

平成21年度

T C 研究助成成果報告書

平成22年10月18日

社団法人 雪センター

平成 21 年度 TC 研究助成成果報告書

目 次

『新潟県内における雪室実態調査と雪室技術の高度化に関する研究』	
和泉 薫	新潟大学 災害復興センター 教授 1
『河川水熱を利用した橋梁凍結防止舗装(潜り通水舗装)に関する基礎研究』	
福原 輝幸	福井大学 大学院 工学研究科 教授 16
『新しい着雪・冠雪除去技術の開発』	
上村 靖司	長岡技術科学大学 機械系 准教授 25
『地吹雪時の道路管理に関わる気象予測の基礎研究』	
高田 吉治	(株)応用気象エンジニアリング 代表取締役 31

新潟県内における雪室実態調査と雪室技術の高度化に関する研究

新潟大学災害復興科学センター 和泉 薫
長岡技術科学大学名誉教授 早川典生
町田建設(株)代表取締役社長 町田 誠

キーワード：伝統的雪室，現代的雪室，石積み，雪穴，融雪水排水，雪貯蔵，断熱材

1. はじめに

明治から昭和 30 年代にかけて，穴を掘り，雪を積み上げるなどし，その上に藁などで屋根をかけた雪室が，北陸地方を中心に日本海沿岸地域に広く作られた．それらの雪室は夏季の冷熱源として使用され，飲食用や鮮魚や生鮮食料品の冷蔵等に用いられた（池上，1999）．新潟県内では，明治 33 年に最も多い 244 箇所「冰雪貯蔵所」が存在した（山口ら，2008）が，衛生上の取り締まりの強化や電気冷蔵庫の一般家庭への普及等の要因により，昭和 40 年代までにはそれら伝統的な雪室は姿を消していった．

近年になって，伝統的な雪室に比べて断熱性に優れ，熱交換システムを導入するなどした現代的な雪室が北海道を中心に普及し，農作物の貯蔵や公共施設の冷房に使用されるようになった．平成 14 年の「新エネルギー利用等の促進に関する特別措置法（新エネ法）」の改正に伴い，雪氷冷熱エネルギーが新エネルギーの一つとして加えられたため，補助制度の整備等により新潟県内でも現代的雪室の設置箇所数が最近増加してきた．新潟県における現代的な雪室の実例を図 1 に示す．

1 トンの雪氷を利用することで，約 10 リットルの石油の消費を節約し，約 30kg の炭酸ガスの放出を抑制できる（媚山，2003）ことから，雪氷冷熱エネルギーは，環境負荷の軽減のためのグリーンエネルギーとして注目されている．

しかし，地球温暖化がこの進行すると，北陸地方以南の日本海側平野部では冬に雪が降らなくなり積雪も生じなくなるという将来予測がある（井上ら，1998）．また，環境省によれば，将来的に真夏日



図 1 十日町市仙田体験交流館の雪室
建物の左側が貯蔵庫，右側が貯雪庫

の日数は増加して，夏季の冷房需要はますます増加することが見込まれている．このように夏季の冷房需要が高まる一方で，暖冬少雪によって現代的雪室でも継続的に使用す

するための十分な量の雪の確保が懸念されてきている。

本研究ではまず、新潟県内における現代的雪室の設置経過と現状を調査し、雪室の様々な構造や立地条件を分析して、これまで現代的な雪室が蓄積してきた雪貯蔵のための工夫や、雪室を継続的に使用するのに必要な積雪条件について明らかにする。

次に、こうした現代的雪室に使われている冷熱利用技術をベースにして、現在でも当時に近い状態で残っている伝統的雪室（雪穴）跡を再生し、そこでの雪貯蔵の高度化を図り、地球温暖化時代における伝統的雪室の利活用の可能性を探ることとした。

2. 新潟県内における現代的雪室の設置状況

文献やインターネットなどから新潟県内の現代的な雪室を調べたところ、1987年から2007年までに建設された現代的雪室は、49箇所であることがわかった。その49箇所の雪室の施設名、所在地、設置年、用途、貯蔵物の内容を表1に示した。

表1 調査した現代的雪室の概要

No.	施設名	所在地	設置年	用途			貯蔵内容
				貯蔵	冷房	遊雪	
1	個人住宅H邸	小千谷市	2004	*	*		米、飲料等
2	スノーランド池ヶ原 雪蔵の里	小千谷市	2000	*			じゃがいも、人参、キャベツ、大根、そば、酒、米等
3	スノーランド池ヶ原 雪山	小千谷市	1995			*	-
4	雪中貯蔵用タンク(高の井酒造株式会社)	小千谷市	1987	*			酒
5	花木球根集出荷予保冷蔵施設	三条市(旧下田村)	1995	*			ユリ切花、球根等
6	雪中貯蔵庫	長岡市(旧山古志村)	1991	*			白菜等
7	銀杏貯蔵庫	長岡市(旧小国町)	1990	*			銀杏
8	鵜川の雪室	柏崎市	2001	*			酒、味噌、農産物等
9	北条アイサービスセンター	柏崎市	2003		*		-
10	雪室付貯蔵野菜販売兼冬期共同車庫	柏崎市(旧高柳町)	1996	*			山菜、野菜
11	岩の原葡萄園 雪エネルギー棟	上越市	2004	*			ワイン
12	JAえちご上越 柿崎雪室貯蔵庫	上越市(旧柿崎町)	2004	*			米、酒
13	個人住宅N邸	上越市(旧吉川町)	2003	*			米、野菜、酒等
14	雪のまぢみらい館	上越市(旧安塚町)	1999		*		-
15	農産物集出荷貯蔵施設	上越市(旧安塚町)	1992	*			米、野菜、そば等
16	雪だるま物産館	上越市(旧安塚町)	1995		*		-
17	雪むろそば家「小さな空」	上越市(旧安塚町)	2004	*			-
18	ほのほの荘、やすらぎ荘	上越市(旧安塚町)	2000	*			-
19	安塚小学校	上越市(旧安塚町)	2001	*			-
20	安塚中学校	上越市(旧安塚町)	2004	*			-
21	JAえちご上越 やすづか利雪型米穀貯蔵施設	上越市(旧安塚町)	2003	*			米
22	センターハウス	上越市(旧安塚町)	2007	*			-
23	ふれあい昆虫館	上越市(旧安塚町)	2007	*			-
24	JAえちご上越 簡易型雪室実験施設	上越市(旧安塚町)	2004	*			米等
25	坊金の雪室	上越市(旧安塚町)	2003	*			野菜等、イベント用の雪保存
26	個人住宅H邸(利雪の家)	十日町市	1988		*		米、漬物等
27	体験交流施設「NATURA(ナトゥーラ)」	十日町市	1998	*	*		米、ふのり、酒等
28	個人住宅M邸	十日町市	1998	*	*		不明
29	小嶋屋そば倉庫(種工房)	十日町市	1996	*			生蕎麦
30	まのこ栽培実験施設「まのこのおうち」	十日町市	2004		*		-
31	仙田体験交流館	十日町市(旧川西町)	2000	*	*		米
32	中里花卉野菜集荷センター	十日町市(旧中里村)	1994	*			ユリ切花等
33	精米貯蔵農産物加工施設(南こしじ)	十日町市(旧中里村)	1994	*			米
34	清田山自然運動公園	十日町市(旧中里村)	1988			*	-
35	雪中貯蔵庫(グリーンファーム)	魚沼市(旧湯之谷村)	1988	*			人参、じゃがいも、大根、山菜、酒
36	個人住宅H邸	魚沼市(旧湯之谷村)	1997		*		-
37	銀山平雪国体験施設	魚沼市(旧湯之谷村)	1990	*			不明
38	ゆきくら館(玉川酒造株式会社)	魚沼市(旧守門村)	1989	*			酒
39	漬物貯蔵庫(南ゆきくらファーズ)	魚沼市(旧守門村)	1997	*			漬物、酒
40	峠の雪むろ	魚沼市(旧守門村)	2000	*			米、野菜
41	新潟県南魚沼地域振興局	南魚沼市(旧六日町)	2003		*		-
42	雪蔵倉庫(榊吉兆楽)	南魚沼市(旧塩沢町)	2007	*			米
43	雪蔵(南山田屋商店)	南魚沼市(旧塩沢町)	2001	*			酒
44	越後ワイナリー(株式会社アグリコア)	南魚沼市(旧大和町)	2001	*			ワイン
45	八色の森公園休憩施設むかしや	南魚沼市(旧大和町)	2007	*			野菜等
46	雪中貯蔵施設	北魚沼郡川口町	1994	*			うど根株、米、野菜等
47	ユリ集荷施設	中魚沼郡津南町	1993	*			ユリ切花、球根等
48	野菜集出荷貯蔵施設「雪エネ熟成施設」(南大地)	中魚沼郡津南町	2007	*			人参、じゃがいも、玉葱、アスパラガス、そば、酒粕等
49	温泉施設「龍神の里」	中魚沼郡津南町	1995		*		-

*用途の中で、貯蔵：食物や花卉の保存に使う施設の冷蔵、冷房：室内冷房、

遊雪：夏期のイベント用の雪の保存

図2に、それら現代的雪室の新潟県内における分布を示した。現代的雪室は、最も北に位置する三条市(旧下田村)の雪室を除くと、ほとんどが長岡市以南で積雪の多い上・中越地方の山間部に分布している。新潟県内で過去に使われていた伝統的雪室が、村上市から糸魚川市まで県内広く分布していた(池上, 1999)のに対し、現代的雪室は上中越地方の限られた地域に存在している事がわかる。

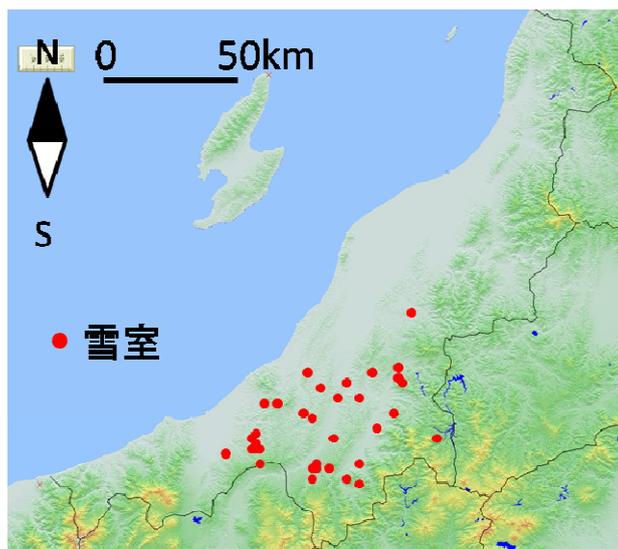


図2 新潟県内の現代的雪室の分布

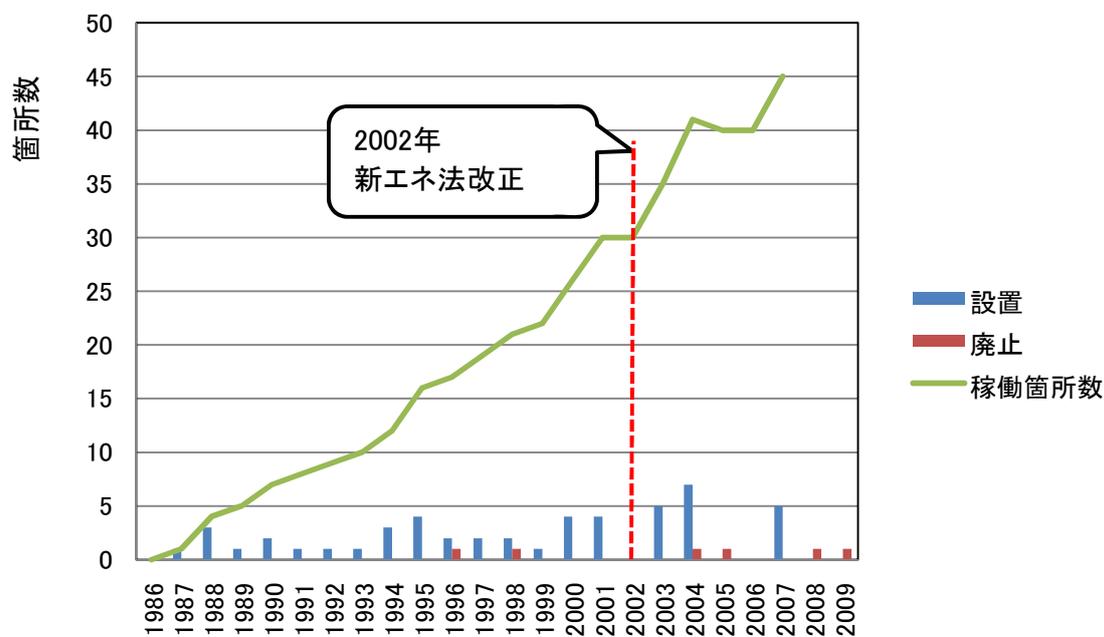


図3 現代的雪室の設置箇所数の推移

図3には、雪室の稼働箇所数の推移と、各年における雪室の設置箇所数と廃止箇所数を示した。新潟県内では1990年代後半以降、使用を停止し廃止された雪室が一部あるものの、稼働箇所数は増加しており、2007年時点で45箇所の雪室が稼働している。

2002年の新エネ法改正で、雪氷冷熱エネルギーが新エネルギーに加えられたため、雪室の設置箇所数はさらに増えたことがわかる。

3. 現代的雪室の構造と特徴

3.1 冷蔵方式別分類

現在よく使われている分類に従うと、現代的な雪室は次の5つの冷蔵方式に分類される。それら各冷蔵方式の構造概略を図4に示した。

- A 自然対流方式：特別な機器を用いず、雪の冷熱を自然対流させて貯蔵庫を冷却。
 - A-1 雪山方式
貯蔵庫を雪で覆い、その上にシートや籾殻などを断熱材としてかけたもの。
 - A-2 雪室（直接）方式
専用倉庫内に貯蔵庫を置き、貯蔵庫に直接雪を被せたもの。
 - A-3 雪室（間接）方式
専用倉庫内を貯蔵スペースと貯雪スペースに区切り、両者の間に空間を設け、空気の流れにより自然対流により冷蔵を行うもの。
- B 冷風循環方式：送風機を用いて貯蔵庫と貯雪庫の間の空気を循環させ冷却
- C 冷水循環方式：雪で冷却された液体をポンプで循環させ、貯蔵庫側で循環する液体を熱交換器により冷却

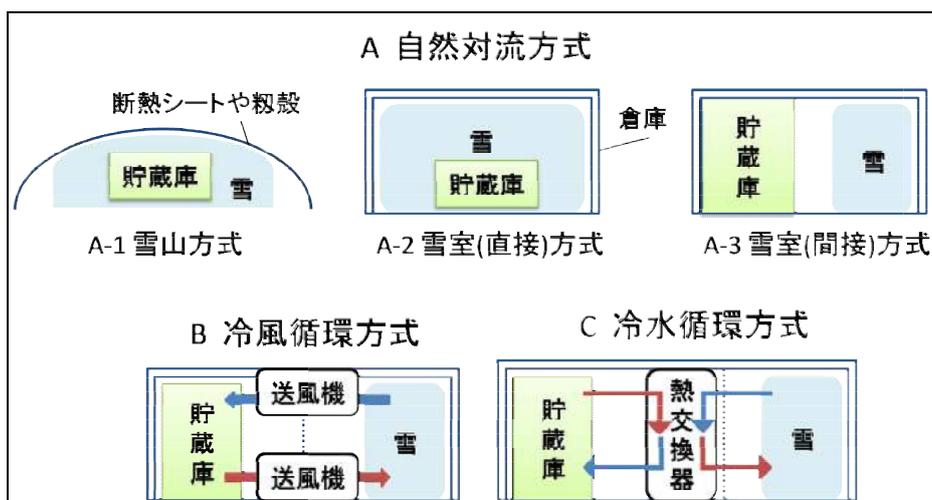


図4 冷蔵方式別の構造概略（北海道経済産業局，2008より）

3.2 冷蔵方式別の雪室稼働箇所数の推移

図5に3.1で分類した冷蔵方式別の現代的雪室の稼働箇所数の推移を示した。初期には伝統的雪室の流れを汲む雪山方式が多く設置されたが、その後廃止されるものもあり、2002年以降では雪山方式での新たな雪室の設置はない。一方、冷風循環方式や冷水循環方式は2002年以降設置件数が急増している。この二つの方式は建設コストがかかることから、新エネ法改正後に補助制度を利用することで設置が増加したものと考えられる。

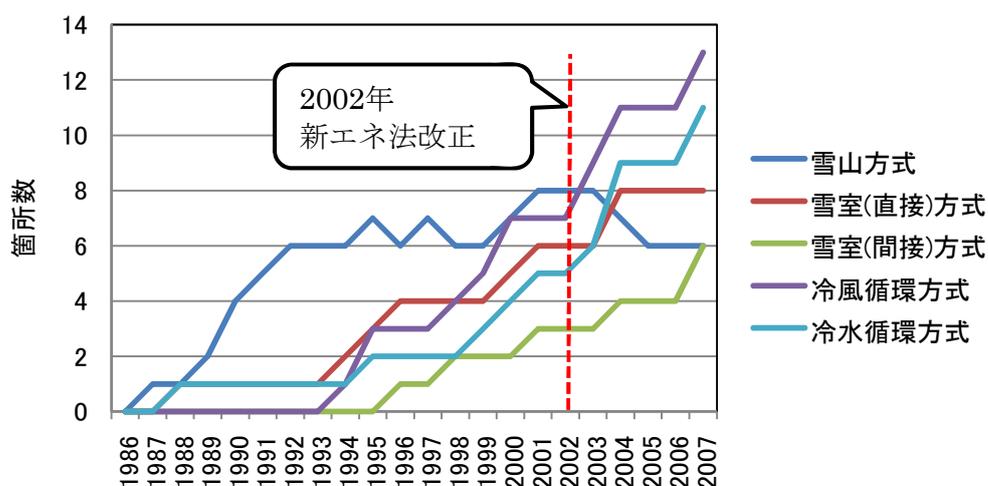


図5 冷蔵方式別の稼働箇所数の推移

3.3 現代的雪室の冷却温度と貯雪量

かつての伝統的雪室では、貯蔵した雪を雪室から取りだし他所でその雪の冷熱を利用することが普通であった。一方、現代的雪室では、貯蔵した雪自体は移動せずにそこから冷熱を取り出す方式が一般的である。このため、冷熱の利用方法によっては、雪の融解温度付近よりも高い温度で冷却することも可能となる。その冷却温度は、表2のように3段階に分けられる。

表2 冷却温度の分類と用途

冷却温度	用途
0～5℃	野菜，米，酒等の貯蔵
10～15℃	切り花の開花調整
25℃	室内冷房

野菜や、米、酒等を貯蔵する雪山方式や雪室（直接）方式では、伝統的雪室と同様に、冷却温度は0～5℃である。切り花の開花抑制などに使われる雪室（間接）方式では、貯蔵庫と雪との間のカーテンなどで冷気其自然対流を調節することで冷却温度を10～15℃にしている。建物や家屋の室内を冷房する冷風循環方式や冷水循環方式では、流量調整などによって冷却温度を25℃にしている。

これら冷却温度別に、現代的雪室の冷却を必要とする貯蔵庫（冷房室）の面積と貯雪庫の容積の関係を調べた結果を図6に示す。この図から、冷却温度が低ければ貯蔵庫（冷房室）の面積の割に雪を多く必要とし、逆に冷却温度が高ければ貯蔵庫（冷房室）の面積の割に雪の量は少なくなっている。また、冷却温度が10～15℃の雪室では貯蔵庫の面積の割に貯雪庫の容積が少ないが、これは切花の出荷までの使用となるので、冷却が必要な期間が9月位までと比較的短いことが関係している。

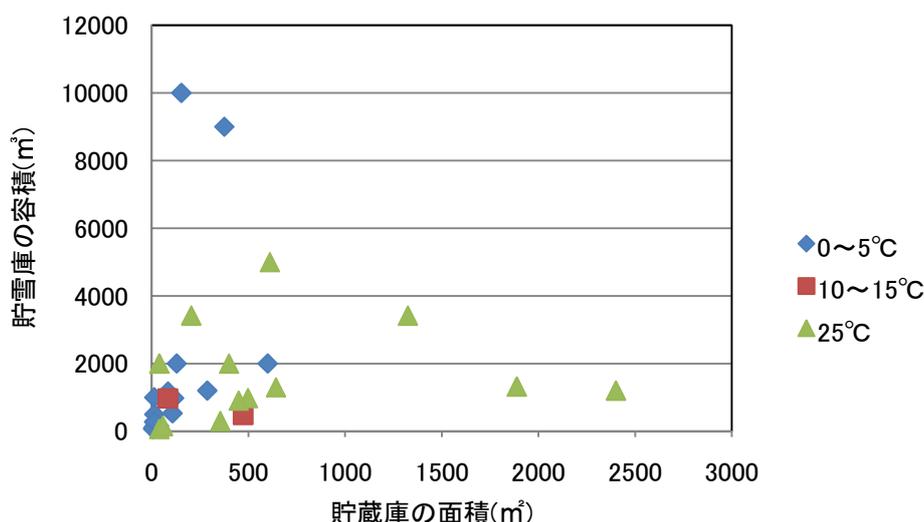


図6 冷却温度別の貯蔵庫面積と貯雪庫容積の関係

3.4 冷蔵方式別に見た現代的雪室の特徴

現代的な雪室は、冷蔵方式、冷却が必要な対象・期間、冷却温度によって、様々な構造やサイズがあり、統一的に特徴をまとめることは難しいが、少なくとも冷蔵方式別の長所と短所をあげることができる（表3）。

雪山方式では、冷蔵面積の割に雪を多く必要とすることから、通年で広い面積を冷蔵するには多量の雪を必要とする。これは、積み上げた雪の山が断熱シートなどを介して外気と接しているため、融解の抑制に体積効果が大きく効くからである。雪山以外の方式では、十分な断熱材を入れた冷蔵庫仕様の建物の中に雪を貯蔵するので、雪山方式と比較すると雪の量は少なくてすむ。ただし建物を作るためのコストはかかる。

雪山方式や雪室（直接）方式では、貯蔵庫が直接雪と接するため冷却温度は雪の融解温度付近の低温でしか利用できない。これに対して雪室（間接）方式、冷水循環方式、冷風循環方式では、冷熱を運ぶ媒体である空気や水の流量を調節することで雪の融解温度よりも高い温度で冷却することが可能である。また雪室（間接）方式や冷風循環方式では、雪で冷却された空気が貯蔵庫（冷房室）にも循環することから、雪による除塵、脱臭の効果が見込める。

表3 冷蔵方式別の現代的雪室の長所と短所

	長所	短所
雪山方式	建設（運用）コストが比較的安い	貯雪量が比較的多く必要 冷熱供給調節が困難
雪室（直接）方式	貯雪量が比較的少なくてよい	冷熱供給調節が困難
雪室（間接）方式	貯雪量が比較的少なくてよい 雪による除塵効果等が得られる	冷熱供給調節がやや困難
冷風循環方式	貯雪量が比較的少なくてよい 冷熱供給調節が可能 雪による除塵効果等が得られる	建設（運用）コストが比較的高い
冷水循環方式	貯雪量が比較的少なくてよい 冷熱供給調節が可能	建設（運用）コストが比較的高い

4. 使用が困難になった現代的雪室の問題点

新潟県内にある現代的雪室の調査を進める過程で、現在使用されていない雪室や、使用できなかったことのある雪室が存在することがわかった。2009年度時点での雪室の使用状況を、①使用されている、②使用されないときもある、③使用されていない、の3つに分類して設置年度別に示したのが図7である。

現在使用されていない雪室は、2000年以前の比較的初期に設置されており、その多くが構造や施設の不備により雪が予定した冷蔵期間いっぱいまで持たないため使用されなくなったことがわかった。一方、2000年以降に設置された雪室で使用されていない、または使用されないときもある雪室では、貯雪庫を満たすだけの雪の確保が困難なため使用されないときのあることがわかった。

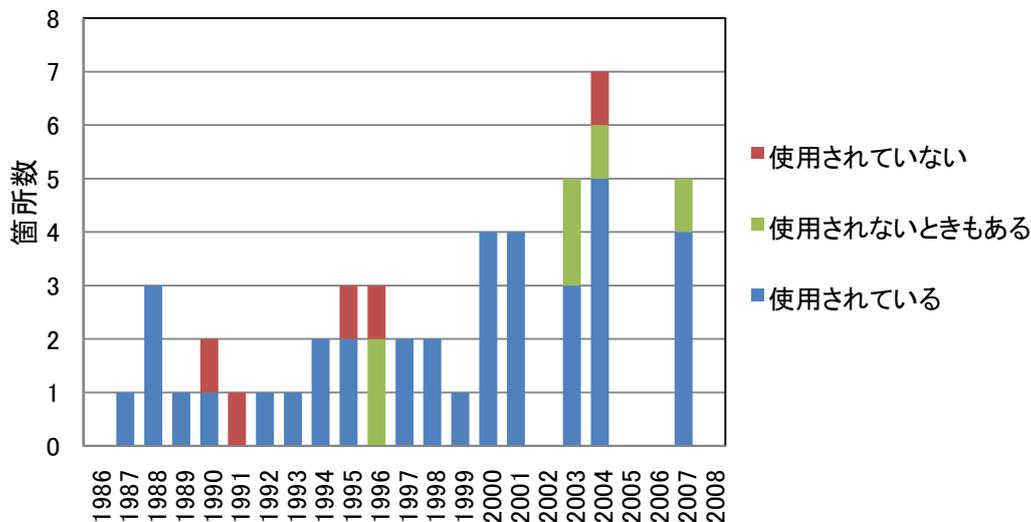


図7 使用状況別の設置年度の推移

4.1 雪室の構造における問題点

現代的雪室の実態調査から、比較的初期に設置された雪室に見られた構造の不備の代表的なものには次のようなものがあることがわかった。

- ・雪室の断熱が十分でないために雪の融け方が早い
- ・融雪水の排水口から冷気が逃げ出す、暖気が入り込む
- ・貯雪庫の容積が設置時から少ない

・形状や配置の関係から貯雪庫に雪を詰め込むのが困難

これらはすべて建物の中に雪を貯蔵する方式の雪室における問題点で、建設当初からの構造的な不備によるものであるため、それら構造的な不備の顕著な雪室は現在使用されていないものが多い。2000年以降に建設された雪室では、それらの問題点を設計時から技術的に改善した構造になっている。

一例を挙げれば、断熱性を向上させるため、貯雪庫の壁を二重にし外壁と内壁の間隙内に空気を対流させることによって、日射などで貯雪庫の外壁が暖まるのを防ぐ工夫を設計段階から取り入れている図8のような雪室がある。



図8 安塚中学校雪室の壁面（上越市）

4.2 雪室が継続的に使用できるための積雪条件

2000 年以降に設置された現代的雪室で、使用されていないまたは使用されないときもある雪室では、貯雪量を満たすだけの雪の確保が困難なことがその理由であることがわかった。そこで雪室の立地条件を、積雪深から検討してみた。

2009 年度時点での使用状況によって雪室を、①使用されている、②使用されないときもある、③使用されていない、の 3 つに分け、新潟県における累年平均最大積雪深分布の図に示したのが図 8 である。新潟県内の現代的雪室は、全て累年平均最大積雪深で 100cm 以上の積雪の多い地域に立地していることがわかる。

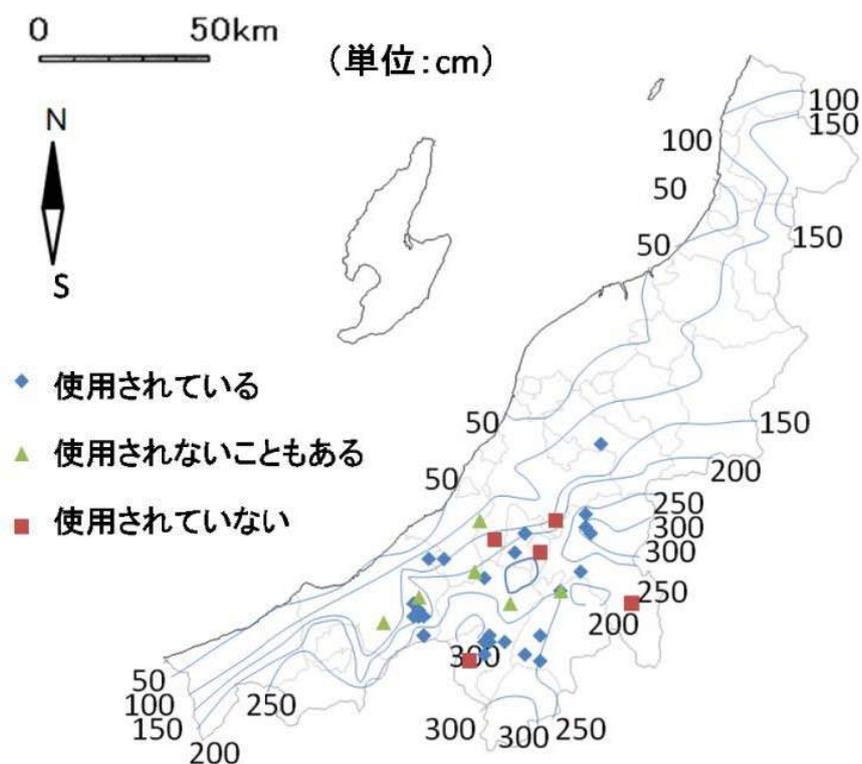


図 9 雪室の分布と累年平均最大積雪深

(累年平均最大積雪深は新潟県降積雪及び気温観測 30 年報を参考にして作成)

図 10 には、少雪年に十分な貯雪量を確保できないことがあった雪室を△印にし、それぞれの雪室の貯雪量と累年平均最大積雪深の関係を示した。ただし貯雪量を把握できなかった雪室は除外しているので図 9 の箇所数よりは少ない。それぞれの雪室の積雪深は、最も近い観測地点（新潟県，1999）の累年平均最大積雪深を用いた。

この図から、最大積雪深が 200cm 以上あるところでは、数千トンもの雪を貯蔵する雪山方式の雪室も成立しうるが、貯雪量が 500 トン未満と少なくとも最大積雪深が 100cm 程度だと、付近から集めた雪で貯雪量を満たすことが困難になる雪室が出てくることがわかる。

従って、累年平均最大積雪深が少なくとも 100cm 以上ある場所に立地していることが、雪室を継続的に使用するための最低条件と言える。

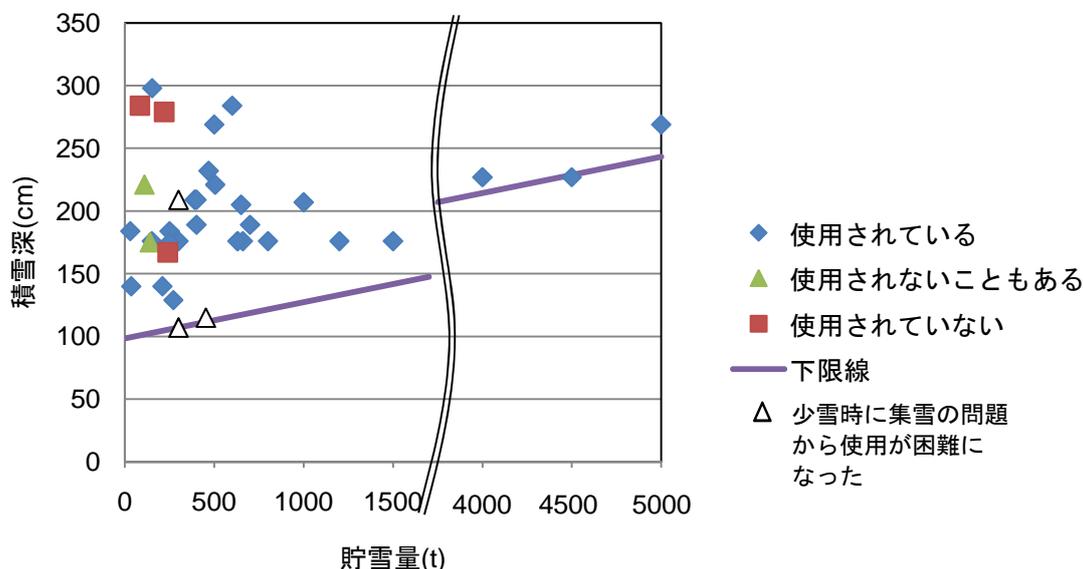


図 10 累年平均最大積雪深の関係

5. 新潟県における現代的雪室の実態調査のまとめ

新潟県内の現代的雪室は、1987 年以降 49 箇所建設され、2007 年時点では 45 箇所の雪室が稼働していることがわかった。冷蔵方式や規模は雪室によって異なり、酒類、農産物、農産加工品の貯蔵や、建物室内部屋の冷房等に使用され、冷却期間も 3 か月から通年までと様々であることがわかった。

