特 集

雪氷と風

低温風洞装置を用いた吹雪の実験的研究 Blowing Snow Experiments in a Cold Wind Tunnel

根本征樹*

Masaki NEMOTO

1. はじめに

地表面を流れる風は、地球表層上の様々な物質を移動・循環させる。降雪時や積雪面上における風は、しばしば吹雪を引き起こし、雪粒子は大気中を輸送される。強い吹雪は視程を著しく悪化させるとともに、吹きだまりや雪庇を形成し、交通障害や雪崩発生などの原因となる。また雪国の建築物では、建物周囲での吹きだまりや雪の吹き込み、屋根雪の偏分布荷重など様々な問題が吹雪により生じる可能性がある。南極氷床や北極域などの寒冷陸域では、吹雪による雪の移動(積雪再配分)が水循環や質量収支において重要な役割を担っている。

吹雪時における雪粒子の運動形態は、飛砂における砂粒子の運動と同様に、転がり(creep)、跳躍(saltation)、浮遊(suspension)の3つに分類される¹⁾。それぞれの明確な区別は困難であるが、高さは跳躍が10cm程度であるのに対して、浮遊では数十mを超える場合もあるといわれている。

吹雪の基礎的なメカニズムの解明や吹雪対策の検討などにおいて、風洞実験は有用な研究手法の一つとなっている。実験の場合、風速をはじめとする環境条件を任意に設定した上で現象を観察できる。また模型などを併用する場合、対象物の構造や配置について様々なパターンを試験することも野外観測とくらべれば比較的容易であるほか、観測よりも試験費用を抑えることも可能である。

さらに、同一条件の実験を繰り返すことが出来るため再現性の確認も容易である。こうした利点があるため、野外観測と並行して風洞実験による吹雪の研究もこれまで数多く行われてきた。

吹雪風洞実験は、1939年のFinny²⁾による、鋸くずや雲母の粉末を用いた、防雪柵の吹きだまり効果の研究がそのはじまりとされている。これは吹雪風洞実験のみならず、系統だった吹雪研究の最初の例とされている。

吹雪の風洞実験の実際として、現代では、様々な模擬雪粒子(活性白土、炭酸マグネシウム、ばん砕、クルミ粉末、おがくずなど)を使うものや、実際の雪を使うものがある。模擬雪の場合、常温での実験が可能であるが、実際の雪を使う場合には、低温室などによる低温環境を要する、あるいは実験期間が冬期に限られるなどの制約がある。本稿では実際の雪と、室内風洞を用いた吹雪実験について、(独)防災科学技術研究所雪氷防災研究センター新庄支所の環境実験施設である「雪氷防災実験棟(CES: Cryospheric Environment Simulator)^{3), 4)}」の紹介も含めて述べることにする。この場合、風洞全体が温度調整可能な実験室(低温室)に設置されていることになる(低温風洞)。模擬雪を用いた吹雪風洞実験や、冬期低温時において外気と自然雪を用いた風洞実験については佐藤⁵⁾、堤^{6), 7)}の解説にて例が示されているほか、スイス国立雪・雪崩研究所(SLF)の研究例^{8), 9)}などがあるの

* (独)防災科学技術研究所雪氷防災研究センター新庄支所 主任研究員
Senior Researcher, Shinjo Branch, Snow and Ice Research Center, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

で、そちらを参照されたい。

低温風洞を用いた吹雪実験の最大の特長は、低温下であるために実際の雪（野外で収集した自然雪や、人工的に作成した雪）を使用できることである。その場合、模擬雪実験とは異なり、粒子の粒径や物性などの違いを考慮する必要が無い。これは吹雪跳躍層の内部構造の解明において特に有利である。

2. 吹雪風洞実験

2. 1 雪氷防災実験棟

雪氷防災実験棟^{3), 4)}では、天然の雪に近い結晶形の雪を降らすことが可能な人工降雪装置をはじめ、降雨、日射装置が大型低温室（約1500m³）の内部に設置されており、様々な雪氷現象を実験室内で再現、制御することが可能である（図1）。風洞装置は吹雪現象の再現を主な目的としたものであり、温度制御可能な低温室内（-30～+25℃）に風洞全体が設置されている（図f）。表1に各装置の諸元をまとめた。

降雪装置は2種類あり、1つは樹枝状結晶に近い結晶形の雪（降雪A、図3）を降らすことができる。もう1つは直径数10mm程度の氷球の集合体からなる雪（降雪B、図4）を降らすことができる。

