

## 5-5 広帯域アンテナの開発

### 5-5 Development of Wideband Antenna

氏原秀樹

Hideki UJIHARA

鹿島宇宙技術センター 34 m アンテナ (鹿島 34 m アンテナ) のような既存の大型カセグレンアンテナの受信帯域幅を低コストで拡大できる広帯域フィードと OMT (Orthogonal Mode Transducer: 直交偏波変換器) を開発した。これらを使用して広帯域化した鹿島 34 m アンテナと、同様に改造した 2.4 m の小型 VLBI 可搬局 MARBLE を用いて日伊間での VLBI (Very long Baseline Interferometer: 超長基線干渉計) による光格子時計の周波数比較実験を開始した。既存の様々なアンテナ光学系に適用可能な広帯域フィードの設計技術は電波天文や測地 VLBI への応用のみならず大気中の水蒸気量の精密測定や違法無線の監視、地球外文明探査など多くの用途が期待される。

Wideband feed and OMT (Orthogonal Mode Transducer) have been developed for Kashima 34 m. This system also enables low cost refurbishment of conventional Cassegrain reflector antennas. NICT has been started intercontinental VLBI Time and Frequency Transfer experiment of optical lattice clocks between Japan and Italy with refurbished Kashima 34 m and two 2.4 m antennas on each observatory. This wideband feed will be widely applicable for astronomy, geodetic VLBI, water vapor radiometer, field survey of illegal radiations, SETI, and more.

#### 1 まえがき

VLBI[1] は電波干渉計の一種であるが素子アンテナ間の距離が遠いため各局に原子時計を置き、これを基準信号として個々のアンテナで受信した銀河系外の電波星からの信号の位相を記録し、それらの相関処理を行うことで高分解能の天体観測、あるいはアンテナの精密な位置測定や原子時計の周波数比較を行うことができる。情報通信研究機構 (NICT) では、将来の「秒の再定義」候補となっている光格子時計の周波数比較に用いるための広帯域 VLBI システムを開発し、国内での実証を経て 2018 年から日本-イタリア (日-伊) 間での比較実験を始めた [2][3]。

このシステムは広帯域フィードとダイレクトサンプラ、広帯域バンド幅合成ソフト [4] を組み合わせた独自の開発の成果であり、独自の進化を遂げた生態系を有するガラパゴス諸島にちなんで Gala-V (ガラパゴス VLBI の略) という愛称がつけられている。Gala-V では鹿島 34 m アンテナのような集光力の高い大口径アンテナをハブとして十分な基線感度を確保し、比較したい原子時計を持つ研究機関には MARBLE と名付けた口径 2.4 m の移設が容易で低コストな小型アンテナを設置する。Gala-V の特徴は、高感度の大型アンテナ

と小型局との相関結果から小型アンテナ間の遅延時間差を得ることで大型アンテナの弱点である風や重力、温度変形による誤差を減じ、システムコストの低減と感度、利便性を両立させていることである。

近年では測地 VLBI での VGOS (VLBI Global Observing System) [5] や電波天文での SKA (Square Kilometre Array) [6] において、既に広帯域アンテナが前提となっている。測地 VLBI ではクエーサーなどの遠方天体からの連続波を用いるので、帯域が広がれば感度が向上し、精度が上がる。電波天文では受信機を切り替えることなく同時に複数の分子輝線やメーザの観測ができる、あるいは周波数ごとの天体像を同時に得られることが利点である。これらのプロジェクトでは開発済みの小型でビーム幅の広い広帯域フィードに合わせた 11-15 m クラスのアンテナを新規に建設し、受信機は冷却して高い感度を得ている。

VLBI 観測での基線における感度、すなわち SNR は式 (1) のように表される。

$$SNR \propto \sqrt{BT \frac{\eta_1 A_1 \eta_2 A_2}{T_{sys_1} T_{sys_2}}} \quad (1)$$

T は積分時間、T<sub>sys</sub> は温度に換算した受信機系の雑音電力、A はアンテナの開口面積、η は開口能率、

Bは受信帯域幅、添字の1と2は基線対となる個々のアンテナを示す。Tは大気や受信機、基準信号の「揺らぎ」で制限される。Aの拡大は大型アンテナでは実質不可能だが、既存の大型アンテナの感度向上を図るなら受信アンプを冷やして $T_{\text{sys}}$ を改善するより広帯域フィードを開発して帯域幅Bを桁で改善の方が費用対効果は高い。

受信機の雑音で最も支配的な初段アンプの雑音は3-14 GHzの製品を常温で使うと40 Kから60 K程度、4 Kでは1/10程度に下がるが冷凍機の搭載場所や保守・運用コストが必要になる。その上、受信機系の雑音にはアンプだけでなく大気や鏡面、フィードなど初段アンプに至る経路での熱雑音が数10 K程度加わる。他方、これまでせいぜい数10～数100 MHzだった帯域幅を10 GHz以上にしてもアンプの冷却と同程度にSNRを改善でき、フィードの開発に使う計算機とソフトウェアは4 K冷却受信機の1/3～1/5くらいの価格である。

鹿島34 mのような大型カセグレンアンテナ用の広帯域フィードが開発できたとして、小型局を相手とする基線でのSNRを考えてみる。10数mクラスのアンテナを使用するVGOSやSKAのアンテナの開口面積は鹿島34 mアンテナの1/4以下だが受信機は冷却されている。受信帯域幅が同じとするなら、鹿島34 mアンテナのような開口面積の大きなアンテナがハブであれば受信機が常温でもVGOSやSKAのアンテナと感度面では遜色ない。よって既存の大型アンテナを広帯域化してハブに利用するのがコストパフォーマンスの点で最善と考えられたので、Gala-Vではまず鹿島34 mアンテナ用の広帯域フィードを開発して感度向上を狙うことにした。

フィードアンテナ(以下、フィードと略す)はレフレクタアンテナやレンズアンテナなどの焦点に置かれ、フィード後端の端子から同軸ケーブルや導波管を介してアンプにつながる伝送線路と目標電波源からフィード開口面までの3次元の伝送路の間で、極力損失なく電磁波を仲介する役割を果たす(図1)。パラボラアンテナではフィードは放物面鏡の焦点に、カセグレンアンテナでは双曲面副鏡が作る2次焦点に置くと表現されるが、実際は波動光学で設計されるので無限遠方からの平面が作るのは焦「点」ではなく、中央のピークとそれを取り巻く同心環状の電力の集中した領域を持つ焦点像である。フィード内部の導波路と外の自由空間とのインピーダンス整合の必要からフィードの開口径は数波長を要することが多い。

レフレクタなどアンテナ光学系の一般的な使用周波数の上限は鏡面誤差が波長の1/10程度になる周波数、下限は鏡面の大きさが波長の10倍程度となり幾何光



図1 パラボラアンテナ(左)とカセグレンアンテナ(右)の例  
赤丸の中がそれぞれのフィードアンテナ  
左: NICT本部(小金井)2号館屋上に設置した当初のMARBLE2(口径1.5 m)  
右: 同所で改修後のMARBLE2(口径2.4 m)

学近似が悪化する周波数と考えてよく、多くの場合、使用可能な最大最小周波数の比は2から10を超える。よって本項ではアンテナの広帯域化でボトルネックであった、広帯域フィードの研究開発に焦点を当てる。周波数帯は、古くから無線通信やレーダー、電波天文や測地VLBIなどで広く使われている周波数1 GHzから100 GHz程度、すなわちマイクロ波からミリ波の領域を対象としている。送受信アンプや信号処理装置は半導体技術の進展により既にフィードよりも十分に広帯域なものが利用できるし、レフレクタやレンズなどのアンテナ光学系についても十分な設計理論が確立され、多数の良書がある[7]ので割愛する。

## 2 広帯域フィードの開発

### 2.1 これまでの状況

フィードは、送信あるいは受信アンプにつながる伝送線路内の電磁波とアンテナ光学系の焦点にあるべき電磁波分布のインピーダンスとモードの整合を取らねば効率の良い伝送ができない。一般的なホーンアンテナによるフィードでは、周波数帯域が最大最小周波数の比が1.2から2程度だが、20世紀の後半には測地VLBIで用いられてきたS/X帯(2 GHz帯/8 GHz帯)共用フィードのように複数の周波数帯を共用できるものも実用化されていた。しかし、その間の周波数帯を全て同時に受信できる構造ではなかった。

測地VLBIやGala-Vでは電波源天体の構造や特性を研究することが目的ではないので電波スペクトルの観測は行わず、相関処理でアンテナの相対位置と遅延時間差を精密に決めるための連続波観測を行う。式(1)に示すとおり、同時に受信できる帯域幅が広がれば連続波についての感度が改善する。遅延時間を決定するのに利用できるサンプルが増え、誤差が減るからである。

近年の計算機能力の向上の結果、広帯域フィードの研究・開発が盛んになってきた。例えば先に述べた次世代の測地 VLBI プロジェクトの VGOS では 2-14 GHz を一挙に受信できる広帯域フィードを開発し、これに適合する口径 10 数 m クラスのレフレクタアンテナを新規に建設して運用を始めている。使用周波数や帯域幅は異なるが電波天文で進行中の SKA 計画では、様々な波長帯での電波源天体や星形成領域のスペクトラムや星間吸収の観測を目的に VGOS と同様の広帯域フィードを利用したアンテナ光学系を開発している。しかし既存の大型アンテナ、特にカセグレンアンテナの改修に使用できるものは無く、鹿島では独自に開発することとなった。

## 2.2 広帯域化の原理と開発指針

フィードに用いるアンテナの構造は大きく分けてパッチアンテナやダイポールアンテナのような共振アンテナと、ホーンアンテナのような進行波アンテナの 2 つである [7]。前者は共振器からの漏れ電磁場が空間と結合しアンテナとして動作するのだが、広帯域化のためには共振周波数が異なる複数の素子が必要で、構造が複雑になる。後者は導波路から空間へ、インピーダンスとモードが徐々に変わりながら望ましい電磁場分布の形状となればよいので原理的に広帯域化しやすい。

直径  $d$  の領域から放射された波長  $\lambda$  の電磁波のビーム幅は  $\lambda/d$  で近似できる。Maxwell 方程式は抵抗などの散逸過程がなければ時間反転に対して対称なので、まずは受信アンテナとしてフィードの設計を考えることにする。天空の電波源からの電波がパラボラ鏡面で反射し焦点に置かれたフィードアンテナへ向かうときの電磁場分布は鏡面の中心から淵までは平坦かつ縁で急峻に 0 になる分布を初期値とし、形状を変えながら伝播して焦点に置かれたフィード開口に達する。その時にフィードを通してアンテナにつながる伝送路へ損失なく伝送できる分布になっていればフィード開口での反射が起きず、鏡面全体で無駄なく集光できたといえる。このアンテナの実効的な面積と幾何的面积の比を開口能率という。この過程を逆にして送信で考えれば、フィードが鏡面を照らすビームの幅はフィードからの鏡面の見込み角と同じで、その中での電力分布が均一であれば理想的である。しかし周波数に応じて  $\lambda$  が変わってもフィードの開口領域の物理的な大きさ  $d$  は不変であるから、周波数に応じてフィードのビーム幅が変わることになる。つまり鏡面とフィードの間でモードの不整合が起き、鏡面の使用効率、つまり開口能率が悪化する。しかしフィードの開口径が変えられなくても、電気的な開口径が波長に応じて変化するな

ら効率の良い広帯域フィードが実現できるだろう。これが広帯域フィードの開発の基礎となる考え方である。

これまでは概念の説明のためにビーム幅を  $\lambda/d$  で近似したが、無限遠方での正確なビームパターンは開口面の電磁場を角度方向に空間周波数でフーリエ変換して得られる。これが近傍界測定器でビームパターンが測定できる原理であるし、広帯域フィードの実現には開口面での電磁場分布の積極的な制御が必要な理由でもある。なお、VLBI などの干渉計では素子アンテナを含む仮想的なアンテナ面に各素子アンテナが作る小さな開口があると見立ててフーリエ変換をすれば干渉計のビーム形状が得られ、素子アンテナ間の距離が伸びれば分解能が上がるが、集光力は上がらないことが理解できる。

広帯域フィードの実装で、一番簡単な方法は低周波用の大きなフィードと高周波用の小さなフィードを入れ子にすることだろう。あるいは周波数によって位相や振幅が変化する高次モードをうまく重ね合わせて適切な開口面電磁場分布を実現してもよい。使用周波数と設置場所の容積に応じて様々な実装が考えられるが、研究に使用するフィードである以上は実用的な時間内に数値計算が終わり、製作できる必要がある。

なお、本稿で問題にする開口能率は主鏡の能率であって、フィード単体のものではない。フィードの設計指標はフィード単体のゲインではなくアンテナ光学系を照らす際のビーム形状である。パラボラやカセグレンなど軸対象な光学系と組み合わせて良好な開口能率を得るためにはフィードのビーム形状が軸対象かつ交差偏波やフィードの反射損が少ないことも必要である。このために電波天文などで広く使われてきたコルゲートホーンによるフィードではコルゲート導波管の HE11 モードのみが使われているが、これに似た電磁場分布は円形導波管の TE11 モードと TM11 モードを適度な振幅比と位相差で合成しても得られる (図 2)。モードの数を増やせば電磁場分布の制御の自由度も大きくなる。コルゲートホーンでは HE11 モードしか使われないため、カセグレンアンテナで開口能率を向上させるにはフィードのビーム幅以外の自由度がない。

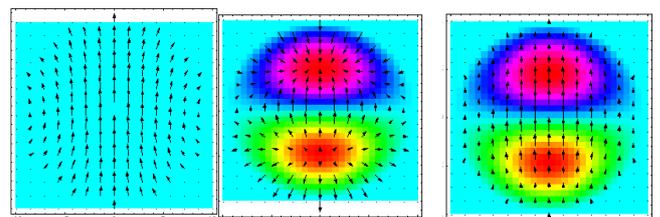


図 2 理想導体壁の円形境界内の電場分布

左から TE11 モードと TM11 モード、両者を適切に合成して交差偏波を減少させた状態

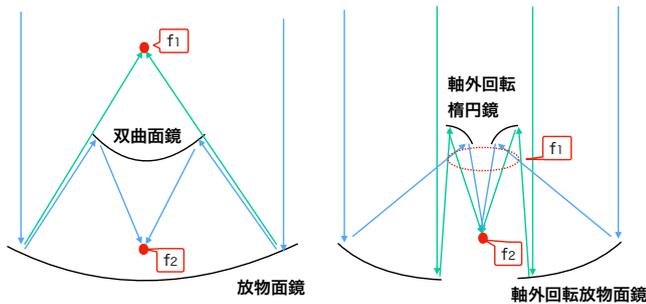


図3 パラボラアンテナ、カセグレンアンテナ(左)、リングフォーカス・アンテナ(右)

パラボラでは副鏡がなく主鏡の焦点( $f_1$ )を使い、カセグレンでは副鏡による2次焦点( $f_2$ )を使う。リングフォーカスでは1次焦点がリング状になり、電力の強いフィードのビームの中心が主鏡の縁に来るような照射分布となる。



図4 典型的なリングフォーカス・アンテナ  
副鏡形状が独特であり、副鏡とフィードが近い。

そこで放物面の主鏡と双曲面の副鏡の鏡面を光路長が一定の条件を保ったまま少し修整して主鏡面での電磁場分布を調整することで、開口能率80%程度を達成している[8]。しかし光軸中心にフィードが置けない場合、副鏡と主鏡、フィードの位置関係が設計とずれた場合など光学系の誤差による性能低下は大きくなり、多数のフィードを切り替えて使用する鹿島34mアンテナでは60-70%程度となっている。VGOSではリングフォーカス光学系(図3、4)で鏡面での電力分布の均一化を図って効率を上げているが、これも光学系の誤差に弱い(図4)。とはいえGala-VのようなVLBIでの感度を考えたとき、従来の10倍以上の帯域幅を得られるなら開口能率が20-50%程度でも感度は向上するのだから、Gala-Vではまず帯域幅の拡大を図り、そのフィードを実験・観測に使いながら改良を進め、能率を向上していくこととした。なお、開発にあたってはVGOSアンテナとの仕様互換性とアンテナ周辺の電波雑音の周波数特性、データ量の削減を考慮して周波数を決定している。当面の実験では鹿島34mアンテナはVGOSアンテナと同等の感度が確保できれば良く、全局が常温受信機でも問題はないが、将来的には冷却受信機による感度向上も可能なフィード設計としている。

### 2.3 数値計算の戦略

パラボラの主焦点に置くフィードでは要求されるビーム幅が広いため開口径が小さく、数値計算の規模も小さくて1モデルあたりの計算時間も短い。しかし鹿島34mアンテナのようなカセグレンアンテナではフィードが直接照らすのは副鏡であり、要求されるビーム幅が小さいことから開発が困難だった。前者ではフィードのビーム幅は中心から縁までおおむね50度程度だが後者は17度で約1/3なので開口径は3倍、体積は20倍以上になる。さらに前項で述べたとおり最大最小周波数比が10の広帯域を狙うなら数値モデルの節点数は通常のフィードの1000倍になり、その2乗から3乗で計算時間が増大する[9]。効率良く格子点を設けて100倍程度の増大に抑えても計算量が飛躍的に増えることは間違いない。

そもそもフィードの形状は通常の円錐では無理で、高次モードを発生させる段差やテーパの変化が必要となる。円錐であれば形状パラメータは開口径と長さの2つだが、テーパの変化部を設けると、その軸方向の位置と半径でパラメータが2つ増える。その自由度を利用して電磁場分布を調整していく(図4)が、N個のパラメータの単に初期値の上下を探索するだけでも $2^N$ 通りの組合せになる。1年間に1000個のモデルを試すなら1つのモデルには8時間しか使えない。この種の問題ではパラメータが増えすぎると開発に要する時間が容易に宇宙年齢を超えるので、開発の初期値には同心円構造かつモード整合法だけで効率的に計算できるマルチモードホーンとコルゲートホーンを選んだ。ただし、コルゲートホーンは製作の容易な開口面コルゲートとし、高次モードも利用して広帯域化する。動径方向に溝を切る通常のコルゲートホーンでは軸方向に多数の溝が並ぶため格子点数が増えるだけでなく、制作の時間も手間もかかるうえにフィードが長く重くなるからである。マルチモードホーンは著者自身が手がけたVSOP2/ASTRO-G衛星[10][11]や上海天文台の6.7GHzメタノールメーザ観測用フィードの設計[12]の設計を初期値とし、ビーム幅を鹿島34mアンテナに合わせ、更なる広帯域化を図ることとした。

フィードの計算モデルの伝送路側は円形導波管の基本モードであるTE<sub>11</sub>モードを仮定してモード整合法で最適化し、並行して有限要素法で設計した直線2偏波対応のOMTをフィードに接続して再度、有限要素法で最適化を図ることとして全体の計算時間を短縮した。OMTは遮断周波数と高次モードが発生する周波数の比を大きくとるためにクワッドリッジ導波管(図5)としたので直線2偏波での利用となるが、円偏波のOMTを広帯域化するよりはるかに容易である。

数値計算による試行の結果、十分に満足がいく性能

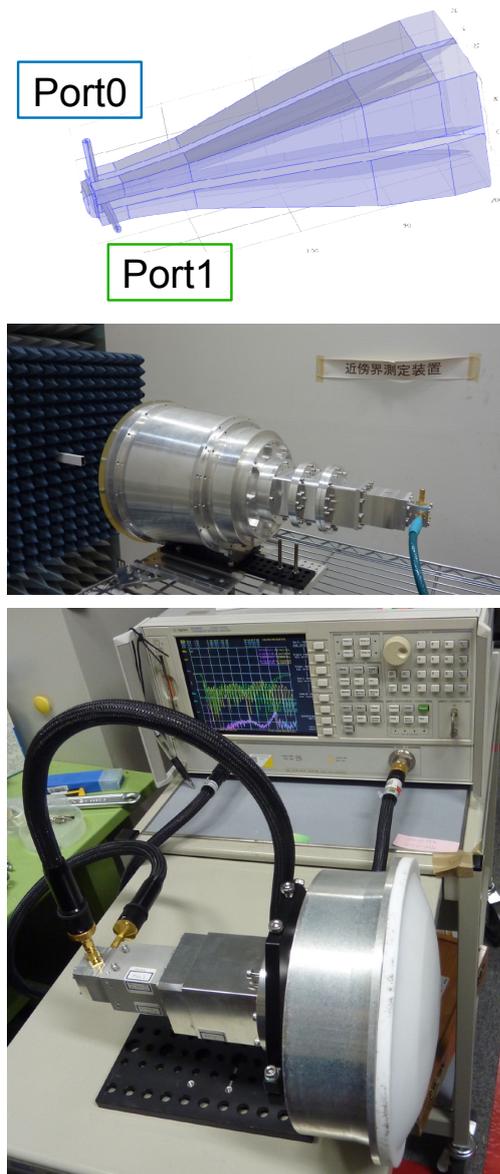


図5 OMTと広帯域フィード

- 上：OMTの計算機モデルの例  
クワッドリッジ導波管の端部にSMAコネクタで直線2偏波のポートを設けている。  
フィードから見て奥の端子をPort0、手前の端子をPort1とする。  
直線状の切り抜き・切削のみで製作できるように設計した。
- 中：近傍界測定装置でビームパターン計測中の広帯域フィード(京大METLAB)
- 下：ネットワークアナライザでリターンロス計測中の広帯域フィード(NICT)  
これらと同じ状況を計算機シミュレーションで模擬して設計を進めている。

が得られれば実際のフィードを製作して電波暗室や近傍界測定器でビームパターンを、ネットワークアナライザでリターンロスを測定して性能確認を行う(図4)。この試験で問題がなければアンテナに搭載して実際の天体で性能を測定し、問題がなければ観測に使用する(図6)という流れである。

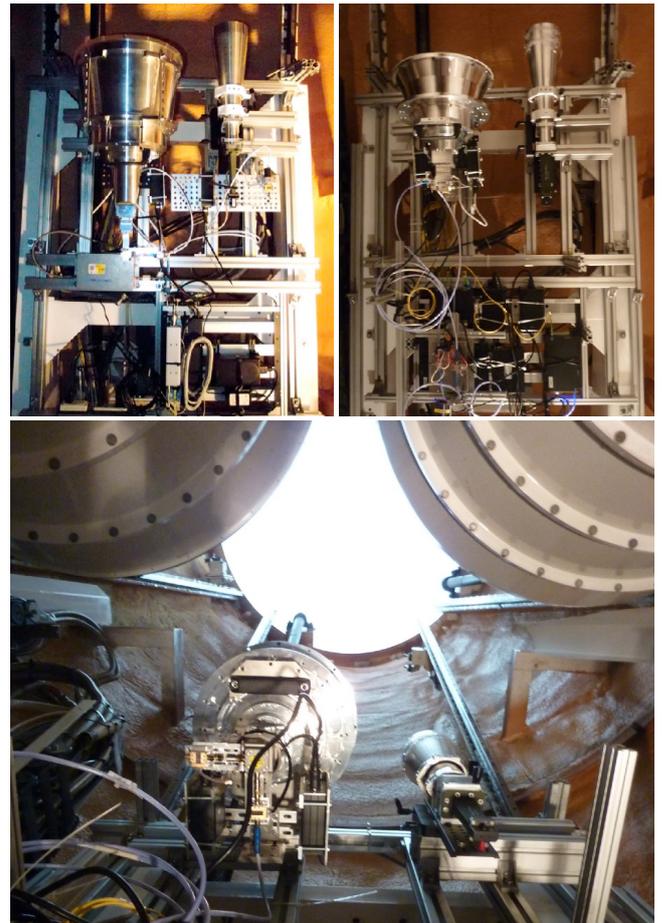


図6 鹿島34mアンテナに搭載したNINJAフィード(左)とIGUANA-Hフィード(右)

フィードはフィードコーン内の4面に設置したトロリー架台に設置し、使用時に上昇させて切り替えるが、フィードによっては光軸中心に置けない。従前のCバンド(5GHz帯)コルゲートホーンよりNINJAフィード(3.2-14.4GHz)は小さくなり、口径は8割、軸長は4割以下である。NINJAフィードの後端にはOMTと初段の低雑音アンプがある。

### 3 鹿島における広帯域フィードの適用と性能評価

このようにして計算時間と設計手法の効率化を図った結果、1年程度で最初の実用的な設計が得られ、まず2013年末にIGUANA-Hフィードと名付けた6.5-16GHzの広帯域フィードを鹿島34mアンテナに搭載した[13]。1989年の観測開始からほぼ四半世紀後に、鹿島34mアンテナはカセグレンアンテナとしては世界で初めて広帯域VLBI実験を開始することになったのである[7]。さらに、電波天文観測においても従来は個別の受信機とフィードの切り替えを必要としていた星形成領域からの6.7GHz/12.2GHzのメタノールメーザの同時受信も世界に先駆けて実現できた。その後も様々な観測や実験を続けながらも継続的に広帯域フィードやOMTの性能向上を図り、改良品と交換を続けている[14]。

かつて正確な周期性を持つ電波放射のため宇宙人に



図7 イタリアへ送られた MARBLE2

上：鹿島からイタリアに向けて輸送準備中の MARBLE2  
 下：国立天文物理学研究所 (INAF: Istituto Nazionale di Astrofisica) のメディチーナ (Medicina) 電波観測所 (伊) に設置した MARBLE1 (口径 2.4 m)。



図8 鹿島 34 m アンテナ

上：ホログラフィによる鏡面調整中の鹿島 34 m アンテナと参照アンテナと月広帯域フィードであれば実際に VLBI や電波天文観測に使う受信機系で衛星放送や通信波も受信できるので、受信機系を切り替えることなく鏡面調整ができる。参照アンテナには改修で不要となった旧 MARBLE1 の 1.65 m パラボラ主鏡とフィードを再利用した。  
 下：皆既月蝕に向かう月と鹿島 34 m アンテナ

よる宇宙版 JJY かと思われたパルサーは、ブラックホールになるほど重くない星が最期を迎えて中性子星となった姿であった。しかしその周期はいまや地球回転と同様に「秒」の基準ではなく、「星」より正確な原子時計を手にした物理学者の観測対象である。その基準となる光格子時計などの正確な時計の精度比較は科学や社会生活の基盤を支える技術である。VLBI で比較を行う Gala-V は光ファイバ接続での比較と異なり時計間の距離に制限がなく、衛星双方向と異なり衛星回線使用料と送信免許が不要で、GPS のように衛星軌道情報への依存がないのは利点だが、ハブとなる大型アンテナの維持費が難点である。

Gala-V における観測周波数帯は VGOS でも使用可能な 3.2-14.4 GHz の中から最大 1.6 GHz 幅をバンド幅合成で 4 チャンネルを 1 台のサンプラで周波数変換を行わずに一括して取得する仕様だが、この「RF ダイレクトサンプリング」によりダウンコンバータの位相ノイズや並列したサンプラのタイミングのズレを避けられる。事前のアンテナ周辺の RFI (Radio Frequency Interference) の調査結果とデータ記録容量の節約を考慮してフィードの性能最適化周波数に優先順位をつけ、開発の迅速化を図っている。鹿島 34 m アンテナには 2015 年に、2 つの小型局 MARBLE には 2016 年と 2017 年に NINJA フィードと名付けた

3.2-14.4 GHz が受信可能な広帯域フィードと OMT が搭載され (図 1、6、7)、国内での試験を経て 2018 年夏に MARBLE1 をイタリアの国立天文物理学研究所 (INAF: Istituto Nazionale di Astrofisica) のメディチーナ (Medicina) 電波観測所に設置し (図 7)、NICT 本部 (小金井) に据え置かれた MARBLE2 と共に日本とイタリア間での VLBI による光格子時計の周波数比較実験を開始した。なお、実際の運用では 1 GHz 幅で 4 チャンネルをサンプリングし、強い RFI を避けつつデータ記録量も節約して遠隔地間のデータ転送時間や関連処理時間も短縮している。

この実験ではアンテナ位置と遅延時間差を精密に測るので、観測天体の数が重要である [15]。感度が向上すれば基線長が伸びても分解されない遠方の天体が利用できるし、所定の SNR を得るための積分時間を短かくできれば多くの天体が利用できるメリットがある。

### 3.1 周波数比較実験 Gala-V に向けた各アンテナの改修

#### 3.1.1 鹿島 34 m の改修

鹿島 34 m アンテナは 1988 年に建設され、沿岸部にあるために痛みがひどくなっていたので、イタリア

との周波数比較実験の前に補修工事を行なった[16]。主鏡支持構造は主に溶接組立であり、補修で部材を交換すると主鏡面が歪むのはやむを得ないので、補修後に鏡面調整を行なった。ボルト組みは溶接歪みがなく組み立てや部材交換時の位置再現性も良いが定期的な緩みの点検が必要になるし、適切な防錆処理をしなければ腐蝕する点では溶接に対して特に有利でもない。沿岸部の橋梁などと同様に溶接前後の錆対策と保守が適切であれば錆の進行は抑えられるので、鹿島 34 m アンテナの使用周波数と軽量化を鑑みれば現場での溶接組み立ても合理的であろう。ボルト組みでもサビ対策や清掃がなされなければ当然に腐蝕する[17]。実際、鏡面精度の維持のために主鏡パネルの支持構造からの高さはネジで調整できるが、建設以降に経年変形が生じ得るにもかかわらず使用されたことがなく固着していた。鏡面調整を行うにあたって構造体の経年変形の蓄積は把握できず、エンコーダの位置校正の不備により鹿島 34 m アンテナでは鏡面調整の基準に使える支

