

解説

受賞技術 - 33

新型高精度平坦度計を用いた 高強度熱延鋼板製造技術の開発

Development of the Hot Rolling Technique for High Strength Steel Sheets by Means of the New Accurate Shape Meter

日本製鉄(株) プロセス研究所 計測・制御研究部 課長
伊勢居良仁
Yoshito Isei

日本製鉄(株) 東日本製鉄所 工程業務部 課長
大杉正洋
Masahiro Osugi

日本製鉄(株) 技術開発本部 尼崎研究支援室 班長
加藤朋也
Tomoya kato

日本製鉄(株) 東日本製鉄所 薄板部 上席主幹
太田 武
Takeshi Ohta

1 緒言

高強度・高延性等の優れた機械特性を有する鋼材を製造するためには、熱間加工度と温度・冷却速度を所定の範囲に制御するいわゆる加工熱処理が必要である。この加工熱処理を熱延鋼板に適用するうえでは平坦度の確保が前提になる。熱間圧延時に鋼板の伸び率が幅方向に偏差をもつと板が波打つ座屈変形を起こす。このような鋼板の平坦性の不良は、通板安定性を阻害する要因となるだけでなく、圧延後の冷却時における波打ち部への冷却水溜まりなどによる冷却の不均一性を招き、目標の機械特性を得られなくなる。近年、自動車に対して環境対策として燃費向上が求められ、構造材に使用する鋼板を薄くすることで軽量化可能な高強度鋼板の需要が増加した¹⁾。しかし、これら高強度鋼板は高精度な加工熱処理を必要とするが、高圧下率、高荷重であるが故に必然的に平坦形状が悪化しやすい。

そこで、圧延機出側の平坦形状を平坦度計により測定し、

圧延ロールの湾曲度を制御することで鋼板をフラットにする自動平坦度制御が提案されたが、従来の平坦度計は、通板状況により測定できない場合や、目視状況と異なるなど測定精度に問題があり、実現できていなかった。今回、高精度・安定測定が可能なLEDドットパターン投影式の平坦度計を開発し、高精度な平坦度自動制御を実用化した。本開発技術は、令和2年度科学技術分野の文部科学大臣表彰科学技術賞(開発部門)を受賞した。本稿では、開発した平坦度計とこの平坦度計を活用した高精度な熱間圧延技術について紹介する。

2 従来技術の内容

2.1 薄板の熱間圧延プロセス

図1に熱延鋼板を製造する熱間圧延プロセスの設備構成²⁾を示す。熱間圧延プロセスは、一般的に、加熱炉、粗圧延機、仕上圧延機、ランアウトテーブル、巻取機にて構成されている。加熱炉で1200℃程度に加熱された鋼片は、サイジングブ

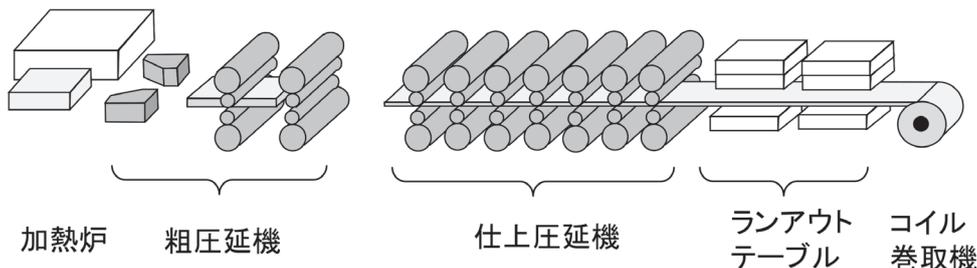


図1 熱間圧延プロセスの設備構成²⁾

レスで幅を調整された後に、粗圧延で圧延され粗バーと呼ばれる厚み30mm～60mmの鋼片に加工される。ついで、その鋼片は6または7スタンドで構成される仕上圧延機により所定の板厚に圧延される。仕上圧延後の板厚は1.2mm～数mm、温度は800℃～950℃、最高圧延速度は90km/hである。仕上圧延機を出た鋼板は、ランアウトテーブルと呼ばれる搬送テーブルを通りながら冷却水により指定された温度に冷却されてコイル状に巻き取られる。

