

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 15 日現在

機関番号：82102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25350513

研究課題名(和文)防雪施設周辺における非平衡状態の吹きだまり形成過程の解明

研究課題名(英文) Mechanism of the snowdrift development processes in a non-equilibrium states around snow protection facilities

研究代表者

根本 征樹 (Nemoto, Masaki)

国立研究開発法人防災科学技術研究所・観測・予測研究領域 雪氷防災研究センター・主任研究員

研究者番号：30425516

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：防雪設の効果的・効率的な配置位置の検討において、非平衡状態での吹きだまり発達過程が特に重要となる。防雪柵を対象とした野外観測により、柵の周辺における吹きだまり形成域について、その始点およびピーク形成位置は吹きだまり発達とともに柵に徐々に近づくこと、また吹きだまり発達とともに吹きだまり成長速度は風下側で急激に増加すること、さらに吹きだまりの非平衡状態を示す指標(吹きだまり発達度)としてピーク形成位置が有効であることが明らかとなった。その他、風洞実験および数値流体シミュレーションによる吹雪、吹きだまりの解析も実施し、吹きだまり分布について観測結果と比較した。

研究成果の概要(英文)：Snowdrift development processes in a non-equilibrium state is of particular importance to investigate the effective and optimal position of snow protection facilities. Field observations for a snow fence revealed that 1) the starting point and the peak of a snowdrift moves toward the fence with the occurrence of blowing snow, 2) the rate of snowdrift development rapidly increase in the lee side of the fence, with the development of snowdrift, and 3) the peak point of a snowdrift is an effective indicator to represent the non-equilibrium state of snowdrift. Further, applying wind-tunnel experiments in a cold room using actual snow particles and computational fluid dynamics simulations, blowing snow and snowdrift around the snow fence was estimated and compared with the observed data.

研究分野：雪氷学

キーワード：雪氷学 吹雪 吹きだまり 防雪柵

1. 研究開始当初の背景

吹雪は、風による積雪面の雪粒子の輸送現象であり、冬期道路上での吹きだまりや視程障害、山岳地での雪庇形成とその崩落による雪崩の誘発、南極大陸上など極域での積雪再配分による水循環への影響など、防災科学的・地球科学的に重要なテーマの一つである。冬期交通環境においては、現代では高速交通網の整備が進み、人の移動や物流が交通に大きく依存しているため、吹雪によりもたらされる様々な障害の抑制は重要な課題である。防雪柵や防雪林などの防風・防雪施設は、吹雪障害抑制において一定の効果が期待できるため、雪国の主要幹線道路を中心に整備が進められてきた。しかしながら、これらの防雪施設の効果についての知見は定性的にも十分とは言えず、設置位置の決定などについては試行錯誤的に、あるいは土地の広さや状況などの制約から最適でない場所に決まってしまうことも多い。

野外観測や風洞実験により、防雪施設周辺の吹きだまり分布を測定した研究例は数多く存在する。しかしながら、それらのほとんどは、吹雪がある程度長い時間継続し、防雪施設周辺で吹きだまりが十分に発達した平衡状態を取り扱ったものである。除雪網が発達した現代では道路周辺における吹きだまりが平衡状態に達するまで放置されることは稀であり、実用上重要となるほとんどの問題は、吹きだまりの発達段階にある非平衡状態における防雪施設の効果などである。

一般に、防雪柵の効果は柵高、空隙率、下部間隙(柵と地表間の距離)の3つの要素による(防雪林の場合も同様)。吹きだまりの形成位置を柵高の関数として表すなどのパラメタリゼーションは実用上大変有用なものであるが、この様な扱いで一意的な結果が得られるのは平衡状態の吹きだまりに限られる(竹内(2003)、「雪氷」65巻、271-278)。そのため、非平衡状態においては有効なパラメタリゼーションが無い状況であり、防雪施設についてはこれまでのところ、非平衡状態における諸問題は陽に取り扱わず、平衡状態の結果から防雪範囲等を推定しているのが現状である。しかしながら、吹きだまりの発達段階にある非平衡状態では吹きだまり発生範囲や分布形状などが大きく変化するため、平衡状態のみを考慮する手法では実用性の高い防雪効果の定量化は困難である。

