

冷間圧延における形状制御と空気軸受式形状計

Flatness Control System of Cold Rolling Process with Pneumatic Bearing Type Shape Roll

雲 英 洋 一 IHI メタルテック株式会社管理部 部長
都 筑 茂 IHI メタルテック株式会社電気制御技術部 部長
三 角 憲 二 IHI メタルテック株式会社機械技術部 課長

空気軸受式形状計を用いた形状制御システム (IHI Sheetflat) は、1985 年の実用化以来、多くの客先に利用されている。圧延製品の品質に対する要求は厳しくなっており、形状計もそれに対応するため高品質化を進めてきた。形状制御では、フーリエ級数展開を主とした形状の解析と修正動作を行うとともに、圧延データをサンプリング保存して品質管理に用いるなどの機能向上を図ってきた。形状制御の効果は極薄箔でも実証されており、アルミニウムや銅などの圧延ラインで実績を積み重ねている。

The automatic flatness control system, IHI Sheetflat, has been applied to many cold rolling mills since 1985. The pneumatic type shape roll is used as the shape sensor. Recently, requirements for quality products have become much more important. Therefore, performance of the shape roll has also been improved to meet the requirements. Strip shape is evaluated based on the Fourier's analysis method, and the shape error is corrected by mill actuators. Shape data are sampled for the whole strip length and stored in a computer, which are available as quality management data. Effectiveness of control performance is verified in rolling very thin foils. The number of reference plants using IHI Sheetflat has been increasing continuously.

1. 緒 言

圧延プロセスにおける形状制御は、鉄鋼材料およびアルミニウム・銅などの非鉄金属材料の薄板圧延ラインで広く用いられている。当社は静圧空気軸受の原理を応用した形状計を開発し、1985 年に形状制御システム (以下、IHI Sheetflat と呼ぶ) の 1 号機をアルミニウムの冷間圧延ラインに納入した⁽¹⁾。以来、IHI Sheetflat は国内外の多くの客先に採用され、現在までのシステム納入実績は 72 スタンドを数え、空気軸受式形状計の製作実績は 76 本となった (2008 年 4 月現在、設計製作中のものを含む)。

本稿では、IHI Sheetflat の基本技術である空気軸受式形状計および制御システムの最近の実績を紹介する。

2. 空気軸受式形状計

2.1 圧延材の形状

第 1 図に圧延材の形状の例を示す。形状は、材料の断面プロファイル (クラウンとも呼ぶ) と圧延ロール間げきのプロファイルとの関係によって作られる。材料が均等に圧延され板幅内で等しく伸びていれば平坦な形状 (第 1 図 - (a)) が得られるが、伸びが均一でない場合には余計に伸びた部分が波状の形状不良 (第 1 図 - (b))、

(a) 平坦な形状



(b) 耳伸び形状



(c) 中伸び形状



第 1 図 圧延材の形状
Fig. 1 Strip shape

-(c)) となって現れる。

しかし、圧延中の材料は張力が付加された状態で高速で巻き取られているため、目視での形状判別が極めて困難である。そこで、各種の形状検出装置が開発された⁽²⁾。冷間圧延プロセスにおいては、そのなかでも空気軸受式などによる接触ロール方式の形状計の活用事例が多く報告されている^{(3),(4)}。

形状は、通常、第2図⁽¹⁾および(1)式に示すように急峻度あるいは伸び差率などで定義する。当社は、 1×10^{-5} の伸び差率を基本としたI-UNIT⁽⁵⁾を形状の単位に用いている。

$$\lambda = h_i/l_i \times 100\%$$

$$\varepsilon = \Delta l_i/l_i \div (\pi/2 \times h_i/l_i)^2 \dots\dots\dots (1)$$

λ : 急峻度

ε : 伸び差率

h_i : 伸び差で発生する波の高さ

l_i : 基準長さ

Δl_i : 伸び差

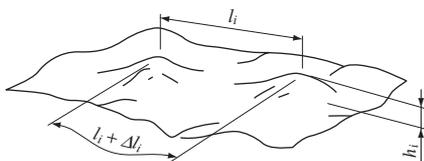
第3図は、形状と伸び差率の関係を示した模式図である。圧延材料を長手方向に裁断すると、波状のところは基準長さ l_i に対し Δl_i だけ伸びる。この比が(1)式で示された伸び差率である。この材料の圧延中における板幅方向の張力分布は、中央部分が高く両端部に向かうと伸び波が大きくなるので低くなる。このように、形状不良の波の程度と伸び差率および張力分布には相関関係があり、張力分布を知ることによって形状を把握することができる。

