

19.北極海における海洋汚染

MARINE CONTAMINATION IN THE ARCTIC OCEAN

和田 明^{*}・木根原 良 樹^{**}・高 野 泰 隆^{***}
Akira WADA, Yoshiki KINEHARA, Tairyu TAKANO

ABSTRACT ; The situation concerning the dumping of nuclear submarines, etc. into the Arctic Ocean by the former Soviet Union is being clarified. As its characteristics, waters in the dumping areas are very shallow and close to land.

The results of flow analysis which was conducted previously by using observation data (water temperature, salinity) and applying a method for obtaining the exchange flow in such a way that the inter-box input and output of salinity, heat and seawater volume is balanced, made it possible to successfully express the actual flow patterns.

In this research, concentration analysis and exposure dose analysis were conducted on the basis of a release scenario with considerations given to nuclide decay, mixing, scavenging and interaction between undersea particles and the bottom sediment layer.

KEYWORDS ; Arctic Ocean, radioactive contamination, concentration calculation, exposure dose analysis.

1. はじめに

旧ソビエト連邦による北極海（バレンツ海およびカラ海）への原子力潜水艦などの投棄の状況が明らかにされつつある。最近ではノルウェー・ロシアの合同現地調査も実施されている。投棄地点は極めて浅く、かつ陸地に近いという特徴を有している。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。

現在、IAEAでは専門家会議（ロシア、デンマーク、米国、英国、日本）を設置し、両海域の流動、拡散モデルの構築に引き続き、被ばく線量の評価作業を実施している。

先に、観測データ（水温、塩分）を用いて、塩分量、熱量、海水量のボックス間の出入りがバランスするような交換流量を求める方式を適用した^{1) 2)}。流動の解析結果は現実の流況パターンを表現できた。今回の放射性物質の濃度計算は、この交換流量を用いて実施するもので、核種の崩壊、混合（拡散、湧昇流、沈降流による）、海水中の粒子および海底堆積物との相互作用による沈着、沈降を考慮している。各核種による濃度解析の実施に先立ちPu239を対象として、分配係数、海洋のSS濃度、浮遊物質の沈降速度をパラメータとしてベンチマーク感度解析を実施し、各要因の大きさが海水中の濃度と海底土の濃度に与える影響を検討した。

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

2. 放射性物質の拡散計算

2. 1 拡散モデル

ここで用いるモデルの拡散計算は、交換流量の解析結果を用いて、沿岸に放出された放射性核種の移動・拡散を計算し、各ボックスにおける濃度の時間変化を求めるものである。放射性核種の海水中における挙動の要因は、①核種の崩壊、②鉛直混合（拡散、湧昇流、沈降流による）、③水平混合（拡散、移流による）、④海水中的の粒子および海底堆積物との相互作用による吸着、沈降となる。

海洋内部では、海洋表面に供給された物質を表層から深層へさらに深層から海底堆積物へ輸送する機構（スキャベンジング）が働いている。本モデルでは、従来の拡散モデルに比し、この点を重視している。海洋の微量元素のスキャベンジングにおける最も主要な個体は、有機性沈降粒子であり、その挙動は正確な解明が重要である。

海水濃度を計算するモデル式は次のとおりである。

ボックス i ($i=1\sim N$) について、

$$V_i \cdot dC_i/dt = - \sum_j W_{ij} \cdot C_i - \sum_j W_{ij} \cdot S_i K_d C_i + \sum_j W_{ij} \cdot C_j + \sum_j W_{ji} \cdot S_j K_d C_j \\ + \sum_j A_{ji} \cdot K \cdot (C_j - C_i) / L_{ij} - V_i \cdot B \cdot C_i + A_{ui} \cdot V_{down} \cdot S_u K_d C_u - A_{iL} \cdot V_{down} \cdot S_i K_d C_i$$

