

論 文

吹雪粒子の帯電と跳躍回数に関する風洞実験

大 宮 哲¹⁾, 佐 藤 篤 司²⁾

要 旨

吹雪粒子は帯電しており, その極性は平均すると負である事が知られている. その量は野外観測値と風洞実験値とで異なり, 野外観測値の方が大きいとの報告がある. この一因として, 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. 本研究では, 吹雪粒子の帯電量と跳躍回数の関係を実験的に明らかにする事を目的とし, 低温風洞を用いて吹雪粒子の電荷測定実験を行った. 本実験では, 削剥されない硬い雪面を用い, 気温 $-20\sim-5^{\circ}\text{C}$ のもと, 球状および樹枝状の雪粒子を使用した. なお, 吹走距離は固定し, 風速変化 ($4.5\sim7\text{ m s}^{-1}$) によって跳躍回数を増減させた. 測定の結果, 気温や粒子の形状に関わらず, 跳躍回数の増加とともに粒子に負電荷が蓄積される事が示された. この結果から, 野外観測値と風洞実験値間に見られる量的隔たりの一因が, 吹雪粒子の跳躍回数, すなわち吹走距離の違いである事が示された.

キーワード: 吹雪, 跳躍運動, 電荷分離, 風洞実験, ファラデーケージ

Key words: Blowing-snow, Saltation, Charge separation, Wind tunnel experiment, Faraday Cage

1. はじめに

吹雪粒子は帯電している事が知られており, その主要因は吹雪粒子の運動形態の 1 つである“跳躍運動”に伴う雪面との衝突であると考えられている. この帯電が, 吹き溜まりや雪底の形成に寄与しているとの議論がある (Latham and Montagne, 1970). また, 静電気力の作用に伴い, 粒子自身の運動軌道が変化する可能性についても示唆されている (Schmidt *et al.*, 1999; Gordon and Taylor, 2009). 吹雪粒子の帯電には, 気温や湿度, 吹走距離, 雪面状態など数多くのファクターが関与していると考えられるが, それらの関係は解明されていない. 本稿では, 吹雪粒子の跳躍回数と電荷量に着目した低温風洞実験結果について報告する.

2. 先行研究

2.1 氷の電荷分離メカニズム

Latham and Mason (1961) によって, 氷の電荷分離は, その内部および氷試料間に形成された温度勾配によって引き起こされる事が明らかにされた. またその分離量は, 勾配の大きさに比例することも報告されている.

氷の温度上昇に伴い, 氷内部に存在するイオン欠陥 (H^+ , OH^-) が増加する. 従って, 温度勾配が形成されると同時にイオン濃度勾配が形成される. この勾配を解消するためにイオンが拡散するが, その拡散速度は H^+ の方が OH^- に比べて相対的に大きいため, 低温部ほどより多くの H^+ が集まる. その結果, 低温部が正, 高温部が負に帯電する.

吹雪粒子と雪面間に温度勾配が形成されるケースとして, “気温と雪面温度の違い”や“吹雪粒子と雪面の非対称摩擦”などが挙げられているが (Latham and Stow, 1967), 風洞の特性上, 気温と雪面温度はほぼ等しい. よって本実験の吹雪粒子の帯電は, 主に“吹雪粒子と雪面の非対称摩擦”

1) 北海道大学大学院環境科学院

〒060-0810 北海道札幌市北区北 10 条西 5 丁目

2) 防災科学技術研究所雪氷防災研究センター

〒940-0821 新潟県長岡市栖吉町前山 187-16

表 1 吹雪粒子の電荷測定に関する先行研究結果.

測定者	場所	測定手法	気温 (°C)	雪面状態	電荷量 ($\mu\text{C kg}^{-1}$)
Wishart (1968)	南極	直接	-14 ~ -11	古いざらめ雪から なる硬い雪面	約 -50
Latham & Montagne (1970)	ワイオミング (米国)	直接	-1	記載なし	約 -10
Maeno <i>et al.</i> (1985)	風洞	直接	-20 ~ -5	記載なし (削剥あり)	-0.7 ~ -0.1
Schmidt <i>et al.</i> (1998)	モンタナ (米国)	間接	-2	古い雪面	-208 ~ +72 (平均: -25)
Omiya <i>et al.</i> (2011)	風洞	直接	-20 ~ -5	硬い雪面 (削剥なし)	-3.58 ~ -0.02

によって生じた温度勾配に起因していると考えられる. “非対称摩擦”とは, 両者間の接触面積が異なる摩擦の事を言う. 衝突の際, 吹雪粒子が雪面上を瞬間的にスライドすると, “非対称摩擦”が生ずる.

