

(解説)

鉄鋼プロセス制御におけるシミュレーション技術

友近信行*・西野 都*・村上 晃*・西田吉晴(工博)*・中山万希志(工博)*

*技術開発本部・生産技術研究所

Simulation Technique for Process Control of Iron and Steel

Nobuyuki Tomochika・Satoshi Nishino・Akira Murakami・Dr. Yoshiharu Nishida・Dr. Makishi Nakayama

In this paper, a simulation technique for the process control of iron and steel is introduced. Simulation techniques play an important role in the development of new control systems or the improvement of existing process systems. In this paper, various process examples are introduced, including continuous casting machine mold level control, a hot strip mill looper height control system, and an automatic thickness control system for a reverse rolling mill.

まえがき = 製鉄所などの製造現場において、歩留まり向上や生産性向上などを目指して新たな制御系を開発する場合や既存の制御システムを改善する場合には、その制御システムを設計する上で、制御系のシミュレーション技術は重要なポイントとなる。昨今のコンピュータハードの高機能化・高速化と高度な制御系設計ツールの整備に伴い、相当規模の動的な制御シミュレーションを効率的かつ容易に行うことが可能になってきた。すなわちパソコン上で、時々刻々と変化するプロセスの状態を逐次演算し、制御を適用した場合の出力の時系列データを求めたり、時間軸波形など、そのシミュレーション結果を簡単に視覚化することもできる。

このようなシミュレーションを行うには、まず制御したい制御対象を数式化(モデル化)し、そのモデルに対してその制御の目的に応じたコントローラ(制御器)を設計する。さらに制御対象と制御器を合体させた制御系をプログラムあるいはツールの表現形式として記述し、制御周期ごとに各部の状態量を演算し、更新することを繰り返す(図1参照)。構築したシミュレータは、外乱を印加した場合の外乱抑制機能や、目標値を変化させた場合の追従性などの評価を通して、制御器の事前評価や設計の改善に活用される。

そこで本解説においては、まず、制御系のシミュレータについて、最新のツールを例にその構築の流れを示し、以下当社におけるプロセス制御系のシミュレータ活用の事例として、第2章では連続鋳造機湯面レベル制御、第3章では熱延仕上げミルにおけるルーバ高さ制御、第4章では可逆式単スタンド圧延機における板厚制御技術について論じる。

1. 汎用ツールを用いたシミュレータの構築

制御系の汎用シミュレータツールの代表的なものとして、MATLAB, Simulink(The MathWorks, Inc.の商標)がよく知られている。本章では例として、Simulinkを用いた制御系シミュレータの構築方法とシミュレーション例について説明する。

ここでは製鉄所の連続鋳造機における鋳型内の湯面高

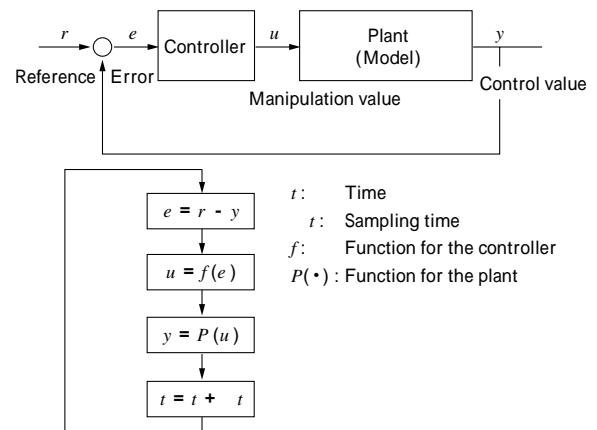


図1 制御系とシミュレーションフロー
Fig. 1 Control system and simulation flow

さを一定値に制御する場合を考える。ストローク指令値から湯面高さ検出値までの応答は、式(1)の伝達関数で表現できる。

$$G(s) = \frac{h(s)}{x(s)} = \frac{K_f}{A \cdot s(T \cdot s + 1)} \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 h :湯面高さ検出値(m)、 x :ストローク指令値(m)、 A :鋳型面積(m^2)、 K_f :ストローク変化に対する流量の変化率(m^2/sec)、 T :油圧シリンダの時定数(sec)である。さらに、湯面高さに影響を及ぼす外乱 D (m)と、湯面高さを検出する際のむだ時間 L (sec)を考慮すると、 x と h の関係は次式となる。

$$h(s) = \left(\frac{K_f}{A \cdot s(T \cdot s + 1)} x(s) + D(s) \right) \cdot e^{-L \cdot s} \dots\dots\dots(2)$$

