キーワード

高電圧, 環境対策, 雷, コロナ放電, 静電気

正 員 宅 間 董

電力中央研究所

1. はじめに

今日, 何らかの形で環境とかかわらない工学はない。直接環境保全に用いられる技術のほか, 本来は人間生活の役に立っている技術が, 逆に一部の迷惑になったり, 環境悪化を引き起こすこともある。むしろ, 広がりの大きい基礎的な工学ほど, このような両面性を有している。毒にもならない技術は薬にもならない, と言えよう。

高電圧には, 表1に示すように自然現象と人工的起源の両方がある。高電圧, 高電界という存在は, 単に空間の場(フィールド)を変化させるだけでなく, 放電や感電など環境上の問題をひき起す要因となりやすい。一方ではまた高電圧は電力輸送を中心とする利用のほかに直接種々の環境対策技術に用いられる。

以下においては, まず高電圧の生じる作用を基礎的に解説し, 次に身の回り的高電圧電源が我々の環境と関係する内容をとりあげる。最後に環境対策に用いられる高電圧技術を紹介する。

表 1 高電圧の存在・発生

A. 自然に存在あるいは発生するもの
a. 大気電界
b. 雷雲, 雷放電(落雷)
c. 動物電気
d. まさつ帯電など各種の帯電
B. 人工的なもの
a. 送電・変電・配電施設
b. 家庭電器製品
c. その他の産業用, 実験用高電圧機器

2. 高電圧の作用・効果

いろいろな高電圧現象や高電圧利用を述べる前に, 高電圧の作用や効果をまとめて解説しておきたい。高電圧は単なる電気現象あるいはポテンシャルの状態に過ぎないが,

表 2 高電圧の作用・効果

A. 直接的作用
a. 力を及ぼす——マックスウェル応力, クーロン力, 配向力, グレーディエント力
b. 電圧, 電流を誘導する——静電誘導
c. 人に電流を流す——感電(感知, 一次ショック, 二次ショック)
d. 放電(絶縁破壊)を生じる——コロナ, 火花(フラッシュオーバー), グロー, アーク
B. 間接的作用
a. 絶縁に使用した媒体や高電圧設備による作用, 環境影響

表2にまとめたようないろいろな作用を生じる。「作用」という用語は悪い印象を与えやすいが, 直接的作用はすべて利用される現象である。感電でさえ電気椅子に用いられる。

以下にこれらを簡単に解説するが, 電源が高電圧であっても離れた点では単なる電界の作用である場合も含めている。

2.1 力を及ぼす

高電圧あるいは電界の及ぼす力は, 放電を生じない場合, まず力を受ける物体の電荷に関係しない力と電荷による力とに分けられる。前者はマックスウェル応力で場の歪みによると考えて良い。電気力線の方向に張力, 電気力線と垂直な方向に圧力が生じる。値は両方とも同じで, 誘電率 ϵ が一定な等方性物質なら

$$f = \mathbf{E} \cdot \mathbf{D} / 2 = \epsilon E^2 / 2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

図 1 電界 (E) による力

High Voltage and Environment.

By Tadasu Takuma, Member (Central Research Institute of Electric Power Industry)

である。 E, D はそれぞれ電界、電束密度で太字はベクトルを示す。

電荷に起因する力は本質的にクーロン力であるが、図1に示すように力を受ける物体の特性によって特殊な力にもなる。クーロン力はもちろん電荷 q に働く力で電気力線

$$f = qE \dots\dots\dots (2)$$

電界は物体の付近では物体の存在によって変化するが、物体がないときの電界を用いてよい。

配向力とグレーディエント力は外部電界によって誘導された双極子に作用する力である。配向力あるいは静電配向は回転対称でない物体の分極電荷が電界の方向に引かれる力で、結果として軸が電界の方向にそろうように働く。平等電界の場合には回転力だけである。また導体の場合は誘電率が無限大の誘電体と見なせば同じ現象である。

図1からわかるように、電界が不平等であれば正負の電荷に働く力が異なり正味の力を生じる。このような誘導双極子と不平等電界の相互作用による力をグレーディエント力と呼ぶ。比誘電率 ϵ_s の粒子が半径 a の球でガス中にある場合の力は

$$f = 2\pi a^3 \{(\epsilon_s - 1)/(\epsilon_s + 2)\} \epsilon_0 \text{grad } E^2 \dots\dots\dots (3)$$

で、 ϵ_0 はガス誘電率である。電界の方向が逆になれば誘導電荷の極性も変わるので、力の向きは変わらず絶対値の大きくなる方向に作用する。したがってクーロン力や配向力と異なり交流電界でも直流電界と同じ作用である。ただし、あまり周波数が高いと分極が追従できない。

2.2 電圧、電流を誘導する

高電圧源に接地した物体が直接接触するのは短絡、地絡といった現象になり通常は高電圧でなくなる。人が触れると感電になる。ここで述べるのは離れた高電圧源によって生じる電圧、電流で、いわゆる静電誘導と呼ぶ現象である。ただし、高電圧源の放電は考えないこととする。

