

18. 北極海全域の海水循環と物質拡散の 解析

ANALYSES OF SEAWATER CIRCULATION AND MATERIAL DIFFUSION
IN THE WHOLE REGION OF THE ARCTIC OCEAN

和田 明*・穂積 照雄**・木根原良樹***・高野 泰雄****
Akira WADA*, Teruo HOZUMI**, Yoshiki KINEHARA***, Tairyu TAKANO****

ABSTRACT ; The results of research on marine contamination in the regional areas (Kara Sea, Barents Sea) in the Arctic Ocean were reported at the 3rd and 4th Symposia on Global Environment. In the present research, the authors carried out flow analysis in the whole region of the Arctic Ocean and concentration analysis of radioactive materials based on the release scenario, made comparative studies of flow and concentration analyses in the regional areas, and examined the consistency of the results obtained by both models and the characteristics of diminution in material concentration in the Arctic Seas.

Keywords ; Arctic Ocean, radioactive contamination, flow analysis, concentration calculation

1. はじめに

最近、旧ソビエト連邦による、北極海（特に、カラ海、バレンツ海）への放射性廃棄物の投棄の状況が明らかにされつつある。この海域は極めて狭く、浅く、かつ陸地に近いという特徴を有している。

この現実の投棄による影響を評価するには、局所的ならびに Global scaleの影響を予測しうる安全評価方法を確立する必要がある。

この問題をめぐって、多数の科学者が調査研究を続けているが、放射性物質の海洋での挙動は、北極海の海洋特性に深い関係があることは言うまでもない。

今後、当該海域の海水循環を求め放射性核種の拡散解析、被曝線量評価を行うためには海洋の流動特性を把握する必要がある。しかし、この海域を対象とした研究は少ない。冬期には海面のほとんどが、海水に閉ざされてしまう特殊な海であることもあり、海洋特性についてはあまり多くのことが知られていない。したがって使用できるデータ、文献も非常に限られたものであるが、本研究では、この海域の塩分と水温の観測データおよび、いくつかの文献を特別に使用することができた。

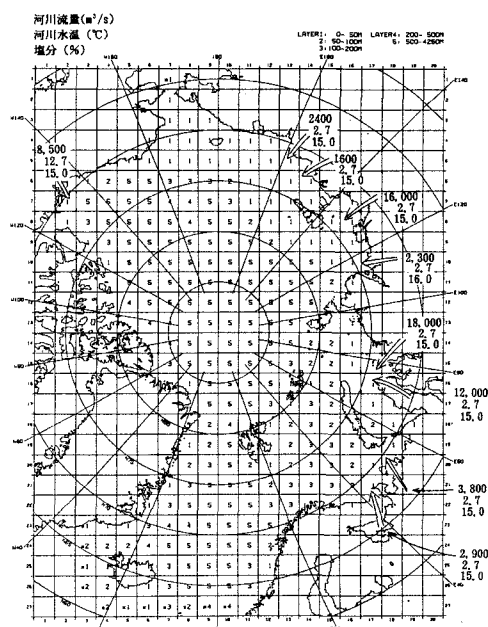


図-1
北極海の格子分割、層数および河川流入位置

* ; 日本大学生産工学部 土木工学科 College of Industrial Technology, Nihon University

** ; アーク情報システム Ark Information System

*** ; 三菱総合研究所 Mitsubishi Research Institute

**** ; 水圏科学コンサルタント Laboratory of Aquatic Science Consultant Co., LTD.

そこで、この観測データ（水温、塩分）を用いて北極海の水塊特性を既往の文献と照らし合わせて調べ、流動解析結果との比較より、流れの状況を調べた。この流動解析結果を用いて、放出シナリオに基づく放射性物質の濃度解析を行い、閉塞した北極海の物質の稀釈効果を検討した。

2. 検討方法

旧ソ連及びロシアによる核廃棄物の北極海への投棄の現実は今後どのような影響を及ぼすのであろうか。

調査の第一段階として、北極海のバレンツ海・カラ海の流れがどのようなになっているかを、当該海域の水温・塩分分布から検討することとし、NOAAの各層観測データなどをもとにして、北緯64°～85°，東経0°～120°の範囲で水温・塩分をそれぞれ0.1℃，0.1‰刻みに整理・図化し、海洋特性の検討に用いた。水平方向のボックスの大きさは4°×1°，鉛直方向は6層（0～50m，50～100m，100～200m，200～500m，500～900mおよび900～2500m）に分割し、各ボックスに塩分，水温を与えた。

