N₂ ガス中における電離電流

(Ⅲ. 電流漸減現象とその機構)

正員 伊藤 晴雄 (千葉工大)

正員 生田 信皓 (徳島大)

1. ま え が き

窒素 (N₂) ガスは高い解離エネルギー (9.7 eV), 長寿命の準安定励起準位 ($A^3\Sigma_u^+ 6.2 \text{ eV}$ など) や, 二原子分子中最長の励起寿命を持つ振動励起準位を持つなど, 大きい内部エネルギーを長く保持する性質を持ったため, 古くから多くの研究が行なわれ, Active Nitrogen という成書もある⁽¹⁾⁽²⁾. 著者らは N₂ ガス中において, 電離電流が数分ないし数十分にわたって大幅に変化したのち定常値をとるに至る現象を見だし, その機構を解明するための実験的研究を続けてきた. 電離電流の変化は, ガス密度, ガス温度, 電界, 電極間距離および器壁までの距離などに大きく支配される. pod (p_0 : 0°C 換算ガス圧力 (Torr), d : 電極間距離 (cm)) が小さいときには, 光電子を源とする電離電流は時間と共に増大し⁽³⁾, ついに自続し飽和するに至る. この電流増加は, N₂ の準安定励起分子による陰極からの二次電子放出 (γ_m) 作用によるものであることが確認されている⁽⁴⁾. pod が 1 Torr·cm 程度より大きくなると, 電離電流の増大は速くなるが電流は増大したまま定常値はとらず, 最大値を経たのち電流は減少して低い定常値に落ちつく⁽³⁾. pod を大きくすると, 電流の増大後減少して落ちつくまでの時間が短くなる.

本論文では, 主として pod が大きい場合の電流減少特性について述べ, 併わせて電流の自続条件についても検討する.

2. 電流変化現象に関する推論

電離電流の時間的変化は電流-電圧特性曲線におい

て, 急しゅんな電流変化を与える電圧範囲において観測される. ここで電流-電圧特性のこう配が緩やかな領域を A 領域, 電流がほぼ垂直に立上る領域を B 領域と呼ぶことにする. B 領域および B 領域に近い A 領域では, 二次電離 (γ) 作用が大きく働いており, このためこの領域の電流は, 電圧に対して極めて急激な変化を示す. 電流の時間的変化も γ 作用, 特に励起分子による γ_m 作用が時間と共に大きく変化することにより観測される. このように γ_m 作用が時間的に変化する条件では, 電流-電圧特性を一義的に定義できないことは言うまでもない.

電流-電圧特性や電流の時間変化特性は, pod 条件に対して大きい依存性を示す. そこで pod 値を 1 Torr·cm 以下, 1~10 Torr·cm および 10 Torr·cm 以上の三領域に大まかに区分して, 各領域における電流-電圧特性, 電流の時間的変化, また UV 光照射を止めた後の電流成分 (後述) の変化の典型的な形を示したのが図 1(a), (b) および (c) である. 図 1(a) において電圧値が記入されていないのは, 電圧が pod 値によって大幅に変わるので, 具体的な電圧値についてはここでは省略してある.

電流が電圧に対して大幅に変化する電圧範囲内の電圧を与えたときの電流は, 時間と共に図 1(b) のように大幅に変化する.

(i) $pod < 1 \text{ Torr}\cdot\text{cm}$ では電流は常に増大し, 時間経過と共に飽和して定常値をとる.

(ii) $1 < pod < 10 \text{ Torr}\cdot\text{cm}$ では, 電流はいったん増大した後ゆっくりと減少する.

(iii) $pod > 10 \text{ Torr}\cdot\text{cm}$ では, 電流は急速に増大して最大値をとったのち, 速やかに減少して低い定常値をとる.

上記の分類はいずれも UV 光で連続的に陰極を照射している場合の電流変化である. このような電流の増大, 減少の原因を調べるため, UV 光を急に遮断

Ionizing Current in N₂ Gas (Ⅲ. Temporal Decrease of Current and its Mechanism). By Haruo Itoh, Member (Chiba Institute of Technology) & Nobuaki Ikuta, Member (Tokushima University).

