

## アラスカバローにおける一層の過冷却水滴層をもつ混相雲の降水の特徴

大東忠保<sup>1,2</sup>、Pavlos Kollias<sup>2</sup>、Wanda Szyrmer<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 名古屋大学地球水循環研究センター

<sup>2</sup> マギル大学大気海洋科学科

## Precipitation properties of single-layer mixed-phase clouds in Barrow, Alaska

Tadayasu Ohigashi<sup>1,2</sup>, Pavlos Kollias<sup>2</sup> and Wanda Szyrmer<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Hydrospheric Atmospheric Research Center, Nagoya University

<sup>2</sup>Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, McGill University

In the Arctic, single-layer mixed-phase clouds rooted in the boundary layer with cloud top heights between several hundred meters and 2 km are frequently observed. Ice particles grow fast in these mixed-phase clouds and thus produce solid precipitation. Understanding the water cycle in the Arctic region requires an extensive study of the precipitation properties of the Arctic single-layer mixed-phase clouds.

The US Department of Energy Atmospheric Radiation Measurement (ARM) facility at Barrow, North Slope of Alaska conducts long-term measurements of mixed-phase clouds using a combination of active and passive sensors. Using the data of 35-GHz (Ka-band) zenith pointing radar (KAZR), ceilometer, and microwave radiometer, 1-hour averaged estimates of mixed-phase clouds are produced. A total of 553 hours of single-layer mixed-phase clouds were visually identified between October 2011 and December 2014.

Using the KAZR radar reflectivity measured just one radar range gate (30 m) below the liquid base of the mixed-phase, ice water content (IWC) estimates are derived. The correlation between the hourly-mean liquid water path (LWP) and IWC below the base is not high. On the other hand, the KAZR mean Doppler velocity ( $V_d$ ) at the same level exhibits high correlation with the LWP. In the LWP regime above  $220 \text{ g m}^{-2}$ ,  $V_d$  is larger than  $1.0 \text{ m s}^{-1}$ .  $V_d$  approached to  $1.8 \text{ m s}^{-1}$  at even higher LWP values. We assumed that the 1-hour averaged  $V_d$  values are representative of the reflectivity-weighted mean terminal velocity of the ice particles. The large terminal velocities cannot be explained if the ice particles grow only via the deposition process. It is suggested that the riming process contributed to the growth of the particles when large terminal velocities are observed. The correlation between LWP and the KAZR  $V_d$  near the surface is similarly high. From high correlations between LWP and  $V_d$  near the cloud base and near the surface, it is clear that the LWP exhibits some control over the precipitating ice mass flux. The observed relationships will provide constraints to numerical simulations of mixed-phase clouds.

Environments of the single-layer mixed-phase clouds were examined using sounding profiles obtained by radiosondes. Figure 2 shows environmental changes with LWP. In the figure, heights are normalized using -1 at the lowest levels, 0 at the bottom of the supercooled liquid layers, and 1 at the heights of mixed-phase clouds. Temperature in the left panel of Fig. 2 increases with increase of LWP. Production of high LWP needs large water vapor amount. It is consistent that the higher temperature, in which saturation water vapor mixing ratio is large, is collocated with higher LWP. The right panel in Fig. 2 shows meridional winds. Northerly winds increase with increasing LWP. Barrow is located south of Arctic sea and north of the continent. High LWP is caused in the northerly warm winds from the Arctic sea.

過冷却水滴と氷晶などの固体粒子が共存する雲を混相雲とよぶ。北極域の境界層内においては、高度数百メートルから 2km にある雲頂付近で混相域を一層のみもつ混相雲（以下、北極域混相雲とよぶ）が頻繁に観測される。混相雲中では固体粒子の成長は早く、固体降水粒子が形成される。北極域における水循環を理解するためには、この一層の混相域をもつ北極域混相雲の降水の特徴を明らかにする必要がある。このため、レーダーを含む以下の長期データを使用して研究を実施した。

本研究で使用した観測データは、アメリカ合衆国エネルギー省 Atmospheric Radiation Measurement (ARM) Climate Research Facility の一つで、アラスカノーススロープのバロー ( $71^\circ 19' 23.73'' \text{ N}$ ,  $156^\circ 36' 56.70'' \text{ W}$ ) にある観測施設（以下、ARM バロー観測施設とよぶ）で長期間にわたって取得されている。まず、35GHz (Ka) 帯鉛直観測レーダー (KAZR、鉛直分解能 30m、時間分解能 3.7 秒)、シーロメーター (同 30m、16 秒)、マイクロ波放射計 (時間分解能 20 秒) のデータを用いて、1 時間平均値を作成した。2011 年 10 月から 2014 年 12 月までのデータを目視で確認し、合計 553 時間分の一層の混相域をもつ混相雲を抽出して使用した。また、環境場の解析等のためにゾンデデータを使用した。

