

平成 30 年 5 月 29 日現在

機関番号：82723

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06614

研究課題名(和文) 振動付与による高精度展開アンテナ構造の形状再現性の向上

研究課題名(英文) Improvement of deployment repeatability of a deployable antenna by vibration

研究代表者

田中 宏明(Tanaka, Hiroaki)

防衛大学校(総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、電気情報学群及びシステム工・システム工学群・教授

研究者番号：90532002

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：衛星搭載用の高精度展開宇宙構造システムにおいて問題となる展開後形状非再現性に関して、その要因となるラッチ部の摩擦とガタに対応した形状再現性向上法を提案し、その有効性を実証した。摩擦については、構造に振動を付与する方法を提案し、試験と数値解析を通して適切な振動特性を検討した。ガタについては、キネマティックカップリングを用いた結合における、適切な押付荷重付与に関する条件を検討し、導出した条件の有効性を試験により確認した。

研究成果の概要(英文)：Methods of improving the deployment repeatability of deployable space antennas were developed and their effectiveness was demonstrated. The shapes of these deployable antennas are required to be highly accurate in order to maintain their performance. Among many causes deteriorating surface accuracy, deployment unrepeatability is one of the largest causes. Gaps and frictions cause the deployment unrepeatability. For the unrepeatability caused by frictions, the improving method by applying vibration to deployable structure after deployment was developed. The effects of vibration characteristics on improving shape repeatability were investigated through experiments and numerical simulations, and the effectiveness of the developed method was demonstrated. For the unrepeatability caused by gaps, a new strategy of pressing load adjustment for high-precision positioning mechanism using kinematic couplings was developed and its effectiveness was demonstrated through experiments.

研究分野：航空宇宙工学，宇宙構造物工学，衛星搭載用展開アンテナ

キーワード：航空宇宙工学 衛星搭載用展開アンテナ 展開構造物 展開再現性 スマート構造システム キネマティックカップリング

1. 研究開始当初の背景

人工衛星を利用した天体・地球観測や通信・放送などにおけるミッションの高度化に伴い、衛星搭載用アンテナなどの宇宙構造システムには、より大型で、より精度の高い構造が求められている。このような大型化への要求を実現するために、大型のアンテナ構造では展開構造が利用されている。一方、鏡面の精度に関する要求も厳しくなっており、例えば電波天文衛星 ASTRO-G では、約 10m の開口径を持つ大型の展開アンテナ鏡面に対し、0.4mmRMS という非常に高い鏡面精度が要求されていた。鏡面精度に関して、アンテナの軌道上での熱変形その他、展開時の形状非再現性が精度を悪化させる大きな要因となっている。展開アンテナ構造における形状非再現性とは、構造の収納・展開のたびに鏡面形状が変化する現象であり、過去の衛星搭載用アンテナでも現象が確認されていたが、これまではミッションから要求される鏡面精度が低かったこともあり、問題とはならなかった。しかし、近年の高精度な大型展開アンテナにおいては、形状誤差の主要な要因であり、実際に ASTRO-G 衛星においても、その開発中止に繋がった顕在化された技術的課題の一つに上げられるなど、克服が急がれる課題の一つである。

2. 研究の目的

次世代の大型・高精度な展開アンテナ構造の実現において大きな技術的課題となっている。展開時の形状非再現性の克服を目指し、展開後の構造に適切な振動や荷重を付与することで形状再現性を向上させる技術を確認することが本研究の目的である。

3. 研究の方法

2 節で示した目的の実現に向けて、以下のステップにて研究を実施し、展開後の形状再現性の向上方法を構築した。

- (1) 展開時の形状非再現性に関する要因整理
- (2) 適切な振動や荷重付与による、形状変化の収束技術の確立
- (3) 最終形状を理想形状とするための、初期形状設計の検討

具体的には、(1)において、展開再現性を悪化させる要因を検討した。その後、(2)において、それぞれの悪化要因に対処する方法を開発するとともに、その有効性を試験および対応する数値解析、理論により実証した。最後に(2)の結果を基に検討を実施し、展開・(2)の方法を実施後に目的形状を得るための初期形状設計に関する指針を得た。

