

直線海岸付近の吹送流による水位変動についての研究

犬飼直之*・早川典生**・福嶋祐介***・Peter Sheng****

1. はじめに

アメリカ合衆国フロリダ半島西岸(図-1)のような直線海岸付近では、海岸線に平行な風が吹くと水面が上下に変動することが知られている。特に Cedar Key 付近は湿地帯が続く遠浅の停滞性水域であるが、季節風による水位変動で海岸付近の海水交換が行われていると言われており、季節風がこの領域の環境に重要な役割を果しているのではないかと考えられる。本研究は、このように直線海岸付近で生じる風成流の水位変動機構を解明し、将来的に隣接する Tampa 湾などフロリダ西岸に存在する内湾の海水交換機構の解明に資することを目的とする。

2. 本研究の概要

直線海岸と平行に風が吹く時にコリオリ力の作用で海岸の水位変動が最大になるという現象を数値的に把握するために、定常状態における水位変動の式を運動方程式より導出し、その式を用いて現象を確認した。次にこの式をフロリダ半島西岸の実地形にも適用し、Cragg ら(1983)の観測結果と比較・検討をした。最後に、観測風データを用いて、Cedar Key 付近の吹送流 3 次元数値実験をおこない、各月毎の水位変動及び流況を把握した。また、現場を把握する為に現地調査およびアンケート調査を実施した。

3. Cedar Key 付近の状況

(1) 現地の状況

まず現地踏査に行き、現地の状況を把握した。写真-1 は一般的と思われる海岸付近の状況である。湿地帯が多く、陸地との境界線が明確でなく入り組んだ地形となっている。写真-2 は居住地区付近の海岸の状況である。海岸からすぐ横に車道があり、海岸との間には堤防などはない。また砂浜海岸もほとんど見あたらず、汀線付近まで植物が植生をしている。海水は泥水のように濁ってお

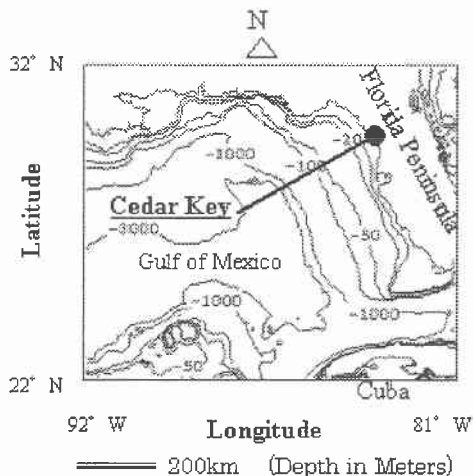


図-1 位置図 (メキシコ湾およびフロリダ半島)

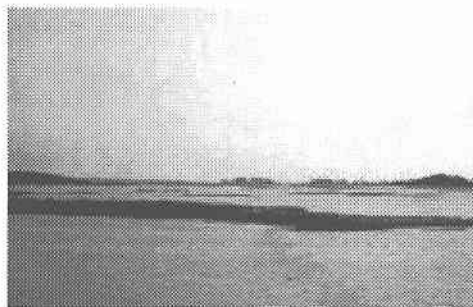


写真-1 一般的な Cedar Key 付近の海岸



写真-2 居住地区前の海岸線の状況

* 正会員 長岡技術科学大学 環境・建設系
** 正会員 Ph.D. 長岡技術科学大学 環境・建設系
*** 正会員 二博 長岡技術科学大学 環境・建設系
**** Ph.D. Professor, Dept. of Civil and Coastal Eng., University of Florida

り、波浪がなく目視でも流れが停滞しているように見える。また水上に建築物も存在する (写真-3)。

(2) 海底地形の横断面

海底地形の状況を調べるために海底地形の横断面図を作成した。地形情報は NGDC (U.S. National Geophysical Data Center) 提供の ETOPO-5 data set (5 分格子) から西経 81 度から 87 度、北緯 24 度から 32 度の領域を切り取り、更に、領域を 30 度右に回転させ、図-2 に示すように海岸線が縦方向になるようにした。図中、線①から④に示す約 50 km 間隔の横断線で横断面を求めた。図-3 に横断面図を示す。図より、Cedar Key 付近(図-2 中の断面線②)では、水深 40 m まではおよそ 1/4,000 という非常に緩やかな勾配が続いていることが分かる。これより、Cedar Key 付近は海岸付近は非常に遠浅であり、かつ海岸付近に湿地帯が多いことから、流れが非常に停滞しやすいのではないかと考えられる。

