

# B17 軌道上での伸展マストにおけるサーマルスナップ現象の解析

清水駿之介（早大・院），石村康生（早大），宮下朋之（早大）

Shunnosuke Shimizu, Kosei Ishimura, Tomoyuki Miyashita (Waseda University)

## 1. はじめに

宇宙開発や宇宙科学の発展に伴って，大型な宇宙構造物を開発することが求められている．しかし，ロケットによる輸送コストより運搬可能な重量や容積が限られてしまう．このため種々の展開・伸展可能な構造物や，インフレータブル構造が宇宙構造物に用いられている．しかし，このような構造物は寸法あたりの重量や容積が小さくなり，構造の柔軟化が予測される．このため，その剛性の低さから擾乱によって生じる変位が大きくなることや，また構造の大きさから変形量が過大になってしまうことが懸念される．このような観点から，従来までは検討されてこなかった微小な擾乱に対しても対策を講じる必要がある．

また一方で，宇宙軌道上は熱真空環境であり，大きな温度変化が構造に生じる．このため，軌道上の熱環境に由来する擾乱（サーマルスナップ）について，検討を行う必要がある．サーマルスナップは，その発生機構から，(I) 熱変形に対する弾性応答<sup>[1]</sup>，(II) 熱に起因するスティックスリップ<sup>[2,3]</sup>，(III) 熱応力による座屈<sup>[4]</sup> の3種に大きく分類することができる．本研究では，多くの伸展構造物が摺動部を持つという観点から，(II) の熱に起因するスティックスリップ型のサーマルスナップを扱うこととする．この擾乱は，固着状態から滑り状態に急峻に遷移することで構造へ影響（変位・加速度）を及ぼすことにより発生する．

軌道上の熱環境に起因するスティックスリップに関して，各種の研究<sup>[2][3]</sup>によりその特徴が調べられてきた．また，筆者らの以前の調査<sup>[5]</sup>により，伸展マストを模した構造における実験室上での加熱実験と，その実験系を対象とした有限要素解析が行われ，数値計算におけるサーマルスナップ現象の再現と，それに適した摩擦モデルの選定が行われている．しかし，実験室系による実験では温度が緩やかに変化する様子が確認されており，軌道上で生じる入出射時の急峻な温度変化とは異なった特徴を持つため，実際

の軌道における熱環境での調査が求められる．

また，この調査により，擾乱の低減のために動摩擦と静摩擦の差異を低減や，滑りの発生する周波数による構造共振を回避する固有振動数設計などが挙げられたが，このほかの方法についてもより進んだ検討が期待される．

以上の議論を踏まえて，本研究では以下の事項を行った．

- (1) 軌道熱環境を対象としたサーマルスナップ（熱起因スティックスリップ）の解析と検討
- (2) サーマルスナップ（熱起因スティックスリップ）擾乱低減における指針の検討

本稿では，上記の2つについて述べる．

## 2. 熱構造解析（軌道上熱環境）

軌道（図1）上の熱環境において発生する熱起因性のスティックスリップ現象を確認するために，数値計算による熱構造解析を実施した．解析は図2に示すような構造を対象とした．この構造は，X線天文衛星ひとみ（ASTRO-H）における伸展マスト（Extendible Optical Bench, EOB）を簡易化したものである．まず，ASTRO-Hの軌道条件を想定して軌道上の輻射計算を行い，ここで得られた熱入力や放射係数などから定常熱解析を行い部材における温度を計算した．その後，得られた温度データを用いて構造解析を行い，構造の変位および加速度を計算した．

