

蓮江和夫*, 中倉健治*, 中原正二*, 三川佳央**

1. 緒 言

マイクロ波の放電現象は、電子レンジ内に金属などの良導体を置くくと見られる。本実験はマイクロ波放電の爆薬の起爆への利用の可能性について調べるため、雷管管体に爆薬を密閉し、マイクロ波により雷管内で放電を起こさせて、爆発の有無を調べた。マイクロ波放電は、絶縁体より良導体の方が起こり易い。従って、マイクロ波放電により雷管の起爆ができれば、静電気放電などによる爆発の危険性の少ない雷管の製造が可能になる。放電による火薬類の着火については、電気放電感度が調べられているが³⁾、マイクロ波放電を雷管の起爆に利用する試みは行われていないので報告する。

2.1. 爆 藥

1995年9月4日受理

*防衛大学校化学教室

〒239 横須賀市走水1-10-20

TEL 0468-41-3810 内線2426

FAX 0468-44-5901

****防衛大学校電気工学教室**

〒239 横須賀市走水1-10-20

TEL 0468-41-3810 内線2275

FAX 0468-44-5903

2.2 実験装置

2.2.1 マイクロ波発振器

2.2.2 アプリケーター

本実験ではマイクロ波により導波管と金属間で起きる放電のエネルギーを爆薬の起爆に用いるために、アプリケーションに接続した雷管管体とマイクロ波を導く銅製アンテナの間で放電を起こさせている。

アプリケーションと金属（本実験では銅製のアンテナ）間で放電が起きるが、アプリケーション内に爆薬を入れることは装置の保護、操作性、実用上などの点で望ましくない。本実験では雷管をアプリケーションの外で爆発させることとし、マイクロ波を雷管内に誘導するためにアンテナを用いた。放電はアンテナとアプリケーションの一部となっている雷管の内管との間で起こる。

2.2.3 試料雷管

試料雷管は雷管内で放電が起きやすいようにFig. 3の構造とした。使用した雷管管体は6号電気雷管用のものを用いた。雷管内にマイクロ波を効率的に誘導す

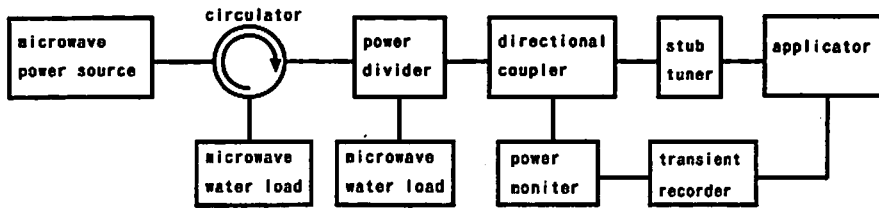


Fig. 1 Block diagram of the apparatus.

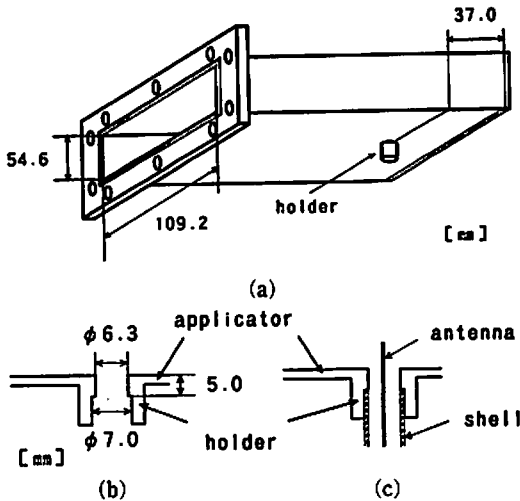


Fig. 2 Schematic diagram of an applicator. (a) applicator; (b) cross-sectional view of a holder; (c) cross-sectional view of a holder with a shell.

