レーザーオリジナル

Ti:サファイアレーザーによる水蒸気DIAL測定

長澤親生*・阿保真*・畑洋一*

(1992年4月20日 受理)

DIAL Measurements of Water Vapor with a Ti:Sapphire Laser

Chikao NAGASAWA*, Makoto ABO* and Youichi HATA*

(Received April 20, 1992)

A differential absorption lidar (DIAL) system based on a continuously tunable Ti:sapphire laser is described. The system is capable of range-resolved measurement of atmospheric water vapor with 720nm absorption lines. A simple and compact laser wavelength tuning system for the water-vapor 720nm absorption lines is presented. The tuning system makes use of a compact wavemeter calibrated by the neon resonance line (724.5167nm) of a hollowcathode lamp. An actual measurement of water vapor in the lower troposphere is achieved by using this DIAL system.

Key Words: DIAL, Lidar, Water vapor, Ti:sapphire laser

1. はじめに

大気中の水蒸気量の測定は、気象観測業務上重要であるとともに、NO_xやSO₂等の都市大気汚染物質との関係を究明する上からもその時間的空間的分布の測定が望まれている。更に、最近では地球規模の環境汚染や気候変動を考える上でも高い高度までの大気中の水蒸気分布の情報を得ることが重要となってきた。衛星搭載型ライダーによる全地球的測定も計画されている¹⁾。これまでに提案、使用されてきた大気中の水蒸気分布の測定法には、バルーン、航空機等による直接計測法^{2,3)}、マイクロ波放射計を用いる方法⁴⁾、後方散乱を利用したライダー

による方法⁵⁾等がある。その中でもライダーによる遠隔計測は、短時間で三次元空間分布を測定できるという他の測定法にない特徴を持っている。

従来、ライダーによる水蒸気測定には水蒸気分子吸収の波長依存性を利用した差分吸収ライダー (DIAL) と同分子のラマン散乱を利用したラマンライダーが報告されている⁶⁾。ラマンライダーは分子のラマン散乱断面積がミー散乱やレイリー散乱に比べて3桁以上小さく、また大気中の水蒸気は高度が高くなるにつれて減少し、対流圏圏界面で濃度約1~2 ppmを示す⁷⁾ため、超大型ライダーを用いない限り地表設置ラマンライダーや衛星搭載ラマンライダーでの

* 東京都立大学工学部電子情報工学科(〒192-03 八王子市南大沢1-1)

* Department of Electronics and Information Engineering, Faculty of Engineering, Tokyo Metropolitan University. (Minami-Osawa, Hachioji, Tokyo 192-03)

対流圏上部や成層圏における高精度な水蒸気分布の測定は期待できない。更にラマンライダーは、背景光の多い昼間の測定にも不向きである。それに対しDIALは、分子吸収の波長依存性を利用するためその性能が光源の波長に大きく依存し、第一義的には空気分子やエアロゾルによる散乱信号が強い領域においては、水蒸気によるより強い吸収線を用いることによって測定精度を向上させることが可能である。

これまでにDIALの光源として用いられたレーザーは、ルビーレーザー⁸⁾、CO₂レーザー⁹⁾、色素レーザー¹⁰⁾、アレキサンドライトレーザー¹¹⁾等がある。この中で色素レーザーやアレキサンドライトレーザーに代表される波長可変レーザーは、最適波長の選択が可能のため水蒸気DIALには有力な候補ではあるが、色素レーザーはこの波長領域に用いる色素の寿命が短く、アレキサンドライトレーザーは、吸収線強度の強い720nm帯で利得が小さく、また高い利得を得るためにレーザー媒質を高温に温度制御をする必要がある。

