

宇宙機表面絶縁材料のアーキングによる破壊現象の数値計算

Numerical Calculation of Electric Breakdown by Arcing on Spacecraft Insulating Surface Material

田原 弘一・増山 貴久 (大阪大学大学院基礎工学研究科)

Hirokazu Tahara and Takahisa Masuyama (Graduate School of Engineering Science, Osaka University)

Key Words: Spacecraft Surface Insulator, Space Plasma Environment, Arcing, Anodized Aluminum Plate

Abstract: In the future, LEO spacecraft will be larger and higher powered. Because of the balance of leakage currents through ambient space plasma, their main conductive body will have a higher negative potential without plasma contactor operation. When spacecraft operate with a higher voltage, more intensive arcing is suspected to occur on the surface. When an arc occurs on the spacecraft insulating surface, it causes some problems such as degradation of spacecraft surface material. Therefore it's important to know how much energy is supplied to an arcing and how much an arcing degrades spacecraft surface materials. In previous works, it was observed that arc spots diameter tended to enlarge with initial stored energy. Here, arc spots can signify the location on insulating material where an arc occurred. In this study, we carried out numerical simulation to verify the dependence of arc spot diameter on initial energy and to estimate how much energy is supplied to arc plasma. Calculated Results showed that arc spot diameter enlarged as initially stored energy increased. Furthermore, the plasma density near arc spot was much higher than that of ambient space plasma because of ablation of the insulator due to arcing.

記号

A	: アークスポット断面積	R_p	: プラズマの電気抵抗
C_0	: 静電容量	T	: 温度
C_p	: アルミナ比熱	T_c	: アルミナ特性温度
E	: 全エネルギー	u	: 流速
e	: 電荷素量	V_i	: 電離エネルギー
ΔH	: アルミナ結合エネルギー	α	: 電離度
h	: プランク定数	Γ	: アブレーションフラックス
j	: 電流密度	Λ	: クーロン対数
k	: ボルツマン定数	ρ	: 密度
L_0	: 放電回路のインダクタンス	σ	: アルミナ密度
m	: 粒子質量	ϕ	: シース内における電位降下
n	: 数密度	η	: プラズマ電気抵抗率
P	: 圧力	λ	: アルミナ熱伝導率
P_{vap}	: 蒸気圧	ϵ_0	: 真空の誘電率
P_c	: アルミナ特性圧力	Θ	: 絶縁層内部温度
Q	: 電荷	添字	
Q_{ab}	: アブレーション粒子のもつエネルギー	e	: 電子
Q_j	: ジュール加熱によるエネルギー	i	: イオン
Q_{rad}	: 制動放射によるエネルギー	n	: 中性ガス
Q_{conv}	: 対流熱伝達によるエネルギー	w	: 絶縁層壁面
q	: 対流エネルギーフラックス		
R	: アークスポット半径		
R_0	: 放電回路の電気抵抗		

1. ま え が き

宇宙機を取り巻く宇宙環境は過酷なものである。宇宙機表面は電子、イオン、陽子、原子状酸素や紫外線のような高エネルギーで反応性の高い粒子に曝されている。このよ

うな粒子にはプラズマ推進機から排出される粒子も含まれ、宇宙環境が宇宙機に与える影響は宇宙機の信頼性と寿命を決める上で重要な役割を果たす¹⁾。低地球軌道 (LEO: Low Earth Orbit) では原子状酸素の数密度に比べ酸素や窒素のイオン数密度は低いが、宇宙機は周辺プラズマと静電的な相互作用をすることにより帯電、放電現象を引き起こす。宇宙機周辺のイオンは太陽電池アレイの負電位によって加速され、アレイ表面に形成されたイオンシースへ流入するイオン電流はリーク電流となって発電損失につながる。さらに収集されたイオンは太陽電池アレイに衝突し、表面材料を劣化させる^{2),3)}。このような周辺宇宙環境との相互作用を通して宇宙機表面材料はその化学的構造や電気特性が変化することになる^{4),5)}。静止衛星軌道 (GEO: Geosynchronous Orbit) を飛翔する宇宙機では、その表面を覆う絶縁物の絶縁破壊により宇宙機システムの故障を招くことが知られている。プラズマコンタクトから放出されるイオンを宇宙機が収集することで宇宙機の帯電を緩和することが期待されているが、太陽電池アレイの場合と同様に表面材料の劣化を招くことが考えられる^{6),7),8)}。