式(2)のようなプロセスの伝達関数モデルが求めれば、その関係式をそのまま Simulink 上で CAD 感覚で構成することにより、制御対象部分のシミュレータを構築できる。

次に、コントローラ部分のシミュレータを構築する。例えば、湯面高さをフィードバックして、PID 補償器によってストローク指令値を演算する制御系を Simulink 上で構成する場合、図2ようになる。

Simulink 上には、伝達関数要素、むだ時間要素などシミュレータ構築に必要な各要素(ブロック)が用意され

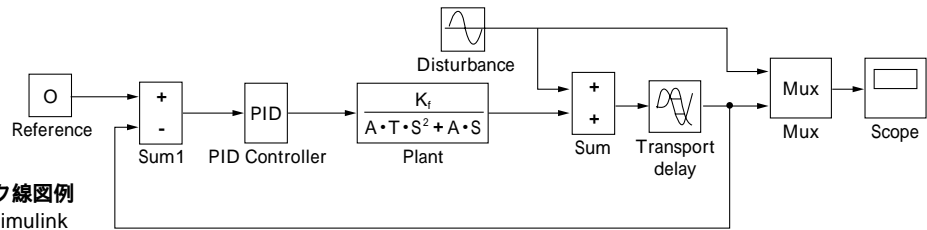


図2 Simulinkのブロック線図例
Fig. 2 Block diagram by Simulink

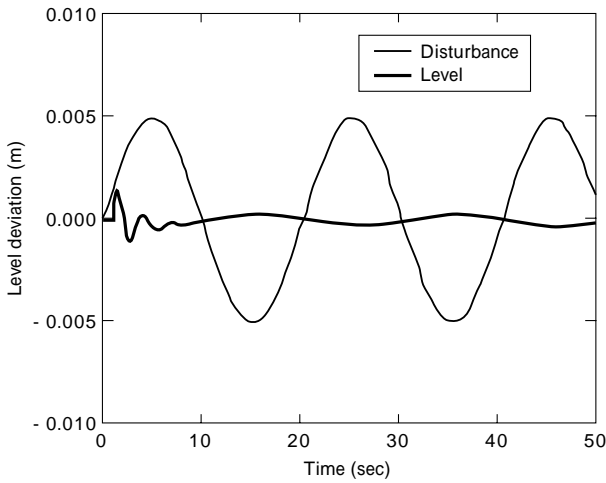


図3 シミュレーション結果
Fig. 3 Simulation result of CC level control

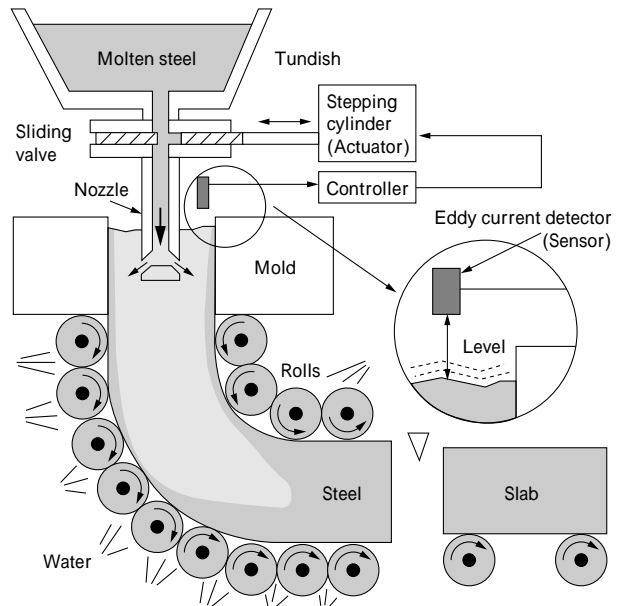


図4 連続鋳造機
Fig. 4 Continuous casting machine

ており、これら各ブロックを画面上に配置し結線することによってシミュレータを構築できる。

図2の制御シミュレータによるシミュレーション結果を図3に示す。ここでは、湯面レベルに対する外乱として、振幅0.005(m)の正弦波が印加されるものとしている。図3から、フィードバック制御によって、外乱の影響がピークで30%程度、定常的には5%程度に抑制できていることが分かる。

