

酸素同位体比などの化学トレーサーを用いた寒冷海水の流動に関する研究

川 合 美千代*

(2006年3月16日受付, 2006年4月14日受理)

Chemical tracer studies of water mass modification in the Arctic and subarctic regions

Michiyo YAMAMOTO-KAWAI*

* Institute of Ocean Sciences, P. O. Box 6000, 9860 West Saanich Road,
Sidney, British Columbia, V8L4B2, Canada

Oxygen isotope ratio and other chemical tracers are used to distinguish water mass modification processes in the Sea of Okhotsk and the Arctic Ocean. Distributions of tracers show that formation of the dense water during sea ice formation is a key process in both regions. This process freshens, cools, and ventilates water below the surface. In the Sea of Okhotsk, however, diapycnal mixing in the Kuril Straits is found to contribute more than the dense water formation to form the Okhotsk Sea Intermediate Water. This process will also affect the properties of North Pacific Intermediate Water, which receives anthropogenic CO₂ and freshwater by mixing with Okhotsk Sea Intermediate Water.

In the Arctic Ocean, formation of dense water and distribution of fresh water determine the salinity distribution in the upper part of the ocean. A newly investigated tracer, alkalinity, reveals that Siberian river runoff and meteoric water from the Bering Sea are the main freshwater sources, even in the Canada Basin. Historical alkalinity and oxygen isotope ratio data from the past 70 years are combined to draw distributions of sea ice meltwater/brine and other freshwaters for the entire Arctic Ocean. Accumulation of freshwater with brine in the Canada Basin indicates that this is the region where massive amount of freshwater enters, and a large portion of freshwater is converted into sea ice.

Key words: chemical tracer, Sea of Okhotsk, Arctic Ocean, sea ice formation, freshwater, CFCs, oxygen isotope ratio, alkalinity

1. はじめに

本稿では、海水の水温・塩分がどのように決まっているかを調べた筆者の研究を紹介する。海水は冷たいほど重く、また塩分が高いほど重い。重くなった水は、海の中を沈んでいく。沈んだ先にもっと重い水や海底があったらそれ以上は沈めないで、今度は横に

広がっていく。これが中層・深層を通して世界の海をつなぐ大きな流れを形成している。このような流れは、海水と同時に熱、栄養物質、汚染物質や二酸化炭素なども運んでいる。このため、海水の水温・塩分の変化は、海水の循環を変え、地球規模の気候や生物生産量にも影響を与えうる。そこで、現在の水温・塩分が何によって決められているのか、今後どう変化する可能性があるのかを明らかにするため、化学トレーサーを用いた研究を行った。

化学トレーサー（追跡子）とは、対象を追いかける

* 海洋科学研究所

〒V8L4B2 カナダ ブリティッシュコロンビア州
シドニー市 ウェストサーニッチロード9860

ための「色付け」の役割をする化学成分のことである。海水の塩分や水温は、大気との熱交換、蒸発、降水・河川水の流入、海氷の生成・融解、混合などの様々な要因によって変化するが、化学トレーサーを用いれば諸過程を識別して個別に評価することができる。

調べた海域は、現在の中深層水の形成に重要なオホーツク海および北極海である。次章から、それぞれの海域についての背景、トレーサーを用いて明らかになったこと、今後の課題について述べる。

2. オホーツク海中層水の変質過程

2.1 背景

オホーツク海には低温、低塩分で、酸素などのガスを大量に溶かし込んだ中層水が存在する (Itoh *et al.*, 2003)。このオホーツク海中層水はやがて太平洋に流出し、北太平洋中層水 (NPIW) の形成に寄与している (Yasuda, 1997; Talley, 1991; Warner *et al.*, 1996)。NPIW とは、北太平洋に広く分布する、塩分が上下の層に比べて低い層 (塩分極小層) で、大量の人為起源二酸化炭素 (Tsunogai *et al.*, 1993; Ono *et al.*, 2003) と淡水を含んでいる (NPIW 研究に関しては Yasuda (2004) による総説を参照いただきたい)。NPIW に淡水や二酸化炭素を送り込むのは、オホーツク海から流出した中層水ではないかと指摘されており、オホーツク海における中層水の形成過程の解明が望まれていた。

以前の研究では、オホーツク海中層水の低温・低塩分・高ガス濃度という特徴は、主に海氷の生成に関連してつくられると考えられていた。海水が凍る時には純水部分が先に凍り、残った海水に塩が濃縮される。淡水や溶存ガスを大量に含んだ表層水が、冷却と塩分増加の効果によって、重い水に変えられる。このような水はオホーツク海北部の大陸棚上 (Fig. 1 の) で観測されており (Kitani, 1973; Gladyshev *et al.*, 2000; Shcherbina *et al.*, 2003), DSW (Dense Shelf Water) と呼ばれている。結氷温度に近い DSW は、同じ塩分の水より重い。このため、DSW と重さが釣り合うのは、より高塩分な水であり、オホーツク海ではちょうど中層水にあたる。従って、DSW は大陸棚を流れ出るとオホーツク海中層に広がり、中層水を低塩化・低温化・高ガス濃度化することができる。

しかし、それがどの程度かという定量的評価は困難であった。中層水形成には、千島列島海峡域 (Fig. 1

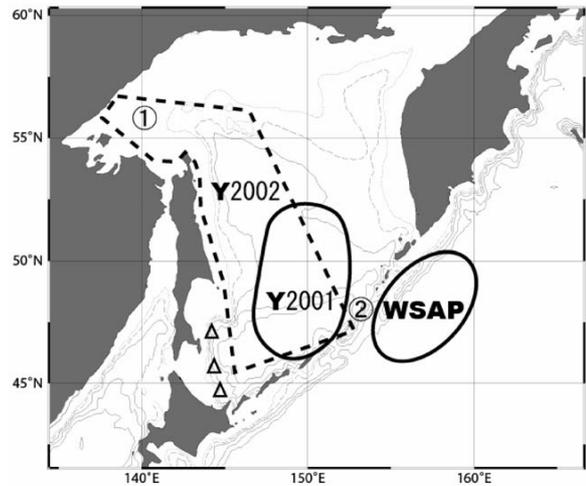


Fig. 1 Map of the Sea of Okhotsk with bathymetric contours of 250, 500, 1000, 2000, and 3000 m. Areas of observations for Yamamoto *et al.* (2001) and (2002) are enclosed by ellipses and dashed lines, respectively. Triangles indicate stations where influence of Soya warm current was evident in salinity- ^{18}O diagram (see Yamamoto *et al.*, 2001). Circled numbers indicate ventilation processes of the intermediate water in the Sea of Okhotsk, i.e., dense water formation on the northwestern shelf, and diapycnal mixing in and around the Kuril Straits.

