

第5回宇宙環境シンポジウム

平成20年12月18日(木)～19日(金) つくば国際会議場

The 5th Space Environment Symposium 18 (Thu) - 19 (Fri) December 2008 Tsukuba International Congress Center, Conference Room 101

小型衛星／観測ロケット実験による宇宙テザー実験

藤井裕矩(神奈川工科大学/日本大学)、水野敏弘(神奈川工科大学)、渡部武夫、佐原宏典(首都大学東京)、田中孝治(JAXA)

Experimental Study on Space Tether by a Sounding Rocket/Small Satellite

Hironori A. Fujii<sup>1), 2)</sup>, Toshihiro Mizuno<sup>1)</sup>, Takeo Watanabe<sup>3)</sup>, Hironori Sahara<sup>3)</sup> and Kohji Tanaka<sup>4)</sup>

1) Kanagawa Institute of Technology, Atsugi, Kanagawa, 2) Nihon University, 3) Tokyo Metropolitan University, 4) ISAS/JAXA

Abstract: This talk introduces some projects for space tether technology including a sounding rocket experiment deploying electro-dynamic tether with 300m length, YES II (Young Engineer Satellite II) with 31.7km tether, and a small satellite equipped with 30km tether. These space tether experiments will provide new methods to study space environment. Future of space tether technology is also introduced as “ free-lunch” Jovian tour, electro-dynamic re-boost, electro-dynamic tether de-orbit of satellite.

Key words: Space Tether, Electro-dynamic Tether, Sounding Rocket, Small Satellite, YES II

はじめに

宇宙テザー技術は宇宙新技術の一つであって、人工衛星同士をひもでつなぎ構造物を形成するシステムであり巻き取った状態で打ち上げ、軌道上で展開することにより大型宇宙構造物の要素となる。

このため、宇宙テザー技術は次のような特長を持つ、すなわち、1) 宇宙構造物に加わる重力は小さいため軽量で長大な構造物を構築できる；2) 打ち上げ時にコンパクトに巻き込むことが出来る；3) 圧縮には耐えられないが、引張りには強い構造物を構築することが出来る；4) スプールから巻き戻すことによって展開することが出来、自律的な構築が可能であり宇宙の人的資源の省力化につなげることが出来て、軌道上では、重力傾度により受動安定

が得られる、さらに、5) 我々のプロジェクトで用いているベア導電テザーでは、宇宙空間において電磁的な環境を人工的に生成し宇宙環境の受動的な観測のみならず、能動的に電離層やアルフヴェン波に働きかけることができる。



Fig. 1 Brief History of Tether Technology

多くのテザー技術による応用が NASA による宇宙ハンドブックで、空気力学研究、ミッションコンセプト、重力制御、導電技術、惑星ミッション、科学、宇宙ステーション、そして輸送といった多様な分野で見ることが出来る [1]。本稿では、このような宇宙テザー技術について実験的な検証の手法の紹介と、いくつかの応用例ならびに将来構想について述べる。

### 1. 宇宙テザー技術実証1：観測ロケット実験 [2]

導電テザーの初の実験として期待された ProSEDS はコロンビア事故のあおりを受けキャンセルされ、テザー技術の将来計画におけるミッシングリンクとなった (Fig. 1)。エレクトロダイナミックテザー (EDT) の作動には、テザーの一端から電子を放出し (今回はホロー・カソードを用いる)、他の一端から電子を収集してテザー中に電流を流す必要がある。ベア導電テザーによる電子収集には、テザーが周辺プラズマに対し正電位になることが必要であるが、観測ロケットの速度は小さいため、これによって引き起こされる誘電起電力は小さく、自然に電位が生じることは期待できない。したがって、ベア・テザーで電流を収集するためには搭載電源によりアクティブに 0.5kV 程度のバイアス電圧を加える必要がある。本理学実験では、このベア導電テザーによる宇宙での電子収集に加え、宇宙機の帯電など宇宙機設計に重要となる



Fig.3 International Tether Meeting (2007 August)

