



# 1970～80年代の反射鏡アンテナ研究

—三菱電機における研究開発を中心に—

牧野 滋

金沢工業大学

# 講演内容



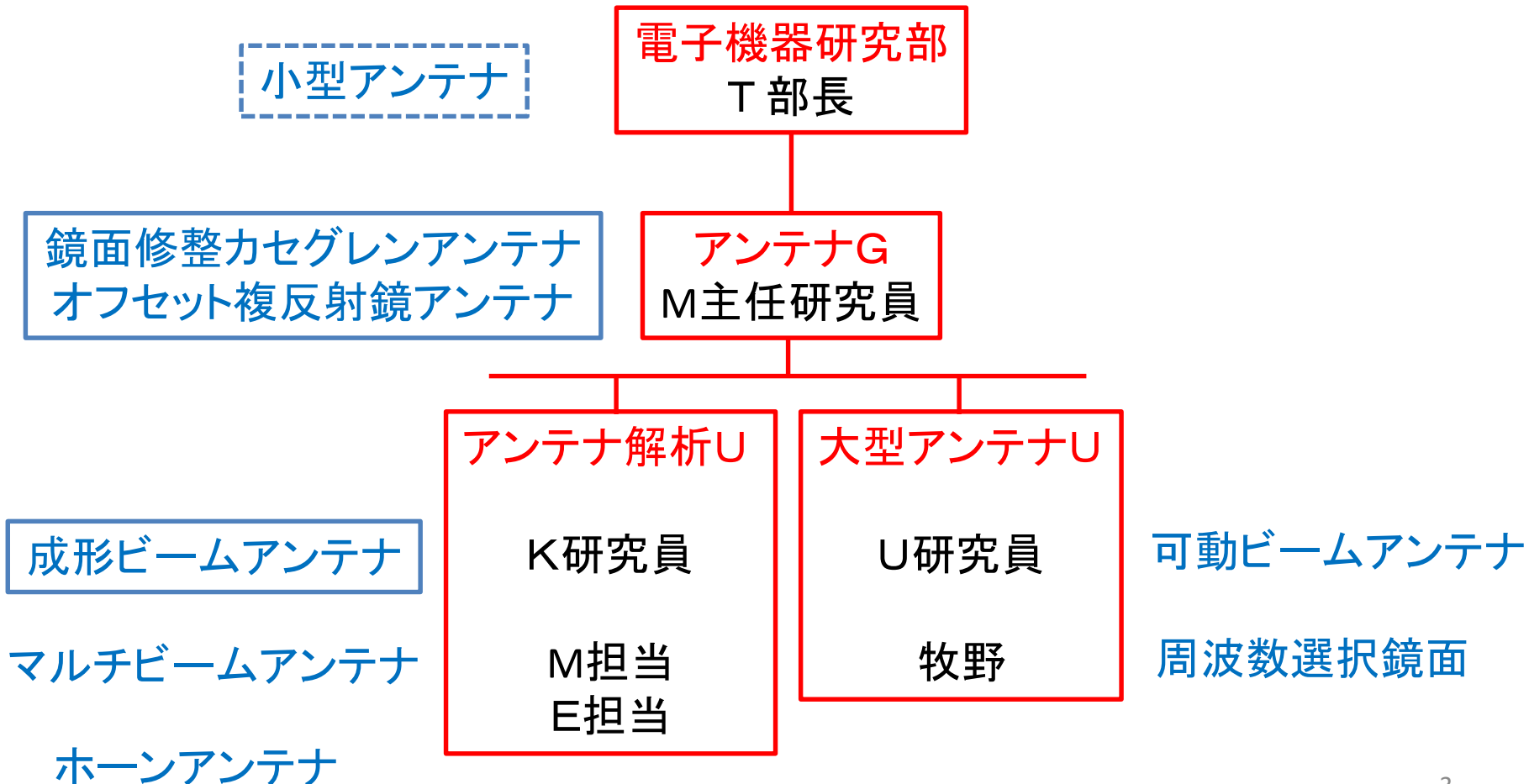
1. 背景
2. 鏡面修整オフセット複反射鏡アンテナ
3. マルチビームアンテナ
4. 周波数選択鏡面
5. むすび

注) 手元に資料の無い状況で準備したため、私の貧しい記憶に頼る部分が多く、誤りもあると思うが、ご容赦願いたい。

# 背景



## 三菱電機における開口面アンテナ研究体制 (1977年4月時点)

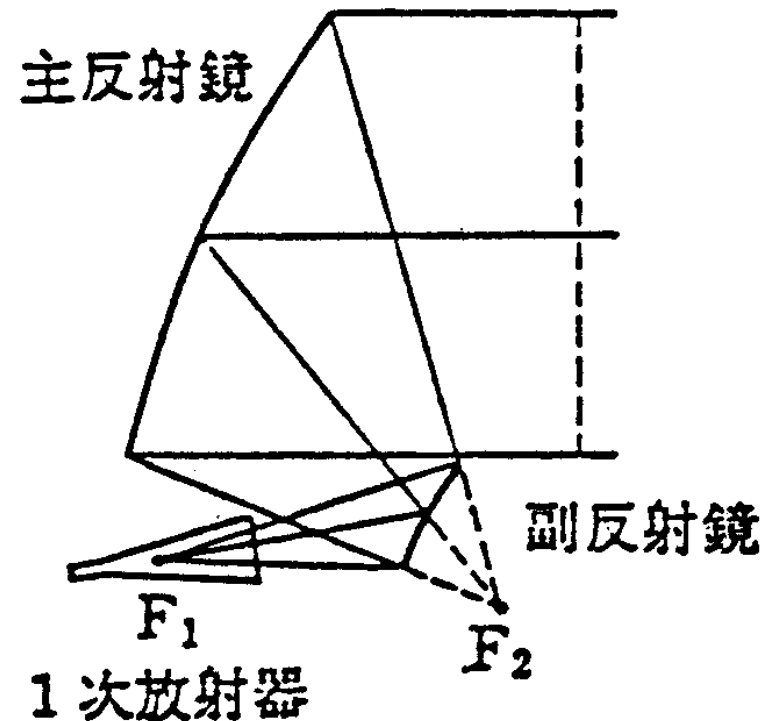




# 鏡面修整オフセット複反射鏡アンテナ

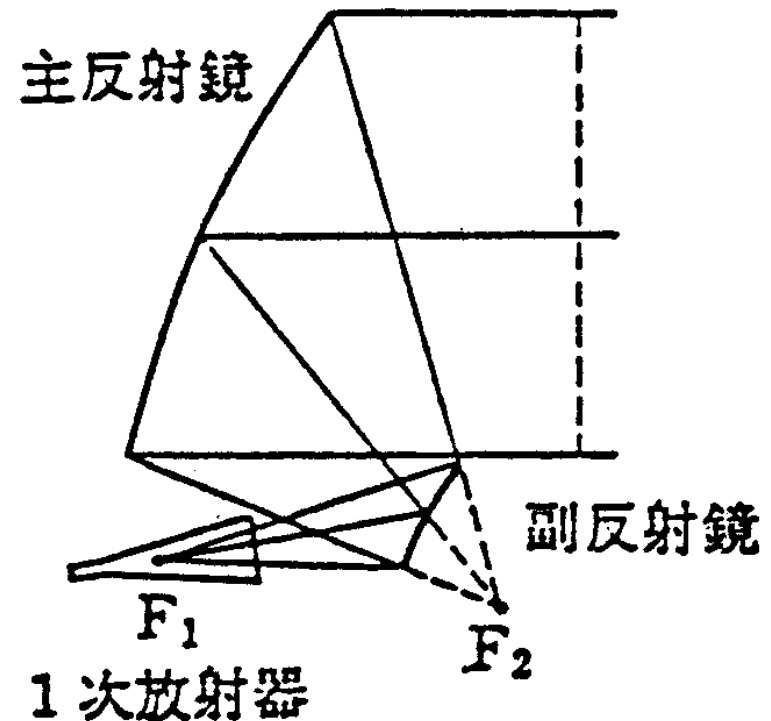
# オフセット複反射鏡アンテナ

複反射鏡アンテナにおける副反射鏡およびその支持柱のブロッキングを避ける方法として、パラボラアンテナに対してオフセットパラボラアンテナがあるのと同様、右図に示すような**オフセット複反射鏡アンテナ**(オフセットカセグレンアンテナ, オフセットグレゴリアンアンテナ)がある.



# オフセット複反射鏡アンテナの特徴

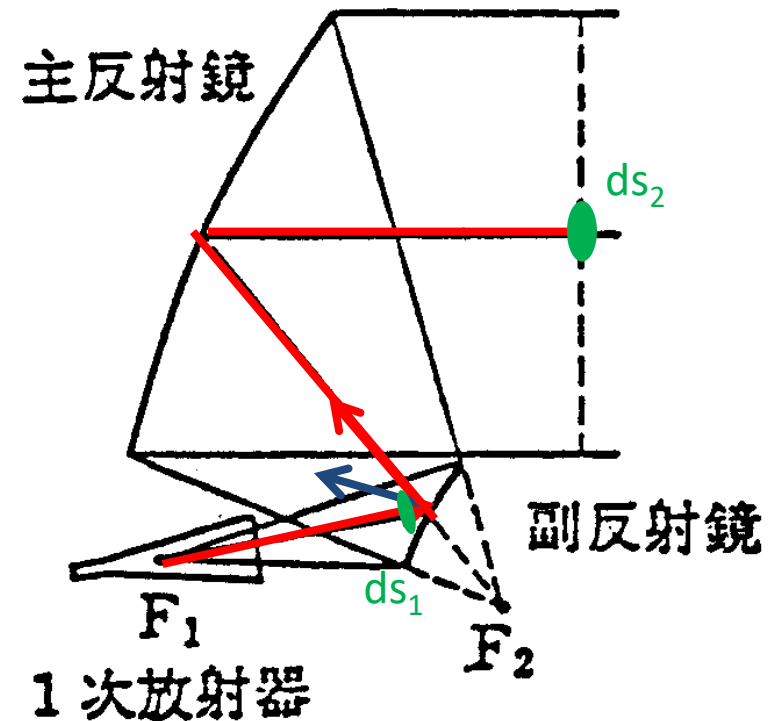
- ①ブロッキングがないため低サイドローブである.
- ②**2枚の反射鏡を2次曲面から変える鏡面修整**が可能で, これにより高効率かつ低サイドローブ特性を有するアンテナが実現できる.
- ③オフセットパラボラよりなる主反射鏡から発生する交差偏波成分をオフセットした副反射鏡が打ち消すように設計することが可能で(**交差偏波消去条件**), これにより低交差偏波特性が実現できる.



究極の反射鏡アンテナ

# オフセット複反射鏡アンテナの鏡面修整

- ①副反射鏡の形状を関数で与える.  
独立変数:  $\theta, \phi$  未知数:  $r(\theta, \phi)$
- ②副反射鏡の単位法線ベクトルが決まる.
- ③副反射鏡から主反射鏡に向かう光線の単位ベクトルが決まる.  
(反射の法則)
- ④副反射鏡から主反射鏡までの距離が決まり, 主反射鏡の形状が決まる.  
(光路長一定の条件)
- ⑤主反射鏡開口上の電界分布が決まる.  
 $|E_1|^2 ds_1 = |E_2|^2 ds_2$   
(電力保存則)
- ⑥一次放射器からの放射パターンと所望の開口分布より, 連立偏微分方程式が求められる.



主反射鏡および副反射鏡の形状を, それぞれ $\theta$ と $\phi$ とで偏微分した4つの未知数に対し, 上記3条件に加え, 「さらにひとつの条件」を加えた連立2階偏微分方程式を解くことにより, 鏡面が求められる. この条件をどう選ぶのかが問題.

