

論 文

針-平板ギャップの雷インパルス放電特性に 及ぼす湿度の影響

首藤克彦*, 久場英治*

(1994年8月24日受理)

The Effect of Humidity on the Sparkover Characteristics of the Needle-Plane Gaps Under Impulse Voltages

Katsuhiko SHUTOH* and Eiji KUBA*

(Received August 24, 1994)

Experimental studies on the influence of humidity on the sparkover phenomena are described. The experiment was carried out on the 5 to 50 mm needle-plane gaps under impulse voltages having the wave shape of 1.2/50 μ s. 50% sparkover voltages and distribution of sparkover time lags were measured. Development process of sparkover phenomena were observed by means of an image-converter-camera. Increase in the 50% sparkover voltage of 0.4 to 1.0% was obtained for each increase of humidity by 1 g/m³ at gap length above 15 mm under positive impulse voltage. From the photographic study with the image-converter-camera, it can be concluded that the development of sparkover is suppressed by the presence of water vapour.

1. はじめに

放電現象は湿度の影響を強く受け、湿度は放電不整の主要な要因の一つであり、大気中の放電現象と湿度との関係については多くの研究成果が公表されている¹⁻³⁾。

また、放電現象と湿度との関係は、実用的な問題としてギャップ長が数十cmより十数mにわたり放電電圧と湿度との相関に関する多くの実験的研究が行われ⁴⁻⁷⁾、この領域における放電電圧と湿度との関係は明らかにされつつあり、その補正係数も示されている⁸⁾。

しかし、ギャップ長が数mm～数十mmにおける領域では、放電電圧と湿度との関係に関する研究は少なく、また、この領域においては、湿度に起因すると考えられる放電不整が多く観測され、これらは、JEC等に規定されている湿度補正を行っても、補正結果に矛盾が感じられる場合がある⁸⁾。

本論文は、ギャップ長が5～50mmにおける針対平板ギャップのインパルス放電現象と湿度との関係について検討を行ったものである^{9,10)}。

キーワード：放電、放電不整、湿度補正

* 東京理科大学理工学部電気工学科 (278 千葉県野田市山崎 2641)

Department of Electrical Engineering, Faculty of Science and Technology, Science University of Tokyo, 2641 Yamazaki Noda, Chiba, 278 Japan

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置

本研究においては、実験箱の湿度コントロールを広範囲で行い、長時間にわたり実験条件を一定に保つことが重要である。また、自然大気中に浮遊している浮遊粉塵は、放電に影響を与える因子の一つ¹¹⁾であり、浮遊粉塵の影響を極力少くするため、実験箱の粉塵濃度をクラス100のクリーンルームと同等に保つことを目標に実験装置の製作を行った。

実験装置は、高性能フィルタにより除塵を行った空気を加湿して放電箱へ送風し、放電箱の湿度コントロールを行うような構成であり、その系統を図1に示す。

実験箱は、内箱と外箱の二重構造とした。内箱は、厚さ10mmのアクリル樹脂で製作し、その内寸法は、190mm×180mm×180mm、内箱の容積は約6リットルである。外箱は、放電路の写真撮影を行うことを目的に遮光構造とするため、厚さ5mmの紙フェノール樹脂で製作した。また、実験箱の前後面に写真撮影用の石英ガラス製の観測窓を設けた。

加湿器は、アクリル樹脂で製作しその内寸法は、150mm×150mm×300mmである。加湿は、加湿箱の底部に取り付けた2個の超音波振動子により行った。湿度コントロールは、超音波振動子の駆動電圧により行い、加

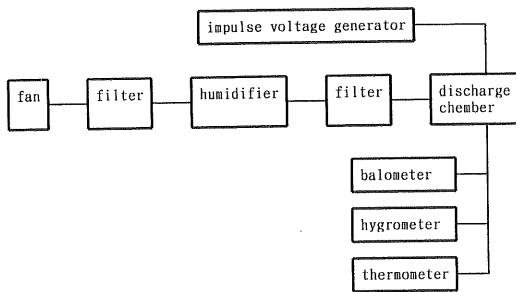


図 1 実験装置の系統

Fig. 1 The block diagram of the experimental arrangement.

