

令和 2 年 6 月 18 日現在

機関番号：82109

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K05557

研究課題名(和文)氷粒子の多様性を考慮したバルク法雲微物理モデルの設計と構築

研究課題名(英文)Development of bulk microphysics model including diversity of ice particles

研究代表者

橋本 明弘 (Hashimoto, Akihiro)

気象庁気象研究所・気象予報研究部・主任研究官

研究者番号：20462525

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)：降雪粒子の温度域別昇華成長量・雲粒捕捉成長量の他、初期氷晶数といった素過程を表すパラメータを追跡する素過程追跡雲微物理スキームを開発した。これを用いて、2017年3月27日那須町雪崩災害の降雪再現実験を行い、この雪崩の強い背景要因となった弱層(雲粒付き雪粒子と雲粒付きの少ない雪粒子の互層構造)形成の再現に概ね成功するとともに、上空の雲システムまで含めた雲・降雪・雪崩メカニズムの解明に資する知見を得た。素過程追跡雲微物理スキームの定式化、それを適用して実施した数値実験、および、気球観測と地上降雪粒子観測の結果を用いた検証結果をまとめ、論文として公表した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

気象学研究や気象・気候予測で広く用いられている低コストの数値モデルを改良し、計算コストを抑制しつつ複雑で多様な降雪粒子の表現を可能とする新しい設計思想に基づいた数値モデルを開発することに成功した。このモデルを活用することで、地上で観察される降雪粒子の形状をもとに、その粒子が上空でどのような成長過程を経て地上に至ったかを、様々な降雪事例で広領域にわたって具体的に描き出すことができる。これによって、我々が地上で目にする降雪粒子とはるか上空の気象現象との関連についての理解が飛躍的に進み、気象学・雪氷学のみならず、気象・雪氷防災上の観点からも有用な知見を生み出されるだろう。

研究成果の概要(英文)： We developed the process-tracking cloud microphysics scheme that tracks the parameters closely relating microphysical processes such as water vapor deposition, cloud droplet accretion, and so on. Using this scheme, we performed the numerical simulation of heavy snowfall event that caused the snow avalanche disaster on March 27, 2017 in Nasu town. As the result, the model successfully reproduced the weak layer that was a strong environmental factor of this avalanche, and revealed the connections between the surface snow particle and the microphysical processes working in the atmosphere. We published achievements of this project such as the formulation for the process-tracking microphysics scheme, numerical experiments conducted by applying it, and validation using the results of balloon observations and ground snow particle observations.

研究分野：気象学

キーワード：雲微物理モデル 氷晶 降雪 雲粒寄与率 粒子特性 メソスケールモデル 数値実験

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

自然界に出現する雲・降水粒子は、柱状・板状・雲粒付き結晶・雪片・霰・雹等、極めて多種多様である。これを数値モデルで再現するために、雲微物理過程のより精緻なモデル化の取り組みがなされてきた。雲微物理過程のモデル化は、従来、計算コストの低いバルク法を用いて行われてきた。一方、ビン法・粒子法など、多様な雲・降水粒子の物理特性を表現できる高コストな手法の利用も進んできており、いわば、低コストモデルと高コストモデルに二極化した状態だった。汎用的に利用できる数値モデルの実現のためには、バルク法の低コストであるという大きな利点を活かしつつ、より多様な粒子の表現が可能な雲微物理モデルの構築が求められていた。

数値気象モデルの検証を目的として、近年、地上および衛星リモートセンシングデータの利用が進んでおり、雲・降水の物理特性に関する均質で稠密なデータを得られるようになった。また、地上観測や航空機観測・気球観測によって直接雲・降水粒子を捉えた観測データの蓄積もなされており、これらを利用した雲微物理モデリングが可能になった。

2. 研究の目的

本研究は、計算コストを抑えつつ、従来よりも格段に多様な氷粒子を再現できるバルク法モデルを構築するために、直接観測データの解析と数値モデリングを行う。

3. 研究の方法

観測データ解析：1994～2002年に行われた気球観測による直接観測データの解析を行い、温度条件の違いと雲・降水粒子の物理特性の違いによってデータを類型化し、環境条件と粒子特性の関係を明らかにする。

