

宇宙テザー技術およびテザーを利用した移動ロボットの実験

能見公博，山極芳樹（静岡大学），青木義男（日本大学）

1. 科学的重要性・学術的意義

テザーは軽量・収納性・大規模展開の優位性を持つため、宇宙においての有効利用が期待できるが、その柔軟性のために取り扱いが難しく、実利用に結びついていない。実ミッションを確実に実施していくためには、テザーの挙動を把握すること、およびテザー状態を制御できることが求められる。とくに後者は、短距離テザーであれば形状記憶、インフレータブルなどの応用で制御が可能と考えられるが、長距離テザーでは難しい。そこで長距離テザー上にクライマー（テザー上移動ロボット）を配置し、その移動制御によりテザー全体の状態を制御することを提案している。クライマーは軌道間輸送エレベーター、さらに宇宙エレベーターへと繋がる技術としても重要である。本提案では、テザーの挙動計測およびクライマー（テザー上移動ロボット）によるテザー状態の挙動変化を観測することを目的とする。前者は宇宙テザーの将来ミッションに重要な技術であり、後者は世界初の宇宙実験となる。世界的に見てもテザー伸展はいくつか実施されているが、計測技術を獲得することにより、日本がこの分野でリードしていくことが期待できる。そして観測ロケット実験による成果は、小型衛星でのミッションへと繋げ、さらに将来システム実現へと展開していく。

観測ロケット実験の位置付け（小型衛星に向けて）

現在、宇宙デブリ問題は深刻な問題と認識され、打ち上げ時にはさまざまなガイドラインが設定されている。その中で、テザーのデブリ衝突による切断はとくに危険視されており、細かく取り扱われている。このため、テザーミッションを実施する場合には確実性を求められることから、小型衛星ミッションのプレ実験として観測ロケット実験を利用し、確実なテザーミッションとする技術を獲得することは重要である。

クライマーのテザー上移動ミッションは世界初である。このことからプレ実験は重要な位置づけとなる。

小型衛星によるテザー／クライマー実験を計画しているが、これまでのテザー実験では伸展はある程

度成功しているものの、テザー挙動解析データは十分に得られていない状況である。そこで、本申請の観測ロケット実験では計測系に重点を置き、軌道上実験における確実なデータ取得へと繋げていく。

宇宙実験の必要性

微小重力環境における長距離テザー（km オーダー）の地上実験は困難である。

テザーの空間運動を地上で模擬することは難しい。二次元挙動についても、柔軟テザーから重力を影響させない環境を作ることは難しい。

テザー端の機器の挙動は、テザー挙動に重要な要素であるが、空間的な運動を地上で模擬することは難しい。

人材育成

また若手研究者に積極的にプロジェクトマネジメントを任せるとともに、国際交流を積極的に実施していき国際協力を得ていく活動していくこととし、国際協力によるプロジェクトで活躍できる若手研究者を育成する。

2. STARS-Elevator (STARS-E)

STARS-E (Space Tethered Autonomous Robotic Satellite -Elevator) は、宇宙機械制御システム（テザー・ロボット）の実証を目的とする超小型衛星である。地球周回軌道上で1~2kmのテザー伸展を行い（国内初）、テザー上においてロボット（クライマー）を移動させる（世界初）宇宙実験を行う。これまでのSTARS シリーズの技術実証実績を踏まえ、長距離テザー制御技術および3基以上の複数衛星によるテザーシステム制御技術を実証する。国内外において2基の衛星によるテザー伸展実証はいくつか行われてきているが、3基以上の衛星をテザーにより連結したものの、テザー上をロボットが移動するものはない。テザーを宇宙空間において安定に伸展するためにはkm オーダーの長さが必要となり、テザー質量が大きくなるために衛星質量が増加、さらに衛星質量が大きいくほど重力加速度の効果による安定化が期待できる。ロボット（クライマー）がテザー上を移動する場合、テザーは安定していることが好ましく、衛星はある程度大型化が要求されるため、50kg 級衛星とする。



図1 STARS-E イメージ図

3. 観測ロケット実験

3.1 実験シーケンス

観測ロケットにおいては、自由運動状態となった後に「親子分離（子機放出によりテザー伸展）」を行い、テザー300m程度伸展後に「クライマー分離」を行い、クライマーがテザー上を移動する。なお、テザー伸展は継続し1000m以上伸展を目標とする。

各シーケンスのトリガーは時間とする（自動シーケンス）。実験時間10分で、テザー伸展およびクライマー移動を達成するため、テザー伸展途中にクライマー移動を開始する。テザー伸展長が十分でない場合でも、テザーは親機側に収納、クライマーは子機から移動することで、両実験を実施することは可能である。

