

(技術資料)

# 製鉄・製鋼プロセスを対象としたマイクロ波レベル計の計測技術

## New Technology Development of Microwave Level-meter for Ironmaking and Steelmaking Processes



今井 孝\*  
Takashi IMAI

Shinko-EN&M has developed a unique and superior microwave level-meter for measuring the level of molten iron, molten steel and ore in particular environments of ironworks. The level meter has enabled us to supply appropriate measuring results to our customers even when the surfaces of molten iron and molten steel are wavy, or the surface of ore is rugged. This report describes two essential technologies of our microwave level-meter, as well as a summary of a common microwave level-meter.

まえがき = レーダ技術は、第二次世界大戦の時代に生まれた軍事技術であるが、その後、遠方の物体までの距離を測る技術として、航空、航海などの分野で広く用いられている。近年では、自動車の追突防止用センサとして、レーダ装置がトラックや乗用車に搭載されるほど一般的になってきた。

レーダ技術の基本技術である距離計測技術の応用としては、これまでも、船舶用液面レベル計（タンカーの油面レベル測定）などに広く利用されている。マイクロ波を応用した距離計測技術は日進月歩であり、現在では、パルス方式とFM-CW(Frequency Modulated - Continuous Wave : 周波数変調連続波)方式に大きく二分されて各方面で利用されている。

本稿では、(株)神鋼エンジニアリング&メンテナンス（以下、神鋼 EN&M）の納入実績から、製鉄所内における高炉鑄床、転炉などの特殊な使用環境への適用事例として、揺れ動く溶鉄/溶鋼のレベル測定の手間、測定対象物以外による測定阻害要因への対処法、の2点について、神鋼 EN&M の技術開発を紹介する。図1は、神鋼 EN&M 製マイクロ波レベル計の外観（試験風景）である。

### 1. マイクロ波方式のレベル計の概要と特徴

#### 1.1 マイクロ波レベル計の概要

製鉄所でのレベル計の適用では、次の ~ の環境に左右されない計測装置が要求される。

< 製鉄所内で要求される主な耐環境条件 >

- 高温環境
- 高圧環境
- 蒸気や粉塵が発生する環境

簡便なレベル計としては、超音波式やレーザー式があるが、前者の場合、空気を伝播媒体としているため、温度の変化が測定結果に大きく影響するために、この条件下では使用できない。また後者は光を用いる計測装置であるため、この条件下では光の透過が阻害されて測定ができない。

マイクロ波方式は、伝播する媒体を必要とせず、空中に漂う粉塵等の影響を受けにくい特性があるため、この影響をほとんど受けずに計測が可能である。

前記のとおりマイクロ波レベル計の測定方式は、大きく分けて次の二つの方式がある。一つは、マイクロ波をパルス状に発射して、そのパルスが戻るまでの時間を計測するパルス方式であり、もう一つは、FM-CW方式で

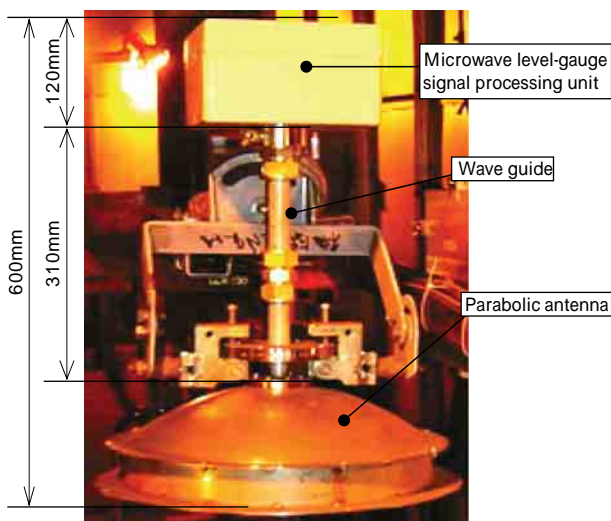


図1 神鋼 EN&M製マイクロ波レベル計外観  
Fig. 1 Appearance of Shinko EN&M microwave level-gauge

\* (株)神鋼エンジニアリング&メンテナンス 電気計装コンピュータ本部 電気計装部

ある。

パルス方式の場合、レベル計から得ることができる情報が計測結果の値（距離情報）のみであるため、測定対象物や周辺の構造物からの反射の状況を知ることが困難である。

それに対してFM-CW方式では、信号処理の中でスペクトル（後述）情報を得ることができるため、測定対象物や周辺の構造物からの反射の状況を把握することができる。これに関しては1.2節で詳細を述べる。

