

ライダーによる雲・エアロゾルの連続観測

杉本伸夫、松井一郎、劉 兆岩、高藪縁（国立環境研究所）、
浅井和弘（東北工業大学）、清水邦夫（慶応大学）

要旨

国立環境研究所では、つくばにおいて、ライダーによる雲・エアロゾルの常時連続観測を96年から実施している。このライダーは、エアロゾルの鉛直分布の気候学的な解析に関する研究の中で観測頻度を上げるために開発した装置であるが、既に2年間以上にわたってつくば上空の雲・エアロゾルの鉛直分布が得られている。このデータを用いて、エアロゾルの消散係数の高度分布の解析、雲の高度毎の出現頻度の統計的な解析、巻雲の出現頻度と光学的厚さの解析などを進めている。雲に関するこれらの研究は、2000年代の始めの打ち上げを目指してNASDAで開発されている実証衛星ライダーの解析アルゴリズム開発やデータ利用手法の基礎となるものでもある。この観点から、高スペクトル分解ライダーによる観測も並行して行っている。高スペクトル分解ライダーでは、消散係数と後方散乱係数の比などを仮定することなく、雲・エアロゾルの光学特性を定量的に測定できる。一方、昨年、インドネシア、ジャカルタにおいてもライダー観測を開始した。このデータも利用して、雲の分布構造と放射特性に関する研究を行う計画である。さらに、雲・エアロゾルのグローバルな分布を観測するために海洋地球研究船「みらい」を用いた観測を今年から開始する。

1. はじめに

国立環境研究所では、ライダーによる雲・エアロゾルの観測研究を継続的にやってきた。このライダー観測は主に科学技術庁促進費のエアロゾルに関する研究課題の中で実施しているが、この研究では気候モデルの入力となるようなエアロゾルの分布モデルの構築を目的として、対流圏エアロゾルの鉛直分布の気候学的な解析を行っている。当初、国立環境研究所の掃引型の大型ライダーの観測を中心に、サンフォトメータ、オリオールメータ（スカイラジオメータ）などの受動型の測器と組み合わせることによって、定量的にエアロゾル分布を導出する方法を開発し観測研究を行ってきた¹⁾。この方法は、観測が晴天時に限られることと、解析において大気的光学的性質の一様性を仮定する必要があるという制約があるため、その後、これに加えて、新たに2つの方向で研究を進めてきた。ひとつは、観測頻度の向上。もうひとつは、定量的観測のためのライダー技術の高度化である。観測頻度の向上のために小型の全天候型ライダーを開発し1996年からつくばにおいて連続観測を開始した²⁾。また、昨年、インドネシア、ジャカルタのライダーデータも取得している³⁾。定量的なライダー観測技術に関しては、消散係数と後方散乱係数を独立に測定することができる高スペクトル分解ライダーを開発し観測を開始した⁴⁾。これらのライダー観測では、エアロゾルだけでなく雲に関するデータも継続的に得られている。

一方、実証衛星2号機に搭載される衛星搭載ライダー(MDS Lidar)の開発が、2000年代の始めの打ち上げを目指して宇宙開発事業団で進められている。衛星搭載ライダーは、雲の多重構造や、巻雲やエアロゾルのグローバルな分布の観測に極めて有効であると期待されている。国立環境研究所では衛星搭載ライダーのデータ解析アルゴリズムやデータ利

用手法を内容とする研究を開始した。この研究の中では、衛星ライダーのデータ解析に必要な、雲・エアロゾルの光学パラメータを得るために地上ライダー観測のデータを利用している。また、解析アルゴリズムの検証のために高スペクトル分解ライダーのデータを利用している。さらに、衛星ライダーデータの利用の予備研究として、巻雲の出現頻度とその光学的厚さの統計的解析や雲の多層構造の解析、モデル化等に関する研究を開始した。今後、地上ライダーの観測は、実証衛星ライダーの検証や、衛星ライダーデータを同時に利用する研究において重要となる。そのために、ネットワーク的な観測を充実する必要がある。