2.2 吹雪粒子の電荷測定例

これまでに行われた吹雪粒子の電荷測定結果を表 1 に記す.

直接測定として, 野外観測 (Wishart, 1968; Latham and Montagne, 1970) のほか, 風洞実験 (Maeno *et al.*, 1985; Omiya *et al.*, 2011) がある. これらはいずれも, ファラデーケージ内に集められた吹雪粒子の総電荷量を測定したものである. 得られた単位質量あたりの電荷量は, 野外観測値が約 $-50 \sim -10 \mu\text{C kg}^{-1}$, 風洞実験値が約 $-3.58 \sim -0.02 \mu\text{C kg}^{-1}$ であり, 全て負極性を示した. なお, 両者間に見られる量的隔たりは, 吹走距離の違いに伴う吹雪の発達程度の違いに起因するものと考えられている (Maeno *et al.*, 1985). 電荷の気温依存性に関しては, $-15 \sim -10^\circ\text{C}$ 付近までは低温ほど絶対値の増加傾向がある事で一致している. しかし, それより低温下では Maeno *et al.* (1985) と Omiya *et al.* (2011) とで異なる結果が得られている. この点については今後の研究課題の 1 つであるが, 電荷測定を行った際の雪面状態に違いがある事や, 湿度が電荷に及ぼす影響 (Takahashi, 1978) についてなど, 気温以外の要因についても考慮すべきものと考えられる.

野外における電荷の間接測定が Schmidt *et al.* (1998) により行われた. これは, 水平方向に一樣にかけた電場中を通過させた個々の吹雪粒子の軌道変化量から見積ったものである. その結果, 単

位質量あたりの値は $-208 \sim +72 \mu\text{C kg}^{-1}$ (平均: $-25 \mu\text{C kg}^{-1}$) を示し, 吹雪時の空気中には正および負に帯電した粒子が混在している事が明らかにされた. これにより, 複数の粒子を集めて電荷測定を行う場合, 異符号電荷の相殺によって, 測定値が過小評価される可能性が高い事が示唆された.

吹雪粒子の平均電荷が負であるゆえ, 雪面は平均すると正に帯電していると考えられている (Maeno *et al.*, 1985; Schmidt *et al.*, 1998). 従って, 単純に雪面上ではね返った粒子は負に, 風や粒子の衝突によって新たに雪面から射出した粒子は正に帯電している事が多いと考えられる. しかし, 雪面ならびに個々の吹雪粒子の電荷量を直接測定する事は容易ではなく, その手法については検討が必要である.

2.3 粒子運動に与える影響

Schmidt *et al.* (1999) および Gordon and Taylor (2009) は, 吹雪粒子および雪面の帯電に起因して引き起こされる静電気力が, 粒子自身の跳躍距離に影響を与えている可能性について言及した. その力の大きさや向きは, 粒子自身の帯電量, 極性, 空間電場の大きさなどに左右される. またこの静電気力は, 飛雪粒子同士間のみならず, 雪面との間でも作用する. Gordon and Taylor (2009) は, この力によって, 粒子にかかる加速度が最大で $0.68 g$ (g : 重力加速度) にも達するとの試算結果を報告した. これは決して無視できない大きさである.

3. 研究目的

吹雪粒子の帯電には, 気温や湿度, 吹走距離,

雪面状態など、数多くのファクターが複雑に関与しているものと考えられる。しかし、これまでに行われた電荷測定例は少なく、どのファクターが帯電に大きく影響を与えているかについてなど、その特性に関する知見は乏しい。本研究の目的は、低温風洞内において様々な条件下で発生させた吹雪粒子の電荷測定を行い、その帯電特性を明らかにすることである。

本実験では、粒子の跳躍回数と電荷量の関係に着眼した。これまでの野外観測値と風洞実験値間で見られる量的隔たりの一因として、“吹走距離の違い”が挙げられている。しかし、吹雪粒子への負電荷蓄積量と吹走距離間の相関が実験的に示された例はない。この“吹走距離の違い”は、主に“跳躍回数の違い”に帰着させる事ができることから、跳躍回数を様々に変えた電荷測定実験を行った。

