

みずほ基地とドームふじ基地における吹雪観測

西村浩一^{1*}・亀田貴雄²Blowing snow measurements at Mizuho Station
and Dome Fuji Station, AntarcticaKouichi Nishimura^{1*} and Takao Kameda²

(2007年11月7日受付; 2008年2月26日受理)

Abstract: Blowing snow observations were carried out at Mizuho Station, Antarctica from Sept. to Nov. 2000. A blowing snow observation system including snow particle counters (SPC) which can sense not only the number of snow particles but also their diameters, was situated on a 30 m tower. All instruments worked properly and the data obtained revealed profiles of mass flux and particle size distributions as a function of the friction velocity. Since the SPC is found to be useful to evaluate precipitation as well, it was set at Dome Fuji Station from Feb. 2002 to Jan. 2003, and measurements of snowfall as well as blowing snow were undertaken.

要旨: 2000年9月から11月にかけて、南極みずほ基地において雪粒子の運動と風の乱流構造に着目した吹雪観測を実施した。観測は30mタワーにスノーパーティクルカウンター (SPC) を4台 (設置高: 9.6 m, 3.1 m, 1.0 m, 0.2 m), 超音波風向風速計を3台 (設置高: 25 m, 1.0 m, 0.2 m), 気温・露点計を2台 (設置高: 3.0 m, 1.0 m) 設置して行われた。観測期間中、すべての機器はほぼ順調に作動し、吹雪フラックスの鉛直分布や雪粒子の粒径分布などを風速 (摩擦速度) の関数として求めることに成功した。また SPC が降雪の観測にも有用であることが確認されたため、2002年2月から2003年1月にかけては、ドームふじ基地においても観測が行われた。

1. はじめに

南極氷床上では強いカタバ風が年間を通して吹送することから、多量の積雪が連続的に再配分される。この輸送量は南極氷床の質量及びエネルギー収支の重要な要素となるほか、グローバルな気候変動の影響を予測する上でも重要な鍵とされているが、値の正確な見積もりは依然困難な状況にある。一方、広大な平原とそこを吹きわたるカタバ風は、時間的にも空

¹ 新潟大学理学部自然環境学科. Department of Environmental Science, Niigata University, 8050 Ikarashi 2no-cho, Nishi-ku, Niigata, 950-2181.

² 北見工業大学社会環境工学科雪氷研究室. Snow and Ice Research Laboratory, Department of Civil and Environmental Engineering, Kitami Institute of Technology, 165 Koen-cho, Kitami, Hokkaido 090-8507.

* Corresponding author. E-mail: knishi@env.sc.niigata-u.ac.jp

間的にも変動の小さい定常な吹雪を発生させるため、南極は吹雪に関する理論やモデルの検証と評価が可能な理想的実験フィールドと言っても過言でない。

南極ではこれまでも数多くの吹雪観測が行われた。質量フラックスの高度分布や粒径、風速分布などの詳細な観測は初めて Budd (1966) により実施された。彼らはロケット型吹雪計とレプリカを用いて質量フラックスと粒径を測定した。後述するように、ほとんどの粒径分布やフラックスの測定には同様の捕捉装置（吹雪計）が用いられてきた。こうした機械的な捕捉手法は最も直接的ではあるが、多くの測定器を同時に扱うことの難しさに加えて捕捉率もかなり低く、精度の高い測定は困難であった。当然、質量フラックスや粒径分布の短時間変動の測定は不可能であった。こうした問題を克服するため Schmidt (1977) によって開発されたのがスノーパーティクルカウンター (SPC) で、同様のシステムが Dover (1993), King and Turner (1997), Mann *et al.* (2000) によって使用された。しかしこれらの SPC は雪粒子の数フラックスを測定するだけで、質量フラックスを得るためにはレプリカによる粒径分布の観察がまだ不可欠であった。

本報告では、南極のみずほ基地において 2000 年に実施された吹雪観測と、2002 年から 2003 年のドームふじ基地での吹雪・降雪観測の概容を紹介する。両者とも吹雪の飛雪粒子数に加えて粒径の測定が可能な新型の SPC (新潟電機(株)) が用いられた。観測体積 ($2 \times 25 \times 0.5$ mm) を通過する雪粒子の計測値は 1 秒間隔で記録され、その粒径によって 32 階級に分類される。つまりフラックスが粒径ごとに計算される。この SPC は $50 \mu\text{m}$ 以下の小さい雪粒子は検知できないが、それらのフラックスへの寄与は、高所を除くと一般に大きくない。