降雪A、Bによる積雪の初期密度はそれぞれ30kg/m³、200kg/m³程度である。いずれも降雪強度を5段階に変更可能であり、1時間あたり最大4cm程度の降雪深を実現している（図5）。

日射装置は約700個のメタルハライドランプを用いて日射を模擬するものであり、強度を50W/m²刻みで変更可能である。実際の日射スペクトル分布を忠実に再現することが望ましいが、ランプの波長域は日射の波長域を含んではいるもののスペクトル形状は完全には一致しない。

2. 2 低温風洞

風洞全体を低温室内に設置した低温風洞の例としては、北海道大学低温科学研究所の低温風洞施設^{10), 12), 12)}などがある（既に廃止）。本稿で紹介する雪氷防災実験棟の低温風洞装置¹³⁾は、低温科学研究所の風洞装置を参考に設計されており、その構造は共通する部分が多い。

風洞装置は密閉型回流式で、測定部は長さ14m、幅1m、高さ1m、最大風速は20m/sである（図6）。風洞内部にも空調器が設置されており、きめ細かな温度制御が可能である。測定部の底面には深さ20mm、幅0.8mの溝がつけられており、雪を敷き詰めて水平様な雪面を作りやすくするための工夫がなされている（図7）。

一般に、ある風速のもとで、吹雪が飽和状態（その

図1 雪氷防災実験棟（CES）の各種装置の配置

表1 雪氷防災実験棟（CES）の主要な装置

装置名	機能	仕様
降雪装置A	樹枝状結晶(径0.5～5mm)の霜を降らせる装置	降雪強度:0～1mm(水換算)/時, 5段階(手・自動) 運転時間:連続72時間(最大) 降雪範囲:3m×5m
降雪装置B	氷球(径約0.025mm)を降らせる装置	降雪強度:0～5mm(水換算)/時, 5段階(手・自動) 運転時間:連続72時間(最大) 降雪範囲:3m×5m
降雨装置	微小水滴を降らせる装置	降雨強度:0～2mm/時, 5段階(手・自動) 運転時間:連続12時間(最大) 降雨範囲:3m×5m
日射装置	太陽光のスペクトルに近い日射を照射する装置	日射強度:0～1000W/m ² , 50W/m ² 毎(手・自動) 照射範囲:3m×5m 傾斜角:0～45度, 任意(手動)
降雪テーブル	降雪を積もらせる台, 昇降・傾斜可能	傾斜角:0～45度, 任意(手動) 水平寸法:3m×5m 昇降範囲:700mm(手動)
風洞装置	任意の速さの風を発生させる装置	測定部寸法:長(X)12m×横(Y)1m×縦(Z)1m 風速:0～20 m/秒, 任意(手・自動) 温度調整可能(但し低温実験室と連動)
横風発生装置	降雪テーブルA上に風を発生させる装置	吹出口寸法:横(Y)3m×縦(Z)0.1m 昇降範囲:71cm, 任意(手動) 風速:0～10m/秒, 任意(手動)

図2 雪氷防災実験棟（CES）の風洞（測定部周辺）

図3 樹枝状結晶の人工雪（降雪A）

図4 微小小球からなる人工雪（降雪B）

風速で最も強い吹雪の状態）に達するまでには相当な吹走距離が必要となるが¹⁴⁾、吹雪の発達を促すために風上から雪粒子を供給すれば、より短い距離で飽和に近づく。風洞内への雪粒子の供給方法は幾つかあるが⁵⁾、雪氷防災実験棟の風洞では、測定部の風上端底面に取り付けられた棒状の吹雪粒子供給装置により、底面の雪粒子を機械的に削り取り、気流中に射出している（図8）。このタイプの供給装置は風洞内の風の流れをほとんど乱さない。ただし雪面が樹枝状結晶の雪粒子で構成されている場合、粒子同士の絡み合いが顕著であり、棒状の射

図5 人工降雪装置（降雪A）稼動時のようす。降雪テーブル上に深さ約50cmの積雪がある

出装置では粒子の安定した供給が困難である。そうした場合、回転しているブラシ状の供給装置（図9）を用いて、雪粒子を強制的にかき上げて気流中へ射出させる。なお、風洞上部には移動式の降雪粒子供給装置があり、風洞天板の一部を外してこれを取り付けることにより、そこから雪片を落下させて風洞内にて降雪・降雪を伴う吹雪を生じさせることができる（図10）。ただし落下中に風によって雪片の選別が行われ、雪片の大きさにより着地点がずれるため、一様な降雪を再現できるのは風洞測定部の限られた領域のみであることに注意しなければならない。

