海氷生成と融解に伴う大気への二酸化炭素放出・吸収に関する研究

地球圏科学専攻物質循環・環境変遷学コース
博士後期課程１年　野村 大樹　（指導教官；吉川 久幸）

はじめに

本研究の最終目的は、海氷生成・融解に伴う大気－海洋間の二酸化炭素（CO_2）交換を支配する要因を明らかにし、季節海氷域が炭素循環に果たす役割を評価することにある。海氷の存在は物質循環の観点において単なる大気-海洋間の物質交換の“障壁”として認識されてきた。例えば、海氷が存在すると温室効果気体である CO_2 の海洋への吸収が生じないとされてきた。しかし、実際、海氷は、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脆いため、ガス透過性が大きいことが知られている。地球温暖化の将来予測を行う上で、現在の全球炭素収支を正確に把握する必要があるが、そのためには、海氷が大気-海洋間の炭素循環にどのように関わっているのかを定量的に評価することが不可決である。

そこで著者は低温室での水槽実験にて、季節海氷域の結氷を再現し、主に温度（海氷成長速度）に注目し、大気-海氷間の CO_2 交換を評価してきた（Nomura et al., 2006 submitted to Tellus)。

本報告書では、Ⅰ. 現在行っているオホーツク海南部での氷上現場観測について、Ⅱ.比較的低塩分より結氷が起きる海域（例えばサロマ湖）を想定し、室内実験を行った結果について報告する。

Ⅰ．季節海氷域での氷上現場観測について

実際の海氷域は室内実験の限られた状況とは異なり物理、生物・化学的要因が複雑に入り混じっている。海氷を通しての CO_2 交換は、主に、大気と海氷中に存在する高塩分水であるブラインの CO_2 濃度の差、もしくは大気と海氷下海水の濃度差によって起きる。海氷成長期に海氷中ブラインの CO_2 濃度を決めるのは、主に海氷中ブラインの濃縮効果（高塩分化）、つまり物理的要因である（Nomura et al.,2006 submitted to Tellus)。一方、海氷融解期は、海氷直下及び海氷中ブラインでのアイスアルジー（植物プランクトン）の存在、つまり生物・化学的要因が優先し、生物の光合成・呼吸が海氷中ブラインの CO_2 濃度を支配すると考えられる（Semiletov et al., 2004)。季節海氷域での現場観測においては、海氷中及び海氷下における物理、化学・生物過程が担っているそれぞれの CO_2 吸収・放出能力を理解し、室内実験で得た基本的なメカニズムを考慮して評価する必要がある。

氷上現場観測は、１）海上保安庁巡視船“そうや”による南部オホーツク海(2006 年 2 月 10－16 日)、２）サロマ湖（2 月 17 日－3 月半ば）にて行う（図１)。

図１　そうや航路及びサロマ湖

これまで、著者は現場観測において使用する各種観測機器の開発、測定法などについて検討してきた。大気-海氷間の CO_2 交換量はチャンバー法で評価する。氷上に設置したステンレス製チャンバーを独自に設計、組み立てた小型 CO_2 測定システム（図２：耐寒仕様）に接続し、チャンバー内の CO_2 濃度変化を連続的に測定する。

