

シンポジウム報告

雪氷不純物に関するワークショップ (Workshop on Impurities in Snow and Ice) 参加報告

青木輝夫¹⁾, 竹内 望²⁾

1. はじめに

標記ワークショップが 2010 年 6 月 20-23 日に米国コロラド州シルバートンにおいて開催された。このワークショップは米国立科学財団の予算により、ユタ大学の Thomas Painter 博士とシルバートンにある雪・雪崩研究センター (CSAS) 所長の Chris Landry 博士が企画したもので、CSAS が現地における会議準備を行った。この会議の目的は雪氷面が黒色炭素やダストといった雪氷不純物によって汚れることにより、アルベドが低下し、雪氷の融解が進み、地球温暖化が加速されるメカニズムを観測とモデルによって明らかにしようというものである。発表者 13 名に学生を含め、全員で 20 名余りの研究者が集まった。米国以外の参加者は日本から著者ら 2 名、中国から 2 名であった。シルバートンはデンバーから飛行機で 1 時間ほどの地方空港から、さらに車で 2 時間半ほど山に入った標高 2800 m 余りの場所にある小さな街である。かつて鉱山として栄え、現在は南側のデュランゴからはデュランゴ-シルバートン鉄道という蒸気機関車が運行され、観光地になっている。冬には降雪量が多く、我々の泊まったホテルの主人によると昨冬は 3 m の積雪があったという。峠道では雪崩が頻発するため、この地に雪崩情報を提供する CSAS ができたらしい。一方、周囲には 3 千メートルを超えるロッキーマウンテンが広がり、6 月のこの時期でも多くの雪渓が残っていた。これらの雪渓の表面は例外なくダストに覆われており、なるほどこの場所で雪氷不純物に関するワークショップを開催した意図が理解できる。

2. 発表内容

発表のトップとして、著者の一人である青木が気象研究所における積雪アルベド物理モデルと積雪変質モデルの紹介を行った。その中で可視、近赤外域の広波長帯域のアルベドを計算する際、更に複数の副波長帯域に分割しないと精度が確保できないこと、積雪中で短波放射が吸収される深さが波長によって大きく変化し、積雪不純物は積雪表層を加熱し、下層を冷却することなどを示した。

次に発表したミシガン大学の Mark Flanner は気候モデルの研究者で、ここ数年優れた論文を多数発表している (例えば, Flanner *et al.*, 2007; 2009)。その中で彼らは積雪不純物の効果を陽に気候モデルに取り込み、主に黒色炭素 (BC) が北極域の雪氷面アルベドを低下させる効果を計算し、その放射強制力を見積もった。同時に大気中の光吸収性エアロゾル (BC, ダスト, 有機炭素 (OC)) による放射強制力も見積り、大気中のエアロゾルによって日射が遮られて暗くなる効果 (dimming) よりも、積雪中の BC によるアルベド低下効果 (darkening) の方が大きいことを示した。特に、積雪中の BC による放射強制力は地域的、季節的 (特に 4-5 月) に無視できない大きさであることを強調した。

パシフィック・ノースウェスト国立研究所の Youn Qian は、アメリカ北西部の山岳地帯における積雪中不純物が融解に与える影響のモデル計算についての発表を行った。その中で BC の影響は、放射強制力換算で $2-10 \text{ W m}^{-2}$ 、気温換算で $0.2-1.2^\circ\text{C}$ の上昇に匹敵するという結果を出した。さらにチベットの季節積雪への BC, Dust, 有機物 (OM) の影響をそれぞれモデル計算で求めた結果を紹介した。

1) 気象研究所

2) 千葉大学

中国気象局の Ming Jing は、ヒマラヤの山岳アイスコア（エベレスト北面ロンブク氷河）の分析から求めた BC の過去 60 年の変動を示した。その変動の結果はインドの BC エミッションの年変動と直接相関はないが、大気循環を考慮したトラジェクトリー解析でその氷河への BC の沈着量の年変動を求めた結果、アイスコア中の変動と相関が得られたと報告した。さらに、MODIS から求めた氷河表面の 2000-2009 年のアルベドの変化は、約 $0.34\% \text{ a}^{-1}$ の減少を示し、これは 10 年間で 10 Wm^{-2} の放射強制力に匹敵し、BC 沈着の影響ではないかと主張した。しかしながら、議論の中では、アイスコア中の BC の濃度は平均 18 ppbw（雪氷の重さ 1 g 当たりに含まれる BC の重さを ng 単位で表す）で、一般的なモデルをもとにすればアルベドへの影響は非常に少ないこと、衛星画像からのアルベド計算は、検証作業が必要であることなどの意見がでた。

