

グリーンランド南東ドームアイスコアに含まれる 不溶性微粒子の定量的測定

Quantitative measurement of insoluble particles in an ice core from the southeastern Greenland Ice Sheet

桐生 紗稀人^{1,2}, 的場 澄人², 飯塚 芳徳²
Sakito Kiryu^{1,2}, Sumito Matoba², Yoshinori Iizuka²

Corresponding author: kiryu.sakito.i9@elms.hokudai.ac.jp (S. Kiryu)

¹ 北海道大学大学院 環境科学院, ² 北海道大学低温科学研究所

¹ Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University, ² Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University

In this study, dust particle concentrations were measured with seasonal resolution in the southeast dome of the Greenland ice sheet (SE-Dome II) ice core, which has a high accumulation rate (1.04 ± 0.20 m w.e. yr⁻¹) area in Greenland, covering the past 60 years. The obtained dust concentrations were used to statistically cluster the particle sizes and investigate their trends. The relationship with ionic composition and NAO index was also investigated by correlation analysis.

1. はじめに

1. 1 氷床アイスコアから復元する古環境

地球の極域まで輸送されたエアロゾルは氷床表面に乾性または湿性沈着する。またグリーンランド氷床では雪が断続的に降り積もっており、沈着したエアロゾルは氷床の内部へと保存される。したがって、氷床を垂直に掘削して得られる円柱状の氷試料アイスコアは、過去から現在にかけての古環境を復元する古環境記録媒体となる。

アイスコアに含まれる微粒子（以下ダスト粒子）は気候システムに影響を与える成分の 1 つとされており¹⁾、ダスト粒子の経年変動を定量的に知ること、過去の気候システムの変動メカニズムを理解するうえで重要である。ダストの濃度変動と、その起源や輸送過程の変化は、半球的大気循環の変化や、環境変動に対するダストの応答を復元する手がかりとなる。

1. 2 研究対象

本研究はグリーンランド氷床において高涵養の地域に当たる (1.04 ± 0.20 m w.e. yr⁻¹) グリーンランド南東ドーム (SE-Dome II: 67° 19' 17" N, 36° 47' 03" W, 3161 m a.s.l.) において 2021 年に掘削された全長 250m のアイスコア (SE-Dome II アイスコア) を用いた²⁾。高涵養域で採取されたこのアイスコアは季節単位の高時間分解能で環境変動の復元が可能で、かつエアロゾルなどの物質の保存性が優れている利点を持つ。SE-Dome II アイスコアの年代は過酸化

水素 (H₂O₂) 濃度の季節変動を用いた年層カウントによって、過去 221 年間に相当することが推定された³⁾。

2015 年には同地域で SE-Dome I (67° 18' N, 36° 36' W, 3165 m a.s.l.) アイスコアが採取され³⁾、過去 60 年間の古環境記録が復元され、ダストの解析から、近年、掘削地点近傍のローカルな起源のダスト粒子の増加が示されている⁵⁾。

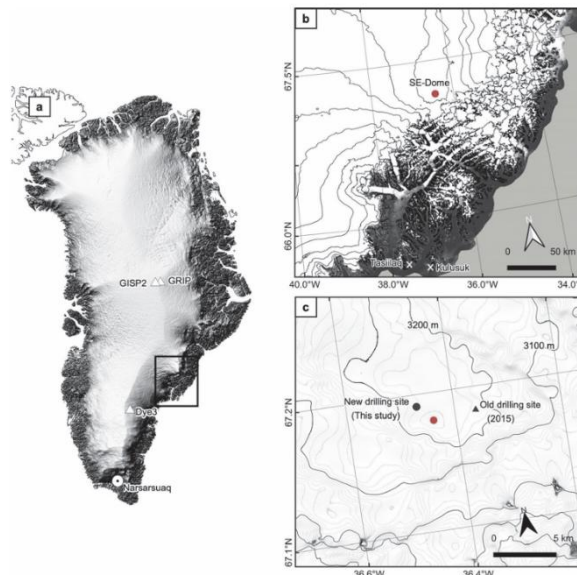


図1 (a) グリーンランド氷床全体図, (b) グリーンランド南東部を拡大した図, (c) SE-Dome サイトを拡大した図²⁾。

1. 3 研究目的

本研究では高時間分解能な記録を持つ SE-Dome II アイスコア中に含まれるダスト粒子の濃度と粒径分布を季節分解能で測定し、グリーンランド氷床南東部に沈着するダスト粒子の定量的な経年変動を捉えること、イオン成分や大気循環のインデックスなどと比較照合し、それらとダスト粒子との関係性を解明することを主な研究目的とした。

