

## 学位論文題名

Experimental studies on the electrification phenomena of  
blowing snow

(吹雪の帯電現象に関する実験的研究)

## 学位論文内容の要旨

吹雪粒子は、跳躍運動に伴う雪面との衝突を主要因とし、帯電することが知られている。この帯電に付随して生ずる静電気力が、粒子自身の運動軌道に影響を及ぼす可能性があり、吹きだまりや雪庇の形成ならびに視程障害の発生を助長している可能性について議論されている。従って、吹雪粒子の帯電がこれらの現象にもたらす影響を正確に理解し、将来的に発生予測につなげるためには、吹雪粒子の帯電特性について把握する事が重要である。この帯電には、粒径や吹走距離、風速、湿度など、数多くのファクターが関与し合っていると考えられる。しかしながら、系統的に電荷測定が行われた例はほとんどなく、どのような条件下で大きな電荷を持つのかなど、その詳細についてはほとんど分かっていない。そこで本研究では、吹雪粒子の帯電特性を明らかにする事を目的とし、風洞内および野外において吹雪粒子の電荷測定を行った。風洞実験は、防災科学技術研究所・雪氷防災研究センターの回流型低温風洞を用いた。野外観測は、2011年1月から2月にかけて北海道当別町にて行った。

先行研究によって、吹雪粒子は平均すると負に帯電しており、その絶対値は低温ほど増大する傾向がある事が示されている。しかしながら、その多くは単位質量あたりの粒子が持つ電荷に関する議論であり、1個あたりの粒子が持つ電荷に関する議論はほとんどない。また、野外観測値の方が風洞実験値よりも大きな負電荷を持つとの報告がある。この要因として、両者の吹走距離の違いに伴う跳躍回数の違いが挙げられているが、それが実験的に確認された例はない。そこで本風洞実験では、主に、粒径ならびに跳躍回数と電荷の関係に着眼した。粒径別に実験を行う事で、粒子1個あたりが持つ電荷に関する議論が可能となる。また、先行研究にて示された粒径と跳躍距離の関係から、1個あたりの粒子が雪面との1度の衝突で帯びる電荷量について見積もった。跳躍回数に着眼した実験では、跳躍回数と電荷蓄積量の相関の有無について調べた。ここで、跳躍回数の増減は風速変化によってコントロールした。なお、一連の風洞実験は、雪面の削剥が生じない硬い雪面および球状の雪粒子を使用し、 $-20 \sim -5$  °Cの気温範囲で行った。また、野外観測の結果について、風洞実験の結果ならびに観測時の湿度の点から考察した。電荷の測定には、ファラデーケージおよびエレクトロメーターを用いた。また、吹雪時の大気電場強度の変動特性を知るため、表面電位計を用い、風洞内において大気電場測定を行った。

風洞実験で得られた結果を以下に示す。

(1) 単位質量あたりの吹雪粒子がもつ負電荷は、小さい粒子ほど大きいことが示された。また、粒子1個あたりの電荷に関しては、大きい粒子ほど大きな負電荷を持つ事が示された。この結果は、雪面に近いほど単位空間体積あたりの電荷量が大きい事を示唆している。

(2) 雪面と吹雪粒子の1度の衝突で帯びる電荷量は、大きな粒子ほど大きい事が示された。これは、大きな粒子ほど雪面との摩擦面積が大きいと推測される。雪面との1度の衝突で帯びる負電荷量は、気温 $-5^{\circ}\text{C}$ において粒径 $200\mu\text{m}$ については約 $-1.8\times 10^{-4}\text{pC}$ 、 $450\mu\text{m}$ については約 $-9.1\times 10^{-4}\text{pC}$ であった。

(3) 跳躍回数と電荷の関係に着眼した実験から、跳躍回数と電荷蓄積量の間には相関があることが示された。この結果から、先行研究において報告されている野外観測値と風洞実験値の量的隔たりの一因が、吹雪粒子の跳躍回数の違い、すなわち吹走距離の違いである事が示された。

(4) 吹雪時の大気電場測定実験から、吹雪粒子が大きな電荷を持つ時ほど大気電場も増加する事が確認された。吹雪粒子が受ける静電気力は、粒子自身の帯電量と大気電場の積で与えられる。従って、粒子にかかる静電気力は、粒子自身の帯電量の増加によって相乗的に増加する事が示された。

野外観測で得られた結果を以下に示す。

(1) 多くの測定結果において、低温ほど負電荷の増加が確認され、気温依存性に関して先行研究との一致を得た。しかし、最も気温が高かった時に最大の負電荷が得られた。この要因として、雪面状態(硬さ)の違いならびに降雪の有無に起因する吹雪粒子の跳躍回数の違いから考察した。また、観測時の湿度の違いが粒子の帯電量に影響を与えている可能性を提案した。

本研究によって、主に粒径および跳躍回数の観点から、吹雪粒子の帯電特性に関する新たな知見が得られた。これらの成果は、帯電した吹雪粒子自身にかかる静電気力を見積もる上で重要な手がかりとなり、雪庇形成や視程障害の予測研究の基礎となるものである。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 佐 藤 篤 司  
副 査 教 授 藤 吉 康 志  
教 授 渡 辺 力  
准教授 中 井 専 人  
教 授 高 橋 修 平 (北見工業大学工学部)

