

吸収性エアロゾルの積雪面への沈着と 気候に対するインパクト

物理気象研究部 青木 輝夫

1. はじめに

雪氷圏は地球温暖化の影響を最も大きく受けるため、正確な気候予測には雪氷圏の放射収支メカニズムを解明し、モデル化する必要がある。特に、積雪面のアルベド（太陽光の反射率）は雪氷面の放射収支を決定する重要な要素であるため、積雪アルベドを支配する物理過程の解明とモデル化が重要である。本研究では長期間の積雪面上放射収支と積雪断面観測結果に加え、放射伝達数値モデル（光の散乱や吸収を計算する数値モデル）を利用して、積雪アルベドと積雪不純物（不溶性固体粒子）の関係を調べた。また、その物理過程をモデル化し、気候モデルに組み込むことにより積雪の汚れが気候に与える効果を調べた。さらに、その検証のために衛星データから物理量を求めるアルゴリズムを開発した。

2. 結果と考察

2.1 積雪物理量とアルベドの関係

2003年以降の冬期間、札幌において放射収支観測、積雪断面観測、エアロゾル観測を行い、積雪粒径と積雪中の不純物濃度の関係を調べた（図1：2003/2004年冬期の結果）。12月から2月までの積雪が増加する涵養期には各波長域のアルベドは高い値で推移し、3月の融雪期には積雪不純物濃度の増加と共にアルベドは急激に低下している。特に、2004年3月11-12日には強い黄砂イベントが観測され、可視域のアルベドは0.7から0.5まで低下した。このときの大気中のエアロゾル濃度と積雪中の不純物濃度の関係を解析したところ、大粒子は自由落下による乾性沈着、小粒子は降雪に取り込まれて落下する湿性沈着であること

が確認された⁽¹⁾。

2003年以降の3冬期間のアルベドと積雪粒径及び不純物濃度の関係をプロットし（図2）、放射伝達モデルによる理論計算値と比較した結果、札幌の積雪は鉱物性のダスト（＝土壌粒子）だけでなく黒色炭素（BC）（＝すす）によっても汚染されていることが分かった⁽²⁾。これらは光を吸収する性質があるため吸収性エアロゾルと呼ばれる。このように積雪不純物としてダストとBCを分離して考慮する必要があることが分かった。そこでさらに、積雪中のカーボン濃度を測定する手法を開発し、2003/2004年の積雪サンプルを分析した結果、1-2月の厳冬期には0.1 ppmw前後、3月の融雪期には1 ppmw前後の元素質炭素（EC～BC）が確認された（図3）。

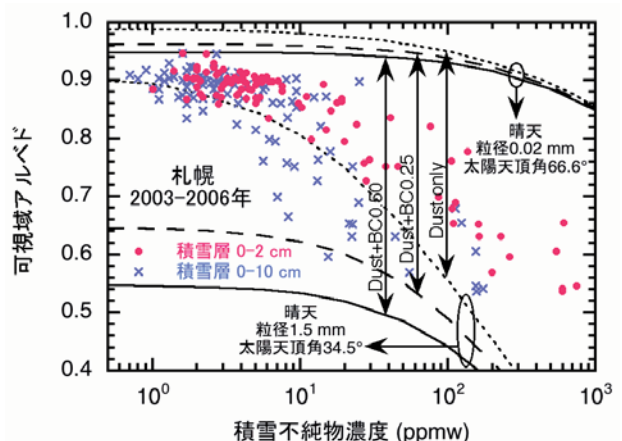


図2 積雪不純物濃度と可視域アルベドの関係。記号は観測値、曲線は放射伝達モデルで計算した観測期間におけるアルベドの最大値と最小値で、積雪不純物として鉱物性ダスト(Dust)と黒色炭素(BC)を組み合わせる吸収の強さの違う3種類のモデルを仮定した。