本論文では、将来の衛星搭載型水蒸気ライダーへの利用も考慮し、全固体化が可能なNd:YAGレーザーの第2高調波で励起した、720nm付近で相当の利得を持つ波長可変固体レーザーであるTi:サファイアレーザーを、光源として用いた水蒸気DIALシステムを開発し、初期的な水蒸気測定実験を行った。地表付近での水蒸気の吸収線のDoppler幅は約15pmであり¹⁰⁾、水蒸気分布を高精度に測定するためには正確な波長同調が必要となる。これまで水蒸気の波長同調法としては、長光路吸収セル¹²⁾やphoto-acoustic効果¹³⁾を利用したシステムによる同調が試みられているが、長光路吸収セル利用は比較的システムが大型になり、photo-acoustic効果を利用したシステムは周囲の音波ノイズの影響を受けやすい。我々は波長同調法として衛星搭載も考慮し、比較的簡単で小型のシステムであるNeを封入したホロカソードランプにより校正したウェーブメーターによる波長同調システムを用いた。

2. 差分吸収ライダーの原理

差分吸収ライダー(DIAL: Differential Absorption Lidar)は、吸収の波長依存性を利用して、吸収の強い波長(on line)と吸収の弱い波長(off line)の2波長に対する吸収の差から特定物質の密度を求めるものである。このときの受信信号は主に大気中のエアロゾルによるミー散乱と空気分子によるレイリー散乱と物質の吸収の影響を受ける。もし、物質の吸収量に相当の差がある非常に近い2波長を選ぶことができるならば、ミー散乱とレイリー散乱の波長依存性を無視することにより吸収物質量の測定を行うことができる。

レーザー波長が λ のときの距離 R からのライダー受信光強度を $P(\lambda, R)$ とし、非常に近い2波長をon line, off lineに選び、それぞれの波長を λ_{on} , λ_{off} とすると、水蒸気密度 $N(R)$ の解は近似的に次式で表される¹⁰⁾。

$$N(R) = \frac{1}{2\Delta\sigma\Delta R} \left[\ln \left\{ \frac{P(\lambda_{\text{on}}, R)}{P(\lambda_{\text{on}}, R + \Delta R)} \right\} - \ln \left\{ \frac{P(\lambda_{\text{off}}, R)}{P(\lambda_{\text{off}}, R + \Delta R)} \right\} \right] \quad (1)$$

ここで ΔR は距離分解能、 $\Delta\sigma$ は2波長における吸収断面積の差で、 $\Delta\sigma = \sigma(\lambda_{\text{on}}) - \sigma(\lambda_{\text{off}})$ である。

3. シミュレーションによる統計的誤差の計算

水蒸気の720nm吸収バンドを利用したTi:サファイアレーザーでのDIAL水蒸気測定の可能性を確認するために、我々の試作したライダーと同程度の性能を仮定し、US標準大気(1976)⁷⁾を大気モデルとして簡単な計算機シミュレーションを行った。

パルスレーザーを光源とした差分吸収ライダーによる距離 R での水蒸気密度のDIAL測定誤差 $\epsilon(R)$ は、積算回数 M 、雑音指数 μ 、プラ

ンク定数 h , レーザー光周波数 ν , 背景光雑音強度 P_b , 暗電流雑音強度 P_d , ゲート時間 τ , 量子効率 η として, 近似的に次式で表される⁵⁾。

$$\epsilon^2(R) = \frac{1}{M} \frac{1}{4\Delta\sigma^2\Delta R^2 N(R)^2} \times \sum_{i=\text{on, off}} \left[\frac{2\mu h\nu (P(\lambda_i, R) + P_b + P_d)\tau}{\eta P(\lambda_i, R)^2} \right] \quad (2)$$

送信光パワーとしては3, 15, 100mJ/パルスとし, 直径20cm受信鏡を用い, 受光系全効率1%, 距離分解能1000m, 積算回数は各波長2000回とした。また, on lineは724.373nmを用い, off lineの吸収断面積は0と仮定した。レーザーの発振スペクトル幅を6pmとし, 水蒸気の吸収ラインのドップラー幅を15pmとする。この時のon lineの有効吸収断面積は $3.7 \times 10^{-23} \text{m}^2$ である。レーザースペクトル幅と吸収線のドップラー幅は高度により変化するがここでは無視する。シミュレーションによる統計的誤差の計算結果をFig.1に示す。これによると, 出力100mJで高度4~5kmまで誤差1%以下で測定できることがわかる。

