

Fig. 1 Schematic of a wireless initiation system by microwave power.

へ供給する必要がある。エネルギーを点火部へ効率良く供給するには、受電したマイクロ波を整流し直流エネルギーとして供給する方法やその直流エネルギーを一旦充電した後に供給する方法等が考えられる<sup>4)</sup>。しかしながら、ワイヤレス雷管は消耗品であるため簡単な構造であることや経済性が良いことが望まれる。従って本システムにおけるワイヤレス雷管は、受電アンテナ、伝送線路、雷管より構成され、受電したマイクロ波エネルギーを伝送線路により直接雷管内の点火部に供給して起爆するものとした。

上記の構造において、マイクロ波を確実に受電し、効率良く点火部に導いて、発火させるに必要な熱エネルギーに変換するには、受電アンテナ-伝送線路-点火部系のインピーダンスを整合することが要求される<sup>5)</sup>。これが本研究におけるワイヤレス雷管の最重要課題であり、この要求を満足させることを前提として各構成要素それぞれの検討を行った。

### 3. ワイヤレス雷管の開発

#### 3.1. 受電アンテナ

トンネル内等の閉空間でマイクロ波を照射した場合、

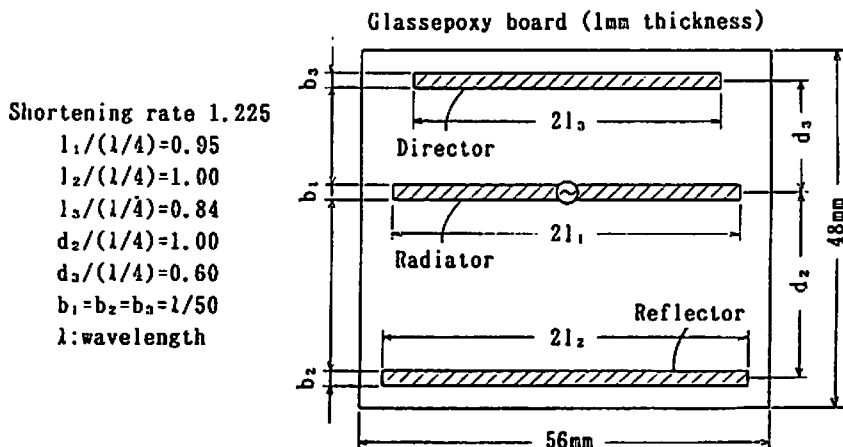


Fig. 2 Design of a 3-element yagi-Uda antenna on a printed glass epoxy board.

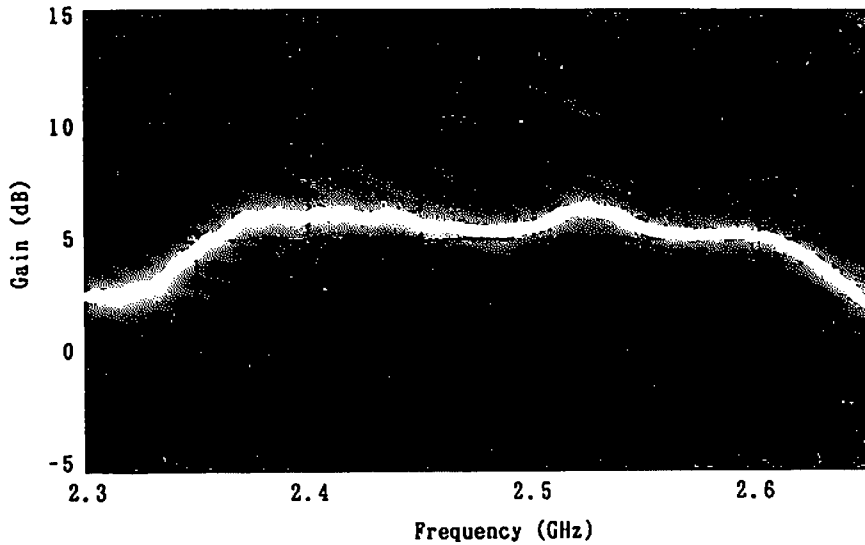


Fig. 3 Relation between frequency and gain for a 3-element Yagi-Uda antenna.

