

M系列信号マイクロ波レベル計とその応用

長棟 章生*・手塚 浩一*・佐藤 光威*²・金田 靖*³・菊地 一郎*⁴

M-Sequence Modulated Microwave Level Meter and Its Application

Akio NAGAMUNE, Kouichi TEZUKA, Mitsutake SATO, Yasushi KANEDA and Ichirou KIKUCHI

Synopsis : A high-resolution version of the M-sequence modulated microwave level meter has been developed. This level meter consists of a continuous wave radar where the carrier is modulated by the M-sequence (Maximal-length-sequence). Employing two M-seq. which are the same in code but generated by the slightly different clock frequencies, the implementation of the cross-correlation between the received and the reference signals can be simple, and high sensitivity and accuracy can be obtained. Moreover, using high resolution M-sequence which is a three-valued random signal in stead of the conventional two-valued M-sequence, a high resolution in terms of range is obtained and it becomes easy to distinguish the desired signal and unwanted signals which may be receiving and transmitting antenna leakage or reflection from walls nearby.

Due to the improvement of resolution of the level meter, its application has been widely ranged for iron and steel making process. Covering a level measurement of the molten iron in a moving ladle, a molten steel level meter in a tundish of the Horizontal Continuous Casting (HCC), and foamed slag level measurement in a converter, the effectiveness of the sophisticated level meter is confirmed.

Key words : sensor ; process control ; measurement ; level meter ; microwave ; signal processing.

1. 緒言

マイクロ波は、空中における伝播時間や直進性が周囲温度で変化せず、また粉塵による散乱減衰を受けにくいことから、計測環境の厳しい鉄鋼プロセス、特に製鉄・製鋼などの上工程プロセスにおける非接触レベル計測への応用が期待される¹⁾。たとえば、転炉のスロッピング予知をはじめ、溶銑予備処理、炉外精練などでマイクロ波レベル計のニーズが多いが、スラグ表面からのマイクロ波の反射波は微弱なため、安定したスラグレベル計測が可能となるような高感度なマイクロ波レベル計の開発が待たれている。また、タンディッシュのプラズマ加熱プロセスにおける溶鋼レベル計ではトーチと溶鋼表面との距離を管理するための高精度なレベル計が要求されている。これらのニーズに対し、従来のパルス変調レーダは、パルス変調したマイクロ波を測定対象に向けて送信し、その反射波が受信されるまでの遅延時間から距離を換算するものであるが、平均的な送信電力がパルス変調により低下するため、測定対象の反射率が低いとS/N比が悪くなる。またFMCW方式は、周波数変調したマイクロ波を送信し、測定対象からの反射波と送信波との周波数差を計測して距離を算出するが、周波数変調

幅の制約と周波数差計測上の限界から、FMCW方式固有の量子化誤差と不要反射波などに対するS/Nに問題が生じる²⁾。量子化誤差を軽減する方法はいくつか提案され、実用化された例もあるが³⁾、不要反射波による影響を受けやすい問題が残されている。

これらの問題を解決するために、筆者らは、擬似ランダム信号のひとつであるM系列信号で変調したマイクロ波レベル計を既に開発した⁴⁾。このレベル計では、周期のわずかに異なる二つのM系列信号を用いたアナログ的な相関演算方式による変調信号検出と搬送波に対するコヒーレント検波との複合信号処理により、簡単な回路構成で、高感度・高精度が得られる。しかし、このレベル計の現場適用を拡大するのに伴い、取り付け場所の制約などにより周囲の構造物からの不要な反射波が発生する場合は生じ、これとレベル面からの反射信号とを区別する能力、すなわち複数の反射信号の距離分解能が高いことが要求されるようになった。このためには、本方式で使用されるM系列信号発生のクロック周波数を高くする方式も考えられるが、現状ではデジタル素子の処理速度の制約のため、クロック周波数には実用上の上限がある。

本文では、この問題を解決するため高分解能型のM系列

平成4年11月4日受付 平成5年4月9日受理 (Received on Nov. 4, 1992; Accepted on Apr. 9, 1993)

