

技術報告

渦流式連続铸造モールド湯面レベル計

佐野 和夫*・安藤 静吾*²・川瀬 芳広*²
高橋 郁夫*³・竹中 正樹*⁴・坪井 邦夫*²

The Eddy-current Type Continuous Casting Mold Level Meter

Kazuo SANO, Seigo ANDO, Yoshihiro KAWASE,

Ikuo TAKAHASHI, Masaki TAKENAKA and Kunio Tsuboi

Synopsis:

In the continuous casting (CC) process, it is technically of great importance to measure accurately the level of molten steel in the mold and to keep the level constant, because this results in the more stable casting operation and the improved casting quality.

The development has been made on an eddy-current CC mold level meter based on the method of a positive feedback amplification. This new non-contact level meter is capable of measuring the molten steel level without the influence of the mold powder. An accuracy of the level meter is ± 1 mm under a quick response. Moreover, a differential type of the detecting coil has been developed from a theoretical analysis of the electro-magnetic field of the level meter. This type of the level meter is more stable against an influence of the environmental condition, such as a position of the mold wall. By using the differential type, a small sized level detector of which diameter of 30 mm is realized and it can be applied to a billet casting with a smaller cross-section.

The eddy-current type mold level meter is in use not only at NKK's Keihin and Fukuyama Works, but also abroad, to improve the CC technology.

1. 緒 言

今日の鉄鋼業において、製造コストの低減と製品品質の向上は緊急の課題であり、重要テーマの一つとして、連続铸造から圧延への鋼片無手入れ直送と加熱炉への熱片装入技術、さらには、両工程を直結するダイレクトローリング技術の開発が指向されている。このためには、鋳片の表面欠陥を完全に防止することが必要不可欠であり、鋳込中モールド内容鋼湯面レベルの極めて高精度な自動制御がぜひとも必要になる。

筆者らは、独自に開発した帰還増幅型渦流式モールド湯面計¹⁾²⁾と溶鋼注入量制御を組み合わせたモールド湯面制御技術を確立し、京浜、福山両製鉄所のスラブ、ブルーム、ビレットの各連铸機に導入して、製造工程の改善ならびに製品品質向上に多大な成果を収めた³⁾。

本報告では、湯面計の原理である帰還増幅型渦流距離計の特性解析と実用化にあつての開発技術、湯面制御による操業上の効果を述べる。

2. 測定原理と基本性能

2.1 帰還増幅型渦流計測法

2.1.1 帰還増幅回路法の原理

渦流の計測法には従来から発振法、同調法、ブリッジ法があつたが⁴⁾、測定範囲の拡大と良好な線形距離特性の実現のため、Fig. 1 のように増幅器の帰還回路を検出コイルで構成する方法を開発した。コイルのインピーダンス変化によつて帰還増幅回路の増幅度が変化し、その出力変化を計測するのが測定原理である。正帰還増幅器を、インピーダンス変化の検出に用いる非線形増幅回路として応用した例は新しい。

Fig. 1 で発振器からの入力電圧を E 、正帰還電圧を E_c 、増幅器の増幅度を G 、ダミーコイルのインピーダンスを Z 、測定距離 D に対応した検出コイルのインピーダンスを $Z_s(D)$ とすると、出力電圧 V は次のようになる。

昭和 58 年 11 月 11 日受付 (Received Nov. 11, 1983)

- * 日本鋼管(株)技術開発本部 (Engineering Research and Development Division, Nippon Kokan K. K.)
- *² 日本鋼管(株)システム技術研究所 (Systems & Control Research Center, Nippon Kokan K. K., 1-1-2 Marunouchi Chiyoda-ku 100)
- *³ 日本鋼管(株)京浜製鉄所 (Keihin Works, Nippon Kokan K. K.)
- *⁴ 日本鋼管(株)福山製鉄所 (Fukuyama Works, Nippon Kokan K. K.)

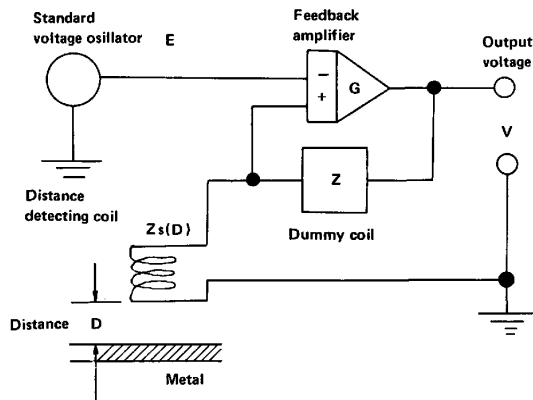


Fig. 1. Principle of positive feedback amplification applied distance measurement.

