空気中正針コロナとその前駆パルス

名古屋工業大学 細川 辰三
名古屋工業大学 三好 保憲

1. ま え が き

空気中正針不平等電界ギャップにおける前駆コロナパルスの特性については、すでに多くの研究者によって研究されている。中でも Amin 氏⁽¹⁾、生田氏ら⁽²⁾は直流電圧印加のもとで前駆コロナパルスの波形解析を行ない、Bandel 氏⁽⁴⁾は前駆コロナパルスから定常コロナ放電への移行特性を明らかにした。また筆者らも、これら前駆コロナパルスの特性をさらに詳細に調べた結果、一次、二次バーストパルスおよびストリーマコロナパルスの形成に関する重要な結果を得、その一部をすでに報告した。⁽⁵⁾⁽⁶⁾

本報告は、それらの結果をまとめたもので、空気中正針前駆コロナパルスとしての一次、二次バーストパルスおよびストリーマコロナパルスの波形解析を行ない、その波形が初期電子供給用陰極照射源、気体の種類などによっていかに変わるかを述べ、空気中正針前駆コロナパルスの形成機構の解析を試みた。さらに、前駆コロナパルスから定常コロナへの転移特性も述べている。

2. 実験装置および実験方法

実験装置は第1図のようである。光パルス検出回路は EMI 製 6255 B 光電子増倍管 P を使用し、その時定数はほぼ 1×10^{-8} s、電流パルス検出回路の時定数はほぼ 2.0×10^{-7} s で、光、電流両パルスは岩崎通信機製デュアルビームシンクロスコープ 5305 B (周波数帯域幅 30 MHz) で同時観測した。しかし、コロナパルスの観測においては、前報⁽⁷⁾でも述べたように、使用するシンクロスコープの周波数帯域幅あるいはそ

第1図 実験装置

Fig. 1. Experimental apparatus.

の増幅特性などによって波形が異なり、その信頼性においてはなお検討の余地はあるが、コロナ形成の機構的説明には本実験結果も十分有用な資料となるものと信ずる。

針先電極は黄銅製半球頭部円柱で、その先端半径 r をもって曲率半径とし、平板電極は半径 7.5 cm の黄銅製ロゴウスキー形電極を用いた。また、これらの装置は1辺の長さ 85 cm の電磁しゃへい箱に納められ、さらにコロナパルスの波高値の減少を防ぐために放電抑制用外部抵抗はそう入されていない。

陰極照射源 I としては、前報⁽⁷⁾同様 ^{90}Sr - ^{90}Y β 線源 (以後 β 線と記す) および水銀灯よりの紫外線を用い、照射の強さは照射距離を変えることによって適当な強さに調節した。

また、窒素 (以後 N_2 と記す) 中での実験は、電極装置および β 線を直径 40 cm の大形デシケータ内に入れ、これを 2×10^{-3} Torr に排気した後、高千穂化学製純 N_2 (純度 99.995%) を所定の圧力に充てんした。この場合、光パルスはデシケータに設けられた石

Characteristics of Positive Corona and Its Pre-Corona Pulse in Air. By T. HOSOKAWA, Member & Y. MIYOSHI, Member (Department of Electrical Engineering, Nagoya Institute of Technology.)

細川辰三: 正員, 名古屋工業大学電気工学教室
三好保憲: 正員, 名古屋工業大学電気工学教室

英窓を通して光電子増倍管で検出した。

なお、本報告では、特にことわらない限り実験は室内空気中で行なっている。

3. 実験結果

〈3・1〉 前駆バーストパルス 空気中正針コロナで最初に観測されるパルスは前駆バーストパルス (pre-onset Burst Pulse, 以後 BP と記す) と呼ばれ、この BP はさらに一次バーストパルス (primary Burst Pulse, 以後 pBP と記す) とそれに後続の二次バーストパルス (secondary Burst Pulse, 以後 sBP と記す) に分けられる。⁽¹⁾

第2図～第5図は $r=0.2\text{cm}$ 、ギャップの長さ $l=3.0\text{cm}$ のギャップで β 線照射のもとで観測された BP のオシログラムで、図中上が電流波形、下が光波形を示している。第2図(a)は最も初期に観測されたpBPで、これらのパルスではそのパルス間隔は比較的最長後続パルスを伴わない単一パルスを形成していた。しかし、これらのパルスでもよく観察すると、光波形が

第2図 一次バーストパルスとその後続なだれパルス

Fig. 2. Primary burst pulse and its successor avalanche pulses.

