

© 1983 ISIJ

マイクロウェーブを用いた転炉スラグレレベル計の開発

論文

小林 純夫*・鳩野 哲男*・加藤木 健*²
 栗山 明*²・市原 清*²

Slag Level Gauge Using Microwaves in BOF

Sumio KOBAYASHI, Akio HATONO, Ken KATO
 Akira KURIYAMA, and Kiyoshi ICHIHARA

Synopsis :

A microwave method to measure directly the level and the reflectivity of the slag in a BOF has been developed, and successfully tested in a 150 ton BOF process. The measurement system is based on the FM radar technique. The results show that this method can be applied to predict slopping, and estimate the slag formation. Most of sloppings are observed when the slag level exceeds a certain critical limit and the reflectivity decreases under a certain level. Slopping prediction criteria have been established after a series of measurements. Using the criteria, the slopping is predicted with a reliability of over 80% within 30 s before the event. The slopping control scheme using the microwave method has been established and the frequency of the slopping has been decreased to 1/5 of the uncontrolled heat. The microwave system is now in on-line operation at Wakayama Works of Sumitomo Metal Industries.

1. 結 言

転炉吹錬においては、脱燐、脱硫などのスラグ-鋼浴間の反応を促進するため炉内反応に適した組成をもつスラグを形成させる必要がある。スラグ-鋼浴間の反応は装入石灰の滓化速度に大きく影響され、石灰の溶解はスラグ中 FeO 含有量、攪拌強度、温度により左右される。

通常、送酸流量、ランス高さの調整により、石灰の滓化を適正におこなわせるように吹錬されるが、スラグの流動性、吹錬条件により、過度にスラグの泡立ち（スラグフォーミング：Slag foaming）が起り、粒鉄を含んだスラグが炉外に飛散するスロッピング（Slopping）を発生する場合がある。スロッピングの発生は、転炉操業の妨げとなるばかりでなく、スラグの吐出に伴い溶鋼も炉外に持ち出されるため、歩留りの低下を招くことになる。このため、転炉内のスラグフォーミング状況を計測しスロッピングを予知することは重要な課題である。

スロッピングの予知方法としては、転炉音響^{1)~3)}、ランス振動⁴⁾等より転炉内スラグレレベルを間接的に推定する方法が報告されている。それに対して、本報告では転

炉内スラグレレベルを直接的に計測する方法として、マイクロ波を用いる方法を開発し、当社和歌山製鉄所 150t 転炉において試験ならびにオンライン使用をおこなった。

スロッピングの予知、防止制御につき良好な結果を得たので報告する。

2. 測定方法

2.1 測定原理

マイクロ波による転炉スラグフォーミングレベル測定装置の機能は、1) スラグレレベルの測定、2) スラグ反射率の測定の 2 点である。スラグレレベルの測定は FM レーダの原理⁵⁾に基づく（FM：Frequency Modulation：周波数変調）。

Fig. 1 の実線に示すような、時間とともに周波数が直線的に変化する波をアンテナより送信する。距離 x のところに反射体があると、反射波は時間 $T=2x/c$ 後にもどってくるから、その周波数は破線のようになる。

ここで、送信波の電圧波形 v_t を

$$v_t = V_t \cos 2\pi (f_0 t + \dot{f}_0 t^2 / 2) \dots \dots \dots (1)$$

と表すと、受信波の電圧波形 v_r は、

昭和 56 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 57 年 1 月 8 日受付 (Received Jan. 1982)

* 住友金属工業(株)中央技術研究所 (Central Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 1-3 Nishinagasuondori Amagasaki 660)

*² 住友金属工業(株)和歌山製鉄所 (Wakayama Steel Works, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

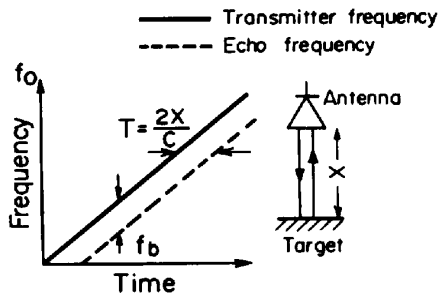


Fig. 1. Principle of the FM radar.

$$v_r = V_r \cos 2\pi (f_0(t-T) + \dot{f}_0(t-T)^2/2) \dots\dots (2)$$

となり、両者をミキサにより混合すると、次式で示されるうなり信号 v_b を得る。

$$\begin{aligned} v_b &= kV_t V_r \cos 2\pi (\dot{f}_0 T t + f_0 T - \dot{f}_0 T^2/2) \\ &\approx kV_t V_r \cos 2\pi (\dot{f}_0 T t + f_0 T) \\ &= V_b \cos 2\pi (\dot{f}_0 T t + f_0 T) \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

($\dot{f}_0 T^2/2$ は通常微小であるので無視できる.)

ここで、 V_t : 送信波電圧の振幅、 V_r : 受信波電圧の振幅、

V_b : うなり信号電圧の振幅 ($=kV_t V_r$),

f_0 : 送信波の初期周波数 (Hz)、 k : 比例定数、

\dot{f}_0 : 送信波の周波数変化率 (Hz/s)、

$T = 2x/c$

x : アンテナと反射体間の距離 (m)

c : マイクロ波伝播速度 ($=3 \times 10^8$ m/s)