* NKK基盤技術研究所 (Applied Technology Research Center, NKK Corporation, 1-1 Minamiwatarida-cho Kawasaki-ku Kawasaki 210)

* 2 NKK福山製鉄所 (Fukuyama Works, NKK Corporation)

* 3 NKK京浜製鉄所 (Keihin Works, NKK Corporation)

* 4 NKK総合材料技術研究所 (Material and Processing Research Center, NKK Corporation)

信号を用いたマイクロ波レベル計を考案し、その有効性について確認した内容について報告する。すなわち、従来の各ビットが連結された2値のM系列信号の波形に対して、各ビットを切り離して3値のM系列信号の波形とすることで、クロック周波数は同じでも、距離分解能がほぼ $1/2$ に向上する改善を行った。この性能改善により不要反射波が存在してもその影響を低減できるようになり、本レベル計の応用は、移動中の鍋中の溶銑レベル計、水平連続鑄造タンディッシュ内溶鋼レベル計、転炉スラグレベル計へ拡大された。

2. 基本原理

2.1 回路動作

M系列信号マイクロ波レベル計は、搬送波となるマイクロ波をM系列信号(Maximal length sequence)で変調した連続波を送信信号とするレーダ方式のレベル計である。

M系列信号は擬似ランダム信号のひとつで、クロック信号で駆動される多段シフトレジスタと適切なフィードバック回路により簡単に発生できる⁵⁾。その自己相関関数は鋭いピークを持ち、このピークの周期 T_m は、クロック信号の周波数を f_c 、シフトレジスタの段数を n とすると、次式となる。

$$T_m = (2^n - 1) / f_c \quad (1)$$

M系列信号マイクロ波レベル計のブロック構成をFig. 1に示す。回路構成が同じ二つのM系列信号発生器が³⁾、周波数のわずかに異なる二つのクロック信号でそれぞれ駆動される。そのクロック周波数を f_1 、 f_2 ($f_1 > f_2$) とし、それぞれに対応するM系列信号を $m_1(t)$ 、 $m_2(t)$ とする。マイクロ波発振器からの搬送波を一方のM系列信号 $m_1(t)$ で2位相変調して式(2)で表される送信信号 $S_t(t)$ をアンテナから送信する。ただし、 A_t は送信信号の振幅、 f は搬送周波数である。

$$S_t(t) = A_t m_1(t) \cos(2\pi f t) \quad (2)$$

受信されたレベル面からの反射波 $S_r(t)$ は、振幅を A_r 、伝播

時間を τ_0 とすると、次式となる。

$$S_r(t) = A_r m_1(t - \tau_0) \cos(2\pi f(t - \tau_0)) \quad (3)$$

受信信号はM系列信号と搬送波に関して複合検波される。検出信号 $S(t)$ はM系列信号の自己相関関数を $\Phi_{m_1 m_1}(\xi)$ とすると次式となる。ここで、二つのM系列信号の周期の差は十分小さいものと仮定した⁴⁾。

$$S(t) \approx A_r^2 \Phi_{m_1 m_1}^2(\tau - \tau_0) \quad (4)$$

ただし、

$$\tau = (\Delta f / f_1) t \quad (5)$$

$$\Delta f = f_1 - f_2 \quad (6)$$

一方、時間基準信号 $T(t)$ は、次式となる⁴⁾。

$$T(t) \approx \Phi_{m_1 m_1}(\tau) \quad (7)$$

このようにして、 $T(t)$ を時間基準とし、レベル面からの反射波を検出した信号として $S(t)$ が得られる。

2.2 距離の算出

$S(t)$ と $T(t)$ の関係を示すタイムチャートをFig. 2に示す。 $T(t)$ が極大値となる時刻を基準として $S(t)$ の極大値が検出されるまでの時間 τ_0' を測定すれば、レベル面までの距離 L は次式で求まる。ただし、 v はマイクロ波の伝播速度である。

$$L = (\tau_0' v / 2) (\Delta f / f_1) \quad (8)$$

また、式(8)は、電磁波の伝播という高速現象が³⁾、出力

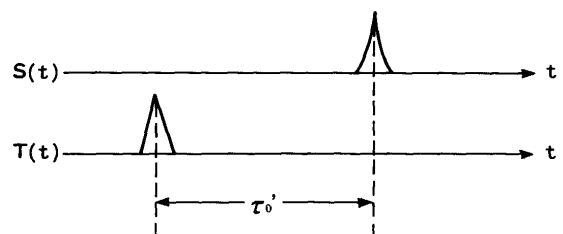


Fig. 2. Time chart of $S(t)$ and $T(t)$.

