

厚板圧延における平面形状・板厚制御技術

Automatic Plan View Pattern Control and Automatic Gauge Control for Heavy Plate Mill

和田凡平/Bompei Wada・鹿島製鉄所 制御部 プロコン計測技術室 参事補

古川裕之/Hiroyuki Furukawa・システム事業部 システム研究開発部 プロセス制御技術室 参事補

要 約

日々、高まる高品質・低価格へのお客様の要求に応える厚板鋼板を生産するために、圧延ラインの圧延制御技術の開発は最重要課題の一つである。当社でも休むことなく開発が続けられており、歩留り向上、品質向上に大きく貢献しているエッジア一法を用いた平面形状制御技術や高精度板厚制御技術の一端を報告する。

Synopsis

Rolling control technology is one of the most important technologies for satisfying customers demands for both higher quality and lower price of heavy plate products. Therefore, Sumitomo Metal Industries, Ltd. has been continuously developing new rolling technology. This paper describes some technologies for plan view pattern control and for automatic gauge control, both of which contribute to better heavy plate quality and increase the yield of Kashima Plate Mill.

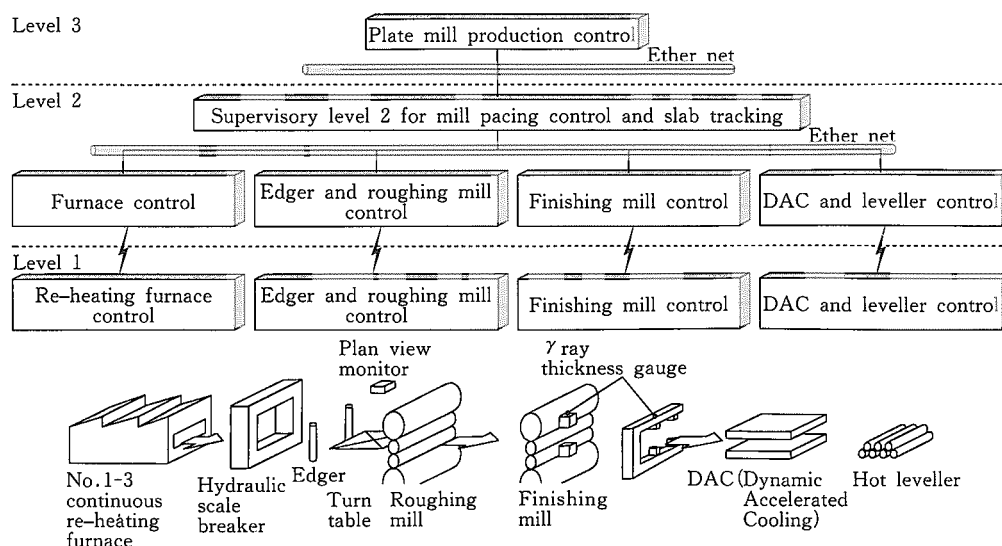
1. 緒 言

日々高まる、高品質・低価格へのお客様の要求に応える厚板鋼板を生産するために、最も重要である圧延ラインの圧延制御技術の開発は最重要課題の一つである。

当社でも、休むことなく開発が続けられている圧延制御技術の一端を以下に紹介する。

2. 圧延ラインの設備レイアウトとシステム構成

当社、鹿島製鉄所厚板工場の圧延ラインにおける設備およびその制御システムの構成を第1図に示す。2基の圧延機（ミル）を用いて圧延が行われるが、1回の加工（以下、パス）で減少させることのできる板厚量は、圧延機の耐荷



第1図 圧延ラインの設備レイアウトおよび制御システム構成

Fig.1 Rolling line layout of Kashima Plate Mill and over view of control system

粗ミルでは、所望の板幅を得るための水平ロールによる幅出し圧延と、平面形状を整えるための垂直ロール（エッジャー）を用いた垂直圧延が行われており、仕上げミルでは、鋼板の板厚・板長さを決定する水平ロールのみを用いた仕上げ圧延が行われている（第2図）。したがって、粗ミルでは幅および平面形状制御機能を、一方の仕上げミルでは板厚制御（AGC：Automatic Gauge Control）機能を重視して制御システムの開発が進められている。



