

# 低気圧中の衝撃ストリーマ閃絡

大 重 力  
 費 田 寛 (宮崎大学)

Impulse Streamer-Breakdown in Air at Low Pressures.

By Tsuyoshi OSHIGE  
 Hiroshi NIEDA

The streamer-breakdown of discharge was investigated when positive impulse voltage ( $1 \times 70 \mu\text{s}$ ) was applied to the point-plane gap in air at low pressures from 400mmHg to 4mmHg by using two-photomultiplier technique.

As a result, it was newly found that the streamer-breakdown exists even at 4mmHg.

## 1. 緒 言

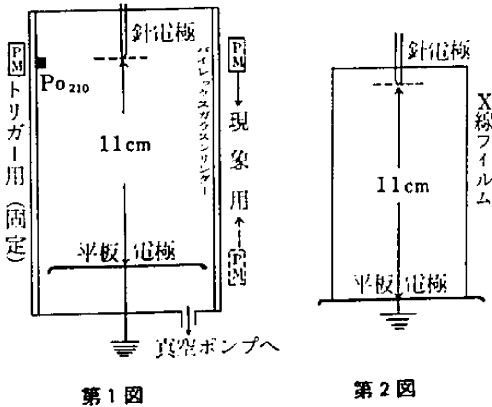
低気圧空気中の針対平板の衝撃閃絡については Allibone, Meek<sup>1)</sup>の両氏が研究を行ったことがあるが、50mmHg 以下において組織立った研究は現在まで行われていない。Allibone, Meek の両氏は閃絡時に高速度カメラのフィルムのハレーションを避けるため、電極間隙にかなりの直列抵抗を附しており、そのため放電の様相もかなり異なっていると考えられる。著者等は針対平板電極において次第に気圧を減じて、リヒテンベルグ図を取り、同時に光電子増倍管（以下P.M）を使用して放電の解析を行ったが、<sup>2)</sup>針対平板電極間の距離は11cmであるにもかかわらず、ストリーマは15mmHgまでリヒテンベルグ図形上に明瞭に観測されることが分かった。更に気圧を減じて10mmHgに達するとリヒテンベルグ図形上にはもはやストリーマの明瞭な痕跡を認めることは出来ず、ストリーマは11cmの電極間隙では一応15mmHg~10mmHgの間に消滅するものと考えられるが、一方P.Mの出力より解析したこの種放電の機構から考察するとき、15mmHgにおけるストリーマ放電に相当するP.Mの出力波形と同一の波形は4mmHgにおいても観測することが出来、しかもその進展速度は約 $10^7 \text{cm/sec}$ 程度と極めて高く、従ってストリーマ様放電は4mmHgにおいても存在するが、ストリーマは拡散によって極めて大きくなり、一方励発粒子密度も低

くなるので、X線フィルム上にストリーマを感光させることができないものと考えられ、少なくとも4mmHg程度においても、閃絡はストリーマに始まるものと考えられる。

本論文においてはリヒテンベルグ図形上に明瞭にストリーマの観測される15mmHg、ストリーマの観測されない10mmHg並びに4mmHgにおいて、リヒテンベルグ図形と、P.Mを使用して実験した結果とを比較検討し、間隙長11cm、4mmHgにおいても、閃絡はストリーマ放電によって始まることを述べようとするものである。

## 2. 実験の方法

第1図に示すように針（直径1mm）対平板電極はバイレックス・ガラス・シリンダー内に挿入し、真空ポンプによって排気する。リヒテンベルグ図形を取るときは、第2図<sup>3)</sup>のようにX線フィルムを挿入し、所定の気圧まで排気する。しかる後に $1 \times 70 \mu\text{s}$ の衝撃電圧を印加し、フィルムのみ取出して、それを現像してリヒテンベルグ図形を得る。P.Mは第1図のように2個のP.Mを配置し、トリガー用のP.Mは常に針端に固定し、他の現象観測用P.Mは針対平板電極間の間隙中を1cm、又は2cm置きに現象観測を行ないながら移動して行く。<sup>4)</sup>尚P.Mのスリット巾は約1mmである。直流コロナの場合、印加電圧に振動は重畳しないので、P.Mの出力には何ら雑音は入らないが、<sup>4)</sup>このような回路に衝撃電圧を



