

称号及び氏名	博士（理学） 木村 公洋
学位授与の日付	平成21年 6月30日
論文名	「電波望遠鏡に用いる高性能受信機光学系の開発 (Development of high-performance optical systems for radio telescope)」
論文審査委員	主査 小川 英夫 副査 田中 智 副査 前川 寛和

論文要旨

1-初めに

天文学とは、天体の進化などの宇宙の現象や宇宙形成など、地球外で自然現象を観測、研究する学問である。天体などの観測対象物は、可視光領域だけでなく、電波領域やX領域など様々な領域で情報を我々に与えており、電波天文学はその中でも、周波数が数メガヘルツ～数テラヘルツの電磁波を取り扱った天文学である。電波に関わらず、観測天文学においては、宇宙の現象を正確に科学するために、宇宙から伝来する微弱な信号を精度良く観測することが重要になってくる。そこで観測装置である電波望遠鏡の性能向上が求められている。電波望遠鏡とは、名前のとおり、電波領域において使用される天体望遠鏡のことであり、天体からの信号を光の様に集光して検出する装置である。

電波天文学の重要なテーマの一つに星形成の解明がある。星形成は分子雲とよばれるガスやチリの濃度が他の空間より約100倍程度濃い領域の内部で行われる。この分子雲は約10Kと非常に低温な為に可視光では観測することができない。また、誕生したばかりの星(原始星)も分子雲に包まれているため、光を放射しても分子雲に吸収されて観測する事ができない。星形成の観測的研究には主に、原始星を観測することが可能な赤外線や分子雲の構造を観測することが出来る電波が用いられる。

本研究では、星形成の観測的研究に欠かせない電波望遠鏡(図1)および受信機の開発を光学系の側面から行い、星形成などの解明を進める。



図1 ALMA プロトタイプ受信機
左図：口径12mALMA プロトタイプ望遠鏡
右図：この望遠鏡に搭載された超伝導受信機システム。

2-本研究の内容と成果

1) 野辺山 45m 電波望遠鏡搭載 100GHz 帯両偏波サイドバンド分離帯受信機の開発

野辺山 45m電波望遠鏡に 100GHz帯の両偏波サイドバンド分離受信機の開発を光学系開発の観点から進めた。この受信機は両偏波および両サイドバンドのそれぞれ独立した観測帯域を同時に観測する事が可能なため、広帯域な同時観測ができる。星形成領域の観測に重要なプローブとなる $^{12}\text{C}0$ 、 $^{13}\text{C}0$ 、 C^{18}O の一酸化炭素分子輝線だけでなく、CS、SiO、HCN、 HCO^+ などの輝線を同時に観測する事ができるこの受信機は、星形成の解明に強力なツールとなる。この受信機光学系の開発には、従来から用いられているガウシアン光学手法による設計だけでなく、物理光学手法を用いて詳細な検討を進めた。野辺山 45m鏡において、物理光学手法を用いた光学系開発は今回が初めてである。その結果、鏡面劣化がないと仮定して、開口能率 0.81 と高性能な設計に成功した。現在、この受信機は共同利用観測に用いられ、多くの研究者が利用している。図 2 には物理光学計算で用いた 45m鏡のモデルを示し、図 3 には、その計算によって算出された 100GHzのアンテナビームパターンを示す。

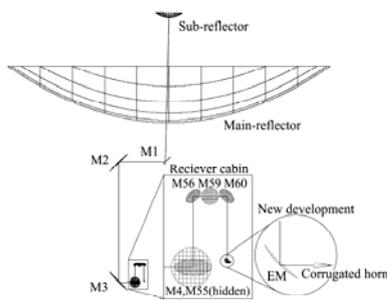


図 2 45m 鏡光学系(物理光学計算モデル)