の) におけるはげしい潮汐による上下混合も関わっているからである (Kitani, 1973; Kono and Kawasaki, 1997; 川崎, 1996; Nakamura *et al.*, 2000)。従来の水温・塩分・溶存ガス濃度といったデータだけでは、オホーツク海中層水形成における DSW の寄与と上下混合の寄与とを分離して評価することができなかった (e.g., Wong *et al.*, 1998)。

そこで筆者らは、オホーツク海中層水の低塩・低温・高ガス濃度化において、海氷生成と上下混合とがどのように寄与しているかを調べるため、化学トレーサーとして海水の酸素同位体比と CFC (フロン) の濃度を導入した。酸素同位体比からは、海氷生成の影響を定量化することができ、DSW の形成、分布を明らかにした (2.2~2.3)。さらにこの結果を元に、中層の低温・低塩化に海氷生成と上下混合がそれぞれどれだけ寄与しているかを見積もった (2.4)。また、CFC 濃度からは、最近大気に接した水が中層へ運ばれている様子を調べた (2.5)。

2.2 オホーツク海水の酸素同位体比 塩分

海水生成のない海域 (Fig. 1 の WSAP ; 西部亜寒帯太平洋域) では, 塩分を下げる要因である淡水 (降水・河川水) が, 低い酸素同位体比を持つため, 両者はともに変化し, 良い直線関係をもつ (Fig. 2 a)。この太平洋水がオホーツク海に入る際, 海峡域において上下に混ぜられたとしても, Fig. 2 の直線上を移動するだけである。一方, 海水生成がおきると, 海水の塩分が増加するが, 海水の酸素同位体比はほとんど変わらない。このため両者の直線関係は崩れ, 直線から右方向へと変化していく。従って, 海水生成による塩分変化は, 酸素同位体比 塩分の関係におけるズレとして表わされる。このことから, 酸素同位体比 塩

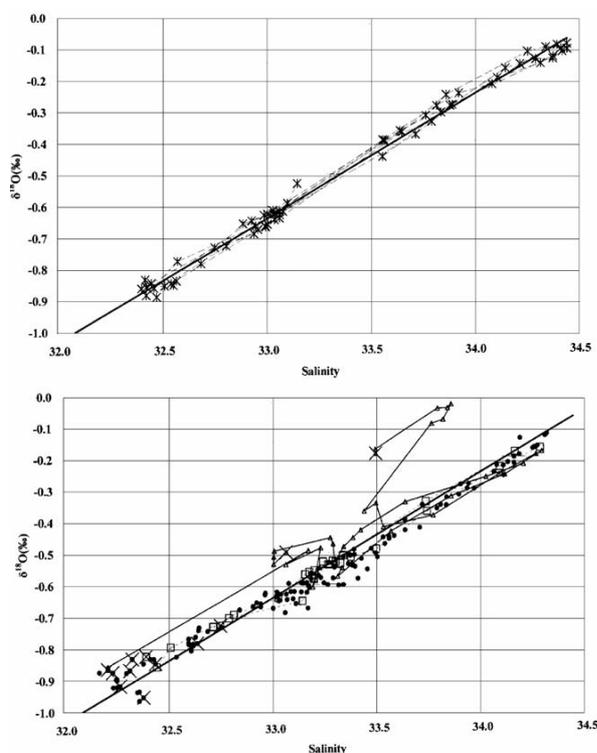


Fig. 2 Salinity- ^{18}O relationships for waters in regions of (a) Pacific side of the Kuril Island (WSAP in Fig. 1) and (b) southern part of the Sea of Okhotsk (Y2001 in Fig. 1) (from Yamamoto *et al.*, 2001). The straight lines are the regression line for waters in WSAP region: $^{18}\text{O} = 0.3915 \cdot \text{salinity} - 13.561$ ($R^2 = 0.99$). Cross symbols in Fig. 2b indicate surface waters (<5 m depth). Triangles with line shows data from stations marked with triangles in Fig. 1. Squares indicate data from Bussol' Strait (see Yamamoto *et al.*, 2001 for detail).

分の関係に見られるズレの大きさをを用いて, 海水生成の影響を上下混合とは識別して調べることができる。

Fig. 2 a に, オホーツク海南部 (Fig. 1 の Y 2001 海域) で測定された, 酸素同位体比と塩分の関係を示す。オホーツク海では, 塩分と酸素同位体比の関係はただの直線ではなく, 表層水, 南西部の海水, 中層水 (塩分 33~33.5) において直線からのズレが見られた。表層では河川水の同位体比の季節変動, 南西部の海水では宗谷暖流水の影響を示しているが, これらについては Yamamoto *et al.* (2001) を参照されたい。オホーツク海中層のズレは, 海水生成時に排出された過剰の塩 (ブライン) の存在を表わしている。この結果から, オホーツク海中層水は海水生成と直接関連していることが証拠付けられた。

2.3 酸素同位体比から見た DSW の形成と分布

海水生成と中層水を繋ぐのは, 北西部大陸棚での DSW の形成である。そこで, DSW がどのように生成され, どのように広がっているかを調べるため, オホーツク海北部を含む広い範囲で酸素同位体比の測定を行った (Fig. 1 の Y 2002 海域)。

オホーツク海北西部の大陸棚上では, 冷たくて重い DSW が観測された (Fukamachi *et al.*, 2004)。この DSW の酸素同位体比と塩分の関係性を調べた結果 (Fig. 3), 直線から右側への大きなズレが認められた。これは, 海水生成時に排出された過剰の塩を大量に含んでいることを示している。このズレの大きさから, 加えられた塩量を見積もった結果, 厚さ 2.5 m の海水生成に相当する量であることが分かった。中層に入ることができるほど重い DSW を作るためには, 活発な海水生成にともなう大量の塩分付加が必須であることが確かめられた。

また, Fig. 3 に見られる過剰塩の水平分布を調べたところ, 北西部大陸棚からオホーツク海南部へと大きく減少していた。これは, 大陸棚で形成された DSW が周りの水との混合によって希釈されながら広がっているためと解釈される。過剰塩の減少量から定量的に見積もった結果, 大陸棚上では 100% であった DSW が, オホーツク海南部では 20% にまで希釈されていることが分かった。

2.4 海水生成と上下混合による中層水の水温・塩分変化

酸素同位体比から見積もった DSW の量は, 水温・塩分・溶存ガス濃度から見積もった量 (40~50%; Wong *et al.*, 1998; Itoh *et al.*, 2003) のおよそ半分で

