

# ソーラーセイル膜面の構造におよぼす宇宙機帯電による 静電力の影響評価

○村中崇信（中京大），篠原育，高木亮治，森治，白澤洋次（JAXA），船瀬龍，大野剛（東大院）

## Evaluation of Influence of Electrostatic Force Generated by Spacecraft Charging on Membrane Structure of Solar Sail

Takanobu Muranaka (Chukyo University), Iku Shinohara, Ryoji Takaki, Osamu Mori,  
Yoji Shirasawa (JAXA), Ryu Funase, Go Ono (University of Tokyo)

Key Words: Solar Sail, Solar Wind, Spacecraft Charging, Electrostatic Force, Membrane Structure

### Abstract

Solar sail is a next-generation spacecraft that has a large-scale membrane to utilize the solar radiation pressure as its thrust. Hence, stable deployment of the membrane during a space flight is a critical issue to maintain the thrust performance of the spacecraft. In this paper, we have numerically estimated the electrostatic force on the membrane due to spacecraft charging as one of the possible factor to cause the deformation of the deployed membrane. We obtained spatial distribution of the electrostatic force and the maximum magnitude of the force on the membrane in solar wind plasma at 1.0 AU. We also made structural analysis for the deployed membrane with the electrostatic force. As a result, we can hardly recognize the deformation of the membrane due to the electrostatic force in this case.

### 1. はじめに

ソーラーセイルは太陽光圧を利用して推力を得る宇宙機であり， $10^{-6}$  Pa 程度の微小な太陽光圧を機体の推力に変換するために，大面積薄膜を有することが大きな特徴である．この推力発生機構は，宇宙飛行に必要な推進材を低減させるため，ソーラーセイルは惑星間航行等の長時間の飛行ミッションに有望な次世代宇宙機のひとつとして考えられている．JAXA では 2010 年 5 月に世界に先駆けて，ソーラーセイル実証機 IKAROS を打ち上げ，軌道上で太陽光圧を利用した推力発生の原理実証を達成した<sup>1)</sup>．図 1 に IKAROS の外観図を示す．また，膜面の展開と，展開後の形状維持は，IKAROS が軌道上で推力を維持するための重要事項であるため，打ち上げ前の数値シミュレーションや IKAROS 実機による取得データ等により，詳細に解析されている<sup>2,3)</sup>．

当研究グループでは，これまでに太陽風プラズマ環境中でのソーラーセイル周辺の電位構造解析を数値シミュレーションによって実施した<sup>4)</sup>．これらの解析は，次期大型ソーラー電力セイルによる将来ミッション<sup>1)</sup>に向け，膜面上への電子デバイスの配置等，機体設計に貢献するものと考えられる<sup>4)</sup>．得られた知

見のひとつとして，宇宙機帯電に起因する電場が，ソーラーセイル膜面上に非一様に分布することが分かっている<sup>4)</sup>．本研究では，この電場によってソーラーセイル膜面に発生する静電力に着目し，これを定量的に評価するとともに，膜面の構造におよぼす影響を検証することを試みた．本稿では，太陽風プラズマ環境での IKAROS 周辺の静電解析および膜面上に作用する静電力解析について述べた後，得られた静電力を考慮した膜面の構造解析について述べる．

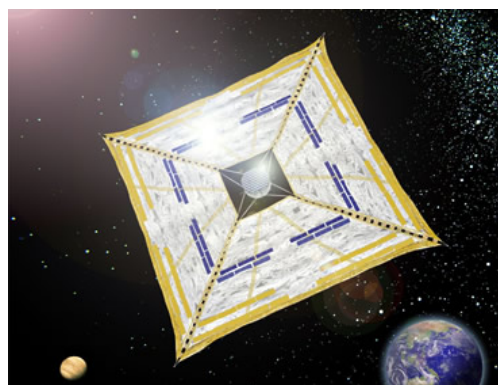


図 1 IKAROS の外観図(JAXA 提供)

