

— 2014年度 日本海洋学会 岡田賞受賞記念論文 —

## 海水の生成と融解が極域海洋の物質循環に与える影響\*

野村 大樹<sup>1,2</sup>

### 要 旨

海水の生成と融解に伴う物理場の変化が極域海洋の物質循環過程に与える影響を把握するため、室内実験、フィールド観測を実施した。従来、海水は、海洋表面を覆い、大気–海洋間の物質循環を妨げる“障壁”として認識されてきた。しかし、海水は、気候変動に関わる温室効果ガスや揮発性有機化合物等の大気–海洋間の交換に重要な役割を果たしていることが分かってきた。本稿では、著者の研究グループが、これまで実施してきた海水の生成と融解が極域海洋の物質循環に与える影響に関する研究を紹介する。

キーワード：二酸化炭素, 海水, 物質循環, 極域

### 1. はじめに

高緯度海域に分布する“海水”は、海洋の約1割の面積を占めており (Comiso, 2010), 地球規模の気候変動を制御する要因として大きな役割を担っている。海水は、大気–海洋間で断熱材として働き、海洋からの熱放射を軽減させる効果があると認識されている (Maykut, 1978)。また、海水表面で太陽光を反射する効果 (アルベド) により、地球温暖化を抑制している (Shine and Henderson-Sellers, 1985)。海水生成時には、海水内に存在す

る高塩分水であるブラインが、海水から海水下に排出される (Wakatsuchi and Ono, 1983)。その結果生成する高密度水が、海洋深層に沈み込み、海洋大循環の駆動力となっている (Schmitz, 1995)。さらに海水内では、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水生態系を作り出している (Thomas *et al.*, 2010)。

物質循環の観点からは、海水は単なる大気–海洋間の物質交換の“障壁”として認識されてきた。しかし、海水は、普段我々が目にする淡水氷とは異なり、多孔性の構造を持ち、気体や物質のやり取りが起きる可能性を示した基礎的研究 (Gosink *et al.*, 1976) が、過去に報告されていた。近年では、地球温暖化の影響による極域での急激な環境変動が懸念され、海水が物質循環に果たす役割を把握する必要性が認識されつつあった。このような背景の中、著者の研究グループでは、2003年より海水の生成と融解が極域海洋の物質循環に与える影響を把握するため、室内実験や現場観測を実施してきた。本稿で

\* 2014年5月30日受領; 2014年11月8日受理

著作権: 日本海洋学会, 2015

1 北海道大学低温科学研究所

〒060-0819 北海道札幌市北区北19条西8丁目

2 日本学術振興会

〒102-8471 東京都千代田区一番町6

TEL: 011-706-5480

e-mail: daiki@lowtem.hokudai.ac.jp

は、これまで実施してきた著者の研究グループの成果を中心に述べる。

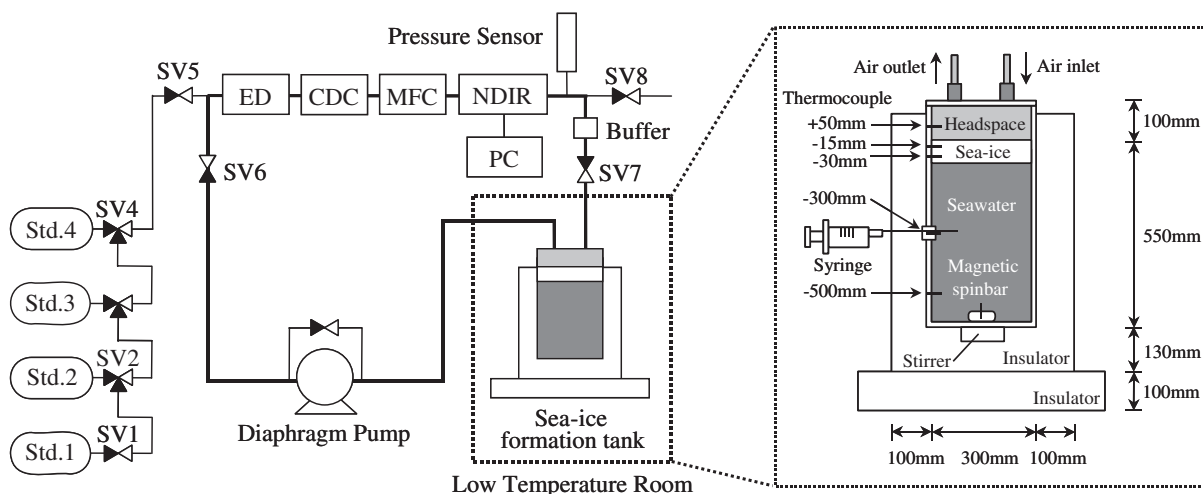
## 2. 海氷成長に伴う大気への炭素輸送プロセス

炭素循環モデルにおいて、海氷存在域では大気-海洋間の  $\text{CO}_2$  交換は無いものとされてきた (Yager *et al.*, 1995; Sun and Matsumoto, 2010)。また、全球規模での炭素循環研究において、大気-海洋間の  $\text{CO}_2$  交換に関する研究がなされていたが、著者の研究グループが研究を始めた当時は、両極海洋において広大なデータ空白域が目立っていた (Takahashi *et al.*, 2002)。これは、海氷存在域での炭素循環過程が不明であったことが一因であったと考えられる。一方、海氷物理分野の先行研究によると、海氷にはブライン・チャネルが存在し、その微細構造は多孔質であることが分かっていた (Golden *et al.*, 1998)。そこで著者の研究グループでは、これまでの物

質循環研究の先入観を疑い、海氷を“無数の穴の開いた蓋”として捉えることから始めた。そのため、まず初めに、2-1. 海氷生成を再現して気体交換過程を調べる室内実験を行った。次に、2-2. 海氷域での氷上野外観測を実施し、気体交換過程の現場検証を行った。理想条件下の水槽実験では、海氷上の積雪や海水中の生物活動の影響を検討できないため、野外観測により補完した。

