

A08 キネマティックカップリングへの適用に向けた金属材料の耐衝撃特性評価

高木健太郎（防衛大・院），田中宏明（防衛大）

Kentaro Takagi (National Defense Academy), Hiroaki Tanaka (National Defense Academy)

1. はじめに

人工衛星等で使用される大型展開アンテナ構造の技術課題として，展開再現性や展開後の形状安定性が挙げられる．天体観測等で使用する周波数帯は様々であり，これらの観測のためにはアンテナと衛星本体の位置を高精度に決めるシステムが必要である¹⁾．高精度に位置決め可能な結合方法としてキネマティックカップリング（KC：Kinematic Coupling）が検討され，研究開発が行われている²⁾．KCとは，2つの物体の相対運動を拘束する手法である．(1)円錐面内と球外面(3DOR)，(2)V形溝面内と球外面(2DOR)，(3)平面と球外面(1DOR)の3つの組合せがあり，合計6自由度拘束となるよう配置することで，物体の相対運動を拘束することができる．

本年度，KCを用いた高精度位置決めシステムの展開組立再現性の検討試験を行った際に大きな非再現性を確認した³⁾．KCの接触部を確認したところ傷がついていたが，この原因をアンテナ鏡面と支持構造とを取り付ける際の衝撃であると推定した．そこで本研究では，傷発生状況を明らかにすることで展開組立再現性の向上を目指す．落錘試験により，展開・組立時に予測される位置エネルギーでKCの一部を模擬した錘を落下させ，傷の大きさ（傷深さ，傷半径）を評価する．

2. 試験方法

2.1 落錘試験装置

本試験の試験装置を図1に示す．装置の中央に治具で固定された円筒形（ $\Phi 27$ mm）のガイドパイプがあり，その中を錘と半球部から構成される錘部が落下する．半球部は，KCの球を模擬し，板部はKCのV形溝の片面を模擬している．

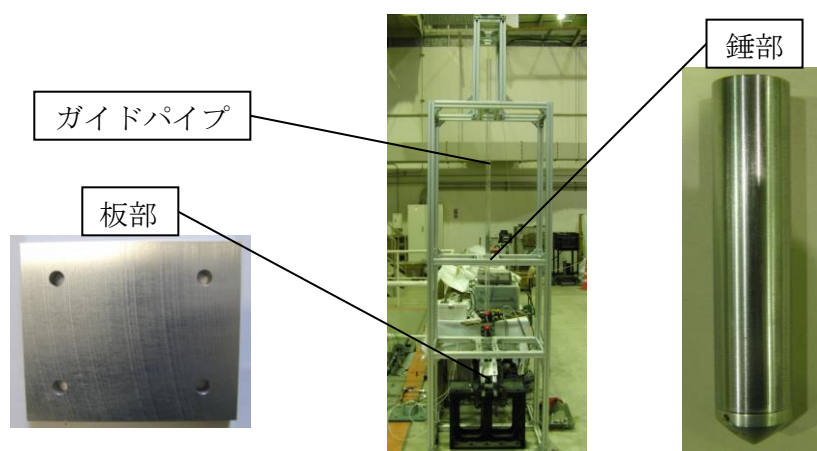


図1 落錘試験装置

2.2 試験片

錘部の先端に KC の球を模擬した半球部を取り付ける。この半球部と板部を 2 種類ずつ用意した。図 2、3 に半球部の概要図を、表 1 に試験片パラメータを示す。半球部は、表面の半径 R が異なるものを用意した。板部には表面加工として、焼成膜（二硫化モリブデン系コーティング材）を付けたものと、付けないものを用意した。この焼成膜は宇宙関連部品で実績のある固体潤滑被膜である。