4. 理論式による水位変動の確認

(1) 基本式の導出

Cedar Key 付近では 100 km 以上にわたり海岸の状況がほぼ同様なので、海岸を直線状と近似をする。本節では、直線状に近似をした海岸の水位変動を理論的に把握する事を試みる。まず、図-4 に示すように、水深が一様な直線海岸付近を考える。図中右側の縦方向が直線状海岸である。図では風が海岸に平行な方向に一様に吹いており、十分に長い時間が経過して水位および流速が定常状態となっているとする。この条件下での、コリオリ項、重力項、摩擦項からなる 2 次元の運動方程式は次式のように書ける。

$$\frac{\partial u}{\partial t} - fv + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - K_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + fu + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - K_z \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} = 0 \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 f はコリオリ力、 K_z は鉛直動粘性係数である。上式を z で積分し h で除して鉛直平均をする。また、水深平均した x 方向の流速 u はゼロであり、 τ_{xb} は無視できると仮定すると、上式は次式のようになる。

$$\frac{\partial \zeta}{\partial x} = \frac{\tau_{xs}}{\rho_w g h} + \frac{f}{g} \bar{v} \dots\dots\dots (3)$$

$$\tau_{ys} - \tau_{yb} = 0 \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 τ_s 、 τ_b はそれぞれ海表面の風応力および海底摩擦力である。

海表面の風応力および海底摩擦力は風速および流速の 2 乗に比例することを考慮すると、表面での風応力 τ_s は式 (5) のように示すことができ、海底摩擦力 τ_b は式 (6)、(7) のように 2 種類の方法で示すことができる。

$$(\tau_{xs}, \tau_{ys}) = \rho_a C_d (W_x |W_x|, W_y |W_y|) \dots\dots\dots (5)$$



写真-3 水上建築物

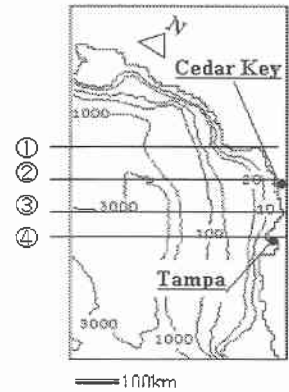


図-2 横断面線位置図 (Cape San Blas~Tampa, 約 500 km 間隔)

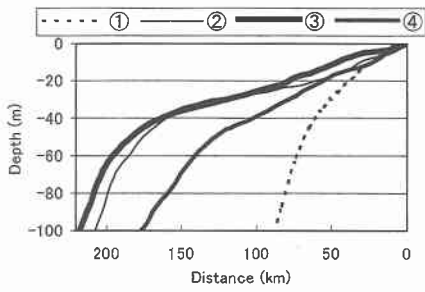


図-3 断面 (海岸線から水深 100 m まで)

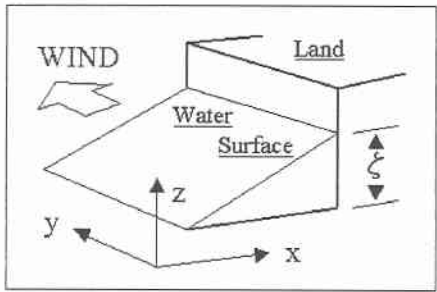


図-4 定常状態における水位変動のイメージ

$$\tau_{yb} = \rho_w C_f \bar{v} |\bar{v}| \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\left. \begin{aligned} \tau_{yb} &= \rho_w \frac{g}{C^2} \bar{v} |\bar{v}| \\ C &= \frac{1}{n} h^{\frac{1}{6}} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 ρ_a は空気、 ρ_w は水の密度、 C_d は風の海面摩擦係数、 C_f は海底摩擦係数、 C は Chezy 係数、 n はマンニングの粗度係数である。これらの式を (4) 式にそれぞれ代入すると、水深平均した流速 $\bar{v}$ は (8)、(9) 式のように示すことができる。

$$\bar{v} = \pm \sqrt{\frac{|\tau_{ys}|}{\rho_w C_f}} = \sqrt{\frac{\rho_a C_d}{\rho_w C_f}} W_y \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\bar{v} = \pm C \sqrt{\frac{|\tau_{ys}|}{\rho_w g}} = C \sqrt{\frac{\rho_a C_d}{\rho_w g}} W_y \quad \dots\dots\dots (9)$$

