

川口則幸教授 退任記念ワークショップ  
「VLBIとその展望」

# VERAアンテナ開発 ～2ビームアンテナの実現～

2014年6月3日

三菱電機株式会社  
通信機製作所  
松本 操一

1. はじめに
2. 三菱電機の宇宙観測機器開発の歩み
3. VERA2ビームアンテナ開発
4. エピソード(名言(迷言?))
5. 終わりに

# 1. はじめに

川口則幸先生の退官記念ワークショップで、このような機会をいただき、誠にありがとうございます。

本稿では、先生と最も関わりの深い、また印象に残る、

## 「VERA 2ビームアンテナの開発」

について、その開発概要を御報告するとともに、最後にVERA他でのエピソードを交え、紹介させていただきたいと思います。

## 2. 三菱電機の宇宙観測機器開発の歩み



東京大学  
18mφアンテナ



KDD  
20mφアンテナ

**1960年代** アンテナ開発黎明期  
カセグレンアンテナ、自動追尾技術の実用化



サウジアラビア32mφ



英国32mφ

**1970年代** 大型アンテナ技術の確立  
高精度鏡面パネル技術の確立(インテルサット標準A局)

高精度追尾技術の確立  
高精度測距測角技術の確立



ISAS深宇宙  
探査用64mφ



野辺山45mφ  
電波望遠鏡

**1980年代** 大型アンテナ技術の確立  
超大型駆動制御技術の確立



野辺山10mφ  
ミリ波干渉計

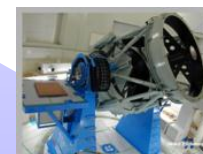
**1990年代** 超高精度アンテナ技術の確立  
指向精度、鏡面精度の高度化



