分散と協調に基づく熱延仕上ミル張力・ルーパー制御†

浅野 一哉*・山本 和宏*・市井 康雄**・野村 信彰**

Looper and Tension Control in the Hot Strip Finishing Mill Based on Decentralization and Coordination

Kazuya ASANO*, Kazuhiro YAMAMOTO*, Yasuo ICHI** and Nobuaki NOMURA**

This paper presents a new control method for interstand tension and looper height in the hot strip finishing mill. In the finishing mill, several passes of rolling are executed by tandem rolling in the presense of interstand tension. Tension can be adjusted either by manipulating roll speed or by using the looper, which is implemented between stands. Since tension and looper height control is the key to successful mill operations, several multivariable control schemes have been applied to cope with interactions between tension and the looper. However, they lead to complicated controllers which are hard to be tuned on site. The proposed method is based on decentralization and coordination. First, the interactions are evaluated using the structured singular value to ensure the applicability of decentralized control. Then, a decentralized controller based on the two-degree-of-freedom IMC (Internal Model Control) structure is applied. Moreover, impedance control of the looper is introduced to retrieve the coordinated action of the looper and to improve transitional responses of tension. The control scheme enables stepwise commissioning of control systems, which is very helpful for on-line tuning. The control scheme has been successfully applied to the tension and looper control system in a hot strip mill.

Key Words : hot strip finishing mill, tension and looper control, decentralized control, impedance control, structured singular value.

1. はじめに

熱間仕上圧延は、粗圧延で得られた厚さ約 25 ~ 50mm のシートバーを約 1 ~ 20mm にまで圧延するプロセスであり、6, 7 台の圧延スタンドによるタンデム圧延が行われている。各スタンド間では、ルーパーと呼ばれるアーム状の機構が設置されており、圧延材に張力が付与されている。この張力を設定値に制御することは、圧延材を安定に通板し、製品の寸法形状精度を確保する上で重要である。また、定常状態ではルーパーの角度も設定値に制御されていることが望ましい。そこで、張力とルーパー角度を同時に制御することが課題となる。

従来は、ルーパー角度に応じてルーパーモータにトルクを発生させる一方、ルーパー角度をロール速度にフィードバックする制御方法が一般的であった。この方法では、張力はオープンループ制御であり、ルーパー角度によって張力変動を間接的に検出して制御するため、応答性が不十分であった。このため、ルーパーに設置したロードセルなどによって張力を測定し、それをフィードバック制御に用いた種々の制御方法が開発され

ている。圧延中、ルーパーと圧延材の接触によって、ルーパー角度変動と張力変動は互いに影響し合う。従来、このルーパーと張力の干渉が問題とされ、ルーパーモータのトルクあるいは速度、およびロール周速を操作量とし、張力とルーパー角度を被制御量とした 2 入力 2 出力の多変数制御が適用されてきた。このような多変数制御系は、構造が複雑でパラメータ数が多く、さまざまな圧延条件に対応した制御系設計、調整、およびメンテナンスの負荷が大きいという問題がある。

本論文では、制御性能と設計、調整、メンテナンスの容易さを両立させた新しい張力・ルーパー制御方法を提案する。まず、張力系とルーパー系との干渉を構造化特異値を用いて解析し、それが制御系の安定性に対して影響しないことを示す。つぎに、この解析結果に基づいて張力制御系とルーパー制御系をそれぞれ独立させた分散制御系を適用し、各制御系を IMC (Internal Model Control) を用いた 2 自由度制御系とすることによって、設計およびオンライン調整を容易にする。さらに、ルーパー角度を張力変動に協調させて変化させる機能をインピーダンス制御の適用によって導入し、全体として張力系とルーパー系の分散と協調を実現する²⁾。シミュレーションおよび実機適用結果によって、本制御方法の有効性を検証する。

2. 張力・ルーパー制御の概要と課題

2.1 張力・ルーパー制御の役割

Fig. 2.1 に 7 スタンド仕上ミルの例を示す。張力・ルーパー制御は、以下の 4 つの観点から極めて重要である。

† 第 36, 37 回計測自動制御学会学術講演会で発表(1997・7, 1998・7)

* 川崎製鉄(株)技術研究所 千葉市中央区川崎町 1

** 川崎製鉄(株)千葉製鉄所 千葉市中央区川崎町 1

* Technical Research Labs., Kawasaki Steel Corporation, Chiba

** Chiba Works, Kawasaki Steel Corporation, Chiba

(Received April 3, 1998)

(Revised October 29, 1998)