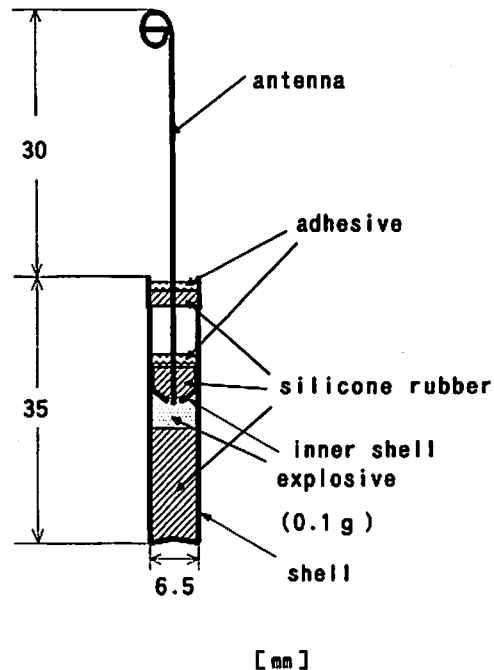


Fig. 3 Cross-sectional view of a shell

るために、直径1.0mmの銅製アンテナを付けた。アブリケータ内面とアンテナ間で放電が起きないように、アブリケータ上下のほぼ中心にアンテナの上端が来るように、アンテナの外部の長さは約30mmとした。鋭利な端面は放電を起こしやすいので、アンテナの上端部は丸めた。PETN, RDX, HMX, Tetryl, TNTの二次爆薬0.1gを秤量し、6号雷管管体に充てんした。各試料の充てん密度は約1.0g/cm³であった。雷管底部に15mmのシリコンゴムを入れて爆薬の位置を調節した。アンテナと内管が接触せずに、内管孔の中心に来るようにシリコンゴムで固定し、更に密閉を良くするためにエポキシ系樹脂を充てんして内管を固定した。放電はアンテナの下端と内管孔の間で起きる。

なお、起爆実験以外の発振装置の特性を調べる場合は、アノード電流の変化幅を大きくとり、大電力を照射した。そこで、雷管内及びアブリケータ内で放電が起きるのを防ぐために、アンテナ、内管、充てん物などのない空雷管を用いた。

2.2.4 爆発現象の測定

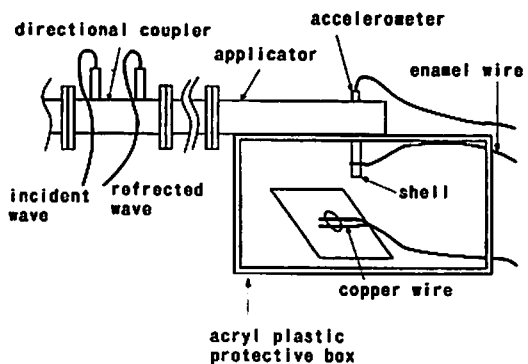


Fig. 4 Schematic diagram for measuring methods of explosion.

Fig. 4に示すように、加速度計 (PCB社, 303A02) をアブリケータ上面に取り付け爆発による振動の測定

を行い、雷管の爆薬充填部に1.5Vの直流電圧をかけたエナメル線を巻いて切断時間の測定を行い、雷管から10cm離れた位置に9Vの直流電圧をかけた2本の銅線を1cmの間隔をあけて置き、爆轟波を観察した。いずれの電圧変化もトランジェントレコーダに記録した。本実験ではエナメル線の切断による信号により測定系を動作させることとし、エナメル線切断時を爆発開始時間とした。

2.2.5 入射及び反射電圧の測定

入射電力 $P_i(W)$ は方向性結合器によってその一部が取り出されて、パワーモニタのダイオード検波器により電圧に変換された入射電圧 $V_i(mV)$ をトランジェントレコーダに記録した。 P_i と V_i の関係は次式で示される。

$$P_i = 5.585 \times 10^{-3} \times V_i^2 + 1.783 \times V_i \quad (1)$$

反射電力 $P_r(W)$ と反射電圧 $V_r(mV)$ も同様に求められ、両者の関係は次式で示される。

$$P_r = 1.290 \times 10^{-2} \times V_r^2 + 2.058 \times V_r \quad (2)$$

V_i と V_r をトランジェントレコーダに記録し、 P_i と P_r を上式から求めた。本実験の起爆試験は、パルス波領域で行ったため、パルスの立ち上がりから次のパルスが立ち上がる前までの各電力、電圧の平均値を求めた。