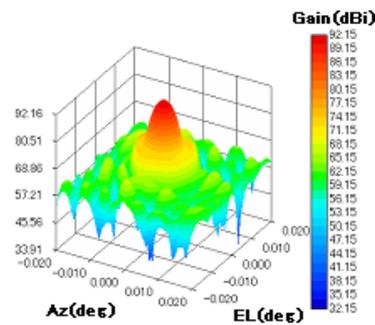


図 3 アンテナビームパターン@100GHz

2) ALMA Band4 受信機の開発

日米欧が協力して開発が進んでいる ALMA 計画に搭載される 150GHz 帯受信機の光学系開発を行う(図 4)。この 150GHz 帯受信機の光学系は冷却コルゲートホーンと常温部での楕円鏡、平面鏡から構成される。ALMA 受信機は、カートリッジと呼ばれる $\phi 140\text{mm}$ の筒状の容器に冷却光学素子および、受信機部品を収納する必要があるため、受信機全体の設計も行った(図 5)。光学系を含めた Band4 受信機は PDR(Preliminary Design Review)で高い評価を受けた。2008 年には ALMA 望遠鏡に搭載されファーストライトを行い、月食中の電波強度変化の観測に成功している

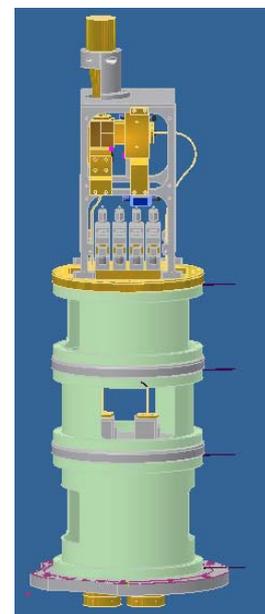
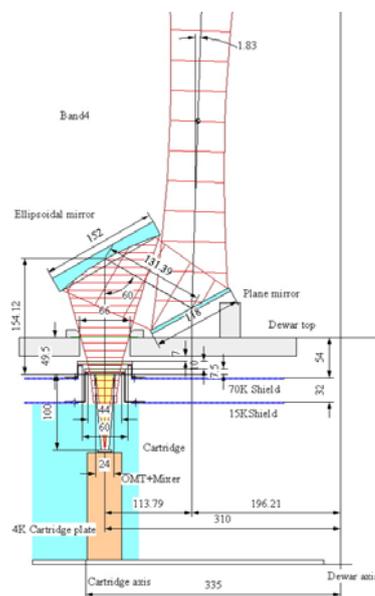


図 4(左上) ガウシアン光学で設計した Band4 光学系

図 5(右上) カートリッジ受信機デザイン図
カートリッジ受信機は、上段から 4K、15K、70K に冷却され、図 1 右の中心にある装置の中に設置される。

また、この光学系でも使用されるコルゲートホーンの製造は連続した微細加工が必要なため、ミリ波サブミリ波帯においては電気鋳造方法による製造が一般的であった。しかし、電気鋳造方法では、

製造時間がかかるうえ、高価であった。そこで、切削加工のみによる製造技術を確認し、いままでになく安価(約 1/3)で製造期間の短い(1/5~1/10)コルゲートホーンの製造に成功した。この技術によって製作されたコルゲートホーンは 800GHz 帯まで実用化しており、ALMA 以外の受信機にも使用されている。

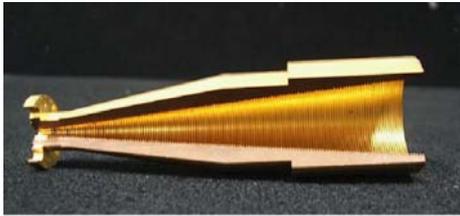


図6 切削方式で製造した 150GHz 帯コルゲートホーンのカットモデル

3) VERA 搭載メタノールレーザー用 6.7GHz 帯受信機の開発

VERA20m 鏡に搭載する 6.7GHz 帯メタノールレーザー用受信機の開発を行った。大質量星形成領域にしか付随しない 6.7GHz 帯のメタノールレーザーを観測することで、未だ謎が多い大質量星の誕生の解明に期待される。この望遠鏡には 6.7GHz 帯受信機を配置するための十分な空間がなく、コルゲートホーンを使用することが困難であった。そこで、フレア角を変化させて軸長を短くすることが可能なデュアルモードホーンを採用して開発を行った。開発した受信機は水沢局にて搭載試験を行い(図7)、メタノールレーザーの観測に成功した(図8)。また、開口能率は 0.5 であり、試験的に搭載されていた受信機にくらべ 2 倍程度向上された。



