

B20 キネマティックカップリングへの振動印加による 位置決め精度の向上

小川雄樹（東海大・院），石村康生（早大），田中宏明（防大），
佐藤泰貴（JAXA），角田博明（東海大）

Yuki Ogawa (Tokai University), Kosei Ishimura (Waseda University), Hiroaki Tanaka (National Defense Academy of Japan),
Yasutaka Satoh (JAXA), Hiroaki Tsunoda (Tokai University)

1. はじめに

1.1 キネマティックカップリング

キネマティックカップリングは二剛体間の 6 自由度を適切に拘束する技術である．典型的な拘束には球と平面からなる 1 自由度拘束 (1DoR)，球と V 溝からなる 2 自由度拘束 (2DoR)，球と円錐溝からなる 3 自由度拘束がある (3DoR)．拘束の組み合わせの代表例として，2 自由度拘束を 3 つ有する Maxwell/Boyes clamp，1, 2, 3 自由度を 1 つずつ有する Kelvin clamp がある^[1,2] (図 1)．キネマティックカップリングでは，摩擦が無ければ，各ラッチにおいて球が V 溝にそって自由に動くことができるため，ラッチ部の熱膨張による熱応力の発生を避けられるという特徴がある．近年，宇宙構造物分野においてキネマティックカップリングは展開構造物や組み立て構造物の高精度位置決め技術として研究が進められており^[3,4]，精度向上のための各種研究が行われている^[5]．著者らの過去の研究^[6]で，Maxwell/Boyes clamp において，ラッチが完了する条件を，各 V 溝斜面の傾斜角度に対して許容可能な最大静止摩擦係数の関係として導出している．

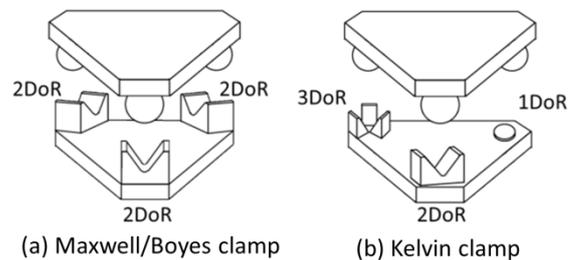


図 1 キネマティックカップリング

1.2 ラッチ完了条件式

本研究では，図 1 (a) の Maxwell/Boyes clamp キネマティックカップリングを対象とし，各ラッチ (2 自由度拘束) が正三角形の頂点に配置されたものを想定する．V 溝方向に伸びる中心線は，正三角形の図心の一点で交わる．ここで，ラッチ位置に関してラッチ完了状態とラッチ未完了状態の定義を行う．ラッチ単体において，球が V 溝の両側斜面と接触しており，それ以上球が V 溝の底へと滑り落ちていかない状態を両側接触状態と定義する．一方で，ラッチ単体において，球が V 溝の片側斜面とのみ接触している状態を片側接触状態と定義する．両側接触状態が 3 組のラッチ (図 2: KC1, KC2, KC3) 全てで発生している状態をラッチ完了状態と定義し，片側接触状態がいずれかのラッチで生じている状態をラッチ未完了状態と定義する．ラッチ未完了状態においては，ラッチが両側接触状態にあるラッチでも，球と V 溝の相対位置はノミナルな状態にあるとは限らず，球は V 溝の中心線に沿ってずれている可能性がある．

ラッチ完了条件式とは，キネマティックカップリングにおいてラッチ未完了状態が発生している時，ラッチへの押し付け荷重が，V 溝斜面との間の摩擦力に打ち勝ってラッチ完了状態へと移行するための条件である．具体的には，ラッチ完了条件式は，各 V 溝ラッチの斜面傾斜角度に対してラッチ完了状態への移行のために許容される最大静止摩擦係数として与えられる．