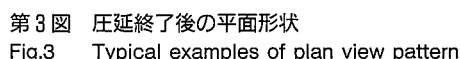
3-1 板幅制御

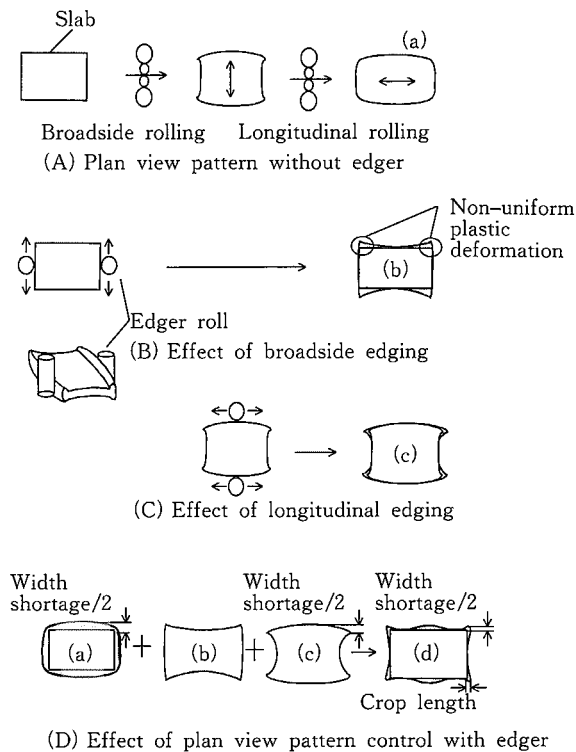
厚板圧延ではスラブ幅が製品幅に比べて狭いのが一般的であり、目標の製品幅を得るために幅方向に幅出し圧延を行う。加熱炉から抽出されたスラブは粗ミル手前に設置されているターンテーブル上で第2図に示すように90°回転され(幅出し圧延前ターン)、スラブの幅 W_0 と長さ L_0 が入れ替わる。次に、目標板厚 H_1 まで圧下することにより、スラブ幅 W_0 を製品幅 W_1 まで延ばす。したがってこの場合、

3-2 平面形状制御

厚板圧延においては、幅出し圧延、仕上げ圧延での鋼板端部の不均一変形が複雑に重ね合わされるため圧延終了後の平面形状は一般に矩形とはならない。圧延終了後の平面形状は、幅出し比(=仕上げ幅/スラブ幅)、延し長さ比(=仕上げ長さ/スラブ長さ)の大小により第3図に示すような種々の平面形状となる。ここで、図中の網掛け部が精整での切り捨てロスとなり歩留り悪化の大きな要因となる。この切り捨てロスの面積をできるだけ小さくし、歩留りを向上させるためにエッジャー法と呼ばれる平面形状制御を実施している。エッジャー法の基本原理を第4図に示す。エッジャーとは堅型圧延機であり、堅ロールで幅圧下する(エッジング)ことにより矩形鋼板は第4図(B)―(b)のように先後端が凹形状となり「つ」が発生する。この変形を利用して鋼板の矩形化を図る。具体的には、幅出し圧延前に幅方向に幅出しエッジングを行うことで、第4図(B)―(b)のような形状変化を得る。また、仕上げ圧延前に長手方向に仕上げエッジングを行うことで、第4図(C)―(c)のような形状変化を得る。水平圧延のみを行った場合は、第4図(A)―(a)のような平面形状になるので、幅出しエッジングの効果(第4図(B)―(b))と仕上げエッジングの効果(第4図(C)―(c))を重ね合わせて、第4図(D)―(d)のように平面形状の矩形化を狙う。

エッジ法を用いた場合は、仕上げエッジングによる
 先後端での幅落ち（第4図(D)―(c)）が水平圧延により生じ
 る幅落ち（第4図(D)―(a)）を助長するという欠点があるた
 め、結果的には圧延終了後の平面形状の幅落ち（第4図(D)
 ―(d)）は大きくなる。これは、従来のオペレータの経験に





第4図 エッジャーによる平面形状制御の基本原則

Fig.4 Principle of plan view pattern control with edger

基づく制御では、先後端のクロープ長のみを最小化するように仕上げエッジング圧下量を決定しているからである。ここで圧延終了後の鋼板に先後端で幅落ちがある場合、製品となる矩形鋼板の幅は最も幅が狭いところを基準として切り出されるため、幅落ちが大きいと製品幅は小さくなり歩留りが悪化する。すなわち、幅落ち低減は歩留りを大きく向上させることとなる。そこで、幅落ちとクロープ長の両方を最適化するために、平面形状予測モデルに基づいた

