

名古屋大学大学院理学研究科 教授

福井 康雄

「超伝導受信器を用いたオゾン等の大気微量分子の
高度分布測定装置の開発」

1. 研究実施の内容

オゾン層破壊は、生態系の遺伝子を壊す紫外線透過量の増加をもたらす深刻な問題である。1980年代には70年代には見られなかったオゾン全量の著しい減少トレンドが明らかになり、その傾向は90年代にはますます深刻化した。1995年には人為的オゾン層破壊の主要な原因と考えられている特定フロンが全廃され、成層圏のオゾン量には増加傾向がみられているが、太陽活動の活発化に伴いオゾン量が増加した可能性も否定できず、長期にわたってオゾンの増減の測定さらにはオゾン変動の原因を監視するためのモニタリングが重要とされている。最近では衛星を用いたオゾン全量のグローバルなデータが供給されるようになってきた。しかし、成層圏変動の早期検知とその変化の原因を明らかにするためには、地上からの詳細な高度分布測定が衛星の大局的測定と並んで欠くことのできないものである。

本研究は、そのような背景のもとで、ミリ波の超伝導受信機を搭載した高感度の大気微量分子測定システムを開発し、南米チリ共和国において南半球中緯度帯におけるオゾンおよびその破壊物質とされるClO分子の高度分布モニタリングを行い、オゾン破壊の現状とその要因を把握するための基礎データを取得することを目的としている。

ミリ波による測定は、太陽などの他の光源を必要とせず昼夜にわたって24時間連続してデータが取得可能であることが大きな特長である。また、エアロゾルの影響を受けにくく、多少の曇天であってもデータの取得が可能である。現在問題になっているフロンによる成層圏オゾンの破壊は、フロンの光解離が起こる太陽紫外線（波長190nm）の侵入高度である40km前後で起こると考えられている。この高度は、オゾンが最も多く生成される領域であるために、オゾンの生成率がClOの触媒作用により直接弱められ、オゾン減少の一因になると考えられている。また、南極の春に極渦の内側で起きるオゾンホールは、オゾンゾンデ観測等により高度20km前後の下部成層圏で起こっていることが明らかになっている。また、この高度でオゾンを直接破壊するClOが、気相反応では全く生成できない程度にまで著しく増大すること、さらに、空間的な輸送効果によっても説明できないことなどが、続々と判明してきた。現在、南極のClO濃度の異常な増加は、190K以下の低温中で生成したエアロゾルからなる極域成層圏雲（PSC）中の表面反応によると説明されている。これらの現象は、当初極域特有なものであると考えられていたが、近年では、中低緯度から極への物質流入から始まり、極渦の崩壊とともにオゾンの少ない極域から中低緯度への拡散で終わる、一連の大気物理化学過程として理解されるべきとの考え方が支配的になりつつある。このように、世界的に見られるオゾン層の減少は、複雑なメカニズムによって支配されている可能性が高く、これまでに測定データが無い南半球中緯度帯での基礎データを取得する意義は大きい。本研究で用いる地上観測装置に要請される課題は、それぞれ異なるメカニズムでオゾンが破壊されると考えられている高度20km付近と40km付近の両範囲をカバーし、同一地点でオゾン、ClOの高度別、時間別分布を精度良く観測することである。

我々は、5年間の研究期間を通して、200GHz帯の超伝導受信機の高感度化と安定化を徹底して追求し開発を進めた。そして開発した観測システムを1999年12月に標高2,400mの南米チリのラス・カンパナス天文台に設置し、同装置により2000年10月、世界で初めて南半球中緯度帯においてオゾン破壊のメカニズムを解明する上で鍵を握るClOスペクトルの検出に成功した。我々の開発した装置により、それまで24時間以上の積分が必要とされていたスペクトルが、数時間の積分で取得可能になり、長期間にわたって安定したデータ取得が可能となった。

開発は200GHz帯超伝導ミキサの開発から始まり、初年度の段階で実験室において雑音温度50K、サイドバンド比 $\sim 15\text{dB}$ （ともに220-240GHzの値）の高感度受信機を完成させた。さらに超伝導受信機を安定に冷却するための小型4Kクライオスタットおよび大気からの電波を集光し超伝導受信機へ導入するビーム伝送光学系の設計・製作を行なった。特にビーム伝送系の開発では、測定結果のスペクトルベースラインに悪影響を与える定在波を極力抑えるために、4枚の鏡を用い、光路を半波長だけ周期的（5Hz程度）に変化させることにより位相をキャンセルする光路長変調器を開発し、定在波に起因するベースラインのうねりを10分の1以下に逡減することができた。

