

エアロゾルによる放射強制力の変動及びメカニズムの実態解明に関する研究

(2) エアロゾル-雪氷相互作用に関する観測

国土交通省 気象庁 気象研究所

物理気象研究部 第三研究室

青木輝夫・田中悦子・朽木勝幸

平成17～19年度合計予算額 53,756千円(全課題分)
 (うち、平成19年度当初予算額 18,048千円(全課題分))

[要旨]

気候モデルの中で用いることのできる積雪アルベド物理モデルを高度化し、札幌における2003/2004年冬期の積雪断面観測データ、積雪サンプルから求めた積雪不純物(鉱物性ダスト、黒色炭素、有機性炭素)濃度データ、放射収支観測データを用いてモデルの精度を検証した。積雪物理量(積雪粒径と不純物濃度)をモデルに入力して計算したアルベドを、放射収支観測から求めた実測値と比較した結果、計算値は可視域ではやや過大評価、近赤外域ではやや過小評価したものの、相関係数はそれぞれ0.926、0.756で、積雪物理量から物理的にアルベドを再現できることが示された。同モデルを用いて、積雪不純物の有無によるアルベドの違いを計算した結果、札幌における積雪不純物による冬期間の平均アルベド低下量は、短波長域で0.085、放射強制力としては 10 W m^{-2} の加熱であった。また、観測期間中における積雪不純物濃度の成分別重量比では常にダストと有機性炭素が全積雪不純物濃度の95%以上を占めたが、光学的な効果を表す積雪不純物指数(SIF)に対しては、12-2月は黒色炭素による寄与が高く、黄砂のあった3月はダストによる寄与が大きいことが分かった。

[キーワード] 積雪アルベド、鉱物性ダスト、黒色炭素、有機性炭素、放射強制力

1. はじめに

エアロゾルと雪氷の相互作用に関してはまだ十分理解されていないが、吸収性エアロゾルが積雪面の可視域のアルベド低下に関係している点については、放射伝達モデルによる研究(Warren and Wiscombe, 1980)¹⁾や放射収支観測と積雪断面観測による結果と放射伝達モデルの比較による研究(Aoki et al., 2003)²⁾によって示されている。Hansen and Nazarenko (2004)³⁾は、吸収性の強い「すす」などの人為起源エアロゾルが大気中を長距離輸送され、北極域の雪氷面に沈着し、アルベドを低下させることで、最近の極域の温度上昇に寄与していると述べている。このように吸収性をもつ大気エアロゾルは雪氷面アルベドを低下させ、地球の気候に対して正の放射強制力を持っている。一方、中国の砂漠域において、積雪が鉱物性ダストの発生を抑制しているという報告もあり(Kurosaki and Mikami, 2004)⁴⁾、エアロゾルと雪氷にはお互いを駆逐する方向に働く相互作用があると言える。当研究グループでは雪氷放射伝達モデルによって積雪の汚れとアルベド低下(Aoki et al., 2003; 2006)^{2, 5)}や各種エアロゾル(Aoki et al., 2005a)⁶⁾をモデル化し、衛星データから積雪不純物量を抽出するアルゴリズムを開発してきた(Stamnes et al., 2007; Aoki et al., 2007; Hori et al., 2007)⁷⁻⁹⁾。これらのモデルや地上における放射・エアロゾル・雪氷観測から、エアロゾルと雪氷の相互作用を明らかにし、その放射強制力を見積

もるための積雪アルベド物理モデルを構築すること必要である。

2. 研究目的

エアロゾルが直接及び間接的に放射強制力へ影響をもたらすメカニズムを明らかにするとともに、そのメカニズムを考慮した放射モデルを数値モデルに組み込み、放射強制力のより信頼度の高い変動実態を明らかにすることによって、地球温暖化の予測精度向上に資する。

従来の研究では考慮されていない (1) エアロゾルが相対湿度とともに日射を反射・吸収する性質（光学特性）を変える効果 (2) 雪氷面に降下したエアロゾルが雪氷面の反射率を変える効果を、観測を行ってパラメータ化し、それをサブ課題3の数値モデル（大気大循環モデル+エアロゾルモデル）に組み込むことによって、放射強制力への影響評価を行う。

