

## 化学的手法による北極海の研究 \*

川合 美千代 †

### 要 旨

化学トレーサーを用いて、オホーツク海および北極海における海水の変質・混合過程を調べた筆者のこれまでの研究を紹介する。海水の酸素同位体比から、オホーツク海中層に海水生成の影響を受けた水が広がっており、中層水に含まれるこの水の割合は 20%であることが分かった。CFCs の分布からは、海水生成と潮汐混合が中層の通気に重要であることが示された。さらに、中層水の水温・塩分には海水生成よりも潮汐混合の影響がより大きいと見積もられた。

過去の酸素同位体比とアルカリ度のデータを用いて、北極海全域における融氷水/ブラインとその他の淡水を識別し、これらの分布を示した。さらに、北極海の中でも特に淡水が多いカナダ海盆の淡水収支を、栄養塩と酸素同位体比を用いて明らかにした。また、この際に水塊識別のトレーサーとして用いた海水中の窒素とリンの関係に着目し、北極海経由の水輸送が、海洋の窒素収支をバランスさせるための働きをしているという説を提唱した。

キーワード：オホーツク海，北極海，トレーサー，栄養塩，淡水

### 1. はじめに

海水は、地球上を廻りながら、熱、栄養物質、汚染物質、二酸化炭素などを運び、物質循環や生物活動、気候に影響を及ぼしている。海水の動きを決める重要な要因である水温や塩分、そして海水に溶けている物質の濃度は、様々な過程—風、潮汐、降水、蒸発、河川水の流入、生物活動、大気との物質のやり取り、海水生成・融解など—によって変わる。しかし、適切な「トレーサー (追跡子)」を用いることができれば、それぞれの過程の影響を識別し、個別に定量化することが可能となる。

本稿では、海水中に存在する化学成分をトレーサー

として、海水の混合・変質や動きと、それに伴う物質の循環について調べた筆者らの研究を紹介する。研究対象は、オホーツク海と北極海である。これらは現在の中層水・深層水の形成に関わる海域であり、大洋規模・地球規模の物質循環を考える上で要点となる海域である。また、どちらも近年、海氷面積の減少や海水の昇温などの変化が観測されており、今後の生物や気候への影響が懸念されている海域でもある。

オホーツク海を対象とした研究では、海水生成と潮汐混合が中層水に与える影響を定量化することを試みた (Yamamoto *et al.*, 2001; 2002; Yamamoto-Kawai *et al.*, 2004; Chen *et al.*, 2004; 川合 2006)。北極海の研究では、海氷の生成・融解や河川水と混合の影響を受けた海水の分布を示した (Yamamoto-Kawai *et al.*, 2005)。また、その結果を用いて、海水生成・融解が海水の塩分に与える影響を調べた (川合・伊東, 2008)。次

\* 2008 年 11 月 7 日 受領；2008 年 11 月 19 日 受理  
著作権：日本海洋学会, 2009

† カナダ漁業海洋省海洋科学研究所  
9860 West Saanich Road, Sidney, BC, V8L4B2, Canada  
主著者 e-mail address : michiyo.kawai@dfo-mpo.gc.ca

に、北極海カナダ海盆において、海水の構成比(各起源水の混合比)を見積もり、この海域の淡水収支を明らかにした(Yamamoto-Kawai *et al.*, 2008; 川合・伊東, 2008; Carmack *et al.*, 2008)。また、北極海を經由する水輸送が海洋の窒素収支に与える影響についての新たな説を提案した(Yamamoto-Kawai *et al.*, 2006)。本稿の第2章ではオホーツク海研究を簡単に紹介し、第3章では北極海研究について述べる。

## 2. オホーツク海

### 2.1. オホーツク海中層水

オホーツク海の中層には、太平洋の中層に比べて低温・低塩分で、溶存酸素、人為起源二酸化炭素、有機物、鉄などを豊富に含んだ水がある。この水はやがて千島列島間の海峡から流出し、亜寒帯域のみならず、亜熱帯域に広がる北太平洋中層水(NPIW)に入るため、北太平洋における物質循環や生物生産に重要な役割を果たしているのではないかと考えられている(Ono *et al.*, 2004; Nakatsuka *et al.*, 2004; Chen *et al.*, 2004; Nishioka *et al.*, 2007)。

オホーツク海中層水の持つ、低温・低塩分、高ガス濃度という特徴は、表層で淡水の供給、大気との熱やガスの交換を行った水が中層にもぐりこんでいるためと考えられる。その過程としては、海水生成時の高密度水形成と、潮汐混合とが挙げられる。オホーツク海では、冬季にシベリアからの冷たい風により、北部の浅い大陸棚上で活発な海水生成がおきる。海水には海水の1/3かそれ以下の塩分しか含まれないため、海水の生成時には過剰の塩を含んだ高塩分水(ブラインと呼ばれる)が吐き出され、海水下の海水の塩分が高くなる。その結果、オホーツク海北部の大陸棚上には「大陸棚高密度水(DSW: Dense Shelf Water)」と呼ばれる、冷たくて高塩分な重い水が形成される(e.g., Shcherbina *et al.*, 2003)。DSWはやがて大陸棚から流れ出し、周りの水(DSWよりも高温・高塩分)と混合しながらオホーツク海の中層に広がる(Fukamachi *et al.*, 2004; Mizuta *et al.*, 2003)。これが、オホーツク海に特有な中層水を形成する過程の一つ目である。二つ目は、オホーツク海と太平洋とをつなぐ千島列島の海峡でおこ

る、激しい潮汐混合である。潮汐混合の際には表層の水が中層に混ざり、中層水の性質を変えることができる(中村, 2008)。

DSWと潮汐混合の、どちらがどれだけ、オホーツク海中層水の形成に寄与しているのだろうか。この問いに答えるため、筆者らは、クロロフルオロカーボン類(CFCs)と海水の酸素同位体比( $\delta^{18}\text{O}$ )をトレーサーとして、両過程を識別することを試みた。

### 2.2. CFCsと $\delta^{18}\text{O}$ を用いたオホーツク海中層水の研究

CFCsは、100%人為起源のガスで、1930年代から大気に放出・蓄積されてきた。このCFCsは、大気との気体交換によってのみ海洋に侵入するので、簡単にいうと、CFCsをたくさん溶かしこんでいる海水は、CFCsを多く含む最近の大気と接した水ということになる。従って、CFCs濃度の分布から、オホーツク海中層水がどこで通気(Ventilation: 大気に接してガス交換を行うこと)しているのか、つまり、表層の水がどこからオホーツク海中層に入っているのかを知ることができる。一方、 $\delta^{18}\text{O}$ は、海水生成・融解の指標となる。基本的に、亜寒帯域においては、塩分と $\delta^{18}\text{O}$ は良い直線関係を持つことが知られている(Craig and Gordon, 1965; Yamamoto *et al.*, 2001)。しかし、海氷の生成や融解の影響がある場合、この関係にズレが生じる(e.g., Bauch *et al.*, 1995)。そこで、このズレを追いかければ、海水生成の影響を受けたDSWをトレース(追跡)することができる。