湿用の水は市販の蒸留水を用いた。実験箱中の湿度可変範囲は、最大絶対湿度 25 g/m^3 である。

加湿後の空気中に含まれる比較的大きな霧状の水粒子を除去するため、加湿箱と放電箱のあいだにガラス纖維フィルタを挿入した。

放電電極は、垂直配置形針-平板電極を用いた。針電極には、直径 1 mm のタンクステン棒の一端を 60 度の円錐状に加工し、その先端の曲率半径を $10 \mu\text{m}$ としたものを、平板電極には、直径 100 mm の黄銅製疑似ロゴスキー電極を用いた。

気圧計は、受圧ベローズで圧力を検知し、電気信号への変換に差動インダクタンスを用いた計測器を使用した。温度ならびに湿度の測定は、半導体温度検出素子ならびに塩化リチウム露点センサを用いた計測器で行った。

2.2 実験方法

絶対湿度を変化させ、ギャップ長を $5\sim50 \text{ mm}$ の範囲にわたり 5 mm 間隔で変化させて、電圧印加回数 41 回の昇降法により 50% 放電電圧 (V_{50}) を測定した。

電圧-放電遅れ時間特性は、種々のギャップ長において絶対湿度を変化させ、各印加電圧における総放電回数を 100 回として測定した。測定にあたって、さい断までの時間が $20 \mu\text{s}$ 以上となった例について放電遅れ時間は $20 \mu\text{s}$ として取り扱った。

イメージコンバータカメラによる放電過程の観測は、絶対湿度が $4\sim5 \text{ g/m}^3$, $12\sim20 \text{ g/m}^3$ の場合について行った。イメージコンバータカメラは HADLAND PHOTONICS 社製の IMECON 790-S20-UV を用い、撮影には光透過特性が $220\sim1,000 \text{ nm}$ のレンズを使用した。

印加電圧波形は、 $\pm(1.2/50) \mu\text{s}$ の標準雷インパルス電圧である。また、測定は、ギャップの中心において $0.1\sim0.15 \text{ m/s}$ の風速で常時送風した状態で行い、照射は行っていない。

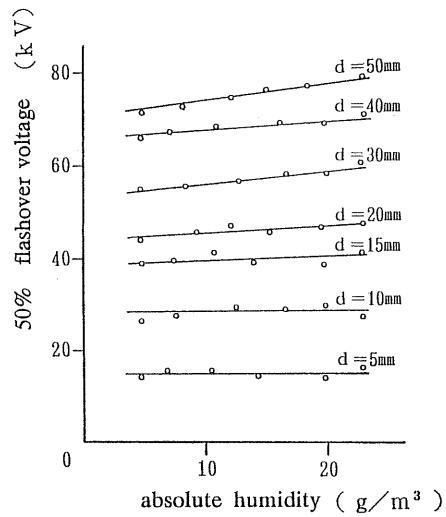
図 2 V_{50} と湿度との関係 (正極性, δ 補正)

Fig. 2 50% sparkover voltage after δ correction versus absolute humidity for positive $1.2/50 \mu\text{s}$ waves.

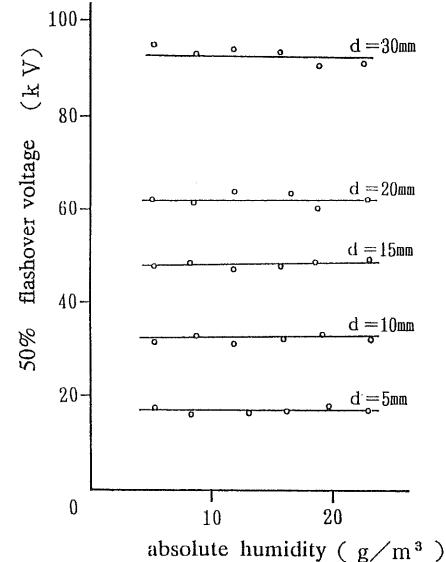
図 3 V_{50} と湿度との関係 (負極性, δ 補正)

