

# 大気を観測するミリ波装置の紹介

○ 児島 康介

計測・制御技術支援室

【 宇宙地球環境研究所 技術部 】

## はじめに

ある種の分子構造を持つガスは特定波長の電波を自然放射し、その波長はミリ波からサブミリ波となる事が多い。この自然放射される電波の強度を定常観測する事で、当該ガスの濃度変化を掴む事が可能となる。この種のガスのうち、地球大気で重要な役割を果たしているのがオゾンである。宇宙地球環境研究所の気象大気研究部では、地球大気の反応性気体成分や粒子成分を精度よく観測する事により、環境問題や地球大気科学に関わる諸現象にアプローチしている。

このミリ波による観測に適用できる市販の装置はなく、当グループでは最重要部品となる超伝導素子を国立天文台/大阪府立大学と共同開発し、観測装置を構築してきた。報告者は主に観測装置の総合組立と最適化を担当すると共に、保守作業にも従事してきた。

今回 報告するミリ波装置は、2010年の冬に南極 昭和基地の観測サイトへ据え付けた装置である。主にシステムの概要と調整の要点を紹介する。

## 1 大気の観測

地球大気を観測する方法は、化学的技法で直接測定する方法と、分光学的に測定する方法に大別される。上空のオゾン濃度を直接測定する方法として、飛行機による直接採取やゾンデを用いる方法がある。特にゾンデ観測は長期に渡って続行されており、重要な基本データとなっている。しかし、その観測は数日間隔で行われているため、時間的に連続なデータを取得することは困難である。

一方、地上からオゾン濃度を遠隔測定する方法として、紫外/赤外分光法、ライダー法、ミリ波分光法がある[1]。紫外/赤外分光法は太陽光を必要とし、昼間の晴天時のみの観測となる。特にオゾン層の標準的な観測手法である紫外吸収分光法 (Dobson 型分光法) は、地上から大気上端までの気柱に含まれるオゾンの総量 (オゾン全量) を観測することが基本である。そのため、オゾンの高度分布を求めることは、Dobson 型分光法の単体システムではできない。また、ライダー法 (レーザーライダー法) は、オゾンの高度分布を観測することはできるが、夜間の晴天時しか観測ができない。また、観測高度は約 50 k m までとなる。

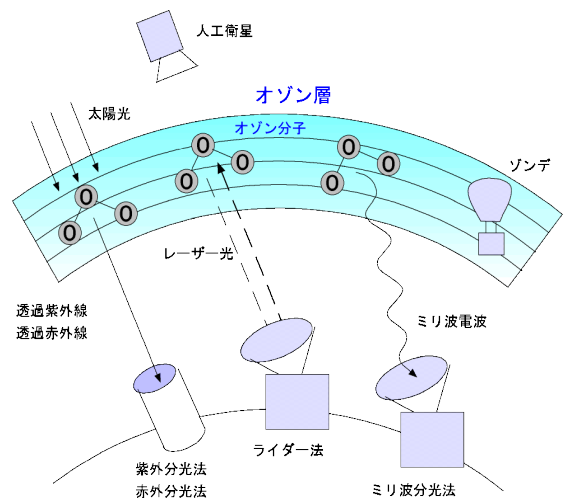


図1 オゾンの観測方法

ミリ波分光法は、電氣的偏り（電気双極子モーメント）を持つ大気分子自身が放射する電波を利用する観測手法である。従って、太陽などの背景光源を必要とせず、昼夜を問わず 24 時間連続観測ができる。

また、受信した電波のスペクトル分布は、大気の圧力と相関関係が成立しているため、スペクトル分布を解析することから、大気の高高度分布が求まる。なお、観測高度は約 80 km まで可能であり、その観測範囲は成層圏から中間圏にまたがる広い領域となる。

尚、ミリ波が大気中を伝搬する際、自由空間伝搬損失以外の伝送損失が生じる場合もある。それは、酸素ガスと水蒸気による吸収である [1][2]。幸い、その吸収周波数は特定されており、200GHz~300GHz の範囲では、酸素ガス等による吸収損失は比較的小さくなる。その為、この周波数範囲は“大気の窓”と呼ばれている。

