

## 技術解説

## Technical Review

## 鉄鋼業における計測制御技術の進歩と今後の展望

山田龍三\*<sup>1</sup>, 木村良久\*<sup>2</sup>, 片桐和雄\*<sup>2</sup>, 古瀬泰輔\*<sup>3</sup>, 奈良光洋\*<sup>4</sup>

## Progress and Future Prospect of Instrumentation and Control Technologies in Steel Industries

Ryuzo Yamada, Yoshihisa Kimura, Kazuo Katagiri, Taisuke Furuse, and Mitsuhiro Nara

## Synopsis

It is becoming important for Japanese manufacturing industries to change their target of manufacturing process from increase in production to improvement of resource yield rate because of the resource problem, environmental problem and economic development of emerging nations.

In the last decade, many technical progresses have been made in the area of instrumentation and control based on the improvement of electrical technologies and information technologies. Phenomenon in the process has been visualized by improvements of sensing devices and data logging techniques. In the area of control, new techniques such as model predictive control has been applied for steel manufacturing plant so as to control more complicate target of control. Diffusion and progress of information technologies realized a new area of control, called network sensing.

This article is intended to survey a technological progress of instrumentation and control technologies in steel industry. Recent development and application of new technologies in rolling, forging and casting processes in Daido Steel Co., Ltd. and a group company are introduced. Further, developments in research and development center are introduced. Finally, future prospects of technological trend are mentioned.

## 1. はじめに

生産効率の向上を目標に邁進してきた日本の製造業は、地球規模での資源不足と環境問題および新興国の技術力向上により方向転換を余儀なくされている。鉄鋼産業を支える計測制御技術分野においても、これまでの大量生産指向から、品質と歩留りの向上を目標とした資源効率の向上を目指すことが必要になってきている。本解説では、このような環境のもと、最近の鉄鋼業における計測制御技術の進歩を振り返り、大同特殊鋼(株)（以下、当社という）およびグループ会社の各セグメントにおける計測制御に関する技術開発および研究動向について解説し、今後の技術動向を展望する。

## 2. 計測制御技術の動向

## 2. 1 最近の技術動向

製造業における計測制御技術は、従来より計装技術を駆使してプロセスを安定に動作させるための制御が求められている。一方、最近のインターネットや無線通信に代表される情報通信技術（以下、IT技術）やパーソナルコンピュータ（以下、PC）および電子技術の進歩により、技術の高度化や新しい制御分野の形成がすすめられている。

鉄鋼業においては、従来のPID制御に続きロバスト安定性を高めたH<sub>∞</sub>制御などが適用されてきているが、最近では、モデルを用いて制御量の未来値を予測する機

2008年12月5日受付

\* 1 大同特殊鋼(株)研究開発本部 (Daido Corporate Research &amp; Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

\* 2 大同特殊鋼(株)知多工場 (Chita Plant, Daido Steel Co., Ltd.)

\* 3 大同特殊鋼(株)渋川工場 (Shibukawa Plant, Daido Steel Co., Ltd.)

\* 4 (株)大同キャストイングス 名古屋工場 (Nagoya Plant, Daido Castings Co., Ltd.)

能を有するモデル予測制御などの新しい制御手法も実用化されてきている<sup>1)</sup>。また、IT技術の進歩によりネットワークセンシングという新しい技術分野が生まれ、たとえば鉄鋼産業以外の例としてはインターネットを介したリアルタイム遠隔制御の実用化<sup>2)</sup>や、センサネットワーク<sup>3)</sup>を用いたITS (Intelligent Transport Systems)におけるETCやカーナビゲーションなどへの実用化が始まっている。一方、熟練労働者の大量退職(2007年問題、2011年問題)という大きな変化点を機に、プラントの運用スキル(意思決定や状況認識など)を担保するための操業支援システム(エージェント技術)の開発を目的とした研究もおこなわれており、熟練労働者の技能のモデル化などが研究されている<sup>4)</sup>。さらに、各種センサや画像化技術および解析技術の進歩により事象のデジタル化が進められ、かつてはブラックボックスであった事象やプラント内各部の「見える化」が実現し、制御および管理の向上が図られている。

## 2. 2 個別技術の開発動向

### 2. 2. 1 信号処理

PCは、クロック周波数の増加による高速化に限界が見えてきたが、マルチCPU (Central processing unit) 技術の開発により、たとえば2005年に販売されたPentium4 (3.4 GHz) に対し2007年に販売されたCore2Duo (2.6 GHz) の浮動小数点演算速度が1桁以上向上する、など、着実に高性能化が進んでいる。さらに低廉化も進められた結果、各種のデジタル信号処理がPC上で容易に実施可能になった。また、各種数値解析時の演算時間も大幅に短縮された結果、シミュレーションを併用したシステム開発による開発納期短縮が可能になってきている。また、FPGA (Field Programmable Gate Array) などのプログラム可能なロジックデバイスの適用が広がり、複雑な信号処理もハードウェア並の速度で実行可能となっている。

### 2. 2. 2 非破壊検査

センサ技術と信号処理技術が融合しアレイ超音波技術が検査業界での地位を確立した。本技術は、もともと医療分野を中心に適用されてきたが、北米を中心に産業界での適用が進み、日本でも電力設備の保守点検や鉄鋼産業での素材検査への適用が進められている。また、レーザ超音波などの非接触の超音波探傷技術も、信号を検出するレーザ干渉計の高感度化などにより実用化が始まっている。さらに、X線透過試験の分野においては、従来

のフィルム露光式から、イメージングプレートと呼ばれる蛍光体塗布プレートに透過像を記憶させ放射線画像をデジタル画像として取得可能な装置が広く普及し、処理の高速化と高ダイナミックレンジ化および環境負荷低減が可能になった。