第1図

第2図

印加した場合には、波頭部分の振動（旧式コンデンサを使用したため、波頭部分の振動を完全に抑制することは出来なかった。）の影響で、P.M.の出力は極めて雑音の多いものとなる。<sup>5)</sup> この雑音を完全に抑制することは困難であるが、同軸ケーブル（125Ω）を遮蔽網で更に遮蔽して2重シールドケーブルとしP.M.の外箱も2重遮蔽して現象の観測、解析には支障のない波形を一応得ることが出来た。尚P.M.の電源は300V電池4個を直列にしたものを使用し、整流回路による高圧電源は使用しなかった。P.M.の出力は通常のμsシンクロ（545A型テクトロ）に導き、ポラロイドカメラをシンクロに装置しASA10,000のフィルムでその波形を観測撮影した。このフィルムを使用すればシンクロを0.2μs/divで掃引しても明瞭なP.M.出力波形を撮影出来る。

尚リヒテンベルグ図形の撮影及びP.M.による観測は、いずれの場合も第1図に示すように針電極の直下にPo<sub>210</sub>を置き、針電極周辺を照射しなければならない。低気圧中では適当な照射がなければ極めて高い電圧を印加しないと放電は進展せず、且現象にバラツキが多い。但しこの照射も気圧が350mmHgを越えると照射の効果はほとんどなくなる。<sup>3)</sup>

### 3. 実験の結果

第3図は第2図のようにX線フィルムを挿入しそれぞれ15mmHg、10mmHg及び4mmHgに排気した後、これに衝撃電圧を印加した場合のリヒテンベルグ図形である。第3図(a)は低い電圧

では分枝せず1本のストリーマが相手電極に到達しているのみであるが、更に電圧を上げると同図(b)のように分枝し、明瞭にストリーマであるとみなされる。第3図(c)は針端及び平板電極側にグロー様放電が見られるのみで、間隙中にストリーマ放電の痕跡は認め得ない。第3図(d)は一見グロー放電のように非常に拡散し、放電形式は他のリヒテンベルグ図形と異なるように見える。但しこの場合はX/Pが同図(c)に比較して2倍以上の値に達しているため、針端電極及び平板電極のグローはかなり進展している。以上代表的四つのリヒテンベルグ図形から、ストリーマは間隙11cmの針対平板電極においては15~10mmHgの気圧において図形上から消滅することがわかる。

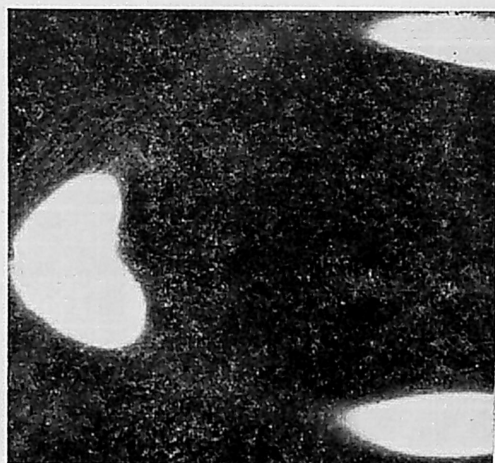
すでにリヒテンベルグ図形上の図形と、P.M.出力との対応は一応ついているので、<sup>2)</sup> 図形上にストリーマの見られる領域と見られない領域について、P.M.によって実験を繰返して見る。針対平板電極間隙で、現象用P.M.を針端より1cmあるいは2cm置きに位置を変え、衝撃電圧を繰返し印加して得たP.M.出力のオシログラフを第4図に示す。同図(a)は15mmHgの気圧に2.9kVの電圧を、同図(b)は10mmHgの気圧において2.6kVの電圧を、最後に同図(c)は4mmHgにおいて2.1kVの電圧を印加したときのオシログラフを示すものである。15mmHgにおいては既にリヒテンベルグ図形上に見たようにストリーマ放電であり、オシログラフ上に最初に現われる継続時間の比較的短いパルスがストリーマに対応するものと考えられる。現象用P.M.の位置を針端から次第にずらして行けば、オシログラフ上には次第に時間的に遅れた位置にP.M.の出力パルスは発生するようになり、これよりストリーマの進展を解析することが出来る。このストリーマが陰極に到達すると、極めて短い時間内（数10ns以下）に陽極周辺にsecondaryストリーマ（又はグロー）が発生する。一方陰極からは極めて徐々にnegativeグローが間隙中を進展するのがわかる。同図には又、それぞれ掃引時間を遅くして、secondaryストリーマの全継続時間も同時に示してある。

