



National Institute of Information and Communications Technology

衛星搭載大型アンテナの開発と現状

(電気屋から見たメッシュ鏡面アンテナ)

2015年12月24日

宇宙通信システム研究室

織笠光明

衛星搭載大型反射鏡アンテナ

展開鏡面

- メッシュ反射鏡
- インフレータブル
- ソリッド鏡面

ETS-VIII、STICS(研究開発)

ETS-VI(三つ折り展開)、
花卉展開(研究開発)

電気性能に関する研究開発

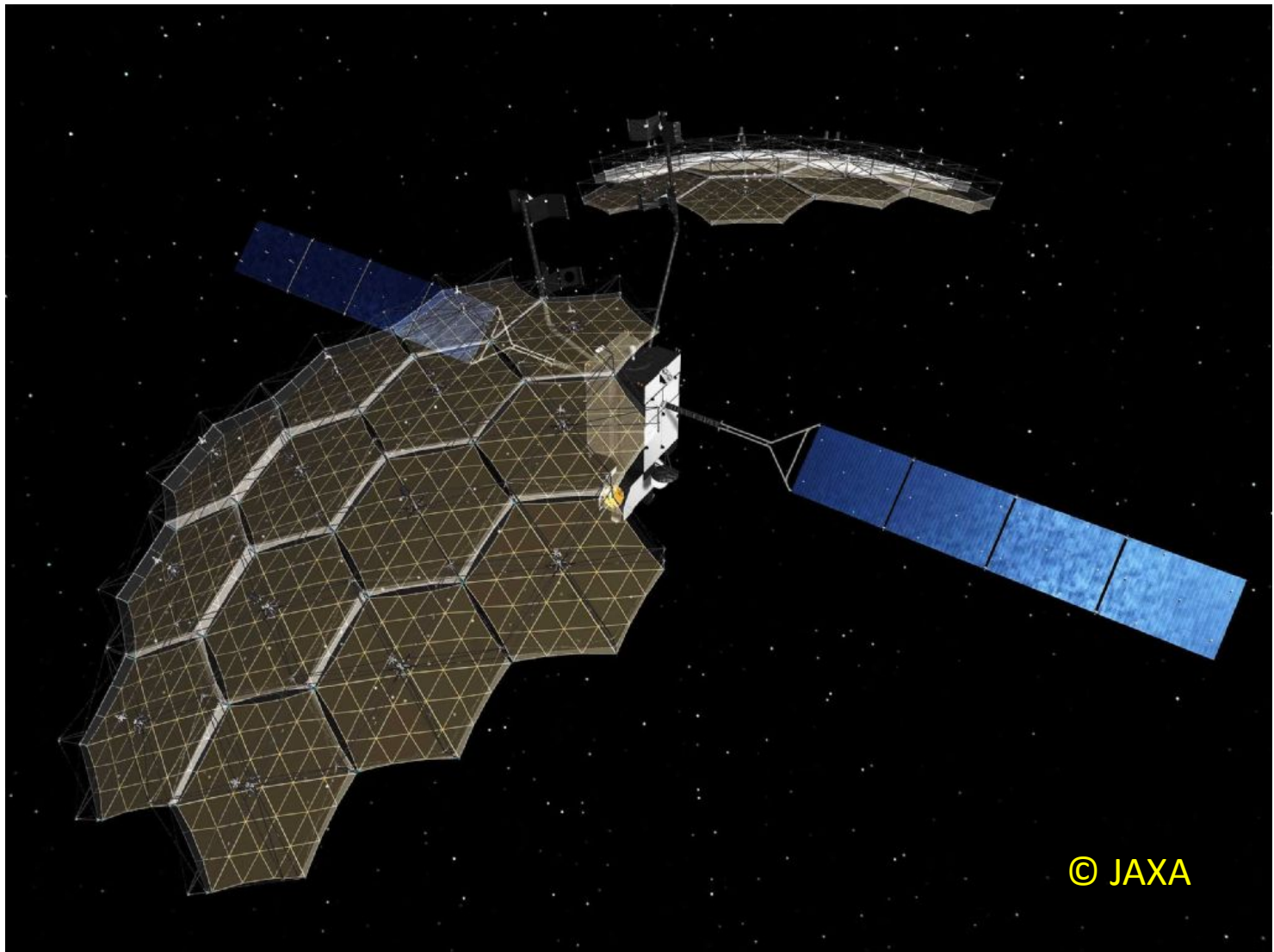
(1)メッシュ鏡面と鏡面材料

(2)ETS-VIII

(3)STICSにおける実験(Ka帯)

(4)課題とまとめ

メッシュ反射鏡アンテナの例 ETS-VIII



(1)メッシュ鏡面と鏡面材料

メッシュ反射鏡の特長

特長

- (1) 鏡面材料は金メッキモリブデン線で作られた**編み物**
- (2) 伝線しにくい編み方を採用
- (3) 鏡面材料と編み方は伸縮性と可撓性を考慮している
- (4) 展開トラスとワイヤで鏡面材料を支持して鏡面を形成
- (5) 展開トラスは単独または多モジュール化で鏡面を形成
- (6) ETS-VIIIでは多モジュール(14モジュール)構成とした
- (7) **ピロー変形**を抑圧するため、ワイヤでファセットを形成(線で固定)

電気的特性

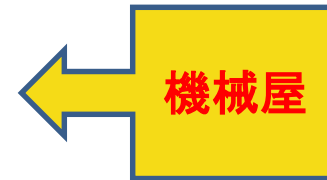
- (1) 編み方で反射(透過)特性が異なる
- (2) 編み物は縦糸のみで形成されるので透過量が偏波方向で異なる
(電界が編み方向と平行であると透過量は最小で、直交すると最大)
- (3) 多モジュール化とするとモジュール間に**隙間**が生じ、損失となる
(張架時の膜面材料(メッシュ)の特性で端部が弓なりに縮むため)
- (4) 反射鏡は**周期性の誤差**が生じ、RMS値だけではサイドローブ特性は評価できない
- (5) 周波数が高くなると鏡面材料の**反射特性を直接測定**する必要がある
(透過量の測定のみで反射特性評価が困難)

反射鏡アンテナの検討項目

ETS-VII搭載アンテナの反射鏡として開発

1. 必ず展開させる。

- (1) 航空機実験
- (2) LDREXとして2回打ち上げて展開実験
- (3) 動的解析
- (4) 絡み防止策



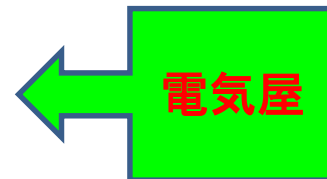
2. 鏡面精度

- (1) 誤差要因分析と推定
- (2) 誤差バジェットの作成と値の検討
- (3) 誤差の低減化検討
- (4) RMSによる評価



3. 電気性能

- (1) 透過法による反射損失の測定・評価
- (2) 部分モジュールによるパターン測定試験
- (3) 測定値と計算値の比較



メッシュ鏡面材料の評価

鏡面材料に適するメッシュは**機械的**には伸びやすく、等方性を有すること、しわになりにくいことが考えられる。

電気性能評価

(1) 透過量測定(周波数が低い場合に有効)

透過量を測定し、透過量から反射量を求めることで反射特性を評価する手法である。これは導波管に鏡面材料を挟んで測定することができるので評価が容易である。但し、**材料の抵抗損等のその他損失が小さい**ことが必要である。

(2) 反射量測定

周波数が高くなると透過量の測定のみでの評価はできず、直接反射特性を測定する必要がある。以前測定した装置は多重反射が大きく**十分な測定ができなかった**。

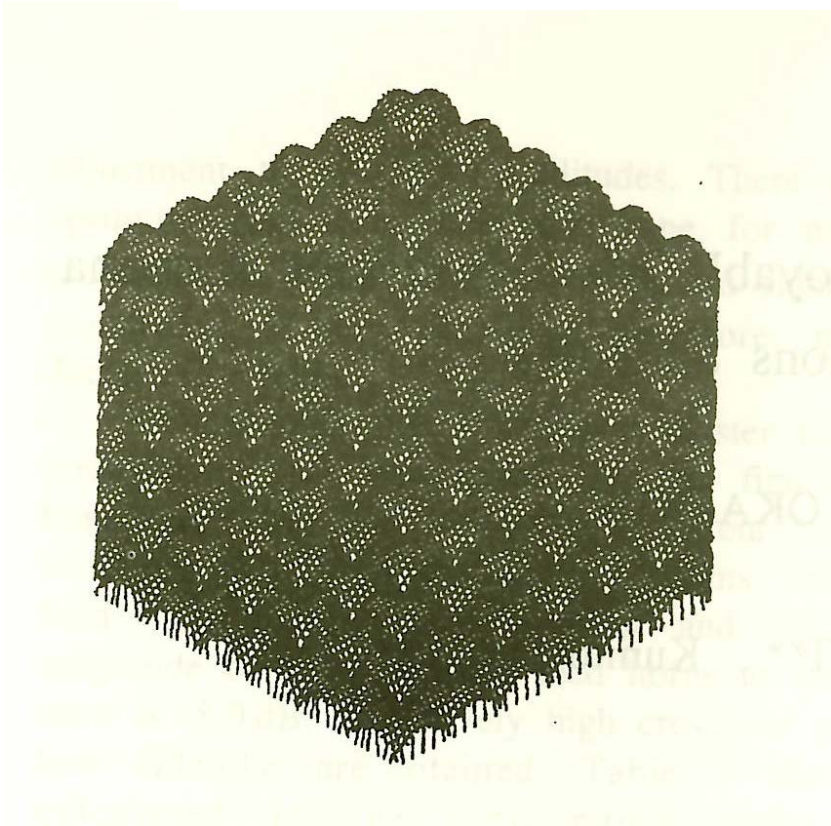
(3) パターン測定(反射鏡として評価) **周波数が高くなると必要**

比較的小型なメッシュ反射鏡とホーン(既知)を組み合わせパターン測定を実施する。(2)をさらに詳細に評価が可能である。(利得の差異も評価できる)

