

直線状海岸付近における吹送流の流況変動に関する研究

水工学研究室 工藤 義幸

指導教官 細山田 得三

1. はじめに

アメリカ合衆国フロリダ半島西岸は、タンパ湾を挟んで直線状の海岸が広く南北に伸びている。この海岸は北アメリカでも有数の広大な大陸棚を有し、その規模は沖方向に 200km、沿岸方向に 700km にも及ぶ。南方に Florida Keys、北方においては大陸がその広い大陸棚を挟み込むようにして迫り出し、一帯は閉鎖域となっている一方で、この海域では季節風が卓越しており、季節によってはこの季節風に駆動されて沿岸方向の流れとともに岸沖方向には循環流が生成され、海岸付近の海水交換が行われているといわれている。一般に大洋での主要な生物学的生産活動は大陸棚上で行われることを考慮すると、この海域での風応力にもなう流速や混合といった流れの特性を定量的に把握することは、海洋環境上極めて意義のあることと考えられる。したがって本研究では、フロリダ大陸棚上での吹送流による流速の鉛直分布を定量的に示したうえで、季節風による基礎的循環特性を把握することを目的とする。

2. 基礎方程式

吹送流の鉛直構造を解くうえで、基礎方程式は 2 次元・線形・定常・非成層を仮定した次式を用いた。

$$\begin{aligned}
 -fv &= -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\
 fu &= -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial v}{\partial z} \right)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

ここに f はコリオリ係数 ($1/s$)、 K_z は鉛直渦動粘性係数 (m^2/s) である。境界条件は、海底ですべりなしの条件とし、海面での接線応力は風応力を与えるものとする。

3. 吹送流モデル比較

本研究では、鉛直渦動粘性係数が一定の条件下での吹送流モデル、いわゆる Ekman の吹送流モデルと、Madsen によって提案された双一次式で表される鉛直渦動粘性係数を用いた吹送流モデル(以下双一次モデル)の 2 種(図 1)について、はじめに、鉛直構造の比較を行い相違を検討した。なお、両モデルともに地球回転効果は北半球を想定したものとする。また地形条件は

直線海岸を想定したものとして、 y 軸を岸を右に見て沿岸方向にとり、 x 軸はその右方とする。岸は延々と続くものとし、沿岸方向の海面勾配は発生しないものとする。その結果、2次元モデルの連続性から、