高強度鋼板は強度向上のための合金成分を多く含み硬いこと、薄手化により圧下率が高くなることから、圧延荷重(圧延機が受ける反力)が高い圧延条件となり、普通鋼の鋼板の2倍にもなることがある。圧延荷重の増加は、圧延ロールの変形等を計算して求める板厚プロファイルの予測精度を悪化させる。板厚プロファイルの予測精度が悪化すると、板幅方向の圧延長さと分布の予測誤差が生じ、図2に示すような鋼板の平坦形状の不良が発生する³⁾。平坦形状の不良は、鋼板のばたつきや巻取り不良などの通板安定性を阻害する要因となるだけでなく、波打ち部への冷却水溜まりなどによる冷却の不均一性を招き、要求の機械特性を得られなくなる⁴⁾。

2.2 従来技術の問題点

圧延機出側の平坦形状を測定できれば自動制御が可能であるが、圧延直後の薄鋼板は上下方向のばたつきや蛇行、板波形状の変化を伴い高速で走行しているため、測定不良を生じない高精度な平坦度計は実現できていなかった。従来の仕上圧延機出側での平坦度測定方式としては、圧延方向に2組のレーザー距離計を配置したレーザーインビーム距離計方式^{5,6)}と、鋼板表面に広範囲に多数の線状パターンを投影する方式^{7,8)}がある。レーザーインビーム距離計方式の平坦度計は、圧延方向

に配置した2組のレーザー距離計を用いて定点での表面傾きを測定するため、圧延スタンドを固定端として板波が定在し、板波が静止したように観察されるときに測定精度に問題がある。一方、鋼板表面に広範囲に多数の線状パターンを投影する方法は、広範囲の板波形状を瞬時に一括で測定することで、板波が定在したときの測定精度劣化を抑制することができる。このため、高輝度なレーザービームにより線状パターンを鋼板表面に投影する方法が開発されたが、開発当時のレーザー技術では投影できる線状パターンの数が限定されたため、板波形状を正確に把握できず、測定精度に課題があった。また、光源として高輝度なランプを用いスライドを通して多数の線状パターンを投影する方法は、光源の寿命確保の課題にくわえて、投影パターンの照度分布を自由に調整できないため部分的に正反射光が入射するなど輝度分布にむらがあるときの測定安定性に課題がある。このように、従来の平坦度計は測定精度の悪化や測定不良が生じるため、自動制御へ適用できず、作業者の手介入に依存していた。結果的に、品質不良により出荷できない鋼板が生じていた。

3 開発技術の内容

3.1 LEDドットパターンプロジェクタの実現

多数の線状パターンを投影する方法では、正反射部において強度増加により観察カメラがハレーションを起こし、隣接する線状パターンが繋がって観察されるパターンつぶれが問題となる。線状パターンピッチとパターンつぶれの関係を調査した結果、表1に示すように投影パターンを千鳥状パターンに変更すれば、パターンつぶれを抑制するために明部間の間隔を広くしても測定分解能を確保できるとのアイデアを