得られた結果の一例をFig. 1に示す。Fig. 1aは、水温・塩分の違いがCFCs濃度に与える影響を補正した後、同じ密度の太平洋水との差をとったものである(詳細はYamamoto-Kawai *et al.*, 2004参照)。この図は、太平洋の水に比べて、オホーツク海の水がどれだけ良く通気されているかを示しており、値が大きいくほど、「オホーツク海特有の通気過程」の影響を受けていることを示す。オホーツク海全域に、よく通気された中層水が広がっていることが分かる。

$\delta^{18}\text{O}$ から見積もったDSWの割合の分布図(Fig. 1b)からは、北部の中層水にDSWが多く含まれていることが分かる。ところが南部では、北部と同様に通気さ

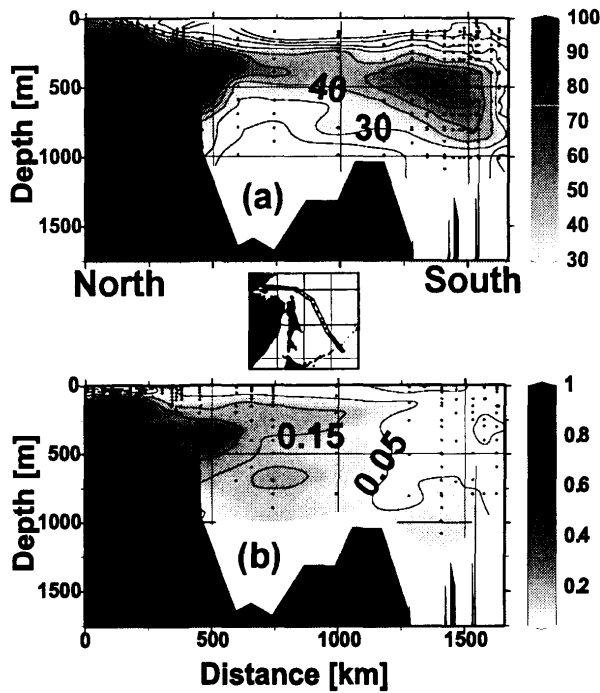


Fig. 1. Distributions of (a)  $\Delta p\text{CFC-11}$  and (b) fraction of dense shelf water (DSW) along the line extending from the northwestern shelf (left) to outside the Bussol' Strait (right).  $\Delta p\text{CFC-11}$  is calculated by subtracting pCFC-11 value of the Pacific water from observed pCFC-11 of the Okhotsk Sea water at the same density level (Yamamoto-Kawai *et al.*, 2004). Fraction of DSW is estimated using the  $\delta^{18}\text{O}$ -salinity relationship (Yamamoto *et al.*, 2002).

れているにもかかわらず、DSWの含量は少ない。従って南部では、海水生成以外の過程、すなわち海峡域での潮汐混合により、大気と接した上層の水が中層にまで混ざりこんでいると考えられる。また、 $\delta^{18}\text{O}$ から見積もられた、中層水に含まれるDSWの量は20%程度であったが、一方、太平洋水とDSWの等密度面混合を仮定した場合(すなわち潮汐混合が無いと仮定した場合)に、水温や塩分、酸素から中層水のDSW含量を見積もると、50%となる(e.g., Wong *et al.*, 1998)。このことから、潮汐混合が中層水の水温・塩分・ガス濃度を大きく変えていることが分かる。さらに、 $\delta^{18}\text{O}$ から定量化したDSW含量をもとに、DSWと潮汐混合のど

ちらが中層水の水温・塩分により影響を与えているかを見積もった。その結果、潮汐混合の影響がより大きいことが分かった(Yamamoto *et al.* 2002)。また、オホーツク海域内での中層水の滞留時間は0.6–3.8年と見積もられた(Yamamoto *et al.* 2001)。

以上、筆者が学生時代に行った研究を簡単に紹介した。詳細は、Yamamoto *et al.* (2001; 2002), Yamamoto-Kawai *et al.* (2004) と、これらについてまとめた川合(2006)をご参照いただきたい。オホーツク海についての研究は、現在も日本を中心に盛んに行われており、様々なことが明らかになってきている。例えば、オホーツク海から太平洋への中層水を介した二酸化炭素や鉄の輸送が、北太平洋における物質循環や生物生産にとって重要であること(Ono *et al.*, 2004; Nishioka *et al.*, 2007), 18.6年周期で潮汐の強度が変動する影響で、オホーツク海周辺の水温や酸素、栄養塩の濃度に周期的変動が見られること(Osafune and Yasuda, 2006; Yasuda *et al.*, 2006; Watanabe *et al.*, 2008), また、この潮汐混合の強度によってDSWの生成量が影響を受けること(中村, 2008)などである。さらに、オホーツク海中層水の水温と酸素濃度は、1950年代以降それぞれ上昇および減少傾向にあることがわかり(Nakanowatari *et al.*, 2007; Itoh, 2007), 海水生成量の減少との関連が示唆されている。これらの変化・変動が、二酸化炭素や鉄などの物質の輸送をどう変化させ、気候や生物生産にどのような影響を与えているのか、そして今後はどう変化していくのかを調べる研究なども進められており、今後の成果が大いに期待される。

### 3. 北極海

#### 3.1. $\delta^{18}\text{O}$ とアルカリ度から調べた北極海の淡水分布と塩分変化

北極海については、主に淡水分布を調べる研究を行ってきた。淡水の分布は塩分の分布を決めるからである。北極海水の密度は主に塩分によって決まるため、塩分の変化は、北極海の水塊構造を変えると同時に、流出先である北大西洋における深層水の形成量を変化させ、地球規模の気候にも影響を与えかねない(e.g., Aagaard and Carmack, 1989; Karcher *et al.*, 2005)。また、淡

水の流路や滞留時間を知ることは、淡水(例えば河川水)によって運ばれる様々な物質の循環を知る上でも重要である。

Fig. 2 に、北極海の水塊構造を示す。大西洋からの高温・高塩分な海水(塩分 $\sim 35$ )が、フラム海峡とバレンツ海を經由して大量に流入している。一方、太平洋からの比較的低塩分な海水(塩分 $\sim 32.5$ )は、浅いベーリング海峡を通り、北極海の太平洋側に広がっている。これらの海水は、北極海に注ぐ大量の河川水との混合、降水と蒸発、そして海氷の生成・融解によってその塩分を変える。これらのうち、海氷の生成・融解の影響を識別するためのトレーサーとしては、オホーツク海研究でも利用した  $\delta^{18}\text{O}$  が有用である。海水の  $\delta^{18}\text{O}$  は海水の値( $\sim 0\text{‰}$ )に近いのに対して、北極海に注ぐその他の淡水(降水・河川水および太平洋水が運ぶ淡水成分(主に北太平洋での降水河川水))の  $\delta^{18}\text{O}$  は  $-18\text{‰}$ 程度と大きく異なるからである。このため、 $\delta^{18}\text{O}$  は比較的古くから北極海の研究に用いられてきた(e.g., Vetshteyn *et al.*, 1974; Östlund and Hut, 1984; Macdonald *et al.*, 1995; 2002)。しかし、各々の研究は海域や時期の限られたデータに基づいているため、北極海の全体像が分からず、また、同位体比だけでは「その他の淡水」の起源が分からないという問題があった。

