

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H03370

研究課題名(和文) 南北両半球の堆積物を用いた年レベルの偏西風経路復元と地球温暖化影響の検出

研究課題名(英文) Reconstruction of the past westerly jet path and detection of the effects of global warming using sediments from both hemispheres

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・地球環境部門(地球表層システム研究センター)・副主任研究員

研究者番号：90426289

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：地球温暖化が偏西風経路に及ぼす影響を検証するため、南北両半球の堆積物試料(福井県水月湖・北海道大沼の湖底堆積物、南太平洋チリ沖の海底堆積物)を用いて、東アジアおよび南米チリ上空の過去数百年間にわたる偏西風経路を復元した。日本の湖沼堆積物等に含まれる黄砂の量や供給源を調べ、黄砂を輸送する偏西風の経路変動を検証した結果、地球温暖化に伴う経路変動は検出されなかった。一方チリ沖では、海洋堆積物を用いて、偏西風経路下で増加する降雨の指標となる砕屑物堆積フラックス等の復元を行った結果、1800年代後半から南半球冬期の偏西風経路が極側にシフトし始め、温暖化に伴う段階的な極側へのシフトが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

偏西風経路は中緯度域の気候に大きな影響を与え、東アジア～日本においては、梅雨の緯度分布や台風経路などの主な支配要因となっている。本研究では、数値モデルから予測されている、地球温暖化に伴う両極偏西風の極側へのシフトを検証するため、南北両半球の堆積物試料を用いた過去数百年の偏西風経路復元を行った。その結果、南半球の偏西風経路は、主に1800年代後半から現在に至る気温上昇に伴い、極側へシフトしたことが示唆された。一方、北半球偏西風の復元結果からは、顕著な経路変動の傾向は示されなかった。

研究成果の概要(英文)：To examine the westerlies changes before and after the onset of global warming and to assess background variability, we reconstructed past westerlies changes of both hemispheres during the last ca. eight hundred years using marine sediment cores obtained from the upper continental slope of southern Chile and lake sediment cores derived from Lake Suigetsu and Onuma, Japan. The deposition flux of Asian dust in Lake Suigetsu sediments suggests a relatively stable westerly jet path after the onset of global warming. In contrast, detrital material fluxes and provenance of marine sediments derived from the continental slope of southern Chile suggest a poleward shift of the southern westerlies since the late 1800s, especially during the late 1900s.

研究分野：古気候学、地球化学

キーワード：偏西風 地球温暖化 黄砂 堆積物

1. 研究開始当初の背景

南北両半球の中緯度帯上空を吹く偏西風は、日本をはじめ世界の多くの人々が暮らす中緯度の気候と密接に関係する。偏西風は冬から夏にかけての地表気温分布の変化と共に高緯度側へシフトするが、その経路や季節進行が変わると、例えば日本においては梅雨入りや梅雨明けのタイミングのずれ、暖冬などが起こり、我々が実感する異常気象の主な原因になっている。そのため、地球温暖化に伴い偏西風の経路がどのように変わってきたのか、今後どのように変わるのかを理解することが、日本を含む中緯度帯における気候変動の将来予測における重要な課題である。

これまで複数のモデルによる温暖化実験から、南北両半球の偏西風経路が年間を通じて極側にシフトする傾向が示されている(例えば Simpson et al., 2014)。しかし、南半球の偏西風は極向きシフトが大きく明確に示されているのに対し、北半球では、場所毎に極側へのシフトの程度が異なり、季節性も異なる。中でも東アジア上空の偏西風は、極側へのシフトが夏に弱い傾向が示されているが、モデル間のばらつきが大きくコンセンサスが得られていない(Simpson et al., 2014)。そのため、偏西風経路は地球温暖化と共に極域へシフトするのか? さらに東アジア上空の偏西風と南半球の偏西風とで違いはあるのか? という点を明らかにすることが、中緯度気候の将来予測に重要である。