高電圧の物体（導体）は周りの低電位の物体に電荷を誘起する。これは高電圧物体から発した電気力線の他の端には、発生端と同じだけの電荷が存在するという原理による。図2(a)のような配置を(b)の等価回路で書けばわかるように、高電圧物体は被誘導物体に対し静電容量 C で作用し、被誘導物体の電圧と電流は、大地に対する静電容量 C_0 と抵抗 R によって変化する。典型的な例は R が無限大（絶縁）の場合と0（接地）の場合である。

誘導電流の例をあげると、50 Hz の交流で 30 V/cm の一様電界中にある大型バスの場合、バスが接地状態のとき流れる電流は約 1 mA である。長さ 4 m、幅 1.6 m の乗用車ならおよそ 0.2 mA である。一方、背の高さ H (m) の人が E (V/m) の一様電界下に立ったときの誘導電流 I は H の二乗と E に比例する。50 Hz の場合、

$$I(\mu A) \approx 6.4 \times 10^{-3} H^2 E \dots\dots\dots (4)$$

図2 静電誘導とその等価回路

表3 ギャップと放電形態

	電 圧 (電 界) の 増 加
	電離→電子なだれ→ストリーマ
平等電界ギャップ	暗流
	⇨フラッシュオーバー (火花)
不平等電界ギャップ	電離→電子なだれ→ストリーマ
	暗流
長ギャップ	⇨コロナ⇨フラッシュオーバー
	コロナ⇨リーダ⇨フラッシュオーバー

である⁽¹⁾。 $H=1.6$ m, $E=30$ V/cm = 3,000 V/m なら、約 50 μA で、頭部（首から上）にはこの約 30% が流れる。60 Hz では(4)式の 1.2 倍である。

なお、高電圧源が十分大きいと十分遠方にあれば、一様電界と見なすことができるが、さもないと誘導電圧や誘導電流を求めるには図2の C の値が必要である。この値は配置が簡単な場合でないと解析的に与えられないので、一般的には数値的な電界計算を行わなければならない。

2.3 放 電

静電誘導は漏えい抵抗（図2の R ）が電圧に依存することがあるが、本質的に線形現象である。すなわち誘導電圧や誘導電流は高電圧源の電圧に比例し、被誘導物がないときの電界が一様電界と見なせるときは誘導量はこの電界値に比例する。

放電は静電誘導と異なり非線形現象である。印加電圧が放電開始電圧を越えたとき初めて現れる現象であり、放電開始電圧以上でも線形な現象ではない。例えば印加電圧 V が部分的な絶縁破壊（コロナ放電）電圧を越えるときの電流は、多くの場合コロナ開始電圧を V_c として $V(V - V_c)$ に比例する。

高電圧の作用は本質的に電界の作用である。電界の増大とともに、高電界→電子の加速→電離→電子の増倍→電子なだれ→放電開始、の経過をたどる。放電が開始すると高電圧の印加された気体の種類や電極の配置によって、電極間全体が短絡（絶縁破壊）状態となる火花放電（フラッシュオーバー）か、局所部分だけ絶縁破壊状態となるコロナかのどちらかになる。表3はギャップの種類と放電形態との関係を示したものである。ただし表3ではコロナ放電を経

い配置を全て平等電界ギャップと呼んでいる。ログウスキー電極のような平行平面部分が主体である電極のみを平等電界と呼び、ほかは準平等電界ギャップと呼ぶこともある。

実際にはコロナ放電も、印加電圧の波形、極性、気体の状態に依存して各種の形態がある。また、火花より進展した放電形態に、気圧が低いときのグロー放電、さらに自続放電の最終形態であるアーク放電があるが説明は省略する。いずれにしても各種媒質の放電特性、放電の対策である絶縁、放電の応用は高電圧工学の過半を占める中心テーマである。

2.4 高電圧の間接的作用

絶縁の目的で、すなわち高電圧対策として用いた絶縁物や設備が生じる作用である。絶縁物には固体、液体、気体、ならびにこれらの複合物、真空といったいろいろな種類のものがあるが、場合によっては環境上の問題になる。例えば、絶縁に油を用いると、火災の危険性や油もれの問題がある。最も深刻な例は、1950年代初めより約20年間コンデンサや変圧器の絶縁に用いられた塩化ジフェニル(PCB)である。PCBは環境汚染物質として1972年全面的に製造、使用が禁止になったが、やっかいな後始末は未だに尾を引いている。

また、高電圧であるために高い送電線や鉄塔が必要となり、テレビ電波を反射してゴーストを発生させるとか、遮へい効果によって受信電界を低減させるなどの作用も、高電圧の間接的作用といえよう。

3. 天然自然の高電圧環境

3.1 大気電界

屋外の大気中には常に大地に垂直な方向の電界が存在する。この電界は大気電界あるいは大気電場と呼ばれ、正極性(地球に向う方向)である。大気電界の値は、大気の状態、場所、時刻によって大いに変わるが、晴天時で1mあたり80~200Vである。1cmあたり約1Vという覚えやすい値である。

このような電界で多量の電荷が地球に移動しても、地球が正極性にならず大気電界が継続しているのは雷の作用である。雷雲は大抵上部が正極性、下部が負極性で、落雷によって負電荷を地球に運ぶとともに、大気上層を充電して300~400kVの電位を維持する。このプロセスは図3のよ

