

407 : 4011 : 10 (雪氷 ; 防災 ; 予測)

5. 雪氷防災情報への利用

中 井 専 人*

1. はじめに

雪氷災害 (雪氷害, snow and ice damage, snow

and ice related disasters) とは, 雪や氷がもたらす災害の総称であるが, その内容は実に多岐にわたる. 降雪に関係するものだけでも, 吹雪, 雪崩をはじめとして, 着雪による送電線の破断, 吹きだまりや視程低下及び路面の雪氷による交通障害, 雪荷重による家屋の倒壊などがある. これらの災害は降雪に伴って広範

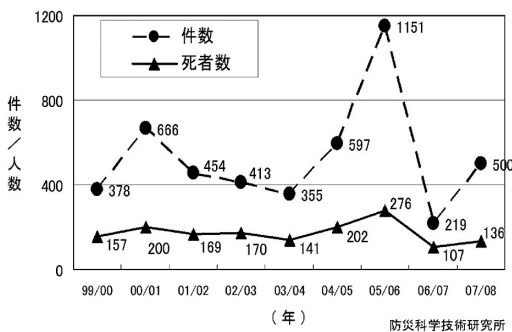
* (独)防災科学技術研究所雪氷防災研究センター.
saint@bosai.go.jp

© 2010 日本気象学会

囲に散発的、あるいは同時多発的に発生する。1件1件は目立たないが、それを集計すると犠牲者の数は多い年で200人を超える(第1図;佐藤 2008)。このような多様性と広域分散の性質もしくは同時多発性が雪氷災害の特徴である。このため犠牲者があるのに社会的に注目されにくく、また対策にも多様な手法が求められるという、被害軽減の困難さも併せ持っている。

高橋・中村(1997)は、雪崩、吹雪など従来の雪害について、その特性から技術対策まで包括的にまとめており、その中で「雪害は進化する」ということばを紹介している。これはモータリゼーションや生活様式の変化に伴い、都市型の生活、経済環境への影響が無視できなくなったことを表し、そのような状況における、個人生活レベルでの雪対応の限界と雪害対策の総合化の必要性が述べられている。しかし、この時点(初版は1986年)では、数値的な気象予報の分解能は、その値を直接、雪氷防災情報の入力とするにはまだ粗いものであった。

近年、気象予報によって得られるデータの高度化、高分解能化に伴い、予報データから雪氷防災情報を作り出すことが可能となってきた。このような状況に対応して、防災科学技術研究所雪氷防災研究センターでは雪崩危険度、吹雪時の視程、道路面上の雪氷状態など、雪氷防災情報の予測に向けた技術開発を行ってきた(佐藤ほか 2003;佐藤 2008;http://www.bosai.go.jp/seppyo/)。そのためには、吹雪の発達過程の定式化など物理過程の基礎実験から行う必要があり、一方では、細かくなったとはいえ数 km スケールで予測される気象要素から、雪氷防災情報で必要とされる数



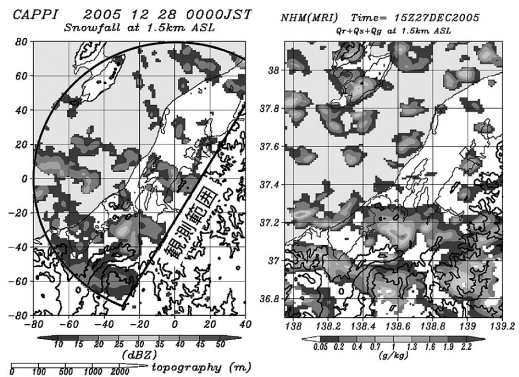
第1図 北海道から島根県まで13道府県(最初の2冬季は東北以北7道県)の地方新聞記事の集計により得られた、9冬季の雪氷災害件数と犠牲者数(佐藤篤司による)。

10m スケールの値をいかに作り出すか、両者の概念のすりあわせから始める必要があった。本稿では、ダウンスケリングを含めた雪氷災害の発生予測について、概観して述べることにしたい。

2. 降雪、積雪変質、災害危険度を表現するモデル

日本の冬季の降雪は、低気圧や寒気の吹き出しに伴い、主として海上で発達した雲が上陸することによってもたらされる。それらの雲は10km スケールの特徴的なパターンを持ち、新潟県での観測によれば主として6種類に分類することができる(Nakai *et al.* 2005)。雲解像モデルと呼ばれる、個々の雲を表現できる数値気象モデルを分解能1-2 kmで使用すると、その特徴はかなり再現されるが、ピンポイントで同じ場所に降水が再現されるわけではない(第2図)。例えば、筋雲による降雪が筋雲の間隔の半分だけずれてモデルで再現されると、現象は的確に再現していてもある地点の降雪としては大きく外れてしまうことになる。

