. Calculating conditions (1).

Roll diameter : 300~600mm	Material : SPCC
Strip thickness: 1.0~6.0mm	Reduction : 30%
Strip Width : 1000mm	Back tension : 20MPa
Friction coefficient : 0.05	Front Tension : 98MPa

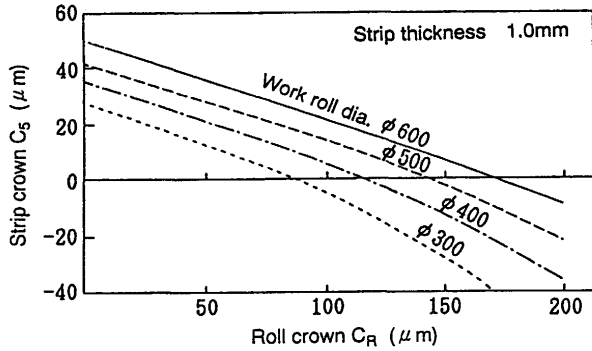


Fig. 1. Effect of roll crown control on strip crown.

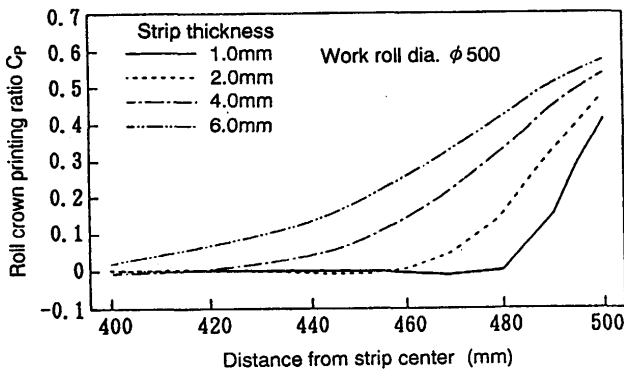


Fig. 2. Distribution of roll crown printing ratio.

とロールクラウン C_R (ロール中央部の直径-端部の直径)との関係を上記モデルで計算した結果をFig. 1に示す。ロール径が小さいほど形成される板クラウンは小さく、ロールクラウンを増加させるとロール径によらずほぼ一定の割合で板クラウンが減少する。板幅方向各点でのロールクラウン変化に対する板クラウンの変化の比をロールクラウン転写率 C_p と定義し、その幅方向分布を入側板厚を変えて求めた結果をFig. 2に示す。クラウン転写は、板厚が厚いほど大きくかつ広範囲に生じるが、板厚を6mmとしてもクラウン転写の範囲はほぼ板幅端部の100mmに限られている。平面歪の条件がほぼ成立する板幅中央部では、いわゆる張力フィードバック効果によりロールクラウンがロール表面の偏平変形に相殺されて断面プロファイルは変化せず、転写率はほぼ0となる。一方、材料の幅方向流れが生じる板幅端部では転写率は増大し、ロールクラウンの変化に応じて断面プロファイルも変化する。従ってFig. 1に示した板クラウン C_s の変化量は、板幅端部の断面プロファイル、すなわちエッジドロップの変化量を表している。

ロールクラウンで断面プロファイルを制御する場合、板平

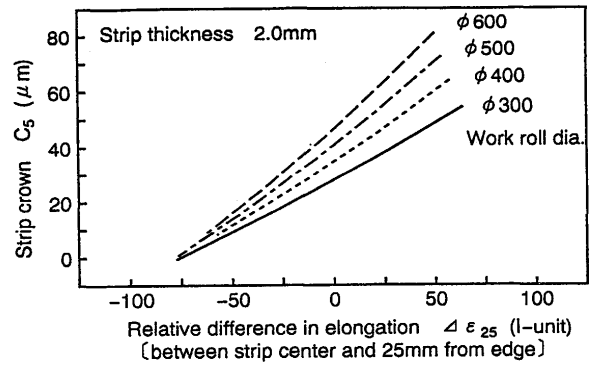


Fig. 3. Relationship between relative difference in elongation and strip crown.

