
熱間エンドレス圧延を実現したプロセス制御技術

Advanced Process Control Technologies for Realization of Endless Hot Strip Rolling

市井 康雄 (Yasuo Ichii) 山崎 孝博 (Takahiro Yamasaki) 村山 彰二 (Shoji Murayama)

要旨：

川崎製鉄千葉製鉄所第 3 熱間圧延工場では、1996 年世界で初めて熱間におけるシートバー接合を実現し、仕上げ圧延の連続化による、いわゆる熱間エンドレス圧延を開始した。熱間エンドレス圧延を実現するためには、高精度のプロセス制御ならびに信頼性の高い完全自動化が必要であり、その中核となる圧延ピッチ制御、走間接合制御、仕上ミル接合部通板制御、走間板厚変更制御、完全自動の高速切断巻取制御の各制御技術を開発した。これにより、安定した熱間エンドレス圧延を実現し品質の向上、従来の圧延限界を越えた薄物広幅鋼板や極薄鋼板の製造、さらに潤滑圧延あるいは強冷却圧延による新製品の開発・製造が可能となった。

Synopsis：

Fully continuous hot strip finishing rolling by joining sheet bars ends, so called ㄨ endless hot strip rolling ㄨ, started at No. 3 hot strip mill in Chiba Works of Kawasaki Steel for the first time in the world in 1996. High-reliability and full automation are necessary to establish endless hot strip rolling. The main control technologies applied for this purpose include high-accuracy mill pacing, the control of joining sheet bar ends while the bar is moving, stabilization of joint rolling control in finishing mills, high-accuracy flying gauge change control and high-speed fully-automatic coiling control. As a result, product quality and stability of rolling were extremely improved. In addition, by applying heavy lubrication over the full length of the strip and forced cooling, ultra-thin strip, thin-wide strip and products with a higher level of quality than in the past have been able to be produced without trouble.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

Advanced Process Control Technologies for Realization of Endless Hot Strip Rolling



市井 康雄
Yasuo Ichii

千葉製鉄所 制御技術
部制御技術室 主査
(課長)



山崎 孝博
Takahiro Yamasaki

千葉製鉄所 制御技術
部制御技術室 主査
(課長)



村山 彰二
Shoji Murayama

千葉製鉄所 制御技術
部制御技術室 主査
(主席掛長)

要旨

川崎製鉄千葉製鉄所第3熱間圧延工場では、1996年世界で初めて熱間におけるシートバー接合を実現し、仕上げ圧延の連続化による、いわゆる熱間エンドレス圧延を開始した。熱間エンドレス圧延を実現するためには、高精度のプロセス制御ならびに信頼性の高い完全自動化が必要であり、その中核となる圧延ピッチ制御、走間接合制御、仕上げミル接合部通板制御、走間板厚変更制御、完全自動の高速切断巻取制御の各制御技術を開発した。これにより、安定した熱間エンドレス圧延を実現し品質の向上、従来の圧延限界を越えた薄物広幅鋼板や極薄鋼板の製造、さらに潤滑圧延あるいは強冷却圧延による新製品の開発・製造が可能となった。

Synopsis:

Fully continuous hot strip finishing rolling by joining sheet bar ends, so called "endless hot strip rolling", started at No. 3 hot strip mill in Chiba Works of Kawasaki Steel for the first time in the world in 1996. High-reliability and full automation are necessary to establish endless hot strip rolling. The main control technologies applied for this purpose include high-accuracy mill pacing, the control of joining sheet bar ends while the bar is moving, stabilization of joint rolling control in finishing mills, high-accuracy flying gauge change control and high-speed fully-automatic coiling control. As a result, product quality and stability of rolling were extremely improved. In addition, by applying heavy lubrication over the full length of the strip and forced cooling, ultra-thin strip, thin-wide strip and products with a higher level of quality than in the past have been able to be produced without trouble.

