

B06 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

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

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

1. はじめに

キネマティックカップリングは複数剛体間の 6 自由度を適切に拘束する技術である。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 が挙げられる^[1,2]。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, ラッチ部の不整合による初期応力や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との観点から整理している。本研究では, このラッチ完了条件について, 実験的に評価する。

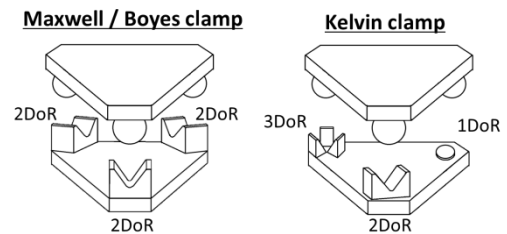
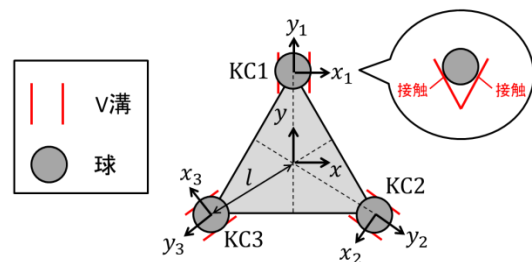


図 1 キネマティックカップリング

2. ラッチ完了のための条件

2.1 ラッチ完了状態の定義

本論文では, 図 1 左側の Maxwell/Boyes clamp キネマティックカップリングを対象とする。ここでは, 各ラッチ (2 自由度の 1 組) が正三角形の頂点に配置された状態を想定する (図 2)。ここで, 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。まず, 1 組のラッチに注目し, 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。この両側接触状態が 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する。一部のラッチが両側接触状態にあったとしても, その球と 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ことに留意されたい。



キネマティックカップリング(上から見た図)

図 2 ラッチ完了状態

2.2 ラッチ未完了状態の定義

まず、両側接触状態にないラッチが1つでもある状態をラッチ未完了状態と定義する。つまり、ラッチ未完了状態では、いずれかのラッチの組で球がずれてV溝斜面に片側で接触している。このラッチ未完了状態を、各2DORにおける球とV溝の接触状態の観点から分類する。球とV溝の接触状態を、

0：球がローカル座標（各ラッチの中心を原点とした座標系）の+X側と-X側でV溝斜面に両側接触（図2）

+1：球がローカル座標の+X側のV溝斜面にのみ接触

-1：球がローカル座標の-X側のV溝斜面にのみ接触

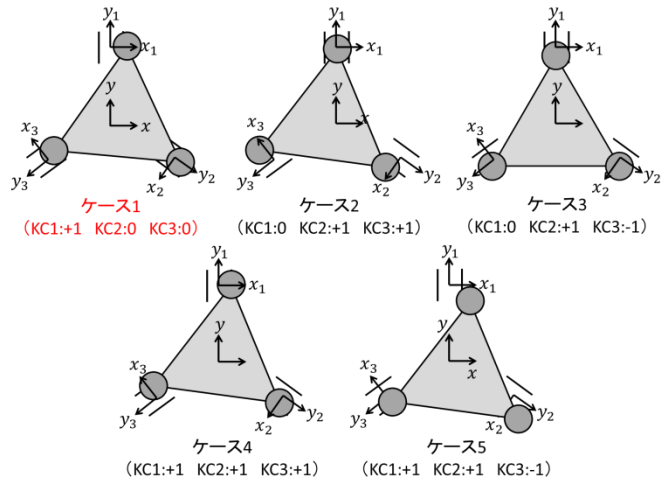


図3 ラッチ未完了状態（全5ケース）

の3つの状態を表す。ずれ方のパターンを幾何学的な対称性を考慮して整理すると、ラッチ未完了状態は、図3に示すような5ケースにまとめられる。本来、これらのラッチ未完了ケースの中でも球のずれ量の違いによってバリエーションがある。例えば、ケース2では球2のずれ量と、球3のずれ量に違いがあるという状態があり得る。しかし簡単化のため、以下ではこれらの量的なバリエーションは考慮せず、複数ヶ所でずれが存在する場合には、それぞれ絶対値としては同じ量ずれていることを想定する。

