

2E19 デブリ除去用導電性テザーの温度評価とローレンツ力への影響について

○古賀悠斗（早稲田大学），河本聡美（宇宙航空研究開発機構），森野美樹（早稲田大学）

Temperature of electro dynamic tether for space debris removal and its effect on Lorentz force
Yuto Koga (waseda university), Satomi Kawamoto(JAXA), Yoshiki Morino (waseda university)

Key Words: Electrodynamics tether, Lorentz force, temperature of tether, thermal optical property

Abstract

Electrodynamics tether (EDT) systems is expected as an effective system for deorbiting space debris. EDT systems is a high efficiency propulsion system using the Lorentz force generated by the interference with the earth's magnetic field and the current through the tether. The conductivity of the tether varies with temperature of tether in orbit, and it affects the Lorentz force that EDT systems can generate. Tether temperature in orbit depends on the thermal optical property. However, the shape of tether is not suitable for the measurement of absorptivity and emissivity, and the temperature prediction is difficult. In this study, four types of tether were set in a solar simulation chamber, and the equilibrium temperature of tether was measured by a thermocouple. And then numerical simulations of EDT in orbit were performed using the absorptivity and emissivity of the tether estimated by the experiments.

1. 研究背景および目的

スペースデブリ（以下「デブリ」）とは、地球周回軌道上にある不要になった人工物体の総称である。かつて、その数は少なかったために存在が注目されることはなかったが、近年、衛星やロケット上段機体の衝突や爆発等によりその数は増加の一途をたどっており、低軌道約 10cm 以上、静止軌道約 1m 以上のデブリだけで 20000 個以上存在する。特に 2009 年に起きたアメリカの通信衛星 Iridium33 とロシアの軍用通信衛星 CosmoS2251 の衝突事故などによりその数は急増している。このような衝突によるデブリの増殖は、今後衛星の打ち上げを行わないとしても、止まることはないと予測されており、デブリの能動的除去は、宇宙開発にとって必要不可欠となっている¹⁾。

宇宙航空研究開発機構(以下 JAXA)では、デブリ除去方法として導電性テザーシステム (Electro Dynamic Tether system, EDT system) が研究されている²⁾。テザーとは金属の紐のことであり、地球磁場を横切るように移動させることで電位差が生じ、テザー内に電流が流れる。そして再び、地球磁場と電流が干渉することによって、EDT システムの周回方向と逆方向にローレンツ力が発生する (図 1)。この

ローレンツ力によりデブリの持つ周回速度を減速させ、デオービットさせることが可能である。

導電性テザーは軌道上において高真空と日照や日陰といった環境に遭遇し、テザー温度が高温になると、電気抵抗が増大し、電流が流れにくくなり、ローレンツ力が低下する恐れがあるので、テザー推力を正確に算出するためには、軌道上の熱輻射環境に置かれたテザー温度を見積もる必要がある。太陽光吸収率と赤外放射率は、軌道上におけるテザー温度を算出するための重要なパラメーターである。しかし、太陽光吸収率測定装置及び垂直赤外放射率測定装置は、反射光を測定するため、平面以外の形状での計測は難しく、テザーの熱放射特性の測定には不向きである。そこで、本実験では真空チャンバ内にテザーを設置し、疑似太陽光を当て、テザーの温度を測定し、太陽光吸収率と赤外放射率の比を算出する。そして、数値シミュレーションにより、日陰や日照といった環境下でのテザー温度変化や得られるローレンツ力を見積もり、テザーの種類毎で比較を行う。