本研究では，各ラッチに同一の押付荷重 ($P_1=P_2=P_3$) が働く条

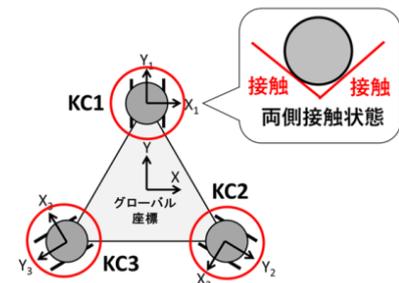


図 2 ラッチ完了状態

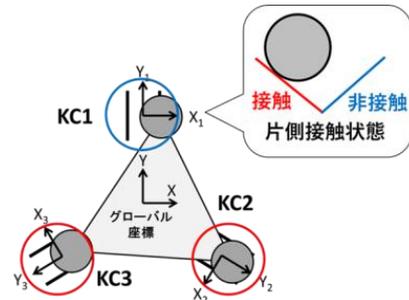


図 3 ラッチ未完了状態

件下で、最もラッチ完了状態への移行が厳しい条件である”KC1 で球がローカル座標+X 方向にずれて片側接触状態、KC2 と KC3 は両側接触状態となっているラッチ未完了状態”を考える。両側接触状態のラッチ (KC2 と KC3) に加えられている押付力は、ラッチ完了状態へ移行するための駆動力にはならず、単なる抵抗力となる摩擦力を生じさせている。一方で、キネマティックカップリングをラッチ完了状態へと移行させるための駆動力は、片側接触状態のラッチ部 (KC1) 1ヶ所のみで発生する。このときのラッチ完了条件式は、参考文献^[6]の研究において導出されており、以下ようになる。

$$\mu_s < \frac{3 P_1 \sin \alpha \cos \alpha}{3 P_1 \cos^2 \alpha + \frac{\sqrt{3}(P_2 + P_3)}{\cos \alpha}} \quad (1)$$

μ_s : V 溝斜面の最大静止摩擦係数, α : V 溝斜面の傾斜角度,
 P_i : KCi (i=1,2,3) における押付荷重

押付荷重が均一の場合のラッチ完了条件式のグラフ (図 4) から、V 溝斜面の傾斜角度 40 度近傍で許容最大静止摩擦係数が極値をとることがわかる。

1.3 実験目的

キネマティックカップリングを設計する際、ラッチ完了条件式などの方法を用いてラッチ未完了状態が生じない条件を整えることが理想ではあるが、実運用上では先行研究^[4,8]のようにラッチ未完了状態が生じる可能性がある。従来の研究では、ラッチ未完了状態をラッチ完了状態へと移行させる適切な方法に関しては検討がほとんど行われてこなかった。本研究では、キネマティックカップリングの位置決め精度向上を目的とし、ラッチ未完了状態を面内方向力の荷重によってラッチ完了状態へと移行させる方法について実験を通して評価する。なお、類似の研究として、参考文献^[7]が挙げられる。この研究では、ラッチを咬合させる際に超音波振動をキネマティックカップリングに印加し位置決め精度の向上を図っている。実験の結果、加振強度が大きい程、位置決め精度向上に効果があることが確認されている。

2. 面内方向力の荷重によるラッチ完了状態への移行

ラッチ未完了状態のキネマティックカップリングに対して、面内方向力を負荷してラッチ完了状態へと移行させる方法について実験を通りして評価を行う。ラッチ未完了状態において、片側接触のラッチ部を固定することは特殊なセンサー等を配置しない限り困難であり、キネマティックカップリング全体に対してどの方向に力を加えればラッチ完了状態へと移行するかはわからない。そのため、本研究では、偏心錘を DC モーター (TG-55M-SU-4.8-KA, ツカサ電工) で回転させた際に生じる遠心力を面内方向力として、キネマティックカップリング全方向に荷重を周期的に負荷する。面内方向力の荷重によってラッチ完了状態に移行するには片側接触の球が V 溝底へと移動して両側接触となる必要があるが、逆に球が V 溝斜面上を登る方向に面内方向力が作用する可能性もある。そのため、本研究では負荷する面内方向力の大きさに関して、球が V 溝斜面を降るには十分だが、登るには不十分である大きさに限定し、その範囲式を導出する。但し、本来ならば各ラッチに関する 3 本の釣り合い式を解いて求めるところを、今回は簡単のためラッチ 1 つのみを取り出して考えているため、残りの 2 つのラッチで生じる摩擦力の影響等を考慮しない。そのため、本研究では、この面内方向力の範囲はあくまで目安として用いる。

