

平成 21 年 6 月 1 日現在

研究種目：若手研究（A）  
 研究期間：2006 ～ 2008  
 課題番号：18686024  
 研究課題名（和文） マイクロ・ナノ技術を活用した誘電体界面の極微細現象の測定と解析  
 研究課題名（英文） Charge Accumulation Measurement on Dielectric Insulators by Micro/Nano Electro Mechanical Sensors

## 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

## 研究成果の概要：

本研究においては、ナノ・マイクロ技術を駆使することにより、空間分解能が  $10\mu\text{m}$  に達する高分解電荷密度分布測定システムを構築し、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、絶縁物の帯電機構および沿面放電進展機構を解明することを目的とした。具体的な測定ターゲットは、(A) GIS モデルコーンスペースアの直流帯電現象と(B)厚さ数 $\mu\text{m}$ の誘電体上を進展する沿面放電現象とした。(A)については、既存の表面電位計をベースに、分解能としては現状の最高値である mm オーダの測定システムを開発し、大気圧 SF6 ガス中における GIS モデルスペースア帯電現象を把握した。(B)半導体プロセス技術を活用し、3 種類の MEMS センサを作成した。いずれも分解能はサブミクロンオーダに達する。これらのセンサの特性を測定し、沿面放電測定への適用可能性を検討した。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	9,600,000	2,880,000	12,480,000
2007 年度	9,000,000	2,700,000	11,700,000
2008 年度	4,500,000	1,350,000	5,850,000
年度			
年度			
総計	23,100,000	6,930,000	30,030,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、電力工学・電機機器工学

キーワード：電気機器、誘電体界面現象、MEMS、帯電、沿面放電

## 1. 研究開始当初の背景

絶縁物の帯電現象は、電力用機器から、半導体デバイスに至るまで、その絶縁設計を決定する重要なパラメータとなっている。例えば電力用機器においては、直流機器はもちろん交流機器においても断路器作動時の GIS（ガス絶縁開閉装置）内の絶縁スペースやケーブルブッシング表面に帯電が生じる。中国

における DC800kV 送電建設計画のように、直流電力機器の開発が精力的に行われている今日の状況下においては、絶縁設計の合理化を行う上で、帯電電荷量の正確な把握、そして機構の解明が強く求められている。電気絶縁材料に関しては、ナノマテリアルを充填した新材料が産学を問わず研究されているが、これら新材料の開発にナノスケールでの帯

電荷の把握が必要となりつつある。また次世代のディスプレイとして注目される Field Emission Display (FED)においては、その内部のスペーサ表面のサブミクロンスケールの真空帯電現象が実用化上のボトルネックとなっている。

## 2. 研究の目的

(1)本研究においては、ナノ・マイクロ技術を駆使することにより、空間分解能が  $10\mu\text{m}$  に達する高分解電荷密度分布測定システムを構築し、直流電界下における GIS モデルスペーサの帯電現象や、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、絶縁物の帯電機構および沿面放電進展機構を解明することを目的とする。

(2)なお限られた期間であるため、3にて後述するとおり具体的なターゲットとしては (A)GIS スペーサの直流帯電現象の測定と解析 (B)沿面放電進展時における電荷密度分布の測定と解析の2点に絞っている。

## 3. 研究の方法

(1)誘電体表面の帯電分布を測定する手法としては、表面電位計を物質背面に埋め込む、物質表面近くを走査させる手法のほかに、電気光学効果を用いたセンサを物質背面に埋め込む、もしくは物質表面近くを走査させる手法がある。まず、これらの手法の空間分解能および時間分解能、期待される測定可能範囲を数値計算を通じて解析した。その結果、すべての対象物に万能な高時間、空間分解センサの開発は難しいことが判明し、測定対象ごとに最適なセンサを開発することとした。

(2)具体的な測定ターゲットは、(A) GIS モデルコーンスペーサの直流帯電現象と (B)厚さ数  $\mu\text{m}$  の誘電体上を進展する沿面放電現象の2種類に絞り、(A)については、既存の表面電位計をベースに、分解能としては現状の最高値である mm オーダの測定システムの開発を目指す、(B)については MEMS 技術を活用して分解能  $10\mu\text{m}$  に達する測定システムの開発を目指すこととした。

