

超小型衛星テザー伸展ミッションの大気球実験による検証評価の提案

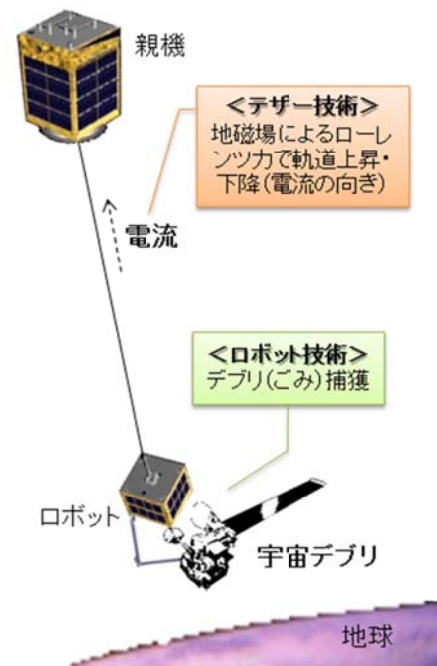
香川大学工学部 能見公博

1. はじめに

香川大学では、テザー宇宙ロボットの技術実証を目的に研究開発を進めている。現段階ではテザー宇宙ロボットを宇宙デブリ除去へ実利用することを目指している。ここで計画する宇宙デブリ除去方法(右図参照)は、地球周回軌道上において導電性ワイヤ(テザー)を伸展、その先端に連結されるロボットによりデブリを捕獲、テザーに電流を流し地磁場によるローレンツ力を利用し軌道高度を下降してデブリを放出、大気圏に突入させ燃え尽きさせるものである。その後、電流を逆向きに流して軌道高度を上昇、次のデブリへと向かい繰り返し処理を行う。

テザー先端に連結されるロボットは、「テザー宇宙ロボット」として、申請者が1995年に提案したものである[1]。そして、工学的な観点から挙動解析および制御解析を行い、航空機微小重力実験などによる実験解析を進めてきた[2]。2009年1月には、香川衛星 KUKAI を H-IIA ロケットにより打ち上げた。親子衛星、短距離テザー伸展、ロボットの技術実証を目的とし、その基本技術を習得した[3], [4], [5]。次に、2010年8月に観測ロケット S520-25 号機による10分程度の宇宙実験において、テザー張力を利用した宇宙ロボットの姿勢制御実験を実施した。

このような背景から、次期香川衛星では導電性テザー(EDT)を用いた電流収集実験を計画している。ここでは、JAXA 研究開発本部および静岡大学との共同研究とし、協力支援を得る。香川衛星として軌道変更技術の獲得、日本の宇宙開発として宇宙デブリ除去衛星実現に向けた基礎データ取得、の意義があり、前述の宇宙デブリ除去の緊急性を考慮すると次号機での実証が強く望まれる。EDT 実験ではテザーを長距離伸展させた後に実施することとなるため、テザー伸展を確実に行う必要がある、その事前検証は重要となる。とくに、長距離伸展が必要となることからテザー伸展抵抗の低減、過去の実験からテザー伸展終了時において過大張力によるリバウンド(テザー両端の質量が近づく方向に戻ってくる現象)を回避すること、が課題となる。



2. 実験目的

大気球実験の目的を以下に示す。

(i) EDT (導電性テザー) のスプール方式収納からの長距離(数百m)伸展

香川衛星搭載 EDT はスプール方式の収納方法を採用し、巻かれたテザーが内側から伸展する方式を計画している。この方式により 200m~300m の伸展が可能であることを実証、また伸展時の挙動評価を行う。伸展抵抗の影響、巻癖による影響に焦点をあてる。なおテザー長 200~300m は、低軌道上における誘電起電力を推定し、超小型衛星搭載システムにより流すことが可能な電流から決めた長さである。

(ii) リール機構（香川大開発、張力制御機能）による伸展ブレーキ性能

過去のテザー伸展実験では、過大張力によるリバウンド（テザー両端の質量が近づく方向に戻ってくる現象）が問題となるケースが多い。そこで、香川大学では張力制御が可能なリール機構を開発している。この機構により、テザー伸展速度の滑らかな減速が可能となり、リバウンドを回避できると考えている。その性能を検証評価する。

