

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題	2018年7月西日本豪雨における潮汐起因の河川背水に関する解析と現地調査
Title	Interrelationship between River Water Level and Oceanic Tide during 2018 Western Japan Floods: Field Survey and Numerical Analysis
著者	高木 泰士, Luc Henry, 水落 拓海
Authors	Hiroshi Takagi, Luc Henry, Takumi Mizuochi
出典	土木学会論文集B3 (海洋開発), Vol. 75, No. 1, pp. 1-9.
Citation	Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B3 (Ocean Engineering), Vol. 75, No. 1, pp. 1-9.
発行日 / Pub. date	2019, 2
権利情報 / Copyright	本著作物の著作権は土木学会に帰属します。 (c) 2019 Japan Society of Civil Engineers.

2018年7月西日本豪雨における 潮汐起因の河川背水に関する解析と現地調査

高木 泰士¹・Luc HENRY²・水落 拓海³

¹正会員 東京工業大学准教授 環境・社会理工学院 (〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1)

E-mail: takagi@ide.titech.ac.jp

²東京工業大学 環境・社会理工学院修士課程 (〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1)

E-mail: henry.l.aa@m.titech.ac.jp

³東京工業大学 工学部国際開発工学科学士課程 (〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1)

E-mail: mizuochi.t.aa@m.titech.ac.jp

倉敷市真備町では西日本豪雨で堤防が決壊し、約2100世帯が全壊した。被害拡大の一因として本支川合流部の背水による水位上昇が指摘されている。一方、高梁川河口は河川改修や臨海開発で川幅が著しく広がっており、瀬戸内海でも日潮差が特に大きい場所に位置するため、潮汐が河川水位に影響した可能性も無視できない。本研究では、洪水時に感潮域が潮止堰の上流側に延伸する可能性や、2018年豪雨で河川水位上昇と上げ潮の時間帯が一致していたことなど、潮汐の影響を各種解析で示した。また、高梁川沿いに現地調査を行い、上流では10m以上も水位上昇したにも関わらず、河口では満潮位程度の水位であったことを明らかにした。以上より、潮汐と河川水位の関係性を考察し、洪水に及ぼす海からの影響について指摘した。

Key Words : 2018 Western Japan Flood, tide, backwater, submerged weir, field survey, numerical model

1. はじめに

2018年6月28日から7月8日にかけて前線や台風7号の影響により、日本付近に暖かく非常に湿った空気が供給され続け、西日本を中心に全国的に広い範囲で記録的な大雨となった¹⁾。広島、岡山、愛媛など多くの県で河川の氾濫や洪水、土砂災害が発生し、死者224人、行方不明者8人(2018年11月6日時点)を出し、豪雨災害としては平成最悪の被害となった²⁾。このうち岡山県における死者・行方不明者は64人である。特に、倉敷市真備町で被害が大きく、国土地理院の調べによると、堤防が決壊のため市街地の約3割が浸水し、最大浸水深は4.8mに達している。

真備町は、岡山県西北部から水島灘につながる高梁川と広島県東北部より岡山県西部へと流れる小田川が合流する場所に位置している。2つの河川に囲まれて、過去にもしばしば洪水被害に見舞われてきた。特に、1893年10月の洪水では高梁川本川が決壊し、溺死者68人、浸水家屋が776戸に上った³⁾。その後、高梁川本川の河川改修が進み、本川の破堤は見られなくなったが、1972年と1976年には小田川下流が決壊して、真備町で大規模な浸

水が発生している。その後、河道整備や排水機場が設置されるなど対策が進められているものの、抜本的な解決には至らず、今次の災害につながっている。

今回の豪雨災害では、真備町の堤防破堤・洪水とバックウォーター(背水現象)の関係性が、災害直後よりマスメディアによって指摘されている⁴⁾⁵⁾。この現象は、本川である高梁川の水位が著しく高いため、支川の小田川からの流入が阻害されて合流部で水位が上昇するため生じる。このリスクは以前より認識されており、2017年には国土交通省が高梁川水系河川整備計画⁶⁾⁷⁾を策定し、背水影響を軽減する目的で合流点の付替えを計画している。

これに対して、高梁川流域の洪水原因について海の視点からの問題指摘はこれまでのところない。潮汐の河川への影響は、海域静水面の延長と河床の交点より上流では微弱であるといわれている⁸⁾。高梁川と小田川の合流地点は河口から13kmほど離れており、平均河床高も約TP.+7m⁹⁾と十分に高い。このため、今回の豪雨でも潮汐自体が波として直接上流へと伝わり洪水の主原因になったとは考えにくい。しかし、潮汐が河口部のせき上げ背水や出水の阻害を誘発し、間接的に上流の水位変化に