2. みずほ基地での吹雪観測

吹雪の観測は、昭和基地より約 250 km 内陸にあるみずほ基地 ($70^\circ 42.6'S$, $44^\circ 18.9'E$, 2230 m a.s.l.) において 2000 年に実施された。地表面はほぼ一様な雪面が広がり、東よりの 10 m/s から 15 m/s 程度のカタバ風の影響ではほぼ定常的に吹雪が発生している。1976 年には接地境界層内の気象観測を目的に 30 m タワーが建設され、吹雪の観測もこれまで Kobayashi (1978) や Takahashi (1985) により実施されている。

観測機器のほとんどは図 1 に示すように 30 m タワーに設置された。4 台のスノーパーティクルカウンター (SPC) は、それぞれ 9.6 m, 3.1 m, 1.0 m, 0.2 m の高さに設置された。このうち最も低い位置のセンサーは 0.01 m から 0.2 m の高さに調節が可能で、手動により地表付近の詳細な観測が行われた。超音波風向風速計 (DA-600, Kaijo Denki) は高さ 25 m, 1.0 m, 0.2 m にそれぞれ設置された。これも SPC と同様、最下部のセンサーは高さの調節を可能とした。自然通風筒に格納された気温と露点計 (HMP243) は高さ 3.0 m と 1.0 m に設置され、他のデータとともに 100 Hz のサンプリング間隔で収録された。このほか、タワーから 20 m 離れた地点には自動気象観測装置が設置され、風向・風速 (高さ 3 m), 気温, 湿度, 気圧 (1 m),

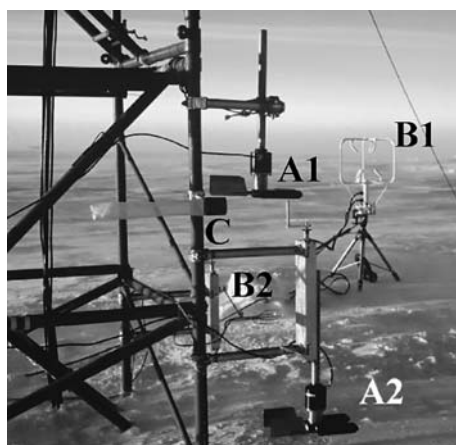


図 1 みずほ基地の 30 m タワーに設置された吹雪観測システム。A: スノーパーティクルカウンター (SPC) (A1: 3.1 m, A2: 1.0 m), B: 超音波風向風速計 (B1: 1.0 m, B2: 0.2 m), C: ネット型吹雪計。

Fig. 1. Blowing snow measurement system at Mizuho Station. A: Snow particle counter (SPC) (A1: 3.1 m, A2: 1.0 m), B: Ultra-sonic anemometer (B1: 1.0 m, B2: 0.2 m), C: Net-type blowing snow collector.

日射, 放射収支, 雪温 (10 cm と 30 cm 深) がそれぞれ 10 分間隔で記録された。

吹雪観測は 2000 年 9 月 30 日から 11 月 18 日にかけて行われた。観測期間当初は, 約 -50°C まで気温が低下したが, それ以降は徐々に上昇し期間の終わりには -20°C 程度に達した。図 2 には 11 月 12 日から 15 日にかけての自動気象観測装置による高さ 3 m の風速と, SPC を用いて測定された高さ 0.05 m の吹雪質量フラックスを示した。ともに 10 分間の平均値である。平均風速が約 5 m/s を上回ると吹雪が発生を始め, 風速の増加と共に質量フラックスも増大する様子がわかる。風速は最大で約 13 m/s にまで達するが, その変化は緩やかで, 吹雪の発生から停止に至るまでの期間が 2 日程度も継続している。ちなみに図 2 の矢印で示した急激な質量フラックスの減少と増大が見られる部分 (11 月 13 日 0930-1000 LT, 14 日 0830-0900 LT) は, 手動で SPC の高度を変えて, 地表面付近の質量フラックスプロファイルの計測を行った期間である。

一方, 図 3 には地上高 1 m で超音波風向風速計により測定された風速と摩擦速度の関係を示す。摩擦速度 u_* は, 以下に示す渦相関法により求められた。

$$u_* = \sqrt{-u'w'}, \quad (1)$$

ここで u' と w' は, それぞれ風速の乱流成分の水平および垂直成分である。Mann *et al.* (2000) は, 超音波風向風速計の出力は吹雪粒子の影響を大きく受けたとしたが, 図 3 を見る限り本研究では定常な乱流境界層の風速分布,

