

10. 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－

MARINE CHARACTERISTICS OF THE ARCTIC OCEAN (KARA SEA, BARENTS SEA)
－ IN CONNECTION WITH MARINE CONTAMINATION －

和田 明^{*}・高野 泰隆^{**}・山本 讓司^{***}
Akira WADA, Tairyu TAKANO, Joji YAMAMOTO

ABSTRACT ; The objective of this report is to discuss the marine characteristics which the author examined in connection with the marine contamination in the Arctic Ocean (Kara Sea, Barents Sea).

The sea regions subjected to the research are located in longitude 0° to 130° east and latitude 64° to 85° north. For the sake of convenience, these regions are called the Arctic Ocean.

Most of coast lines in these regions belong to Russia. In recent years, it has been clarified that in Russia high-level radioactive contamination is taking place owing to the dumping of nuclear waste materials, the release of waste liquids containing a large amount of radionuclides from mines, etc., in addition to frequent crude-oil spill accidents caused by broken petroleum pipelines. In the event that the contamination caused by such accidents directly extends to the ocean and countermeasures must be taken against it, what is most important is to gain a correct understanding of fundamental marine characteristics in these regions.

Using the observation data (water temperature, salinity), therefore, the author examined the water-mass characteristics of the Arctic Ocean with reference to the known literature and compared the results thus obtained with the results of flow analysis, and investigated the present situation of flow. Additional research was also conducted on the relationship between the analytical results of this flow and the movement of cod larvae in the Barents Sea.

