

電力ハーネス焼損時における 発生22ガスによる推力解析

Analysis of Thrust by Gas Jet Ejected from Power Harness in Anomaly of Solar Generation Power Drop

小 島 寧^{*1}・後 藤 大 亮^{*1}・河 内 宏 道^{*2}

Yasushi KOJIMA, Daisuke Goto and Hiromichi Kawauchi

Key Words: ADEOS-II, Power Harness, Exhaust Gas Velocity

Abstract: ADvanced Earth Observing Satellite-II (ADEOS-II) was launched by the H-IIA launch vehicle Flight No. 4 from the Tanegashima Space Center on Dec. 14, 2002. On Oct. 25, 2003, about ten months after launch, communication link was lost due to drop of solar generation power. At the same time that the anomaly occurred, small attitude perturbation and orbit change were observed. The cause is estimated that burned electric power harnesses of solar array paddle boom generate the thrust. In order to confirm this estimated cause, the length of burned power harnesses is analyzed using two approaches. First approach is the method based on kinetic theory of gasses and second one is to measure thrust by gas jet from burned power harnesses directly.

1. はじめに

2002年12月14日に種子島宇宙センターから打上げられた環境観測技術衛星「みどりII」(ADEOS-II)は、約9ヶ月後の2003年10月25日に発生電力が約6kWから約1kWに低下し、観測運用を停止した。一方、この電力低下とほぼ同時期に、衛星の姿勢と軌道に変化が見られた。一回帰前の姿勢、角運動量と比較して、その変化量は僅かであり、それぞれ、ロール軸：-0.004度、-1.0 Nms、ピッチ軸：0.003度、0.6 Nms、ヨー軸：-0.005度、-2.0 Nmsであった。これらの変化量は何らかの外力によ

り発生したと仮定し、力積の作用点が存在する範囲を求め(図1参照)、さらにFTA(Fault Tree Analysis)による異常部位の絞り込み結果を考慮すると、太陽電池パドル(PDL)から太陽電池ブランケットの一部の範囲に外力が付加された可能性が高いと考えられる。特にここでは、PDLブーム上に配線された多層断熱材(MLI)で覆われた電力ハーネスの焼損に伴い発生したガスがMLIの隙間もしくは焼損により開いた穴から、宇宙空間に噴出され、衛星の姿勢、軌道が変化したというシナリオを想定し(図2参照)、①平均分子運動論に基づく手法、②直接推力を求める手法¹⁾という2つのアプローチから、シナリオの妥当性について検証する。