将来 LEO の宇宙機は大型化、高電圧化すると考えられる。プラズマコンタクトを使用しない場合、宇宙機の導電性本体の電位は周辺プラズマから宇宙機に流出入する電流がバランスすることにより決定され、その結果大きく負に沈むことになる。そのため太陽電池が高電圧で発電を行うと、宇宙機表面において絶縁破壊によるアーク放電が発生することが予想される。また宇宙機表面材料でアーク放電が繰り返し発生することにより、材料本来の熱特性が失われるという報告もある⁹⁾。そのためアーク放電の際に宇宙機表面材料、およびアークプラズマに投入されるエネルギーと放電による絶縁性材料の劣化の程度を知ることは重要であると考えられる。

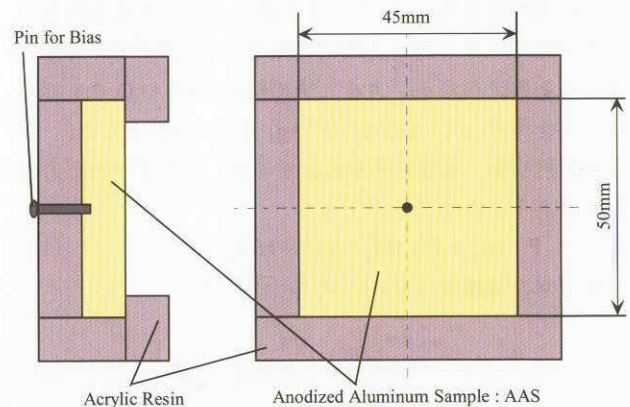
大阪大学では、これまで宇宙機表面を覆う絶縁性材料表面におけるアーク放電現象に関する地上模擬実験を行ってきた。その結果、アーク放電の際に流れる電流、電荷量はサンプルに印加された初期電圧、および周辺中性粒子密度に対して依存性があることが確認された。また放電後のサンプル表面を走査型電子顕微鏡 (SEM: Scanning Electron Microscope) を用いて観察した結果、放電痕の直径は初期印加電圧に対して依存性を示していたが、中性粒子密度に対しては依存性が確認されなかった¹⁰⁾。このような結果から、放電痕直径とアーキングによる絶縁性材料の劣化の程度は放電前にコンデンサに蓄えられていたエネルギーに依存すると推察される。しかしながら、放電前に蓄えられていたエネルギーがどの程度アークプラズマと絶縁層に供給されるかは明らかになっていない。

本研究では熱流体計算を行い、絶縁性材料表面において

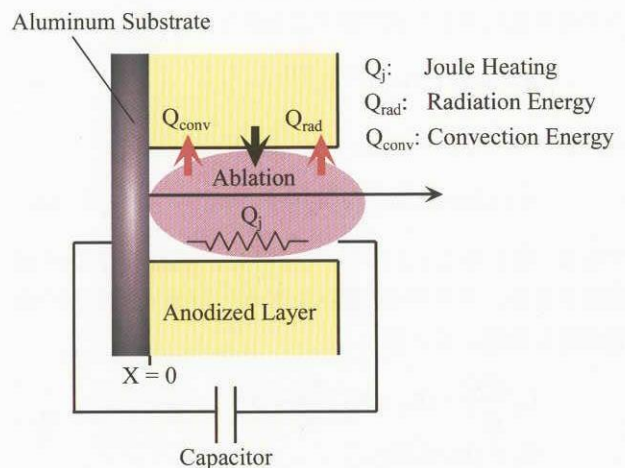
発生するアーク放電によって、どれだけのエネルギーが放電に供給され、放電痕直径がどのように拡大するかを調べた。

