

# H5

## レーザ・レーダによる巻雲の観測

### — レビュー、スペースレーザ・レーダへの期待 —

今須良一<sup>\*</sup>、岩坂泰信<sup>\*\*</sup>

Ryoichi Imasu<sup>\*</sup>, Yasunobu Iwasaka<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>資源環境技術総合研究所、<sup>\*\*</sup>名古屋大学太陽地球環境研究所

<sup>\*</sup>National Institute for Resources and Environment,

<sup>\*\*</sup>Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University

**Abstract** Cirrus clouds play important roles in climate system through radiative and water circulation processes. In this paper, current understanding and knowledge of the radiative and microphysical properties of cirrus clouds are reviewed. In light of the reviews, suggestions and requirements are outlined on the future investigations of cirrus clouds using laser radar systems aboard satellites.

#### 1. はじめに

巻雲は、その放射的役割（温室効果）や上部対流圏の水循環過程における役割の重要性が古くから指摘されているにもかかわらず、出現高度が非常に高いことなどから、これまでに観測的な研究は十分はになされてこなかった。しかし、リモートセンシング技術や航空機の発達により、近年、勢力的に研究が行われるようになってきている。以下、これまでに行われてきた観測的な研究からトピックス的なものをレビューし、衛星搭載レーザ・レーダを用いることにより期待される成果や、それに関する要望などをまとめた。

#### 2. レーザ・レーダで測定できる雲のパラメータ

通常のレーザ・レーダにより得られる光学的な物理量は、①後方散乱係数、②散乱パラメータ、③偏光解消度などがあげられ、①と③についてはその空間分布が高分解能で得られる。

このうち、散乱パラメータは、受信信号から後方散乱係数を求める時に必要であり、積算後方散乱係数に乗して散乱体の光学的厚さを得る時にも必要となる。さらに、雲粒子の相（水-氷）や結晶形などによっても異なる値を示すことから、雲の微物理的な情報としても利用できる可能性がある。雲についてこの値を求める方法を今須・岩坂が第15回シンポジウムにおいて報告した。

偏光解消度の値は、粒子が Mie 散乱領域の大きさにある場合、その非球形度と関係が深い。しかし、巻雲を構成するような大きな氷粒子については、結晶内部での光の屈折、反射といった幾何光学的な扱いが必要となる。偏光解消度が特に大きくなる時の氷結晶内光路を図1に示す。

##### 氷粒子による鏡面反射現象

レーザ・レーダによる雲観測時に特有の現象として、基底面を水平に保つ六角板結晶による鏡面反射がある（ただし、天頂方向観測時のみ）。この時、散乱強度は非常に強く、偏光解消度がほぼ0になるという特徴がある。これを同様の特徴を示す雲中の水滴と区別するには、レーザ・レーダを真上から少し傾け、受信強度の急激な減少と偏光解消度の増加を見えればよい（図2）。それができない場合には、偏光解消度と散乱パラメータとを軸とする2次元のダイアグラムが有効である（第15回シンポジウム）。

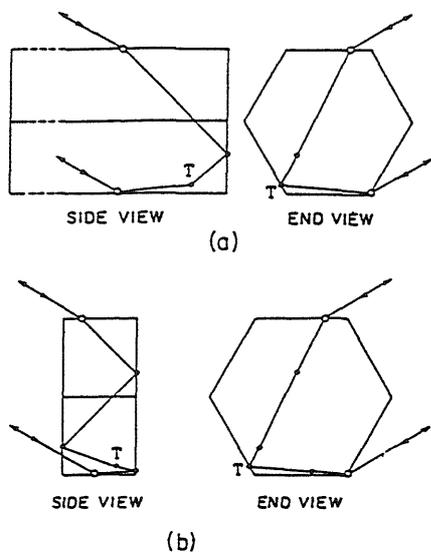


Fig. 1 Geometrical paths of symmetrical spatial skew rays which cause high linear depolarization ratio (after Takano and Jayaweera, 1985).

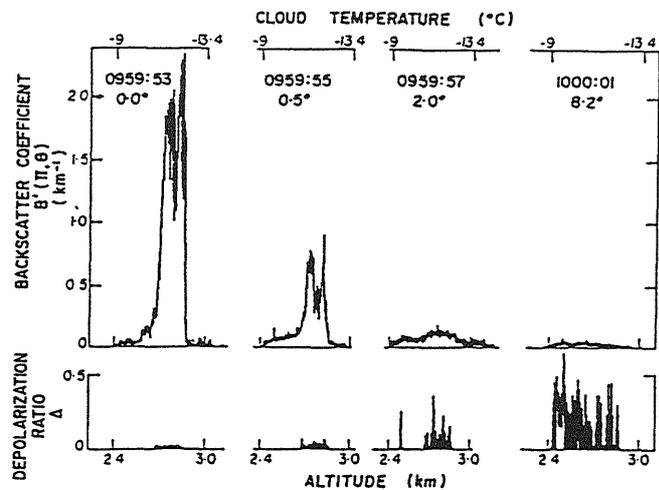


Fig. 2 Backscattering coefficients and depolarization ratios of a cloud which caused specular reflection (after Platt et al., 1978).

