

A-1. オゾン層変動の総合的観測及び解析に関する研究

(1) 地上から総合的観測手法の開発とその評価に関する研究

② ミリ波分光法による ClO 及びオゾン測定手法の開発と評価に関する研究

研究代表者 名古屋大学理学部 小川英夫

環境庁国立環境研究所

地球環境研究グループ オゾン層研究チーム 中根英昭

委託先 名古屋大学理学部

小川英夫

福井康雄

水野 亮

平成 5～7 年予算額 74,727(千円)

[要旨]

本研究では大気微量物質特に ClO の観測を目的として周波数 200GHz 帯での超伝導ミキサを使用した低雑音受信器の開発を行った。このために我々は 200GHz ミキサマウント、SIS 素子、バックショート、70～80GHz 帯局部発振器用ガン発振器、同 3 通倍器等の開発を行った。

現在、これらを用いた 200GHz 帯超伝導ミキサを使用した受信器の 60K(DSB)の雑音特性が得られている。これによって、このミキサを使用した ClO 観測用受信器製作の見通しを得た。

又、広帯域(250MHz)音響光学型分光計を開発し、オゾン観測を従来の下限 35 km を 25 km にすることに成功した。

平成 7 年度に導入された環境研究所のミリ波オゾン分光観測システムと名古屋大学の 100GHz 帯ミリ波スペクトル観測装置を使用して同時観測を行った。その結果、成層圏から中間圏にかけての変動に 2 点間で同じような同じような変化傾向が見い出された。

[キーワード]

ClO、オゾン、ミリ波受信器、超伝導

1. 序

近年、フロン等の人工的物質の大気汚染による、成層圏に於けるオゾン破壊が社会問題になり、成層圏オゾンの高精度な測定が急務となっている。

現在行われているオゾン破壊に管する研究は、オゾン総量の時間変動を基とした現象論・運動学的解析が多い。その原因はオゾンその他の地球大気微量成分の下部成層圏から、上部成層圏、中間圏までの高度別の時間変動に関するデータが少ないことに起因していると思われる。下部成層圏でのオゾン変動は力学的過程が重要であるが、上部成層圏・中間圏でのオゾン量は化学過程により支配されている。よって高度別に出来る限り短いタイムコンスタントでオゾンを測定することは、オゾン化学的及び運動学的動向の解明にとって重要なデータを提供すると期待される。

ミリ波帯でのオゾン観測の利点は次の点にある。

- a. 高度 80 km にわたって、高度分布の測定が可能である。
- b. 輝線が観測するので、昼夜を問わずに観測出来る。
- c. エアロゾルの影響を受けず、多少の曇天でも観測可能であり、連続観測が容易である。

これらの事よりミリ波分光観測による微量大気成分の観測は中間圏・成層圏の研究にとって極めて重要である¹⁾²⁾。

そこで我々は 100GHz 帯波分光法による大気オゾンの観測装置を開発してきた。この装置は超伝導 SIS (Superconductor - Insulator - Superconductor) 素子を使用したもので量子限界 ($T = \frac{h\nu}{k}$: 6K at 110GHz) の 3 倍である 雑音温度 17 K (DSB) という低雑音である³⁾。

これによって高度 80km までのオゾン密度分布を諸外国では実現していない数分の積分時間で修得するのに成功した。この装置を用いた観測から、日の出、日の入時のオゾンの破壊と生成の進行状態が、高度別に詳しく調べられたり、この装置の雑音温度は現在諸外国で用いられている装置に比べて一桁以上小さい³⁾。

表 1 に現在稼働中のミリ波オゾン観測装置を示す。

これらの経験をもとに我々はミリ波 ClO スペクトル観測装置の開発を進める。

2. 研究目的

現在フロンによるオゾン層破壊の直接の原因である微量物質 ClO の観測 (278GHz) は、その反応現場をおさえることになり決定的に重要である。よって本研究では ClO 等の観測の為に 200GHz 帯での超伝導受信器の開発を主に行う。更に 200GHz 帯超低雑音受信器を用いることにより ClO の外に、N₂O (276GHz) HO₂ (266GHz) 等の観測も可能となる。現在までにマウナケア (ハワイ、NASA) 及びユングフラウ (アルプス、独ブレーメン大) 等での ClO モニター (定点観測)⁴⁾⁵⁾⁶⁾ が行われてきたが、いずれも半導体ミキサを使用したものであり S/N 比は不十分である。最近南極点で SIS を使用した ClO 測定装置が稼働を開始した⁶⁾⁷⁾。現在稼働中の ClO 観測装置を表 2 に示す。

我々は超伝導ミキサを使用することで、それらよりも低い雑音温度の受信器で(100K 以下)で観測を行い、高い時間分解でこれら微量分子のふるまいを明らかにして、オゾン動向との関係を解明することを目指す。

3. 200GHz 帯超伝導受信器の開発

我々は図 1 に示すように 200GHz 帯超伝導ミキサはファンダメンタル、ハーモニックの両面より開発を進めた。ここでは主にファンダメンタルミキサについて記す。

(1) 超伝導(SIS)ミキサマウントの製作

精度のよいミキサマウントを作ることは、SIS ミキサの低雑音化を図る上で必要不可欠である。我々は、100GHz 帯ミキサにおいて、高さ 150 ミクロンの高精度導波管を機械加工 (スリッティング・ソウ) によって製作している。この方法は、入出力インピーダンスの変更や、素子形状の多少の変化にも柔軟に即応でき、実験の便を大いに高めている。200GHz 帯ミキサとしては、導波管特性インピーダンスを 100 Ω 以下にすることが必要であり、これは導波管の高さを 120 ミクロン以下にしなければならないことを意味する。

100GHz 帯ミクサマウントの場合は、30 ミクロン厚の磷青銅板を特殊なジグを用いて加工し、直径 170 ミクロンの円筒状のバックショートを開発した。これを高さ 150 ミクロンの導波管にぴったりとフィットさせることによって、より損失の少ないインピーダンス整合が可能となった。200GHz 帯では、波長が約半分になるのに伴い、バックショートの直径も約 2 分の 1 (100 ミクロン) に小型化することが必要である。そのために、加工に用いる数値制御ワイヤー放電加工機の高精度化、ジグ類の開発を行い、達成することができた。製作したミクサマウントの断面図を図 2 に示す。

(2) SIS 接合の製作

高周波化にともなって、接合の容量を減少させることが必要不可欠である。しかし、SIS 接合の直径を小さくすることにより容量の減少を図ることは、薄膜加工技術上の限界がある。接合はフォトリソグラフィによって作られるため、0.2 ミクロン程度が加工精度の限界である。しかし実際は直径 1.0 ミクロン以下にすると分留りが悪くなり現実的ではない。高い再現性をもって実用機を製作するためには、接合の製作における分留まりを向上させることが必要不可欠なポイントである。そこで我々は、接合径としては直径 1.5 ミクロンの接合を用いるが (100GHz 帯では直径 2.5 ミクロン)、8 個直列にした素子を用いることにより容量を減らす計画である。実際、現在 1.5 ミクロン径の SIS 接合の試作を富士通研究所において進めているが、分留り 60% 以上で目標とする接合容量 30fF、直流抵抗値 50 Ω の SIS 接合が実現された。

