

電波センシング—電波による非破壊探査—

RADIO SENSING—NONDESTRUCTIVE
DETECTION BY RADIO WAVE—

鈴 木 務*

By Tsutomu SUZUKI

まえがき

電波はラジオ、テレビや各種通信機などわれわれの日常生活と結びついて広く利用されているが、電波を計測に利用する分野はレーダーなどの一部の利用は知られているが、可視光（レーザー）や赤外線の利用に比較すると一般にまだ普及していない。最近になってリモートセンシングや地下探査などに電波センシングが有用なことが明らかになり、非通信分野での電波利用について人々の関心が広まってきた。

本論文は電波のもつ特性を知り、これらの特性を利用したいいくつかの電波センシングの実用例について紹介する。

1. 電波とその特性

可視光、赤外線、マイクロ波、X線などはすべて電磁波と呼ぶ。一般に電波というとき光領域より波長が長い電磁波のことで、図-1のミリ波から長波 LF までの波長帯の呼び名である。電波帯のすべてを計測用に利用で

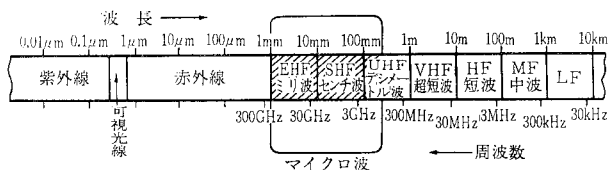


図-1 光と電波の周波数帯と波長の関係

きるが空間分解能、利用距離、電波干渉およびアンテナなどの装置の実現性から波長の短いマイクロ波や超短波帯が主として用いられる。電波によるセンシングの特色は、

利 点：

- ① 広域を短時間で非破壊計測が可能となる。
- ② 周波数による相違（分光特性）を特性として利用できる。
- ③ 物体内部への透過性が大きいので雲、雨、粉塵を通して計測できる。地中や水中の探査も可能となる。
- ④ コヒーレント（位相同期）情報や偏波特性の利用が容易となる。
- ⑤ エネルギーの保存や移動が容易となる。
- ⑥ 取扱いが容易で安全である。

欠 点：

- ① 波長が長くなる程空間分解能が悪くなる。
 - ② アンテナ部が大形となる。
 - ③ 電波干渉を受け易い。
 - ④ 送信電力が大きくなると無線局の免許と取扱い者に資格が必要となる。
 - ⑤ 利用できる周波数帯が有限であり、電波の割当が困難となる場合が多い。
- などが考えられる。

表-1 に光と電波によるセンシングの長所と短所を比較して示す。光は雲や雨に伝搬を妨げられるが、電波は透過できる。空中から地中の埋設物探査や衣服を通して人体の心拍動や呼吸などを計測できる電波医用センサーなどは、電波の特色を有効に利用した非接触計測器である。

表-2 に電波センサーに利用される方式と主

* 工博 電気通信大学教授 電気通信学部応用電子工学科
(〒182/東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1)

表-1 光と電波によるセンシングの長所と短所

区 分	電 波	光 波	
長	雲、雨、雪など伝搬途中の影響	影響が少ない、波長が長いと全天候型となる。	影響が大きい、特に可視光は測定不能となる。
	昼夜の区別	昼夜間ともに観測可能。	夜間は利用不能（レーザーレーダーは使用可能）
	電波と物標との共振現象の利用	共振を利用して地面の凹凸、波波の高さ、気体ガスの分析が可能。	波長が短すぎて共振現象が利用できない。
所	偏波の利用	偏波面の相違を利用して物標の識別が可能。	円偏波面の利用がハード的に困難。
	物標内部の透過性	物標の内部に浸入するので他中の含水率、海中の塩分濃度、氷雪の厚さなどが測定できる。	物標の表面の性質のみが測定される。
短	画像の分解能	高い分解能を得るのが困難である。	高分解能の画像が得られる。
	装置の大きさや重量	装置（特にアンテナ）が大型で重量、取付けが困難。	装置の小型、軽量化が容易である。
	色による物標の識別	多周波センサーの製作が困難であり、グランドトゥルースとの対応が不明である。	マルチスペクトルセンサーにより物標の識別が可能である。

