

雪氷圏におけるエアロゾルの輸送・沈着過程、 及び雪氷コアを用いた高分解能放射強制力の変動復元

Aerosol deposition process in winter season in cryosphere, and reconstruction of high resolution aerosol radiative forcing by using ice core

地球圏科学専攻 博士後期課程 1 年 安成哲平 (指導教官 : 本堂武夫)

1. はじめに

大気中にはエアロゾルと呼ばれる液体・固体の微粒子があり、それらは太陽光を散乱吸収するため、地球の放射収支に影響を与える。しかし、その効果については依然として不確定な部分が多い [Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2001]。また、エアロゾルは様々な物質からなるため、地球規模の物質循環に大きな影響を与える。本研究においては、エアロゾルの中でも特に固体エアロゾル（ダスト）に注目した研究を行ってきた。過去から現在までの大気中のダスト量変動を復元し、これまでダストが大気中の放射収支へ与えてきた影響を評価することで将来の気候変動予測が可能となると期待される。過去から現在までの、大気中のダスト量は雪氷コアを用いることで復元可能である。

我々が最も注目している対象領域は、ユーラシアの東アジア・シベリア等を中心とした物質が太平洋を越えて地球規模でどれくらいの影響を与えてきたかということである。東アジアにはゴビ・タクラマカン砂漠という大きなダストソースがあり、シベリアでは近年森林火災による、すすの放出が問題となっている。これらが地球規模でどのくらい影響を与えるのか評価するため、これらの影響が強く受けていると考えられる氷河において雪氷コアを掘削した。研究の核となるのはアラスカのランゲル山 (62°N, 144°W ; 4100 m ; 活火山) で掘削された 2 本の雪氷コア (約 50 m [Shiraiwa et al., 2004] と約 216 m) である。博士後期課程の研究は主に 3 つの過程から成り立っている。(1) ダストがどのように北太平洋を越えて輸送されるのか？また、そのダストの起源は？そして、物質循環に与える影響は？(2) 雪氷圏での雪によるエアロゾルの沈着過程の理解(3) 過去から現在まで大気中のダストがどのくらい地球の放射収支に影響を与えてきたか？今年度は主に(1), (2)について研究を行ってきた。特に(1)について得られた知見を Yasunari et al. [2006] として論文を投稿したので、今年度の成果の中心として本報告書に記載する。

2. 研究背景 (投稿論文)

近年（特に 2000 年以降）、春季の黄砂の発生日数が増加しており [Japan Meteorological Agency (JMA), 2004; Chun and Lim, 2004]、黄砂の増加が地球の放射収支へ与える影響が懸念されている。黄砂は、東アジアのタクラマカン砂漠、ゴビ砂漠、その周囲の乾燥域が主なダストソースである。我々が雪氷コアを掘削したアラスカへも 1979 年に初めて黄砂が観測されてから [Rahn et al., 1977]、頻繁に黄砂が観測されている [e.g., Cahill, 2003; Darmenova et al., 2005]。

一方、成層圏-対流圏物質交換[Stratosphere-Troposphere Exchange (STE)]は、その名の通り、成層圏と対流圏の物質交換であるが、STE は対流圏界面を通じて起こる。STE はブロッキング現象、カットオフ低気圧等の低気圧活動に伴って起こることが知られている [Holton et al., 1995; Monks, 2000; Stohl et al., 2003; Gat et al., 2001]。成層圏で作られる、トリチウムやオゾンは STE を通じて対流圏に流れ込み、その流入量は主に春季に最大となる [Monks, 2000; Gat et al., 2001]。トリチウムは危険な放射性核種であり、オゾンは温暖化ガスであるため、これらの対流圏への移流は人類の健康や地球温暖化に影響を与えると考えられるため、対流圏への春季の STE 量を知ることは重要である。トリチウムは宇宙線によって形成されるため地球磁場の関係から北半球の高緯度ほど濃度が高くなる。つまり、本研究で用いた北半球高緯度の雪氷コアは非常にトリチウムの測定に優れていると考えられる。