図3 大気電気の循環プロセス

うになり、雷が電池というわけである。少し古い文献になるが、文献(2)では地球全体で毎日300個(現在は1,000~2,000個と言われている)の雷雨が大気電界によるイオン電流(地球全体で1,800A)を補充していると説明している。ちなみに世に電磁気学の教科書は多数あるが、わざわざ1章を割いて大気電気、雷雲の発生と発達、稲妻について解説しているのは、筆者の知る限りこのファインマンの名著だけである。ただし、基本的な機構は同じだが地球磁場の効果を考慮した新しいモデルも提案されている。

人が屋外に立ったとき、およそ1V/cmの電界があるからといって頭と足の間に電位差が生じることはない。これはもちろん直流的な電界に対して人が導体とみなされるからで、体の至るところが大地電位になるよう電界がひずめられる。商用周波の交流でもほぼ同じである。しかし電界のひずみによって頭部では電界が高くなる。もとの電界に対する比を電界増倍係数(enancement factor)と呼ぶが、人が直立したときは15~18である⁽²⁾。つまり1V/cmの電界は15~18V/cmに増大する。電界増倍係数は相似な形状であればもちろん、電界の大きさによらず同じである。大抵の動物は直立でないのもっと低く、ねずみや豚なら4~7の値である。

3.2 雷雲

雷は古来「地震、雷、火事、おやじ」と並び称せられる恐いものの代表であるが、身近のしかも電圧が最高の高電圧現象である。雷の研究は有名なフランクリンに始まるが、実験的に電気現象であることを確かめたのはフランスのダリバルが最初である。彼はフランクリンの書に刺激されて1752年13mの垂直鉄棒を立てた実験を行い、雷雲下で4cmの火花を生じさせた。フランクリンの風の実験はその1ヶ月後である。我が国では約60年後に泉州熊取村の郷士中喜久太が高さ38mの松の木に針金をかけて

図4 雷雲下の電界と空間電荷密度の測定例(石川県河北潟)⁽⁴⁾

雷雲からの誘導を観測している⁽³⁾。中喜久太の師は電気が自然科学であることを解説した著書「エレキテル究理原」で名高い橋本宗吉である。

雷雲は強い上昇気流の中で電荷の分離が起こって発生するが、日射や気団などの気象的要因のほか、火山の爆発、火災、砂あらしなどでも発生する。典型的な雷雲は電位が 10^5 kV (1 億 V) のオーダで、雲底高度 2 km で上部に 10 km も広がっている。日本海沿岸で冬季に発生する雷雲は雲底が低い。雷雲下の地上電界は 100~200 V/cm 程度から最大では 1 kV/cm にもなるので晴天時の大気電界より 2~3 けた上である。図 4 は石川県河北潟で測定された電界の一例⁽⁴⁾である。高度が上がるほど電界は高くなるが、急速に増大するのは高度 10 m 位までで 20~30 m の高度ではほぼ飽和している。

3.3 落雷⁽⁵⁾

まず、雲底から大地に向かって数 10 m の長さを間欠的に進展する先駆放電 (ステップドリーダ、階段状先駆ともいう) が進展する。地表近くに到達すると残りの数 10 m の距離を地上からの放電で結合し (ファイナルジャンプ)、完成した放電路を通して帰還雷撃 (リターンストローク) と呼ばれる大電流で強い発光の放電が生じる。

この進展速度は $10^7 \sim 10^8$ m/秒で先駆放電の平均進展速度よりおよそ 2 けた大きい。放電電流は数 10 kA から最大 200 kA 程度である。通常の落雷では 1 回目の帰還雷撃が終了した後、数ミリ秒から数十ミリ秒の間隔を置いて、雷雲から地表に連続的に進展する放電と帰還雷撃とが数回繰り返される。これを多重雷撃という。落雷の放電電荷量は数 C から数 10C である。

落雷による被害には対象物に直接落ちる直撃雷と近傍の雷による誘導雷の作用とがある。少し前には雷雲の電荷で拘束された電荷の解放が誘導雷の原因であると説明されていたが、最近の検討結果では主放電、すなわち師還雷撃が主な原因とされている。帰還雷撃路に生じる電荷と電流が静電的あるいは電磁的結合によって誘導サージを生じる。

雷による事故は送電線では全事故の約半分、配電線では約 30% に達する。通常送電線では直撃雷だけを考慮誘導雷は絶縁設計の対象としないが、配電線では雷事故の過半は誘導雷と考えられている。ただ配電線でも最近構成物に直接落雷する直撃雷がかなりの事故を引き起こしているのではないかと調査が始まっている。

落雷は人体、構造物、樹木への危害、停電や電力機器の損傷ばかりでなく高度情報社会を脅かす新しい加害源になっている。例えば落雷によるマイクロ波回線の通信障害、雷放電の電磁波による電子機器の誘導障害、無線通信の雑音妨害のほか、送電線トリップによる通常ほとんど気がつかない瞬時電圧低下が情報機器のメモリ消失を生じるなどである。

