

# 状態フィードバックを用いたリバースミル張力制御の安定化

## Stabilization of Tension Control in Reverse Rolling by Using State Feedback

浅野 一哉 ASANO Kazuya JFE 技研 計測制御研究部 主任研究員(部長)・博士(工学)  
高橋 弘之 TAKAHASHI Hiroyuki JFE アドバンテック 計量事業部 次長  
宮田 武志 MIYATA Takeshi JFE スチール 東日本製鉄所 ステンレス部 統括マネージャー(副課長)

### 要旨

リバースミルでは、リールとスタンドの間の圧延材に張力を付与した状態で圧延が行われる。この張力を一定に保つことは安定操業上重要であるが、圧延条件によっては張力発生系の特性が振動的になり、操業トラブルの原因となることがある。そこで、張力制御の安定性向上のため、張力実績値の微分値をリールモータトルクにフィードバックする新たな制御方法を開発した。このフィードバックは、リールと圧延機における圧延材の速度差の状態フィードバックであり、張力発生系の自然な張力緩和メカニズムを強化することにより振動的な特性を改善し、張力変動を低減できる。構造的にも極めて簡単であり、実用的である。シミュレーションおよび実機実験結果により、その有効性を確認した。

### Abstract:

This paper presents a new tension control scheme for reversing mills based on a state feedback approach. The proposed control scheme consists of a feedback of the derivative of the strip tension to the reel motor torque, which is equivalent to the state feedback of the difference of the strip velocity between the reel and the mill. The state feedback virtually has the effect of enhancing the damping ratio of the tension dynamics and is effective to alleviate its oscillatory nature. With its simple structure, the control scheme has been successfully incorporated into the existing control system of an actual reversing mill, increasing the rolling speed and thereby improving the productivity.

## 1. はじめに

リバースミルとは、Fig. 1 に示すように一つの圧延スタンドとその両側に設置されたリールから構成される圧延機である。一方のリールから圧延材を巻き出してスタンドで圧延し、他方のリールで巻き取る操業を、圧延方向を変えながら複数回行うことにより、所定の板厚まで圧延する操業が行われる。センジミアミルやクラスターミルがその代表的なものであり、ワークロール径を小さくできるため、主としてステンレス鋼板のような薄くて硬い圧延材を最終製品板厚まで圧延するために用いられている。

リバースミルの圧延は、リールスタンドとの間の圧延材に張力を付与した状態で行われる。この張力は、蛇行の防止や形状の潜在化を通じて通板を安定化させ、また、圧延荷重を低減して圧延そのものを成立させるためにも必要不可欠である。そのため、リバースミルでは、リールモータのトルクを操作することにより張力制御が行われている。リバースミルでは、圧延材の先尾端ではミルの起動、加減速、停止にともなう非定常な圧延状態が生じる。この非定

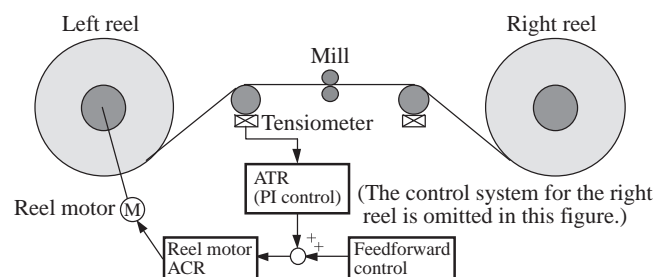


Fig.1 Typical tension control system for reversing mills

常状態では、圧延材のマスフローバランスの崩れによる張力変動が生じやすく、その結果圧延荷重が変動して板厚や形状の変動が大きくなる。張力変動が著しい場合には、圧延材の通板性が阻害され、破断のようなトラブルに至ることもある。したがって、張力変動を防止しながらミルを停止状態から立ち上げて定常圧延状態に移行させ、再び停止させる過程を円滑に行うことは、製品品質の向上、および安定操業上極めて重要である。

