

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年5月31日現在

機関番号：62616

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K13789

研究課題名（和文）電波天文のための超伝導大規模集積回路の基礎技術開発研究

研究課題名（英文）Development study on the Basic Technologies of Superconductive and large-scale Integrated Circuit for Radio Astronomy

研究代表者

井口 聖 (Iguchi, Satoru)

国立天文台・アルマプロジェクト・教授

研究者番号：10342627

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、RF超伝導集積回路の作製方法の確立に加え、その動作実証試験も世界に先駆けて成功することができた。これにより、受信機コンポーネントの小型化を実現し、マルチビーム受信機の実現に向けた見通しが立った。現在、他の国内外の研究機関でも機能回路のオンチップ化の研究が行われているが、未だ導波管を用いた技術が主流であり、それらの集積化には至っていない。つまり、本研究が、超伝導集積回路の作製において、世界第一線の技術開発を牽引できたといえる。今後は、さらなる高機能化を進め、デバイスの歩留まりを向上させることで、マルチビーム受信機と干渉計を組み合わせた新しい開口合成法の開拓研究を前進させたい。

研究成果の学術的意義や社会的意義

低電力かつ究極の高感度性能を実現できる超伝導技術は、未だその応用範囲は限定的である。この原因の1つに装置が汎用性に欠けることがある。小型化は高性能や高機能化を実現できる鍵であり、超伝導技術に様々なブレークスルーを起こす可能性を秘めている。そこで、本研究では、これを打破するために超伝導集積回路に取り組み、小型化に向けた第一歩を成功することができた。この成果は、広視野・高分解能・高画質観測を可能とする次世代電波天文望遠鏡を提案でき、さらなる新しい天文学の扉を開くことができるだけでなく、超伝導技術の可能性を広げるものであり、今後さまざまな所で応用されることが期待できると考える。

研究成果の概要（英文）：This study contributes to establishing a complex fabrication process of the RF superconducting integrated circuit (IC) and first verifies the novel concept in the world. These results will be a preparatory step toward making a compact receiver component and open up a possibility to the development of a multibeam receiver. Although many research institutes around the world have been conducting research and development of on-chip functional circuits, the current mainstream still relies on the waveguide technologies, all of which are not yet fully integrated. From this perspective, our study can be considered as the leading driver at the forefront of the world's technology development in the field of superconducting IC fabrication. Our pioneering research will be moved forward aiming to realize a new aperture synthesis method combining a multibeam receiver and an interferometer while working on further sophistication of the device and achieving a higher yield rate.

研究分野：電波天文学

キーワード：超伝導 集積回路 オンチップ マルチビーム 広視野 電波干渉計

## 1. 研究開始当初の背景

複数のアンテナを統合し、一つの巨大望遠鏡として使用する仕組みを“開口合成”とよび、ケンブリッジ大学の天文学者マーティン・ライル博士により電波望遠鏡の「空間分解能」を飛躍的に向上する方法が考案された。これにより、ライル博士は1974年にノーベル物理学賞を受賞された。しかし、この原理にも弱点があった。それは、物理的にアンテナの直径より狭い間隔でアンテナを配置できないために、隙間が多く存在し、たとえ高分解能観測が実現できたとしても、観測された天体の画像が歪むことであった。そこで、高画質化を目指した「アルマ望遠鏡」では、大小2種類のパラボラアンテナ66台を用い、そのデータを結合することにより観測画質と精度を向上させる方法が考案された (S. Iguchi, et al. 2009, PASJ, 61, 1)。しかし、アルマ望遠鏡でも、電波干渉計の原理のために未だ実現できない観測性能があった。それは観測視野が狭いことであり、これは電波干渉計での観測視野がその一つの素子アンテナのビーム幅（つまり半値幅）で決まるためであった。そこで、この問題を解決するために、アンテナに搭載される受信機をマルチビーム化することに着目した。これにより観測視野はビーム数  $N$  の平方根で広がり、アンテナ台数を  $N$  倍増やすより圧倒的に安価で実現することが期待できる。