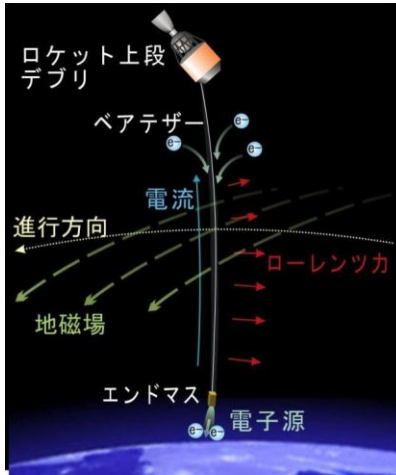


図 1 導電性テザーの原理

2. 対象とする導電性テザーの種類

本研究で対象とする導電性テザーは図 2 の一番下のような網状のテザーである。網状構造であるため冗長性が高く、被覆がないことで周辺プラズマから直接電子を収集できるため、電子収集機を用いるよりも軽量かつシンプルな構造になっている²⁾。テザーは、アルミワイヤ及び、ステンレス繊維を撚った子糸をさらに撚って編糸とし、その編糸 3 本から構成されている。アルミワイヤは導電性、ステンレス繊維は強度を持たせる役割を担っている (図 2 AL-SUS 被膜無しテザー)。このテザーを含む、HTV 搭載実証実験及びデブリ除去試験衛星を用いたミッションで使用予定の 4 種類を実験の対象とした。HTV 搭載実証実験では、振動等によりアルミワイヤとステンレス繊維が擦れ、その部分が凝着し伸展停止することを未然に防ぐために、AL-SUS 被覆無しテザーに固体潤滑剤である、二硫化モリブテン (以下 MoS_2) 系導電性焼成膜を施したテザーを使用している (図 2 AL-SUS+ MoS_2 焼成膜テザー)。このテザーはテザーの両端以外の大部分に使用されている。両端 10[m] ずつは非導電性でありのポリテトラフルオロエチレン (以下、PTFE) 系焼成膜を施したテザーを使用している (図 2 AL-SUS+PTFE 焼成膜テザー)。デブリ除去試験衛星ミッションでは、テザーは数 km~数十 km を予定しており、張力が増加するため、ステンレス繊維の代わりに比強度の高いアラミド繊維を使用している (図 2 Al-Alamid 被覆無しテザー)。

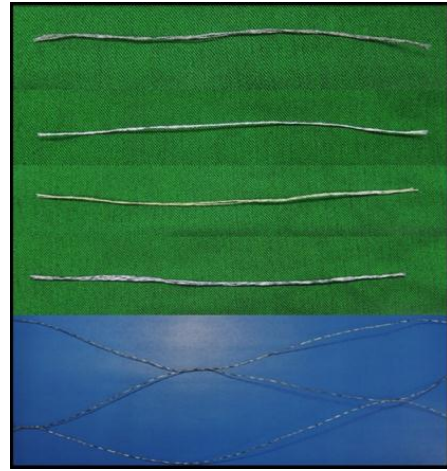


図 2 導電性テザー

(上から AL-SUS+ MoS_2 焼成膜テザー, AL-SUS 被膜無しテザー, AL-SUS+PTFE 焼成膜テザー, Al-Alamid 被膜無しテザー, 網構造を示すための写真)

3. テザーの擬似太陽光照射試験

3.1 テザーの温度計測実験

3.1.1 実験概要

真空度 1.0×10^{-4} [Pa], 温度 100 [K] 以下に冷却された真空チャンバ内に AL-SUS 被膜無しテザーと AL-SUS+ MoS_2 焼成膜テザーを以下の 3 点を踏まえ、図 3 に示すように配置した。

- ・ テザー間の輻射の影響を低くするために、並べてテザーを置かないようにする。
- ・ テザーからフレームへの伝熱の影響を低くするため、極細のケーブルで固定する。
- ・ 熱電対は、直接擬似太陽光の温度を直接測定することを避けるため、テザー直径より小さい極細シース熱電対を用い、テザーに這わせて取り付け (図 4)。

そして、テザー全体に 1 ソーラー (照射強度 1.4 [kW/m²]) の擬似太陽光を当て、日照環境を模擬し、テザーの平衡温度を極細シース熱電対により直接測定した。

3.1.2 実験結果・考察

擬似太陽光を照射して温度が上昇し、平衡に達するまでのテザー温度履歴を図 5 に示す。そして、擬似太陽光の直接輻射熱とテザーからの放熱量の熱平衡式(1)から、テザーの太陽光吸収率 α と赤外放射率 ε の比を算出した。その結果を表 1 に示す。

$$\frac{\alpha}{\varepsilon} = \left(\frac{A_r}{A_s} \right) \left(\frac{P_s}{\sigma} \right) T^4 \quad (1)$$

テザーの照射面積と放熱面積の比 A_r/A_s , 太陽光照射

強度 $P_s [W/m^2]$, Stefan-Boltzmann 定数 σ , 測定したテザー温度 $T [K]$ とする。

AL-SUS+MoS₂ 焼成膜テザーは, AL-SUS 被膜無しテザーより平衡温度が低いため, α/ε が小さいということがわかった. また, AL-SUS+MoS₂ 焼成膜テザーの方が温度上昇が早い, テザーの熱容量には差がないと考えられるため, AL-SUS+MoS₂ 焼成膜テザー α, ε は, それぞれ AL-SUS 被膜無しテザーの α, ε より大きいと考えられる.