### 2. 2. 3 距離・形状計測

三角法を利用したレーザ距離計が多くのメーカから市販されており、測定範囲25～200 mm、分解能0.02～30  $\mu$  mの高精度で測定レンジの広いセンサが市場から入手できるようになった。また、光の到達時間差計測によるレーザ距離計においては数百mの距離を1 mm前後の分解能で測定可能なセンサも市販されている。一方、光切断法やステレオ方式を利用した距離画像取得技術も実用化可能なレベルまで高くなっており、0.1 mmの深さ分解能、1 kHzのライン走査速度で距離画像を取得可能なセンサも市販されている。

### 2. 2. 4 画像処理

画像技術は、設計、製造、検査といった生産プロセスで広く普及した<sup>5)</sup>。撮像素子の解像度に関しては、アナログ式工業用カメラで主流であった30万画素から現在は500万画素の工業カメラ用素子が開発されている。また、従来のCCD (Charge Coupled Devices) からCPUやメモリと同じプロセスで製造できるCMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) 方式の撮像素子も開発されてきており、低廉化が進んでいる。またカメラについては、CPUを組み込み簡単な画像処理を実行することができるもの(スマートカメラ)が市販されはじめている。さらに信号の伝達方式に関しては、アナログのNTSC方式からGbitE (Gigabit Ethernet) などのデジタル通信規格の適用が始まり、解像度の向上に合わせて高速化がはかられている。

画像処理ソフトウェアにおいては、二値化、フィルタ処理、マッチング、粒子解析などの各種処理がライブラリー化され、それらを用いることにより従来に比べ短時間で画像処理のカスタマイズと最適化が可能になってきている。

### 2. 2. 5 温度計測

熱電対や測温抵抗体、放射温度計といった標準的な温度センサに加え、高温、高圧といった特殊な環境や微小領域や急速に変化するプロセスでの温度計測技術の開発がすすめられている。また、赤外線検出用2次元アレイ

が開発され、HgCdTe素子と走査ミラーを組み合わせた従来の方式に比べ安価で高速に熱画像が取得可能になっている。なお、溶鋼温度計測においては、消耗熱電対式から光ファイバ式(消耗)が開発され測定精度が向上した。

## 2. 2. 6 ロボット

組立て、搬送、溶接、などの各種製造プロセスにおいては決められた手順に従い動作する第1世代と呼ばれる産業用ロボットが用いられているが、画像センサや距離センサなどを装備し自らの動作を修正可能な第2世代と呼ばれるロボットも普及し始めている。また、第3世代と呼ばれる学習機能と問題解決能力を備えた知的ロボットの開発も進められている。なお、一般家庭向けロボットも市販されはじめた。

## 3. 特殊鋼の計測制御技術

以下に当社およびグループ会社の鋼材、素形材、鋳鋼品の各製造プロセスにおける新しい計測制御技術の実用化事例を紹介する。なお、従来は専門メーカーへのシステム開発委託が主流であったが、開発環境の簡便化と技術のブラックボックス化の観点から、内製化への動きが進んでいる。

### 3. 1 条鋼における計測制御技術の導入例

鋼材を製造するうえで必要な計測制御技術の一つに、鋼材の識別技術があげられる。これは、特徴として多品種・小ロットの製造が行われていること、熱片への識別表示が必要であること、および細分化された品質トレー

サビリティが要求される点にある。また、この識別作業は自動化が遅れている分野であり生産性という面においても課題を残していた。今回、熱片鋼材を含む識別技術についてその取組と今後の展望について紹介する。

### 3. 1. 1 鋼材の識別方法

鋼材における識別管理例を Fig.1 に示す。従来は、分塊圧延後に人手により約 700℃の熱片にロット表示として刻印を打刻し冷却後ペンキ表示を施し、次工程以降この再表示したペンキ文字を目視により照合作業してきた。課題は、高温下での重筋作業、ヒューマンエラーの発生、取り扱える情報量が少なくトレーサビリティが粗いなどであり、従来から自動化が切望されてきた。

### 3. 1. 2 自動識別方法

識別の自動化を進めるにあたり重視した点は、①耐熱性を有した表示であること、②自動表示・自動読取りの信頼性が高いこと、③保有情報量の拡充である。今回、自動識別化に用いた要素技術と重点項目との関係を Fig.2 に示す。鋼材の場合、被表示面のスケール生成の状態が材質により変わること、また切断法により被表示面の凹凸が著しく異なることから識別信頼性の観点より、マーキングなどによる鋼材への直接表示方式から耐熱性を有する金属タグを使用した間接表示方式を選択した。

自動表示・自動読取りの信頼性および保有情報量の拡充については、規格化された2次元コードを適用することで対応した。また、これら表示・読取りの自動化に

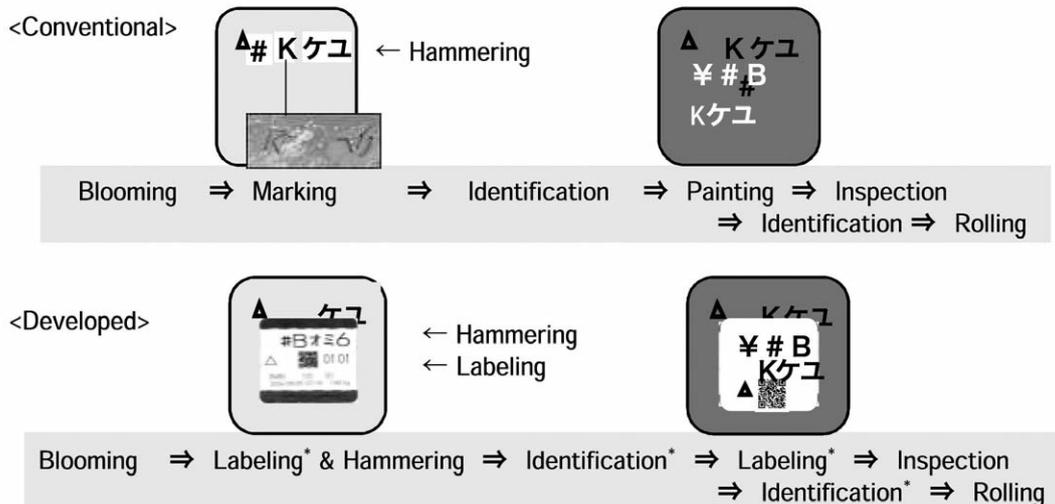


Fig.1. Marking and its identification method. (\* : Automated process)

