

# MBS の雷に対する安全性の検討

田崎陽治\*, 黒川孝一\*, 中野雅司\*, 植田武雄\*

MBSは電磁誘導を利用した電気雷管の起爆システムである。本システムの雷に対する安全性を検討するために、実際の地絡電流を模擬した周波数17KHzの多重雷形式のインパルス電流を用いて、1次電流と2次電流の関係及び電気雷管の発火の有無を検討した。

その結果、MBS結線の場合には、最大1次電流1700Aで最大2次電流は11.8Aとなり、その条件で電気雷管は発火した。

実際の発破現場では、電気雷管は爆薬と共にポアホールに装薬された状態であるため、発破母線に雷電流が侵入した場合、雷管を通してアースされる可能性が高い。電気雷管はJISに定める耐静性能として2000pF×8kV以上のエネルギーがかかれば発火危険性があるが、本実験では42kV以下であることが確かめられた。

しかし、従来の直流電気発破の場合、電気雷管は8×20μsの雷インパルス電流波形においてわずかに18Aで発火することを考慮すると、その安全性は高い<sup>1)</sup>。

## 1. 緒言

MBS(electromagnetic induction blasting system)は、電磁誘導を利用した電気雷管の起爆システムである。

本システムは使用するトランスコアーの周波数特性上、1次側の発破母線に50/60Hzの低周波の交流電流が流れても2次側の電気雷管にはほとんど電流は流れない<sup>1)</sup>。しかし、落雷の際に発生する対地雷撃電流はその周波数も数10KHzと高く、2次側の電気雷管には多くの電流が誘導されると考えられる。

一般的に雷の標準衝撃電流波形はFig. 1に示す8×20μsで規定されているが、実際の対地雷撃雷流波

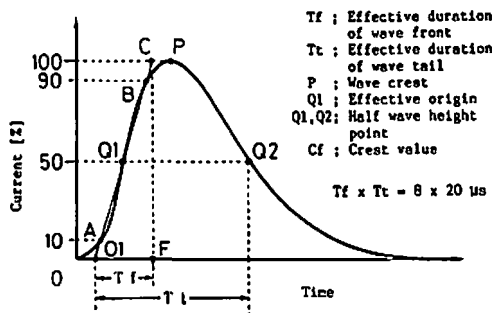


Fig. 1 Typical waveform of unipolar impulse.

形はそれに高周波成分の重畳したものであり、しかも、数10msの間に3～4回放電する多重雷がほとんどである<sup>2)</sup>。そこで、高周波の重畳及び多重雷を考慮し、周波数17.3kHzで減衰時間250μsの振動波形を用いた。

本報告では、落雷による地絡電流が発生し、その一部が発破母線に流入した場合を想定しMBSの雷に対する安全性を検討した。実験方法としては、雷インパルス発生装置から雷インパルス電流を1次側の発破母線に流し、2次側の電気雷管に誘導する電流を測定した。

なお、直撃雷については、想像を絶する電撃現象(数10億V、数10kA)が発生するため、今回の検討からは除外した。

## 2. 実験装置

実際には、最大発生電圧300kV、最大出力電流3000Aの雷インパルス発生装置を用いた。主回路に流れる電流値は、5.06mΩのシャント抵抗(東京変圧器社製)の両端の電圧を測定し算出した。電気雷管に流れる電流は1.8mの脚線の先端に白金線電橋の代わりとして1Ωの抵抗を取り付けて模擬品とし、カレントプローブ(ソニー・テクトロニクス社製P6021)によって測定した。

また、それぞれの測定データは、誘導ノイズを防止するため、実験室と計測室を電氣的に分離し、その間には光学伝送ミッター(日立電線社製HL-AHV070A)によってデータの伝送を行った。測定波形の読取り及び記録は、デジタルメモリー(岩

