



特集記事・3

ここまで来た鉄鋼の計測・制御・システム技術

# マイクロ波による悪環境下における 距離計測技術

Microwave Measurement Technology for Distance under Unsuitable Surroundings

今井 孝

(株) 神鋼エンジニアリング&メンテナンス

Takashi Imai

## 1 緒言

日本が高度成長期を迎えた頃、大型製鉄所や石油コンビナートでは、大量の粉塵等のダストやガスを大気へ放散させていた。その結果、光化学スモッグ、四日市ぜんそく、等の未曾有の環境汚染問題を引き起こした。官民一体となって、速やかに環境汚染の防止に努め、その後公害問題も影を潜めた。製鉄所では、煙突から出てくるものは水蒸気だけといえる姿を実現し、日本の全ての製鉄所が環境に優しくなった。鉄鋼プロセスの各現場でも同様に、労働環境の改善が実現され、そこで従事する作業者は直接ダストやガスに触れることはほとんどなくなった。しかし、各プロセスにおいては、金属酸化物や原料の微粉などがダストとなって反応炉周辺を覆う。脱珪/脱磷/脱炭等の溶銑/溶鋼処理による反応炉内の湯面の揺れや、注湯による鍋内の湯面の揺れなど、常時湯面が揺れている状態が発生する。湯面レベル計測においては、ダストや湯面の揺れなどの悪環境下であっても、各プロセス制御において正確なレベル計測が要求される。

過去30年に亘り鉄鋼プロセスでは、波長が10~30mm程度のマイクロ波を応用して、ダストの影響をほとんど受けないレベル計測を行ってきた。その中でも、最近の半導体技術の向上に伴い、高性能マイクロプロセッサの汎用化などのおかげで、リアルタイム性を重視した観測モニタの実現や計測に対する外乱を除去する技術を、比較的安価に実現できるようになってきた。その具体的な計測技術を事例と共に紹介していく。

## 2 鉄鋼プロセスにおけるレベル計測のニーズ

高炉から出銑された溶銑は、トールカー（混銑車）や溶銑鍋などの容器に一時的に溜め、次の工程へ運搬される。

ここでは、溶銑の温度が1,500℃以上であるため、漏銑を防止する安全面と放熱を抑えて大量に運搬する効率の面から、運搬作業で許される湯面高さの上限まで溶銑を溜める作業を行いたい。

次工程の転炉操業では、吹錬用のメインランスと湯面との間隔、及び湯面プローブの浸漬深さを制御することが重要であるので、転炉内の湯面レベル計測を精度良く行いたい<sup>2)</sup>。

二次精錬工程においては、脱ガス処理などの処理用浸漬管の浸漬深さを制御することが、処理効率と品質の面で重要である。

また、生産管理の面では、溶銑鍋及び溶鋼鍋内の重量管理と共に、湯面レベル管理を行い、耐火物の損耗状況を考慮した生産管理を行いたい。

このように、鉄鋼プロセスでは、レベル計測が安全面や品質面、及び生産管理面で重要な要素となっている。

## 3 マイクロ波による非接触式の距離計測技術

湯面レベル計測を行う計測手法としては、非接触式が望ましい。接触式の計測装置では、検出部と湯面が接触することでレベル計測を行うため、接触部の中で最初に触れた部分を計測結果とする場合が多く、揺れる湯面を正確に測定することが難しい。また、湯面と接触する部分は消耗するため、計測の都度その部分の交換が必要であり、ランニングコストが大きくなる要因となる。

非接触式のレベル計測装置としては、レーザー距離計のような光学式と、超音波距離計の音波式が一般的であろう。鉄鋼プロセスで要求される湯面レベルの計測では、粉塵やヒューム等のダスト及び水蒸気に対して、レーザー距離計のような光学系の計測装置では測定対象面からの反射が十分得られず計測が困難である。また、超音波距離計のように空

気を伝播媒体とする音波式の場合は、測定対象物周辺の温度分布が一律でないことから、測定精度を確保することが困難である。

航空関連で使用されるレーダー技術以外では、マイクロ波による距離計測はあまり一般的でないが、鉄鋼プロセスで発生する粉塵、ヒューム等のダストや水蒸気に対して、波長が10mm~30mm程度のマイクロ波は影響を受けにくく、電磁波の伝播速度は温度の影響を受けないため、精度良く湯面レベルを計測するためにはマイクロ波の適用が望ましい<sup>2)</sup>。