2. 分析手法

ダスト粒子の測定には精密粒度分布測定装置コールターカウンターMultisizer™3 (Beckman Coulter 社製)を使用した。30 μm 孔径のアパチャーを用い、測定粒径は 0.60 μm から 18 μm であった。試料は季節毎に分注したコア融解水 3 mL を電解液 12 mL で希釈して調整を行い、100 μL 中に含まれるダスト粒子の粒径と個数の測定を 5 回実施した。その 5 回の平均を当該季節のダスト濃度とした。誤差を表す 5 回の分析の変動係数は個数濃度が 0.95% から 64% (平均 6.4%)、体積濃度が 4.1% から 111% (平均 37%) であった。なお季節は 12 月から 2 月を冬季、3 月から 5 月を春季、6 月から 8 月を夏季、9 月から 11 月を秋季とした。本研究では 1960 年から 2021 年までの 245 サンプルを分析した。

3. 測定結果

過去 60 年間におけるダスト粒子の個数濃度 ($\# \text{mL}^{-1}$) および体積濃度 ($\mu\text{m}^3 \text{mL}^{-1}$) の経年変化を図 1, 2 に示す。個数濃度の 10 年移動平均は 2000 年頃から増加した (図 1)。一方の体積濃度の移動平均は顕著な変化はなく、単発的な濃度ピークが複数みられた (図 2)。

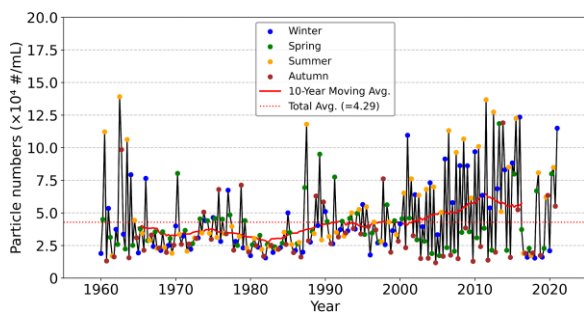


図 1 1960 年から 2021 年までの個数濃度 ($\# \text{mL}^{-1}$) の経年変化

(青：冬季，緑：春季，黄：夏季，茶：秋季，
赤実線：10 年移動平均，赤点線：平均値)

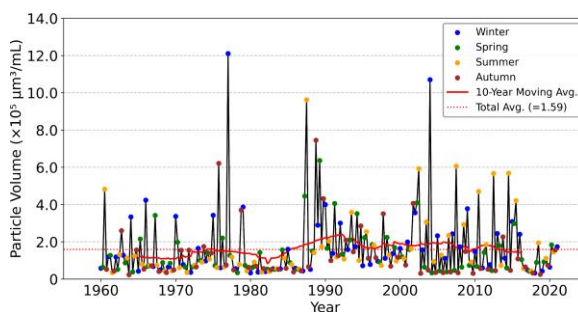


図 2 1960 年から 2021 年までの体積濃度 ($\mu\text{m}^3 \text{mL}^{-1}$) の経年変化

4. 解析と考察

4. 1 粒径の分類と経年変化

過去 60 年間の粒径分布のデータを混合ガウスモデル (GMM; Gaussian Mixture Model) を用い粒径分布の多峰性検定を行った。このモデルは元となるデータが複数のガウス分布の混合によって生成されたと仮定し、データ全体の確率分布を表現する統計モデルである。この統計モデルはクラスタリングの手法として有用であることから本研究で用いた。なお本研究では、粒径分布を三峰性と仮定をして解析した。その結果、粒径を Mode 1 [0.60, 2.64], Mode 2 [2.64, 9.2], Mode 3 [9.2, 18] の範囲で分類された。

5 μm 以上の粒子は近距離輸送による供給の寄与が強くなるとされている^{5,7,8)}。SE-Dome I コア⁵⁾では 1995 年頃から近距離輸送の自然起源のダストが増加したことが指摘された。本結果でも 1990 年頃から Mode 2 のダスト濃度が高くなっており、この指摘と整合的である。

