

熱延仕上スタンド間鋼板速度計の開発

伊勢居 良仁*・本田 達朗*・木村 和喜*・焼田 幸彦*²・武衛 康彦*²

Development of Interstand Velocimeter for Hot Strip Finishing Mill

Yoshito ISEI, Tatsurou HONDA, Kazuyoshi KIMURA, Yukihiko YAKITA and Yasuhiko BUEI

Synopsis : To measure strip velocity accurately between the stands of the hot strip finishing mill is effective in keeping the stable production and improving the strip dimension control accuracy. Two laser doppler velocimeters has been installed at F4 stand exit and F5 stand exit for evaluating their durability and measurement accuracy. These velocimeters have achieved accurate and stable measurement in bad environment with water splash and high temperature at interstand of hot strip finishing mill by implementing the effective countermeasures to environment and improving the digital signal processing. F5 stand mass flow gage is calculated by using the F4 stand exit gage and the strip velocities measured by these velocimeters. The F4 stand exit gage is measured by existing interstand X-ray thickness gage. The evaluation results indicate that the mass flow thickness has been measured within $\pm 0.46\%$ accuracy and will be able to apply to the mass flow AGC (Automatic Gage Control) at the hot strip finishing mill.

Key words: laser doppler velocimeter; hot strip finishing mill; mass flow gage; digital signal processing; gage control.

1. 緒言

熱延鋼板の寸法精度に対する顧客からの要求は、非常に厳格化している。熱延鋼板の製造に用いられる仕上ミルは、7台の圧延スタンドからなり、粗ミルで圧延された粗バー(30~60 mm)を、製品板厚にまで連続圧延する設備である。本設備において重要な製品品質の一つである板厚精度が決まる。熱延仕上ミルの板厚制御には、鋼板先端部のセットアップ制御と、定常部のAGC (Automatic Gage Control, 自動板厚制御)がある。これまで、前者には、スタンド間X線厚み計を用いたフィードフォワード制御¹⁾、後者には、高応答の油圧圧下装置を適用することにより、板厚精度の向上が図られてきた。

セットアップ制御は、鋼板先端部が仕上ミルを通過する際に、各スタンドのロールギャップ、回転数を予め設定する制御である。現状では、これらの設定は圧延理論式により計算された先進率を用いるため、先端部板厚精度の劣化や、過張力など不適切な張力設定の原因となることがある。スタンド間に設置した鋼板速度計により先進率を実測できれば、これらを適正化でき、通板安定性向上による生産性向上や鋼板先端部での寸法精度向上に寄与することが可能である。

また、AGCにおいては、既存の仕上ミル出口厚み計測定値に基づくフィードバック制御(モニターAGC)が適用されているが、無駄時間の問題があり、制御性能向上に限界がある。スタンド間鋼板速度計を、既に実用化されて

いるスタンド間X線厚み計と併用することにより、制御遅れのない理想的な板厚制御である高応答なマスフローAGCを実現することができ、大幅に板厚精度を改善することが可能である。本制御方法は既に冷間圧延において実現²⁾されている。

このような新制御法を実現し、更なる寸法精度向上を図るためには、仕上スタンド間の鋼板速度を高精度に測定可能な鋼板速度計の開発が必要である。これまで、熱延仕上スタンド間における鋼板速度測定に関して、先進率予測誤差学習³⁾は報告されているが、マスフローAGCの実現性について言及された報告はない。マスフローAGCを実現するためには、冷間圧延での適用実績から判断すると、コイル全長にわたりX線厚み計と同等な応答速度、且つ、高精度な速度測定が必要である。しかしながら、劣悪なスタンド間の環境下において、この要求仕様を達成することは非常に困難である。

そこで、熱延仕上スタンド間にレーザードップラー方式の速度計(Laser Doppler Velocimeter)を設置し、上記課題解決のための信号処理改善と耐環境対策を行い、性能評価を実施した。本報では、その対策内容及び性能評価結果について述べる。

2. 技術開発課題

測定対象である熱延鋼板は、高速で通板され、且つ、700°C以上の高温であるため、高応答・非接触で測定可能

なレーザードップラー方式の速度計を適用することにした。

スタンド間は、圧延に伴う強烈な振動や高熱が生じる環境であり、また、圧延機間隔が約5mと非常に狭く、更に、圧延ロールや鋼板に対して大量の冷却水を使用しているため、蒸気や飛散水滴が充満している。

これに加えて、仕上ミルで圧延されている熱延鋼板は、張力制御を行うために設置されているルーパーにより、パスラインや傾きの変動が生じる。この様に、センサーの耐久性を確保することが困難であるのみでなく、光学式センサーの測定に必要なSN比(Signal to Noise Ratio)を確保することも困難な測定環境である。

