

# 大気エアロゾルが積雪面の放射特性に与える影響

○青木輝夫、田中悦子、朽木勝幸(物理気象研究部)  
田中泰宙(環境・応用気象研究部)、内山明博、保坂征宏(気候研究部)

## 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、正確な気候予測のため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、積雪のアルベドは雪氷面の放射収支を決定する重要な物理量であるため、積雪のアルベドを支配する物理過程の解明と、そのモデル化が重要である(Aoki et al., 2003)。本研究では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、積雪面の放射特性と積雪粒径及び不純物濃度の関係を調べた。この結果を基に、それら積雪物理量によって変化する積雪アルベド陸面モデルを開発し、気候モデルに組み込み、その放射効果を調べた。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の精度評価を行った。

## 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(不溶性粒子)濃度の関係を調べた(図1)。12月から2月までの涵養期には各波長域のアルベドは高い値で推移し、3月の融解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ダスト濃度の関係を解析したところ、大粒子は乾性沈着、小粒子は湿性沈着であることが確認された(Aoki et al., 2006)。

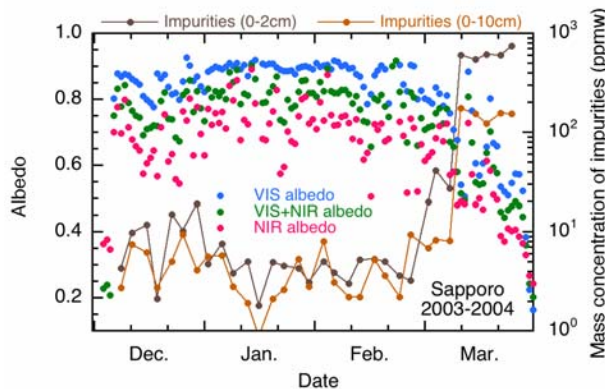


図1 札幌における2003/2004年冬期間におけるアルベドと積雪不純物濃度変化。

全冬期間のアルベドと積雪粒径及び不純物濃度の関係を調べ、大気-積雪系の放射伝達モデル(Aoki et al., 1999, 2000)による計算と比較した結果、札幌の雪は鉱物性ダスト(MD)だけでなく、黒色炭素(BC)によっても汚染されていることが分かった(図2)(Aoki et al., submitted to *Ann. Glaciol.*)。一般に、日本に飛来するMDには、BCとの関係が指摘され(Uchiyama et al., 2005)、BCによる積雪アルベドの低下は他の地域でも確認されている(Motoyoshi et al., 2005)。この研究からアルベドを物理的に予測するためには、不純物としてMDとBCを考慮する必要があることが分かった。

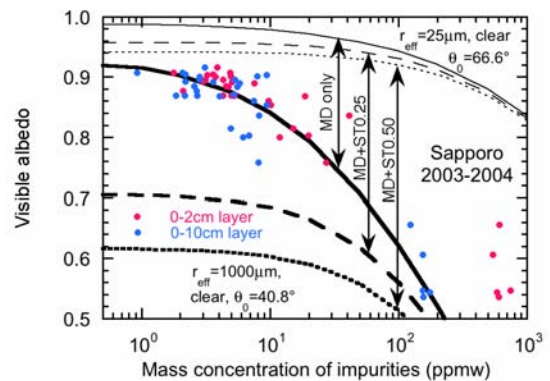


図2 積雪不純物濃度と可視域アルベドの関係。ドットは観測値、曲線は放射伝達モデルで計算した観測期間におけるアルベドの最大値と最小値で、積雪不純物には吸収の強さの違う鉱物性ダスト(MD)と黒色炭素(BC)の組み合わせから3種類のモデルを仮定した。

### 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の幾何学的効果を除くと、本質的に積雪粒径と不純物濃度に依存している(Aoki et al., 1999)。そこで、積雪中不純物としてBC濃度( $c_{BC}$ )とMD濃度( $c_{MD}$ )、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。不純物の効果は、BCとMDの効果を一括して扱うため、Snow impurity factor:  $SIF = K_{a_{BC}}C_{BC} + K_{a_{MD}}C_{MD}$ を定義した。ここで $K_{a_{BC}}$ と $K_{a_{MD}}$ はBC及びMDの質量吸収係数である。本アルベドモデルを陸面モデル(Hosaka et al., 2005)に組み込み、その陸面モデルを大気大循環モデルMASINGAR(Tanaka et al., 2003; Tanaka and Chiba, 2005)に組み込んで、気候再現実験を行った。その結果、大気エアロゾル(BCとMD)の沈着がないと、雪面アルベドは高い値で維持し融雪が

遅れる。すなわち、大気エアロゾルの沈着は雪面アルベドを低下させる効果を持つ。大気エアロゾル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 W/m<sup>2</sup>、晴天のみでは+1.12 W/m<sup>2</sup> という値となった(図 3)。これは大気エアロゾルの直接効果や間接効果に匹敵する大きさである。