この疑問に答えるには、モデルの精緻化と共に、19世紀半ばから現在に至る温暖化において、偏西風変動の兆候が既に表れているのかを実測データに基づいて検証する必要がある。しかしながら、これまでのところ偏西風経路の変動に関して気象観測データによる裏付けは十分に行われていない。その主な理由として、一般的に用いられている気象再解析データ(例えばヨーロッパ中期気象予報センターが提供する ERA-40)が過去40年間に限られているため、温暖化の傾向を抽出するには短く、偏西風経路を変える他の要因(例えば、太陽活動、NAO、ENSO、火山噴火)による影響との識別が難しい点が挙げられる。一方で、近年の古気候研究は、年代決定法や代替指標の進化により、観測記録とシームレスにつながるような高時間分解能で長期間のデータ取得が可能になりつつある。南半球では、南太平洋チリ沖の堆積物を用いて、現在のチリの降雨が偏西風帯で増加する事、そのため偏西風帯では沿岸域から河川を伝って海洋へと運ばれる陸起源砕屑物の割合が増加する事を利用し、チリ沖堆積物に含まれる砕屑物の量や供給源などを調べることで、偏西風経路を復元する指標が確立されている(例えば Lamy et al., 2001)。北半球では、研究代表者らのこれまでの研究から、日本海堆積物や日本の年縞堆積物(1年毎の縞が刻まれた堆積物)に含まれる黄砂の量や供給源を基に、過去の偏西風経路が復元できることを示してきた(例えば Nagashima et al., 2011, 2013, 2016)。そこで、南北両半球の高時間分解能の堆積物を利用することで、現在に至る温暖化において偏西風変動の兆候が既に表れているのかを実証する事が出来ると考えた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、高時間分解能(1年~数年)で長期間の記録が保存される南北両半球の堆積物試料(福井県水月湖と北海道大沼の年縞湖底堆積物と、南太平洋チリ沖の海底堆積物)を用いて、東アジア上空と南米チリ上空の偏西風経路を過去数百年間にわたって年レベルで復元し、温暖化と他の要因による変動とを分けることで温暖化に伴う偏西風経路変動の実態を検出することにある。

3. 研究の方法

(1)南半球チリ上空における偏西風経路の復元

2017年1-2月の海洋地球研究船「みらい」による航海で、南緯46度のチリ沖・陸棚斜面で採取したコア(MR16-09 PL01, MC1, PC01, PC02)を用いて、南半球チリ上空の偏西風経路の復元を行う。中でも PL01 コアの堆積速度は 50 cm/ky 余りと速く、高時間解像度の分析が期待できる。

本研究では観測記録とシームレスに繋がる堆積記録となるように、コアトップの保存が良い PL01, MC01 試料を 5 mm 間隔で ^{137}Cs および ^{210}Pb 測定(金沢大学環日本海域環境研究センター)を行い、約 5 cm 間隔で ^{14}C 年代(東京大学博物館)の測定を行った。これらの測定結果を踏まえ、高精度・高確度の年代軸を構築する。

研究協力者であるドイツ Alfred Wegener Institute (AWI) の Frank Lamy 氏は、現在のチリの降雨が偏西風帯で増加する事、降雨の増加に伴い、偏西風帯では沿岸域から河川を伝って海洋へと運ばれる陸起源砕屑物量が増加する事を利用し、チリ沖堆積物に含まれる砕屑物の含有量や起源から、偏西風経路の復元を行ってきた(Lamy et al., 2001, その他多数)(図1: 概念図参照)。本研究では、彼らの手法を発展させ、XRF コアスキャナー(Itrax, 高知コア研究所)による分析を 200 μm 間隔で行って砕屑物由来元素の含有量を高時間分解能で復元し、高精度の年代