うなり信号の周波数 f_b は (3) 式より、

$$f_b = \dot{f}_0 T = 2x \dot{f}_0 / c \dots\dots\dots (4)$$

となり、アンテナと反射体間の距離に比例する。

また、うなり信号の電圧の振幅 V_b は受信波の電圧に比例しており、測定対象によるうなり信号電圧の振幅を V_{bs} 、測定対象と同一距離に金属板があるときのうなり信号電圧の振幅を V_{bm} として、スラグ面の反射率 Γ_s を次式で定義した。

$$\Gamma_s = \left(\frac{V_{bs}}{V_{bm}} \right)^2 = \left(\frac{V_{rs}}{V_{rm}} \right)^2 \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 V_{rs} 、 V_{rm} はそれぞれ対象がスラグ面、金属板であるときの受信波電圧の振幅である。

2.2 測定装置

一般に、FM レーダを設計するためには、対象の反射率を知る必要がある。スラグのマイクロ波反射率を知るため、2.5t 試験転炉で予備試験を実施し次の知見を得た。

(1) マイクロ波帯における転炉吹錬中のスラグの反射率は、金属板の反射率に対して -47 dB 程度である。さらに、マイクロ波の伝播損失を考慮すると、受信波の電力は伝送電力の -66 dB 程度になり、きわめて微弱

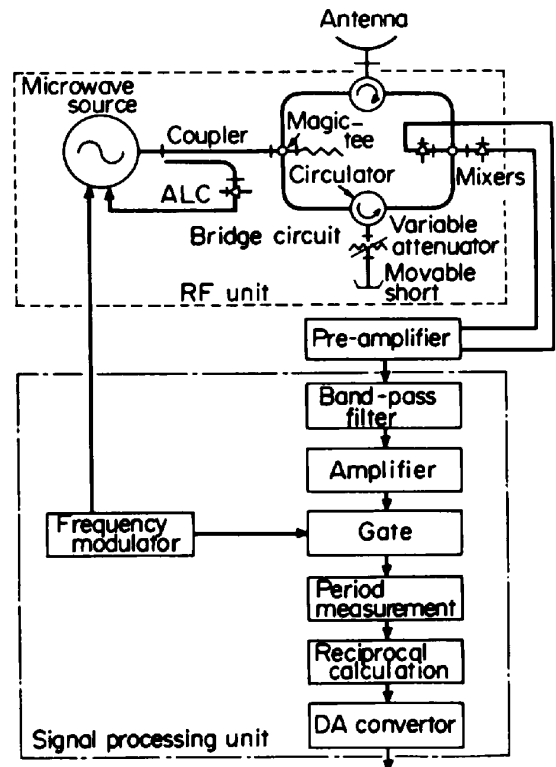


Fig. 2. Block diagram of the microwave slag level gauge.

である。このような微弱電力を検出するため高感度の受信装置が必要である。

(2) スラグ面からの反射が微弱であるため、スラグ面以外からのわずかな反射があつても測定の妨害になる。不要反射の要因は種々考えられるが⁶⁾、転炉内スラグレベル測定の場合に重要なものは、転炉炉口からのマイクロ波散乱、マイクロ波回路内の反射であり、これらを極力低い値に押さえる必要がある。

これらの点に留意して測定装置を製作した。Fig. 2 にマイクロ波スラグフォーミングレベル測定装置の構成を示す。本装置はマイクロ波アンテナ、RF ユニットおよび信号処理ユニットの部分から構成されている。

2.2.1 マイクロ波アンテナ

転炉炉口からの不要反射を避けるためには、アンテナの指向性を鋭くし、マイクロ波ビームが転炉炉口にかからないようにする必要がある。必要な指向性を得るため、波長 (λ) 約 12.5 mm (24 GHz) のマイクロ波および内径 (D) 350 mm のパラボラアンテナを採用した。アンテナとスラグ面間の距離 (x) は 10 m 程度であり、マイクロ波ビームの半値角は、アンテナから 6 m の距離で 2.60 度、 10 m の距離で 2.52 度である。転炉炉口位置は、アンテナから 6 m の距離で 3.34 度の角度であり、炉口からの反射を避けるに十分な指向性である。

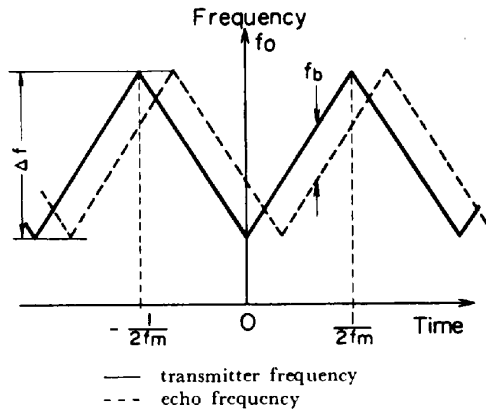


Fig. 3. Triangular modulation.

また、距離 10 m 付近におけるこのアンテナのフレネルゲインは 36 dB である。

2.2.2 RF ユニット

RF ユニットは、マイクロ波発振器、マイクロ波回路および検出うなり信号前置増幅器により構成される。マイクロ波発振器としては、10 mW 出力のK帯域半導体式発振器 (YIG 同調発振器) を使用した。

一方、微弱な受信波を SN 比良く計測するため、平衡混合器を用いたマイクロ波ブリッジ回路を適用した。すなわち、平衡混合器により発振器の AM 雑音を抑制するとともに、ブリッジの一端に設けた可動短絡器および可変減衰器を用いてアンテナからの不要反射を補償した。

2.2.3 信号処理ユニット

信号処理ユニットは、うなり信号の周波数を測定し、スラグレベルに対応した出力を得るための信号処理をおこなう部分である。また、うなり信号の強度を測定し、スラグの反射率に対応した出力を同時に得る。

周波数変調は、Fig. 3 に示すような三角波変調方式を採用した。三角波変調の場合、うなり周波数 f_b は次式で表わされる。

$$f_b = 2 \cdot f_m \cdot \Delta f \cdot T = \frac{4 \cdot x \cdot f_m \cdot \Delta f}{C} \dots \dots \dots (6)$$

