

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 8 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2010～2013

課題番号：22686030

研究課題名(和文)低炭素消費型社会に貢献するマイクロ・ナノスマート電荷センサの開発

研究課題名(英文)Development of Micro Sensors for Measuring Charge Distribution on Insulators

研究代表者

熊田 亜紀子(Kumada, Akiko)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：20313009

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 19,600,000円、(間接経費) 5,880,000円

研究成果の概要(和文)：まずMEMS技術を利用した空間分解能が μm オーダーの放電に伴う電荷密度分布測定システムの開発を試みた。プロトタイプを試作を行い、特性を測定したところ、内部耐電圧が当初の設計よりも低く、放電直接測定が難しいことがわかった。そのため、電気光学センサに着目し、その高分解化を行うことで、時間分解能1ns、空間分解能 $3\mu\text{m}$ を達成し、沿面放電進展時の空間電荷分布を測定した。流体モデルを用いた数値シミュレーションと併用することで、ストリーマ進展、停止機構に迫った。また、平行してマイクロメートルスケールの沿面放電の観測を行ったところ、そのようなギャップでは真空中放電に近い機構によることが判明した。

研究成果の概要(英文)：Sensors with high time and space resolution were challenged to be developed for measuring propagating surface discharge. First, a micro sensor was proposed based on MEMS technology and a prototype was assembled. It turned out, however, the internal insulation strength of micro sensor was not enough for measuring discharge phenomena. Thus, the electro-optic sensor with 1ns and 3 μm resolution was developed and applied to the surface discharge measurement. From the comparison with the measured data and the numerically simulated results based on continuity equation, the critical condition for keeping propagation was clarified. Breakdown phenomenon across micrometer-scale gap was also measured. And it turned out that the discharge process in such a small gap has a similar characteristics of discharge in vacuum.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：電気エネルギー工学 帯電

1. 研究開始当初の背景

資源リサイクル社会を目指したニーズ、そして市場開放など、電力産業を取り巻く環境は大きく変化しており、自然エネルギーの各所での導入、新興国における直流高電圧の送電網の導入など、従来にはなかった新しい「電力機器」の開発が進められている。これら新しい開発機器も含めた、「電力機器」の絶縁設計において必ず考慮しなくてはならないのが、絶縁上再弱点になる複合絶縁上必ず含まれてしまう異種相界面における帯電とそれによって引き起こされる沿面放電現象である。これらの解明は、機器開発を行う上で必要不可欠である。

一方で資源リサイクル社会を構築する上で着目されているのが、既設経年設備の効率的保全運用である。電力機器内の「有害な」部分放電を見地する技術に基づくものであるが、帯電とそれに伴う沿面放電の特性を知ることがキーポイントとなっている。

このように、低炭素消費型電力システムを構成する新しい電力機器の開発においても、また資源リサイクル社会を構築するうえでも、帯電現象とそれに伴う沿面放電現象の物理解明へ要求は極めて強い。しかしながら、その詳細電荷蓄積機構、沿面放電進展機構や、絶縁物との相互作用に関する物理的機構解明は未だ行われておらず、工学的には経験則に頼っているのが実情である。物理解明に向け、帯電機構および沿面放電進展機構の本質である、絶縁物表面の帯電電荷分布の過渡変化と、沿面放電により絶縁物表面が受けた変化、の2点を体系だてて把握する必要がある。

2. 研究の目的

ナノ・マイクロ技術を駆使することにより、空間分解能が nm- μ m オーダの高分解電荷密度分布測定システムを構築する。これにより直流電力機器の絶縁物帯電現象や、帯電電荷により発生、進展する沿面放電の微細構造、電気二重層キャパシタ内部の電界など従来の手法では測定不可能であった帯電・放電現象の高分解計測を行い、絶縁物の帯電、沿面放電機構、そして帯電と材料表面物性との相互作用を解明し、低炭素消費・資源リサイクル社会構築に貢献する電力機器の設計に資することを目的とする。