なお測定域の一部のみであるが、風洞上部にも日射装置が設置されており、風洞内への照射が可能である。

後述する吹雪計などのセンサーはトラバース装置に取り付け、測定部内を3次的に走査することができる。トラバース装置はマニュアル操作のほか、専用のプログラムに従って自動的に移動可能となっている。

吹雪実験では測定部で舞い上がった吹雪粒子のダクトへの混入や再循環を防ぐために、適切な補修装置が必要となる。補修装置にはサイクロン式やフィルター式などがあり⁵⁾、雪氷防災実験棟の風洞装置では後

図6 雪氷防災実験棟（CES）の風洞装置（側面図）

図7 風洞底面に雪を敷き詰めたようす

図8 雪供給装置

図9 回転ブラシ式の新雪供給装置

者が用いられている。

風洞内部において、境界面付近には乱流境界層が形成される。しかしながら、境界層はあまり厚くなく、境界面近傍を除くと風の乱れは一般に小さい。このため、自然風の乱れの状況を再現するために、底面にラフネスブロックなどの粗度要素を置く場合や、風上にスパイヤーを設置する場合がある。ただし吹雪実験の場合、粗度要素周辺に雪粒子が吹きだまる場合もあり、設置場所などには注意を要する。

2. 3 雪粒子

既に述べた通り、降った直後の降雪Aは樹枝状結晶に近い結晶であり、降雪Bは微小氷球の集合体である。これらの雪はそのまま、あるいは一定期間低温下で保存した後に吹雪実験に用いる。氷点下に保って長期保管された雪は、自然積雪の場合と同様に、しまり雪へと変化している。吹雪実験においてしまり雪を用いる場合、あらかじめ、ふるいなどを用いてほぐし、個々の粒子間の結

図10 風洞上面に設置した降雪粒子供給装置

図11 しまり雪にふるい（1mm メッシュ）をかけて作成した雪粒子

図12 レーザー光スクリーンで照射して撮影した吹雪の可視化画像の例（建物模型周辺）。風は右から左に吹いている

合を取り除く必要がある（図11）。

2. 4 吹雪の計測

吹雪の状態を測定するためには、スノーパーティクル・カウンター（SPC: Snow Particle Counter）やネット式の吹雪計などが利用される。前者は空気中を風とともに移動する吹雪粒子の個数を粒径別に測定できるものである。また、後者の場合、風はネットを通過するが、雪粒は袋の中に捕集される。その重量を測定することで、吹雪の質量フラックスを得るものである。これらの測器は野外観測でも用いられる。吹雪計測の詳細については西村（2009）¹⁵⁾などを参照されたい。

吹きだまりの分布・形状を求めるためには、積雪の深さを測定する必要があり、スケールを用いて直接読み取るか、レーザー距離計などを用いる。後者の場合、トラバース装置に取り付けることで自動計測も可能である。

吹雪粒子の運動の可視化のために、光スクリーン（レーザー光などをシート状にして風洞内に照射する可視化装置）を用いることもある（図 12）。

3. 吹雪風洞実験の例

3. 1 吹雪の素過程

吹雪風洞実験により、吹雪粒子の運動、吹雪の鉛直構造や発生・発達のメカニズムなどを解明するための基礎研究が以前から活発に行われてきた。風洞実験では特に、雪面近傍で顕著な吹雪跳躍運動（跳躍層）を取り扱うことになる。実際の雪粒子を使用する場合、跳躍運動のみを対象とする限り相似条件を特に考慮する必要はない。

吹雪の発生・発達過程において、跳躍粒子の雪面での衝突・反発や、衝突により新たな雪粒子が射出されるプロセス（スプラッシュ過程）は重要である。そのため、レーザー光を用いた跳躍粒子の可視化（図 13）とそれによる粒子軌道の統計データ（入射・射出粒子の角度、速度や射出粒子数など）の収集・解析が多数試みられてきた¹⁶⁾。近年ではこれらの解析結果に基づき吹雪のスプラッシュ関数が導出されており¹⁷⁾、その成果は吹雪の数値シミュレーションに反映されるに至っている。

