

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26281019

研究課題名(和文) 湖年縞堆積物および雪氷コアを用いたアジアダスト輸送の季節性と沈積フラックスの解明

研究課題名(英文) Asian dust deposition flux and seasonality of the transport from the analyses of varved lake sediment and ice core

研究代表者

長島 佳菜 (NAGASHIMA, Kana)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球環境観測研究開発センター・技術研究員

研究者番号：90426289

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：水月湖の年縞堆積物とカナダで採取された雪氷コアを用いて、アジアダストの沈積量を過去100年間にわたって復元した。更に、全球エアロゾル気候モデルSPRINTERSを用いた数値実験結果との比較を行った。その結果(1)水月湖におけるダスト沈積フラックスは過去100年の間に徐々に減少する傾向を示す、(2)アリューシャン低気圧が弱く偏西風が高緯度側で強くなる1950年代～1970年代半ばにかけて、水月湖へのダスト輸送は減少しカナダへのダスト輸送は増加する、(3)水月湖に比べ、砂漠域から遠く高緯度に位置するカナダの方が春以外の季節のダスト輸送が卓越する、ことが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：We reconstructed depositional flux of Asian dust during the last century using the Lake Suigetsu sediment and ice core from Canada, and compared to the result of long-term simulations using SPRINTERS. The results exhibit 1) continuous decreasing trend of Asian dust deposition flux at Lake Suigetsu during the last century, 2) decadal-scale decrease (increase) in dust deposition flux at Lake Suigetsu (Canada) from middle 1950's to middle 1970's with the weakening of Aleutian low and northward shift of the westerlies, and 3) relative abundance of dust transport during summer to winter compared to that during spring seems to be larger at Canada compared to the Lake Suigetsu, probably due to the location, far from desert and higher latitude.

研究分野：古気候学、地球化学

キーワード：ダスト 10年規模気候変動 高時間解像度 湖年縞堆積物 雪氷コア 地球化学

1. 研究開始当初の背景

東アジアの中緯度域には、中国西部のタクラマカン砂漠をはじめとする砂漠が数多く点在し、またモンゴル南部を中心とした広大な地域にはゴビ(礫砂漠)が広がる。こうした砂漠域からは毎年多くのダストが発生し、その一部は上空の偏西風に乗って北太平洋や遠くはアメリカ・ヨーロッパまで数千~数万 km 輸送される。このように長距離輸送されるアジアダストは、雲核としての働きや、栄養源(鉄)の供給を通じた海洋の生物生産への影響などから、その動態の理解に注目が集まっている。しかし、アジアダストの供給源、輸送量、輸送メカニズムの理解は、春先の大規模ダストイベント(いわゆる黄砂イベント)を対象として進展してきたため、他の季節のダスト輸送の実態については不明な点が多く、年間を通じた輸送量および沈積量の定量的な評価が遅れている。更に、ダスト輸送に関わる長期データの不足によって、総観規模の気象場が、ダスト輸送の経年~数十年規模変動にどのように影響を与えているのか、その関係性の解明が進んでいない。そこで高い時間分解能を持つ湖沼堆積物および雪氷コアから、観測記録からは得られていない長期的なアジアダスト記録を抽出することで、アジアダスト輸送の特徴や変動要因を明らかにする必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、アジアダストの輸送経路に沿って採取された、季節毎の分析が可能な日本の湖年縞堆積物と、カナダで採取された雪氷コアを用いて、アジアダストの沈積量とその供給源を過去 100 年間にわたって復元し、アジアダスト長距離輸送の季節性(どの季節にどこで発生したダストがどれだけ運ばれるのか)やダスト輸送の長期変動を明らかにすることにある。さらに、全球化学輸送モデルを用いたアジアダストの長期再現実験と、領域化学輸送モデルを用いた高解像度の再現実験を行い、ダスト長距離輸送の季節変動および長期的な変動を引き起こす気象場を解明する。

3. 研究の方法

(1) 試料

アジアダストの長距離輸送の季節性や年間を通じた沈積量およびその変動を供給源からの距離ごとに把握するため、本研究では、アジアダストの主な供給源(タクラマカン砂漠、ゴビ砂漠)から 2,500~5,000 km に位置する福井県・水月湖で 2012 年に採取した湖の堆積物、約 10,000 km に位置するカナダの Mount Logan で 2002 年に採取された雪氷コアを分析に用いた。

