

## 2D05 宇宙エレベーター用クライマーの高重量駆動機構の解析と開発

○井上文宏, 佐藤紀子, 川上翔平, 寺田百恵 (湘南工科大学),  
石川洋二, 大本絵利, 小田観世(大林組)

Analysis and Development of Heavy Weight Drive Mechanism of Space Elevator Climber  
Fumihito Inoue, Noriko Sato, Shohei Kawakami, Momoe Terata (Shonan Institute of Technology),  
Yoji Ishikawa, Eri Omoto, Miyo Oda (Obayashi Corporation)

Key Words: Space Elevator, Climber Mechanism, High weight

### Abstract

In the space elevator climber design considering practical use, it is expected that the weight will be about tens to hundreds of tons, and the mechanical and dynamical details of each of the climber mechanisms we have developed so far have not been well presented. In this research, by enabling the variable arrangement of the drive roller, the pressing friction of the roller and the contact friction of the tether are increased and the mechanism to increase the driving force of heavy climbers was examined. Such analysis is considered to lead to design and development of future manned climbers. In this paper, we report the analysis of the cross position type mechanism and each friction state obtained by the heavy weight experiment.

### 1. 緒言

宇宙エレベーター建設構想とは宇宙空間から吊り下げられたテザー(ケーブル類)を用いてクライマーを昇降させる技術で、ロケットによる輸送に比べて低コストで安全な究極の宇宙輸送システムとして期待されている。著者らの一部は宇宙エレベーターの建設に向けた詳細な分析と計画を立案し、その実現に向けた研究開発を進めている<sup>(1)</sup>。

前報ではクライマーの駆動機構として対向式、非対向式、交差式の力学的な詳細を示し、複数の交差式ローラの配置による効果を解析的に検証した。交差式の駆動ローラは、対向式(テザーがローラとローラの1点で挟まれた摩擦駆動)と非対向式(テザーがローラの円弧に沿って押付けられた接触駆動)が結合した機構であり、非対向式の接触力を有効的に活用することが、クライマーの昇降能力を向上させるものと思われる<sup>(2,5)</sup>。

そこで、交差式ローラ配置のパターンを変えられる高重量対応(最大 300kg)の実験装置を作成し、昇降時のローラに作用する力の状態を解析と実験により検証した。本報では交差式機構の原理解析と高重量実験で得られた各摩擦状態について報告する。

### 2. 駆動ローラの構成と原理解析

#### (1) 対向式

テザーは、一对のローラによって対面方向に押圧さ



図1 宇宙エレベーター構想のイメージ

れている(Fig.2)。押付摩擦力  $T_a$  は、押圧力  $F$  および摩擦パラメータ  $\mu_1$  が両面に作用することから、式(1)によって決定される。

$$T_a = 2\mu_1 F \cos \theta \quad (1)$$

#### (2) 非対向式

テザーは1つの駆動ローラと2つの受動ローラによって挟まれており、周面での先端摩擦係数は、テザーに接する円弧面で発生する(Fig.2)。この場合、オイラーのベルト理論より、 $\mu$  を摩擦パラメータ、 $\theta$  をテザーの接触面の角度とすると、すべり摩擦力  $T_b$  は以下の通りになる。