本論文では、リバースミルの張力制御系を対象として、張力系が振動的な特性を有する場合でも効果的な張力制御方法を提案する。まず、張力発生メカニズムをモデル化し、

操作量がトルクの次元である場合には、先進率の張力依存性に由来する自然な張力緩和効果の大きさが張力系の特性に大きく影響することを示す。次いで、張力実績値の微分値をリールモータトルクにフィードバックする新たな制御方法を提案し、その物理的意味について考察する。シミュレーションおよび実機適用結果により、本制御方法の有効性を検証する。

## 2. リバースミルの張力制御系

### 2.1 張力制御の基本的考え方

リバースミルにおける張力制御は、リールを駆動するモータをアクチュエータとして行われる。すなわち、リールモータには、張力発生に必要なトルク、機械損失補償分のトルクがフィードフォワード的に与えられるとともに、加減速に必要なトルクがフォーシングトルクとしてそれに加算され、リールが圧延スタンドと見合った速度で回転するようになっている。フォーシングトルクの算出にはリール速度指令値と同実績値が用いられるが、それらの微分値の偏差をとることによりトルクの次元での演算が行われており、リール回転速度の絶対値を設定値に一致させるものではない。このように、リバースミルの張力制御はリールモータのトルク制御によって行うことを基本としている。これは、ミルモータの速度制御系を介してロール周速を操作するタンデムミルの張力制御と大きく異なる点である。この制御によって、圧延スタンドに流入、流出する圧延材に見合った量の圧延材が入側リールから巻き出され、出側リールで巻き取られればマスフローバランスが保たれて張力変動は生じない。リールモータトルク指令値に含まれる誤差や外乱によって張力実績値と設定値に偏差が生じた場合、その偏差に比例・積分演算を施してリールモータトルクを補正するATR (automatic tension regulator) と称するフィードバック制御も行われている。

リバースミルの張力制御に関しては、板厚と張力との非干渉化に重点を置いた制御系に関する報告<sup>1-3)</sup>が多くなされているが、張力制御単独についての報告は少ない。リールの偏芯に起因する張力変動の制御に関する報告<sup>4)</sup>があるが、周期的な外乱による張力変動の抑制に特化したものであり、本論文が対象としている一般の外乱による張力変動の抑制を目的としたものではない。本論文では、張力系が振動的な特性を有する場合にも、また、非定常状態においてもすぐれた変動抑制効果を有する張力制御方法<sup>5)</sup>を提案する。

### 2.2 張力系のモデル

ミルモータの速度は、圧延速度設定値にしたがって操作され、張力制御の目的で操作されることはない。逆に、圧延速度の変化はマスフローバランスが崩れるきっかけにな

るので、張力制御に対しては外乱として作用する。そこで、ここではミルモータ制御系はモデルには含めず、ロール周速は一定に保たれるものとし、それが変化した場合の影響は外乱として考える。また、本論文では、主としてミルの起動時のように圧延スタンドのロールギャップ操作による板厚制御が開始される前に生じる張力変動を制御の対象としており、そのような場合にはロールギャップは変化しないから圧下位置制御系の動特性を考慮する必要はない。そこで、圧下位置制御系もモデルには含めない。その結果、モデルはリールモータトルク指令値を入力とし、張力を出力とする1入力1出力系となる。

以下、圧延スタンド出側の張力系のモデルを考える。各変数はすべて定常状態からの偏差を表すものとする。簡単のため、リールモータのトルク制御系を時定数  $T_c$  の一次遅れ系で近似する。リールモータトルク指令値  $q_r$  とリールモータトルク  $q$  の関係は (1) 式で表される。

$$q = \frac{1}{1 + T_c s} q_r \dots\dots\dots (1)$$

リールには、リールモータによる駆動トルク  $q$  と、圧延材の張力  $\sigma$  による負荷トルク  $q_d$  が加わる。リールの慣性モーメントと半径をそれぞれ  $J, R$ 、圧延材の板幅と板厚をそれぞれ  $W, h$  とすれば、 $q_d = WhR\sigma$  であるから、リール周速  $v$  は、