これらの式および (5) 式を (3) 式にそれぞれ代入し、整理すると、最終的に x 方向の水位勾配を表す式は次式のようにそれぞれ表すことができる。

$$\frac{\partial \zeta}{\partial x} = \frac{\rho_a C_d}{\rho_w g h} |W_x| W_x + \frac{f}{g} \sqrt{\frac{\rho_a C_d}{\rho_w C_f}} W_y \quad \dots\dots\dots (10)$$

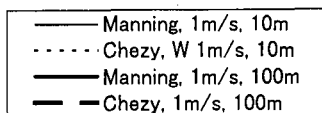


図-5 水深の変化による水位勾配（絶対値）の変化

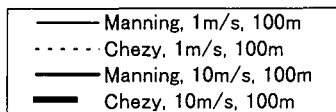


図-6 風速の変化による水位勾配（絶対値）の変化

$$\frac{\partial \zeta}{\partial x} = \frac{\rho_a C_d}{\rho_w g h} |W_x| W_x + \frac{fC}{g^{3/2}} \sqrt{\frac{\rho_a C_d}{\rho_w}} W_y \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここで便宜上、(6) 式より導出した (10) 式を Chezy タイプ、(7) 式より導出した (11) 式を Manning タイプと呼ぶことにする。これらの式で風応力 W_x 、 W_y を入力すれば、定常状態時の x 方向の水位勾配を求めることができる。

式によると、海岸線に鉛直な風向 ($W_y=0$) では、風が吹き寄せる方向に水面勾配が生じ、海岸線に平行な風向 ($W_x=0$) の場合には、風向きに対して右向きへ寄せられる水面勾配（傾斜流）が生じることを示す。

(2) 単純地形での計算結果

式 (10)、(11) で得られた式を使用して風向を 16 方位に変化させてそれぞれの風向時の水位勾配を計算した。最初は風速固定で水深を変化させて計算をおこない、次に水深固定で風向を変化させて計算をおこなった。また、式中、 $C_d=0.015$ 、 $C_f=0.0026$ 、 $n=0.026$ とした。

図-5、6、7 に計算結果を示す。図中、例えば S は北向きの風であり、S と N が海岸に対して平行風である。これらの結果より、水深がある程度深い海域で風速が小さくなると水位勾配は海岸に平行な風に強く影響を受けることがわかる。

(3) 実地形への適用

導出した式を利用して実地形での水位変動の把握を試みた。Cragg らが Cedar Key での観測風データを元に毎

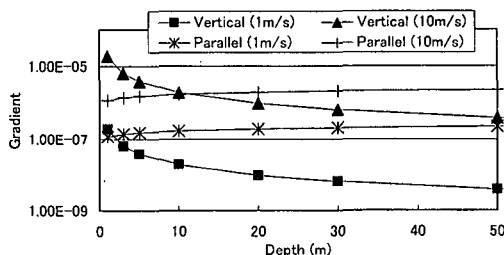


図-7 平行風および直角風における水深と水位勾配の関係 (Manning 方式)
(Vertical は海岸に直角風、風速は 1, 10 m/s と変化)

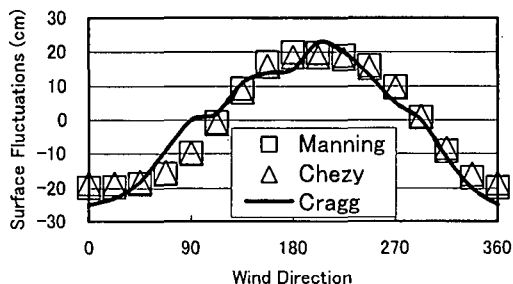


図-8 Cedar Key の水位変動
(数値計算と観測結果の比較、単位: cm)

