

令和元年6月13日現在

機関番号：82645

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2017～2018

課題番号：17H07405

研究課題名(和文) 275-500 GHz 超広帯域導波管回路(OMT)の実現

研究課題名(英文) Development of 275-500 GHz super-wideband waveguide Ortho-Mode Transducer

研究代表者

長谷川 豊 (Hasegawa, Yutaka)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・宇宙航空プロジェクト研究員

研究者番号：70802750

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：電波天文観測装置として広く用いられているヘテロダイン受信機における近年の開発課題のひとつに、比帯域 50% 超への観測帯域幅の拡張がある。本研究では、観測需要が非常に強い 275-500 GHz (58%) をカバーする超広帯域の直交偏波分離器の実現を狙い、それを妨げる電氣的・構造的設計上の問題解決に取り組んだ。

結果として、従来は 10  $\mu\text{m}$  程度あったデバイス接続位置誤差を約 3  $\mu\text{m}$  程度まで抑制出来る新たな接続機構の実現など、構造上の問題要素をいくつか解決することが出来、これらにより 275-500 GHz OMT の実現を成功させた。また、当該技術はより高周波帯に応用可能である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により開発された、従来より高い加工精度でのデバイス製造技術や、従来より高い精度での位置合わせが可能な接続機構などにより、今後実施される 300 GHz 超のサブミリ波帯デバイス開発における金属切削加工上の問題は大きく取り除かれた。

これにより、強い需要があるサブミリ波帯天文観測に対する装置開発上の解を容易に提案できるようになり、今後の天文学の進展への大きな貢献が期待できる。また、無線通信などでも将来的に 300 GHz 超の高周波化が取り込まれる見込みであるが、そうした分野への貢献も十分期待できる。

研究成果の概要(英文)：One of the issues in recent development of heterodyne receivers, which widely used as radio astronomical observation devices, is the extension of the observation bandwidth to more than 50% fractional bandwidth.

In this research, we aimed at the realization of the ultra-wideband Ortho-Mode Transducer (OMT) which covering 275-500 GHz (58%), where the observation demand is very strong. To do this, we worked on the solution of the electrical and structural design problems that obstructs it.

As a result, we succeeded in the realization of the 275-500 GHz OMT, with solving some structural problems; for example, we have realized a new connector that can reduce the device connection position error to about 3  $\mu\text{m}$ , which was about 10  $\mu\text{m}$  in the past. Also, these technologies are applicable to higher frequency bands.

研究分野：電波天文学、観測機器、導波管回路

キーワード：電波 天文学 導波管 直交偏波分離器 広帯域 高精度 フランジ

## 1. 研究開始当初の背景

大型電波干渉計 ALMA によるかつてない高解像度・高感度観測結果は、新たな知見と更なる課題をもたらした。特に、近傍銀河の巨大分子雲スケールでの高分解能観測の結果  $\text{HCO}^+$ 、 $\text{HCN}$ 、 $\text{CH}_3\text{OH}$  といった微量分子が巨大分子雲のほぼ全域に分布していることが示唆され、銀河系内の超新星残骸等でもこうした兆候があった。これらの広がった分子輝線の起源は不明であったが、それを解き明かすことで星間ガスの性質を捉える新たなプローブになると期待された。ところが、従来の比較的狭帯域での観測では、広大な観測領域における多数の微量分子輝線の検出を、現実的な時間では達成できなかった。これに対応すべく ALMA を含めた世界中の天文観測装置開発において、可観測帯域幅の拡張が非常に活発化していた。特に、超伝導ヘテロダイン受信機の中核を為す SIS-Mixer およびその前段の直交偏波分離器（Ortho-Mode Transducer, OMT）などの導波管回路は、観測帯域幅を支配的に決定するため、これらの広帯域化をいち早く達成する必要がある。