な用途を示す。測定対象までの相対距離・速度からその大きさ、形状さらに材質（物理定数）を計測する方向に研究が進められている。

レーザーや赤外線の利用に比較すると、媒質中での吸収減衰が少ないので環境条件の悪い場所での利用に適する。音波や超音波センサーでは接触形が多く利用されている。音波は空中での減衰が大きく、雑音や風などの影響が大きいため、非接触形音波センサーは一部の近距離用のみ利用されている。しかし、海水中のセンシングでは電波の減衰が大きく、逆に音波が優れている。放射線センサーは鉄板も透過するが取扱いが危険である。電

波センシングの特色を利用すれば、これらの他のセンシングでは困難とされる分野にまで利用が拡大できる可能性がある。

2. 電波による非破壊探査の応用

(1) リモートセンシング

電波をリモートセンシングに利用すると、大気中の雲、雨、水蒸気の減衰が少なく、太陽光線が不要なので全天候形センシングが可能となる。

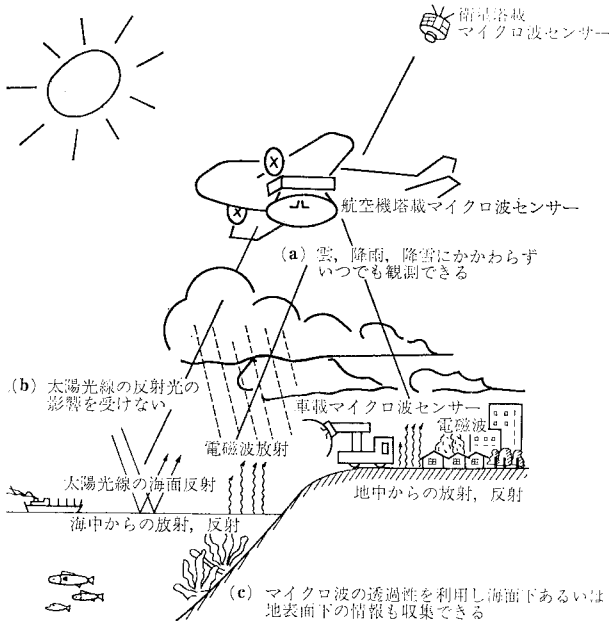
図-2 にリモートセンシングの概念図を示す。人工衛星や航空機から雲や雨を通して地球の観測ができる。車載形や船舶塔載形のセンシングも行われている。電波センシングには、観測対象物体からの熱放射エネルギーを電波として受信する受動形センサー（放射計と呼ばれる）と、レーダーのように対象物体に電波を放射し、物体からの反射波を受信する能動形センサーに分類される。

図-3 は受動形センサーの原理図で、温度 T_0^K の物体から放射される輝度温度 ϵT_0 を熱雑音電波として高感度の受信機で検出する。 ϵ は放射率と呼ばれ、周波数、偏波面、物体の形状、電波の放射方向、物体の材質（電気的定数）などの関数となる。 ϵ が予め知られていれば物体の実温度 T_0 が測定できる。一般には複数の周波数、偏波面、アンテナ入射角などの組合せによりその未知要因を取除く必要がある。

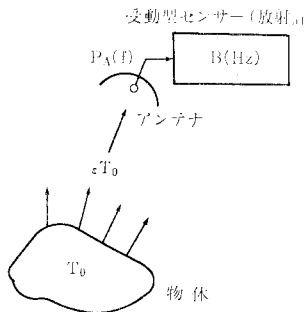
図-4 は、ニンパス5号衛星搭載のマイクロ波放射計による南極の温度分布から結氷状況を図形として表示したもので、冬と夏の状況が比較してある。冬になると周