1999年に観測システムを南米中緯度帯の標高2,400mにあるラス・カンパナス天文台に設置し、試験観測を開始した。当初は100GHz帯のオゾンスペクトルの観測から開始し、システム全体の調整を行った。2000年度には受信機を200GHz帯に交換し、さらにスペクトルを分光する音響光学型分光計も従来の250MHzの2倍の帯域をもつ500MHz、その1年後の2001年にはさらにその2倍の1000MHz帯域の分光計を開発し、実用化した。特に1000MHz帯域分光計では、参照光源をHe-Neレーザから、より出力が高く、出力安定度の高い半導体レーザに変更しさらなる安定化をはかった。また、使用する音響光学型分光素子の特性を調べ、信号入力レベルが2mWを超えるとベースラインに $\pm 100\text{mK}$ 以上のうねりが生ずることが判明したため、適性な信号入力レベルで十分な強度の回折光出力が得られるように分光計光学系の変更を行った。上記の開発により、測定高度の下限を14kmまで下げることが可能となり、南極オゾンホール内のPSCに起因するオゾン破壊に関連する高度20km前後のClO測定にも対応可能となった。

また、装置の非線形性の影響を低減するために、バランス観測法、エレベーションスイッチ観測法等の観測手法の改善に取り組んだ。エレベーションスイッチ観測法は天頂近くと仰角 20° 付近の視野を交互に観測し、その出力の差を取ることで、ClOスペクトルを検出する方法である。出力差を取り出す際に背景の大気雑音レベルを補正するため、天頂近くを測定する光路中に誘電体プレートを挿入する必要があるため、そのためにビーム伝送光学系の大幅な改造と観測室の観測窓を広げる工事を行った。上記の開発・改良の結果、両観測法ともに全帯域でベースラインのうねりを $\pm 50\text{mK}$ 以下にすることが出来た。特にエレベーションスイッチ観測法では、帯域200MHz以上でうねりが $\pm 20\text{mK}$ 以下を達成した。

さらに、大気の状態に応じた誘電体プレートの自動交換システムの開発や液体窒素製造装置を用いた冷却黒体用窒素の自動供給、観測プログラムの改良、データ転送の自動化など、将来の遠隔地における測定ネットワークの構築を見据えた観測システムの無人化、自動化も合わせて進めた。

上記のような開発・試作・試験評価・装置の改良を名古屋大学とチリ共和国のラス・カンパナス天文台で並行して進め、2001年10月、南半球中緯度帯としては初のCIOスペクトルの検出に成功した。スペクトルのリトリーバル解析から、検出されたのは高度40km付近のCIOであることが示された。CIOスペクトルの強度はアンテナ温度で50mK程度と20GHzのオゾンスペクトルの1/100以下と極めて微弱なものであった。2時間程度のデータ積分時間（デッドタイム等を含めて約5時間の実観測時間）で高度分布のリトリーバルに十分なS/N比のデータが取得できた。他の研究機関の装置がCIOのスペクトル取得に24時間以上の観測時間が必要なのに対し、我々の装置は数時間の観測時間で済むことは、特筆すべき特長である。これは、我々の装置の感度の類いまれなる高さを示しており、それまでの装置では観測ができなかった一日内のCIO量の時間変動を実測できる可能性を拓いたという意味で非常に重要な成果であった。

2001年10月以降もCIO測定装置はラス・カンパナス天文台でのCIOスペクトルの観測を継続的に進めている。

他のサブグループの研究概要

(1) ライダー観測グループ

CRESTの研究期間、極域オゾン破壊で主要な役割を演ずる極成層圏雲(PSC)を、ライダーやOPCによる観測とそのデータ解析、および数値シミュレーション等の手法を用いて研究した。ライダー・OPC観測はスバル諸島、スピッツベルゲン島、ニーオルスンにて冬季に実施した。スバル上空の成層圏は、冬季北極域でもっとも低温となることが多く、PSC発生とそれに引き続くオゾン破壊（近年北極域でも顕在化しつつある）が盛んであると考えられている。ライダー観測では成層圏（及び対流圏）エアロゾル（PSCを含む）の相、濃度、粒径の高度分布及びそれらの時間変化を精密に測定した。

