

論 文

水中導線の電気的爆発による発生圧力への線径の影響

斎 藤 宏*, 山 口 肇**, 佐 藤 正 志**

赤 上 陽 出 男***†, 小 室 弘***

(1992年8月10日受理)

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

Hiroshi SAITO,* Takeshi YAMAGUCHI,** Masashi SATO,**

Hideo AKAGAMI***† and Hiroshi KOMURO***

(Received August 10, 1992)

Applying a large impulse current to a metal wire in water, an "under water wire explosion" generates pressure waves together with arc discharges. In this paper, experimental studies on the generated pressure and time variation of input energy are introduced and discussed for four kinds of metal wires having a diameter between 0.1 mm and 0.3 mm. We also measured the periods t_a and t_1 from voltage application to the onset of arc discharges and to the occurrence of maximum current, respectively. Experiments show that the pressure and time variation of input energy depend on the diameter of wires used. There exists an inherent diameter in the material and length of wires and in the source voltage, which is referred to as an "optimum diameter". Using wires with the optimum diameter, the periods t_a and t_1 mentioned above are approximately equal, resulting in the highest values of the generated pressure and time variation of input energy.

1. ま え が き

水中に配置した金属線に電圧を印加して溶断発弧させると、衝撃圧力波が発生する。溶断発弧後、瞬時に発生する衝撃圧力波を第1次圧力波と呼ぶ。水中に生成される高温高圧のガス体が時間の経過と共に膨張し、ある時

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

* 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, 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

*** 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

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

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

点で過膨張の状態となる。その後、逆にガス体は収縮し、この時点では第2次圧力波が発生する。さらに、同様の状態を繰り返し、次々に圧力波が発生するといわれている。これらの衝撃圧力波は、現在放電成形加工、圧接着などに利用されている。しかし、この水中の放電現象と発生衝撃圧力波との関係は未だ十分に明らかにされていない。

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の発生を扱ったものである。筆者らは、水中における第1次衝撃圧力を評価するための特性量として、過渡水中放電を経てアーカ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_I/dt を用いることができる前に報告^{1,2)} した。本報告においては、金属線の直径とこの W_I/dt との関係について測定を行った。すなわち、金属線の種類、長さ及び印加電圧が同一という条件の下で、金属線の直径を変化させることにより、特性量 W_I/dt が最大となる直径の存在の確認を目的に実験的な検討を行った。

本研究においては、4種類の金属線（銅、鉄、錫、タンゲステン）を用い、その直径を 0.1~0.3 mm の間で5段階に変化させ、種々の印加電圧の下で放電エネルギーの時間変化 W_I/dt 及び第1次圧力波の波高値（以下

これを圧力の大きさと呼ぶ)を測定した。それらの結果から、金属線の種類、長さ及び印加電圧が同一という条件の下で、 W_1/dt が最大となる直径が存在し、さらにこの直径において発生する圧力が最大となることを確認した。

2. 実験回路及び方法

図1に本実験で用いた回路を示す。電極間に接続された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 $V_0=10\sim23\text{ kV}$ 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用いている。この電源に $R=1.8\Omega$ の抵抗、 $L=40\mu\text{H}$ のインダクタンス及び水中に配置した金属線を直列に接続している。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

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

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

式(2)を用いて計算すると、電極間を短絡した場合の電流の周期は $82.9\mu\text{s}$ 、減衰時定数は $44.4\mu\text{s}$ となる。また、金属線を電極間に設置した実際の回路においても、ほぼ同様の周期、減衰時定数の値を示している。電源投入から電流が最大となるまでの時間 t_1 は約 $17\mu\text{s}$ となる。

従来の研究においては、電流の最大値を大きくするために、 $R=24^3\sim180\text{ m}\Omega^4$ 、 $L=0.73^5\sim7.5\mu\text{H}^4$ 程度の回路の抵抗及びインダクタンスで実験を行っている例がある。しかし、本実験においては金属線の“固体→液体→気体→プラズマ”という状態変化に伴う抵抗及びインダクタンスの変化が回路電流に及ぼす影響を少なくし、解析が複雑となることを避けるために回路中に比較的大きな抵抗とインダクタンスを挿入した。

回路電流の測定は同軸円筒型分流器で測定を行った。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もっている。

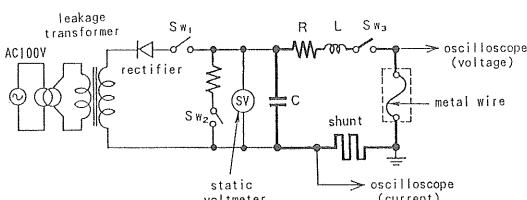


図1 実験回路

Fig. 1 Schematic diagram of experimental circuit.