伊藤晴雄: 正員, 千葉工業大学電気工学科
生田信皓: 正員, 徳島大学工業短期大学部電子工学科

図1 pod で分類した電離電流の時間的変化
Fig. 1. Temporal variation of ionizing current depending on pod .

(オフ) したときの過渡電流波形を測定した。

図2(a)は、 pod が小さく増加しつつある電流の測定中、UV 光オフ時の過渡電流波形である。光電子を源とする電離電流 I_p のステップ状変化に続いて、 N_2 の準安定励起分子による二次電子電流成分 $i_m(t)$ が、時定数数 ms~数十 ms で単一指数関数的減衰を示す。測定した時定数 (τ_m) から求めた励起分子の拡散係数 D_m および寿命 (τ_i) は、準安定励起分子 $A^3\Sigma_u^+$ の報告値と一致し、 $i_m(t)$ が $A^3\Sigma_u^+$ 準安定励起分子の二次作用によることが確認されている⁽⁴⁾。 $i_m(t)$ の初期値 I_m は、 $pod < 1$ Torr·cm の条件では時間と共に増大し、ほぼ一定の I_p に対して $I_m \gg I_p$ となっていく。この時点 ($I > 5 \times 10^{-9}$ A) で再び UV 光オフ後の過渡波形を記録すると、図2(b)のように $i_m(t)$ の減衰後、更に寿命の長い電流成分 I_s の存在が見られる。この I_s 成分は図1(c)(i)のように時間と共に増大して $I \approx I_s$ となり、自続状態となりついに飽和して定常値をとる。しかし pod が大きくなると、 I_s はいったん増加した後、減少、消滅するようになり〔図1(c)(ii)〕, 更に大きい pod 値では、 I_s は急速な増大の後、速やかに減少、消滅する〔図1(c)(iii)〕。

このように二次電子電流成分 I_s が、電流の自続または消滅を支配していることが理解された。 I_s がどの

(a) 漸増状態における過渡電流波形
(b) 自続放電開始に近い条件での過渡電流波形
図2 UV 光遮断時の過渡電流波形

Fig. 2. Transient current waveforms after UV irradiation cut off.

ような励起粒子の二次作用によるものかを断定できる実験結果は、残念ながらまだ得られていない。しかし文献(3)、(4)および本論文における実験結果から、 I_s 成分の性質の概要を記すと次のようになる。

(1) I_s 成分の寿命は、 $A^3\Sigma_u^+$ 準安定励起分子の寿命よりはるかに長く、分 (min) のオーダーである。

(2) I_s 成分の減少特性は、時間に対してはほぼニアで、 pod 値、電圧、ガス温度、器壁の材質および温度、器壁までの距離、また電流を流した履歴、電流レベルなどに依存する。

(3) I_s 成分は人為的に O_2 , CO などを数 % 程度混入してもなお観測される。

τ_m 作用による二次電子を源とする長寿命の電流成分 I_s の減少には、次の二つの過程が考えられる。一つは、電離電流を流すことにより放電空間で生成された高い内部エネルギーを持つ粒子の陰極への帰還率の低下であり、もう一つは陰極における実効的な二次電子放出率の低下である。 pod が大きくなると、放電空間で生成された励起分子自身の陰極への拡散による帰還が抑制され、ガス中での衝突による励起緩和が速くなって、高い励起準位にある分子数は減少し、低位の励起状態に密度高く分布するようになる。低位の励起分子には二次電子放出の能力はないが、他の分子または電子との衝突断面積は、基底準位にあるガス分子よりも大きくなることが推測される。このため、高い準位にある励起分子の陰極への拡散は更に抑制され、また二次電子が陰極から放出される際の逆散乱率が増加、従って電子のガス中への実効放出率が低下することになる。このように励起分子の生成、衝突緩和、低励起分子密度の増大は二次電子放出作用を抑制し、電流減少の原因となり得る。

