

# B19 熱サイクル環境下におけるラッチ荷重制御による キネマティックカップリングの位置決め精度向上

○浅沼範大(早大・院), 石村康生(早大), 佐藤泰貴(JAXA), 宮下朋之(早大)

Improvement of positioning accuracy of kinematic coupling by latch load control under thermal cycle environment

Norihiro Asanuma(Waseda Univ.), Kosei Ishimura (Waseda Univ.), Yasutaka Satoh(JAXA) and Tomoyuki Miyashita(Waseda Univ.)

**Key Words:** Structural Design, Structural Mechanics, Kinematic Coupling and Thermal Deformation

### Abstract

Kinematic coupling is a well-known method to constrain the relative degrees of freedom between two rigid bodies with high precision. In various deployable structures, the kinematic coupling has been used. The famous kinematic coupling is the Maxwell clamp, which consists of three pairs of two degrees of restraint. Hence the Maxwell clamp shows symmetry behavior under thermal cycle environment. When external disturbance torque is applied, however, latch force caused at each constraint becomes different, so the tendency of slip becomes different depending on the latch force. In that case, accuracy of kinematic coupling becomes lower. In this paper, we analyze the best way of latch force control for improving the positioning accuracy of kinematic coupling. In the most improved control, the maximum latch force at each coupling is equal and the waveform of latch force has the same amplitude with the phase shifted by 1/3 period. Finally, it was found through experiments sine wave control is the most effective among the condition of analysis result.

### 1. はじめに

キネマティックカップリングは、2剛体間の相対的な6自由度を必要十分に拘束する手法として知られており<sup>1)</sup>, その再現性についての研究が実施されている<sup>2,3)</sup>. 展開構造物などにおいても高精度位置決め技術として、James Webb Space Telescope や、ASTRO-Hなどの伸展式光学架台にも用いられている<sup>4,5)</sup>. また過拘束では無いため、幾何学的な不整合による初期の内部応力や、熱応力の発生を回避できる特徴もある. 代表的なキネマティックカップリングの形式としては、3つの2自由度拘束を有するMaxwell clamp と3, 2, 1自由度拘束をそれぞれ1つずつ有するKelvin clampなどが挙げられる(図1). 前者のMaxwell clampは、V溝と球のペアからなる2自由度拘束を3つ有する. 3つのV溝の溝方向は、一点で交わるように設計される. 面内の熱膨張に対しては、理想的にはV溝上を球が滑り、熱応力が発生しない. そして、前述の交点が不動点となる. 後者のKelvin clampは、ユニカルと球のペアからなる3自由度拘束と、V溝と球のペアからなる2自由度拘束、平面と球のペアからなる1自由度拘束によって構成される. V溝の溝方向は3自由度拘束の中心を通るように設計され、面内の熱膨張に対しては、3自由度拘束点が生動点になる. ASTRO-H搭載の伸展式光学架台では、Muses-B搭載の伸展マストと同様に、Kelvin clampが採用されていたが、光学架台の様な用途において熱変形の観点では、Maxwell clampのように不動点が図心の位

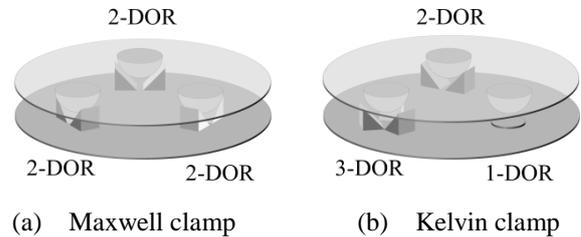


図1 キネマティックカップリングの代表例  
置に配置できる方が望ましい.

しかし、不動点を図心にするためには、熱変形時に各ラッチ部が等しく滑る必要がある. つまり、各ラッチ部の摩擦力が不均一になると等しく滑らなくなる. このような状況は伸展式架台に外乱トルクが発生する時におこりうる.

