

平成21年6月1日現在

研究種目：基盤研究(C)
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18510166
 研究課題名（和文） 吹雪の発生・発達に関わる削剥過程の解明とそのパラメタリゼーション
 研究課題名（英文） Research on the Snow Surface Erosion by Drifting Snow Particles and its Parameterization
 研究代表者
 佐藤 威 (SATO TAKESHI)
 独立行政法人防災科学技術研究所・雪氷防災研究センター・新庄支所・支所長
 研究者番号：30142920

研究成果の概要：

吹雪による視程障害等を予測し、その被害を防止するためには、風速だけでなく、積雪の種類や状態を考慮して吹雪強度を定量化する必要がある。吹雪の発生と発達を通じて吹雪強度と密接に関連する雪面の削剥過程について、環境条件を制御した低温風洞実験を行った。その結果、削剥は風速とともに増大するが、雪面硬度が大きくなると急速に減少し、雪温が -10°C から 0°C に近づくと減少することなどを明らかにした。また、野外観測から雪面の削剥の実態を明らかにした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	2,100,000	0	2,100,000
2007年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2008年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	480,000	4,180,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学・自然災害科学

キーワード：(1)自然現象観測・予測 (2)自然災害 (3)吹雪 (4)雪氷災害 (5)雪氷学

1. 研究開始当初の背景

吹雪による吹き溜まりや視程障害などの雪氷災害を予測し、その被害を防止あるいは軽減するためには、吹雪強度の定量化が必要となる。具体的には、飛雪流量(飛雪粒子の質量フラックス)や吹雪量(飛雪流量の鉛直積分)について、風速だけでなく、積雪の種類や状態をもとに正確に評価する必要がある。

吹雪の発生と発達に関与する物理過程(図1)のうち、雪面での境界条件ともなる削剥過程(Aerodynamic entrainment 過程と Splash

過程)が特に重要である。Aerodynamic entrainment 過程は雪面上の雪粒子が風の剪断応力により気流中に取り込まれるもので、飛砂を対象とした研究は行われているものの、吹雪を対象とした研究は未だ行われていない。また Splash 過程は、飛雪粒子が雪面に衝突した時に新たな雪粒子をはじき出す過程で、新雪や軟らかなしまり雪を対象とした実験研究があるのみである。このように、これまでの吹雪による雪面の削剥過程に関する研究は不十分であるため、それらの結果を取り込んだ数値モデルなどの適用性は限

定されるとともに、その妥当性についても検証は不十分である。

これまでに、多くの研究者がさまざまな場所において吹雪の観測を行ってきたが、得られた吹雪量の風速依存性はばらつき、その原因として積雪の種類や吹送距離の違いが指摘されている。一度積もった雪は、焼結によって雪粒子同士の結合が発達し積雪の力学的強度も増していく。その変化の態様と速度は気象条件に依存するため、野外において積雪の種類や力学的強度に注目して観測データを系統的に得ることはきわめて困難である。また、実際には積雪の種類や力学的強度、ならびに吹送距離の影響が複合しているために、それらを分離して解析することも困難で、未だそのような研究例はない。

2. 研究の目的

環境条件の制御が可能な低温風洞を用いて、積雪の状態を任意に変えながら吹雪による雪面の削剥現象の実験を行い、吹雪の発生と発達に関わる削剥過程について、積雪の種類や力学的強度との関係を系統的に解明する。

また、これまでは野外で事例研究しか行われなかった削剥率に注目し、それを風速、積雪の種類と力学的強度の関数としてパラメタライズする。

さらに、削剥率のパラメタリゼーションを数値モデルに導入し、吹雪の発達のシミュレーションを行い、その結果を野外観測と比較することにより、パラメタリゼーションの検証を行う。

3. 研究の方法

①吹雪による雪面の削剥率を直接測定する低温風洞実験を行った(写真 1)。この実験では、風洞底面に雪を敷き詰め、その一部に雪を入れたトレイを埋め込み、風洞内に発生させた吹雪中に一定時間曝露した後に、その重量変化を測定し削剥率 E を求めた。この実験を、風速、雪面硬度、雪温(気温)を変えて行い、削剥率のそれらに対する依存性を求めた。
②吹雪による雪面の削剥に関する野外観測

