

定常風成流の解析解と渦動粘性係数について

宇部短大環境科学研究所 正会員 松本治彦
 山口大学工学部 正会員 羽田野袈裟義
 山口大学工学部 正会員 斎藤隆

1. はじめに

閉鎖性水域における風成流の問題は、ほとんどの場合計算機で数値的に解く近似解法に頼っている。本研究では、水の交換や水温成層を無視することができ、比較的大規模な一様水深の矩形閉塞水域で任意の定常な風系により誘発される定常風成流を理論解析し、その水平流速の3次元分布を表示する式を求めた。また得られた解析解について渦動粘性係数の与え方を検討した。

2. 基礎方程式

北緯 ϕ の位置に矩形閉塞海を設定する(Fig.1)。この海上を長時間、定常的に風が吹き続けた場合に誘発される定常状態の海流を検討する。またこの現象は、 f -平面近似で十分な精度を持つ範囲内でおこるものとする。海水の密度 ρ は一定とし、海水の運動に関与する力として風応力、コリオリ力、重力、摩擦力を考慮する。さらに水平流に比べて鉛直流は微小であるとして、静水压の近似を行う。以上の仮定により線型化された運動方程式と連続の式は、

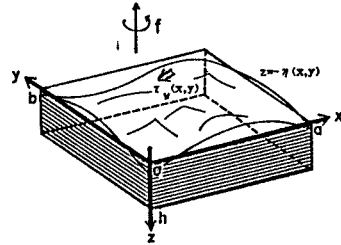


Fig.1 モデルの概要と座標の設定

$$0 = fv - g \frac{\partial \eta}{\partial x} + A_h \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + A_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad \dots(1)$$

$$0 = -fu - g \frac{\partial \eta}{\partial y} + A_h \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + A_z \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad \dots(2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{-\eta} u dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{-\eta} v dz = 0 \quad \dots(3)$$

ここで、 u および v は流速の x および y 方向成分、 f はコリオリパラメータ、 A_h は水平渦動粘性係数、 A_z は鉛直渦動粘性係数、 g は重力加速度を表す。境界条件として、水表面 $z = -\eta(x, y)$ を $z = 0$ と近似して $(\rho A_z \frac{\partial u}{\partial z})_{z=0} = \tau_{wx}(x, y)$ $(\rho A_z \frac{\partial v}{\partial z})_{z=0} = \tau_{wy}(x, y)$ $\dots(4)$ とする。ここで、 $\tau_{wx}(x, y)$ および $\tau_{wy}(x, y)$ は風応力の分布 $\vec{\tau}_w(x, y)$ の x および y 方向成分である。また簡単のため海底面では海水はすべるとする。さらに鉛直境界壁では流速をゼロとする。

3. 解析法の概要と解析解

解析法の概要は以下の通りである。まずストークスの方法により、任意の定常風成流について風系と海面傾斜量により水平流速を表示する式を求める。次に、流量流線関数を導入してその支配方程式を所与の定常風系に対して解き、この結果を用いて海面傾斜量を求める。最後に、風系と海面傾斜量により水平流速を表示する式に、風系と海面傾斜量の結果を代入して水平流速を求める。

今、海面傾斜量 $\gamma_x = -\partial \eta / \partial x$ 、 $\gamma_y = -\partial \eta / \partial y$ と水平流速 u, v の空間分布を複素数ベクトル表示して $\vec{W}(x, y, z) = u(x, y, z) + i v(x, y, z)$ 、 $\vec{\gamma}(x, y) = \gamma_x(x, y) + i \gamma_y(x, y)$ おくと方程式(1)、(2)は、次のように表示される。 $A_h \left(\frac{\partial^2 \vec{W}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vec{W}}{\partial y^2} \right) + A_z \frac{\partial^2 \vec{W}}{\partial z^2} - i f \vec{W} = -g \vec{\gamma}$ $\dots(5)$

また、風の応力分布 $\vec{\tau}_w(x, y)$ 海流と同形のフーリエ級数で展開し、上述の手順で解く。その結果のみを示すと、 $\vec{W}(x, y, z) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{\vec{I}_{mn}}{\rho \sqrt{A_z \bar{D}_{mn}}} \left[(\coth \sqrt{\frac{\bar{D}_{mn}}{A_z}} h) \cosh \sqrt{\frac{\bar{D}_{mn}}{A_z}} z - \sinh \sqrt{\frac{\bar{D}_{mn}}{A_z}} z \right] + \frac{g}{\bar{D}_{mn}} \vec{\Gamma}_{mn} \right\} \sin^m \frac{\pi x}{a} \sin^n \frac{\pi y}{b}$ $\dots(6)$