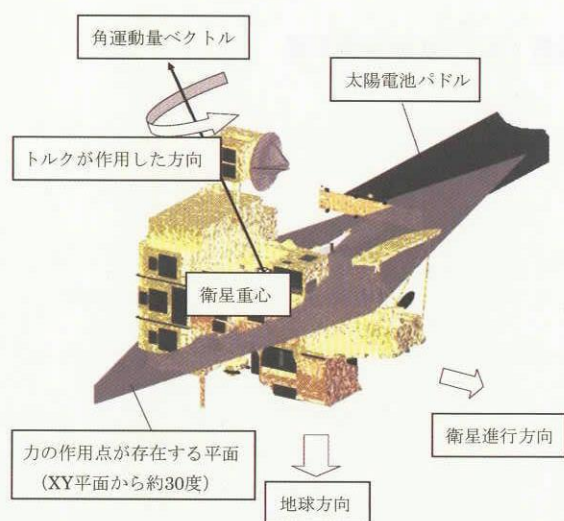


図1 力積の作用点が存在する範囲

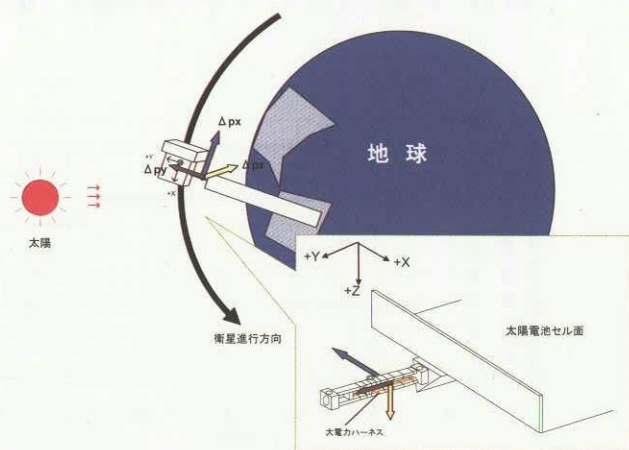


図2 姿勢、軌道変化のシナリオの概念図

^{*1} 宇宙航空研究開発機構

^{*2} NTスペースシステム

2. 平均分子運動論に基づく推定

2.1 評価手順 評価手順を図3に示す。まず、ハーネスの高温加熱時における発生ガス成分分析を行い、平均分子量（推定値）、質量減少率を算出する。次に、これらのデータを用いて、ガス化した被覆の長さを推定する。但し、本評価の精度は解析モデルおよびパラメータの誤差を考慮すると、オーダを評価する程度であると考えられる。

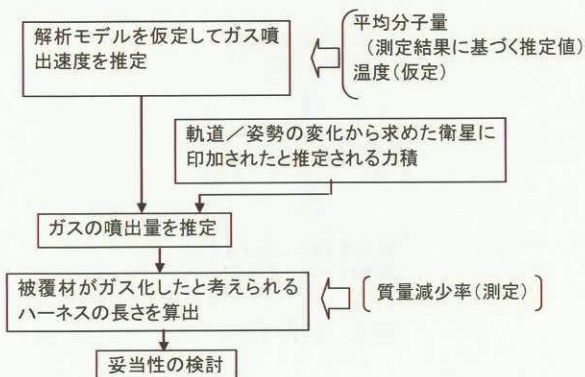


図3 評価手順

2.2 試験概要 本試験の目的は、太陽電池パドルハーネスが高温になった時に、その被覆材から放出されるガスの種類と濃度（最終的には平均分子量）、および温度に対する質量減少率のデータを取得することである。以下に試験概要を述べる。

(1) 供試体

ADEOS-II 実機と同等のハーネスの被覆のみを測定に供した。

(2) 測定方法

ハーネス被覆材を加熱して発生するガスを捕集し、ガスの種類に応じて、ガスクロマトグラフィー、イオンクロマトグラフィーなど数種類の分析方法を使用して成分分析を実施した。

(3) 測定条件

加熱温度は、500℃と800℃の2ケースについて実施した。

(4) 分析結果

表1に、捕集ができたガスに含まれるガスの種類と質量割合を示す。なお、表1はハーネス被覆から発生したガスを化学分析し、分子量を特定した結果に基づいている。また、平均分子量の範囲を表2に示す。

表1 発生ガスの組成

成分名	捕集できたガス全体質量に対する各成分の質量割合(%)	
	500℃加熱	800℃加熱
CO、CO ₂	5.7	5.7
低沸点有機成分	10	42.5
高沸点有機成分	2.9	4.6
HF	12.9	11.5
タール分	27.1	0
水分	41.4	37.9

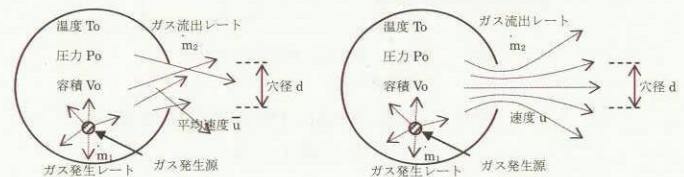
表2 平均分子量

温度	平均分子量の範囲
500℃	20～47
800℃	11～49

2.3 焼損ハーネス長の推定 2.2項で得られた平均分子量の値を用いて、ガス化したハーネス被覆の長さを推定する。

(ガスのモデル)

MLIの内部で発生したガスは、圧力が高い場合は連続的な流体、圧力が低い場合はそれぞれの分子を粒子として扱う分子運動論に従い、それぞれの挙動を示す式は多少異なる。それぞれの流れのイメージを図4に示す。軌道上では分子流と連続流の間の状態になる。どちらに近いかは、平均自由行程（分子同士が衝突する前に移動する距離）と考えている対象の代表長さの比（=クヌーセン数）により判断する。



(a) 分子流モデル

(b) 連続流モデル

図4 MLIから噴出するガスの流れのイメージ

ガス温度に対するクヌーセン数の計算結果を図5に示す。

図5の結果から、MLI内部のガスの流れは、連続流と分子流の中間領域になるため、被覆がガス化したと考えられるハーネスの長さについては、この2つのモデルで求め、その中間の値を採用する必要がある。

