

# 鉄鋼プロセスにおける最近の寸法・形状計測技術

市川 文彦\*

A Review of Recent Technologies on Dimension and Shape Measurement in Steel Industries

Fumihiko ICHIKAWA

**Key words:** measurement; sensor; shape; dimension; optical method; ultrasonic method; X-ray method.

## 1. はじめに

鉄鋼業における寸法・形状計測は昔からの重要テーマであり、近年、鉄鋼製品の寸法・形状品質に関する要求が厳しくなるにつれて、その重要性はますます増している。さらに、3K作業の解消などの自動化に対しても、寸法・形状計測の果たす役割は大きくなっている。一方、計測システム構築に使われる部品、ツールに関しては、センサデバイスおよび電子デバイスの小型化・デジタル化、マイクロプロセッサの高速化・大容量化・低価格化がなされ、画像処理やセンサの知能化が容易に行える環境になってきているのが最近の特徴であると言える。

さて鉄鋼プロセスにおける寸法・形状計測技術を展望するにあたり、鉄鋼プロセス全体をみると、そのニーズおよびそれに応えるセンサ技術は多種多様で、広範にわたっているのが分かる。この分野をまとめると以下のように言える。寸法形状計測は、長さの単位で計る最も基本的な量の計測である特徴づけられ、測定要素から、レベル、厚さ、幅、長さ、間隔、形状(2次元、3次元)、粒度に分類することができる。また、鉄鋼業における寸法形状センサ開発の目的は、①製品の寸法形状に関する品質保証、②要求される寸法形状を持った製品の作り込みのためのフィードバックまたはフィードフォワードのためのセンサ、③設備診断、④操業の安定化、⑤内表面の材質を含めた品質向上、⑥3K作業の解消を含む自動化、などが挙げられる。鉄鋼プロセスにおけるこれら計測の特徴は、ほとんどが製品の流れ、工程の流れを止めることなく計測すること、すなわちオンライン測定が要求されることである。オンライン測定における技術的課題は①耐環境性、②高精度化、③高応答化、④長寿命化、⑤メンテナンスの容易化のいずれか、またはその組み合わせに帰着されると思われる。

本報告は、寸法・形状の各測定要素ごとにニーズの動向

を述べ、ここ4～5年の間に主に日本で報告された寸法・形状計測に関するセンサ技術について紹介し、本分野の技術の動向および今後の課題について概観するものである。

## 2. レベル計測

### 2・1 レベル計測のニーズ動向

代表的な測定課題として、①原料処理および高炉上部での粉粒体のストック面レベル計測、②高炉下部から連続铸造に至る工程での溶銑、溶鋼およびスラグのレベル計測が挙げられる。このようにレベル計測では鉄鋼製造の上流工程でのニーズが高く、多くの場合、高温、粉塵などの厳しい環境条件での測定が求められる。

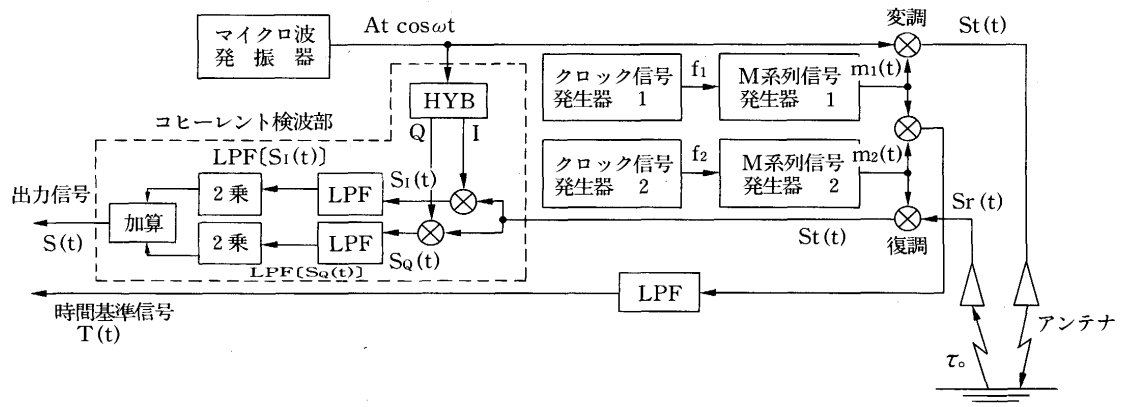
原料処理工程でのレベル計測の目的は、種々の原料の投入量把握と制御である。高炉では、装入物や溶銑レベルなどがあり、炉内反応を正確に把握し、安定操業に結びつけるときに重要な制御項目になる。転炉プロセスにおいては、スラグおよび溶鋼レベルが代表例であり、吹錬制御精度向上、ランスレベルの設定、およびスロッピング防止などが目的となる。連続铸造プロセスではモールド内溶鋼面レベルが代表例であり、これは铸片の品質と深い関わりがあり、品質の作り込みを行ううえで重要な制御項目となる。このほか、溶銑予備処理や2次精錬においても同様なニーズがある。上流工程でのレベル測定は、高熱下での計測であり、これらのセンサ開発は、3K作業の解消やプロセスの自動化にも繋がるものである。

### 2・2 最近のレベル計測技術

上流工程でのレベル計測は、高熱、ダスト等の悪環境下での測定を余儀なくされ、これまで、放射線、マイクロ波、渦電流、熱電対方式、フロート方式、圧力方式、レーザ方式などが各場面に応用・開発され、使い分けがなされている。最近の注目される開発事例を2つ紹介する。

平成4年12月18日受付 平成5年4月9日受理 (Received on Dec. 18, 1992; Accepted on Apr. 9, 1993) (依頼解説)