ここに、 f_m : 変調周波数、 Δf : 変調周波数帯域であり、それぞれ、 $f_m = 100 \text{ Hz}$ 、 $\Delta f = 300 \text{ MHz}$ を用いた。

信号処理装置は精度向上のため以下のくふうを施した。

(1) 一般に FM レーダでは、周波数カウンタでうなり信号の周波数を求める場合、固定誤差を生じる⁵⁾。

三角波変調の場合の固定誤差 δR は次式で示される。

$$\delta R = \frac{c}{4 \cdot \Delta f} \dots \dots \dots (7)$$

固定誤差の影響を減少させるためには、変調周波数帯域 Δf を増大させれば良いが、これには実際上限界があ

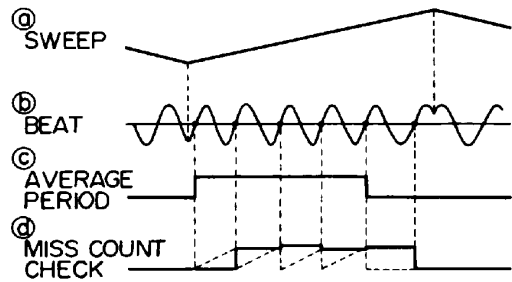


Fig. 4. Ideal waveforms in the signal processing unit.

る。そこで、各変調周期ごとに三角波の折り返し点から離れた個所でのうなり信号の N 周期の平均値を測定し、その逆数演算をおこなう方式を採用した。概念図を Fig. 4 に示す。①は三角波変調信号であり、それに対応して得られるうなり信号②の零点を検出して、N 周期 (Fig. 4 では 4 周期) 分の時間幅を持つパルス③を得る。このパルスの時間幅を計数し、逆数演算によりうなり信号の周波数に対応した出力を得る。④は、N 周期のうなり信号のおおのこの周期に応じた電圧波形を示す周期チェック信号であり、計測値の異常検出に用いる。

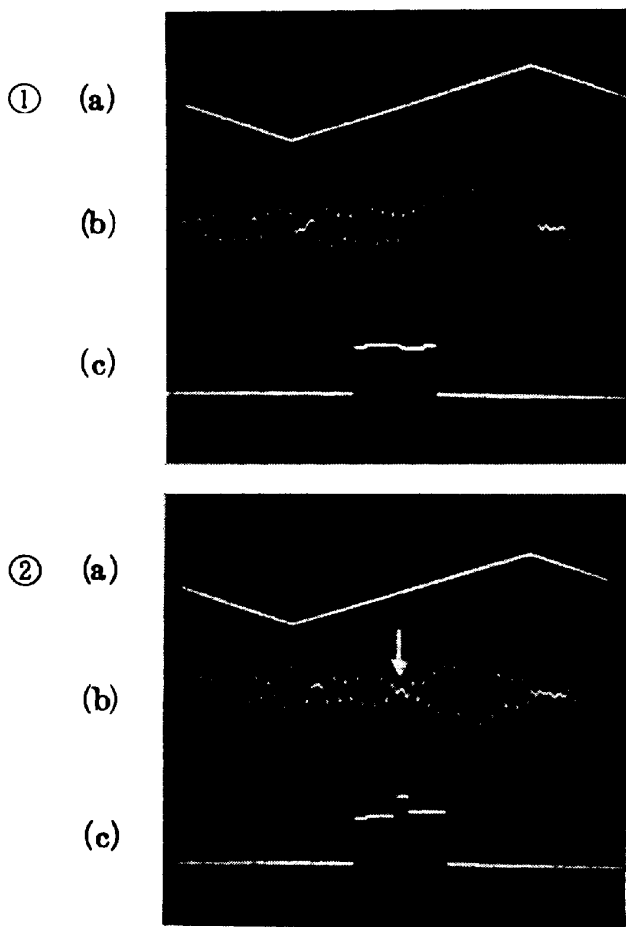
(2) 転炉吹錬中はうなり信号波形が正弦波形よりくずれる場合がある。そのために生じる距離測定誤差を除くために、周期チェック信号のおおのこの周期に対応した電圧を比較し、その変動が一定値を越える場合には、真の周期より長い計測値が得られるので、直前の距離測定値を保持するような論理回路を付加した。信号波形の一例を Photo. 1 に示す。①は正常な場合、②はうなり信号波形がくずれた場合の例である。写真中矢印で示した部分でうなり信号波形がくずれ、零点の検出が正常になされていないため、周期チェック信号の電圧が大きく変動している。この場合は直前の距離測定値を保持する。

(3) うなり信号の振幅が一定値より小さくなった場合、(2)と同様に直前の距離測定値を保持する論理回路を付加した。

2.2.4 距離測定精度

スラグの反射率が -47 dB 程度と微弱であるため、スラグの反射率に近い、マイクロ波吸収体を対象物として距離測定試験をおこなった。使用したマイクロ波吸収体は、0.6×0.6 m の市販品 (Eccosorb-AN 79⁷⁾) であり、反射率は -32 dB であつた。測定結果を Fig. 5 に示す。

距離測定範囲 5~15 m で精度 38 mm の計測が可能である。



(a) Sweep signal (b) Beat signal
(c) Miss count check signal

Photo. 1. Typical waveforms of miss count check logic.