坦度の悪化が懸念される。冷延中間パスを想定した入側板厚2mmの圧延でのロールクラウン変更に伴う平坦度と板クラウンの関係をFig. 3に示す。ロール径500mmの場合、板クラウン C_s を70 μm から0 μm まで低減させても、平坦度は板幅中央を基準とした板端25mm位置の伸び差率 $\Delta\epsilon_{25}$ で50I-unit(10^{-5} の歪みの慣用単位)の端伸びから-75I-unitの中伸びまでしか変化しない。鋼板に大きな張力が加えられるタンデムミルスタンド間では伸び差率 ± 150 I-unit程度の平坦度まで許容されることから、平坦度変化が圧延作業に支障を来さない範囲で実用上十分に大きな板クラウン制御を行うことができる。また同じ平坦度変化の下ではロール径が大きい方が板クラウン可変範囲が広い。小径ロールの方が形成される板クラウンは元々小さいが、大径ロールを用いてもその差はロールクラウン制御により容易に補償しうる。

次に5スタンドタンデム圧延における板クラウン制御可能範囲を母材板厚の影響を含めて上記解析モデルにより検討した。No. 1~4スタンド出側の平坦度がフラットな状態から伸び差率で-100I-unitの中伸びとなるまで各スタンドのロールクラウンを変更し、出側板クラウンの変化を求めた。計算条件をTable 2に、結果をFig. 4に示す。ここでは母材に一定量のクラウンを仮定しており、母材厚3ケースでそれぞれの圧下率を乗じた値を○で図中に示した。 C_{100} , C_{50} , C_{25} , C_{15} は板幅中央と端部から100, 50, 25, 15mm位置との板厚差である。

スタンド間平坦度がフラットの場合は母材厚が厚いほど板クラウンは大きくなるが、平坦度が伸び差率で-100I-unitの中伸びとなるまでロールクラウンを大きくすれば反対に母材厚が厚いほど板クラウンをより小さく、板幅端部の板厚を中央部に対しより厚くすることもでき、断面プロファイルの制御範囲は母材が厚い方が大きい。

平坦度をフラットとする通常の圧延では母材を厚くし各スタンドでの圧下率を大きくとれば、圧延荷重の増大によってロールの偏平変形が大きくなり、幅端部での回復によるロール間隙変化も大きくなるために板クラウンは増大する。これに対し、ロールクラウンを十分に大きくすれば、

Table 2. Calculating conditions (2).

Stand No.	1	2	3	4	5	
Strip thickness (mm)	3.50	2.52	1.84	1.34	1.01	1.00
	4.50	3.04	2.07	1.41	1.01	1.00
	5.50	3.54	2.28	1.48	1.01	1.00
Tension (MPa)	31	91	120	159	197	122
Roll diameter :480mm	Material :SPCC					
Strip width :1220mm	Friction coeff. :0.02~0.06					

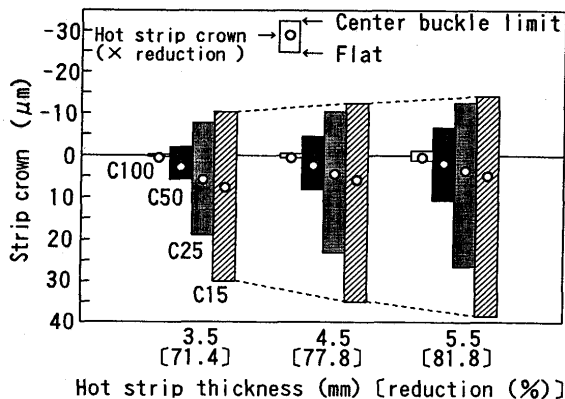


Fig. 4. Strip crown control range in tandem mill.

母材が厚く各スタンド入側板厚が厚い方がFig. 2に示した通りロールクラウン増加による板クラウン低減の効果が大きくなるため、ロール扁平変形増大の影響を補償し、さらには板クラウン値を小さくすることができる。C₁₀₀~C₁₅の変化量の差に見られるように断面プロファイルの変化はほぼ板幅端部近傍のみで生じており、この解析結果もエッジドロップ制御の特性を示すものである。

以上の結果から、タンデムミル前段に大きなクラウン制御能力を持つ圧延機を配し、母材を厚くした高圧下圧延を行うことは、エッジドロップ低減に対し大変有効な手段であると結論できる。

2・3 冷延ペアクロス圧延機の開発

2・3・1 冷延ペアクロス圧延機の必要性

高圧下圧延は製品の深絞り特性の向上および高強度材の製造範囲拡大の点から新圧延設備開発の重要な狙いの一つであった。高圧下圧延のためにはワークロール径を小さくし、圧延荷重を低減させることが有効であるが、ロール径を小さくすればその分ロール間ヘルツ圧力が増大する。同じ圧延荷重に対するヘルツ圧力は、6段圧延機より4段圧延機のほうが小さく、ロール表面疲労抑制のためヘルツ圧力を所定の限界値に制限すれば、4段圧延機の方が6段圧延機より圧下率を大きくとれることになる。

