

高周波エネルギーに対する電気雷管の発火特性

黒木和弘*, 小坂安則*, 加藤浩之**

近年の移動体通信機器の普及により、火薬類が電磁波環境に晒される機会が多くなっている。また一方では、火薬を取り扱う現場において移動体通信技術を積極的に利用する動きもある。しかしながら、電磁波に対する火薬類の取扱いに関する明確な規制はなく、また実態に則した指針は少ない。

今回、これら通信機器が放射する高周波エネルギーを有線によって直接電気雷管に入力してその挙動を確認した。その結果、高周波エネルギーに対する電気雷管の発火感度は、その負荷特性が大きく影響することを確認した。また、高周波エネルギーによっても、電気雷管の発火感度は電気雷管に流れる電流に依存するので、高周波エネルギー伝搬回路系をモデル化して、電流値を推定した。その結果、信号源の出力インピーダンスが $50\ \Omega$ の場合において、出力電力が $0.8\ \text{W}$ 以上の場合は危険性が高いと推定された。

1. 緒言

近年の科学技術及び情報化の著しい進展により、電波利用に対する需要は高まる一方である。

特に電波を用いた移動体通信は、国民生活のなかに急速に普及してきており、総務省総合通信基盤局の発表によれば、平成14年9月末において、携帯電話の契約件数は72,080,915件に達している。¹⁾ これら移動体通信技術は、火薬類を取り巻く環境においても様々な方面に影響を与えつつある。これら無線機器等による電磁波が電気雷管に与える影響については、過去から様々な検討がなされている。^{2), 3), 4), 5)}

本報告では、過去の検討結果を参考にして、高周波電気エネルギーを実際に電気雷管に入力してその挙動を確認したので、その結果について報告する。

2002年12月19日受付

2002年1月21日受理

*旭化成株式会社雷管工場技術開発グループ
〒882-0854 宮崎県延岡市長浜町4丁目5003番地の1
TEL:0982-22-6741
FAX:0982-22-6436

e-mail kurogi.kd@om.asahi-kasei.co.jp

**旭化成株式会社生産技術センター自動検査・計測開発室

〒416-8501 静岡県富士市鮫島2-1

TEL:0545-62-2141

FAX:0545-62-2139

e-mail hkatoh@pte.fuji.asahi-kasei.co.jp

2. 電波の種類と特性

一般に用いられる商用電波の種類は周波数の大きさによりAMラジオ等に使用される中波(MF 0.3MHz~3MHz)、長距離通信に使用される短波(HF 3MHz~30MHz)、FMラジオやテレビで昔から使われている超短波(VHF 30MHz~300MHz)、特定小電力無線機や携帯電話に使用される極超短波(UHF 300MHz~3GHz)、さらにその上の周波数で最近良く無線LANなどに使用されるマイクロ波(SHF 3GHz~30GHz)等があり、その特性は周波数が高くなるほど電波到達の直線性が増すなどの特性を持つ。また、放射電力に関していえば、移動体通信機器の出力は特定小電力無線機で10mW、PHS電話機で80mW、携帯電話機で800mW、タクシー無線で約10Wであり、さらに放送局においては数kWと用途に応じて多様化されており、電気雷管の発火の可能性に対しては、出力の大きい電波が危険であることはいうまでもない。参考として、総務省が発行している情報から日本国内の電波の利用状況(周波数帯ごとの主な用途と電波の特徴)をFig. 1に示す。

