

枝分かれした小河川における長波の挙動に関する現地観測

青木伸一*・加藤 茂**・熱田浩史***

浜名湖の湖口部に位置する感潮河川である浜名川において、潮位変動および流れの観測を行った。浜名川は河道がループ状になっており、さらに枝分かれして 2 カ所から浜名湖に注ぐ小河川である。本論文は、このように複雑な形状の小河川内の潮汐波の伝播特性について、現地観測および数値計算によって検討したものである。浜名湖内の潮汐がほとんど減衰せずに河川に侵入していること、河道内の流れは水位の微小な勾配とよく対応し、一潮汐間に流れの向きが 2 回反転するなど複雑な流れになっていることを明らかにした。また観測期間中に発生した高潮に対応するために作動させた樋門と排水ポンプの河道内水位に及ぼす影響についても述べている。

1. ま え が き

沿岸部の都市域には排水のための小河川や運河が網目状に広がっている地域が見られる。近年、東海・東南海地震等による津波の来襲が懸念されており、太平洋沿岸の都市では予測津波高をもとに種々の防災対策が講じられようとしているが、このような小河川を有する地域では河川を遡上する津波の伝播と増幅について十分検討しておく必要がある。一方、地球温暖化に伴う海水面の上昇によって、感潮河川を有する地域の高潮に対する危険度が高まっており、これまでの防災施設でどの程度まで対応できるのかを再検討しておく必要もあろう。以上のように、都市域に小河川を遡って侵入してくる津波や高潮などの長波の挙動を検討しておくことは沿岸防災上極めて重要である。

河川を遡上する長波については、潮汐波や津波を対象とする研究がいくつか見られるが（例えば、宇野木ら、1973；岩崎ら、1978；後藤・首藤、1981）、枝分かれした複雑な水路における長波の伝播特性については知見があまりなく（堀口・高、1965；由比ら、2001）、研究の緊急性が高いと思われる。本研究は浜名湖の南西部に位置する小さな感潮河川である浜名川を対象に、河道内の水位と流速の多点同時観測を行って、潮汐波の河川への侵入特性を明らかにしたものである。（さらに、観測期間中に発生した高潮に対して、河道内に設置してある樋門と排水ポンプを作動させたが、その影響がどのように河道内に伝播したかについても示している。

2. 浜名川の現状

浜名湖今切口付近の空中写真を写真-1 に示す。浜名

川は今切口の北西部に位置する水路（写真中に示す東樋門と西樋門の間の水路）に 2 カ所で注ぐループ状になった小河川であり、写真中の「三文字」で 2 つの河道に枝分かれしている。上流側は写真の左端あたりでせき止められており、河道の全長は 3 km 程度である。川幅は下流域で 3～5 m 程度である。

写真-2 に示すように、現在の浜名川は護岸の整備と周辺の宅地化が進み、上流の水田および宅地からの排水路となっている。河床勾配は非常に小さく、川底には汚泥が堆積して水質の悪化を招いており、地元自治体では水質の浄化が課題となっている。

降雨時には雨水の流入があるが、通常時は河道内の流れは潮汐によるものが支配的であり、上流部まで潮汐の影響を強く受けている。河道のすぐ脇には民家が建ち並んでおり、主要な道路も河川を横断しているため、高潮

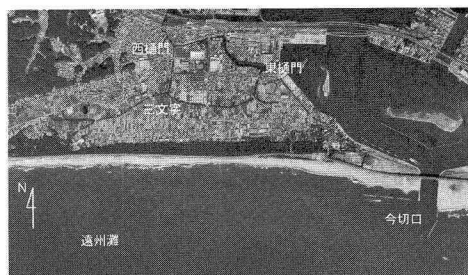


写真-1 浜名湖今切口と浜名川



写真-2 浜名川の河道

* 正会員 工博 豊橋技術科学大学教授 工学部建設工学系
** 正会員 工博 豊橋技術科学大学講師 工学教育国際協力研究センター
*** 工修 株式会社トヨタコミュニケーションシステム CAE部

