

.....  
**論 文**  
 .....

UDC 531.717.2 : 537.5-962

## マイクロ波による物体検出器\*

白 岩 俊 男\*\*・小 林 純 夫\*\*\*

### Microwave Object Detector

Toshio SHIRAIWA and Sumio KOBAYASHI

#### Synopsis:

A new instrument for detecting the object using microwaves has been developed. This instrument, which is called MOD (Microwave Object Detector), consists of three basic units, that is, the transmitter, receiver, and control unit. Details of each unit and characteristics of MOD are discussed. MOD has several advantages over conventional detectors such as hot metal detectors, photoelectric relays and so on. An important advantage of MOD is due to the properties of microwaves that they suffer little attenuation in steam, rain, smoke, flame and dusty atmospheres, and therefore MOD can be utilized more extensively than conventional ones. Two typical applications of MOD are presented, i.e., the detection of the position of pipe-edge in the tube rolling process and the level detection in the hoppers of cokes or sintered ore, where no conventional sensors are useful because of their severe environments.

(Received June 29, 1972)

#### 1. 緒 言

近年、マイクロ波領域における小型固体発振素子として、ガンダイオード、インパット、ダイオードが実用できるようになり、比較的簡便に小型マイクロ波発振器を得ることが可能になった。われわれは、マイクロ波の応用として、物体検出器 (Microwave Object Detector ; M.O.D と略称) を開発し、実用に供しているので、今回その概要を報告する。従来、物体の検出にはHMD 光電リレーなどの光学的な装置が多く用いられているが、MOD は、通常の光学的な装置にくらべていくつかの利点がある。その一つは、マイクロ波の伝搬特性が良好なことで、伝搬空間中に、水蒸気、煙、水滴、火、ダストなどがあつてもほとんど減衰を受けない。したがって、MOD は、鉄鋼製造工程上多々見られる環境の悪いプロセスでの物体検出にとくに適する。その他の利点としてはマイクロ波が金属面で良好に反射されるため反射型の利用範囲が広いことや、送受信器間の位置合わせが容易なことがあげられる。

#### 2. 動作原理

MOD の動作原理を2種の配置について Fig. 1 に示す。

#### 2.1 透過型

Fig. 1(a) は、透過型の検出法を示すものでアンテナを対向して設置し、一方よりマイクロ波を放射し他方で受信する。アンテナ間にマイクロ波散乱体が存在すると受信レベルが下がるので、物体を検出できる。いま散乱体が存在しないときの受信電力を  $P_{ro}$  とすると、

$$P_{ro} = \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 P_t G_t G_r \dots \dots \dots (1)$$

となる<sup>1)</sup>。ここで

$P_{ro}$  : 散乱体がないときの受信電力

$P_t$  : 送信電力

$\lambda$  : マイクロ波の波長

$d$  : アンテナ間距離

であり、またアンテナが互いに十分離れているとき (フラウンホーファー領域にあるとき) には  $G_t$ ,  $G_r$  はアンテナに固有の定数で

$G_t$  : 送信アンテナの利得

$G_r$  : 受信アンテナの利得

である。

一方、アンテナの中間に散乱体があるときの受信電力

\* 昭和46年11月19日第49回計測部会にて発表

昭和47年6月29日受付

\*\* 住友金属工業(株)中央技術研究所 理博

\*\*\* 住友金属工業(株)中央技術研究所

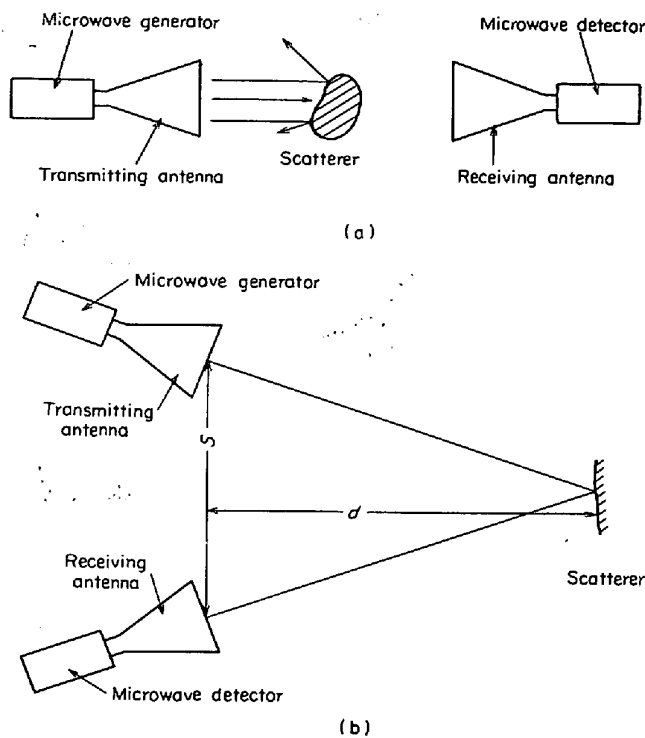


Fig. 1. Principle of object detection using microwaves.

$P_r$  は

$$P_r = \eta P_{r0} \dots\dots\dots (2)$$

で与えられ  $\eta$  は散乱体の形状, 位置, 電磁氣的性質で決まる値である.

2.2 反射型

Fig. 1(b) は反射型の検出法を示すものであつて, アンテナをある一定角度をなして設置し, マイクロ波散乱体が幾何学的な正反射の位置付近にきたとき, 受信電力が大になることによつて, 物体を検出するものである. 散乱体が, 十分大きな平板であり Fig. 1(b) の位置にあるときの受信電力は(1)式を変形することにより.

$$P_r = \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2 \frac{P_t G_t G_r}{4d^2 + s^2} \dots\dots\dots (3)$$

で与えられる.

