

論 文

各種ガス質中の放電に音が及ぼす影響

中根偕夫^{*,1}

(1999年8月18日受付, 2001年1月22日受理)

The Influences of Sound Waves on Discharging

Phenomena in Several Gases

Tomoo NAKANE^{*,1}

(Received August 18, 1999; Accepted January 22, 2001)

The influence of sound waves on discharging phenomena in the air was researched. Therefore, It was considered that the influence of sound waves on discharge is not only in the air but also in the other gases. First of all, the electrodes were put into the sound tube at the loop of particle velocity. Between two electrodes (Needle vs. Disk) was discharged inside the sound tube filled with air. Moreover, the medium in sound tube was changed to N₂, CO₂, He, Ar. Then, discharging phenomena in several gases were compared in the air with in different gases. As a result, it was found that the discharge was influenced by the sound waves in any gases. But the effect was different according to the kind of gases.

1. はじめに

強力定在波音場内に電極を挿入し各種の放電を発生させ、その発光部の挙動については、今までに複数報告¹⁻⁵⁾してきた。すなわち、これらは針對平板電極間のコロナ放電、間欠スパーク放電、高気圧グロー放電の発光部が音によって扇子状に広がる現象⁴⁾や、音により放電形式が他の形式に移行する現象²⁾、高気圧グロー放電のV-I特性が音により影響を受ける現象⁵⁾などの報告であった。また、これらの現象は定在波音場を作る音響管の有無に関係なく音があれば存在し、可聴周波数域よりも高い周波数域の音（超音波）でも同様な影響が存在することなどについても報告⁶⁾している。応用面では音により電極間でのオゾンの発生量が増加する⁷⁾ことや、音を併用することにより電気集塵機の集塵効率を向上⁸⁻¹⁰⁾させることなども報告してきた。

しかし、これらの報告は、放電電極領域のガス質を大気圧の空気とした場合であり、空気以外のガス質においては可視的検討^{11,12)}のみであった。そこで本論文では、放電場の媒質となる空気をN₂, O₂, He, Arの各ガス質に変えた場合について検討した。その結果、音の放電へ与える影響

が空気のみの特有な現象でなく、いずれのガス質でも起こりうる普遍的な作用であることを実験的に証明をした。また音が放電のV-I特性へ与える影響のさらなる解明もした。また、その作用の現れ方とその大きさは、ガスごとで異なるという結果も得ることができた。なお、ここで対象とした放電現象は、針對平板電極間の放電のコロナ放電、間欠したスパーク放電（この放電は電流波形がスパークの場合に酷似しているので、ここでは仮に間欠スパークと表記する）、グロー放電を対象とした。

すなわちこれらのことから、音の放電への影響の物理的意味、及び放電の発生機構のさらなる解明や、工学的な応用にも寄与するものと考えられる。

2. 音が放電へ及ぼす影響の定性的な考え方

音は、気相（空気中）を媒質とした振動である。すなわち、大気圧（静圧の1気圧）に微小な交番圧力の変化が加わったと考えられる。

この音は、定在波音場¹³⁾とすることで、音圧分布¹³⁾と粒子速度（以後音の粒子速度と記す）分布¹³⁾に別けることができる。この定在波音場は一般に筒状の管を利用し、管内部が平面波となる共鳴状態にすることで得られる。この様にすることで、音圧と音の粒子速度は1/4波長ずれた状態¹³⁾の2つに分けられた分布が得られる。すなわち音圧分布の腹の位置では、音の粒子速度はゼロ（粒子速度分布の節）となる。また、歪みのない正弦波音波であるとすると、音の変位振幅のピークピーカー値 ξ_{pp} は次式によって求め

キーワード：放電、放電領域、音圧、粒子速度

*日本大学生産工学部電気工学科 (275-8575 習志野市泉町 1-2-1)

College of Industrial Technology, Nihon University,
1-2-1 Izumicho, Narashino, Chiba 275-8575, Japan¹nakanet@ee.cit.nihon-u.ac.jp