# オフセット複反射鏡アンテナの 鏡面修整法（‘70年代）

## 世の中のアプローチ

前記3つの条件に、**開口分布が回転対称となる条件**（交差偏波消去条件）を加えた4つの条件より連立偏微分方程式を解こうとした（Kinber, Galindo, Lee, Mittraら）が、これらを**すべて満足する解はなく**、4つのうちの1つの条件を近似的に満足させて修整鏡面を求めた。



## 現在の解法

前記3つの条件に、**可積分条件**を加えた4つの条件より連立偏微分方程式を解くことにより、修整鏡面を求めることができる（Westcott, 野本）。

**開口分布が回転対称となる条件**（交差偏波消去条件）を満足するかどうかは、二次曲面鏡の場合と同様、連立偏微分方程式を解くときの初期値に依存する。

可積分条件：

$$\frac{\partial^2 f(\theta, \phi)}{\partial \theta \partial \phi} = \frac{\partial}{\partial \phi} \left( \frac{\partial f}{\partial \theta} \right) = \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{\partial f}{\partial \phi} \right)$$



# オフセット複反射鏡アンテナの 鏡面修整法（‘70年代）

## 三菱電機のアプローチ

### ①ダブリーカーブによる近似（水沢）

厳密解を求めることができる中心断面における鏡面から全体の鏡面を近似的に求めた。

「NTT 11.5m Ka-band Offset Cassegrain Antenna」に適用。

### ②副反射鏡を関数で与える方法（片木，牧野）

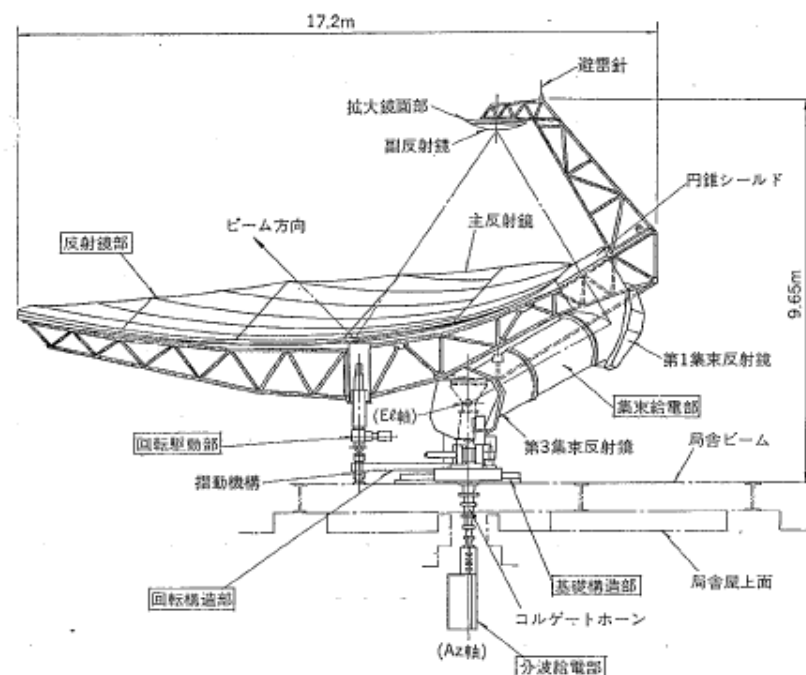
微分方程式を解くのではなく，前記①から⑤の手順に従って回転二次曲面鏡から徐々に鏡面修整を行い，所望の開口分布となる鏡面を求めた。

- ・実際の一次放射器の放射パターンを使用できる。
- ・鏡面修整後に交差偏波消去を満足させるための初期値を明確にした。

「NTT Ka-band Elliptical Aperture Shaped Offset Cassegrain Antenna」

「SNG and VSAT Elliptical Aperture Offset Gregorian Antennas」

# NTT 11.5m Ka-band Offset Cassegrain Antenna



# NTT 11.5m Ka-band Offset Cassegrain Antenna



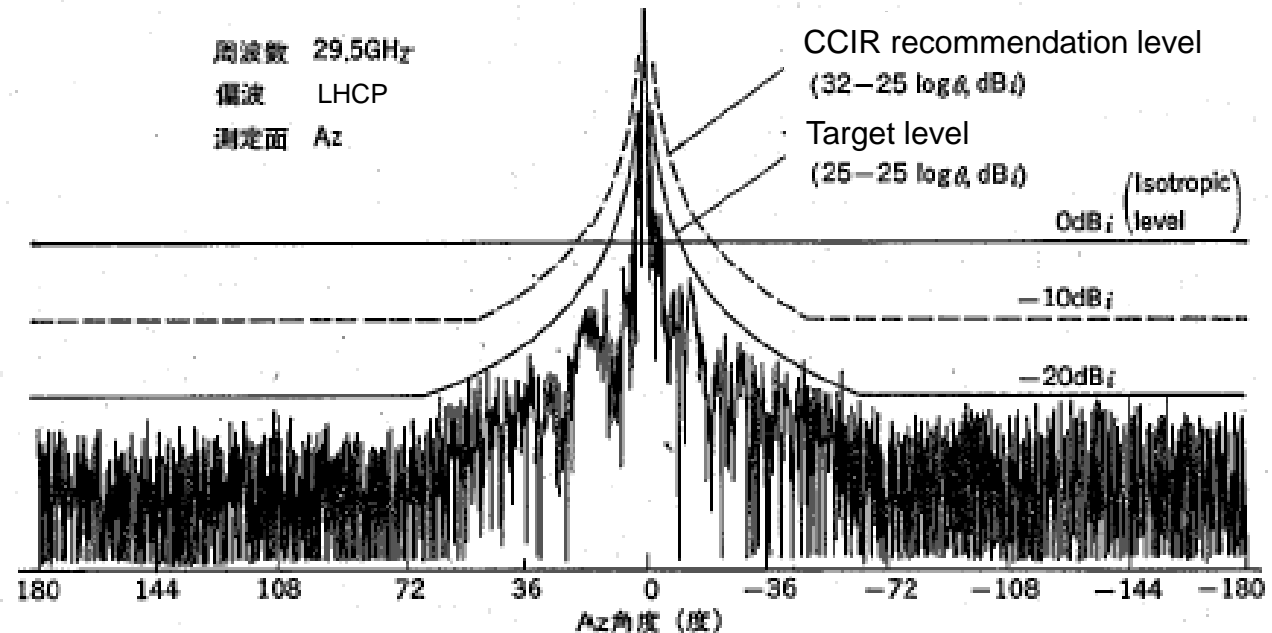
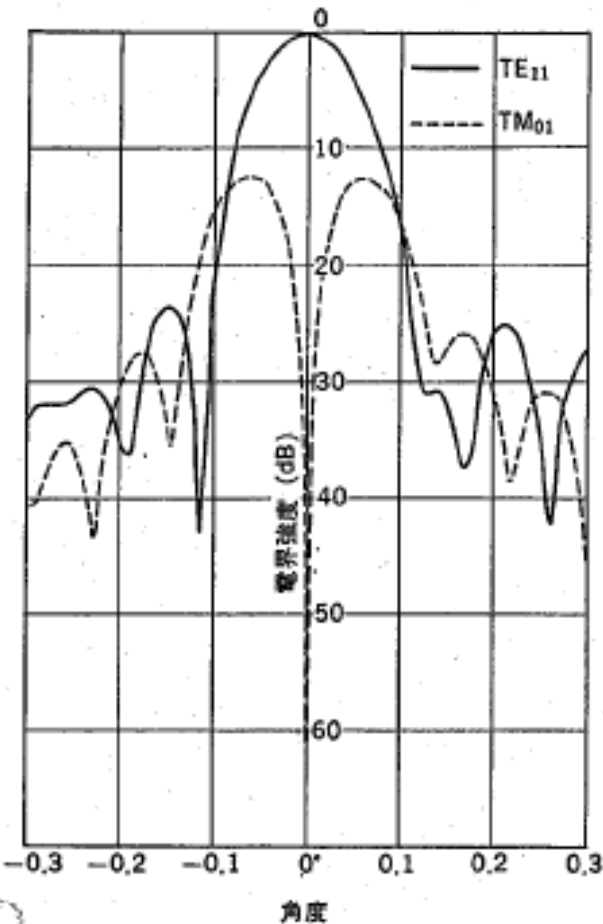
- First offset Cassegrain earth station antenna
- Constructed in 1978
- Ka (20/30GHz) band
- High aperture efficiency and low sidelobe characteristics
  - 69.5dBi (60%) at 29.5GHz
  - 66.3dBi (69%) at 19.5GHz
  - 10dB less sidelobe level than conventional antenna

# NTT 11.5m Ka-band Offset Cassegrain Antenna



Antenna Type — 3-reflector focused beam waveguide fed shaped-reflector Cassegrain antenna  
 Reflector — Effective diameter 11.5 m  
 Profile error 0.17 mm rms

	Transmit	Receive
Frequency	27.5–31.0 GHz	17.7–21.2 GHz
Polarization	LHCP	RHCP
Gain	69.5 dBi (29.5 GHz)	66.3 dBi (19.5 GHz)
Noise Temperature	—	43 K (EI 45°)



# オフセット複反射鏡アンテナの鏡面修整法（‘70年代～‘80年代）



## 三菱電機のアプローチ

### ①ダブリーカーブによる近似（水沢）

厳密解を求めることができる中心断面における鏡面から全体の鏡面を近似的に求めた。

「NTT 11.5m Ka-band Offset Cassegrain Antenna」に適用。

### ②副反射鏡を関数で与える方法（片木，牧野）

微分方程式を解くのではなく，前記①から⑤の手順に従って回転二次曲面鏡から徐々に鏡面修整を行い，所望の開口分布となる鏡面を求めた。

- ・実際の一次放射器の放射パターンを使用できる。
- ・鏡面修整後に交差偏波消去を満足させるための初期値を明確にした。

「NTT Ka-band Elliptical Aperture Shaped Offset Cassegrain Antenna」

「SNG and VSAT Elliptical Aperture Offset Gregorian Antennas」

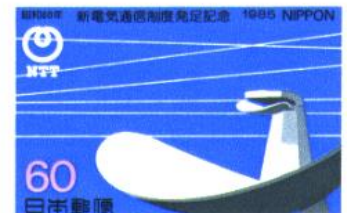
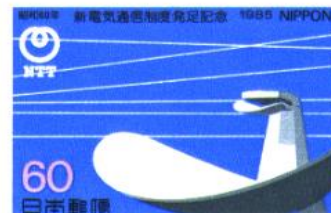
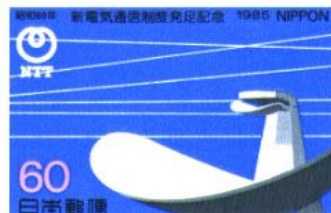
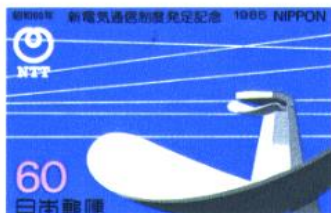
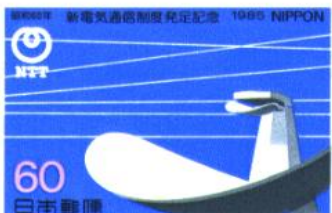
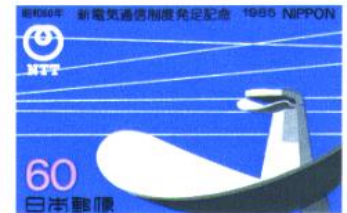
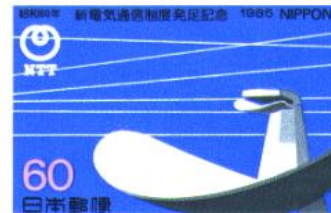
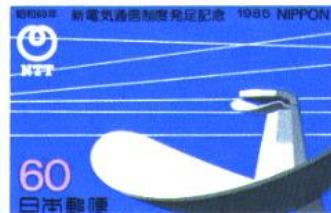
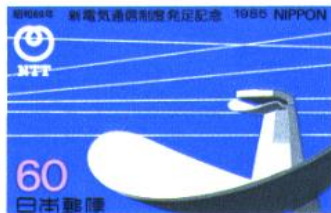
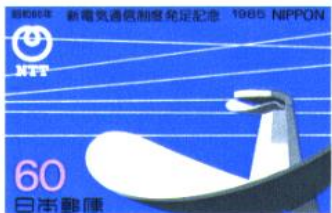
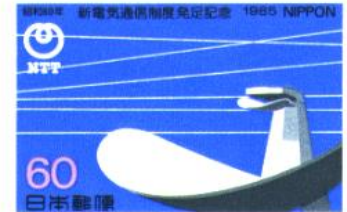
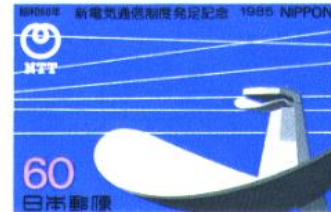
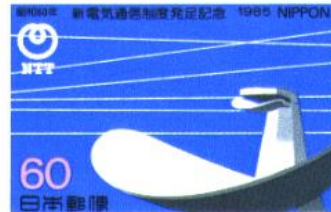
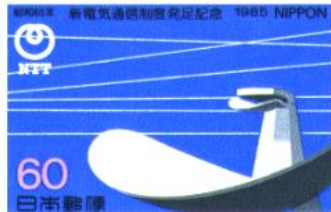
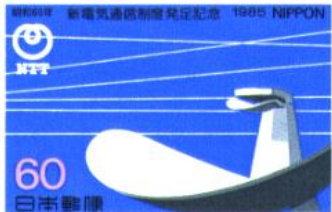
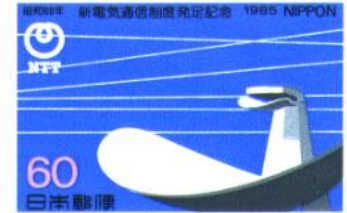
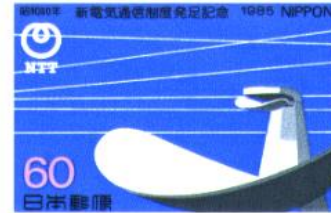
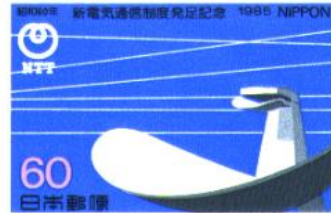
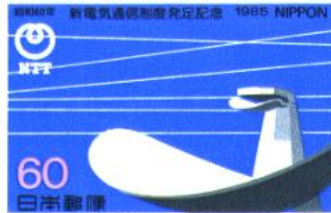
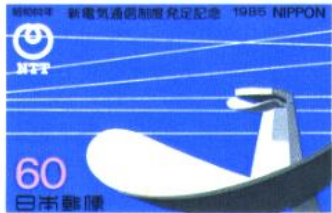
# NTT Ka-band Elliptical Aperture Shaped Offset Cassegrain Antenna



# NTT Ka-band Elliptical Aperture Shaped Offset Cassegrain Antenna



- First elliptical aperture offset Cassegrain earth station antenna
- Constructed in 1979
- High efficiency aperture distribution on elliptical reflector using shaping technique
- Ka (20/30GHz) band
- Model of commemorative stamp design





