

Modeling of Secondary Arc on High Voltage Solar Array in Space

Mengu Cho Member (Kyushu Institute of Technology, cho@ele.kyutech.ac.jp)

Keywords : solar cell, space, sustained arc, secondary arc, vacuum arc, genetic algorithm

1. Introduction

Since the end of 1990s, size of Geostationary Orbit (GEO) satellites has increased rapidly. As a result, power of each satellite has also increased drastically, to 10kW or higher. As the satellite power has increased, operational voltage (called bus voltage) of satellite has also increased to efficiently manage the power distribution inside a satellite. The satellite bus voltage has increased to 100V from the previous voltages of 28V or 50V.

Sallite solar array panel has solar cells laid down with minimum spacing to save the limited area as much as possible. The spacing between each solar cell is less than 1mm. There is a possibility that potential difference of 100V may appear between the narrow gap of the solar cells. As the satellite surface is charged due to sudden change of space plasma environmnet, such as so-called substorm, arcs occur on solar array.

There are three types of arc discharge on solar array. When satellite surface is charged by space plasma, primary arc (or trigger arc) occurs at triple junctions on solar array, mostly made of coverglass, solar cell electrode and plasma. The primary arc is an electrostatic discharge pulse that consumes energy stored by insulator surface on satellite, such as coverglass or thermal insulator. Although, as much as 1J energy may be cosumed by each primary arc, damage caused is not serious compared to the other two types of arc discharge. Once a primary arc occurs at a gap between two solar cells with sufficiently high voltage, the arc current may keep flowing sustained by electrical power generated by the solar array itself. This stage is of arc is called secondary arc. Secondary arc is divided into two stages. If the arc current keeps flowing until excessive heat of the arc discahrge eventually destroy insulation of solar array circuit, it is called permanent sustained arc. If the arc terminates itself before the permanent loss of insulation, it is called temporary sustained arc (or non-permanent sustained arc). Once the permanent sustained arc occurs, the satellite loses output power from the solar array circuit.

The puppose of the present paper is to carry out theoretical/numerical analysis regarding the conditions for secondary arc. These arcs have many things in common with traditional vacuum arc discharge, though the gap distance is extremely short and the current level is very low.

2. Analytical Method and Results

Analysis is made in a simplified one-dimensional geometry. The gap is divided into two regions, cathode sheath and plasma. I formulate several equations based on conservation of mass and

energy in the one-dimeinal direction including the electrode surface. We find a set of variables that satisfies the equations. We neglect temporal variations assuming that the arc is quasi-steady.

Most of the formula are taken from literature. Because the electric field at the cathode surface is not high enough to sustain the electron current, we used a field enhancement factor, β_c , assuming geometrical field enhancement at the cathod spot. We have 17 equations with 20 unknowns. To find the optimum set of variables, we use a genetic algorithm.

Figure 1 shows the simulation results and the experimental results. The gap distance was $690\mu\text{m}$. The simulation results show the same tendency as the experiment. Even for very low current of 0.3A or 0.5A, the solutions still exist, though the cathode fall voltage, V_c , and the gap voltage, V , derived by the simulations are higher than the experimental data by tens of voltage.

Further works are necessary to improve the accuracy of the analysis. Measurement of arc plasma property, such as temeperature or density, is necessary to check the solutions. Expanding to two-dimension, inclusion of plasma momentum and insulator near the electrode are also necessary.

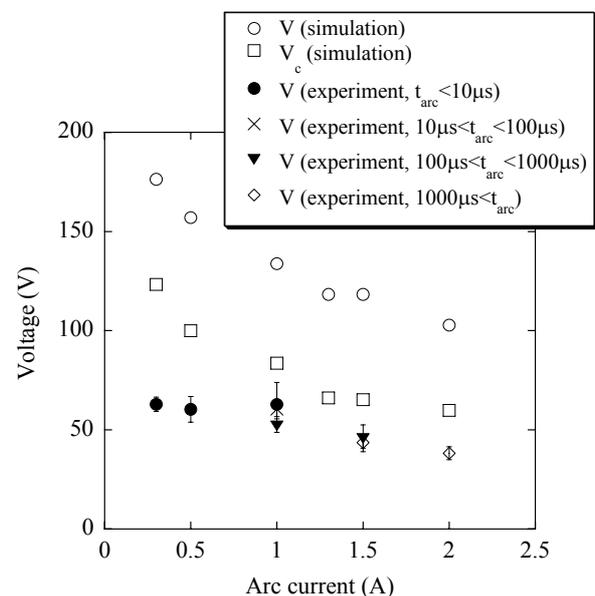


Fig. 1. Arc and sheath voltages for various arc for a gap of $690\mu\text{m}$

宇宙用太陽電池アレイ上の二次アーク放電のモデリング

正員 趙 孟佑*

Modeling of Secondary Arc on High Voltage Solar Array in Space

Mengu Cho*, Member

Secondary arc on solar array in space is defined as an arc discharge short-circuiting adjacent solar cells. As operational voltage of spacecraft increases to 100V, there is more risk of secondary arc that can destroy solar array circuit. Secondary arc is categorized as vacuum arc, although its current is very low, even less than 1A. One-dimensional modeling is carried out to derive sets of parameters that satisfy the governing equations. Genetic Algorithm is used to find the optimal set of solutions. Even at a current less than 1A, the solutions exist though the arc voltage is higher than the experimental values by several ten volts.

