

VAISALA



ホワイトペーパー

ヴァイサラ CL61 ライダーシーロメータ

シーロメータによる偏光解消計測

偏光解消により深い洞察を得る

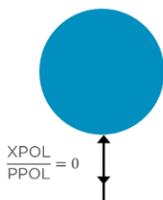
ヴァイサラは、偏光解消計測機能を高性能のプロファイリングシーロメータに導入し、分析とアプリケーションに新たな基準を打ち立てています。偏光解消は、水雲と氷雲、降水タイプ、融解層を容易に識別できるほか、エアロゾル、煙、埃、火山灰を監視する可能性を提供します。

1 偏光解消とは

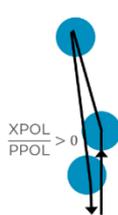
ライダーシーロメータは、直線偏光レーザーパルスを発射します。この光の一部が散乱して計測機器に戻ると、偏光方向が変わる可能性があります。この偏光解消は、散乱体の形状や向き、レーザー波長によって大きく変化します。

球形散乱体

受光器に戻ってくるレーザーパルスは、180°のバックスキャット角度において、水雲の水滴や小



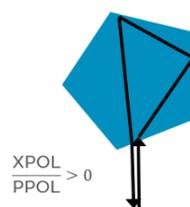
さな雨滴などの均一な球形散乱体と相互作用しています。散乱事象の対称性により、検出された反射信号では偏光は解消されません。



水雲などのように光学的に厚い媒体内での多重散乱は、散乱体が球形の場合でも偏光解消が発生する可能性があります。検出された光の一部は、180°から外れた角度で前方散乱や後方散乱を起こしながらも受光器に到達することがあります。

非球形散乱体

非球形の固体粒子は、固体-気体界面での多重内部反射により、大きな偏光解消を引き起こします。また、底面が平らな大きな雨滴も、一定の偏光解消を引き起こします。



2 偏光解消度

ライダーの偏光解消の程度は、偏光解消度 (LDR) で表すことができます。LDRは、垂直偏光または交差偏光 (XPOL) 成分と水平偏光 (PPOL) の信号成分の比率であり、ゼロ以上の値を示します。PPOLは大気中の粒子の主要なバツ

クスキャット信号成分であるため、最大LDR値は1未満になります。粒子と空気分子の双方が偏光解消の程度に影響し、これらの両方の成分が含まれているものは、体積偏光解消度 (VDR) として知られています。正確な偏光解消計測に

は、埃、煙、火山灰、境界層のエアロゾルなどによる比較的高いバックスキャットが必要で

3 CL61による偏光解消計測

CL61 ライダーシーロメータは、VDRを計測します。CL61の動作波長である910.55nmは、偏光解消計測のための新しいレーザー波長であり、通常300~500nmの紫外線範囲の偏光解消チャンネルを使用する従来の研究用ライダーと比較して、いくつかの利点があります。910nmのエアロゾル層は分子散乱の強い波長依存性 (λ^{-4}) により、分

子信号によって覆われないため、より確認しやすくなります。またこれは、CL61で計測されたVDRが、より短い波長で動作するライダーで計測された粒子偏光解消度 (PDR) と同様であることも意味します。

CL61はXPOL信号とPPOL信号を交互に取得し、それぞれの計測時間は0.2

秒です。地上から15.4kmの計測範囲までの鉛直プロファイルは、解析前の5秒間の時間平均値になります。CL61では、同軸光路上の単一光子アバランシェフォトダイオード検出器の前に2つのフィルタを配置して偏光解消を計測します。XPOL信号とPPOL信号に同じ受光器モジュールが使用されているため、受光感度の校正は必要ありません。

4 偏光解消の解釈方法

鉛直偏光解消度プロファイルにより、液相と固相の降水、雲相、融解層など、複数の気象現象を容易に識別することができます。液相の散乱体の値はほぼゼロであり、複雑な氷晶状の散乱体のより大きな値とは明らかに識別することができます。

ほとんどの場合、ボックスキャット (ABS) と偏光解消度 (LDR) の時間高度断面図を並べて、目視で確認すること

をお勧めします。信号強度、変動、パターンの形状に見られる局所的な気象事象の特徴的な挙動は、実践を重ねることで明確に認識できます。たとえば、LDR値だけを参照した場合、ABS情報がなければ、一部のエアロゾルと水雲の識別が困難なことがあります。また、特にモデル予測やバックワードトラジェクトリ、または補完的なライダー計測などの追加情報が得られる場合は、エアロゾルの特性評価も可能です。