4. Ti:サファイアライダーシステム

4.1 Ti:サファイアレーザー

Ti:サファイアレーザーはTiドープのサファイア結晶を用いたレーザーで, 700~1100nmに

わたる広範囲で同調可能である¹⁴⁾。近年, 研究が進められているこのレーザーは連続発振とパルス発振の両方に適しており, 第2高調波の発生やラマンシフターとの組み合わせにより可視域から近赤外域をカバーでき, 様々な用途への利用が期待されている。励起準位の蛍光寿命は3.15 μsec と比較的短いが, ナノ秒パルスでのレーザー励起には十分な長さである。吸収スペクトルは波長500nmを中心に350nm~650nmに広がっており, 励起光源としてはNd:YAGレーザーの第2高調波や, Ar⁺レーザー等が用いられる。Ti:サファイアレーザーはその波長同調域内に720, 830, 920nm帯の水蒸気の強い吸収線を含むので, 差分吸収ライダー方式による水蒸気測定システムの光源として高い性能が期待できる。ここでは, 上記3つの水蒸気吸収帯の中で吸収強度が比較強く, 光電子増倍管の効率が一番高い720nm帯の利用を考えた。

4.2 ライダーシステム

今回使用したレーザーは, Nd:YAGレーザーの第2高調波(532nm)励起のTi:サファイアレーザー(Cygnus Laser社 Model Tis-532)で, 狭帯域化のためにプリズムとエタロンを追加している。レーザーの構成図をFig.2に示す。出力鏡, 反射鏡はどちらも780nmを中心とするものを用い, 反射鏡の反射率は100%, 出力鏡の反射率は80%, 同調素子としては2個のプリズムと厚さ0.1, 0.5, 2, 5mmの4枚のソリッドエタロンを挿入した。手持ちのエタロンを使用したため, フリースペクトルレンジの選択は最適設計にはなっていない。このときの波長同調域は720~880nmであった。また, Fig.3に発振スペクトルの5パルスを重ねたものとその平均値を示す。発振スペクトルの半値全幅は約6pmで, スペクトルの5パルスの揺らぎは2pm以下である。

ライダーシステムの諸元をTable.1に, 概略図をFig.4に示す。レーザーはコリメーターを通してミラーで上空へ射出している。受光系は直径20cmのシュミットカセグレン式望遠鏡で

Fig.1 Simulations of vertical H₂O DIAL measurement.

Fig.2 Schematic of the Ti:sapphire laser system.

Table 1 Specifications of Ti:sapphire laser radar.

wavelength	720-870nm
energy	15mJ (100mJ pumped)
repetition rate	10Hz
beam divergence	1mrad
range resolution	100m
telescope type	Schmidt-Cassegrain reflecting telescope
aperture	200mm
field of view	2mrad
filter bandwidth	3.5nm
detector	PMT (R666S HAMAMATSU)

Fig.3 Spectra of the Ti:sapphire laser.

Fig.4 Schematic of the Ti:sapphire laser radar system.

