

機関番号： 22604
 研究種目： 若手研究 (B)
 研究期間： 2009 ~ 2010
 課題番号： 21760651
 研究課題名 (和文) テープ型テザー展開機構の収納法と展開特性に関する実験的研究
 研究課題名 (英文) Experimental Study on Tape-Tether Storage Method and Deployment Performance
 研究代表者
 渡部 武夫 (WATANABE TAKEO)
 首都大学東京 システムデザイン学部 航空宇宙システム工学コース 助教
 研究者番号： 40433180

研究成果の概要 (和文) : 宇宙テザーシステムの折りたたみ式テープテザー方式をより発展させるための方法として二次元的にテザーを折るクロスシフト折りを提案し、性能を実験的に検証した。折りたたみピッチ幅をパラメータとして、テザーの収納効率や展開抵抗を測定し、パラメータを変えた際の性能変化を求めることができた。

研究成果の概要 (英文) : We proposed cross-shift folding method as improved type of folded tape-tether as space tether. By the method tape is folded 2-dimensionally, and the performance such as folding efficiency and deployment resistance is measured. By setting the pitch width of folding as parameter, the above performances were evaluated.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
総計	2,800,000	840,000	3,640,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：宇宙インフラ、宇宙科学、展開構造物、宇宙物理、テザー技術

1. 研究開始当初の背景

(1) 宇宙開発では、テザーシステムと呼ばれるひもを使った技術が研究されている。テザーにより複数の衛星をつなぎ合わせることで容易に大型の構造物を構築できる。またその利用法は、姿勢制御・軌道変換・衛星間の通信など、様々である。さらに宇宙テザーシステムでは通常のワイヤ状シングルラインテザーのみならず、導電性などの機能を備えたテープ型テザーを用いることにより高機能なシステムを構成することが考えられている。例えば、テザーに導電性を持たせることでエレクトロダイナミックテザー (EDT) と呼ばれるシステムを構築し、惑星磁場との干渉でテザーにローレンツ力を与えることができる。これは化学推進剤の不要な

推進システムとして利用できるため、衛星の軌道制御だけでなく、惑星探査やデブリ除去のミッションなどへの応用が考えられている。宇宙テザー技術はこのような多様性、応用性に加え、低価格、シンプルさなどから将来性が期待されている。

(2) これまでに様々な宇宙テザーミッションが提案されてきた。近年では ESA の YES2 ミッションにおいて 35km のシングルラインテザー展開に成功している。一方で展開構造の複雑さと取り扱いの難しさからテープテザーの実施例は少なく、1999 年の ATEX ミッションでは 6km のテープテザー展開が予定されていたが、結果は 22m の展開に終わっている。JAXA では 2010 年 8 月に観測ロケット実験において 300m 級のテープ型テザーの展

開実験 (T-REx ミッション) を行った。テープ型テザーの展開には、従来用いられてきたリール式の展開方式ではなく、折りたたみ式の展開方式という新しい展開方法が採用され、コンパクトかつ信頼性の高い展開性能を目指し、130mの展開に成功した。しかし今後 km 級のより長いテープテザーを展開する場合には、宇宙機内部への搭載条件から収納時形状に制限が加わり、従来の折りたたみ方式の単なるスケールアップのみでは対応しきれないと考えられる。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、折りたたみ方式テープ型テザーの展開機構のスケールを大幅に増大させるための新たな収納方法である「クロスシフト折り」を提案し、その性能を実験的に検証することを目的とする。検証項目としてはテザーを収納する際の収納効率や展開抵抗、展開時の挙動特性などが挙げられ、展開をスムーズに行うためのガイド形状による影響も考慮する。

(2) 展開中のテザーは、ロケットや人工衛星といった搭載先である宇宙機の運動の影響を受けやすく、微小重力や真空中など、展開される環境も地上での実験では再現が難しい。これらの問題に対しては数値シミュレーションによって展開挙動解析を行う。シミュレーションの手法にはマルチボディダイナミクスを用いる。この手法の利点は接触や振動といった今後のシミュレーション条件の追加が容易であることが挙げられる。これまでの研究では二次元モデルにおける折り目を考慮した折り目一つ分の解析が行われてきた。本研究ではこの方法を三次元に発展させ捻りを考慮した解析を行う。

