

複雑な密度場を有する北極海域での流動解析

Flow Analysis in the Arctic Seas with a Complicated Density Field

和田 明^{*}・穂積照雄^{**}

By Akira Wada and Teruo Hozumi

The objective of this report is to discuss the flow characteristics in the Arctic Ocean (the Kara and the Barents) in connection with the marine contamination.

Using the observation data (water temperature, salinity) the author examined the water mass characteristics of the Arctic Ocean and compared the results with the results of flow analysis taking into account of river inflow, density structure in the sea, and investigated the present situation of flow. Additional research was also conducted on the relationship between the analytical results of this flow and the migration of cold larvae in the Barents Sea.

Keywords: box model, Arctic Ocean, flow analysis

1. はじめに

最近、旧ソビエト連邦およびロシア共和国による、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（図-1参照）。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。

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の動きとの関連についても検討を加えた。

* 正会員 工博 日本大学生産工学部 土木工学科
(〒275 千葉県習志野市泉町 1-2-1)

** (株)アーク情報システム
(〒102 東京都千代田区5 番町 4-2)

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、北極海のパレンツ海・カラ海の流れがどのようにになっているかを、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。

図-2はモデルの格子と鉛直層の数を示す。

3. 北極海水の密度構造

3.1 北極洋

北極洋の面積は $9.5 \times 10^6 \text{ km}^2$ 、容積は $1.7 \times 10^7 \text{ km}^3$ を占め、陸地により閉ざされた水域である。場所によっては4000mの深さがある。ここでは、3つの主要な水塊があると考えられる。

- i. 北極表層水：表層から200m深さまで存在しているこの水塊は、氷のカバーに依存するが、温度・塩分とも顕著に変化する。
- ii. 大西洋水：水面下200～900mに存在する。この水塊の温度は0度以上、塩分濃度は35‰である。
- iii. 北極深層水：大西洋水塊以深で海洋底までおよんでいる。

北極洋の水収支は、ベーリング海峡とノルウェー海を通過する流れによって、均合が保たれている。

3.2 パレンツ海 (図-3)

パレンツ海の面積は、1,424,000(km²)、容積は $3 \times 10^5 \text{ km}^3$ であり西側のノルウェー海と隣接している。暖流系水である北大西洋流は、ノース岬の西側から流入する。そして2つの主要な分岐流に分かれる。1つは東方(沿岸流系)へ、1つは北中心域へ流れる。冷たい北極水は、スピッツベルゲン島とフランツヨセフ諸島との間の北方から、またフランツヨセフ諸島とノバヤゼムリヤ島との間の北方から流入してくる(図-3参照)。

