

平成 22 年 4 月 30 日現在

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2008～2009
 課題番号：20760208
 研究課題名（和文） 半導体圧力波センサを用いた帯電計測装置による絶縁材料の帯電解析
 研究課題名（英文） Analysis of Charging Phenomena on Dielectrics using PEA System and Developing Semi-conductor Pulsed Pressure Signal Sensor
 研究代表者
 三宅 弘晃（MIYAKE HIROAKI）
 東京都市大学・工学部・講師
 研究者番号：60421864

研究成果の概要（和文）：

本研究では、半導体を用いた圧力波センサの開発、現有する帯電計測装置を用いて放射線を照射した宇宙機材料の帯電計測を実施。これは開発した半導体圧力波センサの構成データとして使用、の2点を実施した。

PNジャンクション型とMOS型半導体センサの試作を行った。入力圧力波に応じた出力が確認された。パルス状の高帯域パルス圧力波の検出を半導体素子で行えたのは世界初の成果である。

電子・プロトン照射下における宇宙機材料宇宙機絶縁材料の帯電計測を実施し、材料内の帯電挙動の取得を行った。特にプロトン照射中の帯電計測における各種条件下でのデータの取得を実施できるのは世界でも申請者だけある。

研究成果の概要（英文）：

This research work is carried out as a development of piezo device using semi-conductor. And our final aim is new developed device will be applied for the surface charging sensor for surface materials for spacecraft. The carried out point are as follows:

1: Development of pulsed ultrasonic waves sensor device using PN junction type and MOS type semiconductor.

2: Measurement of charge accumulation in surface materials of spacecraft irradiated by an electron and proton which can be used for calibration data of the developed sensor.

From our research work, we succeeded to develop a new pulsed ultrasonic waves sensor using semi-conductor. Furthermore, we also succeeded to obtain charge accumulation result in surface materials of spacecraft irradiated by electron and proton. Particularly, around the world, the results of charge distribution under the proton irradiation condition are obtained by us.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学 ・ 電子・電気材料工学

キーワード：帯電計測、宇宙放射線環境、劣化、材料物性

1. 研究開始当初の背景

内閣府に設置された総合科学技術会議は、2004年9月に「我が国における宇宙開発利用の基本戦略」を策定し、その中で「紛争や災害などから国民の生命や財産を守り、我が国の安全の確保を図る責務が政府にはあり、そのため、宇宙という場の活用を図る」としている。これを受け、宇宙航空研究開発機構(JAXA)も2005年に「JAXA長期ビジョン」の中で、人工衛星を活用した災害・危機管理情報収集通報システムを提案している。この計画は衛星による情報通信の重要性の増大を示している。しかしながら、宇宙空間は放射線環境(ヴァン・アレン帯：電子や陽子等の荷電粒子、プラズマで満たされた空間)であり、飛行している衛星が荷電粒子に起因した帯電・放電(あるいは材料の絶縁破壊)現象により誤作動や故障するという事故が発生している。

米、Aerospace社のDr. Koonsらは米・空軍とNOAA(アメリカ海洋大気圏局)のサポートにより調査した結果によると8割以上が荷電粒子による障害と報告している。さらに近年わが国でも、2002年12月に打ち上げられた環境観測技術衛星みどり2号(ADEOS-II)が2003年10月に帯電・放電によって太陽電池パドルハーネス(電力送電線)が損傷し、その運用を停止するという事故があった。この衛星の寿命は予定の1/3以下であった。さらに近年、衛星の軽量・高効率、打ち上げコストの低減を図れる推進器として注目されているイオンエンジンの搭載によって、動作上の副産物として発生する低速イオン流やモリブデン・カーボン(グリッド材料)のコンタミネーションが、放射線環境による帯電との相乗効果により衛星の帯電状況が変歪され、特に太陽電池近傍にて帯電・放電が頻発し衛星システムの安定に大きく影響を及ぼすという新たな問題も生じてきている。