範囲式の導出にあたって、まず、以下の仮定をおく。

仮定：ラッチ部に外力が加わっていないとき、球は摩擦力によって動かない。

$$\mu_s \cos \alpha - \sin \alpha > 0 \quad (2)$$

上記の仮定を踏まえて、面内方向力の範囲を求めていく。ここで、 P : 押し付け荷重, Q : 面内方向力, N : 垂直抵抗力とする (図 5, 図 6)。まず、球が斜面を降るためには、球に働く斜面方向力は、

$$\mu_s N < P \sin \alpha + Q \cos \alpha \quad (3)$$

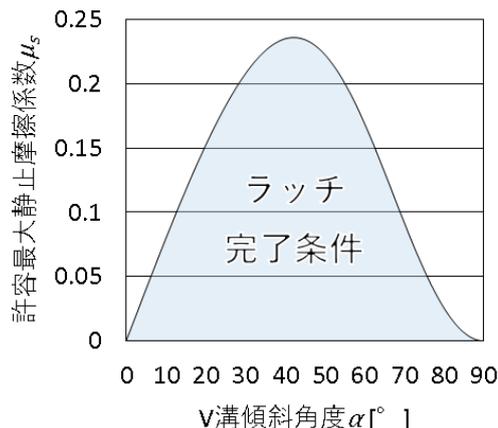


図 4 ラッチ完了条件式のグラフ (押し付け荷重均一)

となる必要がある．式 (2) と斜面垂直方向の力の釣り合いより，

$$Q > \frac{P(\mu_s \cos \alpha - \sin \alpha)}{\mu_s \sin \alpha + \cos \alpha} \quad (4)$$

が得られる．次に，球が斜面を登らないための面内方向力の範囲を求める．球が斜面を登らないためには，球に働く斜面方向力は，

$$\mu_s N + P \sin \alpha > Q \cos \alpha \quad (5)$$

となる必要がある．

① $\cos \alpha - \mu_s \sin \alpha > 0$ のとき，式 (5) から

$$Q < \frac{P(\sin \alpha + \mu_s \cos \alpha)}{\cos \alpha - \mu_s \sin \alpha} \quad (6)$$

② $\cos \alpha - \mu_s \sin \alpha \leq 0$ のとき，式 (5) は成立する．

以上より，球が V 溝斜面を降るには十分だが，登るには不十分である面内方向力の範囲は $\cos \alpha - \mu_s \sin \alpha > 0$ のとき，

$$\frac{P(\mu_s \cos \alpha - \sin \alpha)}{\mu_s \sin \alpha + \cos \alpha} < Q < \frac{P(\sin \alpha + \mu_s \cos \alpha)}{\cos \alpha - \mu_s \sin \alpha} \quad (7)$$

となる．また， $\cos \alpha - \mu_s \sin \alpha \leq 0$ のときは，

$$\frac{P(\mu_s \cos \alpha - \sin \alpha)}{\mu_s \sin \alpha + \cos \alpha} < Q \quad (8)$$

となる．

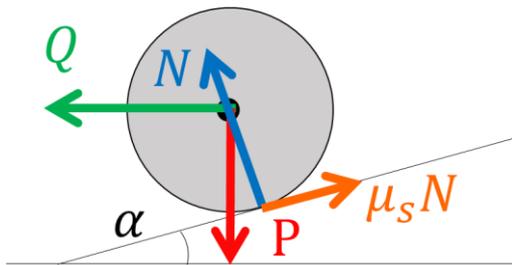


図 5 球が斜面を降る場合に働く力の方向

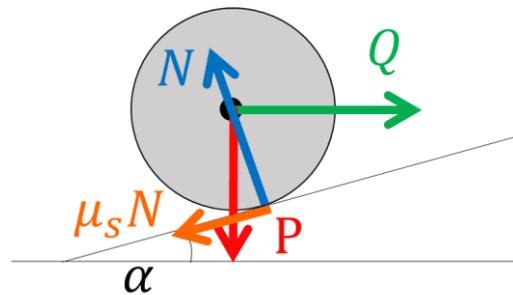


図 6 球が斜面を登る場合に働く力の方向

今回使用した V 溝ラッチは V 溝傾斜角度 10° ，最大静止摩擦係数は 0.38 (標準偏差 0.04) である．これらの値は先述のラッチ完了条件を参考に，ラッチ未完了状態が発生するような条件を選択した．また，特に V 溝傾斜角度 10° を選択した理由として，著者らの先行研究^[8]において高い頻度でラッチ未完了状態が発生する条件であると確認されていることが挙げられる．このとき， $\cos \alpha - \mu_s \sin \alpha$ は正であり，球が V 溝斜面を降るには十分だが，登るには不十分である面内方向力の範囲は式 (7) となる．