ぐんま望遠鏡



ハワイ島  
すばる望遠鏡



西はりま  
なゆた望遠鏡

**2010年代**  
大型国際プロジェクト  
への参画  
ALMA, TMT等



ISAS Ebina  
10mφアンテナ



科学衛星追跡用  
34mφ

VERA20m  
2ビーム  
電波望遠鏡



チリ・アタカマ砂漠  
ALMA/ACA



サブミリ望遠鏡  
ASTE



宇宙太陽望遠鏡  
SOLAR-B



ハワイ島  
超大型光学望遠鏡  
TMT

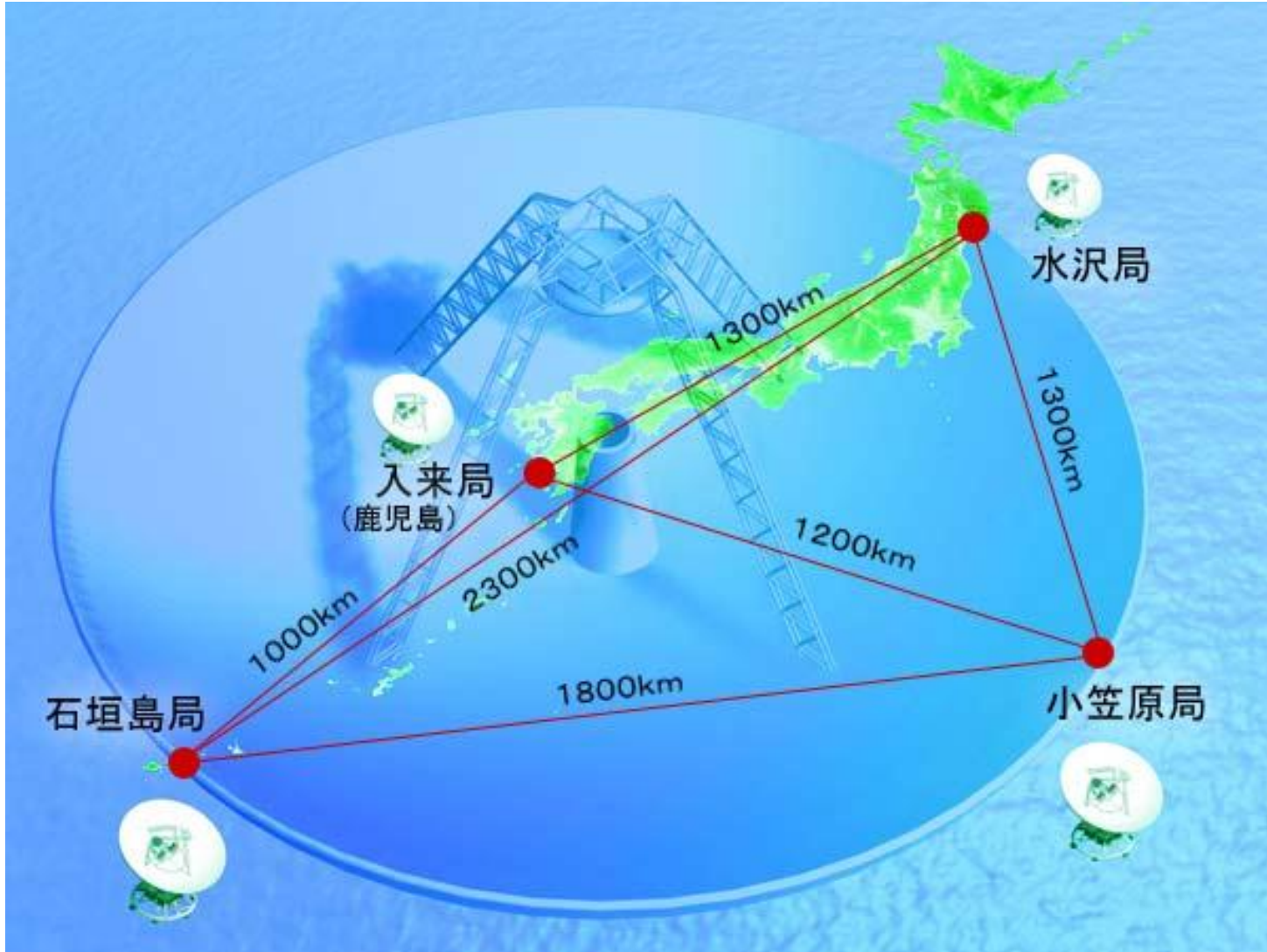


電波望遠鏡

光学望遠鏡

衛星通信/管制(参考)

# 3. VERA2ビームアンテナ開発



三菱電機株式会社 【引用】 国立天文台殿HP (<http://veraserver.mtk.nao.ac.jp>)

#### (1)サイエンスからの要求

数度離れた任意の2天体を同時に観測することで、大気の揺らぎによって発生する遅延時間の揺らぎを補償し、2天体の位置関係を正確に観測するためのアンテナが必要！！

- |              |                     |
|--------------|---------------------|
| (1)周波数       | : 2/8/22/43/(86)GHz |
| (2)アンテナ口径    | : 15m~25m級          |
| (3)最大離角      | : 5° (~10° )        |
| (4)2ビーム間光路長差 | : 50μm以下            |



サイエンス要求は、十分理解したが……！

- ・50~100ビーム幅(例: 22GHz/20mの場合)もビームを振ったら、シングルディッシュでは利得が大幅に低下してしまふ…。