## 4. 研究成果

(1) GIS モデルコーンスペーサの直流帯電現象測定について

ガス絶縁開閉機器 (GIS) は交流に用いられる場合においても断路器開極時に最大で運転電圧分の直流電圧が残留する可能性がある。このような状況下においてスペーサ近傍の電界分布は、容量分布に基づいて決定される容量場から、抵抗分布に基づいて決定される抵抗場へと移行する。静電抵抗場への移

行に伴いスペーサとガスの界面には帯電が生じ、逆極性の電圧が加わった場合の破壊電圧の低下が指摘されている。すなわち直流電界のスペーサ帯電現象の正確な把握とその帯電機構の解明が課題となっている。そこで、信号処理手法を取り入れることにより、数千点に及ぶ測定点で mm オーダの分解能の三次元計測可能な帯電電荷密度分布測定装置を開発し、直流電界下におけるスペーサ帯電現象を測定し、その帯電機構に迫ることとした。

測定装置の概略を図1に示す。接地ガード電極を有した静電容量型表面電位計、PC制御 xyz ステージ、エレクトロメータよりなる。表面電位計で対象物表面から 1mm の地点を走査し、直径 0.5mm の検出電極に誘起される電位をエレクトロメータで測定する構造である。測定試料としては、GIS 縮小コーンスペーサを用意し、外部導体は接地し、中心導体に一定時間直流電圧を印加した後の、スペーサ表面の電荷密度分布を測定した。なお試料は電力用エポキシよりなり、低塵埃環境下での課電から測定までを同一環境で行うために、グローブボックスを用いて実験を行った。

表面電位計出力は対象物表面全体の帯電電荷の影響を受けるため、測定点の出力から、電荷量を求めるには、行列計算が必要となる。数値電界計算により行列項目を計算するとともに、逆計算時に Tikhonov の正則化技法を用いることで、安定に逆計算が行える手法および測定系の空間分解能の評価法を開発した。本研究で開発した GIS スペーサ表面帯電電荷の測定装置の測定空間分解能は 5.4 mm となった。

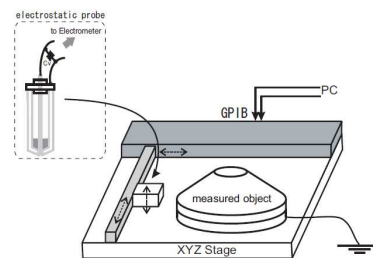


図1 GIS モデルスペーサ電荷密度分布測定装置

大気圧 SF6 ガス中において直流電界下の GIS モデルスペーサ帯電現象の測定を行った結果、図2に示すように SF6 ガスの体積抵抗及びスペーサの表面抵抗が支配的と考えられる同心円状帯電のほかに、塵埃がトリガとなった紡錘状帯電痕もみられることがわかった。またスペーサ保管時に湿度管理を行うことにより、表面抵抗値を十分高い値に保持し帯電の時定数を長くできることに加え、表面抵抗分布のばらつきも抑えられ帯電絶対

量が低下することがわかった。

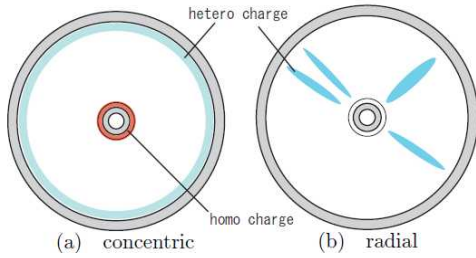


図2 スペース帯電の特徴

(2) マイクロギャップにおける沿面放電現象

センサ開発に先立ち、マイクロギャップにおける沿面放電特性の把握を行った。具体的には、SOI ウェハ上に図3に示す200 $\mu\text{m}$ ~100nmの沿面ギャップを半導体プロセスより作成し、これらのインパルス放電電圧、交流放電電圧特性を把握した。