また、豪雪の発生にとって重要なのは、降雪の集中であり、これは日本海寒帯気団収束帯(Japan Sea Polar-Airmass Convergence Zone; JPCZ)、等温位面渦位の正偏差(吉崎・加藤 2007)など、対流雲が発達しやすい場を作るもの、及び山岳地形の影響が組



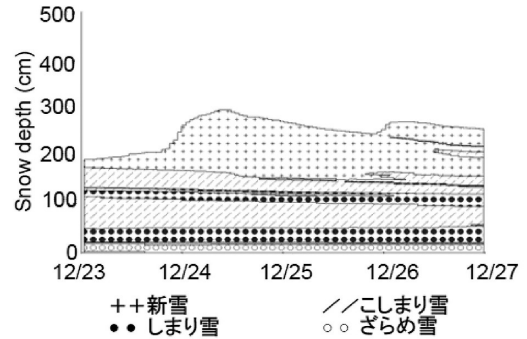
第2図 高度1500mの降水について、ある瞬間の分布を比較した例。南北160km×東西120kmの範囲を示す。(左)レーダー観測による降水強度。(右)雲解像モデル(気象庁非静力学モデル(NHM; Saito *et al.* 2006))による降水粒子の混合比(Nakai *et al.* 2008)。標高は0 m, 100m, 500mを細線で、1000m, 2000mを太線で表す。

み合わされて起こるものと考えている (中井 2007). 降雪の集中は長いときには1週間にわたって継続することがある. 第3図は降雪集中の例を集めたものであるが, 同一の地域であっても集中する場所が少しずつ異なっている. これは, 降雪の集中する場所が複数の要因によって決まることを示唆しており, 雲解像モデルによって正確な降雪分布を予測するためには, 山岳地形の影響を含めて降雪過程を正確に理解することが必要と考えられる.

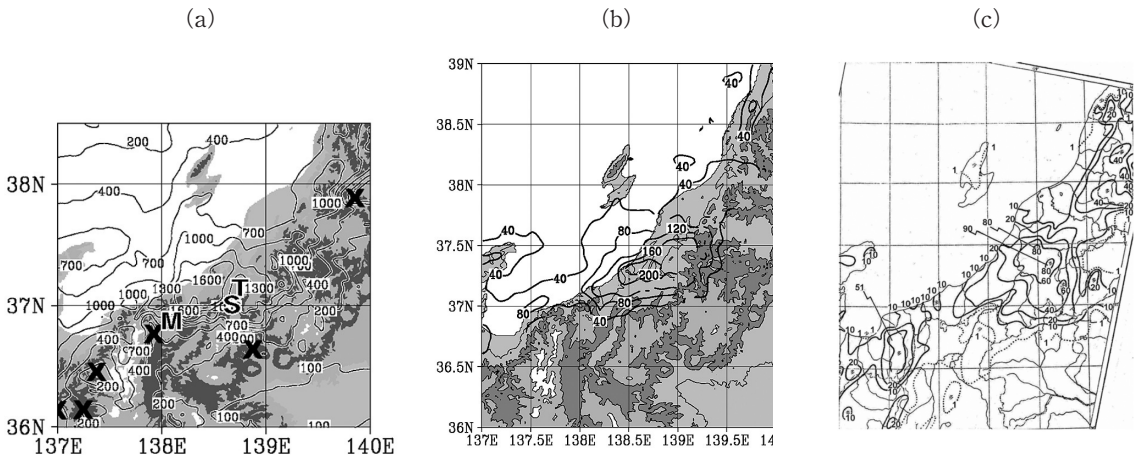
積雪については, 雲解像モデルの中では地表面過程の一部として簡略化して表現される (例えば, 気象庁予報部 2008). これとは別に, 雪氷学分野では降雪毎に積雪層が形成される様子を表現できる鉛直1次元の積雪変質モデルが開発されてきた. これは, ある地点における気象要素の時系列を入力 (境界値) として, 積雪各層の密度, 粒径, 雪質, 含水率, 雪温などを求める物理モデルである. 入力する気象要素に雲解像モデルの予測値を用いれば, 積雪状態の予測を行うことができる. 積雪の詳細な成層まで表現できるので, 雪崩のすべり面となる弱層, あられ層の変化, 融解水の挙動や底面流出の変化などを調べることができる (第4図). 雪崩モデルでは, この積雪層にその地点の傾斜, 斜面の方位 (日射の計算に用いる) などを与え,