秒4.5メートルの風速について全方位の風向に対する海面変動量をフーリエ解析で推算しているの、これと本研究の結果を比較した。まず Cedar Key の付近の海底地形は図-2の②の横断面に示す地形であると仮定する。ある一様風について各点で水位勾配を計算し、それに格子間隔を乗ずれば水位変化量が出るので、それを沖側から岸方向へ加算すれば水位変動量の総和を求めることができる。この手法から得られた結果と Cragg らの結果と比較をした。図-8に結果を示す。地形精度等が原因してか最大値・最小値などに差があるが、導出式から得られた結果と Cragg らの結果は非常によく一致しており、実地形でも平行風のときに最大水位となることが分かる。以上より、直線海岸付近では、海岸と平行に風が吹いた時に水位変動が最大になることを導出式より確認することができた。また、本式は実地形にも適用が可能であることが確認できた。

5. 数値シミュレーション

(1) 基本式および数値モデル

これまでに実地形でも一様な風についての水位変動は把握できることが確認できたので、次に、一様でない(領域内全体で風応力分布が異なる)実際の観測風で数値実験をおこない、海岸付近の水位変動を求めた。領域は図-9に示すように西経81度から87度、北緯24度から31度の領域とした。この地形データも ETOPO-5 data set

$$\frac{1}{a \cos \phi} \frac{\partial u}{\partial \lambda} + \frac{1}{a \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} (v \cos \phi) + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad \dots (12)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u}{\partial t} + L(u) - \frac{uv \tan \phi}{a} - f_v \\ &= -\frac{1}{\rho_w} \frac{1}{a \cos \phi} \frac{\partial P}{\partial \lambda} + A_h \left\{ \nabla^2 u + \frac{(1 - \tan^2 \phi) u}{a^2} \right. \\ & \quad \left. - \frac{2 \sin \phi}{a^2 \cos^2 \phi} \frac{\partial v}{\partial \lambda} \right\} + A_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad \dots (13) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial v}{\partial t} + L(v) - \frac{u^2 \tan \phi}{a} + f_u \\ &= -\frac{1}{\rho_w} \frac{1}{a} \frac{\partial P}{\partial \phi} + A_h \left\{ \nabla^2 v + \frac{(1 - \tan^2 \phi) v}{a^2} \right. \\ & \quad \left. - \frac{2 \sin \phi}{a^2 \cos^2 \phi} \frac{\partial u}{\partial \lambda} \right\} + A_v \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad \dots (14) \end{aligned}$$

$$-\rho_w g - \frac{\partial P}{\partial z} = 0 \quad \dots (15)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\frac{1}{a \cos \phi} u_s \frac{\partial \zeta}{\partial \lambda} + \frac{1}{a} v_s \frac{\partial \zeta}{\partial \phi} + w_s \quad \dots (16)$$

$$\begin{aligned} L(a) &= \frac{u}{a \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \lambda} (a) + \frac{v}{a \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} (\cos \phi a) \\ & \quad + w \frac{\partial}{\partial z} (a) \quad \dots (17) \end{aligned}$$

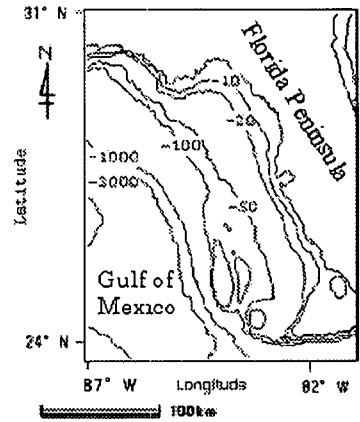


図-9 計算領域および地形データ

$$\nabla^2 a = \frac{1}{a^2 \cos^2 \phi} \frac{\partial^2 a}{\partial \lambda^2} + \frac{1}{a^2 \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\cos \phi \frac{\partial a}{\partial \phi} \right) \quad \dots (18)$$

