

論 文

## 水誘雷の基礎実験

高木浩一\*, 秋山秀典\*\*, 前田定男\*\*  
(1992年8月27日受理)

### Basic Experiments of Triggered Lightning Using a Water Jet

Koichi TAKAKI,\* Hidenori AKIYAMA\*\* and Sadao MAEDA\*\*  
(Received August 27, 1992)

A new method to trigger lightning by a water jet is proposed and investigated experimentally by using an impulse generator. Lightning has been triggered successfully by using a thin wire which is pulled up by a rocket. Here it is proposed to use a water column instead of the thin wire. A spherical electrode of 20 mm in diameter and a plane electrode of 25 cm in diameter are used for the basic experiment of triggering the lightning by a water jet. The water jet is directed to the spherical electrode through a hole in the center of the plane electrode. It was found from basic experiments that the 50% flashover voltage decreased considerably as the height of the water jet was increased. The decrease of the 50% flashover voltage by the water jet was equal to the decrease in the case of using a metal conductor instead of the water jet. One of systems to produce the water jet is composed of a water chamber and a high pressure chamber of air. The volume of water chamber and the air pressure were calculated from Bernoulli's theorem.

#### 1. まえがき

落雷を誘発する誘雷技術は、雷害防止に役立つのみでなく、いつどこで起こるか分からぬ落雷を瞬時に捕らえ計測する困難から、これまで詳細に観測されていないファイナルジャンプ、地表面での放電路、衝撃音、前駆電流や落雷点近くの電界変化など、多くの雷現象を明らかにする上で魅力ある技術である。ロケットを用いた誘雷の研究は、1960年Newmannに始まり<sup>1)</sup>、フランス、日本<sup>2,3)</sup>、アメリカなど世界的に行われ、雷雲のレーダ図、フィールドミルによる地上電界強度、針端コロナ電流<sup>4)</sup>等を総合的に判断することにより、高い確率で誘雷できるまでに至っている。しかしながら、ロケットとピアノ線を使うことの危険性から、人里離れたところで研究がなされてきた。また、加えて繰り返しが利かない欠点を持つ。これらの欠点を補うため、ロケットを使わない多くの誘雷方式が提案されている<sup>5)</sup>。強力なレーザ光

線で空気をプラズマ化して誘雷するレーザ誘雷は、アメリカで試みられたが成功には至っておらず、現在、多くの場所で研究がなされている<sup>5-8)</sup>。しかし、実際に誘雷するためには大出力レーザが必要なこと、及び雨粒によるレーザ光の散乱吸収など、多くの難問を克服しなければならない。

本論文では、ロケット誘雷に代わる新しい誘雷方式として、雷雲めがけて噴水を上げ誘雷する水誘雷の提案を行い、基礎実験により、実現の可能性について検討した。水誘雷に関しては、爆弾テストで生じた70mの水柱に偶然にも落雷しているが<sup>9)</sup>、積極的に誘雷を行った例は見当たらない。基礎実験は、球電極と平板電極の間に噴水で水柱を挿入し、雷インパルス電圧に対するフラッシュオーバ電圧の変化を調べた。また、噴水の径や印加電圧の極性がフラッシュオーバ特性に与える影響や、噴水が放電を誘発するメカニズムについて検討した。基礎実験の結果より、誘雷に必要な噴水の高さを求め、水誘雷装置の簡単な設計を行った。水誘雷の利点は、装置が安価で、しかも車で持ち運べるほどコンパクトなこと、安全で、繰り返し使用が可能であることである。

#### 2. 水誘雷の基礎実験

##### 2.1 実験装置及び実験方法

図1は噴水を用いた基礎実験の装置図である。小さい

キーワード：水誘雷、誘雷、雷、長ギャップ放電、沿面放電

\* 大分工業高等専門学校電気工学科 (870-01 大分市牧1666)

Department of Electrical Engineering, Oita National College of Technology, 1666 Maki, Oita, 870-01 Japan

\*\* 熊本大学工学部電気情報工学科 (860 熊本市黒髪 2-39-1)

Department of Electrical Engineering and Computer Science, Kumamoto University, 39-1, Kurokami 2-chome, Kumamoto, 860 Japan

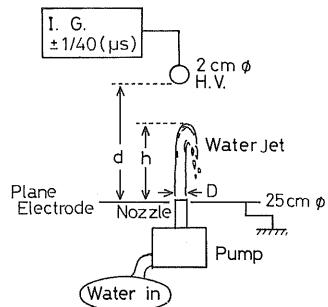


図 1 噴水を用いた実験装置 ( $h$ : 噴水の高さ,  $d$ : ギャップ長,  $D$ : ノズルの径)

Fig. 1 Experimental apparatus using the water jet.

