

## 30m 級大型展開反射鏡の研究開発と次世代情報通信衛星への適用

宇宙航空研究開発機構

小澤 悟

### はじめに

**東** 日本大震災で発生した被災地での地上通信網の障害により、被災地は、携帯電話の通話や、安否確認などのためのインターネット環境の利用が困難な状態となりました。このため、宇宙航空研究開発機構(JAXA)は、技術試験衛星Ⅷ型「きく8号」(ETS-VIII)を利用した被災地へのインターネット環境の提供を行いました。

図1は、「きく8号」による通信システム概念図です。「きく8号」の通信端末を、大船渡市、大槌町、女川町に持込み、あらかじめインターネットと接続済みの筑波宇宙センターに置かれた「きく8号」端末と、「きく8号」を通して接続することで、各地域にインターネット環境を提供しました。

この経験から、災害時における通信衛星の必要性を強く確信するに至りました。

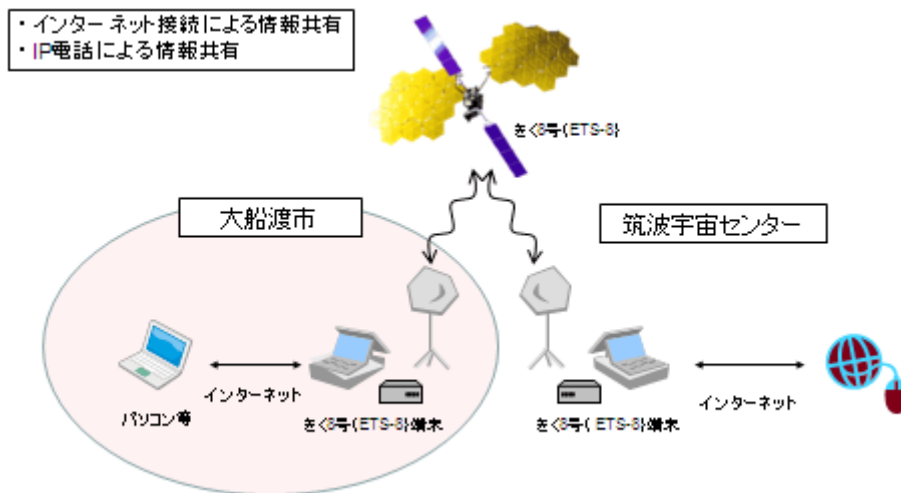


図1. 「きく8号」による通信システム概念図

東日本大震災が発生する以前から、国内にて、地上／衛星共用携帯電話システムの調査検討が行われていました。この調査検討の中で、地上用携帯電話と同等の大きさの小型端末から、直接、通信衛星と通信を行うため、大きさが19 m×17 m「きく8号」の大型展開反射鏡(ETS-VIII LDR; Large-scale Deployable Reflector)より大きな、30m 級にまで拡大した反射鏡が必要であるとの結果が得られました。

ETS-VIII LDR は、打上げた2006年12月当時、衛星搭載アンテナ反射鏡としては最大口径でした。その後、2009年7月にはETS-VIII LDRとほぼ同等サイズの18 mの反射鏡を持

つ TerreStar 1 が、2010 年 11 月にはそれを越える 22 m で、軽量の反射鏡を持つ SkyTerra 1 が打ち上げられています。

そこで、JAXA では、国際競争力を持ち、かつ地上との直接通信を可能にするため、世界最軽量で 30m 級の反射鏡を実現することを目的として、大型展開反射鏡の研究開発を行いました。目指す諸元は、表 1 のように設定しました。図 2 は、表 1 の反射鏡を持つ衛星の、軌道上 (a) と打上げ時 (b) のイメージです。なお、打上げロケットは、衛星の打上げ質量やフェアリングの大きさ等を考慮してアリアンロケットを想定しました。