昭和62年7月6日受理

\*日本油脂株式会社 武豊工場化薬研究所  
〒470-23 愛知県知多郡武豊町字西門 82番地  
TEL 0569-72-1221 内線273

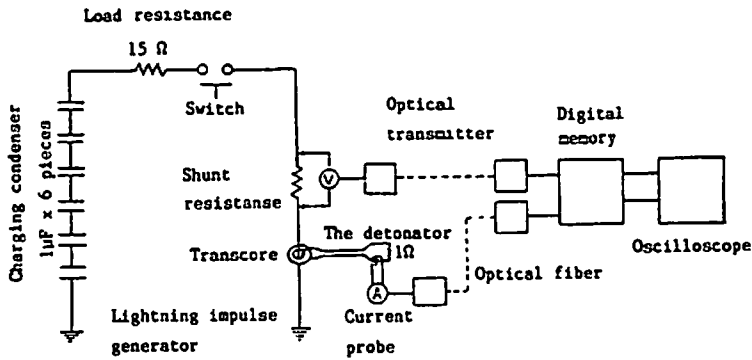


Fig. 2 Schematic diagram of the measuring system.

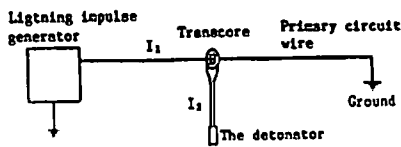


Fig. 3(a) Schematic diagram in the condition of only a primary current flows through the transcore.

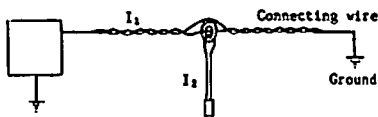


Fig. 3(b) Schematic diagram in the condition of one primary current flows through the transcore, and the other primary current flows outside the transcore (MBS connection).

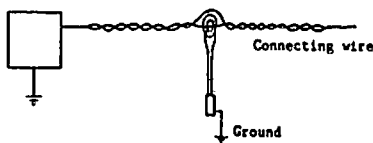


Fig. 3(c) Schematic diagram in the condition that the detonator is grounded to the earth.

崎通信社製DM-901)とオシロスコープ(ソニーテックノロニクス社製7904)を用いた。

実験装置概略図はFig. 2に示す。

### 3. 実験方法

#### 3.1 実験1 1次電流と2次電流の関係

Fig. 3(a)は、実験1の概略を示すもので、トランスコアに電線を1本通し、その線に雷インパルス電流 $I_1$ を流して2次側に誘導される電流 $I_2$ と2次側電気雷管の発火の有無を検討した。

#### 3.2 実験2 MBS結線における1次電流と2次電流の関係

Fig. 3(b)は、実験2の概略を示すもので、MBSの実際の結線を想定して、補助母線の片線にトランスコアを装着して、 $I_1$ 、 $I_2$ 、雷管発火の有無を検討した。

#### 3.3 実験3 実際の切羽におけるMBSの安全性

Fig. 3(c)は、実験3の概略を示すものである。実際の切羽においては、MBSで結線した場合、雷管の管体はボアホールに挿入されアースされた状態であり、補助母線の先端は空中に浮いた状態である。このような状況を想定して雷インパルス発生装置の印加電圧と雷管発火の有無を検討した。

### 4. 実験結果及び考察

#### 4.1 1次側に正弦波の高電流が流れた場合の2次側誘導電圧波形

実験1、2、3において、その計測された2次側の電気雷管に流れる電流波形は、鋭いピークを持った波形になっている。

これは、Fig. 4に示す強磁性体の磁化曲線に起因しており、磁界の強さ(H)を強くすると、強磁性体内の磁束密度(B)は増加するが、ある程度まで磁界の強さが強くなると、飽和現象のため磁束密度はそれ以上増加しない。このときの磁束密度を飽和磁束密度という<sup>3)</sup>。

例えば、トランスコアの材質として本システムでは強磁性体である $M_n-Z_n$ フェライトを用いているが、このトランスの1次側コイルに正弦波の電流を入力し、2次側コイルの電流波形を観察すると以下ようになる。

