

# 雪氷災害予測システムの開発 ～多様化する雪氷災害への対応～

中村一樹\*1、小杉健二\*1、根本征樹\*1、佐藤研吾\*1、安達 聖\*1、  
荒川逸人\*1、山下克也\*1、山口 悟\*1、平島寛行\*1、本吉弘岐\*1、  
伊藤陽一\*1、中井専人\*1、上石勲\*1

## 1. はじめに

図-1に2001-18年冬季の雪氷災害発生件数と死者（犠牲者）数を示す。黒塗りは、防災科学技術研究所（図中ではNIED、以下防災科研）が全国の新聞記事から収集した雪氷災害の発生件数と死者数（2014年冬季は統計データ見直し中につき除外）、白抜きは、総務所消防庁が毎年発表している今冬の雪による被害状況等（例えば、総務所消防庁, 2018）から抽出した重軽傷者数と死者数である。なお、防災科研の統計には、雪が原因であると判断された交通事故も含まれており、総務省消防庁の統計には交通事故は含まれていない。多雪指数は、地点と期間を適切に選んで規格化した冬季最深積雪である（中井・岩本, 2006, 中井, 2015）。

2001～2018年の防災科研の年毎の雪氷災害発生件数と死者（犠牲者）数を平均すると、変動はあるものの、死者数は171名/年冬季、雪氷災害発生件数は641件となり、毎年多くの被害があることがわかる。

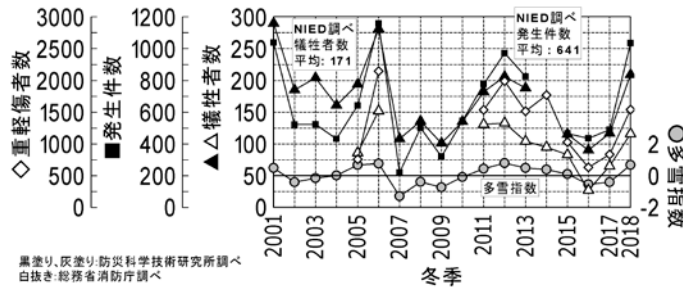


図-1 2001-18年冬季の雪氷災害発生件数と死者（犠牲者）数

図-2に、防災科研が調べた2018年冬季（2017/12～2018/4）の死者原因内訳を示す。同様に、2018年冬季（2017/12～2018/4）の雪氷災害原因内訳を図-3に示す。

2018年冬季（2017/18年の冬）は北陸地方を中心に広範囲で大雪となり、図-1に示す防災科研の統計によると、雪による死者は全国で209人となった。また、幹線道路の長時間立ち往生、建物やビニールハウス等の倒壊、ライフライン（生活道路、鉄道、水道）の障害等が各地で発生しており、防災科研の統計では雪氷災害発生件数が1034件となり、広域的かつ多方面に大きな影響を及ぼした。