大気からの散乱光を集光し、干渉フィルター、絞りを通して光電子増倍管により光電変換され

る。得られた電気信号はディスクリミネーターで波高弁別された後、フォトンカウンティング法により積算され、パーソナルコンピュータを通して磁気ディスクに保存される。

4.3 水蒸気吸収線へのレーザー波長同調法
差分吸収ライダーで水蒸気を測定する場合に吸収線への精確な波長同調が必要である。水蒸気の波長同調法としては、セルを用いた長光路吸収システムやphoto-acoustic効果を利用した方法が試みられているが、長光路吸収システムは比較的システムが大型になり、photo-acoustic効果を利用したシステムはマイクロホン検出時の周囲の雑音による影響に弱い。もう一つの同調法としてFASCODE¹⁵⁾などで得られた水蒸気の吸収波長にレーザーの波長を同調させる方法が考えられる。ここでは、水蒸気の720nm吸収帯の中にあるNeの共鳴線を利用して、波長精度10pmのウェーブメーター(キャンデラ社LS-2)をNe封入のホロカソードランプにより同調されたレーザー光で波長校正し、水蒸気の吸収線に波長同調を行った。使用したウェーブメーターは、レーザー波長測定用のエシレ格子分光器で、検出器としてフォトダイオードアレーを用い、コンピュータによりリアルタイムでスペクトルを測定できる。高次回折光を用いることにより10pmの高分解能を得ている。通常は内蔵のヘリウムネオンレーザーの回折光との比較から300~700nmの範囲で絶対波長が得られるが、今回はホロカソードランプで校正したレーザー光を基準とし、720nm帯での絶対波長を得ている。本ウェーブメーターの原理の詳細は文献16を参照されたい。高精度の分光器をNeランプにより校正して絶対波長を測る方法¹⁷⁾もあるが、本ウェーブメーターは同精度の分光器に比べてコンパクトになる利点がある。

ホロカソードランプは、ランプ内に封入された原子や分子の光学遷移に共鳴する波長のパルスレーザー光を入射させると、Optogalvanic効果により共鳴線強度に比例したパルス電気信号

が得られる¹⁸⁾。この信号により、レーザーを原子の共鳴波長へ同調させることが可能となる。ここでは波長の校正用としてNeの共鳴線の1本である724.5167nm(空気中)を利用した。水蒸気吸収線はこの波長の近辺に多く存在し、FASCODEより1pm以内の精度で得られており、Neの共鳴線の波長もそれ以上の精度で得られる。この2波長の短い区間をウェーブメーターで測定することにより吸収線への同調が可能となる。今回用いたウェーブメーターの精度は10pmであるが、1pm精度のウェーブメーターも市販されており、これを用いるならば更に高精度の測定が可能になる。水蒸気の吸収線は圧力によりスペクトル幅の広がりやシフトが起こる¹⁹⁾が、今回行った高度数km以内の大気中の測定ではこの影響は無視できる。

5. 水蒸気測定実験

前述したTi:サファイアライダーシステムと同調システムを使用して、大気中の水蒸気測定実験を行った。測定は1992年3月13日21時30分~21時55分にかけて行った。レーザーシステムの出力は3mJ/パルス、繰返しは10Hzで、近距離を精度良く測定するために比較的吸収強度が強くNeの吸収線に近い724.373nmをon lineに取り、off lineはon lineの近くで吸収線の存在しない波長として724.433nmとした。レーザーの発振スペクトル幅が6pmの時の、on lineの有効吸収断面積は $3.7 \times 10^{-23} \text{m}^2$ である。波長の切り替えはエタロンの角度を変えることにより行い、積算回数は1000回ずつon line, off lineを交互に2回ずつ測定した。各波長の積算回数は 1000×2 回、距離分解能は100m、仰角は30°である。大気からのライダー応答をFig.5に示す。フォトンカウンティングモードでの測定は、3kmより近距離では出力3mJ/パルスでの測定が出来ないため、NDフィルターを用いて出力を25μJ/パルスとして近距離の測定をした。Fig.6に(1)式のDIAL方程式より求めた水蒸気密度を示す。3km以下の近距離は300mの平滑化をし、3kmより遠距離は1300mで平滑化し

Fig.5 Lidar echoes at on-line and off-line.

Fig.6 Water DIAL measurement at night.

ている。この測定値は通常のラジオゾンデ等による測定値と同程度のものではあった。水蒸気測定のための統計的誤差を(2)式を用いて計算し、エラーバーとして示した。ここではon, offの2波長同時測定を行っていないが、これに起因する誤差は、比較的短時間で測定しており、また平均的水蒸気分布を測定する意味から無視した。出力3 mJ/パルスで測定した場合の距離5 kmにおける測定誤差は約20%であるので、出力を100 mJ/パルスとすれば距離7.8 kmまで誤差数%で測定できると考えられる。

6. まとめ

ウェーブメーターとホロカソードランプを利用して波長校正したパルスTi:サファイアレーザーを光源として水蒸気DIAL測定を行った結果、出力3 mJ/パルス、仰角30°で距離6 kmまでの測定において有意な結果を得た。このこと

