

大気環境計測のための航空機搭載ライダー技術

内野修

航空機を用いた大気の観測は、大きく分けて直接測定と遠隔測定に分けられる。直接測定では、航空機の中に外気を取り入れて、オゾンや二酸化炭素などの大気微量成分を紫外線や赤外線の光源を用いて、その光の吸収量から濃度を測定する。直接測定では、野外観測実験によるプロセス研究¹⁾や定期航空便による二酸化炭素やオゾンなどの観測でこれまで多くの科学的な成果を上げている^{2,3)}。

しかしながら、直接測定の場合にはその飛行航路上しかデータが得られないという欠点がある。一方、遠隔測定では直接測定に比べ上下方向の大気微量成分の濃度分布を立体的に得ることができる。ここでは、主に大気中のエアロゾルや雲、オゾン、水蒸気などを観測する航空機搭載ライダー技術の最近の発展と観測成果などについて述べる。

1. 航空機搭載ライダーによるエアロゾルや雲の広域立体分布の観測

ルビーレーザーが開発されてまもなくそのレーザー光を大気中に発射し、エアロゾル（大気中に浮遊する微粒子）や雲からの散乱光を望遠鏡で受信し、それらの高度分布を得るライダー（レーザーレーダーともいう）の実験に成功した。ルビーレーザーより安定で高繰り返しの Nd: YAG レーザーがコマーシャルベースで供給されるようになってからライダーの利用が進んだ。

地上観測で培われた技術を用いて、航空機搭載ライダーについては気象庁気象研究所が Nd: YAG レーザーの波長 532 nm を利用した小型ライダーの開発と、それを用いた関西上空での航空機実験を 1991 年 3 月に行っている。その結果松山市上空では高濃度のエアロゾルが海陸風によ

り陸域から瀬戸内海上へひろがっている様子が観測され、航空機搭載ライダーが対流圏下層の汚染大気の観測に有用であることを示した⁴⁾。

米国ではいろいろなタイプの航空機に恵まれ、早い時期から航空機を利用した観測が行われている。下向きのライダーで火力発電から出てくる煙の広域測定⁵⁾や、成層圏を飛行する ER-2 型航空機に搭載したライダーにより巻雲などの観測を行っている⁶⁾。また、図 1 に示すように 1982 年のメキシコのエルチチョン火山噴火後には米国宇宙航空局 (NASA) ラングレー研究センター (LaRC) の航空機搭載ルビーライダーで、成層圏のエアロゾルの観測を北緯 13 度から 35 度の範囲で行っている。図の横軸の散乱比 $R(z)$ は、大気分子からの後方散乱に対する全後方散乱を示し、 $R(z)=1$ は空気分子からの散乱だけになる。噴火後 3 か月たっても、まだ火山灰は低緯度にトラップされたままでいることがわかる⁷⁾。

航空機搭載のライダーは、地上設置のライダーに比べて衛星が観測する同じ地点を機動的に観測できることから、衛星観測の検証（グランドトゥルース）として有効である。そのため、これまでいろいろな衛星の検証実験が行われている⁷⁾。

南極や北極域のオゾン層破壊のプロセスを明らかにするために、航空機搭載ライダーによる極域成層圏雲 (PSCs) の観測では、2 波長による観測により PSCs の粒径情報を、また偏光消度の観測から形状（球形か非球形）に関する情報を得ることができるので PSCs のいろいろなタイプを知る手段として有力である⁸⁾。

2. 航空機搭載オゾン差分吸収法ライダーによる広域立体分布の観測

オゾンの観測は差分吸収法ライダー (differential

気象庁観測部環境気象課 (〒100-8122 東京都千代田区大手町 1-3-4)
E-mail: ouchino@met.kishou.go.jp

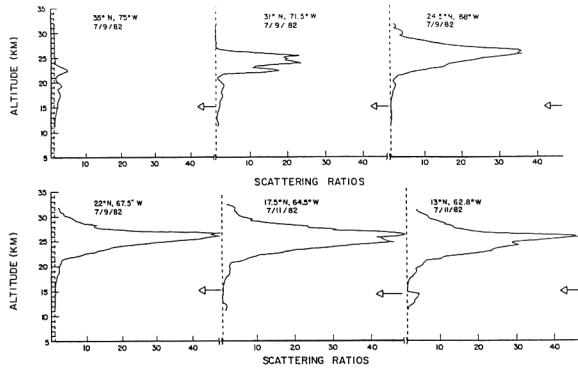


図1 1982年7月7日と9日に波長694.3 nmのルビーレーザーを用いたNASA-LaRCの航空機搭載ライダーで観測したエルチジョン火山噴火後のエアロゾル分布⁷⁾.