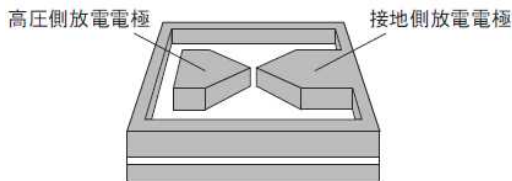


図3 マイクロ沿面ギャップ

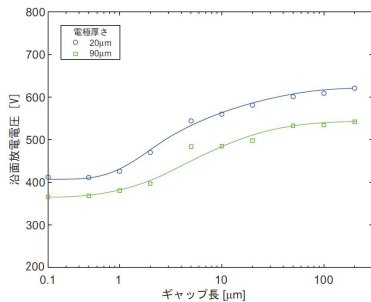


図4 沿面フラッシュオーバー電圧測定結果

図4に、インパルスフラッシュオーバー電圧特性に及ぼすギャップ長、放電電極厚みの影響を測定した結果を示す。電極厚さが厚い方が、沿面フラッシュオーバー電圧は下がる傾向にある。マイクロギャップ中の電界強度が非常に大きく、面積効果が働いた可能性があることを示唆している。また、ギャップ長が短くなるほど沿面フラッシュオーバー電圧は一定値(350~400V)へと収束した。印加電圧波形がインパルス電圧であるうえ、紫外線照射等も行っていないため、初期電子が十分ではなく、パッシュェンの法則よりも全体的に高い値をとったと思われる。また、一定値に収束する点については、放電路が電極間の最短距離ではなく、電子なだれが十分に成長できるような気体中を迂回していると考えられる。なお、このような状況下における放電発光は、電極間が全体的に光ったものとなり、放電路がは

っきりとは認識できなかった。

(3) 沿面放電測定用 MEMS センサの開発

図5に示す厚さ2 $\mu\text{m}$ のSiO<sub>2</sub>層上面に、1対の沿面放電電極を、下100 $\mu\text{m}$ もしくは200 $\mu\text{m}$ のギャップを設けて作成し、下面には直径1 $\mu\text{m}$ の帯電測定プローブを3点配置した構造を持つセンサを、半導体プロセスを利用してSOIウェハより作成した。その出力特性を測定した。固有静電容量が大きいため出力が小さく、配線の引き回しにより放電印加時のノイズが重畳する欠点があることが判明した。

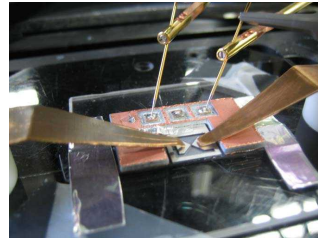


図5 SOIウェハを利用した沿面放電測定用MEMSセンサ

この欠点に対応するため、新たにガラス基板上にセンサ、沿面放電電極構造、及び出力パッド構造を有したセンサの開発を行った。図6に示すように、放電により、ギャップ直下に埋め込まれた検出電極に誘起された電位を、内部配線を通してセンサ表面の出力パッドの電位の変化としてオシロスコープのFETプローブで測定する構造とした。沿面ギャップの表面と検出電極間の静電容量と、検出電極から出力パッドまでの配線容量との、容量分圧回路になると期待される。

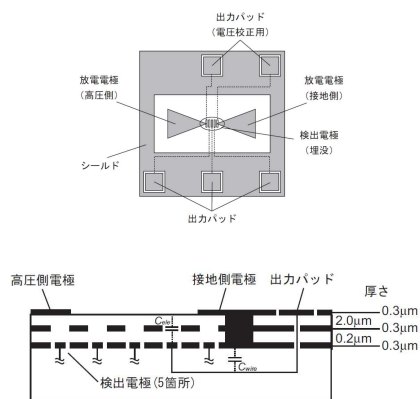


図6 ガラス基板を利用したセンサ

このガラス基板を利用したセンサの出力特性を、沿面ギャップ間に既知の電圧を印加し測定した。図7に振幅特性および応答波形例を示す。設計通り印加電圧に対して、十分大きい出力電圧が得られたが、応答波形を見ると予想に反してプローブ出力と印加電圧波形の間に、90度の位相差が見られた。ガラ