表-2 電波センサーに利用できる主な方式

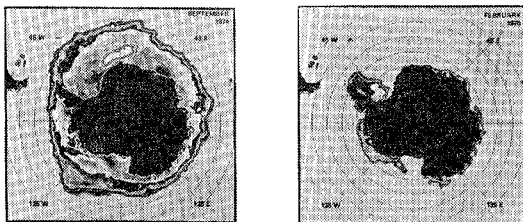
名 称	変 調 形 式	用 途	特 徴	
アクティブセンサー	CWレーダー CW（一波）ドプラー 2周波ドプラー 2周波2位相レーダー FMCW レーダー 多周波レーダー	相対速度 相対速度、距離 相対速度、距離 相対速度、距離 対象物の形状、物理定数	簡易、移動体の速度のみ検出 移動体の速度と距離を検出 静止物体の距離も検出 三角波、正弦波で変調 複数の周波数、偏波の組合せ	
	パルスレーダー	単純パルス変調 パルスドプラー ベースバンドパルス	距離、距離変化 距離、速度、物理定数 距離、形状	速度検出能力が劣る 表面形状、波浪、風向 キャリアのないパルス波
パッシブセンサー	ラジオメーター（放射計）	ディックレシーバー（多数波形）	放射輝度温度	温度、含水率、塩分濃度、大気分析、風浪
誘導型	共振器	インピーダンス変化	近接センサー、厚み計	非常に近い物体の計測用
透過型	吸収	物標中での吸収変化	含水率、厚み計、異物検出	金属体には使用できない
ビーコン	2次レーダー	トランスポンダー型 ハーモニックレーダー型 自動焦点型	特定物標のみが応答 同上、パッシブ型 高能率反射器、ECM	物標で受信した電波を送り出す 無給電ダイオード反射器使用 電波到来方向に物標から送り出す
特殊センサー	パルス圧縮	チャープ FM 変調 符号化パルス変調	距離高分解能計測 同上	S/N も向上する、タイムサイドローブあり M 系列、Barker 符号など使用
	ビーム圧縮	換算（相関）型アレイ サイドロッキング型アンテナ	高分解能レーダーイメージ 同上	アンテナビーム幅が約半分になる アンテナが物標の移動による SAR



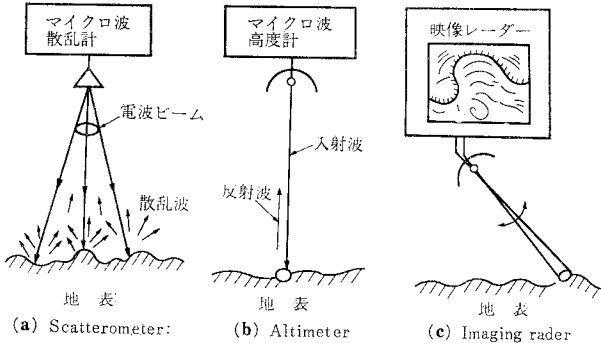
図—2 電波によるリモートセンシングの概念図



図—3 受動型センサーの原理図



冬 夏
図—4 マイクロ波放射計で観測した南極の氷



図—5 能動型センサーの原理図

辺部に広がる一年氷の部分が区別できる。夏になっても残っている多年氷と一年氷とは水中の塩分濃度の違いが放射輝度の相違として検出できるので、マイクロ波では区別ができる。航空写真ではこのような区別が検知できない。

図—5 に三種類の能動形センサーの原理図を示す。マイクロ波散乱計は、地表に向けて発射された電波が波のような地表面の凹凸によって散乱され、戻ってくるエネルギーが小さくなることを利用して波浪や海上風などを計測するセンサーである。マイクロ波高度計は電波の往復時間を正確に計測するセンサーで、人工衛星の高度が既知ならジオイドや海流などの海洋トポグラフィ計測ができる。現在 1000 km の高度の衛星から 10 cm 以内の誤差で海洋の凹凸が計測されている。映像レーダーは通常のレーダーと同様に地表のレーダー映像を画かせるセンサーで、合成開口レーダー技術により空間分解能を向上して可視光とほぼ同等の高分解能が

得られている。可視光、赤外線と異なる電波スペクトル映像が得られるので地質調査、資源探査、海面下流速分布の観測などに広く利用されている。

図—6 は SEASAT 衛星搭載のマイクロ波高度計による海面の凹凸図で、日本海溝などの海溝部で海面が凹み、ハワイ沖や大西洋中央などの海底山脈に沿って海面が凸状となっている。これらは地球の重力分布によるもので海底 1 km ごとに約 1~2 m 海面高が上下することが観測された。