表 1. 反射鏡の研究開発目標

開口径	30 m 以上	等価投影面積円
フォーカス長	18 m	F/D 0.6
鏡面精度	3.0 mmrms 以下	2.0GHz 波長の $\lambda/50$
面密度	0.43 kg/m <sup>2</sup> 以下	海外製品と同程度

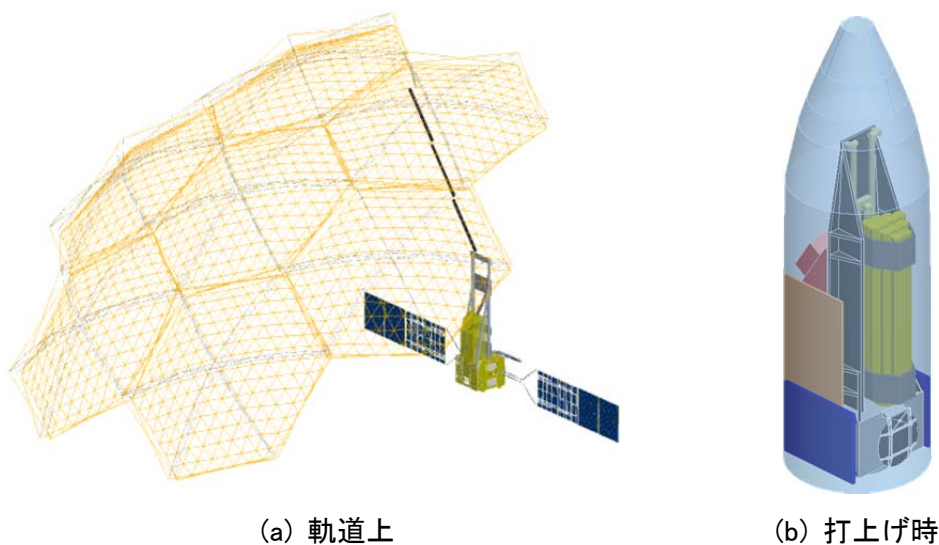


図 2. 30m 級大型展開反射鏡を持つ通信衛星のイメージ

### モジュールの口径拡大

ETS-VIII LDR は、図 3(a) のように直径 4.8 m のモジュールを 14 個合わせて、19 m × 17 m の反射鏡を構成しています。このため、一つのモジュールの直径を拡大することで、全体の開口径を拡大することができます。

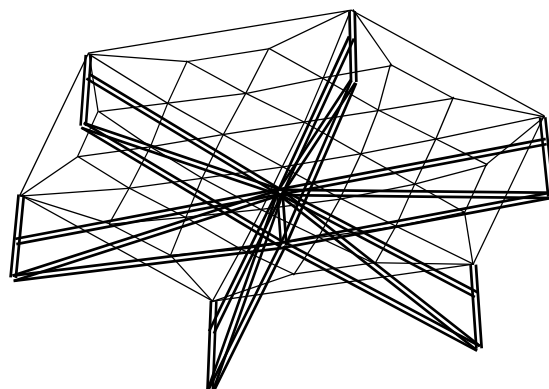
しかし、直径を単純に拡大する、例えばモジュールの直径を倍の 9.6 m にすると、開口径は拡大しても、その面積比だけ重くなってしまいます。この設計方針で設計を行うと、ETS-VIII LDR の単位面積当たりの密度(面密度)は 0.65 kg/m<sup>2</sup> なので、新しい反射鏡においておも面

密度は変わらないため質量が4倍程度になります。これでは、表1の面密度の目標に入れることができません。

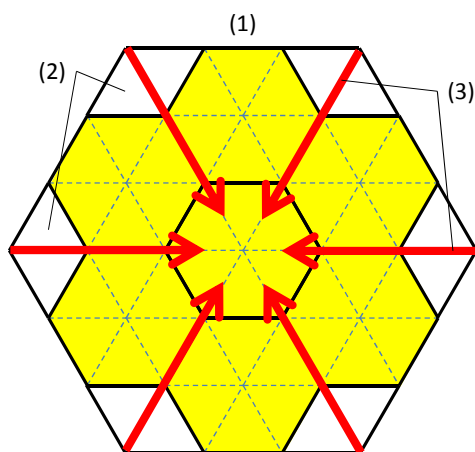
そこで、口径を拡大しつつ、軽量化を行うこととしました。軽量化のコンセプトを、図3を使って説明します。

