

論 文

水中導線の電気的爆発による圧力波の諸特性

斎 藤 宏*, 佐 藤 正 志*, 赤 上 陽 出 男*

岩 谷 高 四 郎 **, 小 室 弘 ***

(1991年7月29日受理)

Characteristics of Pressure Wave by Under Water Wire
Electric Explosion

Hiroshi SAITO,* Masashi SATO,* Hideo AKAGAMI,*

Koushiro IWAYA** and Hiroshi KOMURO***

(Received July 29, 1991)

When a fairly large current flows along a small wire under tap water impulsively, pressure waves are produced by the gasification of the wire and subsequent arc discharges. This phenomenon is well known as an "under water wire explosion". We studied those pressure waves with four wire materials (Cu, Fe, W, Sn), varying the distance between the wire and pressure sensor, which is referred to as a "propagation distance", in the range of 10 cm to 30 cm. The results show that pressure waves propagate with velocity 1480 m/s in water. The magnitude of the generated pressure P [MPa] is

$$P = 11.2 (W_I / \Delta t)^{0.72} (R_d)^{-0.81}$$

where $W_I / \Delta t$ [MW] is the time variation of input energy and R_d [cm] is the propagation distance. Using the quantity $W_I / \Delta t$, one can estimate the amplitude of pressure generated by the wire explosion under water with various sizes and materials of wire for different source voltages and propagation distances of pressure waves.

1. ま え が き

水中に配置した金属線に衝撃的に大電流を流し、金属細線を溶断発弧させると、衝撃圧力波が発生することは古くからよく知られている。この現象は水中導線爆発として知られている。最初に発生する衝撃波を第1次圧力波と呼ぶ。第1次圧力波が発生するとともに、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

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、伝搬速度、減衰特性

* 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

** 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

*** 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

に膨張し、ある時点で過膨張の状態となる。この時点で、逆にガス体は収縮し、第2次圧力波が発生する。さらに、同様の状態を繰り返し、第3次、第4次圧力波が発生するとされている。これらの衝撃圧力波は成形加工、圧接着、その他に利用されている。

水中での電気的な導線爆発については従来より数多くの研究¹⁻³⁾がなされている。しかし、金属線の種類、直径、長さおよび回路条件が異なると、発生圧力を統一的に評価することができない。そのため、従来はこれらの関係を実験的に求めていた。

水中導線爆発は電気的には過渡放電を経てアーキ放電へと移行する過程で発生する。筆者らは、水中での導線爆発、言い換れば金属線の溶断放電によって発生する圧力（第1次圧力波の波高値）を評価する特性量として、この過程における放電エネルギーの時間変化を用いてこれを前に報告⁴⁻⁶⁾した。

本研究においては、この特性量が金属線からの距離（圧力波の水中での伝搬距離）が異なっても適用できるかどうかならびに圧力波の伝搬距離による水中減衰特性について検討を行った。すなわち、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測定を行っ

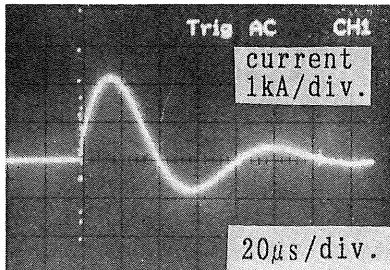


図1 電極間短絡時の電流波形

Fig. 1 Current waveform of circuit without metal wire.

た。それらの結果をもとに、圧力波の距離-時間特性を求め、この特性から圧力波の水中での伝搬速度を算出した。次に、水中での電気的な導線爆発により発生する圧力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関係なく、金属線からの距離が異なっても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った。

また、導線爆発により発生した衝撃圧力波は水中を減衰しながら伝搬する。本報告ではこの伝搬距離による圧力の水中での減衰特性についても検討した。

2. 実験回路ならびに方法

前報^④と同様の回路により実験を行った。すなわち、金属線に電圧を印加する電源には、一般に用いられているコンデンサ充電方式を採用した。すなわち、電圧 $V_0 = 7.5 \sim 17.5 \text{ kV}$ 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使用した。この電源に開閉器を介して、 $R = 1.8\Omega$ の抵抗、 $L = 40\mu\text{H}$ のインダクタンスと共に配置した電極間の金属線がいづれも直列に接続している。