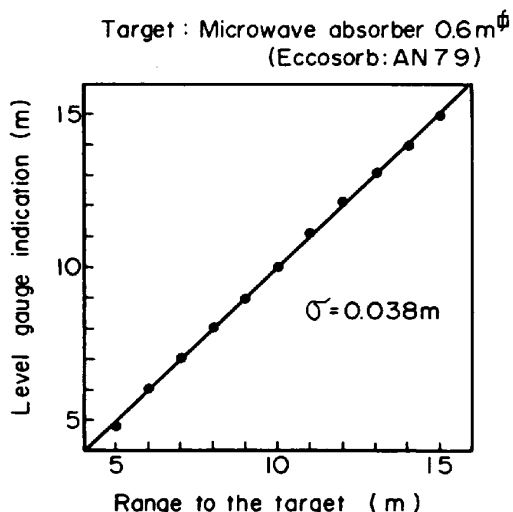


Fig. 5. Accuracy of level gauge.

3. 試験方法

マイクロ波スラグフォーミングレベル測定装置を当社和歌山製鉄所第2製鋼工場 No. 1 転炉 (150 t) に設置し、以下の試験をおこなった。

- (1) スラグレベル、スラグ反射率とスロッピングの関係調査。
- (2) スラグ反射率とスラグ成分の関係調査。
- (3) マイクロ波測定値に基づくスロッピング防止試験。

測定装置の設置状況を Fig. 6 に示す。パラボラアンテナは転炉上部フードに設けた観測孔 (ジャケット) に取り付けられ、防熱、防塵対策として水冷および窒素ハージを施した。マイクロ波発振器、マイクロ波回路などの RF ユニットは、アンテナ上部に組み込まれており、装置の総重量は約 300 kg である。(Photo. 2)

信号処理ユニットの出力は計算機に取り込まれ、データロギングに用いられるとともに、スラグレベルをカラー CRT 上に模式的に表示し、オペレータガイドとして使用できるようにしている。CRT 画面の例を Photo. 3 に示す。

吹錬中のスロッピングの発生は目視観察により判定記録した。また、スラグレベル測定精度の確認、およびスラグ滓化状態の指標を得るために、サブランスを用いたスラグレベルの間欠測定およびスラグサンプルの採取をおこなった。サブランスによるスラグレベル測定は、サブランス先端に取り付けた電極が導通したときのサブランス位置を検出することによりおこなった。

4. 測定結果と考察

4.1 スロッピングとスラグレベル、スラグ反射率との関係

本装置によるスラグレベル、スラグ反射率の測定結果例を Fig. 7 に示す。(a)は吹錬中にスロッピングが観察された場合、(b)は観察されなかった場合の例である。スラグレベルは炉口レベルを基準として、またスラ

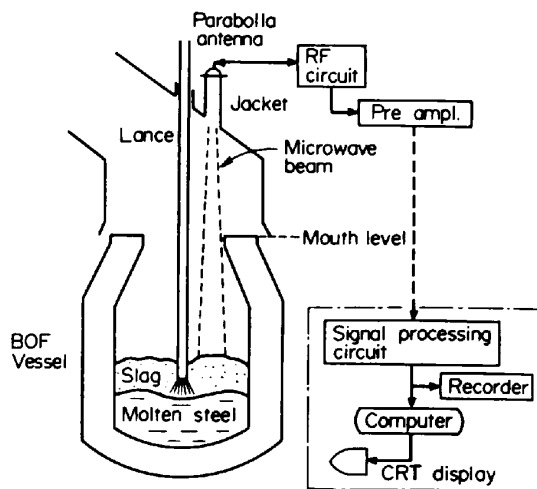


Fig. 6. Schematic diagram of the installation.

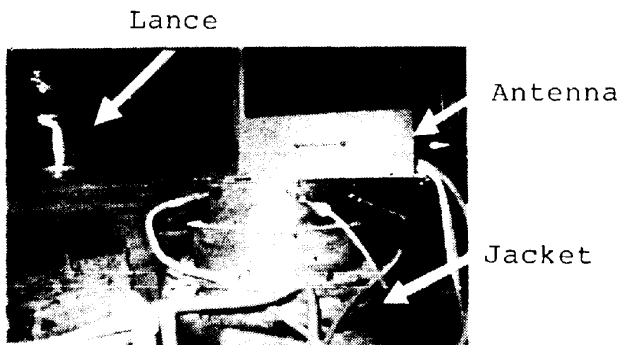


Photo. 2. Microwave antenna.

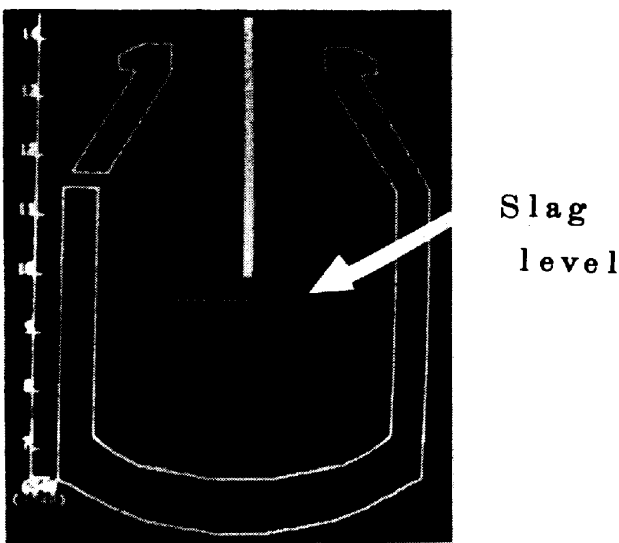


Photo. 3. CRT display.

