
川崎製鉄における厚鋼板製造プロセス技術の進歩

Development of Steel Plate Manufacturing Technologies at Kawasaki Steel

西田 俊一(Shun-ichi Nishida) 奥村 健人(Taketo Okumura) 上村 尚志(Takashi Uemura)

要旨：

近年の川崎製鉄における厚鋼板製造プロセス技術の進歩を概括した。板厚制御技術としては、仕上ミル直近 γ 線厚さ計を設置するとともに油圧 AGC システムを更新し、さらに先尾端非定常領域への新制御方式を開発した。また、ミル近接平坦度計データをもとにワークロールベンディング力を設定する平坦度制御の開発、加速冷却設備の均一冷却化改造、ホットレベラの更新により、平坦度が向上した。剪断ライン設備として新たに冷間ミリング設備を導入するとともに、新板長測定システムの開発を行い、製品板幅、板長の寸法精度を向上させた。さらに、冷間 γ 線厚さ計の更新、平坦度計の導入、平面形状計の開発により、品質保証レベルが向上した。

Synopsis：

The development of steel plate manufacturing technologies at Kawasaki Steel since 1987 is described. A proximate γ -ray thickness gauge at a distance of 2 m from the finishing mill, a remodeled hydraulic AGC, and head and tail end thickness control systems were developed as the constituents of the advanced methods for plate thickness control. A shape control system composed of work roll bending force control based on data from a shape meter, an improvement on accelerated cooling device control for uniform cooling, and the renewal of hot leveller improved flatness. A milling machine and a new plate length meter on the shearing line achieved highly accurate edge cutting. A 3-head γ -ray thickness gauge, a flatness meter, and a plan view shape meter were installed on the shearing line as automatic inspection devices.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

Development of Steel Plate Manufacturing Technologies at Kawasaki Steel



西田 俊一
Shun-ichi Nishida
厚板セクター室 主査
(課長)



奥村 健人
Taketo Okumura
厚板セクター室長



上村 尚志
Takashi Uemura
水島製鉄所 厚板・鋳
鍛部長

要旨

近年の川崎製鉄における厚鋼板製造プロセス技術の進歩を概括した。板厚制御技術としては、仕上ミル直近 γ 線厚さ計を設置するとともに油圧 AGC システムを更新し、さらに先尾端非定常領域への新制御方式を開発した。また、ミル近接平坦度計データをもとにワークロールベンディング力を設定する平坦度制御の開発、加速冷却設備の均一冷却化改造、ホットレベラの更新により、平坦度が向上した。剪断ライン設備として新たに冷間ミリング設備を導入するとともに、新板長測定システムの開発を行い、製品板幅、板長の寸法精度を向上させた。さらに、冷間 γ 線厚さ計の更新、平坦度計の導入、平面形状計の開発により、品質保証レベルが向上した。

Synopsis:

The development of steel plate manufacturing technologies at Kawasaki Steel since 1987 is described. A proximate γ -ray thickness gauge at a distance of 2 m from the finishing mill, a remodeled hydraulic AGC, and head and tail end thickness control systems were developed as the constituents of the advanced methods for plate thickness control. A shape control system composed of work roll bending force control based on data from a shape meter, an improvement on accelerated cooling device control for uniform cooling, and the renewal of hot leveller improved flatness. A milling machine and a new plate length meter on the shearing line achieved highly accurate edge cutting. A 3-head γ -ray thickness gauge, a flatness meter, and a plan view shape meter were installed on the shearing line as automatic inspection devices.

