へら絞り法によるコストダウン・短ミリ波帯アンテナの検討 ―― 事象の地平線観測に向けて

三好 真¹, 岡田則夫², 三ツ井健司², イシツカホセ³, 春日 隆⁴

(2013年6月7日受付; 2014年8月18日受理)

A Study for Cost Reduction in Making Antenna Surface for Short Millimeter-Wave Receiving —Toward the Observation of Black Hole Horizon

Makoto MIYOSHI, Norio OKADA, Kenji MITSUI, Jose ISHITSUKA, Takashi KASUGA

Abstract

The Caravan-submm is a 230GHz-VLBI network for observing black hole horizons that we plan to construct at Andes Mountains. To enhance the realization of the project, we are aiming cost down of the system. We examined an accuracy of the surface of antennas made by metal spinning method in order to realize cost-down in making a high precision antenna panel for receiving shorter millimeter wave around 230GHz. We found that surface accuracies of spinning antennas made from existing molds $80 \mu m r.m.s.$ on average. Also the portions of the surfaces more than half area show $\sim 30 \mu m r.m.s.$ We found that the accuracies of spinning method are quite high as well as $30 \mu m r.m.s.$, the surface accuracies of the mold we used here are around $50 \mu m r.m.s.$ while errors from the aluminum panels we used are $36 \sim 70 \mu m r.m.s.$ Errors of the panels came from their warp with $\sim 50 \mu m$ deviation. Therefore if we can use a fine mold and flat aluminum panels as well as $20 \mu m r.m.s.$ in each, $30 \mu m r.m.s.$ level surface accuracy can be realized in making antenna with using spinning method.

要旨

我々はブラックホール・ホライズンの撮像的観測を実現するため、230GHz帯のVLBIネットワークをアン デスに展開するきゃらばん・サブミリ計画を構想している.その実現性を高めるために短ミリ波帯アンテナの コストダウンをめざしている.へら絞り法は安価なアンテナ面製作法であるが、我々は短ミリ波帯の受信に用 いることができるか、そのアンテナ面の表面精度について調べた.既存の金型を用いた「へら絞り加工」に よって、平均面精度80µm r.m.s.が達成されている.またアンテナ面の50%以上の部分では30µm r.m.s.が達成 されている.「へら絞り加工」では工作精度は高く、30µm r.m.s.程度、我々の用いた金型の面精度は平均50µm r.m.s.、素材アルミ板に起因する残差は36~70µm r.m.s.程度であると推定する.アルミ板に起因する残差は、主 に板の反りによるものであり、それがアンテナ面に±50µm程度の変位をつくっている.この反りがへら絞り アンテナの面精度をきめる主要因である.従って面精度の高い金型を新規に形成し、素材として反りの小さい アルミ板を用いるならば、「へら絞り加工」によってさらに精度の良いアンテナ面、30µm r.m.s.レベルのアン テナ面形成を期待できる.

Key words: sub-millimeter antenna, spinning method

¹ 国立天文台·電波研究部(Division of Radio Astronomy, National Astronomical Observatory of Japan)

² 国立天文台・先端技術センター(Advanced Technology Center, National Astronomical Observatory of Japan)

³ ペルー地球物理観測所、GIP (Astronomy Division, Huancayo Observatory, Geophysical Institute of Peru (GIP))

⁴ 法政大学理工学部創生科学科(Department of Advanced Sciences, Faculty of Science and Engineering, HOSEI University)

1 はじめに

1.1 動機・目的

我々は、black hole horizonの存在確認やその近傍の 解像を目的として, 南米アンデス山脈ペルー・ボリ ビア域などに複数の電波望遠鏡を展開、VLBI観測を 行うプロジェクト、「きゃらばん・サブミリ (Caravansubmm)」を構想している[1]. サブミリ波に近い短ミ リ波帯、230GHz帯の観測のできる大型固定局2、移 動 VLBI 局1の最低3 局を展開し、1~2千kmの VLBI 短基線を実現, visibility 解析から銀河系中心にある 大質量ブラックホール, Sgr A*を観測, black hole horizonの世界初の検出を目指す. さらにALMAなど 世界のサブミリ波望遠鏡と協力して、ブラックホー ル近傍の撮像(降着円盤,ジェット生成現場やblack hole horizonの形状の観測) やメーザ源の高空間分解 能観測を行う.現在.装置全体のコストダウンによっ て本計画の実現を果たそうと考えている.「きゃらば ん・サブミリ (Caravan-submm)」の一番の特徴は移 動 VLBI 局である。移動 VLBI は測地 VLBI 観測では40 年近い歴史がある[2,3]. この移動局というアイデア

を電波天文VLBIへ応用する.アンデス高地を移動し て観測点を変え、様々なuv(空間フーリエ成分)を 確保する.

移動局の望遠鏡の性能仕様としては、230GHz受信 が可能である鏡面精度r.m.s.100µm(230GHz帯受信に おいて開口効率39.5%に相当)をもつ実効口径5m相 当を考えている.図1は鏡面精度と開口効率の関係 を示したものである。ALMAの素子アンテナでは鏡 面精度5µm r.m.s.の仕様を要求されている. これは観 測最高周波数として860GHz帯の観測を想定してい るためそれだけの鏡面精度を必要としているからで ある.一方,我々の目的とする観測周波数は230GHz 帯であり、約4倍周波数は低い、そのため必要鏡面 精度はALMAの素子アンテナに比較すれば粗くて良 い. 仮に鏡面精度が5µm r.m.s. あれば230GHzにおい て開口効率は99.8%となる(アンテナの照射分布は考 慮しない場合). 鏡面精度が30µm r.m.s. であれば開口 効率は92%, 60µm r.m.s. で71.6%である. 鏡面精度が 100µm r.m.s. においては39.5%となり、230GHz帯で実 用的な電波望遠鏡となる.ただこれ以上鏡面精度が 悪くなると230GHz帯では実用にならなくなる、鏡面 精度150µm r.m.s. では開口効率は12.4%となり、実用



図1:アンテナ鏡面精度(r.m.s.) と観測周波数による開口効率の関係:ALMAの観測最高周波数860GHz帯と比べ,我々が 観測目標とする230 GHz帯では周波数は4倍近く低く,そのため要求される鏡面精度はALMAに比べ低くてよい. 鏡面精度 300, 150, 100, 60, 50, 30, 20, 10, 5µm r.m.s.の場合での観測周波数とそのアンテナ開口効率の関係を示した.本図ではアン テナ照射分布(illumination)は考慮していない.

には適さない. 従って, 鏡面精度の最低目標を100μm r.m.s. とするのが合理的である.

現状では多額の予算の確保は難しくなっている.プ ロジェクトの実現性を高めるには費用を下げる工夫 が重要である。例えばALMA素子アンテナは受信・ 中間周波数伝送系などを除いても20億円以上かかる. 廉価な望遠鏡を実現するには,大型の精密製作設備 や材料を必要とする特殊仕様を極力排し. 既成部品 を大幅に用いる製作法を確立する必要がある.我々 は一つの方法として、口径2mの廉価で軽量な小型パ ラボラ数枚を複合させ、口径5m相当の単一電波望 遠鏡とすることを検討している[4]. 高精度の望遠鏡 を、廉価に製作しようとする動きは近年顕著になっ ており、この動きは電波望遠鏡よりも京都大学3.8m 望遠鏡計画のような光学赤外線望遠鏡、また、宇宙 線研のチェレンコフ望遠鏡アレイCTA(Cherenkov Telescope Array) などにおいて先行しているといって よい[5,6,7,8,9,10].

移動を前提とする望遠鏡においては全体の軽量化が 求められる.架台部に関してはKuritaらによる2.5m 光学赤外線望遠鏡を目指した優れた先行研究が日本に はある[8].その応用によって我々の移動型電波望遠 鏡においても,軽量かつ高精度の架台が実現できる見 通しがたっている.また,受信機ではALMA技術開 発での大量生産の確立,VLBI記録システムではその 共用性から多くの開発研究があり,我々が独自に取り 組んでコストダウンのための検討を行わねばならない わけではない.その一方,ミリ波帯より短い波長を受 信するアンテナを軽量化して移動に適した構造にする 研究開発はこれまでになく,倣うべき前例が存在しな い.従って,我々は検討の重点を軽量かつ高精度のア ンテナの開発におくことにした.

1.2 ミリ波サブミリ波帯小型アンテナの作成例

口径10mクラスまでの通信用アンテナは一般にカ タログ品として市販されている.しかし、ミリ波帯、 さらに230GHz帯用ともなると、小口径アンテナとい えども一般には市販されてはいない.そのため、ミリ 波・サブミリ波の電波天文観測用途としてはアンテナ を特注するなどの方法で製作するのが通例である.日 本における小型サブミリ波電波望遠鏡の製作として は、大阪府立大学ミリ波テラへルツ波研究所における 口径1.85mの例がある.アルミ鋳造でアンテナ本体の 製作を行い、その後、鏡面の切削による形成方法を とっている. この手法により17μm r.m.s.の精度をもつ 口径1.8mアンテナを実現している[11]. Onisiら[11] の大阪府立大1.85m鏡は非常に精度の高い電波望遠鏡 である. 一方, 我々は230GHz帯で実用になる100μm r.m.s. (開口効率39.5%相当)のアンテナを作成する ことを最低限の目標とした.

