

## 平成 14 年度 国立天文台ALMA共同開発研究 研究成果報告書

1. 研究課題名 ALMA ミリ波超伝導受信機の開発2. 区分 A・B3. 研究代表者 氏名 米倉 寛則所属 大阪府立大学

4. 研究成果の概要（1000字程度で、ALMA計画に関連して重要であると思われる成果を重点的に記入してください。必要に応じて図表等は別紙として添付してください。また、主要な購入物品との関係についても記載してください。）

ALMAミリ波超伝導受信機の開発の成果について、開発項目ごとに示す。

#### (1) 光学系の開発

我々の開発したミリ波光学系では、デュワー上面に平面鏡および楕円鏡、デュワー内部にコルゲートホーンを配置するシンブルな光学系を採用している。広帯域化に対応するため、周波数に依存しない条件を取り入れた設計を行なった（図 1, 2, 3）。この方式を用いた 100 GHz 帯の受信機は、既に ASTE 望遠鏡に搭載され、観測に使用されている。さらに同様な方式で ATF 100 GHz 帯、150 GHz 帯、230 GHz 帯、345 GHz 帯用受信機の開発を行ない、今後 ATF および ALMA 12 m 鏡、7 m 鏡、ASTE 10 m 鏡に搭載を予定している。

コルゲートホーンについては、モード整合方法を用いたコルゲーションの解析を行い、リターンロスが小さく、指向性の良いホーンの設計・製作を行なった（図 4）。100 GHz 帯、150 GHz 帯ではプロファイルホーン型コルゲートホーンの試作を行い指向性の測定を行なった。その結果はシミュレーションと非常に良い一致を示した（図 5, 6）。これによりコルゲートホーンについては見通しを持った開発が出来るようになった。

#### (2) 超伝導ミキサの開発

国立天文台の既存の SIS 素子を用いたミキサブロックを、素子部のインピーダンスのシミュレーション結果に基づいて設計・製作した。その結果、IF = 5-7 GHz で 95-115 GHz にわたり雑音温度  $\sim 20$  K の値を達成することができた。このことから、多段のインピーダンス変換回路を使用せずに PCTJ 等の並列接合を使用できる見通しが立った。さらに、図 7 に示すように 150 GHz 帯においても 100 GHz 帯と同等な雑音温度を得ることに成功した。また、200 GHz 帯についても、図 8 に示すように 40 K という量子限界の 4 倍以内の雑音温度の達成に成功した。これらの 2 周波帯での性能は、100 GHz 帯で使用している 1/4 ハイト（標準導波管の 1/4 の高さ）導波管ではなく、1/2 ハイトの導波管を用いることで達成されている。この方式は、更に微細加工を要するサブミリ波帯でのミキサマウントの製作における見通しを与えるものとなっている。

#### (3) サイドバンドセパレーションミキサの開発

ミキサ単体で、両サイドバンドの信号を分離するサイドバンドセパレーションミキサの開発を進めている。このミキサの実現には、位相を  $90^\circ$  ずらして電力を等分配する  $90^\circ$  ハイブリッドカプラーが不可欠となる。現在我々は、導波管方式による  $90^\circ$  ハイブリッドカプラーの開発を進めている。電磁界解析ソフトを用いて設計し、試作を行なったところ、ほぼ設計どおりの性能が得られた。よって今回は、 $90^\circ$  ハイブリッドカプラー等を組み込んだ一体ブロックを製作し、サイドバンドセパレーションミキサの製作を行なった（図 9, 10, 11）。その結果を図 12, 13, 14 に示す。雑音温度 50 K、サイドバンド比 10 dB は、一体型マウントとしては世界初のデータである。さらにこれら 2 つのミキサに供給するバイアスは、電源 1 台から供給されても性能に変化はなく、この手法は画期的な方法である。

さらに高周波の 150 GHz 帯、230 GHz 帯、345 GHz 帯での実用化を目指して開発を進めている。これらの 2SB 同時方式は、今までの準光学方式に比して非常にコンパクトであり、機械調整部分がないため、多くの電波望遠鏡から搭載希望が出ている。

#### (4) 受信機搭載用カートリッジの開発

今後の SIS 受信機の開発には、カートリッジ型を用いる。その理由は、容易にデュワーからの脱着が可能のためである。我々は、平面 GFRP を使用し、容易に組み立て可能な Wall 型カートリッジを開発した。このカートリッジの熱伝導、温度安定性、振動等のテストを行い、いずれの観点からもミリ波帯 SIS ミキサに使用可能であることを確認した。その後、ミキサ、HEMT 等を組み込んで ASTE 望遠鏡での搭載し、試験観測に成功した。さらに Wall 型方式と、天文台方式、ラザフォード研究所（英国）方式との 3 者での撓みの比較（図15）を行い、表 1 に示すような結果を得た。Wall 型は他 2 者に比して撓みに非常に強いことが判明した。今後は、この方式を改良して、さらに撓みに強く、かつ RF 部品等の設置がより簡単に行える方式を開発する予定である。