による氾濫に対して弱い構造となっている。写真-1の東西の樋門は高潮対策として設けられており、西樋門には排水ポンプが2基設置されている。

3. 現地観測

浜名川における観測は、2001年8月18日～8月23日および2001年10月30日～11月3日の2期間にわたって行った。観測期間はいずれも大潮の時期である。また8月期には、期間の後半（8月21日～22日）に比較的大型の台風の来襲があり高潮が発生した。そのため、樋門と排水ポンプが稼働した。観測では、以下に示す水圧計および流速計を用いて、河道内数点で水位および流速の同時連続観測を行った。

(1) 計測機器

水位の計測には、(株)アレック電子社製のメモリー式圧力計 Compact-TD を、8月期の観測では6台、10月期の観測では9台設置した。ただし、いずれの場合も1台は大気圧補正のために使用した。一方、流速の計測は、同メモリー式電磁流速計 Compact-EM を2台使用した。データのサンプリング間隔は水位については1分、流速については10秒である。水圧計は河床に置いたブロックの上に設置し、流速計は河床に沈めた後、橋の上などから一端をロープで引っ張ることによりセンサー部を鉛直に立ち上げた。したがって、流速の計測位置は河床から約60 cm 上方である。

(2) 観測位置

図-1 に10月期の観測における水圧計 (●印, No.10-1～No.10-8) および流速計 (□印, A～G) の配置を示す。水圧の観測地点の詳細情報は表-1 に示す通りである。8月期の観測では主として水位を測定したが、測点の位置が10月期のものと1カ所異なる (8-2)。これについては表-1 に別に示してある。なお、No.10-1 (8-1) および10-8 は樋門の外側に位置している。流速計については、2台の設置位置を図-1 のA点～G点までの7地点に移動させていずれも24時間程度の間、連続観測を行っている。

水圧計によって測定された水深データから水表面の絶対高さに換算するために、測点の近傍路上に基準点を設けた。標高が既知の点から水準測量を行い、基準点の標高をまず出しておき、観測期間中のある時刻に水面位置と基準点の標高差を測定することにより、水面の絶対位置と水深との関係を求め、これを用いて全ての水深データを水面の高さ (TP +) に換算した。

4. 河道内への潮汐の伝播特性

以下では、10月期の観測データを用いて、河道内における潮汐の伝播特性について考察する。ただし、観測期

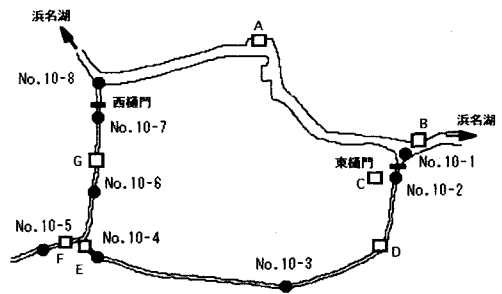


図-1 10月期の水圧計と流速計の配置

表-1 水圧計設置点の詳細 (10月期および8月期)

測点 No.	平均水深(m) (高潮時を除く)	No.10-1から時計回りに測った距離(m) (No.10-8からの距離は1,158 m)	川幅(m)
10-1 (8-1)	2.18 (1.99)	—	—
10-2 (8-2)	0.95 (1.25)	91 339	4.5 4.5
10-3 (8-3)	0.62 (0.65)	920	3.25
10-4 (8-4)	0.83 (0.82)	1,306	3.25
10-5	0.60	1,637	3.25
10-6 (8-5)	0.79 (0.82)	1,466	5.0
10-7	0.88	1,811	5.0
10-8	1.86	1,931	—

間中のすべての水位変動データをグラフにして比較すると、その差異はグラフ上ではほとんど認められない程度に小さいものであった。ただし、今切口湖内東側に位置する舞阪潮位観測所の潮位変動と比べると、東樋門外側の No.10-1 では振幅比で約90%、時間遅れで20分程度の違いがあった。このずれは浜名湖全体の潮汐応答に関連していると考えられる (有田ら, 2005)。