3. 実験

3.1 試料

実験では、旭化成株式会社で製造・販売されている電気雷管(登録商標 SUNJED)を用いた。

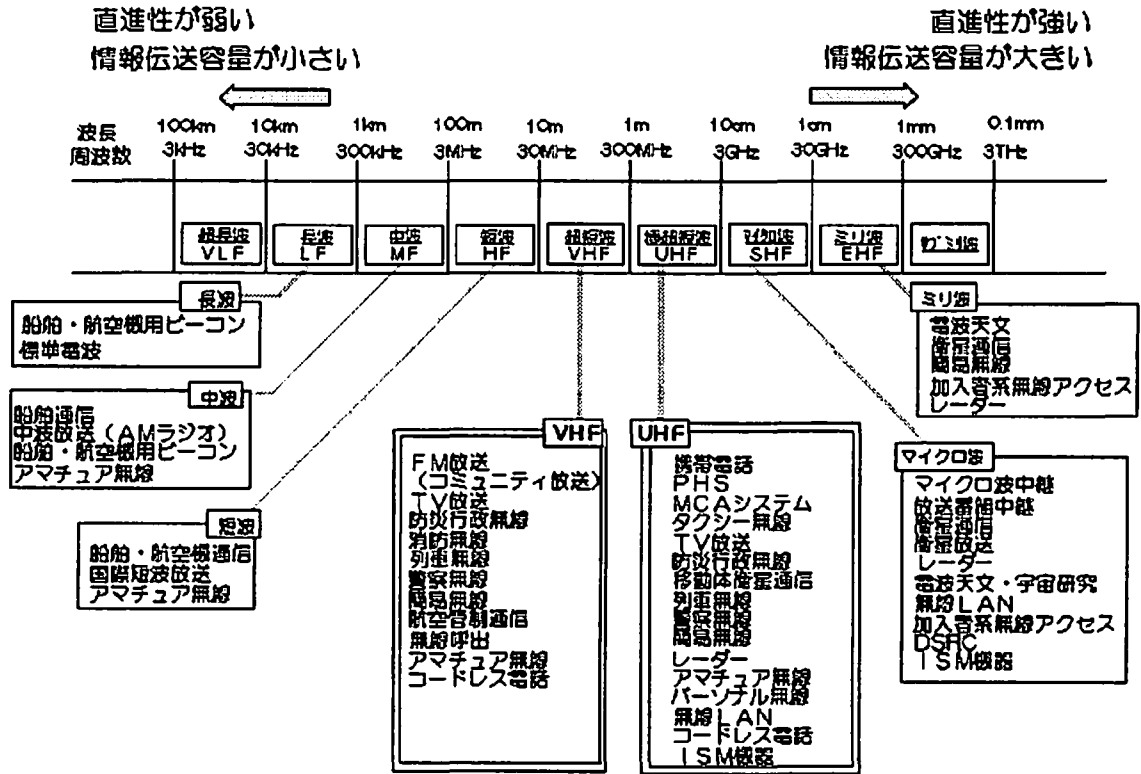


Fig. 1 The present condition of electric wave use to see by the frequency obi.

電気雷管の構造をFig. 2に示す。

電気雷管の直流電流に対する発火特性についてブルーストン法を用いて評価したところ、50%発火推定値は約390mAであった。(電気雷管の電流感度の指標としては、JIS K 4806において

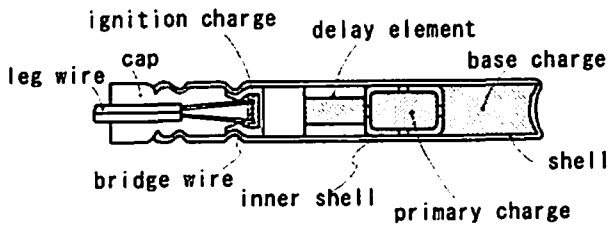


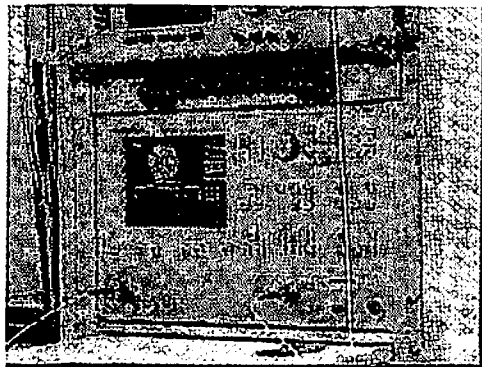
Fig. 2 The structure of the electric detonator.see by the frequency obi.

