

スバルバルフィヨルドの海洋環境に氷河由来の淡水流出が与える影響

Impact of glacier-derived freshwater discharge on the marine environment of Svalbard fjord

所属機関：スバルバル大学 代表研究者氏名：大橋 良彦

研究期間：2022年11月1日～2023年5月31日

滞在研究機関： Department of Arctic Geophysics, The University Centre in Svalbard
P.O. Box 156, N-9171, Longyearbyen, Norway

共同研究者等： Assoc. Prof. Ragnheid Skogseth, Prof. Frank Nilsen, Prof. Eva Falck

Glacial meltwater discharge into the Arctic fjords has increased in recent years, impacting water circulation and biological productivity. To understand the impact of glacial-derived freshwater (subglacial discharge and submarine meltwater) discharge on the marine environment, we analyzed hydrographic data in Tempelfjorden, Svalbard, measured by The University Centre in Svalbard in the summers of 2014–2017. The numerical experiments were performed with a non-hydrostatic ocean model. The observed subglacial discharge fraction at the subsurface (5–10 m depth) was higher in 2016 and 2017 (> 2%) than in 2014 and 2015, likely due to greater subglacial discharge amount. The numerical experiments showed that the great amount of subglacial discharge increased the subglacial discharge concentration at the subsurface in the fjord. In addition, stronger surface stratification in 2016 and 2017 prohibits the upwelling of subglacial discharge to the fjord surface. The observed submarine meltwater fraction at the subsurface in 2017 was the highest (~1%) during 2014–2017, also confirmed by the numerical experiments. The highest submarine fraction in 2017 can be attributed to the warm fjord in the subsurface in 2017. The subglacial discharge amount and the fjord water structure would be important factors controlling the vertical distribution of glacial meltwater.

研究目的

近年、北極域で海洋に流れ出す氷河の質量減少に伴って、周縁海洋への淡水流出量が増加している¹。氷河融解に伴って生じる淡水として、次に示す2種類が挙げられる。I. 氷河の表面融解によって生じ、氷河底面から流出する融解水（氷河流出水）、II. 海洋の熱によって引き起こされた氷河末端での水中融解で生じる融解水（水中融解水）である²。これらの氷河由来の淡水流出によってフィヨルド内部では、海水・懸濁物質・栄養塩が鉛直・水平的に輸送される（e.g., refs. 3–5）。以上のことから、氷河由来の淡水流出は海水の循環や海洋生態系に大きな影響を与える。また、前述したように、氷河由来の淡水流出はフィヨルド内で起こる様々な事象に影響していることから、氷河由来の淡水分布の把握を起点とした物理・化学・生物の分野横断研究（海水循環・物質

循環・生物生産などの理解）への応用・発展も期待できる。従って、淡水流出は、氷河の質量減少に伴う海洋環境変動を理解する上で非常に重要な過程であり、その過程の把握の重要性が近年より一層高まっている。しかしながら、氷山や海氷の存在による観測の困難さからデータが不足しており、北極域のフィヨルドにおける氷河由来の淡水分布やその分布の変動要因は詳細には明らかになっていない。滞在先であるスバルバル大学では、氷河融解の影響が現れる北極域スバルバルフィヨルドにおいて、海洋観測を実施しており（e.g., ref. 6）、そのデータは氷河由来の淡水流出の把握においても有用である。

そこで本研究では、スバルバルフィヨルドの海洋環境に氷河由来の淡水流出が与える影響を定量的に評価することを目的とする。滞在先の貴重な海洋観測データを使用することで、氷河由来の淡水（氷

河流水・水中融解水)の分布とその変動の実態を詳細に明らかにする。

研究経過

スパーバル諸島のテンペルフィヨルドを研究対象として、2014–2017年の夏季に取得された海洋観測データを解析した。フィヨルド下層(30 m以深)では、2014年において高温・高塩分な大西洋水が見られた。その他の年では、2014年に比べて低温・低塩分であり、大西洋水が見られなかった。次に、フィヨルド上層(20 m以浅)を対象として海水に占める氷河流出水・水中融解水の割合を定量化した。2016・2017年における亜表層(水深~5–10 m)の氷河流出水の割合は2014・2015年と比べて高かった(>2%)。亜表層の水中融解水の割合は2017年において解析期間の中で最も高い値を示した(~1%)。

