

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 3 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2021

課題番号：20K20930

研究課題名（和文）電波望遠鏡用テラヘルツ帯検出器の高感度化に向けた超低損失立体伝送路の実現

研究課題名（英文）Development of Ultra-Low Loss Waveguide for High-Sensitivity Terahertz Receivers in Radio Telescope

研究代表者

中島 拓（Nakajima, Taku）

名古屋大学・宇宙地球環境研究所・助教

研究者番号：90570359

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究は、ミリ波～テラヘルツ波帯電波望遠鏡の受信機に使用される立体伝送路である導波管の伝送損失を極限まで低減させるための新しい技術を提案し、その実証実験を行った。具体的には、完全導電性を有する超伝導金属を導波管壁面の材料とする「超伝導導波管」を製作し、極低温下で伝送特性を測定することによって、従来の常伝導金属製の導波管と比べて伝送損失を大幅に低減可能なことを示した。さらに、三次元電磁界シミュレーションを用いて測定結果を解析することにより、超伝導矩形導波管の主要な伝送モードを考察した。以上により、世界初の超伝導導波管の実用化に向けた製作技術の確立、伝送特性の解明、有用性の実証に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電波と赤外線境界に位置する電磁波領域である「ミリ波～テラヘルツ波」は、エレクトロニクスとフォトニクス技術が適用される境界領域に位置し、最後の未開拓波長帯と言われている。科学観測のほか、情報・通信、医療・バイオ、セキュリティ分野などでの応用が期待されている一方、既存の技術では発振・伝送・検出が困難であり、それが未開拓領域として残されている所以である。本研究は、この領域の基礎課題の一つである「伝送」の技術開拓に資するものである。超伝導伝送路は、平面回路や同軸ケーブルは既に市販されているが、導波管回路は実用例が無く、本研究の成果はテラヘルツ帯導波管コンポーネントの実現における重要な足掛かりとなる。

研究成果の概要（英文）：We have proposed a new technology to reduce the propagation loss of waveguide for the receiver of the millimeter to terahertz band radio telescopes and have carried out the demonstration experiment to confirm an availability of it. In this work, we made a rectangular waveguide using superconducting material, measured its propagation characteristics, and compared with 3D electromagnetic field analysis. As a main result, significantly small propagation loss of the superconducting waveguide relative to the normal metal waveguides was found around 100 GHz. We have successfully established the manufacturing method, clarified the propagation mode, and confirmed the potency of the superconducting waveguide.

研究分野：電波天文学

キーワード：ニオブ材 超伝導 導波管 テラヘルツ波 ミリ波・サブミリ波 電波望遠鏡 受信機 低損失伝送

1. 研究開始当初の背景

電波望遠鏡では、自由空間を伝わってきた宇宙からの電波をホーンによって導波管モードへと変換し、後段の検出器に伝送するのが一般的である。検出器前段での損失を避けるため、従来はホーンと検出器はほぼ直結されていた。しかし近年、超精密金属加工技術の向上や電磁界解析精度の向上により、複雑な導波管回路が比較的 low loss で実現され、検出器前段で偏波や周波数の分離を行う受信機が主流となっている（例えば偏波分離器 (Wollack et al. 2002)、ハイブリッドカプラ (Claude et al. 2000)、周波数マルチプレクサ (Kojima et al. 2017) など)。ただし、テラヘルツ帯の微小な導波管では伝送損失が無視できず、その応用はミリ波・サブミリ波帯 (~0.5 THz 程度) までに限られている。従って、この伝送損失を低減させることが出来れば、テラヘルツ帯でも導波管コンポーネントが現実的となるだけでなく、既存のミリ波・サブミリ波電波望遠鏡においては受信感度を飛躍的に向上させることができる。

申請者のグループでは、これまでに超伝導体である窒化ニオブチタン (NbTiN; ギャップ周波数 1.4 THz) を DC スパッタによって銅の導波管内面に成膜する手法で「超伝導導波管」を試作・評価した (Kuroiwa 2014)。その結果、超伝導の効果によって伝送損失が 1/10 程度に低減出来たが、同時に大きな残留損失も確認された (図 1)。この原因は、DC スパッタによる NbTiN の成膜には方向性があるため、導波管壁面への付着が充分ではなかったと考えられる。そこで本研究では、超伝導膜の成膜という手法ではなく、超伝導体金属そのもので導波管を加工する手法を提案した。

