

平成 30 年 6 月 11 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05285

研究課題名(和文) 走査型雲レーダーを用いた偏波観測による過冷却雲粒存在域の識別方法の開発

研究課題名(英文) Development of an identification method of supercooled liquid droplets using a scanning polarimetric cloud radar

研究代表者

大東 忠保 (Ohigashi, Tadayasu)

京都大学・防災研究所・特定助教

研究者番号：80464155

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：35GHz帯(Ka帯)走査型雲レーダーを用いた過冷却水滴存在域の識別方法の検討を行った。雲粒子ゾンデや雲粒子センサー(CPS)ゾンデを用いた直接観測と、雲レーダーによる観測を実施し、過冷却水滴層が氷粒子なしに単独で存在する場合、レーダー反射強度と偏波パラメータの一つレーダー反射因子差(ZDR)を用いて識別できる可能性があることがわかった。適用できる箇所が限定的であると考えられるため、偏波機能を用いないレーダー、ライダー、マイクロ波放射計を用いたその他の識別方法についても最新の動向をレビューした。

研究成果の概要(英文)：We examined a method of identifying presence of supercooled liquid droplets using a 35 GHz band (Ka band) scanning-type cloud radar. In-situ observations using cloud particle sonde and cloud particle sensor (CPS) sonde and cloud radar observation were carried out. In cases that supercooled liquid droplets are present without ice particles, there is a possibility of identifying supercooled liquid droplets using radar reflectivity and differential reflectivity (ZDR). Since it is considered that the method is applicable in limited regions, other recent identification methods using radar without polarimetric function, lidar, and microwave radiometer were also summarized.

研究分野：気象学

キーワード：過冷却水滴 雲粒 氷晶 Ka帯レーダー 雲レーダー 偏波レーダー 雲粒子ゾンデ

### 1. 研究開始当初の背景

0～約-40℃までの温度帯では、液体の水である過冷却水滴が広く存在することが知られている。氷よりも放射強制力が大きいことから雲内の力学過程にも有意な影響を及ぼすことがあり、霰や雹のもととなるため降水形成過程において重要な役割を果たしていると考えられている。地球の放射収支を理解する上で重要な北極域混相雲の維持過程、短時間豪雨をもたらす夏季の積乱雲の発達過程、冬季寒気吹き出し時に日本海上で発達し頻繁に霰をもたらす雪雲、そのほとんどがわかっていない冬季北海道東部の降雪雲、ライミング時の雲水量が電荷分離の際の粒子が帯電する電荷の符号と関係していると考えられている雷現象など、多くの現象で過冷却水滴が重要な役割を果たしていると考えられている。しかしながら、過冷却水滴の分布は、消失源となる氷晶形成の形成過程(核形成過程)の理解が不十分なため数値モデルで表現することが完全ではなく、観測においてもその分布の詳細はよくわかっていなかった。

### 2. 研究の目的

常時観測できるリモートセンシング機器であるレーダーを用いて、過冷却水滴の存在域を推定する方法を構築することを目的とする。

### 3. 研究の方法

雲レーダーを用いて液相雲、固相雲を観測しその特徴を調べるとともにその違いを明らかにする。また、過去の研究を参考に過冷却水滴の存在域を特定できる観測法を調べる。過冷却水滴が存在する場合に、確実に観測できる直接観測測器を用いて観測を行うとともに雲レーダーによる同期観測を実施する。



図1 沖縄県瀬底島の琉球大学瀬底研究施設に設置した名古屋大学雲レーダー。

本研究では名古屋大学宇宙地球環境研究所が所有する35GHz (Ka) 帯の雲レーダーを使用した。同レーダーは2014年に導入され、名古屋大学で観測が実施されていた。同レー