数値モデリング：上記直接観測データに加え、多次元ビン法モデルによる数値実験結果をリファレンスとして、多様な氷粒子の物理特性を表現できるバルク法雲微物理モデルの設計と構築を行う。これを気象庁非静力学モデル(JMA-NHM)に導入し、冬季越後山脈での降雪事例の再現実験を行い、高精度バルク法モデリングの効果を明らかにする。

4. 研究成果

1994～2002年の冬季越後山脈上空で実施された雲粒子の直接観測によって得られたデータをもとに、温度に対して、柱状結晶・板状結晶・樹枝状結晶等、様々な氷粒がどのように出現するかを調べた。その結果、柱状結晶は-25と-5に、樹枝状結晶は-15℃～-10付近にピークをもち、板状結晶はピークがはっきりしない分布であることが分かった。

多次元ビン法雲微物理モデルを用いた空気塊断熱上昇実験を様々な大気条件のもとで実施し、氷粒子の縦横比や密度等に関するリファレンスデータの構築を進めた。これを用いて、雪粒子と雲粒の衝突併合係数について検討した結果、衝突併合係数を定数で与えた場合、粒子成長の環境条件によって大きな誤差を生じることが分かった。

表1 素過程と結晶形 (Tは温度, SSiは氷過飽和度)。橋本ほか(2018)から転載。

	素過程	結晶形
Dep-0	昇華成長, $-4 < T < 0\text{C}$	角板
Dep-4	昇華成長, $-10 < T < -4\text{C}$	針・角柱
Dep-10	昇華成長, $-20 < T < -10\text{C}$, Dep-14を除く	角板
Dep-14	昇華成長, $-17 < T < -14\text{C}$, SSi > 7%	樹枝
Dep-20	昇華成長, $-36 < T < -20\text{C}$	角柱
Dep-36	昇華成長, $T < -36\text{C}$	砲弾集合・不規則等
Accr	雲粒捕捉成長	雲粒付き

気象庁非静力学モデル(JMA-NHM)の雲微物理過程を改良した。新しいモデルには、従来計算していた予報変数に加えて、氷晶・雪・霰それぞれの温度・湿度別昇華成長量および雲粒捕捉成長量といった素過程別の成長量を新たな予報変数として組み込んだ。昇華成長する氷晶の形状が温度・湿度条件に応じて変化することを考慮して、Nakaya (1954)の実験結果をもとに、表1のように温度・湿度によって昇華成長量をクラス分けした。氷粒子の質量に対する温度・湿度別昇華成長量の比は、粒子形状と密接に関連した変数と見なせる。また、粒子質量に対する雲粒捕捉成長量の比は、粒子の密度に関連した変数と見なせる。これらの変数は、大気の流れと粒子自体の重力沈降によって、粒子とともにモデル大気中を輸送される。これにより、氷粒子の物理特性に関する表現力を飛躍的に向上させられるとともに、粒子の形状や密度に関する物理特性を、

粒子の生成から降水を経て地上に至るまで追跡できるようになった。

新しいモデルを用いて、冬季越後山脈上空に生じる山岳性降雪雲の再現実験を、鉛直 2 次元大気を仮定して行った。その結果、降雪粒子の形状・雪片構成氷晶数・雲粒寄与率など、従来のバルク法雲微物理モデルでは評価できなかった粒子特性の時空間分布を求めることに成功した。この再現実験で得られた結果を、冬季越後山脈上空で実施された雲粒子ゾンデ観測や三国川ダムで行われた地上降雪粒子観測の結果と比較したところ、モデルは観測結果を概ね再現できていることが分かった。

他課題(16K01340, 17K18453)と連携した取り組みとして、新しいモデルを用いて、2017 年 3 月 27 日那須町雪崩災害の降雪再現実験を行ったところ、この雪崩の強い背景要因となった弱層(雲粒付き雪粒子と雲粒付きの少ない雪粒子の互層構造)形成の再現に概ね成功するとともに、その降雪をもたらした上空の雲システムまで含めた雲 降雪 雪崩メカニズムの解明に資する知見を得るなど、革新的な成果を得た。

