

講座：プラズマ実験入門II

2. プラズマの作り方

2.3 大気圧中でのプラズマ

小 駒 益 弘

(上智大学理工学部)

(1993年 3 月26日受理)

Plasmas at Atmospheric Pressure

Masuhiko Kogoma

(Received March 26, 1993)

Abstract

In this article, I introduce various types of low temperature discharge plasma at atmospheric pressure, for examples, silent discharge, atmospheric pressure glow (APG) discharge and corona discharge. In their discharge apparatus, some restrictions of the discharge current are needed to prevent the transition to an arc discharge (high temperature) from low temperature discharge. The plasma generation mechanisms which give the restricted currents are briefly discussed. Some applications of plasma at atmospheric pressure are also introduced.

Keywords:

atmospheric pressure, low temperature plasma, barrier discharge, silent discharge, atmospheric pressure glow discharge, helium, oxygen, corona discharge,

1. 圧力と温度と種々の放電形式

プラズマは前にお話した通り中性電離ガス状態の事です。実際は大量の電離していない気体の中のイオンや電子が希薄に混在した、殆ど中性に近い気体状態なのです。さて、2-2-1でお話した直流グロー放電は、低圧下だったので、陰極からの電子は気体分子とあまり衝突せずに加速され、容易に電場からエネルギーを得て次の衝突で分子を雪崩的に電離することが出来ました。しかし気体の圧力が次第に上昇してくるに従い、電子は分子との多数回の衝突のため、平均エネルギーが低

下して、もはやこのような機構では放電を容易に持続できなくなって来ます。そのため圧力とともに放電を維持する為の電圧はどんどん上昇して行きます。気体温度は圧力に関係していて、低圧放電では蛍光灯に触って判るように、室温に近い気体温度となっています。

大気圧近くになるとグロー放電に代わって登場するのが火花放電です。火花放電は細いフィラメント状発光で電極間がつながった放電で、フィラメントの中心は高温で強く電離した導電性の高い状態になっています。電流はこの細いフィラメン

トの中だけで流れるため、放電は電極上に広がらず、一点で放電する傾向があります。自動車エンジンの点火プラグとして使われています。

そしてこの時、もしも電源の容量が充分大きければ、放電の性質として時間とともにますます電流が増えていき、ついには金属製の電極さえも熔解する温度まで到達すると、そこはアーク放電の世界です。この状態では気体分子(原子)自身が高温のために電離をするので、高い電子エネルギーは必要とせず、火花やグローの状態よりもずっと低い電圧で放電が維持できます。耐熱性の高い黒鉛電極を使ったアーク灯は、その強い発光から明治時代には街路灯に用いられましたし、アーク熔接法は現在も建築現場で汎用されています。これら高温放電は別の機会であらうにして、ここでは低温のプラズマ状態だけを考えて見ましょう。

2. 大気圧低温放電

大気圧下では直流の代わりに交流を使っても放電状況は上とほぼ同じですが、放電を開始する電圧よりも少し高い電圧を加えた場合、前のように火花放電やアークになるには一定の時間が必要です。それよりずっと短い時間で電源を切ると、放電は極く弱い状態のまま終了してしまいます。電源を強制的に切らずに放電時間や放電電流を自動的に制限するには、金属製の放電電極の上に絶縁体(誘電体)の層(barrier), 例えば薄いガラス層を密着させてやり、誘電体を通して放電して、コンデンサ充電作用で放電を自動的に停止させるバリヤ放電と言われる方式や、高压電極の先端を針の様に尖らせたコロナ放電といわれるやり方があります。この様な弱い低温の放電は気体の化学反

表1 大気圧中での低温放電と応用分野

放電形式名	電極形状	応用分野
バリヤ放電	絶縁層(誘電層) を挟んだ電極	オゾン発生器 大気圧 PCVD
コロナ放電	細線又は針先端	帯電, 除電, 中和電荷発生 コピー機, 粉塵除去