混相雲の過冷却水滴が存在する下端をシーロメーターで決定し、それより一格子上の KZAR の反射強度データから氷水量 (IWC) を推定した。マイクロ波放射計で測定された鉛直積算液水量 (LWP) と液相域下端の IWC とのそれぞれの 1 時間平均値の相関は高くなかった (図 1 左)。一方で、液相域下端における KAZR の平均ドップラー速度 ( $V_d$ ) は LWP と高い相関を示した (図 1 右)。LWP が  $220 \text{ g m}^{-2}$  以上では、 $V_d$  は  $1.0 \text{ m s}^{-1}$  を越えるようになり、さらに大きな LWP では  $V_d$  は  $1.8 \text{ m s}^{-1}$  に達した。 $V_d$  は大気鉛直と粒子の終端落下速度の和である。ここで、1 時間平均において前者は 0 とみなし、 $V_d$  をレーダー反射強度で重み付けされた固体粒子の終端落下速度と考えた。LWP が大きな部分におけるこの大きな終端落下速度は、固体粒子の昇華凝結成長過程のみでは説明できない。LWP と KAZR で得られた地上付近の  $V_d$  との相関も同様に高かった。LWP と液相域下端および地上付近での  $V_d$  の高い相関関係から、LWP が固体降水の質量フラックスをある程度コントロールしていることは明らかである。観測されたこの関係は、北極域混相雲の数値シミュレーションに対して有効な拘束条件となると考えられる。

次に、一層の混相域をもつ混相雲について、ゾンデを用いて環境場の特徴を調べた。図 2 は最下層を -1、混相雲の液相域下端を 0、上端を 1 として規格化した高度を用いて、LWP の大きさごとの環境場の違いを示したものである。温度 (図 2 左) をみると、LWP が大きい時ほど温度が高くなっていることがわかる。大きな LWP を生じたためにはそのもととなる水蒸気が必要である。したがって、飽和水蒸気混合比が大きいより高い気温時に大きな LWP が形成されていることは整合的である。一方で、図 2 右は南北風を示している。LWP の増加に伴って、北風成分が大きくなっていることがわかる。バローはおおまかにいって、北側に北極海、南側に大陸が位置している。これらのことは、北極海側から暖かい北風が吹くときに大きな LWP をもつ混相雲が形成されることを示している。

### 謝辞

本研究は北極環境研究若手派遣支援事業による派遣支援、および JSPS 科研費 15K05285 の支援を受けました。

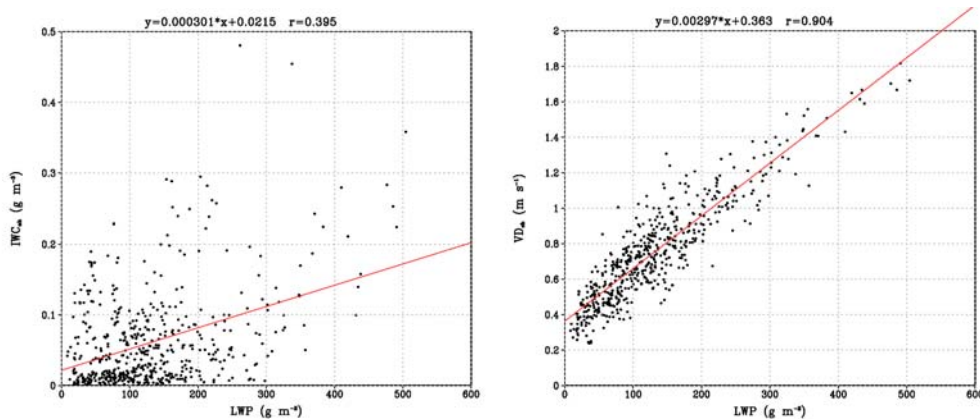


Figure 1. (left panel) Scatter plots of liquid water path (LWP,  $\text{g m}^{-2}$ ) and ice water content (IWC;  $\text{g m}^{-3}$ ) at the bottoms of supercooled liquid water layers. (right panel) Scatter plots of LWP ( $\text{g m}^{-2}$ ) and Doppler velocity ( $V_d$ ;  $\text{m s}^{-1}$ ) at the bottoms of supercooled liquid water layers.

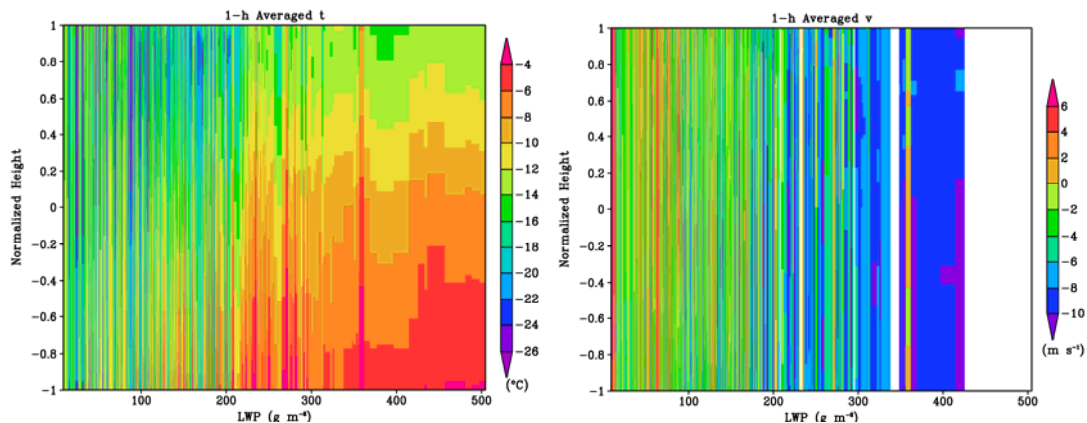


Figure 2. Changes of (left panel) temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ) and (right panel) meridional wind speed ( $\text{m s}^{-1}$ ) along with LWP in a normalized height. Heights are normalized using -1 at the lowest levels, 0 at the bottom of the supercooled liquid layers, and 1 at the heights of mixed-phase clouds.