

## 質問 1. 放電の写真を捉えるにはどのくらいの性能のカメラが必要でしょうか？

<回答>

コロナ放電（部分放電）、火花放電、定常放電（グロー放電、アーク放電）の全体的な様子を見るなら、一般的なデジカメやスマホのカメラで捉えることができます。ただし、火花放電が瞬時に起こる場合には、その瞬間に同期してシャッターを開くのは難しいので、シャッターを開放状態（ないし数秒開放状態）にして撮影することになります。火花放電やアーク放電は強い光のため、画像がハレーションで真っ白になってしまうことがあるので、適度な光量になるよう絞りを調整する必要があります。

コロナ放電で、特に微弱な発光の場合は、暗視カメラと呼ばれる、光量を電子的に増倍する機能を有するカメラを使う必要があります。

放電の時間進展を捉えたい場合には、通常の動画撮影（1秒間に30コマ程度）では捉えきれないので、高速カメラや超高速カメラが必要となります。ストリーマなどは、光速の百分の一で進む、すなわち、1 ns（10億分の1秒）で3 mm ぐらい進むことから、数十 mm の進展を正確に捉えるためには少なくとも時間分解能 1 ns（超高速カメラ）が必要となります。

## 質問 2. シリコンゲル中の放電進展現象について、放電路は導電性が向上して自己進展するのでしょうか？

<回答>

いくつかの実験結果から見て、その通りだと考えています。放電路空間に残されたプラズマ（電子、正・負イオン）が導電性の上昇や荷電粒子源の増加に寄与し、後続の放電進展を容易にし、更にその先への進展に繋がっていると考えています。空気中で1次ストリーマが通った経路を、2次ストリーマやリーダと呼ばれる放電がなぞるように進展し、放電全体の更なる進展に繋がっているのと同じメカニズムと推定しています。これは、あくまでも推定の域を超えていませんので、今後の研究に期待しています。

## 質問 3. Air と SF6 で放電の冷やし方が違うのはなぜですか？

<回答>

現状では、総て解明されているわけではありませんが、種々の実験結果やシミュレーション結果から推定すると、乱流による冷却効果が効いているのではないかと私は考えています。講演時のスライドでご紹介したように、同じノズル・スロートにガスを流しても、Air では層流に、一方、SF6 では細かな乱流が多数発生していました。熱い物体を冷やすのに、冷たいものをただ表面に押しつけておくのではなく、冷たいものが絶えず表面に当たるように細かく循環させたり、場合によっては、熱いものの内部まで入るように攪拌したりすると、速く冷えるのと同じ原理で、乱流が多数発生すると効果的に冷えるものと考えています。乱流になりやすいかどうかは、気体の動粘性係数やレイノルズ数に関係して、SF6 ガスは Air に比べて動粘性係数

<p>が小さく（さらさらしている）、結果的にレイノルズ数が大きいので乱流になりやすいと言われています。</p>
<p><b>質問 4. 私はプラズマのレーザ計測を研究しているのですが、位相コントラストイメージングでも放電の様子や SF6 の乱流測定ができると思ったのですが PCI はそのような測定には向かないのでしょうか？</b></p>
<p>&lt;回答&gt;</p> <p>放電や乱流の“様子”を捉えるという目的において、PCI は有効だと思います。ここでいう“様子”とは、空間の屈折率をレーザの進行方向に沿って積分した線積分屈折率です。</p> <p>検出器や光源、光学部品の選定に注意すれば、線積分屈折率の定量化も可能でしょう。</p> <p>ただ、PCI も屈折率測定法の一つですので、一つのレーザ波長で PCI を行っても、原理上は PCI の明暗の縞模様がどの物理量と一対一で対応するかは分からない(分離できない)可能性が大きいと思います。是非、屈折率変化を生む物理量をしっかり検討するとよいでしょう。</p> <p>検討結果にもよりますが、光源の波長を X 線や中ないし遠赤外にする、などの対策をすれば、一つの波長の PCI でも、大まかな一対一対応がとれる場合があるかもしれません。</p>
<p><b>質問 5. 気体中の沿面放電において気圧依存性を示していましたが、温度や湿度依存性は存在しますか？</b></p>
<p>&lt;回答&gt;</p> <p>YES or NO でいうと YES になります。補足をすると、気体中の沿面放電だけでなく、一般の放電現象でその進展特性に最も影響を与えるのは、気体の密度 <math>n</math> です。従って、<math>n = p / (kT)</math> (<math>p</math>:気圧、<math>k</math>:ボルツマン定数、<math>T</math>:絶対温度) という関係がありますので、気圧や温度依存性も出てきます。</p> <p>湿度依存性についても検討していますが、合成された気体（絶対湿度はほぼゼロ）と水分を含む気体を比べても、放電の進展特性は数%程度の変化があるかないかで、実験結果のバラツキの標準偏差に埋もれてしまうぐらいと考えています。</p>
<p><b>質問 6. フレキシブルゲルは曲げたら絶縁耐力が下がったりしないのですか？</b></p>
<p>&lt;回答&gt;</p> <p>ゲルの密度が変わるような極端な曲げ方をしない限り、また、ゲルの変形時に電極間距離が変わったり、ゲルと電極の間にすきまができたりにすることが無い限り、絶縁耐力が変化することはないと考えます。</p>
<p><b>質問 7. シャックハルトマン法では、なぜ電子のみ波長の違いに反応するのですか？</b></p>
<p>&lt;回答&gt;</p> <p>シャックハルトマン法では、レーザ光を電磁波と考え、その電磁波が対象となる粒子（電子、イオン、中性粒子）とどのように相互作用し、位相速度がどのように変化するかという屈折現</p>