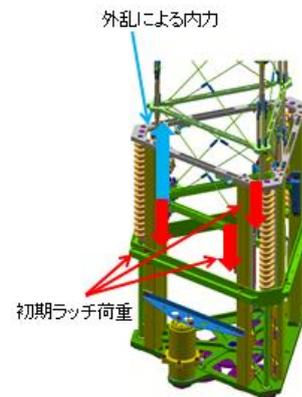


図2 伸展式架台下端のキネマティックカップリングのラッチ部に外乱による内力が付加された様子

図2に示すように外乱トルクによってラッチ部に発生する内力を考える。ラッチ部では締結に必要な初期ラッチ荷重がかかっており、初期ラッチ荷重と内力の和がラッチ荷重になる。最終的なラッチ荷重が不均一になると、摩擦力が均一ではなくなり、熱サイクル環境下では各ラッチの滑りが不均一になる。その結果、図心が不動点でなくなり、熱サイクル終了時に残留変位が生じてしまう。この残留変位は、外乱トルクが無くなったあとも残る恐れがある。このような不均一荷重が発生するケースを扱っている研究はほとんどない。本研究では、ラッチ荷重制御することで、熱サイクル負荷時の図心変位の抑制を研究目的とした。研究のプロセスとしては、ばねマスモデルで数値解析を実施し、図心変位を抑制できるラッチ荷重制御関数を探す。実験によって、そのラッチ荷重制御関数の有効性を検証する。

## 2. キネマティックカップリングと実験構成

キネマティックカップリングの外観図を図3に示す。伸展式光学架台の根元の構造を模擬しつつも、ここでは熱サイクル負荷時の不均一荷重の影響をより顕著に評価するために、バテンの材料として線膨張係数が大きくヤング率が小さいPC樹脂を用いた。バテン(PC樹脂)は1辺約300[mm]、厚さ10[mm]、各ボール(A5052)は $\phi 40$ [mm]、V溝(A5052)は $40 \times 40 \times 46$ [mm]、傾斜角はラッチ完了条件を考慮して40度に設定している<sup>6)</sup>。

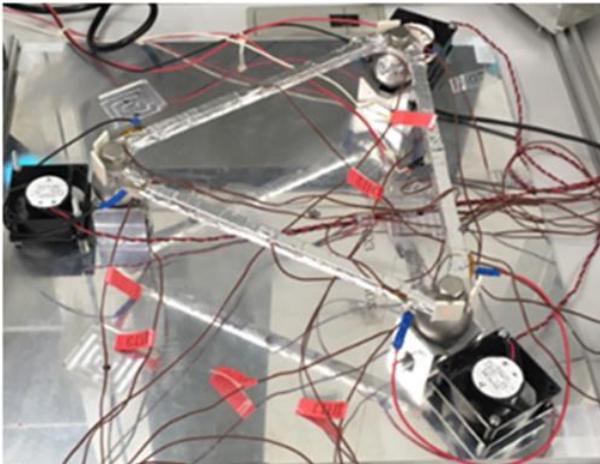


図3 設計したキネマティックカップリングの外観

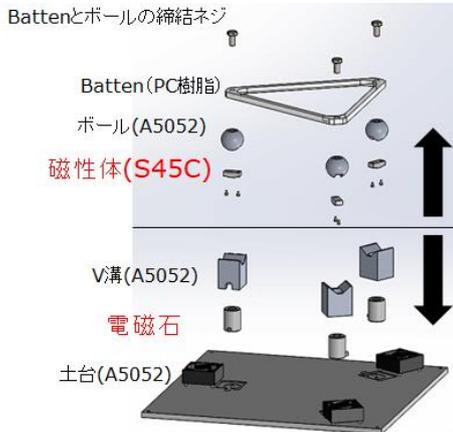


図4 キネマティックカップリングの展開

本研究では、ラッチ力を制御するために電磁石を用いることとした。ボールに磁性体を埋め込み、V溝の下に電磁石を挿入し、磁性体とボールとの距離を0.10[mm]以下になるように設定した。その上で最大電磁力が30[N]になるような電磁石を選定した。図4は、展開図である。

熱負荷は、各辺に巻き付けられたテープヒータ(クレイボン製)によって行った。2分半の加熱で最高上昇温度が約20度に達したら、熱入力を切り空冷した。この空冷は初期温度から0.1度の差になるまで続けた。温度測定はバテンの各辺に5点ずつ熱電対を貼り付け測定する。バテン1辺で計測した5つの温度を平均した値をバテン1辺の温度と定義する。以下の図は各辺の温度履歴であり、すべての実験で共通している。変位測定は以下の図に示すように各頂点異なる角度(矢印の方向)からレーザーを当て変位を計測した。赤の矢印はレーザーの向きである。図6の各頂点の2変位を小文字で書いてあるlocal変位に変換した。ここで得られた各頂点のlocal変位を図6に大文字で書いてあるglobal座標に変換し、各頂点でその平均を図心変位と定義した。