今回 紹介するミリ波大気観測装置の受信周波数は、観測対象を考慮し、250GHz 帯となった。

## 2 ミリ波大気観測装置の概要

ミリ波大気観測装置に必要な性能として、大気分子の放射する微弱電波が受信できる感度（総合雑音温度）を、第一に挙げることができる [1][5]。そして、受信電波のスペクトル分布を解析する必要性から、周波数と総合利得の安定度も、重要な性能指標となる。この電波は非常に微弱であるため、スペクトル解析の可能な信号強度まで増幅する必要がある。その際に必要な総合利得は約 100dB（電力比で百億倍）となる。この様に高利得な増幅の場合、周囲温度の変化で生じる利得変動を避けることができない。当然、温度ドリフトの様な問題があると正しいスペクトル分布が採取できず、データ解析において無視できない誤差が生じる。

この問題を解決するため、Dicke 型ラジオメータを基本構成とした。この Dicke 型ラジオメータは利得変動の影響を最小限とするために考案された観測装置である [2]。特に電波天文用受信機として多くの実績を持つ装置である [3]~[5]。Dicke 型ラジオメータの特徴は、低温と高温の標準雑音源を備えることで、観測対象の大気が放射する電波の信号強度を較正する事が可能となる。低温用標準雑音源には液体窒素（77K）で冷却した黒体を用い、高温用標準雑音源には常温黒体（300K）を用いる構成とした。なお、黒体には電波吸収体を使用した。

この様に実際の観測では大気分子が放射する電波と、低温/高温用標準雑音源が放射する白色雑音の三種類を採取している。その際、受信機利得の変動周期よりも短い間隔で、三種類の電波を時分割（スイッチング）して受信する必要がある [1]~[5]。この受信システムを採用することで、利得変動の影響を大幅に減ずることが可能となる。当グループで運用しているミリ波大気観測装置の基本構成を図 2 に示す。

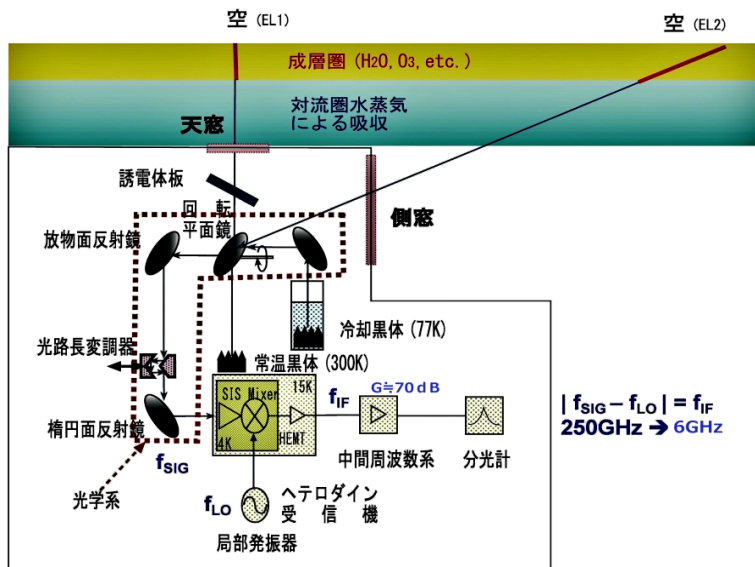


図 2 ミリ波大気観測装置の概要

一般にミリ波帯では、受信した電波を直接増幅することは不可能である。そこで、微弱な受信電波を増幅可能な周波数（中間周波数）に変換し、その中間周波数を増幅してスペクトル解析をするシステムとなっている。いわゆるスーパーヘテロダイン受信方式である。なお、本装置の中間周波数は6GHzに設定した。

この周波数変換で用いるミキサが、本装置の心臓部となる超伝導素子で製作したS I S (Superconductor Insulator Superconductor) である。このS I S素子は、ミリ波/サブミリ波帯で動作する非線形素子の中で最も低雑音となるが、約4Kまで冷却しなければならない[1][5]。また、4Kまで冷却するためには、常温(300K)と熱的絶縁をする必要もある。この熱的絶縁には、真空状態が不可欠となる。

この様にS I S素子を用いる場合、高価で大掛かりなシステムとならざるを得ない。また、S I Sミキサで得られた6GHzの中間周波数を最初に増幅する素子は、HEMTである[5]。このHEMTアンプも雑音指数を低減させるため、約20K程度に冷却して使用する[1][5]。

