

論 文

水中導線の電気的爆発による発生圧力への 線長の影響

斎 藤 宏*, 佐 藤 正 志**, 佐 藤 安 弘**, 赤 上 陽 出 男***
立 崎 修 二****, 岩 谷 高 四 郎*****

(1993年6月24日受理)

Effect of Wire Length on the Pressure Generated by Electric Explosion in Water

Hiroshi SAITO,* Masashi SATO,** Yasuhiro SATO,**
Hideo AKAGAMI,*** Shuzi TACHIZAKI****

and Kousirou IWAYA*****

(Received June 24, 1993)

An under water wire explosion generates pressure waves by applying a large impulse current to a metal wire in water. This paper describes the relation between the magnitude of generated pressure and the length of metal wires used. Experiments were conducted for four kinds of metal wires (Cu, Fe, Sn and W) with 0.1 mm and 0.2 mm in diameter and 10 mm to 80 mm in length. The magnitude of generated pressure P [MPa] is discussed in point of the time variation of input energy $W_I/\Delta t$ [MW] calculated from voltage and current wave forms. The results show that the experimental formula of the pressure P , represented in the previous paper, should be reformed by the factor of the wire length g [mm]. This gives

$$P = 6.59(g)^{0.20}(W_I/\Delta t)^{0.72}(R_d)^{-0.81}$$

where R_d [cm] is the propagation distance. This formula shows that the quantity $W_I/\Delta t$ is available for estimation of the pressure magnitude generated by an under water wire explosion. The results also show the existence of an optimum wire length which maximizes the values of P and $W_I/\Delta t$.

1. ま え が き

水中に配置した金属線に電圧を印加し、溶断発弧させると、衝撃圧力波が発生する。この衝撃圧力波は、第1次圧力波と呼ばれており、ここではこれを圧力波と略称する。

本論文は水中における放電現象とそれに伴う衝撃圧力波を取り扱ったものである。水中導線爆発については従来より数多くの研究がなされている。しかし、基礎特性についても未だ不明な点が多い。水中の金属線を溶断発弧させると、金属線部分は固体→液体→気体→過渡放電→アーカ放電と状態が変化する。水中の第1次圧力波は

キーワード：水中導線爆発、発生圧力、最適線長、圧力と線長、エネルギーの時間変化と線長

* 秋田大学教育学部技術科 (010 秋田市手形学園町 1-1)
Department of Industrial Arts, College of Education, Akita University, 1-1 Tegata Gakuenchou,

encho, Akita, 010 Japan
** 秋田大学鉱山学部電気電子工学科 (010 秋田市手形学園町 1-1)

Department of Electrical and Electronic Engineering, Mining College, Akita University, 1-1 Tegata Gakuenchou, Akita, 010 Japan

*** 秋田県高度技術研究所 (010-16 秋田市新屋町字砂奴寄 4-21)

Akita Research Institute of Advanced Technology, 4-21, Sanuki, Arayamachi, Akita, 010-16 Japan

**** 東北電力株式会社電力技術研究所 (981 仙台市中山 7 丁目 2-1)

Electricity Technology Research and Development Center, Tohoku Electric Power Co. Inc., 2-1, 7-chome, Nakayama, Sendai, 981 Japan

***** 八戸工業大学エネルギー工学科 (031 八戸市大字妙字大開 88-1)

Department of Energy Engineering, Hachinohe Institute of Technology, 88-1, Myo, Ohbiraki, Hachinohe, 031 Japan

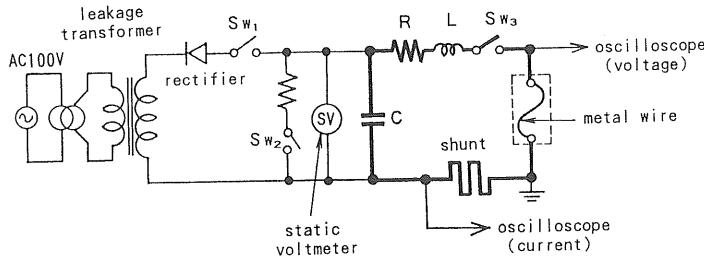


図1 実験回路

Fig. 1 Schematic diagram of experimental circuit.

過渡放電を経てアーケ放電へと移行する過程(時間 Δt)で発生すると考えられる。したがって、圧力は時間 Δt の間に金属線部分に投入されたエネルギー W_1 に関係する。この考えに基づき、筆者らは水中におけるこの圧力波を評価するため、過渡放電を経てアーケ放電へと移行する過程における放電エネルギーの時間変化 $W_1/\Delta t$ を、特性量として用いることができる。これを先に報告^{1,2)}した。さらに、圧力波の伝搬速度及び減衰特性についても報告²⁾した。また、この特性量 $W_1/\Delta t$ は、金属線の直徑が変化した場合の圧力の変化に関しても、適用できることを明らかにした^{3,4)}。