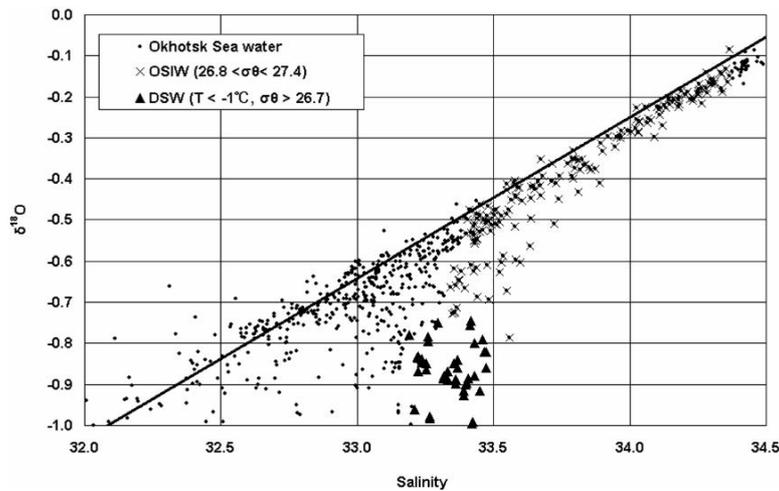


Fig. 3 Salinity- ¹⁸O relationship for the Okhotsk Sea water (Y2002 region in Fig. 1) (after Yamamoto *et al.*, 2002). A thick straight line refers to the relationship for waters in the WSAP region (see Figs. 1 and 2). Crosses and triangles indicate Okhotsk Sea Intermediate Water (OSIW) and dense shelf water (DSW), respectively.

Table 1 Changes in temperature and salinity from WSAP to Okhotsk Sea Intermediate Water (OSIW) due to diapycnal mixing and mixing with DSW. See text and Yamamoto *et al.* (2002) for details.

	Temperature (°C)			Salinity		
	WSAP		OSIW	WSAP		OSIW
26.80	3.47	1.48	0.84	33.69	33.45	33.43
26.90	3.52	1.96	1.31	33.85	33.66	33.59
27.00	3.68	2.33	1.68	33.93	33.85	33.76
27.10	3.45	2.64	2.08	34.10	34.01	33.92
27.20	3.27	2.61	2.24	34.18	34.14	34.06
27.30	2.96	2.70	2.33	34.29	34.28	34.20
27.40	2.68	2.76	2.32	34.37	34.42	34.31

	diapycnal mixing	DSW		diapycnal mixing	DSW
--	------------------	-----	--	------------------	-----

しかなかった。この差の原因は、以前の見積もりでは DSW と上下混合とを識別していないのに対し、酸素同位体比からは DSW の混合量を直接見積もったためである。つまり、20%程度しかない DSW だけでは中層水の水温・塩分・ガス濃度を説明することはできないということを意味し、さらに上下混合が中層水の低温・低塩分・高ガス濃度化に重要であることを示している。

そこで、海水生成と上下混合という二つの過程が、オホーツク海中層水の低温・低塩分という性質にどれだけ寄与しているかを見積もった (Yamamoto *et al.*, 2002)。Table 1 に結果を示す。左列の「太平洋水」

の水温・塩分から中央列までの変化が、上下混合による変質を示している。そこからさらに右の「オホーツク海水」の値にまで変化させているのが海水生成時に作られた DSW との混合である。この結果、オホーツク海中層水の水温・塩分を決めているのは、主に上下混合であることが分かった。例えば、中層上部 (= 26.8) では、水温減少の 7 割が上下混合によるものであり、残りの 3 割が DSW の寄与によるものである。

2.5 オホーツク海水のフロン(中層水の換気過程)

オホーツク海中層水の低温・低塩分という性質は、主に上下混合によってもたらされているということが

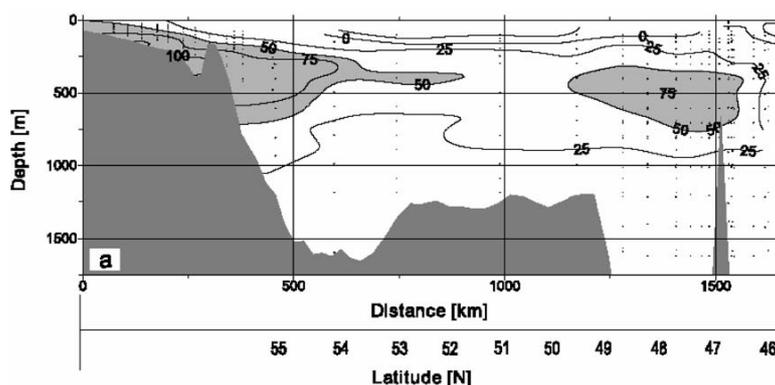


Fig .4 Distribution of pCFC-11 from the northwestern shelf (left side) to outside the Bussol' Strait (right side) (from Yamamoto-Kawai *et al.*, 2004). The shaded area indicates the distribution of water having pCFC-11 values larger than 50 pptv. CFC-11 is calculated by subtracting the pCFC value of the Pacific water from the observed pCFC-11 of Okhotsk Sea at the same density level.

明らかとなったが、それではオホーツク海中層水の「高ガス濃度」という性質についてはどうであろうか？このことはオホーツク海から NPIW への二酸化炭素輸送を考える上で重要な問題である。そこで、CFC を測定し、オホーツク海における中層水の換気（大気からのガスを運び込むこと）がどのように起きているかを調べた（Yamamoto-Kawai *et al.*, 2004）。CFC とはクロロフルオロカーボンのことで、フロンとも呼ばれる。20世紀に作り出された100%人為起源のガスで、大気との気体交換によってのみ、海洋に侵入する。大まかに言うと、CFC をたくさん溶かしこんでいる海水は、より最近大気と接していた水であり、CFC 濃度を用いて換気の起きている場所を知ることができる。

Fig .4 に、CFC 濃度の分布を示す。CFC 濃度は、同じ密度の太平洋水と比べて、オホーツク海水がどれだけよりよく換気されているかを示している。北部大陸棚上の DSW で最も高い CFC 濃度がみられ、オホーツク海南部へと広がっている。よく換気された表層水が、海氷生成によって重い DSW となり、オホーツク海中層を広げていることが分かる。また、オホーツク海南部にも、よく換気された水が存在している。これは DSW によるものだけではなく、千島海峡域での上下混合によってさらに換気された水であると考えられる。よく換気された表層付近の海水が、上下混合によって中層にまで運ばれるためである。水平（密度面上）分布を調べると、中層下部では、

千島海峡域において最も高い CFC 濃度が観測された（Yamamoto-Kawai *et al.*, 2004）。これは、この海峡域での上下混合により、中層下部まで換気が及んでいることを証拠付けている。一方、中層上部については、DSW による換気と上下混合による換気とが重なり合っており、両者の影響を定量的に識別するには至らなかった。ただし、太平洋から流入する水を上下混合するだけでも、オホーツク海南部の CFC 濃度の大部分は説明可能であり、オホーツク海中層水の上部の換気においても上下混合の影響は無視できないことを強調しておきたい。

2.6 まとめと今後の課題

オホーツク海中層水の形成過程について、酸素同位体比と CFC 濃度から調べた結果、中層水の形成には海水生成と海峡域での上下混合とがどちらも重要であることが分かった。特に、以前の研究では無視されることさえあった上下混合が、オホーツク海中層水に低温・低塩分という特徴を与える主な過程であることが、初めて定量的に示された。