積雪安定度と呼ばれる雪崩発生のポテンシャルを表す量を求める. 積雪安定度は, 積雪の密度, 雪質, その層より上にある積雪の荷重, 傾斜によって決まり, その値が2以下になると雪崩発生の危険が高くなる (Hirashima *et al.* 2008).

吹雪と道路雪氷に関しては, 雪氷防災研究センターでモデルを開発した (佐藤・根本 2006; 小杉ほか



第4図 積雪変質モデル (スイス国立雪・雪崩研究所 SNOWPACK; Lehning *et al.* 2002) による雪質の計算例. 横軸は日付, 縦軸は積雪深を表す. 佐藤ほか (2007) より.



第3図 新潟県中越地域に降雪が集中した事例の比較 (中井 2007より一部改変). (a)平成18年豪雪時 (2005年12月1日09時から2006年3月1日09時まで)の気象庁全国合成レーダー降水強度の積算値 (単位mm), (b)新潟県中越地震被災地の集中豪雪時 (2005年1月8日00時から1月14日09時まで)の気象庁全国合成レーダー降水強度の積算値 (単位mm), (c)昭和38年1月豪雪時 (1963年1月29日09時から1月30日09時まで)の日降雪深分布 (単位cm) (気象庁 1964). (a) (b)の標高 (陰影)は0m, 100m, 500m, 1000m, 2000m. (a)のT, S, Mはそれぞれ十日町, 津南, 妙高笹ヶ峰を表し, Xは降水強度が明らかに過小評価とみられるところを示す.

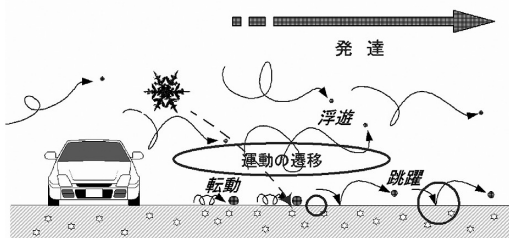
2007). 吹雪粒子の運動には転動、跳躍、浮遊の3形態があり、粒子の大きさや風速によって、異なる運動形態に移行したり、粒子濃度の鉛直分布が変わったりする(第5図). これに積雪面との相互作用が加わり(Sato *et al.* 2008), 風速, 気温, 雪面の状態によって吹雪粒子の数が変化する. さらに, 降雪粒子の昇華, 蒸発があり, これには相対湿度が関係する. 吹雪が起こることによる災害には, 吹きだまりや視程の低下による交通障害, 積雪再配分による雪崩危険度への影響などがある. 現在では, 吹雪モデルと視程モデルを組み合わせて求めた視程の低下が観測を比較的良く再現するようになってきている.

道路面の雪氷状態の計算は, 雲解像モデルの出力から道路の路線に沿った気象要素を算出し, これに対して路面温度, 路面状態, 路面摩擦の順に求めていく(小杉ほか 2007). 路面温度については, 積雪路面をモデル化し, 熱収支を解く. その後, 路面状態毎に定式化した摩擦係数を用いて路面摩擦を求める. 摩擦係数は雪氷防災実験棟における実験などから求めたものを使用する(例えば小林ほか 2007).

これらのモデルはデータの値の分布のみから関係式を得た統計的モデルではない. いずれも物理過程の数式に基づくモデルであり, その数式は観測や室内実験によって定式化されている. 気象モデルに関して, 現業観測や研究機関における集中観測などの結果がモデルの改良に用いられていることは言うまでもないであろう. 積雪や雪氷災害のモデルに関しても同様に, 降雪粒子観測, 積雪断面観測, 雪崩現地調査, 雪氷防災実験棟(佐藤 2006)における室内実験の結果などがモデルの開発, 改良に活かされている.

