

天竜川河口域の地形の推移に関する研究

Morphology transitions at the mouth of River Tenryu

高橋 亮¹・武若 聡²・田島芳満³・佐藤慎司⁴

Ryo TAKAHASHI, Satoshi TAKEWAKA, Yoshimitsu TAJIMA and Shinji SATO

An X-band radar was employed to observe morphological behaviors at the mouth of River Tenryu, Sizuoka, Japan, for 2.5 years from June 2007. Land area of the river channel showed a seasonal variation: it increases in the summer seasons and decreases in winter. The river mouth widens by floods and narrows at ordinary flow periods. Phase difference between water levels in the river and ocean decreases generally in summer and increases in winter. Also, a coefficient representing flow resistance in the estuary showed a similar seasonal variation. The sand bar at the river mouth migrated towards inland in 2009, and sea bottom profiles in front of the river mouth estimated by analyzing wave motions captured during storms became milder from 2007 to 2009, suggesting overall coastal slope decreased during the period.

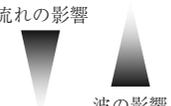
1. 諸言

遠州灘の各海岸は全般的に侵食傾向にあり、天竜川ダム再編事業（浜松河川国道事務所，参照2010-05-10）により海域への土砂供給の増加が期待されている。これを沿岸に波及させる手法を検討する一環としてXバンドレーダを用い、漂砂活動の起点地となる河口付近の地形と流動に関する観測を行っている（武若ら，2008，2009）。表-1に示すように，河口感潮域は流れの影響が強い領域，流れと波の影響を受ける領域，波の影響が強い領域から成る。本研究ではそれぞれの領域における地形の変化，河川内水位一潮汐の応答に関する解析について説明する。

2. 観測の概要

天竜川河口右岸にある下水処理施設の屋上にXバンドレーダを設置し2007年6月より観測を継続している（2010年5月時点）。レーダ画像には波の進行状況，水際位置などが映る。図-1に観測サイト，座標系，レーダ画像を平均化した平均画像（武若ら，2008）などを示す。座標系は平面直角座標系（Ⅶ系）を参考に，東西方向にx軸，南北方向にy軸を設定した。平均画像は解析に用いる部分を取り出して表示してある。輝度値の大きい部分が陸域に対応しており，河道内の砂州，河口，河口砂州の水際位置，河口フロントの発生などの状況を判読できる。画像下部に下水処理施設の塔が妨げとなってレーダエコーを取得できない領域が扇状に広がっている。平均

表-1 検討対象領域と用いるデータ

対象領域	支配的な要因	使用データ
感潮域河道	流れの影響	レーダ平均画像
河口砂州 河口開口部		河川水位，潮位 レーダ平均画像
河口砂州沖合		レーダ平均画像

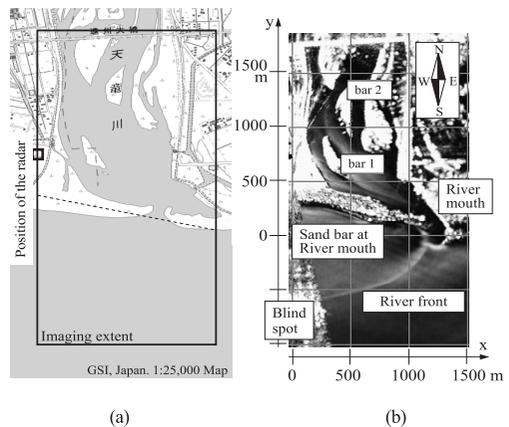


図-1 (a) 観測領域，(b) 座標系と平均画像（2007年6月8日21時）

画像の処理と解析に関する基本的な確認は前報（武若ら，2008）にある。

3. 河口・感潮域の地形変化

(1) 河口幅と河口砂州の変化

2007年6月から2009年12月の間の潮位（御前崎，河口から東方約40 km）がT.P.0.3-0.4 mにあった時に取得された平均画像を選択し，河口，河口砂州の水際位置を読み取った。欠測期間を除くと，選択した画像が取得された日時の間隔はおおよそ3日である。

1 学生会員 筑波大学大学院システム情報工学研究科
2 正会員 工博 筑波大学准教授 大学院システム情報工学研究科
3 正会員 博(工) 東京大学准教授 大学院工学系研究科
4 フェロー 工博 東京大学教授 大学院工学系研究科