1.3 「へら絞り加工」によるアンテナ製作例

小型アンテナを廉価に作成した例として、日本では 早稲田大学大師堂研究室の64素子干渉計の素子アン テナが有名である[12]. 日本の独自技術である「へら 絞り加工」を用いている.「へら絞り加工」によるセ ンチ波帯のアンテナ製作は海外でも例があり、イギリ スのメーカQ-parでは、「へら絞り加工」によって製作 したアンテナを市販している[13]. しかしながら、こ れまで、「へら絞り加工」によって、ミリ波、サブミ リ波に対応する高精度アンテナを製作できるかどうか については,全く検討がなされていなかった¹⁾.我々 は、まず、廉価に製作した実績があるという観点から 「へら絞り加工」に着目した。当初の方針は、「へら 絞り加工」によって、300µm r.m.s. 程度のアンテナ面 を製作、それに研磨等で修正をかけ、最終的に100µm r.m.s. 程度に仕上げて、実用上230GHz帯受信に使える 小型アンテナを作ることであった. そのために, まず, 既存の金型を流用して「へら絞り加工」によるアンテ ナを作成、その面精度を計測することにした、本報告 はその調査計測結果をまとめるものである.

2 「へら絞り加工」によるアンテナ面形成

2.1 へら絞り加工とは

金属は弾性と塑性という2つの性質をもつ.弾性は 金属に力を加えたときに、反発して元にもどろうとす る性質、塑性は変形したままになる性質である.金 属の塑性を利用した加工技術を塑性加工技術という. 「へら絞り加工(スピニング加工:Spinningとも呼ぶ)」 は塑性加工技術の一つである.金属材料を回転させ、 専用工具("へら押し棒"と呼ぶ)を使い、局部的な 塑性変形を徐々に繰返し与え、全体の製品形状を形成 していく.「へら絞り加工」の歴史は古く、金属精錬 技術の進歩とともに発展してきた.実際のへら絞りは 金属を円盤状に加工したものを、絞り旋盤と呼ばれる 機械の回転軸に固定して、へら押し棒で絞って成形し ていく.絞り旋盤の回転軸にはあらかじめ、金型が固 定され、その金型に沿うように、へら押し棒を使っ

¹⁾ 国土地理院において「へら絞り加工」で製作した口径2mアンテナの鏡面精度の測定を行い、100µm r.m.s.を確認した先例がある.

て金属板を成形していく.大きさ,数mmの小さなも のから4mを超える大きさのものまでが,「へら絞り加 工」で形成できる.同じく塑性加工技術の一つである プレス加工では雄型と雌型の2つの金型を必要とする のに対し,「へら絞り加工」では雄型のみで加工を行 うことができる.つまり,金型製作費用は半分になる. 熟練度の高い作業者によってはプレス加工よりも高い 厚み精度を実現することができる.一方で,座屈や破 断が発生しやすいため難易度の高い加工法であるとい われる[14,15,16].

我々の目的, つまり「廉価に」「230GHz帯受信可能」 な小口径アンテナを少数、せいぜい10枚程度を製作す るためには、「へら絞り加工」は適している. 口径2m 程度のパラボラ面を10枚製作すると仮定する.2金型 の製作費は1枚300~400万円程度である. へら絞りの 加工賃は1枚20万円程度である。新規の金型作成を含 めて500万円程度で10枚の230GHz帯受信可能な2m口 径アンテナが作成できる可能性がある. つまり, 先に 引用したアルミ鋳造・鏡面切削法による大阪府立大学 の1.85mサブミリ波アンテナに比べても数分の1のコ ストダウンの可能性がある²⁾. 日本で最初に製作され た6mミリ波電波望遠鏡(1970年), その後の野辺山45m ミリ波望遠鏡(1982年)の製作の際にも「へら絞り加工」 によるアンテナ鏡面は検討された. しかし当時の「へら 絞り加工」では「無理やり板を変形させているのでス トレスが残り、かつ熱で変形しやすい」と評価されて 採用されなかった経緯がある[17]. しかし当時から45 年の歳月を経た2010年代における「へら絞り加工」に よる製作精度についての評価はこれまでない.

3 「へら絞り加工」による口径 90cm アン テナの作成

我々は最終的には口径 2m 程度のアンテナを製作し たいわけであるが、口径が 2m ともなるとその鏡面全 面の形状を簡単に計測できる測定装置は少ない. 口径 1m 程度であれば、国立天文台・先端技術センターの 三次元座標測定機(Mitsutoyo LEGEX-910)が有効に 利用できる. また、別目的のために製作された既存の 金型を流用すれば、金型製作の費用は発生しない. 加 工賃は1枚4万円程度からとなる. そこで、まずは既 存の金型を用いて、口径 90cm 余の絞りアンテナを作 成して、絞りアンテナの表面精度、パラボラ面として の鏡面精度を調べることにした. 「へら絞り加工」による口径 90cm アンテナの加工過 程をここに述べる.

図 2-(a) は金型の錆落としを行っている様子である. 我々が用いた既存の金型は鉄製の鋳物であり,その形 状は NC 旋盤で形成されている.鉄製であるため,保 存期間中に金型には赤錆が発生している.そのため, アンテナ加工作業の前段階として,金型にサンドペー パーをかけて,錆落としが行われた.図 2-(a) にみえ る金型の裏面にはモータがあり,そのモータの軸に金 型は取り付けられている.回転する金型の表面にへら でサンドペーパーを押しつけ,錆を落とす.また,金 型は鋳物であるため,経年劣化によって小さなこぼれ ができ,ところにより穴(へこみ)ができることがあ る.その穴のある半径では,アンテナ加工時にアンテ ナ面に同心円状の傷をつけることがある.錆落としが 終わった金型の表面にはオイルが塗装される.

図 2-(b) は金型に対して,加工するアルミ板を向か い合わせたところである.アルミ板の背後から伸びる 回転軸をクランプで調整して,アルミ板を金型に近づ け,金型へ押さえつけて固定してある.アンテナ形成 の素材であるアルミ板(我々は板厚 1.5mm と 3.0mm の板を用いた)はほぼ円に近い形に切ってある.最初 アルミ板は真円でなくてよい.「へら絞り加工」でパ ラボラ面に仕上げた後で,余分な外縁を削り落として 真円に仕上げることができるからである.

図 2-(c) はアルミ板をパラボラ状に変形させてゆく 様子である。金型側、アルミ板側のそれぞれの回転軸 を合わせ一本の軸として, 回転させる. この時, 両軸 が完全に同一直線上にある必要がある.が、何かで軸 の一致度を測定するのではなく、職人の感覚で調整 されてゆく. 最初, アルミ板の中心は回転軸上にない. およそのところで取り付け、回転させながら、アルミ 板の外縁を押して、中心を合わせる.このあと、金型 とアルミ板は、ともに同期して回転する. へら押し棒 でアルミ板を押しての加工が始まる. アルミ板の押し 加工は回転軸の内側から外に向けて進めていく. へら 押し棒の支点は治具によって固定させる. へら押しす る半径が大きく変わってくると、へら押し棒の支点位 置を変えるため、回転を一旦止めて、治具を調整して 支点を変更する. 最初のアンテナ製作ではこの支点位 置の調整は、3度行われた、アルミ板をへら押しで変 形させたあと、アルミ板を叩き、その音で、金型から の浮きを判断する、浮いている部分はそこをさらにへ ら押しする.基本的に中心部分から外に向けて、へら 押し棒で押していくが、ほぼ形状が整ったあと、各部 を叩いて, 浮きの確認をする. この時の押し直しに関 しては必ずしも内側からではなく、浮いている部分と 判断した箇所をその都度,へら押しする.

²⁾ 必要とする鏡面精度が異なる. 我々の当初の目標は面精度100µm r.m.s. 程度である. これは費用だけの比較である.



図 2:「へら絞り加工」による口径 90cm アンテナの製作工程:(a) 金型の錆落とし,(b) アルミ板の装着(加工前),(c) へら 押し作業,(d) 余分なアルミ材を削っての縁の真円加工,(e) 真円加工後の縁の形状,(f) 縁のカール加工,(g) 加工作業完了 時の様子,(h) 金型からのアンテナ面の取り外し.

図 2-(d) は縁の余分なアルミ板を削り取り,真円に 加工する様子である.パラボラ状に形成されたアルミ 板を回転させたまま,一人の職人がアルミ板の縁にグ ラインダをかける.もう一人の職人がアルミ板の縁に へらをあて,毳立ったアルミ板を削ってゆく.余分な アルミは薄皮となって,剥かれたリンゴの皮のように 削り落とされる.アルミ板の縁の部分は図 2-(e)のよ うに,パラボラ面のカーブに対して外向きに反ってお り,山高帽のつばのような形になっている.つば状に した縁はローラーのついた治具によりカールさせられ る (図 2-(f)).カールを形成したあとで,パラボラ面 をもう一度,叩いて聴音し,浮いた部分にへら押しを 行う.図 2-(g) は加工作業終了時のアンテナ面と金型 である.右側に青くみえる部分がモータである.

