

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 5日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010 ～ 2012

課題番号：22340136

研究課題名（和文）

降水雲上部における氷晶粒子の成長過程と粒径分布の観測とモデル化

研究課題名（英文） Observation and modeling of cloud ice size distribution and its growth in the upper part of precipitating clouds

研究代表者

坪木 和久 (KAZUHISA TSUBOKI)

名古屋大学・地球水循環研究センター・教授

研究者番号：90222140

研究成果の概要（和文）：

北海道東部内陸部に偏波ドップラーレーダを設置し、2011年2月から3月にかけて観測を実施した。同時に陸別町で雲粒子ゾンデを放球し、雲内部の粒子の観測を実施した。これにより低気圧と寒気の吹き出しに伴う降雪雲を観測した。MPレーダ観測からは降雪雲の力学的・雲物理学的構造を明らかにした。雲粒子ゾンデのデータから、雲内の氷晶粒子の大きさ、結晶タイプ、数濃度、粒径分布などの特性を明らかにした。これらの観測をもとに、粒径分布をモデル化した氷晶粒子の落下過程を雲解像モデル CReSS に導入した。

研究成果の概要（英文）：

Using two polarimetric radars and the hydrometeor videosonde, we performed an observation of snow clouds in an inland region of eastern Hokkaido for the period from February to March 2011. During the observation period, many different types of snow clouds associated with cyclones and the winter monsoon wind were observed. The polarimetric radar observation showed kinematic and microphysical structures and the direct observation using the videosonde revealed size, type, number density and size distribution of cloud ice. According to the observation, size distribution of cloud ice was formulated and its sedimentation process was installed into the cloud-resolving model.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	10,600,000	3,180,000	13,780,000
2011年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2012年度	1,300,000	390,000	1,690,000
総計	14,200,000	4,260,000	18,460,000

研究分野：気象学

科研費の分科・細目：気象・海洋物理・陸水学

キーワード：気象

1. 研究開始当初の背景

気象の数値モデルの一つである雲を直接表現する“雲解像モデル”は、近年、コンピュータの発達とともに、詳細な雲の物理過程を取り入れたものが発達してきている。特に

氷晶雨（冷たい雨）の物理過程では、雲水、氷晶、雨、雪、あられなどの水物質のカテゴリを考慮し、それらの物理量の間の詳細な変換過程を詳細に計算している。これらの粒子はその粒径分布に応じて落下速度が決ま

り、このプロセスによる水物質の変化が計算される。これらの物理量のなかで、最も未解明なものは、降水雲上部の氷晶粒子の成長過程と粒径分布である。そのためほとんどの雲解像モデルでは、氷晶粒子は成長せず、単一の粒径分布を持つというきわめて不正確な過程をおいて計算している。さらに大きな問題は粒径分布がわからないので、落下速度が計算できないことである。このため氷晶粒子は落下速度ゼロ、すなわち落下しない粒子として扱われているのが現状である。

たとえば秋の晴れた空に見られる巻雲が釣り針状にストリークを描く様子を見てもわかるように、実際の大気中で氷晶粒子は急速に成長し有意な速度で落下している。ところが雲解像モデルでは、このような氷晶粒子を成長も落下もしない粒子として扱うことで、降水雲の上部その周辺に溜まってしまい、空全体が薄い巻雲で覆われてしまうという不都合が生じている。氷晶粒子は雪や雲水などの他の粒子がないと、雪やあられに変換されない。また、上空の氷晶粒子はいったん生成されると蒸発はほとんどできない。このため落下過程が氷晶粒子の空間分布を大きく規定している。そしてその落下過程は粒径分布によって決まっている。

上空に薄い巻雲が広がると放射過程に大きく影響し、温度の計算に大きな誤差をもたらす。また、実際の雲では上部から氷晶粒子が落下することで、降水粒子の種となり、降水が強化される。実際に雲解像モデルで氷晶粒子を 10cm/s で落下させると、台風や梅雨に伴う降水が強化されるという結果が得られた。2000年9月に発生した東海豪雨では、上空に西から移動してきた雲が氷晶粒子を下層の雲に供給して、あられの形成が強化され、豪雨をもたらしたことがわかっている。

