

© 1984 ISIJ

マイクロ波によるトービードカー溶銑 レベル計測

技術報告

牧 勇之輔*・崎村 博*・沢田 寿郎*

岩村 忠昭*²・秋本 圭一*²

Measurement of Hot Metal Level in a Torpedo Car by Microwave

Yunosuke MAKI, Hiroshi SAKIMURA, Hisaro SAWADA,
Tadaaki IWAMURA and Keiichi AKIMOTO

Synopsis:

Microwave type hot metal level meter in a torpedo car was developed by Kawasaki Steel. One point of development is an improvement in gain and directivity of the antenna by the use of parabola type, and the other is an improvement in signal processing by microprocessor. It achieved the measuring accuracy ± 50 mm.

This level meter was installed at Chiba No. 6 blast furnace for practical use and has been working satisfactorily. It has contributed to lightening the operators' load for watching and increase in efficiency of hot metal transportation.

1. 緒 言

高炉から出銑された溶銑は傾注樋を介してトービードカーに注入され、次工程の製鋼工場へと運ばれる。高炉ではトービードカーが注入された溶銑で満車となると、傾注樋を反転して注入を停止する操作を行つているが、その判断は従来炉前オペレータの目視による監視にゆだねられていた。注入中の溶銑レベルを連続して測定することができれば、この監視作業の負荷を軽減させ、ひいては自動化による省力のメリットも期待することができる。

当社では、粉塵による散乱を受けにくいマイクロ波によるトービードカー溶銑レベル計の開発に取り組み、実用化することができた。省エネルギーなどのコストダウン効果も顕著で、千葉製鉄所第6高炉で順調に稼動している。

本報告では、マイクロ波による溶銑レベル計の開発内容、実機化による効果について述べる。

2. 開発の経緯

トービードカーへの溶銑注入監視作業は、機械化の遅れている高炉鑄床作業のひとつである。当社では、この溶銑注入監視の自動化を目的として溶銑レベル計の開発に着手した。

トービードカー内の溶銑レベル計としてはこれまで種々の方法が考えられている。しかし、溶銑を注入する際に発生する多量の粉塵など厳しい条件のため実用化に至った報告は少ない。溶銑レベル計は操業上の安全のためにも ± 50 mm 以内の精度が必要と考えるが、サウンジ方式のレベル計やルール歪み測定方式の重量計¹⁾²⁾はそれぞれ安全性やトービードカー停止位置の影響を受けるなど問題点が多かった。

当社では、粉塵による散乱の少ないマイクロ波を利用した距離計をすでに高炉の装入物レベル計として応用していた³⁾こともあつて、溶銑レベル計としても可能性があることに着目した。マイクロ波距離計は高炉装入物が対象の場合 ± 100 mm 程度の精度が得られているが、前述の要求精度を考えるとこのままでは十分でない。さらに、測定距離が長く (6~13 m)、トービードカー受銑口が狭い (2 m \times 1 m) ことから、マイクロ波の指向性を向上させなければならないなど多くの改良すべきポイントがあつた。

このような問題点を解決して昭和 56 年には開発機が完成⁴⁾、実使用テストを繰り返した後、トービードカー溶銑レベル計として使用できることを確認した。なお、本レベル計は安川電機(株)と共同で開発したものである。

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

* 川崎製鉄(株)千葉製鉄所 (Chiba Works, Kawasaki Steel Corp., 1 Kawasaki-cho Chiba 260)

*² 川崎製鉄(株)水島製鉄所 (Mizushima Works, Kawasaki Steel Corp.)

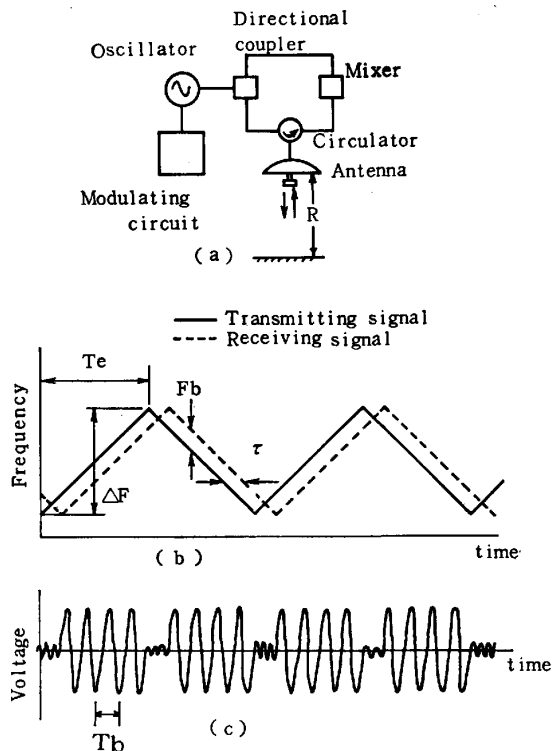


Fig. 1. Principle of measurement.