1つの波長で動作する偏光ライダーでは、エアロゾルの種類を単独で明確に識別することはできません。エアロゾルは混合物にも存在し、吸湿成長を経ることで、識別が複雑になるからです。しかし、このようなライダーは、降雪、過冷却の水雲、着氷性の雨など、複数の気象状況を迅速かつ確実に特定することに役立ち、エアロゾル研究における研究用ライダーを補助します。次の図は、さまざまな散乱体のおおよそのLDR値の範囲

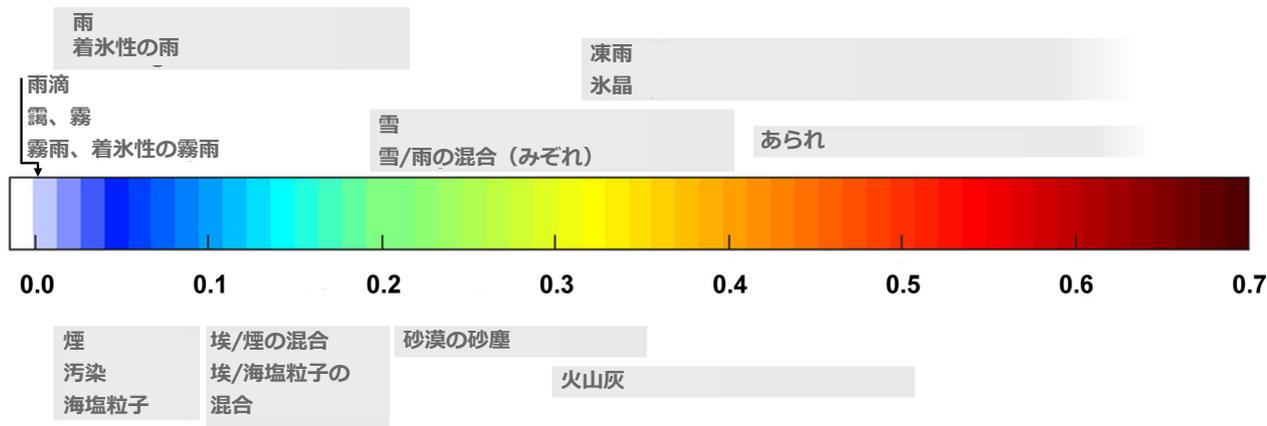


を灰色の帯の幅で示しています。カラーバーの上部に表示されている値の範囲は、910nmの偏光解消計測ライダーを

使用したヴァイサラの研究で観測されたものです。カラーバーの下部に記載された値の範囲は、英国気象庁の作業報

告書（本資料の後半を参照）によるものであり、910nmでの観測を正確に表していない可能性があります。

一般的なLDR値のおおよその範囲



5 事例

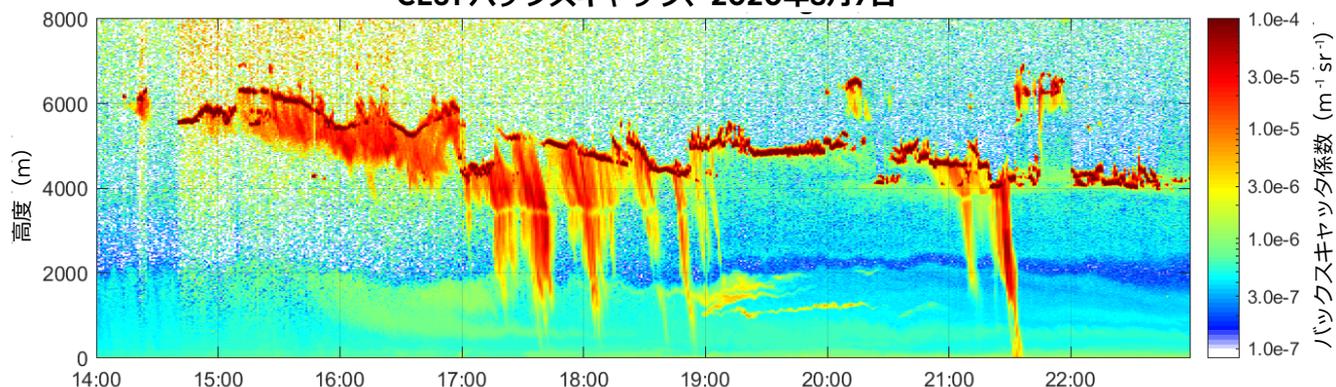


次の事例では、英国のカーディントンにおける中緯度の夏の条件、およびフィンランドのバラスにおける北極の冬の条件と非常にきれいな空気など、異なる気候と季節で計測されたさまざまなタイプの雲、降水、エアロゾルについて説明しています。