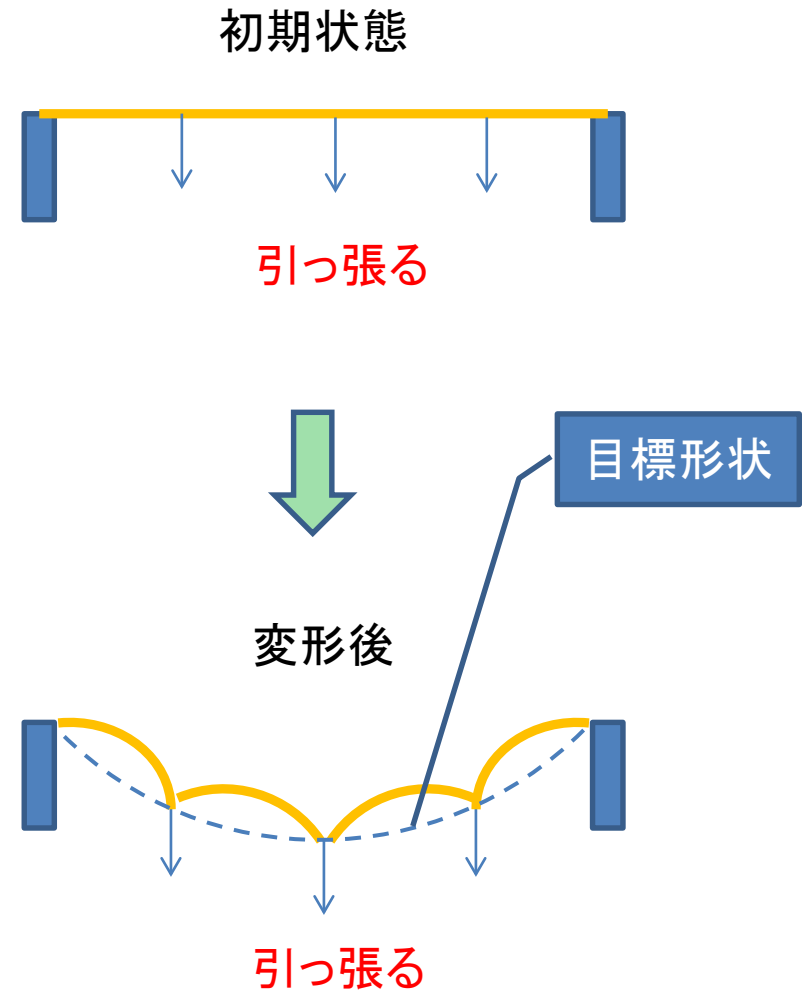
(4) PIM測定

金属接触が多いため大電力を使用する場合、考慮する必要があった。そこでETS-VIIIではPIMを考慮して送受分離アンテナとした。

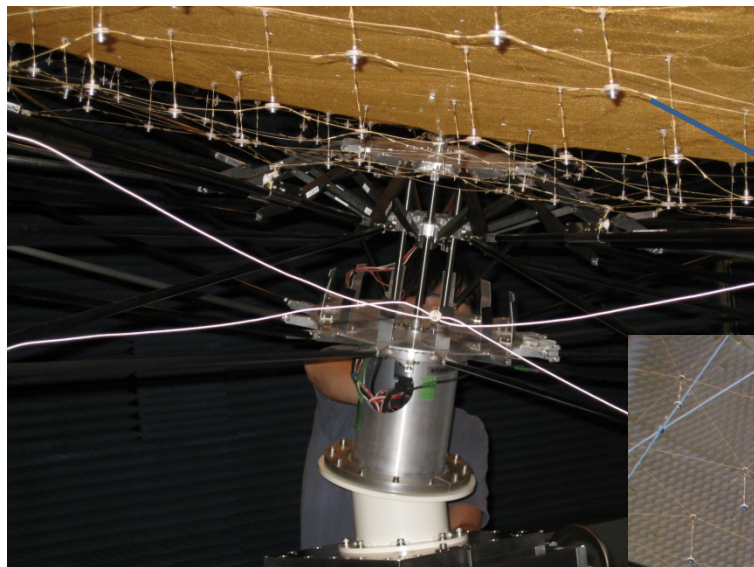
最初知らなかった



トラスタイプの反射鏡のピロー変形例



ピロー低減手法



リアのワイヤは形状維持のため

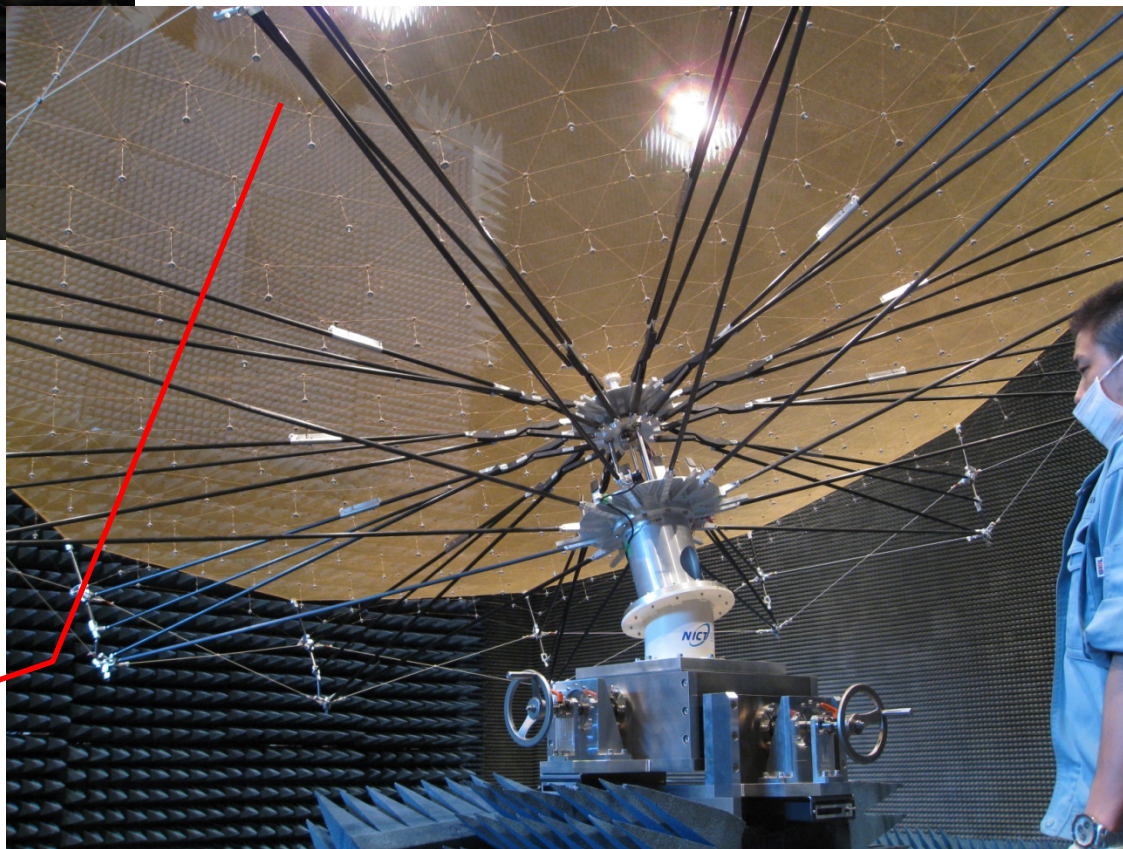
リアのワイヤ

展開終了状態

非展開終了状態

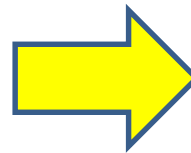
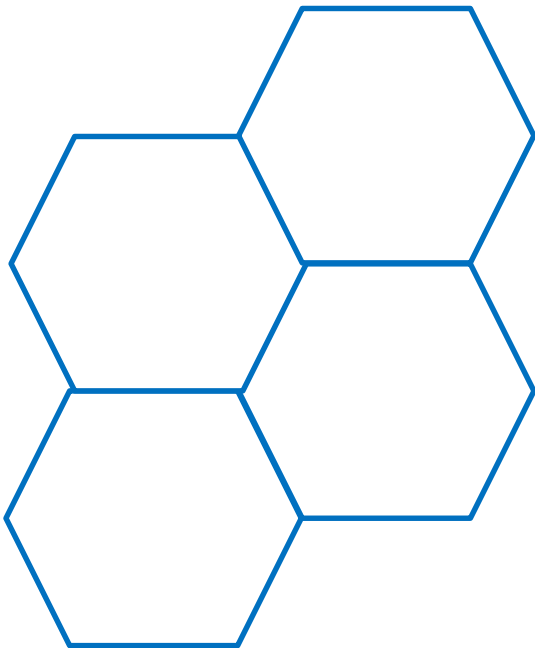
反射面にワイヤを張って
ファセット形成

ファセット形成用ワイヤ

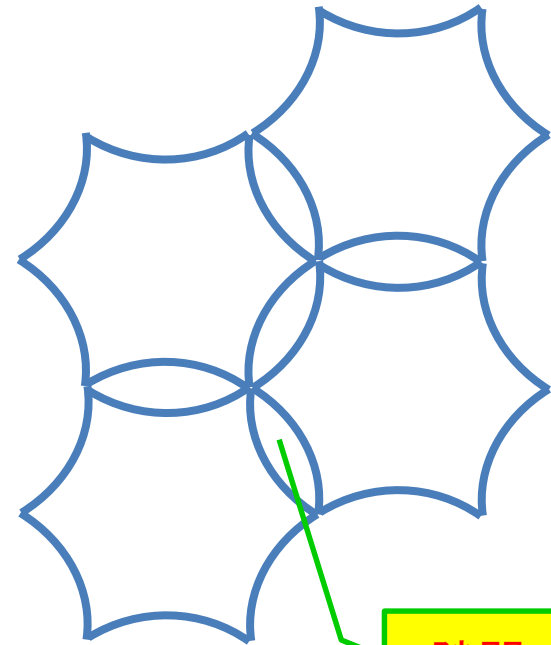


隙間は反射損失とグレーティングの影響を与える。

理想の結合状態



実際の隙間のある結合状態

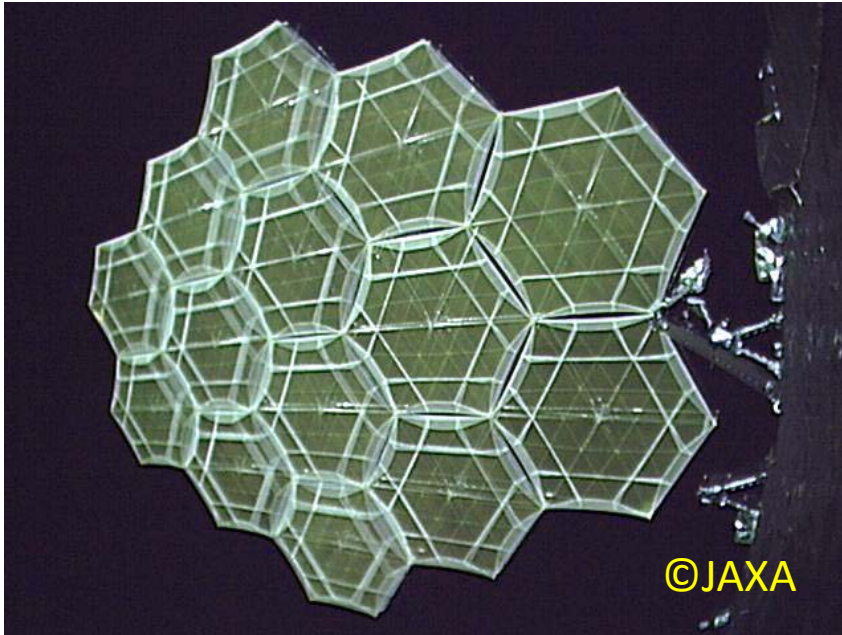


隙間

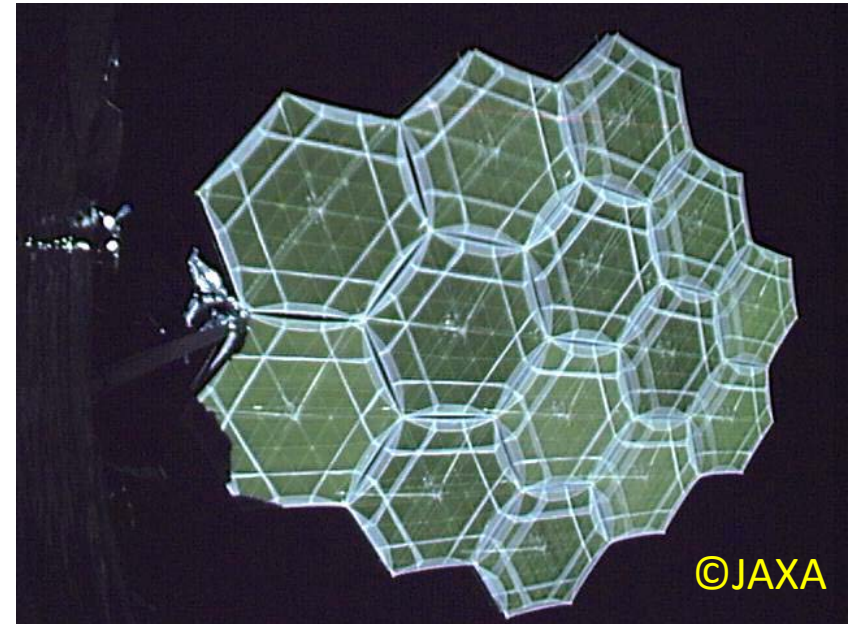
ETS-VIIIではなるべく隙間を小さくさせるようにした。
(がんばった、苦労した)

実際の反射鏡の隙間

カメラがとらえたメッシュ反射鏡の隙間



受信アンテナ反射鏡部展開後
(12月25日展開)



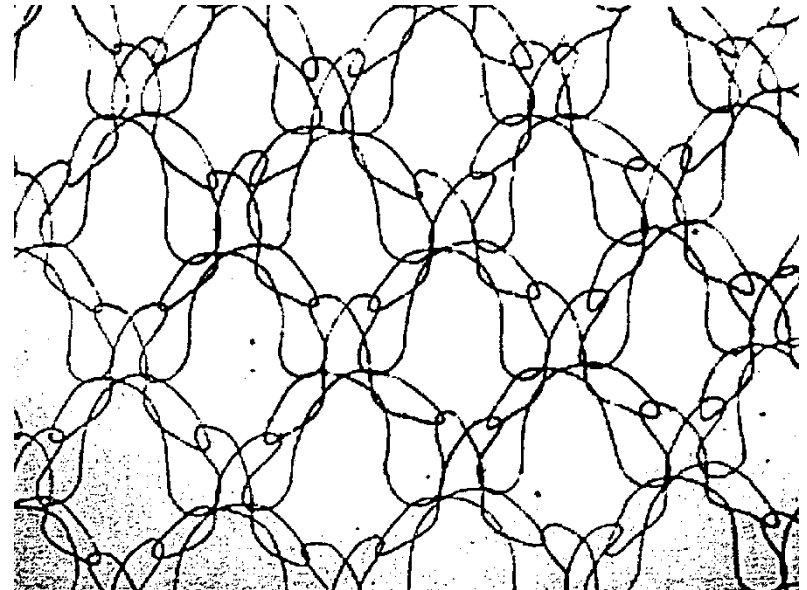
送信アンテナ反射鏡部展開後
(12月26日展開)

- ・白い箇所(面)が加えられた反射面
- ・何もしなければかなり大きな隙間となっていた

ETS-VIIで使用した鏡面材料

- ・金メッキを施したモリブデン線で鏡面材料を構成
- ・線材を編んで鏡面材料とする(編み物とする)
- ・編み物は縦糸のみ、織物は縦糸と横糸で形成される
- ・(織物は伸縮性が悪いので使用しない)

項目	特性	備考
編み方	ダブルアトラス編み	
ゲージ数	7	1 inch 当たり
素線径	30 μ m	



STICSで使用したメッシュ鏡面材料特性

反射面材料: 金メッキモリブデンメッシュ

- 線素材: **金メッキモリブデンワイヤ** (MOX2030)
 - 素線公称径 : **30 μ m**
 - 素線質量範囲 : 1.465 ~ 1.555 mg/200mm
 - 金めっき厚 : 0.4 \pm 0.1 μ m
 - 引っ張り強さ : 0.588N以上 (素線1本当たり)
 - 伸び率 : 10%以上
- メッシュ
 - 編み方 : **シングルサテン**
 - ゲージ数 : **28**
 - コース数 : 30 線送り量240cm
 - 張力 : 4.9N/m (500gf/m)