- ・熱/風/自重で、構造はmm単位で変形し、光路長差が生じてしまふ…。

### 3. VERA2ビームアンテナ開発

#### (2) どんなアンテナ形式なら実現できる？

- 【案A】 シングルビームアンテナ × 2台
- 【案B】 シングルビームアンテナ + スイッチング
- 【案C】 2ビームアンテナ



		利得	同時観測	2つの天体観測に対する光路長変化				総合評価 (課題他)
				自重	風荷重	熱変形	指向角度ずれ	
案A	シングルビーム × 2台	○	○	△	△~×	△	○	×
				2台のアンテナの変形を揃える必要あり	2台のアンテナの設置場所での風の動きが異なる	2台のアンテナの設置場所での日射、温度変化等がどの程度影響するか		・自重/風/熱による光路長差の影響は無視できない。(mm単位) ・特に風の影響は、2つのアンテナ間で補償することが難しい。
案B	シングルビーム + スイッチング	○	△~×	△	△	○	○~△	△
			スイッチング時間が観測にどう影響するか	スイッチング時の相対変化のみ	スイッチング時の相対変化のみ		スイッチング時の静定により実観測時間が影響	・同時観測は困難。 ・スイッチングの高速化の実現 ・その時間ずれがサイエンス要求に対する許容されるか。
案C	2ビーム	△~×	○	△	△	○~△	○~△	△
		離角が大きくなると、大幅な利得低下が発生		構造全体の変形の影響はキャンセルされ、2ビーム間の相対差のみが影響	2ビーム間の相対差のみが影響	2ビーム間の相対差のみが影響	開口の波面収差が大きいと影響が大きくなる	・離角が大きくなった場合、利得低下を最小化するアンテナ構成の実現 ・2ビーム間の光路長差の補償方式の実現。