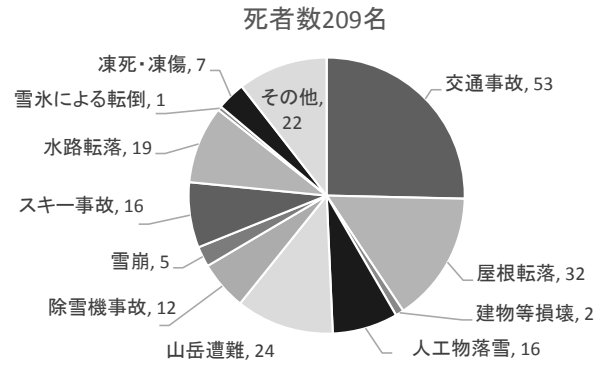


図-2 2018年冬季（2017/12～2018/4）の死者原因内訳（防災科研調べ）

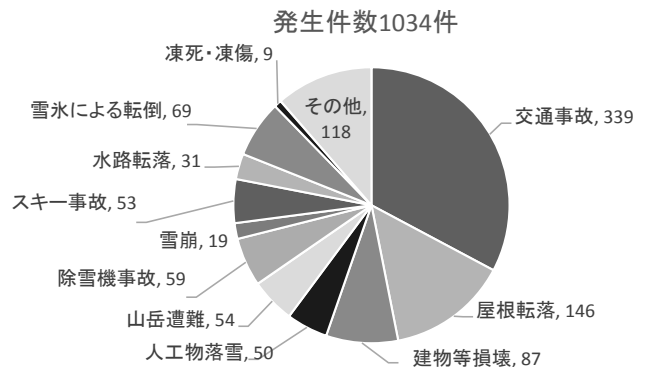


図-3 2018年冬季（2017/12～2018/4）の雪氷災害原因内訳（防災科研調べ）

図-2と図-3に示すように、雪氷災害の原因は多様であり、それぞれの原因に対して対策を講じる必要がある。雪氷災害の対策には、ハード対策とソフト対策が考えられる。防災科研は、雪氷防災実験棟（新庄市）やレーダー（長岡市）、地上観測ネットワーク（豪雪地帯の山岳域に展開）等を用いた基礎研究をベースにして、ソフト対策である雪氷災害予測システムの開発を重点的に行っている。具体的には、多様な雪氷災害危険度の現況の把握技術と面的な予測技術を高度化させるとともに、両者の融合により総合的な雪氷災害ハザードマップの開発と高機能化を図ることや、それらの社会実装実験を通じ、多様化する雪氷災害に対応した災害予測情報の提供方法について検討を行っている。

\*1 国立研究開発法人 防災科学技術研究所 雪氷防災研究センター

図-4に、雪氷災害の被害と発生場所とハザード（自然現象）の関係性を示す雪氷災害イベントツリーを示す。雪氷災害予測システムでは、ハザードの現況把握と危険度の予測を面的に行う必要がある。そこで創出された面的な情報を道路などの場所の情報と合わせることで、雪氷災害の被害推定や防災、減災対策につながる。

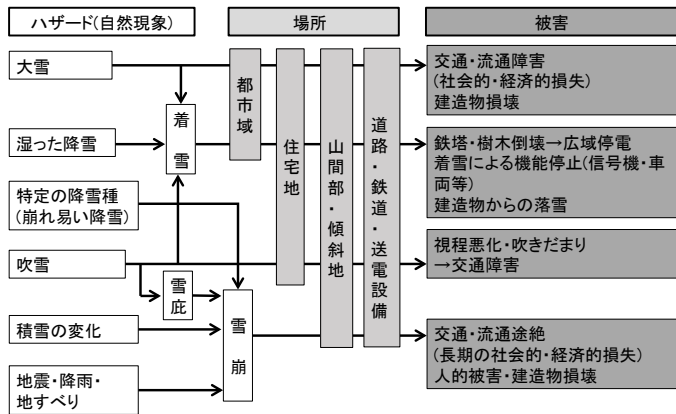


図-4 雪氷災害イベントツリー

## 2. ハザードの現況把握と予測に関わる成果

本章では、雪氷災害予測システムに関わる社会実験として実施しているハザードの現況把握と危険度の予測のうち、屋根雪、雪崩、着雪、吹雪について紹介する。

### (1) 屋根雪

図-1に示すように、雪氷災害により毎年100名以上の死者が出ており、そのうち屋根雪処理中の滑落等、除雪中の事故の割合は多い(図-2参照)。また、過疎高齢化が進行する中山間地域では、人手不足のため雪下ろしが困難になり、雪の重みによる空き家の倒壊が後を絶たない。防災科研では、図-5に示すスイスで開発された積雪変質モデル(SNOWPACK) (例えばLehningら, 1999)を改良、応用し、複数の機関で観測されている気象データや積雪深のデータを解析して積雪の重量を計算するシステムの開発を行なった。このシステムを活用して、雪下ろし作業のタイミングを適切に判断することにより、雪氷災害を軽減することを目指している。