このように、シミュレータを活用した制御シミュレーションによって、事前に制御系のパラメータ調整と制御性能の評価を行うことができる。次章以降、鉄鋼プロセスの中から3つの事例について述べる。

2. 連続鋳造機湯面レベル制御

2.1 背景

連続鋳造機は、溶鋼を連続的に鋳造し、圧延素材となる鋼片を製造する設備である(図4)。

鋳型内溶鋼の表面(湯面)の高さ(レベル)は鋼片の表面品質や歩留りに大きな影響を与える。しかし、湯面レベルには種々の周波数の外乱が印加し、従来のPID制御では対応が困難であった。

そこで、H制御¹⁾を利用した制御系を設計し、シミュレーションにて検証の上、実機に適用した²⁾。シミュレータは、Simulinkを用いた。

2.2 湯面レベル制御系の設計とシミュレーション

制御手法としては、周波数領域で設計可能で、ロバスト安定性(実際の制御対象が設計時に想定したモデルと隔たっていても、制御系の安定性を保持する性質)を保証できるH制御を用いた。また、鋳造速度などのプロセス条件が大きく変わることに対応して、ゲインスケジ

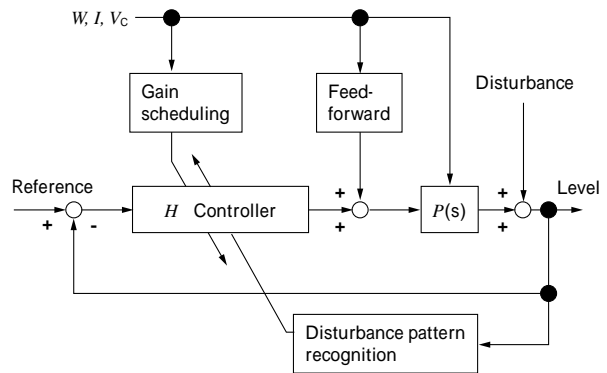


図5 制御系のブロック図
Fig. 5 Block diagram of control system

ューリング³⁾を用いた。

さらに、外乱の周波数によっては制御性能が劣化することがあることから、常に最適な制御を実現するため、Hコントローラを切替える適応系とした。加えて、鋳造速度などの既知外乱に対しフィードフォワード補償を行い、加減速部にも対応可能とした(図5)。

設計されたHコントローラをシミュレータ上で実現し、外乱成分を印加した結果を図6に示す。従来のPID制御と比べて、H制御の方が、主に低周波の外乱が抑制され、レベル変動が小さくなっていることが確認できる。

