

無線電波に対する電気雷管のエネルギー受信特性

旭化成株式会社 雷管工場技術開発グループ

小坂 安則

黒木 和弘

旭化成株式会社 生産技術センター自動検査・計測開発室

加藤 浩之

はじめに

放送や通話，通信の無線化で我々の生活空間には目に見えない様々な電波が飛び交っており，特に近年携帯電話を中心とした誰もが容易に電波発生源を持ち運び，移動できるという生活様式になってきた。

これは，大変便利になった一方電波の発生源が電気雷管に接近する可能性が有り，その安全性を危惧する声も出ている。また，微小出力の無線を発破現場で使用したいが電気雷管に対してその安全性はどうなのかというユーザーのご質問もある。

社団法人全国火薬類保安協会発行の保安教育講習用テキスト¹⁾でも各種電波が電気点火に及ぼす影響と，その取り扱いの注意点が具体例をあげて解説されている。

関連した研究例では岡崎一正氏の高周波感応による電気雷管の発火²⁾では周波数7,000kHzで比較的大出力(10W~150W)の無線電波によって電気雷管に誘起される電流値を測定し発火電流以上の測定値も得られている。測定結果から推定式を導出し，信号源が近接したときの電流値など様々な要素を推定している。

また，岩武周佐氏の電波による電気雷管の暴発を防止するための安全指針について³⁾では米国火薬類製造会社協会における安全指針の中で標準化されている各種放送局の出力別安全距離を紹介し，AM放送局からレーザー発振に至る広範な安全(保安距離)指針を展開している。

水島容二郎氏のトランシーバー電波と電気雷管保安⁴⁾では周波数27MHz帯，出力0.1Wの携帯型無線機の電界強度測定結果を中心に考察している。

村田健司氏は携帯電話の特性と電磁波レベルに関する調査及び携帯電話・通信機器の特性⁵⁾で携帯電話(出力0.8W)の電磁波レベル測定結果を中心に考察している。

近年通信機器技術の進歩とともに高い周波数帯域が使用されるようになり，出力も通信状況により自動的に変化したり電波の種類も様々なものが使用されるようになった。

一方電気雷管は脚線を通じて点火エネルギーを供給する必要上，その脚線形状が特定電波の周波数と合致したとき無線の高周波エネルギーが電気雷管内に入力する可能性が考えられ，本研究レポートでは電気雷管の脚線がアンテナとして作用したときの各種無線電波のエネルギー受信特性を実験評価し，無線電波の周波数と出力とで電気雷管が発火する可能性について考察した。

1 各種電波の種類と特性

電波は周波数の大きさによりAMラジオ等に使用される中波(MF0.3~3MHz)，長距離通信に使用される短波(HF3~30MHz)，FMラジオやテレビで昔から使われている超短波(VHF30~300MHz)，特定小電力無線や携帯電話に使用される極超短波(UHF300~3GHz)，さらにその上の周波数で最近良く無線LANやITSに使用されるマイクロ波(SHF)があり，その特性は周波数が高くなるほど波長に比例して受信アンテナが短くなることと電波到達の直線性が増すことである。

また，出力は特定小電力の10mW，PHSの80mW，携帯電話の800mW，タクシー無線等の約10W，さらには放送局の数KWと様々であり，

当然のこと出力の大きい電波は電気雷管の発火の可能性に対して危険であり、微小出力は危険性が小さいと言える。

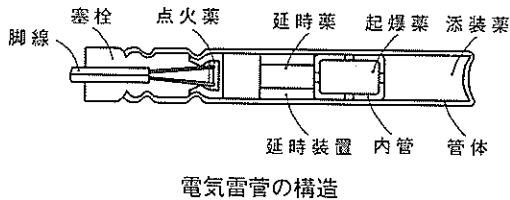
近年多くの人を持ち歩いている携帯電話の特性は、通信方式により若干異なるが使用周波数は、NTTDOCOMO, au, J-PHONE等の事業者毎に割当てられており、800MHz帯、1.5GHz帯が主で最新のW-CDMA方式では、2GHz帯が使用されている。