なお、周波数変換で用いる局部発振器には、Gunnダイオードとバラクタダイオードを組み合わせ、244GHz帯のミリ波を発生させている[5]。そして、局部発振器からの局発信号と受信信号を同時にS I Sミキサで混合させる為、カップラ（結合器）を使用した。S I Sミキサの非線形特性により、混合された電波から和と差の周波数成分が生じるが、伝送系の損失特性から差成分のみが増幅系へ出力される。

また、局部発振器から送出された244GHzの局発電波が乱反射をして定在波を発生させる。この定在波が受信電波のスペクトル分布に悪影響を及ぼす。PLM (Path Length Modulator) は、この定在波を除去するために考案された四枚一組の平面反射鏡である。

大気分子から放射された電波と、低温/高温用標準雑音源からの雑音電波をスイッチングする具体的な機構として、ステッピングモータで制御できる回転反射鏡を採用した。回転反射鏡の周辺には低温/高温用標準雑音源が設置されており、受信機利得の変動周期よりも短い間隔で回転反射鏡の角度を三方向へ制御し、各々の電波を時分割受信している（図3）。そして、受信された電波は放物面鏡（パラボラ反射鏡）とPLM（光路長変調器）を経由し、楕円鏡で収束され、電磁ホーンアンテナに供給される。

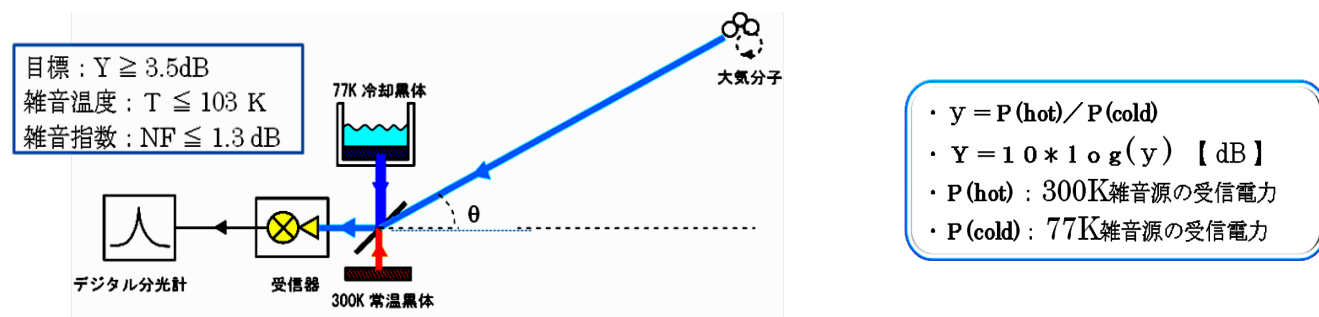


図3 回転反射鏡によるスイッチング受信

ここまでミリ波大気観測装置の全体像を概観してきた。本装置を構成する主要要素は以下の様になる。

- S I Sミキサ (4Kで作動)
- HEMTアンプ (20Kで作動)
- 常温で使用するアンプとミキサ (6GHz帯を500MHz帯に周波数変換) ⇨ 常温 IF-AMP
- ミリ波帯の局部発振器 (Gunnダイオード, バラクタダイオード, PLL, 他)
- 光学系 (電磁ホーンアンテナ, 楕円鏡, 放物面鏡, PLM, 回転反射鏡)
- 冷凍装置 (GM冷凍機, コンプレッサー, チラー, 温度計, 他)
- 真空装置 (ポンプ, 真空計, 他)

これら構成要素のなかで、S I S ミキサと光学系（アンテナ系）は、自ら設計・製作をする必要がある。そして、他の構成要素は、一般市販されている製品を流用することが可能である。しかし、市販品を単純に組み合わせるだけでは雑音温度の低い観測装置とならない。丁寧な組立・調整が不可欠である。この調整作業に技術職員の存在意義がある。

### 3 観測装置として必須の調整

ミリ波大気観測装置を調整する際に最も重視する性能指標は、光学系（アンテナ系）を含めた総合雑音温度である。この総合雑音温度は、高温/低温用標準雑音源からの雑音電波を受信することで計測できる。二つの標準雑音源から受信した信号の比を取り、これを Y ファクタと定義する。この Y ファクタが最低 3.5dB 以上となれば総合雑音温度は 103K 未満となり、実用上、観測に支障はない[1] [5]。そして、Y ファクタの最適化は、S I S ミキサのバイアスやアンテナ系の配置を調整する事で達成する。その際、常温 IF-AMP の性能（線形性）が最適化されている事は前提条件となる。