新しいモデルを用いて、2018 年 2 月 23 日早朝の札幌における降雪イベントに関する数値実験を行い、札幌市で観測された新雪粒子特性(日本雪氷学会北海道支部雪氷災害調査チーム、さっぽろ積雪情報第 19 号, <http://avalanche.seppyo.org/snow/>)の再現を試みた。観測では、粒子形状が鼓型から樹枝状結晶へと変化していった様子が捉えられていた。数値実験の結果を見ると、降り始め(2 月 23 日 00-03JST)に柱状と板状(図 1, Dep-20 と Dep-10)が混在しており、これは、観測された鼓型結晶と整合的である。その後、樹枝状(図 1, Dep-14)が出現してお

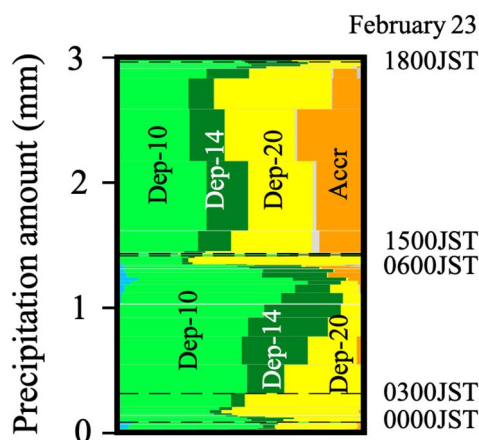


図 1 観測点における新雪粒子特性の層位(10 分間降水量に対する各素過程成分の質量比の推移)。縦軸は、降り始めからの降水量、横軸は、各素過程の質量比を表す。橋本ほか(2018)から転載。

り、観測された粒子が時間とともに樹枝状結晶に変化していった様子と整合的であった。このように素過程別成長量を追跡できる新しいモデルを用いることで、地上の降雪粒子や新雪粒子の物理特性を上空の降水形成機構と具体的に関連づけて議論する新しいアプローチが可能となった。

