

大学の研究・動向**電力輸送にかかわる諸課題の基礎的研究**

電気工学専攻電力工学講座電力発生伝送工学分野

教授 宅 間 堯

takuma@kuee.kyoto-u.ac.jp

講師 垣 本 直 人

kakimoto@kuee.kyoto-u.ac.jp

講師 濱 田 昌 司

shamada@kuee.kyoto-u.ac.jp

助手 山 本 修

o-yamamo@kuee.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

現代の我々の生活は電気エネルギーに支えられ、電気文明とも言うべき時代を画しているが、それを可能にしているのは高度に発達した電力輸送技術である。エネルギー消費の伸びが鈍化しつつあるとはいえ、電力化率の上昇にも支えられて、来世紀も電力消費が伸び続けるのは間違いない。

このように電力分野は社会生活を支える基盤として高度に発達したシステムが形成されているが、なお新しい課題の発生や新技術の導入が活発に行われている。たとえば、交流1000kVのUHV (ultra high voltage) 送電計画、紀伊連系の直流高電圧送電、500kV CV (架橋ポリエチレン) ケーブルの東京都心導入、パワーエレクトロニクス機器の適用を挙げることができる。

同時に、電力系統、電力機器について、これまでの高信頼度という必要条件に加えて、経済性の向上と環境対策の二面が非常に重要になった。高い信頼性を維持しつつ、徹底的な小型化と効率向上を目指すことが要請され、さらに環境面から新しい課題や対策が必要になってきている。これらに対応するには、より正確な設計を可能にするような「定量的な解析方法の開発」、「放電・絶縁、電力系統の諸現象の基礎的解明」、さらに環境対策のための「新しいアイデアの提案」が必要である。電力分野、特に輸送技術に関して当研究室の進めている研究内容は色々あるが、以下にそのいくつかを紹介する。

2. 電磁界計算法の開発・応用

計算機による数値的な電磁界計算法は機器の設計や現象の解析に革新的な進歩をもたらし、すでに多方面に応用されている。電界については、簡単な電極 (導体) だけからなる配置 (単一誘電体場) ではほとんど問題なく計算できるレベルに達した。しかし、複雑な形状・配置や特殊な計算条件の場合には、まだ正確に計算できる段階に至っておらず、計算法の改良や新しい手法の開発課題が多々存在している⁽¹⁾。

数値的な計算法は、計算したい領域全体を細かく分割する領域分割法と領域の境界を分割する境界分割法とに大別されるが、境界分割法には、電荷重畳法、表面電荷法 (表面磁荷法)、境界要素法と呼ぶ方法がある。現在進めている研究の一つは、誘電体 (絶縁物) が2種類以上ある複合誘電体の境界分割法による計算法である。たとえば、複合誘電体場は誘電率の差が大きい場合に通常の電荷重畳法や表面電荷法 (a 法) で計算すると大きな誤差を生じる。これに対して、高誘電率の誘電体境界の

電荷だけで内部の電界を与える方法 (β 法)⁽²⁾、さらに模擬電界を付加する方法 (γ 法)を開発し、精度が画期的に向上することを示した。

人体や動物のようになめらかな表面の媒質がある場合の電界計算には、表面を曲面で模擬するのが望ましい。そこで、曲面三角形で三次元の境界面を分割する表面電荷法や境界要素法の開発と応用を進めている。図はそのような模擬 (分割状態) の例である。研究目的の一つは、複合誘電体場の計算精度を向上させるための形状模擬方法の開発 (4枚協調9自由度3次形状関数の提案など)である⁽³⁾。

