HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	氷河と海氷の融解現象が北極海表層の物質循環過程に与える影響
Author(s)	野村, 大樹; 漢那, 直也; 大木, 淳之
Citation	地球化学, 53(4), 149-158 https://doi.org/10.14934/chikyukagaku.53.149
Issue Date	2019-12-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/79064
Type	journal article
File Information	Nomura et al 2019.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

氷河と海氷の融解現象が北極海表層の物質循環過程に与える影響

野村大樹 [1, 2, 3 *], ・漢那直也 [2] ・大木淳之 [1, 2]

1, 北海道大学大学院水産科学研究院　〒041-8611　函館市港町 3-1-1

2, 北海道大学北極域研究センター　〒001-0021 札幌市北区北 21 条西 11 丁目

3, 北海道大学国際連携研究教育局（GI-CoRE）〒060-0808 札幌市北区北 8 条西 5 丁目

Effects of glacier and sea ice melting on the biogeochemical cycles of the surface water in the Arctic Ocean

Daiki Nomura[1, 2, 3 *], Naoya Kanna[2] and Atsushi Ooki[1, 2]

1. Faculty of Fisheries Sciences, Hokkaido University, 3-1-1, Minato-cho, Hakodate, Hokkaido 041-8611, Japan

2. Arctic Research Center, Hokkaido University, Kita-21, Nishi-11, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido 001-0021, Japan

3. Global Institution for Collaborative Research and Education, Hokkaido University, Kita-8, Nishi-5, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido 060-0808, Japan

[*]Corresponding-author: daiki.nomura@fish.hokudai.ac.jp, 0138-40-8849

In the Arctic region, the glacier and the sea ice are melting rapidly. This melting process leads to the drastic changes of the surface ocean environments by supplying fresh water and biogeochemical components. For example, the glacier melting provides minerals and nutrients from the land to the ocean, and these processes were depending on the type of the glacier between land- and marine-

terminating glaciers. In addition, sea ice melting dilutes the chemical components (e.g., CO_2) in the surface water, leading the decrease of the CO_2 concentration with respect to the atmosphere, and increases the absorption of the atmospheric CO_2. In this review, we assess the effects of glacier and sea ice melting on the biogeochemical cycles of the surface water (e.g., nutrients, iron, CO_2, and CH_4) in the Arctic Ocean based on the previous and our studies. We also discuss future biogeochemical cycles in the Arctic Ocean.

北極域では，氷河や海氷などの雪氷の融解が急速に進行している。この融解現象は，淡水や雪氷中に存在する物質を海洋表層に供給するなど，北極域の環境に劇的な変化を招いている。例えば，氷床融解は、陸の鉱物や栄養塩および鉄などを海洋に供給する。この供給過程は，氷河の形態に依存する。さらに，海氷の融解は，海洋表層の化学成分（例えば二酸化炭素）を希釈する。そのため，海洋表層では，二酸化炭素濃度の減少を招き，大気からの二酸化炭素吸収が増加する。本総説では，雪氷の融解現象が北極海表層の物質循環過程に与える影響について，栄養塩，鉄，二酸化炭素，メタンに注目し，これまでの研究や我々の研究グループによる氷上や船舶での現場観測で得た結果を含め紹介するとともに，今後注目すべき北極海表層での物質循環過程について議論する。

Key words: Glacier, Sea ice, Fresh water, Melting, Greenland, Arctic Ocean

1. はじめに

北極域では，氷床，海氷，積雪などの雪氷の融解が急速に進行している。この融解現象は，雪氷が固体から液体に相変化することを通じて，体積変化，温度上昇，淡水・含有物の輸送など，北極域の環境に劇的な変化を招いている。グリーンランドおよび北極域の大陸氷床・氷河は年々後退している（AMAP, 2017）。また，北極海の夏季の海氷面積は年々減少するとともに，多年氷から一年氷へのシフトが起きている（Stroeve *et al.,* 2012）。これら雪氷の融解現象は，海面上昇，大気海洋循環，生物生産等，地球規模の環境変動をもたらし，自然災害や水産業など我々の生活にも直接影響する可能性がある。

本総説では，1). 多量の陸氷が失われつつあるグリーンランドを対象とし，氷床・氷河からの淡水流入により駆動されるグリーンランド沿岸の栄養塩および鉄の循環について概説する。また，2). 面積が激減するとともに，多年氷から一年氷へのシフトが報告されている北極海の海氷を対象とし，海氷融解によって海洋表層に供給される淡水が海洋表層の栄養塩，鉄，二酸化炭素（CO_2）の循環に与える影響について概説する。また，近年，海氷中および海氷直下において高濃度で存在することが報告されているメタンについて，海氷融解に伴う大気への放出，海洋表層への影響についても紹介する。メタンは CO_2 に次ぐ温室効果気体であり海洋または海氷から大気への放出量を把握することは重要な課題である。さらに本総説で取り扱う氷床・氷河と海氷は，それぞれ雪と海水と起源が異なること，海洋への流出経路や過程が異なることより章を分けて概説する。

2. 氷河融解と海洋表層の物質循環過程

北極域の氷河は，グリーンランド，カナダ北部，アラスカ，北極海群島，スバールバル諸島に広く分布する。これらの氷河は，2000 年代以降，顕著に氷を失っている（Gardner *et al.,* 2013）。北極全域でみると，陸氷の消失の 64%はグリーンランドで起こっている（AMAP, 2017）。陸氷の融解により，膨大な量の淡水が，海洋に流入している。本章では，多量の陸氷が失われつつあるグリーンランドを対象とし，氷床・氷河からの淡水流入により駆動されるグリーンランド沿岸の物質循環（特に栄養塩および鉄）について概説する。

北極域の気温上昇に伴い，氷河の融解がグリーンランド沿岸の基礎生産に与える影響が注目されている。グリーンランド南部の沿岸では，氷河の融解量が最大となる夏季に基礎生産が増加することが，衛星や現場観測から確認されている（Juul-Pedersen *et al.,* 2015; Arrigo *et al.,* 2017）。このことは，混合層深度の浅化や光量の増加（Juul-Pedersen *et al.,* 2015; Oliver *et al.*, 2018）に加え，植物プランクトンの増殖に必要な栄養塩や鉄（ここでは特に鉄）が，夏季に氷河融解とともに海洋表層へ供給されることが原因と考えられている（Arrigo *et al.,* 2017）。

夏季の融解によって氷河表面にできた融解水は，クレバス（氷河に形成された深い割れ目のこと）に流れ込み，氷河底面の岩盤に達する。その後，融解水は 2 つの経路（以下、a および b）により海洋へ流入する（Chu, 2014）。(a）氷河末端が陸上にある場合（Land-terminating glacier），融解水は陸上を河川のように流れて海洋表層に流入する（Fig. 1a）。融解水は氷河砕屑物を多く含むため，溶存シリカや鉄を多く含む泥のプルームとなって海洋表層に広がる様子が衛星で捉えられる（Chu *et al.,* 2012; Ohashi *et al.,* 2016; Overeem *et al.,* 2017）。(b）氷河末端が海中にある場合（Marine-terminating glacier またはカービング氷河。本文では以下、カービング氷河と示す），融解水は海面より深い氷河底面から海洋の数十~数百メートルに流入する（Fig. 1b）。(b）の経路で海洋に流入した融解水は，周囲の海水に対して塩分（密度）が低く浮力を得て，氷河底面や海底面の泥を巻き込みながら，周囲の海水と混合して海面へ浮上する（Motyaka *et al.,* 2003; Bendtsen *et al.,* 2015; Mankoff *et al.,* 2016; Kanna *et al.,* 2018）。この淡水と海水の混合水は，泥のプルームとなって亜表層（表層混合層の直下）に広がることが濁度計による現場観測により確認されている。そのような泥のプルームはグリーンランドのフィヨルドに多く存在すると考えられるが，亜表層のためその広域的な分布を衛星観測により捉えることは難しい（Hopwood *et al.,* 2015）。

