

グローバルイシューを考える
—氷底湖と急激な気候変動—

張佳晏(チョウカアン)

東京都立大学都市環境学部・地理環境学科(台湾)

私は自然地理学において、自然環境を成り立たせている仕組みと人間との関わりに関心を持っている。現在では、地球温暖化などの環境危機に直面している中、様々な地域で年平均気温の上昇(例えば、IPCC, 2021)が観測される上、大陸氷床の急速な縮小(例えば、Paolo et al., 2015; Hanna et al., 2013)や、山岳氷河が地域的な気候変動により融解しはじめる(例えば、Roe et al., 2016)などの研究結果が次々と発表され、それらに関連した取り組みが進められている。こうした陸上における調査や空中写真から容易に観測できる形の氷河に対し、氷底湖という、氷床の下部に存在する氷河地形もある。これは、大陸が氷床に覆われる際に、上部は低温で維持されるので固体のままで存在するが、基盤と接している部分では、地球中心部からの地熱や、氷床流動時に生じる摩擦熱などにより温度が相対的に高くなることもあり、そうすると氷は融けて氷底湖となる。氷底湖に関する研究は、二十世紀の終わりに南極大陸でボストーク湖の存在が確認されて以来、掘削調査が続々と行われてきた。南極氷床を中心に、数々の氷底湖が発見されるようになり、湖の水深や湖底地形の探査、生物の有無の調査(例えば、Siegert et al., 2001)も進められてきた。2006年では南極大陸において、氷底湖の水量が季節によって変動することで、氷床の表面高度が変化することが発見された(Fricker et al., 2006)。南極大陸にある氷底湖の数は2018年の時点で379個にのぼり、氷床の下部で複雑なシステムを成している。氷底湖は、水量の変動を通じ氷床面の氷流速度を変化させたりするので、平均海水面を大いに左右し、その連動で気候システムにも影響を及ぼすことになり、地球環境を作り出す一つの重要な因子であることが指摘されている(例えば、Chandler et al., 2021)。そのため、私は氷底湖の性質や仕組みを研究することは、現在様々な地域で頻繁に観測されるようになっている異常気象や、全球的な気候変動などの環境問題の解決策あるいは緩和措置を見出すことにつながるのではないかと考えている。

現在地球上に存在している大陸氷床は、南極大陸とグリーンランドにあり、全氷河・氷床体積の約 99%を占めている。このうち、グリーンランドのすぐ東側と南側、すなわち北大西洋の北部は、地球の気候変動を大きく左右する熱塩循環における表層水が沈み込む場所となっている。過去では、大陸氷床が急に融解したことで熱塩循環の効果を減少させ、急激な気候変動をもたらした、ヤングドリラスイベントという実例がある。最終氷期が終わり、比較的温暖的な気候のヤングドリラス期(約 1 万 2900～約 1 万 1600 年前)に移る頃に、北米大陸を覆っていたローレンタイド氷床が何らかの原因で急速に融け出し、大量の淡水が北大西洋の北部に注ぎ込まれた。この地域では、低緯度地域を経て流れてきた海水が冷やされ、塩分濃度が大きくなって深層に沈み込み、他の地域へと海水を輸送していく。この過程で海水は大気中に熱を放出し、常時的な熱の給源として地球規模の気候を支えている。しかし、ローレンタイド氷床が崩壊した際に、大量の淡水が海に流れ込み、低塩分化が発生したことで表層の海水の密度が軽くなり、沈み込む量が小さくなったため、大気中に放出する熱の量が減少した。その結果、地球全体の平均気温が急に下がり、氷河期に逆戻りして生態系の急変を引き起こし、マンモスをはじめとした動植物の絶滅の一因(例えば、Seersholm et al., 2020)であったと言われている。そのイベントについては、氷底湖が起因になっていたことや、そもそもローレンタイド氷床に氷底湖があったかどうかということは明らかにはなっていないが、大陸氷床が急激に融解したことでもたらさうる影響の深刻さを示唆している。地球温暖化による作用に加え、氷底湖も氷床の融解条件を牽引しているならば、グリーンランドにおける大陸氷床がローレンタイド氷床のような崩壊を起こすかもしれないし、熱塩循環の作用を軽減させ、大きな気候変動を引き起こす可能性も十分にあるだろう。