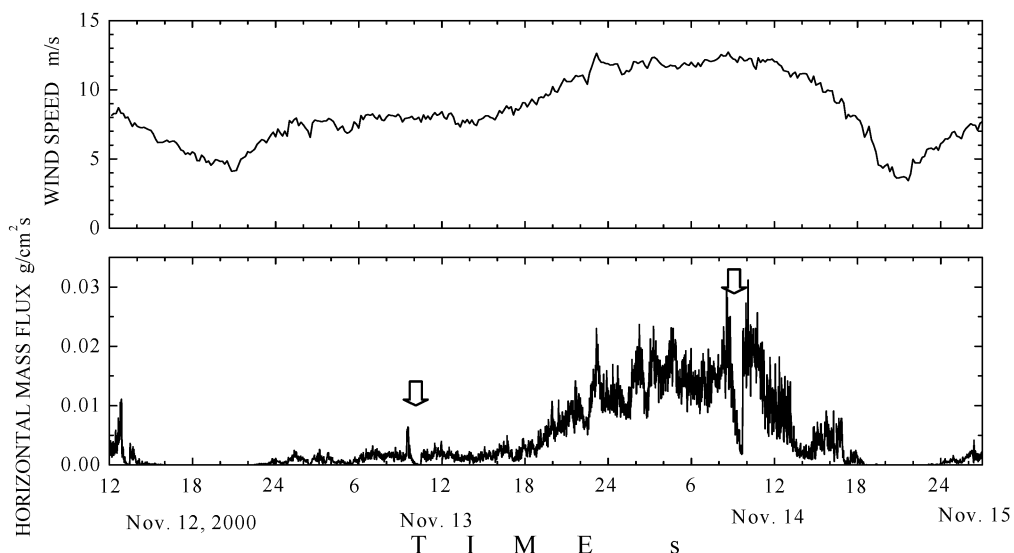


図 2 風速 (高さ 3 m) と吹雪質量フラックス (高さ 0.05 m) の比較. 2000 年 11 月 12 日~15 日. 図中の矢印は手で SPC の高度を変えて, フラックスの計測を行った期間を示す.

Fig. 2. Time series of wind speed at 3 m height and the horizontal mass flux of snow at 0.05 m height from 12 to 15 November 2000. Sudden increase and decrease indicated by arrows are due to changes of SPC height by hand during the flux profile measurements.

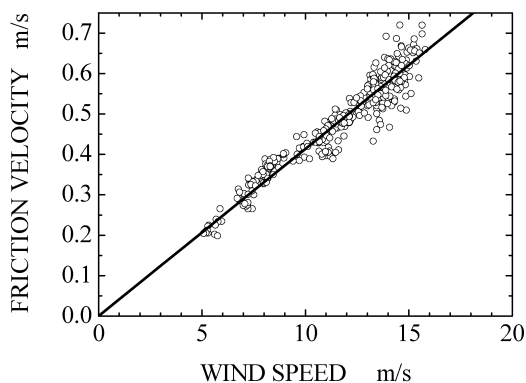


図 3 高さ 1 m の風速と渦相関法により求められた摩擦速度の比較.

Fig. 3. Comparison between the wind speed at 1 m height and friction velocity calculated using the eddy correlation method.

$$U = \frac{u^*}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0}, \quad (2)$$

が適用可能であることを示している. ここで U は高さ z の平均風速で, κ はカルマン定数である. 表面粗度 z_0 は, $6.3 \times 10^{-5} \text{ m}$ と求められるが, これは平坦な雪面上の値とほぼ一致する

(Nemoto and Nishimura, 2001). よって、以後の議論においては、高さ 1 m での超音波風向風速計の測定値に渦相関法を適用して求めた摩擦速度の値を用いる。手で SPC の測定高度を変化させた期間を除き、図 3 の質量フラックスと摩擦速度の関係を示したのが図 4 である。この吹雪イベントにおける臨界摩擦速度は約 0.2 m/s であったことがわかる。

SPC により測定された吹雪質量フラックスの高度分布を、摩擦速度 0.56 ms^{-1} から 0.21 ms^{-1} までの 5 ケースについて図 5 に示す。臨界摩擦速度に近い $u_* = 0.21 \text{ ms}^{-1}$ の場合には、