初期の頃は伝統的雪室の流れを汲む雪山方式の現代的雪室が多く作られたが、近年、特に 2002 年の新エネ法の改正以降は、補助金制度を利用して断熱性に優れた冷蔵庫構造の雪室が建設され、しかも冷風や冷水を動力により循環させ、温度を（雪室によっては湿度も）調節して冷却ができる冷風循環方式や冷水循環方式の雪室の設置が増えたことがわかった。すなわち十分な貯雪量さえ確保できれば、最新の雪室では冷却するものに合わせた低温環境を通年でも維持・供給することが可能になっている。ただ、このような最新の雪室は建設コストがかかるため、補助金制度を利用することによって設置数が増加してきたとも言える。

一方、十分な貯雪量を確保できる現代的雪室の立地条件を、積雪深から調べて見たところ累年平均最大積雪深が少なくとも 100cm 以上ある所でないと、様々手立てを尽くして雪を集めない限り、雪室を継続的に運用することはできないことがわかった。実際、新潟県内の現代的な雪室は、降積雪の多い上中越地方の中山間地に集中しており、雪の少ない海岸部や下越地方では成り立ちえないことを示している。

6. 伝統的雪室を使った雪貯蔵の概要

現代的雪室の実態調査から、断熱性に優れた冷蔵庫構造の雪室であれば、貯えた雪での長期間の冷却は可能であるものの、建設コストが高く、建設によっても少なからず二酸化炭素は排出される。建設コストを極力抑えて雪貯蔵を行うやり方の一つとして、雪穴など伝統的雪室の跡を再生して使用する方法が考えられる。

新潟県では1960年代ころまで、各地に雪室があり、冬に集積した雪を藁や茅などで覆って夏場まで貯蔵し、冷熱源として利用していた。冷熱は、主に魚介など生鮮食料品の貯蔵や運搬に必要とされ、海岸部や平野部に雪室は多く作られた。それら雪室のうち、現在もまだ跡が残っている所もあるが、図9からわかるように、累年平均最大積雪深が100cm程度以下の場所に多く存在するため、現在では貯蔵する雪の確保が難しく、継続して再利用できる可能性は低いと考えられる。

そこで、現代的雪室が多く設置され、累年平均最大積雪深が200cm程度以上ある中越地方の中山間地域を探したところ、ほぼ作られた当時の形態を留めている雪室の跡が、南魚沼市(旧六日町)麓地区に残っていることがわかった(以後「麓雪室」とする、図11)。



図11 南魚沼市麓地区の雪室の位置

明治以降、夏秋蚕の蚕種製造のため雪山方式の雪囲冷蔵庫が新潟県内各地に設置されたが、この「麓雪室」は、ほぼ使用当時のまま石積みの穴壁が残っている数少ない雪室の一つである。麓雪室は、蚕種貯蔵業を営んでいた地元の「富田屋」が、養蚕が盛んに行われていた大正年代に作成したもので、山麓の小高い地形を利用して穴を掘り、穴壁を石積みで土留めした雪穴方式の雪室である。雪穴の平面形は、上面で約11m×13m、下底で約7m×10mの角丸長方形で、深さは約3.5mある(図2)。

この穴の西角には二重扉の付いたコンクリート製トンネルが設けられ、穴内に建てられた蚕種貯蔵用小屋(雪囲冷蔵庫)への出入口となっていた。設置当時は、穴に雪を積み上げ藁で覆い、その上に茅葺きの四角錐状屋根をかけて雪を貯蔵したと謂われている。跡がほぼ昔のまま現存する貴重なこの雪室を再生して雪貯蔵することができれば、地域文化としての伝統的な雪室を広く再認識することになり、その積極的利用は地域の活性化にもつながると考えられる。そこで、麓雪室において、断熱シートなどの新しい技術も取り入れ、経費を極力抑えてかけずに雪貯蔵ができるかどうかの試みを実施することとした。

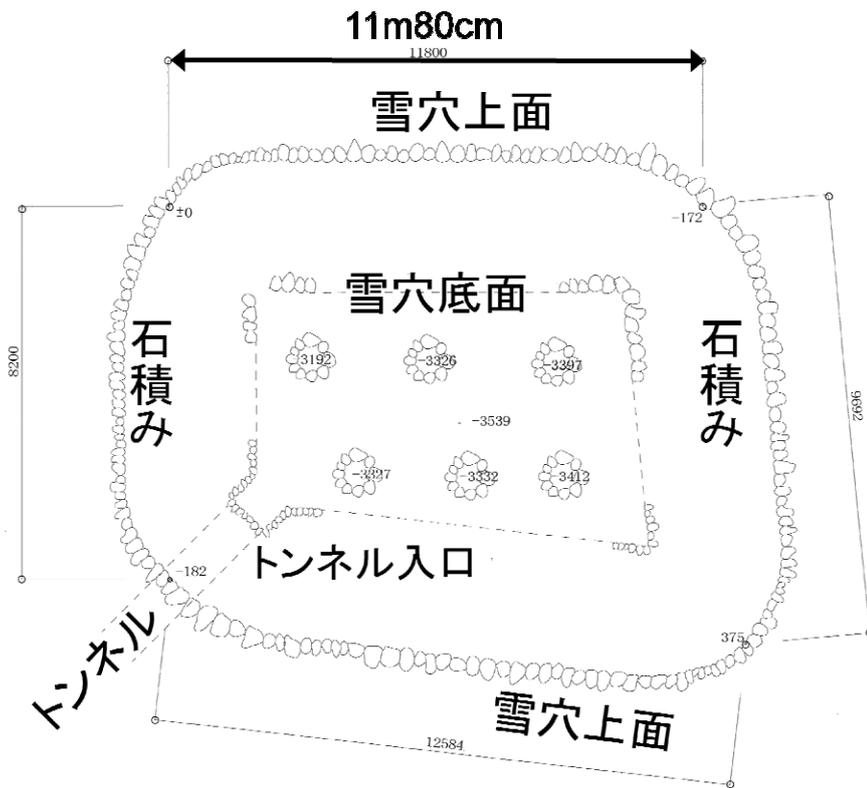


図 12 麓雪室の平面図

7. 雪室の石積み補修

麓雪室は、2000年代入ってからでも穴内の壁面がほぼ使用していた時に近い石積み状態にあった。ところが、2004年10月に発生した中越大震災で、南東側壁面を主として石積みの一部が崩落してしまった(図13)。雪室として再利用するには、この石積みの崩落をまず補修する必要があった。そこで最初にTC研究助成金の一部によって崩れた石垣の補修を行った(図14)。



図 13 南東側壁面の地震による崩落



図 14 石積み補修後の南東側壁面

補修工事により石積みはほぼ元の状態に戻ったが、その後、長雨時には雪穴の底に 15～20cm 程度、暫時湛水することがわかった。これは、雪室の上流で地下に浸透した沢水の経路が中越大震災の影響で変化し、穴の内に流れ込みやすくなったことと、元から雪室にあった排水管が長年かけての土砂の堆積や石積み崩落の影響などで詰まったためと考えられる。この湛水を全面的に解消するには、上流側の遮水や排水管路の再敷設など、大規模な土木工事を施工する必要があると判断された。

しかし、この土木工事を行うには多大な経費が必要となることから、今回は暫定的に南東側の石積み補修壁面の下に水溜用のプラスチック容器を埋設し、その中にリミットスイッチ付の水中ポンプを投入して水が溜まるごとに排水し、湛水状態を緩和するように工夫した（図 15）。また水中ポンプで排水しても雪穴底面の一部には水溜まりができるため、穴の底面に厚さ 12mm のコンパネを並べて敷き、さらにその上にブルーシートを敷いて、貯蔵雪の下部が湛水と接触するのを避けるように工夫した（図 16）。



図 15 排水用水中ポンプの設置



図 16 敷設したコンパネとブルーシート

8. 雪室への雪貯蔵

湛水対策を施した後、2010年3月8～9日にかけて、穴への雪詰めを重機で行った。杉林付近の畑地の積雪をバックホーで運び込み、穴に詰め込んでさらに圧雪した。穴に投入し積み上げた雪の量は、約 490 m³ で、大半がぬれざらめ雪であった。積み上げた雪の密度は平均で 590 kg/cm³ と測定されたので、貯蔵雪の初期総重量は、約 290 ton である。

石積み天端から上に雪を台形状に積み上げ、その上面を建築用遮熱材（エアキャップ層の上下をアルミシートで挟んだ厚さ 8 mm の遮熱シート）で覆い、その上にブルーシートを被せ、上面における断熱と雨水の遮断を行った（図 17）。一方、石積みの壁面には断熱は施していないが、西角のトンネル出入口は、発泡プラスチック保温材で二重に塞いで断熱した。

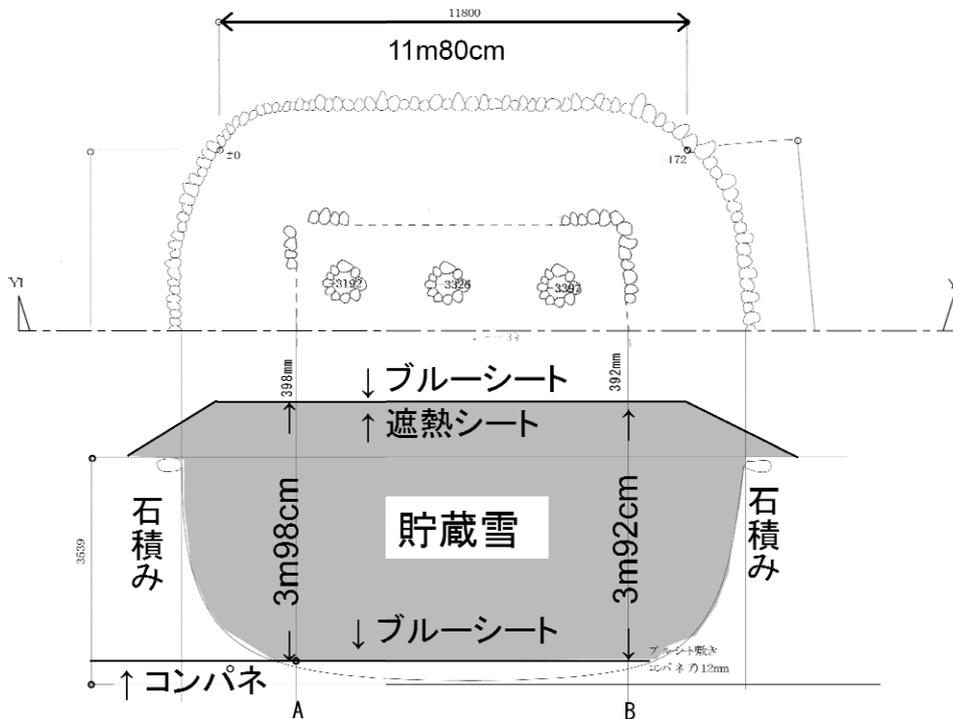


図 17 雪詰め後の雪室断面図

9. 雪貯蔵における問題点と今後の展開

2010年3月10日以降、雪室の中央部の2箇所、貯蔵した雪を垂直に貫いて立てた測量用スタッフによって、雪面低下量を測定している。杉林の中の地上1.5m高さに温湿度データロガーを設置して気温と湿度を測定している。また、雪面と遮熱シート、遮熱シートとブルーシートの間の空間に、それぞれ温度データロガーを設置し上面から雪面への熱の伝わり方を観測している。また杉の木の約3mの高さからインターバルカメラによって、雪室上面を俯瞰する画像を間欠的に撮影している。

3月30日現在、雪室下底に設置した水中ポンプからは、日中の平均で約0.9 ton/hourの水が出ているので、貯蔵雪の下底でも融雪が進んでいる可能性がある。また融雪によって貯蔵雪と石積み壁面の間が凹み、雨水などが湛水して融解が進行している箇所が部分的に出来ている。

このように雪貯蔵を進めるにあたって貯蔵初期から問題点が出てきているが、それらを踏まえた上で上記の測定と定期的な現地観測は消雪まで続ける予定である。今後の追跡調査によって、伝統的な雪室を再利用する際の、雪室の構造、貯蔵のための被覆方法と材料、雨水の遮蔽、融雪水の排出などにおける問題点が洗い出せると考える。これら問題点の解消策、緩和策を検討することによって雪室技術を高度化し、新潟県内に残る他の伝統的雪室の再利用に適用したいと考えている。

参考文献

- ・池上佳芳里, 1999: 北陸地方における雪室の分布とその衰退. 地理科学, 54 - 2, 126-137.
- ・山口健太郎・和泉薫・河島克久, 2008: 北信越地方における過去の氷雪貯蔵所(雪室・氷室) 数の変遷と分布. 雪氷北信越, 28号, 25.
- ・媚山政良, 2003: 雪資源の石油エネルギー換算と CO₂ 低減効果. 室蘭工業大学紀要, 53号, 3-5.
- ・井上聡・横山宏太郎, 1988: 地球環境変化時における降積雪の変動予測, 雪氷, 60-5, 367-378.
- ・環境省ホームページ: <http://www.env.go.jp/>
- ・資源エネルギー庁ホームページ: <http://www.enecho.meti.go.jp/>
- ・新潟県, 1999: 新潟県降積雪及び気温観測 30 年報, 407pp.
- ・北海道経済産業局, 2008: 雪氷冷熱エネルギー活用事例集 4, 66 pp.
- ・新潟県, 2008: 新潟県の雪対策, 151-153.
- ・佐渡市, 2006: 佐渡市地域新エネルギービジョン～自然エネルギーを 100%活かした島を目指して～, 資料編, 102-103.
- ・財団法人雪だるま財団: 安塚における雪冷房の取り組み
- ・上越市: 雪だるま高原キューピットバレイスキー場雪冷房施設
- ・新潟県, 2009: 雪冷熱エネルギー住宅建築のためのガイドライン, 29pp.

雪センターTC 研究助成制度

研究成果報告書

「河川水熱を利用した橋梁凍結防止舗装

(潜り通水舗装)に関する基礎研究」

福井大学大学院工学研究科 教授

福 原 輝 幸

1. 研究の目的および方針

和田山八鹿道路に架かる円山川橋は、全長が長く（571m）、縦断勾配がきつい（3%以上）といったように道路条件が厳しい。また、和田山JCTと隣接する主要地点に位置する。そのため、円山川橋は、融雪システムの設置が必要とされる区間の一つである。円山川の水温は、冬期においても比較的に高い（約7℃）ことが分かっている。このような場合は散水消雪が有効な手段と考えられるが、当該区間は排水性舗装であるために、散水が内部に浸透し、密粒度舗装と同じような消雪能力を発揮できるかが不明である。また、散水停止後の路面凍結の危険も懸念される。とは言え、無散水融雪を施工するには経済的に難しい。そこで本研究では、散水消雪に代わる排水性舗装に適した新しい融雪システムについて検討を行う。

本研究で提案する新しい融雪システムの方針は、

1. 道路上には水を流さない（内部を通水させる）
 2. 河川水のような低温度でも融雪できるだけの通水能力を確保する
- である。

本研究では、この方針に合った融雪システムを潜り通水融雪舗装と呼び、図1に示すように2方式を提案する。一つは、排水性舗装（透水層）と密粒度アスファルト舗装（不透水層）間に通水層を設けるタイプ（透水-不透水層間通水型、同図（a））、もう一つは、排水性舗装とコンクリートの2層構造でコンクリートに通水孔を開けるタイプ（コンクリート通水孔型、同図（b））である。

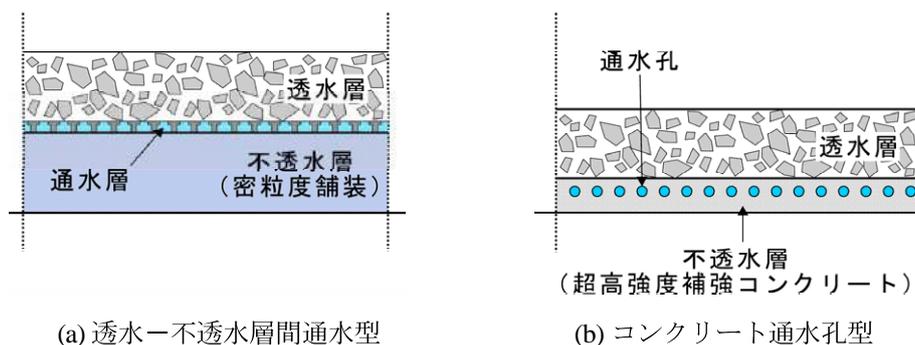


図1 潜り通水融雪舗装の概要図

2. 実験の内容

2.1 舗装の熱物性測定

(1) 比熱

図1は、熱量方式含水計による舗装の比熱測定概念図である。舗装供試体と容器内に投入する前後で、舗装供試体と水の内部エネルギー変化量が等しいことから、舗装の比熱 c_p (J/gK) は式(1)より得られる。

$$(cM)_w(T_w - T_{wf}) = (cM)_p(T_p - T_{pf}) \quad (1)$$

ここに、 c_w ：水の比熱 (J/gK)、 M_w ：水の質量 (g)、 $T_w - T_{wf}$ ：舗装供試体投入前後の水の温度差 (°C)、 M_p ：舗装供試体の質量 (g)、 $T_p - T_{pf}$ ：舗装供試体の変化温度 (°C) である。なお、精度検証のために、比熱 0.91 J/gK の純アルミニウムの比熱も測定した。

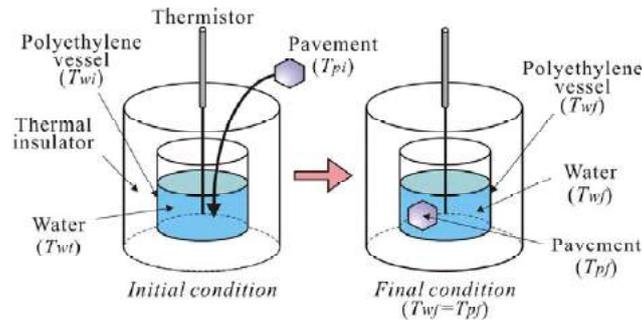


図2 熱量方式含水計による舗装の比熱測定概念

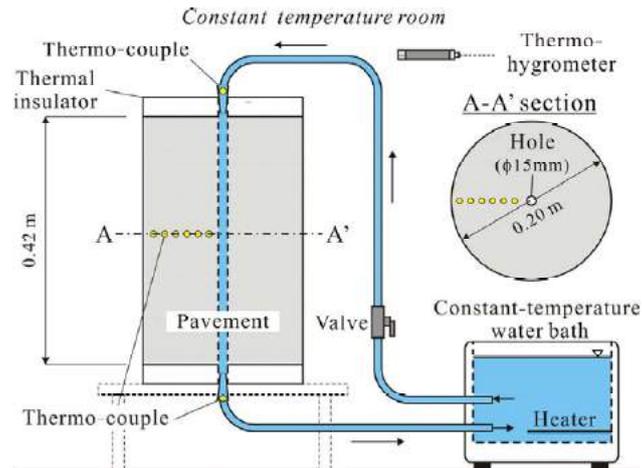


図3 伝熱実験装置の概要

(2) 熱伝導率

図3は、舗装の熱伝導率を求めるために行った伝熱実験装置の概要である。本装置は、中央に通水孔（直径15mm）を有する舗装と氷水の入ったタンクからなり、舗装内部には同図のように熱電対が配置される。実験では、15°C一様にした舗装に0°Cの水を循環させる。これにより、非常常および定常温度状態における $T_p(r)$ が得られる。なお、鉛直方向の熱移動を抑制するために、舗装供試体の上下面はスタイロフォーム（厚さ50mm）で断熱した。

λ_p は、この伝熱実験から得られる非常常温度状態の半径（ r ）方向の T_p 分布の時間変化と有限差分法による解析解が適合するように決定する。

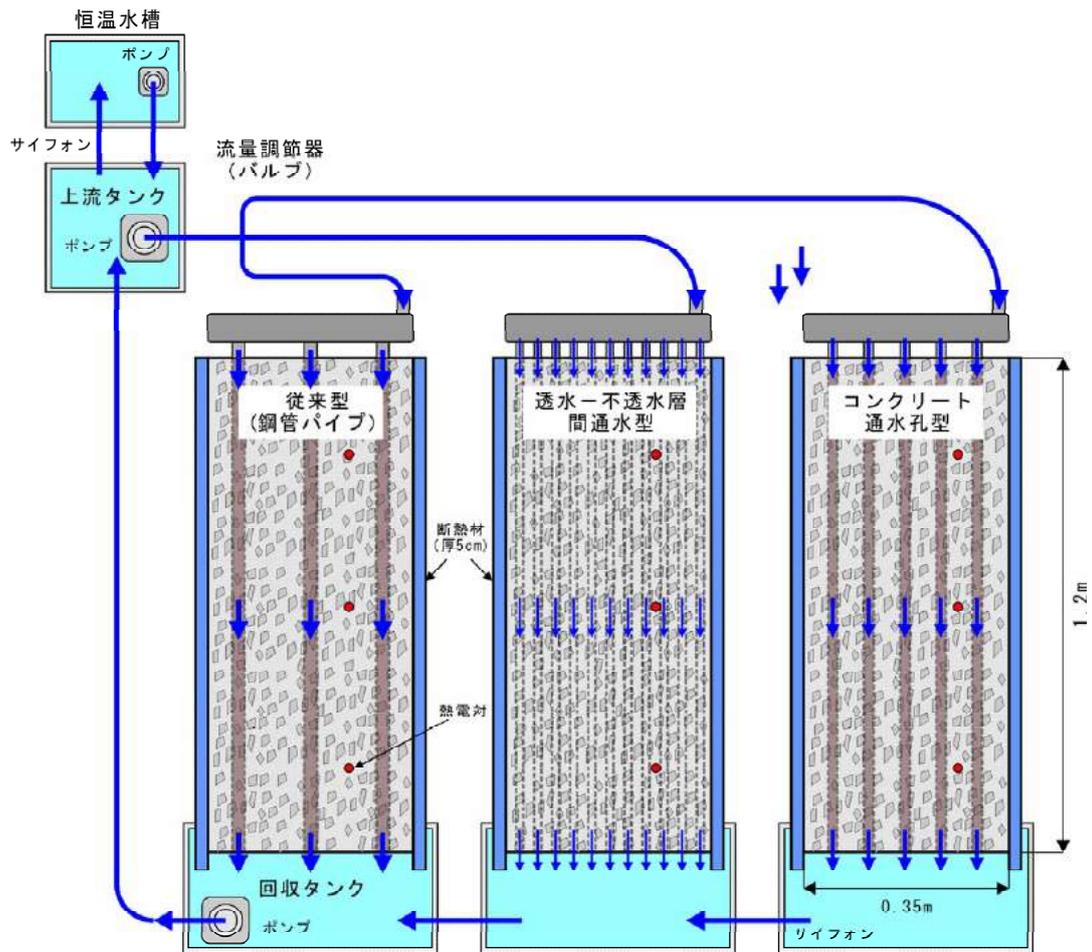
2.2 透水-不透水層間通水型の伝熱実験

は、透水-不透水層間通水型潜り通水融雪舗装の実験装置の概要を示す。本実験装置は、通水舗装、上流タンク、下流タンク、恒温水槽および循環ポンプから構成される。

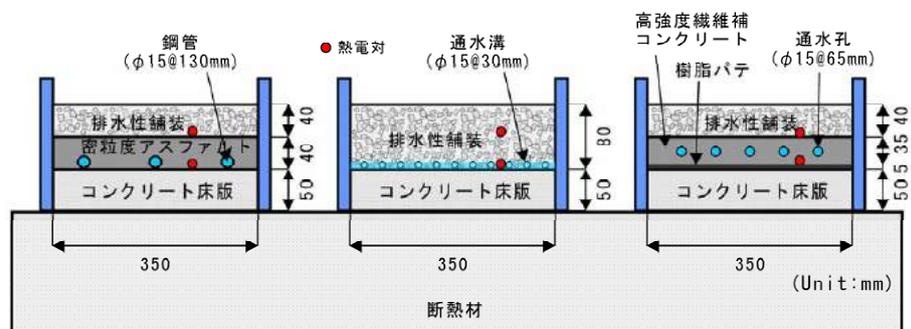
まず、潜り通水舗装について述べる。図中右の断面1に示すように透水-不透水層間通水型は、断熱材で覆われた水路（アクリル製）に等間隔で角材（幅9×高9mm）を設置し、その上に舗装（長1.2×幅0.12×高0.05m）を載せて作られる。舗装は、ポラスアスファルト混合物であり、密度は1984kg/m³、空隙率20%である。

次に、流体循環装置について述べる。循環ポンプの入った下流タンクの水温は、恒温水槽で約10°Cに制御される。約10°Cの熱流体は、循環ポンプによって潜り通水舗装の上流タンクに送られる。その後、熱流体は上流タンクから自然流下し、舗装下の通水路を通る間に舗装を暖めて、下流タンクに戻る。

実験は、舗装温度が全体に亘り0°C一様状態になったのを確認した後、素早く熱流体を通水路に流し、



(a) 平面図



(b) 断面図

図5 潜り通水舗装と従来無散水融雪舗装の比較実験

(3) 融雪比較実験

以下に、融雪比較実験の手順を述べる。

1. 室内温度を -5°C に設定し、舗装温度が -5°C 一様になるまで放置する。
2. 舗装の上に約2cmになるように乾燥雪を載せる。
3. 恒温水槽で 15°C 温度制御した規定流量の水を上流タンクに送る。
4. 積雪が無くなると実験を終了する。

実験条件は、気温 -5°C 、循環流体温度 15°C 、循環流量 $9.6\text{l}/\text{min}$ とした。

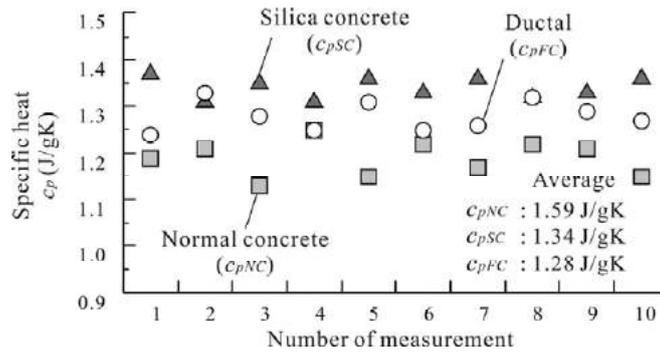


図6 比熱の測定結果

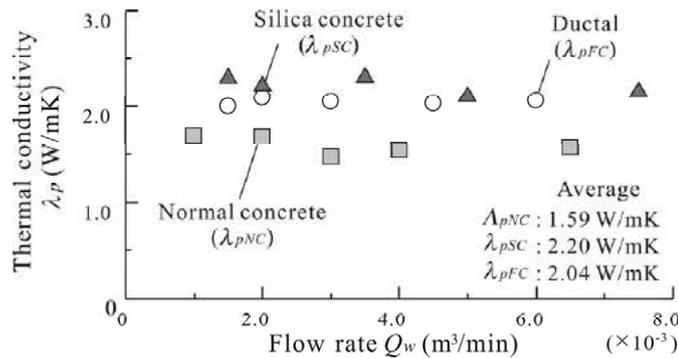


図7 熱伝導率の評価結果

3. 実験の結果

3.1 舗装の熱物性測定

以下に記載する添え字 *NC*, *SC* および *FC* は、普通コンクリート、珪石コンクリートおよび高強度繊維補強コンクリート(ダクトル)をそれぞれ意味する。

(1) 比熱

図6は c_p の測定結果を示す。 c_{pNC} , c_{pSC} および c_{pFC} は、それぞれ1.13~1.25 J/gK, 1.31~1.37 J/gKおよび1.24~1.33 J/gKの範囲にあり、平均値はそれぞれ1.19, 1.34および1.28 J/gKであった。なお、アルミニウムの比熱は0.92から0.94の範囲で、本装置の誤差は3%以内であった。

(2) 熱伝導率

図7は λ_p の評価結果である。 λ_{pNC} , λ_{pSC} および λ_{pFC} は、それぞれ1.53~1.69 W/mK, 2.08~2.31 W/mKおよび1.96~2.07 W/mKの範囲にあり、平均値はそれぞれ1.59, 2.20および2.04 W/mKであった。参考文献(土木学会:超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案),日本コンクリート工学協会, p.20, 2005.)に記載されている λ_{pFC} は2.31 W/mKであり、本結果と概ね一致した。

3.2 透水-不透水層間通水型の伝熱実験

図8に伝熱実験結果の一部を示す。同図(a), (b)および(c)は、断面2, 3および4における舗装鉛直温度分布の時間変化である。同図には、実線で伝熱解析モデルによる計算値を併せて示す。

初期の舗装温度 T_p はいずれの断面も0°Cで鉛直方向に一様である。断面2に注目する。通水開始以後、循環流体温度 T_w は約9.4°Cで一定である。 $t=10\text{min}$ での深さ $z=40\text{mm}$ の T_p は、約6.0°Cまで急激に上昇する。それに追従するように、内部および表層の T_p も上昇する。時間の経過と共に舗装内部の温度差は小さくなり、 $t=1\text{h}$ では、舗装上部の $z=10\text{mm}$ 層で約7.7°C、舗装下部の $z=40\text{mm}$ で約8.7°Cとなった。

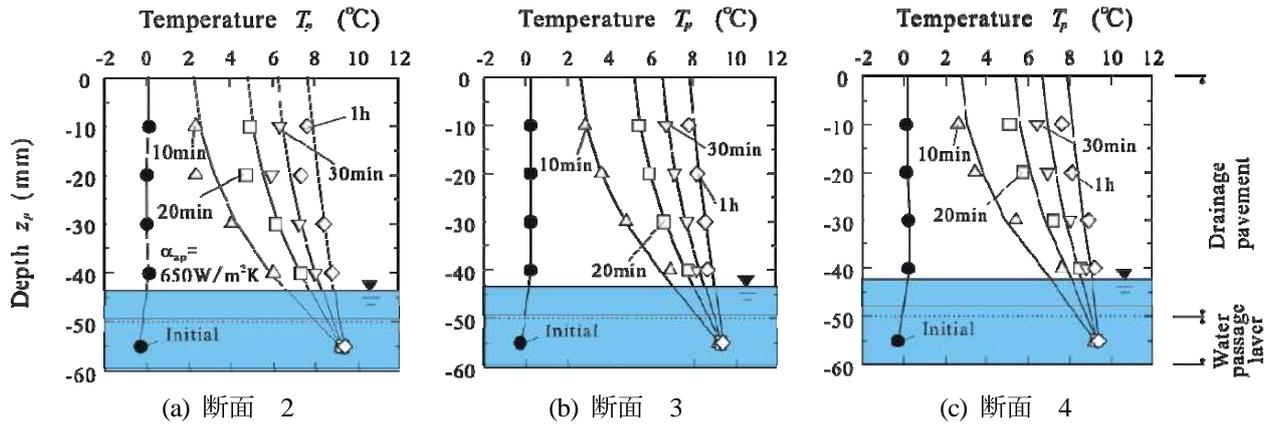


図8 鉛直温度分布の時間変化

次に断面3および4を見ると、 T_p の変化は断面2の結果と酷似している。これは潜り通水舗装供試体のコントロールボリュームに対して、循環流量が十分に大きかったためと考えられる。

図8に示すように計算値と実験値は良好に一致した。

3.3 潜り通水舗装と従来無散水融雪舗装の比較実験

(1) 伝熱比較実験

図9は3つのタイプの舗装表面温度の時間変化を示す。実験開始後の舗装表面温度の上昇率は、コンクリート通水孔型、透水—不透水層間通水型、従来型の順で大きい。また、2時間経過後の温度平衡状態においても、前者が約 10°C 、中者が約 8.5°C 、後者が約 7°C であった。