1 緒 言

川崎製鉄千葉製鉄所では1995年5月に第3熱間圧延工場を稼働させ、翌1996年には熱間エンドレス圧延という世界で初めてのプロセスが誕生した。本ミルは需要家からの厳しい品質要求および寸法領域拡大、特に薄物化のニーズに応え、21世紀に通用する高い競争力を保持することを目的に建設されたものである^{1)~3)}。熱間エンドレス圧延は、シートバーの接合技術はもとより、加熱炉のスラブ抽出からコイラーの巻取り、コイル搬送に至るまでの一貫した高精度かつ信頼性の高い完全な自動化技術により初めて実現するものである。本報告では、エンドレス圧延を支える主要なプロセス制御技術について述べる。

2 設備構成と主要制御技術

Fig. 1 に第3熱間圧延工場の圧延設備列と熱間エンドレス圧延のための主要な制御技術を示す。

熱間エンドレス圧延においては走間でシートバーを接合するた

め、仕上げミル前に配置した接合装置にとぎれることなく接合材を供給し、接合を行い、通板し、圧延するとともに巻取りを連続することが必須である。これらを満足するために以下のプロセス制御技術、自動化技術を新たに開発した。

- (1) ミルライン上の材料のインターバル予測に基づく高精度抽出ピッチ制御、およびシートバーコイラーからの巻き出しタイミング適正化など、従来の材料1本単位での圧延ピッチ制御の概念を越えたエンドレス圧延グループ内の総合圧延ピッチ制御
- (2) 接合において、先行材の尾端に接合台車および後行材を高精度で追従させ、また、シートバーの張力を適正に保つ高精度追いつき制御からなる走間接合制御
- (3) 接合した圧延材の仕上げ圧延において、ミル剛性可変制御、絶対値AGCとX線モニターAGCからなるダイナミック制御、および高精度セットアップ制御を組み合わせた高精度板厚制御ならびに走間板厚変更制御
- (4) 交流電動機による高速度応答ミルと低慣性ルーバを用いた高精度高応答張力制御、ならびにマスフロー制御による仕上げミル接合部通板制御
- (5) 仕上げミルを通過したストリップの高速切断、巻取りコイラーの選択切替と巻取り、高速巻き終わりでの尾端定位置停止制御からなる完全自動高速度切断巻取制御

*平成11年6月7日原稿受付

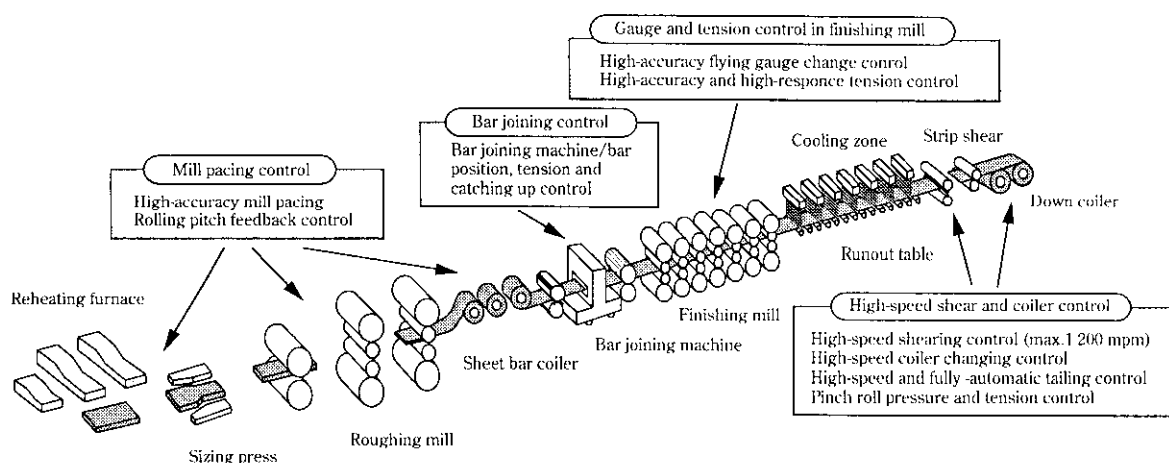


Fig. 1 Endless hot strip rolling equipments and key technologies of process control

Table 1 Main specifications of endless hot strip rolling and equipments

	Items		Specification
	Thickness	(mm)	0.8~6.0
Available size of products	Width	(mm)	780~1900
	Bar thickness	(mm)	20~40
Endless rolling	Min. pitch	(s)	45
	Number of coils at an endless train		Max. 15
Flying gauge change	Thickness	(mm)	±1.5
	Width	(mm)	+50 -100
Sheet bar coiler	Coiling speed	(m/min)	Max. 340
	Recoiling speed	(m/min)	Max. 150
Bar joining machine	Type		Self driving with sheet bar carriage
	Driving speed	(m/min)	Max. 60
	Heating		Induction heater
Strip shear	Shearing speed	(m/min)	1200
	Shearing thickness	(mm)	0.8~6.0