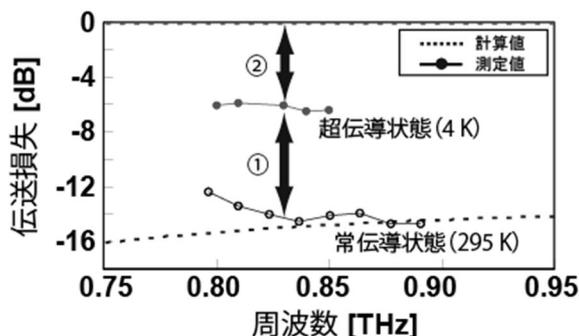


図 1: NbTiN をスパッタした超伝導導波管の伝送損失の実測結果。は超伝導による損失低減だが、の残留損失 (6 dB 程度) が見られる (Kuroiwa 2014 の図を改変)

2. 研究の目的

本研究は、電波望遠鏡用の受信機システムに使用される導波管を用いた立体回路での伝送損失を極限まで低減させる新しい技術の実証実験を行うことを目的とする。具体的には、完全導電性を有する超伝導金属を材料とする「超伝導導波管」の実現によって、伝送損失を極限まで低減可能なことを実際の導波管の製作と特性の測定から示すと共に、電磁界解析との比較によって伝送モードの電磁気学的理解を目指す。

3. 研究の方法

「超伝導導波管」を実現するため、製作技術の確立、伝送特性の解明、有用性の実証の 3 項目を実施する。

(1) 超伝導金属としてニオブ (Nb) を用いた導波管を試作する

Nb は、電波天文用検出素子に用いる薄膜材料として広く用いられている超伝導金属である。比較的高い臨界温度 9.2 K で超伝導性を示すため、一般的なヘリウム閉サイクル冷凍機 (4.2 K) を用いることで冷却実験が可能である。ただし Nb のギャップ周波数は 0.7 THz であり 1 THz を超えるような周波数では伝送ができないこと、加工においては難削材として知られ加工実績もほとんど無いことから、まずは低周波のミリ波帯 (~0.1 THz = 100 GHz) の矩形導波管で試作を行う。これにより Nb の切削特性や加工精度の情報が得られ、実際の導波管回路の製作に重要である。試作に用いる Nb 材料 (6.6 x L200 mm) は既に入手済みであり (図 2)、ミリ・サブミリ波の導波管製作で多くの実績を有する (株)川島製作所に加工を依頼する。



図 2: 導波管製作に用いる Nb 材の丸棒

(2) 超伝導導波管の伝搬特性の実測と解析

実際に Nb 導波管を製作した後、ヘリウム冷凍機を用いて 4.2 K に冷却することで超伝導状態にし、ミリ波帯ベクトルネットワークアナライザ (VNA) によってその伝送特性を測定する。ただし先行研究の理論計算から、超伝導状態では表皮効果の影響などによって基本伝搬モード (TE₁₀) が励起されず高次モード (TE₁₁) が支配的となること (Wang et al. 1994) や、ギャップ周波数や導波管のカットオフ周波数近傍以外でも伝送損失が大きくなることが予想されている (Yeap

et al. 2015)。従って、伝送特性を実験によって明らかにするだけでなく、さらに電磁界解析との比較によって導波管の主要な伝搬モードの理解を目指す。

(3) 同条件で既存の常伝導金属導波管と比較する

一般的にミリ波・サブミリ波帯の導波管としては、アルミニウム合金、銀、テルル銅などを用いたものが市販されている。本研究では、材質の異なる導波管を複数用意し、超伝導Nb導波管と同条件で伝送特性を実測し比較することにより、超伝導導波管の有用性を実証する。

4. 研究成果

(1) ニオブ導波管の製作と機械加工精度

Nbは難削材として知られ、加工実績もほとんどないことから、まずは刃物の選定や加工条件を探ることから開始した。今回は加工機としてマシニングセンタを使い、導波管はNb材のブロックの表面にエンドミルによって切削加工した。刃物は、樹脂用、アルミ加工用、耐熱合金加工用、DLC(ダイヤモンドライクカーボンコーティング)など5種を使って、単純な直線導波管の試験加工を行った(図3上)。結果を比較すると、DLCのエンドミルが表面粗さは最良ではないものの、最も溶着が少なく安定した(刃物の破損やバリが少ない)加工が可能であることが分かった。