図10はサーモグラフィで撮影した熱画像を示す。同図左はコンクリート通水孔型、中央は透水—不透水層間通水型、右は従来型である。初期の温度は同じである。上述したように、コンクリート通水孔型が最も早く温度上昇し、最終的(2時間後)な温度も高い。また、従来型では鋼管パイプとその中間で温度上昇にむらができていたことが認められるが、コンクリート通水孔型ではほぼ一様に温度上昇していることが知れる。

(2) 融雪比較実験

図11は、各舗装の積雪厚の時間変化を示す。同図に示すように、透水—不透水層間通水型およびコンクリート通水孔型の方が従来型より融雪速度が速いことが分かる。融雪の状況を図12に示す。

4. 結論

本研究では、新たな無散水融雪システムとして、コンクリート通水孔型および透水—不透水層間通水型の潜り通水融雪舗装を開発し、①潜り通水融雪舗装の熱物性値の測定と②潜り通水融雪舗装の伝熱特性および融雪性能を調べた。また、伝熱解析モデルを構築し、透水—不透水層間通水型の伝熱実験の測定値と計算値の比較を行い、モデルの妥当性を検証した。

以下に、本研究で得られた知見を列挙する。

- (1) 透水—不透水層間通水型は従来の地中熱無散水融雪に対して約3倍の通水面積を有する。水深が浅く、舗装と流体が接しないと、流体から舗装への伝熱能力は大幅に落ちる。
- (2) 乾燥伝熱実験の結果より、舗装表面の温度上昇率は従来型、透水—不透水層間通水型、コンクリート通水孔型に大きくなる。
- (3) 融雪速度はコンクリート通水孔型と透水—不透水層間通水型は若干前者が早かった。従来型と比較すれば、両型の潜り通水融雪は約2倍の速さで融雪した。

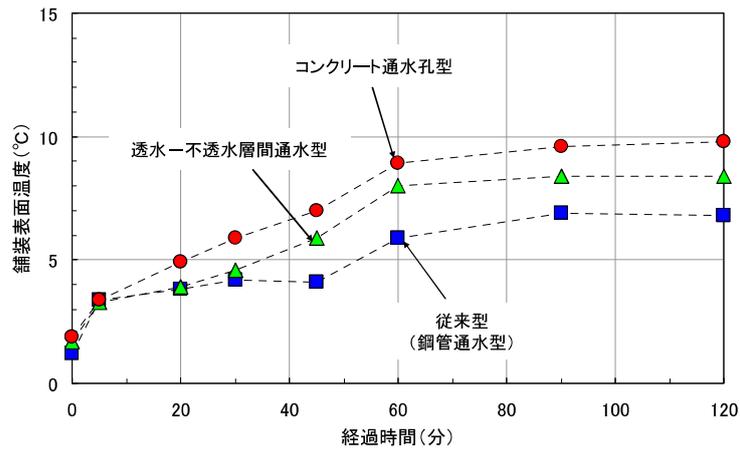


図9 舗装表面温度の時間変化

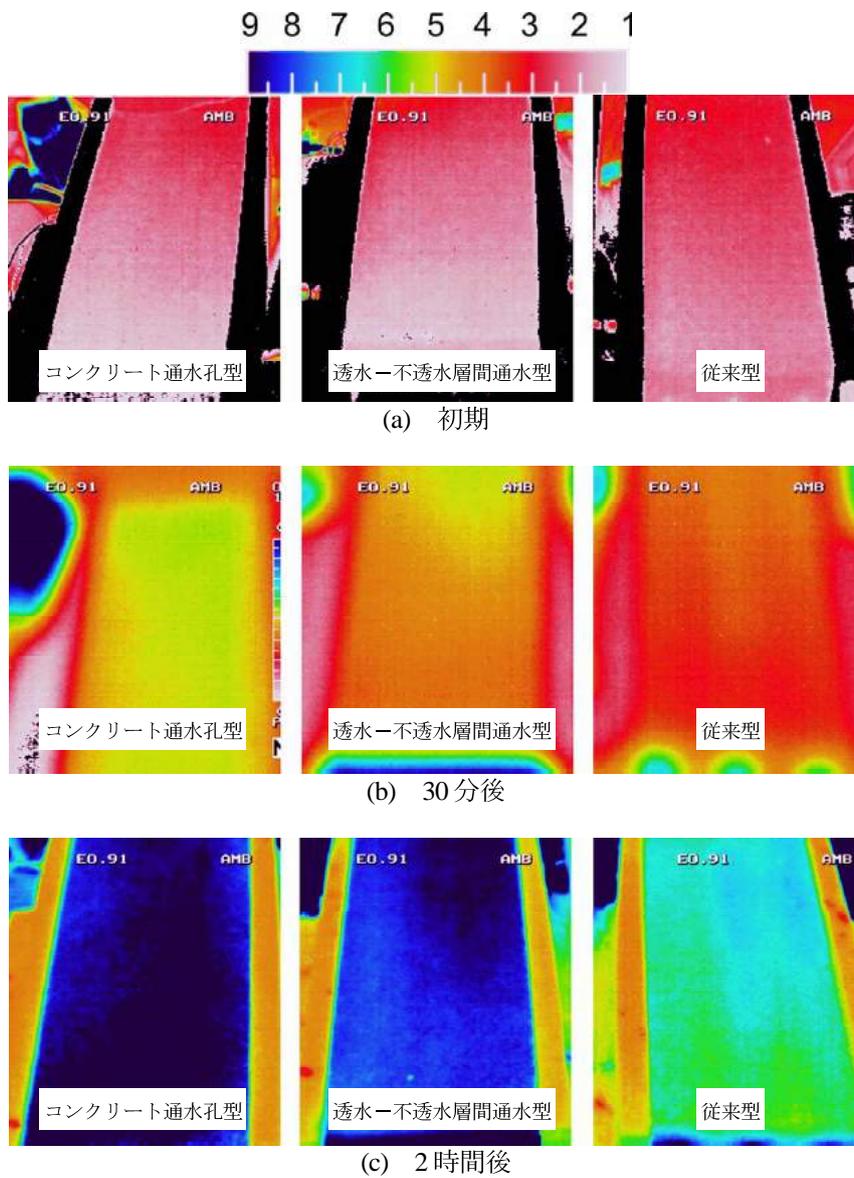


図10 サーモグラフィーによる舗装表面温度の時間変化

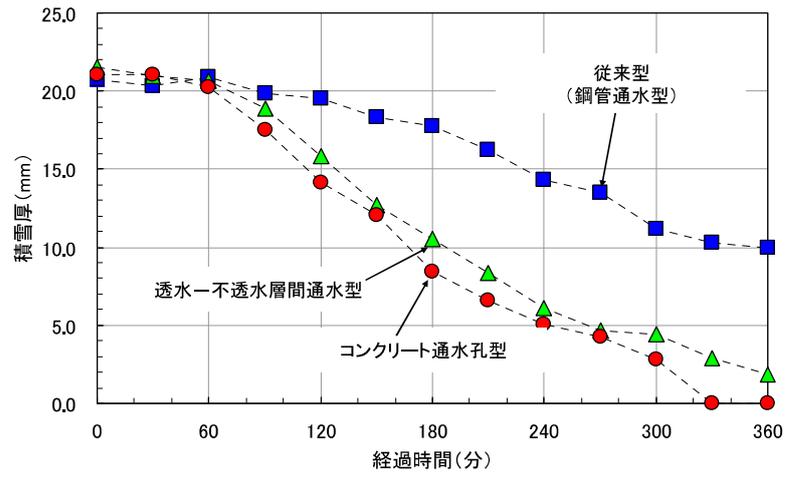


図 11 積雪厚の時間変化

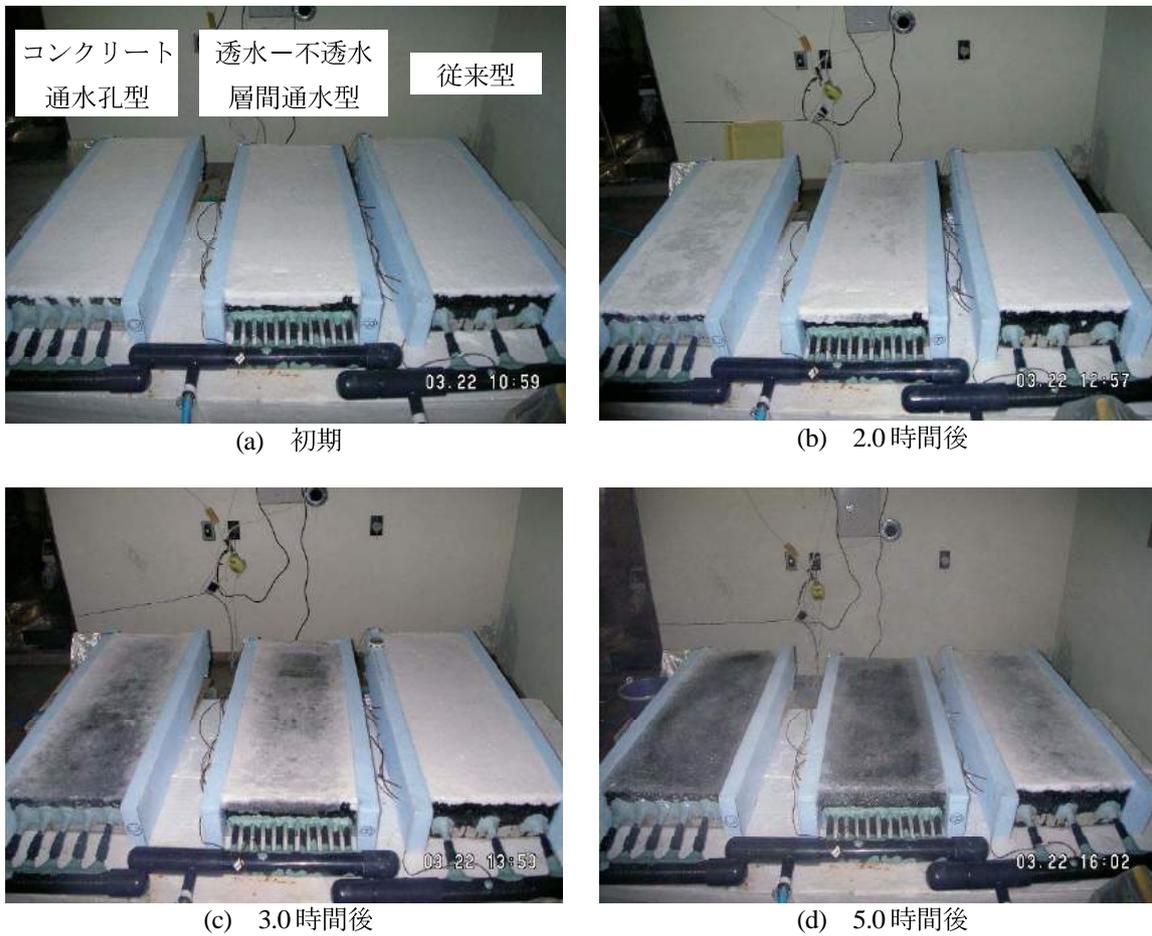


図 12 雪氷状態の時間変化

周期加熱による着雪除去技術

Cyclic Heating method for snow accretion removal

上村 靖司**1・菊入 正浩*2・鈴木 善和*2

Seiji Kamimura, Masahiro Kikuiri and Yoshikazu Suzuki

SYNOPSIS

The aim of this study is to develop a new technology to remove accreted snow safely and less expensive. Cyclic heating method, a combination process of heating and cooling, is to form thin freezing layer on contact surface of the accreted snow, and to make it easier to slip down at the final heating process. To compare with the melting method, there are some advantages such as relatively low energy consumption and no icicles formation by refreezing of melt-water.

The simulated snow of 40 mm square area put on an aluminum plate with given depth of 15, 20 and 25 mm. The Cyclic heating process is composed of heating (2, 3 or 4 second), active cooling (30 second) and natural cooling (90 second). The active heating and cooling of the plate is done by a Peltier device set on opposite side of the plate. First experiment to judge accreted snow slipping-down showed successful conditions of number of cycle, heating time and depth of accreted snow. Second experiment of freezing layer observation showed accreted depth of 20 mm or more and 90 % or more freezing area ratio bring slipping down of accreted snow.

Keywords : Snow accretion, Cyclic heating, Freezing layer, Snow slipping down

1. はじめに

電線、車両、建築物など、積雪寒冷地における屋外構造物や移動体には、積もったり付着したりした雪が、荷重として悪影響を及ぼしたり予期せぬ落下によって種々の被害を引き起こすリスクがある。着雪や冠雪と呼ばれるこれらの現象は、古くから課題として認識されているが、決め手となる技術がなく、本質的な解決には至っていない¹⁾。

道路に限ってみても、情報表示板・信号・橋梁などに形成された冠雪の落下、看板・標識面への着雪によるドライバーへの情報提供阻害など、解決すべき課題が残されている。

その対策として、表面の化学的処理による難着雪対策、加熱による融雪除去対策、形状の工夫などの技術開発が進められてきた^{1), 2), 3), 4)}。しかしコスト、耐久性の問題、適用可能な対象が制約されるなどの

理由によって、結局は人力による除去に頼っているのが現状である。

本論文では、難着雪ではなく、支障のない程度の量のうちに滑落を促進する技術として「周期加熱」による着雪除去方法について提案し、その有効性と除去可能な条件を実験的に検討した結果を報告する。

2. 原理

着雪を防ぎたい面（着雪面と呼ぶ）を加熱して雪を融かす熱的処理法は、十分な熱量さえ与えれば着雪の除去効果は高い。しかし、完全に着雪面を露出（全量融解）させるように加熱し続けるには大量の熱量を投入しなくてはならず、そのためのランニングコストが高価になる。また、融解水がしたり落ちる着雪面下端に氷柱を形成することがあり、これが成長すると元の着雪以上に危険な物体が不安定な状態でぶら下がることになる。これが、下を通る自

*1 長岡技術科学大学 機械系

*2 長岡技術科学大学 大学院 機械創造工学専攻

動車・歩行者、建築物等へのリスク源となる。

本論文で提案する周期加熱の原理を図 1 に示す。ある面上に雪が付着した状態で着雪面を加熱すると、着雪の接触部分が一部融解（部分融解）し、融解水は残った雪（図中左方向）の粒の間へと吸収される。そのまま加熱し続けると、雪の層が融解水を保持しきれなくなった時点で融解水がしたたり落ちるので、そうならないうちに、加熱を止めて冷却をする。着雪面に接する部分の雪の層は吸水しているため、雪粒の間の水が凍結し、氷結層が形成される。そこから再度加熱すると、氷結面によって融解水の吸収が阻害され、氷結面と着雪面の間に水膜が形成されて、着雪が滑落する。

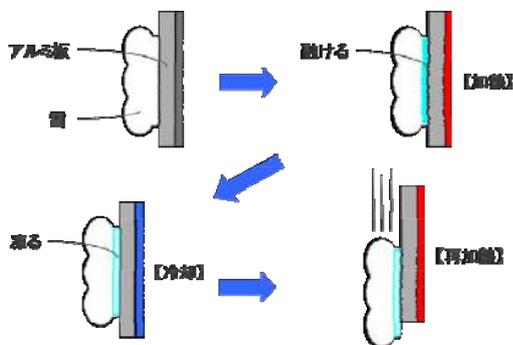


図 1 周期加熱による着雪除去の原理

周期加熱の長所は、全量を融解せずに表面のごく一部のみの融解であるため消費熱量を小さくできること、融解水の浸み出しがないため氷柱が形成されないことである。さらに全体が氷塊になるのではなく、薄い氷結層を除けば雪のままなので、仮に落下して何かに衝突しても衝撃力が小さく、被害を起こしにくいことも大きなメリットとなる。

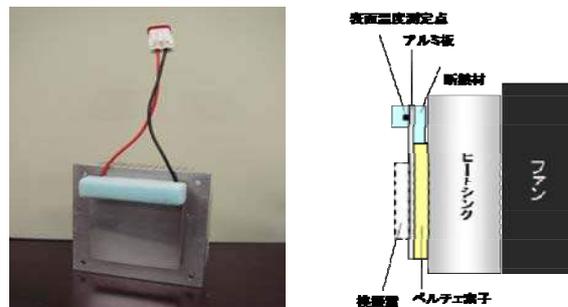
3. 実験装置および実験方法

3.1 模擬着雪と実験装置

実験では、微細に砕いた氷を 1 mm のふるいにより 1mm 以下の粒径に揃えて模擬雪とした。これをアルミ板表面に 40×40mm の大きさで所定厚さになるようにのせ模擬着雪とした。模擬着雪厚さは、15, 20, 25mm の 3 通りとした。そのときの模擬着雪質量は、平均密度を 0.2 g/m³ とすると、それぞれ 4.9g, 6.2g, 8.6g となる。

実験装置の外観及び概略図を図 2 に示す。ペルチ

ェ素子 (62×62mm) ・ヒートシンク・ファンのユニットにアルミ板 (76×68×0.6mm) を貼り付け、ペルチェ素子の反対側の面を着雪面とした。ペルチェ素子を用いたのは、電流方向の切り替えによって加熱も冷却もできるからである。



(a) 外観 (b) 機器の構成

図 2 装置構成

3.2 実験方法

模擬着雪が滑落する条件を見いだすために、「滑雪成否判定実験」と「氷結部の観察実験」を行った。周期加熱の加熱-冷却サイクルのフローチャートを図 3 に示す。加熱時間は 2, 3, 4s の 3 通りとし、その後冷却時間 30s, 雰囲気温度 (-5 °C) に放置 90s を 1 サイクル (以降 cyc と表記) とした。これを 1 ~ 5cyc について実験する。加熱・冷却時には電圧 12.2 V, 電流 10.7 A をペルチェ素子に印加した。

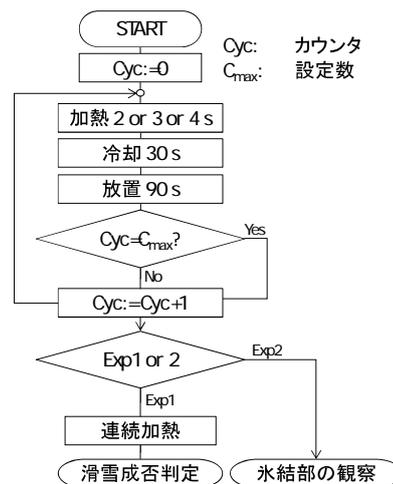


図 3 実験のフローチャート

「滑雪成否判定実験」では所定サイクルの周期加熱終了後に連続加熱を行い、そこで成功・失敗を判定する。この場合の成功とは融解水がしみでることなく滑雪した場合であり、失敗とは連続加熱中に模擬着雪が滑落せずに融解水がしみ出た場合である。

「氷結部の観察実験」では、所定サイクルの周期加熱終了後、連続加熱せずに実験を終了する。氷結部分以外の雪をハケではらい落とし、氷結部の厚さ、質量、氷結面積率を測定する。氷結部厚さはノギスで、氷結部質量は電子天秤で測定する。氷結部面積率は、氷結部を鉛直上方からデジタルカメラで撮影し、画像処理ソフトを用いて2値化し(図4)、全ピクセル数に対する白色ピクセル数の割合として算出する。

3. 実験結果

3.1 滑雪成否判定実験結果

表1に滑雪成否判定実験の結果を示す。表中の○と×はそれぞれ滑雪成功、失敗を、数字は成否それぞれの回数を示す。

実験結果より、着雪厚さ15mmでは周期加熱3cyc以上で滑雪するところがあるが、成功よりも失敗の回数の方が多い。着雪厚さ20mmでは、周期加熱3cyc以上になると成功の数が失敗を上回るようになる。着雪厚さ25mmでは、周期加熱2cyc以上で失敗する場合がごくわずかとなった。

以上の結果から、失敗回数よりも成功回数が多い条件(加熱時間とサイクル数)を着雪の滑落成功条件(表1の太線)とする。着雪厚さ15mmでは成功条件なしということになる。

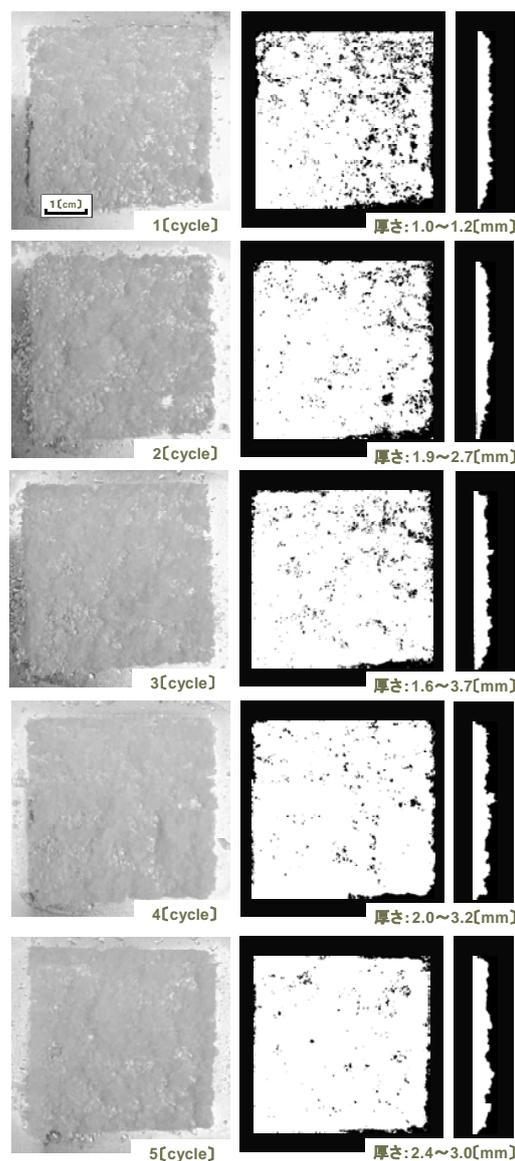


図4 氷結部の観察
(原画像, 二値化処理, 側面図)

表1 滑雪成否判定実験の結果

着雪厚さ	15mm						20mm						25mm					
	2s		3s		4s		2s		3s		4s		2s		3s		4s	
滑落成否	○	×	○	×	○	×	○	×	○	×	○	×	○	×	○	×	○	×
1 cycle	0	5	0	5	0	5	1	4	1	4	1	4	1	4	3	2	3	2
2 cycle	0	6	0	5	0	5	1	4	2	3	4	1	3	2	5	0	5	0
3 cycle	2	5	0	5	1	4	4	2	4	1	4	1	5	0	5	0	5	0
4 cycle	1	3	1	4	1	4	3	2	4	1	4	2	5	0	5	0	5	0
5 cycle	3	10	1	4	2	3	3	2	4	2	3	2	4	1	5	0	5	0

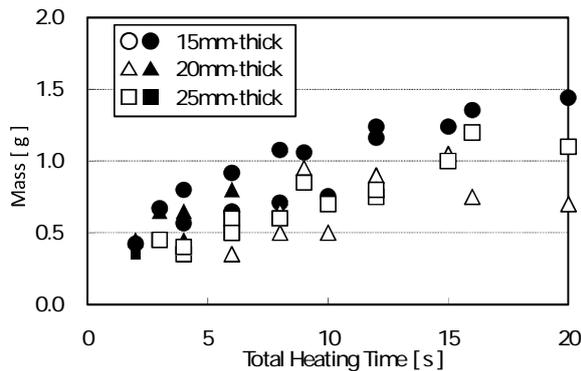


図5 氷結部質量

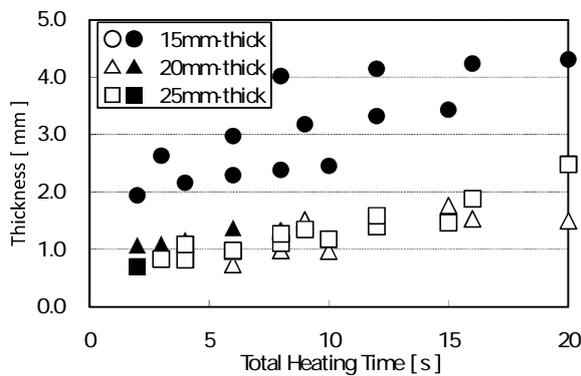


図6 氷結部厚さ

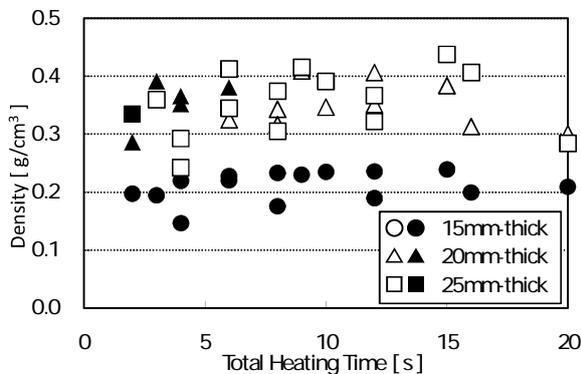


図7 氷結部密度

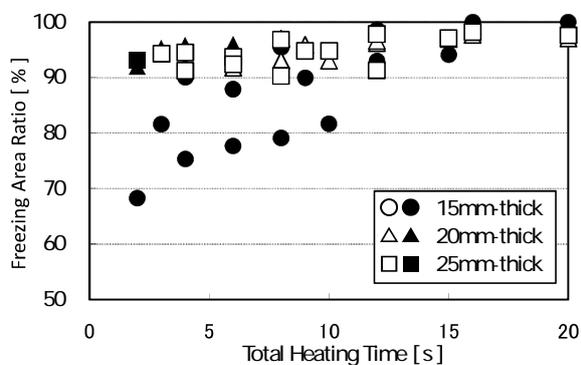


図8 氷結部面積率

3.2 氷結部分の観察結果

着雪厚さ 15mm, 加熱時間 2s の場合の氷結部分の観察結果を図 4 に示す. 実験後に着雪の柔らかい部分をハケで払い落として残った氷結部の原画像, 二値化画像, 側面図を並べている. 1cyc から 5cyc にたどってみると, 氷結部の面積率が大きくなっていること, 厚みが増していることがわかる.

氷結部の測定結果を図 5~7 に示す. 横軸はすべて総加熱時間をとっている. 総加熱時間とは, 所定サイクル数が終了するまでに加熱した時間の総和であり, 例えば, 加熱時間 2 s, 周期加熱 2 cyc ならば, 総加熱時間は 4 s となる. また, 表 1 で示した滑雪成功の条件での測定結果のプロットは白抜きで, 失敗は黒塗りで表している.

図 5 を見ると, どの条件でも総加熱時間の増加に伴って氷結部質量が大きくなっている. 15mm 厚さの時, 他の条件に比べて質量の増加が大きいこと, 成功条件 (白抜き) の方が, 失敗条件 (黒塗り) よりも質量が小さい傾向も見られる. 図 6 を見ると, 氷結部厚さは着雪 15mm 厚さの時 2~4mm あるのに対して, 着雪 20mm と 25mm 厚さのときには 0.7~1.9mm と半分以下になっている. 氷結部の厚さと質量から計算される密度をプロットした図 7 を見ると, 着雪 20mm と 25mm 厚さでは, 初期密度 0.2kg/cm³ から密度の増加が見られるが, 着雪 15mm 厚さではほとんど変化していない.

図 7 は氷結部の面積率を示す. 全体的には総加熱時間の増加に伴って面積率も増加している. 着雪 20mm と 25mm 厚さでは, 全てのプロットで氷結部面積率 90%以上となっており, 滑雪成功 (白抜きプロット) もすべて 90%以上にある. 滑雪成否の観点から見れば, 氷結部の質量や厚さは滑雪成否に対して問題ではないと考えられる. 氷結部の密度が大きい, あるいは面積率が大きい方が融解水のしみ込む隙間が減り滑雪が起こりやすくなるものと考えられ, 図 7, 図 8 の結果からもそれが裏付けられる.

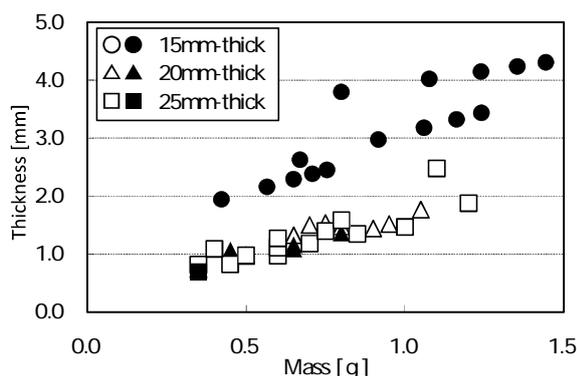


図9 氷結部質量と氷結部厚さ

図9は、氷結部の質量を横軸に厚さを縦軸として整理した図である。着雪厚さ 20mm (△▲) では、氷結部厚さが約 1.3mm 以上の範囲で成功 (△), 着雪厚さ 25mm 厚さ (□■) では氷結部厚さが約 0.8mm 以上の範囲で成功 (□) である。このことからこれらの条件で滑雪が可能であると結論づけられる。

4. 考察

着雪厚さの違いによって滑落条件に違いが見られた原因について考察をする。滑雪が起きるかどうかは、着雪に作用する重力と着雪面との付着力のバランスによってきまる。吉田らは、実験的に氷とアルミ板の凍結付着力を調べて 234 kPa と報告している²⁾。一方、着雪に作用する重力は、単位面積当りで見ると着雪厚さ 15, 20, 25mm に対してそれぞれ、29.4, 39.2, 49.0 Pa となる。つまり、これらの比を取ると着雪面のわずか 0.012~0.021%が凍結付着しているだけで着雪全体を支えることができる。従って、少なくとも凍結付着は着雪面全面にわたって解除しなくてはならない。

完全に凍結面が氷板となり融解によって水膜が形成されれば容易に着雪は滑落するが、今回の実験のように、数回の周期加熱によって短時間の間に完全な氷板を形成するのは困難であり、部分的に雪のままで残る。水野・若浜は、アルミ板と湿雪の付着力は、含水率や初期条件によって変化するが 294~1666 Pa の範囲であることを実験から示している³⁾。氷結部面積率が 90%を超えたときに滑雪が成功するという図8の結果を元に、残りの 10%の部分が湿

雪の状態に着雪に作用する重力 29.4~49N/m² と釣り合っていると仮定すると、必要な付着力は、294~490 Pa となり、水野・若浜の結論の範囲に適合する。15mm 厚さでは、水野・若浜の示した湿雪の付着力のちょうど下限値に当り、落ちるか落ちないかというしきい値付近であったと言え、加熱の温度ムラ、氷結部面積率の測定精度を考慮すれば、この考察は概ね妥当なものと考えられる。

図7で示した氷結部面積率を元に、湿雪の付着力を 500 Pa と仮定し、それぞれの実験条件毎に付着力を求めた結果を表2に示す。表中の数値は氷結部を除く面積に作用する付着力であり、この値と着雪単位面積当りに作用する重力との比較から、重力が付着力を上回る条件を太字で示している。これを見ると、表1に示した滑雪成功条件とほぼ一致しており、概ね妥当な結果を得ていると判断される。着雪 15mm 厚さの場合、図4・5で示したように氷結部が厚く発達しているが、図6で示したように密度に変化が現れていないことから、氷板が形成されたというよりも、雪粒子同士の焼結の促進に熱量が使われているものと思われ、その結果として加熱時間 4s の時、氷結部面積率はほぼ 100%となっても実質的にスカスカの状態に着雪面に接触しているものと思われる。その結果として、表1と表2の結果に違いがでたのであろう。

表2 着雪に働く付着力と重力
(単位: N/m²)

着雪厚さ	15mm			20mm			25mm		
	2 s	3 s	4 s	2 s	3 s	4 s	2 s	3 s	4 s
1 cyc	158	92	50	40	24	21	35	29	28
2 cyc	124	60	23	38	20	15	44	38	16
3 cyc	112	50	7	41	21	17	32	26	11
4 cyc	104	35	0	35	19	12	49	44	9
5 cyc	92	30	0	35	15	15	26	15	12
重力	29.4			39.2			49.0		

本論文で提案した周期加熱による着雪除去法では、省エネルギーの観点での優位性が期待されているが、

本実験においては、極めて熱効率の悪いペルチェ素子を採用しているためその優位性はない。しかし、わずか4～20秒というわずかな加熱時間だけで、着雪を滑落させることができたということは、今後の可能性を感じさせる結果であると考えられる。

5. 結論

本論文では、周期加熱という新しい方法によって、着雪を全量融解させることなく滑落を促進させる技術を提案した。模型による実験によって、模擬着雪の滑落成否判定実験と氷結部分の観察によって、滑雪条件を見いだした。

着雪厚さが20mm以上、加熱時間2秒以上、周期加熱3サイクル以上で、滑雪は起きる。そのときの氷結部面積率は90%以上であり、氷結部厚さは着雪厚さ20mmでは1.3mm以上、25mmの場合では

0.8mm以上であることを示した。これらの条件を満たすと模擬着雪を滑落させる事が出来る。

なお、本研究は(社)雪センターTC研究助成制度の支援を受けて実施されたことを記し、謝意を表す。

参考文献

- 1) 上村靖司, 雪庇(せっぴ)処理への流体力の利用～雪の害をいかに防ぐか, 油空圧技術, Vol.47(10), pp.42-47, 2008.
- 2) 水野 悠紀子・若浜五郎: 湿雪の付着強度, 低温科学, 物理篇, 第35輯, pp133-143, 1977.
- 3) 吉田 光則ら: 着雪氷防止技術に関する研究(第1報)―各種材料の着氷力について―, 北海道立工業試験場報告, No.292, pp13-22, 1993.