シミュレーションで、幅出しエッジング量と仕上げエッジング量を決定した。

3-2-2 平面形状予測モデル

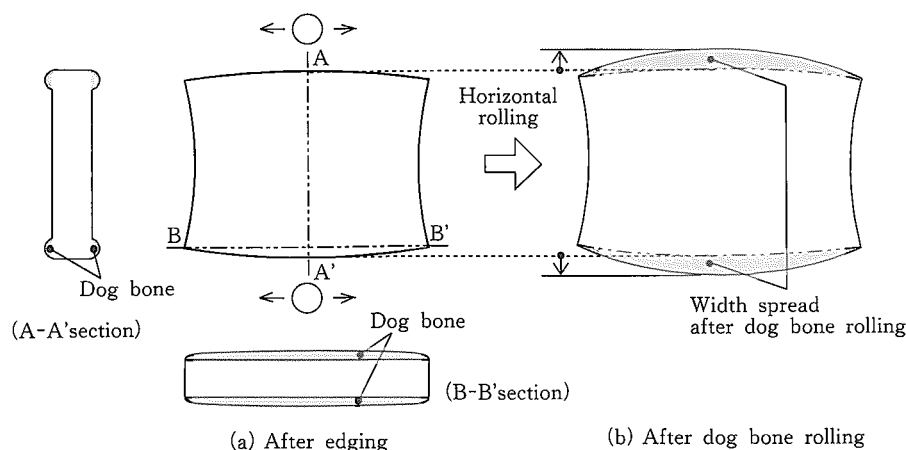
最適なエッジング量を決定するため、矩形スラブから圧延終了後の平面形状まで予測できる平面形状予測モデルを開発した。平面形状予測モデルは基本モデルとして、エッジングによる平面形状変化モデルと水平圧延による平面形状変化モデルからなる。これら基本モデルをベースに、圧延中の鋼板のターン(90°回転)を考慮し、エッジングを含む圧延パススケジュールに対して、圧延中あるいは圧延後の平面形状を予測するモデルを構築した。

(1)エッジングによる平面形状変化モデル

矩形鋼板を長手方向にエッジングすれば、第5図(a)のように先後端で幅が狭まり、両端にドッグボーンと呼ばれる盛り上がりができる。このドッグボーンの高さは板の中央部から先後端に向かうほど低くなる。したがって、エッジング後に水平圧延するとドッグボーンによる幅戻り量も先後端に向かうほど少なくなり、その結果更に先後端で幅が狭くなる(第5図(b))。エッジングによる板幅変動モデルとしては、熱延の粗圧延における板幅変動予測に用いられている芝原らの式¹⁾を適用した。またエッジングの効果として、先後端ではクロープ長が第6図に示すように増大する。この予測式には河野らの式²⁾を適用した。

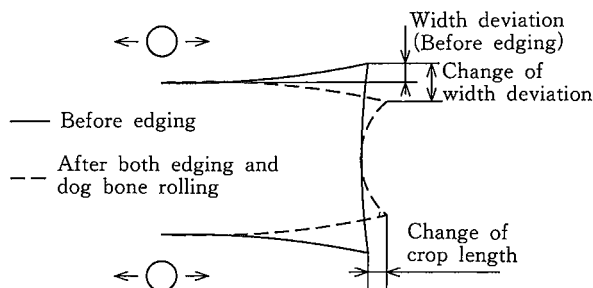
(2)水平圧延による平面形状変化モデル

矩形スラブを水平圧延すると、幅方向中央部の材料は左右を拘束されているため圧延方向にほとんどすべて延ばされるのに対して、端部では片側が拘束されていないため、圧延方向と90°の方向にも延ばされる。この結果、中央部と両端で圧延方向への伸び差が生じ、第7図に示すような形状となる。この平面形状変化モデルとして、岡戸らの式³⁾を適用した。

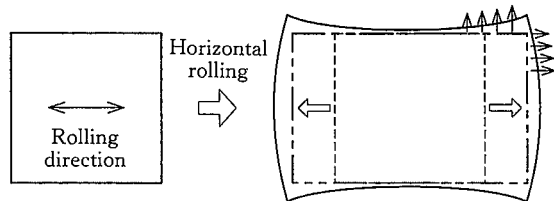


第5図 エッジングによる板幅変動

Fig.5 Width profile after edging



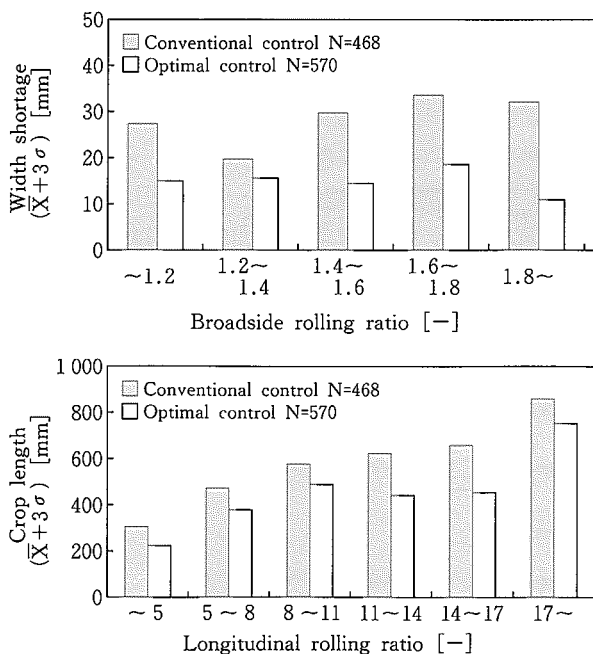
第6図 エッジングによる先端クロップ形状変化
Fig.6 Head and tail crop profile deformation by edging