送信出力については、最大800mWで基地局からの指示でパワーコントロールも行っている。

また、注意すべきことは通話中だけでなく基地局との定期通信を行うので時々電波を出しているということである。

2 電気雷管の構造と特性

電気雷管は約6mm径の銅管体の中に点火薬、延時薬、起爆薬、添装薬が配置されており、線径0.42mm長さが1.8mから9mの2芯平行線の脚線を通じて外部から電流を流すことで点火薬に接した白金線が瞬時のうちに発熱して発火起爆する。



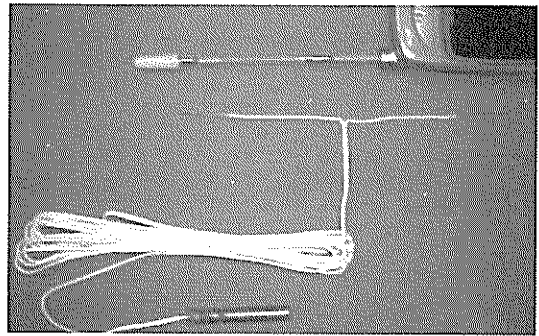
電気雷管の構造

脚線を通じて点火エネルギーを供給する必要上、切羽で電気雷管を使用するとき脚線末端の短絡部をはずして平行線を引き裂くときにその脚線形状が特定の周波数に対して1/2波長ダイポールアンテナとして同調し、無線電波を拾う可能性が考えられる。

3 実験内容とその結果

(1) 無線電波の受信特性

電気雷管を切羽で使用するとき脚線末端の短絡部をはずして平行線を引き裂くときに1/2波長ダイポールアンテナとして特定の周波数に対して同調し、無線電波を拾う可能性があることに着目して実験を行った。



(電気雷管の脚線を引き裂いた状態と携帯電話)

① 脚線アンテナの受信特性と距離減衰

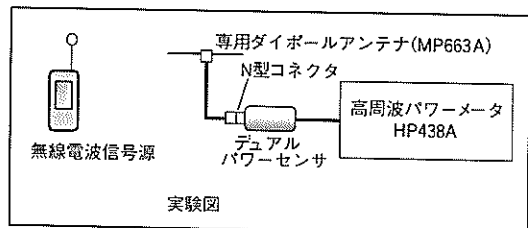
実験では430MHz帯のアマチュア無線機(KENWOOD TH78)を用いて出力2Wで電波を送信し、受信は当該周波数に設定した専用1/2波長ダイポールアンテナ(MP663A アンテナ長32cm)を水平に設置してアンテナで受けるエネルギーを高周波パワーメータ(HP438A)で計測した。

障害物のない広場で離れた位置から徐々にアンテナへ接近し最終的には送信アンテナと受信アンテナとを接触させた。

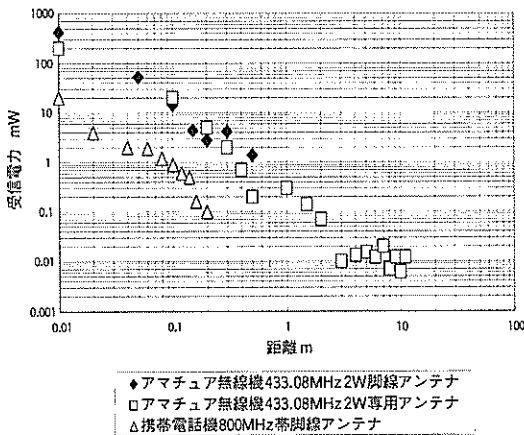
また、同様に電気雷管に使用する線径0.42mm長さ1.8mの脚線先端を同一長の32cmに引き裂いて受けるエネルギーの距離減衰を計測した。

さらに、脚線アンテナ長を14cmにしてDOCOMOの携帯電話(800MHz帯)を通話状態にして同様に行った。

携帯電話の場合、送信が連続でないこと、出力パワーが特定できないこと、基地局からの電波も測定してしまうことから、今回のパワーメータでの測定では、正確なデータが測れないため参考値に留めた。



実験の概念図を示す(図1)