ところが、南極大陸と比べて、グリーンランドの氷底湖に関する研究はごく最近になってようやく発足したものであった(Palmer et al., 2013)。南極大陸では先ほど述べたように、二十世紀末より氷底湖の特定や氷床の掘削計画が着実に成されているのに対し、グリーンランドの氷底湖の最初の特定は、2013 年の音響探査でなされるものであった(Palmer et al., 2013)。この研究においては、グリーンランドの北西部に 2 つの氷底湖が特定されたとともに、そのうちの 1 つの上部の氷床表面に氷河湖があることもわかった。グリーンランド氷床は、南極大陸のように氷床表面が一年中氷点下にあるわけではないので、氷床表面が融解し川や湖を成すことが

見られる。このような融け水は、水圧破碎作用により氷河の隙間を通過して下方の氷底湖に滴り落ちることが考えられる。すなわち、グリーンランドの氷底湖は比較的開放的なシステムとなっている可能性が大きい。その証拠に、氷床表面の氷河湖の水量が時期によって変動することが観測結果から読み取ることができ、氷底湖に水を供給していることが指摘された。それゆえに、氷底湖は外界との相互作用が大きいと考えられる。さらに2019年には、グリーンランド全域におけるより包括的な音響探査やシミュレーションによる調査が行われた。その結果、計54個の氷底湖の候補が挙げられた(Bowling et al., 2019)。これらの候補のうち、季節的变化を示すものや、水文学的に活発なものがあることが発表された。氷床表面融解水の供給に頼っているものも示唆され、先ほどの2013の研究と相応している。その上、氷底湖が増水、排水することにしがたい、上部の氷床表面高度が変化することも観測された。したがって、グリーンランドの氷底湖は、南極大陸の氷底湖と比べて、外界からの影響を受けやすく、また外界に対しても影響を与えやすいことが指摘され、気候変動との関係は一層強まっていると考えられる。

近年では、過去の気候変動を解析することでこれからの気候変動をより正確に得ようとする動きが強まっている。例えば南極大陸では、西南極氷床より1桁大きい体積を持つ東南極氷床に注目し、南極氷床の質量収支のメカニズムを解き明かそうとする研究が進められている(菅沼ほか, 2020)。グリーンランドでも、氷床コア掘削によって得られた試料から過去の大気組成を復元させる GRIP や NorthGRIP などのプロジェクトがあったが、どの地域に関しても、氷底湖の仕組みや湖底堆積物から気候を解明する研究が滞っている。大陸氷床の底に存在する氷底湖はそもそも、直接的なアクセスが困難であり、多くの場合はボーリング調査と音響探査による間接的な観測結果しか入手できない。また、南極氷床の方では、氷底湖による影響が従来の考えより小さいことが見直されていることもあり、掘削研究を行うとすると莫大な予算になるため、実行することがなかなか難しい。しかし、グリーンランド氷床では、以上に述べたように、過去にヤンガードリアスイベントが起きていることに加え、氷底湖がより開放的なシステムを織り成していることが大いにあるので、急激な気候変動をもたらす一因となっている可能性は無視できない。それゆえに、これらのような氷底湖について全般的な掘削研究を行い、氷底湖のメカニズムの解明および気候との相互作用を明らかにすべきであると私は考えている。そう

