

令和 4 年 6 月 17 日現在

機関番号：62611

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2020～2021

課題番号：20K23370

研究課題名(和文) 海水が運ぶ栄養分：その取り込み過程

研究課題名(英文) Incorporation of particulate matters into sea ice: a key factor of material cycle in polar oceans

研究代表者

伊藤 優人 (ITO, MASATO)

国立極地研究所・研究教育系・特任研究員

研究者番号：40887907

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：海水内の物質の起源やその取り込み過程について、室内実験によると、新成氷である氷晶と堆積物の接触が重要視されている。そこで、実際の海洋で氷晶がどの程度の深度まで存在しうるかを、過去にオホーツク海で実施された係留観測のデータより解析した。その結果、風速8 m/s以上の環境において、平均的には35 m以浅、最大で100 m程度まで氷晶が存在することが明らかとなった。極域海洋において氷晶が盛んに生産される沿岸域の高氷生産海域であるポリニヤにて、氷晶と堆積物の接触を通じた海水への物質の取り込みが生じる可能性が示唆される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

春に海水が融けると海水内の物質は海へと供給される。この過程は海水域で春季に一般的に生じる植物プランクトンの大増殖を引き起こす要因と考えられている。しかし、海水内の物質の起源やその海水による取り込み過程は未解明である。本研究では、この過程で重要視されている氷晶に関して、海洋中での生成が起こる状況やその存在深度を現場観測から初めて明らかにした。これらの結果から、海水による物質の取り込みが浅い沿岸域での氷晶と再懸濁物の接触を通じて生じることが示唆される。また、極域海洋の生物生産が、海水から海洋へと供給される海底堆積物由来の物質に強く依存する可能性が示唆される。

研究成果の概要(英文)：Underwater interaction between frazil ice (newly formed ice) and seafloor sediment is considered to be a major process to supply particulate matter with sea ice, according to past laboratory studies. In this study, the mooring data obtained in the Sea of Okhotsk were analyzed in order to examine the penetrate-depth of frazil ice in a real ocean. This study revealed that the penetrate-depth was 35 m averagely under windy conditions (wind speed > 8 m/s) although its maximum reached 100 m. This result indicates the possibility that sea ice mainly incorporates particulate matter through the interaction between frazil ice and resuspended seafloor sediment in coastal polynyas, which are the high ice production areas distributed in shallow coastal regions in polar oceans.

研究分野：海水物理

キーワード：海水 氷晶 物質循環

1. 研究開始当初の背景

海氷は海水の凍った氷である。海水は真水のみが凍るので、生成時には高塩分水「ブライン」が周囲の海水へと排出される。また、真水が凍った海水が漂流し、その先で融けることで、淡水の輸送にも寄与する。さらに、海氷に物質が取り込まれると、それらは海氷の漂流に伴い輸送され、海氷融解に伴い海中へと供給される。これらの海氷による淡水や物質の輸送・供給は、生物活動を含む極域海洋の物質循環に強く寄与する。

たとえば、海氷域では海氷融解の直後から氷縁ブルームと呼ばれる植物プランクトンの大増殖が生じることがある。この要因として、海氷から供給される淡水による海洋表層の成層の強化やそれに伴う光環境の改善、さらには海氷内物質由来の栄養分の供給が指摘されている。海氷による物質の輸送に関しては、このような環境への正の影響のみでなく、人為起源物質の輸送などの負の側面も指摘されている。

海氷への物質の取り込みについて、物質の主な起源は何か、それがどのように海氷に取り込まれるかは未だわかっていない。これに関して、室内実験などから、海中で生成される新成氷、フラジリアイス（氷晶）と海底から巻き上がった再懸濁物が海中で接触する過程が提唱されている。しかし、この過程に対する現場観測に基づく報告は極めて限られている。海中でのフラジリアイス生成については、そもそもこの事象についての観測例が限られており、フラジリアイスの存在深度やフラジリアイスが生成され得る状況などもわかっていない。

そこで、本研究では海氷への物質の取り込み過程や、それに関連する海中でのフラジリアイス生成について明らかにするために、過去に海氷域で実施された係留観測データの解析、海氷域で採取した海氷コア試料の分析を行う。

2. 研究の目的

本研究の目的は、海氷による物質の主要な取り込み過程の解明と、それに関連する海中でのフラジリアイス生成など諸過程の解明である。まず前者については、過去の室内実験より提唱されるフラジリアイスと再懸濁物の接触を軸に考えつつ、降雪起源の物質や海氷の底面結氷（下方成長）時に海中の物質を取り込む過程も考慮する。後者については、そもそも観測例が少ない海中でのフラジリアイスの生成に着目し、未だ観測からは定量的に明らかにされていない、海中でのフラジリアイス生成が生じる気象・海洋条件やフラジリアイスの存在深度の解明を目指す。