4. 実験方法

4.1 風洞の説明および実験条件

本実験は、防災科学技術研究所・雪氷防災研究センター新庄支所の雪氷防災実験棟 (Cryospheric Environment Simulator: CES) 内にある回流型低温風洞 (図 1) にて行われた。この風洞の測定領域は全長 14 m (断面 1 m × 1 m) であり、最大風速 20 m s^{-1} 、最低気温 -30°C まで制御可能である。まず、細かく粉砕した雪試料を測定領域の床に敷き詰め、一様な雪面を作成した。次に、表面に水噴霧を施し、雪面の削剥が生じない硬い雪面を作成した。これにより、既知の吹走距離を経て

きた粒子についてのみ着目できるだけでなく、正電荷を持つと考えられている雪面由来の粒子の発生を防ぐことができ、電荷量の過小評価を防ぐことができる。また、同一雪面状況下での実験を行う事が可能となる。人工吹雪の発生には、図 2 に示す吹雪粒子供給装置を用いた。これは、測定領域の風上底部にセットされた容器 (長さ 0.2 m × 幅 0.75 m × 深さ 0.3 m) 内に詰め雪を、回転ブラシによって空気中に舞い上げる装置である。この容器は任意の速度で上昇させる事ができるため、常に一定の雪供給量での実験が可能である。

吹雪粒子の電荷測定には、図 3 に示すファラデーケージ (ADVANTEST 社, TR8031) とエレクトロメーター (ADCMT 社, 8252) を用いた。ケージ内に取り込んだ吹雪粒子の電荷量を、エレクトロメーターによって測定する事ができる。電



図 2 吹雪粒子供給装置
回転ブラシによって雪粒子を空気中に舞い上げ、人工吹雪を発生させる。

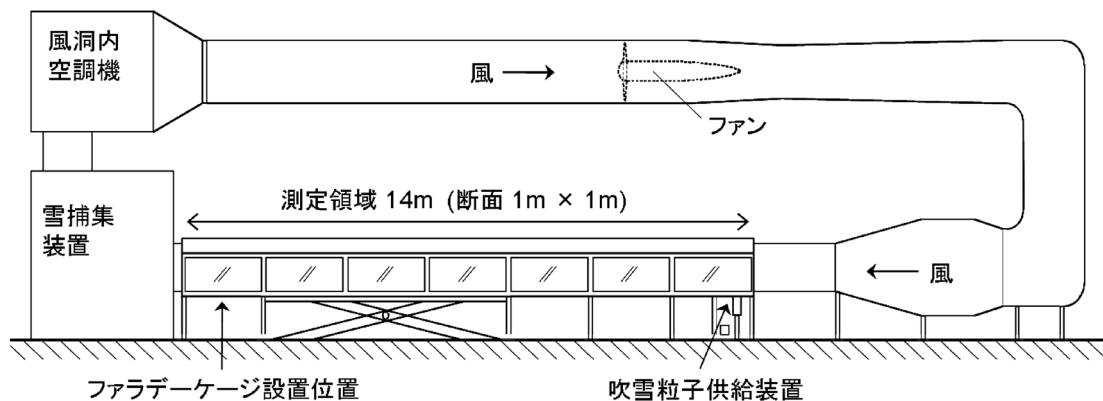


図 1 本実験で使用了回流型低温風洞 (防災科学技術研究所・雪氷防災研究センター新庄支所) の概略図および測器設置地点。

荷測定後, 取り込んだ粒子の総質量を電子天秤 (METTLER TOLEDO 社, PR2003DL) で計測し, 単位質量あたりの電荷量 Q を算出した. ケージ内への粒子の取り込み方法は, 図 4 に示す通りである. 風洞の床に開けた穴の下にケージを設置し, 吹雪粒子を落とし込んだ. なお, 雪で覆われていない漏斗部分およびその周辺の風洞の床は, その表面を氷化することにより電氣的に雪面と同様であると見なした. 本実験では, CES 内にある人工降雪装置によって作成した球状および樹枝状粒子 (図 5) を用いた. なお, 吹走距離一定のもと, 風速を変えることにより跳躍回数を変化させた. 実験条件を表 2 に記す.