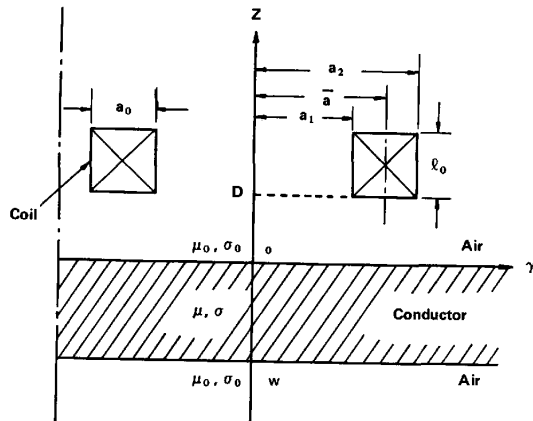


Fig. 2. Electro-magnetic field analysis model for the eddy-current type mold level meter.

$$V = \frac{-G \cdot E}{1 - G \left\{ \frac{Z_s(D)}{Z + Z_s(D)} \right\}} \dots\dots\dots (1)$$

帰還増幅回路法の特長をまとめると次のようになる。

- (1) 増幅度 G の調整で距離特性を任意に変更できる。
- (2) 適正な条件下では、測定範囲が従来法の 2~3 倍は広く、直線性が良い。

2.1.2 理論解析

定常正弦波電流で励磁されているコイルに近接して配置された導体中には渦電流が生じ、コイルのインピーダンスは導体の電磁特性、リフトオフなどによつて影響を受ける。Fig. 2 に示すように、導電体の上に配置された矩形断面円形有限長コイル系に関するインピーダンス解析は、星川らによつて厳密な解析解が求められている⁵⁾。これらを利用して渦流センサのコイルインピーダンス特性ならびに帰還増幅出力特性の数値解析を行った。

すなわち、コイルのインピーダンス Z は、空芯コイ

ルのインピーダンス Z_a と導体により影響を受ける部分 Z' の和の形になる。 Z_a はコイルの寸法だけで決まる値であるのに対して、 Z' はリフトオフ D の関数になる。また、測定対象となる溶鋼は非磁性であるので $\mu = \mu_0$ とした。これらのインピーダンス式は次のようである。

$$Z = Z_a + Z'(D) \dots\dots\dots (2)$$

$$Z_a = j \frac{\pi \omega \mu_0 N^2}{a_0^2 l_0^2} \cdot \bar{a} \int_0^\infty \frac{2}{x^6} I^2 \cdot (a_2 x, a_1 x) (x l_0 + e^{-x l_0} - 1) dx \dots\dots\dots (3)$$

$$Z'(D) = -j \frac{\pi \omega \mu_0 N^2}{a_0^2 l_0^2} \cdot \bar{a} \int_0^\infty W(x) \cdot \{e^{-2x(D+l_0)} + e^{-2x D} - 2e^{-x(2D+l_0)}\} dx \dots\dots (4)$$

$$W(x) = \frac{\left\{ \left(\frac{\eta - x}{x - \eta} \right) + \left(\frac{x - \eta}{\eta - x} \right) e^{-2\eta w} \right\}}{\left\{ \left(2 + \frac{x}{\eta} + \frac{\eta}{x} \right) + \left(2 - \frac{x}{\eta} - \frac{\eta}{x} \right) e^{-2\eta w} \right\}} \dots\dots (5)$$

$$I(a_2 x, a_1 x) = \int_{a_1 x}^{a_2 x} ax \cdot J_1(ax) d(ax) \dots\dots\dots (6)$$

$$\eta = (x^2 + jF)^{1/2} \dots\dots\dots (7)$$

$$F = \omega \mu \sigma \bar{a}^2 \dots\dots\dots (8)$$

ここに

- \bar{a} : コイルの平均半径
- N : コイルの巻数
- a_1 : コイルの内径
- μ_0 : 真空中の透磁率
- a_2 : コイルの外径
- μ : 導電体の透磁率
- a_0 : コイルの厚み
- σ : 導電体の導電率
- l_0 : コイルの長さ
- ω : 励磁電流の角周波数
- D : リフトオフ距離
- F : 正規化周波数
- w : 導電体の厚さ
- J_1 : 第 1 種 1 次 Bessel 関数
- x : 積分変数