画：翠 康孝（中部大学漫画研究会）

応に適していて、空気をオゾンに変えるオゾンナイザーや煙突の煤の除去などの産業機械に応用されています。

表1に大気中で弱い放電を起こす方法と主な応用分野をまとめて見ました。

それでは各々の放電形式についてその機構を簡単に説明しましょう。

(1) バリヤ放電

〈無声放電〉

図1の様に電極を構成し、極間に空気を流します。極間に加える交流電圧をどんどん高くしていくと、ある電圧でシャーと言う微かな音を立てて放電が開始します。この時部屋を暗くして電極間を覗くと、無数の極めて細い光りの筋が電極間を短絡しているのが見えます。この様な形式の放電を一般に無声放電と呼んでいます。これは上で説明したように、放電回路に直列にコンデンサーが入ったために、放電が火花やアークに完全に移行せずに途中でストップしたために起こった温度の低い放電で、極めて弱い火花放電の集まりとも言えます。この時の印加電圧波形と放電場に流れる放電電流をみたのが図2です。小さな電流パルスが50Hzの誘導電流の上にたくさん現れているのが判ります。

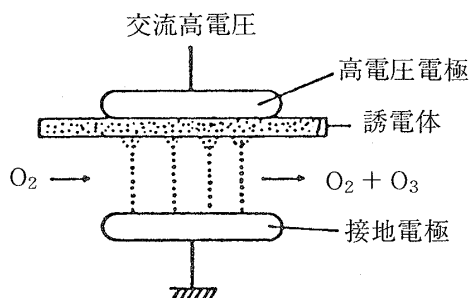


図1 無声放電の電極構造
誘電体は一般に0.1cm程度のガラス板を用いる。
極間距離は0.1cm~0.2cm
放電電圧は4~10kV
周波数は50Hz~数kHz

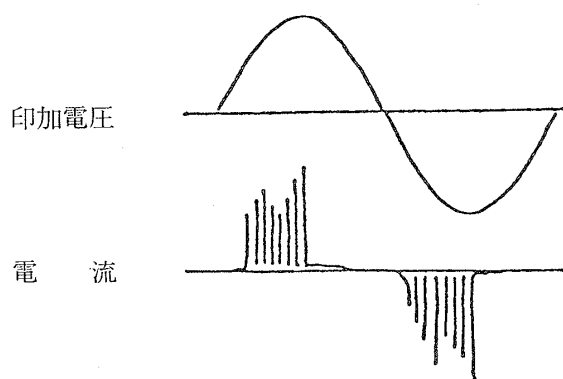


図2 無声放電の印加交流電圧(50Hz)と放電電流波形

空気の中に20%含まれる酸素分子は細い放電の柱のなかで次のような化学反応でオゾン (O_3) を発生します。ここで記号の e は放電の中で発生した電子 (electron) の事で、電界の中で加速されて得た高いエネルギーで、酸素分子に衝突して分子を解離します。 M は酸素原子が更に酸素分子と反応したときに、不要なエネルギーを除いてくれる気体分子です。出来たオゾンは熱に弱いので、高温の火花放電では分解してしまいますから、低温のバリヤ放電が使われているわけです。



オゾンはとても酸化力が強い上に、分解した後無害の酸素に戻る事から、上水の殺菌、悪臭の除去や排水の浄化など様々な分野でますます用途が増大しています。

〈大気圧 PCVD〉

PCVD はプラズマ化学蒸着 (Plasma Chemical Vapor Deposition) の略で、気体試料をプラズマの電子エネルギーを使って分解して固体上に析出させる方法です。例えば電卓に付いているアモルファス太陽電池は SiH_4 ガスを低圧放電中で分解させて、ガラス上に極く薄いシリコン膜を付着させたものです。この様な均一な薄膜をつくるためには放電自身が空間的にも極めて均質である必要が有りますから、上に述べたような無声放電は不適格です。しかしある種の希ガスを使うと大気圧の中でも低圧で行っているプラズマ処理を行える可能性が出てきました。

例えばあらゆる気体の中でも放電電圧の最も低い He ガスを、無声放電と同じ様なバリヤ放電法を使って放電させると、丁度低圧の中での放電と良く似た、電極全体に広がったグロー放電状態になることから、この中に目当ての試料気体を極くわずく混合してやると、電極の上に薄い固体膜が析出してくることが判っています。

図3ではこの様な方法で大気圧の放電中で作ったポリエチレン膜の吸収赤外線スペクトル[1]と普通の化学的重合法で作ったポリエチレン膜の透過赤外線スペクトルを比較していますが、化学的に良く似た構造を持っている事が判かります。

大気圧の状態でも均一なプラズマ処理が出来れば、低圧にするための真空ポンプが不要になりますから、プラズマ処理を工業的分野でずっと安価に、そして大量に使うような時代が来るかも知れません。