図 3 に SIS 素子の電圧電流特性を示す。これにより 200GHz 帯に於いての良好な特性を確認した。

(3) 200GHz 帯超伝導受信器の雑音特性

上記ミクサマウントは、実験室において 4 K に冷却し、雑音特性を測定した。この際局部発振器は前年開発した 70GHz 帯 Gunn 発振器と 3 通倍器を用い、結合方式としてはハーフミラーによるビームスプリッター方式とした (図 1)。SIS ミクサよりの中間周波信号は 4 K 冷却の低雑音の HEMT 増巾器を用いた。図 4 には、雑音特性の時のバイアス電圧に対する中間周波出力を示す。300K 及び 80 K とは、それぞれの黒体に対する出力を表わしている。これらの値より求めた雑音温度を図 5 に示す。図 6 には第 1 中間周波数に対する受信器雑音温度を示す。現在のベストデータは 220GHz で 60 K の値を得ている。この値は、量子限界 (11 K at 220GHz) の約 5 倍値であり、現在更に下げるべく実験を続行中である。

(4) 局部発振器の開発

CIO の局発系 (ファンダメンタル用) については、図 1 に示すように通倍出力を用いる方式を開発した。局部発振器は、ガン発振器をアイソレイトを通して 3 通倍器に入力される。通倍器出力で 1 ミリワット以上の出力が必要である。今回開発した 3 通倍器出力は図 7 に示すように、CIO 周波数である 270GHz 付近では 5% 前後である。

このためのガン発振器電力としては、20mW 以上の出力が必要とされる。現在、図 8 に示すように開発したガン発振器は 71~78GHz での 30mW 以上の出力が得られている。この周波数帯での見通しができ、さらに周波数帯 90Hz 帯までのガン発振器の開発を行っている。

今回開発したガン発振器の基準周波数へのフェーズロックの方式は図 10 中に示した方式と同じである。すなわち、ガン発振器からの出力の一部を 20dB の方向性結合器で取り出す。一方、周波数シンセサイザーからの信号をロックドオシレーターで約 60 倍の周波数にした後、上記のガン信号とハーモニックミクサに導入する。このハーモニックミクサでフェーズロックの部分の中間周波数信号(300MHz)が取り出せるようにした。

この 300MHz の信号をフェーズロックコントローラに導入することでガン発振器の信号にフェーズロックすることができた。こうしてミクサ部分の局発信号を得ることができた。

この信号をいかにして超伝導ミクサに導くかについては、当初は 200GHz 帯クロスガイドカプラを製作して、これによって注入する方式を考えた。200GHz 帯のクロスガイドカプラは導波管サイズ 1 ミリ×0.5 ミリを採用し、製作を行った。しかしながら、その結合度は期待通りの約 20dB の値が得られたが、信号が伝播する導波管での通過損失は約 3dB 前後の値となって、等価的に受信雑音が 2 倍以上になるために、クロスガイドカプラの採用は見送った。

そして局発電力の結合方式としては図 1 に示すようにビームスプリッター方式を用いることにした。SIS ミクサのホーン前のデュワ入り口に入射方向に対して 45° の傾斜されたテフロンフィルムを設置することによって、局発信号を導く方式、となっている。テフロンの厚みを、変化させることで反射損失、通過損失等を考慮して、現在の局発能力では 100 μ m の厚みが適当であるという結論を得た。

4. 100GHz 帯超伝導受信器によるオゾン観測及び同装置の広帯域化開発

(1) オゾン観測装置

ミリ波オゾン観測装置はアンテナ・ミリ波受信器・電波分光器・制御用計算機からなる。図 9 は装置全体のブロックダイアグラムを示す。アンテナは直径 10 cm のオフセットパラボラで、ステッピングモータを用いて回転させることによって、任意の高度、室温の電波吸収体、低温の電波吸収体に向けることが出来る。低温電波吸収体はその中心部は 20K 迄ヘリウム冷却された電波吸収体、その周りの室温の吸収体から構成されており、アンテナの回転によって 20K 部分と室温部分の照射の割合を変えることによって、総合して任意の輝度温度が得られるようになっている。ロードスイッチング方式による観測に際しては、低温電波吸収体の輝度温度を空の輝度温度とほぼ等しくして観測する。

大気中のオゾンからの輝線はアンテナからホーンを通して SIS ミクサへ導かれる。このミクサは二つのバックショートを持ち、これによって整合を取ると共に受信器に片サイドバンド特性を持たしている。SIS ミクサによってこの電波は 1.55GHz の中間周波に変換され、20K に冷却された雑音温度 15K の HEMT 前置増幅器により増幅され、主増幅器によってさらに増幅されて、375MHz の第 2 中間周波に変換される。ここで更に増幅して、周波数 375MHz の第 3 中間周波に変換・増幅して、音響光学型電波分光計に導くようになっている。

名古屋大学で現在稼働中のオゾンミリ波測定装置と同様の装置が平成 7 年度に国立環境研に導入された。これによって名古屋と筑波で同種装置で同時観測を全く独立に行うことが出来、平成 7 年には約 2 ケ月間にわたってこれを実行した。

結果を図 10 に示す。

これにより名古屋と筑波ではほぼ同様な変化傾向があることが確認された。

これはポテンシャル渦度データ等、他のデータとの比較を通じて更に解析をする必要がある。このような長期にわたる中緯度での同時観測は今だほとんど行われておらず、オゾンの輸送過程の研究に新しい一面をひらくものであると考えられる。

(2) 広帯域音響光学分光計の開発

現在の名古屋大学でのミリ波オゾンスペクトル観測装置では、高度約 35~75 kmにあるオゾンが観測対象となっているが、今後、この観測高度領域の拡張を行うために、まず従来よりも低い高度領域のオゾンの観測を試みた。

ミリ波分光法ではオゾン分子の発するミリ波帯のスペクトルを観測する。観測されるスペクトルは大気の圧力によって、幅の広がったものとなる(圧力幅)。そして、この圧力(高度)とスペクトルの幅(圧力幅)の関係からオゾンの高度分布を求めることができる。大気の圧力が大きいほどスペクトルの幅が広がることから低い高度領域のオゾンの観測を行うためには観測周波数帯域の幅を広げる必要がある。そこで、初めに従来よりも広い周波数帯域幅をもつ分光計の製作を行った。

この観測装置では分光計に音響光学型分光計(AOS)を使用している。この分光計の原理は次の通り。オゾンからの信号を周波数変換、増幅した後、光偏向素子に入力する。ここにレーザー光を照射してレーザー光に回折を生じさせ、この回折光を一次元配列の受光素子で受光する。このときの回折光の回折角が信号の周波数に、回折光の強度が信号の強度にそれぞれ対応することを利用して分光を行うというものである。ここでは光源としてHe-Neレーザー(波長632.8nm)、受光素子としての2048チャンネルのCCDを使用している。