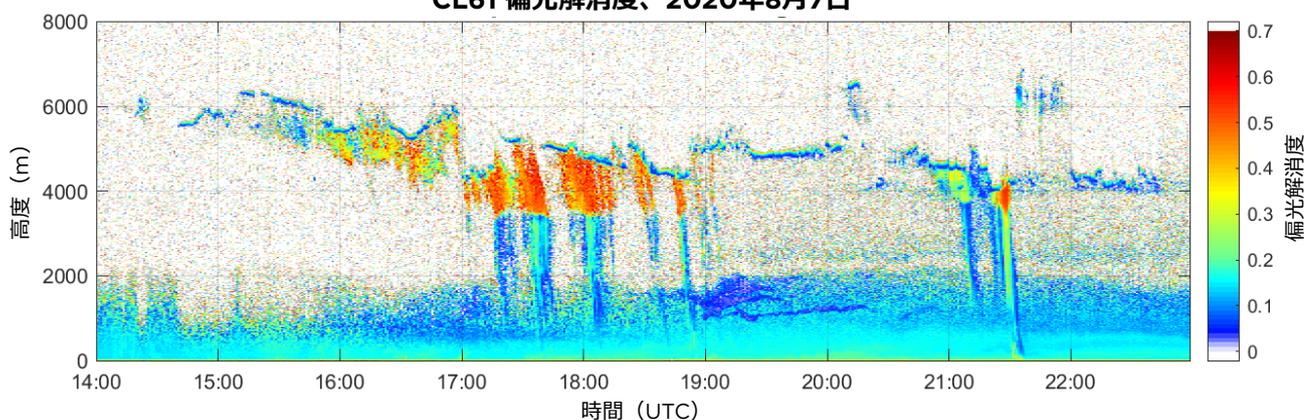
各事例は、ボックスキャッタ (ABS) と偏光解消度 (LDR) の時間高度断面図により図示されています。図のx軸は協定世界時 (UTC) を示し、y軸は計測機器からの高度 (メートル) を示しています。色は、上図ではボックスキャッタ係数を表し、下図ではLDR計測値を表します。データは平均化され、1分間の平均値としてプロットされます。鉛直解像度は4.8メートルです。

事例1. 水雲、融解層、境界層のエアロゾル

CL61 バックスキャッタ、2020年8月7日



CL61 偏光解消度、2020年8月7日



事例1は、2020年8月7日に英国のカーディントンにおいて9時間にわたって計測された結果を示しています。水雲の層は、バックスキャッタの図内で、この期間全体にわたって暗赤色の薄い層として確認できます。個々のバックスキャッタプロファイルは、水雲の層でのピーク信号を示しています。水雲の層に大量の小さな雲粒が含まれる場合、信号強度は最大になります。信号は通常、層内で減衰し、信号を受信することはできません (ノイズのみが表示されます)。球形の液滴は、線形偏光解消の図でそれらの層の値がゼロに近いことが確認できます。

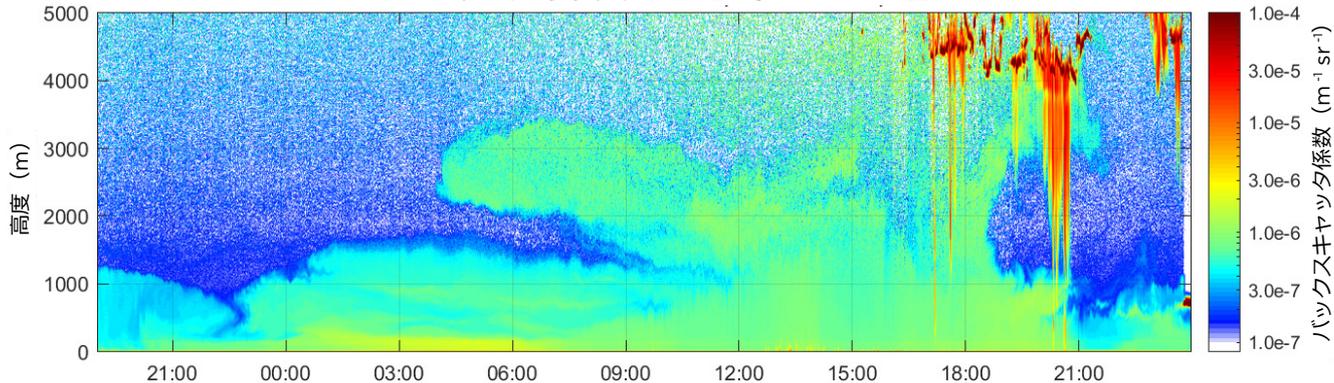
ある時間帯 (15:00~19:00と21:00~22:00) において、これらの水雲の層による降水が発生しています。この降水は、バックスキャッタの図では、強いピーク信号の下に垂直方向に伸びている赤色の信号として確認できます。このことは、降水領域でLDRの値が変化し、高い値は氷/雪を表し、低い値は雨滴/霧雨を表している偏光解消度の図からも確認できます。なお、ほとんどの場合、降水は地面に到達せず、大気中に蒸発しています。