第7図 水平圧延による平面形状変化
Fig.7 Plan view pattern after horizontal rolling

3-2-3 実機への適用

平面形状予測モデルに基づいた最適平面形状制御を実機適用した。実機適用に際しては、平面形状予測モデルを用いて、スラブサイズ区分、幅出し比区分、延し長さ比区分ごとに最適エッジング量をあらかじめオフライン計算で求めておき、これに基づきオンラインでエッジャー開度を設定した。第8図に実機適用結果を示す。幅落ち、クロップ長を幅出し比と延し長さ比で整理し、 \bar{x} (平均値) + 3σ (標準偏差) で評価した。最適化により、幅落ちはすべての幅出し比の平均で約半減しており、クロップ長はすべての延



第8図 実機適用結果
Fig.8 Effect of optimal control

し長さ比の平均で約20%低減されている。以上、本制御の適用により従来制御に比べ平面形状不良による切り捨てロスを23%低減することができた。

4. 仕上げミルにおける板厚制御技術

4-1 板厚制御システム構成と機能分担

第9図に仕上げミルにおける板厚制御システム構成を示す。仕上げミル制御コンピュータでは、粗ミル制御コンピュータから送信される粗圧延終了後のスラブの板厚、板幅、板長さなどの実績と上位生産管理コンピュータから指示される圧延材の最終板厚・板幅・板長さに基づき、仕上げミルでのパス数、圧延各パスのロールの間隔、予測圧延荷重等を計算する(ドラフトスケジュール計算)。更に、圧延中の各パス(第*i*パス)が終了することにより、そのパスの圧延中の荷重等に基づいて、当初計算した第(*i* + 1)パスのドラフトスケジュールを修正(アダプティブ計算)しながら、パスごとに各種パラメータをAGCコントローラに設定する。

AGCコントローラは、その設定パラメータに従ってロールの間隔を設定するが、ミルに鋼板が進入して加工が行われている間(噛み込み中)、リアルタイムにロールの間隔、圧延荷重、ミル入り/出側の板厚を測定しながら、目標の板厚になるように圧延機のロール間隔の制御を行う(ダイナミックAGC)。

4-2 ドラフトスケジュール計算

ドラフトスケジュール計算では、基本的に圧延機的能力が最大限に発揮されるように圧延途中の各パスの目標とする出側板厚が決定される。しかし、当社は、鋼板のクラウン(鋼板幅方向の中央部と両エッジとの板厚差)をダイナミックに制御する設備を持たないため、最終の数パスは、クラウンの比率が一定となるように(式4-1参照)各パスの板厚、圧延荷重を決定する。

