

称号及び氏名 博士(理学) 岡田 望

学位授与の日付 2019年12月31日

論文名 Development of 22/43-GHz-band simultaneous observation system  
of the Nobeyama 45-m telescope  
野辺山 45m 電波望遠鏡搭載 22/43 GHz 帯同時観測システムの開発

論文審査委員 主査 大西 利和  
副査 野口 悟  
副査 細越 裕子

# 2019 年度 博士論文要旨

## Development of 22/43-GHz-band simultaneous observation system of the Nobeyama 45-m telescope

野辺山 45m 電波望遠鏡搭載 22/43 GHz 帯同時観測システムの開発

大阪府立大学 大学院理学系研究科 物理科学専攻 宇宙物理学研究室  
岡田 望

### 1. Introduction

#### 1-1. VLBI 観測における多周波同時観測の意義

一般的に望遠鏡の分解能は波長に比例し、口径に反比例する。電波は電磁波の中でも波長が長いので、高い空間分解能を実現するためには電波望遠鏡の口径を大きくする必要があり、口径の大きさは保持機構や駆動速度という物理的条件によって制限される。そこで、複数の電波望遠鏡を離して配置し、受信された電波を干渉させることで実効的に高い分解能を得る干渉計という手法が実用化されている。

特に基線長が 100km を超えるような VLBI (Very Long Baseline Interferometer) 観測は望遠鏡間距離が大きいため観測中の大気は望遠鏡ごとに異なり、大気は電波遅延を発生させるため観測において各望遠鏡の大気の補正が重要となる。そこで多周波同時観測を行い、大気の影響をより受けにくい低周波帯側の受信信号を参照信号として高周波帯側の受信信号データを校正するという位相補償という手法を用いる。特に近年の複数周波数帯同時観測可能な望遠鏡の増加に伴い、位相補償手法が発展してきた。この複数周波数帯同時観測望遠鏡の一例として、韓国 VLBI 観測網 (KVN) が挙げられ、光学系内に周波数選択膜を導入することで、複数周波数帯の電波を同時に受信することが可能な光学系システムを構築し、科学的な成果を上げている。特に波長が短い電波の観測では、複数周波数帯同時観測が観測精度の向上に不可欠であり、望遠鏡に応じた周波数の選択手法を設計・作成する必要がある。

#### 1-2. 野辺山 45m 電波望遠鏡

野辺山 45m 鏡はミリ波帯を観測できる電波望遠鏡の中でも世界最大級の口径を持つ望遠鏡で、観測周波数帯は 20-116 GHz をカバーしている。野辺山 45m 鏡光学系のビーム伝送系はビームガイド方式を採用しており、ビーム伝送路内には複数の切り替え可能ミラーがある。天体信号は主鏡・副鏡へと導かれたのち平面鏡 (M1 鏡) で反射され、2 枚の楕円鏡 (M2・M3 鏡) へ導かれた後、複数ある稼働式ミラーを切り替えることで複数ある受信機ポートの

うちのある一つの受信機へと導かれる構造となっている。図 1 の灰色に色付けされているのが可動式ミラーである。可動式ミラーのうち M4 鏡は回転することで 3 経路のうち 1 経路を選択、M5,M55 鏡は開閉することで透過 or 反射を選択することができる。また M7~9, M57~59 鏡も透過か反射を切り替えることができるが、複数の光学素子をカートリッジに搭載できることが M5,55 鏡と異なる点である。カートリッジは四つあり、反射鏡やフィルタ等を最大 4 つ搭載可能である。