田中ら(2002)および Yamamoto-Kawai *et al.*(2005)では、まず、 $\delta^{18}\text{O}$  とアルカリ度を併せて用いることで、 $\delta^{18}\text{O}$  だけでは識別できない「その他の淡水」の起源を識別することを試みた。アルカリ度は、北アメリカ河川水で  $\sim 1,800 \mu\text{mol kg}^{-1}$  (Telang *et al.*, 1991; Cooper *et al.* 2008), シベリア河川水で  $\sim 800 \mu\text{mol kg}^{-1}$  (Olsson and Anderson, 1997; Cooper *et al.*, 2008), 太平洋からの淡水で  $930 \mu\text{mol kg}^{-1}$ , そして降水はほぼ  $0 \mu\text{mol kg}^{-1}$  と、起源によって大きく値が異なるため、これらを識別できるのではないかと考えたのである。もちろん海氷の生成・融解時にも海水の濃縮・希釈によってアルカリ度が変化するが、同じ海水の  $\delta^{18}\text{O}$  と塩分を測定すれば、その影響を定量的に知り、補正することができる。同一航海からの  $\delta^{18}\text{O}$ , 塩分, アルカリ度のデータを用いた解析の結果、北極海大西洋側では「その他の淡水」のアルカリ度は  $730 \mu\text{mol kg}^{-1}$  で、シベリア河川水が主な起源であるということが分かった。一方、

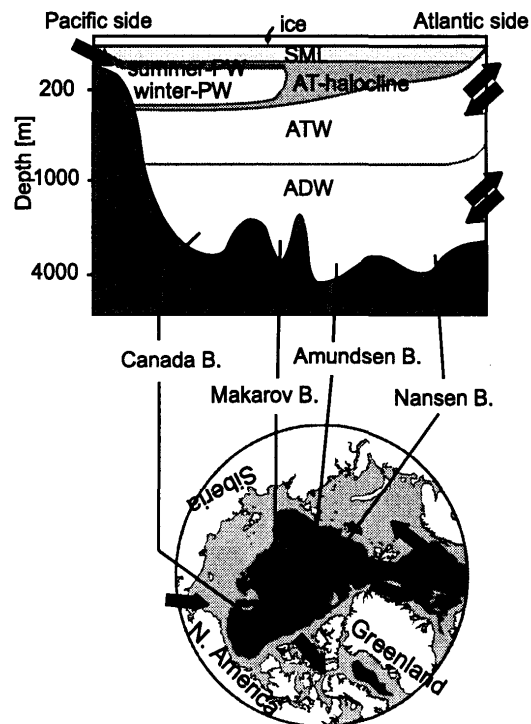
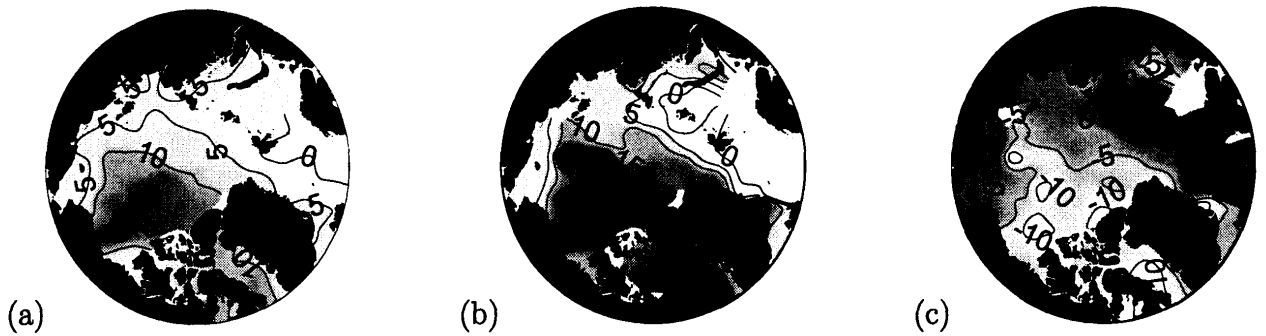


Fig. 2. Schematic view of water mass distribution in the Arctic Ocean along  $180^\circ/0^\circ$  meridians. Black arrows indicate exchange of water with N. Pacific and N. Atlantic oceans. Surface mixed layer, Pacific Water, Atlantic halocline water, Atlantic Water and Arctic Deep Water are indicated by SML, PW, AT-halocline, ATW, and ADW respectively.

北極海太平洋側では、アルカリ度の高い北アメリカ河川水の明らかな影響は河口域・沿岸および表層 30 m のみにしか見られず、大部分の海水に含まれる「その他の淡水」は、 $930 \mu\text{mol kg}^{-1}$  というアルカリ度をもつことが明らかになった。これは、シベリア河川水あるいは太平洋水の運ぶ淡水が主な起源であり、北アメリカ河川水の寄与は 20%かそれ以下であることを示している。以上の結果から、北極海全域において、「その他の淡水」は太平洋水とシベリア河川水が主な起源であり、そのアルカリ度は  $830 \pm 100 \mu\text{mol kg}^{-1}$  で代表できることが分かった (Yamamoto-Kawai *et al.*, 2005)。

この結果から、 $\delta^{18}\text{O}$  と同様に、アルカリ度からも海



**Fig. 3.** 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) (after Yamamoto-Kawai *et al.*, 2005).

氷生成・融解と「その他の淡水」とを識別できないかということをおもいついた。「その他の淡水」の持つアルカリ度 ( $830 \pm 100 \mu\text{mol kg}^{-1}$ ) が、海氷に含まれるアルカリ度 ( $\sim 250 \mu\text{mol kg}^{-1}$ ) とは大きく異なるからである。これまでに北極海で測定された  $\delta^{18}\text{O}$  データに、Hydrochemical Atlas of the Arctic Ocean (2001) に大量に含まれる過去のアルカリ度のデータをあわせれば、データ数が倍増し、北極海全体の淡水分布を描くことができるはずである。両トレーサーによる見積もりを比較した結果、両者は良く一致することが確かめられた。そこで、アルカリ度と  $\delta^{18}\text{O}$  の過去 70 年間のデータをあわせ、北極海全体における「融氷水・ブライン」と「その他の淡水」の分布を描いた。結果の一部を Fig. 3 に示す。これは、表層から水深 300 m までの淡水含量を積分したものである。融氷水・ブラインの値が負の場合は、海水生成が融解を上回り、正味でこれだけの淡水が海水から取り除かれたことを示す。Fig. 3a は、塩分のみから計算した全淡水含量であるが、太平洋側に厚さに換算して 15–20 m の淡水がたまっていることが分かる。 $\delta^{18}\text{O}$  とアルカリ度から淡水の内訳を調べると、太平洋側では 25–30 m 相当の「その他の淡水」が加わり (Fig. 3b)、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. 3c)。このように、「融氷水・ブライン」と「その他の淡水」の分布を、北極海全体で示すことができたので、ここから様々なことを読み取ることができる。

Yamamoto-Kawai *et al.* (2005) では、大陸棚上での重い水の形成が淡水とブラインの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した。さらに、この結果から、海氷の生成・融解が海水の塩分を正味でどれだけ変えているのかを見積もった (川合・伊東, 2008)。その結果を Fig. 4 に示す。一年中海氷に覆われている北極海中央部では、海氷の生成が融解を上回り、そのため表層海水の塩分が 2 程度高められていることが分かる。一方、大西洋水や太平洋水が流入する経路沿いでは、融解の影響で表層の塩分が下げられている。これは、夏の観測データによるもので、暖かい海水の流入により、海氷の融解が起きていることがわかる。しかしながら、過去 70 年にわたる、2 種類のトレーサーデータをあわせても、経年変化を調べるには不十分であり、空白域といえる海域さえあった。その空白域とは、カナダ海盆とカナダ多島海付近、そして東シベリア海とその沖である。

