

論 文

音が高気圧グロー放電の諸特性に及ぼす影響

中根偕夫^{*,1}, 寺西研二^{*,2}

(1999年9月8日受付, 2001年1月22日受理)

Influence of the Sound on Characteristics of High-pressure Glow Discharge

Tomoo NAKANE^{*,1} and Kenji TERANISHI^{*,2}

(Received September 8, 1999; Accepted January 22, 2001)

This paper describes the influence of sound waves on high-pressure glow discharge. The papers have been published on the influence of sound waves on various discharges by us. But these presents have been dealt with only 660Hz. Therefore, the influence of sound waves, which used different frequencies, was investigated. First of all, the characteristics of high-pressure glow discharge were measured in 660Hz. Secondly, the characteristics were also measured in case of different frequencies. As a result, it was found that the effect of sound waves on high-pressure glow discharge universally depends on particle velocity. In addition, the frequency on this experiment was within the parameters of audio frequency. And standing wave field was used for understanding characteristics of the sound. For that reason, the unit of sound intensity was indicated with particle velocity.

1. まえがき

電気放電は気圧・温度・ガス質などの影響を受ける。また、放電の発光時には、時により電磁波や音の発生を伴うことは周知である。しかし、その逆の放電に音が影響を与えることに関しては、著者ら以外には報告¹⁾された例は他には見られない。

著者らは、今までに強力定在波音場内に放電電極を挿入し、種々の放電への音の影響について報告²⁻⁶⁾してきた。それらは供試放電として、主として払子コロナ、連続した間欠スパーク放電、高気圧グロー放電などであり、電極間の発光部の観測を対象としていた。それらは発光部が扇子状に広がる現象⁴⁾や、音により放電の形式が他の形式に移行⁵⁾（後退）する現象や、高気圧グロー放電のV-I特性に及ぼす音の影響⁶⁾などであった。しかし、これらの報告は定在波音場を作る音響管⁷⁾を共鳴状態で使用し、また可聴周波数帯の一一周波数のみの実験報告にとどまっていた。そこで今回は音の周波数の差異においても、音の影響を普遍的に有することを実験的に証明し、音が放電に及ぼす現象を確かなものにし、その知見の範

囲を広げることを試みた。すなわちこのことから工学的応用の用途もあるものと考えた。

なお、ここでの使用する音の周波数は可聴周波数域にとどめ、今までと同様に音響管を使い定在波音場を利用した。これは管内を音圧分布⁷⁾と粒子速度（以後音の粒子速度と記す）分布⁷⁾に分けることができ、音の作用が明確になるためである。また一般に音響管は筒状の管を用い、管内部を共鳴させることで管径に対し平面波を発生させている。このようにすることで、音圧と音の粒子速度を1/4波長ずれた⁷⁾状態の各分布が得られ、放電に影響を与える音の効果を考察することができる。なお、今までに報告²⁻⁶⁾したことからは、音の粒子速度による効果が大であったので、ここでは音の大きさを音の粒子速度Vsで表すことにした。

すなわち、ここでの報告は実験的研究であり、今回の音の周波数の範囲では、周波数の差異によらず、音の粒子速度による普遍的な作用であることを立証した。これらのことから音の放電に及ぼす物理的解明や、工学的応用（例えばO₃の発生の促進⁸⁾や、NO_x対策⁹⁾）へも寄与するものと考えられている。

ここでの報告はまず3の実験結果として、音の周波数を660Hzの場合で高気圧グロー放電の各特性について検討した。次に4の実験として、音の周波数を変えた場合¹⁰⁾の音の効果の大きさについて実験的に考察をした。