アノード電流を変化させ、 V_i と V_r の関係を調べると、パルス波領域では次式のような関係があることがわかった。

$$V_r = 0.7444 \times V_i + 21.085 \quad (3)$$

3. 結果及び考察

3.1 マイクロ波発生装置による放電特性

連続発振マイクロ波装置はアノード電流が小さい場合には発振は不安定で、本実験で用いた装置は、アノード電流が低い場合はパルス波を発生し、アノード電流がある値以上になると連続波を発振した。アノード電流を0.05Aから0.30Aまで、約0.025Aずつ徐々に上昇させたときのマイクロ波の発振状態の測定結果から、アノード電流が0.18A付近でパルス波から連続波発振となることがわかった。

Fig. 5 aはアノード電流0.10Aのときのパルス波の電圧、Fig. 5 bはアノード電流0.18Aのときの連続波の電圧を示している。パルス波は連続波より低いアノード電流で発振しているが、その出力のピークは連続波の場合よりも大きかった。装置のアノード電流を上げると、アノード電圧も上昇するが、アノード電圧は50Hzのリップルを持っているため、各リップルでパルス発振が起き、さらに電圧が高くなると連続波発

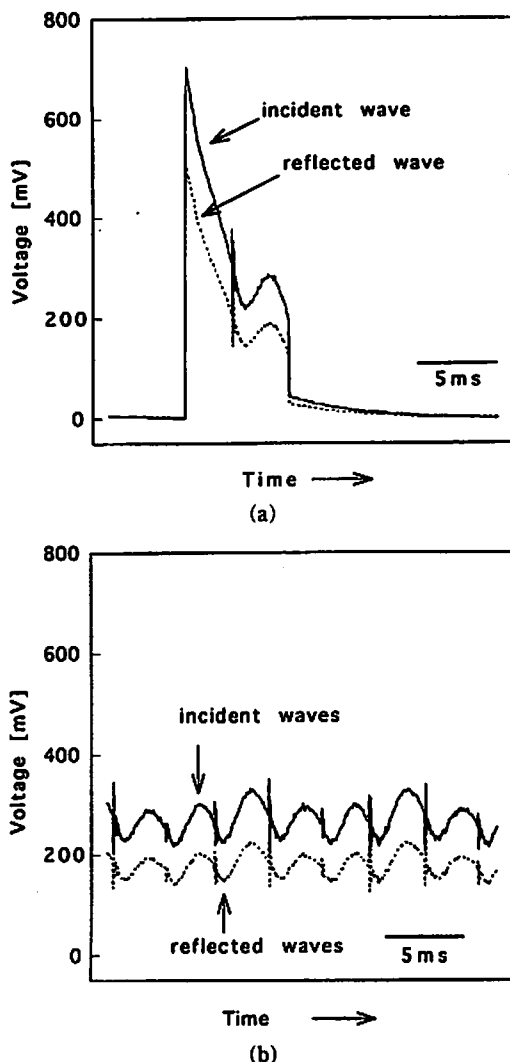


Fig. 5 Output of incident waves and reflected waves. (a) pulse wave (anode current: 0.10A); (b) continuous waves (anode current: 0.18A).

振が起きるようになる。パルス波発振はリップルで起きるため、ピークの出力は連続波の出力より大きくなったのであろう。ただし、パルス波は発振していない時間があるので、その平均電力は連続波の電力より低くなる。パルス発振を利用すると平均電力が小さくてもよいので、連続波より小さい発振装置が利用できる。なお、本実験では連続波領域に達するより低いアノード電流で、パルス波による放電が起きて爆薬が起爆した。

3.2 起爆結果

3.2.1 爆・不爆の判定

本実験における試料雷管の爆・不爆の判定基準は予備試験の結果から Table 1 に示すように完爆、半爆、

Table 1 Judgement criteria of initiation

Judgement	Symbol	Assesment Criteria
Explosion	×	The shell was completely shattered.
Incomplete explosion	△	The shell was deformed and explosion sound was observed.
No explosion	○	The shell kept its original shape.