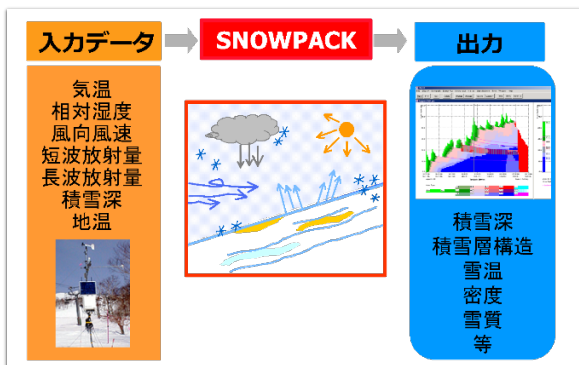


図-5 積雪変質モデル(SNOWPACK)模式図

新潟大学災害・復興科学研究所(以下、新潟大学)と京都大学大学院工学研究科(以下、京都大学)では、全国の積雪量を把握するためにweb上で公開されている気象庁、自治体、国土交通省、研究機関等の積雪深の情報を収集して分布図として示す準リアルタイム積雪分布監視システムを開発・運用してきた(新潟大学災害・復興科学研究所, 2017)。防災科研と新潟大学、京都大学では、同システムで収集された積雪深の情報とSNOWPACKを組み合わせ、新潟県内で観測されている積雪深から屋根に積もっている積雪の重量を推定する積雪荷重計算システムを共同で開発した(防災科学技術研究所・新潟大学・京都大学, 2018)。

図-6に示すように、積雪荷重計算システムでは、気象観測データと、新潟大学と京都大学が開発した準リアルタイム積雪分布監視システムによって集約された複数機関の積雪深情報を組み合わせて、任意の場所における積雪重量を出力する。その情報をもとに積雪重量の分布図を作成するとともに、雪下ろし実施日からの差分をとることで、任意の日時、場所で雪下ろしを行なった場合、積雪重量が現在どのぐらいかを見積もることができる。

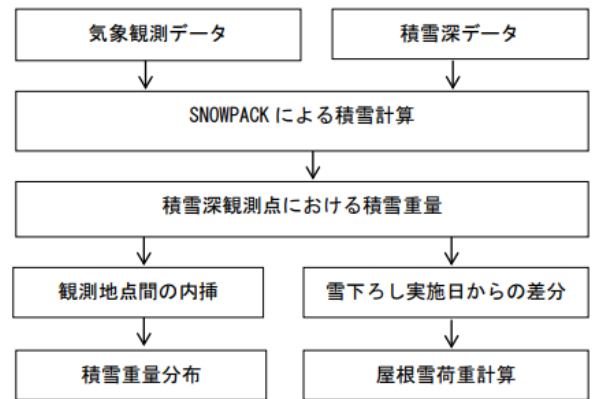
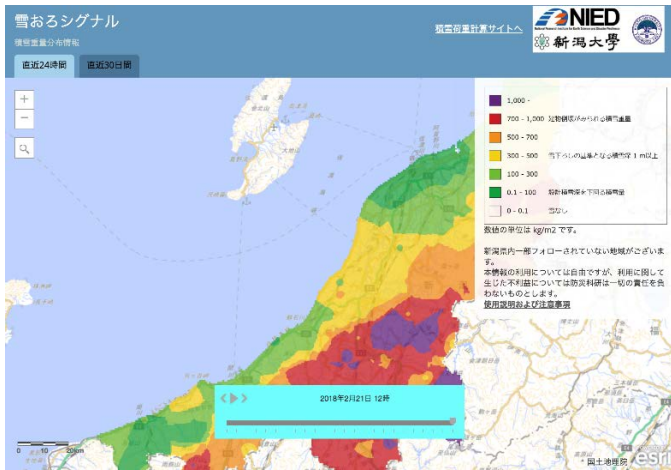


図-6 積雪荷重計算システムの概略図

屋根雪荷重と家屋倒壊の危険性に関しては、個々の家屋の強度に依存するが、一般的に積雪深が1m以上だと雪下ろしが必要と言われている。建築の設計で一般的に使われている積雪密度を当てはめると、本システムで表示される値としては、積雪深1mは300kg/m<sup>2</sup>に相当する。

積雪重量情報の屋根雪対策への利活用に向けて、積雪荷重計算システムを用いて推定される積雪重量分布情報を「雪おろシグナル」と命名し、2018年1月から新潟県で活用を開始した。「雪おろシグナル」は、国土地理院地図上に分布図として表示されるほか(図-7参照)、積雪荷重計算サイト(図-8参照)において、特定の地域における現在の積雪量や、雪下ろしを実施した日を指定することで、それ以降に堆積した雪の量から現在の積雪重量を知ることが可能となる。



最小値 (kg/m <sup>2</sup> )	最大値 (kg/m <sup>2</sup> )	色	備考
1000	∞	紫	
700	1000	赤	建物倒壊がみられる積雪重量
500	700	橙	
300	500	黄色	雪下ろしの基準となる積雪深 1m 以上
100	300	黄緑	
0.1	100	緑	設計積雪深を下回る積雪量
0	0.1	無色	雪なし

