

5 章 プラズマの性質と生成

気体放電により発生したプラズマについて、その特徴を整理し、プラズマの捉え方を学ぶ。さらにプラズマを生成させるための方法について説明する。

5.1 プラズマとは

一般にプラズマ (plasma) とは気体が絶縁破壊して放電している状態であり、気体を構成する原子・分子のいくらかが電離している状態である。空気を放電させるとその主成分である窒素 N_2 、酸素 O_2 が励起・解離・電離して、 N_2^* や O_2^* の励起分子、 N や O の原子、 N_2^+ 、 N^+ 、 O_2^+ 、 O_2^- 、 O^- などの正・負イオンが生成される。このような状態になった分子や原子がもとの安定な基底状態に戻ろうとするときに、それらの分子や原子に特有の光 (電磁波) を放出する。気体放電で発生しているプラズマは多くの場合可視光を放つため、プラズマからの発光が観測される。したがって、気体と違って電子、イオンを主とする荷電粒子群を含むプラズマは特徴ある振舞いを示す。

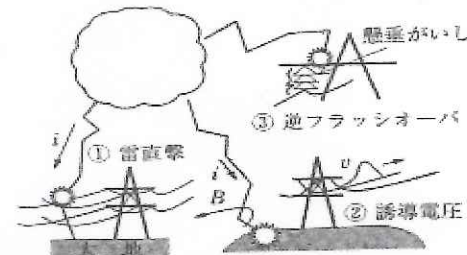
三つの雷害

- 1. 直撃雷
- 2. 誘導雷
- 3. 逆フラッシュ
オーバ

雷害対策—避雷針から誘雷まで—

昔の絵巻を見ると、左遷された菅原道真のたたなりなど、雷が人に災いを起こしている場面を目にすることがある。現代では、雷をたたなりとみなす人は少ない。しかし、情報化社会と呼ばれる現代のシステムにとっての脅威であることには変わりはない。

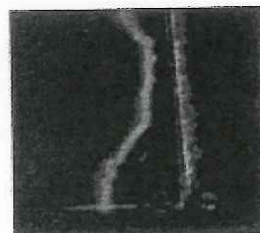
雷による電力系統への災害（雷害）として、①雷直撃、②誘導電圧、③逆フラッシュオーバがある。雷直撃は雷が直接送電線などを直撃し、被害に至るものをいう。誘導電圧は落雷時に流れる大電流で生じた磁場により、電線に誘導起電力によるパルス電圧が発生し、災害へ至るものをいう。この誘導電圧は電線を伝導し、電線に接続されている機器に障害を起こす。逆フラッシュオーバは鉄塔などへの落雷によりその箇所の電位が上がり、そのため電線と鉄塔との間でフラッシュオーバ（flashover：火花）に至る現象である。



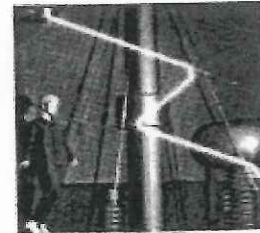
三つの雷害

雷害を防ぐための対策として、避雷針（lightning conductor, lightning rod）、架空地線（overhead ground wire）、避雷器（lightning arrester）などがある。避雷針や架空地線は保護対象物と雷雲との間に接地電位のボールや線を設置し、雷放電の道筋を変える。避雷器は落雷により電線に誘導で生じた過電圧を取り除くものである。保護器のテストや避雷の観点から、雷放電を制御する誘雷技術の研究も行われている（下図）。

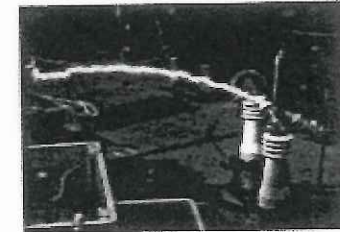
電力設備における開閉器や保護機器、電力系統の弾力的運用、架空地線や避雷針などの雷害防止技術は、昔からすると格段に進歩した。雷による事故死や雷による停電はめっきり減った。“地震、かみなり、火事、おやじ”，昔から怖いものの代名詞のように使われてきた言葉だが、少なくとも“かみなり”への畏怖は昔に比べ薄れたように感じる。