象を利用しています。通常、レーザ光の電磁波と直接相互作用を行うことができるのは、自由電子ないし、分子やイオン中の束縛電子になります。定性的に説明しますと、自由電子は非常に軽く、周りからの束縛も小さいのでレーザ電界に追従して自由に振動できます。そのため、レーザ電界の特徴量(ここでは周波数や波長)を変えるとその影響が大きくなってきます。つまり、自由電子はレーザの波長の違いに追従して反応できます。

一方、中性粒子やイオンの電子は原子核に強く束縛されているのでレーザ電界に追従して必ずしも自由に動くことができません。そのため、レーザ電界の波長を変えてもその影響は小さくなります。つまり、自由電子と比べると、中性粒子やイオンはレーザの波長の違いに追従して反応しにくくなります。

詳しく述べると、自由電子に対する運動方程式と、ファラデーの法則やアンペールの法則を連立して解くと、(レーザの周波数)  $\gg$  (プラズマ周波数) を満たす範囲で、電子密度に対しては、波長の2乗に比例して屈折率が大きくなる、という結論に至ります。また、金属中の自由電子に適用できるドルーデモデルで考えると、緩和時間  $\tau = \infty$  のときに対応します(一般的に、大気圧のプラズマでは、電子の衝突周波数はレーザの周波数よりもかなり長いので緩和時間  $= \infty$  の関係は成立します)。

中性粒子やイオンの場合は、束縛電子がレーザ電界で分極を起こし屈折率(誘電率)変化が生じます。誘電体現象論で出てくるローレンツモデルで計算してみると、レーザ電界の周波数が粒子構造で決まる特定の共振周波数を除いて、周波数依存性(波長依存性)はあまりない、という結論に至ります。

**質問8. 基礎的な質問ですが、正極性と負極性ではなぜ放電(ストリーマ)の進展の様子が変わるのでしょうか?**

<回答>

正直な所、万人が納得する明解な説明はないというのが回答です。勿論、シミュレーションを通じて説明している場合もありますが、物理的な描像を必ずしも分かり易く描いていないような気がします。これだけでは、回答になっていませんので、不平等電界を対象として正極性と負極性で放電進展の様子が変わるという「極性効果」を考える上で大切な基礎知識を提示しておきます。

第1に、放電進展には、電子が電界によって加速され、多数の衝突電離を繰り返し形成される電子なだれが必要不可欠です。これは、電圧の極性に関係なく、共通の物理現象ですので、これだけでは極性効果は説明できません。そこで重要となるのは、電子なだれの進む方向です。具体的に針電極と平板電極で構成される電極系で、針電極に印加する電圧の極性によって、正極性と負極性とを区別することにします。

正極性では、電子なだれは平板電極ないし電極間から出発し針電極に向かいます。その後、電子なだれが成長し正極性のストリーマに転換していく過程は高電圧工学の教科書を参照して頂くことにして、結果的に初期の電子なだれが残した正イオン群に向かって、後続の電子なだれが次々と進展し、その先端の電子で正イオン群をプラズマ化(ストリーマ部の発生)し、後

方に新たな正イオン群を残すというフィードバックプロセスが構築されます。このプロセスでできる正極性ストリーマは、平板電極に向かうこととなります。つまり、平板電極方向に進む正極性ストリーマの先端部では、平板電極側から到来する電子なだれを集めてくることとなります（電子なだれとストリーマの進行方向は逆になっています）。

負極性では、電子なだれは針電極先端から出発し平板電極方向に向かいます。その後、電子なだれが成長し、その電子なだれが残した正イオン群に向かって、針電極側から電子が流入し正イオン群をプラズマ化（ストリーマ部の発生）し、初期の電子なだれ先端部の負電位が上昇することで先端部の電子が加速され新たな電子なだれが次々と形成され、後方には新たな正イオン群を残すというフィードバックプロセスが構築されます。このプロセスでできる負極性ストリーマは、平板電極に向かうこととなります。平板電極方向に進む負極性ストリーマの先端部では、そこに存在する電子が種となり電子なだれが平板電極方向に放射される形となります（電子なだれとストリーマの進行方向は一致しています）。

正極性ストリーマでは、その先端に電子なだれを集めてくることから、先端がとがった形になりやすく、また、正イオン群は電子を加速することに寄与するのでストリーマ進展がしやすい傾向にある、という推定がなされています。一方、負極性ストリーマでは、その先端から電子なだれが放射されることから、先端が太くなる形になりやすく、また、正イオン群は電子を電子なだれの進行方向とは逆に引き戻すように働くので、結果的に負極性ストリーマは正極性に比べると進展がしにくくなる傾向にある、という推定がなされています。ただ、いずれも推定の域を出ていません。是非、納得できる明解な解釈を待ちたいと思います。放電にはまだまだ解明されていない不思議が多くあるということとなります。