(λ : 緯度, ϕ : 経度, a : 地球半径, $u(\lambda, \phi, z, t) \cdot v(\lambda, \phi, z, t) \cdot w(\lambda, \phi, z, t)$: 流速 (m/s) 成分, t : 時間 (s), $\zeta(\lambda, \phi, t)$: 水表面高さ (m), $f(\phi)$: コリオリ・パラメーター, g 重力加速度 (m/s²), $P(\lambda, \phi, z, t)$: 圧力 (N/m²), $A_h \cdot A_v$: 水平・鉛直渦動粘性拡散係数 (m²/s)) を利用した。ところで、この領域では緯度差が7度あり、北緯31度では24度の格子長よりも7%短くなる。よって本研究では、式(12)から(18)で示される静水圧近似、ブシネスク近似、浅海長波近似の球面座標系で作成された3次元の運動方程式および連続式を全陽解的に計算を進めるレベルモデルを用いて吹送流の数値計算をおこなった。

(2) 観測風

観測風は過去106年間にわたり観測された情報を、毎月毎に平均し、全領域の各格子全てにそれぞれ風向・風速が補間されたデータである。なお、このデータはNOAAより購入した。全季においてCedar Key付近では風速は毎秒4.5メートル程度である。

(3) 数値実験および結果

計算では、鉛直方向に層数は最大で10層に分割し、2方向の開境界では水位および流速勾配をゼロとして、流れが定常になるまでおよそ10日間計算をおこなった。図-10に1月および7月の計算開始後10日のときのCedar Key付近の水位分布を示す。導出式(10), (11)より予測をすると、1月の風向きと海岸線北向きを基準にした角度は右向きへ約90度であるので、約10cm低下し、7月の風向きは約180度であるので、約20cm上昇するはずである。数値実験の結果を見ると、1月では水位は約10cm低下し、7月では約20cm上昇した。これより風の分布が一様でない実際の風を用いても水位の

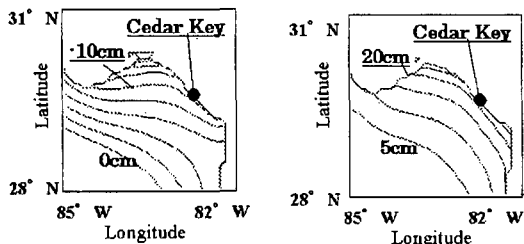


図-10 水位分布 (Cedar Key 付近, 計算 10 日後)
(左: 1 月, 右: 7 月)

変動はある程度予測が可能であることがわかった。

6. 結 論

本研究では、Cedar Key 沖付近の季節風による水位変動を数値計算により確認をした。

(1) 導出式: 直線状海岸付近では、風速が小さい又は水深が大きくなると、平行風の影響が強くなる。Chezy タイプおよび Manning タイプの両方の方式でも結果はほぼ同様になる。一様風による定常状態下であれば、本式は実地形でも適用可能である。

(2) 現地踏査: 湿地帯が多く、また 1/4,000 の緩勾

配のため流れが停滞しており、水質が悪い。Cedar Key 周辺の流れは波浪よりも吹送流の影響を受ける。

(3) 数値計算: Cedar Key の水位は夏季は上昇傾向にあり、冬季は低下傾向にある。この水位変動量は導出式からもある程度予測が可能である。

謝辞: 本研究は犬飼がフロリダ大学に在外研究で赴任中に実施した。滞在中には、土木海岸工学科の Peter Sheng 教授より、いろいろとご助言を受け賜った。ここに謝辞の意を表す。

参 考 文 献

- 仲敷憲和(1994): 自由海表面を考慮した海洋循環モデルの開発, 電中研報告, U94016, 49 p.
- Cragg J., G. Mitchum and W. Sturges (1983): Wind-Induced Sea-Surface Slopes on the West Florida Shelf, *Journal of Physical Oceanography*, Vol. 13, pp. 2201-2212.
- Hellerman S. and M. Rosenstein (1983): Normal Monthly Wind Stress Over the World Ocean with Error Estimates, *Journal of Physical Oceanography*, Vol. 13, pp. 1093-1104.
- Hsueh Y., G. O. Marmorino and L. L. Vansant (1982): Numerical Model Studies of the winter-Storm Response of the West Florida Shelf, *Journal of Physical Oceanography*, Vol. 12, pp. 1037-1050.