### 3.2. 栄養塩と $\delta^{18}\text{O}$ によるカナダ海盆の淡水収支

そこで、現在の職場 (Institute of Ocean Sciences) に移ってからは、カナダ海盆の淡水分布を詳細に調べることにした。カナダ海盆は、北極海の中でも特に塩分が低く、大量の淡水が蓄えられている場所である (Carmack *et al.*, 2008)。前述の結果から、カナダ海盆の主な淡水起源は太平洋水とシベリア河川水であることが分かっ

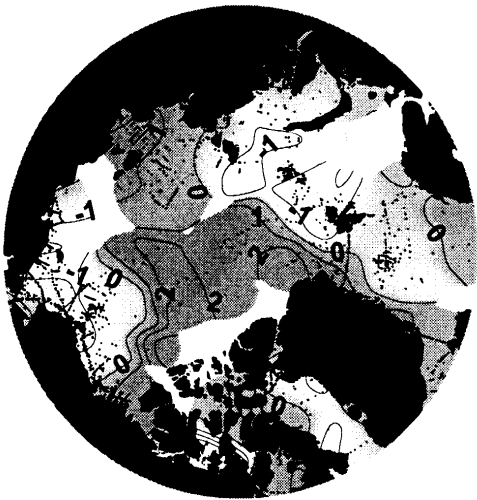


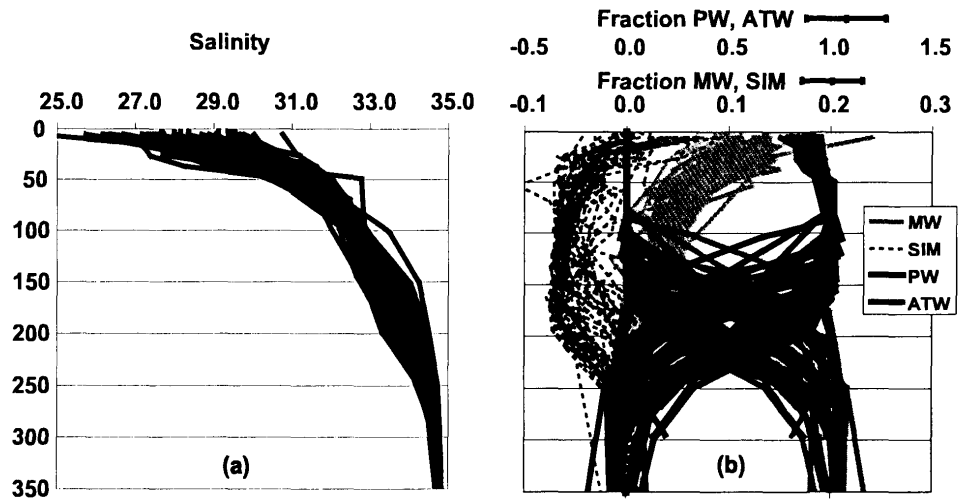
Fig. 4. Net changes in surface salinity due to formation and melting of sea ice. Positive (negative) values indicate regions of net ice formation (net ice melting).

たが、 $\delta^{18}\text{O}$  やアルカリ度からは、両者を識別することはできない。そこでまず、栄養塩を用いて太平洋水を定量化するための検討を行った。冬の太平洋水はベーリング海での湧昇と大陸棚上での再生によって高い栄養塩濃度を持つため、ケイ酸塩やリン酸塩の濃度を用いて太平洋水を定量化する試みがなされてきた (Bauch *et al.*, 1995; Ekwurzel *et al.*, 2001)。しかし、栄養塩濃度は夏には大きく低下するため、この方法では太平洋水の影響を過小評価することになる。そこで、Jones *et al.* (1998) は、硝酸塩とリン酸塩濃度の関係自体を、太平洋水のトレーサーとして利用することを提案した。生物生産および有機物の分解過程において、両栄養塩はおおよそ 16:1 の比 (レッドフィールド比) で変化するため、太平洋水でも大西洋水でも、硝酸塩とリン酸塩濃度をプロットしたときの傾きは  $\sim 16$  である。しかし、両者の切片は異なる。太平洋や、ベーリング・チャクチ大陸棚の堆積物中でおこる脱窒のため、同じリン酸塩濃度で比べたとき、太平洋水は大西洋水よりも硝酸塩が少ないからである (Devol *et al.*, 1997; Tanaka *et al.*, 2004)。この違いを利用して、太平洋水と大西洋水を定量的に見分けることができる。

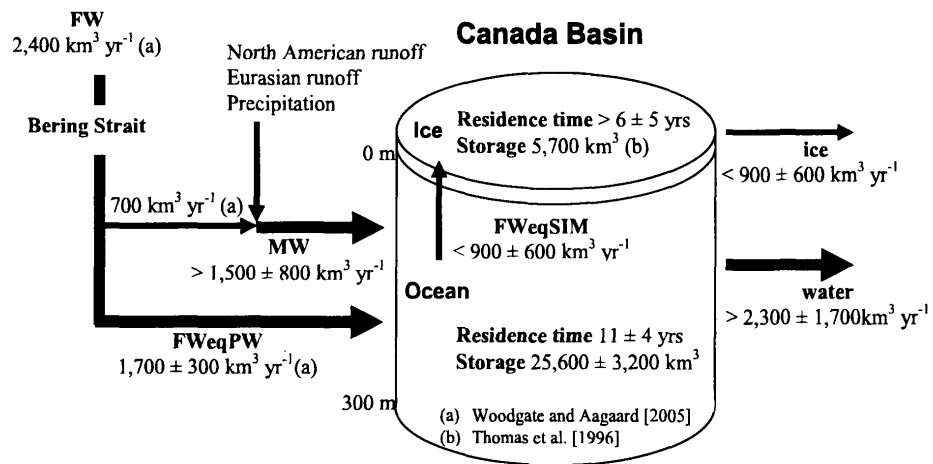
ところが、実際に解析を始めてみると、Jones らの

定義した太平洋水の硝酸塩-リン酸塩の関係は、我々の観測データに合わないことが分かった。原因を調べた結果、北極海太平洋側の大陸棚上では、硝酸態以外の窒素、特にアンモニアの濃度が高く (Nishino *et al.*, 2005)、硝酸塩だけではリン酸塩との相関がとれないことと、また、Jones らのデータは海域が限られていたため、局所的な脱窒の影響を受けていることが考えられた。そこで、大陸棚およびカナダ海盆の広範囲で得られた、アンモニアを含む栄養塩データを改めて解析し、新たな「太平洋水の窒素-リンの関係」を定義した (Yamamoto-Kawai *et al.*, 2008)。