2.3 実機適用

実機適用結果を図7に示す。レベル変動の平均値を4.3から2.4mmと、約40%低減することに成功した。

本システムは、現在も継続して稼働中である。

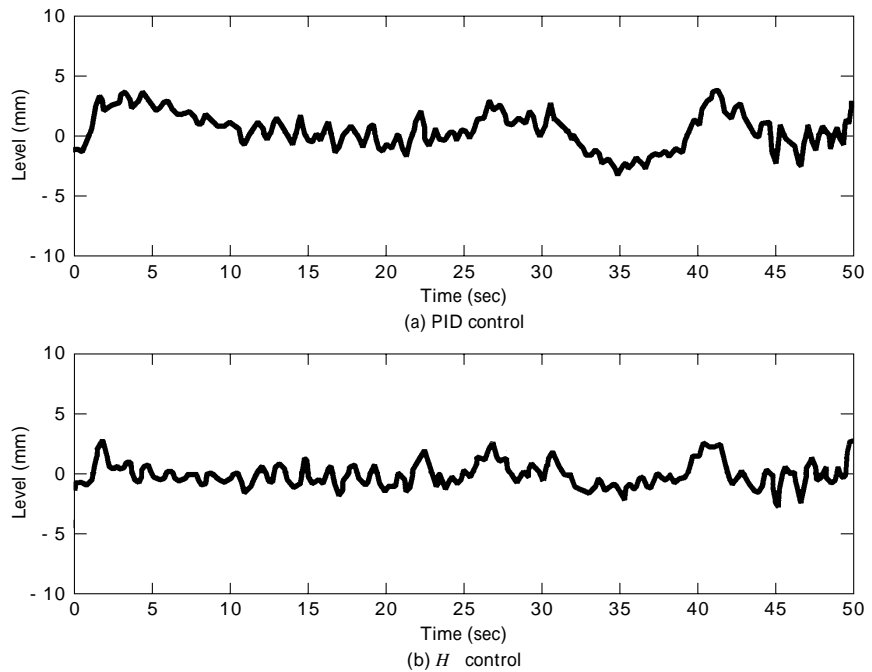


図6 シミュレーション結果
Fig. 6 Simulation results

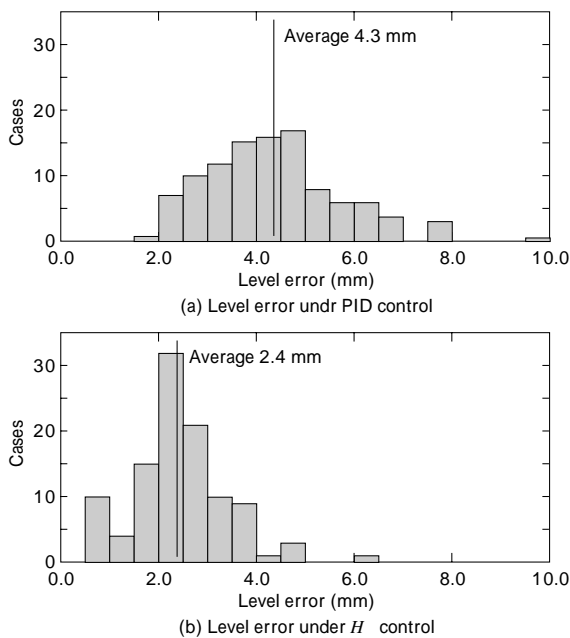


図7 実験結果のヒストグラム
Fig. 7 Histograms of results

3. 熱延仕上げミルにおけるルーバ高さ制御

熱延仕上げミルにおいて、各圧延スタンド間のストリップ張力は、製品の板厚・板幅・板形状などの精度に及ぼす影響が大きく、種々の圧延外乱に対してこの張力値を一定に制御することが要求される⁴⁾。このため、各スタンド間にはルーバ装置が設置されている。

スタンド間でのストリップ張力に瞬間的な変動があると、ルーバが動いてその変動を吸収する。しかし、定常状態でのストリップ張力はルーバ高さによって決まるので、ルーバ高さを精度よく制御することは重要な課題である。

熱延仕上げミルのルーバ高さ制御に対して、我々は補間制御手法を用いた制御器を開発し、実機化した。ここでは、開発過程で実施した制御能力検証のためのシミュ

レーション方法と結果について述べる。

3.1 制御対象のモデル

ルーバ高さ系は、ミルモータへの速度指令値を入力、ルーバ角度を出力とするシステムであり、入出力間の制御モデルは、ルーバとストリップの力学的な釣合いに基づくモデル、ミルモータの速度の変動からスタンド間の張力変動までの特性モデル、そしてミルモータの動特性モデルにより構成される(図8)。

しかし、各モデルやモデル間の相互干渉には、ストリップの材料特性や先進率など、正確に把握しきれない変動パラメータが含まれており、このモデルでは突発的なハンチングをとらえきれない。

そこで、藤崎らはルーバ高さ系に対し、入出力応答に基づきモデリングを行い、ルーバ高さ系を「2次遅れ+むだ時間」で近似した⁵⁾。ここでは、藤崎らの求めたモデル{式(3)}を引用する。

