

2F09 HTV 軌道上データによる帯電解析手法の妥当性評価

○辻田大輔, 奥村哲平, 大川恭志, 植松洋彦 (宇宙航空研究開発機構)
趙孟佑 (九州工業大学)

Evaluation of charging analysis methods by HTV on-orbit data
Daisuke Tsujita, Teppei Okumura, Yasushi Ohkawa, Hirohiko Uematsu (JAXA)
Mengu Cho (Kyushu Institute of Technology)

Key Words:HTV, ISS, Charge, MUSCAT

Abstract

The 4th HTV installed a new experimental instrument for measuring HTV surface potential against surrounding plasma. The measured potential of HTV structure against surrounding plasma during HTV solo-flight phase shows -30V through -60V in sunshine and about 0V in eclipse, and the potential during attached ISS phase follows the ISS potential with almost no difference. Based on the potential data, we evaluate two kinds of analysis method and refer to the application

1. 目的および背景

HTV 軌道上プラットフォーム^{1) 2)}の初の利用アイテムとして、2013年8月に打ち上げられたHTV4号機に実験機器として表面電位センサを搭載して、飛行中及びISS係留中の軌道上データ取得に成功した。ISS係留中の計測データを、他ISS搭載の電位センサ計測値と比較評価してよく一致していることから、表面電位センサは正しく計測できていると判定している。本計測データを用いて、解析手法の妥当性を評価する。対象の解析手法は、①ソフトウェアMUSCAT (Multiutility Spacecraft Charging Analysis Tool)、及び、②簡易解析、の2種とする。MUSCATは地上試験結果に基づいてコリレーションしたツールである為、軌道上データとの比較評価は初めてとなる。簡易解析では、HTVの導体露出面積及び太陽電池パネル発電部の電子・イオン収集が平衡に達するときのHTV構体電位を算出する手法を用いる。本論文では、これら解析手法の妥当性を示すと共に、その適用範囲の特徴に関する考察を報告する。

2. HTVの特徴

HTVの特徴について帯電解析の観点から、特に寸法、外表面情報、飛行運用内容について述べる。

寸法は直径約4.4m、高さ約10mの日本最大規模の大型宇宙機である。機能毎に独立した与圧部・非与圧部・電気モジュール・推進モジュール・曝露パレットの計5モジュールから構成される(図1参照)。その外表面であるが、各モジュールで異なる熱制御温

度範囲要求に対応する為、与圧部/非与圧部はMLI、電気モジュールはシルバートフロン、推進モジュールはβクロス、という表面熱制御材の構成をしている。また、全55枚の太陽電池パネルをHTV表面全体に渡ってボディマウントしている。導体露出面積として寄与の大きいスラスタについては、推進モジュール下部にメインエンジン(500N級)を4基、推進モジュール及び与圧部に姿勢制御用エンジン(120N級)を28基有する。

飛行運用であるが、高度350~460km、軌道傾斜角51.6度のISS軌道を飛行する。軌道面に対する太陽角度であるβ角は-75度~+75度で変化する。運用期間は、ISS接近飛行に約1週間、ISS係留が約一か月、再突入運用は数日という構成で、合計で約1か月半になる(図2参照)。飛行姿勢は、LVLH(Local Vertical Local Horizontal)、Yaw+90度、Yaw-90度、Yaw180度の4種類(図3参照)を取り、太陽電池発生電力確保の為に、適切な姿勢を選択して飛行する。