2.3 ラッチ完了条件式

ラッチ完了条件とは、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、駆動力が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。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を導出したものである。参考文献[6]の研究では、図3の各ケースに対して、上述のラッチ完了条件式を導出している。これらの導出された式より、同一の押付荷重（ $P_1=P_2=P_3$ ）が各ラッチに加わる場合に、5ケースの中でもケース1がラッチ完了状態に移行することが最も難しいことが示されている。この理由を以下に示す。まず、ケース1では、両側接触が2ヶ所（他ケースでは多くても1ヶ所）で発生しているが、球とV溝の相対位置がノミナル状態にはない。そのため、この2ヶ所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、ラッチ完了状態へと向かう駆動力は、片側接触のラッチ部1ヶ所のみで発生する。そのため、抵抗力が全ケースで最大であり、駆動力は最小となる。結果として、ケース1はラッチ完了状態に移行するのが最も難しいケースとなっている。このケース1に対するラッチ完了条件式を以下に示す。

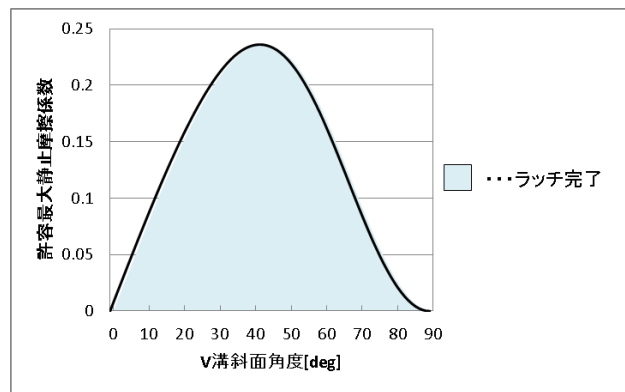


図4 ラッチ完了条件式のグラフ（押付荷重均一）

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

μ : 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）より，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．本研究では，このラッチ完了条件を実験的に評価する．

3. 実験装置ならびに実験方法

3.1 実験装置

Maxwell/Boyes clamp のキネマティックカップリングを用いて，ラッチ完了条件を満たすことが最も困難なラッチ未完了ケース 1 でラッチ完了状態へ移行できるかどうか実験を通して確認する．ラッチ完了条件式は V 溝斜面の最大静止摩擦係数と傾斜角度で表されているが，本実験では V 溝の傾斜角度が 10 度，40 度，70 度の V 溝ラッチを各角度 3 つずつ用意する（異なる角度の V 溝ラッチを同時に使用することはない）．各ラッチは 250[mm]×250[mm]×30[mm]のアルミ板の上で，アルミ板と図心の位置を一致させた正三角形の頂点に配置されている．V 溝ラッチ 3 つとアルミ板の一組を下板とし，球 3 つとアルミ板の一組を上板とする．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付荷重として印加する．今回，KC1 と KC2 に加わる押付荷重 (P_1 , P_2) は 1.83[kg]，KC3 は 1.78[kg]である．KC3 の押付荷重 (P_3) の方が 3[%]小さく，ラッチ完了条件式のグラフは図 6 のようになる．押付荷重均一の場合と， P_3 が P_1 と P_2 に比べて 3%小さい場合の許容最大静止摩擦係数の差は，最大で 0.012 [%]程度と極めて小さいため，今回は押付荷重が

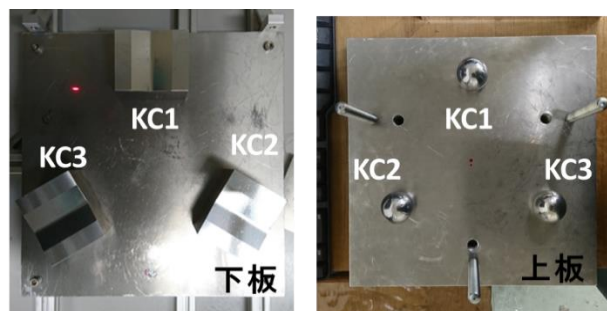


図 5 実験で使用したキネマティックカップリング

ほぼ均一であると考えて差し支えない．本実験装置の球と V 溝間の最大静止摩擦係数は，事前実験より平均値が 0.16，標準偏差が 0.02 と判明している．そこで，ラッチ完了条件式のグラフ（図 6）より 10 度と 70 度では最大静止摩擦係数が許容値を超えるためラッチ未完了状態となることが予想される．一方で，40 度では最大静止摩擦係数が許容値に収まるためラッチ完了状態となると予測される．