金型からアルミアンテナをはがす際には圧縮空気を アンテナの脇から吹き込む.すると,アンテナは簡単 にはがれる(図2-(f)).口径90cmアンテナの形成工 程は1時間かからない.アンテナ面のへら押し形成よ りも,縁を削り,さらに丸めてカールを形成する作 業に手間を要している.1.5mm厚のアルミ板の場合, 加工されたアンテナ面厚はノギス計測で1.37mm(或 る部分での測定値.全体を計測したのではない)となっ ていた.へら押しによってアルミ板は延ばされ,約 10%程薄くなっている.さらに薄いアルミ板での加 工を試そうと1mm厚での製作を依頼したが,加工中 に座屈が起こりアルミ板にしわができた.このしわは へら押しでは元に戻せない.1mmアルミ板での形成 は2度試したが,果たせなかった.口径90cmクラス の絞りアンテナをアルミ板厚,縁の形状,金型を変え て,我々は計4枚を製作した.

4 アンテナ面形状の測定法の確立

今回のへら絞りアンテナは板厚1.5mmと3mmのア ルミ板を用いて加工して形成した.「へら絞り加工」 ではアルミ板を押して変形させてゆくため,仕上がり 段階ではさらに若干薄いアンテナ面となることは既に 述べたとおりである.アンテナの縁を丸めるなどの加 工によってアンテナ全体の剛性は保持されているが, 手で力を加えるとたわませることはできる.実用的な アンテナに仕立てるのは,このアンテナ面のパラボラ 形状を維持するバックストラクチャが必要である.ア ンテナ面のパラボラ面としての精度を我々は調査した いのだが,この軟らかな構造物の形状をどのようにし て測定するかが最初の問題となった.最終的には縁を 6点で支持して固定する方法にたどり着いたが,以下 に測定法の検討について述べる.

4.1 三次元座標測定機

本測定で主に使用したのは国立天文台先端 技術センター所有のCNC三次元座標測定機 (Mitsutoyo LEGEX-910) である.その測定範囲は 900(x)×1000(y)×600(z) mmであり,指示誤差は測定長 をLmmとすれば(0.35+L/1000) μ mである.まず,図3 にLEGEX-910による通常の測定例を示す.アルミを 切削して1 μ m以下の精度で製作された口径60 cmの球



図3:(a)通常の三次元座標測定の様子(直径60cmの球面鏡の場合).(b)60cm球面鏡の鏡面残差分布.測定・解析の結果. 球の半径はr=4803.8715mm,最適フィット球面からの残差はσ=0.261µm r.m.s.(松尾宏氏所有.2003年に東芝生産技術 センターで切削加工を行ったもの).多くの場合,被計測物はこのように定盤上のしっかり固定できる形状である.



図4:三次元座標測定の試み.我々の絞りアンテナはそのままでは測定機定盤に固定できる形ではないため,固定法の工夫 が必要であった.右手前にゲージを置き,アンテナ裏面に接触させて,そのプローブ位置の変位をみた.三次元座標測定機 のプローブの接触によってアンテナ面は変位する.このようなアンテナ中心部のみの支持では十分な精度の測定はできない.

面鏡(2003年に東芝生産技術センターで切削加工を 行ったもの)の例である.この鏡には十分な肉厚があ り,裏面は平らな台があるのでそのまま測定台におい て測定している.測定精度としては0.1µmを達成して いる.接触型三次元座標測定機ではプローブが直に測 定物に触ってその位置を測る.そのため,接触時に微 少だが,衝撃(撃力)を与える.この例のように,通 常の測定物は固くて,三次元座標測定機のプローブの 接触による撃力程度³⁾では変形しない.

4.2 三次元座標測定におけるアンテナ支持法の検討

一方,我々が製作し,鏡面の形状測定を行うへら絞 りアンテナは大変,柔らかく,何らかの支持構造なし では測定時のプローブ接触によって測定点の位置は変 位する. どのように固定すれば計測できるであろう か? まず試みに,図4のように,へら絞りアンテナ の中心部に穴を開け,10cm角の微調整架台を取り付 けて,三次元座標測定プローブの接触により,絞りア ンテナ位置がどの程度変化するかを調べた.プローブ

を接触させると(接触以前に比べて)アンテナの外縁 は70µm沈む. また半径r=400mmの辺りでは60µm沈 み込む、半径に応じて変形して沈み込むことがわかっ た、プローブの接触によって測定した座標値が、どの 状態での値なのかは判別できない。接触によってアン テナ面が沈み込んだ時の値か、沈み込む途中での値な のか、あるいは沈み込む前の元の位置なのか判断する 術がない.アンテナ中心部のみを保持する方法では、 アンテナ面は測定プローブの接触によって変位するた め、アンテナ面を正確には計測できないことがわかっ た. 個々の測定点の測定精度は1µmをきっているの であろうが、「測定位置がどこであるかわからない」 という意味で、この測定実験での測定精度は100um 程度と思われる.アンテナの底部を固定するだけでは、 アンテナ全体を静定させて計測することはできなかっ た、アンテナ全面を変形させずに保持する必要がある、 そこでアンテナをビーズで敷き詰めて作った床の上に 置き,アンテナ全面をビーズ床に安置して固定しよう と試みた、しかし、発泡スチロール製のビーズは密度 が低く、測定プローブの撃力によって、アンテナは ビーズの床へ沈み込んでゆき,固定は失敗,精度の良 い測定はできなかった.

³⁾ LEGEX-910の場合、プローブは被計測物に速度3mm/secで接近し、 0.3N以上の力を受けると位置を検出する.

4.3 支持柱固定による三次元座標測定

アンテナ全面を固定することはあきらめ、6本の支 持柱を立て, アンテナの縁を支持柱上部で固定して, 三次元座標測定を行った、その結果、安定して、アン テナ全体を固定することに成功し, 三次元座標測定機 の性能を生かした測定が可能であることがわかった. 以下に、その詳細を述べる、アンテナの縁は丸い縁の もの (カール), 平らなつばを付けたもの (フラット) の2種類を作成した、どちらのアンテナについても、 縁を支持柱にのせ、留め具で締め付けることでうまく アンテナを固定して計測できることがわかった(図5). 三次元座標測定機の基盤に対して口径90cmのアンテ ナは載せることのできるほぼ最大サイズである.6本 の支持柱は本来アンテナ中心に対して60度間隔に立 てるべきであるが、固定すべき基盤からはみ出してし まう. そのため, 可能な限り等間隔に近づけて支持柱 を立てることですませた(図5(a)).アンテナの外縁 はL字型の留め具で押さえつけ、留め具に通したボル トの締めによって固定した. 外縁をカールさせたアン テナの場合はそのカールの丸みを、外縁がフラットな 場合はその平板部分を金具で押さえた(図5(b), (c)). また留め具や支持柱がアンテナ面に接触して外圧をか けることのないよう、アンテナとそれらはアンテナ外 縁部分以外では接触させないようにした.

アンテナ面を支持柱に対して回転させて再度の測定

をしたところ,パラボラ面フィット後の残差分布もア ンテナの回転とともに回転することを確認した.この ことから,支持柱での固定による圧迫がアンテナ形状 に与える変形は小さく,アンテナ面本来の形状を変形 させることなく測定していると判断できた.

さら詳しく、6本の支持柱をアンテナの縁に立て て固定した際、その留め具の締め付けが与えるアン テナ面への影響を調べた. トルクレンチによって留 め具を締め、留め具の固定の強さを定量的に調整し た. 図6(a)は測定したz座標の変化(差分)を示した ものである. トルク4.5Nmでは. パラボラからの残 差92.9µm r.m.s. であった. (a) の各図はトルク4.5Nm での測定値を基準として、0.3Nm、0.1Nm、Free (=完 全に緩める)とトルクを変えた場合の各測定点のz座 標成分の変化を示している.締め付けを緩めるに従っ て、アンテナ面のうち外縁部が浮き上がってくる. 逆 に下降する部分もある. その変位は最大締め付けトル ク(4.5Nm)での固定と完全自由(留め具は縁に載っ ているだけの状態)では0.3mmである. しかしこの ような大きな変位を示すのはアンテナ外縁であって、 中心部分での変位は小さい.6本の支持柱上部面は一 つの基準平面を作り出していると考えられるが. アン テナ縁をこのように基準平面に合わせるように固定し た場合、その固定による外力はアンテナのパラボラ面 へは及ばず,アンテナ面の変形はあっても小さい.図 6(b)には三次元座標測定結果にパラボラ面フィット



図5: 我々がたどり着いたアンテナ面の固定法.(a)支持柱にアンテナの外縁を固定する.アルミ製のL字金具をボルトで 締めることで,アンテナ縁を支持柱に押しつけ固定する.(b)カール縁のアンテナの固定の場合.アルミ製のL字の面をボ ルト締めすることで押しつける.(c)フラット縁のアンテナの固定の場合.アンテナ外縁の複数点で固定・支持することで 計測が可能となった.口径90cmアンテナ面上を4cm間隔の格子点400点の座標を計測した.プログラムを組んで自動計測 させると40分程度で全面を測定できる.



図6:支持柱への固定強度が鏡面形状に与える影響の調査.固定ネジの締め付けトルクを変えてアンテナ面形状の変化を測定した.(a)測定z座標の変動.アンテナ外縁がネジを緩めるにつれ浮き上がってくる.4.5Nmで締め付けて測定した場合の値を基準にした.締め付けトルク,0.3Nm,0.1Nm,0Nm(留めない場合)で留め具を締めて測定した時のz座標相対値. (b)パラボラ面フィット後の残差分布の比較.ネジを緩めても、アンテナ面形状に与える影響は小さい.上からそれぞれ、4.5Nm,0.3Nm,0.0Nmのモーメントにてトルクレンチで留め具を締めた場合の測定から.