実験は、直径 50 cm 、高さ 60 cm の円筒容器の水槽を用いた。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、この電極に直径 $d=0.1\sim0.3\text{ mm}$ 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、本研究では特記しないものはすべて g が 20 mm におけるものである。金属線は銅、鉄(ピアノ線)、錫、タンゲステンの四種類を用いた。

本研究における衝撃圧力は金属線の真上の距離 $R_d=10\text{ cm}$ の位置の値である。すなわち、こ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 HPM-375)を用い、デジタルオシロスコープで測定を行った。

この円筒容器に満たした水道水の水温は $12\sim20^\circ\text{C}$ 、抵

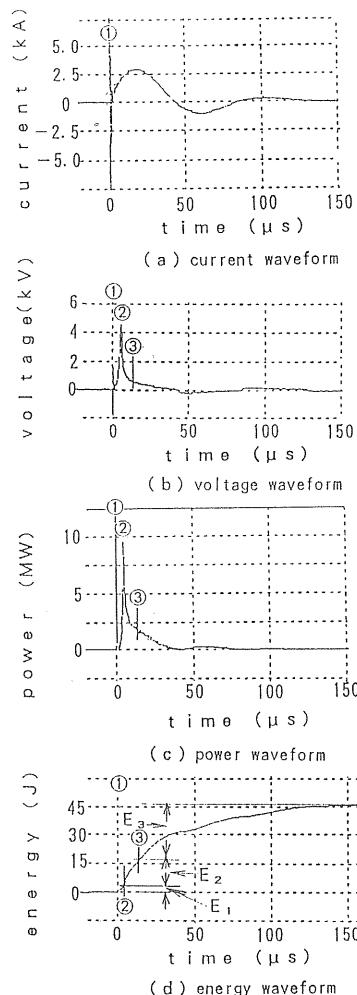


図2 エネルギーの時間変化 W_1/dt の算出
(録線: $d=0.15\text{ mm}$, $g=10\text{ mm}$, $V_0=15\text{ kV}$)

Fig. 2 Estimation of time variation of input energy W_1/dt .

抗率は約 $10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ である。

3. 放電エネルギーの時間変化の算出法

本章においては、前に報告^{1,2)}した放電エネルギーの時間変化 W_I/dt 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。同図(a)の電流波形において、電源投入①時点から約 $17 \mu\text{s}$ 後に電流は最大となり、周期が $83 \mu\text{s}$ 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ケ放電へ移行する。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 $5.3 \mu\text{s}$ 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、過渡アーケ放電など）を経てアーケ放電へと移行する。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、定常のアーケ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。すなわち、電極間に投入されたエネルギーの時間変化である。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 E_1 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り、本例においては、数 J の値である。時点②から時点③までの間に投入されたエネルギー E_2 は、最大電圧が発生した時点②からアーケ放電へ移行する時点③までの期間 Δt (図2では $3.7 \mu\text{s}$) に電極間に投入されたエネルギー W_I である。この例においては、 $E_2 (=W_I)=14 \text{ J}$ である。時点③以降のエネルギー E_3 は水中の定常アーケ放電に消費されたエネルギーである。なお、 $E_1+E_2+E_3$ は約 50 J であり、これは水中の電極間で消費されたエネルギーである。参考のために、実測電流をもって回路の抵抗 R (1.8Ω) で消費されるエネルギーを計算した結果、約 400 J であった。意識的に回路に抵抗 R を挿入しているため、 $V_0=15 \text{ kV}$ に充電したコンデンサの保有するエネルギー 450 J のうち約 10% だけしか、水中の電極間で使用されていないことがわかる。

放電エネルギーの時間変化 W_I/dt は図(d)における E_2

(= W_I) 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。なお、アーケ放電へ移行した時点③は、図(b)の電圧波形から推測したものである。

4. 金属線直径と放電エネルギーの時間変化

4.1 金属線直径と最大電圧が発生する時間

図3に、充電電圧 $V_0=23 \text{ kV}$ において、タンクステン線の直径を $d=0.25 \text{ mm}$, 0.2 mm , 0.15 mm 及び 0.1 mm と変化させた場合の電流及び電極間電圧の変化を示す。各図の上部は電流、下部は電極間電圧である。同図(a)において、①, ②は、図2の場合と同様に、それぞれ電源投入時点及び最大電圧が発生する時点である。ここで電源投入後電流値が最大となるまでの時間を t_1 、電源投入から電圧が最大となるまでの時間 (図中時点①