$$v = \frac{2\pi R}{J} \int (q - WhR\sigma) dt \dots\dots\dots (2)$$

となる。圧延スタンドのロール周速  $V_R$  と圧延スタンド出側の板速度  $v_0$  には、(3) 式の関係が成り立つ。

$$v_0 = (1 + f)V_R \dots\dots\dots (3)$$

$f$  は先進率と呼ばれるが、その値は張力とともに変化する。本モデルではロール周速  $V_R$  は一定に保たれると仮定しているが、その場合でも先進率変化によって板速度が変化するので、それを考慮する必要がある。張力  $\sigma$  から板速度  $v_0$  への影響係数を  $K_{v\sigma}$  で表す。 $K_{v\sigma}$  は、

$$K_{v\sigma} = v_0 \frac{\partial f}{\partial \sigma} \dots\dots\dots (4)$$

となる。張力  $\sigma$  は、応力と歪の関係から、

$$\sigma = \int \frac{E}{L} (v - K_{v\sigma} \sigma) dt \dots\dots\dots (5)$$

となる。ここで、 $E$ は圧延材のヤング率、 $L$ はリール～圧延機間の圧延材の長さである。

以上から、出側張力系の線形モデルの伝達関数をブロック図で表せば **Fig. 2** のようになる。モータトルク  $q$  から張力  $\sigma$  までには2個の積分があり、張力からはトルクと板速度に帰還する二つの自然なフィードバック機構がある。フィードバックの一つは、張力変化によるリールモータ負荷トルク変化であり、その影響は  $W, h, R$  に比例して大きくなる。張力が大きくなればリールモータの負荷が大きくなり、張力変化を妨げるからネガティブ・フィードバックとして作用する。もう一つは  $K_{vs}$  で表される張力変化から板速度変化へのフィードバックである。出側張力が増加すると先進率も増加し、スタンドからの圧延材の供給量が増えるために張力増加が緩和される。すなわち、この機構もネガティブ・フィードバックとして作用する。

2個の積分と上記の2つのフィードバック機構により、モータトルク  $q$  から張力  $\sigma$  までの伝達関数は、(6)式の2次振動系となる。

$$\sigma = \frac{2\pi ER/JL}{s^2 + (EK_{vs}/L)s + (2\pi EWHR^2/JL)} q \dots\dots (6)$$

(6)式の固有周波数  $\omega_n$ 、減衰係数  $\zeta$  は、それぞれ以下のようになる。

$$\omega_n = \sqrt{\frac{2\pi EWH}{JL}} R \dots\dots (7)$$

$$\zeta = \frac{K_{vs}}{2R} \sqrt{\frac{EJ}{2\pi LWH}} \dots\dots (8)$$

(8)式より、 $K_{vs}$  が小さい時には張力発生系の振動特性の減衰率が小さくなる事が分かる。 $K_{vs}$  は (4)式のように張力による先進率変化と板速度の積なので、板厚や圧下率が小さく先進率自体が小さい場合や、圧延速度が小さい場合にはその値が小さくなる。このような場合、起動時などにマスバランスが乱れて張力変動が発生すると、それが収束しにくく、通板性を阻害する原因となる。このように、リバースミルの張力制御では操作量がトルクであるため、操作量から制御量までが2次系となり、圧延条件によって制御対象の特性が大きく変化する。これは、タンデムミルの

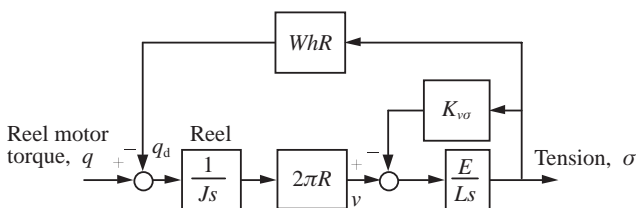


Fig. 2 Block diagram of the tension control system

の張力制御では操作量がロール速度であるために操作量から制御量までが1次遅れであるのと異なるリバースミルの張力制御の特徴であり、注意を要する点である。

### 3. 状態フィードバックによる特性改善

張力発生系の2次振動系の特性が振動的である場合、制御的に減衰係数を高めることにより特性改善を図れば張力変動が低減できると考えられる。**Fig. 3**のように、張力実績値を微分し、それにゲイン  $K$  を乗じてモータトルクにフィードバックすることを考える。ACRの動特性を無視して **Fig. 3** を等価に変形したブロック図を **Fig. 4(a), (b)** に示す。**Fig. 4**のいずれの場合も、モータトルク  $q$  から張力  $\sigma$  までの伝達関数は、

$$\sigma = \frac{2\pi ER/JL}{s^2 + (E(K_{vs} + K/J)/L)s + (2\pi EWHR^2/JL)} q \dots (9)$$