ポンプで水道水を汲み上げた後、ノズルの直径  $D$  を変えて、任意の直径をもつ噴水を作り、アース電極の背後より水を上げている。噴水の高さ  $h$  は、ポンプのパワーを変えることで可変とした。噴水の高さは時間に対して多少変動する。実験では、噴水の高さの平均を  $h$  として、変動幅が 5 mm 以内となるように設定した。直径 2 cm の鉄製球電極にインパルス電圧発生装置 (I.G.) で発生させた  $\pm 1/40 \mu s$  の雷インパルス電圧を印加した。アース電極は、中心に直径 1 cm の穴を開けた直径 25 cm、厚さ 1 mm のアルミ製平板電極を用い、中心が球電極の真下になるように設定した。平板電極の中心より球電極までの距離  $d$  を 25, 18 cm の 2通りとして実験を行った。フランシオーバ電圧は、30 回の昇降法<sup>10</sup>により 50 % フラッシュオーバ電圧  $V_{50}$  を求めた。相対空気密度補正、湿度補正是行っていない。

図 2 は比誘電率、抵抗率とフランシオーバ電圧との関係を測定するための実験装置図である。電極は図 1 同様に配置されている。試料は平板電極中心の穴より電極間に挿入される。試料の材質として、内径 8 mm、厚さ 1 mm のホースに詰めた水道水と直径 8 mm のポリアセタール棒単体を用いた。電極や試料の表面は濡れていない状態で実験を行った。水はホースでアースと直流に対して絶縁されている。また、ポリアセタールの抵抗率はホース同様非常に高く、アースと直流に対して絶縁されているとみなせる。水の比誘電率は、 $f < 0.6 \text{ GHz}$  において

$$\epsilon_s = 88.15 - 0.414 t + 0.131 \times 10^{-2} t^2 - 0.046 \times 10^{-4} t^3 \quad (1)$$

ただし、 $t$  は水の温度 [°C]

と表され<sup>11</sup>、本実験条件では  $\epsilon_s = 80$  となる。また、水道水の抵抗率は  $31 \Omega \cdot \text{m}$  である。また、ポリアセタールの比誘電率は 3.7、抵抗率は  $6 \times 10^{12} \Omega \cdot \text{m}$  である。

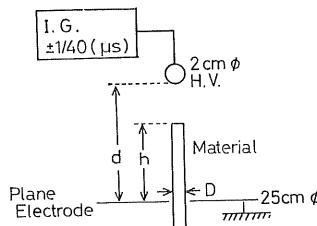


図 2 噴水を用いない実験装置 ( $h$ : 試料の高さ,  $d$ : ギャップ長,  $D$ : 試料の径)

Fig. 2 Experimental apparatus without the water jet.

## 2.2 噴水によるフランシオーバ電圧の低下

図 3 は典型的な放電の静止写真及びその模写図である。カメラを電極の真横に置いたため、平板電極上の放電した位置は分かりにくいが、(a)は水を上げない場合に放電が平板電極の端に落ちた様子を示している。水を上げない場合、放電のほとんどが電界が強い平板電極の端に落ちる。(b)は水をまっすぐに上げたときの放電の写真である。(c)は、噴水が放電路に与える影響の大きさを確認する目的で、故意に水を斜めに上げたときの放電の写真である。このときの噴水の直径  $D$  は 8 mm である。

図 4 は、 $D$  を 8 mm としたときの 50 % フラッシュオーバ電圧  $V_{50}$  と水の高さ  $h$  との関係 ( $V_{50}-h$  特性) を示している。水は、球電極の真下よりまっすぐ上げている。(a)は  $d$  が 18 cm の場合、(b)は 25 cm の場合である。印加電圧の極性により差は見られるものの、両者とも、 $h$  の増加に対して  $V_{50}$  の低下が確認される。図 4(a)における  $V_{50}$  は、 $h$  の増加に対して、負極性の場合約 80 %、正極性の場合約 40 % 低下する。

