

浜名川に生じる渦と激流の成因

浜松学芸高等学校

サイエンス部 1年 勝谷恵伍 他2名

1. 動機・目的

浜名湖南部に位置する浜名川は、河道の全長が約3kmの小河川である(図1)。浜名川の流路は、明応地震に伴う津波に加えて、明治時代以降の浜名湖埋め立てによる影響で大きく変遷してきた。

明応7年(1498年)に発生した明応地震により発生した津波では、浜名湖南岸では大規模な海岸浸食が起こり、浜名湖と遠州灘をつなぐ「今切れ口」が開いた(都司1979、静岡県1996)。明応地震と津波の影響が疑われる例の1つとして、浜名川の地形の変化がある。浜名川は、中世まで現在とは逆に浜名湖から西へ流れて遠州灘に注いでいた(榎原2008)。一方で、江戸時代初期の『正保遠江国絵図』(1644年ごろ)では浜名川は遠州灘から切り離されて、浜名湖へ注いでいる(小野・矢田1498)。現在の浜名川は、湖西市新居町を東流して浜名湖南部に位置する水路に2か所で注ぐ、ループ状になった小河川であり、「三文字」で2つの河道に枝分かれしている複雑な水路となっている(図2、青木など2005)。

静岡県湖西市新居町の浜名湖に注ぐ浜名川およびその支流にあたる州崎川では、浜名湖の潮汐変化に伴うと推定される激しい流れ(以下、激流)が発生しているのが確認されている(図3)。激流の根本的な発生原因を究明するべく予備調査を行ったところ、川の流れが上流から下流へ向かって一方向である一般的な河川とは大きく異なり、時間帯によって流れの向きや流速が大きく変化することが判明した。このような、流れの向きや流速の変化を示す河川は全国的に見ても非常に珍しい。また、浜名川では小規模の渦がみられるが、この渦の形態も満潮時と干潮時では異なっていることが分かった。

以上のような特徴をもつ河川において、我々は特に渦に注目した。すなわち、なぜ河川において渦が発生するのか、また、なぜその形態が満潮時と干潮時で異なるのかに疑問をもち、その解明を目的とした検証研究を行った。具体的な方法は、以下の3つの通りである：① 浜名川での現地調査 ② 浜名川河口の流路を模した水槽による激流の再現実験 ③ 河川シミュレーションソフトウェア iRIC を用いた数値計算。以上の結果より、浜名川にみられる特殊性の根本原因を明らかにし、激流発生時刻の予測および、それを活かした水難事故の防止や、沿岸生態系の解明等に繋げることができればと考えている。

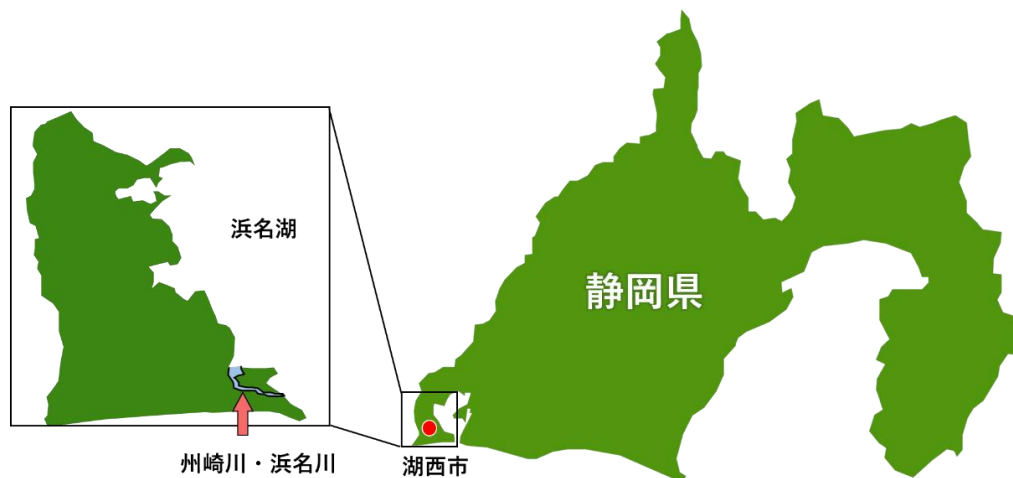


図1. 湖西市新居町の浜名川および州崎川.