## (3) シングルビームアンテナ＋スイッチング方式【案B】

### 【課題1】高速スイッチングの実現

最大速度/加速度をできる限り上げて、高速スイッチングを実現できるか。

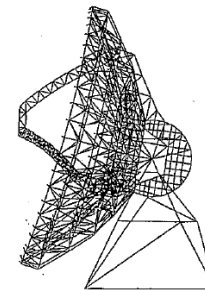
速度UP : 駆動機構等の配置で決まる限界  
(特に、高仰角になるほど、AZは高速駆動必要)  
指向誤差の増大(静定時間)

加速度UP : 駆動トルクの増大による耐久性から決まる限界

### 【課題2】光路長変動(自重/風荷重/熱変形/指向誤差他)の抑圧

スイッチング時の光路長変動の主要因

- ・自重変形(スイッチング時の相対差)
  - ・風荷重による変形
  - ・熱変形
  - ・指向角度ずれ
- 等



風荷重による変形(例)

(※)変形量は拡大して表示

各種シミュレーションを実施した結果、「シングルビームアンテナ＋スイッチング」では、光路長変動はある程度許容範囲に近いものの、観測上の制約が非常に大きい。

- ①天頂付近での観測(スイッチング)に大きな制約！！
- ②観測周期をもっと上げる必要あり！！

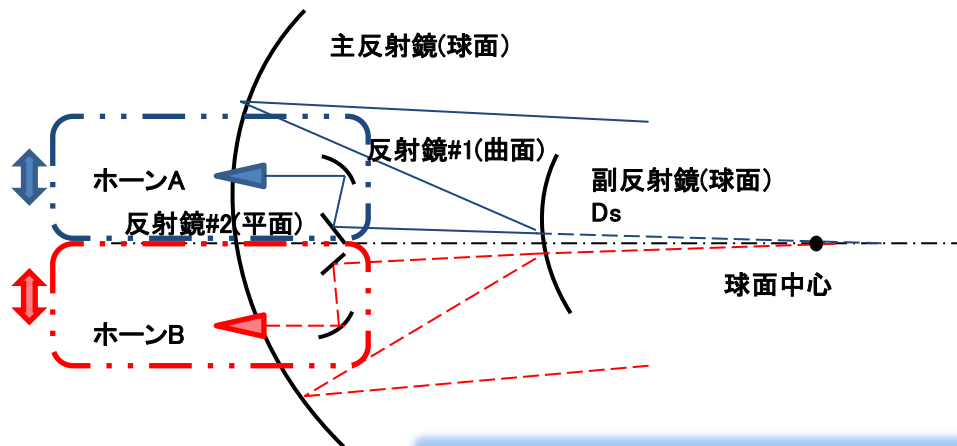


## (4) 2ビームアンテナ【案C】

**【課題1】大きな離角時の利得低下を最小化するアンテナ方式の実現**  
(ビーム幅の50~100倍(※)もビームを振って、その時の利得低下をどこまで抑えられるか。)

(※)例: 開口径20m、周波数22/43GHzの場合、ビーム幅約0.05° /約0.025°

### (案C-1) 2枚球面鏡アンテナ



#### (1) 概略寸法

- ①副反射鏡 : 約7mφ  
(主鏡比約30%)
- ②アンテナ高さ : 約30m
- ③副反射鏡変位量 : 約80mm / 約0.2°

#### (2) 概略性能

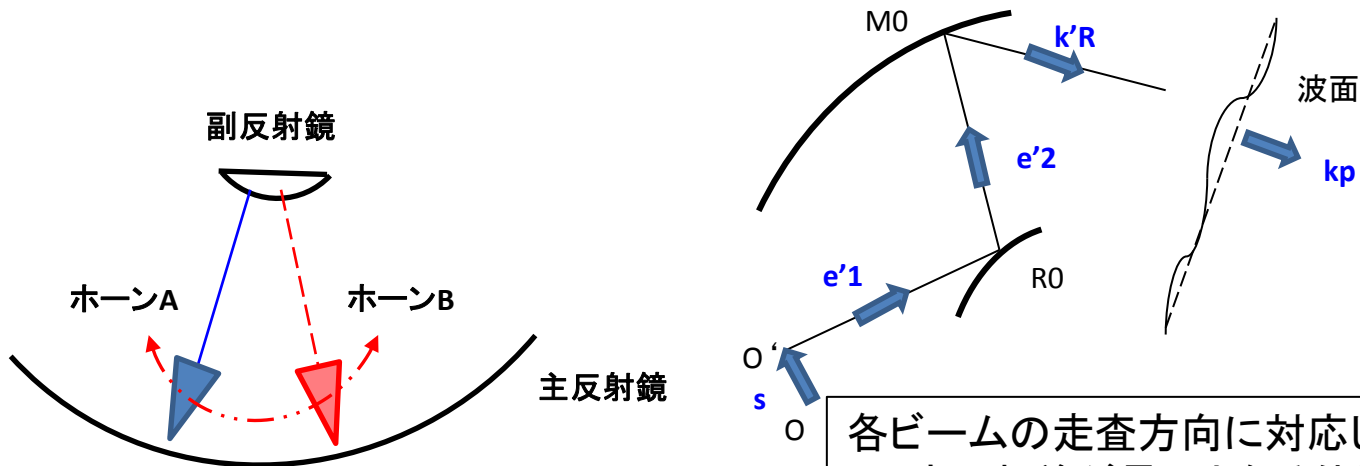
- ①開口能率 : 22GHz帯 約40%  
43GHz帯 約20%
- (最大ビーム離角 5° の場合)

副反射鏡が主反射鏡の約30%必要で、

- ・自重変形が大きくホモロジー補正が必須で、構造的にも実現困難。
- ・副反射鏡によるブロッキング損失が大

三菱電機株式会社

(案C-2)ホーン位置を最適化駆動したカセグレン形式の2ビームアンテナ



各ビームの走査方向に対応して、波面収差が最小となる位置(O')及び方向(e'1)を選定。

→ ホーンの位置及び放射方向を最適化し、収差を最小化するアンテナが実現可能  
(2° 離角時の利得低下 約0.5dB (@22GHz)、約1.0dB (@43GHz))

#### 【課題2】光路長差の補償方式の実現

(2ビーム間の光路長差を50 $\mu$ m規模に抑えられる補償方式が実現できるか)