(iii) 超小型衛星搭載用 EDT の運用および機器動作の検証評価

大気球実験に用いる EDT は超小型衛星搭載機器の仕様とし、衛星運用の観点から実験準備、実験実施、データ解析等の検証、さらに機器動作に問題が無いことを確認する。

大気球実験の優位性を以下に示す。

(i) 3次元長距離テザー伸展

長距離テザー伸展の地上試験は、空間的に困難である。収納機構から伸展されたテザーを巻き取っていくことにより、小空間実験とする方法もあるが、長距離テザーの挙動（テザーのたわみ・よじれ等による伸展方向および張力変動）の影響を模擬することが難しい。

(ii) 模擬微小重力環境（航空機：20秒、落下施設：数秒）

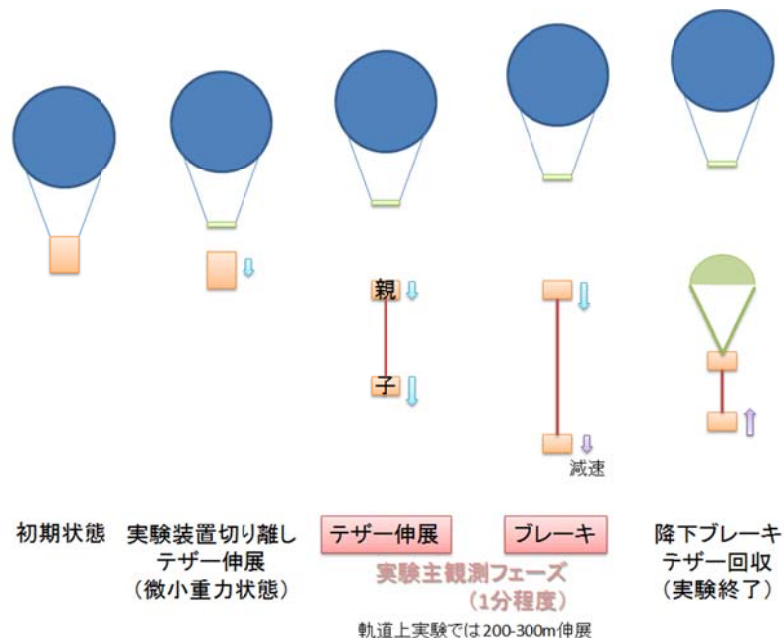
地上における空間的な微小重力実験は、航空機および落下施設等が考えられるが、時間的な制約が大きい。今回の大気球実験では、大気球から実験装置を切り離すことにより微小重力環境を模擬する計画であるが、60秒程度の実験時間を確保できると見込んでいる。

なお、ここで空気抵抗（成層圏の風の影響を含む）が大きな問題となるため、シミュレーション解析等により空力の切り分けを行うこととする。

3. 実験シーケンス

3.1 実験シーケンス

全体の実験シーケンスを図1に示す。大気球放球後浮上して安定した状態を初期状態とし、地上からのコマンドにより実験装置を切り離す。同時にテザー伸展を開始する。ここでテザー伸展は、ナイロンテグスにより固定された状態からニクロム線加熱するヒータカッター方式とし、バネ力により伸展初速度を得る。なお、バネ力による反力を考慮してニクロム線加熱時間を設定する。スプール方式収納機構からテザーが全て伸展されると（ここまで30秒程度



を想定、降下距離 4km 程度)、リール機構からのテザー伸展が開始され、ブレーキ作動状態となりテザー伸展が終了する。(ここまで1分程度を想定、降下距離 17km 程度)その後パラシュートを展開するとともに、テザー全体を巻き取る装置（大気球実験用に開発）によりテザーを回収した後に着水する。