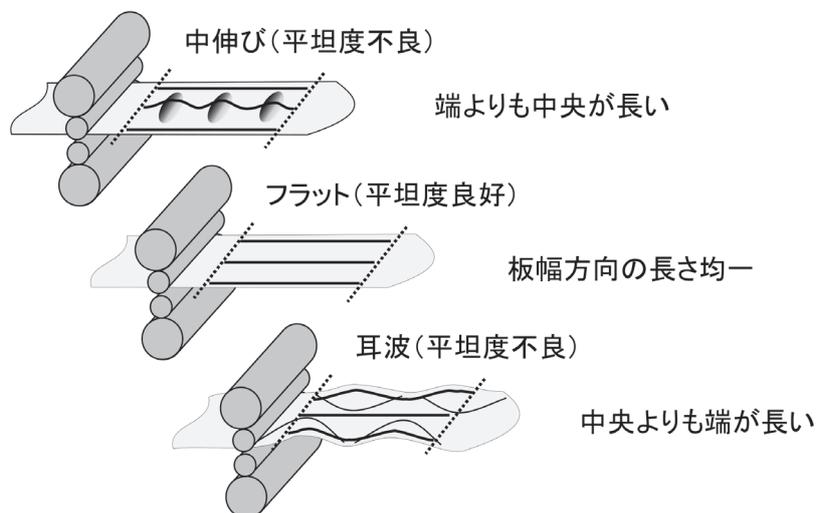
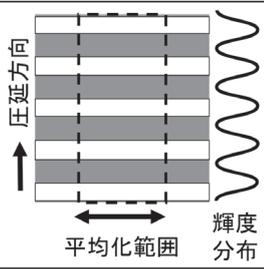
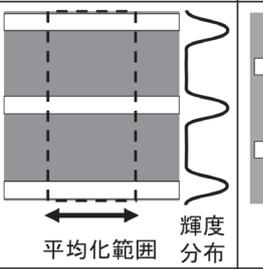
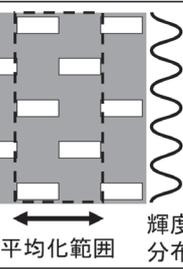


図2 圧延時に発生する鋼板の平坦形状の例³⁾

表1 投影パターンとパターンつぶれ、測定分解能の関係³⁾

	狭いピッチの線状パターン	広いピッチの線状パターン	千鳥状パターン
撮像画像 (投影パターン)			
正反射部の パターンつぶれ	つぶれ易い	つぶれ難い	つぶれ難い
測定分解能	高い	低い	高い
明部の面積率	0.5	0.25	0.25

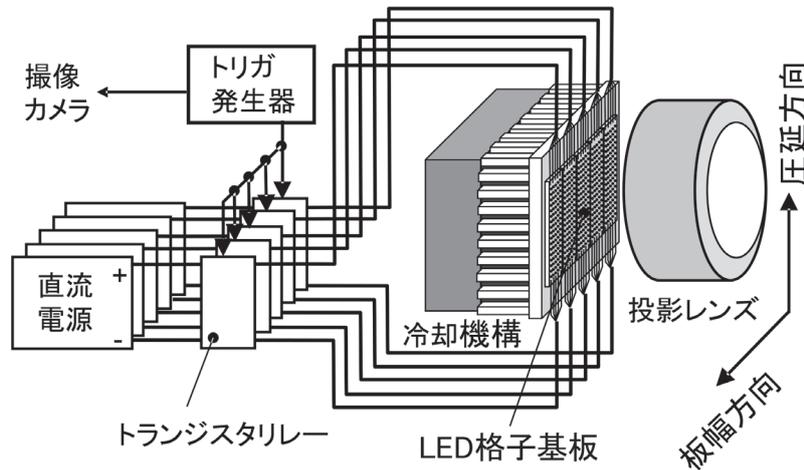


図3 LEDドットパターンプロジェクタの構成³⁾

思いついた。また、千鳥状パターンをスライドで形成すると、光を遮断する部分の面積が大きく、投入電力の大半が無駄なることに気付いたことが、多数の光ドットを集めてパターンを形成する全く新しい「LEDドットパターン投影法」を実現する動機となった。

これを具現化するには、当時、照明用途としてパワー密度が向上していた1 mm角程度のパワーLED素子を精密に配列してパターンを形成することが最適であると考えた。しかし、1000個以上のパワーLED素子を100mm角程度の基板上に狭ピッチで配置することは、発熱量が大きく連続点灯できないため前例がなかった。LED実装方法の検討、発熱対策の試作と評価を繰り返した結果、カメラが撮像するタイミングのみLEDを点灯する電流供給回路の実現と、LED素子を高熱伝導のアルミ基板上に直接実装するCOB (Chip On Board) 技術を有したLED実装メーカの協力により、発熱を