2.2 静圧空気軸受の原理を応用した形状計

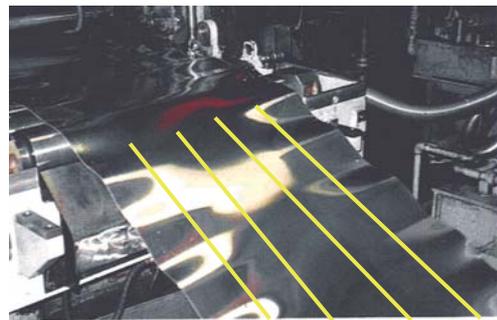
静圧空気軸受は原理的に摩擦抵抗がなく、工作機械のスピンデルなど高速回転軸の軸受や、重量物搬送用の平面軸受などに用いられる。また、軸受に作用する荷重は軸受面の空気圧力を計測して求めることができる。これらの特性を形状計に応用している。

2.2.1 形状計の原理

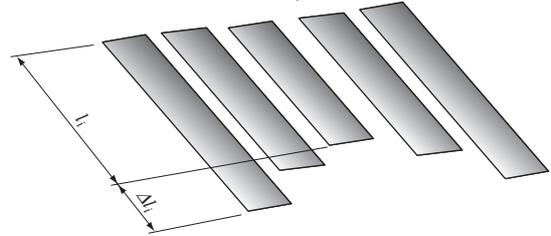
第4図に空気軸受式形状計の構成を示す。円筒軸(アーバ)表面のノズルから噴出される圧縮空気が外側にはめ込まれた複数のリング(ロータ)とアーバとの間に空気



第2図 形状の定義⁽¹⁾
Fig. 2 Definition of strip shape⁽¹⁾

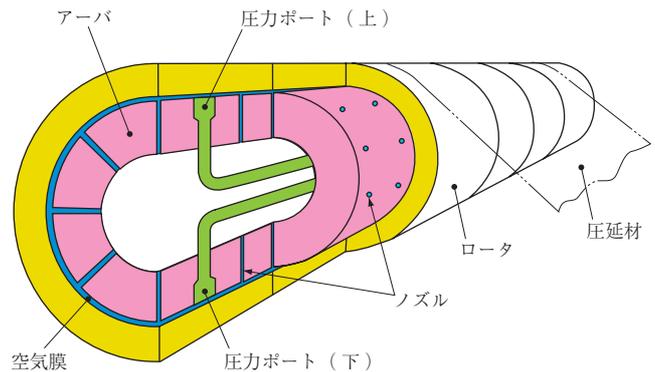


長手方向に裁断



第3図 形状と伸び差率の関係

Fig. 3 Relationship between strip shape and relative difference in elongation



第4図 空気軸受式形状計の構成

Fig. 4 Configuration of aerostatic bearing type shape roll

膜を形成して、空気軸受が構成される。空気膜の圧力はロータの負荷と釣り合うので、荷重側の圧力ポート(上)と反荷重側の圧力ポート(下)の間で圧力差が生じる。これをロータごとに計測すれば負荷荷重分布が分かり、板幅内の張力分布を求めることができる。

空気軸受式形状計は、

- ① 高感度である(0.1 N未達の荷重変化を検知)。
- ② 連続的に形状を検出できる。
- ③ ロータが空気軸受支持なので回転抵抗が小さい。
- ④ 構造が単純で補助駆動装置が不要である。

などの特長をもっていることから、アルミニウム、銅などの冷間仕上げ圧延ラインや、箔圧延ラインに数多く採用さ

れている。

2.2.2 形状計の基本諸元

(1) 形状計の寸法

ロータの外径は 160 ~ 180 mm (標準 180 mm), 幅は 1 個当たり 25 ~ 100 mm (標準 50 mm) である。圧延する材料の仕様に合わせてロータ幅とロータ数を決める。また, 異なる幅のロータを組み合わせることも可能である。

(2) 材料の巻き角

第 5 図に形状計への材料の巻き角を示す。巻き角 θ は, ロータに作用する負荷荷重の許容値と形状検出の分解能を勘案して決定される。

(2) 式に, ロータに作用する力 (F) と圧延材料の張力および巻き角との関係を示す。形状が乱れて特定のロータに張力が集中した場合でも, F が許容値以内になるように巻き角の最大値を決定する。

$$F = 2 \times UT \times W \times T \times \sin(\theta/2) \quad \dots\dots\dots (2)$$