3. 研究の方法

(1) テープテザーを確実に安全に展開させるためには、展開時のテザーにかかる負担や収納ボックスでの挙動などを把握することが重要となる。また、ローラーなどの展開装置にテザーが詰まるといったトラブルを防止し、スムーズに展開を行うためには展開部と収納部の間にガイドを設ける必要がある。

(2) 本実験では図 1 に示すピッチ幅の違う複数のクロスシフト折りテープテザーを展開し、収納ボックス内でのテザー挙動の観察とガイド形状による展開に必要な抵抗の計測を行う。その計測を行うための実験概要図を図 2 に示す。

(3) テープテザー展開時の抵抗測定は電子天秤によって行う。テープテザーを入れたテザーボックスは電子天秤の上部に設置する。テープテザーは収納箱上部に設置された展開装置により上方に引き上げられ展開され

てゆく。この展開装置のローラーはコントローラで制御でき、一定の回転速度が出せるようになっている。一方、テザーボックス下部の電子天秤はパソコンと接続されている。電子天秤によって得られるデータは、展開中のテザーボックス内部の見かけの重量変化といえる。テープテザーは展開速度に応じてその重量が減少していく。このため、テザーボックス内部の重量は一定に減少すると考えられる。展開開始と展開終了の重量変化を解析することで、テープテザー展開中に発生する衝突、摩擦に起因する抵抗を求めることができる。

(4) クロスシフト折り収納法では一定の長さのテザーであっても、ピッチ幅によって折りたたまれたテザーの形状は異なり、折る回数や堆積する段数も変化する。これによるテザー収納に要するボックス容積を計測し、ピッチ幅ごとによる収納効率を算出する。

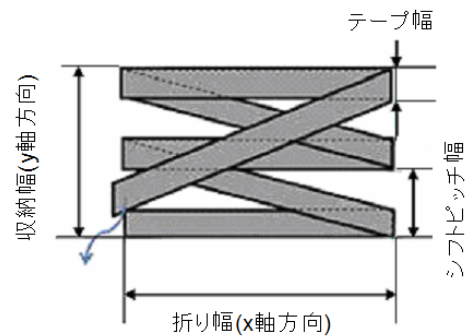


図 1 提案したクロスシフト折り

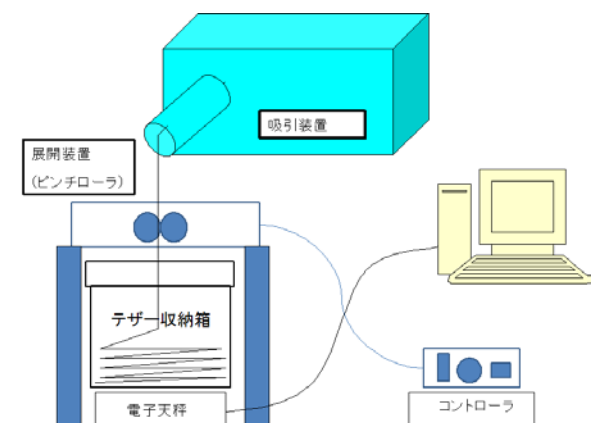


図 2 実験概要図

4. 研究成果

(1) 平均展開抵抗：テザーの展開を円滑にする目的でサイズ 100mm*100mm 及び 200mm*100mm のテザーガイドをテザー収納箱の上部に設けて実験した。ガイドが無い場合は抵抗もほとんど無く展開が実現できてい

る。またどのピッチにおいてもガイド形状が大きい方が展開抵抗が小さい。これを元にそれぞれのピッチの各ガイドごとの平均展開抵抗を図3に示す。図に示すピッチ範囲ではいずれのガイド形状においても展開に支障のない抵抗となっていることがわかった。