## 2. 研究の目的

本研究では、前述の通り観測帯域幅の拡張に必須となる導波管回路の帯域幅拡張に取り組んだ。特に、OMT については、我々の従来成果などにより ALMA band 2+3 相当の 67-116 GHz, 比帯域 54% で実用可能な新たな構造モデルの開発に成功していたが、観測需要が極めて高い ALMA band 6+7 相当 275-500 GHz, 比帯域 58% への応用には困難があり、達成出来ていなかった。また、国立天文台 ASTE 望遠鏡では 275-500 GHz 受信機システムの開発計画が進んでいたが、これに採用するデバイスの開発目途がつかない状況であった。そこで本研究では、特に 275-500 GHz, 比帯域 58% の OMT 実現を狙って、従来モデルの応用における問題点の解決に取り組んだ。

## 3. 研究の方法

我々の従来成果などによる比帯域 54% 程度の導波管型 OMT には、下記 3 点の問題のために、275-500 GHz, 比帯域 58.5% への応用が非常に困難であった。そこで本研究では、これら 3 点の問題についてそれぞれ解決方法を模索した。

- (1). 入力された直交 2 偏波を分離する  $B\phi$  fot-Junction 構造から分岐した部分において、高周波側限界外の帯域に TE20 Mode の共振が生じるため、帯域幅を拡張できない。
- (2). 導波管サイズ 0.8 x 0.4 mm, 回路全長約 3mm と OMT 自体は極小の構造体である一方で、他デバイスとの接続機構である導波管フランジの従来設計における接続位置誤差が  $\pm 5\sim 10\ \mu\text{m}$  と大きく、さらに回転の影響もより強く受けるため、偏波分離特性などの重要な機能が接続フランジ位置誤差により大きく劣化する。
- (3). デバイスの接続フランジ面精度が  $\pm 10\ \mu\text{m}$  程度で、さらにわずかに面傾斜を持つため、2つのデバイスの導波管の延伸軸にズレや接続面での隙間・凹みが生じ、高次モード共振や定在波による周波数特性のリップルが強く生じる。

## 4. 研究成果

問題 (1) について、TE20 Mode を抑制する Cut-off フィルタを経路中に挿入することで共振問題を軽減/回避出来ると考えた。ただし本手法では低周波限界側での特性劣化が避けられないため、両者のバランスを上手く取る必要がある、単なる経路中挿入では全く問題解決が出来ない。そこで本研究ではまず、TE20 共振が経路中のどこで発生しどこで最も強くなるのかを探り、フィルタ挿入場所の候補を複数挙げた。次に、それぞれの挿入候補場所に同一の弱い Cut-off フィルタ構造を挿入し、フィルタ特性を少しずつ変えた時のそれぞれの場所での低/高周波特性の劣化/向上のバランスを探った。この結果、最適なフィルタ挿入場所は  $B\phi$  fot-Junction 部水平偏波の出力分岐点のすぐ先であり、Cut-off フィルタの減衰特性の強弱調整により比帯域を最大 60% まで拡大することが出来ると分かった（ただし、反射損失など諸特性は比帯域に反比例して劣化する）。この結果から 275-500 GHz OMT に最適な構造モデルを得ることが出来た。（図 1）