5. 成果発表（学会発表、研究会集録などを含みます。印刷中、投稿中なども可。）

| 著 者 名                                                   | 論 文 標 題                                                     |
|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| Asayama, S., Noguchi, T., and Ogawa, H.                 | A Fixed-Tune W-Band Waveguide SIS Mixer with 4.0–7.5 GHz IF |
| 発行年、雑誌・研究会名、巻・号、ページ                                     |                                                             |
| Int. J. Infrared Millimeter Waves, 24, 1091–1099 (2003) |                                                             |

| 著 者 名                                                                                            | 論 文 標 題                                                                            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Andoh, H., Asayama, S., Ogawa, H., Mizuno, N., Mizuno, A., Tsukamoto, T., Sugiura, T., Fukui, Y. | Numerical Matrix Analysis for Performances of Wideband 100GHz Branch-Line Couplers |
| 発行年、雑誌・研究会名、巻・号、ページ                                                                              |                                                                                    |
| Int. J. Infrared Millimeter Waves, 24, 773–788 (2003)                                            |                                                                                    |

| 著 者 名                                                                                                                                                                | 論 文 標 題                          |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| Ogawa, H., Yonekura, Y., Asayama, S., Kimura, K., Mizuno, A., Mizuno, N., Minamidani, T., Maeda, H., Suzuki, K., Fukui, Y., Andoh, H., Sekimoto, Y., and Noguchi, T. | ALMA front-end system for Band 4 |
| 発行年、雑誌・研究会名、巻・号、ページ                                                                                                                                                  |                                  |
| Proceedings of IAU 8th Asian Pacific Regional Meeting, (eds. S. Ikeuchi, J. Hearnshaw, and T. Hanawa, Astron. Soc. Japan), II, 23–24 (2002)                          |                                  |

| 著 者 名                                                                                                  | 論 文 標 題                                                             |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| Andoh, H., Minamidani, T., Mizuno, N., Mizuno, A., Fukui, Y., Asayama, S., Yonekura, Y., and Ogawa, H. | Designs of Wideband 3dB Branch-line Couplers for ALMA Bands 3 to 10 |
| 発行年、雑誌・研究会名、巻・号、ページ                                                                                    |                                                                     |
| ALMA Memo 468 (2003)                                                                                   |                                                                     |

| 著 者 名                                                                      | 論 文 標 題                                                                                    |
|----------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| Asayama, S., Ogawa, H., Noguchi, T., Suzuki, K., Andoh, H., and Mizuno, A. | An Integrated Sideband-Separating SIS mixer Based on Waveguide Split Block for 100GHz Band |
| 発行年、雑誌・研究会名、巻・号、ページ                                                        |                                                                                            |
| ALMA Memo 453 (2003)                                                       |                                                                                            |

| 著 者 名                                                                                                       | 論 文 標 題             |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| 小川英夫、木村公洋、浅山信一郎、米倉覚則(大阪府立大学)、南谷哲宏、前田普教、鈴木和司、水野範和、水野亮、福井康雄(名古屋大学)、安藤浩哉(豊田高専)、野口卓、関本裕太郎(国立天文台)、原淳、阿部安宏(日本通信機) | ALMA ミリ波帯受信機の開発(II) |
| 発行年、雑誌・研究会名、巻・号、ページ                                                                                         |                     |
| 日本天文学会 2002 年秋季年会、宮崎シーガイア、2002 年 10 月                                                                       |                     |

| 著 者 名                                                                         | 論 文 標 題             |
|-------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| 鈴木和司、前田普教、南谷哲宏、水野範和、水野亮、福井康雄(名古屋大学)、関本裕太郎(国立天文台)、木村公洋、浅山信一郎、米倉覚則、小川英夫(大阪府立大学) | ALMA デュワー用カートリッジの製作 |
| 発行年、雑誌・研究会名、巻・号、ページ                                                           |                     |
| 日本天文学会 2002 年秋季年会、宮崎シーガイア、2002 年 10 月                                         |                     |

| 著 者 名                                                                                            | 論 文 標 題                      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| 浅山信一郎、木村公洋、米倉覚則、小川英夫(大阪府立大学)、鈴木和司、前田普教、南谷哲宏、水野範和、水野亮、福井康雄(名古屋大学)、安藤浩哉(豊田高専)、岩下浩幸、高橋敏一、野口卓(国立天文台) | ALMA 用ミリ波サイドバンドセパレーションミキサの開発 |
| 発行年、雑誌・研究会名、巻・号、ページ                                                                              |                              |
| 日本天文学会 2002 年秋季年会、宮崎シーガイア、2002 年 10 月                                                            |                              |

| 著 者 名                                                                       | 論 文 標 題                    |
|-----------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| 南谷哲宏、前田普教、鈴木和司、水野範和、水野亮、福井康雄(名古屋大学)、安藤浩哉(豊田高専)、浅山信一郎、木村公洋、米倉覚則、小川英夫(大阪府立大学) | ALMA100GHz 帯ミキサ用導波管部品の性能評価 |
| 発行年、雑誌・研究会名、巻・号、ページ                                                         |                            |
| 日本天文学会 2002 年秋季年会、宮崎シーガイア、2002 年 10 月                                       |                            |