図—6 SEASAT 衛星マイクロ波高度計による海面の凹凸

わが国では、海洋観測衛星 MOS-1 を昭和61年に打上げる準備をしている。MOS-1 には可視・赤外放射計とマイクロ波放射計 (23 と 31 GHz の二周波数) が搭載される。マイクロ波放射計は大気中の水蒸気と雲水量の観測に利用される予定である。昭和 60 年代の中期に資源観測衛星 ERS-1 が打上げられる。搭載予定のわが国初の合成開口レーダーに期待がかけられている。

(2) 地中・水中の電波探査

電波の透過性を利用して地中や水中(淡水)の

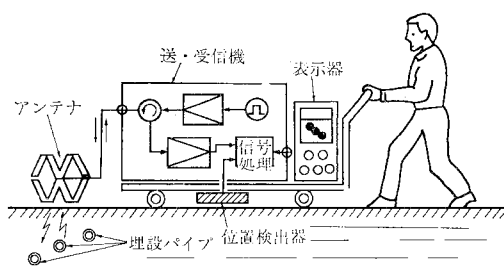


図-7 地中探索レーダシステム

探査が可能となる。図-7 に地中探索レーダシステムの原理図を示す。数 ns 以下のきわめて細かいパルス電波をアンテナから地中に発射すると、地表で約6割の電波が反射されるが残りの4割が地中に侵入して地中埋設物や地層境界面で反射され再び地上に戻ってくる。受信された電波は大きな減衰と波形の崩れを生じているので増幅器と信号処理回路により補正して地中断面の映像を得る。

地中探索レーダの探知距離、分解能などの性能は発射電力、パルス幅、アンテナ、土質、含水率、地層構造などにより相違する。海水のように塩分の多い地下水があると探知能力は著しく短縮されるが砂漠のような乾燥土質中では100m以上も深い地中探査が可能となる。ヘリコプターや航空機搭載形の地中探索レーダが外国で

表-3 電波探査の主な用途

地中埋設物の探知	ガス、水道、電線、下水管、ビニールパイプ、岩石、空洞など。
地質調査	岩盤、断層、地下水など。
探鉱	石油、石炭、岩塩鉱床の探査。
トンネル掘削	岩盤、湧水源、断層、空洞など。
道路舗装状態調査	舗装の厚さ、構成、地下空洞。
湖、河川底調査	湖底、川底のプロファイル作成。
海水の調査	氷の厚さ、組成の調査。
氷河、ツンドラ	氷河やツンドラ内部構造観測。
犯罪捜査	埋められた凶器、死体の発見など。
軍用	地雷探知、トンネルの発見など。

開発されている。表-3 に電波探査が可能な主な用途を示す。図-8 に地中3mまでに埋設した6本のφ10cmの鉄パイプの断面映像を示す。(a) 上部に示す約6nsのパルス波を用いて3m深さの鉄パイプがはっきりと示されている。(b) の映像を信号処理により不要反射(クラッタ)を除去した映像が(c)である。一般に地中は均質でなくクラッタが生ずる。地中では高い周波数の減衰が大きく低域濾波器と同様な周波数特性を持つので、受信波形が崩れて物標形状が不明確となる。このため信号処理をする必要がある。

複数の埋設物体間の弁別能力を分解能と呼ぶ。深度方向の分解能を高めるには細いパルスが望ましいが、パルス幅を細くすると最大探知距離が小さくなってしまふ。このため直線FM変調した幅の長いパルスを発射し、受信機内の信号処理回路でパルス幅を細く変換するパルスコンプレッション地中レーダが研究されている。