ここで

$d$  : アンテナ対象間距離

$s$  : アンテナ間距離

である.

3. 構 成

3.1 概要

構成の代表的なブロック図を Fig. 2 に示す. 装置はマイクロ波の送信器受信器および本体の3つの部分から成つており, 送信器中にはマイクロ波発振器, 送信アン

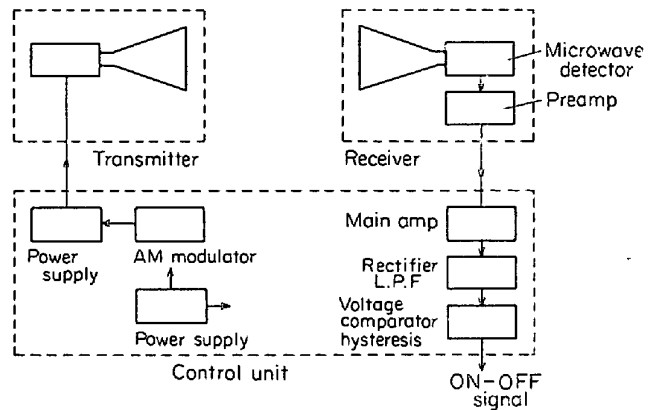


Fig. 2. Block diagram of MOD (Microwave Object Detector).

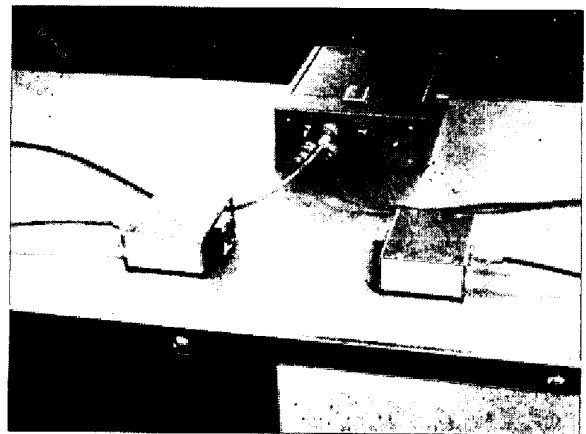


Photo. 1. A view of microwave object detector.

This instrument consists of a transmitter, a receiver and a control unit.

テナ, 受信器中には受信アンテナ, マイクロ波検波器, 前置増幅器, 本体中には, 信号処理回路および電源を含む. 各ユニット間の信号伝送は, 長距離伝送も考慮して電流伝送とした. また, マイクロ波を振幅変調し, 受信側での交流増幅を可能にしている. 使用したマイクロ波周波数は  $10.525 \text{ GHz}$  (波長  $28.5 \text{ mm}$ ) である. MOD の一例を Photo. 1 に示す. この装置は, 送信器, 受信器間隔約  $500 \text{ mm}$  で使用するもので, われわれが製作した MOD では最も小型のものである.

3.2 マイクロ波発振器

発振器として利用できるものは, ガンダイオード (GaAs) か, インパットダイオード (Si) の2種にかぎられる. 両者の比較を Table 1 に示す<sup>2)</sup>. ガンダイオードの主な利点は, 動作電圧が低く, 使いやすいことであり, インパットダイオードのほうがマイクロ波出力が大であるが, 当初, 電源の利点からガンダイオードを用いていた. 現在では, インパットダイオードに切替つつある. インパット発振器の特性は, マウントによつて大きく左右されるが<sup>3)</sup>, われわれが使用している発振器の略

Table 1. Comparison of low power GaAs Gunn diode and low power Si IMPATT diode.

Parameters	Gunn diode (NEC GD 511AA)	IMPATT diode (hp 5082-0432)
Operating frequency range	8.2~12.4 (GHz)	8~12 (GHz)
Operating voltage	10V typ.	90V typ.
Operating current	200mA typ.	30mA typ.
CW power output	15mW min (max. power)	100mW min (at 3.5W input)
Efficiency	1.0% typ.	3.5% typ.

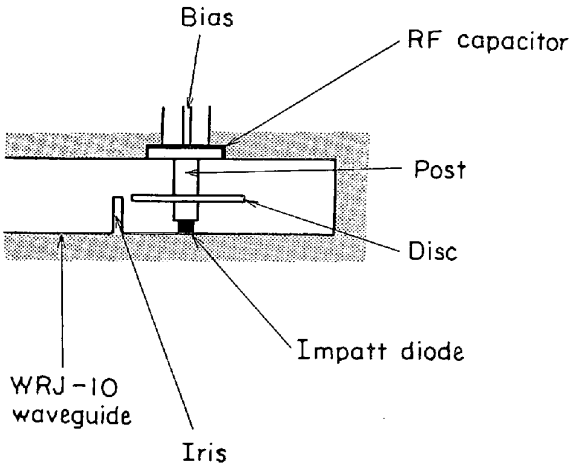


Fig. 3. A scheme of IMPATT oscillator.