冒頭でも述べたが今後はますます社会生活における衛星の重要度は増大してきており、そのような社会要請の中で信頼性向上・長寿命化のためにも放射線環境と衛星搭載システムによって生ずる衛星表面材料の帯電・放電機構を研究することは非常に重要であり、今最優先で取り組まなくてはならない課題である。

2. 研究の目的

申請者は本研究課題として『半導体圧力波センサを用いた帯電計測装置による絶縁材料の帯電解析』とした。本研究の主目的は、以下の3項目である。

第一に、耐宇宙環境性能を持たせ内部の帯電を同時に計測することが可能な帯電計測装置を、パルス静電応力法(PEA法)を用いて開発、特に高感度で耐宇宙環境性を有するセンサ素子の開発を、半導体を使用して行う。さらにPEA法を用いて内部のみならず表面の帯電をも計測可能なシステムの検討と宇宙環境用への対応の検討を行う。

第二に、開発したシステムを用いて電子線やプロトンなどの照射による内部帯電計測を行い、絶縁材料の内部の導電率算出やトラップ準位等を算出し、帯電物性の検討を行う。

第三に、宇宙放射線環境である電子・プロトン・紫外線・原子状酸素等により予め劣化させた試料を用いて、電子線やプロトン照射時の内部帯電計測の測定結果と、同様に劣化させた試料の二次・光電子放出測定(申請者の所属先の業務)結果と比較し総合的に宇宙機の表面材料の帯電メカニズムの解析を行う。

3. 研究の方法

3-1. 半導体センサの開発及び試験法

厚さ700 μm のSi基盤(Bの拡散濃度 10^{15} 個/ cm^3)を使用し、p+をドープレシPN接合層を作成した。

PN接合素子においては接合面に空乏層が形成されると、そこに電気的な容量 C_d

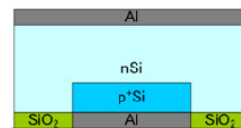


図1 PN接合型半導体センサモデル図

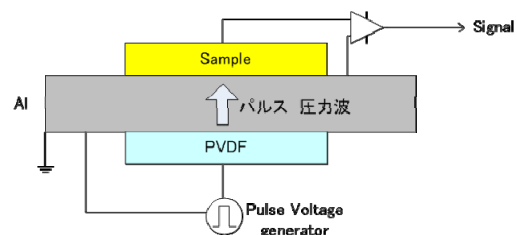


図2 圧力波入力装置 模式図

が形成される。よって、この空乏層は、高分子圧電素子が形成している分極構造と等価的な構造と見なすことができる。空乏層幅 d が圧力波により偏歪することで C_d が変化する。この変位はPN接合、MOSキャパシタとも両端の電極間を流れる変位電流 $I=(dC_d/dt)V$ を検出することによって測定することができる。

図1に作成素子のモデル図を示す。開発した素子は図2に示すように、圧力波発生装置に取り付け、パルス圧力波を入力させた。圧力波は、高分子圧電素子であるポリフッ化ビニリデン(PVDF)にパルス電圧 $v_p = 200\text{ V}$ 、 $t_p = 1\text{ ns}$ を入力することにより発生させた。発生圧力波はAl電極を介して、半導体素子に入力される。その際に、上述した変位電流を検出することで圧力波の検出確認をした。

3-2. 帯電計測方法測定方法

図3にパルス静電応力法(PEA法)の原理図を示す。電極で挟んだ試料にパルス電界を印加することにより、空間電荷の存在する各位置で電荷密度に比例した静電応力が瞬間的に発生し、試料に蓄積している電荷が微小変位する。これにより、圧力波が発生する。圧力波は下部電極を伝搬してセンサー(圧電素子)に到達し、電気信号に変換される。この際、圧電素子に届く圧力波は試料内の位置(深さ方向)によって到達する時間が異なるために、空間電荷の分布は出力信号の時間変化として測定されることになり、空間電荷の蓄積している位置が分かる。また、発生する圧力波の振幅は電荷密度に比例するため、圧電素子から発生する電気信号は試料内の電荷密度に比例している。圧電素子から出力される電圧信号はアンプで増幅され、オシロス