3.2 実験詳細

図2にテザー伸展フェーズの詳細を示す。親に「バネ押し出し機構」を搭載し、子に初速度を与えてテザーを伸展する。そして、「スプール方式収納機構」に搭載された導電性テザー (EDT) が、巻き取り部内側からほどけることによりテザーは伸展する。親は大気球観測機器に取り付けることとし、「センサ系 (GPS: テザー伸展距離計測, 角速度・磁気: 姿勢挙動計測・加速度)」および「風速計 (空気抵抗を計測)」のデータを大気球通信回線により地上にダウンリンクする。また、テザー伸展挙動を親側から大気球観測機器のカメラで撮影する。

子は超小型衛星でのブレーキ力を考慮して、質量 5kg 以下となるように設計する。子のデータ取得は親への伝送、またはアマチュア無線を用いて直接地上に伝送 (送信速度が低くなる) する方式について検討する計画である。

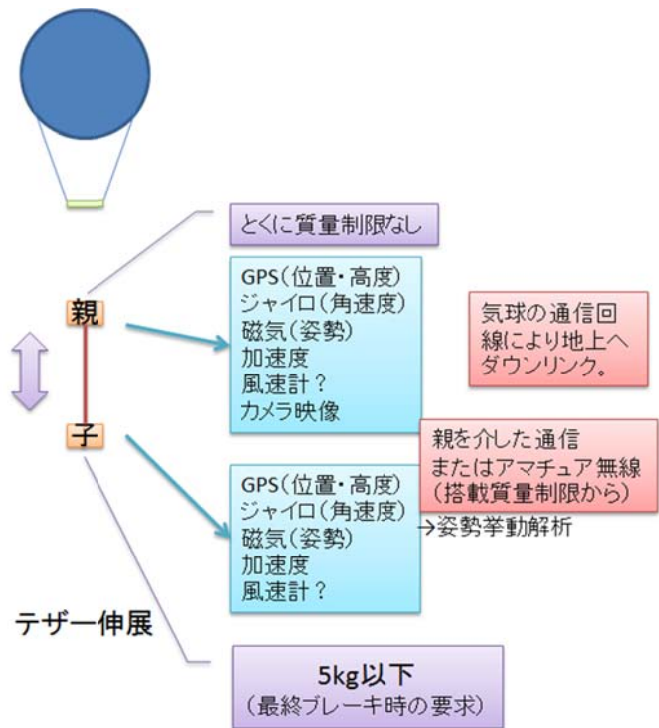
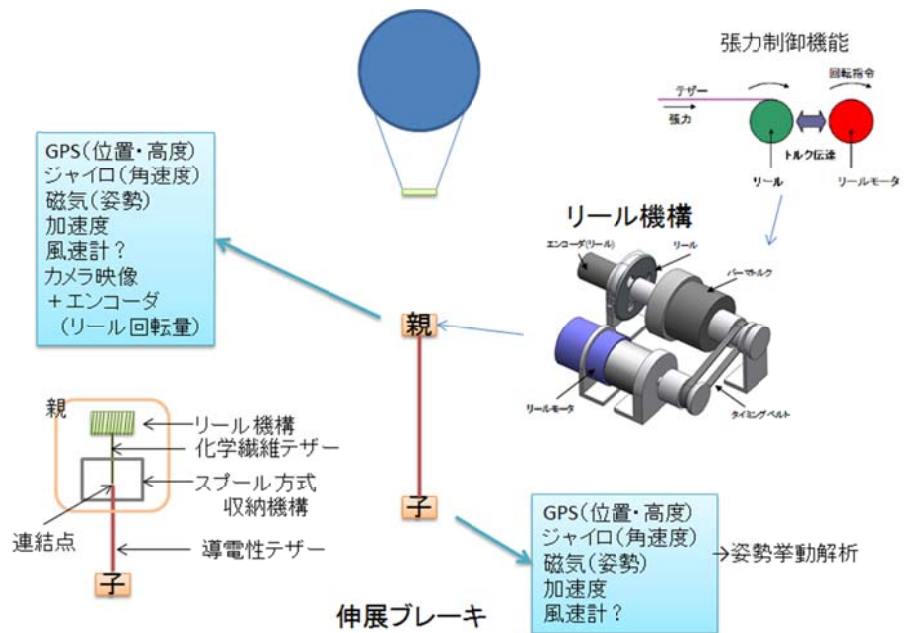