本報告においては、金属線の長さと放電エネルギーの時間変化、すなわち、特性量 $W_1/\Delta t$ ならびに圧力との関係を調べることを目的に実験的検討を行った。具体的には、金属線の種類及び直徑、印加電圧が同一であるという条件の下で、金属線の長さを変化させることにより、特性量 $W_1/\Delta t$ ならびに圧力がどのように変化するかを測定した。

本研究においては、直徑 0.1 及び 0.2 mm の 4 種類の金属線(銅、鉄、錫、タンゲステン)を用い、その線長を 10 mm ~ 80 mm の間で変化させ、種々の印加電圧の下で放電エネルギーの時間変化 $W_1/\Delta t$ 及び第 1 次圧力波の波高値(以下これを圧力と呼ぶ)を測定した。それらの結果から、同一の金属線の種類及び直徑ならびに印加電圧の下で、 $W_1/\Delta t$ が最大、したがって、圧力が最大となる線長の存在することを確認した。すなわち、発生圧力に線長が関係することを明らかにした。さらに、金属線長が変化した場合においても、 $W_1/\Delta t$ が圧力を評価する特性量として使用し得ることを明らかにした。

2. 実験回路及び方法

図 1 に本実験の実験回路を示す。金属線に電圧を印加する方法としては一般に用いられているコンデンサ充電方式を採用している。すなわち、電圧 $V_0 = 7.5 \sim 17.5$ kV に充電した静電容量 $C = 4 \mu\text{F}$ のコンデンサを電源

として用いている。この電源に、水中に配置した抵抗 r の金属線、 $R = 1.8 \Omega$ の抵抗及び $L = 40 \mu\text{H}$ のインダクタンスを直列に接続している。回路抵抗 R が金属線の抵抗 r よりも非常に大きな $R \gg r$ の場合には、コンデンサ C を所定の電圧 V_0 に充電した後、スイッチ S_{w3} を閉じると、回路には下式に示されるような電流 i が流れる。

$$i = (V_0 / \beta L) \cdot \exp(-t/\tau) \cdot \sin(\beta t) \quad (1)$$

式(1)において

$$\begin{aligned} \tau &= (2L/R) \\ \beta &= \{(1/CL) - (R^2/4L^2)\}^{1/2} \end{aligned} \quad \} \quad (2)$$

であり、 τ は減衰時定数であり、周期は $2\pi/\beta$ となる。

式(1)を用いて計算すると、 $R \gg r$ の条件の場合、本実験回路の周期は $82.9 \mu\text{s}$ 、減衰時定数は $44.4 \mu\text{s}$ 、電源投入から電流が最大となるまでの時間は $17 \mu\text{s}$ となる。

本実験においては金属線の長さを $10 \sim 80 \text{ mm}$ と変化させて測定を行う。金属線長が大きくなると、金属線の“固体→液体→気体→プラズマ”という状態変化に伴う抵抗 r の増加の効果が大きくなる。このため、 $R \gg r$ の条件が状態変化の過程で成立しなくなり、回路方程式は非線形となる。そのため、電流は上述の式(1)で表せなくなり、一般に歪んだ流形となる。

回路電流は同軸円筒型分流器で測定した。この分流器の抵抗値は $2 \text{ m}\Omega$ 、応答速度は $0.27 \mu\text{s}$ であり、本実験における測定には十分な性能を有している。

実験には、直徑 50 cm 、高さ 60 cm の円筒容器を用いた。この容器内の底部から 20 cm の位置に水平に電極を配置し、この電極に金属線を直線状に張る。電極間の金属線の線長を $g = 10 \sim 80 \text{ mm}$ と種々の値に設定し、電流ならびに電圧をデジタルオシロスコープで測定した。なお、金属線としては直徑 0.1 mm (錫線のみ 0.15 mm)及び 0.2 mm の銅、鉄(ピアノ線)、錫、タンゲステンの 4 種類の線を用いた。

衝撃圧力波の波高値は金属線の真上 20 cm に配置した圧力センサ(KULITE 製の半導体圧力トランジスターデュードル)で測定した。

サ HKM-375, 共振周波数 385 kHz) を用い, デジタルオシロスコープで測定を行った。

実験には, 円筒容器に満たした水温 12~20°C, 抵抗率約 $10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ の水道水を使用した。

3. 放電エネルギーの時間変化 $W_1/\Delta t$ の算出法

本章においては, 前に報告¹⁻⁴⁾した放電エネルギーの時間変化 $W_1/\Delta t$ の算出法の概略について述べる。

図 2 に直径 $d=0.15 \text{ mm}$, 長さ $g=10 \text{ mm}$ の錫線で, コンデンサ充電電圧 V_0 が 15 kV の場合の電流, 電極間電圧, 電力及びエネルギー変化の波形を示す。この例の場合には, 金属線長 g が 10 mm と短く, 金属線の抵抗が状態変化により増大しても, まだ $R \gg r$ の条件が成立しており, 同図(a)の電流波形は式(1)で示されるような波形となっている。すなわち, 図(a)の電流波形において, 電源投入①時点から約 17 μs 後に電流は最大となり, 周期が 83 μs の減衰振動波形となっている。