- (1) 図3(a)のような従来のモジュールを7個結合した鏡面を作ります。図3(b)の黄色で塗られた部分が出来上がります。
- (2) 欠けている部分を埋めます。これで、全体の大きさが六角形になります。
- (3) この反射鏡は鏡面により赤矢印の方向に圧縮されます。この矢印方向の部材だけを残り、他の部材を取り除きます。

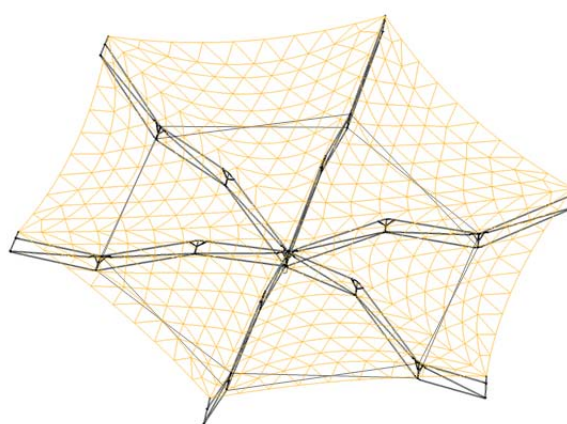
このようにして、図3(c)のような反射鏡が設計できます。この反射鏡は、図3(a)の反射鏡と比較すると、リブ(中央から6方向に伸びた背面構造)が3段に折れ曲がることから、三つ折り展開反射鏡、と名付けました。



(a) 従来のモジュール反射鏡



(b) 軽量化の手順



(c) 三つ折り展開反射鏡

図3. 反射鏡軽量化のコンセプト

三つ折り展開反射鏡は、リブと、反射鏡面から構成されています。リブは、3つに折れ曲が

る三つ折り展開トラス構造です。三つ折り展開トラス構造の展開シーケンスを図 4 に示します。(1)は収納状態です。(2)~(3)は、展開途中状態です。中央と各リブの折れ曲がり部にはバネの力で駆動するスライダが組み込まれていて、それぞれが同期してスライドすることで、三つ折り展開トラス全体が展開します。展開が終了すると、図 4(4)のようになります。

図 3(c)の直径 14.4 m の三つ折り展開反射鏡を 7 モジュール組み合わせると、図 2(a)の衛星に搭載されているような 30m 級大型展開反射鏡になります。設計結果を表 2 に示します。

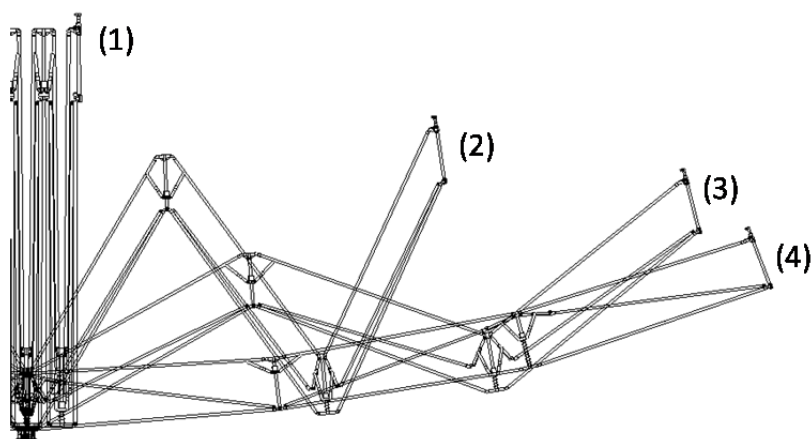


図 4. 三つ折り展開トラスの展開シーケンス

表 2. 反射鏡の設計結果

開口径	30 m	等価投影面積円
モジュール数	7	
モジュールサイズ	14.4 m	
面密度	0.37 kg/m <sup>2</sup>	ETS-VIII LDR の 57%
反射鏡タイプ	三つ折り	