ニーオルスン(79°N, 12°W)でのライダー観測では、多くのPSC発現事象を観測した。特に、成層圏温度が露点近くまで低下した際には、ほとんど例外なく、「サンドウィッチ構造」と命名した特徴的なPSC鉛直構造が頻繁に観測された。成層圏の温度が露点温度付近にまで低下した際、しばしば偏光解消度がほとんどゼロで、532nmの後方散乱計数が5-8の層が現れた。すなわち、液体状態の粒子がPSCのもっとも高濃度で主要な部分を形成していることが初めて確認された。また、この層の上端、下端には偏光解消度の極大の層が付随している。すなわち、球形（液滴）の粒子のPSC層を非球形（固体）のPSCの層が挟む（サンドウィッチ）ように見える。ただしこれら偏光解消度の層では後方散乱の増加は見られなかった。一方、後方散乱と偏光解消度が同時に増加する例はほとんど無かった。

言い換えると固体粒子の生成もしくは成長は非常に小さいことが明らかとなった。

サンドウィッチ構造生成過程の数値シミュレーションの結果、上記液滴粒子と非常に数の少ない固体粒子の外部混合がサンドウィッチ構造のみならず、ライダー観測された後方散乱係数と偏光解消度の関係をよく再現することを明らかにした。観測（偏光解消度数%）は限られた個数の固体粒子数（ 10^{-3} から 10^{-2} 個/cc）でのみ可能であることが示された。固体粒子が存在可能な温度まで、せいぜい数日のオーダーで、PSCを含む空気塊の温度が低下していることが流跡線解析の結果明らかとなった。この時間スケールと固体粒子の個数から固体PSC粒子の核生成速度の最低値を見積もった結果、固体粒子の個数は液体粒子の個数に比べて非常に少ないが、現在唱えられている値に比べて5桁以上早い生成速度でなければならないことが明らかとなった。

(2) モデル化グループ

モデル化グループでは、①オゾン・CIO 高度分布解析ソフトウェアの開発、②ラスカンパナスにおける観測支援を目的とした、オゾンホール起源や熱帯起源等の気塊の分布を予測するための渦位分布予測、③南極オゾンホールや北極域の極渦内部のオゾン破壊やCIO濃度をシミュレーションするトラジェクトリーボックスモデルの開発、を中心に研究を進めた。

オゾンの高度分布解析、その評価、オゾン高度分布の変動に関しては、国立環境研究所のモニタリングプログラムによって得られたデータ等も活用して研究を進めた。その結果、これまで明確に認識されていなかった、高度60km付近のオゾンの半年周期変動を見出した。CIOについて、ラスカンパナスで得られた微弱な信号から、CIOの高度分布を導出する解析手法の開発を行った。

②、③については、まず、研究に必要な大規模なハードディスクの整備を行った。次に、米国National Centers for Environmental Prediction (NCEP)の全球気象予報データを自動的に取得し、475K温位面（高度18km付近）上の渦位分布を4日先まで計算し、研究分担者に配信するシステムを完成した。これによって、オゾンホールを含む極渦気塊が南米先端を覆う現象や、その気塊がフィラメント状に中緯度に伸びる現象を前もって知ることが可能になった。また、NCEP再解析データを用いた極渦変動の解析、渦位とオゾンとの変動についての解析等を実施した。

トラジェクトリーボックスモデルに関しては、European Center for Medium-range Weather Forecasts (ECMWF)の3次元の風で輸送されるトラジェクトリー上で走る光化学ボックスモデルを開発した。このモデルでは極域成層圏雲(PSC)表面での不均一反応や巨大PSCに取り込まれ硝酸の重力落下の効果、極渦内での非断熱的下降流の効果を取り込んだ。非断熱下降流については、ECMWFの鉛直風データをそのまま使用した。1996年の北極域のオゾン破壊について本モデルを走らせ、オゾンゾンデ観測結果等と比較し、極域オゾン破壊を妥当に記述していることを明らかにした。また、本モデルを南極について走らせ、塩