$$(Cr)_{i-1}/h_{i-1} = (Cr)_i/h_i \quad (=一定値) \quad (式4-1)$$

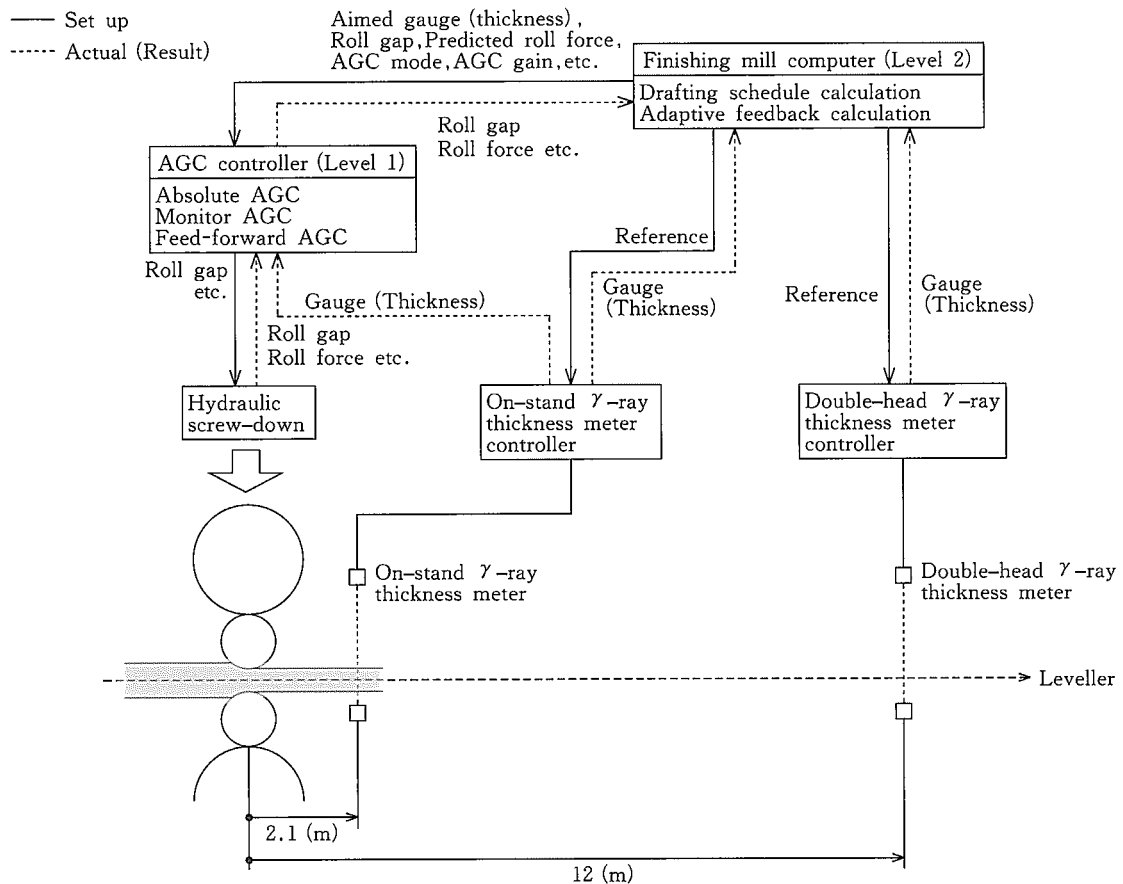
$(Cr)_n$: 第*n*パスにおける板クラウン

h_n : 第*n*パス出側の幅方向中央における板厚

これは、以下の理由による。

圧延の前後で鋼の体積は変化せず、圧延によって薄くなった分の鋼は、鋼板の長手方向に移動する。圧延の前後でこのクラウン比率が著しく変化すると圧延後の鋼板長さが幅方向の中央部とエッジ部とで異なることとなり、鋼板の平坦度を悪化させることとなる。

これを具体的な例で説明する。第*i* - 1パス終了時点の鋼板の板厚が幅方向中央で10.0mm、両エッジで9.9mm、長さが10mとする。第*i* - 1パス終了時点でのクラウン比率は式4-1より1%である。第*n*パスの圧延によって、幅方向中央部の板厚が9.0mm、両エッジのそれが8.0mm



第9図 仕上げミル板厚制御システム構成

Fig.9 Automatic gauge control system for finishing mill

となった場合(クラウン比率=11.1%)、圧延後の鋼板の長さは、幅方向中央部では11.1m、両エッジでは12.4mとなり1m以上も差が生じることになるのである。この結果、鋼板は両エッジに波ができた形状となってしまう。

クラウン比率が変化しないように圧延した場合には、板厚は、幅方向中央部9.0mm、両エッジで8.91mm、鋼板の長さは中央部、両エッジ部とも11.1mとなり、圧延後も平坦な状態のままである。

以上がクラウン比率を一定に保って圧延する理由であるが、このクラウン比率は、圧延各バスの圧延荷重によって変化するため、クラウン比率を一定に保つように各バスの圧延荷重を決定することが重要となる。

圧延荷重は実際には各バス前後の板厚の変化量によって決まる値である。したがって、ドラフトスケジュール計算では、クラウン比率が一定となるような各バスの板厚と荷重とが繰り返し計算により算出される。しかし、このようにして計算された荷重が実際の圧延荷重と大きく異なる場合、すなわち圧延荷重の予測精度が悪い場合には、クラウン比率を一定に保ったまま圧延されることにはならず、その結果、平坦度を悪化させることになる。したがって、当社は、ドラフトスケジュール計算における圧延荷重予測の精度を重視している。

4-3 圧延荷重の予測

圧延各バスの圧延荷重は(式4-2)により求められる。

$$P = 1.15 \cdot k_{fm} \cdot Q_p \cdot l_d \cdot W \quad (\text{式4-2})$$

P : 圧延荷重 k_{fm} : 平均変形抵抗 (美坂の式)

Q_p : 圧下力関数 l_d : 接触弧長 W : 板幅

(式4-2)において平均変形抵抗 k_{fm} は美坂の式により算出されるが、この式の精度は、鋼板の温度予測精度に依存する。当社では、この温度予測を式4-3から算出しているが、放熱による温度降下、ワークロールとの接触による温度降下のほか、圧延中に鋼板使用されるデスケーラや鋼板水冷装置による温度降下も考慮した温度計算を行っている。

$$c\rho \frac{d\theta}{dt} = \lambda \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad (\text{式4-3})$$

式4-3における境界条件 (鋼板の表面)

$$\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} = q \quad (\text{式4-4})$$