3. 研究方法

雪氷面上における放射・エアロゾル・積雪観測により、雪氷面の日射に対する反射特性を把握すると共に、積雪内の不純物（積雪不純物：主に吸収性大気エアロゾル起源の不溶性粒子）の成分毎の濃度変化を解析し、複数の積雪不純物の光学特性をパラメータ化した。さらに、放射伝達モデルを用いた積雪アルベドの理論計算と観測値との比較から、不純物を含む積雪面の反射特性を数値モデルに組み込めるよう物理モデル化した。

4. 結果・考察

(1) 積雪アルベド物理モデルの改良と検証

平成17-18年度の研究期間では札幌における放射収支と積雪観測結果を解析し、大気エアロゾルが雪氷面に沈着する過程を粒径毎に湿性沈着と乾性沈着に分けて見積り、アルベドに対する積雪不純物の効果を調べた (Aoki et al., 2006)。それらのデータを用いて、平成18年度に全球エアロゾル輸送モデルMASINGARに組み込むための積雪アルベド物理モデルを開発した。このモデルを組み込んだ全球エアロゾル数値モデルMASINGARによる気候影響評価では、積雪面に沈着した大気エアロゾルの効果が大気エアロゾルの放射強制力に匹敵する大きさであるとの結果が見積られた。

平成18年度に開発した積雪アルベド物理モデル（積雪粒径、不純物濃度、太陽天頂角、日射量直達散乱比から可視域及び近赤外域のアルベドを計算するモデル）を改良し、(1) 積雪不純物の吸湿性（湿度依存性）の導入、(2) ダスト光学パラメータの改良を行った。吸湿性導入の対象積雪不純物は鉍物性ダスト、黒色炭素 (BC)、有機性炭素 (OC) である。積雪アルベド物理モデルでは、これら3種類の積雪不純物を1つのパラメータで扱うため下記のSnow Impurity Factor (*SIF*: 積雪不純物指数) を可視域と近赤外域それぞれに定義する：

$$SIF = c_{\text{dust}} k_{a_{\text{dust}}} + c_{\text{BC}} k_{a_{\text{BC}}} + c_{\text{OC}} k_{a_{\text{OC}}}, \quad (1)$$

ここで、 c は積雪不純物濃度、 k は質量吸収係数である。

図1aは各成分の粒子サイズが湿度に依存して増加する様子を表す。ここでは、BCとOCはChen et al. (2002)¹⁰⁾のデータに基づき、ダストは本研究費のサブ課題(1)の測定結果に基づいた。積雪中では不純物は湿度が99%の吸湿性を持っていると仮定した。図1bは乾燥状態及び湿度99%にお

ける各不純物の質量吸収係数の理論計算値である。この計算には、先ず乾燥状態における各粒子の典型的な粒径分布を仮定し (Hess et al., 1998)¹¹⁾、図1aの吸湿性により湿度99%の大きさと水と内部混合したときの各吸湿粒子の質量吸収係数を求めた。この結果、湿度99%の質量吸収係数はBCとOCではほとんどの波長で増加、ダストではやや減少となった。

図2aは2003/2004年冬期の札幌における毎日の各広波長帯域アルベドと積雪深を表す。1-2月には各アルベドは比較的高く安定した値を示し、特に、可視域のアルベドは変動が少ない。3月の融雪期になると各アルベドは減少し始め、3月末の消雪直前には急激に減少している。一方、図2bは同じ期間の積雪サンプルから得られたダスト、OC、BC濃度の変化で、やはり1-2月に低い値、12月と3月に高い値を示している。そのなかでダストは3月に非常に高い値を示しており、これは3月11-12日の黄砂現象が大きく寄与している (Aoki et al., 2006)⁵⁾。