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K \cdot \frac{1}{n^2}}{s^2 + 2 \cdot \frac{1}{n} \cdot s + \frac{1}{n^2}} e^{-Ls} \dots\dots\dots(3)$$

ただし、 Y はルーバ角度、 U はミルモータ速度修正量、 k は定常ゲイン、 n は共振周波数、 δ は減衰係数、 L はむ

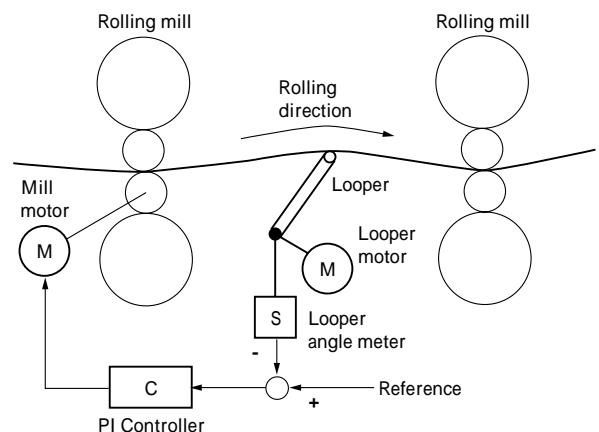


図8 熱延ルーバ制御系
Fig. 8 Looper control system of hot strip mill

だ時間である。また、ルーバ高さ系は、むだ時間・定常ゲイン・共振周波数はほぼ一定だが減衰係数は大きく変化することがわかっている⁵⁾。

3.2 コントローラ設計

上述の制御対象に対して次の3つの制御器を考える。

PI コントローラ⁶⁾

ロバストコントローラ⁵⁾

補間コントローラ^{7) 8)}

PI コントローラは従来から使用されており、制御対象の減衰係数の変動により、圧延中にルーバが不安定化することがわかっている。ロバストコントローラでは、最悪の外乱（この場合、減衰係数が最小値となる時）を想定して設計されるため、制御系の安定性は補償されるが、保守的な制御器となることが知られている。これらに対し我々の開発した補間コントローラでは、圧延中の減衰係数の変動をオンラインで推定し、制御器内のパラメータを自動調整する。そのため、減衰係数が小さいときの系の安定性を補償しつつ、大きいときの応答性を向上させることができる。

3.3 シミュレーション結果

MATLAB, Simulink を用いてルーバ高さ系に上述の3つの制御器を適用した場合のオフラインシミュレーションを実施した。ただし、 $k = 5.0$, $\omega_n = 7.0$, $L = 0.28$ (sec) とし、 γ は、1.5 から 0.3 の間をなめらかに変化させる（図9）とともに、複数の周波数成分を持った正弦波外乱を与えた。また、制御周期は 35 (msec) とした。シミュレーション結果を図10に示す。

図9, 10より、PI コントローラでは、減衰係数が約0.4以下となると不安定化することがわかる。また、ロバストコントローラでは減衰係数の変動にもかかわらず、安定性を維持している。しかし、保守的なゲイン設定となるため、応答性は、PI コントローラに劣っている。これに対し補間コントローラでは、ロバスト制御と同様に、減衰係数の変動に対する安定性を維持しつつ、減衰係数の大きな領域ではPI コントローラ並みの応答性が達成できていることが確認できる。