1 緒 言

川崎製鉄の厚鋼板は、最大製品幅 5350 mm が圧延可能な世界最大級の 4 段可逆式圧延機を有する水島製鉄所厚板工場で製造される。当厚板工場は、1976 年の稼働当初より高品質な製品を高効率に生産することをめざし、各種設備の計算機制御や自動化機器を積極的に導入してきた¹⁾³⁾。

オイルショック以降の 1970 年代後半から 1980 年代前半にかけて、厚鋼板製造プロセス技術は平面形状制御に代表される歩止向上技術やホットチャージに代表される省エネルギー技術など、資源節約技術において長足の進歩を遂げた。当社では歩止向上技術において、業界に先駆け MAS (Mizushima automatic plan view pattern control system) 圧延法を開発実用化し⁴⁾、さらに 1980 年代後半にはトリミングフリー厚鋼板製造技術へと発展させた⁵⁾。

一方、材質造り込み技術として 1980 年代前半に圧延後の加速制御冷却を用いた TMCP (thermo mechanical control process) 技術が実用化され、炭素当量低減による高張力鋼の溶接性向上など厚鋼板

の性能向上に大きな効果をもたらした。当社も 1983 年に制御冷却設備を設置し⁶⁾、造船材、建築材、ラインパイプ素材などを中心に高性能厚鋼板を提供してきた。

歩止向上などの資源節約技術および TMCP 技術がある一定の高度な水準に到達した 1980 年代後半以降、厚鋼板製造プロセス技術に求められている課題は、高度化する需要家要求に対応した高品質造り込み技術の開発と、品質保証レベルの向上を可能とする FA (factory automation) 化技術の開発に集約される。本報告では、近年の当社における厚鋼板製造プロセス技術の進歩を概括する。

2 需要家要求に対応した高品質造り込み技術

2.1 板厚制御技術

厚板圧延における板厚精度は、1970 年代後半の油圧 AGC (automatic gauge control) 導入により飛躍的に向上した。その後も当社は、新たなコンセプトでのセンサー開発、制御装置のリブレースによる制御性能向上、先尾端非定常領域への新制御方式の適用などにより、さらなる板厚精度の向上にチャレンジしてきた。

まず特筆に値するのは、1987 年に世界で初めて導入した直近 γ

* 平成 10 年 6 月 18 日原稿受付

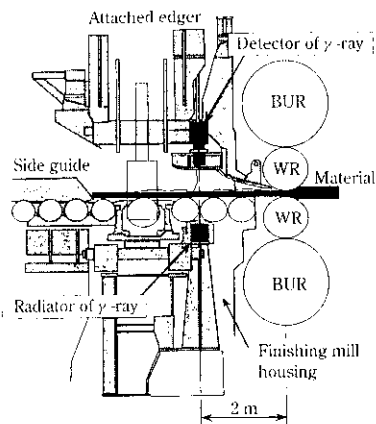
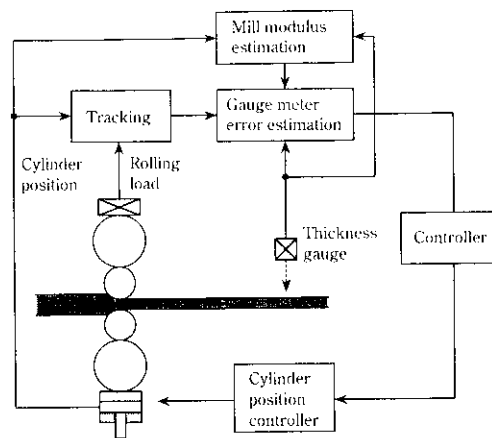
Fig. 1 Schematic view of proximate γ -ray thickness gauge