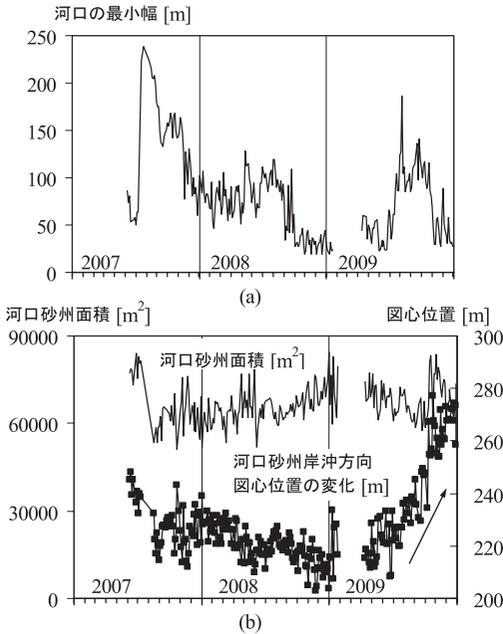


図-2 (a) 河口幅, (b) 500 m<x<1000 mの河口砂州の面積とその平面形状の図心位置 (岸沖方向)

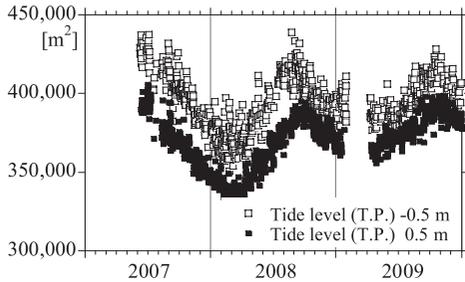


図-3 領域 (0<x<1,000 m, 500<y<1,500 m) 内の陸部面積の変化

図-2に河口幅, 500 m<x<1000 mにある河口砂州の面積とその平面形状の図心位置 (岸沖位置) の変化を水際位置の座標から算出した結果を示す。

河口幅は2007年7月の出水時に最大となった。その後、2008年末まで、出水がある度に小規模な拡幅があったものの、河口幅は小さくなる傾向にあった。2009年は出水により河口幅が大きくなったが、その後の縮小は早かった。

図心位置は2007年, 2008年には平均的な位置にとどまっていたが、2009年になり継続的に河道に向かって変位した。この海域側の侵食により河口前面の海浜勾配が緩やかになったと考えられる。

(2) 河道陸域面積の変化

河口砂州の上流側の河道がある領域 (0 m<x<1,000 m, 500 m<y<1,500 m, 面積1,000,000 m²) の陸面積の経時変化を調べた (武若ら, 2010) (図-3)。平均画像の対象域内のしきい値を超える輝度のピクセルを陸域として取り

表-2 対象域の水位T.P.-0.5 m～0.5 mの間の土量変化

期間	土量変化 [m ³]	
2007年6月-2007年8月	-15,000	出水
2007年8月-2008年2月	-39,500	夏季→冬季
2008年2月-2008年9月	48,000	冬季→秋季
2008年9月-2009年5月	-28,000	秋季→春季
2009年5月-2009年10月	29,500	春季→秋季

出した。河川敷, 河川堤防, 河川敷上の構造物などは常に高輝度部として存在するので、差分が河道内に生じる陸域面積変化と考えられる。なお、面積の評価は、潮位がおおよそT.P.-0.5 mと+0.5 mの時にそれぞれ行った。

河道陸域面積の変化には季節的な変化の存在が伺われる。夏季から冬季に減じ、冬季から夏季にかけて増加するサイクルは植生の効果によりもたらされたと考えているが、現時点で定量的な検証はなされておらず、今後の検討課題である。

表-2にいくつかの期間における対象域のおおよその土量変化を求めた。土量変化は高さT.P.-0.5 mから+0.5 mの範囲の面積変化に水位差1 mを乗じて求めた。2007年7月の出水により、対象域からは少なくとも15,000 m³の土砂が失われた可能性がある。田島ら (2008)はこの出水により20万 m³のオーダの土砂供給が河川域から海岸域にあったとしており、ここに説明した土量の減少はこれの一部であった可能性がある。

季節的な土砂量増減を推算すると僅かな値となり、対象領域への土砂ストック, 対象領域からの土砂供給は小さい。季節的に現れる土砂量増減の過程, 例えば, 土砂供給が上流側からあるのか, 侵食された土砂の行方などの土砂移動過程の詳細は不明であり, その解明には測量データ, 河道内の流況解析などを交えた議論が必要である。

