

超小型衛星用テザー伸張機構の設計と開発

東京工業大学 山中富夫, 居相政史, 臼田武史, 松永三郎

Design and Development of Tether Deployment Mechanism for Nano-Satellite

Tomio Yamanaka, Masafumi Iai, Takeshi Usuda and Saburo Matunaga

Tokyo Institute of Technology, Meguro-ku, Tokyo 152-8552

E-Mail: yamanaka@lss.mes.titech.ac.jp

Abstract: An electro dynamic tether is the effective way to deorbit nano-satellite. The authors focused on tether deployment which is one of the fundamental technologies in this way and developed two small tether deployment mechanisms with different methods. One was marman band method and the other was a string hold method. Micro gravity tests were conducted with both methods to evaluate the mechanisms. Furthermore, the mechanism with a string hold method was installed in Cute-1.7 + APD, nano-satellite developed by authors and launched successfully.

Key words; Tether Deployment, Marman Band Method, String Hold Method, Cute-1.7 + APD

はじめに

近年, 新規技術の早期軌道上実証や新規ビジネスチャンスの発掘, 学生の実践的教育などを目的に, 低コストである数 kg 級の超小型衛星開発が大学などを中心に世界中で行われている. いくつかの超小型衛星は, すでに軌道投入に成功しており, 運用が行われている. さらに, 多くの超小型衛星が, 近い将来打ち上げを予定している. この活発な超小型衛星開発を背景に, 数多くの衛星が軌道に投入されると, それにともなうデブリの増加問題が懸念される. デブリ化防止のための有効な方法の一つに, 導電性テザーを用いた軌道離脱法がある. 著者らは, この方法に必要な不可欠なテザー伸張に注目し, 超小型衛星に搭載可能なテザー伸張機構を試作した. 機構には, マルマンバンド方式とストリング保持方式の両方を考案し, 前者は平成 17 年に, 後者は平成 18 年に無重量総合研究所 (MGLAB) にて, 無重量状態でのテザー伸張実験を実施した. 後者のストリング保持方式は, マルマンバンド方式から明らかになった課題を考慮して, 新たに考案した方式である. 本方式を採用した小型テザー伸張機構は, 著者らが開発した超小型衛星 Cute-1.7 + APD に搭載し, 軌道投入に成功している. 本論文では, 両方式の特徴及び無重量実験結果を記述するとともに, Cute-1.7 + APD に搭載したストリング保持方式の開発について述べる.

マルマンバンド方式

テザー伸張機構は, 内部プレートと分離プレート及び両者をつなぐテザーによって構成されている. 本機構の外観図を Fig.1 に示す. 本機構は, 大型衛星の分離時によく使用されるマルマンバンド方式とは異なり, 超小型衛星に損傷を与える危険のない非火工品となっている.

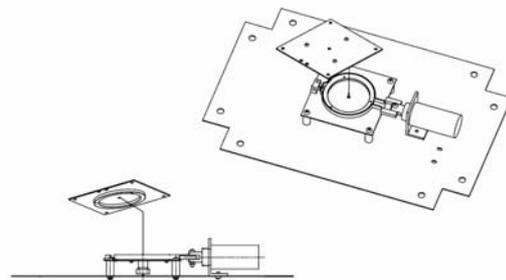


Fig.1 Tether Deployment Mechanism with marman band

ばね性を持つ金属バンドが分離プレートと内部プレートに付いているリングを締付けて両者を結合する. 金属バンドのコの字形留め具は, 分離時にはソレノイドを用いて, 引抜かれ展開する. その後, 押しばねによって分離プレートが分離するとともに, テザーが伸張する. 分離メカニズムを Fig.2 に示す.

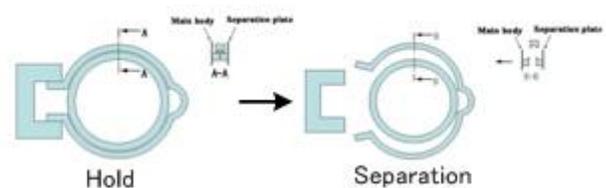


Fig.2 Mechanism of Separation

無重量実験装置の外観図は, Fig.3 のようになる. 分離プレートの放出方向には, ビデオカメラを 2 つ設置し, 浮遊する分離プレートの挙動を把握する. 撮影可能な空間は, 約 430mm * 300mm * 200mm である. また, 分離機構横にもビデオカメラ 1 台を設置し, 分離直後のテザーの動きを記録する.