Fig. 3 Block diagram of new monitor AGC control

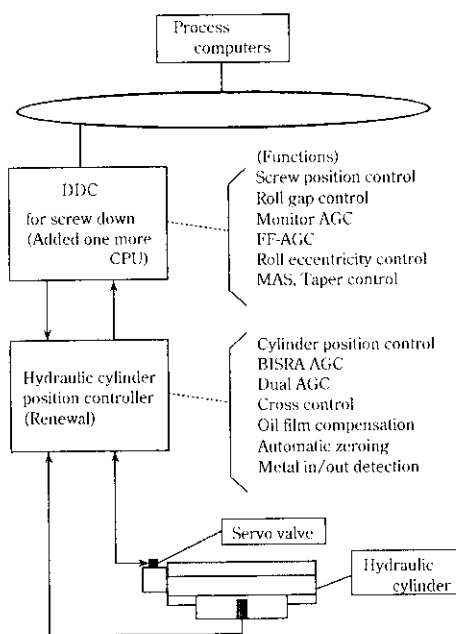


Fig. 2 Configuration of new AGC system

線厚さ計であろう。Fig. 1 に示すように、線源機器部と検出機器部を分離しそれぞれ単独にミルハウジングに取り付けることにより、厚板仕上げミル直近 2 m という設置位置を実現した。圧延機の直近は高温、多湿であり、さらにミル噛み込み時の衝撃および振動が極めて大きく、厚さ計という精密機器を設置する環境としては極めて劣悪である。導入にあたっては、検出機器部をメカニカルダンパーを応用した緩衝装置が組み込まれた恒温槽で保持することにより、設置環境の問題を克服した。

さらに、板厚制御のアクチュエータとして極めて重要な油圧 AGC システムを、1994 年に更新した。サーボ弁として応答性と耐環境性に優れた直動型を採用し、さらにシリンダに直付けすることにより応答性を飛躍的に向上させた⁹⁾。Fig. 2 に制御システム構成および機能を示す。高応答が要求される機能は油圧圧下制御装置内の専用コントローラで処理し、その他は圧下系 DDC (direct digital control) で処理する。シリンダ位置制御は DSP (digital signal processor) を採用することにより 1 ms の高速周期を実現した⁹⁾。なお今回新たに、左右シリンダを独立に制御できるデュアル AGC 機能と左右シリンダの応答性差を補償するクロスコントロール機能も

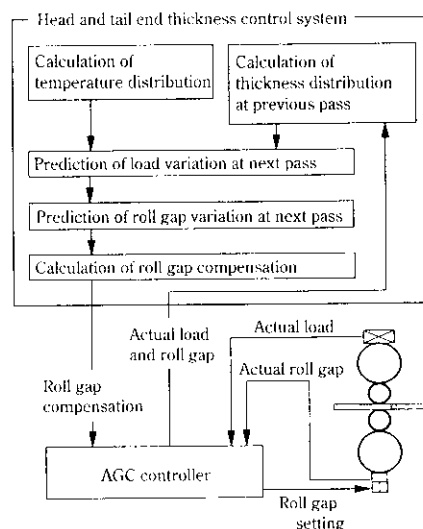


Fig. 4 Configuration of head and tail end thickness control system

導入した。加えて、直近 γ 線厚さ計と組み合わせたモニタ AGC について、トラッキングによる無駄時間補償およびミル定数誤差とゲージメータ誤差の圧延中同定を行うことにより、制御性向上を図った¹⁰⁾。Fig. 3 に制御ブロック図を示す。

板先尾端部すなわち非常領域の板厚精度は、AGC 作動前のセットアップ精度に起因するものと、AGC 作動後の応答遅れに起因するものに大別される。今回当社では、AGC 作動後の応答遅れの要因となる板先尾端部の急激な温度変化を予測し、AGC の応答遅れをフィードフォワードで補償するシステムを開発した¹⁰⁾。Fig. 4 に制御システム構成図を示す。板先尾端部の温度予測には新たに開発した 2 次元解析温度モデルを用い、温度分布から荷重分布を予測し、ゲージメータ式を用いてロール開度分布を算出し、AGC 応答遅れを考慮したロール開度補償量を決定する。

2.2 板幅・板長の寸法精度向上

タンクやカーキャリアデッキなどの用途では、厚鋼板の板幅および板長の寸法精度が良好であれば、需要家での再切断が不要となる。このような用途では、従来より JIS 規格以上の高寸法精度が要求されており、当社ではその実現に向けて各種開発を行ってきた。

前述のとおり、当社は平面形状制御技術として、1980 年代後半

Table 1 Specifications of milling machine

Place	Between side shear and end shear
Type	Helical milling
Cutter head	1 000 mm ϕ × 2
Feed speed	42 m/min max.
Depth of cut	20 mm/each side max.
Work thickness	4.5~80 mm
Milling control	Center position control (CPC) Edge position control (EPC) Straight position control (SPC)
Motor power	DC 200 kw × 2