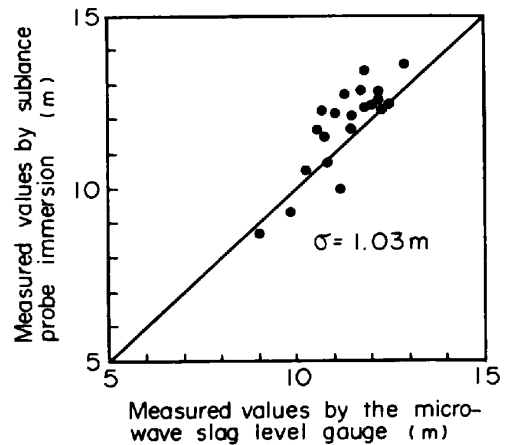


Fig. 8. Comparison of the microwave method with the sublance probe immersion method.

グ反射率は 2.1 で示したように金属板による反射を基準として表した。

吹錬開始前は溶銑レベルを示しており、吹錬開始後、鋼浴面上にスラグが形成され、吹錬進行に伴いスラグレベルが変化する状況が良好に測定されている。サブランスによるスラグレベル間欠測定の結果との対応も、Fig. 7(図中×印) および Fig. 8 に示すように十分であった。

Fig. 7 の (a), (b) 両者を比較すると、(a) は全般的にスラグレベルが高く、スラグ反射率が低い。また、スロッピングはスラグレベルが特に高くなった時点で生じている。

以上のことから、スラグレベル、スラグ反射率ともにスロッピングの発生と密接な関係にあることがわかった。

また、吹錬開始前の炉底、湯面の測定が可能である。

4.2 スロッピングの予知

スロッピング発生時におけるスラグレベル、スラグ反射率の分布を、非スロッピング時と比較した結果をFig. 9に示す。スロッピングの有無によりスラグレベル、スラグ反射率とも明らかな差があるが、完全には分離しておらず、これらの測定値を用いてスロッピングを予知する場合にはある程度の過検出を伴う。

そこで、約 30 回の吹錬の測定結果をもとに統計処理をおこない、過検出率を一定値以下に押さえ、しかもスロッピング予知率を最大にする予知レベルの検討をおこなった。ここで、過検出率、スロッピング予知率は以下の定義による値である。

$$\text{過検出率} = \frac{\text{スロッピング非発生機会}}{\text{スロッピング予知機会}}$$

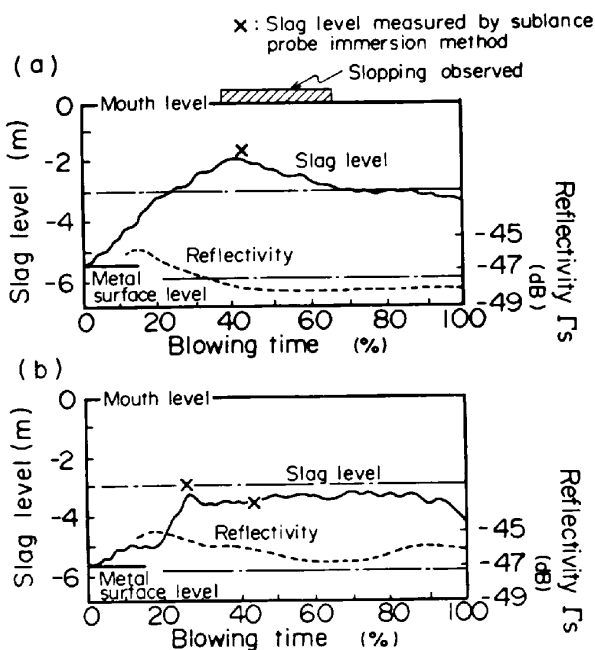


Fig. 7. Typical results of measurement during BOF operation.

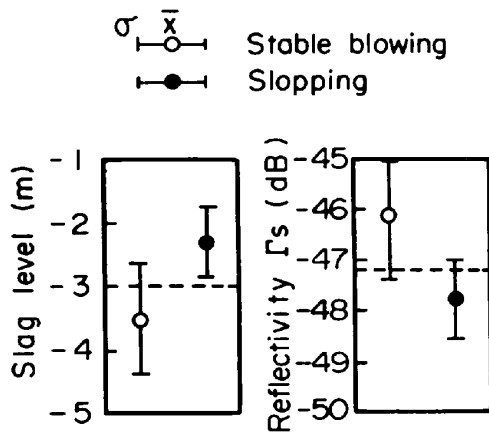


Fig. 9. Slag level and reflectivity versus slopping.

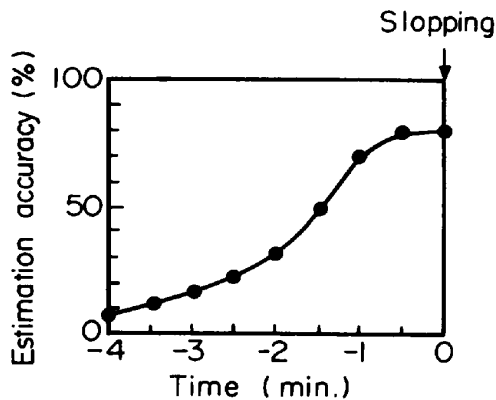


Fig. 10. Estimation accuracy of slopping.

$$\text{スロッピング予知率} = \frac{\text{スロッピング発生機会}}{\text{スロッピング予知機会}}$$

検討の結果、スラグレベルが炉口から -3m 以上に上昇し、かつスラグ反射率が -47.2 dB 以下になった時を、スロッピング予知範囲に設定した。この設定におけるスロッピング予知率の実績を Fig. 10 に示す。

スロッピング発生 1 min 前に 70% 以上、30s 前には 80% 以上の確率でスロッピングの予知が可能であり、また、この時の過検出率は 20% 以下である。