absorption lidar, DIAL) の技術を用いて測定できる。DIALとは、吸収断面積の異なる2波長(on波長とoff波長)をほぼ同時に大気中に発射し、2波長の受信パワーからその濃度分布を得るものである。日本は、エキシマーレーザーを用いた成層圏オゾンDIALの開発で先駆的な仕事をした⁹⁾。また炭酸ガスレーザーを用いた航空機搭載DIALで、都市大気のオゾンの予備観測に成功している¹⁰⁾。

図2にNASA-LaRCのDC-8型航空機搭載のオゾンDIAL装置を示す¹¹⁾。1980年初期からこれまで一貫してNd:YAGレーザー励起色素レーザーを利用したDIALである。波長の組み合わせは、対流圏のオゾン観測にはon波長として289 nm, off波長として300 nmを用いている。また、成層圏用にはon波長に301 nmが、off波長として311 nmの組み合わせをしている。それぞれ2波長のレーザーを0.3 msの時間差で大気中に発射する。これは同じ空間からの後方散乱をほぼ同時に得ることで、エアロゾルなどの不均一性による系統的な誤差を少なくするためである。なお、色素レーザーの基本波と1064 nmのレーザーはエアロゾルの高度分布を得るのに利用される。

レーザーは口径40 cmの石英の窓ガラスを通して上下方向に打ち出され、背中合わせにした2個の口径36 cmの受信望遠鏡で後方散乱光を受信し、波長分離用ミラーで分光し、光電子増倍管(PMT)で検出し10 MHz, 12ビットのアナログ・ディジタル変換器(AD)で信号処理し、1.5秒(45ショットの平均)ごとのデータを8 mmのテープに書き込む。オゾンとエアロゾルのデータは実時間処理され、モニターに表示される。このオゾンDIALは、これまで多くのキャンペーン観測で利用され成果を得ている¹²⁾。

ドイツでも航空機搭載のオゾンライダーを開発し、北半球高緯度での成層圏オゾンの観測を行っている。on波長

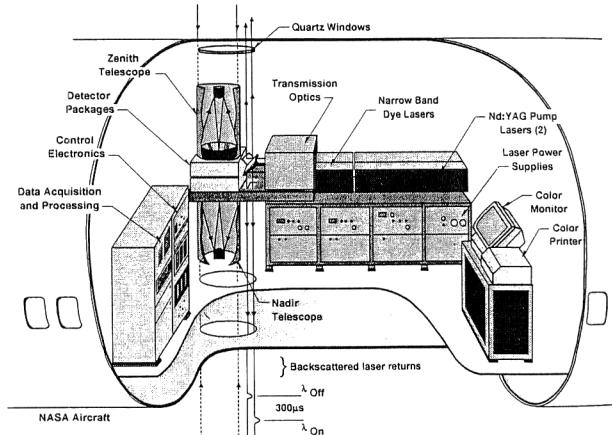


図2 航空機搭載オゾンライダー装置¹¹⁾.

として308 nmで発振するXeClレーザーを、off波長としてNd:YAGレーザーの第三高調波355 nmを利用する。また532 nmはエアロゾルやPSCsの観測に用いている。高度10~28 kmのオゾン分布を水平分解能50 km、高度分解能335~1350 mのとき、昼間の観測で3.3~20%、夜は3.3~10%程度の誤差で測定できる。1994/95年の北極渦内でオゾンが50%破壊されるなどの観測結果を得ている¹³⁾。

フランスでは、重水素と水素を混合した10気圧のラマンセルに、20 HzのNd:YAGレーザーの第四高調波を入れて誘導ラマン散乱のレーザー光を発生させ、3波長266 nm(7 mJ), 289 nm(8 mJ), 316 nm(6 mJ)を航空機から大気中へ発射する。口径40 cmのカセグレン型の望遠鏡で受信したあと、直径1.5 mmの石英の光ファイバーで分光器に導き分光(1 nm以下のバンド幅)し、それぞれの波長の強度をさらに10%と90%の2つに分けた後PMTで検出する。前者は10 MHz, 12ビットのADで、後者はフォトンカウンティングで信号処理している。望遠鏡は上下に向けることができ、高度0.5~11 kmのオゾン分布を精度10%程度で観測できる¹⁴⁾。