2. 小型ライダーによるつくばにおける雲・エアロゾルの連続観測

天候によらず無人で連続観測を行うために小型のライダーを製作した。これは、小型のフラッシュランプ励起QスイッチYAGレーザーを光源とする簡単なライダーである。検出器は光電子増倍管で、信号の記録には精度12ビットのA/D変換を用いている。測定波長は532nmの1波長で、ミー散乱のみの測定であるが、送受光用の窓を持つコンテナに設置することにより降雨時にも観測を中断することなく自動的に連続観測を行なうことができる。また、高感度、低感度の2つの受信チャンネルを持ち、火山噴火時には成層圏までの測定が可能である。この装置による観測は1996年から開始し、現在既に2年間以上のほとんど連続した雲・エアロゾルの鉛直プロファイルのデータが蓄積されている²⁾。

この小型ライダーは従来型の技術、すなわちフラッシュランプ励起YAGレーザーと光電子増倍管を用いたシステムであるが、現在のフラッシュランプ励起YAGレーザーの信頼性は非常に高くランプ交換の頻度は半年に1度程度で十分である。また、現在は行っていないが、偏光解消度の測定やYAGレーザーの基本波、第二、第三高調波の3波長の観測への拡張も容易である。

小型ライダーは1波長のミーライダーであるので、データ処理においては消散係数対後方散乱係数比などを仮定する必要があるが、エアロゾルについてはFernaldの方法等で散乱比あるいは消散係数として分布を求めることができる。また、雲については信号の高度方向の変化から雲底高度、雲頂高度を検出することができる。ただし、厚い雲の場合は雲頂までレーザーが達しないため雲頂高度は得られない。ライダー信号が得られている高度領域ではKlettの方法等でライダー方程式を解くことによって消散係数のプロファイルが得られる。

図2-1に国立環境研究所の小型ライダーの観測結果のクイックルック表示の例を示す。これは、距離補正ライダー信号の、時間・高度表示(THI)である。なお、クイックルック画像はWeb上に、一日に一回、前日までの10日間のTHI表示を公開している。(URLは<http://info.nies.go.jp:8094/~cml/>)

図2-2は連続観測を開始した1996年の6月から今年の8月までの雲低高度をプロットしたものである。圏界面高度の変化と対応して、上層の雲の高度は夏に高く、冬に低いことがわかる。これに対して下層の雲は夏に低く、冬に高い。さらに短い時間スケールで見ると数日の周期で数kmの高度領域で雲の通過する様子が見られる。図中で中層に縦の線状に見える部分はほとんどの場合、天気の変わり目で雲底高度が下降しているところである。地上からのライダー観測では、厚い雲の上が見えないので、上層の雲が見えていない場合が多いと思われるが、それでも統計的な取扱いは可能である。将来の衛星搭載ライ