以上の現象はリヒテンベルグ図形上にストリーマが見られない 10mmHg 及び 4 mmHg においても、P.M の出力波形に際立った変化はなく、いずれの場合もストリーマに相当する P.M 出力

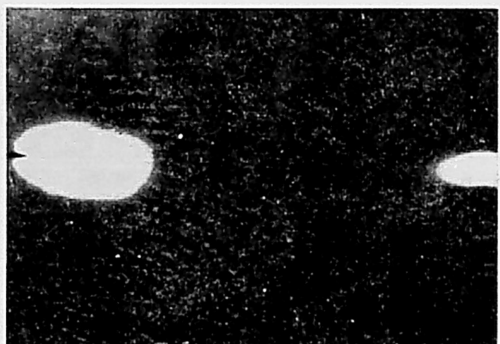
波形がオシログラフ上に見られ、この first discharge は極めて高い速度で間隙中を進展し、以後の放電もほとんど同一形式を取る。



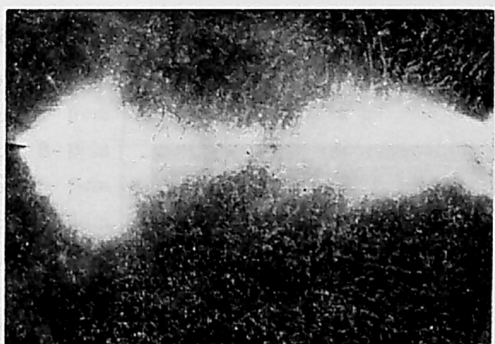
(a) 15mmHg, 印加電圧2.6kV



(b) 15mmHg, 印加電圧3.0kV



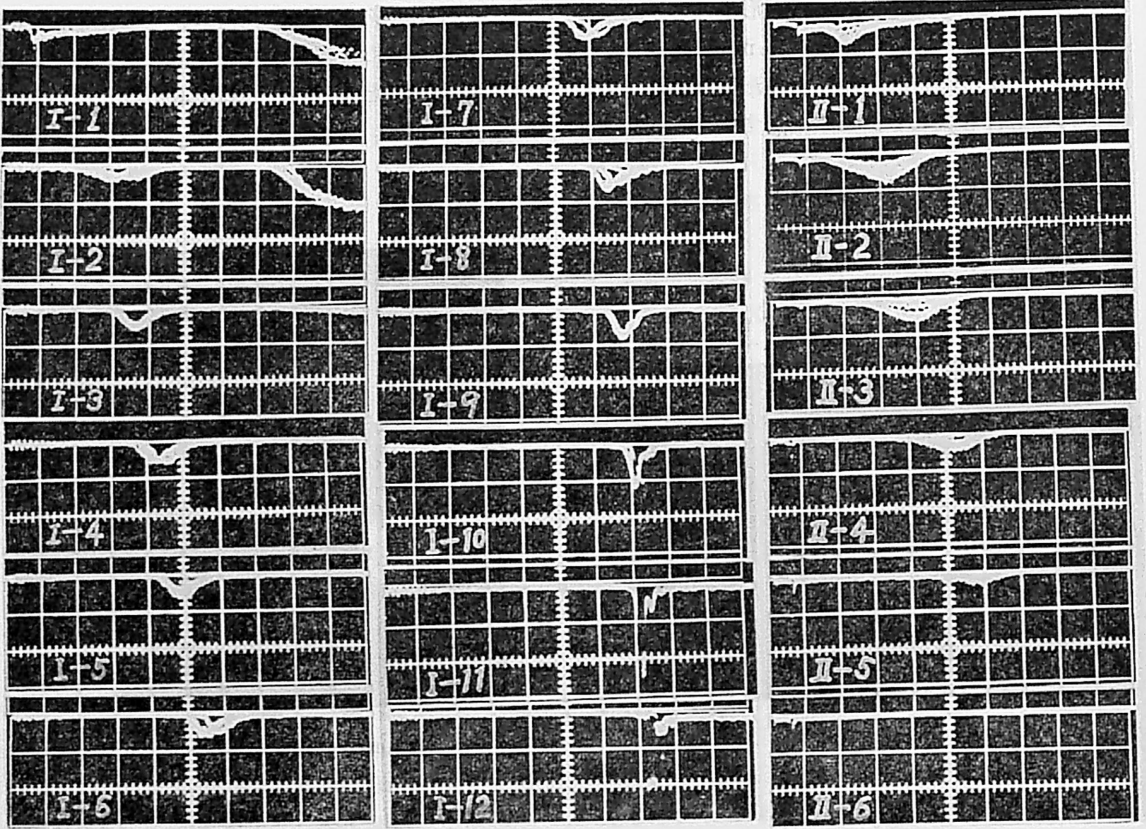
(c) 10mmHg, 印加電圧2.6kV



(d) 4mmHg, 印加電圧2.4kV

間隙長 11cm, 印加電圧波形  $1 \times 70 \mu\text{s}$

第 3 図



I 0.2 $\mu$ s/div, シンクロゲイン=1, first discharge

- |            |           |
|------------|-----------|
| I-1 Point, | I-7 6cm   |