| 著 者 名                                                                            | 論 文 標 題                           |
|----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| 安藤浩哉、塚本武彦、杉浦藤虎(豊田高専)、浅山信一郎、木村公洋、米倉覚則、小川英夫(大阪府立大学)、南谷哲宏、前田普教、水野範和、水野亮、福井康雄(名古屋大学) | RF 帯用3dB ブランチラインカプラーの設計および製作とその評価 |
| 発行年、雑誌・研究会名、巻・号、ページ                                                              |                                   |
| 日本天文学会 2002 年秋季年会、宮崎シーガイア、2002 年 10 月                                            |                                   |

| 著 者 名                                                                                                         | 論 文 標 題              |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| 木村公洋、浅山信一郎、米倉覚則、小川英夫(大阪府立大学)、安藤浩哉(豊田高専)、前田普教、南谷哲宏、伊藤有男、鈴木和司、水野範和、水野亮、福井康雄(名古屋大学)、松永真由美(愛媛大学)、松尾宏、関本裕太郎(国立天文台) | ALMA 搭載ミリ波光学系素子の性能測定 |
| 発行年、雑誌・研究会名、巻・号、ページ                                                                                           |                      |
| 日本天文学会 2002 年秋季年会、宮崎シーガイア、2002 年 10 月                                                                         |                      |

| 著 者 名                                                                                                                                                         | 論 文 標 題                          |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| 木村公洋、浅山信一郎、米倉覚則、小川英夫(大阪府大総合科学)、安藤浩哉(豊田高専)、前田普教、南谷哲宏、伊藤有男、鈴木和司、水野範和、水野亮、福井康雄(名大理)、松永真由美(愛媛大工)、奥田武志、杉本正宏、河野孝太郎(東大理)、横川創造、立松健一、関本裕太郎、野口卓(国立天文台)、他 ASTE、ALMA グループ | ALMA 型ミリ波受信機の ASTE 望遠鏡搭載実験及び試験観測 |
| 発行年、雑誌・研究会名、巻・号、ページ                                                                                                                                           |                                  |
| 日本天文学会 2003 年春季年会、東北大学、2003 年 3 月                                                                                                                             |                                  |

| 著 者 名                                                                                                       | 論 文 標 題                     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| 小川英夫、木村公洋、浅山信一郎、米倉覚則(大阪府大総合科学)、鈴木和司、水野範和、水野亮、福井康雄(名大理)、浮田信治、江澤元、斎藤正雄、石崎秀晴、岩下浩幸、野口卓、関本裕太郎(国立天文台)、他 ALMA グループ | ALMA プロトタイプアンテナ評価用ミリ波受信機の開発 |
| 発行年、雑誌・研究会名、巻・号、ページ                                                                                         |                             |
| 日本天文学会 2003 年春季年会、東北大学、2003 年 3 月                                                                           |                             |

| 著 者 名                                                                                            | 論 文 標 題                |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| 浅山信一郎、木村公洋、米倉覚則、小川英夫（大阪府大総合科学）、鈴木和司、前田普教、南谷哲宏、水野範和、水野亮、福井康雄(名大理)、安藤浩哉（豊田高専）、岩下浩幸、高橋敏一、野口卓(国立天文台) | ミリ波サイドバンドセパレーションミキサの開発 |
| 発行年、雑誌・研究会名、巻・号、ページ                                                                              |                        |
| 日本天文学会 2003 年春季年会、東北大学、2003 年 3 月                                                                |                        |

| 著 者 名                                                                     | 論 文 標 題                                                                           |
|---------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| S. Asayama, T. Noguchi, and H. Ogawa                                      | Sideband-Separating SIS Mixer at 110 GHz for the measurement of atmospheric ozone |
| 発行年、雑誌・研究会名、巻・号、ページ                                                       |                                                                                   |
| Fourteenth International Symposium Space TeraHertz Technology, 2003 年 4 月 |                                                                                   |

| 著 者 名                                                                                                                      | 論 文 標 題                                 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| S. Asayama, T. Noguchi, and H. Ogawa                                                                                       | Sideband-Separating SIS Mixer at W-band |
| 発行年、雑誌・研究会名、巻・号、ページ                                                                                                        |                                         |
| 3rd ESA Workshop on Millimetre Wave Technology and Applications: circuits, systems, and measurement techniques, 2003 年 5 月 |                                         |

| 著 者 名               | 論 文 標 題 |
|---------------------|---------|
|                     |         |
| 発行年、雑誌・研究会名、巻・号、ページ |         |
|                     |         |