Table 1 にエンドレス圧延の主な仕様および各装置の基本仕様を示す。

3 熱間エンドレス圧延のプロセス制御技術

3.1 圧延ピッチ制御

従来、バッチ圧延材に対する圧延ピッチ制御つまりミルベッシングに求められる要件は、ミルラインにおいて圧延材の衝突、各設備の設定替え完了前の進入などのトラブル発生を起さず、設備能力に見合った最大限の圧延能率を達成することであった。具体的には、圧延材ごとの搬送パターンとサイドガイド開度などの設定替え時間予測をもとに、材料先端軌跡の高精度な予測を行い、圧延工程上の圧延材相互の干渉または設備干渉のポイントを求め、そこでの干渉が発生しないように抽出ピッチを決定することであった。

エンドレス圧延におけるミルベッシングの最大の役割は、接合装置上で仕上げミル圧延中の先行材に対し後行材を絶え間なく供給し、さらに不必要な待機による温度低下を発生させない適切な抽出

ピッチおよび粗ミル圧延タイミングを決定することである。基本技術はバッチ圧延材と同様の高精度な予測であるが、考慮すべきことは、同一エンドレス圧延グループの全スラブが加熱炉内にある時点で、グループ全材料の粗圧延での材料寸法と圧延スケジュールに起因する圧延時間の違いを正確に予測し、接合を行う際の接続可否の判定と接続を達成させる搬送条件を決定することにより、粗圧延工程での圧延材相互の干渉と設備干渉を回避し、接合装置へ安定した材料供給を行うことである。そこで、先行材のシートバーコイラー巻出し時間を後行材の抽出ピッチとし、またグループ内で最も粗圧延時間が長い材料でグループ内全材料の粗圧延時間を一定化する方法を用いた⁹⁾。この一定化は、粗ミル各設備進入時にミルベッシングで決定したタイミングまで積極的に進入を待機させることで達成した。結果として粗圧延時間が短い材料は加熱炉から早出しすることとなり、粗圧延工程での圧延材相互の干渉、設備干渉を収束計算のような計算負荷をかけず、簡易な方法で解消して、多くのエンドレス圧延材グループの接合を可能とした。

一方、本圧延ピッチ制御は、予測時刻と実績時刻との差を後続材の粗圧延の待機および抽出材の抽出タイミングに反映し、圧延の乱れを吸収するフィードバック制御機能も有している。このフィードバック制御は、バッチ圧延材とエンドレス圧延材が混在する中でミルライン上が渋滞している場合でも、いち早く状況を検知し事態を收拾するのに効果を発揮している。

Fig. 2 に搬送スケジュールの計算例を示す。先行材の粗圧延と後行材の粗圧延は接合装置の位置で一致しており、問題なく接続されていることが分かる。Fig. 3 に現状のシートバーコイラーの滞留時間を示す。ばらつき (σ) は 1.67 s であり、安定なエンドレス圧延を実現している。

3.2 走間接合制御

走間接合プロセスにおいては、Fig. 4 に示すように、先行材への後行材追い付き、先行材への接合台車追い付き、先行材クランプ、さらに後行材クランプを行った後に適正条件で誘導加熱、アブセットを行い、一連の工程を 20 m の台車ストローク内で完了させる⁹⁾。これらを実現するために、先行材の粗圧延への接合台車の追い付き制御、後行材の先行材粗圧延への追い付き制御、および接合材の仕上げミル入側でのシートバー張力制御などの新たなプロセス制御技術を開発した。