このように，氷河のタイプによって融解水の海洋への流入経路が異なるので（Fig. 1），融解水が海洋の栄養塩や鉄などに与える影響も氷河のタイプにより異なる。(a）に関連した栄養塩や鉄などの供給過程については，陸上からアクセスし、サンプルを採取するなどの現地観測が比較的容易なこともあり，研究例が多い。例えば，グリーンランド沿岸の(a）の経路で流入する氷河性河川（Glacial River）（Fig. 2）の栄養塩および鉄の濃度を Table 1 に示す。氷河砕屑物由来の溶存シリカや鉄濃度が高い水が氷河性河川から海洋表層へ供給される。一方，硝酸塩は，陸上に窒素源となる有機物などが限られるため，氷河性河川にはほとんど含まれていない（Table 1）。グリーンランド沿岸の海洋表層では，春季から夏季にかけて植物プランクトン増殖によって硝酸塩が使われるため、夏季に硝酸塩が不足する傾向にある（Juul-Pedersen *et al*., 2015; Hopwood *et al*., 2018）。そのため，氷河性河川から海洋表層に供給される融解水は，海洋表層の硝酸塩濃度をよりいっそう薄めてしまう。また，氷河性河川による鉄供給とグリーンランド沿岸の基礎生産との関連を議論するためには、淡水と海水が混合する汽水域でサンプルを採取するなどの現地観測が必要で

ある。

前述のように，氷河性河川から海洋への栄養塩や鉄の供給に関する情報は，主に陸上での観測に基づくものである（Fig. 2，Table 1）が，（b）の経路による供給過程を明らかにした研究例は未だ少ない。カービング氷河末端には，氷山や海氷が多く存在するため，氷河末端の海に船舶で近づくのは危険が伴う。そのためこれまで現場観測が敬遠されてきたのである。最近，グリーンランド北西部，南東部・南西部のカービング氷河周辺で小型船舶を利用した海洋観測機器による海洋環境測定やニスキン採水器による海洋観測が実施されるようになり，カービング氷河末端から湧昇する融解水（b）に関連した栄養塩の供給過程について定量的な理解が得られるようになった（Meire *et al.,* 2016, 2017; Kanna *et al.,* 2018; Hopwood *et al.,* 2018; Cape *et al.,* 2018）。カービング氷河末端では，海洋の亜表層・中層数十~数百メートルで融解水と海水が混合する。すると，栄養塩に富んだ亜表層・中層の海水が低塩分化し，浮力を得て，氷河前面に湧昇する（Meire *et al.,* 2017）。すなわち，氷河底面からの排水が呼び水となり，ポンプのように栄養塩が亜表層・中層から海面へ汲み上げられるのである（Fig. 1b）。

Kanna *et al.*（2018）は，グリーンランド北西部のカービング氷河（ボードイン氷河）および氷河が流入する入り海（フィヨルド）で小型船舶を利用した海洋観測機器による環境測定や採水などの観測を実施し，（b）の経路で流入する融解水が，フィヨルドの深さ 200 m から栄養塩を汲み上げるポンプとして機能することを明らかにした。氷河近傍から舌状に張り出した高濁度のプルームが，フィヨルドの 10－50 m 深で確認された（Fig. 3a）。また，この高濁度水の栄養塩濃度は，海面の栄養塩濃度に対して数倍（とくに硝酸塩では約百倍）高かった。このプルームは，過去の観測事例（Meire *et al.,* 2016, 2017; Hopwood *et al.,* 2018; Cape *et al.,* 2018）も含め考慮すると，氷河底面（ボードイン氷河は水深 200 m に接地）から排水された高濁度の融解水と，栄養塩に富んだ 200 m 深の海水との混合・湧昇によって形成されたものであると考えられる。プルームによって水平的に運ばれた栄養塩は，高濁度層の直上で植物プランクトンに利用される（Fig. 3b）。このように，（b）の経路で流入する融解水は夏季の基礎生産を生み出す起点になる。最新の知見によると，淡水と海水がどの深さで混ざるか，すなわち，カービング氷河がどの深さで接地しているかは，夏季の基礎生産量変化の状況と深く関わっていると考えられている（Hopwood *et al.,*

2018)。このことは、湧昇に伴う栄養塩（とくに主要な窒素源である硝酸塩）の鉛直的な供給量が，氷河末端の氷の厚さにより制御されることを意味する。

このポンプシステムを駆動するカービング氷河は，グリーンランドに存在するすべての氷河の約 35%を占める（Gardner *et al.,* 2013)。カービング氷河が流入するフィヨルドは，海棲哺乳類（アザラシなど）や海鳥にとって最適な餌場となっている。なかでもフィヨルドの開放水面と氷河の境界付近は，これら高次捕食者が密集する生物的ホットスポットとして知られる（Lydersen *et al.,* 2014; Urbanski *et al.,* 2017; Everett *et al.,* 2018)。夏季に増大する氷河の融解水量と，氷河前の湧昇により生み出される基礎生産が，豊かなフィヨルド生態系を支える一因であろう。さらに，高次捕食者の餌生物（動物プランクトン）が，湧昇により海洋表面に運び上げられるという報告もある（Naito *et al.*, 2019)。このように，カービング氷河がフィヨルドの生態系に果たす役割の重要性が認識され始めている。その一方で，現在，カービング氷河が流入するフィヨルドは，地球規模の気候の変化に鋭敏に応答し，将来的に大きな影響を受ける可能性のある場所である。氷河の急速な後退により，カービング氷河が後退し，ポンプシステムが機能しなくなるかも知れない（Meire *et al.,* 2017; Hopwood *et al.,* 2018)。このように，カービング氷河は、栄養塩や鉄の循環や生態系に深く関わる可能性があることから，近年の温暖化による氷河後退の様子やその影響を，注意深く監視し続けていくことが求められる。

3. 海氷融解と海洋表層の物質循環過程

近年，北極海では海氷面積が激減するとともに，多年氷から一年氷へのシフトが報告されている（Stroeve *et al.,* 2012)。高緯度海域に分布する海氷は，海洋の約 1 割の面積を占めており（Comiso, 2010)，大気－海洋間の断熱材として働くこと（Maykut, 1978)，海氷表面で太陽光を反射する効果（アルベド）が大きいこと（Shine and Henderson-Sellers, 1985)，アイスアルジが繁茂し，動物プランクトンや魚類に続く海氷生態系を作り出していること（Thomas *et al.,* 2010）などから地球の気候や生態系維持に関係していることが考えられている。そのため，海氷減少とともに海氷が果たしてきた役割が変化し，場合によってはその役割が無くなることも考えられる。本章では，まず，海氷生成時の海氷内の塩

分，栄養塩，二酸化炭素（CO_2）などの炭酸系，鉄などの挙動について示す。そして，海氷融解によって海洋表層に供給される淡水が，海洋表層の栄養塩，炭酸系，鉄，メタンや基礎生産に与える影響について概説する。