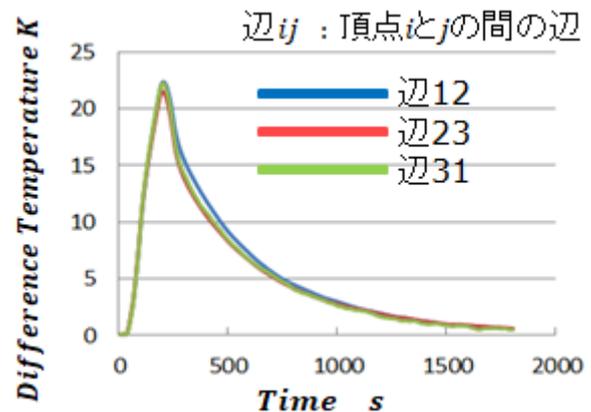


図5 各辺の温度履歴

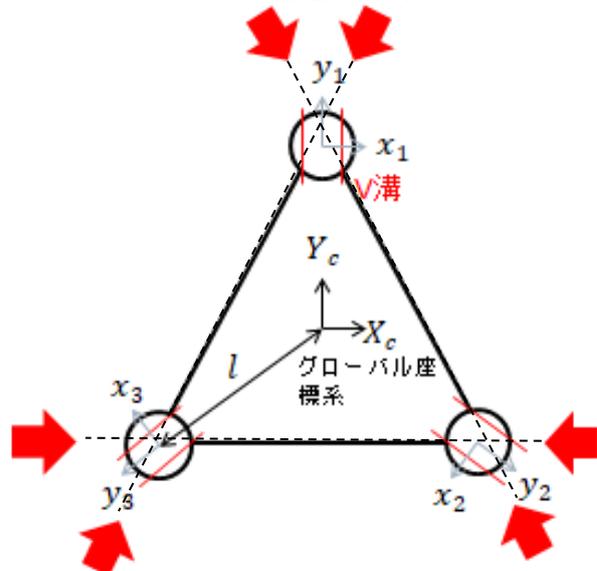


図6 レーザー変位計を当てる向

### 3. 不均一荷重時の熱サイクル負荷実験

ここでは、各頂点2種類のラッチ荷重を負荷し実験を実施した。①は均一荷重負荷時の熱サイクル負荷実験、②は不均一荷重負荷時の熱サイクル負荷実験の荷重条件である。

①  $N_1 = N_2 = N_3 = 1.4[N]$

②  $N_1 = 10[N], N_2 = N_3 = 1.4[N]$

1.4[N] は自重であり、これを初期ラッチ荷重として考える。一方で10[N] は自重に電磁力を負荷したものだが、初期ラッチ荷重と外乱トルクによる内力の和に相当する。この状態で熱サイクルをかけた所、以下のようなlocal - y座標変位を得た。均一荷重実験の場合、各local - y座標変位はほぼ0に収束していることがわかる。しかし、不均一荷重実験では、0に収束しない頂点変位があることが分かる。これは、10[N] 荷重が負荷されている $y_1$ 座標変位が滑りにくいため、最大変位小さくなり、その影響が他の変位にも発生したため、残留変位発生につながったと考えられる。次にこの各頂点で得られた変位を元に図心変位を導出し比較した。図9は、図心変位の時間履歴を均一荷重、もしくは不均一荷重を負荷したときと比べて一例である。これを見ると不均一荷重が負荷されたときでは、図心変位は大きくなったまま原点に戻らなくなっていることが分かる。また、図10は3回実験をした時の図心の平均変位と残留変位の平均を比較したものである。これからも不均一荷重負荷時では、図心の残留変位、平均変位がともに大きくなることが分かった。

