

ミリ波による大気分子観測装置の調整と試運転

児島康介

教育・研究技術支援室 計測・制御技術系

1. はじめに

太陽地球環境研究所の大気圏環境部門では、地球大気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。

大気観測には種々の方法があるが、現在、大気分子から放射されるミリ波/サブミリ波の電磁波を利用した観測システムの開発支援業務に従事している。

今回 報告するミリ波観測装置は、2008年に南米チリのアタカマ高地（標高4800m）の観測サイトに据え付けた装置である。主にシステム概要と調整の要点、現地における試運転を紹介する。

2. 大気観測の概要

地球大気を観測する方法は、化学的な手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50kmまでとなる。

ミリ波分光法は、電気的偏り（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、大気の高さと相関関係が成立している。よって、スペクトル分布を解析することで、大気の高度分布が求まる。なお、観測高度は約80kmまで可能であることから、その観測範囲は成層圏から中間圏にかけての広範囲となる。

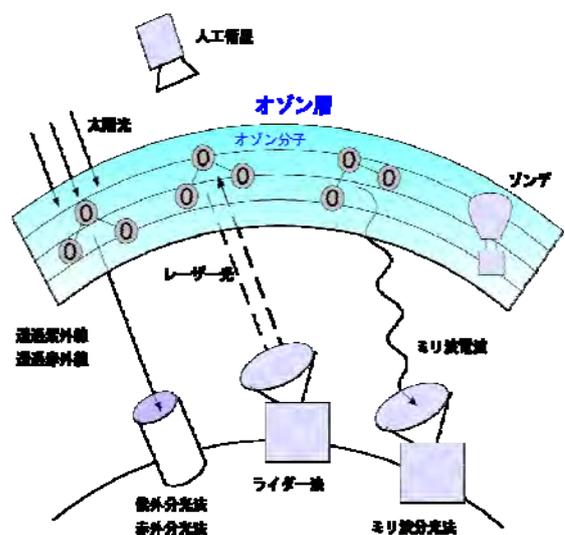


図1 様々な大気観測法

また、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。そのため、この周波数範囲を“大気の窓”と呼んでいる。今回 開発した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。

3. 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、第一に上げることができる[1]。そして、受信電波のスペクトル分布を解析することから、周波数と総合利得の安定度も、重要な性能指数となる。受信した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、最低でも 70dB（一千万倍）となる。この様に高利得な増幅器の場合、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。そして、観測装置側の問題で信号強度が変動した場合、スペクトル解析において無視できない誤差要因となる。

この問題を解決するため、Dicke 型ラジオメータを使用することにした。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受信機である[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、低温用と高温用の標準雑音源を備えていることで、これらの雑音源は受信電波の信号強度を較正するために用いられる。低温用標準雑音源には液体窒素（77K）で冷却した黒体を、高温用標準雑音源には常温黒体（300K）を計画した。なお、黒体には電波吸収体を適用する。

実際の観測では大気分子からの電波を連続受信するのではなく、低温/高温用標準雑音源からの雑音電波も含めてデータ採取をする。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らすことが可能となる。今回 開発したミリ波大気観測装置の概要を図2に示す。

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、受信電波をある程度 低い周波数（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、本装置における中間周波数は 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。それは超伝導素子で製作した SIS（Superconductor Insulator Superconductor）である。この SIS 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 4 K まで冷却しなければならない[1][5]。また、4 K まで冷却するためには、常温（300K）と熱的な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 SIS 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、SIS 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 20 K 程度に冷却して使用する[1]。