今回製作した分光計(以後、広帯域型と記す)で使用した光偏向素子は偏向帯域幅250MHz、分解点数800点のものであり、分光計の分解能は357kHzであった。ちなみに襲来の分光計(以後、高分解能型と記す)では偏向帯域幅60MHz、分解点数1900点の光偏向素子を使用、分光計の分解能は37kHzである。また、光偏向素子の材質はどちらも二酸化テルル単結晶である。

この広帯域分光計を使用して観測を行った結果(図11)、高度約25~65kmのオゾン高度分布を得ることができた。また、高分解能分光計を用いた観測と重なる高度領域(高度35~60km)では非常に良く一致した結果が得られた(図12)。この結果はこれら2つの分光計による同時分光システムの開発に向けて非常に有利な結果であると考えられる。

5. まとめ

本研究では、ClO観測を目的として200GHz帯超伝導受信器の開発を主に行った。

この結果、受信器雑音温度60Kを達成することに成功した。これによって現在稼働中のClO測定器よりもより高精度な受信器の製作の見通しを得た。更に現在稼働中のミリ波オゾン測定装置の分光計改良することにより、観測下限を25kmにすることが可能となった。又、国立環境研のオゾン観測装置と名古屋の同装置の同時観測を行うことでオゾンの輸送過程の解明に新たなデータを供給することができるようになった。

これらよりオゾン変動の諸要因がより明瞭に分離されることなどが期待される。

6. 参考文献

- 1) Ricaud, Ph., Brillet, J., J. de La Noe, and J. P. Parisot,

- "Diurnal and seasonal variations of strato-mesospheric ozone: analysis of ground-based microwave measurements in Bordeaux, France",
J. Geophys. Res., **96**, 18617-18629.
- 2) Zommerfelds, W. C., K. F. Kunzi, M. E. Summers, R. M. Bevilacqua, D. F. Strobel, M. Allen and W. J. Sawchuck(1989),
"Diurnal variations of mesospheric ozone obtained by ground-based microwave radiometry",
J. Geophys. Res., **94(D10)**, 12819-12832.
- 3) Ogawa, H. (1994),
"A 110-115 GHz SIS Receiver for Radio Astronomy",
16th International Conference on Infrared and Millimeter Waves,
eds. M. R. Slegrists, M. Q. Tran and T. N. Tran, pp. 133-134.
- 4) Kawabata, K., Y. Fukui, H. Ogawa, A. Mizuno, M. Fujimoto, S. Nozawa, H. Nakane, H. Hoko and Ji. Yang(1992),
"Observations of ozone mixing ratio by Nagoya 4m millimeterwave telescope",
J. Geomag. Geoelectr., **44**, 1085 - 1096.
- 5) Kawabata, K., H. Ogawa and Y. Yonekura(1994),
"Ground-based millimeterwave measurements of mesospheric and stratospheric ozone employing an SIS mixer receiver",
Journal of Geomagnetism and Geoelectricity, **46**, 755-770.
- 6) De La Noe, J. (1994),
"Remote sensing of stratospheric ozone by ground-based microwave radiometers",
IGRASS' 94.
- 7) Emmons, L. K., D. T. Shindell, J. M. Reeves and R. L. de Zafra(1995),
"Stratospheric ClO profiles from McMurdo Station, Antarctica, spring 1992"
J. Geophys. Res., **100(D2)**, 3049.
- 8) Zafra, R. L., J. M. Reeves and D. T. Shindell(1995),
"Chlorine monoxide in the Antarctic spring vortex 1. Evolution of midday vertical profiles over McMurdo Station",
J. Geophys. Res., **100(D7)**, 13999.
- 9) Ricaud, Ph., J. de La Noe and R. Lauque(1995),
"Preliminary analysis of chlorine monoxide measurements made by the ground-based microwave receivers of the Plateau de Bure, France",
IGRASS' 94, 1681.
- 10) Schwaab, G. W., U. Klein, K. Kunzi and U. Raffalski(1995),
"Millimeter-wave measurements at the arctic NDSC station Ny-Alesund in the winters 1992/1993 and 1993/1994",
IGRASS' 94, 1690.
- 11) Gerber, L. and N. Kampfer(1995),
"Millimeter measurements of stratospheric ClO at the Jungfraujoch station",
IGRASS' 94, 1687

7. 研究発表の状況

誌上発表：(○印は査読誌)

- Kawabata, K., H. Ogawa and Y. Yonekura(1994),

"Ground-based millimeterwave measurements of mesospheric and stratospheric ozone employing an SIS mixer receiver"., J. Geomag. Geoelectr., **46**, 755 - 770, 1994

- Kawabata, K., H. Ogawa and Y. Yonekura(1994), "Ground-based millimeterwave measurements of stratomesospheric ozone"., J. Geomag. Geoelectr., submitted November 1994.
- Ogawa, H., Y. Yonekura, K. Kawabata, H. Suzuki, M. Suzuki and H. Nakane(1994), "Development of millimeterwave instruments for measurements of stratomesospheric minor components using superconductive receiver"., J. Geomag. Geoelectr., submitted November 1994.
- Ogawa, H., K. Kawabata, Y. Yonekura, Y. Iwasaki and H. Nakane(1995), "Diurnal and Seasonal Variation of Strato-Mesospheric Ozone"., J. Geomag. Geoelectr., submitted in 1995.

口頭発表:

福井康雄, 水野 亮, 鈴木和司, 小林和宏, 小川英夫(名古屋大学), 鈴木秀雄(富士通研究所), 鈴木実(富士通VLSI),

"200GHz~300GHz帯超伝導ミキサ受信器の開発"., 日本天文学会1994年春季年会

鈴木秀雄, 今村 健(富士通研究所), 鈴木 実(富士通VLSI), 小川英夫, 福井康雄(名古屋大学), "200GHz帯 SISミキサの開発"., 応用物理学会, 1994年春季

Ogawa, H., Y. Yonekura, K. Kawabata, H. Suzuki and M. Suzuki(1994), "Development of millimeterwave instruments of strato-measospheric minor components using super conductive receiver"., Proceedings of Eighth International Symposium on Solar Terrestrial Physics

Kawabata, K., H. Ogawa and Y. Yonekura(1994), "Ground-based millimeterwave measurements of strato-mesospheric ozone"., Proceedings of Eighth International Symposium on Solar Terrestrial Physics

Suzuki, H., T. Imamura, N. Yokoyama, M. Suzuki, H. Ogawa, K. Kawabata and Y. Fukui(1994), "Applications of mm-Wave SIS Mixers to Middle Atmosphere Monitoring Systems"., Applied Superconductor Conference