水平方向の分解能は、アンテナビーム幅を鋭くすることから得られるが、このために大きなアンテナを用いてもアンテナ近傍の浅い地中では電波ビームが鋭くならない。そこで地表に沿って小さなアンテナを移動しながら地中反射波を順次受信し、その情報を記憶しておき、ある距離移動してからこれらの受信情報を合成して取り出すと移動距離に相当する大きなアンテナを用いたと同様な高い水平分解能の地中映像が得られる。この技術を合成開口レーダ(Synthetic Aperture Radar: SAR)と呼ぶ。

図-9 に合成開口地中レーダの原理と受信映像を示す。小さなアンテナのビーム幅が広いので、(a) 図に示すようにP点にある物標の映像が図のように点線に沿って双曲線状に広がった映像となるので、この広がった映像をP点に戻す信号処理をすれば合成開口が行われることになる。(b) は、水中に沈めた二本のパイプの断面映像で分離されずに重なって見える。合成開口処理により(c)のように二本のパイプが分離表示できる。

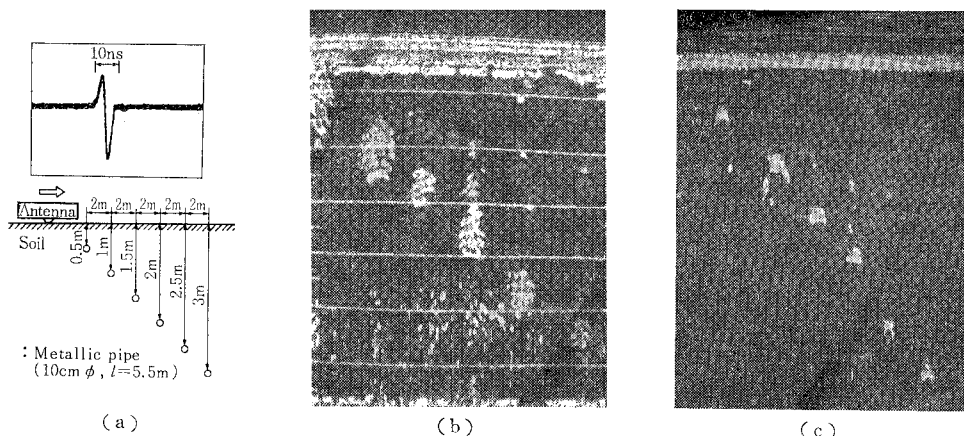
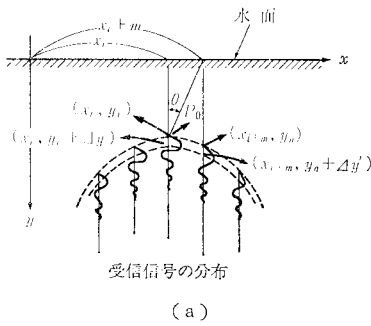
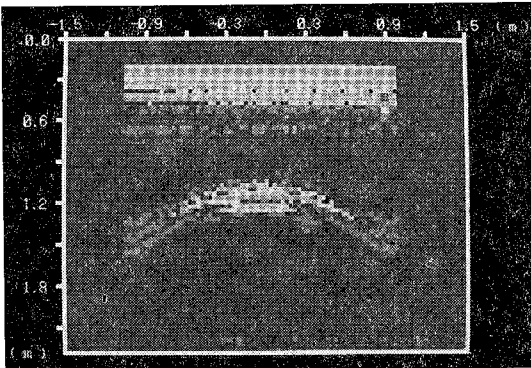


図-8 地中に深度50cmずつに埋設された6本のφ10cm鉄パイプの地中断面映像



(a)



(b)



(c)

図-9 合成開口地中レーダーの原理と受信映像

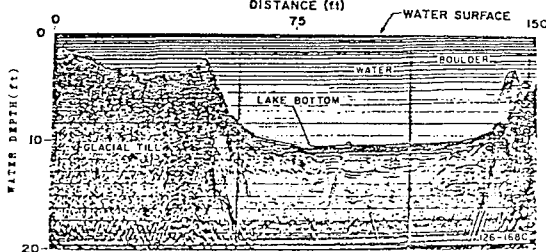


図-10 電波による湖底探索実測図 (GSS 社による)