ダーの解説を雑誌論文①にまとめている。本研究では、2016年と2017年の暖候期に沖縄県瀬底島の琉球大学瀬底研究施設、2017年夏季には神戸市六甲アイランドに位置する神戸国際大学に雲レーダーを設置し観測を実施した。また、2016年と2017年の沖縄では、他のプロジェクトと協力して雲粒子ゾンデ(HYVIS)、および雲粒子センサー(CPS)ゾンデを用いた観測を実施した。HYVIS および CPS はいずれも気球で飛揚させ、雲粒程度の大きさの粒子をその場で観測する測器である。HYVIS は透明なフィルム上で受けた粒子の画像を取得するもので、一方、CPS はレーザー光を用いて粒子の個数、大きさを測定することができる偏光度も測定する。これを、粒子の相の判別に使用できる可能性がある。

### 4. 研究成果

(1) 過冷却水滴の存在域を特定するための一つの方法として、シーロメータを用いる方法を試行した。アメリカのバローにあるアメリカエネルギー省の観測施設の鉛直観測の雲レーダー、ラジオゾンデ、マイクロ波放射計とシーロメータを使用し、北極域で頻繁に観測される固体粒子と過冷却水滴が混在する混相雲に適用した。地上設置であるシーロメータを用いると、液体の雲粒が存在し始める下限の高度を特定することができた。ただし、降雪強度が大きい場合にはシーロメータが識別を誤ることがある。これは偏光機能が可能であれば改善できることが知られている。また、混相域の上端までシーロメータのレーザー光が届くことはあまりなく、一定のモデルを仮定してレーダーから上端を決めるしかないという問題もある。このことに起因して、過冷却水滴を含む層が2層以上ある場合も、より上層に位置する層を検出することは難しい。シーロメータは小型ライダーという位置づけであり、ライダーを用いても同様に液相の雲の下端を推定することは可能である。

(2) HYVIS は画像データを取得するため水滴と固体粒子を区別するための難しさはほとんど無い。CPS については偏光度というパラメータを用いて球形粒子と非球形粒子を区別することが可能で、球形粒子を液相の粒子、非球形粒子を固体粒子とするならば過冷却水滴を判別することは原理上可能である。このことは、CPS の開発に関する論文でも示されている(引用文件①)。2016年の沖縄観測では、CPS と HYVIS を両方取り付けて放球する観測を実施した。梅雨期沖縄では高度10km以上に達する対流域から伸びる層状性降水域の観測を実施した。一般的な液相の雲と、梅雨期の氷晶の数密度は数桁程度異なり、圧倒的に液相の雲の数密度が大きい。このような雲では引用文件①に示されるように、混相雲でも液相の雲粒の測定数が多くなるた