3. マイクロ波トープードカー溶銑レベル計

3.1 測定原理

Fig. 1 に測定原理を示す。マイクロ波発振器で (b) のように三角波状に周波数変調されたマイクロ波は、(a) に示すように方向性結合器で2つに分岐され、一方は直接ミキサへ、他方はサーキュレータを通過してアンテナから被測定面に向けて放射される。被測定面からの反射波と送信波をミキサでミキシング検波すると、(b) のように常に一定の周波数差を持つため、この周波数差によつて (c) のようなビート波が発生する。このビート波の周波数は次のように測定距離に比例する。

$$F_b = \frac{1}{T_b} = \frac{\Delta F}{T_e} \cdot \tau \dots\dots\dots (1)$$

$$\tau = \frac{2R}{c} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 F_b : ビート波の周波数、 T_b : ビート波の周期、 T_e : 変調周期、 R : 測定距離、 c : 光速、 τ : 伝搬時間の差、 ΔF : 周波数変調幅

したがつて、距離 R は(1)(2)式より次式(3)から求められる。

$$R = \frac{c}{2} \cdot \frac{T_e}{\Delta F} \cdot \frac{1}{T_b} \dots\dots\dots (3)$$

この方法を一般に FM-CW (Frequency Modulation-Continuous Wave) 方式と呼んでいる。

Table 1. Specifications of microwave level meter.

Method of Measuring	FM-CW
Accuracy	±50 mm
Range	6~13 m
Microwave Xband	(8.2~12.4 GHz)
Modulating frequency	10~12 GHz
Directivity	±2.1°
Microwave output	50 mW
Output	analog output 4~20 mA D.C. digital display LED 4 figures analog display LED bar
Antenna	parabola
Permitted temperature	50°C under

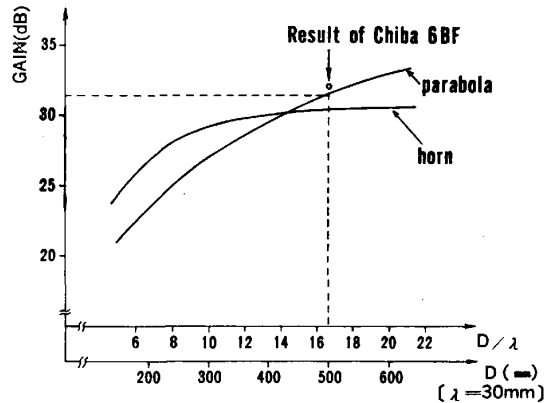


Fig. 2. Relation between diameter and gain of antenna.

ビート波の周波数を計数すると、波数が少なく誤差が大きくなるため、4 MHz のクロックパルスを用いてビート波の周期を測定する方式を採用している。

3.2 装置仕様と信号処理

溶銑レベル計の主な仕様を Table 1 に示す。この特徴はマイクロ波送受信アンテナにパラボラ形のものを用いている点にある。これは、測定精度を向上させるためにはアンテナゲインと指向性の点で高炉炉頂サウンジング計で使用しているホーン形よりパラボラ形の方が適しているからである。また、鑄床ではガスシールやダスト等取り付け上の問題がほとんどないことも有利な条件であつた。

パラボラアンテナのゲイン G_p は次式で表される。

$$G_p = 10 \log \left\{ \frac{\pi D}{\lambda} \cdot \eta \right\} [\text{dB}] \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 D : パラボラの直径、 λ : マイクロ波の波長、 η : 開口能率

Fig. 2 はアンテナの開口比 (D/λ) とゲインの関係を示したものであり、比較のために炉頂サウンジング計のホーンアンテナのゲイン特性も同時に示した。検出限界は経験上 20 dB 程度であるが、炉頂サウンジング計以上の精度を得るためにはゲインは 30 dB 以上であることが望ましい。したがつて、 $D=500$ mm 以上のパラボラアンテナが適していることがわかつた。