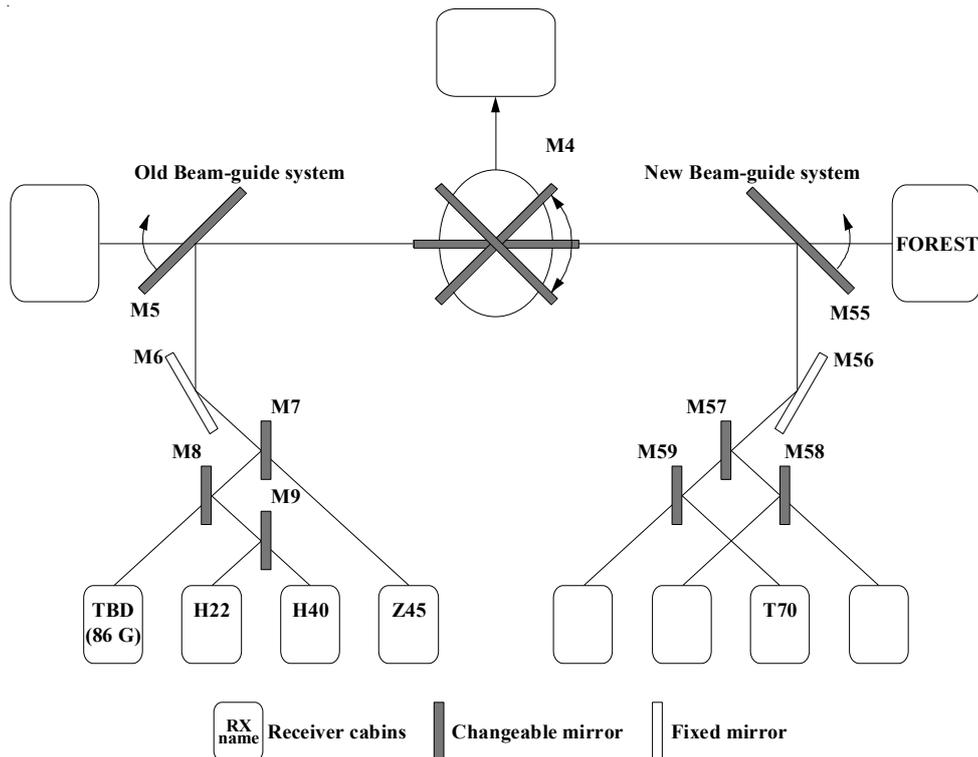


図 1. 野辺山 45 鏡光学系模式図

## 2. 研究目的

望遠鏡の感度は口径が大きいほど得られる為、VLBI 観測網においても野辺山 45m 鏡のような大口径望遠鏡が同時観測可能となれば科学的インパクトも大きい。

本研究では、45m 鏡で多周波観測を達成する手法として、KVN 同様準光学方式の周波数選択機器を野辺山 45m 鏡へ導入することを検討した。45m 鏡には、VLBI でよく観測される H<sub>2</sub>O メーザーの観測周波数帯である、22 GHz 帯観測用 H22 受信機と、SiO メーザーの観測周波数帯である、40 GHz 帯観測用 H40 受信機を搭載・運用しているため、M9 鏡に 22 GHz 帯域を反射して 43 GHz 帯域を透過する周波数選択機器すれば二周波同時観測が可能となる(図 1 参照)。

45m 鏡の光学系の特徴はサイズが非常に大きいことである。通常使用される周波数選択膜は厚みが小さく、大きな光学系に取り付けると、振動などにより観測データの周波数特性に大きな影響を与える。そこで、本論文では、非常に大きな光学系においても設置可能な周波数選択デバイスを設計・製作して、22/43GHz 帯同時観測システムを可能とし、さらに周波数が高い、86GHz 帯観測の実現にめどを付けることを目標とした。

### 3. 研究内容

#### 3-1. Perforated plate

45m 鏡光学系内 M9 鏡部に搭載する、22 GHz 帯を反射し 43 GHz 帯を透過とする光学素子の設計・開発を行った。この光学素子に要求される電気損失は、反射帯・透過帯ともに -0.22 dB(5%)以内、反射帯域が 22.0-25.0 GHz, 透過帯域が 42.5-44.5 GHz である。また 45m 鏡のビーム伝送系の設計上、M9 部への入射角が 30 度となるように設計を行わなければならない。光学素子全体の大きさは約 580 mm×600 mm の厚み~8 mm 以下にする必要がある。この大きさは、電波望遠鏡に搭載する光学素子の中でもかなり大きいものであり、光学素子の平面性を維持するという観点も設計において重要になってくる。