3.4 空間電荷

大気中には宇宙線や地中からの放射線によって電離された正負のイオンが常に存在している。大気イオン濃度は時

間、場所によって大きく変化するが、正の小イオン (粒径数 nm 以下) が $300 \sim 1,000$ 個/cm³、負の小イオンが $200 \sim 800$ 個/cm³、主にエアロゾル粒子と結合して生じる大イオン (粒径 0.1 μ m 程度以下) が正負ともほぼ同じ濃度で $5,000 \sim 20,000$ 個/cm³ くらいである⁽⁶⁾。これからすると正味の空間電荷密度は正で 10^{-2} nC/m³ 程度になるが、実際の測定値も田園地域、郊外、山岳地の屋外では正極性で $2 \sim 5 \times 10^{-2}$ nC/m³ である。ただし、滝の付近では水滴の電荷分離作用で負の電荷密度になる。

フランスや我が国の冬季雷の観測によって雷雲下の地上付近に多量の空間電荷の存在することが見出されている。この空間電荷は雷雲の電界によって草木や建造物の先端で生じたコロナ放電によるとされているが、図 4 のように地上付近では数 10 nC/m³ にも達する。この値は通常の大気中よりも 3 けたも大きく雷雲下では高電荷密度の環境になる。電荷密度は電界 E が大地に垂直な方向だけであれば電界を高度 x に対して微分すれば求められる。

$$\rho = \epsilon_0 dE/dx \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 ϵ_0 は空間の誘電率である。これまで電荷密度は高度とともに指数関数で減少する実験式で表わされているが、筆者は最近直流イオン流場の特性から導いた次式を提案している⁽⁷⁾。

$$\rho = \rho_A / \sqrt{1 + Rx} - \rho_B \dots\dots\dots (6)$$

ρ_A , ρ_B , R は適当な定数である。

正負イオンが人体に与える影響についていろいろな報告があるが、結果のばらつきがはなはだしい。雷雲によって正イオンが多くなると、天候変化に敏感な人は怒りやすくなったり、不安感、ゆううつ感、偏頭痛を感じるという報告がある。負イオンは逆に有益な影響を与えるという報告のほか、正イオンの有害な影響を妨ぐということで実際に負イオン発生装置が製造販売されている。ただし効果は明らかでない。

3.5 動物電気

いわゆる動物電気はイタリアのガルバーニが 1786 年に行ったカエルの筋肉の実験が有名であるが、通常の組織や細胞の有する電位差はせいぜい数 10 mV で高電圧ではない。これに対して魚の中にはかなりの高電圧を発生するものがある。たとえば電気ナマズは 400~450 V、電気ウナギは 800 V にもなる。

電気ウナギの発電器官は数 μ m の大きさの細胞で、イオンの移動によって 1 ユニットあたり数 10 mV の電位差を生じる。導電性のある水中でも高い電圧を発生するのは不思議なようであるが、多数の発電器官が直列に接続されており、刺激によってイオンが一斉に移動してパルスの高電圧を生じる。

3.5 まさつ電気

身の回りの電気現象として最も身近なのは種々の静電気現象である。また、これらの多くは高電圧現象でもある。

図 5 人体の等価回路

冬にセータやシャツを脱ぐときのパチパチという音、じゅうたんで帯電した後、ドアの把手を触れたときのショック、プラスチックの箔や薄板をこすったときの静電力など、いずれもおなじみのものである。そもそも電気の electricity という言葉は、こはく（ギリシア語の electron, ラテン語で electrum）から生まれたものである。イギリスの医師であったギルバートが1600年の著書「デ・マグネテ（磁石論）」の中で、まさつによってこはくと同じような引力を示す物質をラテン語で electrica と名付けたのが最初とされている。その後1646年にイギリスの医師ブラウンが electricity の語を使用している⁽⁸⁾。

二つの物体が接触して離れると一般に接触帯電が起るが、これは電荷のキャリアが電気化学ポテンシャルの低い方へ移るためである。移動した電荷は接触界面をはさんで電気二重層を形成するが、この電荷密度 σ は $\sigma = CV$ で与えられる。 C は単位面積あたりの静電容量、電位差 V は二つの金属の仕事関数の差に対応する。物体を離していくと静電容量の低下によって電位差が上昇するために、トンネル効果による逆流、さらに高電界放出や気中放電などが起って電荷が戻り、残りが帯電量となる。セータを脱ぐときのパチパチという音は引き離し時に生じる気中放電である。

絶縁物のまさつによる帯電量は通常接触帯電より桁違いに大きく 10^{-5} C/m^2 のオーダーにもなる。これはまさつによって表面の凹凸がこすり合わされて接触面が増えることと、局所的な発熱、表面層のはく離、圧電効果、焦電効果などが考えられている。帯電電荷密度が 10^{-5} C/m^2 の場合、間隔が $d \text{ cm}$ であると約 $10^4 d \text{ (V)}$ の電位差になる。1 mm では 1 kV, 1 cm では 10 kV である。