# SNG and VSAT Elliptical Aperture Offset Gregorian Antennas



SNG



VSAT

# Ku band INTESAT IBS Earth Station Antenna (KDD)



# Beam Steerable Dual Reflector Antenna by Subreflector Drive (NTT)



➤ Constructed in 1986

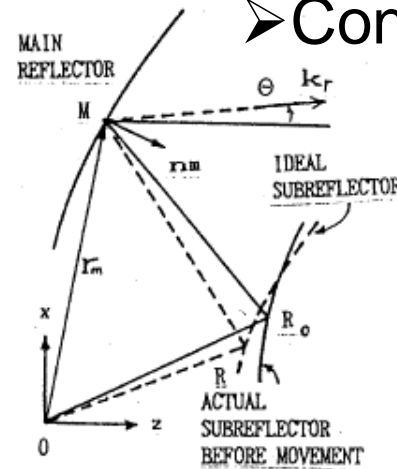


Fig. 3 Ideal subreflector without aberration in  $k_r$  direction

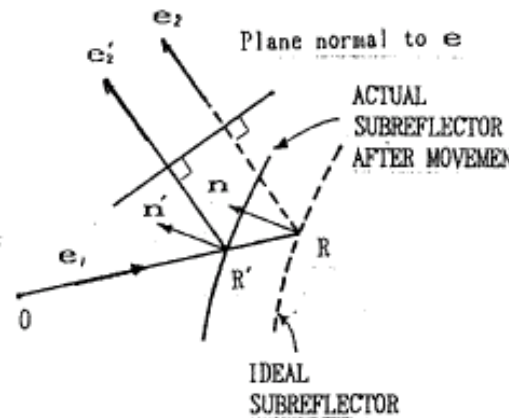


Fig. 4 Incident and reflected ray on two subreflectors

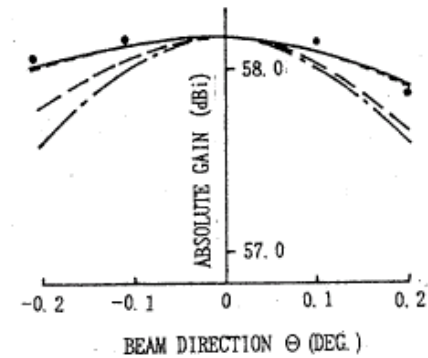
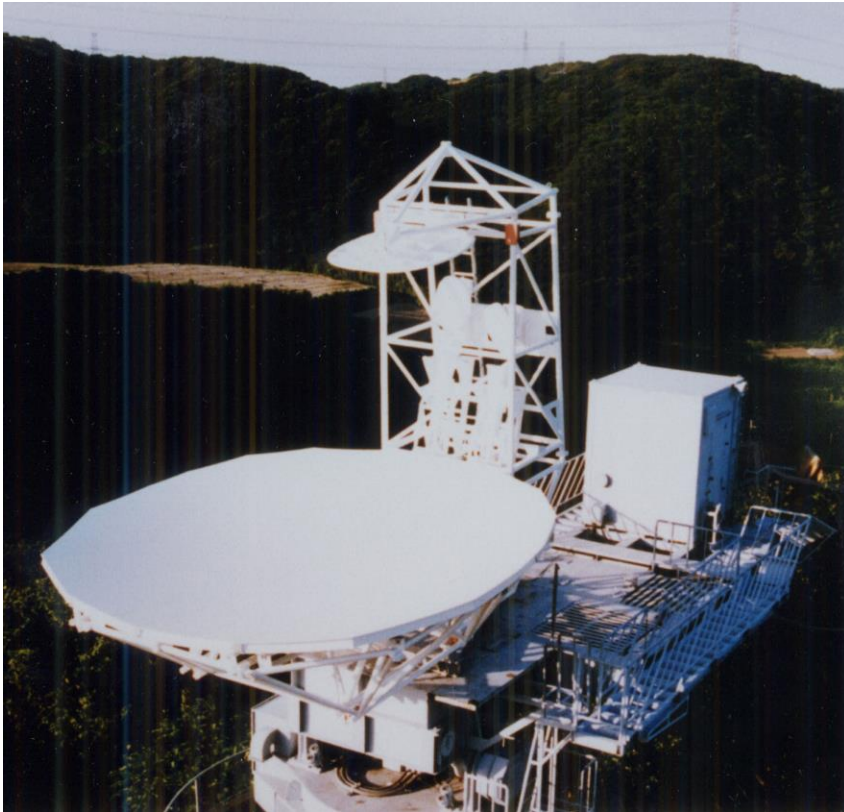


Fig. 5 Beam steering characteristics in Elevation plane

# NTT Dual Beam Antennas



C band

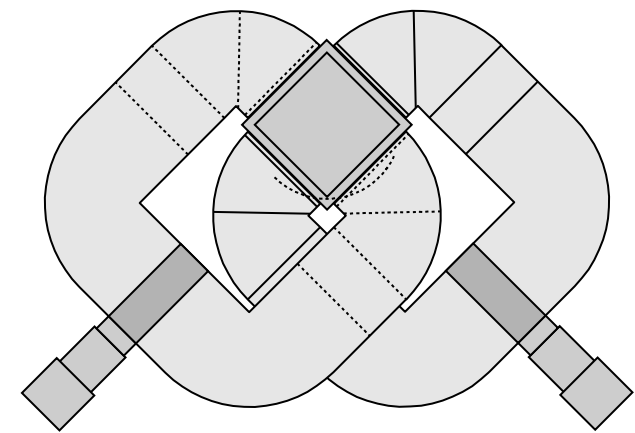
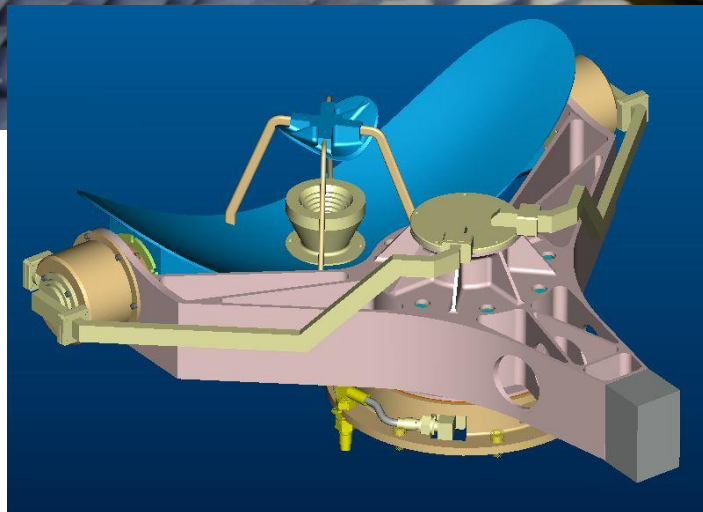
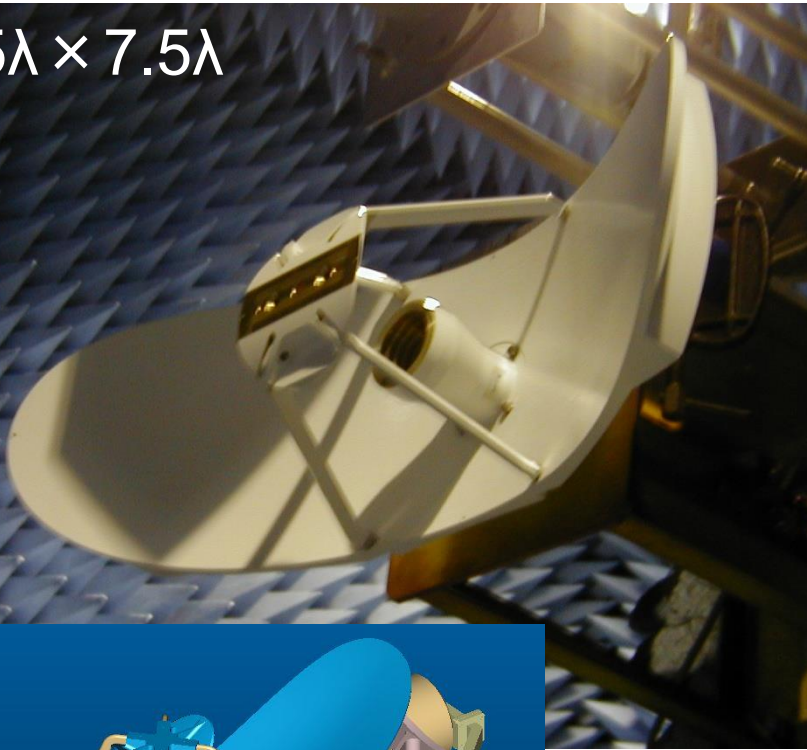


Ku band

# Connexion by Boeing<sup>SM</sup> Ku-band Small Antenna



$24.5\lambda \times 7.5\lambda$



Thin OMT (20 mm)



# マルチビームアンテナ

# マルチビームアンテナ



## マルチビームアンテナの定義

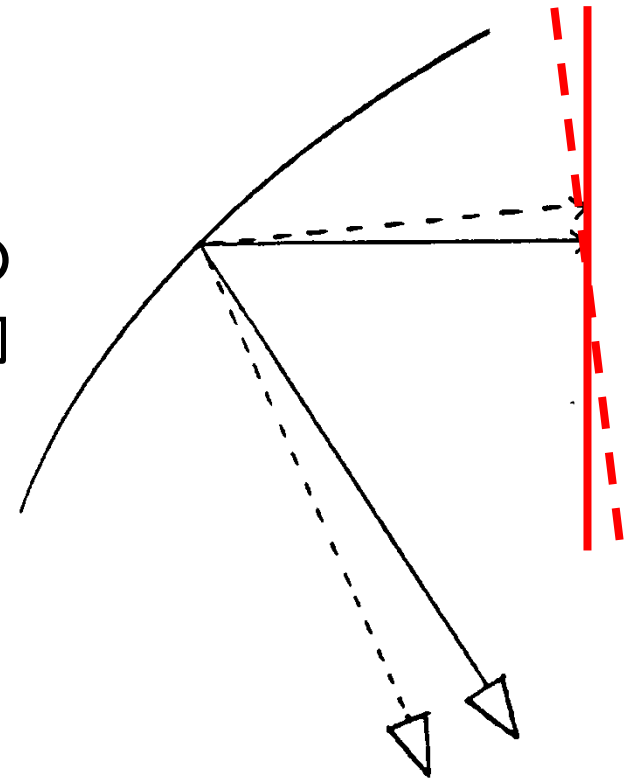
- ・1つのアンテナから複数のビームを放射
- ・各ビームが各々に対応した給電口を有する

反射鏡アンテナを給電する一次放射器の位置を偏位することにより, ビームの方向を変える.

反射鏡アンテナの焦点近傍に複数個の一次放射器を配列



一次放射器の数だけのビームを有するマルチビームアンテナ



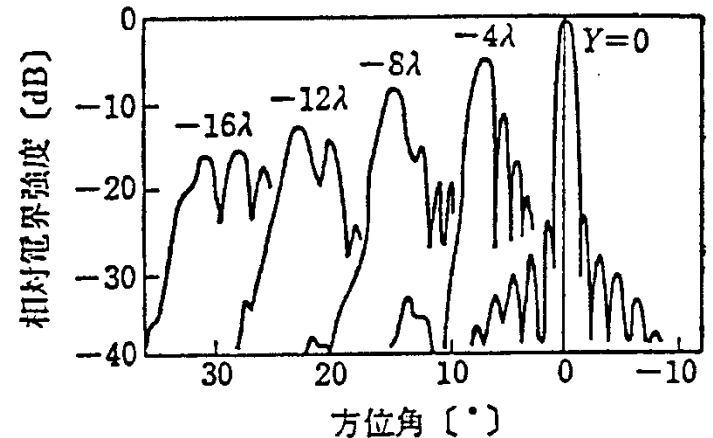
# 偏位給電パラボラアンテナの指向性

焦点に球面波源を配置した場合のみアンテナ開口上で平面波を形成.

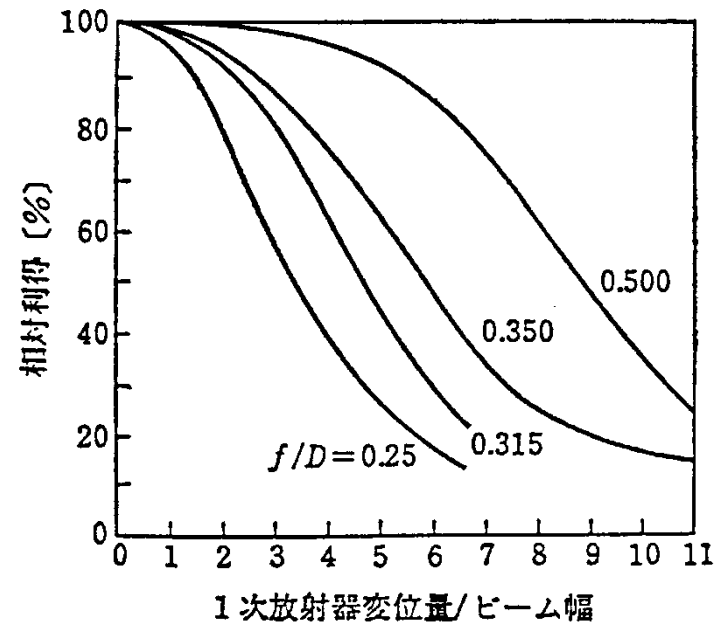
一次放射器の位置を焦点から偏位した場合のアンテナ開口上の波面には平面からのずれ、いわゆる**収差**を生じる.

アンテナ開口上に収差があると、**利得低下**や**サイドローブレベル上昇**などの性能劣化を引き起こす.

一次放射器の位置を焦点近傍に配置した場合、焦点から離せば離すほど収差の発生は大きくなる.



