

An Investigation of Contactless Measurement Method of Space Tether Tension and Velocity*

**Yohei Minagawa, Hironori A. Fujii, Tairo Kusagaya,
and Takeo Watanabe**

Tokyo Metropolitan University

Postal address : 6-6 Asahigaoka, Hino, Tokyo, 191-0065, Japan

Abstract:

The method of measuring both the tether tension and the speed without touching tether is studied in this paper as a contact less measurement method. The tether tension can be measured without any disturbance in this method. This paper examines experimentally the method to measure the tether tension and speed without contact by employing a laser displacement sensor. The range of a tension is expected to become micro level in 10^{-2} N to control the structure in space. The tether SSPS (Space Solar Power System) project is as an example to control the vibration of the structure by using the tether technology. This is a system that generates electricity, converts the electric power into the micro wave in space, and transmits it to the earth from space, and tether is used to control the vibration of the solar panel. The tether moves in accordance with the panel vibration and the speed resulting in the tether. A contact less measurement device is expected to be a useful on for such low tension tether as used in large space structure of SSPS.

* Presented at the 11th SPS Symposium, 17-18 September, 2008

宇宙テザー張力と速度の非接触計測法の検討

皆川洋平、藤井裕矩、草谷大朗、渡部武夫（首都大学東京大学院）

1. 序論

近年、様々なテザーシステムが考案されている。現在、考案されているテザーシステムに宇宙太陽発電システムがある。これは次世代のエネルギー供給の一部を担うと考えられている。これは太陽発電衛星（Space Solar Power Satellite : SSPS）を宇宙に打ち上げて太陽発電パネルを展開し、宇宙空間で太陽光発電を行い、マイクロ波で地上に電力を送信する発電システムであり、自然なエネルギーを安定供給することができるという特徴がある。このSSPSの中で、無人宇宙実験システム研究開発機構（USEF）が提案するテザー型SSPS実証モデルがある[1]。これは大型柔軟宇宙構造物として扱われ、その特徴に非常に低い周期で振動し、また軌道上では減衰が小さく、その主として構造減衰があげられ

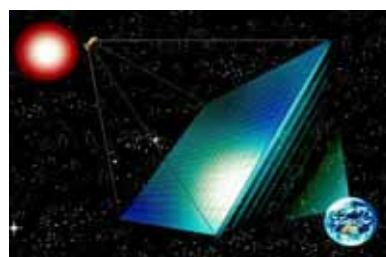


Fig.1 Tethered-SSPS(USEF)

る。しかし、その構造減衰でさえもわずかな減衰とされる。そこで姿勢変更や軌道変更の際に、励起される振動をテザーの張力によって振動を制御することがこのモデルのテザーの特徴である。

このようにテザーシステムは、USEFが提案するモデルのようにテザーの張力を構造物の制御に用いるシステムにおいて、テザーの状態を把握するための計測装置が必要となる。またその他に、宇宙空間でテザーに電流を流すことで推進力を得られる導電性テザーなどもある。これらのミッションの際、テザーの伸展・展開速度の計測などの計測装置が必要となる。SSPSにおいては、低張力状態(1N以下)で走行するテザー（線状材料）の動的挙動の計測・観測技術が必要となる。

しかし、機械式・接触式の張力・速度計測は、走行経路の複雑化、テザー/線材への接触影響や計測装置へのダメージなどの懸念がある。過去にテザーの張力を測るものに歪ゲージやトルクモータが使用されてきた。また、テザーの走行速度計測ではモータの回転数を測った計測法などが挙げられる。しかし、このような方法はテザーに接しており、予期せぬ大張力によるセンサの破損や接触を好まない素材でできたテザーなどに走行速度の計測にあたり何らかの影響を及ぼす可能性などがある。

そこで本研究では、展開時・回収時・制御時などでのテザー挙動の監視、長期間使用するテザーを含む大型宇宙構造物の保守点検を考慮して、テザーに接することない非接触な方法でテザーの運動への干渉を小さくし、走行速度及び走行時張力を測定実験を考案した。

2. 非接触計測法の原理

速度 v で走行する弦において、弦の長さ l と線密度 ρ が既知であれば弦の運動の周期または振動数を知ることができれば次式から弦に働く張力を知ることができる[2]。

$$f_n = \frac{n(T - \bar{\rho} v^2)}{2L(\bar{\rho} T)^{1/2}} \quad [\text{Hz}] \quad (1) \quad T = \alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - (\bar{\rho} v^2)^2} \quad [\text{N}] \quad (2)$$

但し、 $\alpha = \rho(v^2 + 2L^2 f_n^2)$

f_n : 振動数 n : 振動モード L : 紐の長さ[m]
 T : 張力[N] $\bar{\rho}$: 線密度[kg/m] v : 速度[m/s]

本研究ではレーザ変位計を用いて、テザーに触れることなく非接触でテザーの走行速度を測定し、テザーの時間履歴から高速フーリエ変換を施し振動数を求め、上式から走行時の張力が求めることができる。

3. 実験概要

Fig.2 に示すように、プーリ間を一方方向に一定速度で走行するテザーがある。そのプーリ間にテザーの時間履歴を測定するための計測装置である Fig.2 のレーザ変位計を 3 箇所設置した。走行しているテザーに対し、外部から振動を励起することで生じる波の伝播の様子 (Fig.3) から走行速度 v を求めた。