神鋼EN&Mでは、測定状況の把握能力が高く、測定精度を向上できるFM-CW方式を採用した。FM-CW方式のマイクロ波発振ユニットの基本構成、および神鋼EN&Mのレベル計の仕様（一部）は図2のとおりである。

次に、距離測定に関する原理を簡単に説明する。図3に示すように、周波数変調の幅を $F$  (Hz)、変調の周期を $T$  (sec)と規定する。送信波の周波数は時間とともに直線的に変化する。それに対して、物体により反射され受信される受信波は、物体までの距離に比例した遅れを生じて、同時刻における送信波と受信波の間には、距離に対応した周波数の差 $f$ が生じる。送信波と受信波をミキサにて混合した結果、 $f$ に相当する周波数成分を持つ信号が発生する。この信号をビート波と呼ぶ。

ビート波の周波数 $f$ と受信波の時間的遅れ $t$ （アンテナと対象物の間をマイクロ波が往復するのに要する時間）は、式(1)に従う。またマイクロ波の伝播速度は光速 $c$ （= 299,792,458 m/s）であるので、対象物までの距離 $d$ は式(2)により求められる。これより、レベル（距

離）を求めることは、ビート波の周波数を算出することに等しいことが分かる。

$$t = \frac{f}{F} \times T \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$d = c \times \frac{t}{2} \\ = c \times \frac{f \cdot T}{2F} \quad \dots\dots\dots(2)$$

1.2 神鋼EN&M製のマイクロ波レベル計の特徴

現実の設置状態では、マイクロ波レベル計の中で発生するビート波は単純なサイン波形のような場合はまれで、多くの場合はいくつもの周波数成分が混じり合った複合波である。図4にその例を示す。

周波数算出にあたっては、古くは「ゼロクロス」方式を使用していた。ビート波の振動周波数を求める手法として電子回路のみで構成でき、実用レベルの信頼性を確保できるものであった。原理は、ビート波がゼロラインと交差することを利用して、単位時間当たりの交点の数によって周波数を算出する方法であるが、ビート波がゼロラインと交点を持たないようなケースがあるために、周波数解析を誤ってしまうことがあった。

近年では、計算機性能の向上とプログラムの最適化などにより、FFT (Fast Fourier Transform 高速フーリエ変換) 演算が身近なものとなっている。

FFT演算の場合は、図4のように解析結果として周波数スペクトルを得ることで、計測状況や計測結果のエラー（ミス）などを把握することができる。神鋼EN&Mでは、2000年以降、このようなスペクトル画像をパソコンで確認できるシステムを構築してきている。このシステムによって、設置現場での調整作業や非正常状態が発生した場合などの計測状況を把握することが容易になった。レベル計モニタの画面上では、「受信信号（ビート波）」・「測定距離」・「スペクトル」・「測定軌跡」、などが