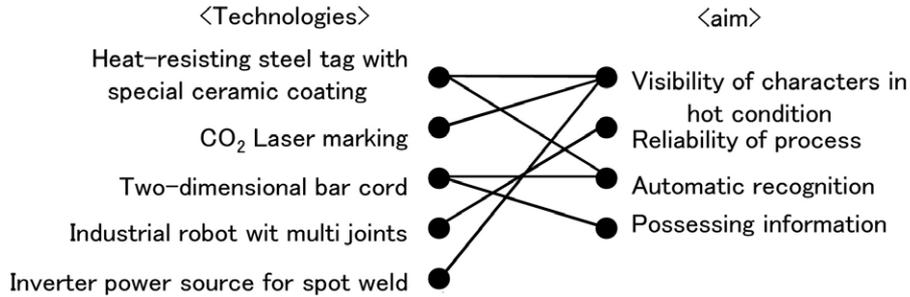


Fig.2. Basic technologies and its aims.



(a) Determination of labeling position before spot welding

(b) Searching symbolizes in QR cord and recognizing ID

Fig.3. Measurement and control processes in the Labeling and ID recognizing process.

は、Fig.2 に示すとおり鋼材または表示されたコードを画像処理することで位置検出し、Fig.3 に示す自動位置合わせの動作ができる多関節の産業用ロボットを用い高い再現性と稼働の信頼性の両立を果たした (Fig.4).

本鋼材の自動識別システムは、各種最新の要素技術を組み合わせることで、2004年10月に設置以降順調に稼働している。これにより、従来ロット単位の識別から鋼材1本単位の識別が可能となり品質トレーサビリティの向上と識別管理の効率化を図る目途が得られた。

### 3. 1. 3 今後の展開

今後、耐熱性金属タグを用いた鋼材熱処理工程におけるロット識別への展開、および印字したコードに比べ耐久・耐候性があり情報量の大きいRFタグ、ICチップを用いるなど、鋼材識別改革へ継続して取り組み、更なる信頼性、効率化を図っていく。

## 3. 2 素形材における計測制御技術の導入例

### 3. 2. 1 二次溶解電極プロフィール計測による高精度スタブ芯出し

二次溶解における品質確保のためには、モールドと電

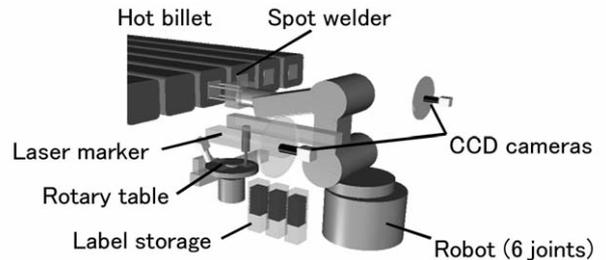


Fig.4. Schematic diagram of steel tag labeler.

極の間隔 (サイドギャップ) を一定に制御する必要がある。そのためにはスタブ (二次溶解炉が電極を保持する掴み部) を電極の芯に溶接しなければならない。グラインダーで手入れされた電極は真円度が低いため、従来、最も適した電極芯を決めることができなかったが、本技術においてはレーザ変位計により電極プロフィールを測定し、独自ロジックにより表面形状に対応した品質上最適な電極芯を算出する。電極軸方向の傾き補正を加えた後、溶接するスタブがセットされる機構をもつが、装置可動部自体の停止精度も加味された仕組みとなっており、その結果、二次溶解炉にセットした段階でのサイドギャップ精度向上に大きく寄与している。

### 3. 2. 2 異型品の自動鍛造制御 (7000t鍛造プレス)

自由鍛造プレスの能率・品質向上策として、金敷とマニピュレーターの動きを連動させた自動鍛造モードがある。これまで鍛造素材の形状変化部においては、金敷と鍛造対象との距離が変化するため金敷引き上げの手動介入をせざるを得ず、能率・形状品質を阻害していた。あらたに開発した制御システムにおいては、鍛造素材の形状変化をプレスの加圧力変化により把握しフィードバックすることで、鍛造素材と引き上げた金敷の距離を常に一定に保つことを可能とした。この制御により金敷とマニピュレーターの連動動作が適正化され、単純形状材と同様の能率で自動鍛造を行うことが可能となった。

### 3. 2. 3 高精度・棒鋼超音波探傷装置

渋川工場が供給する航空機用途部品は“高速回転体”用途であり、水浸超音波探傷による厳しい内部品質の検査が要求されている。航空機エンジンシャフトの周辺部品である耐熱ベアリング用素材をターゲットとし、高精度超音波探傷装置を開発した (Fig.5)。この装置は細径製品を高精度かつ効率的に超音波検査できる設備であり水槽の傍らに外径 $\leq \phi 50\text{mm}$ の製品を自動供給可能な給集材装置を配置しており製品径の事前登録とレーザ測長機による測長機能を具備、またブリッジの往復機能により連続自動運転が可能である。また、探触子を3チャンネル配しており、同一部位の垂直/斜角複数探傷要求に対しても高精度かつ効率的な超音波検査が可能である。

客先要求の高精度化対応として、接触媒体となる水槽



Fig.5. Appearance of high precision ultrasonic inspection system for steel bars.