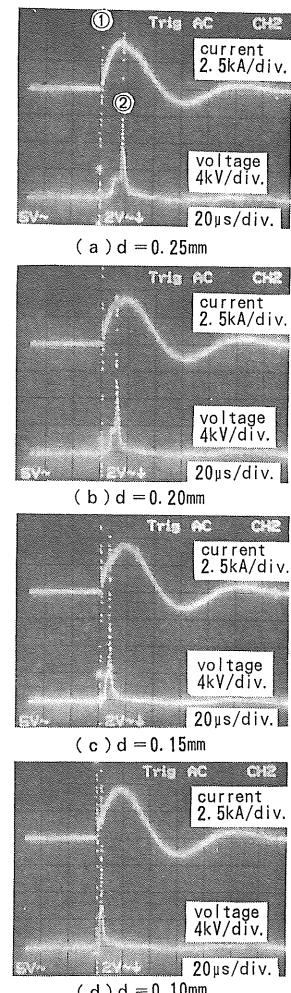


図3 電流、電圧波形 (タンクステン線: $g=20 \text{ mm}$, $V_0=23 \text{ kV}$)

Fig. 3 Waveforms of current and gap voltage.

から時点②までの時間)を t_v とする。本実験回路においては、充電電圧、金属線の種類及び太さに関係なく、時間 t_1 は約 $17\mu s$ である。これに対して、金属線の直径が変わると、時間 t_v は変化する。すなわち、同図(a)の直径 $d=0.25\text{ mm}$ の場合 $t_v=16.70\mu s$ 、図(b)の直径 $d=0.2\text{ mm}$ の場合には $t_v=11.25\mu s$ 、図(c)の直径 $d=0.15\text{ mm}$ の場合 $t_v=7.40\mu s$ 、図(d)の直径 $d=0.1\text{ mm}$ の場合は $t_v=4.25\mu s$ となり、直径が小さくなると電極間電圧が最大となるまでに要する時間は短くなっている。言い換えれば、金属線の直径を変化することにより、時間 t_1 と t_v との関係を変化させることができる。なお、時間 t_v が直径によって異なるのは、金属線の直径によって抵抗が変化し、直列抵抗 R との分担電圧が変化して、金属線の状態変化に要する時間が変わるものである。

4.2 直径とエネルギーの時間変化との関係

図4に、タングステン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ギーの時間変化 W_{I}/At と金属線直径 d との関係を示す。同図より、各充電電圧において、 W_{I}/At が最大となる直径の存在することがわかる。すなわち、充電電圧が $V_0=23\text{ kV}$ (図中○印)及び 20 kV (図中●印)の場合は直径 d が約 0.2 mm (図中 a, b), $V_0=15\text{ kV}$ (図中△印)の場合は直径 d が 0.15 mm (図中 c), $V_0=10\text{ kV}$ (図中▽印)の場合は直径 d が約 0.15 mm (図中 d)の近傍において W_{I}/At が最も大きくなっている。すなわち、高圧力の発生を目的とした場合、これらの直径は、各充電電圧に対し最も大きな放電エネルギーの時間変化 W_{I}/At

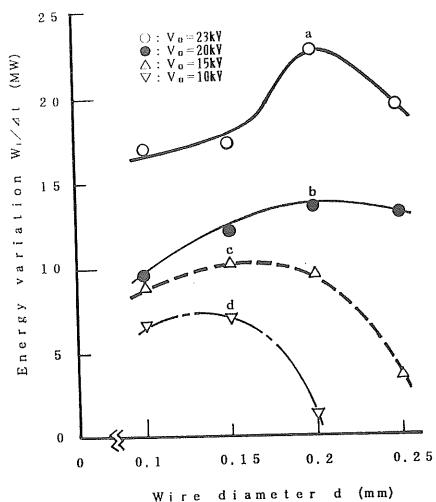


図4 エネルギーの時間変化 W_{I}/At と金属線直径 d との関係(タングステン線: $g=20\text{ mm}$)

Fig. 4 Relation between time variation of input energy W_{I}/At and wire diameter d .