数値計算法の応用面では、電界磁界による誘導電流の計算のほか、固体絶縁物表面の帯電電荷分布の測定法の解析⁽⁴⁾、を進めている。

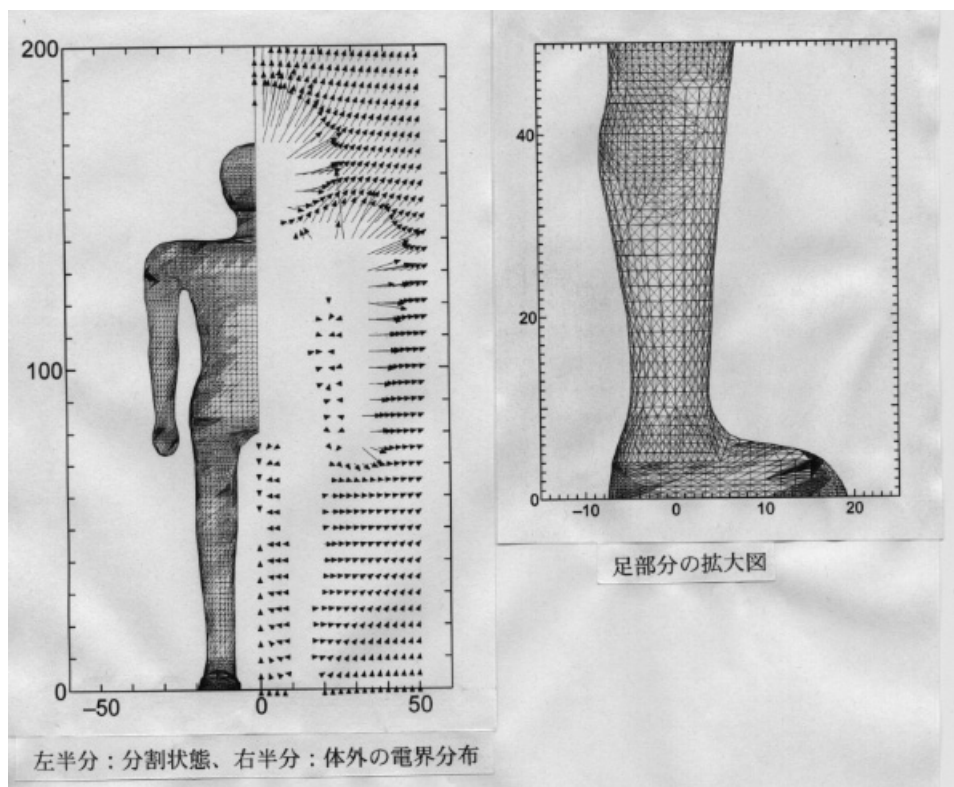


図1 曲面要素による人体の模擬 (一様電界下、単位cm)

3. 放電現象の実験とシミュレーション

電力機器の高電圧絶縁には、大気のほか、高気圧ガス (六フッ化硫黄: SF_6)、真空など種々の方式が用いられている。当研究室では真空、電氣的負性ガス、高気圧ガスを対象として、その放電特性の実験とシミュレーションで調べている。

(a) 真空

真空絶縁の最大の弱点は、高電圧部分を支える固体絶縁物 (スパーサと呼ばれる) の沿面放電である。特に、二次電子放出によってスパーサ表面に帯電する電荷が絶縁性能を低下させる。この帯電状態をオンラインで計測するとともに、帯電の進行をモンテカルロ法でシミュレーション計算している⁽⁵⁾。これらについてはcue第2号で紹介しているのでここでは省略する。

(b) 高気圧ガス

フィルムやシート状の固体絶縁物表面の沿面放電は古くから実験されているが、これは放電がきわめて伸び易く、実用的にも重要なためである。 SF_6 ガスや混合ガスを対象に、矩形波電圧、

VFTO（変電所で発生する急峻振動波電圧）に対する沿面放電特性を調べている。シミュレーションでは、沿面放電路の電荷密度が一定、あるいは誘電率の高い放電路（リーダ放電）の電界（電位傾度）を考慮して進展の伸びを求める計算法を開発し、沿面放電特性の予測方法への応用を進めている。図はSF₆中の沿面放電が7.1cm伸展したときの電位分布状況である⁽⁶⁾。