Fig. 2.1 Schematic diagram of a typical hot strip finishing mill

- (1) 適正な張力を付加することによって、圧延材の横ぶれを防止し、また、圧延材のエッジ部あるいは中央部の波状の形状を潜在化させ、圧延材の絞り込みや破断を防止する。
- (2) 板厚変動などに起因するマスフロー外乱による張力変動を低減して通板性を確保し、また、各スタンドにおける板厚制御の独立性を確保する。
- (3) 張力を一定に保つことにより、張力による圧延材の寸法、特に幅の変動を防止する。また、張力を積極的に操作して幅制御を行う場合には、張力の実現精度と応答性が要求される。
- (4) 圧延材の先尾端部には張力を加えて圧延することができず、非定常な圧延となり、定常部に比べて板厚変動などが生じやすくなる。これに対して、仕上ミル入側でシートバーを複数接合し、連続的に圧延するエンドレス圧延が実用化されている³⁾。製品の歩留まりが向上するだけでなく、極薄材の圧延が可能になるなど多くの長を有する一方、圧延材の温度が局部的に変化する接合部の通板には高応答の張力制御が必要になる。

2.2 張力・ルーパ制御の概要と課題

ルーパはスタンド間のほぼ中間に設置されており、先端のロールによって圧延材と接触している。ルーパアームの軸はモータによって駆動されており、圧延開始後、アームを上昇させることによって圧延材を支持し、張力を与えるようになっている。

張力発生メカニズムとルーパの機能は、以下のようである。

- (1) 張力は、スタンド間における伸び量とヤング率によって決まる。伸び量は、スタンド間における圧延材の実際の長さ、ルーパによって形作られる幾何学的なループ長の差である。
- (2) スタンド間の圧延材長は、前後のスタンドにおける板速度の差の積分である。
- (3) 圧延材の長手方向の温度変動、板厚変動などに起因するマスフロー外乱による張力変動は、スタンド間の圧延材長あるいはループ長の操作により吸収できる。前者はロール速度の操作、後者はルーパ角度の変更により変更することができる。

一方でルーパ角度の変動は、安定な操業を行う上で好ましくなく、これも被制御量と考えるべきである。したがって、張力・ルーパ制御とは、ロール周速を変更するためのミルモータ

速度およびルーパモータのトルクを入力とし、張力およびルーパ角度を出力とする2入力2出力系の制御である。

2.3 従来の制御方法の問題点

以前は、圧延材の張力の検出手段が設けられていなかったため、ルーパモータにルーパ角度に応じて必要なトルクを発生させる一方、ルーパ角度をミルモータの速度制御系にフィードバックする制御方法(以下、従来型高さ制御)が一般的であった。しかし、この方法では、張力がオープンループ制御であり、張力変動がルーパ角度変動として現れたのを間接的に捉えて制御するため、応答性が不十分であった。

これに対し、ルーパにロードセルなどによる張力検出器を設置するとともに、2入力2出力の多変数制御系を構成して張力とルーパ角度をともに制御する方法が提案されており、非干渉制御^{4),5)}、最適制御^{6),7)}、 H_{∞} 制御⁸⁾などが適用されている。非干渉制御は、前置補償器によるプラントの対角化を前提とし、それに張力→ロール周速、ルーパ角度→ルーパトルク(あるいはルーパ速度)の2つのフィードバック制御を行ったものである。最適制御、 H_{∞} 制御は、2入力2出力系に対応した積分器と状態フィードバックのゲインをそれぞれの手法によって設計するものであるが、主となる操作量と制御量の組み合わせは非干渉制御と同様である。これらの制御系では、ルーパ制御が圧延現象とは無関係な機械的な位置制御となり、ルーパ角度変動は従来型高さ制御に比べて極めて小さくなる。また、張力測定値に基づいてロール周速を操作し、スタンド間の圧延材長を調整することにより張力を制御するフィードバック制御が行われるため、張力の応答性も格段に向上する。しかし、これらの多変数制御は構造が複雑でパラメータ数が多く、また、制御系を各要素に分解して調整することが困難であるため、設計、調整、メンテナンスの負荷が大きいという問題があった。