を行い,その残差分布を示した.それぞれの残差は 92.9µm r.m.s. (4.5Nmの場合),95.7µm r.m.s. (0.3 Nm の場合),101.8µm r.m.s. (完全自由の場合)である. これ以外に,トルクを0.2Nm,0.1Nm,0.04Nmとして, 計6通りのトルクにおいて測定を行ったが,残差は留 め具を緩めるに従って大きくはなるがその差は最大で ~10µm r.m.s.である.また残差分布の形状はどれもよ く似ていて,締め付けトルクの変化によって残差分布 が全く異なってしまうものではなかった.

支持柱による固定法の成功は実際の電波望遠鏡設計 にも示唆を与える.「へら絞り加工」ではその最後に 縁を加工して丸める(カール)か平坦(フラット)な 形状にした.アンテナを回転させながら加工すること によって縁は,回転軸に垂直な或る平面に収まるので あろう.その縁を6本の支持柱で規定される平面に固 定することで,アンテナ面は絞り加工時に形成された そのパラボラ面を再現すると考えられる.実際のアン テナ面の固定においても一つの基準平面を作り,そこ にアンテナの縁を固定することができればパラボラ面 の形状は維持されると思われる.しかもこの時の取り 付けによる外力はアンテナ面の内側にはほとんど影響 を及ぼさないであろう.

アンテナの縁に支持柱をたてて,留め具で固定して アンテナを支持することで,アンテナ面の形状を三次 元座標測定機が本来もつ計測精度で測定可能となった. 次にその結果を述べる.

5 「へら絞り加工」によるアンテナ面精度 (90cm アンテナ)

5.1 測定結果

我々は口径90cmの絞りアンテナを計4枚製作した. 国立天文台・先端技術センターでそれらの三次元座標 測定を行い,各々,自動計測プログラムによって,ア ンテナ面上の4cm間隔の格子点,349点を約40分間で 測定した.表1に三次元座標測定データにパラボラ面 をフィットして得た残差と焦点距離を示す.

アンテナ1号を使っての鏡面測定法を検討,その確 立後,素材アルミ板の板厚を3mmに変えてアンテナ2 号を加工して,アルミ厚による面精度の違いを調べよ うとした.当初の三次元座標測定では,アンテナ1号 の鏡面精度が61.8µmであるのに対してアンテナ2号 のそれは117.6µmとなり,あたかも素材アルミ板厚が 薄い方が鏡面精度は良いのではないかと思われる数値 となった(その後の複数回の再計測からアンテナ2号 の最初のこの測定値は誤りと判明した).しかし焦点 距離が1号では約320mmであるのに対してアンテナ2 号では約300mmであるため,誤って,異なる金型を 使って製作した可能性が高かった.

そこで、確実に同一金型(アンテナ2号を製作し た金型. 設計上の焦点距離300mm)を用いて素材ア ルミ板厚を変えた2枚の製作を絞りメーカに依頼した. アンテナ3号、4号がそれらである.これらの鏡面の 三次元座標測定結果では、アルミ板厚が薄い1.5mm の方が、アルミ板厚3.0mmの素材を用いた場合よりも、 鏡面精度が2倍悪くなるという結果となった.同一金 型によるアンテナ2号(の正しい測定結果)とあわせ て考えると、素材アルミ板厚3.0mmの方が鏡面加工 精度は良いかのような結果になる. しかしアンテナ1 号では(別の金型による製作だが)素材アルミ板厚 1.5mmによって面精度61.8µmが達成されている. そ のため,素材アルミ板厚に依存して加工精度が確実に 変わるとはいえない結果となった(なぜアンテナ3号 の面精度だけが他のアンテナに比べて悪いのかはあと で考察する).

図7は鏡面残差の分布を4枚の口径90cmアンテナ について示した. 三次元座標測定によって4cm間隔 の格子点349点の座標を計測したが,それらに対する 最適パラボラ面に対して変位の大きいデータから除 外してゆき残差がいくらになるかを示したものであ る.分布曲線はまず,アンテナ1,2,4号がよく似て いるのに比べて,アンテナ3号の分布曲線が大きく 外れている.アンテナ1,2,4号では鏡面の88~97% の部分に限定すると残差は40µm r.m.s.になる.鏡面

アンテナ	厚(mm)	金型	縁	鏡面精度(測定日)	再測定(2012/8/28)	経過日数	焦点距離(mm)
1号	1.5	I型	カール	61.8µm (2011/1/7)	56.69μm (31.7μm@79%)	599	319.55
2号	3.0	II型	フラット	117.6µm (2011/1/7)	78.57µm (32.4µm@83%)	599	299.46
3号	1.5	II型	カール	$119.5 \mu m$ (2011/4/12)	120.35μm (60.9μm@71%)	504	299.94
4号	3.0	II型	カール	59.2µm (2011/4/12)	60.60μm (33.4μm@75%)	504	299.43

表1:アンテナ面精度の測定.再測定では初回の測定値とほぼ同じ値が得られた.右端の再測定時の欄には全測定点での値の他,大きく外れた測定点を外した場合の面精度とその際使用したデータの割合も記した.焦点距離の値は再測定時のデータ解析から.厚は加工前のアルミ素材の板厚.なお重量は1.5ミリ厚で2.6kg,3ミリ厚で5.2kgとなる.



図7:口径90cmアンテナ,4枚における鏡面残差の割合.アンテナ全面に対する最適フィット面に対し,変位の大きなデー タ点を外してゆくと,当然残りのデータ点が示す残差は小さくなる.アンテナ1,2,4号では鏡面の80%の部分では30µm *r.m.s.*が達成されていることなる.

の70~85%の部分の限定では残差は30μm r.m.s. になる. 鏡面精度の悪いアンテナ3号についても,鏡面の40% の部分では残差は30μm r.m.s. になっている.

このことは全体の面精度を改良できる可能性を示している.全体としての面精度に制限を与えている要因は何かを次に調べる.

5.2 鏡面変位の位置角依存性

まず最適パラボラ面に対して、大きな変位を示す部 分がどこにあるのか、残差分布をみた.図6-(b)にお ける上図(4.5Nmの図)をみると、鏡面全体に対して 最適パラボラ面から変位の大きい部分は均一に現れる のではなく、大局的な上下の変位部分として存在する ことがわかる.ちょうど黄色の矢印で示した方向に変 位がプラスになる部分が連なっており、これに垂直な 方向では変位がマイナスになる部分が多い.

しかも、この中心からの位置角に依存した大局的な 変位はすべてのへら絞りアンテナに存在する.図8は、 鏡面を中心からの位置角で分割し、全体に対しての最 適フィットであるパラボラ面からの上下方向(z軸) の変位を示したものである.4枚の口径90cmアンテナ、 2枚の口径1.8mアンテナの計6枚について示した.こ れら6枚に共通して、連続する位置角90°の範囲では、 マイナスの変位を、残る連続する位置角90°の範囲で はプラスの変位をしている.図8に示すように平均変 位は位置角の半分(0°から90°)ではマイナス,残り 半分の位置角(90°から180°)ではプラスを示す.

大きな変位を示すのは口径1.8mのアンテナ2号と 口径90cmのアンテナ3号である. それらではプラス 側の変位が100~150μmとなり、マイナス側の変位よ り大きいという非対称性がある。この非対称な成分を 別にした場合、変位の絶対値は平均して50um程度で ある. つまり最適パラボラに対して、アンテナは或る 方向では面が開き、その直角方向には面が窄んでいる. すべてのへら絞りアンテナにおいて、アンテナ面に反 りが存在することになる. そして、口径90cmアンテ ナ4枚の最適フィット・パラボラ面からの残差が平均 80µm r.m.s. であることと比較してこの反りは大きいと いわねばならない.「へら絞り加工」では金型と素材 を回転軸の周りに回転させて加工を行うので非軸対称 性は現れにくいはずである.また,金型も旋盤で製作 されるのでその非軸対称性の誤差は大きくないはずで ある. つまり、この反りは金型の形状や「へら絞り加 工」に由来するとは考えにくい、素材としているアル ミ板では圧延によるアルミ板製作時の残留応力による アルミ板の反りが起こることが知られている. 鏡面精 度を左右する大きな要因として素材のアルミ板の反り があるのではないか? この点に関しては、後の議論 の章において考察する.



図8:鏡面各部分の変位の位置角依存性. 作成したへら絞りアンテナ6枚に共通して面の反りが存在している. 横軸に中心 からの位置角(7.5度刻み),縦軸にアンテナ全面への最適フィット・パラボラ面からの変位の平均値を示す. この図では位 置角0度から90度の範囲での変位平均が最小になるように角度原点を角度を回して表示している. 位置角の半分で変位はマ イナス,残り半分でプラスの変位を示す.