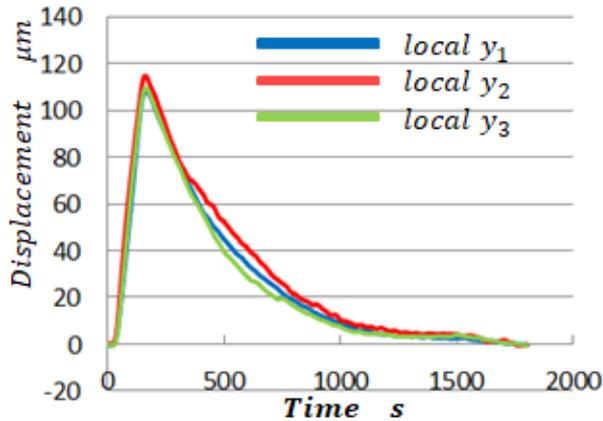


図7 均一荷重負荷時の各頂点のlocal y座標変位

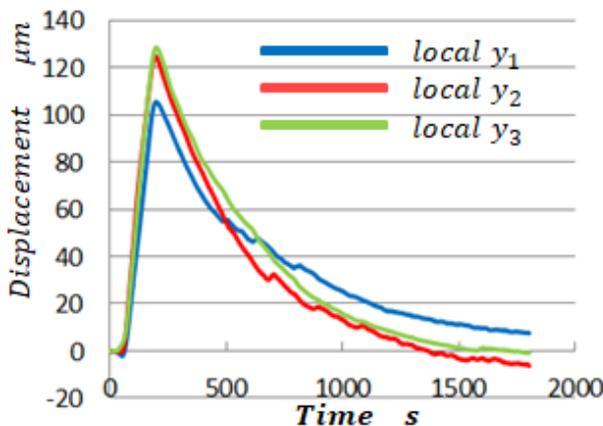


図8 不均一荷重負荷時の各頂点のlocal y座標変位

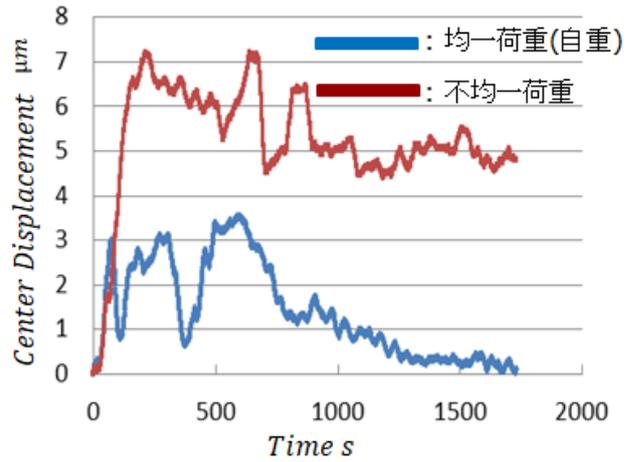


図9 図心変位の履歴比較(一例)

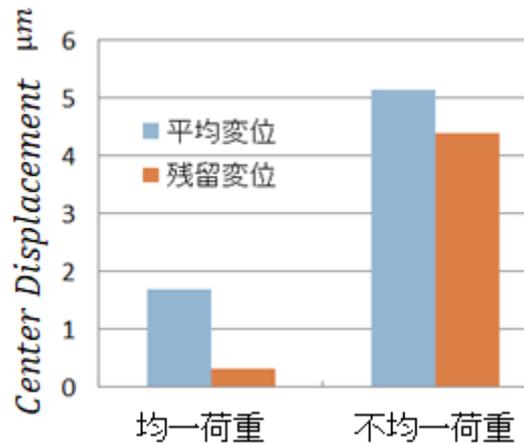


図10 図心平均変位と残留変位の比較

### 4. フーリエ変換の実施と制御荷重関数の決定方法

3節の不均一荷重実験で得られた変位のうち $y_1$ 座標変位でフーリエ変換を実施した。この変位では、熱変形だけでなく、摩擦の影響によるスリップなどのサーマルスナップの影響が含まれた変位である。そこで、変位からその変位の移動平均したものを引いたサーマルスナップ変位についてフーリエ変換を実施した。加熱時と冷却時に分けて評価をしたところ、以下の図11, 12のような結果になった。加熱時では0.30[Hz]、冷却時では0.34[Hz]のところ卓越した周波数となっている。