| I-2 1cm,   | I-8 7cm   |
| I-3 2cm,   | I-9 8cm   |
| I-4 3cm,   | I-10 9cm  |
| I-5 4cm,   | I-11 10cm |
| I-6 5cm,   | I-12 11cm |

} 針電極と観測点との間隔

II 2 $\mu$ s/div, シンクロゲイン=0.5, negative グロー

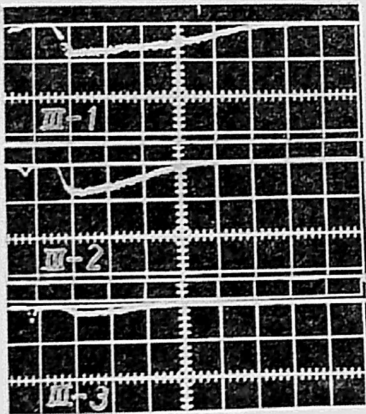
- |             |          |
|-------------|----------|
| II-1 Plate, | II-4 3cm |
| II-2 1cm,   | II-5 4cm |
| II-3 2cm,   | II-6 5cm |

} 平板電極と観測点との間隔

III 1 $\mu$ s/div, シンクロゲイン=1, Secondary discharge

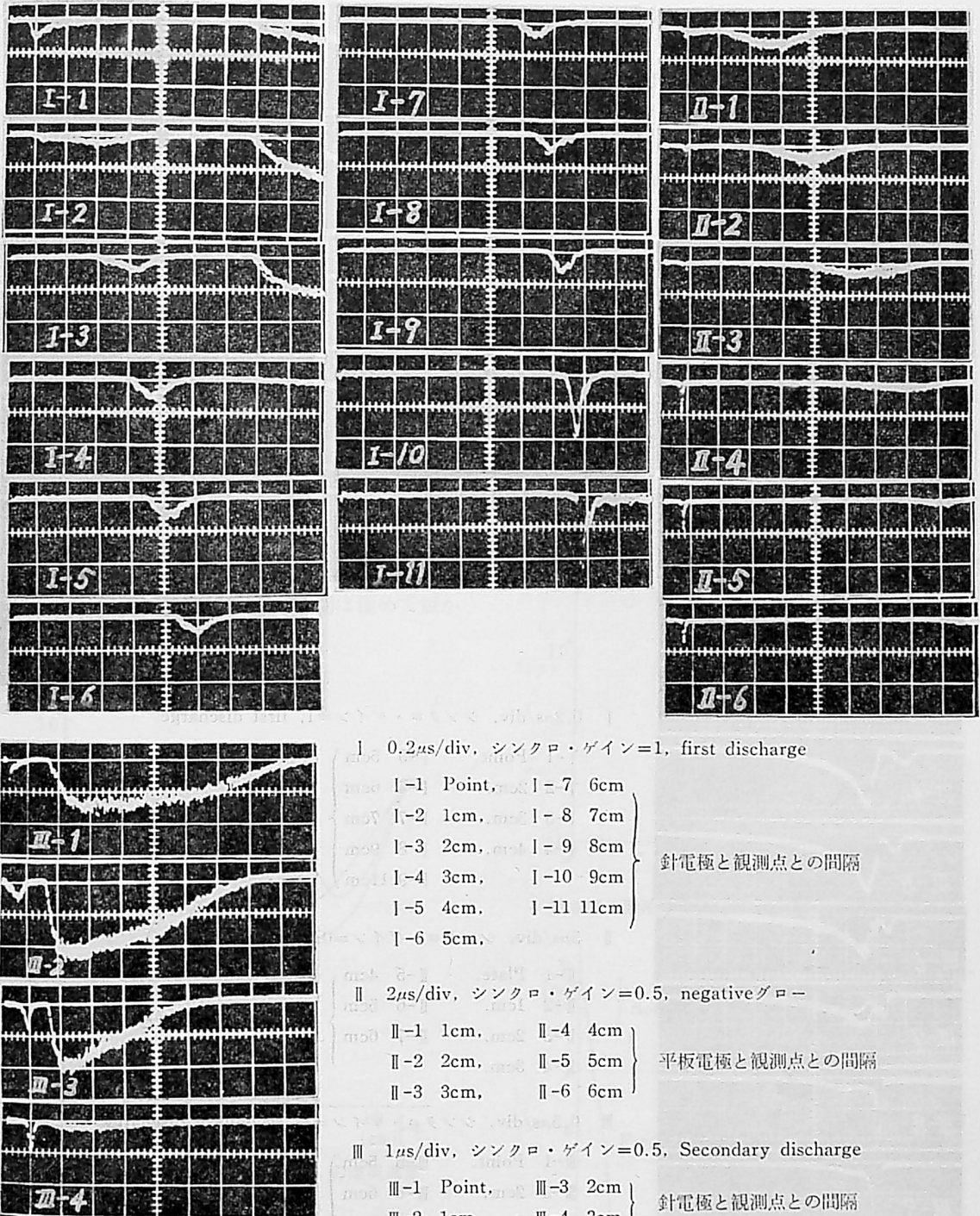
- |              |           |
|--------------|-----------|
| III-1 Point, | III-3 2cm |
| III-2 1cm,   |           |