の水に対して脱気装置を設置し、高感度探傷時に問題となる製品への泡付着に起因するノイズ対策を実施している。また、ターニングローラー上における製品の振止め装置、回転滑り抑制のための補助ローラーを設置し、探傷精度向上を図っている。

同一部位の垂直および斜角複数探傷要求に対する探傷効率化を図るため、探触子の多チャンネル化 (3CH)、ブリッジ往復走査機能により走査回数を最小化した。データ記録においては電子データ (画像処理) 採用により、これまでの A スコープ画像に加え、B スコープ (断面表示)、C スコープ (平面表示) 画像による欠陥指示評価が可能となった。また、レーザ測長機による測長データを走査条件に反映させることにより乱尺製品の連続探傷を可能とした。

### 3. 2. 4 今後の展望

今後はレーザ三次元測定による検査技術、画像処理による表面キズ検出技術、渦流探傷による $\sigma$ 相検出技術などの導入を検討する。

## 3. 3 鋳鋼品における計測制御技術の導入例

(株)大同キャスティングスにおいては、「グラムの領域からトンの世界まで」のキャッチフレーズの基に、グラムの領域を中津川工場、トンの世界を名古屋工場を担当している。

名古屋工場の製品群は、鉄道分岐用マンガンクロッシング、遠心鋳造品、砂型鋳造品の3種類に分類されるがその中でも、砂型鋳造品については、最近の傾向として高難度製品に傾倒しており、インペラ・水車ランナに代表される羽根物製品が主流になってきている。

羽根物製品については、メーカでの試運転による性能試験ができない場合、その性能保証として羽根プロフィールのゲージ合わせ検査、あるいは、三次元羽根面座標測定が要求される場合があり、その対応には多大の工数を費やしている。

従来から使用している片持ち型三次元測定機・罫書き作業装置では、NC割り出しテーブルとのコンビネーションにより、主に砂型鋳造品の荒加工に当たっての芯出し罫書き作業を行っているが、演算装置機能を装備したデジタル読み取り装置を付加したシステムとなっており、

上記座標測定には、製品をNCテーブルのセンターに水平に置くための治具を工夫して行っている。

今回紹介する多関節型三次元空間座標測定装置(Fig.6)は、この座標測定の効率アップ他の効果を狙って導入した装置であり、CADデータとの比較演算機能を備えたシステムで、原点座標系を製品自体の基準点から設定できるため、製品を定盤上にセット、芯出しする必要がないのが特徴である。

以下に、その装置仕様と適用事例を照会すると共に、今後の展望について述べる。



Fig.6. Measurement of three-dimensional shape of an impeller with six joints spatial coordinate meter.

### 3. 3. 1 設備仕様

設備本体：ベクトロン Model 5243L (6軸多関節型)

測定ソフト：3DMajic2000(三次元CADデータ比較演算)

プローブ最大移動範囲：(X軸方向) 3100 mm (Y軸方向) 3100 mm (Z軸方向) 2970 mm

装置の精度：(繰返し精度)  $\pm 0.01$  mm (測定精度) 0.15 mm/400 mm, 0.20 mm/1000 mm

### 3. 3. 2 適用事例

対象製品：ランナ羽根 13枚

測定座標範囲：(X軸方向) 1536 mm (Y軸方向) 1166 mm (Z軸方向) 1377 mm

座標測定点：裏表合計 155点 $\times$ 13枚 = 2015点 寸法許容差：0 ~ +2.4 mm

測定方法：①CADサーフィスデータ入力, ②土間の上に製品を固定, ③測定装置を製品近傍に固定, ④原点

セット(製品のあらかじめ分かっている3点の測定ポイントを測定し、原点座標系を自動作成), ⑤指定された7セクションの座標を測定, ⑥演算(測定点とCADデータ面に一番近い面との面直誤差を演算, 誤差をカラーマッピング)

効果：①7セクション $\times$ 裏表枚のセクションゲージ製作不要, ②製品芯出し治具不要, ③測定の個人差がない, ④演算データをプリントアウトして検査記録にできる。

### 3. 3. 3 今後の展望

今後は、羽根面研磨仕上げ品への研磨代設定への活用、および、非接触測定装置の導入を検討する。

### 3. 4 特殊鋼の設備制御技術の導入例

鉄鋼プラントは設備規模が大きく、その改修工事には長期間のシャットダウン期間が必要となり多大な生産影響およびコストが生じる。そのため、工事・試運転期間の短縮、最適なメンテナンス周期の設定が重要となる。従来よりシミュレータ活用による試運転調整作業の前段取化や設備診断によるCBM(Condition Based Maintenance)化を推進してきたが、近年のコンピュータ技術の進歩によりリアルタイム処理・オンライン化が可能となり、更なるシミュレーション精度向上・自動化が図られているので、その一例について紹介する。

#### 3. 4. 1 リアルタイムシミュレーション(Fig.7)

機械装置や電動機の特徴をモデル化し、シミュレーションにより制御方式やゲインなどのパラメータの事前調整を行うことは従来より実施しており、一定の効果を発現してきた。ただし、①実際の制御装置で同じ特性を作ることが難しい、②ノイズや手動介入といった外乱に対するシミュレーションが難しい、といった課題があった。従って、シミュレーション結果は目安値として有効ではあるものの、試運転段階においてもある程度調整する必要があった。しかし、近年のコンピュータの高速化によりリアルタイム処理ができるようになり、実制御装置と組み合わせた精度の高いシミュレーションが可能となった。リアルタイムシミュレーションの効果は、①実装置の使用によりモデル化部分を少なくし精度が向上できること、②制御装置のプログラムミスも発見できるこ

と、などが挙げられる。知多工場分塊ミルモータ更新工事においては、リアルタイムシミュレーションを最大限活用し試運転時間を12時間短縮した。ただし、確実に効果を出すためにはモデルの完成度を上げる必要があり、その作業に多大な工数を要する。従って、プラントの重要度に応じて従来のシミュレーション方法とうまく使い分けていくことが必要である。

### 3. 4. 2 オンライン設備診断(Fig.8)

設備診断のための振動測定は従来は人間系に頼っており、運転中にも測定可能で振動の大きさを測定する簡易診断と、月1回の定期修理日に一定回転でモータを回し、振動の周波数成分により部位ごとの健全性を評価する精密診断を組み合わせ実施してきた。これらの診断は重大事故の未然防止に大きく貢献してきたが、①システム化されておらず周波数分析・判断に熟練を要する、②月1回の簡易診断では早期発見が難しい、といった問題があった。しかし、IT技術の発達により情報収集やオンライン化が容易となり、常時測定や傾向管理が自動で実施できるようになった。知多工場では本技術を2006