マイクロ波による距離計測として主なものは、パルス式とFM(周波数変調)式である。

パルス式とは、マイクロ波をパルス状に発信し、対象面からの反射波の遅れ時間を計測して距離を換算するものである。短距離計測時には、ナノ秒を正確に計測できる技術が必要であるため、これまでは実現することができなかったが、近年の半導体技術の向上により安価なパルス式マイクロ波距離計が使用されるようになった。

一方、FM式は、周波数を変調させたマイクロ波を発振し、送信波と受信波の周波数差から距離を算出する計測方法である。

FM式マイクロ波距離計の機能ブロック図をFig.1に示す。

マイクロ波発振ユニットに対し、CPUから変調用制御信号をVCO (Voltage Controlled Oscillator、電圧制御発振器)に入力すると、変調制御信号に応じた変調波が発振される。

周波数変調の例をFig.2に示す。Fig.2の横軸は時間、縦軸は周波数である。送信波は周波数変調されて連続的に変化しているため、受信波を受信するまでの時間を $\Delta t$ とすると、送信波と受信波の間に時間 $\Delta t$ に相当する周波数差が生じることになる。つまり測定対象物までの距離の2倍に相当する距離が、 $\Delta t$ に相当する周波数差である。周波数差の信号は、送信波と受信波を混合検波すれば、両波形のうなり成分をビート波として得ることができる。このビート波の周波数を分析すれば、Fig.2の相似図形の関係から、得たい距離が算出できる方式である。このことから、技術的完成度を高く設