接合台車の追い付き制御では、シートバーコイラーから巻き出し

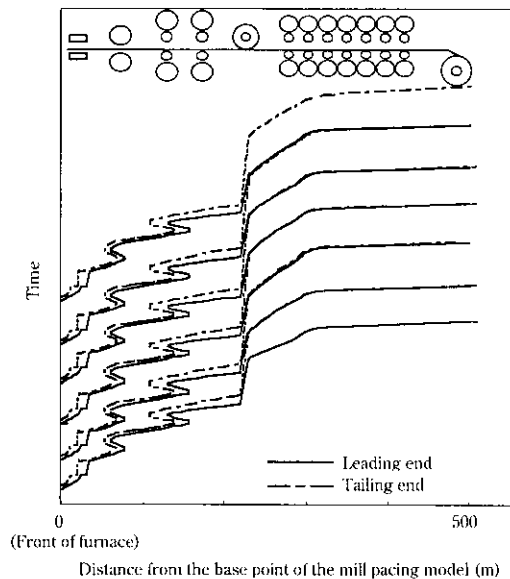


Fig. 2 Example of the result calculated by the mill pacing control system

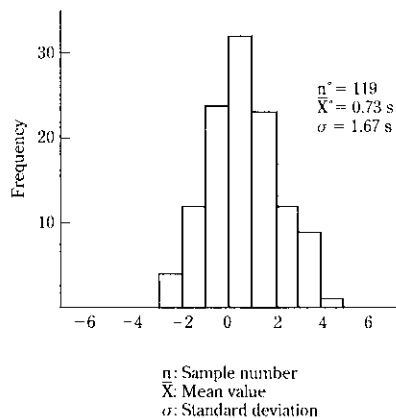


Fig. 3 Results of sheet bar waiting time in sheet bar coiler

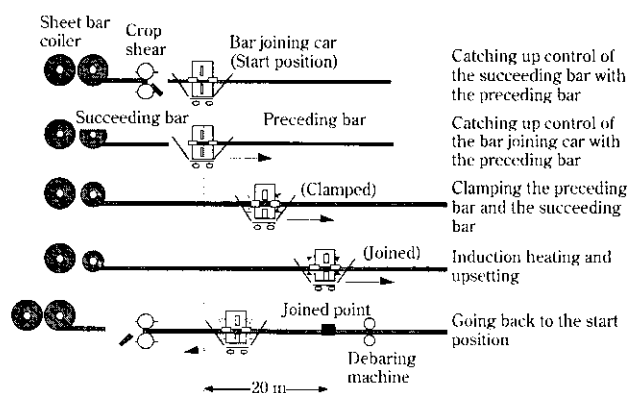


Fig. 4 Sequence chart of bar joining machine

た先行材の尾端に接合台車を追い付かせる。この制御においては、接合台車に設置した先尾端位置検出器により先行材の尾端位置を連続的に認識して、接合台車は最適なタイミングで走行を開始した後、先行材の尾端がインダクタの中央と一致するように接合台車の速度制御を行う。通常、接合装置内に先行材の尾端が入ってから 5

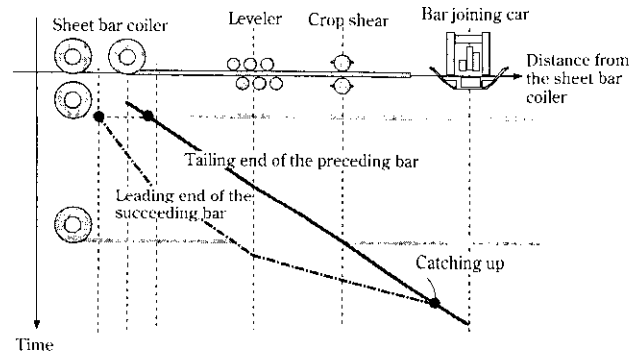


Fig. 5 Catching up control of the succeeding bar

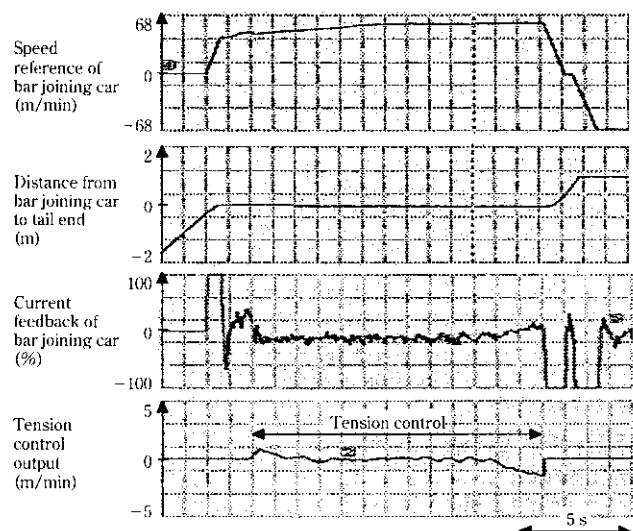


Fig. 6 Chart of bar joining car control

s 以内に位置決めを完了している。

後行材の追い付き制御では、シートバーコイラーから巻き出した先行材の尾端に後行材を巻き出しながら追い付かせる。Fig. 5 に後行材の追い付き制御の概念図を示す。この制御は、後行材の巻出し開始タイミングを決定する機能と、巻出し以降の速度を決定する機能から成っている。後行材の巻出し開始タイミングは、先行材の巻出し残長と圧延スケジュールに基づく先行材の速度変動を考慮して決定する。巻出し後は、先行材の尾端と後行材の先端をクロップシャーで連続して切断できる間隔に制御し、そののち接合台車直近で最短距離になるように制御し、先行材と後行材の突き合わせを行う。突き合わせは、上記台車位置決め完了直後実施する。