年に線材圧延に導入し、ベアリングやギヤの異常の早期発見に貢献している。圧延機の回転は張力制御などにより常に変動するため、現在は一定回転である無負荷状態でのみ診断をしているが、運転中の診断方法についても今後開発していく。また、AE (Acoustic Emission) 診断などの先端技術の活用や多変量解析の導入により、診断精度の更なる向上を図っていく。

## 4. 研究開発状況

### 4. 1 研究開発指針と実績

当社における計測・制御技術の研究開発は、検査、計測、内質評価、測温技術、自動化、と広い分野をカバーしている。測温技術に関しては、1980年代に放射温度計の商品化を<sup>6)</sup>、また、検査技術においては、1990年代に鋼片のインライン検査装置を実用化し大幅な自動化を実施している<sup>7)</sup>。一方、2000年以降は、大きな省力効果を生み出す開発案件が完了したことを受け、積年の課題ともいべき比較的難易度の高い熱間プロセスでの検査・計測技術や高減衰材鋼片の探傷技術、物流技術の

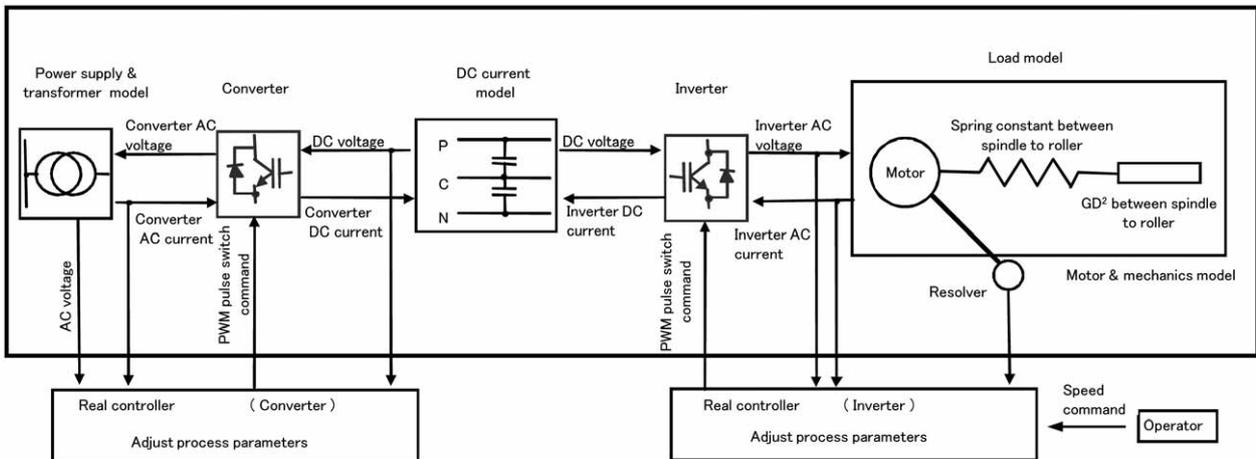


Fig.7. Schematic diagram of real-time simulation.

| Method of data collection   | Timing of diagnosis                                  | Frequency  | Production coat               | Precise analysis              |
|---|--|--|-------------------------------|-------------------------------|
| <p>&lt;Conventional&gt;</p> <p>Motor Attenuator Operator Judged by operator</p> | Trend monitor :Dynamic<br>Precise diagnosis :Static  | Once/month   | 22 h/month<br>(1 h/machine)   | 5 h (minimum)<br>(On request) |
| <p>&lt;Developed&gt;</p> <p>Automated diagnosis</p>                             | Trend monitor :Dynamic<br>Precise diagnosis :Dynamic | Once/5 min.<br>Reporting daily and monthly (max. & ave.) | 0 h/month<br>(5 min./machine) | 3 min.<br>(Once/week)         |

Fig.8. Concept of on-line diagnosis system.

Table 1. Research subjects in the last decade.

| Category                 |                  | Subjects for research   |
|--------------------------|------------------|---|
| Inspection               | Ultrasonic       | Diffusion bond, Weld of clad pipe, Bore in railroad crossing, Inclusion of bar and billet, Weld of dissimilar materials |
|                          | Eddy current     | Surface defects of flat bars and wire rods  |
|                          | Air flow         | Occlusion of turbine housing, Misalignment of cast mold   |
|                          | Image processing | Automobile part, Magnets, Turbine rotor, Forged cross joint   |
| Measurement              | Image processing | Width of flat bar, Dimensions of automobile part, magnet and forged cross joint   |
|                          | Laser method     | Shape of bloom, Flatness of plate, Bend of flat bars, Thickness of steel strip  |
|                          | Contact method   | Bulging of cast billet  |
| Test of internal quality | Ultrasonic       | Hardness distribution   |
|                          | Eddy current     | Detection of sigma phase  |
| Automation               | Machining        | Three-dimensional beveling of round bar   |
|                          | Laser processing | Marking on hot billet end   |

開発に注力してきた。さらに、最近では、グループ全体を見据えた製品検査技術の開発にも注力している。2000年以降の主な研究課題を Table 1 に示し、次項に実用化事例を紹介する。

#### 4. 2 平角鋼片の表面きず検査<sup>8)</sup>

円形断面製品や対角の比較的小さいビレットなどの製品の表面きずについては、磁粉探傷や漏洩磁束探傷などの各種自動探傷が適用されているが、断面形状が矩形で長辺の長さが製品ごとに異なる平角製品については自動化が困難であり目視検査が実施されてきた。また目視検査においては、閉じた線状きずを見逃す危険があった。そこで、励磁コイルと検出コイルを一体化した三列千鳥配列のマルチコイルをプリント基板上に形成し (Fig.9)、32チャンネルのブロック5個を時系列的に高速電子走査することにより、サイズの異なる試験材でも全面探傷が可能な渦流探傷装置を開発した。また、2重周波数や励磁・検出コイルの位相切り替えにより、多様なきず形状へ対応した (Fig.10)。その結果、深さ0.5 mm以上の自然きずにおいてS/Nが3以上であった (Fig.11)。