\* 川崎製鉄(株)加工・制御研究センター主任研究員 (Mechanical Processing, Instrumentation and Control Research Center, Kawasaki Steel Corp., 1 Kawasaki-cho Chuo-ku Chiba 260)

図1 M系列信号変調方式のマイクロ波レーダの原理図<sup>1)</sup>

### 2・2・1 マイクロ波レーダによるスラグレベル計

マイクロ波を利用したレベル計は、従来高炉の装入物のレベル、転炉の溶鋼レベル、混鉄車内溶銑レベルの計測に適用されている。この方式をスラグなどマイクロ波の反射率の小さい対象に適用するにはノイズなどの問題で限界があった。これはその問題を解決すべく、M系列信号を利用した開発事例である<sup>1)</sup>。図1に原理図を示す。わずかに周期の異なるM系列信号を2つ利用することにより、ランダムノイズに対して40dBのSN比改善と電磁波伝搬という高速現象の時間拡大を達成している。

### 2・2・2 連続鋳造モールドレベル計

ニーズ対応から注目されるものとして、ツインレベル計による連続鋳造モールドレベル測定が挙げられる<sup>2)</sup>。これは、CCスラブの内表面品質がモールドの溶鋼レベル変動ばかりでなく、溶鋼の偏流状態にも影響されることが分かってきたため、偏流によって生じる溶鋼面の左右のアンバランスを2つの渦電流式距離センサで検出することにより、溶鋼の偏流状態を推定し、CCスラブの品質制御に役立てようとするものである。モールドレベル計測も点から面の測定への傾向が現れている。

## 3. 厚さ計測

### 3・1 厚さ計測のニーズ動向

鉄鋼プロセスにおける厚さ計測は、圧延工程を主体に、厚板、熱延薄板、冷延薄板、鋼管などの鉄鋼製品の厚さ制御および保証を目的として行われている。鋼板について言及すれば、2次加工における歩留まりや自動化のニーズにより、いっそうの板厚精度向上とともに、製品幅方向の厚み分布（板プロフィール）の制御精度向上も要求されている。このため厚み測定も、1次元から2次元測定へ、また制御性向上のため、応答の高速化および測定位置のミル直近化が行われている。また熱延、冷延のタンデムミルでは、板厚の更なる高精度化やコイルの先端部の板厚制御精度を向上させるために、スタンド間厚み計の開発、導入が行われ

てきている。以上の製品板厚計測以外に、近年では上流・中間工程における耐火物などの損傷状態を把握し、設備自体の診断を行うための厚み測定のニーズも増している。

### 3・2 最近の厚さ計測技術

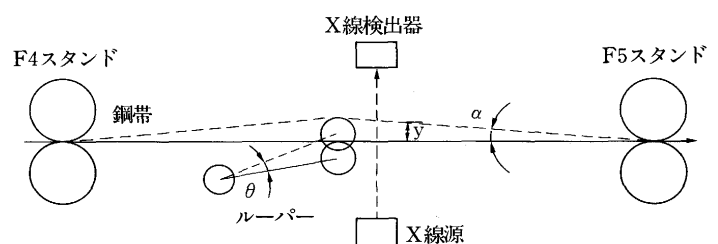
鋼板等の厚み計測に利用されているシーズ技術には、放射線方式、超音波方式、光応用距離測定方式が挙げられる。このなかで、鋼板の厚み計測として最も利用されているのが放射線方式で、 $\gamma$ 線厚さ計とX線厚さ計があり、それぞれ厚板製造ラインから薄板製造ラインの各所に重要計器の一つとして装備されている。最近のX線厚さ計の開発の動向は、スタンド間厚さ計への対応と点計測から幅方向厚み分布（板厚プロフィール）計測への対応が挙げられる。

#### 3・2・1 熱延スタンド間厚み計

スタンド間厚さ計としては、熱延工程では仕上げミルのF3-F4スタンド間に設置されたのが最初の例である<sup>3)</sup>。図2にその概要を示すが、このような装置開発のポイントは、①設置スペースが狭いことによる装置の小型化、②スタンド間ルーパによる鋼板の上下動から生ずる測定誤差の補正、③保守性の向上などが挙げられる。熱延工程ではこの後、F4-F5スタンド間に設置した例<sup>4)</sup>やF4-F5、F5-F6、F6-F7間に3台設置した例<sup>5)</sup>があり、フィードフォワード制御、中間学習制御、中間モニター制御等により、製品板厚精度の向上に役立てられている。

#### 3・2・2 熱延エッジプロフィールメータ

鋼板の板厚プロフィールに関しては、従来は1～2個のX線厚み計を機械的に幅方向に走査して測定していた。近

図2 熱延仕上げスタンド間X線厚さ計の設置概念図<sup>3)</sup>

年、扇状X線源(広がり角30度)と多チャンネル検出器(160ch)の組み合わせで、板厚プロフィールを高速に計測する装置が開発され<sup>6)</sup>使用されている<sup>7)</sup>。図3に装置の概要を示す。開発のポイントは、①鋼板エッジ近傍の散乱線対策、②各チャンネルの校正時間の短縮、③耐環境性の向上が挙げられる。

3.2.3 小径シームレス鋼管肉厚計

鋼管の肉厚計測に関しては、 $\gamma$ 線の透過方式を応用した開発事例がある<sup>8)</sup>。小径シームレス鋼管の平均肉厚を熱間状態で測定しようとするもので、図4にその装置の基本構成図を示す。 $\gamma$ 線が均一で平行であれば、鋼管の断面形状に関連した $\gamma$ 線の吸収量が検出器で検出されるので、鋼管の断面が完全な円環とした場合の等価平均肉厚が計算から求められ、鋼管の長手方向の肉厚変化が監視できる。本開発のポイントは、いかに空間分布が均一で平行な $\gamma$ 線を作るかであり、①複数線源、②線量分布の補正板、③コリメータ、④鋼管