また、ガス空間の放電ではレーザーの集光で生じた空間電荷が高気圧窒素中で放電誘導を生じる実験を行い、空間電荷移動のシミュレーションを行っている。

4. SF₆代替ガスの検討

現在SF₆は高電圧変電所のほとんどの機器の絶縁（ガス絶縁機器と呼ばれる）に使用され、SF₆の無い電力系統は考えられないほどである。ところが近年、SF₆は地球温暖化効果の著しく高いことが問題になり、平成9年12月の地球温暖化防止京都会議（COP3）において削減対象のガスに含まれることになった。その結果、SF₆に代わってガス絶縁に使用する代替ガスが世界中で探索されている⁽⁷⁾。単独ではSF₆に匹敵しうるガスが無いために、混合ガスで使用量を減らすことが考えられているが、現在もっぱら検討されているのはSF₆と窒素の混合である。

これに対し、パーフルオロシクロブタン（c-C₄F₈）を用いる混合ガスの利用を提案し、検討を進めている。c-C₄F₈は、SF₆と同じく無毒無害で、オゾン層を破壊する作用が無く、絶縁耐力もSF₆に匹敵する。温暖化効果はSF₆のGWP（地球温暖化係数）が23900（評価年100年）であるのに対し、8900と約40%である。また、沸点が-6℃（SF₆は約-64℃）であるので、混合ガスから液化回収するのが容易である。現在、c-C₄F₈の電気的特性や回収率について検討を開始している⁽⁸⁾。

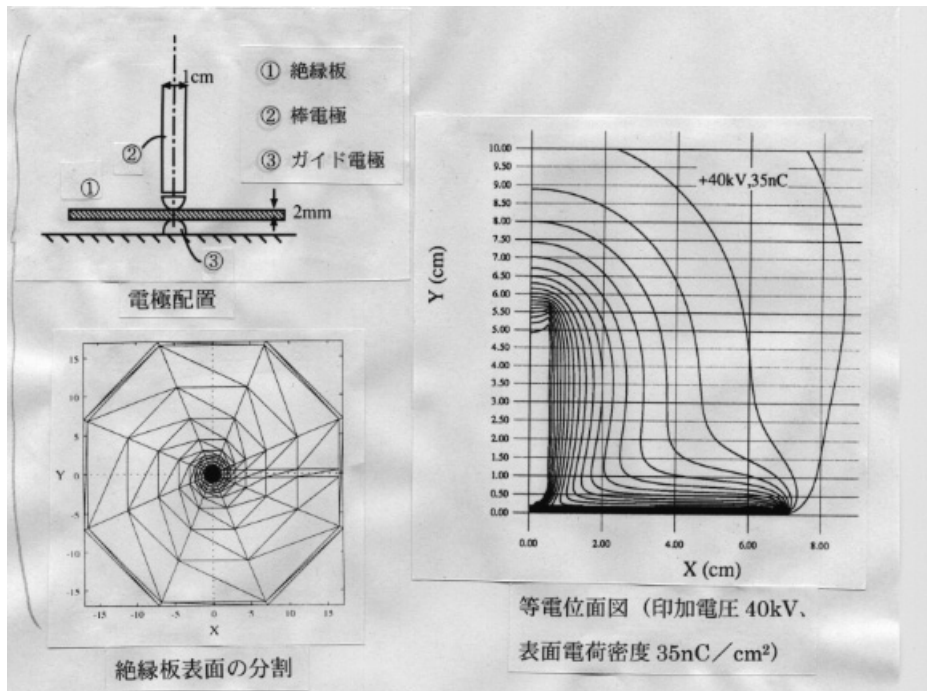


図2

5. 電力系統の不安定現象の解析

電力系統を対象とする電力系統工学もすでに長い研究の蓄積があるが、系統の巨大化、複合化、パワーエレクトロニクス機器（パワエレ機器）の導入などによって新しい課題を生じている。現在検討している主な課題は、パワエレ機器の導入にかかわる問題と内部共振現象である。

代表的なパワエレ機器には、静止形無効電力補償装置 (SVC)、サイリスタ制御直列コンデンサ (TCSC) がある。どちらもリアクトルの通過電流をサイリスタで制御する同じ素子構成であるが、SVCは母線と並列に接続して電圧制御に用いられるのに対し、TCSCは送電線と直列で潮流制御に用いられる。