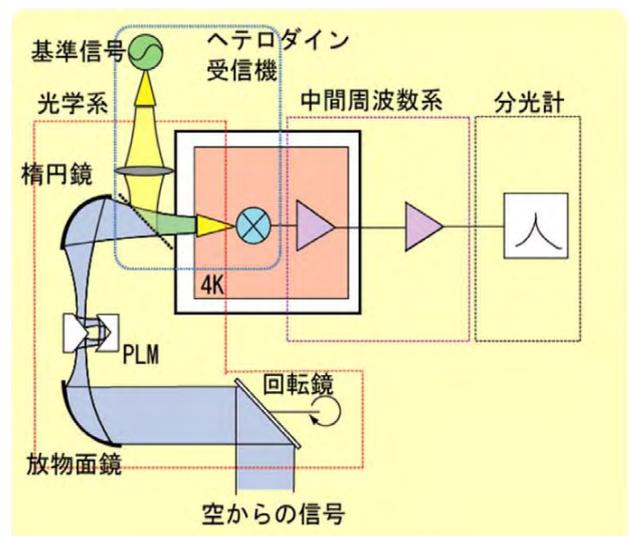


図 2 ミリ波大気観測装置の概要

なお、周波数変換で用いる局部発振器は、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ため、テフロン膜を用いたスプリッタ（分波器）を使用する。混合された電波は、電磁ホーンアンテナで S I S ミキサに導く。

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して受信する具体的な手段として、ステッピングモータで制御可能な回転反射鏡を利用することにした。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（光路長変調機）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。

また、局部発振器から送出されたミリ波の局発電波は、テフロン膜スプリッタを 99%透過し、光学系（アンテナ系）の周辺で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。

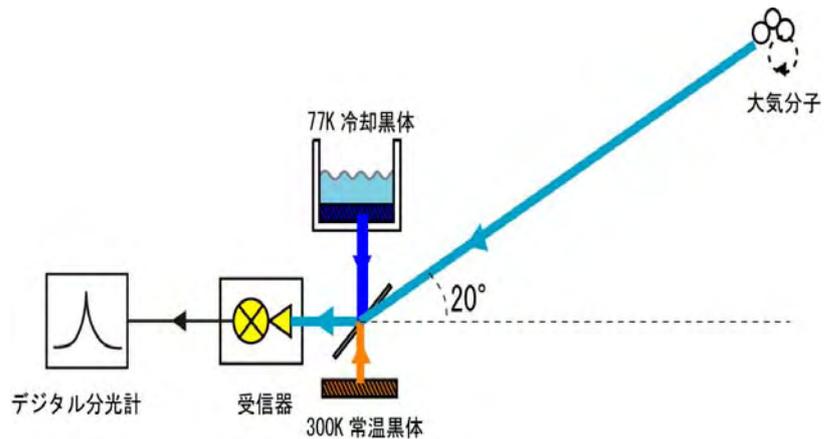


図 3 回転反射鏡によるスイッチング受信

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。

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

- S I S ミキサ
- HEMT アンプ
- 常温で使用するアンプとミキサ（6GHz 帯を 1GHz 帯に周波数変換）
- 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-JT 冷凍機，コンプレッサー，チラー，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 ミキサと光学系は、自ら設計・製作をする必要がある。しかし、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。但し、市販品を単純に組み合わせるだけでは雑音温度の低い受信装置とならない。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。

なお、本観測装置を調整する際に最も重視する性能指数は、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[1][5]。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 3dB を超えるように S I S ミキサや光学系を調整する。この時、総合雑音温度は 150K 未満となる[5]。

また、アンテナ系における放射パターンも重要な性能指数である。特に放物面鏡（パラボラ反射鏡）からの放射パターンは、平行ビームとなるように調整する必要がある。

4. 光学系のアライメント

本装置の光学系は、一次放射器（電磁ホーンアンテナ）と主反射鏡（パラボラ反射鏡）の間に副反射鏡として楕円鏡が配されており、いわゆるグレゴリアンアンテナとなっている[6][7]。

また、光学系における放射パターン設計は、ガウスビーム光学に基づく理論で実施された[5][8][9]。このガウスビーム光学を電波伝搬の設計に適用する際、必ず守るべき条件が存在する。それは、一次放射器の放射パターンが、E面/H面ともに正規分布（ガウスビーム）となっていることである。

加工上の制約から、一次放射器に円錐ホーンアンテナが適用され易い。しかし、そのE面/H面のビーム幅と放射パターンは、同一とならず異なる場合が多々ある[7][10]。

特にホーン開口面から比較的近い範囲では、ガウスビームとは明らかに違う放射パターンとなる[10]。図4と図5に、円錐ホーンアンテナにおける放射パターンの設計資料を示す。