金属線は電源投入時点①からジュール熱によって固体→液体→気体と変化し, その後過渡放電を経てアーカ放電へ移行する。このように金属線が状態変化するに伴い, 金属線の抵抗は増大し, そのため電極間電圧も増大する。すなわち, 図 2(b)の電圧波形において, 電源投入の①の時点から電圧は増大し, 約 5.3 μs 後の②の時点で最大となり, この付近で金属線が気化しているものと考えられる。②の時点以後過渡放電(火花, グロー, 過渡アーカ放電など)を経てアーカ放電へと移行する。図(b)の電圧波形において③以降は電圧が低く, 再点弧を繰り返しており, この条件の下での定常アーカ放電へ移行しているものと思われる。

図(c)は, 図(a)及び(b)より算出した電力の時間変化である。

図(d)は, 電力を時間的に積分することにより求めた電極間で消費されたエネルギー(電力積分値)である。図(d)中の時点①から時点②までの間に電極間に投入されたエネルギーは主として金属線の状態変化(固体→液体→気体)に使用されたものである。時点②から時点③までの間に投入されたエネルギーは, 最大電圧が発生した時点②からアーカ放電へ移行する時点③までの期間 Δt (図2では 3.7 μs) に電極間に投入されたエネルギー W_1 である。時点③以降のエネルギーは, 水中の定常アーカ放電に消費されたエネルギーである。

放電エネルギーの時間変化 $W_1/\Delta t$ は上述のエネルギー $- W_1$ を微小時間 Δt (時点②から時点③までの時間) で割ることにより算出した。したがって, この $W_1/\Delta t$ は図(d)のエネルギー波形における②から③の期間の傾きを表していることになる。なお, アーカ放電へ移行した

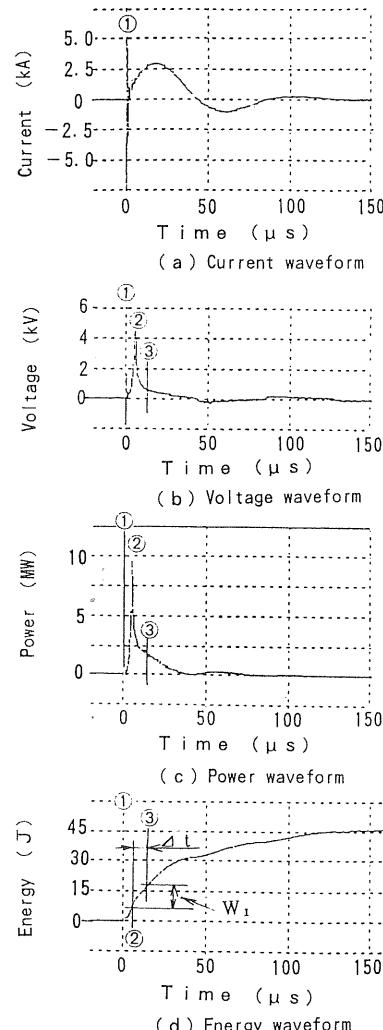


図2 エネルギーの時間変化の算出
(錫線: $d=0.15 \text{ mm}$, $g=10 \text{ mm}$, $V_0=15 \text{ kV}$)

Fig. 2 Estimation of time variation of input energy $W_1/\Delta t$.

時点③は, 前述のように図(b)の電圧波形から推測したものである。

4. 放電エネルギーの時間変化と金属線長との関係

図3に直径 $d=0.2 \text{ mm}$ の鉄(○印), 銅(●印), タングステン(△印), 錫(▽印)の4種類の金属について, 充電電圧 $V_0=17.5 \text{ kV}$ の場合における放電エネルギーの時間変化 $W_1/\Delta t$ と金属線長 g との関係を示す。金属線の種類によって値は異なるが, $W_1/\Delta t$ が最大となる線長の存在していることがわかる⁵⁾。

図4に, 直径 $d=0.2 \text{ mm}$ の錫線において, コンデンサ充電電圧 V_0 をパラメータにとった場合の放電エネル

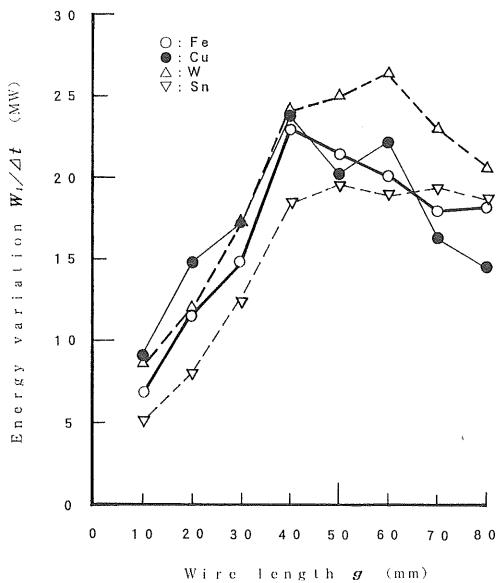


図3 エネルギーの時間変化と線長との関係
($d=0.2$ mm, $V_0=17.5$ kV)

Fig. 3 Relation between time variation of input energy W_I/dt and wire length g .