ら明らかのように1個のpBPはさらに複数個の小さなパルスが重畳したものであることがわかる。他方、電流波形ではこのような小パルスの観測は困難であったが、これは電流波形検出回路の時定数が光波形検出回路の時定数に比べて大きかったことに基因しているものと考えられる。また、光波形にしても後でも述べるように、このような小さなパルスの単独な波形の観測は困難で、本実験装置で観測可能なpBPは、すでに見かけ上3～4個以上の小パルスからなりたち、しかも、1個のpBPに含まれる小パルスの数は同じ印加電圧でも不規則であった。なお、図中 V_{b1} はpBPが観測され始めた電圧を示している。

印加電圧をわずかに上昇すると、pBPの波高値(同じ印加電圧でも種々な値のパルスが観測されるので、その最大値、以後単に最大値と記す)および出現ひん度が增大し、それに伴って第2図(b), (c)にみられるように光波形でpBP Aの波尾部に小さなパルス $a_1, a_2, a_3, \dots$ が観測され始めた。この小パルスは後でも詳述するようにsBPの形成に重要な役割を演ずるパルスで、その出現は印加電圧の上昇とともに活発となった。さらに、印加電圧を上昇すると、本実験ではpBPが観測され始めた電圧より約250 V高い電圧でpBPに後続してsBPが観測され始めた。第3図はそのオシログラムで、このsBP $B_1, B_2, \dots$ はいずれの実験条件においても先行パルスから数 μs 以内の時間間隔(先行パルスがpBPの場合には十数 μs 以内)で観測され、その波高値はpBPの波高値の数分の一以下であった。また、このsBPはpBPと同様多くの小パルスが重畳したもので、種々の波形あるいは波高値のパルスが観測されたが、パルス間隔と波高値には幾分相関関係がみられ、一般には先行パルスと後続パルスの時間間隔が大きいかほど後続パルスの波高値は大きく現われる傾向を示した。なお、(a)図はpBPのみの場合、(b), (c)図はpBPにsBPが後続した場合を示している。

さらに重要なことは、sBPが観測されるためには第4図(掃引時間が速めてある)に示したように、その先行パルスとのパルス間隔内に断続的ではあるが多くの小さな光パルスが観測されたことである。また、この小パルスは先行パルスの出現から十数 μs 後まで観測され、後続パルスの出現がこの時間間隔以上、すなわち小パルスが消滅した後に観測されたパルスは、一般に波高値が大でpBPを形成していた。

さらに印加電圧を上昇すると、第5図に示したようにsBPの出現はさらに活発となるとともに波高値を增大し、他方pBPの出現ひん度および波高値(最大

第 3 図 一次および二次バーストパルス
Fig. 3. Primary and secondary burst pulses.

第 4 図 二次バーストパルスとその二次前駆パルス
Fig. 4. Secondary burst pulses and its pre-secondary burst pulses.

値)は減少して、ついには pBP と sBP の区別が判然としないう連続パルス状の膜状コロナに移行した。この膜状コロナは肉眼でも観察でき、一般には定常コロナ (steady Burst Pulse Corona, 以後膜状コロナと記す)と呼ばれ、外見上は直流特性の観を呈しているが、実際には非常に多くの連続パルスからなりたっている。⁽⁴⁾ また、膜状コロナに移行すると、コロナ平均電流はいずれのギャップにおいても $0.2\sim 0.8\mu\text{A}$ に達した。さらに、印加電圧を上昇してコロナ平均電流 I_c が数 μA を超過すると、第 6 図にその典型的なオ

第 5 図 規則性を帯びたバーストパルス
Fig. 5. Regular burst pulses.

第 6 図 定常コロナ領域で観測された振動現象
Fig. 6. Pulsating phenomena observed in steady corona region.

シログラムを示したように電流および光成分に直流分が現われ、連続パルスは直流分に重畳した脈動特性と変わった。⁽⁴⁾⁽⁸⁾ また、この脈動特性は波形、周期ともに規則的で、しかもコロナから火花への転移に重要な役割を演ずるもので、脈動特性の研究は火花形成の問題として興味ある課題であるが、その詳細については別稿に譲る。