調査の第二段階として、北極海全域を対象として、球座標系において場所によって異なるが222×222kmの水平方向のボックスを考え、鉛直方向は5層（0～50m，50～100m，100～200m，200～500mおよび500～4250m）に分割した。

深さ方向4層までは両モデルは同じ層厚となっている。北極海全域を図－1に示すコンパートメントに分割し、海水の動きをボックスモデルによる方法で計892個のコンパートメント間の年平均の水平・鉛直交換流量を算出した。

3. 流動の解析手法

当該海域のように、内陸部から大量の河川水流入，西側海域から高温・高塩分の大西洋水塊，北側から低温，高塩分の北極海水，大水深，複雑な地形を対象とする流動解析手法の選択には慎重を要する。

本方法は、各ボックスで海水量，塩分量，熱量の収支式を作成し，各ボックスで観測されている水温と塩分濃度を再現するような流れを求めるものである。方程式群において，未知変数の個数と方程式の個数が一致するとは限らず，交換流量が非負でなければならないことから，3つの保存方程式を厳密に成立させることはあきらめて，誤差の最小の解を求める。

流動解析に続く，数100年におよぶ放射性核種の濃度解析を実施するためには，各計算ボックスのみならず，系全体としての質量保存が成立しなければならない。すなわち，次式が成立することが必要である。

$$\sum_{iB,iC} \{W_{iB,iC} \rho_{iB} - W_{iC,iB} \rho_{iC}\} + (\text{河川流入量}) + (\text{降水量}) - (\text{蒸発量}) = 0 \quad (1)$$

ここに，iB：海洋境界のボックス番号，iC：計算ボックスのボックス番号， $W_{iB,iC}$ ：ボックスiBから，ボックスiCに流れる交換流量， $W_{iC,iB}$ ：ボックスiCからボックスiBに流れる交換流量， ρ_{iC} ：計算ボックスiCの海水密度， ρ_{iB} ：ボックスiBの海水密度， $\sum_{iB,iC}$ ：境界ボックスと計算ボックスの全ての組（iB，iC）についての和。

