

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

浅野 一哉*・高橋 弘之*²・宮田 武志*³・小廣 善丈*³

Stabilization of Tension Control in Reverse Rolling Mills Using State Feedback

Kazuya ASANO, Hiroyuki TAKAHASHI, Takeshi MIYATA and Yoshitake KOHIRO

Synopsis : In reverse cold rolling, tension control between the rolling stand and reels plays an important role in assuring stable rolling of strips. While in tandem mills tension control is performed by manipulating the roll velocity, the reel motor torque is manipulated to control tension in reversing mills, which characterizes the tension dynamics as a second-order system. As a result, when the dumping ratio of the second-order system is small, the tension dynamics becomes oscillatory and hard to control. To this end, a new control scheme is proposed to stabilize tension between the rolling stand and reels in reversing mills. In the proposed control scheme, a feedback loop of the derivative of the tension to the reel motor torque is newly introduced to the existing feedforward control. Since this feedback is equivalent to a state feedback of the strip velocity to the reel motor torque and increases the dumping ratio, it is effective to alleviate the oscillatory nature of the tension dynamics and to stabilize the tension. Simulation and experimental results are shown to demonstrate the efficient performance of the control scheme.

Key words: tension control; reversing mills; sendzimir mills; cold rolling; state feedback; second-order system; dumping ratio.

1. 緒言

鋼板の圧延において圧延材に付与される張力は、蛇行の防止や形状の潜在化を通じて安定通板に寄与するだけでなく、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、張力制御に関しては、ミルの形式を問わずさまざまな研究開発が行われてきた。タンデムミルのスタンド間では、上流側のワークロールの周速を操作してマスフローバランスを取ることによって張力制御が行われるが、スタンドでは圧下が行われているためにロール周速とそのスタンドの出側における圧延材の速度（以下、板速度）は一致せず、一般に板速度の方が大きくなる。両者の関係を表すものが先進率であるが、それは張力とともに変化し、張力変化を緩和する側に板速度が変化する。この張力変動を緩和する自然のメカニズムは、圧延材のヤング率とともに張力系の動特性を支配する大きな因子であり、張力制御系の設計・調整にあたってはその影響を十分考慮する必要がある。そのため、熱間仕上圧延において、圧延材のヤング率と張力変動から板速度変動への影響の大きさをオンラインで同定する方法も報告されている¹⁾。

一方、リバースミルでは、スタンドとリールの間の張力をリールモータのトルクを操作してリール周速を変更する

ことにより制御している。この場合はリール周速と板速度は一致するが、スタンドにおける先進率あるいは後進率は張力によって変化する。したがって、タンデムミルと同様に張力変動を緩和する自然のメカニズムが存在する。リバースミルでは、タンデムミルのような連続化された圧延とは異なり、圧延材の先尾端ではミルの起動、加減速、停止に伴う非定常な圧延状態が生じる。非定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をもたらすことになる。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、歩留の向上、および安定操業上極めて重要である。ところが、圧延条件によっては張力系の動特性が振動的になり、張力変動が収束しにくく、圧延材の寸法形状精度を低下させたり、はなはだしいときには圧延材が破断したりするという問題があった。

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てその特性に与える要因を明らかにし、操作量がトルクの次元である場合には自然な張力緩和メカニズムの大きさが特

平成 16 年 4 月 5 日受付 平成 16 年 6 月 18 日受理 (Received on Apr. 5, 2004; Accepted on June 18, 2004)

* JFE 技研 (株) 計測制御研究部 (Instrument and Control Engineering Department, JFE R&D Corp., 1-1 Minamiatarida-cho Kawasaki-ku Kawasaki 210-0855)

* 2 JFE アドバンテック (株) (JFE Advantech Co., Ltd.)

* 3 JFE スチール (株) 東日本製鉄所 (East Japan Works, JFE Steel Corp.)

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 張力制御の基本的な考え方

ここで述べるリバースミルとは、主として冷間圧延で用いられるもので、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。センジミアミルなどのクラスタ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や電磁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。リバースミルでは、一方のリールから圧延材を巻き出して圧下を加え、他方のリールで巻き取る工程が圧延方向を変えながら目的の板厚に到達するまで繰り返し行われる。このようなコイル単位のバッチ圧延という性格上、タンデムミルのような連続化された圧延とは異なり、圧延材の両端ではミルの起動、加減速、停止に伴う非定常な圧延状態が生じる。非定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をもたらすことになる。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、歩留の向上、および安定操業上極めて重要である。

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、メカロス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