0.25Aの直流電流を30秒間通電して発火しないことと規定されているが、交流電流に関する規定はない。)

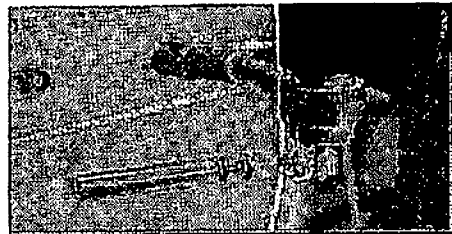
3.2 電気雷管のインピーダンス測定

電気雷管のインピーダンス測定は、ベクトルネットワークアナライザ(Wiltron社製/型式37369A)により、電気雷管に対して40MHz~2GHzの高周波電気信号を入力してSパラメータ(反射係数 Γ)を測定し、それを負荷インピーダンスに変換する方法を用いた。

尚、インピーダンスを測定するに当たっては、電気雷管部の火薬類(点火薬、延時薬、起爆

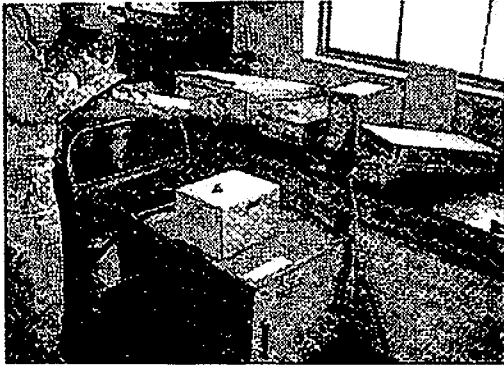


(a) Measurement device.

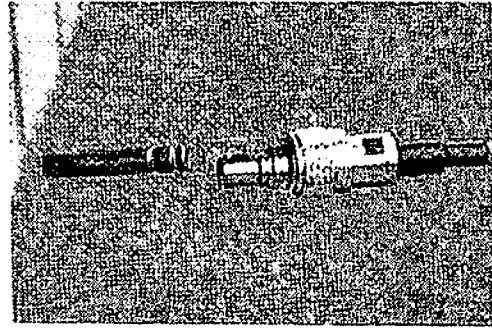


(b) A state of connection.

Fig. 3 The conditions of measurement the impedance.



(a) Measurement device.



(b) A state of connection.

Fig. 4 The conditions of the ignition test.

薬, 添装薬)を除いた。Fig. 3に実験状況の写真を示す。

3.3 電気雷管の発火感度測定

高周波電気信号を有線で電気雷管に直接入力し、発火感度を測定した。入力する高周波信号は、シグナルジェネレータ(アンリツ社製/型式MG3601A)の出力をRFパワーアンプ(ENI社製/604L或いは5100L)により増幅する方法を用いた。なお、無線での評価は、電波法にふれる条件があることと、雷管への入力エネルギーが測定条件により変化して定量化が困難なため実験では有線による直接入力法を取った。

入力する高周波信号の電力レベルの調整は、

印加前に予めパワーメーターによって調整するか、入力する電力を上げる過程において発火したときの電力をパワーメーター(アジレントテクノロジー社製/型式HP438 A)によって、測定する方法をとった。尚、前記パワーメーターには専用のセンサが必要であるが、今回は周波数範囲が100kHz~4.2GHzの電力を測定できるデュアルパワーセンサ(アジレントテクノロジー社製/型式8482B)を用いた。Fig. 4に実験状況の写真を示す。

4. 実験結果及び考察

4.1 高周波エネルギーに対する電気雷管の負荷特性

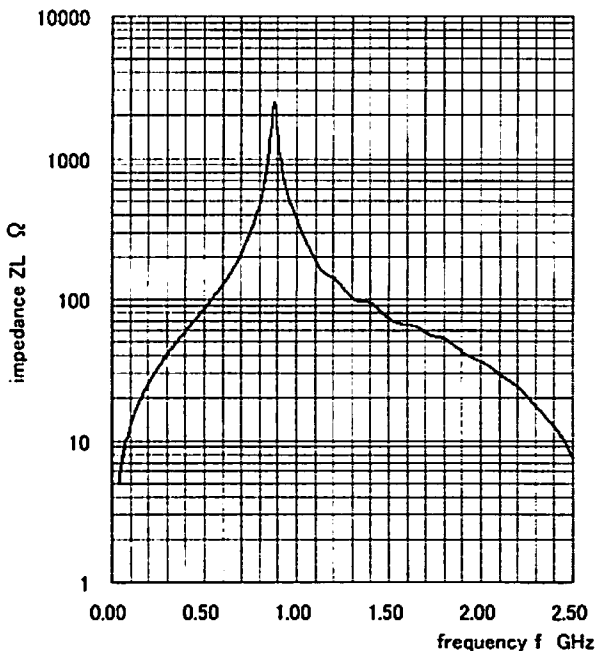


Fig. 5 (a) Impedance characteristic of the electric detonator (the length of the leg wire is less than 5mm).