解析した観測データを基に、氷河流出水・水中融解水の挙動に関する数値モデル実験も実施した。非静力学海洋モデル⁷を使用し実験を行った。モデル領域は南北11 km、東西6 km、鉛直100 mとし(Fig. 1a)、格子幅は水平20 m、鉛直2 mに設定した。海底地形はテンペルフィヨルドの音響測深データを使用した(Figs. 1a and b)⁸。氷河流出水は領域北端にある流出口(幅40 m×高さ4 m;面積160 m²)からモデル領域内に流出させ、トレーサーを導入しその挙動を追跡した。氷河の水中融解過程は Refs. 9 およ

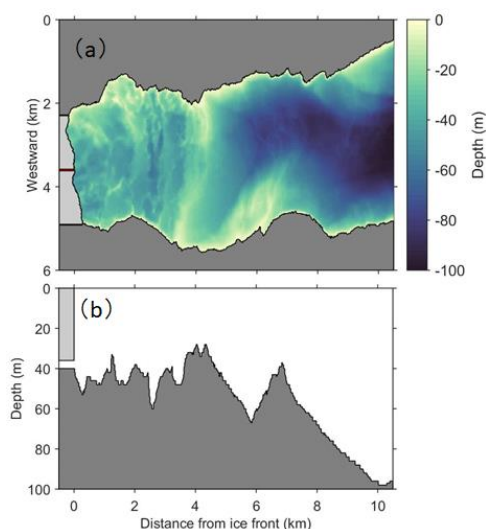


Fig. 1. (a) Bottom topography in the model domain. Red region shows the location of subglacial conduit. (b) Fjord depth along the subglacial conduit from north to south. Dark and light gray shows land mask and glacier mask, respectively.

び10に基づきモデルに組み込まれており、水中融解水トレーサーとしてその挙動を追跡した。まず、2017年の観測を初期成層、氷河流出水量を50 m³ s⁻¹とした実験(CTRL)を実施した(Table 1)。この実験からフィヨルドの初期成層を変化させた3ケースと氷河流出水量を変化させた3ケースの実験を行った(Table 1)。各実験の積分期間は20日とした。

Table 1. List of model runs. Run name, initial stratifications, and values of inflow velocity and flux of subglacial discharge.

Run name	Initial stratification	Inflow velocity (m s ⁻¹)	Flux of subglacial discharge (m ³ s ⁻¹)
CTRL	Observed in 2017	0.3125	50
ST16	Observed in 2016	0.3125	50
ST15	Observed in 2015	0.3125	50
ST14	Observed in 2014	0.3125	50
Q20	Observed in 2017	0.125	20
Q30	Observed in 2017	0.1875	30
Q40	Observed in 2017	0.25	40

実施した全てのケースにおいて、氷河流出水トレーサーは、氷河末端に沿ってフィヨルド表層付近まで湧昇し、その後沖向きに広がった。また、このような氷河流出水の沖向きの広がりによって、その流れを補償する氷河末端向きの流れが水深20 m以深に生じた。この補償流の流向はテンペルフィヨルドの海底付近の係留観測から得られたもの⁶と整合的であった。

氷河流出水トレーサー濃度の鉛直分布は初期成層によって異なっていた(Fig. 2a)。初期成層が2014・2015年の2ケース(ST14とST15)では、フィヨルド表層(水深~0–6 m)においてその下層と比べて氷河流出水トレーサーが高濃度であった。一方で、初期成層が2016・2017年の2ケース(ST16とCTRL)では、フィヨルド表層から亜表層にかけて氷河流出水トレーサー濃度が増加しており、亜表層で最も高濃度となっていた(>4%)。また、氷河流出水量を変化させた実験においては、氷河流出水トレーサー濃度は亜表層で最も高濃度という同様の傾向を示した(Fig. 2b)。しかしながら、氷河流出水量が大きいほど亜表層の濃度は高い値を示した。

水中融解水トレーサー濃度は、氷河流出水トレーサー濃度と比べて顕著に低い値を示した(最大~0.1%; Fig. 3)。その鉛直分布に着目すると、ST14ではフィヨルド表面(水深~0–2 m)で、その他の初期成層を変化させた実験では、亜表層で最も高濃度で