4. 流動の推定

(1) 河川水位と潮位変動の位相差関係

河川水位 (掛塚橋水位観測所, 河口上流3 km, 感潮域内) と潮位 (御前崎, 気象庁観測, 河口から東方40 km) のM₂分潮に着目し, 両者の位相を調べた。

河口・感潮域の流れに対する抵抗が小さければ外海と河道内の水位は小さい位相差で変動し, 逆に抵抗が大きくなれば位相差が大きくなると考えられる。抵抗が変化する要因としては, 河口幅の縮小・拡大, 河道地形の変動に伴う潤辺径深の増減, 粗度の増減などが考えられる。

図-4に2007年から2009年までの河川水位と潮位の位相差および河口幅の変化を示す。2007年および2009年は, 位相差の減少と河口幅の拡大に強い相関が見られる。一方, 2008年の位相差と河口幅の変化には明確な関係性が見られず, 河口幅の変化以外の地形状況等が位相差の変

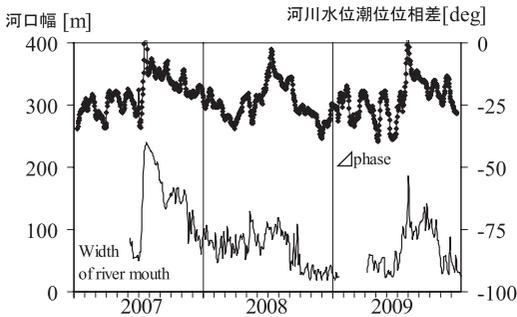


図4 河川水位 (感潮域) と外海水位 (潮位) 変動の位相差と河口幅の関係

化をもたらしたと考えられる。

図-5に2002年から2009年までの河川水位と潮位の位相差および河川流量 (鹿島橋, 河口上流25 km) の関係を示す。2002年, 2006年から2008年は, 位相差は夏季に小さくなり, 冬季に大きくなるという周期的な変化を示した。夏季の流量増加 (出水) が河口幅の拡大, 感潮域河道地形の変化をもたらしたと考えられる。しかしながら, 2004年の夏季は多くの出水があったにもかかわらず, 位相差は小さくならなかった。出水による地形変動が小さかったと推測される。2004年10月には大きな出水が発生し位相差が減少し, これは2005年の冬季まで継続した。この間, 出水後に河口部への土砂堆積が進まなかったと推測される。

(2) 流動モデルを介した河道状況の把握

Keulegan (1967) の tidal inlet 一次元モデルを用い, 河川水位と潮位の変動を解析した (渡辺・田中, 2003)。解析では, 河川と外海との水位差により駆動される感潮域流れの抵抗を調べ, ここから感潮域の河道の状況をマクロ的に調べる。

Keulegan (1967) により示された tidal inlet 一次元モデルは, エネルギーの式 (1) と連続式 (2) から成る。このモデルは, 感潮・河口域の流れのエネルギーが河口流

路の流れの損失, 外海との入口・出口の損失により失われると仮定し, また, 流れの大きさは連続性を考え感潮域の水位変化から評価できるとする:

$$\eta_o - \eta_r = \left(K_{en} + K_{ex} + \frac{2gn^2L}{R^4} \right) \frac{|U|U}{2g} \dots\dots\dots (1)$$

$$U = \frac{A_r}{A_c} \frac{d\eta_r}{dt} \dots\dots\dots (2)$$

ここで η_o は潮位, η_r は河川水位, U は河口部における流れ, K_{en} は感潮域と河口流路の入口損失係数, K_{ex} は外海と河口流路の出口損失係数, g は重力加速度, n はマンニングの粗度係数, L は河口流路延長, R は河口流路径深, A_r は感潮域面積, A_c は河口断面積である。(1), (2) 式より U を消去すると以下を得る:

$$\eta_o - \eta_r = \alpha \left(\frac{d\eta_r}{dt} \right) \left| \frac{d\eta_r}{dt} \right| \dots\dots\dots (3)$$

$$\alpha = \left(K_{en} + K_{ex} + \frac{2gn^2L}{R^4} \right) \frac{1}{2g} \frac{A_r^2}{A_c^2} \dots\dots\dots (4)$$