キーワード：太陽電池，宇宙，二次アーク，持続放電，真空アーク，遺伝的アルゴリズム

Keywords : solar cell, space, sustained arc, secondary arc, vacuum arc, genetic algorithm

1. はじめに

1990年代末以降、静止軌道通信放送衛星の大型化が急速に進行し、一個の衛星にできるだけ多くの中継器を搭載するために衛星電力が飛躍的に増大した。その結果、現在では10kWを超える衛星が主流となりつつある。衛星電力の増大に合わせて、衛星内での配電を効率よく行うために、衛星運用電圧（バス電圧）も上昇し、従来の28Vや50Vから100Vでの運用が主流となりつつある。

人工衛星の太陽電池パネルは限られた面積の上に行われるだけ多くの太陽電池を搭載するために、すき間なく太陽電池を敷き詰めており、電池と電池の間隔は1mmを下回っている。これらの電池間には最大で100Vの電位差が発生する可能性があり、静止軌道プラズマ環境の変動によって衛星表面が帯電し、放電が発生すると小さな放電が火種となって、アーク放電に移行し太陽電池回路を破壊するという事例が報告されている⁽¹⁾⁽²⁾。太陽電池パネル以外にも、電力を衛星本体にもたらずケーブル部や太陽電池パネルを駆動するロータリージョイント等で、最大100Vの電位差を有した部品が1mm程度かそれ以下の間隔で隣接することによりアーク放電発生の可能性が高まっている。2003年10月には地球観測衛星みどり2号がケーブル間のアーク放電により全機能を喪失するという事故を起している⁽³⁾。

本論文でいう太陽電池アレイ上の放電には3種類のものがある。まず、衛星表面が宇宙プラズマによって帯電する

ことによって起きる放電があり、これをトリガ放電(trigger arc)ないし一次アーク(primary arc)と呼ぶ。一次アークは、衛星と宇宙プラズマ間の静電容量や衛星表面の静電容量に蓄えられた静電エネルギーが放出されるだけのパルス状の放電であり、パルス幅は数100nsから数100μsである。一次アークは、最大1J程度のエネルギーが供給されるものの、その被害は後の二つに比べて軽微である。一次アークが、図1に示すような隣接した太陽電池回路間で起きると、電位差を有する微小ギャップ間にプラズマの種をつけるようなものであり太陽電池間を短絡することになる。一端短絡されると、太陽電池という直流電源がプラズマによって短絡されるために、太陽電池がエネルギーを供給することで

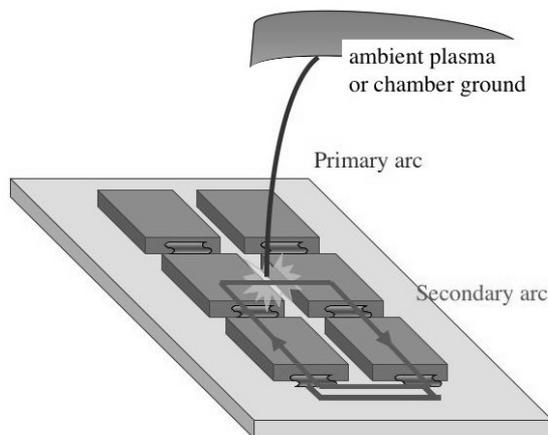


図1 一次アークと二次アークの概念図

Fig. 1. Schematic picture of primary arc and secondary arc.

* 九州工業大学

〒804-8550 北九州市戸畑区仙水 1-1

Kyushu Institute of Technology

1-1, Sensui, Tobata-ku, Kitakyusyu 804-8550

放電が持続する。この段階では放電は数 10V 程度の電圧降下で数 A の電流を流すアーク放電状態となっている。電流値は太陽電池回路の短絡電流, I_{sc} , にほぼ等しい。これらの放電は総称として二次アークと呼ばれている。アークが一端は着火するものの、自然と消滅するものを非恒久的持続放電(non-permanent sustained arc)または過渡的持続放電(Temporary sustained arc)と呼ぶ。非恒久的持続放電は数 μ s から数 100ms に亘る。これに対して自然には消滅せずに意図的に太陽電池回路を遮断するまで電流が恒久的に流れ続けるものを恒久的持続放電(permanent sustained arc) 或いは単に持続放電と呼ぶ。図 2 に本論文での各放電の定義を示す。

本論文の目的は二次アークや持続放電の存続条件についての解析を行うことにある。ここでいう二次アークや持続

放電は、いくつかの違いを除いては真空アークと同等と考えてよい。一般的な直流真空アーク放電が 10A 程度の電流で既に小電流と言われるのに対して⁽⁴⁾⁽⁵⁾, 本論文で取り扱うアーク放電の電流は数 A 程度と更に桁小さい。また、電極周辺の形状が特殊なことやギャップ長が 1mm 以下と短いことも、通常真空アークと異なる点である。アーク放電プラズマからの発光スペクトラムには金属原子からの発光が強く出ており^{(6)~(8)}, 陰極側には陰極点の存在をうかがわせるクレータが観測されている⁽⁷⁾。筆者らの実験室で行った過去の実験⁽⁹⁾で取得した電流・電圧波形の一例を図 3 に示す。この実験では 690 μ m の間隔で離された太陽電池間に最初 100V の電圧が印加されているが、アーク放電に移行してギャップ間に 1.3A の電流が流れだすと、60V 以下の電圧で放電が維持されている。図 3 に示した例は 1ms 程度の後に放電が自然と消滅しており、非恒久的持続放電である。一旦二次アークになると、太陽電池の出力電流に等しい直流電流が流れ続ける、いわゆる定電流モードになる。放電の維持時間はこの電流値が大きい程長くなる傾向にある。