### 2.1 低温室での海氷生成実験

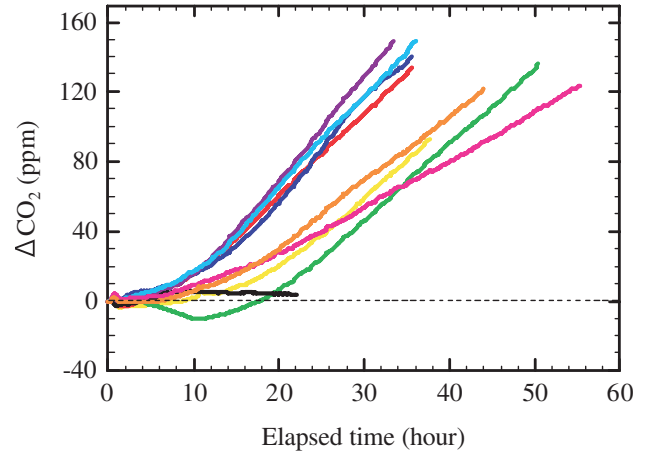
海氷生成容器を低温室に設置し (Fig. 1), 海氷が生成・成長する際の容器上部の気相中  $\text{CO}_2$  濃度を測定する実験を行った (Nomura *et al.*, 2006)。その結果、海氷から  $\text{CO}_2$  が放出されて気相中  $\text{CO}_2$  濃度が増加する現象を捉えることが出来た (Fig. 2)。これは、海氷中ブラインの塩分濃縮に伴う全炭酸濃度の増加、 $\text{CO}_2$  溶解度の減少、炭酸系の平衡の変化によって、海氷内の  $\text{CO}_2$  濃度が、大



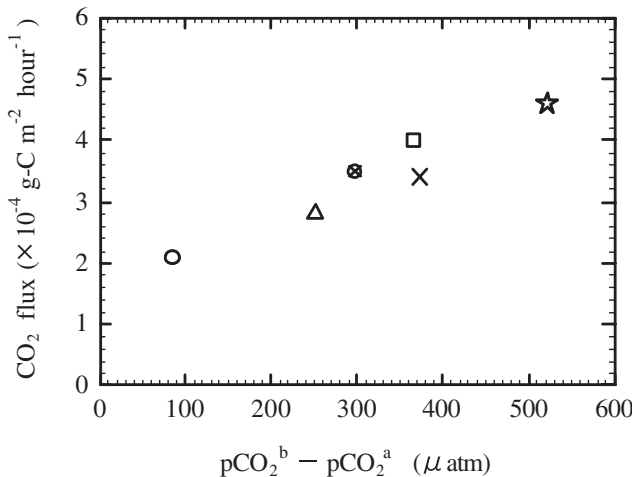
**Fig. 1.** Schematic diagrams of the  $\text{CO}_2$  measuring system (left panel) and sea-ice formation tank (right panel). The  $\text{CO}_2$  measuring system consists of a sea-ice formation tank, a non-dispersive infra-red gas (NDIR) analyzer (LI-6262, LI-COR, Inc.), a chemical desiccant column ( $\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2$ , CDC), an electric dehumidifier (ED), solenoid valves (SV), a diaphragm pump, a mass flow controller (MFC), a pressure gauge, and a data acquisition unit connected to a personal computer (PC) (left panel). The squared sea-ice formation tank (300 mm × 300 mm × 650 mm, right panel) has been installed in the low-temperature room at ILTS, Hokkaido University. The tank is made of transparent acrylic boards with 10 mm thickness and surrounded by the insulator with 100 mm thickness to avoid freezing from the side of the tank. We installed a stirrer under the sea-ice formation tank and put a magnetic spinbar at the bottom of the tank to provide homogeneous physical/chemical properties of seawater. (From Nomura *et al.* 2006)

気に対して過飽和となるため (Papadimitriou *et al.*, 2003), ブライン・チャンネルを通して海水から大気へ CO<sub>2</sub> が放出されたためであると結論づけた。本室内実験は、結氷時の海水が大気に対して CO<sub>2</sub> の放出源として働くことを示唆した。大気-海水間の CO<sub>2</sub> 交換量は、海水成長とともに増加し、その値は主に、大気-海水中ブライン間の CO<sub>2</sub> 濃度差に依存した (Fig. 3)。

また、海水下海水の全炭酸濃度の測定し、海水生成が海水下海水への炭素輸送過程に与える影響を評価した



**Fig. 2.** Time-series of the CO<sub>2</sub> concentration in the air above the sea-ice for each experiment for Exp. 1 (pink: -15°C of room temperature, used seawater), Exp. 2-A (orange: -20°C of room temperature, used seawater), Exp. 2-B (yellow: -20°C of room temperature, used seawater), Exp. 3-A (light blue: -25°C of room temperature, used seawater), Exp. 3-B (red: -25°C of room temperature, used seawater), Exp. 3-C (blue: -25°C of room temperature, used seawater), Exp. 3-D (yellow green: -25°C of room temperature, used seawater), Exp. 3-E (black: -25°C of room temperature, used MQ water), and Exp. 4 (purple: -30°C of room temperature, used seawater). CO<sub>2</sub> indicates the increase in CO<sub>2</sub> concentration since the beginning of decreasing room temperature to form the sea-ice. CO<sub>2</sub> concentration increased at a larger growth rate (lower room temperature) with the growth of sea-ice, increasing by 90 to 150 ppm at the end of the experiment except for Exp. 3-E. For Exp. 3-E, at the beginning of ice formation, ΔCO<sub>2</sub> increased slightly (5.5 ppm). During ice formation, ΔCO<sub>2</sub> was constant within the range of 1.3 ppm. The slight increase in ΔCO<sub>2</sub> at the beginning of ice formation might be caused by the same process that occurred during sea-ice formation. Before cooling the room temperature (elapsed time < 0), the CO<sub>2</sub> concentration in the air equilibrated with the seawater was constant for all experiments. After cooling, ΔCO<sub>2</sub> decreased slightly due to the temperature effect on pCO<sub>2</sub> in seawater (4.23 %°C<sup>-1</sup>, Takahashi *et al.*, 2002). The horizontal dashed line indicates the CO<sub>2</sub> = 0 ppm. (From Nomura *et al.* 2006)



**Fig. 3.** CO<sub>2</sub> flux versus the difference in pCO<sub>2</sub> between brine and overlying air (pCO<sub>2</sub> brine - pCO<sub>2</sub> air) at the end of each experiment for Exp. 1 (open circle), Exp. 2-A (open triangle), Exp. 2-B (open cross circle), Exp. 3-A (open square), Exp. 3-D (cross), and Exp. 4 (open star). The CO<sub>2</sub> flux increased along with the increase of the difference in pCO<sub>2</sub> between the brine and the air. We also found that the CO<sub>2</sub> flux was correlated well with the salinity and negatively with the volume of the brine in the upper part of the sea-ice (see Nomura *et al.*, 2006). These suggested the larger role of the difference in partial pressure of CO<sub>2</sub> between brine and air as compared with that of competitive change in the brine volume. (From Nomura *et al.* 2006)