F : ロータに作用する力 (N)

UT : 材料の単位張力 (N/mm²)

W : ロータ幅 (mm)

T : 材料の厚み (mm)

θ : 巻き角 (°)

次に, (3), (4) 式は, それぞれ ε I-UNIT の形状不良に伴って生じる板幅内の単位張力の差 Δut , およびロータ間に生じる負荷荷重の差 Δf を示す。

$$\Delta ut = \varepsilon \times 10^{-5} \times E \quad \dots\dots\dots (3)$$

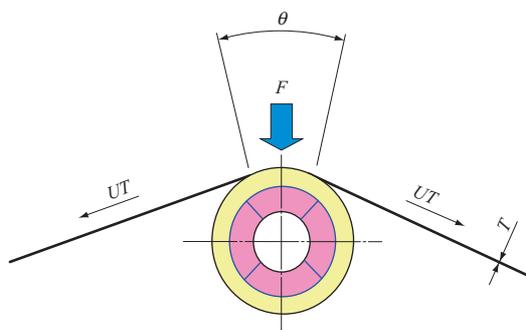
$$\Delta f = 2 \times \varepsilon \times 10^{-5} \times E \times W \times T \times \sin(\theta/2) \quad \dots\dots\dots (4)$$

Δut : 板幅内の単位張力の差 (N/mm²)

ε : 伸び差率の I-UNIT 表示

E : 材料のヤング率 (N/mm²)

Δf : ロータ間の負荷荷重の差 (N)



第 5 図 形状計への材料の巻き角
Fig. 5 Strip wrap angle on shape roll

一般的に, 形状検出の分解能は伸び差率で 1 I-UNIT 未満であることが望まれる。この伸び差率から生じる Δf が, 形状計で安定して検出できるように巻き角の最小値を決定する。

(3) 形状計の配置

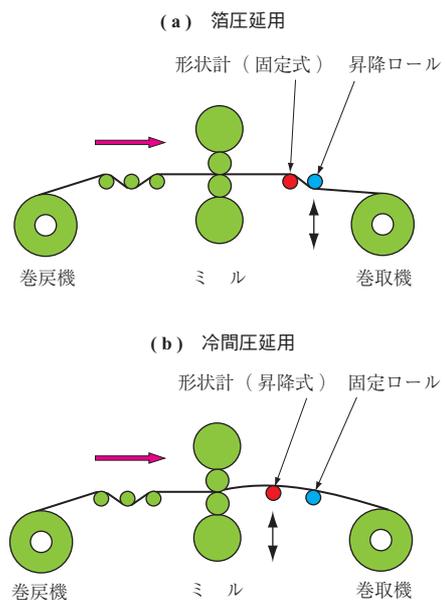
形状計の配置例を第 6 図に示す。箔圧延ライン (材料の厚みが 0.006 ~ 0.5 mm 程度) では, 第 6 図 - (a) のように形状計を固定し, 昇降ロールの高さを変えて巻き角を与える。冷間圧延ラインでは, 箔圧延に比べて材料が厚く張力も大きくなるので, 第 6 図 - (b) に示すように形状計を昇降式とする。巻き角が小さく設定でき, 形状計への負荷が軽減される。

(4) 形状計の高品質化への対応

第 1 表に形状計の高品質化への対応を示す。圧延製品の品質に対する客先の要求は年々厳しくなっており, 当社もこれにこたえるため, 形状計の高品質化を進めてきた。第 7 図および第 8 図に, 検出精度の向上を目的として開発された幅 25 mm のロータを有するシフト式形状計を示す。また, 第 7 図には保守性改善を目的としたインライン校正装置が併せて示されている。

3. 自動形状制御システム

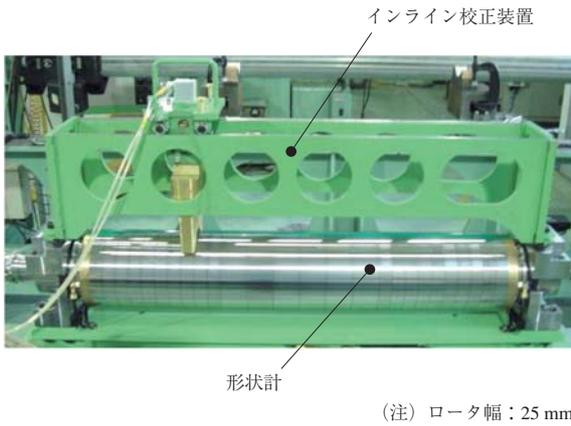
圧延中のロールには, たわみや熱膨張の変化が生じるため, 材料の形状も刻々と変化する。安定した形状を維持するため, 従来は熟練オペレータによる形状把握と手動修正