ゲージ数が大きいのはKa帯を考慮して選定したため

反射鏡面

- メッシュ張架
 - メッシュ張力 : 0.4kgf/m

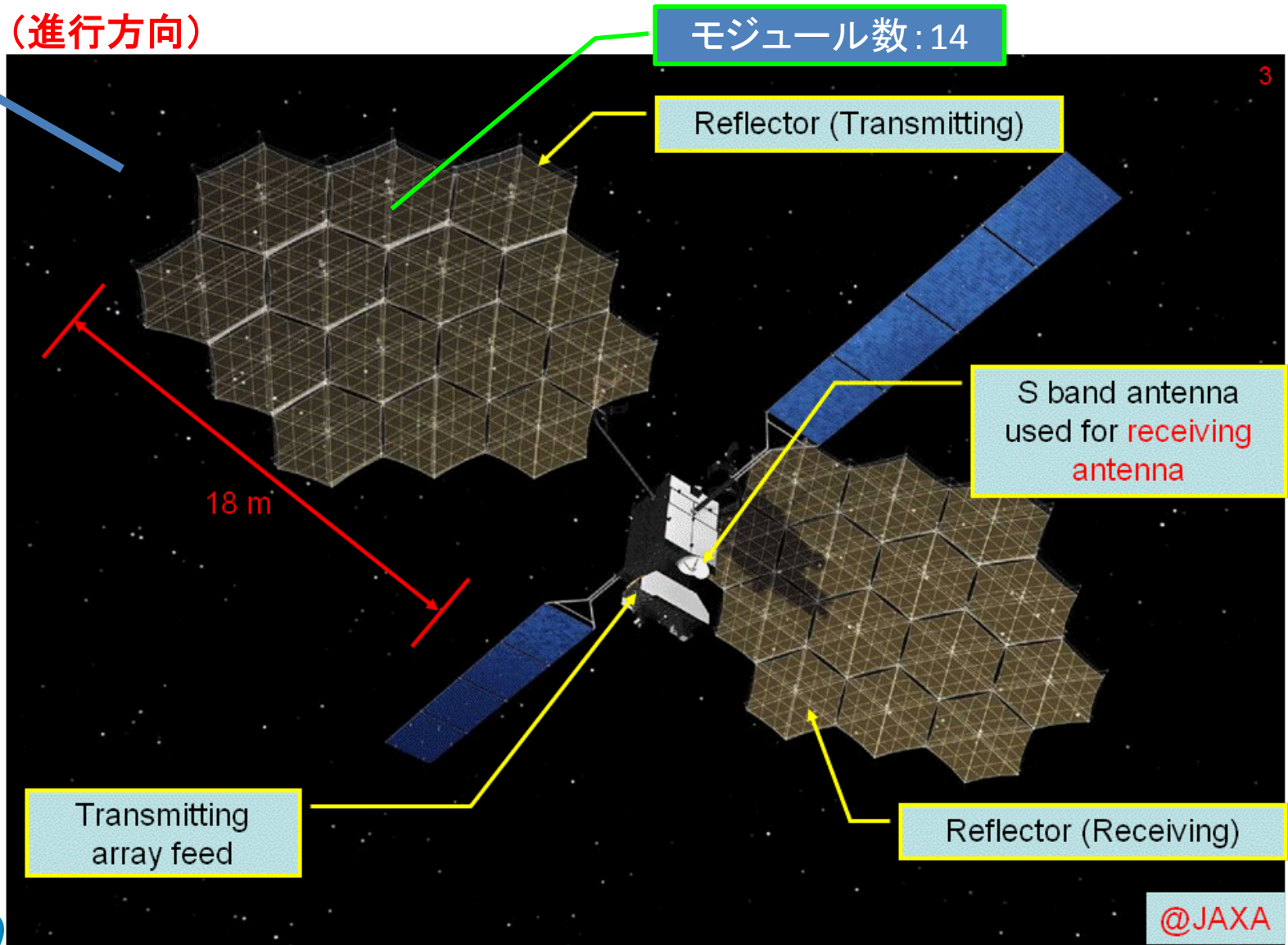
(2) ETS-VIIIの例

2012年7月20日の談話会資料「ETS-VIIIにおける打ち上げ時と軌道上実験時の問題(大型展開アンテナ開発とSTICSへの提言)」参照

(I) ETS-VIIIの概要

ETS-VIIIとアンテナ

x方向 (進行方向)



3

ETS-VIIIの反射鏡緒元

項目	特性	備考
周波数	S帯	
アンテナ形式	オフセットパラボラ	
アンテナ開口径	φ13m以上	
焦点距離	10400±100mm	公差は暫定値
オフセット角	51.2±0.2度	公差は暫定値
鏡面精度	2.4mmRMS以下	
アライメント精度	定常誤差 0.82度以下 (暫定値) 変動誤差 0.16度以下 (暫定値)	Half Cone Angle AAMにより±0.7度の範囲で補正可能
反射損失	0.4 dB以下	隙間損を含む
構成モジュール数	14	
鏡面展開時間	60±10分	
ブーム展開時間	10±1分	
展開時剛性	0.1 Hz 以上	
収納時剛性	機軸方向 40Hz 以上 機軸直交方向 20Hz 以上	ローカルモードを除く
重量	約200 kg (片翼)	

ほとんど隙間損

鏡面精度損失 $\eta_e = e^{-(4\pi\varepsilon_r/\lambda)^2}$
鏡面誤差(rms): ε_r



$\varepsilon_r=2.4\text{mm rms}$ とすると約**0.3dB**以下
(反射損失 0.4dBとは別の損失)

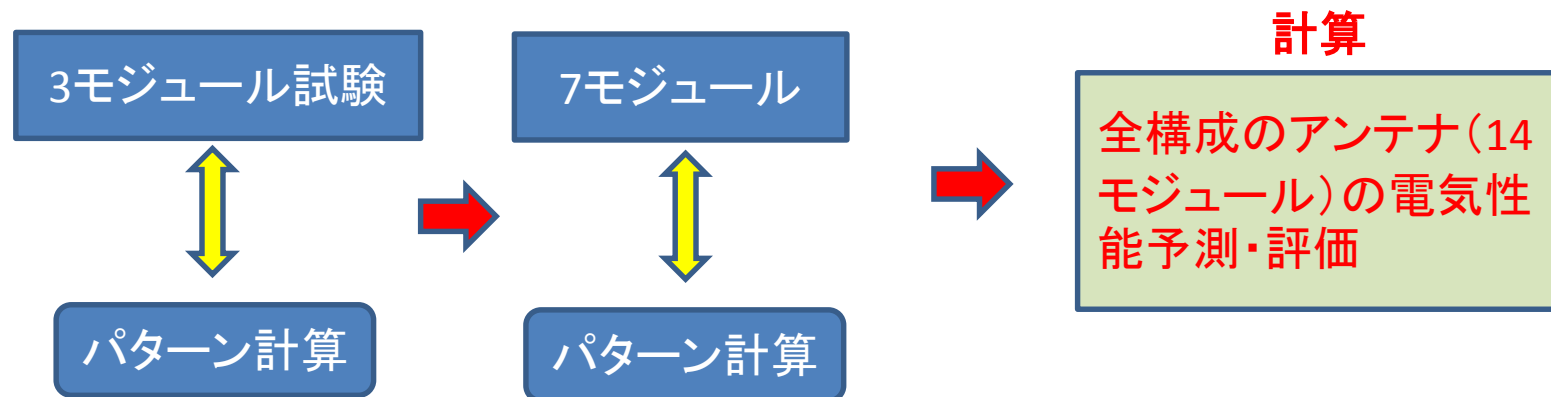
(II) 地上試験(電気性能試験)

アンテナの電気性能評価 (S帯での評価手法であることに注意)

- 一般に衛星搭載アンテナは放射パターン等電気性能を試験・評価する。
- しかし大型アンテナは地上で測定するのが困難である。
- 軽量化等のため強度は弱く自立も容易でなく、風などにも耐性がない。また搭載モデルは屋外での試験は適さない。

大型アンテナ電気性能評価・検証ストーリーを熟慮する必要あり。
ETS-VIIではフルモデル(14モジュール)の電気性能試験はしなかった。

ETS-VIIのストーリー



(III) 軌道上での問題(課題)

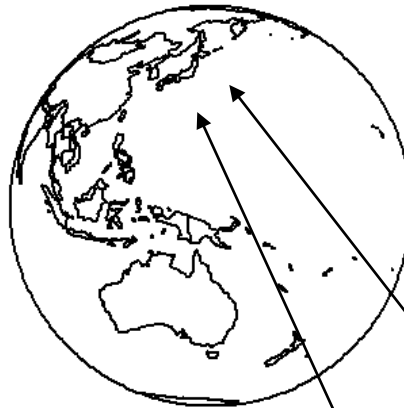
アンテナ性能・特性の問題

- アンテナビーム指向方向が変動する。
主に反射鏡面が熱歪により曲率が変わることによると考えられるが、検証できなかった。いくつかの鏡面の熱歪解析結果を用いてビーム指向方向の推定したが、実際の変動と異なり、**熱歪解析技術が確立していない**ことがわかった。
- サイドローブが高い。
励振ウェイト誤差と鏡面誤差によるものと考えられる。軌道上で十分な補正を与えられなかったことが本特性の要因である。
- ビームが歪んでいる。
要因は上記サイドローブと同様であり、反射鏡と給電部の誤差が複合されており、分離することができなかった。
- 励振ウェイト補正実験
REVによる補正を試みたが、給電部励振誤差と反射鏡形状誤差の分離、形状誤差の**2πラジアンの不確定性**から補正ができなかった。
(STICSの複数地上局での補正実験につながる)

アンテナパターン測定手法

従来のパターン評価手法

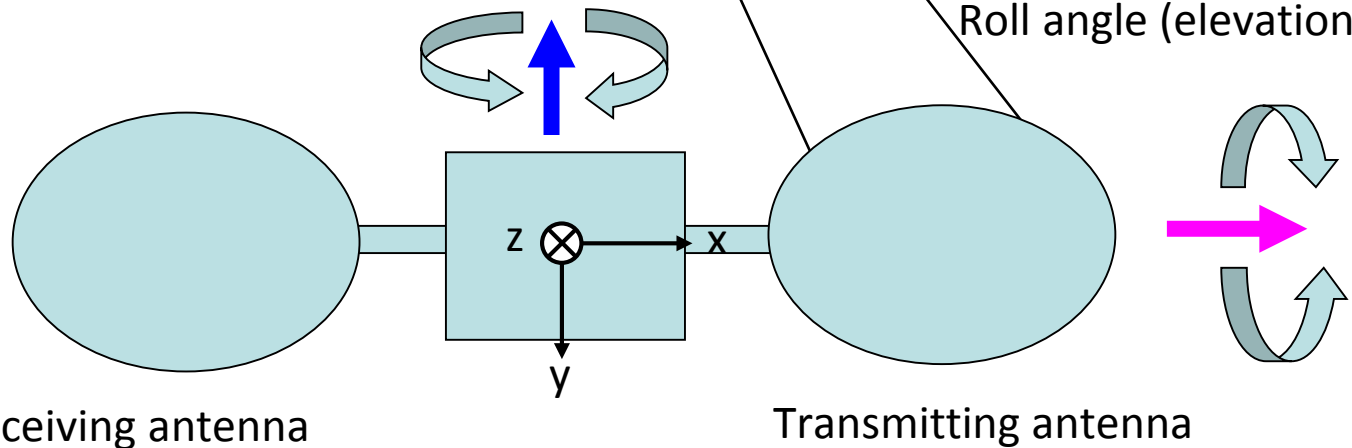
(十字スキャン: 2:30
一文字スキャン: 1:30)