### 展開解析による検証

三つ折り展開反射鏡が展開可能かどうかを、展開解析により検証しました。

使用した解析プログラムは、JAXA で開発した柔軟多体構造解析プログラム「Origami/ETS」です。このプログラムは、NTT 開発のプログラム「SPADE」と同様の、幾何学的非線形性を扱うことができる非線形有限要素解析理論と、ヒンジやスライダなどの結合を表現する理論を元に作成されており、30m 級大型展開反射鏡の開発に合わせて機能向上がなされています。なお、このプログラムは、研究・教育などの非営利目的に限り、JAXA 産業連携センターから配布を受けることができます。

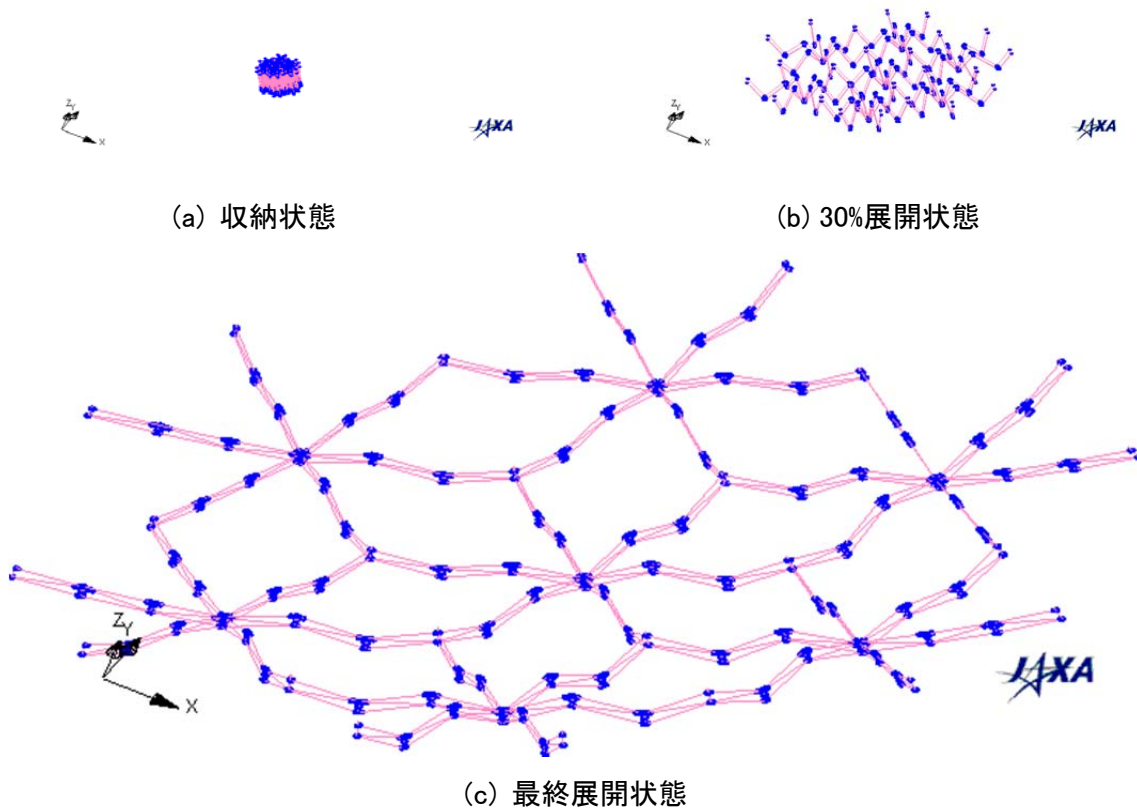


図 5. 展開解析結果

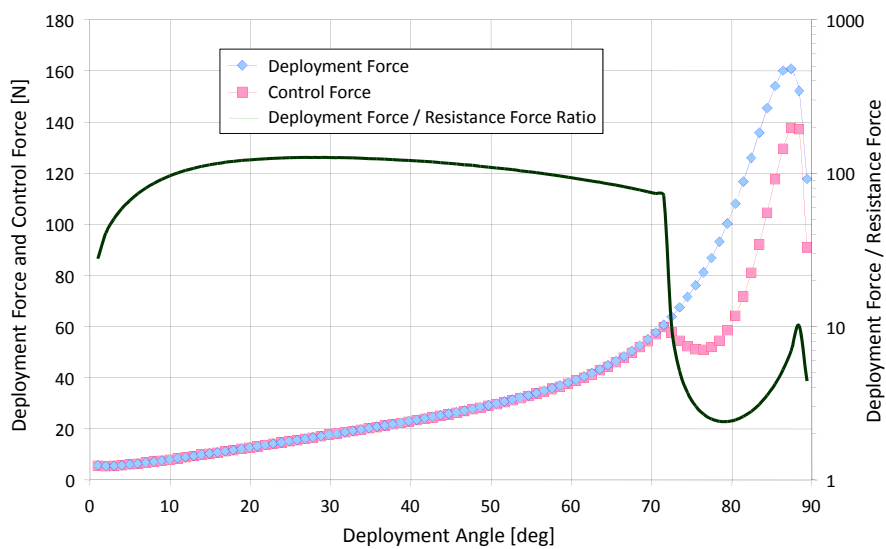


図 6. 展開余裕の確認



「Origami/ETS」による展開解析結果を、図 5 に示します。図 5(a)は収納状態です。ここから、7つのモジュールそれぞれの中央から伸びている6本の三つ折り展開トラスを、図 4 のように展開することにより、三つ折り展開反射鏡が展開します。図 5(b)は 30%展開状態、最後の図 5(c)が最終展開状態です。この展開解析によって、三つ折り展開反射鏡がスムーズに展開できることを確認しました。

次に、展開解析結果を用いて、展開力に余裕があるかどうかを確認しました。このため、展開を行うバネの力と、展開を阻害する摩擦や鏡面の張力と比を、展開余裕として定義し、展開開始から終了まで、展開余裕が2以上となることを目標としました。結果を図 6 に示します。この図から見られるように、展開全体にわたって展開余裕が2以上となっており、目標が達成されていることを確認しました。

### **反射鏡の試作と試験**

三つ折り展開反射鏡の設計が妥当であることを確認しましたので、反射鏡を 1 モジュールだけ試作し、実際に展開が可能かどうかを確認してみました。

まずは反射鏡面を作ります。図 7 は、反射鏡面を試作している様子です。反射鏡面は、ETS-VIII LDR と同様に、パラボラ曲面を形成するケーブルネットワークと、電波を反射する金属メッシュから構成されています。治具上にケーブルネットワークを作成し、その上から金属メッシュを張ります。