} 針電極と観測点との間隔



15mmHg, 印加電圧2.9kV, 波形1 $\times$ 70 $\mu$ s, 間隔長11cm

第 4 図 (a)



I 0.2 $\mu$ s/div, シンクロ・ゲイン=1, first discharge

- |            |           |
|------------|-----------|
| I-1 Point, | I-7 6cm   |
| I-2 1cm,   | I-8 7cm   |
| I-3 2cm,   | I-9 8cm   |
| I-4 3cm,   | I-10 9cm  |
| I-5 4cm,   | I-11 11cm |
| I-6 5cm,   |           |

針電極と視測点との間隔

II 2 $\mu$ s/div, シンクロ・ゲイン=0.5, negative グロー

- |           |          |
|-----------|----------|
| II-1 1cm, | II-4 4cm |
| II-2 2cm, | II-5 5cm |
| II-3 3cm, | II-6 6cm |

平板電極と視測点との間隔

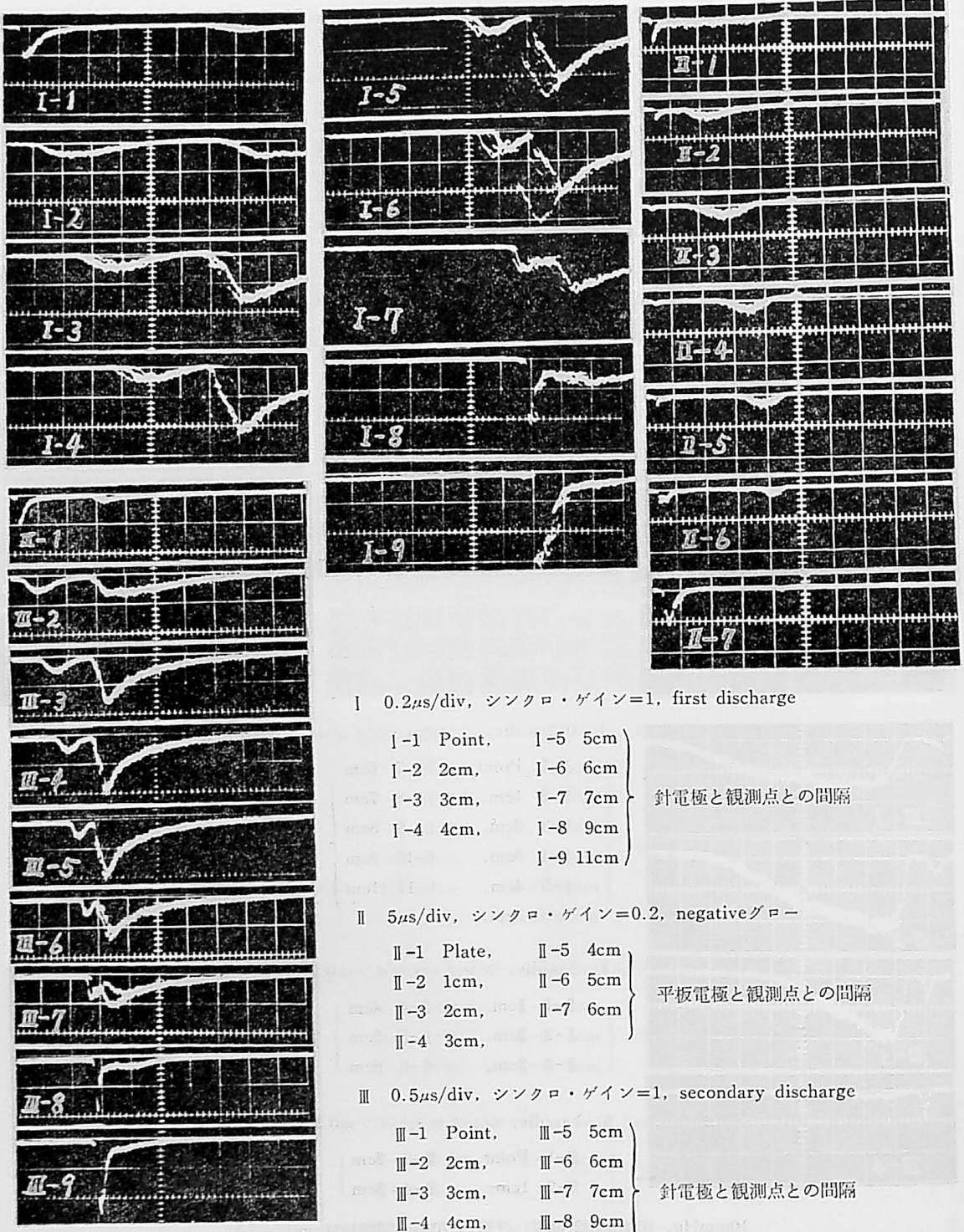
III 1 $\mu$ s/div, シンクロ・ゲイン=0.5, Secondary discharge

- |              |           |
|--------------|-----------|
| III-1 Point, | III-3 2cm |
| III-2 1cm,   | III-4 3cm |

針電極と視測点との間隔

10mmHg, 印加電圧2.6kV, 波形1 $\times$ 70 $\mu$ s, 間隔長11cm