平成 21 年度「雪センターTC 研究助成制度」

地吹雪時の道路管理に係わる気象予測の基礎研究
研究報告書

高田 吉治*、安木 啓*、青柳 秀夫*、荒居 光徳*、荒木 龍蔵*

* (株) 応用気象エンジニアリング

要旨

地吹雪時の視程推定にとって重要な要素である風の詳細な分布を、地形との関係を考慮しながら明らかにすることを目的に、数値モデルを用いて地吹雪時の風に関する事例解析を行った。研究対象は地吹雪多発地帯である秋田県能代地域とし、解析期間は2008年12月～2009年2月とした。

地上天気図、及び気象官署（アメダス）観測データを用いた解析では、地吹雪時、地上気圧配置は西高東低の冬型気圧配置が卓越し、能代地域では西～西北西の風が卓越していた。風速は日本海に面した平野部（海岸平野部）で強く、内陸にいくにしたがって弱くなる傾向が見られた。地吹雪時の最大瞬間風速は海岸沿いの平野部で約25 m/s以上、内陸部で約20 m/sだった。

風の詳細な水平分布を明らかにするために、数値モデルを使用した。数値シミュレーション結果と観測結果との比較では、数値シミュレーションによる風速は、観測データの最大瞬間風速と対応が良く、海岸平野部の方が内陸部よりも風が強いという傾向も見られた。数値シミュレーションによって特に山岳の風下側斜面で風速が弱くなることが示された。また、日本海に突き出した男鹿半島の山の東側（風下側）には山越え気流によると考えられる波状の風速分布（風速の大きい所と小さい所が縞状に分布している）が見られた。

数値シミュレーションの結果は、実際の風速に比べて強い傾向が見られ、この傾向は内陸山岳域で顕著であった。これは、数値シミュレーションに用いた初期値の解像度や、地形データの解像度が粗いことによって地形の影響を十分に取り込むことができていないことによると考えられる。

最後に、本研究結果を用いて将来の地吹雪予報のイメージを示した。

（キーワード）：地吹雪、道路管理、風況布予測、視程障害、道路気象情報、ネットワーク

目次

第1章 序章	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究目的	2
第2章 解析領域・期間・データの説明	3
2.1 解析領域	3
2.2 解析期間	4
2.3 使用データ	4
2.4 数値シミュレーション	5
第3章 地吹雪時の気象特性	6
3.1 地吹雪期間の抽出	6
3.2 地吹雪時の気象特性	9
3.3 数値シミュレーションによる風の水平分布推定（2009年2月16日の事例）	34
第4章 考察	46
4.1 地吹雪日における気象特性	46
4.2 地形と風速の関係	48
4.3 数値シミュレーションの再現性	49
第5章 まとめ	50
参考文献	52
付録	
1 秋田県能代地域における地吹雪現地踏査	
2 吹雪（強風）予測シミュレーションの現状調査	

— 図 表 目 次 —

図 2.1.1	解析領域地形図	3
図 3.2.1	地上天気図 (2008年12月26日06時～27日18時)	9
図 3.2.2	風速・風向・気温の時間変化 (2008年12月25日12時～29日12時)	11
図 3.2.3	地上天気図 (2009年1月10日18時～12日06時)	12
図 3.2.4	風速・風向・気温の時間変化 (2009年1月10日00時～13日00時)	14
図 3.2.5	地上天気図 (2009年1月14日18時～16日06時)	15
図 3.2.6	風速・風向・気温の時間変化 (2009年1月14日00時～17日00時)	17
図 3.2.7	地上天気図 (2009年1月23日18時～25日06時)	18
図 3.2.8	風速・風向・気温の時間変化 (2009年1月23日00時～25日00時)	20
図 3.2.9	地上天気図 (2009年2月15日18時～17日06時)	21
図 3.2.10	風速・風向・気温の時間変化 (2009年2月15日00時～17日00時)	23
図 3.2.11	地上天気図 (2009年2月18日06時～19日18時)	24
図 3.2.12	風速・風向・気温の時間変化 (2009年2月17日00時～20日00時)	26
図 3.2.13	地上天気図 (2009年2月20日18時～22日06時)	27
図 3.2.14	風速・風向・気温の時間変化 (2009年2月19日12時～22日12時)	29
図 3.3.1	数値シミュレーション計算領域	35
図 3.3.2	アメダス能代における風・気温の観測値と数値シミュレーション結果	37
図 3.3.3	アメダス五城目における風・気温の観測値と数値シミュレーション結果	38
図 3.3.4	アメダス鷹巣における風・気温の観測値と数値シミュレーション結果	39
図 3.3.5	アメダス大館における風・気温の観測値と数値シミュレーション結果	40
図 3.3.6	風速分布 (シェイド) と地形 (コンター線) 2009年2月16日12時	42
図 3.3.7	水平風ベクトル分布と地形 2009年2月16日12時	42
図 3.3.8	水平風分布の時間変化 (2009年2月16日06～18時)	44
図 3.3.9	水平風ベクトルの時間変化 (2009年2月16日06～18時)	45
図 4.1.1	850 hPa 天気図	47
図 5.1.1	地吹雪予報イメージ	51

表 2.3.1	気象官署（アメダス）の海拔高度・観測要素・風速測定高度	-----	4
表 3.1.1	抽出された地吹雪日	-----	7
表 3.1.2	地吹雪期間	-----	8
表 3.2.1	地吹雪時の風速・風向・気温の平均値と極値（アメダス能代、五城目）		31
表 3.2.2	地吹雪時の風速・風向・気温の平均値と極値（アメダス鷹巣、大館）	---	32
表 3.2.2	地吹雪時の気象状況の特徴	-----	33
表 3.3.1	数値シミュレーション計算条件	-----	35

1. 序章

1.1 研究背景

雪国において、吹雪や地吹雪による著しい視程障害は、生活者や道路利用者の交通安全にとって脅威となることがある。こうした中で、予め地吹雪などによる視程障害の発生を予測し、把握していればそれを回避するなどの対策が取れる。現在、地吹雪予報は主に限られた地点の点の情報を基に行われているが、国道などの管轄道路を軸とした地域ネットワークを考える場合、こうした点の情報に比べ面の情報の方が雪国の生活者、道路利用者にとって有益となる。

地吹雪や吹雪時の視程推定に関する研究はこれまで、観測、風洞実験等の結果を基に行われてきた。竹内・福沢（1976）は、吹雪、降雪時では、光は雪粒による散乱よりもむしろ反射によって減衰することが示され、また、吹雪、降雪時における視程は、光の減衰に加え、雪粒が移動することによる残像の効果を合わせることによって説明できることを示した。彼らは雪の移動量を雪の空間濃度と移動長さの積から求めている。ここで雪の移動長さには、雪の落下速度と目の高さでの風速とをベクトル的に合成した値を用いている。近藤（1987）は雪粒子の大きさと積雪密度による地吹雪発生の臨界風速の違いを示し、その中で地吹雪の発生を予知するには、積雪粒子の大きさと積雪密度、及び地表面の摩擦速度または地上風速を知ることが重要であると述べている。この研究では、さらに地上風速の推定方法を述べている。松沢・竹内（2002）では、実測値を得ることが困難な物理量（飛雪濃度、雪粒子の落下速度、摩擦速度）を、容易に得られる気象データから推定し、吹雪時の視程を推定する方法を検討している。この研究では、この推定方法による推定値と実測値は視程 1000 m 以下において比較的良く一致することが示されている。これらの研究において、摩擦速度は、地吹雪の発生条件や地吹雪・吹雪時の視程の推定にとって重要な要素であり、その摩擦速度の推定には地上の風速が用いられている。こうしたことから、地吹雪時の視程を推定する場合、地上の風速をできるだけ正確に推定することが重要となる。

1.2 研究目的

本研究の目的は、雪国の冬期道路がより安全安心に利用できるように、地吹雪時の視程推定にとって重要な要素である風の詳細な分布を、地形との関係を考慮しながら明らかにすることである。本研究では、地吹雪多発地域であり、(社)雪センターによって冬期に地吹雪予報が行われている秋田県能代地域を対象とし、地吹雪時における気象状況の特徴、地上風の水平分布を明らかにする。

本報告書は5つの章から構成されている。第2章では本研究の研究領域、使用データ、使用する数値モデルについて説明している。第3章では、本研究の解析結果が述べられている。ここでは、観測データに基づく地吹雪時の気象状況と、数値モデルで求めた風の水平分布が示されている。第4章は本研究の考察であり、解析期間における地吹雪時の気象状況が典型的なものであったかどうかや、風の分布と地形の関係について述べている。第5章には本研究のまとめが記述されている。

2. 解析領域・期間・データの説明

2.1 解析領域

本研究は、秋田県能代地域を解析領域とした。図 2.1.1 に解析領域の地形図を示す。この地域では、西側の日本海側に面した海岸沿いには平野部がある。その東には山岳域が分布し、標高 約 1500 m の山々も含まれる。アメダス鷹巣・大館 (図 2.1.1 中の T と O の地点) の位置する平野部は、山岳域から日本海へ東西に流れる米代川沿いの平野である。アメダス五城目 (図 2.1.1 中の G の地点) の西には、男鹿半島が日本海に突き出している。半島には標高 500~700 m の山がある。

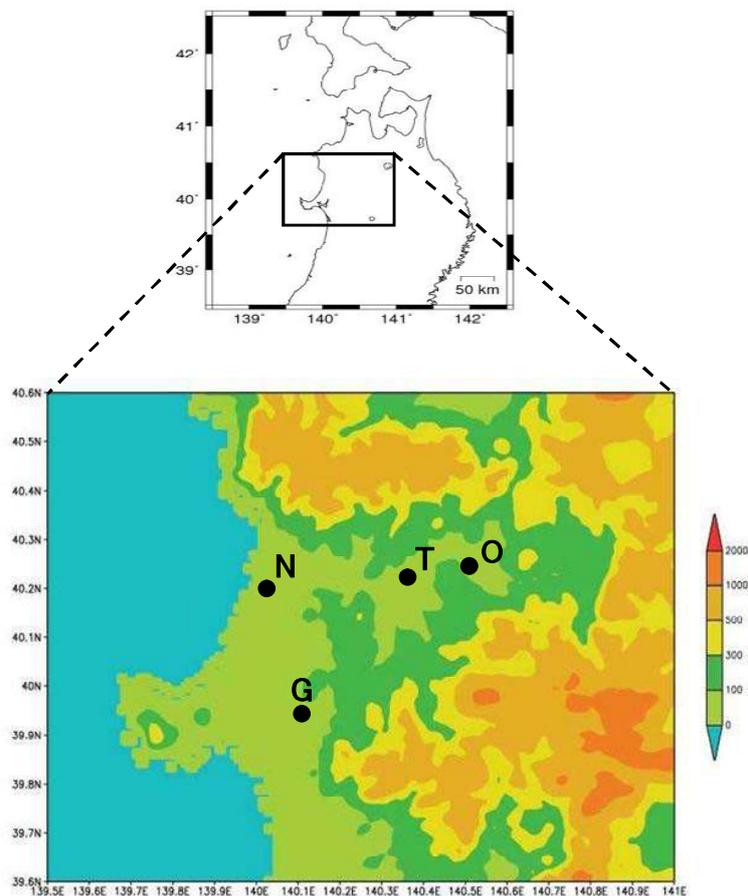


図 2.1.1 解析領域地形図

地形データの分解能は緯度・経度方向共に 30 秒。

下図中の黒丸と文字はアメダス観測地点 (N : 能代、G : 五城目、T : 鷹巣、O : 大館) を示している。

2.2 解析期間

本研究では 2008 年度の冬期期間を対象とした。具体的な解析期間は 2008 年 12 月 1 日～2009 年 2 月 28 日である。なお、本報告書に用いる時間は全て日本標準時（JST）を用いる。

2.3 使用データ

(1) 気象官署観測データ

本研究では、地吹雪時の抽出、及び地上気象状況の解析、及び次節に述べる数値シミュレーション結果との比較に気象官署（アメダス）の地上気象観測データ（以下「アメダスデータ」と呼ぶ）を用いた。観測地点は、国道 7 号線から近い能代、五城目、鷹巣、大館の 4 地点とした。観測地点の位置は図 2.1.1 に示している。アメダス能代と五城目は海岸沿いの平野部に位置し、アメダス鷹巣と大館は米代川沿いの平野部に位置する。観測位置からそれぞれアメダス能代と五城目を海岸沿い平野部の代表、鷹巣と大館を米代川沿い内陸部の代表として解析に用いた。使用したアメダスデータの概要を表 2.3.1 に示す。

表 2.3.1 気象官署（アメダス）の海拔高度・観測要素・風速測定高度

箇所名	海拔高度	観測要素	風測定高度	備考
能代	6 m	風向・風速 最大瞬間風速 気温	19.0 m	
五城目	6 m	風向・風速 最大瞬間風速 気温	6.5 m	2009年1月15日13時～16日06時まで風データ無し。
鷹巣	29 m	風向・風速 最大瞬間風速 気温	10.4 m	
大館	49 m	風向・風速 最大瞬間風速 気温	10.0 m	2008年12月1日01時～12日16時、12月11日10時～12日16時、1月30日10時～11時まで一部、または全てのデータ無し。

(2) 気象客観解析データ

本研究では、地吹雪時における詳細な風況分布を明らかにするために、数値シミュレーションを用いたが、このシミュレーションの初期値に NCEP (National Centers for Environmental Prediction) で公開されている全球客観解析データである GFS-FNL (Final Analysis Data) を用いた。データの時空間解像度はそれぞれ、6 時間、 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ である。

2.4 数値シミュレーション

研究領域における地吹雪時の詳細な風分布を明らかにするために、数値シミュレーションを用いた。用いた数値シミュレーションに用いたモデルは、メソスケール気象モデルである WRF (Weather Research and Forecasting) モデルを用いた。このモデルは、アメリカ合衆国の NCAR (National Center for Atmospheric Research) を中心に開発されたモデルであり、一般に公開されている。数値シミュレーションでは、1 km 間隔の風速、及び温度分布を 1 時間毎に出力した。数値シミュレーションにおける計算条件は次章で説明する。

3. 地吹雪時の気象特性

3.1 地吹雪期間の抽出

高い地吹雪が断続的に発生する臨界条件は、松沢・竹内（1986）によれば、「気温が -2°C 以下かつ高さ7 mでの風速が8.5 m/s以上」となっている。故に、地吹雪の抽出条件の1つである風速には、高さ7 mの風速を用いるのが最も良いが、本研究に用いるアメダス観測地点の風速の高さはそれぞれ、能代で19 m、五城目で6.3 m、鷹巣で10.4 m、大館で10.0 mである。松沢・竹内（2002）によれば、周囲が開けている状態での測定の場合、高さ10 mの風速と7 mの風速にはほとんど差異はない。本研究では、風速の測定高度は必ずしも7 mや10 mではないが、この高さに近いアメダス五城目、鷹巣、大館において次の条件に該当した日を地吹雪日として抽出した。

- ・地上気温が -2°C 以下、かつ最大瞬間風速が8.5 m/s以上が記録された日

アメダス五城目、鷹巣、大館において、この条件を基にして抽出された地吹雪日を表3.1.1に示す。3地点のアメダス観測地点の内、いずれか1箇所でも地吹雪日に該当した日の日数は、2008年12月1日～2009年2月28日では14日あった。地吹雪日は、12月26～28日、1月10～11日、1月15～16日、1月23～24日、2月16～19日、2月21日であり、複数の観測地点で長時間断続的に続いた。

地吹雪日において、「地上気温が -2°C 以下、かつ最大瞬間風速が8.5 m/s以上」の時間帯を抽出し、各アメダス地点の抽出期間を比較して地吹雪期間を決めた。表3.1.2に地吹雪期間を示す。次節では地吹雪期間ごとの気象状況について結果を述べる。

表 3.1.1.1 抽出された地吹雪日

(五城目における1月15～16日では観測データが欠測していた時間が多かったため、地吹雪抽出からは除外した。)

年月		2008年12月																															
日		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	
五城目																																	
鷹巣																																	
大館																																	

年月		2009年1月																															
日		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	
五城目																																	
鷹巣																																	
大館																																	

年月		2009年2月																												
日		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	
五城目																														
鷹巣																														
大館																														

■ : 地吹雪日

表 3.1.2 地吹雪期間

開始日時	終了日時	時間数
2008年12月26日03時	2008年12月27日19時	30 時間
2009年 1月10日20時	2009年 1月11日11時	15 時間
2009年 1月15日02時	2009年 1月16日07時	29 時間
2009年 1月23日23時	2009年 1月24日06時	7 時間
2009年 2月16日07時	2009年 2月17日01時	18 時間
2009年 2月18日08時	2009年 2月18日20時	12 時間
2009年 2月19日11時	2009年 2月19日15時	4 時間
2009年 2月21日03時	2009年 2月21日18時	15 時間

3.2 地吹雪時の気象状況

3.2.1 2008年12月26日～28日事例

(1) 総観場の気象状況

図 3.2.1 は 12 月 26 日 06 時～27 日 18 時の地上天気図である。日本周辺では、西高東低の冬型の気圧配置が卓越しており、北陸地方より東側では等圧線の間隔が狭くなっている。秋田県付近に着目すると、地吹雪期間である 26 日 18 時では、等圧線の走向の変化が見られる。等圧線の走向は秋田県付近で北西 - 南東方向から南北方向へ変化している。このような変化は 27 日 06 時まで持続している。

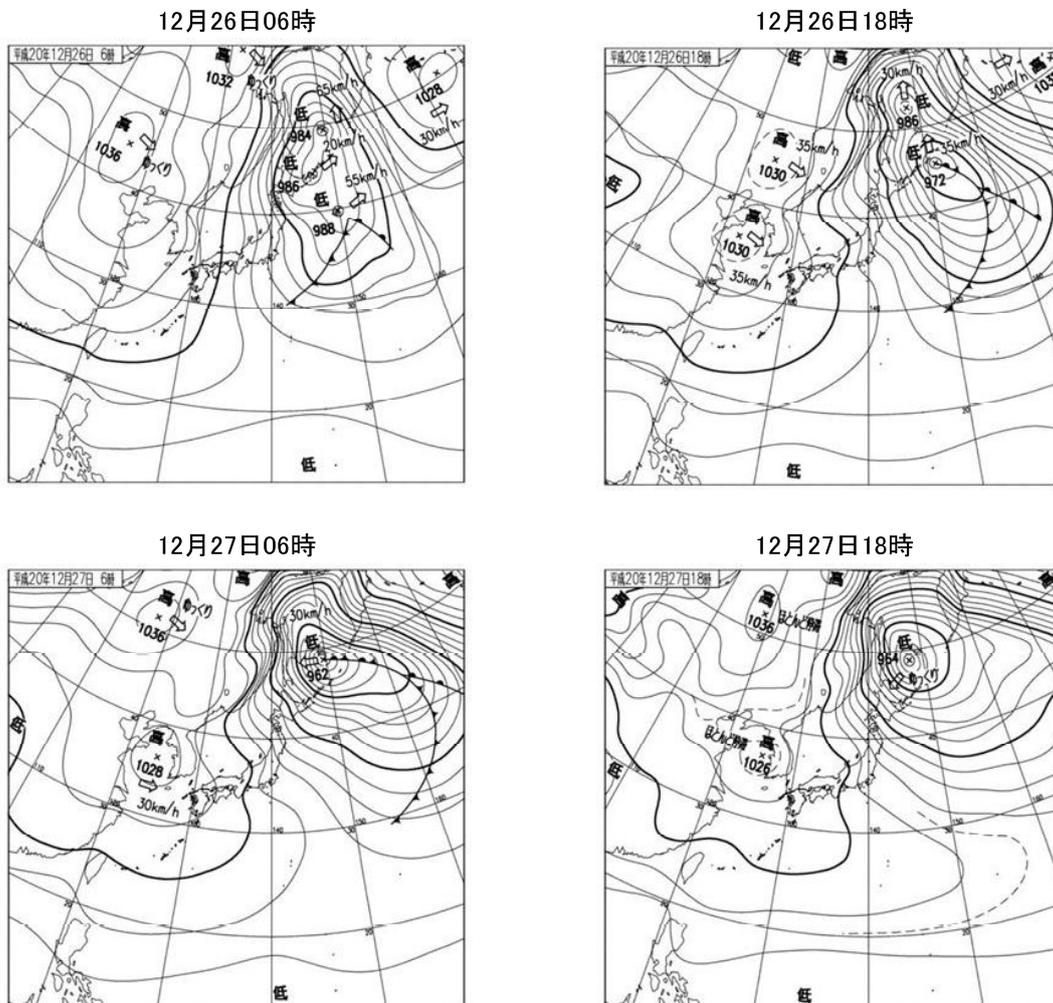


図 3.2.1 地上天気図

(2008年12月26日06時～27日18時)

(2) アメダス地点の風・気温変化

図 3.2.2 はアメダス 4 地点（能代・五城目・鷹巣・大館）における 12 月 25 日 12 時～29 日 12 時の風速、風向、前 1 時間最大瞬間風速、気温の時間変化である。前 1 時間最大瞬間風速とは、前 60 分間での最大瞬間風速であり、例えば 12 時の値は、11 時（11:00 は含まない）～12 時（12:00 は含む）における最大瞬間風速である。地吹雪期間は水色の太線で示してある。

主な結果は次の通りである。

- 風速は 4 地点とも 25 日の夕方から強くなり始める。
- 風速は 4 地点の中では能代で顕著に強く、地吹雪期間の風速は、能代で 10～14 m/s、鷹巣で 4～6 m/s、五城目・大館で 2～4 m/s である。大館は五城目よりもやや弱い傾向が見られる。
- 地吹雪期間の前 1 時間最大瞬間風速は、能代で約 20 m/s、鷹巣で 10～15 m/s、五城目で約 10 m/s、大館で 5～10 m/s である。
- 地吹雪期間中の卓越風向は、能代では西北西、五城目では西北西～北西、鷹巣では西南西～西、大館では西風である。
- 気温は風速の強まり始める 25 日夕方以下に下降し始め、地吹雪期間の 26 日では日中でも気温がほとんど上昇していない。

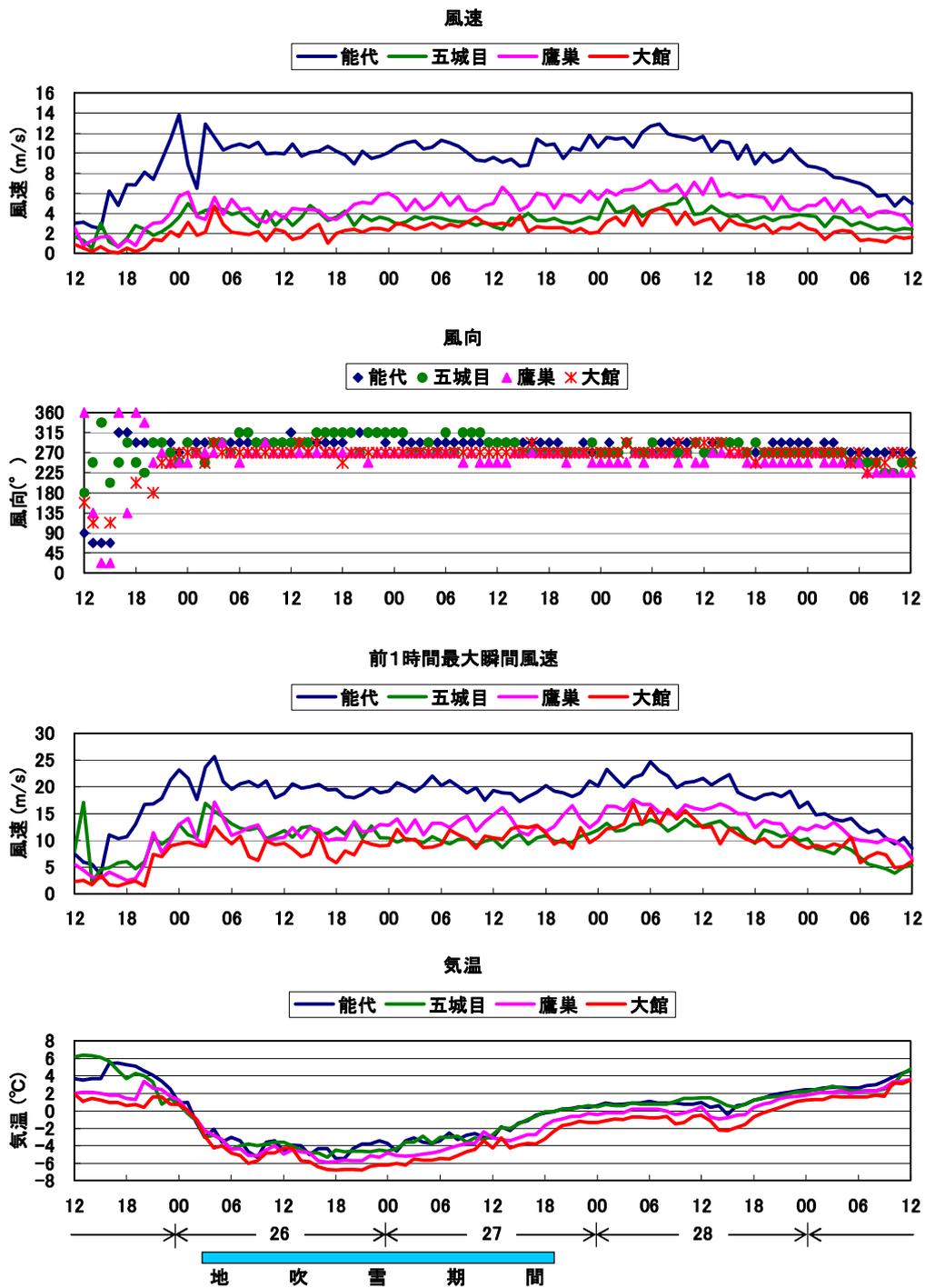


図 3.2.2 風速・風向・気温の時間変化
(2008年12月25日12時～29日12時)

3.2.2 2009年1月10日～11日事例

(1) 総観場の気象状況

図 3.2.3 は 1 月 10 日 18 時～12 日 06 時の地上天気図である。日本周辺では、西高東低の冬型の気圧配置が卓越しており、北陸地方より東側では等圧線の間隔が狭くなっている。秋田県付近に着目すると、10 日 18 時では、等圧線の走向の変化が見られる。等圧線の走向は秋田県付近で東西方向から南北方向へ変化している。このような変化は 11 日 06 時まで持続している。北海道の西の日本海には低気圧があり、ゆっくり南下している。12 日 06 時には、低気圧の中心は秋田県に最も近い。

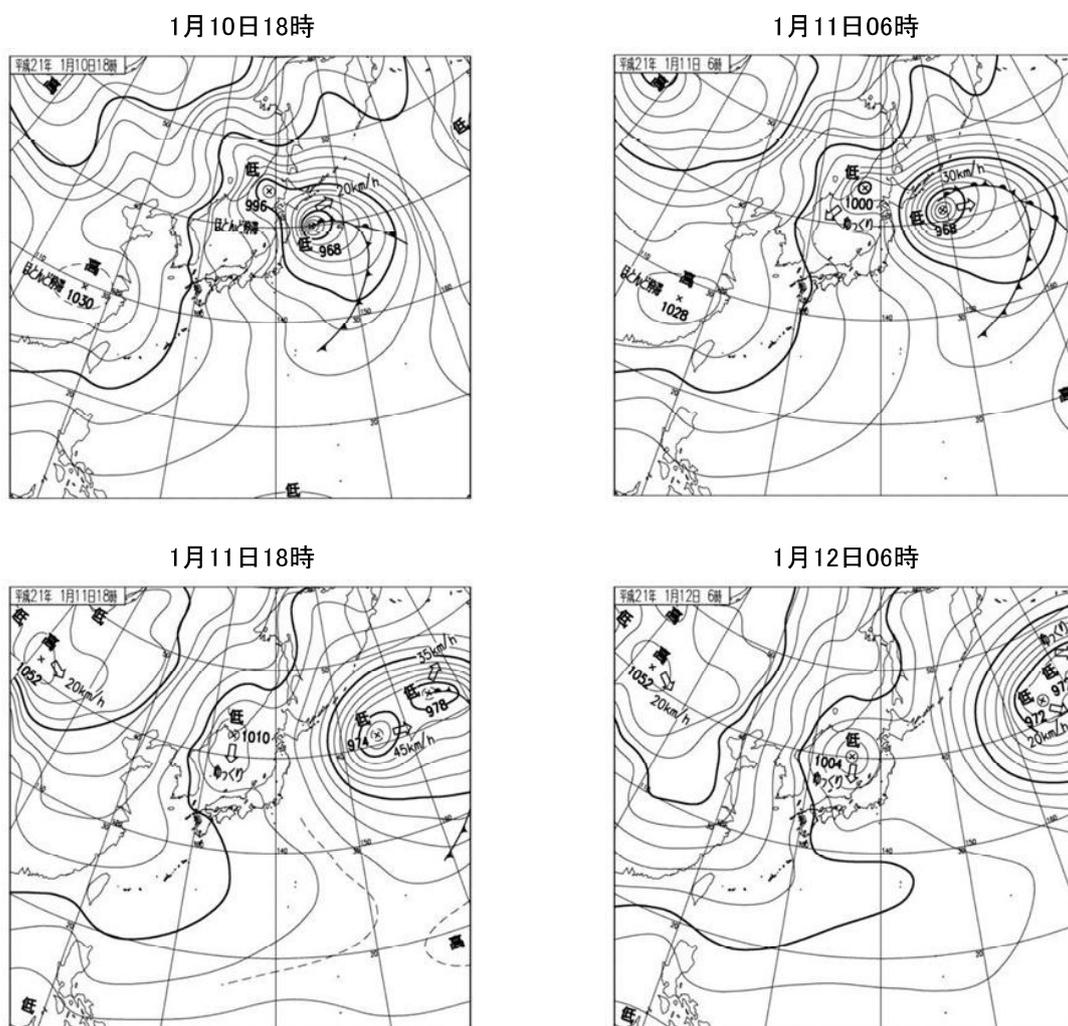


図 3.2.3 地上天気図

(2009年1月10日18時～12日06時)

(2) アメダス地点の風・気温変化

図 3.2.4 はアメダス 4 地点（能代・五城目・鷹巣・大館）における 1 月 10 日 00 時～13 日 00 時の風速、風向、前 1 時間最大瞬間風速、気温の時間変化である。地吹雪期間は 10 日 20 時～11 日 11 時であるが、11 日夜～12 日朝にかけて能代で風速が強くなっているため、図では 12 日まで示している。

主な結果は次の通りである。

- 風速は能代・五城目では 10 日 10 時ごろより、鷹巣・大館では 10 日正午ごろより強くなり始める。
- 風速は 4 地点の中では能代で顕著に強く、地吹雪期間の風速は、能代で 8～10 m/s、鷹巣で約 4 m/s、五城目・大館で 2～4 m/s である。大館は五城目よりもやや弱い傾向が見られる。
- 地吹雪期間の前 1 時間最大瞬間風速は、能代で 15～17 m/s、鷹巣・五城目・大館で約 10 m/s であるが、大館では 15 m/s 近い値も観測されている。
- 地吹雪期間中の卓越風向は、能代・五城目では西～西北西、鷹巣では西南西、大館では西風である。
- 気温は、4 地点とも風速の強まり始めるのと 10 日 10 時～正午頃に下降し始める。
- 12 日夜間では東風が卓越する。このことは低気圧が秋田県西方沖の日本海にあることに調和的である。風速は能代のみ強い。