図-7 「雪おろシグナル」積雪重量分布情報

1.地点キーワード  検索 3.雪下ろし実施日 2017/12/01 00:00  
例1. 長岡市、例2. 新潟市 4.現在 2017/12/26 00:00  
(2017/12/01-)

2.居住地 選択して下さい

5.積雪荷重計算 現在の積雪荷重

図-8 積雪荷重計算サイト

## (2) 雪崩

### 1) 積雪変質モデルによる雪崩発生予測

雪崩の発生を予測するためには、気象条件だけでなく、現在積もっている雪の崩れやすさを知る必要がある。そのためには積雪内部の情報が必要となるが、積雪断面観測や積雪内部にセンサーを挿入する方法では、自動で連続的にデータを得ることは困難である。

自動観測や予測が可能な気象データを入力に用いて、積雪の内部構造を計算するモデルとして、図-5に示した積雪変質モデル(SNOWPACK)が用いられる。このモデルは雪が積もり始めてから現在までの気象データを入力して、大気と雪表面間の水や熱の交換や、積雪内部における雪の性質の変化を計算し、雪質、温度、密度、粒径、含水率等、積雪の細かい層構造の情報を出力する。それらを正確に再現することにより、雪崩発生予測を行う(平島, 2014, 2015)。

雪崩は斜面上の積雪の駆動力がその支持力を上回った時に発生する。多くの表層雪崩は、特に支持力の弱い弱層が破壊されることにより発生する。

表層雪崩の弱層になりやすい雪は、(a)降雪結晶、(b)

表面霜、(c)しもざらめ雪、(d)あられ、(e)濡れざらめ雪などのようにいくつもの種類がある。これらの弱層ができる条件はそれぞれ異なるが、それらを積雪変質モデルで再現するとともに、弱層の存在によってどのくらい雪崩が起こりやすくなったかを正確に計算することで、表層雪崩の予測が可能になる。

雪崩の起こりやすさを数値で表す指標として、積雪安定度を用いる。積雪安定度は、ある斜面上の雪が落ちようとするせん断応力と、落ちまいとするせん断強度の比から計算する。せん断応力は弱層上の上載荷重のうち斜面に平行にかかっている力から(図-9a)、せん断強度は密度との関係式から計算する。密度とせん断強度の関係は、図-9bに示すようなシアフレームを使って測定した結果から定式化されるが、密度だけでなく雪結晶同士の結合度合いも影響するため、雪質によって密度とせん断強度の関係式を使い分ける(平島, 2017)。

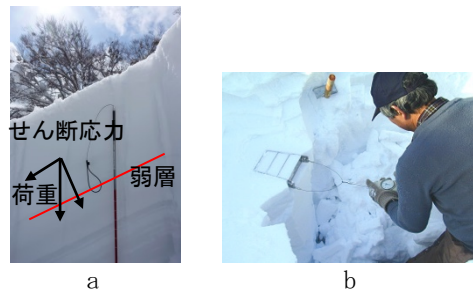


図-9 弱層にかかるせん断応力 (a)とせん断強度の測定 (b)の図(平島, 2017)

最近では、弱層になることがある「しもざらめ雪」の発達度合いを表す「しもざらめ化率」の概念を導入し、しもざらめ雪からなる弱層が破壊されることで発生する表層雪崩の予測精度を向上させてきた(阿部・平島, 2015)。図-10は、2012年に玉川温泉で発生した雪崩に対して行った積雪安定度の計算結果である。積雪安定度が小さい弱層が表現されており、雪崩発生時には雪崩が起こりやすくなっていたことが計算されている。この雪崩はしもざらめ雪の発達段階である「こしもざらめ雪」が弱層となって発生したことが調査結果で確認されているが、積雪モデルでもこの不安定化が再現された(平島, 2015, 2017)。

積雪変質モデルを使用して降雪結晶が弱層になる表層雪崩(例えば、2017年3月の那須岳雪崩)を予測するためには、入力データとして気象だけでなく、降っていた降雪結晶の種類の情報が必要になる。また降雪結晶の種類によって積雪の変質過程や強度の変化がどのように異なるか新たにモデル化する必要がある。現時点ではこの部分が課題であり、これらを可能にするためには、降