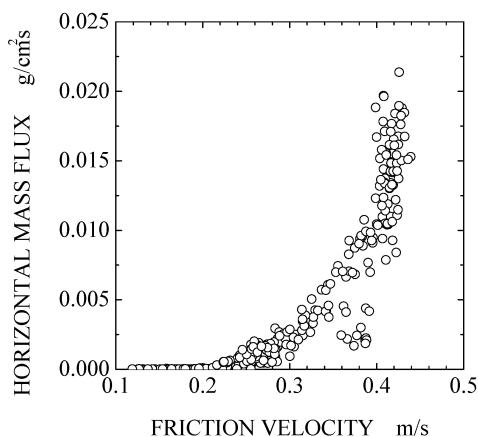


図 4 吹雪質量フラックス (高さ 0.05 m) と摩擦速度の関係. 2000 年 11 月 12 日~15 日.
Fig. 4. Horizontal mass flux at 0.05 m height plotted against the friction velocity from 12 to 15 November 2000.

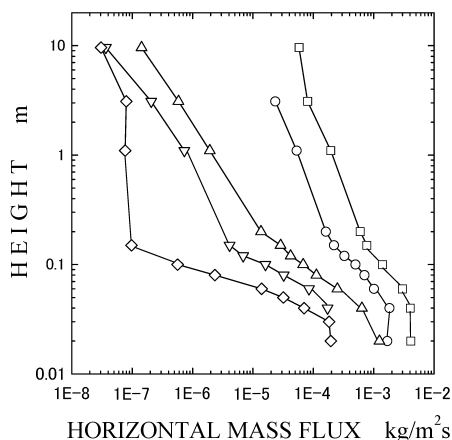


図 5 吹雪質量フラックスの高度分布と摩擦速度の関係. \square : $u_* = 0.56 \text{ ms}^{-1}$,
 \circ : 0.38 ms^{-1} , \triangle : 0.33 ms^{-1} , ∇ : 0.28 ms^{-1} , \diamond : 0.21 ms^{-1} .
Fig. 5. Specific horizontal particle flux of snow as a function of height parameterized for different friction velocities. \square : $u_* = 0.56 \text{ ms}^{-1}$,
 \circ : 0.38 ms^{-1} , \triangle : 0.33 ms^{-1} , ∇ : 0.28 ms^{-1} , \diamond : 0.21 ms^{-1} .

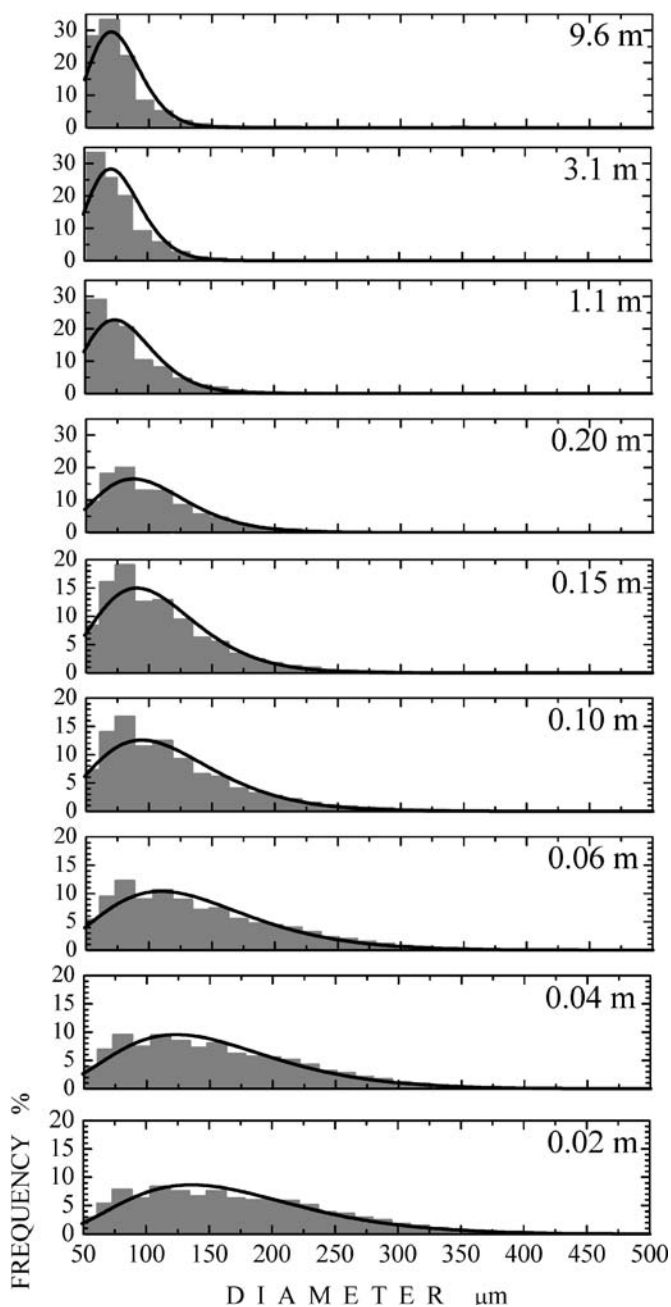


図 6 SPC で測定された吹雪粒子の粒径分布. 摩擦速度 u_* は 0.33 ms^{-1} で, 図中の実線はガンマ関数による近似曲線.

