

3-3 大型展開アンテナ反射鏡部

3-3 Large Deployable Reflector (LDR)

新館恭嗣* 寺田弘慈* 白井基文* 辻畑昭夫* 宮坂明宏**

(*独立行政法人 宇宙航空研究開発機構、**NTT 未来ねっと研究所)

SHINTATE Kyoji, TERADA Koji, USUI Motofumi, TSUJIHATA Akio, and MIYASAKA Akihiro

要旨

大型展開アンテナ(LDR)は、平成16年度に打上げを予定している技術試験衛星Ⅷ型(ETS-Ⅷ)に搭載される。小型携帯端末による移動体衛星通信を実現するために、LDRには世界最大級の大きさや高い鏡面精度との両立が求められている。このため、LDRは精度の高い製造・調整・地上試験評価が可能な大きさの構造要素(モジュール)を組み合わせるモジュール型設計を取り入れている。本稿では、LDRの設計の概要及び開発・評価試験について述べる。

Large Deployable Reflectors (LDRs) are carried on Engineering Test Satellite Ⅷ (ETS-Ⅷ), which is scheduled to be launched in 2004 (JFY) and demonstrates mobile communications via geostationary satellite using cellular-phone-sized terminals. LDR is required to have a tennis-court-sized reflector and high accuracy of its surface. To meet the requirements, LDR is designed based on a modular-mesh concept in which the structure consists of several basic modules. This paper describes concept of design and verification tests of LDR.

[キーワード]

大型展開アンテナ, LDR, 技術試験衛星Ⅷ型, 展開アンテナ

Large deployable reflector, LDR, Engineering Test Satellite Ⅷ, Deployable antenna

1 はじめに

大型展開アンテナ(LDR)は、平成16年度に打上げを予定している技術試験衛星Ⅷ型(ETS-Ⅷ)に搭載される。LDRは、小型携帯端末による移動体衛星通信を実現するために、世界最大級の大きさ(外形 約19m×17m)であると同時に、S-band通信(2.5/2.6GHz)に対応する高い鏡面精度(2.4mmRMS)が要求されている。その実現のために、下記の技術を確認すべく開発を行っている。

(1) ケーブルメッシュ展開アンテナ構造設計技術

金属メッシュとケーブル構造を組み合わせた反射鏡面構造を展開トラス構造で支持することによって高い収納性と高精度な反射鏡面を実現する。

(2) モジュール型展開構造設計、試験評価技術

大規模構造物を一体の構造で設計・製造・試験するのではなく、精度の高い製造・調整・試験評価が可能な寸法の構造要素(モジュール)を構成し、複数のモジュールの結合により大規模構造を構築することによって、高精度・高信頼性・拡張性を実現する。

(3) ケーブル/メッシュ構造とトラス構造との連成解析技術、柔軟構造の運動解析技術

柔軟で非線形な展開構造の構造特性を高い精度で解析し、鏡面精度、展開信頼性を保証する。

本稿では、LDRの設計の概要及び開発・評価試験について述べる。

2 LDRの概要

2.1 LDRの構成

LDRはETS-Ⅷに対して2面搭載され、一方が送信用、他方が受信用の役割を担う。LDRの展開状態における鏡面の面積はテニスコートと同程度となる(図1)。従来の大型アンテナでは、一体の構造として設計・製造・試験を行っているのに対し、LDRでは、精度の高い製造・調整・地上試験評価が可能な寸法の構造要素(モジュール)を組み合わせるモジュール型設計を行っている。図2に単体モジュールを示す。モジュールは、電波を反射する金属メッシュ(モリブデンに金メッキを施したもの)とケーブルネットワークによって鏡面を形成し、トラス構造によりこれを支持する構造となっている。パラボラ面の形成は、各モジュールのトラス構造の、鏡面側六角形の頂点から面外方向に伸びた棒材(スタンドオフ)の長さを調整することにより行う。また、これらを構成する材料(ケーブル、メッシュ、CFRP)については、軌道上10年の設計寿命を保証するために、各種の寿命試験(紫外線、放射線等)を実施し、強度の劣化量を考慮して設計に反映している。