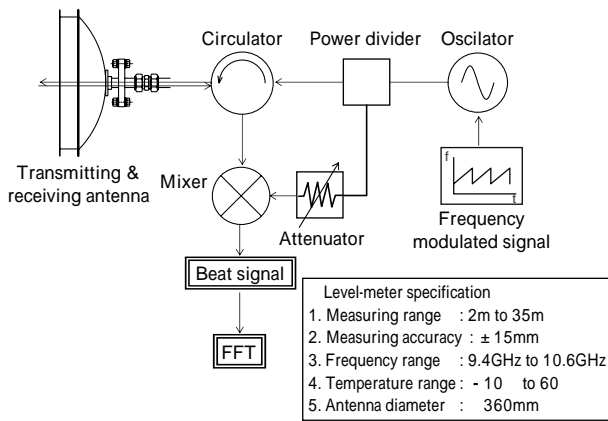


図2 FM-CW方式のマイクロ波発振ユニット基本構成  
Fig. 2 Basic construction of FM-CW microwave unit

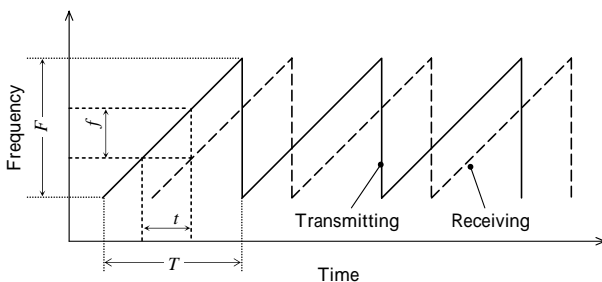


図3 FM-CW方式の測定原理  
Fig. 3 Measurement theory of FM-CW

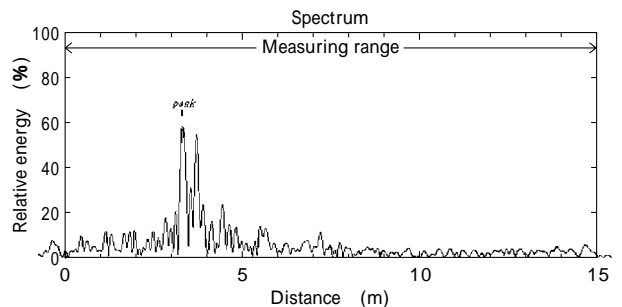
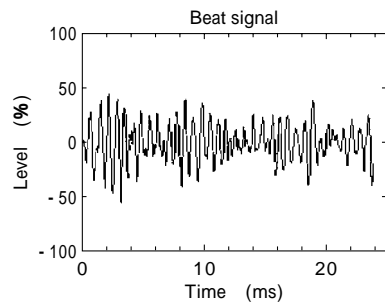


図4 ビート波とスペクトルの例  
Fig. 4 Examples of beat signal and spectrum

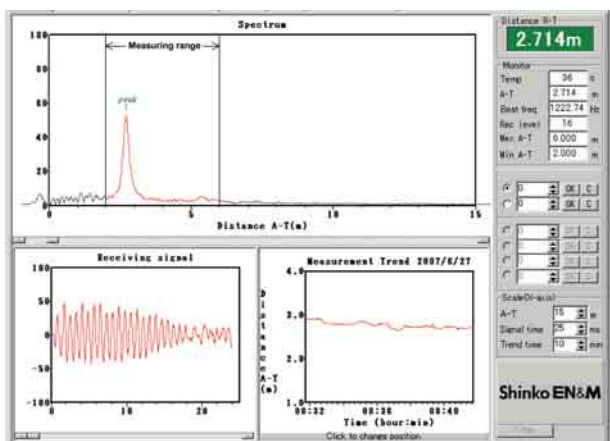


図5 レベル計モニタの画面の例  
Fig. 5 Monitor of microwave level-meter on PC

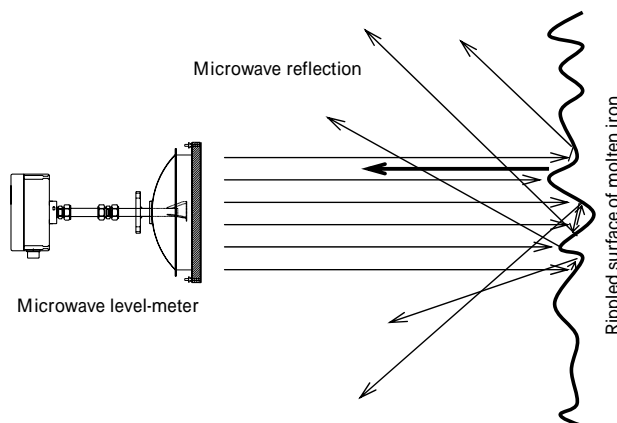


図6 揺れる溶銑表面の反射の様子  
Fig. 6 Reflection from rippled surface of molten iron

表示され、状況に応じた対応をとることが可能となった。図5に、レベル計モニタの画面の例を記す。

## 2. 揺れ動く湯面レベル測定における工夫

製鉄所でのマイクロ波レベル計の適用では、トビードカー（混銑車）が受銑する際の湯面レベル計測や、製鋼工場の転炉に溶銑が装入された直後の湯面レベル計測など、測定対象物の表面が揺れている状態での計測が要求される。