これらの要求より、周波数選択機器の中でも厚みを確保しやすい、perforated plate 方式を採用した。本方式は、特にミリ波およびサブミリ波帯のハイパスフィルターとして使用され、形状は導波管アレイが密に配置されたものである。そのカットオフ周波数は、導波管素子のカットオフ特性によって決定される。Perforated plate の導波管部分は円形や方形、六角形等様々な形状があるが、本開発では加工容易性および加工時間の短さに利点がある円形穴を採用した。また材質は工作容易性と電気性能の確保という観点からアルミニウムとした。

Perforated plate は、数多く開けられた導波管アレイの性質を利用した周波数選択デバイスである。導波管には、電磁波の伝搬モードに対してそれぞれカットオフ周波数があり、基本モードの周波数より低い電磁波は導波管内を伝搬することができないため、この plate により反射される。この、基本モードの周波数より高い周波数の電波は導波管の中を基本モードのみで伝搬されるが、次のモードのカットオフ周波数を超えると、導波管の中に複数のモードが出現し、反射成分が現れる。つまり、perforated plate を通過できる電磁波の周波数は、基本モードとその次のモードの遮断周波数の間となる。さらに、本研究での perforated plate は電波の入射角が 30 度で、導波管に対して斜めに入射することから、電磁波の反射・

透過の振る舞いを慎重に検討することが必要である。また、サイズが大きく厚みのある板を使用することから、特に透過率をいかに落とさずに設計するのか、が重要である。このような、サイズ、厚みを持つ、ミリ波帯の perforated plate は今までに作成されたことが無く、導波管アレイにおける電波の伝播特性を数値的に詳細に解析し、設計・製作に結びつけた。

設計に際し、まず円形穴のサイズは円形導波管の基本モードである TE<sub>11</sub> のカットオフ周波数と次に発生する TM<sub>01</sub> モードのカットオフ周波数を考慮し、二つのカットオフ周波数の中間が 43 GHz 付近となるように設定した。この条件より円形穴の大きさは  $\phi 4.7$  mm と決定した。次に、透過レスポンスに影響を与える板厚は、設置場所の制限から 5-10mm 程度であるという制限がある。板厚は、厚いほど反射特性は良くなるが、導波管部が長くなるため、損失が大きくなる。また、導波管部に生じる定在波により、透過周波数帯域において周波数特性が表れる。これらをシミュレーションした結果、板厚 6mm が使用を満たす性能を持つことを確認した。最後に、円形穴の間隔(充填率)であるが、観測輝線を確保できる透過帯域幅が確保でき、かつ最も反射が低い、(px, py, 充填率)=(8.833mm, 5.100mm, 77.03%) を選択した(図 2 参照)。

設計の結果、反射損失および透過損失が -0.22 dB を満たす perforated plate の設計が達成された。

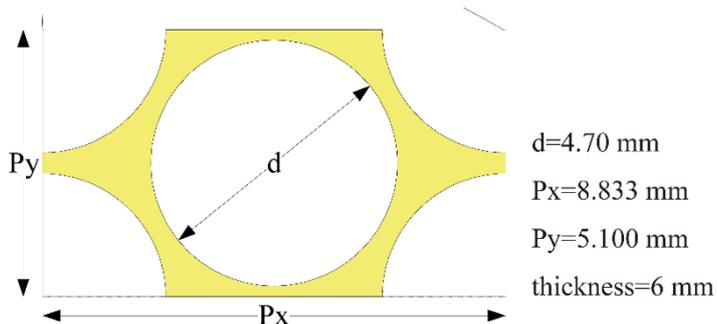


図 2. 開発した perforated plate パラメータ

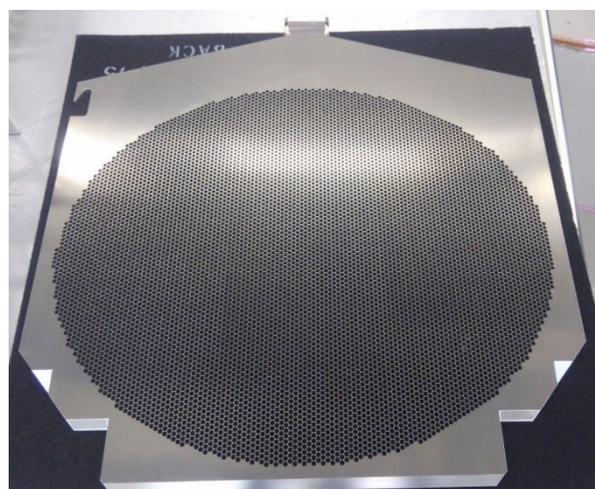


図 3. Perforated plate 写真(現在、45m 鏡搭載)