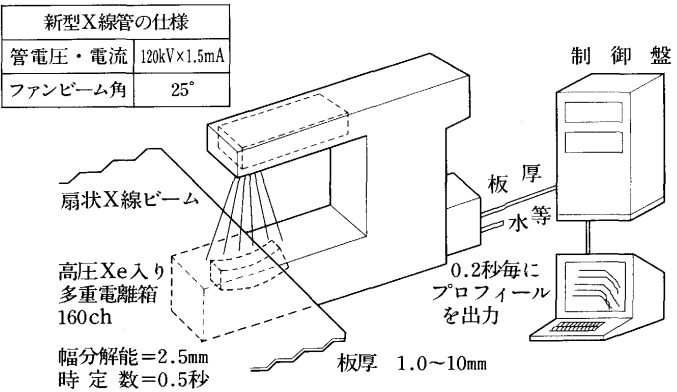


図3 熱延エッジプロフィールメータのシステム構成図<sup>7)</sup>

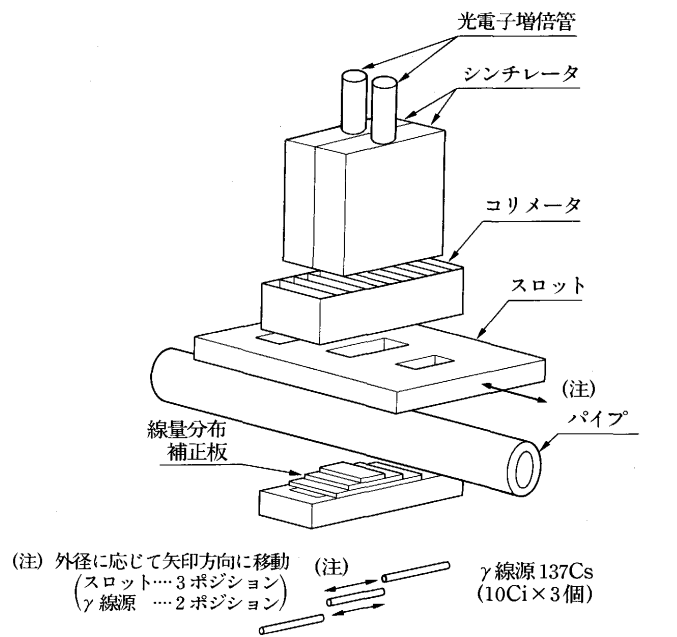


図4 小径シームレス鋼管の $\gamma$ 線肉厚測定装置の概略図<sup>8)</sup>

外径に対応したマスクの使用等で問題解決を図っている。

3.2.4 シートバーウェッジセンサ

レーザ距離計を応用した熱間での厚み計測の開発事例も見られる。熱延工程のシートバーウェッジ(鋼板両端での厚みの差)センサ開発がそれである<sup>9)</sup>。厚み計測は一对のレーザ距離計で鋼板を挟み込み、センサ・鋼板間の距離を測定し、一对のセンサ間の距離は既知として鋼板の厚みを算出するものである。本開発のポイントは、①レーザ距離計特有の鋼板表面粗さによる誤差を回転校正板を用いることにより解決したこと、②センサ支持フレームの熱膨張などによる誤差を、シートバー一本毎に自動校正して補正したこと、③光軌跡の熱揺らぎをエアージャグで防いでいること、などが挙げられる。

4. 幅・長さ計測

4.1 幅・長さ計測のニーズ動向

幅・長さ計測は、厚さと同様、圧延工程を主体に、厚板、熱延薄板、冷延薄板などの鉄鋼製品の幅制御および幅・長さの寸法保証を目的として行われている。幅制御などに関しては、最終製品での目標幅・長さを達成するには、様々な中間工程で製品の断面形状を所定の範囲以内に収まるよう制御することが要求される。このため最近では、幅・長さ計測としては単に寸法を測定するのではなく、製品の端部の形状を考慮した有効幅・長さを測定することが求められるようになってきている。このような計測制御によって、中間工程から下流工程を総合した製品の歩留まり向上が達成可能になる。鋼管においては、鋼管がそのまま各種装置の部品として使用されたり、鋼管どうし接続されて使用されることが多いため、精度の高い寸法計測が要求される。鋼管においても、他製品と同じく制御上、中間工程での熱間オンライン計測が望まれている。

4.2 最近の幅・長さ計測技術

幅・長さ計測に適用されているシーズ技術は、①測長ロールによる長さ測定に代表される機械的方式、②鋼板の幅測定などに適用されている光学的方式、③厚板の幅・長さ同時測定における画像処理方式、④鋼板長さ測定におけるレーザドップラー方式、⑤鋼管の周長測定における超音波方式、⑥転炉ノズル長さ計測などでの同軸ケーブル長測定に適用する電気パルス方式<sup>10)</sup>(TDR: Time Domain Reflectometry) (または光ファイバーを用いたOTDR)などが知られている。

4.2.1 熱延スタンド間幅計

鋼板の幅は、板厚プロフィールとともに鋼板の断面形状を決めるもので、非常に重要な制御項目であり、その精度向上のために、フィードバック制御のみならずフィードフォワード制御やセットアップの学習制御を高度に行う必要があり、熱延仕上げミルなどでは、スタンド間に幅計を設