5.3 アンテナ3号について

図8では口径1.8mの絞りアンテナについても含め ているが、口径90cmアンテナ3号は口径1.8mアンテ ナ1号についで大きな変位を示す. このように口径 90cmアンテナ4枚のうちでアンテナ3号は他の3枚か らはかなり外れた特徴を示している.(1) 鏡面精度. (2) 残差分布, (3) 位置角の関数としての平均変位の 大きさ、の3つにおいて違いが明確に見える. アンテ ナ3号の示す特性には特殊な理由があると考えられる. 一つの大きな可能性は、アンテナ3号に用いた素材ア ルミ板である.アンテナ3号は、当初、板厚1mmの アルミ板を素材として製作するはずであった. ところ が、先に述べたように板厚1mmでは座屈が起きてし まい、へら絞りアンテナの作成に失敗した. 実験目的 はアルミ板厚による面精度の違いを調べることであっ たので、急遽1.5mm厚のアルミ板でアンテナ3号は作 成した.他のアンテナ加工においては十分な準備期 間があったが、アンテナ3号に関してはその時間がな かった.用いたアルミ素材の材質に何か原因があった のかも知れない.

5.4 外力に対する復元性

我々の絞りアンテナは板厚1.5mmと3mmのアルミ 板を素材に形成した. へら絞りによって形成されたパ ラボラ形状はいわばシェル構造であり, もとの平面状 のアルミ面に比べれば遙かに外力に対してその形状は 変形しにくい. しかし, 外力に対してはどの程度の耐 性があるのだろうか?

およそ1年から1年半の間,アンテナは気泡入り緩 衝材をはさんで特段の考慮はなしに重ね置きして保管 していた.アンテナの自重はおよそ3kg(板厚1.5mm の場合)または6kg(板厚3mmの場合)である.そ のため,凹面を上にした状態で,アンテナには最大 12kgwの力が,かかっていたことになる.この外力に よってアンテナ面は塑性変形し面精度が変化したか どうかを,再度三次元座標測定を行い調査した.表1 にその結果は示してある.4枚のアンテナのうち2枚 (3号・4号)は2µm r.m.s.以下の違い,1枚(1号)は 5µm r.m.s.以下の違いしか示さなかった.アンテナ2 号においてはむしろ30µm r.m.s.もの残差の改善が起き ている(理由は不明).

このように,再測定の結果からは,その間のアンテ ナ面の面精度の劣化は認められない.「へら絞り加工」 によって形成された形状は,一時的な外からの応力に よっては塑性的な変形はせず,長期にわたって,少な くとも1,2年は維持される.

我々が構想している移動型電波望遠鏡では、その組 立・分解・移動を何度も繰り返す.アンテナは望遠鏡 に取り付け,観測地の変更のために,取り外し,輸送 車のなかに保管・運搬される.この測定結果は、「ア ンテナ面の取り扱いにどの程度の注意を払えばよい か」の示唆を与える.緩衝材を挟んで重ねて保管して も、10kgw程度の外力では面精度を損なわない.ラフ な扱いをする可能性のある移動型電波望遠鏡のアンテ ナ面として向いている.

6 2枚の1.8m 金型の製作とそれらの面形状 比較

口径90cmのへら絞りアンテナでは予想以上に良い 鏡面精度が測定された.また「へら絞り加工」には面 形状の再現性もある.口径1.8mの金型を用い,絞り 加工によって2枚のアンテナ面を作り,その形状を比 較することで,2m近い大きさのへら絞りアンテナに おいても一定精度で加工製造できるか調べた.

6.1 口径 1.8m アンテナの製作と三次元座標測定

ここで用いた金型は20年以上前に製作され,保管 されていたもので,いたんでおり面自体に目視で確認 できる穴や傷も見受けられる.また用いた金型は正確 にはパラボラ面ではない.各半径を"球面"で逐次近 似して形成,全体をパラボラ面に仕上げていったもの である.「へら絞り加工」は口径1.8mにもかかわらず, 面の加工に要する時間は30分程度であった.これは 口径90cmの場合と大差ない.加工作業の最後にアン テナの端をまるめて丸縁を作るが,この加工作業に時 間はかかる.全体で1時間強を要したが,これは口径 90cmアンテナの全・加工時間とあまり差がない.

口径1.8mともなると、その計測範囲を超えるため、 国立天文台・先端技術センターの三次元座標測定機 では測定できない.そこで、京都のクリスタル光学 (株)が所有するカール・ツァイス三次元座標測定機 MMZ-G30/60/20を用いて測定した.同測定機の測定 範囲は3000×6000×2000mmであり、乗用車1台分の 大きさの物体の形状を測ることができる.我々は4cm 間隔の格子点1605点の座標測定を行った.1回の測定 には約6時間余りを要した.図9には口径1.8mアンテ ナの作成、三次元座標測定の様子を示す.

6.2 測定結果

6.2.1 アンテナ面の形状

測定値に対してパラボラ面フィットを行い,パラボ ラ面からの残差を求めた.二枚の作成したアンテナの 残差は各々234µm r.m.s.,265µm r.m.s.,二次係数から 求めた焦点距離はそれぞれ476.36mm,474.12mmであ り,焦点距離の差では2.24mm,0.4%の違いで収まっ ている.パラボラ面としての鏡面精度は先の90cm口 径のアンテナに比べて2.5倍悪い.金型面を目視して 即座に傷や穴が見つかること,さらにその手触りは口 径90cm用の金型のそれにくらべなめらかでないなど, 金型の面精度が良くないことは予測できたが,そのと おりの測定結果となった.図10は鏡面の全測定デー タに対するパラボラ面フィットを行った際,部分的な 鏡面精度はどのくらいになるかをみたものである.例 えば残差が0.05mm (50µm) r.m.s.となるのは全面の約



図9:口径1.8mアンテナの製作(右図)と大型三次元座標測定機による測定風景(左図).なお口径1.8mアンテナの重量は 20kg程度である.

20%である. 残差が0.1mm (100µm) *r.m.s.* となるデー タ点は全面の約50%になることがわかる.

この金型は"球面"で各半径を近似し擬似的にパラ ボラ面にしていったものであり、一つのパラボラとし ては精度は悪くなっている.図11の示す残差分布に は同心円が現れる.そこで各半径でリング状に鏡面を 分割して、各リング領域内(幅90mmごとに、中心か らの半径を30mmずつ変えたリング内)の測定データ に独立のパラボラ面フィットを行い、残差と焦点距離 を求めてみた.図12は残差の、図13は焦点距離の結 果である. 半径ごとの最適パラボラを選ぶと, 全体 に対してフィットした場合に比べてパラボラからの ずれ, つまり残差は小さくなる. その残差は最小で 13.6µm r.m.s. (アンテナ1号:半径90mm~135mmの領 域), 最大で311µm r.m.s. (アンテナ2号:半径870mm ~外縁の領域) と15倍の開きがある. 半径100mm から600mmまでは残差は50µm r.m.s. 以下と小さいが, それよりも外径では残差は大きくなり100µm r.m.s. を 超え, 最外縁では250µm r.m.s. 程度となる. また, 焦 点距離は (パラボラとして形成されていない中心部の



図10:口径1.8mアンテナでの全面に占める鏡面精度の割合.図7と同じプロットを口径1.8mアンテナについて行った.全面最適フィットのパラボラ面パラメータに対しての残差.



図11:作成した口径1.8mアンテナ,2枚の鏡面変位分布の比較図.ともに、同一半径にフィット・パラボラ面から大きく 外れる部分がある.特に半径300mmあたりにおいて残差が大きくなっている.また、中心部分の残差も大きいが、中心部 分は金型自体の形状が平面になっているためである.

半径120mm以内と残差が非常に大きい半径870mm以上の部分を除いても), f=444.2mm~487.7mmと43mm もの範囲に焦点位置は分散する.これら焦点距離の最 小値(半径172.5mm)と最大値(半径262.5mm)を示 す半径は近接している.この間の半径は図11におい て,パラボラ面からの残差が大きい半径150mmから 300mmにかけての部分である.全面を一つのパラボ ラとしてフィットした場合の残差は250µm r.m.s.前後 となり、230GHz帯(波長で1.3mm)での開口効率は 10%に満たないものとなる(この口径1.8m絞りアン



図12:口径1.8mアンテナの全面を半径ごとのデータに分割,各リング領域に独立のパラボラフィットした場合の各リング領域の鏡面精度.各部分の面精度は悪くない.大局的な形状がパラボラから外れているため一枚のパラボラアンテナ面としては面精度を落としていることがわかる.

テナ面そのものは230GHz帯の受信アンテナとしては 適合しない).

この1.8m口径アンテナの金型面が球面による逐次 近似で形成されたものであることは、パラボラ面では なく、球面を各リング領域にフィットした場合の残差 からもうかがえる。パラボラ面は焦点位置(*x,y,z*)と焦 点距離fの4つのパラメータがある。球面の場合も球 の中心(*x,y,z*)と半径rの4つがパラメータであり、自 由度は共通している。図14では球面フィットした場 合の残差をパラボラ面フィットの場合の残差との差で



図13:口径1.8mアンテナの全面を半径ごとのデータに分割,各リング領域に独立のパラボラフィットした場合の各リング領域の焦点距離.このアンテナ面では部分ごとの焦点位置のばらつきが波長1.3mmに対して大きく,受信波面を位相同期させての集光はできない.



図14:口径1.8mアンテナの全面を半径ごとのデータに分割,各リング領域に独立の球面フィットした場合の各リング領域の残差の差(パラボラ面フィットした場合の残差に対する差).値がマイナスになるのはその領域の形状がパラボラ面より 球面に近いことを意味する.特に半径700mmより外側ではパラボラ面よりも球面とみなすべきであることがわかる.

