

称号及び氏名 博士(理学) 藤井 泰範

学位授与の日付 平成 29 年 3 月 31 日

論 文 名 **Development and improvement of ALMA Band 10 receiver**
(アルマバンド 10 受信機の開発と改良)

論文審査委員 主査 大西 利和
副査 久保田 佳基
副査 前川 寛和
副査 鵜澤 佳徳

論文要旨

Development and improvement of ALMA Band 10 receiver

藤井泰範

1. 電波天文学とアルマバンド 10 受信機

1931 年、通信技術者であったカール・ジャンスキーが偶然的に発見した宇宙電波はそれまで可視光で観測されていた天文学を一変させた。光以外の電磁波で宇宙を見ることは、それまで可視光の観測では解明できなかった全く新しい宇宙を描き出していった。

通信技術の発展を受け電波望遠鏡は飛躍的な進化を遂げた。電波望遠鏡では宇宙からの信号を、位相情報も含めた波のまま受信することが可能であり、複数の電波望遠鏡からの信号を干渉させてあたかも 1 つの大きな電波望遠鏡として動作させることが出来る。この様な干渉型電波望遠鏡の現在最も高感度かつ高分解能な望遠鏡がアルマ望遠鏡である。

アルマ望遠鏡（アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計：Atacama Large Millimeter/submillimeter Array : ALMA）は南米チリ共和国の標高 5000m にあるアタカマ砂漠に直径 12 メートルのアンテナを 50 台組み合わせるアンテナ群と、直径 12 メートルのアンテナ 4 台と直径 7 メートルアンテナ 12 台からなる「アタカマコンパクトアレイ（ACA：モリタアレイ）」で構成され、日米欧 3 者が協力して開発する巨大電波干渉計である。その最大基線長（アンテナ間の距離）である 16Km での観測は角分解能 0.01 秒角に達し、高い集光力と感度を

合わせることにより、初期銀河系形成、星・惑星系形成、生命の起源などの宇宙の謎を解明されることが期待される。

アルマ望遠鏡の観測周波数は **30GHz-950GHz** であり、受信機は大気の透過特性に合わせて **10** 個の周波数帯に最適化され、**30** 年という長期運用に対応しメンテナンスが容易なようにカートリッジ型受信機が採用されている。アルマバンド **10** 受信機（図 1）はアルマ望遠鏡の最高周波数帯である **787GHz-950GHz** を受信帯域に持ち、原始惑星系円盤の内部構造と進化、遠方銀河の星形成、活動銀河核中心角近傍の描像等の解明が期待される。