これで、栄養塩と塩分、 $\delta^{18}\text{O}$  (あるいはアルカリ度) を用いて、太平洋水、大西洋水、河川水、海水融氷水・ブラインという北極海の 4 つの主な起源水を全て識別できるようになった。Fig. 5 に、2003 年と 2004 年にカナダの砕氷船を用いて行ったカナダ海盆広域観測のデータにこの方法を適用した結果を示す。カナダ海盆の 0-200 m では太平洋水、それ以深では大西洋水が北極海水の主な起源であることが分かる。河川水は表層で多いが、200 m まで有意に存在する。融氷水は夏季の表層 30 m に限られており、それ以深ではブラインが融氷水を上回っていた。この広域観測結果からカナダ海盆の淡水収支を見積もった結果 (Fig. 6)、ベーリング海峡を通して注ぐ淡水が最も多く ( $3,200 \text{ km}^3 \text{ y}^{-1}$  以上)、河川水がさらに  $800 \text{ km}^3 \text{ y}^{-1}$  以上の淡水を加え、海水の生成が  $900 \text{ km}^3 \text{ y}^{-1}$  かそれ以下の淡水を海水に変えてカナダ海盆から取り除いていること、これらの平均滞留期間が 11 年以下であることなどを定量的に示すことができた (Yamamoto-Kawai *et al.*, 2008)。さらに、これらの結果と、北極海全体の淡水収支についての過去の見積もり (Serreze *et al.*, 2007) をあわせることで、北極海内部での淡水の動きを定量化することができる。例えば、カナダ海盆から海水あるいは低塩分な海水として輸送される淡水量は、北極海全体の淡水フラックスの  $\sim 40\%$  に相当する (Yamamoto-Kawai *et al.*, 2008; Carmack *et al.*, 2008)。我々の見積もりは、2 年間のデータに基づき、定常状態を仮定したものであるが、北極海に蓄えられる淡水量は大気場 (風) に応答して周期的な変動をすることが知られている (Proshutinsky *et al.*, 2002; Carmack *et al.*, 2008)。また、近年の海水面



**Fig. 5.** Vertical distributions of (a) salinity and (b) fractions of source waters (MW: meteoric water, SIM: sea ice meltwater, PW: Pacific Water, and ATW: Atlantic Water) in the Canada Basin of the Arctic Ocean (after Yamamoto-Kawai *et al.*, 2008). Note two scales are shown in Fig. 5b.



**Fig. 6.** Schematic of the freshwater budget of the Canada Basin (from Yamamoto-Kawai *et al.*, 2008). Fluxes of FWeqPW (freshwater equivalent of Pacific Water) and freshwater storage in sea ice obtained from literature are indicated in parentheses as a and b; other values are determined by Yamamoto-Kawai *et al.* (2008). MW and FWeqSIM indicate meteoric water and freshwater equivalent of sea ice meltwater, respectively.

積の減少は著しく (e.g, Stroeve *et al.*, 2008; Shimada *et al.*, 2006), これに伴って表層や中層の塩分も低下している (川合・伊東, 2008)。淡水の分布や収支が水平的、鉛直的にどのような経年変化をもち、海洋の密度構造や物質循環をどう変化させるのかといったことに

ついては、現在も引き続き観測を行い、解析を進めている。また、化学トレーサーから得られた定量的結果を海洋モデルの検証材料に利用するなどして、より確実な将来予測に役立てていきたいと考えている。

### 3.3. 北極海経由の海水輸送と海洋の窒素収支について

北極海に注ぐ海水のうち、太平洋水と大西洋水ではリンと窒素の関係が異なっていることは、前述の通りである。これを太平洋水のトレーサーとして利用するにあたって、1) どこでどうしてこのような違いが生じるのか、2) 海水が地球を一周した時、どこでどうやって元の状態に戻るのか、という単純な疑問が浮かんだ。文献を調べて勉強したところ、1) については、太平洋の貧酸素海域での水柱内の脱窒と、ベーリング海および北極海チャクチ海の大粒堆積物中の脱窒によって、リンを残して窒素だけが海洋から大気に取り除かれるためだと知った。2) については、特定の細菌(ラン藻など)による窒素固定作用で、大気中の窒素ガスを海洋に取り込むことにより、脱窒で失った窒素を海洋に戻しているということが分かった。しかも、近年になって脱窒量、窒素固定量ともに大幅に上方修正され、海洋と大気が以前に考えられていたよりも盛んに窒素をやりとりしていることが明らかになっていた(Gruber, 2005; Arrigo, 2005)。ところが、脱窒と窒素固定がおきる海域は、多くの場合において地理的に異なっており、海洋の窒素収支がどのようにしてバランスを保っているかについては分かっていなかった。

これを北極海という視点から見てみたところ、脱窒の盛んな太平洋、ベーリング海、チャクチ海を経由する水が、北極海を経由して、窒素固定の盛んな北大西洋に流出しているということに気がついた。北極海の太平洋水は、脱窒によって、窒素が不足した海水である。この水が北大西洋に運ばれ、栄養塩が通常の生物生産によって使われていくと、窒素が0になっても、リンが $0.8 \mu\text{mol kg}^{-1}$ ほど余るようになっている(Fig. 7)。この余ったリンが窒素固定細菌のいる海域に運ばれば、この過剰のリンを使って、窒素固定を行うことができるはずである(Fig. 8)。北極海から北大西洋に運ばれる過剰リンの量を見積もってみると、年間 $2 \times 10^{10}$  molであった。これだけのリンを使って、どれだけの窒素を固定することができるだろうか。窒素固定細菌の窒素：リン比は通常の植物プランクトンに比べて大きいことが知られている(例えば40–50：1(Karl, 2002))。過剰リンを45：1の比で使うと、 $12.6 \times 10^{12}$  gN  $\text{y}^{-1}$ の窒素

を固定できる。これは、北大西洋の窒素固定量(Gruber and Sarmiento, 1997)の45%にも相当する量である。しかし実際には、一旦窒素固定が始まり、硝酸やアンモニウム態の窒素が海水中に放出され始めると、この過剰に増えた窒素は窒素固定細菌以外の生物にも利用可能となる。これら他の生物が、窒素固定由来の過剰窒素と北極経由の過剰リンを、通常の16：1で利用し、また、海水中の窒素-リン比が16：1で保たれると仮定した場合、北極海経由の過剰リンを用いた窒素固定の量は、 $4.5 \times 10^{12}$  gN  $\text{y}^{-1}$ 、北大西洋の窒素固定量の16%に相当すると見積もられる(Yamamoto-Kawai *et al.*, 2006)。

太平洋から大西洋までの、北極海経由の水輸送はおおよそ10数年しかからない。例えば太平洋側で、生物生産量の増加や成層の強化などにより脱窒の量が増えると、海洋はより多くの窒素を失う。しかし、この際には北極海に注ぐ太平洋水に含まれる過剰のリンの量も増え、これが10数年で大西洋に運ばれる。そして、この増えた量に相当する分だけ、北大西洋での窒素固定も増えるのではないだろうか。つまり、北極海経由の水輸送は、海洋の窒素収支をバランスさせる役割を持っているのではないかと考えられる。一方、ベーリング海峡の閉じていた氷期にはどうなっていたのだろうか？過剰のリンは北大西洋には届かず、太平洋内部での窒素固定に使われていたかもしれない。過去の海洋における栄養塩収支や生物生産において、北極海経由の水輸送の存在がどのような影響を与えていたのか、堆積物を用いた古環境の復元などによって、今後明らかになることが期待される。

