

## 論 文

## 水中導線爆発による発生圧力

斎 藤 宏\*, 佐 藤 正 志\*, 赤 上 陽 出 男\*, 岩 谷 高 四 郎\*\*

(1990年10月1日受理)

## Pressure Generated by Explosion of Wire in Water

H. SAITO,\* M. SATO,\* H. AKAGAMI\* and K. IWAYA\*\*

(Received October 1, 1991)

Applying a high voltage to a metal wire in water, Joule heat raises the wire temperature. As a result of temperature rise, the state of the wire changes from solid into gas via liquid. The gasification and subsequent arc discharges produce a pressure wave in water. The peak value of the pressure wave varies with material, diameter and length of the metal wire, and also with applied voltage. In the study, the generated pressure was measured using four different wire materials. We discuss about the time variation ( $dW/dt$ ) of input energy into a transient discharge between the moment the voltage across electrodes has a maximum and the moment the transient discharge changes into an arc discharge. The results make it clear that a certain relation is observed between the peak value ( $P$ ) of the pressure wave in water and  $dW/dt$ . The paper describes that the quantity  $dW/dt$  permits the value of the pressure  $P$  to estimate.

## 1. まえがき

水中に配置した金属線に電圧を印加し、金属細線を溶断発弧させると、衝撃圧力波が発生する。金属線に通電すると、ジュール加熱によって金属線は融点に達し、さらには爆発的に気化し、衝撃波が発生すると言われている。この衝撃波を第1次圧力波と呼ぶ。爆発的気化と同時にアーカ放電が発生し、水中に高温、高圧のガスが生成される。このガス体は時間とともに膨張し、ある時点では過膨張の状態となる。その後、逆にガス体は収縮する。この時点で第2次圧力波が発生するとされている。

爆薬を用いての水中爆破において、爆発時に発生する圧力の最高値は爆薬量に関係すると言われている<sup>1)</sup>。これに対して、水中の火花放電の場合には圧力の値はコンデンサに蓄えられた電気エネルギーに関係付けられるとの報告もある<sup>2)</sup>。また、水中の電気的な導線爆発の場合

の電極間消費エネルギーと圧力との関係について検討し<sup>3)</sup>、消費エネルギーが最大となる金属線の断面積と長さを求めている。この断面積と長さで最大の圧力<sup>4)</sup>が発生すると報告されている。このように水中導線爆発については従来より数多くの研究<sup>5)</sup>がなされている。

しかし、爆薬を用いた場合に示された特性量(爆薬量)に対応する量が、水中導線爆発の場合には、得られていない。本論文においては、この特性量を見いだすこと目的としている。

本研究においては、4種類の金属線を用いて種々の条件下で第1次圧力波の波高値のみの測定を行った。それらの結果をもとに、電気的な水中での導線爆発により発生する圧力値と過渡放電を経てアーカ放電へ移行する過程におけるエネルギー変化との関係について検討を行った。その結果、金属線の種類などに關係なく、上述のエネルギー変化のみで圧力を評価することが可能となつた。

なお、導線爆発により発生した圧力波は水中で減衰しながら伝搬する。本研究では金属線の真上 10 cm の位置で圧力波の波高値を測定した。この圧力を本論文では発生圧力と称している。

## 2. 実験回路ならびに方法

図1に実験回路を示す。電源として電圧  $V_0=7.5\sim 17.5$  kV に充電した静電容量  $C=4 \mu F$  のコンデンサを

キーワード：水中導線爆発、発生圧力、圧力と投入エネルギー、エネルギーの時間変化

\* 秋田大学鉱山学部電気工学科 (010 秋田市手形学園町 1-1)  
Department of Electrical Engineering, Mining College, Akita University, 1-1 Tegata Gakuenchou, Akita, 010 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

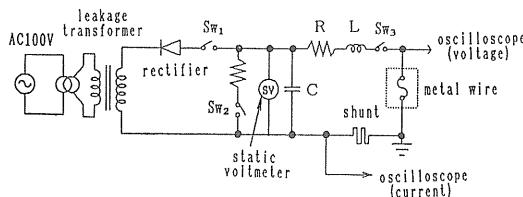


図 1 実験回路

Fig. 1 Schematic diagram of experimental circuit.