c : 比熱 ρ : 密度 λ : 熱伝導率

θ : 材料温度 x : 板厚方向座標 t : 時間

q : 鋼板表面からの放熱量

$$q = q_e + q_w + q_r \quad (\text{式4-5})$$

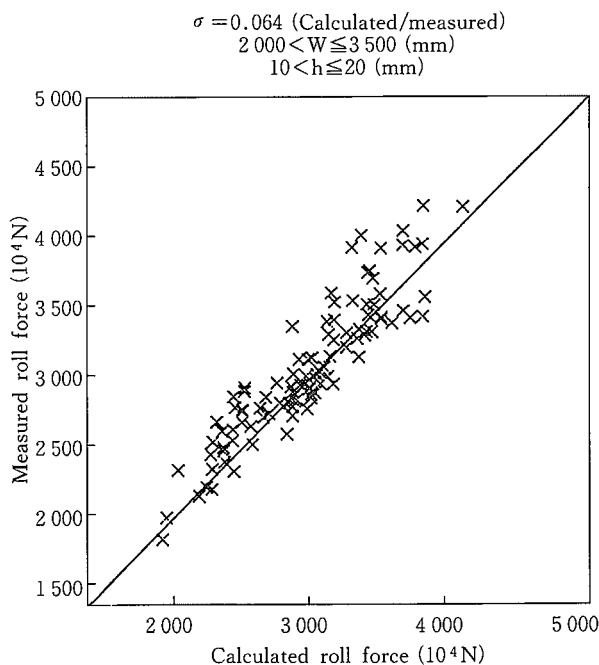
q_e : 材料表面からの輻射熱

qw: デスケーラ等による水冷

qr: 圧延ロールとの接触伝熱

第10図に60mmの鋼板の温度降下と水冷による影響について、放射温度計を用いた実測温度(図中、実線)と計算温度(図中、破線)とを比較した例を示す。第10図が示すとおり、実測温度と計算温度とがほぼ一致しており、デスケーラ等の水による温度降下や復熱も再現できていることがわかる。

第11図に、当社の仕上げミル最終パスの圧延荷重の予測精度を示す。予測精度は6.4%(1σ)であり、この予測精度により良好な平坦度でかつ高精度な板厚の圧延を可能としている。



第11図 最終パス圧延荷重予測精度

Fig.11 Comparison between calculated and measured roll force at last pass

4-4 ダイナミック AGC

前節では、圧延機に鋼板が進入する前のロール間隙の設定計算(ドラフトスケジュール計算)について述べたが、本節では、ミル噛み込み中に圧延機出側の板厚が目標の板厚となるよう、リアルタイムに行われている各種のダイナ

ミック AGC について報告する。

4-4-1 絶対値 AGC

圧延機出側の板厚は、式4-6に示すゲージメータ式と呼ばれる基本式により計算される。

$$h = S + P / M_H (M_0) + \delta_1 + \delta_2 + \Delta S_0 \quad (\text{式 4-6})$$

h : 圧延機出側の板厚 (mm)

S : 無負荷時のロール間隙 (mm)

P : 圧延荷重 (N)

M_H : ハウジングの剛性係数 (mm/N)

M_0 : 圧延機の締め込みによって得られたハウジングの剛性係数 (mm/N)

(圧延ロール交換時の測定により算出)

δ_1 : ロールのたわみ量 (mm)

δ_2 : ロールの偏平量 (mm)

ΔS_0 : 学習項 (mm) (γ 線厚み計の板厚実測値により算出)

圧延に際しては、前節にて述べたドラフトスケジュール計算により求められた板厚、圧延荷重に基づき、式4-6の右辺の各項の値が算出され、最終的に圧延機のロール間隙 S が設定される。

一方、圧延後の板厚は、(式4-7)で求めることができる。

$$h^* = S + \Delta S + (P + \Delta P) / M_H (M_0) + \delta_1^* + \delta_2^* + \Delta S_0 \quad (\text{式 4-7})$$

h^* : 圧延機出側の板厚 (mm)

S : 無負荷時のロール間隙 (mm)

ΔS : 圧延中のロール間隙変更量 (mm)

P : ロール間隙を決定する際に前提とした圧延荷重 (予測圧延荷重) (N)

ΔP : 圧延中に検出される荷重と予測圧延荷重との差 (N)

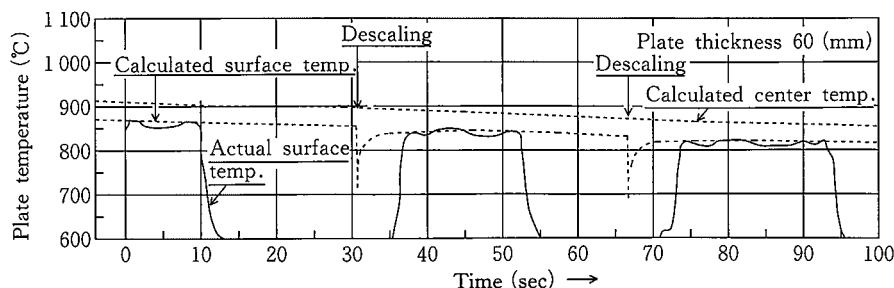
M_H : ハウジングの剛性係数 (mm/N)

M_0 : 圧延機の締め込みによって得られたハウジングの剛性係数 (mm/N) (圧延ロール交換時の測定により算出)

δ_1^* : 圧延中のロールのたわみ量 (mm)

δ_2^* : 圧延中のロールの偏平量 (mm)