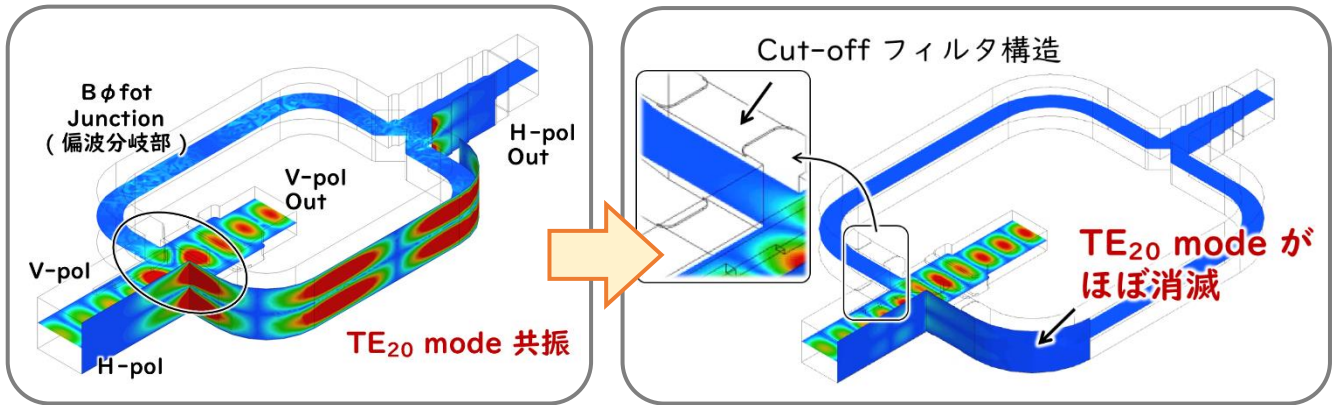


図 1. 275-500 GHz OMT 構造モデルの電界強度分布プロットの比較  
(左：旧 54%モデル、右：新 60%モデル)

問題(2) について、非常に古くは 500 GHz 帯においても  $\phi 19.05$  mm UG-387 導波管フランジを採用していたが、我々は従来研究にて  $10$ mm と UG-387 の  $1/4$  サイズの小型フランジの開発に取り組んでいた。ただし、この旧小型フランジでは接続位置合わせ機構として  $\phi 1.0$ mm ノックピンを採用していたため、その位置合わせ精度は  $\pm 5-10 \mu\text{m}$  であり、角度誤差は最大  $0.16\text{deg}$  である。一方で、500 GHz 帯の周波数特性の劣化量から算出した必要精度は  $\pm 2-3 \mu\text{m}$  であり、このとき角度誤差は Max.  $0.05 \text{deg}$  まで改善される。これを 実現するためには、ノックピンに変わる新たな位置合わせ手法が必要であった。そこで考案したのが、図 2 に示すフランジ構造である。本構造では、図中に示す対となる 1-2 ペアの突起-窪み構造の側面接触、または直交度を担保した特定のフランジ側面を位置基準とし、これらを  $2-3 \mu\text{m}$  の加工誤差を実績値とする超高精度切削加工で製造することにより、接続位置精度  $\pm 2-3 \mu\text{m}$ 、角度誤差ほぼ 0 を達成出来る。

このフランジ構造を持つ 480 GHz 体導波管デバイスを試作し、その接続位置誤差を寸法測定・周波数特性測定の 2 種類で評価した。寸法測定の結果では測定限界レベルで再現が取れており (大きくても  $5 \mu\text{m}$ )、周波数特性結果では、図 3 に示すように旧型フランジでは測定値が著しくバラついていたものが、新型フランジではこの帯域としては驚異的な再現性を示した。さらに、この新型フランジを 770 GHz 帯デバイスに応用した結果、そこでも従来比で高い特性再現度を得ることが出来た。これらの結果から、少なくとも 800 GHz 帯まで十分実用可能な新たな小型・高精度導波管フランジの開発に成功したと言える。

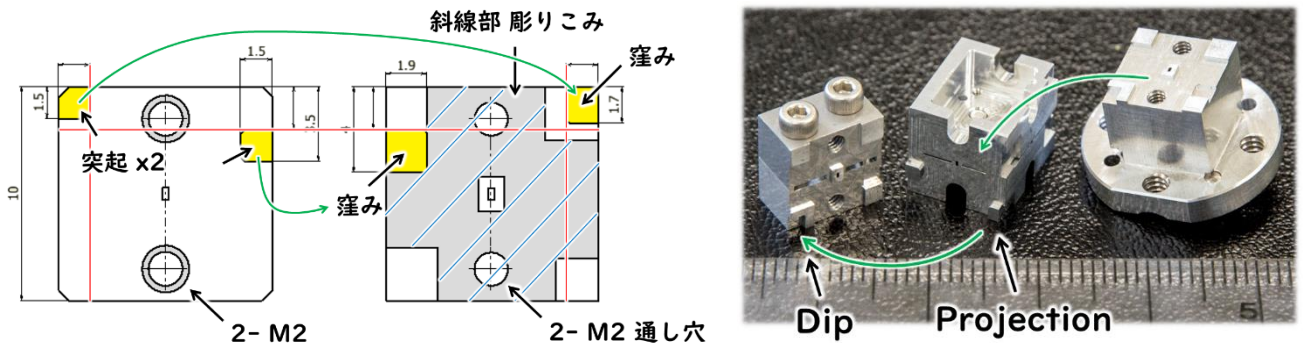


図 2. 本研究で開発した新型の小型・高精度導波管接続フランジ  
(左：概念図面、右：実物写真)