時間がかかりすぎて、
熱歪による誤差が付加され
精度の良い測定ができない

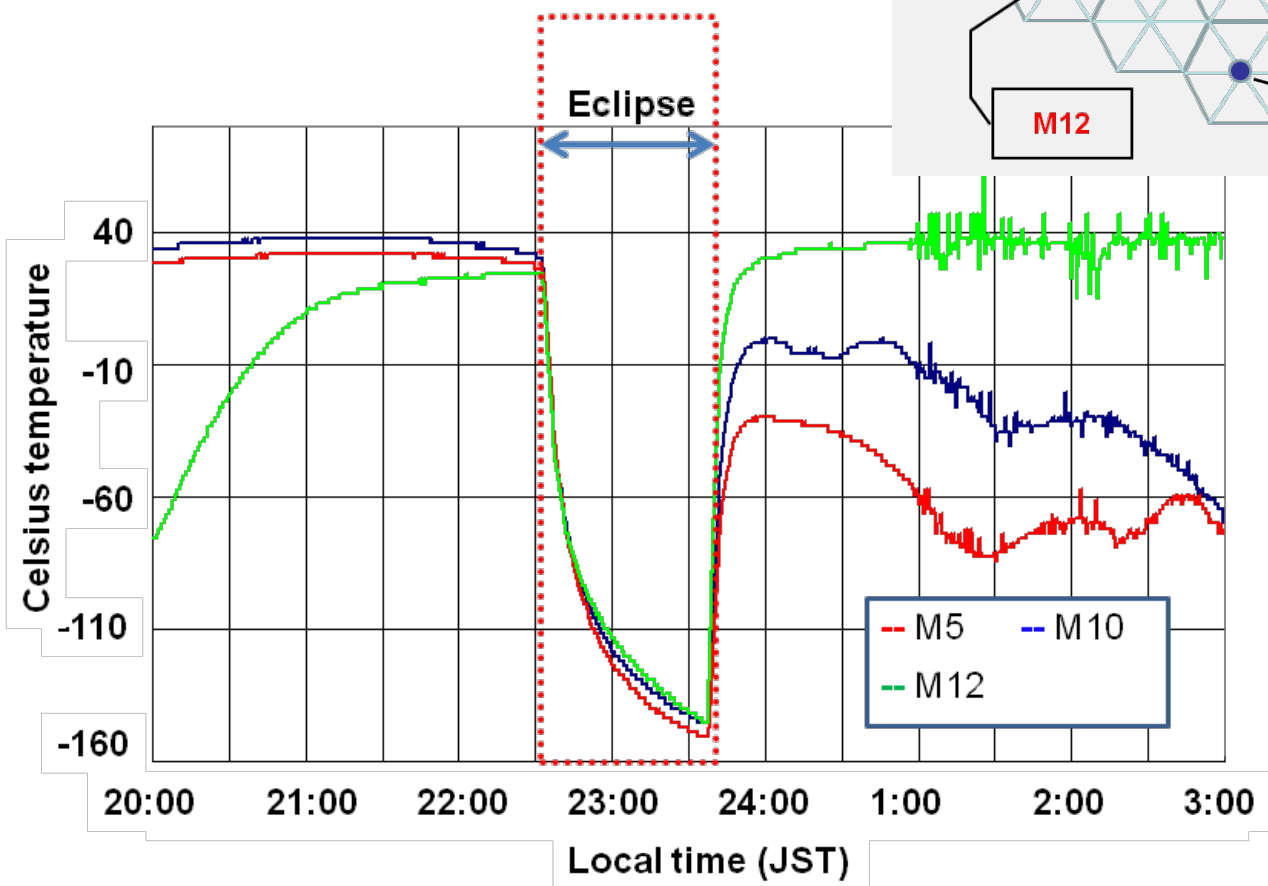
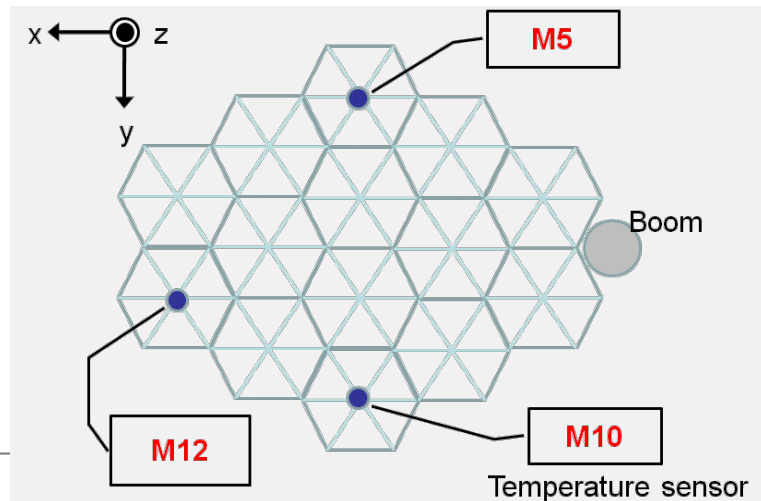
Pitch angle (azimuth cut)

Roll angle (elevation cut)

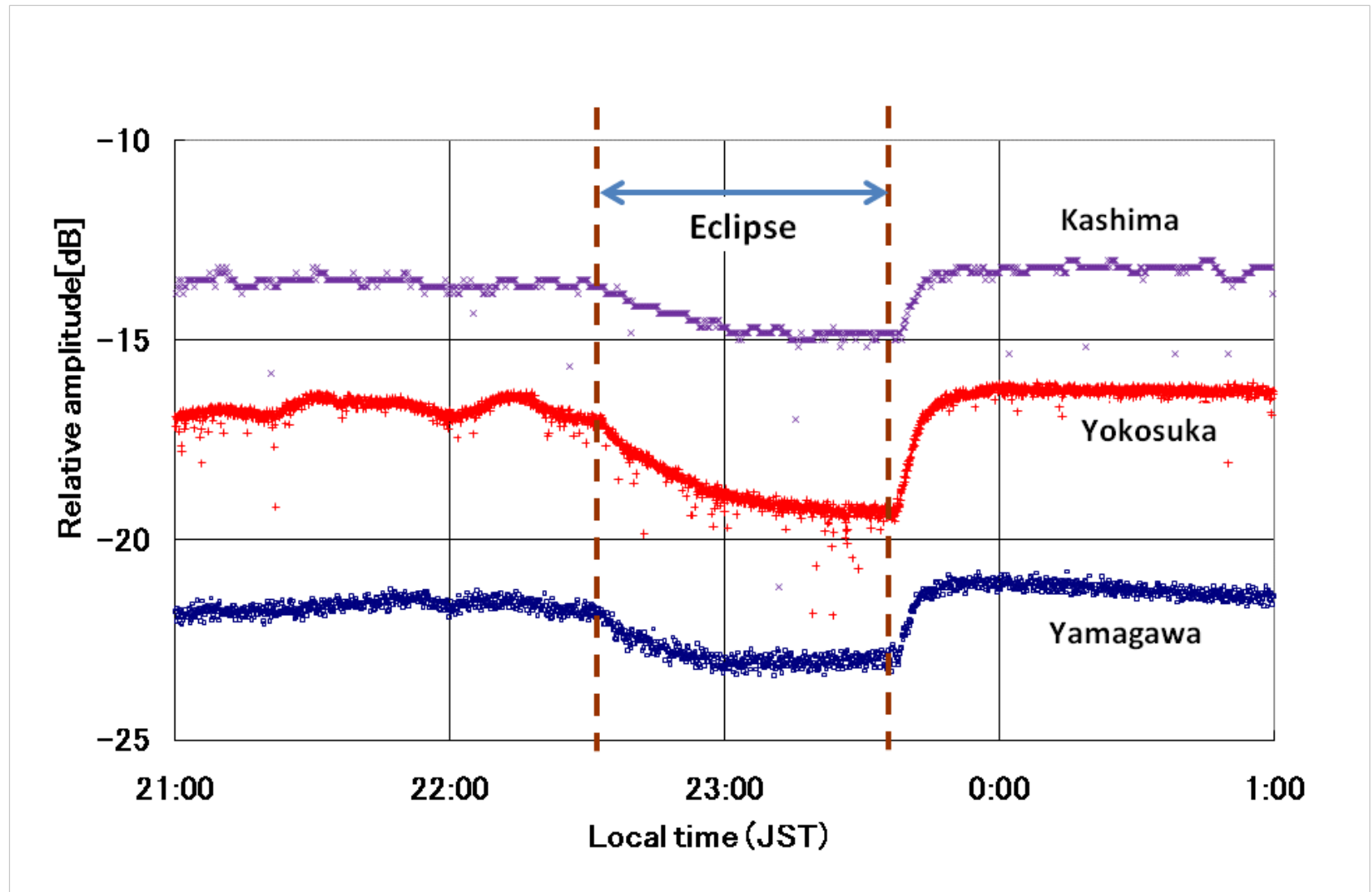


食時における反射鏡温度例

温度センサ位置



九州ビームのレベル変動



(IV) 得られた成果と課題

打ち上げ後の成果と開発課題

成果

- 大型の展開鏡面アンテナは鏡面の熱歪でビーム指向方向が変動することがわかった。(確かめられた)
- 反射鏡の形状が軌道上でわからないと放射パターンの指向方向、形状、サイドローブ等の補正は困難であることがわかった。すなわち、鏡面形状がわからないとアンテナを構成できない。
- ETS-VIIAレーザ給電反射鏡アンテナでは給電部と鏡面の誤差を分離して評価できる機能が必要であることがわかった。

課題

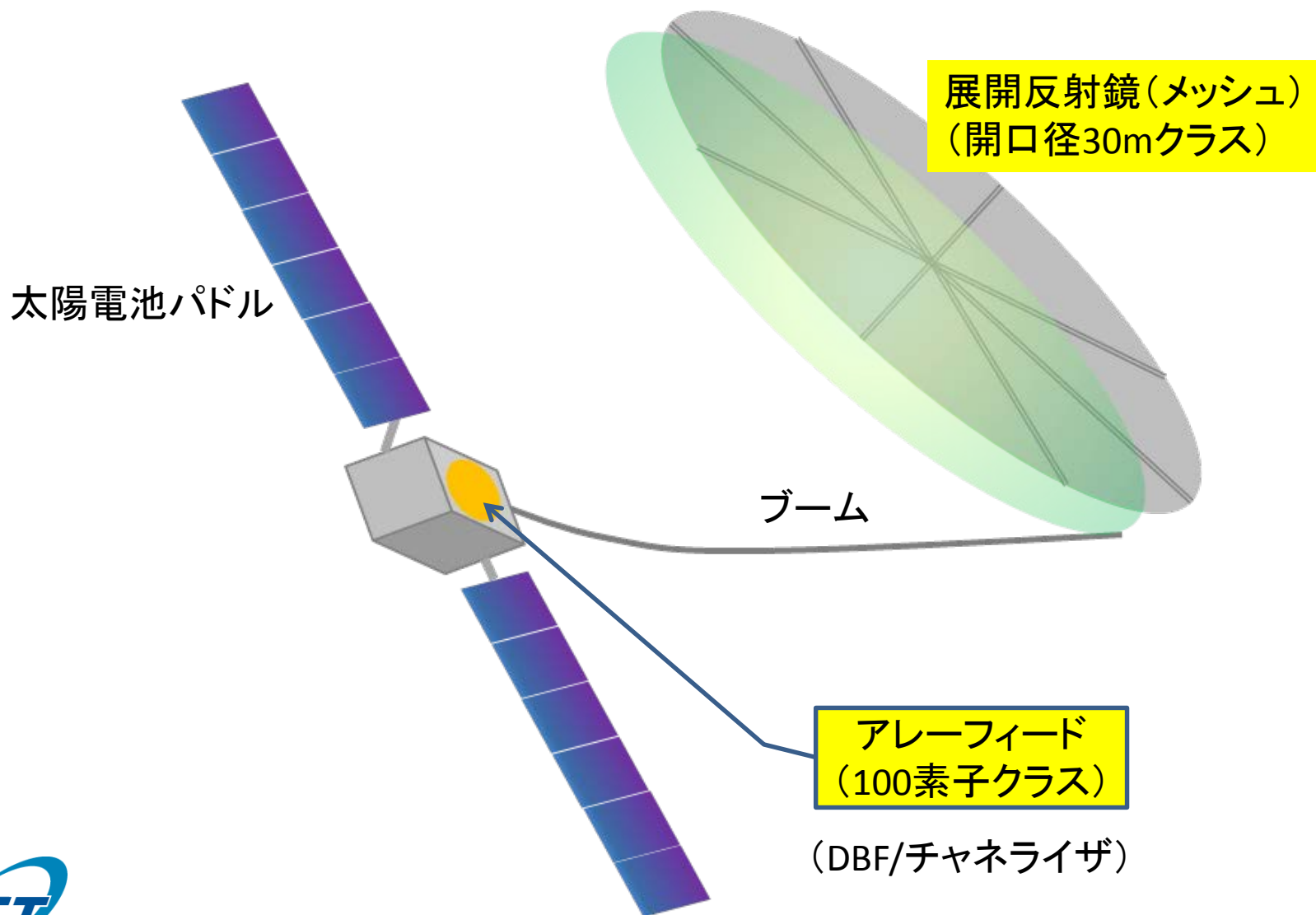
- 軌道上における反射鏡形状測定機能の開発
- 軌道上における素子励振ウェイトの測定・評価機能の開発
- 軌道上電気性能予測技術の確立
- 軌道上放射パターン補正技術の確立

(3) STICSにおける実験(Ka帯)

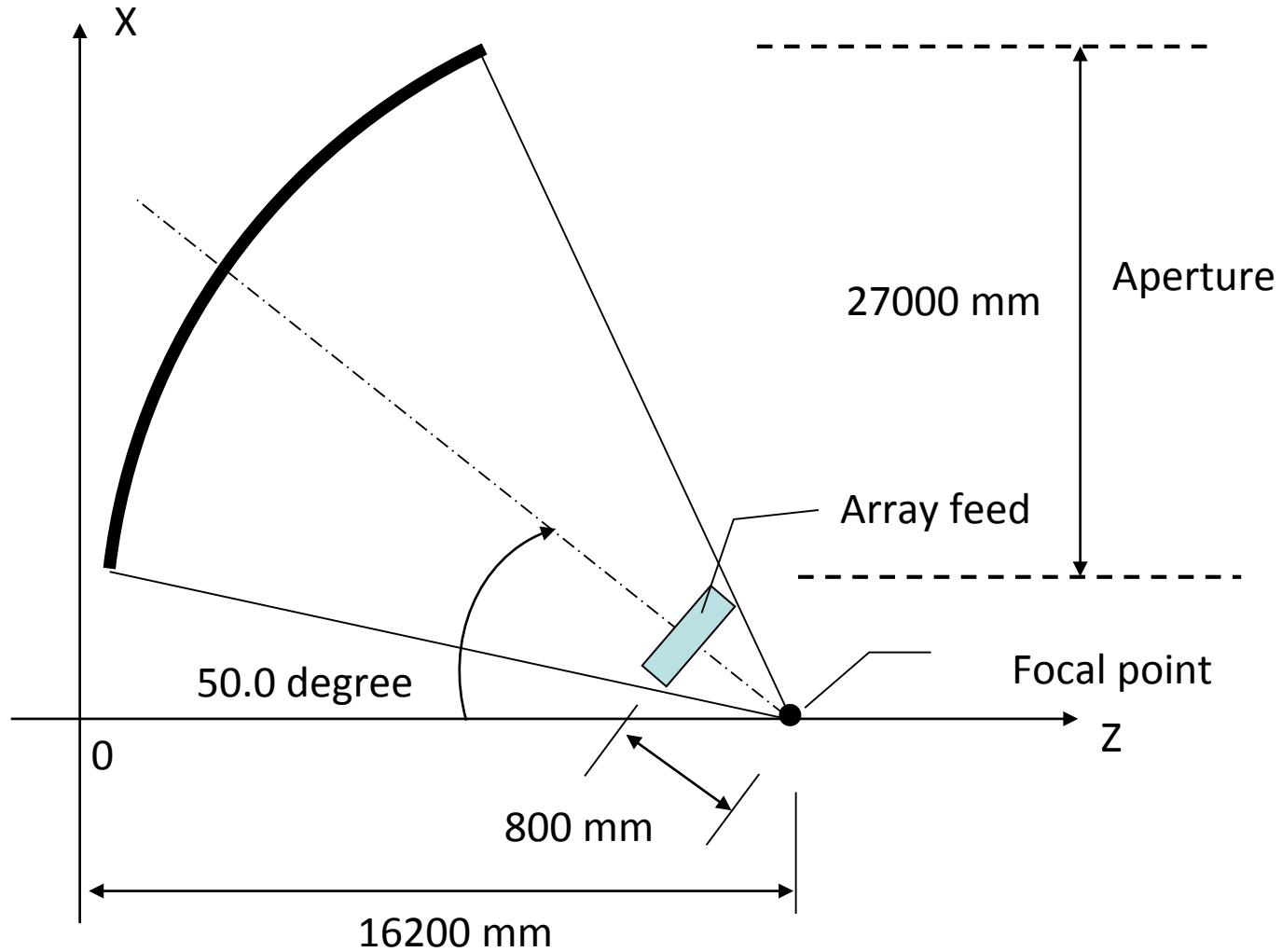
(Ka帯はメッシュ反射鏡が適用可能か)