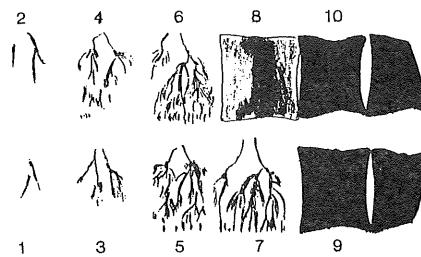
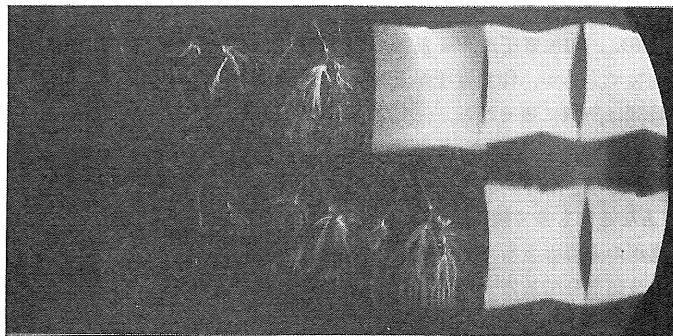
Fig. 3 50% sparkover voltage after δ correction versus absolute humidity for negative $1.2/50 \mu\text{s}$ waves.

3. 実験結果

3.1 V_{50} に対する湿度の影響

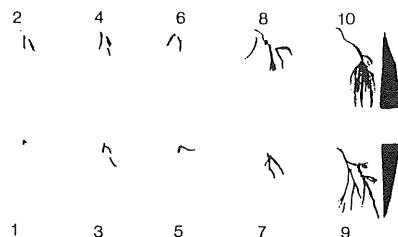
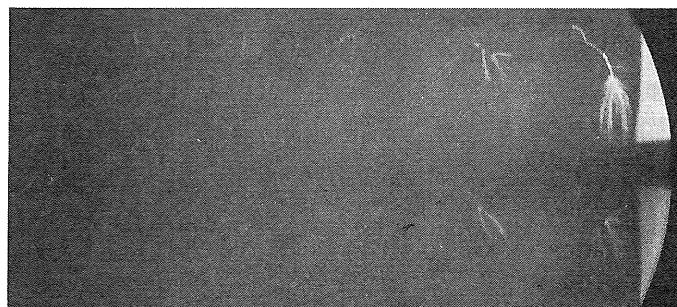
図 2, 図 3 に V_{50} と湿度との関係を示す。図に示す V_{50} の値の標準偏差は、 $0.8\sim1.6\%$ 程度であり、また、空気密度補正を行った値を示している。

正極性インパルス電圧を印加した場合、湿度の影響は



schematic diagram
of photograph

(a) absolute humidity : 5.0 g/m^3
applied voltage : 50% sparkover voltage



schematic diagram
of photograph

(b) absolute humidity : 17.0 g/m^3
applied voltage : 50% sparkover voltage

図 8 放電路進展過程の駒撮り写真の一例

Fig. 8 Photograph of sparkover development process at 2×10^7 framing per second for 20 mm needle-plane gap under 1.2/50 μs waves.

表 1 放電遅れ時間の分布

Table 1 Distribution of sparkover time lag.

Sparkover time lag (μs)	Gap length 10 mm		Gap length 20 mm	
	h : 8.9 g/m ³	h : 15.2 g/m ³	h : 8.5 g/m ³	h : 14.1 g/m ³
0- 2	%	1%	63%	56%
2- 4			6	3
4- 6			2	
6- 8		2		
8-10	2	26	19	24
10-12	28	27	1	4
12-14	44	19	1	4
14-16	9	5	2	3
16-18	4	4	1	3
18-20	1	1		1
above 20	5	15	5	2
The average of time lag	11.3 μs	13.8 μs	4.8 μs	5.6 μs

Applied voltage : 50% sparkover voltage.