ここに、 C_i : ボックス i での核種の溶存態濃度 [Bq/m^3]、 V_i : ボックス i の体積 [m^3]、
 L_{ij} : ボックス i と j との平均距離 [m]、ボックス中心間の距離、
 W_{ij} : ボックス i から j への交換流量 [m^3/s]、 S_i : ボックス i でのSS濃度 [kg/m^3]、
 K_d : 核種の分配係数 [m^3/kg]、 B : 核種の崩壊定数 [$1/s$]、 V_{down} : SSの平均沈降速度 [m/s]、
 K : 拡散係数 [m^2/s]、 A_{ij} : ボックス i と j の接触面積 [m^2]、 N : ボックス数、
 $\sum_j$ は i 以外のボックスで i に隣接するすべてのボックス j についての和を取ることを意味する。

一方、スキャベンジングされた核種の海底における挙動は図-1に示す底質を3層に区分したモデルによって計算される。

海底面に接する海水層（Interface Layer）を含む4層の相互作用を計算することになる。

- 1) W層（Interface 海水層）
- 2) P層（Interface 粒子層）
- 3) B層（Bioturbated Layer）
- 4) D層（Diffusive Layer）

2. 2 懸濁物質に関するパラメータ

(A) ボックス i でのSS濃度 S_i [kg/m^3]

- ・表層ボックスでのSS濃度をデータとして与える。
- ・第2層以深でのSS濃度は深度と共に指数的に減少するものとし、次の式により計算により求める。

$$C = C_0 \cdot 10^{-0.0005d}$$

ここに、 d : 水深 [m]

C_0 : 水深 0 [m] でのSS濃度 [kg/m^3]

C : 水深 d [m] でのSS濃度 [kg/m^3]

(B) SSの平均沈降速度 V_{down} [m/s]

以下のように大粒径と小粒径の浮遊粒子に分けて考える。

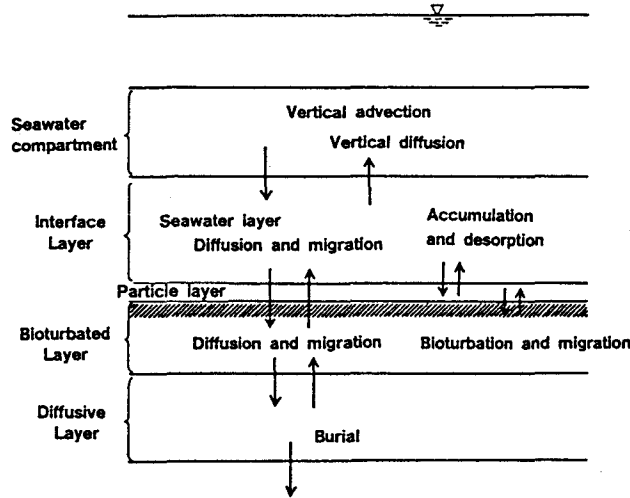


図-1 海底堆積層モデル

	構成比	沈 降 速 度
大粒径	$\alpha_1=0.04$	$V_{down1}=100$ [$m/日$]
小粒径	$\alpha_2=0.96$	$V_{down2}=100/365$ [$m/日$]

従って、 $V_{down} = \alpha_1 V_{down1} + \alpha_2 V_{down2} = 4,263$ [m/日]

3. 感度解析

表－1 感度解析のケース

感度解析の内容は以下のとおりである。

核 種 : ^{239}Pu

パラメータ : 分配係数 (k_d) , 懸濁物質の海水中濃度 (ρ_s) および沈殿率 (S)

ソースの位置 : N

検討事象 : カラ海の2点 (72°N, 65°E および 78°N, 92°E) とバレンツ海の1点 (79°N, 58°E) での海水中濃度

ケース \ パラメータ	k_d (cm^2/g)	懸濁物質中の 海水中濃度 ρ_s	沈殿率 S
ケース 0 (基本ケース)	10^5	10	1
ケース 1 (k_d を変化)	10^4	10	1
ケース 2 (k_d を変化)	10^6	10	1
ケース 3 (ρ_s を変化)	10^5	1	1
ケース 4 (ρ_s を変化)	10^5	100	1
ケース 5 (S を変化)	10^5	10	0.1
ケース 6 (S を変化)	10^5	10	10