一般に増幅器の線形性で最も問題となるのは、過大入力による出力信号の飽和である。仮に常温 IF-AMP の線形性が最適化できていなければ、標準雑音源を用いた感度校正で無視できない誤差が生じ、計測器としての体を為さなくなる。図 4 に線形性を調整する際のブロックダイアグラムを示す。なお、観測対象となるオゾンの観測スペクトラムは数百 MHz に渡るので、調整に用いる信号源は白色雑音とする必要がある。

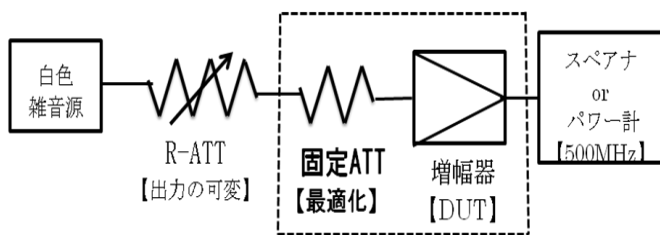


図 4 増幅器などの線形性 調整

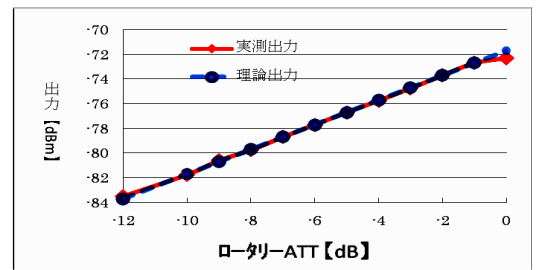


図 5 増幅器の線形性（一例）

図 5 は増幅器の線形性を調整した一例である。理論出力が  $-72\text{dBm}$  の時、実測値との間に 1dB の誤差が生じている。ここが P1dB (1dB 利得圧縮点) となる。よって、この増幅器の利得が  $+30\text{dB}$  と仮定すると、増幅器への入力強度は  $-102\text{dBm}$  未満とする必要があり、適切な固定 ATT を挿入して使用する。そして、このような調整を繰り返し、最適化された IF システムのブロック図とレベル図の一例を図 6 に示す。

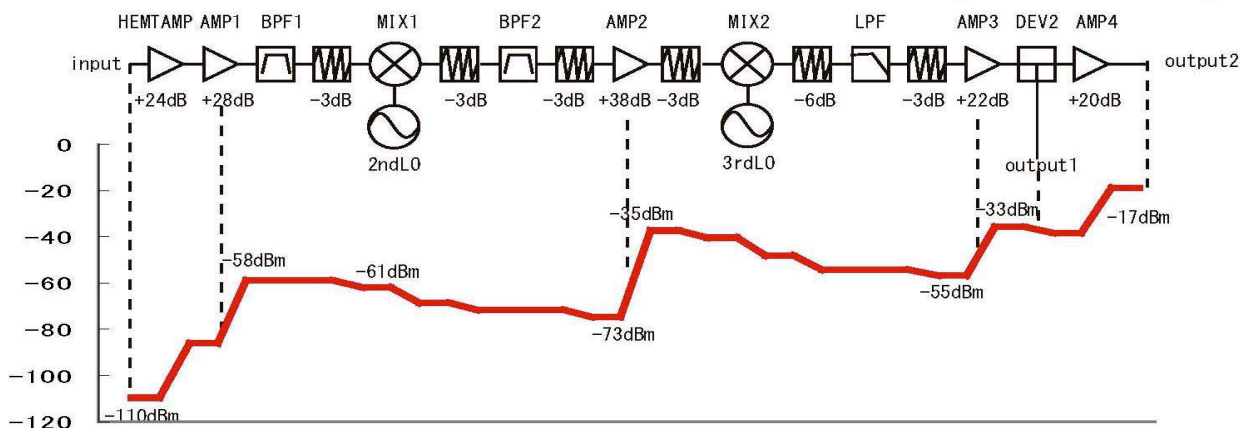


図 6 IF システムのブロックダイアグラムとレベルダイアグラム（一例）

尚、この常温 IF-AMP の総合利得は約 70dB（電力比で 1000 万倍）となり、周囲温度の変化で生じる利得変動（温度ドリフト）を避けることができない。その対策としては能動素子を一定温度に保つ事が最も有効な手段となる。今回はペルチェ素子を用いる事で温度ドリフト対策とした。常温 IF-AMP の天板に全ての能動素子を密着させ、その天板全体をペルチェ素子で一定に保っている。その様子を図 7 に示す。