最終的に、1mm径のエンドミルを用いて、長さ20mmのW-band(2.54mm×1.27mm)矩形直線導波管を製作し、非接触三次元表面粗さ測定機で測定した結果、導波管底面が0.360 μm(Ra)、側面が0.098 μm(Ra)の精度を達成できるようになった。この結果を受けて、さらにベンド導波管、ねじ切り、分割ブロック、フランジなどの試験加工を行った結果、Nb材を用いた導波管回路の製作が可能であるという感触を得た(図3下)。



図3: Nb材を用いたW-band矩形直線導波管の試作結果(上)。ベンドおよび分割ブロック/ねじ切り/フランジ加工試験結果(下)

(2) ニオブ導波管の伝送特性測定と電磁界伝搬解析

長さが限られた短い導波管では、微小な伝送損失をVNAなどの測定器で精度良く測るのは難しいため、今回は誘電体材料の損失測定などでよく使われる共振器法を応用することにした。これは、共振回路のQ値(f_0/f)の逆数が、その回路の損失で決まることを利用したもので、測定されたQ値を電磁界解析の結果と比較することによって金属の導電率を求め、さらに導波管での伝送損失を見積もるという方法である。

今回は、20mm角の二つ割のブロックの中央に、両端がUG387フランジである直線導波管を切削し、それに対して垂直に小さなボックスがアイリス窓を介して接続される構造の導波管共振器を電磁界解析ソフトウェアHFSSで設計した(図4)。そしてこの共振器をニオブ材(Nb)、アルミ合金(A6061)、テルル銅(金メッキを施したもの)(TeCu+Au)の3種類の金属を用いて製作した(図5)。

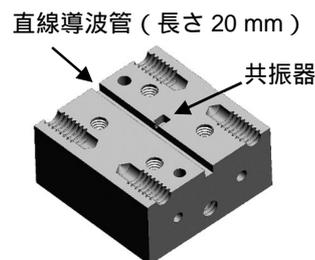


図4: 設計した導波管共振器

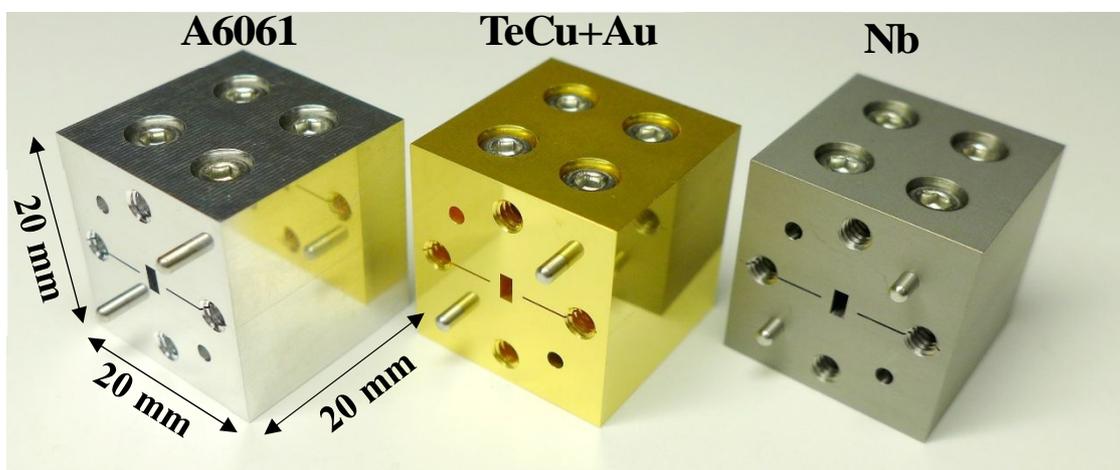


図5: 製作した3種の金属による導波管共振器の外観

製作された共振器は、まず情報通信研究機構 (NICT) のミリ波帯 VNA を用いて、常温で伝送特性を測定した。この測定結果と電磁界解析結果の比較を図 6 に示す。実際の共振器の寸法誤差に起因すると思われる若干の周波数のシフトが見られるが、共振特性の全体としては、全ての金属で実測とシミュレーションがよく一致していることが分かる。