3. 分散と協調に基づく張力・ルーパ制御

3.1 基本的な考え方

プラントの全ての入出力の組み合わせに対して制御要素を持つコントローラによる制御をcentralized controlという。それに対して、主要な入出力にだけ対応する制御要素を持つコントローラによる制御をdecentralized control(分散制御)という。圧延プロセスにおける制御は、decentralized controlによるものが多かったが、前述の張力・ルーパ制御の例にも見られるように、最近ではさまざまなcentralized controlの適用も行われている。後者は、自由度が大きい分だけ前者よりも制御性能を向上できる可能性があるが、オンライン調整に課題がある。一方、分散制御は、(1)構造が簡単でパラメータ数が少ない、(2)ある条件下では、制御系全体の安定性に影響を与えずに各制御系を独立に調整することができる、といった利点を有しており、オンライン調整の負荷軽減に非常に有効である。もし、分散制御のアプローチにより、centralized controllerと遜色のない性能を持つ制御系が得られるとすれば、調整、メンテナンスの負荷の軽い分散制御を選択すべきと考えられる。千葉製鉄所第3熱間圧

延仕上ミルにおける張力・ルーパ制御では、従来のような多変数制御系の考え方は採らず、以下の3点を基本とした。

- (1) 張力系，ルーパ系の制御系を独立させた分散制御系とし，両者にまたがる制御要素はおかない。
- (2) 張力系，ルーパ系の各サブシステムに IMC (Internal Model Control)を用いた 2 自由度制御系を適用する。
- (3) さらに，ルーパ角度を張力変動に協調させて変化させる機能をインピーダンス制御の適用によって導入し，張力変動の更なる低減を図る。

3.2 張力・ルーパ系のモデル

張力発生メカニズム, ルーパ機械系の運動方程式, およびミルモータ, ルーパモータの各アクチュエータの動特性から, 張力・ルーパ系の線形モデルを得る.

- ### (1) 張力発生メカニズム

2.2で述べたメカニズムで張力が発生する。ロール周速 V_R と、スタンド出側の板速度 v との関係は、次のようになる。

$$v = (1 + f)V_p \quad (3.1)$$

と表す。(3.6)式では、張力 σ を主機速度指令値 V_{Rref} に、ループ角度 θ をループ角速度指令値 ω_{ref} にそれぞれフィードバックする制御系を前提として対角項を選んでいる。 P は 2×2 行列であるので、 μ -IMは次式のように簡単に表せる¹³⁾。

$$\kappa_R(s) = \frac{P_{12}(s)P_{21}(s)}{P_{11}(s)P_{22}(s)} \quad (3.7)$$

$$\mu^{-1}(L_T(i\omega)) = |\kappa_R(i\omega)|^{-1/2} \quad (3.8)$$

ここで、 $\kappa_R(s)$ はRijnsdorpの干渉指数である。

張力・ループ系の μ -IMを、No. 6ループを想定し、圧延材のサイズを 3×1200 [mm]、設定張力を 20 [MPa]として算出した。操作量と制御量について、次の3ケースを設定した。

CASE I: Fig. 3.1のようにループ角速度制御系が備えられており、(3.6)式で表されるように張力 σ をロール周速指令値 V_{Rref} に、ループ角度 θ をループ角速度指令値 ω_{ref} にそれぞれフィードバックする場合。

CASE II: ループ角速度制御系がなく、張力をロール周速指令値に、ループ角度をループトルク指令値に、それぞれフィードバックする場合。

CASE III: ループ角速度制御系がなく、張力をループトルク、ループ角度をロール周速指令値にそれぞれフィードバックする場合。

Fig. 3.3 μ -IM of tension and looper (Thickness: 3[mm], width: 1200[mm], set value of tension 20[MPa])

Fig. 3.4 μ -IM of tension and looper (Thickness: 21[mm], width: 1200[mm], set value of tension 2.8[MPa])

結果をFig. 3.3に示す。CASE Iでは、 μ -IMの大きさは全周波数帯で1を上回っており、分散制御系の適用が可能であり、しかも干渉の存在は張力系、ループ系の各制御系の制御周波数帯に全く制約を与えないため、それらの応答を自由に設定できることが示されている。すなわち、従来の多変数制御系における張力・ループ系にまたがる制御要素は、干渉による安定性、制御性の低下を防ぐという観点からは不要である。

CASE IIでも、同様に μ -IMは全域で1を上回っているが、CASE Iに比べてその値は小さくなっている。CASE IIIは、操作量と制御量の組み合わせを逆にしたため、 μ -IMは、CASE IIのものをゲイン1の線に対して折り返したものとなっており、全域で1を下回っている。すなわち、この組み合わせでは、分散制御系は構成できないことが示されている。

つぎに、No. 1ループを想定し、圧延材のサイズを 21×1200 [mm]、設定張力を 2.8 [MPa]としたときの μ -IMを、CASE I, CASE IIについてFig. 3.4に示す。 μ -IMは、CASE Iでは、Fig. 3.3と同様、全域で1を上回っているが、CASE IIでは、 $1 \sim 20$ [rad/sec]で1以下になっており、この周波数帯では干渉のために制御性能に制約が加えられることが示されている。