接合材の仕上ミル入側でのシートバー張り力制御では、先行材の尾端を接合台車でクランプした後、過張力をかけないように、またシートバーにたるみができないように接合台車の速度を制御する。

Fig. 6 に先行材尾端が接合台車に接近してからの制御の例を示す。横軸には時間を、縦軸にはそれぞれ、接合台車速度、接合台車からの先行材尾端距離、接合台車の電流、シートバー張り力制御出力を示した。接合台車が最適のタイミングで追い付き制御を開始し、この例では、約 2 s 後に先行材クランプを完了し、安定した張り力制御に入っている。

以上の追い付き制御システムおよび張り力制御システムの開発により、走間での接合が安定的に行われている。Photo 1 に接合装置の外観を示す。接合台車には走行駆動装置のほかに、内部に接合端面

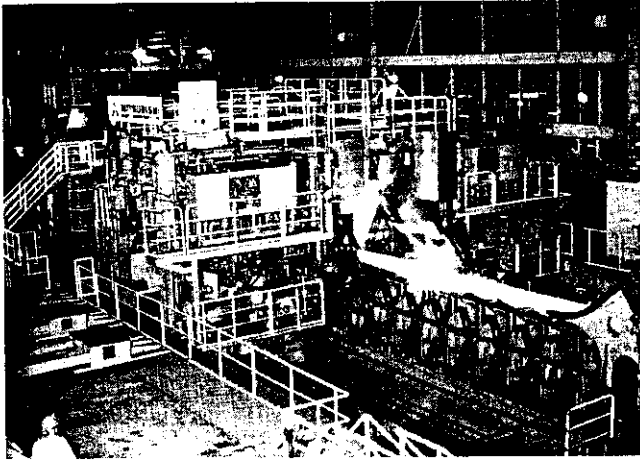


Photo 1 Sheet bar joining machine

を加熱する誘導加熱装置、シートバーをクランプするクランプ装置、クランプしたシートバーをアップセットするアップセット装置が設置されている。

3.3 走間板厚変更制御

連続するシートバーの中で寸法の異なる製品を作るため、また熱間圧延材の限界寸法の拡大を実現するために、仕上げミルにおいて走間で板厚を変更する機能が必要となる。走間板厚変更を精度良く、安定して実施するために、压下位置などの目標値を正確に予測する高精度セットアップ制御、各スタンドの压下動作タイミングを材料の走間板厚変更位置に一致させる高精度トラッキングが重要である。さらに、全スタンド油圧压下による高応答、高速制御周期のミル剛性可変制御 (MMC)、設定板厚とゲージメータ板厚の偏差を修正する絶対値 AGC、F4 ミル以降の各スタンド出側に設置した X 線厚み計からの板厚実績を用いたモニター AGC を組み合わせることにより、安定かつ高精度の走間板厚変更制御を実現している。

Fig. 7 に板厚制御システム構成図を、Fig. 8 にミル剛性可変制御の概要を示す。また、Fig. 9 に製品厚 1.0 mm を含むエンドレス圧延の板厚チャートを示す。板厚精度は最終材まで $\pm 30 \mu\text{m}$ を継続して達成している。走間板厚変更部での板厚変動もなく、良好な制御を実現している。

3.4 仕上ミル接合部通板制御

シートバーの接合部は、接合装置により加熱されているため母材部よりも温度が高い。そのため、圧延荷重の急激な低下や、これにともなう張力変動が発生する。また、母材部よりも材料強度が低く、破断の危険性があり、目標板厚を達成し安定に通板することが極めて重要である。

