

令和元年6月28日現在

機関番号：26402

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K17803

研究課題名(和文) 晶癖予測モデルを用いた北極混合相層状雲の研究

研究課題名(英文) Investigation of Arctic mixed-phase stratus clouds with a habit-prediction scheme

研究代表者

端野 典平 (Hashino, Tempei)

高知工科大学・環境理工学群・准教授

研究者番号：10766520

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：雲は、短波放射と長波放射を通じて、地表面のエネルギー収支に影響を与える。北極では特に、0度以下においても水滴が存在する低層雲が卓越しており、気候を予測する上で重要である。本研究では、氷の結晶の形(晶癖)を再現する数値モデルの再現性評価と、氷の形成過程と晶癖との関係を調査した。雲レーダ観測データと比較し、晶癖モデルの有効性を示した。再現された晶癖の形状は観測されたものと定性的に合致するものとなった。六角平板の結晶に関しては、水滴が凍結する際の大きさが、昇華成長後の軸の比に関係することを示した。また、大きめの活性化していない水滴が凍結過程に重要であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

北極の混合層層雲において、氷粒子の発生メカニズムは未解明であり、気象や気候モデルで再現が困難であるため、現在リモートセンシング観測や現地調査により、活発に研究されている。本研究では、最新の知見を組み込んだ数値モデルを用いて、水滴の凍結現象と氷晶の形状に関する関係性を示した。リモートセンシングから氷晶の形成過程を推測できる可能性がある。大きい水滴の重要性を示し、大きいエアロゾル粒子の観測の重要性を示した。また、晶癖予測モデルによる再現実験を他のモデル開発の際に参照することができる。

研究成果の概要(英文)：Clouds modulate the surface energy budget through shortwave and longwave radiation. In Arctic, low-level clouds with liquid particles prevail even at temperature less than 0 degree, and these are important for climate prediction. In this research, we evaluated a habit-prediction model that simulates ice crystal shapes (habit), and investigated relationships between habit and ice nucleation process. Comparison of the simulation against cloud radar observation indicated its effectiveness and the predicted habit was qualitatively similar to the observation. As for hexagonal plates crystals, the size of droplets freezing relates to the axis ratio of crystals after vapor depositional growth. Also, large droplets that are not yet activated play an important role in the freezing process.

研究分野：気象学、雲物理学

キーワード：北極 混合相層雲 雲物理 数値実験

1. 研究開始当初の背景

北極域では中低緯度に比べ、地表面気温の上昇が約2倍の速さで進行している。そこでは過冷却された水滴と氷粒子から成る混合相の層状性雲が、多頻度で観測されている。混合相層雲は地表面のエネルギー収支に大きく影響を与えるため、その再現と予測は気候予測を行う上で重要である。しかしながら、気象や気候モデルで混合状態を再現することが難しい。

研究代表者らは雲水が凍結する氷晶の形成過程のメカニズム（雲水浸水凍結仮説）を提唱してきた。これは1)凍結を引き起こす不溶性のエアロゾル粒子（氷晶核）が水滴内に存在する、2)雲頂での放射冷却により対流が起こり、上昇流域で水滴が凝結成長する、3)上昇流内で大きさが十分になった水滴から凍結し、残った水滴は溶質の濃度が高くなるので凍結しない、4)大きくなった氷粒子は落下することで雲水の層から取り除かれ、さらなる過冷却水の消耗は減り、過冷却の水滴が維持される、という仮説である。

また、代表者は氷の形状（晶癖）を予測する雲微物理スキーム（AMPS）を開発してきた。氷の粒子の形状は、落下速度、及び昇華成長の速度に影響するため、形状を仮定する既存のモデルではなく、AMPSを利用して、凍結過程を調査することが望ましい。

2. 研究の目的

以下の3つの目的を設定した。テーマ1「晶癖予測モデルの評価」では、飛行機観測、雲レーダ、可視ライダの鉛直観測データを用いて、AMPSにより再現された雲水や氷粒子の分布を評価する。テーマ2「雲水浸水凍結仮説の妥当性」では、これまで検討されたAlaska付近の事例ではなく、極を挟んで反対側のNy-Alesundにて、その仮説を検証する。テーマ3「雲水凍結仮説と晶癖の関係」では、氷晶核となるエアロゾル粒子が、雲の外にある場合と、雲水に含まれる場合で、卓越する晶癖が異なるかどうか、関係性を検証することを目的とする。