小川英夫、河鯨公昭(名古屋大学)
"成層圏・中間圏オゾンのミリ波観測"
第5回大気化学シンポジウム 1995年1月9日-10日

前川昇司、小川英夫、河鯨公昭、福井康雄(名古屋大学)、中根英昭(国立環境研)
"超伝導ミキサを使用したミリ波分光法による大気オゾンの測定"
第98回地球電磁気・地球惑星圏学会1995秋

小川英夫、河鯨公昭、米倉覚則、前川昇司(名古屋大学)、中根英昭(国立環境研)
"超伝導受信器を用いた成層圏・中間圏における微量成分のミリ波観測装置の開発"
第6回STEPシンポジウム、1995年11月15日-18日

Ogawa, H. (1996), "Ground-Based Millimeter-wave measurements of Atmospheric Ozone Employing Superconductive Mixer Receiver", JRDC Forum for Multi-disciplinary Reseachers, Feb. 12-16

表1 各地のオゾン用ミリ波観測装置

T_{sys} 欄が受信器雑音温度を示す。Tsukuba 以外は参考文献 5) による。

Institute / Location	Freq. GHz	Mixer	Cooled K	Band	T _{sys} K	Spectrometer MHz	
NASA / T.M.O.	110.8 109.5	SD	15	SSB	340	630	FB
Bordeaux	110.8	SD	20	SSB	480	128	FB
Onsala	110.8	SD	15	SSB	300	512	FB & AOS
Helsinki	110.8	SD	20	SSB	530	1000	AOS
Nagoya	110.8	SIS	4	DSB	23	51	AOS
	110.8	SIS	4	SSB	34	51	
Bremen / Ny-Alesund	110.8	SD	12.5	SSB	690	950	AOS
	142.2	SD	12.5	SSB	590	950	
Bern	142.2	SD	no	DSB	1300	1200	FB
			25	DSB	700	1200	
Moscow / Puschino	142.2	SD	20	SSB	1000	64	FB
SUNY / South Pole	276.9	SD	20		650	512	FB
NIES / Tsukuba	110.8	SIS	4	SSB	34	60	AOS

SD : Schottky Diode mixer

SIS : Superconductor-Insulator-Superconductor mixer

FB : Filter Bank Spectrometer

AOS : Acousto-Optical Spectrometer

表2 各地のC I O用ミリ波観測装置

Location	Frequency GHz	Mixer	Cooled K	Band	T _{sys} K	Spectrometer MHz		Referance
Mauna Kea (4200m)	278.631	SD	(20)	(SSB)	(850)	(128)	FB	8)
Plateau de Bure (2550m)	278.631	SD	20	SSB	850	128	FB	8)
Ny-Alesund (~10m)	204.352	SD	15	SSB	1100	945	AOS	9)
Jungfraujoch (3580m)	204.352	SD	20-40	SSB	1200	400	FB	10)
McMurdo Sta. South Pole	278.631	SIS	4.5		350	600	AOS	6, 7)