2.1.3 数値計算例

前述の数値解析モデルを用いて、実際の帰還増幅型渦流距離計のコイルインピーダンス変化と帰還増幅出力特性を計算した。Fig. 3, Fig. 4 にこれらの結果を示す。

なお、計算条件は次のようである。

$$a_1 = 70.0 \text{ mm}, a_2 = 71.2 \text{ mm}, l_0 = 90.0 \text{ mm}, w = 10.0 \text{ mm}, f = 2\pi\omega = 50 \times 10^3 \text{ Hz}, N = 150 \text{ turns}$$

導電体の材質については、溶鋼のモデルとして電磁気的特性の近い SUS 304 を想定し、 $\sigma = 1.39 \times 10^6 \text{ s/m}$ 、 $\mu = 1.0$ とした。

これらの計算結果により、コイルのインピーダンスはコイル径程度 (この例では 70 mm) のリフトオフで特性が飽和するのに対し、帰還増幅器の出力は増幅器のゲイン G を適当に選ぶことによつて 0~150 mm の測定スパンを実現できることが理論的に明らかになった。この

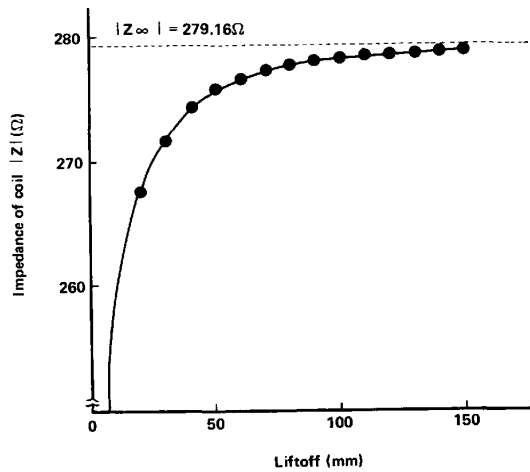


Fig. 3. Calculation result of the impedance model for the eddy-current distance detector.

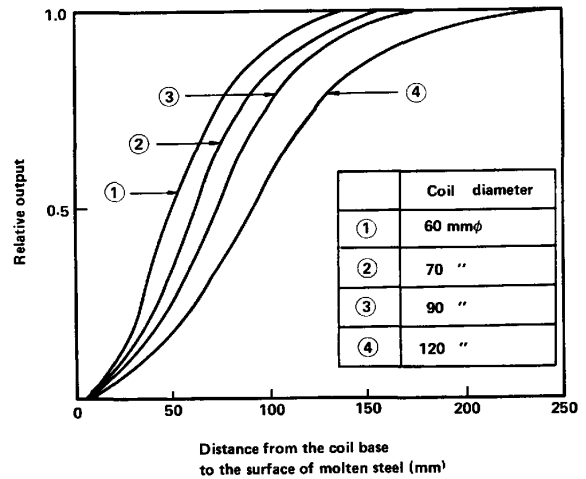


Fig. 5. Distance characteristics of level detecting coils.

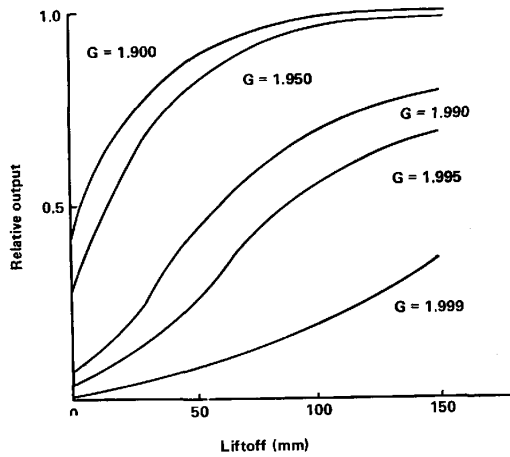


Fig. 4. Output characteristics of positive feedback amplification applied to the eddy-current distance detector.