揺動する表面におけるマイクロ波は、図6のように、反射が散乱する状態であり、アンテナへ戻るマイクロ波のエネルギーが低下する場合が多い。このような状態の周波数解析を行った場合、スペクトルの最大ピークは変動しやすい傾向がある。測定対象の表面の高さが変動しているなかで、実操業で求められるデータは揺れ動く湯面レベルの平均値である。

神鋼EN&Mでは、スペクトルから測定結果を得る方法として、スペクトルの最大ピークを抽出することと定義して開発を進めてきた。つまり受信波に含まれる最もエネルギーの大きい周波数成分を抽出するというのである。神鋼EN&Mが開発したレベル計モニタ画面では、測定範囲内の最大ピークの上に「peak」と表示する仕組みになっている。

平均値を求める方法として一般的なものに、移動平均の手法がある。図7では、サンプリングデータの中に、10データにつき1程度特異点（unique peak）が含まれるような複合波のスペクトルの代表波形を示している。移動平均処理では、対象物からの反射による測定値と特異点が離れていれば離れているほど、平均値が特異点によって大きく影響を受けることになり、正確な平均値を求めることは困難である。

そこで、特異点の距離の値による影響をなくし、特異点のスペクトルの反射エネルギーによって測定対象物からの反射による測定値との相関関係を明らかにすることで解決する手法の一つが「波立ち処理」である。図8に模式的にこの手法の概要を示す。図8の上の部分は、時系列に並んだスペクトルであり、下の部分は、上図のス

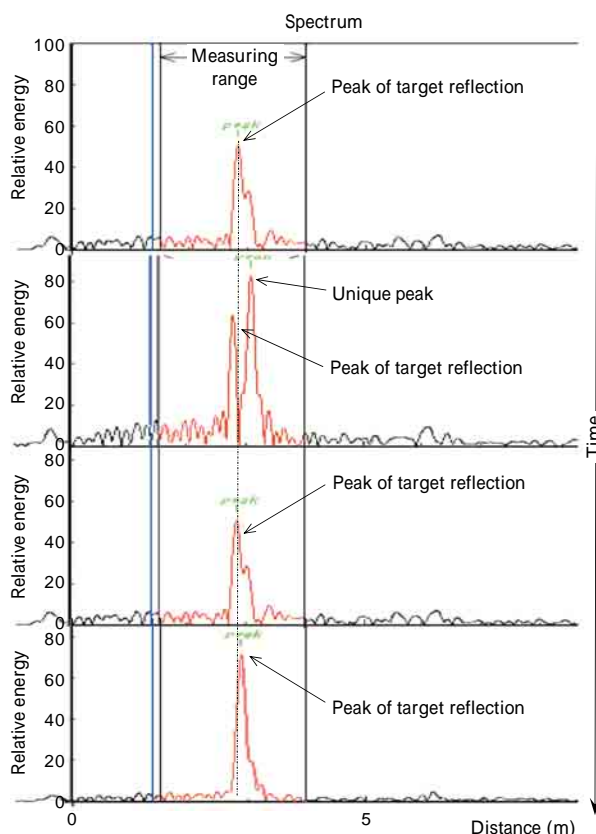


図7 測定対象からの反射ピークと特異点  
Fig. 7 Peak of target reflection and unique peak

ペクトルを時系列に加算した結果である。この図のように、10データにつき1~2回出現する特異点は、加算処理の中で影響力をなくし、処理後のスペクトルでは特異点が出現しないのである。

実際、測定対象の表面が軽石のように多孔性の状態でマイクロ波を吸収しやすい湯面、鉄スクラップなどの金属塊が混ざっているようなマイクロ波の反射が不規則になる湯面、鉱石が堆積しているようなマイクロ波の反射に変化が起こりやすい場合などにおいて、波立ち処理が効果的に機能している。