引用文献

Nakaya, U., 1954: *Snow Crystals: Natural and Artificial*. Harvard University Press, 510 pp.
橋本明弘, 本吉弘岐, 三隅良平, 折笠成宏, 2018: 数値気象モデルによる降雪粒子予測の高度化. *北海道の雪氷*, 37, 63-66.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Hashimoto Akihiro, Motoyoshi Hiroki, Orikasa Narihiro, Misumi Ryohei	4. 巻 16
2. 論文標題 Process-Tracking Scheme Based on Bulk Microphysics to Diagnose the Features of Snow Particles	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 SOLA	6. 最初と最後の頁 51~56
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2151/sola.2020-009	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 橋本明弘, 本吉弘岐, 三隅良平, 折笠成宏	4. 巻 37
2. 論文標題 数値気象モデルによる降雪粒子予測の高度化	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 北海道の雪氷	6. 最初と最後の頁 63-66
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計21件（うち招待講演 0件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 橋本明弘, 本吉弘岐, 山下克也, 石坂雅昭, 中井専人, 山口悟
2. 発表標題 2018年北陸に大雪をもたらした降雪雲の雲物理特性に関する数値実験
3. 学会等名 ワークショップ「降雪に関するレーダーと数値モデルによる研究 in長岡（第18回）JPCZ revisited」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 橋本明弘, 折笠成宏, 田尻拓也, 林修吾
2. 発表標題 平成 30 年 7 月豪雨の雲・降水形成機構に関する数値実験
3. 学会等名 日本気象学会2019年度秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 橋本明弘, 本吉弘岐, 山下克也, 石坂雅昭, 中井専人, 山口悟
2. 発表標題 2018年冬季大雪事例の雲・降水機構に関する数値実験
3. 学会等名 雪氷研究大会(2019・山形)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 橋本明弘, 山口悟, 本吉弘岐, 中井専人, 山下克也
2. 発表標題 降雪メカニズムと新雪比表面積との関係に関する数値実験
3. 学会等名 日本雪氷学会2019年度北信越支部研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 橋本明弘, 山口悟, 本吉弘岐, 中井専人
2. 発表標題 数値気象モデルによる雲粒寄与率予測値を用いた新雪比表面積の推定
3. 学会等名 日本気象学会2019年度春季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hashimoto A. Narihiro Oriyasa H. Motoyoshi and R. Misumi
2. 発表標題 Process-tracking model for snow particle formation based on bulk microphysics
3. 学会等名 2018 American Geophysical Union Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 橋本明弘 折笠成宏 本吉弘岐 三隅良平
2. 発表標題 山岳性降雪雲における降水形成過程に関するバルク法雲微物理モデルを用いた解析
3. 学会等名 日本気象学会2018年度秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hashimoto A. H. Motoyoshi R. Misumi and N. Oriksa
2. 発表標題 Multivariable Scheme for Diagnosing Ice Particle Features in a Bulk Microphysics Model
3. 学会等名 15th Cloud Physics Conference, American Meteorological Society (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 橋本明弘, 本吉弘岐, 山口悟, 中村一樹, 河島克久, 庭野匡思, 中井専人
2. 発表標題 降雪系弱層形成に関する気象数値モデルを用いた再現実験
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 橋本明弘, 本吉弘岐, 三隅良平, 折笠成宏
2. 発表標題 バルク法雲物理モデリングにおける降水粒子特性の精緻化
3. 学会等名 日本気象学会2018年度春季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hashimoto A., H. Motoyoshi, K. Nakamura, S. Yamaguchi, K. Kawashima, M. Niwano and S. Nakai
2. 発表標題 Transition of falling snow characteristics causing weak layer formation simulated by a numerical weather mode in avalanche disaster events on March 27, 2017 in Japan
3. 学会等名 European Geosciences Union General Assembly 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 橋本明弘, 林修吾, 伊藤純至, 山田芳則, 折笠成宏, 本吉弘岐, 石坂雅昭, 山下克也, 山口悟, 中井専人, 三隅良平
2. 発表標題 JMA-NHM降雪種再現性の評価
3. 学会等名 日本気象学会2017年度春季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 橋本明弘
2. 発表標題 雲・降水数値モデルを用いた新積雪粒子の推定
3. 学会等名 低温研共同研究集会「グリーンランド南東ドームアイスコアに関する研究集会」
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 橋本明弘, 本吉弘岐, 山口悟, 中井専人
2. 発表標題 降雪による弱層形成に関する雲・降水数値モデルを用いた新雪特性の推定
3. 学会等名 雪氷研究大会(2017・十日町)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 橋本明弘
2. 発表標題 雲物理モデルの多変数化による雲・降水粒子特性の診断
3. 学会等名 日本気象学会2017年度秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 橋本明弘, 本吉弘岐, 山口悟, 中井専人
2. 発表標題 雲・降水モデルを用いた降雪系弱層形成に関する新たなアプローチ
3. 学会等名 ワークショップ『降雪に関するレーダーと数値モデルによる研究(第16回)』-雪崩につながる不安定積雪を作る降雪-
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 橋本明弘, 三隅良平, 折笠成宏
2. 発表標題 バルク法雲物理モデルを用いた粒子特性診断の精緻化に向けて
3. 学会等名 第19回非静力学モデルに関するワークショップ
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Akihiro Hashimoto
2. 発表標題 Cloud microphysics simulation using multi-dimensional bin-microphysics model
3. 学会等名 17th International Conference on Clouds and Precipitation (ICCP 2016) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 橋本明弘
2. 発表標題 多次元ビン法微物理モデルを用いたバルク法粒子クラスの検討
3. 学会等名 雪氷研究大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 橋本明弘
2. 発表標題 多次元ビン法微物理モデルを用いたバルク法粒子クラスの検討
3. 学会等名 日本気象学会2016年度秋季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Akihiro Hashimoto
2. 発表標題 Examination of the classification of hydrometeor types in a bulk microphysics scheme
3. 学会等名 4th International Workshop on Non-Hydrostatic Model
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

科研費基盤(C)「氷粒子の多様性を考慮したバルク法雲微物理モデルの設計と構築」平成28-31年度
<https://www.mri-jma.go.jp/Dep/phy/ahashimo/jp16k05557.html>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	折笠 成宏 (Orikasa Narihiro) (50354486)	気象庁気象研究所・気象予報研究部・主任研究官 (82109)	
連携研究者	三隅 良平 (Misumi Ryohei) (20414401)	国立研究開発法人防災科学技術研究所・水・土砂防災研究部門・総括主任研究員 (82102)	