実用可能なレベルに抑制できる目途が得られた。

図3に開発したLEDドットパターンプロジェクタの構成を示す。発光部は、5枚のLED格子基板で構成されている。基板表面に1200個のパワーLED素子を二次元的に配列することで、周期的なパターンを形成する。パワーLEDは赤熱する鋼板上でも明瞭に観察できるように青色のLEDを採用した。LED格子基板から放出された光は、LED格子基板の前方に配置された結像レンズにより、LED素子配列で形成された千鳥状パターンを鋼板表面の板幅方向に約1800 mm、圧延方向に約1000 mmの範囲に拡大投影する。LEDの発光はカメラのシャッターと同期させることで、発熱を最小限にしている。また、各基板の入力電力を調整することで、板幅方向の明るさ分布を調整できる。LEDドットパターンプロジェクタは非常にコンパクトであり、スペース制約の大きい既存の仕上圧延機にも容易に設置できる。

3.2 LEDドットパターン投影方式平坦度計

図4に本LEDドットパターンプロジェクタを適用した平坦度計の装置構成を示す。パターン投影方式による平坦度測定では、プロジェクタを用いて、鋼板に対して圧延方向の斜め上方から角度 β で鋼板表面に圧延方向に周期的なパターンを投影し、その鋼板表面の周期的なパターンを異なる方向の角度 α に設置されたカメラで撮像する。図5にパターン投影方式による表面角度の測定原理を示す。圧延方向を x 軸として、鋼板が平坦で傾きがないときに観察されるパターンピッチ分布を $P_r(x)$ 、鋼板が平坦でなく傾きが生じた場合に観察されるパターンピッチ分布を $P_s(x)$ とする。傾きが生じると、鋼板表面がカメラ側に傾いた部分のパターンピッチは広く観察され、鋼板表面がプロジェクタ側に傾いた部分のパターンピッチは狭く観察される。このとき、鋼板表面の傾き $\theta(x)$ は、式(1)により求めることができる。

$$\theta(x) = \tan^{-1} \left\{ \frac{P_s(x)/P_r(x) - 1}{\tan \alpha + (P_s(x)/P_r(x)) \tan \beta} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

あらかじめ平面板を置いて、投影範囲の基準パターンピッチ分布 $P_r(x)$ を測定しておけば、圧延後の鋼板を測定して得られ

たパターンピッチ分布 $P_s(x)$ から圧延方向の角度分布 $\theta(x)$ を求めることができ、圧延方向に積分することにより鋼板の長さ(伸び)を算出できる。

図6にオンラインでの測定画像例を示す。板幅方向に5分割されたLED基板の入力電力を調整することで、鋼板の全幅にわたり明瞭に投影パターンを観察可能である。板波形状が高速に変化しながら高速で圧延される鋼板であっても、パターンがブレない短い露光時間で画像を撮影してパターンピッチ分布を解析することにより、高精度に平坦度を測定することができる。開発した平坦度計は最高速度90km/hで圧延される最大板幅1650mmの鋼板を対象として、鋼板両エッジと中央を含む板幅方向5か所の伸び率をリアルタイムに測定し、急峻度(波高さ/波長)に換算して出力する。

図7にオンラインでの測定安定性の評価結果を示す。1コイル圧延中に処理された全画像数に対する正常にパターンピッチが検出できた画像数の割合で定義した測定成功率により評価した。連続して圧延した1500本の鋼板の測定成功率の平均値は99.994%であり、最小値でも98.5%と高率であった。測定成功率が下がった鋼板の画像を確認すると、その原因は2種類であった。一つ目の原因は、板厚が1~2mmの