使用した。この電源に  $R=1.8\Omega$  の抵抗、 $L=40\mu H$  のインダクタンスおよび水中に配置した金属線を直列に接続してある。スイッチ  $SW_3$  を投入することにより、回路には次式のような電流  $i$  が流れる。

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

ここで、

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

である。

本実験回路においては、電源投入により金属線には電流の最大値が発生する時間  $17\mu s$ 、周期  $83\mu s$ 、減衰時定数  $45\mu s$  の減衰振動の電流が流れ、金属線は溶断発弧し、水中に圧力波が発生する。なお、従来の研究においては、最大電流を大きくするため、 $R=24\sim180\text{m}\Omega$ 、 $L=1\sim8\mu H$  程度の回路抵抗、インダクタンスで実験を行っているものもある。本実験においては、金属線部分の状態変化にともなう抵抗変化およびインダクタンス変化が回路電流に影響し、解析が複雑となることをできるだけ防ぐため、 $R$ （回路抵抗） $\gg r$ （金属線部分の抵抗）となるように  $1.8\Omega$  の回路抵抗を、また、 $L$ （回路インダク

タンス） $\gg L_0$ （金属線部分のインダクタンス）となるよう  $40\mu H$  の回路インダクタンスを挿入してある。

回路を流れる電流は同軸円筒型の分流器で測定した。この分流器の外側円筒は直径  $32\text{mm}$ 、厚さ  $1.5\text{mm}$  の銅、内側円筒は直径  $25\text{mm}$ 、厚さ  $1\text{mm}$  の 18-8 ステンレスであり、それぞれの長さは  $20\text{cm}$  である。なお、この分流器の抵抗値は  $2\text{m}\Omega$ 、応答速度は  $0.27\mu s$  である。

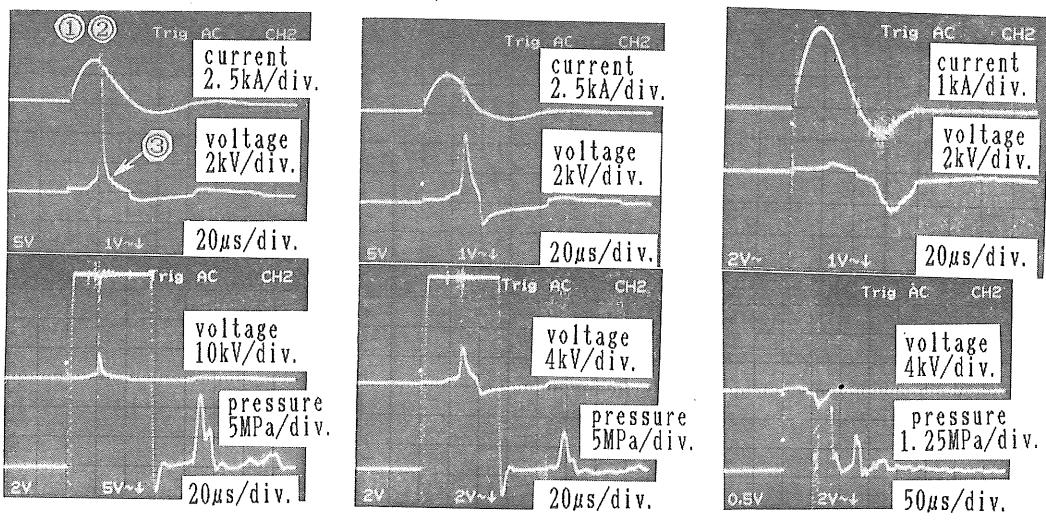
水中での電気的な金属線の溶断爆発ならびに放電は直径  $50\text{cm}$ 、高さ  $60\text{cm}$  の円筒容器中で行った。電極（直径  $10\text{mm}$  の銅棒）は底部から  $20\text{cm}$  の位置に水平に配置してある。この電極間に直径  $d=0.1\sim0.2\text{mm}$  の金属線を直線状に張る。金属線の長さ  $g$  は、電極間隔と等しく、 $10$  ないし  $20\text{mm}$  とした。金属線として、銅、錫、タングステンおよび鉄（ピアノ線）を使用した。