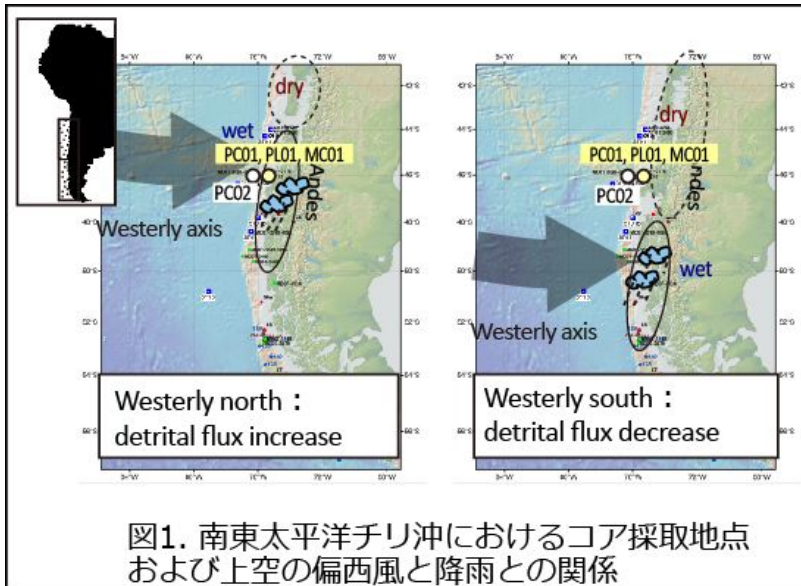


図1. 南東太平洋チリ沖におけるコア採取地点および上空の偏西風と降雨との関係

軸を基に、碎屑物由来元素の堆積フラックスを明らかにする。先行研究では、XRF コアスキャナー強度を基に定性的な元素量の増減が議論されていたが、本研究では定量的に各元素の含有量および沈着フラックスを評価するため、Itrax 分析結果の含水率補正および重量%データへの変換を試みる。さらに、XRD 分析、粒度分析、石英粒子のカソードルミネッセンス分析等を行い、碎屑物の供給源変動を調べ、フラックスと合わせて偏西風経路の復元を行う。

(2) 東アジア上空の偏西風経路変動の復元

2012年6-8月に福井県・水月湖で採掘されたSG12コア（全長41.9m）と2012年6月に北海道南部・大沼湖央で採取されたON12Cコア（全長3.9m）の過去数百年に相当する部分を主な対象とし、その中に含まれる黄砂の量および供給源推定を基に、偏西風経路の復元を行う。黄砂の供給源は主にモンゴル南部のゴビ砂漠と中国北西部のタクラマカン砂漠であるが、そのうちタクラマカン砂漠からのダスト供給の増加は、東アジア上空の偏西風の極側へのシフトを示唆し（Nagashima et al., 2011, 2013）、本研究でもこの関係に基づき検証を行う。

水月湖堆積物は該当年代の年代モデルが既に構築され（Suzuku et al., 2021）、大沼堆積物については、既に測定されている¹³⁷Cs、²¹⁰Pb、¹⁴C年代の結果や堆積物中から同定されたテフラ年代を用いて、年代モデルの検討を行う。それぞれの堆積物に含まれる黄砂の量および供給源推定のために、XRD分析、粒度分析、石英粒子のカソードルミネッセンス分析を行う。また大沼では現地調査を行い、大沼に碎屑物を供給していることが予想される集水域の試料を採取し、分析に用いる。またこれらの高時間解像度データに加え、日本海堆積物から既に得られている、低時間解像度（約50-80年解像度）の黄砂供給源データ（Nagashima et al., 2013）も議論に用いる。

4. 研究成果

(1) 南半球チリ上空における偏西風経路の復元結果

年代モデルの構築

MR16-09 PL01 コアおよび MC01 コアからは、核実験に伴う¹³⁷Csのピークは得られなかった。鉛同位体測定データを基に、²¹⁰Pbのフラックスが常に一定であると仮定するCRS (constant of supply) モデル（金井ほか1995; Turner and Delorme, 1996）を用いて、過去100年の年代モデルを作成した。さらに PL01 コアの8層準で測定した炭素放射年代を合わせ、Oxcal software 4.4 (Bronk Ramsey, 2009; <https://c14.arch.ox.ac.uk/oxcal.html>)を用いて、過去900年のベイズ推定年代モデルを構築した。