温度変動が大きな接合部を安定して通板するためには、先に述べた高応答のミル剛性可変制御 (MMC) と、スタンド間のマスフロー変化にともなう張力変動を抑えるマスフロー制御が有効となる。さらに、仕上げミルモータの交流化による速度の高応答化および低慣性ルーバにより、スタンド間張力の制御性が向上し、より安定な圧延が実現する。接合部圧延時の張力変動に対しては、張力をミル主機モータの速度制御系にフィードバックする張力制御と、ルーバの角度をルーバ角速度制御系にフィードバックするルーバ角度制御の2つの制御ループで構成した。ルーバの角度制御性より張力制御性を高応答化するために、internal model control (IMC) を付加し

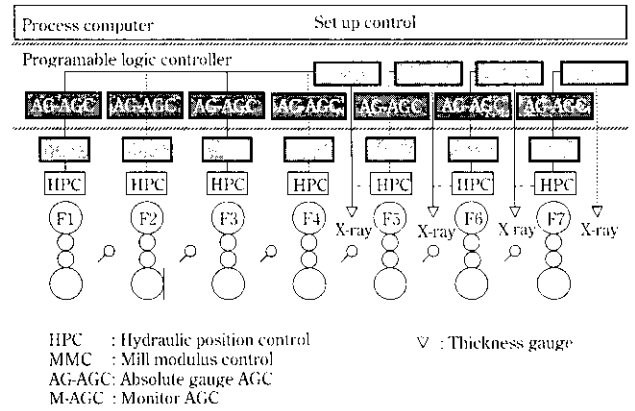


Fig. 7 Outline of automatic gauge control system

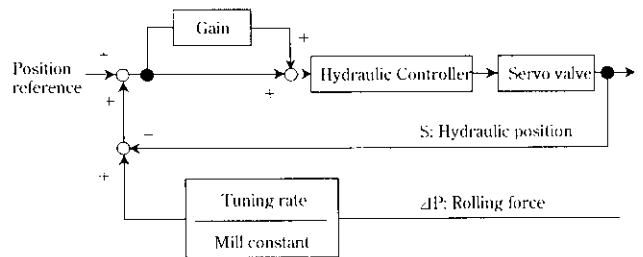


Fig. 8 Outline of mill modulus control (MMC)

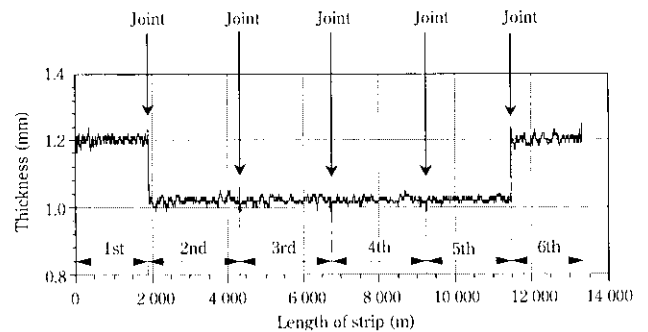


Fig. 9 Strip thickness chart of endless hot strip rolling measured X-ray thickness meter at F7 delivery point (strip thickness: $1.2 \rightarrow 1.0 \rightarrow \dots \rightarrow 1.0 \rightarrow 1.2 \text{ mm}$)

た。Fig. 10 にルーバ角度・張力制御システム構成図を示す。

クラウン・形状については、全スタンドにクラウン制御能力の高いベアクロスミルと強力なワークロールベンダーを採用し、広範囲の板クラウンを高精度に制御することを可能にした。Fig. 11 にクラウン・形状制御システムの概要を示す。圧延荷重の予測とロールプロフィールに応じ、クロス角およびワークロールベンディング力をセットアップする。ベンダーの荷重運動制御により、荷重変動にともなうクラウン・形状の変動を抑制している。Fig. 12 には 10 本接合のエンドレス圧延におけるエッジ 25 mm の板クラウン変化を、Fig. 13 にはエンドレス圧延材の仕上げ側形状計での測定結果を示す。ロールの熱膨張にともなう板クラウンの漸減は見られるが、安定なクラウンおよび形状を達成している。