(1) 振幅比

図-2 に10月期の水位観測結果を用いて求めた各観測点での潮位変動の振幅比を示す (実線)。これは、No.10-1の地点での潮位偏差 (満潮潮位と干潮潮位の差) を基準として、その他の点の振幅を比率で表したものである。ただし、横軸の距離は、No.10-1から時計回りに河川を巡回するように測った水路距離である。

図より、振幅比は1に近い値 (0.96～1) であり、潮汐の河道内への伝播に伴う振幅の減衰は非常に小さいことが分かる。すなわち、東樋門外側の点 No.10-1での潮汐の振幅が各地点でほぼそのまま現われていることがわかる。ただし、水路距離の増大に伴ってわずかながら振幅の低減がみられ、枝分かれする地点 (三文字) 付近で最も小さな振幅比となっている。

(2) 位 相 差

振幅比と同様に10月期の水位データを用いて位相差を求めた。位相差を求めるにあたっては、水位変動の時系列を平滑化して処理した。図-3は、No. 10-1の水位変動からの位相差(時間差)を、振幅比と同様に、横軸にNo. 10-1からの水路距離をとって示したものである。ただし、時間遅れを正として表している。図中、1潮汐周期の単位で求めた位相差(total)に加えて、上げ潮時(flood)および下げ潮時(ebb)のみのデータから求めた位相差についても示してある。また、比較対照として水深と水路距離から線形理論で求められる位相差を計算した。計算では、水深データより波の伝播速度の時系列を求め、測点間の伝播時間を求めて位相差を定めた。ただし、理論値の計算は水路内を時計回りに行うのではなく、基準点からの水路距離が最も短くなる経路を用いている。このようにして求めた理論上の位相差も図-3に“analytical”として示してある。

図より、東樋門外側と各測点との位相差は、上流部で5~6分程度である。理論値を実測値と比較しても概ね伝播傾向を表しており、河道内では、潮汐はわずかな時間遅れで速やかに伝播していることがわかった。次に、上げ潮時と下げ潮時に分けて求めた位相差を比較すると、上げ潮時の方が下げ潮時よりも1分前後位相差が大きくなっていることが分かる。これは、水位が上昇する場合の方が、水位が低下する場合よりも潮汐の伝播がやや遅いことを表している。

5. 流れの特性

ここでも10月期の観測データを用いて潮汐に伴う流動特性について考察する。観測期間中に降雨はなく、潮汐による流れが卓越していた。図-1に示すように、流速計は水位観測点の間に設置しているので、以下では測点間の水位差(圧力勾配)と流れの関係を見ることにする。

(1) 河道内での水位差と流れの特徴

まず、東側水路のNo. 10-2および10-3両地点での水位変動、およびその中間に位置するD点での流速変動について検討する。図-4にNo. 10-2および10-3での水位とその水位差、D点での流速(u は河道方向、 v は横断方向)を示す。ただし、水位差はNo. 10-2からNo. 10-3の水位の値を引いた値を示し、河道方向流速 u は10-2から10-3に向かう向きを正にとっている。

水位差についてみると、干満時の中間で最大値(-3~3 cm程度)が生じている。ただし、水位差が増加するとき(干潮時前後)はその変化が急であり、水位差が減少するとき(満潮時前後)は変化が緩やかになっており、波形が非対称になっている。また、水位差には周期30分程度の振動が目立って現れているが、これは水路内

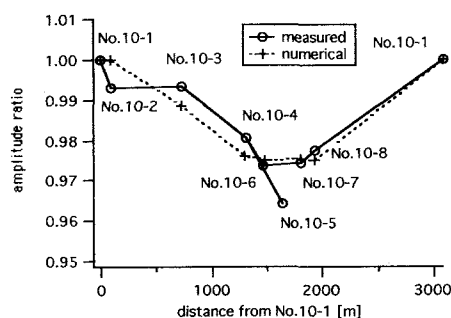


図-2 潮位変動の振幅比 (No.10-1基準)