不爆に分けた。

Fig. 6 に完爆、半爆、不爆の例を示す。Fig. 6 aはRDXが完爆したときの例で、爆薬の充てんされた雷管の部分の小片になっている。Fig. 6 bはTetrylが半爆を示した例で、雷管の口がこわれている。Fig. 6 cはTNTが不爆になった例である。

3.2.2 完爆の測定例

Fig. 7 aは起爆時のパルス波の入射及び反射波の電圧を示している。図からわかるように雷管が爆発すると、入射波と反射波の電圧は爆発していない場合と比較して著しく異なる。これはマイクロ波の行路の途中で放電と爆発によって電界が変化するためである。従って、入射及び反射電圧は放電と爆発の影響を受けるため、起爆時の電圧は正確に求めることはできない。本実験では、短時間内の各パルス波の入射及び反射電圧はほぼ同じであると仮定して、起爆したパルス波の一つ前の入射及び反射電圧の値を起爆時の電圧値とした。

Fig. 7 bはアブリケータに取り付けた加速度計の観察結果で、放電と爆発による加速度変化を示している。放電による振動は、小さいため測定できない場合もあった。

Fig. 7 cは雷管の爆発によるエナメル線の切断を示している。本実験ではエナメル線の切断信号をトリガーとして、測定系を起動させ、パルス発振開始からエナメル線切断までを起爆遅れ時間とした。

Fig. 7 dはイオンギャップによる信号の測定例で、完爆を示した爆薬はいずれも爆轟していることがわかった。

Fig. 7 eは反射電圧の実測値 V_r と計算値 V_r' の比である。 V_r'/V_r が大きく変化しているところが、電界が変化したことを示し、最初のピークは放電が開始したことを示している。二番目のピークは爆発反応が開始していることを示していると思われる。

いずれの図も爆発現象の起きたパルス波の前のパルス波の発振開始時間を原点として示してある。

3.2.3 放電開始時間の観測

本実験では放電の有無、放電開始時間、放電継続時間などは放電が銅管体内で起きるために観察することができない。放電現象が起きるときは、入射電圧よりも反射電圧が放電の影響を強く受けて変化することを利用して、放電現象を観察することを試みた。

雷管が爆発すると反射波の場合は、マイクロ波が反射してくる行路で放電と爆発が起きるため、電界は大きな影響を受け、 V_r は異常な値を示す。放電による

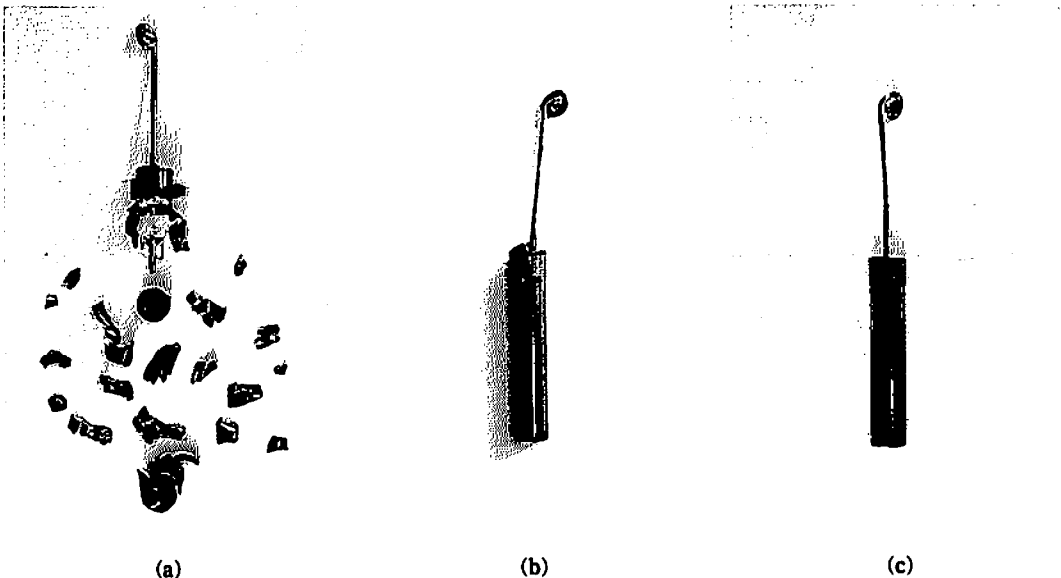
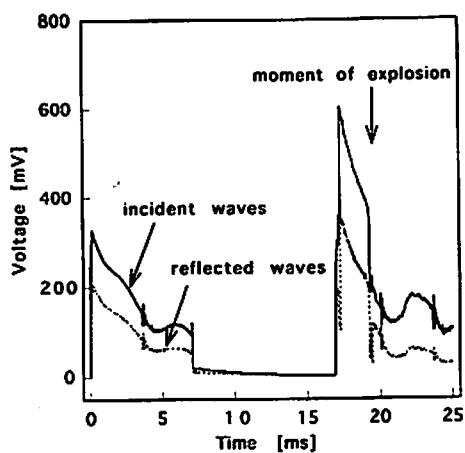
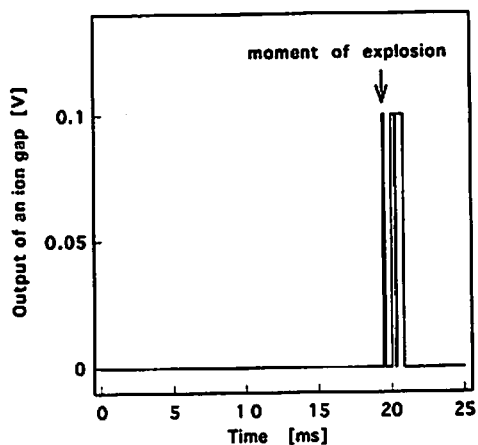