水月湖の表層堆積物(SG12-LM3, 35°35' N, 135°53' E, 全長 25 cm)は、2012 年 6 月、研究代表者の長島が東京大学のグループと共に、湖の中央からリムノス式のグラビティ

コアラーを用いて採取した。そのうち、水月湖堆積物を特徴づける年縞(一年毎の縞)の枚数の計測等により構築された年代モデル(Suzuki et al., 2016, PEPS)から 1920~2012 年に相当すると推測される上部 24 cm 分の試料を分析に用いた。

水月湖の堆積物には、アジアダスト以外にも湖周辺(水月湖集水域および水月湖に接する三方湖と三方湖に流入するはず川の集水域)から供給される碎屑物が多く混入する。従って、湖周辺から供給される碎屑物の特徴を捉え、アジアダストとの識別を可能にする必要がある。そこで、2012 年 6 月 20~24 日に水月湖および三方湖周辺域の調査を行い、集水域から複数の土壌試料を採取して分析に用いた。

一方、雪氷コアは、研究分担者の東が国立極地研究所、アメリカ・ニューハンプシャー大学、カナダ地質研究所の共同プロジェクトとして、2002年にカナダ北西部の Mount Logan (King. Col, 海拔 4135 m, 全長 220 m) から採取したコアの上部 115 m (同一コアの酸素同位体比等に基づくと過去約 100 年に相当)を分析に用いた。

(2) 分析方法

水月湖の表層堆積物および水月湖・三方湖集水域の試料については、石英の物性(カソードルミネッセンス、電子スピン共鳴、結晶化度)分析、長石組成分析、粒度分析を行った。

King Col コアについては、Ca²⁺濃度の計測を季節毎の時間解像度で行い、一部の試料についてはダストの供給源推定のために石英のカソードルミネッセンス分析を行った。過去 100 年分の Ca²⁺濃度データは、約 5~10 cm 間隔(約 1 か月間隔)で既に得られていたが、精度に問題があったため、本研究で約 1500 点の再測定を行った。

石英のカソードルミネッセンス分析は、岡山理科大学の SEM-CL 装置(JEOL, JSM-5410LV)を、石英の電子スピン共鳴分析は、東京大学の ESR 測定装置(JOEL, FA-100)を、石英の結晶化度、長石組成分析は海洋研究開発機構の X 線回折装置(PANalytical, X'Pert Pro X-ray)を、カルシウムイオン濃度の計測には国立極地研究所のイオンクロマトグラフ(日本ダイオネクス, DX-500)を用いた。

本研究では、分析から得られた沈着データの理解を深め、長距離輸送の供給源や季節性、ダストの長距離輸送に有効な気象・気候メカニズムを解明するため、全球エアロゾル気候モデル(SPRINTERS)を用いて、ヨーロッパ中期予報センター(ECMWF)の 20 世紀同化プロジェクトから得られる過去 100 年の気象場のデータを基に、1960 年代~1980 年代のダスト輸送・沈着の数値実験を行った。

4. 研究成果

(1) ダスト輸送の長期変動

水月湖堆積物および水月湖・三方湖集水域の碎屑物の分析結果から、アジアダストと集水域から供給される碎屑物は長石の組成が異なることが明らかになった。すなわち、アジアダストは集水域に比べて灰長石/曹長石比が高い特徴を持つ。これは、降雨量が少ないアジアダスト起源域（中国・モンゴルの砂漠域）においてカルシウムに富む灰長石が保存されやすい事を反映している。一方、水月湖堆積物中の碎屑物の粒度分析結果から、水月湖に堆積する碎屑物は clay サイズおよび fine silt サイズが卓越する 2 つのサイズ分布（Weibull 分布）を持つ粒子群で構成されることが明らかになった。さらに、長石組成との比較から、clay サイズが卓越する Weibull 分布を構成する粒子群が集水域から供給される碎屑物、fine silt サイズが卓越する Weibull 分布を構成する粒子群がダストであることが明らかになった。