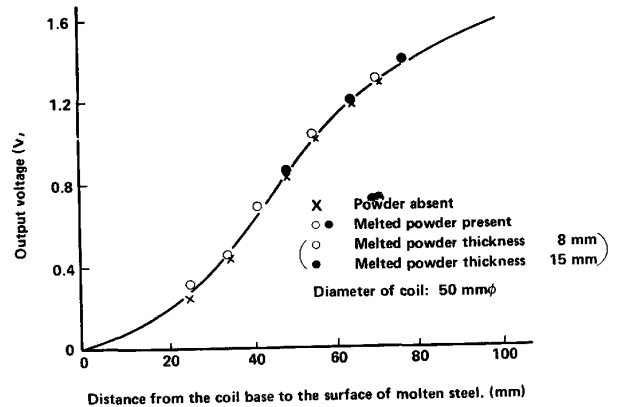


Fig. 6. Effect of powder on the eddy-current mold level detecting sensitivity.

特性が帰還増幅回路法の最大の特長である。

2.2 基本性能

2.2.1 距離特性

モールド湯面レベルを測定する場合、実作業における防熱、保全、作業性を考慮すると測定スパンは広い方が望ましい。検出部に使用する各種円筒型空芯コイルの距離特性を、铸件の厚み 250 mm の条件において測定した結果を Fig. 5 に示す。実用に際しては、製造铸件の厚み、必要とする測定スパン、測定条件などによってコイルの形状を選択し、適正化することができる。

2.2.2 応答特性

渦流式湯面計では、検出コイルに動作周波数 50 kHz の交流電流を供給しており、帰還増幅器の応答特性は 100 Hz 以上である。湯面レベルの変動に対しては、少なくとも 5 Hz まではまったく検出遅れがないことが確認されている。

2.2.3 モールドパウダーの影響

鋼の連続製造では、モールドと溶鋼の界面潤滑剤としてのパウダーの使用は小断面ビレットを除き不可欠の作業条件である。そのため、散布パウダーが渦流式湯面計の出力に与える影響を調査した。その結果を Fig. 6 に示すが、散布パウダーは、粉末状、溶融状を問わず、電気抵抗が溶鋼に比して著しく大きい（パウダー： $0.5 \sim 2 \Omega \cdot \text{cm}$ 以上、溶鋼： $1 \sim 2 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ ）のでまったく影響せず、パウダーを介して直接湯面レベルを計測可能であることが判明した。

3. 湯面レベル計実用化の開発

3.1 実用化上の問題点

連铸機の性質上から渦流式湯面レベル計を実用化するためには、次の各問題を解決しなければならない。

(1) 検出器ヘッドは周囲からの放射、対流により加熱されて高温になる。

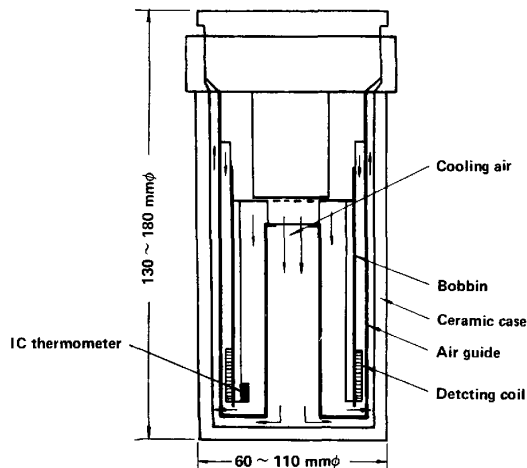


Fig. 7. Construction of the air cooling type mold level detecting head.

(2) モールドがオシレーションする (振幅: ±4 mm, 周波数: 1~1.5 Hz)

(3) 鋳片寸法の変更により, 検出器ヘッドとモールド側壁との相対位置が変わる.

3.2 検出器ヘッドの温度対策

検出器ヘッドは Fig. 7 のようなパイプ構造で空冷し, 冷却空気量 10 Nm³/h で温度上昇は 10°C 以下に抑えることができ耐久性を確保している.

また, 温度変化の影響を受けるダミーコイルと湯面検出コイルに, 負性温度係数特性を持つコンデンサを設置して, インピーダンスの温度変化を補償している. 円筒空芯型検出コイルについて自動補償のテストを行った結果, 湯面計の出力電圧変化を 0.2%/10°C にすることができ, 温度変化特性を大幅に向上させた.

3.3 モールドオシレーション対策

渦流式湯面計はモールドオシレーションに感応し, 周波数 0.5~2.0 Hz に対して ±2 mm 程度出力が変動する.

これに対しては, 周波数に応じた狭帯域カットフィルタを挿入し, オシレーション信号のみを除去している. 一方, オシレーション周波数を変更する操業もあり, オシレーション信号を移相器で処理し自動追従させる方法も開発している.