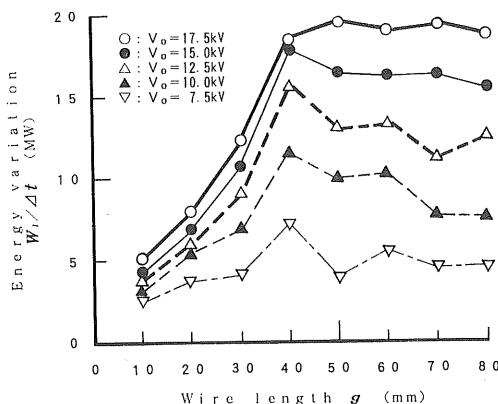
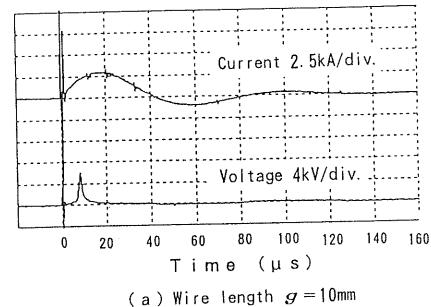


図4 エネルギーの時間変化と線長との関係
(錫線: $d=0.2$ mm)

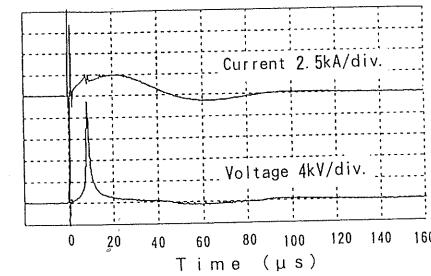
Fig. 4 Relation between time variation of input energy W_I/dt and wire length g .

ギーの時間変化 W_I/dt と金属線長 g との関係を示す。同図より、 V_0 が異なっても、各充電電圧において W_I/dt が最大となる線長の存在することがわかる。

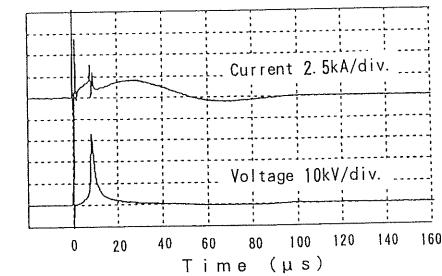
放電エネルギーの時間変化 W_I/dt と金属線長 g との関係は、金属線の材質、直徑及び充電電圧により異なる変化を示す^{5,6)}が、どの場合においても放電エネルギーの時間変化が最大となる金属線長が存在する。ただし、条件によっては（例えば、 $d=0.2$ mm の錫線で、 $V_0=17.5$ kV の場合などにおいては）、 W_I/dt が最大と



(a) Wire length $g=10$ mm



(b) Wire length $g=40$ mm



(c) Wire length $g=80$ mm

図5 線長による電流、電圧波形の変化
(錫線: $d=0.2$ mm, $V_0=15$ kV)

Fig. 5 Variation of current- and voltage-waveform by wire length g .

なる金属線長はある幅を持っている。

5. 電流、電圧及び時間 Δt などと線長との関係

本章では、放電エネルギーの時間変化 W_I/dt と金属線長 g との関係を調べるため、線長と電流、電圧及びアーク移行時間 Δt などとの関係について検討を行ってみる。ここでは4種類の金属の中から代表として錫線、直徑0.2 mmの場合について検討を行う。

図5に線長 g を変化させた場合の電流、電圧波形を示す。同図は直徑0.2 mmの錫線、コンデンサ充電電圧15 kVの場合の実測波形である。図5において上から(a)は線長 $g=10$ mm、(b)は $g=40$ mm、(c)は $g=80$ mmの場合の波形である。各図において、上方が電流、下方が金属線両端間の電圧波形である。これらの波形より、以

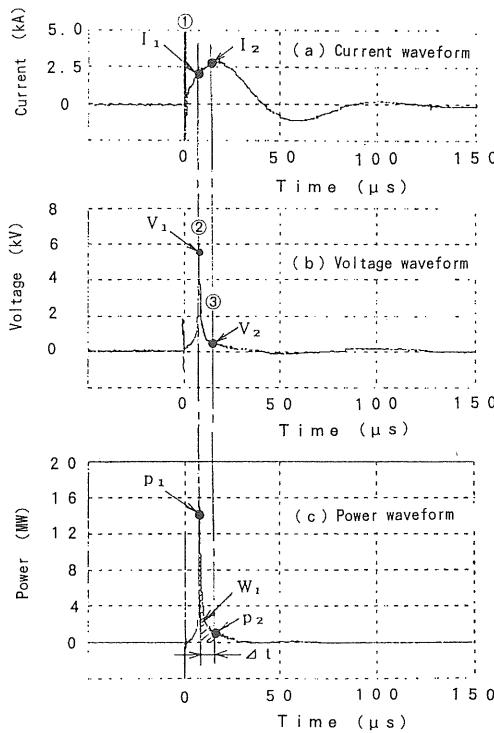


図6 特性値の説明図
(錫線: $d=0.2\text{ mm}$, $g=10\text{ mm}$, $V_0=15\text{ V}$)
Fig. 6 Current-, voltage- and power-waveform.