図を Fig. 3 に、電気的特性を Fig. 4 に示す。

3.3 アンテナ

3.3.1 ホーンアンテナ

MOD の装置としての特性は、アンテナによつて大幅に変化する。標準的には、送受信に同一のホーンアンテナを用いることにし、所要のアンテナ間距離に応じて10~23 dB の間でアンテナゲインを選択している。大ていの用途には、17~20 dB のホーンアンテナで十分である。またとくに検出範囲を広げたり、位置検出精度を上げたりする用途には leaky wave アンテナを用いたり、球面鏡を用いた例もあり<sup>4)</sup> 後述する。アンテナの所要利得は、マイクロ波受信器の所要最小電力を  $P_{r \min}$  とし(1)式を变形することによつて、

$$G \geq \frac{4\pi d}{\lambda} \left( \frac{P_{r \min}}{P_t} \right)^{1/2} \dots\dots\dots (3)$$

より求められる。われわれが、標準的に使用しているホーンアンテナは、10, 17, 20, 23 dB の4種であるが、

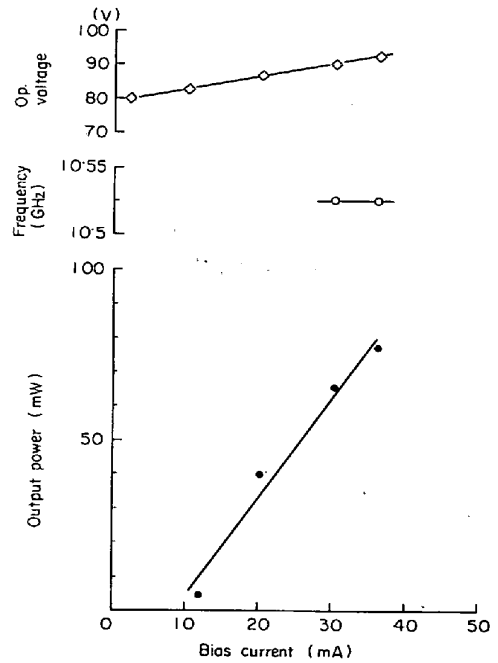


Fig. 4. Characteristics of IMPATT oscillator.

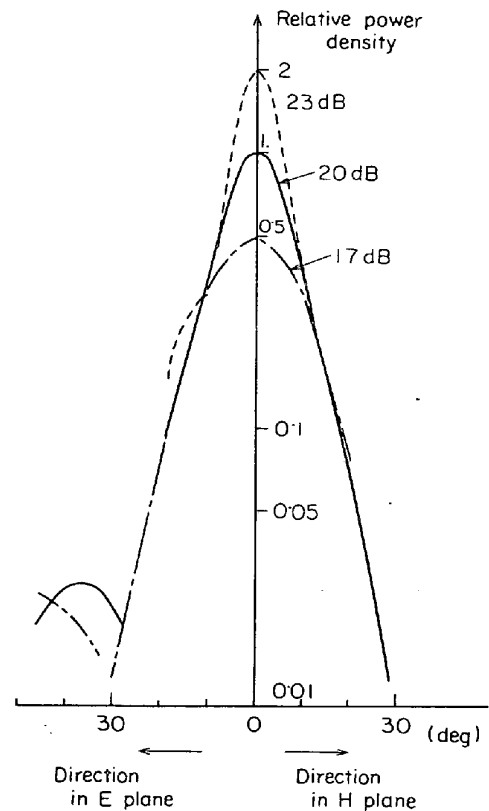


Fig. 5. Directivity of horn antennas.

その寸法は slant 長で 10 mm~350 mm である。各アンテナの指向性を Fig. 5 に、また  $P_t=30\text{mW}$ ,  $P_{r \min}=0.075\text{mW}$  (検波器出力 10mV<sub>p-p</sub>) としたときのアンテナ間距離と所要アンテナゲインの関係を Fig. 6 に示す。アンテナ間距離が増加するにつれて、送受信器の寸

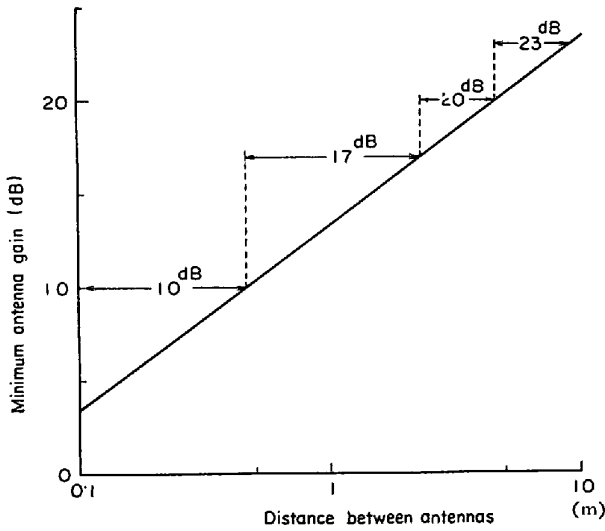


Fig. 6. Minimum antenna gain for MOD  
 $P_t = 30\text{mW}$   $P_r = 0.075\text{mW}$ .

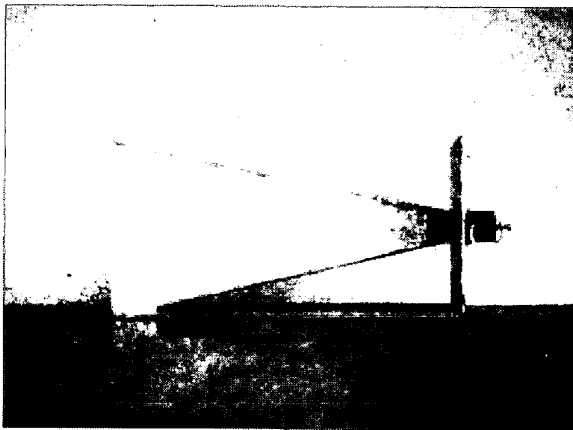


Photo. 2. 23dB horn antenna with IMPATT oscillator.