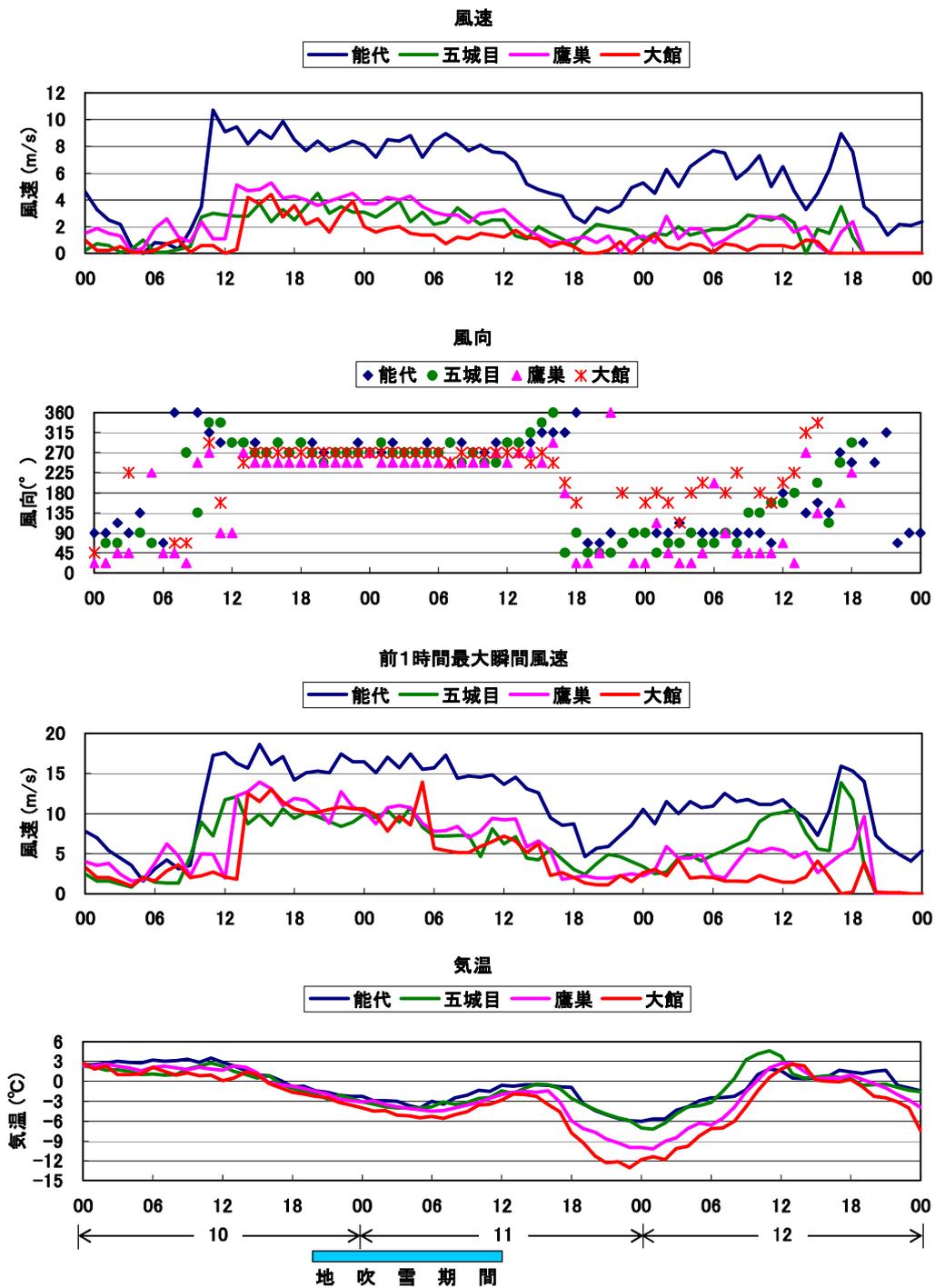


図 3.2.4 風速・風向・気温の時間変化
(2009年1月10日00時～13日00時)

3.2.3 2009年1月15日～16日事例

(1) 総観場の気象状況

図 3.2.5 は 1 月 14 日 18 時～16 日 06 時の地上天気図である。寒冷前線が通過した後、日本周辺では西高東低の冬型の気圧配置が卓越している。秋田県付近に着目すると、15 日 06 時、等圧線の走向の変化が見られる。等圧線の走向は秋田県付近で北西 - 東西方向から北北東 - 南南西方向へ変化している。このような変化は 15 日 18 時まで持続している。

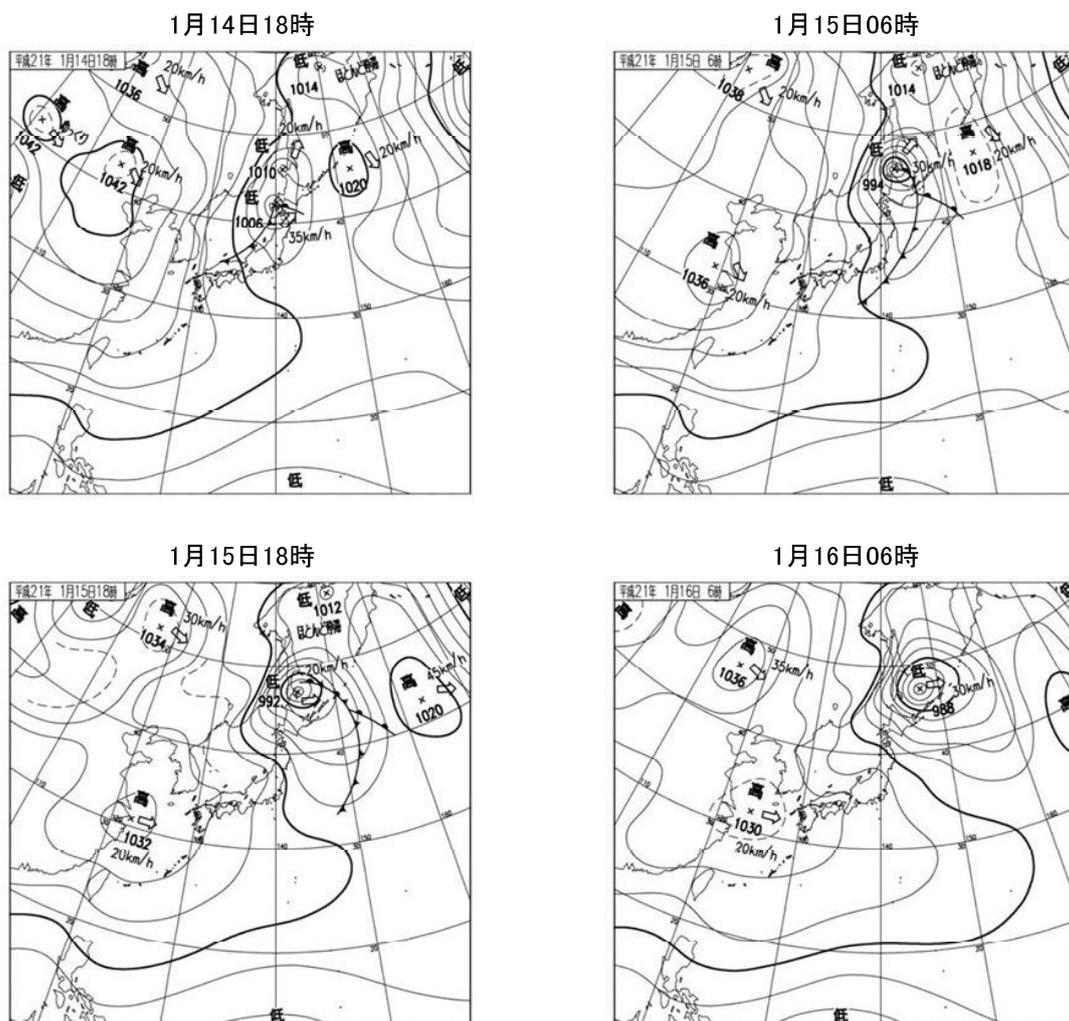


図 3.2.5 地上天気図

(2009年1月14日18時～16日06時)

(2) アメダス地点の風・気温変化

図 3.2.6 はアメダス 3 地点（能代・鷹巣・大館）における 1 月 14 日 00 時～17 日 00 時の風速、風向、前 1 時間最大瞬間風速、気温の時間変化である。

主な結果は次の通りである。

- 風速は能代で 14 日正午ごろより強くなり始めるが、鷹巣や大館では顕著な風速の強まりは見られない。前 1 時間最大瞬間風速では、鷹巣と大館でも 14 日の夕方より風速が強くなり始める。
- 風速は 4 地点の中では能代で顕著に強く、地吹雪期間の風速は、能代で 8～12 m/s、鷹巣で約 4～6 m/s、大館で 0～2 m/s である。
- 地吹雪期間の前 1 時間最大瞬間風速は、能代で 15～20 m/s、鷹巣で 10～15 m/s、大館で 5～10 m/s である。
- 地吹雪期間中の卓越風向は、能代では西～西北西、鷹巣と大館では西南西～西である。
- 気温は、3 地点とも風速（鷹巣と大館では前 1 時間最大瞬間風速）の強まり始める 14 日正午以降に下降し始め、15 日では日中でも気温の上昇は見られない。

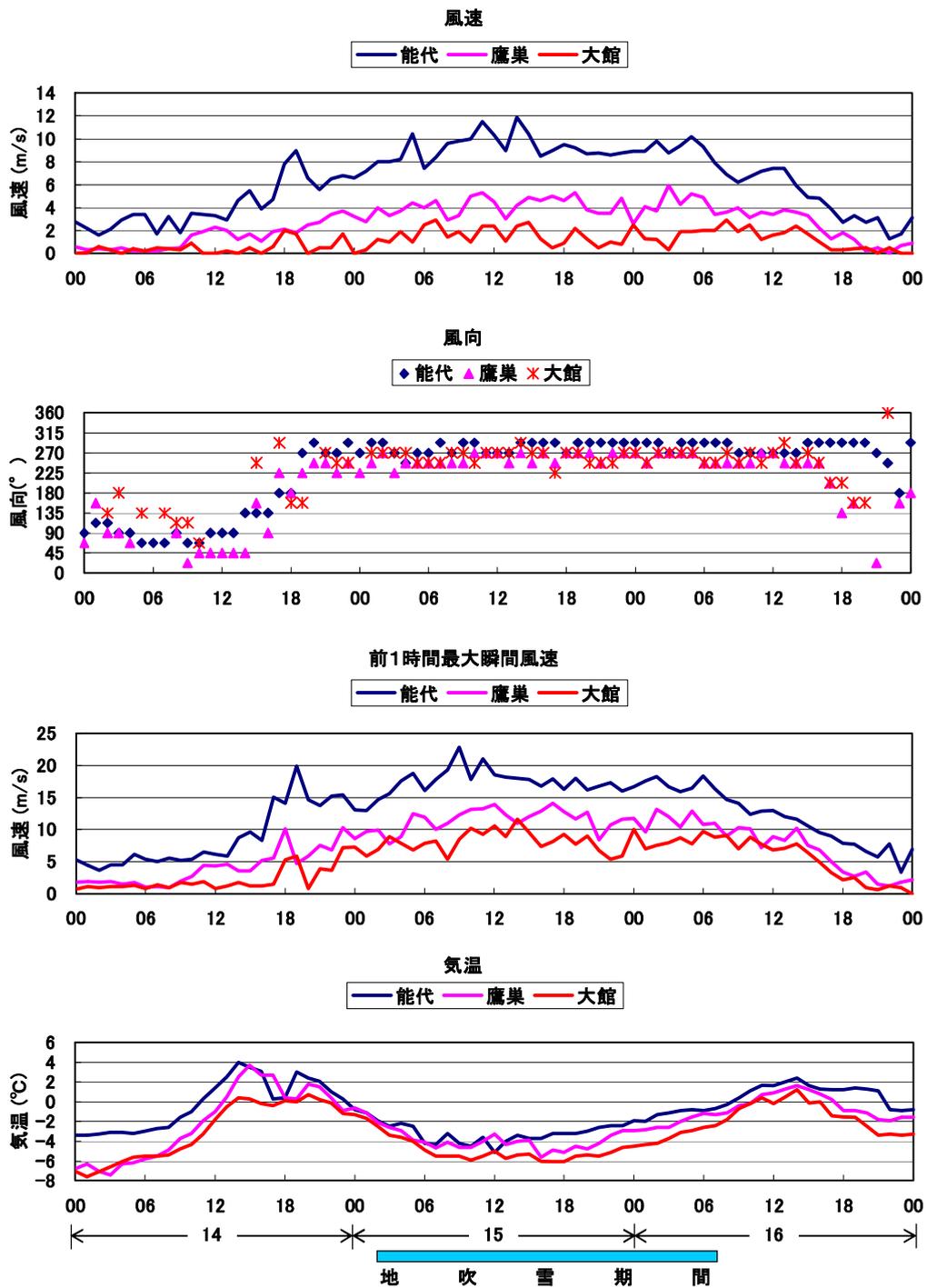


図 3.2.6 風速・風向・気温の時間変化
(2009年1月14日00時～17日00時)

3.2.4 2009年1月23日～24日事例

(1) 総観場の気象状況

図3.2.7は1月23日18時～25日06時の地上天気図である。23日18時頃から翌朝にかけて北陸から北日本を寒冷前線が通過し、地吹雪期間である24日06時には、西高東低の冬型の気圧配置が卓越している。この時間、秋田県付近に着目すると、等圧線の走向の変化が見られる。等圧線の走向は秋田県付近で北西-南東方向から北北東-南南西方向へ変化している。24日18時には冬型の気圧配置は弱まっている。25日06時には日本海に寒冷前線が見られる。

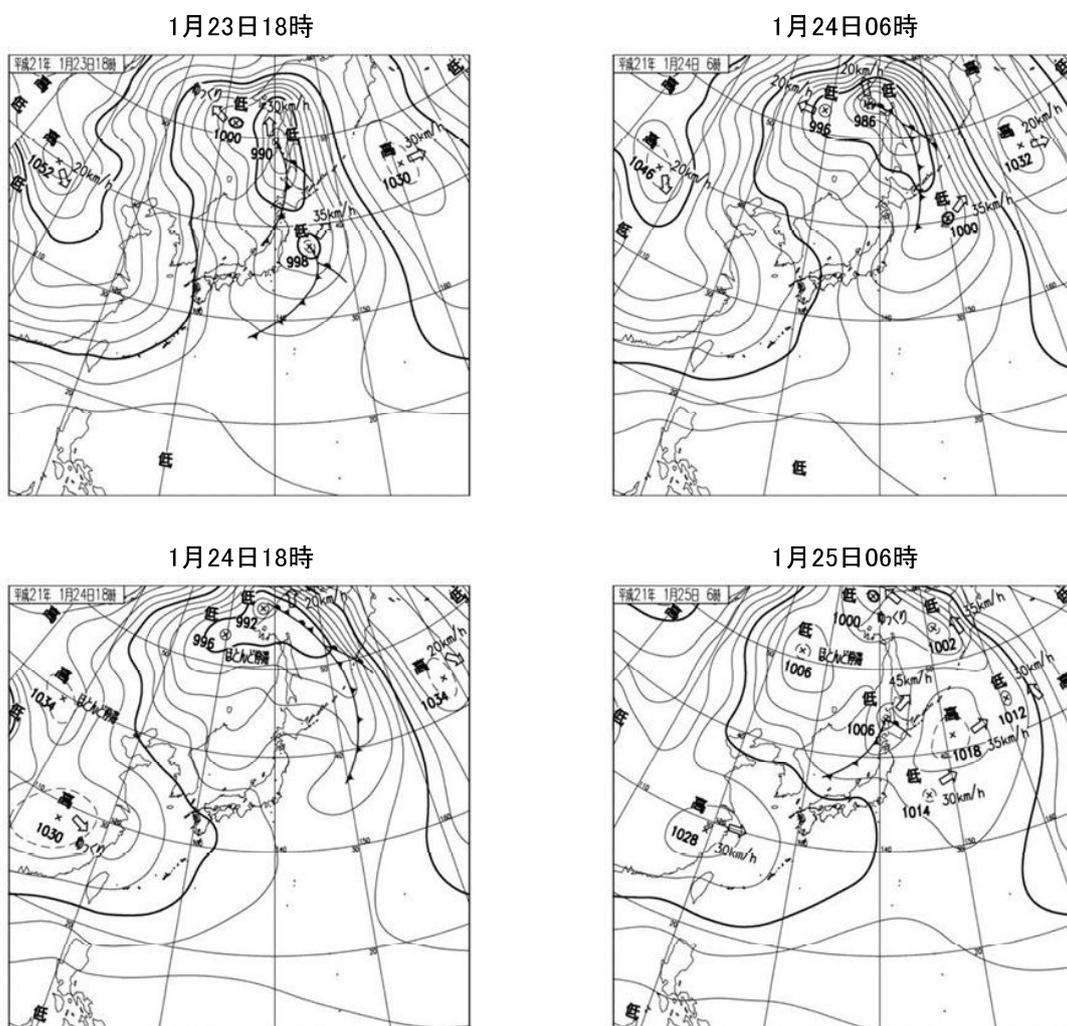


図 3.2.7 地上天気図

(2009年1月23日18時～25日06時)

(2) アメダス地点の風・気温変化

図 3.2.8 はアメダス 4 地点（能代・五城目・鷹巣・大館）における 1 月 23 日 00 時～26 日 00 時の風速、風向、前 1 時間最大瞬間風速、気温の時間変化である。

主な結果は次の通りである。

- 風速は、能代では 23 日正午ごろより強くなり始めるが、他の地点では顕著な風の強まりが見られない。
- 風速は 4 地点の中では能代で顕著に強く、地吹雪期間の風速は、能代で 8～10 m/s、五城目と鷹巣で約 2～4 m/s、大館で 2 m/s である。大館は五城目や鷹巣よりもやや弱い傾向が見られる。
- 地吹雪期間の前 1 時間最大瞬間風速は、能代で 15～17 m/s、五城目・鷹巣・大館で 5～10 m/s である。
- 地吹雪期間中の卓越風向は、能代・五城目では西北西～北西、鷹巣・大館では西風である。
- 気温は、4 地点とも風速の強まり始める 23 日 10～正午頃より下降し始める。

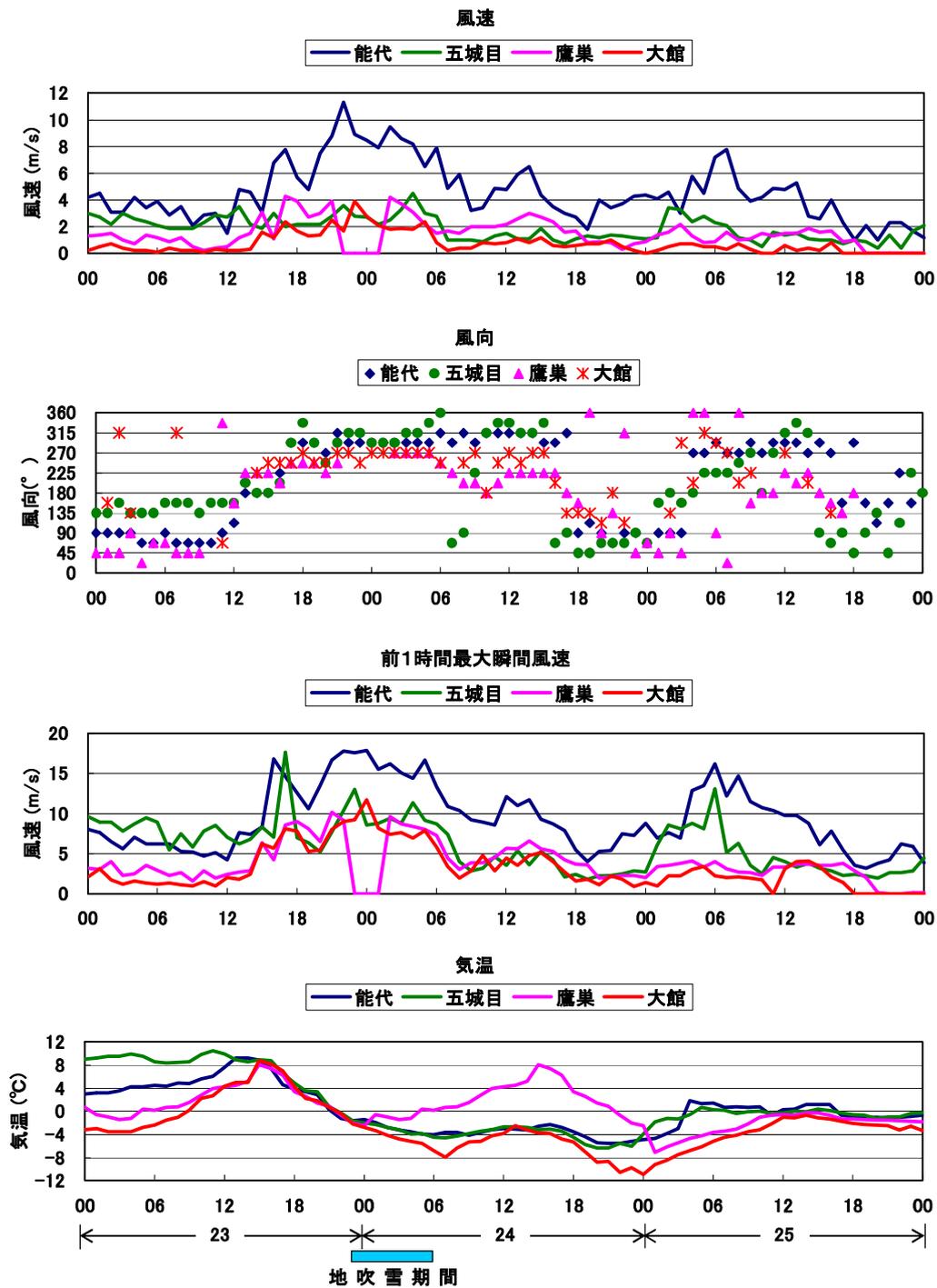


図 3.2.8 風速・風向・気温の時間変化
(2009年1月23日00時~25日00時)

3.2.5 2009年2月16日～17日事例

(1) 総観場の気象状況

図 3.2.9 は 2 月 15 日 18 時～17 日 06 時の地上天気図である。日本周辺では、15 日 18 時以降西高東低の冬型の気圧配置へ変化していく。地吹雪期間である 16 日 06 時、秋田県付近では、等圧線の走向の変化が見られる。等圧線の走向は北西 - 南東方向から北東 - 南西方向へ変化している。このような変化は 16 日 18 時まで維持している。冬型の気圧配置は 17 日 06 時にも卓越しているが、等圧線の走向の変化は明瞭でない。

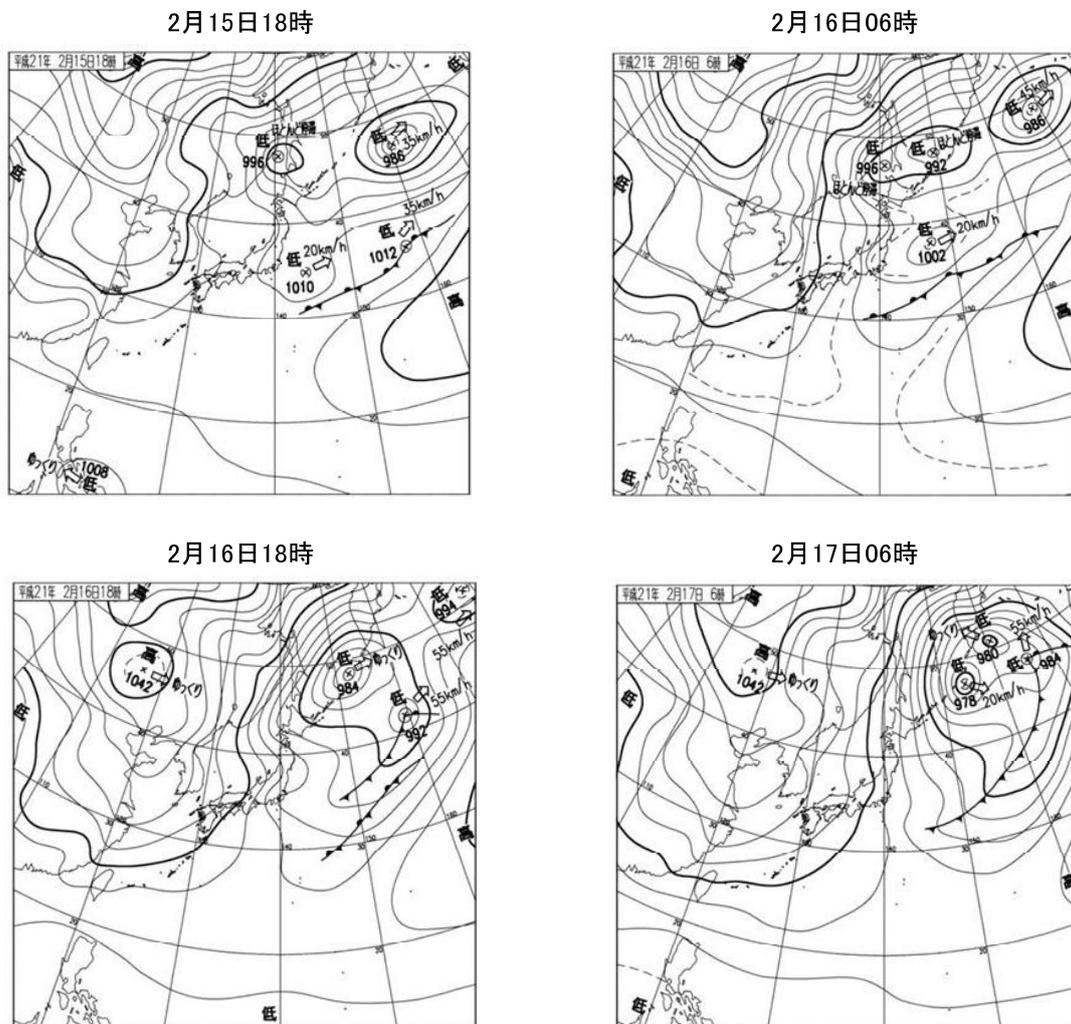


図 3.2.9 地上天気図

(2009年2月15日18時～17日06時)

(2) アメダス地点の風・気温変化

図 3.2.10 はアメダス 4 地点（能代・五城目・鷹巣・大館）における 2 月 15 日 00 時～17 日 00 時の風速、風向、前 1 時間最大瞬間風速、気温の時間変化である。

主な結果は次の通りである。

- 地吹雪期間前、風速は、4 地点共に 15 日 9 時ごろ一度強くなり、その後、能代では 16 日 00 時ごろよりさらに強くなり、他の地点では 16 日 06 時ごろより強くなる。
- 風速は 4 地点の中では能代で顕著に強く、地吹雪期間の風速は、能代で 10～12 m/s、五城目と鷹巣で約 4～6 m/s、大館で 2～4 m/s である。
- 地吹雪期間の前 1 時間最大瞬間風速は、能代で約 20 m/s、五城目・鷹巣・大館で 10～15 m/s である。
- 地吹雪期間中の卓越風向は、能代・五城目では西～西北西、鷹巣・大館では西南西～西である。
- 気温は、4 地点とも風速の強まり始める 15 日 09 時ごろより下降し始める、16 日は日中でも上昇せず緩やかに下降している。

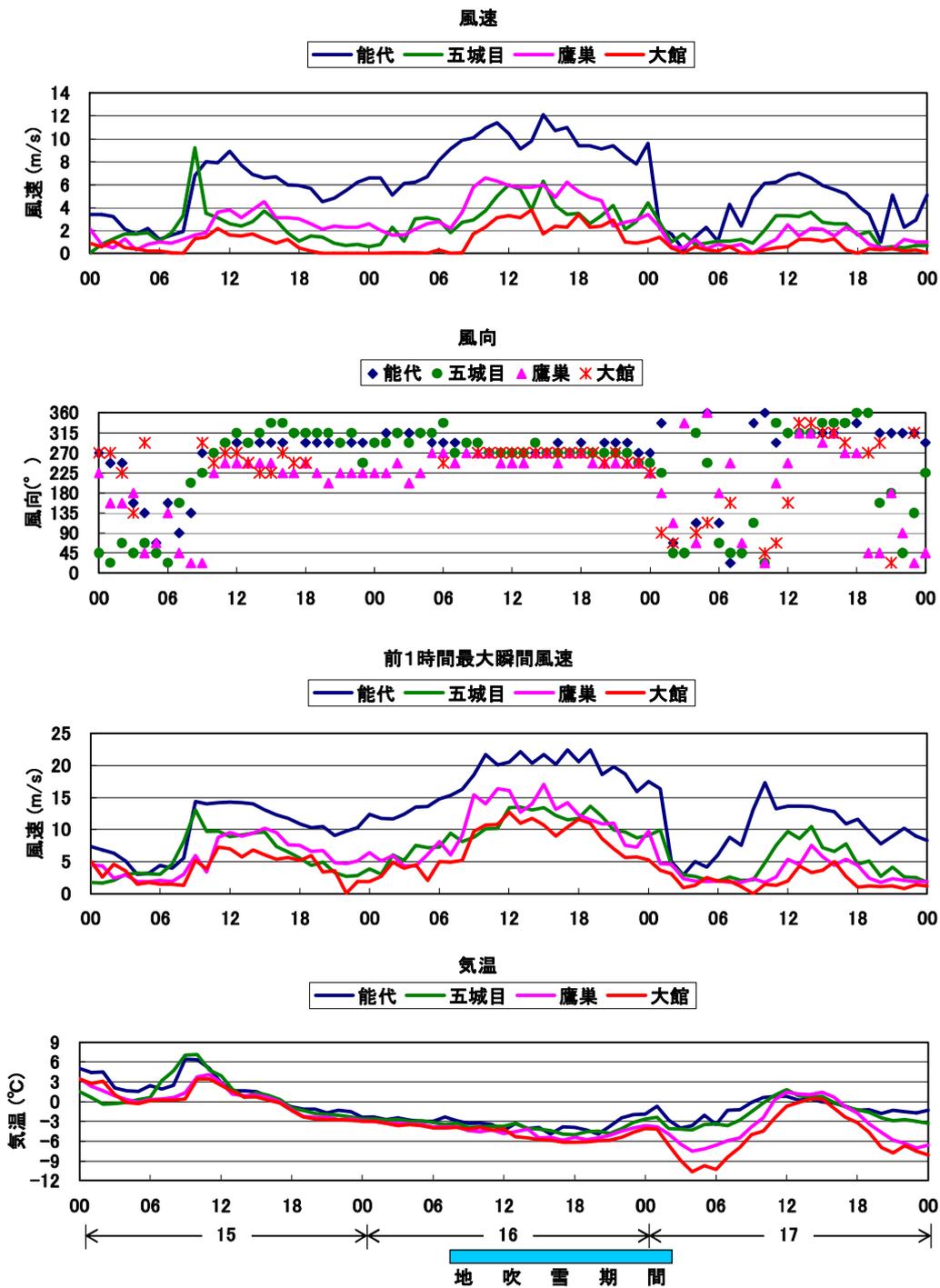


図 3.2.10 風速・風向・気温の時間変化
(2009年2月15日00時~17日00時)

3.2.6 2009年2月18日～19日事例

(1) 総観場の気象状況

図 3.2.11 は 2 月 18 日 06 時～19 日 18 時の地上天気図である。日本周辺では、18 日 06 時～18 時にかけて西高東低型の冬型の気圧配置となっているが、等圧線の間隔は他の事例の時と比べて広い。また、低気圧が北海道を通過している。19 日では、大陸の高気圧が東進し、東日本を中心に日本列島を覆っている。