3.2 計測系

テザー挙動はカメラによるモード計測を行う。ロケット側およびテザー先端機搭載カメラにより、テザー端の形状を把握する。テザーのような柔軟体は境界における挙動が支配的となるため、このカメラ計測によりテザー両端の挙動（形状）を把握する。なお太陽光反射が重要となるため、テザーの素材、表面の工夫、また飛翔経路なども十分に検討することとする。

昇降機実験開始後は、昇降機搭載カメラによる昇降機近傍のテザー挙動（形状）計測も行う。

ロケット側およびテザー先端機搭載のジャイロセンサー、加速度センサーは高精度のものとする。

S-520-25のテザー宇宙ロボット実験において、搭載センサー情報（ジャイロセンサー、加速度センサー）からのデータにより、数値解析評価を行うことでテザー挙動を予測する手法を確立している。この実験

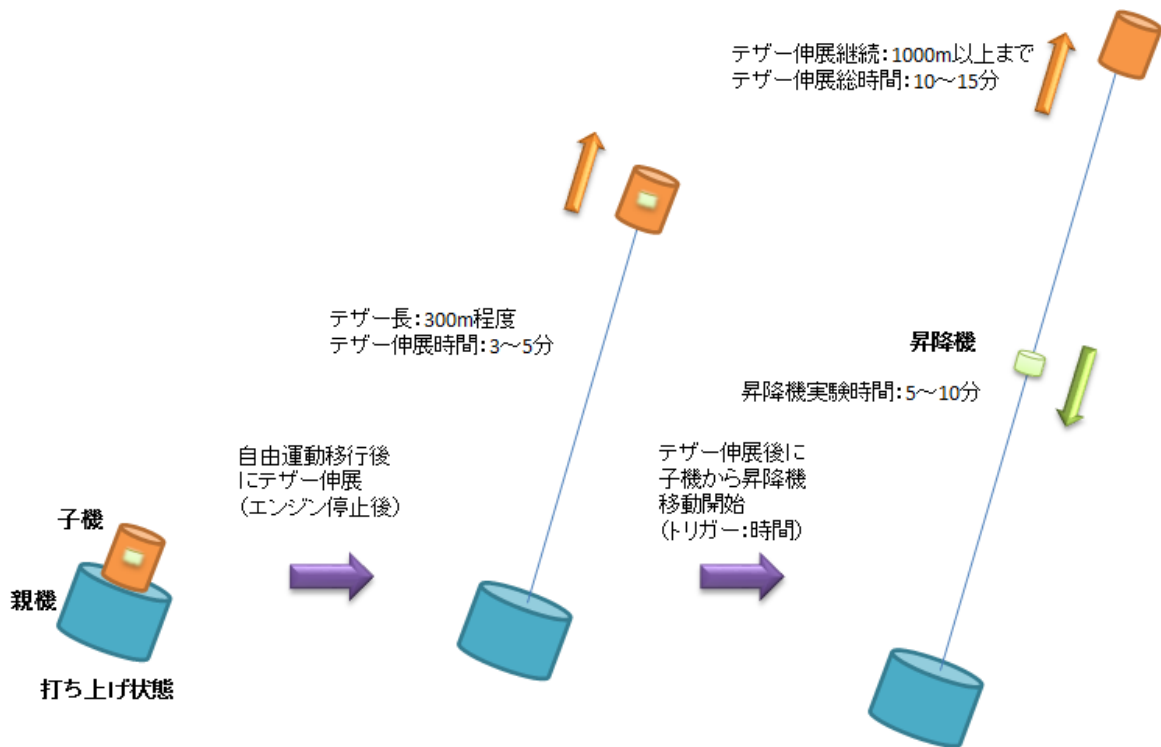


図2 観測ロケット実験シーケンス

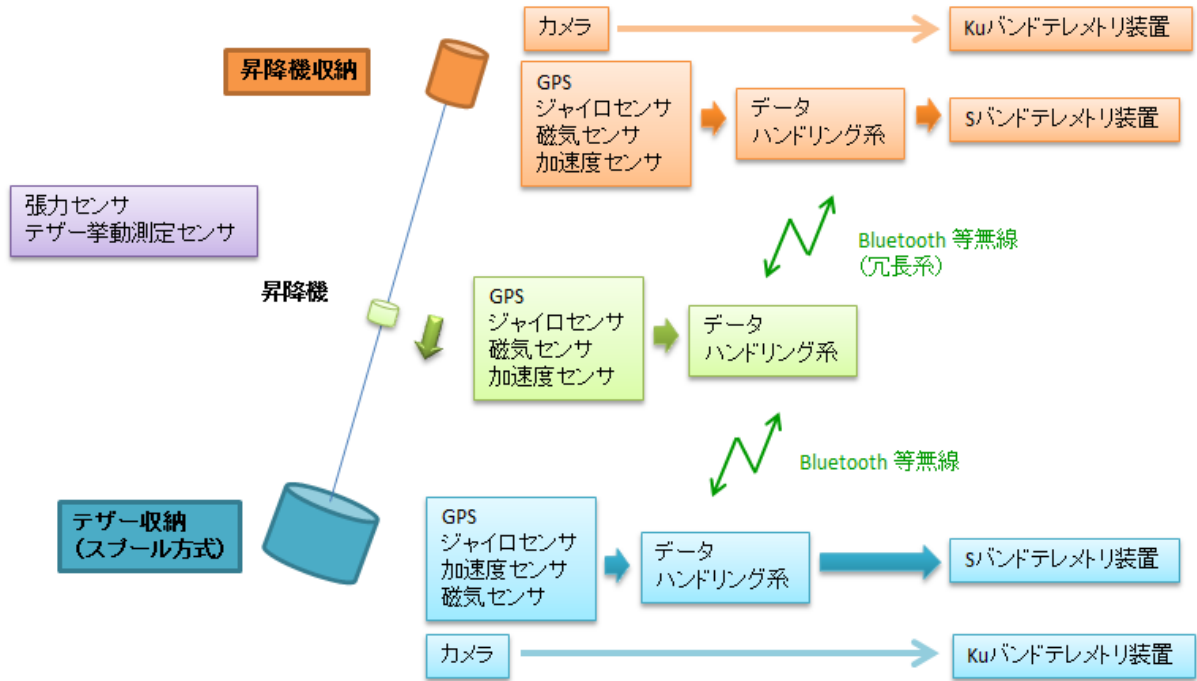


図3 計測系機能ブロック

ではテザーは数 m であったため、ほぼ直線状態であったが、この手法をベースにテザーのたわみ、ねじれを考慮した長距離テザーの挙動解析に応用する計画である。

昇降機はリソースの制約があるため、どこまで小型化できるか、その上でカメラおよびセンサーの精度を高めることが課題である。

GPS についても、高精度なものを選定する計画とする。