$\frac{f}{D} = 0.4$      $D = 7.23\lambda$     7.9GHz    H面  
 $Y$ : 鏡軸に垂直な方向の変位量





# マルチビームアンテナ ( '70年代)



## 世の中のアプローチ

### 一次元ビーム偏向

- ・双焦点アンテナ (NTT)
- ・オフセット双焦点アンテナ (NTT, KDD)
- ・トーラスアンテナ

### 二次元ビーム偏向

- ・交差偏波消去条件を満足するオフセット複反射鏡アンテナ  
等価的に  $f/D$  比の大きいパラボラアンテナと見なすことができるため、収差を小さくできる。
- ・球面鏡アンテナ

# 双焦点アンテナ

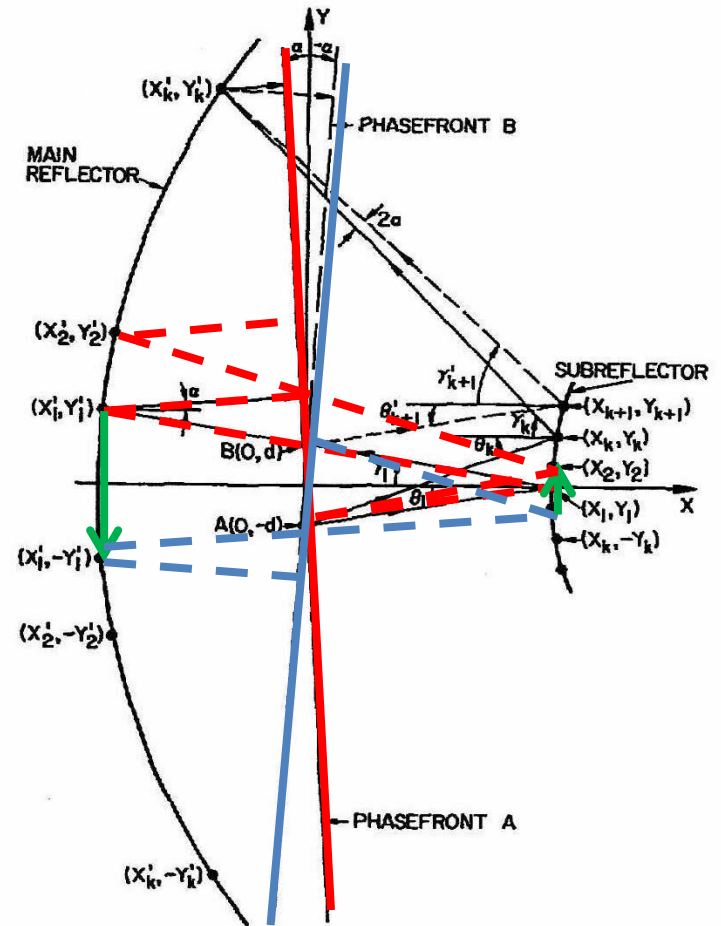
双焦点誘電体レンズの考え方を鏡面に適用したもの。

鏡面形状(座標と法線方向)はRay Lattice Methodにより離散的に決まるため, その間は内挿する必要がある。

対称な2方向に対して収差の無い双焦点アンテナであり, 2つの焦点を含む一次元のビーム偏向に適する。

紙面に直交する断面の鏡面形状には自由度がある。

オフセット複反射鏡形式のもの(初期はNTT, 厳密解はKDD), 多くの疑似焦点を有するもの(NEC)もある。



# トーラスアンテナ

焦点距離  $f$  の放物線を，放物線の頂点からおよそ  $2f$  離れた点を通り放物線の中心軸に直交する直線を回転軸として得られる鏡面。

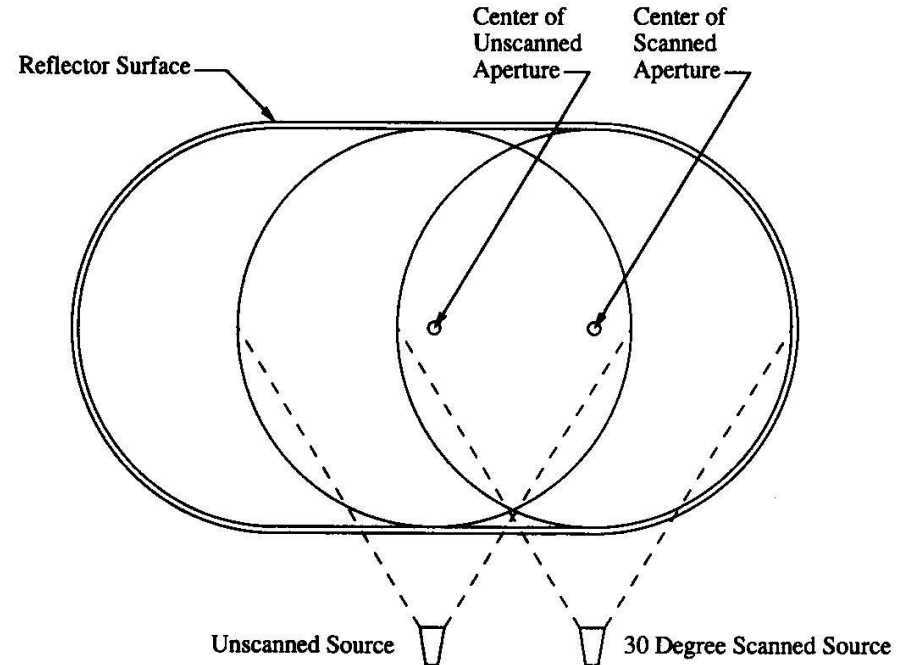
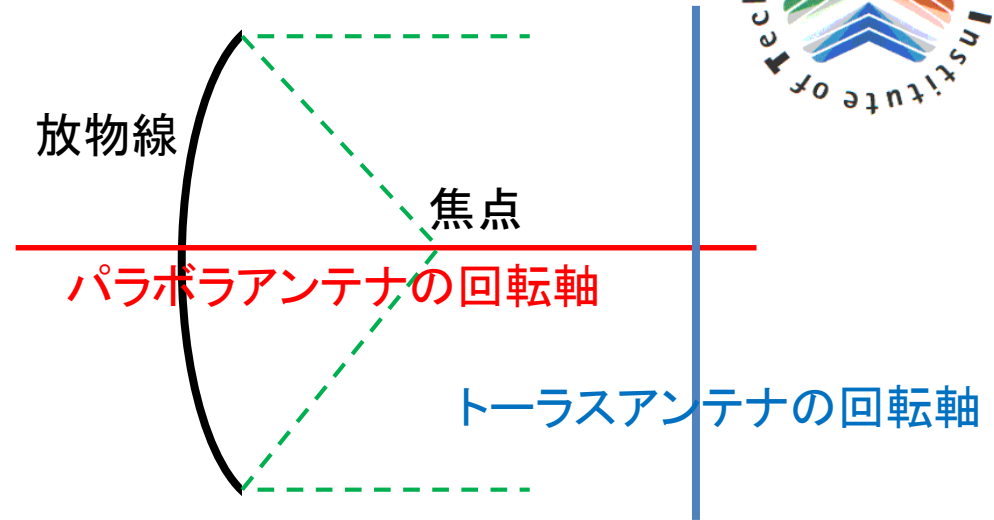
$$\frac{1}{f} = \frac{1}{r} + \frac{1}{r} = \frac{2}{r} \quad \rightarrow \quad f = \frac{r}{2}$$

一次放射器をトーラス回転軸の周りに回転して配置。

回転対称性により，同等の性能のビームを形成。

原理的に位相誤差(球面収差)があり，開口能率，サイドローブ特性が劣る。

ビームによって反射鏡を利用する範囲が異なるため，ビーム偏向が大きい場合は反射鏡が大きくなる。



# マルチビームアンテナ ( '70年代)



## 世の中のアプローチ

### 一次元ビーム偏向

- ・双焦点アンテナ (NTT)
- ・オフセット双焦点アンテナ (NTT, KDD)
- ・トーラスアンテナ

### 二次元ビーム偏向

- ・交差偏波消去条件を満足するオフセット複反射鏡アンテナ  
等価的に  $f/D$  比の大きいパラボラアンテナと見なすことができるため、収差を小さくできる。
- ・球面鏡アンテナ  
原理的に、一次放射器を置く位置と方向を変えるだけで、任意の方向に同等の特性を有するビームを形成できる。  
厳密な焦点ではないため、球面収差により、能率やサイドローブ特性が劣る。  
補助反射鏡により収差を補正することが多い。

# マルチビームアンテナ ( '70年代)



## 三菱電機のアプローチ

### ①回転対称複反射鏡双焦点アンテナ(本間)

回転対称な複反射鏡において, 双焦点の特性を近似的に実現したもので, 特定の角度の円状の方向において, 疑似焦点を有する.

### ②INTELSAT R&D「INTEL-193」(牧野)

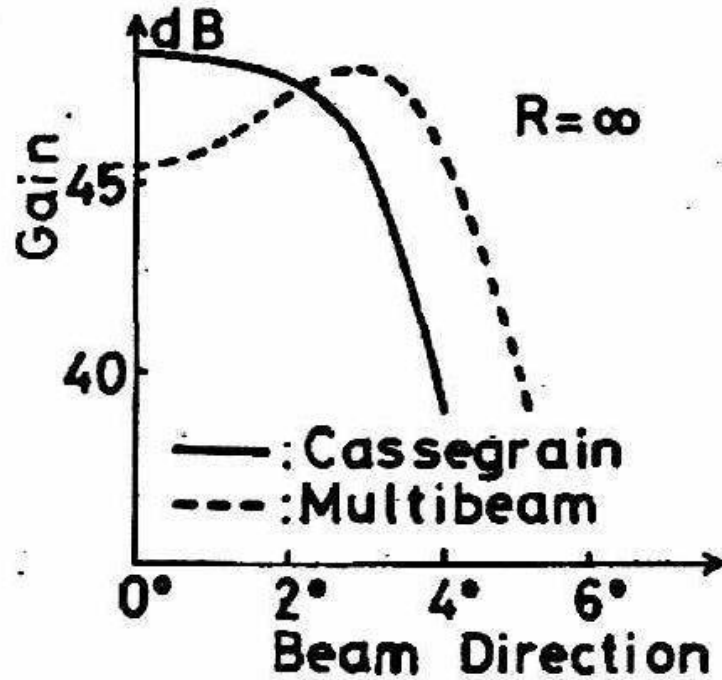
- ・鏡面修整オフセット複反射鏡アンテナ
- ・フロントフィードオフセットカセグレンアンテナ

### ③大分離角マルチビームアンテナ(片木, 内藤)

# 回転対称複反射鏡双焦点アンテナ



開口径: 210波長



# マルチビームアンテナ ( '80年代)



## 三菱電機のアプローチ

①二次元にビーム偏向できる双焦点アンテナ(本間)

厳密解を求めることができる中心断面における鏡面から全体の鏡面を近似的に求めた。

②INTELSAT R&D「INTEL-193」(牧野)

- ・鏡面修整オフセット複反射鏡アンテナ
- ・フロントフィードオフセットカセグレンアンテナ

③大分離角マルチビームアンテナ(片木, 内藤)

# INTELSAT R&D 「 INTEL-193 」



## 要求性能

- ・開口径: 120波長(ビーム幅約 $0.5^\circ$ )
- ・ビーム偏向範囲: 半径 $10^\circ$  の円内(約20ビーム幅)
- ・ビーム偏向による利得低下: **3dB以下**
- ・交差偏波: **-27dB以下(できれば-30dB以下)**

## 検討結果

### ・鏡面修整複反射鏡アンテナ

オフセットカセグレン: 解無し

オフセットグレゴリアン: ビーム偏向による利得低下: **3.2dB以下**

交差偏波: **-20dB程度**

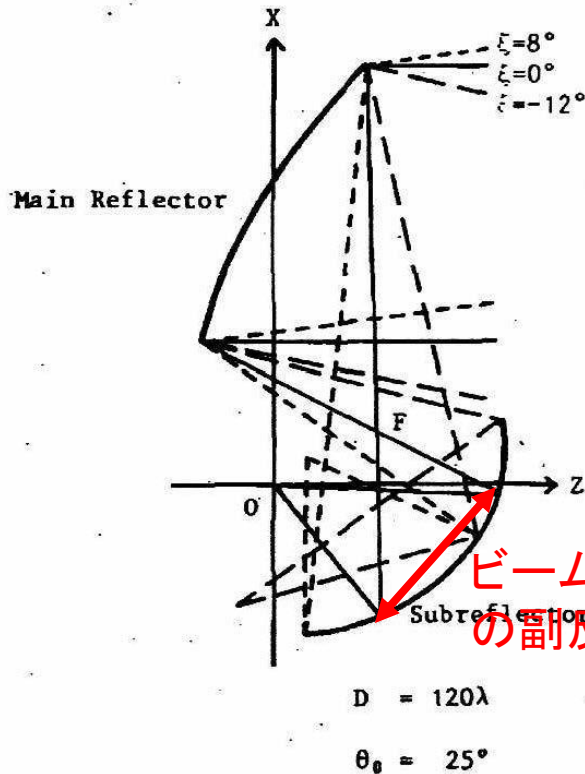
### ・フロントフィードオフセットカセグレン(FFOC)の考案

ビーム偏向による利得低下: **2.2dB以下**

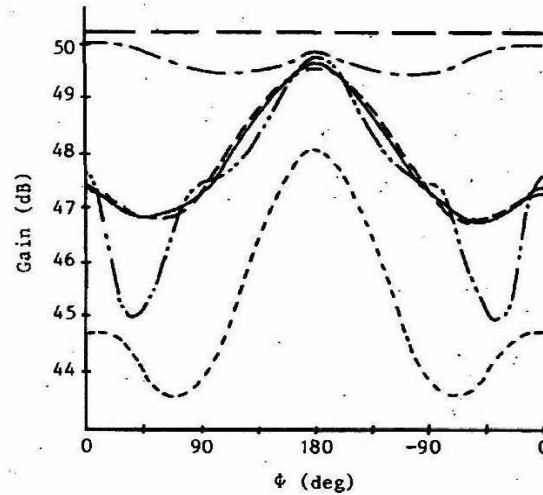
交差偏波: **-38dB以下**



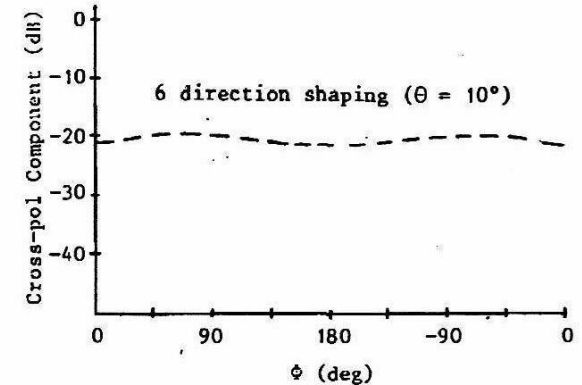
# 鏡面修整オフセットグレゴリアン



ビーム偏向無し  
の副反射鏡



- without shaping ( $\theta = 10^\circ$ )
- with shaping  $\theta_L = 25^\circ$
- 4 directions ( $\theta = 10^\circ$ )
- 6 directions ( $\theta = 10^\circ$ )
- 8 directions ( $\theta = 10^\circ$ )
- 16 directions ( $\theta = 10^\circ$ )
- 6 directions ( $\theta = 5^\circ$ )
- $\theta = 0^\circ$