(Nomura *et al.*, 2006)。海水内に存在する高塩分水であるブラインが、海水から海水下に排出され塩分が増加することと同様に、全炭酸濃度も増加した。海水下海水の全炭酸濃度の増加より炭素収支計算した結果、海水の母海水に含まれる炭素の約7割が、海水成長時のブライン排出により海水下海水へ輸送されることを見積もった。これは、海水からブラインとして排出された炭素の大部分が、高密度水の生成と同時に海洋表層から深層に沈み込み、深層循環に取り込まれることを意味している。

## 2.2 氷上野外観測

大気-海水間の  $\text{CO}_2$  交換量を実測するため、オホーツク海、北極海、南極海の氷上でチャンバー法を用いた野外観測を行った (Fig. 4) (Nomura *et al.*, 2010a; 2010b; 2013a)。その結果、実際の海水においても室内実験と同様に、 $\text{CO}_2$  交換が起きることが分かった。また、大気-海水間の  $\text{CO}_2$  交換量は、a) 海水内部での  $\text{CO}_2$  濃度 (大

気中濃度は一定) と、b) 海水面の物理的形態に依存することを発見した。まず a) の変化要因として、a-1) 生物活動による光合成・呼吸、a-2) 海水の生成・融解による海水の濃縮・希釈が挙げられる。海水融解時の生物地球化学成分と海水希釈率を調べたところ、海水内部の  $\text{CO}_2$  濃度の変化をもたらすのは、a-2) が支配的であることが分かった (Nomura *et al.*, 2010a; Nomura *et al.*, 2010b)。次に b) の変化要因として、海水表面に降り積もった雪の影響を考えた。海水表面と  $\text{CO}_2$  交換効率の関係を調べたところ、積雪量が増加すると  $\text{CO}_2$  交換効率が著しく減少することが分かった (Fig. 5) (Nomura *et al.*, 2010a; Nomura *et al.*, 2013a)。また、これらの海水域での  $\text{CO}_2$  交換過程を南極海での観測航海の結果に組み込み評価した (Nomura *et al.*, 2014)。

また、海水内での炭素循環素過程を把握することを目的として、炭酸カルシウムの6水和塩 ( $\text{CaCO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) の結晶であるイカイト (Fig. 6) に注目して研究を実施した (Nomura *et al.*, 2013b)。イカイトは、自然界では主に海底湧水や海底地層に存在する (例えば Pauly, 1963) ことが知られており、地球上の炭素収支を見積もる上で鍵となる物質の一つである。全球規模での定量的な評価

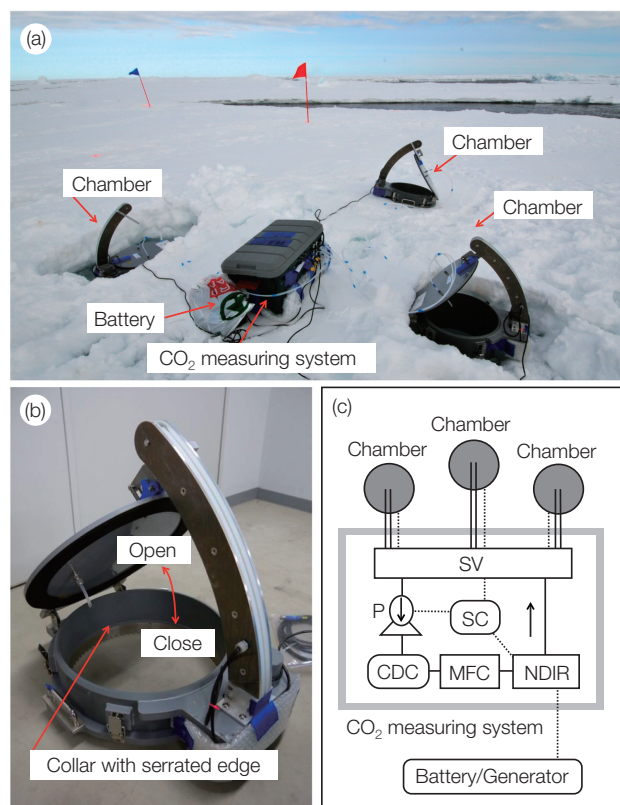
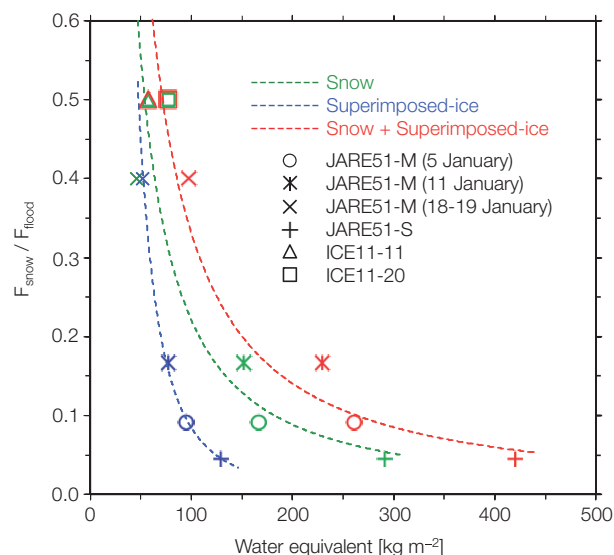