本シミュレーションの結果を受けて、補間コントローラは実機化され、操業の安定化に寄与している。

4. 可逆式単スタンド圧延機の板厚制御

可逆式単スタンド圧延機では圧延速度の加減速を繰返し行うため、オフゲージ長さ（板厚が公差を外れた圧延

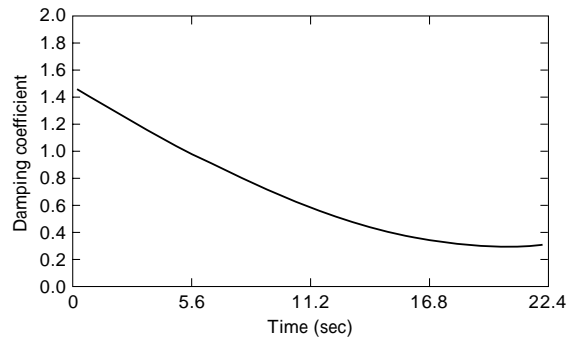


図9 減衰係数の変動
Fig. 9 Variation of damping coefficient

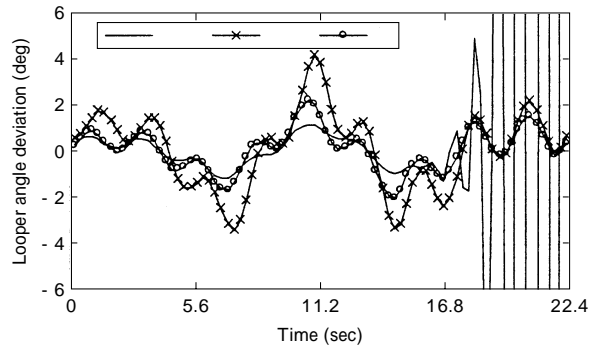


図10 シミュレーション結果
Fig.10 Simulation results

長さ)を減少することが困難であった。歩留まり向上の観点から、このような非定常状態における板厚精度の向上は重要な課題となっていた。

一方、図11に示すように、可逆式単スタンド冷間圧延機では入側と出側の板厚と張力及び荷重を計測できるが、X線板厚計設置位置と油圧圧下装置間の間を圧延材が移動することから、圧延機直下の板厚とその計測値の間には圧延速度に依存したむだ時間が生じる。

加減速時などの非定常状態では、圧延速度に依存する入出力上のむだ時間や非線形要素を含めた圧延状態の変化（塑性係数やミル定数などのパラメータや圧延速度の変動）が大きく変動し、従来の制御手法ではそれら変動に対応することが困難であった。

我々は、むだ時間を考慮するとともに、外乱推定オブザーバ手法を用いた板厚制御手法を開発した⁹⁾。ここでは、開発過程で実施した制御能力検証のためのシミュレーション方法と結果について述べる。

4.1 制御対象のモデルと制御系設計

非定常状態における圧延状態の変動要因として、圧延

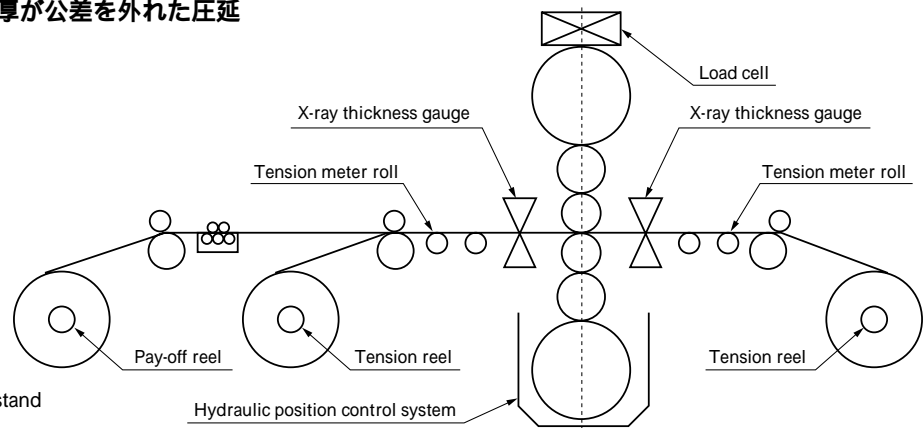


図11 可逆式単スタンド圧延機の概略図
Fig.11 Schematic diagram of a single stand reverse rolling mill

速度の変化による摩擦係数の変化, 入側板厚の変動, ミル定数や塑性係数の変動, 圧延速度の変化に伴うむだ時間の変化, 入側や出側の張力変動, 摩擦や熱膨張などによるロールの偏心 計測ノイズの影響などが考えられる。これら変動要因を正確にモデリングすることは, 定常状態を仮定した圧延理論では困難である。

本手法では, むだ時間を Páde 近似⁹⁾ による動特性モデルとして, その他の変動要因を制御対象に加法的に加わる外乱として, それぞれ制御モデルに取込み, それらの影響を考慮した制御系設計及びシミュレーションを可能とした。

