

インパルス沿面放電の電荷図長さ*

— N_2 と O_2 の混合比との関係—

保 苅 和 雄**

菅 原 宣 義**

(昭和57年4月30日受理)

The Dust Figure Length of Impulse Surface Discharges

—Varying the gas mixing ratio of N_2 to O_2 —

by Kazuo HOKARI and Noriyoshi SUGAWARA

The influence of the N_2 - O_2 gas mixture upon the dust figure length of impulse surface discharges was studied by using the Dust Figure Method for the polbüschel region. Positive and negative standard wave-shape impulse voltage was applied to a needle electrode on an acryl resin plate with a backing electrode. The dust figure length was measured as the maximum length from the contact point of the needle electrode to the edge of the dust figure. The gas mixing ratio of N_2 to O_2 was varied systematically. The instantaneous voltage corresponding to the corona current pulse was obtained by observing the impulse voltage and corona current at the same time.

As a result of the experiment, we reported

- 1) characteristic curves of the dust figure length versus the gas mixing ratio of N_2 to O_2 for each polarity in relation to instantaneous voltage,
- 2) the polarity effects of the gas mixture on the dust figure length and on the shape of the characteristic curve and
- 3) the pattern of the dust figure as affected by the consistency of each gases.

1. 緒 言

近年、電力需要の増加に伴う送電電圧の上昇や、技術進歩に伴う電気機器の小形化により、絶縁設計はその重要性を増してきている。

高電圧導体を支持、固定し接地導体あるいは低電圧導体から絶縁するために固体絶縁材料が用いられるが、異状電圧等によりこれら導体間で絶縁破壊を起す時、気中（あるいは油中）で

* 昭和56年10月電気四学会北海道支部連合大会および昭和57年3月電気学会全国大会にて一部発表

** 北見工業大学電気工学科

閃絡する気中（油中）放電と、固体絶縁材料の表面に沿って閃絡する沿面放電とに大別される。前者に比べ後者は、固体絶縁材料が介在するために、より複雑となり現象の解明が遅れているが、各種電気機器の絶縁設計に際しては、十分考慮されなければならない重要な問題である。

さらに、最近の海洋開発における潜水作業船や海底基地、宇宙開発における宇宙船、ガンやガス中毒など各種の治療にきわめて効果の高い高気圧治療設備等、大気圧空気中とは異なった組成、気圧の環境気中で、各種電気機器、設備が用いられる機会が増えつつある。この様な環境気、特に高気圧空気や高気圧酸素のもとでは可燃物の発火温度や最小発火エネルギーなどが大気圧空気中に比較して、かなり低下すると言われている¹⁾。この様な条件下では、気中および沿面の全路破壊の火花放電だけでなく、部分絶縁破壊においても着火の可能性を有し大事故へつながる場合があると思われる。この様な環境気の一つであり、空気的主要成分でもある窒素および酸素中における沿面放電の研究は鳥山氏²⁾や曾祢³⁾氏らにより二、三報告されている程度と思われる。

筆者等は空気中の沿面放電を理解するためと、前述の人工的な環境気中における絶縁設計の基礎的な資料を得るために、窒素中、酸素中およびこれらの混合ガス中でその混合比を系統的に変えてアクリル樹脂板上の針電極に衝撃電圧を印加した場合の Polbüschel 領域における沿面放電の研究を行った。

この結果、ガス混合比の変化に対する電荷図長さについて、正極性および負極性における特性曲線や、その極性効果を明らかにし、また混合比の変化に伴う電荷図形の違いについても観察を行った。