6. 別刷り（各1部を添付してください。コピーも可。）

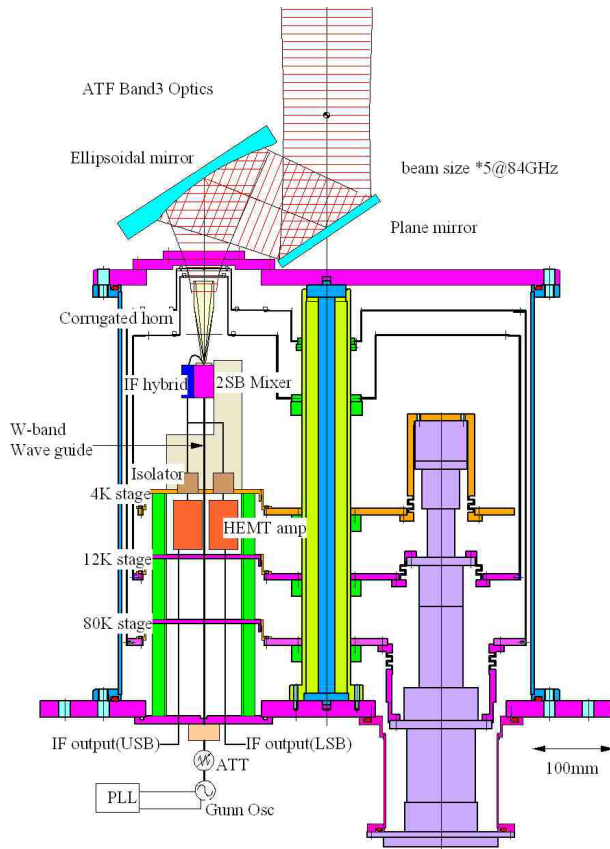


図 1. カートリッジ型デュワーおよび受信機の概念図

受信機はカートリッジと呼ばれる筒状の容器に納められ、デュワー内に挿入される。

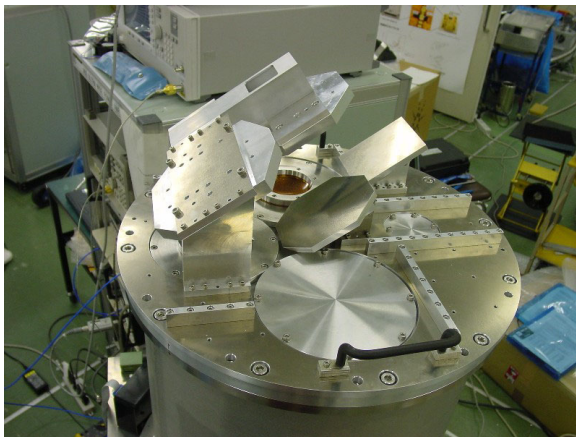


図 2. Dewar 上面（常温光学系）

この百式 Dewar には、100 GHz 帯受信機と 270 GHz 帯受信機が搭載されている。二つの受信機はそれぞれ常温光学系を用いている。  
(手前: 100 GHz 帯受信機、奥: 270 GHz 帯受信機)

