

伸展式光学架台のロンジロン・シャフト部間における接触を考慮した剛性評価

馬場 満久 (JAXA), 河野 太郎 (JAXA), 石村 康生 (JAXA)

Mitsuhsisa Baba (JAXA), Taro Kawano (JAXA), Kosei Ishimura (JAXA)

1. 背景

高精度かつ大型の宇宙構造システムに対する形状安定要求は年々厳しくなっている。その中でも、伸展式光学架台を求める天文観測衛星が持つ高い観測要求に応えるには、大型・高精度を両立し、更に軽量・高剛性を兼ね備える必要がある [1]。大型の伸展構造物は、軌道上で伸展するために摺動部を有するため、そこにはガタが存在しなければならない。このガタは形状精度を悪化させるだけでなく、全機剛性を非線形にし、設計難易度を上げる要因の一つにもなっている。将来の大型宇宙構造システムでは、軌道上で加わる小さな荷重範囲における、こうした非線形な剛性も考慮に入れた設計をおこなう必要がある。

本研究では例として ASTRO-H EOB のブレッドボードモデルとして用いられた伸展マストを対象とする。本伸展マストはアッパーロンジロン、ローワーロンジロンと呼ばれる軸材と、それを繋ぐシャフトで構成された構造 (図 1. 以後、ロンジロン 1Unit と呼ぶ) が伸展することにより、伸展マスト全体が形成される。ロンジロン-シャフトの間はすき間ばめであるため、ここにガタが存在している。伸展した後のマストにおいて、斜部材であるダイアゴナルロッドにより、通常いずれのロンジロン 1Unit も、シャフトがローワーロンジロンへ片当たりした状態である。ただし全機に対する荷重の入り方によっては、ロンジロン-シャフト間のガタの埋まり方、接触状態、部材の微小な弾性変形が生じ、ロンジロン 1Unit の剛性に非線形性をもたらしている。本研究では、ロンジロン 1Unit の構成要素であるローワーロンジロン・シャフトの非線形剛性を評価することを目的とする。特にガタが埋まり、接触が始まる近傍で剛性が非線形に変化する領域に着目する。



図 1 伸展マストの伸展におけるロンジロン 1Unit の展開挙動

2. 伸展トラス摺動部の MSC. Marc による

接触解析

本研究に用いる二次元の対称な構造数学モデルを図 2 に、境界条件を図 3 に示す。ロンジロン内径 $d1=10.015\text{mm}$ 、シャフト外径 $d2=9.995\text{mm}$ とし、ガタを 0.010mm とした。ローワーロンジロンおよびシャフトの厚みは 10mm である。接触が行われる円弧は重点的にメッシュを細分化し、接触面メッシュ長さが 0.08mm (以後、モデル 1-①)、 0.01mm (モデル 1-②) である 2 つのモデルを作成し、結果の違いを考察する。摩擦は簡単のため無視している。

モデル 1-①、1-②に対して、シャフトの中央節点を y 方向に $+0.015\text{m}$ 、 -0.015mm 変位させる解析を行う。これはガタ 0.010mm が埋まった後に、 0.005mm 上または下に押し付けることを意味する。モデル 1-②では解析を行うステップ数もより

詳細なものにしている。接触解析におけるシャフト中心節点の変位量とシャフト中心節点の反力の比較を図 4 に示す。剛性はシャフト上部が片当たりしている場合の剛性と、下部に片当たりしている状態で非対称であることを示している。これは

ローワーロンジロンの形状および境界条件の非対称性から生じているものと考えられる。図 5 にモデル 1-①, ②の結果比較を示す。接触部メッシュ長さが大きいモデル 1-①も、小さい場合のモデル 1-②いずれでも計算は収束しており、両者に大きな違いは見られない。