〈3.2〉 前駆ストリーマコロナパルス ギャップ条件によっては、たとえば $l \geq 1.5\text{ cm}$ で $l/r=10\sim 20$ のギャップで空気中に水分、炭酸ガスなどの不純物がある程度含まれている場合、あるいは陰極からの初期電子 (本報告では種電子と記す) 供給用外部照射が弱い場合などには、sBP が観測される放電域で前駆ストリーマコロナ (pre-onset Streamer Corona, 以後 SP と記す) が観測された。⁽⁴⁾⁽⁹⁾ この SP は立上り、減衰が非常に速いパルスで、⁽²⁾⁽³⁾⁽¹⁰⁾ その波高値も同じ測定条件で BP のほぼ数千倍にも達していた。また、SP は BP の後続として現われるものではなく、SP が観測されるためには第 7 図にその一例 ($r=0.3\text{ cm}$, $l=3\text{ cm}$) を示したようにその先行パルスとの間に数 $10\mu\text{s}$ 以上の比較的長い時間間隔 (ギャップ条件によって幾分変わり、たとえば図の $r=0.3\text{ cm}$, $l=3.0\text{ cm}$ のギャップでは $50\mu\text{s}$ 以上、また l を増大するとこの時間間隔も幾分増大する傾向を示した) を必要とし、さらに

第 7 図 バーストパルスとストリーマコロナパルス
Fig. 7. Burst pulses and streamer corona pulse.

重要なことは、その時間間隔内に小さな光パルスが観測されないことであつた。これは、SP の種電子は先行の BP 形成に基因して発生した光電子ではなく、外的供給の偶存電子であることを示しているものと考えられる。(オシログラムでは、BP も観測されるよう光、電流波形とも検出感度が高めてあり、したがって SP の波形は飽和して物理的意義をもたない) なお、この放電域では印加電圧を上昇すると sBP の出現が活発となり、SP の出現ひん度が減少して膜状コロナへ移行した。

〈3・3〉 陰極照射源による影響 これまで述べた結果は、種電子供給用照射源として β 線を用い照射の強さが一定のものであつたが、照射源および照射の強さによる BP および SP の出現特性を調べるために β 線の照射の強さを変えた場合、あるいは紫外線照射の場合についても検討を加えた。

β 線照射のもとで、照射の強さを弱めると pBP の観測ひん度は減少し、またその観測され始める電圧は幾分高くなる傾向を示した。特に非照射のもとでは、第 8 図にその一例 ($r=0.2\text{cm}$, $l=3\text{cm}$) を示したように、一般に pBP のみが単独には観測され難く (1 分間に数回以下で雑音と区別できなかった)、pBP が観測され始めるとそれに後続して sBP も観測された。しかも、その電圧は β 線照射のもとで sBP が観測され始めた電圧よりわずかに高く、pBP の波高値 (最大値) も β 線照射のもとで観測された pBP の波高値 (最大値) より大であつた。これは、外部照射によって種電子が供給されないと (実際には宇宙線などによって自然に供給されるが、そのひん度は僅少)、針先付近の電界が電子なだれの成長に十分な値に達しても種電子の不足から pBP の発生数は雑音と区別できないほど僅少であるが、さらに印加電圧を上昇すれば、このような状態では pBP が発生すれば必然的に sBP も伴い、単独な pBP の観測が困難であつた理由もこのためと考えられる。なお、非照射のもとでも sBP が観測され始めると、それ以後のコロナの特性は β 線照射

第 8 図 非照射のもとで観測されたバーストパルス
Fig. 8. Primary and secondary burst pulses observed under no irradiation.

第 9 図 照射の強さによるストリーマコロナパルスの出現特性

Fig. 9. Influence of the intensity of irradiation on streamer corona pulse.

のもとでの特性と変わらず、両者に顕著な差異は認められなかった。

また、供試のギャップ範囲内 ($l=1\sim 10\text{cm}$) で SP が観測されるようなギャップでは、SP の出現ひん度は照射の強さにも関係した。⁽⁹⁾ 第 9 図は β 線照射のもとでの一例 ($r=0.3\text{cm}$, $l=3\text{cm}$, 第 7 図と同じギャップ) を示したもので、(a) 図は照射が弱い場合、(b) 図は強い場合を示している。一般に非照射のもとでの SP の出現は、種電子の不足から断続的でひん度も小であつたが、照射すると (a) 図のように出現ひん度は増大した。また、照射を強めると出現ひん度も増大したが、照射の強さが最適量を超過すると出現ひん度はかえって減少し始め、ついには (b) 図に示したように BP の出現が活発となって、SP は観測されなくなった。なお、非照射のもとでもギャップの長さを増してゆくと SP の出現ひん度は幾分増大する傾向を示し

