

## 技術論文

## オープン系機器を用いたリアルタイム観測制御システム

## Real-time Observer and Controller with Open Pc

空尾 謙嗣\*  
Kenji SORAO星野 毅夫  
Takeo HOSHINO山中 祥史  
Yoshifumi YAMANAKA

## 抄 録

汎用PCに代表されるオープン系計算機の高い演算能力や柔軟なソフトウェア開発環境と、産業用PLCの定時刻性や高信頼性を高度に組み合わせたシステムとして、新制御システムを提案し、当該システムを実際の鉄鋼圧延プロセスに活用した事例を紹介した。提案する新制御システムは、従来の鉄鋼製造プロセスの制御システムにおける課題である、新制御機能開発、実装上の自由度の低さや機動性の低さを圧倒的に改善することが可能となる上、これからの鉄鋼製造プロセス制御システムに求められる、(1)未知のプロセス現象の解明機能の実現、(2)解明された現象への解決策の速やかな反映化、(3)非熟練者への操業支援や保全情報提供機能の実現、の3つのポイントを具現化できるシステムである。

## Abstract

This paper proposes a new real-time control system for steel making process. This system has “high computing ability and superb functionality of personal-computers (PC)”, and “punctuality of the processing cycle and high reliability of Programmable-Logic-Controllers (PLC)”. The new signal processing techniques we developed can realize using PC as real-time controller for steel rolling process. The proposed new control system can significantly improve problems of the conventional system such as low flexibility in the development and implementation of new control functions. In this paper, we also introduce several embodiments in steel making plant.

## 1. 緒 言

鉄鋼製造プロセスは、規模の大きさや外乱の大きな操業条件、要求される製品品質の緻密さから、極めて高度で安定な制御機能が要求される。また、鉄鋼製造プロセスの中でも特に圧延工程においては、高炉などの上工程や化学プラントと異なり、サンプリングタイムがmsオーダーの高速なプロセス制御が必須であるという特徴がある。そのため、従来、これら高い性能が要求される鉄鋼製造プロセス制御のうち、特に高速性が求められるレベル1の制御システムには、動作安定性と高速処理を実現できる産業用PLC (Programmable Logic Controller) が採用されてきたが、他方、それらシステムには、CPU (Central Processing Unit) 能力やソフトウェア開発環境の制約から、制御ロジック実装における自由度が低いという問題があった。

一方、近年ネットワークに代表される制御機器仕様のオープン化が進展したことにより、汎用のパーソナルコンピュータ (PC) に代表されるオープン系計算機を、実時間

処理を行うレベル1ネットワークに直接接続することが可能となってきている。このことは、従来の制御システムにおける課題であった実時間制御ロジックの実装における制約を軽減するという点で、非常に大きな出来事といえる。

しかしながら、実時間プロセス制御においてはサンプリングタイムの定時刻性が必須であり、汎用のPCを用いて自由にプログラミングすればよいものではない。そこで我々は、汎用PCの高い数値演算能力および柔軟なソフトウェア開発環境と、産業用PLCの高信頼性と定時刻性を高度に組み合わせる手法を確立し、高度なモデル計算に基づくプロセス観測や、観測結果を用いた高度演算による運転制御機能を、msオーダーの実時間で実現することを可能とする新しい制御システムを開発した。

以下ではまず、提案する新制御システムの適用先として最も効果が高いと考えている鉄鋼圧延分野を代表例に、この新制御システムに期待する成果について説明し、次いで新制御システムを可能とした信号処理手法について解説すると共に、鉄鋼圧延工程への適用事例について紹介する。

\* 設備・保全技術センター システム制御技術部 システム制御技術室長 千葉県富津市新富 20-1 〒293-8511

## 2. 新制御システムがもたらす効果

### 2.1 鉄鋼圧延プロセスの現状

鉄鋼圧延工程では鋼板の板厚、板形状、張力、温度などを総合的にバランスさせながら、鋼板を100km/h近い搬送速度で安定製造するために、自動板厚制御(AGC)に代表される高度な自動制御技術が活用されている。しかし近年、薄くても強度の高い高張力鋼板の生産量が増加しており、これらは圧延中の張力変動や温度変動によって、その特性が比較的大きく変化することから、従来の制御則ではその性能面において充分ではないケースが増えている。加えてこれら高機能製品の圧延現象には未だ解明されていない部分が多いため、日々進歩する操業技術にタイムリーに対応できる柔軟な制御システムへの期待が高まっている。