このようにテザーの平衡温度を測定できたが, 熱電対やケブラーからの伝熱を考慮したテザーの平衡温度を測定するために, 次項のような実験を行った.

表 1 テザー温度及び太陽光吸収率 α と赤外放射率 ε の比

	テザー温度[°C]	α/ε
AL-SUS 被膜無しテザー	71.8	1.80
AL-SUS+MoS ₂ 焼成膜テザー	59.7	1.56

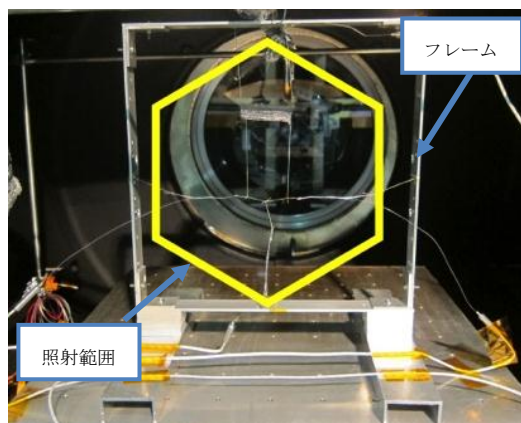


図 3 実験装置の外観

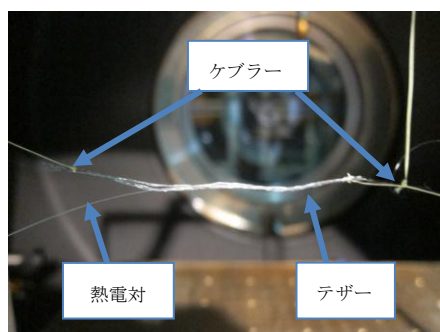


図 4 熱電対固定の様子

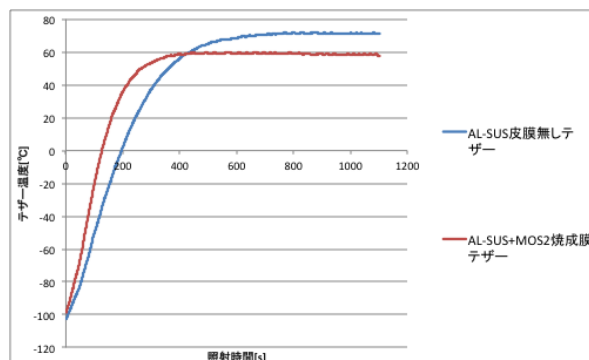


図 5 テザー温度の時間履歴

3.2 テザーの温度計測実験 (輻射の影響を考慮)

3.2.1 実験概要

熱電対とケブラーからの伝熱を考慮したテザーの平衡温度を測定するため, 図 6 のようにテザー 1 本に対して熱電対 1, 2 本, ケブラー 1, 2 本を取り付け, 比較した. さらに, 図 5 より AL-SUS+MoS₂ 焼成膜テザーと AL-SUS 被膜無しテザーの温度差は約 10[°C]であることから, テザー間での熱のやりとりは擬似太陽光からの入熱量の約 3%と影響が低いので, 0.03[m]毎にテザーを 6 本配置した. 実験では, 2 を対象とした 4 種類のテザーを対象とする. その他, ケブラーの取り付けや熱電対の固定, 擬似太陽光の照射範囲は 3.1 と同様の方法でテザーの平衡温度の測定を行った.

3.2.2 実験結果・考察

本実験で得られたテザーの平衡温度を図 7~図 9 に示す. そして, 3.1.2 と同様, 太陽光吸収率 α と赤外放射率 ε の比を算出し, その結果を表 2 に示す.