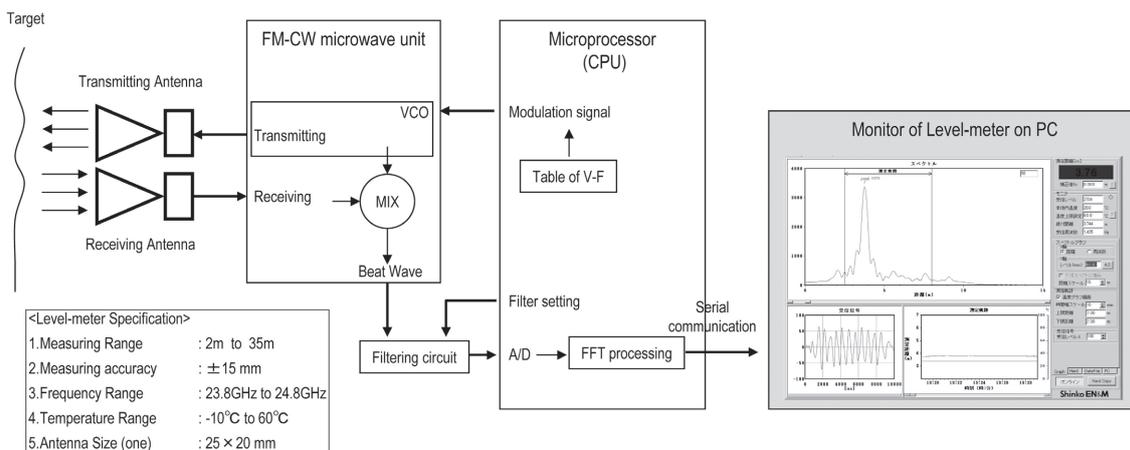


Fig.1 Block diagram of FM Microwave level-meter

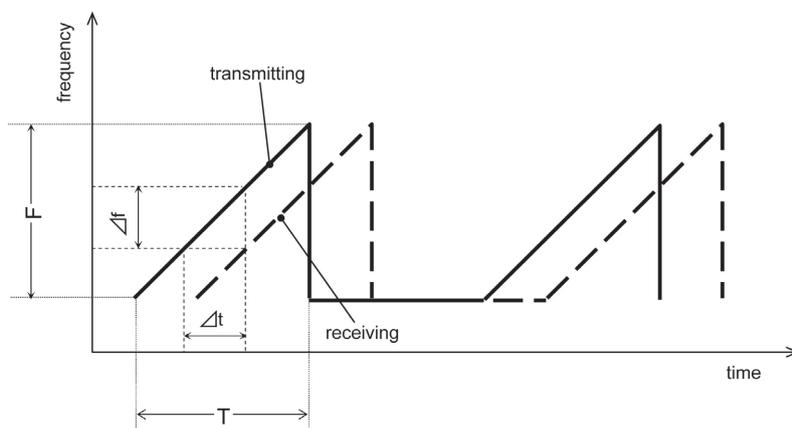


Fig.2 Sample of FM-CW

定できるFM式マイクロ波距離計の開発をスタートさせた経緯がある。現在も尚FM式距離計にこだわる理由は、周波数解析の手法を改良することが可能で、距離計測精度を向上できるからである。開発当初は、汎用CPUの性能が低く、周波数解析手法としてFFT (Fast Fourier Transform) 処理を適用できず、代わりにゼロクロス法を採用していた。この方法では周波数スペクトル分析ができなかった分、観測状況を客観的に把握することが困難であった。しかし、半導体技術の向上と共に汎用CPUを利用してFFT処理を実現することが可能となった。その結果、周波数スペクトル分析が可能となり、観測状況を客観的に把握することができるヒューマン・マシン・インターフェース (HMI) を実現できた。

## 4 FM式マイクロ波距離計の特長

湯面レベル計測を中心として、これまでFM式マイクロ波距離計 (以後、FM式マイクロ波レベル計) の開発を行ってきた。現在も改良を繰り返し継続しているが、最近のレベル計の特長として、次の3点をあげる。

- (1) 揺れ動く湯面レベル測定における工夫
- (2) 不要信号の除去に向けた工夫
- (3) パソコン用アプリケーションとしてのHMI

### (1) 揺れ動く湯面レベル測定における工夫<sup>1)</sup>

製鉄所でのマイクロ波レベル計の適用では、高炉におけるトーチドカーが溶銑を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計測を要求される。

揺動する表面におけるマイクロ波の反射は、Fig.3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。このような場合、周波数解

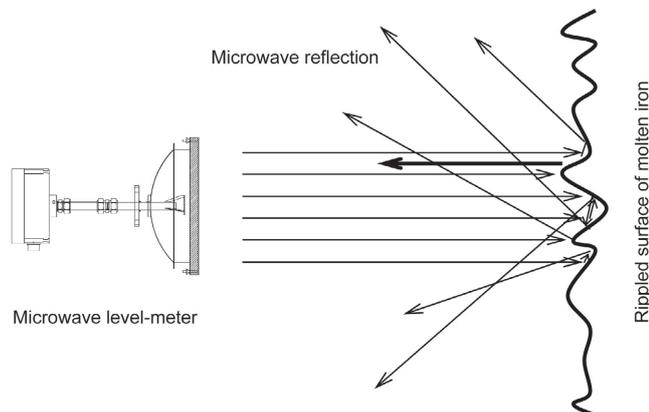


Fig.3 Reflection from rippled surface of molten iron

析を行った結果は、周波数スペクトルの最大ピークが変動し易い傾向がある。実際には、測定対象の表面の高さが変動しているのであるが、操業で求められるデータとしては、揺れ動く面の平均値である。

周波数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開発が進められてきた。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ことである。開発されたレベル計モニター画面では、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。Fig.4では、サンプリングデータの中に、10データにつき1回程度特異点 (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