今回、アラスカ・ランゲル山の 50m の雪氷コア中を用いて過去から現在までの成層圏起源トリチウムと黄砂の変動を知るため解析を行った。

3. 解析方法

アラスカ・ランゲル山の 50m 雪氷コア中の安定水素同位体比 (δD) [10cm 間隔, 合計 495 サンプル], トリチウム濃度[40cm 間隔, 合計 124 サンプル], ダスト粒子数濃度 ($0.52\text{--}16.00 \mu\text{m}$) [5–10cm 間隔, 合計 643 サンプル]をサンプルごとに連続測定した. ダスト粒子数濃度は更に, 大気中の滞在時間の粒径依存性とランゲル山頂での観測を元に, 長距離輸送時に卓越する Find Dust (FD) モード [$0.52\text{--}1.00 \mu\text{m}$], ローカル起源もしくは遠方の大きなダストイベント時に卓越する Coarse Dust (CD) モード [$1.00\text{--}8.00 \mu\text{m}$], ランゲルのクレーターからの空気に最も含まれる Huge Dust (HD) モード [$8.00\text{--}16.00 \mu\text{m}$]の 3 つに分けた.

4. 結果と考察

ランゲル山の 50m 雪氷コアから過去 11 年間 (1992–2002) の詳細なダスト濃度変動, トリチウム濃度変動, δD 変動が得られた (図 1). 年代決定は移動平均の値を用いて CD 粒子数濃度の最大値を春, トリチウムの最大値を春後半, 気温の指標である δD の最大値・最小値をそれぞれ, 夏, 冬として年層カウントを行った (2000 年のみ, 春と春後半が逆転). 図 2 のピーク Y は 1992 年のアラスカ・スパー山の火山噴火による噴煙がランゲル上空を通過した時期とぴったり一致した [McGimsey *et al.*, 2002]. そして, 雪氷コアでは難しい季節を 4 区分するということに成功した. FD と CD の変動の相関係数はスパー山のデータを除いて計算したところ 0.62 (両側 t 検定: 有意水準 99.9%) であった. これは, 毎年春に長距離輸送の指標の FD が増加すると共に, CD も運動して増加していることを示唆する. つまり, CD の季節変動は遠隔地の春のダストイベントと強く関連していると考えられ, 黄砂の影響が示唆される.

決定された 4 つの季節を用いて, 間の期間涵養量を求め, 期間涵養量と期間ダスト・トリチウム濃度からフラックスを計算した (図 2). トリチウムの半減期 12.32 年も計算過程で考慮した [Lucas and Unterweger, 2000]. 近年(特に 2000 年以降), 黄砂の発生が増加しているが [JMA, 2004; Chun and Lim, 2004], 図 2 の (b), (d) の 2000 年以降の増加もこの傾向と非常に良く一致する. この結果と図 1 の FD・CD のダスト濃度の高い正の相関の関係から, アラスカには毎年黄砂が輸送されていることが示唆される. 更に図 2において, 相関があるように見られるが, 統計的にこれらの正の相関の強さを調べるために FD・CD・トリチウムフラックス間の相関係数を計算し, 片側 t 検定を行った. 相関係数の計算にあたっては, 1992 年のスパー山の噴火 [McGimsey *et al.*, 2002], 1998 年の大規模なシベリア・アラスカ森林火災 [Kasischke and Bruhwiler, 2002] の時期のデータを除き, 更に涵養量の劇的な変動の影響を除くため, 平均値から $\pm 1\sigma$ の年のデータのみを使用した.

