

潮汐に伴う岸沖方向の流れと構造物設置の影響

羽田野袈裟義 (社会建設工学専攻) ・坪郷浩一

Cross-Shore Current Due to Tides and the Effects of the Construction of a Structure

Kesayoshi HADANO(Civil & Environmental Engineering) and Koichi TSUBOGO

The flow near the shoreline is deeply related to the growth and survival of living things of a tidal flat. Therefore, prediction of the coastal flow due to tides is important. In this paper, the cross-shore current due to the tides is studied combining the continuity equation for one dimensional flow and the water level change. The equations for line flux and the depth averaged velocity were obtained by integrating the continuity equation from the instantaneous shoreline to the arbitrary position beyond the shoreline. Samples of calculation indicate that the stagnation of the flow occurs in front of the vertical structure constructed on the tide flat.

Key Words: tide change, cross-shore current, line flux, one dimensional model, effect of construction of the structure

1. はじめに

潮位変動にともなう水際線付近の流れは、干潟の生物の生育・生存にとって重要な問題である。したがって、潮位変動にともなう水際線付近の流れや沿岸流を予測することは重要である。これまで活発な研究によりいくつかの重要な知見が得られている。

たとえば、Friedrichs ら^{1), 2)}は1次元問題として岸沖方向の流れを検討している。そこでは、潮汐により水面が水平を保って昇降するとして、岸沖方向の流れの大きさを底面勾配の逆数と水位の昇降速度との積で表現している。この方法は、明らかに水塊の連続条件を前提としているが、単純なケースの取り扱いに限定されるようであり、取り扱いに改善の余地があるように思われる。

また、2次元問題として干潟部分の流れを取り扱った研究として、中村ら³⁾、西田ら⁴⁾の研究が挙げられる。中村らは重み付き残差法を用いて解析し、西田らは矩形メッシュを基本として解析しているが、陸域部と海域部の判別方法は共通で、平均海面を基準面とした潮位と基準面から海底までの水深の和と任意の基準値との大小関係で陸域部と海域部を判別している。また、干出時のスカラー量を保存しておくことで、その保存性を確保し、連続的な水際線の移動を可能にしていることも共通している。しかしながら、これらは流れの再現にとどまり、構造物の築造の影響については検討していない。

このほか、湾を締め切る堤防が潮汐に与える影響に関して、締切りの開口幅が問題視され、その開口部が潮汐

などに及ぼす効果が実験や数値解析などで検討されている^{5), 6)}。開口幅に着目した研究が多い中で、宇野木^{7), 8)}は締切り堤防の設置が潮汐現象に及ぼす影響を、簡易な理論モデルを用いて指摘している。これらは、有明海の潮受け堤建設の影響を潮汐の変化として着目しているが、この問題は潮汐自体よりも潮汐による流れの変化として議論される必要がある。

著者ら⁹⁾は、Friedrichs らと類似の方法を用いて潮汐による岸沖方向の流れを取り扱っている。ただ、Friedrichs らの方法とは異なり、1次元流の連続の式を瞬時の渚線位置から海域の任意点まで積分することにより、岸沖方向の流れを評価している。また、簡単な計算により海域に鉛直構造物を設置することの効果を見積もっている。

本論文は、著者らの前掲の研究に限られた範囲の研究者にしか知られていないことを考慮し、また少し内容を追加して発表するものである。

2. 関係諸量の評価式

図-1に示すように、満潮時の水際線位置を基に、これから沖向きに x 軸をとり、潮汐の水位変動を振幅 A 、周期 T の正弦波で仮定する。平均海面の水位を $z = z_{sm}$ とすると、任意時刻 t における水位 $z_s(t)$ は次式で与えられる。