示したものである. 差の値がゼロからマイナスである ことは球面フィットの度合いがパラボラ面フィットよ りも良いことを意味する. 特に半径が大きくなると残 差の差は100µm以上になり, パラボラ面フィットよ りも球面フィットの方が良くフィットしている. この 口径1.8mアンテナの金型が複数の球面による逐次近 似であったことを強く示している.

なお、部分的な傷や穴は鏡面精度を悪くすることに 大きな寄与は与えていない、それらはへら絞りアンテ ナ面に同心円状のかき傷を作る、もしもこれが大きく 面精度を損なう要因ならばその半径を含むリング領域 のパラボラ面フィットの残差が大きくなるはずである、 しかし、図12ではそのような傷がある半径500mm以 内のどのリング領域の残差も小さく、面精度を損なう 主たる要因ではないことがわかる.

6.2.2 2枚のアンテナ面の形状の比較

次に2枚のアンテナの面形状を比較して、「へら絞り加工」において、金型からの面形状がどのくらい正確に写し取れるのかを検討する。実のところ、金型の面形状を測定できていないこと、以下に述べるように異なる測定データの測定座標を比べる際には測定機の測定精度よりも1桁は悪い精度での議論となるため面形状の転写度を数値で示すことは難しい。そのため検定によって面形状が同一であるかどうかを判定することにした。

まず、2枚のアンテナ面の位置測定データのz軸座 標成分に関する差分を求めることにした.三次元座標 測定時にはパラボラ面の底,アンテナの中心位置を測 定座標系の原点として計測を行っているがその位置は 目視で合わせているため、ずれがどうしても発生す る. 口径90cmアンテナを含めてこれまで延べ20回以 上の三次元座標測定を行ったが、そのずれは少ない場 合でも100µm程度はあり、1~2mmのずれがあること もあった.そのため2枚のアンテナの位置測定データ のz軸座標成分の差分を直接とると大きな誤差が生じ る.そこで、アンテナ中心位置のアライメントを行い、 その修正をして、x-y平面上で近接している3点の値 を補間してz軸座標成分を得て、その差を求める必要 がある.2枚のアンテナ面の三次元座標測定データに 対して, 焦点距離をf=474.5mmと固定してパラボラ 面フィットを行い, アンテナ中心 (=パラボラ面の底) の座標 (x_0 , y_0 , z_0)を自由パラメータとしてこれを推定 した.

表2はそのフィット結果である。各々の残差は 246.7µm r.m.s., 283.2µm r.m.s. となった. 従って, 2枚 のアンテナ面が全く独立の形状であれば、差分を取っ た場合の偏差は √246.7²+283.2²=376µm r.m.s. 程度にな るはずである.ところが、両者データの座標アライ メント修正後得た2面のz軸座標成分の差分の標準偏 差は140µm r.m.s.となった. これは2面の形状が独立 ではなく,非常に強い相関をもつことを意味してい る.図15にはそれぞれのアンテナ面のフィット・パ ラボラ面からの各測定点z軸座標成分の変位をアンテ ナ中心からの距離の関数としてプロットしたものであ る.変位の分布は2つのアンテナにおいて非常によく 似ている.ここで、半径方向に17区分をとり、それ らの幅50mm~100mmのリング領域での測定点の変位 の平均値を比べ、各々のアンテナ面での変位分布が同 ーであるかを検定した結果, 99.9999%の信頼度で, 2 面のずれの分布は「同一でないとはいえない」結果と なった. 中心からの角度分布では分布が角度に強く依 存している分布とはならない.次に中心角を15度ご とに区切り24区分を作り、それらの変位平均値に対 して検定を施したが、その結果は半径方向での区分の 場合と同じく、99.9999%の信頼度で、2面のずれの分 布は「同一でないとはいえない」結果となった. さら に中心角度,半径の両方で70の小領域に区分けして, 同様の検定をも行ったが、その結果も同様であった

次に多重球面としてモデル化した場合のパラメータ で比較して形状の同一性を調べた.各半径領域で独立 に球面フィットした残差,及び球半径についてχ二乗 検定を用い,二つの分布が同一でないと判断できるか どうか検定した.その結果,残差の分布においては 「両者が同一ではない」ということは信頼度99.99%以 上ではできず,球半径の分布についても「両者が同 ーではない」とは,信頼度99.25%で,いえなかった. つまり,2枚のアンテナ面に顕著な違いは現れず,非 常によく似ている.このことから「へら絞り加工」ア ンテナを複数作成した場合、それらの面形状の同一性 は高いことがわかる.

アンテナ	$x_0 (mm)$	y_0 (mm)	$z_0 (\mathrm{mm})$	鏡面精度
1号	0.0824	-1.1483	419.999	246.7µm
2号	-0.0707	-0.0835	419.072	283.2µm

表2:口径1.8mアンテナの三次元座標測定データへの固定焦点距離(f=474.5mm)のパラボラ面フィットの結果.



図15:口径1.8mアンテナ2枚での鏡面変位.固定焦点距離(f=474.5mm)のパラボラ面をフィットし、その面からの変位 をアンテナ中心からの距離の関数としてプロットした.

7 議論

7.1 パラボラ面からの残差の主要因

先の口径1.8mアンテナでは、金型面に目視確認で きる傷や穴が目立つのだが、これらは面精度には一番 の影響を与えてはいなかった。それではへら絞りアン テナ面の残差は何が主につくりだしているのだろう か? パラボラ面フィット後の残差分布の第一要因 は、金型自体の形状や絞り作業で生じたゆがみではな く,使用したアルミ板の反りにあり,これは作成工程 である圧延時の残留応力⁴⁾によるものであると我々 は結論する.先の章5.2で示したように,へら絞りア ンテナはすべて,そのパラボラ面残差に反りが見受け られる.中心からの位置角の半分でアンテナ面はプラ スに,残りの半分でマイナスに変位する.金型や回転 加工である「へら絞り加工」の作業によって生じたと 考えるよりも,素材であるアルミ板の特性であると考 える方が自然である.

最適パラボラ面からの残差が最も大きいアンテナ3 号を例として用いて説明する.残差分布のうちプラス を示す部分の広がりはアルミ圧延の方向と一致してい る.図6(b)をみればわかるが,左右の縁の残差はプラ スであり,上下の縁はマイナスを示す.残差がプラス である部分は右から左につながっているようにみえる.

⁴⁾残留応力:金属材料に外力を加えるとそれに反発する内力が発生する。外力を取り除いた後も内力が多少残る場合があり、これを残留応力と呼ぶ。たとえば、薄い金属板を曲げていた手を離した際、元の形状まで戻れば残留応力は生じないが、戻らず変形が残る場合は残留応力が発生する。残留応力の方向は外力とは逆向きになる。



図16:アルミ板形成における過程の一つである圧延においてに形成されたと思われる縦縞(本図の黄色矢印に並行).「へら 絞り加工」の作業時についた同心円状の傷(本図の二本の赤曲線で示す円弧の方向)の方が卓越しているが、それとは別に、 ほぼ上下方向に延びる縦縞がそれである.アンテナ中心部から放射状に伸びているのではなく、平行線群をなしている.こ の平行線群の方向はパラボラ面フィット後の残差がプラスとなる分布に沿っている.

アルミ板の圧延形成時に形成されたストリークがアル ミ面上の目視でも確認できる(図16)が,これはほ は水平, x軸に沿って延びている.パラボラフィット 後の残差分布にみられるプラス部分がx軸方向に延び ているのと一致している.この方向の一致から素材と して用いたアルミ板の特性(アルミ板形成時についた 残留応力による反りの方向)がアンテナ形状に大きく 影響していると考える⁵⁾.

7.2 鏡面残差を与える要因の大きさの推定

次に、アンテナ面の反りが鏡面残差の最大要因であることを念頭において、それ以外の残差要因とともに、 各々の誤差の大きさを推定してみる。加工されたへら 絞りアンテナの面精度 *σall* についてその内訳を議論する。へら絞りアンテナの面精度をきめる要因としては、 主に3つの要因、

1. 金型自体の面精度 σ_{mold}

2. 加工に用いた素材であるアルミ板に起因する残差

 σ_{plate}

3.「へら絞り加工」による工作精度*σ_{spinning}* があると仮定する.

金型自体の面精度 σ_{mold} と素材段階のアルミ板の面 精度をそれぞれ計測することは原理的には可能であっ たが、諸般の事情で実施していない.そのため、各残 差要因を独立に得ることはできない.アンテナ面形 状からそれらを分離することも、もちろん困難である が、幾つかの仮定をおいて、以下のような推論を行っ た.ここでは、これら3つの要因によってのみ、絞り アンテナの面精度 σ_{all} がきまり、しかもこれら3つの 要因はそれぞれ独立であると仮定する.つまり、

$$\sigma_{all}^2 = \sigma_{mold}^2 + \sigma_{plate}^2 + \sigma_{spinning}^2 \tag{1}$$

と仮定する.