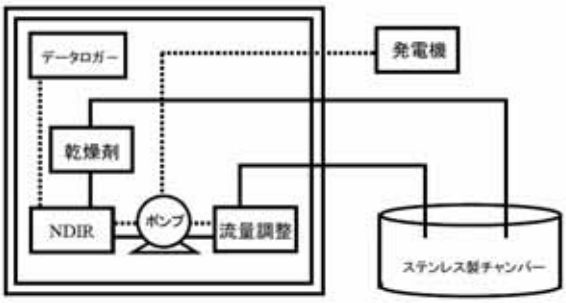

図２　海氷 CO_2 フラックス測定システム

また、大気－海氷間での CO_2 交換を主に支配すると考えられる海氷中ブライン（高塩分水）を現場で直接採取する。オホーツク海のような比較的薄い海氷域ではブライン採取は特に困難なため以下の２通りの方法を試みる（図３）。A.海氷にホールを開け、底に溜まるブラインをシリンジで採取する。B.準閉鎖系円筒型ブライン捕集容器内で海氷コアから重力によって落下するブラインをサンプル瓶に捕集する。また、海氷下海水も電動ポンプ式採水器を使用し採取する。各種サンプルの炭酸系成分（アルカリ度・全炭酸濃度）、クロロフィル濃度、栄養塩濃度、溶存酸素の測定を行う。その他、気象観測（海氷表面温度、気温、湿度、風、短長波放射フラックス）データを使用し、海氷の成長環境を知る。

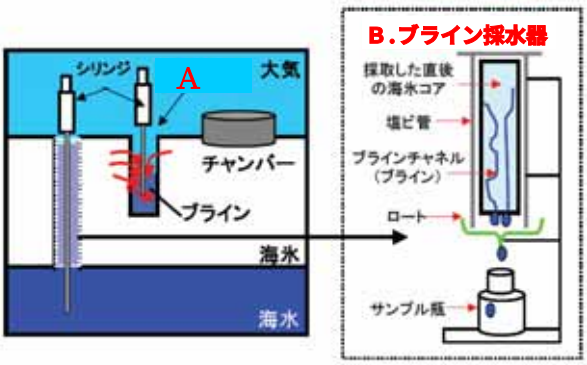

図３　ブライン採取法概略図

Ⅱ．母海水塩分の違いが大気-海氷間の CO_2 交換に与える影響

本研究海域のひとつであるサロマ湖やバルト海北部ボスニア湾、そして北極海沿岸などでは、河川から供給される淡水を主起源とする比較的低塩分の母海水より海氷が生成される。低塩分水の結氷温度は、一般海水（塩分 34：約-1.9℃）に対し高く（Fujino et al., 1974）、海氷が生成し易い状況をつくる。低塩分水から出来る海氷の物理／化学特性に関する研究はこれまで行われてきた（例えば Kawamura, 2002, Granskog et al., 2004）が、気体交換に関する知見は未だ不足している。そこで、低塩分水を起源とする海氷の結氷実験を再現し、母海水塩分の違いが、大気への CO_2 flux に与える影響について実験を行ったので報告する。

本研究では、以下に示す４種の異なる塩分の海水を母海水として使用した。１）北太平洋沿岸で採取された一般海水、２）一般海水を純水（イオン交換水）で希釈し、塩分を約 10、３）約 20 にしたもの、４）純水。各母海水 49.5L を海氷生成容器（縦 300mm ×横 300mm×高さ 650mm）に入れ、室温を-25℃にして海氷を生成･成長させた。実験中、閉鎖系にした容器内気相部分の CO_2 濃度を NDIR（非分散型赤外線分析計）で連続的に測定した。氷厚が約 50mm（純水実験は 30mm で終了）に達した時、実験を終了とした。出来た海氷を採取・分割後、海氷の密度・塩分濃度を測定し、Cox and Weeks, 1983 の式に従い海氷中ブライン体積比（F_b）及びブライン塩分（S_b）を算出した。

海氷成長と同時に気相部分の CO_2 濃度の増加が確認され（純水を除く）、その増加速度は母海水の塩分の違いにより差が生じた（図４）。気相部分 CO_2 濃度の変化より、氷厚 50mm 時の海氷から大気への CO_2 flux を算出した（表１）。Flux 値を決定する要因として海氷中に存在するブラインの寄与が大きく関係している。そこで、塩分濃縮（S_b-S_0）、温度変化、塩分濃縮効果による全炭酸濃度変化(pre.DIC-DIC_0)を考慮し、予想されるブラインの CO_2 濃度（pre.CO_2, elapsed time=0hour に対して）を算出した（表１）。塩分濃縮が大きい低塩分母海水ほど pre.CO_2 値は大きくなった。Flux は大気（気相）との濃度勾配が大きい程、大きくなると考えられ、これは上記の結果と矛盾する。しかし、本実験では、ある CO_2 濃度(表１)を保有したブラインの体積比（F_b）は、低塩分海

