

吹雪時の大気電場強度の鉛直分布に関する考察

A consideration on vertical electric field strength during the blowing snow event

大宮 哲 (北海道大学 低温科学研究所)

佐藤 篤司 (防災科学技術研究所 雪氷防災研究センター)

Satoshi OMIYA (Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University)

Atsushi SATO (Snow and Ice Research Center, NIED)

1. はじめに

吹雪の発生に伴う大気電場の変動が数多く報告されているが¹⁾など、これは吹雪粒子が帯電している事が一因である。この帯電現象が及ぼす影響の1つとして、吹雪粒子の電荷と大気電場の積で生じる静電気力による吹雪粒子自身の運動軌道の変化が挙げられる。この軌道変化は広域の積雪分布に影響を与えうる。また、視程障害の発生を助長している可能性や²⁾、吹き溜まりや雪底の形成に関与している可能性についても議論されている³⁾。従って、吹雪運動を正確に理解するためのみならず、防災の観点からも、吹雪の帯電特性に関する詳細を明らかにする必要がある。

静電気力によって粒子の運動軌道がどのように、どの程度変化するのかを知るためには、粒子が持つ電荷量と極性のほか、大気電場の強度とその向きを知る必要がある。これまでの研究から、吹雪空間中には正および負に帯電した粒子が混在しているが、平均すると負を示す事が明らかにされている²⁾。一方、大気電場の向きに関しては、先行研究間において一義的な結果が得られていない。この要因として、測器に粒子が衝突する事で発生するノイズの影響や、測器自体の存在が電場を乱している可能性などが考えられる。このように、吹雪時の雪面近傍における電場を実測するのは容易ではない。吹雪時の電場強度に関する数値計算は過去に数例あるが⁴⁾など、それらは吹雪粒子の粒径分布および質量フラックスの高度変化に伴う空間電荷密度の高度変化を加味していなかった。そこで本研究では、吹雪粒子が持つ電荷に関する風洞実験結果⁵⁾にて得られた実験式ならびに風洞内で測定した各種データ(風速, 質量フラックス, 粒径の鉛直分布)から求めた空間電荷密度の高度依存性を考慮に入れ、電場強度の鉛直分布に関する考察を行った。なお、この実験式は、(条件付きではあるが)吹雪粒子の粒径 d と気温 T から個々の吹雪粒子が持つ電荷 q を推定する式である。その実験式を以下に記す。

$$q(d, T) = a(T)d^{1.35} \quad (1)$$

$$a(T) = (0.13T^2 + 3.08T + 5.31) \times 10^{-2} \quad (2)$$

2. 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を用いた(図-1)。測定領域の床に一様に雪を敷き詰めたのち、水噴霧によって硬雪面を作成した。これによって雪面の削剥を防いだ。風速測定には熱線風速計を使用した。風洞中心風速を 5m/s とし、雪面上 6 点 (0.01m~0.5 m) にて測定した。吹雪粒子の水平質量フラックスおよび粒径分布の測定には SPC(Snow Particle Counter)を使用し、雪面上 9 点 (0.01m~0.2

m) で測定した. 気温 -10°C のもと, 雪粒子供給量を 4.4g/m/s および 8.7g/m/s として測定を行った.

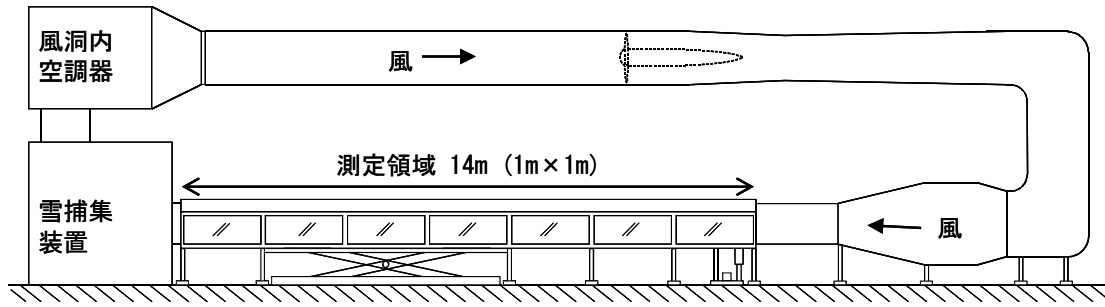


図-1 使用した風洞の概略図

3. 計算

本考察では以下の仮定を用いた.