3. 雲解像—積雪変質—災害危険度モデルの結合

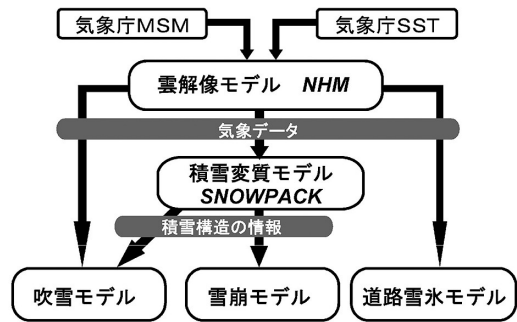
雪氷災害の発生予測をするには, 前章で述べてきた



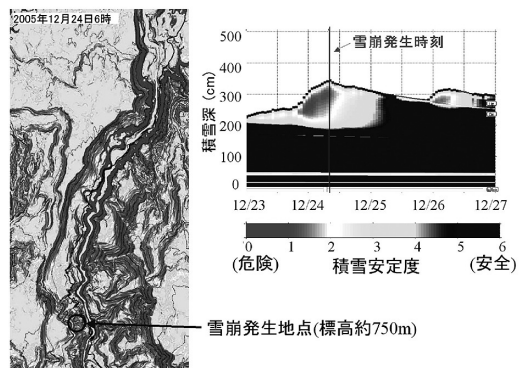
第5図 吹雪粒子の挙動の模式図(佐藤 威氏のご好意による).

モデルを適切に結合し, しかるべき物理量を算出しなければならない. また, それらがどの程度現実を再現しているか, 様々な条件で観測による検証を行わなければならない. 第6図は, モデル結合の概念図である. 数値気象モデル(通常は雲解像モデルを用いる)の出力を出発点として, 雪氷災害の種類や変数によって, それを直接利用するものと積雪変質モデルを通してから接続するものがある. これらのモデルは雲解像モデル出力の分解能でも結合できるが, ダウンスケーリングを行う場合, 雲解像モデルの出力をダウンスケーリングして他のモデルと接続することになる.

第7図は, 平成18年豪雪時に孤立した秋山郷につながる国道405号に対して行った, 積雪安定度の計算例である(山口・平島 2006). 2005年12月24日に軽自動車が行き止まりとなった雪崩の発生時刻における積雪安定度分布(第7図左)を見ると, 広い範囲で危険度が2以下と



第6図 雪氷災害発生予測のためのモデル結合の概念図.



第7図 国道405号沿いにおける2005年12月24日6時の(左)積雪安定度分布(縦10km×横5km)と(右)雪崩発生地点の積雪安定度の時系列.

なっていたことがわかる。雪崩発生地点の積雪安定度の時系列（第7図右）では短時間に多くの降雪があり、表層雪崩が発生しやすくなっていたことが表現されている。この図は津南アメダスデータと地形データから計算したものであるが、雲解像モデルとの結合による予測実験も行っている。現在、予測実験は観測値のある地点に限定し、現在までは観測値、未来については雲解像モデルの予測値を用いて雪崩危険度の計算を行っている。しかし、本来必要とされる雪崩発生地点付近の気象要素は通常は観測が困難であり、特に風による吹き溜まりや雪庇の形成をどう再現するかは課題である。雪崩予測におけるダウンスケールとは降雪分布や気象場の高分解能化だけではなく、数十mスケールで起こる現象の表現が必要となることを意味する。

第8図は路面状態の予測例である。道路に対応する線状にパラメーターが表現されており、トンネル以外の路面雪氷の状態は比較的再現されている。しかし、一部に凍結路面や水べた雪が圧雪となる傾向があるなど、改良が必要である。路面雪氷状態については、第8図は路面温度から観測データに基づく判別分析法を用いて統計的に求めたものであるが、現在、物理モデルに置き換えた実験を進めているところである。

