

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 26 日現在

機関番号：32658

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26550015

研究課題名(和文)海氷コアを採集しないアイスアルジーのモニタリング手法の開発

研究課題名(英文)Development of monitoring method for ice algae without collecting sea ice core

研究代表者

朝隈 康司 (Asakuma, Koji)

東京農業大学・生物産業学部・助教

研究者番号：60349818

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：極域や亜寒帯域の海氷中に棲息するアイスアルジーは海水中に棲息する植物プランクトンと比較してバイオマス量が遥かに高いが、その量を把握するにはアイスコアを採集する必要があり重労働である。本研究では、青色レーザーを用いて氷中の有光層中のアイスアルジーを蛍光させその蛍光量からクロロフィルa濃度の計測装置の開発を検討した。サロマ湖でアイスコアを採取し得られた蛍光値とアイスコアを融解して計測したクロロフィルa濃度がよく一致することを確認した。本システムは小型・軽量化が可能で、飛行ドローンなど無人観測への展開が可能であり、極域における生態系解明などへの大きな寄与が期待できる。

研究成果の概要(英文)：The ice algae live in the sea ice in the polar or subarctic zone has much higher biomass than the phytoplankton live in the seawater, but in order to estimate the amount of it, it is necessary to collect the sea ice core and its collection in extreme cold environments is hard work. In this study, we developed a device for measuring the chlorophyll a concentration from an amount of fluorescence value by fluorescing ice algae in a photic layer in a sea ice using 405 nm blue laser. It was confirmed that the fluorescence value of the ice core collected at Lagoon Saroma-ko obtained by this device and the actual concentration of chlorophyll a measured by melting the same ice core similar well. This system can be made compact and lightweight, it is possible to develop to unmanned observation such as flight drone, and it can be expected to make a great contribution to clear of the ecosystem in the polar region.

研究分野：リモートセンシング

キーワード：極域観測 アイスアルジー リモートセンシング

1. 研究開始当初の背景

(1) オホーツク海南部北海道沿岸はサケ・ホタテなど国内の漁業資源の数パーセントを水揚げする有数の漁業基地である。近年その漁業資源を支える低次生産のメカニズムの解明を目指した研究が行われるようになり、春季には氷縁ブルームや融雪水の流入、夏から秋季にかけては宗谷暖流の盛衰に伴う水塊交代などによる栄養塩供給、これに伴う植物プランクトンの現存量および基礎生産量がわかってきた。また冬季には海水が接岸するため海水下の生態系に関しては未解明な部分が多かったが、近年アイスアルジーや植物プランクトンの種組成や現存量が調査されるようになってきた。

(2) 海水のうち定着氷の下の海水中では太陽光が氷によって遮断されるため植物プランクトンによる基礎生産は低下するがその一方で氷中にはアイスアルジーが生息しており、その現存量はクロロフィル濃度で $177.5 \mu\text{g L}^{-1}$ にもおよぶことが報告されている(服部他, 2009)。融氷時には大量のアイスアルジーが海中に流出すると考えられており、実際、オホーツク海北海道沿岸やサロマ湖、能取湖では融氷時期にあたる4月には春季ブルームが観測される。このため、海水中のアイスアルジーの分布とその総量を高い頻度の時間スケールで見積もることが、オホーツク海の高い生物生産のメカニズムの解明に重要と考えられている。

(3) アイスアルジーの採取にはアイスコアの採掘が必要であるが、危険な作業と大変な労力が伴うため省力化が望まれる。アイスアルジーは藻類であり、クロロフィル濃度を計測することによりその総量を見積もることができるため、非破壊であるリモートセンシングが適用できると考えられるが、海水は高アルベドであるため衛星に代表されるパッシブリモートセンシングは期待できない。この一方で、アイスアルジーは光合成を行うため薄い氷の有光層内に存在するので、光源を別に用意するアクティブリモートセンシングであればクロロフィルの濃度算出が可能であると考えた。