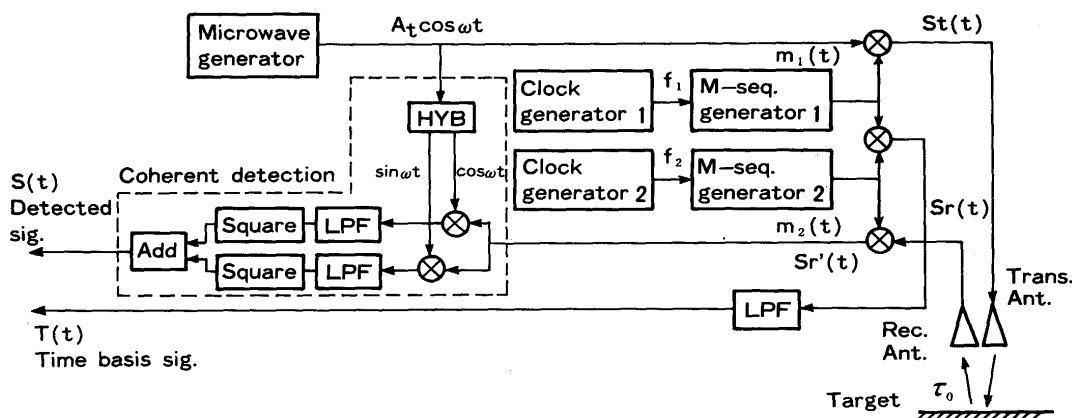


Fig. 1. Block diagram of the M-sequence modulated microwave level meter.

信号の時間軸上では $f_1/\Delta f$ 倍に拡大・低速化されることを意味している。

2・3 測定周期

測定周期は検出信号の周期で決定される。検出信号の周期 T_s は、M系列信号の周期 T_m が $f_1/\Delta f$ だけ時間拡大されたのに等しいので次式となる。

$$T_s = (2^n - 1) / \Delta f \dots\dots\dots (9)$$

ただし、後述の仕様中に記された応答時間は、実用上個々の適用例に応じて実行される検出信号の平均化などの信号処理も含んだ時間となる。

2・4 ノイズ除去

コヒーレント検波部のローパスフィルタは、 $m_1(t)m_2(t)$ の相関演算における積分と同時にノイズ除去の役割を行なう。ローパスフィルタのカットオフ周波数 f_{LPF} の最適値として $5\Delta f$ に設定した⁴⁾。このとき、ホワイトノイズに対するノイズの除去比 N_{SUP} を、受信信号入力端に対する検出信号出力端の周波数帯域の比と定義すると、次式が得られる⁴⁾。

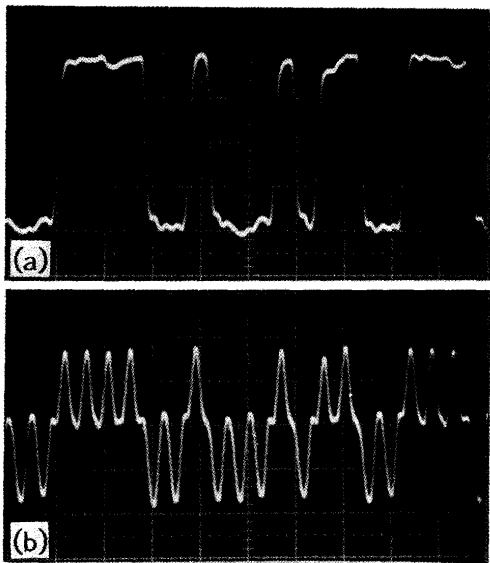
$$N_{SUP} = \Delta f / (2f_1) \dots\dots\dots (10)$$