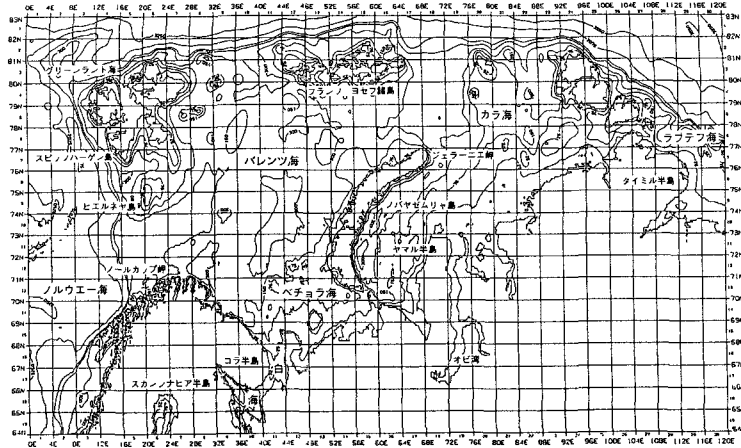


図-1 パレンツ海とカラ海

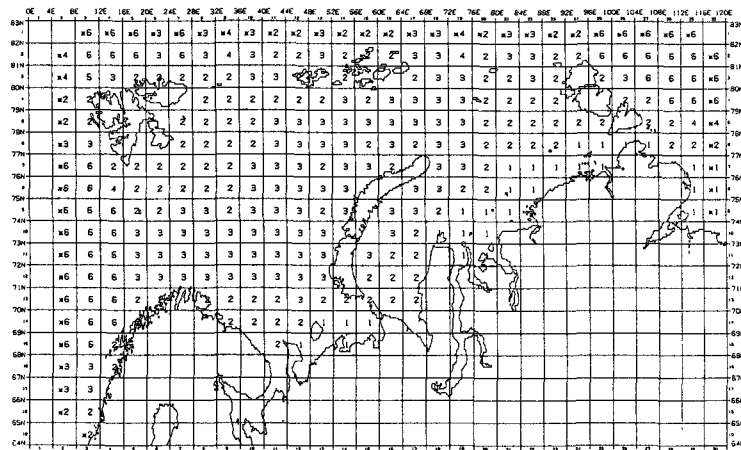


図-2 モデルの格子
(数値は鉛直層の数)

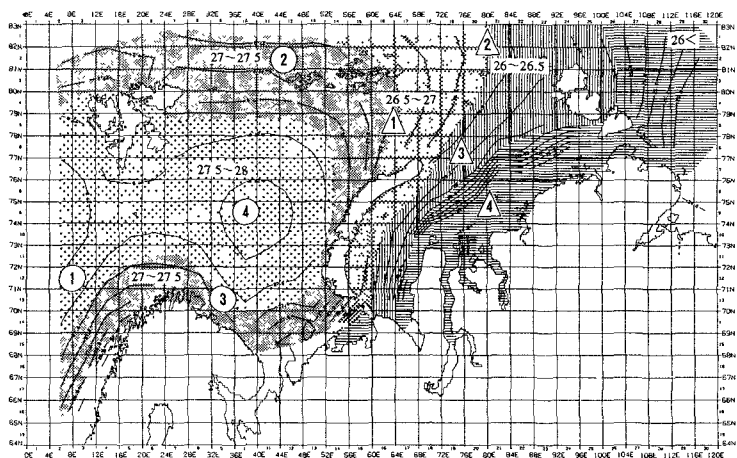


図-3(1) 密度分布 (0~50m層, 暖候期)

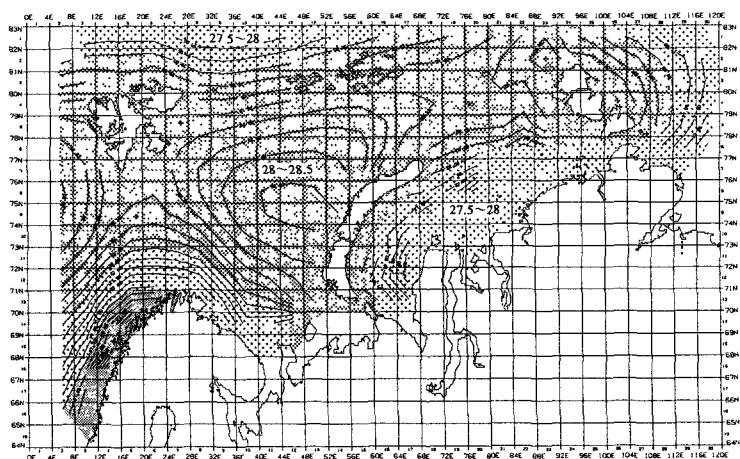


図-3(2) 密度分布 (50~100m層, 暖候期)

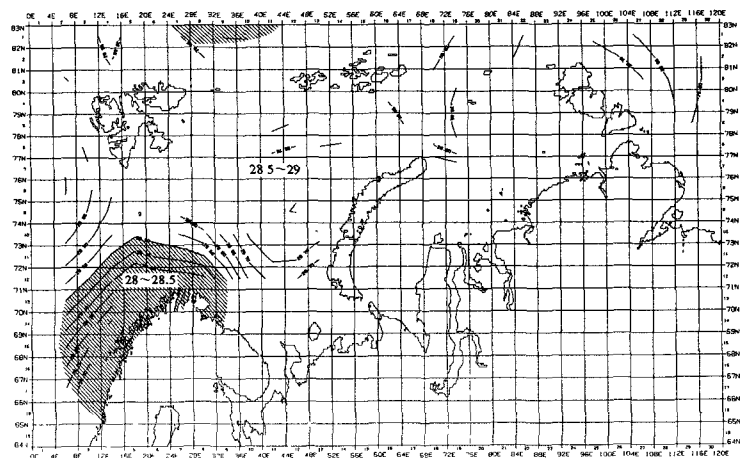


図-3(3) 密度分布 (100~200m層, 暖候期)