図2. 湖西市新居町の浜名川と州崎川と激流ポイント。



図3. (A) 浜名川支流の州崎川のようす。



(B) 激流発生ポイントの様子。

2. 方法

(1) 現地調査

浜名川および州崎川での現地調査は、2023年3月11日(小潮)と8月2日(大潮)の2回行った。浜名川や州崎川沿いの6地点(図4)において、24時間継続して基準からの潮位と流速を計測した。潮位測定を行った6調査地点の選定時には、以下の2点に留意した。1つめは、安全の確保である。足場や夜間の照明が確保され、転落の恐れがないように留意した。2つめは、船の運航や自動車の通行に支障が生じないことである。これを達成するために、静岡県浜松土木事務所、湖西市役所土木課、浜名漁協新居支所、浜名湖財団と事前に計画を練り、了承を得た上で調査を行った。

流速は、測定地点②において、水面上を流下する落葉が10m間を移動する時間を計測することにより算出した。さらに、同地点においては河道内の浅瀬などといった微地形や水深も測定した。水深の測定は、おもりをつけたひもを川底に向けて垂直に下ろし、川底についた時点での水面とひもの接触点上に印をつけることによって測定した。



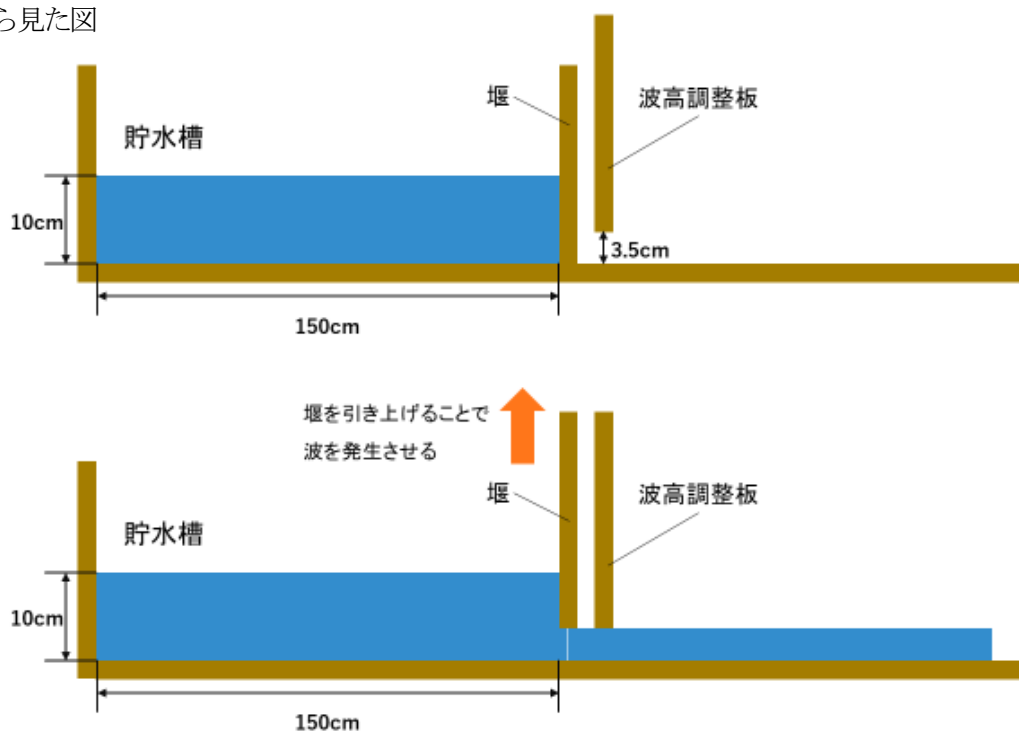
図4. 現地で潮位の変化を計測した浜名川および州崎川流域6地点.