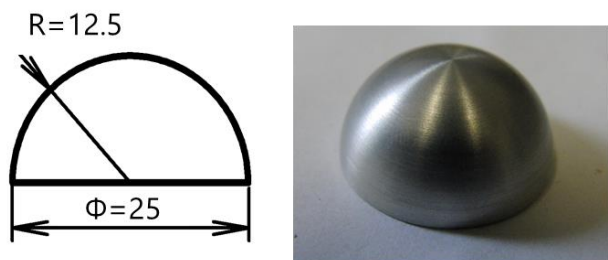


図 2 半球部 1

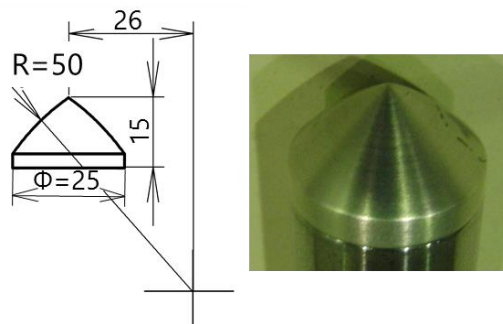


図 3 半球部 2

表 1 試験片パラメータ

試験片	材料	特徴
半球部 1	A7075-T6	$\Phi = 25 \text{ mm}$, $R = 12.5 \text{ mm}$
半球部 2		$\Phi = 25 \text{ mm}$, $R = 50 \text{ mm}$
板部		120W × 100D × 10H mm 焼成膜無し
		120W × 100D × 10H mm 焼成膜有り (平均膜厚 8.5 μm)

2.3 試験の概要

鏡面を支持構造に設置する際に予測される鏡面の位置エネルギー E を「基準エネルギー」とし、錘部の重量 m 、落錘高さ h を変更することで定量的にエネルギー評価を行った。この「基準エネルギー」は約 1.9 J とした（重さ 20 Kg、高さ 10 mm に相当）。

また、本試験においては、図 4 の点線で示すような KC の一部を模擬したが、これは 2DOR の V 形溝の片面に最初に球が接触する場合を想定したためである。KC では、この後球が溝を滑り、適切な位置に移動することで高い位置の再現性が期待できる。

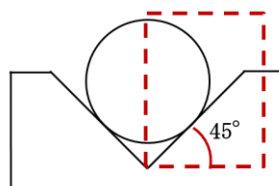


図 4 想定する KC の一部

2.4 落錘パターン

2.2 節で示したように、試験片は半球部、板部ともに 2 種類あり、この組合せで 4 パターンの試験を行った。また、それぞれの場合において、位置エネルギーを変化させ、評価を行った。細部は、表 2, 3 に示す。

表 2 位置エネルギーと錘部の組合せ

番号	位置エネルギー [J]	錘部の組合せ		
		錘重さ [Kg]	落錘高さ [mm]	
1	1.9	0.42	(錘 1 つ)	463
2	4.0	0.42	(同上)	964
3	3.8	0.84	(錘 2 つ)	463
4	8.0	0.84	(同上)	964
5	5.7	1.26	(錘 3 つ)	463
6	11.9	1.26	(同上)	964
7	7.6	1.68	(錘 4 つ)	463
8	15.9	1.68	(同上)	964

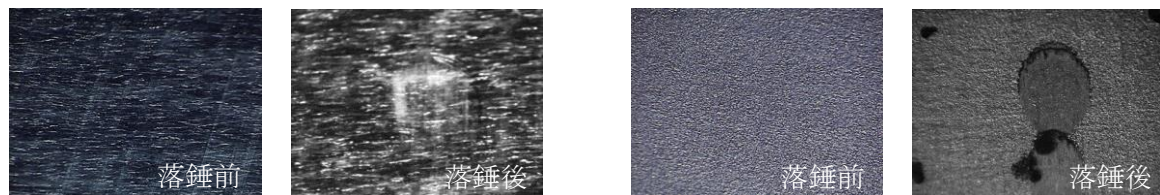
表 3 半球部と板部の組合せ及び位置エネルギー番号

半球部と板部の組合せ		位置エネルギー番号
半球部 1	板部 (膜無し)	1~8
半球部 1	板部 (膜有り)	1~8
半球部 2	板部 (膜無し)	8
半球部 2	板部 (膜有り)	8

3. 試験結果

3.1 損傷測定方法

落錘試験前後で板部の表面を観察すると、図 5 のように明確な衝突痕が確認できた。そのため、レーザー変位計 (KEYENCE LJ-V7020) を用いて、傷の測定を行った。



(a) 半球部 1, 板部 (膜無し)

(b) 半球部 1, 板部 (膜有り)

図 5 落錘前後表面比較の一例

測定値では傷の大きさ (傷深さ, 傷半径) が不明確であったため、フィッティングをかけ、評価を行った。フィッティングは、傷があると思われる範囲を放物線で、その範囲と比較して波形が均一な範囲を直線で近似した。フィッティングしたグラフから、直線近似部の値と