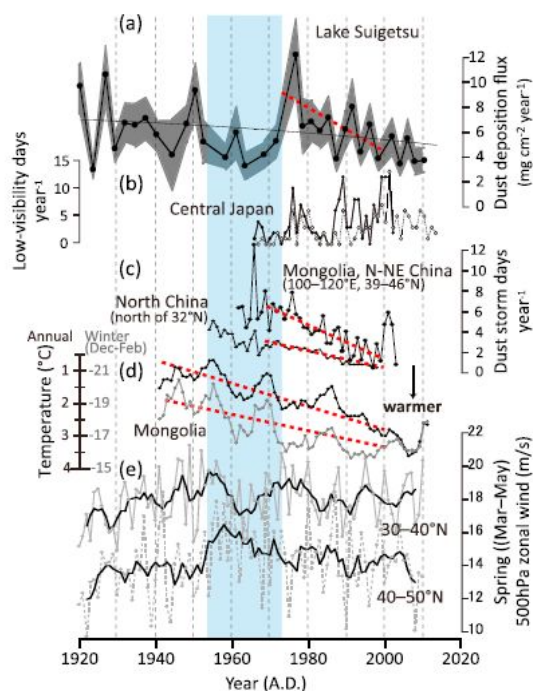


図1 (Nagashima et al., 2016, GRL の Fig. 4 を引用) (a) 水月湖におけるダスト沈積フラックス、(b) 中部日本におけるダスト観測日数 (<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>)、(c) モンゴルおよび中国におけるダストストーム日数 (Qian et al., 2002, J. Clim; Gong et al., 2007, GRL)、(d) モンゴルにおける地上気温 (National Agency for Meteorology and Environment Monitoring of Mongolia)、(e) 春季の 500hPa の東西風 (<http://apps.ecmwf.int/datasets/data/era20c-daily/?levtype=pl&type=an>)

この結果を基に復元した過去 100 年のダスト沈積フラックス (図 1 (a) 参照) は過去 100 年で $3.0 \sim 12.1 \text{ mg cm}^{-2} \text{ y}^{-1}$ の範囲で変動し、緩やかな減少傾向を示した。さらに 1950 年代～1970 年代半ばにかけてのダスト

沈積フラックス減少が明らかになった (Nagashima et al., 2016, GRL)。ダスト沈積フラックスの緩やかな減少の原因として、近年のモンゴルの温暖化に伴ってモンゴル～中国における春季の大気擾乱 (シベリア～モンゴルからの寒気に流入に伴って引き起こされる) の頻度が減少し、ダスト発生頻度が減少した可能性があげられる (図 1(c)(d))。

一方、ダスト沈積フラックスの減少が見られる 1950 年代～1970 年代半ばにかけては、太平洋十年規模振動 (PDO) がマイナスになる時代に相当し、アリューシャン低気圧の弱体化と共に、水月湖を含む北緯 30-40 度でダストの輸送を担う偏西風の風速減少と、北緯 40-50 度での風速増加が見られる (図 1(e))。この結果は、ダストの輸送が高緯度側にシフトし、日本の中部にダストが輸送されにくくなった事を示唆する。一方、その前後の時代は、偏西風が北緯 30-40 度で強く、日本中部へのダスト輸送が増加した可能性が高い (Nagashima et al., 2016, GRL)。そこで、水月湖におけるダスト沈積フラックスの十年規模変動が偏西風変動に伴うダスト輸送ルートの変動である可能性について、SPRINTERS のシミュレーション結果を用いて検証した。

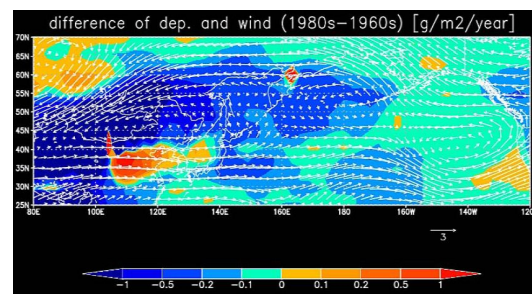


図 2 500hPa の風向・風速 (矢印の向き・大きさ) およびダスト沈積フラックス (カラー) の偏差 (1979-1982 年平均から 1979-1972 年平均を引いたもの)

水月湖でのダスト沈積フラックスが多かった 1979-1982 年と少なかった 1969-1972 年について、シミュレーション結果における 500hPa の風向・風速およびダスト沈積フラックスの偏差 (図 2) を見ると、大局的にはダスト沈積フラックスが北緯 35-42 度付近で増加し、北緯 42 度以北で減少するトレンドが見られ、水月湖における沈積フラックスの増加トレンドと整合的である。また上空の風はモンゴル・中国～日本にかけての北緯 30-40 度付近で西風が強まっており、十年規模の偏西風変動が、ダスト輸送経路を変えている事が裏付けられた。