ダーのデータ利用に関する研究の一環として、この雲底高度の統計的なモデル化に関する研究を行っている。

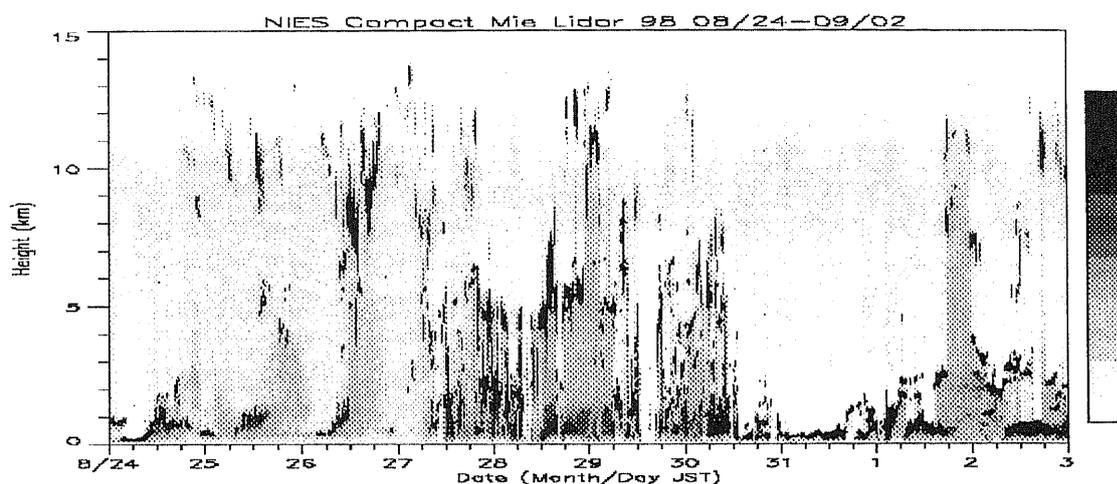


図2-1 国立環境研究所の小型ライダーの観測結果のクイックルック表示

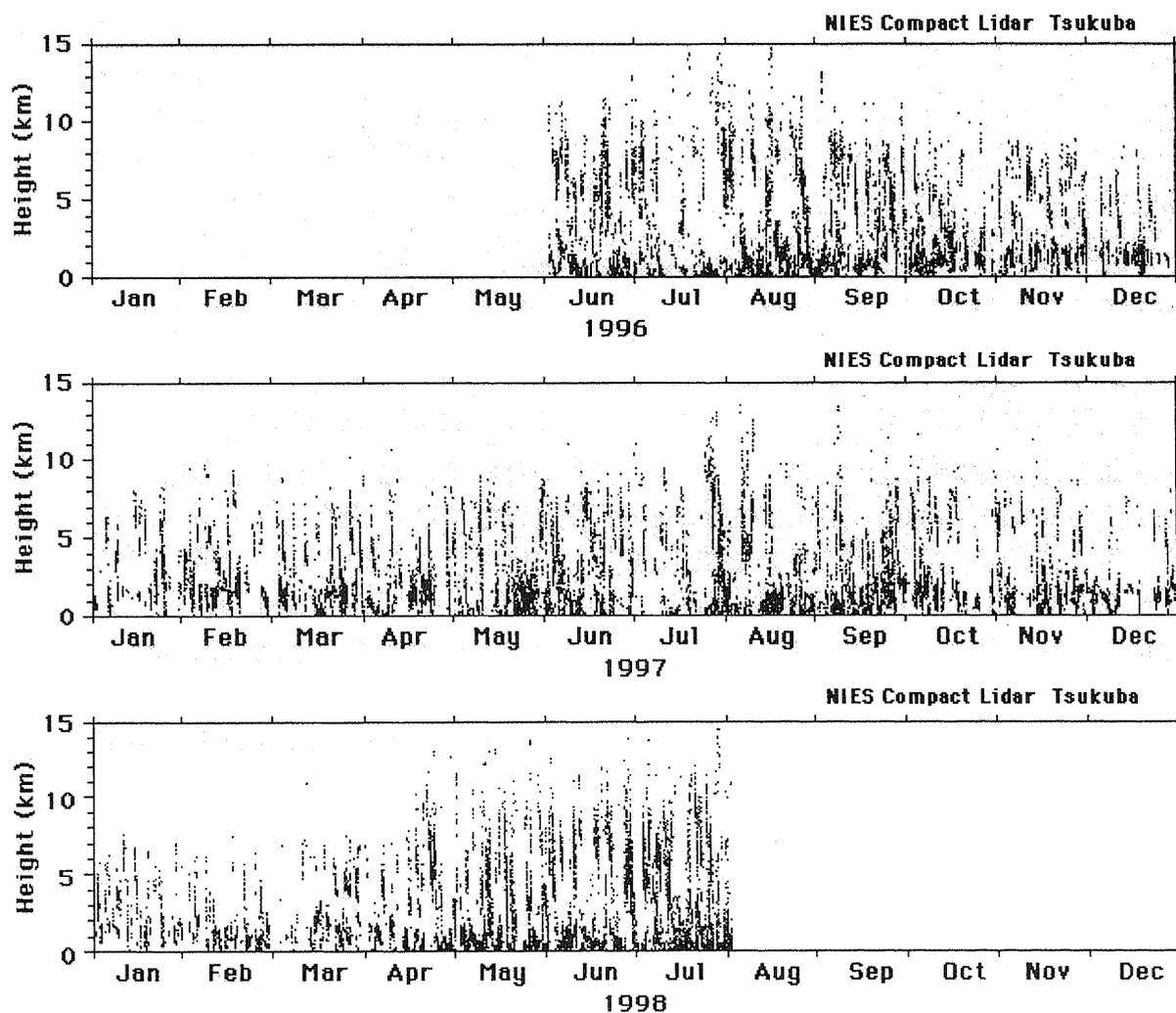


図2-2 雲底高度の年間を通じた変化

図2-3は小型ライダーのデータを用いた薄い雲の解析の一例である。光学的に薄い雲については、雲を透過した後ろの信号も十分なSN比が得られ、比較的正確に消散係数のプロファイルが求められる。図2-3の上は距離補正信号、下がFernaldの方法で求めた消散係数である。消散係数と後方散乱係数の比 (S_1) として2.0を仮定している。