キーワード：グロー放電、音、粒子速度、周波数

*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-shi Chiba 275-8575 Japan

¹nakanet@ee.cit.nihon-u.ac.jp

²teranishi@misa.nkn.ee.cit.nihon-u.ac.jp

2. 実験装置

実験装置を図1に示す。音場を作る装置としては音響管を用いた。この円筒状の管は内径5cm、長さ50cm、厚さ5mmの内部の観測できる透明なアクリル製で、その円筒の一端にスピーカーユニットを接続し他端を閉止した構造とした。使用する音の大きさは、閉止端に接続した標準マイクで音圧を計測した。その後1/4波長ずれた音の粒子速度分布の腹の位置での粒子速度Vsに換算し、その値を用いた。

高気圧グロー放電を発生させる電極には針対平板電極(ギャップの長さ5mm)を用いた針電極(+)は先端曲率半径 $20\mu\text{m}$ 、外径2mmのステンレス製で、 $10M\Omega$ の保護用の抵抗器を介して電源装置から正極の高電圧を印加した。平板電極(-)には直径4cm、厚さ2mmのステンレス製の円型の板を用い、 $20k\Omega$ を介してアースした。また、電源電圧Eは電源装置の出力電圧を測り、電極間電圧Vは針電極とアース間に電子電圧計を挿入して測定し、電流は平板電極側に可動コイル型の電流計を接続して測定した。

3. 実験結果(周波数660Hzの音を照射した場合)

実験測定ではまず、定在波音場中の高気圧グロー放電を供試放電とし、電源電圧Eと音の粒子速度Vsの関係を、放電の発光部の様子と電流波形について検討した。さらに音の粒子速度Vsに対してのV-I特性の関係を記述した。

3.1 定在波音場中で高気圧グロー放電が発生するための電源電圧の値

図2に周波数660Hz(波長 $\lambda=53\text{cm}$ に対し、円形平板電極4cmは充分に小さく、音場を乱さないと考えている)の場合の電源電圧Eと音の粒子速度Vsとの関係を示した。すなわち、図の横軸は音響管の閉止端音圧から求めた音の粒子速度Vsであり、縦軸は図1中の計器Eの値を示している。なお、この電源電圧Eを測るのは、コロナ放電・間欠スパーク放電の電極間電圧Vが測定困難なためである。図は音波を照射しない状態(図の横軸上)でEを増大していくところ、 12kV 程から間欠的に発生する放電(図中S)の発生(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している)が見られ、 $E=17\text{kV}$ で放電形式が高気圧グロー放電(G)に変わったことを示している。

そこで、この作業をそれぞれの音の粒子速度で繰り返し測定し、高気圧グロー放電から間欠スパーク放電へと放電形式が移行(後退)した時の電源電圧Eに対し音の粒子速度Vsを求めたところ(1)曲線が得られた。なお

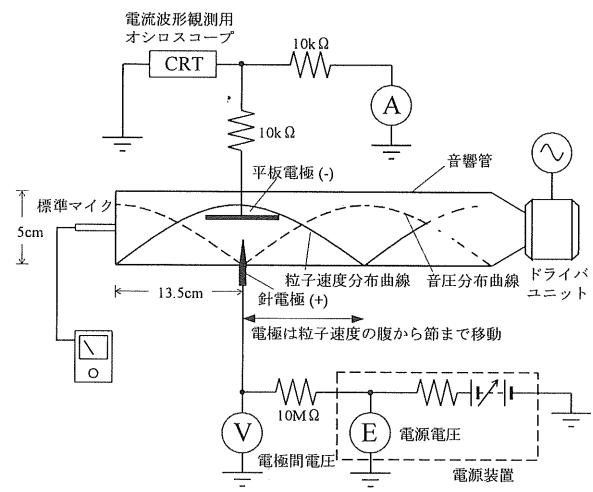


図1 実験装置図
Fig.1 Experimental equipment.