測定値で最大の凹みとなった値の差を「傷深さ」、放物線で近似した測定範囲を「傷半径」として評価することにした。測定例と傷の大きさ評価の概要を図6に示す。

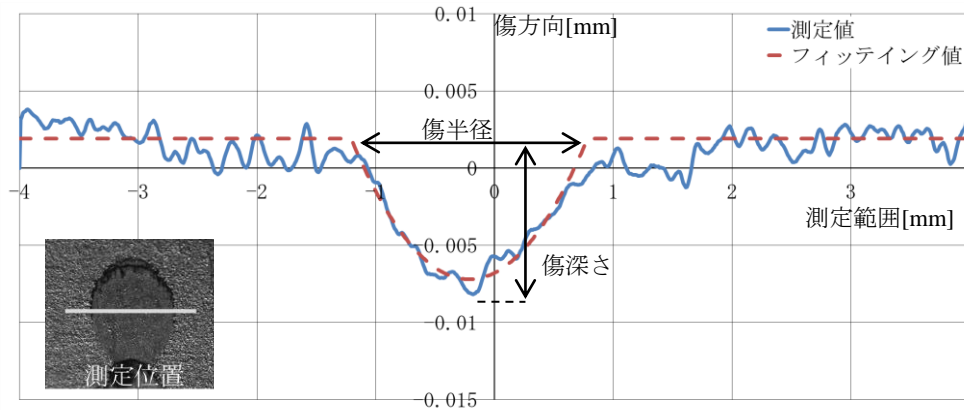


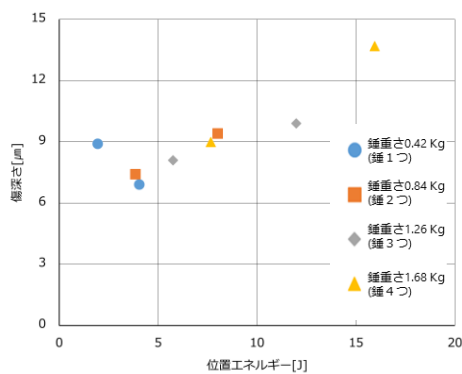
図6 測定例と傷の大きさ評価の概要

3.2 測定結果と考察

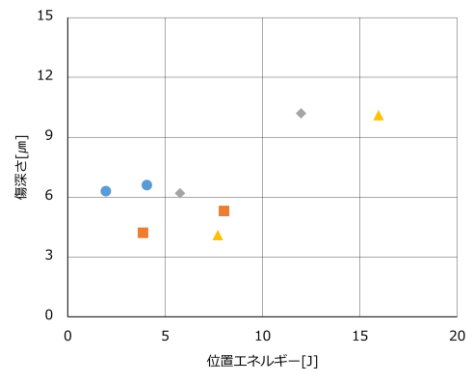
半球部1の測定結果を図7~9に示す。図7より位置エネルギーが大きくなるにつれて、傷深さが深くなることがわかる。また、板部の膜の有無で比較すると全体として板部に膜がある場合の方が、傷深さは2~3 μm 程度浅くなっている。これは、板部の材料(A7075-T6)よりも弾性率が低い焼成膜が、衝撃を緩和したためであると考察する。

図8も図7と同様に、位置エネルギーが大きくなるにつれて、傷半径が大きくなる傾向であることがわかる。また、測定結果全体として、板部に膜がある場合の方が傷半径は小さくなっている。

図9は図8に示されている傷半径からヘルツの接触理論³⁾を用いて、接触部にかかった応力を概算したものである。本実験では傷ができていないため、本来弾性域に適應できるヘルツの接触理論では応力を計算できないが、おおよその応力を得るために用いた。概算値にばらつきはあるが、位置エネルギーが大きくなるにつれて応力も大きくなる傾向であることがわかる。

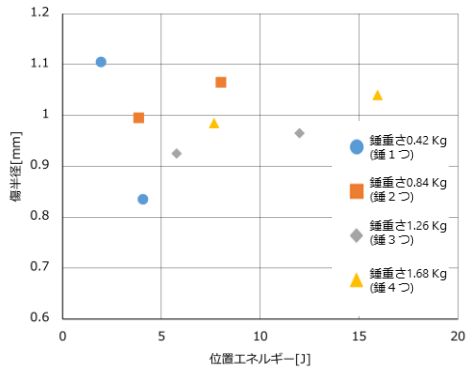


(a) 半球部1, 板部 (膜無し)