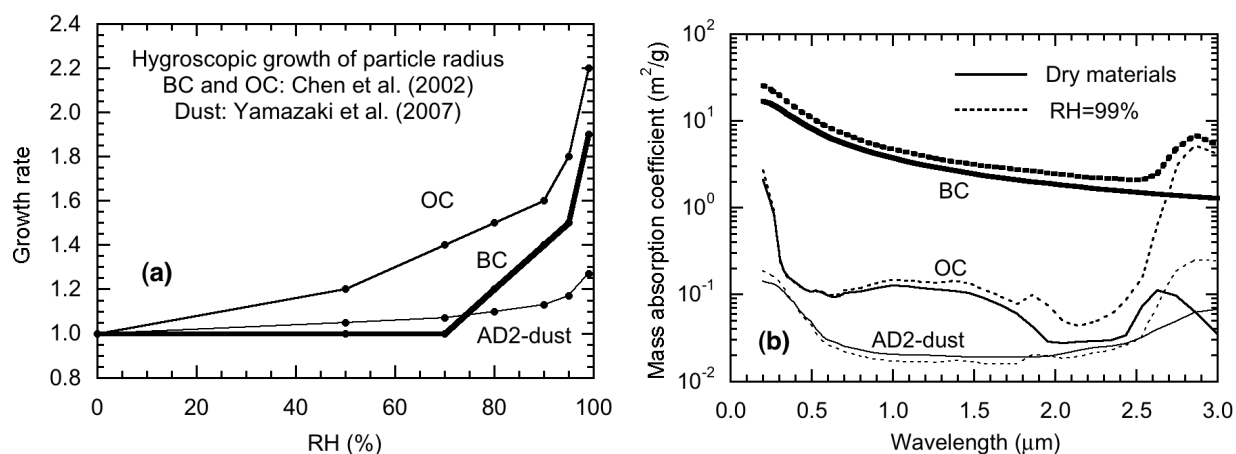


図1 (a)積雪不純物の吸湿性導入に用いた各成分の粒子サイズの湿度依存性、(b)乾燥状態及び湿度99%の積雪不純物粒子の質量吸収係数。AD-2-dustはダストを表し、その光学特性はAoki et al. (2005a)⁶⁾のADEC-2モデルを用い、吸湿性は本研究費サブ課題(1)の測定結果に基づいた。

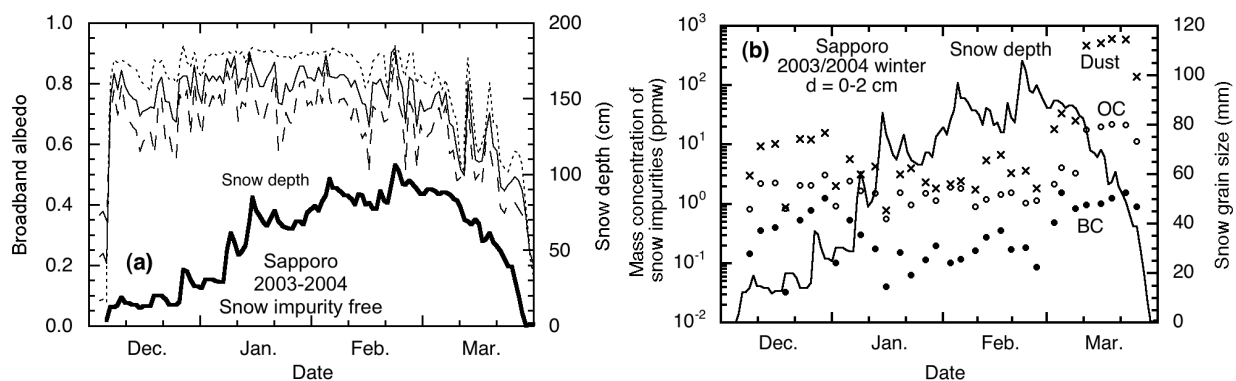


図2 (a)2003-2004年冬期の札幌における、毎日の南中時における各広波長帯域アルベド30分平均値 (左軸) と積雪深 (右軸) の変化。アルベドは点線が可視域、実線が短波長域、破線が近赤外域を示す。(b)積雪サンプル (表面から2cmの層) を分析して得られた積雪中のダスト (×)、OC (白丸)、BC (黒丸) 濃度 (左軸) と積雪深 (右軸) の変化。