図1のコンパートメント内の数値は層の数を表わし，併せて河川水の流入点を示している。

4. 北極海の流動解析

4. 1 流動解析結果

以下，北極海の流動解析結果と既存知見（主に表層流動）との比較結果を述べる（図－2参照）。

図－3は解析結果に基づく北極海全域の海水流動の動きを示したものである。一方，図－5は北極海の5測線（図－4）に沿う鉛直方向の海水粒子の挙動を図示している。

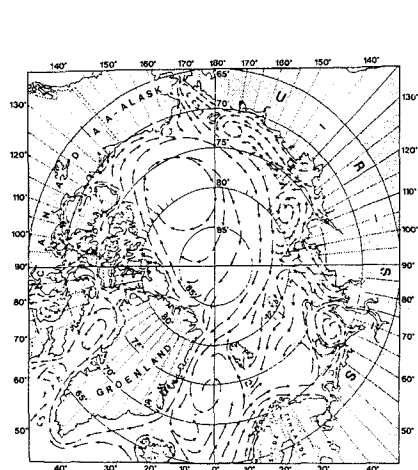


図-2
北極海における流況の既往の知見

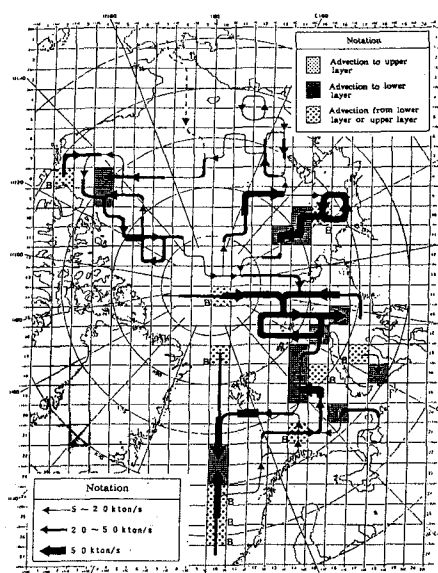


図-3
表層（0～50m）の流れのパターン

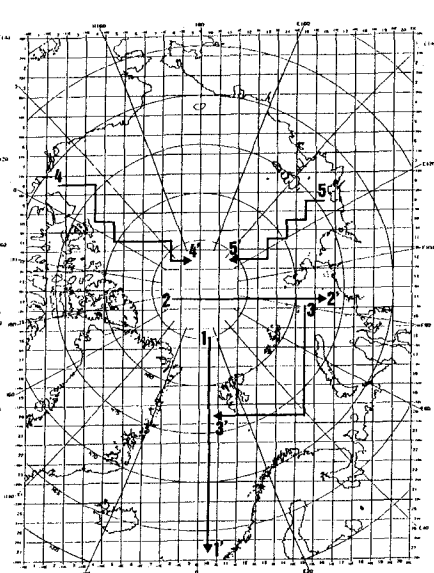


図-4 流況を検討するための5測線

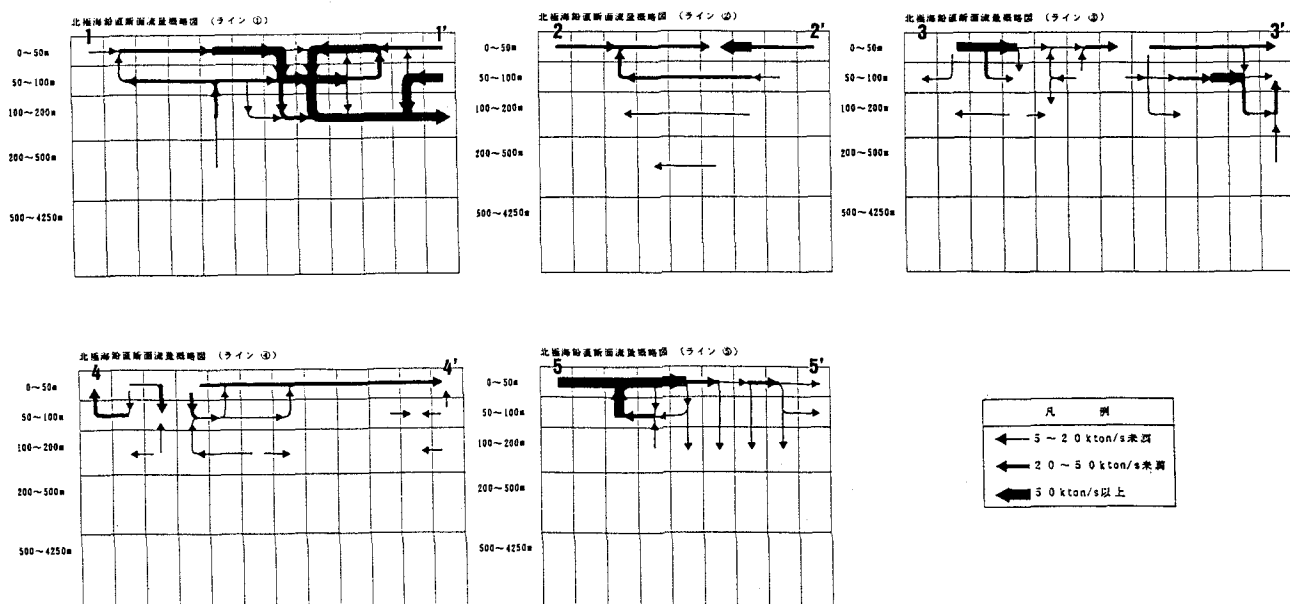


図-5 北極海鉛直断面における流れの概略図

(A) ノルウェー海，グリーンランド海域

- ・ノルウェー海では，ノルウェー海流（広義の北大西洋海流）に相当する北上流が存在する。この流れの分派は，スカンジナビア北岸に沿って北上し，バレンツ海に流入しており，既存知見と一致する。
- ・スピッツベルゲン西部には，南下流があり，スピッツベルゲン海流に相当する北上流は見られない。
- ・また，第2層～第4層（水深50m～500 m）では，ノルウェー海南部から北上してきた水塊とバレンツ海から流出してきた水塊の一部が，上記環流域を通過し，スピッツベルゲン西部から北極海へ流入している。

- ・上記第2層～第4層での一連の流れは、北大西洋水がスピッツベルゲン南西部の環流域（Gyre Sea）で沈降し、中・深層から北極海へ流入するという既存知見とほぼ一致する。
- ・グリーンランド東沖合では、流れは弱いものの、グリーンランド海流に相当する流れ（南下流）が存在する。