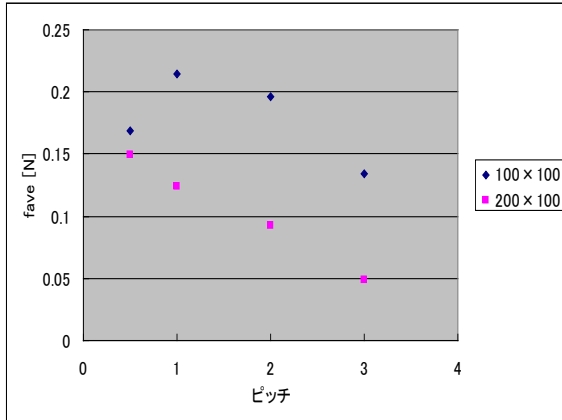


図3 平均展開抵抗

(2) テープ収納効率：クロスシフト折りの場合の理想的な厚みを仮定した収納効率 E_{id} と収納効率の実測値である E_s の比較を図4に示す。ここで実測の収納効率 E_s は非常に小さい値になることがわかる。理想値 E_{id} の値から、これは折り目の増圧等の影響ではなく、展開しやすさを考慮し、余裕を持って収納ボックスが設計されていることが原因と思われる。またピッチ 0 や 2.0, 3.0 と比較してピッチ 0.5, 1.0 の収納効率が理想値より非常に低いことがわかる。この理由は、ピッチが 0.5 や 1.0 といった非常に密に折られているテザーの場合、折る過程においてピッチのずれが生じやすく、結果としてテープ間に間隙が生じていることに起因すると考えられる。

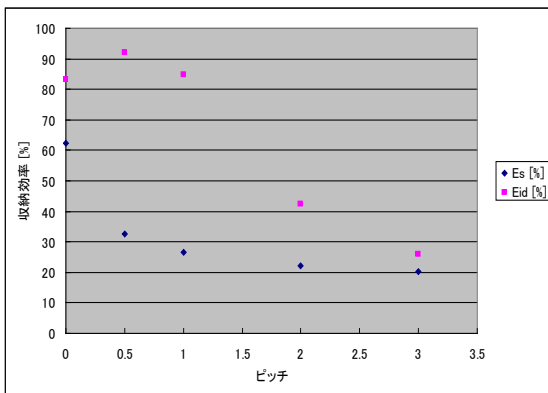


図4 テープ収納効率の比較

(3) 最適パラメータ：前述の実験データから収納効率と展開抵抗、ガイド形状の関係を求めることができた。およその傾向としては収納効率が上昇すると展開抵抗が大きくなる傾向が見られた。これはピッチを小さくすることでガイドとテザーが衝突する度合いが大きくなることが要因であると思われる。図5には、これらの実験結果を総合してピッチに対する収納効率と展開抵抗の変化をガイド形状をパラメータとして示す。この図よりガイド 200mm×100mm においてはピッチ 2.0~3.0 で収納効率、展開抵抗ともにバランスのよいテープテザー展開特性を設定できることが予想される。

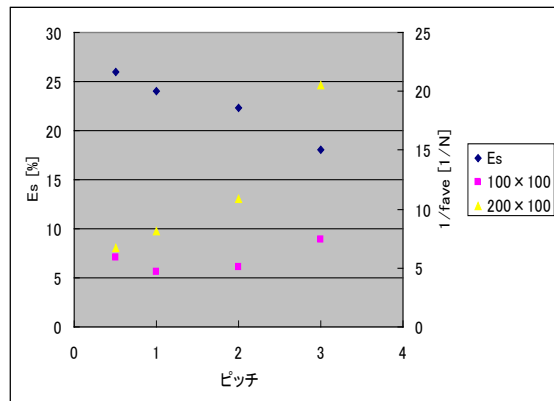


図5 ピッチによる特性変化

(4) 展開挙動の数値解析：テープテザーの展開時の挙動をシミュレートし、最適な展開条件等を求めるために、本研究ではマルチボディダイナミクス理論を用いて折りたたまれたテープテザーの挙動をモデル化する。マルチボディダイナミクスは多体力学といわれ、多数の物体からなる構造物などの運動や制御を扱う。この系では結合部や接触部に運動状態に依存する未知の拘束力が発生し、拘束条件を満たすための未知力を含む混合微分代数方程式を導くことが必要となる。基本的な方法は力学に関する力学原理をもとにモデリング、定式化を行う。マルチボディダイナミクスの利点は接触や振動といった今後のシミュレーション条件の追加が容易であることが挙げられる。これまでの研究では二次元モデルにおける折り目を考慮した折り目一つ分の解析が行われてきた。本研究ではこの方法を三次元に発展させ、捻りを考慮した解析を行った。その結果、柔軟な材料であり塑性変形をするテープテザーの展開中の挙動を表現することができた。ただし、より正確にテザーの展開を模擬するためには、パラメータの設定を詳細に行う必要がある。その場合、パラメータの値によっては硬い方程式とよばれるスティッフな問