(4) 一方、アイスアルジーは主に氷中のブラインチャンネル(高濃度塩分が流出した跡)に生育するため氷の生成過程とも密接に関係する。このため、アイスアルジーによる蛍光のみならず、海水自体の光学特性も同時に把握する必要があった。

2. 研究の目的

オホーツク海南部北海道沿岸は海水が着氷する南限であり、着氷中はアイスアルジーの生育に適した環境である。アイスアルジーは水中のプランクトンと比べ単位体積あたりの個体数が多いため基礎生産量が高い。また、融氷時期には大量に水中に落下するため海洋生態系に大きく影響を与えていると考えられる。アイスアルジーの生態に関わる研

究は近年おこなわれるようになってきているが、試料採取にはアイスコアの採掘など大変な労力がかかるため、氷中の大域的分布やその総量の見積が難しいのが現状である。そこで、本研究では、リモートセンシング技術を用いて氷を物理的に採取することなくアイスアルジーのクロロフィル a の計測システムの開発を検討した。

3. 研究の方法

本研究では、近年安価となってきた青紫色半導体レーザーを励起光源として、海水を透過しアイスアルジーによって蛍光した赤色光が再び海水を透過して戻ってきた蛍光を観測するシステムの開発を目的に、海水の青色光ならびに赤色光の透過特性並びに散乱特性を計測し、その計測結果から氷中のクロロフィル a 濃度を推定した。

(1) サロマ湖を想定した疑似海水を作成して、クロロフィル a の励起光に対する透過率を測定した。疑似海水は、塩化ナトリウム、塩化カリウム、硫酸カリウム、塩化マグネシウム、硫酸マグネシウム、硝酸ナトリウム、リン酸二カリウム、珪酸ナトリウムを混合し、32 PSU に調整した人工海水を -8°C で冷凍し作成した。励起光源として、安価で入手しやすい 405 nm、200 mW、CW の半導体青紫色レーザーを用いた。励起光レーザーを疑似海水上部に照射し、疑似海水下部から透過光強度をスペクトロメーターで観測した。スペクトロメーターには、Ocean Optics 製の USB-2000 を用いた。

(2) 疑似海水下部にクロロフィル a 標準物質を注入した疑似アイスアルジー系を構築した(図1)。励起光レーザーを人工海水上部に照射し、海水を透過しクロロフィル a によって生じた蛍光が再び海水を透過して戻ってきた光の波長と強度をスペクトロメーターで観測した。

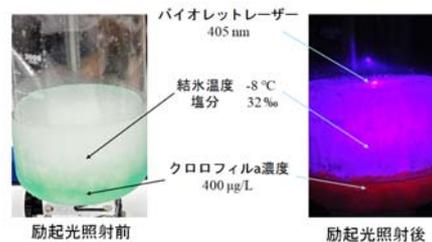


図1 疑似アイスアルジー系のクロロフィル a の蛍光

(3) (2)の方法の SN 比を向上しより厚い氷厚に対応を目的に、広範囲を集光する方法を検討した。今回、励起光を広げる光学系を組み合わせることなく氷上1点照射をした際、氷内の自己散乱で広がった光によって照らされた蛍光を集光する方法を検討するため、氷厚別に励起レーザー光の中心からの透過光分布を計

測し、それを合成して氷内の散乱光分布を求め、氷内の散乱角を求めた。

(4) 海氷の透過率は結氷環境によって様々に変化する。今回は結氷温度 -3°C から -8°C まで変化させて疑似海氷の透過率の変化を測定した。また氷厚との関係は、同一の氷を削るのではなく、凍結させる際の海水の高さを調整して作成した氷をそれぞれ計測した。

(5) サロマ湖で採取された実海氷上部から 405 nm レーザーを照射し、側面からファイバースコープで蛍光を観測した。この氷を融解し実測定したアイスアルジーのクロロフィルa濃度と蛍光値を比較した。