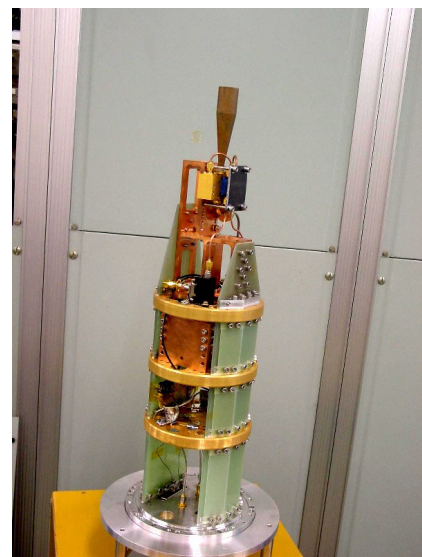


図 3. 100 GHz 帯 2SB 受信機

100 GHz 帯の受信機は USB と LSB との信号を分離して出力できる、2SB 方式を採用している。

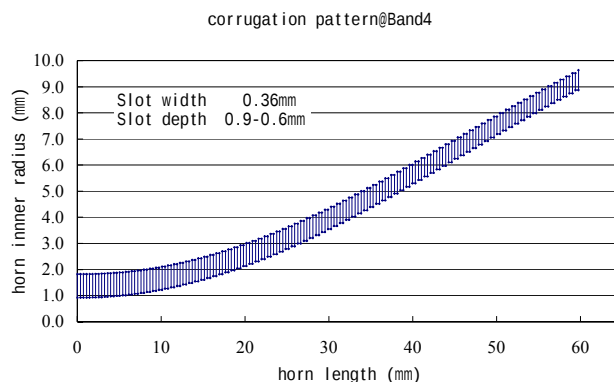


図 4. コルゲートホーン

(左) 100 GHz 帯受信機で用いられているホーン

(右) 150 GHz 帯 (Band-4) のコルゲートホーンのコルゲーション。

コルゲートホーンは、ホーン内壁にコルゲーションと呼ばれる溝を掘ることにより、E 面とH面の対称性、広帯域化を可能としている。

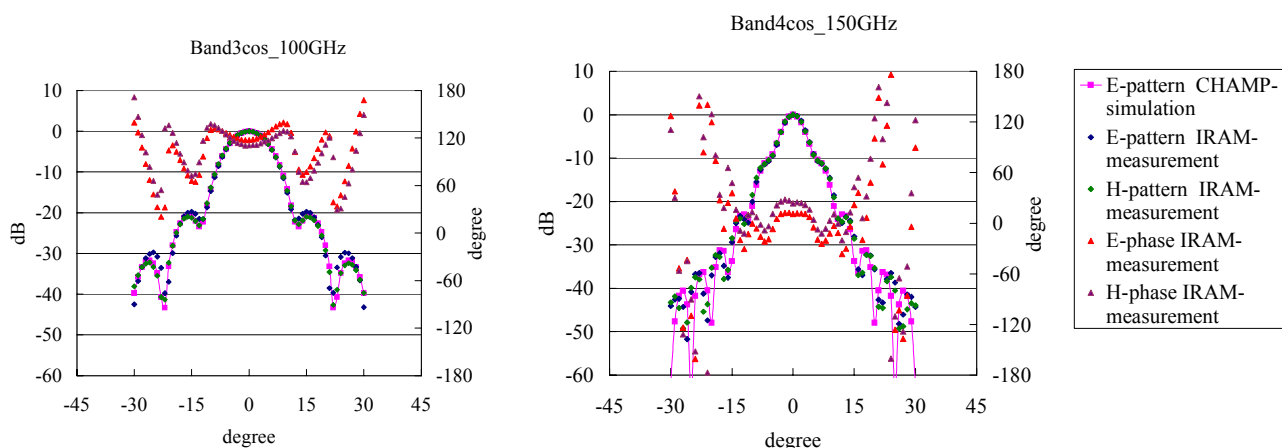


図 5. コルゲートホーンの放射パターンのシミュレーション結果と測定値

設計、シミュレーションは CHAMP (TICRA 社) を用いて行なった。測定は IRAM にて行なった (左: 100 GHz 帯ホーン、右: 150 GHz 帯ホーン)。

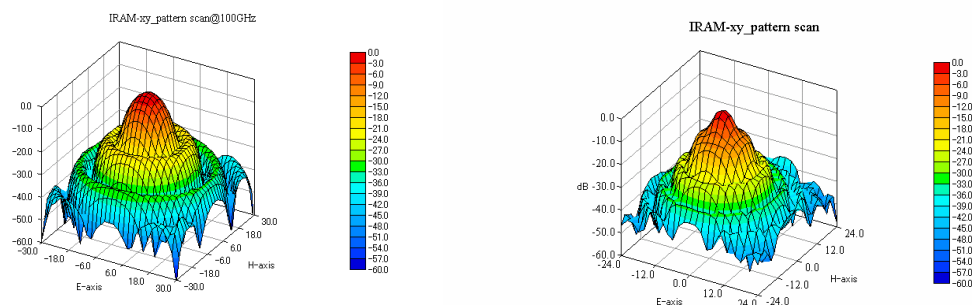


図 6. IRAM で測定を行った三次元放射パターン (左: 100 GHz 帯、右: 150 GHz 帯)

## D-band, 1/2 reduced height

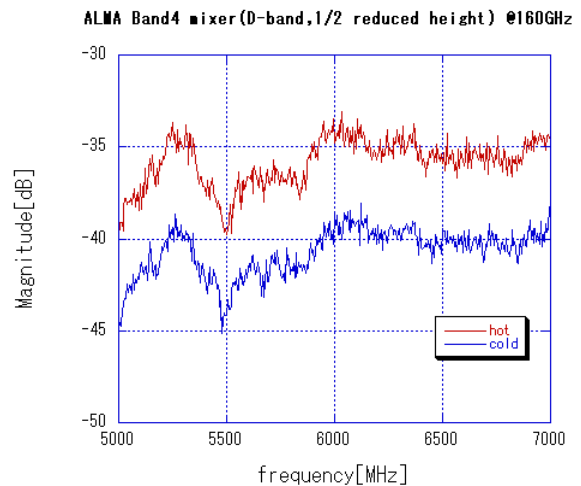
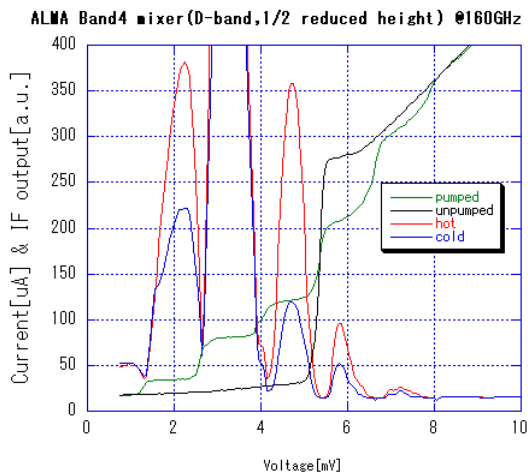
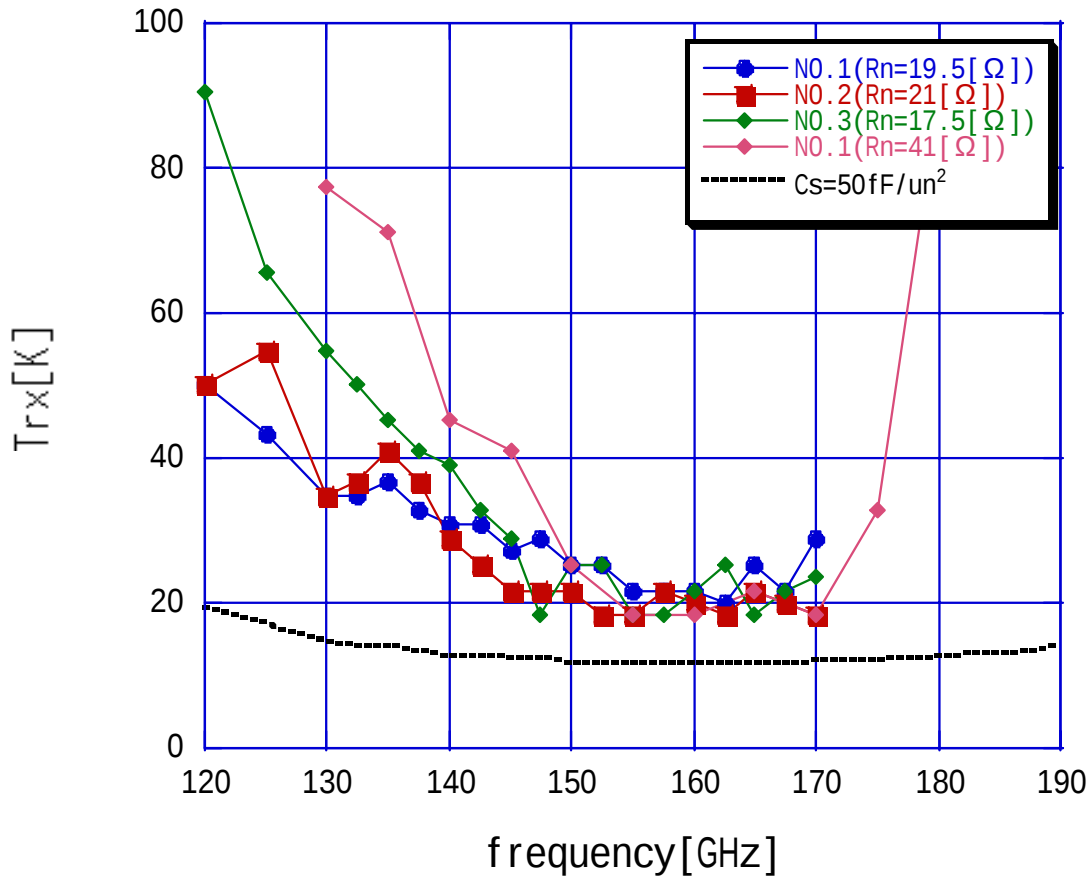