# FFOC Antenna

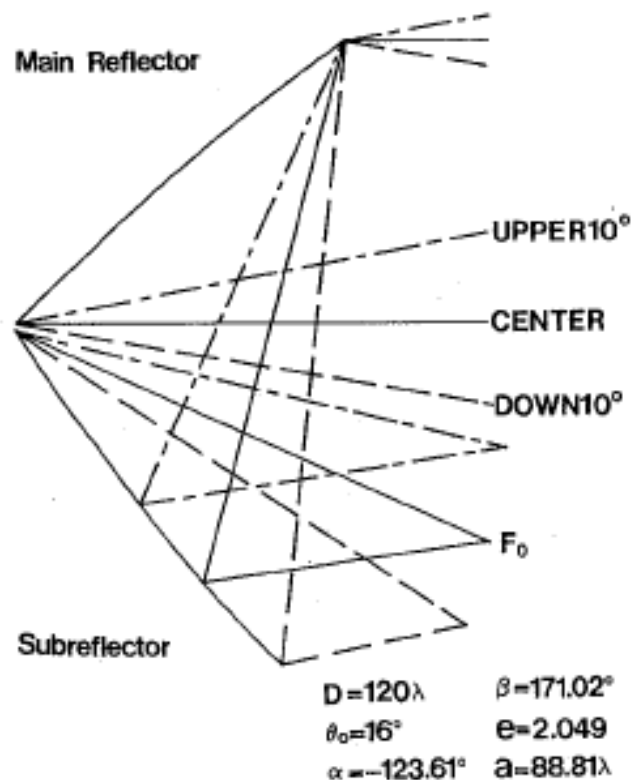


図 12 FFOC 形式マルチビームアンテナの設計例  
 Fig.12 Design example of FFOC type multi-beam antenna.

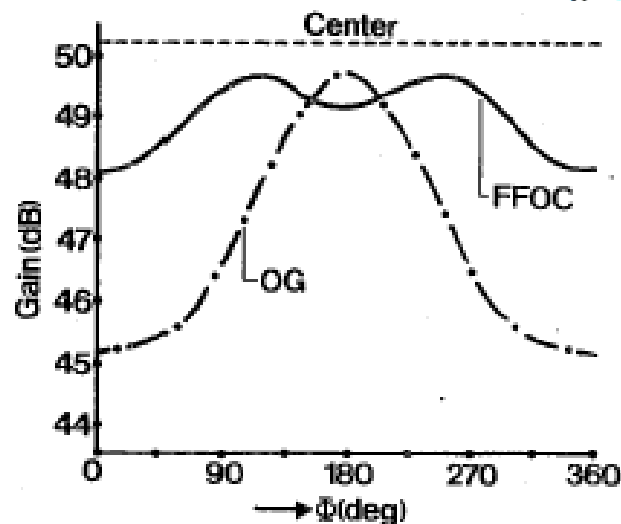


図 13 ビーム偏向による利得の変化  
 Fig.13 Scan characteristic of gain.

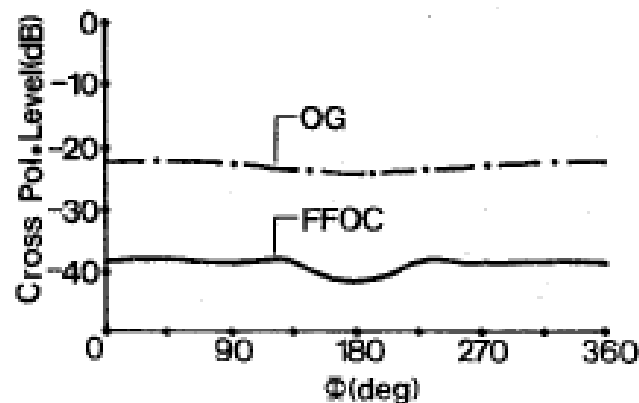
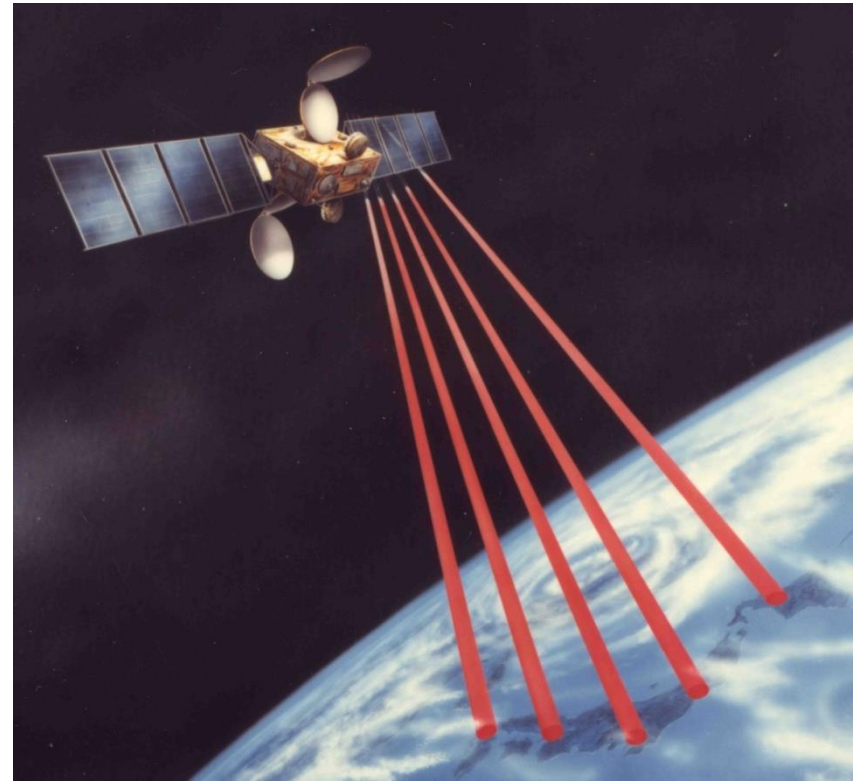
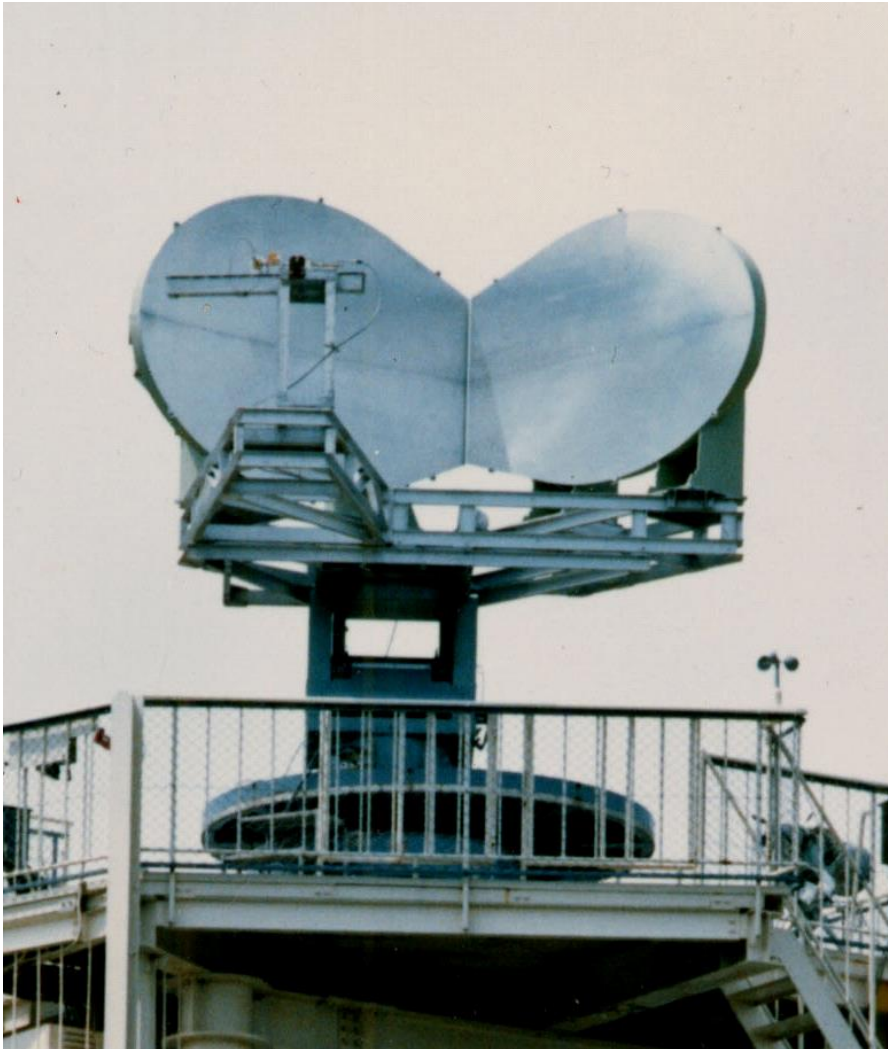


図 14 ビーム偏向による交差偏波レベルの変化  
 Fig.14 Scan characteristic of cross pol. level.

# Front Fed Offset Cassegrain (FFOC) Antenna



# FFOC Antenna

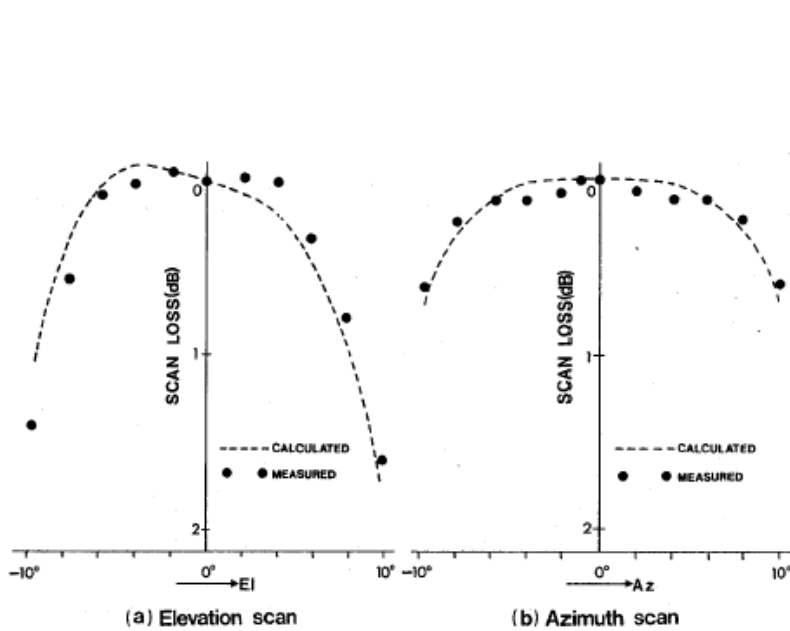


図 17 ビーム偏向による利得低下  
Fig.17 Scan loss of experimental model.