3. 航空機搭載水蒸気差分吸収法ライダーによる広域立体分布の観測

日本における水蒸気観測のためのDIALは、アレキサンドライトレーザー¹⁵⁾やチタンサファイヤレーザー¹⁶⁾を利用した開発が進められてきた。この水蒸気観測のためのDIALでは、特にレーザーのスペクトルの狭帯化と安定性および水蒸気吸収線への同調技術の開発が重要である。スペクトル幅1 pmのレーザーを利用し、水蒸気の長光路吸収セルや光音響分光法(PAS)セルと波長計を用いて、水蒸気吸収線への同調を行い、水蒸気の地上からのライダ

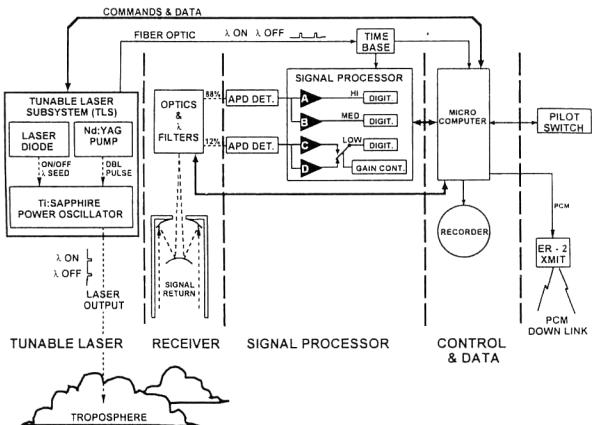


図3 LASEシステムの組立分解図¹⁹⁾.

一測定に成功している。

米国のNASAのLASE(Lidar Atmospheric Sensing Experiment)について述べる。この計画は成層圏飛行するER-2型航空機搭載DIALシステムで、パイロット1人で自動的に下層の水蒸気分布を観測する計画で、LaRCを中心に長年かけて開発が行われている。

最初は、アレキサンドライトレーザーの開発から始まった。水蒸気の吸収線に同調するアレキサンドライトレーザーは、スペクトル幅は1.1 pm、スペクトル純度(purity)は99.85%以上、出力はパルスあたり30 mJである¹⁷⁾。レーザーの水蒸気の吸収線への同調と安定性は、長光路吸収セルと周波数の制御されたヘリウム-ネオンレーザーを用いて、共振器内に同調素子として挿入されている2枚のエタロンの透過率が一定になるようにして確保している¹⁸⁾。このアレキサンドライトレーザーと水蒸気の吸収を受けない色素レーザーとを組み合わせたDIALシステムを用いて、1990/91年に高度数km以下の水蒸気とエアロゾルのDC-8による航空機測定が行われている。またこの実験では、検出器としてアバランシフォトダイオード(APD)がPMTより昼間の観測では信号対雑音(S/N)比が良好であったと報告している¹⁷⁾。

さらに、波長815 nmの水蒸気の吸収バンドを利用したダブルパルスチタンサファイアレーザーを用いたDIALの開発が進められている。励起用に、フラッシュランプ励起のNd:YAGレーザーを用いている。図3に示すように、チタンサファイアレーザーの波長は長光路吸収セルを用いて、水蒸気の吸収線に合わせたレーザーダイオード(LD)をシーディングすることによって制御される¹⁹⁾。LDとしてSDL社のものを用いていたがモードホッピングがおこるため、分布帰還型レーザー(DFB)に取り替えている²⁰⁾。このDFBを用いて、水蒸気の吸収線の中心、サイド、および外側の波長にそれぞれシーディング

表1 LASEの水蒸気DIALの特性²¹⁾.

送信系	
出力エネルギー	100 mJ
スペクトル幅	0.25 pm
パルス繰り返し数	5 Hz
送信波長	813~818 nm
ビームひろがり	0.6 mrad
パルス幅	50 ns
飛行高度	7~11 km
飛行速度	230 m/s
受信系	
望遠鏡の有効面積	0.11 m ²
受信視野	1.1 mrad
フィルター幅	0.4 nm(昼間), 1.0 nm(夜間)
透過率	29%(昼間), 49%(夜間)
検出効率	80%(APD)
雑音等価電力	2.5×10 ⁻¹⁴ W/Hz ^{1/2}
雑音指数	2.5

