

エアロゾル観測におけるシーロメータの利用：

ライダー・シーロメータ比較実験

杉本 伸夫¹, 西澤 智明¹, 清水 厚¹, 神 慶孝¹, 櫻井 元樹²

¹国立環境研究所 (〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2)

²株式会社アイ・アール・システム (〒206-0041 東京都多摩市愛宕 4-6-20)

Use of Ceilometers in Aerosol Observations: Lidar-Ceilometer Comparison Experiments

Nobuo SUGIMOTO¹, Tomoaki NISHIZAWA¹, Atsushi SHIMIZU¹, Yoshitaka JIN¹,
and Motoki SAKURAI²

¹National Institute for Environmental Studies, 16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8506

²IR System Co., Ltd., 4-6-20 Atago, Tama, Tokyo 206-0041

Abstract: Performance of a ceilometer (Lufft CHM 15k) was compared with the backscattering lidar used in the Asian dust and aerosol lidar observation network (AD-Net). The signal-to-noise ratio of the ceilometer (1064 nm) was almost comparable to that of the 1064-nm channel of the AD-Net lidar in the lower troposphere, and the results demonstrated that the ceilometer can be used in aerosol observations. Calibration of the system constant is a common problem with ceilometers where the sensitivity is not high enough to measure reference Rayleigh scattering signals from the aerosol-free atmosphere. The comparison with the AD-Net lidar showed that the calibration method using integrated backscattering signals from water clouds can be applied also to CHM 15k that employs a photon counting receiver, if the receiver response is properly corrected.

Key Words: Ceilometer, Aerosol, Lidar

1. はじめに

シーロメータ（雲底高度計）は名前の通り雲底高度の測定を目的に開発された小型のライダーであるが、いくつかの機種では、エアロゾルの観測にも十分な感度を持っている。シーロメータは本来の目的で空港等に多数配置されており、そのデータをエアロゾル観測にも応用できないかという検討が欧州などでさかんに行なわれている¹⁾。また、最近、名古屋大学では、簡易で耐久性の高い小型のライダーとしてシーロメータを黄砂発生域における黄砂観測に利用している²⁾。シーロメータは赤外波長を用い、レーザーパワーも小さいため、エアロゾルの少ない上空の大気分子のレイリー散乱を境界条件としてエアロゾルの高度分布を解析することが難しい。そこで、ライダーとの同時測定などによって装置定数を校正する必要がある。筆者らは、これまでに、ライダーとの比較による CL51 (Vaisala 社) の校正とエアロゾル観測について報告した^{3,4)}。本報告では、CHM 15k (Lufft 社 (旧 Jenoptik 社)) について、ライダーとの比較実験と校正手法の検討結果を報告する。

シーロメータによる清澄な大気中のエアロゾルプロファイル測定では、予め近距離で後方散乱係数

が測定できるように装置定数を校正しておき、ライダー比を仮定した forward の Klett-Fernald 法で消散係数プロファイルを導出する¹⁾。この場合には、装置定数の校正は非常に重要である。但し、アジアの都市大気やダスト層のような光学的に濃いエアロゾルの場合は、上空で境界条件を与えた backward の Klett 法で下層の消散係数プロファイルを導出することができる⁵⁾。

装置定数の校正は、ライダー(例えば波長 532nm)で測定した近距離の後方散乱係数をシーロメータの波長に換算して比較することによって行なわれる。一方、光学特性の分かった測定対象の信号を利用して校正が可能であれば非常に有用である。ここでは、水雲の信号を用いる校正手法を検討する。

2. シーロメータによるエアロゾル観測

欧州を中心にシーロメータのエアロゾル観測への利用が精力的に進められている¹⁾。シーロメータは欧州だけでも約 700 台が稼働しており⁶⁾、これをエアロゾルの観測に利用できれば、気象モデルにおける大気混合層高度の検証・同化や、エアロゾル化学輸送モデルの検証・同化、大気汚染やダスト、火山噴煙のモニタリングなどに非常に有用である。こ

のような利用のために、例えば TRPROF⁷⁾というプロジェクトなどにおいて、機器の相互比較や校正手法の詳細な検討が進められている。

市販のシーロメータには、Vaisala 社のように半導体レーザー(910 nm)を光源とし、アナログ方式で受信するものと、Lufft 社の CHM 15k のように半導体レーザー励起 YAG レーザー (1064 nm) を光源として、フォトンカウンティング方式で受信するものがある⁸⁾。自然のターゲットの散乱信号を利用した装置定数の校正手法として、欧州では、アナログ方式の場合は水雲のライダー比を用いた方法⁹⁾(詳細は4節で述べる)、フォトンカウンティング方式では、上空の分子散乱を利用した方法¹⁰⁾が用いられている。しかし、1064 nm において分子散乱を用いる校正手法の精度は必ずしも十分といえないと考えられる。欧州における研究では、この他に、CHM 15k の幾何学的形状因子(重なり関数)にわずかな温度依存性があることやその補正手法に関する検討なども行われている¹¹⁾。