(2)水路模型による再現実験

浜名川河口の激流ポイント周辺域の流路を模した水槽模型を木製板およびモルタルを用いて作製し、激流の再現実験を行った(図5)。当初の計画においては図5のように可動式の堰および波高調整板を開閉することにより潮位差と流向の変化を疑似的に再現することに焦点を当てていた。しかし、研究を進める中で、渦の発生には単に潮位差が生じることだけでなく、流路内を激流が流れ続けることが重要である可能性が示唆された。これに対応するために、急遽、開閉式排水装置を増設し、その影響の有無を検証した。

水槽模型における渦の定量化は、直径 1cm の高弾性ゴムボール玩具を水面に浮かべることによって行った。水流にともなうゴムボールの動きを動画で撮影することで、渦の可視化および数値化による検証作業を行った。

【A】横から見た図



【B】 上から見た図

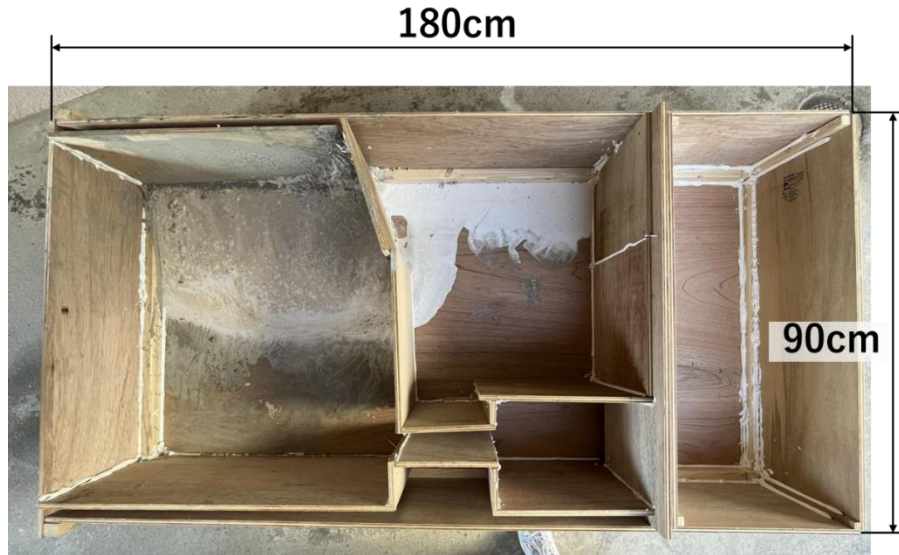


図5. 浜名川河口の流路モデルによる激流再現実験のようす。

(3) シミュレーションソフトを使ったシミュレーション

河川シミュレーションソフトウェア iRIC を用いた数値計算により、模型実験の妥当性検証と激流・渦の発生要因の検討を行った。数値計算の対象となる地形は、図4の測定地点①と測定地点②である。

測定地点②の数値計算には、現地調査で得られた水位や地形高、流量等のデータを用いた(図6)。また、高流量(干潮)時に完全に露出する浅瀬を再現した(図6 中水路モデル上の枠線で囲った部分、詳しくは結果と考察の現地調査および iRIC の部分参照)。

また、今回の研究目的からは外れるが、浜名湖の潮汐に関する検討を進めるために、測定地点①で予備シミュレーション(図7)も行った。予備シミュレーションでは、現地調査で得られた局所水深のデータや、航空写真を元に算出した地形データを用いた。また、流量については、測定地点②で測定した流量や現地調査で得られた潮汐のデータを元に、水の収支を計算して理論的に求めた。