その他、跳躍層における吹雪の特徴量（吹雪粒子の跳躍高度、跳躍距離や吹雪質量フラックスの鉛直分布など）についても様々な実験が実施されている^{18), 19), 20)}など。これらの実験により、風速・硬度の増加に伴う跳躍距離の増加量に関する定量的な知見（図 14）など、吹雪特徴量の風速依存性や雪面硬度依存性などが明らかになってきた。

一方、降雪を伴う吹雪の発達過程²¹⁾や、運動状態にある吹雪粒子が昇華蒸発して気流中の水蒸気量が増加する効果²²⁾、吹雪時において活発に起こっている雪粒子の衝突や破壊による雪粒子の電荷分離・それによる粒子の帯電効果^{23), 24)}などの研究も近年では活発に試みられている。

3. 2 模型実験

低温風洞では、防雪柵や防雪林などの模型を用いた、有効な吹雪防止技術の検討なども行われている。防雪柵には空隙率や構造などが異なるさまざまなタイプがあり、視程や吹きだまりの抑制効果はそれぞれ異なる。また、防雪林の防雪効果は、樹種や樹木の枝葉の茂り具合、さらには林帯幅や樹木の配置などに依存する。これらの複雑な関係を明らかにするため、防雪柵・防雪林の構造と吹きだまりの発生位置・規模などとの関係を調べるため

図 13 レーザー光スクリーンで可視化した吹雪粒子の跳躍運動の軌跡。風は右から左に吹いている。シャッターを用いて 1/1000 秒毎にレーザー光を明滅させている。小杉健二氏撮影。

図 14 風洞実験から得られた跳躍粒子の平均跳躍距離と風速（風洞中心）との関係¹⁸⁾

図 15 模型防雪林を用いた吹雪実験実験²⁶⁾

の実験が数多く行われている^{25), 26)}。図 15 に模型防雪林を用いた吹きだまり実験の例²⁶⁾を示す。また防雪柵周辺における乱流構造の詳細を調べた例²⁷⁾や、模型防雪林を用いた実験結果と野外観測との比較から、防雪林実験における適切な相似条件を検討した例²⁸⁾もある。なお防雪柵・防雪林に関する実験の多くは、主流に直交する防雪施設のみを念頭にいった 2 次元的なものが大半であるが、

防雪柵の端点付近における風の回り込みの効果に注目した3次元的な実験の例もある²⁹⁾。

雪国では、建築構造物周辺に吹雪による吹きだまりが形成されるため、建築計画においては、その影響を十分に検討する必要がある。こうした場合、建物模型を用いた吹雪実験は有効な手段の一つである。図16は立方体の建物模型周辺の吹きだまり分布の実験例である。建物模型周辺にウインドスクープと呼ばれる馬蹄状の吹き払い域とその外側の吹きだまり域が再現されている。さらに複数の建物があればそれぞれの影響が複合し、より複雑な吹きだまり分布になると考えられるが、こうした場合についても、吹きだまりの複雑な分布を特定する手段として風洞実験は有効である。なお南極昭和基地の地形模型上に建物群の模型を配置した吹きだまり実験により、建物の配置計画や防雪対策が検討された例もある³⁰⁾。

雪国では建物の屋根上に雪が積もるが、積雪分布は屋根形状や風速によって大きく異なる。屋根雪荷重は建築物の設計や安全確保において重要な課題であるため、低温風洞を用いて、模型屋根の形状・勾配などが屋根雪分布に及ぼす影響について実験的に検討されている^{31), 32)など}。図17に水平屋根上における堆雪実験の例を示す。なお、屋根雪荷重の実験では風洞内に降雪を再現させるため、風洞天井部の降雪粒子供給装置を用いて雪粒子を供給することが多い。

4. 今後の課題

低温風洞による吹雪実験は、低温下で実際の雪を用いることが可能なため、特に雪面近傍で顕著な吹雪跳躍層の物理過程の解明に有用である。SPCなどを用いたこれまでの計測に加えて、PIV (Particle Image Velocimetry)などの比較的新しい手法に基づく粒子運動の詳細な計測により、風と吹雪粒子との相互作用、さらにはその粒径依存性など、より詳細な運動メカニズムの解明が可能と思われる。

本稿では詳しく触れなかったが、防雪柵や建物の縮小模型を用いる実験研究においては、相似則が大きな問題となる。吹雪風洞実験において考慮すべき相似条件については、詳細な実測データに基づいた老川らの検討例³³⁾、³⁴⁾などを参照されたい。吹雪実験において考慮すべきものとしては、気流の相似や模型の幾何学的相似、さらには吹雪・吹きだまり形成の継続時間に関する相似など、さまざまである。すべての相似条件を完全に満たした実験は不可能であり、実験の目的に応じて適切な相似条件を取捨選択し、適用するのが現実的な手段であろう。そ