図2 テザー伸展フェーズ

図3に伸展ブレーキフェーズの詳細を示す。スプール方式収納機構に収納される EDT は化学繊維製テザーと繋がれており、化学繊維テザーは「リール機構」に巻かれた状態で収納されている。これより EDT が全て伸展されると、化学繊維テザーが、張力 (ブレーキ) が作用した状態で伸展される。リール機構はパーマトルクと呼ばれる磁気によるトルク伝達装置を搭載しており、モータ駆動回転をトルクによりリールに伝達する。さらに、リールとモータのスリップ回転数により伝達トルクを制御できる。このトルク制御により、滑らかなテザー伸展終了を実現する。計測データはテザー伸展フェーズのものに加え、リール機構の挙動をエンコーダ (モータおよびリール) により取得する。

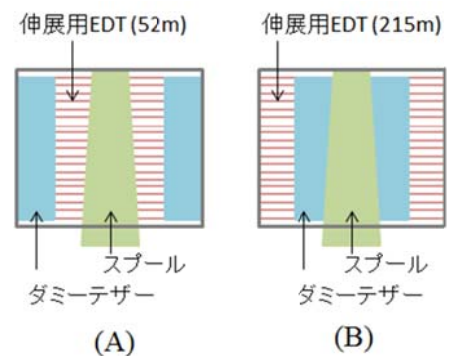


3.3 実験パラメータ

子は質量 5kg とし、初速およびブレーキ張力を実験パラメータとし、さらに初期状態を加えて 3 種類の実験を実施する計画とする。なお 60 秒を実験時間とし、降下高度 17km 程度を実験制約としている。ここでブレーキ張力は平均値を示している。

	初速[m/s]	ブレーキ張力[gf]	EDT 伸展[m]	最終長[m]	
(I)	2	30	52	86	図(A)参照
(II)	2	30	52	86	図(B)参照
(III)	5	150	215	258	

実験(I)および(II)については、右図に示すような状態からの伸展とする。すなわち、超小型衛星伸展初速度程度である 2m/s により、衛星伸展ミッション初盤を実験(I)により、衛星伸展ミッション終盤を実験(II)により評価することとなる。なお、ブレーキ張力についても衛星ミッションと同程度である。さらに衛星ミッションより大きい初速度により EDT 200m 程度を伸展し、実験(III)により衛星ミッションと同程度の伸展距離を評価することとする。なお、この場合ブレーキ張力は衛星ミッションより大きい。



4. まとめ

本稿では、超小型衛星テザー伸展ミッションの大気球実験の提案を行った。(i) 導電性テザーの長距離(数百m)伸展、(ii) リール機構(香川大開発)による張力制御、(iii) 超小型衛星搭載ミッション機器の運用・動作検証、を目的とした大気球によるテザー伸展実験である。

5. 参考文献

- [1] 能見公博・Nenchev Dragomir・内山勝, 「キャスティングによるテザーロボットの宇宙空間移動」, 日本機械学会論文集 (C 編), 第 64 巻, 第 618 号, 629 - 635, 1998 年 2 月.
- [2] 能見公博, 「テザー宇宙ロボットの姿勢制御に関する微小重力実験」, 日本航空宇宙学会論文集, 第 53 巻, 第 617 号, pp. 281-287, 2005 年 6 月.
- [3] 能見公博, 「香川衛星 KUKAI の超小型テザー伸展システム軌道上実験」, 日本機械学会論文集 (C 編), 第 75 巻, 第 760 号, pp. 3144-3151, 2009 年 12 月.
- [4] 能見公博, 山本健志, 糸瀬理, 斎藤隼, 「超小型親子衛星 KUKAI のロケット分離機構」, 日本機械学会論文集 (C 編), 第 76 巻, 第 765 号, pp. 1036-1042, 2010 年 5 月.
- [5] 能見公博, 「超小型ロボット衛星の開発と軌道上動作実証」, 日本機械学会論文集 (C 編), 第 76 巻, 第 770 号, pp. 2515-2521, 2010 年 10 月.