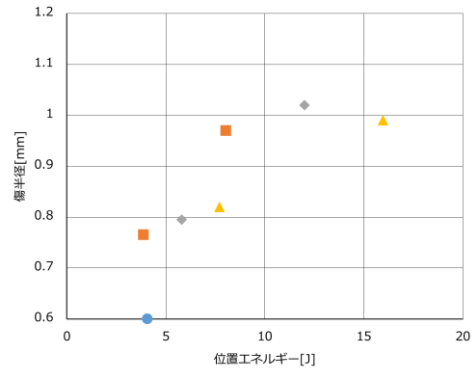


(b) 半球部1, 板部 (膜有り)

図7 位置エネルギーと傷深さの関係

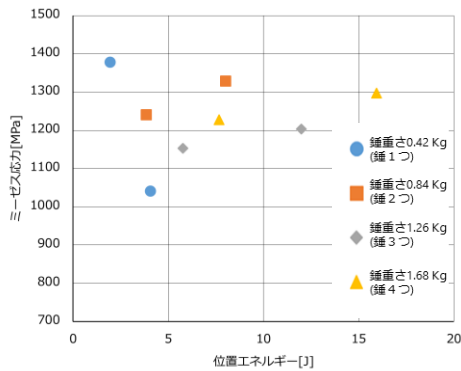


(a) 半球部 1, 板部 (膜無し)

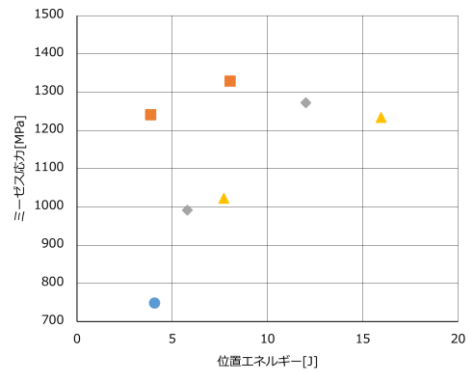


(b) 半球部 1, 板部 (膜有り)

図 8 位置エネルギーと傷半径の関係



(a) 半球部 1, 板部 (膜無し)



(b) 半球部 1, 板部 (膜有り)

図 9 位置エネルギーとミーゼス応力の関係

また、落錘試験の評価では、位置エネルギー又は運動量をパラメータとして評価することがある。そこで、それぞれの落錘パターンにおける位置エネルギーと運動量を考慮しながら、傷の大きさを比較することで、傷の大きさがどちらの影響を受けやすいのかを考察した。表 4 にその比較値を示す。本試験においては、同程度の位置エネルギーの組合せ (3.8 J と 4.0 J, 7.6 J と 8.0 J 等) の場合に、傷の大きさが同程度の値をとっていることがわかった。

表 4 位置エネルギーと運動量の影響比較

(a) 半球部 1, 板部 (膜無し)

位置エネルギー[J]	運動量 [N・s]	傷深さ [μm]	傷半径 [mm]
1.9	1.2	8.9	1.105
4.0	1.8	6.9	0.835
3.8	2.5	7.4	0.995
8.0	3.6	9.4	1.065
5.7	3.8	8.1	0.925
11.9	5.5	9.9	0.965
7.6	5.0	9	0.985
15.9	7.3	13.7	1.04

(b) 半球部 1, 板部 (膜有り)

位置エネルギー[J]	運動量 [N・s]	傷深さ [μm]	傷半径 [mm]
1.9	1.2	6.3	傷無し
4.0	1.8	6.6	0.6
3.8	2.5	4.2	0.765
8.0	3.6	5.3	0.97
5.7	3.8	6.2	0.795
12.0	5.5	10.2	1.02
7.7	5.0	4.1	0.82
15.9	7.3	10.1	0.99