2. 実験方法

本実験に使用した実験装置を図-1に示す。鉄製の気体置換容器内のアルミ製背後電極(1 mm \times 280 mm \times 280 mm)上にアクリル樹脂板(3 mm \times 260 mm \times 260 mm)を置き、その中心に針電極を垂直に立て標準波形に近い衝撃電圧(1.1 \times 36 μ s)を印加した。使用した電極は長さ140 mm、直径6 mmのパネ鋼の先を30°の円錐形とし、その先端を曲率半径0.5 mmの半球状にした針電極で、電圧印加毎に磨いて使用した。また、電極の磨耗により先端の曲率半径が変るのを防ぐため、電極の先端部分は焼入れしてある。試料板は電圧印加毎に取り替え、電荷図取得後、中性洗剤で混合粉末を洗い流し、30分以上流水中にさらし洗剤を除去した後、純水とエチルアルコールで表面を処理し、乾いたガーゼで拭いた後わずかに湿ったガーゼで摩擦電荷を除去し、約40°Cの恒温槽中で12時間程度乾燥した。使用する時は表面電位計により表面電位が0.1 kV以内のものを使用した。背後電極にはコロナ電流測定用の抵抗を接続して、デュアルビームシンクロスコープにより電圧と電流波形の同時観測を行い、これより沿面コロナの発生した瞬時の電圧を求めた。ガスの置換は、置換容器内を約0.4 Paまで真空引きした後、窒素と酸素の混合比の小さい方のガスを所定の分圧まで導入した後、混合比の大きい方のガス

