若狭湾周辺海域における移流拡散解析

福井大学大学院　学生会員　○　山口 潤
福井大学大学院　正 会 員　　　福井 卓雄

1　はじめに

この研究の目的は、若狭湾周辺の海域において、ある沿岸地点から拡散物質が放流されたときの、その物質の拡散状況を追跡することにある。前提として、湾内の流速分布は既知であるとし、その流れの中での拡散物質の分布を移流拡散問題の解として、差分法を用いて解析する。

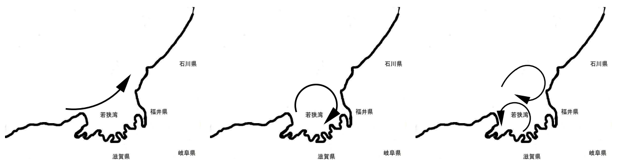
現在、若狭湾沿岸には 15 基の原子力発電所が立地しており、さらに 2 基の新設が計画されている。これらの原子力発電所はすべて海水を利用して、発電所で発生する余剰の熱を捨てている。これによって、実際にはごくわずかな (自然状態の 1/10 以下) 放射性物質 (^{3}H) を放出している。このような地域において、環境 (気中・水中) における放射線・放射性物質の量を常時計測・記録し、異常の早期発見の態勢を維持しておくことは、もっとも重要な環境保護策の一つである。

若狭湾沿岸域においても、最初の原子力発電所建設当初より 30 年間以上にわたって、このような観測態勢が維持されてきている。こういった経緯の中で、最近になって、原子力発電所から放出される放射性物質の行方の追跡が一つの課題としてあげられるようになってきた。

本研究では、若狭湾沿岸域における海中の放射性物質観測システムの一部として、若狭湾において表面流速分布が何らかの計測により与えられるときの、拡散物質の分布状況を推定することを目指す。

2　若狭湾における流れの観測の現状と将来の観測系

若狭湾エネルギー研究センターでは、最近において、若狭湾における流れおよび物質移動について、丁寧な調査を行っている。また、そこで得られた種々のパラメータを用いて、差分法による湾内の流れ解析を行い、海流の流動に 3 つのパターンが現われることを報告している。



図–1　若狭湾における海流の流動パターン (若狭湾エネルギー研究センター)

報告によれば、海流の流動パターンは図–1 に示すようになる。これらのパターンは対馬海流の流速によって決まってくる。第 1 のパターンは、海流が若狭湾外部を通過する場合で、無環流型の流動パターンと考えられる (図–1 左)。第 2 のパターンは、湾内を時計回りにまわる流れが発生する場合で、1 環流型のパターンと考えられる (図–1 中央)。第 3 のパターンは、湾内に時計回りおよび反時計回りの環流ができる場合で、2 環流型のパターンと考えられる (図–1 右)。拡散物質の分布は、流れのパターンの影響を受けると同時に、流れの速度、拡散係数などの影響も受けるので、実際には物質分布の多様なパターンが生じうると考えられる。また、あくまでも定常に近い状態の流れ解析に基づいた結果であるので、季節風の影響や冬季の荒天の影響を評価することはできない問題点もある。

若狭湾エネルギー研究センターの結果は、海水調査による海水パラメータをもとにした解析結果であり、計測という観点からは、表面流速を直接に観測できることがもっとも望ましい。現在、この目的に使えるものは、ドップラーレーダーにより海面の流速を計測する方法である。使用する周波数に依存するが、ドップラーレーダーはかなり広い範囲の表面流速を面的に観測できるものであり、適切な拡散解析と組み合わせれば、拡散物質の挙動を詳しく追跡することが可能であると考えられる。

3　移流拡散解析の方法

解析は、表面流速による 2 次元の移流拡散解析とする。実際には、深さ方向への拡散物質の移動も考える必要があると考えられるが、対象を ^{3}H と考えると、水として放出されることになるので、重力の影響は比較的小さいものと仮定してもよいであろう。

流速について、本研究では 2 次元のナビエ・ストークス方程式を、流れ関数・渦度法を用いて解くことによって求めた。、連続の式およびナビエ・ストークス方程式は

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{Re}\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) \tag{2}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{Re}\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right) \tag{3}$$

となる。ここで、u、v、p、t、ρ、ν、Re はそれぞれ x 方向の流速、 y 方向の流速、圧力、時間、密度、動粘性係数、レイノルズ数である。

キーワード：移流拡散, 差分法, 若狭湾
連絡先：〒 910-8507 福井市文京 3-9-1, TEL0776-27-8596, FAX 0776-27-8746

流れ関数 ψ、渦度 ω を

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad -v = \frac{\partial \psi}{\partial x}, \qquad \omega = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \tag{4}$$

と表すと、式 (2) (3) より渦度輸送方程式

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial \psi}{\partial y}\frac{\partial \omega}{\partial x} - \frac{\partial \psi}{\partial x}\frac{\partial \omega}{\partial y} = \frac{1}{Re}\left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2}\right) \tag{5}$$

が得られる。さらに、渦度の定義式より、流れ関数に関するポアソン方程式

$$-\omega = \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} \tag{6}$$

が得られる。

2 次元移流拡散方程式は、与えられた流速を (u, v) とするとき、

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u\frac{\partial C}{\partial x} + v\frac{\partial C}{\partial y} = k_x\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + k_y\frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \tag{7}$$