また一方で、高度な操業ノウハウを有し、自動制御だけでは不足する技術をカバーしている熟練オペレータ(操業手)の減少という課題も存在する。更に、熟練の減少は設備保全部門でも同様であり、設備を含めたプロセス全体の微妙な変化をいち早く感じ取り、早期に対策を講じることで、常に最適な操業条件を保つという現場力の低下が懸念されている。

以上から、これからの圧延制御システムには、(1)未知のプロセス現象の解明に役立つこと、(2)解明された現象への解決策をタイムリーに反映できること、(3)非熟練者への操業支援や保全情報提供が可能なこと、の3つのポイントが重要となる。

### 2.2 従来型圧延制御システムの課題

代表的な従来型の鉄鋼圧延制御システムを図1に示す。レベル2に位置するプロセスコンピュータ(以下P/C)は、更に上位に位置するビジネスコンピュータとリンクし、工場全体の生産管理を担っている。具体的には、レベル1のPLCやDCS(Distributed Control System)への設定計算を行うと共に、操業情報を収集、分析して次の設定計算のための学習を行うなど、高度な演算モデルを実装している。

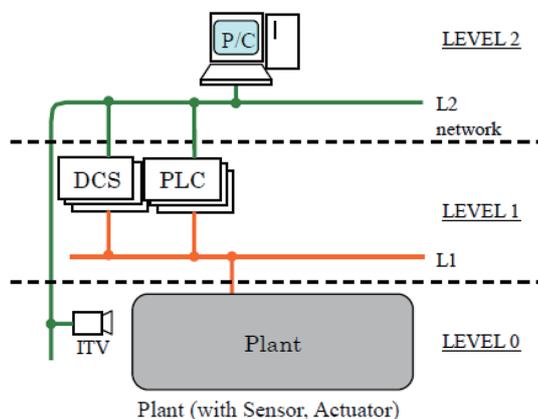


図1 従来制御システムの例  
Typical conventional system

PLCやDCSが現在のように発達する以前の時代にはSCC(Supervisory Computer Control)やDDC(Digital Direct Control)と呼ばれた実時間制御をP/Cが担う場合もあったが、現在ではP/Cのダウンサイジング化が進展し、OS(Operating System)にUNIX<sup>\*1</sup>やLinux<sup>\*2</sup>を採用した汎用PCによる秒単位の制御が中心である。一方でms単位の実時間制御は、高速処理に長けたPLCやDCSが担っている。

このように複雑なモデル計算はP/C、高速な実時間シーケンス制御やループ制御はPLCやDCSと役割分担しているが、近年ではPLC等の性能もあがり、またIEC 61131-3規格言語の普及も手伝って、実時間系でもプログラミング自由度は増している。しかしレベル0のセンサやアクチュエータと直接接続されるPLCは誤動作が許されないことから、あくまで産業用システム機器であって、プログラム開発もこれらの訓練を受けた人間でないと扱えない。またCPUも信頼性の保証された一世代前のものであるため、例えばマトリクス演算や収束演算を扱うような高度演算を行うには能力が足りないという課題があった。

また、PLCにおける演算処理能力の低さなどの制約から新機能のオンラインでの同時並行検証(パララン)も実現が難しく、そのため一般的には、汎用PCなど実際にプロセス制御を行っているPLCとは違うアーキテクチャやプログラミング言語を使ってオフラインにて十分な検証を行った後、開発した機能を改めてオンラインのPLCに再コーディングの上実装し、更にオンラインにてコーディングしたソフトウェアのデバッグもかねて十分な試運転を行うことによって新機能を立ち上げる必要があり、迅速な新機能の実機戦力化にも課題があった。