## 2. 太陽風プラズマ環境中でのソーラーセイルの帯電

太陽風は主として水素イオンと電子から成る希薄なプラズマであり、高速のドリフト速度で太陽から宇宙空間に放出されている。磁気圏外の惑星間航行においては、ソーラーセイルは太陽風プラズマと静電的相互作用するが、その概要は、次の様に考えることが出来る<sup>5)</sup>。宇宙機機体への正味流入電流は、背景プラズマ電流、光電子電流の総和で求められるが、後者が支配的となるため、宇宙機電位は+数 V となることが予想される。また、ソーラーセイルは軌道上で、膜面を太陽方向に向けて飛行するが、太陽風プラズマのドリフト速度がイオンの熱速度より非常に大きく、電子のそれと同程度であるため、膜面の下流側でイオン密度が極めて希薄な領域が存在すると考えられる。また、ソーラーセイルの機体周辺には、日照面から放出された光電子が存在している。

これまでの研究で、ソーラーセイル IKAROS に対する機体周辺の荷電粒子分布は、完全粒子静電コードによる数値シミュレーションで予測されている<sup>4)</sup>。ここでは、IKAROS は一辺 14 m の正方形導体板モデルとした。但し、計算格子定義上の制約から、導体板の厚さは 0.5 m とした。表 1 に、この解析で用いた太陽風プラズマパラメータを示す。太陽風プラズマは、水素イオンと電子で同一のドリフト Maxwell 分布を仮定した。図 2 に、数値シミュレーションで得られた、荷電粒子の空間分布と電位分布を示す。荷電粒子の空間分布では、宇宙機周辺の電子シース、下流側の希薄なイオン領域、および、宇宙機周辺に拡散する光電子が再現されており、それぞれの荷電粒子密度分布が定量的に得られた。これらの総和と宇宙機帯電量から、宇宙機周辺電位が求められており、宇宙機電位は+8V、下流側の希薄なイオン領域に形成される空間電位の最小値は-2.5V 程度であった。ソーラーセイル表面帯電への周辺電位の電流成分の寄与は、太陽風上流側では背景電子、背景イオン、光電子の各電流について、下流側では背景電子電流が支配的であることが改めて確認された。

表 1 完全粒子コードによる帯電解析で使した 1AU における太陽風プラズマパラメータ<sup>4)</sup>

プラズマ密度 [ $\text{m}^{-3}$ ]	$6 \times 10^6$
プラズマ温度 [eV]	10
太陽風ドリフト速度 [km/s]	470
光電子電流密度 [ $\mu\text{A}/\text{m}^2$ ]	40