置するニーズが高まっている。熱延仕上げミル用に開発したスタンド間幅計の事例を示す。図5はF5-F6スタンド間に設置した装置の概略図である<sup>11)</sup>。図では下部光源方式を採用しているが、別の開発では自発光によるCCDカメラ方式を採用している<sup>12)</sup>。このような開発でのポイントは、①下部光源方式では、下部光源周りの耐環境性の向上、②自発光方式では、CCDカメラのダイナミックレンジの確保と鋼板エッジ検出の高精度化、③蒸気などに対処するエアーパージ装置の工夫、④振動対策、などが挙げられる。

#### 4・2・2 冷延鋼板寸法計

ベルトコンベアー上を180mpmで搬送されるシート状鋼板の寸法(幅、長さ、直角度)を全数自動計測する装置の開発である。装置概要を図6に示す<sup>13)</sup>。開発のポイントは、①ストロボ照明、7台のCCDカメラによる7点エッジ位置の同時測定、③エッジ検出精度向上のための照明角度・光量・画像エッジ検出しきい値のきめ細かい設定、などが挙げられる。

#### 4・2・3 鋼管の周長計測

鋼管の寸法検査のひとつである周長計測の自動化の試みとして行った開発事例である。装置の概要を図7に示す<sup>14)</sup>。

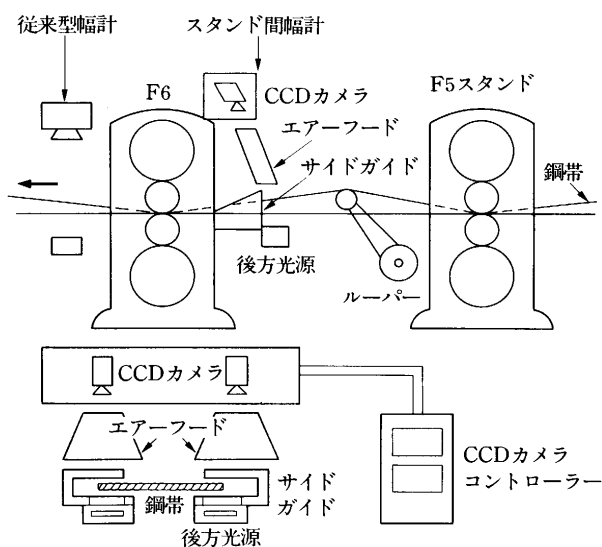


図5 熱延仕上げスタンド間幅計の構成図<sup>11)</sup>

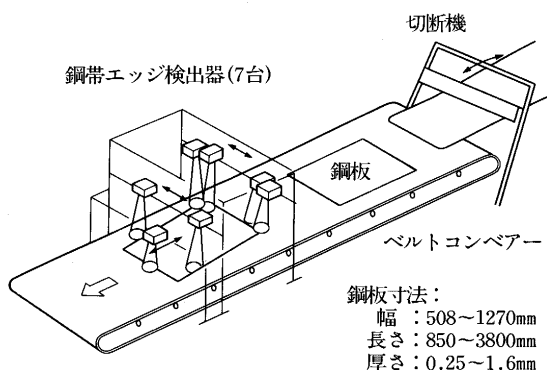


図6 冷延鋼板寸法自動測定装置の概略図<sup>13)</sup>

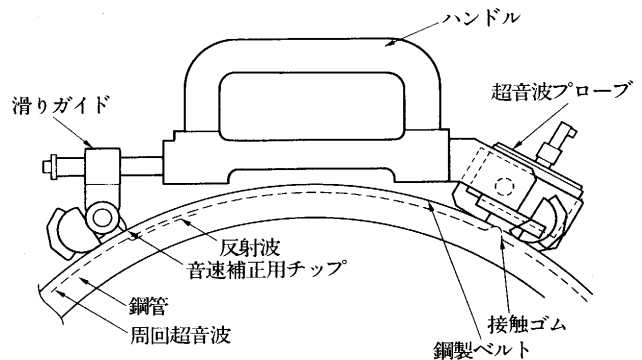


図7 超音波表面波を用いたポータブル型鋼管外径測定装置の概念図<sup>14)</sup>

鋼管の表層を周方向に一周する超音波表面波の伝搬時間から周長を測定するもので、適応鋼管の外径は16"~56"である。本開発のポイントは、①装置の小型・軽量化、②測定毎に同材料で音速校正ができる治具を工夫したことが挙げられる。

## 5. 間隔計測

### 5・1 間隔計測のニーズ動向

間隔計測のニーズの高いものとして、代表的なものに連続鋳造ロールや圧延ロールのロール間隔測定がある。圧延工程では、ロールのロール間隔、すなわちロールギャップをオンラインで直接測定するニーズである。これは、例えば熱延などの鋼板の圧延においては、ロールギャップは圧下スクリー位置で設定しているが、圧延反力のためギャップは拡大する。このため、現状ではロードセルによる圧延反力とミル定数を用いて、ロールギャップの補正を行っているが、ミル定数は必ずしも正確に測定できるものではなく、精度の高い圧延を行うにはロールギャップやその形状を直接測定することが望まれている。同様に形鋼、棒鋼、線材などのカリバー圧延でもロールギャップやその形状を計測するニーズが高い。また連続鋳造工程においては、操業異常の防止などのため鋳造ロールのロール間隔やアライメントを自動測定するニーズがある。連铸モールドでは、モールドの銅板と鋳片間のギャップを測定し、鋳片の凝固収縮状態や冷却現象を把握するニーズもある。