風洞実験による吹きだまり実験の結果などにより、防雪効果が推定されている例も多い。しかしながらこれらについても大半が平衡状態まで発達させた結果に基づく議論に終始しているほか、実験スケールと野外スケールとの相似則の問題等もあり、十分な信頼性を有する定量的な結果が得られているとは言えない。その他、乱流モデル等に基づく数値シミュレーションは有効な手法の一つであるが、乱流モデルの妥当性に加え、吹きだまりプロセスのモデル化手法について

は十分な知見が得られておらず、なおかつ十分な検証データが得られていないため、確立された吹雪モデルは未だ存在しない。

2. 研究の目的

本研究では、野外観測、風洞実験および数値シミュレーションに基づく総合的な手法により、防雪施設付近における非平衡状態での吹きだまり発達過程の解明を目的とする。研究では吹きだまり形状変化に関する詳細な実測データや、防雪施設付近での乱流構造など気流の性状と吹雪流動状態・吹きだまり形状との関連、新たな吹雪・吹きだまりモデリング手法などに基づき、防雪施設の効果的な配置方法にも資する、実用上有用なパラメタリゼーション手法も開発する。防雪林については、研究例が少なく、かつ国土が狭く林体幅を広く取ることが難しいなど土地利用の制約が大きい我が国において重要視される狭帯防雪林の機能の定量的評価を主に実施する。

3. 研究の方法

防風ネット(空隙率0%)を利用した防雪柵(高さ2.5m、下部空隙0.5m)(図1)の風上および風下に最大で13地点、積雪深を計測するための雪尺を設置するとともに(図2)、これら雪尺の目盛を記録するためのインターバルカメラ(Garden Watch Cam(BICOM))を最大で11地点設置し、吹雪の発生・継続とともに変化する吹きだまりの2次元形状を非接触・連続測定した。カメラの撮影時間間隔は1時間毎(2013/14年冬期)、10分毎(2014/15、2015/16年冬期)である。観測地として、強風、地吹雪の発現頻度が高い北海道上川郡新得町を選定し、12月中旬以降から3月上旬まで自動観測を実施した。また風速、気温などの気象観測に加えて、吹雪計(防雪柵風上側のみ)による吹雪強度観測も実施した。観測機器の設置概況を図3、4に示す。なお厳冬期には複数回観測地に向向き、離れた場所から雪尺を直接読み取る目視計測も実施した。



図1 野外観測の対象とした防雪柵

また実際の雪を用いた低温風洞実験も実施するほか、乱流・吹雪モデルによる数値解析も実施し、非平衡状態での吹きだまり発達

過程の再現に適したモデリング手法を確立する。これらの成果を有機的に統合し、非平衡状態における吹きだまり発達過程について、防風林・防雪柵の高さ、空隙率、下部間隙の重要3要素の他、新たに吹きだまりの非平衡状態を示す指標（吹きだまり発達度）というパラメータを導入し、防雪工学等において有用なパラメタリゼーション手法を開発する。