となる。**Fig. 4(a)** に示されるように、見掛けの  $K_{vs}$  は  $K_{vs} + K/J$  となり、減衰係数は (10)式のようにになる。

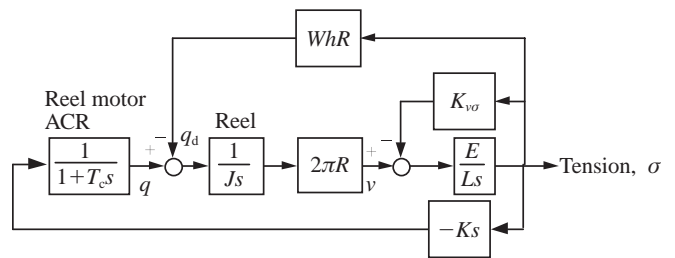
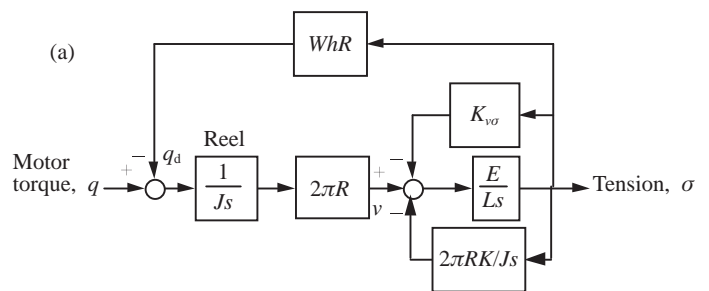
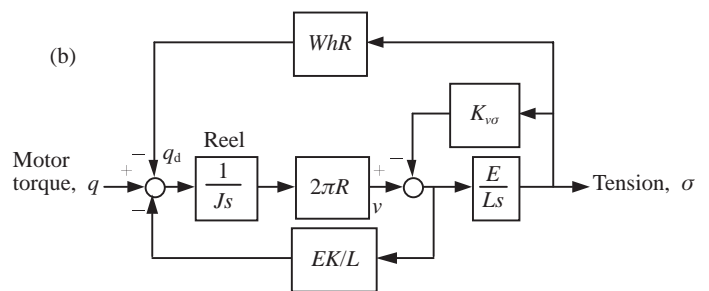


Fig. 3 Block diagram of the tension control system with the proposed state feedback



(a) Interpretation as enhancement of  $K_{vs}$



(b) Interpretation as state feedback

Fig. 4 Block diagrams equivalent to Fig. 3

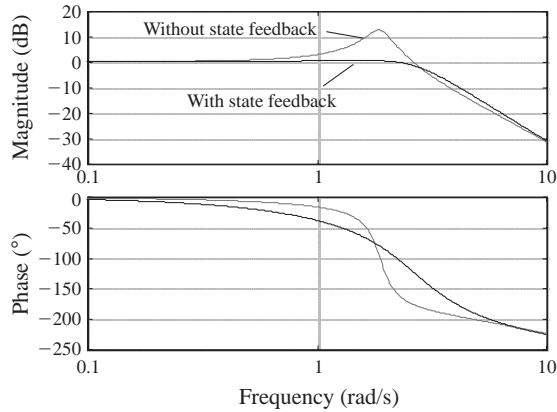


Fig. 5 Frequency response of the back tension dynamics

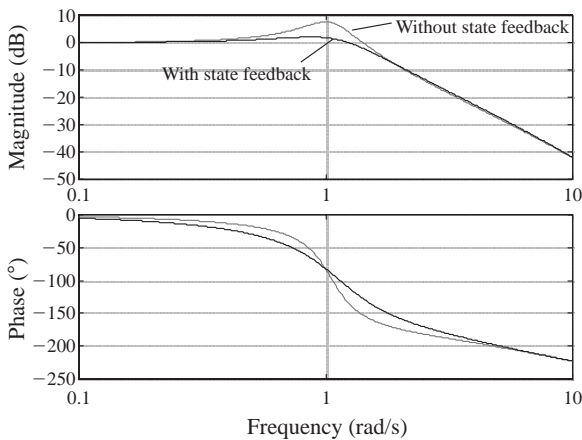


Fig. 6 Frequency response of the front tension dynamics

$$\zeta = \frac{(K_{vs} + K/J)}{2R} \sqrt{\frac{EJ}{2\pi LWH}} \dots\dots\dots (10)$$