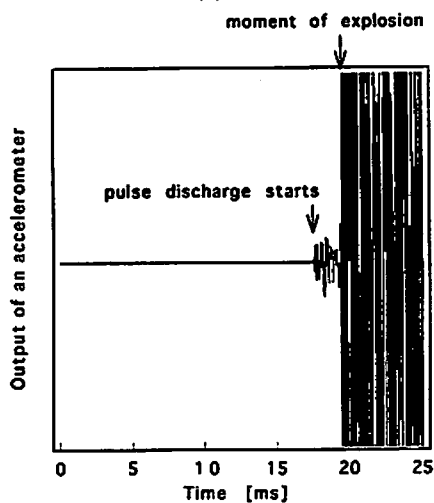
Fig. 6 Examples of (a) complete explosion, (b) half-explosion and (c) no explosion. Explosives are RDX, Tetryl and TNT for (a), (b) and (c), respectively.



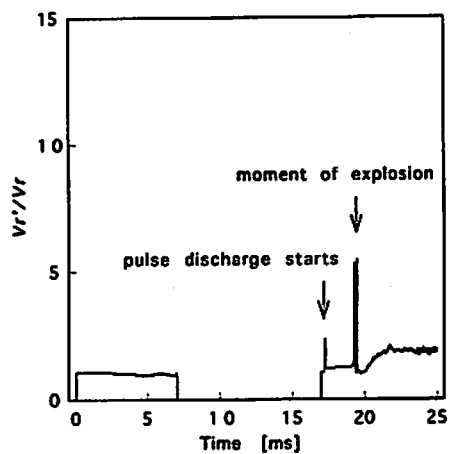
(a)



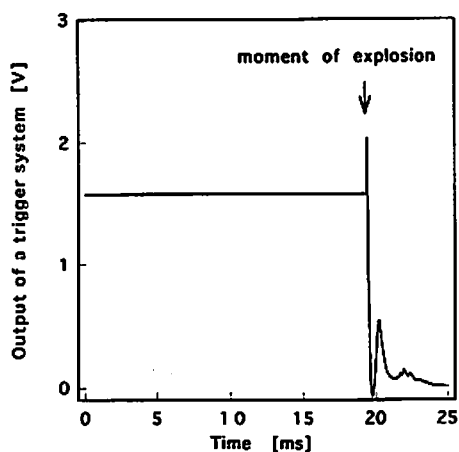
(d)



(b)



(e)



(c)

Fig. 7 Explosion of PETN. (a) Output of incident waves and reflected waves; (b) Output of an accelerometer; (c) Output of a trigger system; (d) Output of an ion gap; (e) V_r'/V_r .