(a) ロケット誘雷

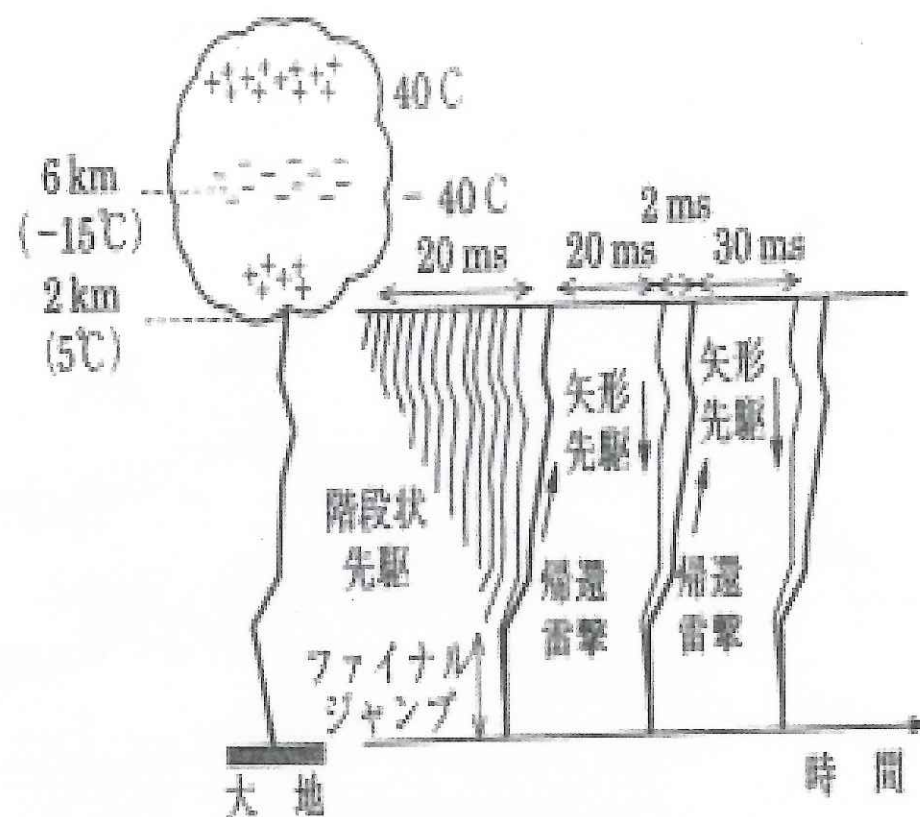


(b) レーザ誘雷の室内実験³⁾



(c) 水誘雷の室内実験

ロケット誘雷の様子とレーザ、水誘雷の室内実験の様子



雷放電の進展過程

リーダ（矢形先駆：dart leader）と呼ばれており、ステップドリーダと区別される。雷では通常 3～4 回程度、先駆放電と帰還雷撃を繰り返す。

7 章 高電圧の発生と計測

直流、交流およびインパルスなどの高電圧の発生法ならびに高電圧・大電流の計測法について学ぶ。これらはパルスパワーシステムの最初段の電源として用いられる。各種の高電圧の発生法ならびに各種の高電圧・大電流の計測法の基本原理について理解する。なお、パルスパワーの発生法と計測法は10章と11章で説明する。

7・1 高電圧の発生

7・1・1 直流高電圧

(a) 整流回路

変圧器により昇圧を行い、整流器で整流して直流高電圧を得ることができる。整流回路 (rectifier circuit) には半波整流回路 (half wave rectifier circuit) と全波整流回路 (full wave rectifier circuit) がある。

半波整流回路を図7・1に示す。変圧器二次側電圧の波高値を E とすると、コンデンサは正の半波で電圧 E に充電される。出力波形はコンデンサの放電による端子電圧の低下 ΔE のために脈動する波形となる。コンデンサの容量が大きいほど脈動は小さくなる。なお、印加電圧の極性が負に反転した際には整流器に最大 $2E$ の逆電圧が加わる。

図では正の半波でコンデンサを充電するので、正の直流高電圧が得られる。整流器の極性を逆にすると負の直流高電圧を得ることができる。

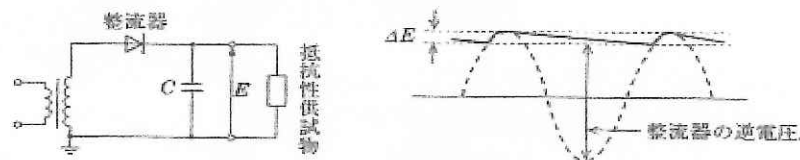


図 7・1 半波整流回路

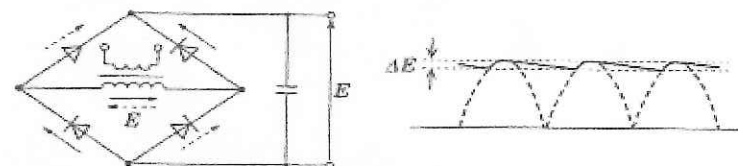


図 7・2 全波整流回路 (ブリッジ方式)