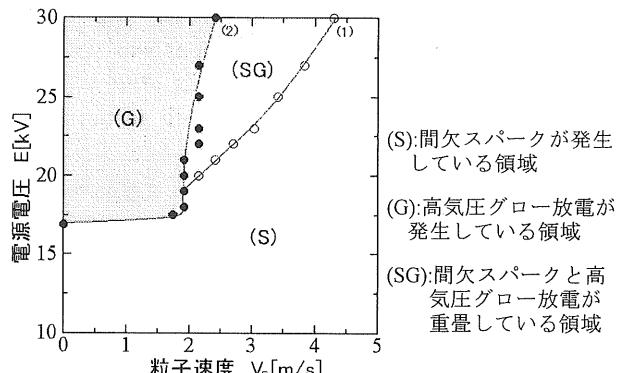


図2 音波を照射した時の放電形式の変化の様子
Fig.2 The change in discharging form by sound waves.

この曲線は $E=19\text{kV}$ より曲線が2本に分かれる様子を示した。この(1)と(2)曲線の間は、両放電形式が重複する領域を意味している。すなわち、この(1)曲線より図に対して右側の領域は間欠スパーク放電が発生し、(2)曲線より左側は高気圧グロー放電の発生している領域を意味している。また、(1)と(2)曲線とで囲まれた範囲は高気圧グロー放電に重複して間欠スパークがまばらに繰り返しながら発生し、複合した放電が見られる範囲であり言い直すと間欠スパークと高気圧グロー放電が繰り返す特殊な放電が見られていた。また見方を変えると例えば $E=25\text{kV}$ の場合、音の粒子速度を 2.2m/s 以上にすることによって(G)の範囲から(SG)の領域の放電へと移り、さらに 3.5m/s 以上にすると(S)の間欠スパークの領域へと移った。すなわち音の粒子速度Vsを高めることで放電形式が後退(低い電源電圧値で発生する放電へ)する様子が見られたと言える。

なおギャップの長さを5mmから15mmに長くした実

験も別に行つたが、この場合も前記と同様な傾向を示し、ギャップ長が長いほどより低い音の粒子速度で高気圧グロー放電が間欠スパーク放電に後退する結果も得られている。

3.2 高気圧グロー放電の発光部の形状に音が及ぼす様子

図3に高気圧グロー放電の発光部の様子を示す。電源電圧 E を25kVとしたところ、高気圧グロー放電が発生し、この時の状態を写真撮影したものを図中(a)に示した。この写真から高気圧グロー放電が、針電極と平板電極の間に橋絡している様子がわかる。この状態に音の粒子速度1.5m/sの音波を照射すると図(b)に示すようになり、高気圧グロー放電の発光部が音によって広がる様子がわかった。さらに音の粒子速度を2.6m/sとした場合、図中(c)に示すようになり、放電形式が間欠スパークと高気圧グロー放電を繰り返す放電となり、その発光部が広がった。音の粒子速度をさらに高く4.3m/sにすると、図中(d)に示すように、放電が間欠スパークとなり、スパークの閃光が扇状に広がりながら電極間を橋絡した。すなわちこれらの写真から、放電の発光部は音により必ず太くなり、放電形式が間欠スパークになると扇状になり、さらに閃光が広がる傾向が見られた。すなわち音により放電の発光域を広げること^[1-3]ができた。

3.3 電流波形に及ぼす音の影響

図4は図1中のオシロスコープで放電の電流波形を観測した結果である。図中(a)には電源電圧 $E=12\text{kV}$ (音波照射なし)とした場合の間欠スパーク放電の電流波形を示した。図よりピーク値約100mAのスパークが繰り返し周波数約12kHzで間欠的に連続して発生していることが分かる。次に電源電圧 E を上げ、25kVとしたところ、高気圧グロー放電の発生する領域となり図中(b)の波形が得られた。この波形から、高気圧グロー放電は時間に対して2.1mA一定の電流が流れていることが分かった。なお、この電流波形は図3の(a)の放電の写真に対応している。次にこの状態に音の粒子速度1.5m/sの音波を照射したところ、電流波形は図中(c)となり、この時(図3(b)と対応)の電流値は2.15mAとなった。この(b)(c)両図の波形とも、電流値が時間に対して一定の直流の波形であり、音により電流値が0.05mAとわずかながら増大した。さらに音圧を上げ2.6m/sとしたところ図中(d)(図3(c)に対応)の波形となった。この(d)の波形は、(c)とは異なり、パルス状の波形が含まれたのが見られた。このパルスのピークは約100mAとなり、間欠スパーク放電の波形の(a)のピークの長さに似ていた。