### 3-2. コミッショニング観測

開発した perforated plate を野辺山 45m 鏡へ搭載し、野辺山 45m 鏡における二周波同時観測システムの科学運用が可能か確認するためのコミッショニング観測を行った。H22 受信機では雑音温度への影響がほとんどなく、H40 受信機では perforated plate の挿入損失-

0.22 dB 起因の雑音温度上昇 10~25 K 程度を確認した。また、2 ビームのポインティングオフセットは 3-4.5"以内に収束することを確認し、二周波同時観測を行うのに十分な精度であると確認した。さらに、開口能率および主ビーム能率への影響は 2~3 ポイント程度であり、観測には問題ないことが確認された。

その後、本同時観測システムと VERA 20 m 望遠鏡で VLBI 試験観測を行い、フリンジを検出、つまり VLBI 観測が可能であるシステムであることを確認した。

#### 4. まとめ

本研究では、野辺山 45m 電波望遠鏡を用いた 22/43 GHz 帯同時観測システムの開発を行った。まず 45m 鏡の巨大なビーム伝送系へ搭載する周波数分離光学素子を設計し、電力損失-0.22 dB 以内という要求仕様を満たす perforated plate の設計に初めて成功した。次に開発した perforated plate を 45m 鏡へ搭載し、45m 鏡の単一鏡観測や VLBI 観測を行うだけの性能が確保されているか確認するため、コミッションング観測を行い、十分な性能が確保されていることを確認した。この同時観測モードは 2018 年冬より 45m 鏡の共同利用観測に公開され、86GHz 帯への応用も期待される。

#### ・雑誌

Development of a 22/43-GHz-band quasi-optical perforated plate and dual-band observation system of the Nobeyama 45-m Telescope, Okada, N., Hashimoto, I., Kimura, K., Manabe, T., Tokuda, K., Onishi, T., Ogawa, H., Imai, H., and Minamidani, T., Publications of the Astronomical Society of Japan, DOI: 10.1093/pasj/psz126

## List of related achievements

### Peer-reviewed papers

- [1] “Development of a 22/43-GHz-band quasi-optical perforated plate and dual-band observation system of the Nobeyama 45-m Telescope”, **Okada, N.**, Hashimoto, I., Kimura, K., Manabe, T., Tokuda, K., Onishi, T., Ogawa, H., Imai, H., and Minamidani, T., Publications of the Astronomical Society of Japan (2019), accepted, DOI: 10.1093/pasj/psz126