太陽電池間の間隔は最短で 200 μ m, 最長で 1mm 程度である。通常の宇宙用太陽電池パネルはアルミハニカムプレートでできた構造体の上にポリイミドシートを貼り、その上に太陽電池を室温硬化シリコン接着剤で貼り付けている。図 4 に典型的な太陽電池間の構造を示す。本論文では簡単化のためにポリイミドシートやその下のアルミハニカムプレートを見捨て、電極間だけを考えた 1 次元近似を行う。本来、恒久的持続放電に移行するためにはポリイミドシートの熱劣化による導電率向上やアルミハニカムプレートへの短絡などを考慮する必要があるが、本論文ではそれら周辺の構造を見捨て、主に非恒久的持続放電の存続条件を調べることにする。

文献(10)では、ポリイミドシートやアルミハニカムの影響を調べるために、それらの下地材から電極を 50mm 浮かした模擬電極(本物の太陽電池ではない)で実験を行い、そのような場合でも二次アークを確認している。そのため下地材の存在を見捨て解析することは決定的な影響は与えない。

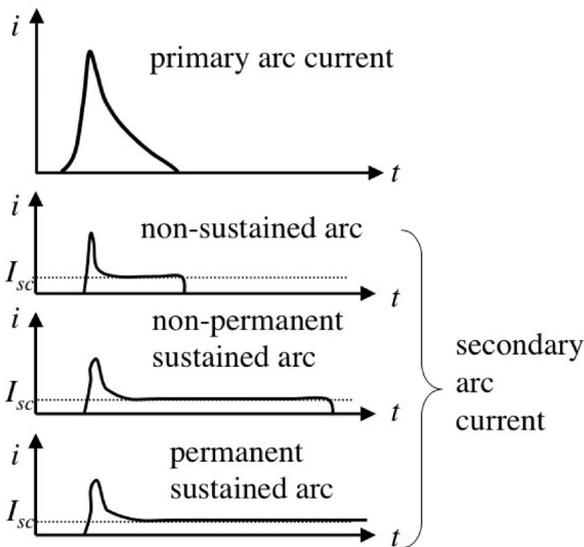


図 2 一次アーク, 二次アーク電流の各段階の定義
Fig. 2. Definition of primary arc, various stages of secondary arc current.

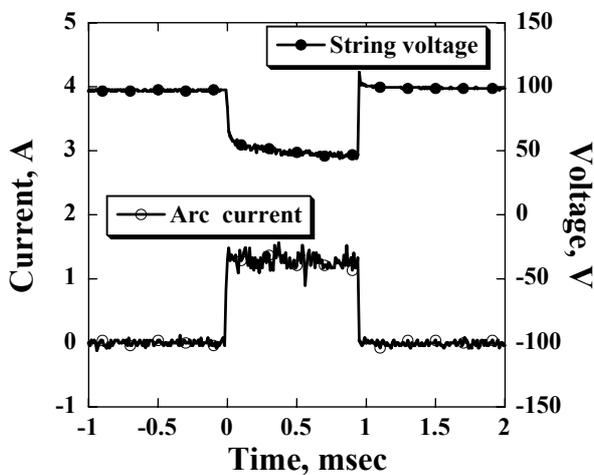


図 3 二次アーク電流・電圧波形の例
Fig. 3. Example of secondary arc waveform.

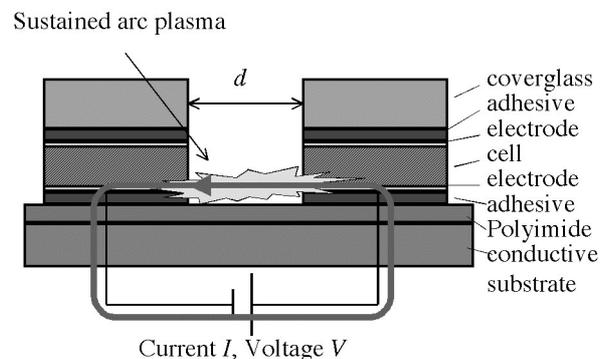


図 4 隣接する太陽電池間の構造の概念図
Fig. 4. Schematic picture of structure between adjacent solar cells.

本論文では簡単化のために解析手法としては文献(4), (5)を参考として, 電子, イオン, 中性気体の流束とエネルギーの保存式と電極表面でのエネルギーバランスを用いる。2章で解析手法について述べ, 3章で結果について報告する。4章では結果をまとめると共に将来課題について述べる。

2. 解析手法

解析は図 5 に示すような一次元的な系で行う。ギャップ間を陰極シース域とプラズマ域とに分け, 電極表面を含んだ次元方向でのエネルギーと質量の保存から 17 個の式をたて, その式を満たす変数の組み合わせを見つけることを目的としている。粒子とエネルギーの出入りは陰極と陽極の境界だけであり, 電極間の粒子の電離生成と電極からの流入で質量保存式をたてる。また, 電源からの注入エネルギーが電極への流出エネルギーと電極間での電離によるエネルギー損失に釣り合うと仮定して, エネルギー保存式をたてる。

このような解析の前提としてアーク放電が準定常になっていることを仮定している。図 3 の例に示すように, 放電電圧はアーク放電発生直後には印加電圧から大きく低下するが, その後はゆっくりと低下していき, ミリ秒より短い時間スケールで見ると準定常であるといえる。境界条件としては, 陰極は無限の厚みをもった銀であり無限遠方の温度は 300K であると仮定した。銀を仮定したのは文献 7 や 8 で太陽電池の電極材の主成分である銀原子の線スペクトルが観測されていることに拠る。