KC1 に働く押し付け荷重の大きさは，今回は 27 [N] 程度である．以上の条件を (2) 式に当てはめると，図 7 のようなグラフが得られる．青線 (球が斜面を登る条件) と赤線 (球が斜面を降る条件) で囲まれた緑色の領域が，ラッチ未完了状態をラッチ完了状態へと移行させることができる面内方向力の範囲である．今回は，実験を実施する上での安全性を考慮して，面内方向力は範囲内下端に近い条件である 7.2 [N] を使用する．このとき，必要となる偏心錘の回転数は遠心力の

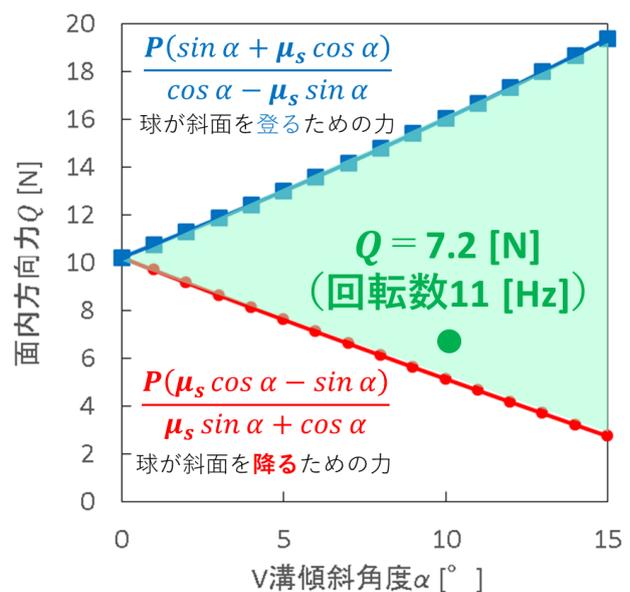


図 7 面内方向力の範囲

式 $F = mr\omega^2$ より、11 [Hz]となる。

3. 実験装置ならびに実験方法

3.1 実験装置

実験では、ラッチ未完了状態の Maxwell/Boyes clamp のキネマティックカップリングに対して範囲式から求めた面内方向力を加えた時、ラッチ完了状態へと移行していくかを確認する。実験変数として偏心錘の最大振動数印加時間を用い、その長短によるキネマティックカップリングの位置決め精度への影響を評価していく。

実験で使用するキネマティックカップリングは2つの部品から構成される。1つが、

アルミ板 (A2017 製) とアルミ球 (AC4B) 3つからなる上板である。もう1つが、アルミ板 (A2017 製) と V 溝 (A2017 製) 3つからなる下板である。使用する V 溝は、V 溝傾斜角度 10° 、斜面部最大静止摩擦係数 0.38 となっている。球、V 溝共に、アルミ板表面において正三角形の頂点に球が1つずつ配置される形になっており、この正三角形の重心位置はアルミ板上から見た時にあらわれる正方形の図心位置と一致している。これにより、球を V 溝底へと動かす駆動力のもととなる押し付け荷重が KC1, KC2, KC3 全てで均等になるよう調整されている。今回の実験では、球と V 溝を咬合させるため上板を下板に対して降ろしていき、各ラッチ部に上板の自重を押し付け荷重として負荷する (KC1 : 26.9 [N], KC2 : 26.1 [N], KC3 : 26.1 [N], ばらつきは 3% 程度)。ラッチ未完了状態を作成する方法に関しては、まず上板に取り付けられたアイボルトにバネとワイヤーを繋ぎ、他端に繋がっているリニアアクチュエータで張力をかけて上板を斜め上方向に上昇させる。このとき、上板は、KC1 球がローカル座標 +X 方向に 2 [mm] 程度ずれるように上昇させられる。その後、張力を緩めて上板を下板に対して下降させていく。上板を降ろし切った時点で KC1 のみ片側接触となるようなラッチ未完了状態が発生する (KC2 と KC3 は両側接触)。上板の昇降にリニアアクチュエータを用いることで準静的な昇降が実現され、ラッチ部に大きな衝撃が加わらないという利点もある。本実験では、キネマティックカップリングの位置決め精度を確認するため、レーザー変位計 (LK-H155, KEYENCE) によって上板の剛体変位を測定する。測定点は、上板表面に面内方向に対して3点、面外方向に対して3点を設ける (図9)。この測定点の変位から、上板の剛体変位 (並進変位3方向と回転変位3方向) を導出する。計測系の精度は、レーザー変位計において20分間に発生する静止ノイズと、実験時間20分間に発生した環境温度変化 $0.4 [^\circ\text{C}]$ によるキネマティックカップリング (A2017 製) の熱変形の二乗和平方根をとって $2.7 [\mu\text{m}]$ となる。この値は並進変位であり、回転変位 $18 [\mu\text{rad}]$ に相当する。また、適切な大きさの面内方向力をキネマティックカップリングに負荷する装置として、DC モーターと偏心錘を組み合わせる。偏心錘を DC モーターによって回転させ、発生する遠心力を面内方向力として利用する。今後、この2つを組み合わせた装置のことを便宜上、加振装置と呼称する。