上記の結果の物理的な解釈を述べる。定常状態では、張力は幾何学的ループ長と実際のストリップ長との関係で決定されるから、ループは幾何学的ループ長を変えないように、必要なトルクを発生して自分自身を固定していればよい。

CASE Iでは、ループ速度制御系によって、制御対象自身がループを固定する作用を持つ。したがって、ループ角度制御系のサーボ剛性を上げることができ、張力制御の応答性は、ミルモータの応答性次第で、どのようにも設定できる。

CASE IIでは、ループ速度制御系がない分、ループ角度が変動しやすくなる。そのため、圧延材の断面積が大きい前段では、干渉のため制御系の応答性が制約を受ける。

CASE IIIは、従来型ループ高さ制御系に、張力からループトルクへのフィードバックを加えたものに相当するが、このままでは分散制御系は構成できず、何らかの補正ループが必要である。特に、 μ -IM(0)<1であることから、この制御系では、積分動作によって系を安定化させることはできない。これは、ループトルク操作では定常偏差なしで張力制御が行うことはできず、ロール周速変更によって実際のストリップ長を変えることが張力制御には不可欠であることを意味している。言い換えれば、従来型ループ高さ制御系では、張力およびループ角度とともにロール周速を操作量として制御することになり、これが「干渉」の本質である。しかも、Fig. 3.1に示されているように、主機速度からループ角度への伝達関数は多くの遅れや圧延条件に依存するパラメータを含むため、制御ゲインは、それに対応して注意深く調整する必要があった。CASE I, IIでは、張力系、ループ系は独立しており、互いに負荷トルク変動、板速度変動の形で外乱を与えるだけである。したがって、個々の制御系をこれらの外乱を考慮して設計しておけば、張力系とループ系の干渉は無視することができ、自由に応答性を設定できる。

3.4 サブシステムの制御系

サブシステムの制御系には、2自由度IMC制御を適用した。

3.4.1 IMCと外乱オブザーバ

Fig. 3.5のフィードバック制御系において、プラント P は安定であるとする。このとき、このフィードバック制御システムを内部安定とするようなすべての制御器 C の集合 G は、 R_- を安定、プロパーな実有理関数の集合として、

$$G = \left\{ \frac{Q}{1-PQ} : Q \in R_- \right\} \quad (3.9)$$

と自由パラメータ Q を用いてパラメトライズできる^{11), 12)}。この Q を用いてFig.3.5のブロック図を書き直すと、Fig. 3.6に示すブロック図が得られる。この制御系の構造は、プラントのモデルを内部に含むことからIMC (Internal Model Control)¹³⁾と呼ばれており、プロセス制御の分野で広く使われている。IMC制御系に対する内部安定性の条件は、

$$\begin{pmatrix} y \\ u \\ \hat{y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} PQ & (1-PQ)P & P \\ Q & -PQ & 0 \\ PQ & -P^2Q & P \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r \\ d \\ u_1 \end{pmatrix} \quad (3.10)$$

の9個の伝達関数がすべて安定であることである¹³⁾。Fig. 3.5の制御系に対する内部安定性の条件は、

$$\begin{pmatrix} y \\ u \end{pmatrix} = \frac{1}{1+PC} \begin{pmatrix} PC & P \\ C & -PC \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r \\ d \end{pmatrix} \quad (3.11)$$

となり、伝達関数がコントローラ C に対して非線形であるのに対し、(3.10)では、すべての伝達関数が自由パラメータ Q に対して線形であり、 $Q \in R_-$ であれば制御系が内部安定になるのは明らかである。特に、感度関数 S 、相補感度関数 T は、それぞれ、

$$S = 1 - PQ \quad (3.12)$$

$$T = PQ \quad (3.13)$$

と表すことができ、自由パラメータ Q によって閉ループの特性が直接指定できる。

実際の適用に際しては、モデルとプラントのミスマッチは不可避免的であり、 Q の選択には、それを考慮しなければならない。プラントの乗法的な不確かさを考え、実際のプラント $\tilde{P}$ と、ノミナルプラント(モデル) P との関係が、