周囲の岩盤面及び壁面における多重反射により定在波を生じる。このため電磁界強度は場所に強く依存されることになり、岩盤面に設置する受電アンテナの位置によっては起爆するために必要なエネルギーを受電できないものを生じる恐れがある。従って受電アンテナに要求されるのは、単に利得が高く構造が容易で経済性が良いこと以外に、上記の定在波の影響を受けにくいものであることも重要となる。定在波の影響を除去するには、照射アンテナから受電アンテナに直進するマイクロ波のみを受電するものであれば良い。即ち、横方向及び後方利得が小さい程好ましい。以上の観点から、受電アンテナとして八木アンテナを採用した。八木アンテナは一般的に利得が高く、先鋭な前方指向性を有する上、簡易構造で安価である等の特徴をもつ。

今回開発した受電アンテナの一例を Fig. 2 に示す。導波器、放射器、反射器の3素子から成る八木アンテナで、ワイヤー式八木アンテナの文献<sup>6)</sup>をもとに厚さ1mmのガラスエポキシ基板上で基本設計を行ない、各素子の寸法、間隔及び短縮率を微調整して最適化した。

その利得の周波数特性を Fig. 3 に示す。2.35GHzから2.55GHzの帯域で約6dBの相対利得が得られた。この相対利得は基準のダイポールアンテナに対する八木アンテナの利得であり、6dBの相対利得値は同じ電界中に置かれた基準のダイポールアンテナの約4倍の電力を受電する能力に相当するものである。

定在波による影響を確認するため、八木アンテナをほぼ完全に近い反射波が存在する定在波中に置いた場

合の前方利得を測定し、定在波が無い場合と比較した。その結果、2.35GHzから2.55GHzの帯域で±1dB以内の利得変動であった。これを電力換算で示すと、定在波の無い場合の受電電力を1とすれば0.79から1.26の変動範囲となる。実際にはこれほど大きな定在波は存在し得ないため、定在波の影響はほとんど受けないといえる。

### 3.2 伝送線路

伝送線路に要求されるのは、インピーダンスの整合性が良いこと以外に、特性が安定していることである。実際使用する場合の適当な外力(引っ張り、曲げ、捻り等)に対してインピーダンスが変化するものでは実用に耐えない。従って、受電アンテナと同一基板上にストリップラインを形成し給電線及び伝送線路とした。その構造を Fig. 4 に示す。反射器は、基板前面にストリップラインを形成するため裏面に設置した。なお、本報では Fig. 4 の受電アンテナと伝送線路を便宜上レシーバーと称することにする。

ストリップラインの寸法変動による特性インピーダンスの計算結果を Fig. 5 に示す。受電アンテナの入力抵抗は Fig. 2 に示したもので21.5Ωであるが、ストリップラインとの実現可能なインピーダンス整合をとるため、放射器は Fig. 4 に示すように完全折返し形とした。放射器をこの形状にすると入力抵抗は4倍となる<sup>6)</sup>。なお、Fig. 4 に示すストリップラインは幅1mm・間隔0.3mmのもので、特性インピーダンスは89Ωである。