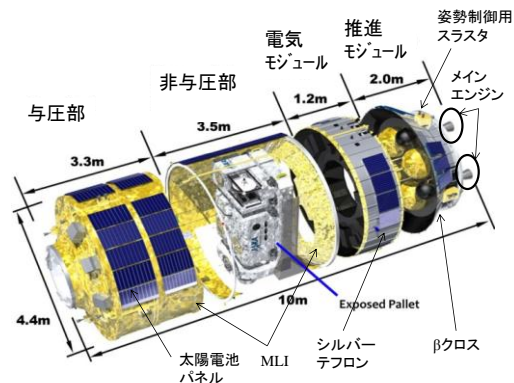


図1. HTV 外観

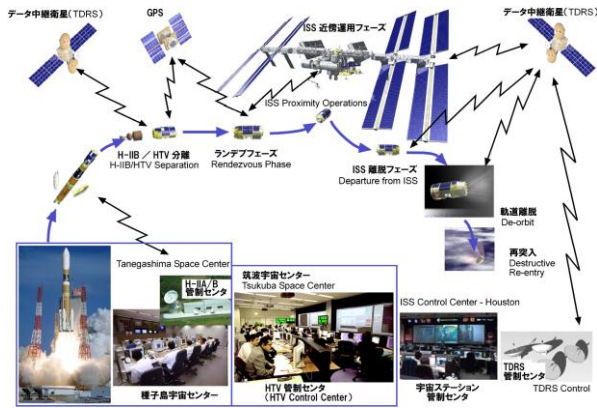


図 2. HTV 運用概要

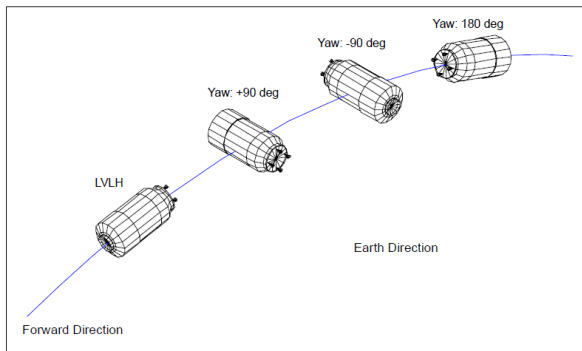


図 3. HTV 飛行姿勢

3. HTV4 号機搭載表面電位センサの概要

表面電位センサは、HTV4 号機において取り外した推進モジュール太陽電池パネルの跡地に搭載した³⁾。当該センサは、異なる計測方法を用いる 2 種類の電位計である能動型表面電位計 (TREK-3G) 及び受動型表面電位計 (SCM) から構成される (図 4 参照)。計測方法であるが、TREK-3G はプローブ電位を周辺プラズマと同電位になるようにフィードバック制御する能動型、SCM はハイインピーダンスプローブへの流入プラズマ量から電位計測する受動型、である。尚、SCM は計測原理上、ウェークに位置する際は、安定したプラズマ流入を得ることができないことにより、計測電位が不安定になる傾向がある為、4 項以降の解析比較対象は TREK-3G に限定する。

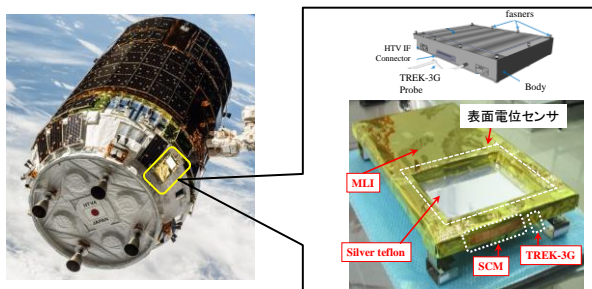


図 4 表面電位センサ概要

表面電位センサは、HTV 構体を基準にした周辺プラズマ電位を $\pm 200V$ 範囲で計測する。約 300km ~ 400km におけるプラズマ密度は約 $10^{12}[m^{-3}]$ と濃く、表面電位センサ周辺は推進モジュールの β クロス、及び、表面電位センサ自身の MLI、と絶縁材料で覆われている為、シースの形成はなくデバイ長は数 cm オーダーであるため、20 cm 表層から離れた長さをもつプローブは周辺プラズマ電位を計測できる評価している。尚、周辺プラズマに対する HTV の電位を求める際は、計測データを正負逆にする必要がある。