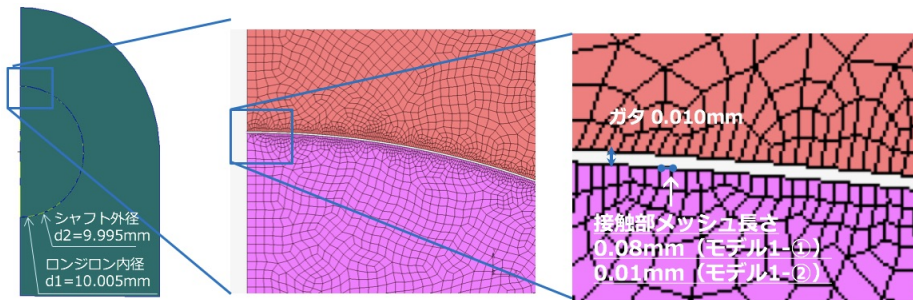


図 2 接触解析用 構造数学モデル

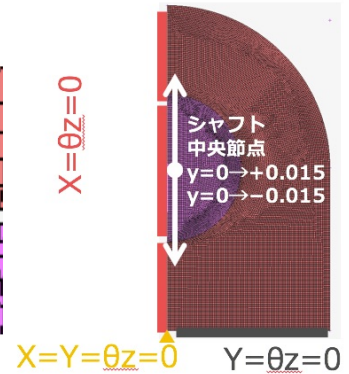


図 3 境界条件

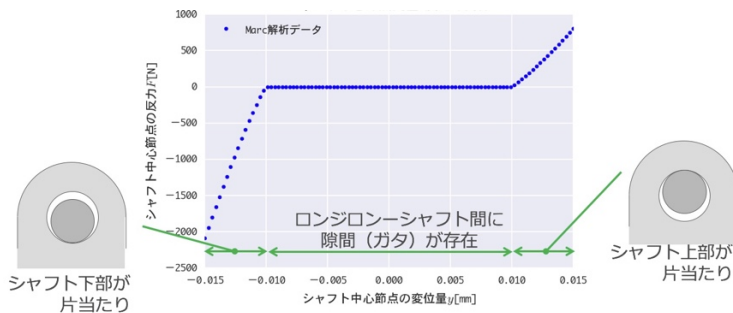


図 4 モデル 1-① 接触解析 結果

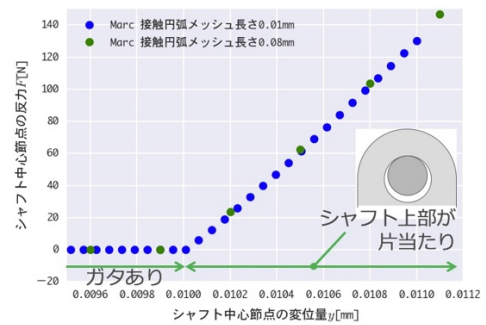


図 5 モデル 1-① / ② 接触解析結果比較

3. 非線形接触解析と線形解析による解析

結果の比較

接触解析は線形解析に比較して設定パラメータが多く、計算コストも高いため、現状の宇宙機開発において積極的に用いられている手法ではない。しかし実機を詳細に設計するにあたり、限定的な用途であっても線形解析に取り込む方法を考えることは有用である。本章では、2章において MSC. Marc 接触解析に使用したモデル 1-①を MSC. Nastran へ渡し、線形解析において模擬する手法を提案する。

MSC. Nastran におけるモデル 1-①では、シャフトとロンジロンの接触する円弧において、位置が対になる節点を RBE2 要素で剛に結合し、ガタが埋まった状態を模擬する。これにシャフト中央節点を 2 章の解析ケースと同様に、0.001mm 上へ押し上げる変位を加えた。本章の解析では、このガタが埋まったことを模擬する結合箇所を 1 箇所 (モデル 2-①)、11 箇所 (モデル 2-②)、円周 90° に渡って存在する全ての節点 (モデル 2-③) とした 3 つのモデルで比較を行う (図 6)。モデル 2-②における RBE2 要素結合数 11 点は、2 章における接触解析でシャフト中央節点を 0.011mm 上に押し上げた際に、接触が行われた節点数である。これはロンジロン-シャフト間のガタ 0.010mm が埋まり接触

してから、更に0.001mmだけシャフトを上を押し上げたことに相当する。

MSC. Marc による接触解析（2章モデル②）と、MSC. Nastran による解析の比較を図7に示す。図7のプロットを数値微分することで剛性としたものを図8に示す。

図7においてMSC. Marcの結果（濃青点）が、RBE2要素結合1箇所モデル2-①（薄青点）による結果と、円周90°に渡って結合したモデル2-③（黄点）の間に存在している。このモデル2つは接触状態模擬としては極端であり、モデル1-②の接触解析結果はこの間に収まっている。シャフトの押上変位量0.0110mmにおいては、RBE2要素による節点結合の数を11点から調整することで、剛性