次に制御荷重関数の決定方法について説明する。まず、制御関数を正弦波にするか、矩形波に限定する。次に、制御荷重を指定する所を3つのラッチ箇所すべてか、10[N] が負荷されているところか、1.4[N] が負荷されているかなどで区別した。周波数については、実施したフーリエ変換をもとに結果として出た卓越周波数近傍、もしくは一桁以上違う周波数かで(0.001~10[Hz])決定する。

このようにしてばねマスモデルの数値解析で計算を約1000通り (波形の種類(2通り)×オフセット荷重パターン(4通り)×周波数・振幅・位相差の組み合わせ(50~200通り)) 実施し、その中で、残留変位と平均変位の積が最も小さくなるパターンを導出した。

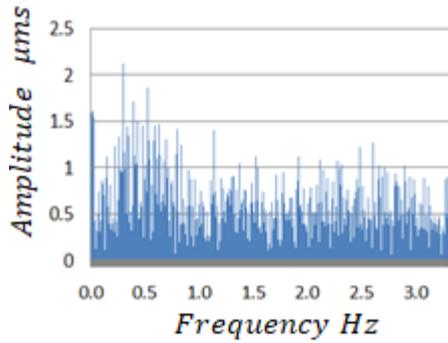


図11 加熱時のサーマルスナップ変位のフーリエ変換

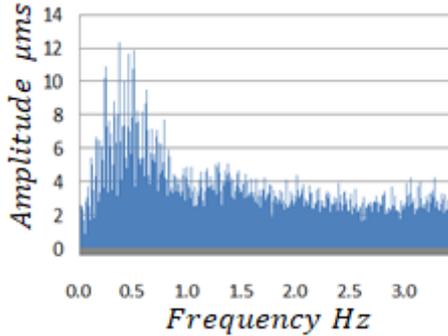


図12 冷却時のサーマルスナップ変位のフーリエ変換

## 5. 解析方法

本研究では、キネマティックカップリングをばねマスモデルに置き換えて数値解析を実施した。ここではクーロン摩擦モデルで数値解析を実施した。キネマティックカップリングの各頂点をそれぞれ頂点1, 2, 3とする。バテンの質量は頂点に配置された球と合わせて集中質量 $m_i$ としてモデル化する。また、V溝とボールの最大静摩擦係数を $\mu_s$ 、動摩擦係数を $\mu_k$ とした。頂点 $i$ のラッチ荷重を $P_i$ 、頂点 $i$ の頂点 $j$ 側のV溝とボールの垂直抗力を $N_{ij}$ 、頂点 $i$ のボールの*local*- $x$ 方向にかかる熱応力を $F_{xi}$ 、*local*- $y$ 方向にかかる熱応力を $F_{yi}$ と置いた。また、キネマティックカップリングのボールとV溝が動きに関しては以下の仮定を置いた。

[仮定1]

キネマティックカップリングのバテンはラーメン構造であるが、トラス構造だと仮定する。

[仮定2]

各ボールにかかるローカルな $z$ 軸周りのトルクを無視する。

[仮定3]

V溝とボールが片側接触(右側)をした時に、V溝斜面に対して垂直な方向の力(垂直抗力 $N$ 、ラッチ荷重 $P$ 、熱応力 $F_{xi}$ )はローカルに釣り合うと仮定する。

$$N_{ij} - P_i \cos\theta - F_{xi} \sin\theta = 0 \quad (1)$$

[仮定4]

両側接触状態では動かないので、摩擦力を無視したうえで、V溝方向に対して垂直な方向とグローバル座標系の $z$

方向の力はローカルに釣り合うと仮定する。

$$\begin{aligned} (N_{ij} + N_{ik}) \cos\theta - P_i &= 0 \\ (N_{ij} - N_{ik}) \sin\theta + F_{xi} &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

[仮定5]