3. 研究の方法

混合相層雲の氷晶核形成を調査するために、3次元高解像度数値実験（3D-LES）を実施する。上記のAMPSはすでに、力学モデルUW-NMSにインストールされている。まず、Barrow, Alaska付近における2事例について再現実験を行い、AMPSの評価を行う。その後、Ny-Alesund付近において春と秋から2事例を抽出し、実験設定を構築、数値実験を行う。仮説の検証に際しては、再現された雲から、観測されるであろう雲レーダとライダの観測量を再現し、仮説と晶癖の関係を調査する。

4. 研究成果

本研究の主な成果：

- 1) 世界でもまだ少ない晶癖予測モデルの実用性が、3次元LESの枠組みで、確かめられた。
- 2) 予測された晶癖の情報と、非球形の散乱モデルを結合し、リモートセンシングで観測する物理量を計算することができた。
- 3) 凍結過程と氷晶の関係性を、3次元LESの計算で力学と大気放射そして雲物理の相互作用を加味して、示すことに成功した。
- 4) 粗粒エアロゾルの観測の重要性を提起した。

対象事例として、SHEBA観測実験1998年5月7日の雲とISDAC観測実験2008年4月8日の雲を選択し、数値実験を行った。本研究の期間内で成果が得られたのはSHEBAの事例であり、ここで報告する。雲水凍結スキームとして、次の3つについて考察した。1つ目は半経験式である体積依存性のあるV-SF、2つ目と3つ目は古典核形成理論に基づくより詳細な定式化であり、2つ目は水滴が活性化したもののみとその定式を適用するC-ACであり、3つ目は粗粒モードのエアロゾル粒子を含む水滴のみに適用するC-CMである。

図1に、SHEBAの事例について再現された水滴と氷晶の数密度鉛直分布、及び鉛直流の速度を示す。水滴の層の厚さは200mほどであり数密度は約200 1/cm³である（図1d）。特徴的なのは、大きめの水滴(>30μm)は上昇流域（図1f）ではなく、下降流域に存在する傾向があることである。六角平板結晶、不規則多結晶、そして凍結水滴を図1の上側パネルに示す。再現された雲は六角平板と不規則多結晶が卓越する結果となり、飛行機観測と定性的には一致する。しかし、今後は定量的な比較が必要である。鉛直分布に関しては、六角平板は雲内及び雲底の下で卓越している。一方、不規則多結晶は雲頂で卓越することがわかる。鉛直流の分布と照らし合わせると、不規則多結晶は下降流により、雲内に引き込まれ地表面に落下することがわかる。一方で六角平板は上昇流により雲頂付近まで持ち上げられる。凍結水滴は雲底付近で高濃度になっており、これは以下に示すようにC-CMが雲底付近の水滴の凍結を引き起こすからである。興味深いことに、水平分布を検討すると、雲内の高度では不規則多結晶はバンド状の構造を示し、雲頂付近の高度では六角平板はセル状の構造を示した。これは上述の鉛直流の水平分布を示していることがわかった。先行研究の飛行機観測結果では、氷のみの雲の場合に、雲の端では不規則な形状の粒子がバンド状、六角の結晶（平板や柱）はセル状で分布していることが報告されている。本研究で定義する不規則多結晶と、先行研究の不規則な粒子は、必ずしも同じ