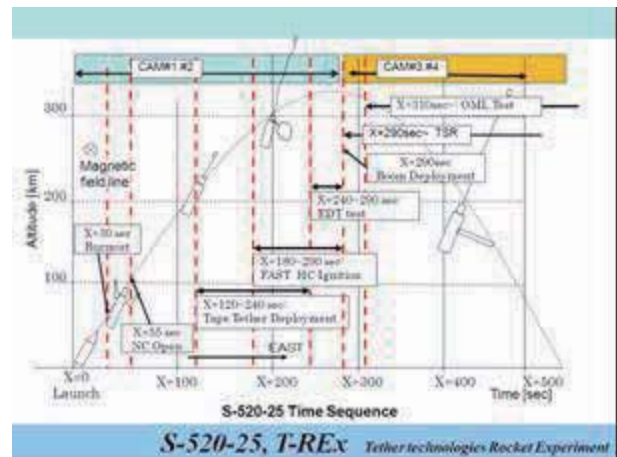


Fig.2 Time sequence of SR520-25

Orbital-Motion-Limit (OML) 理論などの荷電粒子収集理論の軌道上検証を行うものである。このような宇宙実験は米国を中心とした国際協力チームによって ProSEDS 計画のミッションにおいて行われる予定であったが、この計画がキャンセルされたことによって中止となった。このような実験は、短時間の観測ロケット実験によって行うことにより、宇宙ステーションなどの他の衛星との衝突の危険性を回避できる。そのため、今回行われる実験は世界初の実験となり非常に意義深いものであり、日本・米国・欧州・豪州の国際協力によって進められている (Fig. 3)。

本実験では両方とも導電性を持つブームとテープテザー、さらにホロー・カソードによるプラズマ・コンタクターを使い、それぞれフェーズ A と B としてテープに負と正のバイアス電位を与えるような 2 種類

の設定を行う (Fig. 4)。

観測ロケット実験は低価格、シンプルなミッション、短期間での実現性といった特長を持つテザー実験の理想的なデモンストレーションとなる。観測ロケット実験においては全体の飛行時間が20数分と極めて短いため高度300kmの弾道飛行における初期フェーズから、1. 迅速かつ高信頼性のテープテザーの展開、ならびに、2. ホロー・カソードの短時間での点火の技術が必要となり、十分な検討がなされている。

#### 観測ロケットにおける理学実験

理学実験はフェーズAとフェーズBの2種類が予定されており、各々以下のである (Fig. 4) :

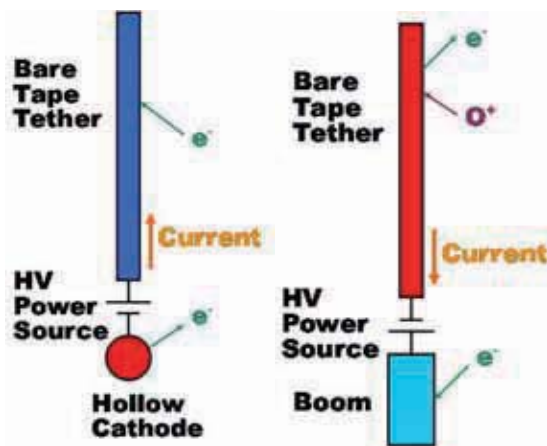


Fig.4 Science experiment on SR520-25

#### 理学実験1. ホロー・カソード (HC) による電子放出+ベア・テザーによる電流収集 (Phase B) : 導電テザー (EDT) 作動検証

ホロー・カソードから電子を放出し、ベアテープテザーにより電子を収集することで、テザーシステム周辺プラズマ間に電気回路を形成し、テザー中に電流が流れることを検証し、また、テザーに与える電圧に対する電子収集能力を評価するものであり、導電テザーの作動検証を行うことができる。