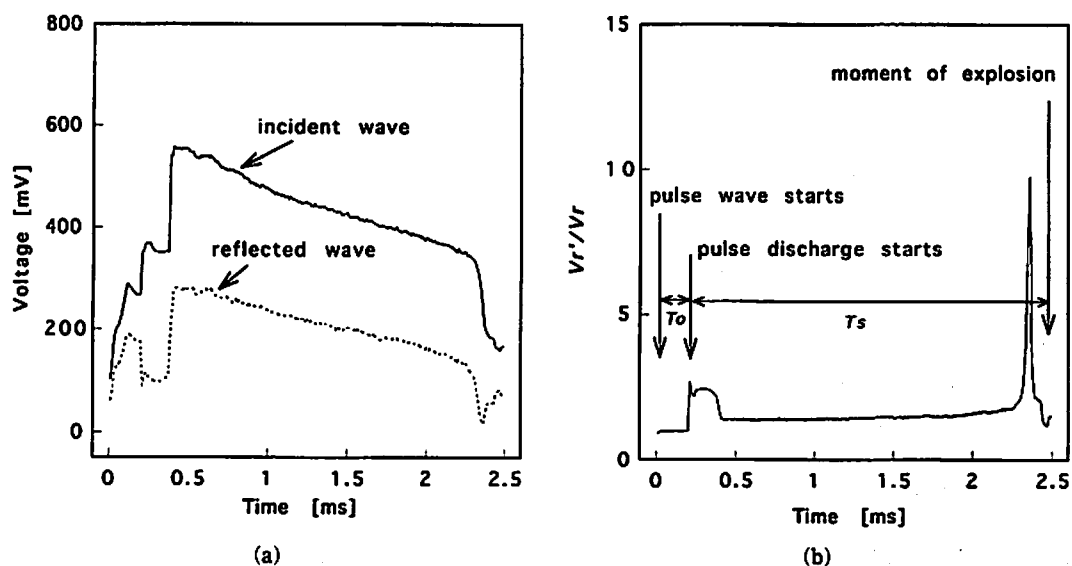


Fig. 8 Observed pulse discharge at explosion of PETN. (a) Output of incident wave and reflected wave; (b) V_r'/V_r .

Table 2 Results of microwave discharge

Explosives	Judgement	$V_{f, ave}$ (mV)	$V_{r, ave}$ (mV)	$P_{f, ave}$ (W)	$P_{r, ave}$ (W)	$P_{f, ave} - P_{r, ave}$ (W)	T_o (ms)	T_i (ms)
PETN	×	65.1	36.1	140	91	49	0.50	2.96
	×	75.8	47.0	167	125	42	0.06	3.73
	×	92.5	52.6	213	144	69	0.07	1.71
	×	70.1	40.8	152	105	47	0.15	2.17
RDX(A)	×	—	—	—	—	—	2.33	3.12
	×	74.1	40.7	163	105	58	3.63	2.79
	×	90.1	49.9	206	135	71	0.03	1.92
	×	84.9	49.4	192	133	59	0.97	1.57
RDX(E)	×	67.5	39.6	146	102	44	0.05	0.45
	×	—	—	—	—	—	0.74	1.22
	×	54.8	32.2	114	80	34	0.17	1.15
	×	82.7	46.7	186	124	62	2.73	0.55
HMX(A)	×	104.7	59.5	248	168	80	1.81	3.58
	×	87.7	50.8	199	138	61	3.83	2.14
	×	101.4	54.6	238	151	87	0.20	1.25
	×	91.5	52.7	210	144	66	0.28	1.15
HMX(E)	×	77.4	44.9	171	118	53	0.36	1.90
	×	82.4	44.9	185	118	67	0.19	1.22
	×	66.0	34.2	142	85	57	1.37	1.62
	×	71.9	39.0	157	100	57	0.22	0.65
Tetryl	○	—	—	—	—	—	—	—
	△	—	—	—	—	—	0.27	2.76
	×	81.2	48.1	182	129	53	0.12	1.57
	×	71.1	40.1	155	103	52	0.10	1.18

— : no results.