上板を準静的に昇降させるため，上板昇降ねじを使用する（図 8）．上板に 3ヶ所ねじ穴が切っており，上板昇降ねじによって上板が支えられるようになっている．この上板昇降ねじを順番に回すことで上板を昇降させる．昇降ねじはひと回しで 1[mm]進み，本実験では作業中の昇降の最小単位は 0.25[mm]（90 度ずつの回転）とする．昇降ねじは上板の面内方向の動きを拘束しないように先端が球の一部となっているものを使用する．

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，レーザー変位計によって上板の変位を測定する．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 7）．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，静止時のレーザー変位計の計測値のばらつき 1[μm] (p-p) と実験中の環境温度変化（最大 0.5[$^{\circ}\text{C}$]) によって生じるレーザー変位計をとりつけたフレームの熱変形による計測値のずれ 1.7[μm] (p-p) の二乗和平方根をとって 2.0[μm]程度である．この計測系の精度，並進変位 2.0[μm]は，本実験系においては上板の回転変位 1.3×10^{-5} [rad]に相当する．

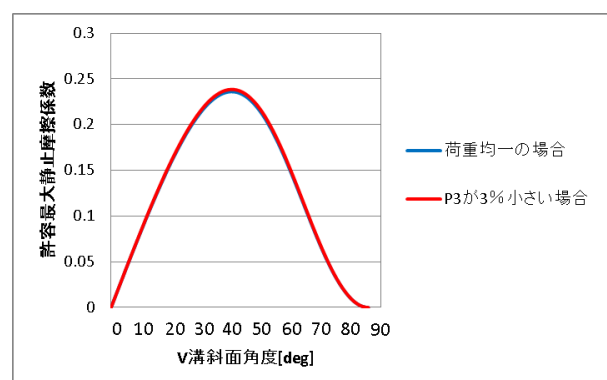


図 6 P_3 が P_1 と P_2 に比べて 3%小さい場合のラッチ完了条件

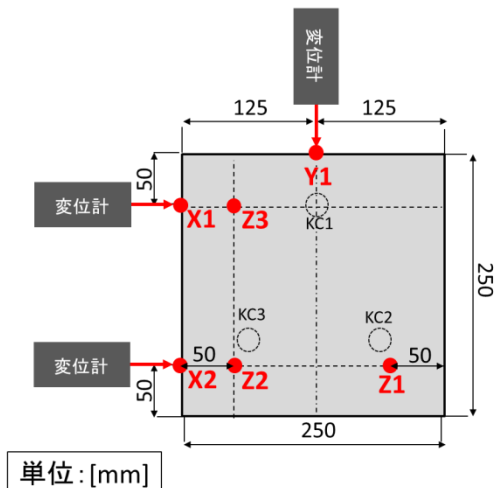


図7 上板の計測点の位置

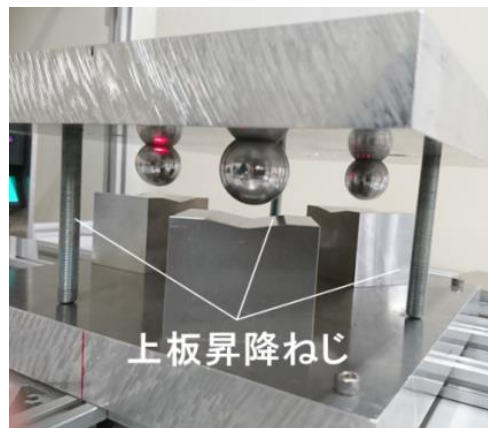


図8 上板昇降ねじ

3.2 実験方法

ラッチ完了条件式を確かめるために、まずキネマティックカップリングの初期状態としてラッチ未完了状態ケース1を与える。次に、上板を下板に対して降ろしていき、ラッチ完了状態へ移行するか否かをV溝角度ごとに実験によって確認する。ラッチ未完了状態は、目視および厚さ30[μm]の隙間ゲージによって、球とV溝の非接触の有無で確認する。