図7 6.7GHz 帯受信機の搭載試験

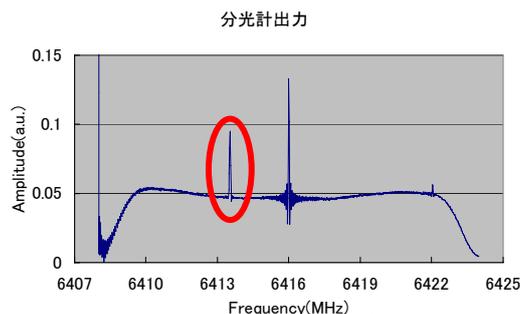


図8 メタノールレーザーの検出

4) VSOP-2 オフセットカセグレンアンテナの光学系開発

宇宙航空研究開発機構(JAXA)が開発を進めているスペース VLBI 計画「VSOP-2」には、ASTRO-G(図9)と呼ばれる電波望遠鏡衛星が用いられ、地上望遠鏡と衛星望遠鏡間で干渉計を形成する事により、0.038 ミリ秒角@43GHz という高分解能観測を達成する。この高分解能で、星形成領域の原始星ディスクやアウトフローで検出されている水メーザーを観測することは、星形成のメカニズムに重要な制限を与える事が期待できる。

この ASTRO-G には、8.4GHz、22GHz、43GHz の受信機が搭載される(図10)。これらすべての受信機の光学系を検討した。それぞれのフィードホーンには、4 モードホーンを用いている。8.4GHz 帯においては、4 モードホーンのビームパターン測定を行い、利得は 1%程

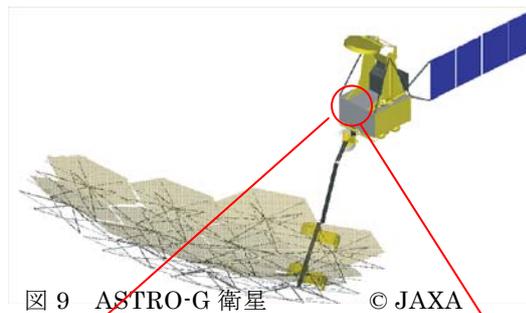


図9 ASTRO-G 衛星 © JAXA



図10 ASTRO-G 衛星搭載 3 バンド受信機。望遠鏡カセグレン焦点位置に設置される。黄:8GHz 青:22GHz 赤:43GHz が各フィードホーンを示す

度の精度で、パターンは±35度内においておおむね計算と一致した。

この4モードホーンを用いた設計において、主鏡を理想鏡面とした場合、アンテナ開口能率はすべての受信機において0.69を達成した。図11に8.4GHzのアンテナパターンを示す。現在、この設計に基づいてASTRO-Gは開発が進められている。

また、衛星軌道に打ち上げ後の性能調整にむけて、太陽光による熱変形が光学性能に及ぼす影響や、鏡面調整機構検証などを進めている。

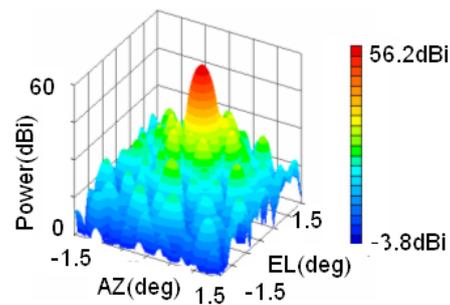


図11 VSOP-2 8GHz帯受信機のアンテナビームパターン

3-まとめ

1) 45m鏡に搭載する100GHz帯受信機の光学系開発を行い、世界で初めての100GHz帯両偏波・両サイドバンド分離受信機の開発に成功した。現在、この受信機は共同利用観測機器として多くの研究者が利用している。