$$T_b = F \sin \theta \cdot e^{2\mu_2 \theta} \quad (2)$$

#### (3) 交差式

交差式は、対向式を水平面から角度  $\theta$  ねじることによって変換することができる(Fig.3)。2つのローラ

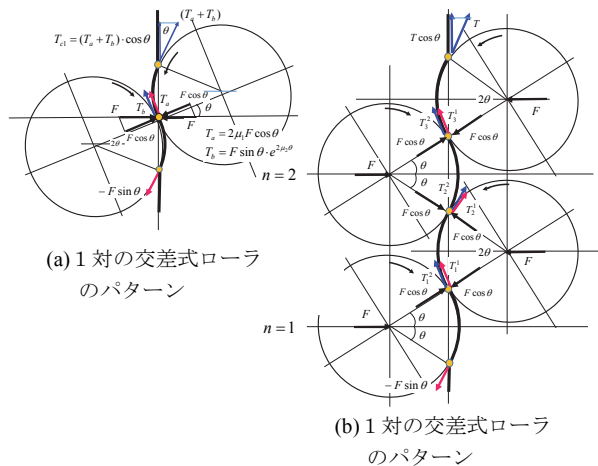


図2 交差式ローラの解析モデル

が互いに交差するため、ローラを押圧したときに生ずる摩擦力  $T_a$  と非対向式のすべり摩擦力  $T_b$  が同時に作用し、より大きい摩擦力が生ずると推定できる。2つの摩擦力加えた  $T_{cl}$  は式(3)となる。

$$T_{cl} = (T_a + T_b) \cdot \cos \theta$$

$$= (2\mu_1 F \cos \theta + F \sin \theta \cdot e^{2\mu_2 \theta}) \cdot \cos \theta \quad (3)$$

さらに、ローラを  $n$  組接続した場合について考える。ローラが増加することで、ローラ同士の接触点と摩擦伝達による張力の増加により、全体として効率的な張力を得ることが出来る。このときの摩擦力  $T_l(n, \theta)$  は式(4)となる。

$$T_c(n, \theta) = (2n-1) \cdot (T_a + T_b) \cdot \cos \theta$$

$$= (2n-1) \cdot (2\mu_1 F \cos \theta + F \sin \theta \cdot e^{2\mu_2 \theta}) \cdot \cos \theta \quad (4)$$

ローラの数  $n$  が増加すると、 $T_l(n, \theta)$  では力の比  $T/F$  はローラの数  $n$  に比例して増加することが分かる。

### 3. 高重量用実験装置の試作と実験

#### (1) 実験装置の概要

2章の結果を基に、交差式駆動機構を応用し、実用的な高重量クライマーを想定した実験装置を開発した(図3)。本装置では、3個のローラを使用し、ローラの配置を対向式から非対向式、交差式に変換することが出来る。交差式を適用することで、最大300kgの荷重を昇降できる設計とした。各ローラは駆動ベルトを介してモータと接続され、同じ回転とトルクが作用できる。高重量物の昇降を行うため、ローラは金属製で十分な押付け力にも耐える構造とした<sup>(6)</sup>。