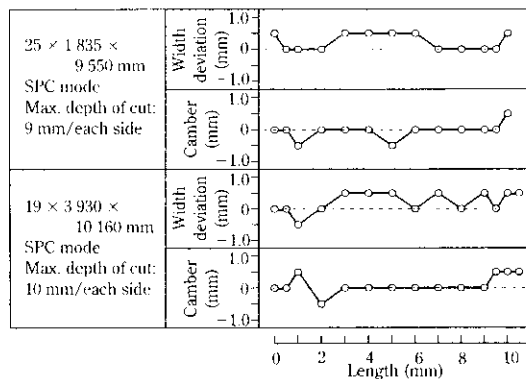


Fig. 5 Cutting accuracy of SPC mode by milling

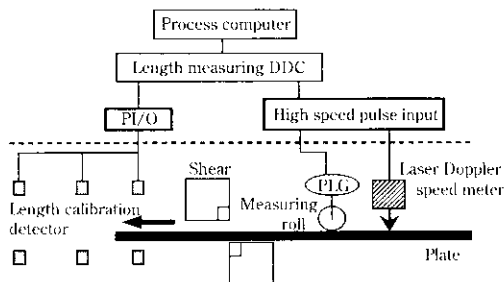


Fig. 6 System configuration of plate length meter

にトリミングフリー厚鋼板製造技術を開発実用化した¹⁰⁾。本技術では圧延段階で極めて高精度に板幅を造り込むため、板幅の仕上げを行う剪断ライン設備として、従来のサイドシャに代わり、冷間ミリング（研削）設備の適用が必要となる。そこで 1987 年に、サイドシャ、エンドシャ間に冷間ミリング設備を設置した^{12,13)}。Table 1 に設備仕様を示す。カッターが鋼板進行方向に 25° 傾斜したヘリカル切削方式を採用しており、片側最大 20 mm の切込深さを高速搬送にて実現している。冷間ミリング設備で SPC（直線切削）モードを適用して板幅仕上げを行った場合の製品板幅精度を、Fig. 5 に例示する。幅変動および長手方向直線性ともに従来のシャ剪断では不可能であった ± 0.5 mm 以内という高精度を実現しており、再切断の省略という需要家要求に十分対応可能である。

さらに、製品板長精度の向上にも取り組んでいる。エンドシャによる剪断精度の向上を図るべく、剪断位置決定のための板長さ測定について従来のメジャーリングロール方式に代わる新方式を開発し、1997 年より実操業に適用している¹⁴⁾。Fig. 6 に新システムの

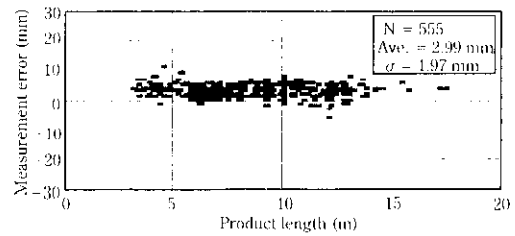


Fig. 7 Accuracy of shear cutting by new plate length meter

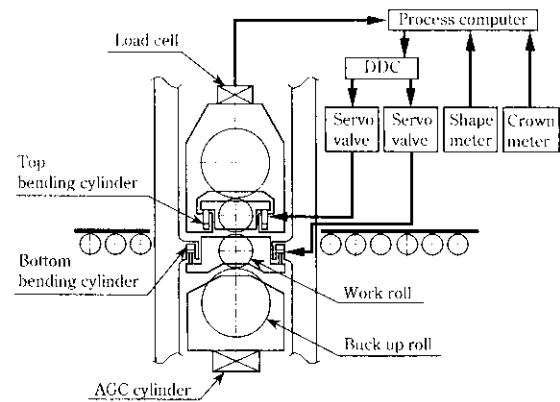


Fig. 8 Structure of shape control system

構成を示す。新板長測定システムは、レーザードップラ方式の速度計と鋼板先端検出器およびメジャーリングロール機構との組み合わせにより構成されている。本システムの適用により、板長測定精度 $\pm 0.02\%$ を実現している。これにより、Fig. 7 に示す高精度な製品板長精度が得られている。