3. 研究の方法

申請時においては、下記の道筋で研究を行う予定であった。

(1)沿面放電進展時の変化をとらえられるだけの時間分解能(1ns 以下)を持った電気光学センサ、及び放電内部の様子を探ることがで

きる空間分解能(3 μ m) を持った MEMS センサの開発を行い、大気圧空気中における沿面放電の空間電荷微細構造の測定を試みる。電気光学センサでは放電の微小長さあたり空間電荷平均値の過渡変化を、MEMS センサでは特定の時刻における空間電荷密度分布の微細構造を探ることを主眼とする。

(2)開発した電気光学センサ・MEMS センサにより、沿面放電進展時の空間電荷分布測定を行う。これらの計測は放電のエネルギー(放電電圧、放電電流)、誘電体の固有容量、ガス種を変化させた種々の条件下で行う。得られた測定結果の解析と、流体モデルによる放電進展シミュレーションの結果を比較することにより、沿面放電の進展機構を解明し、新しい沿面放電進展モデルを構築する。

(3) EDLC 素子端部、電子デバイスの内部配線間の放電など電気光学センサでは測定しづらい対象の空間電荷分布を計測し、同センサの汎用化を行う。

研究成果でも後述するが、(試作した MEMS センサにおいて、耐圧値が、絶縁設計が想定値の半分以下と極めて弱く、空気中で沿面放電を発生させられる電圧以下でセンサ内部に貫通破壊してしまうことがわかった。また、センサの絶縁設計上の予備実験として行った μ メータスケールの沿面ギャップにおいて絶縁上興味深い知見が得られたので、当初の研究計画を変更し(3)の代わりに下記(4)を行うこととした。

(4) マイクロメータスケールの沿面ギャップにおける大気圧空気中沿面放電現象の測定を行い、放電機構の解明にとりくむ。

4. 研究成果

(1)開発した 1ns 以下の時間分解能、3 μ m の空間分解能をもった電気光学センサを用いて沿面放電進展時の空間電荷分布を測定した。測定は、放電のエネルギー(放電電圧、放電電流)、誘電体の固有容量、ガス種(SF₆、空気、N₂)を変化させた種々の条件下で行った。沿面ストリーマ進展時及び、ストリーマからリーダに転換に至る時点における電荷分布、発光分布に焦点を当て計測を行った。平行して、流体モデルによるストリーマ放電進展シミュレーションを行い、測定結果と比較することでシミュレーションの妥当性の検証を行った。本シミュレーションモデルで、今まで明らかでなかったストリーマ進展、停止機構がよく説明できることができた。

(2)市販の静電容量型表面電位計の分解能と被測定試料の幾何学形状との関係を明らかにし、被測定試料を階層化することで、高い電荷密度で帯電した沿面放電残留電荷を高

分解能で測定できる知見をえた。この知見をもとに、SF₆ ガスや CF₃I ガス中の沿面放電残留電荷分布の測定を行った。このような高耐圧ガス中におけるガス絶縁機器の絶縁設計に欠かせないものである。

(3)アレイ型静電容量型表面電位プローブと、その信号出力を取り出す集積回路(以下、信号変換集積回路と略記)とを一体構造で作成したチップセンサ(以下、空間電荷分布計測 MEMS センサと略記)のプロトタイプを試作し周辺電源回路の設計、組み立てを行った。その結果、プロトタイプは耐電圧が当初の設計よりも低く、放電直接測定が難しいことがわかった。

(4)(3)で開発を試みたMEMSセンサは、マイクロメートルスケールのギャップにおける沿面放電が対象となる。そこで、(3)と平行して、マイクロメートルスケールの沿面ギャップにおける大気圧空气中沿面放電現象の測定を行った

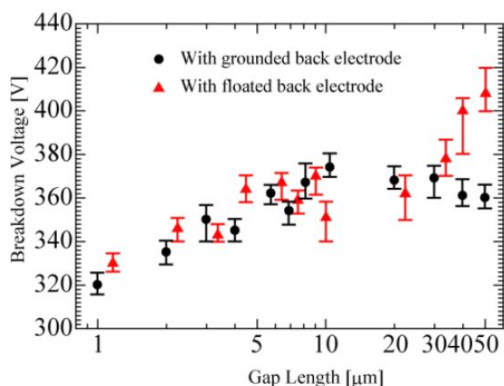


図 マイクロメートルスケール沿面ギャップの大気圧空气中における絶縁破壊電圧(負極性インパルス電圧印加)