Fig. 3.5 Feedback control system

Fig. 3.6 IMC parametrization of stabilizing controllers

$$\frac{\tilde{P}-P}{P} = \Delta W \quad (3.14)$$

と表されると仮定する。ここで、 Δ は、 $\|\Delta\|_\infty \leq 1$ を満たす安定な伝達関数、 W は、不確かさの大きさを表す周波数重み関数で、安定な伝達関数とする。このとき、このフィードバック制御系がこのプラントの摂動に対してロバスト安定であるための必要十分条件は、

$$\|WT\|_\infty = \|WPQ\|_\infty < 1 \quad (3.15)$$

となる^{12), 13)}。したがって、プラントの摂動の周波数特性を考慮して、自由パラメータ Q を設定することにより、制御系設計が容易に行える。このように、IMCでは自由パラメータと閉ループ特性が線形になるため見通しがよく、コントローラ C を用いるよりもはるかに容易に設計、調整が行える。

さらに、次式のように、 Q を各サブシステムの逆モデルと低域通過フィルタ Q' の積で構成する。

$$Q = \frac{Q'}{P} \quad (3.16)$$

このとき、コントローラの出力 u は、

$$u = Q'd \quad (3.17)$$

となり、このコントローラは外乱 d を推定するオブザーバであり、自由パラメータ Q' は、その動特性を表す低域通過フィルタであると解釈できる。これは、外乱オブザーバと呼ばれている構造である。プラント P が最小位相推移系であり、かつ Q' の相対次数が P の相対次数以上であるという制約を加えれば、 $Q' \in R_-$ であれば、制御系は内部安定になる。すなわち、この条件下において、IMCと外乱オブザーバは等価であり、外乱オブザーバは最小位相推移系に対する安定化制御器の実用的なパラメトリゼーションの一つであると考えられる。

3.4.2 IMCを用いた2自由度制御系

本制御系では、IMCをPI制御系と組み合わせることにより、Fig. 3.7に示すような2自由度制御系を構成している。2自由度制御系は、実機における調整においても、既設の制御系からの移行を容易にするという点で、大きな意味を持つ。

Fig. 3.7において、目標値 r および外乱 d から、被制御量 y までの伝達関数は、

$$y = \frac{PC}{1+PC} r + \frac{P(1-K_f Q')}{1+PC} d \quad (3.18)$$

となり、目標値応答は外乱オブザーバの自由パラメータ Q' によらない。ここで、 K_f は、0~1の値を取るゲインであり、0のとき、外乱オブザーバの出力は切断されてメインループのコン

Fig. 3.7 Two-degree-of-freedom controller using a disturbance observer

トローラCだけによる制御になり、1のとき外乱の抑圧能力が最大となる。この間、外乱抑圧能力は K_f に関して線形になる。実機への適用に際しては、コントローラCをPIコントローラなどの簡易な制御器としておき、十分な目標値応答を確保した上で、 K_f の調整によって徐々に外乱抑圧性能を上げていくことができる。すなわち、2つの自由度を段階的な調整に用いることにより、非常に実用性が高い制御系が得られる。

感度関数 S 、相補感度関数 T は、それぞれ、

$$S = \frac{1 - K_f Q'}{1 + PC} \quad (3.19)$$

$$T = \frac{PC + K_f Q'}{1 + PC} \quad (3.20)$$

となり、ロバスト安定性の条件は、

$$\left\| \frac{PC + K_f Q'}{1 + PC} W \right\|_{\infty} < 1 \quad (3.21)$$

となる。コントローラCを固定してしまえば、あとは、相補感度関数 T がゲイン K_f と自由パラメータ Q' に関して線形であることから、容易に設計、調整が行える。

3.5 ルーパ系の協調の導入

3.3の解析結果によれば、張力系、ルーパ系をそれぞれ独立させた分散制御系で構成することが可能である。しかし、当然のことながら、ルーパが自身の位置を変化させることにより張力変動を吸収するという機能は失われる。そこで、分散制御系によって張力・ルーパ系を独立させた上で、必要に応じてルーパの動きを協調させて張力変動を吸収する制御系を開発した。

ルーパ系の協調機能を付加した分散制御系の構成をFig. 3.8に示す。Fig.3.8で、 $F_i (i=1, 2)$ は、

$$F_i = K_{fi} Q_i \hat{P}_{ii}^{-1} \quad (3.22)$$

であり、制御対象の対角要素の逆モデル $\hat{P}_{ii}^{-1}$ 、低域通過フィルタ Q_i と0~1の値をとるゲイン K_{fi} の積である。制御対象の対角要素のモデル $\hat{P}_{ii}$ と F_i 、およびPIコントローラ C_i によって二組の2自由度IMC制御系が構成されている。