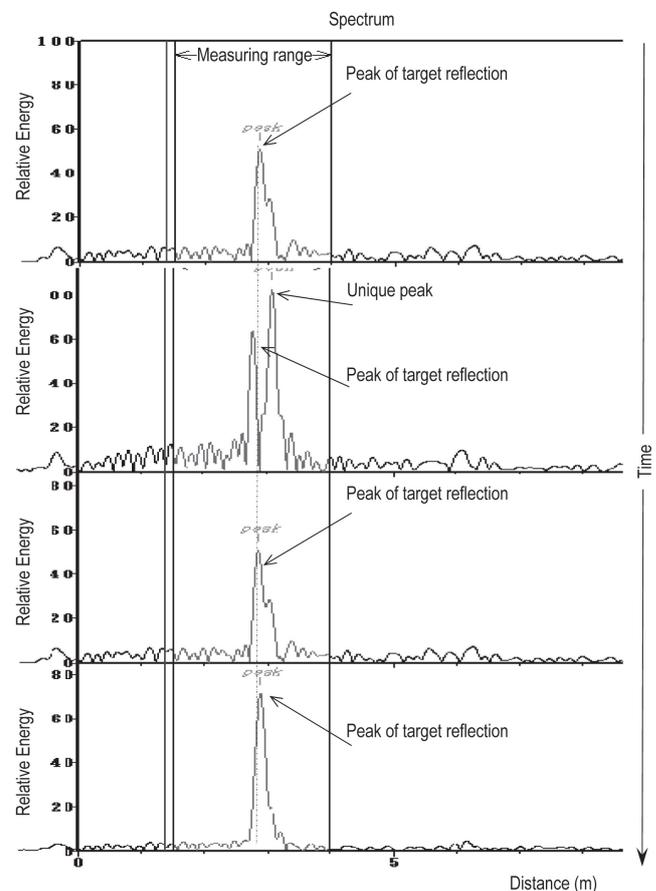


Fig.4 Peak of target reflection and unique peak

手法の一つが「波立ち処理 (time smoothed method)」である。Fig.5には、模式的にこの手法の概要を示す。

Fig.5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。

実際に、①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や、②鉄スクラップ等の金属の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や、③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。

比較のために、移動平均処理を施した結果と波立ち処理を施した結果を示す (Fig.6参照)。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、

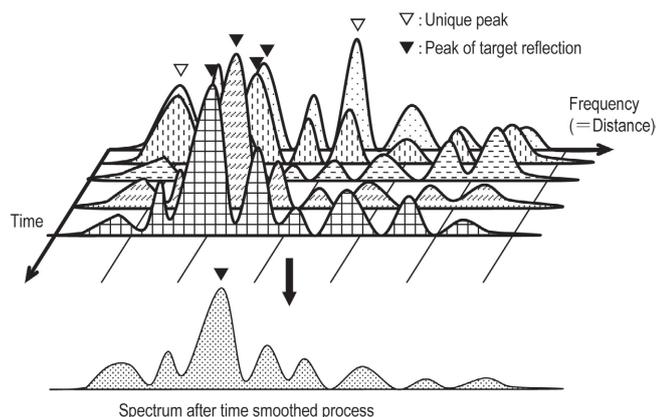


Fig.5 Signal processing of time smoothed method

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できる値を計測結果として出力することである<sup>1)</sup>。

(2) 不要信号の除去に向けた工夫<sup>1)</sup>

一般に、マイクロ波は、波長が短いため、進行に伴う拡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、これまで開発されてき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り、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Fig.7 (上図) である。

Fig.7 (上図) のとおり、0m付近すなわち周波数成分の低い範囲にある集団のスペクトルは、装置設置場所周辺の構造物から反射されたものであり、これらのスペクトルの中でピークの最大値が、周波数成分の高い範囲にある測定対象物から反射されたスペクトル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。

FM式マイクロ波レベル計において、周波数成分の分析がすなわち距離測定となるため、測定対象物以外からの周波数成分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。言い換えると、測定対象物までの計測距離範囲のみを透過させて、それ以外の部分の成分を除去することである。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

