

論 文 要 旨

バリア放電の放電発生点配置における 放電発生メカニズムの研究

A study on Mechanism of Discharge Generation in the
Discharge Generating Point Arrangement of
Dielectric Barrier Discharge

金沢大学大学院 自然科学研究科
機械科学専攻

竹本 翔一

Abstract:

In terms of promoting chemical reactions in barrier discharges, we have focused on methods to "increase the discharge space density" which indicates the spatial occupancy rate of the discharge generation area.

Fixed-field discharges with concentrated electric fields, such as multi-point projection electrodes are effective in increasing the discharge space density and to further improve the discharge space density. It is important to understand the relationship between the distance of the discharge generation point and the presence or absence of discharge coupling and the effect of this on the number of discharges and the average charge per discharge.

(1) the discharge image, (2) the number of discharges, and (3) the average amount of electric charge per discharge in the discharge phenomenon according to the distance of the discharge occurrence point of the barrier discharge. Furthermore, the objective was to use the acquired data to clarify that as the distance between the discharge points decreases adjacent discharges are combined.

I developed a discharge reactor with a horizontal row of discharge generation points. And I established a calculation method in which the number of discharges is the number of times the current waveform of one discharge is subtracted from the original discharge waveform as a template waveform.

From the results obtained using the established method, it was shown that discharges at adjacent discharge points are coupled. And it was clarified that discharge coupling occurs when the distance between discharge points is smaller than the discharge gap.

本研究では、放電プラズマの中でも特に非熱プラズマ領域で化学反応を扱う多種多様な産業製品/システムに応用されているバリア放電を取り扱う。バリア放電での化学反応促進には、反応に寄与する加速電子を増やすことが重要と考えられる。加速電子を増やす観点の中でも、未だ議論が十分になされておらず研究途上の課題である”放電発生領域の空間的な占有率を示す放電空間密度を高める”方法に着眼した。放電空間密度の向上には、多点突起形状電極のような電界集中部を備えた固定電界放電が有効である。この固定電界放電を理解する上で重要な放電発生点配置の密集度と放電本数の関わりにおいて、“放電発生点配置の密集度が所定値以上となると放電本数が減少する”現象がある。この現象の要因は、隣り合う放電発生点の放電が結合する放電結合によるものであると推定した。固定電界放電における放電空間密度の更なる向上のためには、放電発生点距離と放電結合有無の関係と、これによる放電本数・放電1本あたりの平均電荷量の影響を把握することが重要な観点と考え、本研究の目的を「バリア放電の放電発生点距離に応じた放電現象において、①放電画像、②放電本数、③放電1本あたりの平均電荷量を取得すること。さらに放電発生点距離が小さくなることにより隣接した放電が結合することを、取得データを用いて明確化すること」と設定した。

放電発生点距離に応じた①放電画像, ②放電本数, ③放電 1 本あたりの平均電荷量を取得するには, 放電発生点距離 p と放電ギャップ d を水準とした放電を形成し放電及び放電結合の現象を観察すること, 放電本数, 放電 1 本あたりの平均電荷量をそれぞれ測定/計算すること, それらの観察・測定情報を同一時間軸で同期させて取得する実験装置環境/手段が必要となる. 本研究では下記の工夫により, この実験装置環境/手段を構築した.

- ・放電の観察: 放電が観察方向に対して奥行を持たないように, 放電が横一列の並びとなる放電リアクタを採用し放電 1 本および放電結合の観察を可能とした.

- ・電流波形取得: 放電 1 本に分離可能な電流波形取得のため放電本数を調整した. 放電本数の調整は, 放電が「各放電発生点で形成される電界強度が絶縁破壊閾値を超過した際に生じる」という考えに基づき, 放電発生点数と印加電圧を低減方向に制御して行った. この結果, 交流電圧 1/2 周期で 10~100 本程度の電流波形を得た. 加えて, 放電 1 本の電流波形を正確に読み取れるレベルのサンプリングレート 10GS/sec でデータを取得する. これにより, 放電 1 本の電流波形を分離可能とし, この後に続く, 放電本数と放電 1 本あたりの平均電荷量を計算可能とする.

- ・放電画像と電流波形の同期取得: 放電リアクタに交流電圧 V_{out} を印加する. このとき, 高速度カメラは放電撮影トリガー信号を待機した状態となっている. V_{out} が予め設定した撮影トリガー信号の電圧閾値 V_{trg} を超過すると, デジタルオシロスコープより撮影トリガー信号が発信され, 高速度カメラでは放電画像の撮影を行う. この過程で発生している放電電流 I_{out} は電流センサで測定し, V_{out} ・撮影トリガー信号と共にデジタルオシロスコープに記録される. 以上の流れで, 撮影した「①放電画像」と, それに同期する「電流波形」を取得する.