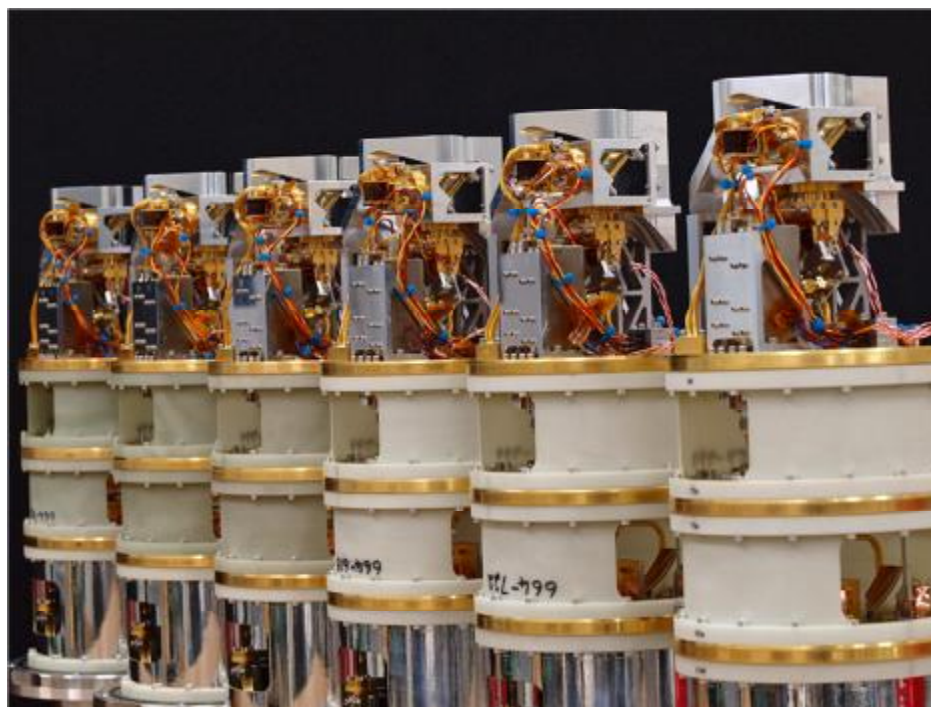


図 1 初期生産 **6** 台のアルマバンド **10** 受信機

宇宙からの観測信号は非常に微弱であり、先の科学的観測成果を得るためには高感度な受信機が必須である。アルマ望遠鏡では国際協力の枠組みの中で受信機に対する要求仕様があり、アルマバンド **10** 受信機においては量子限界雑音の **5** 倍である **230K** を **787-905GHz** の **80%** に渡って達成する必要があった。

アルマバンド **10** 受信機の周波数帯では、これまで電波望遠鏡で広く使用されてきた信頼性の高い超伝導ニオブ（Nb）を用いた **SIS**（Superconductor Insulator Superconductor）ミクサを、その超伝導エネルギーギャップによる動

作周波数限界（約 **700GHz**）のためそのままでは使用することが出来ない等、最高周波数帯であるが故の技術的課題や、先行研究のバンド **9 (602-720GHz)** 等で明らかになった欠点を克服するため、他のバンドとは異なる独自の開発研究を必要とした。

本研究では、アルマバンド **10** 受信機の感度向上を実現し、その科学的仕様を満たすことを目的としている。本研究の主題はこのアルマバンド **10** 受信機の「設計」、「評価」、「将来開発」の **3** つに分かれる。

2. アルマバンド **10** 受信機 設計

アルマ望遠鏡は干渉型電波望遠鏡であり、**66** 台すべてのアンテナにアルマバンド **10** 受信機が搭載される。またメンテナンスのためのスペア機 **7** 台と合わせて **73** 台の製造を日本では受け持つことになった。

アルマバンド **10** 受信機の心臓部である **SIS** ミクサは **Kojima et al. 2009** などにより、配線層にニオブの **2** 倍のエネルギーギャップを有する窒化ニオブチタン薄膜を用いて低損失かつ比較的製作しやすい臨界電流密度でも低雑音で動作する **SIS** ミクサの設計・開発に成功した。

しかし、**73** 台の受信機 (**146** 台の **SIS** ミクサ) を製造するためには、「光学系」「**LO**系」「機械設計」など受信機を構成するほかの要素も入念に設計する必要があった。

「光学系」では冷却光学系に **2** 枚の楕円鏡による配置とし、交差偏波を抑える構成とした。また、ガウスビームによる基本設計の後に物理光学シミュレータを使って詳細な解析を行い、当時他のアルマ受信機では成し得なかった交差偏波特性をアルマバンド **10** 受信機という高周波数にもかかわらず本研究によって達成した (**2.2** 章)。

「**LO**系」は **SIS** ミクサに必要な局部発振信号 **LO(Local Oscillator)**系のことであり、先行研究では導波管による伝送路が提案された。しかし本研究によって、その不都合が明らかになり準光学による伝送線路に変更された。この設計

変更により、**LO** 系に電力調整部品を導入することができて自由度が上がった (2.3 章)。

ただしその反面「機械設計」の難易度は上がった。アルマバンド **10** 受信機は周波数が高いため波長が短い。さらに量産のためには光学素子の組み立て精度を如何に確保するかが設計の重点になる。この問題を解決するために本研究ではこの周波数帯において初めて **4** 枚の楕円鏡を一つのブロックに一体加工する設計を行い、精度と生産性の確保を行った。

また、極低温に冷却されるために熱伝導・熱収縮を考慮した設計が必要である。アルマバンド **10** 受信機の **LO** 系は冷却通倍器までの電力損失を最小にする必要があるが、熱伝導と電力損失を共に抑える単一金属での導波管は存在しない。そこで熱伝導の低いステンレスを構造に使用し、内側に金メッキを施した導波管を本研究によって開発した (図 2)。この時点での製造技術では直線上の導波管しか開発できなかったため、熱収縮に関しては受信機ボディーの **GFRP** の熱収縮を考慮に入れた上で冷却時に機械ストレスが生じないように設計した (2.6 章)。



図 2 アルマバンド **10** 受信機 **300K** 部の **CAD** モデル。**110K** の低温部に接続される。

3. アルマバンド10受信機 評価システム

アルマ受信機は国際協力にて開発され評価項目も「雑音温度特性」「サイドバンド特性」「安定性」「直線性」「ビーム特性」と多岐に渡る。73 台のアルマバンド10受信機を評価するための評価システムも本研究によって初めてこの周波数帯で実現したものである。