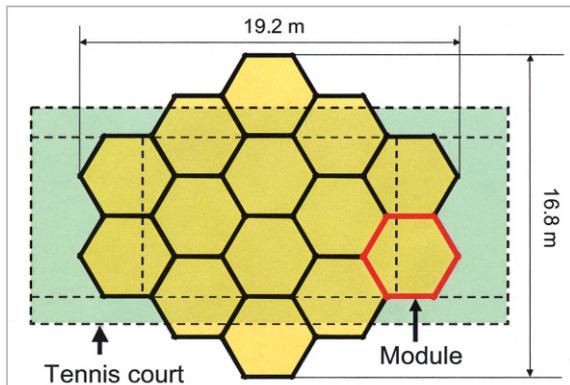


図1 LDRの展開形状の模式図

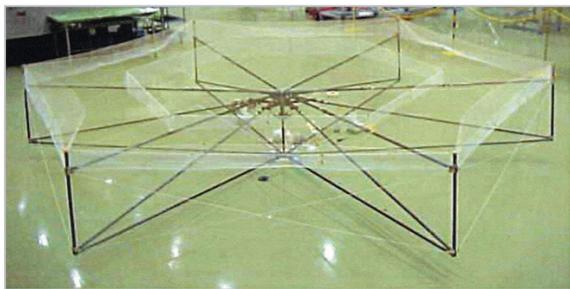


図2 LDRの単体モジュール

2.2 LDRの展開

図3に展開機構を示す。LDRの展開の原理はジャンプ傘と同じであり、モジュールの中心部に取り付けられたバネの力で展開する。また、展開初期の展開力を増強する目的で、展開アシストバネが装着されている。また、各モジュールの展開速度の制御と展開の同期性を保証するために、展開機構からワイヤを引き回し、ワイヤの長さで機構の動きをコントロールしている。ワイヤは、ステッピングモータから徐々に送り出されるが、LDR全体(14モジュール)の展開は4個のモータで制御されている。モータの配置を図4に示す。

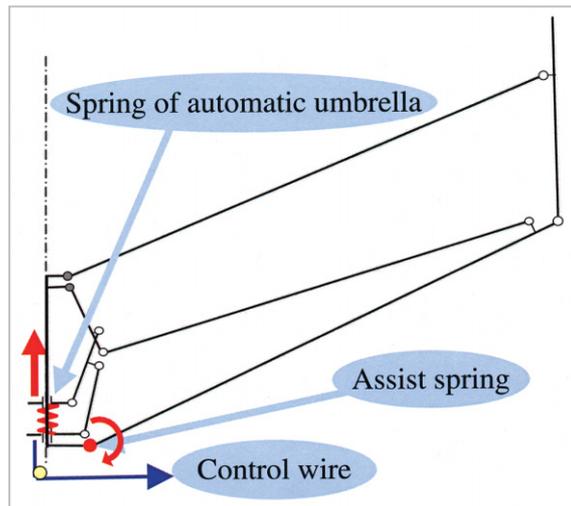


図3 LDRの展開機構

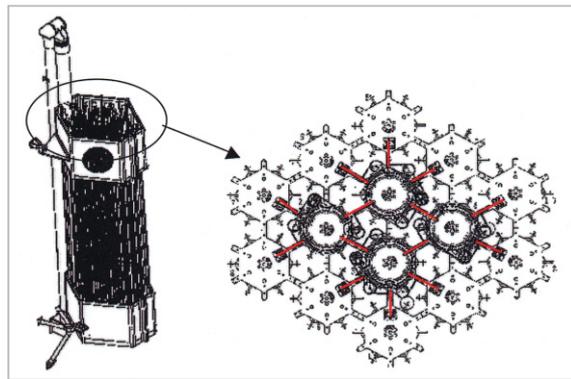


図4 展開モータの配置

図5にLDRの打上げ時のコンフィギュレーションを示す。LDRの鏡面系は、収納状態において二つのアーム(保持解放機構)により固縛されており、打上げ時にさらされる荷重負荷に耐える設計となっている。