図16 立方体模型周辺の吹きだまり。風は下から上に吹いている

図17 水平屋根上における堆雪実験（風は右から左に吹いている）

の際、野外における観測結果と比較しながら、適切な相似条件を見出す作業が不可欠となる。

なお、低温風洞では着雪氷現象の実験も可能である。冬期においてしばしば風速計などに着雪氷が生じ、機器の動作不良が起きることがあり、これまでに、その対策のための実験^{35), 36)}が行なわれている。また電線着雪に関する実験なども行われている。着雪氷現象については木村 (2012)³⁷⁾を参照されたい。

参考文献

- 1) Bagnold, R. A., "The Physics of Blown Sand and Desert Dunes", Methuen, New York, (1941)
- 2) Finney, E. A., "Snow control on the highways", Michigan Engineering Experiment Station, Michigan State College, Bulletin, 57, pp. 1-60, (1934)
- 3) Higashiura, M., Abe, O., Sato, T., Numano, N., Sato, A., Yuuki, H. and Kosugi, K., "Preparation of the experimental building for snow and ice disaster prevention", In: Izumi, M., Nakamura, T., Sack, R.D. (Eds.), Snow Engineering: Recent Advances. A. A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, pp. 605-608, (1997)

- 4) 佐藤 威, 「雪氷防災のための環境実験施設」, 冷凍, 81, pp. 780-787, (2006)
- 5) 佐藤 威, 「吹雪の風洞実験について」, 雪氷, 65, pp. 279-285, (2003)
- 6) 堤 拓哉, 「吹雪の風洞実験」, 日本雪工学会誌, 23, pp. 47-50, (2007)
- 7) 堤 拓哉, 「吹雪風洞」, 日本風工学会誌, 34, pp. 36-41, (2009)
- 8) Clifton, A., Rüedi, J. D. and Lehning, M., "Snow saltation threshold measurements in a drifting snow wind tunnel", *Journal of Glaciology*, 52, pp. 585-596, (2006)
- 9) Guala, M., Manes, C., Clifton, A. and Lehning, M., "On the saltation of fresh snow in a wind tunnel : profile characterization and single particle statistics", *Journal of Geophysical Research*, 113, F03024, doi:10.1029/2007JF000975, (2008)
- 10) 小林 俊一, 「雪面に働く風の力の測定」, 低温科学, A27, pp. 87-97, (1969)
- 11) 荒岡 邦明, 前野 紀一, 「吹雪における雪粒子の運動の観察」, 低温科学, A39, pp. 49-54, (1980)
- 12) Maeno, N., Naruse, R., Nishimura, K., Takei, I., Ebinuma, T., Kobayashi, S., Nishimura, H., Kaneda, Y. and Ishida, T., "Wind-tunnel experiments on blowing snow", *Annals of Glaciology*, 6, pp. 63-67, (1985)
- 13) 佐藤 威, 小杉 健二, 佐藤 篤司, 「雪粒子を用いた風洞実験による吹雪の研究」, 寒地技術論文・報告集, 15, pp. 50-54, (1999)
- 14) Takeuchi, M., "Vertical profile and horizontal increase of drift snow transport", *Journal of Glaciology*, 26, pp. 481-492, (1980)
- 15) 西村 浩一, 「吹雪の計測」, ながれ, 28, pp. 455-460, (2009)
- 16) 杉浦 幸之助, 前野 紀一, 「吹雪における雪粒子の衝突, 反発, 射出」, 雪氷, 65, pp. 241-247, (2003)
- 17) Sugiura, K., and Maeno, N., "Wind-tunnel measurements of restitution coefficients and ejection number of snow particles in drifting snow: determination of splash functions", *Boundary-Layer Meteorology*, 95, pp. 123-143, (2000)
- 18) Kosugi, K., Sato, T. and Sato, A., "Dependence of drifting snow saltation lengths on snow surface hardness", *Cold Regions Science and Technology*, 39, pp. 133-139, (2004)
- 19) Sato, T., Kosugi, K. and Sato, A., "Saltation layer structure of drifting snow observed in wind tunnel", *Annals of Glaciology*, 32, pp. 203-208, (2001)
- 20) 伊藤 優, 大風 翼, 持田 灯, 富永 禎秀, 根本 征樹, 吉野 博, 佐藤 威, 「発達過程の吹雪境界層における飛雪流量の空間分布に関する風洞実験」, 第 20 回風工学シンポジウム論文集, 20, pp. 12-17, (2008)
- 21) Sato, T., Kosugi, K., Mochizuki, S. and Nemoto, M., "Wind speed dependences of fractute and accumulation of snowflakes on snow surface", *Cold Regions Science and Technology*, 51, pp. 229-239, (2008)
- 22) Wever, N., Lehning, M., Clifton, A., Rüedi, J.-D., Nishimura, K., Yamaguchi, S., Nemoto, M. and Sato, A., "Verification of moisture budgets during drifting snow conditions in a cold wind tunnel", *Water Resources Research*, 45, doi:10.1029/2008WR007522, (2009)
- 23) Omiya, S., Sato, A., Kosugi, K. and Mochizuki, S., "Estimation of the electrostatic charge of individual blowing-snow particles by wind tunnel experiment", *Annals of Glaciology*, 52, pp. 148-152, (2011)
- 24) 大宮 哲, 佐藤 篤司, 「吹雪粒子の帯電と跳躍回数に関する風洞実験」, 雪氷, 73, pp. 205-212, (2011)
- 25) 佐藤 威, Gurer, I., 小杉 健二, 佐藤 篤司, 「非平均状態にある防雪柵風下の吹き溜まりに関する風洞実験」, 寒地技術論文, 報告集, 18, pp. 343-348, (2002)
- 26) 山田 毅, 伊東 靖彦, 松澤 勝, 根本 征樹, 小杉 健二, 望月 重人, 齋藤 佳彦, 「風洞実験による防雪林の樹木形態と防雪効果の関係についてーその 3」, 北海道の雪氷, 27, pp. 73-76, (2008)
- 27) Keylock, C. J., Nishimura, K., Nemoto, M. and Ito, Y., "The flow structure in the wake of a fractal fence and the absence of an "inertial regime", *Environmental Fluid Mechanics*, in printing
- 28) 鳥田 宏行, 根本 征樹, 西村 浩一, 佐藤 威, 「防雪林に関する野外観測と風洞実験の比較」, 雪氷, 66, pp. 377-387, (2004)
- 29) Takeuchi, Y., Kobayashi, S., Sato, T., Izumi, K., Kosugi, K., Wang, X., Zhang, J. and Peng, Y., "The effect of wind direction on drift control by snow fences", *Annals of Glaciology*, 32, pp. 159-162, (2001)
- 30) 大久保 紀彦, 遠藤 悠介, 半貫 敏夫, 鮎川 勝, 高橋 弘樹, 阿部 修, 「南極昭和基地居住区のスノウドリフト対策に関する風洞実験」, 寒地技術論文・報告集, 18, pp. 335-342, (2002)
- 31) 桜井 修次, 真田 朋幸, 阿部 修, 城 攻, 「人工雪を用いた降雪風洞実験および屋根面の変動風圧分布特性