3. 研究の方法

本研究では上記の目的の達成のために以下の2つの手法を用いる。

過去に海氷域で実施された係留観測データの解析

自身の過去の研究から、海中に浮遊するフラジリアイスや再懸濁物などが、係留海洋観測で一般的に用いられる超音波流速計（ADCP）が計測する音響後方散乱強度データの解析より検知できることがわかっている。そこで、オホーツク海や北極海などの海域で過去に実施された係留海洋観測により得られたADCP音響データを解析し、海中のフラジリアイスや再懸濁物の検知、および両者の接触の検知を試みる。

海氷コア試料の解析

海氷が生成・固化・成長する際には、その過程によって異なる構造を形成する。したがって、海氷が厚さ方向（鉛直方向）に成長すると、その成長履歴が海氷内に層構造として記録される。

そこで、この層構造の解析と、各層内の含有物の分析を併せることで、どのような物質が海水のどのような成長（生成）過程を経て海水内に取り込まれたのかを推測できる。本研究では、海水による粒子状物質の取り込みに着目し、海水の含有物についてはコールターカウンターでの粒度分析（粒子の大きさと数の測定）、海水の層構造については低温実験室での厚片・薄片解析を行う。解析や分析に用いるサンプルは過去にアラスカで採取したものを使用することに加え、新たにアラスカやオホーツク海にて海水採取を実施する。

4．研究成果

新型コロナウイルスの感染拡大により、特に上記 について、国内出張を伴う海水試料の分析・解析や国内外の出張を伴う海水試料の採取が大きく制限された。そこで、 の係留観測データの解析の比重を大きくして、本研究を実施した。

係留観測データの解析

本研究では、フラジルアイスがどのような気象・海洋状況にて生成されるのか、またどの程度の深さまで存在しうるのかを一般的に特定することを試みた。フラジルアイスに関する現場観測例は過去に数件程度が報告されているが、これらは各観測地域におけるローカルな結果である。そこで、本研究では、一般的な知見を得るとともに、それに基づいて、フラジルアイスによる再懸濁物の取り込みが、一般的にどのような海域で生じるかの解明を試みた。

本研究で解析を行った係留観測は、1998～2000年にオホーツク海サハリン沖で実施された係留観測であり、沿岸から沖合にかけての合計7系の係留系データ（ADCPデータ）を解析した。なお、当初の予定では2系程度の解析予定であったが、新型コロナウイルスの感染拡大状況を鑑みた研究計画の変更に伴い、解析対象を7系に増やした。その結果、沖合の4系の係留系において、フラジルアイスからの音響後方散乱がはっきりと捉えられた。そのため、この4系のADCPデータを他の気象・海洋データと併せて詳しく解析した。

4系を代表して、水深800m程度の海域に設置された係留系による観測データ等の解析例を以下に示す。図1aは係留点付近における海水密接度（人工衛星データによる）であり、1月中旬から流水域の南下に伴って密接度の増加がみられた。図1dはADCPの音響後方散乱強度の鉛直分布の時系列である。観測全期間において、1日周期の生物起源とみられるシグナルが卓越した。このシグナルの散乱強度は-80～-75dB程度であった。このシグナルに重複して、-75dB以上の強いシグナルが海面から海中にかけて、図1の紫色のバーで示す期間に検知された。このシグナルが検知された期間は係留系が流水域の氷縁に位置したときのみで検知された。また、気象データと比較すると、図1bに示す風速が大きな期間にのみ、この強いシグナルが検知された。さらにこのような強いシグナルは海面から海中に伸びる形でのみ検知された。以上の状況から判断して、-75dB以上の強いシグナルはフラジルアイスによるものとみられる。

ここで、ADCPの後方散乱強度データではフラジルアイスと生物活動のシグナルが重複しており、このデータからフラジルアイスのみを断定することは難しい。そこで、ADCPの音波の散乱源がフラジルアイスと生物（1日周期を示すもの）のみと仮定し、音響理論に基づいて後者からの寄与を除いたものが図1eである。この図において、散乱強度が-75dB以上であり、海面から海中に伸び、また係留系が流水縁に位置したとき（紫色のバーで示す期間）のみに検知されたものをフラジルアイスのシグナルとみなし、その存在深度を求めた。その鉛直分布が図1fである。

同様の解析を全4系の係留ADCPデータなどで行った。その結果、フラジルアイスは平均的には水面下35m以浅に分布することが明らかとなった。その一方で、一時的ではあるが、最大で

水面下 100 m まで存在深度が達することもあった。フラジルアイスが海中に存在するか否か、すなわちフラジルアイスが生成されるか否かは風に依って決まっており、開放水面において風速が 8 m/s 以上になるとフラジルアイス生成が卓越することが明らかとなった。ただし、風速とフラジルアイスの最大存在深度との間には相関関係はなかった。