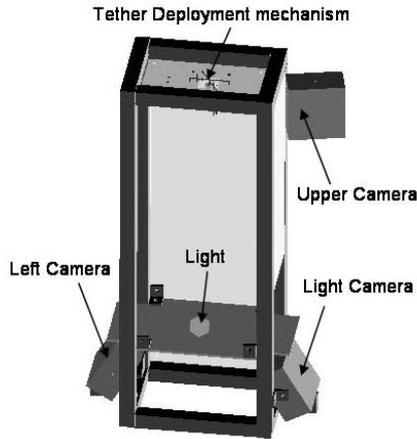


Fig. 3 Overview of the Experimental Setup

実験パラメータは、テザーの種類、テザーの巻き方、押しばね定数（放出初速度）とした。実験条件を Table 1 に示す。

- 1) テザーの種類
 - (a) 銅線（50m, ϕ 0.1mm, ポリイミド被覆）
 - (b) ナイロン線（50m）
 - (c) 形状記憶合金ワイヤ（0.30m）
- 2) テザーの巻き方
 - (a) 整列巻き（Fig.4(a)）
 - (b) 交差巻き（Fig.4(b)）
- 3) 押しばね定数
 - (a) 4.89E+02 N/m（理想速度：0.3m/s）
 - (b) 1.95E+03 N/m（理想速度：0.6m/s）
 - (c) 1.37E+04 N/m（理想速度：1.5m/s）

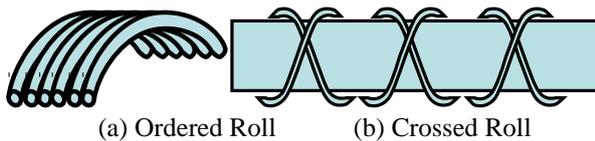


Fig. 4 Tether Winding Methods

Table 1 Experiment Cases

No.	Initial speed [m/s]	Tether
Simple separation experiments		
1	0.3	Nothing
2	1.5	Nothing
3	1.5	Nothing
Tether expansion experiments		
4	0.3	50m, copper wire, ordered roll
7	0.6	50m, nylon wire, ordered roll
9	0.3	0.35m, shape memoried wire, ordered roll
10	0.3	copper wire, crossed roll
Experiments with error		
5	0.3	50m, nylon wire, ordered roll
8	0.6	0.35m, copper wire with shok absorber
6	0.6	0.35m, copper wire

テザーの直径が小さいので、直接その挙動を確認することは難しい。そこで、分離プレートの運動を解析することで、テザーの伸展挙動を推定する手法をとった。実験空間の壁面には、格子を配置し、放出方向に配置した2つのカメラを用いて、3次元運動を捉える。左右のカメラ映像は Fig.5 のようになる。

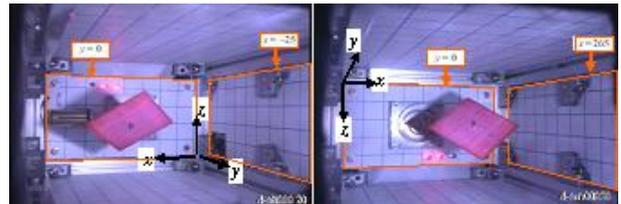


Fig. 5 Camera Image

MGLAB では、計 10 回の無重量実験を行った。1～3 回目は、分離機構自体の特性を見るためにテザーなしで分離プレートの放出のみを、放出速度を変えて行なった。4 回目と 10 回目は 50m の銅線をテザーとし、巻き方を変えた。7 回目は 50m のナイロン線（釣り糸）、9 回目は 0.35m の形状記憶合金ワイヤをテザーに選んだ。5 回目は失敗し、その再実験が 7 回目である。6 回目および 8 回目は、テザーが伸びきった時の跳ね返り速度低減及びテザー切断防止のための実験であったが、8 回目が失敗したために、その対照実験であった 6 回目の有効性も低くなった。

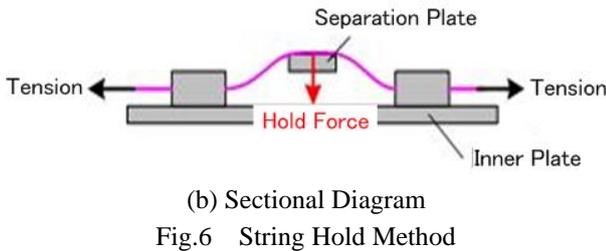
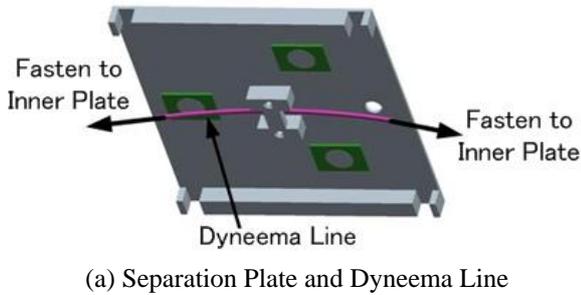
今回の実験により、下記の結果および今後の設計に対する改良指針が得られた。