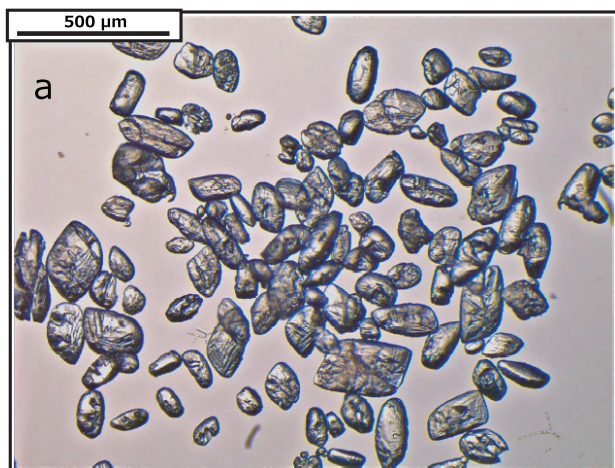
Fig. 4. (a) Photographs of the  $\text{CO}_2$  flux chamber system during the spring melt-onset north of Svalbard during the Norwegian Polar Institute's Centre for Ice, Climate and Ecosystems (ICE) cruise in 2011 on R/V Lance (Station ICE11-11 on 30 April 2011) and (b) scaled close up of one of the chambers. (c) Schematic diagram of the  $\text{CO}_2$  flux chamber system. Sample air from the chambers was passed at a flow rate of  $1.0 \text{ L min}^{-1}$  by a diaphragm pump (P) through 1/4 in. Teflon tubes connected to a non dispersive infrared gas (NDIR) analyzer, a chemical desiccant column of  $\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2$  (CDC), solenoid valves (SV), and a mass flow controller (MFC). Solid and dashed lines indicate the closed loop of flowing air for measuring the air  $\text{CO}_2$  concentration in the chambers and the electric circuit, respectively. (From Nomura *et al.* 2013a)



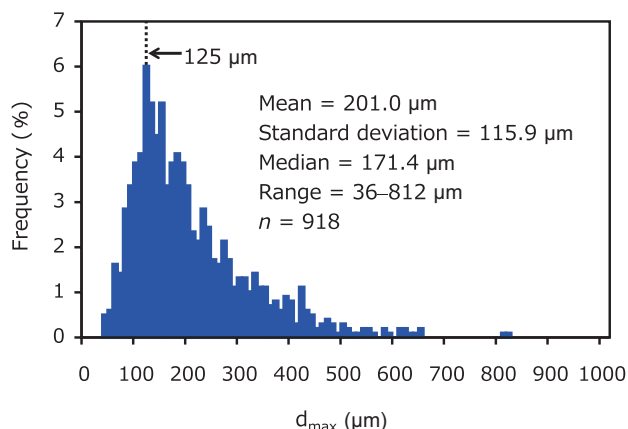
が待たれる中、提唱から45年を経て、ついに南極海の海水内から発見された (Dieckmann *et al.*, 2008)。イカイトの研究は始まったばかりであり、その形態や存在量についての情報が極端に不足していた。そこで、著者の研究グループでは、北極海の海水に注目し、海水内のイカイトのサイズ分画 (Fig. 7) や定量評価した (Nomura *et al.*, 2013b)。また、南極海の冬季から夏季における海洋表層の炭酸系の変化より、海水融解時に海水から放出されたイカイトの溶解が海洋表層の炭素循環に与える影響を評価した (Nomura *et al.*, 2014)。このように、海水を介した炭素循環のメカニズムを明らかにしてきた。



**Fig. 5.** Relationships between the  $F_{\text{snow}}/F_{\text{flood}}$  ratio and water equivalent of snow (green symbol and dashed line), superimposed-ice (blue symbol and dashed line) and snow and superimposed-ice combined (red symbol and dashed line). Symbols represent JARE51-M (circle: 5 Jan. 2010, star: 11 Jan. 2010, cross: 18-19 Jan. 2010), JARE51-S (plus), ICE11-11 (triangle) and ICE11-20 (square). JARE51 is the 51st Japanese Antarctic Research Expedition. Snow surface  $\text{CO}_2$  flux ( $F_{\text{snow}}$ ) measures  $\text{CO}_2$  flux at the snow-atmosphere interface.  $\text{CO}_2$  flux measurements over the flooded slush layer ( $F_{\text{flood}}$ ) were similar to measurement of  $F_{\text{snow}}$ , except that the chamber was placed directly over the slush after the overlying snow or superimposed-ice had been carefully removed without disturbing the slush layer.  $F_{\text{snow}}/F_{\text{flood}}$  ratio indicated the measure how potential  $\text{CO}_2$  flux across the flooded slush surface was reduced due to the presence of the snow and/or superimposed-ice. In order to characterize the ice surface condition combined with snow depth and density, the water equivalent of snow was calculated by multiplying snow depth by snow density. For stations where superimposed-ice was formed over the flooded slush layer, water equivalent of superimposed-ice was also evaluated. A strong relationship between the  $F_{\text{snow}}/F_{\text{flood}}$  ratio and water equivalent suggests that the  $\text{CO}_2$  flux is clearly affected by snow and superimposed-ice properties. Dashed lines indicate the fitting curve used to describe the relationship. (From Nomura *et al.* 2013a)



**Fig. 6.** Photographic image of ikaite crystals from first-year Arctic pack ice, overlying snow and slush layers during the spring melt-onset north of Svalbard during ICE cruise in 2011 on R/V Lance. (From Nomura *et al.* 2013b)

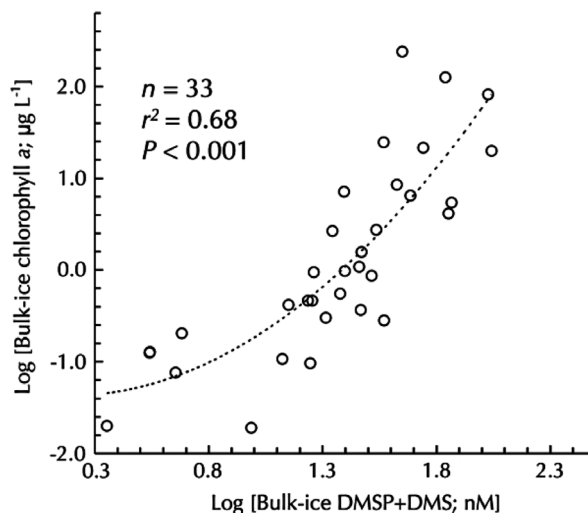


**Fig. 7.** Size distribution of  $d_{\max}$  for ikaite crystals ( $n = 918$ ) from first-year Arctic pack ice during the spring melt-onset north of Svalbard during ICE cruise in 2011 on R/V Lance. The image analysis program ImageJ was used to investigate the shape and size of the ikaite crystals from micrographs. The  $d_{\max}$  indicates the maximum caliper diameters for each crystal. (From Nomura *et al.* 2013b)