このように氷晶粒子の成長過程と落下過程は、大気放射過程と降水過程に大きなインパクトを与えることがわかっているが、降水雲の上部における氷晶粒子の粒径分布がわからないので、それをモデル化できていないのが現状である。

2. 研究の目的

雲物理過程のなかで、雲上部における氷晶粒子の生成・成長過程とその粒径分布はもっとも未解明な部分である。このためほとんどの雲の数値モデルで雲上部に広がる氷晶の分布に大きな誤差が含まれ、雲の分布や降水分布に誤差が生まれる。本研究の目的は、雲粒子ゾンデを用いて、雲上部の氷晶粒子の直接観測と、同時にマルチパラメータレーダ(MPレーダ)による観測を行い、氷晶粒子の粒径分布とその雪粒子への成長過程を明らかにする。さらに観測データに基づく氷晶粒子の粒径分布と落下過程のモデル化を行

う。

3. 研究の方法

(1) 北海道内陸部における観測計画：

海岸からできるだけ遠く、雲頂高度の低い雲を観測するために、北海道内陸部に観測点を設置する。この地域の公共施設の一部を利用して雲粒子ゾンデの放球を行う。また、雲粒子ゾンデの飛揚する範囲を観測できるように、MPレーダ2台を設置して観測を行う。

(2) 雲解像モデルを用いたシミュレーション：

毎日の雲解像予報実験：MPレーダ観測期間中は、雲解像モデル CReSS を用いた高解像度の毎日の気象予報実験を行う。このシミュレーションの結果を用いて、雲粒子ゾンデとMPレーダの観測をサポートする。

(3) レーダ解析と雲粒子解析：

MPレーダ観測からは、ドップラー速度、レーダ反射強度、および降水粒子についての様々なパラメータが得られる。本研究課題の対象とするのは背の低い降雪雲で、鉛直速度の小さなものである。そのような雲について、2台のMPレーダのドップラー速度情報から、精度よく鉛直速度を求める方法を開発する。雲粒子を観測する接触型 HVISS のデータから、氷晶粒子の大きさ、結晶タイプ、数濃度、粒径分布、および過冷却水滴の付着率が、観測された画像上でどのような特性を持っているのかを調べる。

(4) 氷晶過程のモデル化

雲解像モデル CReSS の氷晶過程を観測に基づいて改良を行う。

4. 研究成果

(1) 北海道内陸部における観測：

対流活動が弱く、雲頂高度の低い降雪雲を観測するために、北海道東部内陸部の陸別町と訓子府町に名古屋大学地球水循環研究センターの偏波ドップラーレーダを設置し、2009年2月から3月にかけて観測を実施した。それと同時に陸別町では雲粒子ゾンデ・高層気象観測ゾンデを放球し、雲内部の粒子の観測を実施した。この観測期間に低気圧と寒気の吹き出しに伴う降雪雲を観測することができた。MPレーダ観測から、観測点を通過しつつ降雪をもたらした雪雲の時間変化と内部構造が調べられた。また、雲粒子観測から0度以下においても多くの雲粒子が存在し降水粒子の形成に寄与していることが示された。

(2) 雲解像モデルを用いたシミュレーション：

①毎日の雲解像予報実験：MPレーダ観測期間中、雲解像モデル CReSS を用いた高解像度の毎日の気象予報実験を行った。このシミュレーションの結果を用いて、雲粒子ゾンデ

とMPレーダの観測をサポートした。

②雲粒子ゾンデ観測を行った事例のシミュレーション：雲粒子ゾンデで観測を行った雲について、さらに高解像度のシミュレーションを行い、雲粒子ゾンデの観測、およびMPレーダの観測との比較を行った。

(3) レーダ解析と雲粒子解析：

MPレーダ観測からは、ドップラー速度、レーダ反射強度、および降水粒子についての様々なパラメータが得られた。対象とする背の低い降雪雲は、鉛直速度が小さいので、そのような雲について、2台のMPレーダのドップラー速度情報から、精度よく鉛直速度を求める方法を開発した。雲粒子を観測する接触型雲粒子ゾンデのデータから、氷晶粒子の大きさ、結晶タイプ、数濃度、粒径分布、および過冷却水滴の付着率が、観測された画像上でどのような特性を持っているのかを調べた。