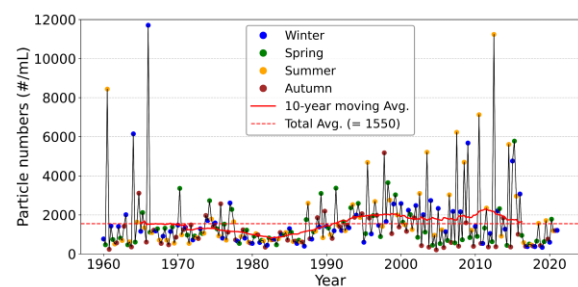


図 3 Mode2 [2.94, 9.2] の個数濃度 ($\# \text{mL}^{-1}$) の経年変化

4. 2 イオン濃度との相関解析

ダストの個数濃度、体積濃度と主要イオン (Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , NH_4^+ , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-}) の濃度との相関を表 1 に示す。個数濃度は Ca^{2+} 濃度との間に、低いが有意な相関関係があった (表 1)。先行研究⁵⁾においてはダストの個数濃度は主に陸域起源の成分とされる Ca^{2+} との間に強い正の相関 ($R=0.66$) があると主張した。本結果においても、陸域起源のダスト粒子の沈着が反映されていると考えられる。

表 1 イオン濃度 (ppb) との相関係数 R と p 値
(括弧内; $p<0.1$ で R を斜体, $p<0.01$ で太字)

n=245	Particle numbers (# mL^{-1})	Particle volume ($\mu\text{m}^3 \text{mL}^{-1}$)
Na^+	0.03 (0.59)	0.03 (0.65)
Mg^{2+}	-0.03 (0.66)	0.01 (0.88)
Ca^{2+}	0.24 (<0.001)	0.08 (0.23)
NH_4^+	0.06 (0.35)	-0.02 (0.73)
Cl^-	0.03 (0.67)	0.02 (0.71)
NO_3^-	0.13 (0.037)	0.11 (0.074)
SO_4^{2-}	-0.12 (0.054)	-0.04 (0.53)

4. 3 北大西洋振動との関係性

中緯度から高緯度にかけての大気循環の変動は、グリーンランドに沈着する物質やその沈着量も変化させるとされている⁹⁻¹¹⁾。そこでアイスランド低気圧とアゾレス高気圧の気圧差を示す指標である、北大西洋振動 (NAO; North Atlantic Oscillation) に着目した。この NAO インデックスが正であるとアイスランド低気圧およびアゾレス高気圧ともに強く気圧差が大きくなることから偏西風が直線的になる。一方 NAO インデックスが負であると低気圧、高気圧ともに弱く気圧差が小さくなることから偏西風の南北方向の蛇行が強くなり、大気の循環が変化する¹²⁾。

ダスト濃度と NAO インデックスとの相関関係をまとめたものを表 2 に示す。NAO インデックスはアメリカ海洋大気庁 (NOAA; National Oceanic and Atmospheric Administration) で提供されているデータベースを用いた¹³⁾。全期間 (All) では相関はみられなかったが、季節別では NAO との関係が異なることが判明した。特に夏季の個数濃度とは有意な負の相関関係 ($n=61$, $R=-0.52$, $p<0.001$) がみられた。これは夏季に偏西風の南北方向の蛇行が強まることで、中緯度域由来の微小粒子の長距離輸送が活発

になったと考えられる。

表 2 ダスト濃度と NAO インデックスとの相関係数 R と p 値 (括弧内; $p<0.1$ で R を斜体, $p<0.01$ で太字)

vs NAO index	Particle numbers (# mL^{-1})	Particle volume ($\mu\text{m}^3 \text{mL}^{-1}$)
All (n=245)	-0.14 (0.028)	-0.10 (0.12)
Winter (n=62)	-0.04 (0.77)	-0.17 (0.19)
Spring (n=61)	0.18 (0.16)	0.33 (0.01)
Summer (n=61)	-0.52 (<0.001)	-0.37 (0.0031)
Autumn (n=61)	0.10 (0.46)	0.07 (0.12)

5. 総括

本研究ではグリーンランド氷床の高涵養地域で採取されたグリーンランド氷床南東ドーム (SE-Dome II) アイスコアを用い、季節分解能で過去 60 年間 ($n=245$) のダスト粒子の濃度測定を行った。混合ガウスモデルによる多峰性検定の結果、Mode1 [0.60, 2.64], Mode2 [2.64, 9.2], Mode3 [9.2, 18] の 3 つのモードに分類された。特に中間粒子にあたる Mode2 は 1990 年頃から増加傾向を示した。これは 1995 年以降近距離輸送のダストが増加したという先行研究の主張と整合的であった。個数濃度は、主に陸域起源とされる Ca^{2+} とのみ低い有意な相関関係 ($R=0.24$, $p<0.001$) がみられた。さらに北大西洋振動 (NAO) との関係性を調べたところ、インデックスが負のときにダスト濃度が高くなることが判明し、特に夏季に顕著であり ($n=61$, $R=-0.52$, $p<0.001$)、中緯度域からの長距離輸送に伴うダスト粒子の沈着が寄与していることが考えられる。