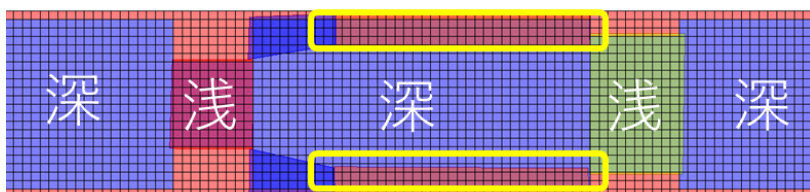


図6：現地調査をもとに再現した水路モデル。

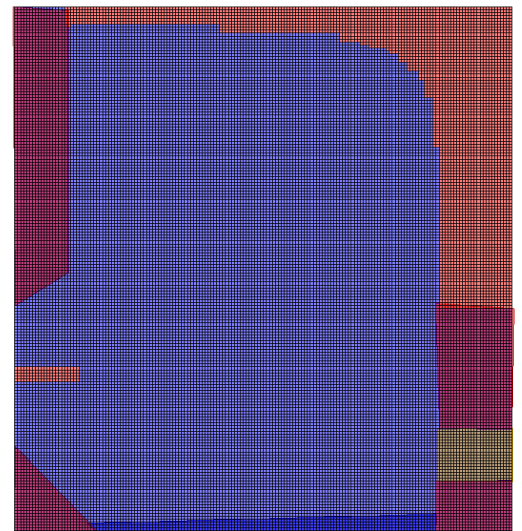


図7. 予備シミュレーションの水路モデル。

3. 結果と考察・今後の展望

(1) 現地調査

現地調査では、浜名川および州崎川流域6地点で24時間潮位変化を実測し、その結果が図8、図10である。この結果のなかで注目すべき点は、距離が100m程しかない調査地点①と②の2地点間で、満潮・干潮のピークに潮位の大きさに加えて、時間的ピークのズレがみられた点である(図8)。

特に、浜名川の川幅が最も狭くなっている JR 高架橋下の地点（調査地点①と②の間の地点）において、南北方向の潮位差により水の流れる方向や流速が大きく変化し、渦が発生していることが確認できた(図 8、図 9)。満潮と干潮のあいだで、南北の潮位差がなくなると、流れが一時的に静止する。その後、水の流れる向きは南北方向で逆転した。流速は速いときに約 2.0m/s に達し、一度ピークを迎えると約 2 時間変化しなかった(図 9)。しかし、観察結果からは、流れの勢いが増しているように見えたため、海水の流れのエネルギーが、海水の湧きあがり現象などといった 3 次元的な力に変換されていたのではないかと推定される。また、潮位差により生じる激流と川幅の変化および浅瀬により生じる逆流の衝突が大きな渦の発生する主要因であると推定された。さらに、激流の流速・流向等が浅瀬による不連続的な水位変化によりかき乱される様子もみられ、浅瀬の存在が浜名川にみられる渦の多様性に寄与している可能性が示唆された。加えて、渦の大きさは時間帯で変化した。満潮と干潮のあいだで流れが止まったときには、大きくゆるやかな渦がみられた(図 11-A)。一方、満潮や干潮時には小さな渦が多数みられ、またそれらの小さな渦が移動する様子がみられた(図 11-B)。今後の課題として流速をより正確に実測する必要があることがあげられる。特に複雑な流れの影響を受けない流速の測定方法の確立が課題である。

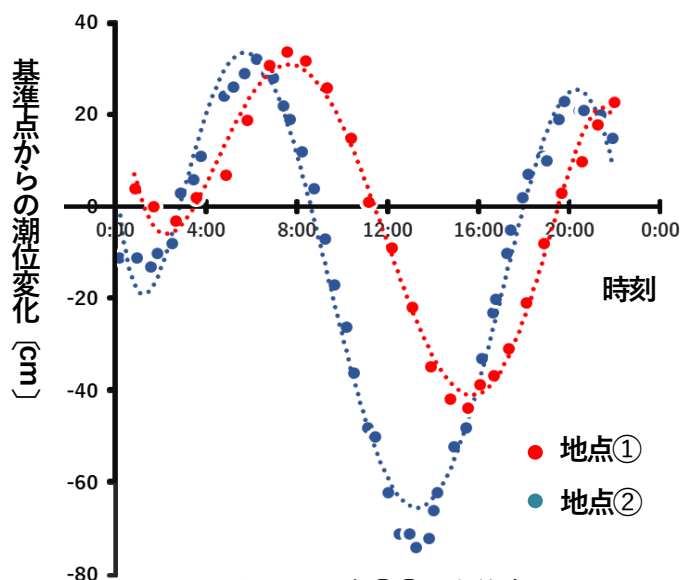


図 8. 地点①②の潮位変化.