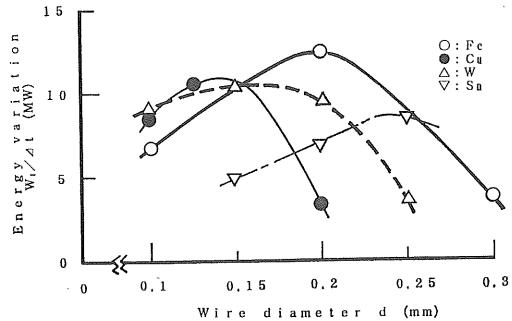


図5 エネルギーの時間変化 W_{I}/At と金属線直径との関係(金属線: $g=20\text{ mm}$, $V_0=15\text{ kV}$)

Fig. 5 Relation between time variation of input energy W_{I}/At and wire diameter d .

が得られる最適な直径であるといえる(以下、これを最適直径と呼ぶ)。同一の長さのタングステン線においては、コンデンサ充電電圧ごとに最適直径が存在する。

次に、図5に鉄(○印)、銅(●印)、タングステン(△印)、錫(▽印)の四種類の金属について、充電電圧 $V_0=15\text{ kV}$ の場合における放電エネルギーの時間変化 W_{I}/At と金属線直径 d との関係を示す。金属線によつて、 W_{I}/At の値は異なるが、最適直径の存在していることがわかる。具体的には、図5においては鉄(○印)は直径 d が約 0.2 mm 、銅(●印)は約 0.15 mm 、タングステン(△印)は約 0.15 mm と、それぞれこれらの値の近くに最適直径があるものとみられる。なお、錫(▽印)の場合にはエネルギーの時間変化のピークが存在しないように見えるが、6章における検討から、直径 0.23 mm 近辺に最大値が存在するものと予測される。

5. 金属線直径と発生圧力

金属線溶断放電によって発生した第1次衝撃圧力波の波高値は、放電エネルギーの時間変化 W_{I}/At に関係し、次に示すような特性式で表されることは前に報告^{1,2,6}した。

$$P=11.2 \times (W_{I}/At)^{0.72} \times (R_d)^{-0.81} \quad [\text{MPa}] \quad (3)$$

ただし、 P : 圧力波高値、 W_{I}/At : 放電エネルギーの時間変化 [MW], R_d : 金属線からの距離 [cm]。

この特性式から見て、 W_{I}/At が最大となる最適直径において、圧力も最大になることが予想される。図6に、図3と同様の条件、すなわち、充電電圧 $V_0=23\text{ kV}$ においてタングステン線の直径を $d=0.25\text{ mm}$, 0.2 mm , 0.15 mm 及び 0.1 mm とした場合の電極間電圧及び圧力の変化を示す。各図の上部は電極間電圧、下部は圧力($R_d=10\text{ cm}$)のオシログラムである。図中の①は電源投入時点、②は最大電圧が発生する時点である。下部の

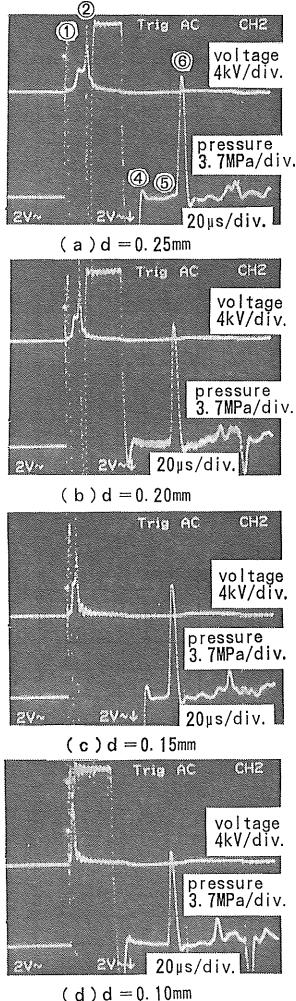


図6 電圧、圧力波形 (タングステン線: $g=20\text{ mm}$, $V_0=23\text{ kV}$, $R_d=10\text{ cm}$)

Fig. 6 Waveforms of gap voltage and pressure.