N₂ ガスの場合、二次電子放出の可能な高い励起状態として準安定 $A^3\Sigma_u^+$ 状態 (放射寿命 1~2 s⁽⁶⁾⁽⁷⁾) がまず考えられる。これに対して低位の励起状態としては、N₂ の振動励起状態を考えなければならないであろう。基底準位の N₂ の振動励起準位は、準安定励起準位 $A^3\Sigma_u^+$ よりかなり高いエネルギーレベルまで確認されており⁽⁸⁾、 $A^3\Sigma_u^+$ 準位との間でエネルギー授受をすることが報告されている⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。また、N₂ の振動励起準位の寿命は二原子分子中最も長く⁽¹¹⁾、特に低位の振動準位で長いので、ガス中でのエネルギー保存に適した性質を備えている。

pod が高い条件では、放電空間で生成された励起分子は他のガス分子との衝突により次第にエネルギー緩和を生じ、励起準位における密度分布を形成する。一方、空間的にも放電空間で高く周辺部で低いという励起分子の密度分布が形成されるものと思われる。このため周辺へ向かう方向にエネルギーの流れを生じ、この流れによって励起エネルギーが放出される。例えば、人工器壁を挿入すると短距離に置かれた電極表面で衝突脱励起が盛んに起こってエネルギー放出が速くなる。また器壁温度を上昇させると、器壁における衝突脱励起率が減少し、励起分子密度こう配も小さくなってエネルギー放出速度は遅くなる。このように pod の大きい条件では、励起注入されたエネルギーの閉じ込め状態が周囲条件によって変化し、これが電流の時間的な変化をもたらすものと考えられる。このような推測に従って、1~40 Torr·cm の範囲で電流の時間的な変化を種々の条件下で測定した。以下、これらについて検討した結果について述べていく。

3. 実験装置

使用した実験装置は前報⁽³⁾⁽⁴⁾のものと同じである。直径約 30 cm のステンレス鋼製真空容器中にセットした一對のロゴウスキー形電極間に電圧を加えて、電離電流を測定した。陰極からの電子放出には、紫外線 (UV) 光源 (H 4141 S, 日立電子) を用い、それぞれのガス圧力 p_0 で、 $E/p_0 = 10 \text{ V/cm} \cdot \text{Torr}$ のときの光電子電流 I_0 が、 $2 \times 10^{-12} \text{ A}$ となるよう光量を調整した。電流の測定には Keithley 427 形高速電流増幅器を用い、その出力をデジタルメモリあるいは記録計に接続して、過渡電流波形や長時間にわたる電流変化を記録した。また、励起分子の損失過程を調べる目的で、電極を囲む人工器壁 (内径 16 cm, 高さ 10 cm) を挿入して実験を行ない、ない場合の結果と比較した。人工器壁はパイレックスガラス製のものと銅製の二種類用いた。銅製器壁は外側に冷却管を付け、これに温

(冷) 水を流すことにより器壁温度 (T_w) を制御できる。またガス温度の設定には、真空容器の外壁に設けたヒータにより容器全体を加熱し、定常状態になるのを待って実験を行なった。従って、冷却管に通水していないときは $T_w = T_g$ となる。 T_w および T_g は、微細ビード状サーミスタ (N 126, 日立) を用いて測定しており、時定数 1.5 s という速応性を得ている。また、今回からはガス圧力の測定にバロトロンガス圧力計 (日本 MKS, 310 形) を用いたので、従来より正確なガス圧力の測定が可能となった。なお真空系の到達真空度は $2 \times 10^{-6} \text{ Torr}$ 、ガス圧力の上昇速度は 10^{-4} Torr/h 程度である。

4. 実験結果および検討

〈4.1〉 電離電流のガス温度依存性

(1) 図 3 は $pod = 40 \text{ Torr} \cdot \text{cm}$ において、 $T_g = 23^\circ\text{C}$, 50°C および 73°C に設定して電流の時間変化を記録したものである。電圧は測定を始めたときの電流値が約 $8 \times 10^{-8} \text{ A}$ となるように与えた。 T_g が高いほど高い電圧が必要となっており、電流の減少速度も著しく速やかとなっている。減少特性は、各曲線とも初め緩やかな減少特性を示した後、 $2 \sim 4 \times 10^{-7} \text{ A}$ 付近から急速に減少し、 $4 \times 10^{-8} \text{ A}$ 付近から再び緩やかに減少する。電流の減少特性を記録しつつ、ときどき UV 光をオフして過渡電流を記録し、各電流成分を求めた結果を●印 (I_s 成分) および○印 (I_m 成分) で示してある。 I_s 成分は $4 \times 10^{-8} \text{ A}$ 付近から全電流 I と分離して減衰している。残された電流 $I_p + I_m$ のうち I_m は時間と共に減少するが、その減少速度は I_s と同様 T_g が高いほうが速い。しかし I_m は I_s のように消滅はせず、時間と共にある定常値に落ちつき、 I_p と共に定常電流を形成する。この間に I_p も少し減少するが大幅

図 3 電流減少特性のガス温度依存性
Fig. 3. Gas temperature dependence on current decreasing characteristics.