KEYWORDS ; Arctic Ocean, Marine contamination, Box model, Flow Analysis

1. はじめに

本報告は、北極海（カラ海，バレンツ海）における海水汚染に関連して実施した海洋特性を記述したものである。

対象とする海域は、東経0° から、東経130°，北緯64° から北緯85° までの海域である。便宜上この海域を北極海と呼ぶ。（図－1 参照）

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

^{**} ; エフ・エイ・エル・コンサルタント, F.A.L. Consultant ,

^{***} ; 東海大学大学院 海洋学研究科（現：芙蓉海洋開発株式会社）, Post Graduate Student of Tokai University

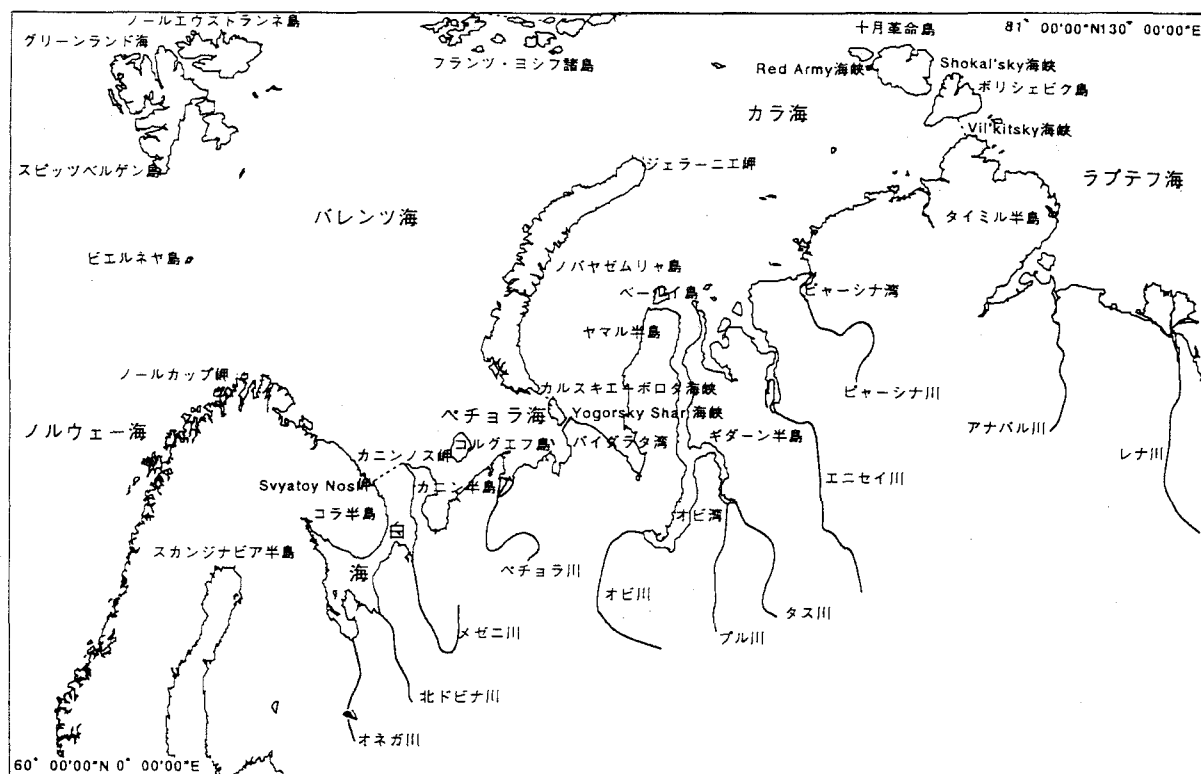


図-1 北極海（カラ海，バレンツ海）

この海域の海岸線の大部分は、ロシアに属している。近年、ロシアにおいて、核廃棄物の投棄、鉱山からの放射性核種を多量に含んだ廃液の流出、などの高いレベルの放射能汚染が発生していることが明らかとなってきた。また、石油パイプラインの破損などによる原油の流出事故も多発している。こうした事故による汚染が直接海洋に波及し、それに対処しなければならない場合、その海域における基礎的な海洋特性の理解が非常に重要である。

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、海氷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。

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、流れの現状を調べた。この流れの解析結果とバレンツ海でのタラの卵稚仔との動きとの関連についても検討を加えた。

2. データの処理法

水温、塩分のデータは Climatological Atlas of the World Ocean に基づき、年間を暖候季である春・夏季と、寒候季である秋・冬季に2分してそれぞれの2つの季節から1つの平均場を作成した。カラ海にそそぐ河川水のデータは参考文献(1)に収録されているデータを使用した。河川からの流量負荷は河口の位置するボックスの第1層に与えた。北極海を図-2に示すコンパートメントに分割し、それぞれの季節分布を再現するような海水の動き、海水の交換性をボックスモデルによる方法で計516個のコンパートメント間の水平・鉛直交換流量を算出した。

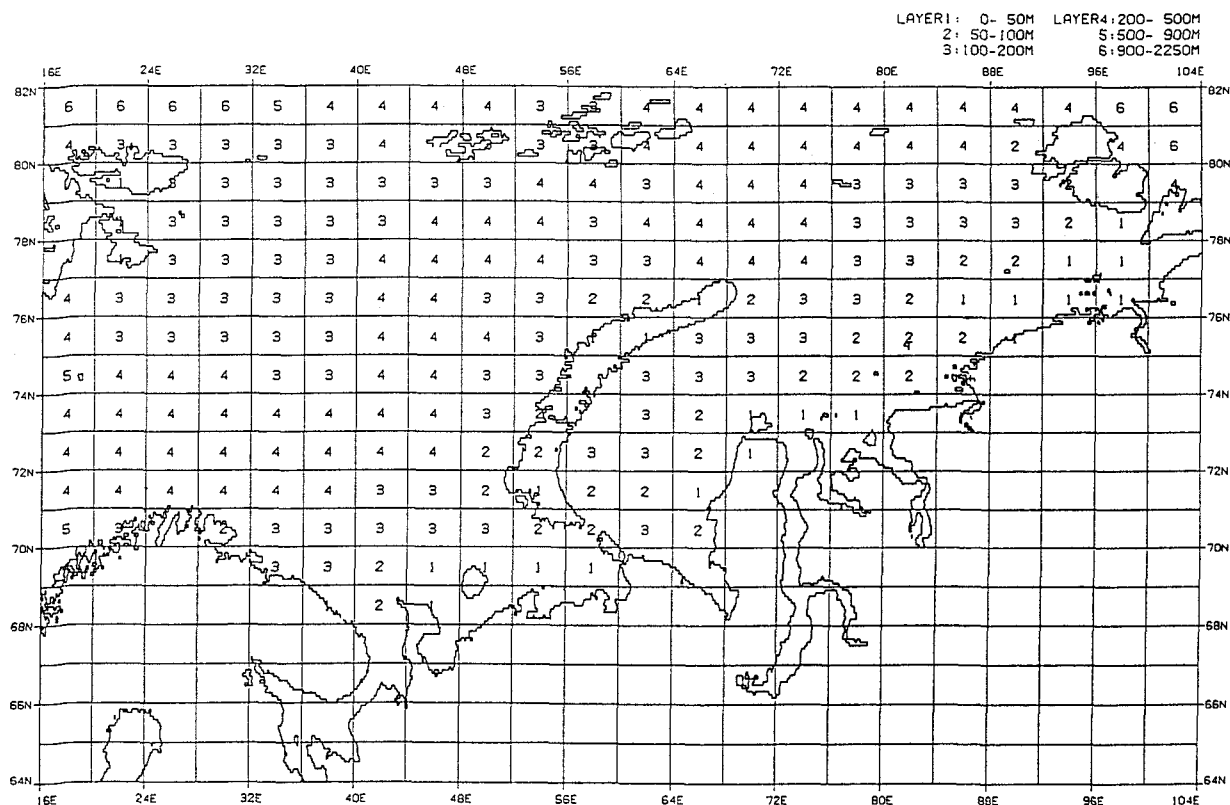


図-2 モデルの格子

3. 密度分布

3.1 0-50m層 (図-3(1))