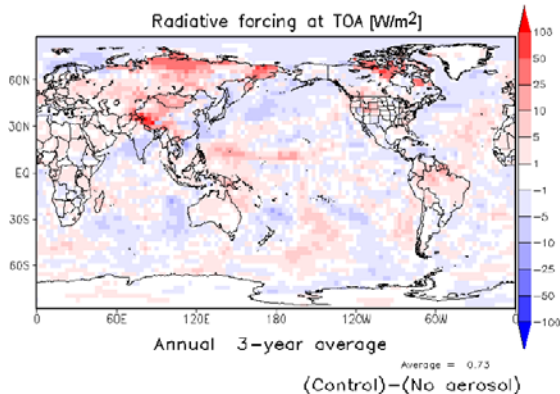


図 3 エアロゾルの沈着による雪面アルベド変化があるときとないときの、大気上端における放射収支差の年平均値。

### 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不純物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(Stamnes et al., submitted to *RSE*)、全球分布を求めた(Hori et al., submitted to *RSE*) (図 4)。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、不純物濃度は誤差が大きいことが分かった(Aoki et al., submitted to *RSE*)。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ことと期待される。特に、衛星プロダクトの精度向上には、衛星センサの校正(Nieke et al., 2004)や積雪反射率モデル(Kokhanovsky et al., 2005)が重要である。

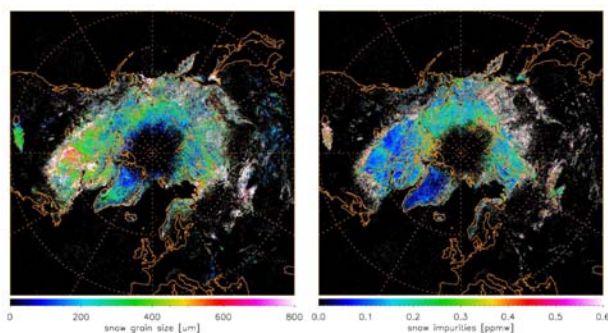


図 4 ADEOS-II/GLI データから求めた北極域における積雪粒子半径(左図)及び不純物濃度(右図)。不純物として BC を仮定、2003 年 4 月(after Hori et al., submitted to *RSE*)。

### 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エアロゾルを起源とする積雪中不純物濃度に大きく依存していることを明らかにした。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、大気エアロゾルが積雪面の放射特性に与える影響を調べた結果、大気エア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、大気中におけるエア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し、精度評価を行った。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検証できるものと期待される。

### 謝辞

本研究の実施にあたり、下記の方々のご協力を頂きました。深くお礼申し上げます。本吉弘岐、谷川朋範、堀雅裕、兒玉裕二、杉浦幸之助、八久保明弘、安成哲平、飯塚康子、高橋文宏、中島幸徳、Knut Stamnes, Wei Li, Rune Stordvold, Hans Eide, Jens Nieke, and Alexander Kokhanovsky.

### 参考文献

Aoki, Te., Ta. Aoki, M. Fukabori and A. Uchiyama, 1999, *J. Meteorol. Soc. Japan*, **77**, 595-614.  
Aoki, Te., Ta. Aoki, M. Fukabori, A. Hachikubo, Y. Tachibana and F. Nishio, 2000, *J. Geophys. Res.*, **105**, 10219-10236.  
Aoki, Te., A. Hachikubo, and M. Hori, 2003, *J. Geophys. Res.*, **108**, 4616, doi:10.1029/2003JD003506.  
Aoki, Te., H. Motoyoshi, Y. Kodama, T. J. Yasunari, K. Sugiura, and H. Kobayashi, 2006, *SOLA*, **2**, 013-016, doi:10.2151/sola.2006-004.  
Aoki, Te., H. Motoyoshi, Y. Kodama, T. J. Yasunari, and K. Sugiura, *Ann. Glaciol.*, (submitted).  
Aoki, Te., M. Hori, H. Motoyoshi, T. Tanikawa, A. Hachikubo, K. Sugiura, T. J. Yasunari, R. Stordvold, H. A. Eide, K. Stamnes, W. Li, J. Nieke, Y. Nakajima, and F. Takahashi, *Remote Sens. Environ.*, (submitted).  
Hori, M., Te. Aoki, K. Stamnes, and W. Li, *Remote Sens. Environ.*, (submitted).  
Hosaka, M., D. Nohara, and A. Kitoh, 2005, *SOLA*, **1**, 093-096, doi: 10.2151/sola.2005-025.  
Kokhanovsky, A. A., Te. Aoki, A. Hachikubo, M. Hori, and E. P. Zege, 2005, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **43**, 1529-1535, doi: 10.1109/TGRS.2005.848414.  
Motoyoshi, H., Te. Aoki, M. Hori, O. Abe, and S. Mochizuki, 2005, *J. Meteorol. Soc. Japan*, **83A**, 137-148.  
Nieke, J., Te. Aoki, T. Tanikawa, H. Motoyoshi, and M. Hori, 2004, *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, **1**, 215-219.  
Tanaka, T. Y., K. Orito, T. T. Sekiyama, K. Shibata, M. Chiba, and H. Tanaka, 2003, *Pap. Meteor. Geophys.*, **53**, 119-138.  
Tanaka, T. Y. and M. Chiba, 2005, *J. Meteorol. Soc. Japan*, **83A**, 255-278.  
Stamnes, K., Wei Li, Hans Eide, Te Aoki, M. Hori, and R. Stordvold, *Remote Sens. Environ.*, (submitted).  
Uchiyama A., A. Yamazaki, H. Togawa, J. Asano and G. Shi, 2005, *SOLA*, **1**, .209-212.