

令和 4 年 6 月 19 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2021

課題番号：18K19851

研究課題名（和文）積雪の酸素同位体比から復元される気温推定の再考察

研究課題名（英文）A revised interpretation of the relationship between d18O in snow and surface temperature over Antarctica

研究代表者

栗田 直幸（Kurita, Naoyuki）

名古屋大学・宇宙地球環境研究所・准教授

研究者番号：60371738

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、氷床コアを用いた古気温復元に利用されている「降雪の酸素同位体比が地上気温と線形関係を示す」という経験則が成り立つ物理メカニズムの解明に取り組んだ。具体的には、南極観測を実施し、酸素同位体比の地理的分布、および時間分布を支配する共通因子の探索を行った。そして、南極にもたらされる降雪は沿岸域からの暖気移流に伴う降雪と放射冷却によるダイヤモンドダスト（細氷）に大別でき、卓越する降雪タイプおよびその寄与率の変化が酸素同位体比の時空間分布の支配要因であると結論づけた。本成果は、経験則が時間データと空間データ異なるという従来法の問題点を解消し、古気温復元手法の高度化につながると期待できる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

氷床コアの酸素同位体比は古気温の指標として利用されている。観測結果から得られた経験則に基づいて古気温推定が行われているが、現在の経験則が過去に適応できる条件は未解明なままである。本研究の成果である「経験則が成り立つ物理的背景の解明」は、経験則を利用できる条件を明確にし、従来よりも信頼性の高い古気温推定を可能にする。気象観測の開始が遅れた南極内陸域では、温暖化影響の実態把握を行うために、酸素同位体比を使った長期気温データセットの作成が求められている。本研究は、そのニーズの実現に欠かせない課題の一つである。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to elucidate the physical background of the empirical relationship between precipitation isotopic composition and local temperature over Antarctica. In this study, several inland Antarctic surveys were conducted to obtain the spatiotemporal isotopic variability. Then, the key factor controlling the observed isotopic variability was identified from their results. It is noteworthy that the contribution of clear sky deposition of diamond dust characterized by very depleted isotopic composition increases toward the inland and the spatial distributions are linked to the relative ratio of diamond dust to total accumulation. In addition, this feature is also consistent with the temporal isotopic variations observed at Dome Fuji. These findings highlight that the different types of precipitation may be a key driver for isotopic variability of Antarctic snow.

研究分野：地球科学

キーワード：酸素同位体比 南極 ダイヤモンドダスト

1. 研究開始当初の背景

南極氷床域では、降雪の酸素同位体比と気温が線形関係を示すという経験則を使って古気温の推定が行われている。しかしながら、酸素同位体比の地域分布から得られる経験則と酸素同位体比の時間変化から得られる経験則が一致せず、利用する経験則に応じて結果が異なるという問題がある。教科書等では、「沿岸域から移流してきた水蒸気塊が降雪をもたらす」という水循環に基づいて経験則の説明が試みられているが、地理的分布と時間変化で経験式の傾きが異なる原因については言及がない。このように、経験則の問題点は古くから知られているが、その原因探求についてはほとんど進んでおらず、また具体的な改善策も提案されていない。それゆえ、経験則に基づいて推定された古気温には大きな不確実性があると考えられている。

2. 研究の目的

本研究では、経験則に備わる問題点を浮き彫りにするため、経験則が成り立つ物理的メカニズムの探求に取り組んだ。南極氷床域では、氷床域に侵入する擾乱によってもたらされる降雪だけでなく、沿岸域からの水蒸気輸送を伴わないダイヤモンドダストにも涵養に寄与している。そして、降雪時の気温は、降雪タイプによって大きく異なっている。擾乱侵入時は暖気移流によって地上気温が上昇し、放射冷却によって気温が低下した際にダイヤモンドダストは発生する。そこで、南極地域における酸素同位体比は降雪タイプと密接に関係していると作業仮説を立て、その実証に取り組んだ。具体的には、沿岸域から移流してくる水蒸気は、暖気と共に高い酸素同位体比で特徴づけられ、移流をともなわないダイヤモンドダストは低い酸素同位体比で特徴づけられると仮説を立て、その実証に取り組んだ。