Itrax データの補正式の構築および測定結果の検証

MR16-09 PC02 コア（図1）を用いて、スラブ試料のItrax分析（Wet試料のXRFコアスキャナー強度取得）、また特定層準の試料についてDryプレス試料のItrax分析（Dry試料のXRFコアスキャナー強度取得）、さらに同一層準のビード試料のXRF分析（各元素の重量%測定）を行い、含水率の補正係数の算出および重量%データへの変換式を作成した（Hasegawa et al., in prep.）これらの補正式・変換式を基に、MR16-09 PL01の

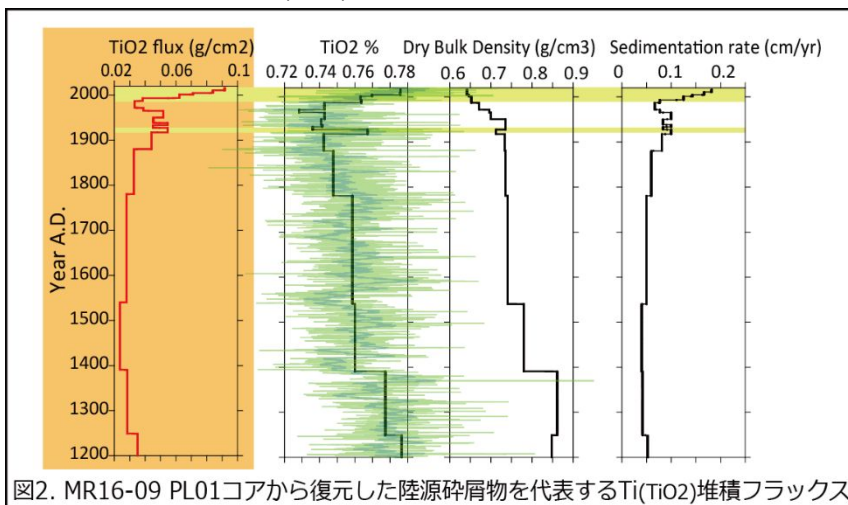
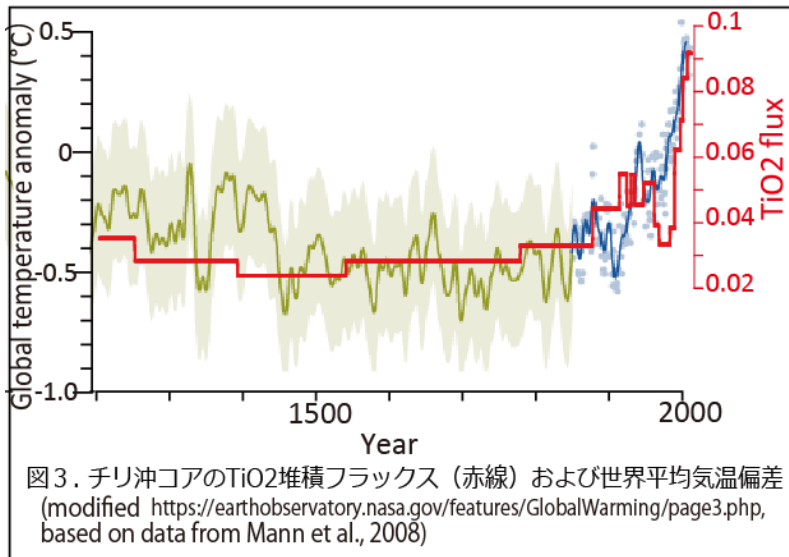


図2. MR16-09 PL01コアから復元した陸源碎屑物を代表するTi(TiO₂)堆積フラックス

Itrax 分析結果から各元素の含有量の復元を行った。また粒子密度の測定を行い、年代モデルに基づく堆積速度結果と合わせて、碎屑物に関する元素（K, Ti, Fe等）の堆積フラックスの計