な変化は起こさない。

(2) T_g が高いほど高い電圧が必要になるのは、電圧印加と同時に励起粒子の蓄積が始まっており、低励起粒子の蓄積が速やかに起こる高い T_g 条件で、同じ電流を流すのにより高い電圧を必要とすることによるものであろう。図3のどの曲線も、測定開始から次第に減少速度を増し、 $2 \sim 4 \times 10^{-7}$ A 付近から急速に減少するのは、時間と共に低励起粒子の蓄積が進んで実効二次電離係数 γ が低下し、上記の電流レベルで電流の自統条件が満たされなくなると考えられる。すなわち、電流 $I (=I_s \text{ 成分})$ の自統が電流レベルに依存していることが理解される。自統条件が満たされなくなると、 I_s 成分は急速に減衰、消滅する。 I_s 成分の減少に伴って、残る I_m , I_p 成分が観測されるようになる。 I_m 成分も低励起粒子の蓄積により減少するが、電流の低下と共に低励起粒子の生成と損失が平衡して定常値をとるようになるものと考えられる。また、この実験で初期の電流上昇部分が見られないのは、電流レベルを調整している間にピークを過ぎて、以後減少部分だけが記録されたことによる。このような実験結果から、高ガス圧条件では自統電離電流が観測されない理由が理解された。 N_2 ガス中では電離電流を流すことによって生じる励起粒子が、緩和蓄積することによって二次電子の実効放出率（透過率）を抑圧する。他のガス中においても、同じ機構で自統電流が観測できなくなるのかどうかについても調べる必要がある。

〈4.2〉 電流減少の電界依存性

(1) 図4は $p_0 d = 40 \text{ Torr} \cdot \text{cm}$ において、種々の電界条件での電離電流と電流の記録中にときどき $E/p_0 = 10 \text{ V/cm} \cdot \text{Torr}$ を与えて測定した光電子電流 I_0 を記録したものである。同図から明らかなように、電流の減少率は E/p_0 が低くなるほど低くなっており、 $E/p_0 = 40 \text{ V/cm} \cdot \text{Torr}$ ではほとんど減少が見られない。すなわち、電流変化は電離や励起をひんぱんに起こす高い電界条件でだけ観測される。また I_0 についても、高い電界 ($E/p_0 = 72.5, 70 \text{ V/cm} \cdot \text{Torr}$) のときには少し減少が見られるが、低い電界では見られない。

図5も同様な電流の記録であるが、 I_m 成分を分離して示してある。全電流 I の減少は主として I_m の減少によるものであることが理解される。また電流平衡後、 $E/p_0 = 10 \text{ V/cm} \cdot \text{Torr}$ を与えて I_0 を測定すると、 I_0 はやや低い値から時間と共に増加して規定値（電流減少を記録する前の値）に回復していく。その回復時間は分 (min) のオーダーである。

(2) 図4、図5の結果は電流の減少がガス空間で電離や励起が頻度高く起こり、励起粒子が蓄積される

図4 電流減少特性の E/p_0 依存性
Fig. 4. E/p_0 dependence on current decreasing characteristics.

図5 電流減少後の I_0 の回復特性
Fig. 5. Recovering characteristics of photo-emitted current.

図6 電流減少特性のガス入れ換え効果
Fig. 6. Gas replacement effect on current decreasing characteristics.

ような条件で生じることを明確に示したものである。また低励起粒子の蓄積は、二次電子電流成分だけでなく、UV光による光電子電流成分も抑制することが明らかとなった。蓄積された低励起粒子の減少、すなわち I_0 の回復には分 (min) のオーダーの時間を要し、低励起粒子の長い寿命が確認された。

図7 パイレックスガラス人工壁挿入時の電流変化のガス圧力依存性

Fig. 7. Gas pressure dependence of current variation with artificial wall.