また、これら結果から、再懸濁物が水深 35 m 以浅に存在する海域では、フラジルアイスが生成されさえすれば海水への物質の取り込みが生じる可能性がある。さらに、水深 35 m 以浅の海域であれば、フラジルアイスが海底付近まで達する可能性があるため、僅かでも海底堆積物の再懸濁が生じれば、それらがフラジルアイスと接触することが可能である。フラジルアイスは海域を問わずに、開放水面で強風環境（風速 8 m/s 以上）となれば海中で生成されうる。極域海洋にはポリニヤという、海水域内にも関わらず風や海流によって開放水面が維持される海域が存在する。特に、海岸線に沿って形成される沿岸ポリニヤでは、水深が 35 m よりも浅いこと、開放水面が維持されること、風速が 8 m/s 以上となることの全ての条件が満たされ易い環境にある。したがって、フラジルアイスと再懸濁物の接触を通じた海水への物質の取り込みが、沿岸ポリニヤでは頻繁に生じる可能性が示唆される。

以上の結果をまとめた論文は、国際誌 cold regions science & technology にて受理された。

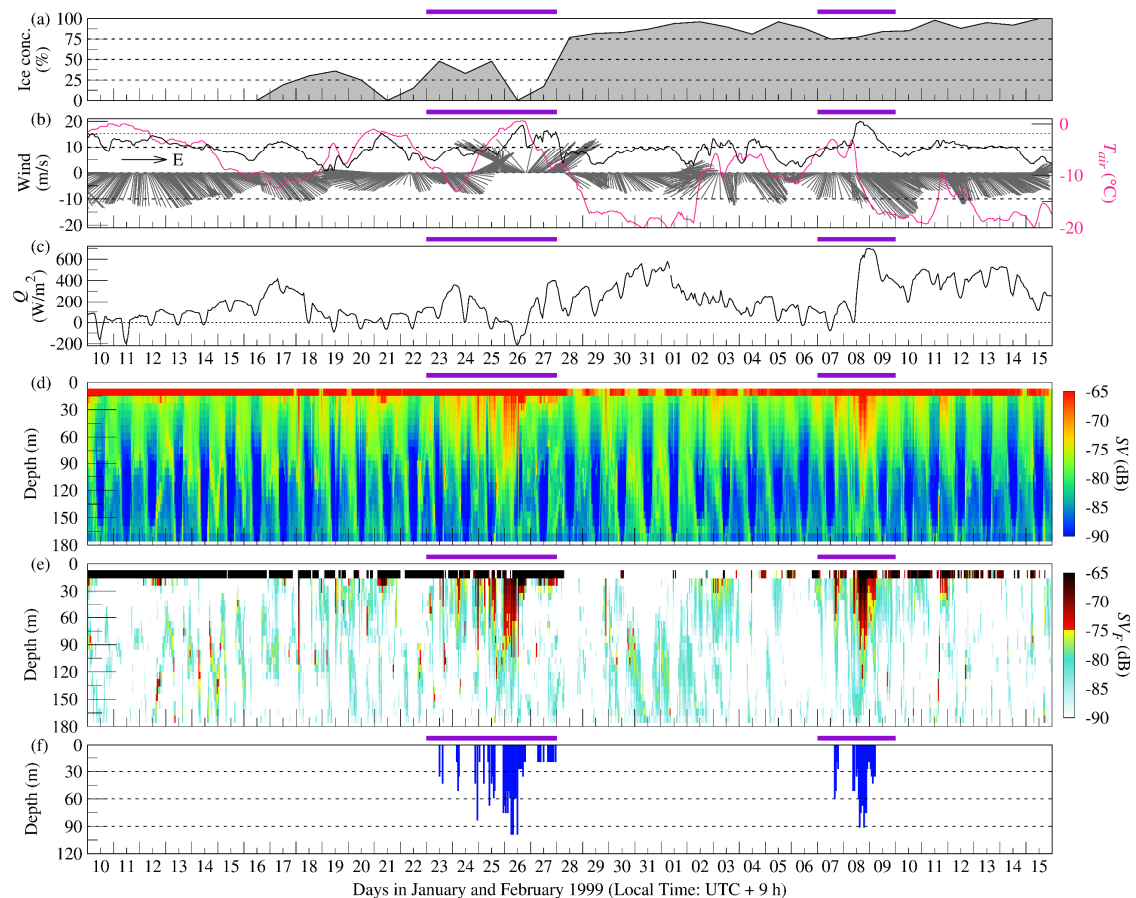


図 1. (a)係留点付近の海水氷接度。(b)係留点付近の風速および気温。(c)係留点付近での海面から大気への熱損失（開放水面を仮定した計算）。(d)ADCP が取得した音響後方散乱強度。(e)ADCP 音響散乱強度へのフラジルアイスからの寄与。(f)フラジルアイスの存在深度。