この分散制御系をベースとして、ルーパ系を協調させて張

力変動を吸収する機能をインピーダンス制御を用いて導入する。インピーダンス制御¹⁴⁾とは、機械系のインピーダンスを制御的に調整するものであり、ロボット制御などの分野で広く適用されている。本制御系では、モデルベースの方法により、位置制御に基づいてインピーダンス制御を実現する方法¹⁵⁾を用いている。

まず、仮想インピーダンスモデルにより、張力変動が生じたときのルーパの望ましい振る舞いを(3.23)のように記述する。

$$\hat{J} \ddot{\theta}_{ref} + \hat{D} \dot{\theta}_{ref} + \hat{K} \theta_{ref} = \hat{K}_{gs} \sigma \quad (3.23)$$

ここで、 $\hat{J}$ 、 $\hat{D}$ および $\hat{K}$ は、仮想的なルーパ機械系の慣性モーメント、ダンピング、およびばね定数をそれぞれ表す。また、

$$\hat{K}_{gs} = K_g K_{gs} \quad (3.24)$$

であり、 K_g は0~1の値をとるゲインである。Fig. 3.8において、

$$G = \frac{\hat{K}_{gs}}{\hat{J}s^2 + \hat{D}s + \hat{K}} \quad (3.25)$$

であり、その出力から望ましいルーパ角度 θ_{ref} が得られる。 $G_{r\theta}^{-1}$ は、 θ_{ref} から θ までの伝達関数の近似的な逆モデルであり、ルーパ角度の追従性を高めるためのものである。 $G_{r\theta}^{-1}$ の次数は、 G と $G_{r\theta}^{-1}$ の積がプロパーであるように選ぶ必要がある。

本制御系は、従来の多変数制御系と比べて、以下の利点を持つ。

- (1)対角成分をノミナルモデルとした、2つの1入力1出力系からなる制御系であるから、構造が簡単である。
- (2)系全体の安定性に影響を与えずに、片方の応答性を任意に設定でき、張力系とルーパ系が個別に調整可能である。
- (3)PIコントローラ、IMC、インピーダンス制御の各機能モジュールを順次段階的に立ち上げていくことが可能である。
- (4)制御系のパラメータの物理的意味が明確であり、直感的に理解しやすく見通しがよい。

本制御系では、上記の利点により、設計、調整、メンテナンスの負荷が非常に軽減されており、特に段階的な立ち上げが可能であるため、オンライン調整が容易に行える。

外乱オブザーバを、多変数系のローカルなコントローラに適用した例は多軸マニピュレータ制御¹⁶⁾などに見られるが、ハイゲイン化に力点が置かれ、制御系全体の安定性が考慮されていない。本制御系では、分散制御系の適用可能性が構造化特異値を用いた干渉指数によって保証されており、上記の段階的調整においても安定性が損なわれることはない。

4. シミュレーション結果

本制御系と従来型ルーパ高さ制御系をシミュレーションによって比較する。シミュレータは、Fig. 3.1に示すような線形の張力・ルーパ系モデルに、ルーパ系の非線形性を加味したものである。Fig. 3.3に示したNo. 6ルーパの干渉指数と同じモデルパラメータを用いて、100mm/secのステップ状の板速度外乱(約1%の板厚外乱に相当)に対する応答を計算した。結果を

Fig. 3.8 Tension-looper control system based on decentralization and coordination

Fig. 4.1 に示す。

従来型ルーパー高さ制御と比較して、分散制御系では張力変動とルーパー角度変動がともに抑制されている。また、それにインピーダンス制御を付加した場合には、操業上問題のない範囲でルーパー角度を変動させることにより、張力変動のピーク値をさらに減少させている。

同じ外乱を用いて、No. 1 ルーパーの場合について、最適制御系(図中ではLQと表示)と分散制御系の応答を計算した結果をFig. 4.2 に示す。分散制御系は、Fig. 3.1のモデルに対して設計

Fig. 4.1 Simulation results (No. 6 looper)

Fig. 4.2 Simulation results (No. 1 looper)

Fig. 4.3 Simulation results in the case where time constant of mill motor ASR is three times as large as its nominal value (No. 1 looper)

された最適制御系において、積分器および状態フィードバックのうちFig. 3.8の C_1 , C_2 に対応するもの以外のゲインを0としたものに張力制御系のIMCを付加したものである。なお、応答性を合わせるために、分散制御系では張力制御の積分ゲインを0.7倍し、ゲイン K_f は0.5としている。3.3.2で述べたように、前段では後段に比べて張力とルーパーの干渉が大きい、分散制御系でも最適制御系と遜色ない応答性が得られており、張力系とルーパー系にまたがる制御要素の寄与は小さいことがわかる。