た。

陰極照射源として紫外線を用いてもコロナパルスの特性は β 線照射の場合と変わらず、両者に顕著な差異は認められなかった。

〈3・4〉 窒素中における前駆コロナパルス 空気中正針前駆コロナパルスとしての pBP および sBP の形成機構が γ 作用(陰極からの二次電子放出作用)によるか、 β_p 作用(光子による気体の電離作用)によるかを確かめるために、 β_p 作用がきわめて生じ難い N_2 中⁽¹¹⁾(純粋気体中では β_p 作用がきわめて困難とされている)における前駆パルスの特性を調べた。

第 10 図は N_2 中 $r=0.2\text{ cm}$, $l=2\text{ cm}$, $p=760\text{ Torr}$ で火花電圧よりわずかに低い電圧で観測されたパルスのオシログラムで、(b)図は掃引時間を速めて観測したものである。[(a)図と(b)図では波形の見やすさから電流、光両波形の配置が変わっている。また V_1 は前駆パルスが観測され始めた電圧を示している)しかしこの実験では定常コロナは定在しなかった。また、この電極配置では 350 Torr 以下の気圧で定常コロナが定在し、そのような場合には出現ひん度は僅少であったが、定常コロナへ移行前に二次パルスが観測された。なお比較のために、同じ実験装置を用い空气中で観測されたオシログラムを第 11 図に示した。

図から明らかなように、760 Torr の N_2 中では空气中に比べてパルスが観測され始める電圧は高かったがその波高値は小さく、しかも sBP のようなパルスは観測されなかった。さらに重要なことは、先行パルスと後続パルス間に空气中で観測されたような小さな光パルスも観測されなかったことである。

第 10 図 窒素中で観測された前駆パルス

Fig. 10. Pre-avalanche pulses observed in nitrogen.

第 11 図 空气中で観測された一次および二次バーストパルスと二次前駆パルス

Fig. 11. Primary, secondary and pre-secondary burst pulses observed in air.

4. 考 察

〈4・1〉 空気中正針不平等電界ギャップにおける二次機構 空気中正針不平等電界ギャップにおける電子なだれ(以後なだれと記す)の二次機構としては、針先付近の高電界部で先行なだれの成長に伴って放射された光子による β_p 作用と、光子あるいは正イオンによる陰極からの γ 作用が考えられる。

しかし、 β_p 作用がきわめて困難とされている N_2 ⁽¹¹⁾ 中においては、空气中における sBP のような後続パルスおよび先行パルスと後続パルス間になだれに基因した小さな光パルスが観測されなかったことから、空气中における二次機構としては Amin 氏⁽¹⁾の説も考慮して β_p 作用を考えるのが妥当と思われるので、本報告においてはなだれの形成過程を α 作用(電子による気体の電離作用)と β_p 作用で説明する。

〈4・2〉 バーストパルスの形成機構 空気中正針不平等電界ギャップで、最初に観測される前駆コロナパルスは pBP で、この pBP は単一波形と考えられていたが、⁽¹¹⁾第 2 図からも明らかなように、このパルスはさらに多くの小パルスが重畳したもので、その形成は次のように説明され、その模型を第 12 図に示した。

針先付近の陽極側高電界部 ($E \geq E_0$) に進入した偶存電子(種電子)は高電界部で加速され、気体分子を衝突電離しながら電子なだれ(以後一次なだれと呼ぶ)に成長する。また、この一次なだれに伴って放射された光子は、 β_p 作用によってさらに針先付近の未電離気体を電離し、この電子はさらに二次あるいは三次のな

第 12 図 一次および二次なだれ形成の図説

Fig. 12. Schema for the formation of primary and secondary avalanches.

なだれに成長する。他方、なだれ群の成長に伴って生成された正イオン群は、針先付近に空間電荷電界を形成して静電界を弱めなだれの成長を止める。なだれの成長が止まり、針先付近の正イオン群が移動、拡散などによって針先付近の空間電荷電界が消滅すると、針先付近の高電界部に進入した偶存電子は再びなだれに成長する。⁽¹⁾ このように、なだれの成長、休止によって生ずるパルスが pBP と考えられる。なお、Amin 氏⁽¹⁾ においては pBP を単一波形として表現されているが、しかし pBP は元来多くのなだれが重畳したもので、Amin 氏の結果はシンクロスコープの分解能、測定回路の時定数などの関係で、これが平滑化されたものと考えられる。