$$z_s(t) = z_{sm} + A \sin \frac{2\pi}{T} t \quad (1)$$

なお、満潮時の水位を $z = z_{b0}$ とおくと、 $z_{sm} = z_{b0} - A$ の

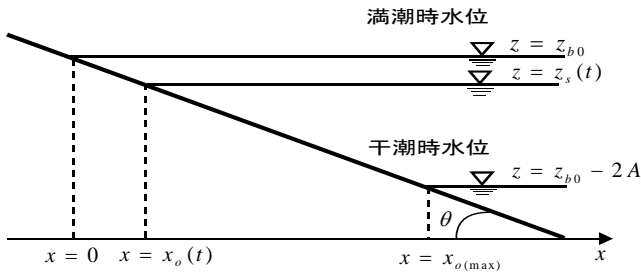


Figure 1 Location of the shoreline

関係がある。また任意の位置 x の地盤高 z_b は次式で与えられる。

$$z_b = z_{b0} - x \tan \theta \tag{2}$$

よって、任意時刻 t の水深 h は次のように表される。

$$h = z_s(t) - z_b \tag{3}$$

$$= \left(z_{sm} + A \sin \frac{2\pi}{T} t \right) - (z_{b0} - x \tan \theta)$$

$$= -(z_{b0} - z_{sm}) + A \sin \frac{2\pi}{T} t + x \tan \theta$$

$$h = -A + A \sin \frac{2\pi}{T} t + x \tan \theta \tag{4}$$

ただし、適用範囲は次のようである。

$$x \geq \frac{A}{\tan \theta} \left(1 - \sin \frac{2\pi}{T} t \right)$$

2.1 線流量の表現式

次に連続式を用いて線流量の表現を求める。 x 方向の線流量を q とすると、1次元流の連続の式は次式で与えられる。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0 \tag{5}$$

任意の時刻 t において、水際線位置 $x_o(t)$ からそれより沖の任意点 x まで積分すると、線流量の式として次式を得る。

$$q = - \int_{x_o}^x \frac{\partial h}{\partial t} dx \tag{6}$$

なお、上式では水際線位置 $x_o(t)$ における線流量がゼロであることを考慮している。

式(6)の $\partial h / \partial t$ は式(4)から次式で与えられる。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{2\pi}{T} A \cos \frac{2\pi}{T} t$$

したがって、式(6)は次のようになる。

$$q = - \int_{x_o}^x \frac{2\pi}{T} A \cos \frac{2\pi}{T} t \cdot dx$$

結局 q は次式となる。

$$q = - \frac{2\pi}{T} A \cos \frac{2\pi}{T} t \cdot (x - x_o) \tag{7}$$

これが任意時刻 t における線流量 q の x 方向の分布を

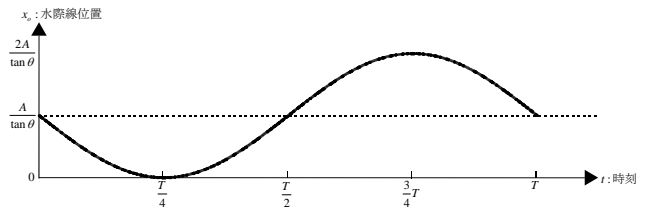


Figure 2 Temporal variation of the location of shoreline

示す式である。

2.2 水際線位置 x_o の決定

ここで、潮汐のため水面が水平に昇降するものとして、任意時刻 t における水際線位置 x_o の表現を求め。まず、時刻 t における水位 $z_s(t)$ は、式(1)と(2)より次のように書かれる。

$$z_s(t) = z_{sm} + A \sin \frac{2\pi}{T} t = z_{b0} - x_o \tan \theta$$

したがって、水際線位置は次式のようになる。

$$x_o = \frac{1}{\tan \theta} \left(z_{b0} - z_{sm} - A \sin \frac{2\pi}{T} t \right) = \frac{A}{\tan \theta} \left(1 - \sin \frac{2\pi}{T} t \right) \tag{8}$$

これが時刻 t における水際線位置 x_o の式である。水際線位置の時刻変化を模式的に示すと、図-2のようである。当然であるが、水際線位置 x_o の最大値は干潮時水際線位置、最小値は満潮時水際線位置である。

式(7)に水際線位置 x_o に式(8)を代入すると次式を得る。

$$q = - \frac{2\pi}{T} A \cos \frac{2\pi}{T} t \cdot \left[x - \frac{A}{\tan \theta} \left(1 - \sin \frac{2\pi}{T} t \right) \right] \tag{9}$$