することによって、過去の気候変動を把握するとともに、現在の状況をいかに改善・緩和するかを見極めることができ、人間社会の存続につながることもなるだろう。

参考文献

- David M. Chandlera, Jemma L. Wadham, Peter W. Nienow, Samuel H. Doyle, Andrew J. Tedstone, Jon Telling, Jonathan Hawkings, Jonathan D. Alcock, Benjamin Linhoff, Alun Hubbard (2021), Rapid development and persistence of efficient subglacial drainage under 900 m-thick ice in Greenland, *Earth and Planetary Science Letters*.
- Edward Hanna, Francisco J. Navarro, Frank Pattyn, Catia M. Domingues, Xavier Fettweis, Erik R. Ivins, Robert J. Nicholls, Catherine Ritz, Ben Smith, Slawek Tulaczyk, Pippa L. Whitehouse, H. Jay Zwally (2013), Ice-sheet mass balance and climate change, *Nature*, *498(7452)*, 51-59.
- Frederik V. Seersholm, Daniel J. Werndly, Alicia Grealy, Taryn Johnson, Erin M. Keenan Early, Ernest L. Lundelius Jr., Barbara Winsborough, Grayal Earle Farr, Rickard Toomey, Anders J. Hansen, Beth Shapiro, Michael R. Waters, Gregory McDonald, Anna Linderholm, Thomas W. Stafford Jr., Michael Bunce (2020), Rapid range shifts and megafaunal extinctions associated with late Pleistocene climate change, *Nature Communications*.
- Gerard H. Roe, Marcia B. Baker, Florian Herla (2016), Centennial glacier retreat as categorical evidence of regional climate change, *Nature Geoscience*, *10*, 95-99.
- Hoffman, M.J., Perego, M., Andrews, L.C., Price, S.F., Neumann, T.A., Johnson, J.V., Catania, G., Lüthi, M.P. (2018), Widespread moulin formation during supraglacial lake drainages in Greenland, *Geophysical Research Letters*, *45*, 778-788.
- IPCC (2021), *The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* edited by Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud,

- Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.), Cambridge University Press.
- J.S. Bowling, S.J. Livingstone, A.J. Sole, W. Chu (2019), Distribution and dynamics of Greenland subglacial lakes, *Nature Communications*.
- Matthew J. Hoffman, Mauro Perego, Lauren C. Andrews, Stephen F. Price, Thomas A. Neumann, Jesse V. Johnson, Ginny Catania, Martin P. Lüthi (2017), Widespread Moulin Formation During Supraglacial Lake Drainages in Greenland, *Geophysical Research Letters*, 45, 778-788.
- Sarah B. Das, Ian Joughin, Mark D. Behn, Ian M. Howat, Matt A. King, Dan Lizarralde, Maya P. Bhatia (2008), Fracture propagation to the base of the Greenland Ice Sheet during supraglacial lake drainage, *Science*.
- Steven J. Palmer, Julian A. Dowdeswell, Poul Christoffersen, Duncan A. Young, Donald D. Blankenship, Jamin S. Greenbaum, Toby Benham, Jonathan Bamber, Martin J. Siegert (2013), Greenland subglacial lakes detected by radar, *Geophysical Research Letters*, 40, 6154-6159.
- Martin J. Siegert, J. Cynan Ellis-Evans, Martyn Tranter, Christoph Mayer, Jean-Robert Petit, Andrey Salamatink, John C. Priscu (2001), Physical, chemical and biological processes in Lake Vostok and other Antarctic subglacial lakes, *Macmillan Magazines Ltd*, 603-609.
- 菅沼悠介・石輪健樹・川又基人・奥野淳一・香月興太・板木拓也・関 宰・金田平太郎・松井浩紀・羽田祐貴・藤井昌和・平野大輔 (2020), 東南極における海域－陸域シームレス堆積物掘削研究の展望, *地学雑誌*, 129(5), 591-610.
- Paolo, F.S., Fricker, H.A., Padman, L. (2015), Volume loss from Antarctic ice shelves is accelerating, *Science*, 348, 327-331.

P. W. Nienow, A. J. Sole, D. A. Slater, T. R. Cowton (2017), Recent advances in our understanding of the role of meltwater in the Greenland Ice Sheet system, *Current Climate Change Reports*, 3, 330-344.

<https://earthobservatory.nasa.gov/images/7624/subglacial-lakes-antarctica>

<http://www.antarcticglaciers.org/glacier-processes/glacial-lakes/subglacial-lakes/>