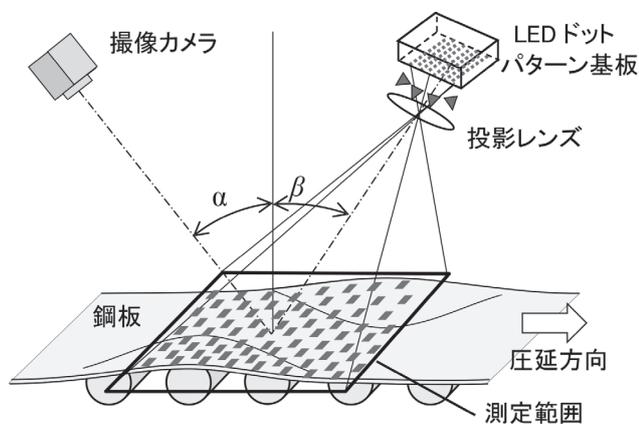


図4 LEDドットパターン投影方式平坦度計の装置構成³⁾

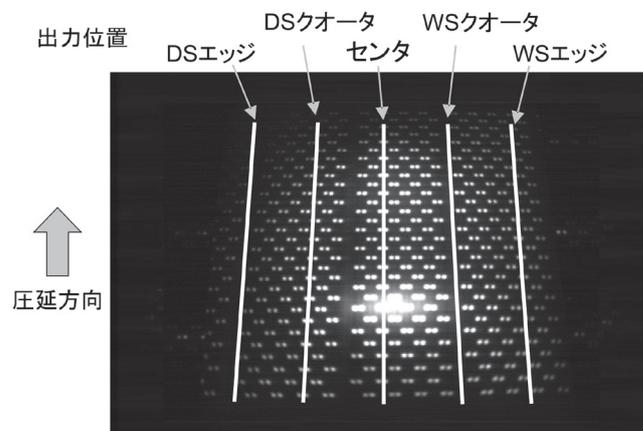


図6 オンラインでの測定画像例³⁾

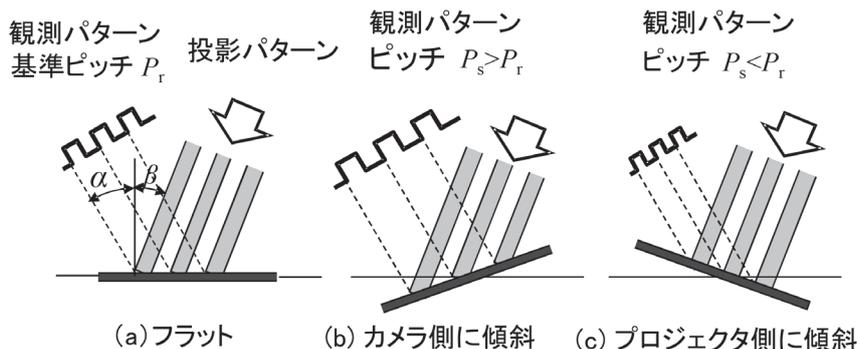


図5 パターン投影方式による表面角度の測定原理³⁾

薄物材の圧延において、鋼板先端がループ状に数百mm浮き上がって通板が非常に不安定になり、鋼板がパターン投影範囲から外れたためであった。もう一つの原因は、鋼板表面に生成した酸化膜の状態により表面の鏡面性が強くなり、部分的にパターン観察部の輝度不足または輝度飽和が発生したためであった。しかし、測定不成功になった時間はいずれも1秒程度以下であり、測定有効性が回復した後、すぐに平坦度制御を再開できている。このように、新開発の平坦度計は、すべての圧延コイルに対して、鋼板の上下パスライン変動や蛇行、板波の状態によらず伸び率の幅方向分布を高精度に出力でき、従来、人の目と経験に頼っていた平坦度測定を、作業者を介さずに高精度に実現した。

3.3 自動平坦度制御

図8に開発した自動平坦度制御の構成を示す。仕上圧延機出側に設置した平坦度計で測定した伸び率の板幅方向分布を対称成分と非対称成分に分離し、圧延機の圧延ロールの湾曲度と平行度を独立して操作することにより、高強度の薄鋼