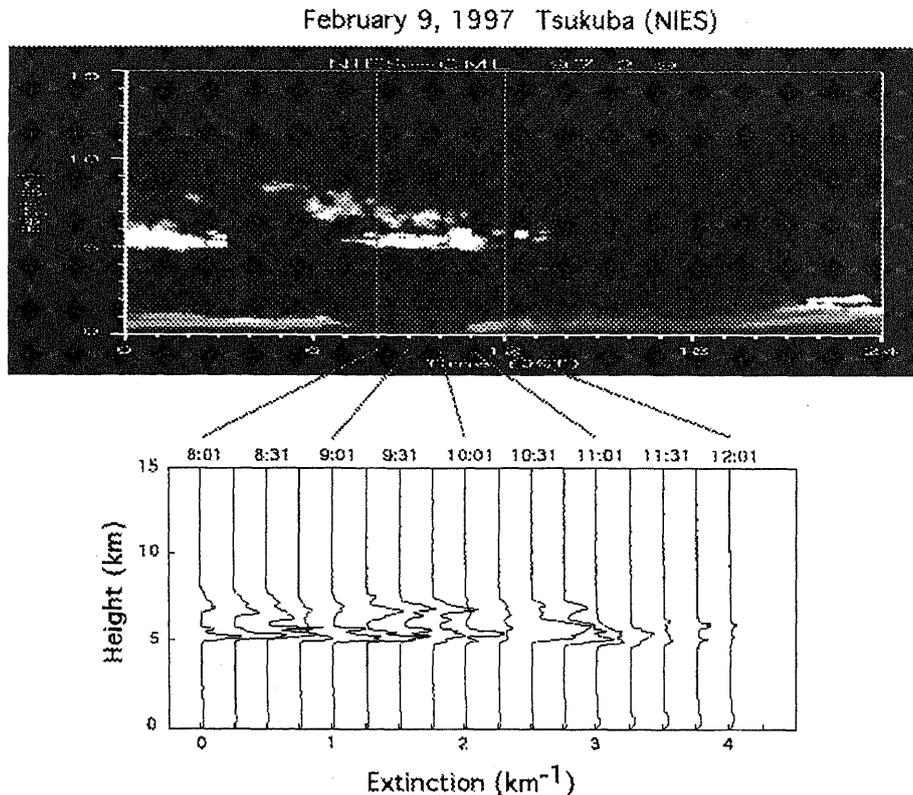


図2-3 小型ライダーデータを用いた巻雲の光学的厚さの解析

3. 高スペクトル分解ライダーによる雲・エアロゾルの光学特性の測定

雲・エアロゾルの光学的性質の定量的な観測のために、高スペクトル分解ライダー (High Spectral Resolution Lidar: HRSL)を開発した。この手法はライダー信号に含まれるミー散乱成分とレイリー散乱成分をスペクトル幅の違いを利用して分解し独立に計測するもので、エアロゾルの光学特性を仮定することなくレーザー波長におけるエアロゾルの消散係数、後方散乱係数のプロファイルを求めることができる。開発したHRSLでは分光素子としてヨウ素分子(I_2)のセルを用いた。図3-1にHRSLの構成を示す。光源としてインジェクションシーディング方式のパルスNd:YAGレーザーの第二高調波 (532nm) を用いた。レーザーのスペクトル線幅は200 MHz以下である。また、インジェクションシーダーの温度調節によって、レーザー波長をヨウ素の吸収線に同調した。ヨウ素分子吸収フィルターは長さ45 cm、内径5 cmのパイレックス製のセルで、温度を制御している。送信レーザー波長をヨウ素の吸収線に正確に同調するために光音響モジュレータを用いた波長モニターを開発した。受信望遠鏡は口径56cmのカセグレン型である。集光された信号を無偏光ビームスプリッターで2つのビームに分離し一方をヨウ素フィルターを通し、それぞれ光電子増倍管を用いて光子計数法により検出する⁴⁾。