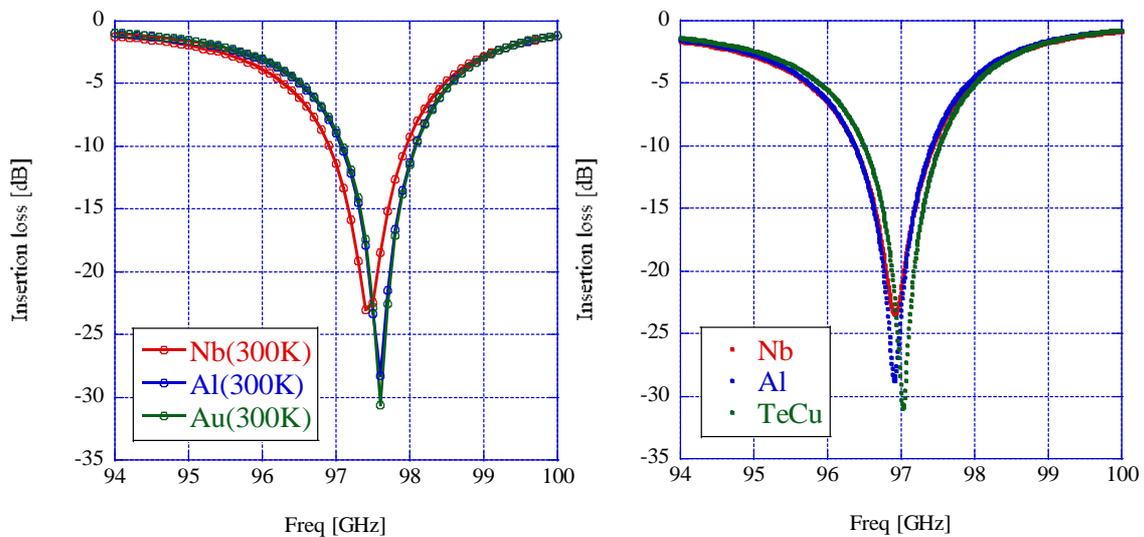


図 6：電磁界解析（左）と VNA による実測結果（右）

次に名古屋大学で、超伝導 SIS ミキサを検出器に用いた測定システムを用いて、極低温での伝送特性を測定した(図 7)。この測定システムは、SG で発振したマイクロ波をハーモニックミキサによって 100 GHz 帯に逡倍して被測定物 (DUT) に入力し、ミキサによって IF 帯に変換されたシグナルの強度をスペクトラムアナライザで測定する。このとき、発振周波数をスイープすることで、DUT の周波数特性を測ることができる。

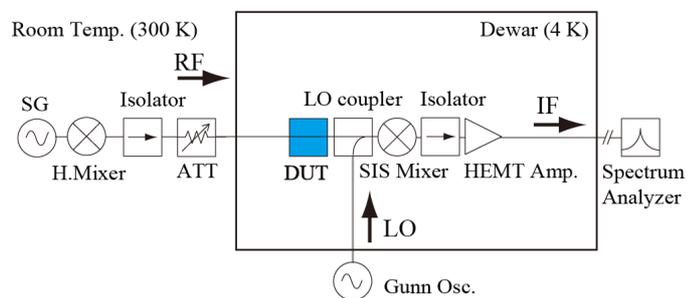


図 7：SIS ミキサを用いた伝送特性評価システム

この評価システムで測定した常温 (300 K) と極低温 (4 K) における伝送特性を図 8 に示す。この結果を見ると、まず名古屋大学の測定システムを用いることで、常温・極低温ともに伝送特性がよく測定出来ていることが分かる。300 K の場合に比べて、4 K での共振特性がどの金属でも鋭く変化している傾向が確認でき、これは金属の導電率が変化したことにはほかならない。

この結果において、超伝導 Nb の特性が他の金属と同様に容易に測れているということは、超伝導導波管内の伝搬モードが先行研究で予測されたように TE_{11} に完全に変わっているということではなく、依然として TE_{10} が主要な伝送モードのままであるということが考えられる。なぜなら、この共振器は TE_{10} モードでの伝搬を想定して設計された構造になっているということ、さらに高次モードである TE_{11} の W-band 導波管におけるカットオフ周波数は 132 GHz であり、ここで示している周波数の電波はそもそも伝搬しないはずだからである。