## 2. 研究の目的

ライルが考案した開口合成技術は、他の波長での望遠鏡では絶対に実現できない高分解能観測を実現し、電波天文観測を飛躍的に向上させた。その後、開口合成の弱点であったイメージング能力と精度を向上させられる研究が進み、高画質化が実現した。これにより、さらなる観測天文学の飛躍が期待されている。しかしながら、未だ、この高分解能を得るがために失われている観測視野の狭さの問題は課題として残っており、我々は、この「開口合成の潜在能力」をまだ十分に出しきれていないと考える。

本研究では、広視野を可能とする電波干渉計のための新開口合成法の開拓を進め、さらなる観測天文学の躍進を目指す。また、広視野化を目指す上で鍵となる超伝導 SIS 素子の集積回路の実現は、この技術開発成果そのものが特に超伝導エレクトロニクス分野において非常に面白い成果と期待される。これらの試みは、まだ電波天文分野で本格的に検討されておらず、まだまだ基礎的な検討レベルであり、観測装置搭載実験検証は行われていない。そこで、いち早くこの開発研究を開始し、実証実験に成功すれば、次世代の天文観測計画をリードできるだけでなく、それで得られると思われる天文学的成果の検討も、どのグループよりも早く開始することできる

## 3. 研究の方法

アルマ望遠鏡における受信機開発研究を通じて、これまでの研究で量子雑音限界の3倍に相当する787-950 GHz帯超伝導 SIS ミキサの低雑音動作実証、超伝導低雑音受信機システムの開発に成功した (Y. Uzawa, et al. 2013, Physica C, 494, 189)。しかし、この技術の延長だけでは、要求される観測周波数帯での広視野化を実現する超伝導 SIS 受信機の開発は容易なものではない。特に、最大の開発課題は「受信機コンポーネントの小型化」である。受信機を構成する機能部品を個別に評価し、仕様を満たした部品を選定して組み合わせることで低雑音性能を実現してきた。しかしながら、この方法では、サイズ、重量、コストなどがビーム数に比例して膨らんでいき、また原理上ビーム間に隙間が発生する問題がある。さらに、組み立てが非常に複雑になり、故障の増加や安定した運用の実現も懸念される。従って、単純に超伝導 SIS ミキサを並べ、広視野化を目指すことは現実的でない。マルチビーム受信機のような大規模受信機システムの開発では、コンポーネントの集積度を上げることでサイズの低減と軽量化そして安定した運用を図り、性能面でもビーム間の隙間を無くす設計を行うことが必須となる。

本研究では、受信機コンポーネントの小型化を実現するために、すべての機能部品を集積化する“システムオンチップ (System on Chip) 化”を目指す。これにより上記課題がすべて解決できるだけでなく、高機能システムも組み込むことが期待できる。一方、ヘテロダイン受信機を究極まで高性能化するためには、周波数変換部は超伝導技術、低雑音増幅器部分は半導体技術と、最適な技術を組み合わせることが必要である。そこで、本研究では超伝導体・半導体ハイブリッド型集積回路の実現を目指す。

#### 4. 研究成果

まず、高品質(高  $R_{sg}/R_n$ )かつ高臨界電流密度(高  $J_c$ )の SIS 接合の作製と高周波特性評価を行った。ヘテロダイン受信機の集積回路化においては、超伝導体で構成される要素回路を歩留まりよく製作し、その回路パラメータを高精度に抑えておく必要がある。特に SIS 接合は様々な臨界電流密度  $J_c$  において、リーク電流の低い高品質な接合が必要となる。そこで、AlN を絶縁層に用いた Nb 接合を作製し、 $45 \text{ kA/cm}^2$  という従来よりも 5 倍高い  $J_c$  でも、 $R_{sg}/R_n > 15$  という高品質な接合の作製に成功することができた (図 1)。さらに、透過型電子顕微鏡を用いて SIS 接合の断面解析を実行し、この接合がウエハ上で均質に作製されていることを確認できた。一方、Nb/AlN<sub>x</sub>/Nb 接合では、従来用いてきた AlO<sub>x</sub> 絶縁層に対して、キャパシタンス等の回路パラメータが異なる懸念があるが、知られる限り系統的に評価された例がない。そこで、冷却プローブステーションおよびネットワークアナライザを用い、Nb/AlN<sub>x</sub>/Nb 接合の容量測定を進めた。測定では、広いバイアス電圧領域かつ広周波数帯域において S パラメータを取得することで、量子サセプタンスの影響を定量的に見積った。これにより、構造由来の接合容量を高精度に抽出でき、集積回路の設計精度向上が可能となった。