本実験回路において電極間を溶融しないほど太い電線で短絡した時の電流は、図1に示すように、電源投入より電流の最大となるまでの時間が $17\mu\text{s}$ 、周期が $83\mu\text{s}$ 、減衰定数が $45\mu\text{s}$ の減衰振動波形となる。電極間に金属細線を張っての実際の実験においては、電源投入により図1とほぼ同様の電流が流れる。この電流によって金属線は溶断発弧し、水中に圧力波が発生する。なお、本実験においては、金属線部分の状態変化（固体→液体→気体→プラズマ）に伴う抵抗変化およびインダクタンス変化の回路電流に及ぼす影響を緩和し、解析が複雑となることを避けるために、 1.8Ω の回路抵抗と $40\mu\text{H}$ の回路インダクタンスとを挿入してある。

回路を流れる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 $0.27\mu\text{s}$ である。

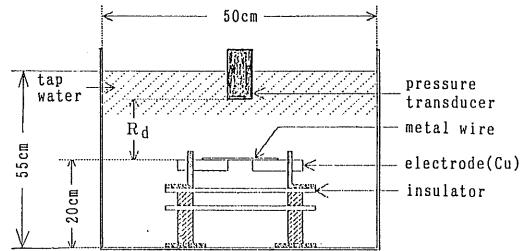


図2 実験装置

Fig. 2 Experimental arrangement.

図2に実験装置の概要を示す。実験は直径50cm、高さ60cmの円筒容器内の水中で行った。電極（直径10mmの銅棒）は容器の底部から20cmの位置に水平に配置してある。この電極間に直径 $d=0.1 \sim 0.2\text{ mm}$ の金属線を直線状に接続する。金属線の長さ g は、電極間隔と等しく、10ないし20mm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 $R_d=10\text{ cm} \sim 30\text{ cm}$ の位置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ユーザ HKM-375, 700 kg/cm^2 , 共振周波数 385kHz および 140 kg/cm^2 , 共振周波数 360kHz の2種類）を用いて検出した。

容器の底部から水面までの高さは55cmであり、使用した水は水温 $12 \sim 20^\circ\text{C}$ 、抵抗率約 $10^4\text{ }\Omega\cdot\text{cm}$ の水道水である。

3. 圧力波の伝搬速度特性

本章においては、水中を伝搬する圧力波の時間-距離特性を測定し、その結果から、衝撃圧力波の伝搬速度を算出する。

3.1 電流、電圧および圧力波形

電流、電極間電圧の測定波形の一例を図3に示す。同

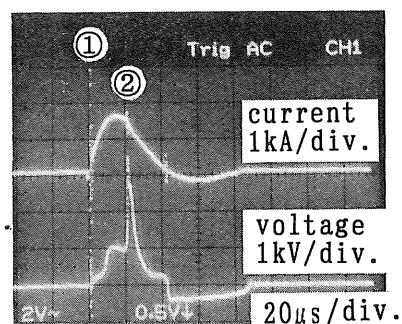
図3 電流、電圧波形（鉄線： $d=0.2\text{ mm}$ ， $g=10\text{ mm}$ ， $V_0=7.5\text{ kV}$ ）

Fig. 3 Waveforms of current and gap voltage.

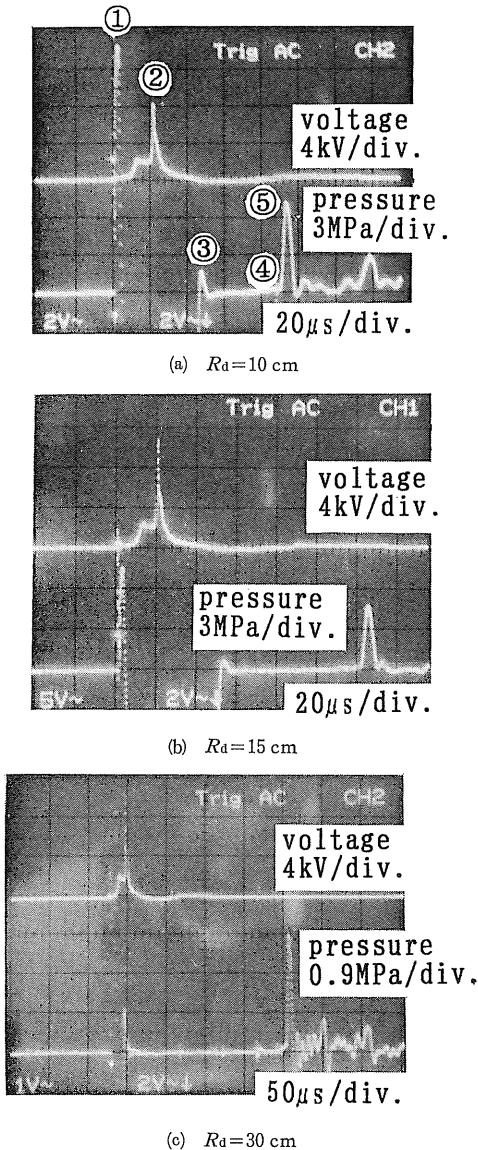


図4 電圧、圧力波形（タンクスチレン線： $d=0.2\text{ mm}$, $g=20\text{ mm}$, $V_0=12.5\text{ kV}$ ）

Fig. 4 Waveforms of gap voltage and pressure.