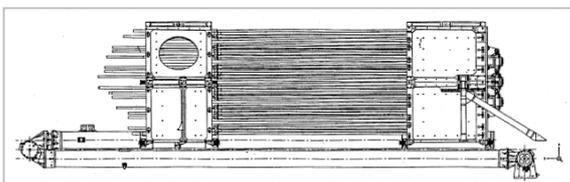


図5 LDRの打上げ時のコンフィギュレーション

3 LDRの開発概要

3.1 LDRの開発スケジュール

LDRの設計としては、平成9年に予備設計に着手し、平成10年に基本設計、平成11年から平成13年に詳細設計を行い、現在(平成15年)は維持設計を実施している。試験用の供試体としては、予備設計の結果を反映してブレッド・ボード・モデル(BBM)を製作(実機相当で7モジュールを製作)し、各種の試験を行うことで、LDRの基本的な技術の実現性を確認した。次に基本設計結果とBBM試験結果を反映してエンジニアリングモデル(EM)を製作(実機相当で14モジュールを製作)し、フライト品の実現性を確認した。これらと並行して、柔軟構造解析プログラムSPADE(NTT未来ねっと研究所製)を用いたケーブル／メッシュ構造とトラス構造との連成解析などにより、LDRの展開特性・信頼性の評価を行った。これらの開発試験結果を踏まえ、プロトフライトモデル(PFM、受信用)及びフライトモデル(FM、送信用)のフライト実機の製作を行い、平成15年9月にはLDR単体としての試験を終了した。平成16年初頭から、衛星本体と組み合わせた試験が実施される予定である。

3.2 LDRの開発試験の特徴と軌道上実験及びその反映

従来の展開構造物(太陽電池パドル等)は、重力をキャンセルするように供試体をつるして地上展開試験を行うことにより、軌道上での展開を保証していた。しかし、LDRは従来の展開構造物のような一次元的な展開とは異なり、その挙動は複雑であるとともに、正確な予測は難しい。したがって、地上展開試験結果のみで軌道上の展開を保証するのでは不十分であるという判断から、下記の試験を追加することとした。

(1) 航空機を利用した微小重力実験(BBMを使

用)

- (2) ロケット搭載PIGGY BACK方式による小型モデルでの軌道上実験
- (3) 真空チェンバ中での展開試験

上記の試験の中で特に有用な結果をもたらしたものは、(2)項の軌道上実験であった。この軌道上実験は大型展開アンテナ小型・部分モデル(LDREX)を供試体とし、Ariane5にPIGGY BACKとして搭載された。LDREXの大きさは実機のハーフサイズであり、モジュール数は7モジュールであった。LDREXのAriane5への取付けイメージを図6に示す。

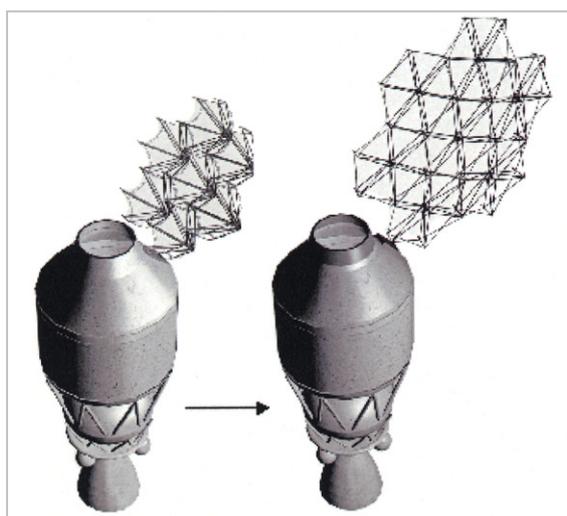


図6 軌道上実験のイメージ図

2000年12月に実施された実験では、保持解放機構を解放した直後の展開初期において、当初予想していなかった大きな揺れが生じ、これにより鏡面メッシュがトラス部材に絡み、展開が途中で停止した。しかし、展開角度(収納状態で0度、全展開で約90度)でみると5度程度まで展開したため、地上で得られた試験データとの比較から、想定していた摩擦抵抗等の見積りの妥当性が確認された。一方、予想していなかった展開初期の揺れ及び鏡面メッシュの絡みを防止するために、LDRに対して下記の設計改良を行った。

- (1) 保持解放機構の解放時における鏡面系の揺れの抑制
 - ・保持解放機構の解放シーケンス変更(従来、上下の保持解放機構を同時に展開する計画を、上部解放後に下部を解放するように変

更する。)

- ・解放速度の緩和(保持解放機構がラッチアップする際の衝撃の低減を目的として、ダンパを取り付け、機構の展開速度を抑制する。)

(2) 鏡面メッシュの絡み防止

- ・飛び出し防止帯の装着(鏡面メッシュが収納位置から飛び出さないようにする。)
- ・スタンドオフロッドの装着(鏡面メッシュが飛び出した場合でもスタンドオフまで物理的に届かないようにする。)

また、展開に対してロバストにするため、展開初期の展開力を増強する目的で、増強バネを装着する設計変更を行った。

これらの設計改良の妥当性を検証するため、下記の追加試験を実施した。

- (1) 航空機による微小重力実験(EMを使用、7モジュール、14モジュール)
- (2) カップ・アップ試験(EMを使用)
- (3) 展開力確認試験(EMを使用)