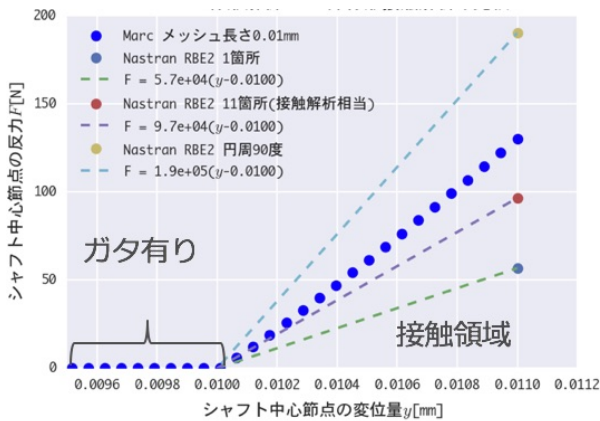


図7 MSC. Marc による接触解析と MSC. Nastran による線形解析の比較

4. 結 言

本研究では今後の大型高精度伸展マストのロンジロンとシャフトの接触を考慮した剛性評価を数値解析により行った。解析結果より、ローワーロンジロン・シャフト部の非線形剛性が非対称性であること示した。またMSC. Marc 接触解析で用いたモデルをMSC. Nastran に渡し、限定的ではあるが線形解析内で剛性を表現する手法を提案した。今後ロンジロン1Unitの剛性評価実験を行い、3次元に拡張した接触解析との比較をおこなうことで、知見を深化させていく計画である。

を線形解析により表現することが可能であると考えられる。

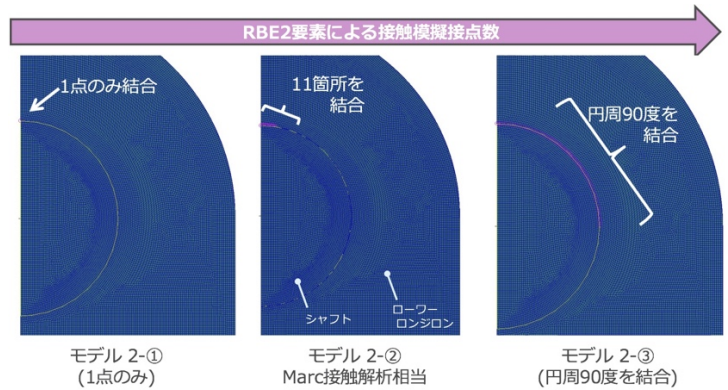


図6 RBE2要素による接触模擬

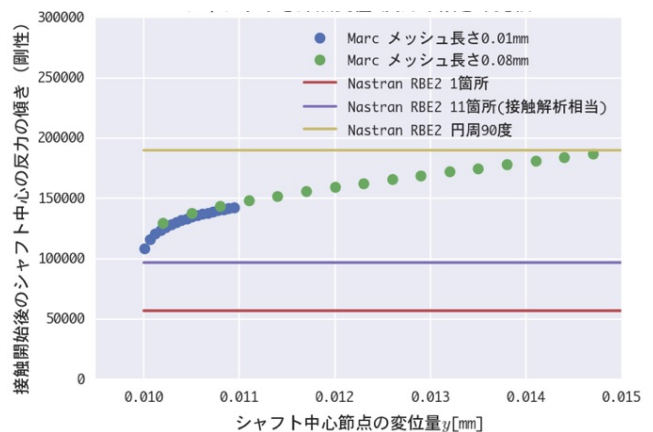


図8 MSC. Marc と MSC. Nastran の結果に基づく剛性比較

謝 辞

本研究はJAXA宇宙科学研究所の戦略的研究開発費「大型高精度光学架台に関する研究」の一環として実施した。ここに感謝の意を表す。

文 献

- [1] 石村康生. 河野太郎. 馬場満久. 他, "X線天文衛星「ひとみ」(ASTRO-H)高精度構造システムの開発報告," 日本航空宇宙学会誌, vol. 65, no. 1, p. 5, 1/2017.