熱延仕上スタンド間における鋼板速度計の技術開発課題は、以下の2つになる。

(1) レーザー光路確保、耐久性の確保を行うための環境対策により、全数のコイルを全長にわたり、高精度に測定可能とする。

(2) 振動やパスライン変動下での安定測定を確保するための高精度な信号処理により、応答速度10msにおいて、速度測定精度 $3\sigma=0.3\%$ を達成する。

この要求仕様は冷間圧延において適用されている鋼板速度計と同等のものである。

3. 速度計の測定原理

レーザードップラー方式の速度計はレーザー光を移動物体に照射し、その物体からの散乱光の周波数が、ドップラー効果によりシフトすることを利用し、移動速度を測定する。Fig. 1(a)に通常のレーザードップラー方式の速度計の構成を示している。レーザーから出た周波数 f_0 の光は、ビームスプリッターで2つに分けられ、移動する測定対象物表面に2方向から照射される。2つのレーザー光が交差する交差領域内の移動物体で散乱された光は、その速度に応じてドップラー効果を受け周波数が f_D だけシフトしている。ここにおいて f_D は

$$f_D = V/\lambda \cdot 2\sin\theta \dots\dots\dots (1)$$

で表される。

(1)式中の λ はレーザー光の波長で c/f_0 に等しい(c は光速)。 θ は2つの入射光の交差角である。

それぞれのレーザー散乱光の周波数は、 f_0+f_D 、 f_0-f_D となっている。この2つの光が受光素子上でヘテロダイン検波され、この差成分すなわち周波数 $2f_D$ のみが電気信号として取り出される。この信号を周波数分析することにより移動物体の速度 V を知ることができる。

レーザードップラー方式の速度計には、停止及び移動方向を判別可能とした周波数変調型と呼ばれるものがある。この構成をFig. 1(b)に示している。通常速度計に対して、

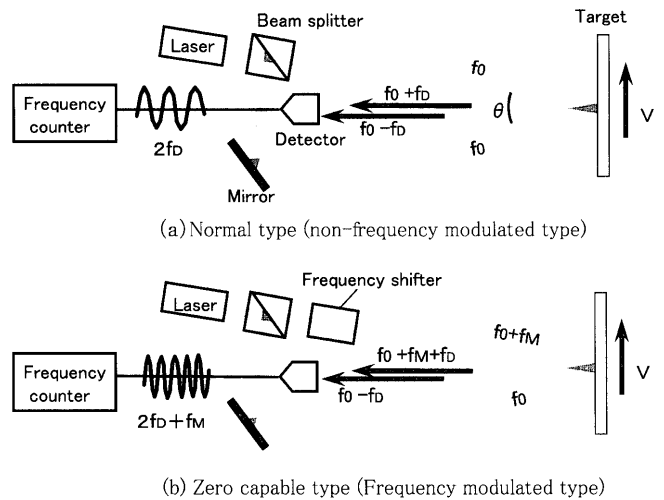


Fig. 1. Principal of strip velocity measurement based on laser doppler method.

片側のレーザー光に周波数シフターを備えており、レーザー光の周波数が f_0+f_M (f_M は周波数シフターによるシフト量)となって、測定対象に照射される。このため、最終的に周波数 $2f_D+f_M$ の電気信号が測定される。

いずれの測定方式においても、得られた電気信号は増幅、帯域制限等前処理を行なった後、周波数測定器で周波数 f_D を測定し、その周波数より速度 V が求められる。

4. 装置構成

4.1 設置スタンド

Fig. 2に熱延仕上ミルの設備構成、Fig. 3にスタンド間鋼板速度計の装置構成を示す。スタンド間鋼板速度計の設置スタンドとしては、スタンド間厚み計がF4-5間に設置されているため、F5直下のマスフロー板厚を測定可能なようにF4-5間、F5-6間とした。それぞれF4速度計、F5速度計と呼ぶ。

このような装置構成とすることにより、2台の速度計測定値 $V_{4out}(t)$ 、 $V_{5out}(t)$ とF4-5間X線厚み計測定値 $h_4(t)$ から、下記(2)式により、F5直下のマスフロー板厚 $h_{5MF}(t)$ を計算することが可能である⁴⁾。

$$h_{5MF}(t) = V_{4out}(t)/V_{5out}(t) \cdot h_4(t-u) \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 u は鋼板がスタンド間X線厚み計からF5スタンドまで移動するために要する時間を示す。