降水内の融解層 (17:15~19:00、高度約3,700m) は、非球形の雪/氷晶が雨滴に融解したことを示すオレンジから青への急激な変化が見られるため、偏光解消度の図から容易に識別することができます。融解層は、降水信号内にある信号の弱まり (バックスキャッタプロットで黄色の縞として表示される、いわゆる暗帯) として、バックスキャッタの図からも確認できます。

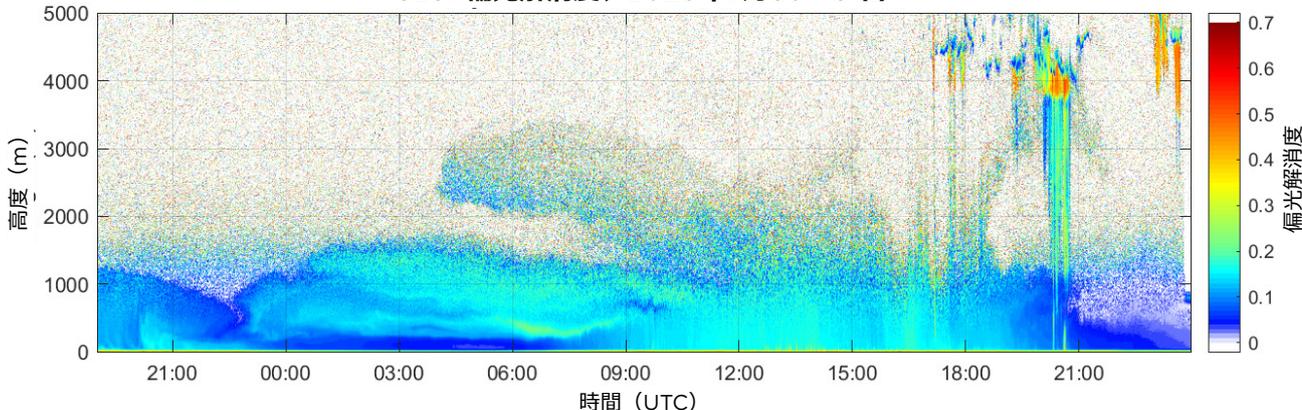
エアロゾル信号は、どちらの図でも境界層 (高度2,000m未満) に見られます。

事例2. 日中の対流境界層を含むさまざまなエアロゾル層。水雲、降水、融解層

CL61 バックスキャッタ、2020年7月30～31日



CL61 偏光解消度、2020年7月30～31日



事例2は、2020年7月30～31日に英国のカーディントンにおいて29時間にわたって計測された結果を示しています。この事例では、高度3,500m未満でさまざまなエアロゾル層が計測されたこと、7月31日17:00 (UTC)以降に複数の雲と降水が発生したことが示されています。バックスキャッタと偏光解消度の図のいずれにも、エアロゾル層が確認できます。バックスキャッタと偏光解消度