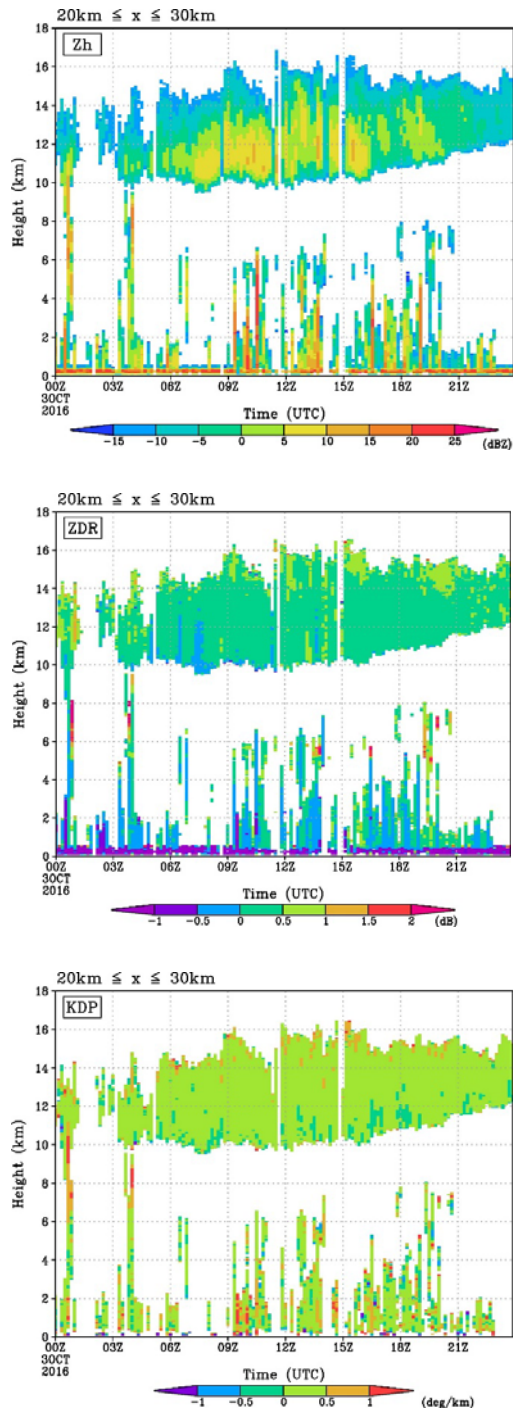


図2 2016年台風18号外縁部の上層雲のレーダー反射強度(上図)、偏波パラメータZDR(中央図)とKDP(下図)の時間変化。各時間、雲レーダーからの距離20~30kmの距離の平均で平均されている。高度14~16kmの雲の上端部において、反射強度が小さく、ややZDR、KDPの大きな粒子が観測されている。これは氷晶粒子の存在を示していると考えられ、同等のレーダー反射強度域の過冷却水滴とは異なる特徴を示す。

めに雲粒が含まれていると判断ができる。一方で、梅雨期の層状雲の観測ではHYVIS画像から固相粒子と同程度と思われる非常に低

濃度の過冷却水滴が観測されることがある。非球形粒子と球形粒子の判別に用いる偏光度は、非球形粒子では球形粒子と同等の値(0.3~1程度)も示す。このことから、ある程度の厚みを持った層において統計量をとった結果として球形粒子の数が一定程度多くならないとCPSを用いて過冷却水滴を含む層(混相域)を判別ができないことがわかった。

(3) 名古屋大学雲レーダーについては沖縄と神戸において観測をおこなった。名古屋大学雲レーダーについては、導入されてから間もなかったため基本的なデータ処理プログラムから作成した。本研究とは関係が無いが、当該プログラムは他のプロジェクトでの研究にも提供し基本的な解析に使用されている。沖縄の観測から、2016年台風18号の外縁部上層雲を解析した。2013年の台風27号のHYVIS観測では、過冷却水滴が観測されたものの、いずれの数濃度も小さかったことから、上層雲はほぼ氷晶で構成されていると考えて解析を実施した。レーダー反射強度が大きい時に偏平度を示す偏波パラメータZDR、KDPの値が小さく、逆にレーダー反射強度が小さい雲頂部においてそれらの偏波パラメータが大きな値を示した(図2)。

(4) 一方で、梅雨期の山岳部に生じた非降水の下層雲のHYVIS観測から、約 $30\mu\text{m}$ 以下の粒子で100個/cc程度の液相粒子が解析された。これは、雲粒としては一般的な量の範囲であった。Ka帯の雲レーダーから約6kmの距離における場所においてエコーは確認できなかった。ミリメートルの送信波長をもつレーダーを一般に雲レーダーとよぶことが多いが、アンテナの大きさや送信出力によって、またレーダーからの距離によっても観測可能な最低のレーダー反射強度は異なる。HYVISの直接観測で得られた雲粒の粒径分布からレーダー反射因子を計算すると、該当する位置における名古屋大雲レーダーでは観測できないことがわかった。したがって、雲レーダーからの距離に依存するものの、過冷却水滴についても一般的な雲粒の大きさよりも少し発達しドリズル程度の大きさのものが一般的な個数(1個/cc程度)生じた場合にのみ雲レーダーで観測できることがわかった。