(4) 雲粒子ゾンデの解析

厳冬期の北海道東部の内陸部で発生した降雪雲に対して放球した雲粒子ゾンデ HYVIS の観測した雲粒子画像を解析した。顕微鏡画像で観測された氷晶粒子を針状、板状、鼓状、その他の不明に分類し、高度毎の粒子の分布を明らかにした。

(5) MPレーダによる降雪雲の観測

厳冬期の北海道東部の内陸部で実施した特別観測期間に、2台のマルチパラメータレーダで観測された降雪システムについて、力学的構造と雲物理学的構造を調べた。なかでも特に4時間にわたって持続した降雪システムの詳細な解析を行った。2台のMPレーダ観測から、降雪システムの気流場を解析した。この降雪システムはエコー頂が3km程度で、高層観測から得られた湿度プロファイルに見られた高度3km付近の顕著な湿度の減少と対応していた。この高度より下はほぼ北風で、下層の弱い収束が降雪システムの前部と後部に見られた。この収束に対応して、降雪システムとしては非常に弱い上昇流（ 1ms^{-1} 以下）が前部と後部に形成され、それによって降雪粒子が形成されていた。偏波パラメータの解析から、降雪システム内にはあられが存在しないことが示された。これは弱い上昇流と対応している。粒子情報に関するMPレーダパラメータから、上空では氷晶があり、下層では雪片が存在した。この降雪システムについて、雲解像モデルCReSSを用いてシミュレーションを行い、降雪システムの環境場を解析した。その結果、オホーツク海からの弱い北風内に降雪システムが形成されたことを裏付けた。

(6) 厳冬期における過冷却雲粒の観測

2011年2月8日～28日に北海道東部の陸別町と訓子府町で実施したXバンド偏波レーダと雲粒子ゾンデ観測の解析を行った。雲粒

子ゾンデ観測では厳冬期にも関わらず、雲上部に大量の過冷却水滴が観測された。このような事例は3事例あり、それらに共通して雲頂付近に強い安定層が存在し、その直下に厚さ100～200mの過冷却層が存在していた。この過冷却水滴の層は降水の形成だけでなく、雲頂部における放射過程に重要な役割を持つと考えられる。今後、この過冷却水滴層についての、放射伝達を計算し、これによる雲の冷却率を求める。

(7) 雲解像モデルの氷晶過程のモデル化

雲解像モデルCReSSの氷晶過程について、氷晶粒子の落下のインパクトを調べた。その結果、氷晶粒子を落下させることで、雲頂高度の予報が改善され、降水量について少ないながらも増加がみられること、さらに雲内における降水形成過程が変化することが明らかにされた。また、放射過程を通して台風の強度に大きなインパクトがあることを示した。この結果を踏まえて、粒径分布をモデル化した氷晶粒子の落下過程を雲解像モデルCReSSに導入した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計7件)

1. Mitsuharu Nomura and Kazuhisa Tsuboki: Numerical Study of Precipitation Intensification and Ice-Phase Microphysical Processes in Typhoon Spiral Band. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 90685-699, 2012 (査読有).
2. Mitsuharu NOMURA, Kazuhisa Tsuboki, Taro SHINODA: Impact of Sedimentation of Cloud Ice on Cloud-Top Height and Precipitation Intensity of Precipitation Systems Simulated by a Cloud-Resolving Model. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 90, 791-806, 2012. (査読有)
3. Wen-Yih Sun, Oliver M. Sun, Kazuhisa Tsuboki: A modified atmospheric non-hydrostatic model on low aspect ratio grids. *Tellus*, 64A, 17516, 2012. (査読有)
4. Lee, K.-O., H. Uyeda, S. Shimizu and D.-I. Lee : Dual-Doppler radar analysis of the enhancement of a precipitation system on the northern side of Mt. Halla, Jeju Island, Korea on 6 July 2007. *Atmospheric Research*, 118, 133-152, 2012. (査読有)