3. 研究の方法

本研究では、酸素同位体比および降雪タイプの地理的特徴と時間変化特徴を観測データから明らかにし、両者の対応を解析した。降雪タイプは、宇宙線生成核種である放射性水素（トリチウム）を利用して、擾乱性降雪とダイヤモンドダストの2種類に分類した。強い宇宙線が日々降り注ぐ南極大陸の上空には高濃度のトリチウムが存在し、沿岸域から内陸域へ輸送される水蒸気にはトリチウムがほとんど含まれない。それゆえ、ダイヤモンドダストは高濃度のトリチウム、擾乱性降雪は低濃度のトリチウムで特徴づけられる。

野外観測は、第59次(2017年度から2018年度)および第60次南極地域観測隊(2018年度から2019年度)に参加して実施して実施した。昭和基地近傍から内陸のドームふじ基地周辺域までのルート上で表層積雪試料を10km毎に採取し、地理的分布特徴の実態把握を行った。さらに、第59次南極地域観測ではドームふじ基地近傍にて積雪ピット試料(深さ4.3m)を採取し、本試料を使って1960年から2018年までの時間変化特徴の解析を行った。これ以外にも利用可能な積雪試料をすべて入手し、研究期間中に700試料以上の同位体分析を行った。

また、地理的分布特徴を定量的に解釈するためのモデル開発にも取り組み、宇宙線生成モデルと気象モデルを統合した宇宙線・気象統合モデルを開発した。そして、開発したモデルを使って、第59次および第60次観測隊で採取したトリチウム濃度の再現実験を行った。

さらに、南極内陸域における気温データセットの作成にも取り組んだ。これまでに南極地域観測にて実施されたすべての気温データを収集し、1979年から2021年までの長期気温データセットを作成した。そして、客観解析データ(ERA5)を活用して気温変動を引き起こす要因の探究に取り組んだ。

4. 研究成果

(1) 酸素同位体比の地理的分布特徴と降雪タイプの影響

図1は、南極大陸の広域で採取された積雪試料の酸素同位体比とトリチウムの関係を示している。酸素同位体比は、沿岸域から内陸域に向けて減少傾向を示すといった地理的分布特徴を反映している。一方、トリチウムは、降雪タイプの指標であり、酸素同位体比は降雪タイプと密接に結びついていることを示している。降雪中のトリチウム濃度は、同位体分別の影響が小さいた

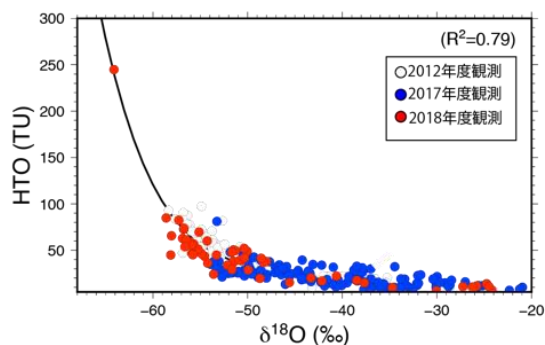


図1 南極内陸域で採取された表層積雪のトリチウムおよび酸素同位体比の関係。

め、水蒸気起源の情報を反映している。そして南大洋の海水はトリチウムを含まないため、洋上由来水蒸気は低いトリチウム濃度で特徴づけられる。高い酸素同位体比は沿岸域の降雪を示しており、この時にトリチウム濃度の下限値が観測されることは整合的である。

一方、内陸域に向かってトリチウム濃度が指数的に上昇することは、洋上由来水蒸気の寄与が相対的に小さくなり、南極上空にある高トリチウム濃度を含む水蒸気の寄与が高くなると解釈できる。ダイヤモンドダストは、南極氷床域の上空水蒸気が主要な起源であり、内陸域に向かってダイヤモンドダストの寄与が高まっていると解釈できる。この説明は、本研究で開発した宇宙線・気象統合モデルを使った再現実験の結果から裏付けられる。図2は、南極域における降雪中トリチウム分布の計算結果である。また、図3はトリチウム分布の観測結果とモデル結果の比較である。モデルは、観測結果を適切に再現できており、沿岸から移流してくる湿潤気塊の影響が弱まるにつれてトリチウム濃度が上昇していた。南極内陸域では、降雪量は小さいが高トリチウム濃度を持ったダイヤモンドダストが高頻度で降雪しており、その寄与の高まりが地理的分布特徴を作り出している。これらの結果より、南極氷床域における酸素同位体比分布は、降雪タイプの変化に大きく依存していると結論づけることができる。