4.2 速度計の仕様

Table 1に使用したレーザードップラー方式の速度計の仕様を示している。測定方式としては、F4出側に変調周波数40MHzの周波数変調型速度計、F5出側に非変調型速度計を設置し、両測定方式の得失評価をおこなった。それぞれの速度計センサーヘッドは、測定対象との離間距離が1300mmまたは1000mmにおいて、レーザー光が完全に重

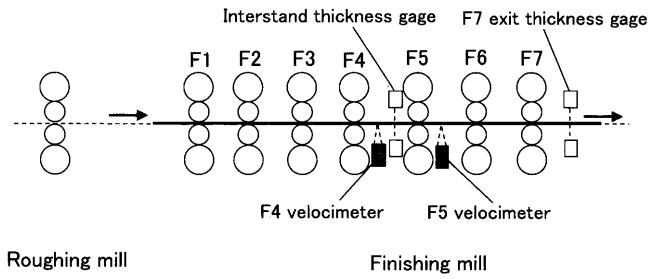


Fig. 2. Layout of hot strip finishing mill.

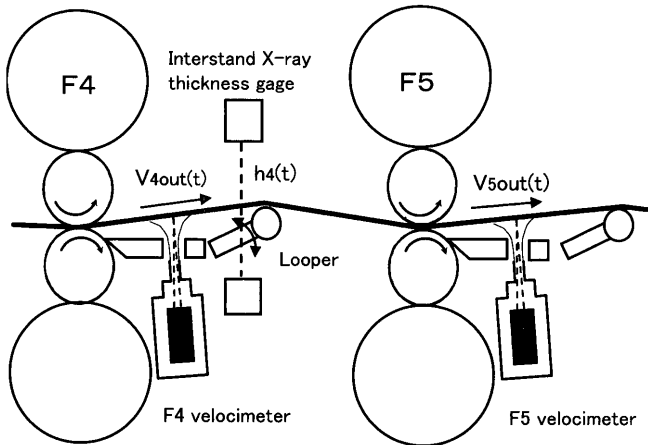


Fig. 3. Layout of interstand velocimeter.

Table 1. Specification of laser doppler velocimeter.

| Item | F4 velocimeter | F5 velocimeter |
|---------------------------|--|---|
| Working standoff distance | 1300±100mm | 1000±100mm |
| Measurement range | 0 to ±15000m/min Frequency modulated type | 2 to 10000m/min Non-frequency modulated type |
| Accuracy*1 | ± 0.1% | |
| Response*2 | 10msec | |

*1.Length measurement accuracy of calibration steel belt
*2.Measurement update period by signal processor

なるように調整されている。ドップラー信号強度はレーザー光の交差領域からの散乱光量により決まるため、測定対象がこの位置からずれると、測定対象面上での交差領域面積が減少し、ドップラー信号強度の低下を招く。信号処理回路にとって、周波数測定に必要なドップラー信号強度を得られる範囲が、測定可能なパスライン変動幅となる。

ドップラー周波数と速度の換算係数は交差角、レーザー広がり角等、直接測定困難な光学的特性に依存しているため、実際に移動体を測定して決定される。具体的には、回転する周長が既知の校正用ステンレス製スチールベルトの表面速度を測定して、その速度積分値から求めた長さ、校正用ベルト長を比較することにより行われる。使用した速度計は、校正用スチールベルト表面を測定した場合に、レーザー交差中心位置から ±100 mm の範囲において、

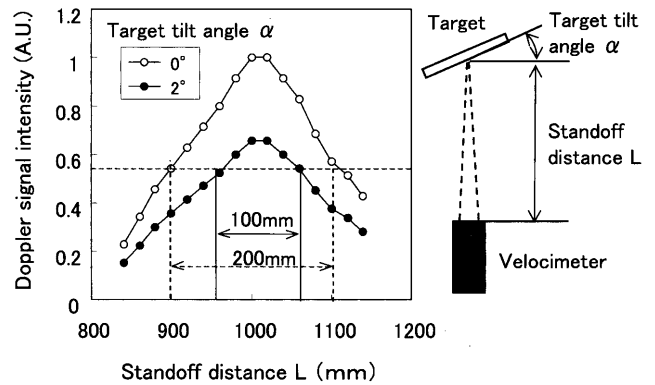


Fig. 4. Relation between standoff distance and doppler signal intensity in case of calibration to measure steel belt velocity.