### 2.3 新制御システムへの期待

新制御システムの構成を図2に示す。近年レベル2のみならずレベル1でも進展したネットワークのオープン化を活用し、加えて、我々にて開発した産業用PLCとPCの連

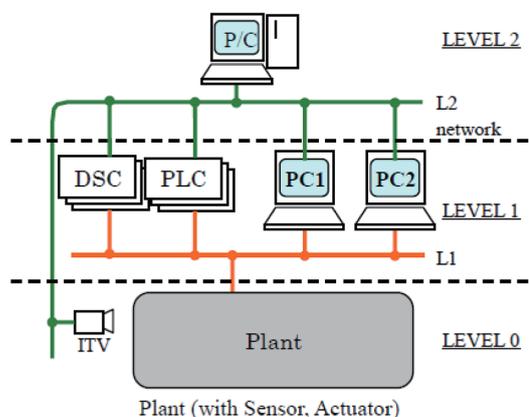


図2 実時間観測・運転制御システム(新制御システム)  
Real-time observe and operation controlled system

\*1 UNIX は、The Open Group の登録商標  
\*2 Linux は、Linus Torvalds の登録商標

携手法を適用することにより、実時間系のレベル1にオープン系機器である汎用のFA-PCを導入したものである。導入したPCは実時間ネットワーク(図2のL1 network)上の任意の情報を入出力できるようになっている。また上位L2 networkとも情報交換が可能である。

近年はP/Cもハードウェア的にはPC化が進んでいるため、基本的にはP/Cをレベル1に降ろした格好であるが、ここで導入するPCには、汎用アプリケーションソフトウェアが動作する、一般OS(Windows<sup>\*3</sup>等)を採用していることが前提である。これによって従来はP/C上にて秒単位で行っていた高度モデル計算をmsオーダーの実時間にて実施することが可能になる他、当該PC上で開発した独自モデルをそのままプロセスの実時間監視や運転制御に持ち込むことも可能となる。即ち産業用プログラムへの変換の手間、およびそのための特別な訓練が不要となるメリットがある。

この新制御システムを用いることにより以下の期待がある。

#### (1) 操業課題分析

例えば図2中のPC1に操業分析PCとしての役割を担わせる。L1 networkを介して、リアルタイムでセンサ計測値や制御出力を取り込み、PC内部に構築したプロセス解析モデルで逐次操業分析を行うわけである。PC1は通常のPCであるので、解析モデル構築には普段使いたプログラムの言語が使用可能であり、例えばMATLAB等の汎用ツールで高度なプロセスモデルを構築して、実時間で動くオンラインプロセスシミュレーションを行うことも可能となる。

#### (2) 新制御方式の検証, 評価

上記課題分析により新たな制御方式が考えられた場合、従来であればオフラインにシミュレータを構築して新制御を検証した後、改めて実機PLC用に再コーディングする必要があった。新制御システムにおいては、図2において先ほどの例のようにPC1をオンラインシミュレータとし、PC2には新制御のアイデアを実装することで、まずはPC1とPC2間の情報交換によって制御則のパララン検証を行うことができる。更に検証が済んだら、PC2の出力をそのまま実機プロセスに入力することが可能なため、新たにコーディングしてデバッグする必要がない。

但し、PC出力を実機入力するためには、信号の信頼性を確保するための仕組みが必要である。これについては次章で述べる。

#### (3) 操業の可視化

上記の操業分析と似ているが、PC1上にプロセス状態を推定するオブザーバやソフトセンシング機能を構築することで、本来計測不可能な物理量の可視化や、微妙なプラン

ト経年変化の検出などを実施する。これにより熟練オペレータの勘や経験の可視化、定量化が可能となり、また予防保全にも応用できるため、飛躍的な操業安定化が図れる。このオブザーバには高度な数式モデルが必要となるが、高級言語が簡単に使える新制御システムであれば、エンジニアリング的にも極めて容易に実現することが可能である。

### 3. 新制御システムを可能とする信号処理手法

上述の新制御システムにおいてレベル1層に汎用PCを用いる場合、その安定性および信頼性の向上が必要不可欠となる。本手法では、安定性および信頼性が確保されているPLCやDCSと汎用PCを連携させることにより、システム全体としての信頼性向上を実現させた。以降、それら手法について説明する。