4. 研究成果

4.1 展開再現性を悪化させる要因

展開再現性を悪化させる要因を検討した結果、「ヒンジ部のガタ」、「ヒンジ部の摩擦」、

「ケーブル材の特性変化」などが主要な要因であることが分かった。このうち「ケーブル材の特性変化」については、研究代表者らの過去の研究等により、対策が検討、効果が確認されており、展開再現性向上に向けた目途が立っている。

そこで本研究では、「ヒンジ部の摩擦」および「ヒンジ部のガタ」による展開非再現性を解消する方法を考案し、検討を行った。なお、研究提案時は振動付与による「ヒンジ部の摩擦」の影響低減のみを対象としていたが、展開再現性向上のためには、「摩擦」、「ガタ」両方に対する対処が必要であることより、研究範囲を広げそれらに対応する方法を構築した。

4.2 ヒンジ部の摩擦に起因する展開非再現性の改善

ヒンジ部の摩擦による展開非再現性を改善する方法として、展開後構造への振動付与による展開再現性向上方法を提案し、その有効性を実証した。リップフープケーブル型アンテナ構造の一部を模した、ヒンジと梁要素からなる供試体を作成、圧電アクチュエータを貼付した。本試験では展開を想定した動作を付与後、残留変位(変位量を D とする)を計測、その後、再現性向上のために圧電アクチュエータを用いて振動を付与、位置の回復量(以降 R とする)を計測した。試験装置を図 1 に示す。

これらの計測値より、加振による展開再現性向上能力を CF (Correction factor = $R/D \times 100[\%]$) を用いて評価する。 CF が 100% の場合は完全にもとの位置に戻っており、100% を超える値は振動負荷により位置が反対方向に振れていることを意味している。試験結果の 1 例を図 2 に示す。試験の結果、圧電アクチュエータを駆動する印加電圧が大きいほど展開再現性向上効果が大きいこと、また 30 秒を超える振動付与時間には明確な効果が期待できないことが分かる。つまり、小さい印加電圧で長時間振動を付与しても展開再現性の向上は望めない。また、アクチュエータ位置に関しては、構造系の固有振動モードを効果的に誘起できるアクチュエータ配置が重要となることを明らかにした。アクチュエータの適切な位置は、構造の固有振動モード解析におけるモード外力の比較から選定できる。

次に、振動付与後の形状について評価を行うために、数値解析を実施した。まず展開再現性評価を適切に行える数値解析モデル構築のため、3 種類のモデルを用いた基礎解析を行い、菊植らによる摩擦モデルが展開非再現性の挙動を適切に表現できることを明らかにした。次に、構築した数値解析モデルを用いて、振動付与後の形状についての評価を実施した。解析の結果を図 3 に示す。この結果より、振動付与後には摩擦を考慮しない状態での釣り合い形状が実現されることが明

らかとなった。

以上より、展開後の構造システムに適切な振動を付与することで、展開再現性が向上すること、振動付与後の形状はほぼ摩擦がない状態での形状となることが確認され、提案方法の有効性が実証された。振動付与後に目的形状を得るための初期形状設計に関しては、摩擦を無視した状態での設計解が利用できる。

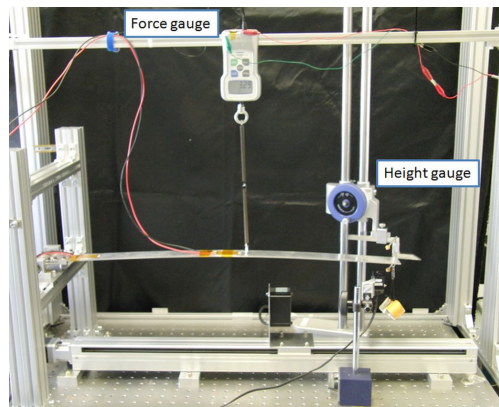


図1 振動付与による展開再現性向上試験装置

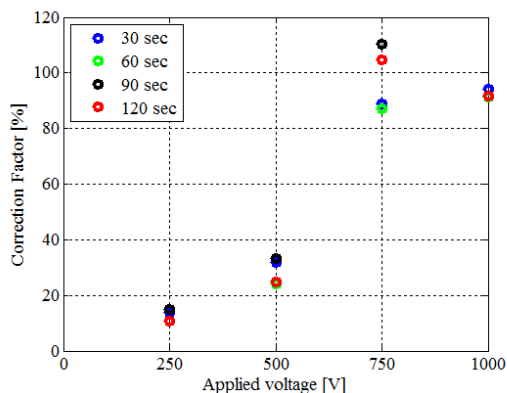


図2 振動付与による展開再現性向上試験結果(1次モード、根元MFC)