### 4.3 点火部

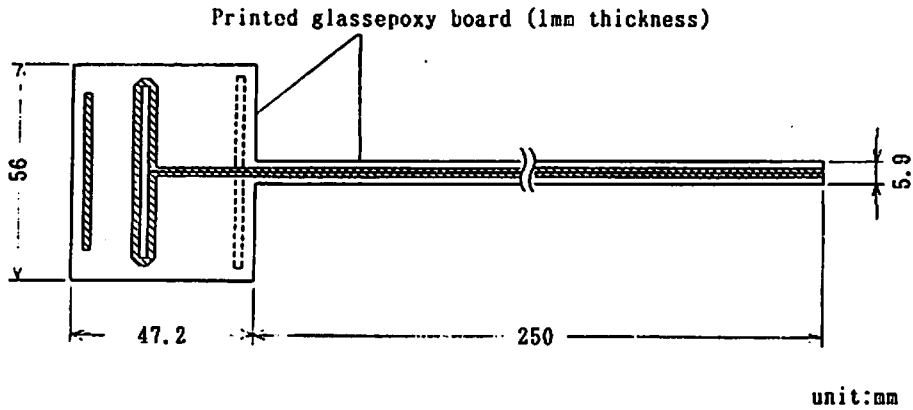


Fig. 4 Structure of a 3-element Yagi-Uda antenna and a strip line whose impedances are matched.

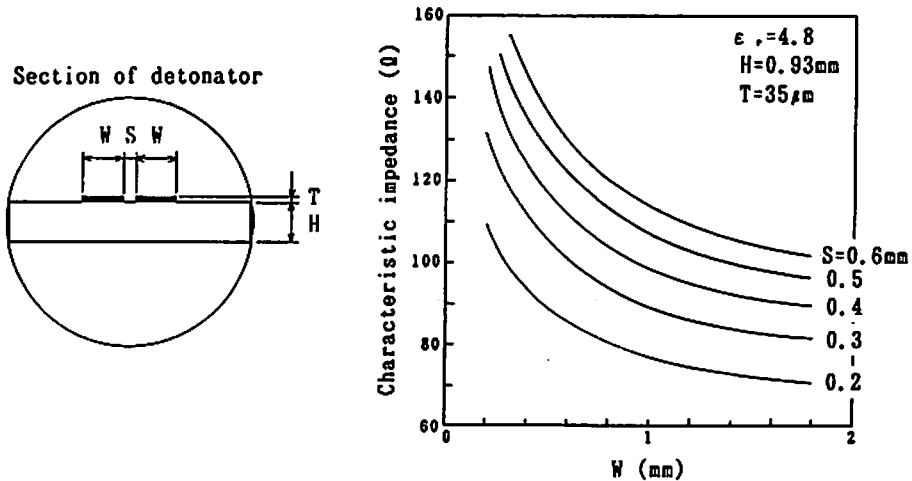


Fig. 5 Characteristic impedances of the strip line according to the change of size.

雷管の点火部（点火玉）以外の部分は6号原管を使用するものとして、ここでは点火部について検討した。

本システムにおける点火部に要求されるのは、伝送線路とインピーダンスを実用可能な範囲で整合することである。具体的に伝送線路の特性インピーダンスを $Z_0$ 、点火部のインピーダンスを $Z_1 = R_1 + jX_1$ とした場合、 $Z_0$ と $R_1$ がほぼ同一の値を示し、且つ $X_1$ が0に近い程整合性が良い。即ち、点火部は2.45GHzにおいて純抵抗に近い働きをし、伝送線路の特性インピーダンスと点火部のインピーダンスの実部が同程度であることが要求される。これに対し、一般の電気雷管に使用されている白金線電橋を発熱体とした点火玉は、0.5mmの長さの脚線付きのもので $0.2 + j17\Omega$  (2.45GHz)程度のインピーダンスを示すため整合性が極めて悪く、逆に整合回路を設けてマッチングするのも技術的に困難であり構造も複雑となる。

以上の問題から従来の点火玉に変わるものとして、発熱体を変えた点火部及び発熱体を使用せずカーボン、銀粉等の導電性物質を点火薬中に添加した点火部を試作し検討した<sup>7)</sup>。その結果、上記のインピーダンスに関する要求を満足する上、任意に精度良くインピーダンスを選定できるチップ抵抗器を発熱体として使用した点火部を採用した。

直流抵抗、定格電力の異なるチップ抵抗器を使用した点火部及び従来の白金線を使用した点火玉に直流電圧を供給し、発火エネルギーを測定した。Fig. 6に発火時間と供給電力の関係を示す。ここで与えた直流電圧は、本システムの発振器が単一パルスのマイクロ波を出力するため、パルスに乗せた定電圧とした。Fig. 6において、チップ抵抗器の定格電力に従って発火エネルギーもB, A, Cの順に小さくなっているが、従来の白金線電橋を使用した点火玉に比べると大きい。