まず、1次側電流 $I_1$ が小さく磁界の強さが弱い場合、フェライトコア内の磁束密度は飽和せず、2次側電流 $I_2$ の波形は1次側と同じ正弦波となる。

次に、1次側電流 $I_1$ が大きく磁界が強くなると、前記の磁界の弱い場合とは大きく異なる。Fig. 5は1次側に正弦波の高電流が流れた場合の2次側電流波形の

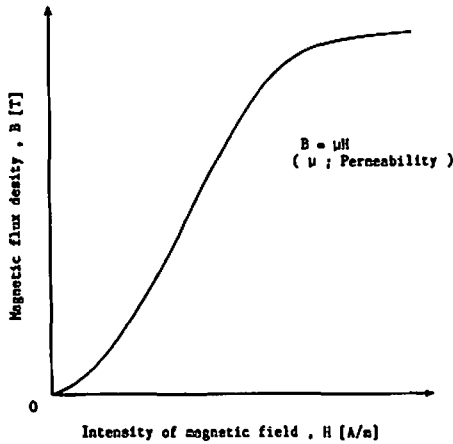


Fig. 4 Magnetization curve of ferromagnetic material.

説明図である。ここで、Fig. 5(b)に示すように1次側に正弦波で、大きな電流が流れた場合、Fig. 5(c)に示すヒステリシス環線(磁化曲線)を有するMn-Znフェライトコアでは、Fig. 5(a)のコア内の磁束 $\phi$ ( $\phi = BS$ ,  $S$ は断面積)は、Fig. 5(d)に示すように飽和現象を起こし、正弦波の頭が切れたような波形となる。そのため、2次側誘導電圧 $e_2$ は、 $e_2 = d\phi/dt$ より、磁束 $\phi$ を微分したものであるため、鋭いピークを持った波形となり、2次側の電流 $i_2$ は、 $i_2 = e_2/R$ より、同様のピークを持った波形となる。

#### 4.2 電気雷管に供給されるエネルギー計算

Fig. 6は1次側母線と2次側電気雷管に流れる電流波形である。この2次側のスパイク状の電流波形によって電気雷管が発火するかどうかを評価するために、電気雷管の白金線電橋に供給されるエネルギーを計算する。

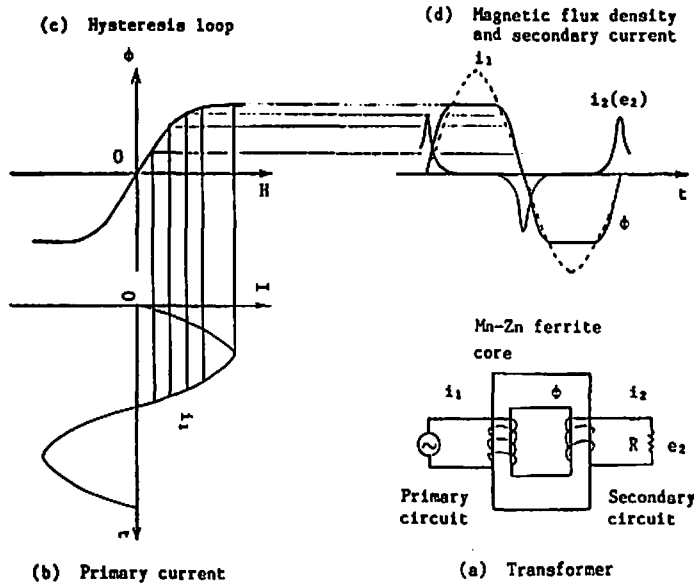


Fig. 5 Secondary current waveform at high and sine waveform current flows on the primary circuit.

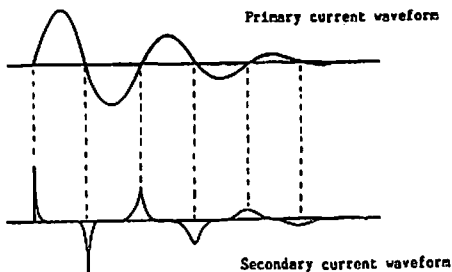


Fig. 6 Primary and secondary current waveforms.