海洋化学の基礎ともいえる栄養塩であるが、実はまだまだ未知なことが多い。Arrigo (2005)でまとめられた4つの注目事項(生物による栄養塩取り込み比は状況により異なること、生物生産は同時に多種の栄養塩によって制限されうること、海洋窒素収支の見直し、海洋におけるAnammox反応の発見)の他にも、窒素固定へのリンや鉄の供給源や、二酸化炭素上昇時の窒素固定量の変化などについて、新たな見解や疑問点が次々と発表されている。興味のある方は、例えば、Codisopoti (2007), Mulholl and (2007), Dyhrman *et al.* (2007), Barcelos e Ramos *et al.* (2007)などをご参照いただきたい。



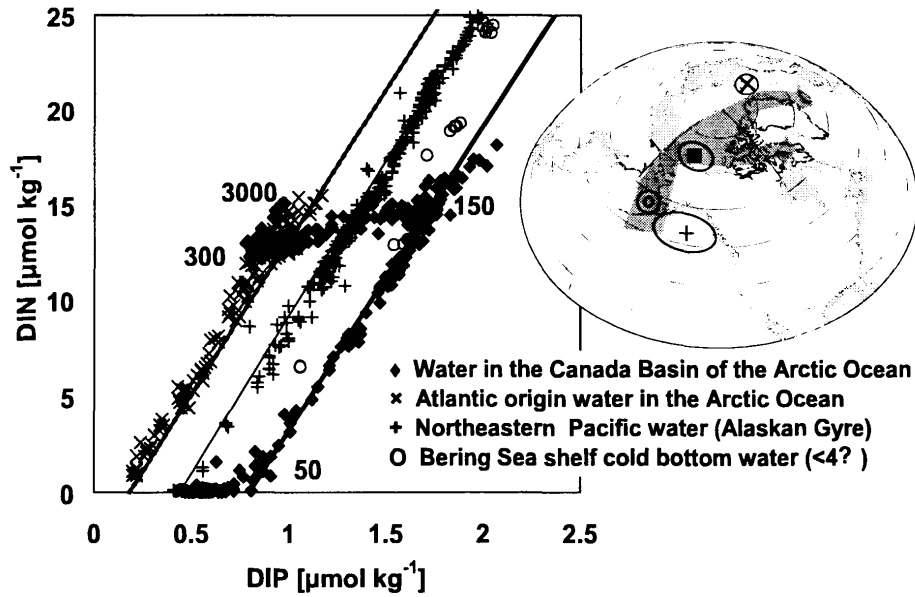


Fig. 7. Relationship between dissolved inorganic nitrogen (DIN) and dissolved inorganic phosphorus (DIP) in waters in regions indicated on the insert map (after Yamamoto-Kawai *et al.*, 2006). Numbers in the diagram indicate approximate depths in the Canada Basin ( $\blacklozenge$ ). Insert map shows the pathway of Pacific origin water into the North Atlantic. The thick grey line indicates global N : P relationship where  $\text{DIN}=16 \text{ DIP}-2.9$  (Gruber and Sarmiento, 1997). The thin black line indicates the N : P relationship for the Northeastern North Pacific water where  $\text{DIN}=16.4 \text{ DIP}-7.2$ . The thick black line indicates the N : P relationship of Canada Basin waters where  $\text{DIN}=16 \text{ DIP}-12.8$  here the right constant reflects an excess P of 0.8 at  $\text{N}=0$ .

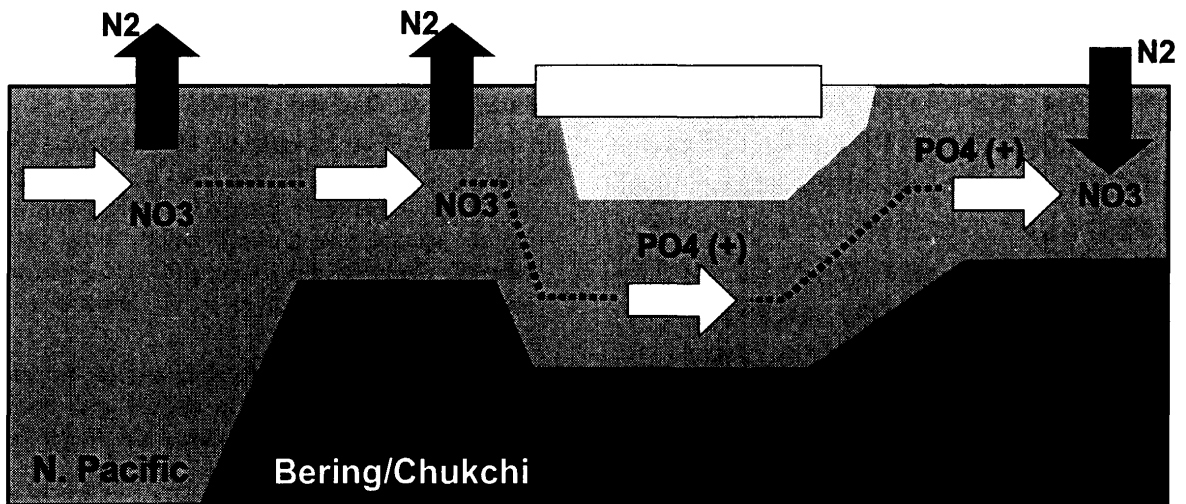


Fig. 8. Schematic of the Arctic throughflow carrying excess phosphate from the region of denitrification to the region of  $\text{N}_2$  fixation. White arrows indicate the flow of Pacific origin water and excess phosphate. Black arrows indicate release and uptake of  $\text{N}_2$  during denitrification and  $\text{N}_2$  fixation processes.

#### 4. おわりに

北半球高緯度域、特に北極海は、現在急激な変化を見せており (e.g., 島田ら, 2008; 川合・伊東, 2008), いずれオホーツク海のような季節海水域になると予測されている (e.g., Stroeve *et al.*, 2008)。夏季の海水がなくなったとき、海洋の熱収支、淡水収支、物質循環、生物生産はどうなるのだろうか。周辺の海域や陸域や気候、そして人間活動にどのような影響をあたえるのだろうか。多岐にわたる急速な変化に対応するためには、今後も観測データを集めつつ、学際的な視野で研究を進め、速やかに将来予測につなげていかなければならない。そのためには、Yamamoto-Kawai *et al.* (2006) や Gueguen *et al.* (2007), Nishino *et al.* (2008) のように、同位体比あるいはアルカリ度などのトレーサーを用いて水の動きを定量化し、その上で有機物や栄養塩などの物質の循環を定量的に考え、生物生産との関わりを調べるといった研究も重要であり、今後も精力的に進めていきたいと考えている。

#### 謝 辞

このたび荣誉ある日本海洋学会岡田賞を頂いたことは大変光栄であり、選考・承認頂いた先生方ならびに学会員の皆様には厚く御礼申し上げます。研究生生活をこれまで続けてこられたのは、多くの方々のご指導とご協力のおかげです。北海道大学名誉教授角皆 静男先生には、長年にわたって多くのご指導と励ましをいただきました。北海道大学教授田中 教幸先生には、化学トレーサーとの出会い、アラスカ行き、ロシア出張など、重要な機会を数多く与えていただきました。オホーツク海の研究に際しては、乗木 新一郎教授をはじめとする北海道大学地球環境研究所、および若土 正暁教授をはじめとする低温科学研究所の皆様から多くのご指導をいただきました。北極海の過去のデータを使用した研究は、JAMSTEC およびアラスカ大学フェアバンクス校のポストドクとして、国際北極圏研究センター (IARC) にて行いました。その際には、JAMSTEC の滝沢 隆俊博士、島田 浩二博士、村田 明彦博士から貴重なデータのご提供をいただきました。また、島田 浩二博士 (現東京海洋大准教授) をはじめとする JAMSTEC 北極グループの皆様には現在も数多くのご指導ご鞭撻、そして貴重な