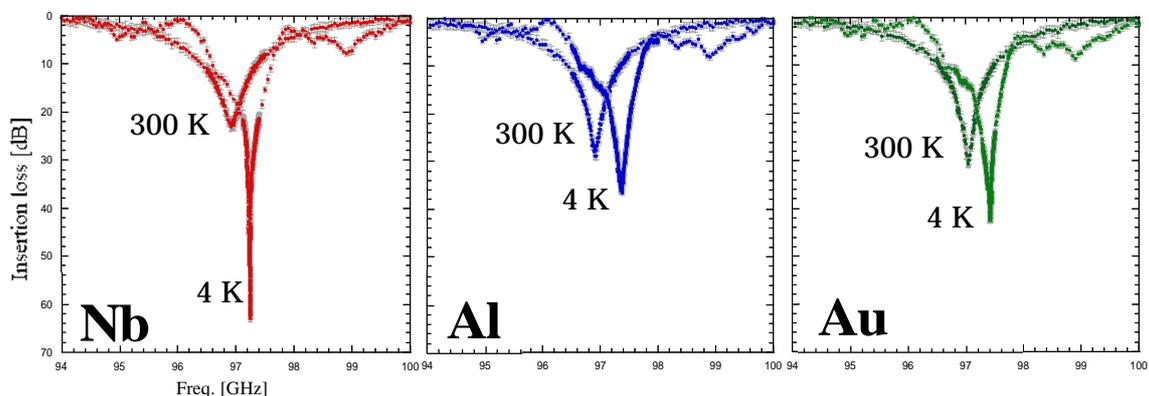


図 8：実測された各金属の常温・極低温での共振特性

(3) ニオブ導波管の有用性の実証

以上で述べた常温と極低温で得られた共振特性から、Q 値を算出した（表 1）。実測値の誤差は、測定値のばらつき（1）によるエラーバー（図 8 参照）の範囲で、フィットされるガウシアン の最大値・最小値の範囲を示している。4 K における Q 値を見ると、Nb については先行研究で理論的に予測されている値に比べて 30 倍近く大きな Q 値が得られており、超伝導状態での導電率の予測は誤りである可能性が高いという結果を得た。Al と Au については、文献値を用いた解析に比べて、実測は誤差の範囲以上に低い Q 値となったが、しかしそれは 0.7-0.9 倍であり、大きな差ではない。この解析と実測の差は、実際に用いた金属（アルミニウム合金および金メッキ）の純度によるものかもしれない。

表 1 各金属による共振回路の Q 値

		Nb	Al	Au (TeCu)
300 K(常温)	HFSS 解析	464 ¹	884 ²	1,166 ³
	実測	426 ⁺²⁹ ₋₂₄	861 ⁺⁶¹ ₋₄₇	1,131 ⁺⁷⁸ ₋₆₆
4 K(極低温)	HFSS 解析	1,229 ⁴	1,512 ⁵	4,388 ⁶
	実測	35,555 ⁺⁶²⁴ ₋₄₃₈	1,356 ⁺⁴⁷ ₋₃₇	3,054 ⁺¹⁵⁴ ₋₁₆₅

1 6.5×10^6 S/m (Maglic et al. 1994) を仮定, 2 2.4×10^7 S/m (Clark et al. 1970) を仮定, 3 4.5×10^7 S/m (Matula 1979) を仮定, 4 Yeap et al. (2015) の理論予想から 7.5×10^7 S/m を仮定, 5 7.2×10^7 S/m (Clark et al. 1970) を仮定, 6 Kojima et al. (2010) で実測した RRR から予想される 4.5×10^8 S/m を仮定

次に三次元電磁界解析によって、4 K での実測結果から算出された Q 値を再現する導電率を調べた結果を表 2 に示す。Nb の Q 値を再現する導電率は 1.1×10^{11} S/m となり、これは理論予想値である 7.5×10^7 S/m と比べて 3 桁以上高い値であった。また、Al や Au と比べても 2-3 桁高い導電率であることも分かった。一方、Al と Au の導電率は、文献値と比べて少し低い値を示しているが、桁はよく一致しており、文献値と比べて大きな差は無いと考えられる。

表 2 各金属で実測された 4 K での Q 値を再現する導電率の文献値との比較および 1 m あたりの損失

	Nb	Al	Au (TeCu)
導電率 [S/m]	1.1×10^{11}	5.2×10^7	2.8×10^8
文献値 [S/m]	7.5×10^7 ⁴	7.2×10^7 ⁵	4.5×10^8 ⁶
損失 [Np/m]	0.01	0.30	0.13