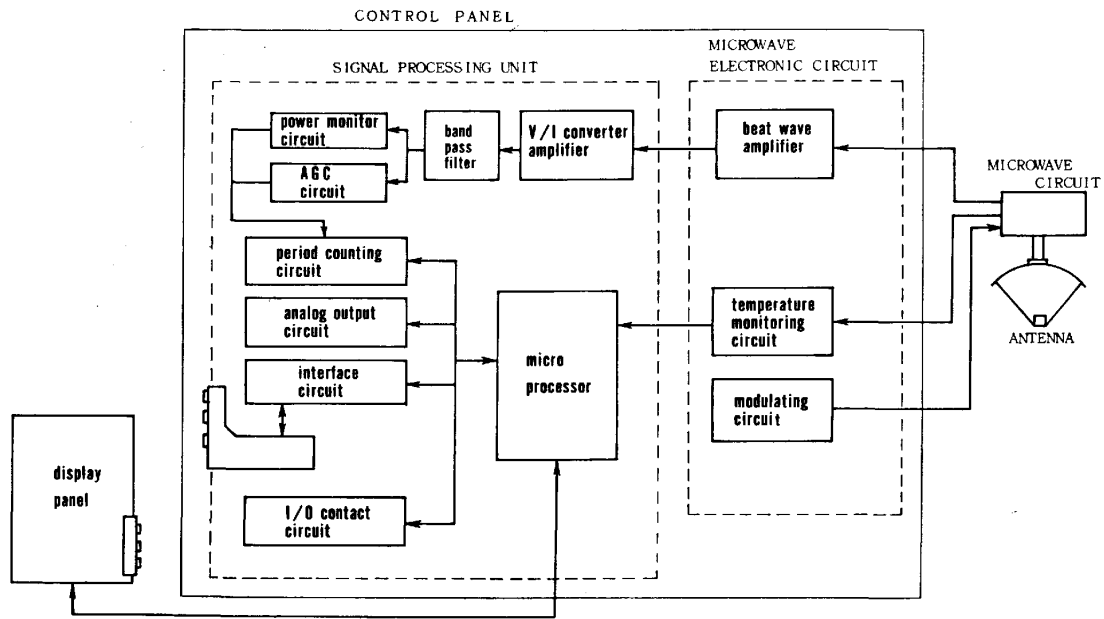


Fig. 3. Unit configuration of microwave level meter.

Table 2. Comparison of microwave directivity.

Example of application	Directivity	Type of antenna
Fixed type sounding meter (Chiba 5 BF)	±7°	2 horn antenna
ditto (Chiba 6 BF)	±3.6°	1 horn antenna
Burden profile meter (Chiba 5 BF)	±15°	2 reflect antenna
ditto (Chiba 6 BF)	±5.5°	1 reflect antenna
Hot metal level meter (Chiba 6 BF)	±2.1°	Parabola antenna

また、マイクロ波の指向特性は、測定に影響を与える半値幅角 θ_a で表現できる。一般に、半値幅角 θ_a は次式で近似され、したがって指向角は $\pm \frac{1}{2} \theta_a$ で示される。

$$\theta_a = 51 \times \frac{\lambda}{D} \dots \dots \dots (5)$$

ここで、 D ：アンテナの直径、 λ ：マイクロ波の波長。
 (5)式より、アンテナ径を大きくするほど指向性は改善されることがわかる。Table 2は各種マイクロ波レベル計の指向角を比較したものである。溶銃レベル計のパラボラアンテナになつて指向性が著しく改善されたことがわかる。トーピードカー受銃口が狭く、測定距離が長くなる溶銃レベル計にとって、指向性を高めることは重要なポイントである。

Fig. 3はレベル計の装置構成である。装置はアンテナとマイクロ波回路ボックス、電子回路ユニットと信号処理ユニットを内蔵した制御盤および表示盤から構成されている。マイクロ波電子回路ユニットは、検出したビート波の中継増幅だけでなくマイクロ波発振器に対して変調駆動をする機能を持っている。また、信号処理ユニットはマイクロプロセッサを搭載しており、ビート波信号にノイズ除去や信号ゲインの調整を加えた後、周期を