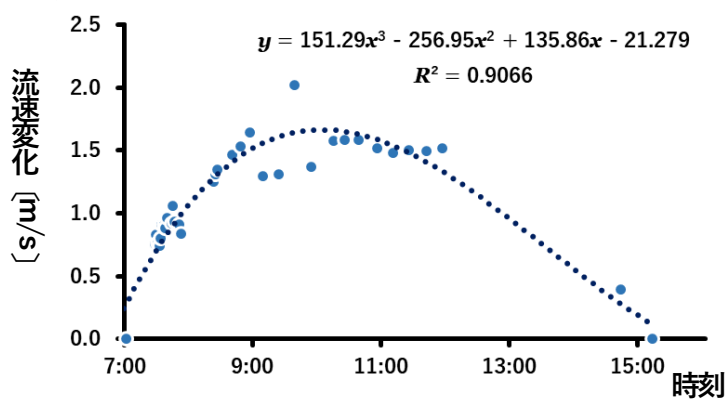


図 9. 地点②での流速の変化.

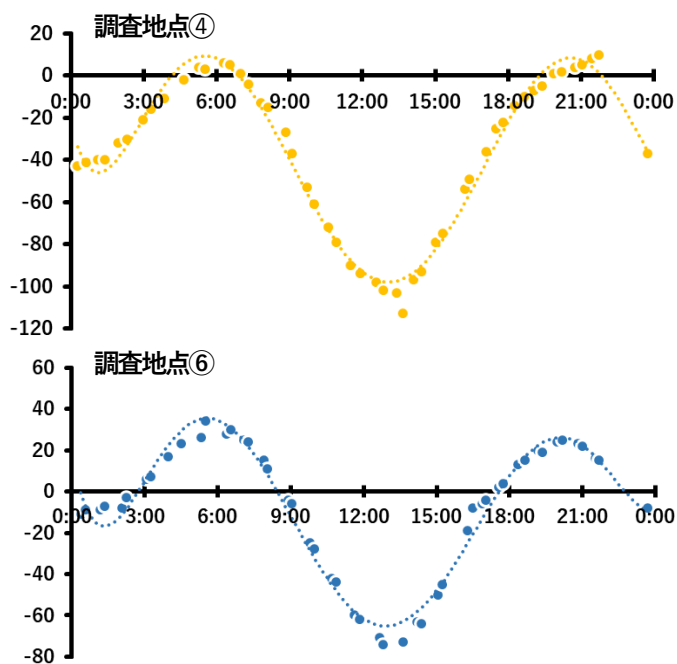
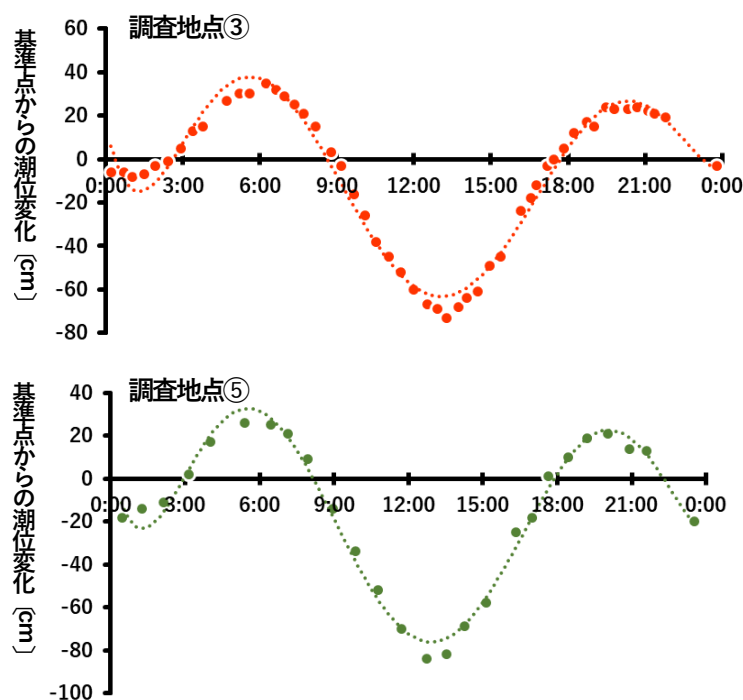


図 10. 調査地点③～⑥の潮位変化.