それでは、温暖化で海氷も DSW もできなくなったらどうなるだろうか？今回の研究によれば、DSW がなくても、オホーツク海中層水の低温・低塩・高ガス濃度という特徴はある程度維持されるであろう。とはいえ、その場合の水温は、現在のオホーツク海中層水の水温（Table 1 右列）よりも約0.5℃程度高いことが予想される（Table 1 中央列）。さらに、上下混合の際にはオホーツク海上層の水も中層まで運ばれてい

ることから、海水生成量の変化は、上層水の変質を介して中層にさらに影響を及ぼすことも考えられる。

また、海水生成がなくなった場合、オホーツク海からの二酸化炭素の輸送はどうなるのだろうか？これについては、水温・塩分・CFC濃度の変化よりもさらに複雑である。生物生産過程と絡まって変動するからである。DSWがなくなれば、栄養塩やその他の物質循環が変わり(Nakatsuka *et al.*, 2002; 2004)、生物生産や二酸化炭素の収支(Chen *et al.*, 2004)も変わるだろう。この複雑な過程については、今後、さらに研究が必要である。また、オホーツク海中層水は、太平洋へ流出する際に再び海峡域を通過するという事実も重要である。流出水の上下混合は、NPIWの人為起源二酸化炭素含量(Ono *et al.*, 2003)にどのように影響するのかといった問題も興味深い。

3. 北極海の淡水分布

3.1 背景

近年、北極海ではさまざまな変化が報告されている。海水面積・厚さの減少(e.g., Rothrock *et al.*, 1999; Johannessen *et al.*, 2004)、海洋上部の塩分変化(e.g., Steel and Boyd, 1998; Melling, 1998; Schlosser *et al.*, 2002)、大西洋水流入の強化と高温化(McLaughlin *et al.*, 1996; Dickson *et al.*, 2000; Shimada *et al.*, 2004)などである。これらの変化は、

大気場の周期的な変動の影響を受けているとともに(Proshutinsky and Johnson, 1997; Maslowski *et al.*, 2001)、海水減少には人為起源温暖化の影響がすでに現れているという報告もある(Johannessen *et al.*, 2004)。水温の低い北極海においては、主に塩分が海洋の成層構造を決め、成層構造は、大気海洋間の熱輸送や海水生成に影響を与える。さらに、北極海から流出する淡水の量の変化は、北大西洋における成層構造を変え、地球規模の海洋大循環の源である北大西洋深層水の形成にも影響を及ぼす(Häkkinen, 1999; Karcher *et al.*, 2005)。従って、北極海における現在の淡水分布を定量的に理解することは、今後の北極海内部の塩分構造の変化や、それに伴うさまざまな変化を予測するために重要である。

北極海における大まかな海洋構造をFig. 5に示す。大西洋から高温・高塩分な水が中層に入り、その上には低温・低塩分な層がある。北極海上層には、大量の河川水(世界の河川水の10%)が注ぎ込んでいるほか、降水や太平洋からの低塩分水も淡水を加えている(Aagaard and Carmack, 1989; Carmack, 2000)。これらの淡水の一部は海水として海洋から取り除かれ、残った海水に過剰の塩を排出したり、別の場所で融解したりして、塩分の分布に影響を及ぼしている。

淡水の起源を識別し、北極海における塩分構造を理解するため、これまでにさまざまな化学トレーサーが

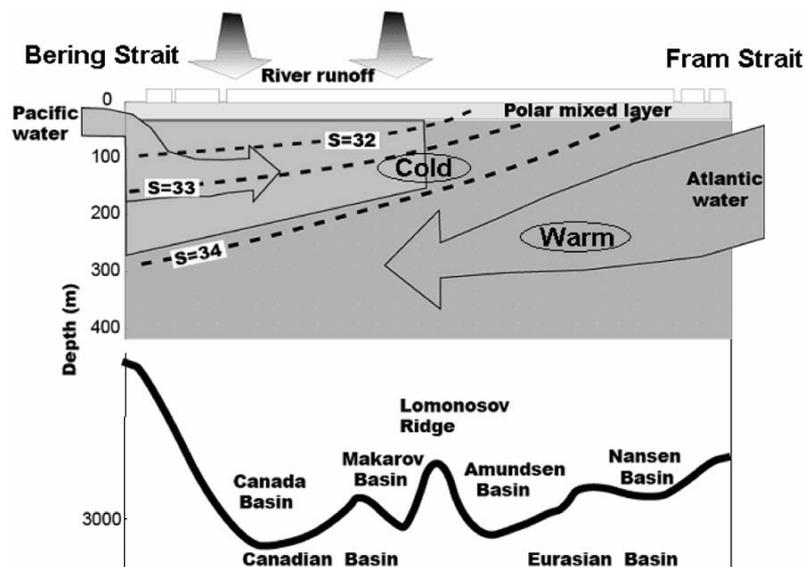


Fig. 5 Schematic picture of water mass distribution in the Arctic Ocean along 180°W meridians. Dashed lines are isohaline surfaces of salinity = 32, 33, and 34.

利用されてきた。例を挙げると、海水の生成・融解過程の影響の識別には酸素同位体比 (e.g., Östlund and Hut, 1984; Bauch *et al.*, 1995), 太平洋水の識別には栄養塩 (Jones *et al.*, 1998; Ekwurzel *et al.*, 2001), 河川水の識別にはアルカリ度 (Anderson *et al.*, 2004), 北アメリカ河川水の識別にはバリウム (Guay and Falkner, 1997; Macdonald *et al.*, 1999) などがあつた。しかしながら、これらは海域や観測年の限られた各々の観測データに基づいているため、北極海全体において、各淡水起源がどのように分布しているかは明らかになっていなかった。

本章では、まず、酸素同位体比とアルカリ度を同時に測定することによって、天水 (降水・河川水) の起源を識別するという新たな方法を紹介します。続いて、過去のデータを集めて「融氷水・ブライン (海水生成時に排出される塩)」と「その他の淡水」の分布を、北極海全体で描くことを試みた研究を紹介する。

3.2 酸素同位体比とアルカリ度の組み合わせによる北アメリカ河川水の識別

Yamamoto-Kawai *et al.* (2005) では、アルカリ度を利用することで、「天水」の起源を識別することを提案した。海水の酸素同位体比は、海水生成と融解の影響は識別できるが、天水の起源までは識別できない。一方、アルカリ度は、北アメリカからの河川水で約 $1,900 \mu\text{mol kg}^{-1}$ (Telang *et al.*, 1991), シベリア河川水では平均 $770 \mu\text{mol kg}^{-1}$ (Olsson and Anderson, 1997), 太平洋からの天水は $930 \mu\text{mol kg}^{-1}$ (Anderson *et al.*, 1994), そして降水ではほぼ $0 \mu\text{mol kg}^{-1}$ と、起源によって大きく異なるため、これら天水起源の識別が可能になるのではないかと考えた。塩分とアルカリ度