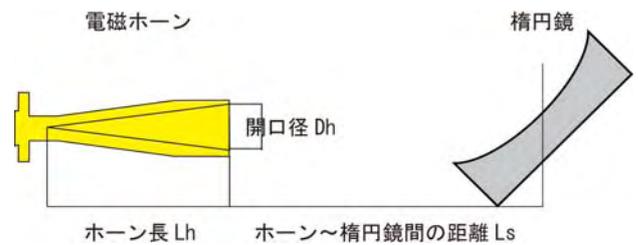


図4 円錐ホーン的设计パラメータ

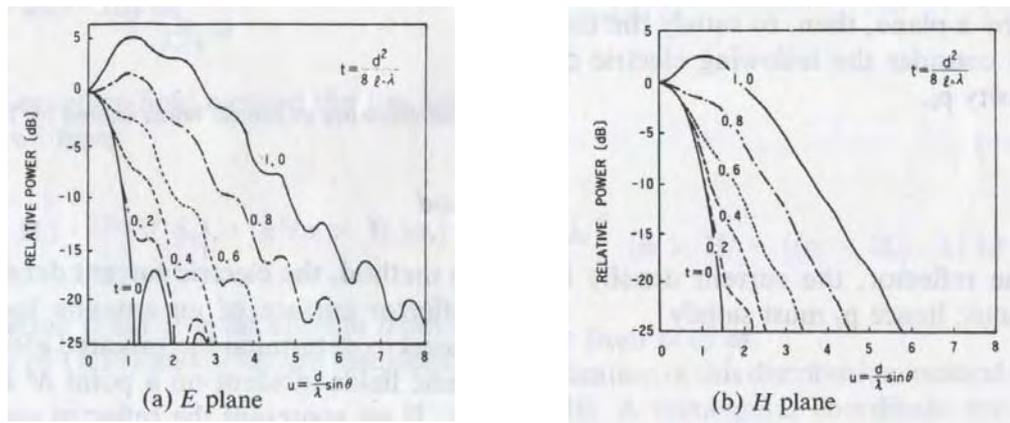


図5 円錐ホーンの放射パターン（設計値）

これらの設計資料を基に、楕円鏡の位置でE面/H面がガウスビームに近い放射パターンとなり、且つ、ビーム幅もほぼ等しくなる円錐ホーンを検討した。なお、設計パラメータ：tは小さくなる程、これらの条件を満たすが、ホーン長を無限大にすることは不可能である。従って、今回は $t=0.42$ となるように各寸法を設計した[9]。

試作した円錐ホーンの外形を図6に示す。また、放射パターンの実測値を図7に示す[9]。



図6 試作した円錐ホーン

図7から明らかなように、試作した円錐ホーンの放射パターンは、E面/H面がガウスビームとなり、且つ、ビーム幅もほぼ等しくなった。この電磁ホーンを使用することで、ガウスビーム光学に基づく光学系のアライメントが可能となった。

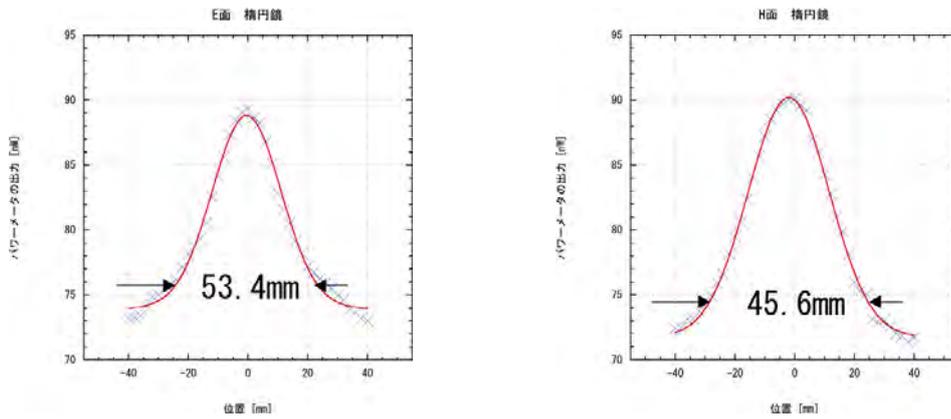


図 7 試作した円錐ホーンの放射パターン（実測値）

図8は、全ての光学系を据え付けた様子を示している。この時、各反射鏡を設置する位置周辺で放射パターンを計測し、ガウスビーム光学に基づく設計値と比較する。さらに、反射鏡が新しく設置される毎に雑音温度（Yファクタ）も実測した。その結果を図9に示す[9]。