（B）バレンツ海・カラ海

- ・バレンツ海では、ノルウェー海から流出してきた水塊が、湾中央部で反時計回りに循環しながら、カラ海から流出してきた水塊とペチョラ川から流出してきた水塊と合流し、スピッツベルゲン南部へ西進している。
- ・この流れは、位置的なズレは若干あるが、既存知見とほぼ一致している。
- ・カラ海西部では、極点付近から東進してきた水塊が、カラ海から流出してきた水塊（エニセイ、オビ川の淡水系水塊）と合流し、バレンツ海へ南下している。

（C）北極海

- ・北極海の表層では、反時計回りの循環流が形成されており、既存知見による大規模な時計回りの循環流は見られない。
- ・ラプテフ海における反時計回りの循環流は、既存知見と良く一致している。
- ・第2層～第4層の流れを合わせると、ノルウェー海から流入した水塊の一部は、北極海を反時計回りに循環しており、北極海中・深層における北大西洋水の循環経路（推論）とほぼ一致する。
- ・上記水塊の一部は、北極海を循環した後、グリーンランド北東岸からノルウェー海へ再び流出しており、既存知見と一致する。

以上のように、解析対象海域（北極海周辺）は、ノルウェー海を北上する北大西洋水と北極海周辺の大河川から流出する河川水により、非常にダイナミックな循環系を呈している。

4. 2 局所域モデル（カラ海、バレンツ海）との整合性

4. 1 で得られた流動解析結果と局所域モデルの結果（和田・高野・山本（1995））を比較して、両者の整合性について検討した。

4. 1 の（B）で述べたようにバレンツ海にノルウェー半島に沿って流入する大西洋水がバレンツ海を反時計回りに循環して、北極海およびノルウェー海域へ再び抜ける流れは両者のモデルとも一致している。北極海から流入する流れとフランス・ノルウェーとノバヤゼムリヤの間をバレンツ海へ流れ込む海流が両者のモデルとも再現している。両者の整合性は良くない。

5. 北極海全域を対象とした濃度解析

5. 1 解析のシナリオ

旧ソ連が投棄した原子力潜水艦からの放射性物質拡散解析の前段階として、表－1 および表－2 に示すように4つの核種、2つの放出形態、2ヵ所からの放出地点を想定し、評価地点は局所モデル域では6ヵ所（図－6 参照）北極海では投棄地点を含めて5ヵ所を定めた。計算実施期間は局所モデルでは100年間、北極海モデルでは1000年間とした。

放射性物質の拡散解析の方法は、「第4回地球環境シンポジウム講演集」に述べてあるのでここでは省略する。

5. 2 核種濃度の分布

ベンチマークテストの結果から、各評価位置ごとに整理し、海水中の濃度（第1層から第3層までの平均値）、底質中の濃度の時系列を表示した。

表－１ 対象核種と放出形態

パラメータ		記号	単位	設 定 値			
核 種	核 種			Cs-137	Pu-239	Tc-99	Co-60
データ	半 減 期	Tr	y	3.0×10^4	2.41×10^4	2.31×10^4	5.27
	分配係数	Kd	m ² /g	2×10^3	1×10^3	1×10^3	2×10^7
	放出形態	瞬時に 1 TBq 放出 10年間連続して 1 TBq/y 放出					

表－２ 放出点, 評価変数および評価位置

放 出 点		評 価 変 数	評 価 位 置	
A	Abrasimov湾 (水深20m)	海水中の核種濃度 (1層～3層の平均)	局 所 域	北極海全域
			(1)N72° E65 °	(A)Abrasimov Bay
B	Novaya Zemlya 海溝 (水深300m)	底質中の核種濃度	(2)N78° E92 °	(B)Beaufort Sea
			(3)N76° E76 °	(C)Central Arctic
			(4)N72° E45 °	(D)Iceland Sea
			(5)N79° E58 °	(E)Chukchi Sea
			(6)N76° E20 °	