図 7 が示すように, 3.1.2 同様, 固体潤滑剤を施すことで, テザーの平衡温度が抑えられること及び, 温度上昇が早いことが分かった. さらに, Al-Alamid 被覆無しテザーは, 金属のみで構成されている AL-SUS+MoS₂ 焼成膜テザーや AL-SUS 被膜無しテザーよりも α/ε が小さく, 温度が低くなった. 図 8, 図 9 が示すように, ケブラーや熱電対からの伝熱による温度差はわずかに見られた. そこで, 擬似太陽光の直接輻射熱及びテザーからの放熱量, ケブラー及び熱電対からの伝熱量とテザー間の輻射伝熱量の熱平衡式から温度補正を行った. ケブラーと熱電対からの伝熱量は, ケブラー及び熱電対の仕様の値とチャンバ内の温度約-173[°C]を用いて計算を行った. α/ε のみ分かっていたので, $\alpha=0.1\sim 0.9$ と仮定し, ε を算出し計算を行った. その結果, 約 44~78[°C]に真のテザー温度があると考えられる (図 10).

表 2 テザー温度及び太陽光吸収率 α と赤外放射率 ε の比

テザーの種類	テザー温度[°C]	α / ε
AL-SUS 被膜 無しテザー	91.6	2.25
AL-SUS+MoS ₂ 焼成膜テザー	63.7	1.60
AL-Alamid 被膜 無しテザー	46.0	1.32
AL-SUS+PTFE 焼成膜テザー	36.9	1.17
AL-SUS+MOS2 焼成膜テザー, 熱 電対 2 本時 (右)	51.2	1.41
AL-SUS+MOS2 焼成膜テザー, 熱 電対 2 本時 (左)	57.4	1.52
AL-SUS+MOS2 焼成膜テザー, ケ ブラー 2 本	61.9	1.61

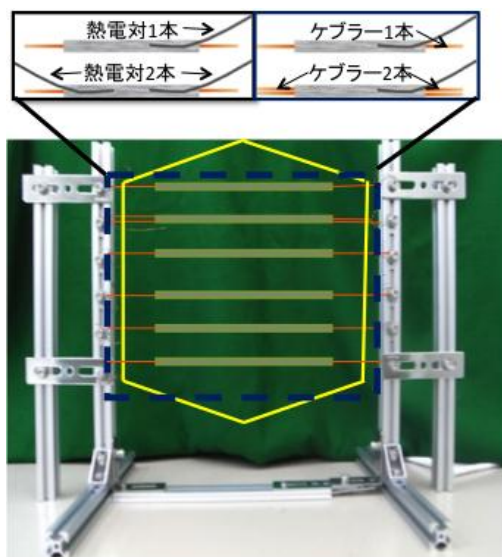


図 6 実験装置の外観

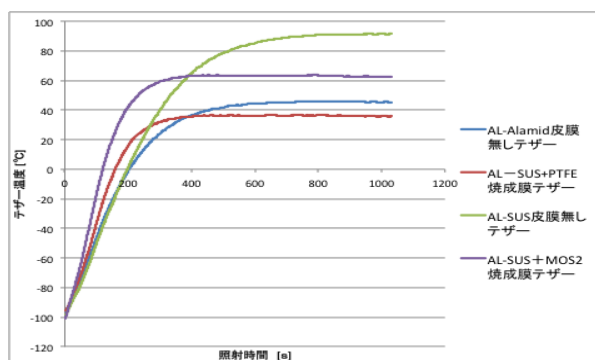


図 7 テザー温度の時間履歴 (テザー4種類の比較)

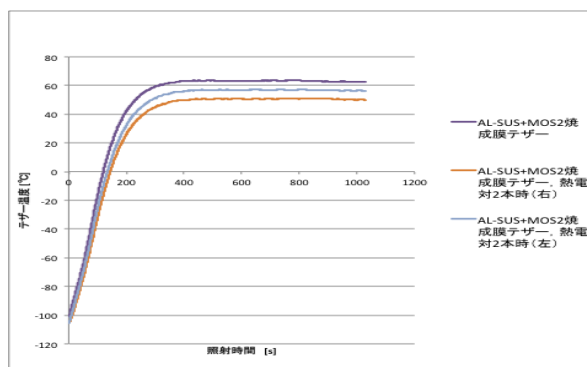


図 8 テザー温度の時間履歴 (熱電対からの伝熱による温度比較) (注) 右と左の熱電対で温度差があるのは右の熱電対は照度計の影になった可能性があるため, テザー温度が低く測定された. いずれにしろ熱電対による温度変化は 6~10 [°C] 以内である.