3.4 AGC 回路の設置

渦流式湯面計の検出コイルの交換や, モールド内設置位置のずれによつて, 基準湯面レベルに対する出力特性が若干異なる場合がある.

これに対しては, Fig. 8 のような AGC (Automatic Gain Control) 回路を付設し, 距離特性を電子回路的に自動補償している. なお, 多点校正型も開発している.

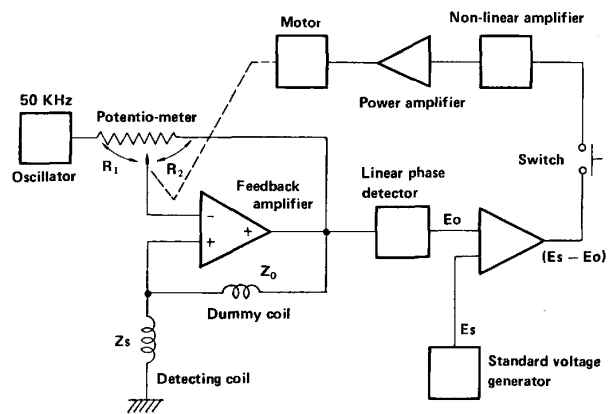


Fig. 8. Block diagram of the automatic gain control circuit.

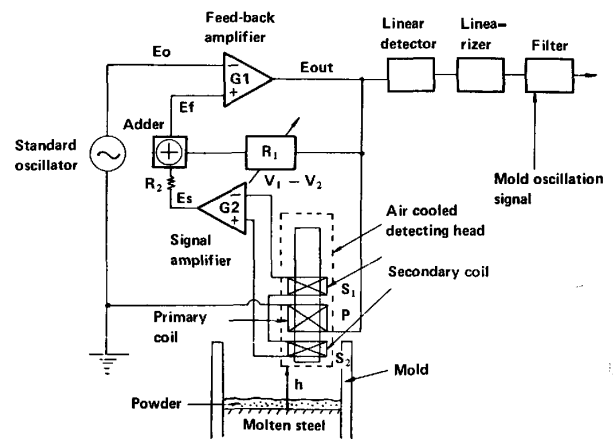


Fig. 9. Configuration of the differential feedback type eddy-current mold level meter.

3.5 差分帰還法による性能向上

3.5.1 差分方式の原理

渦流式湯面計の実用上の性能を向上するため, 差分方式帰還増幅型渦流法を新たに開発した⁶⁾.

Fig. 9 に測定装置の構成を示す. 差分方式の特長は検出コイルが3個のコイルからなることである. 帰還増幅器の出力電圧 E_o を一次コイル P に供給する. 一次コイルの上下, 等距離の位置に同一形状で同一巻数の2個の二次検出コイル S_1, S_2 を設置する. S_1, S_2 のコイルを逆接続し, 差電圧の出力 ($V_1 - V_2$) を増幅し, 信号電圧 E_s を得る. 出力電圧 E_{out} と信号電圧 E_s との間を抵抗 R_1, R_2 で接続し, 電圧 E_f を帰還増幅器に正帰還させる.

二次コイル間に発生する差電圧は, 距離 h により変化するので次式のように表示できる.

$$V_1 - V_2 = E_{out} \cdot f(h) \dots\dots\dots (9)$$

出力電圧 E_{out} と距離 h との関係は, 次のようにして求められる.

$$(-E_o + E_f) \cdot G = E_{out} \dots\dots\dots (10)$$

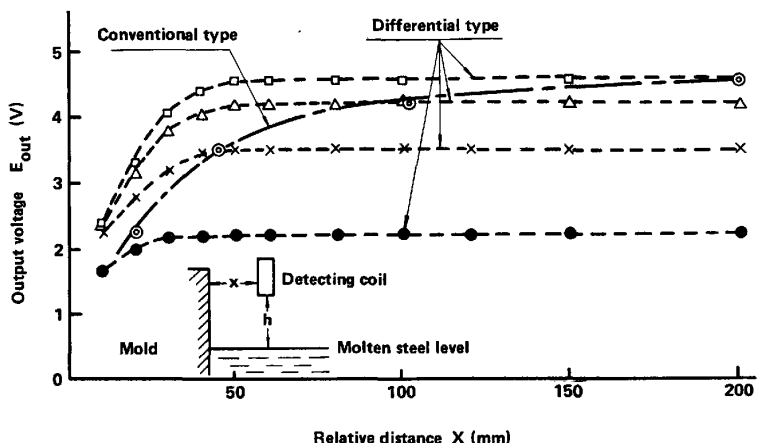


Fig. 10. Effect of relative distance between detector and mold side wall.