となる。ここに、C は拡散物質の濃度、k_x, k_y は x 方向および y 方向の拡散係数 (通常は $k_x = k_y$) である。境界条件としては、海岸において

$$\frac{\partial C}{\partial n} = 0 \tag{8}$$

である。$\partial/\partial n$ は法線微分である。また、湾内流と外洋部との境界においては、

$$C = 0 \tag{9}$$

とおいてよいだろう。

差分法は、次のように構成した。x、y、t の分割幅を Δx、Δy、Δt とし、$C(x_i, y_j, t_k) = C^k_{i,j}$ と表記すると

$$\begin{aligned}
C^{k+1}_{i,j} = &\left(1 - \frac{2k_x\Delta t}{\Delta x^2} - \frac{2k_y\Delta t}{\Delta y^2} + \frac{u^k_{i,j}\Delta t}{\Delta x} + \frac{v^k_{i,j}\Delta t}{\Delta y}\right)C^k_{i,j} \\
&+\frac{\Delta t}{\Delta x}\left(\frac{k_x}{\Delta x} - \frac{u^k_{i,j}}{2} - \frac{|u^k_{i,j}|}{2}\right)C^k_{i+1,j} \\
&+\frac{\Delta t}{\Delta x}\left(\frac{k_x}{\Delta x} + \frac{u^k_{i,j}}{2} + \frac{|u^k_{i,j}|}{2}\right)C^k_{i-1,j} \\
&+\frac{\Delta t}{\Delta y}\left(\frac{k_y}{\Delta y} - \frac{v^k_{i,j}}{2} - \frac{|v^k_{i,j}|}{2}\right)C^k_{i,j+1} \\
&+\frac{\Delta t}{\Delta y}\left(\frac{k_y}{\Delta y} + \frac{v^k_{i,j}}{2} + \frac{|v^k_{i,j}|}{2}\right)C^k_{i,j-1}
\end{aligned} \tag{10}$$

となる。この差分式は、時間軸について前進差分、空間軸に対して中心差分をとり、流速成分に一次上流化をした形になっている。この場合は、数値解の安定性についてかなり厳しい条件があるので、時間増分 Δt をかなり小さめにとる必要がある。

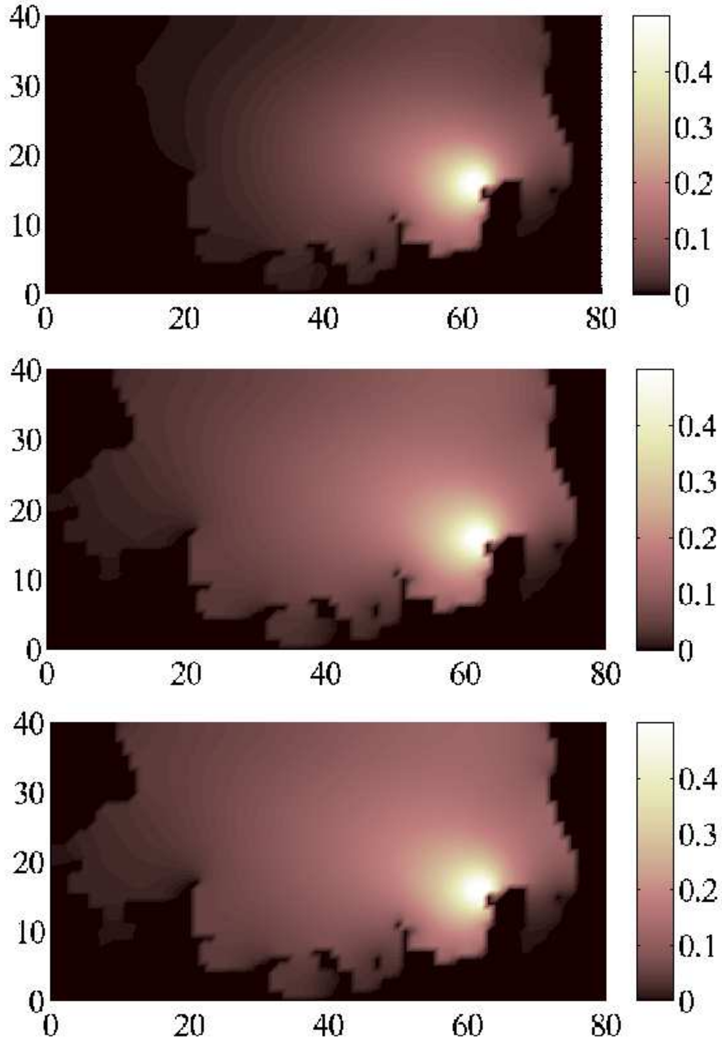
参考文献

[1] 山口潤, 福井卓雄 : 若狭湾周辺海域における拡散物質の移流拡散問題の解析, 土木学会中部支部研究発表会講演概要集 I-15, 2006

4 解析結果

本研究では、若狭湾周辺海域において、ある沿岸地点から拡散物質が放流されたとき、表面流速分布が何らかの計測により与えられるときの、拡散物質の拡散状況を推定することができた。

流速や若狭湾への流入角度などによって若狭湾内の流れに違いがあることが確認でき、それぞれの場合で違った拡散の様子が見られた。流速についっては、流速が大きくなるにつれ、無還流型の流動パターンから 1 還流型、 2 還流型へと流れのパターンが変化していくことがわかった。流入角度については、流入角度が大きくなるにつれ、2 還流型の流動パターンから 1 還流型、無還流型へと流れのパターンが変化変化していくことがわかった。



図–2 流速を $70cm/s$ のときの数値解析の結果 (1 環流型の流動パターン) 上から 1, 3, 6 時間後の拡散物質の濃度分布

5 今後の課題

- 解析領域を拡大し、外洋部も含めた解析領域での解析、
- 解析領域の境界を、更に若狭湾沿岸部に近づくように境界条件を設定し、より細かく分割しての解析、
- 深さ方向も加えた 3 次元での解析

等を考えている。