等密度線の形状から見て、水温場に比べて塩分場が密度場に強く影響していることが示されているが、バレンツ海では急な温度勾配も影響している。

春・夏季、秋・冬季とも基本的な密度分布の構造は変わらない。

スピッツベルゲン島南西部の大西洋水が大陸棚沿いに北上する海域及びバレンツ海中心部で最も大きく $\sigma(s, t, p_{25}) = 28$ 前後を示す。バレンツ海の最北部、最南部では、それぞれ比較的軽い北極表層水、沿岸水の影響を受けて、 $\sigma(s, t, p_{25})$ で0.5程度軽くなっている。

密度の大きいバレンツ海水は東進するに従って密度を低下させ、カラ海に至る。カラ海中心部の海水密度は、バレンツ海に比較して、 $\sigma(s, t, p_{25})$ で1~1.5程度軽い。

カラ海の低密度水は、北側から進入する北極表層水とオビ、エニセイ両河川から流入する膨大な淡水によって形成され、特にカラ海の大陸沿岸では $\sigma(s, t, p_{25}) = 26$ 以下に低下して、フロントを形成している。

ノバヤゼムリャ島北方のバレンツ海とカラ海の接続部では、鉛直混合により秋・冬季により高密度化した海水が東まで分布し、カラ海沿岸では淡水流入量の低下により、低密度水の分布範囲がせばまる。

3.2 50-100m層 (図-3(2))

この層でも、春・夏季、秋・冬季の基本的な密度分布の構造は変わらない。

図に示した密度のアノマリーは $\sigma(s, t, p)$ の型式で表示しているので、圧力が考慮されている。従って σ_t 値よりやや大きい。

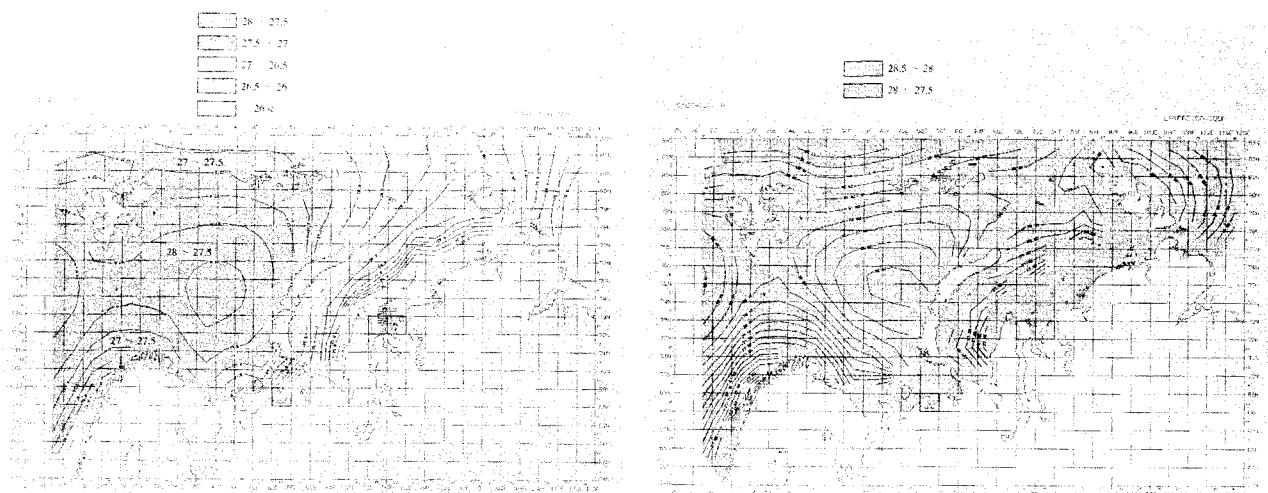


図-3(1) 密度分布(第1層, 0~50m, 夏季)

図-3(2) 密度分布(第2層, 50~100m, 夏季)