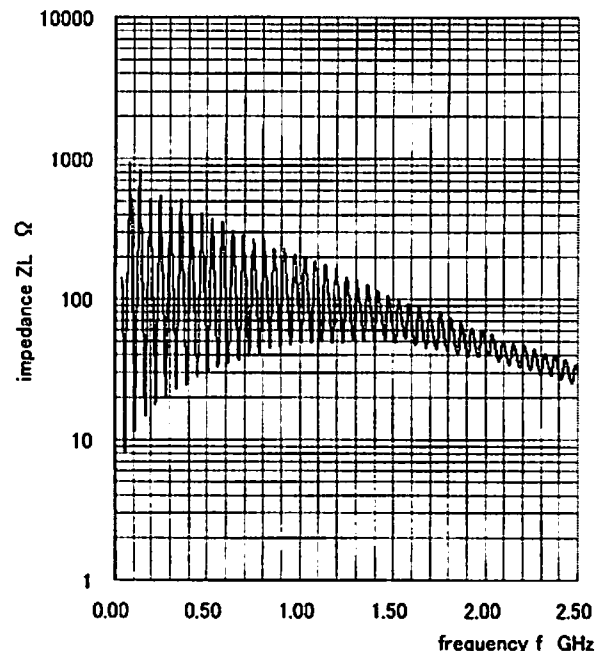


Fig. 5 (b) Impedance characteristic of the electric detonator (the length of the leg wire is 1.8m).

高周波に対する負荷(インピーダンス)特性を Fig. 5 (a), (b)に示す。Fig. 5 (a)は脚線をほとんど切り落として電気雷管単体で測定した結果であり、(b)は脚線1.8 mを付けた製品形状で測定した結果である。Fig. 5 (a)及びFig. 5 (b)によれば、測定した周波数の範囲(40MHz~2GHz)において、脚線の有無或いは長さにより電気雷管の負荷特性が大きく変化することがわかった。

一般にインピーダンス Z_L は(1)式によって表される。

$$Z_L = R_L + jX_L \quad |Z_L| = \sqrt{R_L^2 + X_L^2} \dots (1)$$

(1)式において、 R_L はインピーダンスの実数部であり、 X_L はインピーダンスの虚数部を示しており、複素インピーダンスで表される。

Fig. 5 (a), (b)において、インピーダンス($|Z_L|$)が最上点と最下点を示す周波数がそれぞれ共振周波数 f_0 を示しており、いずれも前記虚数部 X_L がゼロになる周波数となる。共振時は、回路に流れる電流の全てが実数部 R_L によって熱消費される事を示している。但し、一般に電気機器の電波障害は、インピーダンス最大の共振時に誘起される最大電圧によって機器を構成する素子が損傷する等が問題となる。一方、電気雷管の場合は電流による発熱が問題となるので、インピーダンス最小の共振時に流れる回路電流で発火する危険性が問題となる。

Fig. 5 (a)において、脚線の長さが5mm以下の場合には前記最上点を示す共振周波数 f_0 は約880MHzの一点のみ測定され、該周波数におけるインピーダンス Z_L 値は約2.5 k Ω であった。また、前記最下点を示す共振周波数 f_0 は約2.5GHzの一点のみ測定され、該周波数におけるインピーダンス Z_L 値は約3.4 Ω であった。この場合危険な周波数帯は、インピーダンス Z_L の小さい低

周波部と共振周波数である2.5GHz付近となる。

一方、Fig. 5 (b)において、脚線の長さが1.8 mの場合には多数の共振周波数 f_0 が測定され、加えて脚線の長さ、形状等によって特性が変化することも観測された。よって、危険な周波数帯を特定することは極めて困難であることがわかった。但し、実験で最初に観測された最下点のインピーダンス Z_L は約11 Ω ($f_0=111$ MHz)であったが、高次の共振周波数毎に最下点インピーダンス Z_L は大きくなっていることから、周波数が低いほうがより低いエネルギーで発火する危険性があるといえる。

4.2 高周波エネルギーに対する電気雷管の発火特性

高周波エネルギーに対する発火特性をFig. 6 (a), (b)に示す。Fig. 6 (a)は脚線が5mm以下である電気雷管単体の発火感度であり、Fig. 6 (b)は脚線1.8 m製品形状の発火感度である。