られる。

コロナストリーマは針電極の先端に複数観測されるが、その進展は湿度が低い場合に比較すると少なく、ブラシコロナは、一個のコロナストリーマの先端のみに観測され、ブラシコロナの進展範囲は狭い。

4. 検 計

4.1 ギャップ長と湿度との関係

実験結果で明らかなように正極性インパルス電圧を印加した場合、湿度は V_{50} に影響を与えるが、負極性インパルス電圧を印加した場合、 V_{50} に対する湿度の影響はほとんどないと考えられる。

印加電圧が正極性インパルス電圧の場合、ギャップ長が 15 mm 以下では V_{50} は湿度の影響をほとんど受けない。しかし、ギャップ長が 15 mm 以上では、湿度が高くなるに従い、 V_{50} は上昇し、ギャップ長が長くなるに従い、 V_{50} は上昇し湿度の影響は顕著となる。

正極性インパルス放電におけるギャップ長と V_{50} およびコロナ開始電圧との関係や放電機構については常安らによって詳細な検討が行われ、ギャップ長 15 mm を境に放電機構が異なることが示されている。すなわち、コロナ開始電圧は、数 cm 以下のギャップ長ではギャップ長による変化は少ないが、 V_{50} は、ギャップ長 15 mm 前後に変曲点が観測され、また、放電機構は、ギャップ長が 15 mm 程度以下ではコロナストリーマが進展し、平板電極より進展した負ストリーマと結合し、ギャップを橋絡してフラッショーバーに至るのに対し、ギャップ長

が 15 mm 程度以上では、コロナストリーマが間欠的に発生進展し、これに伴いリーダが進展してフラッショーバーに至ることが示されている¹²⁾。

本研究においても変曲点は、ギャップ長 15 mm 前後と推察される。また、図 7、図 8 に示すようにコロナの開始点は湿度の差異による変化は少ないが、コロナストリーマやリーダの進展状況は湿度の差異により異なる。このことよりギャップ長による湿度の影響の差異は放電機構が相違することに起因するものと考えられる。

表 1 は、ギャップ長 10 mm と 20 mm における湿度を変化させた場合の放電遅れ時間の分布を表したものである。表によると、ギャップ長 10 mm, 20 mm, いずれも湿度が高い場合の放電遅れ時間の平均値は大きい値を示している。

ギャップ長が 10 mm の時、湿度が高い場合の放電遅れ時間は広い範囲に分布し、放電遅れ時間が 20 μs 以上の例が全放電数の約 15% 観測された。

ギャップ長が 20 mm の時は、放電遅れ時間が 2 μs 以下の例が湿度が 8.5 g/m³ の場合 63%, 14.1 g/m³ の場合 56% といずれの場合も半数以上を占めているが、平均放電遅れ時間は湿度が高い場合に大きい値を示す。

表 1 は、印加電圧が V_{50} の場合であるが、印加電圧が V_{50} より高くなると放電遅れ時間は短くなる。この場合にも湿度が高くなると放電遅れ時間が長い例がより多く観測された。

これらのことより大気中の水分は、放電路周辺の電子を吸着し放電路の進展を抑制するものと考えられる。ま

た、湿度は、放電路進展の初期過程に与える影響は少ないが、コロナストリーマ、リーダの進展過程ではその影響は大きく、この影響はギャップ長が長くなるほど顕著となることが推察される。

4.2 放電路の進展に対する湿度の影響

50% フラッシュオーバ電圧、放電率、放電遅れ時間特性などの実験結果より、湿度の影響は正極性放電、負極性放電で異なり、正極性インパルス電圧を印加した場合に顕著に現れる。

放電開始には、放電電極先端部の初期電子が重要な働きを行う。放電路の近傍では、光電離、衝突電離などにより生成された電子が放電路の進展に影響を与える。

放電路は、これらの電子が多量に生成され、その電子が放電路の進展に有効に作用する条件の時、その進展速度は早くなると考えられる。

イメージコンバータカメラにより撮影した写真より測定した、湿度が 8.6 g/m^3 ならびに 15.9 g/m^3 の場合の、針電極先端部の発光開始時間は、ギャップ長が 10 mm の時 $0.7 \mu\text{s}$ 、ギャップ長が 20 mm の時 $0.4 \mu\text{s}$ と湿度による相違はなかった。

ここで、針電極先端部の発光開始時間は、印加インパルス電圧の原点よりの時間を示している。この値は、イメージコンバータカメラの撮影感度条件を同一にして、撮影可能な最小の発光と、イメージコンバータカメラ起動用のパルスディレイジェネレータの遅延時間より読み取った相対値である。