### 5・2 最近の間隔計測

間隔(ギャップ)測定技術としては、従来より、①差動トランス等に代表される機械的方式、②渦電流距離計や静電容量式距離計等の電磁的方式、③レーザ距離計等に代表される光学的方式、④超音波距離計を利用する方式、が適用されている。

#### 5・2・1 連続鋳造機ロールギャップ計測

連続鋳造設備では、鋳片内部割れなど操業異常を防止するため、ロール間隔、ロールアライメント、ロールの回転、冷却スプレーノズル詰まりなどをチェックし、マシン管理

を実施する必要がある。この4項目を測定できる計測装置をダミーバーに組み込んで、自動測定を行っている<sup>15)</sup>。ロールギャップセンサとして、差動トランス型の接触式のものが使われている。開発の特徴としては、冷却水飛散下での測定となるため、耐久性、操作性の優れた装置が要求され、主に機械式の接触式センサが用いられていることが挙げられる。

5・2・2 熱延ロールギャップ計測

圧延工程におけるワークロール間のギャップを直接測定することを試みた、開発事例である<sup>16)</sup>。ワークロールの胴端部に差動トランス型の接触式ロールギャップセンサを設置したもので、荷重計では検出できなかったバックアップロールの偏芯による変化を検出できている。本方法では冷却水の飛散、ロールの高速回転等の劣悪環境下の計測であり、耐久性、耐摩耗性等が問題になる。

6. 表面形状計測

6・1 表面形状計測のニーズ動向

形状という言葉の意味は広く、鋼板の板厚プロフィールなどは、厚み、幅・長さ計測の項で言及したので、ここでは表面の凹凸形状を中心に扱うことにする。上流工程では、高温を扱う各種炉に用いられる耐火物などの損耗状況を知って、設備診断を行うための耐火物等の形状測定がある。また、高炉では装入原料の堆積形状や羽口レースウェイ形状など、安定操作のための形状測定がある。圧延工程では、前述の板クラウン、エッジドロップ以外に板の平坦度、C反りやL反りなどの反り、ワークロールのプロフィール、厚板圧延における平面形状などがあり、棒線圧延では、真円度、真直度、鋼管圧延では、真円度、偏肉、真直度、溶接部切削形状などがある。これらは、いずれも品質、歩留まり、生産性に関係する重要な計測項目であり、厳しい条件での計測システムの開発が要求されている。

6・2 最近の表面形状計測技術

表面形状測定で良く行われるのは距離計の1次元、2次元的な使い方すなわちセンサの走査や多チャンネル化であり、距離計の原理により、①機械的方式、②電磁的方式(渦電流センサ、磁気センサ)、③光学的方式(レーザ距離計(三角測量法、干渉法、伝搬時間法))、④超音波方式があり、それ以外に、⑤2次元画像方式(光切断法、モアレ法)が挙げられる。

6・2・1 連続鋳造スラブのバルジング計測

連続鋳造スラブのバルジングをメニスカスから2200mmの位置で測定している事例である<sup>17)</sup>。渦電流式距離計を3台使用し、スラブの狭面側3点を測定してバルジング量を算出している。開発のポイントは水や空気等の冷却を一切使用しないで、1300Kの雰囲気温度まで使用できる耐熱型渦電流距離計を用いて、比較的シンプルな装置に組み上げている

ことにある。

6・2・2 鋼板平坦度計測

鋼板の平坦度計測は、板厚の違いや計測の目的によって種々の方法が開発されている。板厚が厚いと圧延中でも、平坦度は表面形状の凹凸として顕在化するが、板厚が薄くなると、圧延や通板による張力のため、平坦度が形状として顕在化しなくなり、張力の幅方向分布として検出せざるを得なくなる。以下に3つの開発事例を紹介する。

(1)レーザモアレ方式

レーザモアレ方式厚板平坦度計システムの構成図を図8に示す<sup>18)19)</sup>。格子と投影された格子像をある角度の位置から観測すると、2つの像の重なり具合から鋼板の凹凸に対応した等高線を表すモアレ縞が得られる。これを画像処理して、鋼板表面の平坦度を算出するものである。開発のポイントとして、①静止画像計測のための光源として高出力のYAGレーザを使用、②形状記憶合金を活用した大形実格子の実現、③不鮮明なモアレ縞画像を処理できる画像処理手法の開発、が挙げられる。

(2)レーザ利用三角測量方式

本方式は厚板工程から冷延工程に至るまで幅広く適用されている。代表的な例として熱間圧延工程での開発事例を示す<sup>20)</sup>。図9はいわゆる光切断法を適用した例で、線状レー