計算結果から, 春季になると遠方のダストの指標 FD とトリチウムの関連が顕著になった (図 2 の a, b, d). しかし, その中でも最も春後半から夏にかけての相関が最も高かった. これは, 上記で述べたようにアラスカへ毎年春に輸送されている黄砂の増加に STE によるトリチウムの増加が経年的に強く関連していることを示唆する. その関係は春後半に最も強いことが明らかとなった (夏はダストストームも STE も弱いので [JMA, 2004; Chun and Lim, 2004; Holton *et al.*, 1995; Monks, 2000; Stohl *et al.*, 2003; Gat *et al.*, 2001; Sun *et al.*, 2001]). このことから考えられる仮説は, 「春になると東アジアで低気圧活動が活発になり [Sun *et al.*, 2001], その結果, ダストが上空に巻き上げられる. この低気圧活動の活発さが巻き上げる黄砂の量も増加する. つまり, 低気圧活動が活発になると, 地上での風速が強まり黄砂の巻き上げにも寄与する. このような地上での強風時に STE が起こることが観測されており [e.g., Browning and Reynolds, 1994], 本研究結果の相関の強さは, 黄砂の巻上げ量 (つまり, 東アジアの低気圧活動の強さ) は同時に成層圏からトリチウムやオゾン等の物質の対流圏への移流量とも比例するのではないかということである. そして, この関係は最も春後半に強まる.」といいうものである. 実際, 対流圏でのオゾン増加時にダストストームを観測した例もある [Kim *et al.*, 2002].

本研究結果では, STE と黄砂発生が東アジアの低気圧活動によって同時に起こっている仮説を提唱したが, これが直接的なのか, それとも, 他のアリューシャン低気圧の活動等の他の大気循環と間接的に連動した結果なのかは現時点ではわからない. つまり, 今後, 春季 (特に春後半を中心とした) のアジアの低気圧活動を黄砂発生と STE 両方の視点で研究を盛んに行っていくことで, このことがはっきりすると考えられる. そして, この分野の研究が将来の物質循環・気候変動・人間の健康を考えていく上で重要なものになることが大いに期待される.

5. 今年度その他の研究進行状況

本年度, 2 本目の雪氷コア (約 216m) の分析にも着手し, 現在, 1 本目の雪氷コアの続きに対応する 50–80m までの 30m (300 サンプル) のダスト測定を終了した. その他の解析としては, Yamazaki [1986]

による後方流跡線モデルで、1本目の雪氷コアの年代に対応する1992-2002年までラングルへ輸送された空気塊の起源の月ごとの寄与率を計算した。その結果、春季は東アジアからアラスカへの空気塊が増加し、夏季には北太平洋からの空気塊が増加することが明らかとなった。また、シベリアからの空気塊は一年を通して常にある程度ラングルへ輸送されていたが、11月を中心に最も増加する傾向があった。また、降雪時の雪中のダスト濃度を使って、雪氷コアのダストデータから、過去の季節内の積雪涵養量を抽出するという試みも行い、アラスカ沿岸部の気象ステーションの月降水量変動と良く対応することが明らかとなった。現在この内容を投稿準備中である。また、(2)の研究のため行っている、低温研裏で冬季ほぼ毎日採取した積雪サンプル中のダスト粒子数濃度、大気中のエアロゾル粒子数濃度・降雪粒子数データがそろい、現在、雪によるエアロゾル（ダスト）沈着過程について解析中である。

6. 今後の予定

引き続き、2本目の雪氷コアのダスト測定を行い、50年くらいを目標に高時間分解能のデータを取る。北大低温科学研究所で2004-2006年の冬季に観測した、エアロゾル、ダスト、降雪データを元に、降雪粒子のサイズや降雪粒子数密度の観点からの雪によるダストの沈着量を理解し、ラングルのコアのデータを実際の過去の大気中ダスト量に変換する。過去の大気中の実際のダスト濃度を見積もり後、Mie散乱理論・放射伝達理論を用いて過去から現在までの東ユーラシア（東アジア・シベリア）から北太平洋域の大気ダストによる放射強制力の見積もりを行い、ダストによる放射強制力が北半球に与えてきた、影響について議論を行い、将来の気候変動予測の議論へつなげたい。

7. 研究業績

<論文（査読あり）>

Teppei J. Yasunari, Takayuki Shiraiwa, Syosaku Kanamori, Yoshiyuki Fujii, Makoto Igarashi, Koji Yamazaki, Carl S. Benson, and Takeo Hondoh, Possible increases in tropospheric dust, tritium, and ozone in late-spring due to increasing storm activities in East Asia detected by Mount Wrangell Ice core, Alaska, *J. Geophys. Res.*, 2006, submitted.