海水コア試料の解析

研究期間の 1・2 年目の春季に予定していたアラスカでの海水コア採取は新型コロナウイルスの感染拡大状況を鑑みて注視となった。また、研究期間 1・2 年目の冬季に予定していたオホーツク海での観測については、2 年目（令和 3 年度）にのみ実施が可能となった。そのため、本研究では令和 4 年 2 月上旬～中旬に、海上保安庁の砕氷能力を有する巡視船「そうや」でのオホ

ーツク海沖での海水観測を実施、および同年2月下旬～3月下旬にかけてはサロマ湖からウトロまでの北海道沿岸域にて海水コアや浮氷のサンプル採取を実施した。これらのサンプルについては「3.研究の方法」で示した方法にて、今後に解析を実施する。

2017、2019年にアラスカ北部のラグーン域で実施した海水観測にて採取された海水コア試料については、本研究課題の期間内にておよそその解析・分析が終了した。全8本の海水コアのうち、5本は sediment-laden layer または dirty layer と呼ばれる、堆積物由来の粒子状物質を多く含み、色が茶色っぽく見える氷であった(図2)。これらの氷の層構造を解析すると、dirty layer はフラジリアイスが集積・固化して形成される粒状氷の層と一致した。一方で、dirty layer ではない層や、そもそもこの層を含まない氷は、海水が底面結氷により下方に成長する柱状氷や積雪が固化した雪ごおりで形成されていた。このことから、大量の堆積物はフラジリアイスの生成に関連して海水中に取り込まれたことが示唆される。また、コールターカウンターでの海水内の含有粒子の分析結果から、dirty layer 内での含有粒子の濃度は、その他の層のものよりも1~2オーダーほど大きいことや、dirty layer とその他の層では含有粒子の粒度分布が大きく異なり、dirty layer 中には他の層ではみられない大型の粒子が多いことが明らかとなった。つまり、dirty layer 中の粒子は、降雪中の粒子や常に海中に存在する浮遊物とは異なり、フラジリアイスが生成される環境にてイベント的に海中に存在したものであることが推測される。この研究結果より、フラジリアイスが生成される際には強い気象・海洋擾乱が伴う。この状況では、普段は海底に沈んでおり、海中には存在しない大型の粒子も海中を浮遊していると考えられる。つまり、海水コアの解析結果とこの研究結果を併せると、dirty layer の形成は、フラジリアイスと再懸濁物の接触を通じて行われることが示唆される。これらの結果をまとめた論文については、国際誌への投稿に向けた準備を行っている状況である。

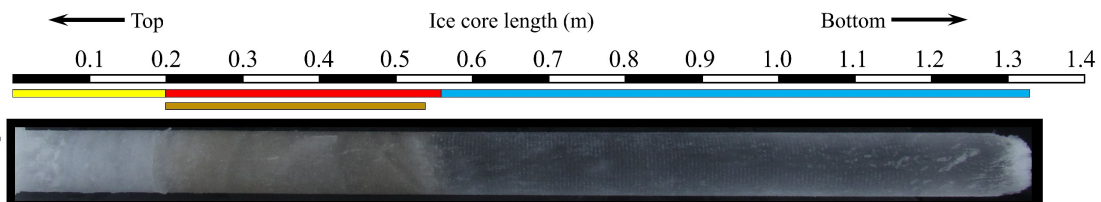


図2. Dirty layer を含む海水コア試料の例。厚さ0.2 - 0.5 m程度にある有色の層が dirty layer に相当する。黄色、赤色、水色のバーは海水の層構造に対応し、各々、雪ごおり、粒状氷、柱状氷である。

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 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ito Masato, Ohshima Kay I., Fukamachi Yasushi, Mizuta Genta, Kusumoto Yoshimu, Kikuchi Takashi	4. 巻 192
2. 論文標題 Underwater frazil ice and its suspension depth detected from ADCP backscatter data around sea ice edge in the Sea of Okhotsk	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Cold Regions Science and Technology	6. 最初と最後の頁 103382 ~ 103382
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.coldregions.2021.103382	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 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 伊藤優人、大島慶一郎、深町康、水田元太、楠本仁麦、菊地隆
2. 発表標題 サハリン沖係留観測で得られたADCPデータを用いたフラジリアイスの存在深度の推定
3. 学会等名 2020年度日本海洋学会秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masato Ito, Andrew R. Mahoney, Chris M. Polashenski, Takenobu Toyota, Sumito Matoba, Takashi Kikuchi
2. 発表標題 The relation between sea ice stratigraphy and particle concentration in an Alaskan coastal lagoon
3. 学会等名 The 11th Symposium on Polar Science (国際学会)
4. 発表年 2020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
---------------------------	-----------------------	----

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		
米国	University of Alaska Fairbanks	Thayer School of Engineering	