っている雪結晶の種類を表す新たな情報を入力データとして追加する必要がある（平島，2014，2015，2017）。

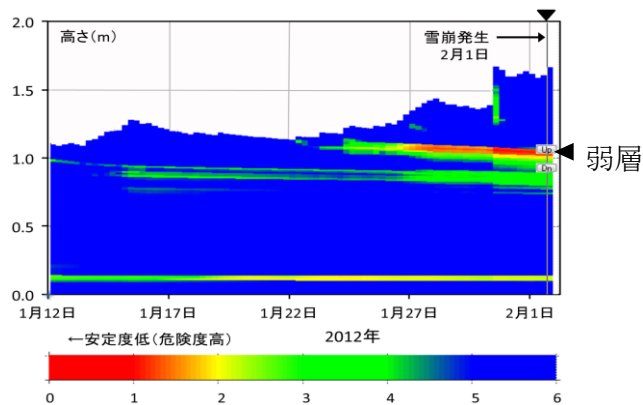


図-10 秋田県玉川温泉の表層雪崩発生時の積雪安定度情報表示例（平島，2015，2017を改変）

防災科研では降雪結晶の性質を数値で表すため、降雪密度や比表面積の測定を行い、降雪結晶の種類との関係を観測から検討している。また、その後の変質過程をモデル化するためにX線断層撮影装置を用いて積雪の微細構造の変化を解析している。これらの情報をもとに積雪変質モデルを進化させ（図-11）、降雪結晶が弱層になる表層雪崩の発生予測が可能になるように研究を進めている（平島，2014，2015，2017）。

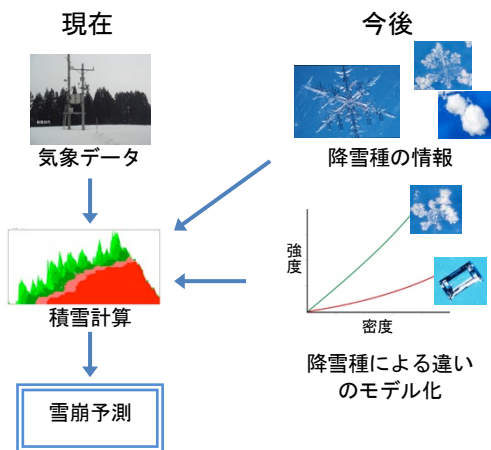


図-11 降雪結晶による雪崩発生予測に向けた取り組み（平島，2017）

## 2) 低気圧性の降雪による表層雪崩危険度予測

前節に示したように、これまでも積雪モデルを用いた表層雪崩発生予測に関わるいくつかの研究例がある（例えば，平島，2014）が、前節に示した課題のため、降雪結晶が弱層になる表層雪崩の予測は、現在まで行われていない。

一方、弱層となる降雪結晶（例えば、雲粒の付着の少ない比較的大型の板状結晶等）は、低気圧による降雪の

場合が多いことがわかっている（例えば，中村ら，2013）。低気圧の進行方向前面（北～東～南東側）の層状雲からは、表層雪崩の弱層を形成する「雲粒付着が少ない板状結晶」や、「崩れやすい形状をしている角柱状結晶」等が降りやすい。

これらの特徴を踏まえ、降雪結晶が弱層になった那須岳雪崩の調査結果（中村ら，2018）や過去の低気圧の降雪が原因の表層雪崩事例（例えば，中村ら，2014）の地形、上空の風、気温、降雪量等进行分析して新たな予測情報を設計し、低気圧性降雪による表層雪崩危険度予測の可視化を実現することを目的として試験運用を行っている（図-12参照）。

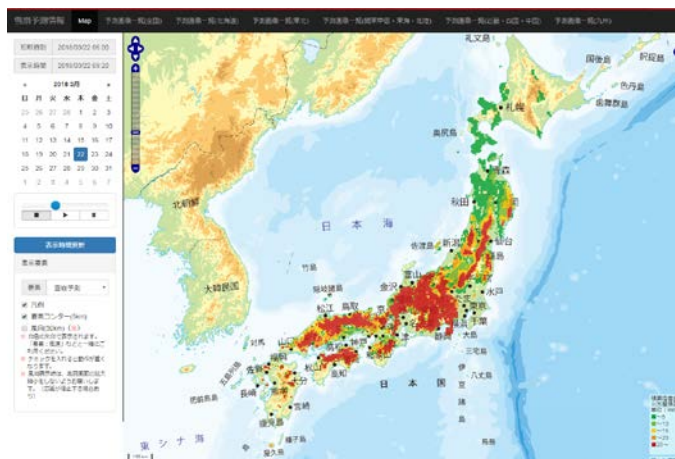


図-12 情報の表示例（表層雪崩危険度予測）

試験運用では、全国を対象に水平格子間隔5kmで低気圧性表層雪崩の危険度を5段階の色で表示した。気象庁メソ数値予報モデルGPV（MSMモデル）の気象要素を入力値として、3時間毎に約30時間先まで予測するシステムのアルゴリズムを開発した。