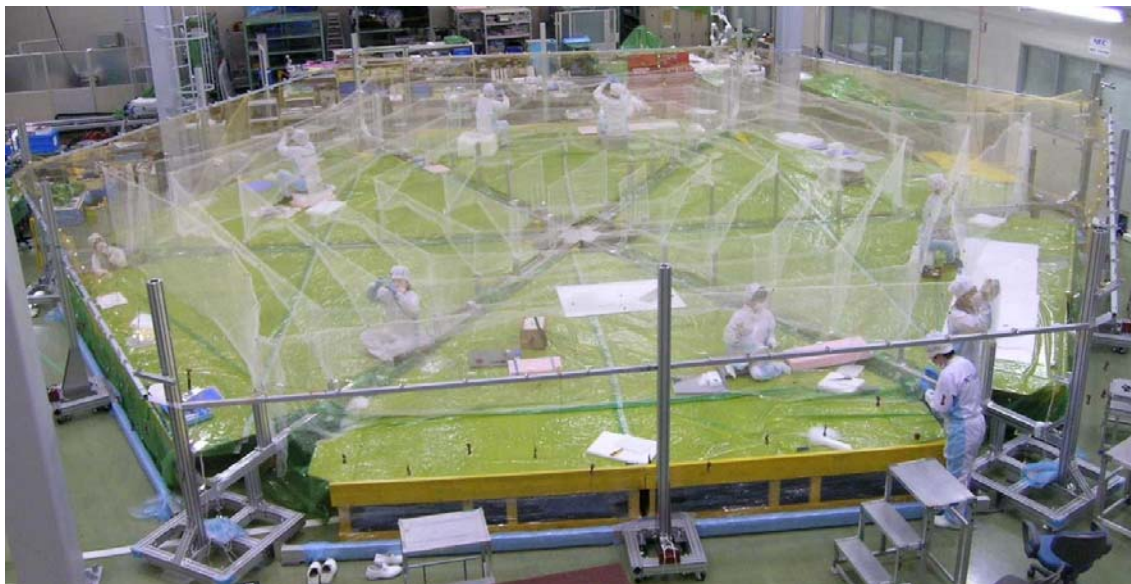


図 7. 反射鏡面の試作

次に、反射鏡面を支える背面構造を作ります。図 8 は、背面構造を試作している様子です。

背面構造は、図 4 のような展開トラス構造のリブを、中心から 6 方向に伸ばしたような構造になっています。図 8 の、背面構造の下に置かれている機材は、反射鏡の展開時に重力をキャンセルすることができる、展開試験治具です。