グラフ1 アンテナ受信電力 距離減衰特性

その結果グラフ1の様に電気雷管の脚線でも専用アンテナと同レベルの受信エネルギーを得た。

また、グラフより受信エネルギーの距離減衰は距離の -1.6 乗に比例して減衰した。

最大受信エネルギーは送信アンテナと受信アンテナとを接触させた時に得られた。なお、接触させたときの距離はグラフ上0.01mとした。

② 脚線開き長と受信エネルギー

電気雷管の線径0.42mm長さ1.8m脚線の先端を引き裂いて $1/2$ 波長ダイポールアンテナを作り、その開き長さを変えて受信エネルギーを前述同様に測定した。

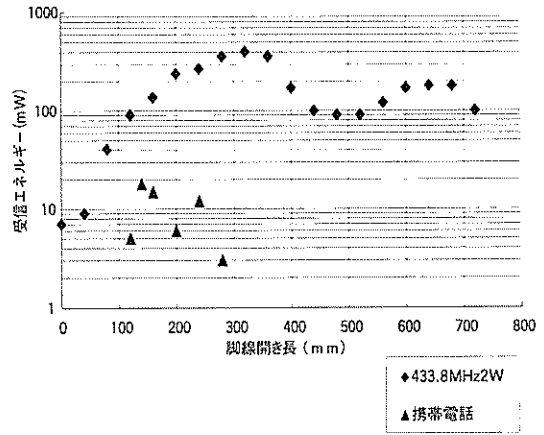
送信は430MHz帯のアマチュア無線機出力2W、及びDOCOMOの携帯電話を通話状態にしてそれぞれ別々に行った。

送信アンテナと受信アンテナは平行に接触させた状態で最大エネルギーを受信した時の値を記録した。

その結果グラフ2の様に430MHz帯のアマチュア無線機での最大値は脚線を引き裂いて開いたアンテナ長がほぼ $1/2$ 波長に相当する32cmであった。

さらに広げるとほぼ1波長の64cm付近でも再び受信エネルギーの向上が見られた。

また、DOCOMOの携帯電話での最大値は脚線を引き裂いて開いたアンテナ長がほぼ $1/2$ 波長に相当する14cmであった。



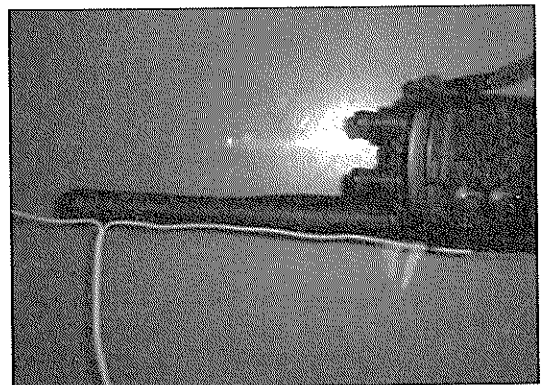
グラフ2 脚線開き長と受信エネルギー

なお、脚線を引き裂かなかった時は先端を短絡させてもさせなくても430MHz帯のアマチュア無線機の場合受信エネルギーは約7mWと微少であり、DOCOMOの携帯電話では受信エネルギーは検出できなかった。

③ アンテナ接触位置と受信エネルギー

430MHz帯のアマチュア無線機のアンテナを受信用に設置した電気雷管脚線（先端を32cmに開いて水平設置）と接触させたとき、その接触位置を様々に変化させて受信エネルギーが最大になる位置を探ってみた。このとき送信出力は2W、0.5W、0.01Wと振ってみた。

また、同様にDOCOMOの携帯電話でも電気雷管脚線の開いたアンテナ長14cmで接触させて行った。



(電気雷管の脚線を開いて無線機のアンテナと接触させた状態)

その結果、送信機のアンテナと開いた脚線とは平行に接触させて尚かつ、中央から少し右または左にずらした位置が最高にエネルギーを受信した。

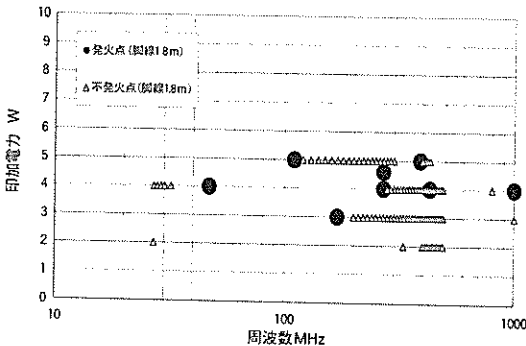
表1 送信出力に対する最大受信エネルギー

送信機	送信出力 (W)	受信 (W)	受信割合 (%)
アマチュア無線機 430MHz帯	2	0.415	21
	0.5	0.182	36
	0.01	0.0008	8
携帯電話 800MHz帯	最高0.8 実質不明	0.018	不明