アーク柱の幅はギャップ長さよりも遥かに細いと考えられるので, 本来は図 5 のモデルで径方向の非一様性を考慮すべきである。今回は, 二次アークについての解析の最初なので, とりあえずは 1 次元近似で式の数を絞ることとした。1 次元近似の妥当性については考察で述べる。

陰極では電流密度 J が存在するとし, 陰極表面ではそのうちの S で表される割合が電子によって運ばれると仮定する。陰極点の半径を a として, 電流 I を

$$I = \pi a^2 J \dots\dots\dots (1)$$

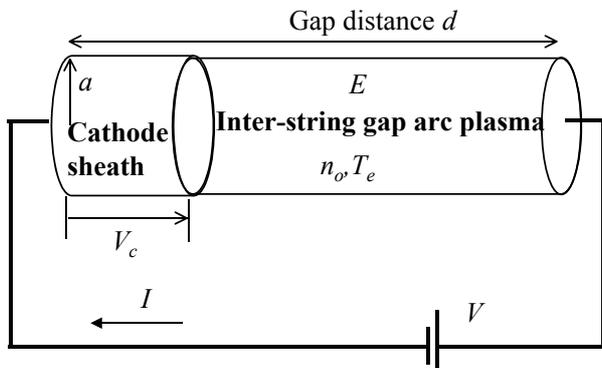


図 5 解析に用いる一次元系

Fig. 5. One-dimensional system used for analysis.

で表す。陽極には電子だけでなく, プラズマ域から逆流するイオンも存在するとする。逆流するイオン電流密度の大きさを δJ で表すと, プラズマ中を陽極に向かって進む電子電流はイオンの逆流分も考慮して $(1+\delta)J$ となる。プラズマ域中の電場を E とすると, 以下の式が成り立つ。

$$\sigma_e E = (1+\delta)J \dots\dots\dots (2)$$

ここで σ_e はプラズマの導電率であり, 電子温度 T_e に依存して以下の式で表す。

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{m_e}} \frac{(4\pi\epsilon_0)^2}{\pi e^2} (kT_e)^{3/2} \frac{1}{\ln \Lambda} \dots\dots\dots (3)$$

ここで $\ln \Lambda$ は, 本来は電子密度と電子温度の関数であるが, プラズマパラメータ $\Lambda = 12\pi n_0 \lambda_d^3$ (ここで λ_d はデバイ長) の自然対数をとっているため広範囲に亘って 5 から 15 程度であり⁽¹¹⁾, 簡単化のために 10 とおいた。プラズマ密度が 10^{20}m^{-3} を上回り電子温度が数 eV であると予想されるが, その場合デバイ長さは μm を下回るため, 陰極シースの厚さは電極間ギャップに比べて十分薄いと仮定できる。その時, 電極間電圧 V は以下の式で書ける。

$$V = Ed + V_c \dots\dots\dots (4)$$

ここで, V_c は陰極シースの電圧降下である。シース域内の平均的な電界は, 一様プラズマ中の電界 E に比べて遥かに大きいことが予想される。

陰極表面からの電子放射が熱電子放射と電界放射の重ね合わせで放射されると仮定して, 放射電子の電流密度を以下の式で表す。

$$SJ = (A_T T_c^2 + A_F F_c^3) \exp \left[- \left(\frac{T_c^2}{B_T} + \frac{F_c^2}{B_F} \right)^{-1/2} \right] \dots\dots\dots (5)$$

ここで, T_c, F_c はそれぞれ陰極表面温度と陰極点電界である。係数 A_T, A_F, B_T, B_F, x はそれぞれ文献(4)の p.165 より銀の仕事関数 $\Phi_0 = 4.26 \text{eV}$ を仮定して導出し

$$A_T = 1.73 \times 10^6, A_F = 3.99 \times 10^4, x = 1.097, \\ B_T = 2.19 \times 10^9, B_F = 3.30 \times 10^{21}$$

を仮定した。ここで単位は全て MKSA 単位である。陰極点電界は, シース中のポアソン方程式を積分して得られるマクロな電界 E_c よりも, 陰極点表面の幾何学的形状により β_c 倍だけ高まっているとした。よって

$$F_c = \beta_c E_c \dots\dots\dots (6)$$

である。過去の同種の真空アークのモデリング⁽⁴⁾⁽⁵⁾においてはこのような電界増倍係数 β_c は導入されておらず, E_c を使って電子放射電流を計算している。陰極表面の状態を完全に平坦であるとして, 局所的な電界がマクロな値 E_c と等しいとおくよりは, ある程度の凹凸を仮定した方が現実的である。また後述するように, マクロな電界を数倍しないと, まともな解が存在しないという理由もある。

陰極表面でのイオン電流密度は $(1-S)J$ で与えられる。陰極シースに流入したイオンが陰極に到達すると仮定して、Bohm速度を使うことで以下の式でイオン電流密度を与える。

$$(1-S)J = qn_o \sqrt{\frac{\kappa T_c}{M_i}} \dots\dots\dots (7)$$

イオンは全て一価電離と仮定し、質量を M_i 、電極間プラズマの密度を n_o 、電子温度を T_e で表す。図5に示すように一様プラズマ中に電界 E が存在しているのを仮定しているが、シース域内の電界が空間電荷によって支配され且つ電界 E よりも遥かに大きければ、イオンがシース境界をBohm速度程度で超えてやってくると仮定するのは妥当である。