Mark	Heating element	DC resistance ( $\Omega$ )	Impedance (2.45GHz) ( $\Omega$ )	Rated power (W)
◆	Pt wire	0.54	$0.2 + j17$	—
●	T.R.A	50	$38 + j10$	1/10
▲	T.R.B	80	$78 + j14$	1/8
■	T.R.C	120	$110 - j5$	1/20

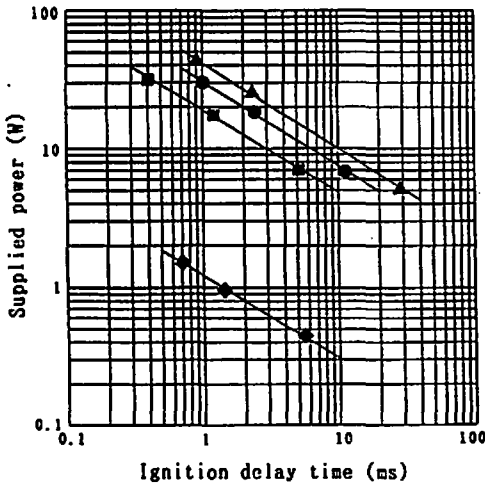


Fig. 6 Relation between ignition delay time and supplied power of igniters using a platinum wire or a tip resistor.

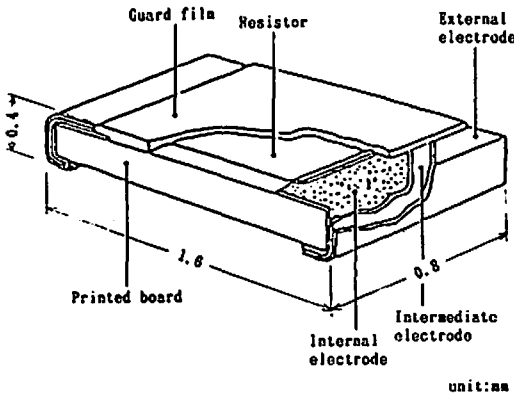


Fig. 7 Structure of a square board shaped tip resistor B.

これはチップ抵抗器の直流抵抗が大きくそれだけ大きな供給電圧を要するためであるが、数10 $\Omega$ の特性インピーダンスを有する伝送線路との実現可能な整合をとるためには止むを得ないことであり、現状ではこれに見合う適当な供給エネルギーを要する。

採用したチップ抵抗器Bの構造を Fig.7に示す。

#### 4. 受電電力測定結果及び考察

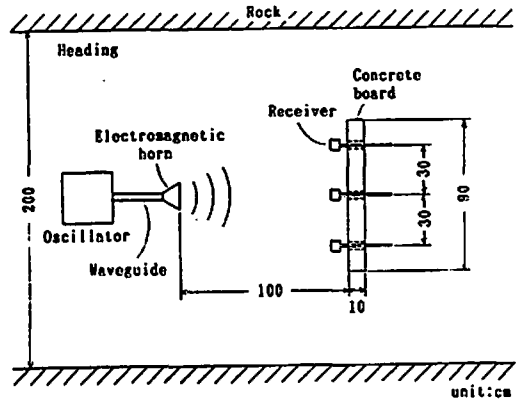


Fig. 8 Schematic of received microwave power measurements.

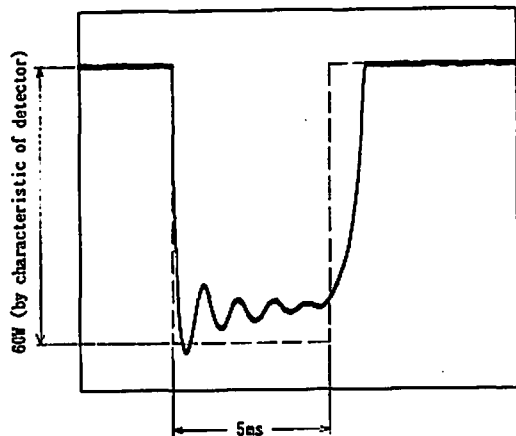


Fig. 9 A typical waveform of received microwave power on the tip of strip line.