### 3. これまでの研究から得られた巻雲の特徴

#### ◎巻雲の光学特性とその全球分布

巻雲の光学特性のうち、特に興味深いものは赤外域での射出率:  $\varepsilon$  と可視域での反射率である。このうち、レーザ・レーダと赤外放射計の組み合わせにより  $\varepsilon$  を求める観測が Platt らにより続けられてきた。図3には、今須・岩坂による観測結果との比較の一例を示す。大気放射学の立場からは、このような巻雲の光学特性の全球的な分布が一定時間内で得られることが強く求められている。

#### ◎ジェット気流近傍における巻雲生成

ジェット気流近傍は、力学的な作用により巻雲が生成されることは古くから指摘されているが、実際にその分布の様子や出現頻度などを観測した例は極めて少ない。図4は今須・岩坂によるレーザ・レーダ観測データから、ジェット気流の軸と巻雲との相対的な位置関係を解析した例である。しかし、この図は観測地点が一定で、ジェット気流の移動に伴って相対的な位置関係が変化したことを利用して描かれたものあり、ある瞬間の断面図ではない。本当のジェット気流近傍の巻雲の分布を知るためには、多地点における同時観測や衛星による観測が必要である。

#### ◎ $-40^{\circ}\text{C}$ 付近における特性の急激な変化

巻雲の特徴のうち、注目に値するものの一つに  $-40^{\circ}\text{C}$  付近を挟んで、その前後で微物理的、光学的性質が急変することがあげられる。具体的には、氷の粒子形が集合体から単体への変化(高温側→低温側)、また、散乱パラメータが小さい値から大きな値への変化として報告されている(図5)。しかし、このような変化の一般性や、 $-40^{\circ}\text{C}$  より高温および低温の巻雲の全球的な分布(比率)などについては現在のところ不明であり、その説明は今後の課題であると言える。

#### ◎複雑な内部構造を持つ巻雲

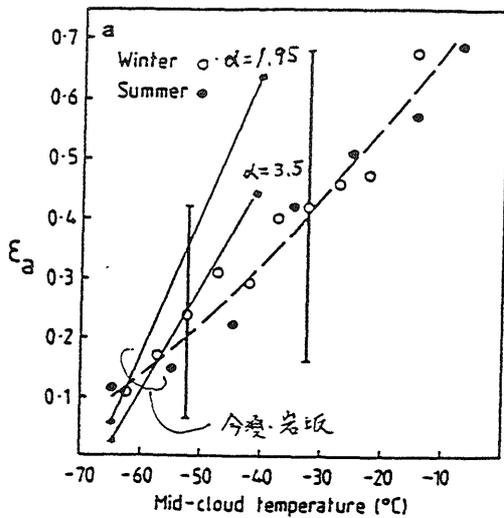


Fig. 3 Absorption emittance of midlatitude cirrus (after Platt et al., 1987).

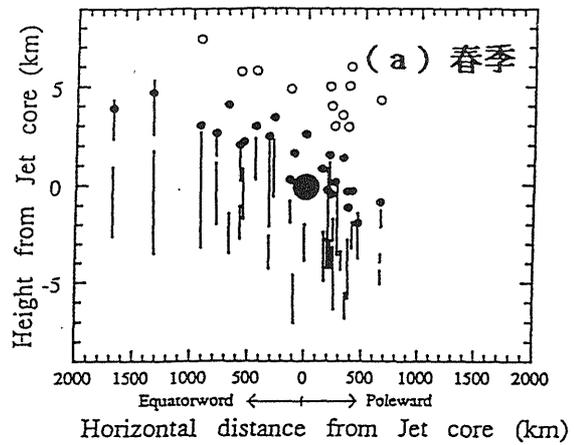
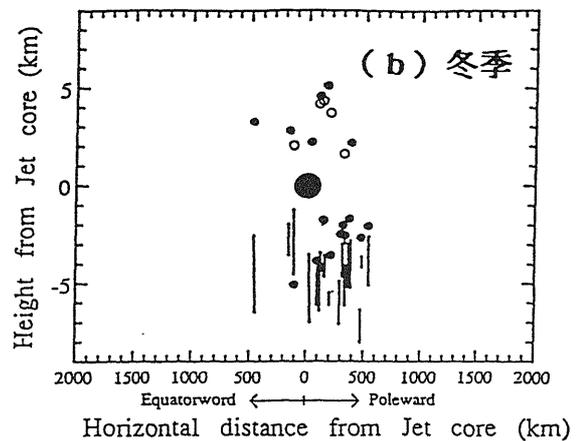


Fig. 4 Relative positions of cirrus clouds to the jet stream core. Abscissa and ordinate are horizontal and vertical distance from the core, respectively. The jet stream core is centered in the figures. Closed (small) and open circles indicate the first and second tropopauses, respectively for (a) spring and (b) winter.