次に、シミュレーション時のミルモータ速度制御系の時定数を、最適制御系の設計に用いたものの3倍とした場合の結果をFig. 4.3に示す。制御性能は時定数がノミナル値の場合よりも劣化しているが、その度合は両制御系で同程度であり、分散制御系は制御対象の変動に対するロバスト性においても遜色ない。また、ミルモータ速度制御系の特性は P_{11} と P_{21} の共通項であるため、(3.7)式から明らかなように相殺されて μ -IMには影響しない。したがって、分散制御系の適用可能性や制御性能が受ける制約が、ミルモータ速度制御の応答性から影響を受けることはない。

5. 実機適用結果

以上説明してきた張力・ルーパー制御系は、現在、千葉製鉄所第3熱間圧延工場仕上圧延機に適用されている^{16), 17)}。実機における応答例として、圧延中にF6スタンドの圧下位置をステップ状に100 μ m変更した場合のF5～6間の張力とルーパー角度の応答をFig. 5.1に示す。圧延材の寸法は、上記スタンド間にお

Fig. 5.1 Experimental results (No. 5 looper)

(a) Conventional controller (b) Developed controller

Fig. 5.2 Effects of impedance control

(a) Impedance control off (b) Impedance control on

いて約 $3 \times 900\text{mm}$ である。まず、圧下位置をステップ状に上昇させ、次いで2~3秒後に下降させているため、マスフローバランスの変動による張力の増加と減少が見られる。分散制御系では、従来型ループ高さ制御系と比較して、張力が目標値へ回復する時間が約 $1/2$ に短縮され、また、ループ角度変動も極めて小さく抑えられている。

インピーダンス制御の有無による張力変動の差異をFig. 5.2に示す。分散制御だけでも張力変動は十分小さいが、インピーダンス制御の付加により、さらに変動が抑制されている。

6. おわりに

本論文では、熱間仕上圧延における張力・ループ制御を適用対象として、分散と協調に基づく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・ループ系の干渉を構造化特異値を用いて定量化し、操作量と制御量を適切に組み合わせることにより、干渉が制御性に及ぼす影響は無視できることを示した。
- (2) 上記の解析に基づき、2自由度IMC制御系を用いた分散制御による張力・ループ制御系を構成した上で、ループを張力変動に協調させる機能をインピーダンス制御によって実現した。
- (3) シミュレーションにより、本制御系が板速度変動の外乱に対する張力、ループ角度変動を抑制する能力は、従来型ループ高さ制御に比べてはるかに高く、最適制御系と同等であることを示した。
- (4) 実機における応答例により、本制御系は、従来型ループ高さ制御に比べて張力、ループ角度変動を抑制できることを示した。

また、外乱オブザーバをIMCパラメトリゼーションと関連づけることにより、その実用性の由来についても言及した。

本制御系の最大の特徴は、張力系とループ系の制御系を独立させ、PIコントローラ、IMC、インピーダンス制御の各機能モジュールから構成した、その構造にある。これによって、本制御系は、従来のcentralized controllerでは困難であった段階的な立ち上げや各制御系の個別の調整を可能とし、オンライン調

整を非常に容易にしておき、制御性能の追求の上でも優れている。現在、本制御系は、すべての圧延材に適用されており、千葉第3熱間圧延工場における安定稼働と製品品質の向上および世界初の熱間連続圧延の実現に大きく貢献している。