### Proceedings

- [1] “野辺山 45 m 電波望遠鏡搭載 20/40 GHz 帯同時観測用周波数分離フィルタの開発”, **岡田 望**, 橋本 育実, 高田 勝太, 本間 愛彩, 高橋 諒, 木村 公洋, 千葉 正克, 真鍋 武嗣, 小川 英夫, 大西 利和 (大阪府大), 南谷 哲宏, 宮本 祐介, 宮澤 和彦, 齋藤 正雄 (国立天文台), 岸本 直子(摂南大), 水窪 耕兵, 今井 裕(鹿児島大), VLBI 懇談会シンポジウム 2016 (山口大学, 2016), P54-56
- [2] “HINOTORI プロジェクトにおける野辺山 45 m 電波望遠鏡搭載周波数分離フィルタの開発について”, 岡田 望, 橋本 育実, 保田 大介, 高田 勝太, 本間 愛彩, 木村 公洋, 千葉 正克, 真鍋 武嗣, 大西 利和, 小川 英夫 (大阪府大), 南谷 哲宏, 宮本 祐介, 宮澤 和彦, 宮澤 千栄子, 小山 友明(国立天文台), 岸本 直子(摂南大), 水窪 耕兵, 澤田-佐藤 聡子, 今井 裕(鹿児島大), VLBI 懇談会シンポジウム 2017(帝京科学大学, 2017), P46-48
- [3] “22/43 GHz 帯フィルタによる野辺山 45 m 鏡二周波同時観測について -フィルタ開発からコミッション観測まで-”, **岡田 望**, 橋本 育実, 保田 大介, 木村 公洋, 千葉 正克, 真鍋 武嗣, 大西 利和, 小川 英夫 (大阪府大), 南谷 哲宏, 宮本 祐介, 宮澤 和彦, 宮澤 千栄子, 小山 友明 (国立天文台), 澤田 - 佐藤 聡子 (日本宇宙フォーラム), 岸本 直子 (摂南大), 前山 大地, 今井 裕 (鹿児島大), VLBI 懇談会シンポジウム 2018 (熊本大学, 2018), P159-162
- [4] “HINOTORI (Hybrid Installation project in Nobeyama, Triple-band Oriented)”, H. Imai, H. Shinnaga, S. Sawada-Satoh, A. Nakagawa, K. Mizukubo, T. Handa (Kagoshima University); H. Ogawa, K. Kimura, T. Manabe, M. Chiba, **N. Okada**, I. Hashimoto, R. Takahashi, S. Takada, A. Honma, T. Ohnishi (Osaka Prefecture University); T. Oyama, Y. Kono, N. Sakai, T. Hirota, Y. Tamura, K.M. Shibata, M. Honma (Mizusawa VLBI, NAOJ); T. Minamidani, M. Saito, Y. Miyamoto, K. Miyazawa (NRO, NAOJ); Y. Asaki, S. Kamenno (NAOJ Chile); K. Fujisawa, K. Niinuma, N. Matsumoto (Yamaguchi University) , VLBI 懇談会シンポジウム 2016(山口大学, 2016), P116-118
- [5] “野辺山 45 m 電波望遠鏡による 3 帯域同時観測に向けた TZ 受信機の改造”, 堤 稔喜,

藤澤健太 新沼浩太郎 甘利涼湖 (山口大学)小川英夫 岡田望 増井翔 (大阪府立大学), VLBI 懇談会シンポジウム 2018(熊本大学, 2018), P163-166

### Conference presentations

- [1] “Development in HINOTORI(Hybrid Installation project in NObeyama, Triple-band ORiented) - 22/43 GHz simultaneous observation system in the Nobeyama 45-m Telescope -”, Nozomi OKADA, Ikumi HASHIMOTO, Daisuke YASUDA, Kimihiro KIMURA, Masakatsu CHIBA, Takeshi MANABE, Toshikazu ONISHI, Hideo OGAWA (Osaka Prefecture University), Tetsuhiro MINAMIDANI, Yusuke MIYAMOTO, Kazuhiko MIYAZAWA, Chieko MIYAZAWA, Tomoaki OYAMA (NAOJ), Satoko SAWADA-SATO (Japan Space Forum), Naoko KISHIMOTO (Setsunan University), Daichi MAEYAMA, Hiroshi IMAI (Kagoshima University), 19th East Asia Submillimeter-wave Receiver Technology Workshop (Kwansei Gakuin University, 2018)
- [2] “野辺山 45 m 電波望遠鏡搭載 22/43 GHz 同時観測用周波数フィルタの開発”, 岡田 望, 橋本 育実, 高田 勝太, 本間 愛彩, 高橋 諒, 木村 公洋, 千葉 正克, 真鍋 武嗣, 小川 英夫, 大西 利和 (大阪府大), 南谷 哲宏, 宮本 祐介, 宮澤 和彦, 齋藤 正雄 (国立天文台), 岸本 直子 (摂南大), 水窪 耕兵, 澤田 - 佐藤 聡子, 今井 裕 (鹿児島大), 第 17 回”ミリ波サブミリ波受信機ワークショップ”第 3 回”理研 NICT 合同テラヘルツワークショップ”(情報通信機構, 2017)
- [3] “野辺山 45 m 鏡搭載 20/40 GHz 帯同時観測用周波数フィルタの開発”, 岡田 望, 橋本 育実, 高田 勝太, 本間 愛彩, 高橋 諒, 木村 公洋, 千葉 正克, 真鍋 武嗣, 小川 英夫, 大西 利和 (大阪府大), 南谷 哲宏, 宮本 祐介, 宮澤 和彦, 齋藤 正雄 (国立天文台), 岸本 直子(摂南大), 水窪 耕兵, 今井 裕(鹿児島大), 日本天文学会 2017 年春季年会(九州大学, 2017)
- [4] “HINOTORI プロジェクトにおける野辺山45 m 鏡搭載周波数分離フィルタの開発”, 岡田 望, 橋本 育実, 高田 勝太, 本間 愛彩, 木村 公洋, 千葉 正克, 真鍋 武嗣, 小川 英夫, 大西 利和 (大阪府大), 南谷 哲宏, 宮本 祐介, 宮澤 和彦, 宮澤 千栄子 (国立天文台), 岸本 直子 (摂南大), 水窪 耕兵, 澤田 - 佐藤 聡子, 今井 裕 (鹿児島大), 第 16 回 IVS 技術開発センターシンポジウム(NICT 鹿島宇宙技術センター, 2017)
- [5] “野辺山 45 m 電波望遠鏡搭載同時観測用周波数フィルタの開発”, 岡田 望, 橋本 育実, 高田 勝太, 本間 愛彩, 木村 公洋, 千葉 正克, 真鍋 武嗣, 小川 英夫, 大西 利和 (大阪府大), 南谷 哲宏, 宮本 祐介, 宮澤 和彦, 宮澤 千栄子 (国立天文台), 岸本 直子 (摂南大), 水窪 耕兵, 澤田-佐藤 聡子, 今井 裕 (鹿児島大), 日本天文学会 2017 年秋季年会(北海道大学, 2017)
- [6] “HINOTORI プロジェクトにおける野辺山45 m 鏡搭載周波数分離フィルタの開発について”, 岡田 望, 橋本 育実, 保田 大介, 高田 勝太, 本間 愛彩, 木村 公洋, 千葉 正克, 真鍋