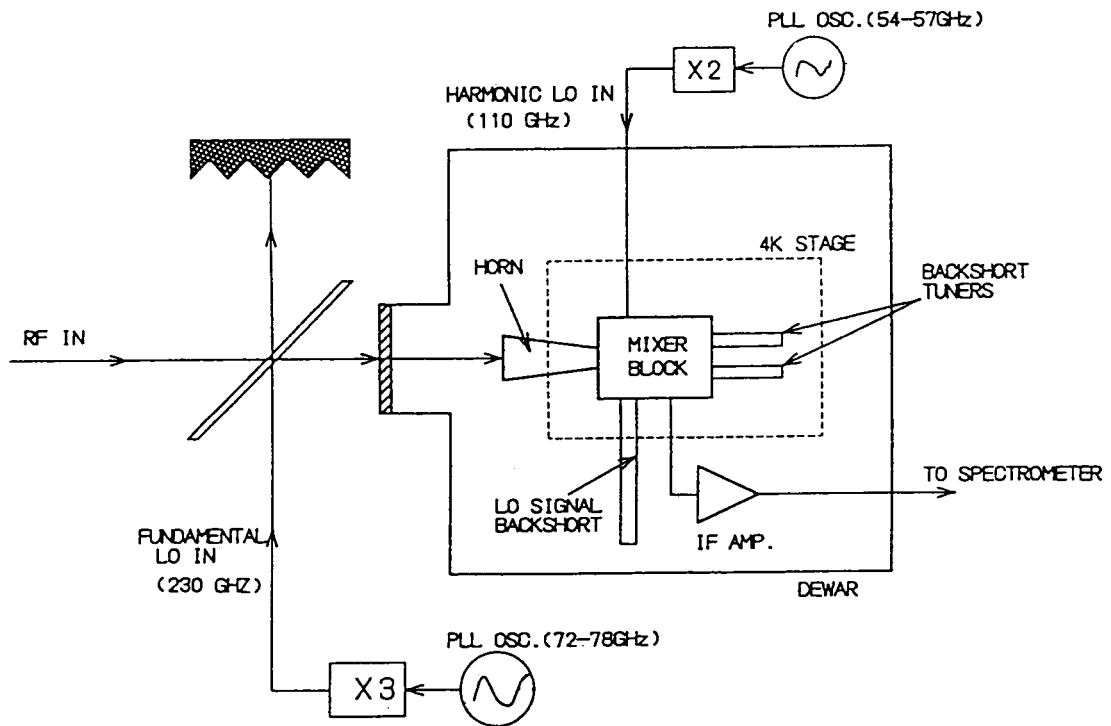


図1. 200GHz 超伝導受信器フロントエンド部のブロックダイアグラム

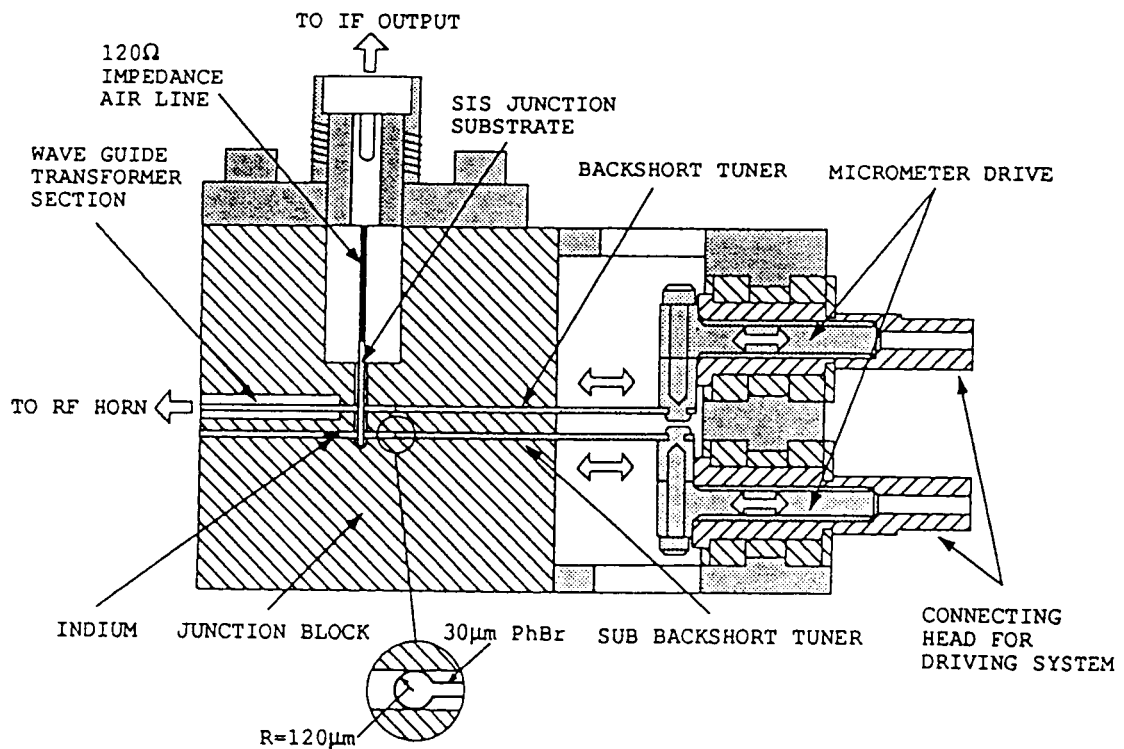


図2. 200GHz 帯ミキサマウントの断面図
(Junction Block は 2cm×2cm)

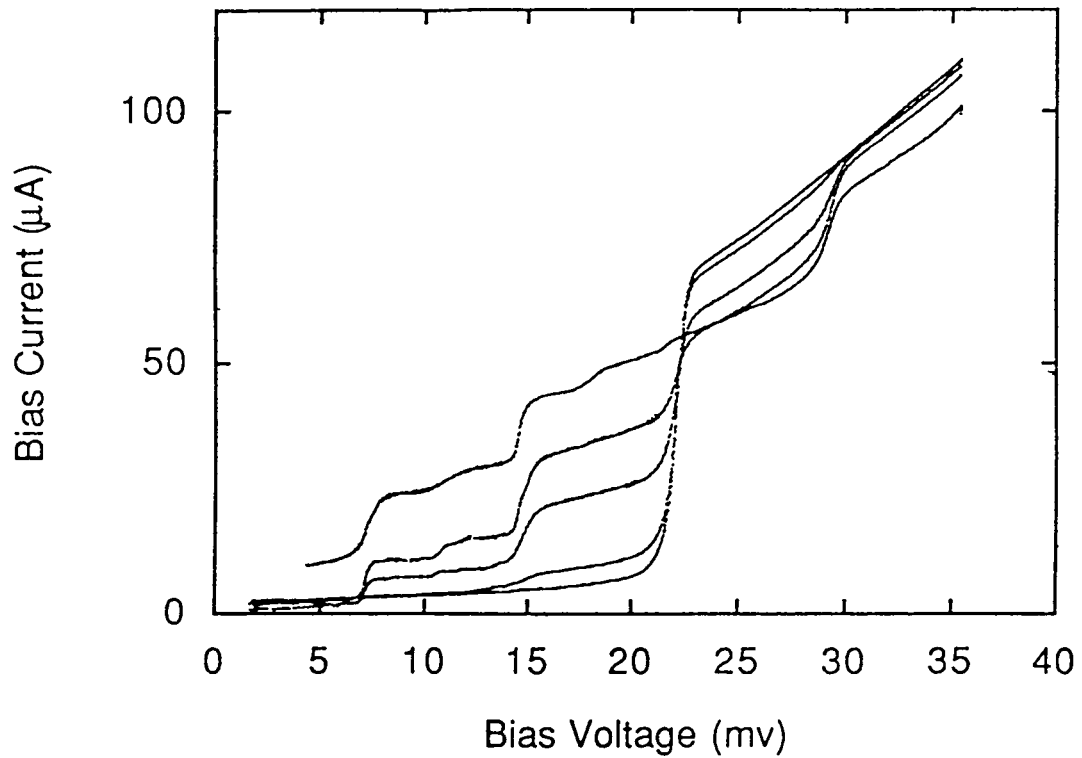