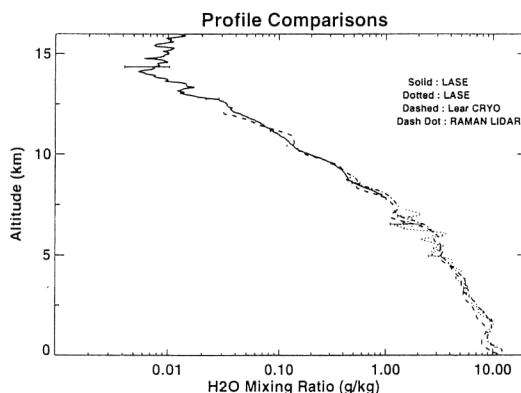


図4 LASEの水蒸気DIALと航空機搭載の湿度計および地上設置のラマンライダーで測定した水蒸気混合比の高度分布の比較。それぞれ実線と点線はLASE、鎖線は鏡面冷却露点計、一点鎖線はラマンライダーによる測定²²⁾。

し、200 msごとに2組のパルス組を作りて大気に発射することで、高度方向に非常に大きく変化する水蒸気を地上から10 km付近まで同時に測定できる。なおダブルパルスの間隔は0.4 msである。

LASEの検出系は、2個のシリコンAPDと3個のADを用いて、ダイナミックレンジを6桁まで高めている。LASE水蒸気DIALの特性を表1にまとめてある²¹⁾。LASEは図4に示すように、地上から高度15 kmまでの水蒸気の分布を6%または0.01 g/kgの精度で測定できる。図5には、LASEによる広域の水蒸気とエアロゾル分布の測定例を示す²²⁾。

フランスの航空機搭載水蒸気DIALのレーザーは、フラッシュランプ励起のダブルパルス(間隔0.05 ms)のアレキサンドライトレーザー(波長727~770 nm)でスペクトル1.2 pm、スペクトル純度は99.99%，ショットごと

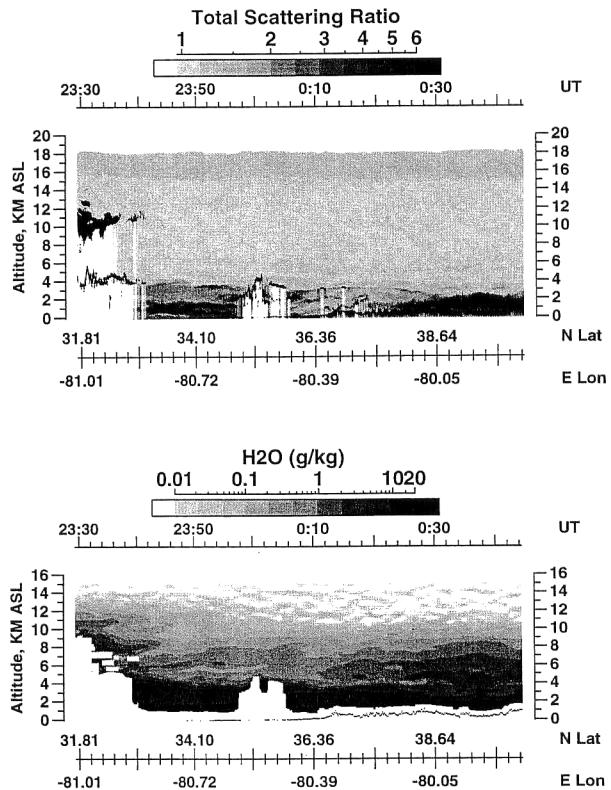


図5 1995年9月26日米国バージニア州西部上空におけるLASEで同時測定したエアロゾル(上)と水蒸気(下)の立体分布²²⁾.

の波長安定度は平均で0.14 pm、パルス幅225 ns、出力50 mJ、繰り返しは10 Hzである。口径30 cmの望遠鏡で受信し、PMT(量子効率4%)で検出し、12ビット、10 MHzでAD変換する。実際の航空機による実験では、ライダーと直接測定のデータは水蒸気の混合比で0.3 g/kg以内でよく合っている²³⁾。ドイツでは、LDで注入同期したNd:YAGレーザー励起の光パラメトリック発振による水蒸気DIALの開発を進めている²⁴⁾。