α は河口・感潮域に生じる流れの全抵抗係数, 河口と感潮域の流路の状況などを反映するパラメータとみなせる。

30日分の $\eta_o - \eta_r$ と $(d\eta_r/dt) |d\eta_r/dt|$ を毎時の観測値から求め, これを線形回帰して係数を α として定めた。

図-6に2002年から2009年までの α の変化を示す。一部の時間帯では河川水位 (掛塚橋) の計測値が正常に取得されなかったと判断されたので, これを図中で区別した。2005年から2008年の変動パターンに代表されるように, α は夏季に小さく (相対的に流れやすい), 冬季に大きくなる周期的な変動を持つことが確認できる。 α は河口域の粗度, 断面形などに依存していると考えられ, これらには季節的な変動があると推測される。前章で示した河道地形の変化の解析結果では, 河道水面積が夏季に減少し, 冬季に増加するサイクルの存在がうかがわれた。こ

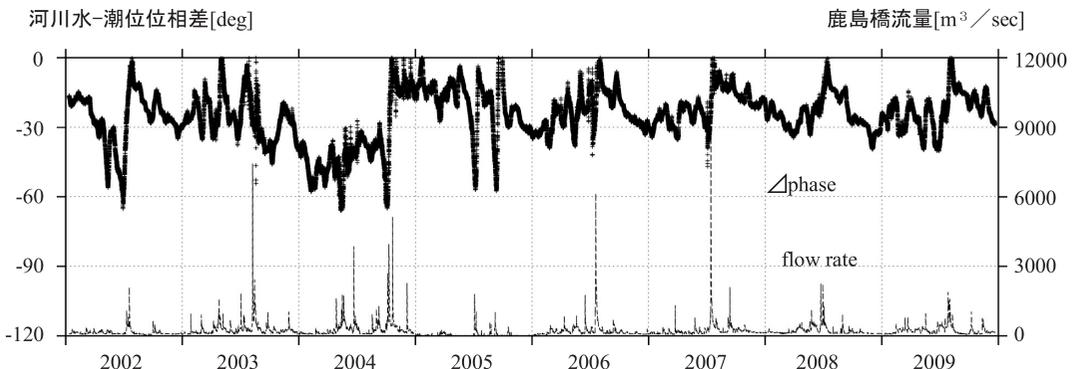


図5 河川水位 (感潮域) と外海水位 (潮位) 変動の位相差と河川流量 (鹿島橋, 河口上流25 km) の関係

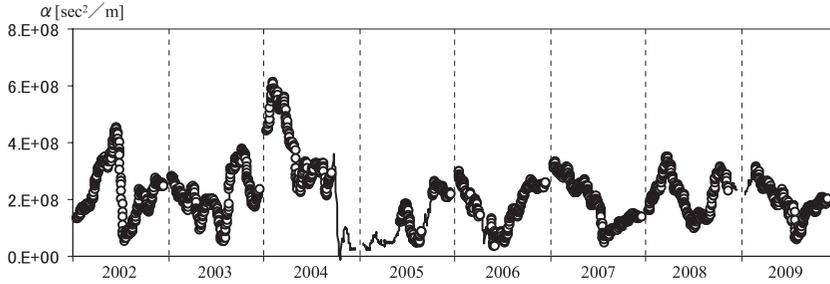


図-6 Keulegan のインレットモデルにより評価した α の変化. 河川内水位計(掛塚橋, 河口上流3 km)が正常に機能していたと判断されるときデータ(○), 全データ(実線).

れに対応して α が季節的な変化をした可能性があるが, その定量的な評価, 例えば, 河口幅, 潤辺, 粗度などの変化が流動に及ぼす影響の評価は今後の検討課題である.

5. 河口沖合地形の推定

河口テラスは河川から海域に供給された土砂が堆積して形成される地形で, ここに一旦貯まった土砂が波の作用により沿岸方向に移動するとされている. 天竜川の河口テラスはその規模が小さくなっているとの報告があり, これに伴い沿岸域への土砂供給の減少, 海岸侵食の顕在化が生じていると考えられる(宇多ら, 2008).