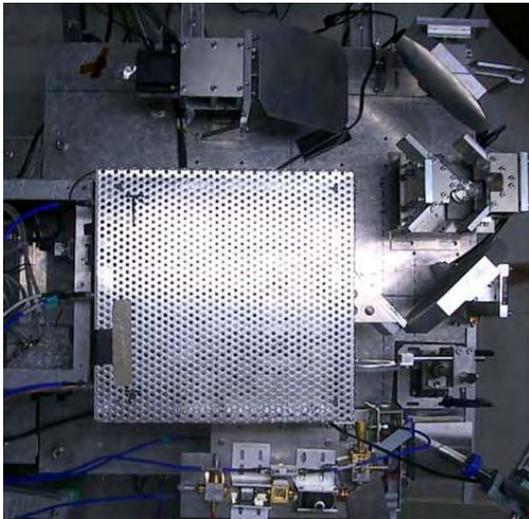


図 8 据え付けられた光学系

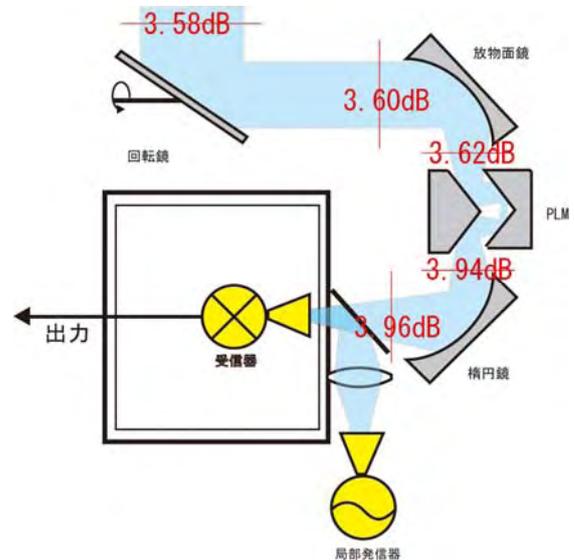


図 9 Yファクタの光学系による変化

図9より、S I S ミキサと電磁ホーンのみで構成した時のYファクタは3.96dBであった。この値を雑音温度に換算すると、約73Kとなる。そして、回転反射鏡まで含めた受信システム全体のYファクタは3.58dBとなり、総合雑音温度は約97kとなった。なお、光学系全体で反射鏡は7枚あり、1枚当たりの平均損失は0.05dBに収まった。名古屋における調整作業は、基本的にこれで完了した。

5. アタカマ高地での観測

名古屋で組立・調整されたミリ波大気観測装置は、南米チリ共和国のアタカマ高地（標高4800m、西経67度/南緯23度）に設置され、観測業務を実施することになった。アタカマ高地で大気観測の計画が立案された理由は、以下の通りである。

- 標高の高い場所なら、大気濃度が薄い。よって、酸素ガス等による吸収損失が低減できる。
- アタカマ高地は砂漠であるため、晴天率が高く、且つ、年間降水量も100mm以下である。従って、対流圏水蒸気による吸収損失も非常に小さくなる。

- アタカマ高地の周辺は、大型車両の通行可能な幹線道路が開通しており、アクセス性が良好である。この様にアタカマ高地は、世界で最もミリ波/サブミリ波による大気観測に適したサイトの一つである。なお、この優れた環境は電波天文の観測にも適しており、名古屋大学 理学研究科 天体物理学研究室の NANTEN 2 が観測を実施している。