衛星イメージ図

STICS:Satellite / Terrestrial Integrated Mobile Communication System



検討する搭載アンテナパラメータ



STICS用衛星搭載アンテナの課題

DBF/チャネライザを下記技術を取得するために開発した。(高度な機能要求)

- 超マルチビーム形成技術

DBF/チャネライザを用いて

- 100相当のビームを配置、形成する。
- ビーム形状を任意に制御する。
- 100素子相当の素子を制御する。

- 低サイドローブ化技術

DBF/チャネライザを用いて

- エリア全体のサイドローブのレベルを下げる。
- 任意の箇所サイドローブレベルを下げる。
- 任意の箇所にヌルを作成する。

STICSはETS-VIIIに比べ、ビーム幅が半分程度となるので指向精度要求も高くなる。

アンテナの放射パターン特性は反射鏡形状に左右される。



軌道上における対策が必要である。

メッシュ反射鏡アンテナの課題

メッシュアンテナの特性と問題(ETS-VIIIにおける課題)

- メッシュ鏡面アンテナはETS-VIII等によってS帯で使用可能であることは確認できた。
- 軌道上で反射鏡が歪み、ビーム指向方向が日変動することが確認された。
- 軌道上でのサイドローブが想定値より高く、下げることができなかった。
(鏡面歪予測とパターンの評価が十分できなかった)
- 鏡面形状とサイドローブの関連性が確認できなかった。

STICSにおける検証(DBF/チャネライザの機能確認)

- 開発したアレー給電部と実際の鏡面と組み合わせた特性確認。
(鏡面形状を考慮した放射パターンと実測結果の比較評価)
- 開発したDBF/チャネライザの補正機能確認。
- 鏡面形状測定データ間隔と放射パターンの関係の確認。
(周波数を変えた時の特性確認)
- 課題の抽出

検討項目

- メッシュ鏡面材料の評価（透過価量の測定）
- 開発したDBF/チャネライザの補正機能確認。
わざと鏡面を歪ませて補正する。
- 鏡面形状測定データ間隔と放射パターンの関係の確認。
（周波数を変えた時の特性確認）
- 周波数に対するメッシュアンテナの反射特性確認
（利得の比較による検討、高周波数化への拡張性）

透過量の測定

入射波とメッシュ座標系の関係

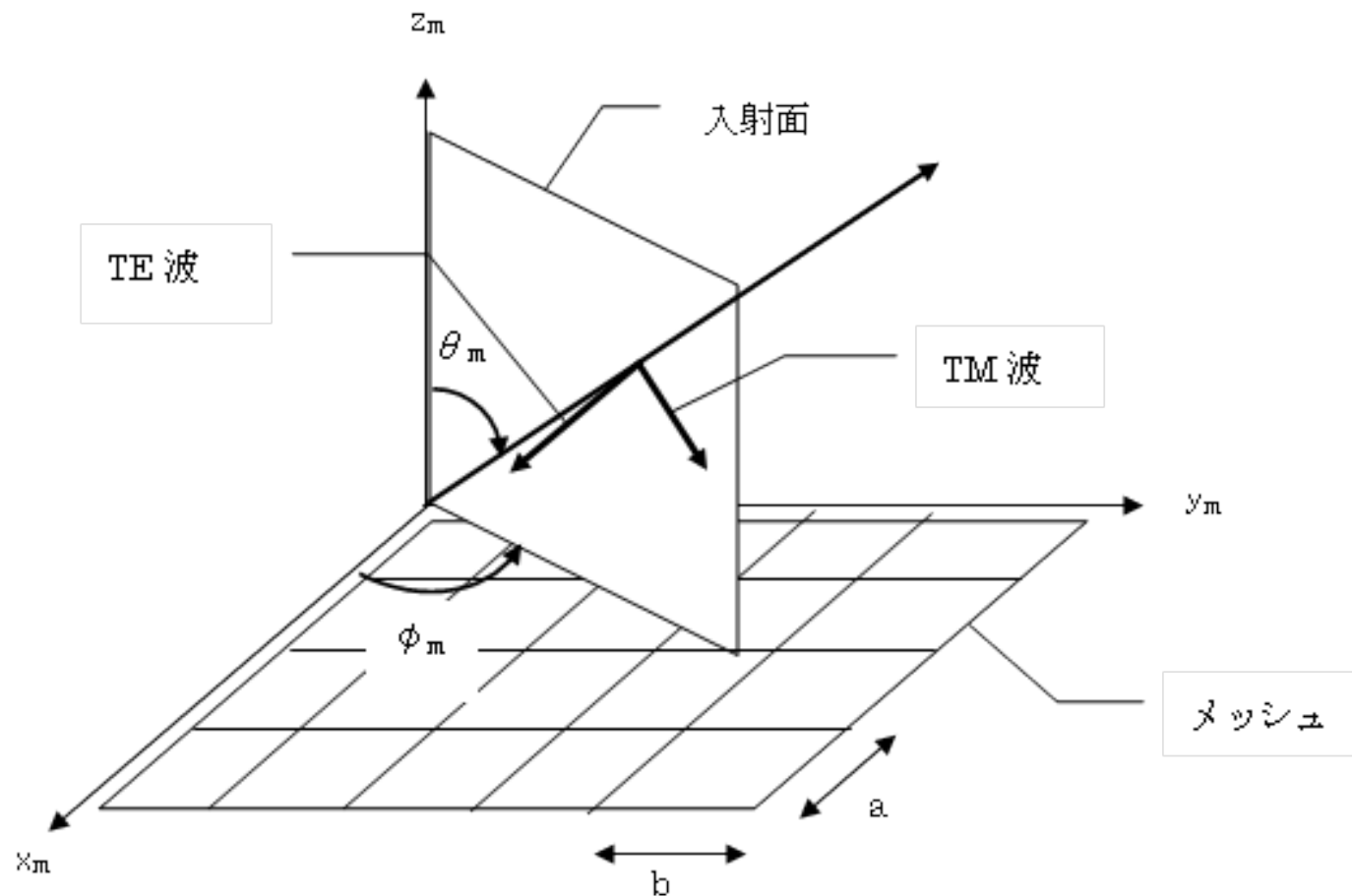
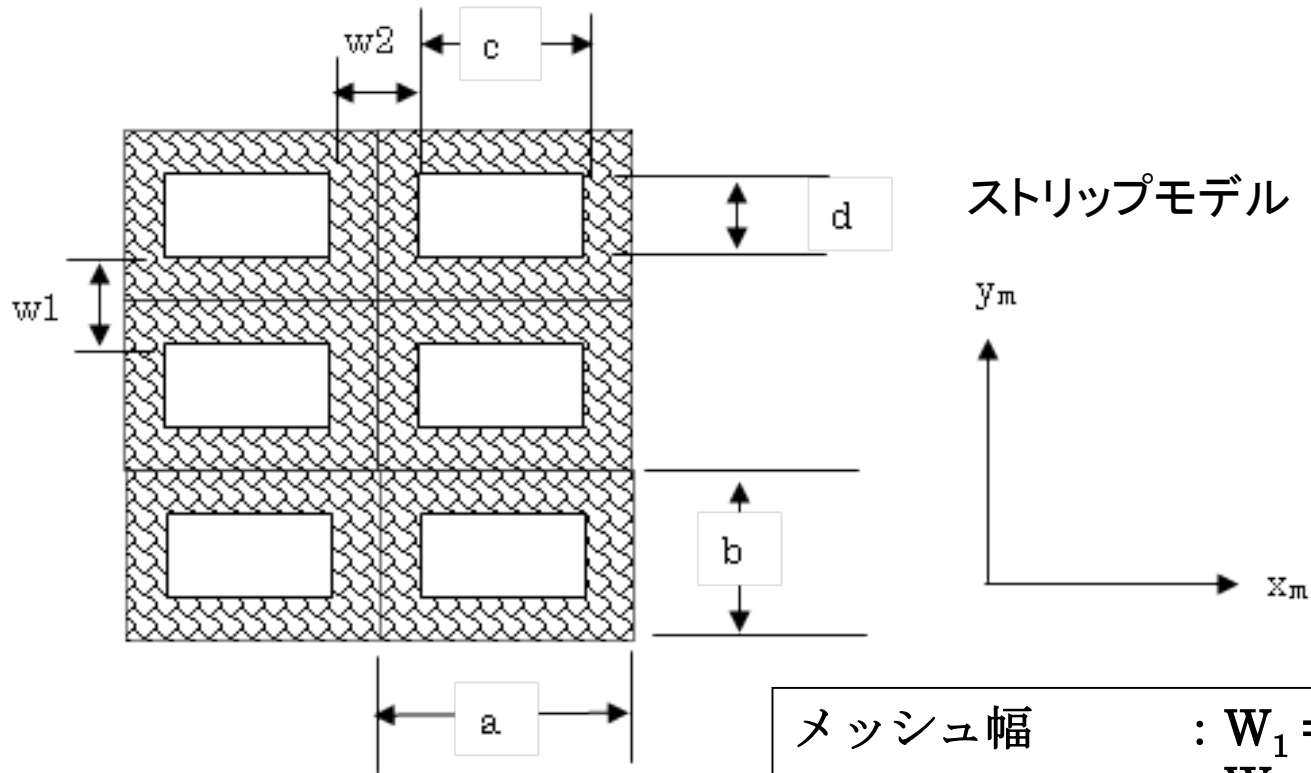


図 3.1 -2 入射波とメッシュ座標系

透過量の測定

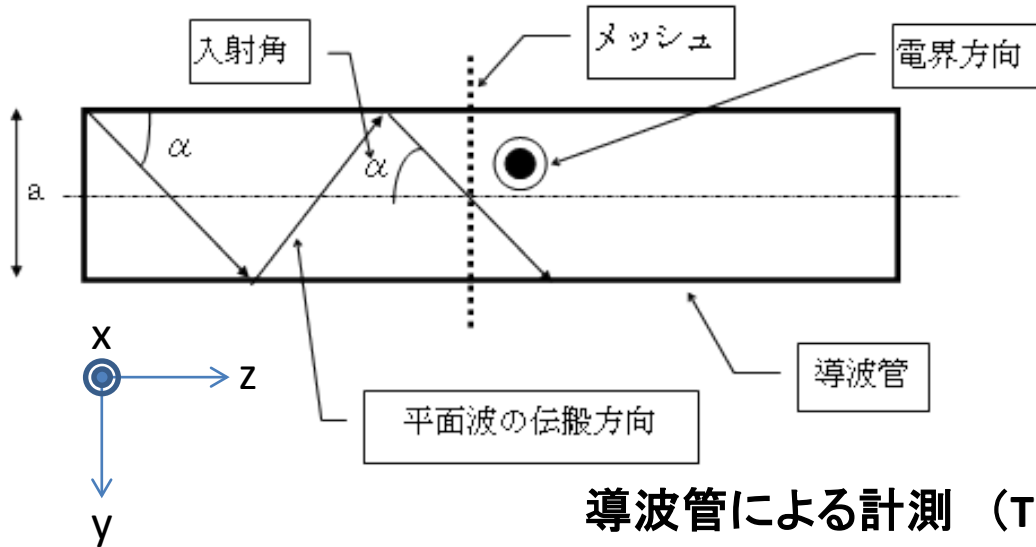
メッシュのモデル化とメッシュ座標系



メッシュ幅 : $W_1 = b-d$
 : $W_2 = a-c$
メッシュピッチ : x_m 方向 a
 : y_m 方向 b

Samii and Lee, 'vector Diffraction Analysis of Reflector Antennas with Mesh Surfaces',
IEEE, Trans. AP -33 No. 1 Jan. 1985.