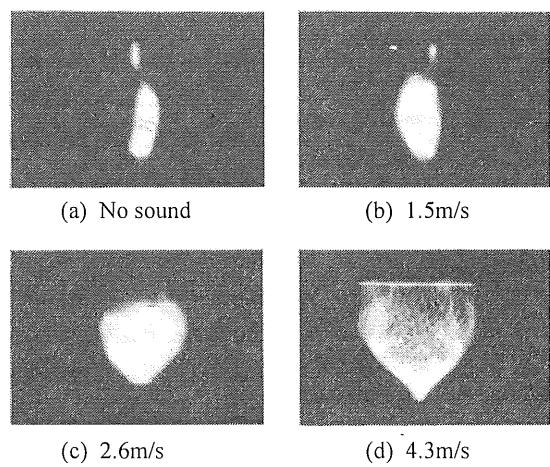


図3 高気圧グロー放電の発光部の様子

Fig.3 Shape of high-pressure glow discharge with varying sound intensity.

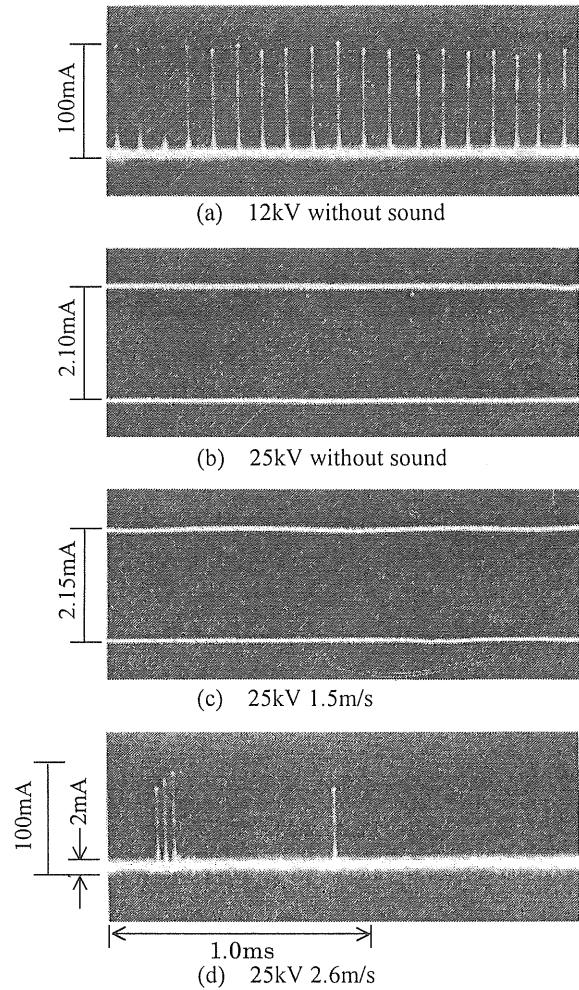


図4 高気圧グロー放電に音波を照射したときの電流波形

Fig.4 The change in current waveform of high-pressure glow discharge when the sound intensity was varied.