図 3 電荷測定に用いたファラデーケージ (左) とエレクトロメーター (右).

4.2 跳躍回数の取り扱いについて

各々の風速条件から跳躍回数への換算には, Kosugi *et al.* (2004) に基づく式 (1) を用いた.

$$n = \frac{12}{0.31U - 1.19} \quad (1)$$

式中の n は跳躍回数, U は風洞の中心風速 (ms^{-1}) を示す. この式は, 風速 $5.5 \sim 8 \text{ms}^{-1}$, 気温 -15°C , 削剥のない硬い雪面, しまり雪をほぐした粒子 (球状粒子に類似) を用いて得られた実験式であり, 本実験条件と全て合致するわけではないが, ここでは単純化のため, 全実験条件に対して式 (1)

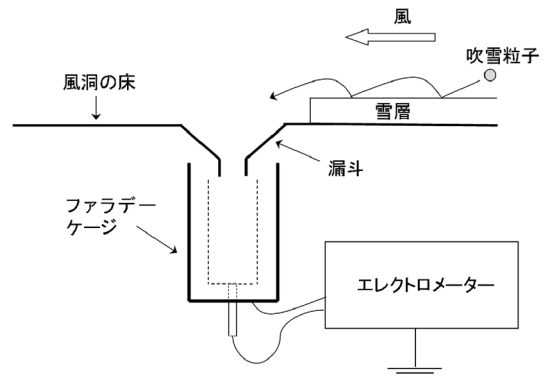


図 4 ファラデーケージへの粒子取り込み方法. 風洞の床に開けた穴の下にファラデーケージを設置した. なお, 雪面以外の部分は表面を氷化し, 電氣的に雪面と等しい状態にしてある.

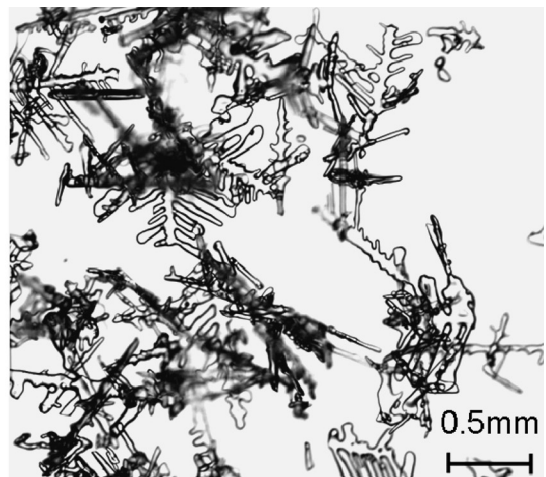
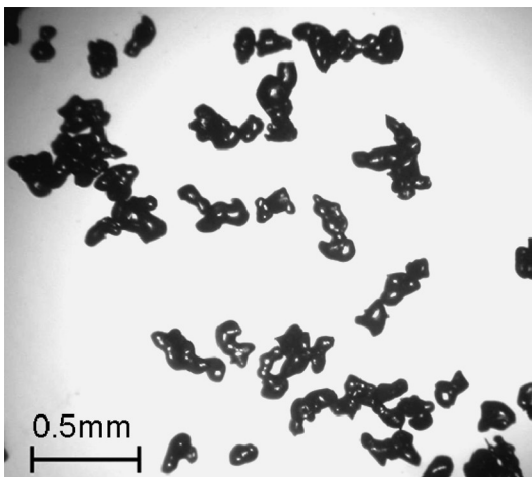


図 5 本実験に用いた球状粒子 (左) および樹枝状粒子 (右). CES (Cryospheric Environment Simulator) 内にある人工降雪装置によって作成されたもの.

表 2 本実験条件.

雪面状態	硬い雪面 (削剥なし)	
粒子の形状	球状	樹枝状
平均粒径 (μm)	145	—
気温 ($^{\circ}\text{C}$)	-20, -15, -10	-20, -15, -10, -5
雪温 ($^{\circ}\text{C}$)	気温に等しい	
風洞の中心風速 (m s^{-1})	4.5, 5, 6, 7	
吹走距離 (m)	12	
雪供給量 ($\text{g m}^{-1} \text{s}^{-1}$)	2.93	1.00

が適用できるとみなした. また, 風速の違いが電荷分離量に及ぼす影響も無いと仮定し, 跳躍回数の違いについてのみ着眼した.