「雑音温度特性」評価では、本研究によりこの周波数帯において初めて評価装置の等価的な低温温度を測定し受信機の評価に反映させている。また、出力電力評価においては基準ノイズ源との比較を行うことによって4-12GHzという広い中間周波数での評価を行うことが可能になった(3.2章)。

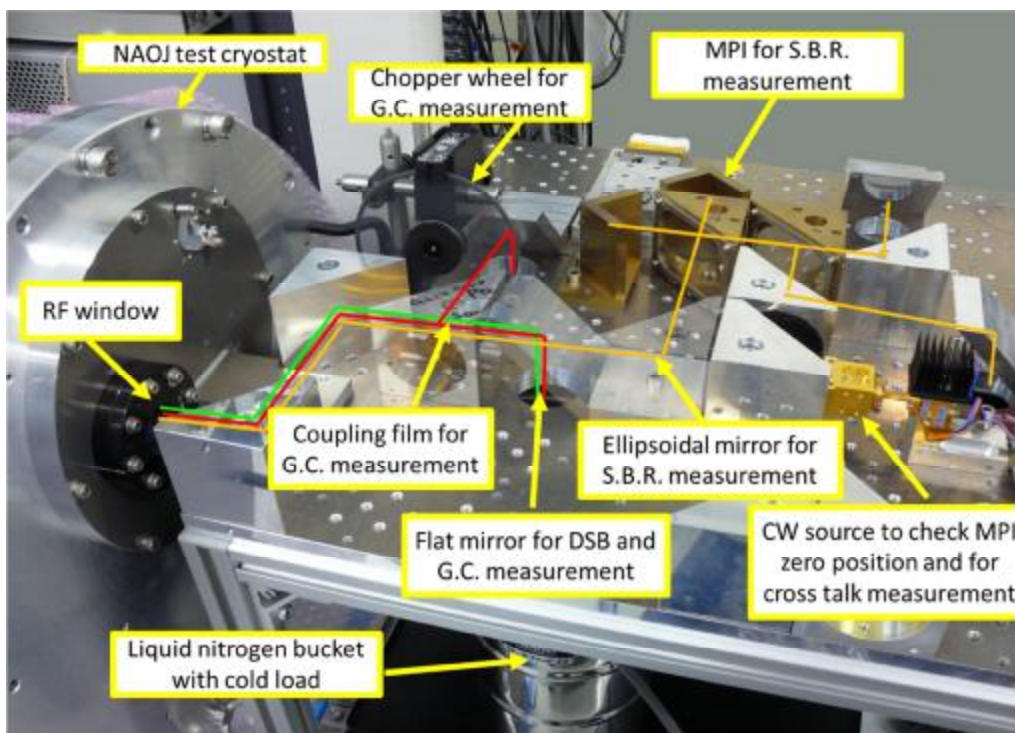


図3 アルマバンド10受信機雑音特性評価用光学系。

「サイドバンド特性」評価ではアルマバンド10受信機の構成がLO周波数に対して上下両方のRF信号を受信するDSB(Double Side Band)受信機であるのに対して、先行するアルマバンド4受信機およびアルマバンド8受信機では片サイドの2SB(Single Side Band)であり、同じ評価方法を使用することが出来な

かった、そのため、電波の偏波特性に着目し本研究によってはじめて周波数帯においてマーチンパレット干渉計を用いた評価系(図 3)を実現した(3.3 章)。

「安定性」評価系はアルマバンド 10 受信機開発初期において強力なツールになった。初期の SIS ミクサの雑音温度特性は悪いため応答が弱い。増幅器の温度特性に着目して最小限の構成で増幅を行う評価系を構築し、安定性を高めていった。このとき得た知見はアルマバンド 10 受信機本体への設計にフィードバックすることが可能になった。(3.4 章)

4. 将来開発 内蔵型アルマバンド 10 周波数帯バランスドミクサ

アルマバンド 10 受信機における問題点はその開発フェーズにおいて解決され、最終的にはアルマ望遠鏡の要求仕様を満たした受信機を提供することが出来た。しかし、要求仕様内であってもまだ改良できる場所が残されていた。その一つが LO 信号からのサイドバンド雑音である。アルマバンド 10 受信機のように LO 信号が高周波になるとその通倍次数からサイドバンド雑音は大きくなり、また出力できる電力は小さくなる。このサイドバンド雑音の抑制と少ない LO 電力でも動作させる方法の一つが「バランスドミクサ受信」方式であり、本研究によって初めて実用可能なアルマバンド 10 周波数帯バランスドミクサを開発した。