一方、ダスト輸送経路変動の可能性は、Mount Logan 雪氷コアの結果からも示された。図 3 に示すように、雪氷コアの Ca^{2+} 濃度は水月湖におけるダスト沈積フラックスが減少する 1950 年代～1970 年代半ばに増加する傾向が見られ、シミュレーション結果に示され

たように、北緯 30-40 度と、より高緯度へのダスト輸送の逆トレンドが明確になった。こうしたダスト沈積フラックスの長期トレンドを観測データから示したのは本研究が初めてであり、モデルと組み合わせた検証から、十年規模のダスト輸送経路の変動を明らかにしたことにより、ダストによる北太平洋への鉄の供給が生物生産に与える影響を評価する上で、重要なデータが得られた。また本研究の結果は、今後モンゴルの温暖化が進んだ場合に、アジアダストの輸送量が更に減少する可能性を示唆しており、ダストによる環境への影響が将来的にどのように変わっていくのかを理解するための礎になる。

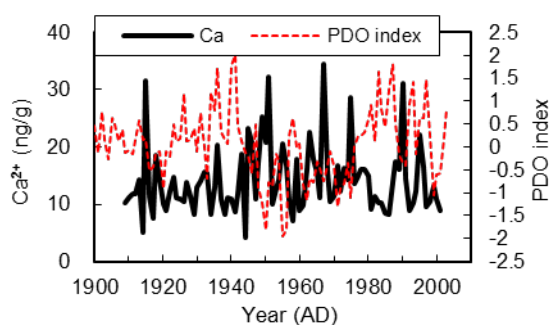


図 3 Mount Logan King Col の雪氷コアから復元した年平均 Ca^{2+} 濃度(黒線)と年平均 PDO index (赤線)の変動

(2) ダストの供給源推定

本研究では、アジアダストの主要構成鉱物である石英に注目し、個別石英粒子のカソードルミネッセンススペクトルを基に、アジアダストの供給源推定を行った。申請者のこれまでの研究において、アジアの砂漠域で採取した石英粒子のカソードルミネッセンススペクトルは、砂漠ごとに異なる特徴を持つことが明らかになったが、その違いの定量的な評価には至っていなかった。本研究では、得られたスペクトルを、その原因となる 5 つの発光成分(それぞれが構造欠陥や不純物に対応)に波形分離し、各発光成分の割合を用いてクラスター解析を行い、アジアの主要な砂漠(タクラマカン砂漠とゴビ砂漠)の石英のクラスター構成を明らかにした。本研究で得られた 3 つのクラスター; クラスター 1 (赤色の発光が卓越し、低変成度の変成岩由来である可能性が高い)、クラスター 2 (赤色と青色の発光が共に卓越し、深成岩由来である可能性が高い)、クラスター 3 (青色の発光が卓越し、火山岩由来である可能性が高い)に対し、ゴビ砂漠で採取した石英粒子はタクラマカン砂漠およびその周辺で採取した石英粒子に比べ、クラスター 3 の割合が高いことが明らかになった(Nagashima et al., accepted)。この結果は、ゴビ砂漠およびタクラマカン砂漠周辺の地質学的特徴とよく合致し、地球表層に普遍的に存在する石英粒子のカソードルミネッセンス分析が供給源の定量的な推定に有効であることを示した。

そこで、水月湖堆積物および Mount Logan 雪氷コアに含まれる石英のカソードルミネッセンスを測定し、砂漠域の結果との比較を行った。水月湖の結果は、砂漠のクラスター構成と異なっており、アジアダスト由来の石英粒子が、水月湖・三方湖およびはす川の集水域から供給される石英粒子によって大きく希釈されているため、集水域の影響を取り除きつつ、タクラマカン砂漠とゴビ砂漠の寄与を推定することが難しいことがわかった。ダストのみのカソードルミネッセンススペクトルを得るため、今後はアジアダストが卓越する粗粒の石英粒子($>20 \mu\text{m}$)にターゲットを絞り、再測定を行う必要がある。一方、Mount Logan, King Col 雪氷コアに含まれる石英のカソードルミネッセンスからはタクラマカン砂漠の寄与が卓越する結果が得られ、タクラマカン砂漠起源のダストが上空の偏西風に乗って長距離輸送されるとする先行研究(Uno et al., 2009, Nature Geoscience)とよく一致した。