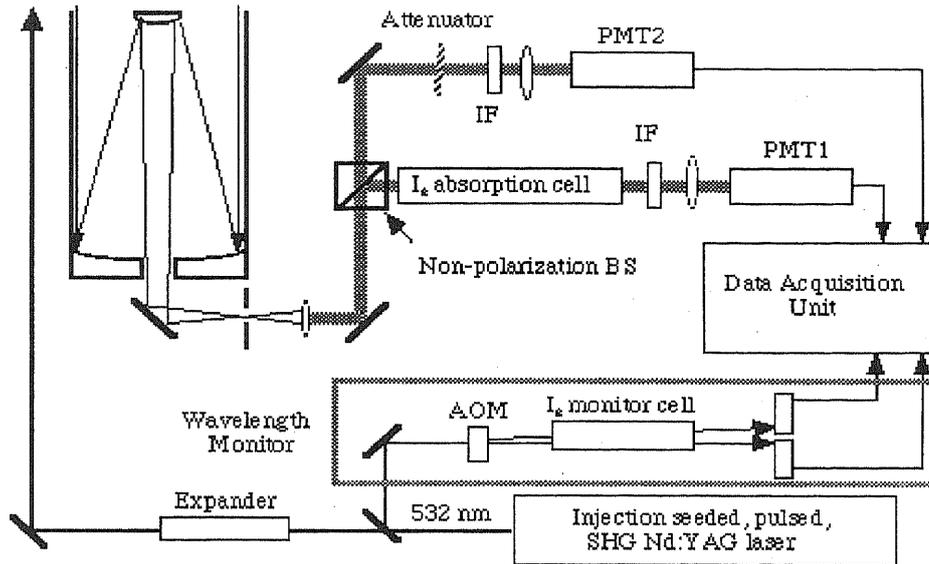


図3-1 高スペクトル分解ライダーの構成

図3-2 に観測したライダー信号の1例を示す。ch1はヨウ素セルを通過したレイリー信号、ch2はレイリーとミー信号の両方を含む信号である。この例では、ch2の信号により、7.6kmから9.4kmの高度にかけて2層構造の薄い雲があることが分かる。ヨウ素フィルターを通過したレイリーチャンネル(ch1)には雲による散乱信号が現われず、雲の消散による信号の減衰が示されている。ミーチャンネルとレイリーチャンネルの比から散乱比が求められる。また、レイリーチャンネルから雲の光学的厚さが求められ、さらに、 S_1 η パラメータ（ここで、 S_1 は雲の消散係数と後方散乱係数比、 η は多重散乱ファクタ）も求められる。この例では、得られた $S_1 \eta$ の平均値は、7.5 km~8.4 kmの層に対して14.6 (sr^{-1})、8.4 km~9.4 kmの層に対して25.4 (sr^{-1})であった。

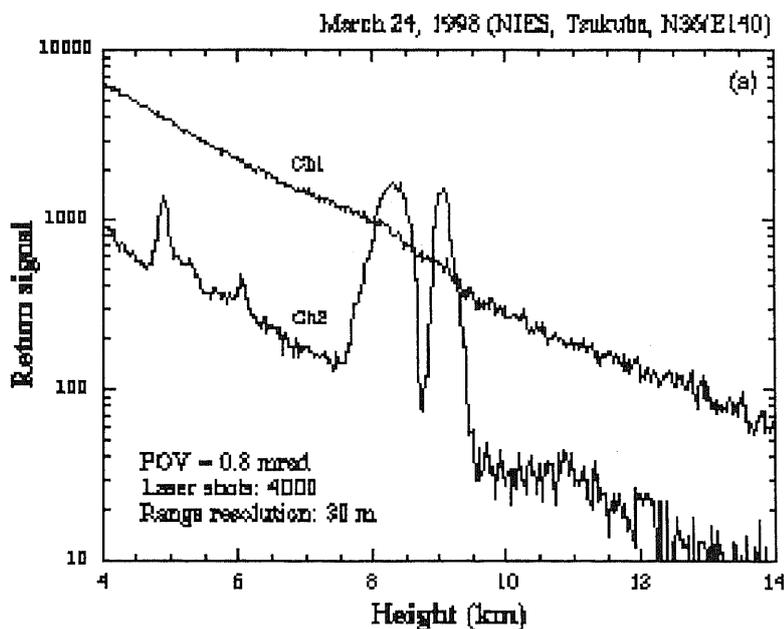


図3-2 高スペクトル分解ライダーの受信信号の例

このようにHSRLによって、雲・エアロゾルの光学的特性を高度毎に定量的に求めることができる。現在、巻雲やエアロゾル、黄砂、光学的に厚い雲などについて、HSRLを用いた観測研究を行っている。また、HSRLを用いて1波長のミー散乱ライダー信号の解析手法を検証することができるので、ライダー信号の解析アルゴリズムの研究にもHSRLを利用している。