圧力変化の時点①から時点④まではアーカ電流によるノイズであり、それ以降が圧力を示している。⑥の時点で金属線から $R_d=10\text{ cm}$ のセンサ位置に圧力波が到達し、⑦の時点で最大の圧力となっている。図6において、圧力は、図(a)の $d=0.25\text{ mm}$ では 16.4 MPa 、図(b)の $d=0.20\text{ mm}$ では 17 MPa 、図(c)の $d=0.15\text{ mm}$ では 15 MPa 、図(d)の $d=0.10\text{ mm}$ では 12.6 MPa となり、金属線直徑によって発生圧力が異なる。

図4は $W_1/\Delta t$ について示したものであるが、図7には図4と同じ条件での発生圧力 P ($R_d=10\text{ cm}$ における値) と直徑 d との関係を示す。図4に示した最適直徑の a, b, c, d の近傍に対応する直徑の下で図7に示すように圧力が最大となっている。

図8に、タングステン線における発生圧力 P とエネル

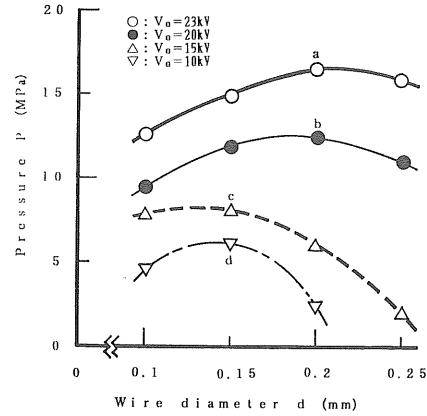


図7 圧力 P と金属線直徑 d との関係
(タングステン線: $g=20\text{ mm}$, $R_d=10\text{ cm}$)

Fig. 7 Relation between pressure P and wire diameter d .

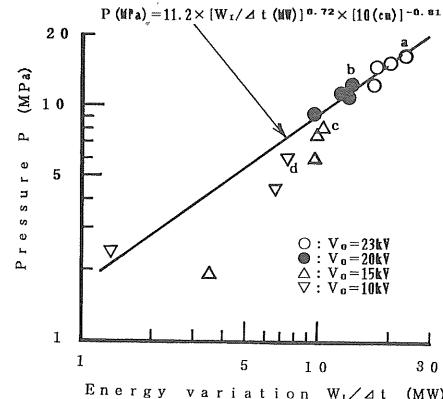


図8 圧力 P とエネルギーの時間変化 $W_1/\Delta t$ との関係
(タングステン線: $g=20\text{ mm}$, $R_d=10\text{ cm}$)

Fig. 8 Relation between pressure P and time variation of input energy $W_1/\Delta t$.

ギーの時間変化 $W_1/\Delta t$ との関係を示す。図8は図4と図7から求めたものである。パラメータは充電電圧 V_0 である。実線は式(3)によるものであり、各実測値はこの実線で表し得ることがわかる。さらに、各充電電圧における最適直徑に対応する図中の a, b, c, d において、同一充電電圧における P 及び $W_1/\Delta t$ の両者はそれぞれ共に最大であることが確認できる。

図9に鉄 (○印), 銅 (●印), タングステン (△印), 錫 (▽印) の四種類の金属線を用い、充電電圧が $V_0=15\text{ kV}$ の場合における金属線直徑と圧力との関係を示す。同図は、4章に述べた図5に対応するものである。これより、金属線の種類が異なっても、図9の圧力 P -直徑 d 特性は、図5のエネルギーの時間変化 $W_1/\Delta t$ 特性と同様な傾向を示していることがわかる。つまり

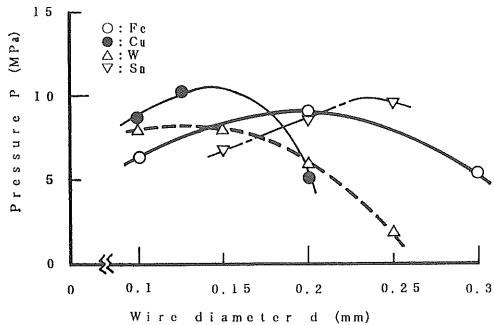


図9 圧力 P と金属線直径 d との関係
(金属線: $g=20$ mm, $V_0=15$ kV, $R_d=10$ cm)
Fig. 9 Relation between pressure P and wire diameter d .