すなわち、 Δf を小さくすれば、ノイズ除去の効果が大きくなるが、式(9)のごとく測定周期は長くなる。

3. 高距離分解能化の検討

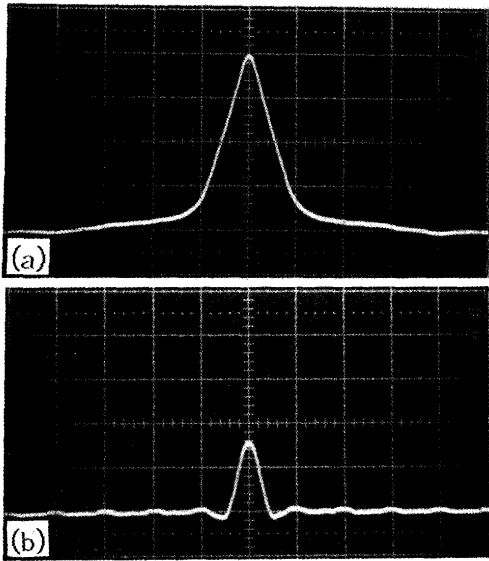
3・1 高分解能型M系列信号

従来のM系列信号の波形は、Photo. 1(a)に示すように+1と-1の値をランダムにとるが、符号間はクロック毎



H : 10ns/div. V : 200mV/div.
(a)Original M-seq. (b)High-resolution M-seq.

Photo. 1. High-resolution M-seq. has 0 to separate each chips which take +1 and -1 being synchronized with the original M-seq.



H : 200 μs/div. V : 50mV/div.
(a)Original M-seq. (b)High-resolution M-seq.

Photo. 2. Auto-correlation of high-resolution M-seq. is twice as sharp as that of the original M-seq., although its amplitude is half of the original one.

に区切られておらず、たとえば、+1が連続する場合には、その期間のあいだ連続して+1の値となる。これに対して、高分解能型M系列信号は、Photo. 1 (b)に示すように、各符号は+1と-1の値をとるが符号間には必ず0の値をとることによりクロック毎に区切られるようにした3値のM系列信号である。0の値をとる期間は任意に設定できるが、ここでは信号の発生し易さの点からクロック間隔の1/2とした。

3・2 高分解能型M系列信号の相関関数

Photo. 2 には、従来型と高分解能型のM系列信号(1周期127ビット)のそれぞれについて、クロック周波数220.000MHzと220.005MHzで発生させた信号を乗算し、カットオフ周波数25kHzのローパスフィルタを通過させて得た相関波形が、前述したように、220MHz/5kHz=44000倍に時間軸が拡大されて表示されている。従来型のM系列信号の場合は、Photo. 2 (a)のように、クロックの周期の2倍の9nsに相当する400μsの時間幅を持つパルスが得られる。これに対し、高分解能型のM系列信号では、Photo. 2 (b)のように、従来型の1/2である200μsのパルス幅に鋭くなり、距離分解能が改善される。ただし、パルスの振幅については、後者の方が6dB小さくなり、感度が若干低下することになるが、本方式全体のノイズ除去効果に比べるとこの感度低下分は十分小さく実用上の影響はない。

4. 実験および考察

4・1 基本特性

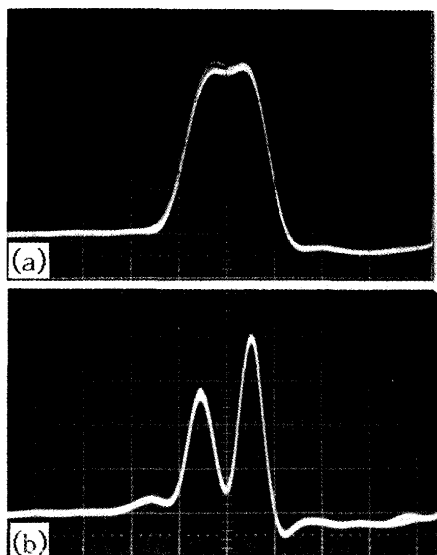
基本特性実験に使用したレベル計の仕様は、Table 1 のご

とく、搬送周波数10GHz、出力40mW、クロック周波数は220MHzにおいて5kHzだけ異なった2周波を用いた。アンテナは空冷の角型ホーンアンテナを送信用と受信に2個並べて使用した。標的としては金属板を用いた。