図2のデータを用いて、改良した積雪アルbedo物理モデルを検証した。モデルの入力には図2bに示した3種類の積雪不純物濃度と積雪断面観測から得られた積雪粒径のデータを用いた。その他の入力パラメータである日射量直達散乱比は実測値を用い、太陽天頂角はアルbedo観測時刻の値を計算で求めた。図3aは各広帯域アルbedoの実測値と積雪アルbedo物理モデルによる計算値の比較である。モデル計算値は可視域のアルbedoに対してやや過大評価、短波長域では良く一致し、近赤外域ではやや過小評価となった。図3bはアルbedoの実測値と計算値の関係をプロットしたもので、両者の相関係数は可視域で高く0.926、近赤外域では低く0.756であった。積雪アルbedo物理モデルが積雪1層モデルで、実際には積雪層は鉛直方向に不均一であることを考えると(Aoki et al., 2007b)¹²⁾、概ね良く一致していると言える。可視域のアルbedoは不純物濃度に大きく依存し、近赤外域では積雪粒径に大きく依存することが理論的に分かっている(Wiscombe and Warren, 1980; Warren and Wiscombe, 1980)^{1, 13)}。このことから可視域におけるモデルの過大評価は不純物成分の光学パラメータにおける問題、近赤外域における過小評価は積雪粒径の観測方法における問題を検討する必要がある。

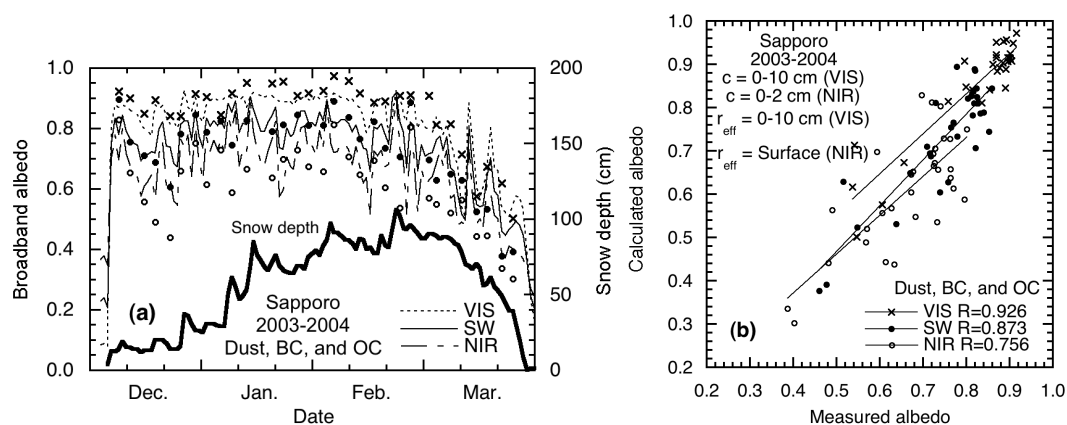


図3 (a)各広帯域アルbedoの実測値(図2aと同じ曲線)と積雪アルbedo物理モデルによる計算値(記号は可視域(×)、近赤外域(白丸)、短波長域(黒丸))、(b)アルbedoの実測値とモデル計算値の比較(記号の意味は図3aと同じ)。

(2) 積雪不純物が放射収支に与える効果

平成17-18年度の研究期間では札幌における放射収支と積雪観測結果データを用いて、大気エアロゾル、すすやダストといった不純物がアルbedo低下を引き起こしている効果を定量的に見積もった(Aoki et al., 2007)。平成19年度はそれらのデータを用いて、各積雪不純物がアルbedoに与える項を独立して見積もった。積雪アルbedo物理モデルを用いると、積雪不純物の有無によるアルbedoの違いを計算することができ、その違いと日射量の観測値を用いると積雪不純物による局所的な放射強制力を計算することができる。図4a及び図4bはそれぞれ各積雪不純物濃度の重量比と各積雪不純物による積雪不純物指数(SIF)への寄与を表す。重量比では常にダストとOCが全積雪不純物濃度の95%以上を占めるが、各不純物の吸収特性を考慮したSIFへの寄与では、12-2月はBC、黄砂のあった3月はダストによる寄与が大きいことが分かる。

積雪アルベド物理モデルを用いて、積雪不純物がないときの各広波長帯域アルベドの計算値を図5aに示す。計算された可視域のアルベドは観測よりも常に10%以上高く、現実の可視域のアルベドは汚れの影響を強く受けていることが分かる。図5bは積雪アルベド物理モデルで計算した積雪不純物の有無によるアルベド低下量と可視域及び近赤外域におけるSIFの変化を示す。積雪不純物によるアルベド低下量は可視域の方が近赤外域よりも数倍大きい。これは前述したように可視域のアルベドが積雪不純物に大きく依存しているためである。12-3月の4ヶ月間の平均アルベド低下量は、可視域が-0.111、近赤外域が-0.033、短波長全体では-0.085であった。短波長域のアルベド低下量と毎日の日積算日射量から、期間全体の積雪不純物による局所的な放射強制力を計算した結果、 10 W m^{-2} の加熱であった。図5bに示したSIFの変化は、ダストとBC濃度の高い3月に最も大きく、次いでBC濃度の高い12月、各不純物濃度の低い1-2月は小さかった（図2b参照）。