EMを使用した微小重力実験の様子を図7に示す。本実験は、2002年4月にフランスにて実施した。保持解放機構の解放シーケンスの変更を反映させた上で、解放直後の鏡面系の挙動及び鏡面の展開初期の挙動についてデータの取得を行った。これにより、軌道上よりも厳しい加速度擾乱が入力された場合であってもLDRの鏡面系に強度的な問題がないことを確認するとともに、微小重力下での鏡面系の挙動によりメッシュの絡み等が生じないことを確認した。

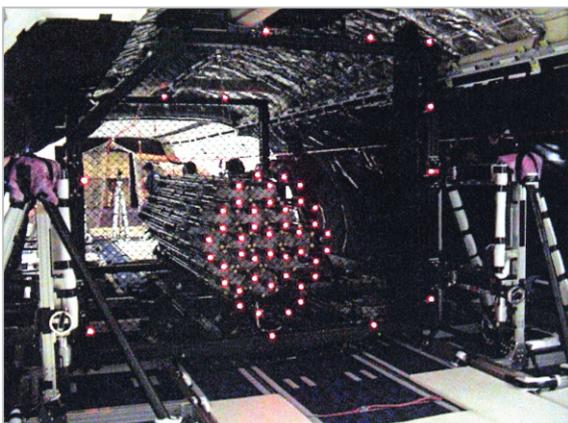


図7 微小重力実験のコンフィギュレーション(14モジュール)

次に、カップ・アップ試験の様子を図8に示す。本試験は、2002年夏期に実施した。鏡面を下に向けたつり下げ状態(カップ・ダウン)では、重力の影響により、保持アーム解放時の鏡面の揺れが抑制され、過小評価となる恐れがあるため、鏡面を上に向け(カップ・アップ)、なおかつ衛星構体と鏡面系とをつなぐブームを取り付けた試験コンフィギュレーションとした。試験により、保持解放機構の解放シーケンスの変更を行ってもブーム根元等における強度に問題がないこと、解放時に発生する衛星本体に対する擾乱がその基準値内に入ることが確認できた。また、保持解放機構の解放時の軌道上解析モデルを高精度化するのに必要なデータを取得し、更に前述の微小重力実験結果に基づいた鏡面系の挙動をも反映させることにより、保持解放機構の展開による鏡面系の揺れの影響に関する予測精度の向上が実現した。図9には、カップ・アップ試験結果と解析結果との比較の一例を示す。

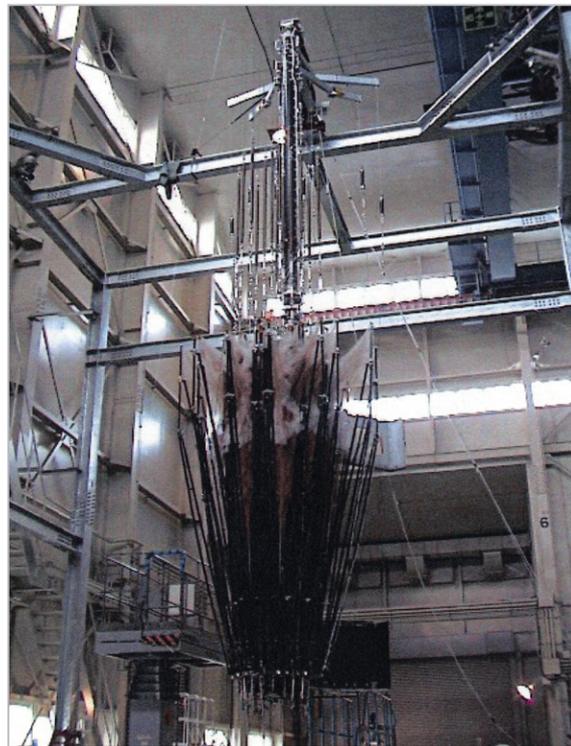


図8 カップ・アップ試験のコンフィギュレーション

以上、微小重力実験及びカップ・アップ試験の結果を見る限りにおいて、LDREXによる軌道上実験結果を反映した鏡面系の揺れの抑制及び

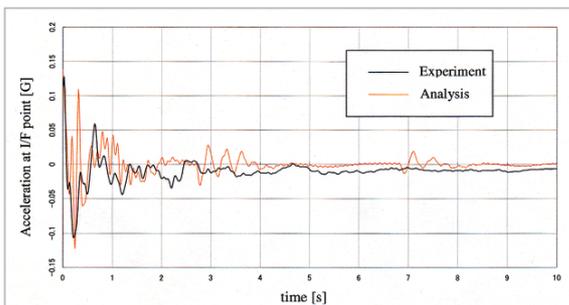


図9 カップ・アップ試験結果と解析結果との比較 (モジュール取付点加速度)