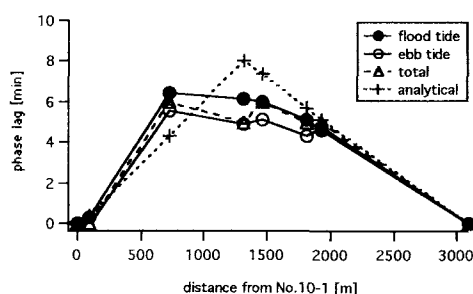


図-3 潮位変動の位相遅れ (No.10-1基準)

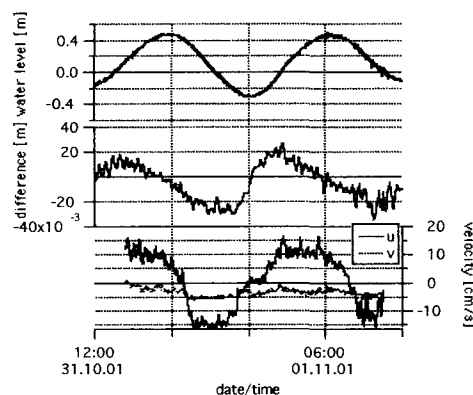


図-4 水位差およびD点での流速の時系列

水面の自由振動によるものではないかと思われる。

一方、流速についてみると、水位差より若干遅れて変動しているが、やはり波形は歪んでおり、特に下げ潮に転じた直後には流速の変化が大きく、また流速のピークの大きさも、上げ潮時に比べて大きくなっている。この急激な「潮の引き」が前節で述べた下げ潮時に上下流の水位変動の位相差が小さくなる原因であろう。下げ潮時の潮の引きが急激であることにより、干潮時をはさんで2時間程度、潮止りが生じているのが特徴的である。

(2) 三文字付近での流れ

河道が枝分かれする地点(三文字)における流れの様

子を見るために、No.10-4およびNo.10-6の2地点での水位データ、およびE点における流速データを用いる。図-5に両地点の水位とその水位差（No.10-4の水位から10-6の水位を引いたもの）およびE点での流速を示している。水位差についてみると、他の測点のデータのように12時間周期の単純な変動とはなっておらず、河川合流部をはさんだ2地点の水位差は複雑に変化していることが分かる。すなわち、干潮時直後には、短時間であるが水位差が負の方向に増大する傾向が見られ、その後水位差が正へ転じる。これは、上げ潮期には、まず潮汐が西樋門を通して先に三文字付近に到達し、その後東樋門側から水位上昇が伝播してくることを示している。満潮を越して下げ潮期に入ると、今度は反対に東樋門側からの影響が先に三文字付近に到達していることがわかる。以上のように、三文字付近の水位変動は、上げ潮時には西樋門側からの、下げ潮時には東樋門側からの影響を先に受け、これに伴って一潮汐間に水位差は2つのピークを有して変動する。流速については、上述のわずかな水位差による水面勾配に対応するように変動しており、水位差と同様、両方の樋門からの潮汐の影響を受けて流れの向きを変化させている。

6. 数値計算との比較

上述の水位変動および流れの特徴を再現するために、2次元の長波モデルを用いて数値計算を行った。計算においては、ループ状になった河道をNo.10-1とNo.10-8を両端境界とした直線水路と見なした。水路内での水深は、各測点での水深を線形補間して与えている。No.10-1から時計回りにNo.10-8までの1930mを計算格子幅10mで設定した。水路横断方向には1.5m格子を用い、現地での水路幅（3～6m）を考慮して格子数を設定した。また、三文字から本川上流部は貯水池のような閉鎖水域として設定した。この大きさは、上流部の水路距離と平均的な水路幅および水深から、水塊の体積がほぼ等しくなるように与えている。今回の計算では水路距離2000m、水路幅3m、平均水深0.5mとした。水底での摩擦係数には Manning式を用い、水平渦動粘性係数は流速の水平勾配に基づいたモデルを用いている。静水状態から計算を開始し、境界条件として、No.10-1とNo.10-8で周期12時間の水位変動（正弦波）を1分ごとに与えた。10月期の観測結果に基づき、No.10-1での潮位差を0.9mとし、No.10-8ではNo.10-1に対する振幅比を0.975、位相差を5分としている。計算時間は24時間とした。

