

## オホーツク海南部の海水の酸素安定同位体比の特徴

豊田 威信、河村 俊行、中塚 武、若土 正暁 (北大低温研)

### 1. はじめに

オホーツク海南部は冬期降雪が顕著であり、現場海水域を見ても多くの海水は数 cm~数十 cm の積雪に覆われている。このため、海水上の積雪が海水の成長に何らかの影響を及ぼしていると予想される。

積雪の熱伝導率は海水に比べて大きいため、一般には海水上の積雪は海水の下面結氷量を抑制する働きをする。しかし、積雪量が十分多く積雪-海氷境界面が海面近くまで下がるような状況では、境界面を通して積雪に海水がしみ上がって氷化することにより snow ice が形成され、海水の成長を助長する役割を果たすことが知られている。海水の成長履歴の一過程として、後者の特徴を定量的に見積もることは重要と思われる。しかしながら、通常の結晶構造解析や塩分解析からは snow ice の識別が困難なことが多く、オホーツク海南部の海水の snow ice の特徴はよく分かっていない。

その点、酸素安定同位体比 ( $\delta^{18}O$ ) は積雪と海水で値が大きく異なるため snow ice の識別に有用であり、近年、南極域の海水の snow ice の比率の見積もりにも用いられてきた (e.g. Lange et al., 1990; Jeffries et al., 1994; Jeffries et al., 1997)。本研究では 2 年程前から質量分析計が設置され、 $\delta^{18}O$  の測定が可能になった。そこで、オホーツク海南部における snow ice の特徴を知ることを目的として、1996~2000 年の 5 年間にわたって現場で採取した海水サンプルのデータの解析を行なった。このように、snow ice の見積もりという観点から海水の  $\delta^{18}O$  の特徴を記述することが本論文の目的である。これまで南極域を対象に見積もられた結果によれば、積雪の多い海域では snow ice の割合が 24% に達しているという報告もある (Jeffries et al., 1997)。オホーツク海の状況との比較も興味深いと思われる。

### 2. 観測、測定方法

観測はいずれの年も海上保安庁巡視船「そうや」を用いて 2 月の結氷期に行なわれ、オホーツク海南部比較的広範囲な海域 (Fig.1 参照) で 100 個近くの様々な海水サンプルを採取した。得られた海水サンプルから底面 5~7cm 四方のコラムを切り出し、更に鉛直方向に 2cm 間隔で刻んで直方体の section 試料を作成した。個々の試料は体積、質量を計測して密度を算出した後、常温で融解し、塩分および  $\delta^{18}O$  を測定した。ここでは特に Young ice ( $10 \leq H_i \leq 30\text{cm}$ , 31 個) と First-year ice ( $H_i \geq 30\text{cm}$ , 16 個) を解析の対象とする。