比較のため、移動平均処理を施した結果（図9）と波立ち処理を施した結果（図10）を示す。図中、丸印で示した部分は特に計測結果が異なる部分である。使用して

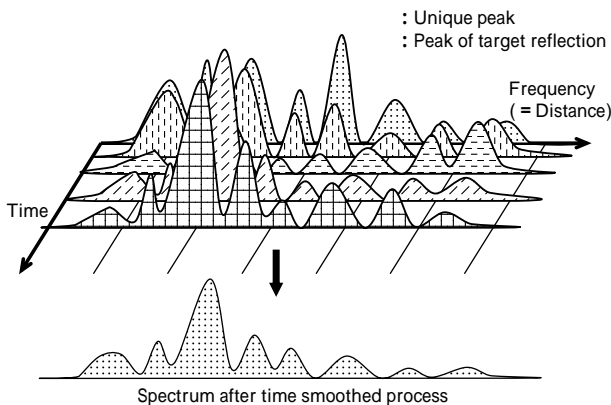


図 8 波立ち処理の方法  
Fig. 8 Signal processing of time smoothed method



図11 溶鋼鍋内の湯面(左), 堆積コークス(右)  
Fig.11 Photo of molten steel (left), cokes (right)

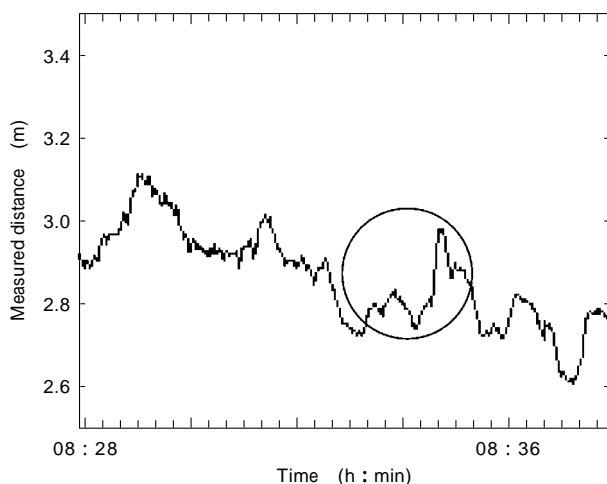


図 9 移動平均処理による測定軌跡  
Fig. 9 Trend of moving averaged data

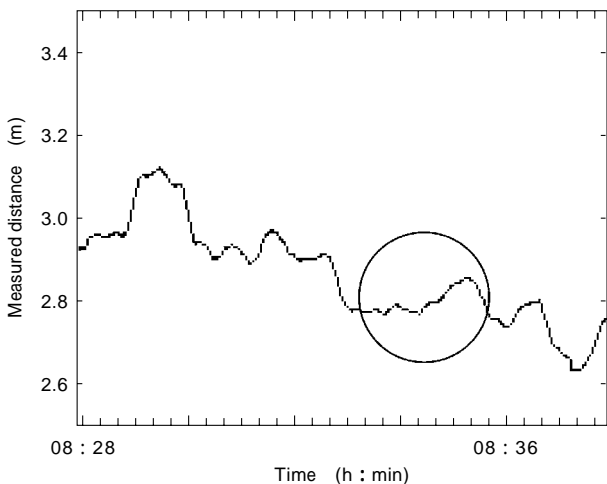


図10 「波立ち処理」後の測定軌跡  
Fig.10 Trend of time smoothed processing

いるデータ(ビート波のデータ)は同一であるが、処理方法が異なるため、トレンドグラフに表現されている測定軌跡が異なる例である。

この例で見ると、製鉄プロセスにおける作業上の要求としては、瞬間的な変化ではなく、測定対象のレベルを代表する値を計測結果として出力することである。測定対象物の表面の状態における参考として、溶鋼鍋内

の湯面と堆積コークスの写真を示す(図11)。

### 3. 不要信号の除去に向けた工夫

一般に、マイクロ波は波長が短いため、進行に伴う拡がり(広がりが小さいことが特徴としてあげられる。その拡がりの程度は、使用する波長やアンテナの大きさによっても異なるが、神鋼 EN&M が開発したパラボラアンテナの場合、10m 先で直径約 1m の円に相当する拡がりとなる。この拡がりの影響により、測定対象物よりも手前にある構造物がマイクロ波の拡がりの範囲の中にあると、そこからの反射波が測定対象物からの反射波よりもエネルギー的に大きくなる場合があり、測定対象に対するノイズとなって目的信号に関する SN 比(Signal to Noise Ratio: 信号対雑音比)が低下する原因になる。