第 6 図 形状計の配置例
Fig. 6 Arrangement of shape roll

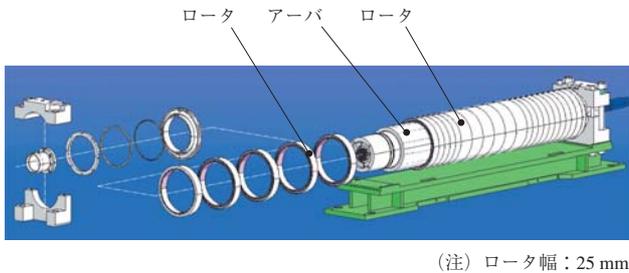
第1表 形状計の高品質化への対応
Table 1 Recent improvement in shape roll technology

項目	開発技術	特長
検出精度	低ノイズロータ	ロータの製造工程を改良し、無負荷回転時のノイズを従来の半分以下にした。
	シフト式形状計	圧延材料の端部のロータへの掛かりをつねに有効とし、全幅の形状検出を行うことができる。
	25 mm 幅ロータ	形状測定をより細分化し、特に圧延材料の端部の形状を精度良く検出できる。
	高感度センサ	形状検出の分解能をあげるため、差圧アンプの感度を従来の2倍に向上させた。
製品品質	ブラシロール	ロータに付着するパウダの除去に用いる。
	低慣性ロータ	ロータの薄肉化によって、回転慣性を従来比30%減とし、圧延材料への追従性を向上させた。
保守性	インライン校正装置	形状計を圧延機に組み込んだまま校正を行うことができる。



第7図 形状計とインライン校正装置

Fig. 7 Shape roll (narrow rotor type) with inline calibration station



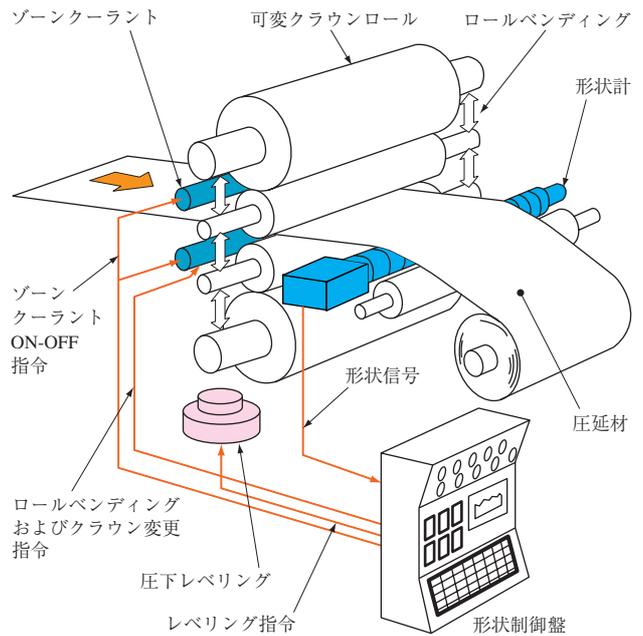
第8図 形状計の組立図

Fig. 8 Shape roll (narrow rotor type) assembly

動作がなされていたが、これに取って代わり第9図に示すような形状計と圧延ラインを閉ループ化した自動形状制御が採用されてきた。この結果、オペレータの技量に頼ることなく高速で安定した圧延ができるようになった。

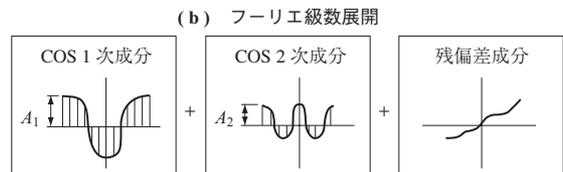
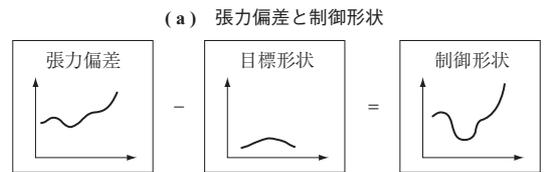
3.1 形状解析