陰極表面が温度 T_c まで上昇することにより、陰極から金属蒸気が Γ_{ev} の流束で電極間に流入すると仮定する。流束 Γ_{ev} を以下の式であたえる。

$$\Gamma_{ev} = \frac{p_v}{\kappa T_c} \sqrt{\frac{\kappa T_c}{2\pi M}} \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 M は銀原子の質量(原子量108)、 p_v は銀の蒸気圧であり、以下の式で与える。(文献(4)のp.167)

$$p_v = \alpha T_c^\beta \exp\left(-\frac{\gamma}{T_c}\right) \dots\dots\dots (9)$$

ここで定数 α, β, γ は $\alpha = 747.66, \beta = 1.9443, \gamma = 26170$ である。これらの値は文献(12)の銀のデータを(9)式で近似して求めた。

また、陰極表面から流失した金属蒸気流が全て電離されイオン化すると仮定する。電離されるのが一部であるとおいてもよいが、その場合は放電電圧 V が上がるだけであり、簡単化のため全て電離されるとした。陰極側へのイオン流束が J/q 、陽極側へのイオン流束が $\delta J/q$ で与えられるので、連続の式より以下の式がなりたつ。

$$\Gamma_{ev} = \frac{(1+\delta-S)J}{q} \dots\dots\dots (10)$$

アークが維持されるためには、陰極にアークプラズマからエネルギーが注入され陰極表面が高温に維持されないといけない。陰極表面への流入エネルギー束 S_i はイオンが運び込むエネルギー、放出される電子が持ち出すエネルギー、蒸発する金属原子が持ち出すエネルギーの差で表され、以下のように書ける。

$$S_i = \frac{(1-S)J}{q} [qV_c + q(E_i - \Phi_o) + H_o] - \frac{SJ}{q} [q\Phi] - \Gamma_{ev} \left[H_o + \frac{5}{2} \kappa T_c \right] \dots\dots\dots (11)$$

ここで右辺第一項がイオンの運び込むエネルギーで E_i が電離エネルギー、 H_o が金属原子一個あたりの蒸発潜熱である。つまりイオンは表面に到達すると中和・冷却されて表面に

凝固すると仮定している。第二項が電子の持ち出すエネルギーであり、エネルギー Φ は仕事関数 Φ_o が高温と電界のために少し変形するので

$$\Phi = \Phi_o - \sqrt{\frac{qE_c}{4\pi\epsilon_o} + \frac{2\kappa T_c}{q}} \dots\dots\dots (12)$$

と与えられる。(11)式の第3項は金属原子が持ち出すエネルギーである。陰極へのエネルギー流入束が与えられると、陰極表面の温度 T_c が以下の式で与えられる(導出の詳細は文献(4)のp.177)。

$$T_c = T_\infty + \frac{8aS_i}{3\pi k} \dots\dots\dots (13)$$

ここで、 T_∞ は電極のバルクの温度で300Kとおいた。また k は熱伝導率であり $k = 429 (W/m/K)$ とおいた。この式は無限遠の温度を T_∞ とおいて、境界で半径 a の円に S_i という熱流束があると仮定して、2次元の熱伝導方程式を解けば求められる。

陰極表面の電界はPoissonの式を陰極表面からシース境界まで積分して以下の式で得られる。

$$E_c^2 = \frac{4}{\epsilon_o} J \sqrt{\frac{1}{2q}} [(1-S)\sqrt{M_i} - S\sqrt{m_e}] \sqrt{V_c} - \frac{2n_o \kappa T_e}{\epsilon_o} \left[1 - \exp\left(-\frac{qV_c}{\kappa T_e}\right) \right] \dots\dots\dots (14)$$

ここで右辺の第一項がシース外から来るイオンと陰極から放射された電子の空間電荷による項、第二項がシース外からの電子の逆拡散項である。

電極間に単位断面あたり注入されるエネルギーは JV である。このエネルギーが陰極表面と陽極表面にプラズマからもたらされるエンタルピーと電離に使われるエネルギーに等しく、以下のようにかける。

$$JV = \frac{\delta J}{q} \left(\frac{1}{2} M_i v_i^2 + \frac{5}{2} \kappa T_e \right) + \frac{(1+\delta)J}{q} \left(\frac{1}{2} m_e v_e^2 + \frac{5}{2} \kappa T_e \right) + \frac{(1-S)J}{q} qV_c - \Gamma_{ev} \frac{5}{2} \kappa T_c + \frac{(1+\delta-S)J}{q} qE_i \dots\dots\dots (15)$$

ここで、右辺第一項と第二項がそれぞれイオンと電子が陽極にもたらすエンタルピーである。簡単化のためイオン温度は電子温度と同じと仮定している。電極間を電子が走行する間の衝突回数は数万回から数10万回と見積もられ、電子と銀イオンの質量比(約 2×10^5)を考えると、完全に局所熱平衡を達成するには若干衝突回数が必要だが、未知数の数を減らすためにここではイオン温度と電子温度が等しいと仮定している。右辺第三項と第四項が陰極への損失である。金属蒸気が陰極から奪うエネルギー分だけ陰極への損失が少なくなっている。第五項がプラズマ中で電離に費やされるエネルギーである。簡単のため輻射によるエネルギー