セントラル・ワシントン大学の Susan Kaspari は、ネパール側のヒマラヤの氷河の BC 分析の結果を報告した。2009 年にメラピークにかかる氷河で調査を行い、涵養域の積雪中の BC を SP2（McConnell の部分で後述）で測定した結果、10 ppbw 以下の濃度が確認された。この濃度は、Ming Jing の測定した中国側のヒマラヤの氷河の BC 濃度と比較すると数倍低い濃度であることがわかった。この差は、分析方法による違いなのか、もしくは沈着量が実際に違うのか検討の必要があるとした。議論では、やはり測定された BC の濃度では、アルベドへの影響は非常に少ないと見られることが指摘された。また、氷河上で見た目に見える黒い物質をすべて BC と言及していたが、ヒマラヤでは比較的豊富なその他の有機物に関しては全く考慮されていなく、不純物の各成分のアルベドへの実際の影響を定量的に評価する必要があるという意見が出た。

インド出身でチャップマン大学の Ramesh Singh は、ヒマラヤ西部の氷河および積雪中の不純物の衛星画像を使った解析を紹介した。ヒマラヤの西部では、特にパキスタン地域からの鉱物粒子の影響が大きいこと、また近年では BC の影響も無視できないと報告した。

中国チベット高原研究所の Mo Wang は、中国

の様々な氷河で採取したアイスコアや表面雪氷サンプルの Elemental Carbon (EC) と Organic Carbon (OC) の分析結果を発表した。氷河によって EC と OC の比が異なり、チベットのメイカン氷河では EC の方が大きく、その他では OC の方が大きい結果がでた。さらにウルムチ No. 1 氷河でのピットサンプルからは、EC と OC の季節変動はほぼ同期していること、両者とも夏にピークがあることを示した。

ワシントン大学の Stephan Warren は、最初に Clarke and Noone (1985) による北極域における先駆的な積雪中の BC の観測結果を紹介し、その後、この数年間、彼が大きな予算を獲得して北極域（グリーンランド、北極海、シベリア、アラスカ、北部カナダ）で広域に観測してきた BC の観測結果を報告した。その測定方法は積雪サンプルをフィルターに濾過し、その透過率を分光器で波長別に測定することで濃度を求めるもので、透過率の波長依存性から BC と BC 以外の成分を分離している。最新の観測結果はすでに共著の Hegg *et al.* (2009) によって発表されているが、グリーンランドを除いて BC 濃度は 1980 年代よりも現在の方が低下している。

著者の一人、千葉大の竹内は、雪氷生物起源の有機物による氷河表面のアルベドへの影響についての発表をおこなった。雪氷生物の紹介をしたのち、北米の氷河積雪域では雪氷藻類による赤雪が顕著な不純物であること、アジアの氷河の消耗域ではシアノバクテリアが形成するクリオコナイトがアルベド低下を引き起こしていることを紹介した。アイスコアの分析からアジアの氷河の積雪中には、鉱物粒子の他、土壌有機物粒子、雪氷生物起源有機物粒子も、大量に含まれており、これらのアルベドへの影響も無視できないと主張した。氷河変動を考える際に必要になる、氷河のシステムを、雪氷生物群集を含めた生態系としてみる考え方を紹介した。

Desert Research Institute の Joseph McConnell は、レーザー誘起白熱法による Single Particle Soot Photometer (SP2) を用いて、アイスコアの少量サンプルから BC 濃度を 0.01 ppbw の高精度で求める画期的な方法を開発した。グリーンランドにおける測定結果は McConnell *et al.* (2007)

で発表されているが、最近では、南極や山岳氷河のアイスコアの分析にもこの装置を適用し、南極の表層では 0.1–0.2 ppbw の BC 濃度であったと報告した。

カリフォルニア大学デーヴィス校の Tony Van Curen は、カリフォルニア州のエアロゾル観測と山岳積雪中の不純物の分析結果について発表を行った。エアロゾル観測では、アジア起源のダストとローカルのダストのイベントをそれぞれ確認することができ、鉍物粒子の分析結果からもその二つの寄与がわかることを示した。

ユタ大学の Thomas Painter はロッキー山脈の積雪が、周囲の砂漠から飛んできたダストによって覆われることにより、アルベドが低下し、融雪が進むことを示した。2009 年の春に観測されたダスト濃度は 4 ppthw (積雪の重さ 1 g 当たりに含まれるダストの重さを mg 単位で表す) という高濃度で、少ない年でも 1 ppthw 前後という。このダスト降下により融雪は 26–50 日早まると見積もられる。

3. 議論

2 日目は朝から夕方まで、ひたすら議論を行った。その内容は、用語の統一、科学的に必要な事項、社会的に必要な事項、測定技術と方法論など時間毎に内容が準備されていたが、それほどはっきり区別して議論されず、用語を除き、とりあえず第 1 回目のワークショップとして今後必要な研究課題が確認された。その中で指摘された主なものを以下にまとめておく。