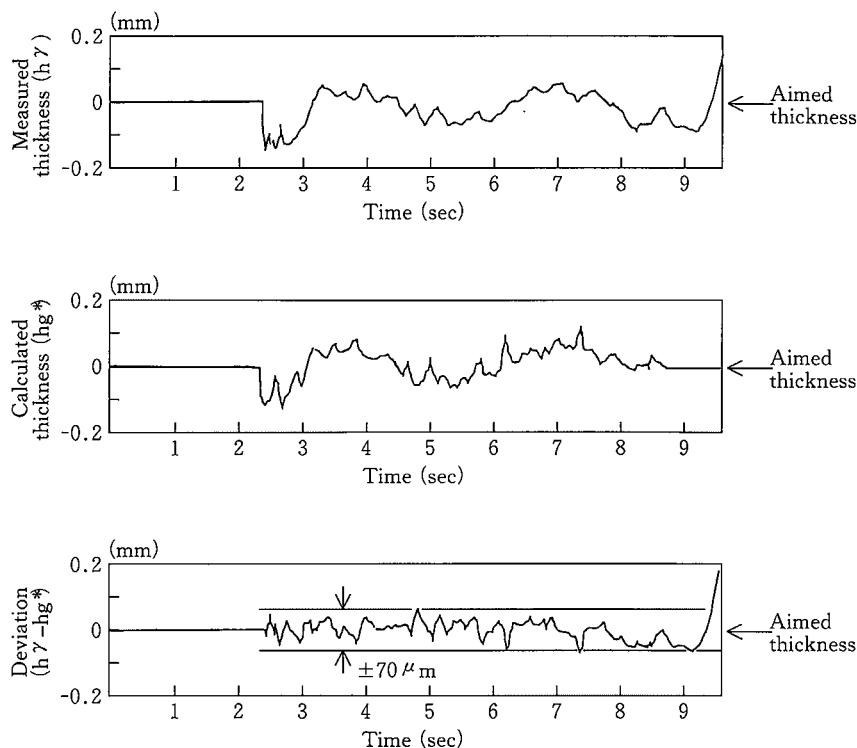
ΔS_0 : ロール間隙の検出誤差 (学習項) (mm) (γ 線厚み計の板厚実測値により算出)



第10図 材料温度計算と表面実測温度の比較

Fig.10 Comparison between measured and calculated plate temperature

第12図 スミス法を用いたモニタ AGC 制御概略図
Fig.12 Monitor AGC with Smith's method

第13図 スミス法におけるトラッキング精度例 ($h=20\text{mm}$)Fig.13 Example of the tracking accuracy of Smith's method ($h=20\text{mm}$)

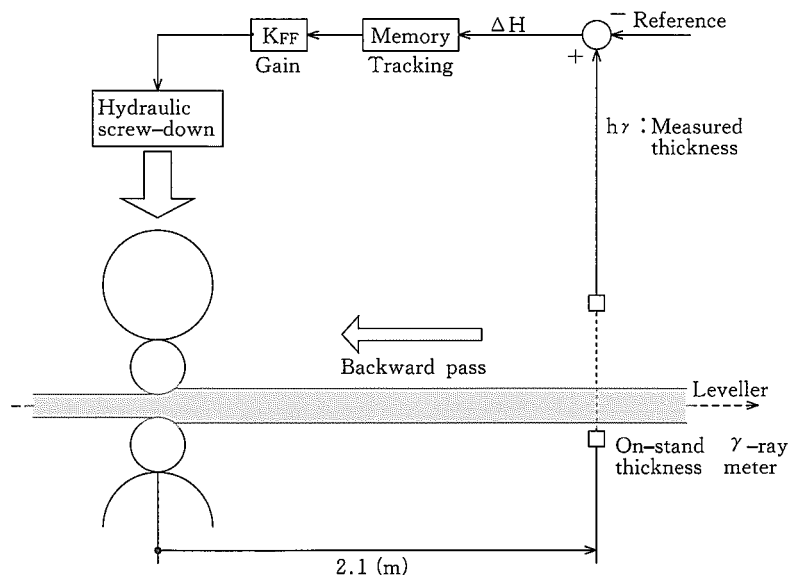
計で測定された板厚の変動により推定される圧延荷重の変動を推定し、この推定結果に基づきロール間隙を制御する(第14図)。

前述したモニタ AGC と同様に、FF—AGC でも長手方向の板厚位置のトラッキングが重要となる。当社では、鋼板の移動速度のほか、 γ 線厚み計の板厚検出遅れや油圧圧下装置の応答遅れ、後進率等も考慮した独自の技術により、高精度なトラッキングを実現している。