(6) (1)-(5)の結果を基に、アイスアルジー計測用飛行ドローンを開発した。飛行ドローンにはDJI製のphantom 4を利用した。励起光源には、 405 nm 、 30 mW のものを用い、ドローンカメラには、 660 nm のロングパスフィルターを用いた。励起光源とフィルタを装着する治具は3Dプリンターを使って制作した。



4. 研究成果

(1) 図2に 405 nm における疑似海氷の透過光強度を示す。図中の測点を指数関数近似すると、消散係数は 0.413 程度であることがわかった。一方、サロマ湖の実海氷の透過率は、氷厚 40 cm で 3% 程度であることから、消散係数は 0.09 程度であり、疑似海氷とは大きく開きがあった。これは、後述するが、結氷温度に起因することがわかった。

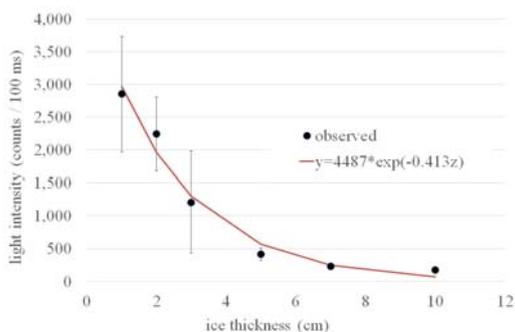


図2 405 nm における疑似海氷の透過光強度

(2) 図3に疑似海氷下のクロロフィルaの氷厚別濃度別の蛍光強度を示す。図3は、図1

に示したように疑似海氷上部から励起光レーザーを照射し、疑似海氷上部へ到達した蛍光強度をスペクトロメーターで測定したものである。この系での蛍光強度はクロロフィルa濃度に対して良好な線形関係にあり、海氷上部からのレーザー照射により、概算で 20 cm 程度の氷厚でアイスアルジーの蛍光を受光できることがわかった。

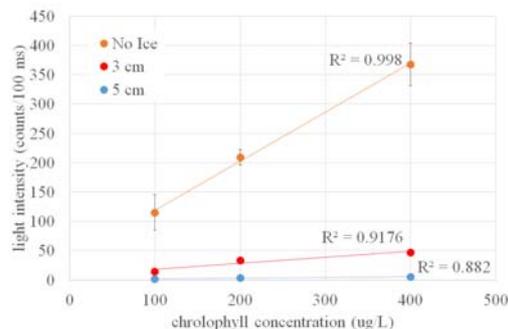


図3 疑似海氷下のクロロフィルaの氷厚別濃度別の蛍光強度

(3) 図4に 405 nm における疑似海氷内の散乱光分布を示す。図中の赤線は、反対面にレーザー光を1点照射した場合の海水中心から水平方向に散乱光強度が等しくなる箇所までを結んだ線。この赤線の広がりから、氷内の散乱角を求めると、 39.6° であることがわかった。

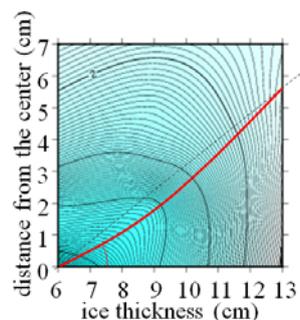


図4 405 nm における疑似海氷内の散乱光分布

(4) 図5に 405 nm における結氷温度別氷厚別の海氷透過率を示す。結氷温度と透過率の関係は、バラツキが大きく必ずしも温度順にはならないが、結氷温度が低いほど透過率が低い傾向があることがわかった。これは、氷の結晶構造のうちグレイン（鉛直方向に長く、斜め方向を向いた柱状結晶）が、結氷温度が高いほど成長していることを目視と超音波探傷機で確認した。氷厚に関しては、 6 cm の氷厚で透過率が最も高く、 6 cm 以上の氷厚であれば氷厚が厚くなるほど透過率が低くなる傾向があった。また、 6 cm 未満の氷は、グレインの構造が見られず、結晶が細かく様々な方向を向いていた。このため散乱の大きな青色光では透過率が低くなったと考え