2次側電流波形の1パルスのエネルギー $W_1 [J]$ は、底辺 $a$ 、高さ $h$ の三角形で近似すると、次式で表わすことができる。

$$\begin{aligned}
 W_1 &= 2 \int_0^a IV dt \\
 &= 2 \int_0^a I^2 dt \quad (R=1\Omega, V=1) \\
 &= 2 \int_0^a \left\{ -\frac{h}{a}t + h \right\}^2 dt \\
 &= \frac{2}{3} ah^2 [J]
 \end{aligned}$$

2次側の電気雷管に供給される全エネルギー  $W$  [J]は以下の式で近似できる。

$$\begin{aligned} \therefore W &= \sum_{k=1}^n \frac{2}{3} a_k h^k_2 \\ &= \frac{2}{3} (a_1 h^2_1 + a_2 h^2_2 + \dots + a_n h^2_n) \end{aligned}$$

又、今回の実験に使用した電気雷管の最小発火エネルギーは、脚線長1.8mを含めて2.4mJであり、脚線を除いた白金線電橋のみでは1.28mJである。

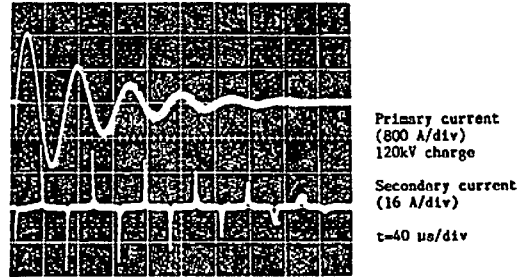


Fig. 7 Waveforms of primary and secondary current.

Table 1 Relation between primary and secondary current and supplied energy to the detonator at first test condition.

Charging voltage (kV)	Maximum primary current (A)	Maximum secondary current (A)	Supplied energy (mJ)	Result
42	620	23.7	3.375	Fired
60	880	25.6	4.091	Fired
120	1680	28.8	7.408	Fired

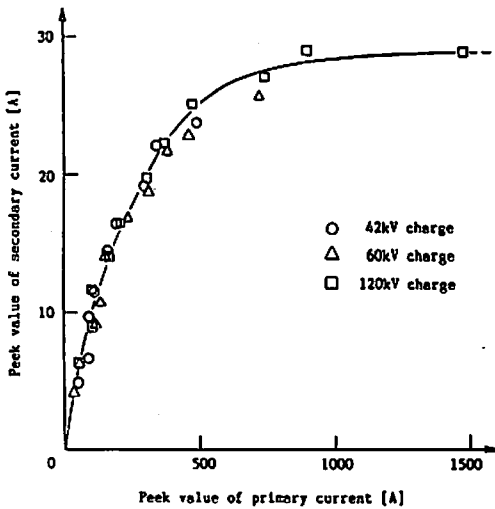


Fig. 8 Relation between peak value of primary current and peak value of secondary current at first test condition.

#### 4.3 実験1 (1次電流と2次電流の関係)の結果

Fig. 7は実験1における1次電流と2次電流の計測波形形である。Table 1はその測定結果であり、1次電流、2次電流の最大値および電気雷管に供給されるエネルギーを計算した値と電気雷管の発火の有無について検討したものである。

Table 1に示すように、雷インパルス発生装置のコンデンサー充電電圧42kV、1次電流の最大値620Aで電気雷管は発火した。その際、電気雷管には、3.37mJのエネルギーが供給されており電気雷管を発

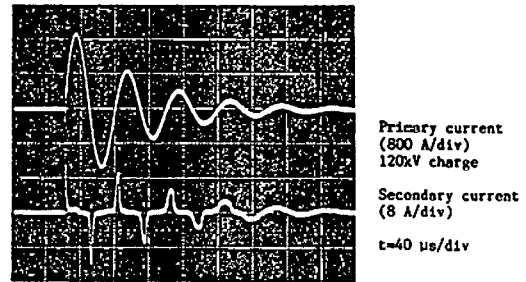


Fig. 9 Waveforms of primary and secondary current.