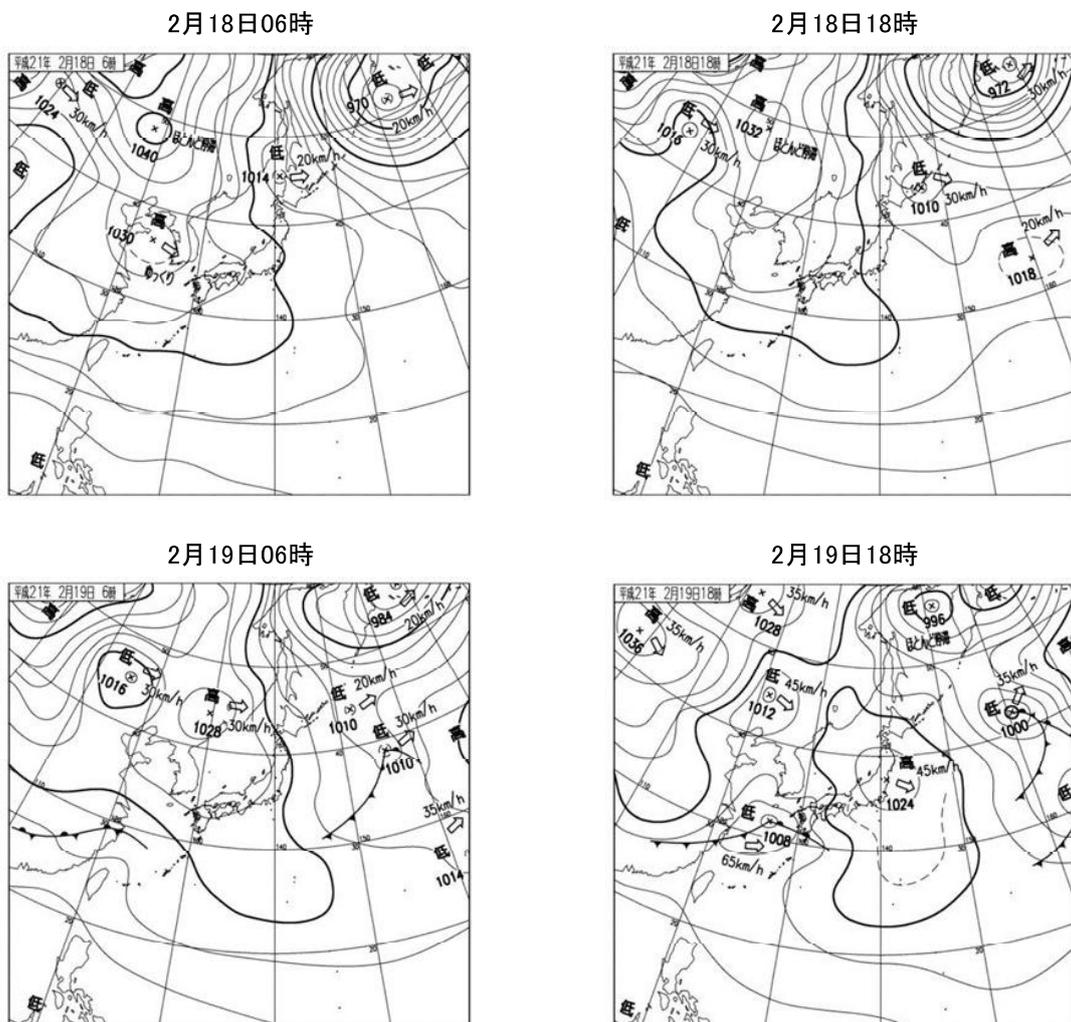


図 3.2.11 地上天気図

(2009年2月18日06時～19日18時)

(2) アメダス地点の風・気温変化

図 3.2.12 はアメダス 4 地点（能代・五城目・鷹巣・大館）における 2 月 17 日 00 時～20 日 00 時の風速、風向、前 1 時間最大瞬間風速、気温の時間変化である。

主な結果は次の通りである。

- 17 日～19 日、風速は能代を除く 3 地点で日中に強くなる傾向が見られる。能代では、そのような傾向が明瞭ではないが、前 1 時間最大瞬間風速では同じ傾向が見られる。
- 風速は 4 地点の中では能代が最も強く、地吹雪期間の風速は、能代で 6～8 m/s、五城目と鷹巣で約 2～4 m/s、大館で約 2 m/s である。
- 地吹雪期間の前 1 時間最大瞬間風速は、能代で約 15 m/s、五城目・鷹巣・大館で約 10 m/s である。風速は、五城目・鷹巣に比べ、大館はやや弱い傾向が見られる。
- 地吹雪期間中の卓越風向は、能代・五城目では西～北西、鷹巣・大館では南西～西である。
- 気温は、4 地点とも日中に高くなる日周期の変動が見られるが、地吹雪期間である 18 日及び 19 日日中では気温は 0℃以下である。

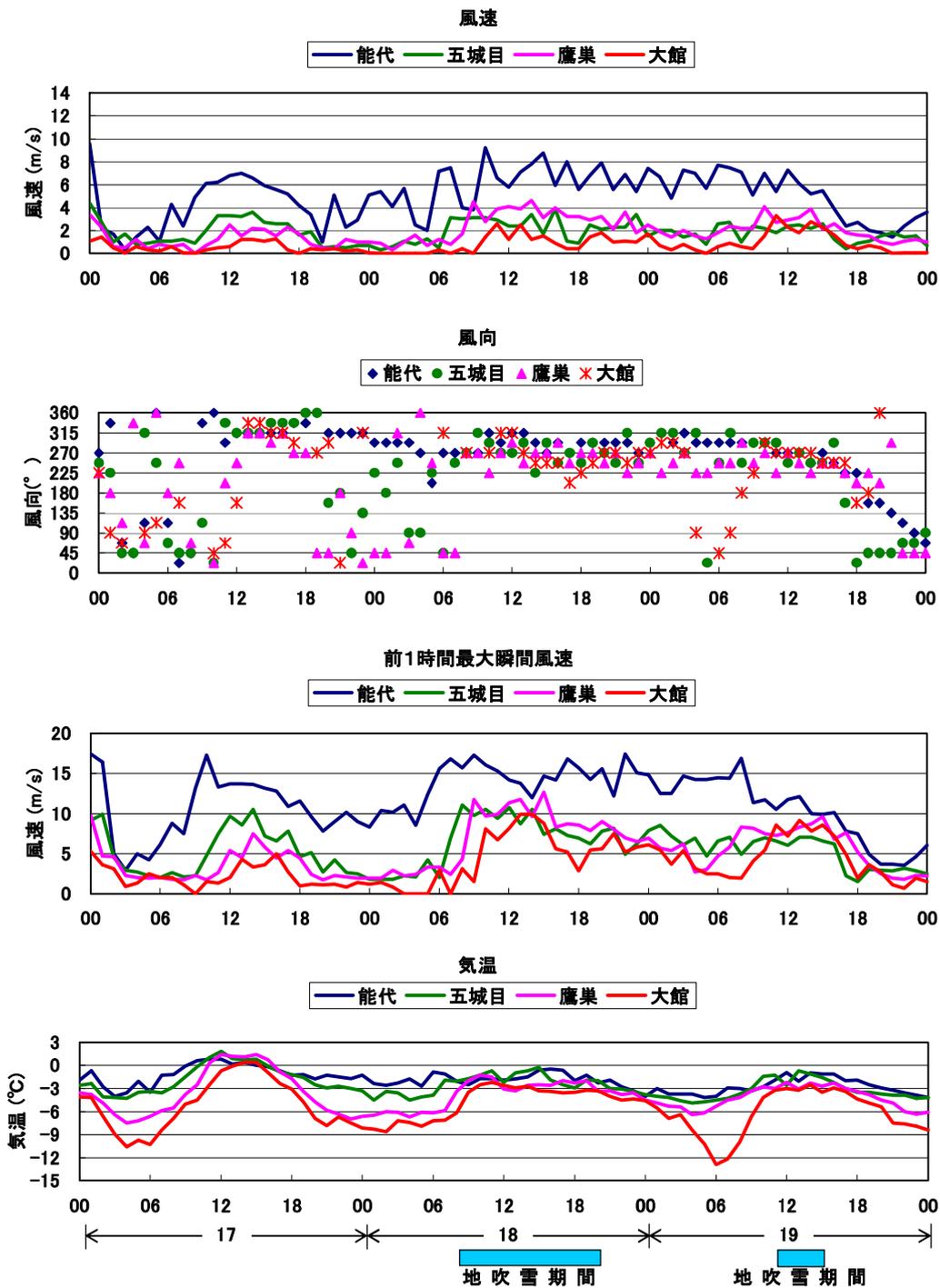


図 3.2.12 風速・風向・気温の時間変化
(2009年2月17日00時～20日00時)

3.2.7 2009年2月21日事例

(1) 総観場の気象状況

図 3.2.13 は 2 月 20 日 18 時～22 日 06 時の地上天気図である。日本周辺では、20 日 18 時～21 日 06 時にかけて西高東低型の冬型の気圧配置となっている。大陸の高気圧は移動性となり、21 日 06 時から 22 日 06 時にかけて西日本を通過し、冬型の気圧配置は弱まっていく。

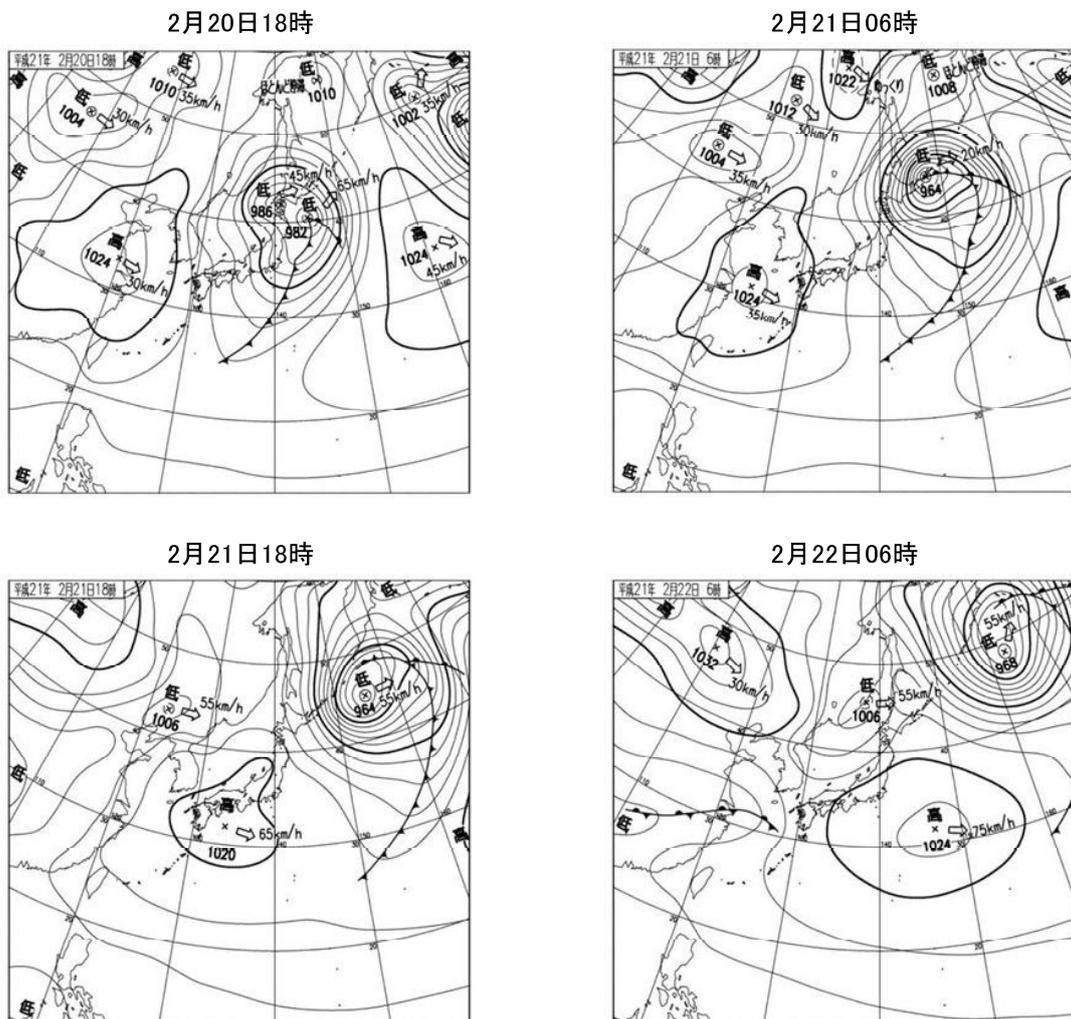


図 3.2.13 地上天気図
(2009年2月20日18時～22日06時)

(2) アメダス地点の風・気温変化

図 3.2.14 はアメダス 4 地点（能代・五城目・鷹巣・大館）における 2 月 19 日 12 時～22 日 12 時の風速、風向、前 1 時間最大瞬間風速、気温の時間変化である。

主な結果は次の通りである。

- 風速は、4 地点共に 20 日 15 時ごろ強くなり、地吹雪期間直前の 21 日 00 時ごろ最も強い。
- 地吹雪期間の風速は、能代で 6～12 m/s、五城目で約 4 m/s、鷹巣や大館では 2～4 m である。
- 前 1 時間最大瞬間風速は、地吹雪期間直前の 21 日 00 時ごろ最も強い。能代では約 30 m/s である。
- 地吹雪期間中の前 1 時間最大瞬間値は能代で 15～25 m/s、五城目で 5～15 m/s、鷹巣と大館で 10～20 m/s である。
- 地吹雪期間中の卓越風向は、能代・五城目では西～西北西、鷹巣では西南西～西、大館では西である。
- 気温は、4 地点とも風速の強まり始める 20 日 18 時ごろより下降し始める。

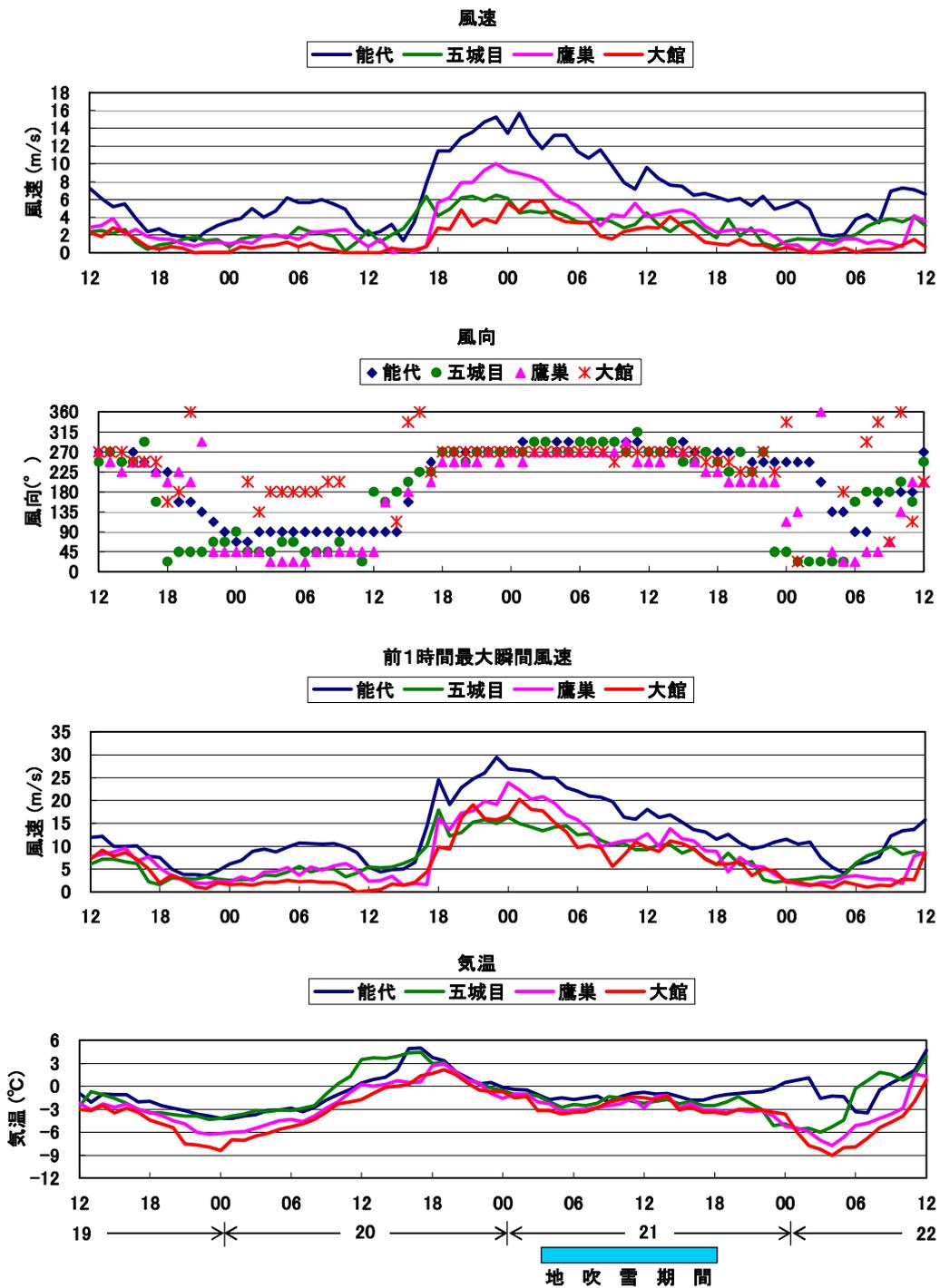


図 3.2.14 風速・風向・気温の時間変化
(2009年2月19日12時～22日12時)

3.2.8 地吹雪時気象状況のまとめ

表 3.2.1～3.2.2 にアメダス能代、五城目、鷹巣、大館における地吹雪時の風向・風速、気温の平均値と極値を、表 3.2.3 に気象状況の特徴を示す。

地吹雪時、総観場では寒冷前線が通過した後から西高東低の冬型の気圧配置が強まっていく状況が多い。本解析領域では、地吹雪時、海岸沿い平野部（アメダス能代・五城目）では西～西北西の風が、米代川沿い内陸部（アメダス鷹巣・大館）では西南西～西の風が卓越している。風速は、海岸平野では最大約 13 m/s、内陸部では最大約 7 m/s であり、海岸部の方が内陸部よりも風が強い傾向が見られる。地吹雪時の最大瞬間風速には 20 m/s よりも強い時も見られる。

気温は、風速の強まりと同時に下降し、日中でもほとんど上昇しないことが多い。内陸部の方がやや低い傾向が見られる。

表 3.2.1 地吹雪時の風速・風向・気温の平均値と極値（アメダス能代、五城目）

アメダス能代

地吹雪期間\項目	風速 (m/s)		最大瞬間風速 (m/s)	最大出現風向 (16方位)	気温 (°C)	
	平均値	最大値			平均値	最低値
2008年12月26日03時～27日19時	10.3	12.9	25.7	西北西	-3.3	-5.4
2009年1月10日20時～11日11時	8.1	9.0	17.4	西	-2.5	-4.0
2009年1月15日02時～16日07時	9.2	11.9	22.9	西北西	-2.8	-5.1
2009年1月23日23時～24日06時	8.3	9.5	17.9	西北西	-2.8	-4.0
2009年2月16日07時～17日01時	9.5	12.1	22.4	西	-3.3	-4.9
2009年2月18日08時～18日20時	6.7	9.2	17.3	西北西	-1.6	-2.5
2009年2月19日11時～19日15時	5.9	7.3	12.1	西	-1.4	-2.1
2009年2月21日03時～21日18時	9.3	13.2	25.0	西北西	-1.4	-2.0

アメダス五城目

地吹雪期間\項目	風速 (m/s)		最大瞬間風速 (m/s)	最大出現風向 (16方位)	気温 (°C)	
	平均値	最大値			平均値	最低値
2008年12月26日03時～27日19時	3.5	4.8	16.9	北西	-3.4	-5.3
2009年1月10日20時～11日11時	3.0	4.5	10.7	西	-3.1	-4.0
2009年1月15日02時～16日07時	—	—	—	—	—	—
2009年1月23日23時～24日06時	3.0	4.5	13.0	西北西、北西	-3.0	-4.5
2009年2月16日07時～17日01時	3.7	6.3	13.7	西	-3.9	-5.0
2009年2月18日08時～18日20時	2.5	3.9	11.1	西	-1.6	-2.9
2009年2月19日11時～19日15時	2.3	2.6	7.1	西南西	-1.5	-2.6
2009年2月21日03時～21日18時	3.4	4.7	14.4	西、西北西	-2.1	-2.7

表 3.2.2 地吹雪時の風速・風向・気温の平均値と極値 (アメダス鷹巣、大館)

アメダス鷹巣

地吹雪期間\項目	風速 (m/s)		最大瞬間風速 (m/s)	最大出現風向 (16方位)	気温 (°C)	
	平均値	最大値			平均値	最低値
2008年12月26日03時～27日19時	4.7	6.6	17.1	西	-4.2	-5.9
2009年1月10日20時～11日11時	3.6	4.5	12.7	西南西	-3.3	-4.5
2009年1月15日02時～16日07時	4.2	5.9	14.1	西	-3.5	-5.6
2009年1月23日23時～24日06時	1.8	4.2	9.6	西	-1.0	-2.5
2009年2月16日07時～17日01時	4.6	6.6	17.0	西南西	-4.7	-5.8
2009年2月18日08時～18日20時	3.5	4.6	12.7	西	-2.5	-3.4
2009年2月19日11時～19日15時	2.9	3.9	9.6	南西、西南西	-2.7	-3.1
2009年2月21日03時～21日18時	4.7	8.1	20.9	西	-2.5	-3.3

アメダス大館

地吹雪期間\項目	風速 (m/s)		最大瞬間風速 (m/s)	最大出現風向 (16方位)	気温 (°C)	
	平均値	最大値			平均値	最低値
2008年12月26日03時～27日19時	2.5	4.7	12.8	西	-5.0	-6.8
2009年1月10日20時～11日11時	1.8	3.9	13.9	西	-4.2	-5.6
2009年1月15日02時～16日07時	1.6	2.9	11.6	西	-4.7	-6.1
2009年1月23日23時～24日06時	2.2	3.9	11.7	西	-4.3	-6.8
2009年2月16日07時～17日01時	2.1	3.8	12.7	西	-5.0	-6.2
2009年2月18日08時～18日20時	1.2	2.6	9.9	西南西、西	-3.3	-6.2
2009年2月19日11時～19日15時	2.5	3.3	9.1	西	-3.1	-3.5
2009年2月21日03時～21日18時	2.9	5.8	17.7	西	-2.6	-3.6

表 3.2.3 地吹雪時の気象状況の特徴

	総観場	風速	最大瞬間風速	風向	気温
海岸沿い平野部 (アメダス能代・五城目) 米代川沿い内陸部 (アメダス鷹巣・大館)	冬型(西高東低)の 気圧配置が卓越	2 ~ 13 m/s	26 m/s	西 ~ 西北西	-1 ~ -6 °C
		1 ~ 8 m/s	21 m/s	西南西 ~ 西	-1 ~ -7 °C

3.3 数値シミュレーションによる風の水平分布推定（2009年2月16日の事例）

3.3.1 数値シミュレーションの概要

地吹雪時における地上付近の風の詳細な水平分布を明らかにするために、数値モデルを用いて2009年2月16～17日の事例について再現実験を行った。用いた数値モデルは米国のNCAR（National Center for Atmospheric Research）を中心に開発され、一般に公開されているメソスケール気象モデルであるWRF（Weather Research Forecast）である。数値シミュレーションの初期値にはNCEP（National Center for Environmental Prediction）で公開されているGFS-FNL（Final Analysis Data）を用いた。シミュレーションでは、2009年2月15日15時の客観解析値を初期値とし、2009年2月17日09時までの42時間積分を行った。数値シミュレーションにおける計算条件を表3.3.1に、計算領域を図3.3.1に示す。

表 3.3.1 数値シミュレーション計算条件

初期値	GFS - FNL
地形分解能	30 秒
ネスト数	3
グリッド数(東西)	100, 200, 200
グリッド数(南北)	100, 200, 200
鉛直層数	28
グリッド間隔 (km)	25, 5, 1
時間間隔 (秒)	150, 30, 6

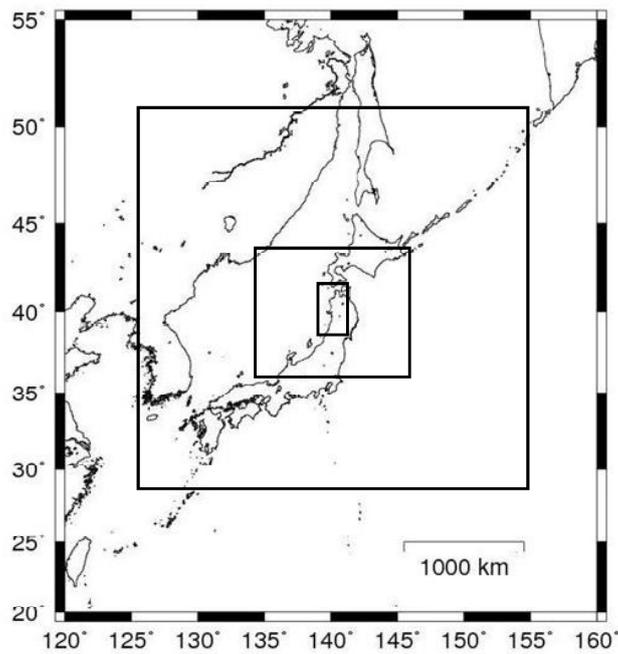


図 3.3.1 数値シミュレーション計算領域 (四角で囲まれた部分)

3.3.2 風・気温の再現

WRF による計算結果の再現性を検証するため、アメダス観測データとの比較を行った。図 3.3.2～3.3.5 は、2009 年 2 月 15 日 21 時～17 日 09 時の、アメダス能代・五城目・鷹巣・大館における風と気温、及び観測地点に最も近い格子点における数値シミュレーション結果の時間変化図である。図中の風速について、観測値の「風速」とは、定時の前 10 分平均値であり、最大瞬間とは前 1 時間最大瞬間風速を示している。また、風向の観測値とは定時の前 10 分平均値（ベクトル平均）である。一方、モデルの結果は風向・風速共に瞬間値である。

主な結果は次の通りである。

- 風速の時間変動について、モデル結果でも、4 地点共に地吹雪時に風が強くなる。
- 風速の値について、地吹雪時では、アメダス能代を除いて、モデル結果は観測値の前 1 時間最大瞬間風速とだいたい同じ値である。アメダス能代では、前 10 分平均値とだいたい同じである。
- 風向について、地吹雪時では 4 地点共に観測とモデルの結果はだいたい同じで、西～北西である。風の弱まる 16 日 22 時以降では、風向のモデルと観測の対応はあまりよくない。
- 気温の時間変動について、観測では地吹雪期間では気温が下降傾向であるのに対し、モデルでは下降傾向は明瞭でない。また、観測では内陸ほど気温が低くなる傾向が見られるが、この傾向も明瞭ではない。

モデル結果は、風の変動については特に観測の最大瞬間風との対応が良く、数値シミュレーションは、地吹雪時の最大瞬間風については再現性が良い。

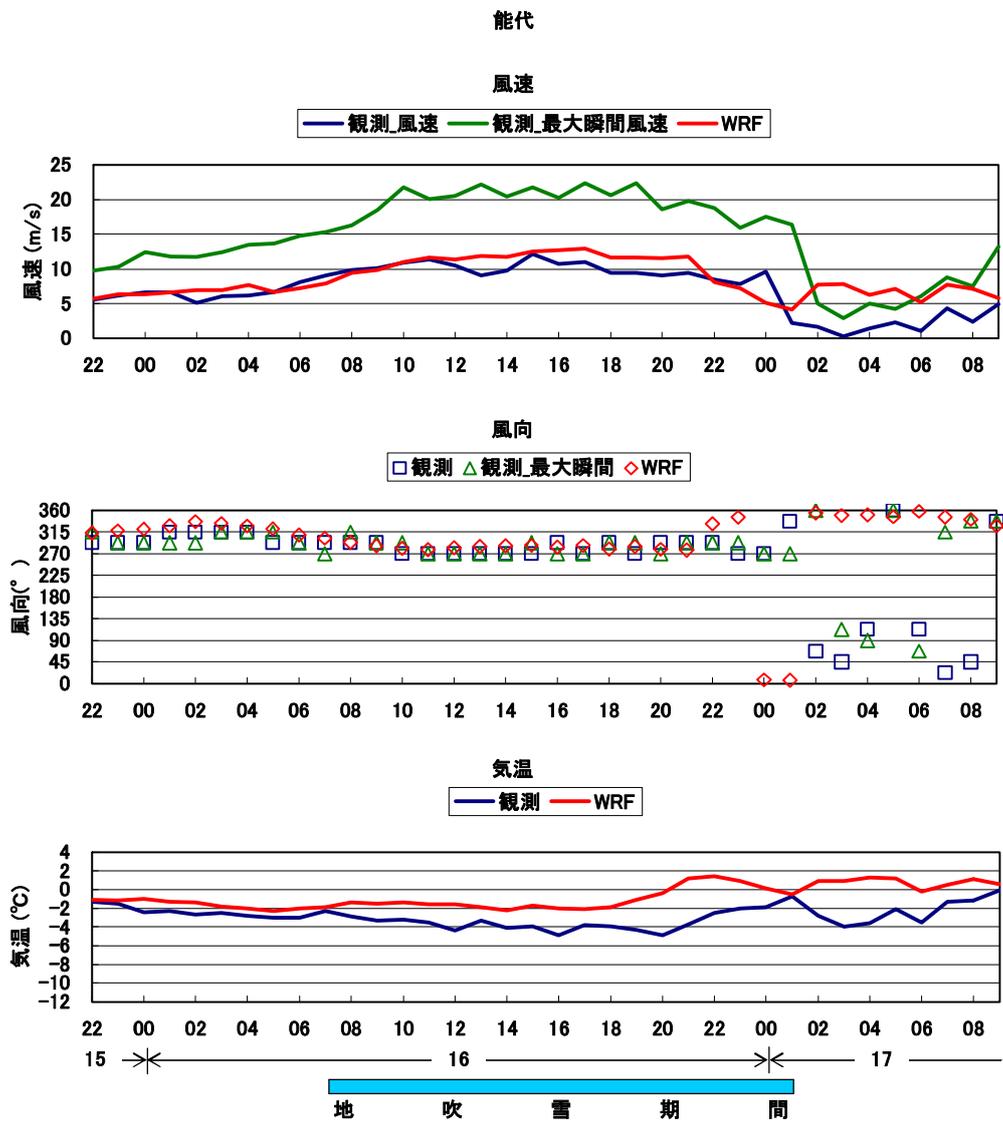


図 3.3.2 アメダス能代における風・気温の観測値と数値シミュレーション結果
 2009年2月15日22時～17日09時。風向風速の「最大瞬間」とは前1時間における最大瞬間風速とその風向を示している。