Fig. 6 (a)においては、入力する電力の周波数が高くなるほど低下(鈍化)する傾向にあり、Fig. 5 (a)の結果に関する考察で述べたインピーダンス(Z_L)特性の傾向と一致する。また、Fig. 6 (b)においては、周波数の高低に関わらず約4 W前後で発火する結果が得られ、Fig. 5 (b)の結果に関する考察で述べたように、脚線があることによって危険な周波数帯が点在することが裏付けられた。

電気雷管が発火に至る高周波エネルギーのレベルは、実験条件(実験機器の仕様や特性及び入力する電力の周波数、または試料のばらつき等)によって異なる場合が想定されるので、推定式を用いて数値解析する。

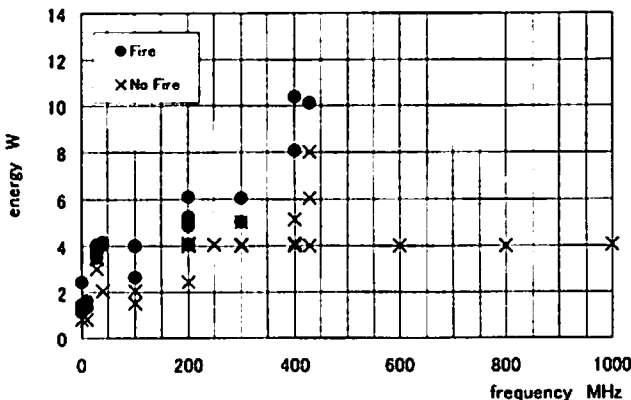


Fig. 6 (a) The ignition characteristic of the electric detonator against the high frequency energy (the length of the leg wire is less than 5mm).

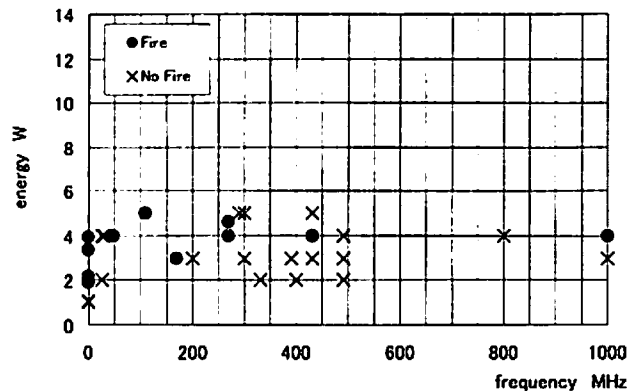


Fig. 6 (b) The ignition characteristic of the electric detonator against the high frequency energy (the length of the leg wire is 1.8m).

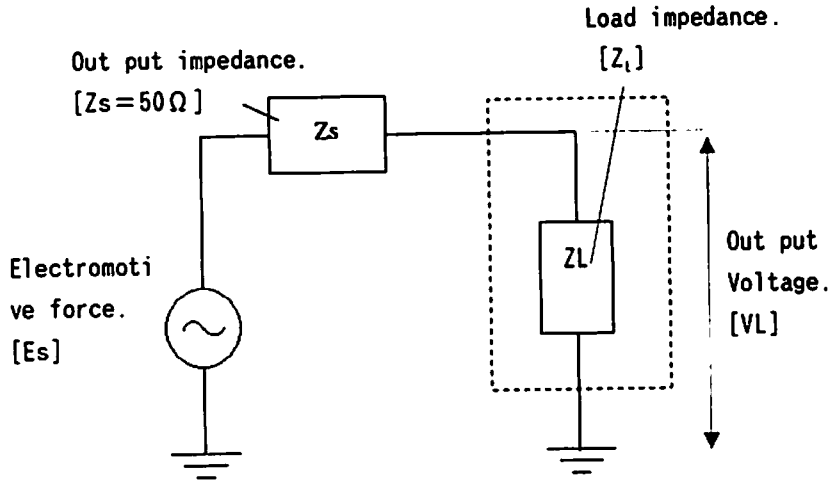


Fig.7 Model circuit.