図 3. 200GHz 帯超伝導ミキサの電圧電流特性
 (局部発振電力を変化させた時の特性を示す
 ステップ状の形は 200GHz 帯光子によるトンネル特性を示す)

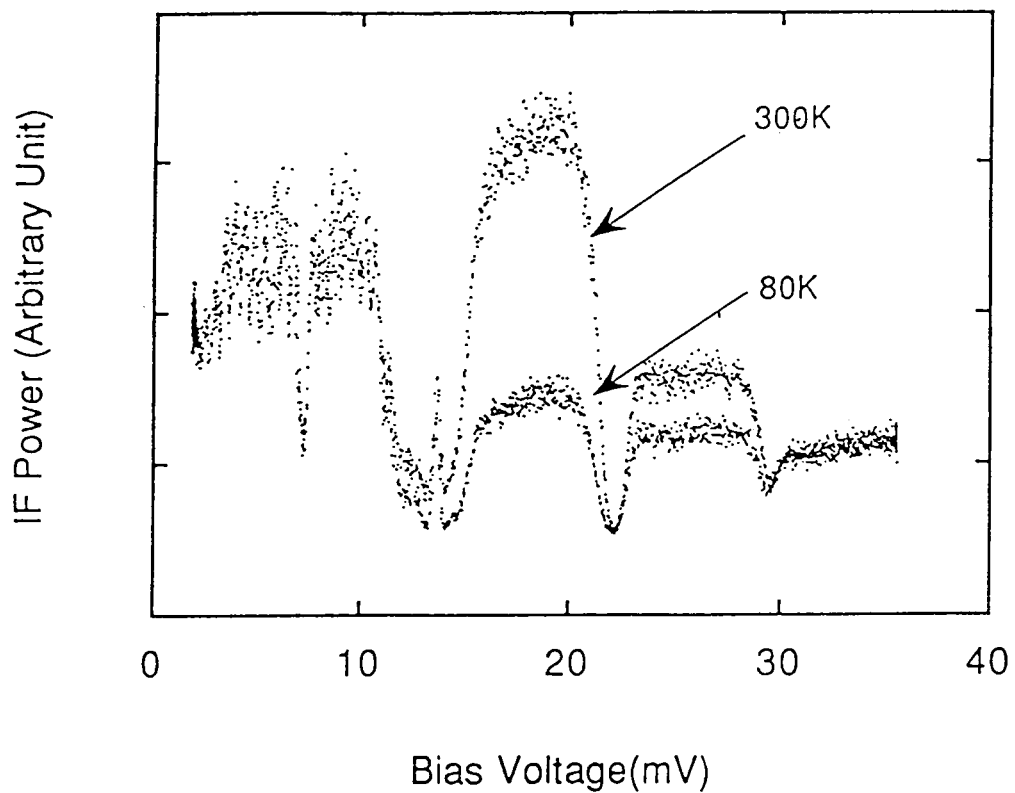


図 4. 200GHz 帯超伝導受信器のバイアス電圧に対する中間周波出力特性
 (300K, 80K はそれらの値の黒体輻射に対する出力を示す)