上記設定値に基き、スロッピング予知時にはカラー CRT 上に警報を出すようにした。

4.3 スラグ成分とスラグ反射率の関係

転炉吹錬中にサブランスを用いたスラグサンプリングをおこない、スラグ成分とスラグ反射率の関係を調査した。スラグ中 T・Fe とスラグ反射率の関係を Fig. 11 に示す。スラグ中 T・Fe が増加する程スラグ反射率は弱くなるという良好な相関がみられた。スラグ中 FeO が高い程石灰の滓化速度が早いことが知られているので⁸⁾、スラグ反射率は滓化状況の指標として使用し得る。

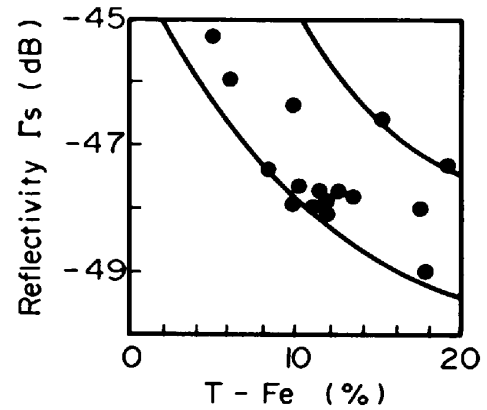


Fig. 11. Relation between T-Fe in slag and slag reflectivity.

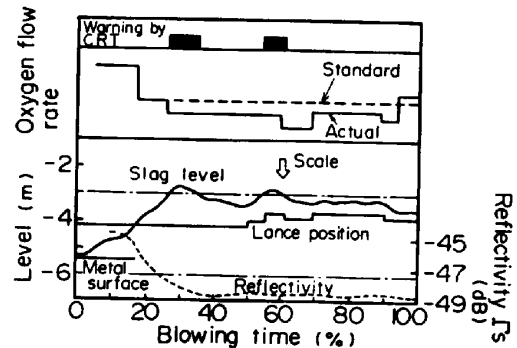


Fig. 12. Typical result of controlled blowing by the microwave slag level gauge.

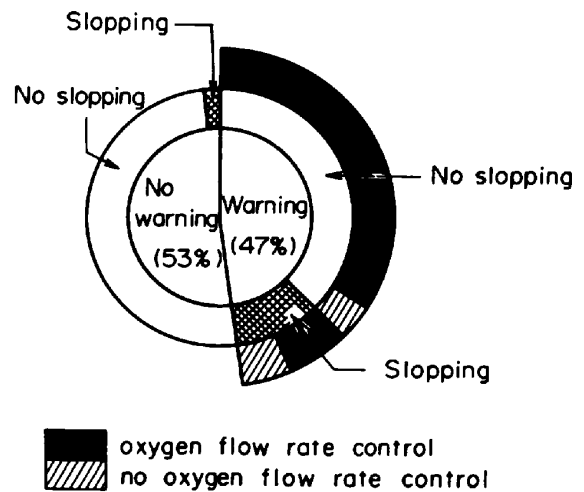


Fig. 13. Results of slopping control.

4.4 マイクロ波測定値に基づくスロッピング防止

マイクロ波スラグフォーミングレベル測定装置によるスロッピング予知に基きスラグレベルを制御しスロッピング発生を防止する試験をおこなった。スロッピング制御は、送酸流量減少、副原料投入、およびランス高さ調整によりおこない、副原料としては鉄鉱石、軽焼ドロマイトなどを使用した。スロッピング防止制御の一例を Fig. 12 に示す。

この例では、スロッピング警報に基く送酸流量減少のアクションによりスロッピングを防止するとともに、ランス操作をおこないスラグレベルを一定に保つ制御を実施しており、ほぼ良好な制御結果である。

約 50 回の吹錬に対してのスロッピング防止制御試験の結果を Fig. 13 に示す。ほぼ良好な制御がなされており、本測定装置の有効性が確認された。また、制御効果としては、送酸流量減少が最も効果があるという結果を得た。

4.5 考察

4.5.1 スロッピングとスラグレベルの関係

スロッピングとスラグレベルの関係は従来より指摘されている。すなわち、立川らは⁹⁾ 2.5 t 転炉 および 170 t 転炉におけるスラグレベルの間欠測定により、スラグレベルはフォーミングにより吹錬中期に最も上昇し、転炉炉口付近まで達しているとの結果を得た。また、スロッピングが、スラグフォーミングおよび運動量授受によるものと予想し、転炉吹錬中におけるスラグレベル制御の重要性を指摘している。一方、CHERNYATEVICH らは¹⁰⁾、観測窓を設けた 60 kg 転炉における吹錬状況の観察により、スロッピングの機構を次のように考えた。ガス、スラグおよびメタルのエマルジョンが激しく形成され、転炉内の広範囲の部分を満たす結果、それが反応により生成する CO ガスの排出に対しての障害となり、捕足された CO ガスが爆発的に抜け出る時にスラグメタルエマルジョンを同時に持ち出すことによりスロッピングが発生する。

著者らの得た、スラグレベルが非常に高くなつた時点でスロッピングが発生するという結果は、これらの従来からの考え方を実炉において実証したものと考える。

4.5.2 スラグフォーミングと反射率の関係

本試験によれば、スラグのマイクロ波反射率はスラグフォーミングおよび滓化度と相関があり、フォーミングレベルおよび滓化度が高いほど反射率が低くなる結果を得た。

マイクロ波を物体に投射した場合の反射率は、対象物体の物性値および表面状態により変化する。そこで、以下に示す場合につき、スラグ反射率の実測値を用いて考察した。

(1) スラグ表面が粗面であると考えられる場合

スラグ表面の凹凸により、マイクロ波が乱反射され、見かけ上反射率が変化する場合である。乱反射が起こるような粗面の条件は、Rayleigh criterion¹¹⁾ により次式で与えられる。

$$h > \lambda/8 \dots \dots \dots (8)$$

ここで、 h は凹凸の高さ、 λ はマイクロ波波長である。

スラグ面の単位面積あたりの後方散乱断面積を s とすると、送信電力 P_t と受信電力 P_r の比 η_r は次式で与えられる¹¹⁾。

$$\eta_r = \frac{P_r}{P_t} = \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3} \int \frac{s}{r^4} \dots G^2 dS \dots \dots \dots (9)$$