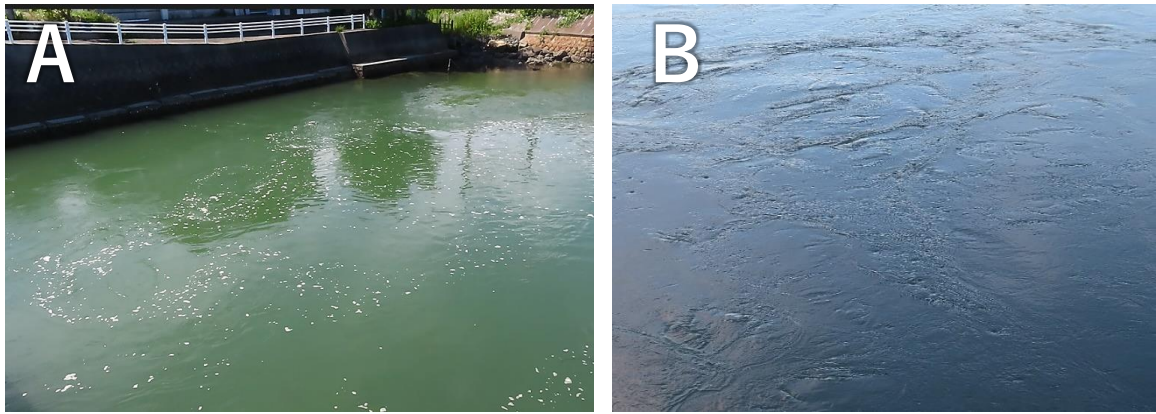


図 11. 現地での潮位および流速計測時に観察された渦の様子.

(A) 満潮と干潮のあいだの大きくゆるやかな渦がみられた

(B) 満潮や干潮時には小さな渦が多数みられ、小さな渦が移動する様子がみられた

(2) 再現実験

水槽実験でも現地調査と同様に渦の発生が確認された(図 12 中の矢印)。しかし、流量によって渦の発生状況が変わったり、現地の渦とは異なっていた点があったため、渦発生条件の解釈が課題である。また、自作水槽の排水装置に到達したときの流水の勢いが弱いので、開閉式排水装置の排水口まで水が到達せず、目論見通りに機能しなかった。そのため、図 4 の堰(可動板)を改良し、水の勢いを弱めないようにする必要がある。加えて、水を実験毎に貯水槽に蓄えた水の量と排水された水の量を計測していなかった。そのため、実験が同じ条件下で行われていないという問題があった。今後は、貯水槽内に蓄えた水量を管理し、同じ条件下で実験を行いたい。また、水漏れが若干あるため水漏れ対策も行っていく。さらに、水槽を改良した後は、流速を上げたり、傾斜があるところで実験したりするなど条件を様々に変更して検証を行い、渦の根本的な発生原因を解明していく。

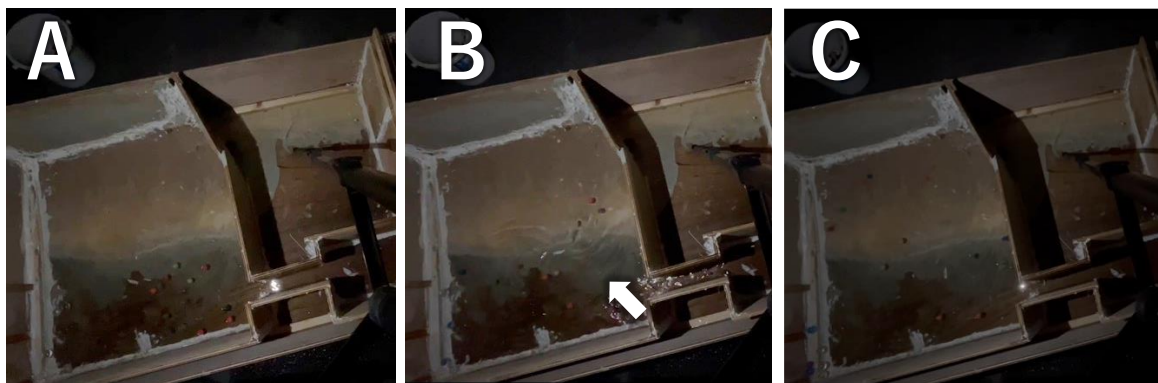


図 12. 水槽実験時に発生した渦の様子.

(A) 堰から水が流れ出してから 5 秒後. (B) 堰から水が流れ出してから 15

秒後、矢印のところに渦がある. (C) 堰から水が流れ出してから 30 秒後.

