

B05 キネマチックカップリングにおける熱変形時の境界面の滑りについて

-温度変化の特性に対する依存性の評価-

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

Sliding of boundary surface during thermal deformation in kinematic coupling

-Evaluation of dependence on heat rate-

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

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. Representative types of kinematic coupling are (1) the Maxwell/Boyes clamp, which consists of three pairs of two degrees of restraint and (2) the Kelvin clamp, which consists of 3-DOR, 2-DOR, and 1-DOR pairs. 1-DOR consists of a flat plane and a sphere; 2-DOR consists of a v-groove and a sphere; and 3-DOR consists of three slopes and a sphere. The most remarkable characteristic of Maxwell/Boyes clamp is symmetry. In this paper, we evaluated the position stability of Maxwell/Boyes Clamp under heat inputs. Especially, dependence of heat rate is discussed.

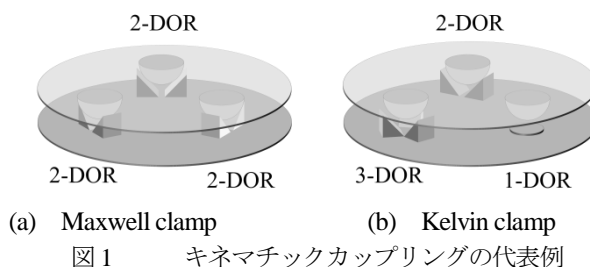
1. はじめに

キネマチ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¹⁾, その再現性についての研究が実施されている^{2,3)}. 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(hitomi)などの伸展式光学架台にも用いられている^{4,5)}. 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。

代表的なキネマチ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/Boyes 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、コン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自由度拘束点が不動点になる。

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、不動点が図心の位置に配置できる方が望ましい. 以前の研究では、ASTRO-H(hitomi)と同型式の伸展式光学架台を対象として、ラッチ再現性と熱変形の観点で評価し

ていた⁶⁾. 結果、Maxwell Clampの方がKelvin clampよりも中心変位の位置精度が良いことが示された. しかし、理想的には熱変形時に図心の位置が変化しないと予想されたMaxwell Clampに対して、実際は15~35[μm]程度の変位が生じていた.



そこで、本研究ではより直接的に、キネマチックカップリングのみの性能を評価するために、伸展式架台などの影響を取り除き、Maxell Clamp 単体での熱変形試験を実施する. また、以前の熱変形試験で確認されたスティックスリップ的な現象の発生の有無を確認するために、温度上昇率を変えて、その影響も評価する.

2. キネマチックカップリングと実験環境

キネマチックカップリングの外観図を図2に示す. バッテンは1辺約300mm, 厚さ10mm, 各ボールは $\Phi 40\text{mm}$, V溝は $40 \times 40 \times 46\text{mm}$, 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⁷⁾. ボールとバッテンはねじ止めされている. 材料はすべてA5052である.

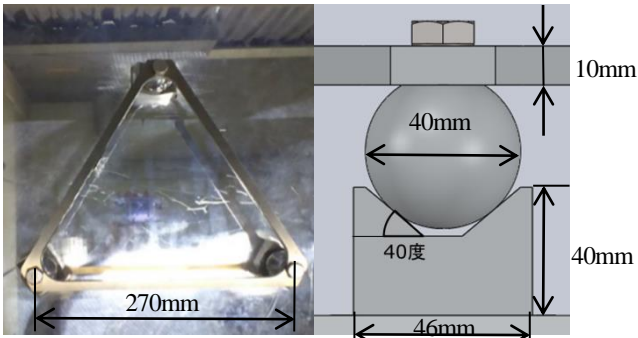


図2 キネマチックカップリングの外観と組み立て

実験では、テープヒータ(クレイボン製)を各辺の外側に270mm程度長さで貼り付け加熱した。規定した最高上昇温度に達したら、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。温度測定は以下の図にあるようにバテンの各辺に3点、それぞれのV溝とボールに1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3つの温度を平均した値をバテン1辺の温度と定義する。