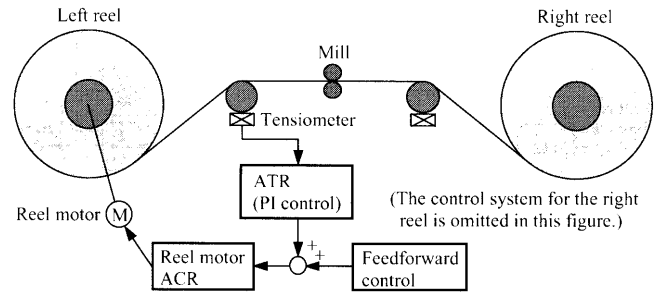


Fig. 1. Schematic diagram of a typical tension control system for reversing cold mills.

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²⁻⁴⁾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⁵⁾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⁶⁾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。

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

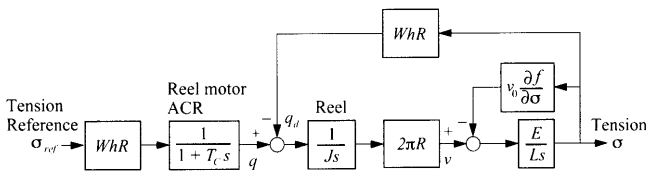


Fig. 2. Block diagram of the tension control system.

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 σ 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、

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

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。

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

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 σ から板速度 v_0 への影響係数を $K_{v\sigma}$ で表す。 $K_{v\sigma}$ は、

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

となる。張力 σ は、応力と歪の関係から、

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

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 σ 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 $K_{v\sigma}$ 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、

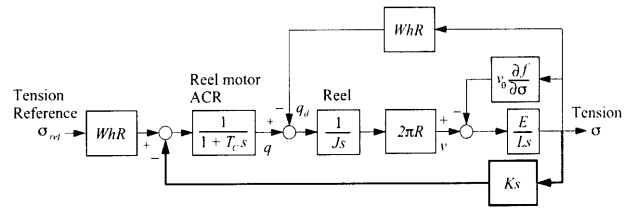


Fig. 3. Block diagram of the tension control system with the proposed state feedback.

モータトルク q から張力 σ までの伝達関数は、(6) 式の2次振動系となる。

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

(6) 式の固有周波数 ω_n 、減衰率 ζ は、それぞれ以下のようになる。

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

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

(8) 式より、 $K_{v\sigma}$ が小さいときには張力発生系の振動特性の減衰率が小さくなるのがわかる。 $K_{v\sigma}$ 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。Fig. 4(a), (b) に、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示す。Fig. 4のいずれの場合も、モータトルク q から張力 σ までの伝達関数は、

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

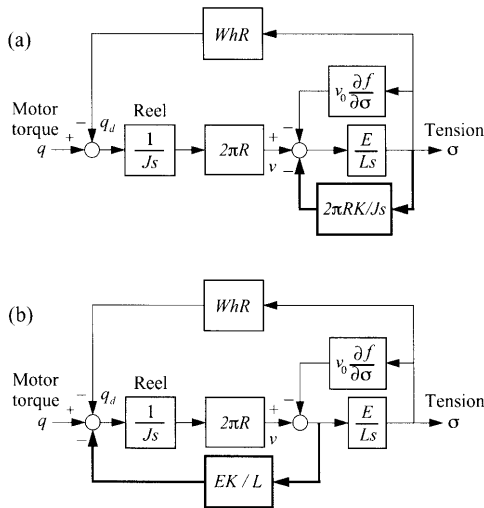


Fig. 4. Block diagrams equivalent to Fig. 3.

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

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

すなわち、このフィードバックは $K_{v\sigma}$ を制御的に大きくすることによって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 σ 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わかる。

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2秒後に張力設定値を0からステップ状に変更し、それに見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プ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における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

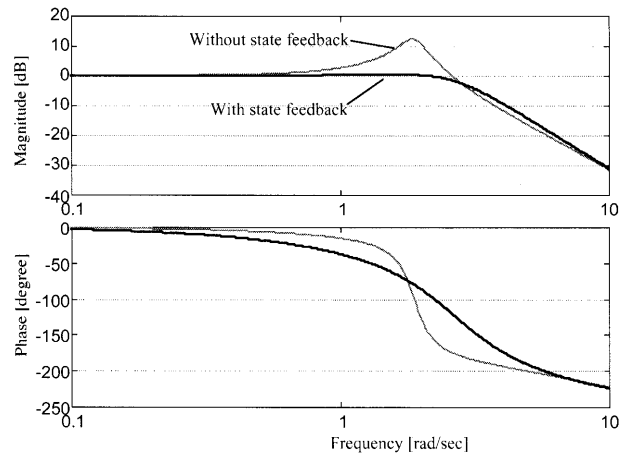


Fig. 5. Frequency response of the entry tension dynamics.