$$E_f = E_{out} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} (E_{out} - E_s) \dots\dots\dots (11)$$

$$E_s = G_2 \cdot (V_1 - V_2) = G_2 \cdot E_{out} \cdot f(h) \dots\dots\dots (12)$$

(9)~(12)式から

$$E_{out} = \frac{-G_1 \cdot E_o}{1 - G_1 \left\{ \frac{R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot G_2 \cdot f(h) \right\}} \dots\dots\dots (13)$$

関数 $f(h)$ は距離 h に対して非線形であるが、各定数 G_1, G_2, R_1, R_2 を適切に選ぶことにより、出力電圧の E_{out} と距離 h の特性を線形に近くすることができる。

3.5.2 性能の向上

差分方式では次の点の改良が行える長所がある。

- (1) 電圧測定であるので、ケーブルのインピーダンスの影響がない。
- (2) 2個の検出コイルの差電圧を増幅しているのので、モールド側壁の影響が大幅に軽減される。
- (3) 従来方式より回路系が安定し、距離測定範囲の拡大が期待できる。

Fig. 10 に模擬モールドを用いて、モールド短辺との距離 x を変えて測定した場合の出力電圧 E_{out} の変化を示す。従来の帰還方式では、200 mm 以下に近づくと大きな変化を示したのに対し、差分方式では 50 mm まではほとんど出力が変化していない。

このことから、スラブ連铸での幅方向に対して大きな余裕を生じ、湯面計への影響は無視できるので自動幅変更への対応が可能となるとともに、検出器ヘッドの小型化により小断面モールドへの適用が可能となつた。小型検出器としてはヘッド外径 30 mm のものを開発し実用化している。

また、差分方式では、最近設置されはじめたモールド

内溶鋼電磁攪拌の影響も容易に除去できる。

4. 湯面レベル制御装置の構成と特徴

4.1 装置の構成と仕様

これまでに述べた開発の成果を設計に十分反映させたモールド湯面レベル制御装置について、Fig. 11 に構成を、Table 1, Photo. 1 に湯面レベル計の仕様と写真を示す。

特に、制御装置に関しては次の配慮が施してある。

(1) 流量特性の線形化

モールドへ流入する溶鋼量を制御するタンディッシュ

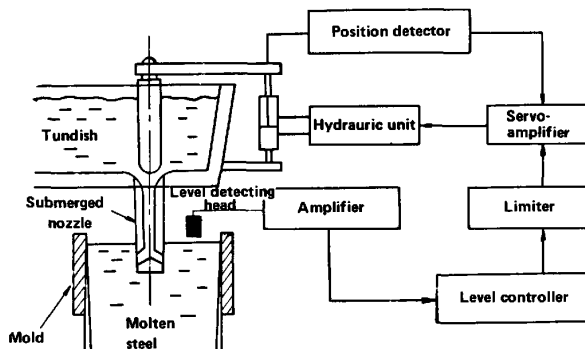


Fig. 11. Arrangement of the mold level control system.

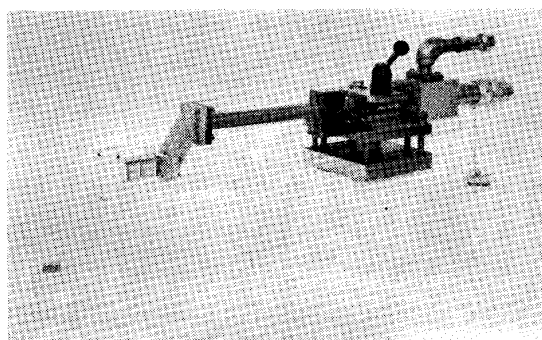


Photo. 1. Mold level detecting head. (Outer diameter 30mm φ)

Table 1. General specifications of the eddy-current type mold level meter.