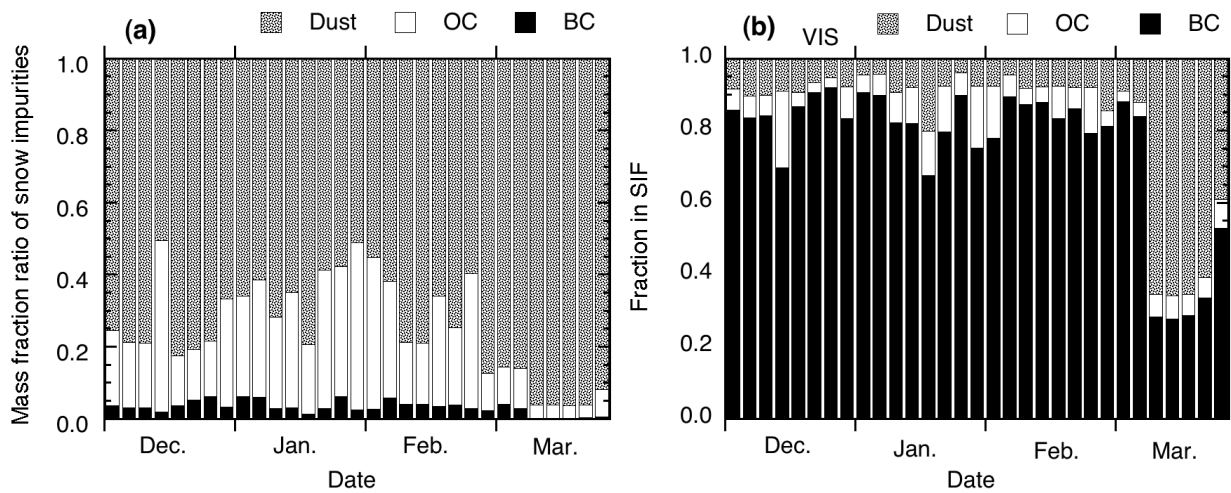


図4 (a)ダスト、OC、BCの各積雪不純物濃度の重量比、(b) 各積雪不純物による積雪不純物指数 (SIF) への寄与。

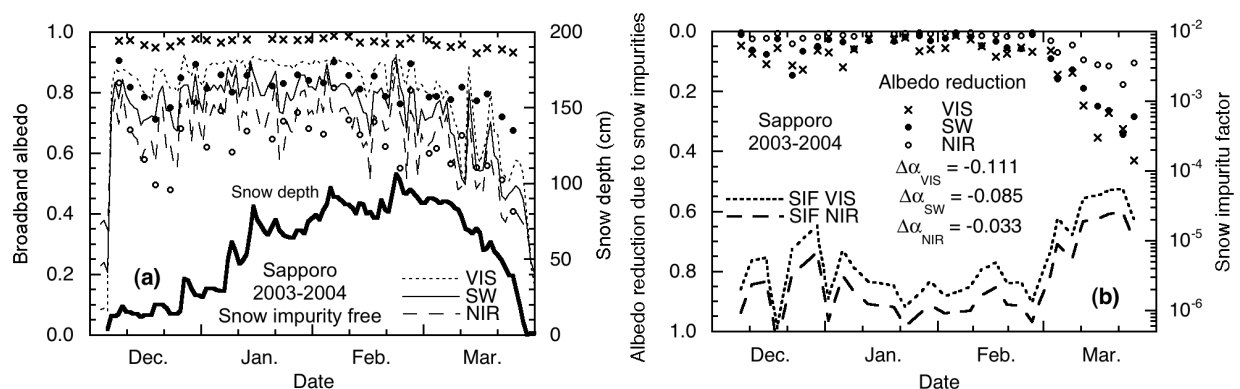


図5 (a)各広波長帯域アルベドの実測値 (図3aと同じ曲線) と積雪アルベド物理モデルによる不純物がなかった場合のアルベド計算値 (図3bと同じ記号) 及び積雪深 (右軸)、(b) 不純物による各アルベドの減少量のモデル計算値 (左軸) と可視域及び近赤外域における積雪不純物指数 (SIF) の変化 (右軸)。