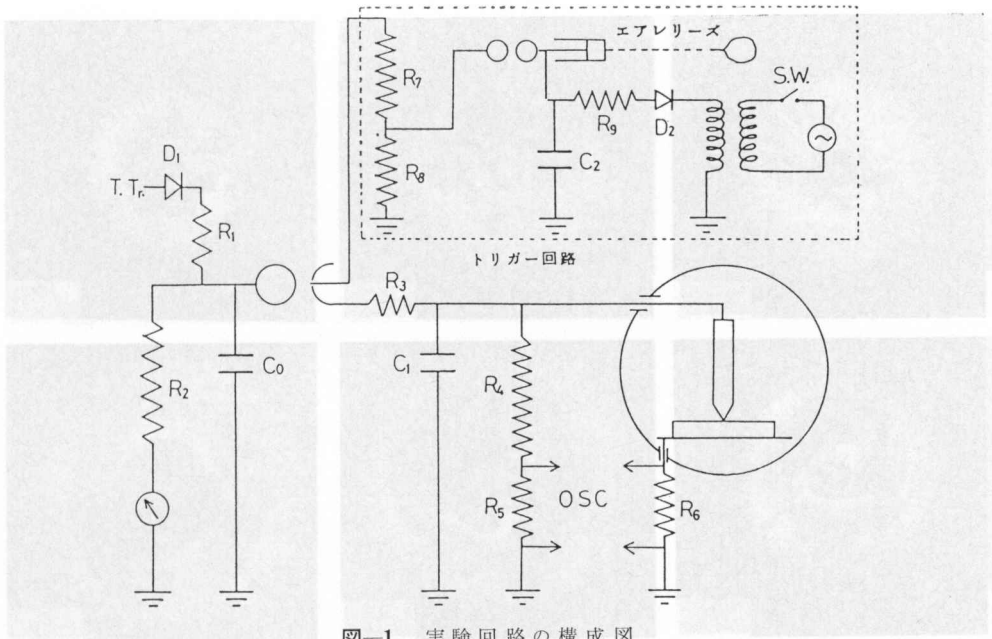


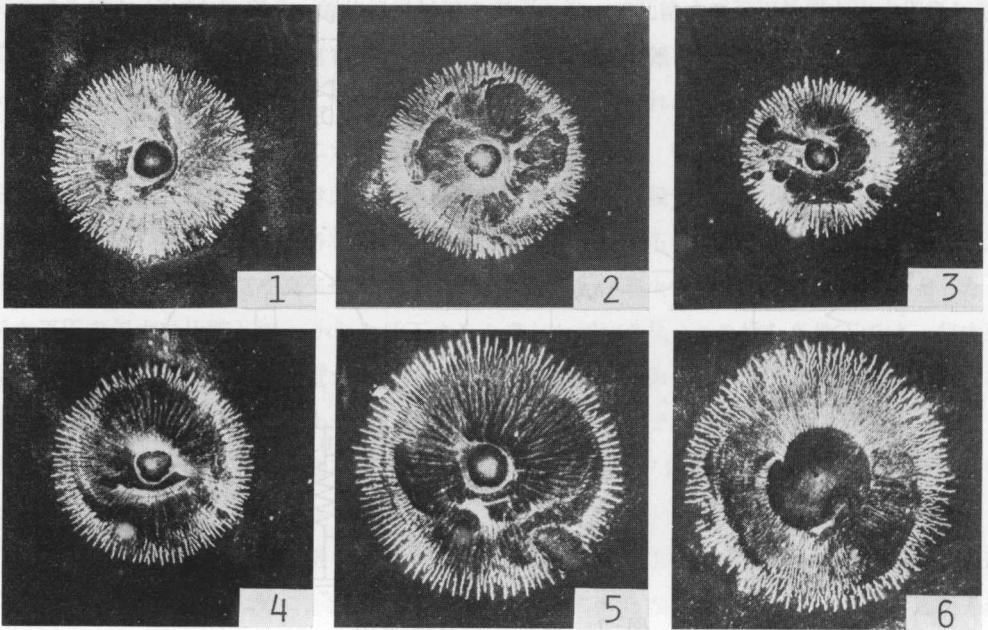
図-1 実験回路の構成図

を導入し、全圧は 101.32 kPa 一定とした。またガスの導入に際し、コロナ放電に影響を与えると思われる水分^{4),5)}を除去するためにシリカゲルと五酸化二リン (P_2O_5) の吸湿管をゆっくりと通し相対湿度をほぼ 0% とした。使用した窒素、酸素の純度は約 99.9% である。電荷図は、電圧印加後、松ヤニ (黄白色) と光明丹 (PbO , 赤色) の混合粉末をふりかける事で得られ、余分な混合粉末を払った後、電極の接点より電荷図の縁までの最大長さを測定し、電荷図長さとした。一般に正図形は明瞭に得られるが、負図形は電荷図周辺が不明瞭な場合が多く、肉眼で識別できる範囲を測定した。また沿面放電では、放電形態から分類して Polbütschel⁶⁾ と Gleitbütschel⁶⁾ に大別され、本実験の電圧の高い範囲では Gleitbütschel が出現するが、本文では Polbütschel のみを対象とする。印加電圧は、正極性 20.7 kV, 24.6 kV, 29.4 kV および負極性 20.9 kV, 24.8 kV, 29.4 kV の各電圧について実験を行った。

3. 実験結果と考察

3.1 窒素と酸素の混合比変化と電荷図形状

3.1.1 正極性の場合 正極性衝撃電圧 24.6 kV を印加した場合の各混合比における電荷図の写真を写真-1 に示す。窒素 100% (写 1-6) では、細く白い樹枝状のストリーマが放射状に広がり、粉末のつき方は比較的薄い。中心の電極接点付近は粉末が薄赤くつき負極性の残留電荷を示している。酸素 100% 中でもストリーマは白く樹枝状となるがストリーマの幹の部分には窒素中に比して太く、分枝も短い。粉末のつき方は濃くつく。中心部は窒素中同様薄赤い。酸素分圧の減少とともに図形形状は連続的に変化していく様であり、判然とはしないが酸