(2) コロナ放電

先端の尖った金属電極に数 kV もの高電圧を印加した時に、尖った先端の回りだけに僅かな発光が見られて、放電が起こっていることが判ります。これは昔、嵐のときに船のマストの先端が光るのを見て、セントエルモの火といって西洋の船乗りが恐れた現象と同じ性質の物です。雷が近くになって、空気中に強い電界が発生したために、尖ったマストのてっぺん付近に放電が発生したのでしょう。尖った部分には強い電界が集中するため、局部的に気体が絶縁破壊を起こしているの

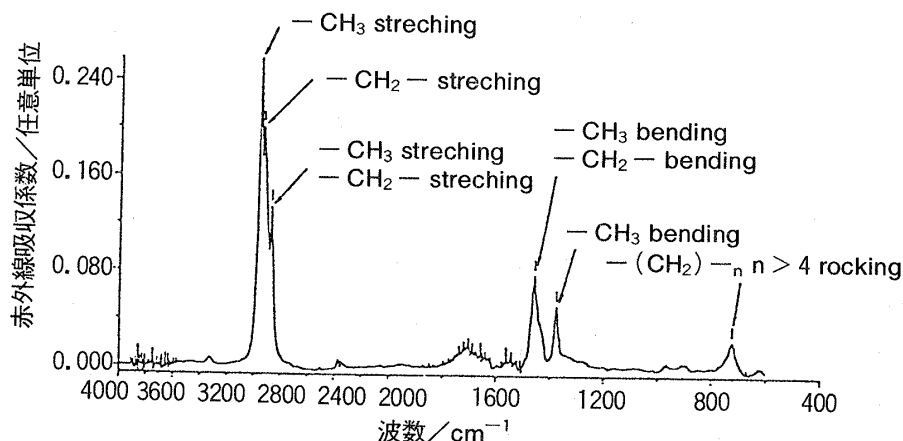


図3-a 大気圧 PCVD によるポリエチレン薄膜の赤外線吸収スペクトル[1]

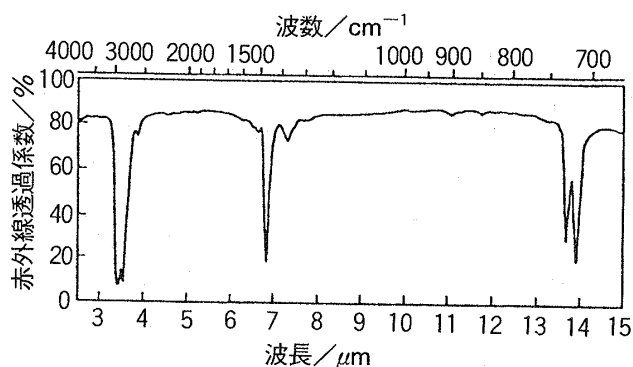


図3-b 化学合成したポリエチレン薄膜の赤外線透過スペクトル[2]
3-a図(吸収スペクトル)とは上下逆になっている。

す。極端な場合には相手極が存在しない場合でも放電が起こることがありますが、これは地面（アース）に対して放電が行われているからです。火花やバリヤ放電の様に、放電場が全路に渡って破壊した、つまり発光部が両電極間を橋掛けした状態を全路破壊と呼ぶのに対して、コロナ放電を部分破壊と呼ぶことがあります。

コロナ放電では針先端の電界が放電破壊電界を越えたときに放電が始まりますが、針電極が正電位の時と負電位の時では放電の進展の仕方が違うために、図4に示すように放電が開始する電圧が大きく異なることが知られています。