#### 理学実験2. ブームによる電子収集+テザーによるイオン収集 (Phase A) : OML (Orbital Motion Limit) 理論検証

決まった形状のテープテザーとブームを使用し、異なるプラズマ密度の高度 (異なるデバイ長) において、一方に正、一方に負の異なる電圧を与えることで、プローブ代表長とデバイ長の異なる状況で、電子電流収集、イオン電流収集に関して広範囲にデータ収集することによって、電子収集理論の広範囲の検証を行うものである。



Fig.5 YES2 (Young Engineers' Satellite 2)

#### 2. 宇宙テザー技術検証 2: YES 2 (Young Engineers' Satellite 2) による 31.7km テザー展開

Young Engineers' Satellite (YES2) が2007年9月25日にFoton-M3の微小重力プラットフォームのピギーバックとして打ち上げられた (Fig. 5)。これは32kmのテザーを制御しながら展開するものであり、人類が宇宙に打ち上げた宇宙構造物として最長のものとなり世界記録を樹立した。YES2の目的はFotinoと呼ぶ球状の再突入カプセルを再突入軌道に正確に投入することであった。

これは宇宙メール (SpaceMail)、国際宇宙ステーション (ISS) からのサンプルを回収する構想、のデモンストレーションである。飛行実験データからこのテザーの展開はほとんど成功したことがわかり、カプセルは気象条件のためまだ発見するこ



とは出来ないでいるが、Fotinoの着陸点は決定することができている (Fig6)。

YES2 は欧州主導型の日・米・欧・豪の国際協力による宇宙実験であり、欧州にとっては初の宇宙テザーの展開実験として重要な意義を持っており、テザー実験としての項目はすべて達成することができた。この展開のおもな新しい特長は鉛直に展開し、制御して展開を止め、その後切り離して再突入軌道に投入する点である。いくつもの安全設計を実装することによって宇宙環境で運用における非常に高い信頼性を確認することが出来た。さらに、データ解析によって適切な展開性能を実証できて、シミュレーションと地上実験の信頼性を証明することもできた。また、宇宙環境の下でのテザーの特性と共振などの振動特性について新しい知見が得られた。このようなミッションの結果によって多くの種類の将来テザー技術の応用に道を開くことができたし、また、ESA の教育部門の活動の一部として欧州・ロシア・日本・豪州・カナダ・米国からの若い技術者や学生が参加し、この衛星とこれに応用された新しい技術を十分に展開し実証することができた。

### 3. 宇宙テザー技術の検証 3: 小型衛星実験

小型衛星実験は MV の後継機を用いて全体重量 400kg の衛星を高度 600km の傾斜角  $31^\circ$  の軌道に挙げ全長 22km の非導電部と全長 3km の導電部からなるテザーを展開させるもので 2011 年打ち上げとして現在提案中である。

この検証のミッション内容は、1) テザー展開・収納技術の実証、2) 導電テザーによる非線形 Alfvén 波の発生・観測実験 (Fig.7)、3) 導電テザーを起源とする高エネルギー電子ビームによる人工オーロラ生成実験、4) モーメントム・テザーによる軌道上昇実験 (Fig.8)、5) エレクト