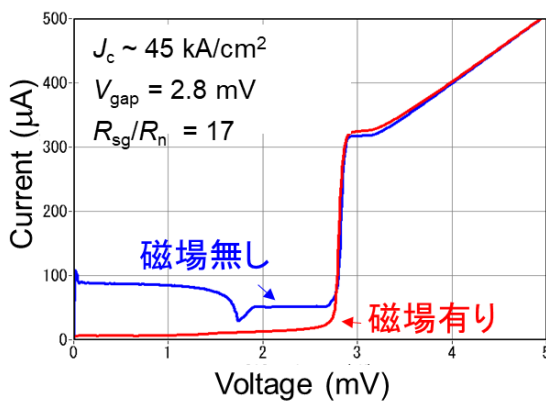


図 1：作製した Nb/AlN<sub>x</sub>/Nb 接合の直流電流電圧特性。

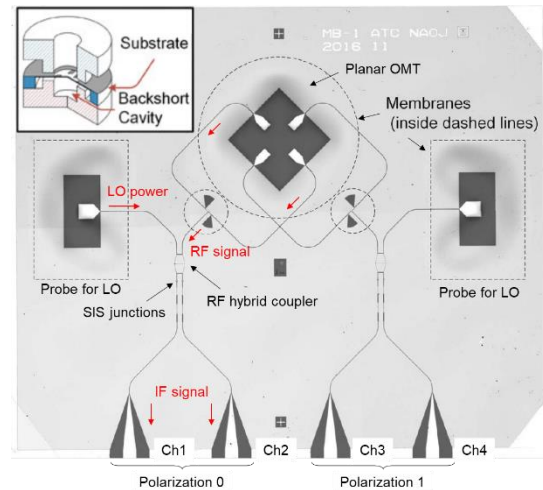


図 2：オンチップ超伝導集積回路 (詳細は雑誌論文③を参照)。

次に、シングルビーム用超伝導集積回路の設計および作製プロセスの確立を進めた。超伝導体を電極材料として用いた平面回路型直交偏波分離器やバランスド SIS ミキサ回路を設計し、数 mm 角の基板の上に回路を集積でき、従来の導波管回路と比べて非常にコンパクトにシステムを配置構成できる設計解を得た (図 2)。そして、設計されたシングルビーム用超伝導集積回路を作製し、そのマスクおよび実装筐体を製作した。この設計された超伝導集積回路は、偏波分離器をはじめ、ハイブリッドカップラや SIS ミキサ整合回路が  $13 \times 11 \text{ mm}^2$  の同一平面回路基板上に集積されている。従来は偏波分離器やカップラ回路は、2-3 cm 程度の金属ブロックを加工した導波管回路で 3 次的に構成されてきたが、回路を 2 次元平面内に集積することにより、RF 回路部は格段にコンパクト化することができる。さらに、設計された偏波分離器と導波管プローブはメンブレン構造上に作製する必要があったが、深掘反応性エッチング装置 (DRIE) を用い、Silicon on Insulator 基板の偏波分離器と導波管プローブ部分のみを背面からハンドル層 (シリコン) と熱酸化膜層 ( $\text{SiO}_2$ ) を完全にエッチングすることによって、 $5 \text{ μm}$  厚程度のメンブレン構造を作製することができた。そして、物理温度 4 K における冷却試験を実施し、作製したメンブレンが冷却過程で破損せず、機械的強度を保っていることを確認した。また、ニオブ (Nb) を配線材料として、偏波分離器や SIS ミキサ、周辺回路を組み合わせて同一基板上に回路も作製した。これにより、シングルビーム用超伝導集積回路の作製プロセスを実証することができた。