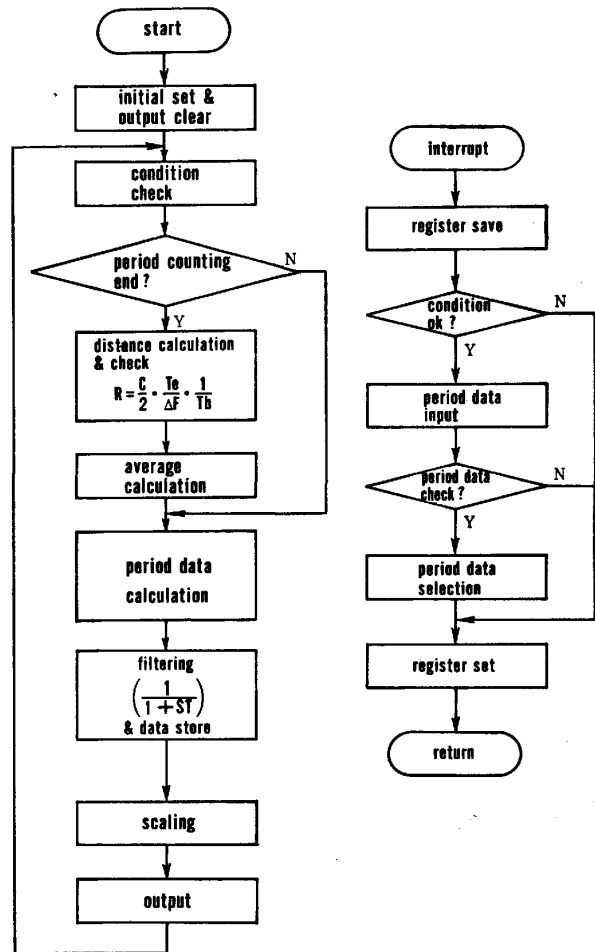


Fig. 4. Processing flow chart by microprocessor.

測定してマイクロプロセッサで距離を算出する。この信号処理フローを Fig. 4 に示す。

信号処理上の特徴は、異常信号の除去をマイクロプロセッサのソフトウェアで処理していることにある。周期データは割り込み処理で入力され、約 0.1s ごとに数個単位で信号の大きさを比較して異常値を除くとともに過去の信号変化から予測して異常な変化を示したデータも除去している。また、通常処理においても、平均化処理や設定した閾値との比較などによつて秒オーダーのチェックを行っている。

こうして計算された距離出力は表示盤へ送られ、設定上限レベルを越えた場合に警報ランプおよびサイレンでオペレータに湯面上昇を知らせることができる。表示盤では種々の異常状態モニタリングを行っているが、その中のひとつに「初期レベル異常」という警報を設定している。これは、受銑開始直後においてレベルが異常に高い（トービードカー上面付近のレベルにある）ことを意味しており、後述の口元にノロ付着の著しいトービードカーを検出するためのものである。

3.3 設置方法

Fig. 5 に高炉铸床に本装置を設置したときの状況を示す。マイクロ波アンテナはトービードカー受銑口の真上に、かつ水平となるよう設置する。粉塵と輻射熱対策のため空冷ボックスの中にマイクロ波回路とともに収納した。また、ボックスの下面にはマイクロ波を透過できる防熱板（アスベストボード）を傾斜して設置し、粉塵や輻射熱を遮蔽している。防熱板を傾けている理由は、防熱板からの反射波に対応する信号を距離に関して分散させ、フィルタで除去しやすくするためである。

また、樋修理時を考慮して冷却ボックスを容易に脱着可能な構造とするくふうを施している。Photo. 1, 2 に

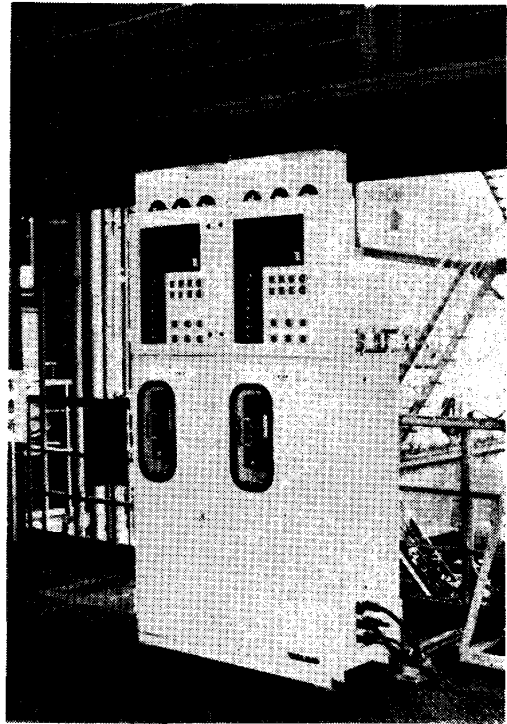


Photo. 1. Display and signal processing unit of level meter.