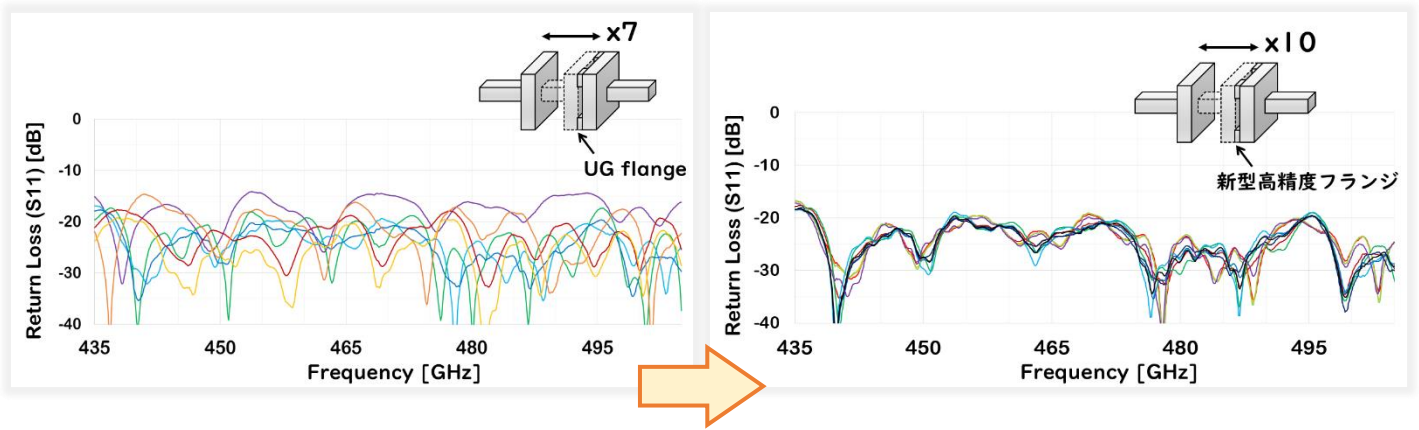


図 3. 反射損失の反復測定による導波管フランジの接続再現度試験の結果  
 ( 左：従来 UG-387 フランジ、右：新型の小型・高精度フランジ )

問題(3) について、アルミ合金・TeCu などの金属直方体から切削される導波管デバイスにおける接続面の不良 (  $\pm 10 \mu\text{m}$  程度の窪み・盛り上がりなど ) および面傾斜は、切削加工前段階での仕上げ加工不良・不足に因るものと、切削加工に伴う応力歪みに因るものに大別出来る。本研究では、まず前者を改善するために、素材仕上げ加工の最終段階での研磨工程の見直しに取り組んだ。この結論として、高硬度樹脂で製造した研磨治具に素材を詰め込み、治具全体を研磨盤に垂直に押しつける手法を開発した。本手法により、全ての素材を均一且つ高精度に研磨することが可能になり、接続面傾斜・面不良とも大きく改善できた ( 図 4,5 )。また、採用率の高いアルミ合金における内部応力歪みへの対策として、従来採用されてきた A6061, 6063 に加えて、応力ひずみに強いとされる特殊合金など合計 5 種類のアルミ合金に対して同一の応力ひずみがおきやすい加工を施し、高精度 3 次元寸法測定で各々の歪み量を比較した。この結果、最も歪みが少なかったのは A6063-T5 である事が分かった。A6063 はアルミ合金の中でも電気伝導度が最も高く、損失を抑制出来ることから 2013 年頃より導波管デバイスとして採用してきた実績があったが、一般にはアルミサッシ等の押出し材によく用いられる柔らかい素材のため、従来は加工誤差が出やすいと認識されていた。A6063-T5 合金が電氣的・構造的の両面で導波管デバイスに最適である事を示した本成果は、今後の導波管デバイスの特性に大きく貢献出来ると期待できる。