$$\frac{\partial \zeta}{\partial y} = 0 \rightarrow U = 0
 \tag{2}$$

となり、この条件を考慮すると (1)からは、流速分布とともに岸沖方向の海面勾配が算出される。

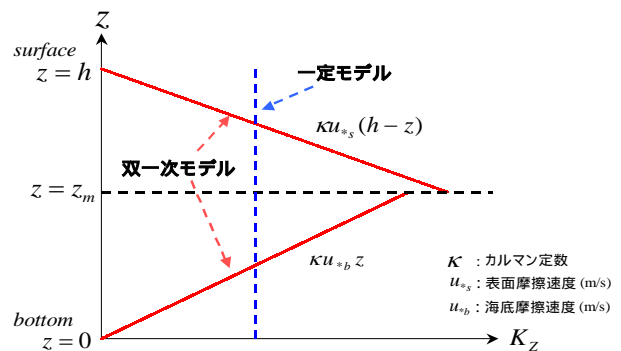


図 1. 鉛直渦動粘性係数モデル 2 種

図 2 に一定、双一次モデルの比較の一例を示す。

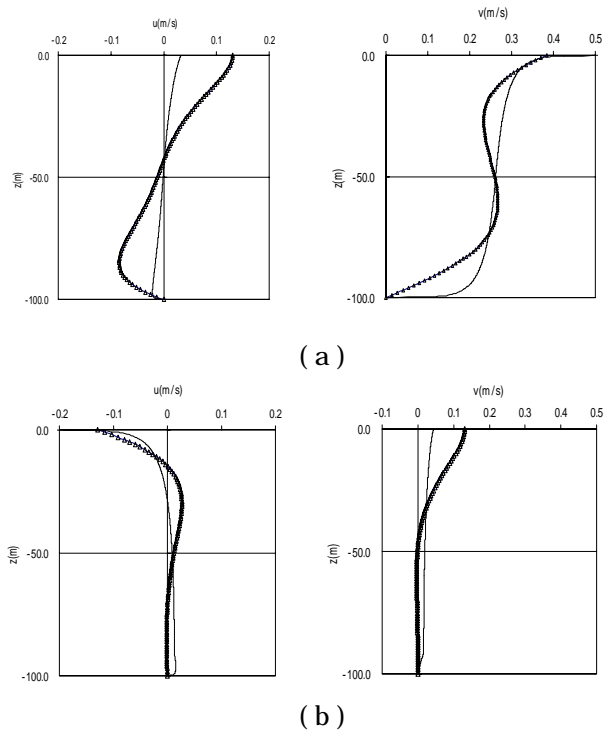


図 2. モデルの相違による鉛直分布の比較

ここで(a)は岸を右手に見て平行に 10m/s の風速を与えた場合、(b)は岸を背にして岸と垂直方向に 10m/s の風速を与えた場合である。また水深はどちらも 100m とした。図 2 より、分布の傾向としては両モデルとも同様の流速分布結果を示しており、2 者の相対的な比較のみにより、どちらが特に良いと判断することはできない。しかし流速分布曲線に関する限り、両者の間で特徴的な違いを見せている。双一次モデルの流速分布では、海底付近ですべり要素の強い、対数的な変化をするのに対し、一定モデルでは比較的曲率の小さい分布曲線を示している。この結果から、海底境界層付近の流れの一般的知見に照らして、双一次モデルの方がより実現象に近いと考えられる。

4. 双一次モデルの検証

双一次モデルの実地形適用の有用性を判断するため、以下の2項目について検証を行った。

4.1 犬飼ら(2002)の算出した海面勾配との比較

犬飼ら¹⁾は、直線海岸付近における水深平均の吹送流モデルにより、精度よく海面勾配を求められることを確認している。そこでまず、双一次モデルにより得られた海面勾配と、犬飼のモデルの計算結果の比較を行った。図 3 はその一例であり、入力値として水深 100m、風速 10m/s を与え、風向を 16 方向に変化させたものである。両者の間で非常によく一致しているのが見られる。

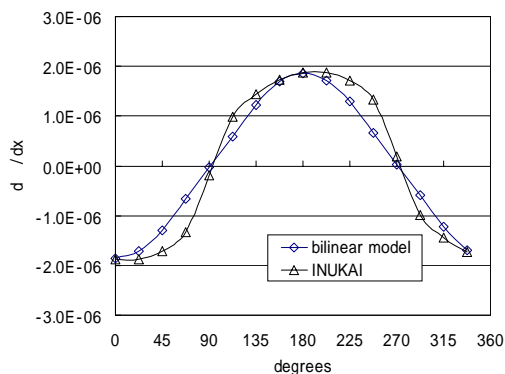


図 3. 海面勾配の比較

4.2 観測データとの比較

次に流速の鉛直分布について、双一次モデルと北カリフォルニア大陸棚での観測データとの比較を行った。図 4 に比較結果の一例を示す。観測データは潮汐成分が予め除去されているもの³⁾を用いた。

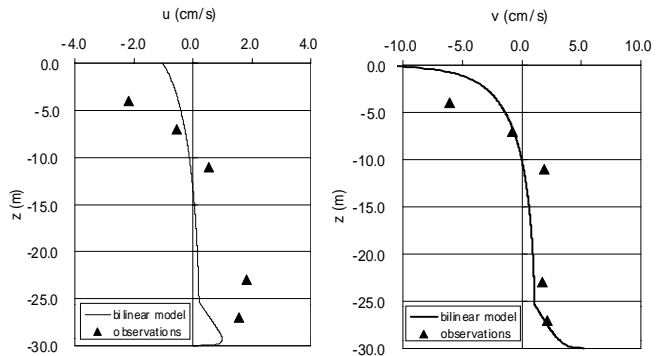


図 4. 双一次モデルと観測値との比較

図 4 より、モデルと観測値との間で分布の傾向について一致しているのがわかる。したがって、この結果と、4.1 での海面勾配の比較結果から、双一次モデルは実海域への適用が可能であることが示された。

5. フロリダ西海岸の吹送流特性

5.1 Cedar Key 付近での吹送流の流況変動

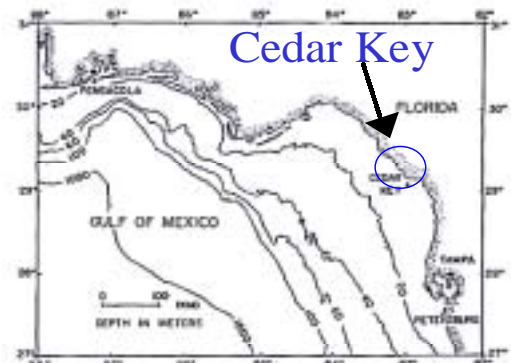


図 5. Cedar Key 位置図

フロリダ半島西岸において、北方と南方で大陸が迫り出しているのに加え湿地帯が広がっているために特に停滞域の様相を強めている Cedar Key 周辺の海域について、吹送流の鉛直構造を求めた。計算に際し、海底条件は図 6 に示す ~ の 3 断面 (水深 10m, 20m, 30m 地点) にたいして双一次モデルを適用した。また、風速はこの領域の平均風速とされる 4.5m/s をモデル風速として与え、風向を 16 方位変化させた。