これが、任意点 x 、任意時刻 t での線流量 q の式であり、後述の計算結果はこの式の結果である。ただし、適用範囲は $x \geq x_o$ である。

2.3 水深平均流速 u の決定

任意の位置、時刻における水深平均流速 u は、線流量を q 、水深 h を用いて次式で表わされる。

$$u = \frac{q}{h} = \frac{- \frac{2\pi}{T} A \cos \frac{2\pi}{T} t \cdot \left[x - \frac{A}{\tan \theta} \left(1 - \sin \frac{2\pi}{T} t \right) \right]}{\tan \theta \left[x - \frac{A}{\tan \theta} \left(1 - \sin \frac{2\pi}{T} t \right) \right]} = - \frac{2\pi}{T} \frac{A}{\tan \theta} \cos \frac{2\pi}{T} t \tag{10}$$

この式は、 u が x によらないことを示す。すなわち、水深平均流速はどの位置でも同じ値を取りながら時間的に変動することを示している。

3. 構造物設置の効果

次に、構造物設置の効果を検討する。Figure 3 のように、 $x = x_D$ の位置に略鉛直な連続した構造物を設置した場合を考える。構造物は、満潮時の水深が D の位置に設置するものとする。この時、 x_D は次式で与えられる。

$$x_D = \frac{D}{\tan \theta} \quad (11)$$

前述のように、構造物がない場合、水際位置 x_o は、式(8)で与えられる。すなわち、

$$x_o = \frac{A}{\tan \theta} \left(1 - \sin \frac{2\pi}{T} t \right) \quad (8)$$

一方、構造物を設置した場合には、水際は構造物より後方に及ばないから、水際が構造物の前方にあるとき以外は、構造物の設置位置を新たな水際となる。このように式(8)の x_o が $x_D \geq x_o$ のときは、構造物設置 x_D を水際線位置 x_o として考える。

以上のことを考慮すると、水際線位置 x_o の式は次のように整理される。

$$x_o = \begin{cases} x_D & (x_o \leq x_D) \\ x_o & (x_o > x_D) \end{cases} \quad (12)$$

次に、流量の評価式の x_o に式(12)を用いると次のようになる。

$$q = \begin{cases} 0 & (x_o \leq x_D) \\ -\frac{2\pi}{T} A \cos \frac{2\pi}{T} t \cdot (x - x_o) & (x_o > x_D) \end{cases} \quad (13)$$

なお、時刻 t における水際線位置 x_o は次式にしたがう。

$$x_o = \frac{A}{\tan \theta} \left(1 - \sin \frac{2\pi}{T} t \right) \quad (x \geq x_o)$$

同じようにして、水深の評価式は次のようになる。

$$h = \begin{cases} - & (x_o \leq x_D) \\ x \tan \theta - A \left(1 - \sin \frac{2\pi}{T} t \right) & (x_o > x_D, \quad x \geq x_o) \end{cases} \quad (14)$$

4. モデル計算

本モデルで予測される潮位変動による岸沖方向の流れと、構造物設置による流れの変化の概要をみるため、簡単なモデル計算の結果を示す。モデル計算は、底面勾配 $I = 1/800$ 、潮位振幅 $A = 1\text{m}$ 、潮汐の周期 $T = 12$ 時間として行った。

図-4に潮位（平均水面を基準）と水深平均流速の時系変化を示す。流速の正は沖向き流れを示す。図-5(a)には、構造物がない場合、直感的に予想される岸沖方向の流れが示されている。

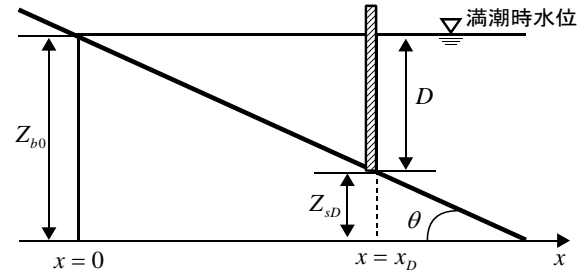


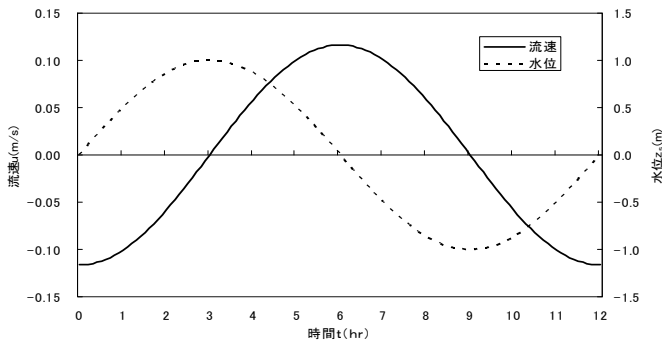
Figure 3 Location of the dyke and the sea bottom height