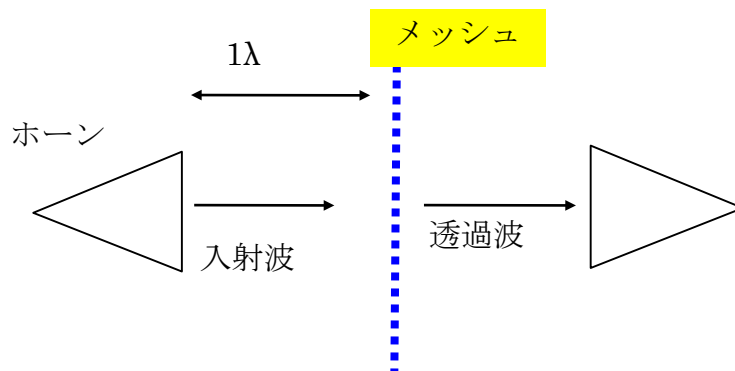
透過量の測定



$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}}$$

$$\cos \alpha = \frac{\lambda}{\lambda_g}$$

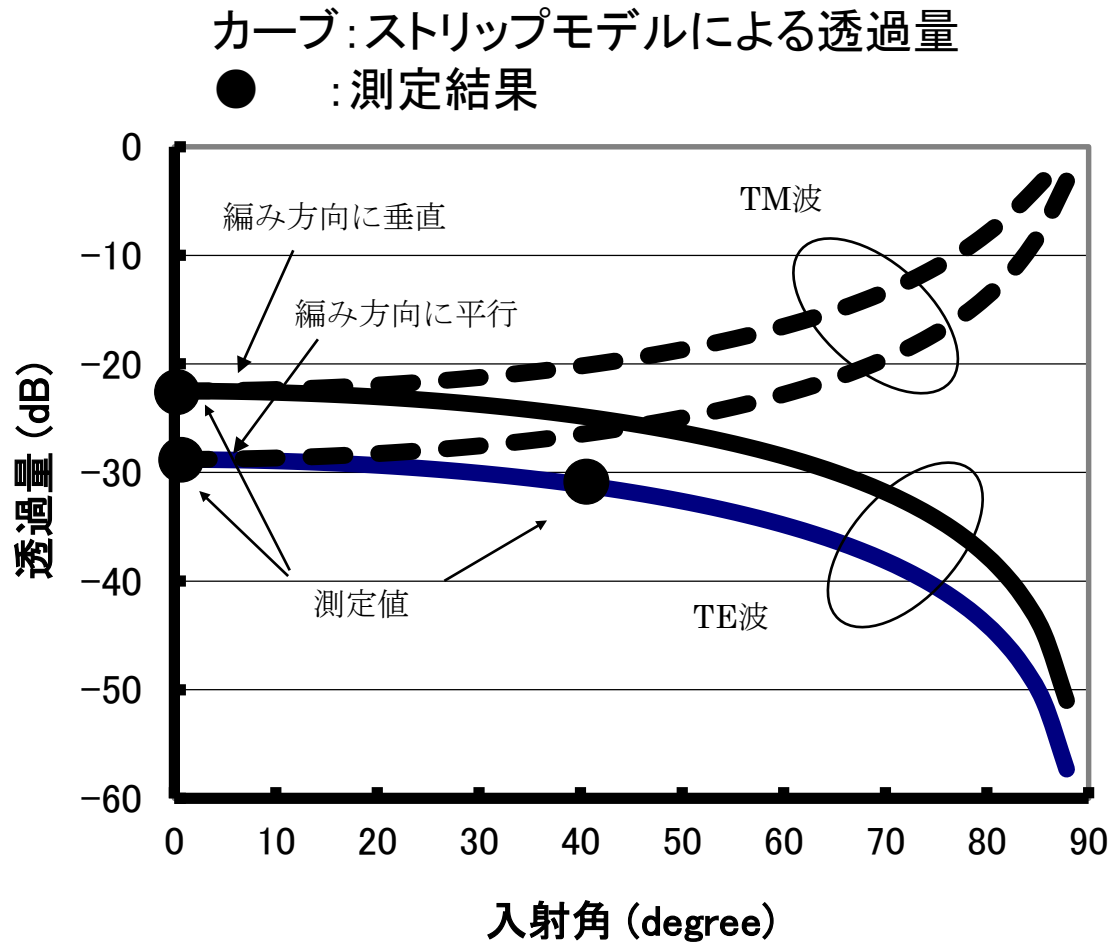
導波管による計測 (TE波の測定)



入射角 $\theta=0.0^\circ$

ホーンによる計測

透過量の測定例



反射特性の評価 : **反射量** = 1 - 透過量

反射損失

等価量から推定した反射損失

順番	名称	メッシュ番号(略称)	反射損失	
			15GHz	33.25GHz
1	同方向逆ハーフ 30コース	Mesh8(DG-H30)	-0.018 dB	-0.08 dB
2	CFRP3軸織り	Mesh9(CF-3D)	-0.018 dB	-0.10 dB
3	シングルサテン 30コース	Mesh6(SGL-S30)	-0.021 dB	-0.091 dB
4	ダブルアトラス 34コース	Mesh5(DBL-A34)	-0.021 dB	-0.11 dB

透過損から推定される損失は小さい

コースは編み方向に対し、繊維に針をかけた数を示す

Ka帯を含めた他の周波数での検討

反射鏡電気性能評価について

背景

- 電気性能予測のために反射鏡面の形状を知ることは重要であり、アンテナ性能を維持するために必要不可欠である。
- 鏡面形状を知るためには形状測定が必要である。測定ポイント数は有限であり、無限に細かい測定はできない。
- 鏡面は大型になると通常計測間隔が広がってしまう。(ハードポイント間隔が大きくなる)

計測間隔とパターンに対する影響について検討する。

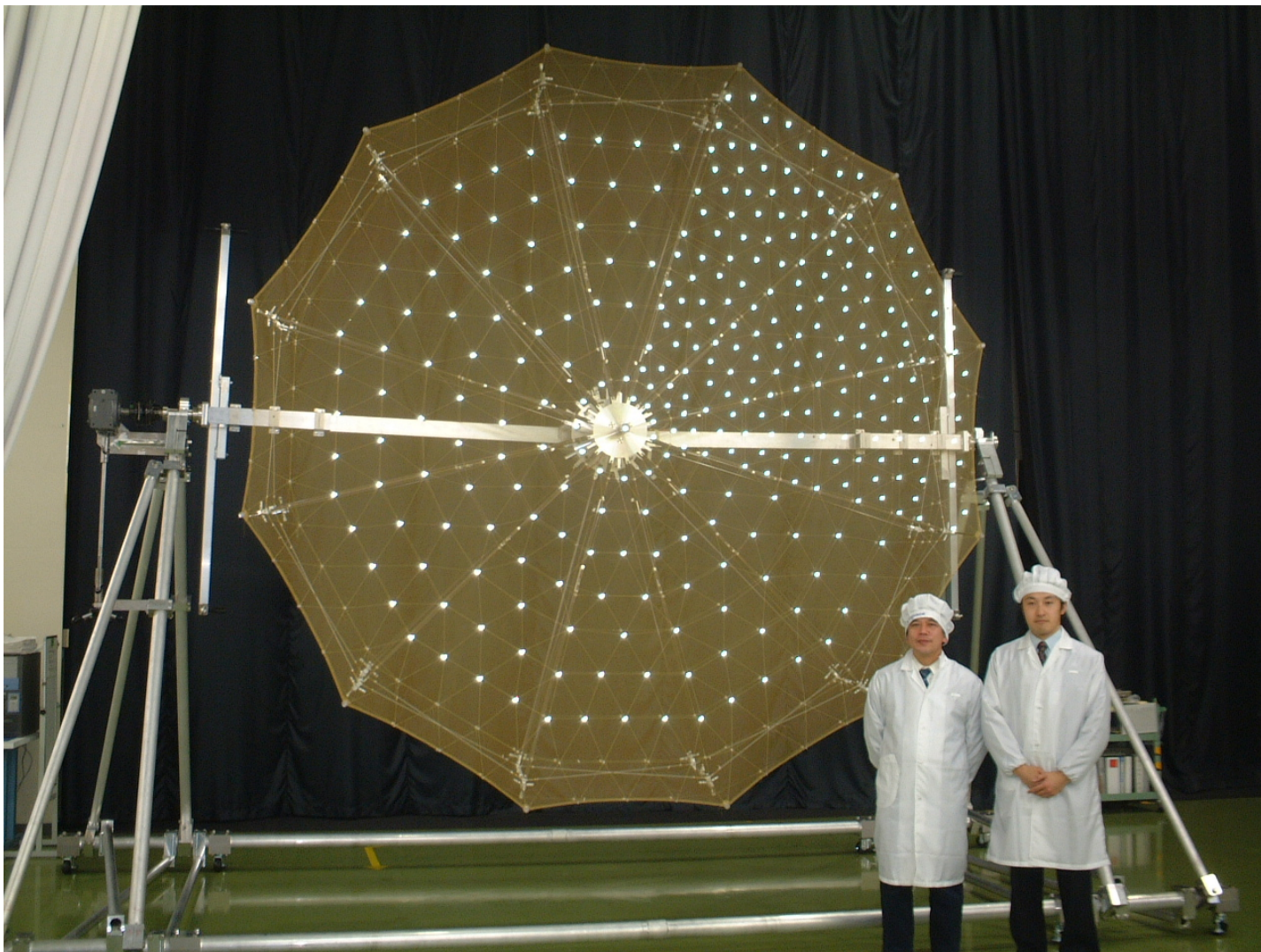
等価的に計測間隔を変えるため、周波数を変えた。

S帯: 1.995GHz ノミナル

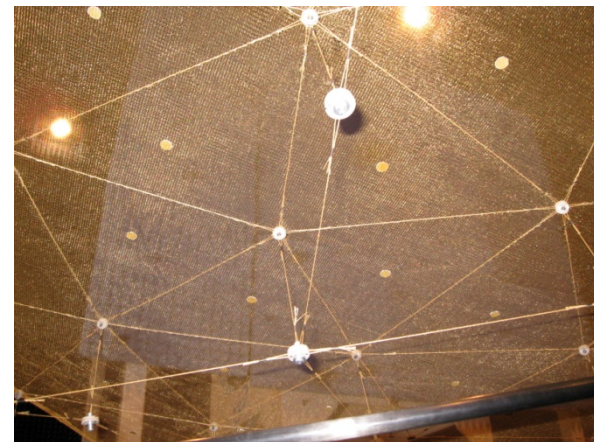
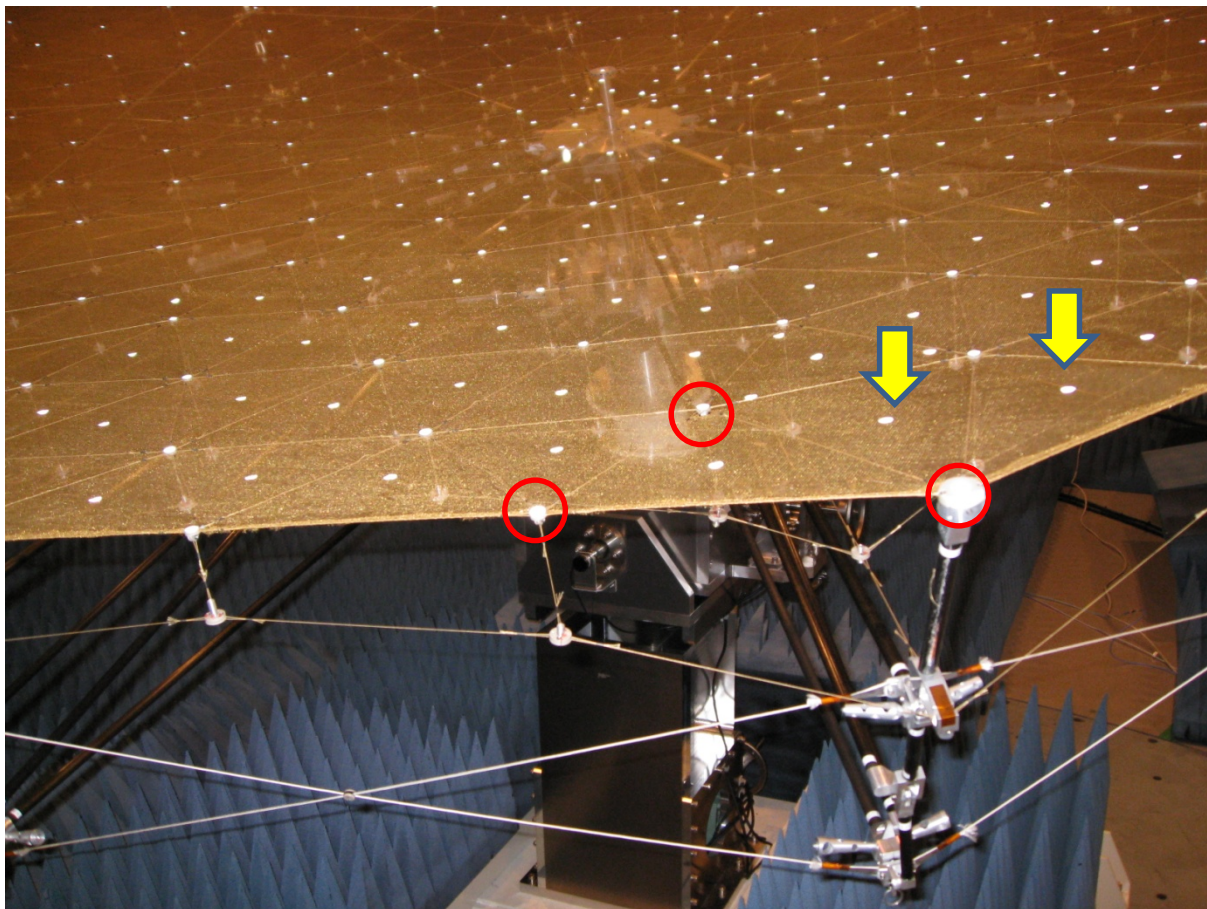
X帯: 11GHz 5.5 倍間隔