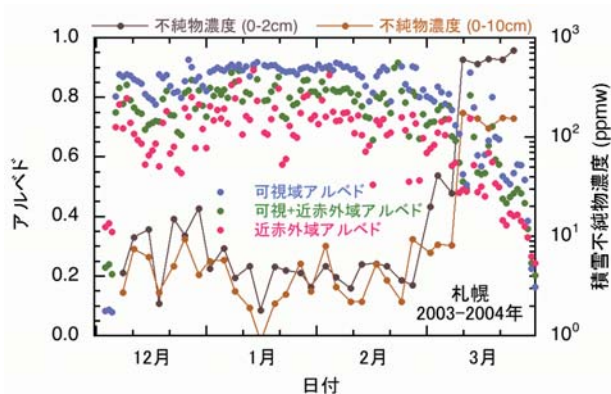


図1 札幌における2003/2004年冬期間の可視域、近赤外域のアルベドと積雪不純物濃度の変化。不純物濃度は積雪層0-2 cm及び0-10 cmの2層の測定結果。

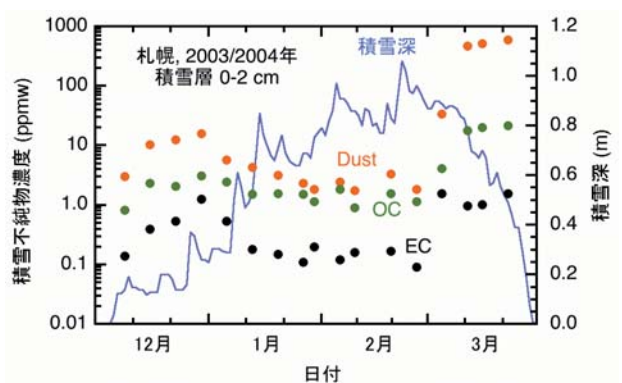


図3 札幌における2003/2004年冬期間における積雪サンプル中のダスト(Dust)、有機性炭素(OC)、元素質炭素(EC)及び積雪深の変化。ECはほぼBCに等しいと考えられる。

2.2 積雪アルベド物理モデル

積雪面のアルベドは、大気による効果と太陽高度の効果を除くと、本質的に積雪粒径と不純物濃度に依存している。そこで、積雪中不純物としてBC濃度及びダスト濃度、積雪粒子の有効半径、及び太陽天頂角の関数として変化する積雪アルベド物理モデルを開発した。このモデルを地表面のエネルギーのやり取りを計算するための陸面モデル⁽³⁾に組み込み、さらにその陸面モデルを気候モデルの一種であるエロゾル輸送モデル⁽⁴⁾に組み込んで、気候再現実験を行った。その結果、BC及びダストの沈着がないと、積雪アルベドは高い値で維持し、その結果融雪が遅れた。すなわち、吸収性エロゾルは雪面アルベドを低下させる効果を持つ。これら吸収性エロゾル沈着の有無による大気上端における放射収支差の年平均値は全球平均で $+0.7 \text{ W/m}^2$ 、晴天のみでは $+1.12 \text{ W/m}^2$ という高い値となった(図4)⁽⁵⁾。これは大気中のエロゾルが光を反射・吸収する直接効果や雲の核になり雲量や雲の寿命を変化させる間接効果に匹敵する大きさである。また、BCはダストよりも長距離輸送されやすく、北極域周辺ではダストよりも相対的にBCの寄与が大きいことが分かった。