最後に、半球部 2 の測定結果を図 10, 11 に示す。測定グラフ及び損傷部の画像から、目視による接触位置の視認は可能であるが、明確な損傷をレーザー変位計により確認することはできなかった。よって、半球部 1 の測定と比較すると、球半径を大きくすることにより損傷を低減できることがわかる。これは、以下のヘルツの接触理論式から説明できる⁴⁾。

$$p_0 = \frac{3P}{2\pi a^2} = \sqrt[3]{\frac{6P}{\pi^3 R^2 \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)^2}}$$

ここで、 P は押付け荷重、 a は接触面半径、 R は球半径、 ν_1 は球のポアソン比、 ν_2 は板のポアソン比、 E_1 は球のヤング率、 E_2 は板のヤング率を表す。球半径 R が大きくなるにつれて、最大接触圧 p_0 が小さくなるため、損傷を小さくすることができたと考えられる。

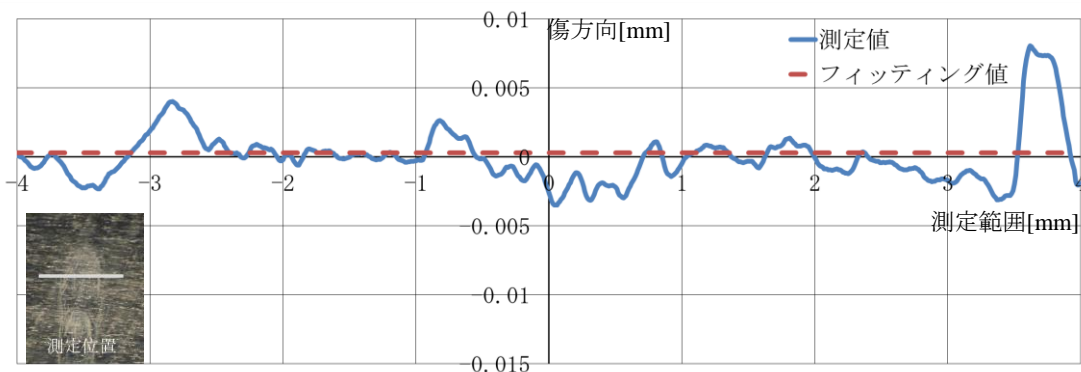


図 10 半球部 2, 板部 (膜無し)

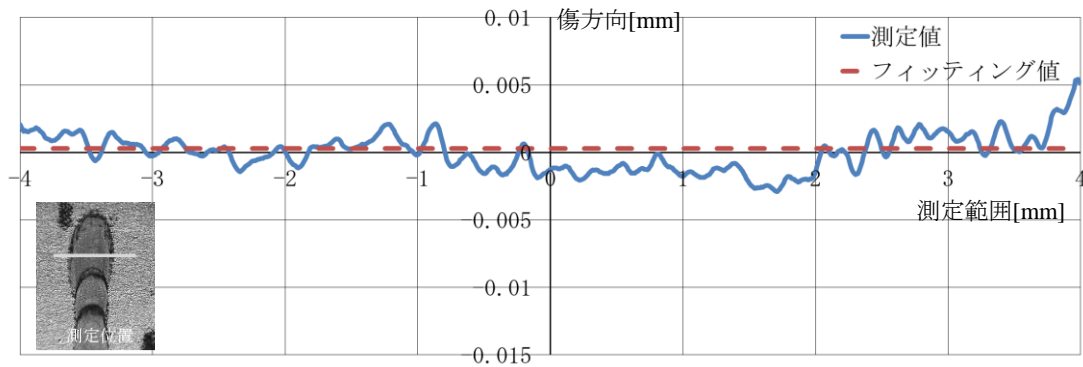


図 11 半球部 2, 板部 (膜有り)

4. まとめ

落錘試験を行い, KC 部に衝撃が負荷された際の傷発生状況を明らかにした. 傷の大きさは位置エネルギーに影響していること, 焼成膜による損傷低減効果があること及び球半径を大きくすることにより損傷が低減できることを確認した.

謝辞

本研究は, JAXA 宇宙科学研究所の戦略的研究開発費の助成を受けたものである.

参考文献

- 1) 土居 明広, 他: 気球 VLBI の検討, 平成 26 年度大気球シンポジウム, 2014.
- 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講演集, 3A08, 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, A07, 2015.
- 4) K.L.Johnson: CONTACT MECHANICS, Cambridge university press, pp45-106, 1985.