潮位変動の振幅比に対する数値計算結果を図-2に破線で示してある。測点ごとに若干の差異はあるものの、全体的な傾向をよく説明している。位相差については、

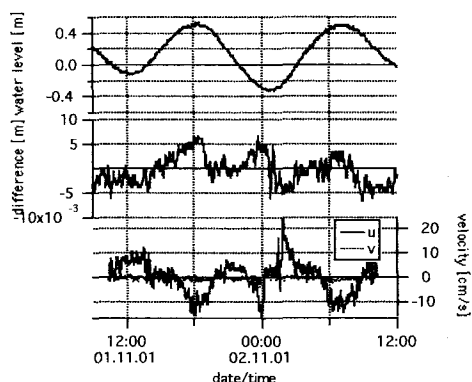


図-5 水位差およびE点での流速の時系列

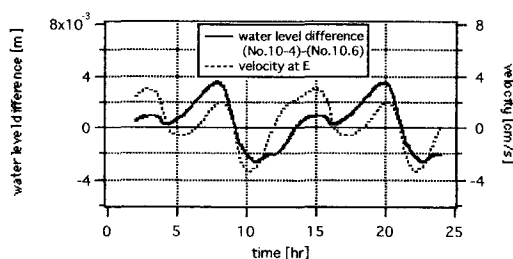


図-6 数値計算による水位差とE点での流速

図-3の上げ潮下げ潮の違いを明確に説明するまでには至らなかったが、ほぼ全体の傾向を表していた。

次に、河道内の流れ、特にE点での流れについては、数値計算でも一潮汐間に4回の流れの方向変化が確認された。図-6はNo.10-4とNo.10-6の水位差とE点における流速の時系列変化を示しているが、水位差に対応して流れが反転している様子がよく現れている。ただし、図-5と比較すると、流速の大きさは計算値の方がかなり小さくなっている。これは、三文字付近の水位差が非常に微小であるため、三文字から上流側の取扱いの問題などによる計算誤差が現れたものと思われる。今回は、計算を簡単にするために合流地点から上流を貯水池のような扱いにしたが、三文字に集まる3河川間での微妙なバランスが三文字周辺の流動に影響を及ぼしており、合流地点から上流部の影響も無視できないと思われる。

7. 樋門と排水ポンプの操作による水位変動

8月期の観測期間中に台風の来襲があり、浜名川内の水位調節のために、東西樋門の開閉および西樋門に設置された2基の排水ポンプが稼働した。その間の各観測点および舞阪での水位変動を、樋門とポンプ操作の経緯とともに図-7に示す。21日20時には舞阪の水位は台風の影響でTP+1.14mにまで達しており、No.8-1地点は東樋門の外側にあるため、舞阪より数十分遅れで水位が