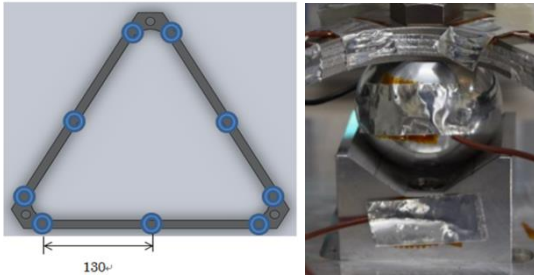


図3 熱電対の貼り付け場所

変位測定は以下の図4に示す。各頂点の局所座標系に対する変位をレーザー変位計で計測した。赤の矢印はレーザーの向きである。図5は測定の様子である。バテンの頂点部分にブロック材を設置し、レーザーをこのブロック材にあてることで、測定する。ここで得られた各辺の変位をグローバル座標に変換しグローバル座標系での変位の平均を中心変位と定義した。

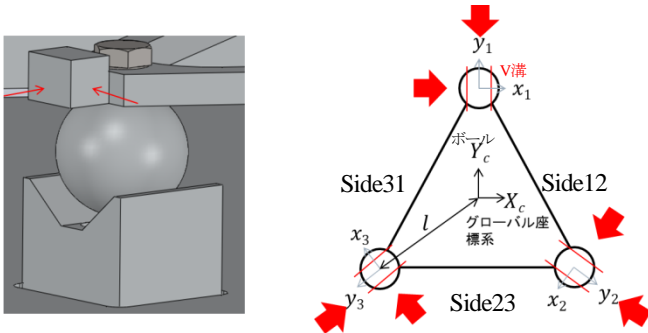


図4 local x,y軸の変位を計測するブロック材と各local x,y軸

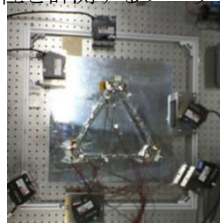


図5 変位測定の様子

スティックスリップ現象の発生を評価するために、温度上昇率を3水準設定した。また、最高上昇温度の影響の有無を評価するために、最高上昇温度を4水準設定した(表1)。

表1 各種実験条件

		最高上昇温度 度			
		40	30	20	10
温度上昇率 W/m ²	1870	○	○	○	○
	1300	N/A	N/A	○	○
	830	N/A	N/A	○	○

40K, 30Kの温度上昇で830, 1300W/m²のときは目標の上昇温度に達しなかったため、N/Aとしている。

3. 実験結果

830W/m²で約20Kの温度上昇をさせたときのバテンの各辺の温度履歴を図6に示す。

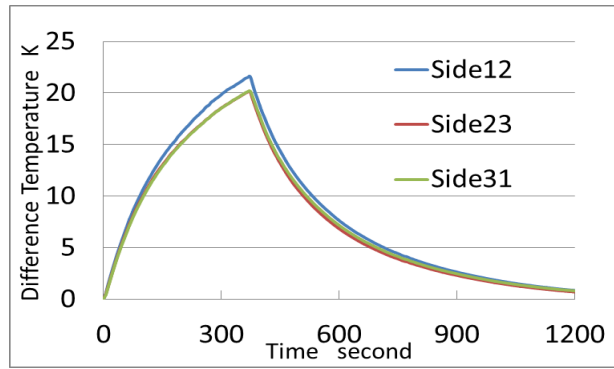
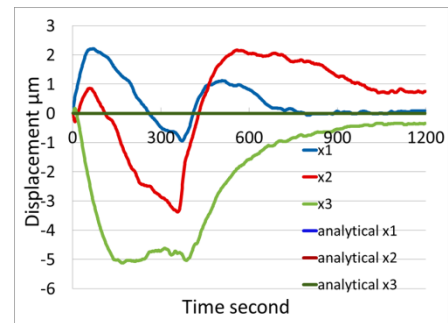
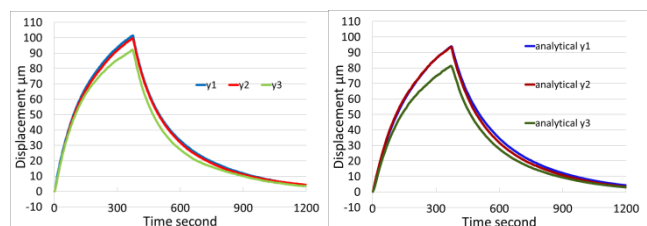