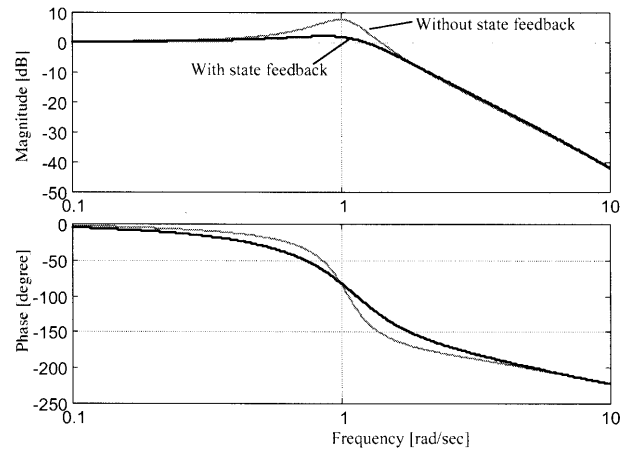


Fig. 6. Frequency response of the delivery tension dynamics.

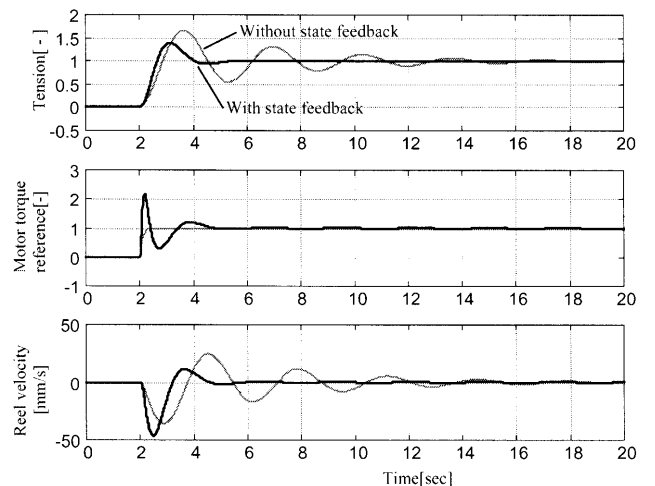


Fig. 7. Simulation results in the case of a step change in the entry tension reference.

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。

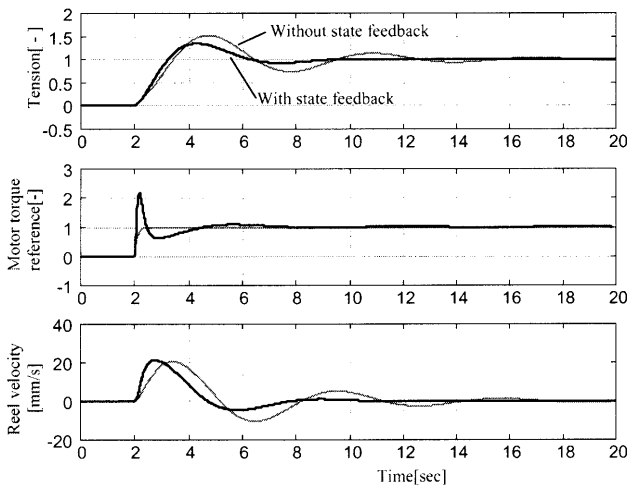


Fig. 8. Simulation results in the case of a step change in the delivery tension reference.

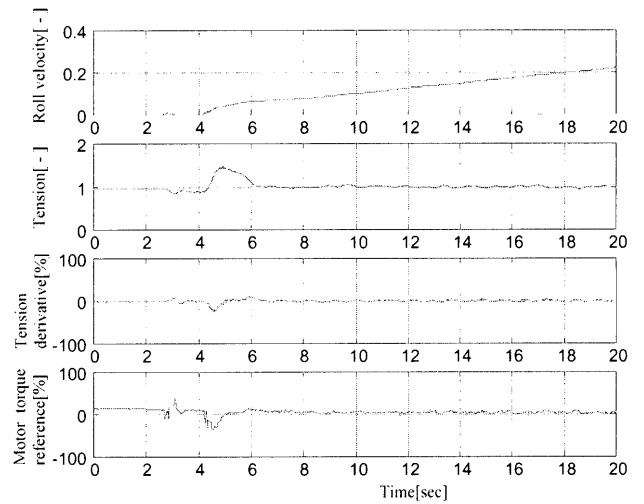


Fig. 10. Performance of the entry tension control system with the proposed state feedback.