題となり解析が困難になることが予想され、この問題を解決する必要がある。

(5) 結論：本研究では折りたたみ式テープテザーをより発展させるための方法として二次元的にテザーを折るクロスシフト折りを提案し、検討を行った。ピッチ幅をパラメータとして設定し収納効率や展開抵抗を測定、パラメータを変えた際の傾向を知ることができた。またマルチボディダイナミクスを用いて一次元折りと二次元折りのテープテザーの展開挙動解析を行った。ピンジョイントとポールジョイントを組み合わせた柔軟なテザーをモデリングし、折り目近傍をと端点とで要素の大きさを変えることで少ない要素数で解析を行い計算負荷を減らすことができた。

(6) 今後の課題：今回はテザー収納ボックスをある特定の大きさとして設定したが、今後の宇宙機等への搭載の指標となるためには、ボックスの形状やガイドも考慮したより一般的なパラメータを設定する必要がある。また展開の抵抗はボックスやピッチ幅といった形状的なものだけでなく展開のスピードにも大きく関係する。これらのことからクロスシフト折りはまだまだ検討する要素が多い。マルチボディシステムにおいては硬い方程式の問題や要素数が増えた場合に計算量が膨大になってしまうという問題も残されている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① Nakanishi, T., Kojima, H. and Watanabe, T., Trajectories of In-plane Periodic Solutions of Tethered Satellite System Projected on van der Pol Planes, Elsevier Acta Astronautica, 査読有, vol. 68, 2010, pp.1024-1030.
- ② Watanabe, T., Micro Gravity Experiment and 3 Dimensional Dynamic Analysis of Tethered Sampler, Trans. Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan, 査読有, vol. 7, 2010, pp.Pk_17-Pk21.
- ③ Toru Suzuki, Tomoya Mazawa, Takeo Watanabe, and Hironori A. Fujii, Design of Brake Control System on Sounding Rocket Experiment, ISTS Special Issue, Transactions of JSASS, Space Technology Japan, 査読有, 2009, pp. Ph_71-Ph_74.
- ④ Pavel M. TRIVAILO, Hironori A. FUJII, Hirohisa KOJIMA and Takeo WATANABE, Multi-Constrained Optimal Control of

3D Robotic Arm Manipulators, ISTS Special Issue, Transactions of JSASS, Space Technology Japan, 査読有, 2009, pp. Pd_95-Pd_104.

[学会発表] (計 12 件)

- ① 渡部武夫, 観測ロケットにおけるテープテザー展開実験, 第 19 回スペース・エンジニアリング・コンファレンス, 2011 年 1 月 27 日, 熊本
- ② 渡部武夫, 小島広久, 助川真, 小型衛星搭載用テープテザー展開機構の開発研究, 第 54 回宇宙科学技術連合講演会, 2010 年 11 月 19 日, 静岡
- ③ Takeo Watanabe, Hironori Fujii, Tomoya Mazawa, Masahiro Sukekawa, Hirohisa Kojima, Hironori Sahara, Experiments of Electro Dynamic Tether System Using Bare Tape Tether and Development of the Tape Tether Deployer, 27th International Symposium of Space Technology and Science, 2009 年 6 月, 筑波.
- ④ Hironori A. FUJII, Takeo WATANABE, Ryo-Ichiro OHKAWA, Akio ABE, and Yuzo SHIMADA, Experimental Study on Penetration performance of a Sampler in Asteroid Exploration, 27th International Symposium of Space Technology and Science, 2009 年 6 月, 筑波.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 1 件)

名称: 宇宙構造物およびテザー折り畳み装置

発明者: 藤井, 渡部, 草谷

権利者: 首都大学東京

種類: 特許

番号: 2007-083924

取得年月日: 2011 年 1 月 14 日

国内外の別: 国内

[その他]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡部 武夫 (ワタナベ タケオ)

研究者番号: 40433180

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし