

# ACA 7m電波望遠鏡の主鏡技術

高木淳治\* 角野宏紀\*  
川口 昇\* 惣福 諭\*  
永江一博\* 高根澤 隆\*\*

*Technology on Main Reflector of ACA 7m Radio Telescope*

*Junji Takaki, Noboru Kawaguchi, Kazuhiro Nagae, Hiroki Sumino, Satoru Sofuku, Takashi Takanezawa*

## 要 旨

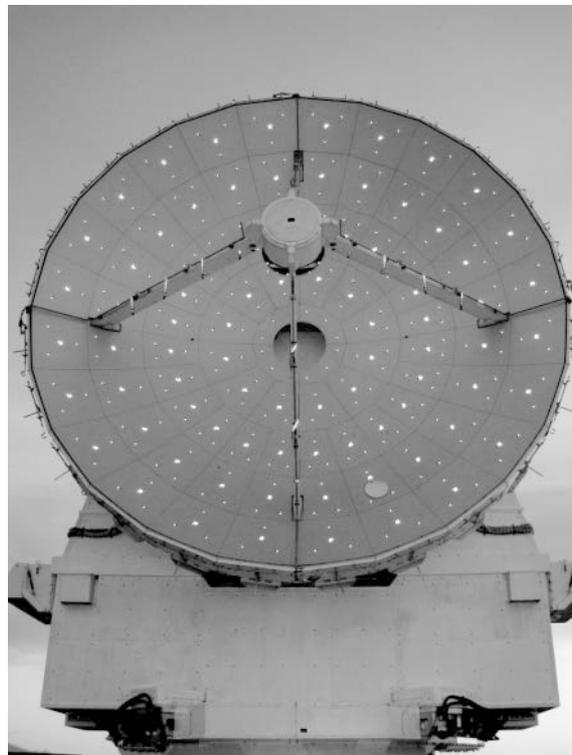
ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) 計画の観測周波数帯域は30GHzから950GHzであり、最も高い周波数950GHz(波長0.3mm)で観測に必要なアンテナゲインを得るために、主鏡部は25 $\mu$ mRMS (Root Mean Square) という高い総合鏡面精度が要求されている。設置場所はチリのアタカマ砂漠の標高5,000mの屋外であり、環境温度は-20~+20 $^{\circ}$ Cである。加えて日射による熱変形、風荷重による風力変形、姿勢変化による重力変形等が発生する。

日本が建設するアンテナは直径12mが4台、7mが12台である(この合計16台を“ACA(Atacama Compact Array)”という)。直径12mのアンテナはこの鏡面精度を達成するために、従来のサブミリ波電波望遠鏡同様、主鏡部に低熱

膨張材のCFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics)とインバーを使用して鏡面精度を達成した。しかし、直径7mアンテナではコスト要求達成の観点からあえて12mアンテナで実績のある低熱膨張材料を採用せず、サブミリ波望遠鏡史上初めて<sup>(注1)</sup>、主鏡部の主要構造部に鉄を使用し、様々な設計上の創意工夫を凝らすことで、実測鏡面精度がベストで4 $\mu$ mRMSオーダーという世界最高<sup>(注1)</sup>の性能を達成した。

本稿では、鉄材料だけでいかに鏡面精度要求を満たしたかについて、熱変形抑制に焦点を当て、理想的な相似形の熱膨張、縮小を実現するための設計方針と最終的に採用されたアイデア、工夫点等について述べる。

(注1) 2011年7月26日現在



## ACA 7mアンテナの現地据付け風景

標高2,900mのOSF (Operation Support Facility) で組み立て中のACA 7mアンテナである。OSFで試験調整を行い、国立天文台へ引渡し後、最終的な据付け場所である標高5,000mのAOS (Array Operation Site) に移設される。

左は昼間、強い日射が主鏡パネル全面に入射している。主鏡部側面と背面には吸排気口が見える。背後に見えるのは試験中の12mアンテナである。右は夕刻ごろに正面から撮影したものであり、鏡面調整用の反射ターゲットが反射して見えている。

\*通信機製作所 \*\*同製作所(博士(学術))

## 1. ま え が き

電波望遠鏡の目的は天体からの電波を集め、観測装置に導くことである。その主要な要求項目であるアンテナゲインには、反射鏡面部(主鏡, 副鏡)の鏡面精度が大きく影響する。

特に、屋外で使用する電波望遠鏡はドーム内の光学式望遠鏡と違い、日射、風等による熱変形が大きく影響し、サブミリ波用で主鏡部を線膨張係数の大きい鉄構造で成立させるのは、技術的に不可能と思われてきた。本稿では、その達成方法について述べる。

## 2. アンテナの構造

### 2.1 7mアンテナ全体の構造

図1に7mアンテナの外観を示す。架台方式はAZ(Azimuth)/EL(Elevation)方式であり、駆動範囲はELが2~90度、AZが-270~+270度、マウントの基本構造は12mアンテナと同じである。駆動制御方式はDirect-Drive方式を採用し、指向誤差0.6秒角RMS以下の高精度な動作を実現している。また、通常の観測に加えて、二つの天体を交互に高速に切り替えて観測したり、一つの天体を高速でスキャンする駆動モードも備えている。

### 2.2 主鏡部の構造

図2に7mアンテナの主鏡部構造の断面図を示す。主鏡部は受信機室とのインタフェース面を介して板バネ構造で連結支持されている。中心にはセンターハブがあり、バツ

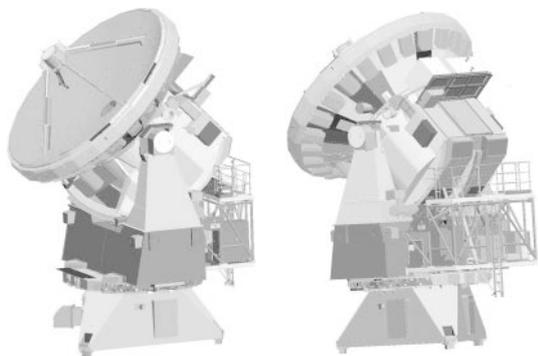


図1. 7mアンテナの外観

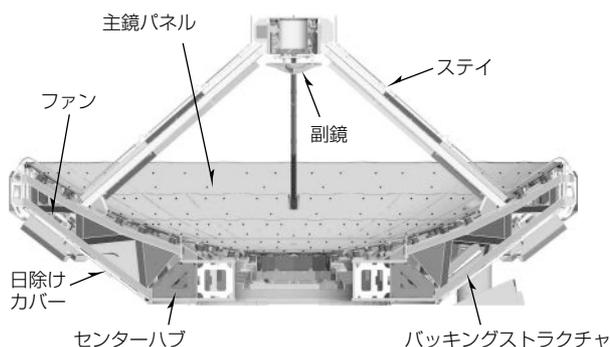


図2. 7mアンテナの主鏡部構造断面図

キングストラクチャー、スティを支持している。各主鏡パネルはバックリングストラクチャーから固定された3本のパネル調整機構によって支持されている。また、副反射鏡は6自由度の平行ジャッキによってスティ部から支持されている。これらの構造部材は鉄を用いており、その部材周囲は断熱材で完全に覆われている。さらに、主鏡部内を日射から遮断するために日除(よ)けがあり、外気を導入するためのファンも持っている。

## 3. 鏡面精度達成のための方法

### 3.1 設計方針

仕様では、鏡面精度は主鏡副鏡を組み合わせたものとして定義されている。主鏡面は放物面であり、相似形の放物面への変形は、新たな焦点位置に副鏡を調整することによって、鏡面精度へは影響を与えないことになる。このことを念頭に、主鏡部を次の方針で設計した。

- (1) 熱変形：一様な鏡面の膨張、収縮は、相似形の放物面への変形となる。主鏡部構造全体の温度を、昼夜含めて外気温度に完全に追従させ、温度むらを抑える。追従させにくい部位は熱時定数を大きくし、変形感度を鈍くする。
- (2) 自重変形：7mサイズでありながら、12mアンテナの主鏡部と同等重量を配分できる利点を活用し、主鏡部の剛性を高く設計し、自重変形悪化を抑える。
- (3) 風変形：受風面積が12mアンテナに比べて小さく、風荷重が少ない。12mアンテナでは風変形に配分していた誤差を、7mアンテナでは受信機室と主鏡部の連結熱変形部に配分する。主鏡部の風の流れを図3に示す。

### 3.2 熱変形を抑えるアイデア

シミュレーションによって、主鏡部全体の鉄材料の温度むらを最大1.5℃に抑える必要があることが分かった。直径7mもある構造物を昼夜を問わず、この温度むらに抑えるために次のような工夫をしている。

- (1) バックリングストラクチャーの材料を断熱部分と放熱部分に切り分けて温度を制御した。図4に示すようにリブ部に熱伝導率の低い断熱材を数十ミリ以上吹き付け、構造物が周囲から受ける熱影響(輻射(ふくしゃ)、熱風、

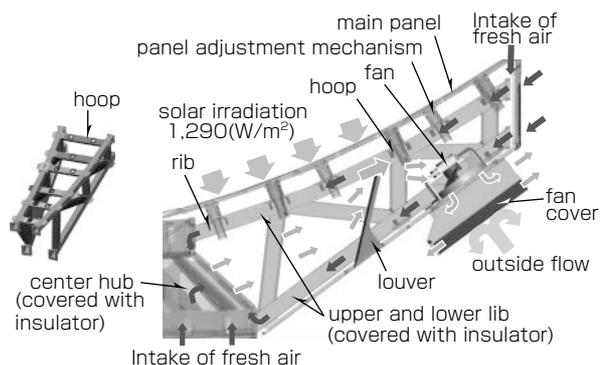


図3. 主鏡部の風の流れ

日除けすき間からの日射などを遮断。一方フープ部は、パネルからの熱がパネル調整機構を通じて入ってくるので、断熱せずに積極的に風が当たるように流路を設計して、放熱するようにしている。

- (2) 全体を同時に外気温度に追従させるために、すべてのバックিংストラクチャー材料の管の内部とセンターハブ内部に隈(くま)なく外気を高速流でかつ一様速度で吸引導入し、主鏡部背面に放出する。特にステイ内部では十数メートル以上の風速となる。また、屋外風速9m/秒の中でも、吸引風速に影響が少なくなる位置に、空気取入口と排気口を配置している。
- (3) アルミ主鏡パネルは直接日射を受け、表裏温度差による変形が発生しやすい。12mアンテナではパネル裏面に断熱材を張ることで温度差の発生を最小限にしていたが、7mアンテナではパネルをブロック化することで熱伝導性を良くすることで対応している。また、アンテナ姿勢変化などによる急速な日射の変化があっても温度変化が最小になるよう、ブロック化によって熱容量を稼ぐとともに、主鏡部内に吸引した高速流の外気をパネルの背面全体に吹き付けている。これらの工夫によって主鏡パネルの表裏温度差、温度変化に起因する変形が軽減されたため、主鏡パネルを支持するパネル調整機構を12mアンテナで5本であったものを3本に最少化することが可能となった(図5)。なお、調整機構には面内の熱変形を放射状に逃がすと同時にモーメント反力が作用しないよう球面軸受けが採用されている。
- (4) 主鏡骨組みの前面と背面にも温度差が発生すると変形を起こす。この温度差の原因である、パネル調整機構か

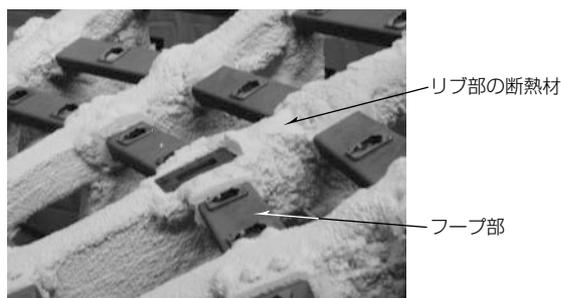


図4. 骨組み構造の断熱材施工状況

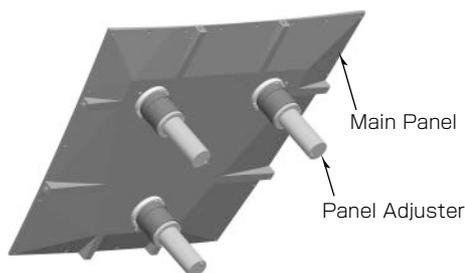


図5. 7mパネルとパネル調整機構

らの熱流入を抑えるため、パネル調整機構を支持しているフープ材(断熱していない横つなぎ材)を積極的に放熱面に利用することで、メインの鉄骨材に熱が流入する前に内部空気中に放熱させている。

- (5) 受信機室の熱変形が主鏡部に伝わることを最小にするために、スプリングプレートと称する板バネで連結している(図6)。このバネで受信機室の半径方向変形を主鏡部に伝えないようにしている。また、スプリングプレートの配置を中心位置に寄せ、受信機室インタフェース面の面外変形が、主鏡部に伝わりにくい構造としている。

### 3.3 自重変形と風変形を抑えるアイデア

- (1) 鉄骨材は12mアンテナで採用したCFRP材に比べて比剛性は落ちるが、放射状のメインリブを増やし、ステイ支持部のメインリブを補強することで主鏡部を固く作り、自重変形悪化を最小に抑えている。
- (2) ステイ構造をダブルからシングルの角管構造とすることで受風面積を減らし、風変形による副鏡の主鏡に対する相対変位を最小化している。また、それによる軽量化によってステイ重量が主鏡部に与える変形を小さく抑えている。

## 4. 設計結果と実験及び実測結果

### 4.1 部分モデルによる検証試験

設計コンセプト及び解析の妥当性を検証するために、主鏡部の円周方向部分モデルを実物大で製作し、試験を行った(図7)。

検証項目は、ファンでの強制対流によって所要の流速が

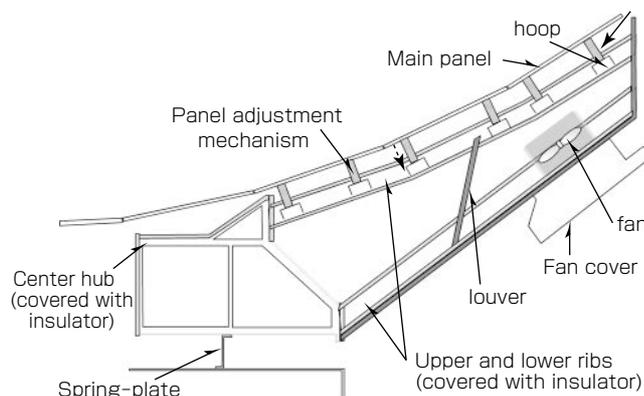


図6. スプリングプレートの配置図



図7. 部分モデル検証試験

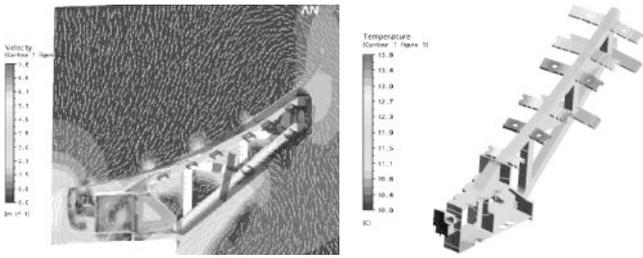


図8. CFDによる流速分布予測(左), 温度分布予測(右)

表1. 温度試験結果

検証項目	要求条件 検証試験(@ 0 m)	試験 結果
リップ上下の平均温度差	2.5℃以内	0.1℃
センターハブ上下面の平均温度差	2.5℃以内	0.3℃
バックングストラクチャ全体の平均温度上昇	2.5℃以内	0.7℃

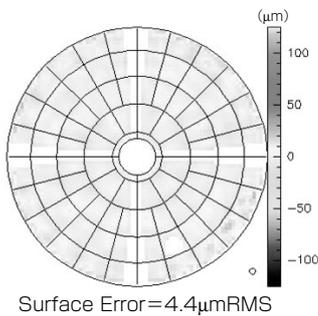


図9. 電波ホログラフィ測定による主鏡鏡面精度(国立天文台提供)

出るか、また、ヒーターでの強制加熱による熱量を適切に排熱して構造温度を目標値に抑えられているかである。図8にCFD(Computational Fluid Dynamics)による流速分布及び温度分布の予測を示す。

4.2 実機による検証試験

最終的な形状での性能を検証するために、実機で風量及び温度分布を検証した。風速及び温度分布とも目標値以下であることを確認できた(表1)。

4.3 客先による実測結果

最後に、国立天文台による性能検証結果を示す。図9は、調整実施後の主鏡面の電波ホログラフィ結果である。鏡面の理想放物面からの凹凸を表しており、全体で4.4μmRMSという高い鏡面精度を示している。これは、同サイズレベルの電波望遠鏡としては、世界最高の値との報告を受けている。図10は、ある時刻の鏡面を基準とした、鏡面変形の日変化を示したものであり、最内周と外周部で外気温及び日射による熱変形が見られる。この変形パターンは解析シミュレーションによって予測したものと良く一致している。図11は、鏡面精度の日変化を示したものである。下段が横軸に外気温を取ったグラフであり、仕様条件の外気温幅ΔT=40℃(-20~+20℃)に外挿しても、鏡面精度の要求仕様値25μmRMSを十分に満足していることが証明されている。

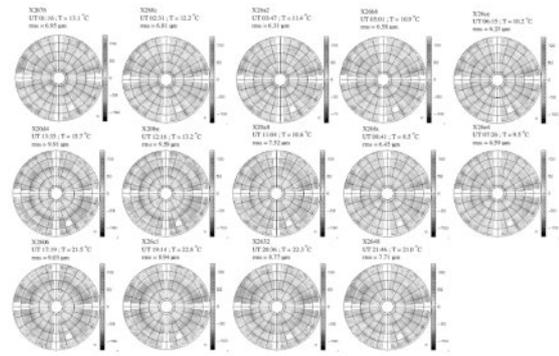


図10. 鏡面変形の日変化(国立天文台提供)

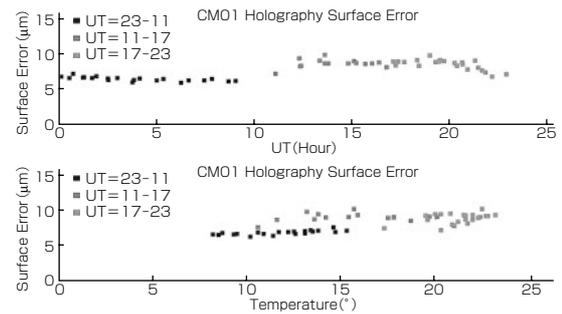


図11. 鏡面精度の日変化(国立天文台提供)

5. む す び

ACA 7 mアンテナでは量産機におけるコスト削減を実現するため、主鏡部にCFRPやインバー材の高価な素材を使用せず安価な鉄を選定し、そのデメリットを補うべく主鏡構造部の強制対流による均温化などの様々なアイデアと工夫を凝らし、シミュレーションやモデル試験による実証を積み上げて製品化を行った。その後、国立天文台による現地環境下での電波ホログラフィ試験が実施され、ACA 7 mアンテナは史上初の鉄製サブミリ主鏡であるのみならず、サブミリ波望遠鏡として世界最高性能の鏡面精度を持つことが実証された。紙面の都合上紹介できなかったが、その他にも日除けカバーの変形影響の遮断方法、副鏡への太陽光反射率の低減方法、受信機室の熱変形低減方法等多数の新規技術が投入されており、これらの技術の統合として鏡面精度が達成されたのである。

現在、ACAプロジェクトは、7 mアンテナ量産の最終段階に入っており、12mアンテナ3台が運用サイトである標高5,000mに、その他の10台が2,900m地点で5,000mへの移設を待っている。2012年度からの本格運用は目前である。

参考文献

- (1) 川口 昇, ほか: 望遠鏡で培った技術, 三菱電機技報, 83, No. 3, 183~186 (2009)
- (2) 高木淳治, ほか: ALMA高精度アンテナの主鏡技術, 日本赤外線学会誌, 19, No. 1& 2, 21~24 (2010)