あった (Fig. 3a)。ST14 のフィヨルド表面と CTRL の亜表層は濃度が同程度に高かった ($\sim 0.08\%$)。氷河流出水量を変化させた実験においては、水中融解水トレーサー濃度は氷河流出水量が小さいほど高い値を示し (Fig. 3b)、亜表層より下層 (水深 ~ 20 m) においても高い値が見られた ($\sim 0.1\%$)。

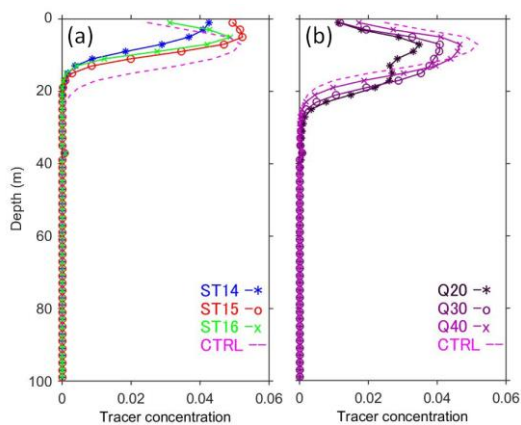


Fig. 2. The averaged vertical profile of concentration of simulated subglacial discharge tracer for the entire region in numerical experiments with (a) the different initial stratifications and (b) the different discharge amount after integration for 20 days.

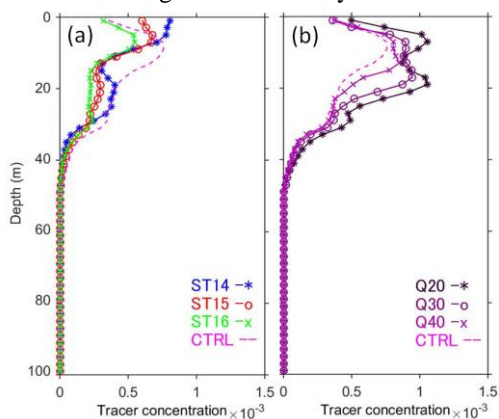


Fig. 3. Same as Fig. 2 but for submarine meltwater tracer.

考察

観測データ解析で得られた海水に占める氷河流出水・水中融解水の割合の年ごとの違いが生じる要因を考察する。2016・2017年の亜表層における高い氷河流出水の割合は、氷河流出水量が大きいことに起因している可能性がある。数値モデル実験においても氷河流出水量が大きいほど亜表層の氷河流出水トレーサーは高濃度であった (Fig. 2b)。氷河流出水量

に加えて、フィヨルドの成層構造も影響している可能性がある。数値実験においても、ST16とCTRLの氷河流出水トレーサーはフィヨルド表面と比較して亜表層において高濃度であった (Fig. 2a)。2016・2017年のフィヨルド表面の強い成層が氷河流出水の湧昇を妨げたと考えられる。2017年の亜表層における顕著な水中融解水の広がり、初期成層を変化させた実験においても得られた (Fig. 3a)。これは2017年の亜表層で見られた高水温層に起因している可能性がある。本研究では、氷河流出水量およびフィヨルドの成層構造が氷河融解によって生じる淡水分布を決定づける重要な要因であることを示唆している。

参考文献

1. The Intergovernmental Panel on Climate Change Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate (IPCC SROCC), eds. Pörtner et al., 2019.
2. Straneo et al., *Nature Geoscience*, 4, 322–327, 2011.
3. Kanna et al., *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*, 123, 1666–1682, 2018.
4. Meire et al., *Global Change Biology*, 23, 5344–5357, 2017.
5. Straneo et al., *Frontiers in Marine Science*, 6: 138, 2019.
6. Skogseth et al., *Progress in Oceanography*, 187, 102394, 2020.
7. Matsumura and Hasumi, *Ocean Modelling*, 24, 15–28, 2008.
8. Flink et al., *Quaternary Science Reviews*, 108, 37–50, 2015.
9. Holland and Jenkins, *Journal of Physical Oceanography*, 29, 1787–1800, 1999.
10. Losch, *Journal of Geophysical Research*, 113, C08043, 2008.

研究の発表

ポスター発表

1. Year-to-year variation of summer glacial meltwater distribution in Tempelfjorden, Svalbard, Ohashi, Y., R. Skogseth, F. Nilsen, and Y. Matsumura, *Svalbard Science Conference 2023*, 31 October–1 November 2023, Oslo, Norway (要旨投稿済、発表予定)