## 2.3 噴水によるフランシオーバ電圧低下の評価

図 5 は、噴水及び金属導体の高さ  $h$  と  $V_{50}$  との関係を示している。黒丸は、噴水による水柱を金属導体（直径 3 mm の鉄棒の先端に直径 13.5 mm の鉄球を付けた電極）に置き代えた場合の実験結果である。(a)は負の雷インパルス電圧を印加した場合、(b)は正の雷インパルス電圧を印加した場合である。 $d$  は 18 cm である。図 6 は噴水及び金属導体の高さ  $h$  と標準偏差  $\sigma$  との関係を示している。黒丸は図 5 同様金属導体、白丸は水柱であり、(a), (b)はそれぞれ負、正の雷インパルス電圧を印加した場合である。

噴水を使ったデータと金属導体を使ったデータとを比較すると、図 5(a)では、 $h=15 \text{ cm}$  まで両者はほぼ一致している。また、図 5(b)では、 $4 \text{ cm} < h < 15 \text{ cm}$  で両者に幾分差が生じているが、両者の  $V_{50}$  は近い値を示している。図 5 より、水柱は金属導体と同程度に放電を誘発する効果が大きいことが分かる。また図 6 より、噴水の

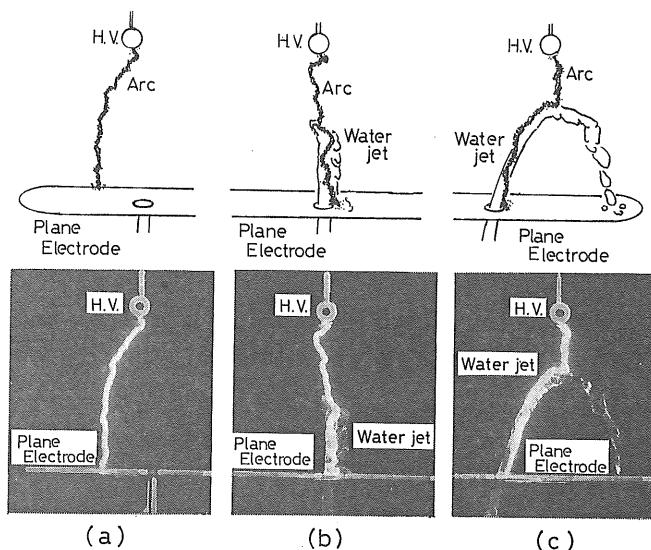


図3 放電の静止写真。 (a)噴水を上げない場合, (b)噴水をまっすぐ上げた場合, (c)噴水を斜めに上げた場合

Fig. 3 Still photographs of discharges.

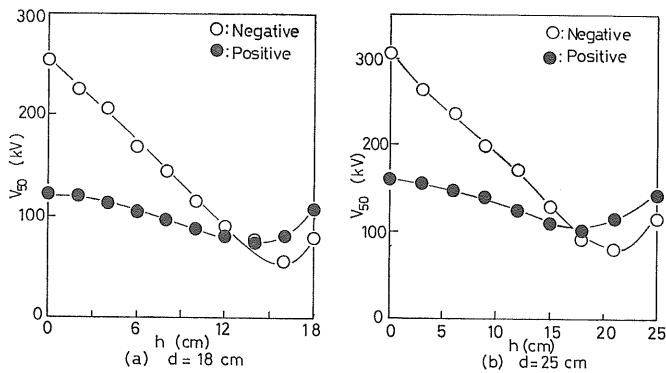


図4 50% フラッシュオーバ電圧  $V_{50}$  と水の高さ  $h$ との関係 ( $V_{50}-h$  特性)

Fig. 4 Dependence of 50% flashover voltage on the height of water column. ( $V_{50}-h$  characteristics)

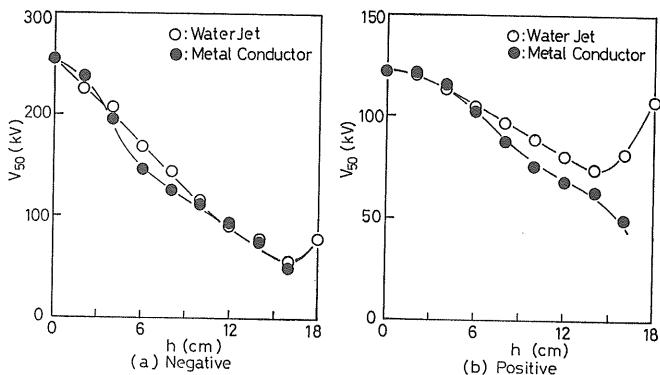


図5 金属導体と噴水を用いた場合の  $V_{50}-h$  特性の比較 ( $h$ : 噴水及び金属導体の高さ)

Fig. 5  $V_{50}-h$  characteristics using the metal conductor and the water jet.