最後に、作製したシングルビーム用超伝導集積回路を筐体の実装し、受信機システムとしての動作実証実験およびマルチビーム化に取り組んだ。まず、140 GHz 帯における評価系を構築し、各受信機特性の測定を実施した(図3)。受信機のビームパターン測定を行い、偏波分離度は-20dB以下を達成していることを確認した。また、常温黒体と液体窒素温度(77 K)黒体を用いたYファクタ法により、受信機雑音温度は40 K以下と測定された。さらに、局部発信器(L0)電力入力ポート由来の雑音抑圧度は典型的に15dB以上であった。以上の結果は、同一チップ上に実装された平面回路型直交偏波分離器およびバランスド SIS ミキサが設計と矛盾なく動作していることを実証したことになる。さらに、これは、導波管回路で作製されてきた偏波分離器やRFハイブリッドカップラなどが、超伝導集積回路上で動作したことを確認したことになる。以上、当初目標としたRF回路部のシステムオンチップ化を達成したことになる。また、バランスドミキサはL0電力を10分の1以下に抑えることができるため、L0電力の不足が懸念される大規模マルチビーム受信機の実現に向けた課題の1つに対し、その解決の見通しをつけることもできた。一方、マルチビーム化への技術検証では、超伝導集積回路の冷却試験を実施し、機械的特性に問題ないことが確認できたが、高周波特性についてはSIS接合の歩留まりが課題となり、完全な動作実証には至らなかった。しかし、超伝導集積回路の作製プロセスの洗練化を進めたことで、この課題の解決に向けた見通しは得られており、現在、その動作実証試験を検討している。

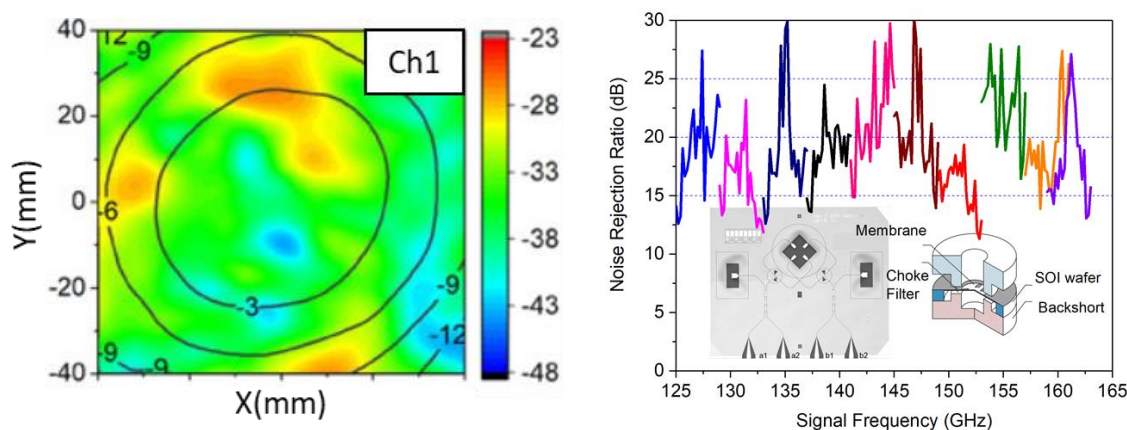


図3：(上) RF 145 GHz でのビームパターンの測定結果。主偏波への応答はコンターマップ、交差偏波はカラーマップで表示(詳細は雑誌論文③を参照)。(下) L0 電力入力ポートから混入する雑音の抑圧度。

本研究ではRF超伝導集積回路の作製方法の確立に加えて、その動作実証試験も世界に先駆けて成功した。また、最大の開発課題であった「受信機コンポーネントの小型化」を解決し、マルチビーム化に向けて明るい見通しを得ることができた。現在、国内外においても機能回路のオンチップ化が進んでいるものの、未だに導波管回路を用いた手法が主流となっている。このような状況を鑑みても、本研究によって飛躍的に技術が向上し、特に超伝導集積回路作製においては我々が世界第一線の技術を有することになったといえる。今後はサイドバンド分離型ミキサおよびIF回路の集積化により、さらなる高機能化を進め、デバイスの歩留まりを向上させることで、マルチビーム受信機と干渉計を組み合わせた新しい開口合成法の開拓研究を前進させたい。