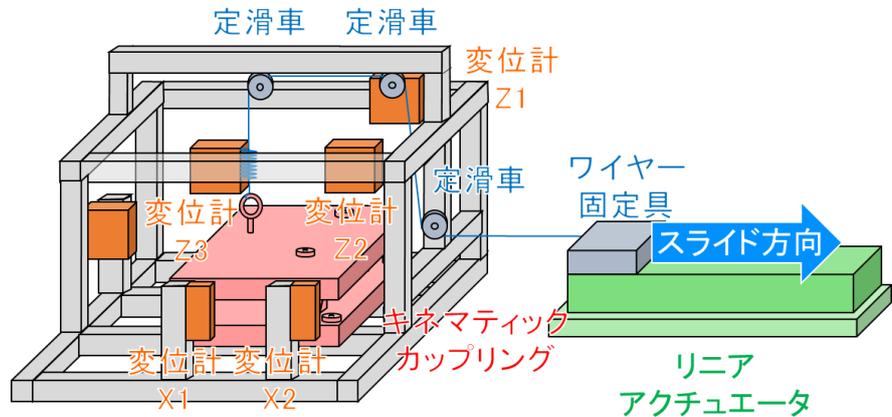


図8 実験装置の全景 (見やすさのため加振装置は省略)

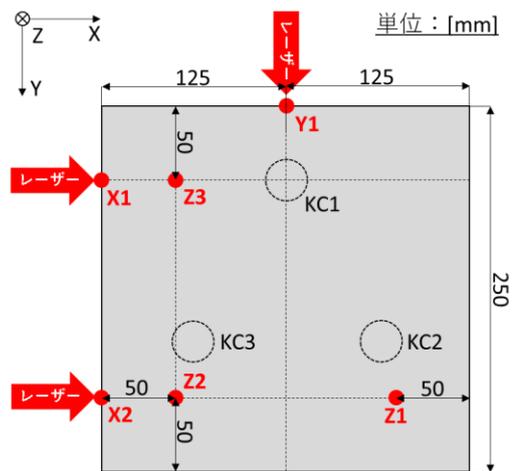


図9 上板の計測点の位置

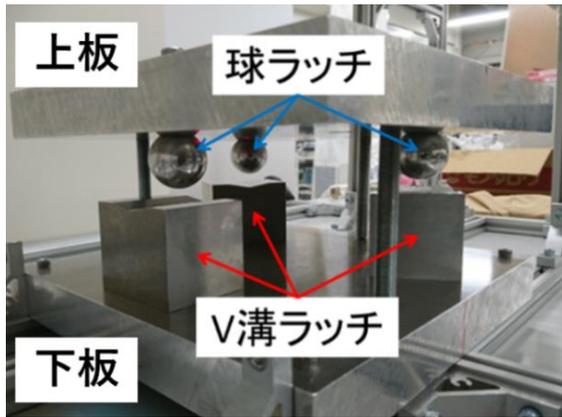


図 10 使用したキネマティックカップリング

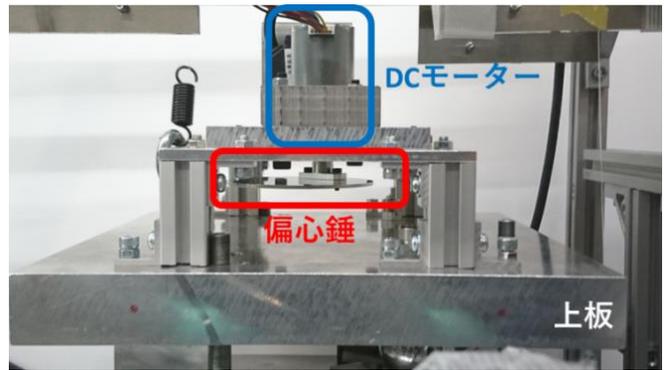


図 11 加振装置（上板重心直上で偏心錘が回転する）

3.2 実験方法

ラッチ未完了状態のキネマティックカップリングに対して面内方向力を加えた時、ラッチ完了状態へと移行していくかを確認するために、リニアアクチュエータによって上板を昇降させてラッチ未完了状態を作成する。その後、加振装置によってキネマティックカップリングに面内方向力を負荷する。目視および厚さ 20[μm]の隙間ゲージを挟み込むことによって、球と V 溝の非接触の有無を確認し、ラッチ未完了状態の発生を判断する

実験手順を以下（表 1）に示す。手順[i]～[iv]を最大振動数印加時間のパターン（手順[iii]を参照）ごとに、3回ずつ実施し、レーザー変位計の測定値より上板の剛体変位の平均値と標準偏差を導出する。

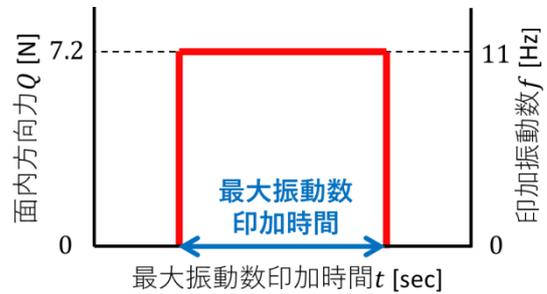


図 12 面内方向力の波形

表 1 実験手順

i	全てのラッチを両側接触状態に移行させてラッチ完了状態を作り、上板の剛体変位を測定するレーザー変位計の零点を設定する。このとき、上板に切ったねじ穴に取り付けられたねじを3本下板に突き立て、そのねじを回していくことで上板を下降させていき、ラッチを完了方向に動かしていく。
ii	キネマティックカップリング上板の KC1 真上に設置されたアイボルトをばねとワイヤーを介してリニアアクチュエータで斜め上方向に吊り上げる。このとき、レーザー変位計の値を目視で確認しつつ、KC1 球をローカル座標+X 方向に 2 [mm]程ずらすように吊り上げる。その後、同様にリニアアクチュエータで上板を下降させていき、ラッチ未完了状態を作成する。