図はコンデンサの充電電圧 V_0 を 7.5 kV とした場合であり、金属線には直径 $d=0.2\text{ mm}$ 、長さ $g=10\text{ mm}$ の鉄を使用している。同図の上部は電流、下部は電極間電圧である。電源を投入した時点①から約 $17\mu\text{s}$ 後、電流値は最大となり、その値（波高値）は約 1.6 kA となっている。電極間電圧は、①の時点から約 $21\mu\text{s}$ 後の②の時点で最大になっている。

図4に金属線からの距離 R_d を種々の値に設定した場合の電極間電圧（図の上部）および圧力（図の下部）波

形を示す。図4は直径 $d=0.2\text{ mm}$ 、長さ $g=20\text{ mm}$ のタンクスチレン線を使用し、コンデンサの充電電圧 V_0 を 12.5 kV とした場合の例である。図(a)は金属線とセンサとの距離 R_d が 10 cm 、(b)は $R_d=15\text{ cm}$ 、(c)は $R_d=30\text{ cm}$ の位置における波形である。図中の時点①および②は、図3の場合と同様に、それぞれ電源を投入した時点および電極間電圧が最大になる時点である。各図下部の圧力波形は、電源投入（時点①）後の時点③まで波形が振り切れている。これは投入時の電流によるノイズによるものであり、それ以後に現れている波形が圧力波形である。すなわち、④の時点で金属線からの距離 R_d の位置に圧力波が到達し、時点⑥で最大の圧力となる。本研究ではこの圧力波高値を対象としており、以後これを圧力と呼ぶことにする。圧力波は鋭いピークを有する三角波となっている。時点①から時点④までの時間、すなわち、電源を投入した後、圧力波が到達するまでの時間を t_p とする。図(a)の場合には時間 $t_p=89\mu\text{s}$ 、(b)の場合には $120\mu\text{s}$ 、(c)の場合には $223\mu\text{s}$ で圧力波が各距離 R_d のセンサ位置に到達している。

図4において時点①から時点②までの期間は金属線の加熱、溶融、気化過程である。したがって、金属線の材質、直径、長さおよびコンデンサの充電電圧が異なれば、①から②までの時間も違った値となる。

このような測定結果に基づき、次節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。

3.2 距離-時間特性

図5に、直径 $d=0.2\text{ mm}$ 、長さ $g=20\text{ mm}$ のタンクスチレン線を使用し、コンデンサ充電電圧 V_0 を 10.0 kV （一点鎖線）、 12.5 kV （実線）および 17.5 kV （破線）とした場合の距離-時間特性を示す。図5の縦軸は金属線からの距離（圧力波の伝搬距離） R_d であり、横軸は電源を投入した後圧力波がそれぞれの位置に到達するまでの時間、すなわち、図4中の時点①から時点④までの時間 t_p である。図5から見て、距離と時間との関係は直線で表し得ることが分かる。

図5の $V_0=12.5\text{ kV}$ （実線）の場合を例により説明する。この場合の実測値から、距離 $R_d[\text{m}]$ と時間 $t_p[\text{s}]$ との関係を最小2乗法により求めた結果、これらの関係は次式で表される。

$$R_d=1.49 \times 10^3 \times t_p - 3.02 \times 10^{-3} \quad (1)$$

圧力波の伝搬速度 $v[\text{m}/\text{s}]$ は dR_d/dt で評価できるから、この場合の伝搬速度は $v=1490\text{ m/s}$ である。

4種類の金属線（直径 0.1 mm 、錫のみ 0.15 mm ）について、上述の方法で算定した圧力波の伝搬速度 v とコンデンサの充電電圧 V_0 との関係を図6に示す。同図か