図6 各辺の温度履歴(830W/m², ΔT = 20K)

図7は、830W/m²で20K温度上昇させたときの各頂点の局所座標系での計測値と解析値である。解析においては、ボールは各辺の温度から計算したもので、V溝に沿うと仮定した。実験値と解析値のlocal y軸の変位は相似の関係にあるが、実験ではV溝に直交する局所x座標の方向の変位が観測された。



(a) local x軸の変位



(b) local y軸の変位(実験値, 解析値)

図7 830W/m²20Kの熱荷重を与えたときのlocal座標

次に、図7にある局所座標の計測を表1にある実験条件で測定しこれらをもとに中心変位を導出した。図8～12がその結果である。解析と実験とで最大値は1.5[μm]前後の違いで収まる。また、実験値同士を比較しても最大値は1.0[μm]前後の違いで収まる。誤差要因は以下の通りである。

表2 誤差要因一覧

考えられる影響	誤差 μm
気温の変化(1 $^{\circ}\text{C}$)による治具の熱変形の影響	0.06
測定用ブロックの熱変形の影響(2mm)	0.26
変位計の取り付け角度誤差の影響(1度のずれ)	0.58
変位計の精度	0.25
合計	1.2

したがって、最大値に注目すると、2つの実験とも誤差の程度の違いだと分かった。

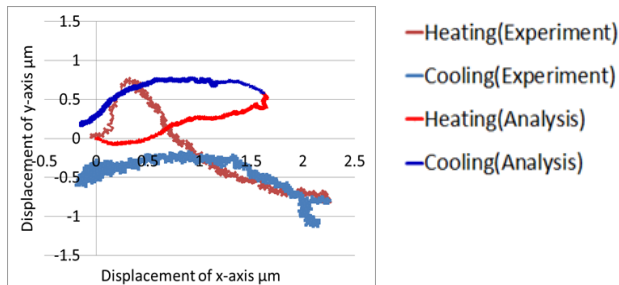


図8 830W/m² 10Kの温度上昇時のヒステリシス

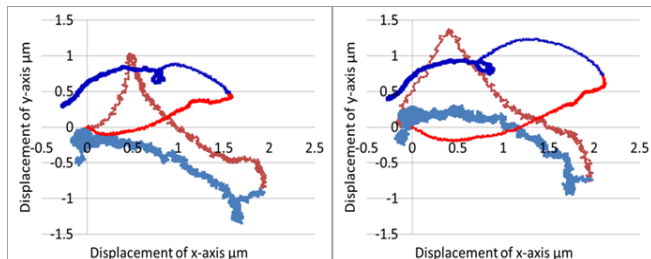