3.5 高速切断巻取制御

バッチ圧延におけるコイラーの巻付き速度は最高でも 800 m/min 程度であるが、エンドレス圧延では最高 1200 m/min に達する。こ

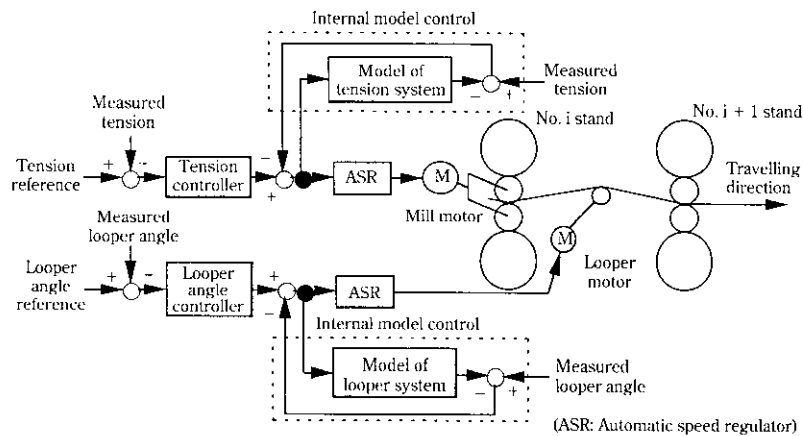


Fig. 10 Schematic diagram of tension and looper angle control system

の高速通板のもとで 0.8 mm までの極薄材を所定の位置で切断するため、切断点トラッキングおよび切断前後のストリップ張力制御、2 基のコイラーでの交互切替制御、および尾端定位置停止制御が重要となる。さらに、エンドレス圧延でのコイラー切替においては、

先行材尾端と後行材先端の通過時間は数十 ms 以下となるため、オペレータ介入の余地はまったくなく、完全な自動運転が必須となる。従来、特にコイラーピンチローラーはオペレータの介入が避けられない装置であったが、油圧サーボ圧下装置による押力制御により「オペレータ手動介入 0」のコイラー完全自動化を実現した¹⁰⁾。Fig. 14 に高速切断巻取の主要制御技術を示す。コイラー切替のサイクルタイムは 40s を達成している。

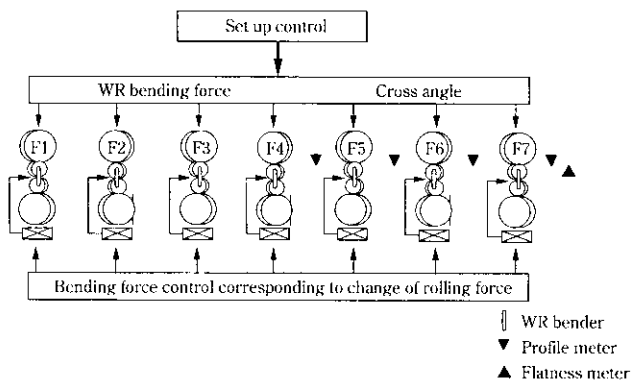


Fig. 11 Outline of crown and flatness control system

4 結 言

エンドレス圧延プロセス制御技術により世界初の熱間エンドレス圧延を実現した。本圧延技術の完成により、品質面では先尾端部の寸法、形状の不良が減少し、板厚精度では $\pm 30 \mu\text{m}$ オンゲージ率 (96→99.5%) が飛躍的に向上し、さらに通板トラブルが減少した。また、バッチ圧延では不可能であった板厚 1.2 mm、板幅 1600 mm の薄物広幅鋼板や板厚 1.2 mm 以下の極薄鋼板の安定生産が可能となり、さらに潤滑圧延あるいは強冷却圧延による新材質鋼板の製造も可能となった。

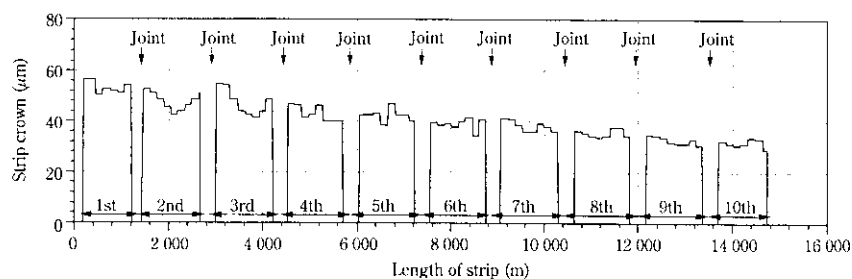


Fig. 12 Changes in strip crown during endless hot strip rolling measured by profile meter at F7 delivery point (strip thickness: 1.66 → 1.26 → ... → 1.26 → 1.66, width: 1 220 mm)