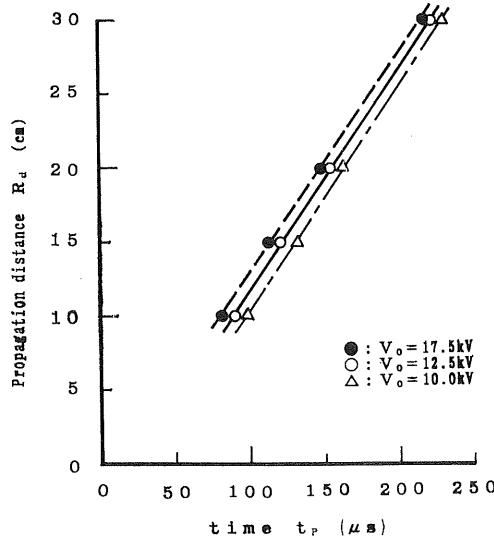


図5 伝搬距離 R_d と時間 t_p との関係 (タンクスチタン線: $d=0.2$ mm, $g=20$ mm)

Fig. 5 Relation between propagation distance R_d and time t_p .

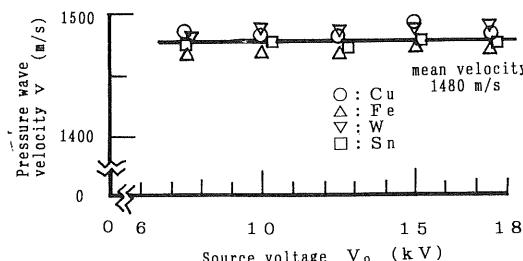


図6 水中の圧力波の伝搬速度 ($d=0.1$ mm, $g=20$ mm)

Fig. 6 Pressure wave velocity in water.

ら、金属線の種類、コンデンサの充電電圧に関係なく、圧力波の伝搬速度はほぼ一定（平均速度 1480 m/s）であることが分かる。金属線の直径が 0.2 mm の場合についても同様の結果が得られた。すなわち、水中での金属線の溶断放電により発生する衝撃圧力波は水中(12~20°C)を 1480 m/s の速度で伝搬している。

従来、水中での火花放電の場合の圧力波の伝搬速度は 1475 m/s¹¹、水中発破の場合には 1500 m/s¹²という値が報告されている。また、蒸留水 (23~27°C) 中の音速は 1500 m/s と言われている¹³。すなわち、水中での金属線の溶断放電による圧力波は従来報告されている値と同程度の値、すなわち水中をほぼ音速で伝搬していると考えられる。

4. 衝撃圧力とエネルギーの時間変化

従来、水中での火花放電ならびに金属線の溶断放電に

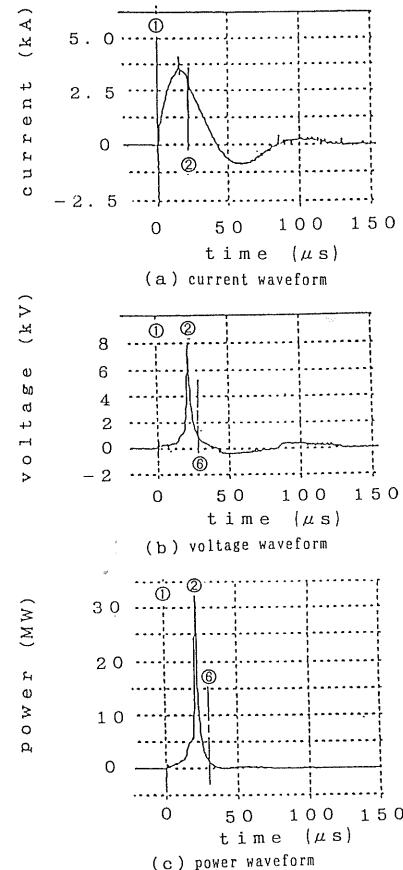


図7 エネルギーの時間変化 W_1/dt の算出 (銅線: $d=0.2$ mm, $g=20$ mm, $V_0=17.5$ kV)

Fig. 7 Estimation of time variation of input energy W_1/dt .

より発生する衝撃圧力をコンデンサの充電電圧と関係付けようとする検討も行われている。しかし、金属線の種類、寸法、コンデンサの充電電圧が異なれば、圧力は複雑に変化する⁴。したがって、金属線の種類、直径、長さなどの影響のため、コンデンサの充電電圧により圧力を統一的に評価することは難しい。