影響を与えた可能性は否定できない。本研究では、各種の解析と現地調査に基づいて、2018年7月西日本豪雨時の高梁川の潮汐と河川水位の関係について検討する。

2. 河口地理・潮位・水文条件

ここでは、潮汐の河川への影響を検討する上で特に重要な河口の地理、潮位、水文条件について述べる。

(1) 河口地理

高梁川は明治時代には現在の小田川合流地点より上流で東西に分流し、西高梁川、東高梁川として別々に水島灘につながっていた(図-1a)。その後大正年間に行われた高梁川改修工事で、天井川であった東高梁川を締め切って廃川化し、同時に西高梁川(現高梁川)の川幅が拡幅された⁹⁾。さらに河口周辺では、1953年からの水島臨海工業地帯の開発で港湾や工業用地が造成され、火力発電所、製鉄所、石油精製工場、化学工場が次々に建設された。この一連の開発で高梁川の中洲がなくなり河口域が大きく広がっており(図-1b)、河口部東側は高梁川航路、西側は玉島東航路のため、水深もかつてより深くなっている。河口を横断する水島大橋付近では、かつては200m程度であった川幅が現在では1.1kmと5倍以上に広がっている。このように河口部が広がることで、海水の流入も増えて、海の河川への影響がより強まっている

と考えられる。また、高梁川河口より約2.7kmには、大正末期に潮止堰が建設されており、現在その上流で農業用水の取水が行われている。後で述べるように潮汐の上流への影響を考える際には、この潮止堰の洪水時の水理条件が重要となる。

(2) 潮位条件

高梁川河口には乙島に検潮所があるが、過去の潮位データがインターネット上で公開されていない。また、後で述べるように、本研究では上げ潮と下げ潮の区別を天文潮位よりおおまかに判断している。そこで観測潮位の代わりに沿岸域流体モデルDelft3D FLOWを利用して2018年豪雨時の天文潮位を推算した。このモデルでは2次元、3次元の解析を行うことができるが、本検討では2次元モデルを使用した。これは津波や高潮の解析で一般的に用いられる非線形長波方程式モデルと同等であり、広範囲な潮汐の解析に適している¹⁰⁾。時間積分にはADI法、移流項の空間差分にはCyclic法を使用した。計算タイムステップは0.2分とし、瀬戸内海全域を含む図-2aの範囲を約1km格子で再現した。海域境界にはTPXO7.1 Global Inverse Tide Model¹¹⁾より抽出した主要13分潮を入力条件として設定した。

予測精度を確かめるため、広島、呉(海上保安庁が観測・公開)と宇野(気象庁)の潮位データを解析結果と比較した(図-2b)。豪雨による災害が各所で発生した7月6日から7日にかけてのデータのため欠測の箇所もある