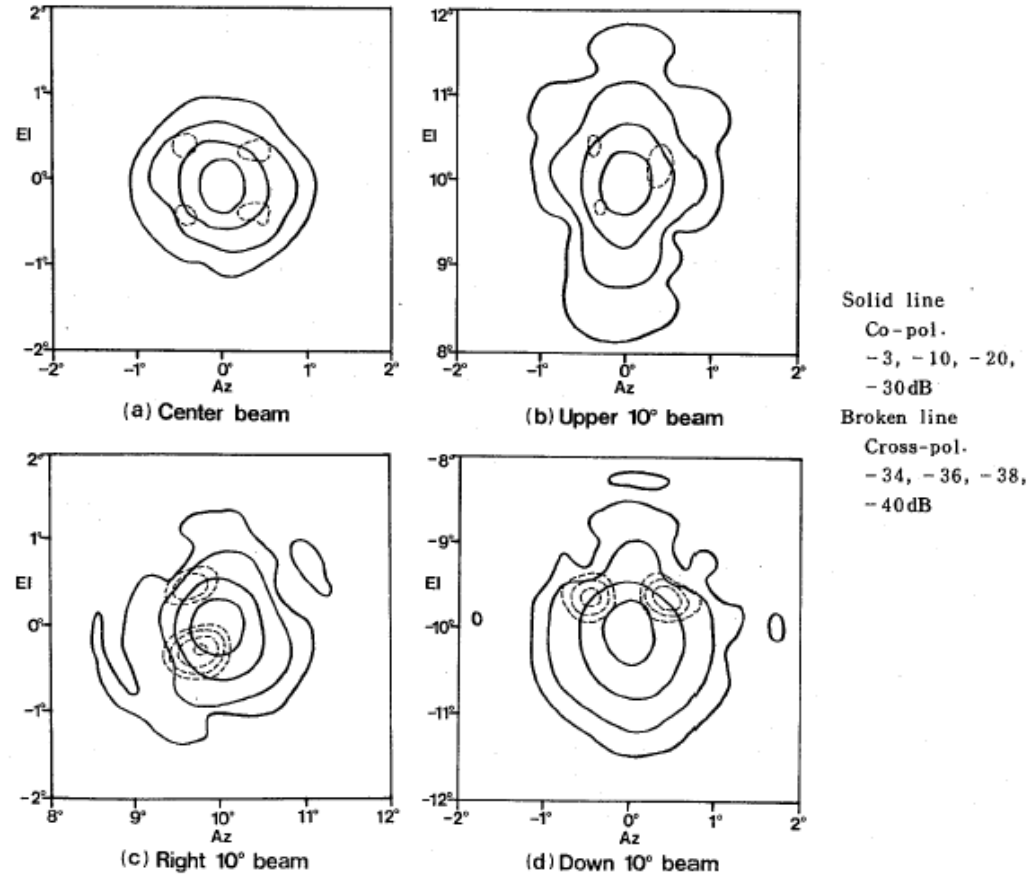


図 18 ビーム偏向時の放射パターン  
Fig.18 Measured radiation patterns.

# マルチビームアンテナ ( '90年代)



## 三菱電機のアプローチ

①二次元にビーム偏向できる双焦点アンテナ(本間)

厳密解を求めることができる中心断面における鏡面から全体の鏡面を近似的に求めた。

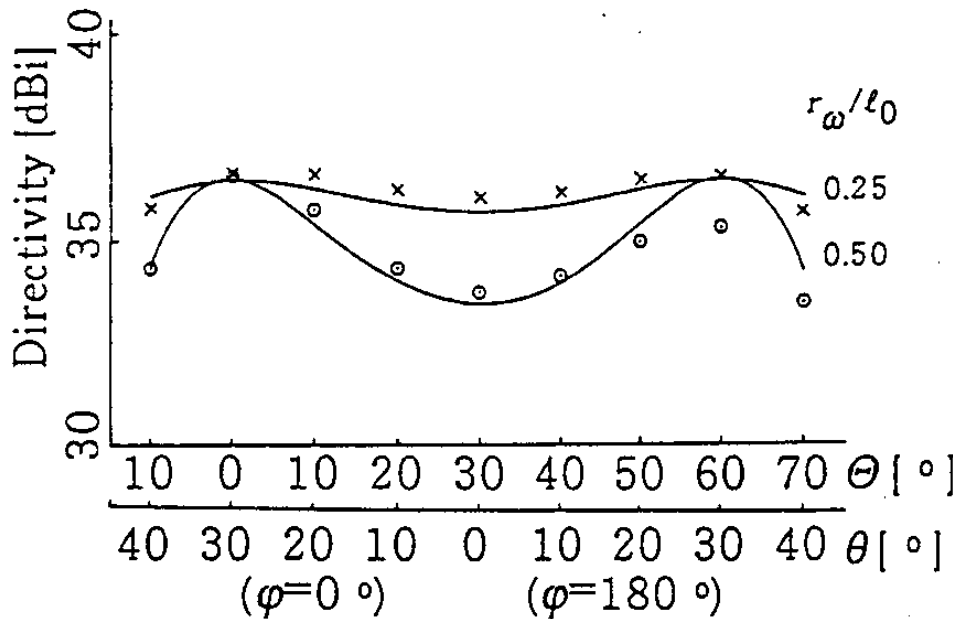
②INTELSAT R&D「INTEL-193」(牧野)

- ・鏡面修整オフセット複反射鏡アンテナ
- ・フロントフィードオフセットカセグレンアンテナ

③大分離角マルチビームアンテナ(片木, 内藤)

# 一次放射器偏位量と利得変化

パラボラアンテナにおいて一次放射器の位置を焦点から大きく離れた場合，下図に示すように収差の発生を小さくできることが理論的に証明されている。



Aperture diameter  $2r_\omega = 25\lambda$        $\theta_0 = 30^\circ$

— : Gain reduction due to astigmatism, aperture amplitude taper, and spillover is included.

○ × : PO results

# CS/BS放送受信アンテナ



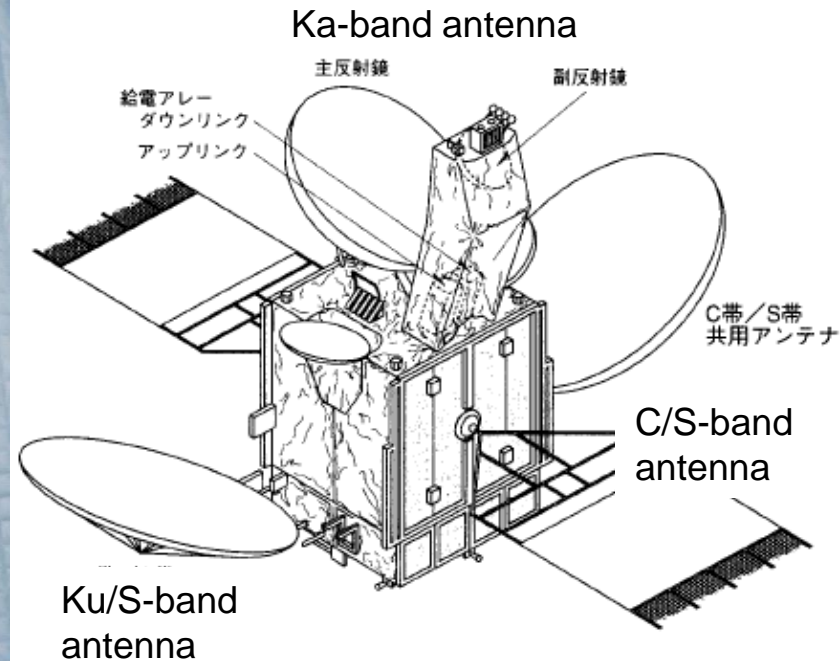
パラボラアンテナにおいて一次放射器の位置を焦点から大きく離れた場合、図に示すように収差の発生を小さくできることが理論的に証明されている。CS/BS放送受信アンテナは、この性質を利用したアンテナであり、約60°離れた2つの方向からの電波を高効率で受信できる。



# N-STAR Ka-band Offset Gregorian Antenna



2.2m offset Gregorian antenna  
Launched in 1995





# Multibeam Configuration

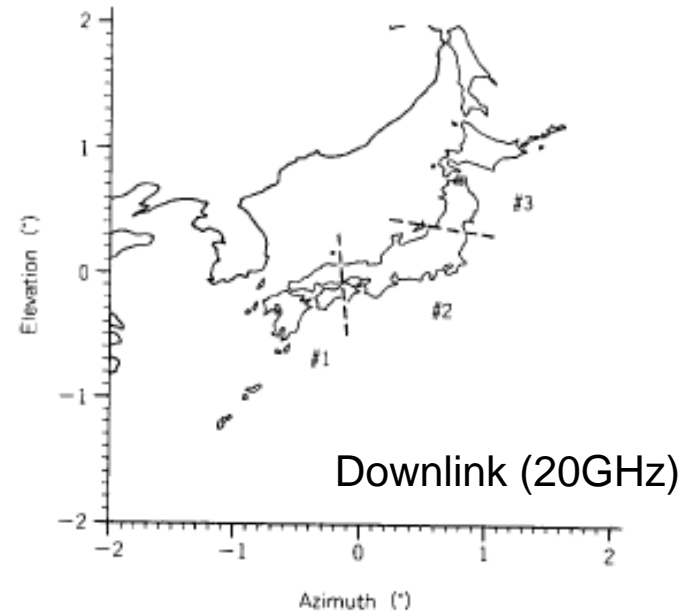
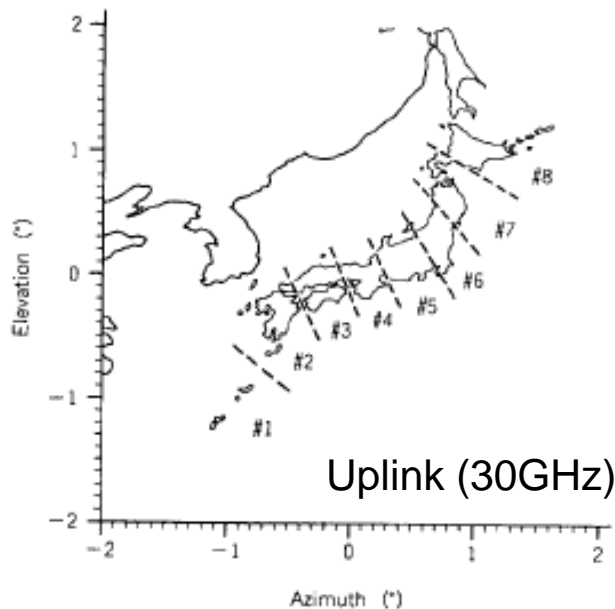


## Uplink (30GHz band)

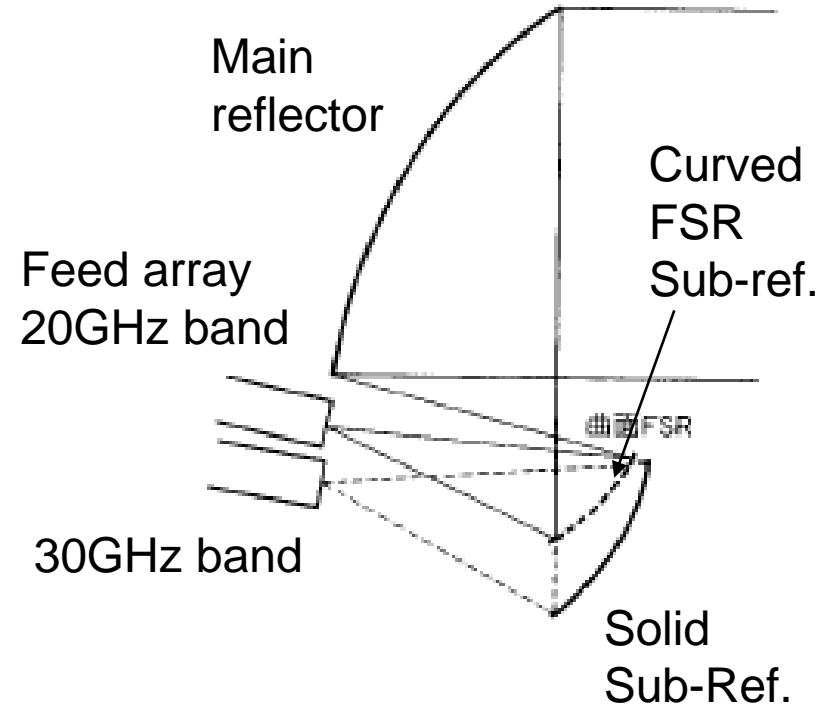
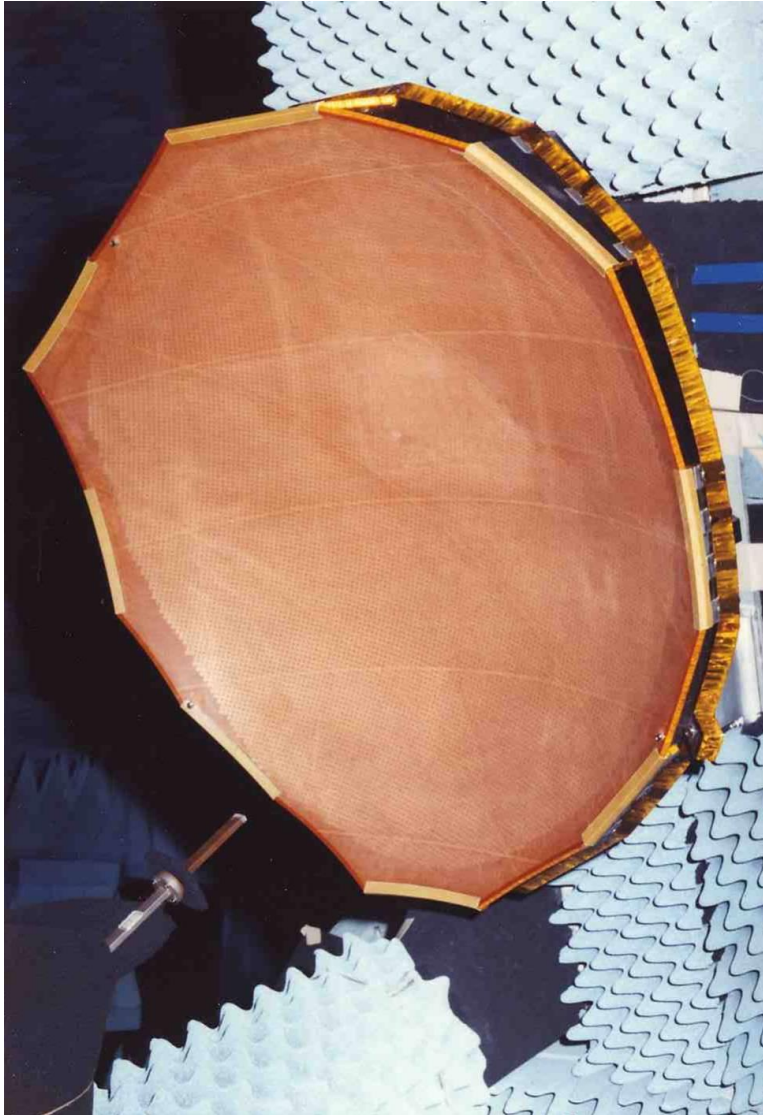
Beam	Multibeam (8 beams)								Shaped beam (1beam)
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	
Frequency	f1	f2	f3	f4	f1	f2	f3	f4	27.0 - 28.2GHz
	28.3 - 30.4GHz								
Polarization	LHCP								