人体の帯電は放電時のショックだけでなく、エレクトロニクス素子の生産工場での素子の破壊などの障害原因となるので重要な問題である。人体を図5のように対地静電容量 C と人体抵抗 R との直列等価回路で表わすことが多い。 R は 0~4 k Ω のいろいろな値が用いられている。 C は 50~300 pF の範囲の値で、標準的に 100~150 pF が用いられることが多い（例えば、じゅうたんによる帯電では 90~100 pF）が、筆者は低過ぎるのではないかと考えている。対地静電容量は床と接触している靴部分の容量 C_G とその他の部分の容量 C_S から成るが、前者は靴底の厚さが小さければ非常に大きくなるので注意が必要である。実際に最近の文献によれば

$$\begin{cases} C_G = 0.088 \varepsilon_s A / t \text{ (pF)} \\ C_S = 0.55 H \text{ (pF)} \end{cases} \quad (7)$$

表 4 交流送電線の高電圧が原因の環境影響

項 目	現 象
コロナ雑音	ラジオの聴取障害、テレビの画像障害
コロナ騒音	人に対する雑音
オゾン	光化学オキシダント濃度の増加
静電誘導	電圧、電流の誘導

の式が与えられている⁽⁹⁾。ここで $A \text{ (cm}^2\text{)}$, $t \text{ (cm)}$, ε_s は靴底の面積 (2 足分)、厚さ、比誘電率、 $H \text{ (cm)}$ は人の身長である。例えば身長 165 cm の人が面積 $220 \times 2 \text{ cm}^2$, 厚さ 1 cm, 比誘電率 5 の靴をはいているときは、 $C_G = 194 \text{ pF}$, $C_S = 91 \text{ pF}$ となって、 C_G の方が 2 倍も大きい。

4. 人工的な高電圧環境

4.1 高電圧の利用

人工的な高電圧環境とは人の作った高電圧機器によるものである。高電圧機器の目的は次のようなものである。

(1) エネルギー密度を増大させる 高電圧にすることによって蓄積エネルギー ($CV^2/2$) や輸送エネルギー (VI) を増大する。1887 年に直流 210 V で始まった我が国の電力供給が、その後交流送電となり、さらに 550 kV まで上昇したのは、第一に送電電力の増大が目的である。また、これに伴って高電圧の発生、測定、試験、ならびに開閉、保護など、いろいろな目的の機器が開発され、使用されている。

(2) 種々の高電圧の作用を利用する すでに 2 章に述べたが、高電圧によって発生する種々の現象あるいは効果を利用するものである。最も重要かつ多様なのは放電を利用する機器で、放電工学とも呼ぶべき大きな分野をなしている。ほかに放電応用も含め電界の作用を利用する各種の静電気応用機器がある。環境対策に用いるものは後出の表 5 にまとめた。

4.2 交流送電線⁽¹⁰⁾

人工的な高電圧源で目につくものの代表は交流送電線であろう。自然起源の高電圧は、落雷のように短い時間の過渡的なもの（数~数十マイクロ秒）もあるが、ほとんどは直流かゆっくり変化する電圧である。これに対して、交流送電線は 50 Hz や 60 Hz の商用周波数であることが相違している。

高電圧送電線の環境影響項目には高電圧に無関係なものと高電圧に起因するものがある。前者の例は 2 章に述べたテレビ電波障害のほか、電線やがいしに風が当たって生じる風騒音、大電流で起こる電磁誘導、などがある。残り的高電圧の作用によるものをまとめたのが表 4 である。静電誘導以外は放電で生じるものである。送電線の設計ではこれらの項目について予測計算を行い、必要なら環境に影響を及ぼさないように対策を講じる。

(1) コロナ雑音 送電線に限らず高電圧機器は密閉型でない限り常にコロナ放電や部分放電を生じ、これら

ら放射された電磁波がラジオやテレビの雑音となる。高電圧送電線で主に考慮の対象になるのは電線のコロナ放電に起因する雑音でコロナ雑音と呼ばれる。主として長中短波帯 AM ラジオに影響するが、電線に水滴が付くと大きくなるので、降雨量とともに増大する。

コロナ放電は電線表面の電界に支配されるので、表面電界、特に最大の電界値を求めればラジオ雑音の大きさ（レベル）を実験式から推定することができる。コロナ雑音を減らすには電線の表面電界を低くすること、すなわち電線を太くする。1 相の導体（素導体）数を増やす、表面の凹凸を減らすといった方法がある。

(2) コロナ騒音 電線のコロナ放電で生じる可聴音である。ジリジリあるいはザーザーと聞こえる広い周波数範囲から成る不規則音と、ブーンと聞こえる正弦波音の 2 成分がある。前者はランダム騒音、後者はコロナハム音と呼ぶ。後者の周波数は電源周波数の 2 倍（100 Hz または 120 Hz）である。

コロナ騒音を減らす方法は基本的にコロナ雑音と同じであるが、コロナ雑音のように電線に沿って伝搬することはないので、人家が近くにある特定の区間だけ対策すれば良い。

(3) オゾン 大気中のコロナ放電によって酸素分子が分解されてオゾンが生じる。電線のコロナ放電でもオゾンができるが自然オゾン濃度 10~60 ppb（1 ppb は 10^{-9} 分の 1）と比べて問題にならない量である。500 kV 送電線の試算例によると、地表濃度は晴天高湿度では 0.01 ppb、降雨時でも 0.2 ppb 程度である。