神戸における観測では積乱雲の初期発達過程を観測した。発達の初期、下層の観測であり上方から落下してきた粒子ではなく、下方から上昇する中で発達する粒子であることから液相粒子であると考えてよい。レーダー反射強度が20dBZ以下の部分では、液相粒子の粒径は小さく丸い形状のため、偏波パラメータZDR、KDPの値は大きくならない。レーダー反射強度30~35dBZを越えると減衰が大きくなるとともに、ミー散乱の効果が大きく反映されることもあり、それ以上のレーダー反射強度はあまり観測されない。これらの

ことから、Ka 帯雲レーダーで観測される液相粒子は基本的に大きな偏波パラメータ ZDR、KDP をとらないことがわかった。

梅雨期における雲レーダーと HYVIS との同時・同所観測では、HYVIS によって過冷却水滴が観測される混相域が存在したが、それらの箇所には氷粒子も同時に存在し、その変化は氷粒子の形状を反映しているように考えられた。

(5) これらのことを総合して考えると、過冷却水滴層をレーダーで判別できるのは以下のような場合であると考えられる。まず、過冷却水滴は氷粒子と共存し混相状態で存在することが多い。一般的な液体の雲粒と氷粒子を比較すると、液体の雲粒は数が多いものの粒径が小さい。このため、レーダー反射強度や、偏波パラメータの ZDR などのレーダーパラメータは、粒径の 6 乗の和に起因するため、粒径の大きな氷粒子に起因する量が大きく反映されてしまう。このため混相域に存在する過冷却水滴を Ka 帯レーダーの偏波機能のみで識別するのは難しいと思われる。

次に、 $0^{\circ}\text{C}$  以下の温度帯で過冷却水滴のみが存在している場合を考える。通常非降水の雲の場合は雲粒の粒径が小さいため、レーダーから近い場所や、または感度が大きな領域（長パルスで観測する領域で比較的レーダーに近い場所）という限定された領域でのみ観測できる可能性があるだろう。それ以外の領域においては、通常非降水雲からやや大きなドリズル粒子に成長した時のみ、観測することが可能と思われる。

これらがレーダーで観測できたとき、過冷却水滴と氷粒子の偏波パラメータは以下のような特徴を示すと考えられる。液体粒子は大きくなると空気抵抗により横長扁平になる。一方で、氷粒子は最初結晶が成長しある程度大きくなると、凝集して雪片となり丸い形状となる。このため、粒径が小さい時に液体粒子は丸い一方で、氷粒子は扁平のものと丸いものの可能性がある。氷粒子の結晶の形状（晶癖）の温度、湿度（過飽和度）依存性については一定の理解が得られている。それによると、 $-20^{\circ}\text{C}$  以下になると多結晶粒子が主要となりこれらの粒子は三次元的に成長することが多いため形状としては丸い形状になると思われる。一方、 $0\sim-20^{\circ}\text{C}$  の温度帯では単結晶が多く、かなり扁平な形状を示すものと考えられ、液体粒子とは異なる偏波パラメータをとるだろう。以上のことから、 $0\sim-20^{\circ}\text{C}$  の温度帯で、レーダー反射強度が弱く ( $< -0\text{dB}$ )、偏波パラメータ ZDR が  $0\text{dB}$  付近の値を示す場合には過冷却水滴である可能性が高いと推測できる。 $-20\sim-40^{\circ}\text{C}$  の温度帯についても、台風上層の氷粒子の巻雲の観測から一定程度大きな ZDR が観測されていることから（図 2）三次元的に成長するといえどもやや扁平な形状を示す可能性が高い。この部分についてはさらにレーダーと直

接観測を詳細に解析し検討する必要があるだろう。偏波パラメータ KDP についてはある程度の質量（液水量、氷水量）が無いと値が大きくなる一方で、レーダー反射強度が小さい場合はノイズも大きいことから過冷却水滴の識別に使用するのには難しいと考えられる。