- 1) 吹雪粒子の粒径および空間数密度は水平方向に一様で, 鉛直方向に変化する
- 2) 全ての吹雪粒子は負電荷を持ち, その電荷は式(1), (2)で与えられる
- 3) 雪面は正の電荷を持ち, その大きさは吹雪粒子が持つ負電荷の総和に等しい
- 4) 吹雪粒子と雪面の間でのみ電荷分離が生じる

高度 z における吹雪密度 (単位体積あたりに含まれる吹雪粒子の質量) $\rho(z)$ は, 式(3)で表される. $F(z)$ および $U(z)$ はそれぞれ高度 z における質量フラックスおよび風速である.

$$\rho(z) = \frac{F(z)}{U(z)} \quad (3)$$

吹雪粒子 1 個の重量 m_p は(4)で表されるので, 吹雪粒子の数密度 $N(z)$ は(5)で表される. ここで, $d(z)$ は z における平均粒径, ρ_i は氷の密度を示す.

$$m_p(z) = \frac{4\pi}{3} \rho_i \left\{ \frac{d(z)}{2} \right\}^3 \quad (4)$$

$$N(z) = \frac{\rho(z)}{m_p(z)} \quad (5)$$

(1), (2), (5)から空間電荷密度 $Q_v(z, T)$ が求められる(6).

$$Q_v(z, T) = N(z)q(d(z), T) \quad (6)$$

高度 z , 気温 T における平面電荷密度 $\sigma(z, T)$ は(7)で与えられ, その平面が周囲に形成する電場 E_{out} は(8)で表される. 同様に, 雪面が形成する電場 E_s は(9)で表される.

$$\sigma(z, T) = \int_z^{z+dz} Q_v(z, T) dz \quad (7)$$

$$E_{out}(z) = \frac{\sigma(z, T)}{2\epsilon_o} \quad (8)$$

$$E_s = -\frac{\int_0^\infty Q_v(z, T) dz}{2\epsilon_o} \quad (9)$$

高度 z における正味の電場 E_{net} は, 高度 z よりも上方の平面が形成する電場, 下方の平面が形成する電場, 雪面が形成する電場の和であるから, E_{net} は(10)で表される. なお, 下向き電場が正電場であると定義されている.

$$E_{net}(z, T) = \frac{1}{2\epsilon_0} \left(-\int_0^z Q_v(z, T) dz + \int_z^\infty Q_v(z, T) dz + \int_0^\infty Q_v(z, T) dz \right) \quad (10)$$

4. 使用した測定データ

測定した風速の鉛直分布を図-2 に, 質量フラックスの鉛直分布を図-3 に, 平均粒径の鉛直分布を図-4 に記す. 図中に記した近似式を計算に用いた. なお, エラーバーは標準偏差を意味している.