## Downlink (20GHz band)

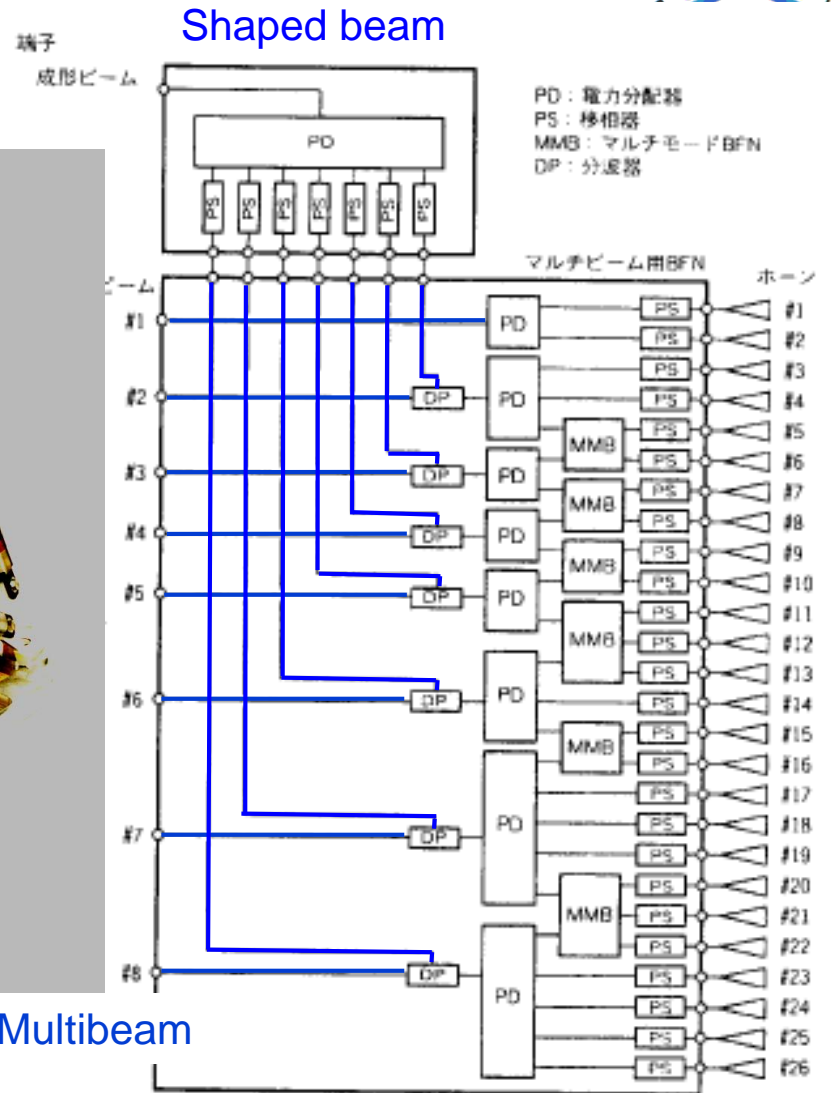
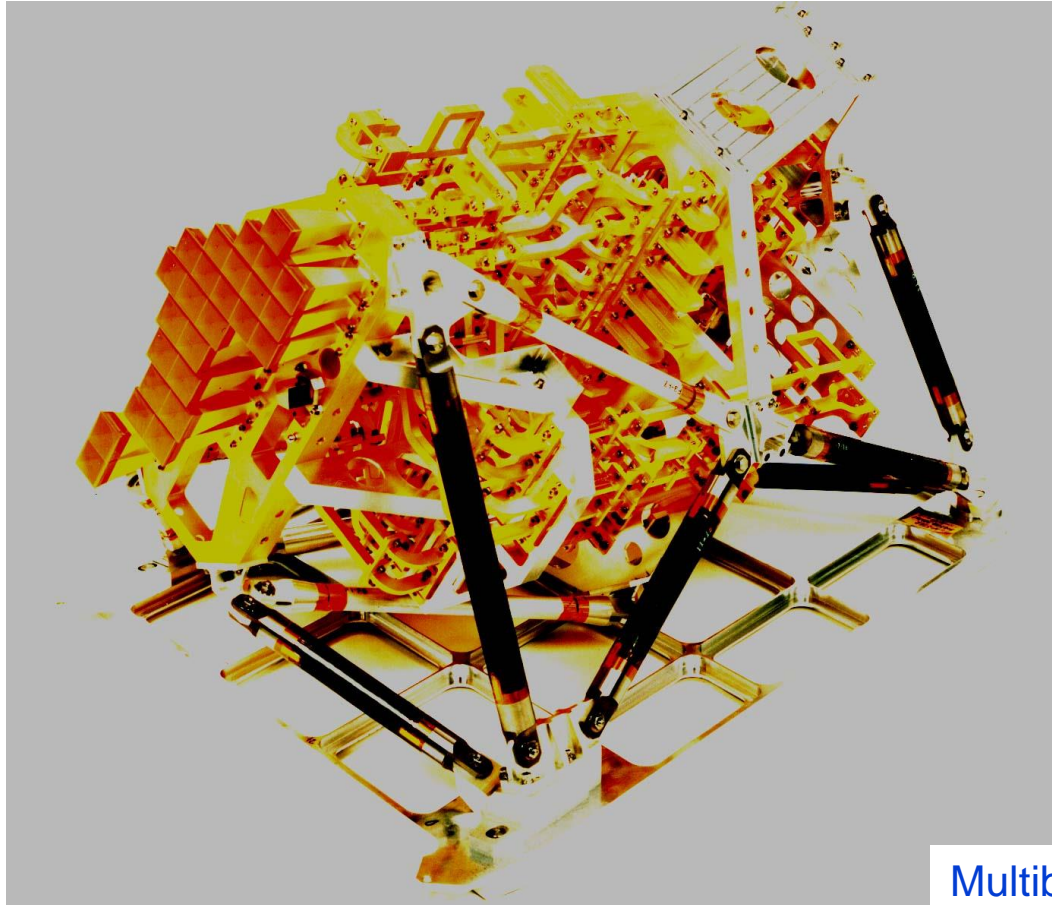
Beam	Multibeam (3 beams)			Shaped beam (1beam)
	#1	#2	#3	
Frequency	f5	f6	f7	17.8 - 18.4GHz
	18.5 - 20.1GHz			
Polarization	RHCP			



# N-STAR Ka-band Frequency Selective Subreflector



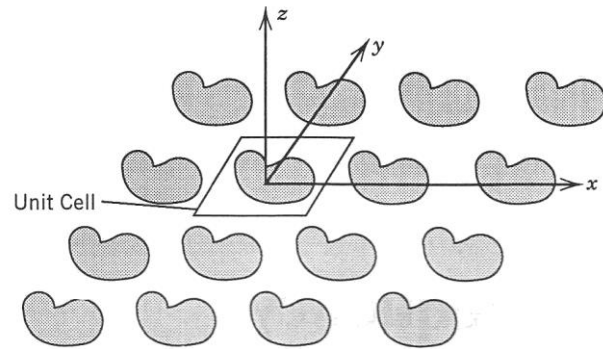
# N-STAR 30GHz-band Feed Network



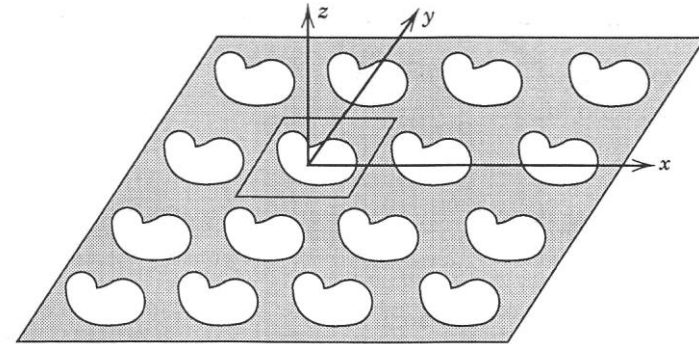


# 周波数選択鏡面

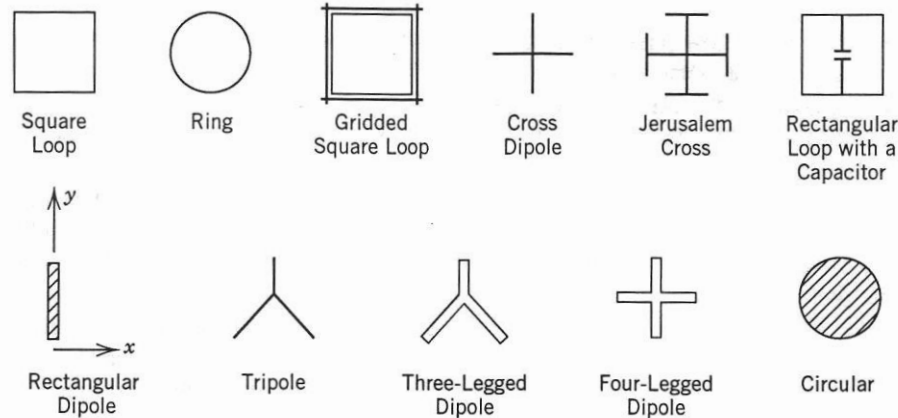
# 周波数選択鏡面の種類



(a) パッチ型

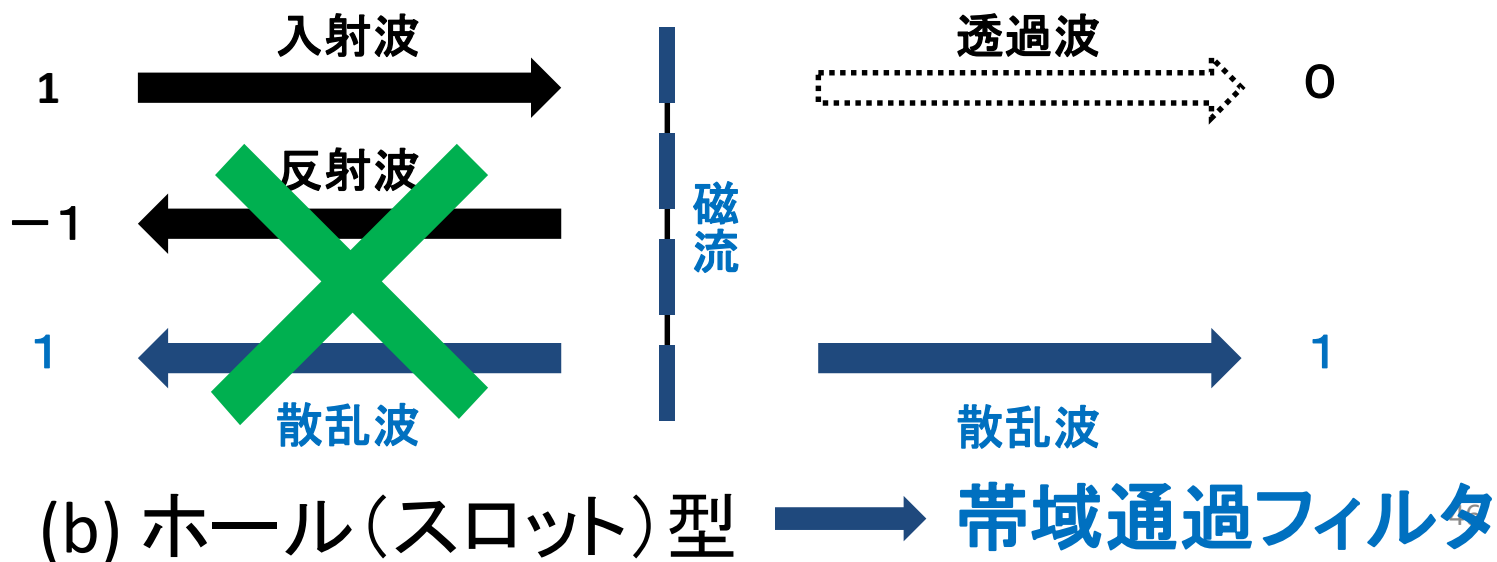
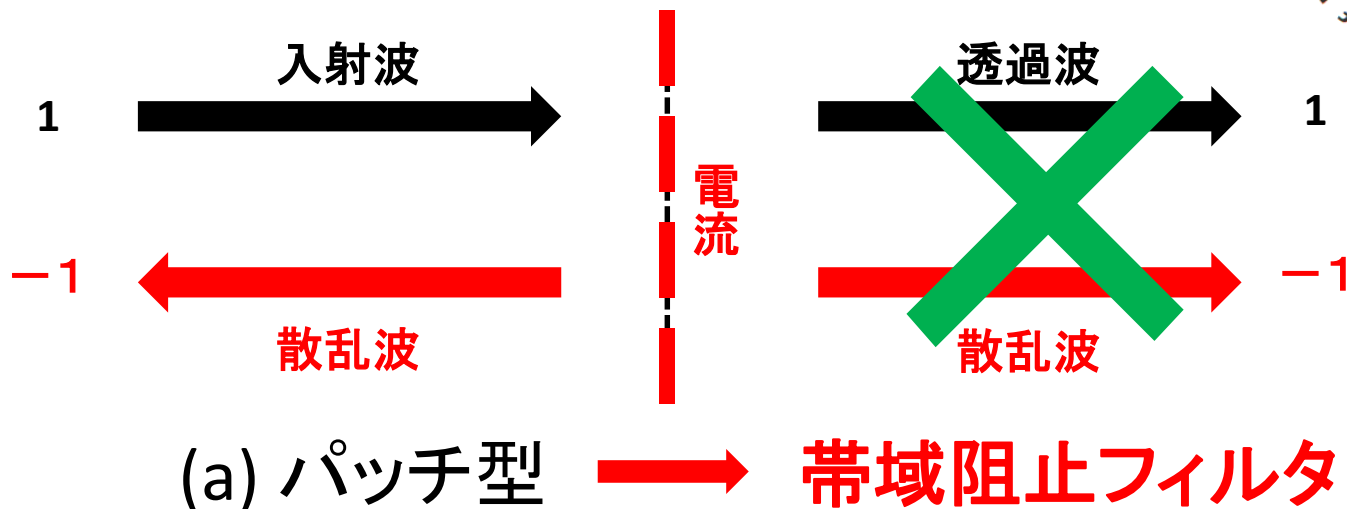