衝撃圧力値は金属線の真上  $10\text{cm}$  の位置に配置した圧力センサ（KULTE 製の半導体圧力トランジスタ HMK-375、 $700\text{kg/cm}^2$ 、共振周波数  $385\text{kHz}$  および  $140\text{kg/cm}^2$ 、共振周波数  $360\text{kHz}$  の 2 種類）を用いて検出した。

容器中の水の底部からの高さは  $50\text{cm}$  であり、水温  $12\sim20^\circ\text{C}$ 、抵抗率約  $10^4\Omega\cdot\text{cm}$  の水道水を使用している。

### 3. 実測電流、電圧および圧力波形

測定波形の 1 例を図 2 に示す。同図はコンデンサ充電電圧  $V_0$  を種々の値に設定した場合の波形であり、金属線として直径  $d=0.2\text{mm}$ 、長さ  $g=20\text{mm}$  の銅を使用

(a)  $V_0=17.5\text{kV}$ (b)  $V_0=15.0\text{kV}$ (c)  $V_0=12.5\text{kV}$ 図 2 電流、電圧および圧力波形（銅線、 $d=0.2\text{mm}$ 、 $g=20\text{mm}$ ）Fig. 2 Waveforms of current, gap voltage and pressure (Cu,  $d=0.2\text{mm}$ ,  $g=20\text{mm}$ ).

した場合である。図(a)は  $V_0=17.5$  kV, (b)は  $V_0=15.0$  kV および(c)は  $V_0=12.5$  kV の場合の実測波形である。同図中の上の写真は電流、電極間の電圧波形を示し、下の写真は電圧、圧力波形を示す。

図2のどの充電電圧  $V_0$  の場合にも、第1波目の最大電流は、電源投入後約  $17 \mu\text{s}$  において発生している。これに対して、電圧の最大は、(a)の場合には  $22.4 \mu\text{s}$ , (b)の場合には  $29.7 \mu\text{s}$ , (c)の場合には第2波目の電流最大値の近傍の  $65.5 \mu\text{s}$  において発生している。また、図2中の一番下に示す圧力波形（センサ位置は金属線の真上  $10 \text{ cm}$ ）においては、電源投入後  $60 \mu\text{s}$  程度は矩形状の波形となっているが、これはアーカー電流によるノイズであり、それ以降に現われている波形が圧力波形である。この圧力の波高値は図(a)→(c)と  $V_0$  が低くなるとともに、 $10.3, 6.6, 1.5 \text{ MPa}$  と低くなっている。すなわち、図2の例ではコンデンサ充電電圧  $V_0$  を高くすることにより、電圧の最大値が発生するまでの時間は短くなり、圧力の波高値は大きくなる。

このような測定結果に基づき、次章以降において種々の検討を行う。なお、以後の検討に使用する実測値はそれぞれ5回の実験結果の平均値で示す。

#### 4. 最大電圧が発生する時間および圧力波の立ち上がり時間

本章においては、電源を投入した後に最大電圧が発生するまでの時間  $t_V$  について検討する。続いて、圧力波の立ち上がり時間について考察する。

##### 4.1 金属線の状態変化

水中での金属線の状態変化については種々の検討がなされており<sup>8,9)</sup>、状態変化に対する模型なども提案されている<sup>8,9)</sup>。また、大気中の金属線についてではあるが、もっと微視的に局部溶断による衝撃波の発生についても検討が行われている<sup>10)</sup>。

それらを参考にすれば、金属線の状態変化は、巨視的には、次のように変化すると考えられる。すなわち、エネルギーの投入により、金属線は最初に固体状態のままで温度が上昇し、融点に達する。金属線はこの溶融の期間（温度が融点の期間）中に一部が液化し、最終的には全部が液体となる。次の段階において液体となった金属の温度は沸点まで上昇する。その後、液体と気体が混在するようになり、最後には、すべて金属蒸気となる。水中導線爆発においては上述の各段階のどこかの時点での過渡放電を経てアーカー放電に移行する。