ここで、 G : アンテナゲイン、 r : アンテナからの距離、 dS : スラグ面の単位表面積である。

アンテナ立体角を $\Omega_0 (= 4\pi/G)$ とし、アンテナ指向性が十分に鋭く、 $r \approx x$ と考えて良いとすると、

$$\begin{aligned} \eta_r &= \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3} \int \frac{s}{r^2} G^2 d\Omega \approx \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3} \frac{s}{x^2} \cdot G^2 \Omega_0 \\ &= \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \cdot \frac{s}{x^2} \cdot G \dots \dots \dots (10) \end{aligned}$$

一方、電力反射率 1 の十分大きい平面からの反射による送受信電力比は次式で与えられる。

$$\eta_s = \left(\frac{\lambda \cdot G}{8\pi x} \right)^2 \dots \dots \dots (11)$$

したがって (5) 式の定義に基づくスラグ反射率は次式で与えられる。

$$\Gamma_s = \frac{\eta_r}{\eta_s} = \frac{4s}{G} \dots \dots \dots (12)$$

とくに、粗面の周期が波長 λ にくらべて十分大きい、ランダム粗面の後方散乱断面積 s は次式で与えられる¹¹⁾。

$$s = \exp \left[- \left(\frac{4\pi\rho}{\lambda} \right)^2 \right] \dots \dots \dots (13)$$

ここで、 ρ : 表面粗さの標準偏差である。

今回の実測値、 $\Gamma_s = -47$ dB、 $\lambda = 12.5$ mm、 $G = 36$ dB より ρ を逆算すると、 $\rho = 1.97$ mm を得る。この考えが正しいか否かを検討するため、X帯のマイクロ波を用いて転炉スラグの反射率を計測した場合の結果と比較した。X帯での測定の結果を Fig. 14 に示す。試験条件は Table 1 のとおりである。

ρ の X帯からの推定値は 6.36 mm であり、K帯のものとは大幅に異なる。以上より、粗面からの乱反射によりスラグ反射率が決定されているとは考えにくい。

(2) スラグの物性値によると考える場合

$h < \lambda/8$ 、すなわち、(8)式が成立しないときには、スラグ面はマイクロ波反射に関しては平面とみなして良い。

空気 (インピーダンス Z_0) とスラグ (インピーダンス Z) の平面境界にマイクロ波を投射した場合の反射率は次式で表される。

$$\Gamma_s = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} \dots \dots \dots (14)$$

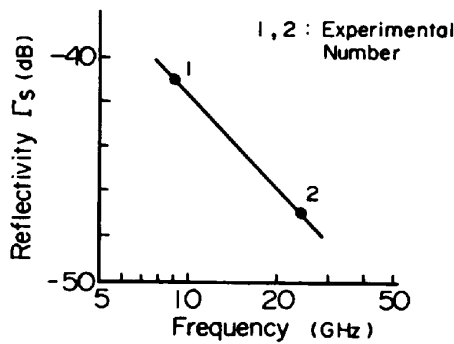


Fig. 14. Reflectivity of the slag v.s. frequency.

Table 1. Experimental conditions.

No.	1	2
Microwave Frequency	9 GHz	24 GHz
Wavelength	33.3 mm	12.5 mm
Antenna Diameter	230 mm ^φ	350 mm ^φ
Antenna Gain	22.0 dB	36.0 dB

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}, \quad Z = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_r \epsilon_0 - j \frac{\sigma}{\omega}}} \quad \dots \dots \dots (15)$$

ここで、 ϵ_0 : 真空の誘電率 (= 8.85×10^{-12} F/m)
 μ_0 : 真空の透磁率 (= $4 \pi \times 10^{-7}$ H/m)
 ω : マイクロ波角周波数
 ϵ_r : スラグの比誘電率
 σ : スラグの電気伝導度 (Ω/m) である。

(14) 式に (15) 式を代入して、次式を得る。

$$\Gamma_s = \left[\frac{1 - \sqrt{\epsilon_r - j \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0}}}{1 + \sqrt{\epsilon_r - j \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0}}} \right]^2 \quad \dots \dots \dots (16)$$

(16) 式を用いて実測反射率よりスラグの電気伝導度 σ を逆算する。(16) 式で σ が正の値を持つためには、 $\epsilon_r \leq 1.03$ である必要があるので、一応 $\epsilon_r = 1$ として σ を求めると、 $\sigma = 0.2 \sim 0.36$ (Ω/m) となる。一方、CaO-FeO-SiO₂ 系スラグの電気伝導度の文献値は 3~20 Ω/m の範囲であり、また、FeO が高くなるにつれて電気伝導度が高くなることが示されている¹³⁾。(16) 式は、電気伝導度が高いほど反射率が高くなることを示しており、FeO が高いほど反射率が低下する Fig. 11 の結果と矛盾する。