図-10 は、湖底のプロファイルを船の上から探査した例で、淡水の場合は電波の減衰が少ないので空中から湖底の観測が可能となる。

地中電波探査は電波の透過性を利用した有用な電波センサーとなるが、現在は探知距離の増大、高分解能、雑音やクラッタの除去の研究が進められている。さらに地中物標の形状、材質までが識別できるよう関係者の努力が向けられている。

(3) 生体の非侵襲電波探査

心臓の拍動や呼吸周期などの医用計測は、心電計や皮膚抵抗ポリグラフなどの電極を身体に貼った計測器で行われている。電波を利用すると身体から離れた場所から衣服や布団を通して心拍や呼吸が計測できる。

図-11 にマイクロ波呼吸センサーの構成図を示す。ガラス箱の保育器中の新生児の呼吸と心拍を数 10 cm 離れた上部から非接触で計測することができる。波長 3 cm のマイクロ波を用い、二位相干渉法という新しい検出方式により新生児が身体を動かしてセンサーとの距離が変化しても常に一定感度を心拍と呼吸が検出できる。図-12 は実測例で、モニターした新生児は呼吸不全で時々無呼吸状態になることが検出されている。心拍動は胸部表面が約数 μm 振動している周期を検出し、呼吸は同じ場所が数 mm ゆっくり動く変化をしているので、受信出力をフィルターで分離することができる。身体に接触することなく衣服の上から家庭で健康状態を簡単にチェックすることが出来るので、予防医学用として電波センサーの利用が期待できる。

X線 CT のように、電波を用いた身体の内層映像を得る電波 CT の研究も行われているが、電波の波長が長いことによる分解能の低下と、身体表面からまわり込んで受信される成分の除去が困難なためにまだ実用化されていない。低い周波数 (1 GHz 帯以下) を用いると身体内部の情報が見られるので今後の研究が期待される。