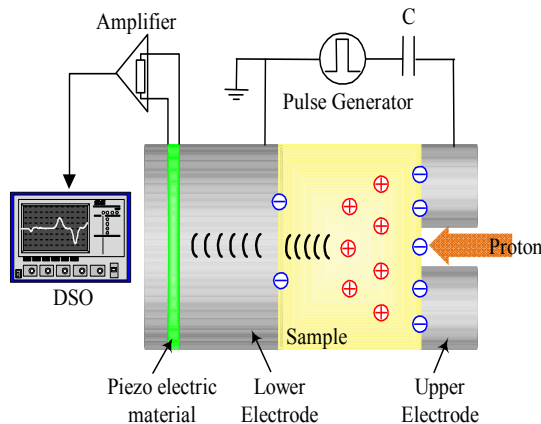


図3 PEA法測定原理

コープにより観測された信号をコンピュータに取り込み、信号処理を施すことによって空間電荷分布を得ることができる。

4. 研究成果

4-1. 半導体センサ圧力波検出結果

図4にPN接合型試作素子における圧力波入力時の電圧出力信号を示す。同図より、微小ながらも入力圧力波による信号出力の検出を確認した。更に、素子に直流電圧 $\pm 3\text{ V}$ まで 1 V 毎に印加し、空乏層圧を制御した際の圧力検出試験を図4と同様に実施したが、波形は図4と同様で変化が観察されなかった。

以上のように、本提案は原理的に可能であると実証された。今後は検出感度の向上を図るべく、以下の項目について試作素子を作成し、センサの構造最適化を進める。

素子構造:

- PN接合やMOSキャパシタの空乏層の変移を直接検出する構造
- MOS-FETの空乏層変移によるソース-ドレイン間電流を検出する構造

空乏層厚:

ドーピング濃度及び基板濃度 ($1 \times 10^{15}\text{ cm}^{-3} \sim 1 \times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$)、感度領域サイズ・形状などのパラメータを調整する。これにより空乏層の厚さが決まるので、感度の最適化を行う。

4-2. プロトン照射下におけるリアルタイム帯電計測

測定試料として厚さ $125\text{ }\mu\text{m}$ のポリイミドフィルム(宇部興産社製: Upilex®)(以

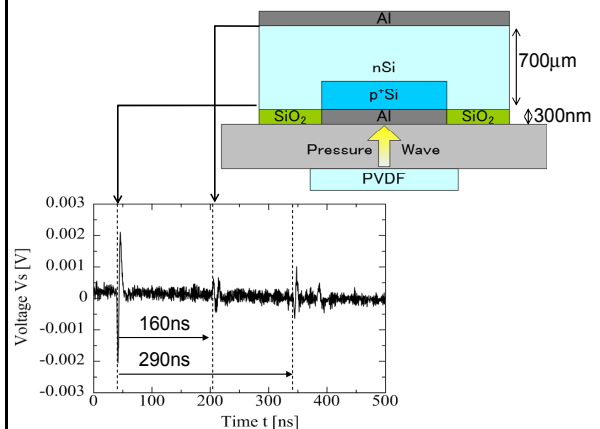


図4. 入力圧力波によるPN接合型試作素子の電圧出力

センササイズ: 2 cm 四方、

ドーピング濃度: $1 \times 10^{17}\text{ cm}^{-3}$

表 1 実験条件

	Energy [MeV]	Current Density [nA/cm ²]	Irradiation Time [min]
実験 1	1.5	30	30
実験 2		3	
実験 3		0.3	
実験 4		0.03	300

下 PI) を用いた。PI は実際の宇宙機の MLI として用いられている。プロトン照射実験はチャンパー内の真空度を約 1×10^{-5} Pa とし、測定試料に照射エネルギー 1.5 MeV 一定とし、電流密度を 0.03 - 30 nA/cm² の範囲で変化させ、プロトン照射中における絶縁材料内の空間電荷分布をそれぞれ測定した。なお、電流密度 0.03 nA/cm² というプロトンは内帯に存在し、太陽の活動が活発になると 0.3 nA/cm² のプロトンも存在すると言われている。各測定における実験条件を表 1 に示す。また、プロトン照射実験は日本の 3MV タンデム加速器、東京大学原子力専攻重照射設備のバンデグラフ、および宇宙航空研究開発機構筑波宇宙センターの宇宙環境試験設備を用いて行った。