形状解析の概念を第10図に示す。各ロータへの負荷荷重から、平均圧延張力とロータごとの張力偏差を求める。この偏差を周期関数とみなして、板幅を1周期とするフーリエ級数展開をCOS成分について行う。フーリエ級数展



第9図 自動形状制御システムの構成例

Fig. 9 Configuration of automatic shape control system



(c) フーリエ係数と形状の関係

係数	符号	+	-
A_1		中伸び	耳伸び
A_2		クオータ伸び	中伸び・耳伸び共存

第10図 形状解析の概念

Fig. 10 Concept of shape analysis

開の一般式を (5) 式に示す。

$$f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos(nx) + B_n \sin(nx)) + \frac{A_0}{2}$$

$$A_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cos(nx) dx$$

$$B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \sin(nx) dx$$

..... (5)

(5) 式で、COS の 1 次成分の大きさ A_1 は形状の中伸びもしくは耳伸びを、2 次成分の大きさ A_2 は材料のクォータ伸びもしくは中伸び・耳伸び共存を表す。

3.2 形状制御

解析結果に基づいて圧延機の形状制御アクチュエータを動作させ、形状制御を行う。フーリエ級数の成分 A_1 , A_2 の制御には、応答性の良いロールバンディング・可変クラウンロールを単独もしくは組み合わせて用いる。また、左

右非対称成分および残偏差については個別に解析を行い、圧下レベリングやロールの熱膨張収縮差を利用したゾーンクーラントの ON-OFF 制御によって修正する。

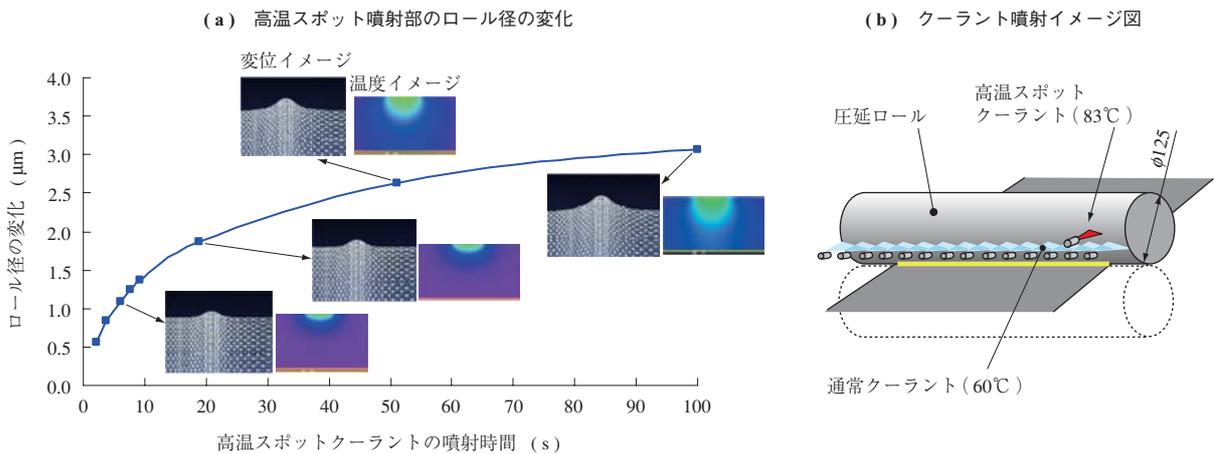
通常のクーラントに加えて温度の異なるクーラントをスポットで噴射することによって、きめ細かい形状制御を行うことも可能である。

第 11 図にゾーンクーラントの温度差制御効果のシミュレーション例を示す。圧延ロールに温度 60℃ のクーラントを全幅噴射し、さらに 83℃ の高温クーラントをスポットで噴射したときのロール表面の温度変化と熱膨張変位を計算したものである。