られる。一方、680 nm では、405 nm の場合とは逆に、結氷温度が低いほど透過率が高い傾向がみられ、赤色光の場合は氷結晶による散乱よりも水分子による吸収が支配的であることがわかった。

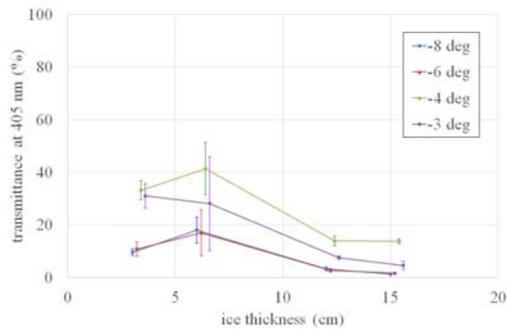


図 5 405 nm における結氷温度別氷厚別の海水透過率

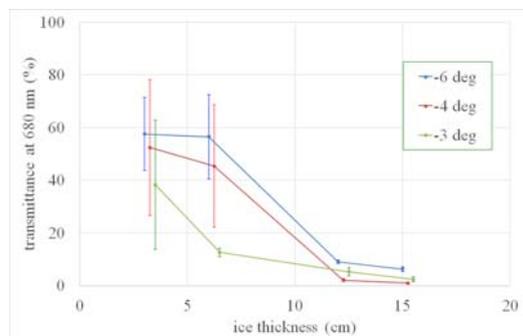


図 6 680 nm における結氷温度別氷厚別の海水透過率

(5) 図 7 にサラマ湖で採取された直径 15 cm、氷厚 52 cm の海氷中のクロロフィル a による蛍光と励起光によるスペクトルを示す。図 7 は、海氷側面からの蛍光を海氷上方から 5cm 刻みに計測した結果である。図中の 680 nm 付近のピークがアイスアルジーのクロロフィル a による蛍光である。462 nm 付近は、励起光の水分子によるストークス波、810 nm 付近は励起光の 1/2 高調波が得られた。図 8 に氷厚別の 680 nm ならびに 810 nm 付近のピーク値を示す。この 810 nm の光強度から実海氷の透過率を求め、680 nm で観測された蛍光強度を透過率で除した値を求めた。図 9 に氷厚別の実クロロフィル a 濃度と 810 nm の透過率で補正された蛍光値を示す。図中の実クロロフィル a 濃度は、海氷を氷厚方向へ 10 cm 刻みに融解させた後、ウェリッシュマイヤー法で計測した。透過率で補正した蛍光値と実クロロフィル a 濃度はよく一致した。

(6) 図 10 に空撮によるクロロフィル a 標準物質濃度とドローン搭載カメラのピクセル輝度を示す。図 10 はビーカーにクロロフィル a 標準物質を入れ、海氷の代わりに擦りガラスで蓋をしたものをドローンに搭載した青色レーザーで照射、ドローン搭載カメラで

空撮した後、クロロフィル a 濃度別にピクセル輝度をプロットしたものである。クロロフィル a 濃度とピクセル値はほぼ線形な関係にあり、ドローンによるアイスアルジー計測が可能であることがわかった。2017 年は天候に恵まれず、また海明けも早かったため、実海氷の空撮の機会に恵まれなかった。今後実用に向けて調整を続ける。