ここで

$$\vec{r}_{mn} = \left(\frac{4}{ab}\right) \int_0^a \int_0^b \vec{r}(x,y) \sin \frac{m\pi}{a} x \sin \frac{n\pi}{b} y dy dx \quad \dots(7)$$

$$\vec{L}_{mn} = \left(\frac{4}{ab}\right) \int_0^a \int_0^b \vec{L}_w(x,y) \sin \frac{m\pi}{a} x \sin \frac{n\pi}{b} y dy dx \quad \dots(8)$$

$$\vec{D}_{mn} = A_h \left[\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 \right] + if \quad \dots(9)$$

4. 渦動粘性係数

以上で得られた解の基本的な特徴は前報¹⁾で述べた。本研究では渦動粘性係数の与え方について検討を加える。鉛直渦動粘性係数 A_z について余越ら²⁾は、風速、表面流速およびせん断応力の関係より次の推定式を与えている。

$$A_z = 0.00055 \sqrt{C_f} h U_{10} \quad \dots(10)$$

ここで、 U_{10} は水面上10mの風速(m/s)、 h は水深(m)、 C_f は水面での摩擦係数である。本モデルでは鉛直渦動粘性係数として式(10)を用いた。

次に、水平渦動粘性係数 A_h について検討した。この係数はふつう経験的に定めることが多く、沿岸の現象では $10^4 \sim 10^6 \text{ cm}^2/\text{s}$ 程度、海洋の大循環では $10^7 \sim 10^8 \text{ cm}^2/\text{s}$ 程度の値が使用されている。ここでは、この係数を詳細に検討するためにモデル海(Fig.2を参照)を設定し、 x 方向に一樣で定常な風速(10m/s)の風が吹いて定常状態に達した場合の水平流速の鉛直分布を求め、 A_h の適当な範囲を求めた。その結果、 $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$ の水平スケールのモデルでは 5×10^4 から $5 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$ 程度の値が A_h として適当であると考えられる。なお、水深については25m(Fig.2)と100m(Fig.3)の2ケースについて行なったが、両者で A_h の適用範囲に差はみられなかった。さらに水平スケールを種々変化させてこの係数と水平スケールとの関係について検討した。

5. 実際の風成流との比較

大村湾(平均水深18m)において、風成流の現地観測が行なわれている³⁾。その結果によると、湾の下層部では、風が吹き始めると遅れ時間が約3時間で風の方向に対して時計回りに約240度の流れが起こっている。前項で検討したモデルでこの層の流向をみると、220~260度であり、現地観測結果と解析解がほぼ一致していることがわかる。

参考文献 1) 松本・羽田野・斎藤：閉鎖性水域における定常風成流の解析解について、土木学会第49回年次学術講演会講演概要集第2部(B)，1994。2) 余越・富所：風による諏訪湖の流動特性，土木学会論文集，276，1978。3) 中村・富樫・福本・三厨：大村湾における風成流に関する研究，海岸工学論文集，39，1992。

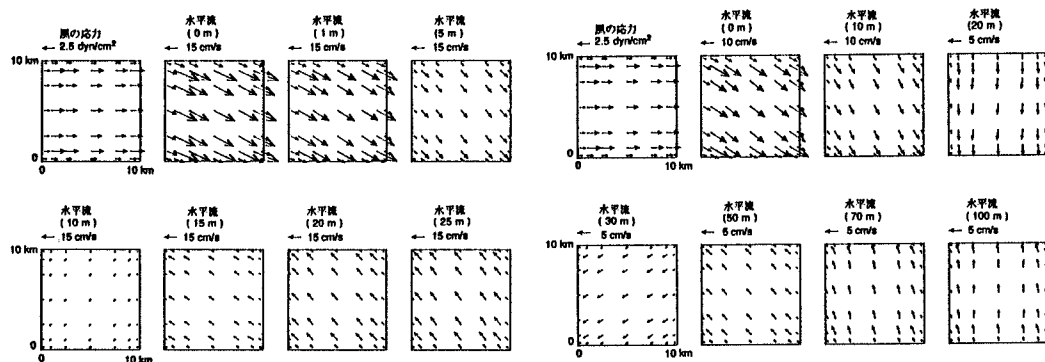


Fig.2 水平流の分布 (25m, $A_h = 10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$)

Fig.3 水平流の分布 (100m, $A_h = 10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$)