最後に、得られた導電率を用いて、単位長さ（1 m）あたりの W-band 矩形導波管（表面粗さは無いと仮定）の損失を三次元電磁界解析によって見積もった。先行研究（Yeap et al. 2015）では、理論計算によって超伝導 Nb の 100 GHz における損失は 0.25 Np/m (2.17 dB/m) と予想されているのに対し、今回実測された導電率を用いた場合の損失は 0.01 Np/m (0.06 dB/m) であり、大きく異なっていた。また Al と Au の損失は、それぞれ 0.30 Np/m (2.64 dB/m)、0.13 Np/m (1.14 dB/m) と見積もられたため、これらを比較すると超伝導 Nb 導波管の損失の大きさは、Al 導波管の約 37 分の 1、Au 導波管の約 17 分の 1 である。例えば Nb の表面粗さ（典型値として 0.5 μ m r.m.s.）を仮定したとしても、Au 導波管に比べてまだ 10 分の 1 以下の損失となる。

以上から、ニオブ材を用いた超伝導矩形導波管は、100 GHz 帯において他の金属導波管と比べて最も高い導電率と、それに応じた低損失特性を有することが確認できた。これは、「超伝導導波管」が、導波管回路の低損失化に有効な技術であることを示している。

<引用文献>

- Clark, A. F., Childs, G. E., & Wallace, G. H., Cryogenics, 10, 295 (1970)
 Claude, S. M. X. et al., ALMA Memo 316 (2000)
 Kojima, T. et al., J. Infrared Milli. Terahz. Waves, 31, 1321 (2010)
 Kuroiwa, K., Ph.D. thesis, Osaka Pref. Univ. (2014)
 Maglic, K. D. et al., Int. J. Thermophys, 15, 963 (1994)
 Matula, R. A., J. Phys. Chem. Ref. Data, 8, 1147 (1979)
 Wang, Y.-C., Qiu, Z. A., & Yalamanchili, R., Int. J. Electronics, 76, 1151 (1994)
 Wollack, E. J. et al., ALMA Memo 425 (2002)
 Yeap, K. H. et al., Frequenz, 69, 111 (2015)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 T. Nakajima, G. Mizoguchi, Y. Saito, T. Nagahama, A. Mizuno
2. 発表標題 Research on a Next-Generation Ground-Based Millimeter-Wave Atmospheric Radiometer
3. 学会等名 The 21st EA Sub-mm-wave Receiver Technology Workshop (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中島 拓, 溝口 玄真, 齊藤 善治, 長濱 智生, 水野 亮, 谷口 暁星, 藤森 隆彰, 児島 康介, 小林 和宏, 鈴木 和司, 林 拓磨, 關谷 尚人, 田島 治, 安達 俊介, 大塚 稔也, 小嶋 崇文, 鶴澤 佳徳, 藤井 泰範, SHAN Wenlei, 江崎 翔平, 宮地 晃平, 渡邊 一世
2. 発表標題 南極/北極における中層大気環境計測のための広帯域ミリ波分光ラジオメータの開発研究
3. 学会等名 第21回ミリ波サブミリ波受信機ワークショップ
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中島 拓, 鈴木 和司, 小嶋 崇文, 鶴澤 佳徳, 石野 雅之
2. 発表標題 電波望遠鏡受信機の高感度化に向けた低損失導波管回路の基礎開発
3. 学会等名 日本天文学会2022年春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中島 拓, 鈴木 和司, 小嶋 崇文, 鶴澤 佳徳, 石野 雅之, 渡邊 一世
2. 発表標題 純二オブ材を用いたミリ波帯超伝導導波管の開発
3. 学会等名 2022年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中島 拓
2. 発表標題 ミリ波～テラヘルツ波分光技術の地球大気環境計測応用
3. 学会等名 シンポジウム「テラヘルツ科学の最先端VIII」(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中島 拓, 彦坂 拓海, 増倉 明寛, 齊藤 善治, 溝口 玄真, 長濱 智生, 水野 亮
2. 発表標題 次世代ミリ波大気分光観測装置の開発と新たな国際融合研究プロジェクト
3. 学会等名 第22回ミリ波サブミリ波受信機ワークショップ
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Nakajima
2. 発表標題 100-GHz-band superconducting filter for radio astronomy (tentative title)
3. 学会等名 The 35th International Symposium on Superconductivity (ISS2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	鶴澤 佳徳 (Uzawa Yoshinori)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	小嶋 崇文 (Kojima Takafumi)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関