一損失等を無視している。(15)式中の陽極へのイオン，電子の速度 v_i ， v_e は以下の式で与える。

$$v_i = \frac{(1+\delta)J}{qn_o} \dots\dots\dots(16)$$

$$v_e = \frac{\delta J}{qn_o} \dots\dots\dots(17)$$

これまでの式をまとめると，17 個の式に対して未知数は $a, J, \sigma_e, \delta, E, T_e, V_c, V, S, F_c, T_c, \beta_c, E_c, n_o, \Gamma_e, p_v, S_s, \Phi, v_e, v_i$ の 20 個ある。そこで，まず与えられた電流 I とギャップ間隔 d に対して $\delta, V_c, V, S, T_c, \beta_c$ の組み合わせを仮定し，その組み合わせに対して(5)，(13)，(15)式以外の 14 個の式から残りの 14 個の未知数を計算する。そして(5)，(13)，(15)式を満たす $\delta, V_c, V, S, T_c, \beta_c$ の組み合わせを探すこととした。6 個の未知数の最適組み合わせの探索には遺伝的アルゴリズムを用いた。

遺伝的アルゴリズムにおいては，先ず，6 個の未知数の最大値と最小値を決めて，その間を 256 等分して各値を 8 ビットの 2 進数に変換した。現実的な値から，電極間電圧 V は 10(V)から 1000(V)の間，陰極温度 T_e は 2000(K)から 5000(K)の間，電界増倍係数 β_c は 1 から 10 の間をとると仮定した。これらの値は更に広範囲で仮定してもよいが，収束に時間がかかるだけである。逆流イオンの割合 δ と陰極電子電流の割合 S は共に 0 から 1 の間の値をとる。陰極シース降下電圧 V_c の最大値は電極間電圧 V で最小値は 0 である。未知数一個あたり 8 ビットなので，48 ビットの 2 進数の数列一個が個体一つを表すとし，1 万個体の集団を作った。初期世代については，各ビットを乱数で決めた。各世代において，(5)，(13)，(15)式の誤差の総和が小さいものから各個体に順番をつけ，成績の上位 30%の中から次世代の親を選んだ。親の 48 ビットのどこかを乱数で選んで，その前後で数列を入れ替える単純交叉によって，親の 2 個体から子の 2 個体を作った。このような選択と淘汰を 50 世代に亘って繰り返して最適解の探索を行った。尚，局所解に陥るのを防止するために，0.1%の確率で突然変異を起こさせ，次世代へ移行するときに，ビットを反転させた。

文献(4)や(5)では予め V_c や δ 等の値を実験値から類推して a priori に固定した値を与えて残りの未知数の数と式の数を一致させて解いている。本論文ではそのような a priori な仮定はせず，外部条件である I と d に対して成立するパラメータの組み合わせを探すこととする。勿論未知数の数が方程式の数を上回る為に，解が複数存在する可能性は否めないが，アークプラズマの特性についての実験データがない初期段階においては，このような組み合わせ最適解法としてのアプローチの方がプラズマ状態を知る上で適していると考えられる。

3. 計算結果と考察

表 1 に電流 1.3A の時にギャップ間を 200 μ m から 10mm まで変化させて計算した結果を示す。1.3A とは現在の標準的な大きさ(70mm \times 35mm)のシリコン太陽電池の出力電流に相当する。表 1 の結果は各ケースにおいて 10 回ずつ最適解の探索を行った結果の誤差最小のものである。図 3 に示された例ではギャップ長 690 μ m の電極間で電流 1.3A の二次アークが発生した時に電圧が 60 から 45V であるが，計算結果が $V=118$ (V)， $V_c=71$ (V)であるので，多くの近似と仮定を含んだ 1 次元解析による計算であるにしてはそれなりに近い値を導出しているといえる。電圧 V と V_c はギャップ間隔が大きくなるにつれて概ね大きくなっているが，300 μ m から 800 μ m は上下しており，未だ最適なパラメータの組み合わせがある可能性を示している。陰極点半径は 15 から 33 μ m であり，通常謂われている値と大差ない。陰極点温度 T_e ，電子温度 T_e もそれほど桁外れの値は示していない。但し， d が長いケースでは一価電離の仮定が若干怪しくなる電子温度となっている。特に目を引くのがシース降下電圧であり，それらは 60V から 100V 程度と，一般に言われているシース電圧(10V 程度)よりはるかに大きい。

電流値を変化させた時のギャップ間電圧とシース降下電圧を図 6 に示す。電流を増やすと共に V ， V_c 共に減少し，通常言われているようなアーク放電の領域に近づいているのがわかる。図 6 には同じく 690 μ m のギャップにて取得した実験データも示す。実験データは最低でも 4 個以上のアーク波形のデータからなっており，エラーバーは標準偏

表 1 アーク電流が 1.3A の時の数値計算結果

Table 1. Numerical Results for the case of an arc current of 1.3A.

d (mm)	S	δ	V (V)	T_c (K)	V_c (V)	β_c	a (μ m)	T_e (10^4 K)	E_c (10^9 V/m)	n_o (10^{24} m $^{-3}$)
0.2	0.219	0.79	91.2	2150	58.4	2.4	20	5.83	1.12	2.5
0.3	0.312	0.96	111	2180	76.4	2.8	23	6.55	1.00	1.5
0.4	0.070	0.99	114	2040	75.1	2.7	33	4.48	0.85	1.2
0.5	0.113	0.82	107	2090	62.5	2.6	25	6.47	0.95	1.6
0.69	0.282	0.84	118	2140	66.1	2.8	20	9.48	0.99	1.7
0.8	0.086	0.86	118	2050	70.7	2.8	30	6.68	0.84	1.2
1.0	0.434	0.99	149	2160	81.0	3.0	19	11.9	1.00	1.4
2.0	0.559	0.93	196	2210	89.4	3.1	15	18.2	1.01	1.3
10	0.672	0.92	319	2130	142	4.0	19	28.3	0.79	0.50