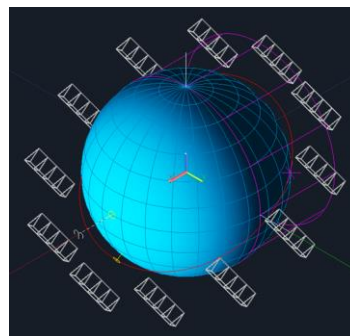


図1 円軌道上の構造

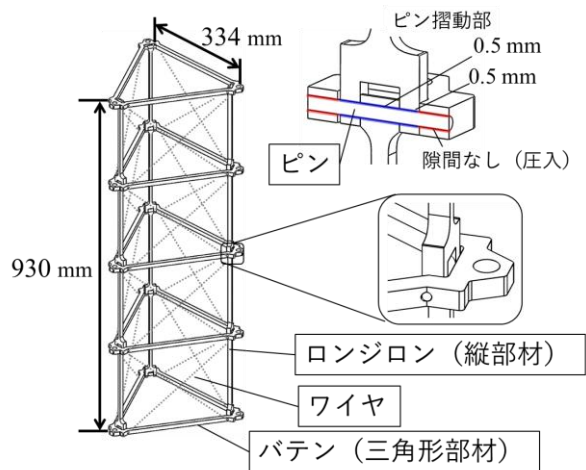


図2 対象構造

## 2.1 軌道上熱解析

宇宙軌道上における熱解析は大きく2段階(軌道条件を想定した輻射計算と定常熱解析)に分かれる。まず、輻射計算が表1で示される条件のもと行われた。軌道上を360分割した各所において、太陽からの入力に対してレイトレーシングを行うことで熱入力量、および構造の放射係数を計算した。その後、輻射計算で得られた結果を用いて、表2に示される条件のもと定常熱解析が行われた。ここで、定常熱解析も輻射計算と同様軌道上を360分割した各点において実施された。

表1 軌道輻射計算条件

計算方法	Monte Carlo 法 (レイトレーシング)	
軌道条件	軌道特性	円軌道
	軌道傾斜角	31 deg
	高度	575 km
	周期	5770 sec
輻射条件	太陽強度	1354 W/m <sup>2</sup>
	アルベド (地球)	0.35
	地球温度 (赤外放射計算)	250 K
光学特性	放射率	0.97

表2 定常熱解析条件

計算方法	Newton 法	
計算条件	材料特性	A2017 (アルミニウム)
	放射形態係数	輻射計算結果
	熱入力	
	要素タイプ	6 面体要素
要素数		27 要素
		(3 要素/パテン) (1 要素/ロンジロン)

熱解析による計算結果を図3および図4に示す。図3は1段目のバテンにおける温度を、図4は1段目と2段目のバテン間に位置するロンジロンの温度を示している。図内で用いられる凡例は図5に対応している。構造の位置は角度で示され、構造が太陽に最も近くなる位置を0 [deg] とした。ここで、異なる段のバテンおよびロンジロンにおいても同様の結果が示され、段数による温度計算結果の違いは確認されなかった。

バテンおよびロンジロンの計算結果より、120 [deg] および 240 [deg] 付近において温度の急峻な変化が確認された。これは構造が地球の影に入ることにより生じる。

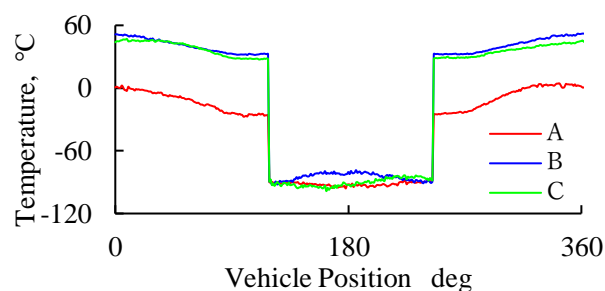


図3 バテンの温度変化 (1段目)

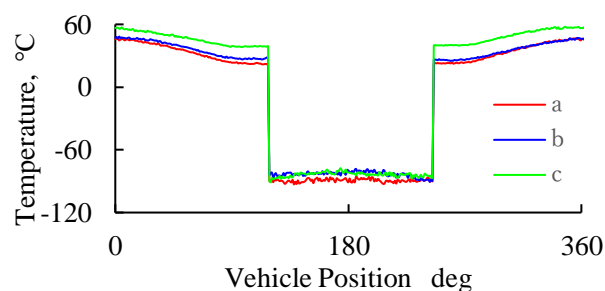


図4 ロンジロンの温度変化 (1-2 段目間)