法は大形になる。

Photo. 2に 23 dB アンテナと送信器内部(インパット発振器)の状態を同時に示す。

3.3.2 特殊なアンテナ<sup>5)</sup>

ホーンアンテナ以外の MOD に使われるアンテナを Photo. 3 に示す。反射鏡(楕円面鏡, 放物面鏡)アンテナ, 電波レンズ, 誘電体棒アンテナ, leaky wave アンテナである。これらは, いずれも高利得アンテナで, ホーンより小型に高利得を実現できるほか, 特殊な用途に使われる。

(1) 電波の集中(レンズ反射鏡)

位置検出精度を上げたり, 小さな物体を検出したりする必要のあるとき, 電波を集中させるのに用いる。回転楕円面鏡を用いたときのアンテナ前方の電界強度を Fig. 7 に示すが, 直径  $\lambda$  ( $\cong 30\text{mm}$ ) の円内に, ほとんどの電

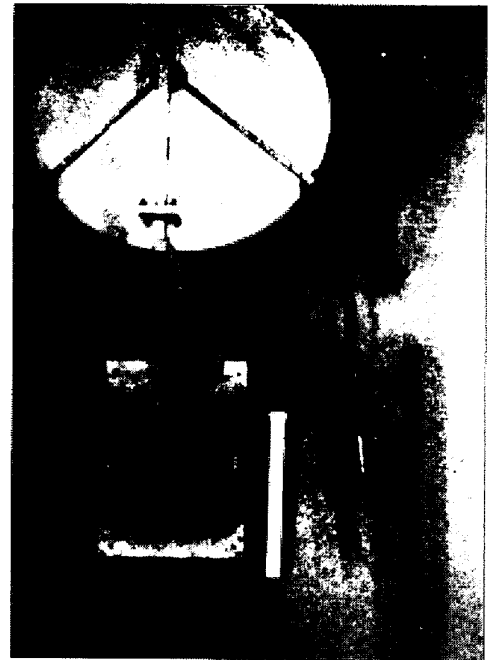


Photo. 3. Various antennas for the MOD; an elliptical antenna, a parabolla antenna lenses, dielectric rod antennas and a leaky wave antenna.

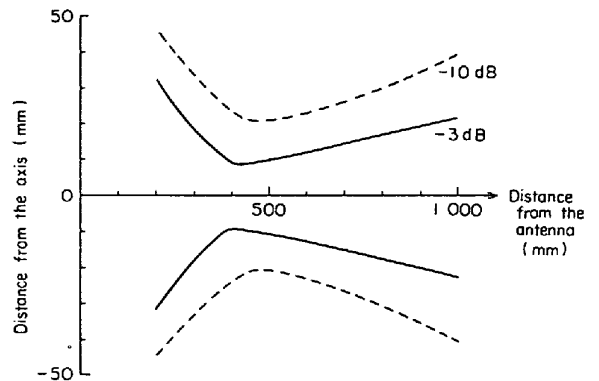


Fig. 7. Radiated field intensity distribution (normalized to the value on the axis) of an elliptical antenna.

波を集中させることができる。このようなアンテナを用いることにより数 mm の精度で位置を検出できる。

(2) 検出範囲の拡大(leaky wave アンテナ)

対象のパスライン変動が大きく, 広い範囲を一個のアンテナでカバーする場合, アンテナ開口径を大にする必要があるがこの用途には, leaky wave アンテナが適する。一例として 30 mm  $\phi$  鋼管を 200 mm のパスライン変動幅に渡り, ほぼ一様に検出した例を Fig. 8 に示す。

3.4 電子回路

3.4.1 発振器電源および検波器

インパットダイオードの直流特性は Fig. 4 に示した通り定電圧特性に近いから, 定電流電源を用いている。

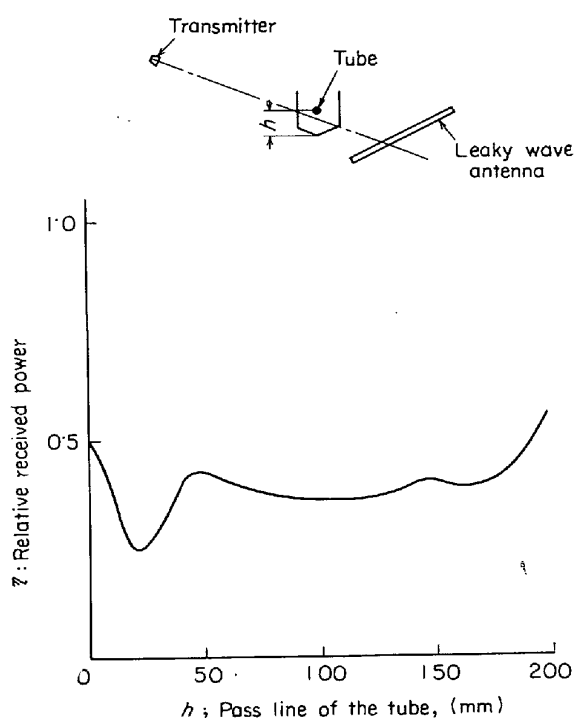


Fig. 8. Wide range detection by a leaky wave antenna. The object is the steel tube of 34mm diameter.