SVCの導入によって電力系統の輸送能力が大巾に向上することを定量的に示すとともに、SVCによる新しい高調波不安定現象の可能性を明らかにした。後者については、サイリスタ制御リアクトル (TCR) の周波数特性を表わす理論式を導き、これを用いて高調波不安定現象はTCRのコンダクタンスが負になるためであることを明らかにした⁽⁹⁾。図はこの現象の解析例である。また、コンダクタンスが負になるのはサイリスタの点弧角が重畳電圧によって変動するためであること、基本波のみで点弧することで不安定現象を抑制できることを示した。

一方、長距離くし形系統における内部共振と呼ぶ現象を検討している。内部共振は電力系統の動揺モード間の相互作用によって周期の長いモードが発散する現象である。この現象の発生条件について理論的に検討するとともに、大型シミュレータを用いて内部共振が実際の電力系統の安定性に重要な役割を果たしていることを示した⁽¹⁰⁾。

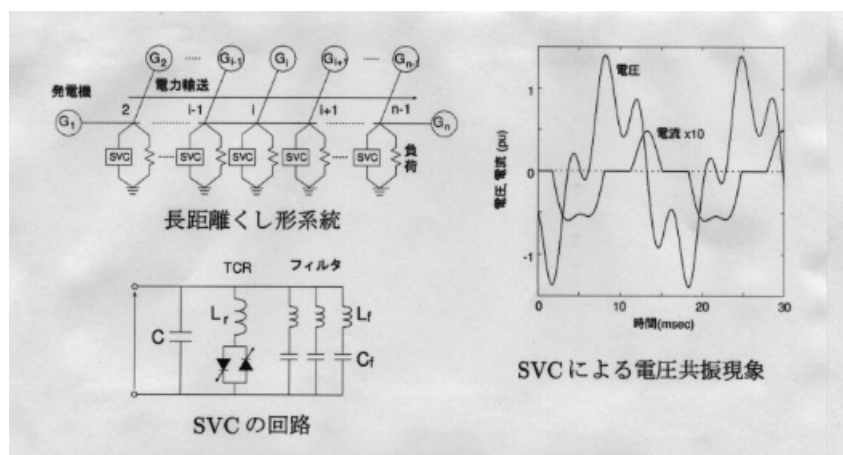


図 3

- [1] T. Takuma, T. Kawamoto : Recent developments in electric field calculation, IEEE Trans. on Magnetics, Vol.33, No.2, pp.1155-1160 (平成 9 年 3 月)
- [2] 紺矢、宅間、垣本、河本：周辺電荷を用いる電荷重畳法に関する検討、電気学会論文誌A、第117巻 第 9 号 977-982頁 (平成 9 年 9 月)
- [3] 濱田、宅間：4 枚協調 9 自由度 3 次形状関数を用いた表面電荷法による電界計算、MAGDA Conf. 講演論文集、PS4-6、pp.210-213 (平成11年 4 月)
- [4] T. Takuma, M. Yashima and T. Kawamoto : Principle of surface charge measurement for thick insulating specimens, IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.5, No.4, pp.497-504 (平成10年 8 月)
- [5] 山本、田辺、宅間、I.D. Chalmers : 真空中絶縁スペーサの帯電分布と帯電メカニズムの検討、電気学会論文誌A、第119巻 第 2 号 171-176頁 (平成11年 2 月)
- [6] 宅間、山本、藤野、安井：SF₆ガス中沿面放電のシミュレーション、電気学会論文誌A、第117巻 第 9 号 983-992頁 (平成 9 年 9 月)
- [7] 宅間：ガス絶縁と地球温暖化問題、電気学会誌、第119巻 第 4 号 232-235頁 (平成11年 4 月)

- [8] 宅間、山本、濱田：c-C₄F₈を用いるガス絶縁方式、電気学会論文誌B、第119巻 第4号 526-527頁（平成11年4月）
- [9] 垣本、中村、永井：サイリスタ制御リアクトルの周波数特性に対する理論式、電気学会論文誌B、第118巻 第11号 1321-1328頁（平成10年11月）
- [10] 垣本、富山：長距離くし形系統における内部共振の検証、電気学会論文誌B、第119巻 第4号 516-523頁（平成11年4月）