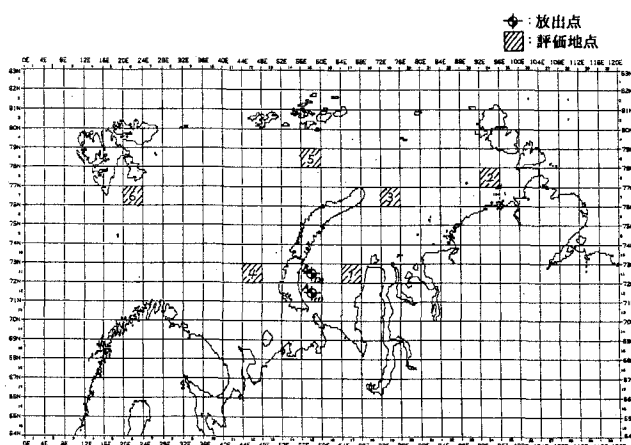


図-6 局所域モデルの格子形, 物質放出点および評価地点

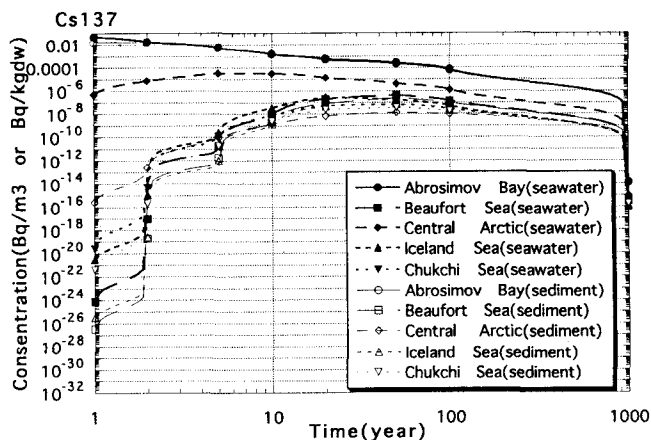


図-7(1) Cs-137 の濃度の時系列

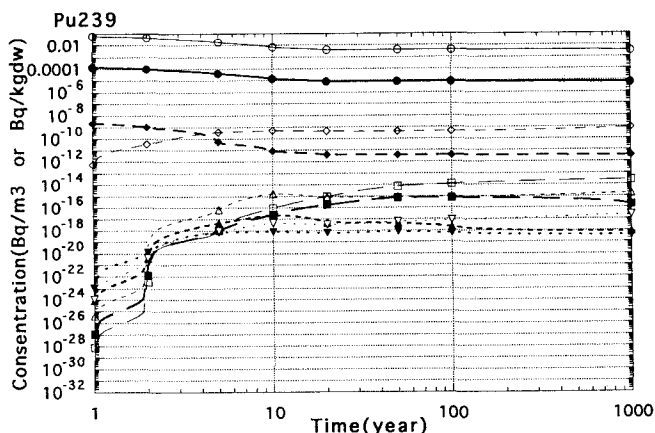


図-7(2) Pu-239 の濃度の時系列

本文では紙数の制限のため, Cs-137 と Pu-239 の時系列濃度を図－ 7 (1) および図－ 7 (2) に示す。

(A) Cs-137 の場合: 北極海中心部では10年以内に最大値が生じ, 10^{-4} のオーダーとなり, 遠方域では50年以内に最大値 (10^{-6} のオーダー) が発生する。

(B) Pu-239 の場合: 放出地点の濃度値は 10^{-5} であるが, 底質濃度は 10^{-3} と2オーダー大きい。他の評価地点も同じ傾向である。Kd 値が大きいため, 各評価地点での濃度の時系列形状が相異なり, ピーク値の出現も場所により変化する。

図-8(1), 図-8(2) はそれぞれ評価点におけるCs-137, Pu-239 の濃度の分布を平面表示した結果である。

評価地点の最大濃度で比較すると、瞬間放出のとき放出点近傍の濃度は4核種とも 10^{-1} のオーダーである。Cs-137 の場合溶解性物質のため海の流動に支配されて北極海全域に拡散する。遠方域の濃度は $10^{-7} \sim 10^{-8}$ のオーダーとなる。底質濃度は海水中濃度に比して同じか1桁低い。