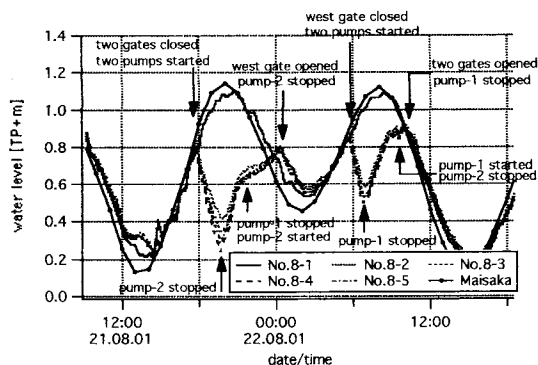


図-7 高潮発生時の水位変動

TP + 1.1 m 程度まで上昇している。その他の地点でも、樋門およびポンプを操作する前までは樋門外側の水位に追随しているが、これらの操作により水位の変化が大きく現れている。まず、河道内水位がおおよそ TP + 0.8 m を越えた時点で、樋門が閉鎖され、その後のポンプ始動で河道内の水が排出されて各点の水位が一斉に下がっている。ポンプから最も遠く、水路距離にして 1.5 km 程度離れている No. 8-2 においても、ほとんど時間差なく水位が低下しており、ポンプの効果が遠方にまですぐに到達していることが確認できる。その後、ポンプ 2 の停止とともに内部の水位は上昇していることから、この時の雨水の流入量が 1 台のポンプの排水容量を越えていたことが分かる。その後、満潮時にはポンプ 1 を停止してポンプ 2 が始動したため、排水能力が増大している。下げ潮により水位が TP + 80 cm 以下になると、西樋門が開放されポンプも停止した。その後は潮汐の影響により浜名川全体の水位が下がっている。その後の上げ潮に伴って再び水位が TP + 80 cm を越えると西樋門を閉鎖しポンプ 1, 2 を始動させている。満潮時に再びポンプの稼働を入れ替え、潮位の低下に伴って東・西樋門が開放され、ポンプも停止した。これらの防災対策により、内部の水位は TP + 0.9 m 以下に常に抑えられていた。

以上の樋門および排水ポンプの操作の流れから、高潮時の樋門・ポンプの操作は、河道内水位を指標として行われており、有効に機能していることが分かる。ただし、1 台のポンプのみでは降雨時の内水排除が十分でないこと、およびポンプの連続運転により排水機能が低下することなどを考えると、不慮の事故や長期間にわたる多量の降雨に対して十分な安全性が確保されているとは言い

切れない。潮位については舞坂の潮位データから河道内の水位変化が予測可能であるので、降雨時の流出予測と組み合わせて、より安全性の高い樋門・ポンプの操作方法を考える必要がある。

8. あとがき

本研究で得られた主要な知見は以下の通りである。

(1) 浜名川では東樋門の外側で観測される潮位変動がほとんど減衰せずに河道内を伝播している。また、潮波伝播の時間遅れも 5 分程度と小さい。

(2) 河道内の潮波伝播の位相差の解析から、上げ潮時に比べて下げ潮時の位相差が若干小さく現れ、潮が引く方が速い。これに伴って、潮止りが生じている。

(3) 河道内の流れは、水面勾配（水位差）によく対応して生じている。ただし、水位差および流速変動は非対称な波形を示し、上げ潮の初期には水位勾配の変化率が大きくなる。

(4) 三文字付近は東西の樋門から入ってくる潮汐の影響を受け、わずかな水面勾配に対応して一潮汐内で 4 度流れの向きが変化する複雑な挙動を示す。

(5) 数値計算は河道内の潮汐の伝播特性を概ね再現しているが、流速の定量的な予測には、上流側の条件を正しく考慮することが必要である。

(6) 高潮に対する河道内の水位調整は樋門とポンプによって効率的に行われている。ポンプの作動は、河道内全域の水位を一様に、かつ速やかに低下させている。

最後に、本調査を行うにあたりお世話になった新居町および（株）サイトプランニングの方々に謝意を表する。

参考文献

- 有田 守・青木伸一・片岡三枝子(2005): 浜名湖今切口の固定化による湖内の潮汐と海水交換特性の変化, 海岸工学論文集, 第52巻, (投稿中)。
- 岩崎敏夫・阿部至雄・橋本潔(1978): 湾奥に位置する河川での津波の遡上に関する数値解析, 第25回海岸工学講演会論文集, pp. 137-140。
- 宇野木早苗・上嶋英機・山下浩一(1973): 河川潮汐の研究(第3報), 第20回海岸工学講演会論文集, pp. 371-376。
- 後藤智明・首藤伸夫(1981): 河川津波の遡上計算, 第28回海岸工学講演会論文集, pp. 64-68。
- 堀口孝男・高隆二(1965): 湾および河川網に侵入する津波の計算, 第12回海岸工学講演会論文集, pp. 14-18。
- 由比政年・中嶋光浩・間瀬肇・石田啓(2001): 分岐水路における孤立波の透過・反射特性の数値解析, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 16-20。