5. 実験結果と考察

5.1 供給段階における粒子の電荷量

回転ブラシとの摩擦により, 吹雪粒子は供給された段階で既に帯電している. そこで, 回転ブラシによって空気中に舞い上げられた粒子を直接フェラデーケージに取り込み, 吹雪粒子が持つ初期電荷量を測定した. そこで得られた単位質量あたりの電荷量 Q は全て正を示した. その値は樹枝状粒子の方が大きく, 球状粒子が $+73 \sim +134 \mu\text{C kg}^{-1}$ (平均: $+100 \mu\text{C kg}^{-1}$) であったのに対し, 樹枝状粒子は $+111 \sim +314 \mu\text{C kg}^{-1}$ (平均: $+198 \mu\text{C kg}^{-1}$) であった.

この違いは, 電荷量と粒径の関係に着目した実験結果 (Omiya *et al.*, 2011) から説明できる. この実験によって, 小さい粒子ほど Q が増加する事が示され, それは単位質量あたりを占める粒子表面積の違いから説明された. 回転ブラシにより粒子を供給する際, 樹枝状粒子は球状粒子よりも破壊されやすい. その結果生じた小粒子が, 初期電荷量の違いをもたらしたと考えられる. 図 6 に, 回転ブラシによる供給直後の樹枝状粒子の一例を示す. 図 5 と比較し, 粒子が破壊されている様子が分かる. また, この電荷量の違いには, 樹枝状粒子自身の複雑な形状に伴う表面積の違いが影響していた可能性も挙げられる.

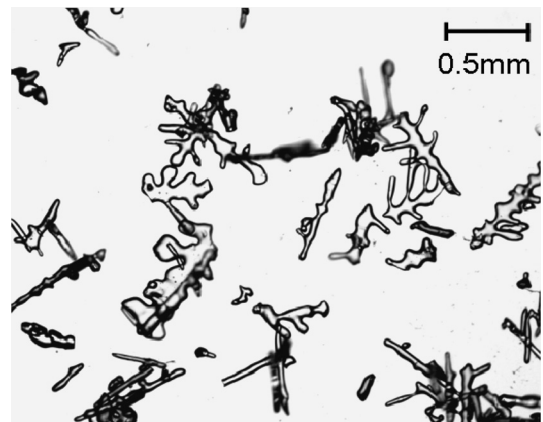


図 6 回転ブラシにより供給された直後の樹枝状粒子. 供給前の樹枝状粒子 (図 5) に比べ, 粒子が破壊されている様子が分かる.

5.2 跳躍運動後の粒子の電荷量

単位質量あたりの電荷量 Q と, 跳躍回数 n および気温の関係を, 球状粒子については図 7-a, 樹枝状粒子については図 8-a に示す. 横軸の風速 U は, 各々の n を算出した U に対応している. また, 図中の破線部分を拡大したものをそれぞれ図 7-b, 図 8-b に示す. なお, 全ての図とも, プロットの重なりを避けて見やすくするため, 温度毎に横軸方向に少しずつずらして記載してある. この結果, 粒子形状や気温に関わらず, 跳躍回数の増加に伴い, 吹雪粒子の初期正電荷が急激に減少する事が確認された. なおこの結果で特に注目すべきは図 7 の「球状粒子, -10°C , 5 m s^{-1} 」のケースであり, 電荷が全て負極性を示した結果 ($-2.46 \sim -0.80 \mu\text{C kg}^{-1}$) である. この結果は, 粒子への負電

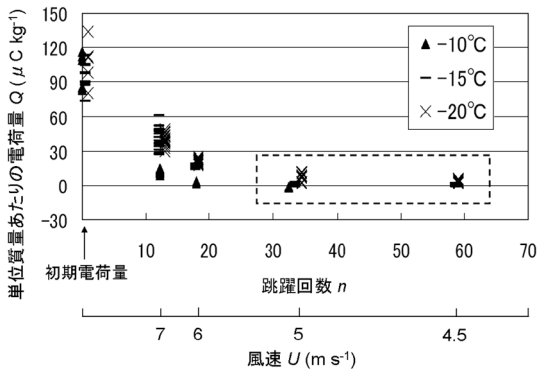


図 7-a 単位質量あたりの電荷量 Q と跳躍回数 n および温度の関係 (球状粒子).