図2(a)上の電圧波形において、電源投入①から最大電圧が発生する時点②までの期間が金属線の加熱、溶融、気化過程である。時点②から時点③までの間は過渡放電

（火花、グロー、過渡アーカー放電など）を経てアーカー放電に至る期間であり、時点③以降はアーカー放電と考えられる。時点③以降は電圧が低く、再点弧を繰り返し、アーカー放電の特徴を示している。

また、図2(a)～(c)からみて、アーカー放電が消滅する前に電極から  $10 \text{ cm}$  離れたセンサ位置に圧力波が到達しており、第1次圧力波は、電源のエネルギー ( $1/2 CV_0^2$ ) をすべて消費する前に発生していることが分かる。

#### 4.2 最大電圧が発生する時間

図3に測定波形から読みとった電源を投入した後最大電圧が発生するまでの時間  $t_V$  とコンデンサ充電電圧  $V_0$  との関係を示す。パラメータは銅および錫の直径  $d$  である。

図3から見て、 $V_0$  が大きいほど時間  $t_V$  は短くなっている。(1)式に示したように、電流  $i$  は  $V_0$  に比例する。したがって、 $V_0$  が大きいほど電流  $i$  も大きくなり、金属線の状態変化が速く進行する。銅あるいは錫において、同じ  $V_0$  であれば、線の直径が細いほど時間  $t_V$  は短くなる。すなわち、直径が細いほど線の抵抗が大きく、金属線に加わる電圧が大きくなる。このためジュール熱が大きく、線の温度上昇が速くなり、時間  $t_V$  は短くなる。同一直径（例えば、 $0.2 \text{ mm}$ ）の銅と錫においては、抵抗率の大きい錫の方が抵抗が大きいため、時間  $t_V$  が短くなる。

また、細線の長さが  $10 \text{ mm}$  か  $20 \text{ mm}$  かということはこの場合時間  $t_V$  にはほとんど関係していなかった。

#### 4.3 圧力波の立ち上がり時間

金属線から  $10 \text{ cm}$  の位置にあるセンサで測定した圧力波形の立ち上がり時間（圧力波が到達した時点から圧力の最大値が発生する時点までの時間）は、本実験の範囲では、特別な場合（第2波目で最大電圧が発生する場合）を除き、 $3.5 \sim 6 \mu\text{s}$  の値であった。本実験で使用し

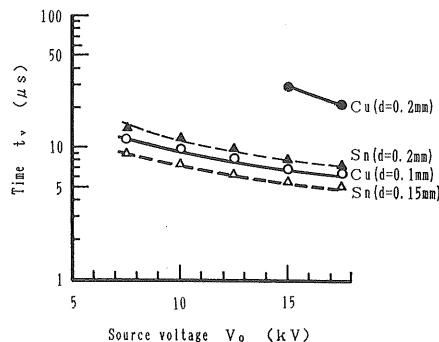


図3 時間  $t_V$  とコンデンサ充電電圧  $V_0$  との関係 ( $g=10, 20 \text{ mm}$ )

Fig. 3 Relation between time  $t_V$  and source capacity charging voltage  $V_0$  ( $g=10, 20 \text{ mm}$ ).

たセンサの共振周波数は 385 kHz であり、この周波数近辺で使用する際には感度が高くなる恐れがある。しかし、本実験においては上述の時間の最小値の場合 (3.5  $\mu$ s) の周波数は 285 kHz となり、未だ余裕のあることが分かる。

### 5. 各種金属線による発生圧力特性

図 4 に、金属線が銅 (○, ●印) ならびにタンゲステン (△, ▲印) の場合の圧力波高値  $P$  (センサ位置は金属線から 10 cm) とコンデンサ充電電圧  $V_0$  との関係を示す。同じ  $V_0$  でも金属線の種類、直径  $d$  によって圧力  $P$  の値は異なる。すなわち、金属線により任意の  $V_0$  において最高の圧力を発生する最適の直径が存在することになる。また、金属線の種類、直径  $d$  および長さ  $g$  が指定された場合には、最適のコンデンサ充電電圧  $V_0$  が存在することが分かる。例えば、 $d=0.1\text{ mm}$ ,  $g=10\text{ mm}$  の W (△印) においては、 $V_0 \approx 10\text{ kV}$  で最大の圧力が発生している。