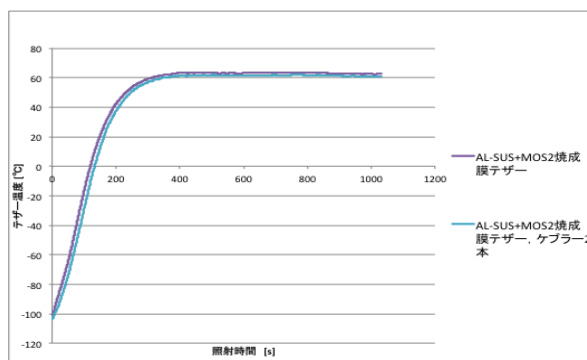


図 9 テザー温度の時間履歴 (ケブラーからの伝熱による温度比較)

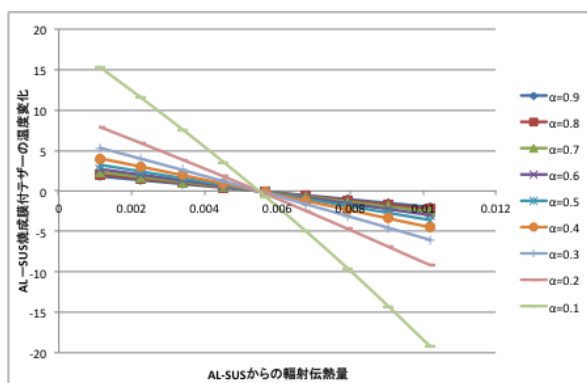


図 10 AL-SUS+MoS₂ 焼成膜テザーの補正予想温度

4. 数値シミュレーションによるテザーの温度とローレンツ力の推定

実験では 1 ソーラー照射時のテザーの平衡温度を計測したが, 軌道上では熱輻射環境が変化する. そこで, 軌道周回中におけるテザー温度やローレンツ力を確認するため, 実験で算出した太陽光吸収率 α と赤外放射率 ε を軌道上での導電性テザーシステム

作動シミュレーションに反映させ、軌道上でのテザー温度やローレンツ力を確認する。

4.1 導電性テザーシステム作動シミュレーション

本シミュレーションは軌道上でのテザー伸展完了後の導電性テザーシステム作動を模擬している。テザーモデルには柔軟性を模擬するために離散質点を用い、質点間はバネとダッシュポッドで接続されたものとする⁹⁾(図 11)。導電性テザーの熱輻射環境には、太陽輻射、アルベド、地球赤外輻射、ジュール熱、電子収集による発熱、空力加熱を考慮した(図 12)。

2015年に予定されている HTV 搭載実証実験での条件に加え、2019年に打ち上げを目標に研究しているデブリ除去試験衛星でのミッションの条件(表 3)を用いてシミュレーションを行う。

表 3 数値シミュレーションに用いたパラメーター

		HTV 搭載実証実験の条件	デブリ除去衛星の条件
軌道	長半径 [km]	6778	7178
	軌道傾斜角 [km]	52	98
親衛星	質量[kg]	13000	3400
エンドマス	質量[kg]	19	350
テザー	長さ[m]	700	10000
	質点数[-]	21	
	熱抵抗[°C/W]	60	
	熱伝導率 [W/(m・K)]	147.386	
	比熱[J/g・K]	863.71	
	熱膨張率[-]	0.000025	
	最大電流[A]	0.01	1.0