2.3 平坦度の造り込み技術

近年、需要家での鋼材加工の自動化や高能率化が進むにつれて、厚鋼板の平坦度に対する重要性はますます高まってきた。平坦度の造り込み技術は、圧延段階での平坦度制御技術に始まり、加速制御冷却での均一冷却技術、さらには矯正技術、熱処理技術、切断技術など多岐に及ぶ。当社は、圧延、冷却、矯正と各種技術分野において、平坦度の向上を図るべく開発を進めてきた。

圧延段階における平坦度制御技術として、平坦度の実測情報にもとづいてワークロールベンディング力を制御する新制御技術を開発し、1992 年に開発実用化した¹⁵⁻¹⁷⁾。制御システムは Fig. 8 に示すとおり、ミル近傍 11 m の位置で圧延中の熱間鋼板の急峻度が測定できる半導体レーザスキャニング方式の平坦度計、3 ヘッドの線厚さ計（クラウンメータ）、ロードセルなどのセンサー、プロセスコンピュータなどの計算機、および最大 3.4 MN/チョック（制御範囲 2.2 + 1.2 MN/チョック）のワークロールベンディング装置で構成されている。ワークロールベンディングによる板クラウン制御能力を検証するために、実機厚板ミルにて冷間アルミ板の扶圧実験を行った。Fig. 9 に、板幅 4000 mm におけるベンディング力に応じた板クラウン変化量を示す。2.4 MN/チョックのベンディング力変化により 0.15 mm の板クラウン変化が得られており、広幅材に対しては平坦度制御のみならず板クラウン制御も可能である。Fig. 10 に、実機に適用しているワークロールベンディング力のセットアップアルゴリズムを示す¹⁸⁾。圧延途中パスでは各パスでの目標板クラウンを狙ってベンディング力を設定し、最終パス付近では平坦度計の実測デ

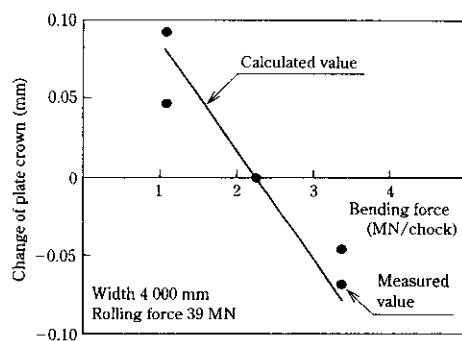


Fig. 9 Comparison of plate crown between experimental and calculated results by simulation model

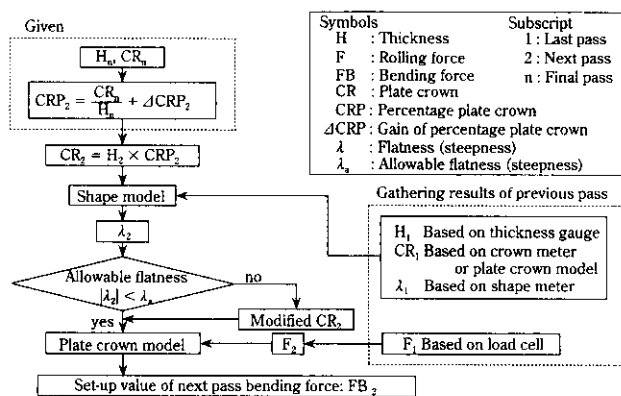


Fig. 10 Set-up algorithm for work roll bending force based on shape meter data

ータにもとづいて平坦度が良好となるようにベンディング力を設定する。アルゴリズム内に用いている平坦度モデルは、形状変化係数と入側伸び差率遺伝係数を用いて定式化した。なお形状変化係数については今回設置した平坦度計により収集した実機データを用いてモデル化した。