Photo. 2. Cooling box of microwave antenna.

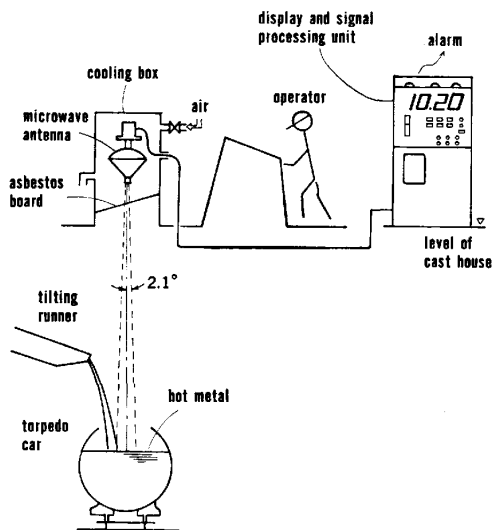


Fig. 5. System outline.

それぞれ制御・表示盤とマイクロ波アンテナ用冷却ボックスの設置状況を示す。

4. 測定結果

4.1 オフライン試験結果

レベル計の精度を確認するため、オフラインで Fig. 6 のような試験装置を製作して水面を対象とした距離特性を調査した。その結果、対象面にゆらぎがあつても ± 50 mm 以内のばらつきで測定できることを確認した。また、金属板を対象とした精度チェックを行い、Fig. 7 のように ± 30 mm 以内で測定できることも確認している。

4.2 現場使用結果

トービードカーへの溶銑注入開始から完了までのレベ

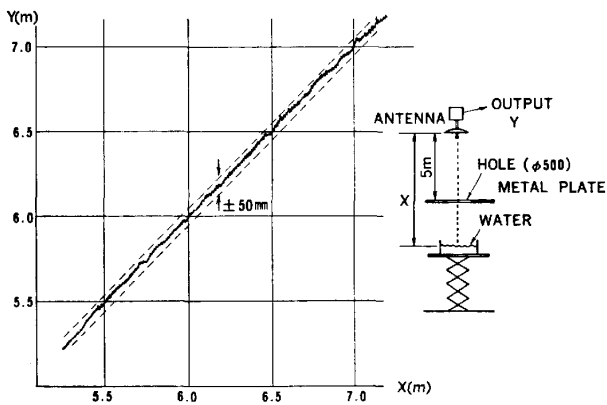


Fig. 6. Result of bench test.

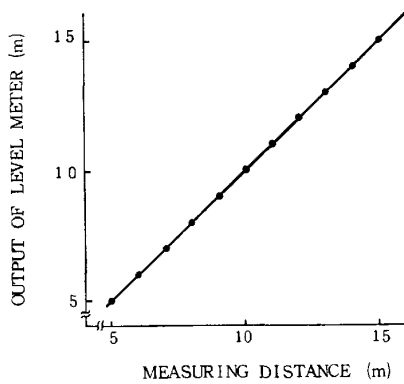


Fig. 7. Result of off line test. (for metal plate)

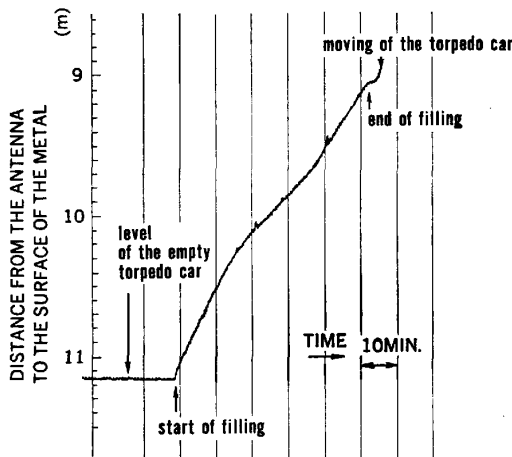


Fig. 8. Example of the hot metal level measurement.