下のことがわかる。すなわち、 g の小さな図(a)の場合には、電流波形はほとんど歪まず、式(1)で示されるような波形になっている。しかし、電流波形において図(a)から(c)へと g が長くなっていると、電流の大きさが式(1)による波形より小さくなる方向に歪んでいる。これは線長が長くなると、金属線の状態変化に伴う抵抗が大きくなり、電流波形に影響が現れるためと考えられる。また、電圧波形において図(a)から(c)へと線長 g が長くなるにしたがい、時点②に対応する最大電圧は、それぞれ $g=10\text{ mm}$ で約 6 kV, $g=40\text{ mm}$ で約 20 kV, $g=80\text{ mm}$ で約 34 kV と、大きくなっている。

エネルギーの時間変化と金属線の線長との関係は、上述のような線長による電流と電圧波形の変化に影響を受けるものと考えられる。そこで、線長 g によるこれらの波形の変化について調べる。線長による波形への影響を調べるために代表値について、図6の電流、電圧及び電力波形を用いて説明する。同図は直径 0.2 mm、線長 10 mm の錫線にコンデンサ充電電圧 15 kV を印加した場合の波形である。上から電流、電圧、電力波形の順である。電流波形及び電圧波形において、電圧が最大となつたとき(時点②)の電圧値を V_1 、このときの電流値を

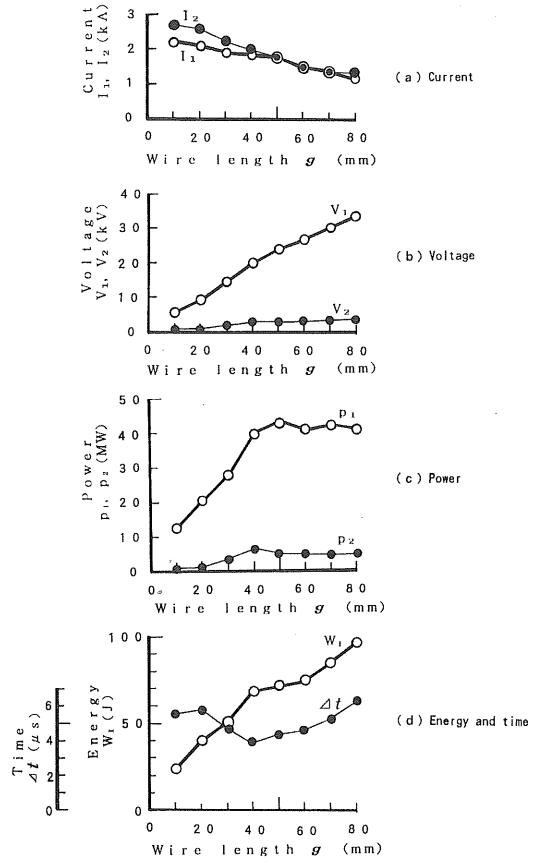


図7 各特性値への線長の影響
(錫線: $d=0.2\text{ mm}$, $V_0=15\text{ kV}$)
Fig. 7 Effect of wire length on current, voltage, power, energy and time.

I_1 、アーケ放電に移行する時点③の電圧値を V_2 、このときの電流値を I_2 とする。また、電圧が最大となつたときの電力を $p_1=V_1 \times I_1$ 、アーケ放電へ移行するときの電力を $p_2=V_2 \times I_2$ とする。さらに、 p_1 と p_2 に関係し、エネルギーの時間変化に大きな影響を与える電力の積分値 W_1 とアーケ移行時間 Δt を特性値として選定する。

図7に、直径 0.2 mm の錫線にコンデンサ充電電圧 15 kV を印加した場合の各特性値と線長との関係を示す。

同図(a)は、電流値 I_1 , I_2 と線長との関係である。この図から、各電流値は、線長 g が長くなるに伴い、小さくなっていることが確認される。これは上述のように、線長が長くなるにしたがい、金属線の状態変化に基づき抵抗が大きくなるためと考えられる。

同図(b)に、電圧値 V_1 , V_2 と線長との関係を示す。この図より、各電圧値は、線長が長くなるにしたがって、

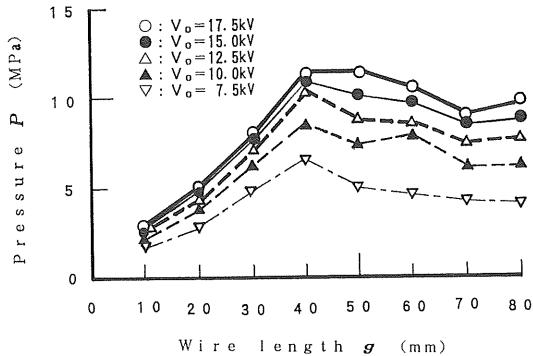


図8 圧力と線長との関係
(錫線: $d=0.2\text{ mm}$, $R_d=20\text{ cm}$)

Fig. 8 Relation between pressure P and wire length g .