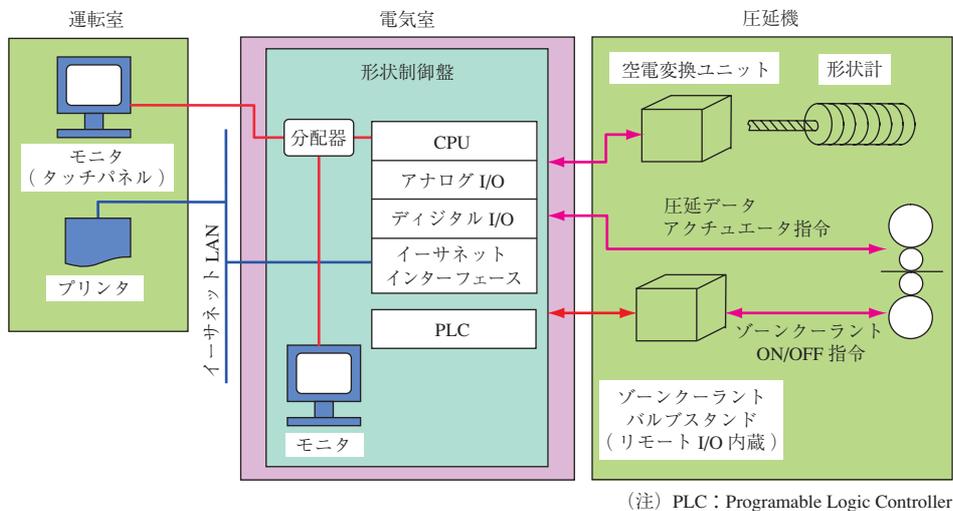
3.3 制御機器

形状制御は、コンピュータを用いて形状の検出・解析・制御出力の一連の動作を繰り返すことによって行われる。形状制御装置の構成を第 12 図に示す。

冷間圧延プロセスでは最大 30 m/s を超える速さで材料



第 11 図 ゾーンクーラントの温度差制御効果のシミュレーション (単位: mm)
 Fig. 11 Simulation of zone coolant control with different temperature (unit: mm)