火させるために十分なエネルギーであった。

又、本実験で1つのトランスコアーに5本の電気雷管を装着した場合も、42kV、620Aですべての電気雷管が発火した。

Fig. 8は1次電流のピーク値と2次電流のピーク値の関係を示す。Fig. 8によると2次電流は1次電流が1000Aまでは増加の傾向を示し、以後は飽和の傾向を示す。この場合の飽和電流値は28.8Aであった。

#### 4.4 実験2 (MBS結線における1次電流と2次電流の関係)の結果

Fig. 9は実験2における1次電流と2次電流の計測波形形である。Table 2はその測定結果であり、1次電流、2次電流の最大値および電気雷管に供給されるエネルギーを計算した値と電気雷管の発火の有無について検討したものである。

Table 2に示すように、雷インパルス発生装置のコンデンサー充電電圧114kV、1次電流の最大値1570A

Table 2 Relation between primary and secondary current and supplied energy to the detonator at second test condition.

Charging voltage (kV)	Maximum primary current (A)	Maximum secondary current (A)	Supplied energy (mJ)	Result
42	460	5.8	0.465	Not fired
60	1240	7.6	0.592	Not fired
90	1520	10.2	0.984	Not fired
102	1640	11.2	1.030	Not fired
114	1570	11.8	1.162	Not fired
120	1700	11.8	1.228	Fire

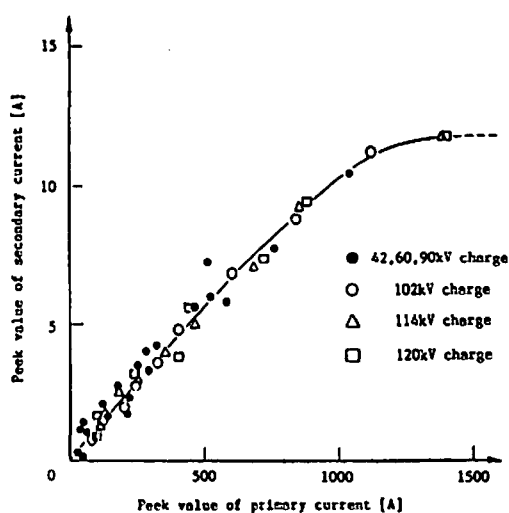


Fig. 10 Relation between peak value of primary current and peak value of secondary current at second test condition.

では電気雷管は発火しなかった。しかし、120kV、1700Aでは発火した。ここで電気雷管に供給されたエネルギーを計算すると、114kV、1570Aでは1.162mJであったが、120kV、1700Aでは1.228mJとなり、電気雷管の最小発火エネルギー1.28mJにはほぼ等しい値であった。

実験1と実験2の結果を比較すると、実験1では、Fig. 3(a)に示したように、トランスコアー内部にのみ電線を通したが、実験2ではFig. 3(b)に示すように、トランスコアーの内部と外部の両方に電線を通した。そのため、実験1ではトランスコアー内部に通した電線によってのみトランスコアーに磁束が発生するのに対して、実験2では内部と外部の両方の線によって発生した磁束の和となる。ここで、実験2では両線に流れる電流の方向が同一であるため、トランスコアー内に発生する磁束の位相は互いに反対となり、打消し合って小さくなり、2次側の誘導電流も小さくなる。

従って、実験1のトランスコアーの内部のみに電線を通した場合には、1次側42kV、620Aで発火したが、実験2では114kV、1570Aまで発火しなかったと考えられる。Fig. 10に1次電流と2次電流のピーク値の関係を示す。Fig. 10によると1次電流が1400A付近より飽和の傾向を示しており、そのときの2次電流は11.8Aであった。この値は、実験1の2次電流の飽和値28.8Aの41%であり、実際の結線による磁束打消効果は59%であると考えられる。

又、前報<sup>1)</sup>においては、1次電流波形として立上り時間8 $\mu$ s、50%までの立下り時間20 $\mu$ sの単極性インパルス波形を用いて実験1と同様の実験を行ったが、1次電流は300Aで2次電流は15.2Aの飽和値に達し、それ以上は増加しなかった。

しかし、本実験のような1次電流に振動波形を用いた場合には、最初の立上りの部分についてはほぼ同様の結果が得られたが、次の立下りから極性が逆転する部分については前報に示した結果より大きな値が計測された。これは、波形の立上りの部分は、スイッチ投入の際のチャタリングによる波形の乱れにより、立下りの部分のような大きな値にならず、立下りの部分については、波形の乱れがないために大きな値となったものと考えられる。