鉄ならびに錫線の長さ  $g$  をパラメータとして、図 5 に圧力  $P$  とコンデンサ充電電圧  $V_0$  との関係を示す。一般には金属線の長さ  $g$  が大きいほど、 $P$  が大きくなる傾向にあるが、鉄における場合は  $V_0$  の低いところで、 $P$  の大小関係が逆転する可能性がある。

図 6 は直径  $d=0.2\text{ mm}$ , 長さ  $g=20\text{ mm}$  の各種金属線の場合の圧力  $P$  とコンデンサ充電電圧  $V_0$  との関係を示す。 $d$ ,  $g$ ,  $V_0$  を同じに設定しても、使用する金属線によって  $P$  の値が異なることが分かる。

以上の結果から、従来は各種金属線について、ある電源状態の下で実験的に最も大きな圧力を発生し得る最適の直径、長さなどが最適条件として検討されてきた。また、図 4～図 6 から、圧力波高値  $P$  とコンデンサに貯えられたエネルギー ( $CV_0^2/2$ ) とを一定の関係で表わすことが困難なことが分かる。

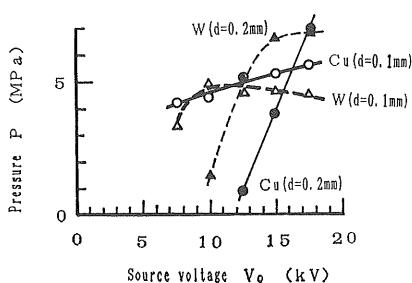


図 4 圧力  $P$  とコンデンサ充電電圧  $V_0$  との関係 ( $g=10\text{ mm}$ )

Fig. 4 Relation between pressure  $P$  and source capacity charging voltage  $V_0$  ( $g=10\text{ mm}$ ).

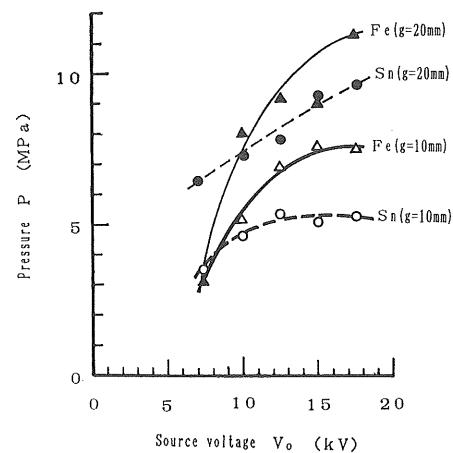


図 5 圧力  $P$  とコンデンサ充電電圧  $V_0$  との関係 ( $d=0.2\text{ mm}$ )

Fig. 5 Relation between pressure  $P$  and source capacity charging voltage  $V_0$  ( $d=0.2\text{ mm}$ ).

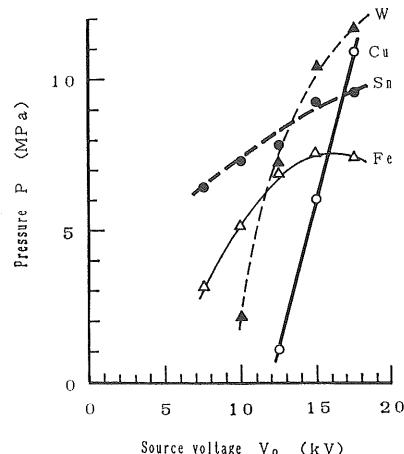


図 6 圧力  $P$  とコンデンサ充電電圧  $V_0$  との関係 ( $d=0.2\text{ mm}$ ,  $g=20\text{ mm}$ )

Fig. 6 Relation between pressure  $P$  and source capacity charging voltage  $V_0$  ( $d=0.2\text{ mm}$ ,  $g=20\text{ mm}$ ).