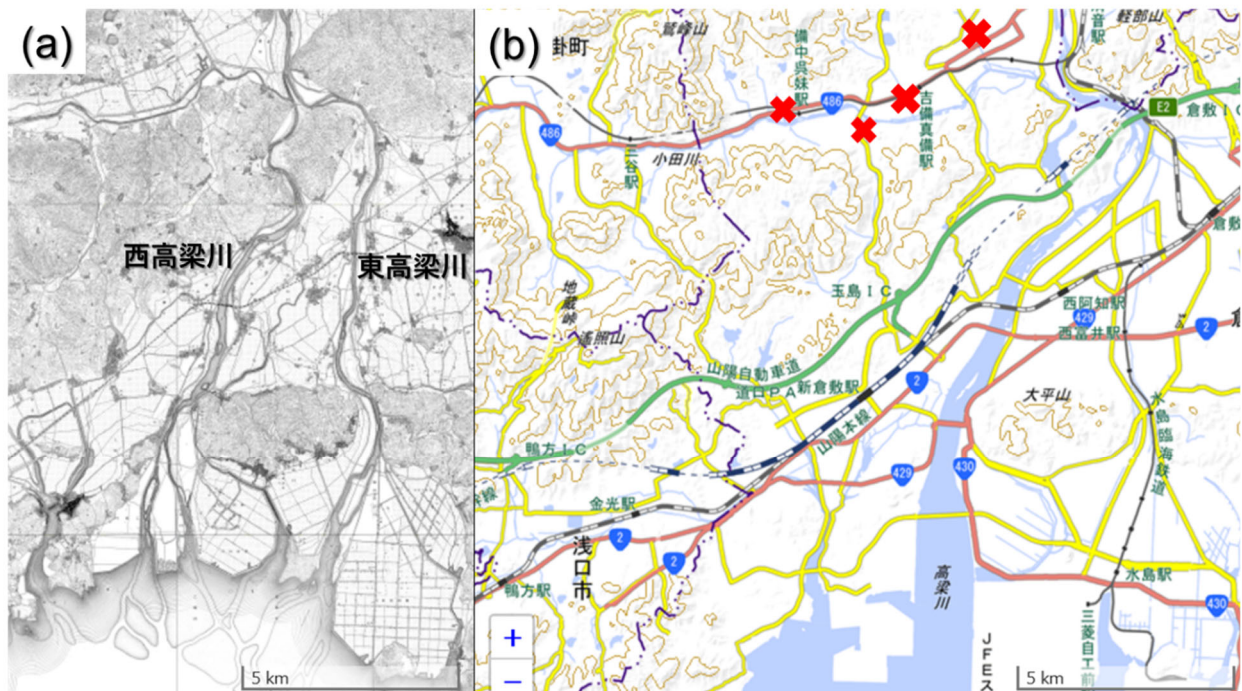


図-1 高梁川河口周辺および小田川下流域：(a) 明治期 1897年測図(今昔マップより)，(b) 現在。赤色の×印は現地報道⁹⁾に基づく破堤位置の概略。

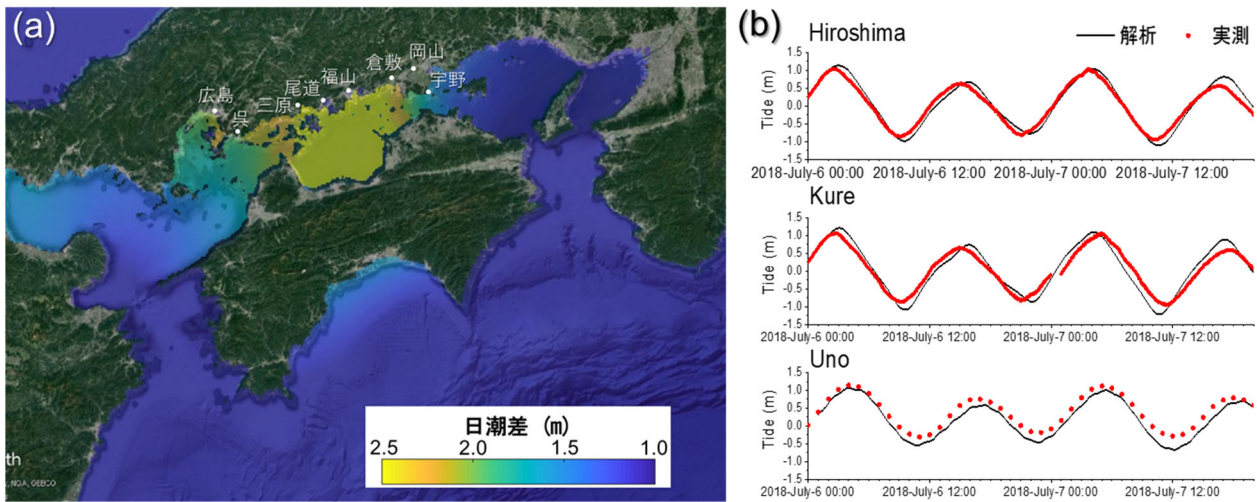


図-2 瀬戸内海の潮汐解析結果：(a) 2018年7月6日の日潮差，(b) 観測潮位との比較

が、解析結果と観測値は全般的によく一致している。特に広島と呉はともに豪雨被災地で相当の出水があったにも関わらず、潮位変動には大きな変化を及ぼしていない。これは、上流側で大規模な洪水が起きていても、河口では天文潮位が水位を支配し、河川下流端の強制水位条件になるためと考えられる。この状況は後述するよう高梁川河口でも同様と考えられる。