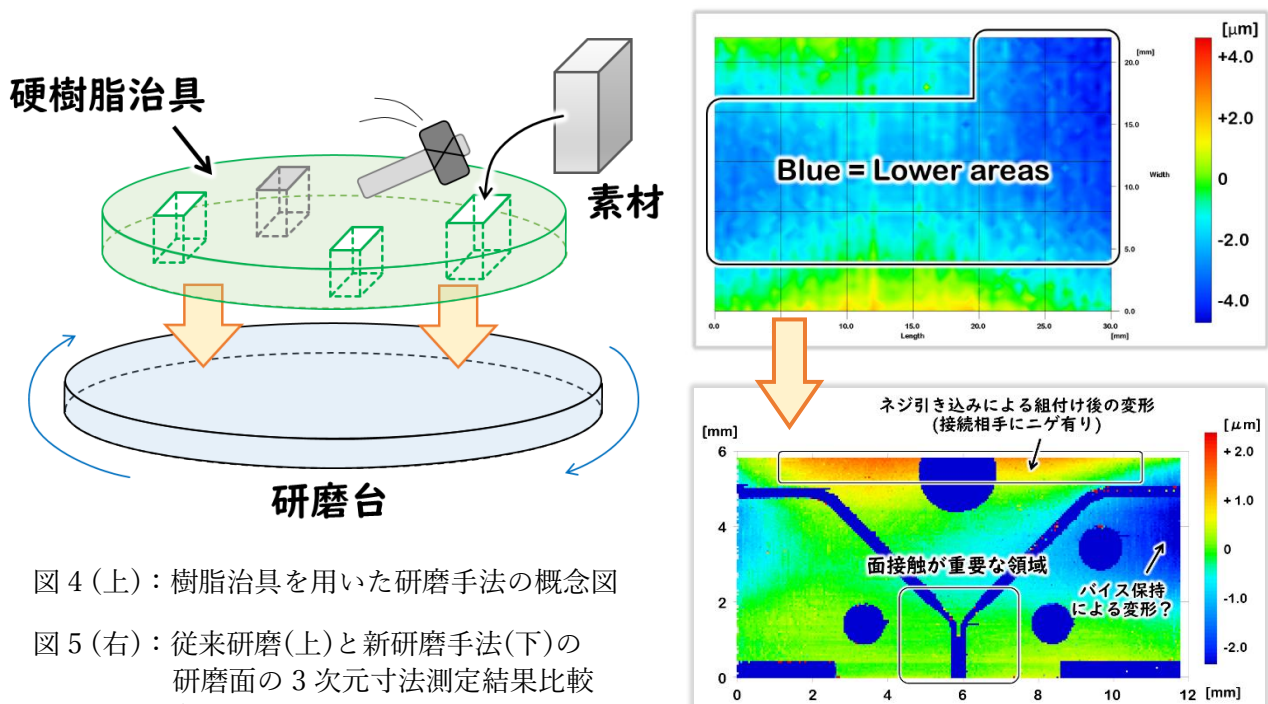


図 4 (上)：樹脂治具を用いた研磨手法の概念図

図 5 (右)：従来研磨(上)と新研磨手法(下)の研磨面の 3 次元寸法測定結果比較  
 ( スケールが異なる点に注意、表面荒さが 1/2 程度に抑制されている )