素貯留物質の活性化、ClO 二量体と ClO の生成についての季節進行、極渦の蛇行の影響について明らかにした。

2. 研究構想

研究開始時の目標

フロンによるオゾン層破壊の直接の原因とされる微量分子 ClO のスペクトル(204GHz, 278GHz)の測定のために超低雑音の超伝導 SIS ミクサの開発を行なう。国外の機関のほとんどの測定装置は半導体ミクサを使用したもので、超伝導ミクサを使用することによりそれらより一桁高い感度を目指す。

研究開始時の計画

初年度・2年次

- ・小型4Kクライオスタットの開発：GM型冷凍機により小型・可搬型のクライオスタットを開発する。
- ・超伝導 SIS 接合の製作：200GHzの周波数帯域に最適化された SIS 接合を設計・製作する。
- ・超伝導 SIS ミクサの開発：導波管型マウントと2バックショートを備えたミクサマウントを開発し、200-300GHzで雑音温度50K以下を達成する。
- ・可視光半導体レーザを用いた1GHz帯域の音響光学型分光計の開発：He-Neレーザから半導体レーザに変更することにより、分光計の出力変動を抑える。また、装置全体の小型化をはかる。
- ・スペクトルデータからの高度分布導出法の開発：観測されるスペクトルは、さまざまな高度のスペクトルの重ね合わせであり、逆に積分方程式を解くことによりその高度分布を知ることができる。各測定分子に最適な高度分布導出法を開発する。

3年度以降

- ・成層圏・中間圏微量成分測定装置によるオゾンおよび ClO の観測：南米チリの2400mの高地に観測装置を設置し、南半球の南極以外の場所として初めての ClO およびオゾントレンドのデータを取得する。

その後の新展開から生まれた目標等

初期の2年間の開発で GM 型冷凍機の温度安定性に若干改善の余地があることが明らかになった。これが受信機・分光計開発を遅らせないように、GM-JT 型冷凍機を用いた測定装置の製作も GM 型冷凍機の開発と並行して進めることとした。

実験室での試験およびフィールドでの試験観測より、以下のような開発項目が新たに加わった。

- ・周波数ベースラインの平坦化：強度が微弱な ClO スペクトルを検出するために、ベ

ースラインの平坦化が極めて重要である。試験機による実験により、特にビーム伝送光学系における定在波リップルの影響が著しいことが明らかになり、光路長変調器を開発し、リップルを最小限に抑える。

- ・観測手法の確立：南米チリにおける試験観測により、従来用いていた周波数スイッチ法、バランス法などの測定法では、ベースラインに歪みが生じることが明らかになった。ロードスイッチ法、誘電体プレートを用いた高度角スイッチ法などの他の観測手法の試験を行い、最適の観測法を確立する。

各グループの役割分担

大気微量分子高度分布測定システムの開発グループ

(名古屋大学・大学院理学研究科、大阪府立大学・総合科学部、東京学芸大学・教育学部、国立豊田工業高等専門学校、日本電気基礎研究所)

- ・超伝導受信器の開発
- ・4K クライオスタットの開発
- ・ミリ波スペクトルより高度分布導出法の開発
- ・音響光学型分光計の開発
- ・チリでのオゾン・CIO 観測
- ・名古屋でのオゾン観測

ライダー観測グループ

(名古屋大学・太陽地球環境研究所、名古屋大学・環境学研究科)