図-2aは解析に基づく日潮差分布図（7月6日）であるが、来島海峡から備讃瀬戸の区間（呉・三原から倉敷の範囲）で特に潮位差が大きいことがわかる。これは瀬戸内海の両側から進行波の形で伝播する潮汐波がこの海域で定常波を形成するためと考えられる。高梁川河口もこの海域に位置しており、瀬戸内海の中でも潮汐の影響が大きい場所である。ただし、7月6日は小潮にあたり、図-2は干満の差が小さいときの結果である。

(3) 水文条件

岡山県は降雨量の少ない寡雨地域として知られている。実際に日本の年間平均降雨量は1600mm程度であるが、岡山県の降水量は1100mm程度と顕著に少ない¹²⁾。このため、豪雨災害リスクが比較的小さい地域とこれまで認識されてきた。

図-3に示す通り、高梁川流域には最も上流地点の高梁市に雨量（気象庁）・水位観測（国交省）、小田川沿いの東三成、高梁川沿いの日羽、酒津、船穂で水位観測（国交省）が行われており、過去のデータがインターネット上で一般に公開されている。最も上流に位置する高梁における雨量が水系の全体的傾向を示すと考えて、この地点の水文統計量を求めた。図-4は水文統計ユーティリティ¹³⁾を使用して一般化極値分布（GEV）を42年分（1976～2017年）の年最大日降水量データに当てはめた結果である。今回の豪雨で記録した2018年7月6日の日降



図-3 倉敷市真備町周辺の地図。Google Earthに国土数値情報（国土地理院）より得た河川網を合成

水量174mmを暫定年最大値としてあわせて表示している。期間最大値は2011年9月3日に記録した179.5mmであり、2018年7月6日はこれに次ぐ雨量である。

再現期間は各々80年、60年程度と推定される。高梁川の計画高水流量が150年に一度の降雨量を対象⁶⁾⁷⁾にしていることを考えると、今回の豪雨が統計的に異常な事象であったと直ちに判断することはできない。激甚な洪水災害の原因は、自然的要因ほか複眼的な視点から検証されるべき問題といえる。

3. 河川水位分析

図-5は2018年と2011年豪雨時の高梁川水系各地点の河川水位であり、いずれもピーク前後の合計3日間の時系

列を示している。水位の高さ基準が観測所毎に異なり直接の比較が難しいため、ここでは元の数値より豪雨開始以前の平水時の水位を引いた値で示している。すなわち、平水時からの河川水位偏差の時間推移である。

2018年豪雨では高梁の降水量に3回の明瞭なピークが現れているが、同様に各地点とも水位のピークが3回現れており、降雨と河川水位で強い相関が認められる。但し、互いの出現には数時間の時差がある。例えば、小田川との合流点に近い酒津では、7月6日0時、7月7日1時および11時頃に水位ピークが出現しているが、降雨ピークはそれよりも4~6時間早く現れている。高梁の水位は酒津他よりも2~3時間ピークが早い。高梁、日羽、酒津、船穂の順で洪水波が上流から下流に伝わっている。一方で、小田川の水位を示す東三成のデータは酒津とほぼ同

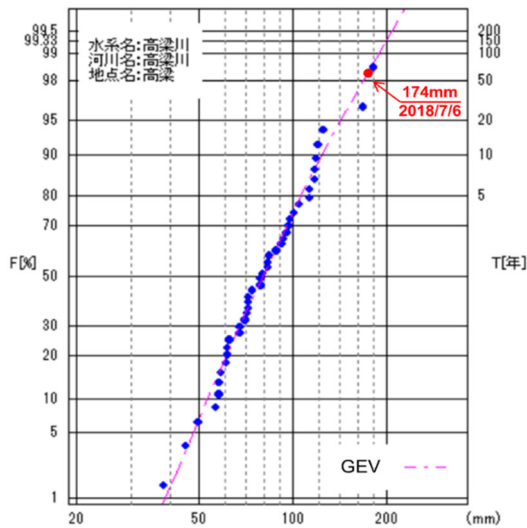


図4 日降水量の極値統計解析結果（高梁地点）

時刻にピークを迎えており、洪水波が本流の高梁川から支流の小田川に伝わったのか、その逆の向きなのか、あるいは2つの異なる洪水波であったのか、今回の分析のみでは判明しない。

図-5には、高梁川河口の潮位解析結果をあわせて示している。ここでは、潮位が上昇局面のときを上げ潮、下降局面のときを下げ潮と大まかに判断して、各々の時間帯について色分けして示している。この判別は簡易的で、あくまで河口部付近の潮位変化を見ているのみであり、河道内で上げ潮・下げ潮に対応する流れが実際に生じているか直接的には言及していない。