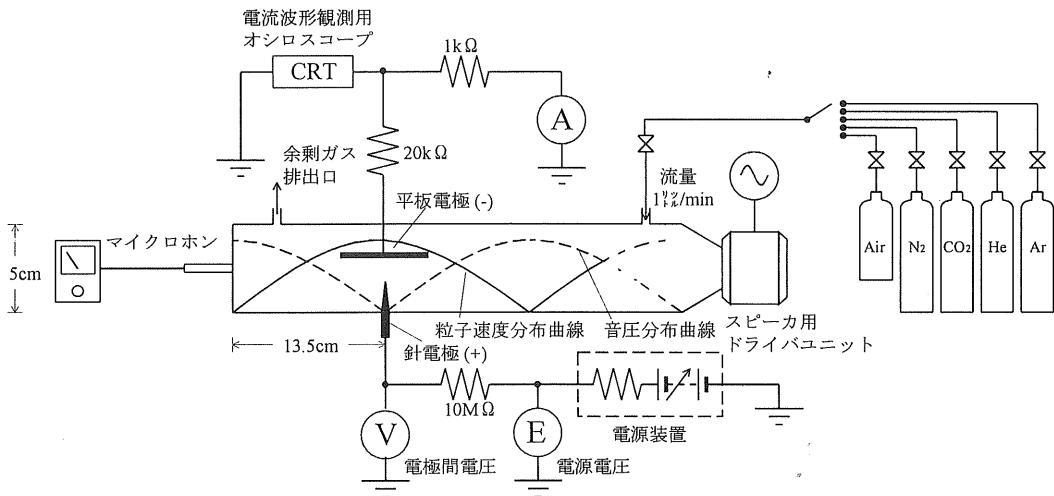


図1 実験装置
Fig.1 Experimental equipment

られる。

$$\xi_{pp} = \frac{\sqrt{2}V_s}{\pi \cdot f} \quad (1)$$

ただし、 f は音の周波数を示し、 V_s （音響工学では V だが、混同を避けるためここでは V_s と記す）は音の粒子速度の実効値を示す。すなわち、定在波音場では微小な領域が音の粒子速度 V_s で粒子変位 ξ の幅を振動していると考えることができる。

今までに報告¹⁻¹⁰⁾した実験研究では、すべてこの音の粒子速度分布の最大（音圧分布の節）の位置で放電への音の影響が大きく得られていた。このことから、音の圧力変化の最も少ない場所（大気圧のままで音による圧力変化のない位置）で放電が大きく影響するということは、音の粒子速度の変位 ξ のみにより、放電は影響を受けていたものといえる。

すなわち一般には、媒質の気圧を増大もしくは減することで、放電の様子に変化が見られるので、交番する音圧の変化が大の位置（音圧分布の腹）で影響が大になると思われるがちだが、音の交番圧力変化から表すことのできる音の粒子速度で音の放電に及ぼす影響は考えるべきと言える。

3. 実験装置

3.1 定在波音場および使用したガスの種類

定在波音場を作る装置としては、図1に示す音響管を用いた。音響管の形状は管内の音場が平面波となるように考慮し、長さ50cm、内径5cm、肉厚5mmの円筒管とした。この管は透明なアクリル製で、内部が可視できる。この管の一端にホーンを介しスピーカユニットを取り付け音波

を管内に照射した。また他端を剛板¹³⁾で閉止し、音を反射させ定在波音場をつくる構造とした。

音の周波数は音響管内が共鳴する周波数で、今回は波長がほぼ53cmとなる周波数を選んだ。各ガス質で音の伝播速度（音速）が異なるので、その結果音の周波数は空気の場合は650Hz、N₂は660Hz、CO₂は510Hz、Heは1960Hzで、Arは600Hzとなった。つまり音響管内の音の粒子速度分布の節と腹の位置は、各ガス質ともに等しくした。そのため、電極中心は常に管閉止端より波長の1/4の13.5cmの位置となった。

音の大きさは、閉止端に小穴をあけ挿入させた標準マイクで測定した。すなわち実験結果には、音響管閉止端での音圧 P として測定し、また音の粒子速度 V_s は音圧 P を用い(2)式から求めた。

$$V_s = \frac{P}{\rho \cdot c} \quad (2)$$

ただし、 ρ は媒質密度、 c は媒質中の音速である。

管内へのガスの注入は、音響管のスピーカユニット近傍に小穴をあけ、ガスボンベからの噴出圧力を利用した。この注入量はガス流が放電現象に影響をしない範囲の毎分1リットル（管内流速は約1cm/s）とし、閉止端近くにあけた小穴から余剰となったガスを排出し続けるようにした。