2. 計算モデル

本計算で対象とする宇宙機表面材料のサンプル形状と本計算における計算領域を各々第1図、第2図に示す。サンプル寸法は 50mm×50mm で、陽極酸化層の厚さは 1.3μm である。母材のアルミニウムは国際宇宙ステーション (ISS: International Space Station) の日本の実験モジュール (JEM: Japanese Experimental Module) にも使用されている A12219 であり、MIL-A-8625-TYPE I に基づいて陽極酸化処理が施されている。陽極酸化層はγ-アルミナ (Al₂O₃) であるといわれている。そのため、本計算に用いる物性値にはアルミナのものを用いる。さらにアルミナの比誘電率を 9.3 とすると¹¹⁾、サンプル自身のもつ静電容量は約 0.14μF と見積もることができる。



第1図 サンプル形状



第2図 計算領域

計算領域は一次元で母材のアルミニウムから陽極酸化層表面下流 2.0 μm までである。アーク放電経路は外部回路を含め、アルミニウム母材を陰極としてアークプラズマの抵抗を介し、アークスポット出口部（陽極酸化層表面）に仮想陽極を配置して模擬している。放電回路の静電容量には地上実験で用いた外部回路のコンデンサ、および上述したサンプル自身のもつ静電容量の値を与える。アークスポットの初期値には円筒型を仮定し、その半径を 10nm とした。これは実験において観測された値（約 10 μm ）に比べ十分に小さな値である。放電が開始されるように計算領域には初期値として $\rho=1\times 10^3 \text{ kg/m}^3$, $E=1\times 10^3 \text{ J/m}^3$ のプラズマを配置した。計算領域全体では、これらの値は各々 $4\times 10^{-18} \text{ kg}$, $3\times 10^{-12} \text{ J}$ に相当しており、アーキングの際に蒸発する陽極酸化層質量（印加電圧-200V の場合 $\sim 7\times 10^{-13} \text{ kg}$ ）、放電前に蓄えられていたエネルギー（印加電圧-200V の場合 $\sim 5\times 10^3 \text{ J}$ ）に比べ十分に小さな値であるため、これらの初期値が流れ場におよぼす影響は無視できるものとする。流れ場の流体は一流体で近似し、原子質量、電離エネルギーには平均値を用いる。アークスポット内に生成されるプラズマはアルミニウムと酸素の原子、およびイオンで構成されると考えられる。アルミナの組成比が Al:O=2:3 であることを考慮して $m_i=3.4\times 10^{-26} \text{ kg}$, $V_i=5.5 \text{ eV}$ とした。

局所熱平衡、電離平衡を仮定すると、プラズマの圧力は次式のように表すことができる。

$$P = (n_n + 2n_e)kT_e \approx \rho(\alpha + 1)kT_e / m_i \quad (1)$$

プラズマの電離度はサハの式より求める。

$$\frac{\alpha^2}{1-\alpha^2} = \frac{2T_e^{5/2}(2\pi m_e)^{3/2}}{ph^3} \exp\left(-\frac{eV_i}{kT_e}\right) \quad (2)$$