#### 4. 3 エチレンスーパーチューブの肉盛品質検査

エチレンプラントの熱分解炉管であるエチレンスーパーチューブは、遠心鑄造管の内面にプラズマ粉末溶接技術を用いて耐コーキング性に優れた金属を肉盛した複合管である。この肉盛溶接部においては、もし大きな融合不良が発生すると炉内の熱を炉管内に伝えることができなくなり、分解炉の生産性を阻害することになる。そこで、肉盛溶接部の品質保証技術が切望されていた。エチレンスーパーチューブは高温強度が要求されるため、遠心鑄造管が用いられるが、外表面肌が粗く、かつ、結晶粒径が大きいため外表面からの超音波探傷は不可能であり、かつ、肉盛り界面の融合不良検査は放射線透過試験の適用も不向きであった。そこで、管内面より超音波を入射させる全没型水深超音波探傷装置を開発した (Fig.12)。探触子は、融合不良検査用の20MHzのラインフォーカス探触子と、管の厚さを測定する5 MHzの探触子を併用した (Fig.13)。また、探傷中は管を回転させ、管端をチャッキングし回転角度を正確に制御する方式とした。φ 1.0 mm および φ 0.8 mm の平底穴の探傷例を Fig.14 に示すが、良好に検出できていることが分

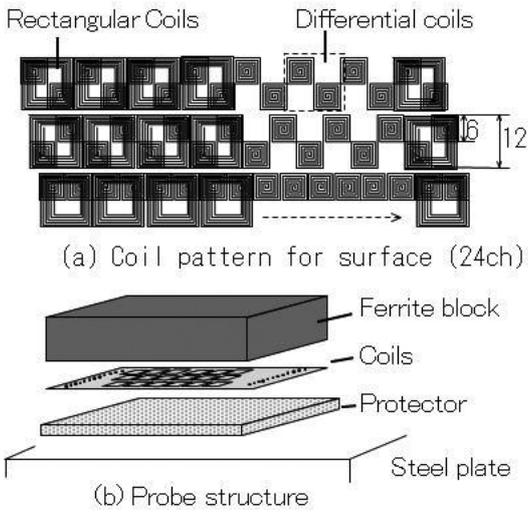


Fig.9. Coil pattern and structure of probes.

|            |     |     |     |     |     |     |
|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Depth(mm)  | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.7 | 0.5 |
| Length(mm) | φ5  | 50  | 10  | 10  | 10  | 10  |

45°

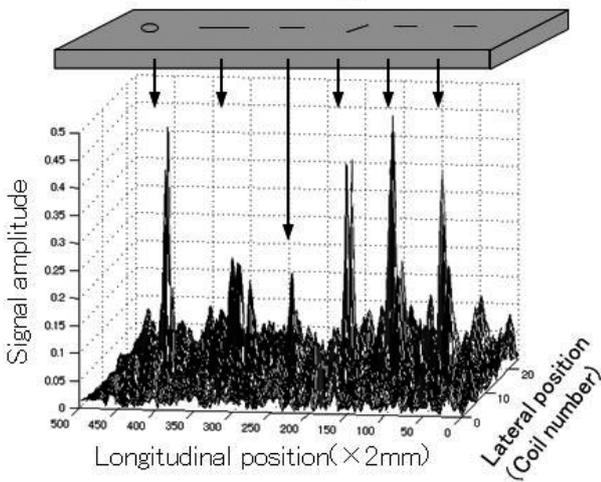


Fig.10. Response from artificial flaws.

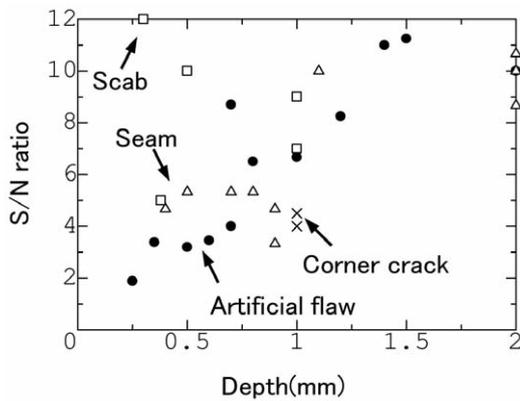


Fig.11. S/N ratio of flaws.



Fig.12. Appearance of immersion tank.

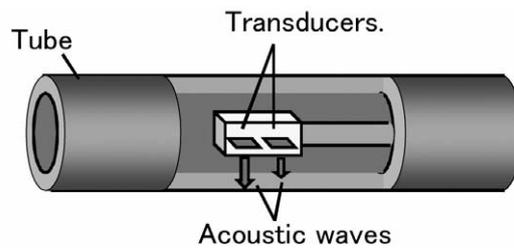


Fig.13. Schematic diagram of inspection.

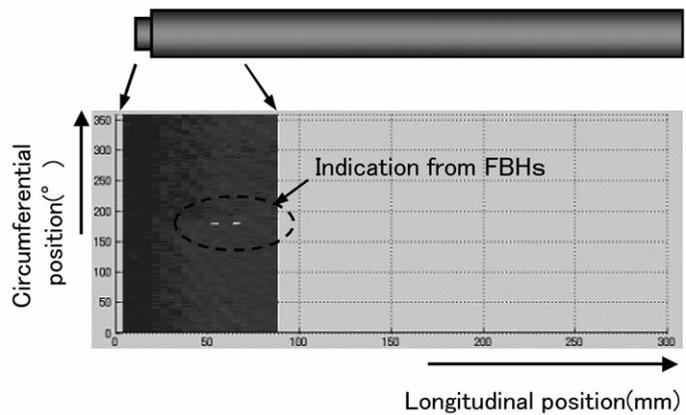


Fig.14. C scope image of flat bottom holes with diameter of 0.8 mm and 1.2 mm.