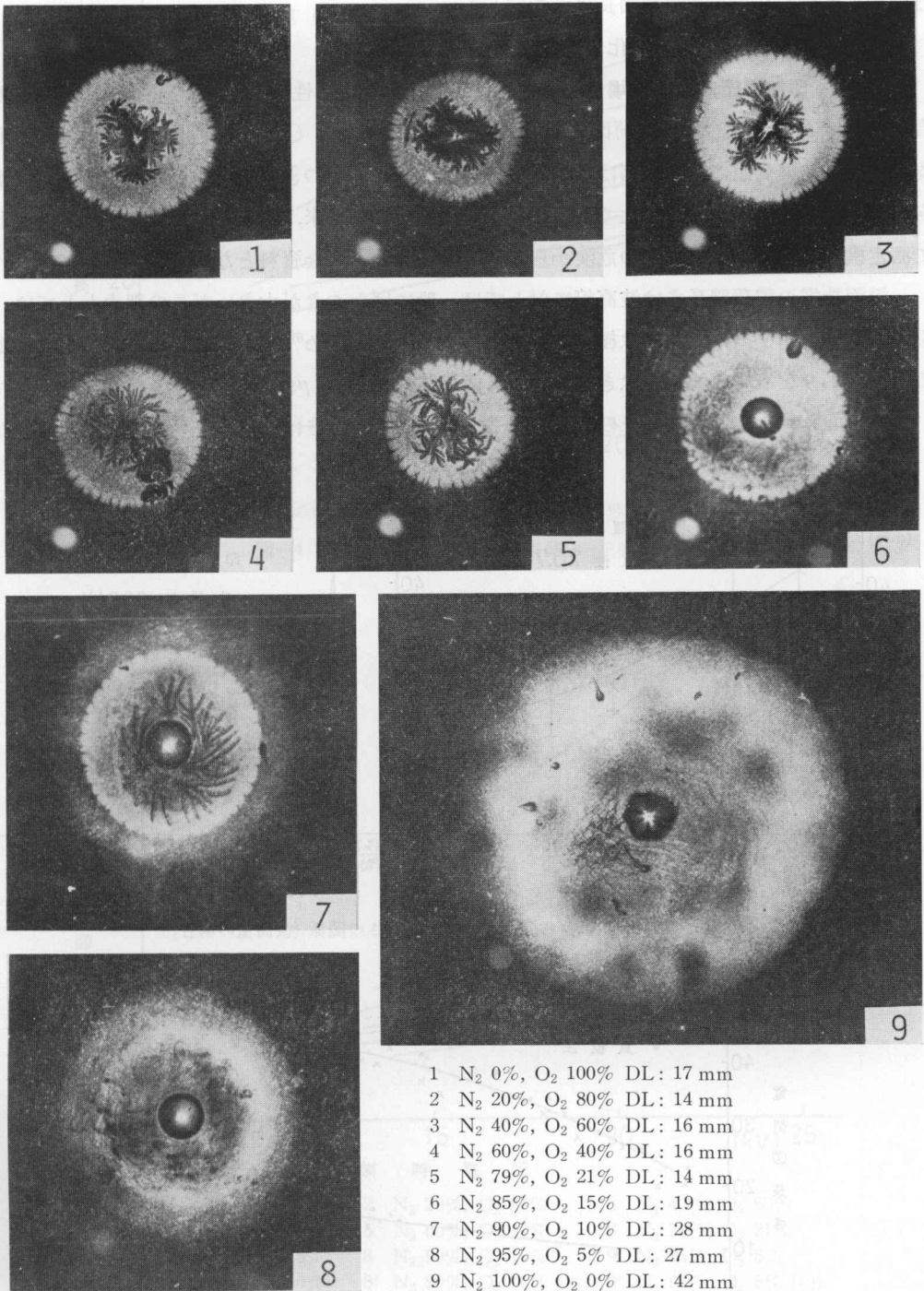


1 N₂ 0%, O₂ 100% DL: 28 mm 2 N₂ 20%, O₂ 80% DL: 28 mm
 3 N₂ 40%, O₂ 60% DL: 23.5 mm 4 N₂ 60%, O₂ 40% DL: 29 mm
 5 N₂ 70%, O₂ 21% DL: 39 mm 6 N₂ 100%, O₂ 0% DL: 39 mm

写真-1 各混合比における電荷図(正極性, 印加電圧 24.6 kV, DL: 電荷図長さ)

素 40% (写 1-4) 程度から窒素中での特徴が認められる様だ。電荷図内部に粉末のつきが良くない部分が見られるが、これは電圧印加後、背後電極から試料板を外す時に生じると言われる Backdischarge⁷⁾ により図形が乱されたためと思われる。

3.1.2 負極性の場合 負極性衝撃電圧 29.4 kV を印加した時の各混合比における電荷図の写真を写真-2 に示す。引き伸ばし倍率は正極性とは異なる。窒素 100% (写 2-9) では、図形は大きく全体に薄赤い円形で、粉末のつき方は薄い。電極接触点付近は粉末が白くつき正極性の残留電荷を示し、この部分は他の混合比においても同様である。酸素 100% では、粉末が濃くつき赤味がかかった円形で小さい。周囲は花卉状に切り込みが入った状態を示す。酸素分圧を減少させてゆくと 21% (写 2-5) 程度までは形状、大きさともほぼ変わらないが 15% (写 2-6) になると図形がやや大きくなる。10% (写 2-7) になると粉末の濃くついた部分のさらに外側に薄く粉末のつく場合があり、内側の部分は酸素中での特徴を有している場合が多い。5% (写 2-8) になると外側の部分がはっきりして来るとともに内側の部分の酸素中の特徴が失われ、内と外の濃度差が小さくなり区別が付き難い場合が多くなる。粉末のつき方からだけ見た場合、酸素 5%、10% の図形の外側の部分は薄く、窒素中に、内側の部分は濃く、酸素中にそれぞれ似ており、両者の複合した様な図形となる。またこの様な図形は内と外の識別が難しい場合が多いが、出現する場合としない場合がある様である。図形の内と外の区別がはっきりした場合に