実際に観測した結果を示しているのが図 12(上)である。0m 付近にあるピークの集団は、装置設置場所周辺の構造物から反射されたものであり、これらのピークの最大値は測定対象物から反射されたピークよりも大きく、計測条件としては望ましくない状態である。

ノイズの除去手段としては一般に、必要な周波数帯域のみを通過させるフィルタ回路を適用することが多い。フィルタ回路も、高次数型のフィルタ回路を使用することで周波数選択特性を鋭くし、狙いの周波数近傍までのノイズを除去することが可能になる。神鋼 EN&M では、最大 8 次の高域周波数通過フィルタ (HPF: High Pass Filter, 所定の周波数よりも高い帯域を通過させるフィルタ) 回路を適用し、計測条件の改善を行ってきた。さらに、HPF の通過帯域周波数を任意に選択することができる回路構成によって、マイクロ波レベル計の設置場所を問わず、いかなる場合にも的確にノイズ除去を行うことができるようになった。また設置場所の条件によって計測結果が異なっていた点も改善することができるようになった。

図 12(下)は、HPF の適用後にノイズが低減された結果を示している。SN 比が改善した結果、測定対象物が

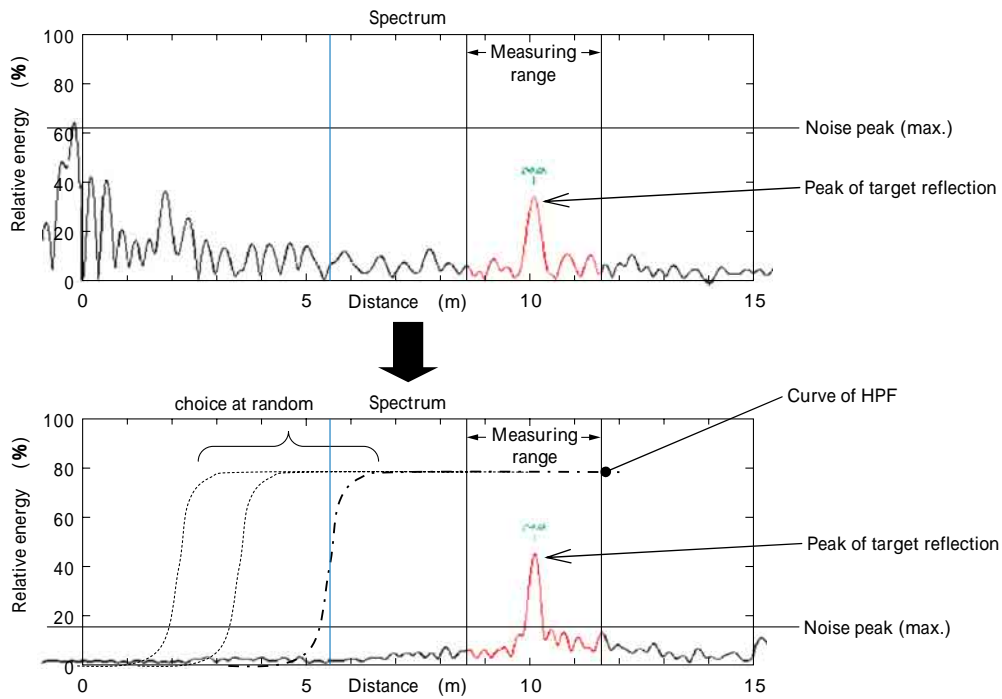


図12 HPF 適用前(上), HPF 適用後(下)  
 Fig.12 Before applying HPF (top), after applying HPF (bottom)

ら反射されたピーク先の鋭度が向上していることも見逃せない改善点である。

むすび = 本稿で紹介した技術は、神鋼 EN&M 製マイクロ波レベル計の高性能化開発において、種々の問題解決を経て実現してきたものである。今後さらなる改善・改良を目指して機能開発を推進する所存である。