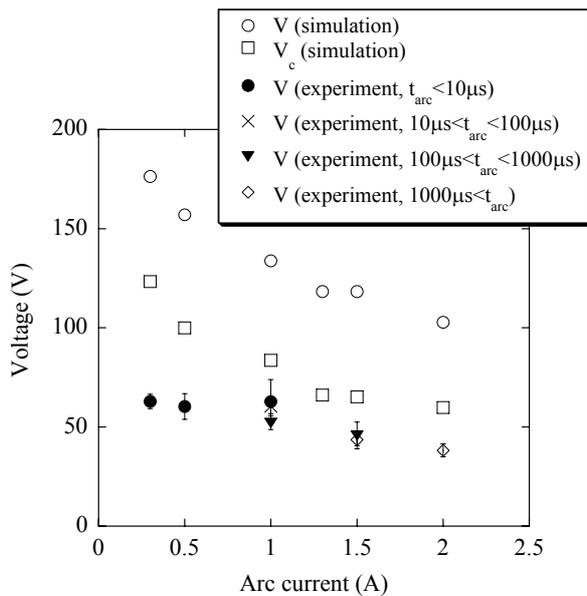


図6 ギャップ長 $690\mu\text{m}$ における各電流値に対応するギャップ間電圧とシース降下電圧

Fig. 6. Arc and sheath voltages for various arc currents in a gap of $690\mu\text{m}$.

差を表す。実験ではアークの継続時間毎に分類しているが、実験データにおける電圧はアークが切れる直前のもっとも電圧が下がった状態であり、アークの初期ではこれよりも $10\sim 20\text{V}$ は高く、継続時間の長いものほどアークの初期電圧との差は大きい。このようなことを考慮したとしても、計算結果は実験データとは傾向は一致しているものの、未だ数 10V から 100V 近い差がある。

計算結果がこのように高い放電電圧を必要とするのは、電流が小さいためにプラズマを維持するに足る電流密度を維持するのに陰極点近傍で高い電界を必要とするからである。陰極点半径 a が小さすぎると(13)式より陰極温度が上昇しなくなって、十分な金属蒸気密度が維持できない。そこで電流が低くとも高い電流密度を維持するには、(5)式中での電界 F_c に頼ることになる。それでもポアソン方程式から導かれる表面電界 E_c では不十分であり、陰極点近傍で局所的に $\beta_c = 2.5\sim 4$ 程度の電界増倍係数が必要となっている。

太陽電池アレイの二次アーク現象を決定する設計パラメータは、太陽電池間の距離、電圧、電流、電極材料であるが、その中で最も設計自由度のあるパラメータは電圧である。隣接する太陽電池回路間の電圧は、太陽電池パネル上にどのように太陽電池回路を配置するかによって決定される。制約条件としては、パネルの大きさと直流電流による発生磁場を抑える事があるが、それを除けば設計の自由度は高い。太陽電池間の距離は広げれば広げるだけ二次アークは発生しにくくなるが、その分余計なパドル面積が必要となって重量増加につながる。電極材料は通常銀が使われており、銅等に変更すれば放電はおきにくくなるが、太陽電池単体の製造プロセスに立ち入る必要がある。ギャップ間を流れる電流は太陽電池の種類と一個あたりの面積によ

り決定され、単結晶シリコン太陽電池で 1.3A 、化合物系太陽電池で 0.5A である。以前は太陽電池回路をいくつも並列化していたので、電流値は非常に大きなものだったが、1997年の Tempo-2 衛星の事故⁽¹⁾以来最小単位に回路を分離しようという対策が普及し、現在では回路 1 列分の電流が基本である。但し、集光型の太陽電池を使ったり大面積の薄膜アレイを使ったりすれば、これらの電流値は増加する。

そこで、太陽電池パネルを設計する際には、与えられた電流、ギャップ長、材質において放電維持電圧がいくらかを知り、その電圧以下に隣接電池間の電圧を抑えるような回路配置を行えばよい。今回のモデリングで得られた放電電圧は、過去の実験データと比較して数 10V 程度高めであり、パラメータ間の相互関係を知るには良いが、 100V 以下の電圧を扱う太陽電池パネルの設計に反映するには定量的誤差が大きすぎる。

誤差の原因として考えられるのが、電極材の高温での物性値や、電極近傍にあるポリイミドシートなどの影響を無視したことなどである。本論文では電離の元になるガスを金属蒸気だけと仮定したが、下地材からの脱ガスや、二次アーク発生前の一次アークによって放出されたガス等を考慮すれば維持電圧 V は下がる可能性がある。その他の誤差の原因としては横方向への質量やエネルギーの拡散があるが、それらを考慮することは維持電圧 V をさらに増加させることにつながる。また運動量についても一切考慮していないが、これらは(15)~(17)式での陽極近傍の電子、イオン速度や温度に影響を及ぼすと思われる。しかし、それが維持電圧 V を増加させるか減少させるかは今のところ不明である。