持構造や副鏡位置の信頼できる座標測定結果がなく、そもそもの鏡面形状も仰角に対する鏡面変形的设计仕様も不明であったので計算機モデルでの検証は省略し、直接的に広帯域フィードで静止衛星を利用したホログラフィ測定により主鏡面の調整のみを実施することとした(図 8、9)[16]。従来のアンテナと異なり天体受信用のフィードを切り替えることなく人工衛星を受信してアンテナ鏡面の調整ができるのは広帯域フィードの利点のひとつである(ただし、副鏡と主鏡、フィードの光軸を合わせておらず、これらの誤差を切り分けずに静止衛星の仰角に対して主鏡面のみを調整して光路長誤差を最小化しただけであって、主鏡面を正確に設計上の修整カセグレン主鏡面に合わせたわけではないので鏡面調整の結果を「鏡面誤差」とは表現すべきではない)。

### 3.1.2 MARBLE の改修

MARBLE については主鏡とフィードの交換により感度の向上を図っている。初期設計[15]ではパラボラ

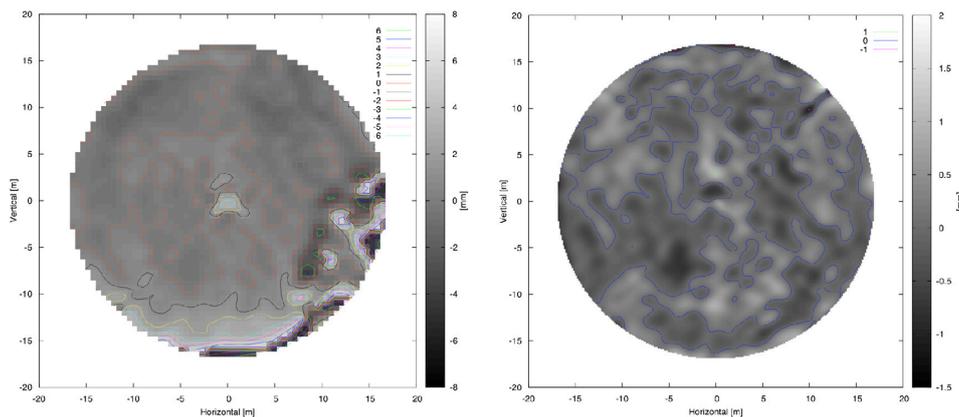


図 9 鹿島 34 m アンテナ光学系の光路長誤差  
調整前(左)は最大±6 mm 程度だったが調整後(右)は最大±2 mm 程度に改善された。  
建設時の主鏡面誤差は仕様が 0.5 mm (r.m.s.)、測定値では 0.17 mm (r.m.s.) だった。

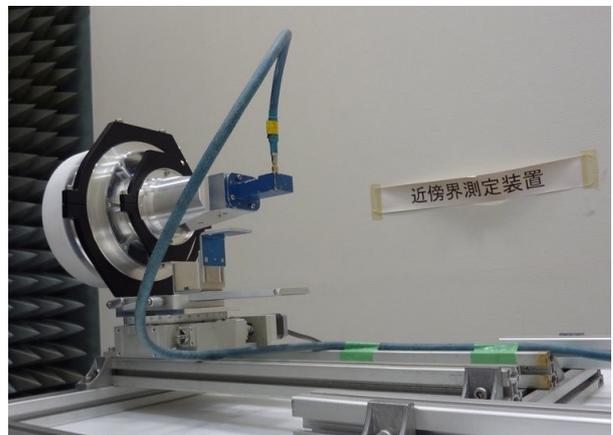
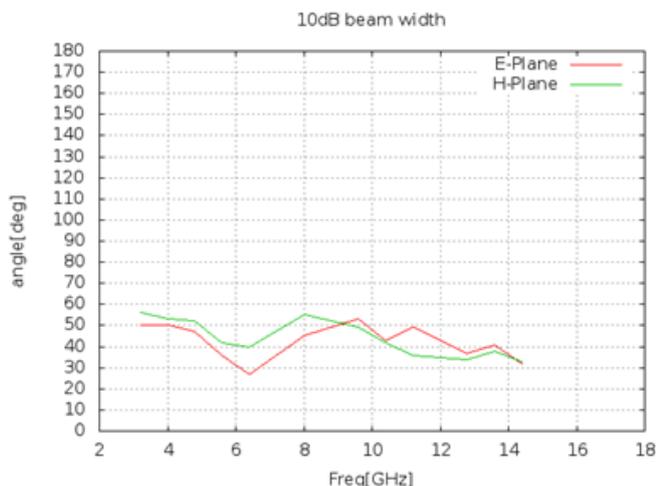


図 10 旧 MARBLE 用 NINJA フィード  
左：-10 dB 落ちビーム幅(計算値)周波数に対する変動も少なく、E 面と H 面の差も少ない。 右：METLAB でのビームパターンの測定