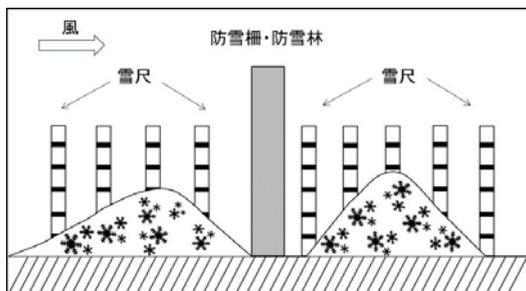


図2 雪尺の設置概況

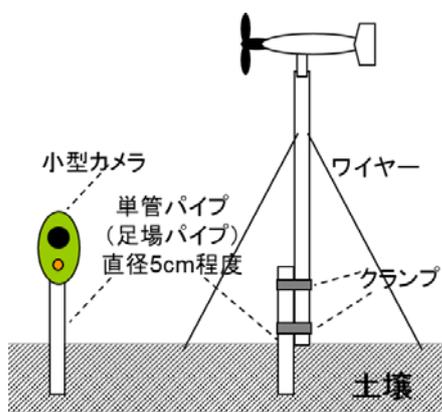


図3 測定機器の設置概況

4. 研究成果

カメラ映像から雪尺の値を読み取る場合、夜間の計測は不可能であるものの、日中において、インターバルカメラを用いた吹きだまり形状変化の非接触・連続測定が十分可能であることが分かった。また映像から、天候概況（降雪、吹雪など）の判別も可能である。ただし、特に好天時に日射が強い場合や、積雪表面が雪尺（赤白ボールを利用）の白色部分に位置する場合など、目盛判読が困難で値を推定するなど、必ずしも容易ではない場合もあった。また、吹きだまり発達に応じて画角調整が必要など、完全なメンテナンスフリーとした計測は困難であるなどの課題もある。

図5に、2013/14年冬期に観測された吹きだまり分布を示す。防雪柵風下側の吹きだまり形成域について、初期段階では高倍距離（水平距離(X)/柵高(H)）が1.5よりも風下側で吹きだまりが発生し、吹きだまりのピーク位置は2.5であった。その後、2014年2月中旬の猛吹雪により、吹きだまりは柵の風下

側で特に急激に発達し（吹きだまり形成開始位置：1.0、ピーク位置：2.0に変化）、防雪柵の有効範囲が減少した。その後は吹きだまり位置、積雪深は大きな変化を示さなかったため、2月の暴風雪（ほぼ3日間継続した）で吹きだまり形状が急速発達し、厳冬期の半ばで平衡状態に達したことが示された。



図4 吹雪計 (SPN) の設置状況

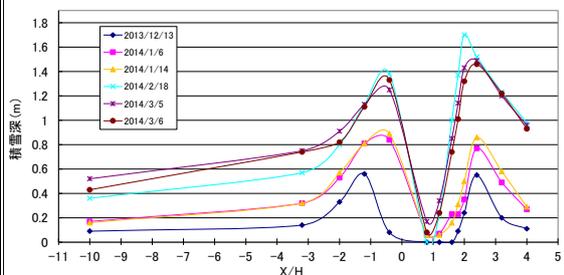


図5 吹きだまり分布の変化(2013/14年冬期)

次に、2014/15年冬期における吹きだまり分布を図6に示す。このケースでは、観測開始直後に弱風化での降雪があり、柵周辺に一樣な深さで積雪が堆積した。その後吹雪発生臨界風速を上回る風が発現すると、柵近傍の積雪はほぼ全てが削剥されるとともに、高倍距離で防雪柵の風上0.5、風下2.0の位置に急速に吹きだまりが発達した。吹きだまりのピーク位置は防雪柵風上、風下、いずれにおいても吹きだまりの発達とともに柵に近づいた。定常に達した風下側吹きだまりのピーク位置は前年の結果（1.5）とほぼ一致し、柵の形状（高さ）で最大吹きだまり量がほぼ規定されることが確認された。また、対象としている柵（高さ2.5m）の場合、冬期の比較的早い段階（図6のケースでは1月中旬ごろ）で最大（平衡）に近い吹きだまりが形成され、その後は柵の吹雪抑制効果が大幅に低下することも分かった。

図7に2015/16年冬期における吹きだまり分布を示す。観測開始時に一樣な深さで積雪が堆積しており、その後の吹雪発生により柵近傍の積雪が削剥、吹きだまりが急速に発達するのは過去2冬期と同様である。また、ピーク位置（高倍距離）は風上、風下でそれぞれ0.5、2.4となり以前とほぼ同様であった。過去の例では、その後に継続する吹雪により吹きだまり量が増加し、それとともに吹きだまりのピーク位置が柵に近づく（風下側の場