ルの変化を Fig. 8 に示す。この曲線はトーピードカーの形状を正確に反映している。また、指示値のばらつきは実際注銑時の湯面の脈動の影響であるが、水面を対象とした模擬実験と同様に安定した指示が得られている。しかし、トーピードカー内部にノロが付着して受銑口が極端に狭くなっている場合にはマイクロ波が受銑口付近で反射し、レベル測定ができないという状態がときどき

Table 3. Influence of the adhered slag on the measurement.

State of torpedo car	A	B	C	total
Measurable	70	19	10	99
Unmeasurable	1	0	4	5
Successful ratio	99.6	100	60	95.2

S58. 1. 13-19, A : Little slag adhere to the car, B : Medium, C : Much slag adhere to the car
Successful ratio $\frac{99}{104} \times 100 = 95.2\%$

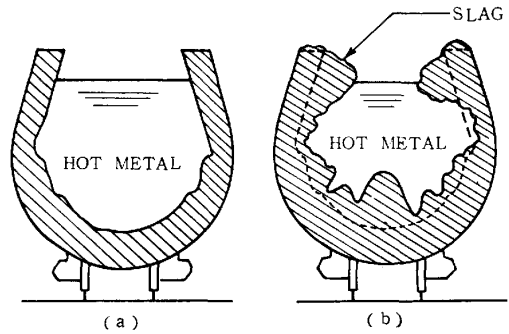


Fig. 9. Inner state of torpedo car.

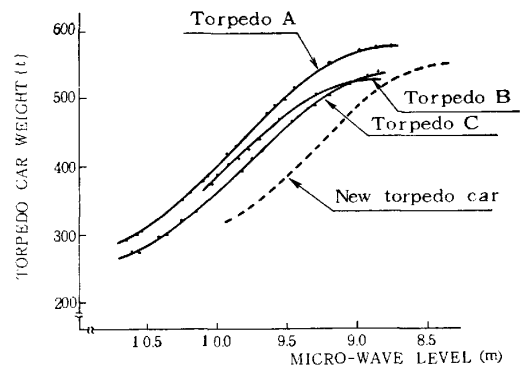


Fig. 10. Comparison between weigher and level meter.

発生した。その頻度を調べるため、オペレータの判断で Table 3 のようにノロ付着の程度を分類し、その時の測定可あるいは不可の状態を調査した。Aと判定したものは Fig. 9 (a) のようなきれいなものであり、Cと判定したのは (b) のようなノロ付着の著しいものである。Bはその両者の中間をとつた。ノロ付着量の大きいトーピードカーは測定できないケースが起こりやすいことがわかる。また、分類Aのときにも1度測定できないことがあつたが、これはトーピードカー停止位置の影響と推定している。実用上は、ノロ付着の著しい場合を前述の初期レベル異常の警報で検出できるため、オペレータは容易に測定可あるいは不可の状態を認識できる。

Fig. 10 は当社千葉第6高炉に設置してあるルール歪み方式の重量計とマイクロ波レベル計の指示値を比較したものである。同一のレベルでもトーピードカーによつ

て耐火物摩耗量およびノロ付着量が違うために重量値にかなりの差が見られる。また、レベルと重量の変化率を比較すると溶銑注入停止の判断にとって重要な停止直前にレベルの方が大きく変化している。これより、重量による管理よりもレベルによる管理の方が溶銑注入停止の判断のためには適していることがわかる。

以上より、マイクロ波レベル計の測定精度は $\pm 50\text{mm}$ 以内であり、成功率は約95%であった。測定できなくなる場合が約5%あるために傾注樋操作の自動化および省力を目的としたときには、さらに信頼性をあげるために重量計など他のセンサ情報と組み合わせたシステム化を指向する必要があると考える。また、溶銑レベル計としての稼働率を向上するために、トービードカー内部のノロ除去対策も今後の課題である。

5. 溶銑レベル計を導入する意義

溶銑レベル計の当初の開発目的は自動化による省力であった。一方、自動化を目的としたときに信頼性の問題があるため、実機化するだけの投資効果が得られないこともわかった。しかし、溶銑レベル計によつてトービードカーへの溶銑注入完了時のレベルを正確に管理できれば、従来の目視作業ではばらつきが大きく安全サイドを見込んで少なめに取つていた受銑量を増加することが可能である。これによつて、次の効果が期待できる。