海は、春に成層化し、冬に混合する。高い生物生産のある地域である。塩分濃度は、32～35‰である。

バレンツ海の水の構造は、図-3に示す4つの主要な水塊をもつものとして考えられる。

(図-3(1)中の番号と対応している。)

①表層流として西側から流入する大西洋水塊と、北極水域からある深さで北及び北東から流入する大西洋水塊

②北側から表層流として流入する北極水塊

③沿岸水塊(大陸から流入)

④混合したのち、そこにとどまるバレンツ海水塊

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。 $(\sigma(s, t, p_{25}))$ については脚注参照)

3.3 カラ海(図-3)

カラ海の面積は883,000(km²)、容積は98,000(km³)である。海の水深は浅く、その平均水深は120mである。しかし、沢山の深い谷が存在している。例えばノバヤゼムリヤ諸島の東側にあるノバヤゼムリヤトラフ(300～400m)、ノバヤゼムリヤ諸島の北方にトラフ(600m)がある。この海域には、オビ川ならびにエニセイ川から年間1500km³の河川水が流入する。これらの淡水流入が、北向きの流れを引き起こし、大陸に沿う北東流とノバヤゼムリヤ島の沿岸に沿う南西流に分かれる渦を形づくっている。

河川水の流入は、夏に顕著で冬に著しく減少する。図-4は、主要な河川水流出量の月変化を示す¹⁾。カラ海の水塊構造は、北極海とバレンツ海からの流入水と河川水流入によって支配されている。5つの主要な水塊が存在している。(図-3(1)参照、図中の番号と対応している)

① より高い水温と塩分濃度を有する大西洋水を起源にもつバレンツ海水が、北方からとフランツヨセフ諸島とノバヤゼムリヤ諸島との間の北西からとカラ海峡を通る南西方向から供給される。

② 北極海水域の表層水

③ カラ海と表層水

④ オビ川とエニセイ川からの低塩分水、夏期比較的高温(7～10℃)の流入

海は北方ならびに南西域において、夏季(20mまで)よく成層しているが、秋になると激しい嵐の来襲により、鉛直方向に完全に混合する。塩分濃度は、沖合で32‰、オビ、エニセイ河口付近で10‰である。

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。

ノバヤゼムリヤ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。

H. Loeng et al (1991)²⁾ は、3つの主要な水塊、すなわち、沿岸水、大西洋水、北極水の各々は海流系の1つ1つと関わっていることを指摘している。バレンツ海の水塊分布を示す図-5は、今回整理・図化した密度分布と良い対応が認められる。表-1は図-5に基づいてバレンツ海の水塊の特徴を示したものである。

海水の密度 $\rho(s, t, p)$ は塩分 s 、温度 t 、圧力 p の関数である。実際の計算では現場密度 $\sigma(s, t, p)=\{\rho(s, t, p)-1\} \times 1000$ が用いられる。 $\sigma(s, t, p_{25})$ は深度25mにおける現場密度を意味する。