- 武嗣, 大西 利和, 小川 英夫 (大阪府大), 南谷 哲宏, 宮本 祐介, 宮澤 和彦, 宮澤 千栄子, 小山 友明(国立天文台), 岸本 直子(摂南大), 水窪 耕兵, 澤田-佐藤 聡子, 今井 裕(鹿児島大), VLBI 懇談会シンポジウム 2017(帝京科学大学, 2017)
- [7] “野辺山 45 m 電波望遠鏡搭載同時観測用周波数フィルタの開発(II)”, **岡田 望**, 橋本 育実, 保田 大介, 高田 勝太, 本間 愛彩, 木村 公洋, 千葉 正克, 真鍋 武嗣, 大西 利和, 小川 英夫 (大阪府大), 南谷 哲宏, 宮本 祐介, 宮澤 和彦, 宮澤 千栄子, 小山 友明(国立天文台), 岸本 直子(摂南大), 水窪 耕兵, 澤田-佐藤 聡子, 今井 裕(鹿児島大), 日本天文学会 2018 年春季年会(千葉大学, 2018)
- [8] “野辺山 45 m 電波望遠鏡搭載 22/43 GHz 同時観測用周波数フィルタの開発(II)”, **岡田 望**, 橋本 育実, 保田 大介, 高田 勝太, 本間 愛彩, 木村 公洋, 千葉 正克, 真鍋 武嗣, 大西 利和, 小川 英夫 (大阪府大), 南谷 哲宏, 宮本 祐介, 宮澤 和彦, 宮澤 千栄子, 小山 友明(国立天文台), 岸本 直子(摂南大), 水窪 耕兵, 澤田-佐藤 聡子, 今井 裕(鹿児島大), 第 18 回”ミリ波サブミリ波受信機ワークショップ”第 4 回”理研 NICT 合同テラヘルツワークショップ”(国立天文台, 2018)
- [9] “野辺山 45 m 電波望遠鏡における 22/43 GHz 帯同時観測評価”, **岡田 望**, 橋本 育実, 保田 大介, 木村 公洋, 千葉 正克, 真鍋 武嗣, 大西 利和, 小川 英夫(大阪府大), 南谷 哲宏, 宮本 祐介, 宮澤 和彦, 宮澤 千栄子, 小山 友明(国立天文台), 澤田-佐藤 聡子(日本宇宙フォーラム), 岸本 直子(摂南大), 前山 大地, 今井 裕(鹿児島大), 日本天文学会 2018 年秋季年会(兵庫県立大学, 2018)
- [10] “22/43 GHz 帯フィルタによる野辺山 45 m 鏡二周波同時観測の現状について”, **岡田 望**, 橋本 育実, 保田 大介, 木村 公洋, 千葉 正克, 真鍋 武嗣, 大西 利和, 小川 英夫(大阪府大), 南谷 哲宏, 宮本 祐介, 宮澤 和彦, 宮澤 千栄子, 小山 友明(国立天文台), 澤田-佐藤 聡子(日本宇宙フォーラム), 岸本 直子(摂南大), 前山 大地, 今井 裕(鹿児島大), 第 16 回 水沢 VLBI 観測所ユーザーズミーティング(国立天文台, 2018)