海水が凍結する時には，はじめ水分子だけで結晶化するため，海水に含まれる塩（例えば塩化ナトリウム）など含有物の一部は海氷の中にブライン（高塩分水）として取り残される（Wakatsuchi and Ono, 1983）。海氷中ブラインの多くは時間の経過とともに海氷の下方へ移動して海水へ排出される。そのため、海氷形成から時間を経るごとに海氷中の含有成分の分布が変わる。海氷が形成されてから半年ほど経た融解時期になると、海氷中のブラインの総量は減少する。母海水（海氷になる元々の海水）の塩分が34 psu（Practical Salinity Unitの略）ほどだったのが，一年氷の塩分（採取した海氷サンプルを融かし塩分を測定した時）では、10 psu程度となる（Nomura *et al.,* 2018）。多年氷については，時間の経過とともにブラインが抜け切ってしまうこと，海氷の上に降り積もった雪も時には融解し再凍結などして氷になることから，海氷の塩分は0 psu近くになる（Nomura *et al.,* 2018）。よって，海氷が融解するときには，塩分が低い水が海洋表層に供給される。海水に含まれる栄養塩や溶存無機炭素なども，結氷してから海氷下の海水にブラインとして排出されるので，多年氷の融解水中の栄養塩や溶存無機炭素の濃度は海水に対して著しく低くなる。そのため，北極海で融解する海氷の種類（多年氷と一年氷）により，融解時の淡水供給や含有成分の供給の効果が異なってくる。

一方，海氷内の栄養塩や溶存無機炭素は，塩分とは異なる挙動を示すことがある。これは，海氷中に生息するアイスアルジによる栄養塩や溶存無機炭素の利用や，アイスアルジの死滅後の分解，北半球での工場や車などの排気ガスなどで汚染された雪の影響，大気との二酸化炭素交換過程の影響などが原因と考えられている。例えば，北極海沿岸では，海氷上積雪や海氷上部にて高濃度の硝酸塩が観測されている（Krell *et al.,* 2003）。これは，人為起源の硝酸塩が大気を経由して北極海に運ばれ，降雪とともに海氷表面に沈着し，雪ごおり（海氷上の積雪に海水がしみ込んで氷化したもの）として海氷内部に取り込まれた結果である。一方，南極海では，汚染源から離れており雪が汚染されていないため，積雪・海氷上部で高濃度の硝酸塩は観測されていない（Nomura *et al.,* 2011）。

また，海氷中の鉄濃度は，海水に比べて非常に高くなることが観測されている（Aguilar-Islas *et al.,* 2008; Tovar-Sánchez *et al.,* 2010; Kanna *et al.,* 2014）。陸棚上の堆積物や大気エアロゾルなど鉱物に由来する鉄，また，藻類やデトリタスなど有機物に由来する鉄が，結氷期に海氷内へ取り込まれる，あるいは海氷に付着する（Lannuzel *et al.,* 2010）。海氷融解水による鉄分供給は，植物プランクトンの成長に重要なものとなる。例えば，南極海は，栄養塩は豊富にあるが，それに見合ったクロロフィル量が見られないHNLC（High Nutrients Low Chlorophyll）海域である（de Baar, 1994）。このような海域で海氷融解水による鉄分供給が起こると，植物プランクトンの増殖を増進させるかもしれない（Lannuzel *et al.,* 2010）。一方，太平洋側北極海表層（チャクチ海）では，窒素態栄養塩が不足して生物生産が抑制されることが知られている（Nishino *et al.,* 2016）。そのような表層水が北極海の海盆域へ運ばれたのち，海氷融解によって鉄や雪起源の硝酸塩が海洋表層に供給された時に海洋生態系がどのような応答を示すのか興味深い点である。

上述の通り例外は存在するものの，一般的に海氷の融解は，海洋表層に多くの淡水を供給するため海洋表層に存在する物質の濃度を薄めてしまう。よって，海洋表層の CO_2 濃度にも大きく関わる。淡水の影響による希釈効果によって，CO_2 濃度は減少する。その結果，海洋表層の CO_2 は大気に対してより未飽和となるため，大気から海洋表層への CO_2 輸送が増す（Fig. 4）。つまり大気から海洋への CO_2 吸収能が増すため,この希釈効果は決して無視することは出来ない。北極海では年々海を覆う海氷が少なくなっており，大気と接する海水面の割合が増えている。つまり，これまで海氷が大気と海洋の境界に存在し大気—海洋間の気体交換過程が制限されていた状況が，海氷の激減とともに解消されつつある。よって，今後の北極海の大気—海洋間の気体交換過程は劇的に変化すると予想されている（Parmentier *et al.,* 2013）。CO_2 に関しては，海氷の減少とともに大気と接する水面の割合が増えるため大気から CO_2 の吸収が増加すると考えられている（Bates and Mathis, 2009）。融解水の供給によって海洋表層の CO_2 濃度が大気に対して減少するということ，光が多く差し込むことによる植物プランクトンによる光合成の増加などによって，さらに CO_2 濃度が大気に対して減少するため，大気中 CO_2 の大きなシンクとなる（Yasunaka *et al.,* 2018）。また，海氷融解に伴う海洋への CO_2 吸収能の増加による北極海の海洋酸性化も加速している（Yamamoto-Kawai *et al.,* 2009）（詳細は，川合による本特集号内の総説を参照）。一方で水温上昇による溶解度の減少は，CO_2 吸収能の減少をまねく可能性がある

（Parmentier *et al.,* 2013）。

グローバルな炭素循環モデルでは，両極域の海洋で氷に覆われている場所では大気とのCO_2交換は起こらないとして計算されていたが（Yager *et al.,* 1995; Sun and Matsumoto, 2010），その認識は近年変わりつつある。海氷の生成や融解は，大気や海洋の物質循環を考慮する上で重要な過程なのである（Vancoppenolle *et al.,* 2013）。海氷内には海氷成長に伴うブラインの排出経路となるブライン・チャネルが存在し，その微細構造は多孔質である（Gosink *et al.,* 1976）。そのため，開水域（海氷がない海域）と同様に，海氷域においても気体（例えばCO_2）交換が起きることが分かった（Nomura *et al.,* 2013a; Delille *et al.,* 2014）。ブライン・チャネルの中にはブラインが存在するのであるが，海氷の成長および融解段階においてブラインに溶存する気体成分の濃度も大きく変化する。例えば，海氷が成長する厳冬期は，気温が低く，海氷上部の温度もマイナス10度以下となる場合がある。その際，ブライン中の真水部分だけが凍結するためにブラインの塩分は時には100 psu（通常の海水の3倍ほど）を超える場合があり，CO_2は塩分と同様に濃縮する。また，海氷内では炭酸カルシウムの結晶であるイカイトの析出によってCO_2が生成する（以下の式1, Geilfus et al., 2012）。

$$Ca^{2+} + 2HCO_3^- \rightarrow CaCO_3 + H_2O + CO_2 \quad （式1）$$

イカイトの析出は，低温および高塩分環境下でより起きる。そのため，結氷する際，最も低温となる大気と接した海氷表面で多く観察される（Nomura *et al*., 2013b）。

このように，ブラインのCO_2濃度（分圧）は，場合によっては2000 µatm近くになることもある。そして大気のCO_2濃度（おおよそ400 µatm）に対して海氷のCO_2濃度が高くなる（過飽和になる）ために海氷から大気にCO_2が放出される（Geilfus *et al.,* 2012）。一方，気温が上昇する融解期は，ブライン・チャネルの周りの純氷部分が融解し，ブライン・チャネル内への融解水の供給による希釈やイカイトの溶解によってCO_2が消費されるため，大気のCO_2濃度に対してブラインのCO_2濃度が10 µamにまで低くなる場合がある（Nomura *et al.,* 2010）。このように，大気のCO_2濃度に対して海氷側が低くなる（未飽和になる）ため大気からCO_2を吸収する（Fig. 4）。実際に海氷の上に設置したフラックスチャンバーで得