大きくなっていくのが確認される。

次に、電圧が最大となったときの電力 $p_1=V_1 \times I_1$ 及びアーケ放電へ移行するときの電力 $p_2=V_2 \times I_2$ と線長 g との関係を同図(c)に示す。各電力値 p_1 , p_2 は、線長 $g=40\text{ mm}$ 近辺までは、 g の増加と共に、増大しているが、 g がそれ以上大きくなると、各電力値はほとんど変化していないことがわかる。金属線の材質、直径、コンデンサ充電電圧によっては、それ以上 g が長くなると、逆に、各電力値が減少する傾向を示すものもある。

p_1 , p_2 に関する電力の積分値 W_1 と電圧が最大となってからアーケ放電へ移行する間の時間 Δt が、線長によってどのように変化するかをみてみる。図6の電力波形において、電力の積分値 W_1 は斜線で示した部分の面積であり、時間 Δt は同図に矢印で範囲を示した時間である。図7(d)に、この電力の積分値 W_1 及び時間 Δt と線長 g との関係を示す。電力の積分値は線長が長くなるに伴って増大するが、線長 $g=40\text{ mm}$ を境にその増加率が小さくなっている。それに対して、時間 Δt は、 g が 40 mm 付近で最小値をとった後、 g の増大に伴って大きくなる傾向を示している。放電エネルギーの時間変化は、電力の積分値のほか、この時間 Δt によっても大きく変化する。しかし、電力の積分値、あるいはそれを構成する電圧、電流などの各要素ならびに金属線長と、時間 Δt との関係を求ることは現時点では困難であり、今後の課題である。

6. 圧力と線長との関係

図8に、図4と同じ条件、すなわち直径 $d=0.2\text{ mm}$ の錫線における圧力 P と線長 g との関係を示す。同図のパラメータは電圧 V_0 であり、各圧力値は金属線からの距離 $R_d=20\text{ cm}$ での実測値である。図4に示したエネ

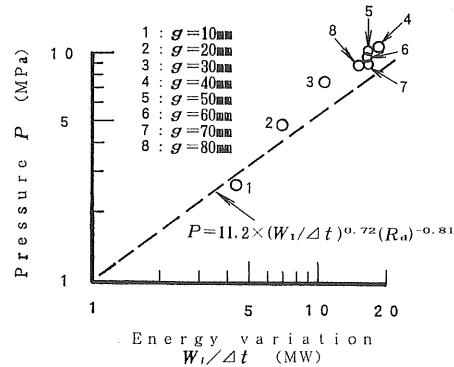


図9 圧力とエネルギーの時間変化との関係
(錫線: $d=0.2\text{ mm}$, $V_0=17.5\text{ kV}$, $R_d=20\text{ cm}$)

Fig. 9 Relation between pressure P and time variation of input energy $W_1/\Delta t$.

ルギーの時間変化 $W_1/\Delta t$ が最大となっている $g=40\text{ mm}$ において、図8の圧力 P も最大値を示している。すなわち、図8の圧力 P -線長 g 特性は、図4のエネルギーの時間変化 $W_1/\Delta t$ -線長 g 特性と同様な傾向を示している。

水中導線（線長 g が 10 mm ないし 20 mm 一定の場合）の電気的爆発によって発生した第1次衝撃圧力波の波高値は、次式のような特性式で表されることを前に報告¹⁻⁴した。

$$P=11.2 \times (W_1/\Delta t)^{0.72} \times (R_d)^{-0.81} \quad (3)$$

ただし P : 圧力波高値 [MPa]

$W_1/\Delta t$: 放電エネルギーの時間変化 [MW]

R_d : 金属線からの距離 [cm]

式(3)からも、 $W_1/\Delta t$ が最大となる g において圧力 P が最大となることが予想される。図9に、図4及び図8から求めた $V_0=17.5\text{ kV}$ における $d=0.2\text{ mm}$ 錫線での P と $W_1/\Delta t$ との関係を示す。図中の破線は式(3)による計算値である。また、図中の番号は各 g における値である。これらの実測値からみて、線長 g が変化しても、上述の式(3)の関係が概略成立するものと考えられる。しかし、詳細にみると、1の金属線長 $g=10\text{ mm}$ を除くと、 P が破線よりも上に現れている。