写真—2 各混合比における電荷図 (負極性, 印加電圧 29.4 kV, DL: 電荷図長さ)

は内側，外側それぞれの電荷図長さを測定した。

3.2 窒素と酸素の混合比変化と電荷図長さ

3.2.1 印加電圧波高値の場合 印加電圧波高値で正極性 20.7 kV，負極性 20.9 kV の場合の窒素，酸素の混合比と電荷図長さの関係を 図-2 に示す。○および×印は各 6 回以上の平均値を示す。波高値に対する図は，正極性，負極性ともばらつきは大きいが簡便に概略的な傾向が得られ，各電圧，各混合比での最大電荷図長さを推測出来，絶縁設計や，実験を進める上で測定機器をフラッシュオーバの危険から予防するために有用な資料となる。

沿面放電の電荷図長さは波高値に対しては一般にばらつきが大きいがこの理由としては，沿面コロナストリーマの進展は極めて短時間内に行われるため^{8),9)}，この時間に対して同程度の立ち上がりを有する波形を除き，本実験に使用した様な 1.1 μs 程度の立ち上がりの波形においては沿面コロナ進展中の電圧の変化は小さく電荷図の大きさは，沿面コロナ放電の開始した

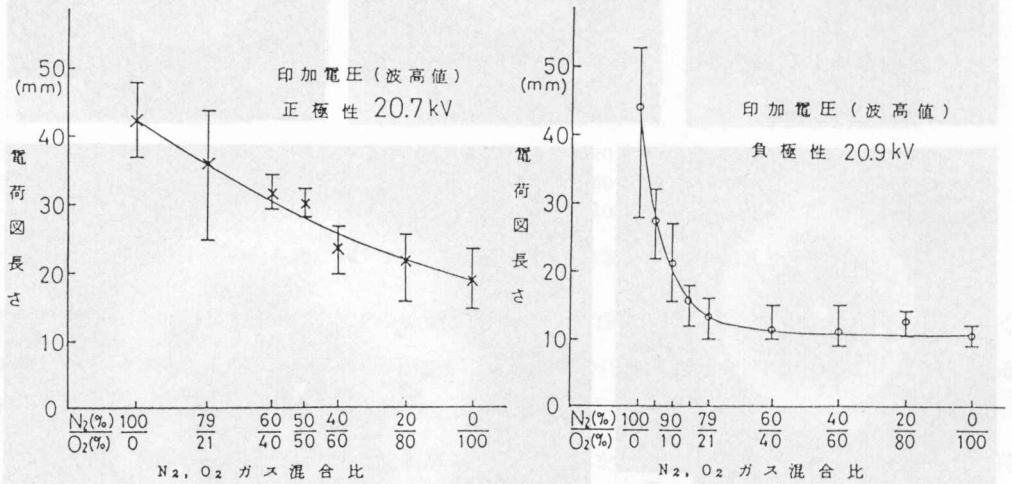


図-2 窒素-酸素ガス混合比と電荷図長さの関係 (波高値の場合)