- ・放電本数の計算: 先行研究で実施されている放電全体の電荷量から代表的な放電 1 本の電荷量を除算し放電本数を計算する手法では, 放電 1 本の電荷量のばらつきを考慮していないため, 正確な放電本数は計算できないと考える. そこで, 生体工学や音響工学

における信号処理で用いられるテンプレート差分法の考え方を参考として手法を構築した。全体の放電電流波形から放電 1 本あたりの電流波形をテンプレート波形として抽出した後、全体の放電電流波形を時間方向に掃引し、テンプレート波形のピーク電流値に設定した閾値を超過するタイミングで全体の放電電流波形からテンプレート波形の電流値を減算する。そしてまた全体の放電電流波形のはじめから時間方向に掃引し、閾値を超過するタイミングで上記同様の減算を行う。この減算を全体の放電電流波形が閾値を超過しなくなるまで繰り返し、減算した回数をその全体の放電電流波形の放電本数とする。

・放電 1 本あたりの平均電荷量：交流電圧 1 周期分の総電荷量をリサージュ図形中の放電電荷量 $2Q_d$ から計算し、上記の放電本数 N の計算後に電荷量 $2Q_d$ を放電本数 N で除算することで放電 1 本あたりの平均電荷量 q_μ を算出する。

本研究で構築した実験装置環境/手段を用いて、放電リアクタの放電ギャップ d を 1.0mm で固定条件とし、放電発生点距離 p を 0.5mm, 1.0mm, 2.0mm の 3 水準とした場合に交流電圧振幅 17.5kVp-p, 交流電圧周波数 45kHz で放電させたときの「①放電画像」の撮影と、その時の「②放電本数」および「③放電 1 本あたりの平均電荷量」の取得を試みた。得られた結果のまとめを図 1 に示す。この結果から、以下の結論を得た。

<放電画像の撮影>

取得した画像より $p \leq d$ では放電発生点間と対向電極の空間に放電が見られ、 $p > d$ では放電発生点の下で放電が見られた。放電発生点距離が小さい $p \leq d$ の条件にて放電が結合することを画像にて示した。

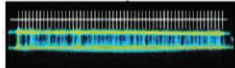
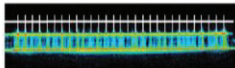
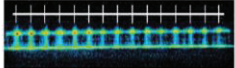
<放電本数の計算>

$p=0.5\text{mm}$ (放電発生点数 57), $p=1.0\text{mm}$ (放電発生点数 29), $p=2.0\text{mm}$ (放電発生点数 15) ではそれぞれ 30 本/cycle, 38 本/cycle, 34 本/cycle であり、放電発生点距離 p が小さくなるに従って放電発生点数に対する放電本数が減少していく、放電結合を裏付ける結果を得た。

<放電 1 本あたりの平均電荷量>

$p=0.5\text{mm}$, $p=1.0\text{mm}$, $p=2.0\text{mm}$ で、それぞれの放電 1 本あたりの平均電荷量の序列が $1.27\text{nC} > 0.81\text{nC} > 0.79\text{nC}$ であることを示した。放電発生点距離 p が小さくなるに従って放電 1 本あたりの平均電荷量が増加しており、放電結合を裏付ける結果を得た。

以上、①放電画像、②放電本数、③放電 1 本あたりの平均電荷量の 3 つの結果より、隣接した放電発生点の放電が結合しているデータを示し、放電発生点距離が $p \leq d$ の条件にて放電結合が起こることを明確化した。

Discharge point interval p [mm]	Discharge photography image	Number of discharges [/cycle]	Average electric charge per discharge [nC]	discharge coupling/co-associating [Occurrence or None]
0.5 ($p < d$)		30	1.27	Occurrence
1.0 ($p = d$)		38	0.81	Occurrence
2.0 ($p > d$)		34	0.79	None

Discharge gap d : 1.0 [mm]

Fig.1 Summary of Verification Results.

本研究では、奥行き方向の放電発生点を排除し、横一列の一次元系かつ放電ギャップ 1.0mm、交流電圧振幅 17.5kVp-p、交流電圧周波数 45kHz、ガス組成 $\text{O}_2 : \text{N}_2 = 21 : 79$ で放電発生点距離を水準としたときの放電結合について検討を行った。後進の研究には、本研究を、工業応用されるバリア放電へ活用できるよう、より実用形態に近い奥行きを持った放電リアクタや多様な電圧印加条件・ガス組成へ適用可能なように発展させることを期待する。

学位論文審査報告書（甲）

1. 学位論文題目（外国語の場合は和訳を付けること。）

バリア放電の放電発生点配置における放電発生メカニズムの研究

2. 論文提出者 (1) 所 属 機械科学 専攻

(2) 氏 名 竹本 翔一

3. 審査結果の要旨（600～650字）

当該学位論文に関し、令和4年7月29日8時40分より第1回学位論文審査会を開催し提出された学位論文及び関係資料に基づき内容を検討した。同日9時00分より口頭発表を行い、発表後に第2回学位論文審査委員会を開催、協議の結果、以下の通り判定した。

本論文は、高電圧印可にて生成するバリア放電反応装置の反応促進に関するものである。促進には放電を反応空間全体に万遍なく配置することが有効であり、放電発生点の工夫により空間全体に放電を促すことが検討されている。筆者は放電発生点間隔が狭くなった領域で放電現象が変化することを先行研究の結果から導いた。本論文ではこの現象変化が隣接した放電の結合によるものと想定、結合を捉えるため新たな手法①～③を考案した。

①放電が横一列に並ぶ放電リアクタを用いて放電画像を撮影 / ②実験取得した電流波形から1本相当の波形を減算し放電本数を高精度で算出 / ③総電荷量を測定し算出した放電本数で除算し放電1本あたりの平均電荷量を算出。取得データにて、放電発生点距離の減少に伴い、放電発生点数に対する放電本数の減少、放電1本の平均電荷量の増加を確認し放電結合の生成を示した。特に複数放電の電流波形から電流1本を抽出し、単位時間当たりの放電本数を正確にカウントした前例はこれまでになく、筆者の創意工夫、実験を重ねることで得られた成果である。本手法の考えを用い、複数放電の発生現象を解明しさらなる反応促進に寄与できると考える。以上より学位論文としての価値があると判断する。

4. 審査結果 (1) 判 定 (いずれかに○印) 合 格 ・ 不合格

(2) 授与学位 博 士 (工 学)