Teruo Aoki, Hiroki Motoyoshi, Yuji Kodama, Teppei J. Yasunari, Konosuke Sugiura, and Hiroshi Kobayashi, Atmospheric Aerosol Deposition on Snow Surface and Its Effect on Albedo, *SOLA*, 2, 13-16, 2006.

Masahiro Hori, Teruo Aoki, Tomonori Tanikawa, Hiroki Motoyoshi, Akihiro Hachikubo, Konosuke Sugiura, Teppei J. Yasunari, Hans Eide, Rune Storvold, Yukinori Nakajima, Fumihiro Takahashi, In-situ measured spectral directional emissivity of snow and ice in the 8-14 Am atmospheric window, *Remote Sens. Environ.*, 100, 486-502, 2006.

<学会発表>

(国際学会)

Teppei J. Yasunari, Takayuki Shiraiwa, Syosaku Kanamori, Yoshiyuki Fujii, Makoto Igarashi, Koji Yamazaki, Carl S. Benson, and Takeo Hondoh, Alaskan Ice Core Shows Relationship Between Asian Dust Storm and The Stratosphere Troposphere Exchange, AGU Fall Meeting, San Francisco, December 2005.

(国内学会)

安成哲平, 白岩孝行, Carl S. Benson, 山崎孝治, 金森晶作, 藤井理行, 五十嵐誠, 本堂武夫, アラスカ・ラングル山へ輸送される空気塊の起源と雪氷コアデータの比較, 日本気象学会2005年度秋季大会, 神戸, 2005年11月。

安成哲平, 白岩孝行, 金森晶作, 藤井理行, 五十嵐誠, 山崎孝治, Carl S. Benson, 本堂武夫, アラスカ・ラングル山雪氷コアから高時間分解能で復元された過去の降雪量, 2005年度日本雪氷学会全国大会, 旭川, 2005年10月。

安成哲平, 白岩孝行, 金森晶作, Carl S. Benson, 山崎孝治, 藤井理行, 五十嵐誠, 本堂武夫: 雪氷コア中のダスト濃度に基づく降雪量の季節配分の復元: アラスカ・ラングル山の事例, 気象学会2005年度春季大会, 東京, 2005年5月。