すなわち、このフィードバックは  $K_{vs}$  を制御的に大きくすることによって減衰係数を高め、振動的特性を緩和するものであると解釈することができる。また、Fig. 4(b) に示されるように、張力の微分値はリールと圧延機における圧延材の速度差という状態量であるから、これにゲインを掛けて状態フィードバックを行うことによって制御対象の極配置を変え、制御対象の性質を改善するものであるとも解釈できる。

入側および出側について、モータトルク  $q$  から張力  $\sigma$  までの伝達関数のボード線図をそれぞれ Fig. 5, 6 に示す。元々の伝達関数は、共振周波数のピークが高く振動的な特性を持っている。これに対して状態フィードバックを施した場合にはピーク値が低くなっており、振動的な特性が改善されていることが分かる。

#### 4. シミュレーション結果

状態フィードバックによる振動的特性の改善効果をシ

ミュレーションによって確認した。シミュレータは、2章で述べたリールモータのトルク制御系と張力発生系のモデルから構成されている。シミュレーション開始2s後に張力設定値を0からステップ状に変更し、それに合ったトルク指令値をフィードフォワード的に与える。ATRは使用していないので、状態フィードバックを行わない場合のルーパモータトルクはこのフィードフォワード出力のみによって与えられる。

入側および出側のリール～圧延スタンド間における起動時の張力変動のシミュレーション結果の例をそれぞれ Fig. 7, 8 に示す。図中では、張力は定常状態における設定値で正規化した値を表示した。また、リールモータトルク指令値も定常状態における値で正規化した値を表示しており、張力を強める側を正方向とした。すなわち、入側では圧延方向と逆方向、出側では圧延方向にリールを回転させるトルクが正方向となる。

状態フィードバックがない場合は、ステップ状のトルク指令値の変更に対するモータトルク制御系の応答と張力による負荷トルクのバランスによってリールが回転するが、入側、出側ともに張力発生系の振動的性質が強く、変動がなかなか収束しない。状態フィードバックを付加した場合

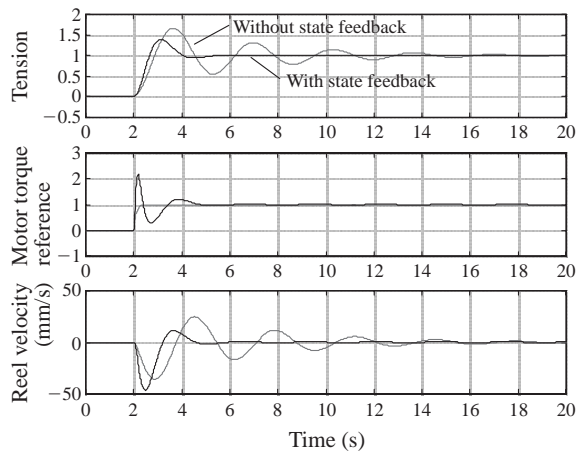


Fig. 7 Simulation results in the case of the back tension

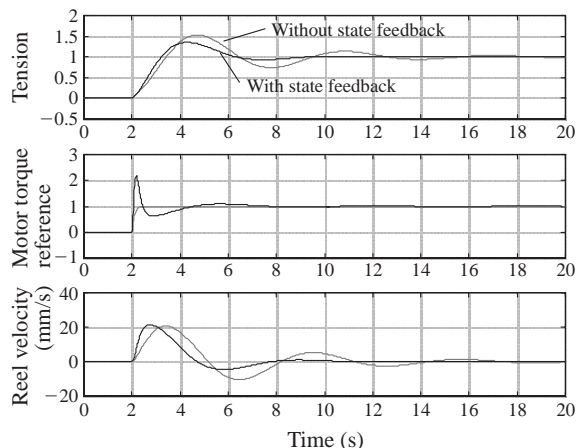


Fig. 8 Simulation results in the case of the front tension

には、ハンチングが抑えられ、オーバーシュートも小さく、整定時間も大幅に短縮されている。

## 5. 実験結果

20段 Sendzimir ミルの張力制御系に提案する状態フィードバックを付加し、圧延実験を行った。既存の張力制御系はフィードフォワード制御と ATR から構成されているが、この実験では ATR は使用していない。