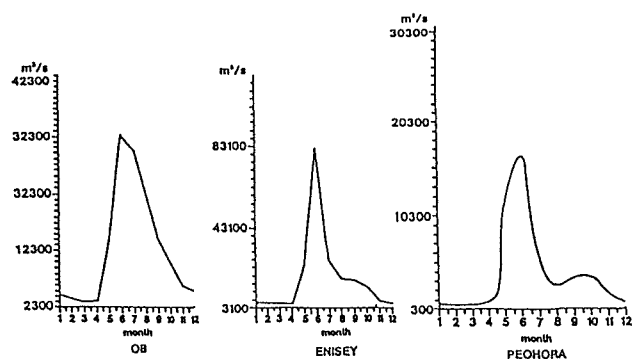


図-4 河川水量の月変化

表-1 バレンツ海の水塊

水塊の名称	記号	水 塊 の 特 徴	
		T (°C)	S (‰)
沿 岸 水 系	CW	> 2.0	< 34.7
大 西 洋 水 系	NAW	> 3.0	> 35.0
北 極 海 水 系	AW	< 0.0	34.3 ~ 34.8
バレンツ海水系	BSW	-1.5 ~ 2.0	34.3 ~ 34.8
底 層 水 系	BW	< -1.5	> 35.0

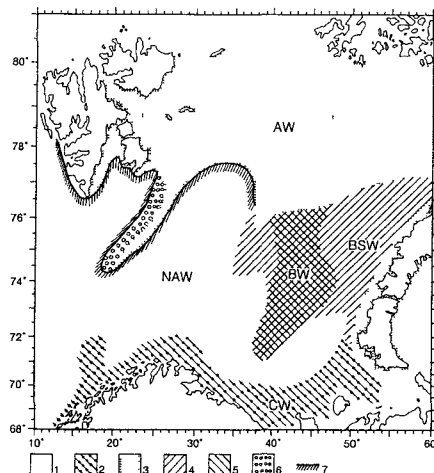


図-5 バレンツ海の水塊分布

NAW : 大西洋水系,
BSW ; バレンツ海水系,
AW ; 北極海水系,
BW ; 底層水系,
CW ; 沿岸水系

4. 流動の解析手法

4.1 ボックスモデルの適用

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。

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。

本研究では、ボックス(コンパートメント)モデルによる解析手法を適用した。本来、流体の運動方程式、連続方程式ならびに水温・塩分に関する拡散方程式に基づくモデルを用い、流動解析を行うことも考えられるが、境界条件の設定が容易で自然なものとなっている上記のモデルを用いている。質の高い観測データ(水温、塩分濃度、気象データ、河川流入条件)が得られると、流動場を求めるのに適した手法と考えられる。

対象海域はロシア大陸から大量の河川流入があり、密度が異なる3つの水塊が共存している場である。また、年間の半分以上結氷が続き、流れに及ぼす風の影響は不明である。

潮汐については、B. Gjevik and T. Straume (1989)³⁾ が北海とノルウェー・グリーンランド・バレンツ海と北極海を包含する海域について数値的に解いた。その結果、当該海域では沿岸部を除くと潮汐の影響はわずかであることを結論している。

計算の境界部での水深が深く、圧力の境界条件の設定が容易でないこと、対象海域の流れの駆動力が明確に設定できないことから、ボックスモデルによる解析手法を選定した。

このモデルの弱点として、観測データによる診断モデルであるため現況条件を変更した予測流動場を求めるような使用には向かないこと、使用する観測データの質（精度、空間的、時間的な細かさ）が直接的に解の質に影響することである。

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。

4.2 保存方程式

各ボックスについて、3つの保存方程式をたてる。ボックス i に注目して以下のような保存式を考える。

① 海水の質量保存方程式

$$\sum_{j \neq i} W_{ji} \rho_j - \sum_{j \neq i} W_{ij} \rho_i + \sum_r R_{ri} \rho_r' + P - E = 0 \quad [\text{ton/s}] \quad (2)$$

ここに、 $W_{ij} \geq 0$: ボックス i からボックス j への交換流量 [m^3/s]、 ρ_i : ボックス i の海水密度 [ton/m^3]、水温と塩分濃度より、クヌードセン式により求めている。

ρ_r' : 河川 r の河川水密度 [ton/m^3] クヌードセン式による。 R_{ri} : 河川 r からボックス i への河川水流入量 [m^3/s]、 P_i : ボックス i への降水量 [ton/s]、 E_i : ボックス i から大気への蒸発量 [ton/s]。

② 塩分の保存方程式

$$\sum_{j \neq i} W_{ji} \rho_j S_j - \sum_{j \neq i} W_{ij} \rho_i S_i + \sum_r R_{ri} \rho_r' (S_r' - S_i) = 0 \quad [\text{ton/s}] \quad (3)$$