iii	ラッチ未完了状態のキネマティックカップリングへ加振装置によって面内方向力を印加する。このときの偏心錘の最大振動数印加時間は、印加時間の長短が分かれるように 1 [s], 10 [s], 20 [s], 30 [s], 180 [s] の 5 パターンとする。
iv	最大振動数印加時間の印加完了後、加振装置を停止させた状態で、レーザー変位計によって上板の剛体変位を測定する。測定開始前に、隙間ゲージによってラッチの接触状態を確認し、ラッチ完了・未完了の判断を行う。

4. 実験結果と考察

実験の結果、偏心錘の最大振動数印加時間が 20 [s]よりも長い場合に、ラッチ未完了状態がラッチ完了状態へと移行することが確認された。まず、上板の剛体変位の平均値について表した図 13 のグラフに注目すると、最大振動数印加時間 1 [s], 10 [s]の値が他のケースに比べて圧倒的に大きな値をとっている。今回の実験では、ラッチ未完了状態を作成するにあたり KC1 球をローカル座標+X 方向に 2 [mm]程ずらしているが、これがほぼそのまま残っているのが並進変位の X 方向の結果から見て取れる。最大振動数印加時間 1 [s], 10 [s]に関して、先述の隙間ゲージによって KC1 において片側接触の残留が確認されており、ラッチ未完了状態が発生していることがわかる。埋もれてしまっているデータを見るためにグラフの Y 軸を拡大すると、図 14 のようなグラフが得られる。

今回の実験系の精度が、並進変位 2.7 [μm], 回転変位 18 [μrad]であることを考えると、最大振動数印加時間 20 [s], 30 [s], 180 [s]では剛体変位の値は全て誤差範囲に収まっており（グラフ中のエラーバーは誤差範囲を表す）、有意な残留変位は見られなかった。また、隙間ゲージによっていずれのラッチにおいても球ラッチの非接触は認められず、ラッチ完了状態であることが確認されている。