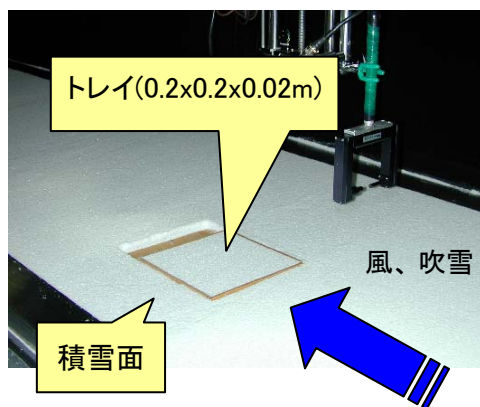


写真 1 風洞実験の様子



写真 2 野外観測の様子

を行った(写真 2)。平坦な雪原にトレンチを掘り、その風下・風上における飛雪流量、雪面高度の変化量、積雪深分布などの測定を行い、風洞実験結果との対応を検討した。

③①と関連して、低温風洞内に人工的に降雪を再現し、降雪片が雪面に衝突する時に、それが破壊する条件と雪面に堆積する条件を求め、野外観測結果と比較した。

4. 研究成果

①トレイの周囲を硬雪、内部を軟雪とした実験から、削剥率 E (Aerodynamic Entrainment による削剥率 E_{AE} と Splash Entrainment による削剥率 E_{SE} の和) は、吹雪量と飛雪粒子の平均跳躍距離の比(近似的に積雪面に落下する質量フラックス G に等しい)に比例することを明らかにした(図 1)。また、その比例係数、 F_E (削剥係数)、が風速とともに直線的に増加することを明らかにした(図 2)。

②トレイと周囲がともに軟雪の場合の削剥率 E は、これまでの吹雪モデルで用いられることの多かった Anderson and Haff により提案された Excess stress rule の仮定に基づ

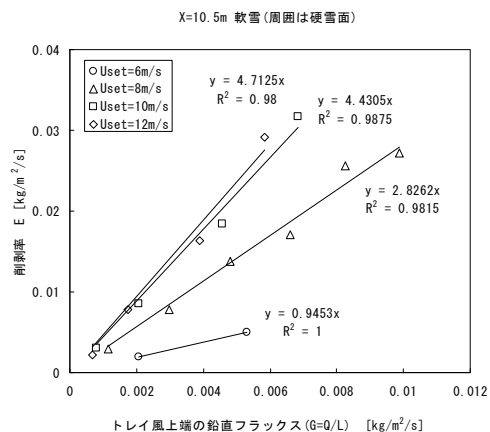


図 1 削剥率とトレイ風上端の鉛直フラックスの関係(トレイの周囲は硬雪、内部は軟雪の場合)

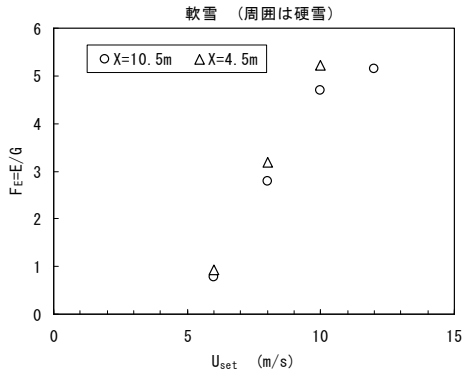


図 2 削剥係数と風速の関係(トレイの周囲は硬雪、内部は軟雪の場合)

く E_{AE} よりかなり小さく、この仮定を再検討する必要があることを明らかにした。

③トレイの周囲および内部の雪を適当な時間放置して焼結による硬度の増大を実現し、同一風速における様々な硬度の雪面の F_E を求めた。 F_E は雪面硬度の増大とともに指数関数的に小さくなり、硬度が 50kPa では雪粒子が焼結していない軟雪の値の 1/100 まで低下した(図 3)。

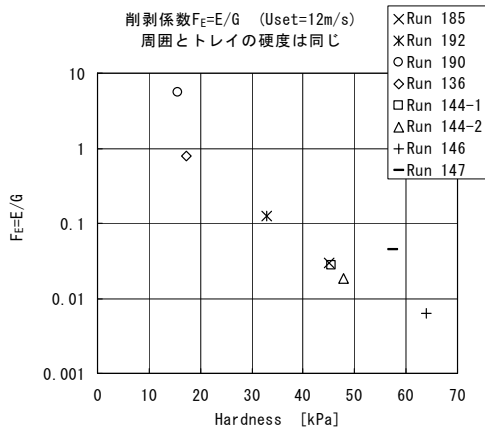


図 3 削剥係数と雪面硬度の関係(トレイの周囲と内部の雪面硬度が同じ場合)