ス基板を利用したマイクロセンサの応答特性は、単純なキャパシタの分圧の等価回路では説明が出来ないといえる。

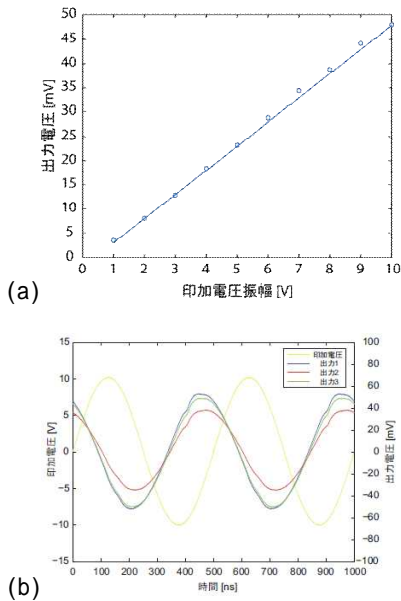


図7 ガラス基板を利用したセンサの特性(a)振幅特性(b)応答波形

ガラス基板を利用したマイクロセンサとFETプローブの等価回路についてより詳細に検討を行った。図41にその等価回路を示す。センサチップの構成部品の抵抗率、FETプローブの公開等価回路の資料を考慮すると、図8のような等価回路が得られる。すなわち、交流印加時の位相進みは、放電部分と検出電極(プローブ)間の2.1fFの容量とFETプローブの1Mの入力抵抗により、微分回路が構成されたことが原因であることが判明した。

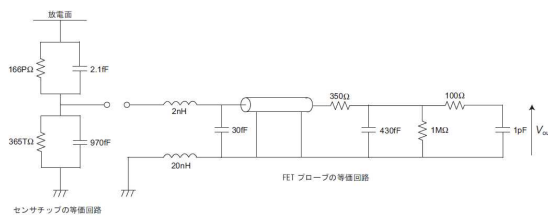


図8 ガラス基板を利用したセンサの等価回路

このようにガラス基板を利用したセンサにおいては、読み出し回路がアナログ回路であるために、センサ出力の大きさが検出電極の面積や配線長さに直接的に影響を受けること、またオシロスコープのプローブまでもセンサの一部に組み込まれていると考える必要があること等から、センササイズ、センサの出力の大きさ、周波数特性等を同時に満たすような設計を行うことが困難であった。そこで、CMOS デジタル回路を用いることで

これらの問題を一挙に解決し、自由度の高い設計を行えるセンサの開発に取り組んだ。図9にCMOS 読出型センサのマイクロ沿面ギャップと検出電極の配置を図12に断面図を示す。検出電極はその下層のCMOS トランジスタによるソースフォロウ回路(保存回路)と接続されており、出力を一旦保存することが出来る。これによりセンサとしての機能がチップ内で完結するので、アナログタイプのセンサで考慮が要求されたプローブの影響は無視でき、プローブ先端の出力パッドとの接触部など、不安定な要素が無くなり、センサ特性の安定化と均一化が図れるというメリットがある。

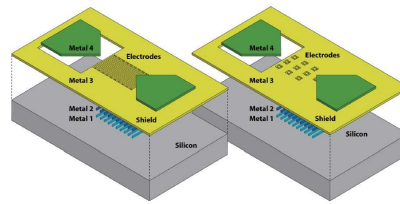


図9 CMOS 読出型センサ

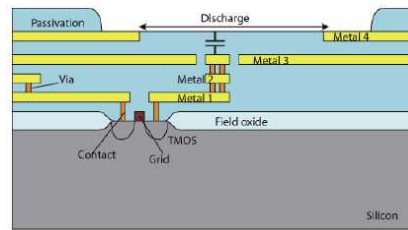


図10 CMOS 読出型センサ断面図

実際に製作したセンサチップの上面図の写真を図11に示す。ギャップ長は150 $\mu\text{m}$ と75 $\mu\text{m}$ の2種類で、検出電極の配置は直列とアレイの2種類あるので、センサとしては合計4種類となる。チップ面積に製作コストが比例するという事情から、これらのセンサが一つのチップに集合した状態で製作した。チップのサイズは3.1 $\times$ 3.1mm<sup>2</sup>である。製作にはおよそ5カ月を要し、2009年2月下旬に完成し、納品された。現在、本センサの応答特性を測定する準備を行っている。