4. 表面電位センサの計測データ

HTV 運用期間を通じて取得した表面電位センサの計測データのサマ리를表 1 に示す。

表 1 計測データサマリ

| No | フェーズ | 日照 | 日陰 |
|----|---------|----------------|-------|
| 1 | 単独飛行 | ~-30 to -60[V] | ~0[V] |
| 2 | ISS 係留中 | ~-10[V] | ~0[V] |

4.1. 計測データの妥当性評価

表面電位センサの計測データの妥当性につき、ISS 係留中の計測データを、ISS 搭載の電位計 FPMU (Floating Potential Measurement Unit) の計測値と比較した (図 5 参照)。両計測値はよく一致していることから、表面電位センサの計測データは有効なものであると評価する。

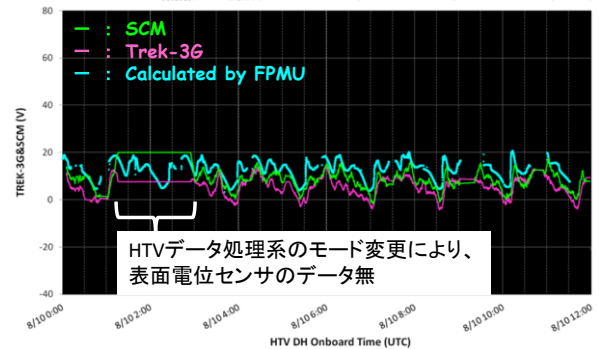


図 5. ISS 係留時の計測データ評価

4.2. 解析対象ケースの選定

計測データ種類としては、飛行中と係留中に大別されるが、係留中のデータ評価の為には ISS を含んだモデル構築が必要となり、現状困難であることから、飛行中のデータを評価対象とする。HTV4 号機は飛行中に LVLH, Yaw+90 度, Yaw180 度の姿勢を取っていることから、各姿勢時の日照・日陰を評価ケースとする。また、飛行中は、 β 角は 60 度以上の高い状態であり、 β 角変化に伴う電位挙動の特徴的な変

化はなかったことから、太陽電池パネル発電電力が大きい傾向となるβ角最大時を選定する。以上の考察により得た解析対象ケースを表2に示す。

表2 解析対象ケース

| No | 姿勢 | β角[度] | 日照[V] | 日陰[V] |
|----|--------|-------|-------|-------|
| 1 | LVLH | 68.6 | -30 | -12 |
| 2 | Yaw180 | 60.1 | -38 | +12 |
| 3 | Yaw+90 | 66.2 | -47 | +5 |

注) 表中の電位は周辺プラズマを基準にした HTV 電位である為、計測データと正負が逆となる。

表2の各ケースの計測データを図6~8に示す。計測電位挙動の概要であるが、日照中は30V程度、日陰中は0V付近の計測電位を得た。日照中はHTV太陽電池パネルの露出電極が発電時に周辺プラズマを収集することによってHTVと周辺プラズマ間に電位差が生じるが、日陰中は太陽電池パネルは発電していないので電位差が生じないことが大きな特徴である。太陽電池パネルは最大100V程度発生するが、30V程度の電位差に留まる理由は、HTVの導体露出面積が周辺プラズマを収集することで電位差を抑制していることと考察している⁴⁾。尚、図中の”Current from SAPs”は太陽電池パネルが発生した電流をHTVの電力制御器が電源バスに流している電流を示し、日照/日陰条件の判定に使用している。