ある地点の積雪状態の変化は、その場所の降雪量と気温に大きく影響される。降雪量の過大（過小）評価は積雪深の正（負）バイアスとなり、気温の予測誤差

は新積雪の密度だけではなく融解水の挙動を通して積雪内部にまで影響を与える（Iwamoto *et al.* 2008）。

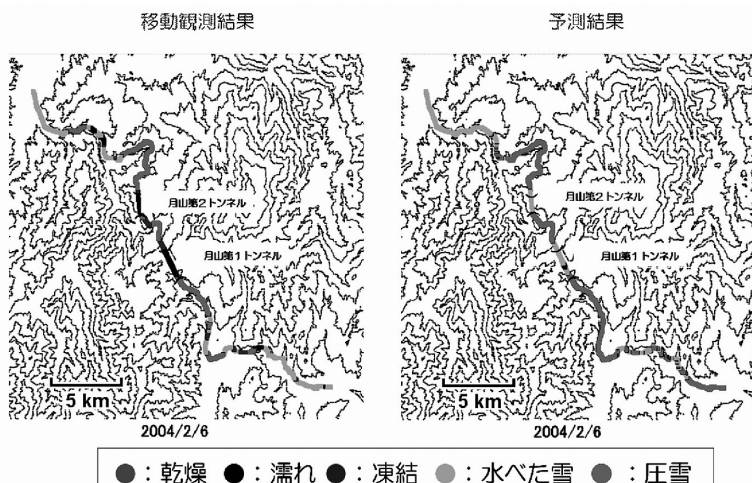
雲解像モデルで用いられる地形データは平滑化されており、モデルの分解能によって表現されている地形が異なる。雲解像モデルの予測が正確であっても、ダウンスケールによってある地点のモデル内での標高は変わることがあり、気温の予測値はそれを補正する必要がある。また地上付近に冷気層が形成された場合は雲解像モデルで表現されていない可能性もある。

降水量については、雲解像モデルで現象を再現しているもある地点の降水量が再現されているとは限らない（2節）。これは“ダブルペナルティ”の問題（高分解能モデルのメリハリのある予報では僅かな位置ずれが統計スコアをかえって低下させる場合がある（斉藤 2004））であり、ダウンスケールと同時に精度情報の付加、もしくは予測結果の確率的な表現を考えていく必要があろう。ただし、第3図に示したような降雪の集中に関しては、その場所が特に重要であり、位置を正確に予測した上でダウンスケールを行うことが、防災上からは最も望ましい。

4. まとめ —今後の課題—

現在のところ、雲解像モデル以外のモデルでは、飛雪粒子、積雪粒子、融雪水の挙動の組み込みはまだ十分とはいえない。特に、吹雪による積雪の再配分は、

吹きだまりや雪庇の形成（崩落による雪崩や交通障害の原因ともなる）を引き起こす。これら表現するためには、ダウンスケールとともにそれぞれのモデルの3次元化、及び、積雪、飛雪層から雲解像モデルへのフィードバックなど双方向の接続が必要となってくると考えられる。雲解像モデルでは地表面状態を表すデータとして土地利用情報が利用可能となってきたが、豪雪地帯（豪雪地帯対策特別措置法に基づく地域）をはじめ積雪のある地域では積雪の有無で地表面状態が大きく異なる。積雪の有無や雪面の状態は



第8図 路面雪氷状態の予測（右）と検証観測（左）の比較。2006年1月20日07時頃、山形県西川町の国道112号。

降雪とともに変化することも、双方向の結合において考慮すべき点であろう。

降雪予測の精度と積雪・災害予測から要求される精度にはギャップがある。ダウンスケーリングに伴う位置ずれの解消と降雪集中の予測がどの程度まで可能かは未知数である。カオスに伴うエラーの成長に関する議論では、雲解像モデルによる完全な予測の困難さも指摘されている (Hohenegger and Schär 2007)。特にダウンスケーリングを行った場合はダブルペナルティの問題も顕在化しやすいため、確率的表現などでカバーする必要が大きくなると思われる。しかし、雲解像モデルのような物理モデルは現象を的確に表現する最良の方法であり、その予測はできるだけ有効に使われるべきである。そのためには、モデルの改良、検証観測、災害調査や事例解析をバランス良く効果的に進めていくことが必要と考えられる。

謝 辞

本研究は防災科学技術研究所プロジェクト研究『雪氷災害発生予測システムの実用化とそれに基づく防災対策に関する研究』によるものであり、発表内容には同研究所雪氷防災研究センターの全研究者の成果が含まれます。作図にはGrADSを使用しました。