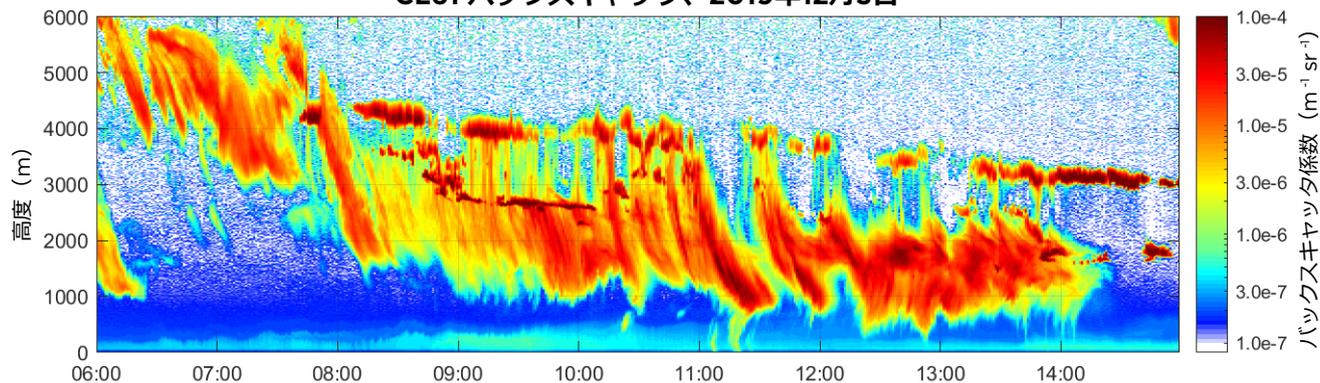
の図を確認すると、前日から夜間の大気境界層に残留層が見られ、日中の対流境界層が午前中に成長し始めていることが確認できます。さまざまな層がバックスキャッタの図から識別できますが、これらの層では偏光解消度の値が異なることは明確であり、これらの層に含まれるエアロゾルの成分が異なることを示唆しています。

偏光解消度の図により、エアロゾルは夜間に層状になりやすく、混合は昼間に発生することがわかります。

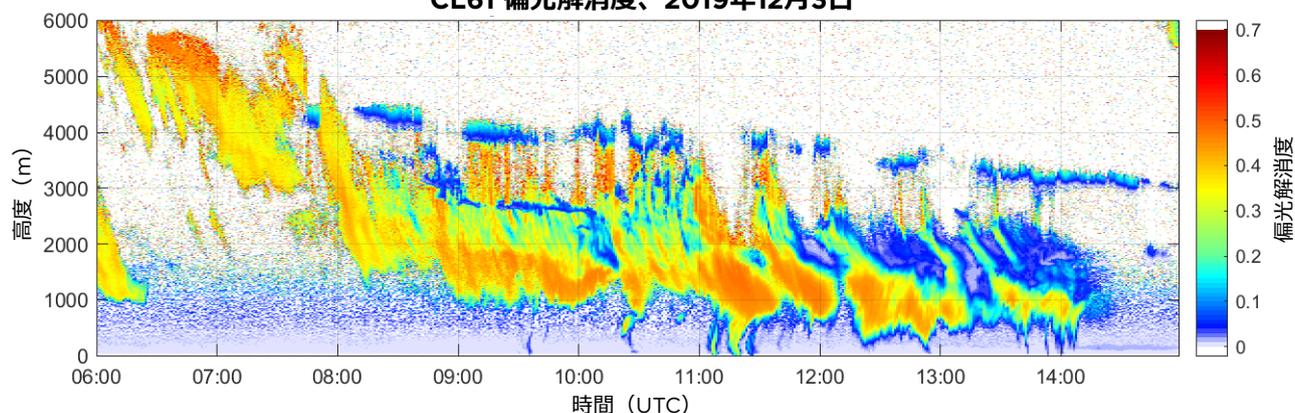
20:00～21:00 (UTC)の降水により、高度3,700m付近に融解層があることがわかり、この降水は偏光解消度の図から非常に明確に識別することができます。また、バックスキャッタの図でも確認できます。