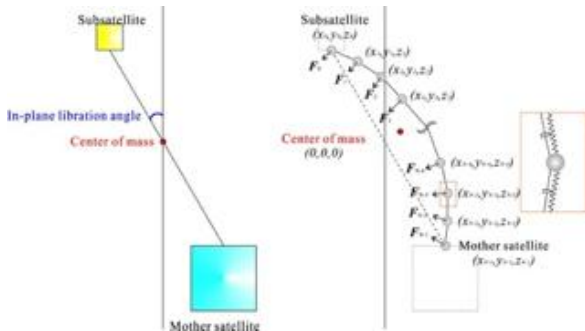


図 11 数値シミュレーションモデル

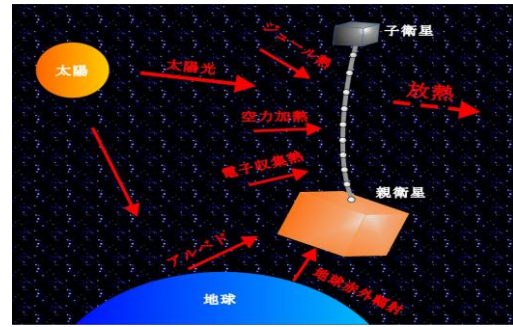


図 12 導電性テザーの置かれる環境

4.2 シミュレーション結果・考察 (HTV 搭載実証実験での条件)

これまでの研究では、テザーの太陽光吸収率 α 及び赤外放射率 ε は、アルミニウム板やステンレス板の α 、 ε ⁵⁾を用いて表面積比から算出し、 $\alpha=0.497$ 、 $\varepsilon=0.163$ と仮定していた。以下、これらを AL-SUS 被膜なしテザー理論値と呼ぶ。本項では 3.2.2 の実験結果より AL-SUS+MoS₂ 焼成膜テザーの α 及び ε を $\alpha=0.900$ 、 $\varepsilon=0.562$ と仮定し、上述の AL-SUS 被膜なしテザー理論値の場合のテザー温度、発生するローレンツ力と比較を行う。

テザー温度の時間履歴とローレンツ力平均値の時間履歴を図 13、図 14 に示す。図 13 から、周期毎に日陰になると温度が下降し、日照になると温度が上昇していることが分かる。3.1.2 同様、軌道上においても潤滑剤を施すことによりテザー温度が抑えられた。これは理論値を算出する際、アルミニウム板やステンレス板それぞれの α と ε の参考値を使用しており、比較的の高い α/ε を見積もっていたためである。しかし、HTV 実験では、最大電流が 0.01 [A]と小さいため、発生するローレンツ力はほとんど変わらないことが分かった。

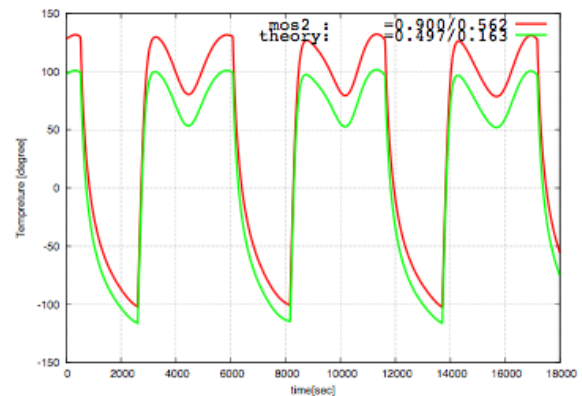


図 13 テザー温度の時間履歴 (MoS₂ AL-SUS+MoS₂ 焼成膜テザーと theory : AL-SUS 被膜なしテザー理論値で比較)

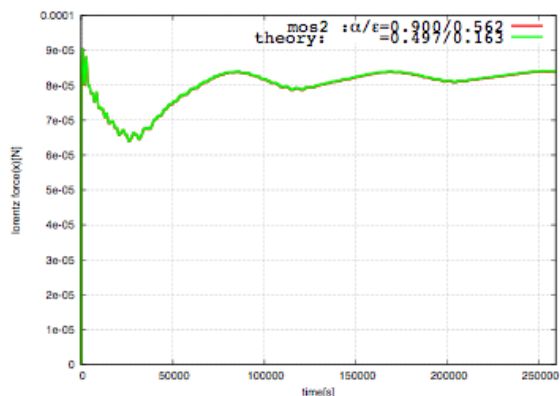


図 14 ローレンツ力平均値の時間履歴 (AL-SUS+MoS₂ 焼成膜テザーと AL-SUS 被膜無しテザー理論値で比較)