第 4 図 (b)



I 0.2 $\mu$ s/div, シンクロ・ゲイン=1, first discharge

- |            |          |
|------------|----------|
| I-1 Point, | I-5 5cm  |
| I-2 2cm,   | I-6 6cm  |
| I-3 3cm,   | I-7 7cm  |
| I-4 4cm,   | I-8 9cm  |
|            | I-9 11cm |

針電極と観測点との間隔

II 5 $\mu$ s/div, シンクロ・ゲイン=0.2, negative グロー

- |             |          |
|-------------|----------|
| II-1 Plate, | II-5 4cm |
| II-2 1cm,   | II-6 5cm |
| II-3 2cm,   | II-7 6cm |
| II-4 3cm,   |          |

平板電極と観測点との間隔

III 0.5 $\mu$ s/div, シンクロ・ゲイン=1, secondary discharge

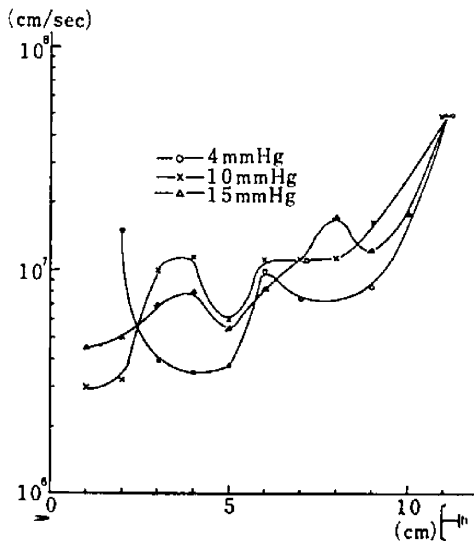
- |              |            |
|--------------|------------|
| III-1 Point, | III-5 5cm  |
| III-2 2cm,   | III-6 6cm  |
| III-3 3cm,   | III-7 7cm  |
| III-4 4cm,   | III-8 9cm  |
|              | III-9 11cm |