参考文献

- 1) 浅野, 山本, 川瀬, 野村: 分散制御系に基づく熱延仕上ミル張力・ループ制御, 第36回計測自動制御学会学術講演会予稿集, 223/224 (1997)
- 2) 浅野, 山本, 川瀬, 野村: 熱間仕上圧延張力・ループ制御へのインピーダンス制御の適用, 第37回計測自動制御学会学術講演会予稿集, 725/726 (1998)
- 3) 二階堂, 磯山, 野村, 林, 森本, 坂本: 千葉製鉄所第3熱延工場におけるエンドレス圧延技術, 川崎製鉄技報, 28-4, 224/230 (1996)
- 4) Y. Kotera and F. Watanabe: Multivariable Control of Hot Strip Mill Looper, IFAC 8th World Congress, 18, 1/6 (1981)
- 5) 中野, 小林, 森高, 岸本, 安部: ホットストリップミル仕上圧延機におけるループ非干渉制御, 鉄と鋼, 70-9, 51 (1984)
- 6) 林, 谷本, 齊藤, 広川, 藪内: 熱延仕上圧延機ループ最適制御方式の開発, 鉄と鋼, 71-9, 367 (1985)
- 7) 関口, 関, 安部, 福島, 辻, 上野: 熱延仕上圧延機のループ最適多変数制御, 電気学会論文誌C, 108-1, 31/38 (1988)
- 8) 今成, 森松, 関口, 江連, 松岡, 徳田, 乙部: ホットストリップミル仕上圧延機のループ H_∞ 制御システムの開発, 電気学会論文誌D, 116-7, 777/784 (1996)
- 9) J. C. Price: The Hot Strip Mill Looper System, IEEE Trans. Ind. Applicat., IA-9-5, 556/562 (1973)
- 10) P. Grosdidier and M. Morari: Interaction Measures for Systems Under Decentralized Control, Automatica, 22-3, 309/319 (1986)
- 11) G. Zames: Feedback and Optimal Sensitivity: Model Reference Transformations, Multiplicative Seminorms, and Approximate Inverses, IEEE Trans. Automat. Contr., AC-26-2, 301/320 (1981)
- 12) J. C. Doyle, B. A. Francis and A. R. Tannenbaum: Feedback Control Theory, Macmillan Publishing Co. (1992)
- 13) M. Morari and E. Zafiriou: Robust Process Control, Prentice-Hall, Inc. (1989)
- 14) N. Hogan: Impedance Control: An Approach to Manipulations, ASME J. Dyn. Syst., Meas., and Control, 107, 1/24 (1985)
- 15) T. Umeno, T. Kaneko and Y. Hori: Robust Servosystem Design with Two Degrees of Freedom and Its Application to Novel Motion Control of Robot Manipulators, IEEE Trans. Ind. Elec., 40-5, 473-485 (1993)
- 16) 山本, 加地, 浅野, 川瀬, 新田, 野村: 千葉3HOT仕上ミルにおけるスタンド間張力・ループ制御系の開発, 材料とプロセス, 9-5, 936 (1996)
- 17) 浅野, 山本, 川瀬, 野村: 熱延仕上ミル張力・ループ制御系へのインピーダンス制御の適用, 材料とプロセス, 10-2, 274 (1997)

《付 録》

A. 記号の説明

- V_{Rref} : ロール周速指令値
 V_R : ロール周速
 v : 圧延機出側における圧延材の速度
 v_d : 外乱による圧延材の速度変動
 σ : スタンド間における圧延材張力
 ω_{ref} : ループ角速度指令値

g : ルーパトルク
 ω : ルーパ角速度
 θ : ルーパ角度
 T_v : ミルモータ速度制御系の時定数
 f : 先進率
 E : 圧延材のヤング率
 L : スタンド間の圧延材のループ長
 T_c : ルーパ電流制御系の時定数
 K : ルーパ角速度制御系の比例ゲイン
 T : ルーパ角速度制御系の積分時間
 J : ルーパの慣性モーメント
 D : ルーパ角速度からルーパ負荷トルクへの影響係数
 $K_{v\sigma}$: 張力から圧延材速度への影響係数
 $K_{g\sigma}$: 張力からルーパ負荷トルクへの影響係数
 $K_{v\omega}$: ルーパ角速度から圧延材速度への影響係数
 $K_{g\theta}$: ルーパ角度からルーパ負荷トルクへの影響係数

「著 者 紹 介」

浅 野 一 哉 (正会員)

1983年, 東京大学大学院工学系研究科修士課程(計数工学)終了。同年川崎製鉄(株)入社。鉄鋼プロセス制御の研究開発に従事。現在, 技術研究所加工・制御研究部門主任研究員。1993～1994年 Caltech, 1994～1995年 ETH 客員研究員。1995年 本学会技術賞・友田賞受賞。

山 本 和 宏

1992年, 早稲田大学理工学研究科修士課程(電気工学)修了。同年川崎製鉄(株)入社。技術研究所加工・制御研究部門において, 鉄鋼の圧延プロセス制御の研究開発に従事。1996年退職。

市 井 康 雄

1980年, 早稲田大学理工学研究科修士課程(電気工学)修了。同年川崎製鉄(株)入社。以来, 千葉製鉄所制御技術部にて熱延, 冷延プロセス制御システムの建設, 設計に従事。現在, 制御技術室主査。

野 村 信 彰

1980年, 東京工業大学大学院総合理工学研究科修士課程(材料科学)修了。同年川崎製鉄(株)入社。以来, 千葉製鉄所熱間圧延部にて, ホットストリップミルの設備建設改造, 操業改善に従事。現在, 熱間圧延課長。