(2) 式より求めた電離度から各粒子種の数密度を計算することができ、各粒子間衝突を考慮することによりプラズマの電気抵抗率を次式で表すことができる^{12), 13)}。

$$\eta = \ln \Lambda / 1.53 \times 10^{-2} T_e^{3/2} \quad (3)$$

Λ はクーロン対数を表し、

$$\Lambda = 12\pi n_e (\epsilon_0 k T_e / e^2 n_e)^{3/2} \quad (4)$$

である。第 2 図に示されているように、放電回路には外部回路を含め、プラズマの抵抗を含めた LCR 直列回路で放電回路を模擬している。

$$L_0 \frac{d^2 Q}{dt^2} + (R_0 + R_p) \frac{dQ}{dt} + Q/C_0 = 0 \quad (5)$$

$$R_p = \int (\eta/A) dx$$

ルンゲクッタ法を用いて上式を解くことにより、放電電流値を求めた。プラズマ中を電流が流れることによりプラズマはジュール加熱される。プラズマから絶縁層への入熱は

制動放射、各粒子による対流熱伝達を考慮した。各熱量は (6) ~ (8) 式で与えられる。

$$Q_j = \eta j^2 \quad (6)$$

$$Q_{\text{rad}} = 1.57 \times 10^{-40} n_e^2 T_e^{1/2} \quad (7)$$

$$Q_{\text{conv}} = (q_e + q_i + q_n) \cdot \frac{2\pi R}{\pi R^2} \quad (8)$$

また陽極酸化層表面に形成されるシースの影響を考慮すると、シースでの電位降下、各粒子種の対流エネルギーフラックスが (9) ~ (12) 式で表される¹⁴⁾。

$$\phi = \frac{kT_e}{2e} \ln\left(\frac{T_e m_i}{T_i m_e}\right) \quad (9)$$

$$q_e = \frac{1}{4} n_e \left(\frac{8kT_e}{\pi m_i}\right)^{1/2} \cdot 2kT_e \quad (10)$$

$$q_i = \frac{1}{4} n_e \left(\frac{8kT_i}{\pi m_i}\right)^{1/2} [2k(T_i - T_w) + e\phi] \quad (11)$$

$$q_n = \frac{1}{4} n_n \left(\frac{8kT_n}{\pi m_i}\right)^{1/2} \cdot 2k(T_n - T_w) \quad (12)$$

陽極酸化層から蒸発する粒子のアブレーションフラックスはラングミュアの法則で与えられる。

$$\Gamma = \left(\frac{m_i}{2\pi k T_w}\right)^{1/2} P_{\text{vap}} \quad (13)$$

またアルミナの蒸気圧は、

$$\log(P_{\text{vap}}) = -T_c / T_w + P_c \quad (14)$$

与え、 $T_c=27320 \text{ K}$, $P_c=11.296 \text{ Torr}$ とした¹⁵⁾。求めたアブレーションフラックスから陽極酸化層の蒸発量が決まり、蒸発量に応じてアークスポット半径を更新する。陽極酸化層からプラズマ中へ溶け出した粒子は壁面温度程度のエネルギーをもっていると考えられる。そのため、アブレーション粒子からプラズマへ入射される単位体積あたりのエネルギーを次式で与える。

$$Q_{\text{ab}} = \Gamma / m_i \cdot 2kT_w \cdot \frac{2\pi R}{\pi R^2} \quad (15)$$

陽極酸化層内部の温度分布は軸方向、径方向の二次元熱伝導方程式を解くことにより決定される。さらに陽極酸化層とプラズマとの境界温度は (17) 式で与える。

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = \frac{\lambda}{\sigma C_p} \left(\frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial r^2} \right) \quad (16)$$

$$\lambda \left. \frac{\partial \Theta}{\partial r} \right|_{r=0} = (Q_{\text{rad}} + Q_{\text{conv}}) \cdot \frac{2\pi R}{\pi R^2} - \Delta H \Gamma \quad (17)$$

流れ場を支配する軸方向の質量保存, 運動量保存, エネルギー保存式は各 (18) ~ (20) 式で表される.

$$\frac{\partial(A\rho)}{\partial t} + \frac{\partial(A\rho u)}{\partial x} = 2\pi R \Gamma \quad (18)$$