との関係は、天水との混合だけでなく、海水生成・融解過程によっても変化する。しかし、この影響は、酸素同位体比を用いて定量的に知ることができる。酸素同位体比とアルカリ度のデータをあわせて用いることで、海水生成・融解の影響を補正し、天水との混合のみによる、アルカリ度と塩分の関係を探ることを試みた。

Fig. 6 に、北極海大西洋側で観測した、海水の塩分とアルカリ度の関係を示す。Fig. 6 a は海水の影響を補正する前、Fig. 6 b は酸素同位体比を用いて補正した後である。アルカリ度と酸素同位体比のデータは、同じ航海で測定されたものであり、それぞれ Anderson *et al.* (1994), Bauch *et al.* (1995) から得た。補正後の塩分とアルカリ度は良い直線関係を示し、塩分を希釈する天水起源が、 $730 \mu\text{mol kg}^{-1}$ のアルカリ度を持つことが分かる (Fig. 6 b)。これにより、北極海大西洋側では、シベリア河川水 ($770 \mu\text{mol kg}^{-1}$) が主な ($\sim 95\%$) 天水の起源であることが分かった。

北極海太平洋側でも、同様の解析を行った。用いたデータはみらい (JAMSTEC) の航海で得られたものである。海水生成・融解の効果を補正すると、殆どのデータは、天水のアルカリ度がおよそ $930 \mu\text{mol kg}^{-1}$ であることを示した。アルカリ度の高い北アメリカ河川水 ($1,900 \mu\text{mol kg}^{-1}$) の影響は、河口域や沿岸域の表層 30 m のみで見られた。大部分の海水が示す、 $930 \mu\text{mol kg}^{-1}$ という値は、シベリア河川水 ($770 \mu\text{mol kg}^{-1}$) あるいは太平洋水の運ぶ天水が主な起源であることを示している。この海域における北アメリカ河川水の寄与は $< 20\%$ 、降水の寄与は $< 10\%$ と見積もられ

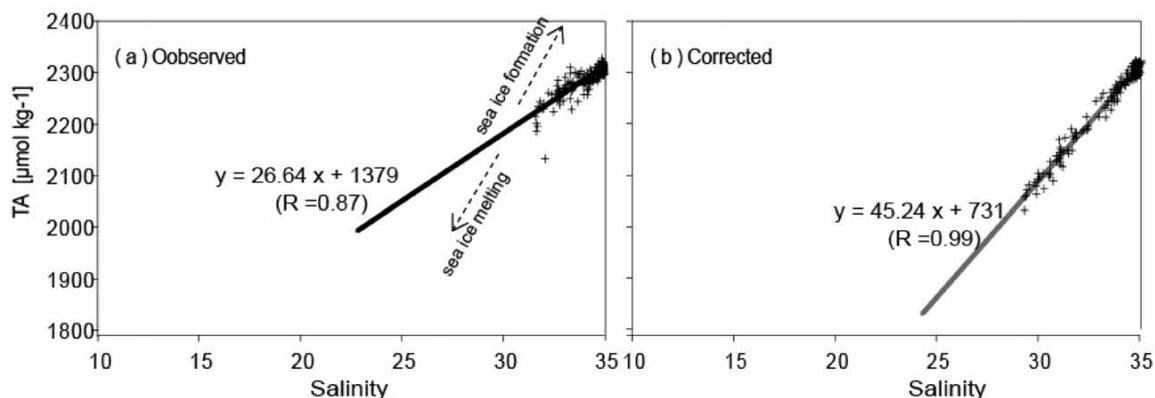


Fig. 6 Relationships between salinity and alkalinity in the Eurasian Basin of the Arctic Ocean for (a) observed and (b) corrected data for the sea ice formation or melting effects by using ^{18}O (from Yamamoto-Kawai *et al.*, 2005).

た。

アルカリ度を用いた解析の結果から、北アメリカ河川水の影響は場所・深さ共に限られており、北極海太平洋側においても主な淡水起源ではないことが分かった。これは以前に考えられていた淡水分布 (Guay and Falkner, 1997) とは異なる、新たな結果である。北アメリカ河川水は、数値モデル計算が示唆するように (Karcher and Oberhuber, 2002), カナダ多島海を經由して比較的素早く北極海外部に流出しているものと推察される。

3.3 過去のデータによる淡水分布の復元

さて、北極海上層部の塩分を決める主な要因は、海水の生成・融解と、太平洋からの天水とシベリア河川水との混合であることが分かった。後者二つの天水のアルカリ度はほぼ同じであり (930 と $770 \mu\text{mol kg}^{-1}$), 海水に含まれる値 ($263 \mu\text{mol kg}^{-1}$, Anderson *et al.*, 2004) とは大きく異なる。このことから、酸素同位体比と同様、アルカリ度からも、天水と海水生成・融解の影響とを識別できるのではないかと考えた。北極海の酸素同位体比のデータが1960年代以降であるのに対し (Schmidt *et al.*, 1999), アルカリ度のデータは1920年代から存在する (Hydrochemical Atlas of the Arctic Ocean, 2001)。二つのトレーサーを

あわせることができれば、データ数は倍増し、北極海全体の淡水分布を描くことができるはずである。

そこで、天水のアルカリ度を $830 \pm 100 \mu\text{mol kg}^{-1}$ とおいて、海水中の天水と融氷水の割合を見積もってみた (Fig. 7)。上の図は従来用いられてきた酸素同位体比をトレーサーとした見積もり、下の図はアルカリ度を用いた新たな見積もりの結果である。両トレーサーによる結果は鉛直分布、絶対値ともに、良く一致した。この解析結果から、アルカリ度が海水の生成・融解と天水の影響とを識別するトレーサーとして使えることが分かった。

アルカリ度と酸素同位体比の過去70年のデータをあわせることで、北極海全体における「融氷水・ブライン (海水生成時に排出される塩)」と「天水」の分布を描くことに成功した。結果の一部を Fig. 8 に示す。この図は、表層から水深300 m まで淡水の存在量を積分したものである。ブラインについては、海水生成時に海水から海水として取り除かれた淡水量として示してある。Fig. 8a は、塩分のみから計算した淡水含量の分布である。太平洋側に淡水が貯蔵されており、その量は厚さに換算して15~20 m ほどだった。酸素同位体比あるいはアルカリ度から淡水の内訳を調べた結果、北極海太平洋側では天水が25~30 m 相当の淡水