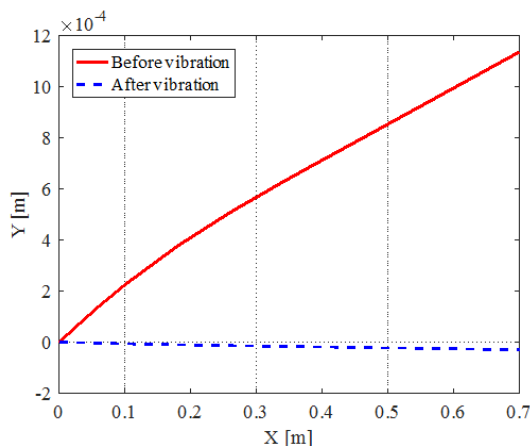


図3 振動付与後の形状誤差(数値解析結果)

4.3 ヒンジ部のガタに起因する展開非再現性の改善

次にヒンジ部のガタによる展開非再現性を低減する方法について、検討を行った。ガタについてはキネマティックカップリング(KC)の利用が有効であり、近年の宇宙構造物の展開再現性を向上させる結合要素として利用されている。しかし、過去の研究において、KCを組込んだアンテナ鏡面モデルの組立て時に非再現性を確認したほか、KCの球や面の接触における摩擦係数、V溝の傾斜角及び押付荷重の関係によっては、適切な位置に嵌合しない可能性があることが理論的に示されている。

そこで本研究では2 D O R (Degrees Of Restraint)-2 D O R-2 D O Rの組合せを対象に、嵌合させるKCの順番と押付荷重を調整することにより適切な嵌合に必要な摩擦係数への要求を緩和することを目指し、再現性を向上させるための押付荷重に関する条件式を導出した。また、位置再現性試験により導出した条件の有効性を確認した。

はじめに、先行研究の理論式をもとに、適切な嵌合状態を実現するための押付荷重に関する展開・組立完了条件を導出した。条件の導出では、1つ目のKC、2つ目のKC及び3つ目のKCを順番に嵌合させるという3つのステップに分けて検討を行った。これらの検討では、嵌合しているKCがある場合、未嵌合のKCを嵌合させる荷重がすでに嵌合しているKCに作用するため、この際に嵌合済みのKCが不適切な嵌合状態とならないための条件を導出した。

次に、位置再現性試験では、導出した条件を全て満たす試験ケースと一部満たさない試験ケースを考え、合計4ケースの押付荷重の組合せを試験した。3つのKCの負荷荷重を個別に調整するための荷重調整機構を考案し試験装置に組込んだ。試験装置を図4に示す。アンテナ鏡面部を模擬した上板とアンテナの支持構造を模擬した下板との間にKCを組み込み、下板にレーザー変位計を取付け、荷重を负荷する前後における下板に対する上板の相対位置を測定することで再現性を評価した。試験結果を図5に示す。

試験の結果、全ての条件を満たした試験ケース(荷重負荷手順A)が最も高い再現性を示した。その他のケースでは、条件を満たす場合と比較して1.5~3倍程度大きな位置ずれが生じていた。導出した押付荷重条件及び先行研究の条件を満たす荷重ケースによりKCを嵌合させることで、位置再現性が向上できることが示されており、これらの結果より、導出した条件式の有効性を確認できたと言える。

この方法では、適切な押付荷重付与により展開後のKCの相対位置が一意に決まり、その位置はKCの幾何学的関係より求められるため、初期形状の設計ではKC位置の設定を行えば良い。