先行研究(Kojima et al. 2014)では RF ハイブリッドカップラなどコンポーネントを接続して動作実証を行ったため、伝送路の損失が性能劣化を招いていた。そこで本研究では導波管の伝送損失に着目して必要最小限の導波管長を実現するために、アルマバンド 10 SIS ミクサと同程度のサイズに RF ハイブリッドカップラー、2 つの DSB ミクサ、バイアス回路、IF パワーコンバイナを内蔵させた。このことにより、雑音温度特性もアルマ望遠鏡要求スペックを満たす結果となった。さらに微細可能が必要な RF ハイブリッドカップラーは将来の高周波

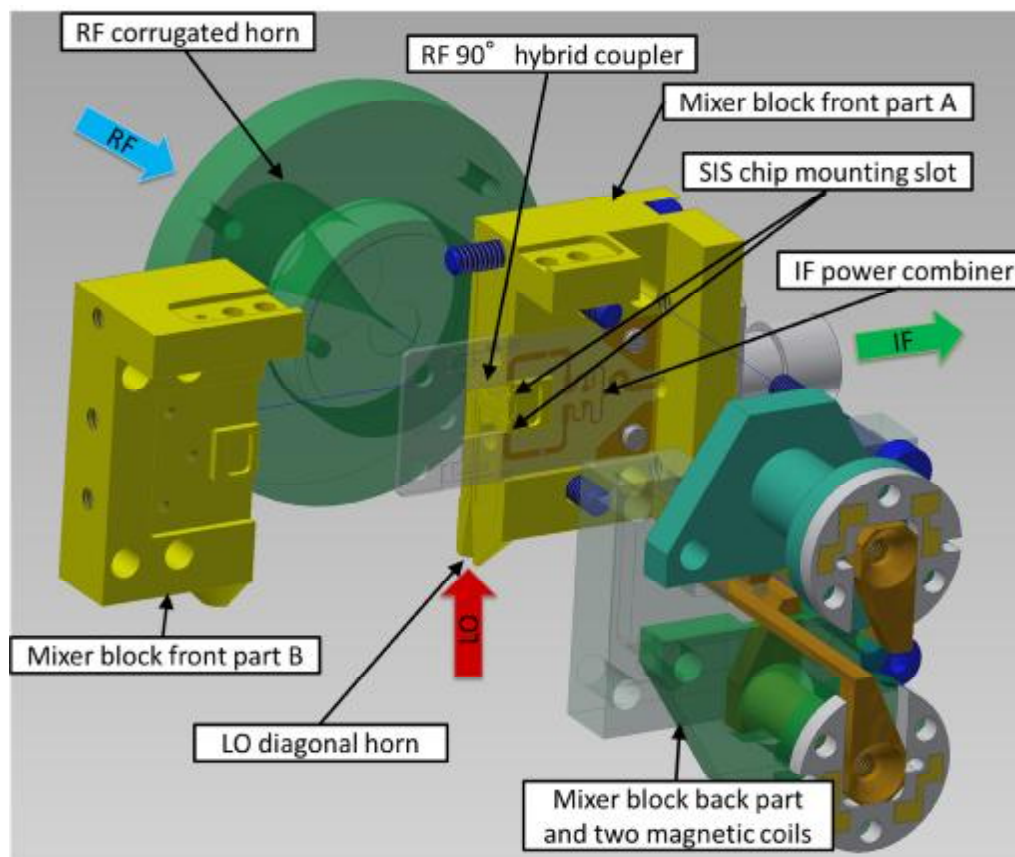


図 4 内蔵型アルマバンド 10 周波数帯バランスドミクサ

応用を見越して最適設計解を電磁界シミュレータで求めることが出来た。

アルマ望遠鏡ではバンド 10 よりも高い周波数帯の受信機開発も計画されており、高周波になればなるほど LO 信号の条件が厳しくバランスドミクサへの開発要求は高まっている。本研究結果は現状のアルマバンド 10 受信機の改良のみならず、将来開発においても重要な成果となった。

5. まとめ

本研究によってアルマバンド 10 受信機の製造を行うための

- 1) 熱伝導・熱収縮・電気伝導特性に着目して、電気性能・機械特性を満たした導波管設計など、世界最高性能かつ量産に耐えうる設計 (第 2 章)
- 2) 電波の偏波特性に着目したサイドバンド評価系や、増幅器の温度特性に