針電極と観測点との間隔

4mmHg, 印加電圧2.1kV, 波形1 $\times$ 70 $\mu$ s, 間隙長11cm

第 4 図 (c)

第5図は間隙中の first discharge の進展速度の変化を示すものである。かなりの過電圧が加えられた 4 mmHg の場合を除き、他の場合は針端附近は低い速度で進展し、いずれも間隙中を定速度で進展せず、複雑な速度変化を行ないながら平板電極に到達するが、平板電極に近づくに従って first discharge の進展速度は急速に上昇し、特に平板電極より 2 cm 内外においては、その進展速度は  $5 \times 10^7$  cm/sec にも達する。これらの first discharge は間隙中を平均  $0.7 \times 10^7$  cm/sec の速度で進展し、その進展速度は大気中のストリーマ進展速度  $10^8$  cm/sec に比較すればかなり遅いが、ストリーマが分枝しストリーマが明瞭にリヒテンベルグ図形上に見られる 100mmHg 以下におけるストリーマの進展速度  $10^7$  cm/sec に比較してほとんど同一程度である。更にストリーマ領域（ストリーマが分枝し、リヒテンベルグ図形上にその痕跡が明瞭に見られる場合）におけると同様、first discharge の継続時間は極めて短い。

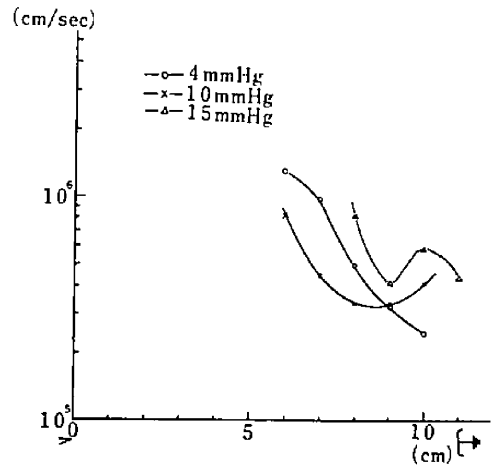


第5図 間隙中の First discharge の進展速度

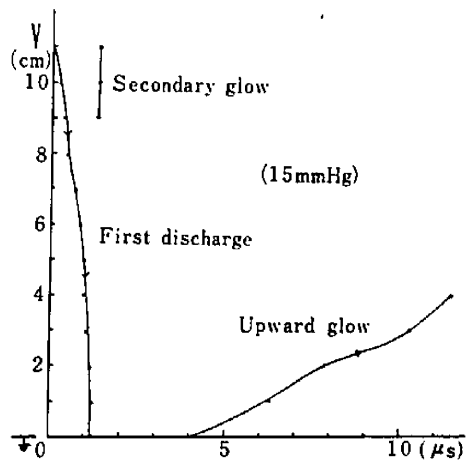
第6図は平板側に発生した negative グローの進展速度を示すもので、いずれの場合も大体平板電極側において比較的遅く、間隙中を進展するに従ってその進展速度は大きくなる。この傾向はストリーマが明瞭にリヒテンベルグ図形上に見られ

る 50mmHg~15mmHg においても全く同様にみられる。2)