チップ抵抗器を発熱体とした点火部を格納した雷管は、Fig.4に示したレーザーのストリップラインの先端に接合される。即ちチップ抵抗器に供給される電力は、レーザーのストリップライン先端における受電電力である。そこで実用の場合を模擬し、マイクロ波を照射した時のレーザーの受電電力を測定した。その概要を Fig.8に示す。測定条件は Fig.8に示すように、素掘りの坑道(断面2×2 m)内でコンクリート板(90×90×10 m)に穿孔した9孔(縦3列、横3行)のポアホール(孔間隔30cm)にそれぞれレーザーを設置し、コンクリート板より距離1 m離れた位置から出力5 kw、持続時間5 msのマイクロ波を電磁ホーンで照射した。コンクリート板中心に設置したレーザーの受電電力観測波形を Fig.9に示す。受電されたマイクロ波エネルギーの大きさは、中心に設置したレーザーのものが最大で Fig.9に示すように60W×5

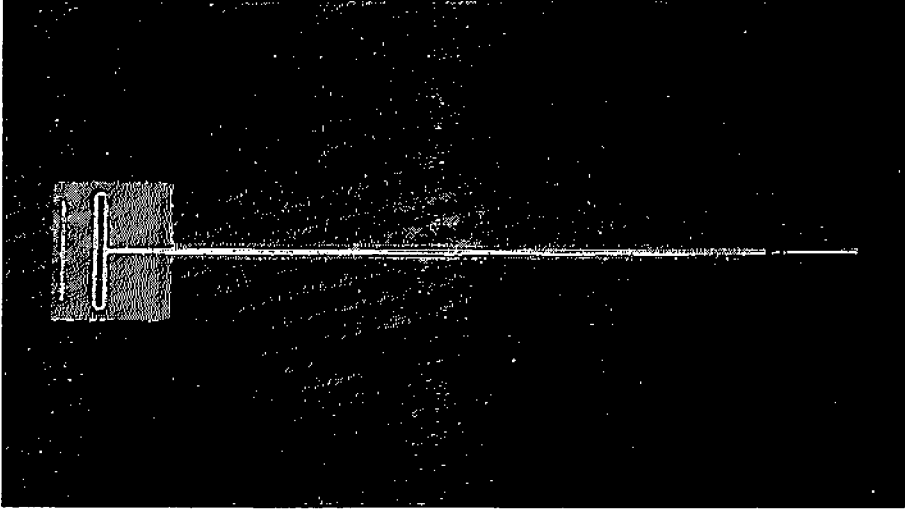


Fig. 10 A photograph of an experimental wireless detonator.

msであり、周囲に設置したレーザーでは  $33\text{W} \times 5\text{ms}$  が最小であった。Fig. 7より  $33\text{W} \times 5\text{ms}$  のエネルギーは、起爆するには十分であるといえる。

受電電力は、マイクロ波照射時の岩盤面におけるポインティング電力（平均放射電力密度）と受電アンテナの実効面積との積で求められる。よって、これを逆算してポインティング電力を求めることにより発振器に必要な出力を算出できる。Fig. 7より発火時間を  $1\text{ms}$  とした場合のワイヤレス雷管に必要な供給（受電）電力を  $20\text{W}$  とすると、 $6\text{dB}$  の相対利得を有する八木アンテナの実効面積は約  $78\text{cm}^2$  ( $2.45\text{GHz}$ )<sup>5)</sup> であるから、ポインティング電力は  $0.26\text{W}/\text{cm}^2$  であれば良い。これより、照射アンテナが発振器で出力されたマイクロ波を  $1\text{m}^2$  の岩盤面で均一な電磁界強度となるように照射するものと仮定すれば、発振器は  $2.6\text{kW}$  出力すれば良いことになる。