(3) ダスト輸送の季節性

主に Mount Logan, King Col 雪氷コアの Ca^{2+} 濃度変動および SPRINTERS のシミュレーション結果から、ダスト輸送の季節性の検証を行った。SPRINTERS の結果に基づく、水月湖に比べ Mount Logan に輸送されるダストは春以外の季節の輸送がより卓越する傾向が明らかになった。一方、Mount Logan 雪氷コアの Ca^{2+} 濃度変動を詳しく検証すると、同一コアの酸素同位体比のピーク(秋にピークを持つことが知られている)との位置関係から、春のピークの他に、夏~秋にもピークが見られることがわかった。また、春のピークは他の季節に比べて高いが、夏~秋のピークは比較的長期に渡って緩やかに続くことが明らかになった。SPRINTERS の結果は、春よりも秋のピークが卓越する結果が得られており、モデルと Mount Logan の Ca^{2+} 濃度変動とでは、春以外の季節にもダスト輸送が見られる点で共通するものの、ダスト輸送量の季節性については相違が見られ、今後の更なる検証が必要である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

Kana Nagashima, Hirotsugu Nishido, Masahiro Kayama, Yasunori Kurosaki, Syhei Ohgo, Hitoshi Hasegawa, Composition of Asian dust from cathodoluminescence spectral analysis of single quartz grains, *Geology*, 査読有, accepted (June 6, 2017), doi:10.1130/G39237.1

Kana Nagashima, Yoshiaki Suzuki, Tomohisa Irino, Takeshi Nakagawa, Ryuji Tada, Yukari Hara, Kazuyoshi Yamada, Yasunori Kurosaki, Asian dust transport during the last century recorded in Lake

Suigetsu sediments, Geophysical Research Letters, 査読有, vol. 43(6), 2016, 2835-2842, doi:10.1002/2015GL067589

〔学会発表〕(計15件)

長島 佳菜, 石英粒子のカソードルミネッセンス分析を用いたアジアダストの供給源推定法開発とカナダ・雪氷試料への応用、2016年度日本地球化学会年会、2016年9月14日、大阪市立大学、大阪府大阪市

Kana Nagashima, Provenance study of Asian dust using cathodoluminescence spectra of single quartz grains, Goldschmidt 2016, 2016/6/30, Pacifico Yokohama, Yokohama, Kanagawa (invited)

Kana Nagashima, Decadal to millennial-scale Asian dust transport changes and its possible impact on ocean biogeochemistry, The Ecosystem Studies of Subarctic and Arctic Seas 2016 Annual Science Meeting, 2016/3/7, Yokohama World Porters, Yokohama, Kanagawa

Kana Nagashima, Asian dust depositional flux changes during the last 100 years recorded in Lake Suigetsu sediment, Japan, 8th International Conference on Asian Marine Geology, 2015/10/5, Maison Glad Jeju, Jeju, Korea

Kana Nagashima, Asian dust input to the North Pacific and its seasonal to decadal variations, 19th INQUA2015, 2015/7/28, Nagoya Congress Center, Nagoya, Aichi

〔その他〕

研究結果・成果を紹介するホームページ
<http://www.jamstec.go.jp/seika/jdb/index.do>

<http://www.jamstec.go.jp/res/ress/nagashimak/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長島 佳菜 (NAGASHIMA, Kana)
国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球環境観測研究開発センター・技術研究員
研究者番号：90426289

(2) 研究分担者

東 久美子 (AZUMA, Kumiko)
国立極地研究所・研究教育系・教授
研究者番号：80202620

西戸 裕嗣 (NISHIDO, Hirotsugu)
岡山理科大学・生物地球学部・教授
研究者番号：30140487

鹿山 雅裕 (KAYAMA, Masahiro)
東北大学・学際科学フロンティア研究所・

助教

研究者番号：30634068

原 由香里 (HARA, Yukari)
九州大学・応用力学研究所・助教
研究者番号：30462493

(3) 連携研究者

滝川 雅之 (TAKIGAWA, Masayuki)
国立研究開発法人海洋研究開発機構・北極環境変動総合研究センター・ユニットリーダー
研究者番号：30360754