事例3. 2層の水雲、氷晶、地上に到達する降雪

CL61 バックスキャッタ、2019年12月3日



CL61 偏光解消度、2019年12月3日

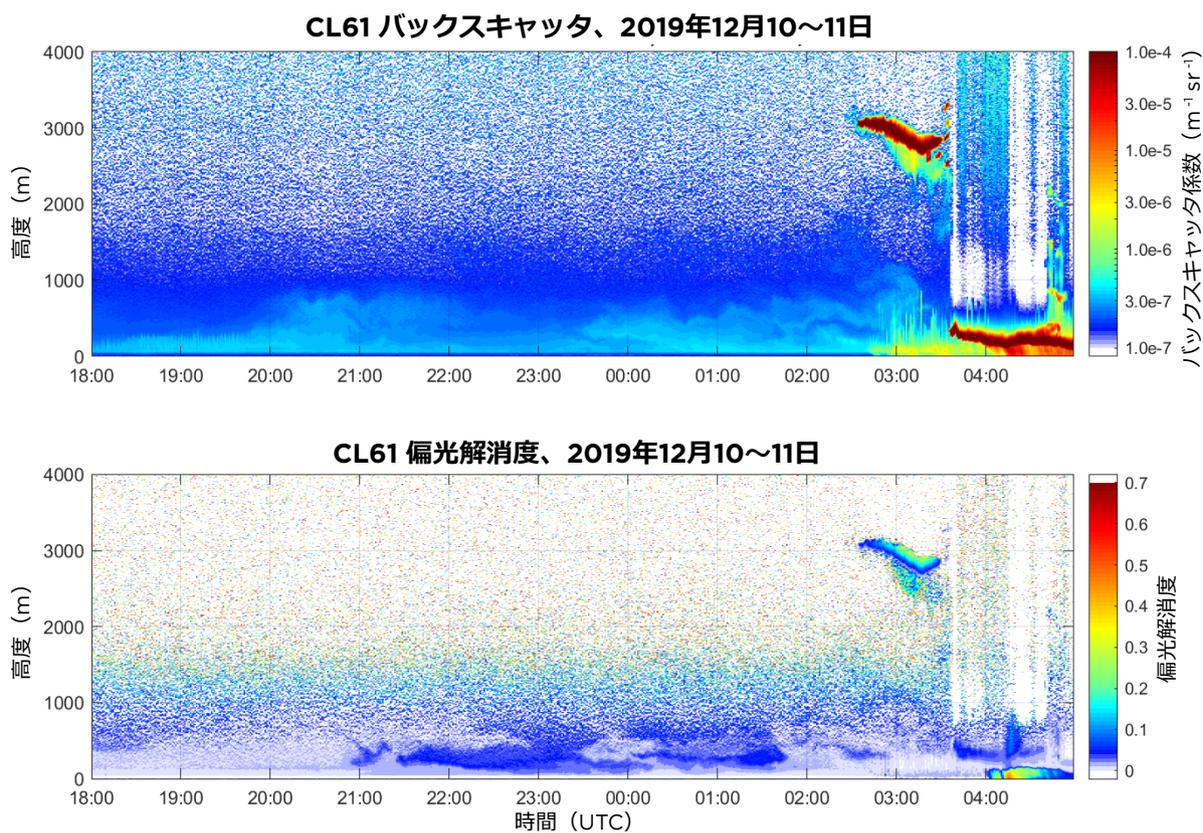


事例3は、2019年12月3日にフィンランドのパラスにおいて9時間にわたって計測された結果を示しています。この事例では、水雲の層と降水を明確に識別することができます。水雲の層は、バックスキャッタの図では暗い赤色の層として、偏光解消度の図では青色で示されてい

ます。降雪は、バックスキャッタの図では赤/オレンジ/黄色で、また、偏光解消度の図ではオレンジ/黄色/緑で、垂直方向に延びるパターンとして示されています。降雪時の偏光解消度の違いは、氷晶の特性/数が異なることを表しています。

9:00から10:00 (UTC) の間に、複数の液体層と降雪が見られます。低層の液体層は光学的に薄いため、ライダー信号は層内で完全に減衰せず、上の2つ目の液体層を識別することができます。液体層での多重散乱効果は、水雲層内、特に高層において、高度とともに偏光解消度のわずかな増加として確認できます。

事例4. 境界層のエアロゾル層の変動。水雲と低層雲からの降水



事例4は、2020年12月10～11日にフィンランドのパッラスにおいて11時間にわたって計測された結果を示しています。この事例では、大気境界層でエアロゾル層が変動していること、2:30 (UTC) 以降高度3,000mで、また、3:30 (UTC) 以降高度500m未満で複数の雲と降水が発生したことが示されています。バックスキャッタの図から識別できるエアロゾル層は、異なる偏光解消の値を示しています。エアロゾル特性が異なる可能性のある層は、偏光解消度の図から容易に識別できます。

フィンランドのパッラスのきれいな空気では、たとえば、境界層にエアロゾルが多い英国のカーディントンで計測された事例1および2と比較した場合、境界層でのバックスキャッタ信号が低くなります。高度3,000mの水雲の層は多重散乱効果を示し、低層の水雲は地上に降雪をもたらします。



6 性能評価

フィンランド気象研究所による パラスにおける雲の実験

CL61 LDRの計測値は、フィンランド気象研究所が使用する研究機関レベルの機器であるPollyXT ラマンライダー (<http://polly.tropos.de/>) と比較されました。計測作業は、フィンランド、ラップランドのパラスにおいて2019年から2020年の冬に実施され、2019年10月から12月の間は計測が重複しました。作業で重視した領域は雲で、北極圏の環境で計測されたさまざまな種類の雲から成るデータセットと比較がされました。910nmでのCL61のVDR計測値を、532nmでのPollyXTのVDRお