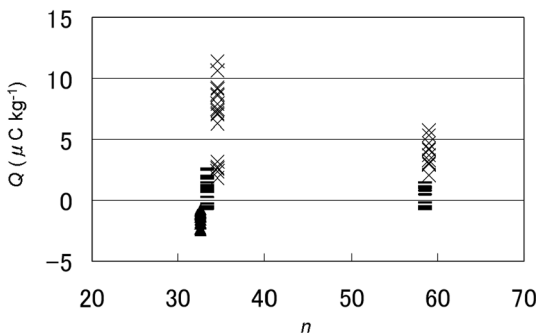


図 7-b 図 7-a 中の破線部分を拡大したもの.

荷の蓄積によって初期正電荷が全て相殺されたのち、さらに負電荷が蓄積した事を示している. 以上から、跳躍回数が増えるほど、粒子に蓄積する負電荷も増える事が示された. これは、野外観測と風洞実験間に見られる電荷量の隔たりの一因が、跳躍回数、すなわち吹走距離の違いであることを示している. なお、「球状粒子、 -10°C 、 5 m s^{-1} 」以外の条件下においても、さらに跳躍回数が増える事によって、その全てが負極性に移行するものと考えられる.

電荷量の気温依存性について、球状粒子は高温ほど早く電荷が移動する傾向があった. その一方、樹枝状粒子は -15°C までは同様の傾向があるものの、 -20°C で逆転する結果が多く見られた. その一例として、風速 5 m s^{-1} における気温と Q の関係を図 9 に示す. $-15\sim-10^{\circ}\text{C}$ 付近を境界とした同様の食い違いは Maeno *et al.* (1985) と Omiya *et al.* (2011) の実験結果間でも報告されており、この点に関しては今後の研究課題の 1 つ

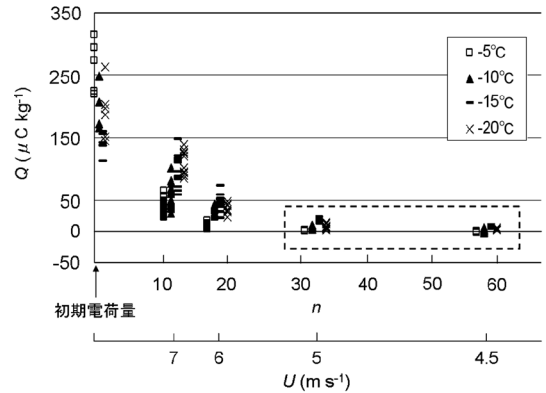


図 8-a Q と n および温度の関係 (樹枝状粒子).
※ 球状と樹枝状で縦軸スケールが異なることに注意.

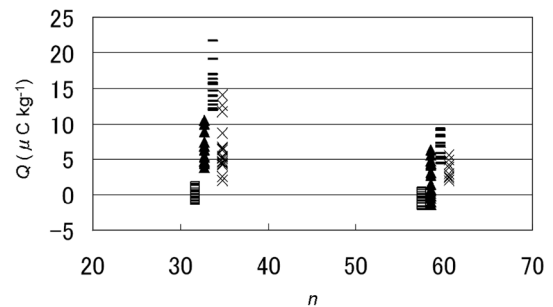


図 8-b 図 8-a 中の破線部分を拡大したもの

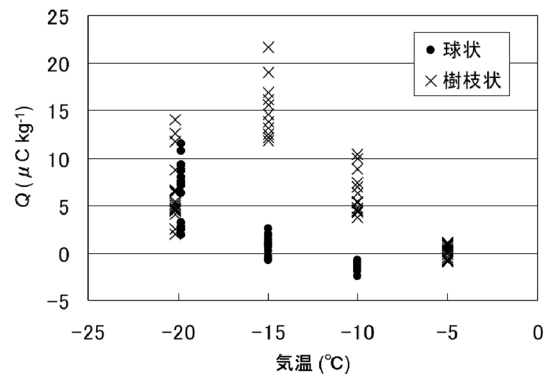


図 9 粒子形状別の電荷量と気温の関係 (風速 5 m s^{-1} の例)

である.