着目した安定な評価系など、本周波数帯で誰も成し得なかった様々な評価システムの開発（第 3 章）

を行い、さらに、

- 3) 導波管の伝送特性に着目して最小限の導波管長とした内蔵型バランスドミキサを初めてアルマバンド **10** 周波数帯で実証の成果を得ることが出来た。

本論文を構成する主要論文

- 1) “Performance of the ALMA Band 10 SIS Receiver Prototype Model”, Fujii, Y., Kroug, M., Kaneko, K., Gonzalez, A., Uzawa, Y., Kojima, T., Kuroiwa, K., Miyachi, A., Makise, K., Wang, Z., Shan, W.: IEEE Trans. Appl. Supercond., 21, 606-611, 2011.
- 2) “The First Six ALMA Band 10 Receivers”, Fujii, Y., Gonzalez, A., Kroug, M., Kaneko, K., Miyachi, A., Yokoshima, T., Kuroiwa, K., Ogawa, H., Makise, K., Wang, Z., Uzawa, Y.: IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol., 3, 39-49. 2013,
- 3) “Low-Noise Integrated Balanced SIS Mixer for 787–950 GHz”, Y. Fujii, T. Kojima, A. Gonzalez, S. Asayama, M. Kroug, K. Kaneko, H. Ogawa, Y. Uzawa, Superconductor Science and Technology, Volume 30, Number 2, 2017

学位論文審査結果の要旨

学位論文題目

Development and improvement of ALMA Band 10 receiver
(ALMA Band 10 受信機の開発・改良)

提出者氏名 藤井 泰範

宇宙の基本的な構成要素である恒星は、分子雲と呼ばれる低温・高密度なガスの塊から形成される。非常に低温であるため可視光では観測できず、分子雲の中に含まれる分子や星間微粒子から放出される電波を観測することにより、その性質を探ることが可能となる。これらの天体からの非常に微弱な電波を検出するためには、電波受信技術の大幅な向上が必要であった。超伝導受信機の開発により、検出感度が劇的に向上し、多くの科学的成果が得られてきた。本研究で開発した受信機を搭載するアルマ望遠鏡は標高 5000 メートルのチリ・アタカマ砂漠に建設された巨大電波干渉計であり、高い空間分解能・集光力により、初期銀河系形成、星・惑星系形成、生命の起源など、宇宙の謎が解明されつつある。特に、受信機の高感度化が国際協力の枠組みの中で競われ、大幅な感度向上が達成された。アルマバンド 10 は最も高い周波数領域 (787-950GHz) であり、最も高い空間分解能での観測が実現可能で星間微粒子放射のピークに近いことから、最も重要な周波数帯の一つである。しかし、最高周波数帯であるが故の技術的課題や、先行研究のバンド 9 (602-720GHz) 等で明らかになった欠点を克服するため、他のバンドとは異なる独自の開発研究を必要とした。

本研究では、アルマバンド 10 受信機の感度向上を実現し、その科学的仕様を満たすことを目的としている。本論文の主題は、この受信機の「設計」、「評価」、「将来開発」の 3 つに分かれる。「設計」においては、先行研究の欠陥を克服するための光学系や局部発信信号系、機械設計に重点を置いた。この際 0.35mm という非常に短い波長を光学系や導波管回路で精密に取り扱うため、複雑な光学系を一体加工可能な光学ブロックの設計、熱伝導・熱収縮・電気伝導特性に着目して、電気性能・機械特性を満たした導波管設計など、世界最高性能かつ量産に耐えうる設計を実現した。「評価」においては、電波の偏波特性に着目したサイドバンド評価系や、増幅器の温度特性に着目した安定な評価系など、本周波数帯では初めての様々な評価システムの開発を行い、量産化への道を開いた。「将来開発」においては、導波管の伝送特性に着目して最小限の導波管長をもつ内蔵バランスドミキサを初めてこの周波数帯で実証した。この技術は、さらに高い周波数帯域での応用が期待される。

以上のように本研究では、受信機コンポーネントの基礎特性を丁寧に調査することにより、アルマ望遠鏡の最も高い周波数帯域であるバンド 10 受信機の高性能化、量産化を実現した。これらの技術は、さらに高い周波数帯域の受信機性能向上にも必須であり、より短い波長でのサブミリ波天文学の発展に大きく貢献するものと考えられる。

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
前川 寛和
久保田 佳基
小川 英夫
鵜澤 佳徳