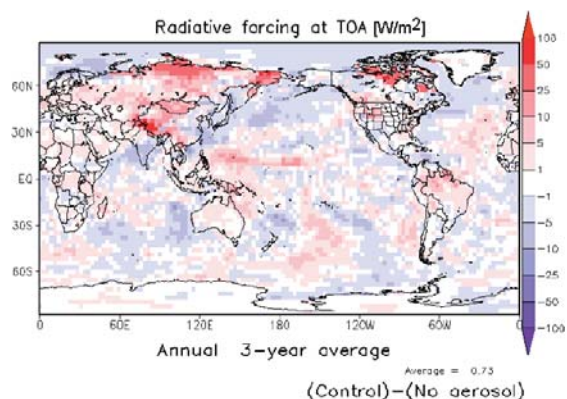


図4 エロゾルの沈着による雪面アルベド変化があるときとないときの、大気上端における放射収支差の年平均値⁽⁵⁾。

2.3 積雪物理量のリモートセンシング

可視域及び近赤外域の雪面アルベドが積雪中の不純物濃度と積雪粒径に依存することを利用し、ADEOS-II衛星/GLIセンサやTerra・Aqua衛星/MODISセンサのデータからそれら積雪物理量を抽出するアルゴリズムを開発し⁽⁶⁾、全球分布を求めた(図5)⁽⁷⁾。その結果、積雪粒径と雪面温度に相関のあることが分かった。また、アラスカや北海道での地上検証の結果、積雪粒径はほぼ正確な値が求まり、不純物濃度はやや誤差が大きいことが分かった⁽⁸⁾。今後、アルゴリズムを改良して精度が向上すれば、積雪アルベド物理モデルの検証に利用できると期待される。さらに、積雪粒径は積雪の融解前に増大するため、衛星データから

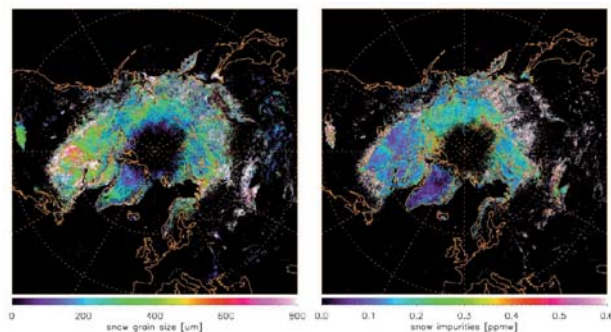


図5 ADEOS-II/GLI データから求めた2003年4月の北極域における(左図)積雪半径及び(右図)不純物濃度⁽⁸⁾。不純物としてBCを仮定。

求めた積雪粒径によって温暖化の兆候を監視できる可能性がある。

3. まとめ

長期間の積雪面上放射収支と積雪断面観測及び、大気-積雪系の放射伝達モデルによって、積雪面の放射特性が積雪粒径と大気中の吸収性エロゾルを起源とする積雪中の不純物濃度に大きく依存していることが明らかになった。この結果を基に、積雪粒径と不純物濃度によって変化する積雪アルベド物理モデルを開発し、気候モデルに組み込んだ。その気候モデルによって、吸収性エロゾルが積雪面の放射特性に与える影響を調べた結果、吸収性エロゾルが積雪面アルベドの変化を通じて全球放射収支に与える放射効果は、大気エロゾルそのものの放射効果に匹敵する大きさであることが分かった。さらに、衛星リモートセンシングによる積雪粒径と不純物濃度を抽出する技術を開発した。これにより、衛星データから、気候モデルで計算した積雪物理量を全球で検証できるものと期待される。

参考文献

- (1) Aoki, Te. et al., 2006: *SOLA*, **2**, 013-016, doi:10.2151/sola.2006-004.
- (2) Aoki, Te. et al., 2007: *Ann. Glaciol.*, (in press).
- (3) Hosaka, M. et al., 2005: *SOLA*, **1**, 093-096, doi: 10.2151/sola.2005-025.
- (4) Tanaka, T. Y. et al., 2003: *Pap. Meteor. Geophys.*, **53**, 119-138.
- (5) 田中泰宙ほか, 2006: 日本気象学会 2006 年度秋季大会予稿集, D151.
- (6) Stamnes, K., Wei Li, Hans Eide, Te Aoki, et al., 2007: *Remote Sens. Environ.*, (in press).
- (7) Hori, M., Te. Aoki, et al., 2007: *Remote Sens. Environ.*, (in press).
- (8) Aoki, Te. et al., 2007: *Remote Sens. Environ.*, (in press).