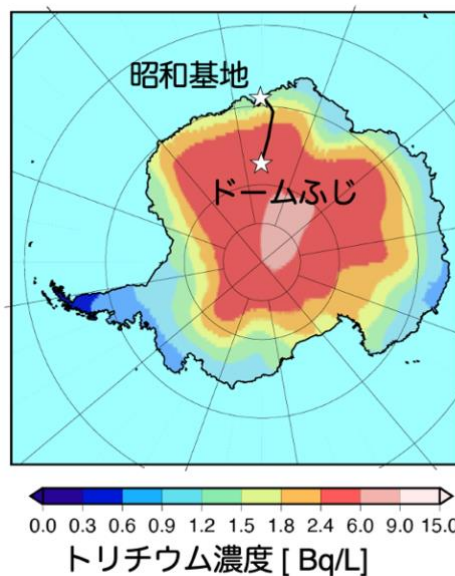


図2 宇宙線生成・気象統合モデルから推定した年平均積雪中トリチウム濃度分布。

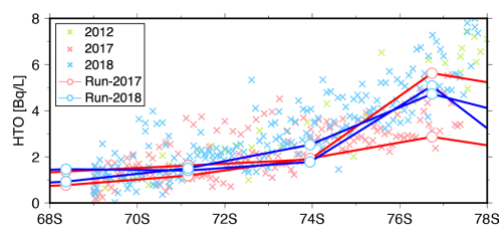


図3 沿岸域からドームふじ基地へのルート上で採取された表層積雪のトリチウム濃度と再現モデル実験結果の比較。

(2) 酸素同位体比の時間変化特徴と降雪タイプの影響

酸素同位体比の時系列変化と比較するための長期気温データセットを作成した。東南極の氷床内陸域では、自動気象観測器を使った気象観測が1993年から行われている。しかしながら、データの品質管理が未実施であり、酸素同位体比データを評価できる気温データが存在しない。そこで、これまでに取得された気象観測データの品質管理を行い、さらに客観解析データ活用して復元した気温データを加えて、過去40年間にわたる地上気温データセットを作成した(図4)。図5は、地域平均値の時系列変化を示している。図5より、研究対象地域の年平均気温は1999年以降に上昇傾向を示していることがわかり、マン・ケンドール検定にて有意な上昇トレンドで

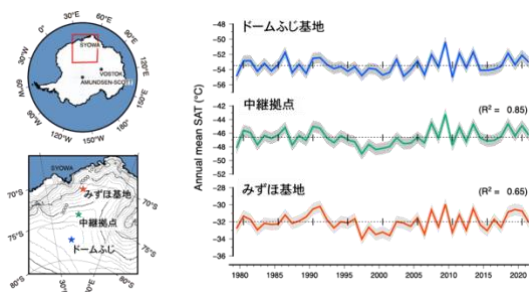


図4 研究対象である東南極地域(左上)と気温観測地点(左下)。右図は、本研究で作成した気温データセットから計算した年平均値の年々変化を示す。決定係数(R^2)は、ドームふじ基地データとの比較結果を示している。

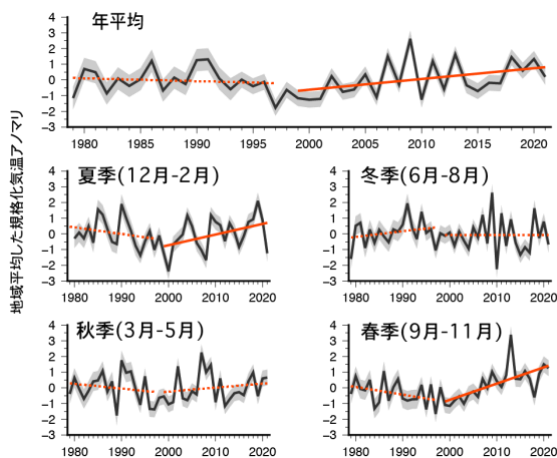


図5 規格化した気温偏差アノマリの地域平均値。波線および実線は1979年-1997年、1999年-2021年のトレンド解析結果。

あることが結論づけられた(有意水準 $p < 0.1$)。南極内陸域では有意な温暖化傾向は見られなかったと言われていたが、本研究はその通説を覆す成果である。また、この温暖化傾向は、南半球の春季から夏季に見られ、特に春季には $1.6^{\circ}\text{C}/10$ 年という非常に早い速度で温暖化していることが明らかとなった。興味深いことに、気温上昇が始まった時期は、南極半島の気温が温暖化傾向から寒冷化傾向に反転した時期と一致している。また、この温暖化は、南太平洋域における積雲対流活動の活発化に伴うロスビー波応答に対応しているという初期解析結果を得た。ロスビー波応答によってアムンゼン海に中心を持つ低気圧活動がウェッデル海周辺まで張り出すようになり、沿岸域から東南極内陸域へ暖気が入りやすくなったことが原因と考えている。