4-2-1. 実験結果および考察

図 5 に実験 1,2,3,4 におけるプロトン照射中の PI 内の最大蓄積時の電荷分布を示す。同図より、照射面から試料内約 50 μm まで正電荷の蓄積が確認され、これら正電荷の蓄積は照射電極側にのみ見られ、対向電極側に正電荷を確認することはできない。これはプロトンが試料内のある位置まで侵入し、それ以上は深く侵入していないことを示している。

また、同照射条件における PI 内のプロトン飛程を数値計算により算出したところ、37 μm であった⁽⁶⁾。図 5 (a)より正電荷蓄積分布のピーク値は 35 μm であり、これは装置の位置分解能 10 μm 程度であるため、37 μm と 35 μm ではほぼ差がなく、一致していると言える。これらより、同図における正電荷分布は、プロトン照射により生じた蓄積電荷が観察されたものと考えられる⁽⁷⁾。また、同図(b), (c), (d)より、照射面からの電荷蓄積位置は、同図(a)と同様の結果が得られている。つまり、

電流密度変化の差としては、最大電荷蓄積位置が最大飛程の位置から照射面近傍に変化していることがわかる。

図 6 に照射中・照射後にかけたの PI 内蓄積総電荷量の経時変化を示す。蓄積総電荷量は電荷分布の測定結果より、試料内の蓄積正電荷分布を積分することにより算出した。まず、最大蓄積量に注目し同図(a), (b)を比較すると、電流密度が 10 倍程異なっても最大量がそれぞれ 0.084 mC/m²、0.063 mC/m² となり、蓄積電荷量が比例しないのがわかる。さらに同図(c), (d)より、電流密度を 1/100, 1/1000 としても最大蓄積量がそれぞれ 0.05, 0.067 mC/m² であり、顕著な差は見られない。

次に蓄積挙動をみると同図(a)の結果よりプロトン照射開始直後に蓄積量は最大となり、その後は照射中にもかかわらず蓄積量は減少し、照射開始 10 分後には 0.055 mC/m² の一定値を取り、電荷量の変化は観察されなくなった。同図(b)においては照射開始 1 分後に最大となり、その後減少に転じている。さらに電流密度を 1/10 とした同図(c)においては、5 分後に最大値に達し、さらに 1/10 の同図(d)においては約 2 時間後に最大値に達している。

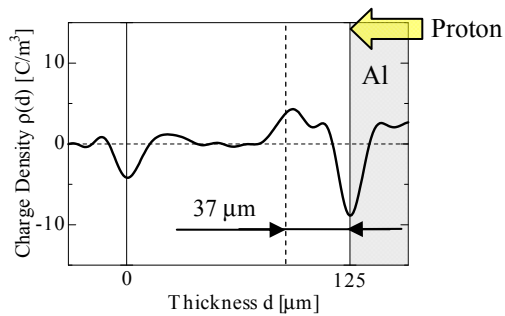
照射後に着目すると電流密度が比較的高い場合には照射終了直後に素早く電荷が減少し、1 分後以降は電荷が観察されない。電流密度が低い場合においては、日単位の減少傾向である。これらより、電流密度を変化させると最大蓄積量に達する時間、および照射後における電荷の減少時間が変化し、電流密度を高くすると飽和時間が早くなり、照射後の電荷の減衰が早くなる。一方、電流密度を低くするとその逆の現象が得られた。