#### (2) テザーに作用する力の計測

本装置の交差式ローラ駆動を適用して荷重100kgの錘を1.0 m/sで昇降させるためのテザーに作用する力を推定した。2台の固定ローラ上にテザーを置き、

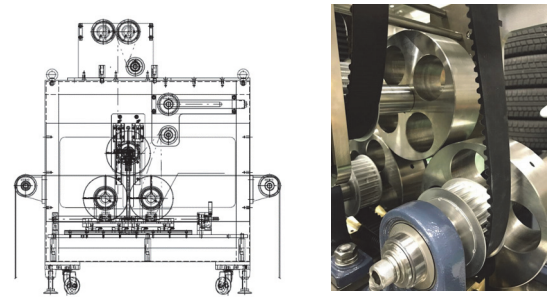


図3 交高重量クライマーを想定した実験装置

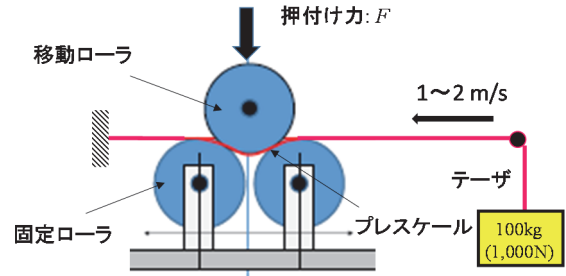


図4 テザーに作用する力の計測実験概略

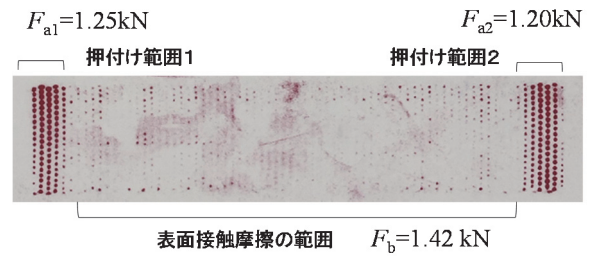


図5 プレスケールの色素沈着状況と力推定

移動ローラでテザーを押付けることで、ローラとローラの押付け摩擦力和ローラ周囲の接触摩擦力の調整を実施した(図4)。移動ローラの押付け力が小さい場合には、錘は上昇しないが、徐々に増加すると錘が上昇するようになり、ほぼ1.0m/sで上昇する押付け状態でのテザー作用力を計測した。計測には、ローラとテザーの間に挟んだプレスケール(感圧紙)の沈着色素濃度から圧力を推定した。

#### (3) 計測結果

図5にプレスケールに沈着した色素の状態を示す。押付け力が作用した範囲は濃い色素沈着の範囲が2ヶ所あり、その間は接触力が作用した薄い色素沈着が確認された。専用の色素計を用いて、点圧力を計測してその範囲を面積で積分することで、作用力を推定した。この結果、押付け力  $F_{a1}=1.20\text{kN}$ 、( $F_{a2}=1.25\text{kN}$ )、接触力  $F_b=1.42\text{ kN}$  となり、テザー全体には  $F_c=3.87\text{ kN}$  が作用していた。1kNの錘を昇降させるには約4倍程度の作用力が必要であることが確認できた。また、接触力は押付け力の約1個分に相当し、その効果は大きく交差式ローラの有効性が確認できた。

なお、今回の実験では固定ローラと移動ローラの角度は 60deg であり、ローラ間の接触角度  $\theta$  を変えた実験を現在実施しており、最も効果的な  $\theta$  を求めることで、より実用性の高い交差式ローラ配置が確定できると思われる。

#### 4. まとめ

将来の宇宙エレベーター構想を実現するクライマーの駆動機構を開発するため、交差式駆動方式に基づく、高重量用の実験装置を試作し、テザーに作用する力の解析と計測実験を実施した。交差式ローラではテザーに押付け力と接触力が作用し、実験の結果、押付け力と接触力の比は2対1であることが分かり、接触力の効果が大きいことが確認できた。接触力を増すことにより、押付け力を小さくすることが可能であり、効率の良い駆動方式が期待できる。今後はローラ間の接触角度  $\theta$  を変えた実験を行い、最も効果的な  $\theta$  を求める予定である。

最後に、本研究にご協力頂いた関係各位に、記して謝意を表す。

#### 参考文献

- (1) 石川洋二 他:特集タワー, 季刊大林, No.53, pp.27-81, 2012.
- (2) 井上文宏, 石川洋二 他: 宇宙エレベーター用クライマーの駆動機構設計と解析, 第 61 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 1F08, 2017.
- (3) 井上文宏, 石川洋二 他: 交差式駆動ローラを用いた宇宙エレベーターの昇降解析と性能検証, 第 62 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 3E16, 2018.
- (4) 井上文宏, 石川洋二 他: 長距離移動を目的としたクライマー機構とループ式テザー試験装置の開発, 第 62 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 3E17, 2018.
- (5) F. Inoue, Y. Ishikawa, et al. : Development and Driving Experiment of Climber Mechanism for Heavy Load in Space Elevator , 68th International Astronautical Congress , Adelaide, Australia, 25-29 September 2017. IAC-17, D4, 3, x38329..
- (6) F. Inoue, Y. Ishikawa, et al. : Experiment study of Climber Mechanism with Cross Roller System for Heavy Load in Space Elevator, 69th International Astronautical Congress, Bremen, Germany, 10. Oct. 2018, IAC-18, D4, 3.12, x45886.