4. インドネシアにおけるライダー観測

ライダー観測の頻度は小型ライダーによって改善されたが、地理的な変化を観測するためには地上ライダーを多地点に展開するか移動観測を行う必要がある。このような観点から、インドネシアジャカルタにおけるエアロゾル・雲のライダー観測を開始した。このライダーは新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) とインドネシア科学院の協プロジェクトで、ジャカルタの大気汚染の計測を目的として開発されたもので、特に海陸風による循環に着目して海岸線に垂直な線上の3地点にライダーが設置されている³⁾。

昨年(1997年)の夏から開始し、断続的にはあるが1年間を通じて大気境界層の観測データが得られている。当初、このライダー測定高度がデータ処理装置の問題で低層に限られたため、雲分布に関しては十分なデータを得ていない。現在はデータ収集システムを改良して対流圏上部までの観測を行っている。このライダーによる大気境界層の日変化の例を図4-1から図4-3に示す。

図4-1の9月25-27日の例は、海陸風の循環を伴う混合層の日変化が明瞭に捉えられた例である。夕方、高度1km付近に海風によって運ばれたエアロゾルの少ない気塊の流入が見られる。この時期は乾期の終わり頃で上空に雲はほとんどない。このような典型的な混合層のパターンが見られるのは、年間を通じてあまりないようである。

図4-2は雨期の例である。雨期と言ってもこの期間、雨はほとんど降っていない。混合層の構造は複雑であるが、発達した混合層の上に夜半にかけて雲ができるというパターンが見られる。図の黒い部分が雲による強い散乱である。

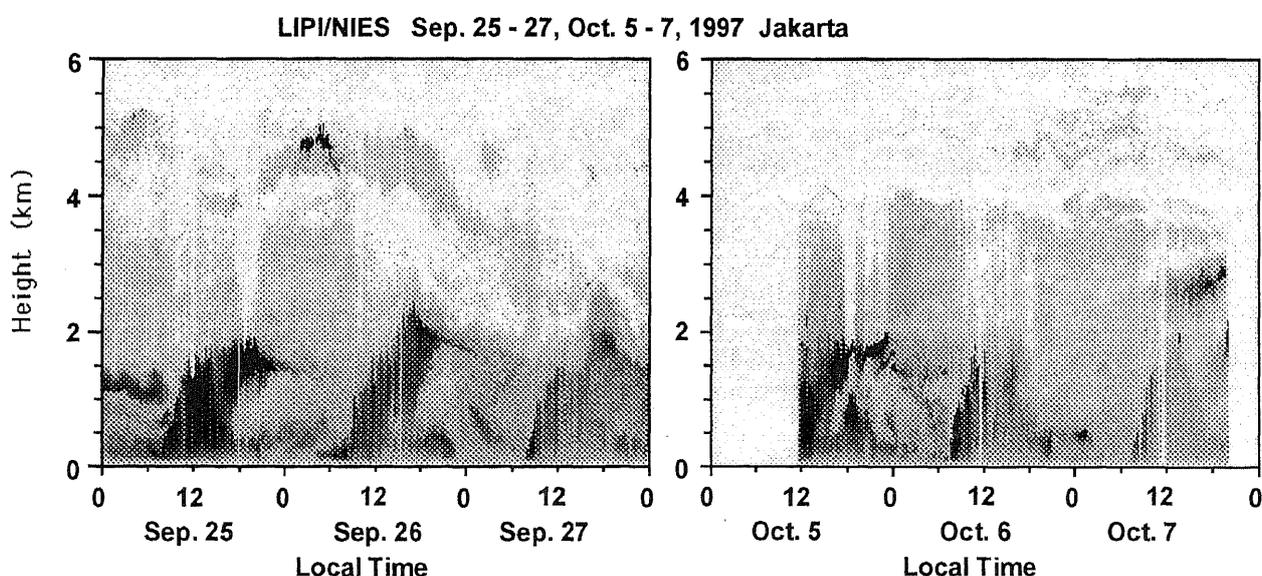


図4-1 ジャカルタの大気境界層の日変化 (1997年9月 - 10月)