図9 1300,1870W/m² 10Kの温度上昇時のヒステリシス

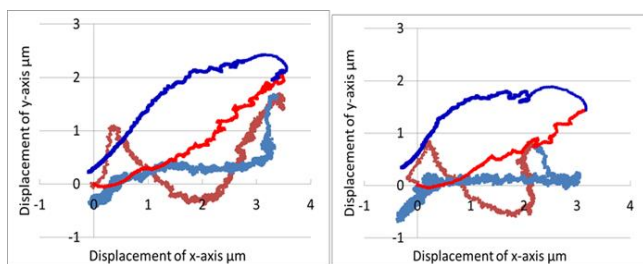


図10 830,1300W/m² 20Kの温度上昇時のヒステリシス

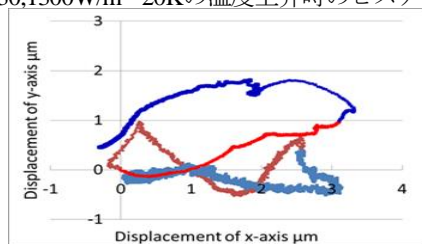


図11 1870W/m² 20Kの温度上昇時のヒステリシス

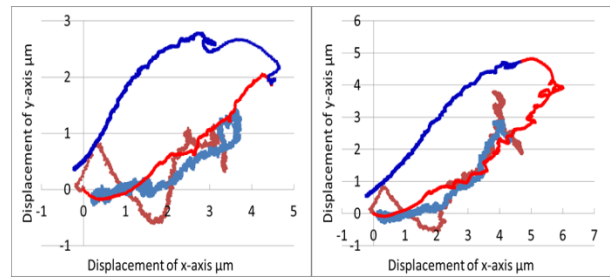


図12 1870W/m² 30,40Kの温度上昇時のヒステリシス

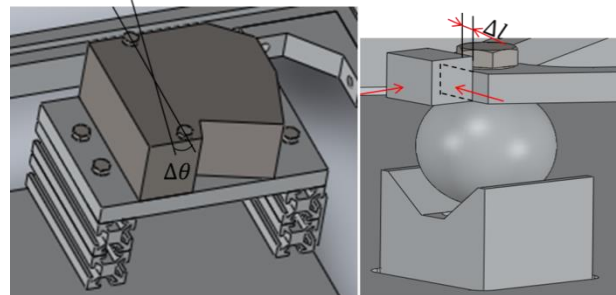
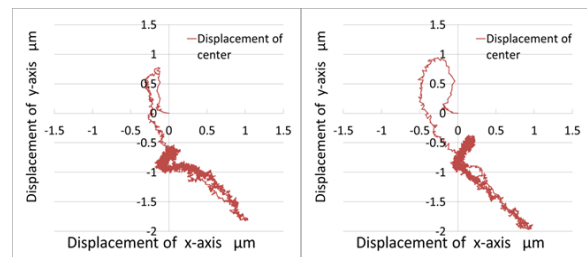


図13 レーザー変位計の治具 ブロック材のずれ

4. 熱入力の不均一性の影響を除いた結果の評価

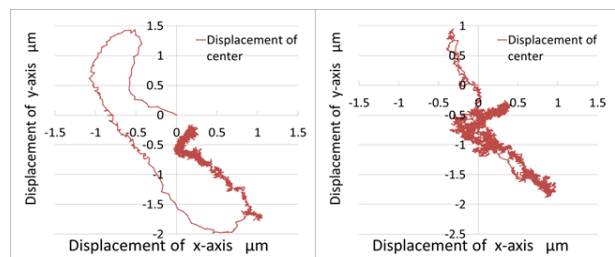
これらの中心変位のヒステリシスには熱入力の不均一性による非対称性の動きが生じる。したがって、この熱入力の不均一性を取り除くために、実験値から解析値を除いたものを評価した。

結果を見てみると、温度上昇率があがると、ヒステリシスの面積が大きくなるのが分かった。また、同じ上昇温度(10, 20K)で温度上昇率(830, 1300, 1870W/m²)を変えると最大値は±1.0[μm]の範囲内で収まっていた。つまり、この違いは計測誤差の範囲内なので、熱入力の不均一性の影響を除いた変位は、温度上昇率に依存しないということが分かった。