Note

逆電圧とは整流器の逆方向に加わる電圧のことで、整流器はこれに対して一定の耐電圧をもっている。

Note

コンデンサの放電による端子電圧の低下は、コンデンサの容量と供試物の抵抗に依存する。供試物の抵抗が小さい場合には脈動を小さく抑えるためには容量の大きなコンデンサを用いる必要がある。

図 7・2 は全波整流回路である。図の全波整流回路では交流電圧のいずれの極性の半波でもコンデンサは電圧 E に充電される。全波整流の場合はコンデンサの放電時間が半波整流の場合に比べて約半分になるので、 ΔE も約半分になり、脈動は小さくなる。

(b) 倍電圧整流回路

図 7・3 に倍電圧整流回路 (voltage doubler rectifier circuit) の一例を示す。交流電圧の正の半波で上段のコンデンサを充電し、負の半波で下段のコンデンサを充電する。それぞれのコンデンサは電圧 E に充電される。二つのコンデンサの充電電圧の方向は等しく、直列に接続されているので、出力電圧は $2E$ となる。このように、倍電圧整流回路を用いると交流電圧波高値の 2 倍の直流電圧を得ることができる。



図 7・3 倍電圧整流回路

(c) コッククロフト・ウォルトン回路

倍電圧整流回路の出力電圧よりもさらに高い直流電圧を得たい場合には、多段縦続整流回路が用いられる。図 7・4 に代表的なコッククロフト・ウォルトン (Cockcroft & Walton) 回路を示す。

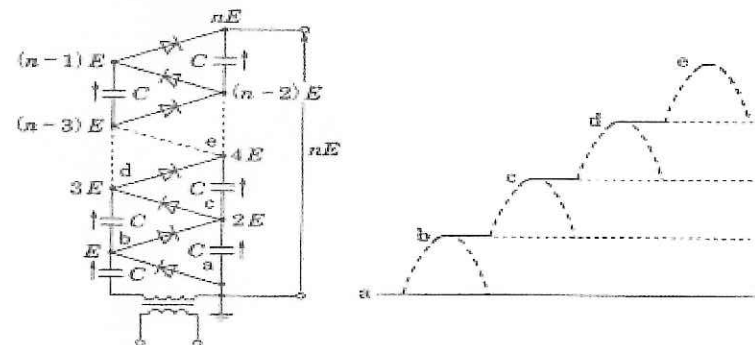


図 7・4 コッククロフト・ウォルトン回路

最初の半波で図の左側 1 段目のコンデンサが電圧 E に充電される。次の半波では c 点と a 点の間の電圧が $2E$ となるので、この電圧で図の右側 1 段目のコンデンサが充電される。以降同様にして、図の左側第 1 段目のコンデンサ以外のコンデンサはすべて $2E$ に充電されるので、出力電圧は nE となる。段数を増やすことによって、同じ充電電圧でより高い電圧を得ることができる。

(d) ファン・デ・グラフ発電機

ファン・デ・グラフ (Van de Graaff) 発電機は電荷を機械的に運搬して直流高電圧を得る装置である。

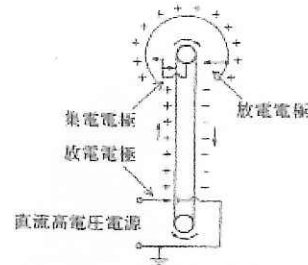


図 7.5 ファン-デ-グラフ発電機

コロナ放電を発生させ、ギャップ間を通過する絶縁物のベルトに直流電圧と同極性の電荷を付着させる。ベルトは電動で駆動されており、ベルトに付着した電荷は上部の金属球内部に設置された集電電極で集電されて金属球に移る。電荷の移動が次々に起こり、金属球の表面に帯電が生じることによって直流高電圧を得ることができる。

金属球内部に放電電極を設置して金属球の極性とは逆極性の電荷をベルトに与えるようにすると、金属球から逆極性の電荷を運び出せるので、金属球の電位上昇速度を大きくすることができる。