図6は、ドームふじ近傍で採取された積雪ピットコアから得られた酸素同位体比の時系列変化である。年代は暫定値であるが、気温データと同様に、21世紀に入ってから酸素同位体比が上昇傾向を示している。上記したように、21世紀における温暖化は沿岸域からの暖気移流の増加が寄与していると考えられており、この期間、相対的にダイヤモンドダストの寄与が低下したと考えれば酸素同位体比の上昇傾向を合理的に説明できる。今後、さらなる解析が必要であるが、時間変化においても降雪タイプの変化が大きく影響していると結論づけられる。

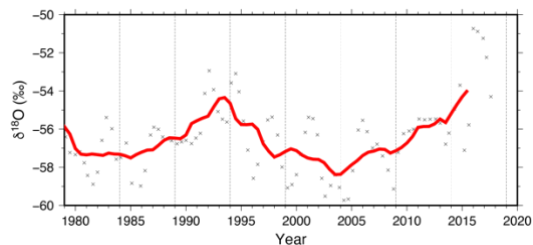


図6 ドームふじ基地近傍で採取された積雪ピットコアから得られた酸素同位体比の時系列変化。クロスは観測データを示し、赤線は4年移動平均値を示している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Morino, S., N.Kurita, N.Hirasawa, H.Motoyama, K.Sugiura, M.A.Lazzara, D.Mikolajczyk, L.Welhouse, L.Keller, and G. Weidner	4. 巻 38
2. 論文標題 Comparison of Ventilated and Unventilated Air Temperature Measurements in Inland Dronning Maud Land on the East Antarctic Plateau	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Atmospheric and Oceanic Technology	6. 最初と最後の頁 2061 ~ 2070
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1175/JTECH-D-21-0107.1	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

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 1件/うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Morino, S., N.Kurita*, N.Hirasawa, H.Motoyama, K.Sugiura, M.A.Lazzara, D.Mikolajczyk, L.Welhouse, L.Keller, and G.Weidner
2. 発表標題 Correction for relative heating errors in naturally ventilated air temperature measurements made from AWS on the Antarctic Plateau
3. 学会等名 Workshop on Antarctic Meteorology and Climate 2021（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Morino, S., N.Kurita*, N.Hirasawa, H.Motoyama, K.Sugiura, M.A.Lazzara, D.Mikolajczyk, L.Welhouse, L.Keller, and G.Weidner
2. 発表標題 Surface temperature changes at Dome Fuji region during the past four decades
3. 学会等名 The 12th symposium on Polar Science（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 栗田直幸*, S. Poluianov
2. 発表標題 宇宙線によるトリチウム生成について
3. 学会等名 第3回日本放射線安全管理学会・日本保健物理学会合同大会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 森野祥平, 栗田直幸, 亀田貴雄, 本山秀明, 平沢尚彦, Matthew A. Lazzara
2. 発表標題 東南極ドームふじ周辺における温暖化影響の実態把握
3. 学会等名 日本気象学会2022年度春季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Horiuchi, K., S. Kato, K. Ohtani, N. Kurita, S. Tsutaki, F. Nakazawa, H. Motoyama, K. Kawamura, H. Tazoe, N. Akata, K. Yamagata, and H. Matsuzaki
2. 発表標題 Spatial variation of ^{10}Be in surface snow along the inland traverse route of Japanese Antarctic Research Expedition
3. 学会等名 The 15th International Conference on Accelerator Mass spectrometry (AMS-15) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Naoyuki Kurita
2. 発表標題 Application of tritium tracer technique to the partitioning between clear-sky and synoptic precipitation over the Antarctic plateau,
3. 学会等名 The 11th Symposium on Polar Science (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Naoyuki Kurita
2. 発表標題 Recent spatial distributions of Tritium concentration in surface snow over East Antarctica
3. 学会等名 Polar Science 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019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	堀内 一穂 (Horiuchi Kazuho) (00344614)	弘前大学・理工学研究科・准教授 (11101)	
研究分担者	赤田 尚史 (Akata Naofumi) (10715478)	弘前大学・被ばく医療総合研究所・教授 (11101)	
研究分担者	保田 浩志 (Yasuda Hiroshi) (50250121)	広島大学・原爆放射線医科学研究所・教授 (15401)	

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
---------	---------