バイアス電流に振幅変調を加え、マイクロ波をパルス変調している。また検波器としては、点接触形の 1N23B を用いている。その感度は数  $k\Omega$  以上の負荷時で約 200 mV/mW である。

3.4.2 前置増幅器と信号処理回路

受信器側に前置増幅器を設置し、約 40 dB の増幅を行なった後、本体に電流伝送している。この信号をさらに一段増幅した後整流し、低域フィルタを通し、電圧比較回路によって物体の有無を判断している。出力はリレーの接点信号である。電圧比較回路はヒステリシス特性を持っているが、これは圧延ラインにおける検出のように対象の速度が早いときには必ずしも必要ないが、後述する貯鋸槽レベル計のように対象が遅いときに必要になる。

4. 特性および特徴

4.1 マイクロ波の伝搬特性

従来、圧延ラインなどでの物体の検出には HMD, 光電リレーなどの光学的な装置が広く用いられている。これに対して MOD の特徴は、伝搬特性のすぐれていることで、マイクロ波は、伝搬空間中のダスト、水滴、水蒸気、火炎、気温の影響をほとんど受けずに伝搬する。これはマイクロ波の波長が光にくらべて十分大きく、小さな散乱体の散乱断面積が  $\lambda^{-4}$  ( $\lambda$ : 波長) に比例する<sup>7)</sup>

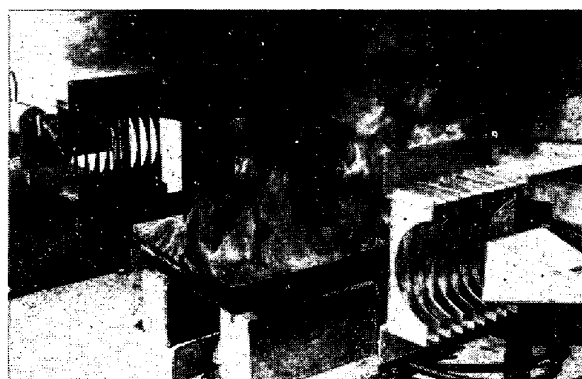


Photo. 4. The experimental set up for measurements of microwave propagation characteristics in fire.

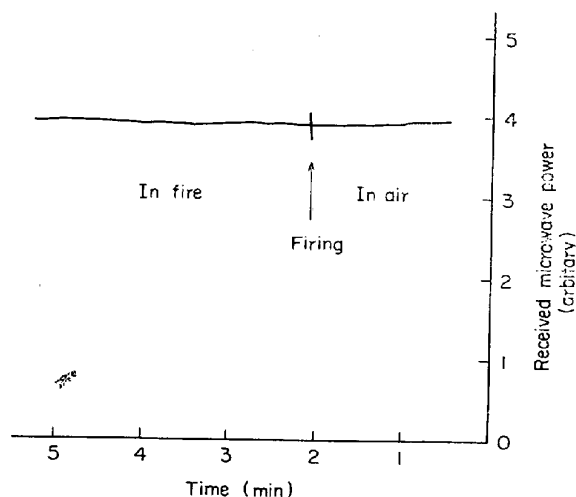


Fig. 9. Transmission of microwaves in fire.

ことから肯ける。視界 30m の霧中でも 0.1 dB/km の減衰しかなく (波長 3cm) 光にくらべて、はるかに伝搬特性のよいことがわかる<sup>8)</sup>。実際、MOD の送、受信器間で噴霧を噴射させた場合や、重油を燃焼させた場合にも受信レベルの変化は、全く認められなかった。送受信器間で、重油を燃焼させたときのもよを Photo. 4 に受信レベルの記録を Fig. 9 に示す。

4.2 安定度

MOD の総合的な温度特性を Fig. 10 に示す。25°C ~ 55°C の温度範囲で  $\pm 10\%$  弱程度の受信レベルの変化があり、必ずしも満足できるものではないが多くの場合、この程度でも十分使用し得る。温度特性のおもな原因は、検波器 (1N23B) の感度変化によるものと思われる。いま透過型の場合を考え、

$P_{R0}$ : 対象が存在しないときの受信電力

$P_R$ : 対象が存在するときの受信電力  $P_R = \eta P_{R0}$

$P_S$ : 設定レベル  $P_S = \alpha P_{R0}$

とし、 $P_{R0}$  が  $\pm \delta P_{R0}$  変動するとき、 $P_R$  の変動は、 $\pm$

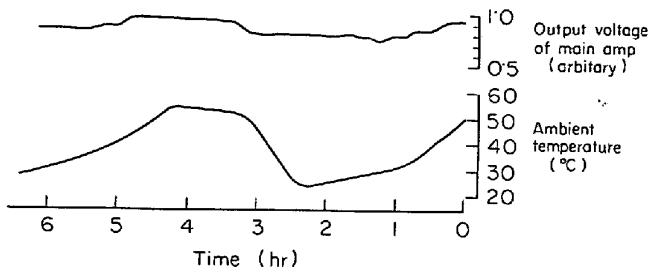


Fig. 10. Stability of MOD.

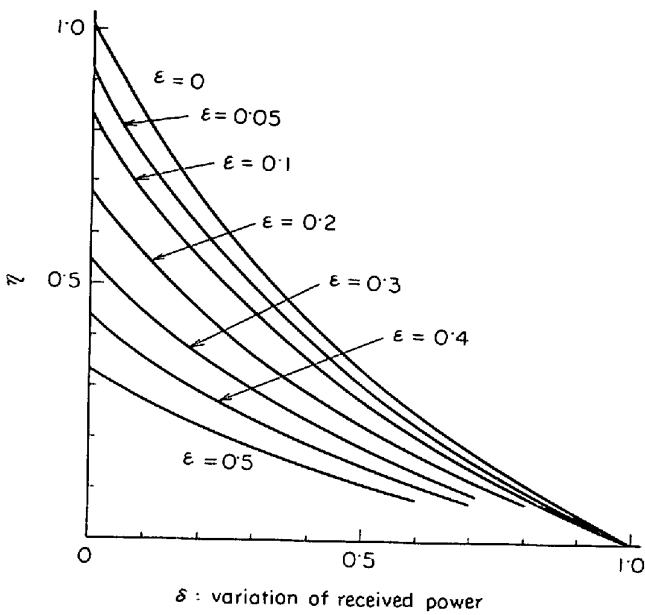


Fig. 11. Minimum  $\eta$  vs. MOD stability.