$W_{I/dt}$ を最大とする最適直径近傍において、圧力も最大となることが確認される。

6. 最大電圧が発生する時間と放電エネルギーの時間変化

本章では、図10に示す電源投入から電流が最大となるまでの時間 t_1 に対し電極間電圧が最大となるまでの時間 t_v あるいは、アーカー放電へ移行するまでの時間 t_a ($=t_v+At$) がどのような関係にあれば、放電エネルギーの時間変化、すなわち、発生圧力が最大となるかを検討する。

従来、一定コンデンサ充電電圧の下での発生圧力が最大となる条件は、時間 t_v が電流周期の1/4程度の場合

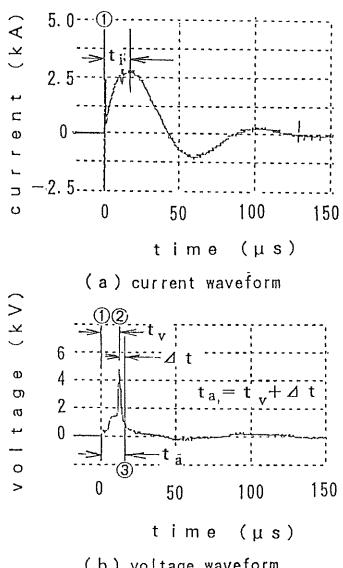


図10 時間 t_1 , t_v 及び t_a
(鉄線: $d=0.2$ mm, $g=10$ mm, $V_0=15$ kV)
Fig. 10 Time t_1 , t_v and t_a .

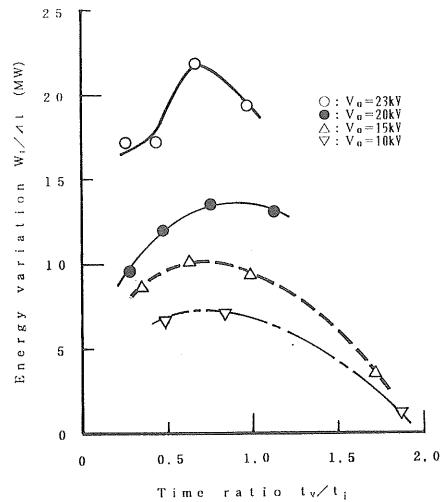


図11 エネルギーの時間変化 $W_{I/dt}$ と時間比 t_v/t_1 との関係 (タンクステン線: $g=20$ mm)
Fig. 11 Relation between time variation of input energy $W_{I/dt}$ and time ratio t_v/t_1 .

であると報告されている⁷。これは、電圧最大時点と電流最大時点が等しい、すなわち、 $t_1=t_v$ の場合に最大圧力が発生することを意味する。図11にタンクステン線の場合の時間比 t_v/t_1 と放電エネルギーの時間変化 $W_{I/dt}$ との関係を示す。パラメータは充電電圧 V_0 である。従来の報告によれば、時間比 $t_v/t_1=1$ において圧力 P 、したがって、 $W_{I/dt}$ が最大になることになる。しかし、本実験の結果では、図11のように時間比 t_v/t_1 が0.6~0.7の場合に放電エネルギーの時間変化 $W_{I/dt}$ が最大となっている^{8,9}。

続いて、図10において示した、過渡放電を経てアーカー放電へ移行するのに要する時間 At を用いて、時間 $t_a=(t_v+At)$ を考える。図12に放電エネルギーの時間変化 $W_{I/dt}$ と時間比 t_a/t_1 との関係を示す。同図は、図11と全く同一の条件の場合で、パラメータは V_0 である。この場合、時間比 t_a/t_1 がほぼ1(図中の細線)のときに放電エネルギーの時間変化が最大となっていることがわかる^{9,10}。

図13は種々の金属線の場合の放電エネルギーの時間変化 $W_{I/dt}$ と時間比 t_a/t_1 との関係を示す。同図は、図9と同じ条件であり、 $V_0=15$ kVの場合である。種々の金属線を使用したのは、これまで主として実験に用いられている銅線^{4,7}を基準に考えれば、融点が低く抵抗率の大きいものとして錫線を、融点、沸点の高いものとしてタンクステン線を使用し、それぞれの特性を検討するためである。しかし、図13から見て、金属線の材質が異なっても、時間比 t_a/t_1 がほぼ1(図中の細線)のときにエネルギーの時間変化が最大、したがって、圧力

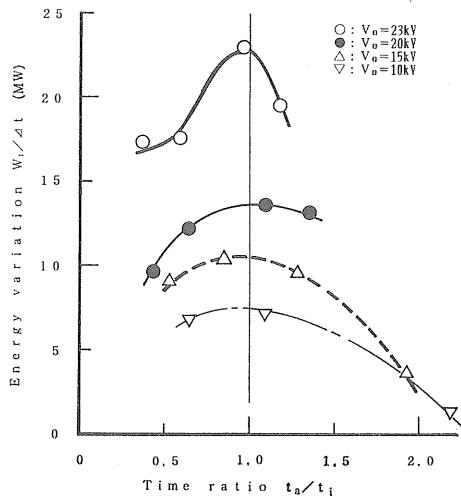


図 12 エネルギーの時間変化 W_I/dt と時間比 t_a/t_i との関係 (タンクスチーン線: $g=20$ mm)

Fig. 12 Relation between time variation of input energy W_I/dt and time ratio t_a/t_i .