(1) 溶銑温度降下の防止

Fig. 11. に示すように受銑量増によつて高炉から製鋼へ輸送する間の溶銑温度降下が防止できることがわかつている。

(2) 脱硫剤原単位低減

製鋼の脱硫工程における反応効率向上による原単位の低減が可能である。

(3) トービードカー耐火物補修原単位低減

定期的に行つている耐火物補修費を輸送量の増加によ

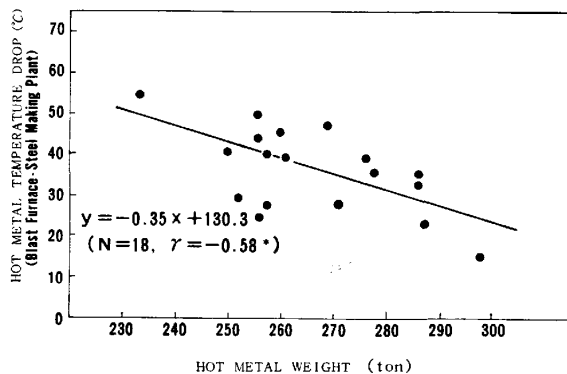


Fig. 11. Relation between hot metal temperature drop and hot metal weight.

つて低減することができる。

(4) トービードカー輸送用燃料削減

トービードカーの回転率（1日の出銑量/1台あたりの平均受銑量）が向上することによつて燃料使用量が削減される。

当社では以上の効果に注目して、千葉6高炉の全出銑口（4出銑口方式）に計8台を実機として導入することを決定した⁵⁾。

6. 実機化による効果

千葉第6高炉に設置したマイクロ波レベル計を昭和57年12月より運転開始した。

Fig. 12 は、レベル計によるレベル管理を正確に行つた時期と従来のように目視判断を優先して操作した時期との受銑完了レベルの比較をしたものである。ここで、レベルを示す数値はマイクロ波アンテナと湯面との距離を意味しており、数値が小さいほどレベルとしては高いことになる。レベル計の適用によつて受銑レベルのばらつきが減少し、受銑完了レベルを上昇させることができたことがわかる。オペレータは従来、トービードカー口元より100cm下を目安として溶銑注入を停止していたが、レベルの上限設定値を80cm下のところまで上げた操作を行うことができるようになった。

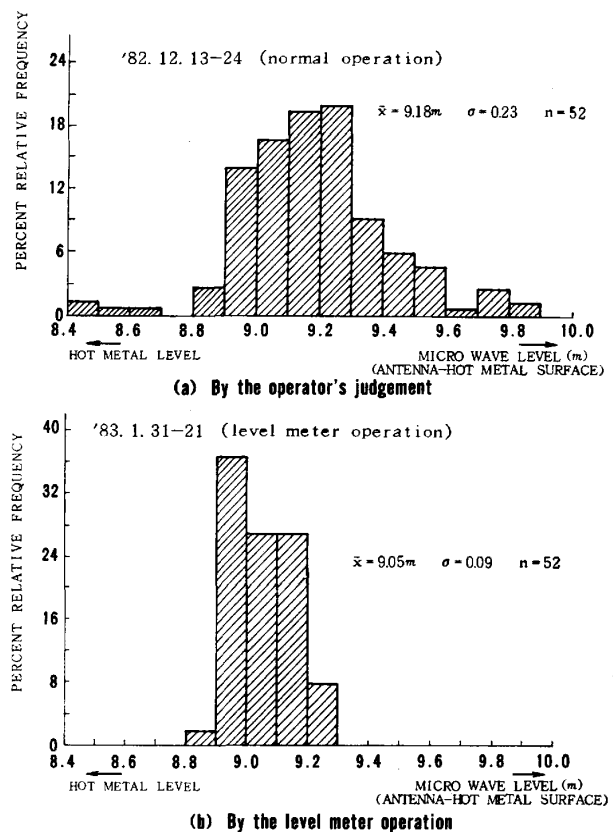


Fig. 12. Result of hot metal level control (1).

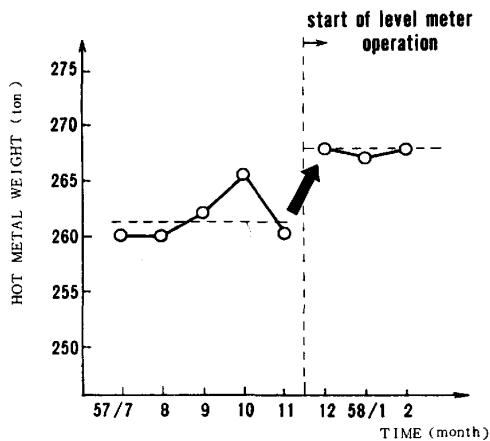


Fig. 13. Average hot metal weight of 350 t torpedo car at 6BF.

