

数値気象モデルによる降雪粒子予測の高度化

Sophistication of snow property prediction by numerical weather model

橋本明弘 (気象研究所), 本吉弘岐 (防災科学技術研究所), 三隅良平 (防災科学技術研究所),
折笠成宏 (気象研究所)

Akihiro Hashimoto, Hiroki Motoyoshi, Ryohei Misumi, Narihiro Orikasa

1. はじめに

新雪粒子の物理特性は、積雪層の変質過程に影響を与える重要な因子だが、降雪イベントの再現や予測に用いられている数値気象モデルでは、降雪粒子の物理特性は極めて簡単な形でしかモデル化されておらず、降雪・積雪粒子の直接観測やリモートセンシング観測によって得られる多様な粒子特性データに追従できていない。このため、著者らは、気象モデルに組み込まれたバルク法雲物理過程を多変数化し、雲・降水の粒子特性を従来よりもはるかに精緻に表す新たな手法の開発に取り組んでいる。この手法を用いて、2018年2月23日早朝に札幌市北区で観測された新雪粒子の再現を試みた。

2. 数値気象モデル

対象とする降雪イベントの再現実験のために、気象庁非静力学モデル (JMA-NHM) に改良を加えた新しいモデルを用いた。JMA-NHMの雲物理過程は、大気中の固体水粒子を氷晶・雪・霰の3クラスに分け、それぞれの総混合比・総数濃度を予報変数として計算する。水過飽和は許容せず、固体水粒子の昇華成長は水過飽和の条件下で計算される。雲粒と固体水粒子が共存する場合は雲粒捕捉成長が併せて計算される。

新しいモデルでは、従来の予報変数に加えて、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が新たな予報変数として組み込まれている。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パラメータと見なせる。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パラメータとみなすせる。これらのパラメータは、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、粒子

表1 素過程と結晶形 (Tは温度, SSiは水過飽和度)

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

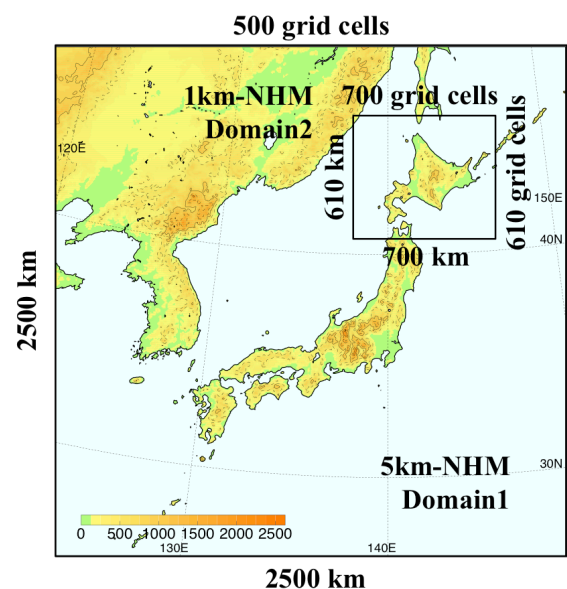


図1 5km-NHM および 1km-NHM の計算領域

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することが可能となった。

3. 数値実験

日本を中心とする水平 2500km×2500km、鉛直約 22km の計算領域を設け、水平格子幅は 5km、鉛直方向には最下層で 40 – 最上層で 735m の可変格子として数値実験を行った

(図 1, 5km-NHM) .タイムステップ長は 15 秒、積分時間は 45 時間とし、初期値・境界値には気象庁メソ解析を用いた。さらに 5km-NHM の計算結果を初期値・境界値として、北海道を中心とする 700km×610km の計

算領域を設け、水平解像度 1km、鉛直層は 5km-NHM と同じ設定で実験を行った (図 1, 1km-NHM) . タイムステップ長は 8 秒、積分時間は 30 時間とした。実験対象期間は 2018 年 2 月 22 日 09 時～23 日 21 時 (JST) とし、初期時刻を 12 時間ずつずらしながら 3 回の数値実験を行った