④トレイ周囲の雪面を硬雪とし、内部を軟雪として、雪温を $-15^{\circ}\text{C} \sim -2^{\circ}\text{C}$ の間で変化させて削剥率を測定した実験から、削剥率は雪温が -10°C 以上において 0°C に近づくとともに低下することを明らかにした(図 4)。

⑤降雪を伴う吹雪の場合には、降雪片が雪面に衝突する際にも削剥が生じると考えられるが、衝突時の降雪片の破壊・堆積過程について風洞実験と野外观測の結果を解析した。その結果、高度 1m の風速 U_1 が 2ms^{-1} 以下であれば、降雪片はそのまま雪面に堆積するが $2\text{ms}^{-1} \sim 5\text{ms}^{-1}$ で降雪片は部分的に破壊し、 5ms^{-1}

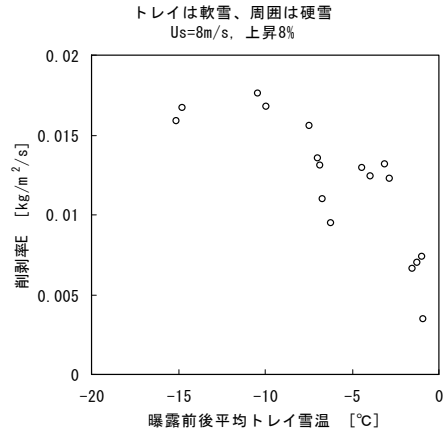


図 4 軟雪の削剥率と雪温の関係(ただし、トレイの周囲は硬雪の場合)

を超えると粉々に破壊することを明らかにした(図 5)。また 5ms^{-1} 以上ではそのような粉碎された粒子は飛雪粒子となり、風下へ流されていくことを明らかにした。これらより U_1 が 5ms^{-1} (吹雪の衝突臨界風速に近い) 以上の場合は、降雪片が雪面に衝突することにより飛雪粒子へ変化する吹雪の発達を促すと考えることができ、降雪片による削剥も十分考えられることを示した。

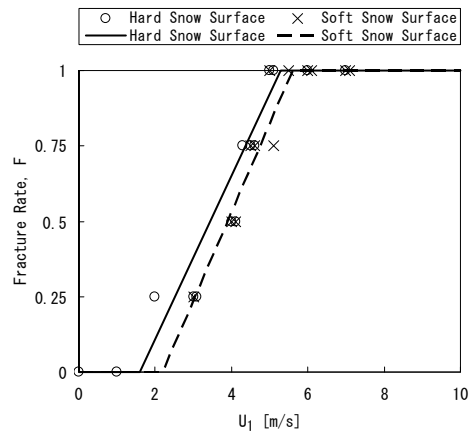


図 5 降雪片が雪面に衝突した時の破壊率と風速の関係

⑥野外において、降雪後に地吹雪が発生して、それが収束した段階で、降雪～地吹雪の一連の現象による積雪深の増加を測定し、トレンチの風下において積雪深の増加が少ないことを明らかにした(図 6)。これは、トレンチの風下で新たに発生した地吹雪によって雪面が削剥されたためと考えられる。

⑦野外において、降雪を伴わない地吹雪の時間帯の雪面高度の変化率を測定し、トレンチの風下直近で削剥が大きく、さらに風下に行

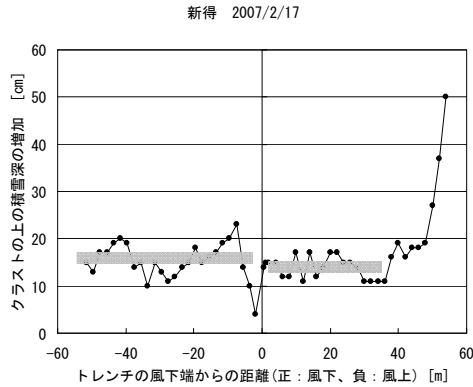


図 6 積雪深の増加の分布 (X>40m ではさらに風下にある防雪柵の影響で堆積が生じたと考えられる)