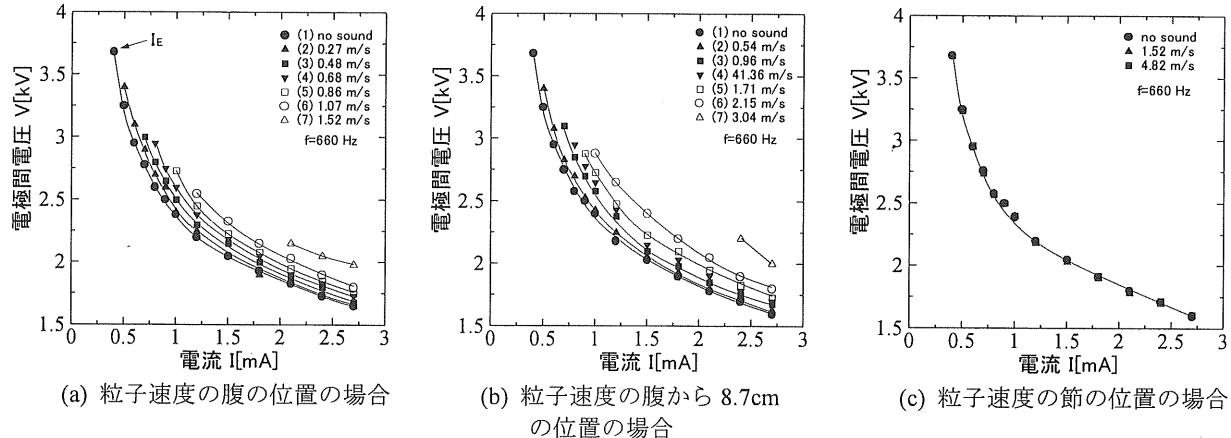


図 5 V-I 特性（電極の位置を変えた場合）

Fig.5 V-I characteristics. (In case of changing the location of the electrodes)

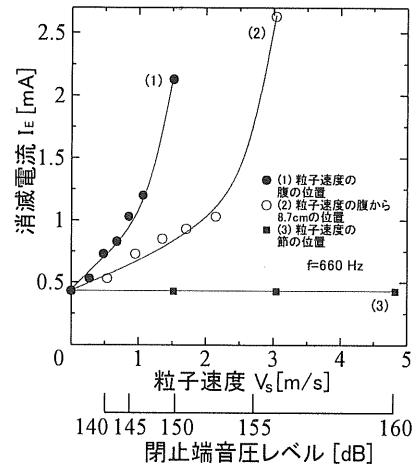
3.4 高気圧グロー放電の V-I 特性への音の影響 (電極の位置を移動させた場合)

周波数 660Hz のままで、音の粒子速度の腹から節の位置まで電極を移動させ、音の粒子速度分布に対する高気圧グロー放電の V-I 特性に及ぼす音の影響を検討した。

電極を音の粒子速度分布の腹の位置にし、高気圧グロー放電を発生させ、電極間電圧 V と電流 I との関係を測定したところ図 5(a)が得られた。図中縦軸は電極間の電圧計の V を示し、横軸は高気圧グロー放電の電流値 I を示している。音波照射なしの(1)曲線は、電源装置の容量のために $I=2.7\text{mA}$ から読めたが、電流値 I を減少させていくと電極間電圧 V が高くなり、その後 V は 3.7kV で、電流 I が 0.4mA で高気圧グロー放電が消滅したことを示した。この(1)曲線から、この V-I 特性は負特性（前期グロー放電）であることが分かる。

次に図中の各曲線(2)～(7)は、音の粒子速度 0.27, 0.48, 0.68, 0.86, 1.07, 1.52m/s の音を照射しながら同様に高気圧グロー放電が消滅するまでを測定した場合である。各曲線の傾向は、音なしの(1)曲線と同様であるが、音の粒子速度を高くすることで、図の上方へ曲線が移動するのが見られた。例えば図(a)中で電流 1mA の場合を見ると、0.86m/s 以上の音を照射すると高気圧グロー放電は見られなくなることを示している。すなわちこの曲線からは比較的電流値が低い状態(曲線の最も左側の測定点)では音により高気圧グロー放電は発生しなくなることも分かる。すなわち、音波を照射することで高気圧グロー放電の消滅する電流の値が大きくなる結果も得られた。