3.2 放電電極とその電気回路

放電を発生させる電極は、図中に示すように針対平板電極を用い、ギャップの長さは9mm（結果4-2は5mm）とした。針電極は削角25度、先端曲率半径約20μm、外径2mmで10MΩの抵抗器を介して電源装置から正極の高电压を印加した。平板電極には直径4cm、厚さ2mmの円板を用いて抵抗器21kΩを介してアースした。なお、電極の材質

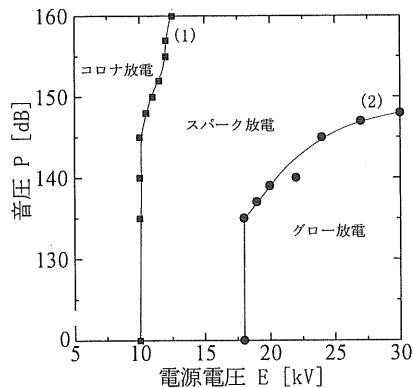


図2 空気の場合の放電領域
Fig.2 Saturation of discharge (air)

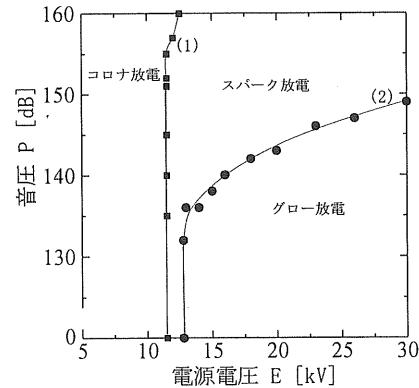


図3 N₂の場合の放電領域
Fig.3 Saturation of discharge (N₂)

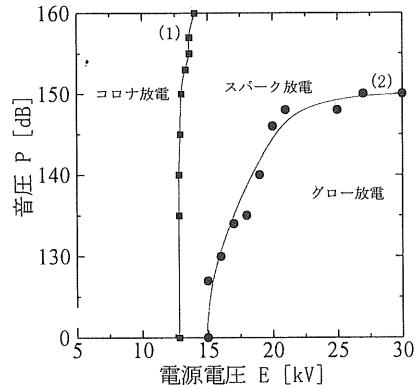


図4 CO₂の場合の放電領域
Fig.4 Saturation of discharge (CO₂)

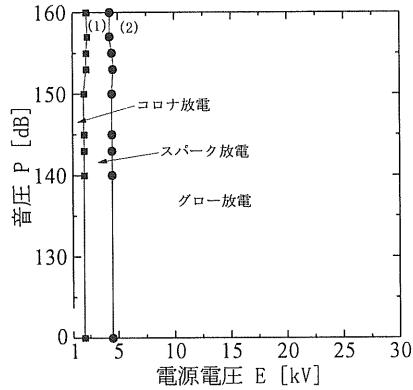


図5 Heの場合の放電領域
Fig.5 Saturation of discharge (He)

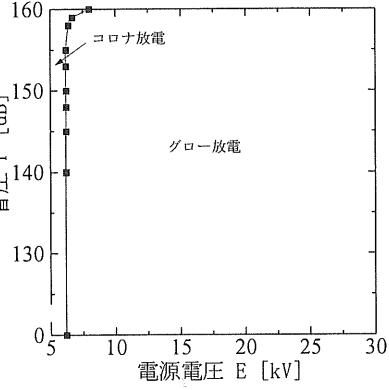


図6 Arの場合の放電領域
Fig.6 Saturation of discharge (Ar)

はステンレス鋼を用いた。すなわち計測は、この針対平板電極を音の粒子速度分布の腹の位置に挿入して計測した。なお、電源装置の定格から今回は30kV, 2.7mAの範囲内のみの実験結果を示した。

4. 実験結果

4.1 種々の媒質中での各種放電形式の範囲に音が及ぼす様子

図2～6に音と放電形式の関係を示す。各図とともに、横軸は電源電圧Eを示し、縦軸は音響管閉止端での音圧Pを示している。たとえば、図2は媒質が空気の場合であり、横軸上は音波照射なしの場合で、電源装置の電圧Eを上げると数kV程でコロナが始まりその後、横軸上の■印(10kV)まではコロナ放電が観測された。さらにEを上げると破裂音を伴ないながら■印より右側で連続したスパーク放電に移行した。さらに電源電圧Eを上げると18kVの●印よりグロー放電に放電形式が移行した。