図 7. ALMA Band-4 mixer 実験結果

(上) SIS の抵抗値の違う素子間での、雑音温度比較

(下左) I-V データ (hot=300K, cold=80K)

(下右) IF (5-7 GHz 帯) の出力。

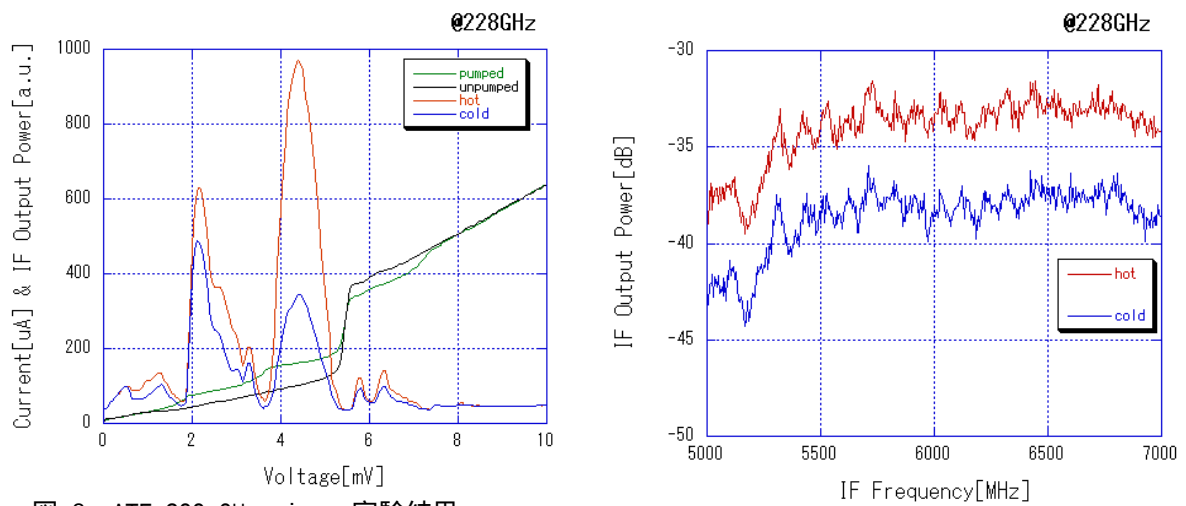
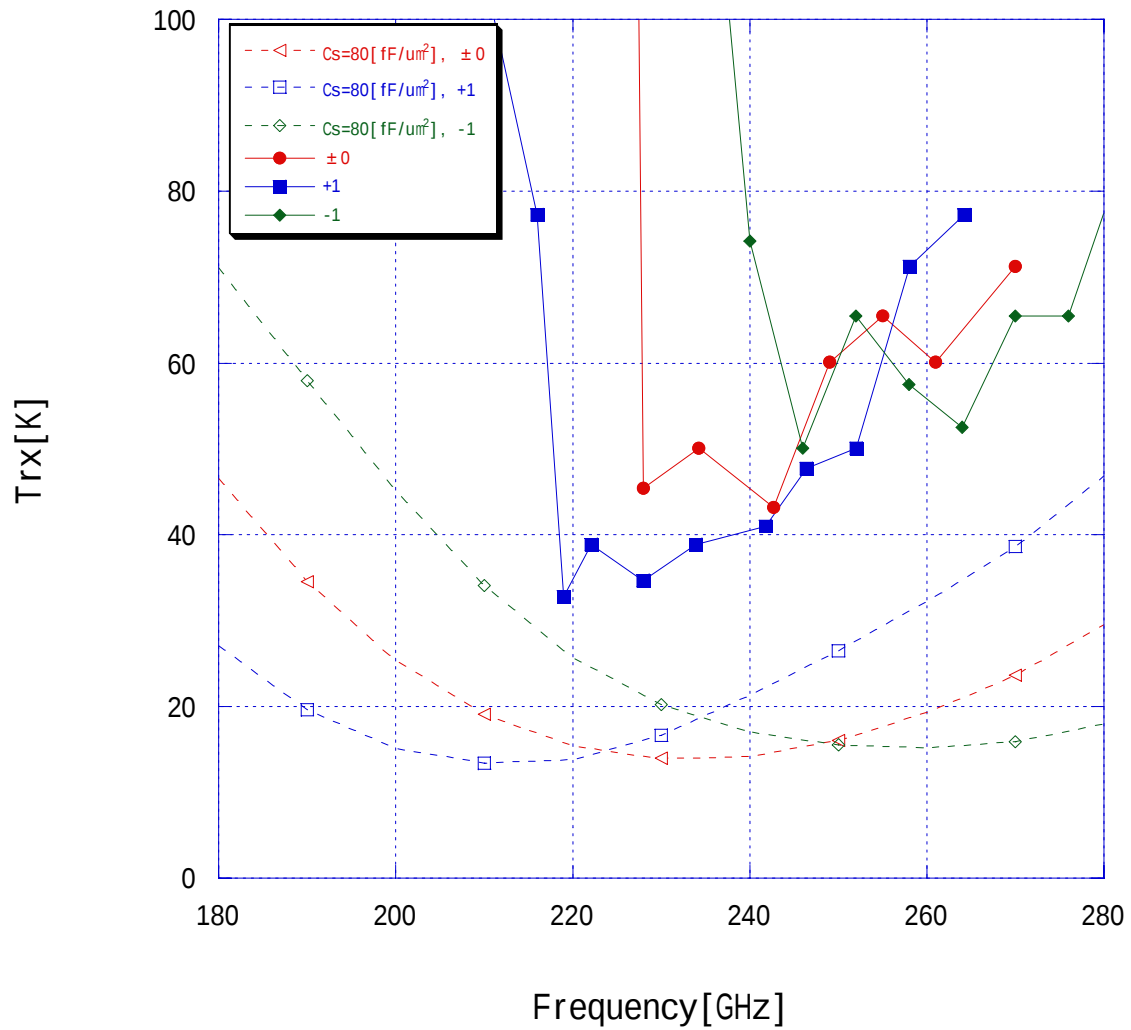