板を曲がりなく、フラットに自動的に修正することに成功した。 10^{-4} オーダーの微小な伸び歪を高精度に制御するため、操作量を単位量変更したときの平坦度変化をオンラインで予測計算するモデルを開発し、その予測値を用いて制御ループを正規化するように制御系を構成⁹⁾した。これにより制御ゲインが常に適正化されるようになり、すべての鋼板を対象とした自動平坦度制御が24時間トラブルなく適用できるようになった。図9に制御効果の例を示す。制御未実施時は張力が付与される巻き取り開始時まで形状不良が継続しているが、制御実施時は平坦度計測定開始後の早期に形状不良がフラットに自動修正されている。

自動平坦度制御の適用により、圧延後の鋼板がフラットに改善され、冷却時における鋼板波打ち部への水溜りなどによる冷却の不均一性を抑制できた。また、鋼板と搬送ローラとの接触が安定することにより搬送時に発生するスリ疵が減少し、コイル状に巻き取る際に板幅方向の端部が局部的に折れる耳折れも減少した。このように、平坦度改善の直接効果に加え、冷却温度外れやスリ疵などの平坦度起因の製造歩留まりロスが自動制御適用前より約30%も減少した。

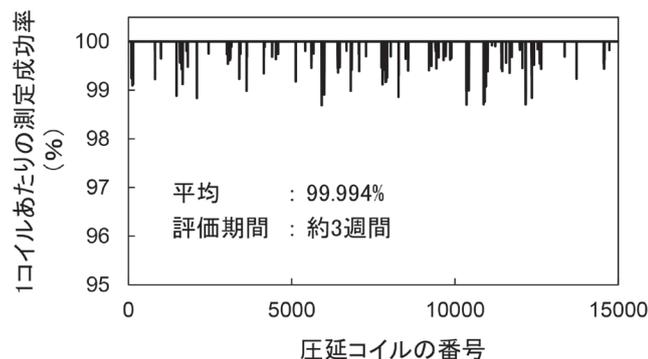


図7 オンラインでの測定安定性の評価結果³⁾

4 本開発技術の成果による社会的効果・実施効果

本開発技術を熱間圧延プロセスに適用することで、薄手、高強度な鋼板の品質と生産性が飛躍的に向上した。自動車の燃費向上を進めている自動車メーカーからの高強度鋼板の増産要求に応え、自動車からのCO₂ガス排出抑制に貢献している。また、全圧延コイルに対して生産性と生産歩留まりが向上したため、単位重量あたりの圧延に要する燃料原単位が改善し、さらに、不良品の減少により再圧延に生じていたエネ