状態フィードバックを行わない場合の入側リール～圧延スタンド間の起動時張力変動を Fig. 9 に示す。なお、図中では、ロール速度は実験中の最高速度で正規化した値、張力は設定値で正規化した値を表示している。また、モータトルク指令値は最大定格に対する比率を表しており、Fig. 7, 8 と同様に張力を強める側を正方向とした。圧延ロールが回転を始めると、リールから巻き出される圧延材の量が不足するために張力が増加しはじめ、その後も振動が収まりにくく整定に長い時間を要している。状態フィードバックを施した場合の起動時張力変動を Fig. 10 に示す。張力が立ち上がり始めたタイミングで状態フィードバックがモータトルクを弱める方向に作用し、リールから巻き出される圧延材の量を増加させることによってリール張力変

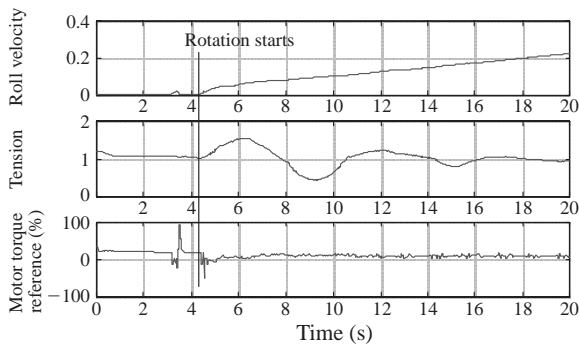


Fig. 9 Experimental results without the state feedback in the case of the back tension

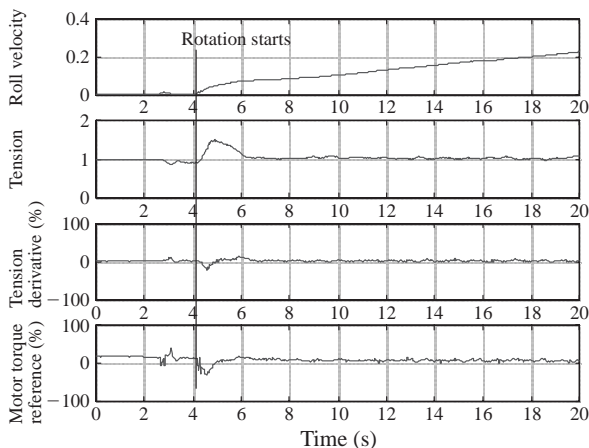


Fig. 10 Experimental results with the state feedback in the case of the back tension

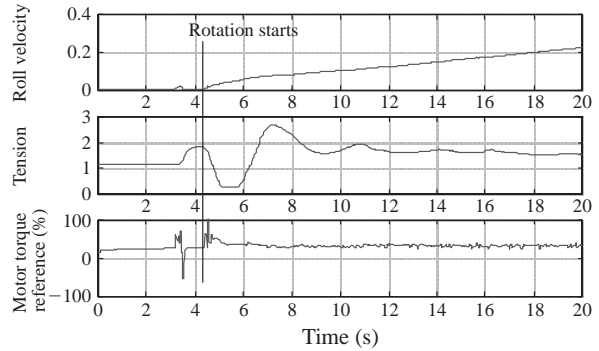


Fig. 11 Experimental results without the state feedback in the case of the front tension

