

令和元年6月24日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K16184

研究課題名(和文) アイスコアの新たな水安定同位体比の動態解明と環境変動評価の不確実性の低減化

研究課題名(英文) Understanding the variation factor of 170-excess in an ice core and reducing in uncertainty of climate change assessment

研究代表者

対馬 あかね (Tsushima, Akane)

名古屋大学・環境学研究科・研究員

研究者番号：70757682

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：近年、 ^{180}D の測定が可能となり、 ^{180}D と ^{170}O から算出される170-excessが新たな水循環のトレーサーとして注目され始めている。しかしながら、現在、アイスコアや積雪中の170-excessに関する研究報告は非常に少ない。本研究では、アラスカやグリーンランドのアイスコア中の ^{180}D 、 ^{170}O の測定を行い、それぞれの地域で100年を超える長い時間スケールで170-excessとd-excessの変動を示した。その結果から、アイスコア中の170-excessとd-excessの相関関係の変化が北極振動などに伴う気候の変化にตอบสนองしている可能性が示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地球の気候環境変動の将来予測の不確実性の低減化には、古環境指標から引き出される過去の環境変動情報の高精度化が重要な課題の一つとなる。本研究では、アイスコアから復元される過去の環境変動情報の高精度化を目的として、新たな水安定同位体比 ^{170}O および170-excessに着目しており、本研究で復元された精度の高い北極域の過去の環境変動情報は、社会的意義のある知見である。また、アイスコア中の ^{170}O および170-excessは未だ測定例が非常に少なく貴重なため、それらのデータの取得は学術的にも重要な意義がある。

研究成果の概要(英文)：The stable water isotope ratios (^{180}D , ^{170}O and d-excess) in ice cores are important proxy of paleo climate change. Recently, ^{170}O and 170-excess which is calculated from ^{180}D and ^{170}O have attracted attention as a promising new proxy of hydro-climate variation. However, little is known about 170-excess in an ice core. In this study, we measured ^{170}O , ^{180}D and ^{170}O in an ice core, which was obtained from Alaska and the northwest Greenland using Wavelength-Scanned Cavity Ring-Down Spectroscopy (model L2140-i; Picarro). In addition, we calculated d-excess and 170-excess from those. Our results suggested that the running correlation between 170-excess and d-excess are responding to climate changes.

研究分野：雪氷学

キーワード：水安定同位体比 ^{170}O -excess d-excess 雪氷試料 古環境復元 気候変動 北極域

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

地球環境変動の将来予測の不確実性を低減させるためには、古環境指標から引き出される、過去の気温や降水量などの環境変動情報の精度を上げることが重要である。アイスコアは古環境変動を保存した有用な記録媒体で、アイスコア中に保存される水安定同位体比と呼ばれる質量数 16 と 18 の酸素安定同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$) と質量数 1 と 2 の水素安定同位体比 (δD) からは過去の気温変化などが復元されてきた。さらに、 δD と $\delta^{18}\text{O}$ の両者から算出される d-excess 値は水蒸気の起源の推定や水蒸気起源域の気候変化の解明など、水循環変動の有用な指標として用いられてきた。最近になり、質量数 17 と 16 の酸素の安定同位体比である $\delta^{17}\text{O}$ の測定が可能となった。 $\delta^{18}\text{O}$ と $\delta^{17}\text{O}$ から算出される ^{17}O -excess は d-excess と同様に水の相変化時、つまり海水からの蒸発時の動的分別の程度によって変化すると考えられ、新たな水循環のトレーサーとして注目され始めている^{引用文献 1,2)}。さらに近年の研究では、極域の積雪中の ^{17}O -excess が水蒸気起源の相対湿度に強く依存する事が示唆された^{引用文献 1)}。以上から、従来用いられてきた d-excess と新しく得られる ^{17}O -excess の 2 つのパラメーターの統合解析により、アイスコアデータから得られる水蒸気起源域や掘削地点の過去の気候・環境変化に関する情報の高精度化がはかれるのではないかと考えた。しかしながら、現在 $\delta^{17}\text{O}$ および ^{17}O -excess に関する研究報告は少なく、特に雪氷試料中の ^{17}O -excess の動態に関してはほとんど理解されていない。

2. 研究の目的

本研究では、波長スキャンキャビティリングダウン分光法を用いた Picarro 社製の水安定同位体比分析装置、L2140-i を用いて、アラスカおよびグリーンランド北西部で掘削されたアイスコアの分析を行い、 ^{17}O -excess の態解明および、 ^{17}O -excess を用いた北極域の気候変動復元を行うことを目的とした。