また、Fig. 13 にトーピードカー1台あたりの受銑量の月ごと平均の推移を示す。レベル計運転を開始した昭和57年12月より受銑量が増加していることがわかる。受銑量の増加をレベル計運転前と運転後で比較したものをFig. 14に示す。平均で約10t近い受銑量増が達成できた。これによるメリットは約38百万円/年であり、このメリットに対する各評価項目の寄与率は以下のとおりである。

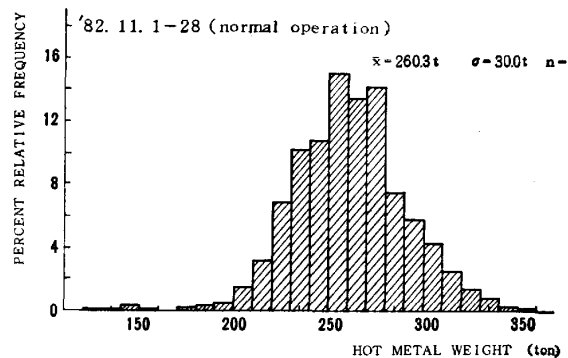
- (1) 溶銑温度降下防止 30%
- (2) 脱硫剤原単位低減 20%
- (3) トーピードカー耐火物補修原単位低減 40%
- (4) トーピードカー輸送用燃料削減 10%

なお、Fig. 14(b)でも依然として受銑量にばらつきが発生しているのは、耐火物の厚さやノロ付着量にトーピードごとの差があるからである。

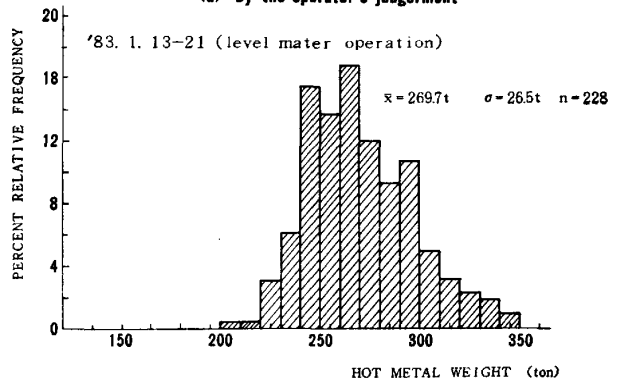
7. 結 言

マイクロ波を利用したトーピードカー溶銑レベル計を開発し、実用化することができた。当社千葉第6高炉では設置後順調な稼働を続けており、トーピードカーへの受銑量増によるコストダウンを達成できた。今後、本レベル計は当社の全高炉に設置していく方針である。

溶銑レベル計の当初の目的である高炉鑄床作業の自動化にまでは至っていないが、監視オペレータの作業性は



(a) By the operator's judgement



(b) By the level meter operation

Fig. 14. Result of hot metal level control (2).

以前より改善されてきており、今後さらに信頼性の向上や他のセンサとの組み合わせなどの活動を行う予定である。また、近年鑄床脱珪設備を導入する高炉が増えてきており、その際に発生する大量の粉塵やスラグフォーミングによつて目視監視はさらに困難になると推定される。こうした状況の中で、溶銑レベル計の重要度はさらに高まっていくであろう。

文 献

- 1) 岩村忠昭, 崎村 博, 田宮稔士, 瀬川佑二郎: 川崎製鉄技報, 13 (1981), p. 621
- 2) 荒井 政, 山本章生: 鉄と鋼, 68 (1982), S61
- 3) T. IWAMURA, M. KUSUNOKI, H. SAKIMURA, T. TAMIYA, K. AKIMOTO, K. NAKASHIMA and A. TAKEDA: IMEKO 9th World Congress (1981) May, Paper No. 15.2
- 4) 秋本圭一, 森田 高, 法領田宏, 山口安幸, 箱田昌弘, 大森英明: 鉄と鋼, 67 (1981), S932
- 5) 牧勇之輔, 崎村 博, 岩村忠昭, 沢田寿郎, 奥村和男, 高部良二: 鉄と鋼, 69 (1983), S905