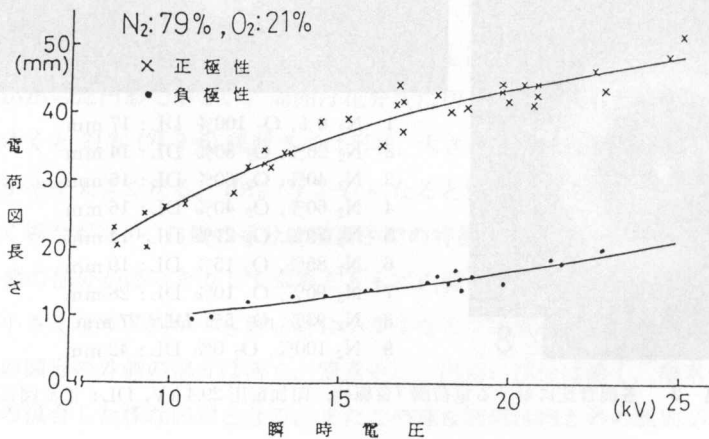
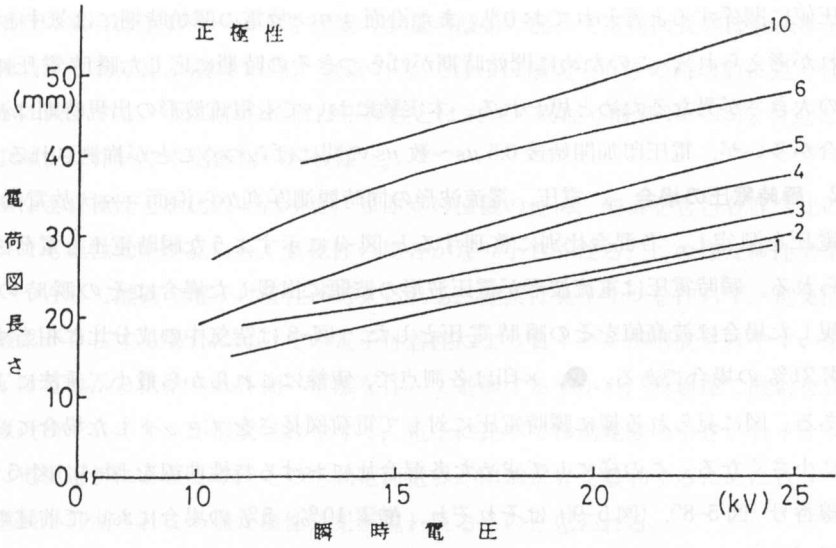
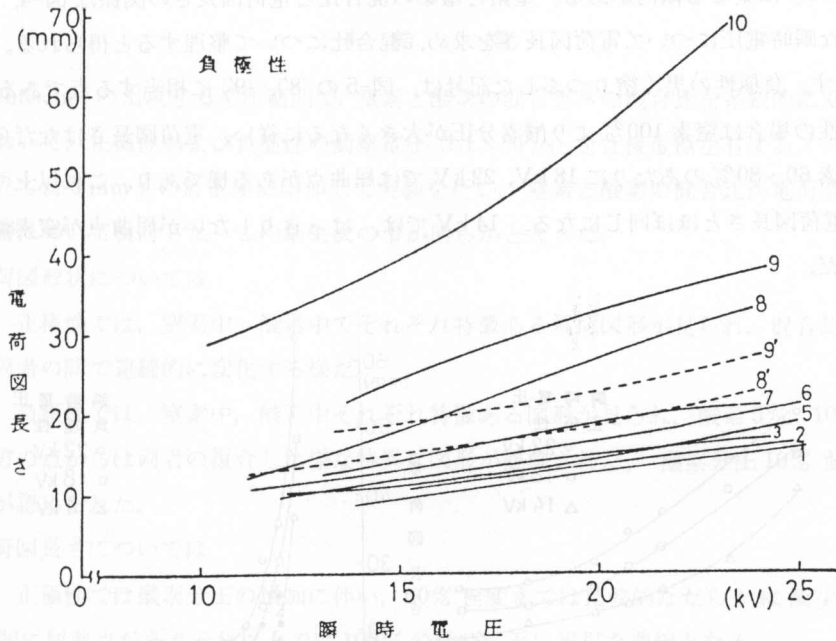


図-3 瞬時電圧と電荷図長さの関係



(各曲線の混合比は 図-5, 負極性の場合の番号と同じ)

図-4 瞬時電圧と電荷図長さの関係 (正極性)