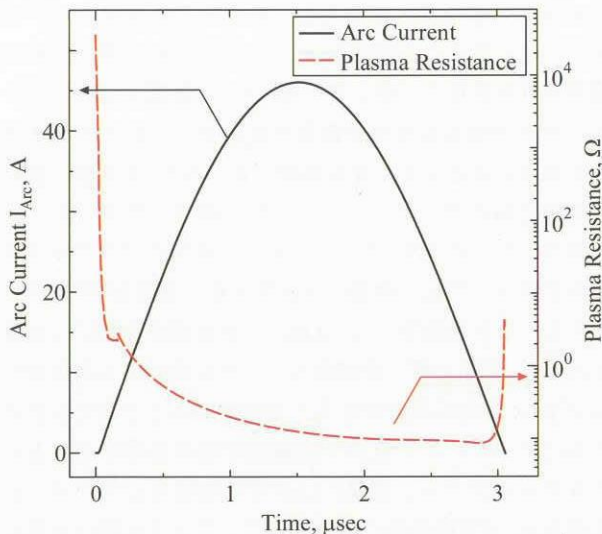
$$\frac{\partial(A\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [A(\rho u^2 + P)] = P \frac{\partial A}{\partial x} \quad (19)$$

$$\frac{\partial(AE)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [Au(E + P)] = A(Q_j - Q_{\text{rad}} - Q_{\text{conv}} + Q_{\text{ab}}) \quad (20)$$

流れ場の計算には TVD マコーマック法を用いた¹⁶⁾.

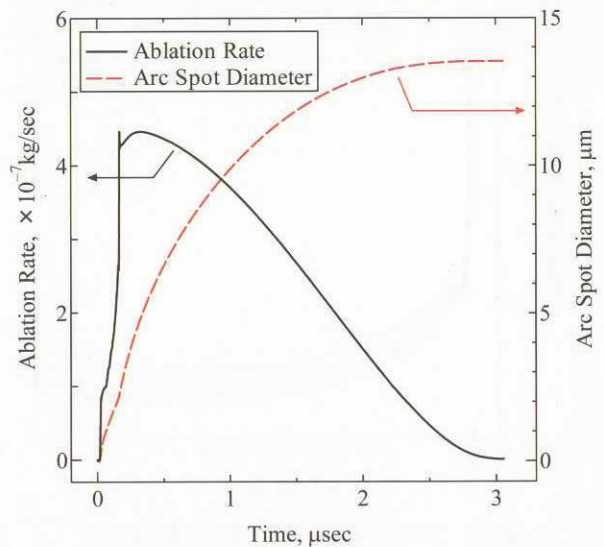
3. 計算結果

初期印加電圧を-200V とした場合の電流波形, プラズマ電気抵抗の時間変化を第3図に示す. 図に示されているようなパルス的な電流が流れた際に, プラズマ電気抵抗は急激に低下した後緩やかに減少した. これはジュール加熱により中性ガスがプラズマ化され, プラズマの電気抵抗率が低減したことに起因している. また放電の終盤にはアークスポット内の粒子密度が低くなることにより, プラズマ電気抵抗が増加している. 第4図は初期印加電圧を-200V とした場合のアブレーションレートとアークスポット直径の時間変化を示している. アブレーションレートは単位時間当たり陽極酸化層から溶け出る粒子の質量を表している. 図より陽極酸化層は放電初期において急激に溶け出し, その後放電が終了するまで徐々に溶けるものと考えられる. 第5図はアークスポット直径の時間変化を初期印加電圧を変化させて描いたものである. 図中で上方に引かれた水平な直線は, 地上実験において数回のアーキング後のサンプル表面に観察されたアークスポット直径を示してい