(4) 静電誘導 高電圧源のひき起す電圧、電流については 2.2 節に基本を解説した。我が国では 500 V 送電の開始にあたって送電線の静電誘導の詳しい検討が行われた⁽¹¹⁾。特に、送電線の下で傘に触れたときの過渡的な放電に対して刺激や気になる程度を調べ、その結果から人の往来の少ない場所を除いて高さ 1 m の電界強度が最大 30 V/cm 以下となるように規制されている。この値は欧米の多くの送電線の 70~150 V/cm に比べて約 1/3 である。その結果、我が国では送電線による静電誘導の苦情はほとんどないが、220 kV 以上の送電線の地上高は静電誘導で決定されるので建設費に大きな影響を及ぼしている。

文献(11)の検討結果は静電誘導の解説などにしばしば引用されるが、残念ながら不十分あるいは間違っているところが何か所かある。自動車のような直方体の導体の誘導電流の近似式、電界計の校正方法、遮へい設備の遮へい効果の値などである。これらはその後 UHV 送電の環境問題の検討に際して二次元、三次元の数値的な電界計算手法を用いて修正されている⁽¹²⁾。

(5) 電界の人体影響 送電線による電界が人の健康に影響するかどうかの問題は、500 kV 変電所の従業員に頭痛や低血圧などの影響が認められるという旧ソ連からの 1972 年の論文を端緒としている。この論文を契機に、各種の疫学調査、動物による影響実験、電界や体内電流の実

図 6 横方向の風があるときのイオンの挙動

験や計算など広範な研究が行われたが、100 V/cm 程度の電界なら健康に対して有害な影響はないと考えられている。

4.3 直流送電線

直流送電線の環境影響項目は交流送電線と共通するものと全く異なるものがある。例えば、コロナ騒音は主として正極性の電線から発生するが、交流送電線のランダム騒音と似た周波数スペクトルをもつ。コロナハム音は存在しない。これらの値（コロナ騒音レベル）は、交流送電線では空間電荷の存在しない電線表面の最大電界で評価できるのに対し、直流送電線では直流コロナで生じる空間電荷を含めた電界計算が必要である。

直流送電線には静電誘導の問題は無いがイオンの流れの作用を考慮する必要がある。交流送電線の場合、半サイクルの間に生じたイオンは大部分次の半サイクルで電線に吸収され、残りのイオンは往復運動しながら外側へ広がっていくが、再結合によって減少するので地表に到達するイオンはごくわずかである。また、イオンは電界分布にもほとんど影響しない。これに対し直流送電線では、発生したイオンは逆極性の電線あるいは大地へ向かって一方向に移動し、大地に向かうイオンはほとんど消滅しないで地表に達する。このイオンが絶縁された人体や傘に流れ込んでじゅうたんとのまさつと同じような帯電状態を生じることがある（イオン流帯電）。

イオン流があるときの電界は、空間電位 Φ と空間電荷密度 ρ を未知関数として、ポアソンの式と電流連続の式から求める。基本的には電気集塵器などの定常コロナ放電にも適用できる重要なものであるが、数値計算が不安定に陥りやすい。二次元で単極性の場合は、次のような式である。

$$\begin{cases} \Delta\Phi = -\rho/\epsilon_0 \\ \text{div } \mathbf{j} = 0, \mathbf{j} = \mu\rho\mathbf{E} \end{cases} \quad (8)$$

ここで、 ϵ_0 は空間の誘電率、 μ はイオンの移動度、 $\mathbf{j}$, $\mathbf{E}$ は電流密度と電界である。正極性、負極性ともあるときは、それぞれの極性の電荷密度が未知関数になり、さらに再結合を考慮する。

直流送電線のイオン流場の解析には、しばしば「空間電

荷は電界の大きさには影響するが電界の方向には影響しない」という仮定が用いられてきた。これは「Deutsch の仮定」と呼ばれるが、未知関数として電位と電荷密度の代わりに電界と電流密度を用いることができるので数値計算上の精度が向上し、安定になる。しかし、風があるときは適用できない上に、仮定のために生じる誤差が明らかでない。最近 Deutsch の仮定によらない差分法や有限要素法の計算が実用の送電線でやっと可能になっている。図 6 は、このような計算結果の一例である⁽¹³⁾。

4.4 その他の高電圧機器、家庭電器

高電圧電源による電界だけでなく一般に我々の身の回りには自然あるいは人工の電磁界が存在する。これらの電磁界の存在する環境を電磁環境と呼び、電磁環境の作用、影響を調べ対策を検討する分野を EMC (環境電磁工学) と呼んでいる。電磁環境の人工的な発生源は、電気を用いるほとんどすべての機器が含まれるが、特に高電圧、大電流、高周波という特性が影響を生じやすい。

高電圧の作用は主に放電によって生じる。電界についていえば電源電圧 100 V でも接地された人が 1 cm の距離まで近づけば、100 V/cm 近くになり、高電圧送電線の直下の地上の値より高くなる。電気毛布は絶縁されており、もちろん放電を生じることはないが、人に与える電界が最も高くなる家電製品である。高電圧機器では、不必要なコロナ放電、部分放電のほか、必ずしも高電圧ではないが、種々の接点、点滅器、蛍光灯、点火栓、しゅう動接触部が電磁波雑音の原因となる。エレクトロニクス技術の進展、特に電子機器の小型集積比と普及に伴って、高電圧工学の分野でも EMC が大きな研究テーマとなりつつある。しかし、ここではこれ以上触れるスペースがない。

