

学 位 論 文 題 名

Dynamics of drifting snow particles
in turbulent boundary-layer

（乱流境界層内における吹雪の動態に関する研究）

学位論文内容の要旨

吹雪は風によって生じる雪粒子の輸送現象である。吹雪は視程悪化、吹きだまり形成などの交通障害や、山岳地帯での雪庇形成による雪崩の誘発、さらには南極氷床や寒冷陸域における積雪再配分を規定する重要な要因となるなど、防災・地球科学における重要なテーマである。

吹雪の運動形態は、跳躍（saltation）、浮遊（suspension）の2つに大別される。従来の研究では、数値モデルを含む理論的な研究、風洞実験・野外観測による研究、いずれもこれら2つのプロセスを別箇に議論したものが大半である。したがって跳躍から浮遊への遷移過程を含めた吹雪の全体像の理解は未だ十分に進んでいない。こうした背景を踏まえ、本研究では跳躍から浮遊への遷移過程を考慮した吹雪の数値モデルを新たに開発し、吹雪の動態を物理的に明らかにすることを目的とした。

数値モデルでは、個々の雪粒子の運動は重力、風による抵抗力を考慮した運動方程式によって計算した。また、風の計算では、平均風速をナビエ-ストークス方程式で計算するとともに、乱流による鉛直風速の変動成分については、流体要素の乱流運動を直接計算できるランダムフライトモデル（Wilson and Sawford, 1996）を用いてモデル化した。なお、雪面における雪粒子の衝突・反発過程（スプラッシュ過程）は、Sugiura and Maeno (2000) によって導かれたスプラッシュ関数を用いた。本モデルは、これまで考慮されることのなかった「大気乱流」、「雪粒子の慣性効果」を組み入れたほか、「雪粒子の粒径分布」を厳密に考慮した点が大きな特徴である。

さらに、風洞実験・野外観測によって取得されたデータを用い、数値モデルとの比較検討を行った。風洞実験では、大型低温風洞室内（-15℃）において、野外で収集されたしまり雪を用い、吹雪発生・非発生時において雪面せん断応力、風速分布を測定し、吹雪発生にともなう乱流構造の変化を測定した。一方、野外観測データについては、南極みずほ基地において2001年9月から11月にかけて取得された吹雪質量フラックス・粒径分布のデータを用いた。

モデルの計算結果から、全吹雪量は約2秒で定常に達することが分かった。また全吹雪量の発達にともない空気力学的粗度、摩擦速度が増加することが分かった。この結果は粒

子跳躍層が粗度の増加に対応するとした Owen(1964)の理論の妥当性を示すものである。全吹雪量 (Q) と摩擦速度 (u_*) との関係は $Q=1.11u_*^{4.15}$ となり, Sugiura et al. (1998) の実験結果とほぼ一致することから, 本モデルによって全吹雪量に関する定量的な評価が可能であることが分かった。せん断応力に関して, Nemoto and Nishimura (2001)は, 吹雪発達にともない雪面せん断応力が増加することを風洞実験により明らかにしたが, モデル計算もこの結果を支持するとともに, 応力の増加に対する吹雪粒子の衝突による応力 (τ_g : grain-borne shear stress) と風による応力 (τ_f : fluid shear stress) それぞれの寄与についての定量的な評価を可能とした。モデル計算で得られた吹雪時の応力の鉛直分布は, 雪面近傍では τ_g が全応力に対して大きな割合を占めるが, 高度の増加にともない τ_g の寄与は減少し, 反対に τ_f の寄与が増加した。吹雪質量フラックスの鉛直分布について, 計算結果は実験・観測結果と一致し, これまでのモデルでは表現できなかった跳躍層から浮遊層まで全体にわたるフラックス分布の再現にはじめて成功した。また, 雪面付近ではフラックスは 1-2 秒で定常に達するのに対して, 高度 1m 以上におけるフラックスが定常に達するには 50 秒以上の時間がかかることが分かった。よって吹雪時において, フラックス分布, 風の構造すべてが定常に達するまでの時間は 50 秒程度必要であることが明らかにされた。本モデルから得られた吹雪発達の時間スケールに Taylor の凍結乱流の仮定 (Taylor, 1938) を適用し, 吹雪発達の空間スケールを求めると, 吹雪が定常に達するまでの吹走距離は約 500m 必要という結果が得られ, Takeuchi (1980)の野外観測結果とほぼ一致した。吹雪粒子の粒径の鉛直分布に関しては, モデルの計算結果は観測結果とほぼ一致し, 高度 10cm 以上では $100\mu\text{m}$ 以下の粒子が大半を占めた。モデルから吹雪粒子の水平・鉛直速度の平均値を計算した結果, 水平方向については, 雪面付近において上昇中の粒子の速度は平均風速・下降中の粒子速度よりもおそいことが分かった。また下降中の粒子の速度はほぼ平均風速に等しく, また雪面近傍では風速を上回る結果が得られた。これは上昇中の粒子が特に風を減速することを意味しており, 風の構造変化に上昇中の粒子が大きく作用していることが分かる。なお高度 10cm 以上においては上昇・下降粒子ともに速度は風速に等しいことから水平方向の慣性効果はないことが分かった。鉛直方向については, 高度 10cm 以上における上昇・下降粒子の平均速度は粒子に作用している鉛直風速の平均値とほぼ一致し, 粒子が上昇・下降流によって輸送されていることが分かった。高度 10cm 以下では粒子速度と鉛直風速との相関は見られず, 粒子に作用する力は重力の効果が卓越していると考えられる。以上から吹雪の運動形態は高度 10cm 付近で跳躍から浮遊にほぼ完全に遷移することが明らかになるなど, 吹雪の内部構造に関する多くの知見が得られた。