5. 本研究によって得られた成果

積雪粒径、不純物濃度、太陽天頂角、日射量直達散乱比から可視域及び近赤外域の積雪アルベドを計算するための積雪アルベド物理モデルを高度化し、積雪中不純物の吸湿性（湿度依存性）の導入とダスト光学パラメータの改訂を行った。このモデルの精度を検証するため、札幌における2003/2004年冬期の積雪断面観測による積雪粒径、積雪サンプルから求めたダスト、黒色炭素、有機性炭素濃度データを用いてアルベドを計算し、放射収支観測から求めた実測値と比較した。その結果、アルベド計算値は可視域ではやや過大評価、短波長域では良く一致、近赤外域ではやや過小評価となった。観測値と計算値の間の相関係数は可視域で0.926、近赤外域で0.756であった。積雪アルベド物理モデルが積雪1層モデルで、実際には積雪層は鉛直方向に不均一であることを考えると、良く一致していると言える。

積雪アルベド物理モデルを用いて、積雪不純物の有無によるアルベドの違いを計算した結果、積雪不純物によるアルベド低下量は可視域の方が近赤外域よりも数倍大きく、札幌における2003/2004年冬期の12-3月の4ヶ月間の平均アルベド低下量は、可視域が-0.111、近赤外域が-0.033、短波長全体では-0.085であった。この短波長域のアルベド低下量と毎日の日積算日射量から、期間全体の積雪不純物による局所的な放射強制力は 10 W/m^2 の加熱であった。すなわち積雪不純物が積雪面放射収支に大きな影響を与えていることが分かった。また、観測期間中における積雪不純物濃度の成分別重量比では常にダストとOCが全積雪不純物濃度の95%以上を占めるが、光学的な効果を表す積雪不純物指数（SIF）に対しては、12-2月はBCによる寄与が高く、黄砂のあった3月はダストによる寄与が大きいことが分かった。

6. 引用文献

- 1) Warren, S. G. and W. J. Wiscombe, 1980: A model for the spectral albedo of snow. II: Snow containing atmospheric aerosols. *J. Atmos. Sci.*, 37, 2734-2745.
- 2) Aoki, Te., A. Hachikubo, and M. Hori, 2003: Effects of snow physical parameters on shortwave broadband albedos. *J. Geophys. Res.*, 108, 4616, doi: 10.1029/2003JD003506.
- 3) Hansen, J. and L. Nazarenko, 2004: Soot climate forcing via snow and ice albedos. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 101, 423-428, doi: 10.1073/pnas.2237157100.
- 4) Kurosaki, Y., and M. Mikami (2004), Effect of snow cover on threshold wind velocity of dust outbreak. *Geophys. Res. Lett.*, 31, L03106, doi:10.1029/2003GL018632.
- 5) Aoki, Te., H. Motoyoshi, Y. Kodama, T. J. Yasunari, K. Sugiura, and H. Kobayashi, 2006: Atmospheric aerosol deposition on snow surfaces and its effect on albedo. *SOLA*, 2, 013-016, doi:10.2151/sola.2006-004.
- 6) Aoki, Te., T. Y. Tanaka, A. Uchiyama, M. Chiba, and M. Mikami, S. Yabuki, and J. R. Key, 2005a: Sensitivity experiments of direct radiative forcing caused by mineral dust simulated with a chemical transport model. *J. Meteorol. Soc. Japan*, 83A, 315-331.
- 7) Stamnes, K., Wei Li, Hans Eide, Te Aoki, M. Hori, and R. Stordvold, 2007: ADEOS-II/GLI snow/ice products: Part I: Scientific basis. *Remote Sens. Environ.*, 111, 258-273, doi:10.1016/j.rse.2007.03.023.
- 8) 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. Nieve, Y. Nakajima, and F. Takahashi, 2007a: ADEOS-II/GLI snow/ice products: Part II - Validation results. *Remote Sens. Environ.*, 111, 274-290, doi:10.1016/j.rse.2007.02.035.
- 9) Hori, M., Te. Aoki, K. Stamnes, and W. Li, 2007: ADEOS-II/GLI snow/ice products: Part III - Retrieved results. *Remote Sens. Environ.*, 111, 291-336, doi:10.1016/j.rse.2007.01.025.
- 10) Chin, M., P. Ginoux, S. Kinne, O. Torres, B. Holben, B. N. Duncan, R. V. Martin, J. A. Logan, A. Higurashi, and T. Nakajima, 2002: Tropospheric aerosol optical thickness from the GOCART model and comparisons with satellite and sun photometer measurements. *J. Atmos. Sci.*, 59, 461-483.
- 11) Hess, M., P. Koepke, and I. Schult 1998: Optical Properties of Aerosols and Clouds: The software package OPAC, *Bull. Am. Met. Soc.*, 79, 831-844
- 12) Aoki, Te., H. Motoyoshi, Y. Kodama, T. J. Yasunari, and K. Sugiura, 2007b: Variations of the snow physical parameters and their effects on albedo in Sapporo. *Ann. Glaciol.*, 46, 375-381.
- 13) Wiscombe, W. J. and S. G. Warren, 1980: A model for the spectral albedo of snow, I: Pure snow. *J. Atmos. Sci.*, 37, 2712-2733.