送信周波数と送信出力に対する最大受信エネルギーは表1の結果であった。

- (2) 高周波エネルギーによる電気雷管の発火特性
通常、電気雷管の発火は直流電流を流して行うが、実験では無線電波に使用するものと同じ高周波をシグナル・ジェネレータとRFパワーアンプで発生させてそれを同軸ケーブル（8D2V）で電気雷管に入力し周波数と出力を変化させたときの電気雷管発火の有無をみた。

なお、実験は旭化成瞬発6号電気雷管脚線長1.8mを用いたが、実験上の安全を考慮して起爆薬と添装薬を除いた点火薬だけの電気雷管も一部用いた。



グラフ3 高周波電気エネルギーに対する電気雷管発火特性

その結果高周波エネルギーを電気雷管へ印加すると3Wから5Wの間で発火した。

また、周波数による特徴的变化は見られなかった。

なお、ベクトルネットワークアナライザを用いて電気雷管単独のときと脚線が付いたときとで高周波を通じてインピーダンスを測定したが直流を通じたときと異なり特定の周波数で共振点が生じそれが脚線の位置や形状によって変化し、かなり複雑な結果となった。

恐らく、このインピーダンスの高低が、発火に必要なパワーの差になっていると考えるが、この高周波を流したときのインピーダンスの挙動については引き続き検討を行う予定である。

4 結果の考察

- (1) 脚線アンテナの受信特性と距離減衰について。

自由空間における受信電力は以下の式であらわされる

$$W_r = P_t / 4\pi d^2 \quad \dots \dots (1)$$

W_r : 受信電力 [W/m²]

P_t : 放射電力 [W]

d : 距離 [m]

式(1)より無線電波の距離減衰は距離の-2乗に比例し、理論線にはほぼ一致した結果を得た。

なお、今回の測定で-1.6乗という減衰率が理論より小さかったのは、送信側と受信側が接近した実験であったため直達波以外に反射波のエネルギーも加わっていたからだと考えられる。

また、電気雷管の脚線を開いたアンテナでも同様の受信エネルギーと距離減衰の特性があることが確かめられた。

- (2) 脚線開き長と受信エネルギーについて

空間の電波を受信するためには、その波長にアンテナ長を同調させる必要があり、周波数と波長の関係は以下の式で示される。

$$\lambda = C/f \quad \dots \dots \dots (2)$$

λ : 波長 [m/c]
 C : 光の速度 3×10^8 [m/s]
 f : 周波数 [c/s]

1 / 2 波長ダイポールアンテナの基本式

$$L = (\lambda / 2) \times k \quad \dots \dots \dots (3)$$

L : 1 / 2 波長ダイポールアンテナ長 [m]
 k : 波長短縮率 (高周波エネルギーが電線の中を伝わる速度は空気中のそれより遅くなるので $k=0.9 \sim 0.95$ であり, それはアンテナの線径や材質で異なる)

(2)(3)式より実験した430MHzのLは32cmとなり実験で最大エネルギーを得た長さと同程度一致した。

また携帯電話880MHzではLは15cmとなり実験で最大エネルギーを得た長さ14cmとほぼ一致した。

(3) アンテナ接触位置と受信エネルギーについて
 送信機のアンテナと開いた脚線とが平行に接触させたときに最高にエネルギーを受信したが, 受信エネルギーが送信出力以上になることはないので, 電気雷管の発火の可能性については最大送信出力を見てもおくことが必要であると考えられる。