跳躍回数の増加に伴う電荷量の変化速度は粒子形状によって異なり、樹枝状粒子の方が早かった. これには、樹枝状粒子に対しても式(1)を適用できると仮定したことや、ファラデーケージ内への粒子の取り込み易さに粒径依存性があること

(Omiya *et al.*, 2011) など、帯電特性以外の要因が影響していた可能性もある。

5.3 野外観測値と同程度の電荷量となる跳躍回数の見積もり

本風洞実験から、粒子の跳躍回数が増加するにつれ、粒子には負電荷が蓄積する事が示された。そこで、ここでは負電荷の蓄積傾向をさらに外挿し、野外観測程度の負電荷量に達するために必要な跳躍回数についての見積もりを行う。

一例として、「球状粒子、 -20°C 」における電荷変化量の絶対値 $|\Delta Q|$ と跳躍回数 n との関係を図 10 に示す。 $|\Delta Q|$ は、平均初期電荷量と各々の n で得られた平均電荷量の差を表す。エラーバーは、全測定結果から考えられる変化量の幅を示す。 n の増加に伴い $|\Delta Q|$ の変化率が減少する傾向があることから、第一近似として $|\Delta Q|$ と n の間に対数関係を仮定し、その近似式を図中に記した。この対数近似式を用い、吹雪粒子の電荷量が野外観測値 ($-50 \sim -10 \mu\text{C kg}^{-1}$) と同程度に達するために必要とする跳躍回数を見積もると、200 回程度の跳躍で $-30 \mu\text{C kg}^{-1}$ に達する事になる。これを式 (1) によって吹走距離に換算すると、風速 7 m s^{-1} で 196 m , 5 m s^{-1} で 72 m 程度である。また、球状粒子を用いた他の気温条件 (-15°C , -10°C) においても同程度の結果が得られ、その跳躍回数は $200 \sim 300$ 回の範囲だった。

本見積もりに用いた球状粒子は、供給段階で既に約 $+100 \mu\text{C kg}^{-1}$ もの正電荷を持っていたが、自然界における吹雪粒子がこのような帯電状態で跳躍運動を開始するとは考えにくい。従って、実

際の吹雪粒子が野外観測値程度の電荷を得るのに要する吹走距離については検討が必要である。この点に関し、下記の相反する可能性が考えられる。1 つ目は、上記近似式の傾きは初期正電荷 ($+100 \mu\text{C kg}^{-1}$) に引っ張られている事から、実際の傾きが過大評価されている可能性がある。この場合には、本見積もり以上の吹走距離を要すると考えられる。2 つ目は、 $+100 \mu\text{C kg}^{-1}$ よりも小さな初期電荷量で始まった吹雪粒子は、より早く負電荷領域に入る。よってこの場合には、本見積もり以下の吹走距離で達成される可能性がある。これらの検証には、非帯電粒子もしくは初期段階に負電荷を持つ粒子を用い、負電荷領域における負電荷の蓄積速度について知る必要がある。

6. おわりに

本実験では、低温風洞を用い、吹雪粒子の跳躍回数に着目した電荷測定を行った。気温条件 $-20 \sim -5^{\circ}\text{C}$ のもと、球状粒子および樹枝状粒子を使用した。その結果、いずれの気温や粒子形状においても、跳躍回数の増加とともに粒子への負電荷の蓄積が確認された。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間の量的隔たりの一因が、吹雪粒子の跳躍回数すなわち吹走距離の違いである事が示された。電荷量の気温依存性については、 $-15 \sim -5^{\circ}\text{C}$ の範囲では、粒子形状に関わらず高い気温ほど早く電荷の移動が生じた。しかし、 -20°C では使用した粒子形状によって異なる結果が得られた。この点については今後の研究課題の 1 つである。

謝 辞

本風洞実験を行う上で、防災科学技術研究所・雪氷防災実験棟の特別技術員である望月重人氏ならびにオペレーターである大川元造氏には、実験に際し、多大なご協力を頂いた。防災科学技術研究所・雪氷防災研究センターの研究員の方々には大変貴重な御指導を頂いた。また、論文作成にあたり、査読者である杉浦幸之助氏ならびに竹井巖氏、論文編集担当の西村浩一氏には大変有意義なコメントをいただいた。ここに感謝の意を表する。