5. 環境対策への高電圧の利用 (表 5)

5.1 集塵、浄化に用いる

電気集塵装置は、1905 年カリフォルニア大学のコッテレルによって発明されたものである。以来、各種の工業設備、発電設備の排ガスの除塵ばかりでなく、工場、住宅、自動車内の空気浄化、火災時の消煙などに広く用いられている。この原理は針や針金のような電極 (放電極) に高電圧を印加してコロナ放電を起こさせ、生じたイオンをダスト粒子に付着させてクーロン力で駆動し、収集、除去するものである。ここでは高電圧は放電の発生と駆動用電界の形成の両方の役目を果たしている。

ただし、排ガスの脱硫脱硝用に放電極を設けずに電子ビームを照射してイオンを生成する集塵装置もある。一方、ダストを捕集する際に絶縁粒子層や繊維層に高電圧を印加して静電気力を利用する集塵装置もある。特に電子ビーム式集塵装置は、 SO_2 および NO_x を除去する排ガス脱硫脱硝システムとして技術開発が進められている⁽¹⁴⁾。大量の水を必要とせず排水処理設備が不要な乾式法であり、粒径 0.2 μm 以下の微粒子の捕集にも有効とされている。

液体の処理や浄化はコロナ放電ではなく静電気力だけが

表 5 環境対策への高電圧の利用

目 的	作 用	応 用 例
集塵、浄化	コロナ放電、静電気力	電気集塵装置、空気清浄器、静電ろ過処理
有用物質の生成	コロナ放電	オゾナイザ、(負イオン発生装置)
分解、除去、殺菌	コロナ、グロー、アーク放電、火花放電、静電気力、放電衝撃圧力	プラスチック、フロン、 NO_x の分解、殺菌、雑草除去

用いられる。原油の静電ろ過処理、あるいは電氣的脱塩法と呼ぶ方法は、数%の水を注入して高電圧を印加することにより、水分子の電気双極子間の吸引力で凝集させ、水分子とともに不純物を分離除去する。

5.2 有益な物質を生成する

放電で生成する物質は多種多様なものがあるが、環境保全に役立っている第一はオゾンで、大気や水の浄化、酸化、分解、殺菌、脱臭、脱色など種々の目的に用いられる。オゾンの発生装置 (オゾナイザ) には水の電気分解や放射線の照射も用いられるが、多量の製造は、いわゆる無声放電によるもので、1857 年に Siemens によって発明された。一方あるいは両方の電極面が固体絶縁物の配置で空気や酸素の放電を起こさせる。交流電圧を印加すると気体空間が放電開始電圧に達したときだけ自続しない火花放電が起り、これが各サイクルで繰り返される。最近ではセラミックオゾナイザと呼ばれる高純度アルミナ表面の 5~10 kHz の沿面放電を用いるものも提案されている⁽¹⁵⁾。

オゾンによる浄化処理は 1906 年にフランスで開始され、現在処理施設は世界中で 3,000 箇所以上に及んでいる⁽¹⁶⁾。我が国の浄化処理は塩素殺菌が普通であるが、水源の水質悪化、使用塩素量の制限、良質な水道水の要望から今後オゾンの需要が増大すると思われる。そのほかプール、下水処理、空調用冷却水などにもオゾンの利用が進んでいる。

地球規模の環境問題の一つはフロンによるオゾン層の破壊 (オゾンホール) である。このオゾン層を修復する方法がいくつか提案されているが、上空で実際に高電圧のオゾン発生装置を用いるものがある。一つは高度 20 km で高層用航空機が曳航し高電圧グロー放電を用いる。他方は気球に発生装置を搭載して高度 20~30 km でグロー放電によってオゾンを発生する。電源は太陽電池で約半年発生が継続する⁽¹⁷⁾。

オゾン以外には、3.4 節に触れた負イオンも高電圧の発生する環境に有用な物質と考えられるかもしれないが効用は明らかでない。しかし家庭や事務室のほか、プール、エレベータ、自動車などにかなり用いられている。

5.3 分解、除去、殺菌に用いる

PCB、廃棄プラスチックの分解処理、減容処理に放電が用いられるが、これらは高電圧の作用よりも主にアーク放電の高温によって強固な分子結合を切断するか、加熱溶

融するものである⁽¹⁸⁾。またオゾン層破壊物質であるフロンもプラズマの分解技術が研究されている。グロー放電、コロナ放電などが検討されているが、オーストラリアでは30 kWと150 kWのアークプラズマ分解パイロットプラントがすでに稼働中である⁽¹⁹⁾。酸性雨の原因物質であるNO_xについても同じように放電プラズマによる分解処理法が研究されているが、こちらはアークよりもコロナやグロー、無声放電が試みられている⁽¹⁴⁾。

最近が高圧パルスを用いた殺菌方法が池目されている。熱や薬品による殺菌に比べて、非接触で、対象物の温度上昇がほとんど起こらず、コントロールが容易という利点がある⁽²⁰⁾。高電界の作用によるものと液体中のアーク放電で生じる衝撃波を用いるものとがある。前者は電界の作用で電荷が細胞膜に蓄積して膜を破壊するもので、後者は液体中に10⁵ Pa以上の衝撃圧力を生じて細胞膜を破壊する。