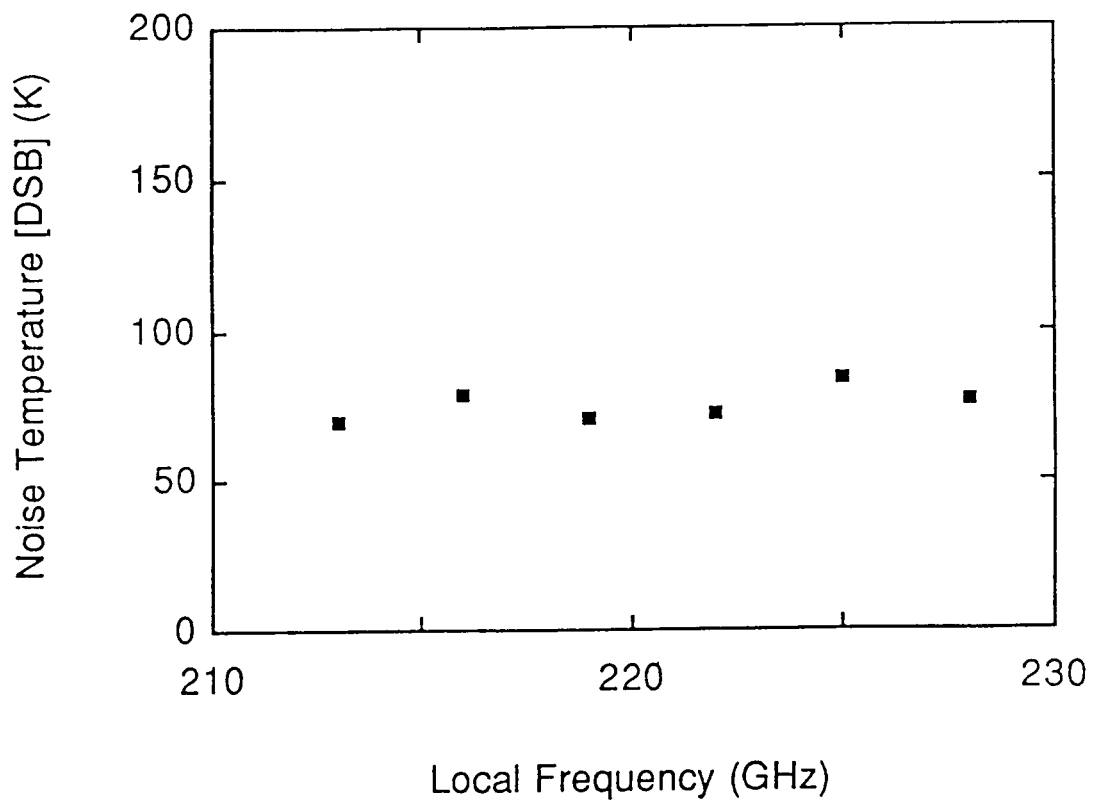


図5. 局部発振周波数(210~230GHz)に対する200GHz帯受信器の雑音温度特性

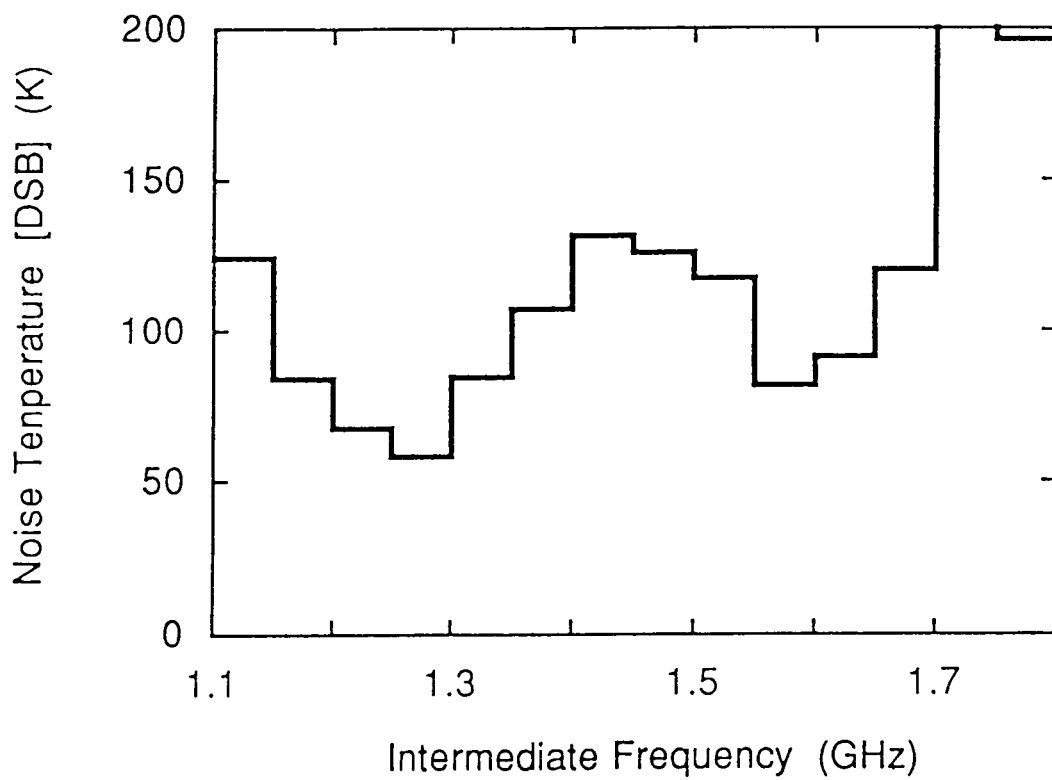


図6. 第一中間周波数(1.2~1.7GHz)に対する200GHz帯受信器雑音特性

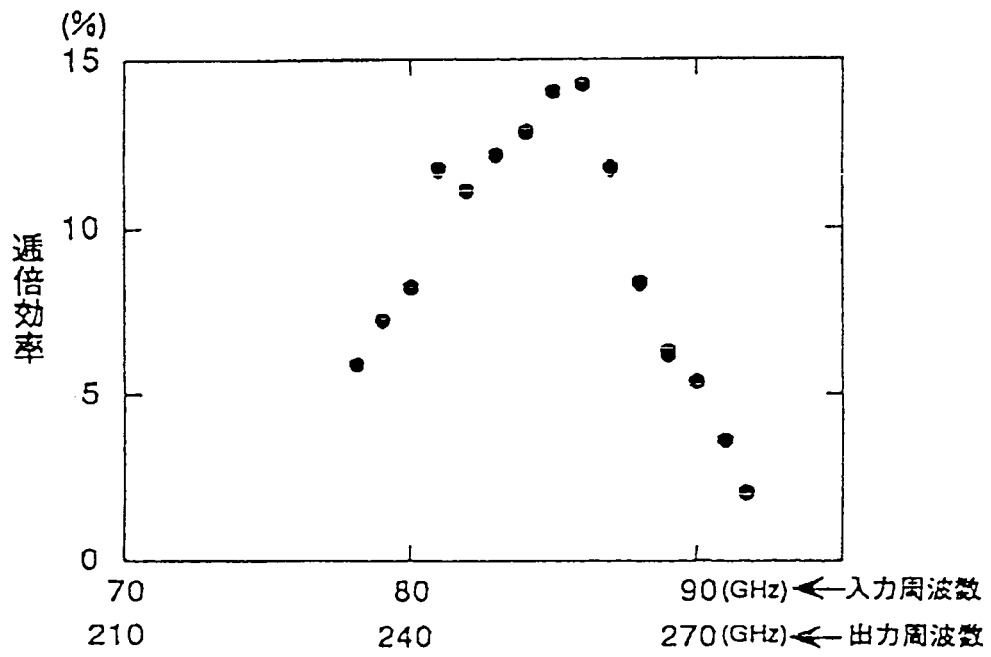


図7. 局部発振器用3通倍器の効率
(80GHz帯入力、240GHz帯出力)

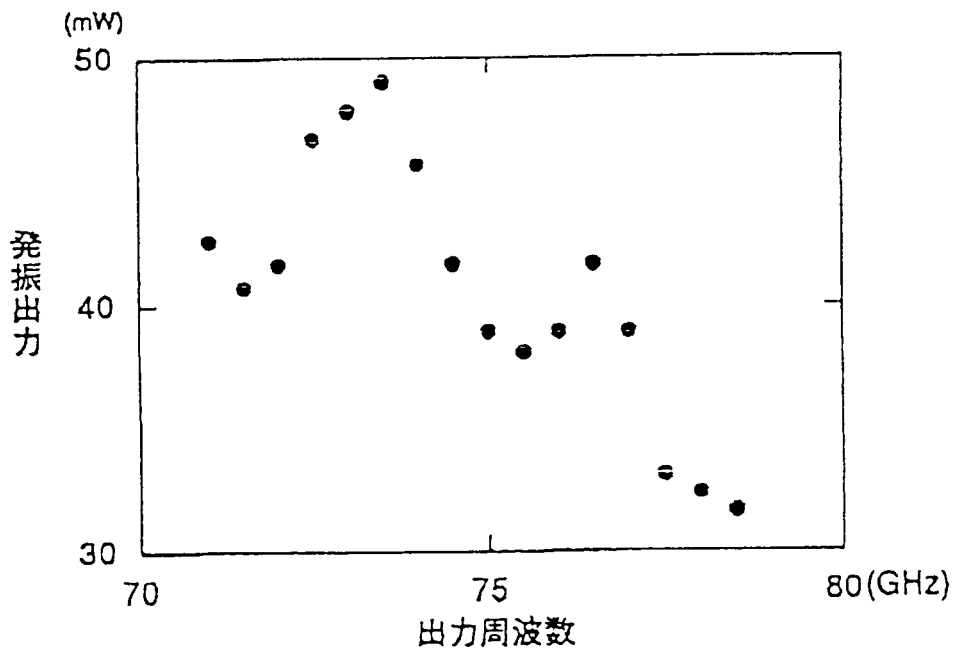


図8. 局部発振器用ガン発振器の出力特性(70~80GHz帯)