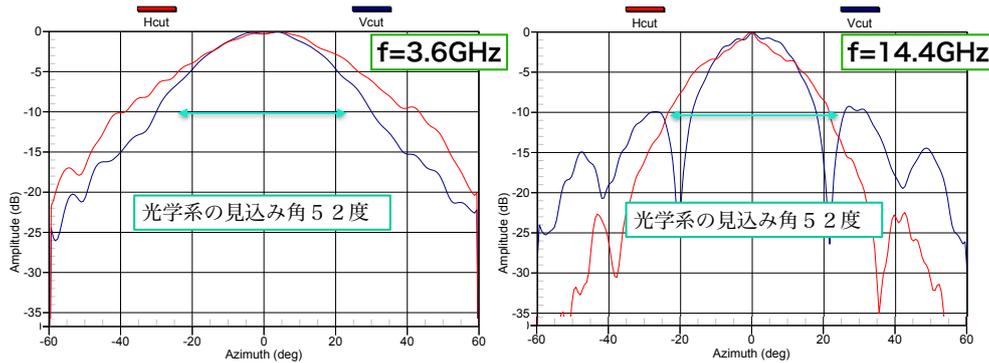


図 11 新 MARBLE 用 NINJA フィードのビームパターン

京大 METLAB の近傍界スキャナで測定し、Hcut/Vcut は地面に対する水平・垂直である。

なお鹿島 34 m アンテナの光学系の見込み角は 34 度であり、MARBLE 用のフィードの設計を少し変更して対応している。

の主焦点に市販の広帯域フィードを置いていたが(図 1)、周波数に対するビーム幅やビームパターンの変動が大きく軸対称性も悪かったため開口能率が悪かった。これを改善するための NINJA フィードも開発した。主鏡の中心から縁までの見込み角は口径 1.65 m の MARBLE1 が 46 度、1.5 m の MARBLE2 が 48 度で、 $-10$  dB 落ちのビーム幅をおおむね合わせることができていた(図 10)。しかし当初は 10 km を 2 mm の誤差で検定することを目的に比較基線場へワンボックスワゴンで運んで設置する想定だった MARBLE は、原子時計の比較実験での輸送事情を検討すると 2.4 m への口径拡大が可能であることがわかり、また、地面からの熱雑音を拾いにくいこと、受信機を主鏡底部付近において配線長を短くでき、モーメント面でも有利であることからカセグレン式に改修し、これに合わせた NINJA フィードを再度設計して搭載することとした(図 1、7)。新 MARBLE ではフィードから見た光学系の中心から縁までの見込み角は 26 度である。主鏡径は「へら絞り」で安価に製造できる範囲内であり、大型トラックの荷台に平置きできて海外輸送用コンテナ内には 45 度の斜め置きで運べる最大サイズである。アルミ切削による直径 500 mm の副鏡は金メッキで耐蝕性を確保した。鳥の落とし物や砂埃のため清掃が避けられない主鏡はアルミ無塗装である。太陽での性能測定・調整時に高温となるフィードには雨避けを兼ねたテフロンレンズを使用している。支持構造は CFRP パイプとして鏡面の大型化による重量増加を抑えながら剛性も確保した。小型局はどこで使われるのかわからないので耐風速性能(多くの大型アンテナと同様に最大瞬間風速 60 m/s を目標)と腐蝕には十分留意して設計し、必要に応じて避雷針を取り付けるネジ穴も用意してある。

なお、鏡面設計に時間がかかること、へら絞り用に新たな型の制作費がかかるために新 MARBLE は鏡面修

整カセグレンやリングフォーカスにはしなかった。特に後者は光軸調整の誤差の許容範囲が狭く、地面からの熱放射や周囲の RFI などの雑音を拾いやすいうえに副鏡とフィードが近く近傍界の影響が大きいと、シミュレーションどおりの性能を発揮しにくいと考えたためである。強い RFI はアンプを飽和させて高調波だけでなく混変調雑音も発生させ、SNR を低下させる。広帯域アンテナでは必然的に影響を及ぼす通信波も増えるので、RFI 対策は重要である。

### 3.1.3 改修後の仕様と性能

Gala-V の仕様は 3.2-14.4 GHz だが、NINJA フィードと OMT の受信上限周波数は 16-18 GHz 程度でゆとりをもたせた。OMT の直線 2 偏波の出力ポートのうち鹿島は両方を、MARBLE では片方のみ使用する。各局で異なる RFI 環境に応じてフィルタを使用しており、実際の受信周波数幅は仕様よりも若干狭い。初段の低雑音増幅器(LNA: Low Noise Amp)は両偏波分を搭載したが、MARBLE では V 偏波(アンテナ仰角 0 度で垂直偏波)を常用し、H 偏波(仰角 0 度で水平偏波)を性能確認と V 偏波障害時の予備系に利用している。アンテナから屋内のサンプラまでは数 10 m から数 100 m の距離があるので RFoF(RF over Fiber)でアナログのまま光信号に変換して伝送しており、鹿島のみ波長多重として両偏波が同じファイバを使うようにした。国産品は波長多重ができないのにシングルモードと偏波保持ファイバの 2 本を要して不便かつ高価だったが、RFI やファイバの曲げ半径の変動に敏感で接続が不安定になりがちであったため保守の容易な小金井の MARBLE2 のみに使用し、他局ではアンプと同様に海外製品である。

改修後の各アンテナの最新の性能を表 1 に示す。現時点で MARBLE の開口能率測定に使える広帯域な電波源は月と太陽しかなく、それらの視直径はアンテナの角度分解能に比べて無視しえないが、その影響の補

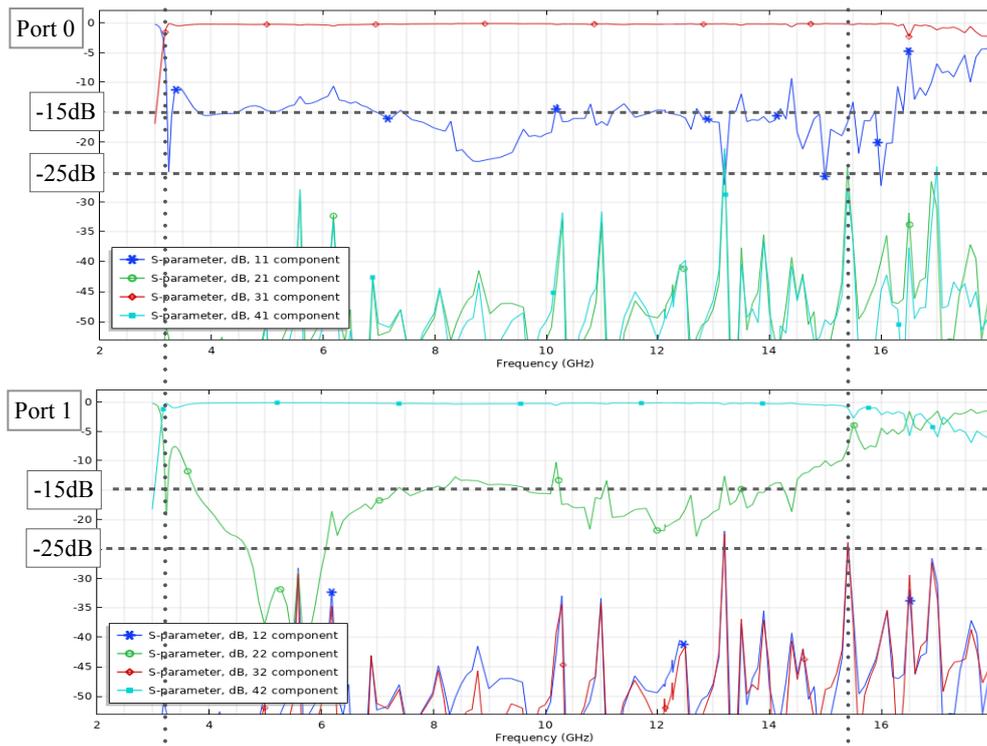


図 12 Gala-V 用 NINJA フィードの OMT のリターンロス (計算値)  
Gala-V で使う 3.2-14.4 GHz で -15 dB 程度のリターンロスを目指した。