すなわち、満潮時と干潮時には流速がゼロで、上げ潮時には流速が負（岸向き）で下げ潮時には流速が正（沖向き）となり、水位が平均水面となる時刻では流速の絶対値が最大となる。図-4(b)では、上げ潮開始の1時間～5時間後の4時間で流速がゼロとなっており、構造物設置の影響が出ていることを示している。図-4(c)では、さらに構造物設置の影響が著しく、上げ潮開始の7時間～11時間後の間を除いた8時間で流速がゼロとなっている。

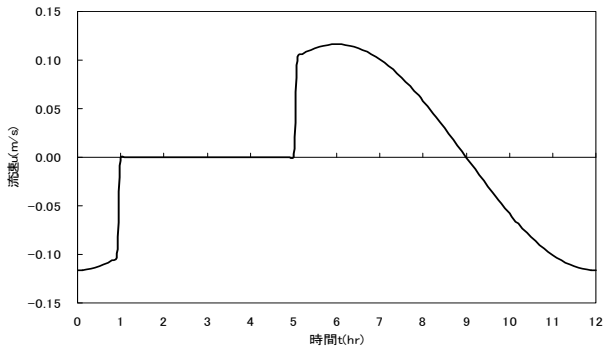
図-5は同じケースに対して線流量の時系列を示す。なお、式(9)に示したように、線流量は岸沖方向の距離 x にも依存するので、図では干潮時水際線位置($x_o=1600\text{m}$)、干潮時水際位置の沖800mの位置($x=2400\text{m}$)、同じく干潮時水際位置の沖1600mの位置($x=3600\text{m}$)における結果を示している。図-4の結果と同様、図-5(b)では上げ潮開始の1時間～5時間後の4時間の間に流れが止まり、図-5(c)では上げ潮開始の7時間～11時間後の間を除いた8時間で流れが止まっている。満潮時の水際位置から岸沖方向にとった距離 x による線流量の違いは、式(9)を反映して沖側の x の大きい部分で線流量の絶対値が大きいことが示されている。

5. まとめ

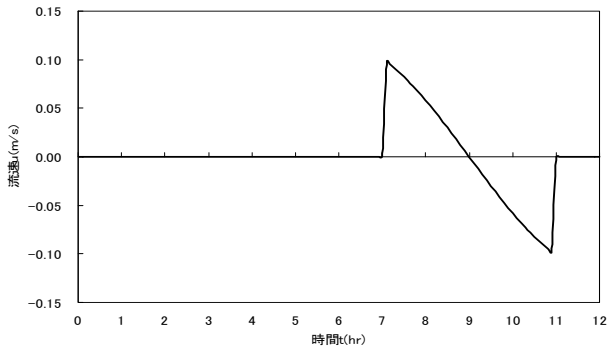
以上、潮汐にともなう岸沖方向の流れを1次元流の連続式に基づきモデル化して簡単な計算を行った。さらに連続した構造物を設置することの効果簡単なモデル計算により予測した。モデル計算の結果は、現象的に考えて矛盾がないと思われる。連続的な構造物を設置した場合、潮位変動があっても構造物により前方水域の流れが止まるという注目すべきであるが至極当然の結果を得た。今後は、観測データによる検証が必要である。また、現実で直面する水底が直線勾配でない場合や、構造物が一部の水域に築造される場合のような二次元問題への拡張が必要である。



(a) No structure case ($D = 0$ m)