ドップラー信号強度を確保しつつ、長さ測定精度が0.1%以内となるように調整されている。

本速度計のドップラー周波数測定器はドップラー信号がグランドレベル(0V)と交差する時間間隔から周波数を測定する、いわゆるゼロクロス法を用いている。この信号処理回路は、ドップラー8周期分のゼロクロス時間を測定し、得られた8周期分の時間間隔データから、ドップラー信号の周波数を求める。信号処理回路は、この処理を応答時間である10ms間にわたり、繰り返し行い、その平均値から測定対象の速度を計算し出力する。また、その応答時間内における周波数の検出を成功した割合を測定成功率%(Measurement success rate)として出力する。オンライン測定時において、この測定成功率を用いて速度計測定値の信頼性を評価することができる。

4.3 スタンド間における速度計の配置

熱延仕上スタンド間においては、張力制御のために設置されたルーバーの上下動により、鋼板は上下に変動し、パスラインと傾きが同時に変化することになる。鋼板が傾くことも、検出器に戻ってくる散乱光量の低下、即ち、ドップラー信号強度の低下を招く。この対策として、圧延時における各種鋼板の鋼板傾き角を調べた結果、鋼板傾きの変動幅は最大4°であることに着目し、速度計センサーヘッドを2°傾けて設置して、ドップラー信号強度低下を最小限にすることを考えた。また、速度計光軸に対する鋼板の傾き変動±2°から生じる最大測定誤差0.06%(=1-cos2°)については、ルーバー角度実績を元に補正することにした。

Fig. 4に使用した速度計を用いて、校正用スチールベルトを測定した際の、測定対象傾き0°、2°における、速度計センサーヘッドからスチールベルト表面までの距離とドップラー信号振幅強度の関係を示している。測定対象が2°傾くと、ドップラー信号強度は約3割低下するため、測定に必要なドップラー信号強度を検出可能なパスライン変動幅は±50mmに限定されることになる。圧延時のルーバー上下動に伴う鋼板傾き変動幅は最大4°であるので、パス

ライン変動幅が100 mm以内となるのは、圧延ロールからの距離が1434 mm以内である。速度計は圧延ロールから、この距離以内に設置されなければならない。

スタンド間の設置場所としては、上記圧延機からの設置距離の制約に加えて、鋼板上面は水乗りによる測定困難が予測されたため、圧延機直近の出口ガイドに穴をあけて鋼板の裏面を測定するようにした。本設置位置は、圧延ロールからの距離が1000 mm以内に行えることに加え、出口ガイドが速度計センサーヘッドのプロテクターとなるため、速度計センサーヘッドの破損を防止する上でも効果がある。

5. 環境対策

5.1 速度計センサーヘッドの保護

Fig. 5に速度計センサーヘッド周辺の装置構成を示す。速度計センサーヘッドは、ステンレス製の耐環境BOX内に収納されている。この環境BOXはエアパージにより、内部を陽圧化し、BOX内への水・粉塵の侵入を防止している。そのBOX上面には開口径φ50 mmのエアパージノズルを備えており、そのノズルを通して、レーザー光を鋼板裏面に照射して速度測定を行う。本エアパージノズルには総流量10Nm³/分を噴出する強力なエアパージを適用しており、ノズル開口部から、環境BOX内へ水や粉塵が侵入するのを防いでいる。また、環境BOX内部には防振ゴムによる防振機構、恒温冷却水による冷却機構を備えており、スタンド間の強烈な振動及び高熱から速度計センサーヘッドを保護している。

5.2 ロール冷却水からのレーザー光路確保

本速度計設置位置は、圧延機に非常に近く、大量の圧延ロールの冷却水が速度計のレーザー光路を阻害することになる。この冷却水がレーザー光路へ侵入する経路は、ガイド上を流れてガイド開口部に流入、ガイド下において下ワークロールからエアパージノズル開口部へ飛散する経路の2経路である。

ガイド上を流れてくる冷却水の対策として、ガイド開口部にパージエアと冷却水の流れ落ちる部位を分ける筒状の水切りパイプを設置した。しかし、設備構造上この出口ガイドは可動式であるため、エアパージノズル先端とガイド下面間に隙間が生じ、この隙間が新たな水侵入経路となる。このガイド開口部から侵入防止対策として、水切りパイプの形状と配置を適正化することにした。

適正化手法としては、Fig. 6に示す実機と同スケールの実験用模型を製作して、実際に水を流し再現試験を行った。光路内への水滴浸入状況はパージエア中心を通過したレーザー光の透過率により判断した。Fig. 7に、水切りパイプ径をφ100 mmとし、ガイド下面とノズル先端の間隔を変えた場合のレーザー透過率測定例を示している。ガイド下隙間を20 mmとした場合、ガイド上面から流れ落ちてきた