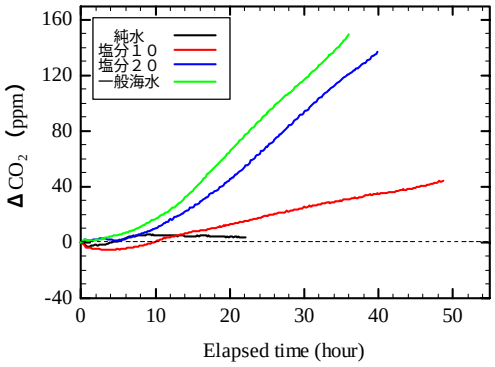

図４　気相 CO_2 濃度の時間変化

水より生成・成長した海氷では極端に低い。以上の事柄を整理すると、成長しつつある海氷からの CO_2 の放出過程について次のようなイメージが浮かび上がってくる。低塩分母海水（低全炭酸濃度）から海氷が生成・成長すると大幅な塩分変化により、高濃度の CO_2 がブラインから大気に放出されるが、その量は少ないので、単位面積当たりの放出量（flux）としては少ない。逆に、母海水塩分濃度が大きいと、放出する CO_2 は低濃度であるが、ブライン量が多く、ブラインチャネルを通して放出し易い状況となるため、単位面積当たりの放出量では、前者をしのぐと考えられる。

表１　各実験の初期塩分（S_0）,全炭酸濃度（DIC_0）,気相 CO2 濃度及び氷厚 50mm 時の CO_2 flux,ブライン塩分（Sb）・体積比（Fb）,予想されるブライン中の全炭酸濃度（pre.DIC）,CO_2 濃度（preCO_2）

実験	初期 (elapsed time = 0hour)			氷厚5cmの時				
	S_0	[1]DICo	[2]CO_2濃度	[3]CO_2 flux	S_b	F_b, %	[1]pre.DIC	[2]pre.CO_2濃度
純水	0	55.3	261.0	-	0	0	-	-
塩分10	10.3	851.2	237.3	0.7	59.6	4.1	4925.4	1338.9
塩分20	20.4	1637.5	279.1	3.6	54.5	11.2	4374.7	1097.1
一般海水	31.2	2379.1	226.0	4.0	68.5	16.1	5223.3	748.5

[1] DIC の単位；μmol/kg, [2] CO_2 濃度の単位；ppm, [3] Flux の単位；g-C/m²/hour

研究成果

学術雑誌等（紀要・論文集等も含む）に発表した論文及び著書

Daiki Nomura, Hisayuki Inoue-Yoshikawa, Takenobu Toyota. The effect of sea-ice growth on CO_2 exchange between the seawater and overlying air on the basis of tank experiments. Submitted to *Tellus*.

国際会議での発表

○ Daiki Nomura, Hisayuki Inoue-Yoshikawa, Takenobu Toyota. “The effect of sea-ice growth on CO_2 exchange between the sea and the overlying air on the basis of experiment in the low-temperature room“ Seventh International Carbon Dioxide Conference (ICDC7), Boulder, Colorado USA, September 2005.英語による発表（ポスター）、アブストラクト査読有り

国内での発表

○野村大樹，吉川（井上）久幸，豊田威信 “海氷生成が大気-海洋間の二酸化炭素交換に及ぼす影響～海氷から気相（大気）への二酸化炭素の放出に及ぼす海氷成長速度の違いについて～“，2005 年度 日本海洋学会春季大会，304，東京海洋大学（東京都），2005 年 3 月

野村大樹 “海氷生成と融解に伴う大気への二酸化炭素放出・吸収に関する研究-室内実験から氷上現場観測へ”第１８回海洋物質循環セミナー,川渡セミナーセンター（宮城県）,2005 年 10 月