しかしながら従来の4段圧延機は6段圧延機に比べてロールクラウン制御能力が劣り、広範囲の圧延サイズに対応してスタンド間平坦度やエッジドロップを制御することは困難であった。そこで、4段圧延機でありながら強力なロールクラウン制御能力を有するペアクロス圧延機を冷間圧

Table 3. Main specification of new tandem mill.

Mill type	5-stand Fully-Continuous 1-3 stand; Pair Cross Mill 4-5 stand; 6Hi-CVC Mill Work roll; φ480~420×2000
Capacity	100,000 metric tons per month
Strip size	Thickness Ent. 2.0 ~6.0mm Del. 0.35~2.4mm Width 600~1880mm
Coil weight	Max. Ent. 31tons Del. 46.5tons
Rolling speed	Max. 1300m/min

延に適用する技術を開発した。

2・3・2 冷延ペアクロス圧延機の実機化

連続式圧延機においては、寸法および材質が異なる鋼板を連続的に圧延するため、圧延荷重が負荷された状態でクロス角度を迅速に変更する必要がある。水平面で旋回運動するバックアップロールチョックとハウジング側との摩擦抵抗力を最小化するため、大容量平面軸受を新たに開発し走間クロス角変更を可能とした¹²⁾。

また、これまでペアクロスミルが適用されてきた熱間圧延とは変形摩擦、潤滑条件が大きく異なるため、負荷特性を詳細に調査し、ロールと板の幅方向摩擦によるスラスト力は大きくとも圧延荷重の6~7%で設備上問題が無いこと、さらに圧延荷重やトルク等はクロス角の影響を受けず、圧延の基本的制御への特別な配慮は不要であること等を明らかにし、実機化の目処を得た¹²⁾。

以上の結果に基づき、世界初の冷延ペアクロス圧延機を完成し、5スタンドタンデムミル(Table 3)のNo. 1~3スタンドに導入した。

2・4 エッジドロップ制御システム

2・4・1 制御の概要

上記圧延設備におけるエッジドロップ制御は主にNo. 1~3スタンドのクロス角のプリセットで行われる。No. 1~3スタンドの平坦度を許容範囲として、また最終スタンドの板クラウンと平坦度を目標値として設定し、コイル毎の圧延条件に応じて各スタンドの制御アクチュエータの設定値をオンラインで計算し、決定する。

2・4・2 板形状予測モデル

各スタンドでの板断面プロファイルと平坦度を予測するため、分割モデル¹³⁾をオンラインで解く制御モデルを開発した。ロール・材料変形の幅方向分布をオフライン解析結果から作成される線形重回帰式で求める従来の手法に比べ、開発した制御モデルでは、実操業における様々な圧延条件変化の影響をその都度正確に考慮できるようになり、信頼性の高い予測が可能となった。

本モデルによる最終スタンドの板クラウンC₂₅の予測精度、および板幅中央を基準とした板端50mm位置の伸び差率Δε₅₀の予測精度をFig. 5に示す。C₂₅の予測精度はエッジドロップ制御の有無によらず±5μm、またΔε₅₀は±20I-unitであり、板クラウン、平坦度とも実用上十分な予測精度である。