5. 大東忠保・坪木和久・石塚暁: 衰退する帯状雲の南端部に形成された降雪バンドの構造. 天気, **59**(1), 33-46, 2012. (査読有)
6. Oue, M., H. Uyeda, and Y. Shusse: Two types of precipitation particle distribution in convective cells accompanying a Baiu frontal rainband around Okinawa Island, Japan. *J. Geophys. Res.*, **115**, D02201, doi:10.1029/2009JD011957, 2010. (査読有)
7. Oue, M., H. Uyeda, and D. I. Lee, 2011: Raindrop size distribution parameters estimated from polarimetric radar variables in convective cells around Okinawa Island during the Baiu period. *Asia-Pacific J. of Atmos. Sci.*, Vol. **47**(1), pp33-44, doi:10.1007/s13143-011-1003-x. (査読有)

[学会発表] (計 7 件)

1. Ohigashi, T., K. Tsuboki, M. Oue and R. Furihata: Vertical distributions of supercooled liquid water on winter stratiform clouds in northern Japan 16th International Conference on Clouds and Precipitation. (ICCP 2012) 2012年07月30日~2012年07月30日 Leipzig, Germany
2. Kouketsu, T., H. Uyeda, M. Oue, T. Ohigashi, T. Shinoda, H. Minda, K. Tsuboki and E. Nakakita: Validation of Hydrometeor Classification Method for X-band Polarimetric Radars using In Situ Observational Data of Hydrometeor Videosonde. 7th European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology (ERAD 2012) 2012年06月25日~2012年06月29日 Toulouse, France
3. Oue, M., T. Ohigashi, K. Tsuboki, T. Shinoda, T. Kouketsu, H. Uyeda, H. Minda and E. Nakakita: Microphysical Structure of Stratiform Precipitation Around Okinawa Island During the Baiu Period of 2011. AOGS-AGU (WPGM) Joint Assembly 2012, 2012年08月15日~2012年08月15日 Singapore
4. 降旗竜飛・坪木和久・大東忠保・尾上万里子・額額丈晴・篠田太郎・加藤雅也・民田晴也・岡本宏樹・上田博: 厳冬期北海道東部内陸で観測された降雪帯の構

造. 日本気象学会 2012 年度 春季大会 2012年05月26日~2012年05月29日, つくば

5. 大東忠保・坪木和久・尾上万里子・民田晴也・降旗竜飛・額額丈晴・岡本宏樹: 冬季北海道内陸部で観測された層状雲頂部の過冷却水滴層. 日本気象学会 2012 年度 春季大会 2012年05月26日~2012年05月29日, つくば
6. 額額丈晴・尾上万里子・大東忠保・坪木和久・民田晴也・上田博・若月泰孝・中北英一: 層状性降水域のHYVIS観測によるXバンド偏波レーダー用降水粒子判別法の検証 日本気象学会 2012 年度 秋季大会 2012年10月03日~2012年10月05日, 北海道大学, 札幌
7. Kouketsu, T. and H. Uyeda: Validation of Hydrometeor Classification Method for X-band Polarimetric Radar ~Comparison with Ground Observation of Solid Hydrometeor~. Sixth European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology (ERAD2010), Sibiu, Romania, September 6-10, 2010

[図書] (計 1 件)

坪木和久 (共著), 共立出版, 超多自由度系の新しい科学, 2010, 323pp.

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

○取得状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

[その他]

ホームページ等
特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

坪木 和久 (Kazuhisa Tsuboki)
名古屋大学地球水循環研究センター・教授
研究者番号：90222140

(2) 研究分担者

上田 博 (Hiroshi Uyeda)
名古屋大学地球水循環研究センター・教授
研究者番号：80184935

篠田 太郎 (Taro Shinoda)
名古屋大学地球水循環研究センター・助教
研究者番号：50335022

大東 忠保 (Tadayasu Ohigashi)
名古屋大学地球水循環研究センター・助教
研究者番号：80464155

(3) 連携研究者

藤吉 康志 (Yasushi Fujiyoshi)
北海道大学低温科学研究所・教授
研究者番号：40142749