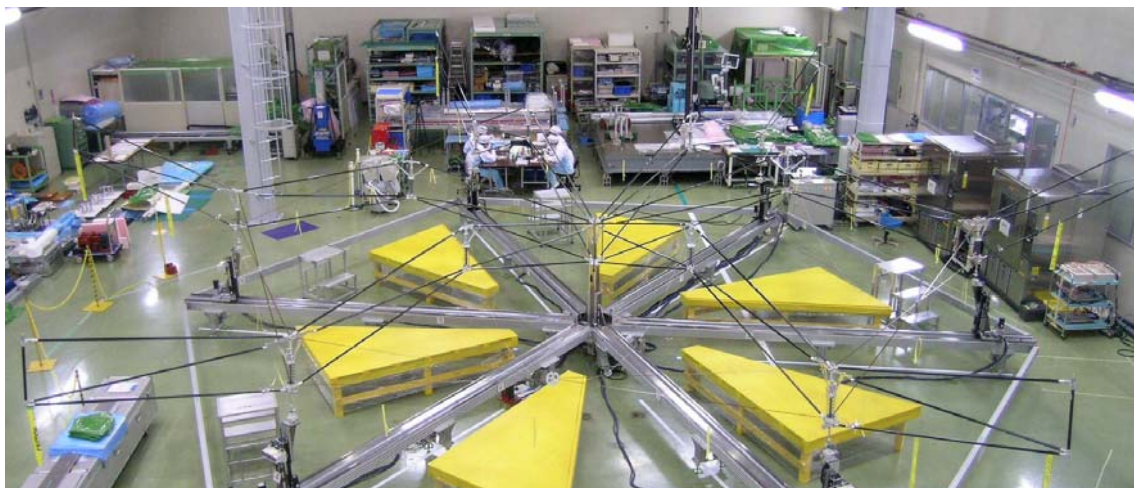


図 8. 背面構造の試作

最後に、反射鏡面と背面構造を組み合わせ、三つ折り展開反射鏡を作ります。図 9 は、完成した反射鏡です。

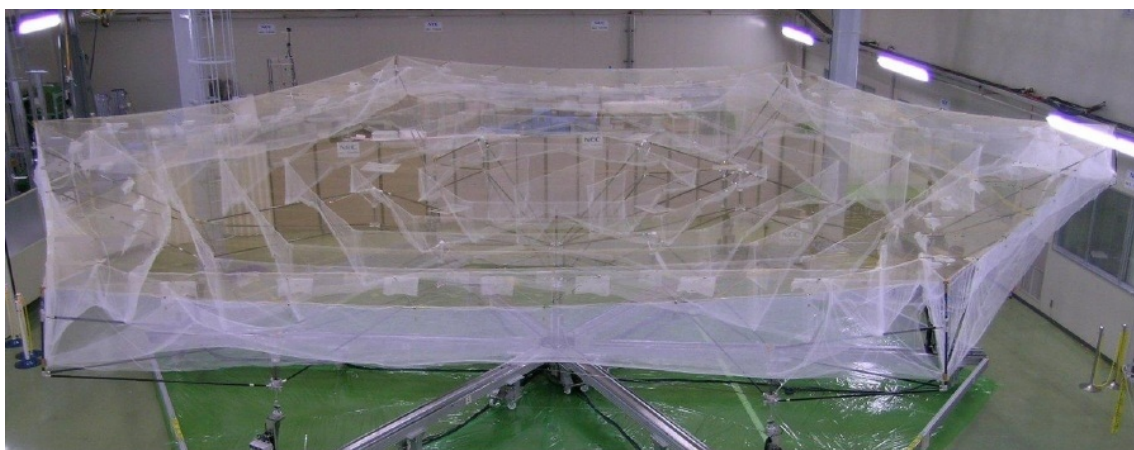


図 8. 三つ折り展開反射鏡の試作

完成した三つ折り展開反射鏡の、展開試験を行いました。図 9 は、展開試験の様子です。図 9(a)の展開初期状態から始まり、図 9(b)の展開途中を経て、図 9(c)の最終展開状態に至ります。このように、三つ折り展開反射鏡の展開がスムーズに行われることを確認しています。





(a) 展開初期状態



(b) 30%展開状態



(c) 最終展開状態

図 9. 三つ折り展開反射鏡の展開試験の様子

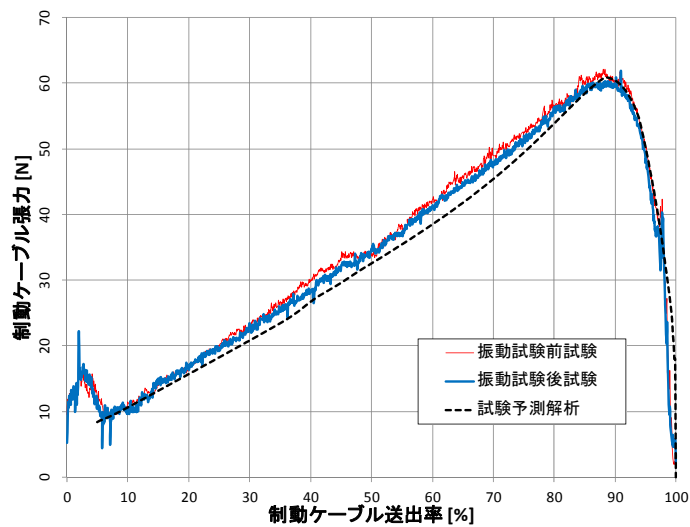


図 10. 展開解析結果と試作試験の比較



また、展開解析モデルの精度検証のため、展開解析結果と展開試験結果の比較を行いました。図 10 は、解析結果と試作モデルの展開試験結果の比較です。図より、解析結果と試験結果は十分に一致しており、解析モデルが精度良く作られていることを確認しました。この結果、図 5 の展開解析で使用された 7 モジュール全体の展開解析モデルと、そのモデルを用いた展開解析結果に、十分な精度があることを確認しています。