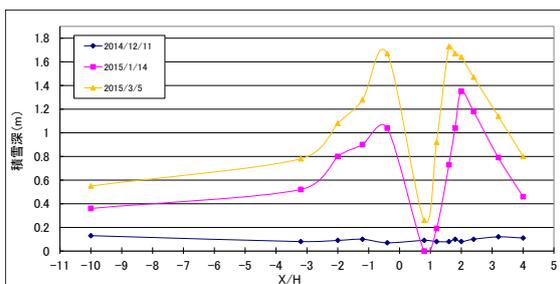


図6 吹きだまり分布の変化(2014/15年冬期)

合、高倍距離 1.5 の位置が最終的なピーク位置となる)が、2015/16 年冬期は少雪傾向で、現地において強い吹雪(跳躍、浮遊を含む高い地吹雪)の頻度は前年までより少なかった。そのため、観測終了時(2016 年 3 月上旬)までに幾度か発生した低い地吹雪(吹雪跳躍運動)により吹きだまり量は増加したものの、柵の風下側の吹きだまりピーク位置は、高倍距離 2.4 の位置でほとんど変化せず、非平衡状態のまま冬期を推移した。

上述した通り、吹きだまりの発達状況と吹きだまりピーク位置との間には特に密接な関係があり、吹きだまりの非平衡状態を示す指標(吹きだまり発達度)としてピーク位置が有効であることが分かった。ただしピーク位置を用いた非平衡状態のパラメタリゼーションについては、柵高、柵の空隙率、下部空隙の割合なども影響してくる。そうした場合、風洞実験や数値シミュレーションを活用した、様々な種類の防雪柵を対象とした効率的な試験も必要となる。

風洞実験に関して、柵周辺の風速分布、乱流構造またそれらと吹きだまり形状との関連を調べるため、風洞実験による模型柵(野外観測で対象とした柵の 1/30 スケール)を用いた風速、吹きだまり分布の測定も実施した(図 8)。

数値シミュレーションにおいては、防雪林・防雪柵など防雪施設周辺の気流・吹きだまりを数値解析により再現する。用いるモデルは 3 次元乱流モデル(時間平均乱流モデル:RANS)に吹雪、吹きだまりモデル組み込んだ、吹雪研究で一般的に用いられているものをベースとして数値解析を実施し、実測値等との比較検証から問題点を抽出し、改良を検討する。防雪施設の影響については、複数提唱されている防雪柵・防雪林モデルを乱流モデルに組み込み計算し、実測値との比較から、防雪施設モデル化に適したものを選定する他、各種パラメータの同定を行なう。また、モデルで表現される弱風域と実測で得られる吹きだまり領域との対応に基づき、吹きだまり形成域のモデル化において、「吹雪発生臨界風速を下回る弱風域に吹きだまりが形成される」とする従来の吹きだまりモデリング手法の妥当性を検証する。例として、図 9 に本研究の野外観測地を対象とした数値地形、その地形上における風速と吹きだまり量の計算結果を図 10、11 に示す(地上高 10m

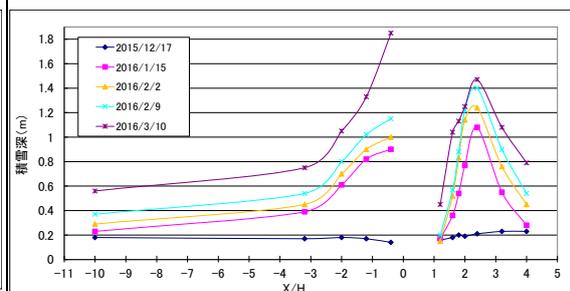


図7 吹きだまり分布の変化(2015/16年冬期)