そこで電極を粒子速度分布の腹から節側へ 8.7cm (660Hz の音の波長 λ の 1/6 ずらした) の位置に装置し、同様に V-I 特性を測定した結果、図(b)が得られた。さらに電極を移動させ、腹から 13cm の位置 (粒子速度分布

図 6 高気圧グロー放電の消滅電流特性
(電極の位置を変えた場合)Fig.6 The current which high-pressure glow discharge was disappeared.
(In case of changing the location of electrodes.)

の節) に電極を装置した結果、図(c)が得られた。なお、この節の位置の場合は粒子速度を 4.8m/s まで高くしたが、V-I 特性には影響及ぼすことは見られなかった。

このことから音が放電に及ぼす影響は、音の粒子速度 V_s によることがわかる。

3.5 放電が消滅する電流値

そこで、音の照射により高気圧グロー放電が消滅した時の電流を消滅電流 I_E と呼称し、各音の粒子速度に対して消滅電流を図 5 の結果から求めたところ図 6 が得られた。図中縦軸はグロー放電の消滅電流 I_E を示し、横軸は照射した音の粒子速度 V_s を示している(参考のため音響管閉止端での音圧を併記した)。図中曲線(1)は電極を粒子速度分布の腹の位置に装置した場合(図 5 では(a)に対応)であり、曲線(2)は電極を粒子速度分布の腹から

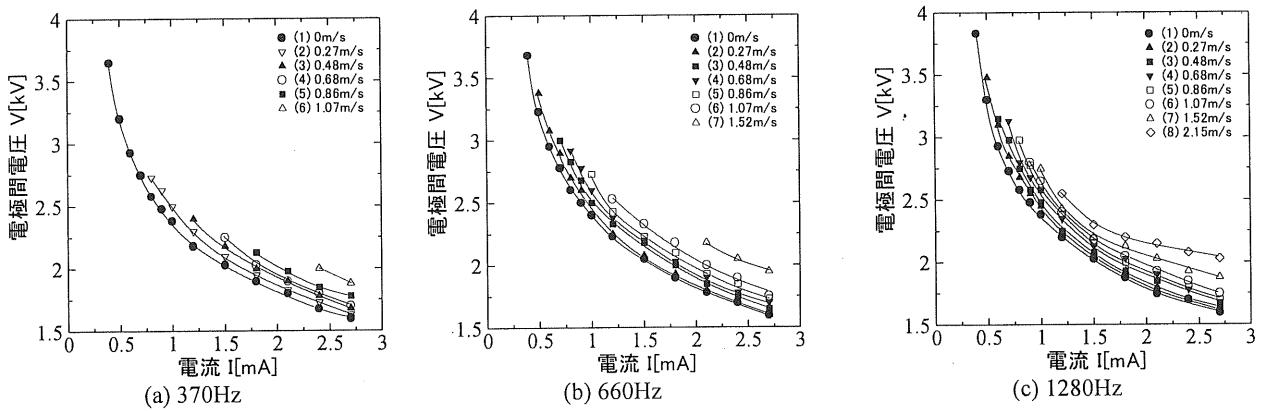


図 7 V-I 特性（音の周波数を変えた場合）
Fig. 7 V-I characteristics. (In case of different frequencies.)