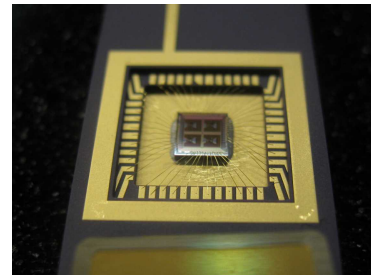


図11 作成したCMOS 読出型センサ上面図

## 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6件)

A. Kumada, S. Okabe, and K. Hidaka, Residual charge distribution of positive surface streamer, Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 42, 095209 (8pp), 2009, 査読有

D. Tanaka, S. Matsuoka, A. Kumada, K. Hidaka, Two-dimensional potential and charge distributions of positive surface streamer, Journal of Physics D: Applied Physics . Vol. 42 ,075204 (8page), 2009 査読有

A. Kumada, K. Hidaka, K. Amano, and K. Itoh, Dielectric loss of PCBs leading to microwave heating, IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, Vol.4, pp.297-299, 2008, 査読有

A. Kumada, K. Hidaka, K. Amano, and K. Itoh, Surface Temperature of Pd/C Catalyst under Microwave Irradiation in Dechlorination Process of PCBs, IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, Vol.4, pp.133-135, 2008, 査読有

S. Okabe and A. Kumada, Measurement Methods of Accumulated Electric Charges on Spacer in Gas Insulated Switchgear, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.22, pp.1547-1556, 2007 査読有

高橋紹大、栗原隆史、武田敏信、熊田亜紀子、松岡成居、日高邦彦、テラヘルツ波を用いたポリエチレン内部応力・空隙界面の計測技術への応用, 電気学会論文誌 A, Vol.127, pp. 593-598, 2007, 査読有

[学会発表](計81件)

┆ Akiko Kumada and Kunihiro Hidaka, Potential and Charge Distributions of Positive Surface Streamer, Proceedings of the 17th International Conference on Gas Discharges and their Applications, pp.261-264, 2008.09.08, Cardiff

┆ H. Yamaguchi, H. Yonezawa, S. Matsuoka, A. Kumada, and K. Hidaka, Surface discharge phenomena in micro gap under impulse/DC voltage application, International Workshop on High Voltage Engineering, pp. 1-6 (ED-08-129/HV-08-58), 2008.10.24, Kyoto

┆ Junya Hayashi, Hiroki Yamaguchi, Shigeyasu Matsuoka, Akiko Kumada,

Kunihiro Hidaka, Micro sensor for measuring surface discharge phenomena with high spatial resolution, Proceedings of 2007 Japan Korea Joint Symposium on Electrical Discharge and High Voltage Engineering, pp. 211-214, 2007. 11.17, Tokyo

┆ 林純也、山口祐樹、松岡成居、熊田亜紀子、日高邦彦、三田吉郎、沿面放電測定用マイクロセンサの開発, 電気学会放電・開閉保護・高電圧合同研究会資料, ED-07-161 pp. 93-98, 2007.11.26, 広島

┆ Junya Hayashi, Daiki Tanaka, Shigeyasu Matsuoka, Akiko Kumada, Kunihiro Hidaka and Y. Hoshina, Charge Distribution Measurement on a GIS Cone Spacer under DC Voltage, Proceedings of 15th International Symposium on High Voltage Engineering, T1-766, 2007.8.31, Ljubljana, Slovenia

┆ 田中大樹、林純也、松岡成居、熊田亜紀子、日高邦彦、保科好一、電力機器モデルスペースの直流高電界下での帯電特性, 電気学会 プラズマ・放電合同研究会, pp.89-94(ED-07-138), 2007.9.14, 札幌

## 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