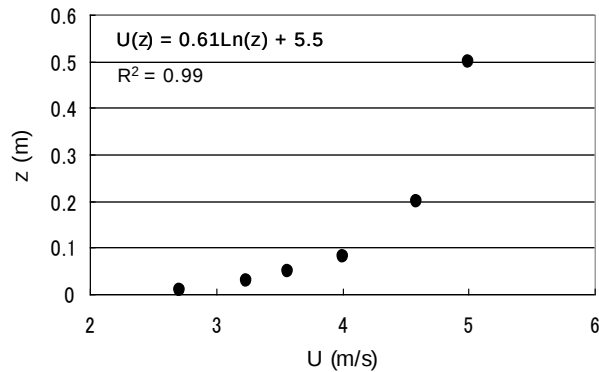


図-2 風速の鉛直分布

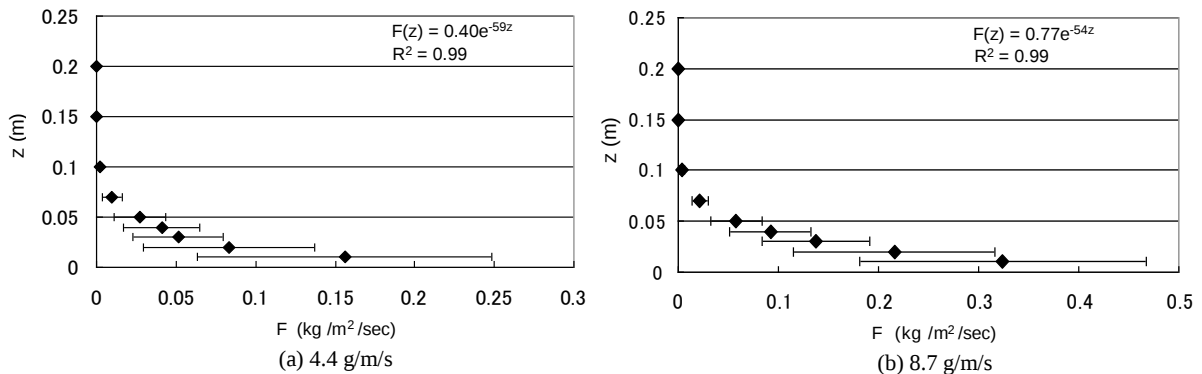


図-3 質量フラックスの鉛直分布 (-10°C)

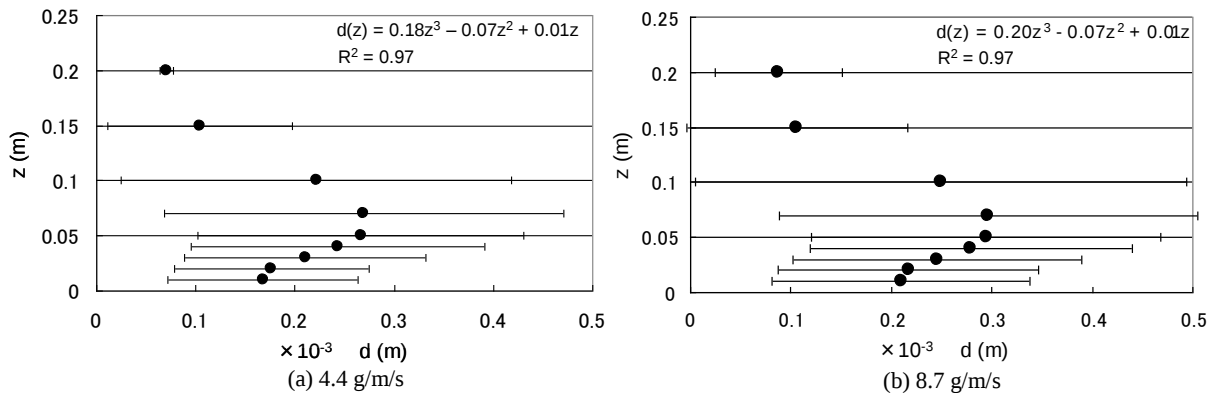


図-4 平均粒径の鉛直分布 (-10°C)

5. 結果

前節の測定結果を用いて, 高度と空間電荷密度および電場強度の関係をそれぞれ図-5, 6 に記す. この結果から, 雪面近傍ほど, また, 吹雪量が多いほど負電荷密度および負電