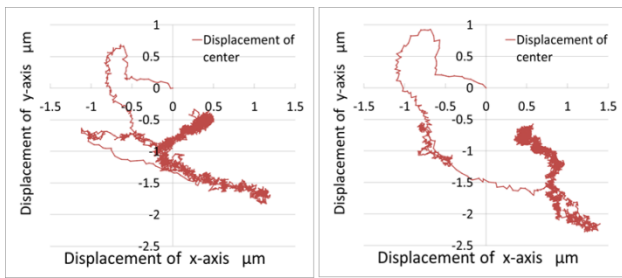
(a) 830W/m² 10K (b) 1300W/m² 10K

図14 熱入力の不均一性の影響を除いたヒステリシス



(a) 1870W/m² 10K (b) 830W/m² 20K

図15 熱入力の不均一性の影響を除いたヒステリシス



(a) 1300W/m² 20K (b) 1870W/m² 20K
 図16 熱入力の不均一性の影響を除いたヒステリシス

次に、最高上昇温度の違いによる影響があるのかを検討するため、1870W/m²の温度上昇率のときに、10~40Kの上昇温度でのデータが取得できていたので、このときのデータをまとめたものを図17に示した。

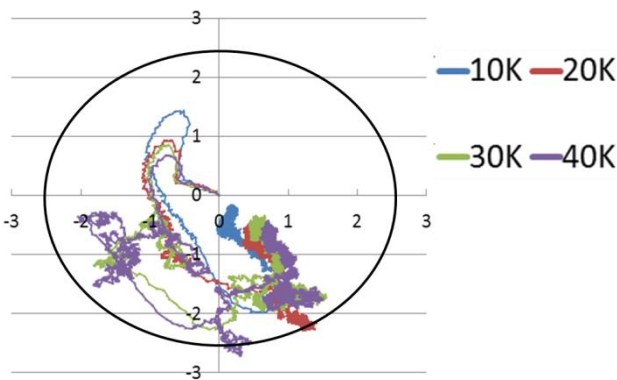


図17 1870W/m² 10,20,30,40K温度上昇時の熱入力の不均一性の影響を除いたヒステリシス

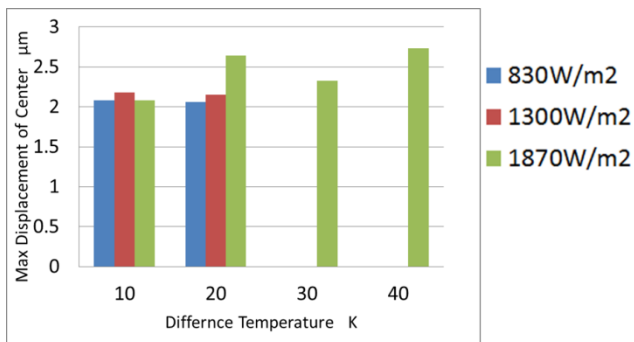


図18 全ての試験条件における熱入力の不均一性の影響を除いた変位の最大値

この結果からもわかるように、30, 40Kの最高上昇温度では、10, 20Kのときには見られなかったヒステリシスが第3象限で見られたが、最大値の比較においては2.5[μm]から誤差の範囲内に収まるということが分かった。すべての結果を比較した図18を見ると、最大値は2.5[μm]から計測誤差の範囲内で収まるということが分かった。

5. まとめ

キネマチックカップリングの熱変形特性試験を、Maxwell/Boyes Clamp単体に対して実施した。キネマのバツテン部に上昇温度(10, 20, 30, 40K)、温度上昇率(830, 1300, 1870W/m²)を変えた熱荷重を加え、計測された変位を評価し、以下の結論を得た。

バツテン端部の最大変位約200[μm]に対し、熱入力の不均一性を除いた中心変位の最大値は、計測精度1.2[μm]の2倍程度の2.5[μm]に維持が可能である。また、最大変位は温度上昇率、最高上昇温度に依存せず一定になる。

さらに、今回の条件ではstick-slipのような現象は確認されなかった。

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 31st International Symposium on Space Technology and Science, 2016.
- 6) 石村康生他, "伸展式光学架台のラッチ再現性と熱変形の試験評価", 第59回構造強度に関する講演会, 2017.
- 7) 石村康生他, "キネマチ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.