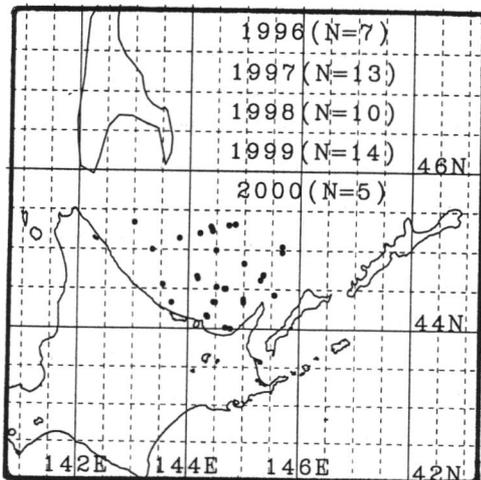


Fig.1 海水サンプリング位置

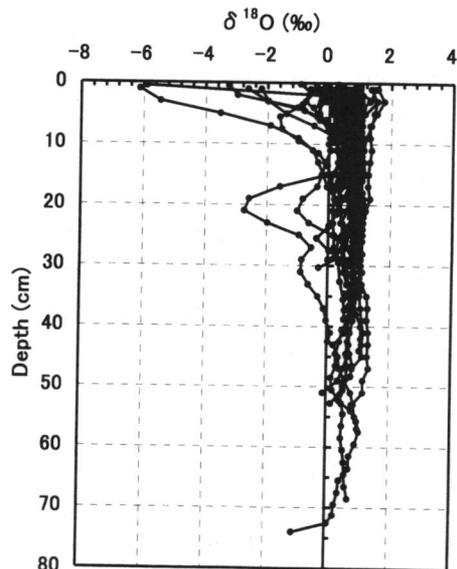


Fig.2 全サンプルの同位体比分布

3. 結果

3.1 特徴的なサンプルについて

$\delta^{18}O$ の測定値と結晶構造を比べた結果、columnar ice(海水起源のみ)と granular ice(雪起源+海水起源)の両方で頻度分布のピーク値に差がないこと、columnar iceの $\delta^{18}O$ はほぼ正值をとることを考慮し、ここでは1)granular iceであること、2) $\delta^{18}O$ が負であることを snow iceの条件として識別した。ちなみに、この識別方法は過去の Lange et al.(1990)や Jeffries et al. (1997)等と同一の手法である。

その結果、snow iceは表面付近に留まらず海水内部にも見られることなどが分かった (Fig.2 参照)。中には海水内部 30cm 付近や底面付近に見られるサンプルもあり、海水が発達する過程で rafting 等の力学的過程により互いに重なり合う過程が重要であることを示唆している。また、Young iceと First-year iceを併せた totalの snow iceの密度、塩分の中央値 [第1四分位数, 第3四分位数]は各々 $815\text{kg/m}^3$  [719, 856]、3.34psu [2.80, 3.80]であり、他海水起源の海水 ( $861\text{kg/m}^3$  [811, 888], 3.61psu [2.89, 4.20])に比べてともに若干低い値を示した (Fig.3 参照)。これは、snow iceは通常の海水に比べて気泡を含みやすいこと、また雪の影響で塩分が若干少なめになることを裏付ける結果と考えられる。

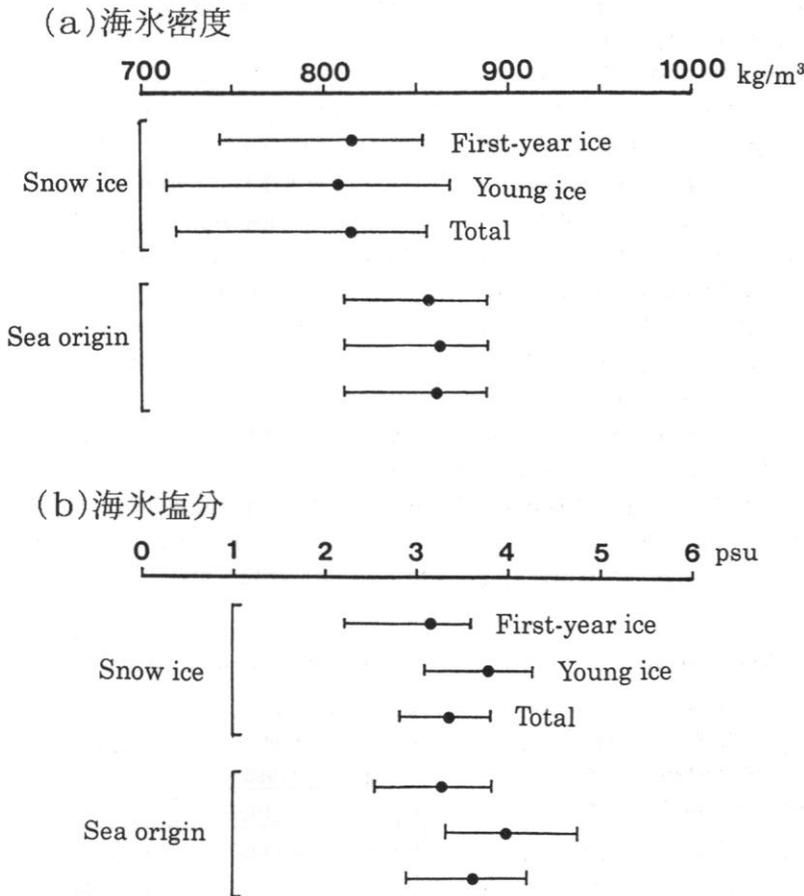


Fig.3 snow iceの特徴

図中、●は中央値(median)を表し、値のばらつきは第1四分位数と第3四分位数で表わす。

3.2 積雪の寄与の見積もり

次に、積雪がどの程度寄与しているかについての定量的な見積もりを行なう。一般に積雪の寄与と言った場合、(1) 海水全体に対して snow ice が占める割合、(2) snow ice の中で積雪が占める割合、(3) 海水全体に対して積雪が占める割合、の3通りが考えられる。