(Bq/m^3) と海底堆積層内濃度 (Bq/kgdw) の最大値, ならびに最大値に達する年数。

パラメータの範囲は表－1 に示すとおりで, ケース 0 が基本ケースとして考えている。

パラメータとして3つの変数を採り上げたが, 表－2 は基礎方程式中におけるパラメータの効き方と各パラメータの感度について記述したものである。

表－2 パラメータの効き方

パラメータ			基礎方程式でのパラメータの効き方	核種濃度に対するパラメータの効き方
分配係数	k_d	—	海水中に溶解している核種は, 懸濁物質に吸着し, ($k_d \cdot \rho_s$) に比例した量が沈降していく。 底質中での核種の移動は, k_d が大きくなると主に W 層 (第1層) から P 層 (第2層) への移動が多くなる。	k_d が大きくなるとスキャベンジングが効き, 浅層の海水中濃度は薄く, 深層の海水中濃度は濃く, 沈殿物中濃度は濃くなる傾向が出る。 k_d が大きくなると底質第1層の W 層から P 層への移動が多くなるため, 海水中の核種を底質の取り込む作用が盛んになる。従って, 同じだけ ρ_s を大きくするよりも底質濃度を濃くする働きが大きい。
懸濁物質の海水中濃度	ρ_s	mg/l	海水中に溶解している核種は, 懸濁物質に吸着し, ($k_d \cdot \rho_s$) に比例した量が沈降していく。	ρ_s が大きくなるとスキャベンジングが効き, 浅層の海水中濃度は薄く, 深層の海水中濃度は濃く, 沈殿物中濃度は濃くなる傾向が出る。
沈 殿 率	S	mm/y	底質中での核種の移動は, S が大きくなると主に P 層 (第2層) から B 層 (第3層), B 層から D 層 (第4層) への移動が多くなる。	今回着目しているのは沈殿物の表層濃度 (W 層と P 層の平均) であり, S が大きくなると底質の浅い層 (W 層, P 層) から深い層 (B 層, D 層) への移動が多くなるため, 沈殿物の表層濃度が薄くなる傾向が出る。

4. 北極海内の濃度解析 (図－2 および 3 参照)

4. 1 放出のシナリオ

次に, 放出点として Novaya Zemlya 島の湾, 島の沖合海溝, バレンツ海を選び 3 核種 (Cs-137 , Pu-239 , Tc-99) による濃度解析, 被曝線量解析を実施した。年間個人線量は海産物摂取による内部被ばく, 累積集団線量は北極海の家産物の摂取による内部被ばくによっている。

放出点の位置は図－2 に示すが表－3 に放出水深を併記してある。

評価区分を Regional なものと, Global なものに分け, 前者については年間個人線量 (海産物摂取による内部被ばく) を, 後者については年間集団線量 (北極海の家産物の摂取による内部被ばく) を算出するものとした。評価海域は Regional の区分では 72°N, 65°E の海域と 68°N, 50°E の海域の 2 箇所とし, Global の区分ではカラ海とバレンツ海を対象としている。

放出される核種のデータは表－4 に示すとおりである。

表-3 放流地点

記号	放 出 点	放出水深
A	Novaya Zemlya湾	海底より30m上方
B	Novaya Zemlya海溝	300m
C	Barents海	1m

表-4

パラメータ		記号	単位	設 定 値		
核 種 データ	核 種			Cs-137	Pu-239	Tc-99
	放 出 量	Q	Bq	1×10^{10}	1×10^{10}	1×10^{10}
	半 減 期	Tr	y	3.0×10	2.41×10^4	2.13×10^5
	分配係数	Kd	cm ³ /g	2×10^3	1×10^5	1×10^2
	放 出 形 態	瞬時全量放出				