4. 結果

2018 年 2 月 23 日早朝、日本海を東進する低気圧の接近に伴い、札幌市では早朝と夕方に降雪が観測された。図 2 は、2 月 23 日 03 時 (日本時) における 1 時間降水量の観測結果と実験結果である。JMA-NHM はこの時の降水分布を概ね良く再現していた。図 3 は、地上気象要素の観測 (黒) と数値実験 (赤) の結果である。観測データとして、札幌市北区にある粒子観測点から最寄りの気象庁アメダス石狩地点の値を用いた。図 3 によると、23 日早朝の降雪のタイミングは良く再現されていた (図 3a) . 風速・風向 (図 3b) についても実験対象期間を通じて良く再現されていた。気温 (図 3c) については、23 日未明と日中に、低温誤差がみとめられる。

23 日早朝の降雪イベントの間に粒子観測点に積もった新雪粒子は、秋田谷英次博士によって撮影され公開されている (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/>) . それによると、新雪の深さは約 15 cm で、雲粒なし結晶が目立ち、降雪の前半にあたる層では鼓型、後半にあたる層では樹枝状結晶が多かった。図 4 は、数値実験の結果から求めた粒子観測点における新雪粒子特性を、水当量積雪深に対する変化として表した層位図である。23 日早朝の降雪の間、雲粒捕捉成長の寄与 (Accr, オレンジ) はほとんど無く、粒子観測の結果と一致した。温度・湿度別昇華成長の寄与をみると、降雪の前半は、Dep-20 (角柱, 黄) と Dep-10 (角板, 黄緑) の寄与がともに大きく、降雪の後半は、Dep-20 (角柱, 黄) の寄与が減少し、Dep-14 (樹枝, 緑) の寄与が増加した。数値実験で、降雪の前半に c 軸成長 (Dep-20) と非 c 軸成長 (Dep-10) の寄与が共存していたことは、粒子観測で降雪の前半にあたる層で鼓型結晶が捉えられたことと整合的である。また、降雪の後半に、c 軸成長 (Dep-20) の寄与が、主に、a 軸成長 (Dep-14) の寄与に置き換えられたことは、降雪の後半にあたる層で樹枝状結晶が捉えられたことと親和的な傾向である。

図 5 は、図 1 の直線 AB に沿った温度・湿度別昇華成長量混合比の鉛直断面図である。23 日早朝の降雪前半にあたる時刻では (0300JST, 図 5a, b, c), Dep-20 の寄与が高度 3 km 付近か

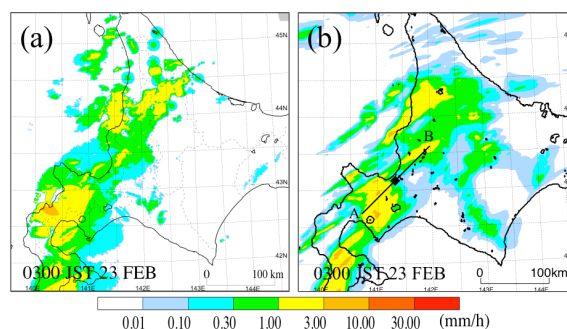


図 2 2 月 23 日 03 時 (日本時) における降水強度の (a) 観測結果 (レーダー・アメダス解析) と (b) 実験結果 (1km-NHM, ダイヤ印は札幌市北区の粒子観測点)

ら地上まで到達していた．さらに Dep-10 の寄与も高度 2km 付近から地上まで到達していた．それに対して，降雪後半にあたる時刻 (0400JST, 図 5d, e, f) では，上空の Dep-20 の寄与は地上まで届かず，降雪雲が上層と下層に分かれており，粒子観測点での降雪は主に Dep-10 と Dep-14 によってもたらされていた．つまり，上空の降雪雲の状態の時々刻々の変化が，地上降雪量に対する素過程別成長量の寄与率の変化 (図 4) に深く関与していることを具体的に表していた．

5. 考察

新雪粒子特性の推移に関して，数値モデルは概ね良好な再現性を示したが，23 日早朝の降雪の後半に Dep-10 (角板，黄緑) と Dep-14 (樹枝，緑) が共存し，このうち Dep-10 が寄与率の大半を占めていた (図 4)．この点については検討を要する．ここで，温度・湿度別昇華成長量の意味を再考する．異なる温度・湿度条件における成長量の寄与が共存することは，異なる結晶形をもつ粒子が複数種存在することを必ずしも意味しない．大気中のある温度・湿度をもつ環境のもとで氷晶が発生し，その環境を保ったまま同じ粒子が地上に到達することは極めて稀である．したがって，むしろ，同一の粒子が複数の異なる温度・湿度条件の空間を経た後に地上に到達したと捉えるべきである．