〈4・3〉 ガス入れ換えの効果

(1) 電流の減少特性を記録している途中で、容器内の活性化されたガスの一部を新しいガスに入れ換えると、減少していた電流が一部回復する。ガスを p_0 (Torr) だけ入れ換え、ガス温度が 80°C に回復するのを確認してから電圧を再び印加し、電流を記録した結果が図6である。なお、ガス入れ換え時に測定した I_0 の値が長時間にわたって一定であることも確認されている(図6)。

(2) この結果は、励起などにより活性化されたガスを一部新しいガスに交換することにより、抑制されていた電流が交換量の大きいほど大幅に回復することを示している。同時に活性化ガスの寿命が相当長く、入れ換えに要した時間(2分程度)後にも、依然として抑制効果を保持していることが理解される。

〈4・4〉 人工壁の影響 励起分子の蓄積に影響を与えると考えられる器壁までの距離、器壁温度などへの依存性を調べるため、人工壁を挿入して実験を行った。

(1) 図7は $d=1$ cm, $T_g=38^\circ\text{C}$ でパイレックスガラス円筒を用い、電離電流が 5×10^{-9} A となるよう電圧を加えて電流を記録した結果である。パラメータとしてガス圧力 p_0 を 0.5 Torr から 40 Torr まで変化させた。同図から推測すると電流は 3 Torr・cm 以上で時間と共に増大するように思われるが、この値は人工壁のない場合の境界値 0.5~1 Torr・cm よりかなり高くなっている。

図8は人工壁の有無および T_g をパラメータにして変化する電離電流の記録である。人工壁の挿入により、電流の変化速度、変化幅ともに小さくなり、また

図8 電流減少特性のガス温度、ガス圧力依存性

Fig. 8. Gas temperature and gas pressure dependence on decreasing current.

T_g が高いときに電流の変化速度、変化幅ともに小さくなっている。

(2) 人工壁の挿入は、放電空間の近くに脱励起作用の大きい人工壁を置くことにより、低励起粒子の蓄積を妨げ、その結果電流抑制作用が小さくなるものと考えられる。図7および図8の人工壁挿入による電流変化幅の減少は、この考えを支持する。また $T_g (=T_w)$ が高いとき、励起粒子の壁への流れが小さくなり、低励起粒子の蓄積密度が大きくなって電流抑制作用が大きくなるであろうという推測も肯定される。 T_g が高いとき、初期における電流の減少速度が大きいのは、ガス分子の運動速度が大きく励起粒子の空間分布形成も速やかとなるため、電流も速やかに抑制される結果であろうと考えられる。また、人工壁挿入時に定常値に至る時間が長くなっているのは、人工壁と電極のすきまから外へ逃れる励起粒子が、全空間に分布を形成するのに長時間を要することによるものと推測される。

〈4・5〉 人工壁温度依存性

(1) 金属(銅)器壁を挿入し、器壁外面の冷却管の通水温度を周期的に切り換えて T_w を変化させたとき、電流もこれに同期して大幅に変化する。図9は $p_0=10$ Torr, $d=1$ cm で T_w を約2分ごとに 50°C 程度変化させたときの電離電流の記録である。 T_w が高いとき電離電流は減少、 T_w が低いとき電流は増大するというように逆位相的变化をしている。ここで、

図 9 人工壁温度、周期的変化の電流減少特性

Fig. 9. Temporal variation of ionizing current with periodical change of wall temperature.

壁温度変化の立上りよりも電流の立上りが速い点、50°C の温度変化が 10^3 倍の電流変化を与える点が注目される。

(2) 電離電流を流すことにより生成される高励起粒子は、陰極表面で二次作用を営むと共に、緩和蓄積されて生じる低励起粒子は、二次電子放出を抑制する。 T_w が高いとき低励起粒子の損失率低下のため、その密度が高くなり二次作用が抑制されて小さい電流値をとり、逆に T_w が低いときは抑制作用が少なくなって電流は高い値をとるものと考えられる。わずか 50°C の T_w 変化が、なぜ 10^3 倍もの電流変化をもたらす理由については次のように考えられる。実験を行なった条件が、電流の自統状態と非自統状態との境界点にあり、 T_w のわずかな変化による二次 (γ_m) 作用のわずかな変化が、与えられた条件下での電離増倍電流を自統、非自統の二状態間で往復変化させているものと考えられる。壁温度の立上りよりも電流変化の立上りのほうが鋭い点も、帰還増幅系の増幅度の大きいことによるものと思われる。時間経過に伴い、変化しながらも電流が流れることによる低励起粒子の蓄積は次第に進み、電流は抑制されて自統条件を満たせなくなり、立上りも遅い小さい変化を示すようになる。