電界の変化の影響を受けて、 V_r は大きく変化をするので、放電の影響の少ない V_i から(3)式で求めた値を V_i' とし、両者の比 V_i'/V_r を比較することで放電現象を観察できる。放電開始は V_i'/V_r に大きな変化の観察されたときである。Fig. 8 aはマイクロ波のパルス波照射により、PETNの爆発したときの入射波と反射波の電圧の変化を示し、Fig. 8 bはそのときの V_i'/V_r の変化を示している。パルス波が発振されると約0.2ms後に放電が開始し、放電開始後数ms後にPETNは起爆している。ここではパルスの発振開始から放電開始までの時間を T_0 とし、放電開始から爆薬が爆発するまでの時間を起爆遅れ時間 T_d とする。両図ともパルス波の発振開始時間を原点としている。

3.2.4 各試料の起爆結果

各試料雷管にマイクロ波を照射した結果をTable 2に示す。PETN, RDX, HMXはすべて完爆したが、Tetrylは完爆以外に半爆、不爆も観察された。TNTはいずれも不爆であった。平均入射電力 $P_{f, ave}$ と平均反射電力 $P_{r, ave}$ は(1)及び(2)式に平均入射電圧 $V_{f, ave}$ と平均反射電圧 $V_{r, ave}$ の値を代入して求めた。 $V_{f, ave}$ から求めた $P_{f, ave}$ と $V_{r, ave}$ から求めた $P_{r, ave}$ の差 $P_{f, ave} - P_{r, ave}$ を平均吸収電力とした。 $P_{f, ave} - P_{r, ave}$ は $P_{f, ave}$ にほぼ比例し、 $P_{f, ave}$ の約1/3が爆薬の起爆に使用されていることがわかった。

4. 結 論

マイクロ波発振器の放電特性を調べた後、雷管にPETN, RDX, HMX, Tetryl及びTNTを雷管管体に充てんし、パルスマイクロ波放電で起爆させることを

試み、次の結果が得られた。

- (1) 測定された反射電圧と入射電圧より求められた反射電圧の比が大きく変化する点が、放電開始時であることがわかった。
- (2) マイクロ波が連続波として安定して発振する前のパルス波は、低アノード電流で大きな電力が発生し、二次爆薬の起爆に有効であることがわかった。
- (3) PETN, RDX及びHMXはすべて完爆したが、Tetrylは完爆は半数、TNTはすべて不爆となった。
- (4) 完爆したPETN, RDX及びHMXについて、起爆の際の入射電力を比較すると、 $PETN < RDX < HMX$ となり、PETNが最も起爆しやすかった。
- (5) 起爆したときのマイクロ波の入射電力は、マイクロ波による誘電加熱起爆の場合より低い値を示した。
- (6) 粒径の異なるRDXとHMXを比較すると、粒径の小さいものが起爆しやすかった。
- (7) 起爆遅れ時間は、 $HMX < RDX < PETN$ となった。

文 献

- 1) K. Hasue, M. Tanabe, S. Nakahara, S. Tashiro, F. Okada, Kogyo Kayaku, 46, 87 (1985)
- 2) 運江和夫, 渡辺信経, 中原正二, 大井幸一, 岡田文明, 工業火薬, 47, 70 (1986)
- 3) 黒田英司, 工業火薬, 44, 103 (1983)

Initiation of secondary explosives by microwave discharge

by Kazuo HASUE*, Kenji NAKASHA*, Shoji NAKAHARA*
and Yoshio NIKAWA**

Microwave at 2450MHz was used to initiate secondary explosives. In this experiment, an explosive was initiated by electric discharge in the shell caused by pulse wave irradiation. The pulse waves were generated at less anode current than CW mode. Five kinds of secondary explosives such as PETN, RDX, HMX, Tetryl and TNT were confined in the shell. All sample shells of PETN, RDX and HMX exploded and half numbers of shells of Tetryl exploded but no sample shells of TNT exploded. The order of microwave powers for initiation of explosives were PETN, RDX and HMX. In the case of RDX and HMX whose particle sizes were in the same region, the smaller particle size explosive required less microwave power.

(*Department of Chemistry, National Defense Academy, 1—10—20 Hashirimizu, Yokosuka, Kanagawa

**Department of Communication Engineering, National Defense Academy, 1—10—20 Hashirimizu, Yokosuka, Kanagawa)