## Awards

- [1] VLBI 懇談会シンポジウム 2016 口頭発表賞第二位受賞, 2016 年 12 月, 山口大学
- [2] VLBI 懇談会シンポジウム 2018 最優秀ポスター発表賞受賞, 2018 年 12 月, 熊本大学

# 学位論文審査結果の要旨

学位論文題目

Development of 22/43-GHz-band simultaneous observation system of  
the Nobeyama 45-m telescope

(野辺山 45m 電波望遠鏡搭載 22/43 GHz 帯同時観測システムの開発)

提出者氏名 岡田 望

電波望遠鏡は、その観測波長が非常に長いため、高い空間分解能での観測を行うためには、望遠鏡自体を大きくするか、長い基線長を有する干渉計での観測を行う必要がある。銀河中心にあるブラックホールやそこから放出されるジェットの本元等を観測するためには、非常に高い空間分解能が必要であり、そのために、100km を超える非常に長い基線長を有する VLBI (Very Long Baseline Interferometer) 観測が行われてきた。天体までの距離は非常に遠いため、地球には平面波として到達するが、観測地の大気条件の違いにより、望遠鏡への電波の到着時刻が前後する事により位相情報がずれてしまい、これは電波の相関処理に大きな影響をおよぼす。この大気の影響は高い周波数の電波ほど深刻になり、波長が短くなることもあわせて、高い周波数での観測を難しくしている。この問題を解決するため、複数の周波数帯での観測により、大気の影響をより受けにくい低周波帯側の受信信号を参照信号として高周波帯側の受信信号データを校正するという位相補償という手法が注目されている。

本研究では、国立天文台野辺山宇宙電波観測所の 45m 電波望遠鏡で、22/43/86GHz 帯同時観測を実現することにより、これを用いた高周波 VLBI 観測を実現することを目標としている。このため、45m 鏡の非常に大きな光学系に対応した 22/43GHz 帯周波数選択デバイスを新たに設計・製作した。電波の透過・反射特性や、大きな光学系への対応を検討した結果、**perforated plate** と呼ばれる、数多く開けられた円形導波管アレイの性質を利用した周波数選択デバイスを採用した。大まかな周波数特性は、導波管自体の遮断周波数（円形導波管の大きさに依存）で決定されるが、**plate** の厚み、円形導波管同士の間隔、**plate** への入射角等により、周波数特性は変化する。特に、透過電波は、これらのパラメータにより大きな影響を受けるため、電波の伝導・反射特性を考慮した上で詳細な電磁界シミュレーションを実行し、透過電波の電力損失を -0.22 dB におさえたデバイスの設計に成功した。開発した **perforated plate** を 45m 鏡へ搭載し、単一鏡観測や VLBI 観測を行うだけの性能が確保されている事を確認し、VLBI の試験観測にも成功した。これを受けて、波長が短くなる分だけスケールダウンした 43/86GHz 帯のデバイスの設計・製作も行い、十分な性能を有するデバイスの作成に成功した。

以上のように本研究は、45m 鏡のような非常に大きな光学系における高い周波数での周波数選択デバイスを初めて設計・製作・搭載したものであり、口径の大きな 45m 鏡が参加した高周波で感度の高い VLBI 観測を実現し、天文学に大きな貢献を果たすと考えられる。

以上により、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して判断した。

主査 大西 利和  
野口 悟  
細越 裕子