#### 3.1 制御信号の定時性および信頼性の必要性

鉄鋼プラントに限らず一般的なプロセス制御分野においては、プロセス量を測定し制御装置内にデータとして取り込み、その測定値と目標値とからPID(Proportional-Integral-Differential)制御などの制御アルゴリズムを用いて操作端の操作量を演算し、それを操作端のアクチュエータ等に信号出力することを1サイクルとして制御動作を行っている。ここで、PID制御などの制御アルゴリズムには一般に、積分や微分要素が含まれており、離散動作をするデジタルコントローラにてこれら動作を実施させる場合、(1)式や(2)式のように1サイクルの処理時間 $T$ が含まれるため、プロセス制御においてはこの1サイクル動作の時間 $T$ が一定である必要がある。

積分処理例

$$y[k] = y[k-1] + (u[k-1] + u[k]) \times \frac{T}{2} \quad (1)$$

微分処理例

$$y[k] = \frac{(u[k] + u[k-1])}{T} \quad (2)$$

$y[k]$ : あるサンプリング $k$ における微積分演算結果  
 $u[k]$ : あるサンプリング $k$ における入力値

本論文にて提案するシステムである新制御システムは、実時間プロセス制御・監視系のレベル1に汎用のFA-PCなどのオープン系計算機を導入したことを特徴とするものであるが、一方、新制御システムに適用するPCは、前節記載のように一般OS(Windows等)を想定しており、このような所謂リアルタイムOS以外のOSでは、CPUを占有できる時間が不定であるため、それ単体では一定周期での処理を実施できない可能性があるといった問題がある。従って、当システムを実プロセスの制御装置として実現させるためには、上述の如く、PCにおける処理を含めて、制御システム全体の処理サイクルタイムが一定であるという“定時性”の確保が必要不可欠となる。

また、産業用PLCに比べて装置としての信頼性に劣るPCを制御装置に高い信頼性が要求とされる鉄鋼製造プロ

\*3 Windowsは、Microsoft Corporationの登録商標

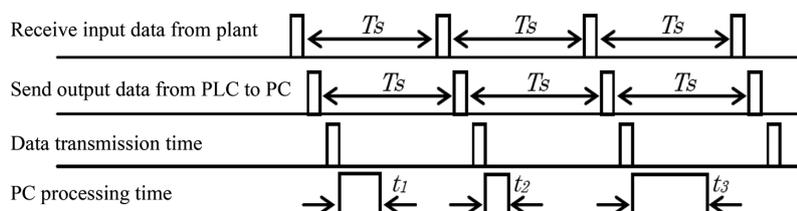


図3 新制御システムでの定周期動作イメージ  
(PC内処理時間にばらつきが生じても、制御システムとしてのサイクル時間 $T_s$ は一定)  
Constant-cycle time operation with new real-time control system

セスに適用するためには、PCにて出力される信号の信頼性を向上させる必要もある。

### 3.2 制御信号の定時性の確保

提案する新制御システムにおける制御信号の定時性の確保方法としては、“PCの演算動作をPLCのサイクル処理に同期させることで、PCでの処理を含めた制御システム全体の処理サイクルタイムの定時性を確保する”という考え方を適用している。具体的には、PLC側のサイクル時間 $T_s$ を(3)式に示す条件にて適切に設定する。

$$T_s > (\text{PC内演算動作時間} + \text{伝送遅れ}) \times \alpha \quad (3)$$

$\alpha$ : 余裕率 ( $1 < \alpha$ )

図3は、(3)式に基づいてPLCでの1サイクル動作時間間隔を $T_s$ とした場合における、各処理時間イメージを示したものである。PLC側にて1サイクル動作時間間隔を適正に選定することで、仮にPCでの処理時間(伝送処理時間含む)にばらつき(図3においては $t_1 \sim t_3$ )が生じても、“プロセスデータの入力～操作信号の出力(図3においては $T_s$ )”という全体のプロセス制御処理時間に関しては、一定性を確保することが可能となり、処理動作の一定性が実現できないPCを含んだ制御システムにおける定時性が実現できる。なお、式(3)にてサイクルタイムを設定するのは新制御システムを用いて動作させる機能についてのみが対象であり、PLCのみで処理する通常機能については従来通り任意のサイクルタイムを選択すればよいことを補足しておく。