### 3. 海洋・海氷表面から大気への揮発性有機化合物 (VOC) の放出

植物プランクトンに由来する硫化ジメチル (DMS: dimethylsulfide) は揮発性有機化合物 (VOC: volatile organic compounds) の一つであり、大気中で酸化されて雲核を形成する働きがある (Charlson *et al.*, 1987)。そして温室効果に対して負の影響を持つと信じられている。従来の研究では、DMS に関しても、 $\text{CO}_2$  の場合と同様に、海氷は“蓋”とみなされてきた。著者の研究グループによる  $\text{CO}_2$  に関する研究結果を踏まえると (Nomura *et al.*, 2006; 2010a; 2010b; 2013a), DMS も海氷から大気へ放出されることが考えられた。特に、海氷内ではアイスアルジが増殖するため、海氷からの DMS 放出は顕著になると予測した。そして、昭和基地周辺の海水域での観測の結果解析より、植物プランクトン現存量の指標であるクロロフィル a 濃度 (ここでは、海水融解水中で測定されるクロロフィル a 濃度をアイスアルジの現存量として取り扱う) が増加するに従い、海氷内の DMS とその前駆

物質 (DMSP) が高濃度で存在することを確認した (Fig. 8) (Nomura *et al.*, 2011a)。また、チャンバー法によるフラックス測定より、大量の DMS が海氷から大気に放出されることが分かった (Nomura *et al.*, 2012)。一方で、DMS の放出は  $\text{CO}_2$  観測 (Nomura *et al.*, 2010a; 2013a) と同様に、海氷表面の状態と濃度に大きく依存することが分かった (Fig. 9)。さらにアイスアルジの増殖に起因して、VOC の一つであるブロモホルム ( $\text{CHBr}_3$ ) も海氷内部で生成していることも確認した (Nomura *et al.*, 2011b)。



**Fig. 8.** Relationship between log-transformed bulk-ice DMS+DMS and chlorophyll a concentrations in the Antarctic sea ice during the 48th Japanese Antarctic Research Expedition (JARE48) over fast ice in Lützow-Holm Bay off Syowa Station, Antarctica. The combined concentration of total DMS and DMS (DMS+DMS) were measured for melted ice samples. The chlorophyll a concentrations in melted sea ice samples were used as an indicator for the abundance of the ice algae within sea ice. Dashed line indicates the fitting curve used to describe the relationship. (From Nomura *et al.* 2011a)

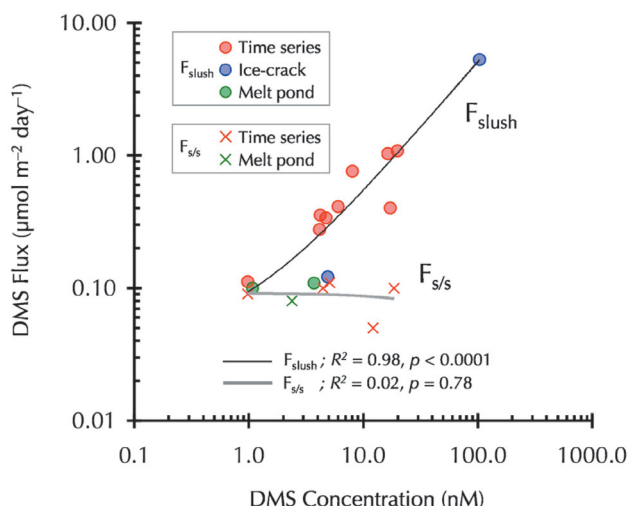


Fig. 9. Relationship between DMS concentrations in slush and melt pond water and DMS fluxes measured over the slush ( $F_{\text{slush}}$ ) and the snow and superimposed ice ( $F_{\text{s/s}}$ ) at the melt pond, ice-crack, and time series stations. These measurements were done over landfast multi-year sea ice in Lützow-Holm Bay, off Syowa Station, Antarctica during the 51st Japanese Antarctic Research Expedition (JARE-51). (From Nomura *et al.* 2012)

#### 4. 海水内部への大気起源物質の取り込み・海洋への供給

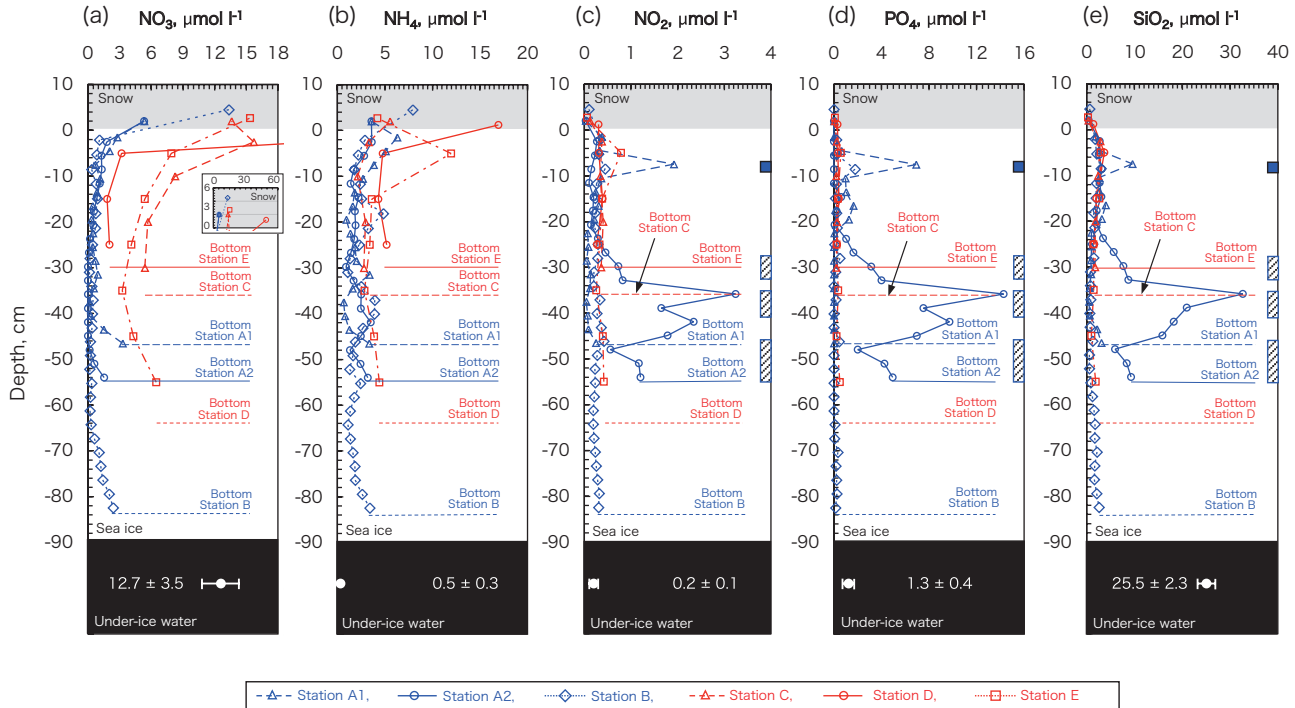
従来、海水中に生息するアイスアルジは、ブライン中に取り残された栄養塩類を利用して成長すると考えられてきた。しかし、それが事実ならば、ブライン中の栄養塩が枯渇した場合 (McMinn *et al.*, 1999), アイスアルジの成長が維持できなくなる事態を招く。残存した栄養塩類だけでなく、海水外部からの供給の可能性を検証するため、海水内部での栄養塩類の収支を評価する観測をオホーツク海沿岸において実施した。その結果、オホーツク海の海水上部で高い硝酸塩 ( $\text{NO}_3^-$ ) 濃度が観測された (Fig. 10) (Nomura *et al.*, 2010c; Nomura *et al.*, 2011c)。これは、大気由来の  $\text{NO}_3^-$  が降雪とともに海水表面に沈着し、雪ごおり (海水上の積雪に海水がしみ込んで氷化したもの) として海水内部に取り込まれた結果と推測した。一方、南極海では、積雪・海水上部で高濃度の