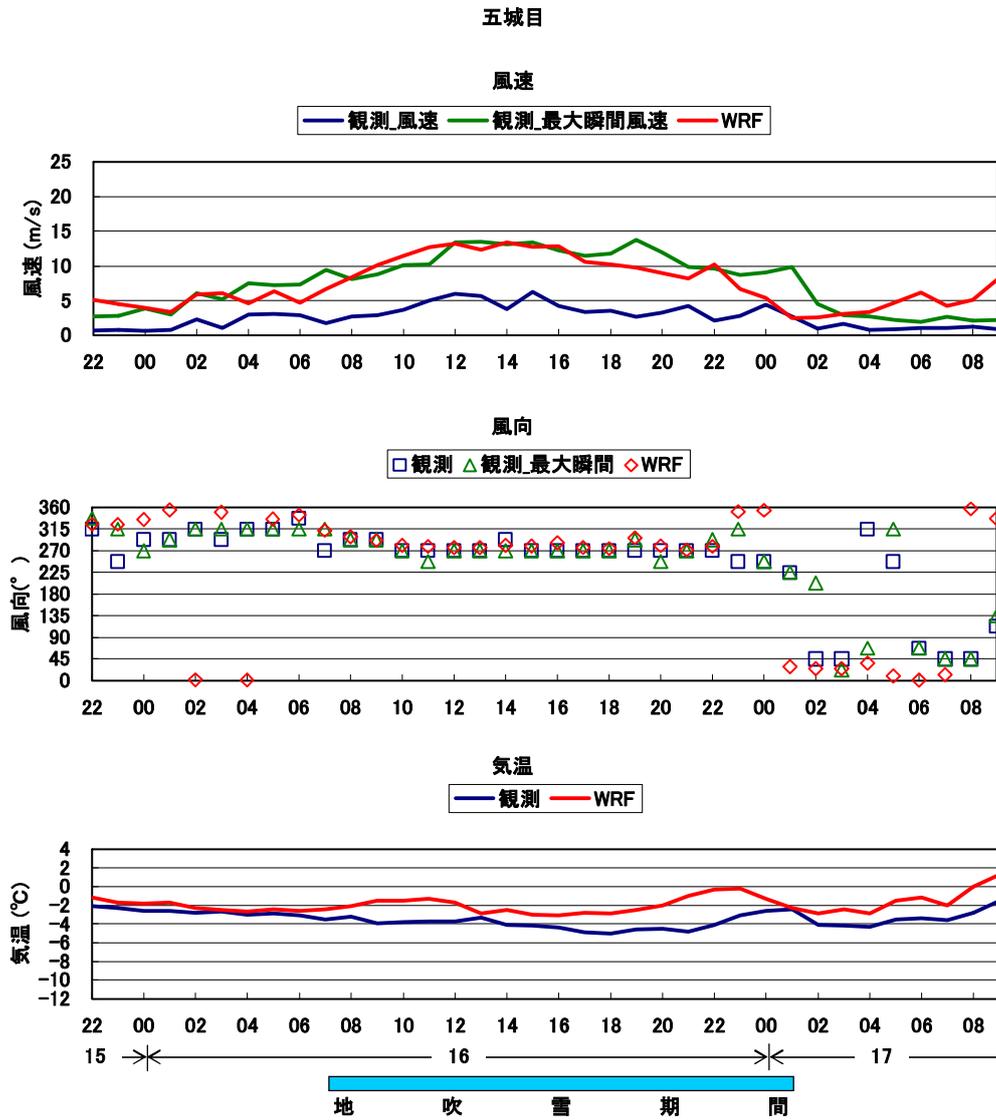


図 3.3.3 アメダス五城目における風・気温の観測値と数値シミュレーション結果
 2009年2月15日22時～17日09時。風向風速の「最大瞬間」とは前1時間における最大瞬間風速とその風向を示している。

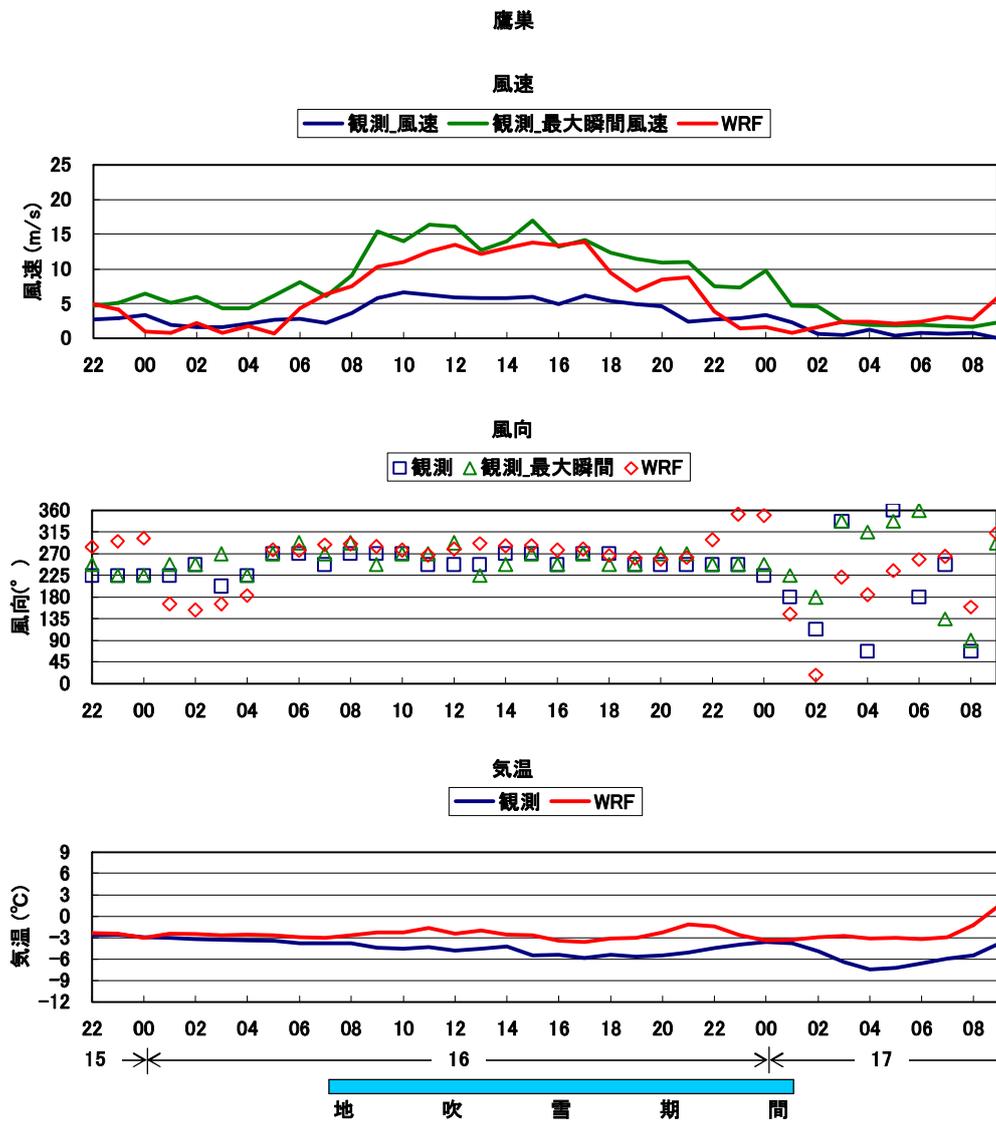


図 3.3.4 アメダス鷹巣における風・気温の観測値と数値シミュレーション結果
 2009年2月15日22時～17日09時。風向風速の「最大瞬間」とは前1時間における最大瞬間風速とその風向を示している。

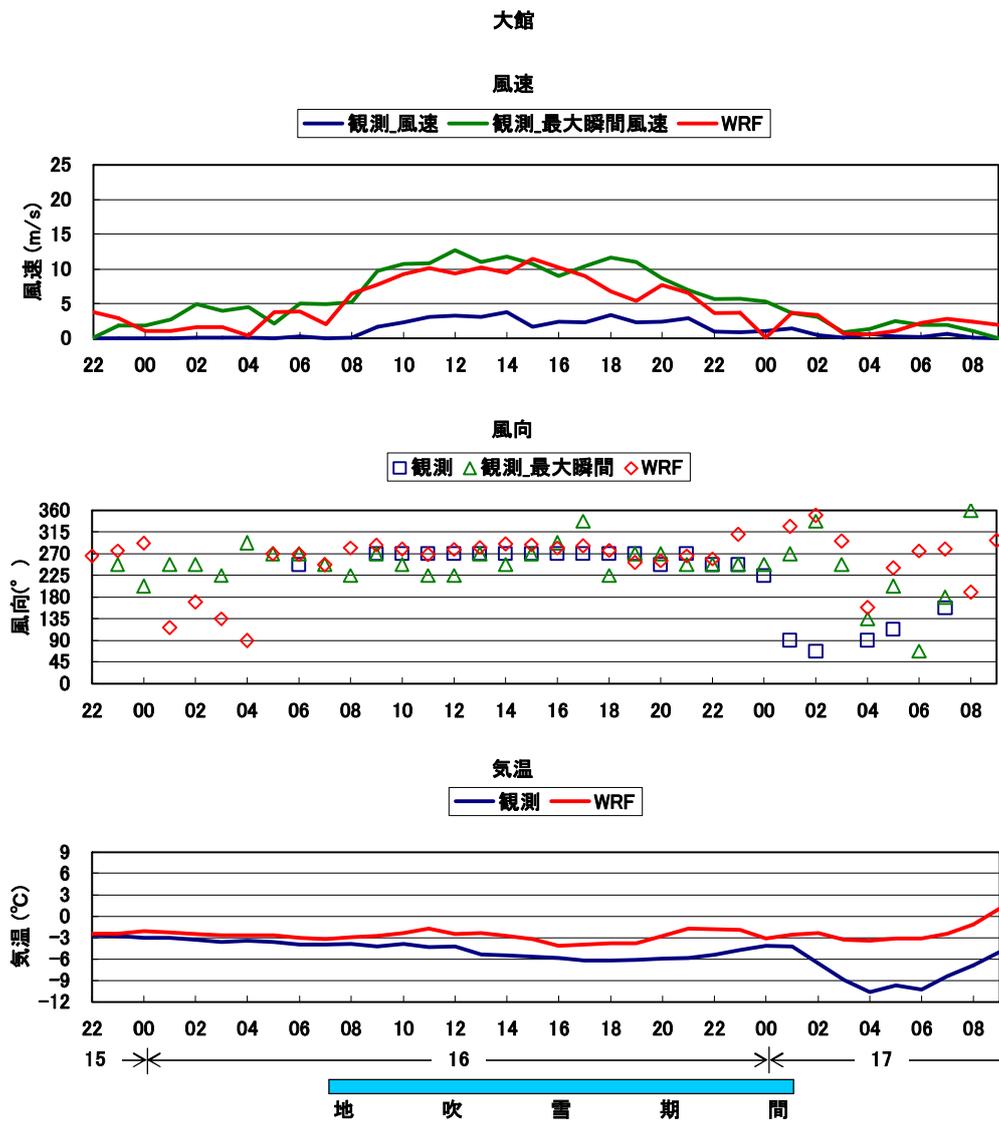


図 3.3.5 アメダス大館における風・気温の観測値と数値シミュレーション結果
 2009年2月15日22時～17日09時。風向風速の「最大瞬間」とは前1時間における最大瞬間風速とその風向を示している。

3.3.3 地吹雪時における風の水平分布

前節において、数値シミュレーション結果は、地上における最大瞬間風速との対応が良く、その再現性が良いことが示された。ここでは、シミュレーション結果による風の水平分布を示す。図 3.3.6 及び図 3.3.7 は、それぞれ風速が最も強い時間帯に含まれる 2009 年 2 月 16 日 12 時の風速と風ベクトルの水平分布である。風速分布の水平分解能は 1 km である。また、図 3.3.7 のベクトルは、水平分解能は 1 km であるが、10 km 間隔で示している。

主な結果は次の通りである。

- 風速は、海岸線沿いで最も強く、内陸にいくにしたがって弱くなる傾向が見られる（図 3.3.6 参照）。
- 風向は西北西～西で、内陸ほど西になる傾向が見られる（図 3.3.7 参照）。
- 風向に対して垂直に面した山岳斜面（東西に面した山岳の斜面）の麓では風速の弱まりが見られる（風向は図 3.3.7、風速は図 3.3.6 と図 3.3.7 参照）。
- 国道 7 号線が通る米代川沿いでは、同じ内陸であっても他の山岳域に比べると風が強い傾向が見られる。
- アメダス能代は海岸に近く、風が強い。一方、アメダス大館は山岳の風下側に位置し、風が他の 3 地点に比べ弱い。
- アメダス大館より北北東へ伸びる谷筋（国道 7 号線や奥羽本線が通っている）では風速は特に小さく、風が弱い。
- 男鹿半島にある山岳風下側では、風速が周囲よりも弱い傾向が見られる。

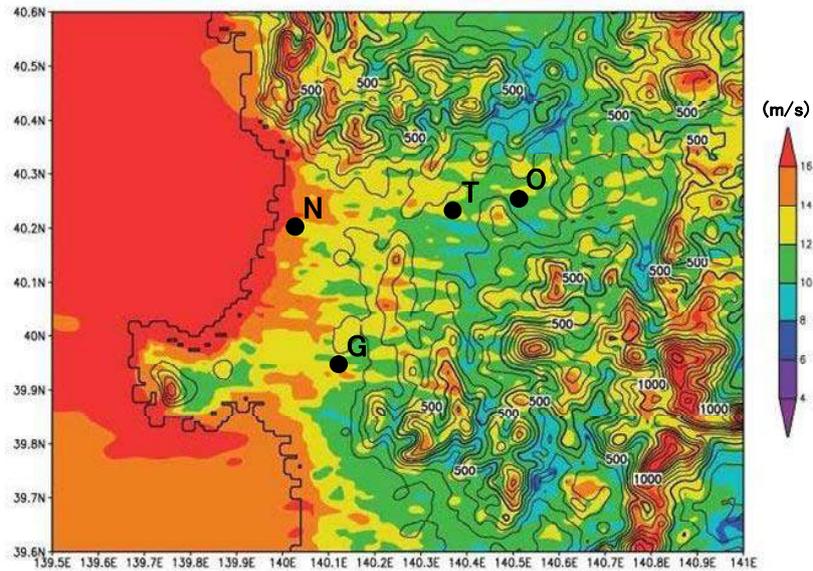


図 3.3.6 風速分布 (シェイド) と地形 (コンター線)

2009年2月16日12時

図中の黒丸はアメダス観測地点 (N:能代、G:五城目、T:鷹巣、O:大館) を示す。等高線の間隔は 100 m。

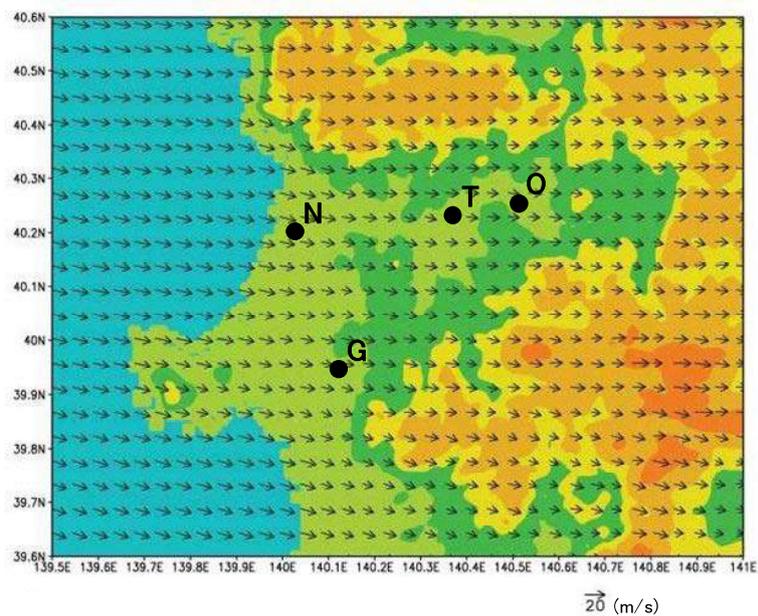


図 3.3.7 水平風ベクトル分布と地形

2009年2月16日12時

図中の黒丸はアメダス観測地点 (N:能代、G:五城目、T:鷹巣、O:大館) を示す。

次に、シミュレーション結果による風の水平分布の時間変化を示す。図 3.3.8、及び図 3.3.9 は、地吹雪期間である 2009 年 2 月 16 日 06～18 時における水平風速、及び水平風ベクトルの時間変化である。

主な結果は次の通りである。

- 06 時、地吹雪の起こる目安となる風速である 8.5 m/s よりも風が強いのは海岸線付近だけである（図 3.3.8）。
- 09 時、解析領域全体で風速が強まっており、平野部のほとんどで風速が 10 m/s 以上になっている。
- 12 時～15 時、内陸部でも風速が 10 m/s 以上の場所が見られ、アメダス鷹巣、大館がある米代川沿いにおいても風が強い。ただし、アメダス大館より北北東へ伸びる谷筋（国道 7 号線や奥羽本線が通っている）では風速は 10 m/s 以下である。
- 18 時、風は内陸から弱くなり、海岸線付近を除いてほとんどの地域で風速 10 m/s 以下となっている。
- 風向は、06 時～18 時まで西～北西の風が卓越している。
- 男鹿半島の山岳の東側では、山岳の風下側に当たり、平野部であっても風速が弱い傾向が見られ、アメダス五城目はこの領域にある。18 時では、男鹿半島の山岳風下側斜面から北東方向に、風速の弱い領域と強い領域が波状に分布している。

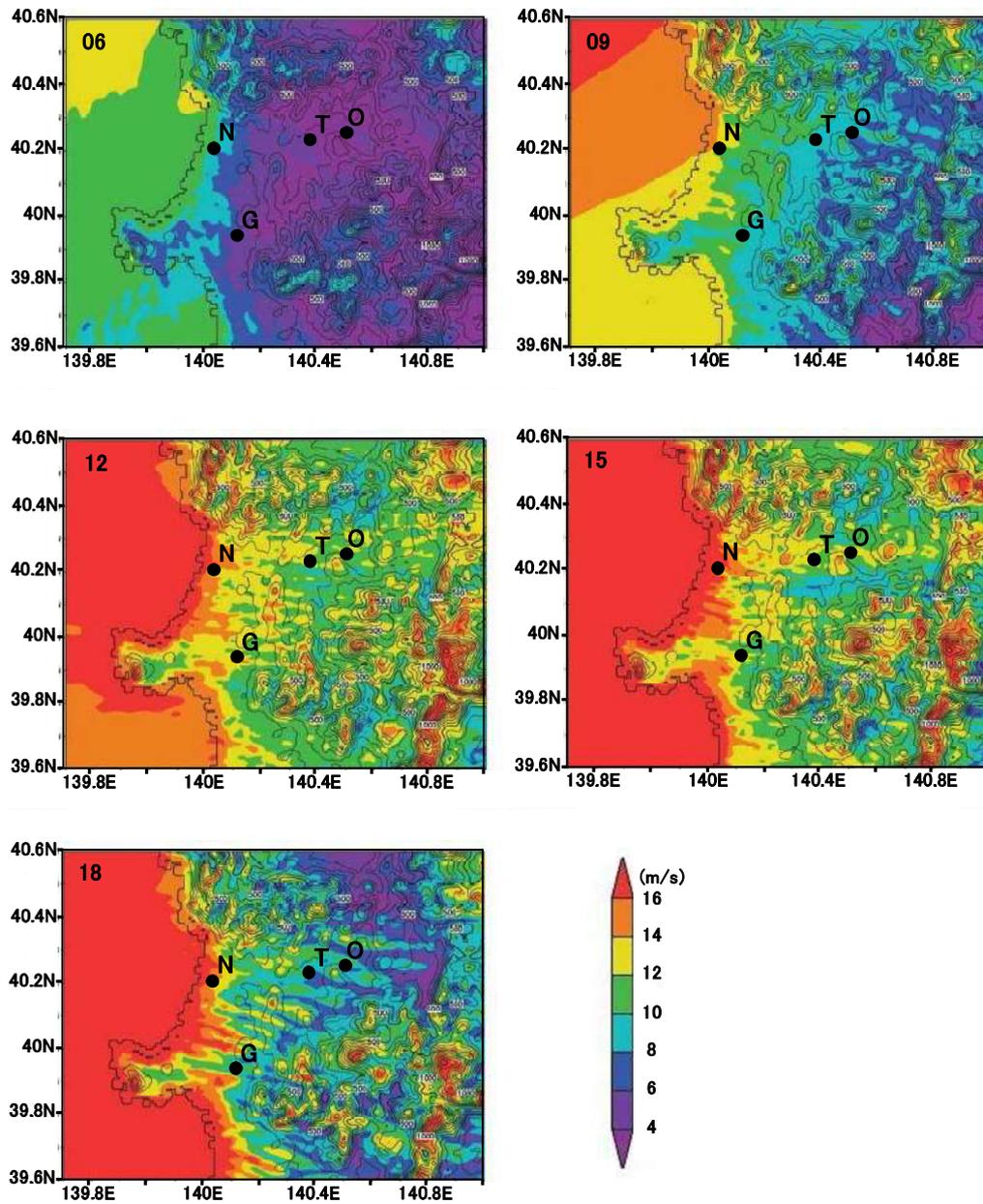


図 3.3.8 風速分布の時間変化

(2009年2月16日06~18時)

各図中左上の数字は時刻を、黒丸はアメダス観測地点 (N:能代、G:五城目、T:鷹巣、O:大館) を示す。

図中のコンター線 (黒) は等高線 (100 m 間隔) を示す。

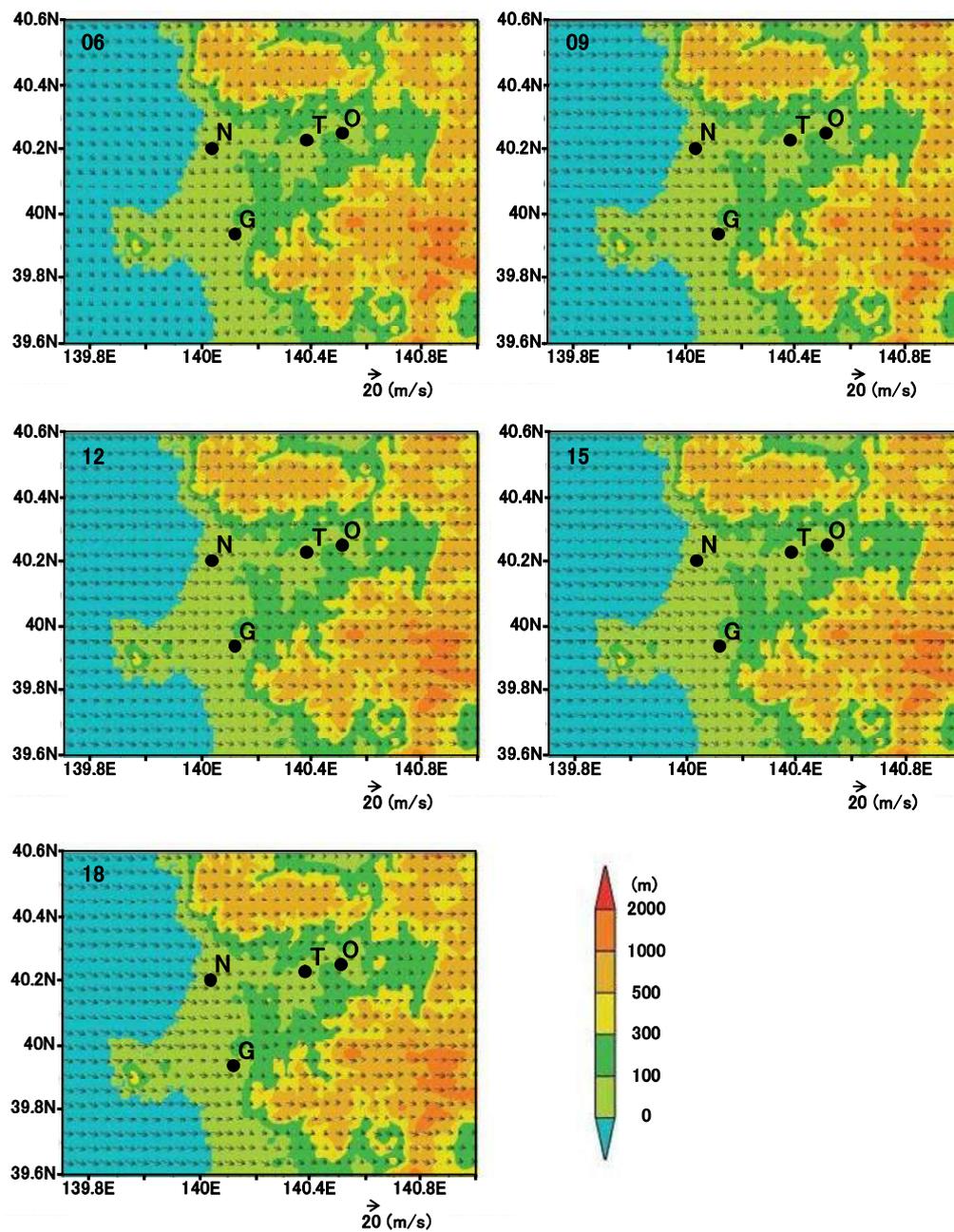


図 3.3.9 水平風ベクトルの時間変化

(2009年2月16日06~18時)

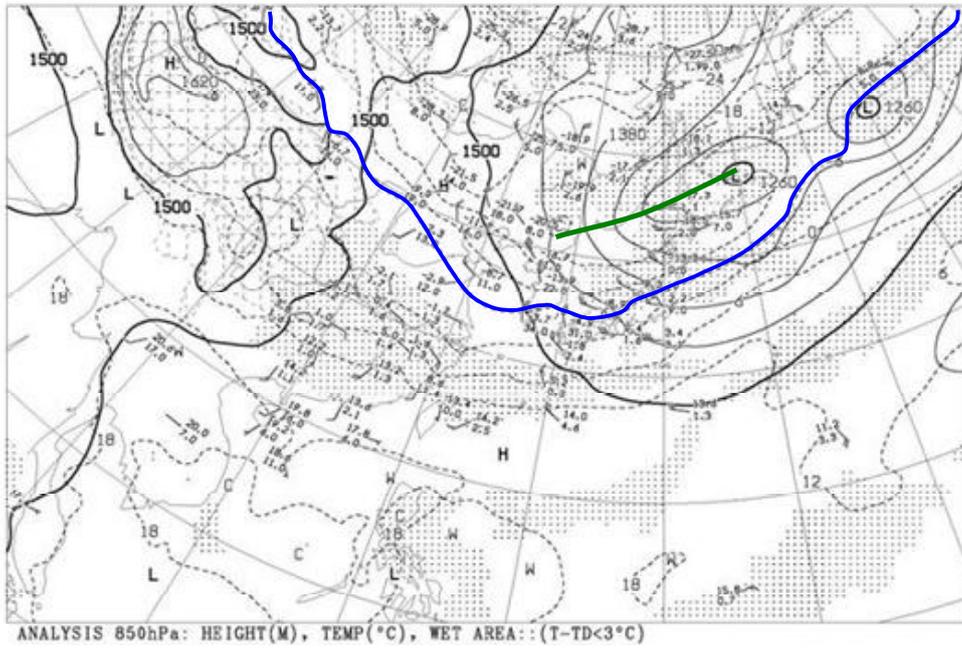
各図中左上の数字は時刻を、黒丸はアメダス観測地点（N:能代、G:五城目、T:鷹巣、O:大館）を示す。シェイドは地形を示している。

4. 考察

4.1 地吹雪日における気象特性

地吹雪日における総観場の特徴として、冬型（西高東低型）の気圧配置が卓越し、特に等圧線の走向が秋田付近で東西方向から南北方向へ変化していた。図 4.1.1 は、2009 年 2 月 16 日 09 時及び 17 日 09 時の 850 hPa 面天気図である。北海道の北東にある低気圧から気圧の谷が伸び、16 日から 17 日にかけて日本を通過し、低気圧は発達する。これと同期して温度傾度の大きな部分も日本を通過し、日本には冷たい空気が流入している。地上天気図（図 3.2.9）には、この発達した低気圧に対応した低気圧が北海道の北東に見られ、また、大陸の高気圧が西日本へ張り出してくるのが見られる。秋田付近における等圧線の走向の変化は、このような北の発達した低気圧と西の大陸性の高気圧の張り出しによるものであると考えられる。このような総観場は、これまでに報告された総観場の特徴（渡部, 1993）と共通しており、本研究で示された地吹雪時の総観場の特徴は典型的なものであったことがわかった。

2009年2月16日09時



2009年2月17日09時

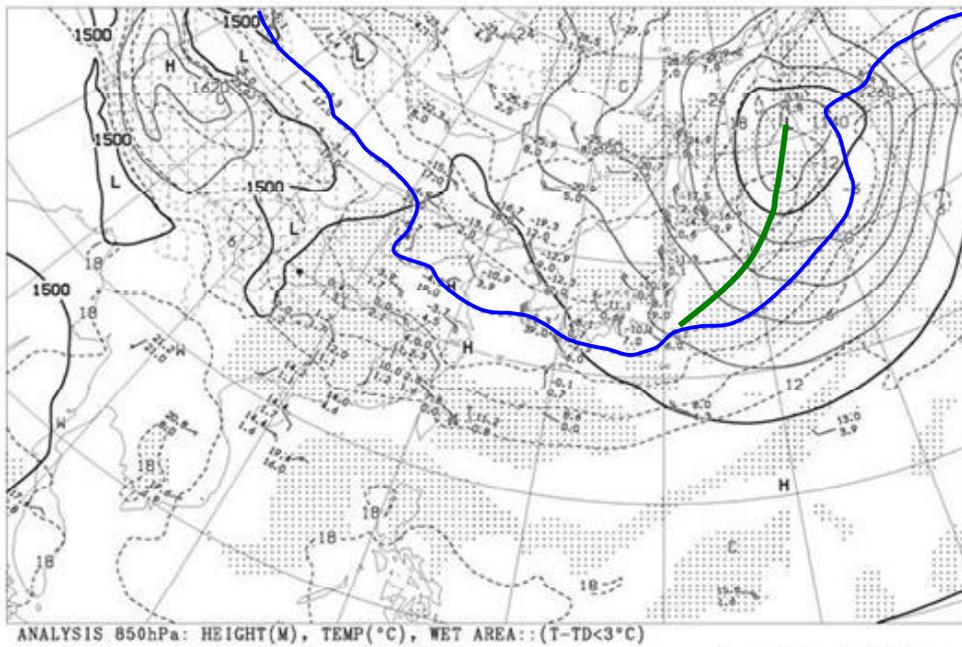


図 4.1.1 850 hPa 天気図

(上: 2009年2月16日09時、下: 2009年2月17日09時)

図中の緑線は気圧の谷を、青線は-6°Cの等温線を示している。

4.2 地形と風速の関係

(1) 海岸平野部と内陸部

地吹雪時における風速の水平分布では、風速は、山岳が分布する内陸に比べ平地の広がる海岸付近の方が強かった。内陸の山岳域では、特に山岳の風下斜面の麓付近で風速は弱かった。一般に風に対し障害物がある場合、障害物の風下側で風速が弱い。今回の事例解析においても、谷筋が南北に伸びた場所（例えばアメダス大館から北北東へ伸びた谷筋）では、地吹雪時でも風速が他の場所よりも常に弱かった。これは強い西～西北西の風が谷筋の西側の山岳によって遮られることによると考えられる。

(2) 男鹿半島の影響

男鹿半島には山があり、その東側は同じ平地であっても風速が弱い傾向が見られ、また、風速が強い領域と弱い領域が波状に分布していた。風が山岳を越えるか、迂回するかどうかを診断する物理量にフルード数がある。フルード数とは、大気の成層状態、山岳の高さ、風速に依存した無次元数であり、次の式で表される。

$$Fr = U / Nh \quad (4.2.1)$$

ここで、 U は風速、 N はブラントーパイサラ振動数、 h は山岳などの高さである。ブラントーパイサラ振動数 (N) は、大気安定度のパラメーターであり、次の式で表される。

$$N^2 = (g / \theta)(d\theta / dz) \quad (4.2.2)$$

ここで、 g は重力加速度、 θ は周囲の大気の温位である。フルード数が 1 よりも大きい場合、風は山岳を超えることができ、1 よりも小さい場合山岳を迂回する。

数値シミュレーション結果から 2009 年 2 月 16 日 12 時、及び 18 時におけるフルード数を求めた。ここで、大気の温位 (θ) は 950 hPa と 700 hPa の解析領域平均値とした。12 時、及び 18 時のブラントーパイサラ振動数 (N) は、それぞれ 0.00734 s^{-1} と、 0.00720 s^{-1} であった。フルード数 (Fr) を 1 とし、山岳の高さ (h) を 400 m とし、式 4.2.1 から風速 (U) を求めると、それぞれ 2.94 ms^{-1} と、 2.88 ms^{-1} であった。このことから、男鹿半島の山岳では、風は約 3 ms^{-1} よりも大きくなると山を越えることができ、地吹雪時では、風は山岳を越えていると考えられる。また、山岳の風下では山越え気流が上下に震動することによって地上における水平風速の分布が波状になっていると考えられる。