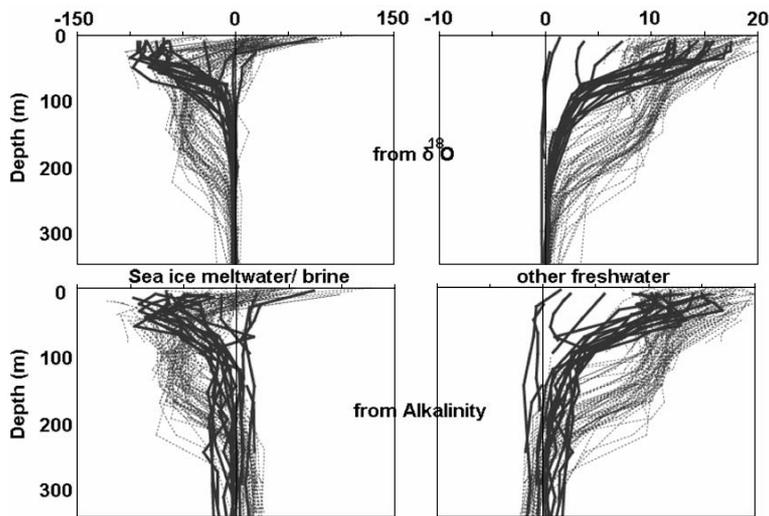


Fig. 7 Vertical distribution of sea ice meltwater/brine (left panels) and other freshwater (right panels) in ml/L (after Yamamoto-Kawai *et al.*, 2005). Negative values in left panels represent removals of freshwater as sea ice to add brine in seawater. Upper panels are from oxygen isotope ratio, and lower panels are from alkalinity. Thick lines are for observations in Eurasian Basin, and dotted lines are for observations in the Canadian Sector of the Arctic Ocean.

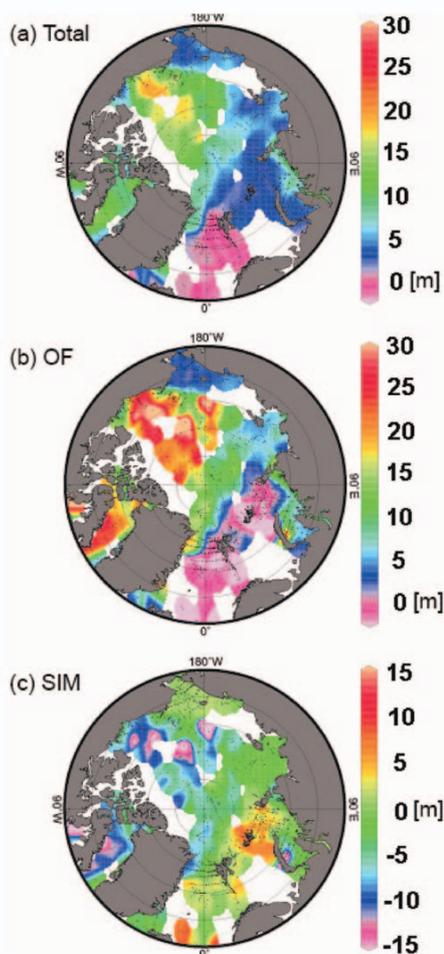


Fig. 8 Inventories (as water depth equivalent in meters) of (a) total freshwater, (b) freshwater other than sea ice meltwater, and (c) sea ice meltwater/brine from the surface to 300 m depth (or to the depth of bottom measurement if it is shallower than 300 m) of the Arctic Ocean (from Yamamoto-Kawai *et al.*, 2005).

として加わり (Fig. 8 b), そのうちのおよそ10 m分が海氷に変換されて取り除かれていることが分かった (Fig. 8 c)。この研究からは、淡水の水平・鉛直分布が描かれ、オホーツク海と同様、大陸棚上での重い水の形成が淡水と過剰の塩輸送に重要であること、それが主に太平洋側の大陸棚で起きていること、重い水形成の変化が淡水分布の変化を引き起こすことなどを示すことができた。

3.4 まとめと今後について

アルカリ度と酸素同位体比を組み合わせることで、北極海における天水起源を定量的に推察できることが

できた。その結果、北アメリカ河川水の影響は、場所・深さ共に限られていることが分かった。この結果を利用して、アルカリ度から海水生成・融解の影響と天水の影響とを識別できることも示した。これにより、酸素同位体比とアルカリ度という二つのトレーサーデータをあわせ、北極海全体における淡水の分布を示すことができた。

しかしながら、70年分のデータを合わせても観測データのない海域もあり、経年変化を明らかにするためにも、さらにデータを蓄積することが必要である。北極海は太平洋から大西洋への海水の通り道であり、大洋間の物質のやりとりにおいても重要な海域である (Yamamoto-Kawai *et al.*, submitted)。そのため、北極海での海水の変質が、地球をめぐる化学物質の循環や生物生産などにどう関わっているのかという問題は大変興味深く、今後積極的に取り組んでいきたいと考えている。

4. おわりに

海水の水温・塩分を決めている過程は何かという問題は、中深層水の形成に関わる寒冷海域において特に重要である。本稿では、オホーツク海と北極海において、化学トレーサーを用いて諸過程を識別評価した研究を紹介した。どちらも、海氷の存在と政治的理由によって困難であった観測が、1990年以降急速に盛んになってきた海域である。新たに得られた知見も多く、両海域の重要性が再度認識されてきている。さらに、水温・塩分にさまざまな変動があることも明らかになってきた。変動の要因がどの過程にあるのかについて、化学トレーサーから得られる知見は多く、今後のデータの蓄積と同時に、得られたトレーサーデータを用いたモデル計算の結果の検証や、非保存性成分の動きの定量化 (田中ほか, 2002; Guéguen *et al.*, submitted) など、諸過程の理解および今後の予測のために、さらに進められるべき課題である。

謝辞

この度、日本地球化学会奨励賞をいただく栄誉にあたりまして、選考に当たられた方々、そして会員の皆様に御礼申し上げます。様々な局面において、周りの方々からのご指導ご鞭撻、そして応援に助けていただきながら、これまで研究を続けていくことができました。角皆静男先生、田中教幸先生には、長年にわたりの確なご指導をいただくとともに、研究の楽しさを教

えていただきました。乗木新一郎教授、渡辺修一元助教授（現 JAMSTEC）、成田尚史元助手（現 東海大学助教授）をはじめとする北海道大学大学院地球環境科学研究科、および低温科学研究所の諸先生方、諸先輩方からも多くのご指導をいただきました。心より御礼申し上げます。オホーツク海の研究は、主に、北海道大学低温科学研究所の若土正暁教授の研究プロジェクト「オホーツク海氷の実態と気候システムにおける役割の解明（戦略的基礎研究；科学技術振興事業団）」に学生として参加させていただき、貴重な資料を得ることができました。このプロジェクトにおいても、また他の航海においても、研究者の方々や乗組員の皆様に試料採取などのご協力をいただきました。