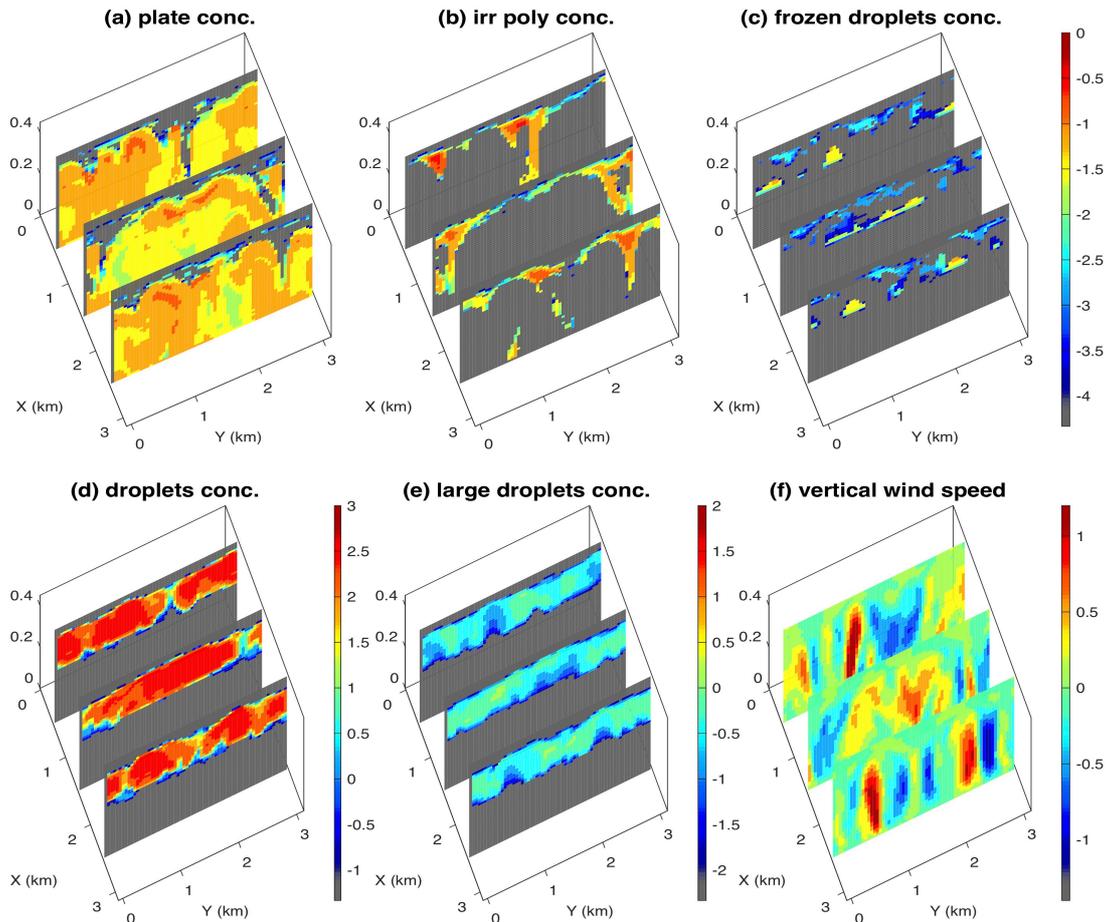


図 1. 実験開始から 3 時間後の、数密度と鉛直流の鉛直分布。a) 六角平板、b) 不規則多結晶、c) 凍結水滴、d) 水滴、e) 大きい水滴 (>30 μm)、f) 鉛直流を示す。数密度の単位は a, b, c については $\log_{10}(\text{L}^{-1})$ 、d, e については $\log_{10}(\text{cm}^{-3})$ 、f は m/s である。鉛直スライスは $x=0.5, 1.5, 2.5$ km で指定。

ものといえない。雲の端における蒸発過程が不規則な形状を作る可能性があるからである。しかし SHEBA の事例のように、雲頂付近が -20°C 以下に到達する場合は、不規則多結晶が下降流と重力落下により雲の端でバンド状の構造を形成しうることがわかる。今後は可視ライダーや飛行機観測により晶癖の定量的な情報を取得し、AMPS の評価、及び氷晶核形成との関係性を探りたい。

図 2 に単位時間あたりの凍結する数密度で重み付けした頻度分布を示す。V-SF では $30\mu\text{m}$ の水滴が雲内で凍結し、雲頂付近では小さい $10\mu\text{m}$ ほどの水滴が凍る。そして鉛直速度への依存性が少ない。しかし、C-AC は $10\mu\text{m}$ の水滴を雲頂付近で凍らせるが、大きめのものは凍らない。これは水滴が活性化するとすぐに水滴が凍ること、そして $30\mu\text{m}$ の水滴は活性化していないことを示している。一方、C-CM は鉛直速度へ強い依存性を示す。上昇流域では、雲底付近にて $30\mu\text{m}$ 付近の大きめの水滴が凍結する。そして下降流域では、雲頂付近で小さめの水滴が凍結する結果となった。これはエアロゾル粒子が雲底、もしくは雲頂から飽和した空気層に入り、凝結成長を経て、凍結することを示しており、凍結が発生している可能性のある場所を示している。また、 $30\mu\text{m}$ の水滴は活性化していない、粗粒エアロゾルを含むものであり、氷晶核の表面積が大きいことが凍結を引き起こす第一要因であることを確かめた。これら $30\mu\text{m}$ の水滴は、溶質の濃度が非常に高く、凍結温度を下げる効果があると予想されたが、古典核形成理論に基づく定式化の場合には、氷と氷晶核の間の表面張力を増やす効果よりも、氷晶核の表面積の効果のほうが大きい結果となった。雲水浸水凍結仮説に立ち返って考えると、氷晶が落下した後に小さい水滴が高い溶質の濃度のために凍結しない、と考えたが、氷晶核が十分に大きい場合には凍結してしまうことになり、一般的には仮説が妥当ではないことがわかる。現実の混合相層で、水滴に含まれる氷晶核の大きさ、及び数密度、すなわち表面積を観測することが重要であり、室内実験にて凍結効率を同定する必要がある。その知見に基づき、より現実的な数値実験の設定を行い、凍結過程を検証することができるであろう。