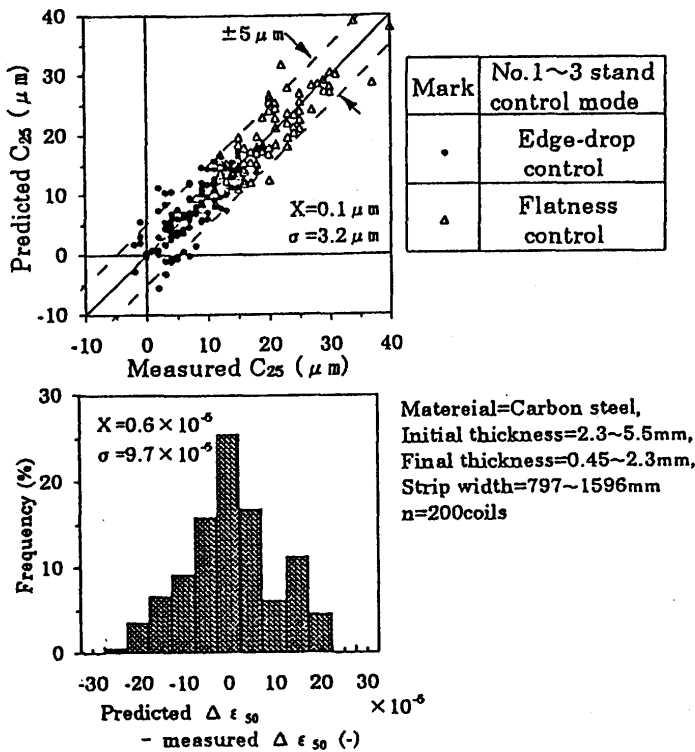


Fig. 5. Accuracy of shape prediction model.

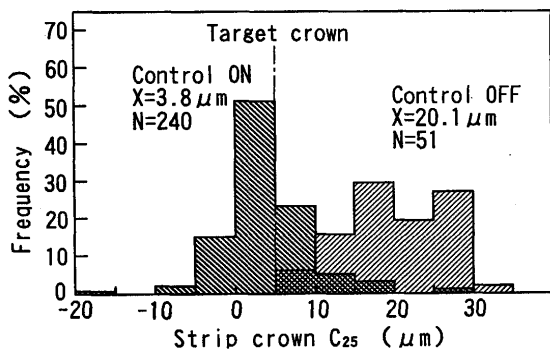


Fig. 6. Accuracy of Edge-drop control.

2.4.3 中間スタンド平坦度制御

従来の平坦度制御は出側平坦度計を用いた最終スタンドのフィードバック制御が中心であったが、エッジドロップ制御を行う場合には中間スタンドでの平坦度制御がこれまで以上に重要となる。そこでクロス角、ワークロールベンダ、圧延荷重の実測値から平坦度をリアルタイムに推定し、これを基にプリセット状態からのずれを主にワークロールベンダ操作によって修正する制御を実用化した。スタンド間平坦度の推定には以下の式を用いている。

$$\Delta \epsilon_{50,i} = \alpha_1^0 + \alpha_1^J \cdot J_i + \alpha_1^\theta \cdot \theta_i^2 + \alpha_1^P \cdot P_i \quad (i=1, 2, 3) \dots (1)$$

ここで θ_i はクロス角実績値、 J_i はワークロールベンダ実績値、 P_i は圧延荷重実測値である。 α_1^0 、 α_1^J 、 α_1^θ 、 α_1^P は圧延開始前に分割モデルで求められる定数であり、サフィック

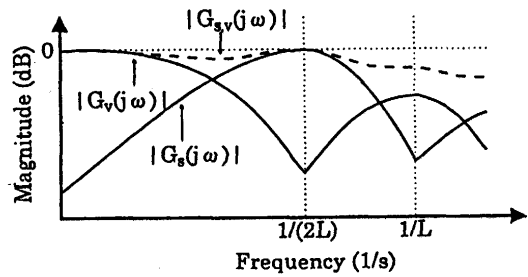


Fig. 7. Gage control characteristics of cold tandem mill.

ス_iはスタンドNo.を表す。これにより、エッジドロップ低減と安定操業の両立が可能となった。

2.5 エッジドロップ制御の適用結果

オンライン計測器の精度上の制約から評価指標を板クラウンC₂₅とし、5μmを目標として制御した場合としない場合の実績値の分布をFig. 6に示す。制御入りでは目標値±5μmに73%が入っており、良好な制御精度を実現している。

3. 板厚制御技術の開発

3.1 ハードウェアの高性能化

高応答油圧圧下装置(25Hz)およびACモータ(60 rad/sec)によりアクチュエータの高応答化を図るとともに、板厚、板速、張力等の計測器を全スタンドに設置して制御情報を充実させた。

3.2 板厚制御システム

3.2.1 冷延タンデムミルの板厚制御特性

従来の板厚制御システムは低応答のアクチュエータを前提として構築されたもので、高周波の板厚変動には対応できず精度向上に限界があった。タンデムミルの板厚制御特性はこれまでアクチュエータのステップ操作に対する板厚の定常変化特性(影響係数¹⁴⁾)として扱われて来たが、高応答のアクチュエータを活用し、より高周波域までを制御するには、正弦波状操作に対する周波数特性¹⁵⁾を検討する必要がある。