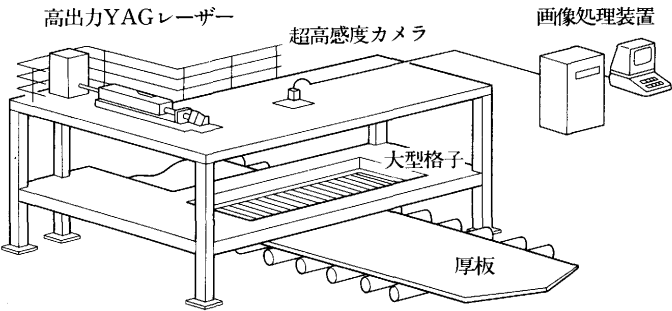


図8 レーザモアレを利用した厚板平坦度計システム構成図<sup>18)</sup>

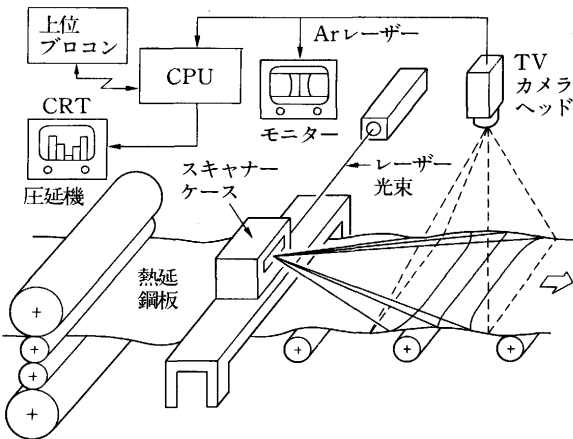


図9 光切断を利用した熱延鋼板平坦度計システム構成図<sup>20)</sup>

ザ光源を3本鋼板表面に投影し、圧延方向3点の変位情報を同時に得ることにより鋼板のばたつきの影響を除去して、表面の平坦度(ここでは、伸び率)を算出している。熱延での他の応用例はレーザ距離計を利用したもので、この場合は鋼板のばたつきの影響を除くため、レーザ距離計を改良したツインビーム方式を採用している<sup>21)</sup>。

これらの開発のポイントは、①鋼板ばたつきの影響除去、②鋼板熱輻射ノイズ対策、③測定装置の熱対策が挙げられる。

### (3) 張力検出方式

この方式は主に冷延鋼板の平坦度計測に適用されている。原理は分割型ローラーを介して、ローラーに加わる圧力の板幅方向分布を磁歪式センサや圧電式センサで計測し、急峻度を算出している<sup>22)</sup>。近年、これらの測定装置の問題点と言われる、ロール分割部で発生する板への押し疵等に対処した開発事例がある。図10に示すように一体ロールに局部的に剛性を小さくしたダイヤフラムを装着し、板からの反

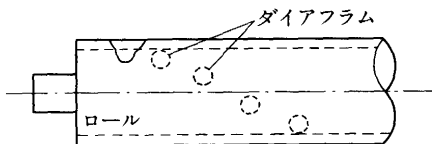
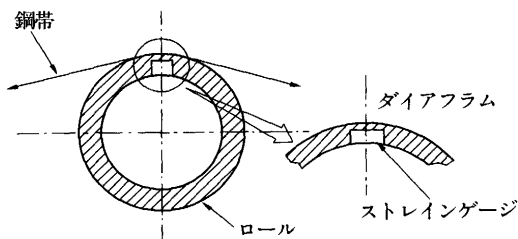


図10 ダイヤフラムを利用したロール方式冷延鋼板形状検出器の原理図<sup>23)</sup>

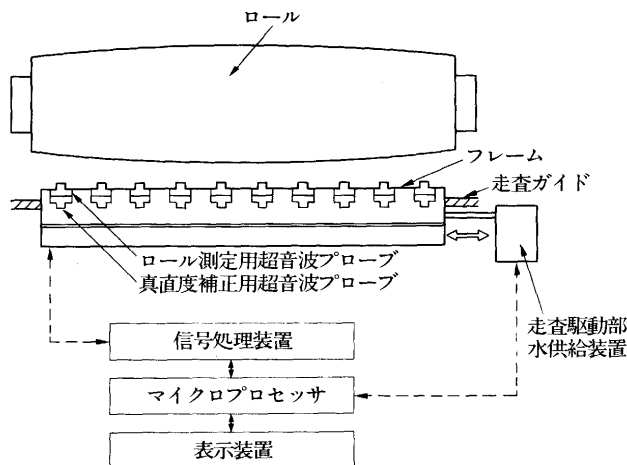


図11 音速補正型超音波距離計を利用したオンラインロールプロフィール計の概念図<sup>24)</sup>

力によるダイヤフラムの微小歪を半導体歪ゲージで検出する方式である<sup>23)</sup>。

### 6・2・3 熱延ミルロールプロフィール計

圧延工程の鋼板のクラウン制御で重要な影響因子の一つであるワークロールのプロフィールをオンラインで測定する計測技術の開発事例である<sup>24)</sup>。図11に測定原理図を示すが、特徴は音速補正型の水柱式超音波距離計と真直度基準としてワイヤーを用いている点である。この開発のポイントは、①冷却水等が飛散する悪環境下でも使用できるセンサの使用、②温度起因音速変化による測定誤差の補正、③架台の真直度変化補正が挙げられる。

### 6・2・4 電縫鋼管ビード切削形状計測

中径電縫鋼管の内面ビード切削形状計測では、従来レーザを用いた光切断とCCDカメラの組み合わせによるモニタリングの報告事例があった。近年、モニタリングのみではなく画像処理を加えて、研削形状を定量化し、制御に結び付けている事例がある<sup>25)</sup>。画像処理の問題点の一つである処理時間について、4基のデータ・フロー型プロセッサを用いることにより、処理時間1.7秒を達成している。

一方、測定の悪環境下を考慮して、機械的方式による開発事例もある<sup>26)</sup>。図12にその原理図を示すが、切削形状に倣う1周1回転の螺旋構造をもつ内ローラーと鋼管母材部の一定位置を倣う外ローラーの間の相対変位を検出することにより、切削形状を得る方式である。