これらの関係を調べるために、種々の線長 g における圧力 P (金属線の距離 $R_d=20\text{ cm}$ における値) と放電エネルギーの時間変化 $W_1/\Delta t$ との関係をみてみる。図10は $g=10\text{ mm}$ の場合における P と $W_1/\Delta t$ との関係である。図中の破線は、式(3)による計算値を示したものである。この場合には、実測値がほぼ破線の上下に分布しているが、どちらかといえば、むしろ下側に多く分布していることがわかる（実線については後に述べる）。図中の実測値には、種々の金属線、直径及びコンデンサ

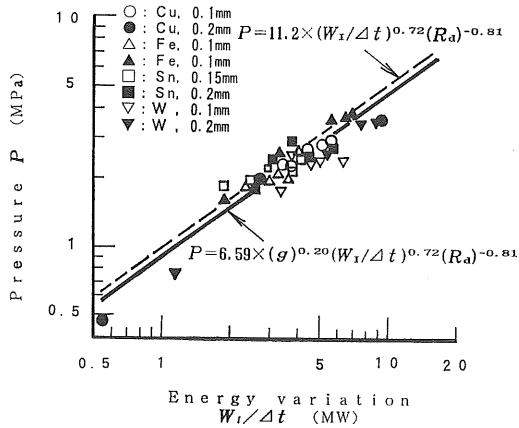


図 10 圧力とエネルギーの時間変化との関係
($g=10 \text{ mm}$, $R_d=20 \text{ cm}$)

Fig. 10 Relation between pressure P and time variation of input energy $W_t/\Delta t$.

充電電圧における値が含まれている。

図 10 の $g=10 \text{ mm}$ においては、測定点は式(3)で示した破線の下側に多く分布しているが、線長 $g=40 \text{ mm}$ においては各実測値が破線よりも上側に多く存在する⁷⁾。

さらに、線長の大きな $g=80 \text{ mm}$ における P と $W_t/\Delta t$ との関係を図 11 に示す。この場合は $g=40 \text{ mm}$ の場合よりも、さらに圧力 P の実測値が破線で示す計算直線よりも大きめの値となっている⁷⁾。

これらの結果から、圧力 P は線長 g が長くなるにつれて、式(3)で与えられる圧力よりも大きな値を示すことがわかる。また、この圧力 P の変化は、放電エネルギーの時間変化 $W_t/\Delta t$ の線長 g による変化とは独立しているものとみられる。

そこで、式(3)で示した圧力の大きさの特性式に、この線長 g による影響を考慮してみる。すなわち、式(3)における係数 11.2 が g によって変化するものと考え、この係数値と線長との関係について調べた。その結果、式(3)の圧力 P に関する特性式を、線長 g について次式のように補正する必要が認められた⁷⁾。

$$P = 6.59 \times (g)^{0.20} \times (W_t/\Delta t)^{0.72} \times (R_d)^{-0.81} \quad (4)$$

ただし、 g は金属線の線長 [mm] であり、他の各特性量 P [MPa], $W_t/\Delta t$ [MW] 及び R_d [cm] は式(3)と同様である。

図 10 及び図 11 中にこの特性式(4)による計算値を実線で示してある。どの図においても、式(3)で示される破線よりも、式(4)で計算される実線の方が、実測値を良く表しており、妥当であるとみなされる。すなわち、

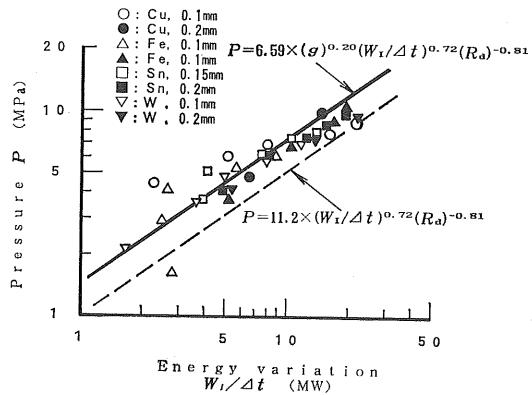


図 11 圧力とエネルギーの時間変化との関係
($g=80 \text{ mm}$, $R_d=20 \text{ cm}$)

Fig. 11 Relation between pressure P and time variation of input energy $W_t/\Delta t$.

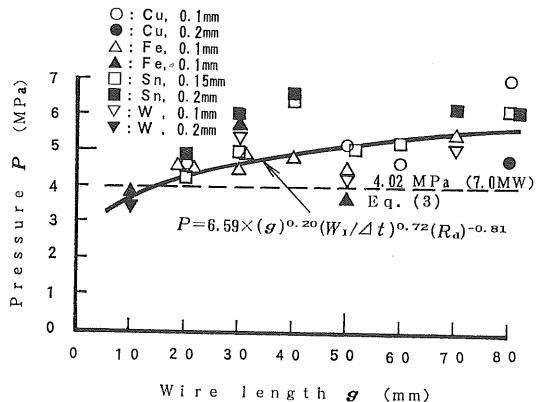


図 12 圧力と線長との関係
($R_d=20 \text{ cm}$, $W_t/\Delta t=7.0 \text{ MW}$)

Fig. 12 Relation between pressure P and wire length g .