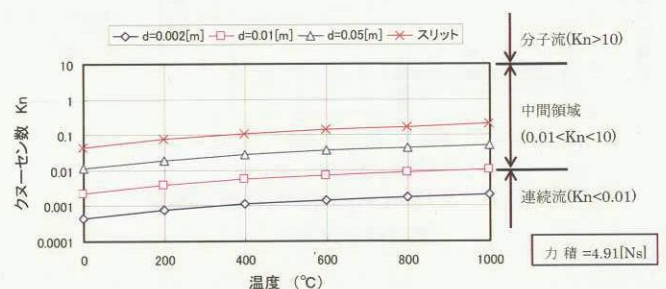


図5 定常状態でのMLI内のクヌーセン数

(ガス化したハーネス被覆長さの推定)

ガス温度に対するクヌーセン数、およびガス温度に対するガス化したハーネス被覆の長さを算出した（図6、図7参照）。次に、得られた平均分子量を使用し、ガス化したハーネス被覆の長さの推定を行った。推定に用いた主要前提条件を以下に示す。

「主要前提条件」

ガス温度 : 500℃ / 800℃

平均分子量上限値 : 47 / 49

質量減少率 : 71% / 92%

衛星に加わった力積 : 4.91 Nms

(軌道/姿勢の変化から算出)

推定した結果を、表3に示す(500℃の推定例を図6、図7に併せて示す)。最終的に、ガス化した被覆の長さは、約3~11cmという値が得られた。

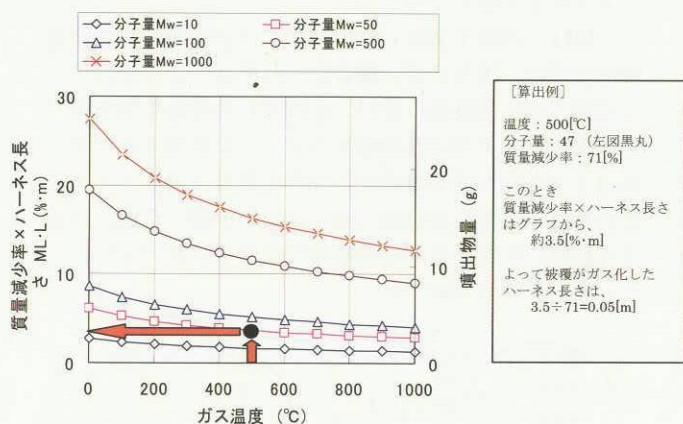


図6 力積=4.91[Ns]相当の噴出物量
(分子流モデル)

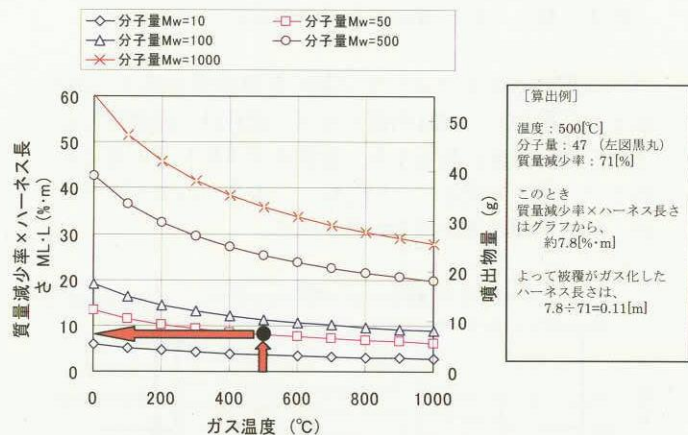


図7 力積=4.91[Ns]相当の噴出物量
(連続流モデル)

表3 焼損したハーネス長さ推定値

温度	分子流モデル	連続流モデル
500℃	5 cm	11 cm
800℃	3 cm	7 cm

3. 直接推力測定法に基づく推定

3.1 評価手順 評価手順概要を図8に示す。まず、チャンバ内に設置した容器内でハーネスを焼損させ、容器壁面からのオリフィス穴から、燃焼ガスを噴出させる。なお、容器は、噴出したガスにより、高さ方向にフリーに移動できるよう振り子の先に容器が設置されている。最終的に燃焼ガスによる容器の変位(角度)を測定し、ガス噴出速度に換算し、焼損ハーネス長を推定する。