圧延後の加速制御冷却技術は、現在では厚板材質制御の中核に位置づけられており、ますますその重要性は高まっているが、プロセス技術の観点からは水冷時の不均一冷却に起因した鋼板歪みや、条切り時の残留応力開放による横曲がり、反りの発生といった解決すべき課題が残されている。当社では問題解決に向けての操業技術指針を得るために、圧延後の冷却条件から鋼板の温度分布、熱応力、形状変化を同時に予測する解析シミュレータを開発した¹⁹⁾。Fig. 11 にシミュレータの流れを示す。断面寸法、初期表面温度、水冷条件、化学成分、条切り条件などを入力し、熱間矯正や相変態の影響を加味した上で、最終的に室温での残留応力、平坦度、条切りキャンパー量を算出する。これらの解析結果や実験結果にもとづき、1995年に加速冷却設備の一部改造を実施した²⁰⁾。全冷却ゾーン長40mのうち、ミル寄りの10mについて水量密度を従来の2.2倍に増加するとともに、Fig. 12に示すとおり下部に斜方長円吹きスプレーノズルを採用し、鋼板先端および板幅エッジへの水乗りを防止した。さらに冷却ゾーン出側にエア－水切り装置を設置するなど、均一冷却に優れた設備とした。

熱間矯正工程についての対応は、TMCP鋼など低温矯正が余儀なくされる高強度材への矯正能力不足の解消を図るため、ホットレベラの設備更新を1988年に行った²¹⁾。Fig. 13に新設備の概要を示

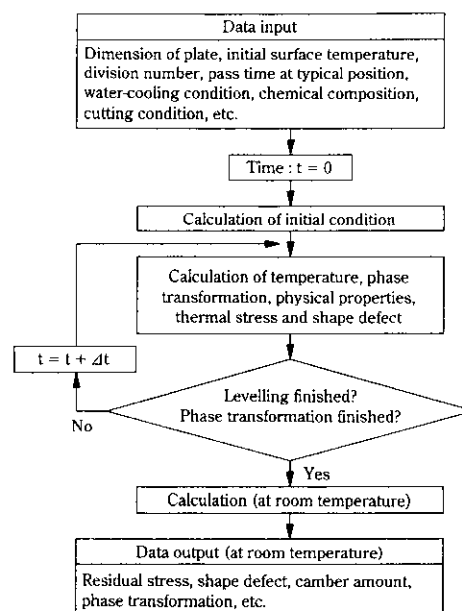


Fig. 11 Flow of the thermal stress and shape defect simulator

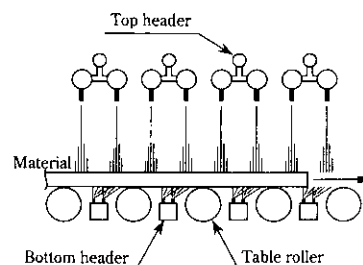


Fig. 12 Water-cooling device (ACC, #4 zone)

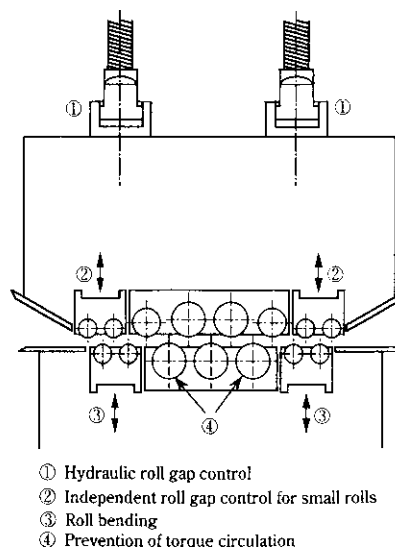


Fig. 13 The main functions of the new hot leveller

す。最大矯正反力は40.2MNであり、全15本のレベリングロールのうち、入、出側各4本はロール径190mm、ロールピッチ200mmの小径ロールとし薄物材矯正の対応とした。厚物高強度材矯正時には、上小径ロール群が上方ヘリトラクトする。下小径ロールは