[研究成果の発表状況]

(1) 誌上発表 (学術誌)

- ① Te. Aoki, H. Motoyoshi, Y. Kodama, T. J. Yasunari, K. Sugiura, and H. Kobayashi: *SOLA*, 2, 013-016, doi:10.2151/sola.2006-004 (2006)
“Atmospheric aerosol deposition on snow surfaces and its effect on albedo”
- ② Te. Aoki, H. Motoyoshi, Y. Kodama, T. J. Yasunari, and K. Sugiura: *Ann. Glaciol.*, **46**, 375-381, (2007)
“Variations of the snow physical parameters and their effects on albedo in Sapporo”
- ③ 青木輝夫、田中泰宙：天気、**55**, (2008) (印刷中)
「大気エアロゾルの沈着が積雪アルベドに与える影響」

(2) 口頭発表

- ① 青木輝夫、本吉弘岐、兒玉裕二、安成哲平、杉浦幸之助、谷川朋範、堀雅裕：日本気象学会 2005 年度秋季大会 (2005)
「全天分光日射計による積雪の分光アルベドと積雪粒径情報の関係」.
- ② 青木輝夫、本吉弘岐、兒玉裕二、安成哲平、杉浦幸之助、谷川朋範、堀雅裕：国立極地研究所第 28 回極域気水圏シンポジウム (2005)
「全天分光日射計による積雪粒径・不純物濃度の鉛直情報量」.
- ③ 杉浦幸之助、青木輝夫、兒玉裕二、大畑哲夫、本吉弘岐、石丸民之永：日本気象学会 2005 年度秋季大会 (2005)
「札幌における吹雪時の長波放射特性に関する野外観測」.
- ④ Te. Aoki: First Asia CliC Symposium - The state and fate of Asian Cryosphere -, Yokohama, Japan, (2006)
“Effects of snow grain size and snow impurities on albedo measured in Sapporo”
- ⑤ Te. Aoki, H. Motoyoshi, Y. Kodama, T. J. Yasunari, K. Sugiura, and H. Kobayashi: 地球惑星科

学連合 2006 年度合同大会 (2006)

“Possible effect of snow contamination with soot on albedo reduction”.