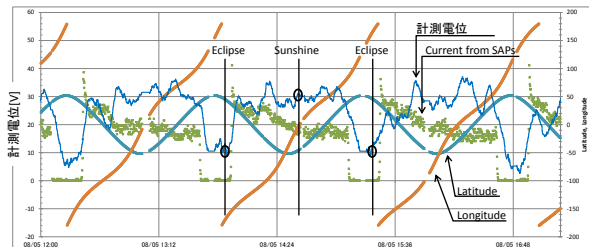


図6. LVLH 姿勢における電位挙動

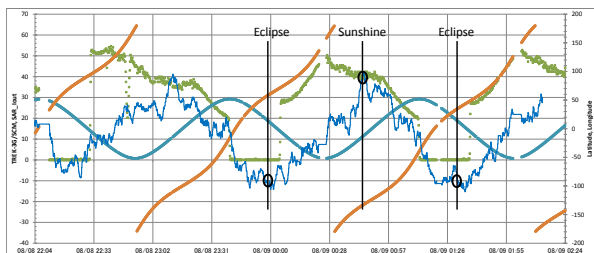


図7. Yaw180度姿勢における電位挙動

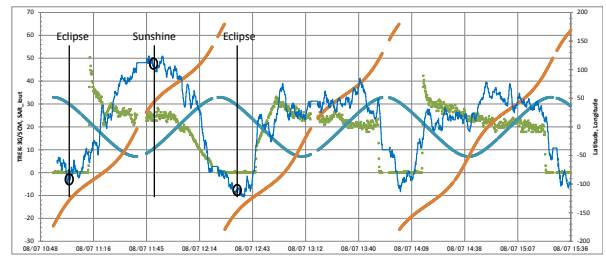


図8. Yaw+90度における電位挙動

5. 解析手法評価

5.1. 簡易解析

HTVの導体露出部、及び、太陽電池パネルの正極・負極が収集する周辺電子・イオンによる電流流入・流出が平衡が取れるHTV帯電電位を計算する、という解析手法であり、具体的なステップは以下の通り。

- HTV負極側の金属であるHTV構体、及び、SAP負極側の導体が収集するイオン電流密度を式(1)、(2)に基づき算出。HTV構体が収集するイオン電流密度は I_s 、SAP負極端が収集するイオン電流密度は I_{an} と表記する。

$$I_s = e \cdot n_i \cdot V_{orb} \cdot S_r \quad (1)$$

$$I_{an} = N_p \cdot N_{cn} \cdot (1/4) \cdot e \cdot n_i \cdot V_{the} \cdot S_c \cdot F \quad (2)$$

- SAP正極側の導体が収集する電子電流密度、 I_{ap} を算出。

$$I_{ap} = N_p \cdot N_{cp} \cdot (1/4) \cdot e \cdot n_e \cdot V_{the} \cdot S_c \cdot F \quad (3)$$

- $I_s + I_{an} + I_{ap}$ が最小値になるように、周辺プラズマに対する太陽電池パネルのセル電位分布を調整する。具体的には、直列セル総数を一定として、負極側セル数(N_{cn})・正極側セル数(N_{cp})を変数評価する。

- ③の操作でイオン/電子電流の差が最小になる(=電位平衡に達する)時の N_{cn} に、太陽電池セル発電電圧を乗じた値が、周辺プラズマに対して負に沈んだHTV電位となる。

各パラメータ説明は以下。

e : 電荷, F : 電極倍率, $n_{i,e}$: イオン/電子密度,
 $N_{cp,cn}$: 正極/負極セル数, N_p : 電力を発生している太陽電池並列数 (=太陽電池パネル電力発生率),
 S_c : 太陽電池セル面積, S_r : ラム面の導体露出面積,
 V_{orb} : HTV飛行速度, V_{the} : イオン/電子熱速度

解析対象ケースと簡易計算により導出した結果の比較図を図9~11に示す。電位表記は周辺プラズマを基準にした電位値としている。また、全ケースの電極倍率 F は”10”とした。