次に、上板の剛体変位の標準偏差について表した図 15 のグラフに注目すると、剛体変位の平均値と同じく最大回転数印加時間 1 [s], 10 [s]の値が特に大きい傾向にある。グラフの Y 軸を拡大すると、図 16 のようなグラフになり、最大回転数印加時間 20 [s], 30 [s], 180 [s]では標準偏差の値は誤差範囲（並進変位 2.7 [μm], 回転変位 18 [μrad])に収まっていた。

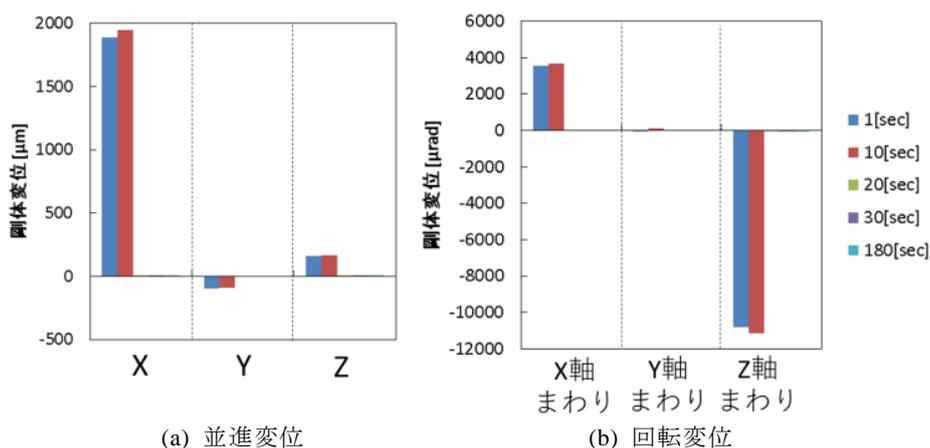


図 13 上板の剛体変位の平均値

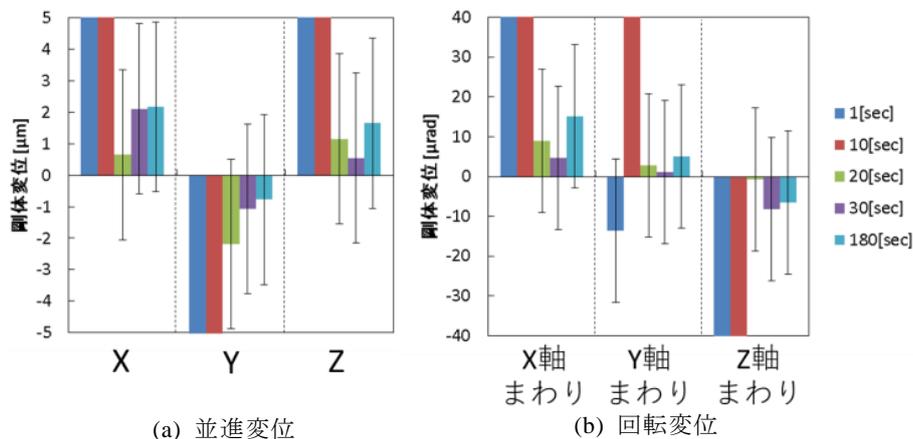


図 14 上板の剛体変位の平均値（微小部分拡大）

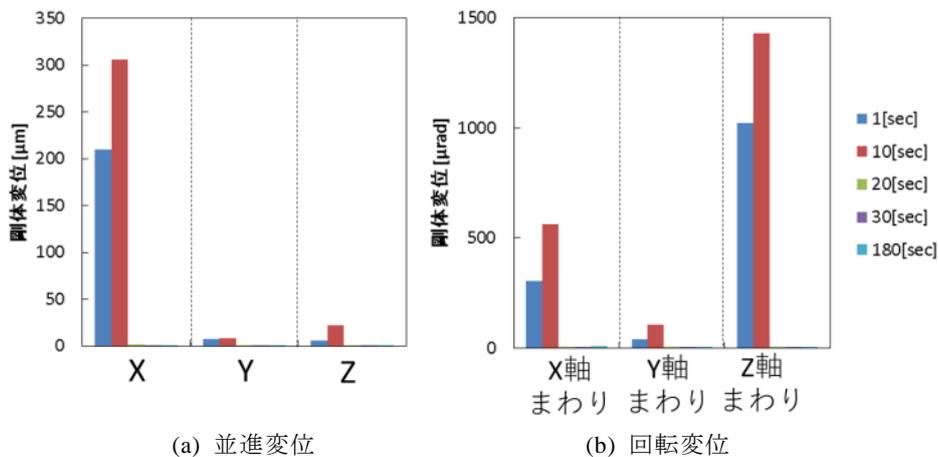


図 15 上板の剛体変位の標準偏差

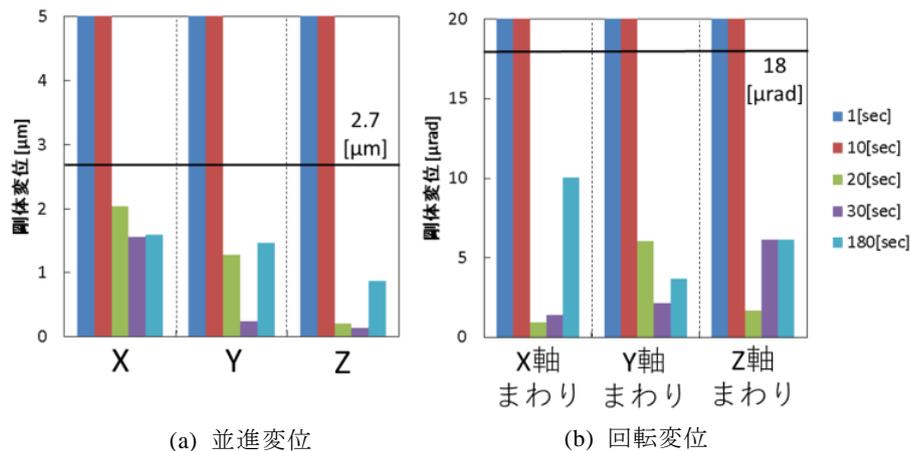


図 16 上板の剛体変位の標準偏差 (微小部分拡大)

5. まとめ

本研究では 2 自由度拘束 (2DOR) を 3 つ有する Maxwell/Boyes clamp のキネマティックカップリングに関して、位置決め精度を向上させることを目的とした。そのために、ラッチ未完了状態のキネマティックカップリングに対して面内方向力を負荷することでラッチ完了状態へと移行させる方法を考案し、その実用性を評価すべく実験を行った。実験の結果、偏心錘の最大振動数印加時間 1 [sec], 10 [sec] ではラッチ未完了状態はラッチ完了状態へと移行しなかった。このとき、KC1 球に与えたローカル座標 +X 方向の変位 2 [mm] はほぼ解消されることなく残留変位として残っていたことが、キネマティックカップリング上板の剛体変位の平均値より確認された。また、剛体変位の標準偏差の値も実験誤差 (並進変位 2.7 [μm], 回転変位 18 [μrad]) より大きいことが確認された。最大振動数印加時間 20 [sec], 30 [sec], 180 [sec] ではラッチ未完了状態はラッチ完了状態へと移行した。このとき、上板の剛体変位の平均値は全て実験誤差よりも小さく、有意な大きさの残留変位は確認されなかった。また、剛体変位の標準偏差の値も実験誤差より小さい値であった。以上より、ラッチ未完了状態が生じた場合に、キネマティックカップリングに対して範囲式程度の大きさの面内方向力を一定時間負荷し続けることでラッチ完了状態へと移行することが確認された。この方法を用いることで、ラッチを咬合させる際に、より確実にラッチ完了状態を作成することができる。

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」の支援によっ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] Layton C. Hale: Friction-Based Design of Kinematic Couplings, American Society for Precision Engineering 13th Annual Meeting, 1998.
- [3] 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, p84-86, 2017.
- [4] 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・材料シンポジウム講演集, A07, 2015.
- [5] 高木健太郎他: キネマティックカップリングを用いた高精度位置決め機構の押付荷重調整法, 第 60 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 3H09, 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, p84-86, 2016.
- [7] 大岩孝彰他: 超音波振動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 (第 2 報), 精密工学会学術講演会講演論文集 2011S(0), p487-p488, 2011.
- [8] 小川雄樹他: キネマティックカップリングの V 溝傾斜角度が位置決め精度におよぼす影響, 第 53 回宇宙構造・材料シンポジウム講演集, B06, 2017.