よびPDR計測値と比較し、1時間の平均値を算出しました。

次の図は、結果の例を示しています。x軸は偏光解消度を示し、y軸は計測機器からの高度を示します。計測値は、同じ垂直グリッドに内挿されています。

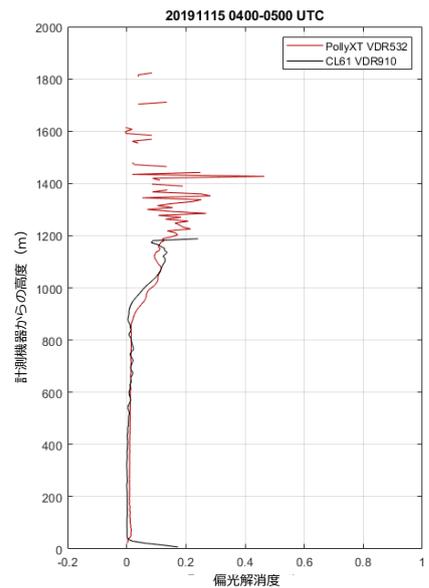
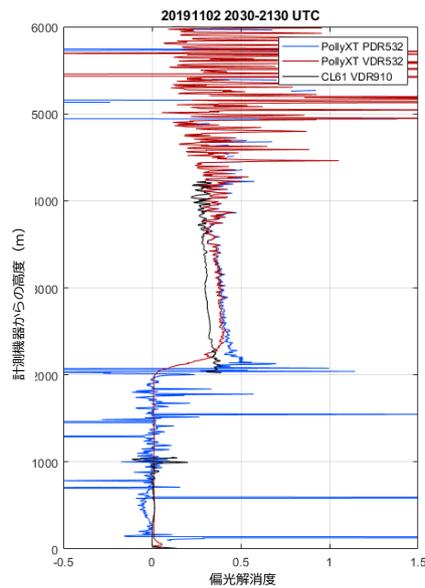
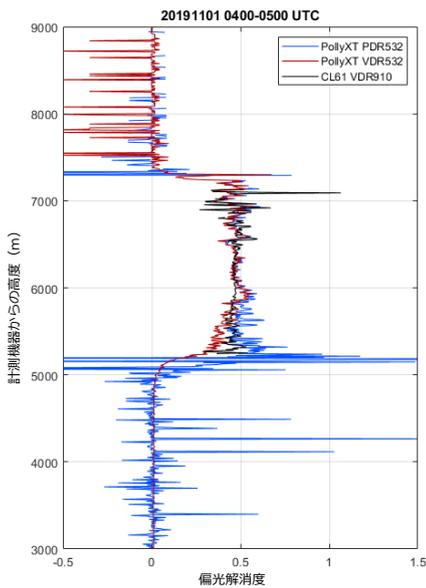
左の例は、高度5~7kmの氷雲を示します。波長が異なるにもかかわらず、2つの計測機器の結果は適切に対応しているのがわかります。

中央の例は、高度2~4kmにある別の氷雲を示しています。910nmでのCL61のVDRは、532nmでのPollyXTのVDRお

よびPDRの結果と比較してわずかに小さい値となっています。

右の例は、高度約900mにある水雲を示しており、予想どおり、CL61のVDRとPollyXTのVDRはいずれもゼロに近い値を示しています。雲の中の偏光解消度の増加は、多重散乱効果によるものです。

全体的に、CL61とPollyXTとの間の偏光解消度の計測値は、分析したすべての例で適切に一致していました。CL61がPollyXTと比較して小さい値を示した事例もありますが、波長に対する粒子の反応が異なるため、すべての状況で値が正確に一致するとは限らないことに注意する必要があります。



英国気象庁による性能評価作業

CL61のLDRの計測値は、英国気象庁が使用する研究機関レベルのRaymetrics LR111-D300 ラマンライダーとも比較されました。Raymetrics ライダーのVDRおよびPDRの値は、355nmで計測されています。計測作業は、2020年3月から9月にかけて英国のカーディントンにおいて実施されました。分析された事例では、エアロゾル研究が重視され、英国気象庁によって実施されました。