上記制御対象に対して, 非干渉制御¹⁰⁾ による圧下系と張力系の分離, 外乱推定オブザーバ¹¹⁾ による上記変動要因の影響抑制, 予測制御¹²⁾ によるむだ時間の補償を施すことにより, 加減速時などの非定常状態での板厚精度向上を実現した。

4.2 シミュレーション結果

加減速時の低速圧延を想定してむだ時間として1 (sec), またパラメータ変動として, 塑性係数やミル定数に30%の誤差が存在するものとして, シミュレーションを実施した。また前節で提案した本手法に加え, 比較のためにゲージメータ AGC (Automatic Gauge Control), 絶対値 AGC, むだ時間を考慮しない通常の外乱推定オブザーバなどの従来制御手法についてもあわせてシミュレーションを行った。ただしゲージメータ AGC ではミル定数に30%の誤差が存在する場合, 安定性を保つためにチューニング率を70%以上に設定できない。従ってシミュレーションではチューニング率70%としている。

図12 にシミュレーションによって求められた入側板厚変動から出側板厚変動へのゲイン線図 (周波数応答) を示す。ゲインが小さいほど, 出側板厚変動に対する入側板厚変動の影響が抑えられており, 制御性能が優れていることを示している。図12 より, 従来手法に比べ, ゲインが小さく, 制御性能が優れていることが確認できる。

むすび=本論では, プロセス制御におけるシミュレーション技術として, 制御系シミュレータの構築の流れとシミュレータの活用事例について述べた。構築に関しては最新の制御系設計ツールの一つである MATLAB/Simulink

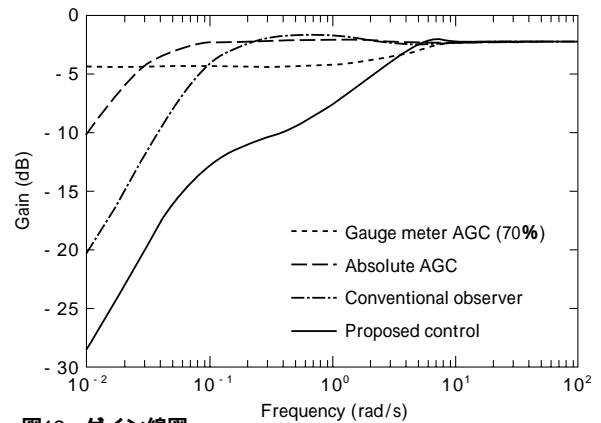


図12 ゲイン線図
Fig.12 Gain diagram

を用いて, その流れを概説した。事例に関しては当社の鉄鋼プロセスの中から3つを選び, シミュレータを活用しながらすぐれた制御系を構築し, 実機に適用した結果について報告した。

参考文献

- 1) B. A. Francis: A Course in H Control Theory, (1987), Springer-Verlag.
- 2) 松浦徹ほか: 電気学会研究会資料 金属産業研究会, Vol. MID-95-1 (1995) p.1.
- 3) K. J. Astrom et al: Adaptive control, (1995) p.390, Addison-Wesley.
- 4) J. C. Price: IEEE Trans., IA-9-5 (1973) p.556.
- 5) 藤崎泰正ほか: 第34回システム制御情報学会研究発表講演会予稿集, (1990) p.321.
- 6) 須田信英ほか: PID 制御, システム制御情報ライブラリー, (1992)
- 7) 西野都ほか: システム制御情報学会論文誌, Vol. 9, No. 11 (1996) p.64.
- 8) 村松鋭一ほか: システム制御情報学会論文誌, Vol. 7, No. 2 (1994) p.42.
- 9) 計測自動制御学会編: 自動制御便覧 (1968) コロナ社.
- 10) 西田吉晴ほか: 鉄と鋼, Vol.79, No.3 (1993) p.373.
- 11) G. Gopinath: Bell System Tech. J., No.50 (1971) p.1063.
- 12) 渡辺慶二ほか: システムと制御, Vol.28, No.5 (1984) p.269.