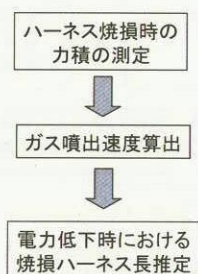


図8 評価手順

3.2 試験概要

【試験装置】

電力ハーネス焼損ガスによる推力を計測する試験装置概要について以下に示す。短絡/焼損方法は、電力ハーネスの被覆材の一部を意図的に炭化させ、ハーネス間を導通させることにより、軌道上の事象を模擬した。

(1) 電力ハーネス

ADEOS-IIの軌道上不具合を考慮して、電力ハーネスは衛星実機で使用されているテフロン系被覆線を使用した。ここでは、焼損を誘導しやすいよう試験用ハーネスについては、以下のようなコンフィギュレーションとしている。

- ① 電力ハーネス8本をツイストして束ね、先端を固縛する。
- ② ツイスト束の先端部分から約20[mm]の部位をバーナーで炙り、隣接するハーネス間の抵抗値が数十[Ω]のオーダになるまで被覆材を炭化させる。

図9に炭化後の外観を示す。

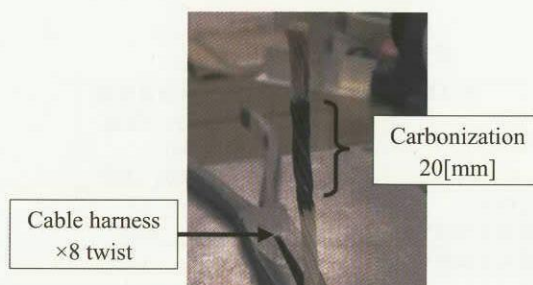


図9 炭化後の電力ハーネス

(2) 燃焼容器

図10に電力ハーネス燃焼容器の外観を示す。

燃焼容器は密閉構造になっており、シールにはカプトンテープを使用している。容器壁面には、焼損ガスが噴出するためのオリフィス穴 ($\phi 2.0[\text{mm}]$) が開いている。

容器は外形 $W100[\text{mm}] \times D150[\text{mm}] \times H40[\text{mm}]$ のアルミ製で、焼損の様子を観察するため、一面に透明アクリル板を使用している。

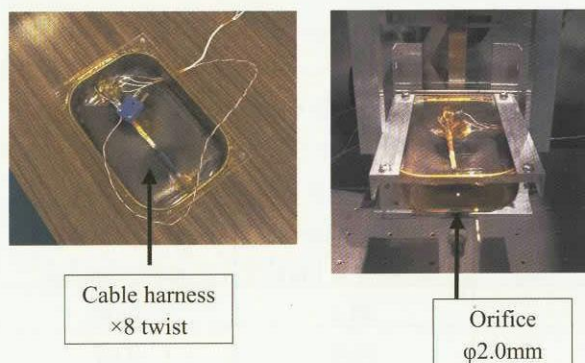


図10 燃焼容器

(3) 推力計測装置

図11に推力計測装置を示す。 $[\text{mN}]$ オーダの微小推力を計測することを考慮して、推力測定装置は振り子式を採用した。燃焼容器のオリフィス穴からガスが噴出し、振り子の軸に直角方向に力が作用して振り子が傾く。角度が十分小さい場合、角度は変位に近似出来る。この変位を計測し、あらかじめ重りを使って作成した校正カーブにより変位を力に換算する。使用したギャップセンサの計測範囲は $0 \sim 4[\text{mm}]$ で、実際の振れ幅は、試験結果より $1 \sim 2[\text{mm}]$ 程度であった。

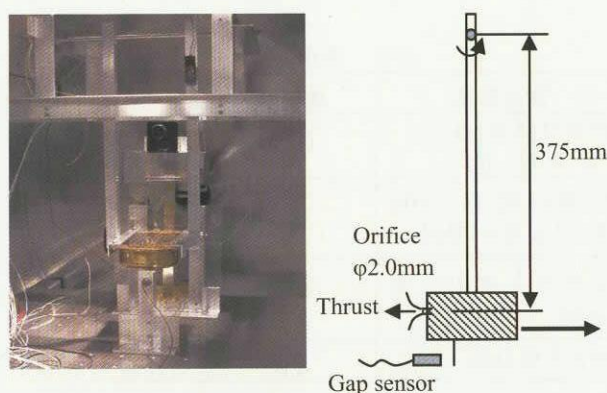


図11 推力計測装置

図12に校正方法の概略図を示す。真空環境下で電力ハーネス燃焼容器の振れ方向に重り (鉛: $0.2[\text{g}]$) を1個ずつ (計6個) 与え、各荷重に対する変位を計測し、校正カーブを作成する。重りの量 (数) は、下部のゴンドラをモータで上下させ操作した。ハーネスの設置位置等により条件が異なるため、校正は焼損実験毎に行った。

