

半導体レーザーを用いた中間圏 OH 観測用ライダーの検討

長澤親生, 阿保 真, 柴田泰邦

東京都立大学システムデザイン学部 (〒191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6)

Proposal for a Resonance Scattering Lidar using Semiconductor Lasers for Mesospheric OH Observations

Chikao NAGASAWA, Makoto ABO, and Yasukuni SHIBATA

Tokyo Metropolitan Univ., 6-6 Asahigaoka, Hino, Tokyo 191-0065

Abstract: The OH radical is one of the most reactive trace components and plays several important roles in the photochemical equilibrium and energy balance of the mesosphere. Vertical profiles of global OH and its seasonal and latitudinal variations have been observed by microwave and ultraviolet optical rim observations, but their horizontal resolution is poor and they can only be observed during the daytime. Altitude profiles of mesospheric OH have been measured by a large ozone lidar, but no continuous observations have been made. Mesospheric OH has been explained in the formation theory of mesospheric metal atomic layers, such as Na, as contributing to the reduction of the bottom side. However, the correctness of this argument can only be explained by the observation of OH. In this presentation, we propose a lidar system by using the code modulated semiconductor laser in order to realize continuous observations of the OH density profiles in the mesosphere.

Key Words: resonance scattering lidar, mesospheric hydroxyl, code-modulation, semiconductor laser

1. はじめに

宇宙天気研究や地球気候変動の研究のため、超高層大気観測の重要性が高まっているが、現状の超高層大気の観測手段は、ロケットによる観測以外では人工衛星や地上からの受動的光学観測、電子・イオンの電波の観測、金属原子・イオンの共鳴散乱ライダー等に限られている。OH ラジカルは最も反応性の高い微量成分の一つで、中間圏の光化学平衡やエネルギーバランスにおいていくつかの重要な役割を担っている。衛星観測では、Aura 衛星搭載のマイクロ波リムサウンダ (Aura MLS) による観測¹⁾、Suomi NPP 衛星搭載の Ozone Mapping and Profiler Suite Limb Profiler (OMPS/LP)の紫外光リム観測²⁾により、全球的な OH の鉛直分布、季節的・緯度的変動が観測され、OH と水蒸気の変動を研究する上で重要な役割を担っている。しかし、衛星によるリム観測は水平分解能が悪い上に、昼間の観測しか出来ない欠点がある。一方中間圏の OH の高度プロファイルは大型のオゾンライダーにより、二次的な観測として行われた例がある³⁾が、OH 専用の観測装置ではないため継続的な観測は行われていない。

高度 90 km 付近をピークとして釣鐘状に成層する Na などの中間圏金属原子層の生成論では、Na 層のボトムサイドは 70~85 km にピークがある OH と金属原子の化学反応による Na の減少と説明されている。しかしこの議論が正しいかは、OH の詳細な観測によってしか説明できない。さらに、中間圏における微量気体の中で金属原子しか高度分布が測定できない現状において、この高度のあらゆる大気成分との化学反応に関する OH が測定できることは、極めて重要である。

本発表では、高度 70~80km 付近に存在する中間圏 OH の密度プロファイルの連続観測を実現するため、半導体レーザーベースの符号変調方式による OH の共鳴蛍光 (波長 308 nm) を利用した共鳴散乱ライダーを提案する。

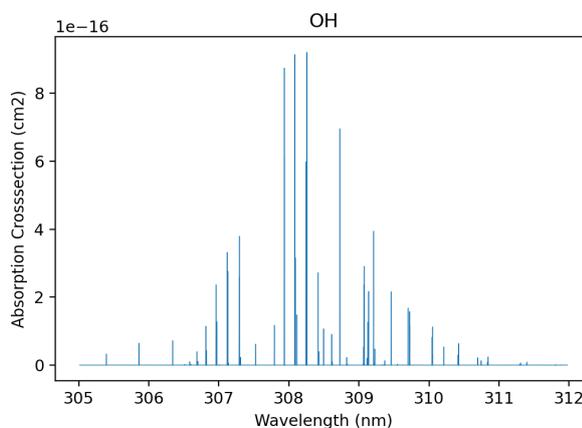


Fig.1 Absorption spectrum of OH at 75km altitude.