かる。また、展開図として表示される探傷結果より、融合不良の有無、肉盛り厚さの変化、母管の健全性、なども評価可能であり、品質情報に基づいたプロセスパラメータの最適化（プロセス支援）にも貢献している。

#### 4. 4 鋳造中の鋳片バルジング検知<sup>9)</sup>

連続鋳造中の鋳片においては、凝固した鋼（シェル）が内部の液状の溶鋼静圧により外部に膨らむバルジングと呼ばれる現象が起こる。このバルジングが進行するとシェルが引張られ破断し、ついにはブレイクアウトに至ることが懸念される。従来は、このブレイクアウトを、モールド内の溶鋼湯面の変動情報やモールドの温度変化より予測し防止してきた。しかし、バルジングの進行に即した鋳造速度などの制御は困難であった。そこで接触式変位測定装置を開発し、1500 K の高温鋳片におけるバルジングを直接監視することを可能とした。接触子は鋳片に接触した時の溶融を防止するために、先端より冷却水を放出する構造とした(Fig.15)。さらに、環境対策として強固なセンサユニットの防塵、防滴構造を装備した。Fig.16 に鋳片中の測定箇所を、Fig.17 に鋳造中に

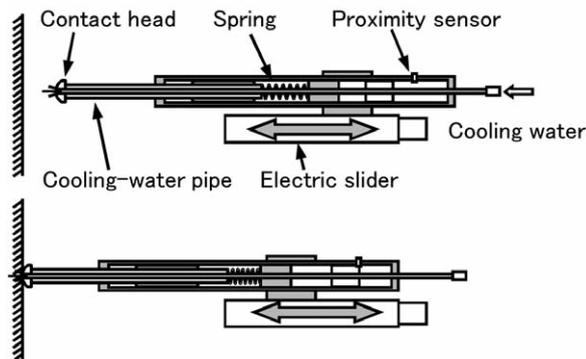


Fig.15. Principle of contact measurement.

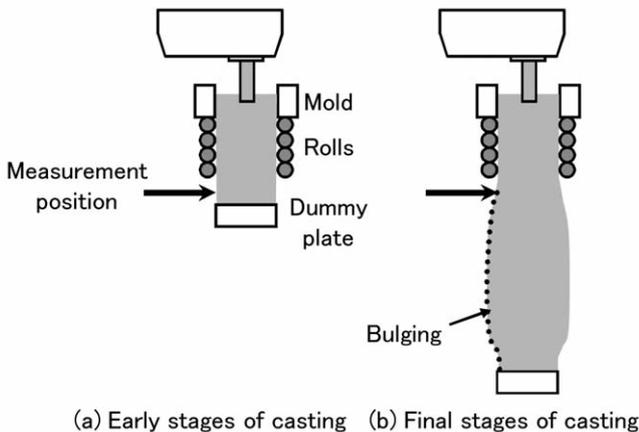


Fig.16. Measured portion on cast billet.

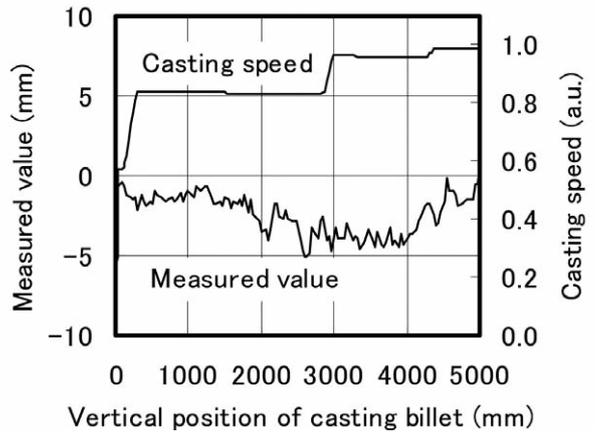


Fig.17. Change of measured value during casting.

おけるバルジング検知装置出力と鋳造速度の関係を示すが、速度の増加に応じてバルジング量が変化していることがわかる。本装置は、現場にて適用条件を探索中である。

#### 4. 5 風速変化を用いたターボハウジングの閉塞検査<sup>10)</sup>

自動車の燃費向上ニーズを受け、ターボチャージャーの適用が拡大している。そのタービンハウジング(Fig.18)においても、寸法の高精度化、薄肉化、など客先からの品質要求も高度化している。一方、その品質保証においては、形状が複雑であるため目視検査あるいはファイバースコープを用いた検査が行われていた。しかし、スクロール内面で発生するバリや閉塞については見逃す危険性があった。本課題に対しては、スクロール内部を通過する風速と内面に発生するバリ高さに相関があることを見出し、風速変化を利用した内面検査装置を実用化した (Fig.19, Fig.20)。センサには、MEMS (微小電気機械システム) タイプセンサを利用した。なお、測定精度を向上させるため、通過風量の最適化、フィルタや室内空調など外乱要因の管理指針を明確化した。



Fig.18. Appearance of turbine housing.

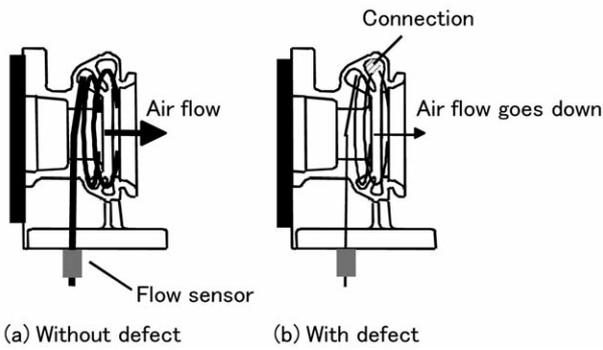


Fig.19. Principle of inspection.