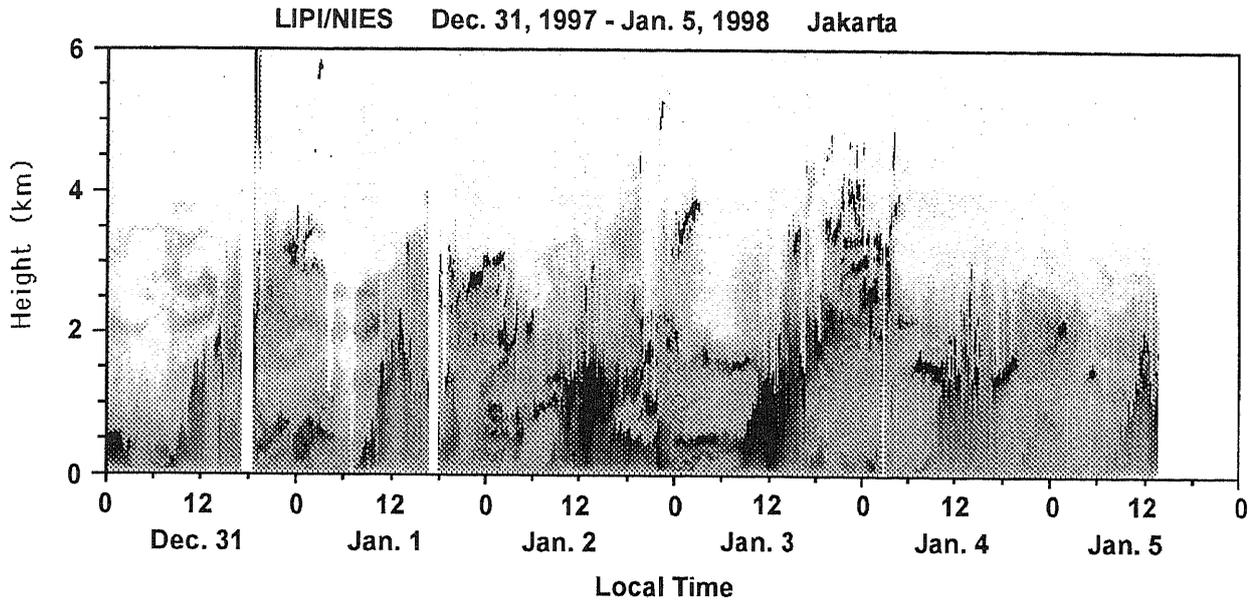


図4-2 ジャカルタの大気境界層の日変化 (1997年12月-98年1月)