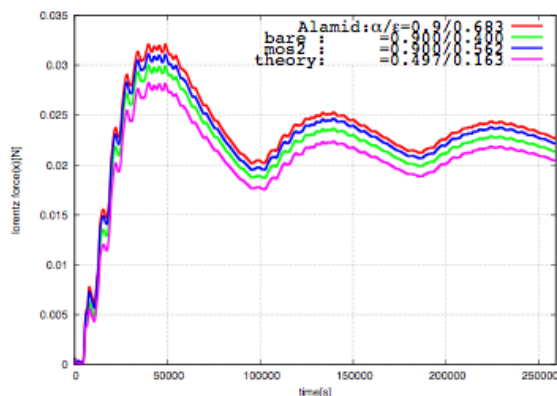


図 16 ローレンツ力平均値の時間履歴 (4 種類のテザーで比較)

4.3 シミュレーション結果・考察 (デブリ除去試験衛星を用いたミッションでの条件)

本項では、4 種類のテザーのテザー温度とローレンツ力を比較するため、AL-SUS+MoS₂ 焼成膜テザー、AL-SUS 被膜無しテザー、Al-Alamid 被膜無しテザー、AL-SUS 被膜なしテザー理論値をシミュレーションの対象とした (仮定した α , ϵ は図 15 参照)。

テザー温度の時間履歴とローレンツ力平均値の時間履歴を図 15, 図 16 に示す。3.2.2 同様、軌道上においても潤滑剤を施す事によりテザー温度が抑えられた。ステンレス繊維からアラミド繊維に変更することで、テザー温度がさらに抑制され、Al-Alamid 被膜無しテザーがローレンツ力を最も発生できることが分かった。

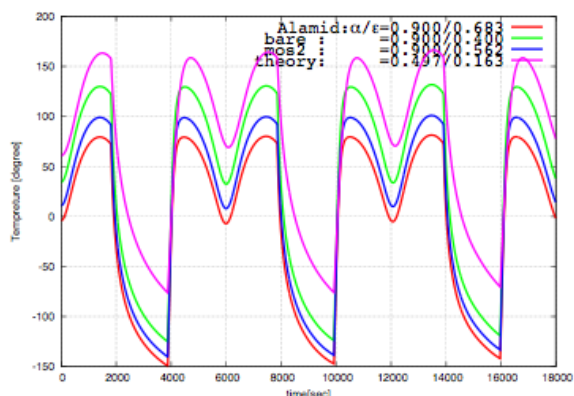


図 15 テザー温度の時間履歴 (MoS₂: AL-SUS+MoS₂ 焼成膜テザー, bare: AL-SUS 被膜無しテザー, Alamid: Al-Alamid 被膜無しテザー, theory: AL-SUS 被膜なしテザー理論値で比較)

5. 結論

導電性テザーの真空チャンバ内でのテザー温度計測実験により、テザー温度を測定し、太陽光吸収率 α と赤外放射率 ϵ を算出した。そして、数値シミュレーションより軌道上でのテザー温度とローレンツ力を見積もった。その結果、HTV 搭載実証実験では、AL-SUS+MoS₂ 焼成膜テザーの方が、テザー温度を抑えられることが分かった。しかし、得られるローレンツ力はさほど変わらなかった。デブリ除去試験衛星を用いたミッションでは、Al-Alamid 被膜無しテザーが最もテザー温度を抑えることができ、ローレンツ力を最も発生できることが分かった。

今後の課題として、本シミュレーションは、太陽光吸収率 α と赤外放射率 ϵ の比から想定した α 及び ϵ をシミュレーションに反映していたため、 α か ϵ どちらかを測定する実験を行い、より正確な軌道上でのテザー温度やローレンツ力を見積もる必要がある。

参考文献

- 1) 河本聡美, 木部勢至朗(JAXA), 他: デブリ除去衛星の必要性について. s.l.: 第 55 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 2011. JSASS-2011-4317
- 2) Y, Ohkawa, S, Kawamoto, M, Higashide, et al: ELECTRODYNAMIC TETHER PROPULSION FOR ORBITAL DEBRIS DEORBIT, The Journal of Space Technology and Science, vol.26, No.1, P33-46, 2012.
- 3) 衛星設計コンテスト実行委員長 斉藤成文: 衛星設計コンテスト技術資料, p53-58,1994
- 4) Kawamoto, S, Makida, T, et al.: Precise Numerical Simulations of Electrodynamic Tethers for an Active Debris Removal System, Acta Astronautica Volume 59 pp.139-148, 2006.