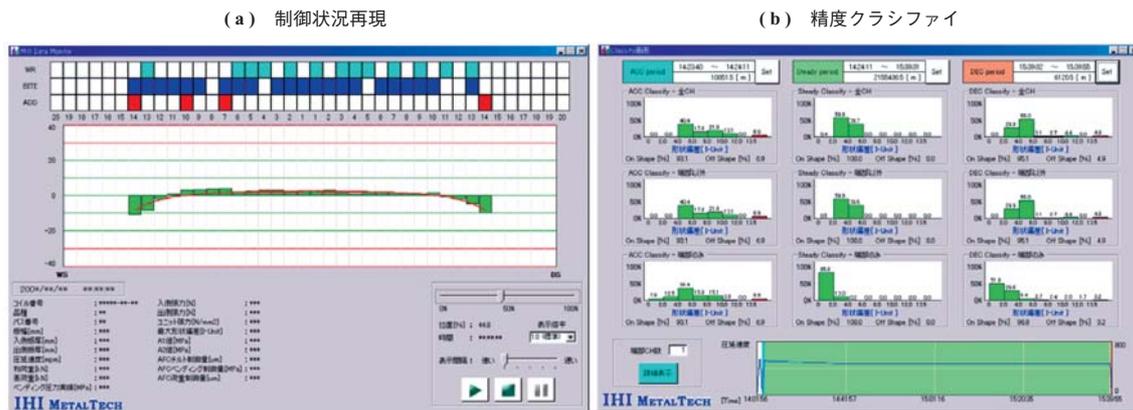
(注) PLC: Programmable Logic Controller

第 12 図 形状制御装置の構成
 Fig. 12 Configuration of shape control system

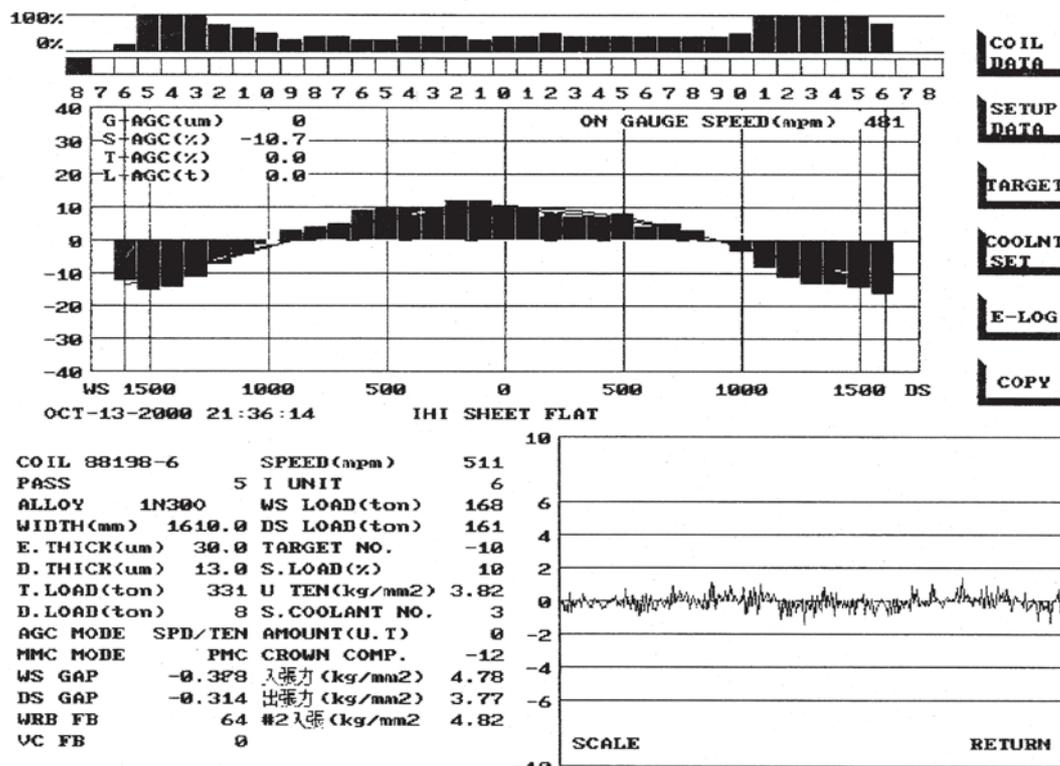
が加工されるため、形状の検出から制御出力までの演算処理を 0.05 s ごとに実施し、形状の変化を確実にとらえて制御している。また、形状のデータは材料の全長にわたって記録されており、第 13 図 - (a) に示す制御状況の再現や - (b) に示す精度クラシファイなど品質管理に活用できる。制御動作にかかわるソフトウェアは一般的なプログラミング言語で記述している。このため、操業に合わせたプログラムの追加や変更を客先自身で行うことが可能である。

3.4 制御パフォーマンス

第 14 図に、アルミニウム箔の最終圧延における形状制御の例を示す。圧延後の厚みは 0.013 mm で、1 枚 0.0065 mm の製品が 2 枚重ねて圧延されたものである。このような極薄箔は、圧延中の材料破断を防ぐ目的もあって耳伸び形状で圧延されることが多い。図の例でも 30 I-UNIT の耳伸び形状を目標に圧延している。定常圧延部における制御精度は 6 I-UNIT 以内に保たれている。



第 13 図 形状データの活用事例
Fig. 13 Screen sample of shape data review



(注) 圧延材料：アルミニウム箔（仕上げ圧延）
幅：1610 mm
厚み：0.013 mm

第 14 図 形状制御例
Fig. 14 Example of shape control performance

4. 結 言

冷間圧延プロセスにおける形状制御システム (IHI Sheetflat) の基本技術である空気軸受式形状計ならびに制御システムの概要を紹介した。空気軸受式形状計は高い検出精度をもっており、アルミニウムや銅の冷間圧延、箔圧延ラインに数多く適用されている。また、形状計と圧延ラインを閉ループ化した自動形状制御システムは、高品質な製品の安定生産に寄与している。

圧延製品は、プロセスの高速化とともに今後とも薄板化・高強度化が進むものと考えられる。当社は、引き続き客先のニーズに的確にこたえ、IHI Sheetflat のいっそうの機能向上を目指す所存である。

参 考 文 献

- (1) 加藤平二, 関 剛, 二反田正夫, 樋口均一: 自動板形状制御システムの開発 石川島播磨技報 第26巻第6号 1986年11月 pp. 360 - 364
- (2) 日本鉄鋼協会編: 鉄鋼便覧 CD-ROM 第4版 (H14) 第3(1)巻 8.4.4.c項
- (3) たとえば, 社団法人日本塑性加工学会: 第133回塑性加工シンポジウム 1990年12月 pp. 42 - 43, p. 55
- (4) たとえば, 軽金属学会編: アルミニウム薄板の板クラウンおよび形状制御の現状 研究部会報告書 No.27 1992年8月 p. 19, p. 21
- (5) 日本鉄鋼協会編: 板圧延の理論と実際 1984年9月 pp. 266 - 270