低気圧による降雪によって生じる表層雪崩には主に2つのパターンがあり、本研究では、2017年3月に那須岳で発生した表層雪崩と同じパターンA「低気圧進行方向前面の層状雲から降った雪で弱層が形成され、さらに同じ低気圧から降った雪により表層雪崩が生じる場合」の雪崩危険度の予測アルゴリズム開発と試験運用を試みた。

一方、パターンB「低気圧進行方向前面の層状雲から降った雪で弱層が形成され、低気圧が通過した後の冬型の気圧配置による対流雲からの降雪や、季節風が強まることによる吹きだまりが上載積雪となって表層雪崩が生じる場合」の予測アルゴリズムの検討は、今後の課題である。

### (3) 着雪

着雪は、気温0度以上で降る雪片が落下中に少し溶けて水を含むため、構造物に付着する現象である。そのため

電力設備や交通構造物の破損や落雪による人的、物的被害を引き起こす。様々な難着雪対策品が開発されているが、特に南岸低気圧に起因する着雪の場合は広範囲で発生するため、対策が十分でない首都圏などの人口密集地では被害が拡大する。道路管理者は、被害軽減のために事前の除雪・巡回体制の整備を行っており、着雪氷予測システムの開発はその効率化への貢献が期待される。

防災科研雪氷防災研究センター新庄雪氷環境実験所では、一般的な気象観測要素に加え、光学式ディストロメータによる降雪粒子の粒径や落下速度の測定および着雪モニタリングを実施している。また、同所の雪氷防災実験棟では、人工降雪が可能で、気温や風速など着雪時の気象状況を再現した風洞試験を実施することが可能である。これらの観測および実験により基礎的なデータを蓄積し、メカニズムの解明に取り組んでいる。さらに、過去の被害事例などの解析も実施し、温湿度、風向風速、降水量、日射などを考慮した着雪モデルと気象予測情報を融合させ、図-13に示すような面的に着雪の予測表示が可能なシステムを構築した。現在は開発途中であるため、実証試験を重ねることで、システムの精度向上を目指している（佐藤，2017）。

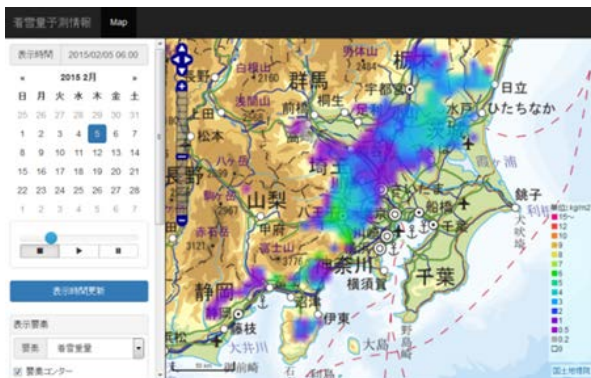


図-13 着雪予測情報の表示例

#### (4) 吹雪

吹雪モデルの構成を大別すると、1)地域気象モデルの出力を基に、地表面付近の風速・雪質などを予測し、2)吹雪の強度を計算し、3)それらの情報から高さ1.2m（普通乗用車のドライバーの目線の高さに相当）における視程を計算する、という3つのプロセスに分類できる。上記2)のプロセスが吹雪モデルの中心となる部分で、ここでは風速などの予測値に基づき吹雪の濃度の空間的な分布を予測し、3)の視程予測（図-14参照）につなげている。吹雪濃度の計算では雪粒子の拡散方程式などに基づき鉛直分布を計算する（鉛直次元モデル）。その他、吹雪の跳躍高さや降雪粒子が雪面で碎ける過程、吹雪強度の温度依存性など、パラメータ化が必要な部分も生じる。これらのパラメータの決定に際しては防災科研雪氷防災