電気雷管に対して高周波信号源の出力を入力した場合に、電気雷管に流れる電流値は(A)式で表される。

$$I = E_s / (Z_s + Z_L) \quad \dots (A)$$

また、前記Esは(B)式で表される。

$$E_s = 2 \times (W \times Z_s)^{1/2} \quad \dots (B)$$

(A)、(B)式導出の根拠は、以下の通りである。

高周波電源と電気雷管の負荷回路系をFig.7に示す。Fig.7において、出力電力(定格)は $Z_s = Z_L = 50 \Omega$ の場合で定義される。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。

$$W = V_L^2 / Z_s \quad \dots (1)$$

また、 $Z_s = Z_L$ から起電力[Es]は、 $E_s = 2V_L$ となるから(1)は下式で表される。

$$W = E_s^2 / 4Z_s \quad \dots (2)$$

(2)式より、

$$E_s = 2 \times (W \times Z_s)^{1/2} \quad \dots (B)$$

また、実際は $Z_s \neq Z_L$ であり雷管の負荷インピーダンスを Z_L とすれば、回路系に流れる電流Iは、

$$I = E_s / (Z_s + Z_L) \quad \dots (A)$$

また、脚線をアンテナとして考えた時は、この出力インピーダンス Z_s がアンテナの放射抵抗に相当する。

脚線が5mm以下である電気雷管単体の発火試験において発火したときの入力電力値及び周波数条件と、その周波数条件に対応する電気雷管のインピーダンス測定結果とを(A)、(B)式に代入して発火電流を試算した。脚線が5mm以下の電気雷管に対する発火試験によれば、周波数100MHz、出力2.66Wの信号において発火した。

この場合の電気雷管のインピーダンス Z_L は約12Ωと測定されており、(A)、(B)式によれば回路電流値は、約370mAと推定される。また、周波数430MHz、出力10.1Wの信号において発火した。この場合の電気雷管のインピーダンス Z_L は約66Ωと測定されており、回路電流値は、約388mAと推定される。電気雷管の直流電流に対する50%発火推定値は約390mAであるから、前記試算結果は直流電流感度に近似している。

(A)、(B)式を用いて電気雷管が発火に至ることのない高周波エネルギーのレベルについて、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、推定する。但し、脚線付き電気雷管のインピーダンス Z_L は、今回の実験結果より発火感度は周波数に関係なく最小のインピーダンスで計算すべきなので、脚線の長さが1.8mの場合の直流抵抗値[$Z_L = 1.2 \Omega$]を用いた。電気雷管に0.25Aを流すために必要な起電力Esは(A)式より、 $E_s = (Z_s + Z_L) I = (50 + 1.2) \times 0.25 = 12.8 (V)$ となる。故に(B)式より $W = E_s^2 / 4Z_s$ であるから、電気雷管が発火しない高周波信号源出力 $W = 0.8 W$ となる。

電気雷管の導通測定で認められている電流値である10mAを基準とすれば、同電流10mAが電気雷管に流れる場合に相当する信号源の出力電力は、約1.3mW以下である。また、例えば出力電力が10mW以下である特定小電力無線機器については、同じく(A)、(B)式より、電気雷管に流れる電流は約28mA以下と計算されるから、危険性は低いといえる。

5. 結論

高周波エネルギーに対する電気雷管の発火感

度は、電気雷管のインピーダンス特性と信号源特性(出力インピーダンス及び電力)によって左右される。雷管のインピーダンス特性は、脚線の形状、設置状態等の影響で共振周波数が低周波数側にシフトし、インピーダンス最小となる周波数が多数発生する。このことから、特定の周波数で安全領域、危険領域を分けることは困難であり、保安上は周波数に関係無く、信号源エネルギーで評価することが適当と考えられる。その結果、JIS K 4806で規定されている30秒間通電時の不発火電流値[$I=250\text{ mA}$]から電気雷管が発火しない高周波信号源出力は 0.8 W となった。このことから、携帯電話は出力が最大 0.8 W なので、JIS K 4806で規定される不発火電流を流すだけのエネルギーを持っていることになり、発火の危険性が高いことが判明した。また、特定小電力無線機等の 10 mW 以下の出力では電気雷管を発火するエネルギーは持っていないため、発火の危険性は低いものと推定される。

今回の実験では、高周波エネルギーに対する電気雷管の負荷特性を明らかにし、負荷特性と発火感度の相関関係がほぼ成立することを確認した。また、発火感度については、全ての条件が危険側に推移した場合を想定したものであるが、無線機器の安全性を厳密に検討する上では、電磁波伝搬上の減衰特性も加味されるべきであろう。