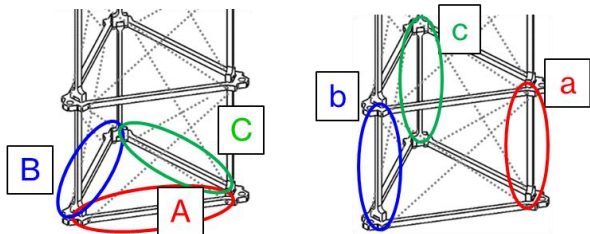


図5 温度測定位置

## 2.2 構造解析

熱解析にて得られた部材各箇所の温度を用いて、構造解析を実施した。構造解析では、温度適用前にワイヤによる張力を付与した定常解析を実施し、その後軌道一周分（5770 秒）の動解析を実施した。この時の解析条件を表3に示す。

ここで、接触計算に用いる摩擦モデルとして、Rising Static Friction モデルを採用した。このモデルは2つの摩擦係数（静摩擦・動摩擦）により記述される摩擦モデル<sup>6)</sup>であり、静摩擦係数が摺動部の固着時間に伴って増大するという特徴を持つ。このモデルは、以前の調査<sup>5)</sup>より熱起因性スティックスリップの解析に有効であるということが確認されている。Rising Static Friction モデルにおける静止摩擦係数 $\mu_s$ は式(1)で示される。

$$\mu_s = \mu_{s\infty} - (\mu_{s\infty} - \mu_k)\exp(-\gamma\tau^m) \quad (1)$$

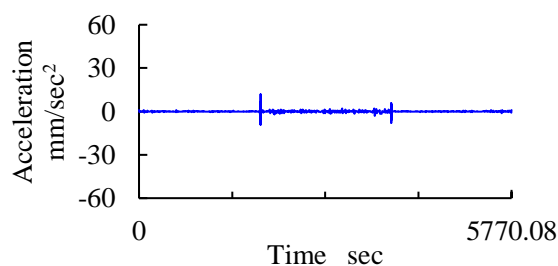
ここで固着時間は $\tau$ で表される。 $\mu_k$ は動摩擦係数（定数）で、 $\gamma$ および $m$ は固着時間の依存性を表すパラメータとなる。固着時間 $\tau$ が十分大きくなる時、 $\mu_s$ は $\mu_{s\infty}$ に漸近する。ここで用いられた摩擦係数は、別途実施された摩擦同定実験により決定した。

構造実験の結果を図6に示す。図は最上段（5 段目パテン）における加速度を示している。構造は5770.08秒で軌道を一周する。いずれの方向においても、入蝕時と出蝕時に加速度の変動が確認される。最大加速度は、入蝕時にはX方向にて11.9 [mm/sec<sup>2</sup>]、Y方向にて-30.7 [mm/sec<sup>2</sup>]であり、出蝕時にはX方向にて-7.93 [mm/sec<sup>2</sup>]、Y方向にて-49.7 [mm/sec<sup>2</sup>]であった。

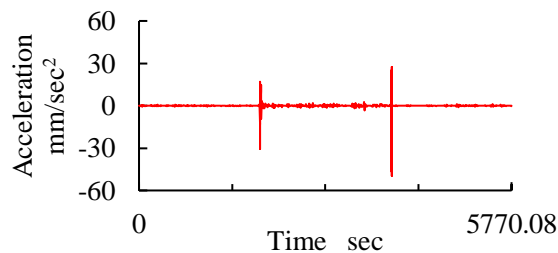
表3 構造解析条件

計算方法	HHT- $\alpha$ 法 ( $\alpha = -0.1$ )	
要素条件	要素タイプ	6 面体要素（摺動部） 4 面体要素（その他）
	要素数	62193
境界条件	荷重・入力	ワイヤ張力 温度（熱解析結果）
	変位条件	下端（1 段目パテン）を固定
接触条件	要素数	面-面接触 ペナルティ法
	摩擦モデル	Rising Static Friction
	摩擦係数	$\mu_s = 0.0893 - 0.0231\exp(-0.570\tau^{0.629})$ $\mu_k = 0.0623$

以上の解析より、軌道上の温度環境では、入蝕および出蝕時の温度変化によりインパルス的な加速度が発生することが確認された。また、実験系での緩やかな温度変化では滑りに伴う加速度が連続で発生していたのに対して、軌道上での解析では大きな加速度が一度発生するという差異が認められた。