8. 参考文献

- Browning, K. A., and R. Reynolds (1994), Diagnostic study of a narrow cold-frontal rainband and severe winds associated with a stratospheric intrusion, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 120, 235-257.
- Cahill, C. F. (2003), Asian aerosol transport to Alaska during ACE-Asia, *J. Geophys. Res.* 108(D23), 8664, doi:10.1029/2002JD003271.
- Chun, Y. and J.-Y. Lim (2004), The recent characteristics of Asian dust and haze events in Seoul, Korea, *Meteorol. Atmos. Phys.*, 87, 143-152.
- Darmenova, K., I. N. Sokolik, and A. Darmenov (2005), Characterization of east Asian dust outbreaks in the spring of 2001 using ground-based and satellite data, *J. Geophys. Res.*, 110, D02204, doi:10.1029/2004JD004842.
- Gat, J. R., W. G. Mook, and H. A. J. Meijer (2001), Tritium in the Atmosphere. In *Atmospheric Water. Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle Principles and Applications*, vol. II(5), edited by W. G. Mook, pp. 63-74, UNESCO/IAEA Series, Paris.
- Holton, J. R. et al. (1995), Stratospheric troposphere exchange, *Rev. Geophys.*, 33, 403-439.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), *Climate Change 2001: The Scientific Basis*, edited by J. T. Houghton et al., 896 pp., Cambridge Univ. Press, New York, 2001.
- Japan Meteorological Agency (JMA) (2004), Basic knowledge about Asian dust (Kosa), Available at: <http://www.data.kishou.go.jp/obs-env/hp/4-4kosa.html> (In Japanese).
- Kanamori, S. (2004) Seasonal variations in density profiles at cold mountain glaciers, *Master Thesis*, 68 pp., Hokkaido Univ., Sapporo.
- Kasischke, E. S., and L. P. Bruhwiler (2002), Emission of carbon dioxide, carbon monoxide, and methane from boreal forest fires in 1998, *J. Geophys. Res.*, 108(D1), 8146, doi:10.1029/2001JD000461.
- Kim, Y. K., H. W. Lee, J. K. Park, and Y. S. Moon, (2002), The stratosphere-troposphere exchange of ozone and aerosols over Korea, *Atmos. Environ.*, 36, 449-463.
- Lucas, L. L., and M. P. Unterweger, (2000), Comprehensive review and critical evaluation of the half-life of tritium, *J. Res. Natl. Stand. Technol.*, 105(4), 541-549.
- McGimsey, R. G., C. A. Neal, and C. M. Riley (2002), Areal Distribution, Thickness, Mass, Volume, and Grain Size of Tephra-Fall Deposits from the 1992 Eruptions of Crater Peak Vent, Mt. Spurr Volcano, *Open-File Rep. 01-370*, U.S. Geol. Surv., Alaska.
- Monks, P. S. (2000), A review of the observations and origins of the spring ozone maximum, *Atmos. Environ.*, 34, 3,545-3,561.
- Rahn, K. A., R. D. Borys, and G. E. Shaw (1977), Asian source of Arctic haze bands, *Nature*, 268, 713-715.
- Shiraiwa, T., S. Kanamori, C. S. Benson, D. Solie, and Y. D. Muravyev (2004), Shallow ice-core drilling at Mount Wrangell, Alaska, *Bull. Glaciol. Res.*, 21, 71-77.
- Stohl, A. et al. (2003), Stratosphere-troposphere exchange: A review, and what we have learned from STACCATO, *J. Geophys. Res.*, 108(D12), 8516, doi:10.1029/2002JD002490.
- Sun, J., M. Zhang, and T. Liu (2001), Spatial and temporal characteristics od dust storms in China and its surrounding regions, *J. Geophys. Res.*, 106(D10), 10,325-10,333.
- Yamazaki, K. (1986), Preliminary Calculation of Trajectory Analysis in the Lower Stratosphere of the Southern Hemisphere, *Geophys. Res. Lett.*, 13, 1,312-1,315.