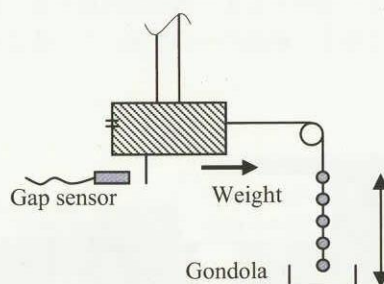


図12 校正方法

(4) 電力供給系

図13に電力供給系の概略図を示す。AC200V入力電源をスライダックでAC100Vに降圧し、保護回路を通して、供試体に入力した。また、焼損時のハーネス通電状態をモニターするために電流プローブを設置した。

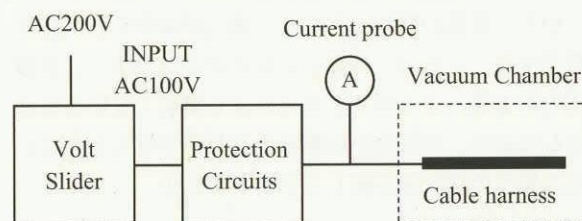


図13 電力供給系概略図

【試験手順】

試験手順の詳細を以下に示す。

- 供試体の焼損前質量を計測する。
- 供試体ハーネスを推力計測装置に設置し、真空槽を真空引きする。(真空到達度 $1[\text{Pa}]$ 程度)
- 校正カーブを作成する。
- 真空ポンプを停止する。
- 供試体に電圧を印可し、ハーネスを短絡/焼損させ、データを取得する。
 - 推力 (変位)
 - 電流
 - 真空槽内真空度
 - 焼損部近傍のハーネス表面温度
- 隣接するハーネス同士が完全に導通したら、通電を停止し、真空槽を大気圧に戻す。
- 供試体の焼損後質量を計測する。

3.3 焼損ハーネス長の推定

(1) 焼損ガスによる推力計測

図14に短絡／焼損後の電力ハーネスの外観を示す。炭化した被覆材を介して電流が流れ、ハーネスが高温になることにより被覆材のガス化・焼損が進行する。この時に溶け出した銅が隣接したハーネスに接触して、ハーネス間で完全に導通するまで焼損が持続する。焼損後は被覆材が無くなり、銅線の一部も溶けていることが観察された。



図14 焼損後の電力ハーネス外観

図15に焼損ガスによる推力計測結果を示す。上段が推力、中段が電流、下段が真空槽内圧力の時間変化を示している。放電の開始とともに、推力が発生し、真空度が低下する。これは、放電とともにガスが発生し、容器内圧力が上昇、ガスがオリフィスより噴射していることを示しており、ADEOS-II軌道上不具合で考えられている推力発生状況を模擬していると考えられる。