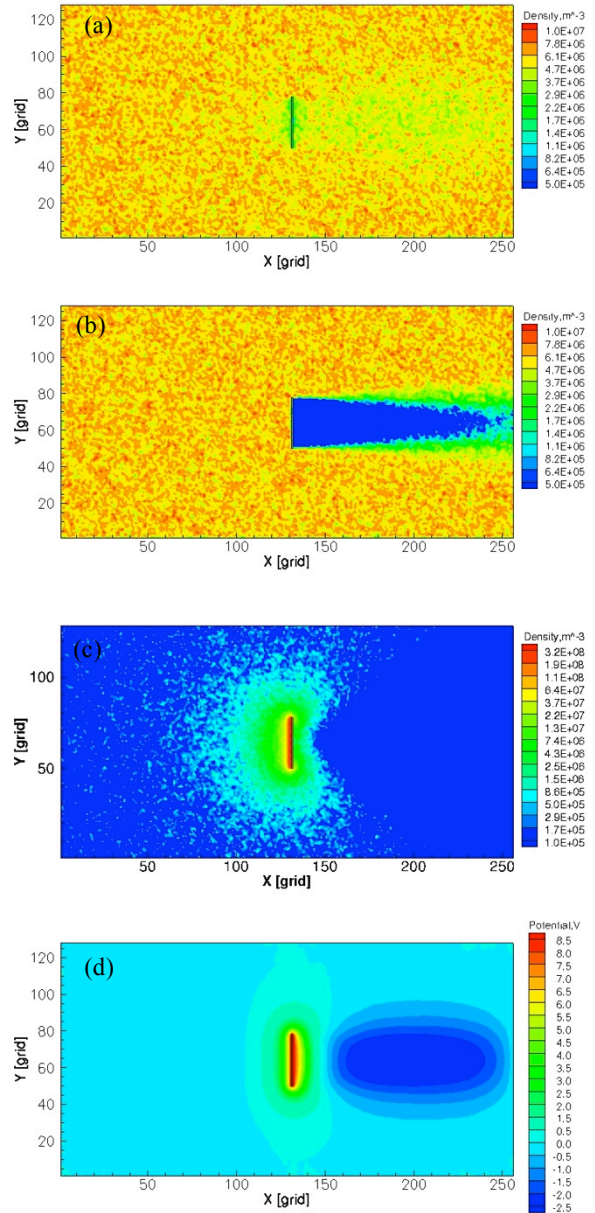


図 2 1AU における IKAROS 周辺の荷電粒子分布と電位分布。太陽風および太陽光の方向は、図の左から右。各図中央の矩形は導体の IKAROS モデル。(a) 電子密度、(b)イオン密度、(c)光電子密度、(d)静電ポテンシャル。

## 3. IKAROS 膜面の静電力解析

これまで述べてきたように、軌道上でのソーラーセイル膜面の形状安定は、機体の推力を維持するために極めて重要である。ここでは、宇宙機帯電に起因する静電力が膜面の構造に及ぼす影響を評価するために、IKAROS に対して帯電シミュレーションを行い、膜面に発生する静電力を評価した。はじめに、帯電シミュレーションから IKAROS 機体表面に発生

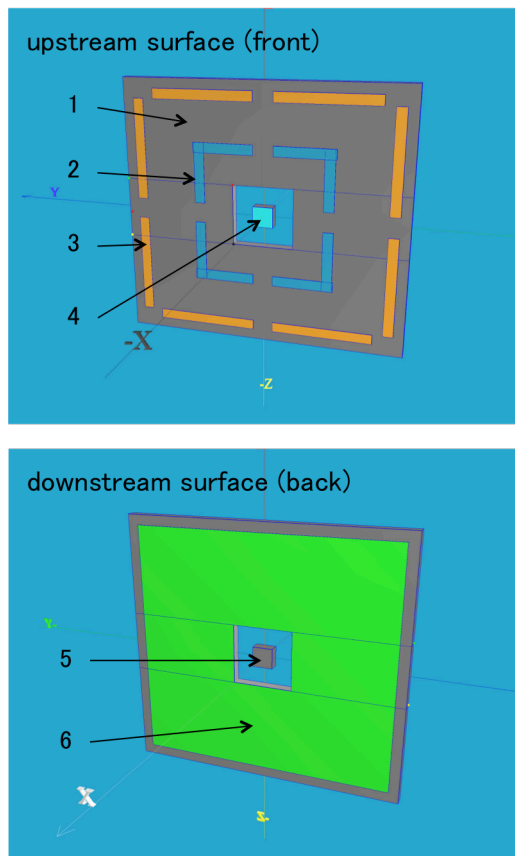


図3 MUSCAT 帯電計算での IKAROS 解析モデル．太陽風上流側の外観（上）と下流側の外観（下）．各部件はそれぞれ，1) 膜面導体面，2) 薄膜太陽電池，3) 姿勢制御デバイス，4) 太陽電池，5) 宇宙機構体，6) 膜面絶縁体面．

する電界ベクトルを求めた後，得られた電界から Maxwell の応力テンソル法<sup>6)</sup>を用いて静電力を算出した．帯電解析には，汎用宇宙機帯電解析コード MUSCAT<sup>7)</sup>を使用した．