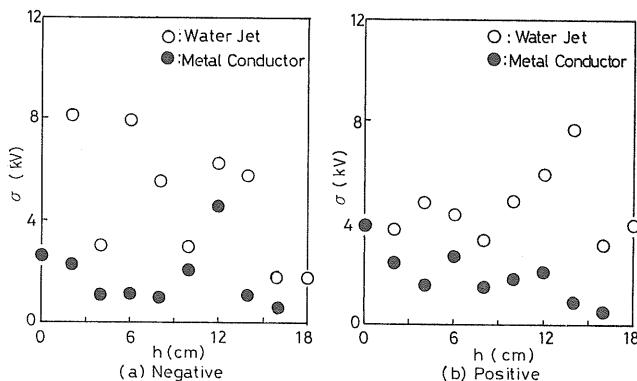


図6 金属導体と噴水を用いた場合の  $h$  と標準偏差  $\sigma$  との関係 ( $h$ : 噴水及び金属導体の高さ)  
Fig. 6 Dependence of standard deviation on the height of water column and metal conductor.

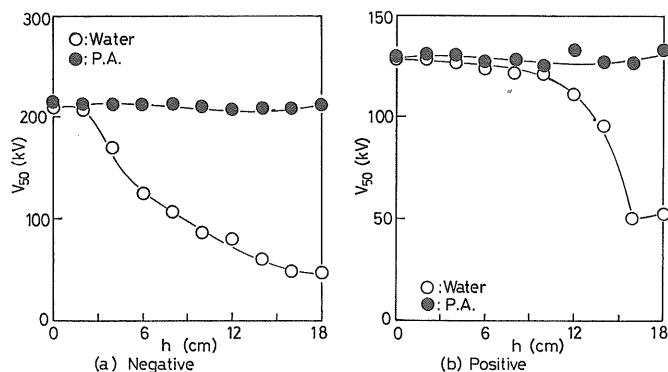


図7 抵抗率や誘電率を変えた場合の  $V_{50}-h$  特性の変化 ( $h$ : 試料の高さ)  
Fig. 7  $V_{50}-h$  characteristics for different resistivity and dielectric constant.

場合の  $V_{50}$  の標準偏差  $\sigma$  は、金属導体に比べて大きな値となっている。この理由として、測定中噴水の高さが変動することなどが考えられる。

図4, 5より、電極間に水柱が存在する場合の放電形態は、以下のように考えられる。実験に用いた水道水の抵抗率は  $31\Omega \cdot \text{m}$  で空気に比べて小さく、電極間に印加された電圧の大部分は水柱の先端と球電極との間に空間にかかる。この電圧がフランシオーバ電圧より大きい場合、球電極と水柱先端との間に気中放電が起こる。この放電の導電性が高い場合、印加電圧の大部分が水柱にかかる。この電圧が水の沿面フランシオーバ電圧より大きいとき、水柱に沿面放電が起り、全電極間はアーケ放電で短絡される<sup>12,13</sup>。 $h < 0.8d$  ( $V_{50}$  が最小のときの  $h$  の値まで) では、気中放電が起こると、続いて沿面放電が起こるため、電極間にフランシオーバ電圧は水柱先端と球電極とのフランシオーバ電圧と等しくなる。従って、 $h$  を増加した場合、水柱先端と球電極間距離が減少し、電極間フランシオーバ電圧は減少する。 $h > 0.8d$  では、

空間のフランシオーバ電圧より水柱の沿面フランシオーバ電圧の方が大きくなり、電極間のフランシオーバ電圧は水柱の沿面フランシオーバ電圧と等しくなる。 $h$  を増加した場合、沿面放電の距離が大きくなり、沿面フランシオーバ電圧は大きくなる。従って、電極間のフランシオーバ電圧も大きくなる。

図5において、 $h > 15\text{ cm}$  で水柱と金属導体の  $V_{50}$  は大きく異なる。水柱の場合、 $h > 15\text{ cm}$  では電極間のフランシオーバ電圧は沿面フランシオーバ電圧で決定され、 $h$  の増加と共に  $V_{50}$  は増加する。しかし、金属導体の場合沿面放電は起こらないため、 $h$  の増加と共に  $V_{50}$  は減少する。このため両者に差が生じる。