られた海氷—大気間のCO_2交換量の結果を紹介する（例えばNomura *et al.*, 2018）。CO_2交換量はフラックスチャンバーの蓋が閉まっている間（通常20分に設定）にチャンバー内のCO_2濃度を非分散型赤外分光法で連続的に分析し，チャンバー内のCO_2濃度変化より海氷—大気間のCO_2交換量を算出することができる。海氷—大気間のCO_2交換量は，海氷がない海域で得られた大気—海洋間のCO_2交換量（Takahashi *et al.,* 2009）に匹敵する値が得られている（Nomura *et al.*, 2018）。ただし，海氷上の雪が解けて再凍結し、ブライン・チャネルのような通路がなくなった場合などは，大気—海氷間のCO_2交換量がゼロとなることから海氷の表面の状態も重要である（Delille *et al.*, 2014）。また，海氷の上部に存在する水たまり（メルトポンド）では，植物プランクトンの増殖（Lee *et al.,* 2012），淡水の流入によりCO_2吸収場となっている（Semiletov *et al.,* 2004; Geilfus *et al.,* 2015）。さらに，氷の割れ目であるクラックやリード（lead, 海氷が割れて出来た水路）もCO_2吸収が起きる（Steiner *et al.,* 2013）。このように，海洋表面だけでなく，海氷自体や海氷付近のクラックやリードも大気からのCO_2シンクとなっていることも忘れてはならない（Fig. 4）。今後，海氷量減少によって，より海氷の動きが活発となりクラックやリードの形成が頻繁化することが考えられる。このような海氷上の割れ目は今後増加すると考えられ，より大気—海洋間での気体交換が活発化することが予想される。

次に海氷光環境について示す。海氷減少は海洋表層の光環境の改善をもたらすため，北極全体で基礎生産が増加すること（Arrigo and van Dijken, 2015），海氷の薄化により海氷を通して太陽光が海氷下に達しやすくなるため海氷下で植物プランクトンのブルームが起こること（Arrigo *et al*., 2012）が報告されている。このように，海氷環境が変化することによって基礎生産が増加し，その結果，海洋表層の栄養塩やCO_2濃度が減少する。よって，生態系の変化も北極海表層の物質循環過程に影響を及ぼす要因の一つとして考慮する必要がある。

最後にメタンについて示す。メタンは北極海の海水側が放出源となり，海氷の減少とともに大気に放出されるメタンの量が多くなると予想されている（Parmentier *et al.,* 2013）。温暖化による北極沿岸域での永久凍土融解に伴い，大量のメタンが河川や海底堆積物から海洋に供給される（Shakhova and Semiletov, 2007）。また，海氷内では，ブライン生成時のメタン濃縮やバクテリアによるメタン生成によって高濃度となったメタンがブラインととも

に海氷下に排出されるなどの影響により，海洋表層のメタン濃度は大気に対して高くなる（Damm *et al.,* 2015）。よって，リードなどの開放水面域では，海洋表層から大気へのメタン放出による大気中メタン濃度の上昇が航空機観測より確認されている（Kort *et al.,* 2012）。また，直接海氷から大気にメタンが放出される可能性もある（Fig. 4）。さらに，温暖化や海氷薄化によって海氷温度の上昇が予想されるため，海氷内部でのバクテリアによるメタン生成が活性化し、海氷内部のメタンが高濃度化することが予想される。このように，融解中の海氷から大気に放出されるメタン量は，今後増加すると考えられる。2019年後半からは，北極海での通年漂流観測（Multidisciplinary drifting Observatory for the Study of Arctic Climate: MOSAiC）が計画されており、一年を通しての海氷内部および海氷下海水のメタン濃度，大気との気体交換量の測定を実施する予定である。不明な点が多々存在する北極海のメタンサイクルについての定量評価に繋がることが今後期待される。

引用文献

AMAP (2017) Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA). *Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP)*, Oslo, Norway. xiv + 269 pp.

Aciego, S. M., Stevenson, E. I., & Arendt, C. A. (2015) Climate versus geological controls on glacial meltwater micronutrient production in southern Greenland, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **424**, 51–58. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.05.017.

Aguilar‐Islas, A. M., Rember, R. D., Mordy, C. W. and Wu. J. (2008) Sea ice‐derived dissolved iron and its potential influence on the spring algal bloom in the Bering Sea. *Geophys. Res. Lett.,* **35**, L24601, doi: 10.1029/2008GL035736.

Arrigo, K. R., Perovich, D. K., Pickart, R. S., *et al*. (2012) Massive phytoplankton blooms under Arctic sea ice. *Science*, **336**, 6087, 1408.

Arrigo, K. R., and van Dijken, G. L. (2015) Continued increases in Arctic Ocean primary production. *Progr. Oceanogr*, **136**, 60–70.

Arrigo, K. R., van Dijken, G. L., Castelao, R. M., Luo, H., Rennermalm, Å. K., Tedesco, M., Mote, T. L., Oliver, H. and Yager P. L. (2017) Melting glaciers stimulate large summer phytoplankton blooms in southwest Greenland waters, *Geophys. Res. Lett.,* **44**, 6278–6285, doi: 10.1002/2017GL073583.

Azetsu-Scott, K., and Syvitski, J. P. M. (1999) Influence of melting icebergs on distribution, characteristics and transport of marine particles in an East Greenland fjord, *J. Geophys. Res.*, **104**, 5321–5328, doi:10.1029/1998JC900083.

Bates, N.R. and Mathis J. T. (2009) The Arctic Ocean marine carbon cycle: evaluation of air-sea CO_2 exchanges, ocean acidification impacts and potential feedbacks. *Biogeosciences*, **6**, 2433–2459.

Bendtsen, J., Mortensen, J., Lennert, K. and Rysgaard, S. (2015) Heat sources for glacial ice melt in a west Greenland tidewater outlet glacier fjord: The role of subglacial freshwater discharge. *Geophys. Res. Lett.,* **42**, 4089–4095. https://doi.org/10.1002/2015GL063846.

Bhatia, M. P. (2012) Hydrological and biogeochemical cycling along the Greenland ice sheet margin, Thesis (Ph.D.) Massachusetts Institute of Technology and the Woods Hole Oceanographic Institution.

Bhatia, M. P., Kujawinski, E. B., Das, S. B. Breier, C. F., Henderson, P. B., Charette, M. A. (2013) Greenland meltwater as a significant and potentially bioavailable source of iron to the ocean. *Nature Geosci.,* **6**, 274–278.

Cape, M. R., Straneo, F., Beaird, N., Bundy, R. M., Charette, M. A. (2018) Nutrient release to oceans from buoyancy-driven upwelling at Greenland tidewater glaciers. *Nature Geosci.*, **12**(1): 34-39.

Comiso, J. C. (2010) Variability and trends of the global sea ice cover, In *Sea Ice*, edited by D. N. Thomas and G. S. Dieckmann, 2nd ed., 205–246, Wiley-Blackwell, Oxford.

Chu, V. W. (2014) Greenland ice sheet hydrology. *Progress in Physical Geography*, **38**(1), 19–54. https://doi.org/10.1177/0309133313507075.

Chu, V. W., Smith, L. C., Rennermalm, A. K., Forster, R. R., & Box, J. E. (2012) Hydrologic controls on coastal suspended sediment plumes around the Greenland Ice Sheet. *The Cryosphere*, **6**(1), 1–19. https://doi.org/10.5194/tc-6-1-2012.

Damm, E., Rudels, B., Schauer, U., Mau, S. and Dieckmann, G. (2015) Methane excess in Arctic surface water—triggered by sea ice formation and melting. *Scientific Reports,* **5**:16179 DOI: 10.1038/srep16179.

de Baar, H. J. W. (1994) von Liebig's law of the minimum and plankton ecology (1899–1991). *Progress in Oceanography*, **33**, 347–386.