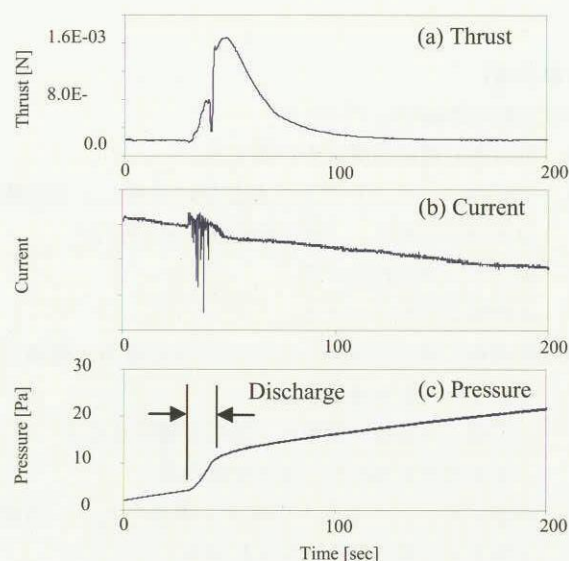


図15 焼損ガスによる推力計測結果

(2) ガス噴出速度の算出

推力計測結果から、力積 I [Ns] を見積もり、焼損前後の電力ハーネス質量変化 Δm [kg] からガス噴出速度 u [m/s] を算出した。

$$u = I / \Delta m \text{ [m/s]}$$

結果を表4に示す。計測結果の再現性を確認する目的で、同様の条件にて計5回計測を実施した。

ガス噴出速度は平均 75 [m/s] であり、この時の比推力は 7.6 [s] であった。ばらつきは大きいものの、およそのオーダを実験結果から得ることが出来た。

表4 ガス噴出速度

Test No.	Exhaust gas velocity u [m/s]	Burn out harness mass Δm [g]
①	93.4	0.08
②	35.0	0.07
③	125.5	0.15
④	54.3	0.09
⑤	66.6	0.06
Ave.	75.0	0.09

(3) 評価

不具合発生時に作用したと推定される約 4.9 [Ns] の力積がハーネス焼損によるものかどうか検討するためには、ガスの分子量、温度、ハーネス被覆材の温度に対する質量減少率を求め、ガスが発生したハーネスの長さを推定する必要がある。しかし、実際にこれらのパラメータを特定すること困難である。そこで、実験で得た結果から、焼損した被覆材の質量を見積もり、試験結果の妥当性について評価を行った。表5に推定条件を示す。

表5 推定条件

関連諸量	条件値	備考
被覆材質量 [1本, 1m 当り] [g]	0.82	計測値
被覆材質量 [104本, 1m 当り] [kg]	0.09	計測値[1本] × 104
推定ガス噴出速度 [m/s]	75.0	計測値
推定力積 [Ns]	4.9	解析値

ハーネス被覆材の焼損により、4.9[Ns]の力積が発生し、その際のガス噴出速度が75[m/s]であると仮定すると、焼損した被覆材の質量は0.07[kg/m]と見積もられる。焼損したハーネスの長さに換算すると77[cm]となり、オーダは想定される範囲内である。表6に推定結果を示す。

表6 推定結果

関連諸量	算出結果
推定焼損被覆材質量 [kg]	0.07
推定焼損ハーネス長 [cm]	76.8

以上の推定結果を受け、考えられる誤差要因について考察した。本計測系で推定される誤差要因を以下に示す。

a) 推力計測装置摺動部の摩擦力

推力計測装置は振り子式であるため、構造上、摺動部に摩擦力が発生する。摩擦力も含めた系で重り校正を行っているが、発生する摩擦力は毎回同様でないため、計測誤差が発生する可能性がある。

b) 力積計算値の誤差

焼損時にハーネスの銅線の一部が溶け、密閉容器内に分散する為、焼損前後で密閉容器の重心位置が変わり、ギャップセンサ出力のゼロ点が僅かながらシフトする。このゼロ点シフトによる力積計算値の誤差が考えられる。

c) 真空槽の背圧

本実験では密閉容器の内部圧力を計測しておらず、推力発生時の容器内外の圧力差を把握出来ていない。この為、背圧による影響を考慮していない。また、軌道上では周囲の真空度のオーダが違うため、被覆材の焼損の仕方が異なることも想定される。

4 結 言

ADEOS-II の発生電力低下時に観測された衛星姿勢、軌道変化は、太陽電池ブーム部の電力ハーネス被覆のガス化／噴出が原因であるというシナリオが想定された。このシナリオの妥当性を確認するため、平均分子量論に基づく推定と直接推力測定法に基づく推定の2つのアプローチを用いて、推力の解析、焼損ハーネス長さの推定を行った。これらの結果に基づいて、オーダ的に、本解析で推定した程度のハーネス長が損傷をうけることは別途実施された多数回路波及試験の結果を考慮しても、十分有り得る範囲であり、発生電力低下時に、ハーネス被覆材がガス化して、宇宙空間に噴出し、衛星に力が作用したというシナリオは妥当と考えられる。

参 考 文 献

1) 草間, 長田, 後藤, 香河, 川北, 小島, 梶原, 河内 : 電力ハーネス焼損発生ガスによる推力の計測, 1E06, 第48回宇宙科学技術連合講演会, 福井, 11月4日~6日, 2004.