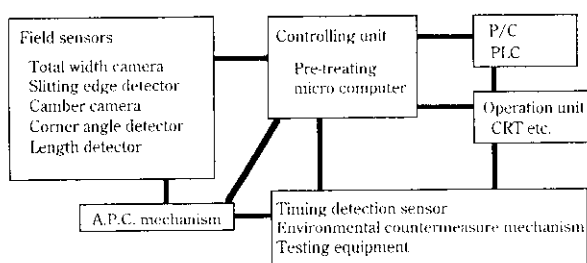


Fig. 14 System configuration of the plan view shape meter

フレーム折り曲げ式ベンダーを有しており、薄物部分歪みの矯正効果を高めた。圧下機構としては油圧圧下を具備しており、矯正中の圧下位置コントロールが可能である。さらに、下大径ロールのスピンデルにクラッチを設け板噛み込み後アイドルにすることにより、トルク循環を低減し厚物高強度材の強圧下矯正を可能とした。

3 品質保証レベルの向上を可能とする FA 化技術

当社では、厚鋼板製品の寸法、形状全数測定による品質保証レベルの向上を目指し、各種センシング技術を駆使して、高精度な寸法、形状測定が可能な自動検査システムの開発に取り組んでいる。

厚鋼板の板厚検査は、従来より冷間γ線厚さ計の測定値をベースとして行われている。当社では、1990年に設備更新を行い、検出器としてフォトマルを用いた高速応答型を採用するとともに、3ヘッドタイプとした²³⁾。これにより、極小測定エリアでの板幅方向3点同時測定が可能となり、板厚保証の信頼性が大きく向上した。

平坦度の検査機器としては、1992年にレーザ変位計を用いた平坦度計を導入した²⁴⁾。レーザ変位計を鋼板搬送方向に2列、板幅方向に30台配列するとともに、歪み演算にあたって鋼板ばたつきの影響を排除する最適アルゴリズムを考案することにより、高精度な鋼板全面の歪みデータが1s弱で算出可能である。

さらに、各種寸法、形状データの高精度自動測定を目的に、1994年に平面形状計を開発導入した²⁵⁾。測定可能項目は、板幅、板長さ、キャンパー、直角度の4項目である。平面形状計のシステム構成を、Fig. 14に示す。全幅測定は、測定範囲が最大4350mmも変化するため、二次元 CCD カメラと下部光源を複数組使用し高応答性を確保した。スリット剪断線検出計は、走査型二次元距離計を用い、

Table 2 Comparison of inspection methods

Inspection item	Conventional method	New method
Thickness	2-head γ-ray thickness gauge	3-head γ-ray thickness gauge
Width	Shearing device Plan view meter for as-rolled plate Inspection by operator	Plan view shape meter
Length	Shearing device Inspection by operator	Plan view shape meter
Camber	Inspection by operator	Plan view shape meter
Squaring angle	Inspection by operator	Plan view shape meter
Flatness	Inspection by operator	Flatness meter

鋼板の搬送中のばたつきおよび密着などの外乱に強い構成とした。その他の検出部には、汎用品のカメラ、画像処理装置、レーザ機器などを使用環境に応じて選定することにより、高精度および高信頼性を実現した。

今回のγ線厚さ計の更新、平坦度計および平面形状計の導入による寸法形状検査方法の変更点を、従来の方法と比較してTable 2に示す²⁵⁾。

4 結 言

高度化する需要家要求への対応および品質保証レベルの向上を目的として、1987年以降に当社が開発した高品質造り込み技術と FA 化技術は下記のとおりである。

- (1) 仕上ミル直近2mの位置にγ線厚さ計を設置、油圧 AGC システムを更新、さらに板先尾端非定常領域への新制御方式を開発し、板厚制御技術を向上させた。
- (2) 冷間ミリング設備の導入、新板長測定システムの開発により、製品板幅、板長の寸法精度を向上させた。
- (3) ミル近接平坦度計データをもとにワークロールベンディング力を設定するミル平坦度制御の開発、加速冷却設備の均一冷却改造、ホットレベラの更新により、平坦度を向上させた。
- (4) 冷間γ線厚さ計の更新、平坦度計の導入、平面形状計の開発により、品質保証レベルを向上させた。