以上の成果について、査読有雑誌論文で計11件、国内外の学会発表では5章に示す主要9件に加えて計27件を達し、積極的に主要な国際会議や国内学会等で成果発表を行った。そして、超伝導集積回路作製とその動作実証試験などについての査読論文を複数件出版することができ、世界に先駆けて広視野・高分解能・高画質観測を可能とする電波干渉計の基本設計の提案を国際学会2018 SPIE で発表することができた(雑誌論文⑥を参照)。

<引用文献>

S. Iguchi, et al. 2009, PASJ, 61, 1  
 Y. Uzawa et al. 2013, Physica C, 494, 189

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計11件)

- ①S. Ezaki, W. Shan, S. Asayama, and T. Noguchi, "Fabrication of Superconductor Integrated Circuits of D-band Dual-polarization Balanced SIS Mixers," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 29 (5), 1101405, Mar. 2019. (査読有)  
doi:10.1109/TASC.2019.2902985
- ②T. Kojima, M. Kroug, Y. Uzawa, Y. Kozuki, W. Shan, "Contribution of Quantum Susceptance in SIS Junction Capacitance Measurement", IEEE Applied Superconductivity, (Early access のため巻号未付与) Mar. 2019. (査読有) doi:10.1109/TASC.2019.2908092
- ③W. Shan, S. Ezaki, J. Liu, S. Asayama, and T. Noguchi, "A New Concept for Quasi-Planar Integration of Superconductor-Insulator-Superconductor Array Receiver Front Ends," IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, vol. 8, no. 4, pp. 472-474, June 2018. (査読有) doi:10.1109/TTHZ.2018.2842750
- ④S. Ezaki, W. Shan, T. Kojima, A. Gonzalez, S. Asayama, and T. Noguchi, "Fabrication and Characterization of Silicon (100) Membranes for a Multi-beam Superconducting Heterodyne Receiver," Journal of Low Temperature Physics, vol. 193, pp. 720-725, Dec. 2018. (査読有) doi:10.1007/s10909-018-2004-2
- ⑤W. Shan, S. Ezaki, J. Liu, S. Asayama, T. Noguchi, S. Iguchi, "Planar superconductor-insulator-superconductor mixer array receivers for wide field of view astronomical observation," SPIE 10708, Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy IX, 1070814, (9 July 2018). (査読有)  
doi:10.1117/12.2311933
- ⑥S. Iguchi, A. Gonzalez, T. Kojima, W. Shan, G. Kosugi, S. Asayama, D. Iono, "How do we design the interferometric system focused on the analog and digital backend and the correlator for scientifically valuable ALMA developments?", Proc. SPIE 10700, Ground-based and Airborne Telescopes VII, 107002Y (6 July 2018); (査読有)  
doi:10.1117/12.2312024; <https://doi.org/10.1117/12.2312024>
- ⑦A. Gonzalez, T. Kojima, M. Kroug, W. Shan, S. Asayama, D. Iono, T. Noguchi, S. Iguchi, "Technical achievements of the ALMA future receiver development program at the National Astronomical Observatory of Japan", Proc. SPIE 10708, Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy IX, 1070812 (9 July 2018); (査読有) doi:10.1117/12.2312969; <https://doi.org/10.1117/12.2312969>
- ⑧S. Asayama, A. Gonzalez, H. Kiuchi, T. Kojima, M. Kroug, W. Shan, G. Kosugi, D. Iono, S. Iguchi, "Overview of the East Asia ALMA development program", Proc. SPIE 10708, Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy IX, 1070837 (9 July 2018) (査読有)  
doi:10.1117/12.2313367; <https://doi.org/10.1117/12.2313367>
- ⑨T. Kojima, M. Kroug, K. Uemizu, Y. Niizeki, H. Takahashi and Y. Uzawa, "Performance and Characterization of a Wide IF SIS-Mixer-Preamplifier Module Employing High-Jc SIS Junctions," in IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, vol. 7, no. 6, pp. 694-703, Nov. 2017. (査読有) doi:10.1109/TTHZ.2017.2758260
- ⑩T. Kojima, M. Kroug, K. Sato, T. Sakai and Y. Uzawa, "On-Wafer Capacitance Measurement of Nb-Based SIS Junctions With a 4-K Probe Station," in IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 27, no. 4, pp. 1-4, June 2017. (査読有)  
doi:10.1109/TASC.2017.2657693
- ⑪S. Iguchi and M. Saito, "Large aperture millimeter/submillimeter telescope: which is more cost-effective, aperture synthesis telescope versus large single dish telescope?" Proc. SPIE 9906, 99062T (9pp), 2016. (査読有)  
doi:10.1117/12.2232022; <https://doi.org/10.1117/12.2232022>