算を行った(図2: 代表値としてTiの例を載せる)。これらの結果から, 1) AD1200-1900年には、元素フラックス変動幅は小さい, 2) 1900年以降に急激なフラックス増加が見られ、特に1930-1960年, 1990年頃に大規模な増加が起こり、2000年前後にピークを迎える, 3) 元素含有量は太陽活動の周期性と類似した、約11, 24, 70-87年といった周期性を持って変動することを明らかにした。一方, XRD, 粒度分析, カソードルミネッセンスなどの分析結果からは、今回の測定期間を通じて比

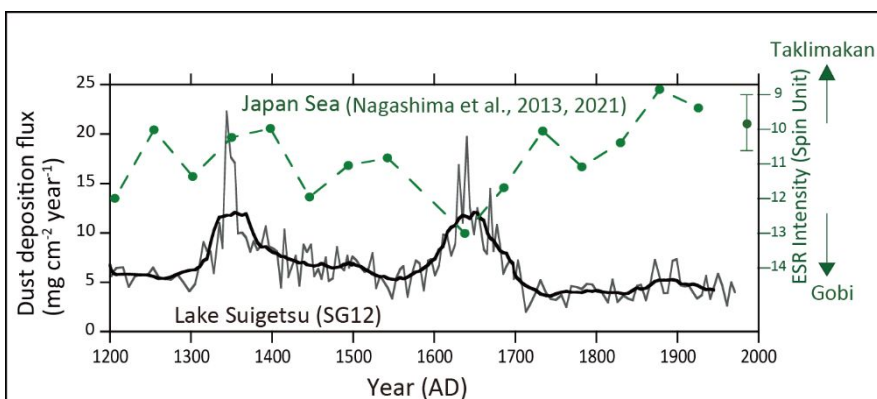
較的均質な碎屑物組成および輸送環境が示唆された。この結果は、復元された元素の堆積フラックスの変動の原因として、パタゴニア氷河などに伴う新たな供給源からの碎屑物供給よりも、冬の偏西風経路の変動に伴う降雨量変化を反映している可能性が高いことを示す。

フラックス増加のトレンドは、地球の気温上昇のタイミングとも比較的良好に一致しており(図3)、温暖化に伴う南半球偏西風(冬季)の高緯度側へのシフトとそれに伴う降雨量の増加に起因する可能性が高い。また、太陽活動が偏西風に影響を与えている可能性も本研究から明らかになった。

(2) 東アジア上空の偏西風経路変動の復元

大沼ON12Cコアの年代モデルの構築を行い(Katsuta et al., 2020)、ON12Cコアに含まれる碎屑物粒子の粒度分析、XRD分析による鉱物組成および長石の種類の同定を行った。黄砂以外にローカルな土壌流入の可能性を検証するため、2018年7月30日-8月1日にフィールド調査を行い、大沼に流入する河川の土壌を採取し、同様の分析を行った。コアと河川試料の組成を比較した結果、特に過去100年余りの大沼堆積物は、大沼周辺域から供給された碎屑土壌が卓越し、黄砂の含有量が約10%程度と少ない事がわかった。過去100年の高精度の黄砂フラックスや黄砂の供給源推定が難しいことが明らかになったため、ここでは水月湖の結果を示す。

水月湖のSG12コアに含まれる碎屑物の粒度分析結果から、ローカルな河川流入物と黄砂を識別し、黄砂の割合(約15-70%)を求めた(Nagashima et al., 2016の方法に基づく)。求めた黄砂の割合や乾燥かさ密度、堆積速度等を基に、黄砂の堆積フラックスを計算した(図4)。過去800年余りをカバーする試料の中には、黄砂の割合が低いものが比較的多く存在し、ローカルな碎屑物の影響によって黄砂の供給源推定に不確実性を伴う。そこで、日本海堆積物から得られている黄砂の供給源変動(Nagashima et al., 2016)と比較し、東アジア上空の偏西風経路変動について検証を行った。得られた黄砂フラックスは数10年~100年規模の変動を示すものの、1700年代以降は変動幅が小さく、温暖化に伴うタイミングでの黄砂沈着フラックスの顕著な変化は見られなかった。一方、日本海の堆積物に含まれる石英の電子スピン共鳴(ESR)信号強度