$\eta \delta P_{ro}$  である。MOD が正常な動作をするためには、  
 $P_r < P_s < P_{ro}$  ..... (4)  
 すなわち、

$$\eta(1 \pm \delta) < \alpha < 1 \pm \delta \text{ ..... (5)}$$

が満足されればよい。

$\alpha$  の変化範囲を  $\alpha(1-\epsilon) \sim \alpha(1+\epsilon)$  とするとき、MOD が誤動作しない範囲は

$$\alpha(1-\epsilon) > \eta(1+\delta), \alpha(1+\epsilon) < 1-\delta$$

すなわち、

$$\eta < \frac{1-\epsilon}{1+\epsilon} \cdot \frac{1-\delta}{1+\delta} \text{ ..... (6)}$$

である。  $\delta$  がきまつたときに必要な  $\eta$  の値を Fig. 11 に示す。また、このとき

$$\alpha = \frac{2\eta}{1+\eta} \text{ ..... (7)}$$

とすればよい。 Fig. 11 より  $\eta < 0.1$  であれば、MOD の安定度はあまり問題にならないことがわかる。

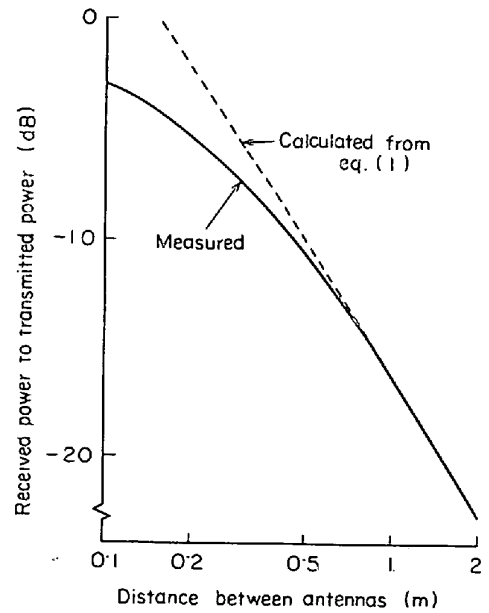


Fig. 12. Power transmission characteristics of adopted 17dB optimum horn.

## 5. 適用例

### 5.1 鋼管製造工程

適用例の一つは、継目無鋼管製造工程でマンドレルミルの出側に設置したものである。このプロセスでは、潤滑剤として、重油+黒鉛を用いているため、火炎を生じ通常の光電的な装置では適用がむずかしい。また、冷却水による水滴飛沫も多い。目的は、マンドレルの位置検出を行ない、以後の材料搬送を制御することである。検出対象となるマンドレルの直径は、74.5~98.0 mm  $\phi$  および 112.5~134.5 mm  $\phi$  である。要求される位置検出精度は  $\pm 100$  mm 以下である。

#### 5.1.1 アンテナの選定

所要アンテナ間距離が 1.5m 以上であるので Fig. 6 によつて 17 dB ホーンアンテナを用いた。使用したアンテナ間の伝送特性を Fig. 12 に示す。

#### 5.1.2 偏波方向

ホーンアンテナより放射されるマイクロ波は通常直線偏波であるが、対象と偏波方向との関係で、(1)式の  $\eta$  の値が異なる場合がある。無限長円柱(完全導体)に平面波が入射するときの前方散乱断面積  $\sigma_f$  を Fig. 13 に示す<sup>19)</sup>が、円柱軸と電界方向を平行に選ぶ方が有利であることが分る。ここで  $k$  は波数、 $a$  は円柱半径であり、前述のマンドレル径に対応する  $ka$  は、10.525 GHz の場合 8.2~10.4 および 12.4~14.8 である。実際 76.3 mm  $\phi$  (65A) 鋼管に対して、2種の偏波方向で入射したときの受信レベルを Fig. 14 に示すが、電界方向を軸

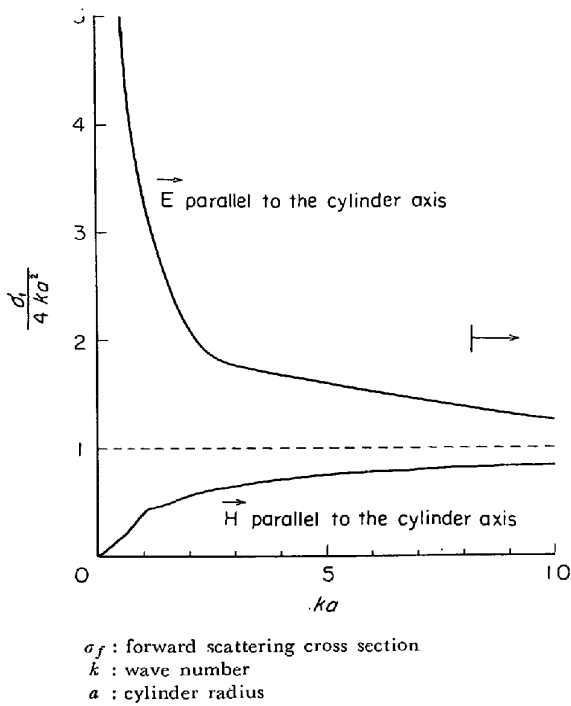


Fig. 13. Normalized forward scattering cross section.