$\text{NO}_3^-$  は観測されなかった (Nomura *et al.*, 2011d)。南半球では、大気由来の  $\text{NO}_3^-$  沈着の影響が少ないと考えられる。また、堆積物の海水内への取り込み、その後の海水内での続成過程について議論した (Fig. 10, Figure caption 参照)。このように海水は、大気 (主に北半球) や海洋から物質を海水内部へ輸送・保管し、その後、融解とともに海洋表層に供給するため、“物質の貯蔵・運搬”の機能を持つと言える。

#### 5. 今後の展開

国内外の研究者による努力によって、海水-大気間の気体交換過程についての理解が進みつつある (Semiletov *et al.*, 2004; Nomura *et al.*, 2006, 2010a, 2010b, 2012, 2013a; Zemmeling *et al.*, 2006, 2008; Loose *et al.*, 2009; Miller *et al.*, 2011; Papakyriakou and Miller, 2011; Sejr *et al.*, 2011; Geilfus *et al.*, 2012; Delille *et al.*, 2014)。しかし、依然として厳しい自然環境より、冬季 (海水成長期) の観測データは極端に不足している。これまでの物質循環に関する海水の野外観測は、主に海水の融解期に実施されてきた。次に必要なのは、実際の冬季海水域での検証である。そして、極域の大気-海水-海洋間の炭素輸送の定量的な評価と、炭素輸送プロセスを解明し、冬季の海水が極域海洋の物質循環に及ぼす影響の実証的研究を行いたいと考えている。著者の研究グループによる近年の取り組みとして、厳冬期の海水-大気間の  $\text{CO}_2$  交換量の測定を開始した。2012年晩冬期東南極海水域での国際海水研究観測 (SIPEX-2: Sea Ice Physics and Ecosystem eXperiment 2) および 2013年厳冬期ウェッデル海での国際海水研究観測 (AWECS: Antarctic Winter Ecosystem Climate Study) に参加し、海水上での観測を実施し、冬季のデータを取得しつつある。また、2015年には、北極海での6ヶ月長期漂流観測 (N-ICE2015: Norwegian young sea ICE cruise 2015) の冬季レグ (2-3月) に参加し、厳冬期から春季にかけての海水生物地球化学成分の変遷過程に注目した研究を実施する予定である。

近年、海水を介した物質循環過程の重要性が認知され、海洋研究科学委員会 (SCOR: Scientific Committee



**Fig. 10.** Vertical profiles of (a)  $\text{NO}_3^-$ , (b)  $\text{NH}_4^+$ , (c)  $\text{NO}_2^-$ , (d)  $\text{PO}_4^{3-}$  and (e)  $\text{Si}(\text{OH})_4$  concentrations in snow, sea ice and under-ice water in the southern Sea of Okhotsk during cruises on Japan Coast Guard icebreaker P/V Soya in the southern Sea of Okhotsk on February 2007 (blue) and 2008 (red). The solid blue and light blue bars indicate the portion of the sediment layers for St. A1 and A2, respectively. Inset in (a) indicates the  $\text{NO}_3^-$  concentration in snow. High  $\text{NO}_3^-$  and  $\text{NH}_4^+$  concentrations were found in snow and snow-ice implying that these were supplied from the atmosphere with snowfall and incorporated into the sea ice through snow-ice formation. In the sediment-laden layers, which were categorized as frazil ice,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$  and  $\text{Si}(\text{OH})_4$  concentrations were highest of all the ice types and considerably enriched compared to parent seawater, suggesting the remineralization of the particulate organic matter. On the other hand,  $\text{NO}_3^-$  concentrations in sediment layers were low (depleted), leading to extremely low N ( $\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+ + \text{NO}_2^-$ ) : P ratios in sediment layers, from 0.2 to 0.8, with respect to that of under-ice water or Redfield ratio. These results suggest that in part of sediment-laden layers fixed-nitrogen was removed partially as molecular nitrogen ( $\text{N}_2$ ) from the sea ice environment by anaerobic nitrate reduction processes (denitrification) by denitrifying bacteria while adding phosphate from associated remineralization of organic phosphorus. (From Nomura *et al.* 2010c)

on Oceanic Research) に国際ワーキンググループ (BEPS-II: Biogeochemical Exchange Processes at the Sea-Ice Interfaces) が設置された。著者は、本ワーキンググループの一員として海氷の生物地球化学に関する方法論の確立 (Miller *et al.*, 2015) を目指している。また、2017年2月予定の海水生物地球化学研究の比較実験の開催地として、これまで数多くの成果が報告され実績のある日本のサロマ湖が、最有力候補地に選ばれた。本実験