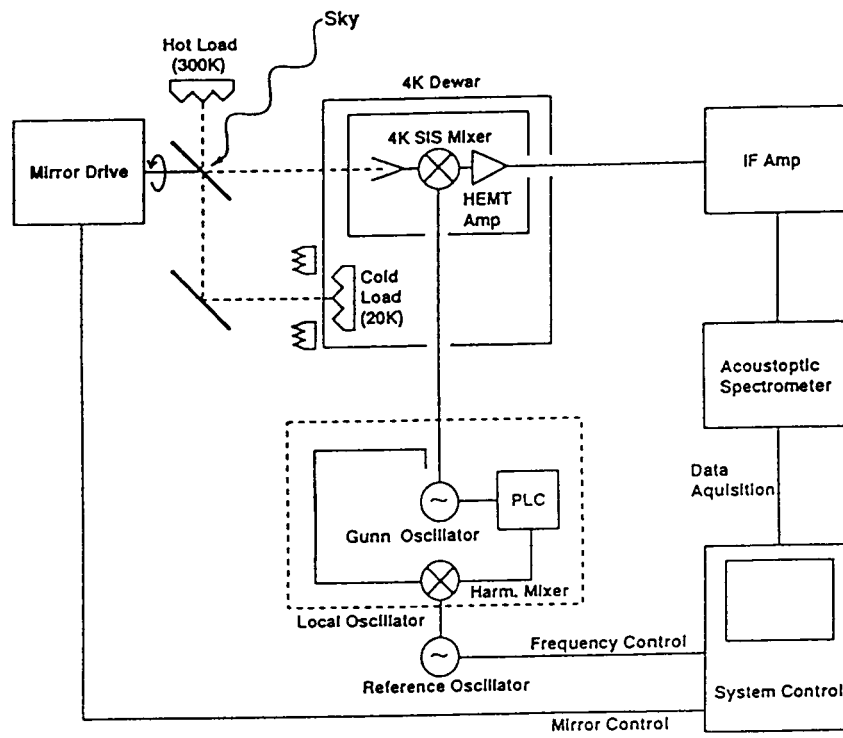


図9. 100GHz帯オゾンスペクトル観測装置のブロックダイアグラム

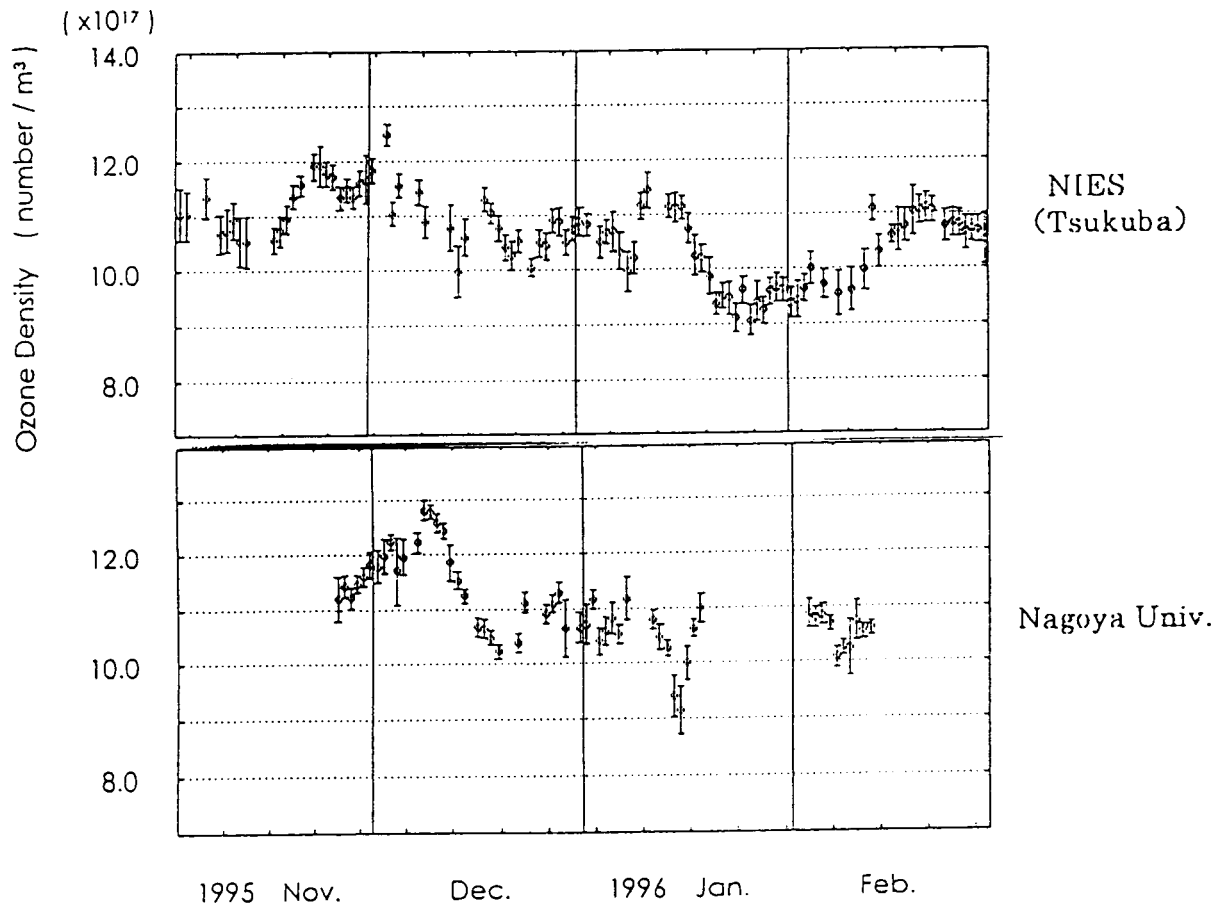


図10. 国立環境研究所及び名古屋大学の100GHz帯観測装置で観測されたオゾンスペクトルの時間変化 (高度37km、午前9時～午後3時までの積分値)

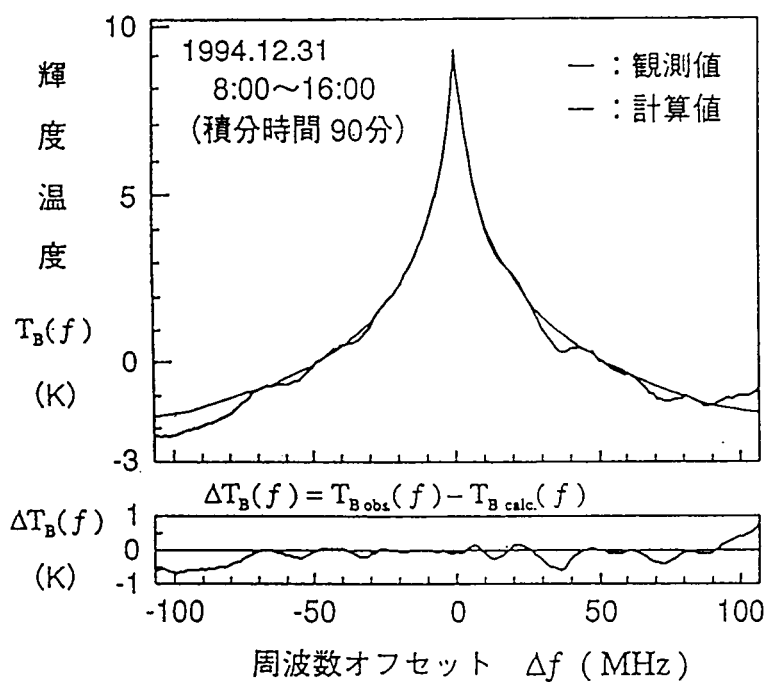


図 11. 広帯域(250MHz 帯域巾) 音響光学型分光計上でのオゾンのスペクトル

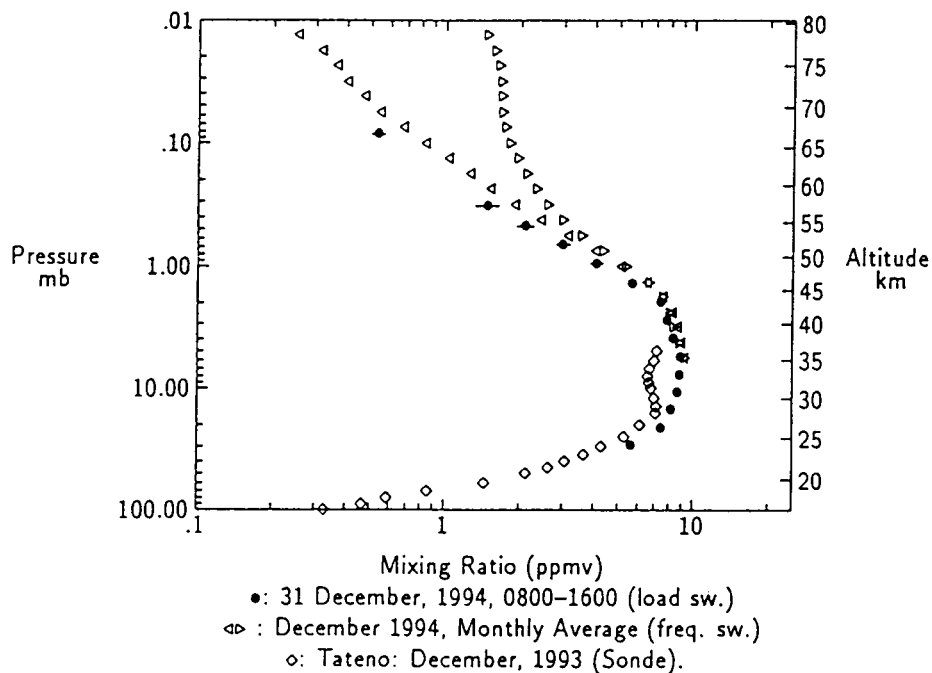


図 12. 100GHz 帯オゾン用ミリ波観測装置で測定した高度分布
(● : 250MHz 帯域巾音響光学型分光計による
◄▷ : 90MHz 帯域巾音響光学型分光計による)