- に基づく屋根雪分布形状の推定に関する開発研究」, 日本建築学会構造系論文集, 620, pp. 9-16, (2007)
- 32) 桜井 修次, 阿部 修, 城 攻, 「風洞実験手法による屋根雪の偏分布形状に及ぼす屋根面の風圧分布特性の影響に関するケーススタディ」, 日本建築学会構造系論文集, 637, pp. 451-458, (2009)
- 33) 老川 進, 苫米地 司, 石原 猛, 「建物近傍の雪吹きだまりの風洞相似則に関する考察」, 日本雪工学会誌, 23, pp. 133-152, (2007)
- 34) 老川 進, 苫米地 司, 石原 猛, 「建物近傍における雪吹きだまりの風洞相似則」, ながれ, 26, pp. 319-324, (2007)
- 35) 木村 茂雄, 森川 浩司, 佐藤 威, 山岸 陽一, 小島 徹也, 「寒冷環境下での風力利用に関わる風速計測の問題」, 寒地技術論文・報告集, 25, pp. 57-61, (2009)
- 36) 木村 茂雄, 森川 浩司, 佐藤 威, 山岸 陽一, 小島 徹也, 吉岡 貴文, 川上 和樹, 「超音波風速計の異常計測の発生機構に関する研究」, 寒地技術論文・報告集, 26, pp. 33-37, (2010)
- 37) 木村 茂雄, 「風観測に及ぼす着氷雪の影響」, 日本風工学会誌, 130, pp. 17-26, (2012)