図 5e, 5g を見ると，黒実線と黒破線で表される Dep-14 の成長条件を満たす領域 (氷飽和度 $<107\%$ ，かつ， $-17^{\circ}\text{C}<\text{気温}<-14^{\circ}\text{C}$) は，この条件で獲得された質量の分布 (青白シェード) と一致していない．つまり，はじめ Dep-14 の条件下で成長した粒子が，その後，Dep-10 の条件下で成長する，または，その逆もあり得ることを示している．このことを考慮すると，角板が卓越する条件と樹枝が卓越する条件の両方を大気中で経験し成長した同一の粒子を，結果的にどのような形状の粒子として類型化してモデリングに反映させるかという点が，新雪粒子観測の結果と数値実験結果を比較する上で，解決を要する課題であることが分かる．

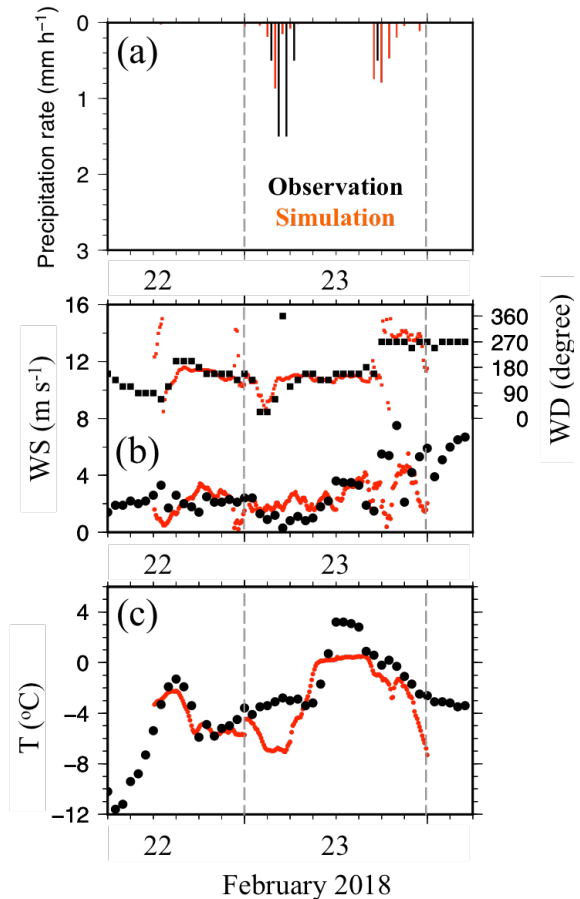


図 3 (a) 1 時間降水量，(b) 風速 (円)・風向 (四角)，(c) 気温の観測結果 (黒，気象庁アメダス石狩) と実験結果 (赤，粒子観測点)

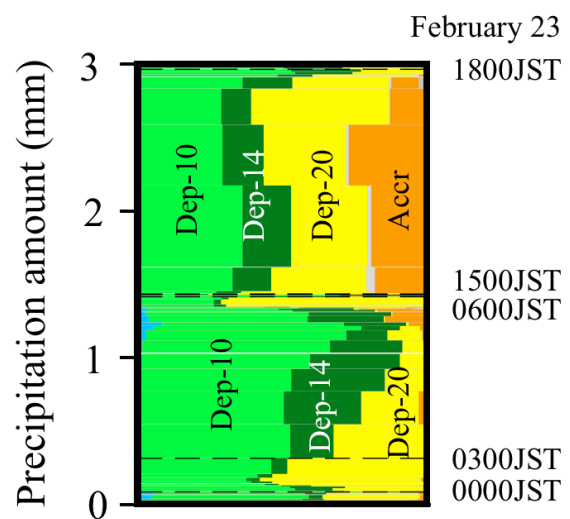


図 4 観測点における新雪粒子特性の層位 (10 分間降水量に対する各素過程成分の質量比の推移)