テザー張力計測は、これまでもテザー関連実験で重要かつ挙動に影響を与えないことが望ましく、本実験でも開発課題である。最低でもロケット側に搭載、可能であればテザー先端機にも搭載し、両端での張力を計測する。さらに昇降機への搭載も検討し、昇降機移動実験における昇降機近傍のテザー張力を計測することにより、複雑なダイナミクス解析に有効と考えている。

昇降機データの伝送方法についても検討する。現状では無線伝送でロケット側およびテザー先端機に伝送、その後地上へと伝送する計画であるが、直接地上に伝送することも検討する。

3.3 ミッション系

3.3.1 テザー伸展機構

テザー伸展機構はリール方式を用いる。基本構成は、リール部、張力計、レベルワインダーであり、全体図を次に示す。張力計は、テザー伸展抵抗を極力小

さくすることを目標に設計している。レベルワインダーはテザー巻き取りを考慮して搭載している。

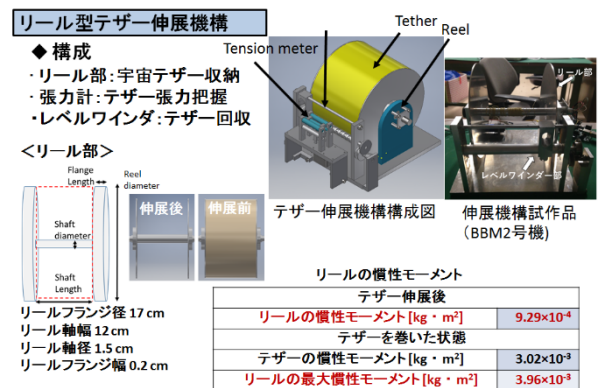


図4 テザー伸展機構

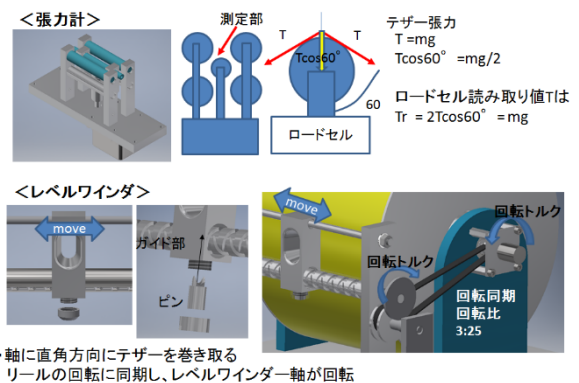


図5 張力計およびレベルワインダー詳細

◆テザーをローラで挟み込み摩擦力にて自律移動を行うロボット

- ・過去に行われた欧州宇宙エレベーターチャレンジにて優勝実績あり
- ・様々な昇降メカニズムの実証実験及びシミュレーションによる最適構造を検討
- ・モーター、制御用電子基板、軸受け等の宇宙環境耐性実験、微小重力環境での昇降機移動試験を実施、これらの経験を生かした、昇降機設計を行った