3. 研究の方法

(1) アイスコア試料の測定に先立ち、値の大きく異なる雪試料や超純水を用いて、装置 (L2140-i) のメモリー効果や安定性の確認と、IAEA の国際標準試料 (VSMOW2, SLAP2 および GISP) を用いた精度確認を行い、より精度良くデータを取得する方法を検討した。精度を向上させる一環として、装置周辺の温度のモニタリングを行い、測定時の温度を一定に保つ方法も検討した。高精度に測定する方法が確立されたのち、アイスコア試料の測定時に使用する実験室標準試料の作成を行った。

(2) はじめに、アラスカにて掘削された浅層アイスコアや各地の雪氷試料中の水安定同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$, δD , および $\delta^{17}\text{O}$) の測定を行った。 $\delta^{18}\text{O}$ と δD から d-excess を、 $\delta^{18}\text{O}$ と $\delta^{17}\text{O}$ から ^{17}O -excess をそれぞれ算出し^{引用文献 1,3)}、5 成分 ($\delta^{18}\text{O}$, δD , d-excess, $\delta^{17}\text{O}$ および ^{17}O -excess) の統合解析からアイスコア中の $\delta^{17}\text{O}$ および ^{17}O -excess の動態解明を行った。

(3) 次に、(2) で得られた知見を踏まえて、グリーンランド北西部で掘削されたアイスコアについても同様の測定を行い、北極域の環境変動復元を行った。

4. 研究成果

上記 (1) ~ (3) の方法で得られた成果の中から、主な研究成果についてそれぞれ簡潔にまとめた。

(1) 測定精度の確認のため、GISP とワシントン大学の実験室標準試料の測定を行い、先行研究の値と比較した (表 1)^{引用文献 3)}。その結果、本研究で得られた ^{17}O -excess 値は先行研究と比較しても十分な測定精度である事がわかった。

表 1 本研究で得られた水安定同位体比の値と先行研究で得られた水安定同位体比の値を比較した。

GISP は国際標準試料で、WWI はワシントン大学のワーキングスタンダードである。

	$\delta^{17}\text{O}$ (per mil)	$\delta^{18}\text{O}$ (per mil)	^{17}O -excess (per meg)
SMOW-SLAP-normalized isotope ratios			
This study (Standard error = σ/\sqrt{n})			
GISP	-13.12 \pm 0.02	-24.77 \pm 0.008	29.71 \pm 2
WW	-17.97 \pm 0.03	-33.81 \pm 0.01	27.59 \pm 2
Steig et al., 2014 (Standard error = σ/\sqrt{n})			
GISP	-13.144	-24.8 \pm 0.02	28 \pm 2
WW	-17.97	-33.82 \pm 0.03	27 \pm 2

(2) アラスカのアイスコア中の $\delta^{17}\text{O}$ および ^{17}O -excess の分析結果

アイスコア中の ^{17}O -excess の動態解明のために、水安定同位体比の変動要因がある程度理解されつつある、1666 年から 2007 年までをカバーしたアラスカのアイスコアを用いて、新たに 1 年の時間分解能で水安定同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$, δD および $\delta^{17}\text{O}$) の測定を行い、d-excess と ^{17}O -excess をそれぞれ算出した。これまでの研究から、アラスカのアイスコア中の d-excess 値は 1760 年頃を境に大きく変化しており、1760 年以前は全期間平均値より高い値を、1760 年以降は低い値を示すことがわかっている。再解析データを用いた気圧場および風向風速の解析から、d-excess 値はアラスカに流入する全水蒸気量に対し、アラスカの西側から流入する水蒸気が少ないと低

い値を示し、アラスカの西側から流入する水蒸気が多いと高い値を示すことが示唆された。さらに、d-excess の変動が、アリューシャン低気圧の変化に応答していることも示唆された^{引用文献 4,5)}。本研究では、1760 年前後の d-excess が大きく変化する時期に着目して、 ^{17}O -excess の変動傾向を解析した。

図1に1699年から1800年の過去102年間の d-excess と ^{17}O -excess の移動相関値を示した。両者は全期間では相関を持たなかったが、一定の期間ずつに区切って相関関係を確認したところ、相関関係が数年から数十年周期で変化しており、1760 年頃を境に、それ以前は負の方向にシフトする傾向にあることがわかった。1760 年以前はアリューシャン低気圧の弱化に伴い、アラスカの西側から水温と相対湿度が低い高緯度海域からの水蒸気が流入したことで、 ^{17}O -excess と d-excess の相関関係が負にシフトした可能性が示唆された。