Delille, B., Vancoppenolle, M., Geilfus, N.-X., Tilbrook, B., Lannuzel, D., Schoemann, V., Becquevort, S., Carnat, G., Delille, D., Lancelot, C., Chou, L., Dieckmann, G. S. and Tison, J.-L. (2014) Southern Ocean CO_2 sink: the contribution of the sea ice. *J. Geophys. Res.-Oceans*, **119**, 6340–6355.

Everett, A., Kohler, J., Sundfjord, A., Kovacs, K. M., Torsvik, T., Pramanik, A., Boehme, L. and Lydersen, C. (2018) Subglacial discharge plume behaviour revealed by CTD-instrumented ringed seals. *Scientific Reports,* **8**(1): 13467.

Gardner, A. S., Moholdt, G., Cogley, J. G., Wouters, B., Arendt, A. A. and Wahr, J., et al. (2013) A reconciled estimate of glacier contributions to sea level rise: 2003 to 2009. *Science*, **340**(6134), 852–857. https://doi.org/10.1126/science.1234532.

Geilfus, N.-X., Carnat, G., Papakyriakou, T., Tison, J.-L., Else, B., Thomas, H., Shadwick, E. and Delille, B. (2012) Dynamics of pCO_2 and related air–ice CO_2 fluxes in the Arctic coastal zone (Amundsen Gulf, Beaufort Sea). *J. Geophys. Res.,* **117**, C00G10, doi:10.1029/2011JC007118.

Geilfus, N.-X., Galley, R. J., Crabeck, O., Papakyriakou, T., Landy, J., Tison, J.-L. and Rysgaard, S. (2015) Inorganic carbon dynamics of melt-pond-covered first-year sea ice in the Canadian Arctic. *Biogeosciences*, **12**, 2047–2061, doi:10.5194/bg-12-2047-2015.

Gosink, T. A., Pearson, J. G. and Kelly, J. J. (1976) Gas movement thorough sea-ice. *Nature*, **263**,

41–42.

Hagedorn, B., and Hasholt, B. (2004) Hydrology, geochemistry and Sr isotopes in solids and solutes of the meltwater from Mittivakkat Gletscher, SE Greenland, *Nord. Hydrol.*, **35**, 25–29.

Hasholt, B., and Hagedom, B. (2000) Hydrology and geochemistry of river-borne material in a high arctic drainage system, Zackenberg, Northeast Greenland, *Arctic Antarct. Alp. Res.*, **32**, 84–94.

Hawkings, J. R., Wadham, J. L., Tranter, M., Raiswell, R., Benning, L. G., Statham, P. J., Tedstone, A., Nienow, P., Lee, K., and Telling, J. (2014) Ice sheets as a significant source of highly reactive nanoparticulate iron to the oceans, *Nature Comm*., **5**, 3929.

Hawkings, J. R., Wadham, J. L., Tranter, M., Lawson, E., Sole, A., Cowton, T., et al. (2015) The effect of warming climate on nutrient and solute export from the Greenland Ice Sheet. *Geochemical Perspectives Letters*, **1**,94–104.

Hopwood, M. J., Bacon, S., Arendt, K., Connelly, D. P. and Statham, P. J. (2015) Glacial meltwater from Greenland is not likely to be an important source of Fe to the North Atlantic. *Biogeochemistry*, **124**, 1–11.

Hopwood, M. J., Carroll, D., Browning, T. J., Meire, L., Mortensen, J., Krisch, S. and Achterberg, E. P. (2018) Non-linear response of summertime marine productivity to increased meltwater discharge around Greenland. *Nature Comm.,* 9(1): 3256.

Juul-Pedersen, T., Arendt, K., Mortensen, J., Blicher, M., Søgaard, D. and Rysgaard, S. (2015) Seasonal and interannual phytoplankton pro-duction in a sub-Arctic tidewater outlet glacier fjord, west Greenland, *Mar. Ecol. Prog. Ser*., 524, 27–38, doi:10.3354/meps11174.

Kanna, N., Toyota, T. and Nishioka, J. (2014) Iron and macro-nutrient concentrations in sea ice and their impact on the nutritional status of surface waters in the southern Okhotsk Sea, *Prog. Oceanogr*, **126**, 44–57.

Kanna, N., Sugiyama, S., Ohashi, Y., Sakakibara, D., Fukamachi, Y. and Nomura, D. (2018) Upwelling of macronutrients and dissolved inorganic carbon by a subglacial fresh water driven

plume in Bowdoin fjord, northwestern Greenland. *J. Geophys. Res. Biogeosci.* 123(5), 1666–1682. https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2017JG004248.

Kort, E. A., et al. (2012) Atmospheric observations of Arctic Ocean methane emissions up to 82 degrees north. *Nature Geosci*. 5, 318–321.

Krell, A., Ummenhofer, C., Kattner, G., Naumov, A., Evans, D., Dieckmann, G.S. and Thomas, D.N. (2003) The biology and chemistry of land fast ice in the White Sea, Russia—a comparison of winter and spring conditions. *Polar Biol*. 26, 707–719.

Kristiansen, S. M., Yde, J. C., Bárcena, T. G., Jakobsen, B. H., Olsen, J. and Knudsen, N. T. (2013) Geochemistry of groundwater in front of a warm based glacier in Southeast Greenland, *Geogr. Ann. Ser. A Phys. Geogr.*, **95**, 97–108, doi:10.1111/geoa.12003.

Lannuzel, D., Schoemann, V., de Jong, J., Pasquer, B., van der Merwe, P.C., Masson, F., Tison, J-L., and Bowie, A.R. (2010) Distribution of dissolved iron in Antarctic sea ice: spatial, seasonal, and inter-annual variability. *J. Geophys. Res*., **115**, G03022. http://dx.doi.org/10.1029/2009JG001031.

Lee, S. H., Stockwell, D. A., Joo, H.-M., Son, Y., Kang, C.-K., and Whitledge, T. E. E. (2012) Phytoplankton production from melting ponds on Arctic sea ice, *J. Geophys. Res.*, **117**, C04030, doi:10.1029/2011JC007717.

Lydersen, C., Assmy, P., Falk-Petersen, S., Kohler, J., Kovacs, K. M. and Reigstad, M., et al. (2014) The importance of tidewater glaciers for marine mammals and seabirds in Svalbard, Norway. *J. Mar. Syst.*, **129**, 452–471. https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2013.09.006.

Mankoff, K. D., Straneo, F., Cenedese, C., Das, S. B., Richards, C. G. and Singh, H. (2016) Structure and dynamics of a subglacial discharge plume in a Greenlandic fjord. *J. Geophys. Res. Oceans*, **121**, 8670–8688. https://doi.org/10.1002/2016JC011764.

Maykut, G. A. (1978) Energy exchange over young sea ice in the central Arctic. *J. Geophys. Res.*, **83**, C7, 3646–3658.

Meire, L., Meire, P., Struyf, E., Krawczyk, D. W., Arendt, K. E. and Yde, J. C., et al. (2016) High

export of dissolved silica from the Greenland Ice Sheet. *Geophys. Res. Lett*., **43**(17), 9173–9182. https://doi.org/10.1002/2016GL070191.

Meire, L., Mortensen, J., Meire, P., Juul-Pedersen, T., Sejr, M. K. and Rysgaard, S., et al. (2017) Marine-terminating glaciers sustain high productivity in Greenland fjords. *Global Change Biol.*, **23**(12), 5344–5357. https://doi.org/10.1111/gcb.13801.