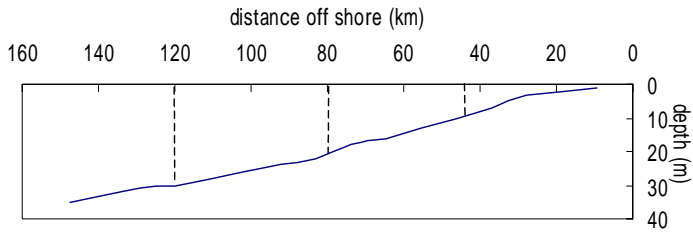


図 6. Cedar Key 海底断面

この条件で流速の鉛直分布を求めたのち、風向の差異による流況の変化をみるために、

岸沖方向上層輸送量

沿岸方向輸送量

を流速の鉛直分布より求めた。岸沖方向の輸送量に関しては、式(2)の条件より全層にわたる輸送量はすべての場合においてゼロになってしまうため、流向が転向する水深までのそれとした。この計算結果を図7に示す。図中、岸を左手に見て海岸と平行方向に吹送する方向を 0° とし、時計回りを正とする。例えば、 90° は岸から沖へ吹送する風向であり、 180° は岸を右手に見て海岸と平行に吹送する風向、 270° は岸から沖へ吹送する風向である。

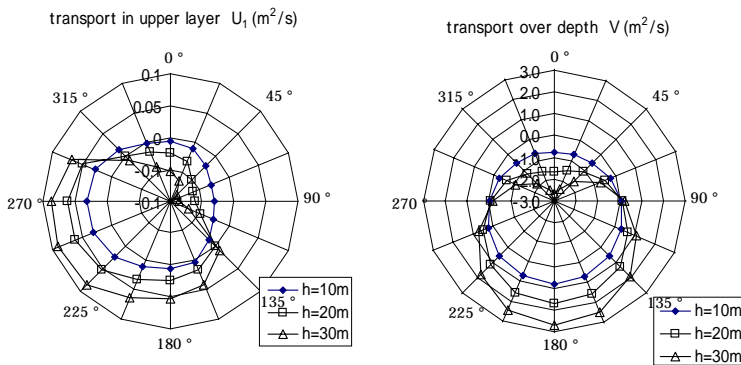


図 7. 風向別の輸送量変化

図7より、岸沖方向の輸送の規模は沿岸方向の輸送量に対して1/30程度と非常に弱いことがわかる。また風が岸と平行に吹く場合には、沿岸方向輸送が最大となることを示している。これは、岸と平行に風が吹く場合には吹送流にともなう体積輸送(エクマン輸送)が風向と直角方向に生起し、海面傾斜が形成されることで、岸と平行方向への傾斜流が発生するためである。ここには示さないが、犬飼らの結果より岸と平行方向に風が吹く場合に海面勾配が最大になるという結果も、エクマン輸送が岸

でのせき止められることに起因すると考えられる。

一方、岸沖方向上層輸送量については、概して風向が $135^\circ \sim 315^\circ$ のときに正となっており、上層で岸方向、下層で沖方向の流れが起きていることがわかる。したがってこの角度で風が吹き付ける場合には、海岸付近で沈降流をとまなう岸沖方向循環流が形成されることが考えられる。また反対に、風向が $315^\circ \sim 135^\circ$ で吹き付ける場合には上層輸送量は負となり、海岸付近で沈降流をとまなう岸沖循環流が形成されると考えられる。

5.2 季節風にとまなう吹送流

図6のCedar Key海底地形の3断面について、季節風影響下の吹送流の鉛直構造を調べるために、季節風による風応力データを与えた。1月、7月の風応力データとして以下の月平均データを用いて、双一次モデルにより吹送流流速分布の計算を行った。

	1月	7月
$\tau_x^x (N/m^2)$	-0.01657	0
$\tau_x^y (N/m^2)$	-0.01657	0.01797

これらは風速に換算すると1月、7月ともおよそ4m/s程度の海上風である。また風向は、図7に従うと、1月には岸に対して 45° 、7月には 180° である。ここで3断面における岸沖方向、沿岸方向流速の鉛直分布を図8,9に示す。これらより、夏期と冬期では、岸沖方向流、沿岸方向流ともに正反対の流れを呈していることが判然と示された。すなわち、岸沖方向循環流を考えた場合、冬期には上層で沖方向の流れが発達するため、海岸付近では湧昇流が生成されると考えられる。一方で夏期には逆の構造となる。しかし流速の絶対値をみると、表面流速でこそやや異なるものの、夏期、冬期ともにほぼ等しく、岸沖方向で1cm/s程度、沿岸方向の流れについては水深平均で7cm/s程度の流速であることが示された。