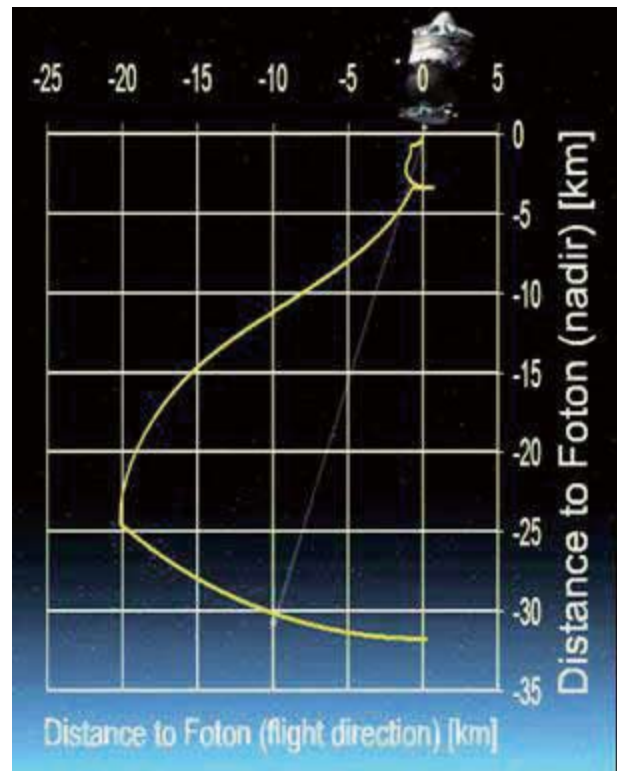


Fig.6 Flight result of YES2

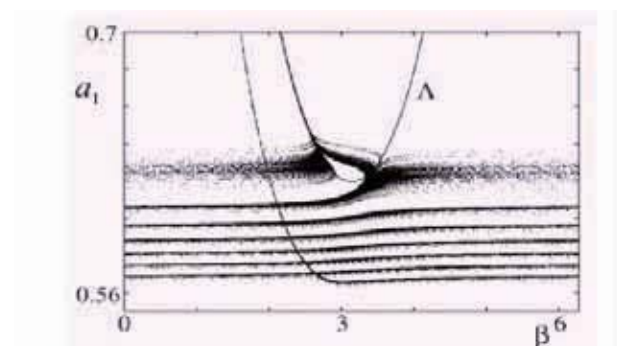


Fig.7 Nonlinear Alfvén Wave

ロ・ダイナミック・テザーによる軌道変換実験であり実験項目は 10 種類である。

このうちミッション 2) 理学実験では宇宙で導電テザーを用いると非線形アルフヴェン波を生成させ制御できる (Fig.7)。このため非線形波動の振る舞いを直接観測する極めて有効な研究手段を与えることが出来る。

また、ミッション 4) は工学的な実証であって、実用的な利点からも大いに有用

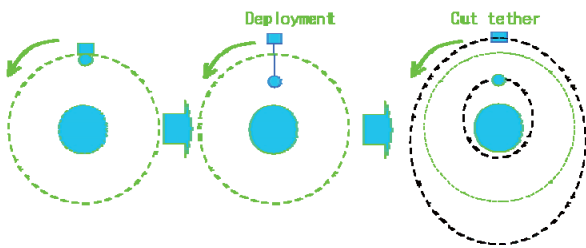


Fig. 8 Engineering Mission

性が期待されているテザー技術を用いて推進燃料を使わない軌道上昇を図る手法である (Fig. 8)。

#### 4. いろいろな宇宙テザーの将来計画

##### テザー技術の応用 1: 小惑星サンプルリターン計画

小惑星探査において、テザーを使うことによって、小惑星からサンプルを引き抜く "はやぶさ Mk2" に向けてのテザードサンプラーのアイデア探査機本体の安全を確保できるサンプリング手法である (Fig. 9)。3次元解析・実験のために航空機を用いた弾道飛行による微小重力実験を2007年に実施してその有効性を検証しており、特性の詳細が不明な小惑星表面から30cmの深さで層状を保った資料を採取するため日本刀など伝統技術を応用した技術を研究中である。

##### テザー技術の応用 2: テザー型太陽発電衛星

太陽発電衛星は宇宙空間で太陽光発電を行い、二酸化炭素を発生しないクリーンな発電システムで更に地上とは違って天候や時間帯によって左右されることなく発電しほぼ無尽蔵なエネルギー供給可能という特徴がある (Fig. 10)