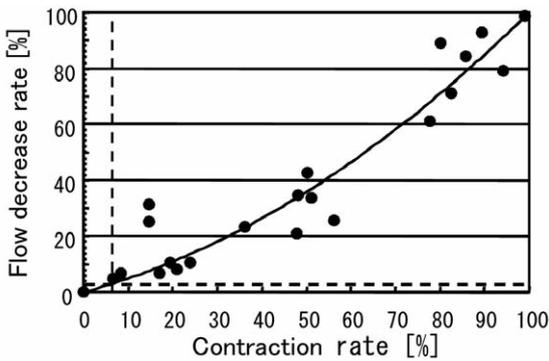


Fig.20. Relationship between contraction rate and flow decrease rate.

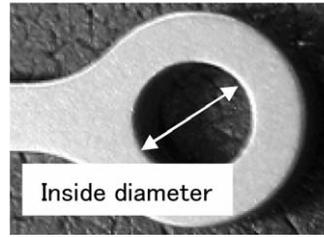


Fig.21. Appearance of vane arm.

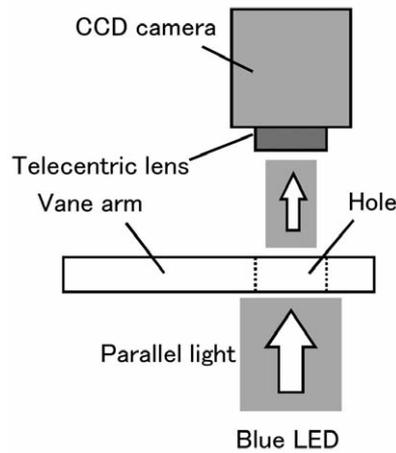


Fig.22. Schematic diagram of optical system.

#### 4. 6 画像処理を用いた自動車部品検査<sup>11)</sup>

当社グループ会社で製造している可変翼式ターボチャージャーのベーンアームについて、ベーン取り付け穴 (Fig.21) の内径検査装置を開発した。本部品は、もし加工穴内面にバリなどが付着していると組立て時に支障をきたすため、内径許容公差は±0.02 mmと管理されている。従来は作業者によるゲージ検査であり、ひと月あたり40万個の製品検査に多くの工数を費やしていた。本課題に対しては、背面透過照明とテレセントリック光学系を採用した画像処理装置を開発した (Fig.22)。なお、レンズの被写界深度を考慮し、穴の上方および下方から二度の検査を実施した。画像判定においては、複数の穴の内径エッジ点より最大内接円を求めることにより高い精度で最大内接円径を求めることが可能になった (Fig.23)。本装置は現在、検査速度1.8秒/個で全数検査に適用されている。

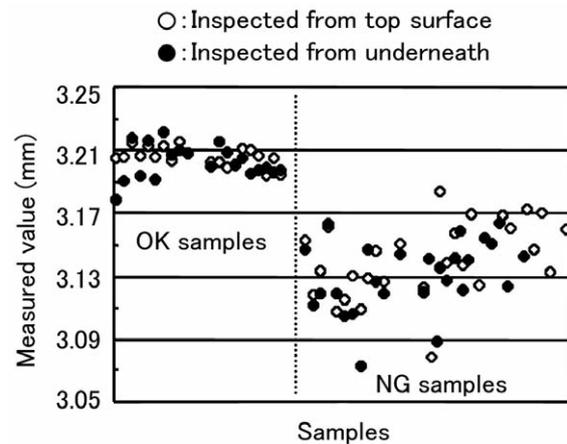


Fig.23. Example of test result.

## 5. おわりに

最近の計測制御技術の進歩および当社における新しい技術の適用事例を概説した。2000年以降、電子・情報処理技術の高速・高精度化を背景に、それらを適用した計測制御の高度化と低廉化による普及が進んだと共に、情報技術という新しいインフラを利用した空間を超えた新しい技術分野が形成された。当社においては、識別、計測、プロセス制御、探傷、シミュレーション、オンライン設備診断、などのさまざまな技術開発および実用化が進められた。

今後は、これらの高度化した計測制御技術を利用し、ますます生産プロセスの自動化と高度化および製品品質の向上がはかられると考えられる。これらの技術を、早期に今後の課題である資源効率の向上に結び付けていくことが重要である。また、ロボットの知能化、情報技術を利用したリモートセンシングと制御、熟練技能の代替化、さらには、制御対象を原料の調達から生産、製品の販売までのサプライチェーンに拡大しビジネス制御への適用研究がすすめられると考えられる。

2007年度を境に日本の人口が減少に転じ、鉄鋼の生産プロセスを支えてきた熟練作業者の大量定年を迎えている。合わせて、若者の工学離れが進む中、計測制御技術はヒューマンスキルの担保のためにもますます重要になる。今後は、高度な学習と判断機能を付加させることも必要である。

過去の偉人が考えた時代設定に比して現実世界の技術進歩は遅く、50年前に考えられた鉄腕アトムの世界は2003年には誕生しなかった。しかし、確実に技術は進歩しており、10年前には考えられなかったインターネットや携帯電話が今や重要な社会インフラに成長している。今後、何十年後に2足歩行ロボットが働く製鋼所が誕生するか、と考えると胸が躍る思いがする。足元の景気の後退は、新しい技術を蓄積するチャンスと捉え、技術開発を加速したい。

(文献)

- 1) 中川繁，鷲北芳朗，岸真友：計測と制御，47 (2008)，941.
- 2) 石井秀明：計測と制御，47 (2008)，627.
- 3) 本谷秀堅：第25回センシングフォーラム，(2008)，

300.

- 4) 玉置久：材料とプロセス，21 (2008)，1094.
- 5) 輿水大和：ふえらむ，13 (2008)，154.
- 6) 長坂浩安，宇津野光朗，雪吹隆夫，稲生博，鈴木一雄：電気製鋼，52 (1981)，270.
- 7) 高田健一，矢野泰三：電気製鋼，74 (2003)，173.
- 8) 渡邊裕之：電気製鋼，71 (2000)，205.
- 9) 片岡克仁：電気製鋼，79 (2008)，281.
- 10) 布施直紀：電気製鋼，77 (2006)，197.
- 11) 森大輔：電気製鋼，79 (2008)，337.