の実施の際には、著者が中心となって世界の海水研究者をとりまとめ、現場観測を実施する予定である。



## 謝 辞

このたび名誉ある日本海洋学会岡田賞を頂いたことは身に余る光栄であり、選考・承認をしていただいた賞選考委員会および学会員の皆様に厚くお礼申し上げます。

本研究は、“物質循環”と“海水”が根幹となっており、北海道大学・吉川久幸教授には、“物質循環”について、北海道大学・白澤邦男准教授、豊田威信助教には、“海水”について、修士課程以来長年にわたるご指導、ご支援を頂きました。また、私がこれまで所属した北海道大学、国立極地研究所、ノルウェー極地研究所（日本学術振興会）において、乗木新一郎教授、福地光男教授、服部寛教授、田口哲教授、西岡純准教授、Mats A. Granskog 研究員、Gerhard S. Dieckmann 研究員、Hajo Eicken 教授、渡邊豊准教授、大木淳之准教授、鈴木光次准教授、橋田元准教授、青木茂准教授、田村岳史助教から頂いた数多くのご助言、ご協力により、本成果を得ることが出来ました。また、参加させていただいたプロジェクトや観測航海に関わられた全ての研究者、技術補佐員、乗組員の皆様には多大なご助力を頂き、大変お世話になりました。現在は、北海道大学・大島慶一郎教授、深町康准教授のもとで物理的な視点を取り入れ、極域海洋の物質循環に関わる研究についてご指導を頂いております。

この紙面をお借りして、全ての皆様に心から感謝の意を表します。

## References

- Charlson, R.J., J.E. Lovelock, M.O. Andreae, and S.G. Warren (1987): Oceanic phytoplankton, atmospheric sulphur, cloud albedo and climate. *Nature*, **326**, 655–661.
- 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.
- Delille, B., M. Vancoppenolle, N.-X. Geilfus, B. Tilbrook, D. Lannuzel, V. Schoemann, S. Becquevort, G. Carnat, D. Delille, C. Lancelot, L. Chou, G.S. Dieckmann, and J.-L.Tison (2014): Southern Ocean CO<sub>2</sub> sink: The contribution of the sea ice. *J. Geophys. Res.*, **119**, 9, 6340–6355, doi:10.1002/2014JC009941.
- Dieckmann, G.S., G. Nehrke, S. Papadimitriou, J. Göttlicher, R. Steininger, H. Kennedy, D. Wolf-Gladrow, and D.N. Thomas (2008): Calcium carbonate as ikaite crystals in Antarctic sea ice. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L08501, doi:10.1029/2008GL033540.
- Geilfus, N.-X., G. Carnat, T. Papakyriakou, J.-L. Tison, B. Else, H. Thomas, E. Shadwick, and B. Delille (2012): Dynamics of pCO<sub>2</sub> and related air-ice CO<sub>2</sub> fluxes in the Arctic coastal zone (Amundsen Gulf, Beaufort Sea). *J. Geophys. Res.*, **117**, C00G10, doi:10.1029/2011JC007118.
- Golden, K.M., S.F. Ackley, and V.I. Lytle (1998): The percolation phase transition in sea ice. *Science*, **282**, 2238–2241.
- Gosink, T.A., J.G. Pearson, and J.J. Kelly (1976): Gas movement through sea-ice. *Nature*, **263**, 41–42.
- Loose, B., W.R. McGillis, P. Schlosser, D. Perovich, and T. Takahashi (2009): Effects of freezing, growth, and ice cover on gas transport processes in laboratory seawater experiments. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L05603, doi:10.1029/2008GL036318.
- Maykut, G.A. (1978): Energy exchange over young sea ice in the central Arctic. *J. Geophys. Res.*, **83**, C7, 3646–3658.
- McMinn, A., J. Skerratt, T. Trull, C. Ashworth, and M. Lizotte (1999): Nutrient stress gradient in the bottom 5 cm of fast ice, McMurdo Sound, Antarctica. *Polar Biol.*, **21**, 220–227.
- Miller, L.A., T.N. Papakyriakou, R.E. Collins, J.W. Deming, J.K. Ehn, R.W. Macdonald, A. Mucci, O. Owens, M. Raudsepp, and N. Sutherland (2011): Carbon dynamics in sea ice: A winter flux time series. *J. Geophys. Res.*, **116**, C02028, doi:10.1029/2009JC006058.
- Miller L.A., F. Fripiat, B.G.T. Else, J.S. Bowman, K.A. Brown, R.E. Collins, M. Ewert, A. Fransson, M. Gosselin, D. Lannuzel, K.M. Meiners, C. Michel, J. Nishioka, D. Nomura, S. Papadimitriou, L.M. Russell, L.L. Sørensens, D.N. Thomas, J.-L. Tison, M.A. van Leeuwe, M. Vancoppenolle, E.W. Wolff, and J. Zhou (2015): Methods for biogeochemical studies of sea ice: The state of the art, caveats, and recommendations. *Elementa—Science of the Anthropocene*, **3**, 000038, doi:10.12952/journal.elementa.000038.
- Nomura, D., H. Inoue-Yoshikawa, and T. Toyota (2006): The effect of sea-ice growth on air-sea CO<sub>2</sub> flux in a tank experiment. *Tellus*, **58B**, 418–426.
- Nomura, D., H. Yoshikawa-Inoue, T. Toyota, and K. Shirasawa (2010a): Effects of snow, snowmelting and refreezing processes on air-sea-ice CO<sub>2</sub> flux. *J. Glaciol.*, **56**, 262–270.
- Nomura, D., H. Eicken, R. Gradinger, and K. Shirasawa (2010b): Rapid physically driven inversion of the air-sea ice CO<sub>2</sub> flux in the seasonal landfast ice off Barrow, Alaska after onset of surface melt. *Cont. Shelf Res.*, **30**, 1998–2004.
- Nomura, D., J. Nishioka, M.A. Granskog, A. Krell, S. Matoba, T. Toyota, H. Hattori, and K. Shirasawa (2010c): Nutrient distributions associated with snow and sediment layers in sea ice of the southern Sea of Okhotsk. *Mar. Chem.*, **119**, 1–8.
- Nomura, D., N. Kasamatsu, K. Tateyama, S. Kudoh, and M. Fukuchi (2011a): DMS and DMS in coastal fast ice and under-ice water of Lützow-Holm Bay, eastern Antarctica. *Cont. Shelf Res.*, **31**, 1377–1383.
- Nomura, D., A. Ooki, D. Simizu, and M. Fukuchi (2011b): Bromoform concentrations in slush-layer water in Antarctic fast ice. *Antarct. Sci.*, **23**, 623–628.
- Nomura, D., A. McMinn, H. Hattori, S. Aoki, and M. Fukuchi (2011c): Incorporation of nitrogen compounds into sea ice from atmospheric deposition. *Mar. Chem.*, **127**, 90–99.
- Nomura, D., D. Simizu, H. Shinagawa, C. Oouchida, and M. Fukuchi