研究センター新庄雪氷環境実験所にある雪氷防災実験棟の風洞装置・人工降雪装置を用いた実験や野外観測に基づく研究の成果を応用している（根本，2017）。

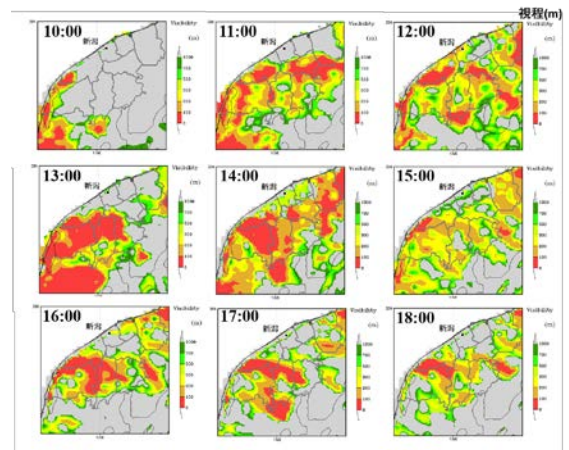


図-14 情報の表示例（新潟市周辺の視程予測値）

### 3. まとめと今後の課題

図-15に現時点の雪氷災害予測システムの概念図を示す。現在、現況把握と予測に取り組んでいるハザードとして、前節で紹介した屋根雪、雪崩、着雪、吹雪、道路雪氷のほか、降雪があり、積雪や冠雪、吹き溜りにも着手しているところである。これらのハザードの現況把握のために、レーダー、地上観測ネットワーク、IoTマルチセンサー、他機関データを用いている。また、予測のために気象庁のメソ気象モデルの数値計算データなどを用いている。それらのデータから、創出された情報は、試験運用として、それぞれのハザードに影響を受けるステークホルダーの機関に提供されている。逆に、各機関からは、情報の検証のためのデータやコメントを頂いている。

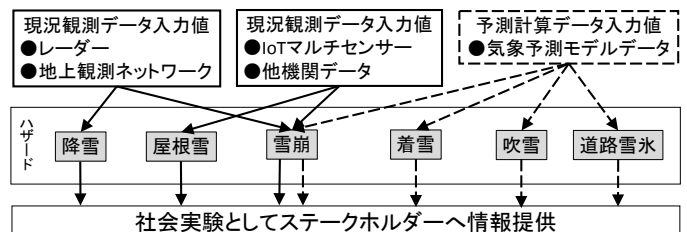


図-15 現時点の雪氷災害予測システムの概念図

しかし、現時点では、雪氷災害の被害軽減の課題に対するハザード情報の種類の不足や、観測データを用いた予測の逐次補正、AI等の技術を用いて画像や映像から抽出した数値データの利用等の課題がある。

図-16に近い将来の雪氷災害予測システムの概念図を示す。上記課題の解決に加え、創出した情報をGISに集約し、他の情報とのマッシュアップすることで、雪氷災害の被害軽減対策に直接資する情報を創出することが可能

になる。さらに、ステークホルダーが情報を使いやすいように、雪氷災害シナリオを作成し、情報提供を行うことが必要であろう。一部のハザードについては、数年以内に、ここまでの情報の流れを実現したいと考えている。

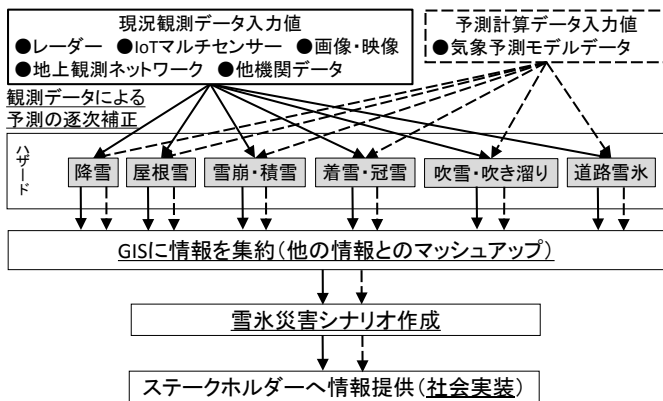


図-16 近い将来の雪氷災害予測システムの概念図

#### 4. おわりに

多様な雪氷災害の被害を軽減するために開発を進めている雪氷災害予測システムの構築は、ニーズ主導で行われている。雪氷災害の被害軽減において有効な方法は、防災の課題を有するステークホルダーのニーズを把握し、関係する市民、地域、企業、自治体、国、他の研究機関が共に解決策を検討し、社会実装することである。