- 1) 分離の初期速度は、分離プレートに余計な回転を生じさせないためには、小さい方がよい。
- 2) 分離の初期速度は、テザー伸展の摩擦に打ち勝つためには、大きい方がよい。
- 3) テザーの巻き方は、交差巻きまたは玉巻きで、大半径薄型のコイルとするのがよい。
- 4) 形状記憶合金ワイヤは、復元力が強すぎ、全体が一度に広がるため、先端から伸展する工夫が必要となる。
- 5) マルマンバンド方式では、機構上、締結の解放に時間差が生じてしまうため、回転が生じやすい。

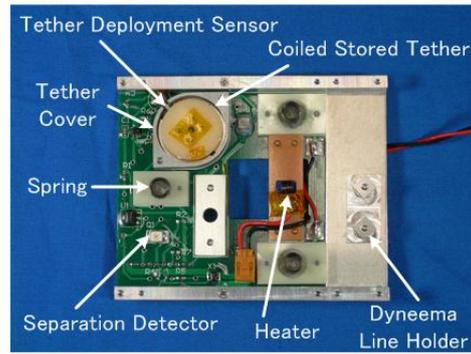
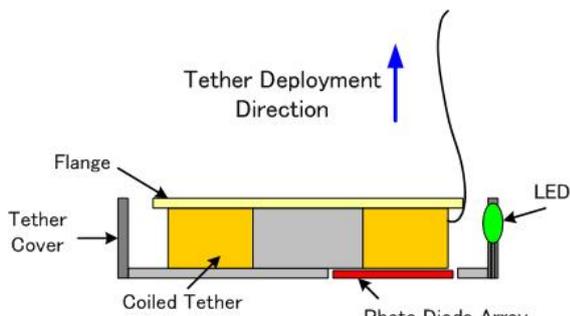
ストリング保持方式

ストリング保持方式のテザー伸展機構は、上述したマルマンバンド方式の無重量実験結果を受けて、分離プレートの分離時の擾乱がより小さくなるように設計した。さらに、テザーの収納法を改良し、計測用のセンサも実装した。本方式では、ダイニー

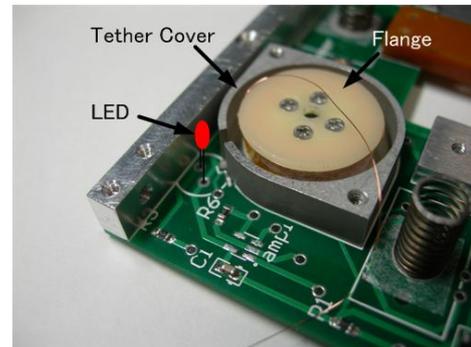
マと呼ばれるポリエチレン製テザーを用いて、分離プレートと内部プレートを結合している。分離時には、ダイニーマ線をニクロム線ヒータで溶断し、3つの押しばねによって分離プレートが放出される。Fig.6 に結合図を示す。



内部プレートには、分離検知センサとテザー伸展検出センサが実装されている。分離検知センサには、フォトランジスタを採用し、分離プレートの分離後、太陽光などの入射に反応する。テザー伸展検出センサは、Fig.7 に示すように、フォトダイオードアレイを用いている。コイルの外側からテザーが解けるにしたがって、センサ出力が大きくなっていく。この検出センサを用いて、テザーの伸展長さを大まかに把握することが可能である。Fig.8 に、内部プレート上の各機器の配置図を示す。

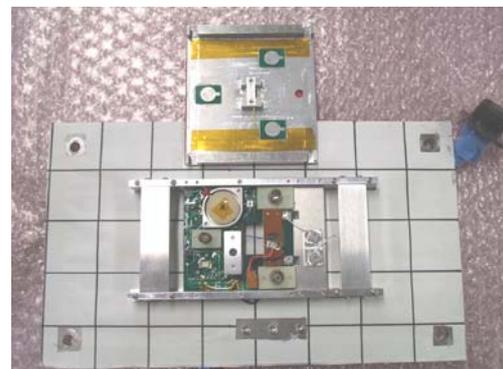


テザーは、直径 0.1mm で長さ約 30m の銅線を使用した。Fig.9 のように、コイル状に収納したテザーの軸にはフランジを取付け、さらに、周りをテザーカバーで囲むことで、伸展中の絡まりを防止した。



本機構のFM 開発の過程では、真空試験・振動試験・温度試験や押しばねを通した電力の送電試験、水平放出試験、電気的統合試験、無重量実験等の環境・機能評価試験を実施してきた。

無重量実験では、分離プレートの分離速度や姿勢擾乱の確認を目的として実施した。テザー伸展機構は、Cute-1.7 + APD 搭載 FM と同等品を用いている (Fig.10)。



実験装置の大きさは、 $200 \times 300 \times 600 \text{ mm}^3$ で、3台のビデオカメラをマルマンバンド方式の無重量実験と同様に Fig.11 のように配置した。