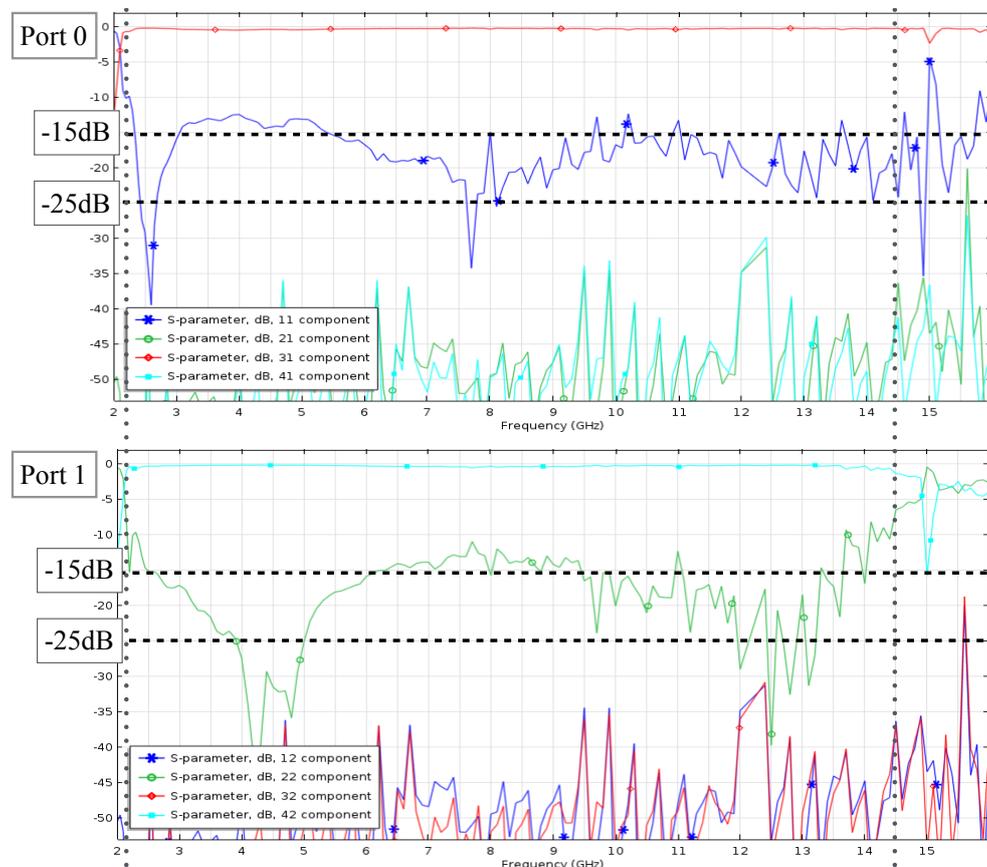


図 13 開発中の広帯域 OMT のリターンロス (計算値)  
帯域拡大を目指して構造を変更し、2.2-14.5 GHz で -10 dB 程度以下となっている。  
これにより S 帯も受信可能になるが、日本の多くの地域では 2.6-3 GHz にある強い RFI を防ぐフィルタも必要になる。

表 1 各アンテナの性能

	新 MARBLE1.2 (旧 MARBLE1.2)	鹿島 34 m <sup>*1</sup>		参考	
				鹿島・小金井 11 m <sup>*1</sup>	Onsala Twin Telescopes (OTT) <sup>*2</sup>
口径 [m]	2.4 (1.65,1.5)	34		11	13.2
フィード名称 または形式	NINJA (Open Boundary Quad-Ridge Horn)	IGUANA-H	NINJA	コルゲートホーン	Quad-Ridge Flared Horn
受信周波数 [GHz]	3.2-15 (2-12 GHz のうち S 帯と X 帯のみ)	6.5-15	3.2-15	S 帯:2.21-2.36 X 帯:7.70-8.60	3-18 (4.6-24 も有) (VGOS 仕様:2-14)
Tsys*[K]	120-250 (200-300)	120-250	80-200	70,120 (常温受信機)	20-25 (冷却受信機)
開口能率 [%]	50-25 (40-10)	50-30	45-20	S 帯:41,X 帯:70	70-50
SEFD[Jy] <sup>*3</sup>	15 KJy-50 KJy (1 MJy-2 MJy)	900-3000	700-2500	S 帯:5000, X 帯:5000	800-1600 (VGOS:2500 以下)
駆動速度 [度/s]	5	Az:0.8, El:0.64		3	Az:12, El:6
備考	副鏡直径 500 mm 可搬局	副鏡直径 3.8 m 広帯域系のみ記載	副鏡直径 1.4 m	同型 2 台を鹿島と小 金井に設置	

\*1: 吉野泰造、黒岩博司, “全体システムの概要” 通信総合研究所季報 vol.36 特 8, pp.23-31, January 1990, NICT 時空標準研究室編 “34 m 白書” などから抜粋

\*2: J. Flygare, M. Pantaleev, B. Billade, M. Dahlgren, L. Heldner, R. Haas, ” Sensitivity and Antenna Noise Temperature Analysis of the Feed System for the Onsala Twin Telescopes. より抜粋

\*3: Jy=10<sup>-26</sup> W/m<sup>2</sup> · Hz

正はまだ行なえていない。補正後の能率は全帯域で 50 % 近くに達していると思われるが、ビーム形状の測定後にあらためて正確な性能評価を行いたい。また、可搬局である MARBLE は鏡面の精度維持のために副鏡をつけたままでも 12 ft 以上のコンテナに収容して運搬できるように設計した。そのため通常のカセグレンアンテナより主鏡に対する副鏡の直径比が大きくなり、遮蔽損失が 4 % 程度に達している。鹿島 34 m アンテナについては様々な研究に使われていており、保守の時間も必要なために広帯域フィードのための光学系の調整時間が十分にとれず、暫定値である。また、MARBLE と鹿島 34 m アンテナの Tsys\* は R-Sky 法による修正システム雑音温度である。

なお、Jy (ジャンスキー) は受信電力のフラックス密度の単位であり、天文学者の名前に由来する。天文学では天体の電波強度を Jy で表現するので、アンテナの性能指標である SEFD (System Equivalent Flux Density) もこれで表現することが多い。SEFD は受信アンテナの雑音温度を 2 倍にする電波源天体のフラックス密度として定義される。他に VGOS 仕様のアンテナとして Onsala Twin Telescope、従来の測地 VLBI アンテナとして鹿島・小金井 11 m アンテナを例に挙げた。鹿島 34 m アンテナは集光面積が大きいので受信機が常温であっても VGOS アンテナと感度が同程度だが、近年の測地 VLBI 用アンテナに比べると駆動速度が低くなってしまっている。

### 3.2 Gala-V 用広帯域フィードと OMT の性能

現状の広帯域フィードの性能の例として MARBLE2 で 2019 年夏から使用している NINJA フィードのビームパターンの計測例を図 11 に示す。前述のとおりフィード開口面の電磁場のモードを適切に制御しない限りは周波数が倍になればビーム幅は半分になるが、高次モードを活用したために周波数によってビーム形状の変動はあるものの、周波数が 4 倍違っててもビーム幅の変動は 1.5 枚程度にとどまり、しかも E 面 (電場に平行な方向) と H 面 (垂直な方向) のパターンの差も抑えられ、軸対称に近い形状となっている。

もちろん、広帯域フィードのみならず OMT についても性能向上に対する研究開発が続けられている。広帯域観測ではアンテナ周辺の人工電波が雑音となるため、Gala-V で使う OMT は、2 回目の改良で 3 GHz 以下を急峻に遮断できる特性を持たせた。初号機をアンテナに搭載してみたところ、3 GHz 直下の無線 LAN などの電波の抑圧が不十分だったためである。2019 年秋から使用予定の 3 回目の改良品ではリターンロス -15 dB 程度にまで低減させた (図 12)。それまでと同様の -10 dB 程度でもよいなら Port0 では 17 GHz まで、Port1 では 15.5 GHz まで上限周波数を拡大できている。2つのポートで性能の差があるのは構造的にやむを得ないが、使用帯域内でリターンロスを十分に下げられれば十分である。Gala-V 以外での使用を想定してさらに帯域拡大を図った OMT も開発が進められている (図 13)。