(Nagashima et al., 2013, 値が大きいとゴビ砂漠起源、小さいとタクラマカン砂漠起源を示す)と比較すると、日本海堆積物の年代誤差(~100年)を考慮しても、過去200-300年はゴビ砂漠からの寄与が減ることで、黄砂沈着フラックスが減少している(図4)。また、タクラマカン砂漠からの相対的な寄与率は増えているものの、タクラマカン砂漠からの黄砂供給量が温暖化に伴って顕著に増えている傾向は示されていない。従って、本研究の結果からは、温暖化に伴う北半球・東アジア上空の偏西風変動の傾向は示されなかった。

< 引用文献 >

- Bronk Ramsey, C., 2009, Bayesian analysis of radiocarbon dates, *Radiocarbon* 51, 337-360.
- 金井ほか, 1995, ^{210}Pb , ^{137}Cs 法による長野県諏訪湖底質の堆積速度の見積り, *地質調査所月報* 46 (5), 225-238.
- Katsuta, N. et al., 2020, Sedimentary rhythm of Mn-carbonate laminae induced by East Asian summer monsoon variability and human activity in Lake Ohnuma, southwest Hokkaido, northern Japan, *Quaternary Science Reviews* 248, 106576.
- Lamy, F. et al., 2001, Holocene rainfall variability in southern Chile: a marine record of latitudinal shifts of the Southern Westerlies, *Earth and Planetary Science Letters* 185, 369-382.
- Mann, M.E. et al., 2008, Proxy-based reconstructions of hemispheric and global surface temperature variations over the past two millennia, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105(36), 13252-13257.
- Nagashima, K. et al., 2011, Millennial-scale oscillations of the westerly jet path during the last glacial period, *Journal of Asian Earth Sciences* 40, 1214-1220.
- Nagashima, K. et al., 2013, Westerly jet-East Asian summer monsoon connection during the Holocene, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 14, doi:10.1002/2013/GC004931.
- Nagashima, K. et al., 2016, Asian dust transport during the last century recorded in Lake Suigetsu sediments, *Geophysical Research Letters* 43(6), 2835-2842, doi:10.1002/2015GL067589.
- Nagashima, K. et al., 2021, Aleutian Low variability for the last 7500 years and its relation to the Westerly Jet, *Quaternary Research*, 1-19. <https://doi.org/10.1017/qua.2020.116>
- Simpson, I.R. et al., 2014, A diagnosis of seasonally and longitudinally varying midlatitude circulation response to Global Warming, *Journal of the atmospheric sciences* 71, 2489-2515.
- Suzuki, Y. et al., 2021, Extreme flood events and their frequency variations during the middle to late-Holocene recorded in the sediment of Lake Suigetsu, central Japan, *The Holocene* 31(1), 121-133.
- Turner, L.J. and Delorme, 1996, Assessment of ^{210}Pb data from Canadian lakes using the CIC and CRS models. *Environmental Geology* 28, 78-86.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Nagashima Kana, Addison Jason, Irino Tomohisa, Omori Takayuki, Yoshimura Kei, Harada Naomi	4. 巻 -
2. 論文標題 Aleutian Low variability for the last 7500 years and its relation to the Westerly Jet	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Quaternary Research	6. 最初と最後の頁 1-19
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1017/qua.2020.116	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Katsuta Nagayoshi, Naito Sayuri, Ikeda Hisashi, Tanaka Kuniaki, Murakami Takuma, Ochiai Shinya, Miyata Yoshiki, Shimizu Mayuko, Hayano Asuka, Fukui Konami, Hasegawa Hitoshi, Nagao Seiya, Nakagawa Mayuko, Nagashima Kana, Niwa Masakazu, Murayama Masafumi, Kagawa Masako, Kawakami Shin-ichi	4. 巻 248
2. 論文標題 Sedimentary rhythm of Mn-carbonate laminae induced by East Asian summer monsoon variability and human activity in Lake Ohnuma, southwest Hokkaido, northern Japan	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Quaternary Science Reviews	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.quascirev.2020.106576	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Kana Nagashima, Naomi Harada
2. 発表標題 Variability of the Aleutian Low and Westerly Jet during the Holocene
3. 学会等名 20th Congress of the International Union for Quaternary Research (INQUA) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長島 佳菜、原田 尚美
2. 発表標題 完新世におけるアリューシャン低気圧-偏西風ジェットの百年・千年規模変動
3. 学会等名 JpGU2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長島佳菜, 長谷川精, 勝田長貴, 落合 伸也, Lamy Frank, Arz Helge, 粕谷拓人, 村山雅史, 原田尚美
2. 発表標題 南半球偏西風の過去1000年に渡る経路変動
3. 学会等名 JpGU2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kana Nagashima, Ryuji Tada, Shin Toyoda, Jason Addison, Naomi Harada, Tomohisa Irino
2. 発表標題 Holocene Westerly Jet Variability Over East Asia and Its Linkages with the Aleutian Low and the East Asian Summer Monsoon
3. 学会等名 AGU2021 fall meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kana Nagashima, Jason Addison, Tomohisa Irino, Takayuki Omori, Kei Yoshimura, Naomi Harada
2. 発表標題 Mid- to late Holocene variability of the Aleutian Low Atmospheric Pressure Cell: Forcing by the Western Jet
3. 学会等名 JpGU2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hitoshi Hasegawa, Fuyu Nagaya, Kana Nagashima, Nagayoshi Katsuta, Masafumi Murayama, Naomi Harada
2. 発表標題 Reconstruction of variations in South Pacific westerly jet path during the last glacial and calibration for the water content influence of ITRAX intensity
3. 学会等名 JpGU2021 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名	Hitoshi Hasegawa, Fuyu Nagaya, Kana Nagashima, Nagayoshi Katsuta, Masafumi Murayama, Naomi Harada
2. 発表標題	Reconstruction of variations in South Pacific westerly jet path during the last glacial
3. 学会等名	JpGU2020 (招待講演)
4. 発表年	2020年