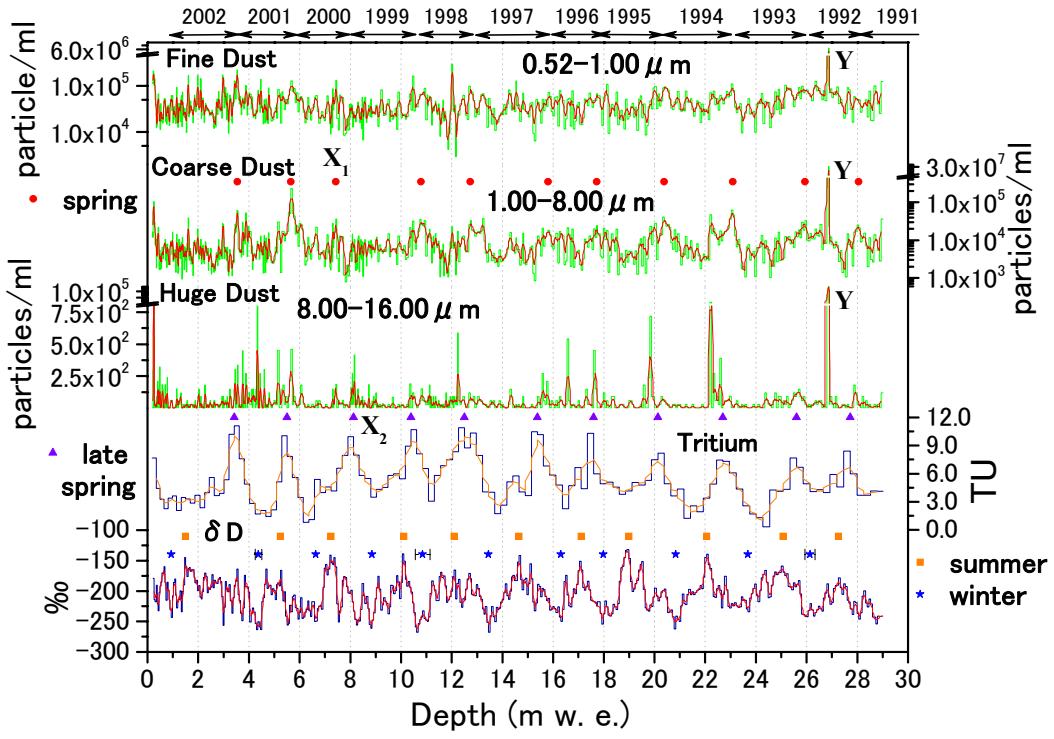


図1 50m雪氷コア中のダスト粒子数濃度、トリチウム濃度、 δD [Yasunari et al., 2006]. (a) FD粒子数濃度 (0.52-1.00 μm) (b) CD粒子数濃度 (1.00-8.00 μm) (c) HD粒子数濃度 (8.00-16.00 μm) (d) トリチウム濃度 (e) δD . 深さは密度プロファイル[Kanamori, 2004]を用いて水当量に換算した. ●, ▲, ■, ★はそれぞれ、春、春後半、夏、冬の中心の位置を示す(2000年のみ、X₁は春後半、X₂は春の中心とした). (a), (b), (c) のYは26.824-26.873 m w.e.の顕著なダスト層に対応する. (e) のエラーバーは冬の幅を示す. 太線は5つのデータの移動平均である.

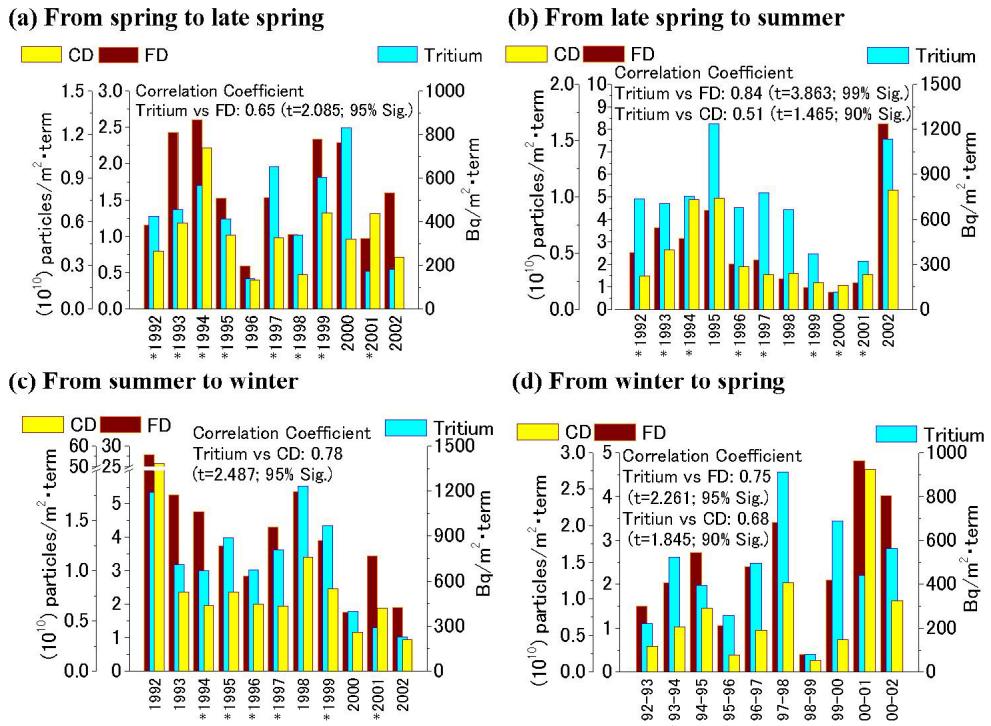


図2 各期間におけるFD,CD,トリチウムフラックスとそれらの相関係数[Yasunari et al., 2006]. (a) 春から春後半 (b) 春後半から夏 (c) 夏から冬 (d) 冬から春. 星印は相関係数の計算に用いたデータ. 相関係数は有意水準90%以上の結果のみ示してある.