2. OHの吸収（共鳴蛍光）スペクトル

OHの共鳴蛍光は吸収と同じ準位で起こる。HITRAN データベースの OH 吸収パラメータを元に、高度75kmの気圧と気温から求めた波長308nm付近の吸収スペクトルをFig.1に示す。308.1nm付近に強い3本の吸収線がありオゾンライダーではこのうち1本を利用している。一方OMPS/LPのリム観測は分解能が1nmと広いので図の複数の吸収線を一緒に測定している。本システムでは最も強い波長308.2nmの準位を利用した共鳴散乱ライダーを検討する。

3. 誤差シミュレーション

符号変調CWレーザによるレンジング手法について計算シミュレーションを行った。OHの観測を行ったオゾンライダーのレーザ線幅は8pmであったが、今回提案する符号変調CWライダーは狭帯域化が容易である。これは共鳴散乱ライダーの場合には有利に働き、例えば線幅を0.2pmまで狭くすると有効散乱断面積が10倍となる。しかしながら308nmという波長はオゾンの吸収の影響を受けるため、ソーラブラインド効果で背景光が大きく軽減するが、一方受信信号も対流圏並びに成層圏に存在するオゾンの影響で減衰が起こる。したがって、良好なS/Nを得るためにはWクラスのレーザ出力と大口径の望遠鏡は必須となる。Table 1に想定したライダーの仕様を示す。

Fig.2にTable 1の仕様とOH、オゾン、大気密度分布、エアロゾルモデルとライダー方程式により求めた各高度からの受信フォトンカウント値のシミュレーション結果を示す。図にはレーザ出力1Wの場合の大気分子からのレイリー散乱光成分とOHの共鳴散乱光成分を合わせて示している。Fig.3にはレーザ出力1Wと5WそれぞれのOH濃度測定の統計誤差を示す。レーザ出力1Wの場合は高度53~82kmの範囲で誤差10%以下、5Wの場合は高度52~84kmの範囲で誤差5%以下の観測が可能であることが確認出来た。

Table 1. Specifications of the code-modulation OH lidar

Transmitter	Wavelength	308.2nm
	Laser Power	1 W / 5W
	Linewidth	0.2pm(0.6GHz)
Receiver	Telescope Diameter	1m
	PMT Quantum Efficiency	40%
	Optical Efficiency	10%
Data Acquisition	Type	Photon Count
	Range Resolution	1000m
	Accumulation Time	3600s

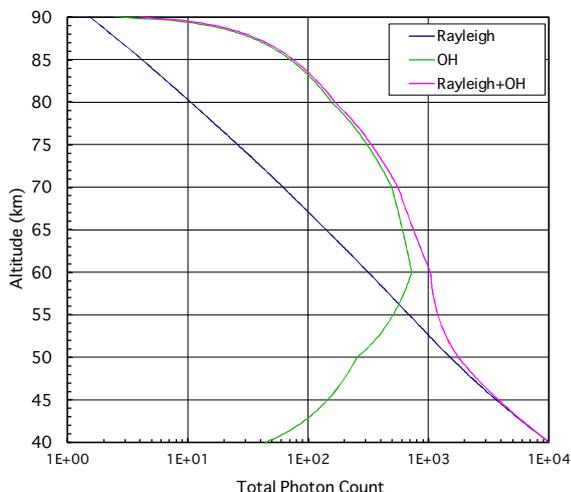


Fig. 2 Simulated photon profiles of the resonance scattering OH lidar.

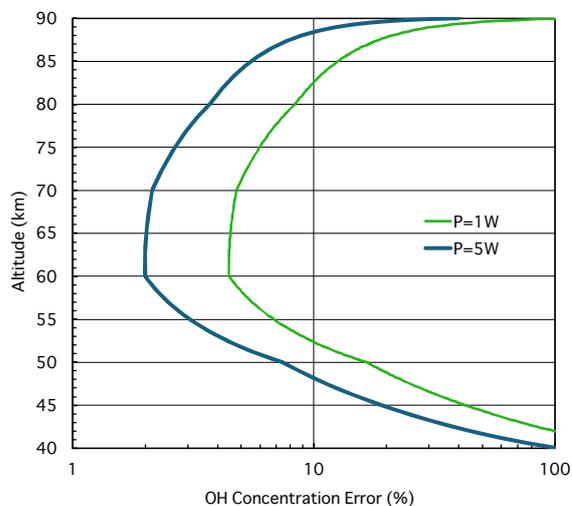


Fig.3 Statical error of the resonance scattering OH lidar.