分解能の改善効果を確認するため、アンテナから1.65mと0.95mの距離にある二つの標的からの反射波を検出した波形を調べた。従来のM系列信号を使用した場合には、Photo. 3 (a)のように、二つの標的を区別できない。一方、高分解能型M系列信号を使用すると、Photo. 3 (b)のように、0.7m離れた二つの標的が明確に区別できる。さらに二つの標的を近づけると、0.4mまでの距離分解能が得られることが確認された。

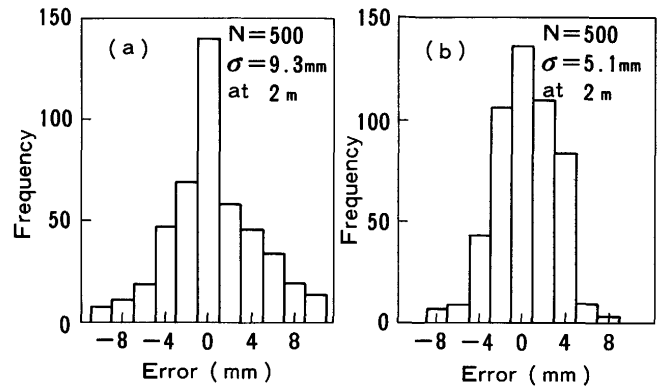
Table 1. Specifications of the M-sequence modulated microwave level meter for molten metal.

Carrier frequency	10 GHz
Output power	40mW
M-seq. length	127 bit (high resolution type)
Clock frequencies	$f_1 = 220.000$ MHz $f_2 = 220.005$ MHz
Response	1 s
Antennas	Gain=17dB Directivity $\pm 11^\circ$ Size 90W $\times$ 240L $\times$ 300H mm Air cooled Vertical type



H : 200 μ s/div. V : 500mV/div.
(a) Original M-seq. (b) High-resolution M-seq.

Photo. 3. High-resolution version of the level meter can distinguish two targets which are close to each other but the original version cannot. The targets are placed at 0.95m and 1.65m from the antenna.



(a) Original M-seq. (b) High-resolution M-seq.

Fig. 3. Repeatability of ranging is improved by employing the high-resolution M-seq.

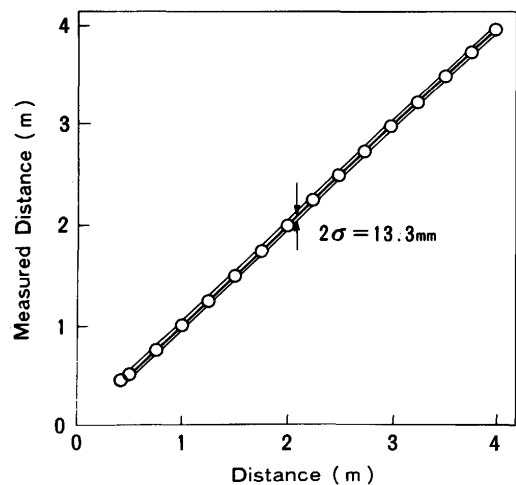


Fig. 4. Accuracy of the high-resolution version of the level meter is 13mm (2σ) for the range of 0.4m~4.0m.