観測や議論の機会を与えていただいています。現在のカナダの職場 (IOS) では、Eddy Carmack 博士から研究の楽しみと刺激を与えてもらい、Fiona McLaughlin 博士からの的確な指示とご理解をいただくという、恵まれた環境で研究を進めさせていただいています。また、これまで観測データに基づいた研究を行うことができたのは、観測の計画、実施、測定、データ処理等に関わられた数多くの方々のおかげです。すべての方のお名前をあげることはできませんが、その他にも多くの皆様にお世話になりました。この場をお借りして心より御礼申し上げます。最後に、家族の協力と理解に感謝します。

#### References

- Aggaard, K., and E. C. Carmack (1989): The role of sea ice and other fresh water in the Arctic circulation. *J. Geophys. Res.*, **94**, 14,485–14,498.
- Arrigo, A. R. (2005): Marine microorganisms and global nutrient cycles. *Nature*, **437**, 349–355.
- Barcelos e Ramos, J., H. Biswas, K. G. Schulz, J. LaRoche, and U. Riebesell (2007): Effect of rising atmospheric carbon dioxide on the marine nitrogen fixer *Trichodesmium*. *Global Biogeochem. Cycles*, **21**, doi:10.1029/2006GB002898.
- 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 H218O. *Prog. Oceanogr.*, **35**, 53–80.
- Carmack, E. C., F. A. McLaughlin, M. Yamamoto-Kawai, M. Itoh, K. Shimada, R. Krishfield and A. Proshutinsky (2008): Freshwater storage in the northern ocean and the special role of the Beaufort Gyre. *Arctic-Subarctic Ocean Fluxes: Defining the role of the northern seas in climate*, edited by R. Dickson *et al.*, Springer.
- Chen, C. A., A. Andreev, K. R. Kim, and M. Yamamoto (2004): Roles of continental shelves and marginal seas in the biogeochemical cycles of the North Pacific Ocean. *J. Oceanogr.*, **60**, 17–44.
- Codispoti, L. A. (2007): An oceanic fixed nitrogen sink exceeding 400TgNa-1 vs the concept of homeostasis in the fixed-nitrogen inventory. *Biogeosciences*, **4**, 233–253.
- Cooper, L. W., J. W. McClelland, R. M. Holmes, P. A. Raymond, J. J. Gibson, C. K. Guay, and B. J. Peterson (2008): Flow-weighted values of runoff tracers ( $\delta^{18}\text{O}$  ,

- DOC, Ba, alkalinity) from the six largest Arctic rivers. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, doi: 10.1029/2008GL035007.
- Craig, H., and L. I. Gordon (1965): Deuterium and oxygen 18 variations in the ocean and the marine atmosphere. *Stable Isotopes in Oceanographic Studies and Paleotemperatures*. p. 9–130, edited by E. Tongiorgi, Cons. Naz. di Rech., Spoleto, Italy.
- Devol, A. H., L. A. Codispoti, and J. P. Christensen (1997): Summer and winter denitrification rates in western Arctic shelf sediments. *Cont. Shelf Res.*, **17**, 1,029–1,050.
- Dyhrman, S. T., P. D. Chappell, S. T. Haley, J. W. Moffett, E. D. Orcahrd, J. B. Waterbury and E. A. Webb (2007): Phosphonate utilization by the globally important marine diazotroph *Trichodesmium*. *Nature*, **439**, 68–71.
- Ekwurzel, 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**, 9,075–9,092.
- 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 moorings off Sakhalin in the Sea of Okhotsk. *J. Geophys. Res.*, **109**, doi: 10.1029/JC001906.
- Gruber, N. (2005): A bigger nitrogen fix. *Nature* **436**, 786–787.
- Gruber, N. and Sarmiento, J. L. (1997): Global patterns of marine nitrogen fixation and denitrification. *Glob. Biogeochem. Cycles*, **11**, 235–266.
- Gueguen, C., L. Guo, M. Yamamoto-Kawai and N. Tanaka (2007): Colored dissolved organic matter dynamics at shelf/basin interface in the Arctic Ocean. *J. Geophys. Res.*, **112**, C5, doi: 10.1029/2006JC00354.
- Hydrochemical Atlas of the Arctic Ocean (2001): Edited 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. (2007): Warming of intermediate water in the Sea of Okhotsk since the 1950s. *J. Oceanogr.*, **63**, 637–641.
- 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., R. Gerdes, F. Kauker, C. Köberle, and I. Yashayaev (2005): Arctic Ocean change heralds North Atlantic freshening. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L21606, doi: 10.1029/2005GL023861.
- Karl, D., A. Michaels, B. Bergman, D. Capone, E. Carpenter, R. Letelier, F. Lipschultz, H. Paerl, D. Sigman and L. Stal (2002): Dinitrogen fixation in the world's ocean. *Biogeochemistry*, **57/58**, 47–98.
- 川合 美千代 (2006): 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. *地球化学*, **40**, 97–109.
- 川合 美千代, 伊東 素代 (2008): 北極海の水氷生成・融解と表層・中層水の変質. *月刊地球*, **30**, 189–197.
- Macdonald, R. W., F. A. McLaughlin, and E. C. Carmack (2002): Fresh water and its sources during the SHEBA drift in the Canada Basin of the Arctic Ocean. *Deep-Sea Res.*, **49**, 1,769–1,785.
- Macdonald, R.W., D.W. Paton, E.C. Carmack and A. Omstedt (1995): The freshwater budget and under-ice spreading of Mackenzie River water in the Canadian Beaufort Sea based on salinity and  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  measurements in water and ice. *J. Geophys. Res.*, **100**, 895–919.
- Mizuta, G., Y. Fukamachi, K. I. Ohshima, and M. Wakatsuchi (2003): Structure and seasonal variability of the East Sakhalin Current. *J. Phys. Oceanogr.*, **33**, 2,430–2,445.
- Mulholland, M. R. (2007): The fate of nitrogen fixed by diazotrophs in the ocean. *Biogeosciences*, **4**, 37–51.
- 中村 知裕 (2008): 潮汐過程がオホーツク海・北太平洋間の海水交換に果たす役割の研究. *海の研究*, **17**, 133–146.
- Nakanowatari, T., K. I. Ohshima, and M. Wakatsuchi (2007): Warming and oxygen decrease of intermediate water in the northwestern North Pacific, originating from the Sea of Okhotsk, 1955–2004. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, doi:10.1029/2006GL028243.
- 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**, doi:10.1029/2003JC001909.
- Nishino, S., K. Shimada, M. Itoh, M. Yamamoto-Kawai, and S. Chiba (2008): East-west differences in water mass, nutrient, and chlorophyll a distributions in the sea ice reduction region of the western Arctic Ocean. *J. Geophys. Res.*, **113**, doi: 10.1029/2007JC004666.
- Nishino, S. K. Shimada, and M. Itoh (2005): Use of ammonium and other nitrogen tracers to investigate the spreading of shelf waters in the western Arctic halocline. *J. Geophys. Res.*, **110**, C1005, doi: 10.1029/2003JC002118.
- Nishioka, J., T. Ono, H. Saito, T. Nakatsuka, S. Takeda, T. Yoshimura, K. Suzuki, K. Kuma, S. Nakabayashi, D. Tsumune, H. Mitsudera, W. K. Johnson and A. Tsuda (2007): Iron supply to the western subarctic Pacific: importance of iron export from the Sea of Okhotsk. *J. Geophys. Res.*, **112**, doi: 10.1029/2006JC004055.