Ka帯: 20GHz 10 倍間隔

用いる反射鏡面と形状測定点(ターゲット)



ターゲットの添付箇所

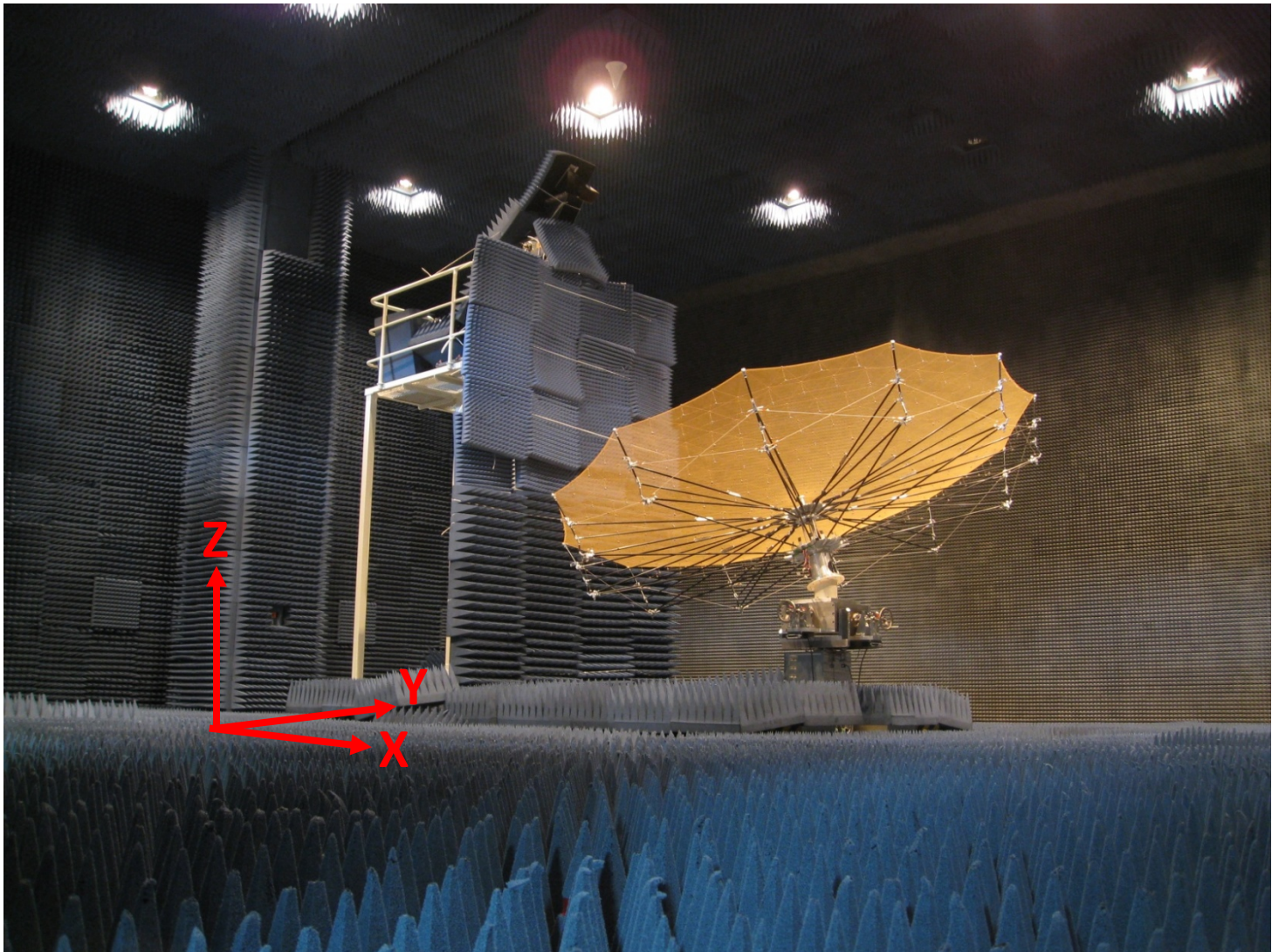


下から見る

○ ターゲット添付箇所

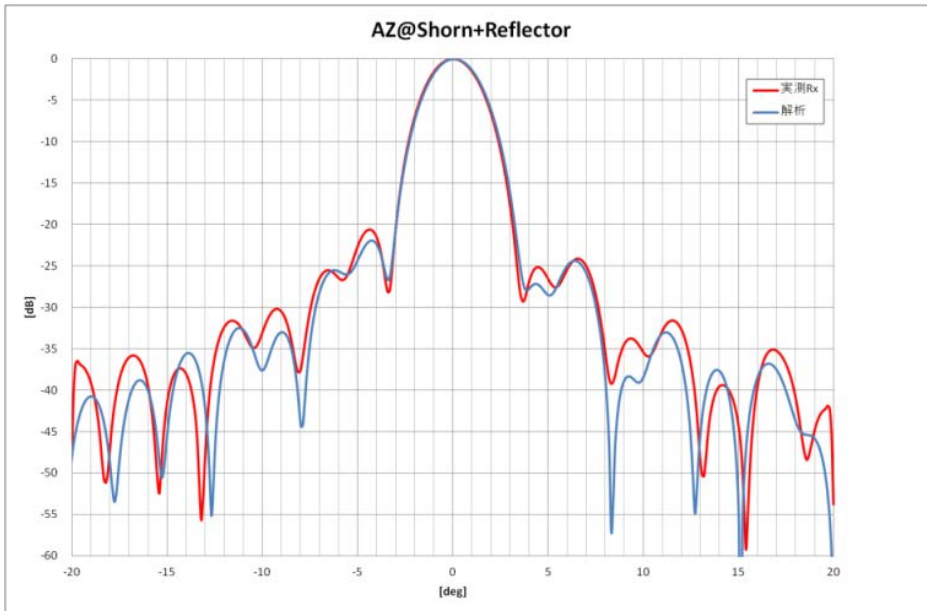
ハードポイント間: 約200mm

ホーンとの組み合わせ試験構成

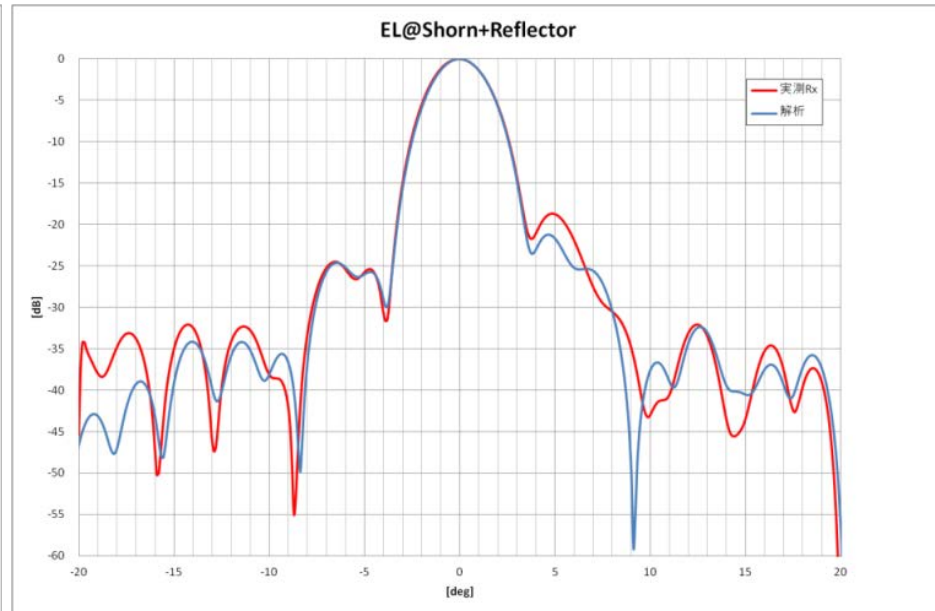


S帯ホーン給電の2次放射パターン特性

周波数: 1995.1MHz
送受: 受信
カット位置: ピークカット
プローブ: デュアル偏波プローブ



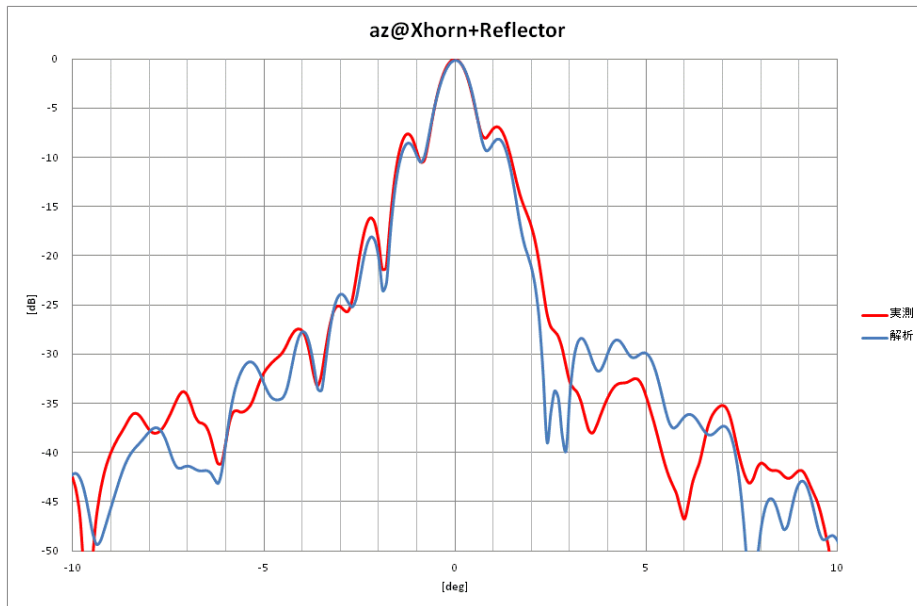
カットパターン(YZ-Plane) (Azカット)



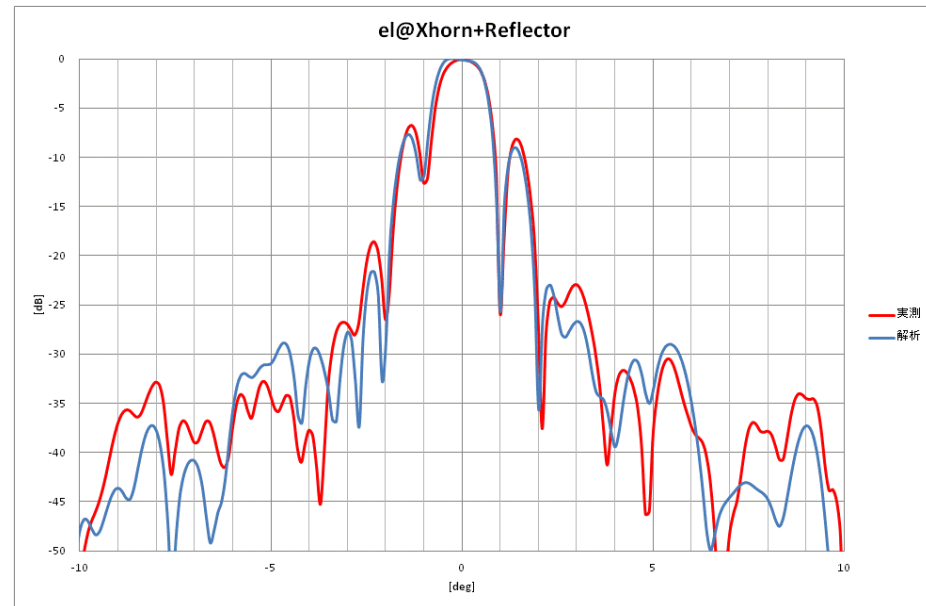
カットパターン(XZ-Plane) (Elカット)