図 8. ATF 200 GHz mixer 実験結果

(上) SIS のリードのインダクタンスの違う素子間での、雑音温度比較

(左) I-V データ (hot=300K、cold=80K)

(右) IF (5-7 GHz 帯) の出力。

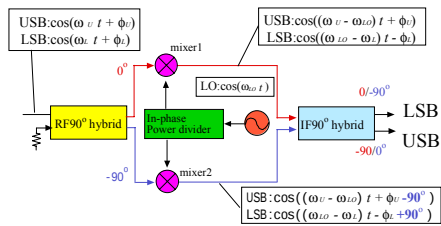


図 9. 2SB ミクサの模式図

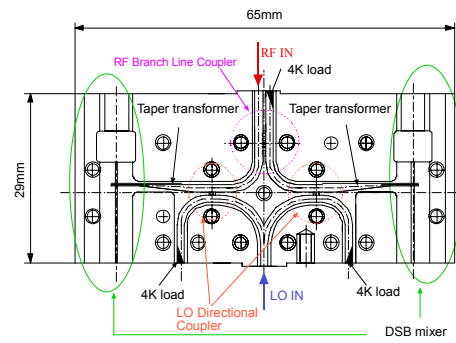


図 10. 2SB ミクサマウント図面

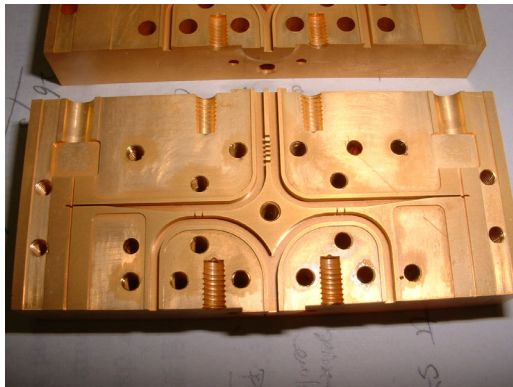


図 11. 2SB ミクサマウント

★The voltage is applied to two SIS at the same time in one power supply.