Fig. 6. Particle diameter distributions measured with the SPC at $u_* = 0.33 \text{ ms}^{-1}$. The solid lines indicate approximations obtained by the two-parameter gamma probability density function.

高さ 0.2 m 以上では飛雪粒子はほとんど観測されなかった。いずれの摩擦速度の場合も、これまで数多くの研究者 (Rasmussen *et al.*, 1985; Takeuchi, 1980; White and Moula, 1991) により報告されているように、フラックスは高さと共にべき関数的に減少している。とりわけ雪面近傍の吹雪跳躍層 (saltation layer) では、その傾向が顕著である。フラックスが減少する傾きは摩擦速度の増加と共に減少する。また特に注意すべき点として、いずれもフラックスの傾きが 0.1 m から 0.3 m の高さで著しく変化すること、また傾きの変化が摩擦速度の増大と共に減少することがあげられる。

図 6 は SPC によって測定された吹雪粒子の粒径分布の 1 例である。0.06 m 以下の高度では粒径は 50 μm から 450 μm の範囲に広く分布しているが、高さの増加に伴い小さい粒子 (特に 100 μm 以下の粒子) の占める割合が次第に大きくなる。吹雪粒子の粒径分布は以下に示すガンマ分布によって表されることが知られている (Budd, 1966; Schmidt, 1981)。

$$f(d) = \frac{d^{\alpha-1}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \exp\left(-\frac{d}{\beta}\right), \quad (3)$$

ここで、 d は粒径、 α は分布のひずみ表現する形状係数 (shape parameter)、 β は分布の幅を決定する尺度係数 (scale parameter) である。ガンマ分布の平均値と分散はそれぞれ $\alpha\beta$ と $\alpha\beta^2$ で表されるため、両係数は容易に求められる。こうして求めたガンマ分布は図 6 に示すように測定結果を良く近似する。形状係数 α と平均粒径 $\bar{d} = \alpha\beta$ を摩擦速度の関数として図 7

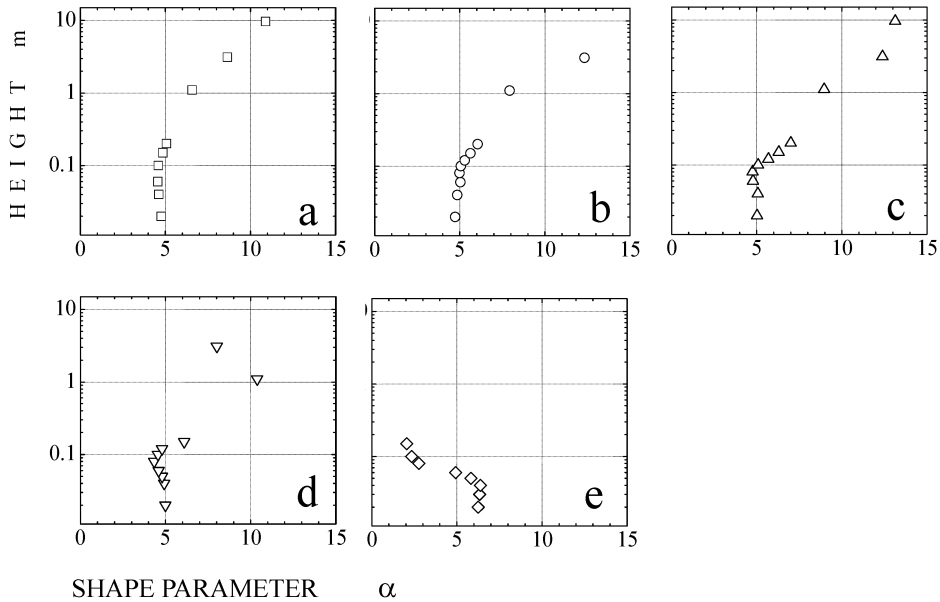


図 7 形状係数 α の高度分布. a: $u_* = 0.56 \text{ ms}^{-1}$, b: 0.38 ms^{-1} , c: 0.33 ms^{-1} , d: 0.28 ms^{-1} , e: 0.21 ms^{-1} .