参 考 文 献

- 1) 柳沢治明、三芳 純：川崎製鉄技報、8(1976)3、354-363
- 2) 佐々木健二、大島 真、平井信恒、土田 剛、石塚信秀、柳沢治明：川崎製鉄技報、8(1976)3、364-373
- 3) 三浦 恒、守谷正一、飯田永久、瀬川佑三郎、佐藤明宗、増田邦彦、石井功一：川崎製鉄技報、8(1976)3、374-387
- 4) 柳沢忠昭、三芳 純、坪田 哉、菊川裕幸、池谷高弘、磯山 茂、旭 一郎、馬場和史：川崎製鉄技報、11(1979)2、168-181
- 5) 井上正敏、西田俊一、大森和郎、岡村 勇、藤岡克志、片山二郎：川崎製鉄技報、20(1988)3、183-188
- 6) 平井信恒、江端貞夫、手塚 栄、田中康浩、志賀千晃、垂井 稔：鉄と鋼、70(1984)、S373
- 7) 片山二郎、山崎順次郎、馬場和史、岡村 勇、小川隆生、井上正敏：材料とプロセス、1(1988)、512
- 8) 弓削佳徳、吉里 勉、西崎 宏、柴田 亮、越智 潔、吉井 誠：材料とプロセス、7(1994)、1392
- 9) 高橋 暢、川島俊明、石川好蔵、弓削佳徳、吉里 勉、岡村 勇：材料とプロセス、7(1994)、1393
- 10) 弓削佳徳、高橋 暢、斧田大介、吉井 誠、吉里 勉：材料とプロセス、8(1995)、1186-1189
- 11) 柳野公治、岡村 勇、岩槻裕司、弓削佳徳：材料とプロセス、9(1996)、938
- 12) 広瀬圭介、井上正敏、竹内隆行、井上紀明、越智 潔、平田賢二、藤井 勲、怒和 孝：材料とプロセス、1(1988)、517
- 13) 片山二郎、竹内隆行、井上正敏、藤岡克志、大野斗志雄：材料とプロセス、1(1988)、518
- 14) 片山二郎、穴吹善範、折田朝之、宮本 範：材料とプロセス、10(1997)、1032
- 15) 吉井 誠、大森和郎、越智 潔、磯山 茂、重田春樹、岡村 勇：材料とプロセス、5(1992)、585
- 16) 重田春樹、西田俊一、岡村 勇、川島俊明、吉井 誠、大森和郎：

- 材料とプロセス, **5**(1992), 586
- 17) 伊藤高幸, 西田俊一, 吉井 誠, 大森和郎, 川島俊明, 岡村 勇: 材料とプロセス, **5**(1992), 1567
- 18) 吉井 誠, 吉里 勉, 岡村 勇: 川崎製鉄技報, **28**(1996)2, 76-81
- 19) 伊藤高幸, 栗本雅充, 柴田 亮, 吉井 誠, 吉田 博, 玉利孝徳: 材料とプロセス, **7**(1994), 412-415
- 20) 伊藤高幸, 折田朝之, 高橋 暢, 越智 潔, 吉井 誠, 斧田大介: 材料とプロセス, **9**(1996), 325
- 21) 磯山 茂, 井上正敏, 大森和郎, 吉井 誠, 井上紀明, 越智 潔, 荒沖久良, 森田壽郎: 材料とプロセス, **1**(1988), 1600
- 22) 片山二郎, 馬場和史, 赤澤 元, 中路 茂, 岩村忠昭, 潮海弘資: 材料とプロセス, **4**(1991), 560
- 23) 片山二郎, 高橋 暢, 折田朝之, 飯田永久: 材料とプロセス, **5**(1992), 366
- 24) 片山二郎, 飯田永久, 山本達雄, 八苅 徹, 小見山義高: 材料とプロセス, **8**(1995), 1162
- 25) 八苅 徹, 折田朝之, 吉里 勉, 小見山義高, 片山二郎: 材料とプロセス, **8**(1995), 1163