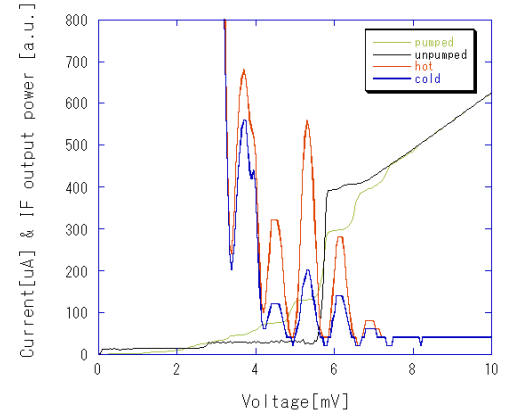


図 12. I-V データ@100 GHz 帯

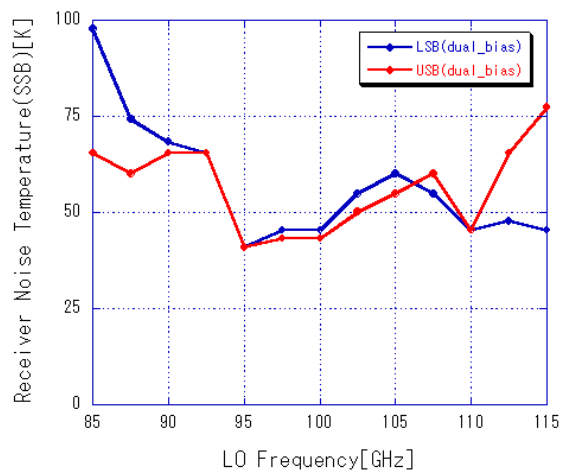


図 13. USB と LSB の雑音評価

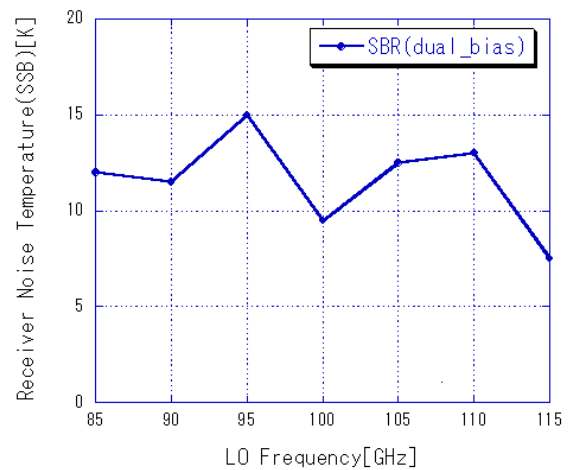


図 14. サイドバンド比測定

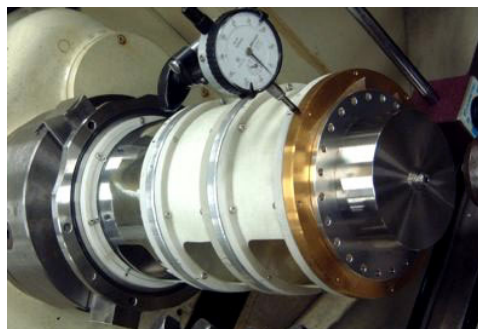
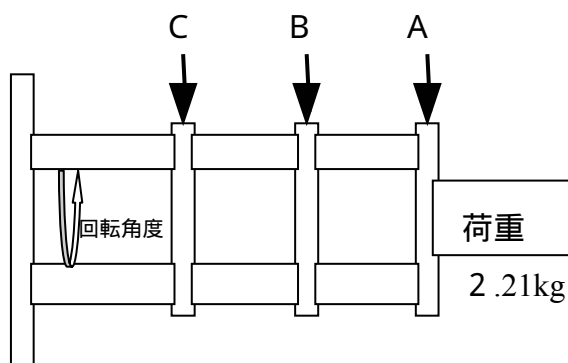


図 15. カートリッジ撓み測定 (荷重無しから荷重ありを引く)

(左) 測定箇所および固定箇所

(右) カートリッジを旋盤に固定し、ダイヤルゲージでひずみを測定している。

#### ウォール型

| 回転角度 | A    | B    | C    |
|------|------|------|------|
| 0    | -40  | -30  | -20  |
| 90   | -180 | -140 | -110 |
| 180  | -20  | -10  | -10  |
| 270  | -140 | -140 | -100 |

表 1. 三種類のカートリッジ撓み (荷重無しから荷重ありを引いた値) の測定結果

#### 天文台

| 回転角度 | A    | B   | C   |
|------|------|-----|-----|
| 0    | -90  | -50 | -20 |
| 90   | -100 | -55 | -25 |
| 180  | -100 | -55 | -25 |
| 270  | -100 | -60 | -25 |

デュワーおよびカートリッジは一方方向にしか傾かない為、ウォール型は 90°、180° 方向 (傾く方向) に対して撓みに非常に強い構造になっている。それに対し、他の二者は、全方向に対し、撓みにそこそこ強い構造になっている。

#### RAL 型

| 回転角度 | A    | B   | C   |
|------|------|-----|-----|
| 0    | -110 | -50 | -10 |
| 90   | -90  | -40 | -20 |
| 180  | -90  | -50 | -10 |
| 270  | -80  | -30 | -10 |

ウォール型: 我々が開発したカートリッジで、二本の柱でステージ間を支えている (図 3 参照)。

天文台型: ステージの中心に太い柱があるデザイン。

RAL 型: 円筒状の柱で固定しているデザイン (図 15. 参照)。

ステージ間の柱に GFRP を用いて Dewar 外部からの熱を遮断している点では、全てのカートリッジ共通である。