イメージコンバータカメラにより撮影した写真より測定したコロナストリーマの進展速度は、ギャップ長が 10 mm の時、湿度が 6.8 g/m^3 の場合 $6.8 \times 10^7 \text{ cm/s}$ 、湿度が 15.6 g/m^3 の場合 $3.8 \times 10^7 \text{ cm/s}$ であった。

ギャップ長が 20 mm ではコロナストリーマの進展速度は、湿度が 6.5 g/m^3 の場合 $5.6 \times 10^7 \text{ cm/s}$ 、 13.4 g/m^3 の場合 $5.0 \times 10^7 \text{ cm/s}$ と相違は少ない。しかし、リーダの進展速度には大きな差異が認められ、湿度が 6.5 g/m^3 の時は、進展速度は $7.7 \times 10^5 \text{ cm/s}$ であるのに対し、湿度が 13.4 g/m^3 における進展速度は $1.5 \times 10^5 \text{ cm/s}$ となり、その値は約 5 分の 1 程度となる。

放電路の進展過程においては、多量の電子・イオンが生成され、これらがそれに続く放電路を形成していく。

空気中の水分は、水分子数個～数十個が結合した状態で浮遊していると考えられる。湿度が高く、大気中に多量の水分が含まれている場合、放電路の進展過程で生成された電子の一部は、発生後ただちに水分子と結合する。そして、生成された一次イオンは、ただちに水分子と結合してハイドロニュームイオンとなり^{13,14)}、放電の

進展に重要な一次イオンの濃度が低下する。このため放電の進展速度は遅くなると考えられる。

これらのことより、正極性放電では、湿度が高くなり、大気中に含まれる水分が多くなると、放電の進展過程におけるブランコロナ・ストリーマコロナの過程で、光電離ならびに衝突電離により発生した一次イオンが、多量に浮遊する水分子と結合する。このためブランコロナの先端部における一次イオン密度が低下し、放電の進展速度が遅くなるものと考えられる。

5. むすび

ギャップ長が $5 \sim 50 \text{ mm}$ の針対平板電極において、インパルス放電と湿度との関係を検討した本研究では、次の結果が得られた。

- 1) 50% フラッシュオーバ電圧に対する湿度の影響は、正極性インパルス電圧を印加した場合、ギャップ長が 15 mm 程度以上で現れるが、ギャップ長がそれ以下においては、その影響は少ない。
- 2) 負極性インパルス電圧を印加した場合、50% フラッシュオーバ電圧に対する湿度の影響は少ない。
- 3) 放電の各過程における湿度の影響は、放電の初期過程に比較し、放電路の進展過程において顕著に現れる。
- 4) 放電路の進展過程において湿度が高くなると、大気中の水分子が一次電子あるいは一次イオンを吸着し放電路の進展は阻害される。このため、湿度が高くなると放電電圧は上昇する。

参考文献

- 1) 御所康七：電学論 A, 94-A (1974) 354
- 2) 細川辰三、岩間紀男、三好保憲：電学論 A, 95-A (1975) 269
- 3) N.L. Allen and D. Dring : Proc. R. Soc. Lond., A-395 (1984) 281
- 4) T. Harada, Y. Aihara and Y. Aoshima : IEEE Trans. PAS, PAS-90 (1971) 1433
- 5) Y. Aihara, Y. Watanabe and I. Kishizima : IEEE Trans. PAS, PAS-102 (1983) 3778
- 6) T.E. Allibone : Proc. IEEE, 119 (1972) 1417
- 7) T.E. Allibone and D. Dring : Proc. IEEE, 121 (1974) 221
- 8) JEC-212-1981
- 9) 首藤克彦：静電気学会講演論文集, '93, 3 p A3 (1993)
- 10) 船橋伸一、首藤克彦、鶴見策郎、旗手 望：昭和 60 年電気学会全国大会論文集, No. 155 (1985)
- 11) 首藤克彦、鶴見策郎：昭和 54 年電気学会全国大会シンポジウム, S-2 (1979)
- 12) 常安 幡：電学論 A, A-96 (1976) 63
- 13) 三崎方郎：気象研究ノート, 142 (1981) 1
- 14) V.A. Mohnen : Proceedings of Fifth International Conference on Atmospheric Electricity (1977) 1