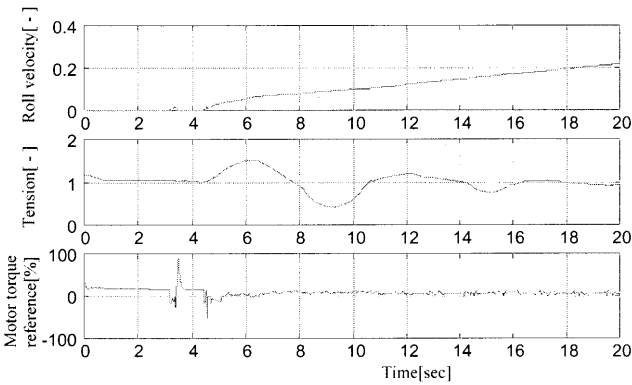


Fig. 9. Performance of the entry tension control system without the proposed state feedback.

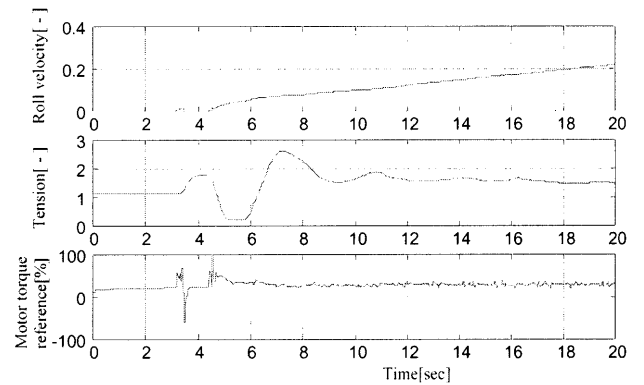


Fig. 11. Performance of the delivery tension control system without the proposed state feedback.

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。元々の張力制御系はフィードフォワード制御のみで ATR は使用していない。張力実績値の微分を PLC (Programmable Logic Controller) において離散値系として実装するに際しては、後退差分近似を用い、ノイズ除去のために一次のローパスフィルタを通した張力測定値に差分を作用させるようにした。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動を緩和していることがわかる。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わかる。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

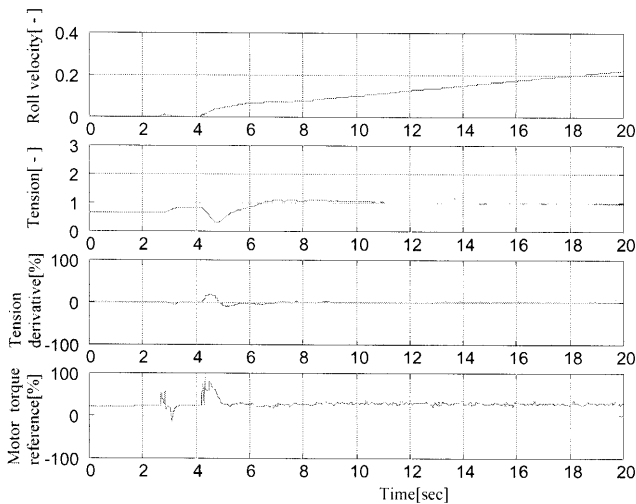


Fig. 12. Performance of the delivery tension control system with the proposed state feedback.

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. 結言

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活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。主な結果は以下の通りである。

(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、圧延速度アップによる圧延能率向上が達成されている。

文 献

- 1) K.Asano and K.Yamamoto: Preprints of 10th IFAC Symp. on MMM, ISIJ, Tokyo, (2001), 319.
- 2) K.Kondo, T.Ooi and M.Okamoto: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **33** (1992), 63.
- 3) K.Kondo, Y.Misaka, M.Okamoto, Y.Matsumori and T.Miyagi: *Trans. Iron. Steel Inst. Jpn.*, **28** (1988), 507.
- 4) Y.Nishida, A.Kitamura, M.Yamamoto and S.Tarumoto: *Tetsu-to-Hagané*, **79** (1993), 141.
- 5) K.Asano, S.Masuda and A.Honda: *CAMP-ISIJ*, **16** (2003), 294.
- 6) K.Asano, H.Takahashi, T.Miyata and Y.Kohiro: *CAMP-ISIJ*, **15** (2002), 259.