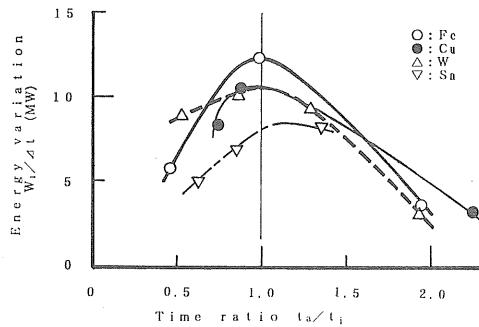


図 13 エネルギーの時間変化 W_I/dt と時間比 t_a/t_i との関係 (金属線: $g=20$ mm, $V_0=15$ kV)

Fig. 13 Relation between time variation of input energy W_I/dt and time ratio t_a/t_i .

が最大になることがわかる^{9,10)}。

以上の結果を、3章で述べた放電エネルギーの時間変化 W_I/dt の考え方を用いて検討を行う。発生圧力は、式(3)に示したように、エネルギーの時間変化に関係している。言い換えれば、発生圧力は、最大電圧が発生(金属線が気化)した後の過渡放電の継続期間 At 内のエネルギー W_I に関係する。この W_I を時間 At で割ったものが放電エネルギーの時間変化である。

図 14 に、図 12 のタンクスチーン線の場合の At 期間内にタンクスチーン線部分に投入されたエネルギー W_I と直径 d との関係を示す。パラメータは充電電圧 V_0 であり、図中 a, b, c, d は各 V_0 における最適直径である。最適直径 a, b, d の各 V_0 では、最適直径において最大のエネルギー W_I を示している。 $V_0=15$ kV (図中△印)

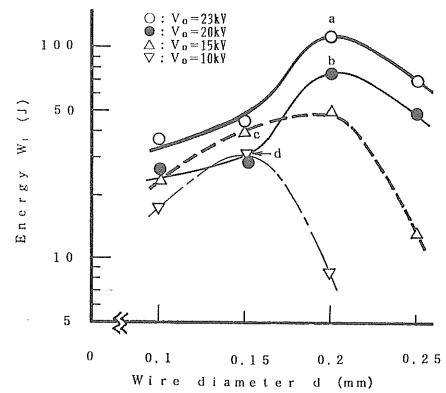


図 14 エネルギー W_I と金属線直径 d との関係 (タンクスチーン線: $g=20$ mm)

Fig. 14 Relation between energy W_I and wire diameter d .

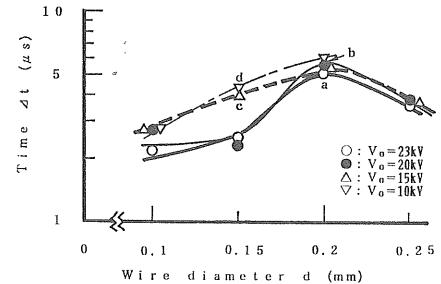


図 15 時間 At と金属線直径 d との関係 (タンクスチーン線: $g=20$ mm)

Fig. 15 Relation between time At and wire diameter d .

印) の場合は、最適直径 c において W_I が最大になっていない。

仮に微小時間 At がほぼ一定であるとすれば、大きな放電エネルギーの時間変化 W_I/dt を得るには、 At 期間内のエネルギー W_I が大きければ良いことになる。

しかし、時間 At は一定ではなく、実験条件によって複雑に変化する。図 15 に、図 12 の場合の、時間 At とタンクスチーン線直径 d との関係を示す。パラメータは充電電圧 V_0 である。各 V_0 の場合とも、直径 d の増加とともに、時間 At は増大し、最大値を経て低下する傾向を示している。なお、この過渡放電期間 At ならびに前述のエネルギー W_I と金属線の種類、寸法及び充電電圧などの関係は今後の課題である。