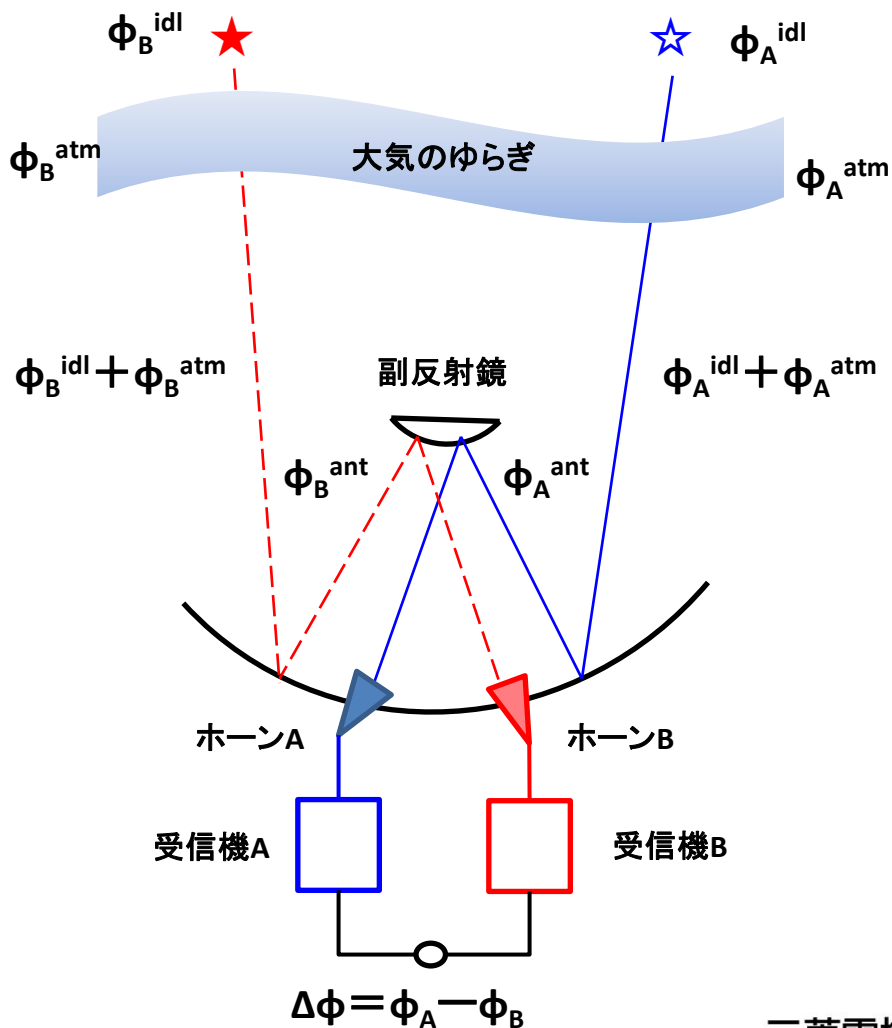
＜2ビーム間の光路長変動の主要因＞

- ・自重変形(2ビーム間の相対差)
- ・風荷重による変形
- ・熱変形
- ・指向角度ずれ                      等

 各種シミュレーションの結果、2ビーム間にmm単位の光路長変動が避けられない。

⇒光路長差を、1/10～1/20規模に低減できる補償方式の実現がキー

## <2ビームにおける大気揺らぎの補償>



・観測天体の受信位相

$$\phi_A = \phi_A^{idl} + \phi_A^{atm} + \phi_A^{ant} + \phi_A^{RX}$$

・基準天体の受信位相

$$\phi_B = \phi_B^{idl} + \phi_B^{atm} + \phi_B^{ant} + \phi_B^{RX}$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \Delta\phi &= \phi_A - \phi_B && \text{: 観測位相差} \\ &= (\phi_A^{idl} - \phi_B^{idl}) && \text{: 両天体の位相差} \\ &\quad + (\phi_A^{ant} - \phi_B^{ant}) && \text{: アンテナの位相差} \\ &\quad + (\phi_A^{RX} - \phi_B^{RX}) && \text{: 受信機の位相差} \end{aligned}$$

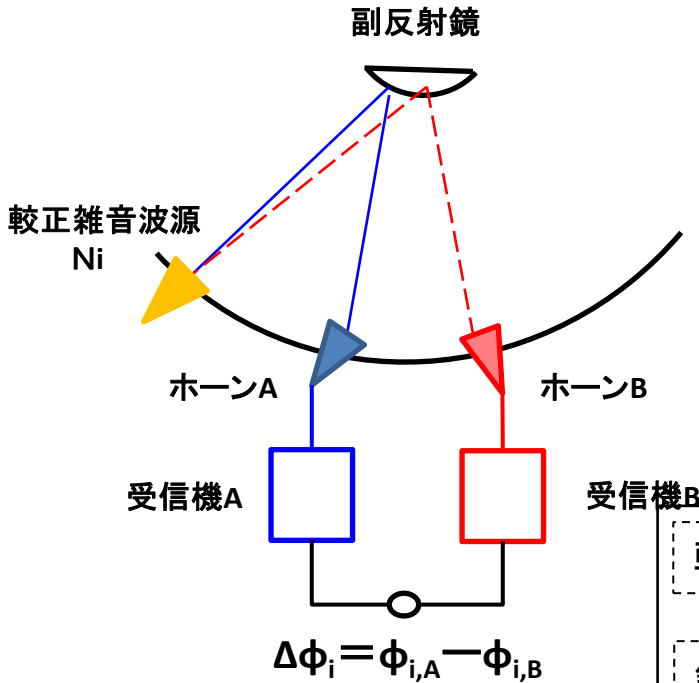
(観測天体近傍に基準天体があり、同時受信により、大気のゆらぎの誤差がほぼ等しい場合)