高電圧パルス放電を雑草の駆除に用いることも検討されている。ゴルフ場や農場での農薬の使用が、水や大気汚染、農産物の農薬汚染の可能性があることから、電気的方法是環境保全の利点がある。コンデンサに蓄積したエネルギーを雑草に放電するのであるが、電圧10~20 kV、放電エネルギー0.3~2 Jで各種の実験が行われている。成長の早い雑草が芝から飛び出している場合、場合によっては1 mm高ければ選択的に除去できる。除去は放電によって雑草の茎と根の細胞が破壊されるためである⁽²¹⁾。

6. おわりに

高電圧の作用、自然の高電圧が生む環境条件、人工の高電圧源と環境のかかわり、環境対策への高電圧の利用について述べた。このとき「高電圧」の作用や関与をどこまで含めるか、必ずしも容易でないのを感じる。また、分野の違う方のために、できるだけ基礎的な内容と最近の技術に重点を置いたが、高電圧安全(感電)や、放電による着火爆発などの障災害については重要ではあるが紙数の点で触れることができなかった。

(平成6年3月15日受付)

文 献

- (1) T. Takuma, T. Kawamoto, K. Isaka, & Y. Yokoi: "A Three-Dimensional Method for Calculating Currents Induced in Bodies by Extremely Low-Frequency Electric Fields", *Bioelectromagnetics* **11**, 71 (1990)
- (2) ファインマン・レイトン・サンズ(宮島訳):「ファインマン物理

- 学, III電磁気学], p. 108 (昭44) 岩波書店
- (3) 吉田:「江戸の科学者たち」, 現代教養文庫 664, p. 123 (昭44) 社会思想社
- (4) 堀井:「ロケット誘雷実験の成果と展望」, 電気学会高電圧研究会資料 HV-83-37 (昭58)
- (5) 高橋, 他:「小特集:雷——その発生・観測・災害防止に関する最近の話題」, 電学誌, **110**, 1 (平2-1)
- (6) 望月:「大気イオンと大気の電気伝導度」, 静電気学会誌, **17**, 68 (平5)
- (7) 宅間:「雷雲下の空間電荷密度の検討」, 電中研研究報告 No. T 93011 (平6-1)
- (8) 清水:「ギルバートの“electrica”について(付:英語の“electricity”の創始)」, 静電気学会誌, **15**, 242 (平3)
- (9) 山野:「静電気Q & A」, 静電気学会誌, **15**, 397 (平3)
- (10) 電力中央研究所:「UHV送電—将来の送電幹線への展望」, 電研レビュー, 第5号 (昭57-10), ほか
- (11) 電気協同研究会:「超高圧架空送電線の静電誘導」, 電気協同研究, **31**, No. 5 (昭50-11)
- (12) 宅間・河本・須永:「交流送電線の静電誘導—三次元配置の計算法と解析結果」, 電中研総合報告 No. 119 (昭59-9)
T. Takuma, T. Kawamoto, & Y. Sunaga: "Analysis of calibration arrangements for AC field strength meters", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, **PAS-104**, 2, 489 (1985)
T. Takuma, T. Kawamoto, M. Yasui, M. Murooka, & J. Katoh: "Analysis of effect of shield wires on electrostatic induction by AC transmission lines", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, **PAS-104**, 9, 2612 (1985)
- (13) 須永:「直流イオン流場の解析手法と直流送電線への応用」, 電中研総合報告 No. T 30 (平5-9)
- (14) 指宿:「酸性雨の現状とその対策技術」, 静電気学会誌, **17**, 245 (平5)
- (15) S. Masuda: *Proc. 9th Ozone World Congress*, **2**, 650 (1989), および増田:「パルスによるプラズマ化学反応—PPCPとSPCPおよびその応用」, 静電気学会誌, **14**, 473 (平2)
- (16) 杉光:「オゾン発生と最近のオゾナイザ応用技術」, 静電気学会誌, **17**, 184 (平5)
- (17) 堀井・山部:「オゾン層は放電で教えるか」, 電学誌, **111**, 413 (平3-5)
- (18) 「高電圧電力技術の高度化と新応用分野」, 電気学会技術報告(II部)第426号, p. 31, (平4-6)
- (19) 水野:「オゾン層の破壊と対策技術」, 静電気学会誌, **17**, 251 (平5)
- (20) 吉村・鈴木・佐藤:「電気及び磁気による微生物のハンドリング」, 静電気学会誌, **18**, 11 (平6)
- (21) 名倉・天満・坂口・水野:「高電圧パルス放電による雑草等の除去」, 静電気学会誌, **16**, 59 (平4)

宅間 董 (正員) 1938年9月30日生まれ。1966年東京大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程終了。工学博士。同年同大学電気工学科講師。1967年(財)電力中央研究所入所。現在、同所参事, 高電圧, 放電, 電磁界解析, 核融合の研究に従事。1989年~93年九州大学客員教授。1975年イギリス電気学会 Maxwell 賞, 1981年および91年電気学会著作賞, 1992年同業績賞受賞。IEEE Fellow。