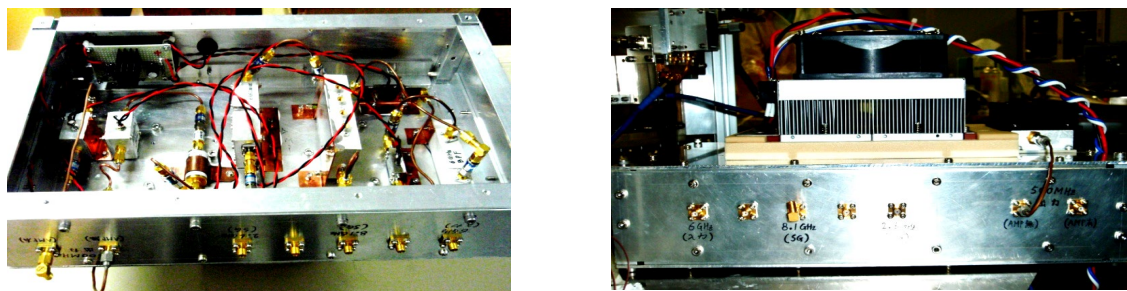


図 7 常温 IF-AMP の組込の様子

最後に最適調整されたミリ波大気観測装置の基本データを図 8 に示す。調整の結果、雑音温度は 76K 以下となり、且つ、温度ドリフトも抑制されている。非常に高感度で安定化された観測装置となった。

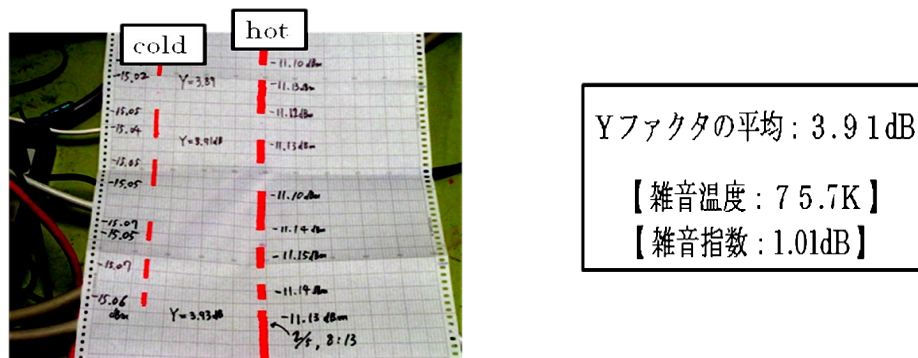


図 8 最適調整された観測装置

おわりに

今回 報告したミリ波大気観測装置は 2011 年の春から南極 昭和基地で本格的な観測活動に入った。報告者は過去 3 回に渡り昭和基地へ赴き、本装置の保守に従事した。なお、本装置は 2020 年 1 月に新型の観測装置へリニューアルされるまで、設置当初の性能を維持し続け、観測業務に大きく貢献した事を付け加えておく。

最後に、今回の報告でも、多くのデータを宇宙地球環境研究所 水野研究室の皆様から頂戴いたしました。ここに記して深謝申し上げます。

#### 参考文献

- [1] 日本分光学会 編：電波を用いる分光，講談社，2009 年 4 月
- [2] 古濱・岡本・増子：人工衛星によるマイクロ波リモートセンシング，電子情報通信学会，1994 年 8 月
- [3] 西村・海部：宇宙の観測 I（現代天文学講座 11），恒星社厚生閣，1981 年 10 月
- [4] 赤羽・海部・田原：宇宙電波天文学，共立出版，1988 年 5 月
- [5] 中井・坪井・福井 編：宇宙の観測 II（電波天文学），日本評論社，2009 年 8 月
- [6] 池上文夫：通信工学（訂正版），理工学社，1995 年 12 月