以上より、スラグの反射率をスラグ物性値の変化のみにより説明することは困難である。

そこで、スラグと CO 気泡の混在により複合物質としてふるまう場合を考える。すなわち、内部に含有する CO 気泡径がマイクロ波波長にくらべて小さい場合、ス

ラグと気泡の混合物はマイクロ波的には一様な物質としてふるまうとみなせる。この混合物の誘電率 $\tilde{\epsilon}_r$ 、電気伝導度 $\tilde{\sigma}$ は次式で表されると仮定する。

$$\tilde{\epsilon}_r - j \frac{\tilde{\sigma}}{\omega} = (1 - \xi) \epsilon_0 + \xi (\epsilon_r \epsilon_0 - j \frac{\sigma}{\omega}) \quad \dots \dots \dots (17)$$

ここで、 ξ : スラグの体積率である。

$\epsilon_r = 1$ と仮定すると、 $\tilde{\epsilon}_r = \epsilon_0$ となるので、反射率 Γ_s は次式で表される。

$$\Gamma_s = \left[\frac{1 - \sqrt{1 - j \frac{\xi \sigma}{\omega \epsilon_0}}}{1 + \sqrt{1 - j \frac{\xi \sigma}{\omega \epsilon_0}}} \right]^2 \quad \dots \dots \dots (18)$$

スラグ反射率の実測値と、副原料投入量とスラグレレベルより概算したスラグの体積率 ($\xi = 0.08 \sim 0.14$) を用いて、(18) 式より推定されるスラグの電気伝導度 σ は、2~5 (Ω/m) となり、ほぼ文献値¹³⁾と一致する。

以上のことから、スラグの反射率は、スラグ表面が CO ガス気泡を含んだ気液混合体となることにより低下すると推定され、フォーミングレベルおよび滓化度が高い程、CO ガス気泡の占める割合が増加し、反射率が低くなる現象を示すと推察される。しかし、CO ガス気泡の大きさやスラグ中での CO ガス分布の影響、およびスラグの比誘電率 ϵ_r は不明であるため、スラグのマイクロ波反射率と滓化度が対応する機構については、今後の検討課題としたい。

5. オンライン使用結果

以上の結果に基づき、マイクロ波スラグフォーミングレベル測定装置をオペレータガイドとするオンライン使用をおこなっている。CRT に警報が表示された時点で、送酸量減少、副原料投入の制御を一定基準を決めて実施している。オンライン使用の効果を Fig. 15 に示す。

マイクロ波測定装置を使用した場合のスロッピング発生頻度は、非使用時の約 1/5 に減少しており、明らかな効果が認められる。一方、スロッピング防止制御の採用による吹錬時間の増加は認められずばらつきは減少している。

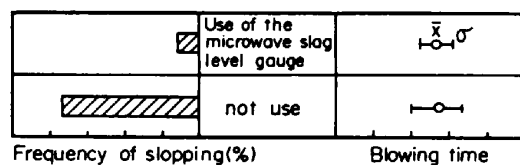


Fig. 15. Effect of on-line use of the microwave slag level gauge.

6. 結 言

マイクロ波を用いる転炉スラグフォーミングレベル測定装置を開発し、当社和歌山製鉄所第2製鋼工場 No. 1 転炉に適用した結果、以下の結論を得た。

(1) スラグレベル、スラグ反射率の測定により、スロッピングの予知が80%以上の確度で可能である。また、過検出率は20%以下である。

(2) スラグ反射率とスラグ滓化状況との間に相関がある。

(3) 本測定装置に基くスラグレベル制御が可能であり、オンライン使用の結果、スロッピング発生頻度を約1/5に減少することができた。

本装置は現在オンライン使用をされており、スロッピング防止を含めた総合的な転炉吹錬制御法の開発に活用することができる。

終わりに、本測定方法の開発をおこなうに当たり、終始御指導をいただいた住友金属工業(株)技監 白岩俊男博士、中央技術研究所次長 梅田洋一氏、和歌山製鉄所製鋼部長 梨和甫氏に感謝致します。また、同製鉄所岸田達氏には、現場適用に関して、栗林隆氏には、計算機によるデータ処理に関して全面的に協力していただきました。また、予備実験に関しては、中央技術研究所 池田隆果博士、増田誠一氏に協力していただきまし

た。

文 献

- 1) R. HOLPER and E. DENIS: C. N. R. M. Metallurgical Report, 17 (1968), p. 11
- 2) P. DAUBY and J. LÜCKERS: B. O. T. Reports (1973)
- 3) 古垣一成, 松永久, 富永忠男, 荒木英夫, 瀬野昭夫, 山本静夫: 鉄と鋼, 64 (1978), S 570
- 4) 飯田義治, 大森尚, 大西正久, 平山勝久, 竹内巧: 鉄と鋼, 64 (1978), S 172
- 5) M. I. SKOLNIK: Introduction to Radar Systems (1962), p. 86, p. 95 [McGraw-Hill]
- 6) M. CAPELLI: Radio Altimeter, I. R. E. Trans., Vol. ANE-1, (1954) 2, p. 3
- 7) EMERSON & CUMMING, Inc. 技術資料 No. 8-2-4
- 8) 第3版 鉄鋼便覧Ⅱ製鉄製鋼 (日本鉄鋼協会編) (1979), p. 469 [丸善]
- 9) 立川正彬, 島田道彦, 石橋政衛, 白岩惟光: 鉄と鋼, 60 (1974), A 19
- 10) A. G. CHERNYATEVICH, E. Ya. ZARVIN, Yu. N. BORISOV, and M. I. VOLOVICH: Steel in USSR, (1976), p. 544
- 11) P. BECKMANN and A. SPIZZICHINO: The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces (1963), p. 9, p. 398, p. 80 [Pergamon Press]
- 12) STRATTON: Electro magnetic Theory (1941), p. 283 [McGraw-Hill]
- 13) 特別報告書 No. 12 溶鉄・溶滓の物性値便覧 (溶鉄・溶滓部会編) (1971), p. 270 [日本鉄鋼協会]