3. ライダー・シーロメータ比較実験

CHM 15k と東アジアのライダーネットワーク(AD-Net)の2波長偏光ライダー¹²⁾の比較実験をつくばの国立環境研構内において行った。Fig. 1 に CHM 15k (波長 1064nm)で得られた減衰後方散乱係数の時間高度表示を、AD-Net の2波長ライダーの 1064nm チャンネルで得られたものと比較して示す。

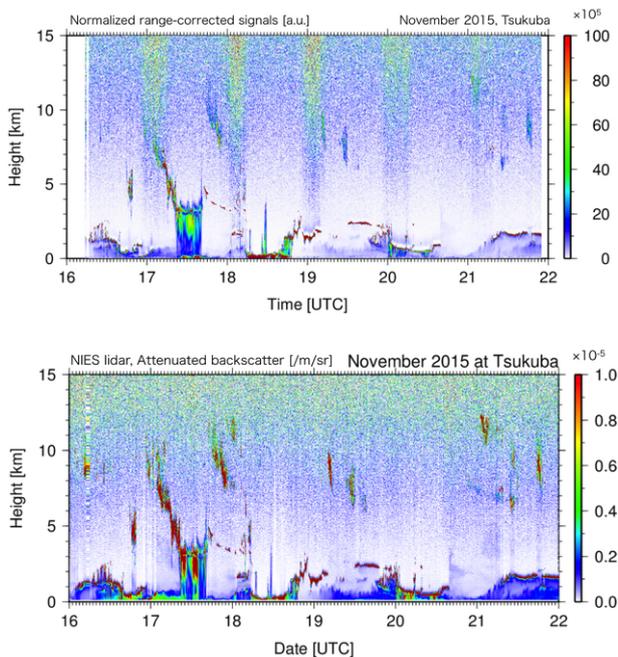


Fig.1. Time-Height indication of attenuated backscattering coefficients at 1064 nm (upper) measured with CHM 15k and (lower) the standard AD-Net lidar (Nov. 16-21, 2015, Tsukuba).

CHM 15k では昼間の背景光雑音が多いものの、下層のエアロゾルについてはほぼ遜色ない SN 比で測定されている。

Fig. 2 に 11 月 21 日の下層のエアロゾルの時間高度表示を比較して示す。

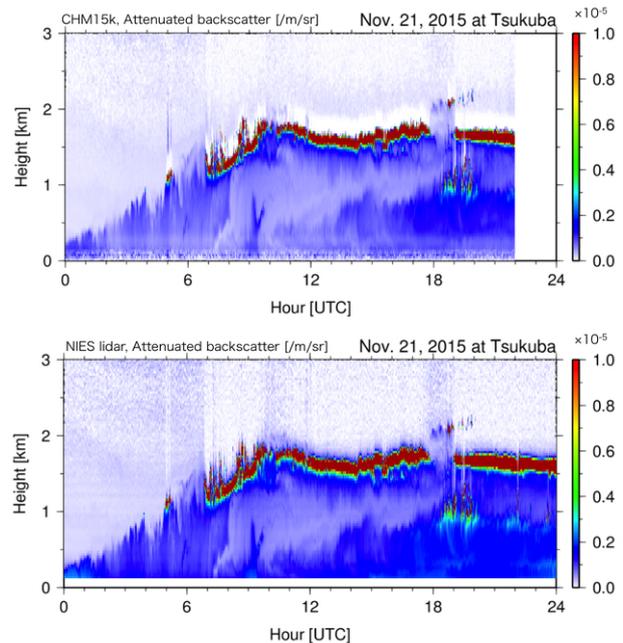


Fig.2. Time-Height indication of attenuated backscattering coefficients at 1064 nm (upper) measured with CHM 15k and (lower) the 1064-nm channel of standard AD-Net lidar (Nov. 21, 2015, Tsukuba).

減衰後方散乱係数のプロファイルの比較を雲のない場合と雲のある場合について、それぞれ Fig. 3 と Fig.4 に示す。CHM 15k の減衰後方散乱係数プロファイルは、エアロゾルのプロファイルが AD-Net ライダーと一致するように定数を掛けて調節している。雲のない場合について、両者は非常によく一致した。なお、幾何学的効率因子(重なり関数)の補正は十分ではない。

雲のある場合について詳細に見ると、雲のピークが CHM 15k では小さめに出るという不一致が見られる。これは、CHM 15k の受信系がフォトンカウンティング方式であるため(AD-Net ライダーはアナログ方式)、強い信号で数え落としが起こっているためであると考えられる。欧州において、CHM 15k の校正に雲の信号が用いられていないのはこのためであると推測される。しかしながら、大気分子の散乱に対する感度は校正に用いるには十分とは言えず、水雲などの自然の散乱体を利用した校正手法が望まれる。そこで本研究では、CHM 15k について、水雲を使った校正の可能性を検討した。