北極海の研究は、地球観測フロンティア研究システムおよびアラスカ大学国際北極圏研究センターのポストドク研究員として行ったものです。同僚の研究者の皆様をはじめ、事務の方々にもさまざまな面でご支援いただきました。また、JAMSTECの滝沢隆俊博士、島田浩二博士、村田昌彦博士から、貴重なデータのご提供をいただきました。酸素同位体比を測定してくれた元技官の G. Bower 氏、ロシア滞在に際してお世話になりました L. Timokhov 博士、S. Pivovarov 博士ほか AARI の皆様にも大変感謝しております。また、過去のデータを利用した北極海の仕事については、各航海に参加された方々、測定された方々、データベースにまとめられた方々など、非常に多くの人々の努力があってこそ達し得た成果であり、ここに改めて感謝の意を表します。最後に、家族の理解と支えに感謝します。

文 献

- Aagaard, K. and E. C. Carmack (1989) The role of sea ice and other fresh water in the Arctic circulation. *J. Geophys. Res.* **94**, 14485–14498.
- Anderson, L. G., G. Björk, O. Holby, E. P. Jones, G. Kattner, K. P. Koltermann, B. Liljeblad, R. Lindegren, B. Rudels and J. Swift (1994) Water masses and circulation in the Eurasian Basin: results from the Oden 91 expedition. *J. Geophys. Res.* **99**, 3273–3283.
- Anderson, L. G., S. Jutterstrom, S. Kaltin, E. P. Jones and G. Björk (2004) Variability in river runoff distribution in the Eurasian Basin of the Arctic Ocean. *J. Geophys. Res.* **109**, doi: 10.1029/2003 JC 001773.
- Bauch, D., P. Schlosser and R. Fairbanks (1995), Freshwater balance and sources of deep and bottom water in the Arctic Ocean inferred from the distribution of $H_2^{18}O$. *Prog. Oceanogr.* **35**, 53–80.
- Carmack, E. (2000) The Arctic Ocean's freshwater budget: sources, storage and export. In: *The Freshwater Budget of the Arctic Ocean* (eds. E. L. Lewis *et al.*), Kluwer Academic Publishers, pp. 91–126.
- Chen, C. A., Andreev, A., Kim, K-R. and Yamamoto, M. (2004) Roles of continental shelves and marginal seas in the biogeochemical cycles of the North Pacific Ocean. *J. Oceanogr.* **60**, 17–44.
- Dickson, R. R., T. J. Osbom, J. W. Hurrell, J. Meincke, J. Blindheim, B. Adlandsvik, T. Vinje, G. Alekseev and W. Maslowski (2000), The Arctic Ocean response to the North Atlantic Oscillation. *J. Clim.* **15**, 2671–2696, 2000.
- Ekuruzel, B., P. Schlosser, R. Mortlock, R. Fairbanks and J. Swift (2001) River runoff, sea ice meltwater, and Pacific water distribution and mean residence times in the Arctic Ocean. *J. Geophys. Res.* **106**, 9075–9092.
- Fukamachi, Y., G. Mizuta, K. I. Ohshima, L. D. Talley, S. C. Riser and M. Wakatsuchi (2004) Transport and modification processes of dense shelf water revealed by long-term mooring off Sakhalin in the Sea of Okhotsk. *J. Geophys. Res.* **109**, C09S10, doi: 10.1029/2003 JC 1906.
- Gladyshev, S., S. Martin, S. Riser and A. Figurkin (2000) Dense water production on the northern Okhotsk shelves: comparison of ship-based spring-summer observations for 1996 and 1997 with satellite observations. *J. Geophys. Res.* **105**, 26281–26299.
- Guay, C. K. and K. K. Falkner (1997) Barium as a tracer of Arctic halocline and river waters. *Deep-Sea Res.* **44**, 1543–1569.
- Guéguen, C., Guo, L., Yamamoto-Kawai, M. and Tanaka, N. (Submitted) Colored dissolved organic matter (CDOM) dynamics across the shelf/basin interface in the western Arctic Ocean. *J.*

- Geophys. Res.*
- Häkkinen, S. (1999) A simulation of thermohaline effects of a great salinity anomaly. *J. Climate* **12**, 1781-1795.
- Hydrochemical Atlas of the Arctic Ocean (2001) Ed. by R. Colony and L. Timokhov, Frontier Research Program, International Arctic Research Center (IARC), University of Alaska, Fairbanks, USA & State Research Center (SRC) - the Arctic and Antarctic Research Institute (AARI), Russia, CD-ROM.
- Itoh, M., K. I. Ohshima and M. Wakatsuchi (2003) Distribution and formation of Okhotsk Sea Intermediate Water: an analysis of isopycnal climatological data. *J. Geophys. Res.* **108**, 3258, doi: 10.1029/2002 JC 001590.
- Johannessen, O. M., L. Bengtsson, M. W. Miles, S. I. Kuzmina, V. A. Semenov, G. V. Alekseev, A. P. Nagurnyi, V. F. Zakharov, L. P. Bobylev, L. H. Pettersson, K. Hasselmann and H. P. Cattle (2004) Arctic climate change: observed and modeled temperature and sea-ice variability. *Tellus* **56A**, 328-341.
- Jones, E. P., L. G. Anderson and J. H. Swift (1998) Distribution of Atlantic and Pacific waters in the upper Arctic Ocean: Implications for circulation. *Geophys. Res., Lett.* **25**, 765-768.
- Karcher, M. J. and J. M. Oberhuber (2002) Pathways and modification of the upper and intermediate waters of the Arctic Ocean. *J. Geophys. Res.* **107**, 3049 doi: 10.1029/2000 JC 000530.
- Karcher, K., R. Gerdes, F. Kauker, C. Koberle, and I. Yashayaev (2005) Arctic Ocean change heralds North Atlantic freshening. *Geophys. Res. Lett.* **32**, L 21606, doi: 10.1029/2005 GK 023861.
- 川崎康寛 (1996) 北太平洋中層水の起源 オホーツク海における観測から. 月刊海洋, **28**, 545-552.
- Kitani (1973) An oceanographic study of the Sea of Okhotsk, particularly in regard to cold waters. *Bull. Far Seas Fish. Res. Lab.* **9**, 45-77.
- Kono, T., and Y. Kawasaki (1997) Modification of the western subarctic water by exchange with the Okhotsk Sea. *Deep-Sea Res.* **44**, 689-711.
- Macdonald, R. W., E. C. Carmack, F. A. McLaughlin, K. K. Falkner and J. H. Swift (1999) Connections among ice, runoff and atmospheric forcing in the Beaufort Gyre. *Geophys. Res. Lett.* **26**, 2223-2226.
- Maslowski, W., D. Marble, W. Walczowski and A. Semtner (2001) On large scale shifts in the Arctic Ocean and sea ice conditions during 1979-1998. *Ann. Glaciol.* **33**, 545-550.
- McLaughlin, F. A., E. C. Carmack, R. W. Macdonald and J. K. B. Bishop (1996) Physical and geochemical properties across the Atlantic/Pacific water mass front in the southern Canadian Basin. *J. Geophys. Res.* **101**, 1183-1197.
- Melling, H. (1998) Hydrographic changes in the Canada Basin of the Arctic Ocean, 1979-1996. *J. Geophys. Res.* **103**, 7637-7645.
- Nakamura, T., T. Awaji, T. Hatayama, K. Akimoto, T. Takizawa, T. Kono, Y. Kawasaki and M. Fukasawa (2000) The generation of large-amplitude unsteady Lee Waves by subinertial K1 tidal flow: a possible vertical mixing mechanism in the Kuril Straits. *J. Phys. Oceanogr.* **30**, 1601-1621.
- Nakatsuka, T., C. Yoshikawa, M. Toda, K. Kawamura and M. Wakatsuchi (2002) An extremely turbid intermediate water in the Sea of Okhotsk: implication for the transport of particulate organic carbon in a seasonally ice-bound sea. *Geophys. Res. Lett.* **29**, 1757, doi: 10.1029/2001 GL 014029.
- Nakatsuka, T., M. Toda, K. Kawamura and M. Wakatsuchi (2004) Dissolved and particulate organic carbon in the Sea of Okhotsk: Transport from continental shelf to ocean interior. *J. Geophys. Res.* **109**, C09S14, doi: 10.1029/2003 JC 001909.
- Olsson, K. and L. Anderson (1997) Input and biogeochemical transformation of dissolved carbon in the Siberian shelf seas. *Continental Shelf Res.* **17**, 819-833.
- Ono, T., K. Sasaki and I. Yasuda (2003) Re-estimation of annual anthropogenic carbon input from Oyashio into North Pacific Intermediate Water. *J. Oceanogr.* **59**, 883-891.