問題 1-3 に帯する上記のアプローチの結果、275-500 GHz OMT を設計製造するための素養技術を整えることが出来た。そこで、これらを用いて実際に OMT を製造し、その特性評価を実施した結果、図 6 に示すように、275-500 GHz の全域において、反射損失 < -15dB, 交差偏波混入率 -30 dB 以下と、十分実用的な ALMA Band 7+8 OMT を実現できた。この試作においては、製造費高騰の影響から導波管サイズ変換の接続フランジ機構を簡略化している。この影響で、反射損失においては設計値から -3dB 程度の劣化が生じ、X-pol についても -40dB レベルでの共振が見られる。これらの問題は、小型・高精度フランジを採用している別の導波管デバイスでは見られず、寸法測定結果からも考えづらいため、簡略化の影響の可能性が非常に高く、本機を採用するプロジェクトにおける本製造において解決される見込みである。

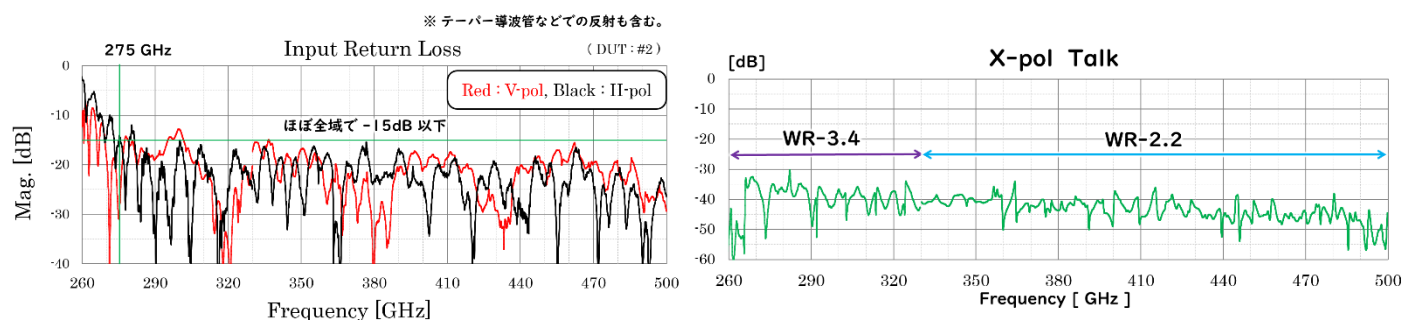


図 6. ALMA Band 7+8 275-500 GHz OMT 試作品の周波数特性測定結果  
( 左 : V, H 偏波入力反射損失、右 : 交差偏波混入率 X-pol Talk )

## 5. 主な発表論文等

〔学会発表〕 (計 3 件)

1. Y. Hasegawa, H. Ogawa, H. Maezawa, S. Ochiai, S. Sato, I. Watanabe, K. Matsushita, M. Ishino, “Development of small and high accuracy flanges for submm WG devices”, 19th East Asia Submillimeter-wave Receiver Technology Workshop. 2018/12/12, 関西学院大学 ( 口頭 15 分 )
2. 長谷川 豊、西堀 俊幸、落合 啓、鶴澤 佳徳、入交 芳久、前澤博之、「SMILES-2 630/770 GHz SIS 受信機のための統合導波管回路の開発」、日本天文学会 2018 年度春期年会、2018/03/15 ( 口頭 12 分 )
3. 長谷川 豊、小川 英夫、前澤 裕之、落合 啓、佐藤 茂、渡邊 一世、松下 幸司、石野 雅之、「次世代サブミリ波帯導波管回路の開発」、第 18 回ミリ波サブミリ波受信機ワークショップ、2018/02/22-23 ( 口頭 15 分 )

## 6. 研究組織

(1)研究分担者 : 無し

(2)研究協力者

研究協力者氏名 : 小川 英夫 ( OGAWA, hideo ), 前澤 裕之 ( MAEZAWA, hiroyuki ),  
落合 啓 ( OCHIAI, satoshi ), 佐藤 茂 ( SATO, shigeru ),  
渡邊 一世 ( WA TANABE, issei ), 木村 公洋 ( KIMURA, kimihiro ),  
松下 幸司 ( MATSUSHITA, koji ), 石野 雅之 ( ISHINO, masayuki )

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。