Item		Type 1	Type 2
Detecting head	Outside diameter	30 mm O. D.	60 mm O. D.
	Height	180 mm	150 mm
Detecting head	Weight	Approx. 3.5 kg	Approx. 4.8 kg
	Temperature drift	Output fluctuations 3% or less for a temperature rise up to 10°C (at level 60 mm)	Output fluctuations 3% or less for a temperature rise up to 10°C (at level 100 mm)
	Coil temperature detection	IC type thermo detector	IC type thermo detector
	Cooling method	Air cooled, single tube construction	Air cooled, triple tube construction
Amplifier	Level measurement range	0-100 mm	0-150 mm
	Coil temperature output	0-100°C	0-100°C
Amplifier	Output signal (Level, Temperature)	4-20 mA DC	
	Attached function unit	Linearizer, Oscillation filter, AGC circuit	
	Size, Weight	Alarm circuit (Level, Temperature, Power) 360 H × 557 L × 283 D, Approx. 25 kg	
	Operating temperature	0-40°C	
Amplifier	Power supply	AC 100/110 V, 50/60 Hz, 150 kVA	

ノズルの流量特性は機構的に非線形であり、ノズル位置により制御系のループゲインが大きく変化する。このため、非線形補償回路を設置して流量特性を線形化し、制御系の安定性を向上させた。

(2) 流量制御特性の向上

ノズルは流量ゲインが大きく、高精度なノズル位置制御が要求される。本制御装置では、サーボアンプと高精度ポテンシオメータを組み込んだフィードバック制御を採用して、精度の高い位置制御で流量制御を実施した。

(3) ノズルの動作点変動補償

ノズルの溶損による経時変化や溶鋼中成分の析出付着により、ノズル位置の動作点変動する可能性がある。これについては積分動作を含んだコントローラにより、動作点変動の影響を除去して対応している。

4.2 制御結果と特長

この計測制御システムを適用して、モールド湯面レベル制御を行つた結果を手動制御、既存の RI (Radio Isotope) 式湯面計による自動制御と比較して、Fig. 12 のチャートに示す。渦流法は優れた応答性を発揮して制御性は極めて良好であり、RI 法で見られるようなモールドパウダーの影響を受けず、実湯面を高精度に検出して制御している。

渦流式湯面計による本システムの特長をまとめると、次のようになり、渦流法の有利性が明らかである。

(1) 検出特性

- (i) 測定範囲を広く選択できる (0~150 mm)。
- (ii) 応答の時間遅れがない (時定数 0.1 s 以下)。
- (iii) 湯面測定精度 ±1 mm 以下 (分解能約 0.1 mm)。
- (iv) モールドパウダーの影響がない。
- (v) モールドオキシレーションの影響がない。
- (vi) 電磁攪拌の影響がない。
- (vii) 検出特性の経時変化がない。

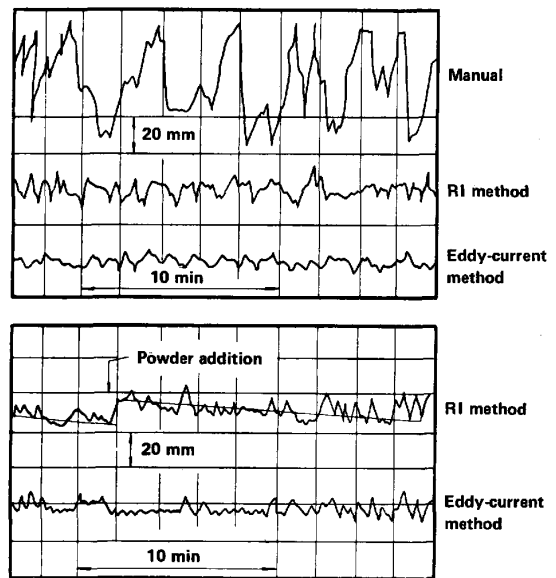


Fig. 12. An example of the mold level control comparing manual method, RI method and eddy-current method.

(2) 制御特性

- (i) 適用範囲が広く、鋳片断面寸法・引抜速度などの変更に対して高精度に追従。
- (ii) 高応答性で、ノズル詰まりなどの外乱発生に対して良好な制御性維持。