「アンテナの自重変形等により2ビーム間で生じる位相差 ( $\phi_A^{ant} - \phi_B^{ant}$ )」を、何らかの方法で校正できれば、両天体の位相差を測定可能

【引用文献】高林、草壁、牧野、本間、川口、“少数の較正雑音波源を用いた自重変形による副反射鏡変位量の一推定法”、信学技報、A・P2001-6,PP39-44,2001

## <ホーンオンディッシュ法>



主反射鏡鏡面上に広帯域で電波を放射する「校正雑音電波源」(Ni)を配置し、2つの受信機で受信した信号を較正する方式。

・校正雑音電波源から送信時の受信位相差

$$\begin{aligned} \Delta\phi_i &= \phi_{i,A} - \phi_{i,B} \\ &= (\phi_{i,A}^{ref} - \phi_{i,B}^{ref}) : \text{誤差がない場合の位相差} \\ &\quad + (\phi_{i,A}^{ant} - \phi_{i,B}^{ant}) : \text{鏡面変形等による位相差} \\ &\quad + (\phi_A^{RX} - \phi_B^{RX}) : \text{受信機の位相差} \\ &\quad (\text{天体と同時受信すれば、受信機の位相差は、天体受信時と同じ}) \end{aligned}$$



校正雑音波源からの、鏡面変形等による位相差  $(\phi_{i,A}^{ant} - \phi_{i,B}^{ant})$

鏡面変形量/変位量(2ビーム間に位相差を発生させる成分)を解析で算出。(主要な変位成分 : 副反射鏡:  $\Delta X_s, \Delta \theta_{ys}$ )

鏡面変形量/変位量をもとに、2つの天体から受信した場合の、鏡面変形等による位相差  $(\phi_A^{ant} - \phi_B^{ant})$  を算出

**【課題1】大きな離角時の利得低下を最小化するアンテナ方式の実現**  
(ビーム幅の50~100倍ビームを振った時の利得低下をどこまで抑えられるか。)

⇒「ホーン位置を最適化駆動したカセグレン形式の2ビームアンテナ」  
を開発・採用することにより、  
【2° 離角時の利得低下：約0.5dB(@22GHz)、約1.0dB(@43GHz)】  
を実現

**【課題2】光路長差の補償方式の実現**

(2ビーム間の光路長差を50 $\mu$ m規模に抑えられる補償方式が  
実現できるか)