バレンツ海西部, バレンツ海中心部では, $\sigma(s, t, p_{75}) = 28.3 \sim 28.4$ 程度を示す。

$\sigma(s, t, p_{75}) = 28$ を越えるような高密度水は, バレンツ海からノバヤゼムリャ島北側海域を通り, セベルナヤゼムリャ島を包括する海域に達している。

塩分と同様, 北極表層水の影響が無くなる結果, 北部海域での密度勾配はほぼ緯度に平行になる。

4. ボックスモデルによる流動解析

ボックスモデル(コンパートメントモデル)による解析は, 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数学的に計算するものである。その方法は, 各ボックスでの海水量, 塩分量, 熱量の収支式を作成し, その収支式を満足するボックス間の交換流量を求める。

水温, 塩分濃度などの観測値をもとに, ボックス間の交換流量を未知数として, ボックスごとに次の3つの方程式をたてる。

- ① 海水の質量の保存方程式
- ② 海水中の塩分量の保存方程式
- ③ 海水の熱量の保存方程式

これらの方程式は, 交換流量を未知変数とする連立一次方程式となる。実は, 次のような解法上の困難があって, この連立一次方程式はほとんどの場合解くことができない。

第一に, 未知変数の個数と方程式の個数が一致するとは限らず一意的な解を求めることは難しい。また, モデルの性質上, 交換流量が非負(正または零)であることである。このため, 解法としては, 単なる連立一次方程式や一般逆行列法を用いることができず, 制約条件(非負条件)付きの非線形計画法によらなければならない。すなわち, ①~③の方程式を厳密に成立させることはあきらめて, 誤差の最小な解を求める。

制約条件付き非線形計画法を使えば, そのような解を求めることができ, 得られる交換流量は非負であり, 方程式①~③に対する誤差が最小となっている。

5. 解析結果

ボックスモデルの交換流量から得た流速をいわゆるラグランジュ的考察に基づき、北極海の各ボックスおよび河川河口からの粒子追跡を行い、海水粒子の動きを検討した。

5.1 バレンツ海

追跡結果（図－4(1)）によると、ノルウェー海流によって大西洋から運ばれた水粒子がノルカップ海流に乗りノルウェーの海岸に沿ってバレンツ海へと流入する様子が顕著に現れている。その後、ムルマン沿岸流として大陸に沿って東方へと流れカルスキエボロタ海峡へ入ったところで北東方向へと向きを変えノバヤ・ゼムリヤの西海岸へと進んでいる。また、この海流の以北にはムルマン海流が見られノバヤ・ゼムリヤに向かって東進して行く様子も再現している。更に西ノバヤ・ゼムリヤ海流に乗った粒子（図－4(1)）は、北西又は西方へと向きを変えスピッツベルゲンとフランツヨセフランドの間を中央北極海へと流入する流れとスピッツベルゲンの南を抜けノルウェー海流に合流する流れとに分かれる。この流れも従来の知見と一致していることが分かる。

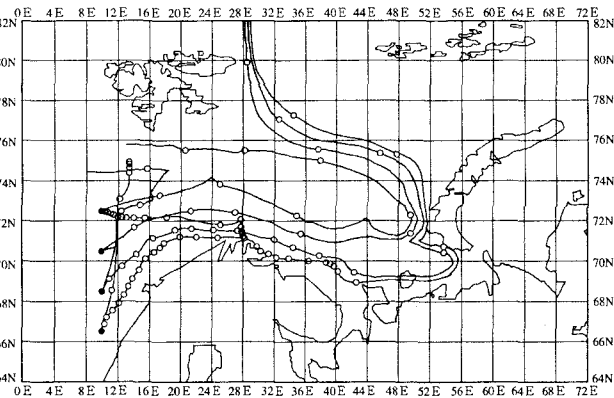
この他一般に知られている流れとして、フランツヨセフランドとノバヤ・ゼムリヤの間を東から西へと流れる海流や東スピッツベルゲン海流として中央北極海の深層部より流入するもの、フランツヨセフランドの北側を西進する流れなどがある。これらの流れについて追跡した結果（図－4(2)）に示したようにどの結果も従来の知見をよく再現している。