そこで、音圧Pを高くし、音を照射しながら繰り返し電源電圧を上昇させていく作業を、測定したところ各■の(1)曲線、●印の(2)曲線が得られた。

すなわち、(1)曲線よりも左側ではコロナ放電発生領域を示し、(1)と(2)曲線の間は、間欠したスパーク放電の発生する範囲であり、(2)曲線より右側はグロー放電の発生している範囲を示している。

また、他のガス質であるN₂, CO₂, He, Arガスについても空気の場合と同様であり図3～6が得られ、それぞれの放電が発生する電源電圧Eと音圧Pの関係の各放電領域を求めることができた。

この図2～6までを比較すると、空気、N₂、CO₂ガスではほぼ同じ様子を示していたが、He、Arガスでは大きな音による影響はない傾向となった。しかし、Arの場合はガスの性質のためか今回の実験では間欠スパーク放電の領域は見られなかった上に、コロナからグロー放電へは158dB(re. 0dB=20μPa)以上の音圧で音の影響が見られる結果となった。

また別の見方をすると図2～4の(2)曲線より、例えば空気の場合18kV以上で音を照射すると、同じEの値でもグロー放電から間欠スパーク放電に変化(後退)する傾向が見られた。すなわち間欠スパーク放電が発生する領域が拡大し、グロー放電の発生する領域が減少することがN₂,

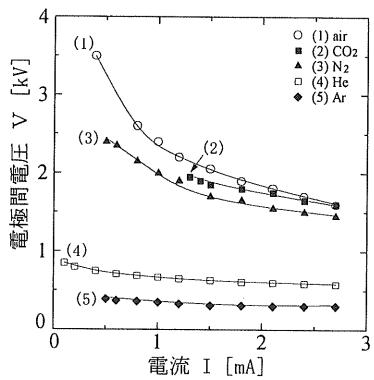


図 7 V-I 特性（音無し）
Fig.7 V-I characteristics (No sound)

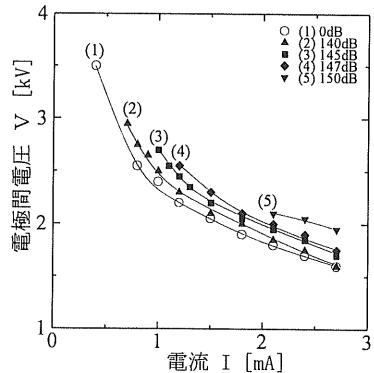


図 8 V-I 特性（空気）
Fig.8 V-I characteristics (air)

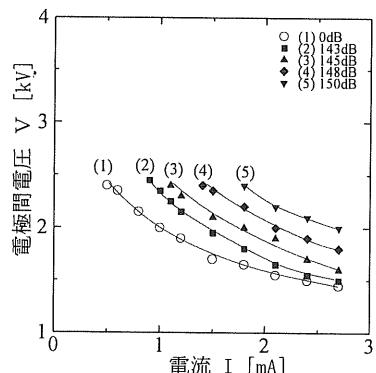


図 9 V-I 特性（N₂）
Fig.9 V-I characteristics (N₂)

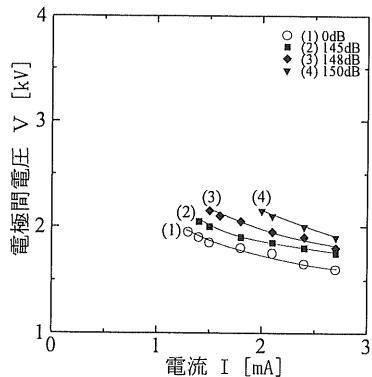


図 10 V-I 特性（CO₂）
Fig.10 V-I characteristics (CO₂)

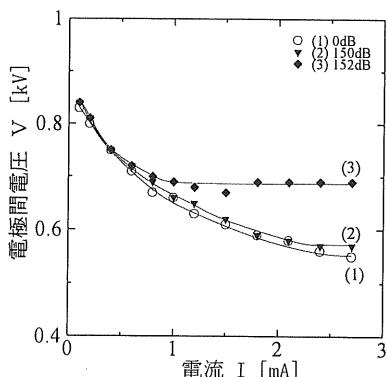


図 11 V-I 特性（He）
Fig.11 V-I characteristics (He)