$\sigma_f$  : forward scattering cross section  
 $k$  : wave number  
 $a$  : cylinder radius

と平行に選ぶ方がはるかに有利である。

5.1.3 位置検出精度

アンテナ間に 76.3 mm φ 鋼管を侵入させたときの受信電力の変化を Fig. 15 に示す。受信レベルが、鋼管が存在しないときの 90% になつてから、10%になるまでの鋼管移動距離を Table 2 に示すが、この距離はアンテナ間距離が小なほど少ない。Table 2 の値より、位置検出精度の仕様 ±100 mm には、十分入ると考えられる。

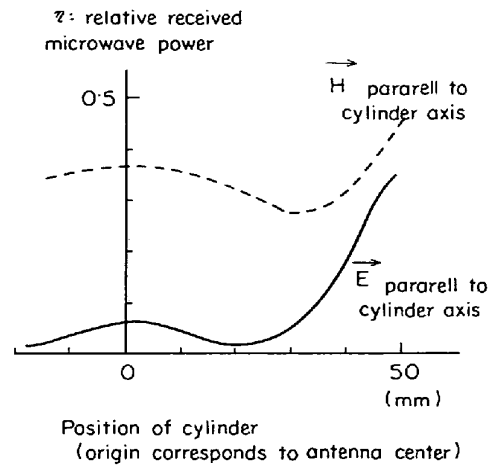


Fig. 14. Effect of polarization, Cylinder diameter is 76.4 mm and wave length is 28.5 mm.

Table 2. Distance ( $d$ ) between antennas vs. displacement ( $L$ ) of the cylinder as  $\eta$  changes 0.9 to 0.1.

$d$ (m)	$L$ (mm)
0.5	80
1.0	115
1.5	140

5.1.4 パスライン変動の影響

前出, Fig. 15 よりパスライン変動の影響を見ることができ、±30 mm 以下であれば、ほとんど問題ない。

5.1.5 稼動状況

本機は昭和 45 年 10 月に設置したが、設置当初は、経験に乏しかつたこと、対象がきわめて悪環境であることなどの理由で、ページ用エア中に水分が混入したた

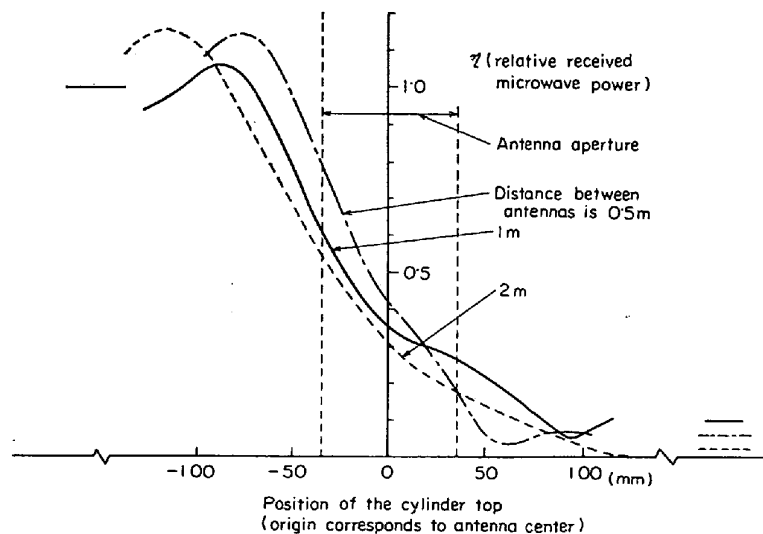


Fig. 15. Received power variation vs. position of cylinder top.



Photo. 5. MOD at tube rolling mill.

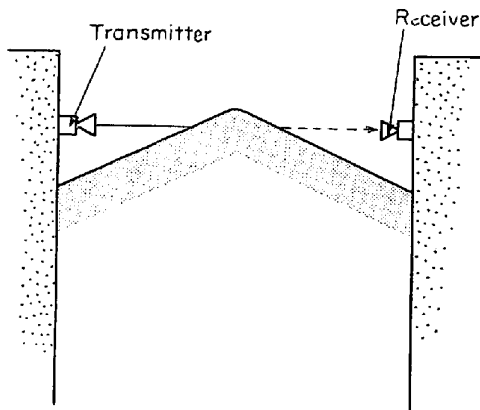


Fig. 16. Schemes of the level dedector using MOD.

めの短絡，振動によるマイクロ波発振器の接触不良，モードジャンプによるマイクロ波出力の急変（発振器設計が悪いため），熱による接続ケーブルの溶断などの事故を起こしたが現在ではすべて解決し順調に稼動している。MOD の設置状況を Photo. 5 に示す。

5.2 貯鋳槽レベル計

MOD の透過型配置を高炉貯鋳槽の上限検出用レベルスイッチとして用いている。粒体用のレベルスイッチとしては，回転翼式，振子式など機械的接触を用いるものがあるが信頼性が低い。MOD を用いる方法の概念図を Fig. 16 に示す。通常，MOD は原料と接触しない。上限レベルを検出することによつて，原料挿入を遠隔操作するのが目的である。

5.2.1 アンテナの選定

この場合，所要アンテナ間距離が最大 6m 程度であるので 20~23 dB のアンテナを用いている。

5.2.2 検出精度

検出精度を推定するため，ナイフエッジの場合について調べた。Fig. 17 のような配置における  $\eta$  の値の計算値を Fig. 18 に示す<sup>10)</sup>。また，アンテナ間隔を 6m としアンテナ間中心に，鋼板を挿入した場合の測定結果を同

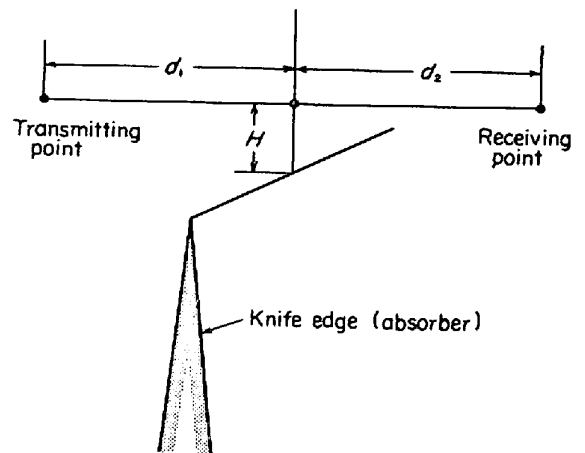


Fig. 17. Diffraction by knife edge.