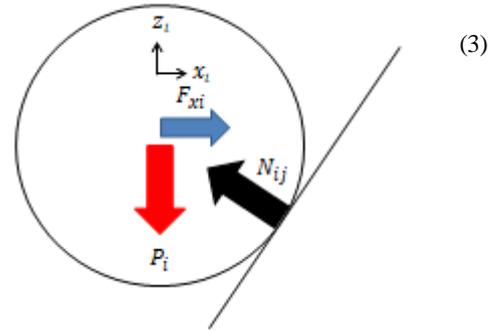


図13 片側接触での垂直抗力、ラッチ荷重、熱応力のつりあい

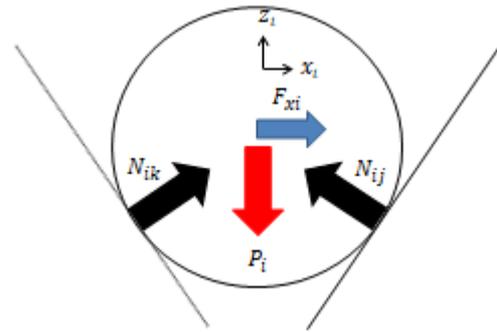


図14 両側接触での垂直抗力、ラッチ荷重、熱応力のつりあい

両側接触状態から片側接触状態になる条件は片方の垂直抗力の値が0になるときであると仮定する。従って、両側接触が維持される条件は仮定3, 4より

$$-P_i \tan\theta < F_{xi} < P_i \tan\theta$$

両側接触から片側接触(右側)するとき、下る方向に摩擦力が発生するので、以下の式を満たしたときに片側接触になり滑り始める。

$$F_{xi} \sin\theta - P_i \cos\theta > \mu_s N_{ij} \quad (4)$$

片側接触状態(右側)において坂を下る場合は、摩擦力が上る方向に発生するので、以下の式を満たす必要がある。

$$P_i \cos\theta - F_{xi} \sin\theta > \mu_s N_{ij} \quad (5)$$

片側接触(右側)で坂を滑る時は図15のようなフリーボディダイアグラムがかけるので、以下の運動方程式となる。

$$m\ddot{x}_i / \cos\theta = F_{xi} \sin\theta - P_i \cos\theta - \mu_k N_{ij} \operatorname{sgn}(\dot{x}_i) \quad (6)$$

同様にして、左側斜面でも運動方程式を導く。*local*- $y$ 方向変位では、摩擦力を $\mu_s(N_{ij} + N_{ik})$ と定義した。すると以下の式を満たすと*local*- $y$ 方向に滑り始める。

$$F_{yi} > \mu_s(N_{ij} + N_{ik}) \quad (7)$$

振動時には以下の運動方程式を満たす。

$$m\ddot{y}_i = F_{yi} - \mu_k(N_{ij} + N_{ik})\text{sgn}(\dot{y}_i) \quad (8)$$

このようにして平面6自由度の運動方程式が立てられるので、ルンゲクッタ法によって数値解析を実施した。

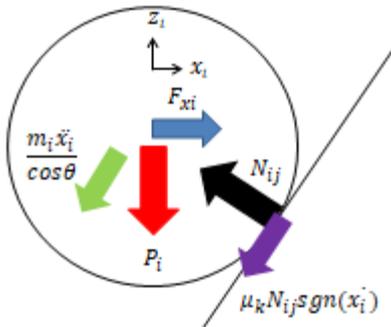


図15 片側接触でのフリーボディダイアグラム

### 5. 解析結果と実験で実施する制御荷重関数の決定

解析の中で図心平均変位、残留変位のいずれかが改善されているケースについてまとめたのが図16である。この図では、横軸が図心平均変位、縦軸が図心残留変位であるが、ともに不均一荷重負荷時の変位でそれぞれ正規化している。各ケースにどのような特徴があるかを確認した。

各頂点の荷重最大値が等しくないケースでは、図心残留変位、平均変位が少ししか改善されていない。一方で、各頂点での荷重最大値が等しく、位相が1/3周期ずつずれている同一の関数波形を用いたケースでは、著しく改善された。

これらの解析結果から実験するケースを選定した。選考条件は2つである。1つは、矩形波と正弦波を1つずつ選ぶこと。2つ目は、実験において加熱時と冷却時で周波数を変えなくて済むケースなど再現性が高いものを選定すること。以上の条件から、2件のケースが選定された。1つはオフセット負荷荷重が10[N]で揃えられ、荷重振幅が3.0[N]、制御周波数が加熱時、冷却時でともに0.36[Hz]、各波形1/3周期位相がずれている正弦波制御。2つ目はオフセット負荷荷重が10[N]で揃えられ、荷重振幅が6.5[N]、制御周波数が加熱時0.5[mHz]、冷却時で0.35[Hz]、duty比が1/3で各波形1/3周期位相がずれている矩形波制御が選ばれた。