4.3 数値シミュレーションの再現性

アメダス観測地点における風速の数値シミュレーション結果と観測データの比較では、アメダス能代では、数値シミュレーション結果と10分平均風の観測値との対応が良かった。一方、アメダス能代以外（アメダス五城目、鷹巣、大館）では、数値シミュレーション結果は、各観測地点における前1時間最大瞬間風速との対応が良かった。各観測地点における風観測高度は、アメダス五城目、鷹巣、大館では6~10 m であるのに対し、アメダス能代では19 m と他の3地点よりも10~15 m 高い。一般に風は地上に近いほど地表面摩擦によって弱くなる。風観測高度の高いアメダス能代では、他の3地点よりも地表面摩擦の影響が小さい風を観測していると考えられる。これらのことから、数値シミュレーションでは、地表面摩擦の影響が実際よりも小さく、数値シミュレーション結果の地上風（高度10 m の風）は、現実の風よりも強くなったと考えられる。

今回数値シミュレーションに用いた初期値の空間解像度は1度×1度である。また、本シミュレーションでは6時間毎に客観解析値に近づくように4次元同化が行われている。こうしたことから、今回用いた客観解析値の解像度では地形の影響が小さくなると考えられる。また、地形の影響は用いる地形データの解像度にも依存する。佐藤（2010）は、気象庁非静力学モデルを用いた視程予測の実験において、解像度が粗い場合、地形が平滑化され内陸における風速の数値シミュレーション結果が実測値よりも大きくなることを指摘している。本研究で用いた地形データの解像度は30秒であり、地形が平滑化されている。より地形の影響を考慮した風の分布を明らかにするためには、数値シミュレーションの初期値、及び地形データの解像度をより細かくする必要があると考える。

5. まとめ

本研究では、秋田県能代地域における地吹雪時の気象特性と風の詳細な分布について、観測データ及び数値シミュレーション結果を用いて事例解析を行った。観測データにはアメダス能代、五城目、鷹巣、大館における観測データを用いた。アメダス能代・五城目は海岸沿いの平野部に、アメダス鷹巣・大館は内陸の山岳域から日本海へ流れる米代川沿いに位置する。気温、及び最大瞬間風速の観測データを用いて地吹雪期間を抽出した結果、8事例が抽出された。各事例について、天気図、観測データを用いて地吹雪時の気象特性を調べた。また、1事例について、数値モデルを用いて地吹雪時の風の水平分布を調べた。地吹雪時の気象特性、及び風の分布について次のことが示された。

- 能代地域では、地上気圧配置において日本の北にある低気圧から南へ伸びる気圧の谷が日本列島を通過し、寒気が流入してくる時に地吹雪が起きている。
- 2008年12月～2009年2月の地吹雪時における地上風（観測値）の強さは、海岸沿い平野部で2～13 m/s、米代川沿い内陸部で1～8 m/s であり、最大瞬間風速は、海岸沿い平野部で26 m/s、米代川沿い内陸部で21 m/s である。
- 地吹雪時の地上風の風向（観測値）は、海岸沿い平野部で西～西北西、米代川沿い内陸部で西南西～西であり、内陸ほど西になる傾向が見られる。
- 数値シミュレーション結果と観測データとの比較では、風速は観測値の風速よりも大きく、観測値の最大瞬間風速との対応が良い。風向については、地吹雪時ではシミュレーション結果と観測値の対応はよい。
- 数値シミュレーション結果において、風向に対して垂直に面した山岳斜面の麓では、特に風下側斜面において風速の弱まりが見られる。
- 数値シミュレーション結果では、男鹿半島の山岳の東側は、山岳の風下側に当たり、平野部であっても風速が弱い傾向が見られる。男鹿半島の山岳風下側斜面から北東方向には、山越え気流によると考えられる波状の風速分布が見られる。

今回の研究は事例解析であるが、数値シミュレーションによって定性的な風の分布が詳細に明らかになった。地吹雪時の視程推定には、定量的な風の分布が重要であり、今後はこれを明らかにする必要がある。その為には、数値シミュレーションの結果を基により適切な地上気象観測地点を決め、観測を行い、数値シミュレーション結果の検証を行いながら風向や風速を推定することが重要であると考えられる。

最後に、将来の地吹雪予報のイメージを図 5.1 に示す。(社) 雪センターの地吹雪予報 HP を参照にし、今回の数値シミュレーション結果（水平風速）を用いて作成している。この予報マップの特徴の 1 つは、道路だけでなく道路以外についても地吹雪強度等の情報をよ

り面的に詳細に提供できる点である。このような予報マップは、雪国の生活者、道路利用者に安心感を与える上で必ず役立つと考える。

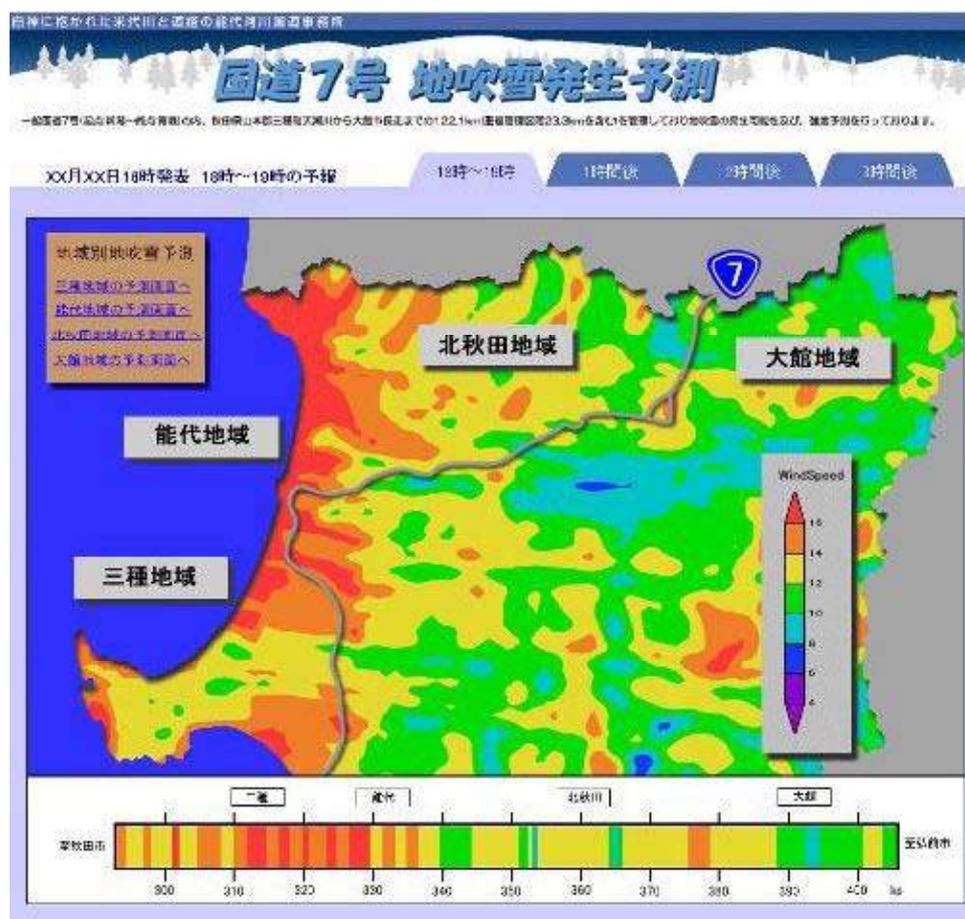


図 5.1.1 地吹雪予報イメージ

(社) 雪センター地吹雪予報 HP を参照に、本研究結果を用いて作成。図では風速の水平分布を示している。

参考文献

- [1] 国土交通省東北地方整備局 能代河川国道事務所, 2008:平成 19 年度 能代管内地吹雪予測検討業務報告書, (社) 雪センター, 58 p.
- [2] 国土交通省東北地方整備局 能代河川国道事務所, 2009:平成 20 年度 能代管内地吹雪予測検討業務報告書, (社) 雪センター, 57 p.
- [3] 近藤純正, 1987:地吹雪臨界風速のパラメータ化, 雪氷, 49, 67-73.
- [4] 佐藤 威, 2010:道路交通における取り組み -吹雪による視程悪化の予測実験と観測-, 天気, 57, 177-178.
- [5] 竹内政夫・福沢義文, 1976:吹雪時における光の減衰と視程, 雪氷, 38, 165-170.
- [6] 竹内政夫・石本敬志・野原他喜男・福沢義文, 1986:降雪時の高い地吹雪の発生臨界風速, 昭和 61 年度日本雪氷学会全国大会予稿集.
- [7] 松沢 勝・竹内政夫, 2002:気象条件から視程を推定する手法の研究, 雪氷, 64, 77-85.
- [8] 渡辺 貢, 1993:秋田のお天気, 無明舎出版, 232 p.

付録 1 秋田県能代地域における地吹雪現地踏査

1. 踏査概要

1.1 目的

本踏査の目的は、秋田県能代地域における地吹雪時の道路視程低下の様子や、防雪柵の効果を実際に確認することである。

1.2 日時

平成 22 年 2 月 6 日 （前日夕刻の気象状況、及び気象予報を基に決定）

1.3 場所

秋田県八郎潟町～三種町の国道 7 号線、及び大潟村の地方道（図 1.1 参照）



Google より

図 1.1 現地踏査地図

地図上の数字は 3 章における写真番号に対応しており、撮影位置を示している。

2. 踏査当日の気象状況

2.1 総観場の状況

図 2.1 に 2010 年 2 月 5 日 18 時～6 日 18 時の地上天気図を示す。この期間を通して、西高東低の冬型の気圧配置が卓越し、日本列島周辺の等圧線の間隔は狭くなっている。6 日 06 時には北海道の西には低気圧があり、この低気圧を囲むように等圧線が分布しているが、視察を始めた 12 時では、この低気圧は見られず、秋田県付近の等圧線は南北に伸びている。

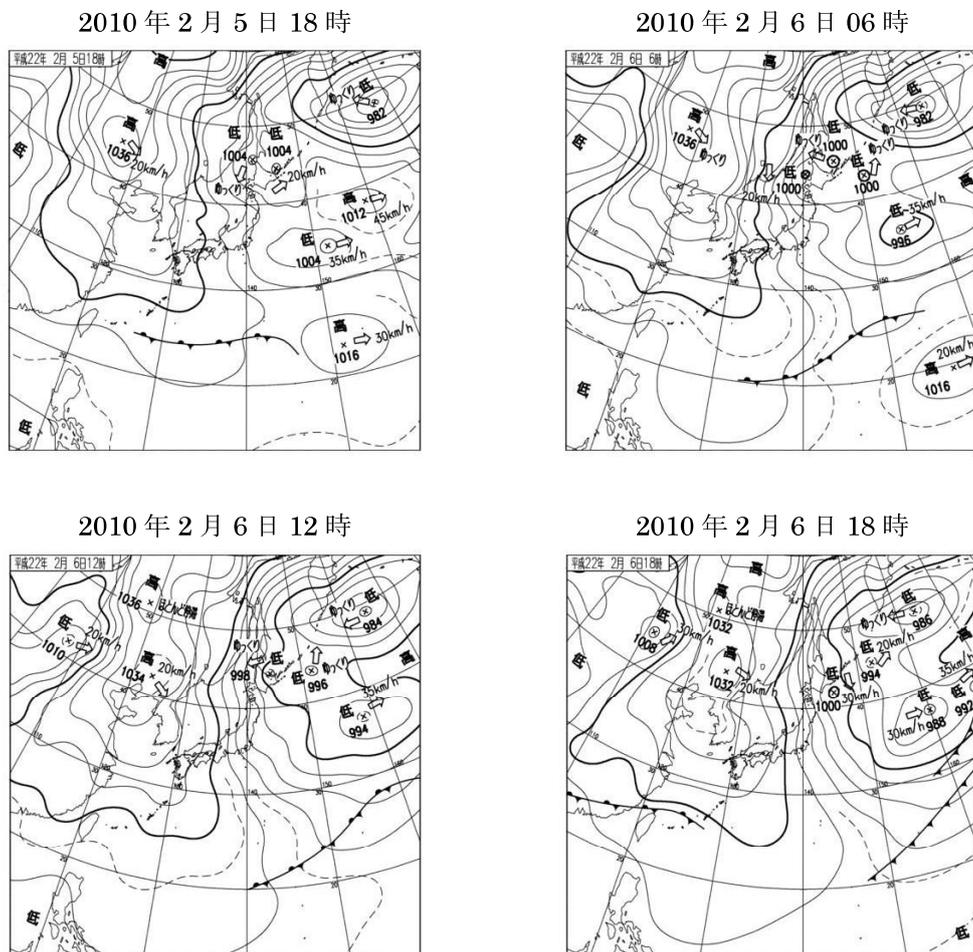


図 2.1 地上天気図 (2010 年 2 月 5 日 18 時～6 日 18 時)

2.2 アメダス観測地点における風・気温変化

図 2.2 はアメダス能代・五城目における 2 月 5 日 00 時～8 日 00 時の風速、風向、前 1 時間最大瞬間風速・気温・積雪深の時間変化である。踏査日は 2 月 6 日である。前 1 時間最大瞬間風速とは、前 60 分間での最大瞬間風速であり、例えば 12 時の値は、11 時（11:00 は含まない）～12 時（12:00 は含む）における最大瞬間風速である。地吹雪期間は水色の太線で示してある。

地吹雪期間における風速は能代で 8～12（前 1 時間最大瞬間風速 15～20 m/s）、五城目で 2～4 m/s（同 10～15 m/s）である。風向は能代・五城目共に西～北西である。気温は日中（6 日正午頃）でも上昇せず、 -2°C 以下の状態が続いている。これらの特徴は、本研究の解析期間である 2009 年 2 月の結果とあまり変わらない。能代・五城目共に積雪があり、これらのことから、視察日の 2010 年 2 月 6 日は典型的な地吹雪日だったと考えられる。積雪深の時間変化では、積雪深の増加が見られたことや、降水量も記録されていることから（図省略）、当日は吹雪もあったことがわかる。

現地踏査を行った時間帯に着目すると、12 時～13 時では一時的に風が弱くなっている。13 時以降風は再び強くなっている。

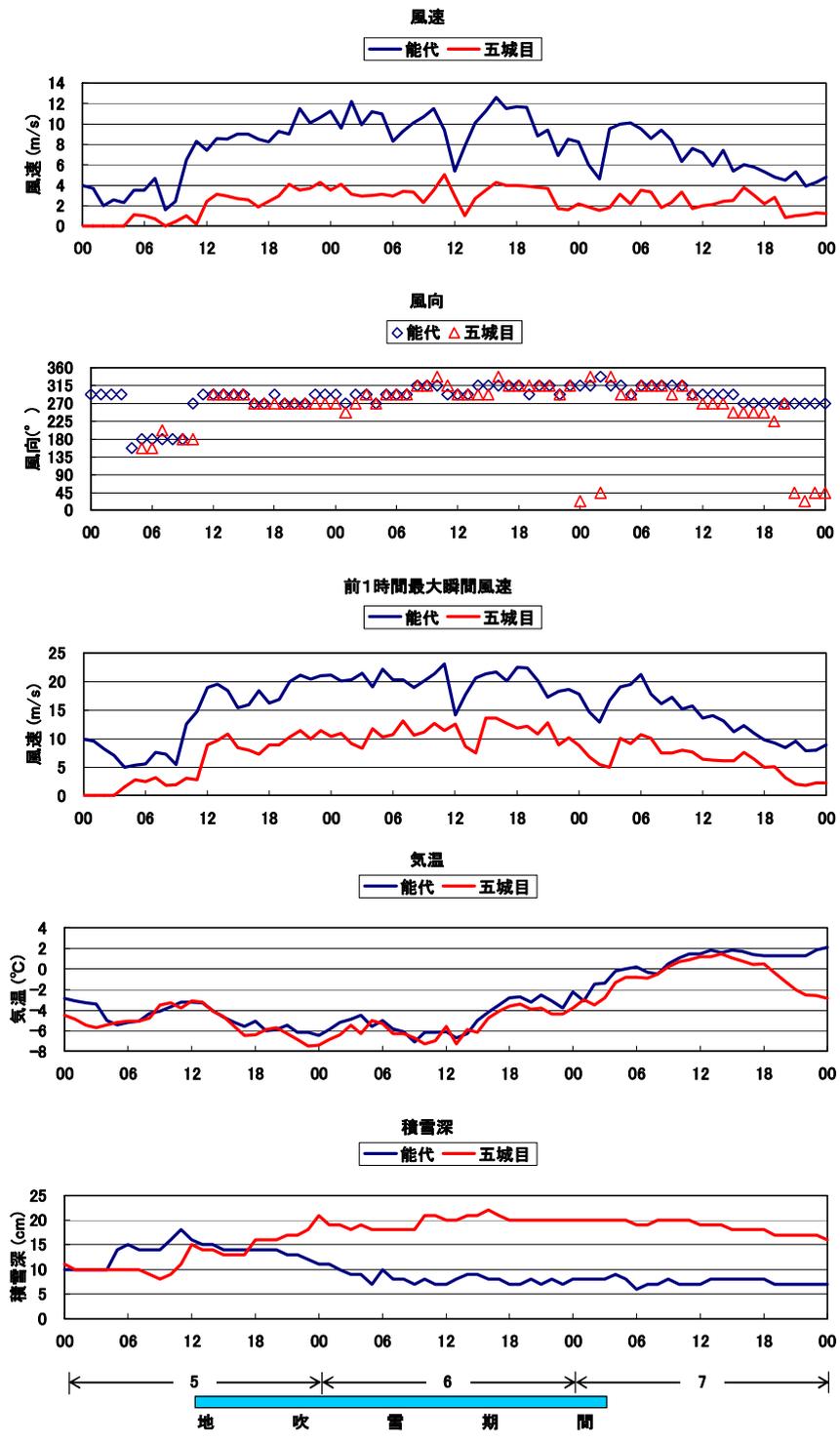


図 2.2 アメダス能代・五城目における風速・風向・気温・積雪深の時間変化
(2010年2月5日00時～8日00時)

3. 現地踏査

図 3.1～3.3 に踏査時の写真を示す。写真の番号は図 1.1 の写真を撮影した位置を示している地図上の番号と対応している。12 時～13 時では、アメダス観測結果では風が弱くなっていたが、国道 7 号線においても風が弱く、地吹雪は見られず、視程は良かった。防雪柵には主に吹き払い柵が設置されており、風上側（防雪柵設置側）の路線では路面が見えていた（写真①③⑨⑩）。場所によっては吹き止め柵が設置されていた。吹き止め柵の場所では、吹き払い柵の場所に比べて路面が見えなかった（写真⑤）。大潟村の地方道では吹きだめ柵（写真⑭）や防雪林（写真⑮）等が見られた。

13 時以降では、風が再び強くなり、地吹雪となった。地吹雪時、視程は、防雪柵が設置されている場所の方が設置されていない場所に比べて良いことが確認できた。特に、吹き払い柵の設置された場所では地吹雪時であっても風上側（防雪柵設置側）の路線の路面が確認でき、視線誘導効果もあることが確認できた（写真⑩）。防雪柵の種類が吹き止め柵から吹き払い柵へ変わる場所においては、路面の見え方も変化しており、吹き払い柵へ変わる所から路面がより確認し易くなっていた（写真④）。

写真① 12:10 柵あり
八郎潟町 夜又袋 国道7号線



写真② 13:33 (地吹雪時) 柵あり
八郎潟町 夜又袋 国道7号線



写真③ 12:15 柵あり
三種町 天瀬川 国道7号線



写真④ 13:28 (地吹雪時) 柵あり
三種町 鯉川 国道7号線



写真⑤ 12:16 柵あり
三種町 鯉川 国道7号線



写真⑥ 13:26 (地吹雪時) 柵なし
三種町 鯉川 国道7号線



図 3.1.1 道路状況写真 (その1)
写真番号は図 1.1 の地図上の番号と対応している。

写真⑦ 12:19 柵なし
三種町 道の駅ことおか 国道7号線



写真⑧ 13:25 (地吹雪時) 柵なし
三種町 道の駅ことおか 国道7号線



写真⑨ 12:19 柵あり
三種町 鹿渡 国道7号線



写真⑩ 13:24 (地吹雪時) 柵あり
三種町 鹿渡 国道7号線



写真⑪ 12:24 柵あり
三種町 鹿渡 国道7号線



写真⑫ 12:27 柵あり
三種町 森岳 国道7号線



図 3.1.2 道路状況写真 (その2)
写真番号は図 1.1 の地図上の番号と対応している。

写真⑬ 12:28 柵あり
三種町 鶴川 国道7号線



写真⑭ 12:34 柵あり
大潟村 方口 地方道



写真⑮ 12:34 防雪林
大潟村 大潟 地方道



写真⑯ 13:16 (地吹雪時) 柵なし
大潟村 東野 地方道



写真⑰ 13:22 (地吹雪時) 柵なし
大潟村-三種町 境界付近 新生大橋



写真⑱ 13:23 (地吹雪時) 柵なし
三種町 鹿渡信号交差点



図 3.1.3 道路状況写真 (その 3)
写真番号は図 1.1 の地図上の番号と対応している。

付録2 吹雪（強風）予測シミュレーションの現状調査

1. 調査概要

1.1 目的

道路の吹雪多発箇所の調査、吹雪予測、及び強風予測の方式、シミュレーション利用の状況調査。

1.2 日時

平成22年3月31日（水）

1.3 場所

仙台市周辺 東日本高速道路株式会社 東北支社、国土交通省東北地方整備局等

2. 調査内容

2.1 吹雪による視程障害

吹雪は、視程障害に対する規制措置の判断や、吹き溜まりによる交通障害に対する除雪作業時期の判断となる情報が必要になる。吹雪の発現は、気象条件と地形条件に大きく左右される現象である。気象条件は、風向風速、気温、降雪状況、雪質等が関連し、地形条件は、風上側雪原の吹送距離や、雪原の植生、小川や地物の状況などが影響する。吹雪の発生状況は、気象条件だけでみると、風上側に雪原が広がり、気温は0℃以下（低いほど雪質はしまり、高い吹雪になりやすい）、風速は8m/s以上（瞬間風速が20m/sを超えると視程は10m以下にもなり車両走行が困難となる）、降雪あり（降雪中は吹雪が継続する）の気象条件が同時に生じたときに起こりやすい。吹雪の発現は、局地性が強く、風上側の雪原の展開や、積雪状況にも左右されるため、吹雪が発現しやすい地域は、事前に地形条件を調査し発現箇所を把握しておく必要がある。吹雪の発現の、主要な気象要素は、風向風速である。したがって、強風の計算シミュレーションによって強風域や、強風の度合い

を把握することができれば、吹雪時の交通運用に大きく役立つものである。このため、吹雪の発現箇所、吹雪シミュレーションに関する状況調査を行った。

2.2 吹雪の可能性のある地域

日本における吹雪による視程障害を概略把握するため、作成した吹雪可能性日数がある(高田原図)。図 2.1 は、気温 0°C 以下、風速 8m/s 以上、降雪ありの 3 条件が同時に起こったときに吹雪が生じやすいことから、これを吹雪可能性日数として求めたものである。この図から、北海道の広い範囲、北陸から東北にかけての降雪多発地域に吹雪が起りやすい所が存在していることがわかる。

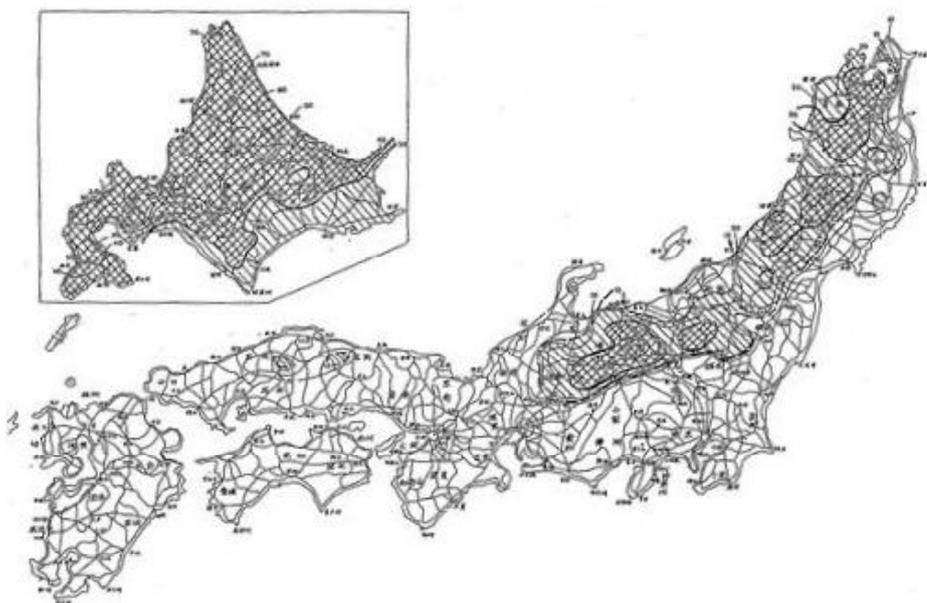


図 2.1 吹雪可能性日数 (日) (1984 ~ 1993、10年平均値)

2.3 高速道路における吹雪多発箇所

高速道路における吹雪の多発箇所は、ほぼ定まっており、各路線の以下に示す区間が該当する。この区間には、吹雪による視程障害緩和のため、各種の防雪柵が設置されている。この防雪柵を設置するに際しては、気象条件、雪質、降雪量などと共に、吹雪に対する防雪柵の効果を判定するための計算シミュレーションを行い、その上で防雪柵を設計、製作して、設置しているケースが多い。風況や雪質によって形状や、通風率を適切に選定する。道路の供用後は、各地点に設置された気象観測システム（視程計、気温計、風向風速計、降水検知器など）からの気象データを基にした吹雪情報を用いて、通行規制、吹き溜まり処理、除雪などを行なっている。

吹雪の予測については、それぞれの保全サービスセンター（以前の管理事務所）ごとに、大まかな判断が行われているが、視程障害の度合いのランク別判定までは行なわれてはいない。しかし、風速計と、視程計の情報から短時間予測ができるシステムは、構築されている所がある。

北海道：北海道については、吹雪多発箇所がいたるところにあり、特定できない。

東北道：郡山 JCT～福島西 IC（223～226kp、235～250kp）

国見 IC～仙台南 IC（274～288kp、304～307kp、323～324kp）

大和 IC～古川 IC（359～381kp）

水沢 IC～紫波 IC（458～486kp）

紫波 IC～盛岡 IC（498～505kp）

盛岡 IC～滝沢 IC（512～520kp）

滝沢 IC～十和田 IC（531～541kp、551～580kp、597～602kp）

碓ヶ関 IC～大鰐弘前 IC（630～641kp、643～659kp）

黒石 IC～青森 IC k（659～680kp）

磐越道：磐梯熱海 IC～会津版下 IC（94～104kp、120～130kp）

八戸道：浄法寺 IC～八戸 IC（578～586kp、595～607kp、608～622kp）

山形道：宮城河崎 IC～山形蔵王 IC（18～36kp、）

秋田道：横手 IC～協和 IC（52～56kp、67～89kp）

2.4 国道における吹雪多発箇所

東北北部から北海道における吹雪多発箇所は無数にあり、特に視程障害の多発する箇所については監視カメラが設置され、吹雪の状態と交通流を監視している。吹雪による視程障害の多発箇所は、工事事務所毎に把握されている。監視カメラは、近年多く設置されている。吹雪のナウキャスト（直前の予報）は行なわれているが、風況の分布解析を行なった所は見当たらなかった。酒田河川国道工事事務所などでは、吹雪多発箇所が詳細に調査されている。風況予測モデルを用いた吹雪時における風況の水平分布を予測しているケースは無かった。

3. 気象予測システムモデルについて

強風の予測などの”局地数値予報モデル”は、最近になって幾つかの手法が提案されてきている。流体力学や、熱力学の法則により、未来の気象現象を定量的に予測するためのシミュレーションソフトウェアを、数値予報モデルと呼ぶ。気象庁では、世界各国からの気象観測情報を収集し、スーパーコンピュータによる計算によって、日本全国の天気予報をはじめ、各種の気象情報を提供している。局地的な、気象現象を高精度にシミュレーションすることを目的として、開発されているモデルは、小さな領域で発生する気象現象の再現に適したモデルとして、非静力学モデルと呼ばれる数値モデルである。

気象庁では、地球全体の気象現象を GSM(Global Spectrum Model) により、水平格子間隔 55km 単位で予測し、さらに RSM(Regional Spectrum Model)によりアジア域の予測を水平格子感覚 20km 単位で行なってきた。その後、局地的な気象現象をキメ細かく予測するため、現在では、気象庁のメソ数値予報モデル MSM(Meso Scale Model) として、水平格子間隔が 5km で予報の現業に用いられている。

一方、MM5（第 5 世代 NCAR/Pen State メソスケールモデル）は、ある一つの領域、非静力学、複雑地形対応のシグマ座標系のメソスケール大気シミュレーション予測モデルである。このモデルは、MM5 モデリングシステムとして集積されたプログラムによるものである。MM5 モデリングシステムソフトウェアは、その殆どがフォートランで組まれている。また全世界のユーザーからの協力と共に、一つのメソスケールモデルとして、The Pennsylvania State University (PSU) と NCAR で開発されている。MM5 モデリングシステムソフトウェアは、自由に配布されており、NCAR のメソマイクロスケール気象部門の、メソスケール予報グループによってサポートされている。また、寄与している大学及び研究機関のいくらかのユーザーにより改良が加えられている。風に関する数値シミュ

レーションは、世界で最も普及しているメソ気象モデル MM5 によっても出来る。MM5 を用いた計算は、スーパーコンピュータでなくても、市販されているパソコンで行うことが可能である。

更に、アメリカでメソスケールモデルが乱立している反省を受け、統一して開発が進められている次世代気象モデルに WRF (ウオルフ : Weather Research and Forecasting) がある。プロジェクトとしては一つであるが、研究用と現業用とで 2 種類メンテナンスされている。

気象モデルは、種々のものがあり、誰もが自由に使えるモデルは多く存在しないが、比較的良く使われている気象モデルを列記すると次のようになる。

- RAMS (ラムス) : 米国コロラド州立大学 (CSU) で開発されているメソスケールモデル WRF への移行が進んでいる。
- ARPS (アールプス) : 米国オクラホマ大学 (OU) のストーム解析センター (CAPS) で開発されているメソスケールモデル。竜巻の研究が盛ん。WRF へ移行中。
- ETA(エータ) : 米国環境予測センター (NCEP:日本の気象庁に当る) で現業運用されているメソスケールモデル。鉛直座標系が特殊で、地形を考慮した気圧傾度力を正確に計算することができる。(静力学モデル)
- RSM(アールエスエム) : 米国環境予測センター (NCEP) で開発され、ハワイ地域で現業運用されているメソスケールモデル。スペクトル法を採用している。同じく日本の領域スペクトルモデルも RSM と呼ばれていたが、全く別のものである。
- CReSS (クレス : Cloud Resolving Storm Simulator) : 名古屋大学水循環研究センターを中心に開発されている雲解像モデル。
- CCSR/NIES AGCM (エイジーシーエム : Atmospheric General Circulation Model) : 東京大学気候システム研究センターと国立環境研究所も共同開発による大気大循環モデル。故沼口敦氏 (2001年6月30日逝去) の尽力による。現在は、地球フロンティア研究センターも加わり、共同体を形成し、地球温暖化予測研究に用いられている。近年は、地球環境フロンティア研究センターも開発に加わり、MIROC と呼ばれることもある。

- ・ NICAM(ニッカム：東京大学気候システム研究センター)：地球環境フロンティア研究センター、東京大学気候システム研究センターの共同開発による全球雲解像大気モデル。従来のスペクトルモデルに代わり、正二十面体格子を用い、地球シミュレータをはじめとする大型計算機環境で、最適に動作するように設計されている。MIROCの次世代モデルと位置づけられている。
- ・ IFS(アイエフエス)：ヨーロッパ各国が出資して設立した「ヨーロッパ中期予報センター (ECMWF)」で開発している全球スペクトルモデル。世界で最も予報精度がよいとされる。(予報モデルばかりでなく、データ同化システムの貢献が大きい) 世界中から優秀な研究者を高給で集め、高速なスーパーコンピュータ群でモデルを運用し、世界のモデル界を圧倒している。

本研究においては、市販されているパソコンで実行可能なメソスケール気象数値モデルである WRF を用いて解析を行った。

平成 21 年度 TC 研究助成成果報告書

2010 年 10 月

発行 社団法人雪センター

〒103-0012 東京都中央区日本橋堀留町 1-3-17

日本橋三洋ビル 7 階

TEL : 03(6740)2941

FAX : 03(6740)2942

ホームページ <http://www.yukicenter.or.jp/>