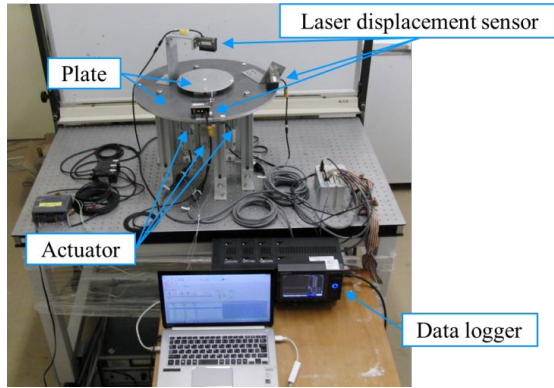


図 4 KC を用いたガタの影響低減試験装置

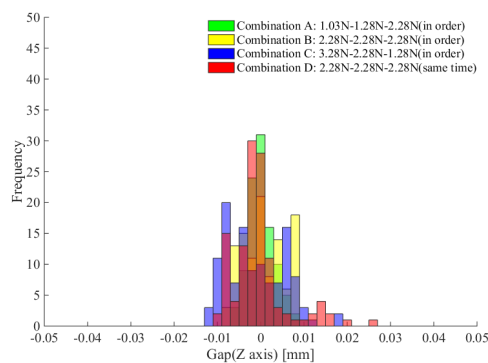


図 5 KC を用いたガタの影響低減試験結果

4.4 最終形状を理想形状とするための初期形状設計

ヒンジ部の摩擦の影響については、4.2 節の結果より、振動付与後の形状はほぼ摩擦がない状態での形状となることが分かった。よって振動付与後に目的形状を得るための初期形状設計に関しては、摩擦を無視した状態での設計解が利用できる。また、ヒンジ部のガタについては、KC を利用し、適切な押付荷重を付与することで展開後の形状を一意に決めることが可能である。

これらのことより、展開構造物を適切な押し付け荷重を付与できる KC を組込んだシステムとし、展開後に振動を付与することで、従来の設計方法による構造システムにおいても展開再現性を向上させることが可能であり、展開後形状についても目的の形状を得ることが可能となる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1 件)

1. R.Sakamoto, H.Tanaka, and Y.Ogi, Improvement of deployment repeatability by the vibration produced by macro fiber composite

actuator, Mechanical Engineering Letters, No.16-00042, DOI: 10.1299/mel.16-00042, pp.1-8 (2016), 査読有。

〔学会発表〕(計 6 件)

(国際会議 3 件)

1. H.Tanaka and R.Sakamoto, Effects of Vibration Characteristics on Improvement of Deployment Repeatability by Vibration, The 28th International Conference on Adaptive Structures and Technologies, pp.1-10, Cracow, Poland (2017).
2. H.Tanaka, K.Takagi, A.Do, K.Ishimura, Y.Ogi, Y.Sato and A.Sumita, High-Precision Positioning of Reflector Segment by Using Kinematic Couplings for Balloon-Borne Radio Telescope, The 68th International Astronautical Congress, IAC-17-C2.2.5, pp.1-5, Adelaide, Australia (2017).
3. K.Takagi and H.Tanaka, Strategy of Pressing Load Adjustment for High Precision Positioning Mechanism Using Kinematic Coupling, The 14th European Conference on Spacecraft Structures Materials and Environmental Testing, pp.1-15, Toulouse, France (2016).

(国内会議 3 件)

1. 田中 宏明, 坂本 諒太郎, 振動付与による展開再現性向上に関する数値解析, 第 61 回宇宙科学技術連合講演会, 3S11, pp.1-6, 新潟 (2017).
2. 田中 宏明, 坂本 諒太郎, 振動付与による展開宇宙構造物の展開再現性向上における振動特性の影響評価, 第 60 回宇宙科学技術連合講演会, 3H11, pp.1-4, 函館 (2016).
3. 高木 健太郎, 田中 宏明, 石村 康生, 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し付け荷重調整法, 第 60 回宇宙科学技術連合講演会, 3H09, pp.1-6, 函館 (2016).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中 宏明 (Hiroaki Tanaka)

防衛大学校・システム工学群・教授

研究者番号: 90532002