8.7cm (1/6 波長) の位置に装置した場合 (図 5 では(b)), 曲線 (3) は電極を粒子速度分布の節の位置 (図 5 では(c)) に装置した場合である。図中曲線 (1) (2) からは、音を照射することによって消滅電流の値が上昇することが分かり、音の粒子速度の大きいほど、消滅電流も大きくなることが分かった。曲線 (3) の電極が音の粒子速度分布の節の位置では、音波の影響は見られなかった。

すなわちこのことから、高気圧グロー放電は音圧よりは音の粒子速度 V_s の作用を大きく受けることがわかる。

4. 実験結果（音の周波数を変えた場合）

音の周波数の影響を高気圧グロー放電の V-I 特性と放電の発光部の様子から検討した。

4.1 音の周波数を変えた場合の V-I 特性への音の影響

前章では、高気圧グロー放電の V-I 特性が音の粒子速度の作用を腹の位置で大きく受けることを明らかにしたが、この章では音の周波数による影響を検討した。すなわち、前章で用いた 660Hz より低い 370Hz と高い 1280Hz の定在波音場を用い、同様に V-I 特性を求め音の周波数による影響を検討した。すなわち、高気圧グロー放電の V-I 特性を各周波数（いずれの場合も電極は音の粒子速度分布の腹の位置）で測定した。その結果図 7 が得られた。

図(a)は音の周波数を 370Hz とした場合の実験結果である。図中 (1) 曲線は音波照射なしの場合であり、図 5 の場合と同様に、 $I=2.7\text{mA}$ から測定を始め、電源装置を操作して電流値を減少させていく、高気圧グロー放電が消滅した $I_E=0.4\text{mA}$ まで測定を行った。

この音なしの状態から、粒子速度 0.27, 0.48, 0.68, 0.86, 1.07m/s の音を照射しながら高気圧グロー放電が消滅するまでの V-I 特性を測定したところ (2) ~ (6) の各曲

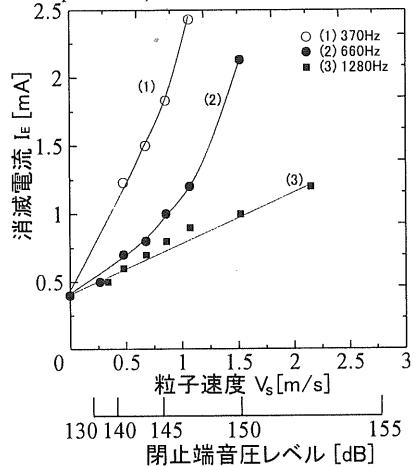


図 8 高気圧グロー放電の消滅電流特性
(音の周波数を変えた場合)
Fig. 8 The current which high-pressure glow discharge was disappeared.
(In case of different frequencies.)

線が得られた。

図(b)は音の周波数が 660Hz の場合であり、図 5(a)と同じである。さらに図(c)は音の周波数が 1280Hz と高くなった場合である。これらの結果より、図(a)~(c)とともに図中の各曲線の傾向は、音なしの場合と同様であるが、各周波数とも音の粒子速度を大きくすることで図の上方へ曲線が移動するのが見られた。また高気圧グロー放電の消滅電流 I_E の値が音の粒子速度の大きさとともに増大した結果も図 5 と同様に得られた。

以上の結果から音の周波数の影響は今回の実験の範囲では、周波数が高いほど¹⁰⁾音の影響が小さくなつた。

4.2 周波数の差異による放電の消滅電流の値

次に図 7 の結果から高気圧グロー放電の消滅電流 I_E の値を音の各周波数の音の粒子速度に対して求めたところ、図 8 が得られた。図中縦軸は高気圧グロー放電の消滅電流を示し、横軸は照射した音の粒子速度を示している。

図中(1)曲線は370Hzの場合であり、(2)曲線は660Hzの場合であり、(3)曲線は1280Hzの場合である。

図より、同一周波数では粒子速度の大きいほど、消滅電流 I_E は大きくなり、周波数の各曲線との比較からは、同一粒子速度でも周波数が高いほど音の影響は小さくなることが分かった。

4.3 高気圧グロー放電の発光部への音の周波数の差異による影響

図3中(a)の高気圧グロー放電の発光部は音の粒子速度を高くすることで、例えば図中(b)の様に太くなることが見られた。そこで、各周波数の場合で発光部が太くなる様子をスチール写真に撮り実寸として測定した。その結果図9を得た。