参 考 文 献

- Hirashima, H., K. Nishimura, S. Yamaguchi, A. Sato and M. Lehning, 2008: Avalanche forecasting in a heavy snowfall area using the snowpack model. *Cold Reg. Sci. Tech.*, **51**, 191-203.
- Hohenegger and Schär, 2007: Atmospheric predictability at synoptic versus cloud-resolving scales. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **88**, 1783-1793.
- Iwamoto, K., S. Yamaguchi, S. Nakai and A. Sato, 2008: Forecasting experiments using the regional meteorological model and the numerical snow cover model in the snow disaster forecasting system. *J. Natl. Disaster Sci.*, **30**, 35-43.
- 気象庁, 1964: 昭和三十八年一月豪雪調査報告. 気象庁技術報告, (33), 1160pp.
- 気象庁予報部, 2008: 気象庁非静力学モデルII—現業利用の開始とその後の発展—. 数値予報課報告・別冊, (54), 265pp.
- 小林俊市, 佐藤 威, 小杉健二, 望月重人, 2007: 道路圧雪の軟化後の圧密過程の特性, 寒地技術論文・報告集, **23**, 297-301.
- 小杉健二, 平島寛行, 小林俊市, 佐藤 威, 岩本勉之, 西村浩一, 望月重人, 上石 勲, 佐藤篤司, 2007: 防災科学技術研究所における道路雪氷研究. 日本雪工学会誌, **23**, 372-376.
- Lehning, M., P. Bartelt, B. Brown, C. Fierz and P. Satyawali, 2002: A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning: Part II. Snow microstructure. *Cold Reg. Sci. Tech.*, **35**, 147-167.
- 中井専人, 2007: 平成18年豪雪における降雪分布の特徴. 2005/06年 日本の寒冬・豪雪. 気象研究ノート, (216), 45-60.
- Nakai, S., K. Iwanami, R. Misumi, S.-G. Park and T. Kobayashi, 2005: A classification of snow clouds by Doppler radar observations at Nagaoka, Japan. *SOLA*, **1**, 161-164.
- Nakai, S., T. Kato, K. Iwamoto and M. Ishizaka, 2008: A comparison of precipitation intensity from radar with model results around coastal topography during cold-air outbreak periods. 13th Conference on Mountain Meteorology, 11-15 August 2008, Whistler, P1.20. (<http://ams.confex.com/ams/pdfpapers/141037.pdf>, 2010年4月30日現在)
- 斉藤和雄, 2004: 第2回次世代数値予報モデル国際ワークショップ参加報告. 天気, **51**, 683-689.
- Saito, K., T. Fujita, Y. Yamada, J. Ishida, Y. Kumagai, K. Aranami, S. Ohmori, R. Nagasawa, S. Kumagai, C. Muroi, T. Kato, H. Eito and Y. Yamazaki, 2006: The operational JMA nonhydrostatic mesoscale model. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 1266-1298.
- 佐藤篤司, 2008: 雪氷災害予測システムについて—その後の展開—. ゆき, (70), 29-32.
- 佐藤篤司, 石坂雅昭, 清水増治郎, 小林俊市, 納口恭明, 西村浩一, 中井専人, 山口 悟, 岩本勉之, 佐藤 威, 阿部 修, 小杉健二, 望月重人, 2003: 雪氷災害発生予測システム, 寒地技術論文・報告集, **19**, 786-789.
- 佐藤 威, 2006: 雪氷防災のための環境実験施設. 冷凍, **81**, 780-787.
- 佐藤 威, 根本征樹, 2006: 吹雪とそれによる視程障害の予測と今後の課題. 平成17年度科学研究費補助金「2005-06年冬期豪雪による広域雪氷災害に関する調査研究 (研究課題番号: 17800006, 研究代表者: 佐藤篤司)」報告書. 169-179.
- 佐藤 威, 佐藤篤司, 中井専人, 小杉健二, 上石 勲, 山口 悟, 小林俊市, 石坂雅昭, 阿部 修, 根本征樹, 岩本勉之, 平島寛行, 望月重人, 三隅良平, 納口恭明, 西村浩一, ミハエル レーニング, 2007: 平成18年豪雪における東北地方の雪氷災害とその軽減のための予測情報. 第19回ゆきみらい研究発表会論文集, 118-121.
- Sato, T., K. Kosugi, S. Mochizuki and M. Nemoto, 2008: Wind speed dependences of fracture and accu-

- mulation of snowflakes on snow surface. Cold Reg. Sci. Tech., **51**, 229-239.
- 高橋 博, 中村 勉 (編著), 1997: 雪氷防災—明るい雪国を創るために— (改訂第2版). 白亜書房, 478pp.
- 山口 悟, 平島寛行, 2006: 雪崩災害への雪氷災害予測システムの適用. 平成17年度科学研究費補助金「2005-06年冬期豪雪による広域雪氷災害に関する調査研究 (研究課題番号: 17800006, 研究代表者: 佐藤篤司)」報告書, 161-168.
- 吉崎正憲, 加藤輝之, 2007: 豪雨・豪雪の気象学. 朝倉書店, 187pp.
-