### 3.3 制御信号の信頼性の確保

更に、前述のように制御装置に高い信頼性が必要とされる鉄鋼製造プロセスの制御システムに汎用用途のPCを適用するためには、制御信号の信頼性を向上させることも不可欠である。また制御周期の定時性に関しても、基本的には上述の対策により実現可能ではあるものの、想定外のPC内処理時間の増大(最悪の場合PCハングアップ)が発生した場合を考えると、なんらかの対応も必要となる。

そこで提案する新制御システムでは、“PLCにてPCからの信号および定時性の健全性をチェックする”というルールにて、制御信号の信頼性を確保する。

具体的には以下の機能を実施する。

#### (1) 各種インターロック条件付与

PC内の演算動作は正常であっても、機械・操業条件等のプラント側の状態によっては当該PC演算値を使用できない、あるいは使用してはいけないケースもありうる。そこでこれら所謂インターロック処理をPLCにて実施。

#### (2) PC演算値の健全性チェック

PCにて演算された値がプラントとして許容できる上下限範囲内に収まっているかを判定する上下限チェック等、PC演算結果信号の健全性判定をPLCにて実施。

#### (3) 制御サイクルの定時性チェック

PLCにてPCの同期動作状況(PCの定時動作状況)を判定。

#### (4) PC側信頼性低下時の処理

上記チェックの結果、PC側信号の信頼性が確保できない状態であった場合、当該データを破棄する等の各種回避処理をPLCにて実施する。

## 4. 新制御システムの適用事例

新日鐵住金(株)では、これら新制御システムの活用を進めており、すでに各種成果を上げている。以降では、それらのうち幾つかについて紹介する。

### 4.1 適用事例①

鋼板の矯正機設備<sup>2)</sup>では、非常に高次かつ複雑な演算を必要とする形状矯正制御を、30ms以下の高速一定周期にて実現する必要があったが、従来のPLCおよびP/Cから構成される一般的な鉄鋼製造設備の制御システム構成では、数値演算能力および信号伝送上の制約によりその実現が困難であることが判明した。

そこで、新制御システムのコンセプトを適用して図4に示すようなシステムを構築し、高い演算能力を持つPCにて複雑かつ高次の演算処理を実施させた上で、前章の信号処理方法を活用することにより、30msでの高速一定周期動作を実現することに成功し、新しい鋼板形状矯正設備の実用化を達成した(図5参照)。また、当該PCでは所謂汎用OA(Office Automation)ソフトウェアや解析ソフトウェアも動作させることが可能のため、新制御方法の評価・検証作業が当該端末で同時に実施可能となり、制御機能の上げ調整の効率化を同時に実現した<sup>3)</sup>。

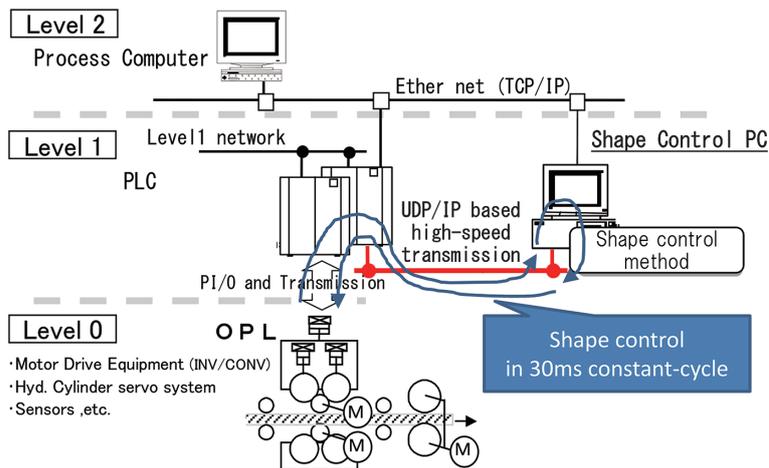


図 4 鋼板矯正機での新制御システム適用例  
Example of the application of new real-time control system in Plate Leveler