図17は選ばれたケースでの図心平均変位と図心残留変位の解析結果を示した図である。緑色で囲まれているのが正弦波制御、赤色で囲まれているのが矩形波制御である。ここで分かることは、どちらのケースもサーマルスナップ周波数近傍の周波数をラッチ制御周波数に持つところである。制御周波数がサーマルスナップ周波数近傍にあると、サーマルスナップの発生タイミングが各頂点でランダムに発生することを防ぎ、各頂点が順番に滑るようになると考えられる。すると、各頂点のV溝方向変位の不均一さを低減させられ、図心変位の改善につながったと考えられる。

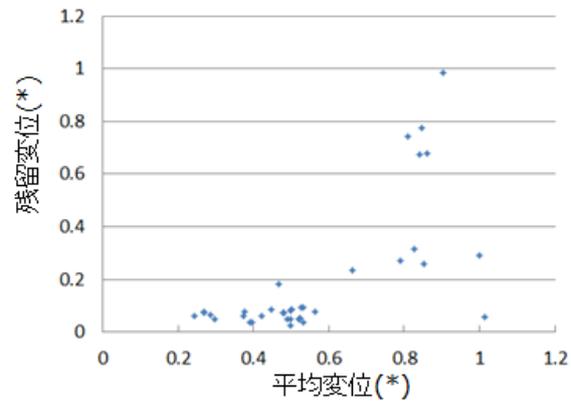


図16 解析で図心平均変位と残留変位が改善されるケース  
\*: 制御なし( $N_1 = 10[N]$ ,  $N_2 = N_3 = 1.4[N]$ )に比べての割合

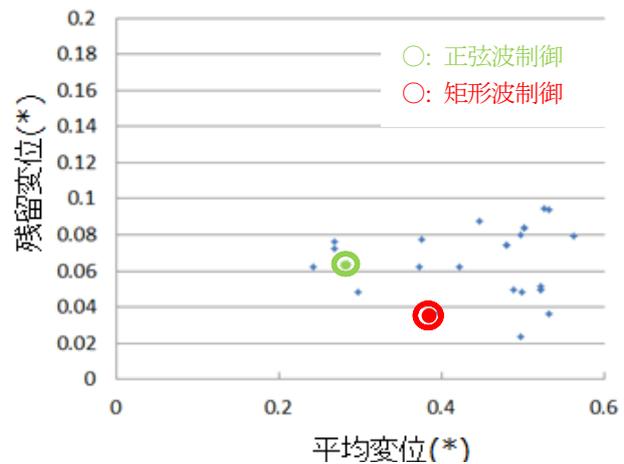


図17 実験で実施する制御荷重関数使用時の解析結果  
\*: 不均一荷重負荷時に比べての割合

### 6. ラッチ荷重制御実験と他のラッチ荷重条件との比較

ここでは、ラッチ荷重制御の効果を調べるために実験で制御なし(不均一荷重負荷時)と比べどれだけ改善したかを比較する。

[実験1] 均一荷重(自重)

$$N_1 = N_2 = N_3 = 1.4[N]$$

[実験2] 不均一荷重

$$N_1 = 10[N], N_2 = N_3 = 1.4[N]$$

[実験3] 均一荷重(付加荷重あり)

$$N_1 = N_2 = N_3 = 10[N]$$

[実験4] 正弦波制御

$$N_i = 11.5 + 1.5\sin(2\pi ft + \theta_i)[N]$$

$$f_h = 0.36[Hz], f_c = 0.36[Hz]$$

$$i = 1, 2, 3 \quad \theta_i = 0, 2/3\pi, 4/3\pi$$

[実験5] 矩形波制御

$$N_{offset} = 10[N](\text{オフセット荷重})$$

$$N_{iamp} = 6.5[N](\text{荷重振幅})$$

$$f_h = 0.5[mHz], f_c = 0.35[Hz], \text{duty比}=1/3$$

$$i = 1, 2, 3, \text{各位相差 } 2/3\pi$$

このような実験を実施した。図18は各ケースでの図心平均変位と図心残留変位を比較したもので、それぞれ実験を3

回繰り返した結果である。これからわかることは矩形波制御ではあまり改善がみられないこと。付加荷重ありの均一荷重負荷時でも改善が見られたが、正弦波制御の条件の方が更に改善されていることが分かる。この正弦波制御と不均一荷重負荷時とで比べると図心平均変位は50%、図心残留変位は20%までに低減することができた。また、図19は、あるケースでの図心変位の履歴を1, 2, 4の条件で比較したグラフである。この結果からもわかるように、サーマルスナップ周波数近傍の周波数をもつ正弦波制御が有効な制御と判明した。