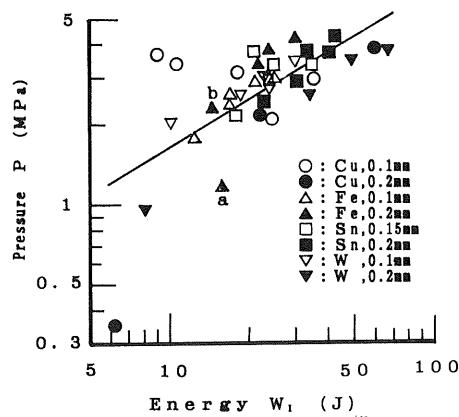
爆発による水中発破において発生する圧力波の最高値 P_m と爆源からの距離 R_d 、爆薬量 W_E との関係は一般に次式の形で表される⁹。

$$P_m = K W_E^n R_d^m \quad (2)$$

本章においては爆薬量 W_E に対応する量として、金属線が気化した後アーケ放電へ移行する期間内の投入エネルギーの時間変化を考える^{4-6,10}。

4.1 投入エネルギー変化

図7に直径 0.2 mm、長さ 20 mm の銅線でコンデンサの充電電圧が 17.5 kV の場合の電流、電圧および電力

図8 圧力 P とエネルギー W_I との関係 ($R_d=30\text{ cm}$)Fig. 8 Relation between pressure P and input energy W_I .

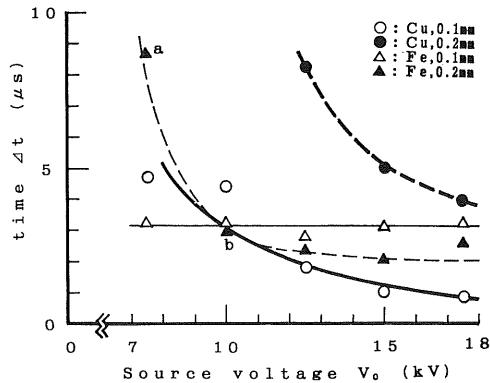
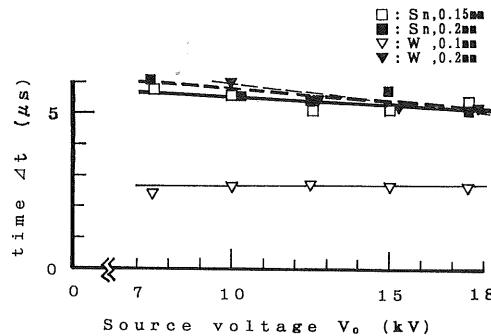
波形を示す。図中①は電源を投入した時点を、②は電圧波形上に最大値を発生する時点を示す。電源投入①から最大電圧が発生する時点②までの期間は金属線の加熱、溶融、気化過程に対応する。その後火花、グロー放電、過渡アーカ放電などの過渡放電を経てアーカ放電に至る。図(b)の電圧波形から見て、時点⑥以降は電圧が低く、再点弧を繰り返しており、アーカ放電の特徴を示している。

図7(c)の電力波形から、最大電圧が発生した時点②からアーカ放電(時点⑥)に至る間に電極間に投入されるエネルギー $W_I[\text{J}]$ を算出する。すなわち、時点②から⑥までの微小時間 Δt の間の電力積分値を計算する。このエネルギー W_I を時間 Δt で割ることによりエネルギーの時間変化 $W_I/\Delta t$ を算出した^{4-6,10}。なお、アーカ放電と見なす時点⑥は電圧波形から推定した。

4.2 発生圧力と投入エネルギー

初めに、最大電圧が発生した時点からアーカ放電に至る間の投入エネルギー W_I と発生圧力 P との関係について調べてみる。

図8に、放電点からの距離 R_d が30cmの場合の圧力 P とエネルギー W_I との関係を示す。同図は種々のコンデンサ充電電圧(7.5~17.5kV)ならびに種々の金属線(銅、鉄、錫、タンクスチン:直径0.1~0.2mm、長さ20mm)の場合の実測結果である。同図は全体的にはエネルギー W_I が増加すれば、圧力 P も増す傾向を示している。しかし、詳細にみた場合には少なくとも次のような問題点が存在する。すなわち、第一には直径0.1mmの銅線(図中○印)の場合には W_I の増加に伴って P は減少する傾向を示している。第二には直径0.2mmの鉄線(図中▲印)において a 、 b の両者はほぼ同じ

図9 時間 Δt とコンデンサ充電電圧 V_0 との関係Fig. 9 Relation between time Δt and source voltage V_0 .図10 時間 Δt とコンデンサ充電電圧 V_0 との関係Fig. 10 Relation between time Δt and source voltage V_0 .