〔学会発表〕(計9件)

- ①小嶋崇文, "ヘテロダイン受信機の開発状況," 宇宙史研究センター南極ワークショップ, 筑波大学, 2019年2月4日

- ②A. Gonzalez, W. Shan, T. Kojima, Y. Uzawa, S. Iguchi, “Novel concept of multibeam integrated heterodyne receiver for radio astronomy and related technological development”, 39th ESA Antenna Workshop on Multibeam and Reconfigurable Antennas for Space Applications, Noordwijk, the Netherlands, October 2-4. 2018
- ③W. Shan, S. Ezaki, S. Asayama, T. Noguchi, and S. Iguchi, “Planar-integration of Arrayed SIS Receiver Frontends,” 29th IEEE International Symposium on Space Terahertz Technology, Pasadena, California (USA), March, 26-28, 2018
- ④W. Shan, S. Ezaki, S. Asayama, T. Noguchi, S. Iguchi, “Next-generation multibeam SIS receiver development in NAOJ : strategy, roadmap, and proof-of-concept,” 日本天文学会春季年会, 千葉大学, 2018年3月15日
- ⑤江崎翔平, Wenlei Shan, 浅山信一郎, 野口卓, 井口聖, “Fabrication of Integrated Circuits for Superconducting Heterodyne Receiver,” 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, 三鷹, 2/22-23 2018
- ⑥S. Ezaki, W. Shan, S. Asayama, T. Noguchi and S. Iguchi, “Development of Multi-Beam Superconducting Heterodyne Receiver for Radio Telescopes,” The 19th East Asia Sub-millimeter-wave Receiver Technology Workshop, ASIAA, Taipei, Taiwan, November 28-30, 2017
- ⑦S. Iguchi, “Atacama Large Millimeter/submillimeter Array, ALMA; the Status of Operations and Future Development,” Astronomy Development in Vietnam Workshop, Quy Nhon University, Quy Nhon, Vietnam, July 31 - August 2, 2016 (招待講演)
- ⑧A. Gonzalez, “Millimeter and Sub-mm Wave Instrumentation Development for ALMA at NAOJ/Chile Observatory,” Astronomy Development in Vietnam Workshop, Quy Nhon University, Quy Nhon, Vietnam, July 31 - August 2, 2016 (招待講演)
- ⑨T. Kojima, “Development of SIS mixers for future receivers at NAOJ,” ALMA Developer’s workshop, Chalmers University, Gothenburg, Sweden, May 25-27, 2016

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：小嶋 崇文  
ローマ字氏名：KOJIMA, Takafumi  
所属研究機関名：国立天文台  
部局名：先端技術センター  
職名：助教  
研究者番号(8桁)：00617417

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名：鶴澤 佳徳  
ローマ字氏名：UZAWA, Yoshinori

研究協力者氏名：ゴンサレス アルバロ  
ローマ字氏名：GONZALEZ, Alvaro

研究協力者氏名：大西 響子  
ローマ字氏名：ONSHI, Kyoko

研究協力者氏名：単 文磊  
ローマ字氏名：SHAN, Wenlei

※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。