Pu-239 の場合、Kd値が大きいので、底質濃度は海水中濃度に比して1桁ないしは2桁高く、遠方域濃度はCs-137 に比して 10^{-10} 低くなる。

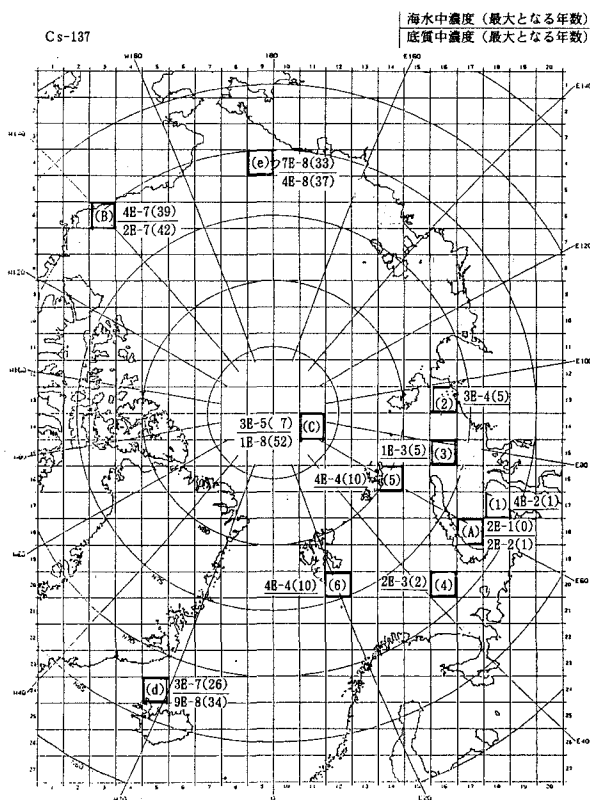


図-8(1) 評価点におけるCs-137 濃度
(瞬間放出Abrassimov 湾で放出)

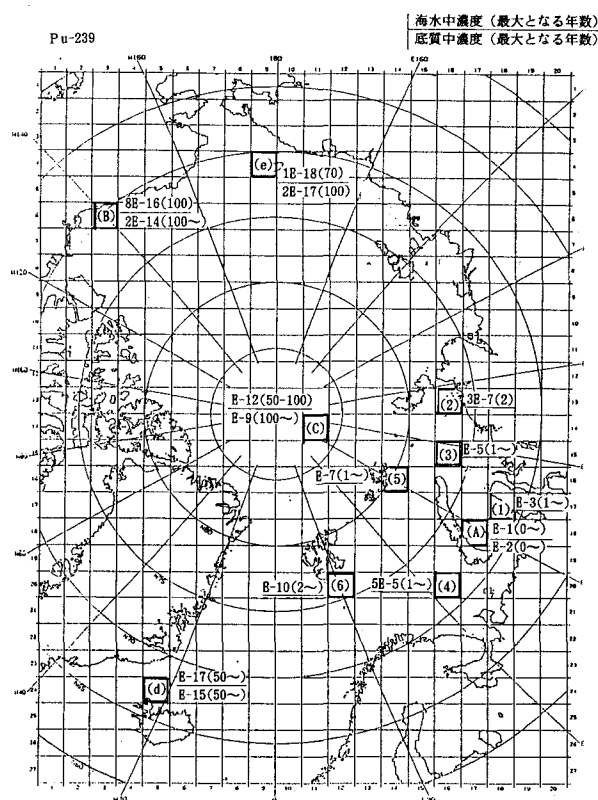


図-8(2) 評価点におけるPu-239 濃度
(瞬間放出Abrassimov 湾で放出)

結 論

1. 北極海全域を対象とした流動解析結果は多くの点で既存知見と一致している。

特に、ノルウェー海、バレンツ海、カラ海、ラプテフ海における流れは、既存知見とほぼ同じである。

北極海中心部での表層の流動場は、既存知見とは異なるものの、中・深層では、既存知見（北大西洋水の反時計回りの循環）と一致する流れが見られる。

グリーンランド東部沖合いでは、流れは弱いものの、グリーンランド海流に相当する流れが見られる。

2. 局所域モデルと北極海モデルによる放出点近傍域の濃度値は同じオーダーとなっており、モデルによる結果の差は認められない。核種の性状による拡散分布の相異が明瞭に表れ、Pu-239 のような分配係数 k_d 値が大きいとき、海水中濃度に比して底質中の濃度が2桁大きい。

参考文献

- 1) 和田明・高野泰隆・山本譲司 (1995) : 北極海 (カラ海, バレンツ海) の海洋特性—海洋汚染に関連して—, 第3回地球環境シンポジウム講演集, pp. 67~72.