(3) グリーンランドのアイスコア中の $\delta^{17}\text{O}$ および ^{17}O -excess の分析結果

アイスコア中の $\delta^{17}\text{O}$ および ^{17}O -excess の動態解明と、 ^{17}O -excess を用いた長期間の環境変動復元を目的として、2014 年に SIGMA プロジェクトの一環としてグリーンランド氷床北西部の SIGMA-D サイトにて掘削されたアイスコアの測定を行なった。アイスコア試料は掘削後に現場にて 5cm の分解能で処理され、北海道大学低温科学研究所および国立極地研究所にて水安定同位体比と化学主成分の測定が行なわれている。それらのデータから推定された年層を基準とし、1 年の時間分解能で試料を新たに切り出して、セラミックナイフを用いて周りを削り落として昇華と凝結による汚染の影響を除去した。その後、非通気の袋に入れて常温で融解し、水安定同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$, δD および $\delta^{17}\text{O}$) の測定を行い、d-excess と ^{17}O -excess をそれぞれ算出した。

図2に SIGMA-D サイトで掘削されたアイスコアの 1907 年から 2013 年の過去 107 年間の d-excess と ^{17}O -excess の関係を示した。アイスコア中の d-excess と ^{17}O -excess は全期間で比較すると相関を持たなかったが、一定の期間で区切ってみると、相関関係が数年から数十年の周期で変化しており、1920 年頃、1960 年頃、および 2000 年頃に有意な負の相関 ($p < 0.1$) を持つことがわかった。先行研究により、グリーンランドの NEEM (SIGMA-D の東側に位置するアイスコア掘削サイト) への水蒸気は南西側から流入していること^{引用文献 6)}、さらに、比較的低い d-excess は南西側から、比較的高い d-excess はアラスカ方向の北西側から流入している可能性が示されている^{引用文献 7)}。本研究では、後方流跡線解析を行い、SIGMA-D サイトへもグリーンランド南西部側からの水蒸気の流入がメインであることを確認したが、一方で、d-excess と ^{17}O -excess が負の相関になる期間だけに限定すると、北西側からの水蒸気の流入が確認できた。さらに、グリーンランド周辺の海域を細かく区切って SIGMA-D サイトへの水蒸気の寄与率の変化を解析すると、負の相関を持つ期間に SIGMA-D 北西側の北極域からの水蒸気の寄与が増えていることが確認できた。以上から、グリーンランド北西側から掘削地点への水蒸気の流入増加が負の相関関係を作り出している可能性が示唆された。

次に、その様な掘削地点北西側からの水蒸気の流入増加が生じる原因について考察した。d-excess と ^{17}O -excess の移動相関の変動を、バフィン湾の海氷面積の変化^(引用文献 8)と北極振動と比較したところ、1960 年頃のバフィン湾の海氷面積が減少する時期に d-excess と ^{17}O -excess が負の相関を示すなど、海氷面積の変化と、d-excess と ^{17}O -excess の

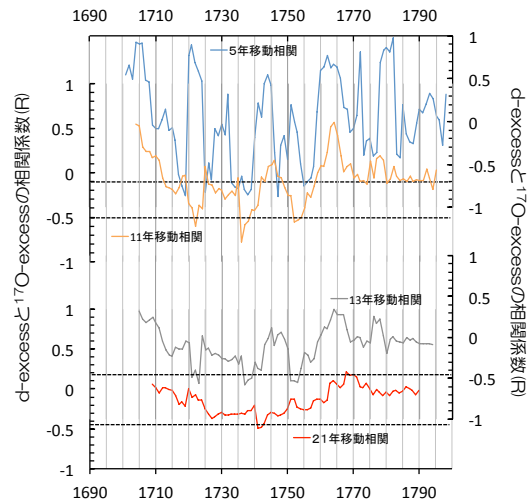


図1 1699年から1800年の過去102年間のアラスカのアイスコア中の d-excess と ^{17}O -excess の移動相関値
上から順に5年移動相関値(青色の実線)、11年移動相関値(橙色の実線)、13年移動相関値(灰色の実線)、21年移動相関値(赤色の実線)を示した。黒い破線は $p < 0.1$ で有意な(負)を示す。