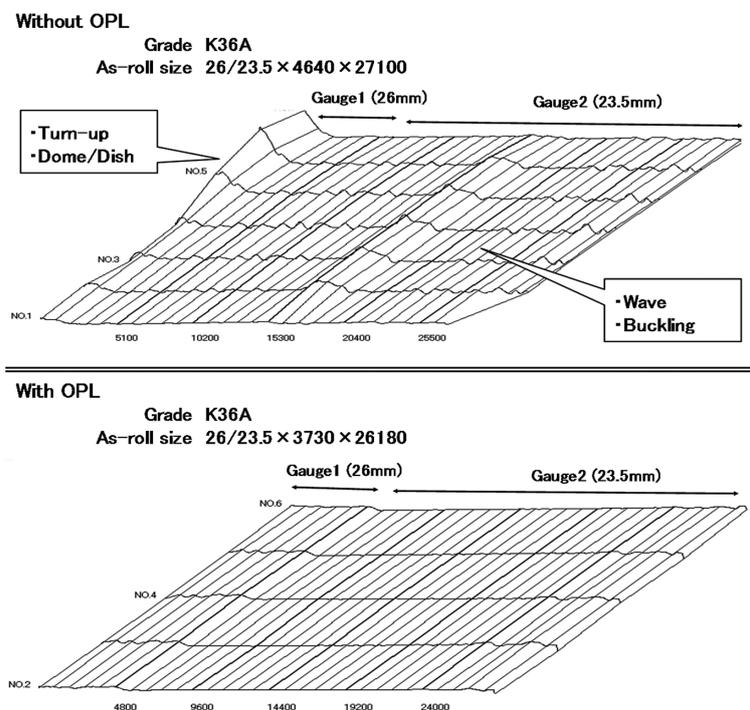


図 5 鋼板矯正例  
Result of Plate Leveling

#### 4.2 適用事例②

圧延工場の制御方式の変更に伴い、鋼種や板厚、板幅で分類される数百にのぼる制御ゲインテーブルを新たに探索する必要があった。そこで、図 6 に示す圧延プラント制御システム上に構築した新制御システムにて、材料区分毎の最適制御ゲインテーブルを自動導出する機能を構築した。

図 6 に示すシステムにおいては、Open-source PC 内にインストールした汎用解析ソフトウェアを使用し、センサでは測定不可能な圧延中の板の特性を数 ms 周期でリアルタイムに推定し(図 7)、得られた特性パラメータに基づき、オンラインで最適制御ゲインを導出することを可能とした(図 8)。当該システムを利用して、制御ゲインテーブルを自動導出することにより、通常ならば 2 か月程度かけて試

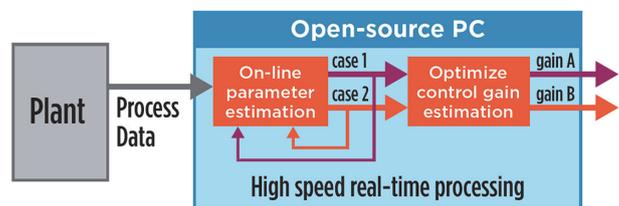


図 6 システム構成図  
System configuration diagram

行錯誤的に探索していた制御ゲインテーブルを、数日のうちに、しかも制御方式切替前の操業中に高精度に同定でき、制御系調整の作業時間を劇的に削減することが可能となった(図 9)。