本測定で使用した発振器は  $5\text{kW}$  の出力である。これを  $1\text{m}^2$  の岩盤面のみに均一に照射できる照射アンテナを使用した場合、ポインティング電力は  $0.5\text{W}/\text{cm}^2$  となり、レーザーの受電電力は  $1\text{m}^2$  の岩盤面の全ての位置で  $39\text{W}$  となる。本測定で使用した電磁ホーンの放射パターンでは、前方中心部の電磁界強度が強く、周囲に遠ざかる程弱くなる<sup>8)</sup>。コンクリート板に設置した9本のレーザーで  $33\text{W}$  から  $60\text{W}$  の測定値が得られたのは、このためである。

Fig. 6に示した特性を有するチップ抵抗器Bを使用して、Fig. 4のレーザーのストリップラインの先端に点火部を形成し、6号原管を接合してワイヤレス雷管を試作した。その外観をFig. 10に示す。これを用

いて無線起爆試験を実施した。試験方法は装置、配置共にFig. 8に示したレーザーの受電電力測定時と同一である。試験の結果、雷管9個全てを起爆できた。

## 5. 結 論

本研究では、山岳トンネルにおいて無線発破を実現するための一手段として考案したマイクロ波無線起爆システムのワイヤレス雷管について検討した。その結果、起爆するには十分な能力を有するワイヤレス雷管を開発できた。本システムは、小規模、小断面の発破に限定されるものの、将来の無線発破のベースとなる一要素技術を確立できたと考えている。今後はワイヤレス雷管のモールド化と周辺装置の能力の充実に努めていきたい。

## 謝 辞

本システムの研究開発に当っては、関西大学工学部の森田正信教授、飯田幸雄助教授の絶大なる御援助を得た。ここに深く感謝の意を表する。

## 文 献

- 1) 後藤勇, 橋元和男, 新藤崇, 「第1回建設ロボットシンポジウム論文集」, P17 (1990)
- 2) 工業火薬協会編, 「新発破ハンドブック」, P114 (1989), 山海堂
- 3) 蓮江和男, 渡辺信隆他, 工業火薬, Vol. 47 No. 2 P70 (1986)
- 4) 飯田幸雄, 梶原仁, 森田正信, 田崎陽治, 黒川孝一, 中野雅司, 「電気関係学会関西支部連合大会講演論文集」, G342 (1986)
- 5) 奥澤隆志, 「空中線系と電波伝搬」, (1983), CQ出版

- 6) Shintaro UDA, Yasto MUSHIAKE, "YAGI-UDA ANTENNA", (1954), MARUZEN  
7) 橋本賢二, 黒川孝一, 工業火薬春季研究発表会講  
8) Henry Jasik, "Antenna Engineering Handbook", (Mc Graw-Hill, New York, 1961), Chap. 10.  
演要旨集, P134 (1992)

---

## Development of a wireless initiation system using microwave power

### A study of a reception part

by Kenji HASIMOTO\*, Yoji TASAKI\*, Koichi KUROKAWA\*

We are currently developing a wireless initiation system using microwave power for the automatization of tunnel blasting operations. This system consists of an oscillation part, a radiation part, and a reception part (a wireless detonator), and an industrial microwave can be used to directly initiate wireless detonators. In this article, we report on a result of study of the wireless detonator.

The wireless detonator developed here consists of a receiving antenna, a strip line for power transmission, and a detonator. A 3-element Yagi-Uda antenna with a gain of 6 dB was employed as a receiving antenna and was formed on a printed glass-epoxy board. The strip line and the receiving antenna were formed on the same printed board. A tip resistor was employed for a heating element in the detonator.

Measurements of received power and initiation tests with this wireless detonator showed that the detonator could be initiated within 1 ms under input power condition of 20 W of microwave power.

(\*Taketoyo Plant, Aichi Works, NOF Corporation, 61-1 Kitakomatsudani, Taketoyo-cho, Cita-gun, Aichi-ken 470-23)