また、前述したように本実験装置では、最も初期に観測された pBP でさえその光波形には複数個のパルスが含まれ、単一パルスの観測は困難であったが、これは測定回路の検出感度の不足によるものか、あるいは β 線照射によりギャップに同時に生成された複数個の電子より成長したなだれによるかのいずれかと考えられるが、そのいずれであるかは判然としていない。さらに、同じギャップ条件においても種々の波形および波高値の pBP が観測されるのは、これを構成している個々のなだれの成長が統計的要素を含むことに基因しているものと考えられ、これらの分布特性を調べることは pBP 形成の解明に重要な課題と考えられるが、その詳細は別稿に譲る。

印加電圧を上昇すると、 α 作用、 β 作用ともに増大してなだれの成長が活発となり、したがって、針先付近に残された正イオン数も増大する。しかし、印加電界が高ければ正イオンに基因する空間電荷が針先付近から完全に掃とうされなくとも比較的空間電荷の少ない局所が生ずれば、その場所で電離増殖が復活し、なだれの成長が可能と

なるものと考えられる。第 2 図(b), (c) で $a_1, a_2, a_3, \dots$ はそれを示している。また、後でも詳述するように、この小パルスは sBP をトリガするパルスで、筆者らはこの小パルスを二次前駆パルス (pre-secondary-Burst Pulse, 以後 psBP と記す) と呼ぶ。

さらに印加電圧を上昇すると、pBP の形成に伴って針先付近に残留した正イオン群が掃とうされなくとも psBP はさらに β 作用によって多くの後続なだれ群を誘発することができるようになる。しかし、この後続なだれ群は残留空間電荷でその成長が抑制されることから、なだれ群に含まれる電子あるいは正イオン数は pBP に比べて少なく、したがって、その波高値は低くなるものと考えられる。⁽¹⁾ このなだれ群が sBP で、先行パルスとのパルス間隔が長いほど後続パルスの波高値が高く現われる傾向もこのためと思われる。〔後でも述べるように、先行パルスによって針先付近に残された正イオン群は数 μ s (sBP の時間間隔) 後には針先から陰極側にはば 0.3~0.4 cm の位置まで進み、この状態では針先付近の電界は空間電荷の影響が無視できない〕さらに、第 4 図、第 8 図からも明らかなように、sBP の種電子は pBP に後続した psBP によって供給されるものと考えられる。以上 pBP および sBP の形成機構について定性的検討を加えたが、これらの結果を図形的に示したのが第 13 図である。

これらのことから、pBP は外部照射 (宇宙線を含めて) によって供給された偶存電子が種電子として成長した電子なだれ群よりなるパルスであり、sBP は pBP β あるいは先行 sBP の形成に伴って放射された光子の作用によって生じた電子が種電子として成長したなだれ群よりなり、しかも自統の条件を満たしたパルスで、両者の種電子は供給源が異なるものと考えられる。なお、sBP が観測され始めると、それ以後のコロナ特性では照射の影響が顕著に現われなかった理由もこのためと思われる。

第 13 図 一次バーストパルス、二次前駆パルスおよび二次バーストパルス形成の図説

Fig. 13. Schema for the formation of primary, pre-secondary and secondary burst pulses.

〈4.2〉 前駆ストリーマコロナの形成機構 sBP

が観測される放電域で、ギャップ条件によっては SP が観測される場合がある。Amin 氏⁽²⁾によれば、針先付近で観測された SP の光パルスにはその立上りの波頭部分に小さなパルスが観測され、この小さなパルスが針先近傍に局部的高電界を形成し、SP はここより成長するもので、この小さなパルスは pBP であったと報告されている。また、第 7 図の実験条件 ($r=0.3$ cm, $l=3.0$ cm) において、針先から距離 x までの正イオンの走行時間

$$t_+ = \int_f^{f+x} \frac{1}{v_+} dx \quad (\text{s})$$

ただし、 f ：針先端と焦点との距離

を $v_+ = 1.4 \times 10^3 E/p$ (cm/s)⁽¹²⁾ (E ：角田氏の 1/2 近似法による電界,⁽¹²⁾ p ：気圧) を用いて計算すると、針先付近で生成された正イオンが $E < 23$ kV/cm の低電界部 (大気中では、これより低い電界では電離が行なわれないものと仮定する。このギャップでは陰極から 0.185 cm) に移動するには 1.97 μ s、陰極面には 612 μ s の時間を必要とする。また、SP が観測されるために必要な時間間隔 50 μ s 間には、針先端からほぼ 0.88 cm 移動しており、この 0.88 cm は $E \approx 23$ kV/cm の位置 0.185 cm のほぼ 4.8 倍であるから、先行パルスによって針先付近に生成された空間電荷は 50 μ s 間に針先付近から拡散してしまっていると考えられる。