図 1 2 日目の議論の様子。

- ・ 現在モデルで扱われている black carbon (BC) とダストのほかに、有色有機物の brown carbon (BRC) と biogenic carbon (BIOC: 雪氷微生物など) も考慮する必要がある。
- ・ snow impurities (積雪不純物) という用語は、より正確な表現として “light absorbing constituents in ice and snow” (LACIS: 雪氷光吸収成分) がふさわしいという意見が出たが、一般社会的には snow impuritiesの方がわかりやすく受け入れやすいとも考えられ、どちらを使うかは今後も検討する。
- ・ BC とダスト以外の成分の光学特性は、まだほとんど理解されていないため、それらの研究を進める必要がある。
- ・ SP2 と TOT/TOR (Thermal Optical Transmittance/Reflectance 法) では同じサンプルでも装置によって結果が違う。SP2の方が良さそうだが、比較を行う必要がある。
- ・ 積雪変質モデルの中で LACIS の移動を取り扱う研究を行う必要がある。
- ・ 今後、国際的に連携してモデルの精度向上と観測手法の標準化などを行い、LACIS によるアルベド低下への影響をより正確に見積もる必要がある。

4. 観測サイト見学

3 日目は CSAS の展開する観測サイトの一つである Swamp Angel Study Plot を見学した。シルバートンから車で 10 分ほど行った峠の近くから 20 分ほど歩いた場所に自動気象観測装置 (AWS) とスカイラジオメーターがあり、すぐ近くの川には流量を測定する装置が設置されている。全ての測器は太陽電池で駆動し、観測データはいくつかの通信アンテナを経由して CSAS のオフィスに送信されている。CSAS にはこれらのサイト維持のための専門スタッフがいて、冬期でも 1 週間に 2 度ほどの頻度でメンテナンスを行っているという。AWS には上下方向の日射計、赤外放射計も設置され、アルベドの測定も行われている。ここのスカイラジオメーター (太陽光を利用して大気エアロゾルを測定する装置) は世界的なスカイラジオメーターネットワークである AERONET の中で 2 番目に標高の高い場所にある。ちなみに 1 番はハワイのマウナロア山頂である。



図 2 参加者全員による集合写真.



図 3 Swamp Angel Study Plot の観測サイトにある自動気象観測装置 (AWS).

5. おわりに

IPCC のヒマラヤの水河に関する記載に誤りがあった、いわゆる“Glacier gate 事件”から、ヒマラヤを初めとするアジアの水河に注目が集まりはじめたように感じられる。アジアの水河は 21 世紀の巨大新興国インドと中国に挟まれた場所に位置するため、その成長に伴う人為的な不純物の雪氷への沈着とその影響が懸念されているようである。水河をはじめとする近年の雪氷圏の縮小には、温暖化による気温上昇だけでなく、不純物によるアルベドの低下がそれ以上に寄与しているのではないかと、ということについていろいろな視点から検証することが今回の趣旨であった。たしかに、積雪アルベドモデルから大気循環モデル、極域からアジアを含む水河、エアロゾル観測など、今回の発表は不純物効果に関わる様々な発表がバランスよくプログラムされ、私たちも非常に勉強

になった。ワークショップでは、それぞれの研究者が主張した雪氷不純物の研究成果をもとに、その重要性をいかに IPCC, AGU ほか、学会および社会に発信していくかについての戦略が話し合われた。ひとつの具体的テーマをしばり、世界の研究者をあつめて、そのテーマのこれからの戦略を立てる、という一連の流れに、世界の科学研究をリードするアメリカ的な方法をかいま見ることができた。ワークショップでは、モデルから観測まで比較的豊富な研究者がそろった日本の雪氷コミュニティにも期待されていると感じた。今回のメンバーは今後も引き続き情報交換と活動を行うことが確認された。その中で、日本人による研究成果も積極的に発信していけたらと思う。

謝 辞

米国立科学財団より予算を獲得し、本ワークショップに招聘して下さったユタ大学の Thomas Painter 博士と CSAS 所長の Chris Landry 博士、会議準備及び招聘事務を担当された CSAS の Kim Buck 氏に深く感謝申し上げます。

文 献

- Clarke, A.D. and Noone, K.J., 1985: Soot in the arctic snowpack: A cause for perturbations in radiative transfer. *Atmos. Environ.*, **19**, 2045–2053.
- Flanner, M.G., Zender, C.S., Randerson, J.T. and Rasch, P.J., 2007: Present-day climate forcing and response from black carbon in snow. *J. Geophys. Res.*, **112**, D11202, doi:10.1029/2006JD008003.
- Flanner, M.G., Zender, C.S., Hess, P.G., Mahowald, N. M., Painter, T.H., Ramanathan, V. and Rasch, P.J., 2009: Springtime warming and reduced snow cover from carbonaceous particles. *Atmos. Chem. Phys.*, **9**, 2481–2497.
- Hegg, D.A., Warren, S.G., Grenfell, T.C., Doherty, S.J., Larson, T.V. and Clarke, A.D., 2009: Source attribution of black carbon in Arctic snow. *Environ. Sci. Tech.*, **43**, 4016–4021.
- McConnell, J.R., Edwards, R., Kok, G.L., Flanner, M. G., Zender, C.S., Saltzman, E.S., Banta, J.R., Pasteris, D.R., Carter, M.M. and Kahl, J.D.W., 2007: 20th-century industrial black carbon emissions altered arctic climate forcing. *Science*, **317**, 1381, doi: 10.1126/science.1144856.

(2010 年 7 月 15 日受付)