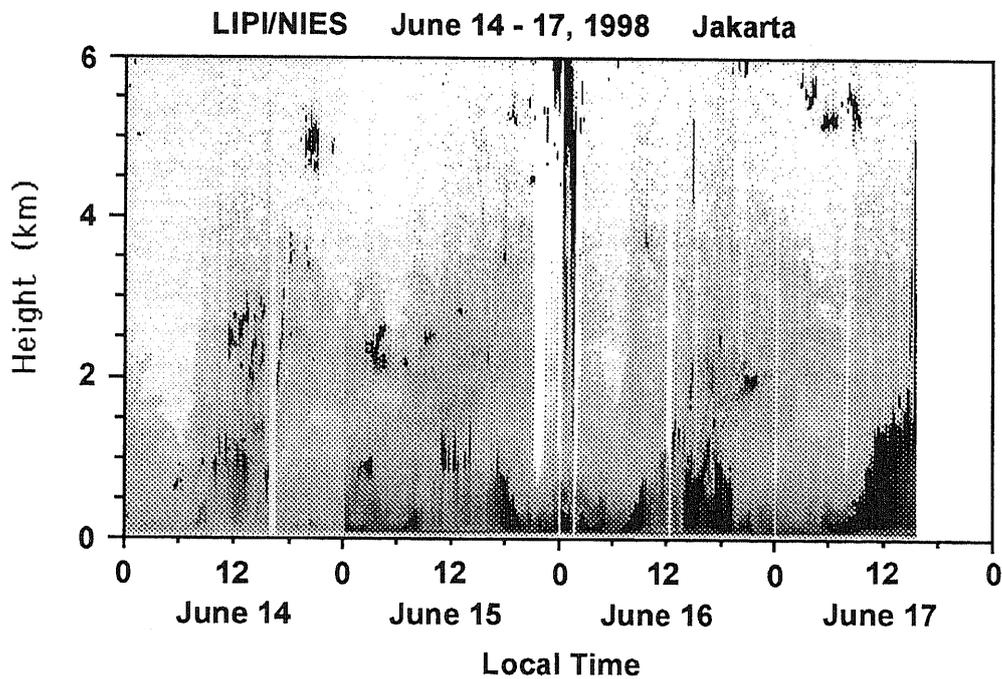


図4-3 ジャカルタの大気境界層の日変化 (1998年6月)

図4-3は今年の6月の例で、乾期に入っていると思われる。この例でも混合層から上空への輸送が起こっているように見られる構造が観測されている。図4-1に示した昨年9月の観測時にはインドネシア航空宇宙局 (LAPAN) の研究グループによる4時間毎のゾンデ観測が行われており、エアロゾル層の構造と気温の逆転や相対湿度の構造との対応が見られる。

5. 海洋地球研究船「みらい」を用いたライダー観測

グローバルな雲・エアロゾルの観測のために、海洋地球研究船「みらい」を用いたライ

ダー観測を国立環境研と東北工大の共同で今年度（H10年度）から実施する。このライダーは、小型のフラッシュランプ励起YAGレーザーの基本波（1064 nm）と第二高調波（532 nm）の2波長を光源として、それぞれの波長でミー散乱と偏光解消度を行う。検出器にはアバランシェ・フォトダイオードを用いる。1999年2月12日から3月26日の「西部熱帯太平洋の観測研究」（MR-99-K1）に参加する計画である。

5. おわりに

国立環境研で実施している雲・エアロゾルのライダー観測について紹介した。ライダー観測の利点は高度分布が得られることであるが、1波長のミー散乱ライダーにおいても、雲の光学的厚さや後方散乱係数を推定することが可能である。また、サンフォトメータ、オリオールメータ（スカイラジオメータ）とミー散乱ライダーを組み合わせることによってエアロゾルの後方散乱係数、消散係数の分布を求めることができる。さらに、高スペクトル分解ライダーでは、仮定をおくことなく後方散乱係数、消散係数の分布を導出することができる。この他、ライダー信号の偏光解消度の測定により粒子が球形であるかを知ることができる。また、多波長の測定によってエアロゾルのタイプや粒径を推定することも可能である。このようにライダーは、雲の放射特性や雲の生成に関する観測研究の非常に有力な手段のひとつである。国立環境研ではライダーによる雲・エアロゾルの観測研究を今後も継続的に行う計画である。

一方、2000年代の始めにはNASDAで開発が進められている実証衛星ライダーが打ち上げられ、衛星からのライダー観測と地上観測、他の衛星センサーを組み合わせた観測研究が期待されている。実証衛星ライダーデータの有効な利用を目指して、データ解析アルゴリズムの開発と衛星ライダーデータの利用手法に関する研究を進めている。

引用文献

- 1) Sasano, Y., Tropospheric Aerosol Extinction Coefficient Profiles Derived from Scanning Lidar Measurements over Tsukuba, Japan, from 1990 to 1993, Appl. Opt. 35 (24) 4941-4952 (1996).
- 2) Sugimoto, N., Sasano, Y. and Matsui, I., Observational Study of Aerosols Distributions with Ground-Based Lidars, Workshop on Japanese Study on the Behavior of Greenhouse Gases and Aerosols, (1997), Nagoya.
- 3) Pinandito, M., Rosananto, I., Hidayat, I., Syamsudin, M., Sugimoto, N., Matsui, I., Murata, S., Ishii, T., Yasuda, N. and Kobayashi, T., Lidar Network System for Monitoring the Atmospheric Environment in Jakarta City, Optical Review, 5 (4) 252-256 (1998).
- 4) Liu, Z., Matsui, I. and Sugimoto, N., High Spectral Resolution Lidar Using an Iodine Filter for Measuring Temperature and Optical Characteristics of Aerosols and Clouds, 19th International Laser Radar Conference, Annapolis, NASA/CP-1998-207671, pp. 103-106 (1998).