1. 発表者名	長島佳菜, Jason Addison, 入野智久, 大森貴之, 芳村圭, 原田尚美
2. 発表標題	完新世のアリュージョン低気圧変動およびアジア上空偏西風ジェットとの関係
3. 学会等名	日本地球化学会第67回オンライン年会
4. 発表年	2020年

1. 発表者名	長谷川精, 長屋英結, 長島佳菜, 勝田長貴, 村山雅史, 原田尚美
2. 発表標題	チリ沖コアを用いたItraxデータの含水率補正と最終氷期の南半球偏西風経路の復元
3. 学会等名	高知大学海洋コア総合研究センター共同利用・共同研究発表会
4. 発表年	2021年

1. 発表者名	長屋英結, 長谷川精, 長島佳菜
2. 発表標題	チリ沖コアから復元する最終氷期における南半球の偏西風経路変動
3. 学会等名	日本地質学会四国支部2020年愛媛大会
4. 発表年	2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	勝田 長貴 (Katsuta Nagayoshi) (70377985)	岐阜大学・教育学部・准教授 (13701)	
研究分担者	長谷川 精 (Hasegawa Hitoshi) (80551605)	高知大学・教育研究部自然科学系理工学部門・講師 (16401)	
研究分担者	落合 伸也 (Ochiai Shinya) (10401936)	金沢大学・環日本海域環境研究センター・助教 (13301)	
研究分担者	村山 雅史 (Murayama Masafumi) (50261350)	高知大学・教育研究部総合科学系複合領域科学部門・教授 (16401)	
研究分担者	岩崎 晋弥 (Iwasaki Shinya) (70751006)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球環境部門(地球表層システム研究センター)・特別研究員(PD) (82706)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	フランク ラミー (Lamy Frank)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	アーツ ヘルゲ (Arz Helge)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
ドイツ	アルフレッドウェゲナー極地海洋研究所	ライプニッツバルト海研究所	