4. 送信レーザーの検討

OH 共鳴散乱ライダーの送信レーザーとして、狭帯域半導体レーザーと半導体アンプを組み合わせたシステムを提案する。従来の共鳴散乱ライダーにはパルスレーザーが用いられてきたが、波長 308 nm の波長制御された強力なパルスレーザー光を得ることは容易ではない。そこで、本提案では半導体 CW レーザを用いて符号変調によるレンジング方式⁴⁾を採用する。波長制御が容易な狭帯域 CW 半導体レーザーとテーパアンプ(TA)を組み合わせることにより高出力化と狭帯域化が容易に実現でき、複数の TA を用意することによる高出力化も可能である。

Table 2 に現状の半導体化合物と発光波長を示す⁵⁾。308nm あるいは 2 倍の 616nm のレーザー発光が可能な半導体化合物は存在しない。一方 3 倍の 924nm を発光させる半導体材質は存在する。そこで、Fig.4 に示すように、第二高調波 (SHG) と和周波 (SFG) 発生器により構成される第三高調波発生システムを提案する。この場合第 2 高調波の発生にはすでに市販されている周期反転(PP: Periodically Poled) LiNbO3(LN)や LiTaO3(LT) の擬似位相整合 (QPM: Quasi-Phase Matching) 結晶を用いることで CW 光でも効率の高い変換が可能である。一方和周波発生には、PPLN や PPLT の QPM 結晶は紫外域での透過率の関係から利用できないが、近年紫外域でも利用可能な窒化物半導体の AlN の QPM 結晶の研究が進められており⁶⁾、今後の実用化が期待できる。

Table 2. Emission wavelengths of different semiconductor compounds

Laser diode material (active region/substrate)	Typical emission wavelength
InGaN / GaN, SiC	380-470nm
AlGaInP / GaAs	630-670nm
AlGaAs / GaAs	720-850nm
InGaAs / GaAs	900-1100 nm
InGaAsP / InP	1000-1650 nm



Fig.4 Block diagram of the diode laser base transmitter system.

(LD: Laser Diode, TA: Tapered Amplifier, SHG: Second Harmonic Generator, SFG: Sum Frequency Generator)

5. まとめ

現在行われていない高度 70~80km 付近に存在する中間圏 OH の密度プロファイルの連続観測を実現するため、符号変調方式による OH の共鳴蛍光 (波長 308 nm) を利用した共鳴散乱ライダーの実現可能性の検討を行った。まず必要なライダーの仕様をシミュレーションより明らかにし、半導体レーザーベースのレーザーシステムを提案した。この手法による OH 密度の観測が可能になれば、さらに波長 308 nm 付近の 2 波長を利用することによる中間圏でのライダーによる新しい気温観測手法が得られる可能性がある。高度 60km 以下はレイリー散乱ライダーで、高度 80km 以上は Na 等の金属原子共鳴散乱ライダーにより気温観測が可能であるが、高度 60~80km の領域はライダーによる気温観測の空白域になっており、実用化が期待される。今後は、より詳細なレーザーシステムの検討を行う予定である。

参考文献

- 1) H. Pickett et al.: Geophys. Res. Lett. **33** (2006) L198088.
- 2) Z. Chen.: J. Atmos. Sci. **79** (2022) 1057.
- 3) E. J. Brinksma et al. Geophys. Res. Lett. **25** (1998) 51.
- 4) C.Y. She et al.: Appl. Opt. **50** (2011) 2916.
- 5) Corporate Information, Eagleyard Photonics (2018).
- 6) 林侑介: 日本結晶成長学会誌 **47** (2020) 47-3-06.