IKAROS の膜面は 1 辺 14 m の正方形で，基本部材として厚さ  $7.5\mu\text{m}$  のアルミ蒸着ポリイミドが使用されている<sup>1)</sup>．太陽光側表面がアルミ蒸着面，反太陽光側がポリイミド面となる．これらの面はそれぞれ，太陽風上流側と同下流側に相当する．アルミ蒸着面には，薄膜太陽電池，姿勢制御用デバイスが配置されている．膜面は機体の回転によって，膜面 4 隅の先端マスの遠心力を利用して展開した後，展開形状を維持する<sup>1)</sup>．図 3 に，MUSCAT による IKAROS 解析モデルを示す．解析モデルでは計算格子幅の制限から，膜面を厚さ 0.5 m の板としている．また，ポリイミド面の静電容量は，比誘電率 3.5，厚さ  $7.5\mu\text{m}$  として算出した．帯電シミュレーションに際し，太陽風プラズマ環境では，背景プラズマ密度が希薄で

あるため，この空間電荷効果の寄与を省略した．入力パラメータとして使用した太陽風プラズマパラメータは，IKAROS が軌道上を飛行した日時の実環境の観測データを使用することとし，NASA の太陽風観測衛星である WIND 衛星による実測データ<sup>8)</sup>を使用した．但し，太陽風のドリフト速度は典型的な値を使用した．WIND 衛星による観測データベースは，イオンと電子の分布関数が Kappa 分布で記述されているが，これを MUSCAT の入力パラメータに適用するために，Maxwell 分布の線形結合として近似した．これにより，太陽風プラズマはイオン 1 成分，電子は低エネルギーと高エネルギー成分の 2 成分とした．また，光電子の帯電への寄与も考慮した．本シミュレーションに使用した，荷電粒子パラメータを表 2 に示す．

表 2 WIND 衛星で実測された太陽風パラメータ

水素イオン密度 [ $\text{m}^{-3}$ ]	$4.05 \times 10^6$
水素イオン温度 [eV]	4.90
低エネルギー電子密度 [ $\text{m}^{-3}$ ]	$2.65 \times 10^6$
低エネルギー電子温度 [eV]	9.21
高エネルギー電子密度 [ $\text{m}^{-3}$ ]	$0.75 \times 10^6$
高エネルギー電子温度 [eV]	44.05
太陽風ドリフト速度[km/s]	470

図 4 に，本帯電解析によって得られた IKAROS 計算モデルの表面電位を示す．この図に示す様に，宇宙機構体電位は +6 V 程度である．太陽風風下側はイオンが希薄なため，この領域に面する絶縁体面は背景電子の流入が支配的となり，その結果，負に帯電する．特に膜面の外周部に顕著な帯電が生じており，電位の絶対値が最大となる外側の角では帯電電位が -18V となる．

ところで，帯電解析によって宇宙機表面電位が得られ，これから宇宙機表面から外部空間への電場が同時に得られる．この電場から宇宙機表面に作用する静電力を算出できる．宇宙機全体に作用する静電力の総和としての力  $\vec{f}$  は，これを囲む面要素に作用する静電力の面積分によって，以下の様に記述出来る．

$$\vec{f} = \int \vec{\sigma} \cdot \vec{n} dS \quad (1)$$



ここで、面積分は宇宙機表面全体への面積分であり、 $\vec{n}$ は単位面ベクトルである。また、式 (1) 中の $\vec{\sigma}$ は、磁場がない場合の Maxwell 応力テンソル<sup>6)</sup>であり、

$$\vec{\sigma} = \varepsilon \begin{pmatrix} E_x^2 - 1/2 E^2 & E_x E_y & E_x E_z \\ E_y E_x & E_y^2 - 1/2 E^2 & E_y E_z \\ E_z E_x & E_z E_y & E_z^2 - 1/2 E^2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

と定義される。ここで、 $\varepsilon, E, E_x, E_y, E_z$ はそれぞれ、誘電率、電場のノルム、電場の x 成分、同 y 成分、同 z 成分である。例えば、x 面の面要素に作用する静電力は、式 (2) の第 1 行を空間 3 成分とするベクトルとして記述される。本シミュレーションでは、電