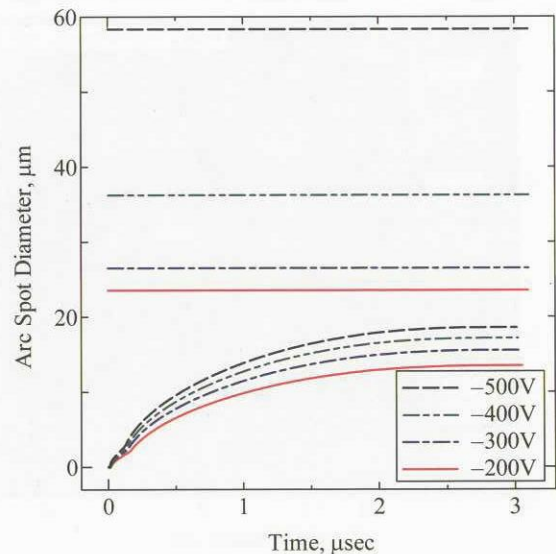


第3図 電流波形とプラズマ電気抵抗の時間変化

る. アークスポット直径は初期印加電圧の増加とともに拡大する傾向を示しており, 実験で観察されたアークスポット直径の初期印加電圧依存性と一致している. そのため放電前に蓄えられていたエネルギーが大きいほど放電の最中に陽極酸化層へ入射するエネルギーは増加し, より多くの陽極酸化層が蒸発するものと考えられる. しかしながら, これらの計算結果は実験で観察されたアークスポット直径に比べ小さい値であった. さらに計算結果におけるアークスポット直径は実験で観察されたものよりも初期印加電圧の影響が小さい. これらのことから, 放電が同一箇所で繰り返し発生することにより, アークスポットの直径が拡大される効果があるものと予想される. 第6図はプラズマ電気抵抗の時間変化を初期印加電圧を変化させて描い