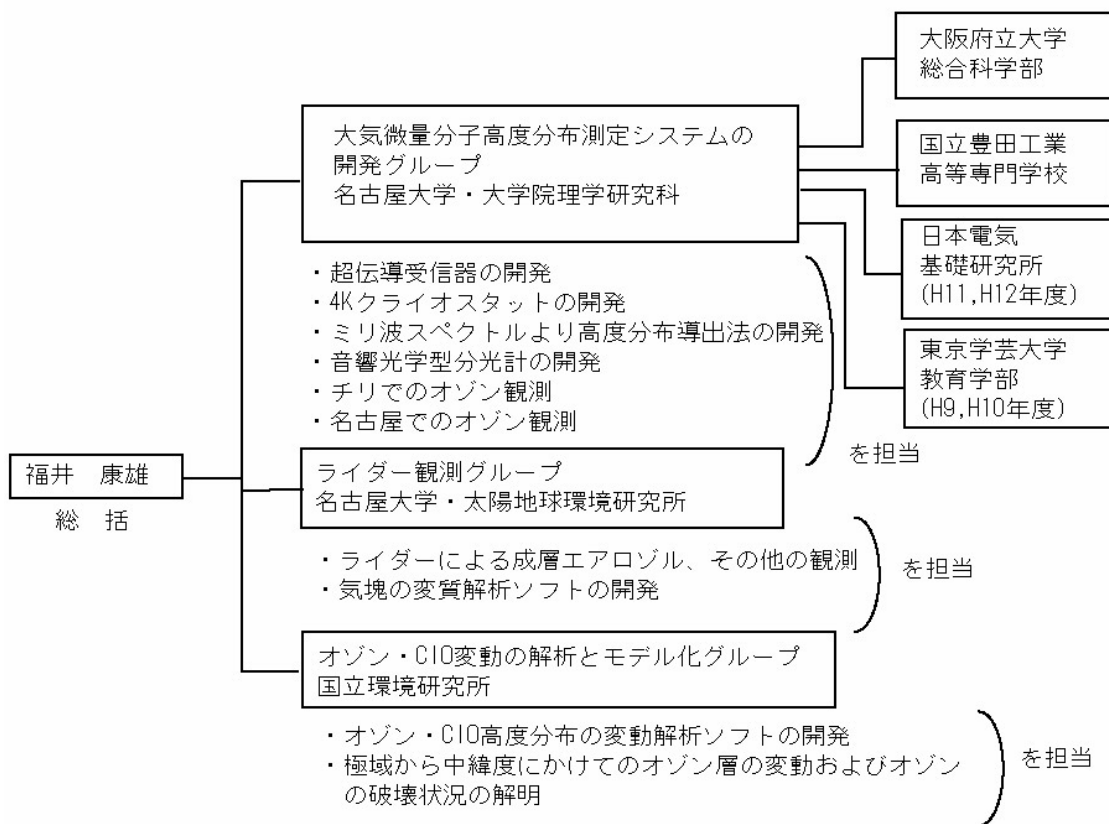
- ・ライダーによる成層エアロゾル、その他の観測
- ・気塊の変質解析ソフトの開発

オゾン・CIO 変動の解析とモデル化グループ

(国立環境研究所)

- ・オゾン・CIO 高度分布の変動解析ソフトの開発
- ・極域から中緯度にかけてのオゾン層の変動およびオゾンの破壊状況の解明
- ・渦位分布予報および CIO 分布予報等による観測グループ支援

3. 研究実施体制



4. 研究期間中の主な活動

(1) ワークショップ・シンポジウム等

月 日	名 称	場 所	内 容	参加人数	備 考
平成 10 年 1 月 16 日	「超伝導受信器を用いたオゾン等の大気微量分子の高度分布測定装置の開発」研究会	東山 ガーデン	基本方針についての討議	25 名	
平成 11 年 2 月 12 日	「サブミリ波帯超伝導ミキサ」小研究会	名古屋大学 理学部	サブミリ波帯ミキサ及び周辺回路、局部発振器、HEMTAmp、4K 冷凍機等について検討した。	35 名	
平成 12 年 4 月 12 日	「南極におけるミリ波分光計についての検討会」	名古屋大学 理学部	地上ミリ波観測の現状および極地研宙空系の計画のレビューを行なった後、南極へのミリ波分光装置の設置可能性と具体的なアクションアイテムに関して議論した。	12 名	
平成 15 年 1 月 30 日	「CREST 研究の総括会議」	名古屋大学 理学部	各サブグループの 5 年間の研究内容に関してレビューを行い、今後の研究発展の方向について議論した。	8 名	

5. 主な研究成果

(1) 論文発表

1. Nagahama, T., Nakane, H., Fujinuma, Y., Ogawa, H., Mizuno, A., and Fukui, Y., “A semi-annual variation of Ozone in the middle mesosphere observed with the millimeter-wave radiometer at Tsukuba, Japan”, 2002 submitted to Journal of Geophysical Research.
2. Shibata, T., Sato, K., Kobayashi, H., Yabuki, M., and Shiobara, M., “The Antarctic polar stratospheric clouds under the temperature perturbation by non-orographic inertia gravity waves observed by micro pulse lidar at Syowa Station”, Journal of Geophysical Research, 2002, accepted.
3. Lukyanov, A.N., Nakane, H., Hakiyoshi, H., and Yushkov, V.A., “A stratospheric diabatic trajectory-chemistry model: Simulation of chemical ozone loss inside polar vortex”, J. Atmos. Chem., in press, 2003.
4. Mizuno, A., Nagahama, T., Morihira, A., Ogawa, H., Mizuno, N., Yonekura, Y., Yamamoto, H., Nakane, H., and Fukui, Y., “Millimeter-wave Radiometer for the Measurement of Stratospheric ClO Using a Superconductive Receiver Installed in the Southern Hemisphere”, Int. J. Infrared and Millimeter Waves, 23, 981-995, 2002.
5. Daneva, D. and Shibata, T. “On the mixing state of Polar Stratospheric clouds particles in