Fig. 7. Profiles of the shape parameter α plotted as a function of the friction velocity.

a: $u_* = 0.56 \text{ ms}^{-1}$, b: 0.38 ms^{-1} , c: 0.33 ms^{-1} , d: 0.28 ms^{-1} , e: 0.21 ms^{-1} .

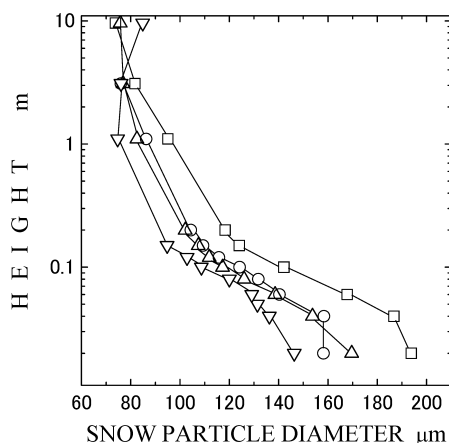


図 8 吹雪粒子の平均粒径 $\bar{d} = \alpha\beta$ の高度分布. \square : $u_* = 0.56 \text{ ms}^{-1}$,
 \circ : 0.38 ms^{-1} , \triangle : 0.33 ms^{-1} , ∇ : 0.28 ms^{-1}

Fig. 8. Profiles of the mean particle diameter $\bar{d} = \alpha\beta$ plotted as a function of the friction velocity. \square : $u_* = 0.56 \text{ ms}^{-1}$, \circ : 0.38 ms^{-1} , \triangle : 0.33 ms^{-1} , ∇ : 0.28 ms^{-1} .

と 8 に示した. α は先に述べたように分布がどの程度ひずんでいるかを示す指標で, 大きいほど左右対称な分布を表す. 図 7 からはすべての摩擦速度の場合とも地表面近くに α が一定となる領域があり, その厚さは摩擦速度の増加と共に大きくなるのがわかる. 地表面近傍の $\alpha = 4$ から 5 という値は, Schmidt (1981) の結果と良く一致するが, Dover (1993) によって求められた 1 から 2 という値に比べて大きい. この領域より上方では α は高さと共に増加する. $u_* = 0.21 \text{ ms}^{-1}$ の場合は, α は 0.05 m 以上の高さで減少するが, これはフラックスが小さく (図 6), 統計を行う際の粒子数が十分ではなかったのが原因と考えられる. 図 8 に示した平均粒径 \bar{d} は, 摩擦速度に大きく依存する. 観測結果は風速が増加するに従って大きな粒子が雪面から取り込まれるようになり, 空中でも運動を続ける様子がわかる. しかし 1 m 以上の高さになると, 飛雪粒子の径はほぼ $80 \mu\text{m}$ と一定になる.

図 9 は吹雪に加えて降雪があった場合の粒径分布を示す. 吹雪の質量フラックスが非常に小さい 9.6 m の高さの結果を見ると, $260 \mu\text{m}$ にピークをもつ広い分布が認められ, 3.1 m ではふた山型の分布となる. これは吹雪粒子に比べ降雪粒子の粒径が大きいため, 高度が低下に伴い吹雪フラックスが増加するとしだいに目立たなくなり, 0.1 m と 0.02 m の高さでは, 降雪粒子の寄与は吹雪粒子の分布の陰に完全に埋没してしまう. この結果を利用すると, SPC をある適当な高さ, できれば数 m 以上の高さにセットすれば, 降水量 (降雪量) の定量的評価が可能となることが示唆された.

このようなみずほ基地での吹雪質量フラックスの高度分布 (図 5) や飛雪の粒径分布 (図 6) は, 風速の乱流項と粒子運動の慣性効果を考慮することで粒子跳躍層から浮遊層への遷移過程までを記述可能とした吹雪のランダムフライトモデル (Nemoto and Nishimura, 2004) と