日本では、将来の衛星搭載を視野に入れた航空機搭載水蒸気DIALの開発を行っている²⁵⁾。伝導冷却型高繰り返し(150 Hz)のLD励起Nd:YLFレーザーの2倍波でリング型のチタンサファイヤレーザーを励起する。水蒸気の強い吸収線と弱い吸収線および水蒸気に吸収されない波長にそれぞれロックされたLDの出力光を、偏光子を用いて1.2 msで切り替えながらチタンサファイヤレーザーにシーディングする。3波長を1組としたトリプルパルスのレーザーを50 Hzで航空機から下向きに発射し、口径20 cmの受信望遠鏡を用いて対流圏の水蒸気を測定するための実験を進めている²⁶⁾。

ここでは、日本および海外における航空機搭載ライダーの開発と観測およびその有効性について述べた。日本では

NASAのように実験室で用いるライダーをそのまま大型の航空機に載せるということは困難である。したがって小型の航空機に搭載するための小型軽量高効率の安定なライダー開発が必要である。

文 献

- J. M. Hoell, D. D. Davis, D. J. Jacob, M. O. Rodgers, R. E. Newell, H. E. Fuelberg, R. J. McNeal, J. L. Raper and R. J. Bendural: "Pacific exploratory mission in the tropical pacific: PEM-tropics A, August-September 1996," *J. Geophys. Res.*, **104** (1999) 5567-5583.
- H. Matsueda and H. Y. Inoue: "Measurements of atmospheric CO₂ and CH₄ using a commercial airline from 1993 to 1994," *Atmos. Environ.*, **30** (1996) 1647-1655.
- A. Marenco, V. Thouret, P. Nedelev, H. Smit, M. Helten, D. Kley, F. Karcher, P. Simon, K. Law, J. Pyle, G. Poschmann, R. V. Wrede, C. Hume and T. Cook: "Measurement of ozone and water vapor by Airbus in-service aircraft: The MOZAIC airborne program, an overview," *J. Geophys. Res.*, **103** (1998) 25631-25642.
- O. Uchino: "Spaceborne lidar," *J. Space Technol. Sci.*, **10** (1994) 53-55.
- E. E. Uthe, N. B. Nielsen and W. L. Jimison: "Airborne lidar plume and haze analyzer (ALPHA-1)," *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **61** (1980) 1035-1043.
- J. D. Spinhirne, M. Z. Hansen and J. Simpson: "The structure and phase of cloud tops as observed by polarization lidar," *J. Clim. Appl. Meteorol.*, **22** (1983) 1319-1331.
- J. A. Reagan, M. P. McCormick and J. D. Spinhirne: "Lidar sensing of aerosols and clouds in the troposphere and stratosphere," *Proc. IEEE*, **77** (1989) 433-448.
- E. V. Browell, C. F. Butler, S. Ismail, P. A. Robinette, A. F. Carter, N. S. Higton, O. B. Toon, M. R. Schoeberl and A. F. Tuck: "Airborne lidar observations in the wintertime Arctic stratosphere: Polar stratospheric clouds," *Geophys. Res. Lett.*, **17** (1990) 385-388.
- O. Uchino, M. Maeda, J. Khono, T. Shibata, C. Nagasawa and M. Hiroto: "Observation of stratospheric ozone layer by a XeCl laser radar," *Appl. Phys. Lett.*, **33** (1978) 807-809.
- T. Itabe, K. Asai, M. Ishizu, T. Aruga and T. Igarashi: "Measurements of the urban ozone vertical profile with an airborne CO₂ DIAL," *Appl. Opt.*, **28** (1989) 931-934.
- D. A. Richter, E. V. Browell, C. F. Butler and N. S. Higdon: "Advanced airborne UV DIAL system for stratospheric and tropospheric ozone and aerosol measurements," *Advances in Atmospheric Remote Sensing with Lidar*, eds. A. Ansmann, R. Neuber, P. Rairoux and U. Wandinger (Springer Verlag, New York, 1996) pp. 395-398.
- R. E. Newell, E. V. Browell, D. D. Davis and S. C. Liu: "Western Pacific tropospheric ozone and potential vorticity: Implications for Asian pollution," *Geophys. Res. Lett.*, **24** (1997) 2733-2736.
- M. Wirth and W. Renger: "Evidence of large scale ozone depletion within the arctic polar vortex 94/95 based on airborne LIDAR measurements," *Geophys. Res. Lett.*, **23** (1996) 813-816.
- G. Ancellet and F. Ravetta: "The airborne lidar for tropo-