(3) iRIC によるシミュレーション

現地調査において観察された高流量(干潮時；高流速)および低流量(満潮時；低流速)の条件において、地形高・浅瀬等の地形条件を設定し、iRIC による川幅・流れ方向の 2 次元数値シミュレーションを実行した。

その結果、高流量の条件下では比較的大きな渦が生じるとともに流れに川幅方向の偏りが生じ、それに対して、低流量の条件下では小さな渦が生じ、主流に沿って渦が移送される様子が再現された。これらの特徴は、いずれも現地調査によって得られた渦と流れの特徴と一致しており、先の調査により示唆された川幅の変化や浅瀬の存在といった地形条件の重要性を支持する。また、今回観察された渦の発生要因が本質的に 2

次元的なものであることを意味している。なお、シミュレーションでは干潮時に激流のなかで見られた小さな渦については再現されなかったが、これは計算に用いる格子のセルサイズを $0.5 \times 0.5 \text{ m}^2$ に取ったことが本質的な原因である。高流量時(図13-上)は、激流である主流と浅瀬や障害物等に反射することで発生した逆流が衝突して大きな渦が発生するのにに対し、低流量時(図13-下)は主流から外れた流れが、逆流と緩やかにぶつかることによって小さな渦が発生したと考えられる。

予備シミュレーションでは、小規模の渦に加えて地形全体での巨大な渦の発生が確認された。また大きな流れもみられ、現地調査で確認できた激流および渦と一致している。これも渦の発生要因が2次元的なものであることを理論的に支持する。この予備シミュレーションも今後同様に条件を様々に変更して、渦発生の本質的な原因を解明し、地形条件の重要性を検討していく。

今後の課題としては図7の浅瀬の地形を実測できていないことや、流量、流速を計測できていないため正確な流量の値を得られていない。今後それらの値を正確に実測する必要がある。

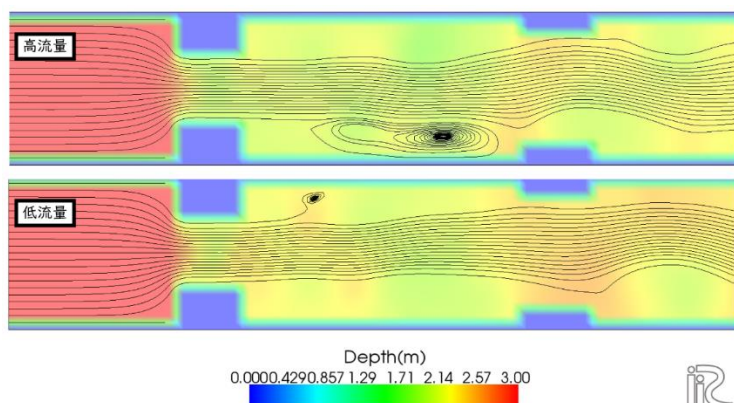


図13. iRICによる高・低流量における河川シミュレーション。

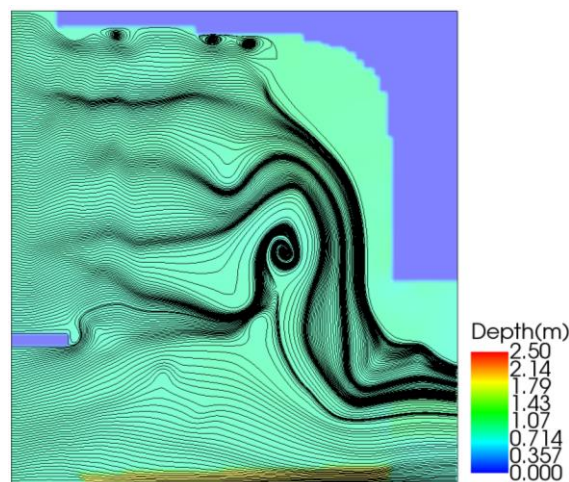


図14. 地点①でのシミュレーション結果。

4. まとめ

(1) 現地調査

潮位差によって激流の流れる向きや流速が変化しており、発生した渦が移送される様子が確認できた。流速の変化より、浅瀬などの微地形により激流が3次元的にかき乱されている可能性が示唆された。今後は、流速をより3次元的に実測する必要がある。