図 9 の T_w を高く保ち続けると、電流はくしの歯の頭を連ねた曲線よりも速やかに減少することが推測される(破線)。すなわち電流の減少している期間が、電流の自統を長く保つ原因となっていると判断される。

5. 考 察

N_2 ガス中における電離電流の時間的変化や電流-電圧特性に関する実験結果に検討を加えた。そして第 2

章で述べた推測が、それぞれの実験結果で肯定されることを示した。ここでは個々の結果について繰返すことは避け、重要と思われる二、三の点について述べる。

〈5・1〉 I_s 成分 長寿命の二次電子増倍電流成分 I_s が、全電離電流 I を自統させていることはさきに述べたとおりである。 I_s 成分はガス空間でかなり多くの励起粒子が蓄積された条件で観測される。 I_s 成分の増大、減少は I_s の増分による励起粒子が、 I_s を増大させるよう作用するか減少する方向に働くかによって決まる。

pod の小さい条件は、励起粒子の陰極への帰還率が高く、衝突緩和によって生じる低励起粒子の拡散による損失が大きいため、蓄積されにくいことを意味する。このような条件では、 I_s は時間と共に増加して自統条件を満たし、更に増大して飽和するに至る。この飽和現象は電流レベルの増大と共に、励起粒子の周囲方向への損失が増し、生成の増分と損失の増加がバランスするようになるためと考えられる。そこには電流レベル増大に対する実効 γ 係数の減少という安定化作用が働いている。

pod が大きくなると励起粒子の衝突緩和がひんばんとなり、高準位励起粒子の陰極への帰還率が減少すると共に低準位励起粒子密度が高くなる。この低励起粒子の衝突断面積が、基底状態の値より大きいとき高励起分子の陰極への拡散帰還を更に抑制し、かつ二次電子の実効放出率も減少させるようになる。このため電圧印加当初、自統条件が満足され電流 I_s の増大が観測されても、時間と共に抑制効果が働くことになる。このとき電流-電圧特性に正特性が観測される⁽¹²⁾。すなわち、電圧の増加に対して I_s はいったん増加したのち、抑制されて安定な I_s の増分を与え、正特性が観測されることになる。更に、 pod が大きい条件では、帰還率の低下、緩和速度の増加、低 E/p_0 化による低励起粒子生成率の増加など、すべて低励起粒子蓄積に好条件となり、二次電子放出も大幅に抑制され I_s は減少、消滅する。

I_s が特に長寿命の励起粒子の二次作用によるものと考えられることは、 $A^3\Sigma_u^+$ 以上の長寿命粒子の安定な存在を仮定しなければならなくなり困難である。むしろ、高密度の振動励起分子に支えられた $A^3\Sigma_u^+$ 励起分子を考えるほうが自然であると考えられる。しかし、この判断については更に実験的検証が必要である。

〈5・2〉 安定自統条件 電離電流の自統条件は、これまで $\gamma(\exp ad - 1) = 1$ という電圧だけで決まる一世代ループ増倍率の形で説明されてきた。しかし、

著者らが観測した電流の自統条件は、電流レベル、電流の履歴、周囲条件など様々な条件によって支配される。従って、電離電流の安定な自統は一世代増倍率だけで与えられるものではなく、その時点までに流れていた電流の履歴、長時間にわたって形成された放電空間のガス状態によって支持されることが明らかとなった。そこでは、二次帰還係数 γ の積み上げによる自統とその抑制による安定化との両作用が巧みに働いている。安定化作用のない自統条件は不安定条件である。

〈5・3〉 二次電離係数 r 従来の一世代自統条件 $\gamma(\exp ad - 1) = 1$ という表式と定常自統電流を与える電圧 V_s とから、計算によって得られる ad の値を用いて求められる γ の値は、多数の世代にわたって形成されてきた条件をすべてこの一世代表示の γ の中に含めることになり、いわば等価的に一世代表示した二次電離係数を意味する。