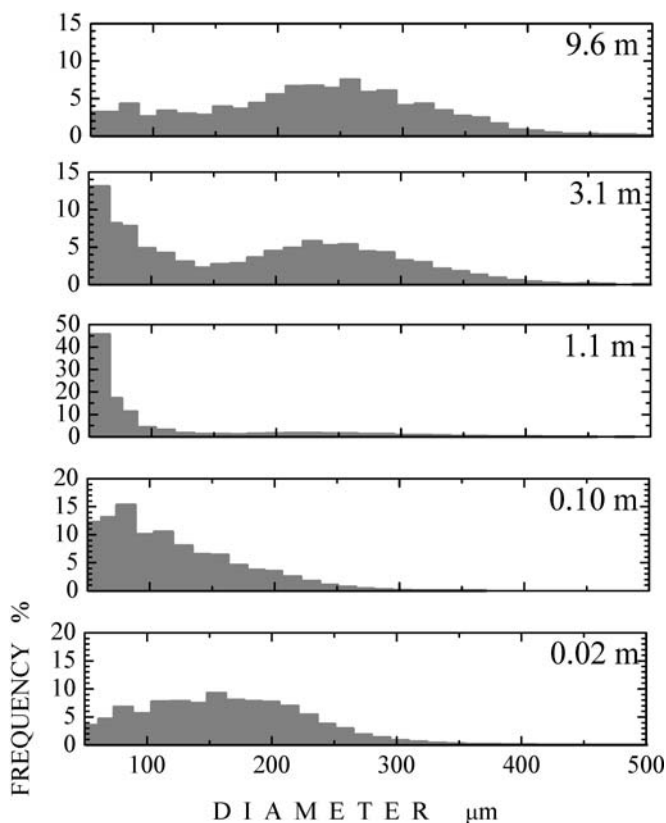


図9 降雪時に SPC で測定された吹雪粒子の粒径分布 (高さ 0.02 から 9 m).
 Fig. 9. Snow particle size distributions in blowing snow 0.02 to 9.6 m above ground when snow precipitation was also observed.

の比較検討が重ねられた (Nishimura and Nemoto, 2005).

3. ドームふじ基地での吹雪・降雪量の観測

みずほ基地での SPC による吹雪観測の結果, 本システムが降雪量 (降水量) の観測にも有用であることが示された (図9). そこで 2002 年 2 月 10 日から 2003 年 1 月 20 日にかけて, ドームふじ基地の東 50 m, 高さ 1.5 m に SPC を 1 台設置し, 吹雪量に加えて降雪量の定量的把握を目的とした観測が実施された. 機器の設置状況を図 10 に, また観測期間中に得られた SPC の出力を図 11 に示す. 1.5 m という比較的高い測定位置にもかかわらず, 観測期間全体を通して大きい値が連続して記録されている. そこで記録を再吟味した結果, ① 粒子数が 100-200 個/cm³ と異常に多い, ② 記録された粒径が 50 μm 付近に極端に集中している, また ③ 気温と強い負の相関 (気温の低下とともに出力が増加) がある (図 12) ことが明らかとなり, 飛雪もしくは降雪粒子ではなくノイズが記録されたものと判断された. 今回設置した



図 10 ドームふじ基地に設置されたスノーパーティクルカウンター (SPC).
 Fig. 10. Snow particle counter (SPC) set at Dome Fuji Station.

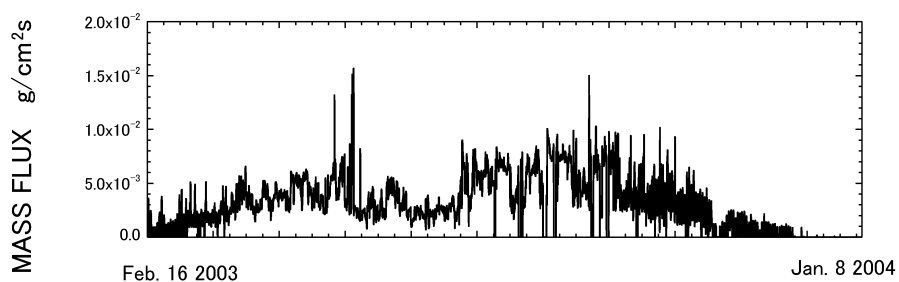


図 11 ドームふじ基地に設置された SPC の記録. 2003 年 2 月 16 日~2004 年 1 月 8 日.
 Fig. 11. Recording of the SPC at Dome Fuji Station from 16 February 2003 to 8 January 2004.