- 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 (2004): Re-Estimation of Annual Anthropogenic Carbon Input from Oyashio into North Pacific Intermediate Water. *J. Oceanogr.*, **59**, 883–891.
- Osafune, S and I. Yasuda (2006): Bidecadal variability in the intermediate waters of the northwestern subarctic Pacific and the Okhotsk Sea in relation to 18.6-year period nodal tidal cycle. *J. Geophys. Res.*, **111**, doi: 10.1029/2005JC003277.
- Östlund, H. G., and G. Hut (1984): Arctic Ocean water mass balance from isotope data. *J. Geophys. Res.*, **89**, 6,373–6,381.
- Proshutinsky, A., R. H. Bourke, and F. A. McLaughlin (2002): The role of the Beaufort Gyre in Arctic climate variability: seasonal to decadal climate scales. *Geophys. Res. Lett.*, **29**, doi: 10.1029/2002GL015847.
- Serreze, M. C., A. P. Barrett, A. G. Slater, R. A. Woodgate, K. Aagaard, R. B. Lammers, M. Steele, R. Moritz, M. Meredith, and C. Lee (2007): The large-scale freshwater cycle of the Arctic. *J. Geophys. Res.*, **111**, doi: 10.1029/2005JC003424.
- Shcherbina, A. Y., L. D. Talley, and D. L. Rundnick (2003): Direct observations of North Pacific ventilation: brine rejection in the Okhotsk Sea. *Science*, **302**, 1,952–1,955.
- Shimada, K., T. Kamoshida, M. Itoh, S. Nishino, E. Carmack, F. McLaughlin, S. Zimmermann, and A. Proshutinsky (2006): Pacific Ocean inflow: influence on catastrophic reduction of sea ice cover in the Arctic Ocean. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, doi: 10.1029/2005GL025624.
- 島田 浩二, 猪上 淳, 鴨志田 隆, 堀 雅裕 (2008): 北極海の激変. 月刊地球, **30**, 105–112.
- Stroeve, J., M. Serreze, S. Drobot, S. Gearheard, M. Holland, J. Maslanik, W. Meier, and T. Scambos (2008): Arctic sea ice extent plummets in 2007. *EOS*, **89**, 13–20.
- Tanaka, T., L. Guo, C. Deal, N. Tanaka, T. Whitley, and A. Murata (2004): N deficiency in a well-oxygenated cold bottom water over the Bering Sea shelf: influence of sedimentary denitrification. *Cont. Shelf Res.*, **24**, 1,271–1,283.
- 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, 海水融解, 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.
- 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, p. 75–104. *Biogeochemistry of major world rivers*, edited by. E. T. Degens, S. Kempe and J. E. Richey, Wiley, New York.
- Vetshteyn, V., G. A. Malyuk, and V. P. Russanov (1974): Oxygen-18 distribution in the central Arctic Basin. *Oceanography*, **14**, 514–519.
- Watanabe, Y. W., M. Shigemitsu, and K. Tadokoro (2008): Evidence of a change in oceanic fixed nitrogen with decadal climate change in the North Pacific subpolar region. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, doi:10.1029/2007GL032188.
- 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**, 15,625–15,642.
- Yamamoto, M., N. Tanaka, and S. Tsunogai (2001): The Okhotsk Sea intermediate water formation deduced from oxygen isotope systematics. *J. Geophys. Res.*, **106**, 31,075–31,084.
- Yamamoto, M., S. Watanabe, S. Tsunogai, and M. Wakatsuchi (2002): Effects of sea ice formation and diapycnal mixing on the Okhotsk Sea Intermediate Water clarified with oxygen isotopes. *Deep-Sea Res.*, **49**, 1,165–1,174.
- Yamamoto-Kawai, M., S. Watanabe, S. Tsunogai, and M. Wakatsuchi (2004): Chlorofluorocarbons in the Okhotsk Sea: ventilation of the intermediate water. *J. Geophys. Res.*, **109**, C09S11, doi: 10.1029/2003JC001919.
- Yamamoto-Kawai, M., N. Tanaka, and S. Pivovarov (2005): Freshwater and brine behaviors in the Arctic Ocean deduced from historical data of  $\delta^{18}\text{O}$  and Alkalinity (1929–2002AD). *J. Geophys. Res.*, **110**, C10003, doi:10.1029/2004JC002793.
- Yamamoto-Kawai, M., E. C. Carmack, and F. A. McLaughlin (2006): A newly recognized role for the Arctic throughflow in the global nutrient cycle. *Nature*, **443**, 43.
- Yamamoto-Kawai, M., F. A. McLaughlin, E. C. Carmack, S. Nishino, and K. Shimada (2008): Freshwater budget of the Canada Basin, Arctic Ocean from geochemical tracer data. *J. Geophys. Res.*, **113**, C1, doi: 10.1029/2006JC003858.
- Yasuda, I., S. Osafune, and H. Tatebe (2006): Possible explanation linking 18.6-year period nodal tidal cycle with bidecadal variations of ocean and climate in the North Pacific. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, doi:10.1029/2005GL025237.

# Chemical Oceanographic Studies of Water Mass Modification and Nutrient Transport in the Arctic and Subarctic Regions

Michiyo Yamamoto-Kawai <sup>†</sup>

## Abstract

This article investigates water mass modification processes in the Sea of Okhotsk and the Arctic Ocean by using chemical tracers. Oxygen isotope ratio shows the flow of dense shelf water (DSW), forms during sea ice formation, from the northwestern shelf into the Okhotsk Sea Intermediate Water (OSIW). Mean fraction of DSW in OSIW is estimated to be 20%. Distributions of CFCs show that both formation of DSW and tidal mixing in the Kuril straits ventilate the intermediate layer. Tidal mixing is found to contribute more than the DSW to characterize OSIW as cold and low salinity water.

In the Arctic Ocean, distributions of sea ice meltwater/brine and other freshwaters are mapped using historical data of oxygen isotope ratio and a newly investigated tracer, alkalinity. Furthermore, recently acquired data of oxygen isotope ratio and nutrients from the Canada Basin are used to estimate freshwater budget of this part of the Arctic Ocean. Finally, a new role for the Arctic throughflow in the global nutrient cycle is proposed; Arctic throughflow transports excess phosphate, produced during denitrification in the North Pacific and the Bering/Chukchi seas, to the Atlantic where it is used by N<sub>2</sub> fixers.

**Key words:** Sea of Okhotsk, Arctic Ocean, chemical tracer, nutrient, freshwater

(Corresponding author's e-mail address: michiyo.kawai@dfo-mpo.gc.ca)

(Received 7 November 2008; accepted 19 November 2008)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2009)

---

<sup>†</sup> Department of Fisheries & Oceans Canada, Institute of Ocean Sciences, 9860 West Saanich Road, Sidney, BC, V8L4B2, Canada