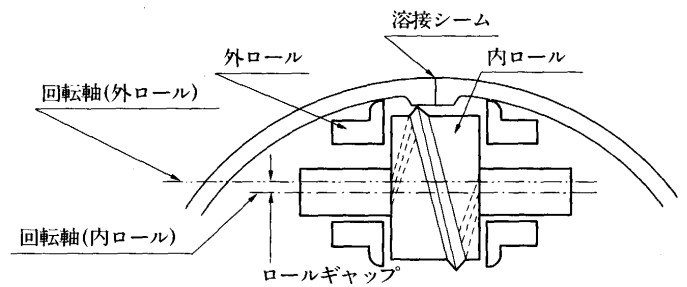


図12 接触ローラーを利用した中径電縫鋼管内面ビード切削形状測定装置の原理図<sup>26)</sup>

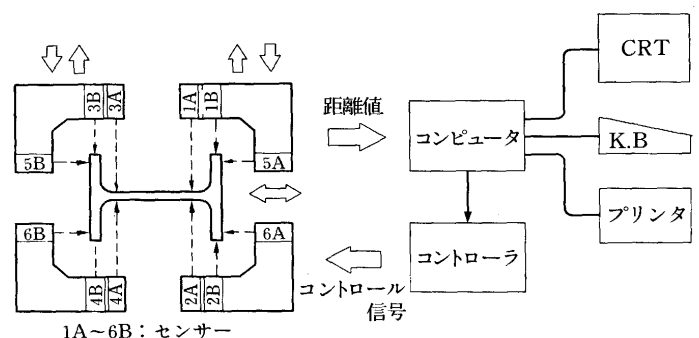


図13 空中超音波距離計を利用したH形鋼寸法測定装置の構成図<sup>27)</sup>

### 6・2・5 H形鋼の形状計測

H形鋼等の寸法・形状測定はその形状から多くの測定項目がある。従来、バックライト方式、光切断方式、レーザ距離計方式等が応用されている。ここでは、超音波距離計を用いた開発事例があるので紹介する<sup>27)</sup>。図13にその装置概要を示す。空中伝搬方式の超音波距離計を12個利用し、フランジ幅、中心偏りおよび直角度を測定するものである。本装置の特徴は、①超音波の伝搬が空間的に広がりを持つので、H形鋼のある程度の横揺れに対して強いこと、②他の手法に較べて比較的コンパクトに安価に装置を組めることである。

## 7. 粒度計測

### 7・1 粒度計測のニーズ動向

鉄鋼プロセスにおける粒度計測の対象は、粉粒体の粒度と鋼材のミクロな結晶粒度の2つに分けられる。結晶粒度は材質計測の分野で取り扱われるので、ここでは粉粒体の粒度を考える。粉粒体の粒度計測のニーズは、ほとんどが上工程の原料の粒度に関するものである。すなわち、高炉操業では、安定操業やエネルギー原単位等の最適化に際して、原料の強度と粒度が重要な役割を果たす。このため、高炉へ原料を提供するコークス炉や焼結工程では、製品であるコークスや焼結鉱の粒度を計測して管理する。また、高炉では、装入した原料の炉内における粒度分布を最適に制御するため炉内で粒度分布を測定するニーズが生じている。

### 7・2 最近の粒度計測技術

従来用いられてきた粒度計測のシーズ技術としては、①サンプリングによる篩い分け方式、②電磁波の前方・後方散乱、③画像計測方式が挙げられる。最近では画像処理を応用した画像計測法が良く用いられている。

#### 7・2・1 ペレット粒径計測

フェロクロムのペレット粒径を画像計測と画像処理の組

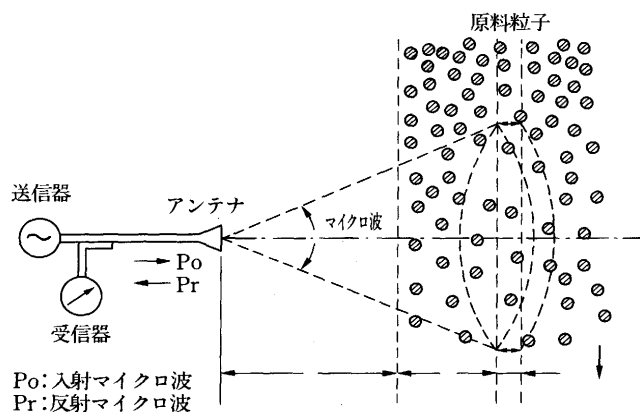


図14 マイクロ波を利用した高炉装入物粒度測定装置の原理図<sup>29)</sup>

み合わせて測定した開発事例である。堆積した状態のペレットの画像は、個々の粒子の分離が悪く一般に用いられる粒度解析ソフトが適用できない。ここでは、原画像から輝度むらを補正した後2値化し、その画像のパワースペクトルの2次モーメントが平均粒径の指標として好都合であることを見出し、採用している<sup>28)</sup>。

#### 7・2・2 高炉装入物粒径計測

高炉の原料である焼結鉱の粒度を炉内での落下途中にて計測する装置の開発事例である。図14に測定原理図を示す<sup>29)</sup>。粒径が5～25mmの焼結鉱に対して、ミー散乱領域に入るような波長のマイクロ波（3～10GHz）を使用し、その散乱電力と粒径との間に良好な相関関係が得られることを利用したものである。

## 8. 今後の課題

寸法・形状計測分野には限らないと思われるが、今後の課題として以下の項目が挙げられる。

#### 1) 耐環境性とメンテナンス性

鉄鋼プロセスでの最近の寸法・形状計測技術について紹介してきたが、これらの技術が全て実ラインでうまく使用されているとは限らない。計測装置の耐環境性、メンテナンス性がキー技術であることが少なくない。環境対策やメンテナンス性の容易化に関する技術蓄積がいっそう大切である。

#### 2) その場計測ニーズと耐環境性

鉄鋼製品の寸法・形状計測では、製品作り込みの制御性を良くするため、できるだけ制御操作端に近い位置での測定が要求される。厚板ミル直近厚さ計、熱延スタンド間厚さ計、スタンド間幅計がその例であるが、更にスタンド間板プロフィール計、スタンド間板平坦度計、ロールギャップ計などへ要求が拡大することが予想される。前述の環境対策やメンテナンス性が問題解決の課題となる。