●放出点 (3ヶ所)

▨線量計算に濃度を用いる
コンパートメント (2ヶ所)

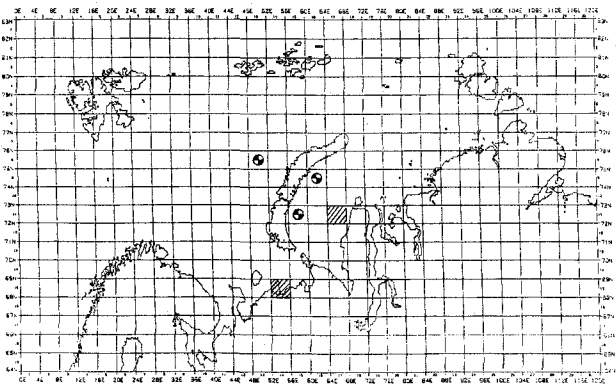


図-2 放出点と評価海域 (Regional)

●放出点 (3ヶ所)

▨線量計算に濃度を用いる
コンパートメント
Barents海の海産物

▨線量計算に濃度を用いるコンパートメント
Kara海の種類

▨線量計算に濃度を用いるコンパートメント
Kara海のアザラシ

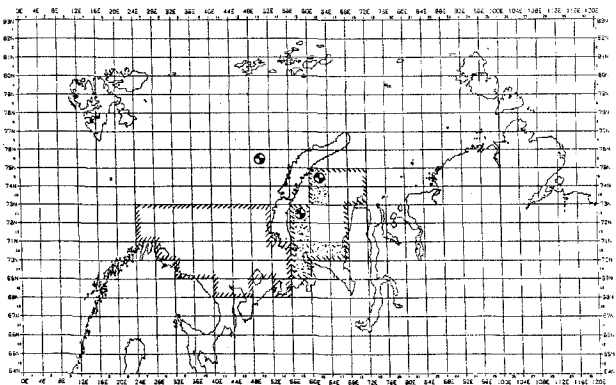


図-3 放出点と評価海域 (Global)

4. 2 濃度の計算結果

(A) 核種濃度の時刻歴

(1) Regionalな区分の場合 ; CsとTcは、放出から5年以内に最大濃度が出現した後、急速に濃度は低下していく。Puでは、最大濃度が出現するのは放出から30年後であり、経年による濃度の低下は緩やかである。

これは、Puは分配係数が大きくスカベンジングの効果が大きいためと考えられる。

(2) Globalな区分の場合 ; CsとTcは、放出から10年以内に最大濃度が出現した後、急速に濃度は低下していく。Puでは、最大濃度が出現するのは放出から40年後であり、経年による濃度の低下は緩やかである。

(B) 放出点による違い (図-4 参照)

(1) 放出点A (N.Z.湾 : 水深50m) ; カラ海南西部に拡散した後、N.Z.諸島北沖での第1~2層 (水深0~100m) の西向き交換流量に乗ってバレンツ海へ広がっていく。

(2) 放出点B (N.Z.湾 : 水深300m) ; カラ海南西部に拡散していくが、放出点Aのケースよりも遅い。これは、水深が深いことが原因の一つにあげられる。バレンツ海への拡散は、N.Z.諸島南側の大陸との海峡を通る経路でも顕著であり、海峡の第2層 (水深50~100m) の西向き交換流量が寄与している。

(3) 放出点C (バレンツ海中央 : 水深1m) ; 放出点が水深1mであり、バレンツ海の第1層 (水深0~50m) の比較的大きな交換流量に乗って、バレンツ海全体に広く速く拡散していく。