(3) 作業性

- (i) 取り扱いが安全で簡易 (特に RI 法と比較して)。
- (ii) 着脱が容易。
- (iii) 設備費が安価。

5. 操業上の効果

新しく開発した帰還増幅型渦流距離計と溶鋼注入量制御を組み合わせた、ダイナミックな制御による連続鋳造用モールド湯面レベル制御技術を実際のプロセスに適用

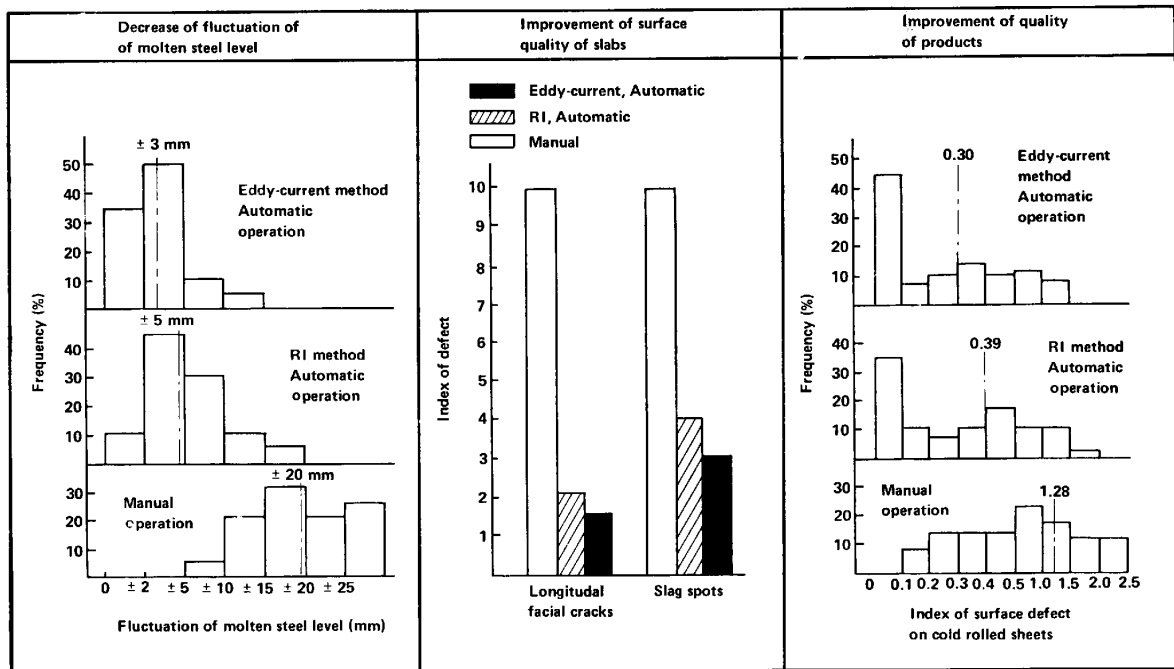


Fig. 13. Advantages of the eddy-current method for quality improvement of products.

した結果、湯面レベルの変動を完全に安定させ、鑄片の表面欠陥を大幅に減少させることができた。それらの結果は、手動および RI 法と比較して Fig. 13 に示すように多大な成果が得られ、次工程への大きなメリットを生んでいる。

6. 結 言

帰還増幅型渦流距離計を応用した連続鑄造モールド湯面レベル計の開発を行い、RI 方式をはじめとする従来の湯面レベル計より、種々の点で優れた特性を有する非接触型の湯面レベル計測制御システムを完成した。

この結果、鑄片を冷却して行う疵取り、手入れ工程が不要となり、冷却、再加熱が省略され極めて大きな省エネルギーと歩留り向上を実現した。また、製品品質の向上と省力化にも貢献し、それらを合わせた経済的効果は非常に大きい。

本装置は当社はもちろん、国内外で採用され、その大きな効果によつて急速に普及しつつある。また、この渦流式湯面レベル計は他の熔融金属計測への適用も可能であり、今後その応用範囲は広く期待される。

文 献

- 1) 山田健夫, 安藤静吾, 渡部勝治朗: 第 22 回応用物理関係連合講演会予稿集 (1975), p. 165
- 2) 佐野和夫, 安藤静吾, 山田健夫, 石黒守幸, 中島広久, 山田俊郎: 日本鋼管技報, 84 (1980), p. 35
- 3) K. SANO, S. ANDO and M. ISHIGURO: Iron and Steel Engineer, 60 (1983) 2, p. 44
- 4) 日本レギュレータ・センサー研究会: センサの働きと最適利用 (1981), p. 70 [技術評論社]
- 5) 星川 洋, 大塚恒幸, 石橋泰雄: 日本非破壊検査協会第 3 分科会 NDI 資料 3540 (1977)
- 6) 山田健夫, 安藤静吾, 川瀬芳広, 佐野和夫, 高橋郁夫, 山下 元: 第 22 回計測自動制御学会学術講演会予稿集 (1983), p. 1804