#### 3) 計測困難な計測課題への挑戦

高炉での溶銑レベル測定や連続鑄造モールド鑄片エアーギャップなどに代表される計測困難なニーズに対しては、計測の新技術が要求される。実現性の評価が難しいが、ブレイクスルーしたときに得られるメリットの大きなものが多く、今後ねばり強く色々な角度から検討を継続すべき課題である。

#### 4) センサ費用削減

鉄鋼のオンラインセンサ開発初期においては、開発メリットの大きいものも多く、センサ費用の多額なものも許されたが、近年このバランスが微妙になってきていると思われる。センサ費用を削減する方策の検討が必要である。センサ価格の低下によって、ラインで活用されるセンサの数は飛躍的に増大すると思われる。

## 9. おわりに

最近の鉄鋼プロセスにおける寸法・形状計測技術について概観した。工程計器としてこの分野のニーズに対する充足度を見た場合、製品の寸法・形状品質保証用を除いてまだまだ低く、ニーズとのギャップは大きいのが現状であろう。この点で開発の余地がいっぱい残された分野である。センサ技術の開発には、色々な分野の技術、知識の集約が必要である。操業サイドの技術者、計測技術者、制御技術者、センサメーカー技術者などがいままで以上に視野を広げて協力しあい、最適なセンサ開発がなされることを望む次第である。

### 文 献

- 1) 長棟章生, 手塚浩一: 材料とプロセス, 3 (1990), p.1279
- 2) 内藤成弘, 松實敏幸, 松本 満, 田中 誠, 国本 衛: 材料とプロセス, 1 (1988), p.1263
- 3) 新田純三, 御厨 尚, 前田一郎, 武智敏貞: 川崎製鉄技報, 18 (1986), p.107
- 4) 布川 剛, 江藤 学, 田中俊光, 山本章生, 本城 基, 原木 裕: 材料とプロセス, 2 (1989), p.485
- 5) 上原淳則, 村山 薫, 上村正樹, 池田晴行, 岡田公之, 二階堂英幸: 材料とプロセス, 5 (1992), p.1515
- 6) 村上純一, 小原 哲: 東芝レビュー, 41 (1986) 3, p.255
- 7) 永島秀雄, 河村国夫, 西山和宏, 松實敏幸, 小笠原達, 小原 哲: 材料とプロセス, 2 (1989), p.1542
- 8) 奥村 精, 紺屋範雄, 岡 弘, 粕谷利昭: 川崎製鉄技報, 22 (1991), p.266
- 9) 頭山 奨, 福高善巳, 菊川裕幸, 藤津 武, 上村正樹, 黒田康徳: 材料とプロセス, 2 (1989), p.1541
- 10) F. Iicikawa and K. Kurita: Imeko 11, 88-D37 (1988), p.397
- 11) 久保多貞夫, 三城賢吾, 三浦寛昭, 加瀬 徹, 桜田欣也: 材料とプロセス, 1 (1988), p.577
- 12) 栗林 隆, 小山朝良, 原木 裕, 吾妻正敏, 中川繁政, 水野健治: 材料とプロセス, 5 (1992), p.1407
- 13) 村岡秀男, 中川忠雄, 一口武夫: 材料とプロセス, 3 (1990), p.1272
- 14) 大平 昇, 前田孝三, 稲葉 護, 竹腰篤尚, 清都泰光, 辻 正男: 材料とプロセス, 5 (1992), p.377
- 15) 徳田将敏, 山本俊行, 小山朝良, 古川恭之, 塚口友一, 佐々木雅夫: 材料とプロセス, 3 (1990), p.1283
- 16) 奥村英典, 福山 敏, 田口輝彦: 材料とプロセス, 5 (1992), p.372
- 17) 東 洵, 森井三千夫, 菅野邦孝, 小北實己, 小林一夫, 手塚正雄: 材料とプロセス, 4 (1991), p.1381
- 18) 松尾次郎, 松實敏幸, 村松 匠, 川上耕有, 北村公一: 材料とプロセス, 1 (1988), p.1581
- 19) J. Matsuo, T. Matsumi and S. Nakao: 2nd Sympo. on Image Sensing in Industry, (1987), p.195
- 20) 松井健一, 橘 秀文, 山本章生: 住友金属, 41 (1989), p.69
- 21) 山根孝夫, 斉藤森生, 菊池隆也, 清水鏝司, 植木勝也, 杉山昌之: 材料とプロセス, 2 (1989), p.1540
- 22) 坪野 肇, 下村雅一, 能勢和夫, 前田恭志, 原田健治, 小池史朗: 神戸製鋼技報, 41 (1991), p.99
- 23) 倉橋基文, 浜田 勲, 安藤正夫, 永井裕和: 材料とプロセス, 1 (1988), p.581
- 24) 市川文彦, 奥野 眞, 河合義人, 多木俊男: 材料とプロセス, 2 (1989), p.1543
- 25) 金山勇人, 黒田泰行, 山本誠二, 三浦孝雄: 材料とプロセス, 4 (1991), p.1377
- 26) 平光雅司, 大出文昭, 薄井輝久, 津田耕三: 材料とプロセス, 3 (1990), p.1287
- 27) 福高善巳, 長谷旅思, 片山 進: 材料とプロセス, 3 (1990), p.495
- 28) 原山昌巳, 上杉満昭: SICE '89, (1989), p.541
- 29) 白川芳幸, 渡辺 敏, 松尾好晃, 矢代弘克, 大野二郎: 製鉄研究, (1990) 339, p. 8