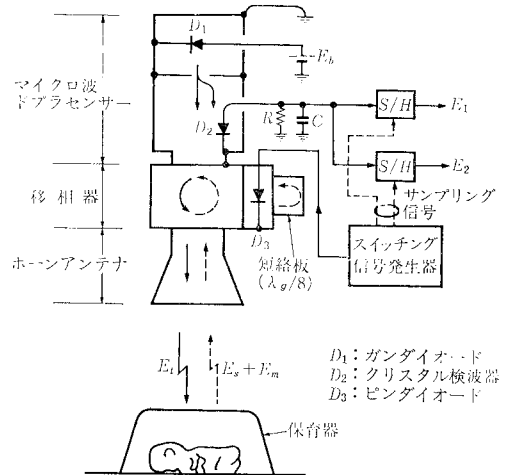


図-11 マイクロ波呼吸センサーの構成

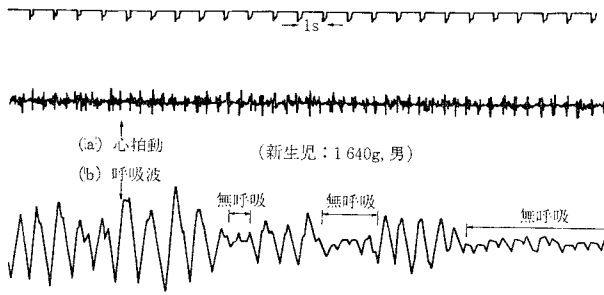


図-12 マイクロ波による新生児の呼吸および心拍動の検出波形

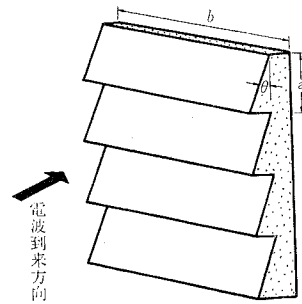


図-14 多段斜面構造体

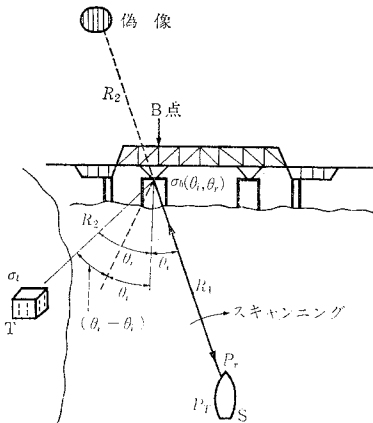


図-13 大型橋梁における鏡面反射レーダー偽像発生原理

(4) その他の電波センサー応用

近年大型架橋が行われつつある。大型橋の出現によって橋付近を航行する船舶上のレーダー映像に偽像が表われ航海士が他船と誤る危険が生ずるようになった。レーダー偽像の表われ方には、陸上の物標のレーダー映像が橋により海上に投影される鏡面反射偽像と、橋の構成部材間を電波が何回も多重反射することから橋の形状が広がって見える多重反射偽像とがある。

図-13 に鏡面反射偽像の発生原理図を示す。船上レーダーから発射した電波が橋の部材で散乱され陸上物体を照射する。その物体から反射された電波が逆経路で橋を経由して再び船上のレーダーに受信される。このときアンテナは橋に向けられているので陸上物体の映像がアンテナが向いている航路上に投影表示され他船と間違えられることがある。この対策としては、電波吸収材を橋面に貼ったり橋の形状を変えたりする。

図-14 は橋の基部(アンカレッジ)の側面を多段斜面構造にしてレーダー電波を上空にはね上げる方法で、本四架橋の一部に採用されている。

高層ビルや高速道路によるテレビのゴースト妨害も大型構造物による電波反射妨害であり、最近の構造物には

電波妨害対策が必要となりつつある。

図-15 は自動車の衝突防止用レーダーセンサーへの応用例を示す。ミリ波帯の電波を用い、前方の自動車または障害物をレーダーで検知し、物標の距離、相対速度などからコンピューターにより衝突予測計算を行い、警報を発したりブレーキを作動させたりする。道路側にあるガードレール、標識などと相手自動車との弁別が難しく、特にカーブした道路上での誤動作防止に努力が向けられている。

図-16 は転炉中のスラグレベルを計測する電波セン

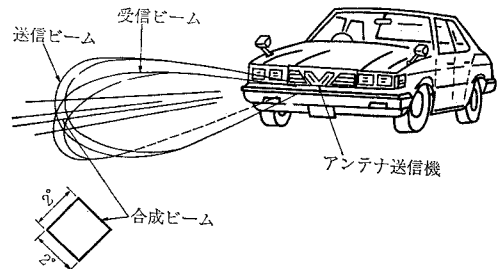


図-15 衝突防止用レーダーセンサー

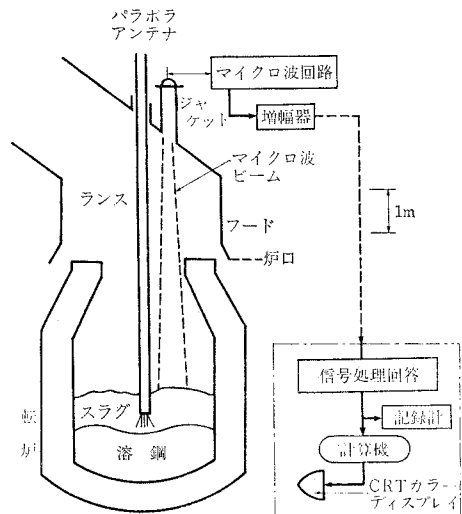


図-16 転炉スラグレベル計設置状況

サーで、水冷式のアンテナから 24 GHz のミリ波を放射し、溶鋼上のスラグ表面からの反射波を受信する。送受信間の時間差は周波数変調により周波数差として検出する。図-17 にその構成図を示す。スラグが吹出るスロッピングの予知に用いる。5~15 m の距離を約 4 cm の誤差で計測できる。溶鋼炉中のように粉塵と高温の悪環境に電波センサーが有用となる。