4. 結論

宇宙用太陽電池アレイ上での二次アークの存続条件についてのモデリングを行った。 1A 程度という非常に低い電流でありながら数 $10\mu\text{s}$ 以上に亘って準定常的に維持されるアーク放電について、電極間の一次元方向へのエネルギーと質量の保存を満たすパラメータの組み合わせを遺伝的アルゴリズムにより探索した。 0.5A という非常に低い電流値であっても解は存在することが示されたが、実験値よりも放電電圧が数 10V 高く、更に陰極点近傍での 2 から 4 の局所的電界増倍係数を必要とした。

本解析手法はパラメータ間の相互関係を知るには使えるが、太陽電池パネルの設計に適用するには、いまだ定量的誤差が大きい。今後は、プラズマ温度などのギャップ間プラズマの物性値も測定して、未知数の数を減らすと共に解析結果の検証を行う必要がある。さらにプラズマの運動量、電界と垂直方向への拡散や電極近傍の絶縁体などの影響も考慮した多次元解析も必要である。

謝辞

本論文中に使用した実験データの取得に尽力した九州工業大学宇宙環境技術研究センターの学生及びスタッフに感謝する。また、本論文の内容の原型は著者が 2003 年に

ONERA(フランス国立航空宇宙研究所)に滞在中に実施したものである。ONERA のホスピタリティに感謝する。
(平成 17 年 9 月 20 日受付, 平成 18 年 1 月 23 日再受付)

文 献

- (1) I. Katz, V. A. Davis, and D. B. Snyder : "Mechanism for Spacecraft Charging Initiated Destruction of Solar Arrays in GEO", AIAA paper 98-1002, 37th Aerospace Science Meeting, Reno (1998-1)
- (2) M. Cho and H. Fujii : "Review on Charging and Discharging Phenomena in Space Environment: Arcing on High Voltage Solar Array and Future Issues", *Aeronautical & Space Sci. Jpn.*, Vol.51, pp.140-145 (2003-5) (in Japanese)
趙 孟佑・藤井治久 : 「宇宙環境での帯電放電現象についての研究動向と将来課題 : 高電圧太陽電池アレイの放電現象と将来課題」, 航空宇宙学誌, **51**, pp.140-145 (2003-5)
- (3) S. Kawakita, H. Kusawake, M. Takahashi, H. Maejima, J. Kim, S. Hosoda, M. Cho, K. Toyoda, and Y. Nozaki : "Sustained Arc between Primary Power Cables of a Satellite", AIAA paper 2004-5658, 2nd International Energy Conversion Engineering Conference, Providence, USA (2004-8)
- (4) R. L. Boxman, P. J. Martin, and D. M. Sanders, Ed. : Handbook of Vacuum Arc Science and Technology, Noyes Publication, Park Ridge (1995)
- (5) O. Morimiya, S. Suzuki, and K. Watanabe : "An Analysis of the Instability Phenomena of a Low Current Vacuum Arc", *T.IEE Japan*, Vol.119, No.2, pp.190-196 (1999-2) (in Japanese)
森宮 脩・鈴木節雄・渡辺憲治 : 「小電流真空アークの不安定現象の解析」, 電学論 A, **119**, 2, pp.190-196 (1999-2)
- (6) M. Cho and T. Goka : "Issues Concerning the International Standard of ESD Ground Test for GEO Solar Array", 8th Spacecraft Charging Tech. Conf., Huntsville, USA (2003-10)

- (7) E. Amorim, L. Levy, and S. Vacquie : "Electrostatic discharges on solar arrays: common characteristics with vacuum arcs", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol.35, pp.L21-23 (2002)
- (8) B. L. Upschulte, W. J. Marinelli, G. M. Wyle, E. Aifer, and D. E. Hastings : "Arcing of Negatively Biased Solar Cells in a Plasma Environments", *J. Spacecraft & Rockets*, Vol.31, pp.493-501 (1994)
- (9) S. Aso, T. Kitamura, J. Kim, S. Hosoda, M. Cho, and H. Kagawa : "Threshold for Secondary Arc Formation on Solar Array in Low Earth Orbit Plasma Environment", *Trans. J. Jpn Soc. Aero. Space Sci.*, Vol.53, pp.516-523 (2005)
麻生誠司・北村倫基・金正浩・細田聡史・趙 孟佑・香河英史 : 「低地球軌道プラズマ環境下での二次アーク発生条件」, 航空宇宙学論誌, **53**, pp.516-523 (2005)
- (10) T. A. Schneider, I. G. Milelides, G. A. Jongeward, T. Perterson, T. W. Kerslake, D. Snyder, and D. Ferguson : "Solar Array for Direct-Drive Electric Propulsion: Arcing at High Voltages", *J. Spacecraft & Rockets*, Vol.42, pp.543-549 (2005)
- (11) F. F. Chen : Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion: Plasma Physics, 2nd Ed., Plenum Pub Corp., New York (1984)
- (12) D. R. Lide and H. P. R. Frederiske : CRC Handbook of Chemistry and Physics, Chemical Rubber, Boca Raton (1997)

趙 孟 佑



(正員) 1962 年 12 月生まれ。1991 年 12 月マサチューセッツ工科大学大学院博士課程修了。1992 年神戸大学大学院自然科学研究科助手。1995 年 7 月国際宇宙大学(フランス)助手を経て、1996 年 8 月九州工業大学工学部講師, 1997 年 10 月同助教授を経て, 2004 年 12 月より同教授, 宇宙環境技術研究センター長併任, 現在に至る。高電圧宇宙システムに関する研究, レーザ生成プラズマの工学的応用に関する研究に従事。Ph.D. 日本航空宇宙学会, アメリカ航空宇宙学会会員。