2) ALMA Band4の光学系開発を行い、広帯域(125-163GHz)で低雑音な(<40K)な受信機の開発に成功した。また、切削によるコルゲートホーン製造技術の開発を行い、従来に比べ低コストかつ短期間で製作できる手法を確立した。現在、800GHz帯コルゲートホーンまで実用化した。

3) 6.7GHz帯受信機の設置が空間的に困難であったVERA望遠鏡において、デュアルモードホーンを用いた受信機の開発を行った。水沢局における搭載試験において、開口能率0.5を達成し、メタノールレーザーの受信にも成功した。

4) ASTRO-G電波望遠鏡衛星において、高能率な光学系設計(開口能率0.69以上)に成功した。現在、この設計に基づいて衛星の開発が進められている。

審査結果の要旨

本論文は天体からより発する微弱な電波観測を行う望遠鏡において光学系システムの開発を行い、観測効率を飛躍的に上げることに成功したものであり、その内容は以下の通りである。

電波天文学の観測対象は数万光年、数億光年の彼方の天体であり、検出すべき信号は極端に弱い。この微弱な信号を検出するミリ波マイクロ波領域受信機の感度は量子雑音のレベルまで達成されており限界に近い。本論文は電波望遠鏡の中でも、天体の電波を集光する鏡から信号を検出する受信機までの、信号の伝送経路における損失を抑えた光学系システムの設計・製作を行うことにより、電波望遠鏡のさらなる効率化に寄与している。

従来望遠鏡の光学系はレーザー光学で用いられるガウシアン光学を使用して設計されてきた。これは伝送される電波の分布をガウス分布とみなして単純化するものであり、必ずしも精度が良いとはいえない。これに対し本論文は電波が伝送する空間に対して電磁界分布を精密に計算することにより精度を上げ、効率的な光学系システムを設計した。

また一次放射器と称せられるホーンについて、新しい知見を加えて開発することによりい

っそうの効率化に成功した。電界の分布の対称性がよいコルゲートホーンは、構造の複雑さのため従来は多大な時間をかけ電鋳方式で製作されていた。これに対して本論文では機械的切削方式を用いることを提案し、製作期間を1桁短縮することに成功した。現在この手法は既に多くの電波望遠鏡で採用されている。さらに、マルチモードホーンについては、従来用いられていたデュアルモードに対して4モードのホーンを提案することによりホーンの効率のみならず、光学系全体の効率を向上することに成功した。

これらのホーンと光学系の設計の成果は、ALMA (Atacama Large Millimeter/sub-millimeter Array) Band4(150GHz)、Band10(900GHz)で採用され、2012年の観測開始に向けて製作が着々と進んでいる。国内的には国立天文台 45m 電波望遠鏡において採用され、新しく開発された超伝導受信機と相まって1桁近い効率化に成功した。また4モードホーンを使用するよう設計された光学系は国立天文台 VERA 干渉計に採用され従来のシステムを約2倍効率化した。さらに ISAS/JAXA が 2012年打ち上げる予定の電波天文衛星(VSOP-2)には本論文が提案している4モードホーンとオフセットカセグレンシステムが採用された。

これら光学系システムの開発は世界的に見ても競争が激しい。その中で、独自の設計方式を考案し各地の望遠鏡に採用されたことは傑出した成果であり高く評価できる。今後、これらの望遠鏡を使用することにより、従来の観測効率では行えなかったような新たな観測が行われることが期待される。さらにこの方式は電波天文学に限らず分子分光学、通信工学等、幅の広い応用が可能となる。

本委員会は本論文を学位論文として十分な内容を有しているものと判断した。