Fig. 3 は、一定距離 2 m の位置にある標的を測定したときの、測定値のバラツキを調べた結果である。従来のM系列信号では分散 $\sigma=9.3$ mmに対し、高分解能型では $\sigma=5.1$ mmと向上した。

高分解能型M系列信号のマイクロ波レベル計の測定精度は、Fig. 4 に示したように、距離0.4mから4 mの範囲で13 mm (2σ) となった。

より鋭い相関波形が得られる高分解能型M系列信号を使用したことで、距離分解能すなわち複数の標的を分離できる能力が向上すると同時に距離測定のバラツキも改善されることが判った。距離測定のバラツキの原因は、搬送波の周波数ノイズによる相関波形ピーク位置の変動およびM系列信号波形の不安定さによる時間基準信号波形の変動と時間原点の変動などが考えられる。

4・2 移動中鍋内の溶銑レベル計測

溶銑の脱硫処理において、攪拌用のインペラを溶銑中に浸漬する量および脱硫剤の投入量を自動的に管理するため、Fig. 5 のごとく、処理場に進入して来る移動中の鍋中の溶銑

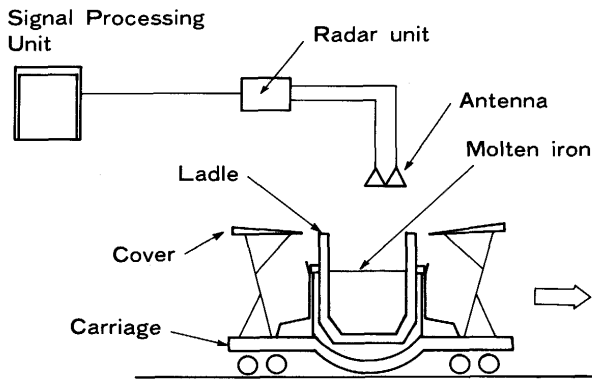


Fig. 5. Level measurement of molten iron in moving ladles is carried out by the level meter.

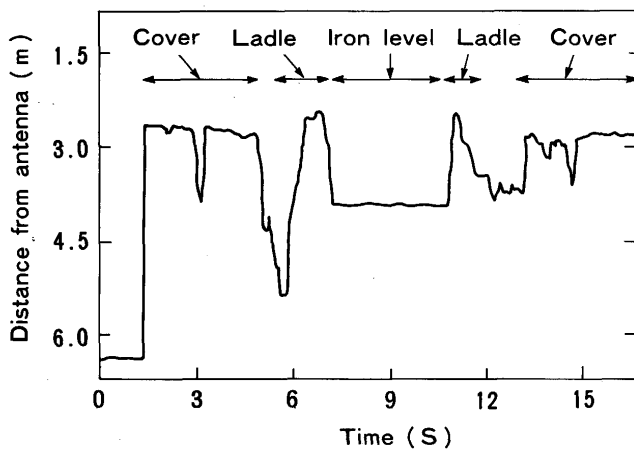


Fig. 6. The measured level signal shows the ladle cover, the ladle edge and molten iron. From this measured pattern, the level of molten iron is automatically recognized and detected.

レベルを計測する目的で本レベル計を適用した。溶銑鍋の直径は約3.5mで進入速度は約1m/sである。使用したレベル計の仕様は前節のものと同じである。ここでは、レベル計は常時レベル測定しながら、鍋が進入して来るときに検出されるレベル変化のパターンから自動的にその溶銑レベルを計測する。

実際に、測定されたレベル変化のパターンはFig. 6に示したように鍋の移動に伴って、カバー、鍋の縁、溶銑部、鍋の縁、カバーの順にレベルが変化し、このパターンから自動的に溶銑部分を認識し、そのレベルを出力する。目視データと比較して、 $\pm 100\text{mm}$ 以内で良く一致した測定結果が得られた。

目視データとの差は、ノロによる凹凸、目視の誤差などが考えられる。本レベル計の距離分解能が改善されたことの効果として、鍋の縁からの反射波と溶銑表面からの反射波が同時に検出されるような過渡的な領域でもこれらを区別できるようになったため、異常な測定値が出力されることがなく、溶銑レベルに相当する測定部が安定して得られ、パターン認識が容易となったことが考えられる⁶⁾。本装置は