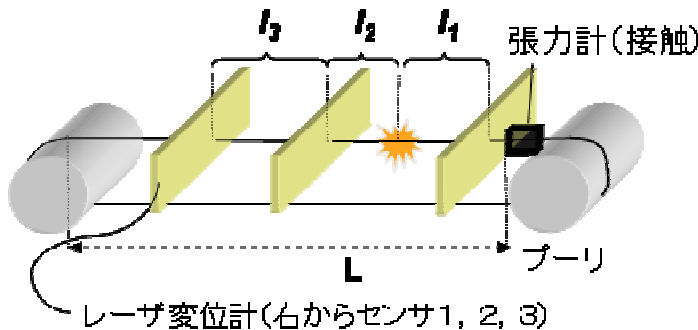


Fig.2 An experiment method

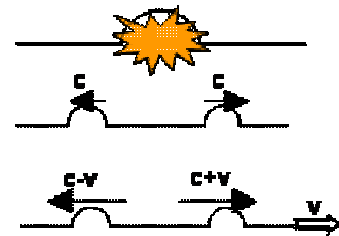


Fig.3 Wave's Propagation

求めた v より (2) 式を用いて張力を算出した。ここで、走行速度の求め方を以下に示す。

$$\Delta t_{12} = \frac{l_2}{c-v} - \frac{l_1}{c+v}, \quad \Delta t_{23} = \frac{l_3}{c-v} \quad (3) \quad v = \frac{1}{2} \left(\frac{l_1 l_3}{l_2 \Delta t_{23} - l_3 \Delta t_{12}} - \frac{l_3}{\Delta t_{23}} \right) \quad (4)$$

ただし、 $\Delta t_{12} = t_2 - t_1$ 、 $\Delta t_{23} = t_3 - t_2$ とする。 t_1 と t_2 、 t_3 は発生した変位がセンサ 1、2、3 を通過時の時刻である。

4.実験結果

$l_1=0.2$ [m]、 $l_2=0.2$ [m]、 $l_3=0.42$ [m]、の時の実験結果をTable1 に示す。実験で用いたテザ一の材質はナイロン糸 $\rho = 1.9 \times 10^{-4}$ [kg/m]。

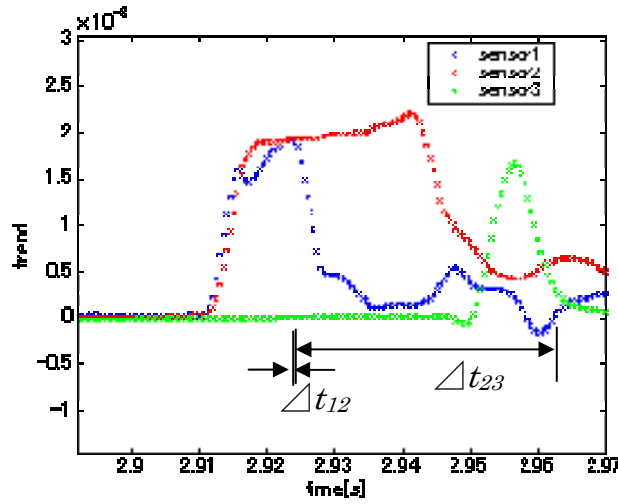


Fig.4 Wave's Propagation($v=0$ [m/s])

Table1 An experiment result

走行速度 v [m/s]	算出速度 v [m/s]	張力 [N]	
		接触型	非接触型
1.71 (± 0.04)	1.59	0.07	0.07
	2.03		0.07
	2.25		0.07
	2.25		0.07
	1.76		0.07
	1.86		0.07
	2.37		0.07
4.28 (± 0.05)	4.68	0.07	0.07
	5.97		0.08
	4.43		0.07
	4.68		0.07
	4.00		0.07
	4.27		0.07
	4.94		0.07
	4.04		0.07

実験結果から本研究の計測方法では、張力において接触型張力計の計測と比べて同精度の結果を得られた。しかし、走行速度計測に関していえば、目標値近辺の値を得ることができたがばらつきがみえる。特に大きくずれている値は、テザーの結び目がプーリを通過する際に振動を励起させ、その波が伝わり、別な波をセンサが検知しまったものであると考える。テザーの結び目とは本実験で使用しているテザーを環状にする際にできる結び目のことである。

5. 考察と今後の課題

振動および、外乱変位の到達時刻差から、走行時のテザー速度、張力を計測する手法についての基礎実験と検討を行った。非接触による張力測定では十分な精度が得られた。速度計測では、計測器（レーザー外径測定器）の時間分解能（2.4 k Hz）が速度分解能の制約となっている。今後の課題として、時間分解能を更に高めた計測を行うことで改善のできると考える。

本研究はテザーを含む宇宙構造物のモニタリング技術を構築と共に、これを用いることで接触計測が難しい極細ケーブルの生産ラインなどへの応用も見込めると考える。

[参考文献]

- [1] 宇宙太陽発電システム (SSPS) 実用化技術検討委員会審問委員会“SSPS 実証実験システム概念検討書” 無人宇宙実験システム開発機構, 2003
- [2] F.R.Archibald and A.G.Emslie “The Vibration of a Stirng Having a Uniform Motion Along Its Length”
- [3] 振動の工学 田島清瀬 (昭 51 年第 6 刷) 産業図書
- [4] 物理学 脇本栄治/ほか著新訂 裳華房, 1959