W_I であるが、圧力 P はかなり異なっている。以上の点からも圧力 P をエネルギー W_I で評価するには問題があるものと考えられる。

同じエネルギーを有する火薬類でも、エネルギーの放出速度が大きい場合は爆薬と呼ばれ、放出速度の小さい場合には燃焼と定義され、この両者においては発生圧力も異なってくる。本論文の水中導線爆発においても投入エネルギーのほかに、最大電圧が発生した時点(図7中の時点②)からアーカ放電(図7中の時点⑥)に至るまでの微小時間 Δt が関係するものと考えられる。

図9に銅、鉄線(長さ20mm)の場合、図10には錫、タンクスチン線(長さ20mm)の場合の時間 Δt とコンデンサ充電電圧 V_0 との関係を示す。本実験の範囲では、時間 Δt は0.9~9μsの値となっており、時間 Δt と電圧 V_0 との関係は次の三種類に大別できる。すなわち、①銅ならびに直径0.2mmの鉄線のように、 V_0 が大きくなれば、 Δt が急激に低下するもの、②錫ならびに直径0.2mmのタンクスチン線のように、 V_0 の増

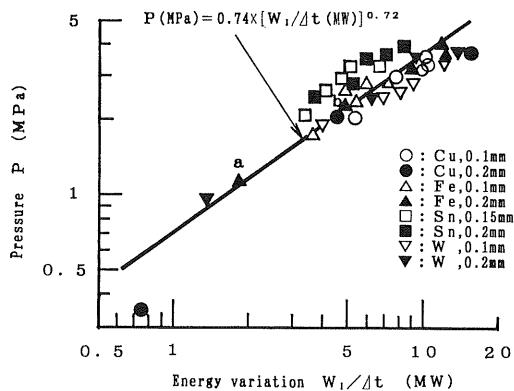


図 11 圧力 P とエネルギーの時間変化 $W_1/\Delta t$ との関係 ($R_d=30\text{ cm}$)

Fig. 11 Relation between pressure P and time variation of input energy $W_1/\Delta t$.

加に伴い幾分 Δt が低下するもの、③直徑 0.1 mm の鉄線ならびに直徑 0.1 mm のタンクステン線のように、 V_0 が変化しても Δt がほぼ一定のものがある。すなわち、金属線の種類、直徑、コンデンサの充電電圧により、時間 Δt は異なる値や傾向を示している。

時間 Δt を考慮しながら、図 8 を見てみる。図 8 の直徑 0.2 mm の鉄線の例 (▲印) の a と b はほぼ同じエネルギーであるが、圧力は b の方が大きい。この場合の時間 Δt は図 9 中の▲印の a と b に対応し、 Δt は a の方が大きい。すなわち、時間 Δt (言い換えれば、エネルギー投入時間に相当) の短い b の方が a よりも圧力が大きくなる。この例からみても、エネルギー W_1 のみでなく、時間 Δt をも考慮することが必要である。

4.3 発生圧力とエネルギー変化

本節では圧力 P とエネルギーの時間変化 $W_1/\Delta t$ との関係について調べてみる。

図 11 は放電点からの距離 R_d が 30 cm の場合の実測圧力 P とエネルギーの時間変化 $W_1/\Delta t$ との関係¹⁰⁾ を示す。同図は種々のコンデンサ電圧 (7.5~17.5 kV) ならびに種々の金属線 (銅、鉄、錫、タンクステン: 直径 0.1~0.2 mm, 長さ 20 mm) の場合の実測結果である。図中の各記号は金属線の種類、直徑が異なる場合の実測値を示す。図 11 中の a と b は図 8 の a と b に対応する。時間 Δt を考慮することにより、圧力の違いが評価できている。また、直徑 0.1 mm の銅線 (図中○印) の場合も、エネルギーの時間変化 $W_1/\Delta t$ の増加と共に圧力 P が増加するというように妥当な傾向を示しているのが分かる。同図からみて、圧力 P [MPa] とエネルギーの時間変化 $W_1/\Delta t$ [MW] との間には次式の関係があることが分かる。すなわち、金属線 (放電点) からの距離、す

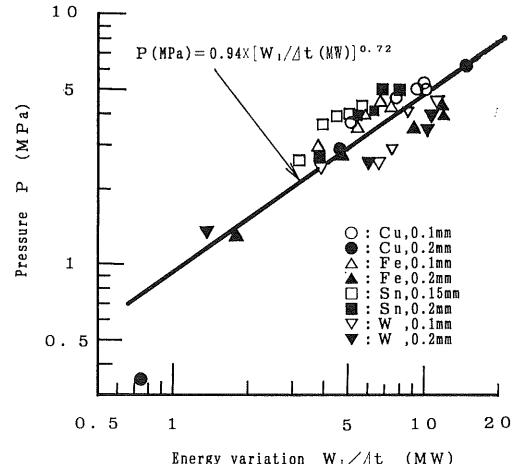


図 12 圧力 P とエネルギーの時間変化 $W_1/\Delta t$ との関係 ($R_d=20\text{ cm}$)

Fig. 12 Relation between pressure P and time variation of input energy $W_1/\Delta t$.