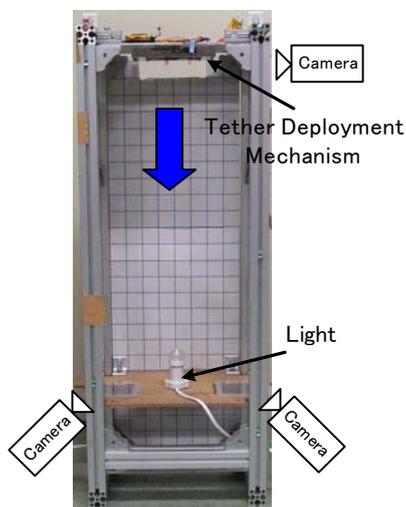


Fig.11 Set-up for Micro-Gravity Test

分離プレートの挙動は、底に配置した2台のカメラ映像から把握できる。機構横のカメラでは、分離直後のテザーをモニターする。実験パラメータは、放出初速度とテザーの巻き量で、初速度は、押ししばねの強さを変えることで対応する。Table 2 にパラメータの詳細を示す。

Table 2 Parameters and Measured Results

Exp.No.	Spring	Ideal Initial Speed ***	Measured Initial peed	Winding Amount
1	same *	0.75 m/s	0.43 m/s	half
2	same *	0.75 m/s	0.47 m/s	full
3	stronger **	1.4 m/s	1.1 m/s	half

*: Spring constant is the same as used in Cute-1.7 + APD.

** : Spring constant is stronger than used in Cute-1.7 + APD.

***: Neglecting friction loss

実験結果から、測定した初速度(0.43-0.47 m/s)は、地上での水平放出試験(0.48 m/s)とほぼ同じであった。実験2から、テザーを100%コイル状に巻いた場合、収納したテザーの一部が、テザー伸展の際に一緒に解け落ちてしまった。ただし、伸展自体は絡まらなかった。実験1でも同様に絡まらずに伸展したことから、テザーの巻き量は、テザーの伸展に悪影響をそれほど及ぼさないことがわかった。分離プレートの姿勢擾乱は、低速での伸展の方が小さかった。Fig.12 に実験1の様子を示す。

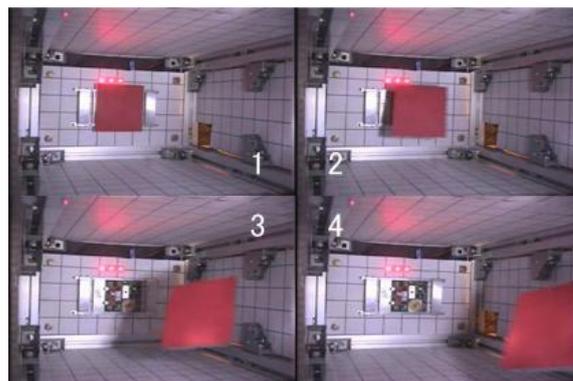


Fig.12 Tether Deployment in Exp. No.1

本機構を搭載した超小型衛星 Cute-1.7 + APD は、昨年2月、軌道投入に成功し、初期運用を行った。しかし、受信機の不具合が生じたため、地上からのコマンドに反応せず、本機構を用いた軌道上でのテザー伸展実験は実施できていない。現在、Cute-1.7 + APD の復旧活動が行われている。

結論

本研究では、2つの方式を用いた超小型衛星搭載用のテザー伸展機構を開発した。それぞれの方式を採用したテザー伸展機構を試作し、各種環境試験・機能評価試験・無重量実験等を通して、ストリング保持方式の有効性を示した。この方式を採用したテザー伸展機構のフライトモデルを開発し、軌道投入に成功した。ただし、衛星本体の不具合により、テザー伸展実験は未実施である。

参考文献

- [1] Cute-1.7 + APD website:
lss.mes.titech.ac.jp/ssp/cute1.7/index_e.html
- [2] T. Yamanaka, M. Iai, K. Fujiwara, S. Masumoto and S. Matunaga, "Design and Microgravity Experiment of Separation Mechanism for Tether Deployment," 56th International Astronautical Congress, Fukuoka, Oct.17-21, IAC-05-C2.4.09, 2005.
- [3] S. Matunaga and T. Yamanaka, "Flight Model Development of Small Tether Deployment Mechanism For Nano-Satellite Cute-1.7 + APD," 57th International Astronautical Congress, Valencia, Spain, Oct.2-6, IAC-06-C2.1.09, 2006.
- [4] T. Yamanaka, M. Iai, T. Usuda and S. Matunaga, "Design and Development of the Tether Deployment Mechanism For Nano-Satellite," The 16th Astrodynamics and Flight Mechanics, Kanazawa, Japan, Aug.1-2, C-5, 2006.