次に、照射中の蓄積電荷現象について考察する。照射しているのにも関わらず電荷の蓄積が減少していく傾向について、以下のことが挙げられる。

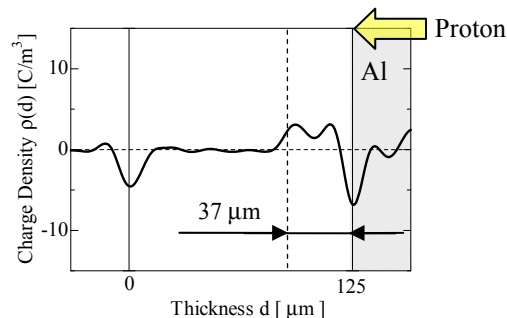
プロトンが侵入した範囲の導電率の上昇

プロトン照射による温度上昇

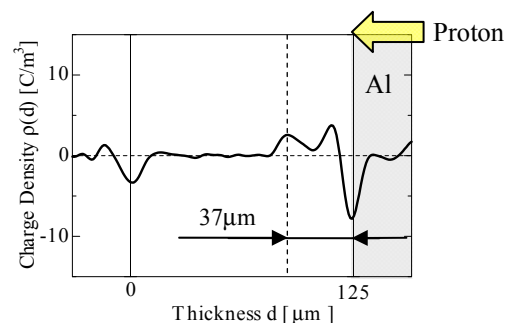
まず、の原因においては、プロトン通過領域の導電率が上昇し、上部電極部に存在する自由電子が試料内部に侵入することで、マクロ的に中和状態を取るために電荷量が減少しているようにみえると考え



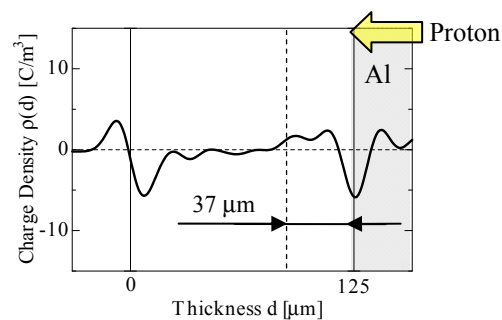
(a) 実験 1 30 nA/cm²



(b) 実験 2 3 nA/cm²



(c) 実験 3 0.3 nA/cm²

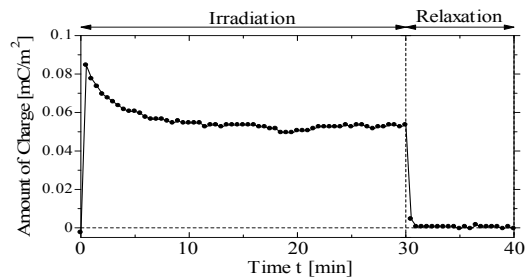


(d) 実験 4 0.03 nA/cm²

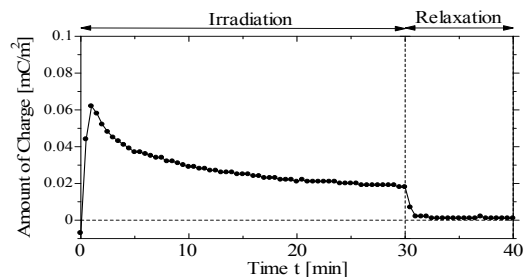
図 5 プロトン照射下における電荷分布

られる。導電率が上昇する原因としては、分子間の結合が高エネルギープロトンにより切断されることや、プロトン照射したことにより生じる放射線誘起電導(RIC)が考えられるが、まだ推定の段階であるため詳細な検討を行うことが今後の課題である。