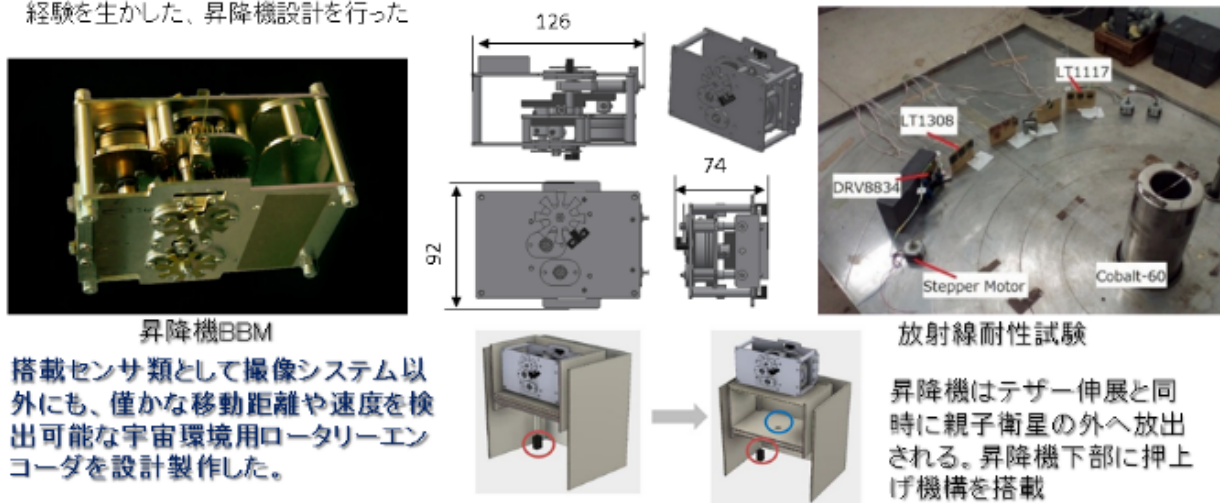


図6 クライマー開発状況

3.3.2 クライマー

クライマー開発状況を纏めたものを図6に示す。特徴を以下に示す。

・昇降機の安定的な移動と姿勢制御

ロケット飛翔中にテザーを進展しながら昇降機を移動させる計画のため、テザーの撓れねじれに対して摩擦車前後にテザーガイドを設け、クライマーの回転を抑制し、重心位置の工夫で摩擦駆動力を適正化した上で適切な移動制御をする。

・モーター軸受の耐久性

摺動部の温度変化、放射線の影響等による耐久性が課題、放射線照射実験、熱サイクル試験から適切な宇宙用軸受けを選定した。

・衛星との通信

昇降機への通信はテザー展開に支障を来さないよう、ポールアンテナ等は設けず、ロケット本体を介した Bluetooth 通信を想定して BLE アンテナと BLE 通信基板を製作し送受信について実証を行った。

4. 人材の育成、教育、および社会との関わり

若手教員の宇宙プロジェクトへの参加

超小型衛星分野が活性化している現在、大学若手研究者が宇宙プロジェクトを経験していくことは重要であり、本実験における大学教授は宇宙プロジェクト経験を有しているため本実験を通して継承していくこと、また歴史のある宇宙機関である JAXA 宇宙科学研究所の研究者と交流して、信頼性の高い宇宙開発を進めていくことは、我が国の将来宇宙開発

に重要であり、かつ大学発宇宙開発の信頼性向上が期待できる。

国際交流

宇宙テザー技術は、宇宙デブリ減少手段や燃料なしの推進機構であり、米国・欧州を含む国際的な研究活動の情報共有を促している。2016年米国ミシガンで開催された The 5th International Conference on Tethers in Space でも S520-25 観測ロケット実験の成果が大きく評価された。本プロジェクトは、国際協定の有力な手段となりうる。

S520-25号機に参加した国外研究者は、本提案に参画することを了承している。

若手教員の国際的プロジェクトへの参加は、人材育成の観点からも有意義である。

社会との関わり

本実験は宇宙エレベーターに繋がる技術の実証と基礎データの取得という側面をもつ。宇宙エレベーターは人類にとって夢の技術の一つであり、社会の関心は非常に高い (STARS-C で実証済)。本実験の実施は、若者を含めた多くの人々に対して科学技術への関心の惹起と、宇宙開発への理解を促す手段として、大変効果的である。

5. まとめ

本報告では、宇宙テザー技術およびテザーを利用した移動ロボットの実験について、小型衛星実験を実施することを目標とした観測ロケット実験について纏めた。