圧下位置操作量から出側板厚変化 $\Delta h(s)$ への伝達関数 $G_s(s)$ およびロール速度操作量から $\Delta h(s)$ への伝達関数 $G_v(s)$ の周波数特性を、タンデムミル中間スタンドを対象としてシミュレーションした結果をFig. 7に示す。ただし $G_s(s)$ 、 $G_v(s)$ は正規化している。

材料が制御スタンドの一つ上流のスタンドから制御スタンドまで進むのに要する時間をLとしたとき、圧下位置操作の伝達関数のゲイン $|G_s(j\omega)|$ は $1/(2L)$ の奇数倍の周波数で大きく、偶数倍の周波数と低周波域で小さくなる。反対にロール速度操作の伝達関数のゲイン $|G_v(j\omega)|$ は $1/(2L)$ の奇数倍の周波数で小さく、偶数倍の周波数と低周波域で大きくなる。この傾向は板厚、速度等の圧延条件によらない。

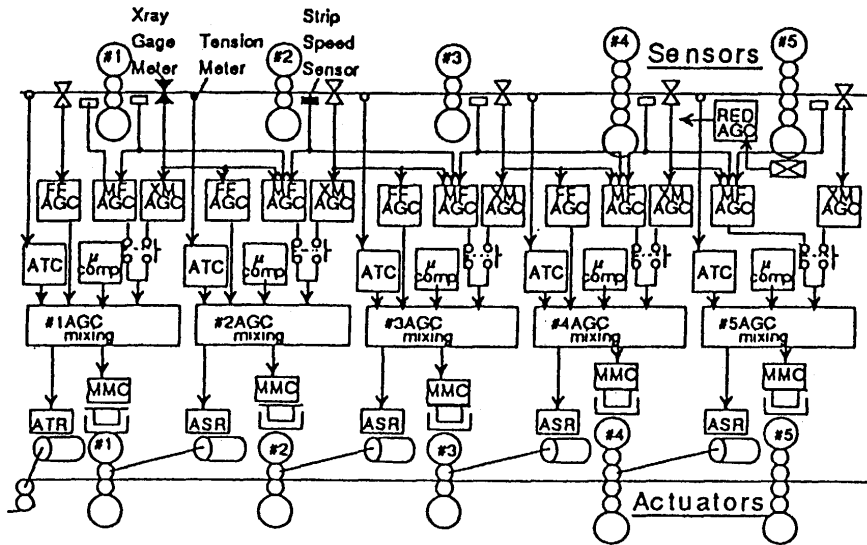


Fig. 8. AGC system of cold tandem mill.

この理由は次のように説明される。圧下位置、ロール速度のどちらの操作を行っても制御スタンド上流側の張力が変化し、これを介して上流スタンドの出側板厚変化 $\Delta H(s)$ が副作用として生じる。圧下位置操作の場合 $\Delta H(s)$ は制御対象である $\Delta h(s)$ と逆位相であるのに対し、ロール速度操作の場合の $\Delta H(s)$ は $\Delta h(s)$ と同位相となる。 $\Delta H(s)$ の $\Delta h(s)$ への影響はスタンド間移動時間 L と変動の周波数の関係によって変化し、 $\Delta h(s)$ を増幅させたり減幅させたりするため、操作量に対する制御結果 $\Delta h(s)$ の比である伝達関数のゲインが周波数に依存することになり、その傾向は圧下位置操作、ロール速度操作で反対となる。

従来の定常特性(周波数0での特性)のみを考慮した制御では、板厚外乱の周波数によらず常にロール速度操作を行っていたが、周波数が $1/(2L)$ に近い場合には制御効果が小さく、板厚変動を除去しきれなかった。この対策としてロール速度操作で生じる上流側張力変化を打ち消すように圧下位置にも板厚制御量を配分し、両者を同時に操作する方法を新たに考案した。この場合の伝達関数 $G_{s,v}(s)$ の周波数特性もFig. 7に示すが、全周波数域で高いゲインを維持できている。

3.2.2 板厚・張力制御系の構成

板厚・張力制御系の構成をFig. 8に示す。各スタンドでモニタリングAGC(XM AGC)、マスフローAGC(MF AGC)、フィードフォワードAGC(FF AGC)、張力一定制御(ATC)、摩擦係数変化補償制御(μ comp)を行っている。主な特徴は以下の通りである。