(6) このようにレーダーでの識別はかなり限定的であることがわかったので、他のリモートセンシング機器による過冷却水滴の識別についてもまとめておく。最も有効な機器はライダーやシーロメータ（小型ライダー）であろう。ライダーは、粒径の 2 乗に関係した量を観測するために、レーダーとは違い粒径だけでなく数の多さも重要となる。氷粒子よりも圧倒的に数の多い雲粒の存在域では氷粒子存在域と比較して非常に大きな後方散乱係数が観測される。また、偏光ライダーによって偏光解消度を測定することができれば、球形の液滴と非球形の氷粒子は明らかに異なる小さな偏光解消度を示す。この観測からほぼ確実に過冷却水滴域を観測することは可能である。ただし、本研究における北極域混相雲の観測で明らかのように、大きな後方散乱がある液相粒子の部分ではライダー光が大きく減衰してしまうため、それよりも遠方を測定できないことが多い。このため、地上が  $0^{\circ}\text{C}$  以下であるか、 $0^{\circ}\text{C}$  以下であっても  $0^{\circ}\text{C}$  以上の温度帯に雲が無いことが条件となる。

レーダーのみを用いて過冷却水滴の存在を識別する新しい方法も試されている（引用文献②、③）。この方法ではやはり Ka 帯などの感度のよいレーダーを用いる。混相域では比較的大きく落下速度の大きな氷粒子と、小さく落下速度の小さな過冷却水滴が存在する。鉛直上向き観測によってこの混相域のドップラースペクトルを観測すると、落下速度の違いに応じて 2 つ以上のドップラー速度のピークが観測できる。一般には最も落下速度が小さいものが、過冷却水滴である。この方法は、レーダーのみを用いて過冷却水滴存在域を特定できる数少ない方法ではあるが、鉛直固定の観測に限定される。これまで数少ない観測事例が示されているのみであり、今後さらに発展が期待される手法である。

また、マイクロ波放射計でも液体の水の量を測定できる。ただし、鉛直の積算量となるため地上の温度が氷点下でない場合過冷却水滴の有無の判定には使えない。また存在する高度を知ることができないため、他のリモートセンシング機器と合わせて使う必要がある。

これらのことから、観測に適した現象も限定されることが予想される。地上気温が  $0^{\circ}\text{C}$  よりも低い時に生じる雲で降水（雪）強度が弱い雲を鉛直ライダーや、レーダーのドップラースペクトル、マイクロ波放射計など、複数の測器・手法で観測するのが最も信頼性が



高いと考えられ、データも豊富に得ることができると思われる。数値モデルの検証などは、このような豊富なデータの得られる観測を用いて実施せざるを得ないように思われる。一方で、三次元的な変動の大きな積乱雲などでは、雨の元となる霰の形成において過冷却水滴は重要な役割を果たしていると考えられるが、レーダーやライダーを用いたリモートセンシング機器での観測はかなり難しい。

航空機の着氷被害への対策を考える場合、対流域の上昇流の大きな部分は大きなレーダー反射強度を同時に示すなどの特徴を持つと考えられ、それ以外のパラメータによって間接的にその存在確率が高いことを知る方法を考えるしかないであろう。一方で、降水が無い、または弱い層状域においてはライダーを搭載していればその存在域の特定はできる可能性があるが、ライダーの観測範囲が大きくないことから至近距離でないとは探知できない可能性が高い。

#### <引用文献>

- ①Fujiwara, M., et al., 2016: Development of a cloud particle sensor for radiosonde sounding. *Atmos. Meas. Tech.*, 9, 5911-5931.
- ②Luke, E.P., et al., 2010: Detection of supercooled liquid in mixed-phase clouds using radar Doppler spectra. *J Geophys Res-Atmos*, 115, D19201, 14 pp.
- ③Kalesse, H., et al., 2016: Fingerprints of a riming event on cloud radar Doppler spectra: Observations and modeling. *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 2997-3012.