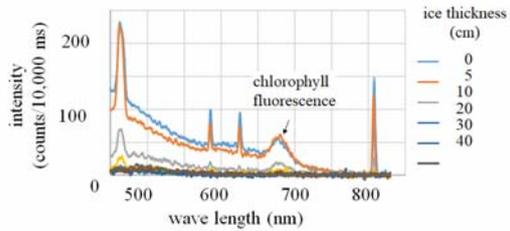


図 7 サロマ湖で採取された海氷の氷厚別スペクトル

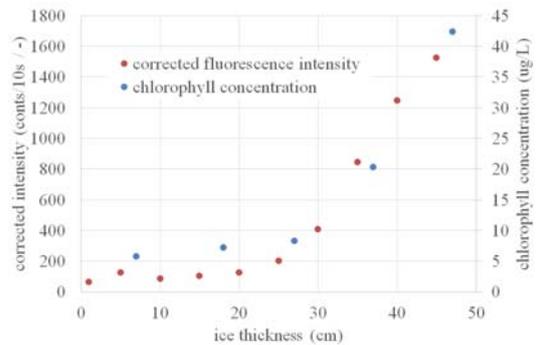


図 8 サロマ湖で採取された海氷の 680 nm ならびに 810 nm 付近の氷厚毎の光強度

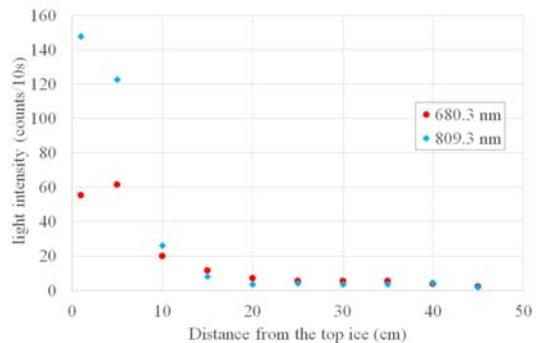


図 9 サロマ湖で採取された海氷の氷厚別の実クロロフィル a 濃度と 810 nm の透過率で補正された蛍光値

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 6 件)

①喜田直人, 中谷忠大, 朝隈康司, サロマ湖海氷のクロロフィル a 蛍光観察のための海氷透過特性の観測、計測自動制御学会第 42 回リモートセンシングシンポジウム、2017 年 3

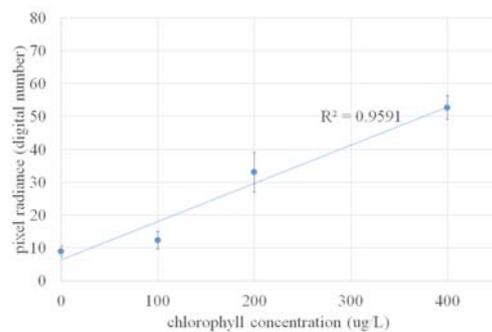


図 10 ドローン空撮によるクロロフィル a 標準物質濃度とドローン搭載カメラのピクセル輝度

月 8 日、千葉大学 (千葉県・千葉市)

②朝隈康司、アイスアルジーのリモートセンシングの開発、千葉大学環境リモートセンシング研究センター第 19 回リモートセンシングシンポジウム、2017 年 2 月 16 日、千葉大学 (千葉県・千葉市)

③朝隈康司, 中谷忠大, 喜田直人、サロマ湖海氷内クロロフィル a 蛍光観察のための海氷内光学特性、日本リモートセンシング学会第 61 回 (平成 28 年度秋季) 学術講演会、2016 年 11 月 1 日-11 月 2 日、新潟テルサ (新潟県・新潟市)

④中谷忠大, 澤藤勇, 濱崎瑛, 朝隈康司、サロマ湖海氷中のクロロフィル a を対象としたリモートセンシング手法の開発、計測自動制御学会第 41 回リモートセンシングシンポジウム、2016 年 2 月 22 日、首都大学東京秋葉原サテライトキャンパス (東京都・千代田区)

⑤ Koji ASAKUMA, Yu SAWAFUJI, Akira HAMASAKI, Tadahiro NAKATANI, Development of remote sensing method for ice algae in ice covered Lagoon Saroma-ko, Hokkaido, The 23th CReS Remote Sensing Symposium, December 1-2, 2015, Chiba (Japan)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

朝隈 康司 (ASAKUMA, Koji)
東京農業大学・生物産業学部・助教
研究者番号：6 0 3 4 9 8 1 8

(2) 研究分担者

塩本 明弘 (SHIOMOTO, Akihiro)
東京農業大学・生物産業学部・教授
研究者番号：4 0 3 4 4 3 2 9