- | | | |
|---|---|--|
| 1 N ₂ 0%, O ₂ 100% | 2 N ₂ 20%, O ₂ 80% | 3 N ₂ 40%, O ₂ 60% |
| 4 N ₂ 50%, O ₂ 50% | 5 N ₂ 60%, O ₂ 40% | 6 N ₂ 79%, O ₂ 21% |
| 7 N ₂ 85%, O ₂ 15% | 8 N ₂ 90%, O ₂ 10% | 9 N ₂ 95%, O ₂ 5% |
| 10 N ₂ 100%, O ₂ 0% | 8' N ₂ 90%, O ₂ 10% (内) | 9' N ₂ 95%, O ₂ 5% (内) |

図-5 瞬時電圧と電荷図長さの関係 (負極性)

瞬時の電圧値に関係すると言われており⁹⁾、また沿面コロナ放電の開始時期には気中と同様に統計的遅れが考えられ⁵⁾、このために開始時期がばらつきその時期に応じた瞬時電圧によって電荷図形の大きさが異なるためと思われる。本実験においても電流波形の出現時期は波頭出現する機会が多いが、電圧印加開始後 $0.5 \mu\text{s}$ ~ 数 μs の間にばらつくことが推測される。

3.2.2 瞬時電圧の場合 電圧、電流波形の同時観測写真から沿面コロナ放電の発生した瞬時の電圧を測定し、各混合比別に整理すると図-3に示すような瞬時電圧と電荷図長さの関係が得られる。瞬時電圧は電流波形が電圧波形の波頭に出現した場合はその瞬時の電圧、波尾に出現した場合は波高値をその瞬時電圧とした。図-3は空気中の成分比に相当する窒素79%、酸素21%の場合である。●、×印は各測点で、実線はこれらから最小二乗法により求めた曲線である。図に見られる様に瞬時電圧に対して電荷図長さをプロットした場合にはばらつきは非常に小さくなる。この様にして求めた各混合比における特性曲線を図-4、図-5に示す。負極性の線番号(図5-8')、(図5-9')はそれぞれ、酸素10%、5%の場合において前述の複合した様な図形が出現した場合の内側の長さの曲線である。複合した様な図形として識別できなかった場合の電荷図長さは酸素5%では外側の長さの曲線(図5-9)に、10%では内側の長さの曲線(図5-8')に集まる傾向がある。窒素と酸素の混合比と電荷図長さの関係は図-4、図-5より、適当な瞬時電圧について電荷図長さを求め、混合比について整理すると得られる。これを図-6に示す。負極性の黒く塗りつぶした記号は、図-5の(8')、(9')に相当する点である。

正極性の場合には窒素100%より酸素分圧が大きくなるに従い、電荷図長さはなだらかに減少し、酸素60~80%のあたりに18kV、22kVでは屈曲点がある様であり、これ以上では酸素100%の電荷図長さとはほぼ同じになる。14kVでは、はっきりしないが屈曲点が窒素側に寄っている様だ。

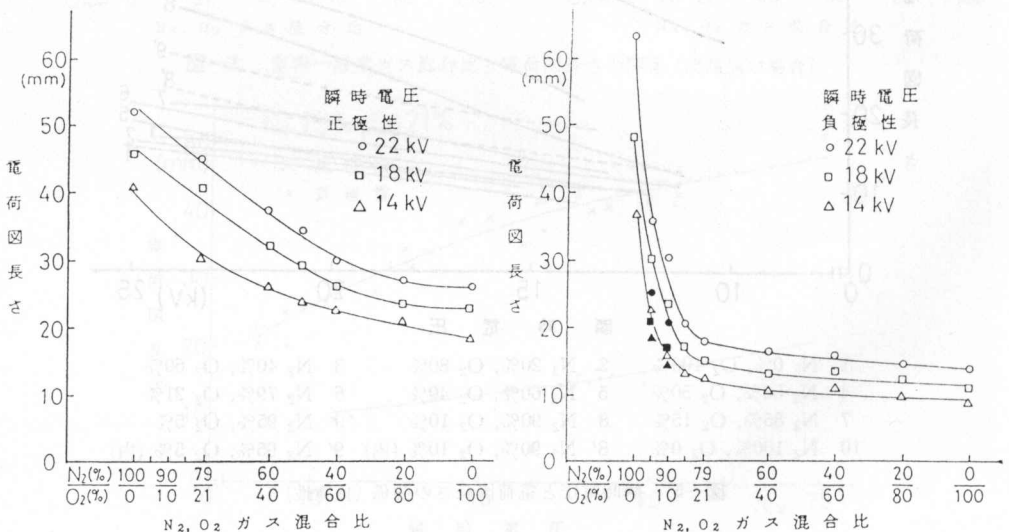


図-6 窒素-酸素ガス混合比と電荷図長さの関係(瞬時電圧の場合)