コロナでは先端電極部から対極である平板電極方向に向かって電界強度は急激に低下してゆきますから、針電極付近で発生した正（負）イオンは

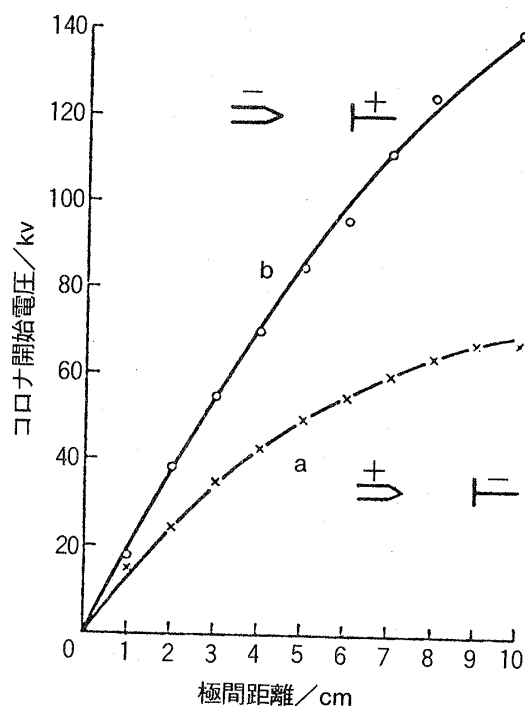
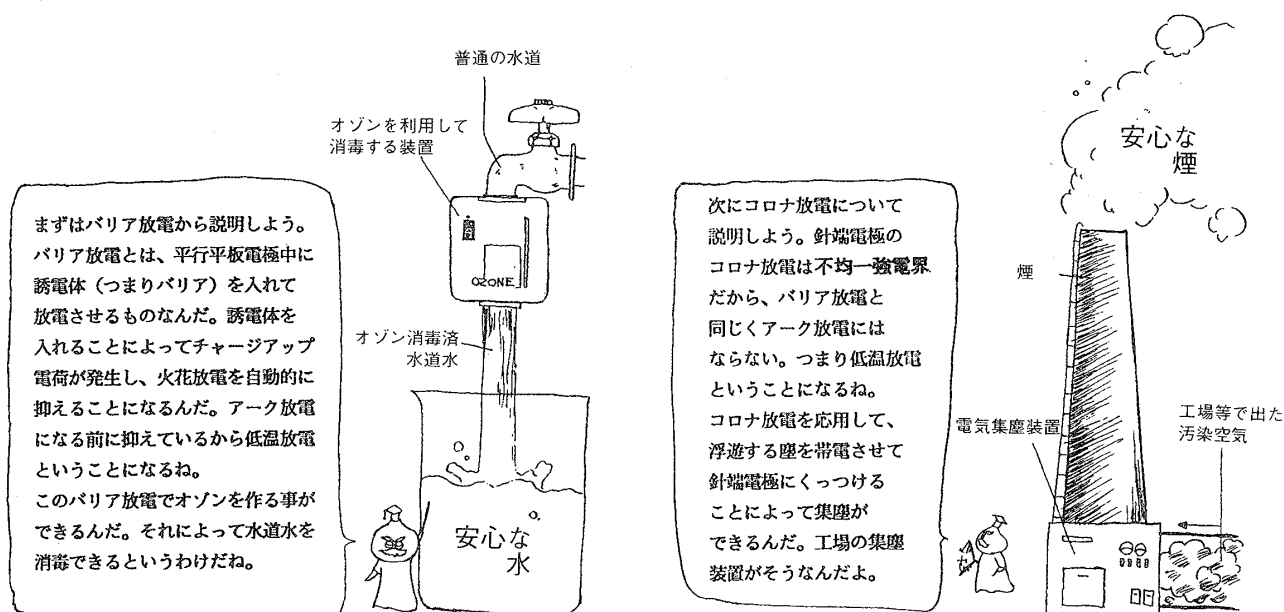


図4 大気中のコロナ放電開始電圧と電極間距離の関係[3]

a：針電極が正電位
b：針電極が負電位

平板対抗電極の負（正）電極方向へ向かってゆっくりとした速度で移動してゆきます。このゆっくりイオンが移動する部分ではイオン化や分子の励起反応は行われませんから、大部分の電極間隙では発光していない事になります。

また、弱い電界中ではイオンは空気中の風などの影響をうけやすくなりますから、コロナ放電を



画：翠 康孝（中部大学漫画研究会）

用いると空気中にイオン風を作ったり、分子イオンを自由に振り撒く事が出来ます。この性質を用いると、空気中に漂う塵にイオンで帯電させ、高電圧で塵を引き付けて電極に集めることができます。実際に煙突の集塵機として使われています。ゼロックスコピー機等も、コロナイオンが半導体表面を帯電させる性質を使っています。但し直流電圧を加えているにも関わらず、放電電流は間欠的（パルス）に流れることが多いので、雑音電波発生の原因にもなることがあります。

見る機会は多くはありませんが、大気圧中での

放電はとてもたくさんの所で実際に使われていることがお判かりになった事と思います。

参考文献

- [1] M. Kogoma, S. Kanazawa and S. Okazaki, *Proc. Symp. Dry Process*, p. 102 (1988) Tokyo
- [2] H. Kobayashi, AT. Bell and M. Shen, *Macromolecules*, **7**, 277 (1974)
- [3] E. Kuffel and M. Abdullah, (松本 崇, 岡部昭三, 共訳) 高電圧工学, p. 54 (東海大学出版会)