ここでは, 河口テラスの南に位置する河口沖約650 mの地点に領域1 (835 m<x<1430 m, -860 m<y<-370 m) と領域2 (-1450 m<x<-1070 m, -860 m<y<-370 m) を設け(図-7), 荒天時の波高の大きい期間を解析対象として(2007年9月5, 6日, 2009年10月8日), 波浪場の波数分布を求めることにより水深分布の推定を行った. 水深の推定を行った領域が2つの領域に限定されているのは, 次に説明する波数分布を調べる際, 矩形領域外のデータも必要となり, そのデータに含まれるノイズの影響を除くためである.

まず, レーダ原画像(図-7)に対して周波数解析を行い, 卓越周波数を求めた. 次にこの周波数を用い, 画像をフィルタリングした位相画像(図-8)を作成した. 領域中の位相画像に映りこんだ等位相パターン(波峰)に対して相互相関法より波数分布を求め, 分散関係式を用い水深推定を行った(図-9).

推定結果には筋状に隆起した地形やパッチ上のくぼみがあるが, これは観測のノイズや水深推定における波数分布推定の空間分解能の低さによるものである. 測量データと推定結果を比較したところ, 地形の概況は捉えていることを確認できた. 2008年に取得されたデータを用い2007年, 2009年と同様の解析を試みたが, レーダ原画像が不鮮明であり水深を推定できなかった.

図-9に示した2007年から2009年の地形変化を眺めると, 領域1では, 東岸側(1200 m<x<1430 m, -500 m<y<-370 m)にあった浅い領域が消滅し, 東側から西側ま

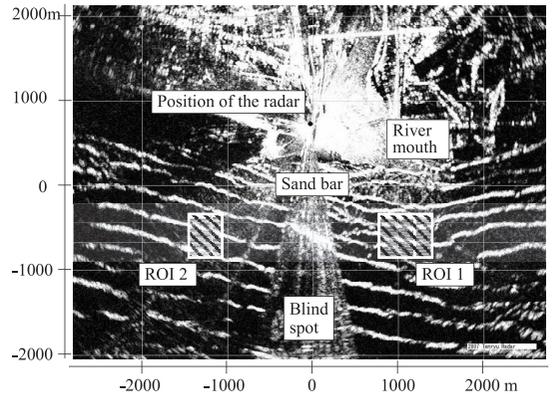


図-7 レーダ原画像(2009年10月8日5時)と水深推定領域(ROI 1, ROI 2)

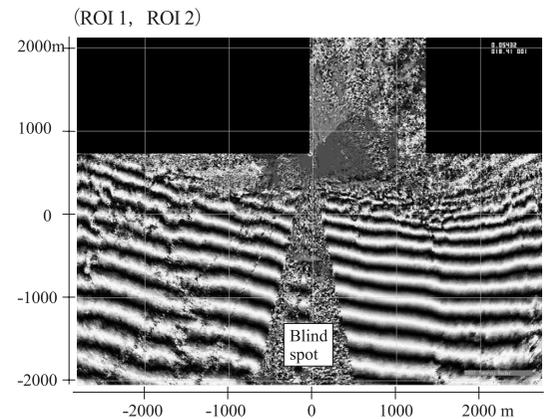


図-8 位相画像(2009年10月8日5時)フィルタリング周波数0.054 Hz

でほぼ一定の勾配となった. 前章に示したように, 河口砂州は2009年に陸側に移動しており, 河口前面の海浜は緩やかな勾配に遷移したと考えられる. 一方, 領域2では, 東部(-1200 m<x<-1070 m, -860 m<y<-370 m)付近が侵食され, 深くなった様子が確認できる. これに対して, 西部(-1450 m<x<-1300 m, -860 m<y<-370 m)では, あまり目立った変化が起っていない.