(4) 高周波エネルギーによる電気雷管の発火について

高周波電源においては, 出力インピーダンスは50Ω, 若しくは75Ωが一般的であり, 実験で用いた高周波電源の出力インピーダンス50Ω系の場合について考察する。

高周波電源と電気雷管の負荷回路系を図2に示す。

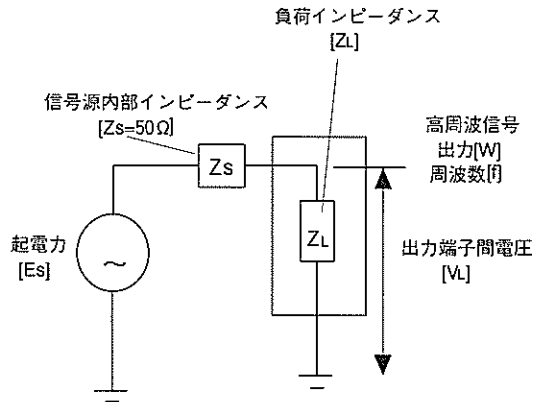


図2 高周波信号源の等価回路

前記高周波信号源の等価回路(図2)において, 出力電力は $Zs=ZL=50\Omega$ の時で定義される。

この時, 出力電力 [W] と端子間電圧 [VL] との関係は下式によって求められる。

$$W = VL^2 / Zs \quad \dots \dots (4)$$

また, $Zs=ZL$ から起電力 [Es] は, $Es = 2VL$ となるから(4)は下式で表される。

$$W = Es^2 / 4 Zs$$

Zs は, 50Ω系信号源のため下記となる。

$$W = Es^2 / (4 \times 50) = Es^2 / 200 \quad \dots \dots (5)$$

また, 脚線をアンテナとして考えた時は, この Zs がアンテナの放射抵抗となる。

次に, $Zs \neq ZL$ である実際の電気雷管を接続した時を考えると, 雷管のインピーダンス [ZL] と, JIS K 4806で規定されている30秒間通電時の不発火電流値 [$I=0.25A$] から, それに必要な起電力 [Es] は, 下式によって求められる。

ここで脚線付き雷管インピーダンスは, 今回の実験結果より周波数に関係なく最低のインピーダンスを考える必要があるので1.8m脚線電気雷管のDC抵抗値 $ZL=1.2\Omega$ を用いるものとする。

$$Es = (Zs + ZL) I = (50 + 1.2) \times 0.25 = 12.8 \text{ (V)}$$

よって, この起電力 [Es] を(5)式に代入してWを計算すると電気雷管が発火しない高周波信号源出力は0.8Wとなる。

5 結論

- (1) 脚線末端が短絡されている電気雷管の製品状態では通常使用される無線電波のエネルギーが電気雷管内部に入り発火する可能性はない。
- (2) 電気雷管を切羽で使用するとき脚線末端の短絡部をはずして脚線を引き裂いたときにその開いた長さが、近くで使用する電波の1/2波長となる付近で1/2波長ダイポールアンテナとして同調し、無線電波を拾いエネルギーが電気雷管内部に入る可能性がある。
- (3) 無線電波の発生源に対して、電気雷管の脚線を引き裂いて開いた長さが1/2波長ダイポールアンテナとして同調して最も大きく無線電波エネルギーを拾うのは電波発生源のアンテナと引き裂いた脚線を接触させたときである。
その程度は方向や位置により変化するが、実験では最大で無線電波出力の1/3～1/10のエネルギーであった。
- (4) 最も良い条件下で100%無線電波のエネルギーが電気雷管に入れば周波数にほとんど無関係に無線電波出力0.8W以上は電気雷管を発火するエネルギーを持ち、その可能性がある。特定小電力無線（10mW）程度では電気雷管を発火するエネルギーは持たない。

引用文献

- 1) 「火薬類保安手帳所持者保安教育講習用テキスト」社団法人全国火薬類保安協会、p145～146（平成13年度発行）
- 2) 岡崎一正「高周波感応による電気雷管の発火」工業火薬協会誌第13巻（昭和27年）
- 3) 岩武周佐「電波による電気雷管の暴発を防止するための安全指針について」工業火薬協会誌第38巻（昭和52年）
- 4) 水島容二郎「トランシーバー電波と電気雷管保安」工業火薬協会誌第38巻（昭和52年）
- 5) 村田健司「携帯電話の特性と電磁波レベルに関する調査及び携帯電話・通信機器の特性」火薬と保安Vol.125（2002年）