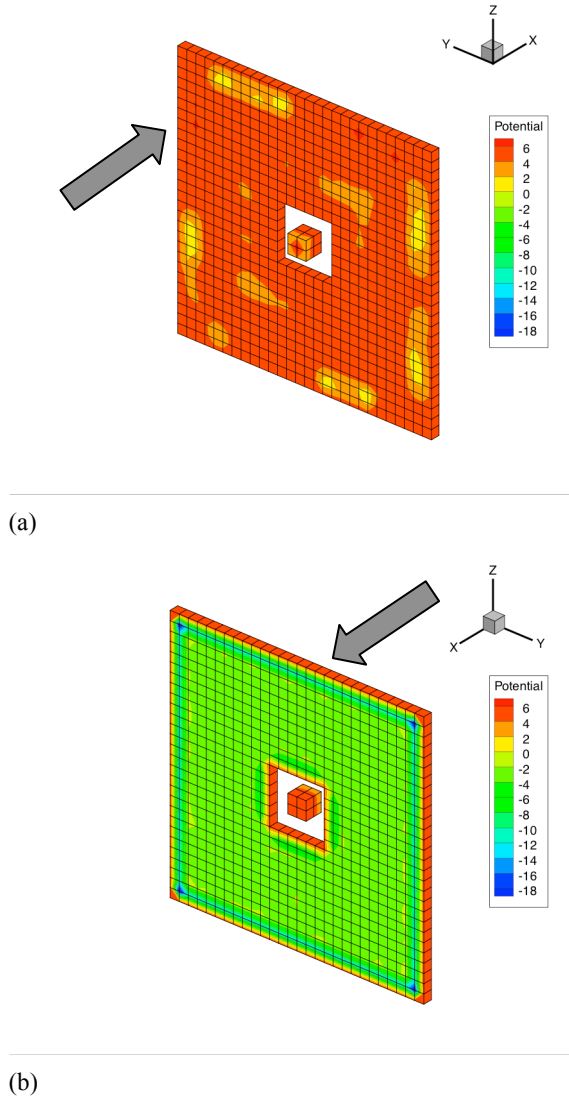


図 4 IKAROS 解析モデルの表面電位計算結果。帯電時間は、57.8 s。図中の単位は[V]。 (a) 太陽風上流側、(b) 太陽風下流側。両図中のブロック矢印は太陽風の方

場は計算格子上でのみ定義されるが、格子点における静電力は式 (1) を単位計算格子面に適用して算出した。得られた IKAROS 計算モデルに作用する静電力を図 5 に示す。この図が示す様に、膜面上の静電力は、太陽風下流側に向く絶縁体面の外周部分で顕著であることが確認出来る。得られた静電力を圧力換算値として評価すると、その最大値は  $1.0 \times 10^{-8}$  Pa であり、これは 1AU における光圧のオーダーである  $10^{-6}$  Pa のおよそ 1% に相当することが分かった。