5. 北極海のエコシステム

5. 1 カラ海

カラ海はバレンツ海にくらべて水温が低いため、生物生産は多くない。商業用にとって重要な魚種はタラである。カラ海における基本的な食物連鎖は図-4に示すとおりである。

北極海タラは、バレンツ海のエコシステムにおけるタラと同じ役割を演じている。アザラシや白魚は魚を捕食している。

カラ海でも南西部で魚類が豊富である。中央部分では、魚の密度は低く商業用として漁業はない。オビ、エニセ両河口部では淡水魚が採れる。河口部での魚の一部は外海へ回遊し、一部はカラ海の南西部へ移行する。

カラ海の南西部、南部およびNovaya Zemlya 島付近の漁獲量は表-5に示してある。

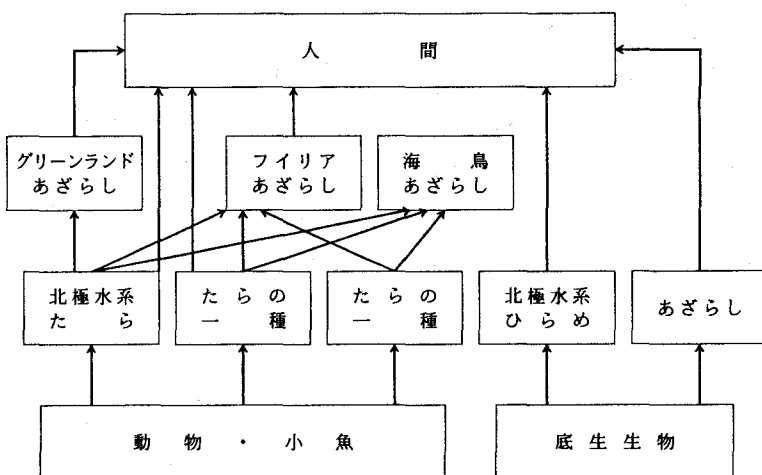


図-4 カラ海でのエコシステム

5. 2 バレンツ海

バレンツ海の漁業として重要な魚種はタラである。

ヒラメ、ニシンなどはそれ程重要でない。海獣で商業上重要となる種はアザラシ、しろいるかである。

0.5～5cmのサイズのおきあみなどの動物プランクトンがバレンツ海の幼魚のエサとなっている。植物プランクトンの種の構成は、今回の評価上重要ではないので、ここでは記述しない。

図-5はバレンツ海の基本食物連鎖のスキームを示したものである。

体長が30cm以下の比較的小さい魚種は食物として動物プランクトンを摂食している。30cm以上大きい魚の捕食としては、ワカサギ、北極水系のタラなどが挙げられる。

グリーンランドのフィリアアザラシやシロイルカは魚を捕食している。

バレンツ海内の商業用の魚類はノルウェー海で産卵したものが多い。その後、幼魚となり暖流と共にバレンツ海に入り、3～5年をかけて成長・成熟する。成魚は産卵を行うためにノルウェー海へ再び戻る。