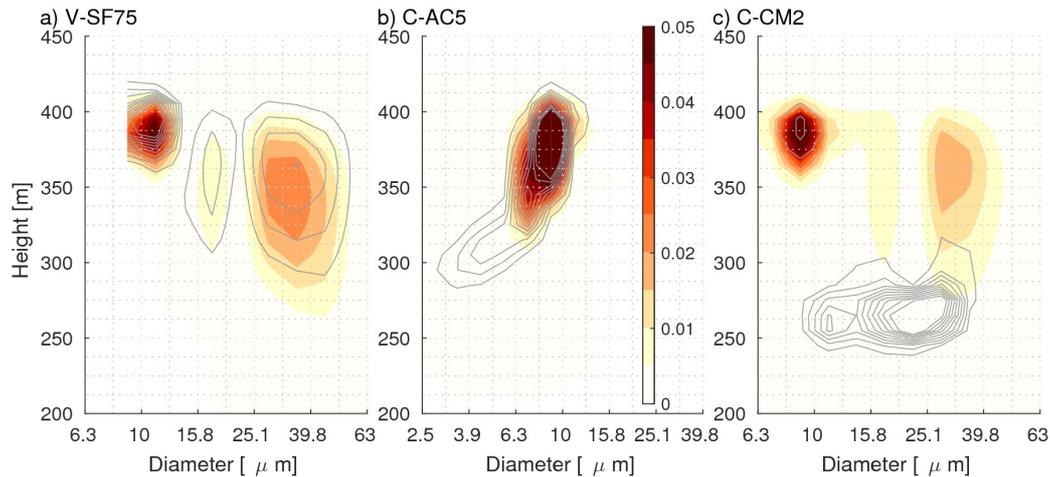


図2. 水滴の直径と高さの空間における、単位時間あたりの凍結数密度で重み付けした頻度。色は下降流域における頻度で灰色等高線は上昇流における頻度である。a)はV-SF、b)はC-AC、c)はC-CMの雲水凍結スキームの結果を示す。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕（計7件）

- ① 端野典平、Gijs de Boer, 岡本創、北極混合相雲へのSHIPSの適用、日本気象学会、2018
- ② T. Hashino, G. de Boer, H. Okamoto, and G. J. Tripoli, Traces of ice nucleation modes in Arctic mixed-phase clouds simulated by a habit prediction scheme, 10th international aerosol conference, 2018
- ③ T. Hashino, G. de Boer, H. Okamoto, and G. J. Tripoli, Impacts of immersion freezing schemes on Arctic mixed-phase clouds simulated with a habit prediction scheme, Japan Geoscience Union, 2018
- ④ T. Hashino, G. de Boer, H. Okamoto, and G. J. Tripoli, Relationships between ice nucleation process and crystal habit for Arctic mixed-phase clouds - a numerical study, American Meteorological Society 98th Annual Meeting, 2018
- ⑤ 端野典平、Gijs de Boer, 岡本創、北極混合相層雲における氷晶核形成過程と晶癖分布の関係、日本気象学会、2017
- ⑥ T. Hashino, G. de Boer, H. Okamoto, A numerical study of ice nucleation process and crystal habit for Arctic mixed-phase clouds, Japan Geoscience Union, 2017
- ⑦ T. Hashino, G. de Boer, H. Okamoto, Evaluation of Arctic mixed-phase clouds simulated by a habit-prediction model, American Geophysical Union Fall Meeting, 2016

6. 研究組織

(1) 研究分担者

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：岡本 創

ローマ字氏名：OKAMOTO, hajime

研究協力者氏名：小池 真

ローマ字氏名：KOIKE, makoto

研究協力者氏名：de Boer, Gijs

研究協力者氏名：Tripoli, Greg

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。