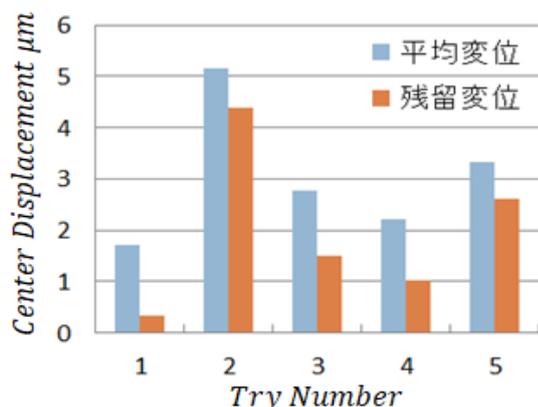


図18 荷重制御実験の結果比較(3回の平均)

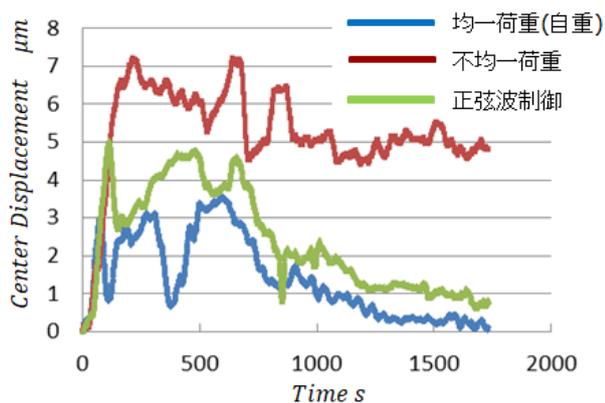


図19 正弦波制御時の図心変位履歴(一例)

## 7. まとめ

伸展式架台の下端を固定するキネマティックカップリングでは図心が不動点になることが求められる。しかし、ラッチ荷重が不均一だと熱変形時に各頂点の滑りやすさが異なることから図心残留変位が発生することがわかった。そこで、ラッチ制御荷重制御を実施した。制御荷重関数は、ばねマスモデルの数値解析を実施し決定した。

図心変位が改善されているのは、共に各頂点のオフセット荷重が付加荷重に揃えられており、波形の振幅が同じで位相が1/3周期ずつずらされているものだった。更に周期は不均一荷重負荷時の各頂点のV溝方向変位をフーリエ変換したときの卓越周波数(サーマルスナップ周波数と定義)近傍の周波数をもっていた。

実験では矩形波制御、正弦波制御、付加荷重で揃えられ

ているだけの3条件を実施した。矩形波ではあまり改善が見られなかった。各頂点が付加荷重で揃えられているだけの制御でも改善されていたが正弦波制御の方が更に改善されることがわかった。

## 謝辞

本研究は、JAXA/ISAS戦略的開発研究費「高性能科学観測にむけた高精度構造・材料の研究開発」の支援を受けて行われたものである。

## 参考文献

- 1) Alexander H. Slocum, "Precision Machine Design," Prentice Hall, 1992.
- 2) 荻芳郎他, "運動学的カップリングを用いたラッチ機構の展開完了条件," 第55回構造強度に関する講演会, 2013.
- 3) 田中宏明他, "キネマティックカップリングを用いたアンテナ鏡面の高精度設置と位置姿勢調整," 第31回宇宙構造・材料シンポジウム, 2015.
- 4) 石村康生他, "ASTRO-H(ひとみ)搭載機器のアライメント性能," JSME 第25回スペースエンジニアリングコンファレンス, SEC'16, 2016.
- 5) K. Ishimura and et.al, "Induced Vibration of High -Precision Extensible Optical Bench during Extension on Orbit," the 31<sup>st</sup> International Symposium on Space Technology and Science, 2016.
- 6) 石村康生他, "キネマティックカップリングのラッチ完了条件と再現性向上に向けた考察," 第58回構造強度に関する講演会, 2016.