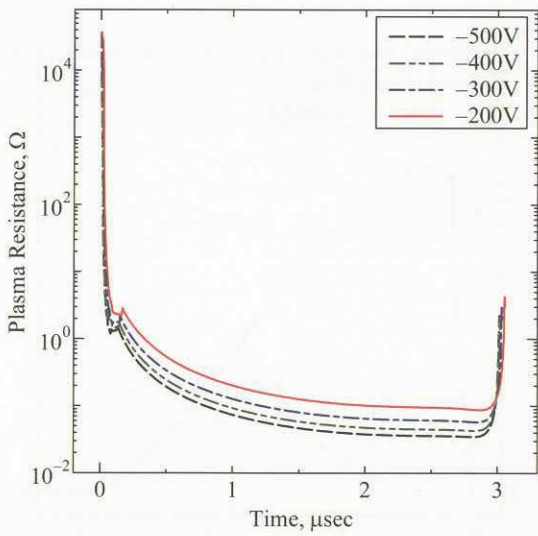
第4図 アブレーションレートとアークスポット直径の時間変化



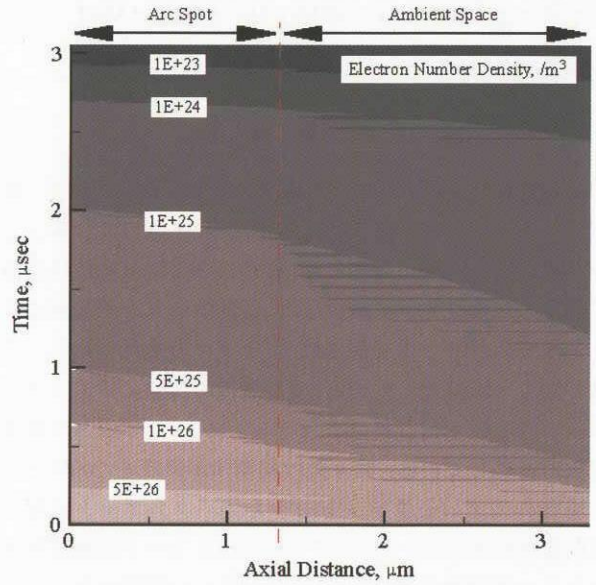
第5図 アークスポット直径の初期印加電圧依存性

たものである。第5図より初期印加電圧が高いほど多くの陽極酸化層が溶け出すため、その結果アークスポット内の中性ガス密度が増加し、プラズマ電気抵抗は大きくなる可能性がある。しかしながら初期印加電圧を高くすると放電の最中におけるプラズマ電気抵抗は小さくなる傾向が見られた。そのため放電前に蓄えられていたエネルギーが増加することにより陽極酸化層へ入射するエネルギーが増加し、同時にアークスポット内のプラズマの電離に消費されるエネルギーも増加すると考えられる。第7図、第8図に初期印加電圧が200Vの場合の軸方向中性粒子密度、電子数密度分布の時間変化を各々示す。中性粒子密度、電子数密度共に軸方向の変化量に比べ時間の変化量が支配

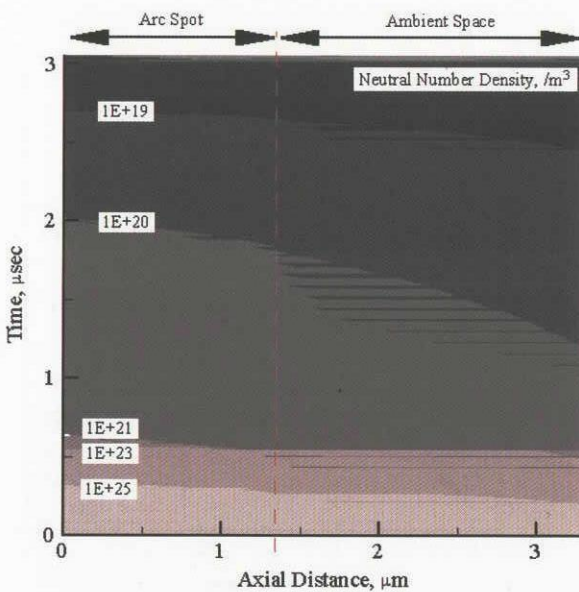
的であることがわかる。またアークスポット内部と外部における数密度の相違はほとんど確認されなかった。第7図、第8図より中性粒子密度、電子数密度のオーダーは共に周辺のプラズマ密度に比べ非常に大きくなることが予想される。そのため、このようなプラズマが光学機器等に付着することによりコンタミの原因となる可能性があると考えられる。



第6図 プラズマ電気抵抗の初期印加電圧依存性



第8図 軸方向電子数密度分布の時間変化



第7図 軸方向中性粒子密度分布の時間変化

4. ま と め

本研究では宇宙機表面の絶縁性材料で発生するアーキングによって、アークスポットがどのように拡大するかを調べるために熱流体計算を行った。計算結果から、アークスポットの直径は放電発生前に蓄えられたエネルギーが大きいほど拡大する傾向を示しており、これは地上実験で観察された結果と一致していた。さらに放電の最中におけるプラズマ電気抵抗は放電発生前に蓄えられたエネルギーが大きいほど小さくなる傾向が見られた。また溶け出した陽極酸化層がアークスポット内から周辺プラズマ中へ排出されることにより、アークスポット近傍のプラズマは周辺のプラズマに比べ非常に高密度となる結果が得られた。このような計算結果から、LEOの宇宙機が高電圧で運用されると、表面を覆う絶縁物のアーク放電による劣化進行が早まり、目的の熱特性を失う可能性があると考えられる。さらにアーキングによって陽極酸化層が溶融することによりアークスポット近傍には非常に高密度なプラズマが生成され、光学機器等に付着することによる汚染の可能性も考えられる。

