

別紙 4

報告番号	※	第	号
------	---	---	---

## 主 論 文 の 要 旨

論文題目    Development of the physical snowpack model SMAP  
                   : Application to seasonal snowpack in Japan  
                   and the Greenland ice sheet (積雪変質モデル SMAP の  
                   開発 : 日本の季節積雪とグリーンランド氷床への適用)

氏        名        庭野 匡思

## 論 文 内 容 の 要 旨

積雪は地球上に存在する多種多様な地表面種別の1つであり、その高いアルベド、低温状態、高い断熱性能、非常に小さな地表面粗度、及び相変化が可能であるという特性によって特徴づけられる。近年、地球温暖化に伴って、根雪期間の減少に代表される積雪物理状態の急激な変化が報告されている。このことは積雪-アルベドフィードバック（消雪によるアルベド低下が地表面加熱を助長させる効果）を介して地球温暖化を加速させていると考えられている。近年の積雪物理状態の急激な変化を理解するためには、観測に基づく実態把握とその理論的考察が必要不可欠であるが、それらに基づいて開発された詳細かつ現実的な積雪変質モデルは理解の確認と深化に役立つツールになりうると期待される。本研究では、アルベドと積雪内部短波加熱率を非常に高い精度で計算することが可能な積雪変質モデル SMAP (Snow Metamorphism and Albedo Process) を開発し、雪氷圏変動のメカニズムを多角的に調べた。本モデルは、圧密、相変化、水分移動、積雪変態などの各種積雪物理過程も取り扱っており、時系列の地上気象情報を入力することで積雪の熱・質量収支の時間変化を詳細に計算することが可能である。

本研究ではまず、SMAP を 2007-2009 冬期の札幌に適用し、精度検証を実施した。ここでは、北海道大学低温科学研究所（低温研）の露場に設置された自動気象観測装置のデータを用いてモデルを駆動した。その結果、2007-2008 冬期と 2008-2009 冬期における積雪深の 2 乗平均平方根誤差 (RMSE) は 6.4 cm と 7.5 cm を得た。またアルベドと雪面温度の RMSE は、それぞれ 0.051 と 0.084、及び 2.5 °C と 2.0 °C と十分な結果を得た。その他の要素の計算精度も概ね良好であり、モデルの妥当性が確認された。本バージョンの SMAP モデルを用いて、札幌の融雪時期に対するブラックカーボンとダストの寄与をモデル感度実験により調べたところ、2007-2008 冬期は 19 日、及び 2008-2009 冬期は 16 日だけ、それらの不純物の存在により融雪時期が早められていたことが分かった。しか

し、2008-2009 冬期（暖冬年）における積雪深の過大評価傾向と、大気下層が強安定の時の雪面温度の過小評価傾向が改善すべき課題として挙げられた。

上述の2つの課題を解決するために、最新版 SMAP では (1) Richards 式の導入による水分移動計算の精緻化、(2) 圧縮粘性係数計算方法の高度化、(3) 強安定時における大気—積雪間の乱流熱交換計算の見直しを行い、2007-2009 冬期の札幌における観測データによって再検証を行った。その結果、上記2つの課題は有意な精度で改善された(2007-2008 冬期と 2008-2009 冬期の積雪深の RMSE はそれぞれ 4.5 cm と 5.0 cm、雪面温度の 2 冬期の RMSE は 2.0 °C と 1.5 °C)。上記3つの改良点のそれぞれに対する感度実験の結果、積雪深の改善には圧密過程の見直しが最も有効であり、雪面温度の改善には乱流熱交換計算手法の見直しが最も効果的であることが分かった。

2005 年から 2015 年にかけての冬期の札幌における雪面熱収支と融雪の特徴について、低温研露場で観測した気象・雪氷データと上記で改良された SMAP の最新版を用いて調べた。10 年分のモデル計算結果を全層水当量、密度プロファイル、表面温度、及び雪温プロファイルについて検証したところ、各要素の RMSE が  $34 \text{ kg m}^{-2} \text{ w.e.}$ 、 $88 \text{ kg m}^{-3}$ 、 $1.6 \text{ °C}$ 、及び  $1.6 \text{ °C}$  といずれも良い結果を得た。このことから、SMAP が札幌における 10 年間の積雪熱収支・質量収支を精度良く計算出来たことが確認出来た。モデルで計算された融雪期（3 月）の平均日積算流出量は  $7 \text{ kg m}^{-2} \text{ w.e. day}^{-1}$  あった。計算された日積算流出量が平均を下回った日（Case-1）と上回った日（Case-2）について雪面熱収支を整理したところ、Case-2 は相対的に大きな短波放射収支と顕熱、及び潜熱（Case-1 との差： $+35$ 、 $+14$ 、及び  $+6 \text{ W m}^{-2}$ ）によって特徴づけられた。これらのフラックスは、下向き短波放射、雲量、アルベド、気温、水蒸気圧、風速、及び大気下層安定度に影響を受けるので、Case-1 と Case-2 におけるそれらの要素の平均値を調べた。その結果、Case-2 では Case-1 と比較して、下向き短波放射、気温、及び水蒸気圧が有意に大きく（それぞれ  $+10 \text{ W m}^{-2}$ 、 $+2.0 \text{ °C}$ 、及び  $+0.6 \text{ hPa}$ ）、一方で雲量とアルベドは有意に低くなっていた（それぞれ  $-0.10$ 、 $-0.1$ ）ことが明らかになった。なお、風速と大気安定度は Case-1 と Case-2 でほぼ同等であり、上記熱収支の差には顕著な影響を与えていなかった。これらのことは、札幌における融雪が、晴れ間の出現と気温上昇、及び雪面アルベドの低下によって加速されていたことを示す。

続いて、SMAP 最新版を、記録的な表面融解イベントが発生した 2012 年 7 月 12 日前後のグリーンランド氷床上の熱収支解析に適用し、その間の大気—積雪相互作用の詳細な理解を試みた。ここではまず、6 月 30 日から 7 月 14 日にかけて北西グリーンランド SIGMA-A サイト ( $78^{\circ}03' \text{ N}$ ,  $67^{\circ}38' \text{ W}$ ;  $1490 \text{ m a.s.l.}$ ) で取得した気象・雪氷データを用いてモデルの検証を行った。その結果、計算されたアルベドと雪面温度の RMSE はそれぞれ  $0.022$  と  $0.6 \text{ °C}$  と十分な精度であることが確認された。そこで、本モデルを用いて上述の期間の SIGMA-A における雪面熱収支を計算したところ、6 月 30 日から 7 月 9 日にかけての期間（Period-1：主に晴天が継続）と 7 月 10 日から 14 日にか

での期間（Period-2：曇天及び降雨と急激な表面融解を観測）では計算された熱収支の特徴が大きく異なることが分かった。短波放射収支は Period-2 において Period-1 と比べて著しく減少（ $-42.3 \text{ W m}^{-2}$ ）したのに対して、長波放射収支・顕熱・潜熱は Period-2 において顕著に増加（ $+57.1$ 、 $+11.3$ 、 $+25.2 \text{ W m}^{-2}$ ）していた。すなわち、Period-2 において観測された急激な表面融解に対して、暖気を伴う下層雲からの下向き長波放射が大きく寄与していたことが結論付けられた。

以上より、日本とグリーンランドにおける SMAP モデルの有用性が確認された。多様な環境下における観測を通じた本モデルの更なる精緻化と信頼性向上の試みの継続は、雪氷物理過程の理解の深化に一層貢献するものと期待される。