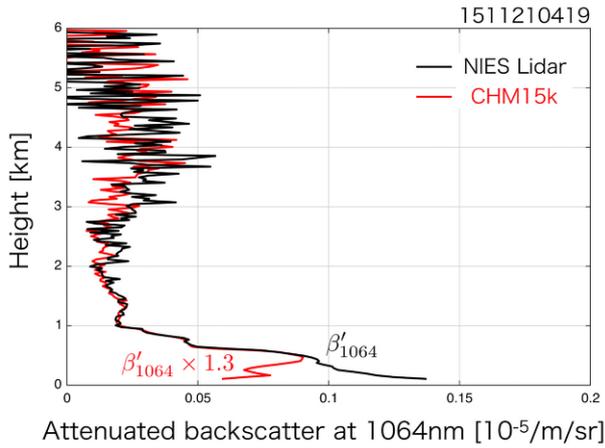


Fig.3. Comparison of attenuated backscattering coefficient profiles measured with CHM 15k and the AD-Net NIES lidar for cloud free case.

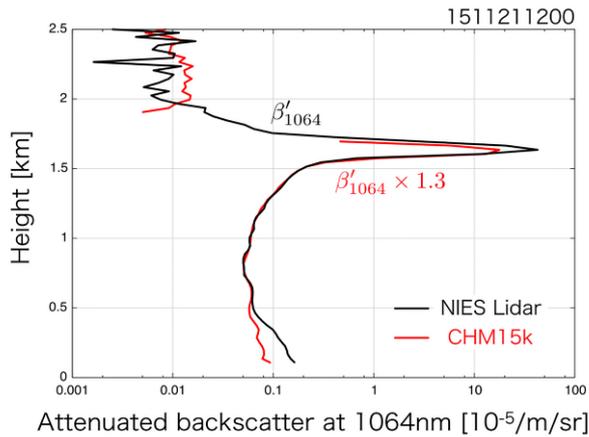


Fig.4. Comparison of attenuated backscattering coefficient profiles measured with CHM 15k and the AD-Net NIES lidar for cloud case.

4. 水雲を使った CHM 15k の校正の可能性

下層の水雲のライダー比の気候値が分かっているならば、水雲の散乱信号を使って装置定数を校正することが可能である。減衰後方散乱係数の距離方向の積分値 γ' は、多重散乱の効果を含めた有効ライダー比 S^* に逆比例する。すなわち、 $S^* = 1/(2\gamma')$ である (C.M.R. Platt, 1973)¹³⁾。これを利用して、 S^* が気候値に合うように装置定数を決定すればよい。この手法は、O'Connor ら⁹⁾ によって、シーロメータの校正手法として提案され、詳細に検討されている。 S^* は、単一散乱に対するライダー比 S と多重散乱の因子 η の積 $S^* = \eta S$ である。 η は 1 から 0.5 の間の値を取り、多重散乱がなければ $\eta = 1$ 、多重散乱が大きいくほど小さくなる。多重散乱は視野の大きさ（視野角ではなく各高度について受信する大気の面積）に依存して大きくなるので、上空ほど多重散乱は大きく η

は小さくなり 0.5 に近づく。単一散乱の S は直径数ミクロン以上の水滴ではおよそ 18 sr であるが、粒径が数ミクロン以下になると大きな値になる⁹⁾。

Fig. 5 に CHM 15k と AD-Net ライダーの 2015 年 11 月 19 日と 21 日のデータについて求めた S^* を示す。AD-Net ライダーについては、1064nm と 532nm の両方に対する S^* を示した。また、532nm の積分偏光解消度も示している。CHM 15k は係数を調節している。 S^* の値は、雲底高度の低い 21 日の方が大きく、また、AD-Net ライダーと CHM 15k で同様の変化を示している。このことは、強い信号について CHM 15k の光子カウンタの応答が補正できれば、水雲を使った装置定数の校正が可能であることを示している。同じ散乱体からの CHM 15k と AD-Net ライダーの信号強度の散布図を見ると CHM 15k の信号は強度とともに飽和するものの 1 対 1 の対応が見られるため応答特性の補正が可能である。