### 6. エネルギー変化と発生圧力

#### 6.1 アーク放電移行時のエネルギー変化

水中の金属線に通電すると、ジュール加熱によって金属線の温度は上昇し、金属線は固体→液体→気体（金属蒸気）へと状態が変化し、過渡放電を経てアーケ放電へと移行する。圧力波は状態変化のどこかの段階で発生を始める。すなわち、金属線が存在した位置に衝撃的な速度で、ある直径（金属線の直径よりはもちろん大きいと考えられる）のアーケプラズマが出現する。これによって圧力波が発生する。圧力波の波高値は、どの程度の時

間で過渡放電がアーカ放電へと移行するかによって決まるものと推測される。本章では、過渡放電を経てアーカ放電へと移行する時点の微小時間におけるエネルギー変化に着目して、この変化と発生圧力との関係について検討する。

爆薬による水中爆破においては、爆発時に発生する圧力の波高値  $P$  は爆薬量  $W_E$  と爆発点からの距離  $R_d$  に関係し、次式で表わされると報告されている<sup>11</sup>。

$$P = KW_E^n R_d^m \quad (3)$$

本章においては、爆薬量に対応する特性量としてエネルギー変化を考え、この特性量と発生圧力との関係を検討する。

## 6.2 エネルギーの時間変化の算出

本節では、過渡アーカを経てアーカ放電に移行する時点のエネルギーの時間変化を算出する<sup>11,12</sup>。図7は銅線の直径  $d=0.2\text{ mm}$ 、長さ  $g=20\text{ mm}$  で、コンデンサの充電電圧が  $V_0=15\text{ kV}$  の場合の電流波形、電極間の電

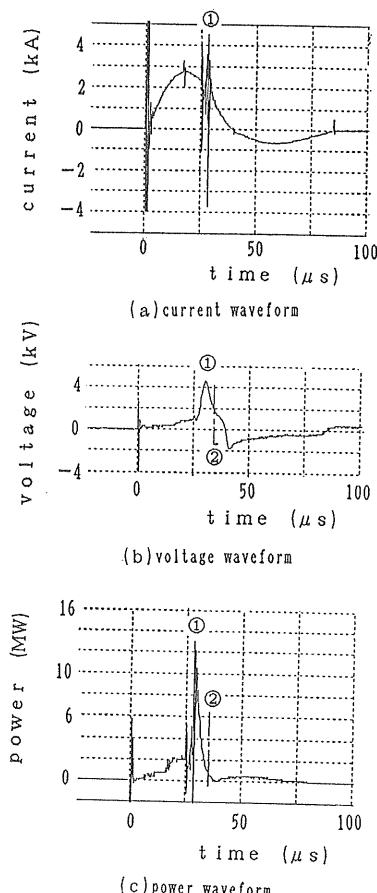


図7 エネルギーの時間変化  $dW/dt$  の算出

Fig. 7 Estimation of time variation of input energy  $dW/dt$ .

圧波形および電力波形を示す。同図(a), (b)はデジタル・ストレージオシロスコープによる測定波形であり、図(c)はデータを計算処理したものである。図(a)の電流波形において電源投入時ならびに投入後約 25 μs の近傍から①の時点までの間に急峻なパルスが重畳されている。電源投入時のパルスはスイッチ投入時のサージである。図(b)の①で示す最大電圧が発生した時点においては、電流波形上に大きなパルスが発生している(図(a)の①の時点近傍)。電圧波形は  $L (di/dt)$  が重畳されたものであり、実験条件によってはこの電圧がコンデンサの充電電圧  $V_0$  より大きな値となる場合もある。この①の時点近傍で電流波形上に重畳されているパルスは、金属線が長さ方向に対して局部的に不連続に蒸発し、金属の抵抗が不連続に大きく変動するためと考えられる。