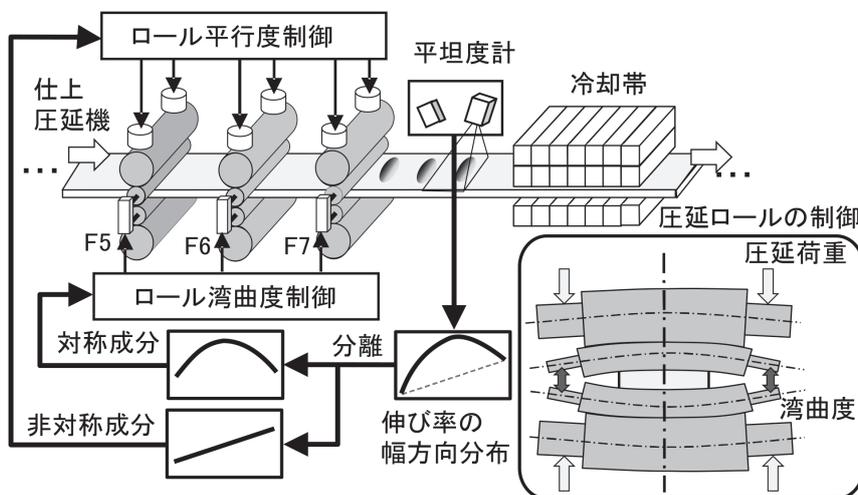


図8 自動平坦度制御の構成³⁾

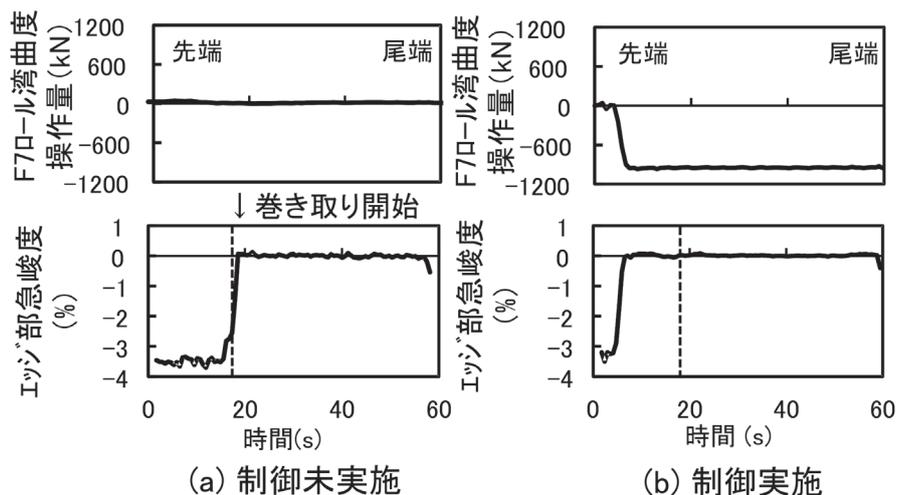


図9 自動平坦度制御の効果例³⁾

ルギーも削減された。このように、鋼板の生産過程におけるCO₂ガス排出抑制にも貢献できた。

近年の日本鉄鋼業がかかえる課題として、団塊の世代を代表とした熟練作業員引退による作業員の急速な若年高齢化、生産設備の老朽化のもとでの高品質な鋼材の製造と安定生産の両立があげられる。新開発の平坦度計はコンパクトな装置であり、従来の平坦度計では適用できない国内の既存の熱間圧延設備にも大きな投資なしに設置可能であり、開発した自動平坦度制御は、従来の作業員の手介入よりも正確に自動で鋼板の平坦度を改善し、高強度鋼板を効率よく製造できる。このように、本開発技術は日本特有の課題への対策にも有効であり、日本鉄鋼業の国際競争力の向上に貢献できる。

5 結言

本平坦度計と平坦度自動制御は、旧住友金属工業時の鹿島地区熱延工場において開発され、旧新日本製鐵との合併を機に日本製鉄内の熱延工場へ展開が進められた。より一層多くの熱延鋼板の生産性向上と品質向上に寄与し、CO₂ガスの排出抑制にも貢献している。

参考文献

- 1) 林央：塑性と加工, 58 (2017), 99.
- 2) 伊勢居良仁：ふえらむ, 23 (2018), 420.
- 3) 伊勢居良仁, 加藤朋也, 大杉正洋, 太田武：鉄と鋼, 105 (2019), 20.
- 4) 柳修介, 山口証, 奥野利明, 小林正宜：神戸製鋼技報, 61 (2011) 2, 69.
- 5) 山根孝夫, 齊藤森生, 菊地隆也, 清水録司, 植木勝也, 杉山昌之：材料とプロセス, 2 (1989), 1540.
- 6) 豊田利夫, 小笠原昭宣, 松原俊郎, 中村覚：鉄と鋼, 70 (1984), 1071.
- 7) 松井健一, 山本章生, 橘秀文：鉄と鋼, 74 (1988), 1817.
- 8) M. Degner, H.-C. Mentrup, N. Holzknrecht, U. Müller, G. Thiemann and D. Winter：MPT Int., (1998), 6, 60.
- 9) 太田武, 加藤朋也, 中田武男, 伊勢居良仁, 大杉正洋, 相原康宏, 渡部敦：計測自動制御学会産業応用部門大会講演論文集, 2012 (2012), 1.

(2021年2月26日受付)