まず、加工に用いた素材であるアルミ板に起因する 残差 σ_{plate} を次のように推定してみる。アンテナ面に は反りがある.或る方向にはパラボラとして開き気味 に、その垂直方向には閉じ気味になっている。つま り、中心からの位置角に応じてアンテナの開き方が異 なるわけである。位置角に応じてアンテナ面を分割 (位置角7%5刻みで24分割)し、それぞれに独立のパ ラボラ面・フィットを行い、残差を求めることで、ア ンテナ面の大局的な反りに起因する残差を除去して のパラボラ面残差、つまり $\sqrt{\sigma_{mold}^2 + \sigma_{spinning}^2}$, またはそ

⁵⁾ へら絞りアンテナの素材はアルミ板である.アルミ板は塑性加工 の一つである圧延 (rolling) によって形成される.2つあるいは複数の ロール (ローラー)を回転させ、その間に金属を通すことによって板・ 棒・管などの形状に加工する方法である.アルミ板には圧延加工の際 に残留応力が残るとともに、圧延時のアルミ板押し出し方向を示す筋 模様 (ストリーク) が形成される

れに近い値を得られると考えて位置角ごとの各領域で のパラボラ面・フィットを行った.図17がその結果 である.口径90cmアンテナ1号,2号,3号,4号の 各々の残差の値は、37.9±26.7 μ m r.m.s.,37.5±36.2 μ m r.m.s.,71.7±15.6 μ m r.m.s.,49.0±62.2 μ m r.m.s.,であり, それら4つの平均は49.0 μ m r.m.s.となった.アンテナ 3号の特性が他の3枚とは異なることは既に指摘して あるが、ここでも他のアンテナとは異なる.アンテ ナ3号では他にアンテナに比べてどの位置角領域の残 差も大きい.他の3枚の平均値は41.5 μ m r.m.s.である ので30.3 μ m r.m.s.の違いを示している.一方で、アン テナ3号における各位置角領域内の残差の標準偏差は 15.6 μ m r.m.s.であり、ばらつきは小さい.これは他の 3枚での平均偏差41.7 μ m r.m.s.に比べてその半分以下 である.

なお図17をみるとアンテナ1,2,3号で残差の大きい位置角領域が1つ以上ある.またアンテナ4号では250µm r.m.s.を超える残差を示す位置角領域がある. これらは大局的な反りとは別の局所的な面の変形もあることを意味している.

さて,ここでの仮定に従えば,個々のアンテナにお いては,

アンテナ1号: $\sqrt{\sigma_{mold}^2 + \sigma_{spinning}^2}(1) = 37.9\pm 26.7\mu \text{m r.m.s.}$ アンテナ2号: $\sqrt{\sigma_{mold}^2 + \sigma_{spinning}^2}(2) = 37.5\pm 36.2\mu \text{m r.m.s.}$ アンテナ3号: $\sqrt{\sigma_{mold}^2 + \sigma_{spinning}^2}(3) = 71.7\pm 15.6\mu \text{m r.m.s.}$ アンテナ4号: $\sqrt{\sigma_{mold}^2 + \sigma_{spinning}^2}(4) = 49.0\pm 62.2\mu \text{m r.m.s.}$

となる. それぞれのアンテナの*all*は既知である. 式 (1)の仮定によって, 個々のアンテナ1, 2, 3, 4号の 素材アルミ板に起因する残差oplateはそれぞれ

アンテナ1号: $\sigma_{plate}(1) = 42.2 \mu m r.m.s.$ アンテナ2号: $\sigma_{plate}(2) = 69.1 \mu m r.m.s.$ アンテナ3号: $\sigma_{plate}(3) = 96.6 \mu m r.m.s.$ アンテナ4号: $\sigma_{plate}(4) = 35.6 \mu m r.m.s.$

と推定される. 異なる特徴を示すアンテナ3号を除外 した平均は49.0µm r.m.s. となる.

次に(3)「へら絞り加工」における工作精度 $\sigma_{spinning}$ を推定する. 口径90cmと口径1.8mの大きさの違うへら絞りアンテナを作ったが,これらの間で工作精度 $\sigma_{spinning}$ はほぼ共通であろうと仮定する. 同じ金型を用いて製作したアンテナ面の違いからこれを推定する.

- 口径1.8mアンテナを2枚製作したが、残差はそれぞれ234µm r.m.s., 265µm r.m.s. であった、差は31µm r.m.s. である、2枚は共通の金型から製作したので、この差はすなわち「へら絞り加工」による加工精度のばらつきである。
- 2. 口径90cmアンテナの製作ではアンテナ2, 3, 4 号は共通の金型から製作した. これらの残差 は $\sigma_{all}(2) = 78.57 \mu m r.m.s. \sigma_{all}(3) = 120.35 \mu m r.m.s.$ $\sigma_{all}(4) = 60.60 \mu m r.m.s.$ である. これら3つでの偏 差は30.7 $\mu m r.m.s.$ である.

これらより、とりあえず、工作精度 $\sigma_{spinning}$ は30 μ m r.m.s.程度と推定する、以上で各口径90cmアンテナの 素材アルミ板に起因する残差 σ_{plate} ととりあえずの共 通の工作精度 $\sigma_{spinning}$ を推定した、これらを前提にす ると口径90cmアンテナの金型における面精度 σ_{lempl} は



図17:口径90cmアンテナ4枚で、位置角に応じて分割した扇状の領域ごとの、パラボラ面フィット残差;アンテナ1,2,4号で概ね30µm r.m.s.,アンテナ3号では残差がその倍以上になり、他の3枚のアンテナ面とは異なることがわかる.

アンテナ1号: $\sigma_{mold}^{temp}(I, 1) = 23.1 \mu m r.m.s.$ アンテナ2号: $\sigma_{mold}^{temp}(II, 2) = 22.3 \mu m r.m.s.$ アンテナ3号: $\sigma_{mold}^{temp}(II, 3) = 65.2 \mu m r.m.s.$ アンテナ4号: $\sigma_{mold}^{temp}(II, 4) = 38.8 \mu m r.m.s.$

となる. アンテナ2, 3, 4号は金型が共通であるの で、それらの金型における面精度 σ_{mold} は同じ値にな るはずである.アンテナ3号では異なる何かがあった と考え除外し、アンテナ2号、アンテナ4号からの金 型精度の推定値が近く、かつアンテナ1の金型の面精 度ともあまり違わない値になるよう,工作精度 $\sigma_{spinning}$ をパラメータとして変化させてみる.特徴としては, まず,工作精度 σ_{spinning} > 37 μm r.m.s. では, アンテナ 1,2号の金型精度の解が存在しなくなる.変数とし て, 工作精度 σ_{spinning} を 37 μm r.m.s. 以下ゼロまでの範 囲で変化させた場合,各値は図18のような結果になる. 工作精度を変化させても、アンテナ1号からの金型I の推定値とアンテナ2号からの金型IIの精度の違いは いつも小さい.一方,金型IIの精度をアンテナ2号か ら推定した場合とアンテナ4号から推定した場合では、 工作精度37µm r.m.s.の時に最大の差26.8µm r.m.s.を 示す. 工作精度を0µm r.m.s. へ近づけると差は11.6µm r.m.s.にまで縮小する.多くの仮定の下での推論では あるが、「へら絞り加工」の工作精度は30µm r.m.s.よ りもずっと良く、ここで用いた金型の精度は40~50µm r.m.s.程度であると推定できる.以上をまとめると,

- 金型自体の面精度はσ_{mold}~30µm r.m.s. 以上. 50µm r.m.s. 程度まで
- 素材であるアルミ板に起因する残差σ_{plate} = 36~70µm r.m.s.
- 3.「へら絞り加工」による工作精度*σ_{spinning}*は30μm *r.m.s.*. おそらくもっと良い.

となる.

面精度を改良した新規の金型を作り、面精度の良い アルミ板を素材とするか、その影響を除去できれば、 「へら絞り加工」によるアンテナ面はさらに良くなる。 金型精度20µm r.m.s.、「へら絞り加工」精度30µm r.m.s., そして素材による影響20µm r.m.s.を実現できるならば 41µm r.m.s.精度のパラボラ面を形成できることになる。 もしも「へら絞り加工」精度20µm r.m.s.が期待できる ならば、30µm r.m.s.の面精度が可能となる。へら絞り アンテナ面の面精度を左右する要因は金型の面精度と 素材のアルミ板である。へら絞りの加工精度にもばら つきはあるだろう。しかし、トータルで30µm r.m.s. レ ベルのアンテナ面精度を達成しようとする場合では、 へら絞り加工の工作精度がアンテナ面精度に限界を与 えるわけではないであろう。

7.3 焼き鈍しによる残留応力の除去

へら絞りアンテナ面の面精度を左右する大きな要因 である素材アルミ板の反りは一般的にアルミ材加工に



図18:「へら絞り加工」精度の推定:変数として「へら絞り加工」精度をふり、各金型の面精度の計算値の変化をプロットした.

おいて課題となる事柄である.アルミ板にはその製造 過程の一つである「圧延加工」の際に生じた残留応力 によって,或る方向に反る性質がある.その対策とし て焼き鈍し(焼き入れ,アニール)によって残留応力 を解消する方法がある.以下,文献からの引用によっ て,その方法について記載しておく.