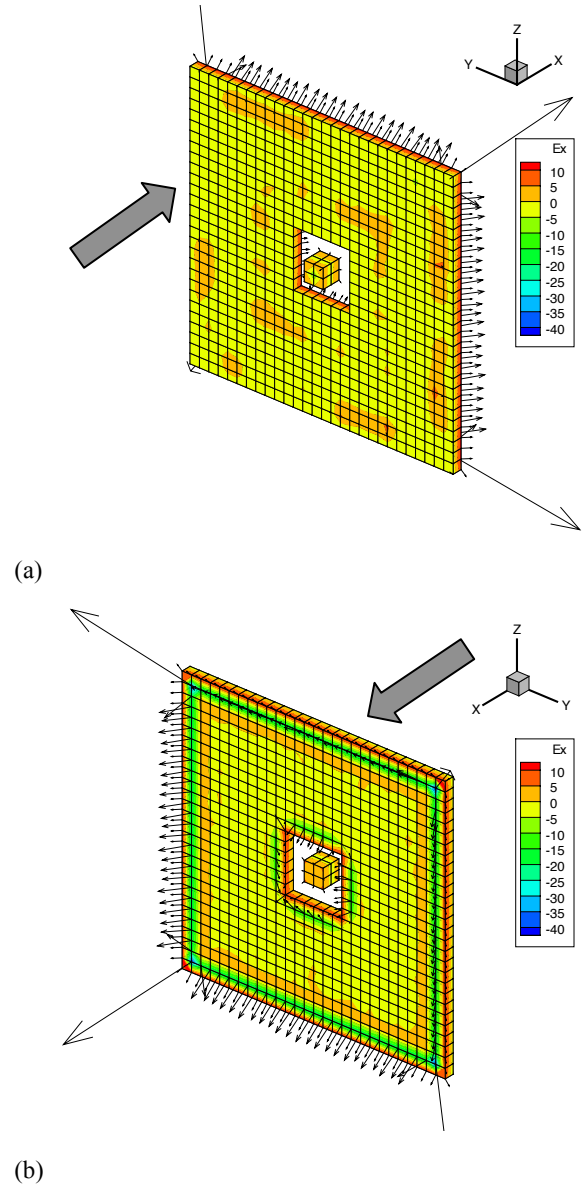


図 5 ベクトルプロットによる IKAROS 計算モデルに作用する静電力。帯電解析時間は 57.8 s。コンターは電場の x 成分。図中の単位は [V/m]。 (a) 太陽風上流側、(b) 太陽風下流側。両図中のブロック矢印は太陽風の方

#### 4. 静電力を考慮した IKAROS 膜面の構造解析

これまでの解析から、地球近傍での太陽風プラズマ環境中における、宇宙機帯電に起因する IKAROS 膜面上での静電力が得られた。得られた静電力を考慮して、数値シミュレーションによる IKAROS 膜面の構造解析を実施した。

本シミュレーションにおける IKAROS 膜面の解析モデルは、厚さ  $7.5\mu\text{m}$  のポリイミド膜単体とし、計算格子幅は帯電シミュレーションの格子サイズに合わせて  $0.5\text{m}$  とした。膜面モデルの材料物性パラメータを表 3 に示す。

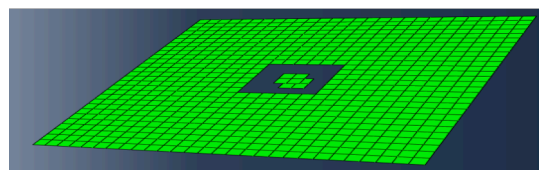
図 6 に、膜面モデルの初期状態および予備的解析から得られた形状変形の結果を示す。この解析では、図 5 に示した膜面上の静電力に加え、 $0.5\text{rpm}$  の膜面自身の回転による遠心力を考慮した。図 6 (b) に見られる膜面変形は、変形倍率を 20000 倍として拡大表示したものである。実スケールでの膜面変形は、一辺  $14\text{m}$  の膜面に対して、最大面外変形がおおよそ  $0.2\text{mm}$  となった。予備的解析結果から、表 2 に示す太陽風プラズマ環境中での帯電による静電力は、膜面スケールに対して極めて微小な変形を発生させる程度であることが確認された。同図に見られる波状の変形は、数値計算の安定性に関する現象であることが確認されており、外力の作用による変形とは異なるものである。現在、ここで見られた解析の数値的不安定性の検討も進めている。

表 3 膜面モデルの材料物性

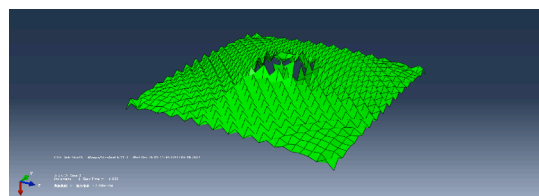
ヤング率 [GPa]	3.0
ポアソン比	0.3
密度 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	1420

#### 5. まとめと今後の予定

本稿では、ソーラー電力セイル実証機 IKAROS に対して、宇宙機帯電に起因する膜面上の静電力が、展開後の膜面の構造におよぼす影響を検証した。IKAROS が飛行時の太陽風プラズマ実環境における帯電状態を数値シミュレーションで解析した。この解析から、外部空間に対する膜面上の電場が得られ、これを用いて膜面上に作用する静電力を求めた。その結果、絶縁体膜面の外周部に顕著な静電力の発生が見られ、その絶対値の最大値は計算格子内での圧力換算で太陽光圧のおおよそ 1% となった。IKAROS 膜面モデルに対し、得られた静電力を考慮した構造解析を数値シミュレーションによって行ったところ、