(1) アクチュエータベクトル制御

板厚制御特性の解析結果より、圧下位置、ロール速度の同時操作(ベクトル制御)をすべてのAGC, ATCの基本とし、板厚・張力の非干渉化を図っている。その最適配分は影響係数法によりコイル毎、スタンド毎にプロセスコンピュータで計算し設定する。例えばNo.iスタンドのMF AGCの操作量の配分は(2)式で与えられる。

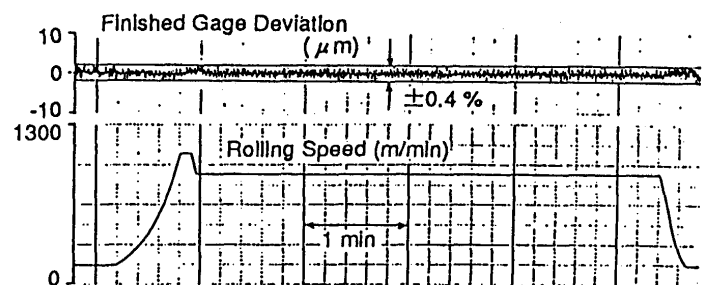


Fig. 9. Example of gage accuracy (0.498t×1064w Low carbon steel).

$$\begin{bmatrix} \Delta S_i \\ \Delta V_{i-1}/V_{i-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_i}{\partial \sigma_{i1}} \sigma_{i1} - \frac{\partial P_i}{\partial h_i} h_i \\ M_i / (1 - k_a) + h_i \\ \frac{\partial f_i}{\partial h_i} h_i - \frac{\partial f_i}{\partial \sigma_{i1}} \sigma_{i1} + 1 \end{bmatrix} \cdot \Delta h_i / h_i \dots \dots \dots (2)$$

ここで ΔS_i は圧下位置操作量、 $\Delta V_{i-1}/V_{i-1}$ はサクセシブ速度操作量、 P_i は圧延荷重、 σ_{i1} は入側張力応力、 h_i は出側板厚目標値、 M_i はミル剛性係数、 k_a は等価ミル剛性制御の係数、 f_i は先進率である。

(2) 最終スタンドAGC

最終スタンドでは、製品の平坦度あるいはダル圧延時の表面粗度の均一性を確保する目的から、圧延荷重も制御の対象とする必要がある。そこで板厚、張力、圧延荷重の3つの対象を圧下位置、ロール速度に新たに圧下率(上流側スタンド出側板厚)(RED AGC)を加えた3つの操作量で制御する3入力3出力の最終スタンド専用AGCを考案した。板厚と張力を応答性の良い圧下位置、ロール速度で非干渉制御し、これによって生じる荷重変動をやや応答性の劣る圧下率変更で補償する方式としている。これによって板厚精度、平坦度、操業安定性の同時確保を実現した。

3.3 板厚制御の適用結果

本制御システムの適用により、長手方向板厚精度は当社

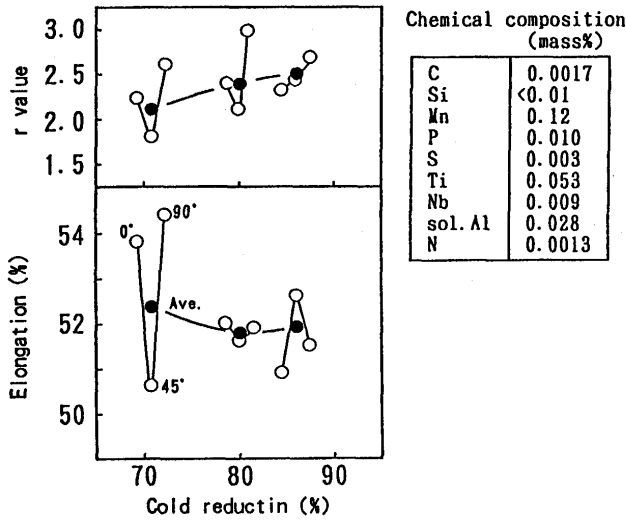


Fig. 10. Effect of cold rolling reduction on tensile properties.

Table 4. Tensile properties with JIS No.5 specimen.