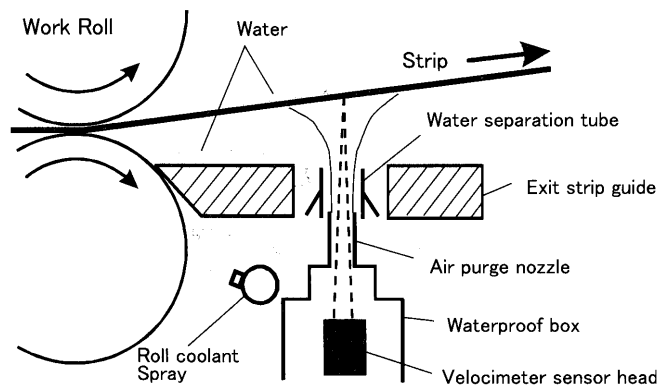


Fig. 5. Schematic diagram of around the Velocimeter sensor head.

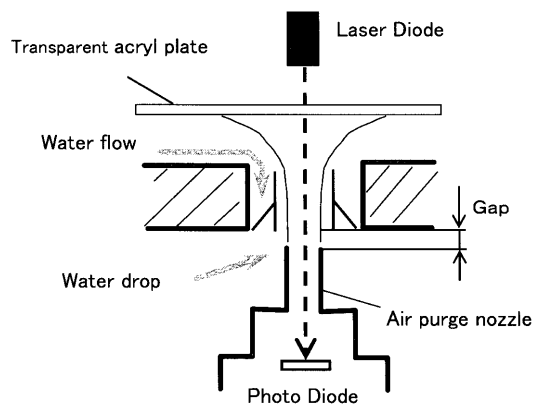


Fig. 6. Experimental setup of evaluating optical transmittance in condition disturbed by water flow.

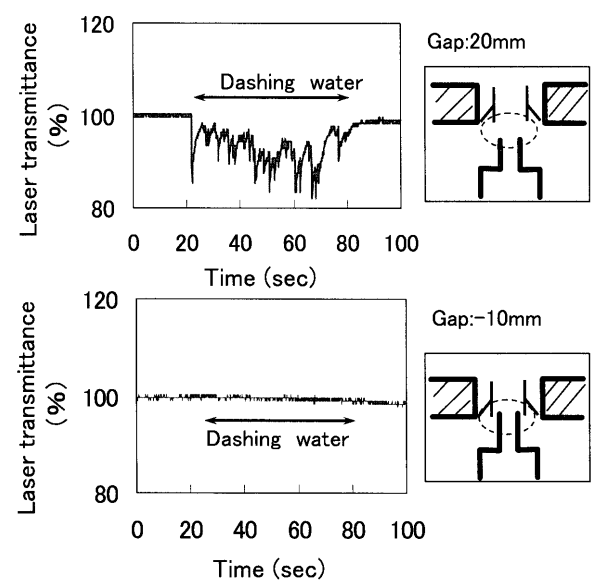


Fig. 7. Influence of water flow on optical transmittance.

水と飛散してきた水はパージエア内に巻き込まれ、レーザー透過率を大きく変化させる。一方、ノズル先端を水切りパイプ内に10 mm挿入させた場合、レーザー透過率の変化は全くなく、水の光路内へ侵入を防止できる。この条件は、ガイド下での下ワークロールから飛散してくる水についても光路内への侵入を防止できる。

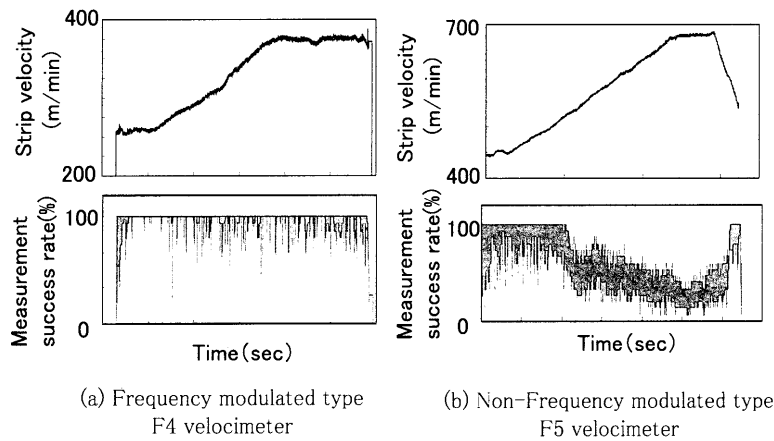


Fig. 8. Example of the strip velocity and measurement success rate measured by conventional signal processor.