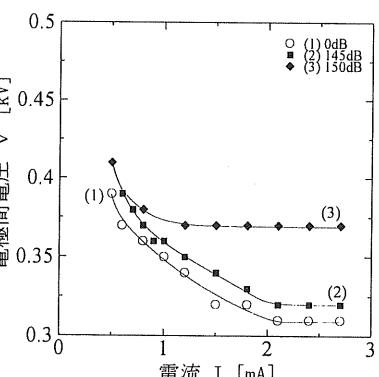


図 12 V-I 特性（Ar）
Fig.12 V-I characteristics (Ar)

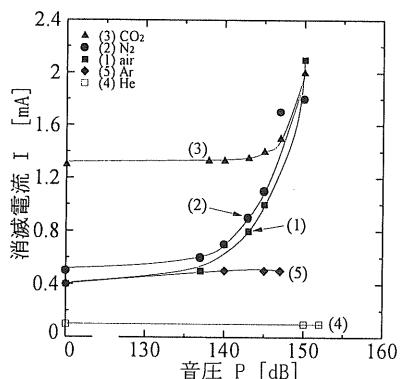


図 13 各ガス質の高気圧グロー放電の消滅する電流値
Fig.13 The value of the current which
grow discharge was disappeared.

CO₂を含めて言えた。しかし、図5のHeの場合は音の影響は受けにくい結果となり、このことはArを含めHeガスは、ガスが単原子分子であることが起因するとも現在のところ考えられた。

4.2 音がグロー放電のV-I特性に与える影響

ここではグロー放電の電極間電圧 V と電流の関係に着

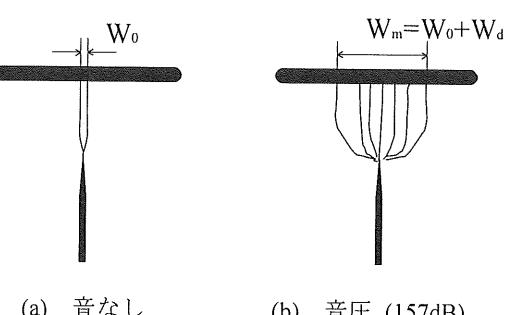


図 14 スパーク放電の広がりの様子例
Fig.14 The appearance of discharge width

目し、音のV-I特性への影響を測定した。なお、ここで装置は前記と同様であるが電極間のギャップの長さを5mmとした。

まず、音波照射なしの場合のグロー放電のV-I特性を各ガス質について求めたところ図7となった。図の縦軸はグロー放電の発生している電極間電圧 V 、横軸はグロー放電

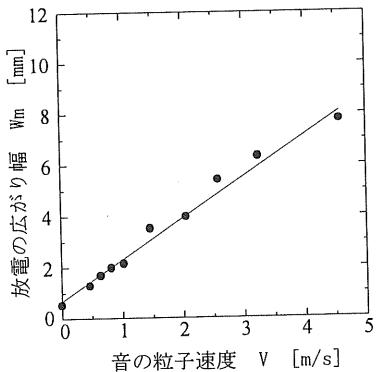


図 15 粒子速度と放電の広がり幅の関係 (空気)

Fig.15 Width of discharge vs. particle velocity. (air)

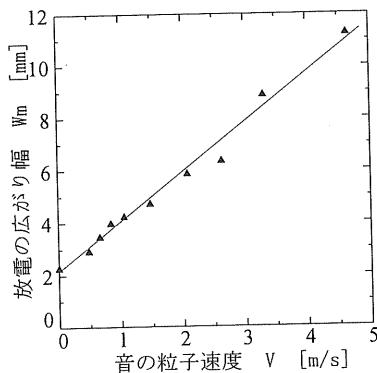
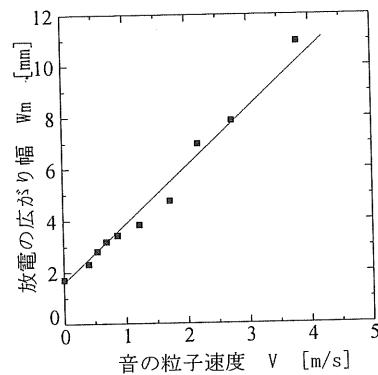
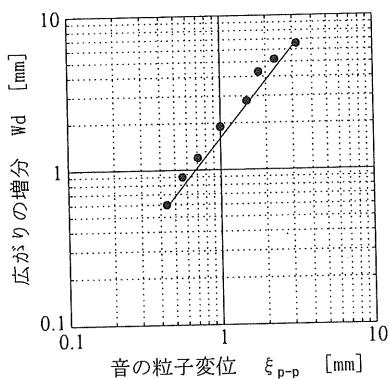
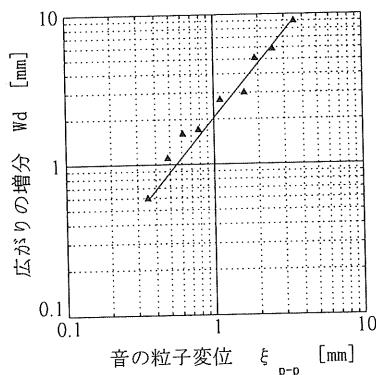
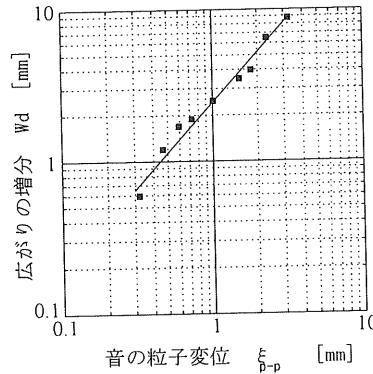
図 16 粒子速度と放電の広がり幅の関係 (N_2)Fig.16 Width of discharge vs. particle velocity. (N_2)図 17 粒子速度と放電の広がり幅の関係 (CO_2)Fig.17 Width of discharge vs. particle velocity. (CO_2)