7.1.2 交流高電圧

(a) 変圧器

交流高電圧を発生させる場合には、変圧器が用いられる。出力電圧と入力電圧の比は変圧器の一次側と二次側の巻線の巻数比に等しいので、二次側巻線の巻数を多くすると、二次側では一次側の入力電圧に比べて大きな出力電圧を取り出すことができる。特に容量を必要とせず、高い電圧を必要とする場合には、試験用変圧器 (testing transformer) が用いられる。

試験用変圧器では電圧の上昇とともに絶縁距離が増大し、絶縁材料の所要量も急激に増大する。このため、通常 500 kV 以上の電圧を必要とする場合には、2 台以上の変圧器を縦続接続 (cascade connection) して用いられる。

大きな電流と高い電圧を必要とする場合には試験用変圧器は使用できない。汚損したがいしやフラッシュオーバー試験では大きな短絡電流が流れ、ケーブルの耐電圧試験では大きな充電電流が流れる。このような用途に変圧器を使用する場合は電力用変圧器のように大形になる。このため、特にケーブルなどの試験では次に述べる共振現象を利用する方法が用いられる。

(b) 共振現象を利用する方法

静電容量がきわめて大きい供試物の場合には、図 7-6 に示すように変圧器と供試物との間に可変インダクタンスを直列接続してインダクタンスを調整すると、直列共振が起こる。共振状態ではインダクタンスと供試物の静電容量との間でエネルギーのやり取りを行うので、電源からは回路に含まれる抵抗による損失分を供給するだけでよい。ただし、この方法は漏れ電流が大きい場合や部分放電を伴う場合など

Note

変圧器と変流器を合わせて変成器と呼ぶ。試験用変圧器は一般の変圧器と比べて巻数比が大きく、高い電圧を得ることができる。

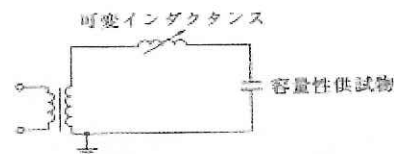


図 7-6 直列共振による高電圧発生回路

には共振条件が安定しないので適さない。このため、大きな充電電流を必要とするケーブルの耐電圧試験などに用いられる。

可変インダクタンスを L 、供試物の静電容量を C とすると、共振周波数 f は次式で与えられる。

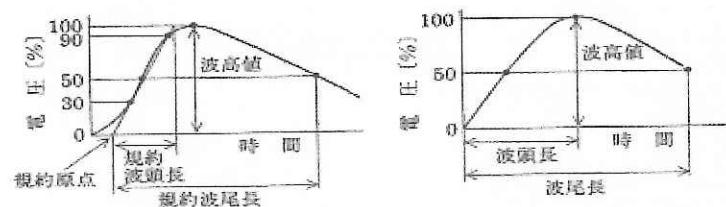
$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (7-1)$$

この条件に合うように L を調整すれば共振状態が実現される。なお、共振状態を実現する方法としては電源周波数を調整する方法もある。

7-1-3 インパルス電圧

雷撃を模擬した雷インパルス電圧 (lightning impulse voltage) と機器開閉時に発生する異常電圧を模擬した開閉インパルス電圧 (switching impulse voltage) のほかに急峻波インパルス電圧などが用いられる。なお、インパルス電圧を発生させる場合、一般には直流電圧でコンデンサを充電しておき、それを一気に放電させる方法が用いられる。まさに、パルスパワーである。パルスパワーの発生法については10章で詳しく述べる。

図 7-7 に雷インパルス電圧波形および開閉インパルス電圧波形を示す。インパルス電圧は波頭長、波尾長および波高値で規定される。波高値とは電圧の最大値の大きさである。開閉インパルスの場合、図 7-7(b) のように原点から波高値に至るまでの時間を波頭長と定義する。また、原点から電圧が波高値を超えて波高値の 50% になるまでの時間を波尾長と定義する。雷インパルス電圧の場合は、図 7-7(a) のように波高値の 30% の点と 90% の点を直線で結び、それを延長した線が時間軸と交わる点を規約原点とする。規約原点から直線が 100% の電圧になるまでの時間を規約波頭長と定義する。また、規約原点から電圧が波高値を超えて波高値の 50% になるまでの時間を規約波尾長と定義する。なお、インパルス電圧の波形は



(a) 雷インパルス電圧波形

(b) 開閉インパルス電圧波形

図 7-7 インパルス電圧波形

Note

回路理論で出てくる LC 直列共振と同じである。回路理論のテキストが参考になる。