Motyka, R. J., Hunter, L., Echelmeyer, K. A. and Connor, C. (2003) Submarine melting at the terminus of a temperate tidewater glacier, LeConte Glacier, Alaska, U.S.A., *Ann. Glaciol.*, **36**(1), 57–65.

Naito, A., Abe, Y., Matsuno, K., Nishizawa, B., Kanna, N., Sugiyama, S., Yamaguchi, A. (2019) Surface zooplankton size and taxonomic composition in Bowdoin Fjord, north-western Greenland: A comparison of ZooScan, OPC and microscopic analyses. *Polar Sci*., **19**, 120–129.

Nishino, S., Kikuchi, T., Fujiwara, A., Hirawake, T., and Aoyama, M. (2016) Water mass characteristics and their temporal changes in a biological hotspot in the southern Chukchi Sea. *Biogeosci.*, **13**, 2563–2578, https://doi.org/10.5194/bg-13-2563-2016.

Nomura, D., Yoshikawa-Inoue, H., Toyota, T. and Shirasawa, K. (2010) Effects of snow, snowmelting and refreezing processes on air–sea-ice CO_2 flux. *J. Glaciol.,* **56,** 262－270.

Nomura, D., McMinn, A., Hattori, H., Aoki, S., Fukuchi, M. (2011) Incorporation of nitrogen compounds into sea ice from atmospheric deposition. *Mar. Chem.*, **127**, 90–99.

Nomura, D., Granskog, M. A., Assmy, P., Simizu, D. and Hashida, G. (2013a) Arctic and Antarctic sea ice acts as a sink for atmospheric CO_2 during periods of snow melt and surface flooding. *J. Geophys. Res.-Oceans*, **118**, 6511–6524.

Nomura, D., Assmy, P., Nehrke, G., Granskog, M. A., Fischer, M., Dieckmann, G. S., Fransson, A., Hu, Y., Schnetger, B. (2013b) Characterization of ikaite ($CaCO_3$•$6H_2O$) crystals in first-year Arctic sea ice north of Svalbard. *Ann. Glaciol.*, **54**, 62, 125–131, doi:10.3189/2013AoG62A034.

Nomura, D., Granskog, M. A, Fransson, A, Chierici, M., Silyakova, A., Ohshima, K. I, Cohen, L, Delille, B., Hudson, S. R., Dieckmann, G. S. (2018) CO_2 flux over young and snow-covered Arctic pack ice in winter and spring CO_2 flux over young and snow-covered Arctic pack ice in winter and spring. *Biogeosciences*, **15**, 3331–3343, https://doi.org/10.5194/bg-15-3331-2018.

Ohashi, Y., Iida, T., Sugiyama, S. and Aoki, S. (2016) Spatial and temporal variations in high turbidity surface water off the Thule region, northwestern Greenland. *Polar Sci.*, **10**(3), 270–277. https://doi.org/10.1016/j.polar.2016.07.003.

Oliver, H., Luo, H., Castelao, R. M., van Dijken, G. L., Mattingly, K. S., Rosen, J. J., Mote, T. L., Arrigo, K. R., Rennermalm, Å. K., Tedesco, M., Yager, P. L. (2018) Exploring the potential impact of Greenland meltwater on stratification, photosynthetically active radiation, and primary production in the Labrador Sea. *J. Geophys. Res.-Oceans*, **123**, 2570–2591, https://doi.org/10.1002/2018JC013802.

Overeem, I., Hudson, B. D., M, J. P., Syvitski, A. B., Mikkelsen, B. and Hasholt, M. R., et al. (2017) Substantial export of suspended sediment to the global oceans from glacial erosion in Greenland. *Nature Geosci.*, **10**(11), 859–863. https://doi.org/10.1038/ngeo3046.

Parmentier, F. J. W., Christensen, T. R., Srensen, L. L., Rysgaard, S., McGuire, A. D., Miller, P. A. and Walker D. A. (2013) The impact of lower sea-ice extent on Arctic greenhouse-gas exchange. *Nat. Clim. Change*, **3**, 195–202, doi:10.1038/nclimate1784.

Semiletov, I., Makshtas, A., Akasofu, S.-I. and Andreas, E. L. (2004) Atmospheric CO_2 balance: The role of Arctic sea ice. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L05121, doi:10.1029/2003GL017996.

Shakhova, N. and Semiletov, I. (2007) Methane release and coastal environment in the East Siberian Arctic shelf. *J. Mar. Syst.*, **66**, 227–243.

Shine, K. P. and Henderson-Sellers, A. (1985) The sensitivity of a thermodynamic sea ice model to changes in surface albedo parameterization. *J. Geophys. Res.*, **90**, D1, 2243–2250.

Steiner, N. S., Lee, W. G. and Christian, J. R. (2013) Enhanced gas fluxes in small sea ice leads and cracks: Effects on CO_2 exchange and ocean acidification. *J. Geophys. Res. Oceans*, **118**, 1195–1205. https://doi.org/10.1002/jgrc.20100.

Stroeve, J. C., Serreze, M. C., Holland, M. M., Kay, J. E., Maslanik, J. and Barrett, A. P. (2012) The Arctic's rapidly shrinking sea ice cover: a research synthesis. *Climatic Change*, **110**, 1005, https://doi.org/10.1007/s10584-011-0101-1.

Sun, X., and Matsumoto, K. (2010) Effects of sea ice on atmospheric pCO_2: A revised view and implications for glacial and future climates. *J. Geophys. Res.* **115**, G02015, doi:10.1029/2009JG001023.

Takahashi, T., Sutherland, S. C., Wanninkhof, R., Sweeney, C., Feely, R. A., Chipman, D. W., Hales, B., Friederich, G., Chavez, F., Sabine, C., Watson, A., Bakker, D. C. E., Schuster, U., Metzl, N., Yoshikawa-Inoue, H., Ishii, M., Midorikawa, T.,Nojiri, Y., Körtzinger, A., Steinhoff, T., Hoppema, M., Olafsson, J., Arnarson, T. S., Tilbrook, B., Johannessen, T., Olsen, A., Bellerby, R., Wong, C. S., Delille, B., Bates, N. R., and de Baar, H. J. W. (2009) Climatological mean and decadal change in surface ocean pCO_2, and net sea-air CO_2 flux over the global oceans, *Deep-Sea Res. II,* **56**, 554–577.

Thomas, D. N., Papadimitriou, S. and Michel, C. (2010) Biogeochemistry of sea ice, In *Sea Ice*, edited by D. N. Thomas and G. S. Dieckmann, 2nd ed., 425–467, Wiley-Blackwell, Oxford.

Tovar-Sánchez, A., Duarte, C. M., Alonso, J. C., Lacorte, S., Tauler, R. and Galbán-Malagón, C. (2010). Impacts of materials and nutrients released from melting multiyear Arctic sea ice. *J. Geophys. Res*., **115**, C07003. http://dx.doi.org/10.1029/2009JC005685.

Urbanski, J. A., Stempniewicz, L., Węsławski, J. M., Dragańska-Deja, K., Wochna, A., Goc, M. and Iliszko, L. (2017) Subglacial discharges create fluctuating foraging hotspots for sea birds in tidewater glacier bays. *Scientific Reports*, **7**, 43999. https://doi.org/10.1038/srep43999.

Vancoppenolle, M., Meiners, K. M., Michel, C., Bopp, L., Brabant, F., Carnat, G., Delille, B., Lannuzel, D., Madec, G., Moreau, S., Tison, J.-L. and van der Merwe, P. (2013) Role of sea ice in global biogeochemical cycles: emerging views and challenges. *Quaternary Sci. Rev*., **79**, 207–230.