これらを実現する仕組みとして、防災科研は、2016年に気象災害軽減イノベーションセンターを設置した（防災科研気象災害軽減イノベーションセンター，2018）。同センターを中核として気象災害軽減コンソーシアムを設立し、産学官連携による研究を推進することにより、研究成果の社会実装を目指している。

#### 謝辞

雪氷災害予測システムを試験運用するに当たり、多くの機関にご協力頂いた。また、本研究の一部は、国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）イノベーションハブ構築支援事業、及び日本学術振興会特別研究促進費「17K18453」の支援を頂き実施した。ここに感謝申し上げる。

#### 参考文献

阿部 修，平島寛行，2015：しもざらめ雪の成長過程を組み込んだ雪崩予測システムの検証. 雪氷，77，37-45.  
 佐藤研吾，2017：着雪氷予測システムの実証実験. 防災科研ニュース，199，10-11.  
 総務省消防庁，2018：今冬の雪による被害状況等（H29.11.1～H30.3.31）（2018年4月13日10時00分現在）.

<http://www.fdma.go.jp/bn/2018/detail/1029.html>（最終閲覧日2018年10月14日）.

中井専人・岩本勉之，2006：規格化した冬季最深積雪から見た平成18年豪雪の特徴. 天気，53，863-869.

中井専人，2015：“多雪指数”を用いた全国が多雪・少雪の年々変動と分布. 天気，62，187-199.

中村一樹・佐藤友徳・秋田谷英次，2013：降雪系弱層形成時の気象の特徴. 北海道の雪氷，32，14-17.

中村一樹・上石勲・阿部修，2014：2014年2月の低気圧の降雪による雪崩の特徴，日本雪工学会. 30，pp.106-113.

根本征樹，2017：吹雪発生予測システムの実証実験. 防災科研ニュース，199，8-9.

中村一樹・上石 勲・根本征樹・小杉健二・山口 悟・伊藤陽一・平島寛行・本吉弘岐・佐藤研吾・安達 聖・阿部修・内山庄一郎・鈴木比奈子・飯田 肇・西村浩一・河島克久・松元高峰・渡部 俊・伊豫部勉・阿部幹雄・阿部直樹・竹内由香里・勝島隆史・近藤伸也，2018：那須雪崩災害の現地調査. 平成 29 年度科学研究費補助金（特別研究促進費）研究成果報告書（課題番号 17K18453），1-20.

新潟大学災害・復興科学研究所，2017：準リアルタイム積雪深分布.<http://platform.nhdr.niigata-u.ac.jp/~snow-map/index.php?FrontPage>（最終閲覧日2018年10月16日）.

平島寛行，2014：積雪変質モデルによる雪崩発生予測の現状と課題. 雪氷，76，411-419.

平島寛行，山口悟，小杉健二，根本征樹，青木輝夫，的場澄人，2015：断面観測結果を用いた積雪変質モデルの検証. 雪氷，77，5-16.

平島寛行，2017：積雪変質モデルによる雪崩発生予測. 防災科研ニュース，199，18-19.

防災科学技術研究所気象災害軽減イノベーションセンター，2018：防災科研気象災害軽減イノベーションセンターホームページ.<http://www.bosai.go.jp/ihub/>（最終閲覧日2018年10月14日）.

防災科学技術研究所・新潟大学・京都大学，2018：積雪時の雪下ろしの判断に役立つ「雪おろシグナル」（積雪重量分布情報）が新潟県で活用開始へ.[http://www.pref.niigata.lg.jp/HTML\\_Article/564/628/180109\\_bousaikaken\\_koho\\_197492\\_0.pdf](http://www.pref.niigata.lg.jp/HTML_Article/564/628/180109_bousaikaken_koho_197492_0.pdf)（最終閲覧日2018年10月16日）.

Lehning, M., P. Bartelt, R.L. Brown, T. Russi, U. Stöckli and M. Zimmerli. 1999: Snowpack model calculations for avalanche warning based upon a new network of weather and snow stations. Cold Reg. Sci. Technol., 30(1-3), 145-157.