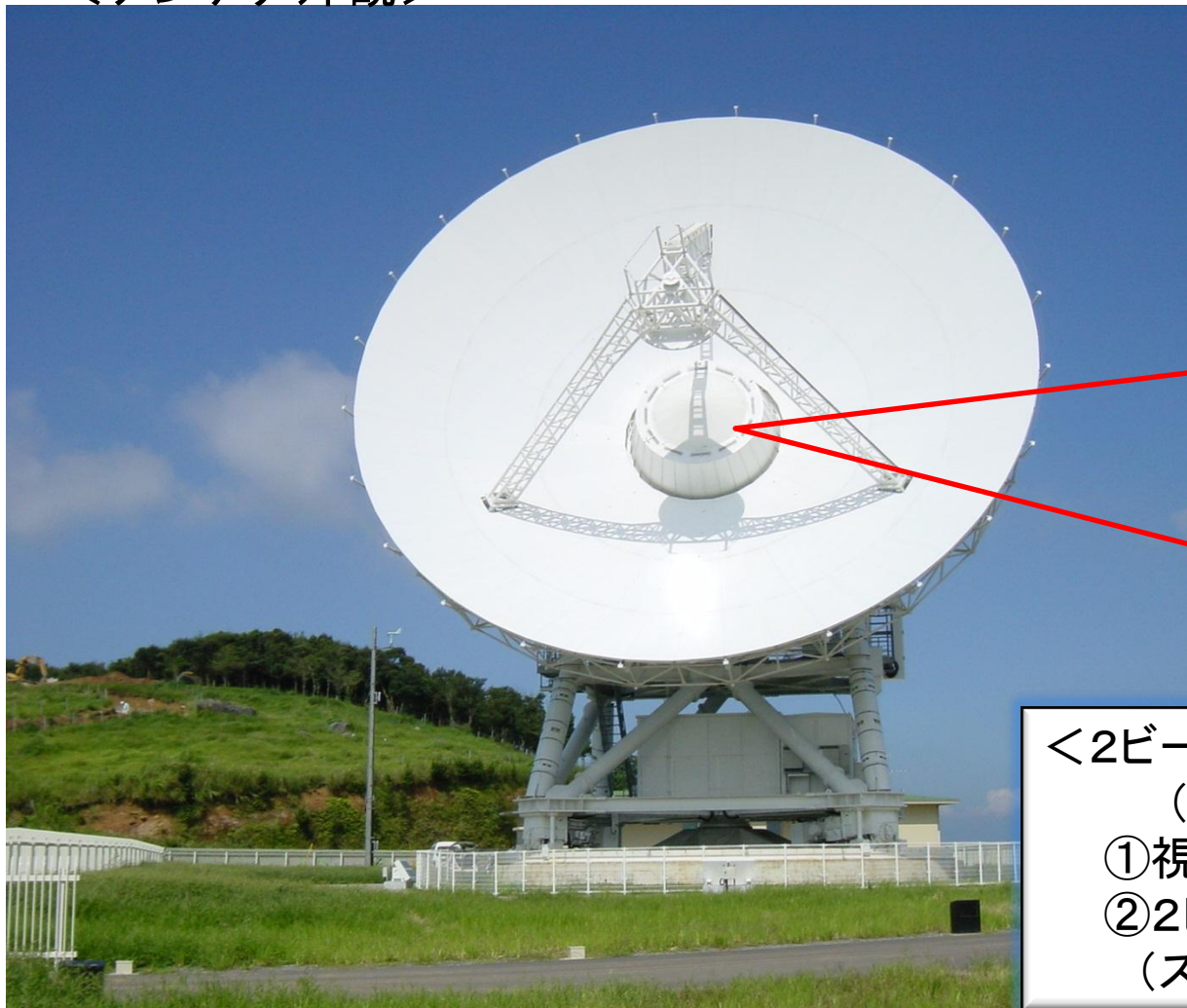
⇒「ホーンオンディッシュ法」(校正雑音電波源によるアンテナ変形  
による位相補償法)の開発・採用により、  
【2ビーム間の光路長差：50 $\mu$ m以下】  
を実現。

 世界でも類を見ない「VLBI用2ビームアンテナ」が実現！！

三菱電機株式会社

### 3. VERA2ビームアンテナ開発

#### <アンテナ外観>



- <2ビーム回転架台  
(@上部機器室)>
- ①視野回転駆動部
  - ②2ビーム駆動部  
(スチュアートプラットフォーム)

## 4. エピソード(名言(迷言?))



(1)「どうしたらできる? こんなアイデアはどう?」と畳み掛けて? 質問が。

(VERA2ビームアンテナ他)

⇒技術とアイデアと知恵、そして執念を出せば、必ず実現できる。



(2)「主鏡の端をトラックで引っ張って、自重変形を測定しよう!」

(HALCA 位相基準信号伝送システム用 10mアンテナ(宇宙科学研究所 臼田))

⇒実測・実証し、理論を検証する重要性



(3)「日本全国 植アンテナ? 計画」

(茨城/山口観測局30mアンテナ

(KDDI 衛星通信アンテナの電波望遠鏡化))

⇒アイデアと知恵を徹底的に出せば、必ず実現できる。



【写真引用】 国立天文台殿HP  
(<http://veraserver.mtk.nao.ac.jp/VERA/kawaguchi>)

三菱電機株式会社



VERAのアンテナ開発等を通じ、  
目的に対してやりたいこと、やるべきことを何としても  
実現するとの強い意志と執念によって、知恵と工夫が生まれ、  
そして技術がさらに進歩すること。  
を、身をもって経験。  
これまでの、川口先生の種々御指導に感謝！！



【写真引用】  
国立天文台水沢観測所  
VERA10周年記念誌