Thickness (mm)	Direction (°)	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	n value	r value
0.65	0	120	290	50.1	0.273	2.25
	45	122	295	48.8	0.267	1.99
	90	120	288	51.9	0.273	2.51
	Ave.	121	291	49.9	0.270	2.19

の既存ミルと比較し大幅に向上した。板幅中央部の長手方向板厚偏差の例をFig. 9に示す。加・減速部を含め、目標板厚の±0.4%以内を達成している。

4. 高成形性鋼板の開発

4・1 材料引張り特性への冷延圧下率の影響調査

極低炭素鋼の引張り特性への圧下率の影響を実験で調査した結果をFig.10に示す。6.0mm厚の熱延鋼板を2.4mm～5.0mmに両表面研削後0.7mmまで実験室で冷間圧延し、さらに870℃で40秒間の焼鈍を施した。その鋼板より圧延方向に対し0°、45°、90°方向にJIS 5号試験片を採取し、引張り試験を行った。45°方向の伸びとr値は圧下率を上げるに伴い顕著に増加し、異方性は低減する。0°と90°方向の伸びは圧下率の増加に伴い低下する一方、r値は圧下率80%までは向上しさらに86%まで上げると低下する傾向がある。ただし3方向平均のr値は86%までの圧下率増加に伴い向上する。

4・2 実機適用結果

以上の実験室での検討に基づき、実機にて4.0mmの熱延

鋼板を0.65mmまで84%の圧下率で冷間圧延し、その後840℃の焼鈍温度で連続焼鈍を施した。この鋼板のJIS 5号引張り特性はTable 4に示す通り3方向平均r値が2.2、伸びが50%であり、加工性の良好な冷延鋼板が製造できた。開発鋼は月約4000ton生産されている。

5. 結言

高成形性鋼板、幅方向を含めた高板厚精度鋼板の最適製造技術を開発し、以下の成果を得た。

(1)比較的大径ロールのタンデムミルにおいても、強圧下能力と大きなクラウン制御能力を持つ圧延機を前段に配することで効果的なエッジドロップ制御が可能であることを明らかにした。

(2)上記機能を実現する最適な圧延機として、世界初の冷延ペアクロス圧延機を完成させた。

(3)タンデムミル板厚制御の高周波特性を調査し、高応答アクチュエータの能力を最大限に活用する新たな制御手法を開発することにより、長手方向の高板厚精度を実現した。

(4)高圧下率圧延により加工成形性に優れた鋼板を製造する技術を確立した。

終わりに冷延ペアクロス圧延機は三菱重工業(株)と住友金属工業(株)とで共同で開発されたものであり、三菱重工業(株)関係各位に深く感謝致します。

文 献

- 1) 武智 弘：塑性と加工, 12 (1971), 85.
- 2) 安田健一, 成田健次郎, 木村智明：材料とプロセス, 8 (1992), 495.
- 3) 池内直樹, 田中 一, 片岡久明, 豊福達生, 細谷成史, 藤田文夫：材料とプロセス, 8 (1995), 1272.
- 4) 福武 諒, 釜瀬敏秀, 実川正治, 社領 武, 尾崎大介, 藤田文夫：NKK技報, 134 (1991), 36.
- 5) 北村邦雄, 竹林克浩, 鎌田征雄, 菅沼七三雄：材料とプロセス, 5 (1992), 479.
- 6) 小野智睦, 植木 茂, 西山輝幸, 黒田 茂, 待留 誠, 富田浩樹：材料とプロセス, 5 (1992), 483.
- 7) 藤田文夫, 釜瀬敏秀, 佐々木健人：鉄と鋼, 79 (1993), 380.
- 8) 山本普康, 馬場勘次, 柿本純忠, 石原 明, 吾郷康人, 新留照英, 稲葉光延：鉄と鋼, 79 (1993), 388.
- 9) 河野輝雄, 美坂佳助：鉄と鋼, 15 (1981), 2542.
- 10) 梶原哲雄, 橋本正一, 大森舜二, 金子 亨：塑性と加工, 36 (1995), 260.
- 11) 梶原哲雄, 橋本正一, 林 寛治, 富澤 淳, 浜田龍次, 伊山彰一：平成7年塑性加工春季講演会論文集, (1995), 247.
- 12) 重松健二郎, 鎌田俊二, 江藤 学, 梶原哲雄, 橋本正一, 松浦征浩：第45回塑性加工連合講演会論文集, (1994), 399.
- 13) 高橋亮一, 布川 剛, 武田 英：鉄と鋼, 74 (1988), 1402.
- 14) 美坂佳助：塑性と加工, 8 (1967), 188.
- 15) 近藤勝也, 美坂佳助：計測と制御, 28 (1989), 445.