実験手順を以下に示す。手順①～③をV溝斜面角度ごとに、5回ずつ実施し（手順①はV溝斜面角度ごとに1回のみ実施）、上板の剛体変位の平均値と標準偏差を導出する。

①全ラッチを完了状態とし、レーザー変位計を零点に合わせる

①ねじ1、ねじ2、ねじ3の順に昇降ねじを回して上板を浮かす（ねじの位置は図9を参照）。

②KC1の球側（上板）をローカル座標+X方向に5[mm]の初期変位を与え、ラッチ未完了状態ケース1の初期状態となるようにする（ローカル座標については図2を参照）。完全にケース1の状態になるのは、上板を降ろしていき、球がV溝斜面に接触する手順③の時である。手順②の段階では、球は全てV溝斜面から離れていることに注意されたい。

③上板を降ろすために、ねじ1→ねじ2→ねじ3→ねじ1→...の順に回す。球がV溝に近くなった時には、上板を極力水平に保つため、ねじを回す回数を1/4回ずつ（昇降の最小単位）にする。最終的にねじの先端が浮いてラッチ部にのみ押し付け荷重がかかる状態までねじを回し、各測定点の変位を記録する。

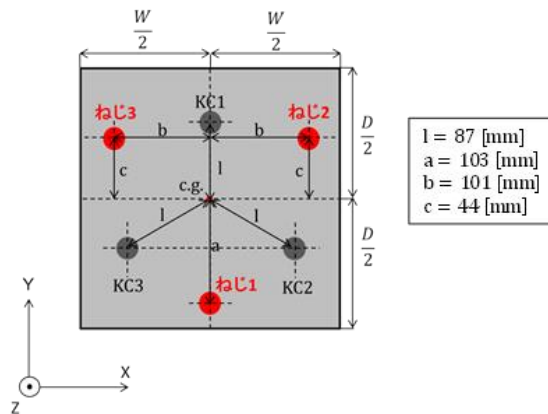


図9 上板昇降ねじの位置

4. 実験結果と考察

実験の結果、V溝傾斜角度が70度の時はラッチ完了状態、40度の時はラッチ完了状態、10度の時はラッチ未完了状態となった。上板の剛体変位の平均値のグラフ（図10,11）から、70度では面内方向に、40度では面外方向に残留変位が確認された。10度ではラッチ未完了状態のため、面内・面外方向ともに大きな残留変位がみられた。次に、70度と40度の上板の剛体変位の標準偏差（図12,13）に注目してみると、70度のX方向の並進変位の標準偏差のみ、計測精度よりも大きな変位が確認された。ラッチ完了条件式から予測される各角度のラッチ完了状態・未完了状態と実験結果を比較すると、70度のみ不整合となっている。この原因のひとつとして、上板昇降作業中の外乱の混入が考えられる。上板の昇降は昇降ねじによって行ったが、ねじを回す際に上板が面内方向

に意図せず動いてしまうことや、ねじが下板に対して傾斜してしまい上板が垂直に昇降しないことがあった。その結果として、一度両側接触となったラッチが再び片側接触になり、各ラッチの押付荷重の不均一性が無視できないほど大きくなっていった可能性がある。もうひとつの原因として、ラッチ完了条件式自体に改善の余地があることが考えられる。導出にあたって設けた仮定や、導出方法の修正によって、今回用いたラッチ完了条件式とは異なる条件式が得られ、その場合には70度もラッチ完了という予測となる可能性がある。

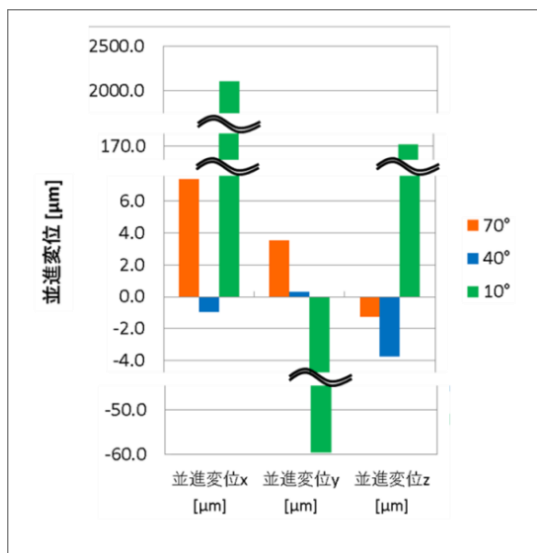


図 10 上板の並進変位の平均値 (全角度)