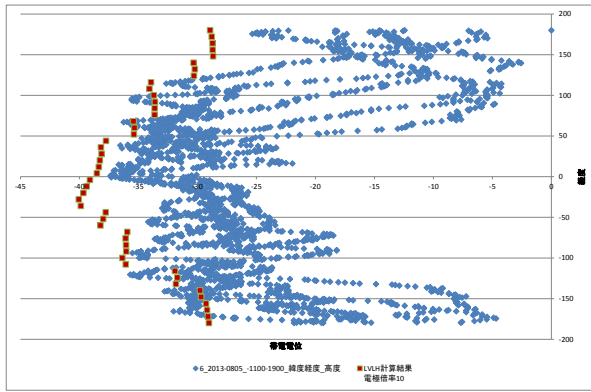


図 9. LVLH 姿勢のデータ比較

全体的に実測結果と比較して低めの値を示している。LVLH はデータが豊富な為、解析対象ケースを含む前後数周回分の実測データを合わせてプロットしている。

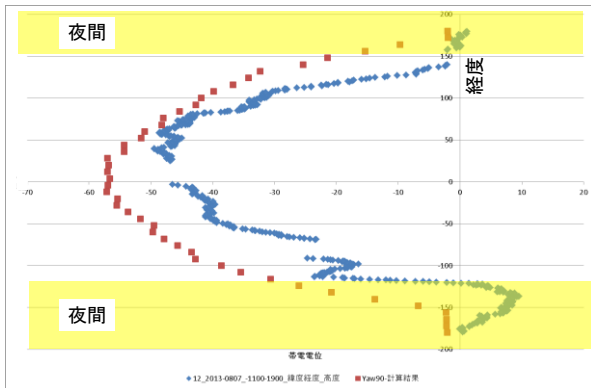


図 10. Yaw+90 度姿勢のデータ比較

全体的に、簡易解析結果は、実測結果と比較して低めの値を示している。上図の夜間期間は実測データは正帯電になっているが、現状の簡易解析は負帯電のみを表現するものである為、夜間の簡易解析結果は、飽和値である。

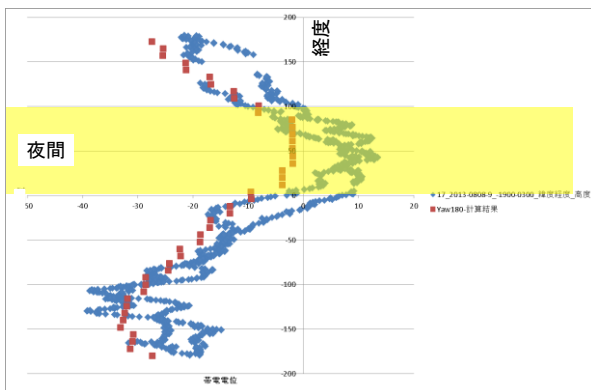


図 11. Yaw180 度姿勢のデータ比較

夜間の簡易解析結果は飽和しているが、日中は実測データとよく一致している。

簡易解析を行う過程で、解析結果に対して影響を与えるパラメータとして電極倍率 F 、太陽電池パネル発生電力率 N_p 、ラム側導体面積感度 S_r を識別した。

それぞれについて感度解析を実施しているが、電極倍率の感度解析結果を図 12 示す。尚、HTV 姿勢条件は Yaw+90 度、太陽電池パネル発電電圧 80[V]、 $N_p=0.8$ (80%) で固定とした。