#### 2.4 比誘電率、抵抗率とフランシオーバ電圧との関係

図7は、電極間に挿入する材質の比誘電率  $\epsilon_s$  と抵抗率  $\rho$  を変えたときの  $V_{50}-h$  特性を示している。実験装置は図2に示したもの用いている。(a)は負の雷インパルス電圧を

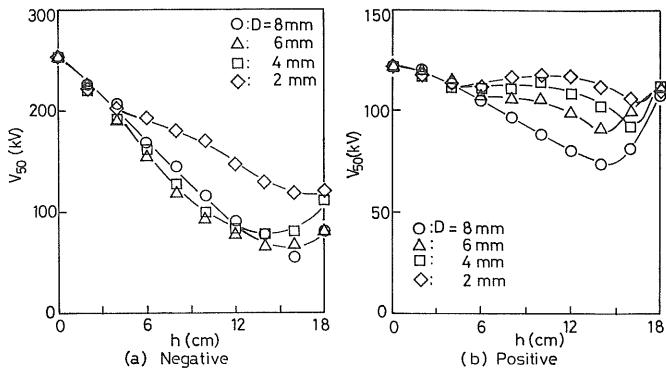


図8 噴水の径を変えた場合の  $V_{50}$ - $h$  特性 ( $h$ : 噴水の高さ,  $D$ : ノズルの径)  
Fig. 8  $V_{50}$ - $h$  characteristics for the different diameter of water column.

印加した場合である。ポリアセタール(図7中 P.A. で表示)を用いた場合、 $h$ の増加に対する $V_{50}$ の変化はほとんどない。放電経路もポリアセタールに沿うことはほとんどなく、平板電極の端に落ちる。ホースに詰められた水道水の場合、噴水の場合同様に、 $h$ の増加とともに $V_{50}$ の低下がみられる。放電も、 $h > 2$  cm では水を詰めたホースの外面を這う。

電極間に抵抗と誘電率の異なる二領域が存在する場合、それぞれの領域にかかる電圧は、抵抗と静電容量の並直列回路からなるインピーダンスの比で決定される。例えば、直流の場合、球電極と水柱先端の間の抵抗と水柱の抵抗で印加電圧は分圧される。ここで、電束の漏れがないと仮定し、水の抵抗、静電容量をそれぞれ  $R = \rho l / S$ ,  $C = \epsilon S / l$  ( $l$  は電流が流れる長さ,  $S$  は電流が流れる面積,  $\epsilon$  は誘電率) とするとき、水の抵抗が分圧に利く条件である  $1/\omega C > R$  は  $1 > \omega \rho \epsilon$  と書き換えることができる。水道水の場合、 $\omega \rho \epsilon = 0.037$  である。電束の漏れを考えると、水の静電容量はさらに小さくなる。従って、本実験条件下では、水柱の増加に対する $V_{50}$ の減少に対して、水の抵抗率が低いことが利いている。

噴水の場合と異なりホースに詰めた水では、 $h=d$  附近での $h$ の増加に対する $V_{50}$ の増加はあまりみられない。放電が違う表面の材質が異なること、形状が異なることなどのため、ホースに詰めた水の沿面フラッシュオーバ電圧は、噴水を用いたときに比べ小さな値(2.5 kV/cm)になると思われる。

正の雷インパルス電圧を印加した場合、図7(b)のホースに詰めた水のフラッシュオーバ特性は図5(b)の噴水の場合の特性と大きく異なる。この原因として、水柱の形状が両者で異なり、極性効果が利くことが上げられる。ホースに詰めた水が円柱形状になるのに対して、噴水では先端が半球状になる。

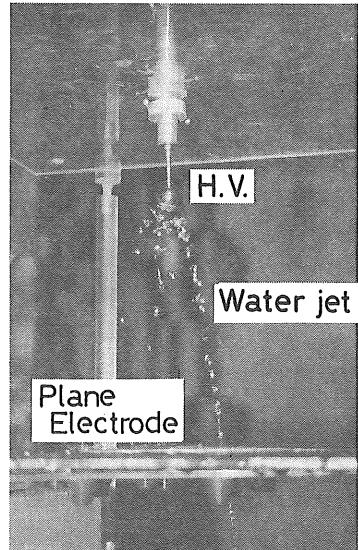


図9 粒状になった水の静止写真  
Fig. 9 Still photograph of water drops.