#### 4.5 実験3(実際の切羽におけるMBSの安全性)の結果

雷インパルス発生装置のコンデンサー充電電圧を42kV(本装置で発生可能な最小電圧)にした場合、1次電流は母線、脚線、雷管、大地と流れ、雷管は発火した。

これは、実験2においては発火しない値であった。現在、電気雷管は耐静電気構造を有しており、脚線、管体間において8kV(2000pF)まで耐えられるように日本工業規格(JIS K4807)で規定されているが、それ以上の高電圧が印加された場合は発火の危険性がある。従って、実際の切羽における雷管の使用状況では、雷のような高電圧流のインパルス波が発破母線に流れ

た場合、雷管を通して大地にアースされる可能性が高いため、母線と脚線の間の絶縁破壊電圧以上の電圧が印加された場合は発火の危険性がある。

#### 5. 結 言

雷インパルスの波形として、振動波形を用いた場合、トランスコアーに電線を1本通した実験1では620A(42kV)で発火し、通常のMBS結線での実験2では1700A(120kV)で発火した。

このように、連続するインパルス電流が流れた場合は、単発のインパルス電流を用いた実験で数千Aの電流にも耐えるという予想に反し、以外に低い値で発火することがわかった。

又、実際の切羽においては、母線に流入した雷電流は、雷管を通してアースされる可能性が高いため、雷に対する安全性は母線と脚線の間の絶縁耐圧に等しいものとなり、本実験においては42kV以下であることが確かめられた。

最後に、実際の雷においては、数10億V、数10kA程度の電圧電流が発生し、しかも、1回の落雷で3回以上放電する多重雷が全体の50%以上を占めるため、

十分な注意を要する<sup>4)</sup>。

#### 文 献

- 1) 田崎陽治, 黒川孝一, 中野雅司, 植田武雄, 工業火薬協会誌, Vol.47, No.5, pp263~270(1986).
- 2) 石井 勝, 北篠準一, 河村達雄, 東京大学生産技術研究所第3部, 研究速報, 36巻, 1号, pp29~32(1984, 1).
- 3) 電気学会, 「電気磁気学」, pp239~241(1977).
- 4) 大重 力, 原 雅則, 「高電圧現象」, pp110~118(1980).
- 5) K. Kurokawa, Y. Tasaki, N. Nakano, T. Ueda, "Electro Magnetic Induction Blasting System", The 12th Annual Conference on Society of Explosives Engineers, Atlanta, USA (1986).
- 6) 田崎陽治, 黒川孝一, 中野雅司, 植田武雄, 工業火薬協会秋季研究発表講演要旨集, pp67(昭和59).
- 7) 田崎陽治, 黒川孝一, 中野雅司, 植田武雄, 工業火薬協会春季研究発表講演要旨集, pp11(昭和61).

---

### Evaluation of Safety Against Lightning in MBS

by Yoji TASAKI\*, Koichi KUROKAWA\*, Masashi NAKANO\*  
and Takeo UEDA\*

MBS is a new firing system of electric detonator which is based on the principle of transformer. In order to evaluate the safety against lightning in MBS, the test is conducted by connecting lead wire with impulse generator. Frequency of impulse current used in the test is 17kHz and the waveform is a vibration type and duration time is 250 $\mu$ sec. The results of the test show that induced current increases with the increasing of impulse current. In the case of MBS connection, when maximum primary is 1700A, maximum secondary current is 11.8A and electric detonator is fired at the condition.

In the blasting site, the detonator in the explosives is loaded to borehole. Therefore if primary current flows through lead wire and connecting wire, primary current breaks the insulation of sheath of connecting wire and leg wire and then primary current flows through the earth. A conventional electric detonator has the protection (2000pF $\times$ 8kV) against static electric hazards. But the results of the test show that electric detonator is fired with the electric energy of primary current of less than 42kV.

(\*Chemicals & Explosives Laboratory, Nippon Oil & Fats Co., Ltd.  
Taketoyo-cho, Chita-gun, Aichi-ken 470-23, Japan)