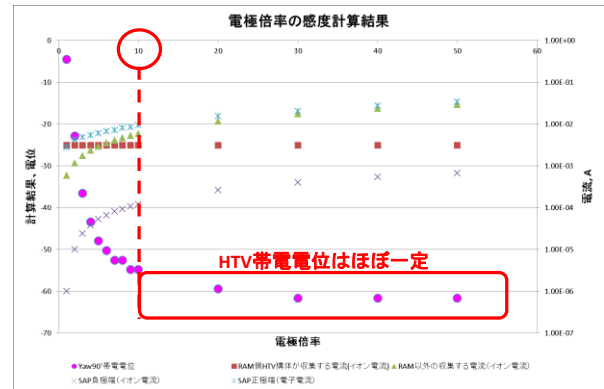


図 12. 電極倍率感度解析結果

電極倍率が 10 を超えると、ほぼ HTV 帯電電位は一定となる。これにより電極倍率は 10 倍程度までが有効なパラメータと評価する。尚、本図より HTV 帯電電位は -60[V] に留まり、SAP 発電電圧 80[V] の逆符号電圧(-80[V])まで達しておらず、実測データと同様な傾向であることがわかる。4 項でも触れた通り、露出導体面積によるプラズマ収集効果の影響と考察しているが、 $S_r=0$ として解析を行った結果を図 13 に示す。本図より電極倍率 10 倍を超えると、HTV 帯電電位が -80V 近傍になり、露出導体面積が電位降下を抑制していることを確認できた。

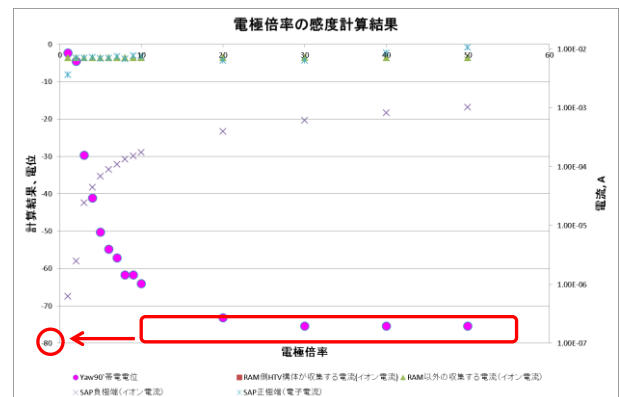


図 13. 露出導体面積の影響確認

5.2. MUSCAT

JAXA/九州工業大学が共同開発した帯電解析ソフトウェア MUSCAT で HTV の帯電解析を行い、実測データと比較評価した。解析においていくつか考慮した点を挙げる。

① モデル分解能

MUSCAT の計算空間格子数は $128 \times 128 \times 128$ であることから、直径約 4.4m、高さ 10m の円柱である巨大な HTV が本空間で表現できるようにする為、一格子サイズを $30\text{cm} \times 30\text{cm} \times 30\text{cm}$ と設定した。HTV 軌道におけるプラズマ密度及びプラズマ温度は、それぞれ $10^{12}[\text{m}^{-3}]$ 、 0.2eV 程度である為、各プラズマスケールはおおよそデバイ長 $3[\text{mm}]$ 、ラーモア半径 $3[\text{cm}]$ 、シース厚 $30[\text{cm}]$ となる。これらスケールは一格子と同等以下である為、MUSCAT 解析結果は巨視的には準中性プラズマ粒子と HTV の相互作用を算出することになる。

② 解析モデル

HTV モデルを構築する上で、200 個以上の表面材料情報を挙げ、 30cm 格子以下のサイズで帯電解析に大きな影響がないと判断される艀装品を取り除く作業を行った。結果として 150 個以上のアイテムをモデルに取り込んだ。解析モデル図を図 14 に示す。

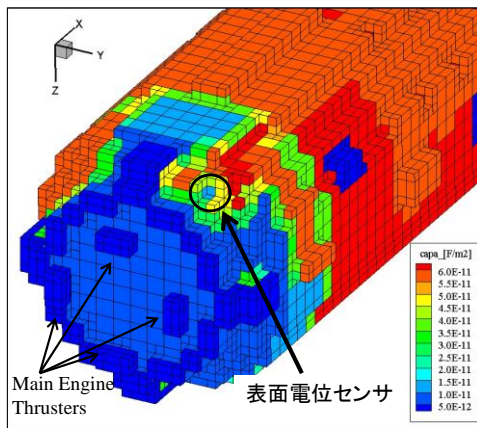


図 14. MUSCAT の HTV モデル

電極倍率を 5.1 項の簡易解析と同様に”10”として解析した結果、Yaw+90 度は表 3 の通り実測データとよく一致する結果を得た。一方、LVLH 及び Yaw180 度は导体露出面積が大きい為、イオン流入電流の影響が大きく、イオンタイムスケールまで計算を行う必要があり、現行 MUSCAT 仕様では対応できなかった。また、計算時間が膨大になることから、解析は日照・日陰時間帯の中心の一点のみとした。