(a) X 方向加速度



(b) Y 方向加速度

図6 構造最上段の加速度

### 3. 擾乱低減方法の検討

従来の検討<sup>[5]</sup>より、滑りの発生頻度に起因した共振発生の回避などが提案された。しかし、共振の回避に関しては滑りが繰り返し発生する場合を想定しているため、入出蝕時のインパルス的な加速度の対策としては適切ではない。そのため、異なった擾乱の対策について検討を行う必要がある。

本稿にて検討するのは、構造へ付与する張力を大きくし、接触圧力や摩擦力を大きくすることで滑りの発生を抑制する方法である。張力の大きさが擾乱に与える影響を評価するため、張力を変えた場合における発生加速度について数値解析を行った。このときの解析は実験での温度変化を用いて実施された。

図7に、解析結果における張力と最大加速度の関係を示す。張力が小さいとき、最大加速度は増加傾向を示す。800 [N] 付近より大きい張力では、最大加速度は小さい値を示す。このとき、滑りの発生は確認されない。

以上の検討より、一定以上のワイヤ張力を付与させて滑りによる擾乱の抑制が可能であるとみられる。一方で、滑りが発生する場合にはワイヤ張力が大きいほど擾乱の加速度が大きくなる。また、張力の増加は構造物への伸展性能へ影響を及ぼす可能性が存在する。このため、各種のトレードオフを検討したうえで滑りを抑制する適切な張力を選定する必要がある。

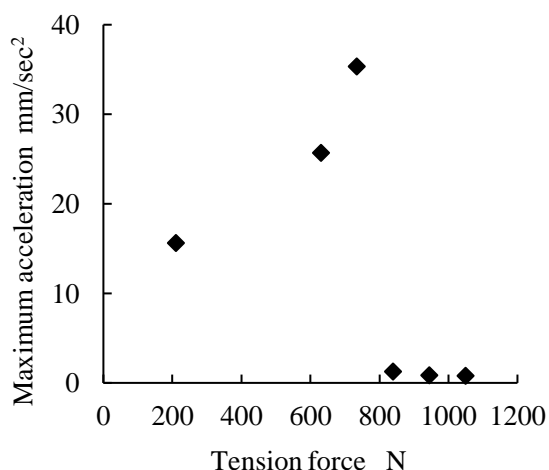


図7 ワイヤ張力と最大加速度の関係

### 4. まとめ

軌道上の環境を想定した熱構造解析を行い、熱起因性スティックスリップによるサーマルスナップ現象を調査した。解析結果より、軌道上において入出蝕の際に大きな加速度の発生が確認され、サーマルスナップ現象の発生が確認された。また、擾乱を低減する方法として張力の付与による方法を提案した。構造に付与する張力を一定以上大きくすると、滑りによる擾乱の抑制が確認された。一方で滑り発生時には張力が大きいほど発生加速度が大きくなる傾向が確認されたため、適切な張力設定が必要となることが示唆された。

### 参考文献

- [1] John D. Johnson, Earl A. Thornton, “Thermally Induced Dynamics of a Spacecraft with a Flexible Appendage”, Journal of Guidance, Control and Dynamics, Vol. 21, No. 4, pp. 581-587, 1998
- [2] Michel D. Ingham, Yool A. Kim, Edward F. Crawley, Hugh L. McManus, David W. Miller, “Experimental Characterization of Thermal Creak Response of Deployable Space Structures” Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 37, No. 3, pp. 342-349, 2000.
- [3] 小島寧, 谷脇滋宋, 狼嘉彰, “張力型展開構造を有する衛星のスティックスリップに対する姿勢安定度評価”, 日本機械学会論文集, 第 71 巻, 703 号, pp. 784, 2005.
- [4] Victor Birman “Thermomechanical Wrinkling in Composite Sandwich Structures”, AIAA Journal, Vol. 42, No. 7, pp. 1474, 2004.
- [5] 清水駿之介, 石村康生, 宮下朋之, “伸展マスト構造の擾乱現象における摩擦特性に関する研究”, 第 62 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 3J14, 2018.
- [6] 加藤仁, 松林恒雄, 佐藤則夫, “案内面の静摩擦特性に関する一考察”, 日本機械学会論文集, 37 巻, 299 号, pp. 1427, 1971.