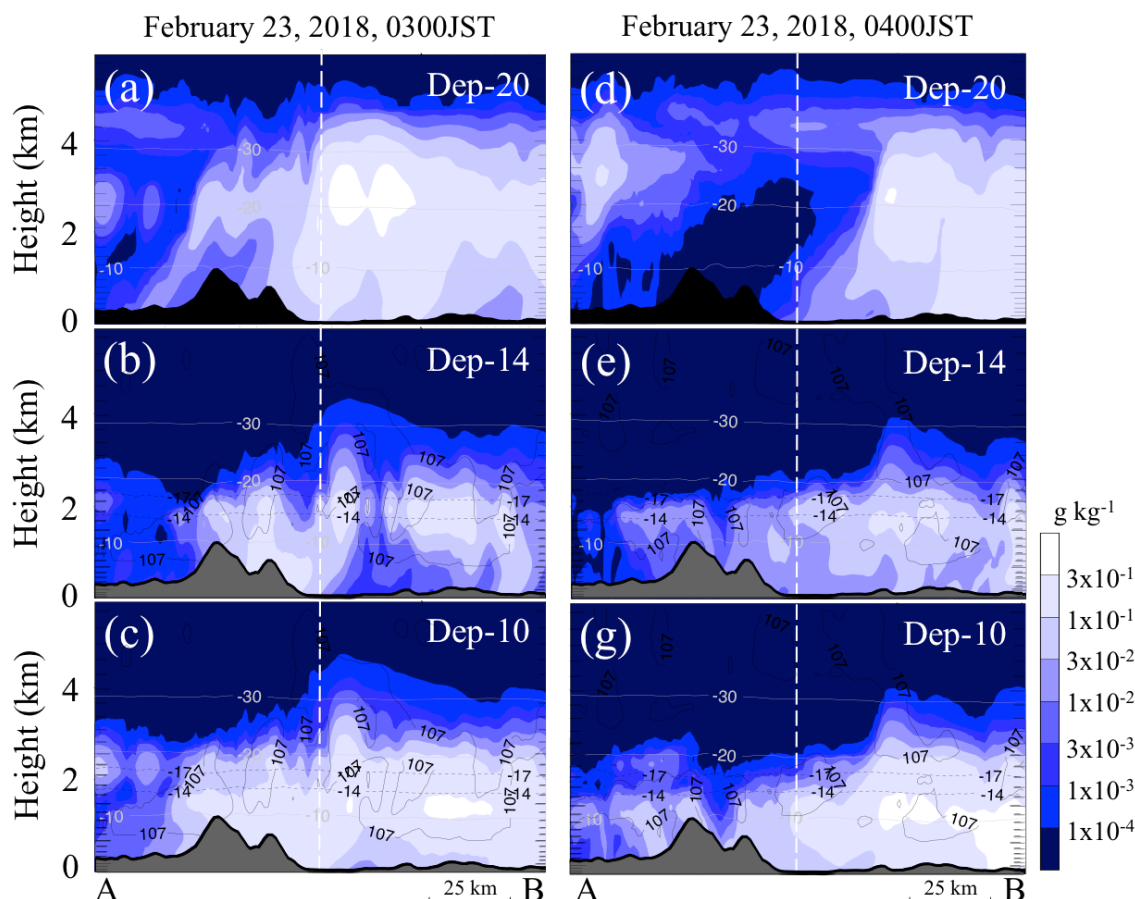


図5 図2bの直線ABに沿った温度・湿度別昇華成長量混合比の鉛直断面（白破線は観測点の位置，白等値線は気温，黒実線と黒破線の等値線は Dep-14 の条件に関する氷飽和度と温度の境界；氷飽和度 107%，および，気温-17℃，-14℃を表す.）

6. 結論

中谷ダイヤグラムをもとに，温度・湿度でクラス分けした昇華成長量その他，雲粒捕捉成長量を新たな予報変数として組み込んだ新しい数値気象モデルを用いて，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，札幌市北区の新雪粒子観測点で，秋田谷英次博士によって観測された新雪粒子特性の再現を試みた．観測された鼓型から樹枝状結晶への粒子特性の変化傾向を新しいモデルは概ね再現した．他方，複数の温度・湿度条件を経て成長した粒子の物理特性をどのように類型化するかという点で検討を要することが分かった．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．

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 16K01340, 16K05557 の助成を受けたものです．

【参考・引用文献】

Nakaya, U., 1954: Snow crystals. Harvard University Press, 246.