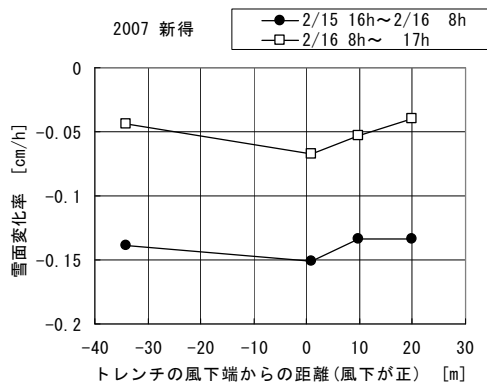


図 7 地吹雪時の雪面高度変化率の分布

くにつれ削剥が小さくなることを明らかにした(図 7)。これは、トレンチ風下で新たに発生した地吹雪が風下に行くにつれ飽和に近づくためと考えられる。

⑧①~⑤の低温風洞実験による成果は、国内外ともにこれまでに類似の研究例はなく、吹雪による雪面の削剥過程について初めて定量的に示し、かつ、その風速・雪面硬度・温度依存性を示したものである。今後、様々な積雪条件下における吹雪の発生・発達モデル化に利用可能と考えられる。削剥過程に関する低温風洞実験に重点を置いたため、当初の目的の一つである、実験結果の数値モデルへの導入と吹雪の発達のシミュレーションについては実施できなかった。しかし、最近の吹雪の数値モデル研究によれば、吹雪の発達を陽に考慮することが重要であると指摘されていて、本研究成果がこの分野の進展に貢献すると考えられる。

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 11 件)

- ①根本征樹、佐藤威、西村浩一、吹雪浮遊層の濃度分布と粒子落下速度の関係に関する数値実験、寒地技術論文・報告集、22、72-75、2006、査読有
- ②根本征樹、佐藤威、西村浩一、粒径別吹雪質量フラックスの鉛直分布と吹雪の運動形態との関係、寒地技術論文・報告集、23、93-96、2007、査読有
- ③T. Sato、K. Kosugi、S. Mochizuki and M. Nemoto、Wind speed dependences of fracture and accumulation of snowflakes on snow surface、Cold Regions Science and Technology、51、229-239、2008、査読有
- ④根本征樹、佐藤威、小杉健二、望月重人、降雪時における吹雪跳躍層の内部構造に関する研究、寒地技術論文・報告集、24、63-65、2008、査読有
- ⑤佐藤威、杉浦幸之助、小杉健二、根本征樹、望月重人、吹雪跳躍粒子による積雪面の削剥過程について、寒地技術論文・報告集、24、78-82、2008、査読有

〔学会発表〕(計 16 件)

- ① T. Sato、K. Kosugi、M. Nemoto、S. Mochizuki and A. Sato、Wind tunnel measurements of snow surface erosion by drifting snow、Int. Symposium on Snow Science、2006.10.2、Telluride
- ② T. Sato、K. Kosugi、S. Mochizuki and M. Nemoto、Wind tunnel measurements of snow surface erosion by drifting snow、International Glaciological Society、2007.9.6、Moscow
- ③ 佐藤威、小杉健二、根本征樹、望月重人、吹雪による雪面の削剥の風速・雪面硬度依存性について、日本雪氷学会、2007.9.27、富山
- ④ 佐藤威、小杉健二、根本征樹、望月重人、風洞内の吹雪量分布について-雪面における横方向への雪粒子反発・射出の影響-、日本雪氷学会、2008.9.26、東京
- ⑤ 佐藤威、杉浦幸之助、小杉健二、根本征樹、望月重人、吹雪跳躍粒子による積雪面の削剥過程について、寒地技術シンポジウム、2008.11.26、札幌

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 威 (SATO TAKESHI)

独立行政法人防災科学技術研究所・雪氷防災研究センター・新庄支所・支所長
研究者番号：30142920

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者(下記の 4 名は 2007 年度までは研究分担者であった)

小杉 健二 (KOSUGI KENJI)
独立行政法人防災科学技術研究所・雪氷防
災研究センター・新庄支所・研究員
研究者番号：40425509
西村 浩一 (NISHIMURA KOUICHI)
名古屋大学・大学院環境学研究科・教授
研究者番号：10180639
根本 征樹 (NEMOTO MASAKI)
独立行政法人防災科学技術研究所・雪氷防
災研究センター・新庄支所・研究員
研究者番号：30425516
鳥田 宏行 (TORITA HIROYUKI)
北海道立林業試験場・森林環境部・研究職
員
研究者番号：50414264