文 献

- 1) 総務省情報通信統計データベース分野別データ
移動電気通信事業加入者数の現状
発表日 : 2002年10月30日(月)
タイトル: 移動電気通信事業加入数の現況(平成14年9月末現在) <携帯電話の加入数の推移>より抜粋
http://www.soumu.go.jp/joho_tsusin/pressrelease/japanese/sogo_tsusin/021030_1.html
- 2) 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) 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) 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) 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))
- 6) 情報通信行政(IT政策)電波利用ホームページ
周波数割当て・公開 2. 周波数の公開
我が国の電波の利用状況 周波数帯ごとの主な用途と電波の特徴 より抜粋
<http://www.tele.soumu.go.jp/search/myuse/summary.html>

Ignition characteristics of electric detonators for radio frequency energy

Kazuhiro Kurogi*, Yasunori Kosaka*, and Hiroyuki Kato**

Summary

With the recent dissemination of mobile communications devices, cases have frequency arisen in which explosives are exposed to electromagnetic radiation. On the other hand, there is also a move afoot to actively utilize mobile communication techniques at locations where explosives are handled. However, not only have no definite controls been established over the handling of explosives in an electromagnetic radiation environment but there are only a few guidelines that reflect the current state of affairs.

We directly applied the radio-frequency energy radiated by such a communications device to an electric detonator through a cable and observed its behavior. As a result, it has been verified that the ignition sensitivity of an electric detonator for radio-frequency energy is greatly affected by its load characteristics. Since the ignition sensitivity of an electric detonator for radio-frequency is dependent on the current flowing in it, we formulated a model for the radio-frequency energy propagation circuit system and estimated the current value. As a result, it has been concluded that when the output impedance of the signal source is 50 Ω , a hazardous condition might occur if the output power is 0.8 W or more.

(*Explosives Division Asahi Kasei Corporation 5003-1, Nagahama-cho 4-chome, Nobeoka-shi, Miyazaki-ken 882-0854, JAPAN TEL +81-0982-22-6741 FAX +81-0982-22-6436 e-mail kurogi.kd@om.asahi-kasei.co.jp)

**Production Technology Center Automatic Inspection And Instrumentation Development Dept. Asahi Kasei Corporation 2-1, Samejima, Fuji-City, Shizuoka 416-8501, JAPAN TEL +81-0545-62-2141 FAX +81-0545-62-2139 e-mail hkatoh@pte.fuji.asahi-kasei.co.jp)

訂正とお詫び

Science and Technology of Energetic Materials 329号 Vol.64, No.1

- 目次 上より3番目の論文著者名 (誤) 藤原和夫 → (正) 藤原和人
- 目次 上より7番目の論文題名
(誤) An investigation on sympathetic detonation for high explosives in the water →
(正) An investigation on underwater sympathetic detonation for high explosives
- P39 論文種類 (誤) 研究論文 → (正) レター
- P46 論文題名
(誤) An investigation on under water sympathetic detonation for high explosives →
(正) An investigation on underwater sympathetic detonation for high explosives
- P59 右段上2行目 書体、文字間隔の誤植

以上、謹んでお詫び申し上げます。

Science and Technology of
Energetic Materials

第64巻 第2冊 通巻330号

2003年4月25日印刷 (隔月刊)
2003年4月30日発行

定価：国内1,500円
海外2,000円(送料込み)

発行所 社団法人 火薬学会
会長 田村昌三

〒104-0028 東京都中央区八重洲2-7-7
八重洲旭ビル6F 日本火薬工業会内
電話 03(3271)6715~7
FAX 03(3271)7592
振替 00180-0-146724

西部支部

〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1
九州工業大学工学部物質工学科
応用化学コース内
電話/FAX 093(884)3319

編集兼発行人 田村昌三

編集部 東京大学大学院工学系研究科
化学システム工学専攻
〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1
電話/FAX 03(5841)7488
E-mail: jes-edit@explosion.t.u-tokyo.ac.jp

印刷所 (有)デジタル・プレス・ワークショップ結城
〒162-0801 東京都新宿区山吹町361
江戸川橋杉原ビルディング601
電話 03(3268)5005(代)
FAX 03(5287)2762
E-mail: dpw-yuki@mtg.biglobe.ne.jp