### 鏡面精度の確認

最後に、鏡面精度の確認のため、鏡面形状測定を行いました。

この結果、試作モデルの鏡面は十分な精度があり、これを 7 モジュール結合して 30m 級展開反射鏡を構成した場合でも、鏡面精度は 3.0 mmmrms 以内であり、表 1 の鏡面精度要求を満たすことが確認されました。

### おわりに

ETS-VIII LDR をベースに、モジュールを三つ折り展開反射鏡とする研究開発を行い、設計および試作試験の結果、30m 級大型展開反射鏡の研究開発目標を達成しました。

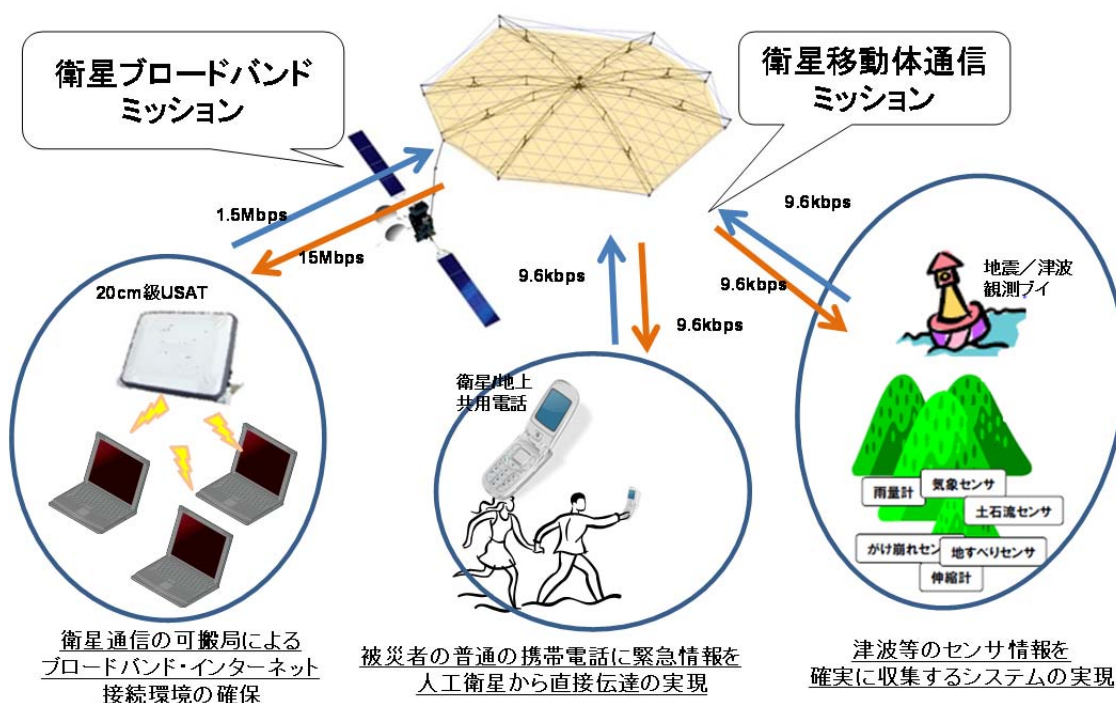


図 12. 次世代情報通信衛星のコンセプト

今、JAXA では、この研究開発の成果を元に、30m 級の大型展開反射鏡を持つ、H2A ロケ

ットで打上げ可能な次世代情報通信衛星を構想しています。図 12 は、次世代情報通信衛星のコンセプトです。次世代情報通信衛星により、地上用携帯電話端末を使った通信衛星と直接の通信、可搬局による高速通信、並びにセンサ情報の収集が可能になります。この衛星通信システムが実現されれば、東日本大震災のような災害発生時にも、被災地にて、普段と変わらない通信が可能となり、被害をこれまで以上に抑えたり、災害復旧をスムーズに行うことができるようになると期待しています。■