図(b)は音の粒子速度 1.5m/s の場合である。縦軸に高気圧グロー放電の最も太く発光した部分の長さ(図(a)に示す発光の太い部分の幅)を取り、横軸に周波数を記した。図の曲線は、放電が時間と共にバタツクので、日時をずらして6回測定した平均をプロットした結果である。図から、この周波数も範囲では音の周波数が低いほうが放電の発光部の太さを大きくしていると言える結果となった。

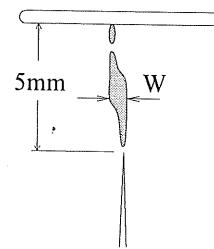
5. まとめ

今までに、音が放電に及ぼす影響について種々報告^{1-6), 10)}してきたが、それらは放電の発光部やストリーマの挙動などの可視による定性的なことが主体であった。そこで今回は、定在波音場中で高気圧グロー放電を発生させ、高気圧グロー放電の諸特性、主にV-I特性に与える音波の影響を検討した。その結果、音の周波数の差異によらず普遍的に音の作用があることを実験的に立証した。実験結果を以下にまとめる。

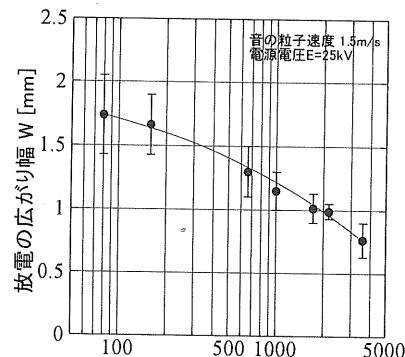
針対平板電極を定在波音場中の粒子速度の腹から節まで移動させ、高気圧グロー放電のV-I特性を測定した結果、例えば電流を一定の条件とすると、音の粒子速度を高めることにより電極間電圧が上昇した。また、ある大きさ以上の音の粒子速度にすることによって高気圧グロー放電を消滅させることもできた。この音の影響は音の粒子速度分布に依存し、音圧には大きな影響を受けない(音圧分布の最大では音の影響はない)結果となった。

また、電極を粒子速度分布の腹の位置に装置した場合、高気圧グロー放電が消滅する電流値については、消滅電流の値が音波によって上昇する傾向が見られ、電極を腹の位置から遠ざけることにより音波の影響が少なくなった。

音の周波数の影響は、周波数が低いほど(波長が長い



(a) 放電の広がり幅の模式図



(b) 放電の広がり幅と周波数の関係

図9 周波数を変えたときの放電の広がり幅

Fig.9 Width of discharge vs. sound frequency.

ほど)音の影響が大きくなる傾向(図9(b))が得られた。

以上から、今回の実験の範囲では、今後の音の物性的な解明や、放電の発生メカニズムの解明に、また工学的応用⁸⁻⁹⁾へも寄与する実験結果が得られたものと思われる。

放電についての研究に、終始ご指導頂いた千葉工業大学伊藤晴雄先生に謝意を表します。

参考文献

- 1) 中根偕夫, 平田尚史, 濱谷浩一郎: 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, 濱谷浩一郎: 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, 濱谷浩一郎: 日本音響学会誌, **46** (1991) 893
- 6) 平田尚史, 中根偕夫, 濱谷浩一郎: 静電気学会講演論文集'86, p.239, 静電気学会(1986)
- 7) 川村雅恭: 電気音響工学概論, p.32, 昭晃堂 (1987)
- 8) 中根偕夫, 平田尚史, 濱谷浩一郎: 日本音響学会講演論文集'90, p.875, 日本音響学会(1990)
- 9) 広村裕子: 放電研究, **156** (1997) 65
- 10) 中根偕夫, 平田尚史: 電気学会誌 A 8/9, (2000) 785