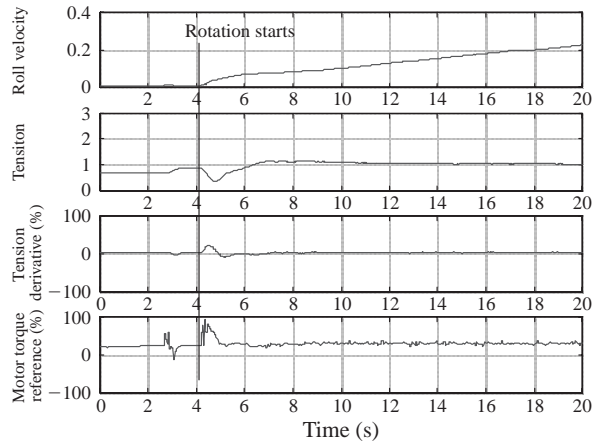


Fig. 12 Experimental results without the state feedback in the case of the front tension

動を緩和していることが分かる。張力変動の振幅は、状態フィードバックを行わない場合に比較して約 1/3 に低減されており、整定時間も大きく短縮されている。出側ロールについて、状態フィードバックを行わない場合、行った場合の応答をそれぞれ Fig. 11, 12 に示す。出側では、圧延ロールが回りだし、張力が低下し始めたタイミングで状態フィードバックがモータトルクを強める側に作用することによって張力変動を低減していることが分かる。張力変動の振幅は、約 1/2 に低減されている。

本制御は制御量である張力の微分値をフィードバックするものなので、ATR に本制御を付加することは古典制御論で言えば PI 制御を PID 制御にすることに相当し、D 動作の付加によって速応性を向上させたという見方もできる。しかし、この実験では ATR は使用しておらず、本制御が唯一のフィードバックループである。したがって、この場合は状態フィードバックによって制御対象の特性を改善したという見方が妥当である。

## 6. おわりに

リバースミルにおけるリール～圧延機間の圧延材の張力制御において、制御対象の動特性の特徴を生かした新たな

制御方法の考え方と実機適用結果について述べた。主な結果は以下のとおりである。

- (1) 張力制御の操作量がリールモータトルクであるため、制御量である張力までの特性が2次振動系となり、圧延条件によっては減衰係数が小さくなって張力変動が収束しにくくなる場合がある。これは、ロール速度を操作量とするタンデムミルの張力制御とは異なる、リバースミル特有の性質である。
- (2) 制御的にその2次振動系の減衰係数を高める方法として、張力実績値の微分値をリールモータトルクにフィードバックする方法を提案した。このフィードバックは、リールと圧延機における圧延材の速度差の状態フィードバックに相当する。
- (3) シミュレーションにより、張力設定値変更時の張力変動を本制御方法によって低減できることを示した。
- (4) 本制御方法を実機に適用することにより、起動時の張力変動を入側では約1/3、出側では約1/2に低減する効果を確認した。

本制御方法は、張力発生系の自然な張力緩和メカニズムに着眼し、それを制御的に強化することにより振動的な特性を改善するもので、構造的にも大変簡単であり、実用的である。本制御の実用化により、通板性は著しく改善され、起動の安定化による圧延能率および製品品質向上が達成さ

れている。

参考文献

- 1) 近藤勝也, 大井俊哉, 岡本真明. 可逆圧延機の板厚制御動特性の解析. 塑性と加工. vol. 33, no. 548, 1992, p. 63-68.
- 2) 上田一郎, 近藤勝也, 大井俊哉. オブザーバを用いた可逆圧延機の張力制御. 計測自動制御学会論文集. vol. 28, no. 7, 1992, p. 825-833.
- 3) 西田吉晴, 北村章, 山本昌生, 樽本慎一. ロバスト制御による冷延ミルの高精度板厚制御. 鉄と鋼. vol. 79, no. 3, 1993, p. 373-379.
- 4) 浅野一哉, 後藤貴敏, 高橋弘之, 小廣善丈. 繰返し制御を用いたリバースミルにおけるロール偏芯制御の開発. 材料とプロセス. vol. 16, no. 2, 2003, p. 294-295.
- 5) 浅野一哉, 高橋弘之, 宮田武志, 小廣善丈. 状態フィードバックを用いたリバースミルにおける張力制御の安定化. 鉄と鋼. vol. 90, no. 11, 2004, p. 958-963.



浅野 一哉



高橋 弘之



宮田 武志