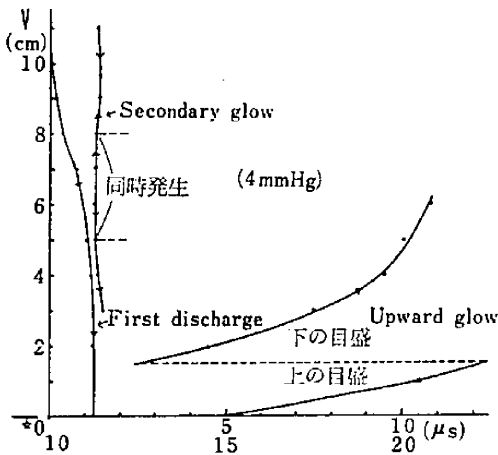
第7図及び第8図は放電の進展の時間的変化をストリーマのリヒテンベルグ図形上に明瞭に見られる 15mmHg と、4 mmHg とについて示す。両図において放電の進展の模様はほとんど同一であるが、ただ secondary グローの発生の位置のみが異なっている。この secondary グローは間隙あるいは針端附近のかなり長い領域にわたってほとんど同時に発生するが、この機構については明らかでない。なお一般に、secondary グローや negative グローの継続時間は first discharge と比較して桁はずれに長いので、それらはリヒテンベルグ図形上に強く感光する。



第6図 間隙中の negative glow の進展速度



第7図 間隙中の放電進展の時間的変化



第8図 間隙中の放電進展の時間的变化

#### 4. 考 察

Loeb, Westberg 及び Huang の三氏は Ar 中の閃絡現象の研究中, Ar を純粋化出来ず, Ar 中に光電離を行い得る微量の不純物が存在するときは, 閃絡は filamentary ストリーマに始まり, 50mmHg までストリーマ放電であることを確認し, その進展速度は  $1 \times 10^8$  cm/sec 程度に達し, 一方 Ar を極めて純粋化した場合には, filamentary ストリーマは生ぜず放電は比較的収縮した円筒状のタウンゼント放電とみなされることを報告している。<sup>6)</sup> この filamentary ストリーマの場合の P.M 出力の継続時間は極端に短かく, 一方純粋気体中のタウンゼント放電においては, P.M 出力は極めて徐々に上昇し, その継続時間は極端に長く, その波高値までの立上り時間も  $3 \mu\text{s}$  以上を必要とする。このようにストリーマ放電とタウンゼント放電の間には P.M 出力によって観察するときには明瞭な差が現われる。

この実験においては, first discharge の P.M 出力の継続時間の極めて短かいこと, 間隙中の任意の点において first discharge と secondary グローとの間に充分な時間間隔のあること, first discharge の進展速度は約  $10^7$  cm/sec 程度のストリーマがリヒテンベルグ図形上に明瞭に見られる低気圧中の進展速度と大差のないこと, またこの first discharge は平板電極に近づくに従ってその進展速度は急激に上昇することから, このよ

うな first discharge はストリーマであると考えることが出来る。ストリーマが平板電極に近づくに従って急激に上昇する傾向は Kritzinger<sup>7)</sup> の研究にも見られ, ストリーマが平板電極に近づくに従って, ストリーマ前方の電界強度が強くなること及びストリーマからの光子によって陰極面から多量の電子が発生すること<sup>8)</sup> により, 更にこれらの電子によって平板上に弱電離が発生しているならば<sup>9)</sup> 弱電離中のストリーマの進展速度は極めて早くなるため, <sup>9)</sup> ストリーマは平板電極に近づくに従って急上昇するものと考えられる。

#### 5. 結 語

間隙 11cm の針対平板電極のリヒテンベルグ図形上にストリーマの明瞭に見える気圧からストリーマを見ることの出来ない気圧 4 mmHg まで, リヒテンベルグ図形を取りながら P.M によって放電の解析を行い, Loeb 等の Ar 中のタウンゼント放電と比較して, この電極系において少なくとも 4 mmHg までは, 閃絡ストリーマによって始まることを明らかにした。

#### 文 献

- 1) Allibone, Meek : Proc. Roy. Soc. A169, 246 (1938)
- 2) T. Oshige : The 19th Annual Gaseous Electronics Conference Paper (Georgia Institute of Technology)
- 3) 前田, 賛田, 大重 : 電気四学会九州支部連大論文集 (昭41)
- 4) Hudson, Loeb : phys. Rev. 123, 32 (1961)
- 5) Dawson : Zeitschrift für Physik 183, 172 (1965)
- 6) Loeb, Westberg, Huang : Phys. Rev. 123, 43 (1961)
- 7) Kritzinger : Proceedings of the 6th International Conference on Ionization Phenomena in Gases 2, 295-299 (Paris) (1963)
- 8) Wagner : Zeitschrift für Physik 189, 465 (1966)
- 9) Winn : Private communication to authors (will be published in J. A. Physics).