【参考文献】

- 1) Kok, J. F., Ward, D. S., Mahowald, N. M. and Evan, A. T. (2018): Global and regional importance of the direct dust-climate feedback. *Nature Communications*, **9**, 241.
- 2) Iizuka, Y., Matoba, S., Minowa, M., Yamasaki, T., Kawakami, K., Kakugo, A., Miyahara, M., Hashimoto, A., Niwano, M., Tanikawa, T., Fujita, K. and Aoki, T. (2021): Ice core drilling and related

- observations at SE-Dome site, southeastern Greenland Ice Sheet. *Bulletin of Glaciological Research*, **39**, 1-12.
- 3) Iizuka, Y., Matoba, S., Yamasaki, T., Oyabu, I., Kadota, M. and Aoki, T. (2016): Glaciological and meteorological observations at the SE-Dome site, southeastern Greenland Ice Sheet. *Bulletin of Glaciological Research*, **34**, 1-10.
- 4) Iizuka, Y., Uemura, R., Fujita, K., Hattori, S., Seki, O., Miyamoto, C., Suzuki, T., Yoshida, N., Motoyama, H. and Matoba, S. (2018): A 60 year record of atmospheric aerosol depositions preserved in a high-accumulation dome ice core, Southeast Greenland. *Journal of Geophysical Research: Atmosphere*, **123**(1), 574-589.
- 5) Amino, T., Iizuka, Y., Matoba, S., Shimada, R., Oshima, N., Suzuki, T., Ando, T., Aoki, T. and Fujita, K. (2020): Increasing dust emission from ice free terrain in southeastern Greenland since 2000. *Polar Science*, **27**, 100599.
- 6) Kawakami, K., Iizuka, Y., Sasage, M., Matsumoto, M., Saito, T., Hori, A., Ishino, S., Fujita, S., Fujita, K., Takasugi, K., Hatakeyama, T., Hamamoto, S., Watari, A., Esashi, N., Otsuka, M., Uemura, R., Horiuchi, K., Minowa, M., Hattori, S., Aoki, T., Hirabayashi, M., Kawamura, K. and Matoba, S. (2023): SE-Dome II ice core dating with half-year precision: Increasing melting events from 1799 to 2020 in southeastern Greenland. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **128**(20), e2023JD038874.
- 7) Kjær, H. A., Zens, P., Black, S., Lund, K. H., Svensson, A., and Vallelonga, P. (2022): Canadian forest fires, Icelandic volcanoes and increased local dust observed in six shallow Greenland firn cores. *Climate of the Past*, **18**(10), 2211-2230.
- 8) Simonsen, M. F., Baccolo, G., Blunier, T., Borunda, A., Delmonte, B., Frei, R., Goldstein, S., Grinsted, A., Kjær, H. A., Sowers, T., Svensson, A., Vinther, B., Vladimirova, D., Winckler, G., Winstrup, M. and Vallelonga, P. (2019): East Greenland ice core dust record reveals timing of Greenland ice sheet advance and retreat. *Nature Communications*, **10**(1), 4494.
- 9) Mayewski, P. A., Meeker, L. D., Twickler, M. S., Whitlow, S., Yang, Q., Lyons, W. B. and Prentice, M. (1997): Major features and forcing of high - latitude northern hemisphere atmospheric circulation using a 110,000 - year - long glaciochemical series. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **102**(C12), 26345-26366.
- 10) McConnell, J. R., Edwards, R., Kok, G. L., Flanner, M. G., Zender, C. S., Saltzman, E. S., Banta, J. R., Pasteris, D. R., Carter, M. M. and Kahl, J. D. (2007): 20th-century industrial black carbon emissions altered arctic climate forcing. *Science*, **317**(5843), 1381-1384.
- 11) Preece, J. R., Mote, T. L., Cohen, J., Wachowicz, L. J., Knox, J. A., Tedesco, M. and Kooperman, G. J. (2023): Summer atmospheric circulation over Greenland in response to Arctic amplification and diminished spring snow cover. *Nature Communications*, **14**(1), 3759.
- 12) Báez, J. C., Gimeno, L. and Real, R. (2021): North Atlantic Oscillation and fisheries management during global climate change. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, **31**(2), 319-336.
- 13) National Centers for Environmental Information (2025): North Atlantic Oscillation (NAO). <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/nao/> (2025 年 6 月 25 日閲覧) .