- ⑥ Te., Aoki, H. Motoyoshi, Y. Kodama, T. J. Yasunari, and K. Sugiura: International Symposium on Cryospheric Indicators of Global Climate Change, International Glaciological Society, 21-25 August (2006), Cambridge, England, (2006)
 “Variations of the snow physical parameters and their effects on albedo in Sapporo”
- ⑦ 青木輝夫、田中泰宙、保坂征宏、田中悦子、朽木勝幸：日本気象学会 2006 年度秋季大会 (2006)
 「積雪粒径と不純物濃度の関数として変化する積雪アルベド物理モデルの開発」
- ⑧ 青木輝夫、本吉弘岐、兒玉裕二、安成哲平、杉浦幸之助、谷川朋範、田中悦子、朽木勝幸：日本雪氷学会 2006 年度全国大会 (2006)
 「積雪期の札幌における放射収支と積雪物理量の観測」
- ⑨ 田中泰宙、青木輝夫、保坂征宏：日本気象学会 2006 年度秋季大会 (2006)
 「エアロゾル沈着による雪氷面アルベド変化の感度実験」
- ⑩ 杉浦幸之助、青木輝夫、兒玉裕二、本吉弘岐、大畑哲夫、石丸民之永：日本雪氷学会 2006 年度全国大会 (2006)
 「札幌における吹雪時の短波放射特性に関する野外観測」
- ⑪ 安成哲平、杉浦幸之助、青木輝夫、兒玉裕二、本堂武夫：日本雪氷学会 2006 年度全国大会 (2006)
 「降雪によるエアロゾル粒子数の最大除去率及び表面積雪に含まれるダスト粒子数の見積り」
- ⑫ 田中悦子、青木輝夫、朽木勝幸、本吉弘岐、兒玉裕二、安成哲平、杉浦幸之助：国立極地研究所第 29 回極域気水圏シンポジウム (2006)
 「札幌における積雪面上の熱収支観測－融雪との関係に着目して－」
- ⑬ 青木輝夫、田中泰宙、内山明博、保坂征宏、田中悦子、朽木勝幸、本吉弘岐、兒玉裕二：日本地球惑星科学連合 2007 年度合同大会 (2007)
 「大気エアロゾルの積雪面への沈着と気候への影響」
- ⑭ 青木輝夫、田中悦子、朽木勝幸、田中泰宙、本吉弘岐、兒玉裕二、安成哲平：日本気象学会 2007 年度春季大会 (2007)
 「積雪に含まれる黒色炭素・ダストとアルベドの観測」
- ⑮ Te. Aoki, T. Tanaka, A. Uchiyama, M. Hosaka, E. Tanaka, and K. Kuchiki: International Union of Geodesy and Geophysics, 2-13 July 2007, Perugia, Italy, (2007)
 “Climate forcing due to black carbon and dust depositions on snow surface”
- ⑯ 青木輝夫、田中悦子、朽木勝幸、田中泰宙、本吉弘岐：日本雪氷学会 2007 年度全国大会 (2007)
 「積雪アルベド物理モデルの精度に与える積雪不純物特性の効果」
- ⑰ 杉浦幸之助、青木輝夫、本吉弘岐、兒玉裕二、安成哲平：日本雪氷学会 2007 年度全国大会 (2007)

「2003/04-2006/07年冬期の札幌における積雪循環曲線」

- ⑱ 青木輝夫、田中悦子、朽木勝幸、田中泰宙、本吉弘岐：日本気象学会 2007 年度秋季大会 (2007)

「積雪アルベド物理モデルの地上観測データによる検証」

- ⑲ 田中悦子、青木輝夫、朽木勝幸、長谷川就一、本吉弘岐、兒玉裕二、安成哲平、杉浦幸之助：日本気象学会 2007 年度秋季大会 (2007)

「札幌における積雪不純物中のカーボン測定」

- ⑳ 山崎明宏、内山明博、古林絵里子、工藤玲、青木輝夫、田中泰宙：日本気象学会 2007 年度秋季大会 (2007)

「エアロゾル散乱係数の湿度特性の測定」

- ㉑ 青木輝夫：日本気象学会 2007 年秋季大会シンポジウム (2007)

「大気エアロゾルの沈着が積雪アルベドに与える影響」

- ㉒ T. Y. Tanaka, Te. Aoki, and M. Hosaka: Third China-Korea-Japan Joint Conference on Meteorology, China, (2007)

“Climatic role of dust aerosol deposition on snow surface”

- ㉓ Te. Aoki, T. Tanaka, E. Tanaka, K. Kuchiki, H. Motoyoshi, and T. Tanikawa: 5th EARSel Workshop, 11-13 February 2008, Bern, Switzerland, (2008)

“Physically based snow albedo model and satellite retrieved snow parameters,”

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

2008年度日本気象学会賞

(5) 一般への公表・報道等

日本経済新聞、2008年5月11日「ネーチャーウォッチ、絶え間なく変化する気象、7. 雪の汚れ」

(6) その他成果の普及、政策的な寄与・貢献について

なし