5.2 カラ海（図－4(2)）

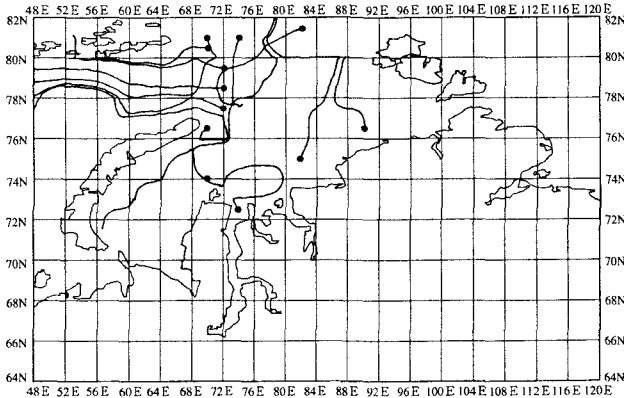
カラ海の西方海域には、ノバヤ・ゼムリヤの東海岸に沿って北東から南西に進むノボゼメリスカヤ海流があり、バレンツ海よりカルスキエボロタ海峡を通して流入するペチョラ海流、その延長に存在するヤマル海流がある。これらの海流の再現性を計るための追跡結果を（図－4(2)）に示す。これによると、ノボゼメリスカヤ海流に乗った粒子がノバヤ・ゼムリヤの東海岸に沿って南下している様子がよく現れている。また、ペチョラ海流及びヤマル海流についても知見と一致する結果となっている。

追跡結果によると、オビ湾の湾口部に投入した粒子は、ノバヤ・ゼムリヤの北部に向かって進み、更にノボゼメリスカヤ海流へと合流した。また、オビ湾周囲に投入した粒子は扇状に北上している。これは既往の知見と一致する。

北部海域では、水深80～125mの海溝によって中央北極海から流入する流れとフランツヨセフランドとノバヤ・ゼムリヤの間をバレンツ海へ流れ込む海流がある。追跡結果（図－4(2)）によると、2層目(50～100m)、3層目(100～200m)において中央北極海からカラ海へ流入している様子がよく再現されている。



図－4(1) 粒子追跡結果



図－4(2) 粒子追跡結果

6. 結果と考察

ハドック及びタラの移動ルート（図-5）とコンパートメントモデル法を用いて得られた流動を基に追跡を行った結果と比べる。

ノルウェー沿岸よりバレンツ海に入り、大陸に沿って移動している様子は、粒子追跡結果と一致している。

これは、ハドックやバレンツ海タラがバレンツ海に存在しているノルカップ海流、ムルマン沿岸流又は、ムルマン海流といった流れに乗って移動しているためと思われる。

これより、この解析結果がこの海域の流動と一致していることが分かる。

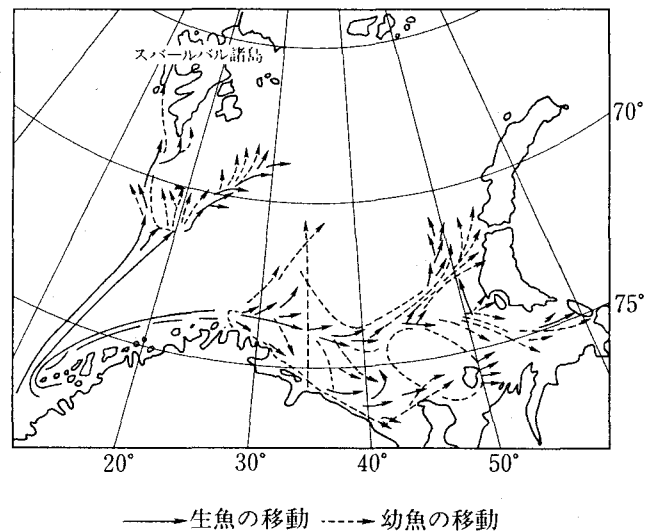


図-5 バレンツ海タラの移動
(1987年 Boytsovらによる)

7. 結 論

- 1) コンパートメントモデル法によって得られた流動は、既往の知見による流れと一致している。一方、中層域及び深層域については、北極深層水に関する僅かな知見しかないがその流動においては再現性が得られた。
- 2) 実測がされている表層の流れについて粒子追跡を行った結果、かなりの精度で再現が認められた。ただし、粒子の動きに関しては知見より遅い結果となっている。これは、メッシュの大きさによる影響であると考えられる。
- 3) タラの移動ルートとの比較においても類似性が高い。

今後、この手法に粒子の性質を加味することにより海洋における油や放射性物質の拡散予測など様々な諸問題に対して適応出来うと思われる。

本研究の解析手法は、水温・塩分などの観測データに基づいて流れの場を求める方式である。従って、データの重要度は計り知れない。特に北極海は、気象データなど他の海域に比べ大変少ないため、今後さらなるデータの集積が必要である。

参考文献

- 1) 和田明 (1994) : 日本海および北極海の海洋特性
— 放射能汚染に関連して — , 第2回地球環境シンポジウム講演集, 土木学会