Yamamoto-Kawai, M., McLaughlin, F. A., Carmack, E. C., Nishino, S. and Shimada, K. (2009) Aragonite undersaturation in the Arctic Ocean: effects of ocean acidification and sea ice melt. *Science*, **326**, 1098-1100.

Yasunaka, S., Siswanto, E., Olsen, A., Hoppema, M., Watanabe, E., Fransson, A., Chierici, M., Murata, A., Lauvset, S. K., Wanninkhof, R., Takahashi, T., Kosugi, N., Omar, A. M., van Heuven, S. and Mathis, J. T. (2018) Arctic Ocean CO_2 uptake: an improved multiyear estimate of the air–sea CO_2 flux incorporating chlorophyll a concentrations. *Biogeosciences*, **15**, 1643–1661, 2018 https://doi.org/10.5194/bg-15-1643-2018.

Wakatsuchi, M. and Ono, N. (1983) Measurements of salinity and volume of brine excluded from growing sea ice, *J. Geophys. Res.,* **88**(C5), 2943–2951.

Yager, P.L., Wallace, D.W.R., Johnson, K.M., Smith Jr., W.O., Minnett, P.J. and Deming, J.W. (1995) The northeast water polynya as an atmospheric CO_2 sink: A seasonal rectification hypothesis. *J. Geophys. Res.,* **100**, 3289－4398.

Yde, J. C., Tvis Knudsen, N., and Nielsen, O. B. (2005) Glacier hydrochemistry, solute provenance, and chemical denudation at a surge-type glacier in Kuannersuit Kuussuat, Disko Island, West Greenland, *J. Hydrol.*, **300**, 172–187, doi:10.1016/j.jhydrol.2004.06.008.

Yde, J. C., Knudsen, N. T., Hasholt, B., and Mikkelsen, A. B. (2014) Meltwater chemistry and solute export from a Greenland Ice Sheet catchment, Watson River, West Greenland. *J. Hydrol.,* 519, 2165–2179. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.10.018.

図表の説明

Fig. 1: Conceptual model of the hydrodynamic circulation and its impact on the biogeochemistry in a fjord affected by land- (a) and marine-terminating glaciers (b). Adapted from Meire *et al.* (2017).

Fig. 2: Location of the glacial river from land-terminating glacier in Greenland. Modified from Meire *et al.* (2016). Numbers in the map are corresponded to the area number in Table 1.

Fig. 3: Water properties within a vertical cross section along the centerline of Bowdoin Fjord (Sts. C3 and D2–6), showing turbidity (a) and concentration of chlorophyll *a* (b) in the upper 50 m of fjord. Adapted from Kanna *et al.* (2018).

Fig. 4: Schematic illustration for the effects of river water runoff, gas hydrate, and sea ice melting on CO_2 and CH_4 of the surface water in the Arctic Ocean. FW means fresh water.

Table 1. Nutrient and iron concentrations in the glacial river from land-terminating glacier in Greenland. "–" indicates no data. Modified from Meire *et al.* (2016). Area number is corresponded to the number in the map in Figure 2.

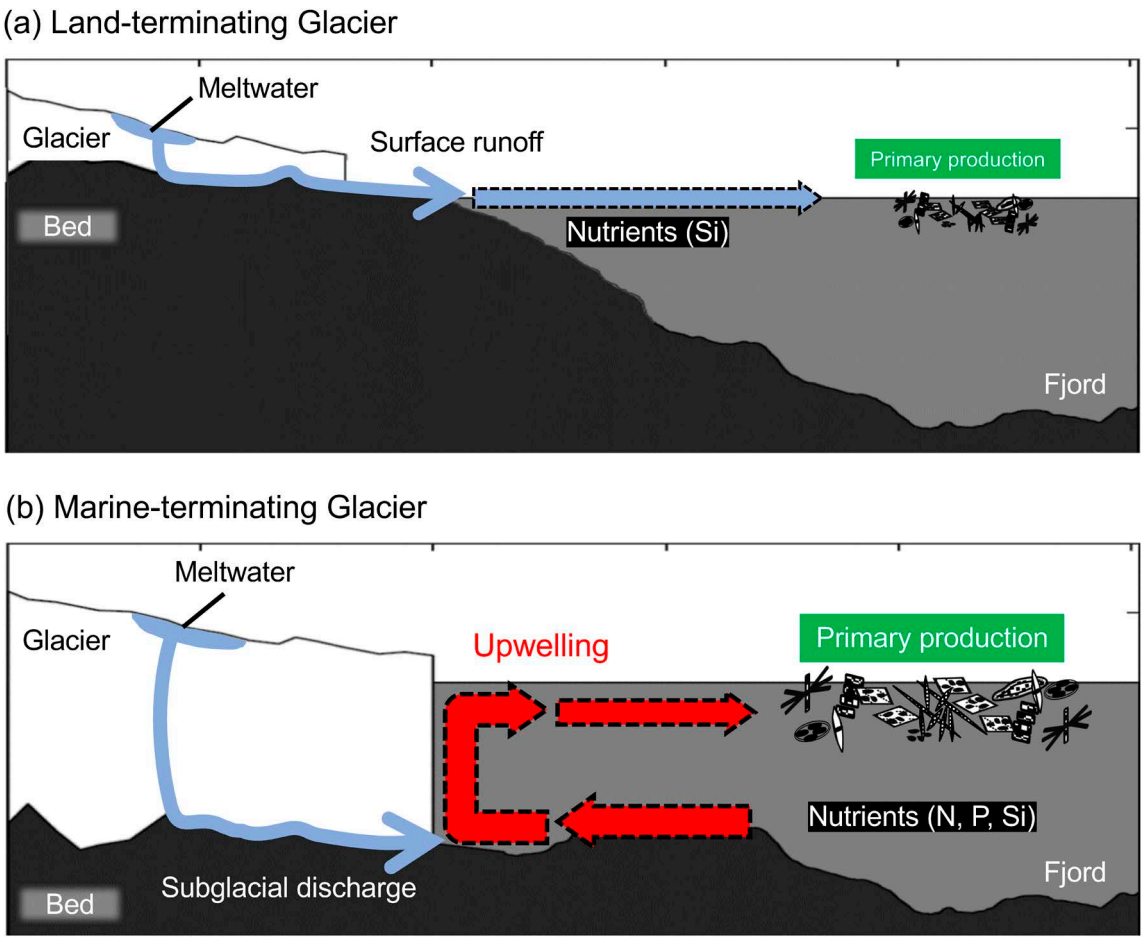

(a) Land-terminating Glacier
Meltwater
Glacier
Surface runoff
Primary production
Bed
Nutrients (Si)
Fjord
(b) Marine-terminating Glacier
Meltwater
Glacier
Upwelling
Primary production
Nutrients (N, P, Si)
Fjord
Bed
Subglacial discharge