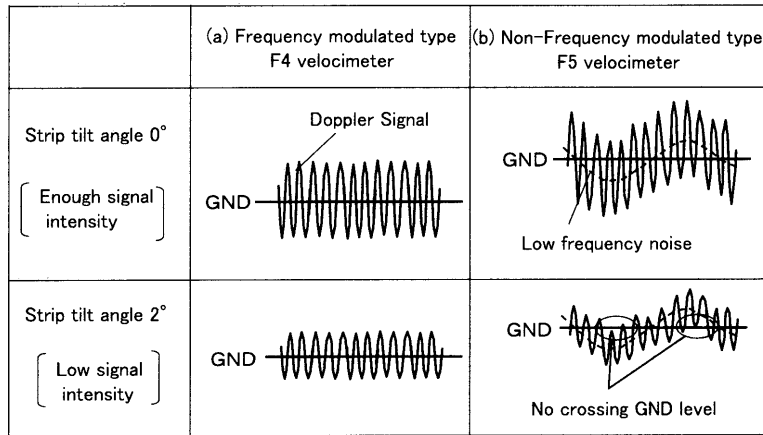


Fig. 9. Velocity measurement error caused by fluctuation of strip tilt angle and low frequency noise.

本条件を実機に適用することより、スタンド間の劣悪な環境下においても安定したレーザー光路を確保することができた。

6. 信号処理

6.1 オンライン測定時の問題点

Fig. 8に熱延仕上スタンド間におけるオンライン測定時の測定例を示す。Fig. 8(a)に変調型、(b)に非変調型速度計の速度測定値と測定成功率を示している。変調型については、測定成功率は、平均して90%以上で測定が可能だった。しかし、非変調型については、速度の速い薄物圧延時に鋼板の傾き変化に応じて測定成功率が低下することが判明した。

また、両速度計共に速度測定値の測定ばらつきが大きく、 $3\sigma=0.5\sim 1\%$ と要求する精度 $3\sigma=0.3\%$ に比べて悪い。

測定成功率低下の原因を調べるために、オンラインにおいて、両速度計に対してドップラー信号の観測を行った結果をFig. 9に示す。非変調型のドップラー波形には、圧延速度の速い薄物圧延時において、ドップラー信号周波数に比べて低周波のゆらぎが生じている。このような低周波ゆ

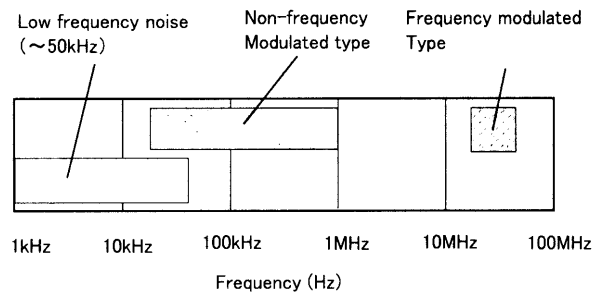


Fig. 10. Doppler signal frequency range used for velocity calculation (band pass filter range) and low frequency noise range.

らぎが生じた状態で、鋼板の傾きが大きくなり、ドップラー信号振幅が小さくなると、一部ゼロクロスしない部分が生じる。これが非変調型速度計における測定成功率低下の原因である。このような低周波ゆらぎは、測定対象の振動による周期的な受光量変動が原因で発生する。

両速度計間で、このような違いが生じた要因は、両速度計におけるドップラー信号の検出周波数帯域の違いにある。Fig.10に横軸を周波数として、両速度計のドップラー信号検出周波数帯域と低周波ゆらぎの周波数帯域を示す。変調型速度計においては、ドップラー信号は、40 MHz変

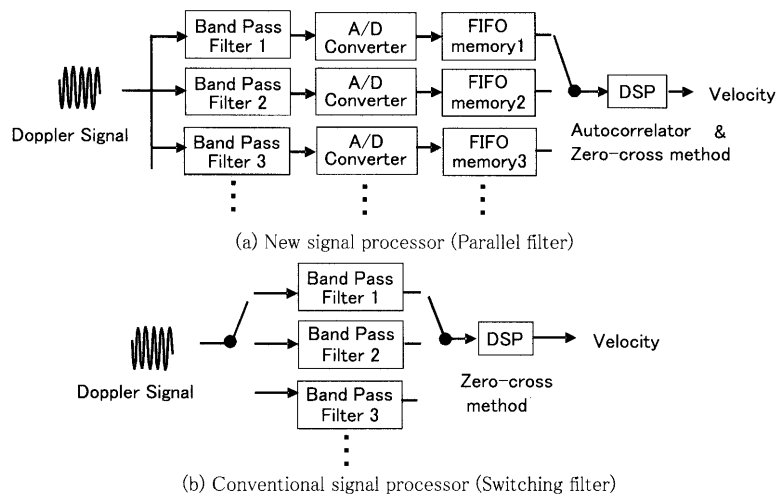


Fig. 11. Schematic diagram of new signal processor and conventional one.