- (2011d) : Biogeochemical properties of water in surface ponds on Antarctic fast ice and relationship to underlying sea ice properties. *J. Glaciol.*, **57**, 848–856.
- Nomura, D., S. Koga, N. Kasamatsu, H. Shinagawa, D. Simizu, M. Wada, and M. Fukuchi (2012) : Direct measurements of DMS flux from Antarctic fast sea ice to the atmosphere by a chamber technique. *J. Geophys. Res.*, **117**, C04011, doi: 10.1029/2010JC006755.
- Nomura, D., M.A. Granskog, P. Assmy, D. Simizu, and G. Hashida (2013a) : Arctic and Antarctic sea ice acts as a sink for atmospheric CO<sub>2</sub> during periods of snow melt and surface flooding. *J. Geophys. Res.*, **118**, 6511–6524.
- Nomura, D., P. Assmy, G. Nehrke, M.A. Granskog, M. Fischer, G.S. Dieckmann, A. Fransson, Y. Hu, and B. Schnetger (2013b) : Characterization of ikaite (CaCO<sub>3</sub> · 6H<sub>2</sub>O) crystals in first-year Arctic sea ice north of Svalbard. *Ann. Glaciol.*, **54**, 125–131.
- Nomura, D., H. Inoue-Yoshikawa, S. Kobayashi, S. Nakaoka, K. Nakata, and G. Hashida (2014) : Winter to summer evolution of pCO<sub>2</sub> in surface water and air-sea CO<sub>2</sub> flux in the seasonal ice zone of the Southern Ocean. *Biogeosci.*, **11**, 5749–5761.
- Papadimitriou, S., H. Kennedy, G. Kattner, G.S. Dieckmann, and D.N. Thomas (2003) : Experimental evidence for carbonate precipitation and CO<sub>2</sub> degassing during sea ice formation. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **68**, 1749–1761.
- Papakyriakou, T., and L. Miller (2011) : Springtime CO<sub>2</sub> exchange over seasonal sea ice in the Canadian Arctic Archipelago. *Ann. Glaciol.*, **52**, 215–224.
- Pauly, H. (1963) : 'Ikaite', a new mineral from Greenland. *Arctic*, **16**, 263–264.
- Schmitz, W.J. (1995) : On the interbasin-scale thermohaline circulation. *Rev. Geophys.*, **33**, 151–173.
- Sejr, M.K., D. Krause-Jensen, S. Rysgaard, L.L. Sørensen, P.B. Christensen, and R.N. Glud (2011) : Air-sea flux of CO<sub>2</sub> in arctic coastal waters influenced by glacial meltwater and sea ice. *Tellus*, **63B**, 815–822.
- Semiletov, I., A. Makshtas, S. Akasofu, and E.L. Andreas (2004) : Atmospheric CO<sub>2</sub> balance : The role of Arctic sea ice. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L05121, doi: 10.1029/2003GL017996.
- Shine, K.P. and A. Henderson-Sellers (1985) : The sensitivity of a thermodynamic sea ice model to changes in surface albedo parameterization. *J. Geophys. Res.*, **90**, D1, 2243–2250.
- Sun, X., and K. Matsumoto (2010) : Effects of sea ice on atmospheric pCO<sub>2</sub> : A revised view and implications for glacial and future climates. *J. Geophys. Res.*, **115**, G02015, doi: 10.1029/2009JG001023.
- Takahashi, T., S.C. Sutherland, C. Sweeney, A. Poisson, N. Metzl, and co-authors (2002) : Global sea-air CO<sub>2</sub> flux based on climatological surface ocean pCO<sub>2</sub>, and seasonal biological and temperature effects. *Deep-Sea Res. II* **49**, 1601–1622.
- Thomas, D.N., S. Papadimitriou, and C. Michel (2010) : Biogeochemistry of sea ice. In *Sea Ice*, edited by D. N. Thomas and G. S. Dieckmann, 2nd ed., 425–467, Wiley-Blackwell, Oxford.
- Wakatsuchi, M. and N. Ono (1983) : Measurements of salinity and volume of brine excluded from growing sea ice. *J. Geophys. Res.*, **88**(C5), 2943–2951.
- Yager, P.L., D.W.R. Wallace, K.M. Johnson, W.O. Smith Jr., P.J. Minnett, and J.W. Deming (1995) : The northeast water polynya as an atmospheric CO<sub>2</sub> sink : A seasonal rectification hypothesis. *J. Geophys. Res.*, **100**, 3289–4398.
- Zemmelink, H.J., B. Delille, J.-L. Tison, E.J. Hints, L. Houghton, and J.W.H. Dacey (2006) : CO<sub>2</sub> deposition over the multi-year ice of the western Weddell Sea. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L13606, doi:10.1029/2006GL026320.
- Zemmelink, H.J., J.W.H. Dacey, L. Houghton, E.J. Hints, and P.S. Liss (2008) : Dimethylsulfide emissions over the multi-year ice of the western Weddell Sea. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L06603, doi:10.1029/2007GL031847.

## Effects of sea-ice growth and decay processes on the biogeochemical cycles in the polar oceans

Daiki NOMURA<sup>1,2</sup>

### Abstract

In order to understand effects of sea-ice growth and decay processes on the biogeochemical cycles in the polar oceans, field observations in the Arctic, Antarctic, and Sea of Okhotsk as well as laboratory experiments were carried out. Sea-ice has not been considered in estimations of biogeochemical cycles, especially in gas exchange, in ice-covered seas because of the assumption that sea-ice acts as a barrier for atmosphere-ocean exchange. However, recent works have shown that sea ice and its snow cover play an active role in the exchange of gases between the ocean and atmosphere. In this paper, results obtained in my previous studies were reviewed.

**Key words** : CO<sub>2</sub>, sea ice, biogeochemical cycles, and polar oceans.

(Corresponding author's e-mail address : daiki@lowtem.hokudai.ac.jp)

(Received 30 May 2014; accepted 8 November 2014)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2015)

---

1 Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, Sapporo, Japan.

2 Japan Society for the Promotion of Science, Chiyoda, Tokyo, Japan.

Corresponding author : Daiki NOMURA

TEL: +81117065480

e-mail: daiki@lowtem.hokudai.ac.jp