場が増加する事が示された。これは、雪面近傍を運動する粒子ほど大きな静電気力を受ける事を示している。この場合、負電荷を持つ吹雪粒子の跳躍距離ならびに跳躍高度は、帯電を加味していない粒子に比べ、短くて低くなる。粒子と雪面の間に働くこの引力は、雪底や吹き溜まりの形成を促進する可能性がある。ここでは吹雪粒子が全て負電荷を持つと仮定したが、実際には正に帯電した粒子も存在する。この場合には粒子と雪面の間に斥力が働くため、浮遊運動への移行が促され、視程障害の発生を誘発する可能性がある。

本計算結果から得られる静電気力は無視できるほど小さく、吹雪粒子にかかる加速度は $0.0004g$ (g : 重力加速度) であったが、それは風洞実験値を用いた事が一因である。風洞内で測定される吹雪粒子の電荷は野外観測値よりも小さい⁶⁾。また、粒子の電荷量と大気電場強度には正の相関があることが分かっている⁷⁾。従って、電荷量の増加に伴って静電気力は相乗的に増加する。今後は、高度別電場強度の実測を試みる。また、高度別電荷測定の結果から電場強度の見積もりを行い、吹雪粒子にかかる静電気力について、より詳細な議論を行う予定である。

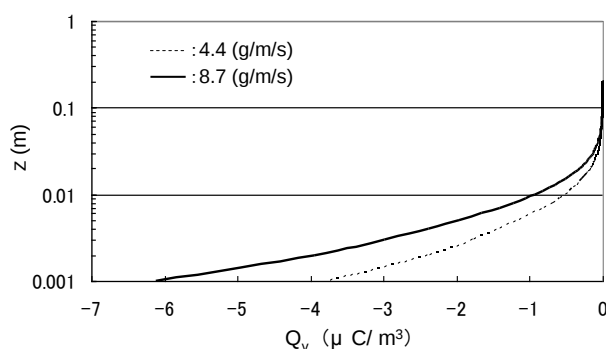


図-5 高度と空間電荷密度の関係

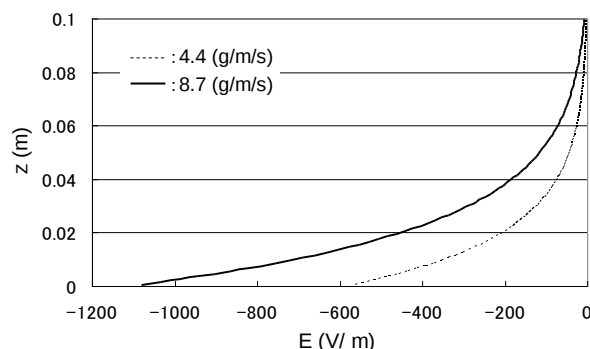


図-6 高度と電場強度の関係

参考文献

- 1) Kikuchi, K., 1970: Observations of the atmospheric electric field at Syowa Station, Antarctica. Journal of the Meteorological Society of Japan, 48(5), 452-460.
- 2) Schmidt, D.S., Schmidt, R.A. and Dent, J.D., 1999: Electrostatic force in blowing snow. Boundary Layer Meteorol., 93, 29-45.
- 3) Latham, J. and Montagne, J., 1970: The possible importance of electrical force in the development of snow cornices. J. Glaciol., 9(57), 375-384.
- 4) Schmidt, D.S. and Dent, J.D., 1993: A theoretical prediction of the effects of electrostatic forces on saltating snow particles. Ann Glaciol 18:234-238.
- 5) 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.
- 6) Maeno, N., Naruse, R., Nishimura, K., Takei, I., Ebinuma, T., Kobayashi, S., Nishimura, H., Kaneda, Y. and Ishida, T., 1985: Wind-tunnel experiment on blowing snow. Ann. Glaciol., 6, 63-67.
- 7) 大宮・佐藤, 2011: 低温風洞内における吹雪時の大気電場測定, 雪氷研究大会講演予稿集, 84.