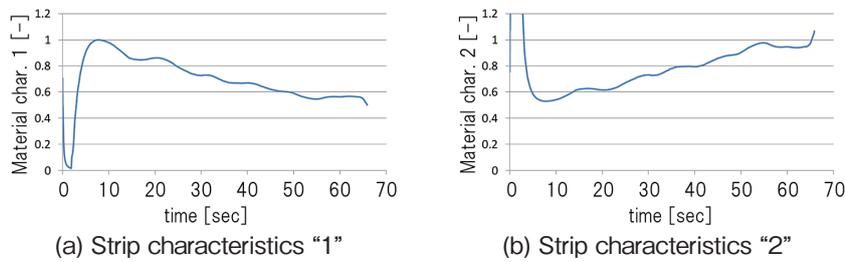


図7 材料特性の同定結果  
Result of strip characteristics estimation

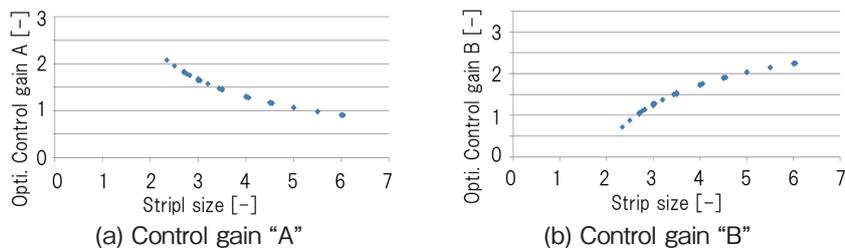


図8 制御ゲイン導出結果  
Result of automatic control gain setting

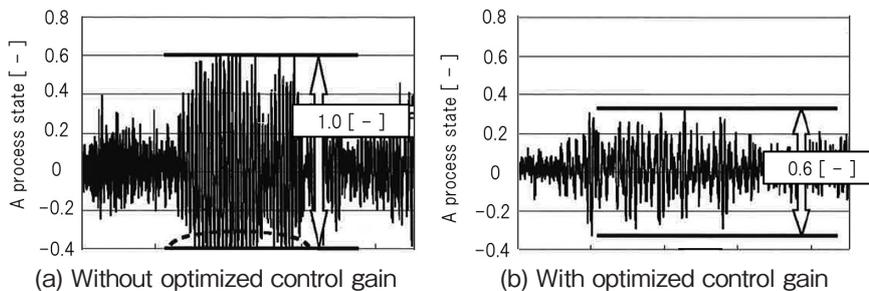


図9 最適制御ゲイン適用結果  
Result of using optimized control gain

## 5. 結 言

汎用 PC に代表されるオープン系演算装置の高い演算能力、豊富なプログラミング言語や様々なアプリケーションソフトウェア活用による高い機能性と、産業用 PLC の定時刻性や高信頼性を高度に組み合わせたシステムとして、新制御システムを提案し、当該システムを実際の鉄鋼製造プロセスに活用した事例を紹介した。

提案した新制御システムは、従来の鉄鋼製造プロセスの制御システムにおける課題である、新制御機能開発、実装上の自由度の低さや機動性の低さを圧倒的に改善することが可能となる上、これからの鉄鋼製造プロセス制御システムに求められる、(1) 未知のプロセス現象の解明機能の実現、(2) 解明された現象への解決策の速やかな反映化、(3) 非熟練者への操業支援や保全情報提供機能の実現、の3

つのポイントを具現化できるシステムであると考えている。また、当該システムを活用することで、昨今その技術的進展が著しい AI 技術や画像処理を鉄鋼製造プロセスの観測制御技術に適用することも十分可能となるため、今後更に当該制御システムの適用拡大を図っていきたい。

## 参照文献

- 1) 星野毅夫：高速通板を支える熱間圧延制御技術．日本機械学会誌．109 (1054)，724 (2006)
- 2) 星野毅夫，空尾謙嗣，山中祥史：鉄鋼圧延プロセス向け実時間観測運転制御システム．電気学会金属産業研究会．MID-10-010，2010
- 3) 空尾謙嗣：OPL (Oita Plate Leveler) の制御システムについて (新形式知能圧延機の開発 第 10 報)．材料とプロセス．22 (2)，1106 (2009)



空尾謙嗣 Kenji SORAO  
設備・保全技術センター  
システム制御技術部 システム制御技術室長  
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



山中祥史 Yoshifumi YAMANAKA  
君津製鉄所 設備部 圧延制御技術室  
主幹



星野毅夫 Takeo HOSHINO  
室蘭製鉄所 設備部長