これらのことから、針先付近の電界がなだれの成長に十分なほど高く、しかも空間電荷が残留していない電界条件で成長したなだれ (pBP) は、陽極側の針先近傍に局部的高電界を形成し、この高電界が SP の形成条件を満たせばその場所で SP を形成し、この SP は陰極に向かって進展するものと考えられる。しかし、もし pBP の成長過程で発生した高電界が SP 形成以前に横広がりをもつとか、種電子の供給が豊富で、第 9 図 (b) のように SP の形成に必要な時間間隔が得られないほど BP の形成が活発な場合、あるいは β_p 作用によって針先近傍に局部的高電界の発生が困難な場合などには SP の形成は困難でそのまま pBP に終わり、BP と SP が混在する理由もここにあるものと考えられる。また、同じ電極配置でも第 9 図に示したように陰極照射の強さを変えると、強さに応じて SP が出現したり、消滅する理由もこのためと思われる。

5. む す び

空気中正針前駆コロナパルスの特性について述べたが、得られた結果を要約すると次のようである。

(1) 空気中正針対平板ギャップで観測される前駆

バーストパルス (BP) およびストリーマコロナパルス (SP) の二次機構は、光電離 (β_p) 作用が有効と考えられる。他方、窒素 (N_2) 中では陰極面における電子放出 (γ_i) 作用の有効性を示唆した。

(2) 正針前駆バーストパルスで最初に観測される一次バーストパルス (pBP) は、Amin 氏によって得られたような平滑な波形ではなく、 β_p 作用に基因すると考えられる多くの微小パルスの重畳からなりたっていることが明らかとなった。

(3) 一次バーストパルス (pBP) とその後続の二次バーストパルス (sBP) との間、あるいは先行 sBP と後続 sBP との間には、断続的ではあるが多くの微小パルスが観測された。この微小パルスは、sBP の形成に対して常に種電子 (初期電子) 供給の役割を演ずるパルスで、本質的には Amin 氏の定義した sBP の一種とも考えられるが、筆者らはこれをその役割から見て二次前駆パルスと呼んだ。

(4) ストリーマコロナパルス (SP) が出現するためには、その先行パルスとの時間間隔が数 10 μ s 以上必要であることが新しく確認された。この時間間隔は先行パルスによって針先付近に残された正イオン空間電荷群が拡散し、静電界が復帰するための最小時間と解釈される。これはまた、SP の形成には針先近傍に局部的高電界の発生が必要であることを示している。

(5) 外部照射が強く種電子 (初期電子) の供給が豊富な場合には、ストリーマコロナパルス (SP) の出現は困難である。これは、照射によって SP 出現に必要な時間間隔が得られないほど、バーストパルス (BP) の形成が活発となることによるものと考えられる。

終わりに、終始ご懇切な助言をいただいた名古屋大学 玉河 元教授、名古屋工業大学三好研究室の諸氏に厚くお礼申し上げる。なお、本研究は文部省科学研究費の補助を得て行なわれたものであることを付記し謝意を表わす。

(昭和 47 年 6 月 3 日受付, 同 48 年 6 月 16 日再受付)

文 献

- (1) M.R. Amin: J. Appl. Phys. **25**, 210 (1954)
- (2) M.R. Amin: J. Appl. Phys. **25**, 358 (1954)
- (3) 生田・牛田・石黒: 電学誌 **90**, 1816 (昭 45-9)
- (4) A.W. Bandel: Phys. Rev. **84**, 92 (1951)
- (5) Y. Miyoshi & T. Hosokawa: International Conference on Gas Discharge 26 (1970)
- (6) Y. Miyoshi & T. Hosokawa: J. Phys. D **6**, 730 (1973)
- (7) 細川・近藤・三好: 電学誌 **89**, 1823 (昭 44-9)
- (8) 長谷部・河合: 電学誌 **84**, 2015 (昭 39-12)
- (9) 中島・小山: 電学誌 **72**, 269 (昭 27-5)
- (10) 林・三好: 昭 41 電気四学会東海支部連大 S-2-8
- (11) E.L. Huber: Phys. Rev. **97**, 267 (1955)
- (12) 角田: 電学誌 **80**, 301 (昭 35-3)