(3)適用例

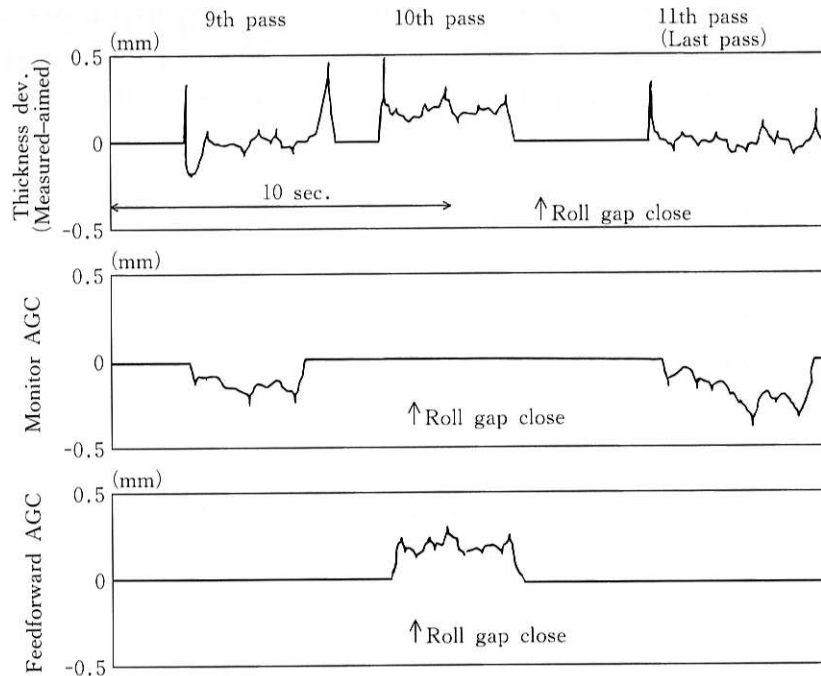
仕上げ圧延機での総パス数11パスの圧延において、最終3パスに高精度ダイナミック AGC を適用した例を第15図に示す。

正転パスである第9および第11パスではモニタ AGC、逆転パスの第10パスでは FF—AGC が動作した結果、最終パス後の出側板厚は板内板厚偏差が大幅に低減された目標板厚の鋼板に仕上がっていることが分かる。



第14図 フィードフォワード AGC 制御概略図

Fig.14 Feedforward AGC

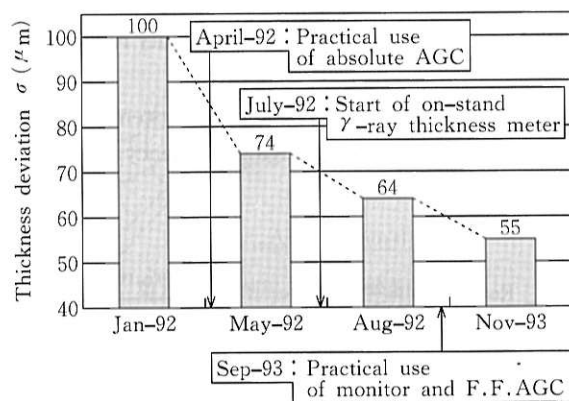


第15図 高精度ダイナミック AGC による板厚制御実施例

Fig.15 Example of on-line control using the F.F.-AGC and monitor AGC

4-5 板厚制御機能の効果

本章で紹介した各種の板厚制御機能の開発は主に'92~'93年にかけて集中的に行われたが、これらの制御機能の戦力化により板厚精度は飛躍的に向上し(第16図), その結果, 歩留りを0.5%向上させることができた。

第16図 狙い厚精度の推移 ($10.0 < h \leq 12.0(\text{mm})$)Fig.16 Achievement of thickness deviation ($10.0 < h \leq 12.0(\text{mm})$)

5. おわりに

近年, 造船や橋梁に使用されるテーパ鋼板や差厚鋼板と呼ばれる, 高い圧延制御技術が求められる特殊形状鋼板の開発が進められている。一方では, また, 高品質の製品を安定して供給する自動化も進められている。

当社においても, これらを実現するために, より高度な圧延制御技術の開発に取り組んでいる。



和田凡平/Bonpei Wada

鹿島製鉄所 制御部
プロコン計測技術室 参事補

(問合せ先: 0299(84)2624)

参考文献

- 1) 芝原, 河野, 布川: 第33回塑加連講論, (1982), p.21
- 2) 河野, 林, 塚本, 益本: 昭58春塑加講論, (1983), p.349
- 3) 岡戸, 有泉: 鉄と鋼, 66 (1980), p.964
- 4) 古川, 上田, 大竹, 坂本, 岡田: 第132回材料とプロセス, Vol.9 (1996), p.1027
- 5) 日本塑性加工学会: 「板圧延」, コロナ社
- 6) H.SUMI, R.TAKAHASHI, T.YOKOI and Y.MISAKA: "A Numerical Model and Control of Plate Crown in the

Hot Strip or Plate Rolling", Advanced Technology of Plasticity 1984, vol.11, p.1360

- 7) B.WADA, H.SUMI, I.UEDA and K.SUZUKI: "Automatic gauge control for heavy plate mill", La Revue de Métallurgie-CIT (Mars, 1994), p.465
- 8) 上田: 「厚板仕上げミル直近 γ 線厚み計による高精度AGC」, 日本鉄鋼協会圧延理論部会 (私信), 98-圧理-14