(1) については、本解析の識別方法で snow ice と特定された section の個数が全 section 個数に占める割合として見積もった。その結果、First-year ice は 363 個のうち 44 個 (12.1%)、Young ice は 359 個のうち 30 個 (8.4%)、両者併せて 10.2% と見積もられた (Table.1 参照)。snow ice を含む海水サンプルの個数という観点では、First-year ice は 16 サンプル中 10 個 (62.5%)、Young ice は 31 サンプル中 7 個 (22.6%)、両者併せて 47 サンプル中 17 個 (36.2%) であった。どちらの見積もりにおいても First-year ice の方が占める割合が若干大きいのは、成長期間が Young ice に比べて長く、雪の影響を受ける確率がそれだけ大きいと考えれば納得される。

(2) については、測定された海水の  $\delta^{18}O$  は雪起源の氷と海水起源の氷の和であると仮定し、 $(1 - f_s) * (\delta_w + f) + f_s * \delta_s = \delta_i$  の式をもとに snow ice 中の積雪の寄与 ( $f_s$ ) を定量的に見積もった。計算で必要となる積雪の  $\delta^{18}O$  ( $\delta_s$ ) は観測期間中に海水面上や甲板上の積雪をいくつか採取して測定した結果をもとに、 $-15 \pm 5\text{‰}$  の値を用いた。また、海水の  $\delta^{18}O$  ( $\delta_w$ ) は 2000 年 2 月の観測航海でオホーツク海南部の 18 点で採取した表面海水の平均値 ( $-0.910 \pm 0.227\text{‰}$ ) を用いた。オホーツク海表面海水の  $\delta^{18}O$  はアムール川からの淡水供給を受けて値が低く、変動も大きいことが予想されるが、低い  $\delta^{18}O$  ( $-5 \sim -10\text{‰}$ ) が分布する海域は北西部の河口付近に比較的限られており (山本美千代、私信, 2000)、オホーツク海南部における  $\delta_w$  は積雪に比べて十分大きく、本研究の見積もりに支障をきたさないと考えられる。代表的な snow ice の  $\delta_i$  値は、 $\delta^{18}O$  の頻度分布の skewness が大きいことを考慮して平均値ではなく、中央値を採用した。海水の生成に伴う見かけの分別係数 ( $f$ ) については確かな知見がまだ確立されていない状況を踏まえ、本研究では統計分布から推測した。すなわち、表面海水の  $\delta_w$ 、海水起源の海水の  $\delta_i$  は各々正規分布  $N(-0.910, 0.227^2)$ 、 $N(0.85, 0.30^2)$  に従うと仮定し、両分布の差に相当する正規分布  $N(1.76, 0.20^2)$  を  $f$  の分布と推定した。以上の値を与えて計算した結果、 $f_s$  は First-year ice で 8.4%、Young ice で 9.0%、両者併せて 8.7% と見積もられた (Table.1 参照)。各パラメータのばらつきから推定される  $f_s$  の上限値は 16.0%、下限は 4.6% であった (Table.1)。

(3) については、(1) と (2) の見積もりの積として推定される。計算の結果は Table.1 に示されているように中央値で 0.9%、上限で 1.6%、下限で 0.5% と見積もられる。すなわち、積雪が海水全体に占める割合は約 1% と推定される。この値は南極域で従来見積もられた値のおおよそ下限となっている (Table.2 参照)。同じくオホーツク海南部について見積もった Ukita et al. (2000) の値に比べてもかなり少ないが、これは次に述べるように用いた見かけの分別係数  $f$  値の違いに起因する。

Table.1 Snow contribution

	First-year	Young ice	Total
Snow fraction	8.4 (median)	9.0	8.7
of snow ice	4.5 (lower)	4.9	4.6
	15.7 (upper)	16.4	16.0
Snow ice fraction	12.1	8.4	10.2
Snow fraction	1.0 (median)	0.8	0.9
to total thickness	0.5 (lower)	0.4	0.5
	1.9 (upper)	1.4	1.6