#### 5. 主な発表論文等

##### [雑誌論文] (計4件)

- ① 大東忠保・中北英一・山口弘誠・坪木和久, 2018: 夏季積乱雲発達初期の雲レーダー観測. 京都大学防災研究所年報, 査読無, 61B, <http://www.dpri.kyoto-u.ac.jp/publications/nenpo/> (受理済).
- ② 中北英一・新保友啓・佐藤悠人・山口弘誠・大東忠保・篠田太郎・坪木和久, 2017: Ka バンド偏波レーダによるマルチパラメータ情報を利用した積乱雲発生の基礎的解析. 京都大学防災研究所年報, 査読無, 60B, 559 - 575, <http://www.dpri.kyoto-u.ac.jp/nenpo/no60/ronbunB/a60b0p27.pdf>.
- ③ Ohigashi, T., K. Tsuboki, and M. Oue, 2016: Cloud-top supercooled liquid droplets in stratiform clouds

observed during winter in inland Hokkaido, Japan. *SOLA*, 査読有, Vol. 12, pp. 140 - 145, doi:10.2151/sola.2016-030.

- ④ Kouketsu, T., H. Uyeda, T. Ohigashi, M. Oue, H. Takeuchi, T. Shinoda, K. Tsuboki, M. Kubo, and K. Muramoto, 2015: A hydrometeor classification method for X-band polarimetric radar: Construction and validation focusing on solid hydrometeors under moist environments. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 査読有, Vol. 32, No. 11, pp. 2052 - 2074, doi:10.1175/JTECH-D-14-00124.1.

##### [学会発表] (計9件)

- ① Ohigashi, T., et al., 2017: Structure of outflow-layer clouds of Typhoon Chaba (2016) observed by a Ka-band cloud radar. 2017 AGU Fall Meeting.
- ② Ohigashi, T., et al., 2017: Videosonde and radar observations in ice-phase regions of stratiform clouds. International Symposium on Earth-Science Challenges (ISEC) 2017.
- ③ Ohigashi, T., et al., 2017: Ka-band radar observation of the outflow-layer clouds of Typhoon Chaba (2016). AOGS 14th Annual Meeting.
- ④ 大東忠保ほか, 2017: Ka 帯レーダーを用いた台風 1618 号 (Chaba) の上層雲の観測. 日本気象学会 2017 年度春季大会.
- ⑤ 大東忠保ほか, 2016: 一層の混相域をもつ北極域混相雲とその環境場の鉛直プロファイル. 日本気象学会 2016 年度春季大会.
- ⑥ Suzuki, Y., T. Ohigashi (発表者), et al., 2016: Microphysical structures in the typhoon outflow layer observed by hydrometeor videosonde. International Conference on Mesoscale Convective System and High Impact Weather (ICMCS-XI).
- ⑦ Ohigashi, T., et al., 2015: Precipitation properties of Arctic single-layer mixed-phase clouds. 2015 American Geophysical Union Fall Meeting.
- ⑧ Ohigashi, T., et al. 2015: Precipitation properties of single-layer mixed-phase clouds in

Barrow, Alaska. The Sixth Symposium on Polar Science.

- ⑨ 大東忠保ほか, 2015: 一層の混相域をもつ北極域混相雲の降水の特徴. 日本気象学会 2015 年度秋季大会.

[その他]

- ① 瀬古 弘・上田 博・真木真之・中北英一・佐藤晋介・大東忠保・出世ゆかり・足立アホロ・川畑拓矢, 2017: 2017 年度春季大会専門分科会報告「5. 偏波レーダーを用いた観測解析技術と利用法の展開」, 天気, 第 64 巻, 10 号, pp. 756-757.
- ② 加藤輝之・上田 博・篠田太郎・津口裕茂・山田広幸・南雲信宏・大東忠保・竹見哲也, 2016: 第 11 回「メソ対流系と顕著気象に関する国際会議(ICMCS-XI)」参加報告. 天気, 第 63 巻, 9 号, pp. 719-725.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

大東 忠保 (OHIGASHI, Tadayasu)  
京都大学・防災研究所・特定助教  
研究者番号: 80464155

### (2) 研究協力者

清水 健作 (SHIMIZU, Kensaku)  
明星電気株式会社