図 18 変位振幅と放電の広がり幅の関係 (空気)

Fig.18 Width of discharge vs. particle vibration. (air)

図 19 変位振幅と放電の広がり幅の関係 (N_2)Fig.19 Width of discharge vs. particle vibration. (N_2)図 20 変位振幅と放電の広がり幅の関係 (CO_2)Fig.20 Width of discharge vs. particle vibration. (CO_2)

の電流を示している。なお、このV-I特性は電源装置の容量のため電流値が2.7mAからで、グロー放電が消滅し他の放電形式(間欠したスパークへ)に移行するまでを測定した。

図より、供試ガスの音の作用なしでのV-I特性は、すべて負特性(前期グロー放電)であった。また、同じ電流の値で見ると電極間電圧Vは空気、 CO_2 、 N_2 、He、Arの順で電極間の電位が低くなっていた。

そこで、各ガス質ごとのグロー放電の特性を各音圧で測定したところ、図8~12となった。図8は空気の場合で、音圧をパラメータとしたときの結果である。図中(1)曲線は音波照射なしの場合であり、電流値を2.7mAから測定を始め電流を減少させて行き、グロー放電が消滅した0.4mAまで測定した。そこで、同様な測定を各音圧を照射しながら測定したところ(2)~(5)曲線が得られた。

この図中の各曲線の傾向は、例えば同じ電流の値では音圧を高くすることで、図の上方へ曲線が移動する傾向が見られた。またこのグロー放電のV-I特性は、各音圧とも音無しの場合と同様な傾向の負特性であった。さらに、グロー放電の維持可能な最小の電流の値を消滅電流(値)とすれば、音の大きさと共に消滅電流は大きな値となった。このことは、グロー放電が音によって維持しにくくなることを意味しているといえる。

図9に N_2 ガスの場合を示した。図中の各曲線の傾向は空気のV-I特性と同様に音圧を大にすることで、図中の上方へ曲線が移動する傾向が見られた。また、消滅電流の値は音圧の増大とともに大きくなつた。しかしグロー放電の消滅する電極間電圧Vはほぼ一定の値を示すことが空気の場合とは異なる特徴であった。

図10は CO_2 ガスの場合であり、前者と同様な傾向であ

るが、空気や N₂ ガスとは異なり、音圧が大になることで V-I 特性の測定できる範囲が狭くなっていた。

He ガスの場合は図 11 となり、前記ガスと同様に同じ電流の値においては図の上方へ曲線が移動する傾向が見られたが、グロー放電を維持可能な消滅電流と、そのときの電極間電圧 V は音の照射にもかかわらず一定となり、他のガスの場合と異なる傾向であった。

図 12 の Ar ガスの場合は、He ガスの場合とほぼ同様であるが、音圧 145dB 以上では急に音の影響が大きくなると言う特徴も見られた。

そこで図 8～12 を比較すると、各ガス質とも音圧 P を高くするにより、グロー放電の V-I 特性の曲線は図面上で上方に移動する。つまり別の言い方では、電極間電圧の値が高くなる傾向が見られた。