福山製鉄所脱硫工場で設備化され、現在順調に稼動している。

4・3 水平連続 casting タンディッシュ溶鋼レベル計測

水平連続 casting のタンディッシュにおいては、Fig. 7に示したように、その側面にモールドが直結しているため、ロードセルによる溶鋼の重量管理が困難である。そこで、タンディッシュ内の溶鋼量をレベル値により管理するため、本レベル計を適用した。レベル計の仕様は、前節で説明したものと同一である。

測定例をFig. 8に示す。検尺棒による確認の結果、 $\pm 20\text{mm}$ の精度で、また実用上十分な応答性で測定できることが判った。Fig. 4で示した金属板を対象とした場合の精度より劣化したのは、湯面の波打ちおよび検尺棒測定の誤差によると思われる。

水平連続 casting のタンディッシュでは、レベル計のアンテナ取り付け場所が制約され、溶鋼面がアンテナ先端に接近する可能性がある。この場合、送信と受信のアンテナ間の漏洩波の位置に対して溶鋼面からの反射波の位置が接近し過ぎると、レベル計測が不可能になる恐れがある。しかし、この測定例では、レベルが最も上昇したときのアンテナ先端との距離は0.4mであったが、安定してレベル測定ができた。これは高分解能型M系列信号の採用によりアンテナの漏洩波と信号波を区別できる能力が改善された効果によるものと考えられる。本装置は京浜製鉄所製鋼工場にて既に実用性を確認し、今後設備化を予定している。

4・4 転炉スラグレベル計測

転炉では、スロッピング予知、操業モニタリングのため

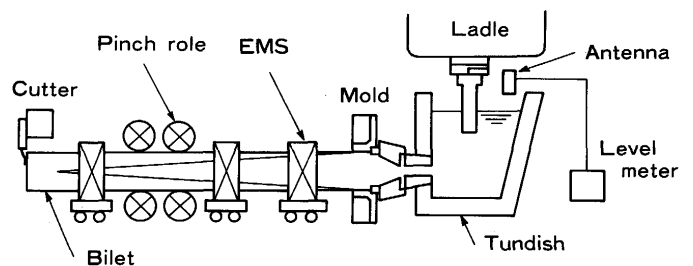


Fig. 7. Horizontal Continuous Casting (HCC) needs to have a level meter to control the amount of molten steel in the tundish.

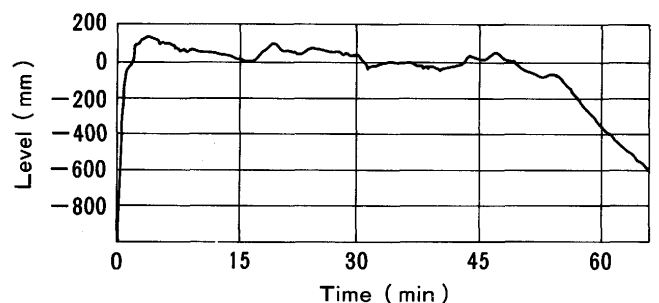


Fig. 8. The level of the molten steel in the tundish is measured by the level meter.

Table 2. Specifications of the M-sequence modulated microwave level meter for slag in the converter.

Carrier frequency	12.8 GHz
Output power	40mW
M-seq. length	1023 bit (high resolution type)
Clock frequencies	$f_1=220.000$ MHz $f_2=220.010$ MHz
Response	15 s
Antennas	Gain=17dB Directivity $\pm 11^\circ$ Size $250 \phi \times 4000$ mm Water cooled Horizontal type

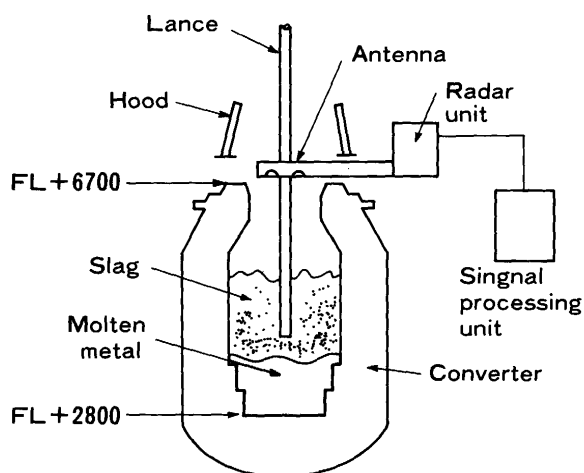


Fig. 9. Slag level in a converter is one of the important information for its operation. A horizontal water-cooled antenna is employed for the measurement.