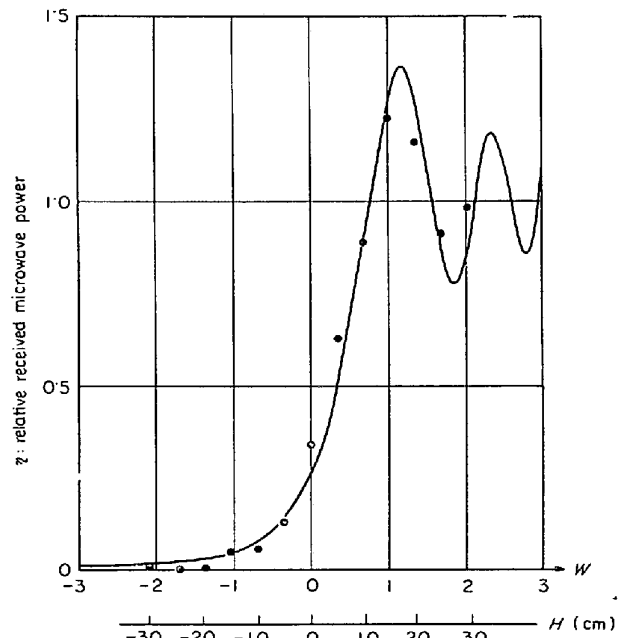


Fig. 18. Relative received power vs. knife edge position.

solid line...calculated

black point...measured at  $(d_1+d_2)$  is 6m

$$W = H \sqrt{\frac{2(d_1+d_2)}{d_1 d_2 \lambda}}$$

時に Fig. 18 中に示す。計算値と測定値の対応は良好であるが，アンテナの大きさが有限で指向性を持つているため，影の部分 ( $W < 0$ ) における測定値は，計算値より低目でありまた日向の部分 ( $W = 0$ ) における測定値は計算値より振動的でない傾向にある。 $\eta$  が 0.9 から 0.1 まで変化する距離は 0.15m であるが，検出精度はこの値よりよいであろう。(実際には，高炉原料の状態はナイフエッジではなく，さらに回折の起こりにくい状態である。)



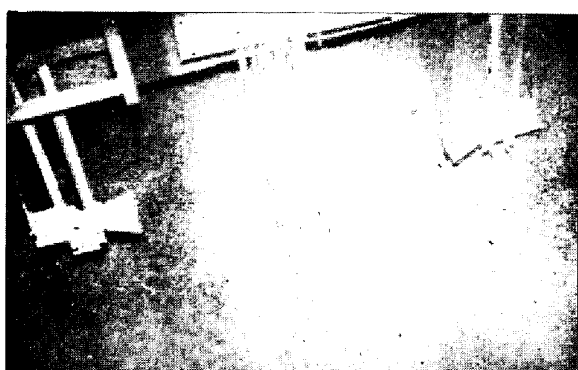


Photo. 6. MOD installed at coke hopper.

### 5.2.3 稼動状況

貯鉱槽レベル計1号機は、昭和46年11月に設置し、設置直後一、二のトラブルがあつたほかは以後順調に稼動している。当初、送受信器面に粉じんが付着してマイクロ波伝搬の障害となることを懸念し、エアパーシの用意をしたが全く必要なかつた。現在では、焼結槽、コークス槽などに計3機設置しているが、全く問題ない。設置のもようを Photo. 6 に示す。

### 5.3 その他

反射型配置を用い、クレーン間距離を求めるクレーン衝突防止装置についても実験的には成功している。

## 6. 結 言

マイクロ波を用いる物体検出装置MODを開発し、いくつかの鉄鋼プロセスに適用している。MODの特徴は光電リレーなど光学な装置にくらべて、ダスト、水滴、火

炎などの影響を受けにくいことであつて、悪い環境での使用に適する。今後は、さらに適用分野を拡大する一方、装置の改善、コストダウンに努力したいと考えている。

最後に、MODの活用を積極的に推進していただいた海南鋼管(株)設備課赤井課長、友松氏、当社和歌山製鉄所計装課池内氏、片山氏にお礼を申し上げます。

### 文 献

- 1) S. SILVER: Microwave antenna theory and design p. 4 (1965) [Dover publications]
- 2) Silicon IMPATT diodes 5-14 GHz, preliminary data sheet (1970) [Hewlett Packard]  
ガンダイオード (Cat. No 72106-A) (1969) [NEC]
- 3) 半導体研究振興会: 半導体研究 6 工業調査会  
Hewlett Packard, Application Note 935 [Hewlett Packard]  
A. M. COWLEY, et al.: IEEE J. SC. SC-5 (1970) 6, p. 338
- 4) 白岩, 小林: 鉄と鋼, 56 (1970) 11, p. 199
- 5) H. JASIK: Antenna Engineering Handbook (1961) [McGraw Hill]
- 6) D. E. COZZENS: Microwaves (1966) March p. 37
- 7) STRATTON: Electromagnetic theory (1941) [McGraw Hill]
- 8) D. E. KERR: Propagation of short radiowaves (1964) [Boston Technical Publishers]
- 9) B. S. USLENGH: Electromagnetic and acoustic scattering by simple shapes (1969) [North-holland publishing]
- 10) 虫明, 安達: 基礎電波工学 (1970) [共立出版]