なわち、圧力波の伝搬距離 R_d が 30 cm の場合には、

$$P=0.74 \times (W_1/\Delta t)^{0.72} \quad (3)$$

図 12 は $R_d=20\text{ cm}$ の場合の実測圧力 P とエネルギーの時間変化 $W_1/\Delta t$ との関係である。この場合には次の関係が成り立つ。すなわち、

$$P=0.94 \times (W_1/\Delta t)^{0.72} \quad (4)$$

それに対して、距離 R_d が 10 cm の場合には

$$P=1.8 \times (W_1/\Delta t)^{0.72} \quad (5)$$

の関係が成り立つことを前に報告した⁴⁾。また、距離 R_d が 15 cm の場合についても実測値を検討した結果¹¹⁾、圧力 P は $W_1/\Delta t$ の 0.72 乗に比例することが明らかとなった。すなわち、水中での導線爆発により発生する衝撃波の圧力 P は、金属線からの距離 R_d が異なっても、

$$P=K_1(W_1/\Delta t)^{0.72}=K(W_1/\Delta t)^{0.72}(R_d)^m \quad (6)$$

という形で表すことができる。ただし、係数 K_1 は距離 R_d が大きいほど小さな値となる。

以上の結果から、水中での金属線の溶断放電により発生する衝撃波の圧力は金属線が気化した後アーケ放電へと移行する過渡放電の期間内に投入されるエネルギーの時間変化に関係している。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徑ならびに温度のアーケプラズマが発生するかによって圧力が定まるものと考えられる。

水中での金属線の溶断放電により発生する圧力は金属線の種類、寸法ならびにコンデンサの電圧などの回路条件、さらに放電点からの距離などのパラメータによって複雑に変化する⁴⁾。そのため、従来は、圧力とこれらパ

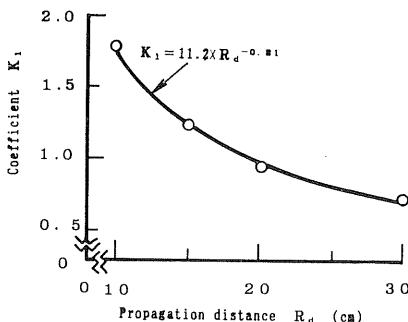
図 13 係数 K_1 と伝搬距離 R_d との関係

Fig. 13 Relation between coefficient K_1 and propagation distance R_d .

ラメータとの関係を統一的に評価することができなかつた。それに対して、本研究におけるように、過渡放電を経てアーカ放電へと移行する過程におけるエネルギーの時間変化に着目することにより、放電点からの距離 R_d などが異なる場合にも到達圧力を統一的に評価することができるようことが明らかとなった。

5. 衝撃圧力波の減衰特性

水中の圧力波は減衰しながら伝搬することが知られている。本章では圧力波の減衰特性について検討する。

金属線からの距離 R_d が 10, 15, 20 および 30 cm の場合の実験結果から得られた係数 K_1 と距離 R_d との関係を図 13 に示す。係数 K_1 は式(6)のように、

$$K_1 = K(R_d)^m \quad (7)$$

で表される。係数 K_1 と距離 R_d との関係を最小 2 乗法により求めると、式(8)のような実験式が得られる。図 13 の実線はこの実験式による計算結果である。

$$K_1 = 11.2 \times R_d^{-0.81} \quad (8)$$

水中での金属線の溶断放電により発生する圧力波は、進行距離の -0.81 乗の割合で減衰しながら、ほぼ音速で伝搬していると考えられる。

以上の結果から、水中での金属線の溶断放電により発生する第 1 次圧力波の波高値は次の関係式で表されることになる。

$$P[\text{MPa}] = 11.2 \times (W_I/\Delta t [\text{MW}])^{0.72} (R_d [\text{cm}])^{-0.81} \quad (9)$$

ここで、圧力の減衰特性について実測値と式(9)による計算値とを比較してみる。図 14 は圧力 P と金属線からの距離 R_d との関係を示す。図中の各記号は、 $W_I/\Delta t$ が 6.2~7.7 MW の場合の種々の金属線の実測値を拾って示したものである。同図から、圧力 P が距離 R_d の -0.81 乗に比例して減衰していることが確認できる。