に、スラグレベル測定ニーズは以前から強い⁷⁾。しかし、スラグ面のマイクロ波反射率は約 -45 dBと小さく、感度の高いレベル計が要求されている。そこで本レベル計の適用を試みた。その仕様は、Table 2に示したように、アンテナの小型化のために搬送周波数を高くして 12.8 GHzとした。また、アンテナは水平型で、3重管の水冷構造とし、アンテナ前面はエアーパージして、Fig. 9のように5 tonの試験転炉の炉口直上に水平方向から設置した。

まず、本レベル計の出力波形を観測すると、複数の反射波が検出された。これらはスラグからの反射だけでなく、炉壁やランスなどからの不要反射波が混在するためと考えられる。そこで、これらの不要反射波はいずれもスラグ面より手前の位置での反射波であることに着目し、複数の反射波の内でも最も遠方からの信号をスラグ面からの反射波と

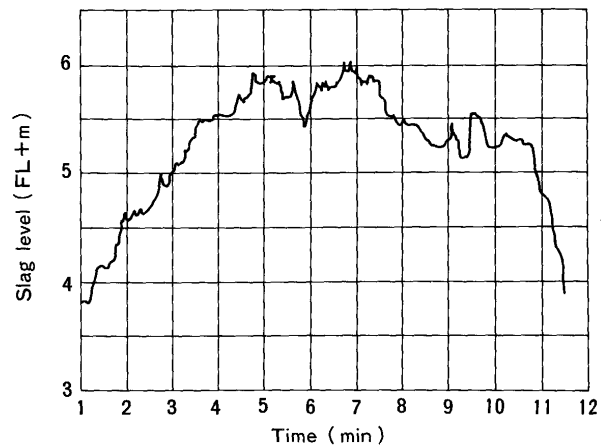


Fig. 10. A trend of slag level in a converter for one charge is measured by the level meter.

して認識するアルゴリズムを適用した。また、スラグレベル面は短時間で細かく変動する場合があるが、レベル変化の傾向を見易くするため、レベル測定値は15秒間の移動平均値を求めて出力した。この信号処理を施した測定例をFig. 10に示すように、操業に伴って変化するスラグレベルの変化が測定できた。高分解能M系列信号の採用により、複数の反射波が分離され、上記アルゴリズムが有効に作用したためと考えられる。

5. 結言

高分解能型M系列信号で搬送波を変調した連続波方式のマイクロ波レベル計を提案し、従来のM系列信号を用いた高感度で高精度なマイクロ波レベル計の特徴はそのまま継承し、さらに高距離分解能の性能が改善され、実用的なマイクロ波レベル計として完成度を向上させた。本レベル計の実機化は既に述べたように進んでいるが、今後さらに適用範囲を拡大し、操業の無人化、新プロセスの確立、コスト低減などの効果に対して計測分野から貢献してゆきたい。

文 献

- 1) 岩村忠昭：計測と制御，**29**(1990)，p.508
- 2) M.I.Skolnik：Introduction to radar systems 2nd ed., (1980)，p.81 [McGraw-Hill]
- 3) 白岩俊男，小林純夫：住友金属，**32**(1980)，p.401
- 4) 長棟章生，手塚浩一：計測自動制御学会論文集，**27**(1991)，p.1199
- 5) M.I.Skolnik：Radar Handbook，(1980)，p.20-19 [McGraw-Hill]
- 6) 手塚浩一，長棟章生：材料とプロセス，**6**(1993)，p.332
- 7) 長棟章生，手塚浩一：材料とプロセス，**3**(1990)，p.1279