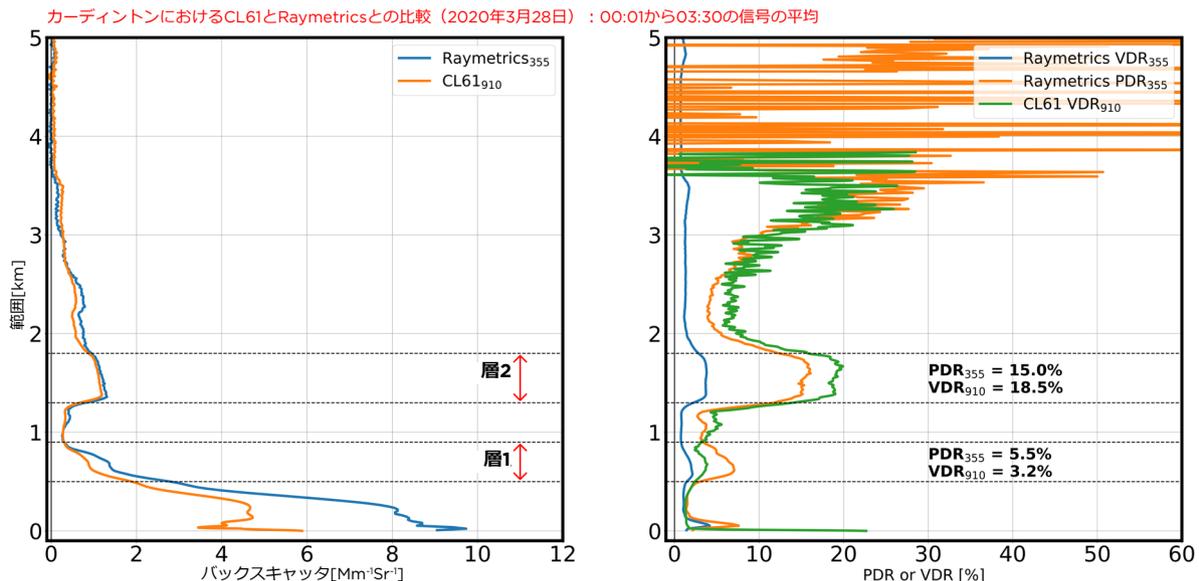
次の図は、境界層上のエアロゾル層を表す1つの事例での比較結果を示しています。左の図は、バックスキヤッタ信号を示し、Raymetricsは青で、CL61はオレンジで表示されています。

右の図は、偏光解消度の計測値を示しており、RaymetricsのVDRは青、RaymetricsのPDRはオレンジ、CL61のVDRは緑でそれぞれ表示されています。

355nmでのPDRと910nmでのVDR（3.5時間の平均）は、2つの異なる層で同様の構造と変動を示しています。しかし、低層（層1）では、910nmでのVDRは355nmでのPDRよりも小さく、高層（層2）ではこれが逆になっています。報告書では、これらの相違は2つの層を構成するエアロゾルの変化による可能性が高いと考えられ、同様の波長依存性が文献にも記載されていると結論付けられています。さらに、HYSPLITによるトラジェクトリ解析では、エアロゾル成分が異なるという結論を裏付ける、こ

れら2つの層が異なるものに由来することが示されました。

さらに詳細な解析結果やその他の事例は、報告書の全文（ヴァイサラにお問い合わせください）をご覧ください。今回の計測作業の結果から、CL61はエアロゾルのモニタリングに適しており、偏光解消計測機能を使用してエアロゾルの分類や定量化ができる可能性があると結論付けられました。さらに、Raymetrics ライダーと併用することで、CL61からの追加波長によりエアロゾルの分類に関する貴重な情報が得られる可能性があります。また、CL61の偏光解消計測は、混合層高度の識別を改善するための優れた可能性を示しました。



© British Crown copyright 2020, Met Office

概要

偏光解消機能を備えたヴァイサラ CL61 ライダーシーロメータは、さまざまなアプリケーションで大きなメリットが得られることを示しています。雲底の高さの計測だけでなく、雨滴、霧雨や降雨、雪や氷晶、埃、火山灰や砂など、さまざまな粒子の特性評価にも使用できます。また、従来のシーロメータよりも効果的に着氷状況や凍結状況、混合層高度を検出することもできます。CL61は、さまざまな気候の下で行われた計測作業において、研究機関レベルのさまざまなライダーと比較され、遜色がないことが明らかとなりました。

VAISALA

vaisala.com/ja/CL61

詳細は以下よりお問い合わせください。
www.vaisala.com/ja/contactus

Ref. B212267JA-A ©Vaisala 2021

本文書は著作権保護の対象となっており、すべての著作権はヴァイサラと関連会社によって保有されています。無断複写・転載を禁じます。本文書に掲載されているすべてのロゴおよび製品名は、ヴァイサラまたは関連会社の商標です。私的利用その他法律によって明示的に認められる範囲を超えて、これらの情報を使用（複製、送信、頒布、保管等を含む）をすることは、事前に当社の文書による許諾がないかぎり、禁止されます。技術的仕様を含め、すべての仕様は予告なく変更されることがあります。