からホロカソードランプのNe共鳴線が水蒸気の強い吸収帯に存在することを利用して、精度10 pmのウェーブメーターを用いても水蒸気の吸収線にレーザー光を同調することが可能となる事を示した。

この全固体化可能なNd:YAG励起Ti:サファイアレーザーとコンパクトな同調システムを用いた水蒸気DIALシステムは、地上設置ライダーだけではなく、今後の発展が期待されている衛星搭載水蒸気ライダーにも有用な技術である。

近距離から長距離を一度に測定するには、近距離の測定には小型(口径50 mm程度)の受光鏡を用い、2組の受光鏡を組み合わせる方法等が考えられる。また、測定精度を向上させるために、レーザー光源の発振スペクトル幅を1 pm以下へ狭帯域化し、高出力化をはかる必要がある。狭帯域化についてはエタロンの最適化や、インジェクションシーディング技術²⁰⁾を利用して可能となり、出力の面でも最近出力100 mJ ~ 1 J/パルスといった高出力のTi:サファイアレーザーが市販されてきたことから、高精度化は比較的容易であると考えられる。レーザーの狭帯域化にともなってウェーブメーターの精度も一緒に向上させる必要がある。更に、より高精度に測定を行なうために同時2波長測定システムや、同調の自動化等が今後の課題である。

謝辞

本実験にあたり、チタンサファイアレーザーを使わせていただいた(株)オプトサイエンス社、FASCODEデータを供与していただいた千葉大学の竹内延夫教授に感謝いたします。なお、本研究の一部は東京都立大学特定研究費の援助により行われた。

参考文献

- 1) 内野修:レーザー研究, 17 (1989) 258.
- 2) F.R.Barclay, M.J.W.Elliot, P.Goldsmith and J.V.Jelly: Quart. J. Roy. Met. Soc., 86 (1960) 259.

- 3) J.A.Silver and A.C.Stanton: Appl. Opt., 26 (1987) 2558.
- 4) P. W. Rosenkranz, M. J. Komichak and D.H.Staelin : J. Appl. Meteor., 21 (1982) 1364.
- 5) R.M.Measures: *Laser remote sensing fundamentals and applications* (Wiley, New York, 1984).
- 6) W.B.Grant: Opt. Eng., 30 (1991) 40.
- 7) *U.S.Standard Atmosphere 1976* (U.S.Government Printing Office, 1976).
- 8) V. V. Zuev, V. E. Zuev, Y. S. Makushkin, V.N.Marichev and A.A.Mitsel : Appl. Opt., 22 (1983) 3742.
- 9) P.W.Baker: Appl. Opt., 22 (1983) 2257.
- 10) E. V. Browell, T. D. Wilkerson and T. J. McIlrath: Appl. Opt., 18 (1979) 3474.
- 11) D.Bruneau, H.Cazeneuve, C.Loeh and J.Pelon: Appl. Opt., 30 (1991) 3930.
- 12) 大津隆一他: 第39回応用物理学関係連合講演会, (1992年3月) p. 904.
- 13) G.Ehret and W.Renger: 15th ILRC, Tomsk, July, 1990, I-67.
- 14) P.F.Moulton: J. Opt. Soc. Am. B,3 (1986) 125.
- 15) L.S.Rothman et al.: Appl. Opt., 22 (1983) 2247.
- 16) M.B.Morris and T.J.McIlrath: Appl. Opt., 24 (1979) 4145.
- 17) 浜口他編: ラマン分光法 (学会出版センター, 東京, 1988) p.94.
- 18) R.B.Green, R.A.Keller, G.G.Luther, P.K.Schenck and J.C.Travis: Appl. Phys. Lett., 29 (1976) 727.
- 19) B.E.Grossmann and E.V.Browell: J. of Molecular Spectroscopy, 138 (1989) 562.
- 20) T.D.Raymond and A.V.Smith: Opt. Lett., 16 (1991) 33.