参 考 文 献

- 1) NASA/SDIO Space Environmental Effects on Material Workshop, NASA CP-3035, 1989.
- 2) H. Tahara, L. Zhang, M. Hiramatu, T. Yasui, T. Yoshikawa, Y. Setuhara and S. Miyake: Exposure of Space Material Insulators to Energetic Ions, *J. Appl. Physics*, **78** (1995) , pp. 3719-3723.
- 3) L. Zhang, T. Yasui, H. Tahara and T. Yoshikawa: X-ray Photoelectron Spectroscopy Study of the Interactions of O^+ and N^+ Ions with Polyimide Films, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **36** (1997) , pp. 5268- 5274.
- 4) A. C. Trrible, R. Lukins, E. Watts, V. A. Borisov, S. A. Demidov, V. A. Denisenko, A. A. Gorodetskiy, V. K. Grishin, S. F. Nauma, V. K. Sergeev and S. P. Sokolova: United States and Russian Thermal Control Coating Results in Low Earth Orbit, *J. Spacecraft and Rockets*, **33** (1996) , pp. 160-166.
- 5) H. Tahara, K. Kawabata, L. Zhang, T. Yasui and T. Yoshikawa: Exposure of Spacecraft Polymers to Energetic Ions, Electrons and Ultraviolet Light, *Nucl. Instrum. and Methods*, **B121** (1997) , pp. 446-449.
- 6) D. Matsuyama, H. Tahara, T. Matsuda, T. Yasui and T. Yoshikawa: Ground Experiments of Interaction between Plasma Flow and Negatively Biased or Charged Materials, Proc. 26th Int. Electric Propulsion Conf., Kitakyusyu, Japan, IEPC-99-224, pp. 1314-1321, 1999.
- 7) H. Tahara, T. Yasui, D. Matsuyama and T. Yoshikawa: Laboratory Simulation of Charging Relaxation by Plasma Flow, Proc. 7th Spacecraft Charging Technology Conf., ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, ESA SP-476, 2001.
- 8) H. Tahara, D. Matsuyama, T. Yasui and T. Yoshikawa: Mitigation Process of Spacecraft Negative Charging by Plasma Flow, Proc. 27th Int. Electric Propulsion Conf., Pasadena, CA, USA, IEPC-01-258, 2001.
- 9) D. C. Ferguson and G. B. Hillard: Low Earth Orbit Spacecraft Charging Design Guidelines, NASA/TP-2003-212287, 2003.
- 10) 田原弘一, 永田政人, 増山貴久: 宇宙機表面のアーキングに関する地上実験, 日本航空宇宙学会論文集, vol. 52, No. 609, pp. 473-478, 2004.
- 11) M. R. Carruth, Jr., T. Schneider, M. McCollum, M. Finckenor, R. Suggs, D. Ferguson, I. Katz, R. Mikaterian, J. Alred and C. Pankop: ISS and Space Environment Interactions Without Operating Plasma Contactor, AIAA Paper, AIAA-2001-0401, 2001.
- 12) 関口忠, 「電気学会大学講座 プラズマ工学」, 電気学会, 1997.
- 13) T. Edamitsu, H. Tahara, T. Yoshikawa: Effects of Cavity Length and Material on Performance Characteristics of a Coaxial Pulsed Plasma Thruster, Proc. 24th Int. Symposium on Space Technology and Science, Miyazaki, Japan, ISTS 2004-b-6, 2004.
- 14) C. H. Chang and E. Pfender: Heat and Momentum Transport to Particulates Injected Into Low-Pressure (~80mbar) Nonequilibrium Plasmas, *IEEE Transactions On Plasma Science*, Vol.18, No.6, 1990.
- 15) A. Busch, G. G. Grau, W.Kast, A.Klemenc, W. Kohl, C. Kux, G. Meyerhoff, A. Neckel, E. Ruhtz, K.L. Schafer, S. Valentiner: Landort-Bornstein, Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology, 6th Ed, Vol.2.2a, 1960.
- 16) 廣瀬直喜, 池川昌弘, 登坂宣好, 久保田弘敏, 本間弘樹, 「圧縮性流体解析 数値流体力学シリーズ2」, 東京大学出版会, 1995.