図7(c)の電力波形から、最大電圧が発生した時点(①の時点)からアーカ放電(②の時点)に至るまでに過渡放電へ投入されるエネルギー  $dW$  (J) を算出する。すなわち、①から②の時間( $dt$ )の電力の積分値を求める。この  $dW$  の値をアーカ放電に移行するまでの時間  $dt$  で割ることによってエネルギーの時間変化  $dW/dt$  を算出した。なお、アーカ放電と見なす時点②は電圧波形の変化より決定した。

## 6.3 エネルギーの時間変化と圧力

発生圧力は、(3)式に示したように、放電点からの距離  $R_d$  に関係する。本論文においては、圧力の減衰特性((3)式中の  $R_d^m$  項)がエネルギー変化項((3)式中の  $W_E^n$  項に対応)に影響を与えないものと仮定し、放電点から 10 cm 位置の圧力値を用いて検討する。

図8に発生圧力  $P$  (放電点から 10 cm のセンサ位置で測定) とアーカ放電への移行時点におけるエネルギー

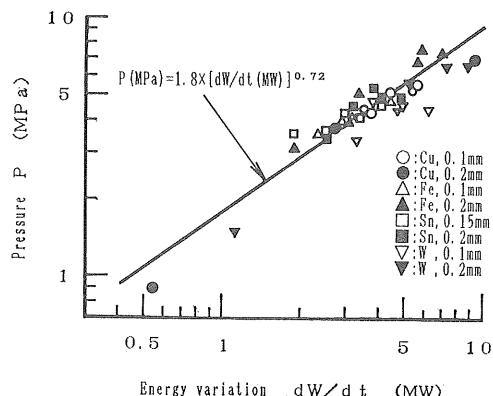


図8 圧力  $P$  とエネルギーの時間変化  $dW/dt$  との関係 ( $g=10\text{ mm}$ )

Fig. 8 Relation between pressure  $P$  and time variation of input energy  $dW/dt$  ( $g=10\text{ mm}$ ).

の時間変化  $dW/dt$  との関係を示す。同図は金属線の長さ  $g$  が 10 mm の場合である。図中の各記号は金属線の種類、直径が異なる場合の実測値である。また、これらは  $V_0$  が 7.5~17.5 kV の場合の各測定値である。図中の実線は次式で示される実験式（放電点からの距離 10 cm の場合）の計算値である。すなわち、圧力  $P$  (MPa) とエネルギーの時間変化  $dW/dt$  (MW) との関係を最小 2 乗法により求めた結果、次の実験式が得られた。

$$P = 1.8 \times (dW/dt)^{0.72} \quad (4)$$

図 9 は金属線の長さ  $g$  が 20 mm の場合の  $P$  と  $dW/dt$  の関係である。同図において実線は(4)式からの計算値である。

図 8 および図 9 からみて、各実測値が実線の周りに分布していることが分かる。すなわち、金属線の種類、金属線の直径  $d$ 、長さ  $g$  およびコンデンサの充電電圧  $V_0$  が異なっても、発生圧力  $P$  はアーク放電への移行過程におけるエネルギーの時間変化  $dW/dt$  と一定の関係にあることが分かる。

圧力の放電点からの距離  $R_d$  による減衰特性は今後の課題であるが、(3)式からみて、水中導線爆発の場合の圧力波高値  $P$  は次式で表わされるものと考えられる。

$$P = K(dW/dt)^{0.72}(R_d)^m \quad (5)$$

以上の結果から、金属が蒸発した後アーク放電へと移行する時間内にどの程度のエネルギーが電極間に過渡放電へ投入されるかによって発生圧力が決定されるものと考えられる。言い換えれば、物理的にはどの程度の時間内にどの程度の直径、温度のアークプラズマが水中に発生するかによって衝撃圧力波の波高値が決まるものと思われる。

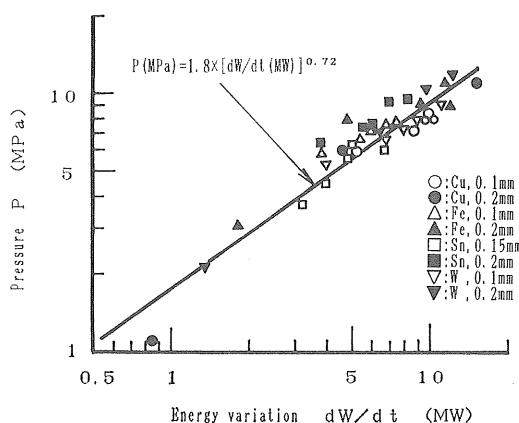


図 9 圧力  $P$  とエネルギーの時間変化  $dW/dt$  との関係 ( $g=20$  mm)

Fig. 9 Relation between pressure  $P$  and time variation of input energy  $dW/dt$  ( $g=20$  mm).