実際には、エネルギーの時間変化 W_I/dt と直径 d との関係は、図 14 に示したエネルギー W_I への直径 d の依存性と図 15 に示した時間 At への直径 d の依存性との両者により決まる。すなわち、図 14 における $V_0=15$ kV (△印) の場合が両者の関係をよく表している。つまり、この場合には、最適直径 c においてエネルギー W_I は

最大となっていない。しかし、時間 Δt と直径 d との関係を考慮すれば、最適直径 c においてエネルギーの時間変化 $W_I/\Delta t$ が最大となっている。このことからも、圧力の評価には W_I ではなく、 $W_I/\Delta t$ を用いるべきであることが確認できる。したがって、この実験結果からみれば、過渡放電を経過してアーカ放電へ移行する期間 Δt 内に電流が最大値を取るように、最大電圧の発生する時間を金属線の直径により設定すれば良いということができる。

また、4.1 で述べたように、同一の条件のもとでは金属線の直径を変えることによって、金属線の状態変化に対応する時間 t_v 、したがって時間 $t_a (=t_v+\Delta t)$ を変化させることができる。つまり、同一条件下における最適直径とは、先に述べた $t_a/t_1 \approx 1$ が実現できる直径である。

コンデンサ充電電圧、あるいは金属線の種類、長さなどが一定の条件においては、上述のような最適直径の金属線を用いることによって、最も大きな放電エネルギーの時間変化が得られ、その結果として、最も大きな圧力を得ることができる。

7. ま と め

水中での金属線の溶断放電により発生する第1次圧力波と金属線直径との関係に関する実験結果から、次のことが明らかとなった。

- (1) 水中金属線の溶断発弧により発生する第1次衝撃圧力波の波高値は、金属線の気化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放電エネルギーの時間変化 $W_I/\Delta t$ の 0.72 乗に比例する。したがって、より大きな圧力を得るために $W_I/\Delta t$ を大きくする必要がある。
- (2) 金属線の種類、長さ及びコンデンサ充電電圧などが同じであれば、最も大きなエネルギーの時間変化が得られる最適直径において発生圧力も最大となることが確認された。
- (3) 回路定数が同一であれば、最大電流が発生するまでの時間は一定である。それに対して、金属線の種類、長さ及びコンデンサ充電電圧などの条件が一定の場合、金属線の直径を変えることによって、最大電圧が発生するまでの時間を変化させることができる。したがって、金属線の直径が異なれば、エネルギーの時間変化 $W_I/\Delta t$ も異なった値となる。
- (4) 金属線の種類、長さ及びコンデンサ充電電圧などの

条件が同一の場合、最も大きな放電エネルギーの時間変化を得るには、過渡放電を経てアーカ放電へ移行する期間 (Δt) 内に、電流が最大となるように、金属線の直径を設定すれば良い。すなわち、このときの金属線の直径が、その条件における最適直径となる。

- (5) 所定の条件（金属線の種類、長さ及びコンデンサの充電電圧）における最適直径は具体的には、電流が最大値となる時間 t_1 の 60~70% の時間に電極間電圧が最大となる直径である。見方を代えれば、電極間電圧が最大となる時間 t_v に、過渡放電の期間 Δt を加えた時間 t_a が、電流が最大となる時間 t_1 とほぼ同じ ($t_a=t_v+\Delta t \approx t_1$) になるような金属線直径が最適直径である。
- (6) 金属線の長さ及びコンデンサの充電電圧などの条件が一定であっても、金属線の種類が異なるれば、最適直径も異なる。しかし、金属線の種類が異なっても、前項に述べたように、時間比 $t_a/t_1 \approx 1$ という観点から検討することにより、最適直径を評価することができる。

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) 元木幹雄, 行村 建: 電気学会誌, 98 (1978) 241
- 4) 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
- 5) 栖原寿郎, 北島一徳, 福田重久: 壓性と加工, 9 (1968) 32
- 6) 斎藤 宏, 佐藤正志, 赤上陽出男, 山口 翁, 岩谷高四郎: 電気学会開閉保護装置研究会資料, SPD-91-11 (1991) 56
- 7) 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) 2912
- 8) 斎藤 宏, 佐藤正志, 赤上陽出男, 佐藤安弘, 山口 翁, 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. 1D7 (1991) 135
- 9) 斎藤 宏, 佐藤正志, 赤上陽出男, 佐藤安弘, 山口 翁, 小室 弘: 静電気学会講演論文集'91, 29 p A10, p. 153 (1991)
- 10) 斎藤 宏, 山口 翁, 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, SPD-92-21 (1992) 32