- “sandwich structure” observed by lidar: 2. Numerical simulations of the optical properties of the liquid and solid particles with external mixture of STS and NAT particles”, in submission for Journal of Meteorological Society of Japan, 2002.
6. Daneva, D., Shibata, T., Nagatani, M., Iwasaka, Y., Shiraishi, K. and Fujiwara, M., “On the mixing state of Polar Stratospheric clouds particles in “sandwich structure” observed by lidar: 1. Determination of the mixing state of PSC particles”, in submission for Journal of Meteorological Society of Japan, 2002.
 7. Shiraishi, K., Fujiwara, M., Shibata, T., and Iwasaka, Y., “Lidar observations of polar stratospheric clouds over Ny-Aalesund in the winter 1994/94-96/97: Impact of the temperature history on the PSC layers”, in submission for Journal of Meteorological Society of Japan, 2002.
 8. Daneva, D. and Shibata, T., “Behavior of externally mixed, liquid and solid polar stratospheric particles in a numerical box model under temperature decrease”, *Polar Meteorology and Glaciology*, No.15, 32-42, 2001.
 9. Adachi, H., Shibata, T., Iwasaka, Y., and Fujiwara, M. “Calibration method for the lidar observed stratospheric depolarization ratio in the presence of liquid aerosol particles”, *Applied Optics*, Vol.40, 6587-6595, 2001.
 10. Ishii, S., Shibata, T., Sakai, T., Kido, M., Hara, K., Osada, K., Iwasaka, Y., Nagai, T., Mizutani, K., Itabe, T., Fujimoto, T., and Uchino, O., "The source, size and chemical composition of the winter arctic tropospheric aerosol layer observed by lidar at Eureka, Canada", *Journal of Meteorological Society of Japan*, Vol.79, 61-78, 2001.
 11. Murayama, T., Sugimoto, N., Uno, I., Kinoshita, K., Aoki, K., Hagiwara, N., Liu, Z., Matsui, I., Sakai, T., Shibata, T., Arao, K., Sohn, B-J., Won, J-G., Yoon, S-C., Li, T., Zhou, J., Hu, H., Abo, M., Iokibe, K., Koga, R., and Iwasaka, Y., "Ground-based network observation of Asian dust events of April 1998 in east Asia", *J. Geophys. Res.* Vol.106, 18,345-18,360, 2001.
 12. 猪俣弥生、松永捷司、菅原 敏、森本真司、長田和雄、渡辺征春、塩原匡貴、岩坂泰信、「北半球中・高緯度における硫化カルボニル (COS) の濃度の緯度分布」、南極資料 (2001、印刷中)
 13. Fukui, Y., Ogawa, H., Xiao, K. C., Iwasaka, Y., Nakane, H. and Nagahama, T., “Ground-based millimeterwave instrument for measurement of stratospheric ClO using a superconductive (SIS) receiver”, *Advances in Space Research*, 26, 975-978, 2000.
 14. Nagahama, T., Nakane, H., Ninomiya, M., Ogawa, H. and Fukui, Y., “Ground-based millimeter-wave observations of ozone in the upper stratosphere and mesosphere at Tsukuba and Nagoya”, *Advances in Space Research*, 26, 1017-1020, 2000.
 15. Xiao, K. C., Ogawa, H., Mizuno, A. and Fukui, Y., "An experimental study of subharmonic SIS mixing", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, Special Issue at December 2000.
 16. Xiao, K. C., Ogawa, H., Mizuno, A. and Fukui, Y., "A LO Path Built-in SIS mixer for further improvement of noise performance", *Proceedings of SPIE's International Symposium on Astronomical Telescopes and Instrumentation 2000*, in press.
 17. Xiao, K. C., Ogawa, H., Mizuno, A. and Fukui, Y., "Low noise SIS receiver development at Nagoya University", *Proceedings of the 2000 China-Japan Joint Meeting on Microwaves (CJMW'2000)*, in press.
 18. Xiao, K. C., Ogawa, H., Mizuno, A. and Fukui, Y., "A 230 GHz low noise subharmonically pumped SIS mixer", *Proceedings of the 2000 IEEE MTT-S International Microwave*