Figure 1

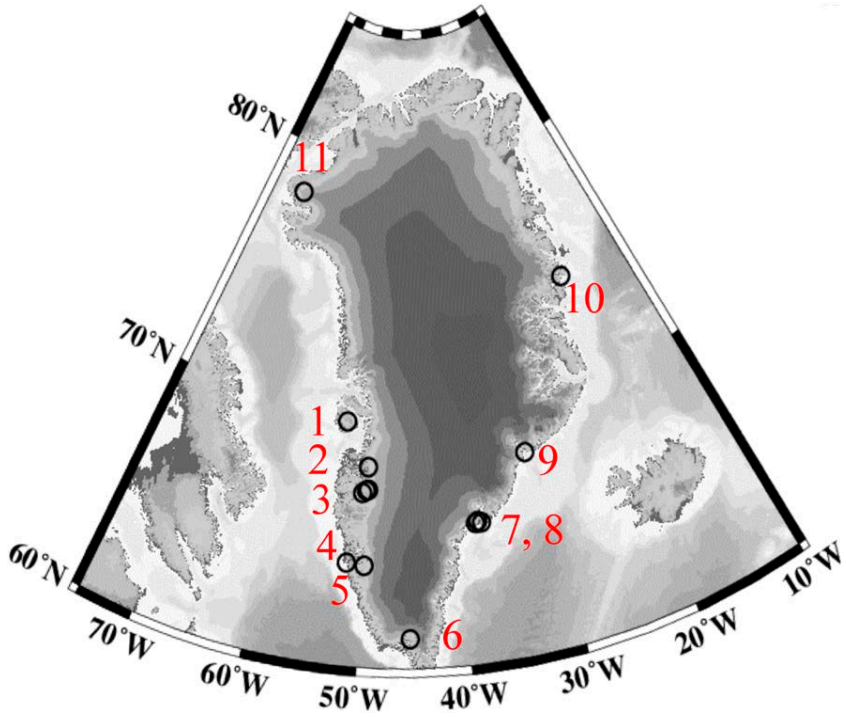


Figure 2

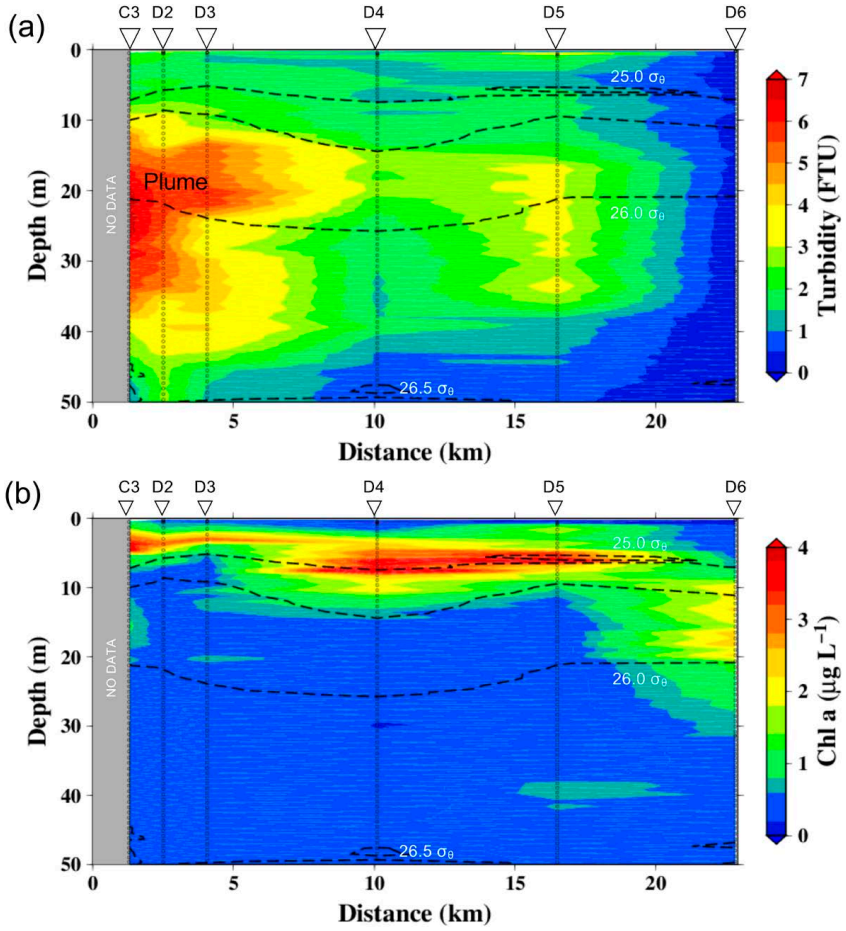

(a)
C3
D2
D3
D4
D5
D6
Depth (m)
NO DATA
Plume
25.0 σθ
26.0 σθ
26.5 σθ
Distance (km)
Turbidity (FTU)
(b)
Chl a (μg L−1)

Figure 3

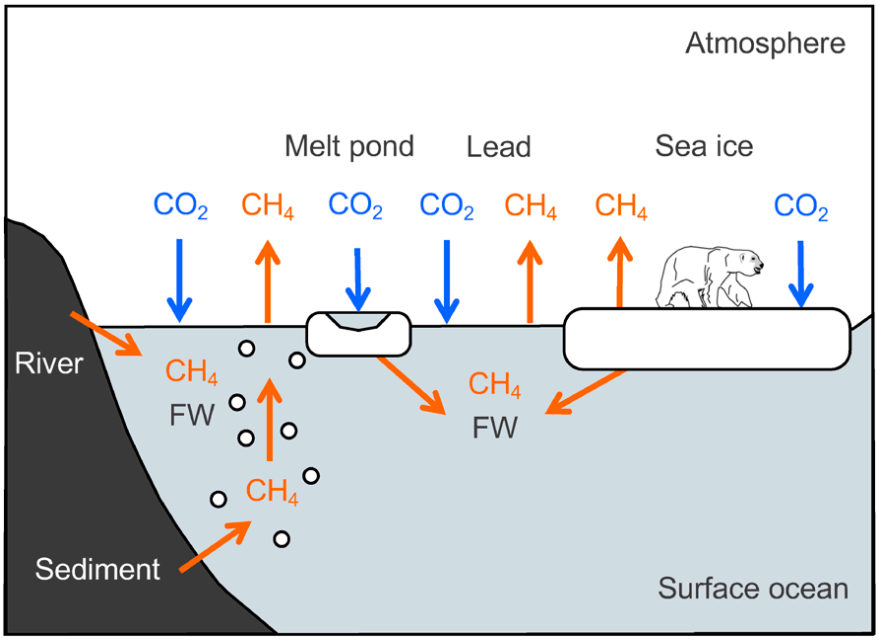

Atmosphere
Melt pond
Lead
Sea ice
CO2
CH4
CO2
CO2
CH4
CH4
CO2
River
CH4
FW
CH4
FW
CH4
Sediment
Surface ocean

Figure 4

Table 1

Area	Macronutrients (μmol L^{-})			Micronutrients (μmol L^{-})	Reference
	NO_3^-	PO_4^{3-}	DSi (mean)	DFe	
1	<1.5	—	280	—	Yde *et al.* (2005)
2	2.3	0.12	14	3.7 (<0.2 μm)	Bhatia (2012), Bhatia *et al.* (2013)
3	2.5	—	51	—	Yde *et al.* (2014)
3	—	0.13	5.5	0.5 (<0.2 μm)	Aciego *et al.* (2015)
3	1.6	0.2	4.2	0.7 (<0.45 μm)	Hawkings *et al.* (2014, 2015)
4	2.5	0.3	33	—	Meire *et al.* (2016)
5	—	0.1	18.3	0.2 (<0.2 μm)	Aciego *et al.* (2015)
6	—	0.7	26.6	4.1 (<0.2 μm)	Aciego *et al.* (2015)
7	—	0.34	6.8	0.3 (<0.2 μm)	Aciego *et al.* (2015)
8	<1.5	—	28	—	Hagedorn and Hasholt (2004) Kristiansen *et al.* (2013)
8	<1.5	—	31	—	Meire *et al.* (2016)
9	—	—	>10	—	Azetsu-Scott and Syvitski (1999)
10	2.5	—	30	—	Hasholt and Hagedorn (2000) Meire *et al.* (2016)
11	1.0	0.1	4.4	—	Kanna *et al.* (2018)