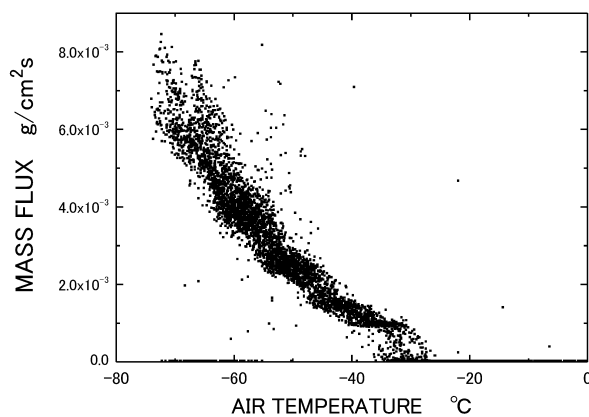


図 12 ドームふじ基地に設置された SPC の記録と気温の関係.
 Fig. 12. SPC recording and the air temperature Dome Fuji Station.

SPC は元来、先に紹介したみずほ基地での測定、つまり約 -40°C 以上の温度環境を想定して製作されたものであり、ドームふじ基地での -60°C 以下という更に厳しい状況の下で動作不良が生じたと推察される。

ちなみにドームふじ基地では、ほぼ毎日、観測隊員により降雪量の重量測定が実施されており、11月2日 1045 LT から 11月3日 0950 LT は 0.85 kg/m^2 、また 12月27日 0835 LT から 12月28日 0805 LT は 0.61 kg/m^2 との記録がある。一方、この間の SPC の出力は前者が 1.2 kg/m^2 、後者は 0.53 kg/m^2 と直接測定結果とほぼ同程度の出力が得られており、まだ気温の低下が小さかった当該時期には比較的妥当な値が得られた様子がわかる。

なお、今回の測定に用いられた SPC は、ダイヤモンドダストの検知も可能であることが低温温室での実験により確認されている。今後より過酷な条件下での作動特性の改良が進めば、吹雪だけでなく広範な降雪現象とその定量的見積りにも有効なセンサーになると期待される。

謝 辞

本稿で紹介したみずほ基地とドームふじ基地での吹雪・降雪観測にあたっては、第41次及び第43次南極地域観測隊員による多大なご協力をいただきました。この場をお借りして深く感謝申し上げます。

文 献

- Budd, W.F. (1966): The drifting of non-uniform snow particles. ed. by M. J. Rubin. Washington, D. C., Amer. Geophys. Union, 59-70 (Antarct. Res. Ser., 9).
- Dover, S.E. (1993): Numerical modeling of blowing snow. Doctor thesis, Department of Applied Mathematical Studies, University of Leeds, England, 237 p.
- King, J.C. and Turner, J. (1997): Antarctic Meteorology and Climatology. New York, Cambridge Univ. Press, 409 p.
- Kobayashi, S. (1978): Snow transport by katabatic winds in Mizuho Camp area, East Antarctica. J. Meteorol. Soc. Jpn., **56**, 130-139.
- Mann, G.W., Anderson, P.S. and Mobbs, S.D. (2000): Profile measurements of blowing snow at Halley, Antarctica. J. Geophys. Res., **105** (D19), 24491-24508.
- Nemoto, M. and Nishimura, K. (2001): Direct measurement of shear stress during snow saltation. Boundary Layer Meteorol., **100**, 149-170.
- Nemoto, M. and Nishimura, K. (2004): Numerical simulation of snow saltation and suspension in a turbulent boundary layer. J. Geophys. Res., **109**, D18206, doi: 10.1029/2004JD004657.
- Nishimura, K. and Nemoto, M. (2005): Blowing snow at Mizuho station, Antarctica. Philos. T. Roy. Soc. A, **363**, 1647-1662.
- Rasmussen, K.R., Sørensen, M. and Willetts, B.B. (1985): Measurement of saltation and wind strength on beaches. Proc. International Workshop on the Physics of Blown Sand, ed. by O.E. Barndorff-Nielsen, Denmark, University of Aarhus, 301-325 (Vol. 2).
- Schmidt, R.A. (1977): A system that measures blowing snow. USDA Forest Service Research Paper, **RM-194**, 80 p.
- Schmidt, R.A. (1981): Estimates of Threshold Windspeed from Particle Sizes in Blowing Snow. Cold Reg. Sci. Technol., **4**, 187-193.

- Takahashi, S. (1985): Characteristics of drifting snow at Mizuho station, Antarctica. *Ann. Glaciol.*, **6**, 71-75.
- Takeuchi, M. (1980): Vertical profile and horizontal increase of drift-snow transport. *J. Glaciol.*, **26**, 481-492.
- White, B.R. and Mounla, H. (1991): An experimental study of Froude number effect on wind-tunnel saltation. *Aeolian Grain Transport 1: Mechanics*, ed. by O.E. Barndorff-Nielson and B.B. Willetts. Wien, Springer-Verlag, 145-157 (*Acta Mech.*, Suppl. 1).