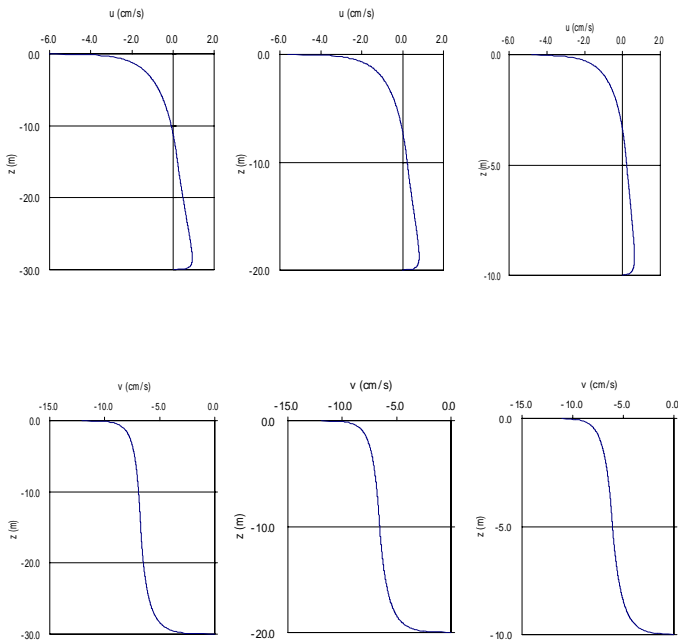


図 8. 1月平均風応力による各断面での流速の鉛直分布

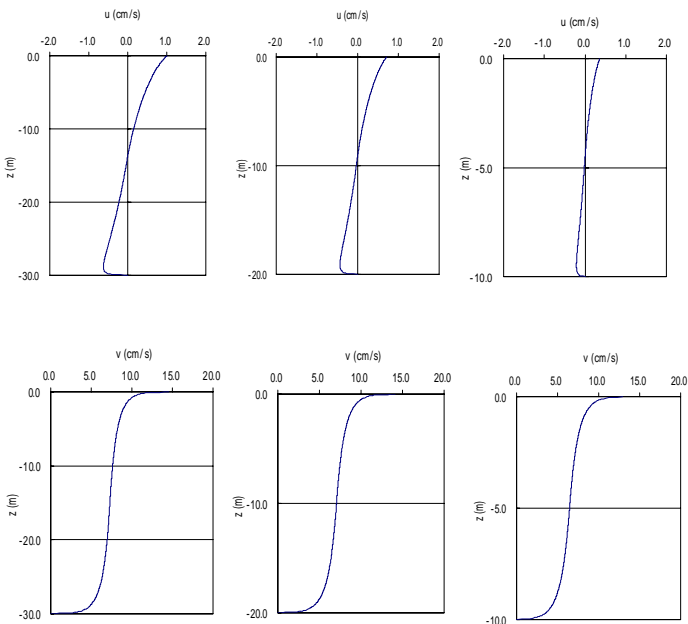


図 9 7月平均風応力による各断面での流速の鉛直分布

7. まとめ

本研究には、双一次モデルの実地形適用の有用性を確認したうえで、フロリダ西海岸 Cedar Key 海域へ適用し、平均風速および季節風影響下の吹送流の流速鉛直分布を求めた。その結果、夏期には沈降流をとまなう岸沖循環流、冬期には湧昇流をとまなう岸沖循環流が生成され、季節風によって鉛直循環流の形態が異なることが示された。

参考文献

- 1) 犬飼直之他(2002):直線海岸付近の吹送流による水位変動についての研究,海岸工学論文集,第 48 巻, pp391-395.
- 2) 宇野木早苗(1993):沿岸の海洋物理学,東海大学出版会,772pp.
- 3) Neumann,G,and W.J.Pierson(1966):Principles of Physical Oceanography, Prentice-Hall, 545 pp.
- 4) Lentz,S.J.(1994): Current dynamics over the Northern California inner shelf, J. Phys. Oceanogr.,24(12),pp2461-2478.
- 5) Madsen,O.S.(1977): A realistic model of the wind-induced Ekman boundary layer, J.Phys. Oceanogr., 7(2), pp248-255.
- 6) Jenter,H.L.,and O.S.Madsen(1989): Bottom stress in wind driven depth-averaged coastal flow,J.Phys.Oceanogr.,19(7),pp962-974.
- 7) Csanady,G.T.(1982):Circulation in the Coastal Ocean,D.Reidel.Pub.,279pp.