S_i : ボックス i の塩分 [%]、 S_r' : 河川 r の塩分 [%]

③ 熱量の保存方程式

$$\sum_{j \neq i} W_{ji} \rho_j T_j C - \sum_{j \neq i} W_{ij} \rho_i T_i C + H_i = 0 \quad [\text{Mcal/s}] \quad (4)$$

T_i : ボックス i の水温 [$^{\circ}\text{C}$]、 H_i : 大気からBox i に流入する熱量 [Mcal/s]、 C : 海水の比熱 [$\text{cal}/\text{g} \cdot ^{\circ}\text{C}$]、現在は1.0としている。

4.3 非線形計画問題への変換

非負条件付連立1次方程式を、非負条件付誤差最小化問題に変換する。

$$\varepsilon = \sum_i \left\{ \alpha_i (\text{Box } i \text{ の質量保存式(2)の左辺})^2 + \beta_i (\text{Box } i \text{ の塩分保存式(3)の左辺})^2 + \right. \\ \left. (\gamma_i (\text{Box } i \text{ の熱量保存式(4)の左辺})^2 \right\} \quad (5)$$

とすると、 ε は交換流量 $W_{12}, W_{13}, \dots$ の関数であり、保存方程式の誤差の2乗和である。

交換流量 $W_{12}, W_{13}, \dots$ は、非負条件 $W_{12}, W_{13}, \dots \geq 0$ のもとで、誤差関数を $\varepsilon = \varepsilon(W_{12}, W_{13}, \dots)$ を最小にする $W_{12}, W_{13}, \dots$ として求めればよい。この問題は、通常、NNLS (Non Negative Least Squares) と呼ばれているものである。

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

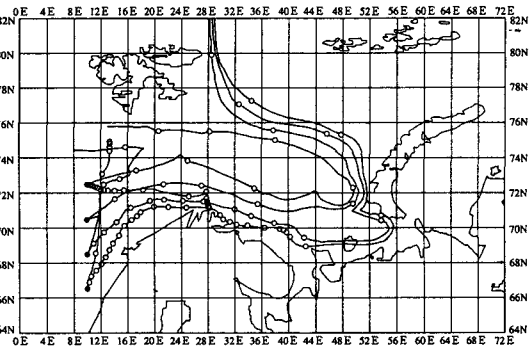
追跡結果(図-6(1))によると、バレンツ海にノルウェー半島に沿って流入する大西洋水がバレンツ海を反時計回りに循環して、北極海およびノルウェー海へ再び抜ける流れである。この循環にはペチョラ川から流出した河川水が接続している。この流れは従来の知見と一致しているといえる(図-7参照)。

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・ゼムリャの間を東から西へと流れる海流や東スπι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流れなどがある。これらの流れについて追跡した結果図-6(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-6(2))

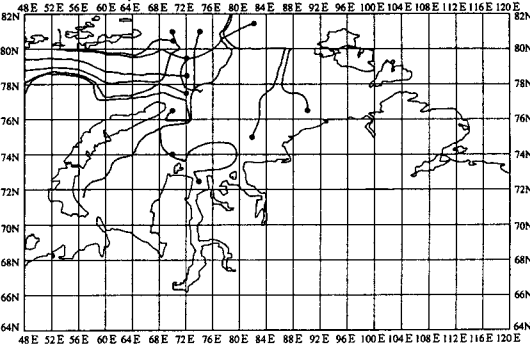
北部海域では、水深80~125mの海溝によって中央北極海から流入する流れとフランツヨセフランドとノバヤ・ゼムリャの間をバレンツ海へ流れ込む海流がある。追跡結果(図-6(2))によると、2層目(50~100m)、3層目(100~200m)において中央北極海からカラ海へ流入している様子がよく再現されている。

カラ海の西方海域には、ノバヤ・ゼムリャ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る。この海流の再現性を計るための追跡結果を図-6(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・ゼムリャの東海岸に沿って南下している様子がよく現れている。