(b) ホール(スロット)型

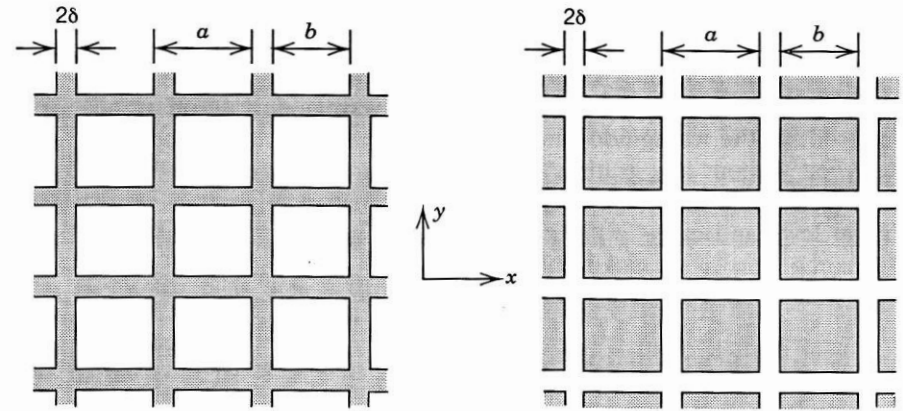
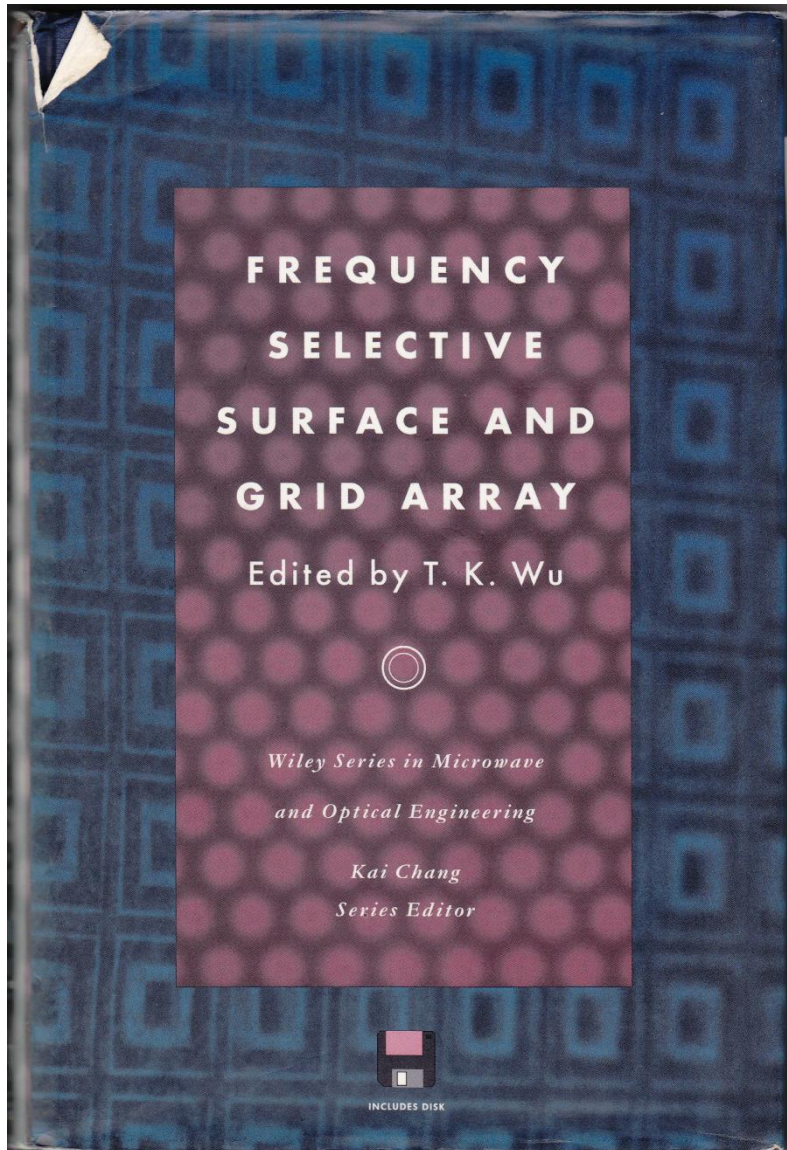


## 共振素子の形状

# 周波数選択鏡面の動作原理



# 周波数選択鏡面の誤った(?)解釈



Shaded Area Is Metal

(a) High-Pass Aperture Element

(b) Low-Pass Patch Element

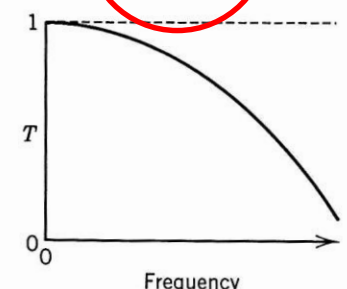
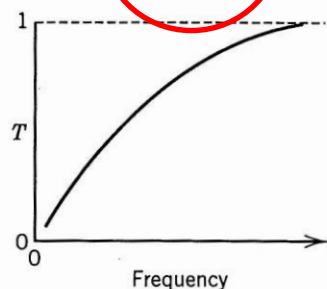


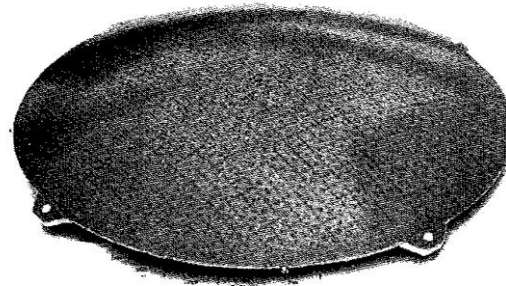
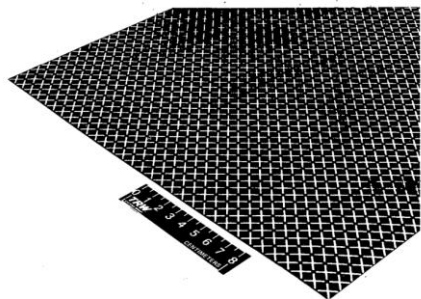
FIGURE 1.2 Aperture (a) and patch-element FSS (b).

J. A. Arnaud and F. A. Pelow, 'Resonant-grid quasi-optical diplexers,' BSTJ, 54, 263-283, 1975.  
がオリジナル?

# 周波数選択鏡面 ( '70年代)

## 世の中のアプローチ

- ・等価回路による近似式, 実験式: J. A. Arnaud他(1975)
- ・Floquet Modeとモーメント法を組み合わせた解析  
誘電体を含まない解析: C. C. Chen他(1973)  
誘電体(1層)を含む解析: J. P. Montgomery(1975)
- ・カセグレンアンテナの副反射鏡にFSRを適用: V. Agrawal(1979)  
誘電体を含む曲面FSRを副反射鏡とするカセグレンアンテナ  
共振素子はクロスダイポール(直交2偏波共用)  
FSRはMontgomeryの方法で解析
- ・多段構成FSRの解析: 岩田(1984)  
各FSRはMontgomeryの方法で解析, FSRとFSR間の誘電体をFマトリクスに  
置き換え, 縦続接続により解析





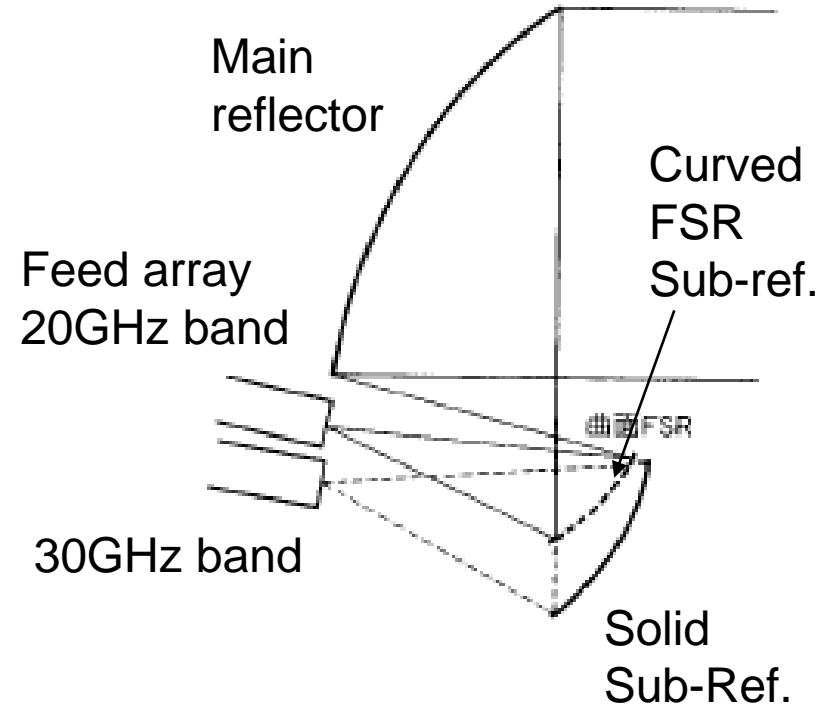


# 周波数選択鏡面 (‘80～90年代)

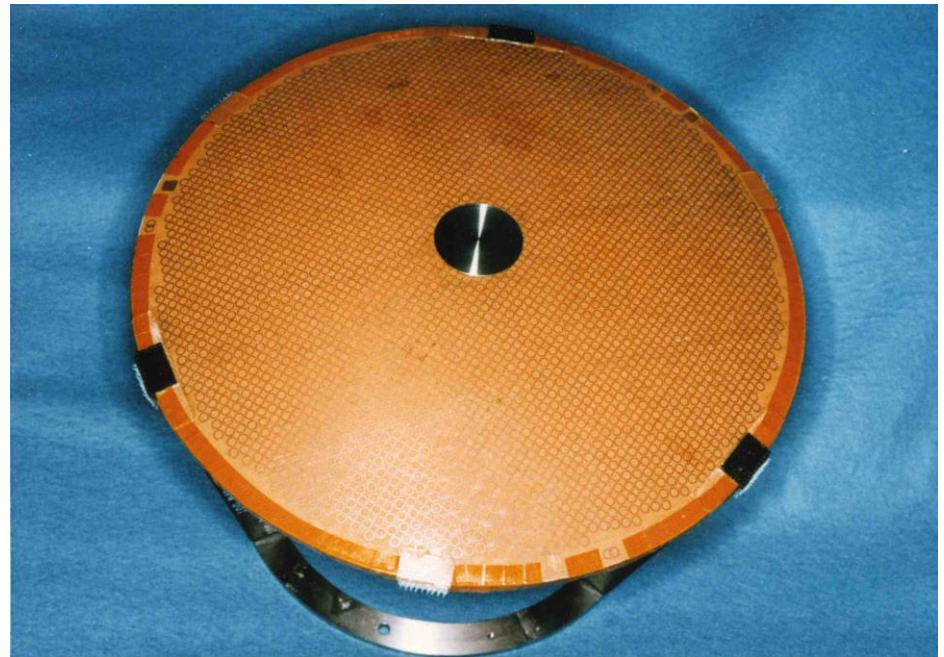
## 三菱電機のアプローチ

- ・多層誘電体中のFSR解析(1985頃)  
Montgomeryの方法を拡張し, 多層誘電体の任意の不連続面にFSRがある場合についても解析できるようにした.
- ・3層メアンダーライン円偏波発生器(1988)  
岩田氏の設計・解析法を適用
- ・各種地球局アンテナに適用(1990年頃)  
臼田64mアンテナ:S/X帯共用  
KSC20mアンテナ:S/X/Ka帯共用
- ・曲面FSR設計法(1990年頃)
- ・各種衛星搭載アンテナに適用  
N-STAR Ka-band(1995年)  
ADEOS S/Ka-band Antenna(1996年)

# N-STAR Ka-band Frequency Selective Subreflector



# ADEOS S/Ka-band Antenna



# むすび



1970～80年代の反射鏡アンテナ研究につき，三菱電機の研究開発を中心に報告した。

- ・鏡面修整オフセット複反射鏡アンテナ
- ・マルチビームアンテナ
- ・周波数選択鏡面

上記はいずれも，当時の花形研究テーマであり，世界中の著名な研究者たちが関わっていた。その割に，国内研究者の数は少なく(電電公社，KDD，電波研，東工大，NEC，東芝，三菱電機くらい)，全国大会の会場は寂しかった。

個人的には，多少なりとも上記すべての研究に関わり，実用化に寄与できたことは幸運であったと思っている。