図 10 アタカマ高地



図 11 観測所の外観

名古屋より輸送した観測装置の再組立・再調整は、2008年10月から現地で開始した。そして、名古屋で実測したYファクタの値が再現できれば、調整完了とした。調整の結果、その差を0.03dBまでに落とし込むことができた[9]。再調整した総合雑音温度は100Kとなり、この時点で試験観測を開始した。

まず観測対象にオゾン (O₃) を選んだ。O₃は中層大気に多く存在しており、そのスペクトル輝度は高い。よって、観測時間(積分時間)は短くできる。図12にO₃の観測結果を示す[9]。図12から明らかのように239.09GHzを中心周波数とするO₃の強いスペクトル分布が確認できた。この時、積分時間は僅か60秒であった。

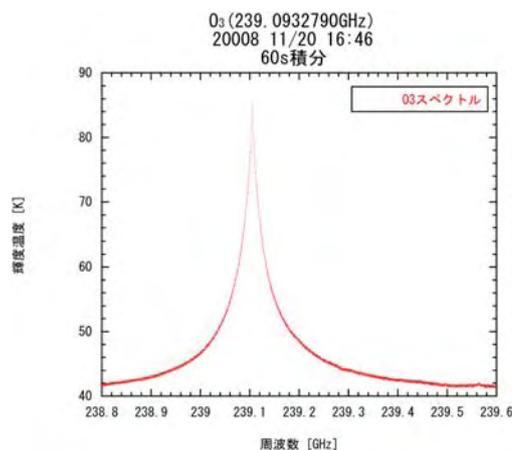


図 12 O₃の観測結果

次に選んだ観測対象は、亜酸化窒素 (N₂O) である。N₂Oは成層圏におけるNO_xの源であり、中層大気においては重要な微量分子である。このN₂Oは非常に安定な分子であるため、対流圏ではほとんど化学反応を起こさない。よって、長時間の観測でも、その濃度分布に変化の生じることは少ない。

図13にN₂Oの観測結果を示す[9]。図13から明らかのように251.21GHzを中心周波数とするN₂Oのスペクトル分布が確認できた。この時、積分時間は13000秒(3時間36分)であった。

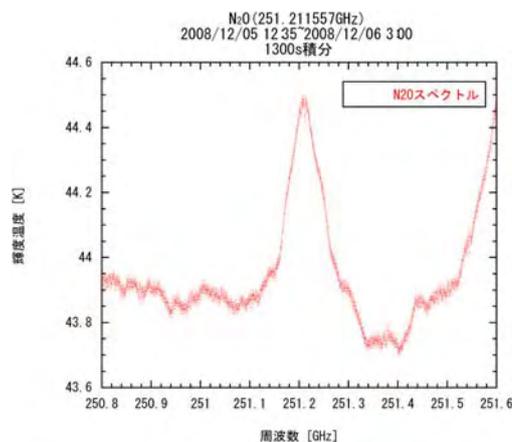


図 13 N₂Oの観測結果

二つの試験観測から、250GHz帯ミリ波観測装置の性能は、十分実用に供することが確認できた。

6. おわりに

2008年に南米チリ・アタカマ高地の観測サイトに据え付けたミリ波観測装置は、足掛け2年に亘るプロジェクトであった。この仕事を通じ、SISミキサや光学系の調整、冷凍機や真空装置の取扱いなど、多くのことを学ぶことができた。この経験は、技術の幅を広げる良い機会となり、たいへん有意義であった。

また、今回の発表では、多くのデータを太陽地球環境研究所 水野研究室の先生方から頂戴いたしました。ここに記して感謝申し上げます。

最後に2年間、一緒に作業をしてくれた卒業生の寺田 良平さまに感謝申し上げると共に、同氏の修士論文から多くのデータを流用致しましたこと、報告させていただきます。

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] 遠藤・佐藤・永井：アンテナ工学，総合電子出版社，1979年4月
- [7] 手代木・米山 編：新ミリ波技術，オーム社，1999年11月
- [8] 川上・松村・椎名：光波電波工学，コロナ社，1992年12月
- [9] 寺田 良平：250GHz 大気組成観測装置の開発，名古屋大学 修士論文，2009年3月
- [10] Takashi Kitsuregawa：Advanced Technology in Satellite Communication Antennas，Artech House，1990年1月