負極性の場合には窒素中への5%程度の少量の酸素の混入で電荷図長さは急激に減少し、空气中に相当する成分比、酸素21%、窒素79%ではほぼ酸素100%の時の値に近くなり、以後ゆるやかに減少する。屈曲点の位置は正極性とは大きく異なり酸素10~15%付近となり、瞬時電圧の減少に伴いやや窒素側へ寄る様だ。

正極性と負極性とを比較した場合、屈曲点の位置の他に、酸素を含む各混合比の電荷図長さについても極性効果が見られ、負極性の場合かなり小さくなる。この様な極性効果が現れる要因の一つとして酸素の電子付着性が考えられる。窒素は負イオンを作らず、電気的負性気体である酸素が存在する場合には、その電子付着性により負イオンが形成されやすい事、負極性では電子は電極から供給され外側へ電離を伴って進展する事から、負極性で酸素を含む場合には、電極近傍で負イオンが形成されやすく、電子に比べて移動能力の小さい負イオンは空間電荷として電極近傍にとどまり、その空間電荷電界が印加電界を緩和するために負コロナストリーマの進展が抑制されこの様な極性効果が現われるものと思われる。

この事をより明確にするためには、印加電界の計算、放電電荷量、残留電荷量等の定量的な測定が必要と思われ、今後更に研究を進め検証してゆきたい。

4. 結 言

Polbüschel の出現する電圧範囲で、窒素と酸素の混合ガスの混合比を系統的に変えた混合気中において、正極性および負極性の衝撃電圧 ($1.1 \times 36 \mu\text{s}$) を背後電極を有するアクリル樹脂板上に立てた6 mm ϕ の針電極に印加して実験を行い、窒素と酸素の混合比が電荷図長さへ及ぼす影響について検討した。この結果次の事が明らかとなった。

電荷図形状については

1) 正極性では、窒素中、酸素中でそれぞれ特徴ある電荷図形が見られ、混合比の変化に対して両者の間で連続的に変化する様だ。

2) 負極性では、窒素中、酸素中それぞれ特徴ある図形が見られ、酸素5%、10%で粉末のつき方の点からは両者の複合した様な特異な図形が観測された。酸素分圧10%まで酸素中の特徴が認められた。

電荷図長さについては

3) 正極性では酸素分圧の増加に伴い、60%程度までは比較的なだらかに減少し、60~80%の間に屈曲点がありそれ以上では100%の伸びに近い平坦な曲線となる。

4) 負極性では酸素分圧の増加に伴い、わずかの増加で急激に減少し21%程度でほぼ100%中の長さに近くなり、以後平坦な曲線となる。屈曲点は10~15%付近になる。

また、正極性と負極性の比較において

5) 特性曲線には顕著な極性効果が認められた。

終りに本実験に協力された本学卒業生久保貴則、競正明の両君に厚くお礼申し上げる。

参 考 文 献

- 1) 駒宮, 田中: 産業安全研究所技術資料, RIIS-TN-70-1, 1970.
- 2) 鳥山: 電気学会論文誌, Vol. 50, p. 82, 1930.
- 3) 曾祿, 早川, 鳥山: 電気学会放電研究会資料, ED-72-19, 1972.
- 4) 御所: 電気学会論文誌, Vol. 94-A, No. 8, 1974.
- 5) 辻村, 中村, 前田: 電気学会放電研究会資料, ED-75-15, 1975.
- 6) 放電ハンドブック, p. 222, 電気学会.
- 7) 横井, 鈴木: 電気学会雑誌, Vol. 87-3, No. 942, 1967.
- 8) 小山, 室岡: 電気学会論文誌, Vol. 93-A, No. 9, 1973.
- 9) 辻村, 中村: 電気学会放電研究会資料, ED-72-6, 1972.