##### テザー技術の応用 3: 導電テザー推進

テザー上に流れる電流と地球磁場との干渉によるローレンツ力を推進に利用



Fig. 9 Tethered sampler

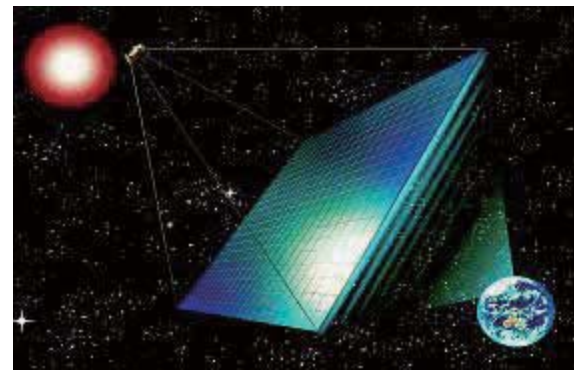


Fig.10 Tethered Space Solar Power Satellite (USEF)



Fig.11 Tethered International Space Station

すると推進剤消費が極めて少ない高比推力な推進システムを構成することが出来、

20km 導電テザーを用いた宇宙ステーションの軌道維持 (Fig. 11) や、デブリ除去 (Fig. 12) などに大いに有効となることが期待されている。



Fig.12 ED Tether Deorbit of Satellites  
テザー技術の応用将来 4: 木星ツアー

木星大気への突入に際して導電テザーを回転させ、木星の衛星 Callisto, Ganymede, Europa, そして Io の連続探査を燃料を使わないで、“Free - Lunch”、行うことが出来る (Fig. 13)。

#### まとめ

宇宙テザー技術の検証実験、また、宇宙テザー技術の応用例、さらに、将来計画として導電テザーによる軌道制御などを紹介した。これら宇宙テザー技術は、低価格で実現でき、そのミッションはシンプルであり、かつ、短期間で実現できる。さらに、理学の面では新発見につながる学術成果が期待され、工学の面では技術的なブレイクスルーが期待される、ProSEDS が残したミッシングリンクを補完する理工学両面で重要な技術検証になる。

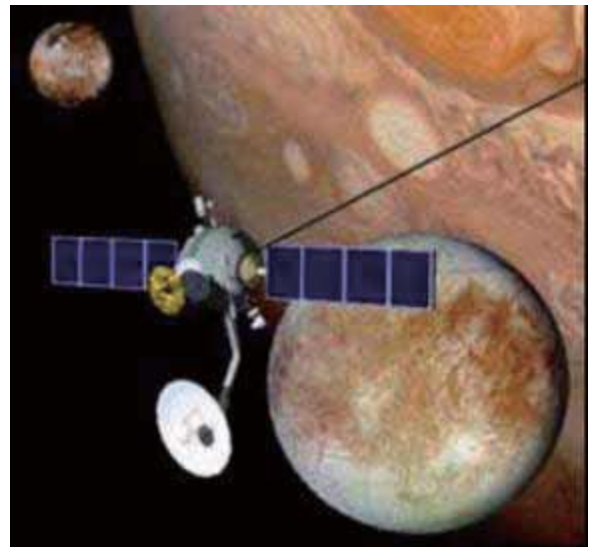


Fig.13 ED Tethers for Jupiter Tour

この宇宙テザー技術は我が国が国際的なリーダーシップをとりうる極めて重要な宇宙技術であり、トップサイエンス、そして、トップテクノロジーを標榜することの出来るものである。

これらの宇宙実証により、宇宙環境における新しい発見が予見されており、今後の進展が大いに期待されるものであり、関係学者の積極的な参加が望まれる。

#### 参考文献:

- 1) H.A.Fujii, “New Space Technology: 1km Tether to 100,000km Space Elevator,” The International IPSI-2004 Conference, Opening Keynote Speech, Montenegro, October 2- 9, 2004.
- 2) H. A. Fujiia, T. Watanabe, H. Kojima, K-I. Oyama, T. Kusagaya, Y. Yamagiwa, H. Ohtsu, M. Cho, S. Sasaki, K. Tanaka, J. Williams, B. Rubin, C. L. Johnson, G. Khazanov, J. R. Sanmartin, J-P. Lebreton, E. J. van der Heide, M. Kruijff, F. De Pascale, P. M. Trivailo, “Sounding rocket experiment of bare electrodynamic tether system,” Acta Astronautica 64 (2009) 313–324. //