調されているため、バンドパスフィルターにより変調周波数付近のみに帯域制限され、信号処理可能な低周波数帯域に周波数を変換された後に、信号処理が行われる。このため、完全に低周波ゆらぎを除去することが出来る。一方、非変調型速度計においては、低速域での測定を確保するために、低周波ゆらぎを残した状態で信号処理がおこなわれる。速度計の信号処理は、予め用意された複数のバンドパスフィルターの中から検出速度に応じたバンドパスフィルターを自動的に選択して、ドップラー信号の周波数帯域を制限した後に、DSP (Digital Signal Processor)により周波数測定を行う。Fig.10には、今回使用した非変調型速度計の周波数帯域として、圧延速度の速い薄物圧延時において、帯域制限されて最終的にDSPにて処理される周波数帯域を示しているが、低周波ゆらぎの周波数帯域と干渉している。非変調型速度計では、速度の速い薄物圧延時において、低周波ゆらぎ周波数を分離できるように、個々のバンドパスフィルター帯域を設定する必要がある。

6.2 信号処理の改善内容

信号処理の改善を目的として、Les Jensonらから提案されている新信号処理⁵⁾を適用することにした。本信号処理は以下の2つの特徴を有しており、非変調型速度計に対してのみでなく、周波数変調型速度計に対しても、測定精度の向上を見込める。

(1) バンドパスフィルターの狭帯域化

Fig.11に従来型の信号処理と新信号処理におけるドップラー周波数測定の流れを示す。従来型の信号処理は、ドップラー信号を処理する際に、バンドパスフィルターを順次切り換えながら、ドップラー周波数測定を行い、速度を検出可能なフィルターに固定する。このようなフィルター換え方式では、急な加減速時の測定抜け防止のため、各フィルターの透過帯域をオーバーラップさせる必要があり、帯域幅を狭くできない。一方、新信号処理において、ドップラー信号を全てのバンドパスフィルターに並列で分けて導

入し、各フィルターからの出力波形をA/D変換(Analog to Digital Converter)して、ドップラー8周期分以上の信号波形を、FIFOメモリー(First In First Out Memory)に一時的に保存する。保存された波形データを順次切り替えて、高速のDSPにより、周波数測定を行う。この信号処理方式では、フィルターを切り替える必要が無く、各フィルターのオーバーラップを最小限にし、測定速度範囲を狭くすること無く、フィルターの透過帯域を狭くすることが可能である。

今回の対策では、低周波ゆらぎが圧延速度の速い薄物でしか生じないことに着目して、低周波ゆらぎが生じない低速域と、低周波ゆらぎが生じる高速とで、異なるバンドパスフィルターが選択されるように、バンドパスフィルターの周波数帯域を設定した。こうすることにより、低速時の測定を犠牲にすることなく、速度が速い薄物圧延時に生じる低周波ゆらぎを除去し、測定成功率の向上が可能となった。

(2) 自己相関演算による速度測定精度の向上

新信号処理では、ゼロクロス法にて周波数を測定する前処理として、8波分のドップラー信号自己相関関数波形を計算する。自己相関処理は、波形から周期的な成分を抜き出すのに適しており、低周波のゆらぎやノイズの影響を抑制することができる⁶⁾。この処理の追加により、速度測定の高精度化が可能となる。

6.3 信号処理改善の効果

Fig.12に、従来測定成功率が低下していた圧延条件での測定例を示す。このように対策後では鋼板傾き変動に関係なく、安定して測定成功率100%での測定が可能となった。

Fig.13に、速度測定ばらつきの大きさを調べた結果を示す。従来信号処理では、測定ばらつきは $3\sigma=0.8\%$ であったが、新信号処理導入後は0.2%以下に改善されている。速度計自体のもつ測定確度0.1%を加味しても、0.3%以下

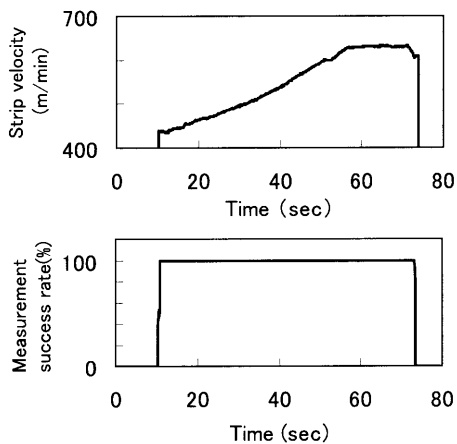


Fig. 12. Example of the strip velocity and measurement success rate measured by new signal processor.