表 3. MUSCAT 解析結果の比較

| No | Yaw+90 度 | 解析結果 | 実測値 |
|----|----------|---------|--------|
| 1 | 日照 | -42 [V] | -47[V] |
| 2 | 日陰 | +4 [V] | +5 [V] |

5.3. 解析手法評価まとめ

簡易解析結果、及び、MUSCAT の両者で軌道上計測データとよく合う HTV 帯電電位を算出できた。簡

易解析では軌道一周回にわたる比較評価を行い、日陰中の正電位（順電位勾配）を解析予測できない点が課題として挙げられるが、電位挙動の概要把握においては十分実用に耐えることを示した。一方、MUSCAT は Yaw+90 度姿勢の日照・日陰の各一点の結果のみの評価となったが、日陰中の順電位勾配も含めて軌道上実測データと比較してよく一致することを示すことができ、帯電解析ソフトウェアの実測データを用いた妥当性検証ができた。

6. まとめ

HTV4 号機に搭載した表面電位センサの実測データを用いて、簡易解析及び MUSCAT という 2 手法を用いて解析評価を行い、両手法共に実測データとよく合う結果が得られ、有効な解析手法であることを示した。今回の実測データは HTV 固有のものであることも踏まえて、以下の通り、総括する。

『HTV のような極域を通らない低軌道宇宙機は、导体露出面積と太陽電池パネル発生電圧がわかれば簡易解析で十分帯電電位を算出できるとして一般化できると評価する。

MUSCAT は高エネルギー粒子による局所放電有無を評価することを主目的としたソフトウェアである為、過渡的な電位変動現象の把握に有効である。尚、解析対象が HTV のような巨大なものである場合は、プラズマスケールと格子分解能の関係を求めて、考慮できる／できない物理現象を把握しておくことが肝要である。』

尚、本簡易解析手法で、軌道上データの整合性を確認した例としては、ISS に続き HTV が 2 例目に当たることを付記する⁵⁾。

参考文献

- 1) Daisuke Tsujita, Toru Kasai, Hirohiko Uematsu, Masayuki Harada, Tsutomu Fukatsu and Hiroshi Sasaki, “Experiments Plan on the HTV”, Vol12, No.ists29, pp. Tg_1-Tg_4, 2014..
- 2) 辻田大輔, 葛西徹, 原田正行, 植松洋彦, 鈴木祐介(JAXA), 「HTV 軌道上プラットフォーム利用計画」, 第 57 回宇宙科学技術連合講演会, 1B09, 2013
- 3) Teppei Okumura, Daisuke Tsujita, Yuki Kobayashi, Kiyokazu Koga, Masato Takahashi, Hiroaki Kusawake, Toru Kasai, Hirohiko Uematsu, Hirokazu Masui, Arifur Khan, and Mengu Cho, ” On-orbit Potential Measurement of H-II Transfer Vehicle”, 13th

SCTC, IV-2-66, 2014.

- 4) Daisuke Tsujita, Teppei Okumura, Yuki Kobayashi, Toru Kasai, Yasushi Ohkawa, Kiyokazu Koga, Masato Takahashi, Hirohiko Uematsu, and Mengu Cho, "HTV Charging Analysis based on On-orbit Data", 13th SCTC, II-1-23, 2014.
- 5) Danie E.Hastings, Mengu Cho, and Jiong Wang, "Space Station Freedom Structure Floating Potential and the Probability of Arcing", Journal of Spacecraft and Rockets, vol.29, No.6, Nov-Dec 1992.