図に示すように、マイクロメートルスケールの沿面ギャップにおいては、負極性電圧印加時において背後電極(接地)の場合、ギャップ長 10μm ~ 50μm 間で絶縁破壊電圧はほぼ一定の値をとっている。これは、電子の供給源と考えられる高圧電極の電界強度がギャップ長によらずほぼ一定で、かつ電界電子放出を起こしうる強い電界となっているためである。ギャップ距離が、電子の平均自由行程以下となると、徐々に破壊電圧が低下し、真空中の放電に近い特性を示している。このようなマイクロメートルスケールの沿面放電現象は、MEMS機器の微細化、高電界化が進む中解明が強くのぞまれているものである。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 8 件)

岩淵大行, 渡邊惇, 松岡成居, 熊田亜紀子, 日高邦彦, アルミニウム電極を用いたマイクロ沿面ギャップにおける絶縁破壊特性, 電気学会基礎共通論文誌, 査読有, 掲載決定

田中大樹, 熊田亜紀子, 日高邦彦, 大気圧空气中における沿面ストリーマ進展シミュレーション, 電気学会基礎共通論文誌, 査読有, Vol. 134, No. 3, pp. 118-125 (2014-3), DOI:10.1541/ieejfms.134.118

H. Iwabuchi, S. Matsuoka, A. Kumada, K. Hidaka, Y. Hoshina, T. Yasuoka, M. Takei, Influence of tiny metal particles on charge accumulation phenomena of GIS model spacer in high-pressure SF₆ gas, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 査読有, Vol. 20, No.5, pp.1895-1901(2013-10) 2013 DOI: 10.1109/TDEI.2013.6633722

J. Deng, H. Mu, G. Zhang, S. Matsuoka, A. Kumada, and K. Hidaka, Residual charge distribution of surface leader discharge under positive impulse voltage, IEEE Transactions on Plasma Science, 査読有, Vol. 41, No. 4, part III, pp. 999-1004 (2013-4) DOI: 10.1109/TPS.2013.2251670

A. Kumada, Q. Wangcen, K. Hidaka, Advanced measurement of surface charge distribution with high potential, IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 査読有 Vol.7, No. S1 (2012年12月増刊号) DOI: 10.100/tee.21821

[学会発表](計 19 件)

H. Iwabuchi, S. Matsuoka, A. Kumada, K. Hidaka, Polarity effect on breakdown phenomenon across micrometer-scale surface gap with tungsten electrodes, IEEJ P&ES Symposium on Advanced Technology in Power Systems 2014, Tokyo, Japan, pp. 1-6 (2014-3-7)

J. Deng, H. Ni, L. Pu, H. Mu, G. Zhang, A. Kumada, K. Hidaka, Propagation characteristic of surface discharge under AC application voltage, 18th ISH 2013, PE-11, pp. 1491-1496, Aug. 25-30, 2013, Seoul, Korea

H. Iwabuchi, S. Matsuoka, A. Kumada, K. Hidaka, Y. Hoshina, T. Yasuoka and M. Takei, Charge accumulation phenomena of GIS downsized spacer under DC field: high-resolution measurement and analysis with circuit model, 18th ISH 2013, OD2-03, pp. 696-701, Aug. 25-30, 2013, Seoul, Korea

森本徹郎, 日高邦彦, 熊田亜紀子, マイクロギャップ放電における前駆現象, 電気

学会放電・誘電・絶縁材料・高電圧合同
研究会資料，ED-13-6/ DEI-13-15/
HV-13-47，福岡（2012-1-28）
渡邊惇，松岡成居，熊田亜紀子，池田久
利，日高邦彦 微小ギャップ間の沿面放
電現象，電気学会放電・誘電・絶縁材料・
高電圧合同研究会資料，
ED-12-026/DEI-12-038/HV-12-026，pp.
61-66（2012-1-27）

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

出願状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6．研究組織

(1)研究代表者

熊田 亜紀子（KUMADA, Akiko）
東京大学・大学院工学系研究科・准教授
研究者番号：20313009

(2)研究分担者

該当なし

(3)連携研究者

該当なし