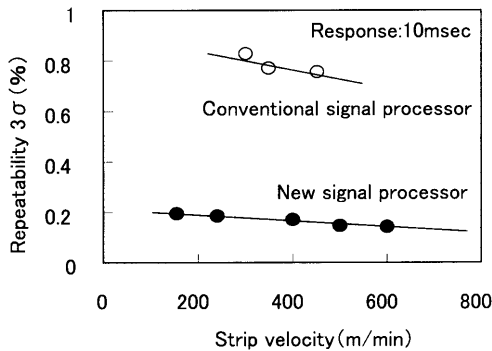


Fig. 13. Improvement of strip velocity measurement repeatability by upgrading signal processor.

となり、マスフローAGCに必要な測定精度を確保することができる。

7. 測定精度検証結果

オンライン測定精度検証として、F6、F7スタンドを解放して圧延した際の、2台のスタンド間鋼板速度計とスタンド間厚み計測定値から計算されたF5出側マスフロー板厚とF7出側X線厚み計測定値との比較を実施した。結果をFig.14に示す。両板厚測定値の差は $3\sigma=0.46\%$ であり、両速度計の測定精度0.3%と両X線厚み計の測定精度約0.1%から計算される自乗和平方根値0.45%とほぼ一致する。このことから、スタンド間鋼板速度計は、良好な精度で測定できていることを確認できた。通常のより薄い厚みの材料であれば、圧延速度が速くなるため、マスフロー板厚測定精度は0.4%以下に改善される。

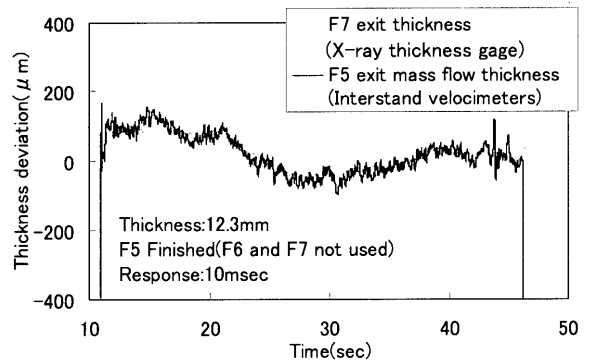


Fig. 14. Comparison of the F5 exit mass flow thickness deviation calculated by interstand velocity and interstand thickness with the thickness deviation measured by the F7 exit X-ray thickness gage.

8. 結言

熱延仕上スタンド間にレーザードップラー方式の速度計を設置し、耐環境対策と信号処理改善を行い、性能評価試験を実施した。以下の知見を得た。

(1) 強力なエアパージと、ロール冷却水のレーザ光路への巻き込み防止対策により、ミル直近の冷却水が大量に飛散する仕上スタンド間の環境下においても、安定したレーザ光路を確保することが可能となった。

(2) ドップラー周波数測定信号処理に対して、バンドパスフィルターの狭帯域化と自己相関関数演算処理の適用し、応答速度10msにおいて、スタンド間の鋼板速度を、測定精度 $3\sigma=0.3\%$ で測定可能となった。

(3) 開発したスタンド間鋼板速度計とスタンド間板厚計測定値から計算されたマスフロー板厚の精度は、 $3\sigma=0.46\%$ であり、マスフローAGCを行うのに必要な精度を確保していることを確認した。

本スタンド間鋼板速度計を適用することにより、熱延仕上ミルにおいて、更なる寸法精度の向上、通板安定性の向上が期待される。

文 献

- 1) K.Kimura, T.Nunokawa, M.Honjo and R.Takahashi: *Tetsu-to-Hagané*, **77** (1991), 528.
- 2) S.Kuroda and S.Goto: *Tetsu-to-Hagané*, **79** (1993), 366.
- 3) T.Fujimoto: *CAMP-ISIJ*, **2** (1989), 1473.
- 4) 鎌田正誠: 鉄鋼技術の流れ第1シリーズ第5巻薄板連続圧延, 地人書館, 東京, (1997), 159.
- 5) Les Jenson: "New Advances in Laser Doppler Velocimetry for Non-contact Speed Length and Elongation Measurement in Hot and Cold Mill Applications", 2001 AISE Annual Convention Proceedings, Association of Iron and Steel Engineers, Pittsburgh (2001), (CD-ROM).
- 6) 江原義郎: ユーザーズデジタル信号処理, 東京電機大学出版局, 東京, (1991), 39.