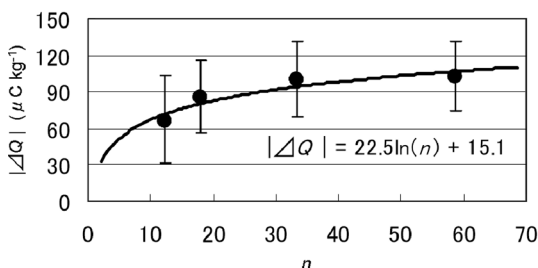


図 10 球状粒子、 -20°C における、単位質量あたりの電荷量の変化量の絶対値 $|\Delta Q|$ と跳躍回数 n の関係。
エラーバーは、全測定結果から考えられる変化量の幅。 $|\Delta Q|$ と n の間に対数関係を仮定し、その近似式を記してある。

文 献

- Gordon, M. and Taylor, P.A., 2009: The Electric Field During Blowing Snow Events. *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. **130**, 97–115.
- Kosugi, K., Sato, T. and Sato, A., 2004: Dependence of drifting snow saltation length on snow surface hardness. *Cold Reg. Sci. Technol.*, **39**, 133–139.
- Latham, J. and Mason, B.J., 1961: Electric charge transfer associated with temperature gradient in ice. *Proc. R. Soc. London, Ser. A.*, **260** (1303), 523–536.
- Latham, J. and Montagne, J., 1970: The possible importance of electrical force in the development of snow cornices. *J. Glaciol.*, Vol. **9**, No. 57, 375–384.
- Latham, J. and Stow, C.D., 1967: A laboratory investigation of the electrification of snowstorms. *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **93** (395), 55–68.
- Maeno, N., Naruse, R., Nishimura, K., Takei, I., Ebina, T., Kobayashi, S., Nishimura, H., Kaneda, Y. and Ishida, T., 1985: Wind-tunnel experiment on blowing snow. *Ann. Glaciol.*, **6**, 63–67.
- Omiya, S., Sato, A., Kosugi, K. and Mochizuki, S., 2011: Estimation of the electrostatic charge of individual blowing snow particles by wind tunnel experiment. *Ann. Glaciol.*, **52** (58), 148–152.
- Schmidt, D.S., Dent, J.D. and Schmidt, R.A., 1998: Charge-to-mass ratio of individual blowing-snow particles. *Ann. Glaciol.*, **26**, 207–211.
- Schmidt, D.S., Schmidt, R.A. and Dent, J.D., 1999: Electrostatic force in blowing snow. *Boundary - Layer Meteorology*, **93**, 29–45.
- Takahashi, T., 1978: Riming Electrification as a Charge Generation Mechanism in Thunderstorms. *J. Atmos. Sci.*, **35**, 1536–1548.
- Wishart, E.R., 1968: Electrification of Antarctic drifting snow. *Proc. Int. Symp. Antarctic Glaciological Exploration, Hanover*, Vol. **86**, 316–324.

Wind tunnel experiment of an electrostatic charge of blowing-snow particles focusing on collision frequency to the snow surface

Satoshi OMIYA¹⁾ and Atsushi SATO²⁾

*1) Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University,
Kitaku, Sapporo, Hokkaido 060-0810*

*2) Snow and Ice Research Center, NIED,
Suyoshi, Nagaoka, Niigata 940-0821*

Abstract: There are some experimental reports on electrostatic charge measurements of blowing-snow particles in the field and wind tunnel. While there were qualitatively consistent in the sign; negative, there were gaps quantitatively between them. A reason of the gaps speculated widely is due to differences of the collision frequency of particles to the snow surface. The purpose of this experiment is to measure the charge of blowing-snow particles focusing on the collision frequency and clarify the relationship between them. Experiments were carried out in a cryogenic wind tunnel using spherical and dendritical snow particles under the following conditions: hard snow surface, air temperature in the range -20 to -5°C . The collision frequency of particle was controlled by changing the wind velocity (4.5 to 7 m s^{-1}) under the fixed fetch (12 m). Blowing-snow particles tend to accumulate negative charges with increase of collision frequency to the snow surface. As a result, it is demonstrated that the gaps between the field values and the wind tunnel ones were due to difference of the collision frequency of snow particles.

(2011 年 2 月 23 日受付, 2011 年 4 月 27 日改稿受付, 2011 年 5 月 20 日最終改稿受付,
2011 年 6 月 1 日受理, 討論期限 2012 年 1 月 15 日)