メッシュの絡まり防止の対策は問題ないと考えている。

一方、展開力確認試験では、鏡面展開試験において人為的に展開阻害力を負荷することにより、展開力の限界値を確認するとともに、展開解析結果との比較を行い解析モデルの妥当性を確認した。試験結果から、増強バネの装着による展開初期の展開力マージンの増大が確認できた。

3.3 LDRの単体試験

平成14年度下期から、受信用LDRに対してプロトフライト試験(PFT)を、送信用LDRに対して受入れ試験(AT)をそれぞれ実施した。その主な実施項目を以下に示す。

- (a) ブーム展開試験
- (b) 保持解放機構展開試験
- (c) 鏡面展開試験
- (d) 環境試験(正弦波振動、音響、熱真空)

LDRが環境負荷を受ける前後で展開特性に変化がないこと、すなわち軌道上で問題なく展開



図10 ブーム展開試験

が行われることを確認するために、(a)から(c)は環境試験の前後で行われた。試験の様子について、ブーム展開試験を図10に、鏡面展開試験を図11に、振動試験を図12にそれぞれ示す。



図11 鏡面展開試験
(上)展開初期状態 (下)全展開状態

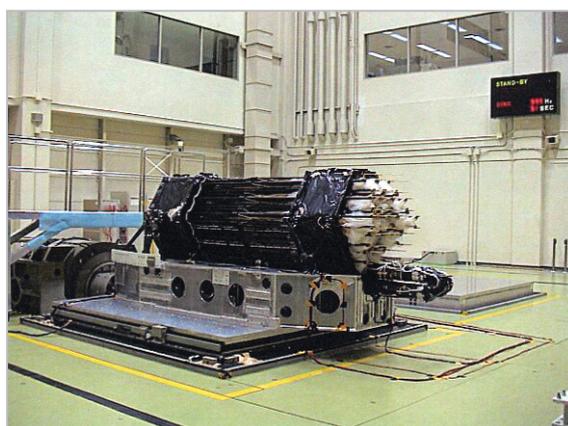


図12 振動試験

PFT/ATの結果、LDR単体としては設計要求を満足する品質に仕上がっていることを確認した。今後、衛星本体に取り付けられ、衛星全体

でのプロトフライト試験に供される。その終了後、再びLDRは本体から取り外され、最終確認の意味で前述の(a)から(c)の試験を行い、打上げに臨む計画である。

4 まとめ

本稿では、LDRの概要と開発の経緯について述べた。長年にわたり開発が進められてきたLDRも、数多くの設計改良が反映されたフライト品が完成し、最終的な試験を待つ段階にある。フライト品は、LDREXによる軌道上実験の結果を反映させた設計改良により若干重量が重くなったものの、鏡面系の重量は約143kg(約

0.7kg/m²)となり、当初目標であった1kg/m²以下を十分満足する軽量設計となった。

また、LDRはリスク低減の観点より実行可能なあらゆる試験を実施し、軌道上の展開を保証する考え方で開発に当たった。しかし、今後このような大型展開構造物の開発の際には、その開発効率の向上の観点から、地上試験が必要(あるいは可能)な部分と設計で保証する部分の切り分け及びそれらの手法の確立が技術的な課題となる。これらの技術的課題を解決するためにも、これまでのLDRの開発で残した試験データや打上げ後の軌道上の展開データが貴重なものとなるであろう。

参考文献

- 1 A. Miyasaka, et al., "A Tennis-court-sized Reflector for Communication Satellites-Use for Engineering Test Satellite Ⅷ", JC-Sat 2002, 87-91, 2002.
- 2 M. Homma, et al., "Experiment Plan of ETS-8 in Orbit: Mobile Communications and Navigation", I AC-02-M.3.08, 2002.



しん たてきょうじ
新館 恭嗣

独立行政法人宇宙航空研究開発機構
博士(工学)



てら だこうじ
寺田 弘慈

独立行政法人宇宙航空研究開発機構



うす い ちら ひろみ
白井 基文

独立行政法人宇宙航空研究開発機構



つじ ひろあき ち
辻畑 昭夫

独立行政法人宇宙航空研究開発機構



みや さか あき ひろ
宮坂 明宏

NTT 未来ねっと研究所 博士(工学)
衛星搭載機器の熱制御法及び熱変形