## 4 まとめと今後の展望

本稿では鹿島における広帯域アンテナの開発、特にフィードと OMT を紹介した。これらは当研究室のアンテナに搭載され、周波数帯域 3–15 GHz 程度で実用的な性能を持つことを確認している。実験目的である原子時計の周波数比較については S 帯/X 帯の 2 波のみを使用していた初期の MARBLE から 3 桁改善した  $10^{16}$  乗台に、測地精度は MARBLE 間の基線長 10 km に対して 2 mm を目標にしていたところを 8784.56 km に対して 16 mm 程度に達している [15][18][19]。大口径を活かした鹿島 34 m アンテナをハブとした実験の後には、各国で建設され測地 VLBI に使用されつつある VGOS アンテナをハブにして実用性と汎用性を検証したいと考えている。表 1 に示すとおり鹿島 34 m アンテナより駆動速度が高く多くの天体を素早く切り替えでき、観測天体数を増やせるからである。

本稿で述べた広帯域フィードは簡素な構造のため加工が容易で高周波数化しやすく、しかも様々な既存のアンテナに搭載することを念頭に開発したのでビーム幅の調整自由度が高い。実際に過去 8 年間で 2 種類の異なる構造と 3 種類のビーム幅の広帯域フィードを開発したが、パラボラからカセグレンまで搭載場所さえ確保できれば改修するアンテナを選ばないのが強みである。今後も VLBI への応用のみならず大気中の水蒸気量の精密測定や違法無線の監視、地球外文明探査など多彩な応用が期待できよう。

現に 2018 年度から科研費により大気中の水蒸気量を精密に図るシステムの開発を開始したところである。この計画では 18–64 GHz 程度の広帯域フィードで 20 GHz の水蒸気とともに 50 GHz 帯の酸素、30 GHz 帯の雨滴量を同時に測り、20 GHz 帯のプロファイルを正確に補正して水蒸気量を精密に計測できるシステムを目指している。

従来の水蒸気ラジオメータでは周波数帯に応じて最低でも 2 系統のフィードと受信機を必要としていたが、これが 1 本に簡素化されれば小型化とともに校正の手間も減る。利便性向上とともにコストも下がればゲリラ豪雨の予測や火山活動の調査などでの観測点を増やしやすくなるだろうし、ラジオメータの高精度化は VLBI や GPS 測地、原子時計の比較においても大気中の水蒸気による遅延誤差の補正精度の向上にも貢献が期待される。

通信や資源探査においても、従来は周波数帯ごとに独立していた複数のフィードを広帯域フィードシステムで 1 本化できれば、地上局や衛星のアンテナシステムの小型化、低コスト化が期待できる。また、電波を出している周波数の見当がつかない違法無線の監視や

地球外文明の探査にも有益だろう。もし最大 8 本のフィードを有した鹿島 34 m アンテナと同じアンテナを今作るなら、わずか 2 本の広帯域フィードで済むうえにフィードごとに飛び飛びであった受信周波数が連続的になるのである。

前世紀の衛星通信が盛んなころに建設された大型アンテナの光学系はフィードに狭いビーム幅を要求するカセグレンであることが多いが、その開発をリードしたのは実は日本であった [20]。これらを低コストに広帯域化できるフィードは本稿で述べたフィードが世界唯一であり、国内外からも広く注目されている。アフリカ大陸などで役目を終えた大型の通信アンテナが電波望遠鏡に転用されつつあるが、測地 VLBI の VGOS、電波天文での国際プロジェクトである SKA やヨーロッパでの BRAND プロジェクトのように、アンテナの広帯域化は世界の流れである。旧郵政省・電波研究所の流れをくむ研究室として今後も性能向上を図り、科学の発展と社会に貢献していきたいと考えている。

## 謝辞

IGUANA-H フィードのメタノールメーザ帯受信対応は 2013 年度、2014 年度の国立天文台共同研究開発経費(山口大 藤沢教授代表)で開発し、NINJA フィードの原型は 2013 年度 NICT インセンティブ経費による開発である。フィード及び OMT は NICT 試作室が製作し、ビームパターンの測定は京大 METLAB で行なった。鹿島 34 m アンテナの鏡面調整、MARBLE を含めアンテナ搭載時の性能測定は時空標準研究室 岳藤一宏主任研究員ほか研究室員の協力による。最後に、長年にわたり技術開発を支え、2019 年 9 月の台風 15 号で運用を停止した鹿島 34 m アンテナに謝意を捧げる。

【参考文献】

- 1 高橋富士信, 近藤哲朗, 高橋幸雄, “ウェーブサミット講座 VLBI 技術,” ISBN4-274-07852-3, オーム社, June, 1997.
- 2 関戸衛, ほか (2018): 広帯域 VLBI システムの開発と測地・周波数比較実験の報告, 測地学会誌 vol63, no3, pp157-169.
- 3 関戸衛, ほか (2018), “VLBI 周波数比較への応用と GALA-V システムの開発 (IX) - イタリア Medicina への広帯域アンテナ設置,” 日本測地学会第 130 回講演
- 4 岳藤一宏, 近藤哲朗, “日伊基線で実施した広帯域 VLB 実験のデータ処理,” NICT 季報 2019.
- 5 <https://ivsc.gsfc.nasa.gov/technology/vgos-general.html>  
“VGOS System Development”
- 6 <https://www.skatelescope.org> “SQUARE KILOMETRE ARRAY
- 7 電子情報通信学会編, “アンテナハンドブック,” ISBN-13 : 978-4274205446, 電子情報通信学会, 2008/7/1
- 8 水澤丕雄: “鏡面修整カセグレンアンテナの放射特性に及ぼす副反射鏡放射パターンの効果”, 信学論, J52-B,2, pp.78-85 (Feb. 1969)
- 9 城道介, 舟田邦彦 (1981), “有限要素法のための可変メッシュ生成プログラム,” 精密機械 47 巻 4 号
- 10 氏原秀樹ほか, “電波望遠鏡用多モードホーンの開発,” 電子情報通信学会技術報告, SPS2007-26, March 2008.
- 11 氏原秀樹ほか, “電波望遠鏡用多モードホーンの開発 (その 2),” 電子情報通信学会技術報告, SPS2008-22, March 2009.
- 12 氏原秀樹ほか, “SKA に向けた広帯域フィードの基礎開発と上海天文台用 6.7 GHz 帯多モードホーンの開発,” 電子情報通信学会技術報告, SPS2009-11 (2010-3 Ujihara, H., 2017.
- 13 Hideki UJIHARA, “Development of wideband feed for Kashima 34m Antenna”, RADIO SCI ENCE, APR 2017, doi:10.1002/2016RS006071
- 14 Hideki UJIHARA, et.al., “Development of wideband Antennas,” International Symposium on Advancing, April 2019, doi:1345\_2018\_41.
- 15 市川隆一ほか, “距離基準超小型 VLBI システムの開発とその実証実験成果,” 情報通信研究機構季報 vol.56 nos.3/4 2010, pp223-237
- 16 川合英治, “鹿島 34 m の維持管理”, NICT 季報 2019
- 17 名取暢ほか, “橋梁の腐食事例調査とその分析,” 土木学会論文集 no.668/I-54, pp.2899-311, 2001, 1
- 18 瀧口博士ほか, “VLBI および GPS による時刻比較情報通信研究機構季報,” vol.56 nos.3/4 2010, pp.239-247
- 19 関戸衛, ほか (2019), “小型広帯域 VLBI を使った、イタリア - 日本の VLBI 観測 (測地・精密周波数比較),” 第 17 回 TDC シンポジウム
- 20 別段信一, “衛星通信地球局アンテナの開発小史,” Space Japan Review, no.49 October/November 2006



氏原秀樹 (うじはら ひでき)

電磁波研究所  
時空標準研究室  
主任研究員  
博士 (学術)  
電波天文学、アンテナ工学