"焼なましは、金属材料を適当な温度に加熱し、 その後、徐冷する熱処理である、金属製品は加工 の工程で、加工硬化や残留応力が発生しているが、 焼なましによって金属組織の格子欠陥が減少し、 再結晶が行われるため組織が均質化し残留応力も 減少するため軟化する、焼なましはその目的によ り温度と冷却速度が異なったいくつかの種類に分 けられる.(中略).残留応力除去のため比較的低 温で行う、応力除去焼なましなどがある(機械加 工技術用語集http://www.weblio.jp/cat/engineering/ kkgysより)"

そして

"応力除去焼なまし、応力除去焼鈍 (stress relief annealing) は一般に再結晶温度以下の適温に加熱 して、鋳造、加工、溶接などによって材料に生 じた残留応力を低減させる焼なまし(鉄鋼用語 http://www.weblio.jp/より)"

のことをいう.

つまり、へら絞りアンテナを、焼き鈍しすること で、アルミ板の残留応力を除去し、面精度を向上させ ることはできると思われる.我々の今後の課題として、 「焼き鈍し」を行い、アンテナ面形状の変化を測定し たい.また、アルミ板では残留応力が少ないことを特 徴としている製品がある.そのような特別なアルミ板を 用いてへら絞りアンテナの作成を行うことも考えたい.

7.4 今後の検討課題

金型面精度の向上と素材アルミ板の特性(おそらく 素材アルミ板形成の圧延作業でついた残留応力が原 因)の除去を行うことで、へら絞り法によるアンテ ナ面を、30µm r.m.s.レベルの面精度へ向上させること ができそうである.へら絞りアンテナは軽量である (1m口径1.5mm厚アルミ板で3kg,2m口径3mm厚ア ルミ板で20kg).アンテナ面の後部支持機構を含めて も2m口径で数十kg以下であろう.移動に適した望遠 鏡は超軽量であることが望まれるが、へら絞りアンテ ナはその要求を満たしたアンテナになり得る.今後の へら絞りアンテナ面の検討課題としては次のようなこ とがある. る残留応力の解消や,精度の高いアルミ板を用い てのへら絞りアンテナの作成を行い,同様の三次 元座標測定から,その効果を実証したい.この検 討は既存の口径90cmの金型を用いれば,低コス トで実現できる.

- 2. 口径2mとして、へら絞りのための金型の製作は 4~5百万円程度で可能である.金型の製作費に 比べ、1枚1枚の製作費は一桁小さい.アンテナ 面として、10枚程度を1千万円程度で作成できる だろう.資金を得て新規金型を作成、その金型に よってへら絞りアンテナを作成する.
- 3. 高いアンテナ面精度を維持し、実際の電波望遠鏡 の主鏡として用いるためのアンテナ面の後部支持 機構の検討. 三次元座標測定における支持法の検 討からアンテナの外縁を主に支持すれば、アンテ ナ面の形状は維持されることがわかった. アンテ ナの縁は「へら絞り加工」の際の回転軸に対して 直交する位置に形成されたものである.「へら絞 り加工」によって、アンテナ面の工作精度は今回 $\sigma_{spinning}$ は30 μ m r.m.s. 程度であった. アンテナの縁 の位置も一平面に対して,同じ程度の精度で形成 されているのであろう. この縁で定義される平面 を, 観測時のアンテナの高度角によらず, 常に維 持できれば、パラボラ面の形状・面精度は再現さ れるはずである.この条件を初期条件として,自 重・熱・風圧による変形のsimulation, 自重を模 擬した張力付加状態での計測を行い、口径2mを 想定して、アンテナ面の後部支持機構の検討を行 いたい.

8 まとめ

本研究では「へら絞り加工」によって製作されたア ンテナの面精度を計測し、230GHz帯の受信アンテナ として実用になるかを調べた.既存の金型,つまり 我々が新たに作成したのではなく,過去に別の目的 で製作された金型を流用して,口径90cmのアンテナ 4枚と口径1.8mのアンテナ2枚を製作して,三次元座 標測定器によって鏡面形状を測った.

製作したへら絞りアンテナは肉厚 1.5~3.0mm と非 常に薄いが,アンテナの縁を複数の支持柱で固定する ことでアンテナ面の三次元座標測定を安定して行えた. 測定・解析の結果,口径 90 cm アンテナで平均残差 $\sigma = 79 \mu m r.m.s.$ となった.面精度の良い3枚では,ア

ンテナ面の70~85%の部分で σ = 30 μ m r.m.s. を示す. 面精度の悪い残り1枚においても40%の部分で σ = 30 μ m r.m.s.を示す.

^{1.} 素材アルミ板の特性の改良として、焼き鈍しによ

に依存して上下に±50µmの変位がある.この特徴は 製作した6枚のアンテナすべてに現れる.素材として 用いたアルミ板の特性であると思われる.

2枚の口径180cmアンテナでは平均残差250µm r.m.s.となった.残差が口径90cmアンテナの場合に比 べて大きいのは、用いた金型がパラボラ面としては精 度が良くないためである.これら2枚のアンテナの面 形状は非常に類似しており、「へら絞り加工」では同 一形状のアンテナ面の加工・形成が可能である.

アンテナ面の精度を左右する要素として、「金型面 精度」、「へら絞り工作精度」、「素材アルミ板の特性」 の3つがあり、それらは独立であると仮定して、値を 見積もった. 口径90cmアンテナ製作に用いた既存の 金型の面精度は $\sigma_{mold} \sim 30 \mu m$ r.m.s. 以上50 μm r.m.s. 以 下である.素材アルミ板に起因する残差は $\sigma_{plate} =$ 36~70 μm r.m.s. である.そして、「へら絞り加工」に おける工作精度 $\sigma_{spinning}$ は悪くとも30 μm r.m.s.と推定 した.

9 謝辞

本研究はJSPS科研費20654020の助成を受けたもの である.アンテナ面の測定では、国立天文台先端技術 センターの松尾宏氏、大渕喜之氏にお世話になった. ここに感謝する.

参考文献

- Miyoshi, M., Furuya, R. S., Niinuma, K., Hagiwara, Y., Kawaguchi, N., Nakajima, J., Irimajiri, Y., Koyama, Y., Sekido, M., Ujihara, H., Ishitsuka, K. J. I., Asaki, Y., Kato, Y., Takeuchi, H., Tsuboi, M., Kasuga, T., Tomimatsu, A., Takahashi, M., Eriguchi, Y., Yoshida, S. I., Koide, S., Takahashi, R., Oka, T., A first black hole imager at Andes, 2010 Asia-Pacific Radio Science Conference, at Toyama International Conference Center, Toyama, Japan, 25, Sep. 2010.
- [2] Ichikawa, R., et al., Development of a Compact VLBI System for Providing over 10-km Baseline Calibration, "Measuring The Future", *Proc. of the Fifth IVS General Meeting*, pp. 400-404 (2008).
- [3] Ichikawa, R., et al., Present Status and Outlook of Compact VLBI System Development for Providing over 10 km Baseline Calibration, *IVS NICT-TDC News*, No. **30** (2009).

- [4] Kasuga, T., Ujihara, H., Miyoshi, M., Multi Dish Telescope for 1.3 mm VLBI Observation, in AP-RASC2013 Taipei, Taiwan Sep. 3-7, 2013.
- [5] Kunda, M., Kurita, M., Ohomori, H., Computational Morphogenesis of Truss Structures, *IASS*, Vol. 53, pp. 49-56 (2012).
- [6] Kurita, M., Nagata, T., Light-Weight Telescope Structure Optimized by Genetic Algorithm, *SPIE*, Vol. 7733, pp. 77333E-77333E-11 (2010).
- [7] Kurita, M., Sato, S., Noda, N., Ultra-Lightweight Telescope Mount, *PASP*, Vol. **121**, Issue 877, pp. 266-271 (2009).
- [8] Kurita, M., Sato, S., Morishima, K., Achiwa, H., Ito, H., Nagata, T., Noda, N., Koiso, N., Development of the ultralight medium-size telescope, *SPIE*, Vol. 5495, pp. 518-525 (2004).
- [9] http://www.cta-observatory.jp/
- [10] CTA Consortium: Proc. of ICRC2011 in China. http://arxiv.org/abs/1111.2183
- [11] Onishi, T., Nishimura, A., Ota, Y., Hashizume, A., Kojima, Y., Minami, A., Tokuda, K., Touga, S., Abe, Y., Kaiden, M., Kimura, K., Muraoka, K., Maezawa, H., Ogawa, H., Dobashi, K., Shimoikura, T., Yonekura, Y., Asayama, S., Handa, T., Nakajima, T., Noguchi, T., Kuno, N., A 1.85 m mm-submm Telescope for Large-Scale Molecular Gas Survey in ¹²CO, ¹³CO and C¹⁸O (*J* = 2–1), *PASJ*, 65, 78 (2013),
- [12] Otobe, E., Nakajima, J., Nishibori, K., Saito, T., Kobayashi, H., Tanaka, N., Watanabe, N., Aramaki, Y., Hoshikawa, T., Asuma, K., Daishido, T., Two Dimensional Direct Images with a Spatial FFT Interferometer, *PASJ*, 46, 503-510 (1994),
- [13] http://www.q-par.com/
- [14] 株式会社・北嶋絞製作所ホームページ http://www.kitajimashibori.co.jp/index.html
- [15] 川井謙一:「スピニング加工技術とその動向」, 塑性と加工, 30巻, 345号, pp. 1387-1394 (1989).
- [16] 精密工学会編『新版精密工作便覧』, pp. 671, コ ロナ社 (1992), ISBN 4-339-04306-0
- [17] 宮地竹史 private communication. (2014)