## 2.5 噴水直径の効果

図8は、 $V_{50}$ - $h$  特性に、噴水のノズル直径 $D$ が与える影響を示している。(a)は、球電極に負の雷インパルス電圧を印加した場合、(b)は、正の雷インパルス電圧を印加した場合である。1/125秒のシャッタースピードで写された写真から、ノズルが細く、水が高くなるほど粒状になることが確認されている。図9は、水が粒状になっている様子を示す。

図8(a)の場合、 $h \leq 12$  cmにおいて、異なる $D$ に対する $V_{50}$ は、 $D=2$  mmを除いてほぼ一致する。ノズルが細い場合、水は粒状になっていることが観測されてお

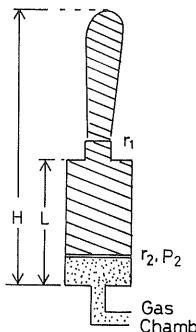


図 10 ピストン方式噴水 ( $H$ : 噴水の高さ,  $L$ : 水容器の高さ,  $r_1$ : ノズルの径,  $r_2$ : 水容器の径,  $P_2$ : 高圧ガスの圧力)

Fig. 10 Water jet using a piston.

り、放電形態は沿面放電と粒状の水の間を空気の放電が埋めた形となっていると思われる。 $D=2\text{ mm}$ ,  $h=9\text{ cm}$ の場合、写真より、噴水の高さに対する水の占める割合は約 60% となることが確認されている。 $V_{50}$  は図 8(a)より、約 175 kV であり、 $D \neq 2\text{ mm}$  の場合の約 120 kV と大きく異なる。しかし、水の占める割合を考慮すると、 $D=2\text{ mm}$  の実質的な  $h$  は 5.4 cm ( $9 \times 0.6$ ) となる。 $h=5.4\text{ cm}$ ,  $D \neq 2\text{ mm}$ , のとき  $V_{50}$  は約 175 kV であり、両者はほぼ一致する。従って、 $D=2\text{ mm}$  のフラッシュオーバ特性が  $D \neq 2\text{ mm}$  の場合と大きく異なるのは、水が粒状になっていることに起因する。図 8(b)の場合、 $h=6\text{ cm}$  付近より  $D$  による  $V_{50}$  の差が生じている。これは水の粒化や水柱の形状の相違などが原因と思われる。

以上のことより、 $d=18\text{ cm}$ ,  $D$  が 2~8 mm の範囲において、 $V_{50}-h$  特性は  $D$  の値により変化するが、これらは水柱形状の変化や表面張力による水の粒化で説明することができる。水誘雷を行う場合、水が粒状になると誘雷効果が小さくなることが予想される。これを防ぐため、水に表面活性剤を混入したり、噴水の径を大きくする必要がある。

### 3. 検討

雷インパルス電圧を用いた水誘雷の基礎実験結果より、噴水によって電極間のフラッシュオーバ電圧が低下することが分かった。加えて、水が電極間のフラッシュオーバ電圧を下げる効果は、金属導体と等しいことが分かった。従って、水誘雷の水柱は、ロケット誘雷のピアノ線に置き代えられ、ロケット誘雷で誘雷に成功したロケットの高さまで噴水を上げることで、誘雷の実現性があると思われる。ここでは、実際に水誘雷を行う方法について考察する。

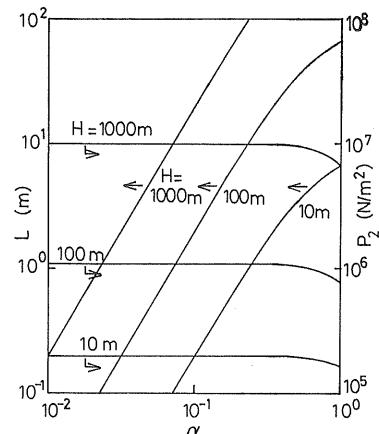


図 11  $H$  をパラメータとしたときの  $P_2$  と  $L$  の  $\alpha$  に対する関係 ( $H$ : 噴水の高さ,  $L$ : 水容器の高さ,  $r_1$ : ノズルの径,  $r_2$ : 水容器の径,  $P_2$ : 高圧ガスの圧力,  $\alpha$ :  $r_1/r_2$ )

Fig. 11 Dependences of  $P_2$  and  $L$  on  $\alpha$  for different values of  $H$ .