第12, 13, 15回のシンポジウムにおいて発表したように、巻雲の中には2層構造や複雑な内部構造を持ったものがしばしば観測されている。その放射特性は、シンプルな構造の巻雲と大きく異なることから、大気放射学の立場からも注目される。それ以上にそのような雲の生成機構そのものが非常に興味深いものであり、大気条件と雲生成に関する観測データの蓄積が待たれる。

#### ◎ 過冷却水滴を含む巻雲

近年、 $-40^{\circ}\text{C}$ 付近に近い低温の巻雲の中に、過冷却水滴が存在するという観測結果が報告され、注目を集めている。レーザ・レーダによる偏光消滅度測定のを図6に示す。このような水滴の層は、雲内にわずかに存在するだけで可視光の反射率と赤外による冷却率を大きく変えるため、その出現頻度や全球的な量の把握が是非とも必要がある。

#### 4. 衛星搭載レーザ・レーダへの期待

##### ◎ 時間的スケール

巻雲の気候システム中での放射効果を通しての役割を解明するためには、ある瞬間における巻雲の高度と光学的厚さの全球分布が、数時間毎に得られれば理想的である。これは静止衛星からの観測が実現できれば可能であろう。極軌道衛星による場合、どのくらいの時間の間に一つの全球データセットを得れば良いかということについては、巻雲の光学的物理量や空間分布の時間変動と関係

(a)

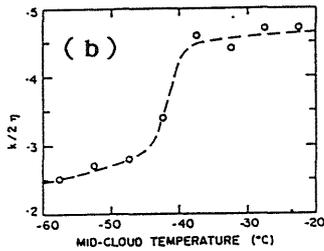
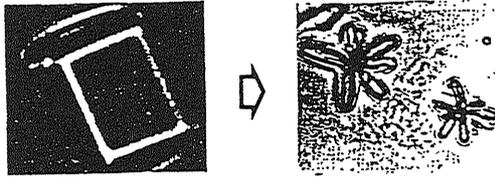


Fig. 5 Changes of cirrus cloud properties occur near  $-40^{\circ}\text{C}$ . (a) Crystal habits and (b) backscatter to extinction ratio (after Heymsfield and Platt, 1984; Platt and Dilley, 1981).

する。しかし、巻雲の放射効果を考える上では、個々の雲の寿命は短くても、ある領域内で雲が生成・消滅を繰り返す、一定量の雲が常に存在しているのであれば、その領域内における一定時間内の平均的な光学的物理量が得られれば問題はない。最も注目したいのは、一つの総観規模の現象（低気圧、前線、ジェット気流、クラウドクラスター等）に伴い、どのような位置に、どのくらいの巻雲が発生するかという点である。この点から考えて、最低一日2回（昼、夜）、全球データセットが得られる程度の観測頻度は求めたい。

#### ◎空間的スケール

これまでの研究結果から、一般的に巻雲の空間的なスケール（水平）は数十 km 程度はあると考えられる（ただし、鍵状巻雲は数 km 程度）。巻雲の放射効果を考える立場から言えば、この程度の間隔で光学的物理量の全球データセットが得られれば、気候システム中での役割を評価するのに一定の成果があげられると考えられる。また、総観規模現象の近傍の巻雲分布を得るにも、この程度のデータ間隔であることは必要であろう。これらの場合の瞬時視野は数 km 程度と広い方が望ましい。ただし、巻雲の内部構造などを研究する場合には 100 m 程度の瞬時視野が必要であろう。したがって、全球データセットを作るモードと、ある領域を集中的に観測するモードとが選択できれば理想的である。

現段階では巻雲の観測的なデータは極めて不足している状態であり、どのような形のデータであるにしろ、巻雲の放射的役割や水循環過程における役割を研究する上で、衛星搭載レーザーレーダによる観測は画期的な成果をあげられるものと期待される。

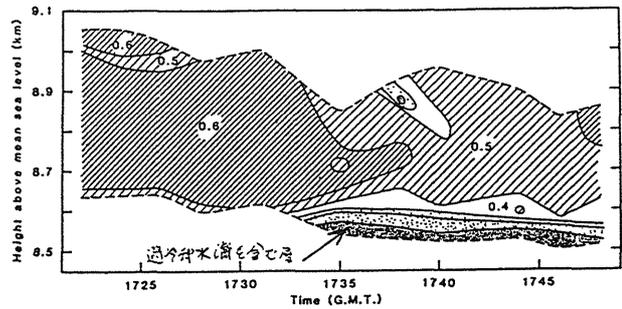


Fig. 6 Depolarization ratio display of a cirrostratus cloud containing liquid water droplets (after Sassen et al., 1985).