学 位 論 文 題 名

## Experimental studies on the electrification phenomena of blowing snow

(吹雪の帯電現象に関する実験的研究)

吹雪粒子は、跳躍運動に伴う雪面との衝突を主要因とし、帯電することが知られている。この帯電に付随して生ずる静電気力が、粒子自身の運動軌道に影響を及ぼす可能性があり、吹き溜まりや雪庇の形成ならびに視程障害の発生を助長している可能性について議論されている。この帯電には、吹雪粒子の粒径や吹走距離、風速、湿度など、数多くの因子が関与していると考えられる。しかしながら、今まで系統的に電荷測定が行われた例は少なく、どのような条件下で大きな電荷を持つのかなど、その詳細については分かっていない。そこで本研究では、吹雪粒子の帯電特性を明らかにする事を目的とし、風洞内および野外において吹雪粒子の電荷測定を行った。風洞実験は、防災科学技術研究所・雪氷防災研究センターの回流型低温風洞を用いた。野外観測は、2011年1月から2月にかけて北海道当別町にて行った。

風洞実験では、主に、粒径ならびに跳躍回数と電荷の関係に着眼した。粒径別に実験を行う事で、粒子1個あたりが持つ電荷に関する議論が可能となる。また、先行研究にて示された粒径と跳躍距離の関係から、1個あたりの粒子が雪面との1度の衝突で帯びる電荷量について見積もった。跳躍回数に着眼した実験では、跳躍回数と電荷蓄積量の相関について調べた。ここで、跳躍回数の増減は風速変化によってコントロールした。なお、一連の風洞実験は、雪面の削剥が生じない硬い雪面および球状の雪粒子を使用し、 $-20 \sim -5$  °Cの気温範囲で行った。また、野外観測の結果について、風洞実験の結果ならびに観測時の湿度の点から考察した。電荷の測定には、ファラデーケージおよびエレクトロメーターを用いた。また、吹雪時の大気電場強度の変動特性を知るため、表面電位計を用い、風洞内において大気電場測定を行った。

風洞実験で得られた結果を以下に示す。

- (1) 単位質量あたりの吹雪粒子がもつ負電荷は、小さい粒子ほど大きいことが示された。また、粒子1個あたりの電荷に関しては、大きい粒子ほど大きな負電荷を持つ事が示された。
- (2) 雪面と吹雪粒子の1度の衝突で帯びる電荷量は、大きな粒子ほど大きい事が示された。これは、大きな粒子ほど雪面との摩擦面積が大きいと推測される。雪面との1度の衝突で帯びる負電荷量は、気温 $-5$ °Cにおいて粒径 $200 \mu\text{m}$ については約 $-1.8 \times 10^{-4}$  pC、 $450 \mu\text{m}$ につい

ては約 $-9.1 \times 10^{-4}$  pCであった。

(3) 跳躍回数と電荷蓄積量の間には明確な相関があることが示された。この結果から、野外観測値と風洞実験値の量的隔たりの一因が、吹雪粒子の跳躍回数の違い、すなわち吹走距離の違いである事が示された。

(4) 吹雪時の大気電場測定実験から、吹雪粒子が大きな電荷を持つ時ほど大気電場も増加する事が確認された。吹雪粒子が受ける静電気力は、粒子自身の帯電量と大気電場の積で与えられる。従って、粒子にかかる静電気力は、粒子自身の帯電量の増加によって相乗的に増加する事が示された。

野外観測で得られた結果を以下に示す。

(1) 気温が低いほど負電荷の増加が確認され、気温依存性に関して先行研究との一致を得た。しかし、最も気温が高かった時に最大の負電荷が得られた。この要因として、雪面状態(硬さ)の違いならびに降雪の有無に起因する吹雪粒子の跳躍回数の違いから考察した。また、観測時の湿度の違いが粒子の帯電量に影響を与えている可能性を提案した。

本研究によって、主に粒径および跳躍回数の観点から、吹雪粒子の帯電特性に関する新たな知見が得られた。これらの成果は、帯電した吹雪粒子自身にかかる静電気力を見積もる上で重要な手がかりとなり、雪庇形成や視程障害の予測研究の基礎となるものである。

吹雪粒子の帯電現象に関しては、観測が容易ではないこともあり、世界的に観測事例が少ない。今回の研究はこの現象に対して影響が強いと考えられる幾つかの要因を取り上げて系統的に実験を行い、それらの依存性を定量的に明らかにしたものである。

まず吹雪粒子の大きさを篩で5種類の粒子グループを作成して実験を行い、帯電の粒径依存性を世界で初めて明らかにした。また、気温を系統的に変えたときの帯電量が、気温の低下とともに増大することを明確にした。さらに、跳躍回数が帯電量を支配することも、初めて定量的に明らかにした。

野外観測では、多くの変動する気象要因のなか、気温依存性、降雪の有無、雪面状態の影響など、多くの事象の帯電量への寄与を明確に説明することが出来るようになった。

今回の基礎的実験観測結果を用いることにより、吹雪の構造理解や、運動メカニズムの高度化を促進し、それらの延長として雪庇の形成や、吹雪による視程悪化の予測や防除に関する研究を進展させる基となることと期待される。

審査委員一同は、これらの成果を高く評価し、また研究者として誠実かつ熱心であり、大学院博士課程における研鑽や修得単位などもあわせ、申請者が博士(環境科学)の学位を受けるのに十分な資格を有するものと判定した。