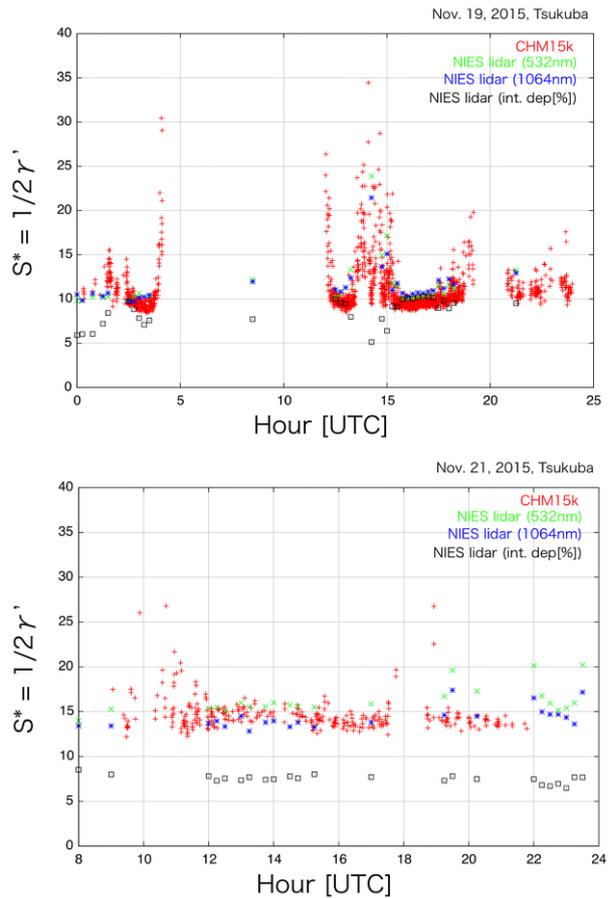


Fig. 5. S^* derived from CHM 15k (1064 nm) and AD-Net NIES lidar (1064 nm and 532 nm) for Nov. 19 and Nov. 21, 2015. (The sensitivity of CHM 15k is scaled.) Integrated depolarization ratio derived from AD-Net lidar (532 nm) is also shown.

AD-Net ライダーの積分偏光解消度を見ると、雲底

の高い11月19日の方が大きく、多重散乱が大きいことと対応している。CHM 15kについては、偏光解消度測定機能付きの装置も開発されており、近く、市販される。雲底高度と偏光解消度の2次元の空間において S^* の気候値を求めて検証に用いることができると考えられる。

5. おわりに

AD-Net ライダーとの比較実験により CHM 15k はエアロゾル観測に十分な感度を持つことが示された。両者で測定されたエアロゾルプロファイルはよく一致したが、雲の信号波形のピークが CHM 15k では低いという不一致が見られた。これは、CHM 15k の受信系のフォトンカウンティングの数え落としによる。しかし、CHM 15k と AD-Net ライダーの信号強度の間には1対1の対応があり、CHM 15k の信号強度の補正が可能である。従って、CHM 15k においても水雲の信号を用いた装置定数の校正が可能である。今後、 S^* および積分偏光解消度の気候値についてさらに検討する計画である。

参考文献

1) M. Wiegner, F. Madonna, I. Binietoglou, R. Forkel, J. Gasteiger, A. Geiß, G. Pappalardo, K. Schafer, and W.

Thomas; *Atmos. Meas. Tech.* **7** (2014) 1979-1997.

2) K. Kawai, K. Kai, Y. Jin, N. Sugimoto, and D. Batdorj; *SOLA* **11** (2015) 156-159.

3) Y. Jin, K. Kai, K. Kawai, T. Nagai, T. Sakai, A. Yamazaki, A. Uchiyama, D. Batdorj, N. Sugimoto, T. Nishizawa; *J. Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer* **153** (2015) 49-56.

4) Y. Jin, K. Kai, K. Kawai, N. Sugimoto, T. Nishizawa, I. Matsui, A. Shimizu, and D. Batdorj; *Proc. of SPIE* **9262** (2014) 92620M.

5) Y. Sasano and H. Nakane; *Appl. Opt.* **23** (1984) 11-13.

6) EUMETNET, ALC Network page;

<http://eumetnet.eu/alc-network>

7) TOPROF home page; <http://www.toprof.imaa.cnr.it>

8) F. Madonna, F. Amato, J. Vande Hey, and G. Pappalardo; *Atmos. Meas. Tech.* **8** (2015) 2207-2223.

9) E. J. O'Connor, A. J. Illingworth, and R. J. Hogan; *J. Atmos. Ocean Tech.* **21** (2004) 777-786.

10) M. Wiegner, and A. Geiß; *Atmos. Meas. Tech.* **5** (2012) 1953-1964.

11) M. Hervo, Y. Poltera, and A. Haefele; *Atmos. Meas. Tech.* **9**, (2016) 2947-2959.

12) N. Sugimoto, I. Matsui, A. Shimizu, T. Nishizawa, Y. Hara, C. Xie, I. Uno, K. Yumimoto, Z. Wang, and S.-C. Yoon; *Proc. of SPIE* **7153** (2008) 71530A-1-13.

13) C. M. R. Platt; *J. Atmos. Sci.* **30** (1973) 1191-1204.