圧力 P に関する特性式には線長 g による影響も考慮する必要があることがわかる。

次に、この圧力 P の線長 g による変化が、放電エネルギーの時間変化 $W_t/\Delta t$ の線長 g による変化と独立していることを示すために、 $W_t/\Delta t$ がほぼ同じ場合における P と g との関係を調べてみる。図 12 に $W_t/\Delta t$ がおよそ 7.0 MW の場合の圧力 P と線長 g との関係を示す。図中の各値はすべての測定値の中から $W_t/\Delta t$ がおよそ 7.0 MW (6.5~7.5 MW の範囲) の実測値をピックアップしたものである。図中の破線は、線長 g を考慮していない式(3)による圧力 P の計算値 ($W_t/\Delta t=7.0 \text{ MW}$, $R_d=20 \text{ cm}$ における値) を示す。すなわち、この条件下では圧力 P は 4.02 MPa 一定となる。それに対し、実線で示した曲線は式(4)による計算値を表したものである。図 12 からみて、圧力 P は特性式(4)で評価できる

ことが確認できる。このことは、 $W_1/4t = 5.5 \text{ MW}$, $R_d = 20 \text{ cm}$ の条件においても確認されている⁷⁾。また、圧力の金属線長による変化は、放電エネルギーの時間変化の線長による変化とは独立していることもわかる。

なお、このように圧力の大きさが線長によって変化する原因は、現時点では不明であり、今後の課題である。

7. ま と め

水中での金属線溶断放電における放電エネルギーの時間変化ならびに衝撃第1次圧力波の波高値と金属線長との関係に関する実験結果から、次のことが明らかとなつた。

- (1) 金属線長の増加と共に放電エネルギーの時間変化 $W_1/4t$ ならびに圧力 P も増大する。しかし、ある長さよりさらに線長が大きくなると、 $W_1/4t$ ならびに P は最大値を経た後減少する。金属線の材質、直径及びコンデンサ充電電圧によりその値は異なるが、 $W_1/4t$ ならびに P が最大となる最適な線長が存在する。
- (2) 放電エネルギーの時間変化に関する諸要素の値と線長との関係について調べた。その結果、線長が増大するに伴い、金属線の電圧は増大するが、電流は小さく歪んだ波形となる。この電流、電圧値に関するエネルギー W_1 は、一般に線長の増大に伴い大きくなるが、その増大の状態は条件によって異なる。また、アーチ移行時間 $4t$ は、線長の増大に伴い、最小値を経て大きくなる。これらの要素から成り立つ放電エネルギーの時間変化 $W_1/4t$ と線長との関係は複雑に変化する。

(3) 放電エネルギーの時間変化 $W_1/4t$ は、線長を変化した場合においても、同様に、圧力 P に関する特性量とみなすことができる。

(4) 圧力 P は、従来提案していた実験式を線長 g でもつて補正すると、次式のようになる。

$$P = 6.59 \times (g)^{0.20} \times (W_1/4t)^{0.72} \times (R_d)^{-0.81}$$

ただし P : 圧力波高値 [MPa]

g : 金属線の線長 [mm]

$W_1/4t$: 放電エネルギーの時間変化 [MW]

R_d : 金属線からの距離 [cm]。

本研究は東北電力株式会社電力技術研究所のご協力によって行ったものである。また、実験に協力された秋田大学鉱山学部大学院修了生山口毅君（現在、同和鉱業株式会社）に深謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 斎藤 宏, 佐藤正志, 赤上陽出男, 岩谷高四郎: 静電気学会誌, 15 (1991) 166
- 2) 斎藤 宏, 佐藤正志, 赤上陽出男, 岩谷高四郎, 小室 弘: 静電気学会誌, 16 (1992) 146
- 3) 斎藤 宏, 山口 毅, 佐藤正志, 赤上陽出男, 小室 弘: 静電気学会誌, 17 (1993) 47
- 4) 斎藤 宏, 山口 毅, 佐藤正志, 赤上陽出男, 小室 弘: 電気学会開閉保護研究会資料, SP-92-21, p. 25 (1992)
- 5) 山口 毅, 斎藤 宏, 佐藤正志, 加賀昭夫, 赤上陽出男, 小室 弘: 平成4年度電気関係学会東北支部連合大会講演論文集, No. 1D6, p. 129 (1992)
- 6) 斎藤 宏, 山口 毅, 佐藤正志, 赤上陽出男, 小室 弘: 静電気学会講演論文集 '92, 22aA12, p. 413, 静電気学会 (1992)
- 7) 斎藤 宏, 佐藤正志, 佐藤安弘, 赤上陽出男, 立崎修二: 電気学会開閉保護研究会資料, SP-93-24, p. 34 (1993)