(unit: %)

Table.2 Comparison with the Antarctic ice

Author	fs to total	snow ice
Lange et al.(1990)	3	7.1
Jeffries et al.(1994)	7.5	18
Jeffries et al.(1997)	2~4 (冬)	12
	4~5 (夏)	24
Ukita et al. (2000)*	8.5	16
This study*	1~2	10.2

\*: Okhotsk Sea

(unit: %)

#### 4. 議論

最後に、各パラメータが我々の見積もり結果に及ぼす感度について議論をしたい。前節(2)の snow ice 中の積雪の寄与の割合の見積もりに対して、 $f$ ,  $\delta_s$ ,  $\delta_w$  のばらつきがどの程度影響を及ぼすかを調べてみた。このうち、 $f$  については確かな知見がないため、観測値のばらつきではなく、純水の分別係数 2.91‰ (Lehmann and Siegenthaler, 1991) を考慮して 0 ~ 3‰ の範囲で調べた。その結果、 $\delta_s$  や  $\delta_w$  のばらつきが与える影響は高々 3 ~ 4% 程度であり、本解析の見積もり値に本質的な影響は少ないと考えられる。それよりも感度が高いのは  $f$  であり、 $f_s$  は 0 ~ 15% まで増減する。同じ海域でありながら Ukita et al. (2000) とかなり異なる値となった主因は彼らが  $f=2.7‰$  と若干高めの値を採用したためである。本研究では統計的に合理的と思われる方法で推定された  $f=1.76‰$  を採用したが、正確な見積もりを行なうにはこの値を今後きちんと調べてゆく必要があると思われる。

#### 5. まとめ

オホーツク海南部で 1996~2000 年にかけて採取した海水サンプルの  $\delta^{18}O$  の測定を行ない、積雪の影響を調べた結果、以下のことが分かった。

- 雪の影響は海水表面だけでなく、内部にも検出されること。
- この海域の海水結氷時の見かけの分別係数は統計的には  $1.76 \pm 0.20$  と推定される。
- snow ice は全体の約 10% を占め、密度・塩分は海水起源の海水に比べて各々  $50 \text{ kg/m}^3$ ,  $0.3 \text{ psu}$  程度低い値を示した。また、snow ice 中の積雪の寄与は 8.7% と見積もられた。
- 従って海水全体に対する積雪の寄与は 1 ~ 2% と見積もられ、南極域における見積もりの下限に近い値を示した。

なお、snow fraction の見積もりに対して分別係数の感度が最も大きい。より正確な見積もりには分別係数の知見が不可欠と考えられる。

#### 謝辞

海水サンプリングにあたっては海上保安庁巡視船「そうや」の乗組員の方々と北大低温研の方々にお世話になりました。また、オホーツク海の表面水の  $\delta^{18}O$  のデータは山本美千代さん(北大地球環境)の測定データを参照しました。

#### 〈参考文献〉

- Jeffries, M.O., R.A. Shaw, K. Morris, A.L. Veazey, and H.R. Krouse,  
Crystal structure, stable isotopes ( $\delta^{18}O$ ), and development of sea ice in the Ross, Amundsen, and Bellingshausen seas, Antarctica, *J. Geophys. Res.*, 99, 985-995, 1994.
- Jeffries, M.O., A.P. Worby, K. Morris, W.F. Weeks, Seasonal variations in the properties and structural composition of sea ice and snow cover in the Bellingshausen and Amundsen Seas, Antarctica, *J. Glaciol.*, 43, 138-151, 1997.
- Lange, M.A., P. Schlosser, S.F. Ackley, P. Wadhams, and G.S. Dieckman,  
 $^{18}O$  concentrations in sea ice of the Weddell Sea, Antarctica, *J. Glaciol.*, 36, 315-323, 1990.
- Lehmann, M. and U. Siegenthaler, Equilibrium oxygen- and hydrogen-isotope fractionation between ice and water, *J. Glaciol.*, 37, 23-26, 1991.
- Ukita, J., T. Kawamura, N. Tanaka, T. Toyota, and M. Wakatsuchi, Physical and stable isotopic properties and growth processes of sea ice collected in the southern Sea of Okhotsk, *J. Geophys. Res.*, 105, 22,083-22,093, 2000.