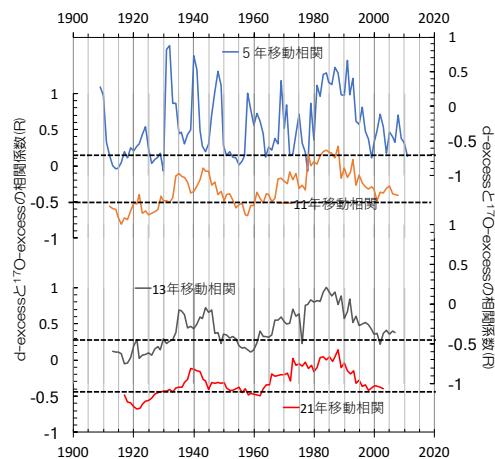


図2 1907年から2013年の過去107年間のグリーンランドSIGMA-Dアイスコア中の d-excess と ^{17}O -excess の移動相関値
上から順に5年移動相関値(青色の実線)、11年移動相関値(橙色の実線)、13年移動相関値(灰色の実線)、21年移動相関値(赤色の実線)を示した。黒い破線は $p < 0.1$ で有意な(負)を示す。

移動相関の変動が良く合うことがわかった。また、北極振動と d-excess と ^{17}O -excess の移動相関の変動も有意な相関 ($p < 0.1$) を持つ事がわかった。

以上から、気候の変化に伴い、起源が異なる、もしくは、流入経路が異なる水蒸気塊が SIGMA-D サイトに流入した事で水蒸気がミキシングされ、その結果として d-excess と ^{17}O -excess の相関関係が変化した事が示唆された。d-excess- ^{17}O -excess が負の相関を持つ時期は、北極振動や周辺海域の海水面積が縮小したことなどに起因して、掘削地点へグリーンランド北西部側からの水蒸気の流入が増加していた可能性があることが示唆された。

本研究では、未だ報告例が少ない、アイスコア中の ^{17}O -excess の変動を、2つの地点で、それぞれ 100 年を超える長い時間スケールで示すとともに、それらの解析から、d-excess と ^{17}O -excess の相関関係の変化が異なる起源の水蒸気のミキシングによって生じている可能性を示すことができた。本研究により、従来用いられてきた d-excess と新たに求められた ^{17}O -excess の統合解析から、過去の気候環境変化をより精度よく復元できる可能性が新たに示された。本研究で得られた成果は、水安定同位体比を用いた古環境変動復元研究において、重要な知見となる。

<引用文献>

- ① Barkan E. and Luz B., Diffusivity fractionations of $\text{H}_2^{16}\text{O}/\text{H}_2^{17}\text{O}$ and $\text{H}_2^{16}\text{O}/\text{H}_2^{18}\text{O}$ in air and their implications for isotope hydrology, *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 21, 2007, 2999-3005
- ② Schoenemann, S. W., Schauer, A. J. and E. J. Steig, Measurement of SLAP2 and GISP $\delta^{17}\text{O}$ and proposed VSMOW-SLAP normalization for $\delta^{17}\text{O}$ and ^{17}O -excess, *Rapid Commun. Mass. Spectrom.*, 27, 2013, 582-590
- ③ Steig E. J., Gkinis V., Schauer A. J., Schoenemann S. W., Samek K., Hoffnagle J., Dennis K. J., Tan S. M., Calibrated high-precision ^{17}O -excess measurements using cavity ring-down spectroscopy with laser-current-tuned cavity resonance., *Atmospheric Measurement Techniques*, 7, 2014, 2421-2435.
- ④ Tsushima A., Matoba S., Shiraiwa S., Okmoto S., Sasaki H., Solie D. J., Yoshikawa K., Reconstruction of recent climate change in Alaska from the Aurora Peak ice core, central Alaska, *Climate of the Past*, 11, 2015, 217-226
- ⑤ 對馬あかね, 山岳アイスコアを用いた北部北太平洋域の古環境復元に関する研究, 学位論文, 北海道大学, 2015
- ⑥ Bonne J. L., Steen-Larsen H. C., Risi C., Werner M., Sodemann H., Lacour J-L., Fettweis X., Cesana G., Delmotte M., Cattani O., Vallelonga P., Kjær H. K., Clerbaux C., Sveinbjörnsdóttir A. E., and Masson-Delmotte V., The summer 2012 Greenland heat wave: In situ and remote sensing observations of water vapor isotopic composition during an atmospheric river event, *Geophys. Res. Atmos.*, 120, 2012, 2970-2989
- ⑦ Steen-Larsen H. C., Johnsen S. J., Masson-Delmotte V., Stenni B., Risi C., Sodemann H., Balslev-Clausen D., Blunier T., Dahl-Jensen D., Ellehøj M. D., Falourd S., Grindsted A., Gkinis V., Jouzel J., Popp T., Sheldon S., Simonsen S. B., Sjolte J., Steffensen J. P., Sperlich P., Sveinbjörnsdóttir A. E., Vinther B. M., and White J. W. C., Continuous monitoring of summer surface water vapor isotopic composition above the Greenland Ice Sheet, *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 2013, 4815-4828
- ⑧ Nancy S., GrumetCameron P., WakePaul A., MayewskiGregory A., ZielinskiSallie I., WhitlowRoy M., KoernerDavid A., FisherJames M. Woollett, Variability of Sea-Ice Extent in Baffin Bay over the Last Millennium, *Climatic Change*, Volume 49, 2001, 129-145