そこで、各ガス質の消滅電流を見やすくするため、各ガス質とも音圧 P と消滅電流の関係に書き直したところ図 13 となった。図の縦軸はグロー放電の消滅電流を示し、横軸は音圧を示す。図より、空気、N₂、CO₂ ガスのグロー放電の消滅電流に与える影響は 140dB 程度以上の音圧で急激に増加することが分かった。また He、Ar ガスの場合は今回の測定範囲の音圧では音の影響は見られないこともわかった。

4.3 音による放電発光部の広がりの様子

使用するガスを可視化し易い空気、N₂、CO₂ とし、針対平板電極間に発生する放電の発光部を観測した。

実験手法としては、音作用の無い場合から音圧 160dB までとし、試供放電は間欠スパーク放電とした。この様子の一例を図 14 に示す。図中(a)は音作用なしの場合で、発光部が針電極先端から平板電極へと棒状に橋絡している状態を示し、図(b)は音圧 157dB で、粒子速度分布曲線の腹の位置での場合である。すなわち、発光部が音の粒子速度 v により広がった状態を示している。

そこで、ギャップ間の閃光が最も広がった部分の長さを放電の広がり W_m とし、変異振幅を求める都合上(2)式より求めた音の粒子速度との関係を求めたところ媒質が空気の場合図 15 となった。図の縦軸は W_m を示し、横軸は音の粒子速度の大きさを示す。図より、音の粒子速度 v に比例するように W_m が増加するのが分かる。同様に N₂、CO₂ について、音の粒子速度 V_s の大きさと放電の広がり W_m の関係を求めたのが図 16、17 である。これらのガスの場合も W_m が音の粒子速度 V_s に比例することが分かった。

そこで放電の広がり W_m と音の粒子速度の変位¹³⁾（媒質の気相中の振動振幅）の関係を検討するために、音波を正弦波と考え、音の変位振幅のピークピーク値 ξ_{pp} を(1)

式で求めた場合が図 18 となった。図は空気の場合で、図中縦軸には音による放電の広がりの増分 W_d を示し、これは $W_d=W_m-W_0$ である。横軸は音の変位振幅のピークピーク値 ξ_{pp} を示す。

図より、 W_d は ξ_{pp} の増加に従い、ほぼ直線的に大きくなる傾向がある。そこでこの傾向が $W_d=a \xi_{pp}^n$ の実験式で表せるものとすれば、図 18 の空気の直線より W_d を求めたところ $W_d=1.7 \xi_{pp}^{1.15}$ となった。

同様に図 16、図 17 の N₂、CO₂ ガスの図を粒子変位と放電の広がりの増分 W_d の関係に書き換えたものが図 19、図 20 となった。同様に $W_d=a \xi_{pp}^n$ の実験式を求めたところ N₂ ガスは $W_d=2.7 \xi_{pp}^{1.05}$ 、CO₂ の場合は $W_d=2.4 \xi_{pp}^{1.08}$ となった。

これらを言い直すと、ここで実験の範囲では ξ_{pp} の指数部分の平均は 1.09 となり、ほぼ 1 に近く（空気の場合のコロナ放電での同様な実験においても n は 0.9 から 1.1 であった）放電の広がりの増分は音の粒子変位の振幅に正比例することになった。つまり空気の放電の広がりの増分 W_d は、音の変位振幅のピークピーク値の 1.7 倍となると考えられる。同様に、N₂ ガスは 2.7 倍、CO₂ ガスでは 2.4 倍となることが分かった。

すなわち、これらのことから、放電の広がりは空気、N₂、CO₂ 共に音に比例し直線的に大きくなることが分かり、発光部が広がった増分はガス質の違いによらず、音の放電の広がりへの影響には、粒子変位の振幅 ξ_{pp} が密接に関係していると考えられた。

5. まとめ

ここでは、音波が空気中の放電に与える影響が今までの報告で明らかにされたことを受け、媒質のガス質によらず同様な作用が普遍的にあることの検証を行った。また、音が放電へ与える影響のさらなる解明の糸口をつかむことを目的として、各ガス質の場合の定在波音場内の放電に関する基礎的実験を行った。

その結果、各ガス質中のコロナ放電、間欠スパーク放電、グロー放電に対し音の照射を行ったところ、各ガス質共に音の影響があり、空気、N₂、CO₂ ガスでは放電の形式が変わることや、それらの放電の発生する電源電圧 E の値を変えることが確認できた。しかし、今回の実験に用いたガスのうち He、Ar ガスは放電形式の変化には大きな影響は見られなかった。