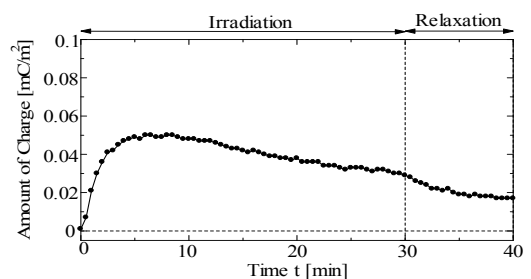
また、図 6 (a)における照射後 10 分以降に



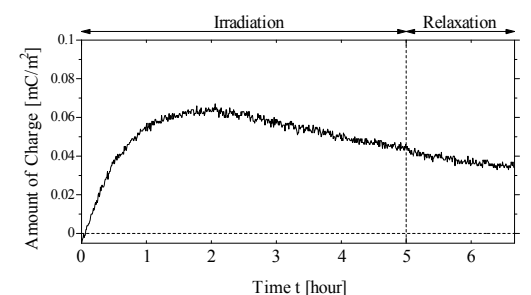
(a) 実験 1 30 nA/cm²



(b) 実験 2 3 nA/cm²



(c) 実験 3 0.3 nA/cm²



(d) 実験 4 0.03 nA/cm²

図 6 蓄積総電荷量の経時変化

みられる一定値の状態は、プロトンの注入量と電極からの電子注入量がつりあっている状態であると考えられる。

次に についてであるが、IR カメラによる温度測定予備実験により、プロトンビームを照射した際の PI の温度は、100 を超えることが確認された。つまり、プロト

ン照射による温度上昇により、蓄積電荷の移動度が上昇し電荷が試料外へ放出されているのではないかと考えられる。

参考文献

- (1) H. C. Koons, J. E. Mazur, R. S. Selesnick, J. B. Blake, J. F. Fennell, J. L. Roeder and P. C. Anderson, "The Impact of the Space Environment on Space Systems", Proceedings of the 6th Spacecraft Charging Technology Conference, Air Force Research Laboratory, pp.7-11, 1998.
- (2) V. Griseri, C. Perrin, K. Fukunaga, T. Maeno, D. Payan, L. Levy and C. Laurent, "Analysis of Electron Behavior in Polymeric Films During Electronic Irradiation", 2005 Annual Report CEIDP, pp 645-648, 2005
- (3) Tatsuo TAKADA, Hiroaki MIYAKE, and Yasuhiro TANAKA, "Pulse Acoustic Technology for Measurement of Charge Distribution in Dielectric Materials for Spacecraft", IEEE NPSC Transactions on Plasma Science, Vol. 34, No. 5, pp.2176-2184, 2006
- (4) M. Honjoh, S. Maruta, Y. Tanaka, T. Takada and R. Watanabe, "Measurement of Charge Accumulation in Electron Beam irradiation Dielectric Materials for Spacecraft," Proceedings of the 10th Space Craft Charging Technology Conference, Biarritz-France, pp.18-21, 2007.
- (5) T.Takada, "Acoustic and Optical Methods for Measuring Electric Charge Distributions in Dielectrics", IEEE Trans. DEI, Vol.6, No.5, pp.519-547, 1999
- (6) J. F. Ziegler, J. P. Biersack and U. Littmark, "The Stopping and Range of Ions in Solids", Pergamon Press, New York, 1985.
- (7) T. Takada, H. Miyake and Y. Tanaka, "Pulse Acoustic Technology for Measurement of Charge Distribution in Dielectric materials for Spacecraft", IEEE Trans. PS, Vol. 34, No. 5, pp.2176-2184 (2006)

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1件)

Kenichiro Nagasawa, Masato Honjoh, Hiroaki Miyake, Rikio Watanabe, Yasuhiro Tanaka, Tatsuo Takada, "Charge Accumulation in Election Beam Irradiated Various Polymers", IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 査読

有, 2010, a09-023

〔学会発表〕(計4件)

沼田、三宅、田中、高田、岩井, プロトン照射ポリイミドフィルムの帯電特性, 第6回宇宙環境シンポジウム, 2009年10月30日, 北九州国際会議場
三宅、沼田、長澤、田中、高田, 放射線環境下における宇宙機材料の内部帯電・放電特性, 放電学会 年次大会放電, 2009年11月14日, 東京都市大学
沼田、柳川、三宅、田中、高田, プロトン照射したポリイミドフィルム内の電荷分布測定, 電気学会 誘電・絶縁材料研究会, 2009年12月4日, 秋田大学
沼田、柳川、三宅、田中、高田, 高電界下におけるプロトン照射ポリイミド内の電荷蓄積特性, 電気学会 全国大会, 2010年3月17日, 明治大学

6 . 研究組織

(1)研究代表者

三宅 弘晃 (MIYAKE HIROAKI)
東京都市大学・工学部・講師
研究者番号: 60421864