図8 熱線風速計を用いた防雪柵模型周辺の風速計測。対象とした柵の空隙率が0%であるため、実験では無孔板を用いている

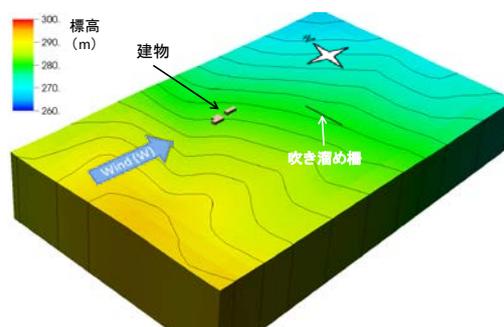


図9 観測地(図1で示した地点周辺)を対象とした数値地形モデル

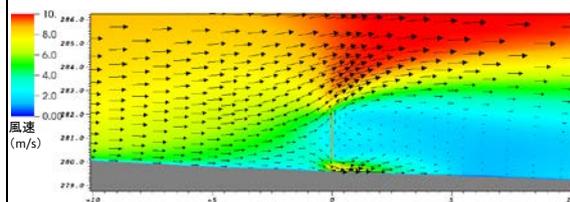


図10 計算による柵周辺の風速の断面分布図

での風速を 10m/s として計算。柵中心部分の鉛直断面における結果を 2 次的に表示)。対象とした防雪柵は下部空隙(0.5m)があり、風下側の底面付近で強い収束流が生じている(図 10)。これは観測結果で柵風下付近の雪が吹き払われることと対応している。図 11 は吹雪が 24 時間継続した場合における吹きだまり分布(吹きだまり発達速度を時間積算して推定)であるが、実測と異なり、風下側の吹きだまり量がわずかである。本研究で用

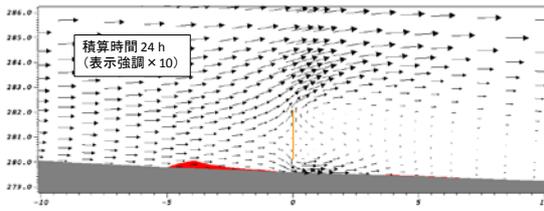


図 11 計算による柵周辺の吹きだまりの断面分布図

いたモデルにおいては、吹きだまり形成に伴う底面地形の変化を考慮せずに解析している。これは除雪体制が整った環境（数 cm 程度の積雪・吹きだまりが生じた時点で速やかに除雪を実施する場合）においては問題ない手法であり、事実、冬期道路環境アセスメント等でこれまでも用いられている。しかしながら、吹きだまり形状変化に着目した場合、この手法では柵の風下側に形成される規模の大きな吹きだまりを全く再現できないことが示された。近年、急速に発達した低気圧により暴風雪が長時間継続し、巨大な吹きだまりが形成されて冬期の交通環境において災害リスクが著しく高まるようなケースが度々生じた。こうした場合にも適用可能な数値シミュレーション手法の確立に向けて、本研究で得られた実測データを活用し、今後モデリング手法の改良を進める必要がある。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 1 件）

- ① 根本征樹、鳥田宏行、防雪柵周辺における非平衡状態の吹きだまり形成過程について、東北の雪と生活、査読無、31、2016、1-4.

〔学会発表〕（計 1 件）

- ① 根本征樹、鳥田宏行、防雪柵周辺における非平衡状態の吹きだまり形成過程について、日本雪氷学会東北支部大会、2016年5月14日、東北大学青葉山北キャンパス（仙台市）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

根本 征樹 (NEMOTO MASAKI)

国立研究開発法人防災科学技術研究所・観測・予測研究領域 雪氷防災研究センター・主任研究員

研究者番号：30425516

(2) 研究分担者

鳥田 宏行 (TORITA HIROYUKI)

地方独立行政法人北海道立総合研究機構・森林研究本部 林業試験場・研究主幹

研究者番号：50414264