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① Niwano M., Aoki T., Hashimoto A., Matoba S., Yamaguchi S., Tanikawa T., Fujita K., Tsushima A., Iizuka Y., Shimada R., and Hori M., NHM-SMAP: spatially and temporally high-resolution nonhydrostatic atmospheric model coupled with detailed snow process model for Greenland Ice Sheet, *The Cryosphere*, 12, 2018, pp.635-655, doi:10.5194/tc-12-635-2018 (査読有り).
- ② 的場澄人, 山口悟, 對馬あかね, 青木輝夫, 杉山慎 2017 年 グリーンランド氷床北西部沿岸部における表面質量収支の変動, *低温科学* (75), 2017, doi:10.14943/lowtemsci.75.37 (査読無し)

[学会発表] (計 8 件)

- ① 對馬あかね, 東久美子, 藤田耕史, 永塚尚子, 的場澄人, 本山秀明, 青木輝夫. グリーンランド広域表面積雪および SIGMA-D アイスコア中の ^{17}O -excess と d-excess の変動, 雪氷研究大会 2018, 2018

- ② 東久美子, 塚川佳美, 近藤豊, ダルマイヤー・レミ, 平林幹啓, 尾形純, 北村亨太郎, 川村賢二, 本山秀明, 的場澄人, 門田萌, 青木輝夫, 茂木信宏, 大畑祥, 森樹大, 小池真, 小室悠紀, 對馬あかね, 永塚尚子, 藤田耕史, グリーンランド北西部のアイスコアを用いたブラックカーボンの高時間分解能解析, 雪氷研究大会 2018, 2018
- ③ 永塚尚子, 東久美子, 對馬あかね, 本山秀明, 的場澄人, 藤田耕史, 山崎哲秀, 大沼友貴彦 箕輪昌紘 青木輝夫 平林幹啓, グリーンランド氷床北西部 SIGMA-D アイスコア中の過去 100 年間の鉱物組成変動の解明, 雪氷研究大会 2018, 2018
- ④ 對馬あかね, 東久美子, 的場澄人, 永塚尚子, 青木輝夫, 藤田耕史 グリーンランド北西、SIGMA-D サイトで掘削されたアイスコア中の ^{17}O -excess の変動から見る北極域の水循環変動, JpGU Meeting 2018, 2018
- ⑤ Akane Tsushima, Vasileios Gkinis, Kumiko Goto-Azuma, Sumito Matoba and Hideaki Motoyama Understanding temporal variation of $\delta^{17}\text{O}$ and ^{17}O -excess in an alpine ice-core of central Alaska, IGS 2018, 2018
- ⑥ 對馬あかね, Gkinis Vasileios, 東久美子, 的場澄人, 永塚尚子, 本山秀明, 藤田耕史, 青木輝夫, SIGMA-D サイトで掘削されたアイスコア中の $\delta^{17}\text{O}$ および ^{17}O -excess の変動傾向, 雪氷研究大会 2017, 2017
- ⑦ 永塚尚子, 東久美子, 對馬あかね, 本山秀明, 的場澄人, 藤田耕史, 山崎哲秀, 大沼友貴彦, 箕輪昌紘, 青木輝夫, グリーンランド氷床北西部 SIGMA-D アイスコア中の鉱物組成変動, 雪氷研究大会 2017, 2017
- ⑧ 對馬あかね, Gkinis Vasileios, 東久美子, 的場澄人, 本山秀明 アイスコア中の ^{17}O -excess の変動傾向, JpGU-AGU Joint Meeting 2017, 2017

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 出願年：
 国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 取得年：
 国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等
 なし

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号 (8 桁)：

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。