〈5・4〉 自統条件の電流レベル依存性 ここでは、電離電流の自統が電圧だけで決められるものではないことを繰返し述べた。電流は長時間にわたって蓄積された累積二次電離作用* によって支配される。このことは自統条件がそれまで流れていた電流レベルに依存することを意味する。すなわち、電離電流の自統条件には電流レベル依存性がある。この点については文献(3)でも指摘したが、再びここで強調したい。そして N₂ ガスは与えられた条件によって様々に動きを変える。Vital Nitrogen という感想をもつのは著者らだけではないはずである。更に他のガスにも同様な性質が観測されており、それぞれ検討する必要があることを感じている。

*: 累積二次電離作用は、従来報告されている衝突脱励起速度定数では律し切れない因子により支配される。例えば、 I_s は速やかに脱励起を起こすだけの O₂ を混合したガス中でも、長い寿命を示す。励起分子密度の高い条件における緩和過程については、新しい考えを導入する必要があるだろう。

上の議論では、光子およびイオンによる二次電離係数 γ_p, γ_i については触れなかった。光電子電流 I_0 を源とする電離電流 I_p は、既に γ_p, γ_i を含んでおり、その増倍度 $A = I_p/I_0$ を前報では $A = A_0/(1 - A_0\gamma)$, ($\gamma = \gamma_p + \gamma_i$) と表示した。すなわち、 γ_m 以外の二次電離係数は電流増倍度 A の中に既に含まれている。また上式で、 A_0 は電子エネルギーの非平衡効果も含めた電離増倍率である。上の議論でも $(\exp ad - 1)$ の代りに、この A_0 を用いるほうが良いと考えられる。

6. あとがき

N₂ ガス中 $pod \leq 40$ Torr·cm において観測される電離電流の時間的変化現象の全体像を示し、この現象を pod の大きさによって分類した。そして、 $pod > 1$ Torr·cm において測定される電流漸減現象について詳しく述べ、その機構について論じた。すなわち、電流の時間的減少は、低励起粒子の蓄積による高励起粒子の陰極への拡散帰還率の低下と、透過率(電子の実効放出率)の低下によるものであることが確認された。また、自統放電の開始とこれを支える電流成分 I_s についても議論した。特に I_s は、高い pod 条件においては急激に減少する特徴を持つことが本論文で明らかとなった。このことは、自統放電開始後の電流が安定に存在するか、あるいは火花破壊に至るかという問題と深くかかわりを持っている。この点については改めて報告したい。

終りに、機会あるごとに暖い励ましを賜った徳島大学名誉教授 石黒美種先生に深甚なる感謝の意を表します。また日ごろ御教示、御べんたつをいただく千葉工業大学 丹羽 登教授に感謝の意を表すると共に、実験に協力された千葉工業大学学生 萩原俊彦君、前田一秀君、藤城順一君に感謝します。

(昭和 60 年 8 月 26 日受付, 同 61 年 2 月 3 日再受付)

文 献

- (1) G. Glockler & S. C. Lind: "Active Nitrogen" The Electrochemistry of Gases and Other Dielectrics, p. 255 (1939) John Wiley
- (2) A. N. Wright & C. A. Winkler: Active Nitrogen (1968) Academic Press
- (3) 伊藤・生田: 電学論 A, 104, 139 (昭 59-3)
- (4) 伊藤・生田: 電学論 A, 105, 189 (昭 60-4)
- (5) 伊藤・生田: 電気学会放電研資, ED-80-6 (昭 55-1)
- (6) D. E. Shemansky: J. Chem. Phys., 51, 689 (1969)
- (7) 小林・太田・鈴木・真壁・森: 昭 60 電気学会全大, No. 189
- (8) A. G. Gaydon F. R. S: Dissociation Energies and Spectra of Diatomic molecules (1968) Chapman and Hall
- (9) G. N. Hays & H. J. Oskam: J. Chem. Phys., 59, 1507 (1973)
- (10) G. N. Hays & H. J. Oskam: *ibid.*, 59, 6089 (1973)
- (11) R. C. Millikan & D. R. White: *ibid.*, 39, 3209 (1963)
- (12) 伊藤・小川・生田: 電学論 A, 105, 230 (昭 60-4)