- Östlund, H. G. and G. Hut (1984) Arctic Ocean water mass balance from isotope data, *J. Geophys. Res.* **89**, 6373–6381.
- Proshutinsky, A. Y. and M. A. Johnson (1997) Two circulation regimes of the wind-driven Arctic Ocean. *J. Geophys. Res.* **102**, 12493–12514.
- Rothrock, D. A., Y. Yu and G. A. Maykut (1999) Thinning of the Arctic sea-ice cover. *Geophys. Res. Lett.* **26**, 3469–2472.
- Schlosser, P., R. Newton, B. Ekwurzel, S. Khatiwala, R. Mortlock and R. Fairbanks (2002) Decrease of river runoff in the upper waters of the Eurasian Basin, Arctic Ocean, between 1991 and 1996: evidence from ^{18}O data. *Geophys. Res. Lett.* **29**, 10.1029/2001 GL 013135.
- Schmidt, G. A., G. R. Bigg and E. J. Rohling (1999) "Global Seawater Oxygen-18 Database" <http://www.giss.nasa.gov/data/o18data/>.
- Shcherbina, A. Y., L. D. Talley, and D. L. Rudnick (2003) Direct observations of North Pacific ventilation: brine rejection in the Okhotsk Sea. *Science* **302**, 1952–1955.
- Shimada, K., F. McLaughlin, E. Carmac, A. Proshutinsky, S. Nishino and M. Itoh (2004) Penetration of the 1990s warm temperature anomaly of Atlantic Water in the Canada Basin. *Geophys. Res. Lett.* **31**, L20301, doi: 10.1029/2004 GL 020860.
- Steel, M. and T. Boyd (1998) Retreat of the cold halocline layer in the Arctic Ocean. *J. Geophys. Res.* **103**, 10419–10435.
- Talley, L. D. (1991) An Okhotsk water anomaly: implication for ventilation in the North Pacific. *Deep-Sea Res.* **38**, S171–S190.
- Telang, S. A., R. Pocklington, A. S. Naidu, E. A. Romankevich, I. I. Gitelson and M. I. Gladyshev (1991) Carbon and mineral transport in major north American, Russian, Arctic, and Siberian Rivers: the St Lawrence, the Mackenzie, the Yukon, the Arctic Alaskan rivers, the Arctic Basin rivers in the Soviet Union, and the Yenisey. In: *Biogeochemistry of major world rivers* (eds. E. T. Degens *et al.*), Wiley, New York, pp. 75–104.
- 田中教幸, 山本美千代, 成田尚史 (2002) 同位体と化学トレーサーによる淡水循環, 結氷, 海氷融解, コールドハロクライン水形成過程の解明. 月刊海洋, **34**, 885–891.
- Tsunogai, S., T. Ono and S. Watanabe (1993) Increase in total carbonate in the western North Pacific water and a hypotheses on the missing sink of anthropogenic carbon. *J. Oceanogr.* **49**, 305–315.
- Warner, M. J., J. L. Bullister, D. P. Wisegarver and R. H. Gammon (1996) Basin-wide distributions of chlorofluorocarbons CFC-11 and CFC-12 in the North Pacific: 1985-1989. *J. Geophys. Res.* **101**, 20525–20542.
- Wong, C. S., R. J. Matear, H. J. Freeland, F. A. Whitney and A. S. Bychkov (1998) WOCE line P1W in the Sea of Okhotsk 2. CFCs and the formation rate of intermediate water. *J. Geophys. Res.* **103**, 15625–15642.
- Yamamoto, M., Tanaka, N. and Tsunogai, S. (2001) Okhotsk Sea intermediate water formation deduced from oxygen isotope systematics. *J. Geophys. Res.* **106** (C12), 31,075–31,084.
- Yamamoto, M., Watanabe, S., Tsunogai, S. and Wakatsuchi, M. (2002), Effects of sea ice formation and diapycnal mixing on the Okhotsk Sea intermediate water clarified with oxygen isotopes. *Deep-Sea Res.* **49**, 1165–1174.
- Yamamoto-Kawai, M., Watanabe, S., Tsunogai, S. and Wakatsuchi, M. (2004) Chlorofluorocarbons in the Sea of Okhotsk: ventilation of the intermediate water. *J. Geophys. Res.* **109**, C9S11, doi: 10.1029/2003 JC 001919.
- Yamamoto-Kawai, M., Tanaka, N. and Pivovarov, S. (2005) Freshwater and brine behaviors in the Arctic Ocean deduced from historical data of ^{18}O and alkalinity (1929-2002 A.D.). *J. Geophys. Res.* **110**, C10003 doi: 10.1029/2004 JC 002793.
- Yamamoto-Kawai, M., E. C. Carmack and F. A. McLaughlin (submitted) A newly recognized role for the Arctic throughflow in the global nutrient cycle, *Nature*.

Yasuda, I. (1997) The origin of the North Pacific Intermediate Water. *J. Geophys. Res.* **102**, 893-909.

Yasuda, I. (2004) North Pacific Intermediate Water: progress in SAGE (SubArctic Gyre Experiment) and related projects. *J. Oceanogr.* **60**, 385-395.