(2) 再現実験

水槽を用いた実験において、渦の発生が観測された。貯水槽から流す流量によって、渦の発生状況が変化するため、流量の管理を徹底することで、渦の発生原因・条件の解釈の課題を解決していく必要がある。また、水槽の設計に不備があったため今後改良を加え、傾斜をつけて実験するなど様々な条件で検証し、渦の根本的な発生原因を解明していく。

(3) iRICによるシミュレーション

高流量、低流量のいずれの条件においても現地調査を再現する結果が得られた。この結果は、現地調査で観察された渦の発生が川幅・流れ方向の2次元的な現象であることを示唆するとともに、本研究で激流・渦発生的主要因素と推定された川幅の変化や浅瀬等の地形条件の重要性を理論的に支持する。今後は、条件を様々に変更してシミュレーションを行い、渦の根本的な発生原因を解明する。また、調査地点①でも同様にシミュレーションを行い、地点②のシミュレーションより現地調査の結果に近い渦および流れの様子が再現された。今後は地点②同様に条件を様々に変更してシミュレーションを行ったり、流速および微地形を正確に実測したりする必要がある。

5. 今後の展望：現地調査

図 10 は、現地調査を行った 6 地点のうち、①②地点を除いた 4 地点の潮位変化である。地点④は他 3 地点と比較して満潮・干潮のピークの時刻のズレがほとんどみられず、潮位変化の大きさにも差はみられない。このような複雑な流れは、浜名湖内の潮汐がほとんど減衰せずに河川に侵入しており、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、という青木他(2005)の報告と矛盾しない。

今後の展望として、浜名川での激流および渦の成因を解明することで、激流および渦の発生がどのように栄養分などの物質循環に影響を与えているのか明らかにしたい。さらに、津波などの非常事態時に浜名川流域への高潮被害を最小限にするために、シミュレーションで激流や渦の発生を制御したり、巨大化を抑制したりして、最善策を探っていききたい。

6. 謝辞

本研究は、日本財団様、JASTO 様、株式会社リバネス様の研究支援、山崎自然科学教育振興会様からの助成金及び研究コーチの佐藤様、株式会社リバネスの岸本様のご指導のもとに研究を遂行することができた。心より謹んで感謝いたします。

7. 引用文献

- 青木伸一・加藤茂・熱田浩史(2005)枝分かれした小河川における調波の挙動に関する現地観測. 海岸工学論文集. 52 : 196-200.
- 有田守・青木伸一・片岡三枝子(2005)浜名湖今切れ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. 52 : 201-205.
- 榎原雅治(2008)中世の東海道をゆく. 中公新書, 244. 中央公論新社, 東京.
- 小野映介・矢田俊文(2010)1498 年明応地震による遠州灘沿岸浜名川流域の地形変化―掘削調査による地質学的検討―. 歴史地震. 25 : 29-38.
- Shimizu, Yasuyuki・Nelson, Jonathan・Ferrel, Kattia Arnez・Asahi, Kazutake・Giri, Sanjay・Inoue, Takuya・Iwasaki, Toshiki・Jang, Chang-Lae・Kang, Taeun・Kimura, Ichiro・Kyuka, Tomoko・Mishra, Jagriti・Nabi, Mohamed・Patsinghasanee, Supapap・Yamaguchi, Satomi (2020) “Advances in computational morphodynamics using the International River Interface Cooperative (iRIC) software”, Earth Surf. Process. Landforms 45, 11-37.
- 静岡県(1996)静岡県史別編 2 自然災害誌, 808.
- 静岡県知事直轄組織デジタル戦略局データ活用推進課 ‘‘浜名湖の周囲長日本一(汽水湖)’’ (2018-8-1) <https://www.pref.shizuoka.jp/j-no1/hamanako.html> (2023-1-24 確認)
- 都司嘉宣 編(1979)東海地方地震津波史料(Ⅰ・上巻)―静岡県・山梨県・長野県南部編―. 防災科学研究資料. 35 : 466, 科学技術庁国立防災科学技術センター.
- 内山雄介・Xu ZHANG・柳瀬翔太(2020)潮流強化に伴う鳴門の渦潮の発生機構に関する研究. 土木学会論文集 B2(海岸工学) 76(2) I_97-I_102.