X帯ホーン給電の2次放射パターン特性

周波数: 11GHz
送受: 送信
給電部: 設計ホーン
プローブ: デュアル偏波プローブ
鏡面: 実測鏡面 A



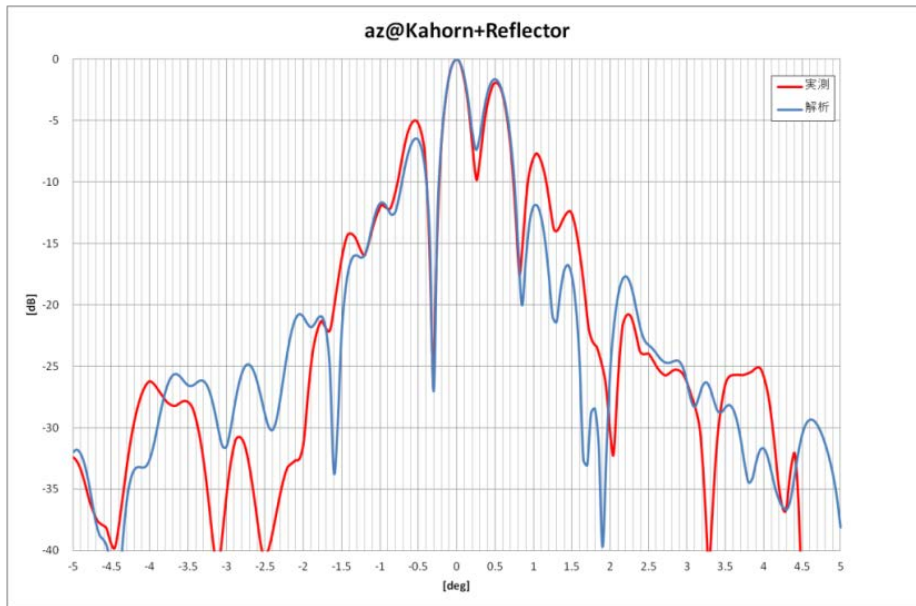
カットパターン(YZ面) Azカット



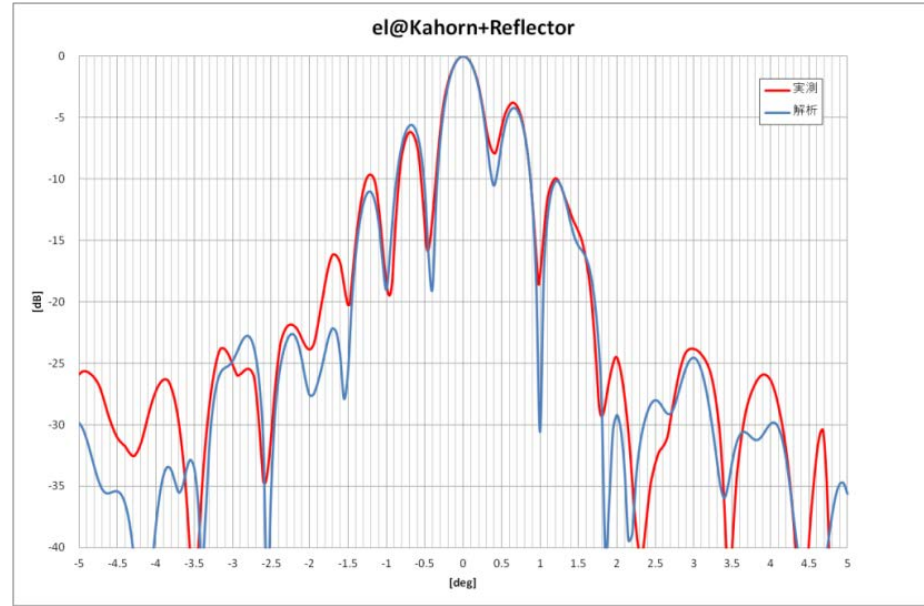
カットパターン(XZ面) Eiカット

Ka帯ホーン給電の2次放射パターン特性

周波数: 20GHz
送受: 送信
給電部: 設計ホーン
鏡面: 実測鏡面 B
プローブ: デュアル偏波プローブ



YZ-面 Azカット



XZ-Plane Eiカット

周波数が高い時のメッシュの反射特性

X帯、Ka帯の反射鏡特性の評価

透過量、オーミックスのみで評価できない要因についてパターン測定より評価する。

- 従来メッシュ鏡面材料の反射特性は透過量から推定。
- 周波数が高くなると評価が十分でないと推測される。
- 反射そのものの測定による評価が必要。

評価手法

- ① 材料を反射で測定する装置(誘電率等)を用いる。
- ② メッシュ反射鏡を製造して放射パターンを評価する。

②の手法が最も正確である。STICSでは3.3mφの反射鏡により、利得を比較した。S帯については計算値と差異がほとんどなかった。

反射損失の不確定量: 0.9 dB

アンテナ利得

実測/解析	値 (dBi)
①実測値	42.71
②解析値(実測鏡面)(*1)	43.61
③解析値(設計鏡面)(*2)	48.02

損失バジェット

項目	dB	備考
反射損失 (②-①)	0.90	メッシュの透過性、 オーミックロス、 ピロー変形を含む
鏡面誤差損失 (③-②)	4.41	

反射損失の不確定量: 2.1 dB

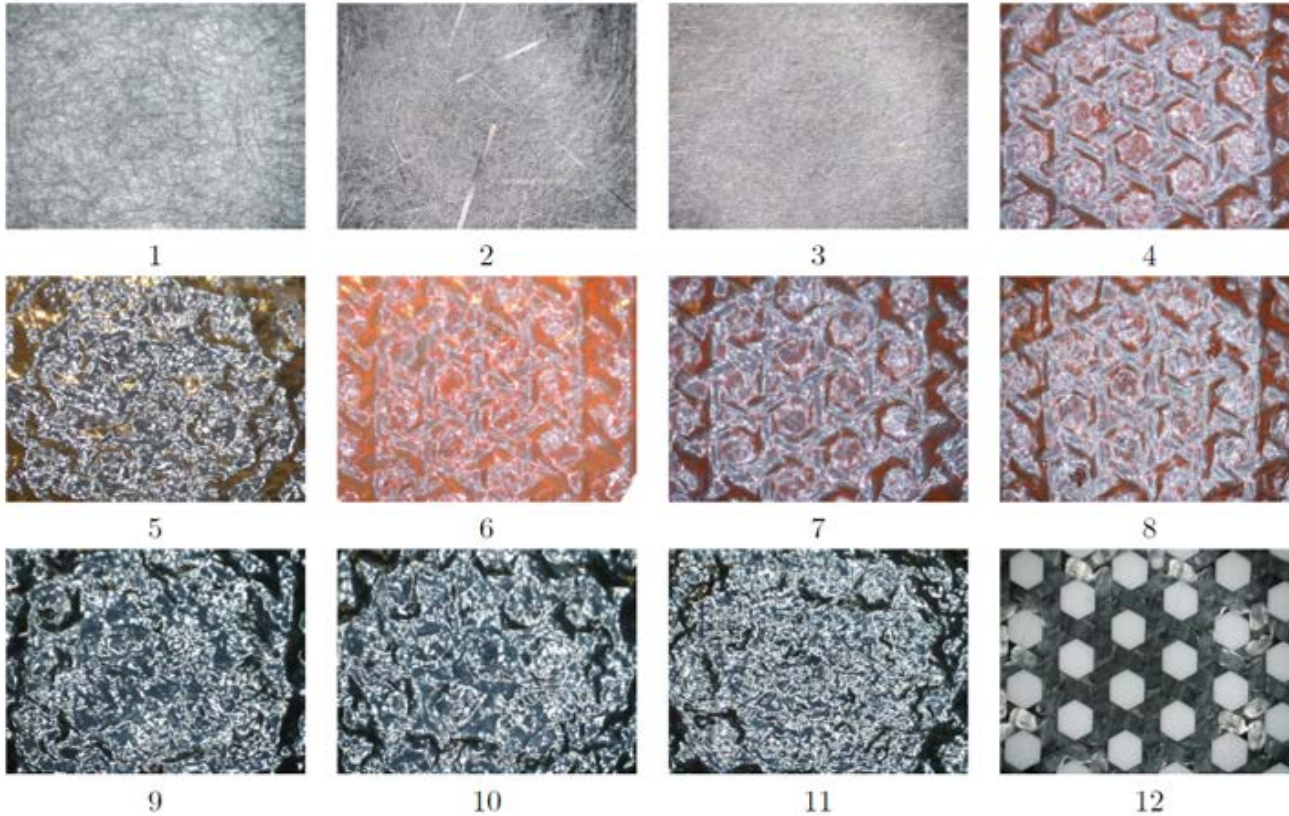
アンテナ利得

実測/解析	値 (dBi)
①実測値	43.77
②解析値(実測鏡面)(*1)	45.84
③解析値(設計鏡面)(*2)	54.12

損失バジェット

項目	dB	備考
反射損失 (②-①)	2.07	メッシュの透過性、 オーミックロス、 ピロー変形を含む
鏡面誤差損失 (③-②)	8.28	

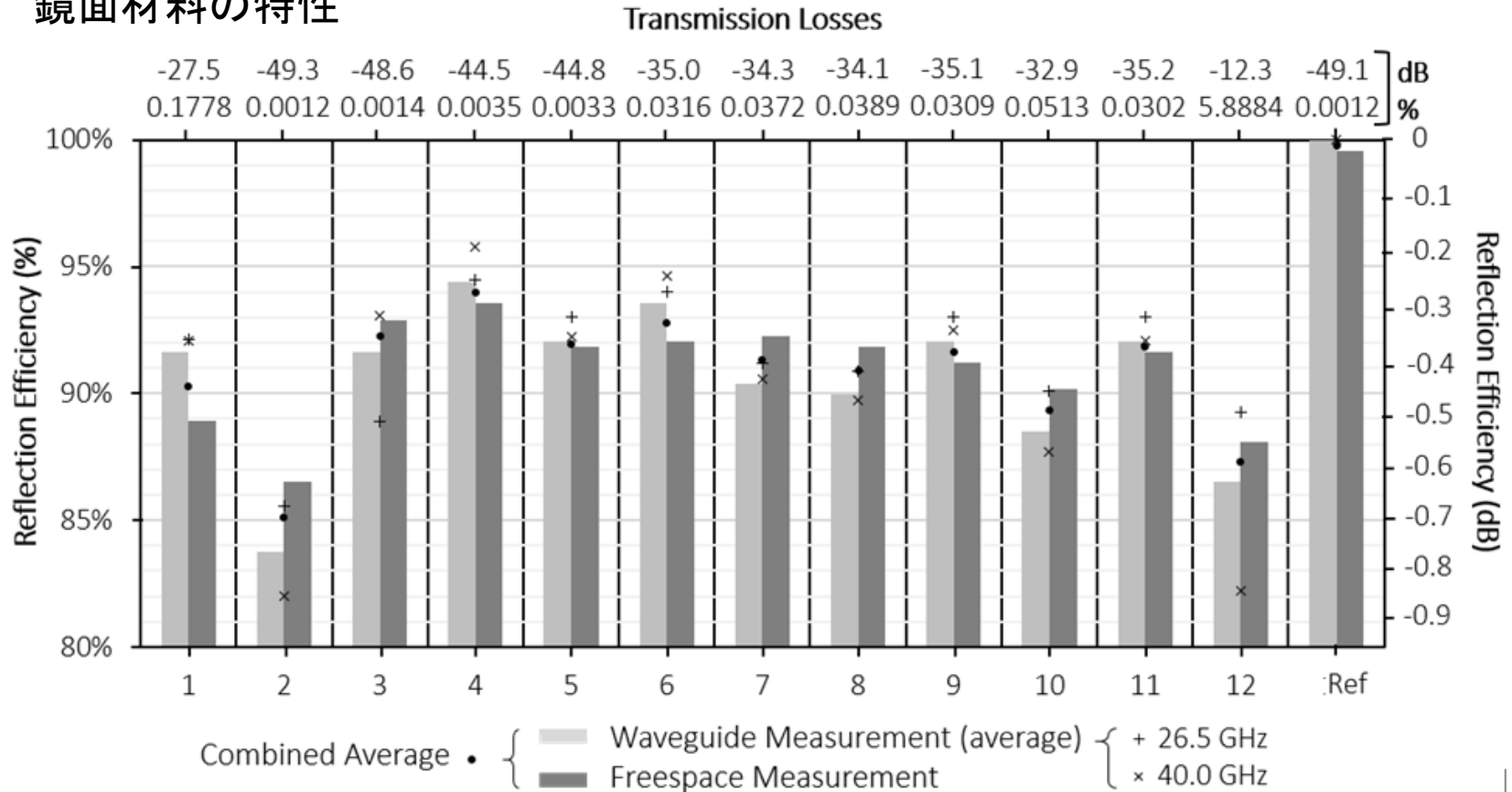
鏡面材料の開発



M. Lawton, et al, "Cost Disruptive Reflector Surface for Large Deployable Antennas",
Proceedings of 13th Reinventing Space Conference, BIS-RS-2015-86, Oxford, UK, 2015

海外での研究開発 (2/2)

鏡面材料の特性



M. Lawton, et al, "Cost Disruptive Reflector Surface for Large Deployable Antennas",
Proceedings of 13th Reinventing Space Conference, BIS-RS-2015-86-86, Oxford, UK, 2015

課題とまとめ

メッシュ反射鏡アンテナについて、今まで検討・確認してきたことを電気性能中心に述べた。

衛星搭載大型反射鏡アンテナの課題

(1) 鏡面形状測定手法

軌道上で鏡面形状を予測してビームを制御しなければならない。

解析は困難であるため軌道上で鏡面を計測する手法の確立。

現在総務省の研究委託「次世代衛星移動通信システムの構築に向けたダイナミック制御技術の研究開発」にて研究開発中。

(2) 地上における放射パターン計測技術の確立

現在総務省の研究委託「次世代衛星移動通信システムの構築に向けたダイナミック制御技術の研究開発」にて研究開発中。

現在総務省の研究委託「次世代衛星移動通信システムの構築に向けたダイナミック制御技術の研究開発」にて研究開発中。

(3) 鏡面形状予測(補間)手法

計測したポイント間の形状を補間する手法の検討。

(より正確な形状推定技術の確立)

現在総務省の研究委託「次世代衛星移動通信システムの構築に向けたダイナミック制御技術の研究開発」にて研究開発中。

(4) メッシュ反射鏡を高い周波数で使用する課題

反射特性に対し十分評価・検討する必要がある。

特にKa帯は反射損失が大きいことがわかった。鏡面材料を評価し、

反射法による特性評価が必要。