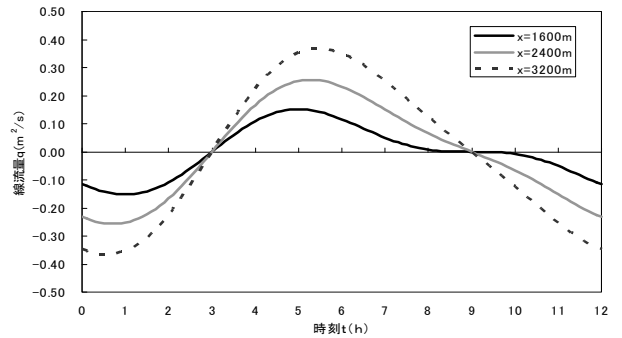


(b) $D = 0.5A$

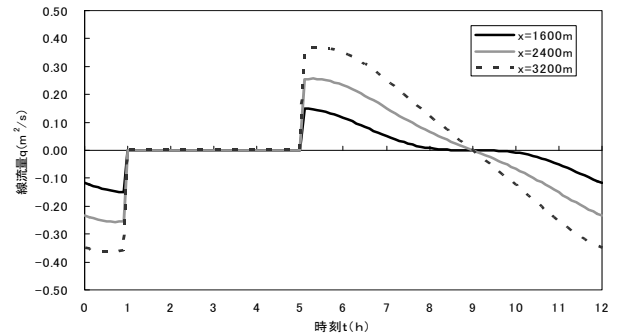


(c) $D = 1.5A$

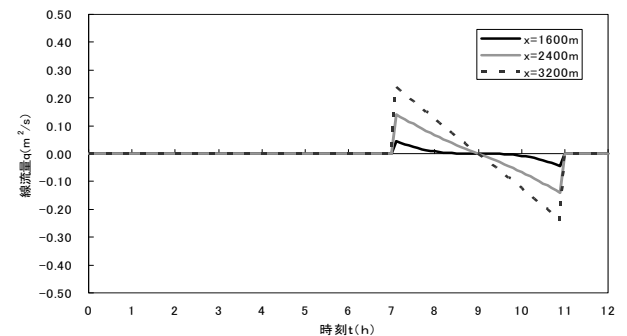
Figure 4 Temporal variation of the velocity



(a) No structure case ($D = 0$ m)



(b) $D = 0.5A$



(c) $D = 1.5A$

Figure 5 Temporal variation of the flow rate

参考文献

- 1) Friedrichs, C.T. and D.G. Aubrey, Uniform bottom shear stress and equilibrium hypsometry of intertidal flats. In: C. Pattiaratchi (ed.), Mixing Processes in Estuaries and Coastal Seas. American Geophysical Union, Washington, D.C., p. 405-429, 1996.
- 2) P. Le Hir, W. Roberts, O. Cazaillet, M. Christie, P. Bassoullet, C. Bacher, Characterization of intertidal flat hydrodynamics, Continental Shelf Research 20, p. 1433-1459, 2000.
- 3) 中村直史, 加納正道, 空閑幸雄: 二次元重み付差分法の浅海流への適用, 土木学会論文集, No747/II-65, pp.1.25-134, 2003.
- 4) 西田修三, 入江正安, 橋本基, 海江田洋平: 干潟を考慮した流動モデルの構築と有明海への適用, 土木学会水工学論文集, 第50巻, pp.1441-1446, 2005.
- 5) 朝位孝二, 山崎宗広, 宮脇周作, 羽田野袈裟義: 潮汐残渣流が内湾の海水交換に及ぼす影響, 土木学会水工学論文集, 第41巻, pp.1081-1086, 2001.
- 6) 川合英夫: 開口幅による付属海の分類と命名由来の解釈, 海の研究, Vol.15No.3, pp.225-233, 2006.
- 7) 宇野木早苗: 有明海の潮汐減少の原因に関する観測データの再解析結果, 海の研究, Vol.12No.3, pp.307-313, 2003.
- 8) 宇野木早苗: 建設途中の締切堤防が湾の潮汐に与える影響, 海の研究, Vol.16No.1, pp.51-59, 2007.
- 9) 坪郷浩一, 羽田野袈裟義: 潮位変動ともなう汀線付近の流れについて, 第17回九州・山口海岸工学者の集い配布資料, 2007.

(平成20年12月26日受理)