水中発破の場合の圧力の減衰指数 m は爆薬の種類によ

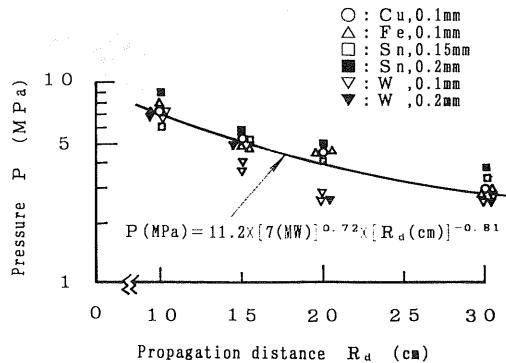
図 14 圧力 P と伝搬距離 R_d との関係 ($W_I/\Delta t = 6.2 \sim 7.7$ MW)

Fig. 14 Relation between pressure P and propagation distance R_d .

り $-1.13 \sim -1.15$ の範囲と報告^{9,12)} されている。しかし、比較的浅い池（水深約 1 m）で行われた TNT による水中発破の実験では $m = -0.815$ という値が報告¹³⁾ されている。これらの報告は、水深によっても指数 m が変わることを示している。また、水中での火花放電による実験では $m = -1.11$ ¹¹⁾、シリコン油中での金属線爆発による実験では $m = -0.8$ という値¹⁴⁾ が、また水中での実験においても同程度の指数で減衰することが報告¹⁵⁾ されている。水中に衝撃圧力波を発生させる方法ならびに水深などにより圧力の減衰指数 m は異なり、この指数は $-1.15 \sim -0.8$ 程度の値になるものと思われる。本実験のように水深も浅く、水中での金属線の溶断放電により発生する第 1 次圧力波は距離 R_d の -0.81 乗程度で波高値が減衰している。

6. ま と め

水中での金属線の溶断放電により発生する第 1 次衝撃圧力波に関する実験結果から、次のことが明らかとなつた。

- (1) 圧力波の伝搬距離が異なる場合においても、水中金属線の溶断放電により発生する第 1 次衝撃圧力波はほぼ 1480 m/s の速度で伝搬している。
- (2) 到達圧力は、金属線が気化した後過渡放電を経てアーカ放電へと移行する時間内に投入されるエネルギーの時間変化 $W_I/\Delta t$ の 0.72 乗に比例する。
- (3) 第 1 次圧力波は金属線（放電点）からの距離（圧力波の伝搬距離）の -0.81 乗に比例して波高値が減衰する。
- (4) 水中の金属線の溶断放電により発生する圧力 P [MPa] と放電点からの距離 R_d [cm]、上述のエネルギー変化 $W_I/\Delta t$ [MW] との間には次式の関係が

ある。

$$P = 11.2 \times (W_I / 4t)^{0.72} (R_d)^{-0.81}$$

- (5) 金属線の種類、直径、長さおよびコンデンサの充電電圧ならびに放電点からの距離が異なっても、エネルギーの時間変化 $W_I / 4t$ に着目すれば、上式のように圧力 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、大学院修了生 国井和康君ならびに大学院生 山口毅君に深謝いたします。

参考文献

- 1) 中尾好隆、坂本三郎：電気学会雑誌, 87 (1967) 979
- 2) 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
- 3) 今井田豊：塑性と加工(日本塑性加工学会誌), 25(1984) 687
- 4) 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
- 5) 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)
- 6) 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年度電気関係学会東北支部連合大会講演論文集, No. 2D-1 (1990)
- 7) 山口 勉、井上 徹、伊藤一郎：日本鉱業会誌, 85 (1969) 237
- 8) 東京天文台編纂：理科年表, p. 物87, 丸善 (1977)
- 9) R.H. Cole : *Underwater Explosion*, pp. 228-248, Princeton University Press, Princeton, New Jersey (1967)
- 10) 斎藤 宏、佐藤正志、赤上陽出男、山口 勉、岩谷高四郎：電気学会閉閉保護装置研究会資料, SPD-91-11 (1991) 55
- 11) 斎藤 宏、佐藤正志、赤上陽出男、山口 勉、岩谷高四郎、小室 弘：平成3年度電気関係学会東北支部連合大会講演論文集, No. 1D6 (1991)
- 12) 工業火薬協会：火薬ハンドブック, p. 217, 共立出版 (1987)
- 13) 三井志郎、佐々木信彦：工業火薬協会誌, 33 (1972) 365
- 14) 藤田一郎：昭和60年電気学会全国大会講演論文集, No. 125 (1985)
- 15) 藤田一郎、岡 秀敏：昭和58年電気学会全国大会講演論文集, No. 180 (1983)