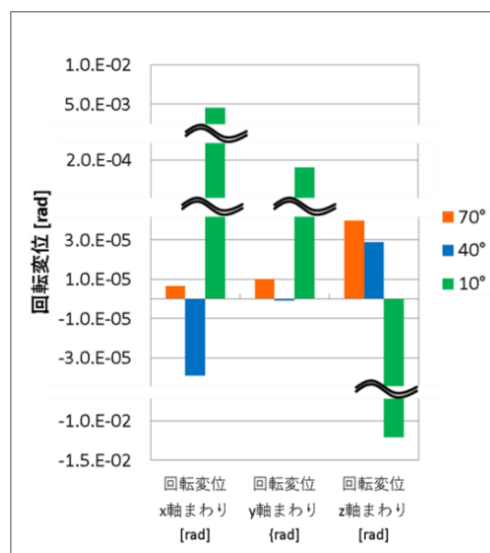


図 11 上板の回転変位の平均値 (全角度)

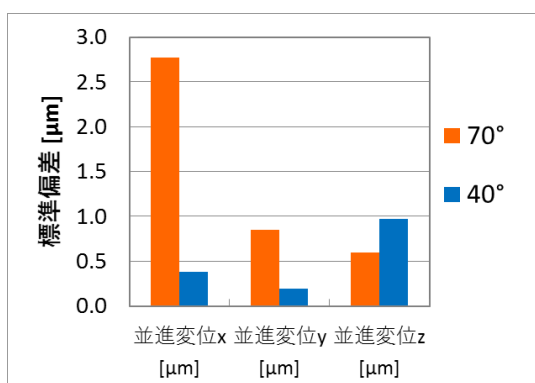


図 12 上板の並進変位の標準偏差 (40度, 70度)

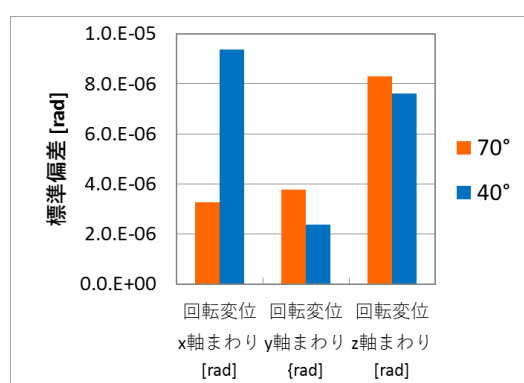


図 13 上板の回転変位の標準偏差 (40度, 70度)

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するラッチ完了実験式を実験的に評価した。ラッチ未完了状態ケース1を初期条件としてキネマティックカップリングに与えた場合、ラッチ完了条件式より、V溝ラッチの角度が70度と10度ではラッチ未完了状態となり、10度のときはラッチ完了状態となることが予測された。実験結果は、70度では予測と反してラッチ完了状態となり、40度では予測と整合してラッチ完了状態となり、10度では予測と整合してラッチ未完了状態となった。これより、キネマティックカップリングにおいて、用いられることの多い40度近傍^[4,5,7](押付力と駆動力のどちらか一方が大きくなるということがないため)では、ラッチ完了条件が適用できるといえる。また、ラッチ未完了状態が発生せず、残留変位の標準偏差が計測精度内に収まるため、今回のキネマティックカップリングで言えば2.0[μm]程度の精度で位置決めが可能である。一方、あまり使用されることのない10度と70度に関しては、10度はラッチ完了条件式には従い、ラッチ未完了状態が頻繁に発生するため、位置決め精度が悪く実用には向かない。70度はラッチ完了条件式には従わなかったが、ラッチ未完了状態が発生せず、残留変位の標準偏差は最大で2.8[μm]程

度であった。そのため、70度は40度程ではないが、位置決めに関する実用性は高いといえる。今後は、実験装置やラッチ完了条件式を見直し、より詳細にラッチ完了条件の確認をしていく予定である。

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.