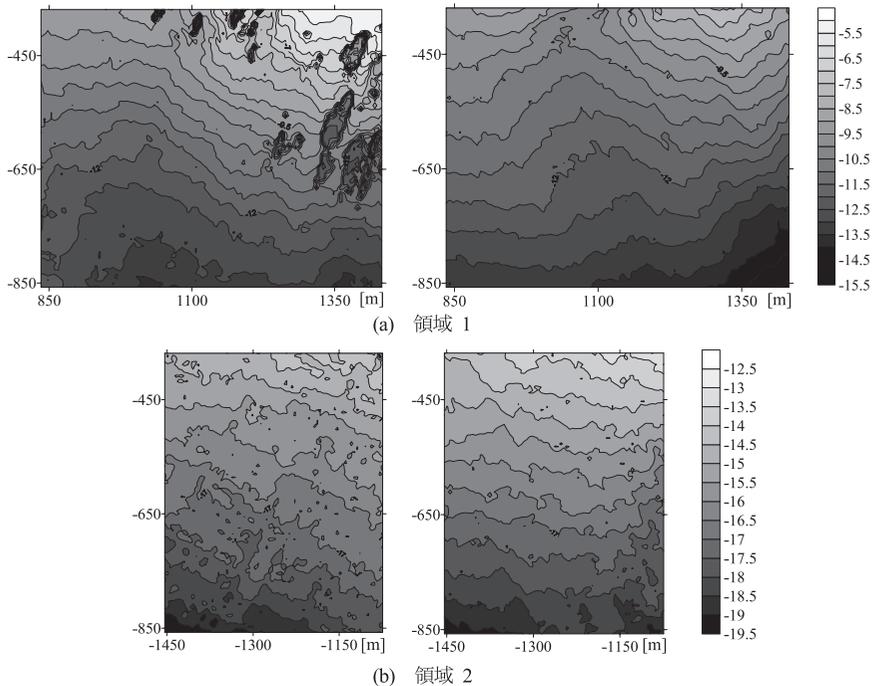


図-9 水深分布河口沖合地形の推定結果 (2007年9月 [左], 2009年10月 [右])

6. 結語

天竜川河口の地形と流動をXバンドレーダにより観測し、河川流、波浪、両者の影響を受けた地形の推移を示した。

- (1) 河道および河口の地形に季節的な変動、出水に伴う短期的な変動があることを示した。
- (2) 河川水位 (感潮域) と外海水位 (潮位) 変動の位相差、河口・感潮域に生じる流れの全抵抗損失係数に相当する α を求め、これに季節的な変動があることを確認した。
- (3) 2009年になり河口砂州重心位置は陸側に変移した。また、2007年と2009年の河口沖合水深分布を推定したところ河口沖合の勾配は小さくなり、河口前面の海浜は緩やかな勾配に遷移したと推測できる。

河道陸域面積、川水水位 (感潮域) と外海水位 (潮位) 変動の位相差、河口・感潮域に生じる流れの全抵抗損失係数を反映する係数 α のそれぞれに季節的な変動を確認できたが、その成因、例えば、河口幅、感潮域水深、潤辺、植生粗度などの変化が地形と流動に及ぼす影響の定量的な評価が必要である。

謝辞: 観測に際し静岡県下水道公社西遠浄化センターならびに日本ヘルス工業 (株) 職員の皆様には便宜を図っ

ていただいた。浜松河川国道事務所には測量データを提供頂いた。本研究は河川環境管理財団・河川整備基金、科学技術振興調整費の支援を受けた。以上、ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 宇多高明, 長島郁夫, 古池 鋼, 宮原志帆, 石川仁憲 (2008): 天竜川ダム再編事業による流出土砂量の増加が海岸に及ぼす影響海岸工学論文集, 第55巻, pp.656-660.
- 武若 聡, 高橋 悠, 田島芳満, 佐藤慎司 (2008): Xバンドレーダによる天竜川河口域の地形と流動の観測, 海岸工学論文集, 第55巻, pp.646-650.
- 武若 聡, 高橋 悠, 高橋 亮, 田島芳満, 佐藤慎司 (2009): 天竜川の河口フロントと河口地形の観測, 海岸工学論文集, 第56巻, pp.411-415.
- 武若 聡, 白川直樹, 坂谷好彦, 内田泰雄 (2010): Xバンドレーダによる感潮域の河道地形変動の観測, 河川技術論文集, 第16巻.
- 田島芳満, 高川智博, 浅野泰史, 佐藤慎司, 武若 聡 (2008): 特性の異なる二つの台風による天竜川河口砂州の大規模変形, 海岸工学論文集, 第55巻, pp.646-650.
- 浜松河川国道事務所, 天竜川ダム再編事業
http://www.cbr.mlit.go.jp/hamamatsu/gaiyo_dam/tenryu.html,
 参照2010-5-10.
- 渡辺一也・田中 仁 (2003): 感潮域における水位応答を利用した河口水深の推定, 海岸工学論文集, 第50巻, pp.61-65.
- Keulegan, G.H. (1967): Tidal Flow Entrances U.S. Army Corps of Engineers, Committee on Tidal Hydraulics, Tech. Bull. No.14. 102p.