(●印: 粒子の投入点, ○印: 50日ごとの粒子の位置)

図-6(1) 粒子追跡結果



(●印: 粒子の投入点, ○印: 50日ごとの粒子の位置)

図-6(2) 粒子追跡結果

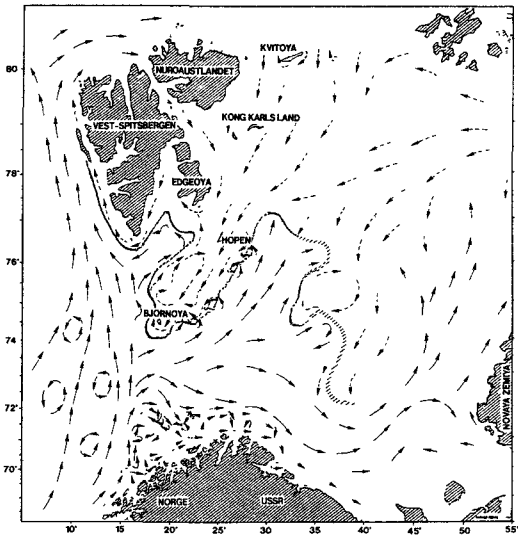


図-7 バレンツ海の上層流パターン

- 太平洋海流系
- 沿岸流系
- 北極流系

(H. Loeng et al(1991)による)

6. 結果と考察

5. で得られた流動解析結果とタラ（ハドックとバレンツ海タラ）の移動経路とを比較し、解析結果の再現性について検討を行うこととする。一般に、ハドックは水温 $4 \sim 10^{\circ}\text{C}$ の海域に生息していると考えられている。バレンツ海においてその条件を満たす場所は、大陸沿岸域と高水温を有する大西洋水塊域である。観測された移動ルートもその海域であり図-8に示すとおりである。

ハドックおよびバレンツ海タラの移動ルートとボックスモデルによる流動解析結果（図-6(1)）と比べると類似性が高いことが認められる。

特にノルウェー沿岸よりバレンツ海に入り、大陸に沿って移動す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、ムルマン沿岸流また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考えられる。

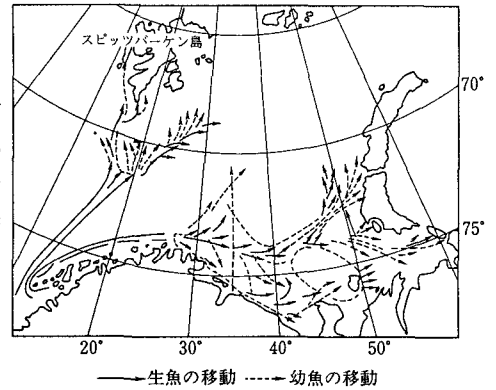


図-8 バレンツ海タラの移動
(1987年 Boytsovらによる)

7. 結 論

- 1) バレンツ海の流動は、隣海（北大西洋、北極海）からの流入による影響を受ける。一方、カラ海の流動変化に最も大きな影響を及ぼす要因として、オビ、エニセイ川などの河川水の流入が挙げられる。
- 2) 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ので流れの再現性について今後検討する必要がある。
- 3) 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。
- 4) タラの移動ルートとの比較においても類似性が高い。

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、データの重要性は計り知れない。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。

謝 辞

本研究は（株）水圏科学コンサルタント高野泰隆氏、東海大学大学院海洋学研究科（現：芙蓉海洋開発株式会社）山本讓司氏の協力を得て実施したもので感謝の意を表します。

参考文献

- 1) V.K.Pavlov and M.Y.Kulakov (1993): Oceanographical description of the Kara and Barents, IAEA Report, pp.3-134.
- 2) H.Loeng, E.Sakshaug, C.C.E.Hopkins and N.Oritsland (1991): Features of the physical oceanographic conditions of the Barents Sea, Polar Research 10(1), pp.5-18.
- 3) B.Gjevik and T.Straume (1989): Model simulations of the M_2 and the K_1 tide in the Nordic Seas and the Arctic Ocean, Tellus, 41A, pp.73-96.