本研究で構築された数値モデルは, 以上のように吹雪素過程の物理プロセスを忠実に再現するというこれまでに無い特徴を有しており, 複雑地形上における吹雪の動態や吹きだまりの形成をはじめとする当該研究分野の今後の発展に大きく寄与すると期待される。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 大 畑 哲 夫

副 査 教 授 前 野 紀 一

副 査 教 授 小 林 俊 一

(新潟大学積雪地域災害研究センター)

副 査 助 教 授 山 田 知 充

学 位 論 文 題 名

Dynamics of drifting snow particles in turbulent boundary-layer

(乱流境界層内における吹雪の動態に関する研究)

吹雪の運動形態は、跳躍 (saltation)、浮遊 (suspension) の 2 つに大別される。従来の研究はこれら 2 つのプロセスを別箇に議論したものが大半であり、跳躍から浮遊への遷移過程を含めた吹雪の全体像の理解は未だ十分に進んでいない。そこで、申請者は、このような背景を踏まえ、室内実験を行うことにより現象の実証的把握を行うこと、また跳躍から浮遊への遷移過程を考慮した吹雪の数値モデルを新たに開発し、吹雪の動態を物理的に明らかにすることの 2 つを目的として本研究を行った。

はじめに、個々の雪粒子の運動を運動方程式によって計算するとともに、風速場については吹雪粒子との運動量交換にともなう相互作用を考慮した数値モデルを構築した。乱流による鉛直風速変動をランダムフライトモデル (Wilson and Sawford, 1996 etc.) によってモデル化し、これまで考慮されることのなかった「大気乱流」、「雪粒子の慣性効果」を組み入れたほか、「雪粒子の粒径分布」を厳密に考慮した点が申請者が作成したモデルの大きな特徴である。このような試みは世界でも例が無い。

また、申請者は吹雪の現象把握およびモデルシミュレーションの検証用データ取得をかねて風洞実験を行った。この実験から地吹雪の発生にともない風速分布が変化すること、吹雪発達にともない雪面せん断応力が増加することを実証的に明らかにした (Nemoto and Nishimura, 2001)。

開発したモデルを用いてシミュレーションを行い、風洞実験や野外 (南極) で観測された吹雪質量フラックスの鉛直分布、乱流構造などと比較し、それらと多くの点で一致を見ることを確認し、モデルの妥当性を検証した。またシミュレーション結果から全吹雪量は約 2 秒で定常に達するが、せん断応力・吹雪質量フラックスの鉛直分布が定常に達するには 50 秒程度の時間が必要であることも明らかにした。吹雪時に雪面せん断応力が増加することを明らかに

した風洞実験結果とも結果は良く一致し、応力の増加に対する雪粒子と風速それぞれの寄与についての定量的な評価を可能とした。吹雪質量フラックスの鉛直分布の勾配は高度 10cm 付近で大きく変化した。高度 10cm 以上では吹雪粒子の平均速度は平均風速とほぼ一致しており、この高さの近傍で運動形態が跳躍から浮遊にほぼ完全に遷移することがわかるなど、吹雪の内部構造を明らかにした。

このように申請者の研究は、跳躍から浮遊への遷移過程を考慮した吹雪の数値モデルを新たに開発し、それが吹雪の現象を忠実に再現できることを示し、しかも計算によって吹雪の内部構造に関する多くの知見を得た。申請者は、この研究により吹雪に関する研究に新たな分野を築いたと言える。複雑地形上における吹雪の動態や吹きだまりの形成をはじめとする当該研究分野の今後の発展に大きく寄与することが期待される。