噴水を高圧ポンベを使って上げる一例を図 10 に示す。このシステムの利点は、構造が単純になること、コンパクトになること、外部電源を使用しないで済むことである。噴水の高さ  $H$  をパラメータとして、噴水の径、高圧ガスの圧力  $P_2$ 、必要な水容器の高さ  $L$  との関係をベルヌーイの定理を使って計算した結果を図 11 に示す。図中、変数の  $\alpha$  はノズルと水容器の径の比 ( $r_1/r_2$ ;  $r_1$ ,  $r_2$  はそれぞれノズル及び水容器の半径) である。この図から、 $H$  と  $\alpha$  を決定すると、必要な水容器の高さ  $L$  とガスポンペの圧力  $P_2$  が分かる。例えば、 $H=100\text{ m}$ ,  $r_1=5\text{ cm}$ ,  $r_2=50\text{ cm}$  とすると、 $P_2=1.08 \times 10^6\text{ N/m}^2$ ,  $L=1.96\text{ m}$  となる。実際には、水の粘性、表面張力による形状の変化、風の影響等も考慮する必要がある。

### 4. あ と が き

新しい誘雷方式である水誘雷の提案を行い、基礎実験を通して、実現の可能性について考察した。その結果、以下のことが分かった。

電極間に噴水を上げ、雷インパルス電圧を印加した場合、50% フラッシュオーバ電圧は水の高さの増加に伴い低下した。噴水を用いた場合のフラッシュオーバ特性は、噴水を金属導体で置き代えた場合とほとんど変わらないことから、水が電極間のフラッシュオーバ電圧を低下させる効果は金属導体と同程度であると考えられる。また、抵抗率や比誘電率を変えた実験より、 $\omega\rho\epsilon < 1$  の条件下でフラッシュオーバ電圧の低下が見られることから、本基礎実験の場合、水道水の導電性がフラッシュオーバ電圧の低下に起因していると考えられる。噴水の径を変えた場

合、極性効果による影響や粒化による影響のためフラッシュオーバ電圧特性の変化がみられた。長ギャップでの実験や直流電源を用いた実験など更なる検討を要するが、水誘雷実現の可能性は、ロケット誘雷と同じ高さまで水柱を作ることにより十分あるものと思われる。

水誘雷が実現した場合の利点は、システムが車で持ち運べるほどコンパクトになること、安価になること、水を十分用意しておくことで繰り返し使用できること、誘雷に失敗しても水が落ちてくるだけで危険性が非常に低いことにある。

最後に、本研究を進めるにあたり貴重な御助言を頂いた、豊田高専堀井憲爾教授、電力中央研究所宅間董氏に深く感謝いたします。また、本研究の一部は文部省科学研究費の援助で行われた。

## 参考文献

- 1) M.M. Newmann, J.R. Stahman, J.D. Robb, E.A. Lewis, S.G. Martin and S.V. Zinn : *J. Geophys. Res.*, **72** (1967) 4761
- 2) H. Akiyama, K. Ichino and K. Horii : *J. Geophys. Res.*, **90** (1985) 10674
- 3) 堀井憲爾：電気学会雑誌, **110** (1990) 21
- 4) 東山慎夫, 武藤三郎, 堀井憲爾：電気学会論文誌A, **54** (1979) 411
- 5) 野口卓也, 矢野雅昭, 霜村珠三, 堀井憲爾：電気学会論文誌A, **93** (1973) 336
- 6) 広橋道夫, 桑 千治, 坂井辰彦, 内山太郎：放電研究, No. 123 (1989) 45
- 7) 新藤孝敏, 鈴木俊男：電力中央研究所報告, No. 182010 (1982)
- 8) 藤原闇夫, 井澤靖和, 河崎善一郎, 松浦虔士, 山中千代衛：レーザー研究, **19** (1991) 528
- 9) 竹内利雄：雷放電現象, p. 149, 名古屋大学出版会 (1987)
- 10) 大重 力, 原 雅則：高電圧現象, p. 84, 森北出版 (1973)
- 11) 東京天文台編：理科年表, p. 531, 丸善社 (1991)
- 12) 高木浩一, 秋山秀典：電気学会放電研究会資料, ED-91-3, p. 21, 電気学会 (1991)
- 13) 赤崎正則, 原 雅則：電気学会雑誌, **90** (1970) 1611