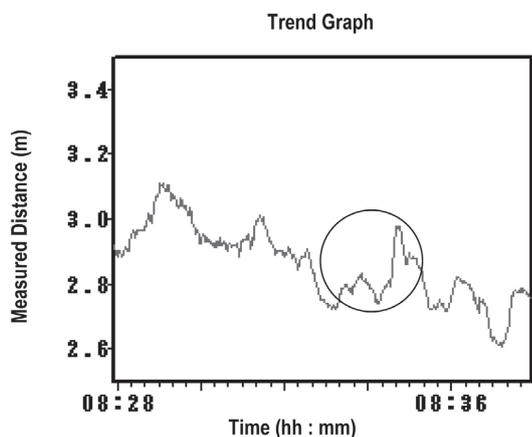


Fig.6-1 Trend of moving averaged data

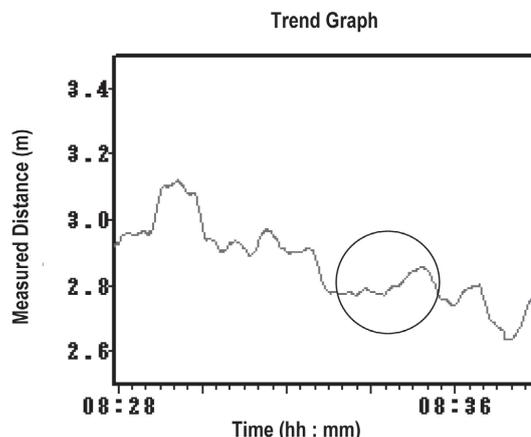


Fig.6-2 Trend of time smoothed processing

選択特性を鋭くして急峻な除去特性を実現し、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。これまで最大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)、すなわち遠距離計測用フィルタ回路を適用し、計測条件の改善が行われてきた。

更に、HPFの通過帯域周波数を任意に選択することができ回路構成にて、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り、設置場所の条件によって計測結果が異なっていたものを、どの場所の結果も等しく改善することができるようになった。

Fig.7 (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比が改善した結果で、測定対象物から反射されたピーク先鋭度が向上していることも見逃せない改善点である<sup>1)</sup>。

計測現場での調整に際し、現場担当者が容易に操作でき、且つこのフィルター処理を任意の周波数に設定できるよう、これまで汎用パソコンでFM式マイクロ波レベル計と通信ができる専用アプリケーション (レベル計モニター兼パラメータ設定用) が開発された。詳細に関しては、(3)の説明に譲る。ここではフィルター処理を任意の周波数に設定できる工夫を紹介する。

計測現場ごとに異なって生じる計測上の障害反射成分を、設置現場で容易に除去する目的で、専用アプリケーションの

操作により任意の周波数成分を除去するフィルタ回路を設けた。スイッチド・キャパシタ・フィルタ回路を応用することで、観測モニタのスペクトル画面上的操作と連動し、フィルタリングが可能となる仕組みである。従来の専用ICでは、任意の周波数設定を行うと高周波ノイズが発生し、微小信号処理に際しノイズ成分が周波数分析に影響した。この点を改良し、高周波ノイズは発生せず、任意の周波数に対するフィルタリングを可能とした。

(3) 現場調整における工夫

設置現場での計測装置の調整では、調整作業者が計測 (観測) 状況を簡単に把握できること、計測を阻害する要因が容易に想像できること、阻害要因に対する対策を容易に実施できること、などが重要である。

従来の現場調整では、熟練の調整作業者が、周波数解析装置 (FFTアナライザー等) を装置設置現場から離れた信号処理盤などに持ち込み、解析装置を見ながら計測状況を想像するやり方であった。熟練の作業者でなければ、FFTアナライザーの表現する内容を正確に読み取ることができず、計測阻害要因の判断が困難であった。

FM式マイクロ波レベル計とパソコンとを直接通信できる機能を持たせ、計測装置の設置現場へノートパソコンを持ち込むことで、設置現場で簡単に観測状況と計測状況を同時に把握できる環境を整えた。Fig.8は、このシステムのパソコン画面のモニター例である。更に、最近のノートパソコンではバッテリーによる長時間駆動が可能なおかげで、設置現場で