次ぎに各種放電形式の内、グロー放電に着目しその V-I 特性への音の影響を見たところ、放電を妨げる方向に音が作用する傾向が見られた。また、このグロー放電の維持が不能となる点に着目したところ、He、Ar ガスは変化が見

られない点では一致したが、他の空気、N₂、CO₂ガスの傾向はそれぞれ異なった様子を見せていた。

また、間欠スパーク放電の閃光の広がりについて検討した結果は、空気、N₂、CO₂の供試ガス質では放電の広がりが音の粒子変位に比例して大きくなる知見を得た。このことから、音が放電への影響を与える機構としては粒子変位（音の粒子速度による媒質の振動振幅）が大きく関与していると結論を得るにいたった。

以上をまとめるとこれらの結果から、音が放電へ与える影響は空気以外のガス質にも存在し、音がガス質によらずに有する普遍的な作用であることがわかった。

なお、今回は音を音圧と音の粒子速度に別けることができる定在波音場を用いたが、音が放電の発光部に及ぼす影響は、主として音の粒子速度によるものと考えられ¹⁻⁵⁾たが、今後の基礎的な研究課題としては、音が放電に影響を与える物理的な機構を知る必要が挙げられる。この機構の内、ストリーマ（ストリーマの生長過程）が、音の粒子速度が有する音の粒子変位の振幅により、棒状に橋絡した放電の左右（装置図に向かって）に空気の場合1.7倍に走査されることは分かったが、音の影響の現れ方とその大きさはガスごとに異なることから、放電の発生機構とガス原子の違いなどを考慮した解明も必要である。

他方、応用的な研究課題としては、さまざまな機器の開発が考えられる。たとえば音により放電形式の変化（後退）する現象を利用した開閉器のスパーク放電除去¹⁴⁾への応用、イオン流（放電ストリーマ）の走査による照射面積の拡大¹⁵⁾や、またCO₂の大気汚染対策¹⁶⁾などが挙げられる。

つまり、音の放電への影響が、空気以外のガス質にも存在することが示されたことで、これらの開発が可能となると考えられる。

この研究の初期に、音と放電の関係について直接ご指導ご助言を賜わった故三好保憲先生、変位振幅の発想については故増田閃一先生にご指導を受け、ここに深く感謝し両先生のご冥福を祈ります。また、各種のガス質についても検討する様にと、わざわざご来訪いただき適切な御指示を賜わった御所康七先生に謝意を表します。さらに元日本大学院生菊池昭宏氏にたび重なるトレース実験をしていただき、ここに重ねてお礼申します。

参考文献

- 1) 中根偕夫、平田尚史、瀬谷浩一郎：静電気学会誌, **9** (1985) 422
- 2) T.Nakane, T.Hirata and K.Seya: JJAP, **26** (1987) 203
- 3) 中根偕夫、平田尚史、瀬谷浩一郎：静電気学会誌, **11** (1987) 378
- 4) T.Hirata, T.Nakane and K.Seya: JJAP, **30** (1991) 45
- 5) 中根偕夫、平田尚史、瀬谷浩一郎：日本音響学会誌, **46** (1991) 893
- 6) 中根偕夫、平田尚史、瀬谷浩一郎：静電気学会講演論文集'92, p.423, 静電気学会(1992)
- 7) 中根偕夫、平田尚史、瀬谷浩一郎：日本音響学会講演論文集'90, p877, 音響学会(1990)
- 8) 中根偕夫、瀬谷浩一郎：静電気学会誌, **10** (1986) 331
- 9) T.Nakane and K.Seya: JJAP, **28** (1989) 149
- 10) 大追美樹、中根偕夫、瀬谷浩一郎、永安克志：平成9年度秋季研究発表会講演論文集, p.1003, 音響学会(1997)
- 11) 菊地昭宏、平田尚史、中根偕夫、瀬谷浩一郎：音響学会講演論文集'93, p.927, 静電気学会(1993)
- 12) 中根偕夫、瀬谷浩一郎：静電気学会講演論文集'95, p.405, 静電気学会(1995)
- 13) 川村雅恭：電気音響工学概論, p.32, 昭晃堂 (1987)
- 14) 平田尚史、中根偕夫：超音波テクノ第6巻, p.57, 日本工業出版会 (1987)
- 15) 広村裕子：放電研究, **156** (1997) 65