(a)



(b)

図 6 帯電による静電力を考慮した IKAROS 膜面の予備的構造解析結果。膜面モデルの初期状態(a)および解析結果(b)。膜面の変形倍率は 20000 倍で表示。解析には Abaqus/Standard を使用した。

静電力による膜面の微小変形が見られたが、最大面外変形は  $0.2\text{mm}$  程度の極めて微小なものであった。以上から、 $1\text{AU}$  付近での太陽風プラズマ環境中では、宇宙機帯電による静電力がソーラーセイルの膜面の構造におよぼす影響は極めて小さいと考えられる。今回考慮した太陽風プラズマ環境はノミナルケースに相当すると考えられるが、今後は惑星磁気圏内などの高エネルギーの荷電粒子が存在するプラズマ環境において同様の解析を実施する予定である。絶縁体膜面の帯電飽和値は背景電子温度の数倍程度と予想されるが<sup>9)</sup>、膜面における局所的静電力の強度と背景電子温度との相関を調査する計画である。また、帯電シミュレーションと構造シミュレーションの連成解析を実施するにあたり、両者の計算格子系の違いを補完するデータ授受手法など、両シミュレーションを連結する手法も検討していく。

#### 参考文献

- 1) Mori, O., Tsuda, Y., Sawada, H., Funase, R., Saiki, T., Yamamoto, T., Yonekura, K., Hoshino, H., Minamino, H., Endo, T., Kawaguchi, J., IKAROS Demonstration Team: IKAROS and Extended Solar Power Sail Missions for Outer Planetary Exploration, Proc. 28th International Symposium on Space Technology and Science, 2011-o-4-01v, Okinawa, June 2011.
- 2) Shirasawa, Y., Mori, O., Miyazaki, Y., Sakamoto, H., Hasome, M., Okuizumi, N., Sawada, H., Matunaga, S., Furuya, H., Kawaguchi, J.: Evaluation of Membrane

Dynamics of IKAROS Based on Flight Result and Simulation Using Multi-Particle Model, Proc. 28th International Symposium on Space Technology and Science, 2011-o-4-05v, Okinawa, June 2011.

- 3) Sawada, H., Mori, O., Okuizumi, N., Shirasawa, Y., Miyazaki, Y., Natori, M., Matunaga, S., Furuya, H., Sakamoto, H.: Evaluation of Solar Power Sail Deployment Mechanism of IKAROS, Proc. 28th International Symposium on Space Technology and Science, 2011-o-4-04v, Okinawa, June 2011.
- 4) Muranaka, T., Hosoda, S., Shinohara, I.: Numerical Analysis of Potential Structure around Solar Sail in Solar Wind Plasma, Transactions of The Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan, Vol. 10, No. 128, 2012, pp. Po\_4\_1-Po\_4\_6.
- 5) Garrett, H. B., Minow, J. I.: Charged Particle Effects on Solar Sails—An Overview, JPL TRS 1992+, 2004
- 6) Jackson, J. D.: Classical Electrodynamics, 3rd Ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, 1999.
- 7) Muranaka, T., Hosoda, S., Kim, J., Hatta, S., Ikeda, K., Hamanaga, T., Cho, M., Usui, H., Ueda, H. O., Koga, K., and Goka, T.: Development of Multi-Utility Spacecraft Charging Analysis Tool (MUSCAT), IEEE Trans. on Plasma Science, 36, No. 5, pp2336-2349, 2008.
- 8) NASA Goddard Space Flight Center, Space Physics Data Facility,  
[http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/istp\\_public/](http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/istp_public/)
- 9) Hastings, D., and Garrett, H., Spacecraft-Environment Interactions, Cambridge Atmospheric and Space Science Series, Cambridge University Press, UK, 1996.