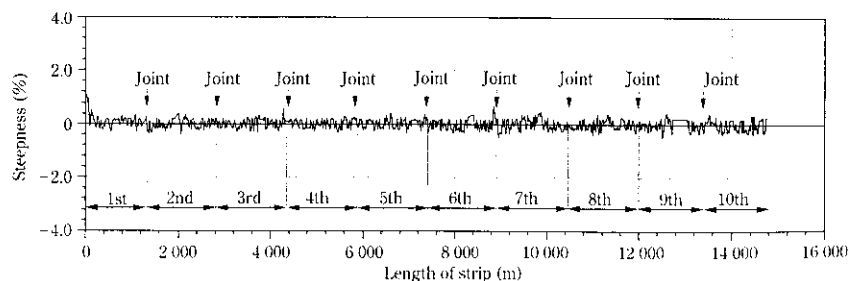


Fig. 13 Steepness chart at F7 delivery point (strip thickness: 1.66 → 1.26 → ... → 1.26 → 1.66, width: 1 220 mm)

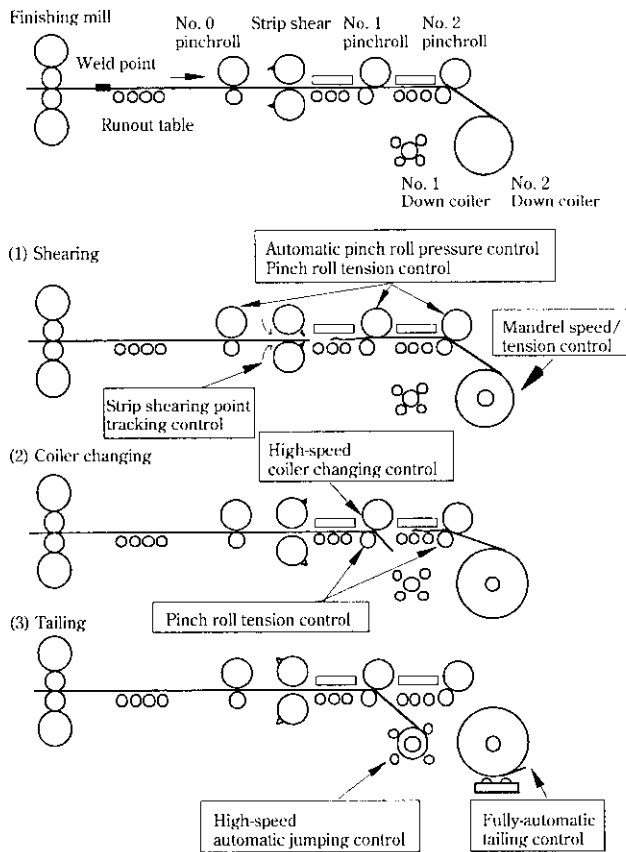


Fig. 14 Process control of high-speed shear and coiler in endless hot strip rolling

参考文献

- 1) 今江敏夫, 野村信彰, 三吉貞行: 川崎製鉄技報, **28**(1996)4, 219
- 2) 二階堂英幸, 磯山 茂, 野村信彰, 林 寛治, 森本和夫, 坂本秀夫: 川崎製鉄技報, **28**(1996)4, 228
- 3) 吉村宏之, 川瀬隆志, 前田一郎: 川崎製鉄技報, **28**(1996)4, 233
- 4) 後藤 太, 野村信彰, 武智敏貞, 高野 武: 材料とプロセス, **10**(1997)5, 280
- 5) 村山彰二, 前田一郎, 三吉貞行, 後藤 太, 野村信彰: 材料とプロセス, **10**(1997)5, 236
- 6) 山崎孝博, 磯山 茂, 植田 潔, 香川卓士, 市井康雄, 永井一則: 材料とプロセス, **10**(1997)5, 284
- 7) 香川卓士, 加地孝行, 市井康雄, 二階堂英幸: 材料とプロセス, **10**(1997)5, 286
- 8) 二階堂英幸, 市井康雄: ふえらむ, **2**(1997)11, 824
- 9) 虎尾 彰, 浅野一哉, 高田 一: 川崎製鉄技報, **31**(1999)1, 82
- 10) 久木崎太一, 今関敏夫, 清水益人, 桑野直樹, 植田 潔, 市井康雄, 高世 寛, 佐藤 久, 桑野 博: 材料とプロセス, **10**(1997)5, 287