- Symposium (IMS2000), in press.
19. Sakai, T., Shibata, T., Kwon, S.-A., Kim, Y.-S., Tamura, K., and Iwasaka, Y., "Free tropospheric aerosol backscatter, depolarization ratio, and relative humidity measured with a Raman lidar at Nagoya in 1994-1997: contributions of aerosols from the Asian continent and the Pacific Ocean", *Atmos. Environ.*, 34, 431-442, 2000.
 20. Shibata, T., "On the lidar observed sandwich structure of polar stratospheric clouds, II, numerical simulations of externally mixed PSC particles", *Journal of Geophysical Research*, Vol.104, 21613-21619, 1999.
 21. Shibata, T., Shiraiishi, K., Adachi, H., Iwasaka, Y., and Fujiwara, M., "On the lidar observed sandwich structure of polar stratospheric clouds, I, implications for the mixing state of the PSC particles", *Journal of Geophysical Research*, Vol.104, 21603-21611, 1999.
 22. Nagahama, T., Nakane, H., Fujinuma, Y., Ninomiya, M., Ogawa H., and Fukui, Y., "Ground-based millimeter-wave observations of ozone in the upper stratosphere and mesosphere over Tsukuba", *Earth, Planets and Space*, 51, 1287-1296, 1999.
 23. Hayashi, M., Iwasaka, Y., Watanabe, M., Shibata, T., Fujiwara, M., Adachi, H., Sakai, T., Nagatani, M., Tsuchiya, M., "Size and number concentration of liquid PSCs: balloon-borne measurements at Ny-Ålesund, Norway in winter of 1994/1995," *Journal of Meteorological Society of Japan*, Vol.76, 549-560, 1998.
 24. Iwasaka, Y., Hayashi, M., Mori, I., Kwon, S.-A., Matsunaga, K., Shi, O., Zhou, J., Shibata, T., Nishikawa, M., Okuhara, Y., Hara, K., Nagatani, M., Watanabe, M., Kim, Y.-S. and Gong, XZ., "Atmospheric Particles in the Asian-Pacific Region: Balloon, Aircraft, and Lidar Measurements", *Global Environmental Research*, Vol.2, No.47-55, 1998.
 25. Xiao, K.C., Ogawa, H., Suzuki, H., and Fukui, Y., "A low-noise 230 GHz SIS receiver for radio Astronomy employing untuned Nb/AlOx/Nb tunnel junctions" *International Journal of Infrared and Millimeter Waves.*, Vol.19, No.1., 15-31., 1998.
 26. Shibata, T., Iwasaka, Y., Fujiwara, M., Hayashi, M., Nagatani, M., Shiraiishi, K., Adachi, H., Sakai, T., Susumu K., and Nakura, Y., "Polar stratospheric clouds observed by lidar over Spitsbergen in the winter of 1994/1995: Liquid particles and vertical "sandwich" structure", *Journal of Geophysical Research*, Vol.102, 10829-10840, 1997.
 27. Shiraiishi, K., Fujiwara, M., Ayukawa, S., Iwasaka, Y., Shibata, T., Adachi, H., Sakai, T., Tamura, K., "Lidar observation above Svarbard, Norway during winter 1996/97-- Characteristics of backscattering ratio and depolarization ratio of PSC particles", *Proc.NIPR Symp.* 12, 29-39,1997

(2) 特許出願

発明者：福井康雄、「コムジェネレータを用いた超伝導ミクサの再度バンド比測定方法及びその装置」(特願 2001-248800 号)、出願人 科学技術振興事業団、平成 13 年 8 月 20 日

(3) 新聞報道

中日新聞：平成 9 年 11 月 15 日 「オゾン破壊 チリで解明へ」

中国新聞ほか(共同通信配信)平成 12 年 2 月 16 日 「21 世紀へ地球みらい 第 5 部 持続への道- 6 ” 極北の異変調べ尽くせ”」