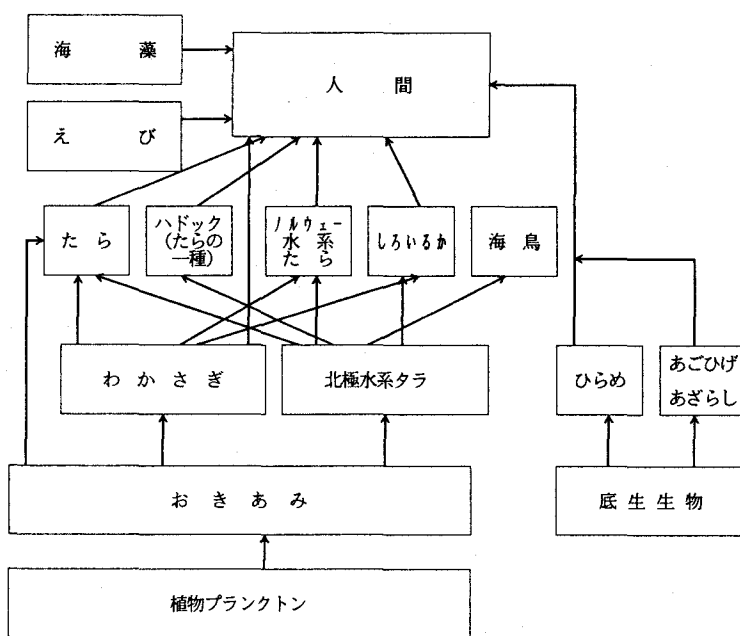


図-5 バレンツ海でのエコシステム

6. 線量計算結果

被ばく線量計算に用いるパラメータは表-5に示す。線量計算に用いる濃度は水深方向に平均化した値を用いるものとする。当該海域は海底水深200～300mであり、主な海産物であるタラは比較的深いところに生息する。Globalの区分においては、北極海のみを評価海域としているので、北極海で漁獲される海産物の

摂取による集団線量を計算することとする。

(1) Regionalな評価

放出点3通り，評価点2通りでの海産物による被ばくについて，各評価ケースの個人線量の最大値は， $1\text{E}-4\sim 1\text{E}-7\text{mSv/y}$ の範囲となった。最大値が出現する年次は，バレンツ海に放出した場合の北緯72度東経50度での被ばくを除き，放出から5年以内となった。

(2) Globalな評価

放出点3通りでの海産物による被ばくについて，放出から100年後の集団線量の累積値は， $1\text{E}-1\sim 1\text{E}+1\text{manSv}$ の範囲となった。

表-5 被ばく線量計算に用いるパラメータ

パラメータ			設定値		
核種データ	核種		Cs-137	Pu-239	Tc-99
	濃縮係数 (Bq/g)/(Bq/cm ³)	魚類	1×10^2	4×10	3×10
		甲殻類	3×10	3×10^2	1×10^3
		軟体動物	3×10	3×10^3	1×10^3
		海藻	5×10	2×10^3	1×10^3
評価スケールごとのデータ	Regional	評価する線量		年間個人線量	
		被ばく経路		海産物摂取による内部被ばく	
		摂取量		魚類 600 g/day	
		線量計算に用いる濃度の海域 (fishのみ)		72°N, 65°Eの海域 及び68°N, 50°Eの海域	
	Global	評価する線量		年間集団線量	
		被ばく経路		北極海の手産物摂取による内部被ばく	
		漁獲量	Kara Sea南西部		魚類 1,000 ton/yr (うち50%が可食部)
			Kara Seaの南岸及びNovaya Zemlya諸島付近		アザラシ 1,000 頭/yr×300kg (うち10%を食用とする)
			Barents Sea(主に南部〜南東部)		魚類 500,000 ton/yr (うち50%が可食部)
					甲殻類 100,000 ton/yr (うち30%が可食部)
					軟体動物 100,000 ton/yr (うち20%が可食部)
					海藻 3,000 ton/yr (うち100%が可食部)
		線量計算に用いる濃度		漁獲海域に相当する各コンパートメントの平均濃度	

結 び

カラ海とバレンツ海の手放射性物質汚染の研究は，海洋・気象学的過程と密度に結びついている。汚染の現地調査の際，海洋物理学的，生物学的調査観測と同時に行われることが望ましい。今後は，カラ海とバレンツ海の手海峡や北大西洋側，北極側との海水交換過程について海洋観測，数学モデルを基に海水循環，氷の漂流との関連を検討する必要がある。

さらに，北極海全域での放射性物質汚染の広がり輸送に関する予測を行うため，大循環モデルの構築が望まれる。

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

2) 和田明・穂積照雄 (1996) : 複雑な密度場を有する北極海域での流動解析, 水工学論文集第40巻, pp.479～486