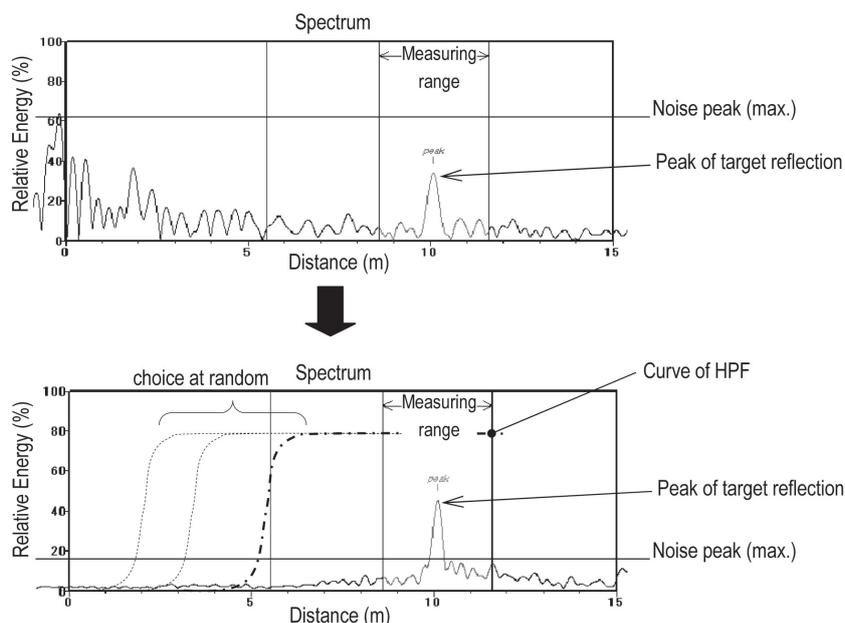


Fig.7 Before applying HPF (above), after applying HPF (below)

の観測に際して交流電源の仮配線工事が不要なため、簡便に現場での確認作業を行うことが可能となった。

また、FM式マイクロ波レベル計を複数台(8~10台)使用する高炉トーチードカー用湯面レベル計では、「集中監視装置」として複数台のレベル計を同時に状態監視することが可能なシステムもあり、現在納入するマイクロ波レベル計は全てこのHMIを有している。多くの設置環境では、人が現場に容易に近づくことができないため、レベル計との通信用配線を計器室や電気室内に設けることで、遠隔の場所からマイクロ波レベル計の状態を把握することができるシステムを提供している。

更に、レベル計モニタには、観測データを電子データとして保存する機能を有しており、その電子データは専用アプリケーションの上で実測同様に再生することが可能である。これにより、オフラインで現場の現象を確認でき、適宜パラメータの選定をより確実に実施できる。前述の「波立ち処理」も、このデータ再生機能を使うことで実際の効果の確認ができ、処理係数の最適設定が可能である。

## 5 結言

FM式マイクロ波レベル計は、FM方式のマイクロ波距離計測技術を基礎に、周波数分析後の周波数スペクトルにおける計測精度の改善技術、アナログ回路における信号処理技術、そして、設置現場での固有の計測阻害要因の分析ツールの開発を行ってきた結果、高炉鑄床トーチードカー(溶銑鍋)溶銑レベル、高炉炉頂ホッパ原料レベル、転炉溶銑レベル、溶鋼鍋内湯面レベル、等の多くの納入実績を積むことができた。

鉄鋼プロセスにおけるマイクロ波距離計測技術は、実用化されて30年以上になるが、まだまだ改良の余地は残されている。微弱な反射対象に対する高感度化、複数反射の低減、など、今後更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。

### 参考文献

- 1) 今井孝：R&D 神戸製鋼技報，57 (2007) 3, 18-20.
- 2) 川田豊，真鍋知多佳，小林明，坪根巖，山名寿：鉄と鋼，76 (1990) 11, 277-278.

(2010年12月1日受付)

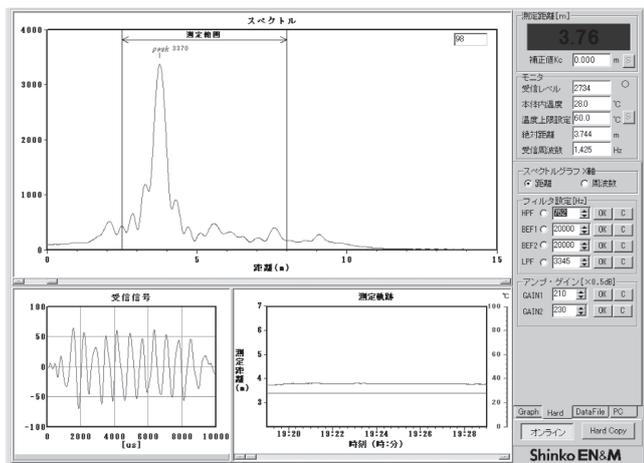


Fig.8 Sample monitor of Microwave Level-meter on PC