海岸土木工事において、海岸に打寄せる波浪の向き、波長、高さを知ることは重要となる。レーダーを用いて波浪の動きを迅速に計測できる。図-18 に示すように

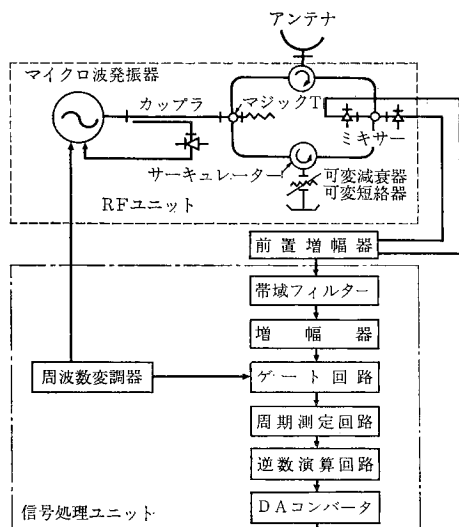


図-17 転炉スラグレベル計回路構成

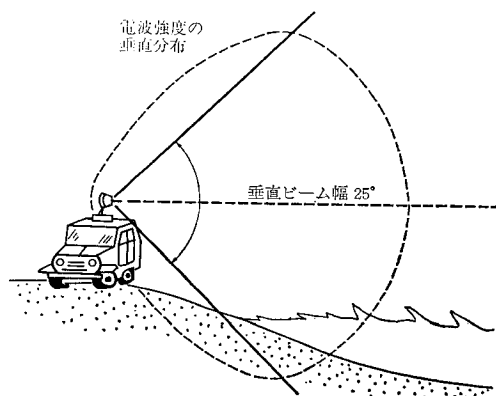


図-18 ジープに搭載したセンチ波レーダーによる波浪観測

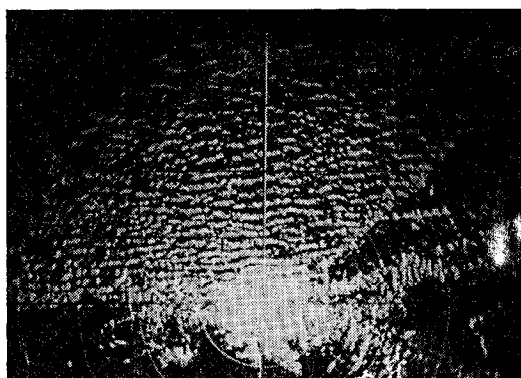


図-19 波向観測写真(昭和58年11月14日, 10:00)

海岸に設置したレーダーにより波浪観測を行ったレーダー映像を 図-19 に示す。Xバンド(3cm 波長)車載形レーダーにより新潟県の海岸で観測したもので波向、波長が波峯線映像から判別できる。

あとがき

電波を利用した非破壊探査(電波センシング)について、その特色と利用例について紹介した。電波を探索用利用する分野は、ラジオやテレビにおける電波利用ほど一般にはまだよく知られていない。電波技術の中では開発途上の技術といえる。電波の特色を利用すると、他のセンサーでは実現できない新しいセンシングが可能となる。これからセンサーを設計する技術者とユーザーとが協力して、電波センシングが普及されることを期待している。

参考文献

- 1) 鈴木 務:電波とセンシング, センサ技術, 1982年12月。
- 2) 鈴木 務:電波による地中・水中の探査, 計測・自動制御学会誌, 計測と制御, Vol. 20, No. 8, 1981年8月。
- 3) 荒井郁男・鈴木 務:マイクロ波による生体表面微小変位計の一方式, 電子通信学会論文誌, J 65-C, No. 3, 1982年3月。
- 4) 小林純夫:近距離電波センサの鉄鋼業への応用, センサ技術, Vol. 2, No. 13, 1982年12月。
- 5) 海洋科学技術センター:レーダ方式による波浪観測の研究, 1959年3月。
- 6) 鈴木 務:電波応用センサ, 日本鉄鋼協会第7・8回白石記念講座, 196. 60。

(1985.8.7・受付)

●ご案内●

土木学会論文集編集委員会第VI小委員会

『土木学会論文集・第VI部門』は年2回(3月, 9月)の発行です。別掲の投稿要項等をご覧のうえ、多数の論文をお寄せ下さい。

なお、不詳点等は事務局編集課(電話 03-355-3441 番, 内線 156)あてお願いします。