従来は個々の金属線ならびにその寸法によって実験的に圧力との関係を検討していた。しかし、特性量として  $dW/dt$  を考えることにより、種々の条件が変わっても圧力  $P$  をこの特性量により評価することが可能になる。すなわち、従来はある条件下で最も大きい圧力が発生する最適条件（金属線の直径、長さなど）を実験的に求めている。しかし、本研究で示したように  $P$  を  $dW/dt$  で評価できるということは、ある条件下で最も大きい圧力を発生させ得る最適条件が物理現象との対応の下に検討できることを示唆している。

## 7. ま と め

本研究は、水中の金属線が爆発的に溶断することによって発生する衝撃圧力波に関する研究である。なお、実験回路は、従来使用されているものに比べ、回路抵抗ならびにインダクタンスを意識的に大きくしてある。これは金属線部分の抵抗ならびにインダクタンス変化が回路電流に影響するのを防ぐ目的のためである。

本研究の概要を以下に摘記する。

- (1) 金属線に電流を流すと、金属線の温度は上昇し、この金属は固体→液体→気体へと状態が変化し、電極間に最大電圧が発生し、その後過渡放電を経てアーク放電へと移行する。
- (2) 水中導線爆発によって発生する圧力波の波高値は金属線の種類、直径、長さおよびコンデンサの充電電圧によって複雑に変化する。
- (3) 最大電圧が発生した後からアーク放電へ移行する時間内の投入エネルギーの時間変化  $dW/dt$  (MW) と圧力波の波高値  $P$  (MPa) との間には次の関係がある（ただし、 $P$  は放電点から 10 cm の位置における値）。

$$P = 1.8 \times (dW/dt)^{0.72}$$

- (4) 金属線の種類、直径、長さおよびコンデンサの充電電圧が異なっても、 $dW/dt$  を用いることにより、圧力  $P$  を統一的に評価できる。

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技官佐藤安弘氏ならびに大学院生国井和康君に深謝いたします。

## 参 考 文 献

- 1) R.H. Cole : *Underwater Explosion*, p. 228-248, Princeton University Press, Princeton, New Jersey (1948)
- 2) 中尾好隆、坂本三郎：電気学会雑誌, 87 (1967) 979
- 3) 戸部俊美、加藤正名、小原治樹：日本機械学会論文集（第3部），44 (1978) 1397
- 4) 栖原寿郎、北島一徳、福田重久：塑性と加工, 9 (1968)

- 324
- 5) 今井田豊：塑性と加工（日本塑性加工学会誌），**25** (1984) 687
  - 6) 元木幹雄，行村 建：電気学会論文誌 A，**94** (1974) 273
  - 7) 元木幹雄，行村 建：電気学会論文誌 A，**96** (1976) 221
  - 8) N.N. Stolovich, V.G. Maksimov and N.S. Minitskaya : Sov. Phys. Tech. Phys., **19** (1975) 1321
  - 9) 五十鈴川浩児，藤村 勉，辻 光英，安井正二：昭和62年電気学会全国大会講演論文集，No. 201 (1987)
  - 10) 行村 建：電気学会論文誌 A, **106** (1986) 480
  - 11) 斎藤 宏，赤上陽出男，佐藤正志，佐藤安弘，国井和康，岩谷高四郎：平成2年電気学会全国大会講演論文集，No. 666 (1990)
  - 12) 斎藤 宏，佐藤正志，赤上陽出男，佐藤安弘，国井和康，岩谷高四郎：平成2年電気関係学会東北支部連合大会講演論文集，No. 2D-1 (1990)