- spheric ozone (ALTO)," *Advances in Atmospheric Remote Sensing with Lidar*, eds. A. Ansmann, R. Neuber, P. Rairoux and U. Wandinger (Springer Verlag, New York, 1996) pp. 399-402.
- 15) 内海道弘, 前田三男, 村岡克紀, 内野 修: "アレキサンライトライダーによる大気水蒸気の測定", レーザー研究, **21** (1993) 1031-1039.
 - 16) 長澤親生, 阿保 真, 君山健二, 内野 修: "PAS セルを用いた準同時 2 波長水蒸気吸収ライダー", レーザー研究, **22** (1994) 1000-1006.
 - 17) S. Higdon, E. V. Browell, P. Ponsardin, B. E. Grossmann, C. F. Butler, T. H. Chyba, M. N. Mayo, R. J. Allen, A. W. Heuser, W. B. Grant, S. Ismail, S. D. Mayor and A. F. Carter: "Airborne differential absorption lidar system for measurements of atmospheric water vapor and aerosols," *Appl. Opt.*, **33** (1994) 6422-6438.
 - 18) P. Ponsardin, N. S. Higdon, B. E. Grossmann and E. V. Browell: "Spectral control of an alexandrite laser for an airborne water-vapor differential absorption lidar system," *Appl. Opt.*, **33** (1994) 6439-6450.
 - 19) A. S. Moore, K. E. Brown, W. M. Hall, J. C. Barnes, W. C. Edwards, L. B. Petway, A. D. Little, W. S. Luck, I. W. Jones, C. W. Antill, E. V. Browell and S. Ismail: "Development of the lidar atmospheric sensing experiment (LASE) —An advanced airborne DIAL instrument," *Advances in Atmospheric Remote Sensing with Lidar*, eds. A. Ansmann, R. Neuber, P. Rairoux and U. Wandinger (Springer Verlag, New York, 1996) pp. 281-288.
 - 20) W. C. Edwards, L. P. Petway and C. W. Antill, Jr.: "Performance improvements to the lidar atmospheric sensing experiment (LASE)," *Proceedings of the 19th International Laser Radar Conference*, Annapolis (1998), NASA/CP-1998-207671/PT2 (1998) pp. 815-817.
 - 21) E. V. Browell, S. Ismail and R. A. Ferrare: "Hurricane water vapor, aerosol, and cloud distributions determined from airborne lidar measurements," *Symposium on Lidar Atmospheric Monitoring*, Long Beach, California (American Meteorological Society, 2000) pp. 65-67.
 - 22) E. D. Browell, S. Ismail, W. M. Hall, A. S. Moore, S. A. Kooi, V. G. Brackett, M. B. Clayton, J. D. W. Barrick, F. J. Schmidlin, N. S. Higdon, S. H. Melfi and D. N. Whiteman: "LASE validation experiment," *Advances in Atmospheric Remote Sensing with Lidar*, eds. A. Ansmann, R. Neuber, P. Rairoux and U. Wandinger (Springer Verlag, New York, 1996) pp. 289-295.
 - 23) P. Quaglia, D. Bruneau, A. Abchiche, M. Lopez, F. Fassina, J. P. Marcovici, P. Genau, T. Danguy, B. Brient, B. Romand, C. Loth, M. Meissonnier, P. Flamant and J. Pelon: "The airborne water-vapor lidar LEANDRE II: Design, realization, tests and first validations," *Advances in Atmospheric Remote Sensing with Lidar*, eds. A. Ansmann, R. Neuber, P. Rairoux and U. Wandinger (Springer Verlag, New York, 1996) pp. 297-300.
 - 24) G. Ehret, A. Fix and V. Weiß: "Diode laser seeded optical parametric oscillator for airborne water vapor DIAL application in the upper troposphere," *Proceedings of the 19th International Laser Radar Conference*, Annapolis (1998), NASA/CP-1998-207671/PT2 (1998) pp. 635-637.
 - 25) O. Uchino, T. Nagai, T. Fujimoto, C. Nagasawa, M. Abo, T. Moriyama, T. Y. Nakajima, N. Murate, K. Tatsumi and Y. Hirano: "Diode-pumped solid state laser for spaceborne water vapor DIAL," *SPIE*, **2581** (1995) 154-160.
 - 26) T. Nagai, O. Uchino, C. Nagasawa, T. Igarashi, T. Nakajima, Y. Hirano, S. Ueno and S. Wakabayashi: "Development of the airborne water vapor differential absorption lidar (DIAL)," *Abstracts of Papers of the International Laser Sensing Symposium*, Fukui (1999) pp. 211-212.

(2000年6月15日受理)