高梁川・小田川合流地点より下流側に位置する酒津と船穂に着目すると、1回目と2回目の水位ピークがちょうど上げ潮の時間帯に重なることがわかる。特に2回目のピーク時刻に小田川支川の高馬川で決壊が確認されている¹⁴⁾。因果関係は不明であるが、上げ潮による河川流の流下阻害と水位上昇の間に何らかの関係性がなかったか、今後海からの影響も含めた検証が必要と考える。

5か所の観測地点のうち、日羽と酒津が最も水位が高い。日羽は山間に位置する場所で降雨が短時間に流下したと考えられる。酒津は川幅が狭く、小田川との合流地点のすぐ下流に位置しているためと考えられる。ただし酒津の氾濫危険、計画高の各水位はT.P.+12.00m、12.293mであるのに対して¹⁵⁾、2018年豪雨時の最高水位はT.P.+12.35mであった。よって、図-5の酒津の水位記録は越流が生じて頭打ちになっている可能性がある。

潮汐の影響をさらに調べるために、高梁で最大の日降水量を記録した2011年豪雨時の水位変化と比較する。このときも、高梁と日羽で最初に水位が上昇し、その後酒津、船穂へと洪水波が伝播しており、9月3日18時頃に水

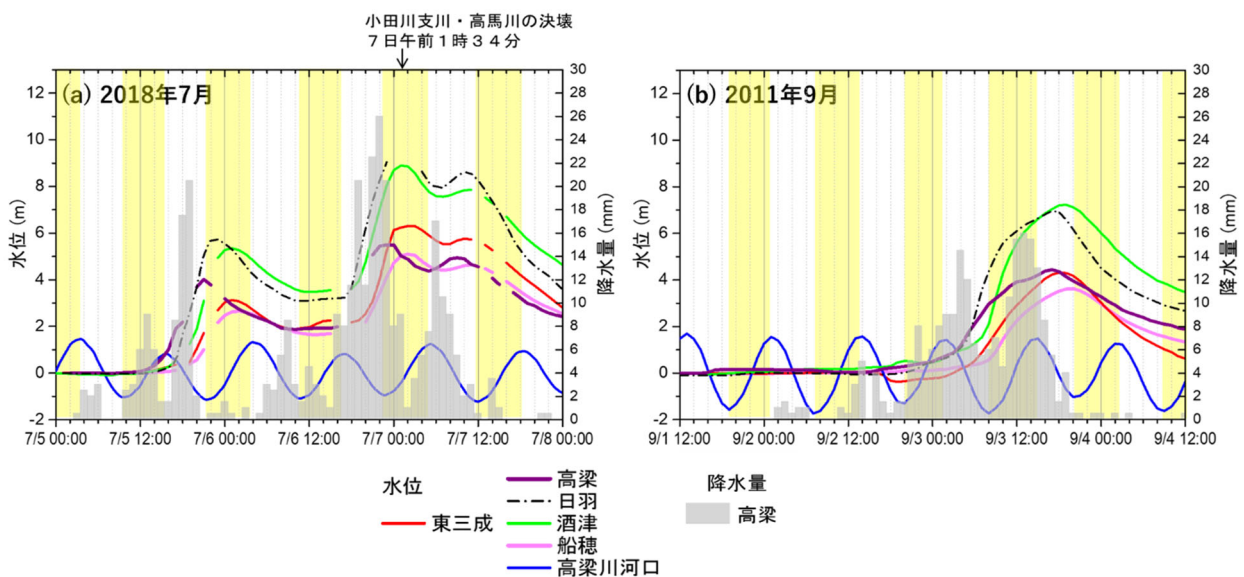


図-5 河川水位の時間推移（注：標高基準ではなく、平水時の河川水位からの偏差）。高梁川河口は潮汐解析結果。
 (a) 2018年7月豪雨時、(b) 2011年9月豪雨時。薄黄色の時間帯は上げ潮時、それ以外は下げ潮時を示す。降水量は気象庁アメダス、水位は国土交通省 水文学データデータベースより取得。

位ピークが現れている。2018年豪雨時とは異なり、このとき潮汐は下げ潮の時間帯にある。2011年9月3日の日降水量は2018年豪雨時を上回るが、酒津のピーク水位は2011年の方が1.7mほど低い。2018年豪雨の方が短時間雨量が尖っており、このような降雨パターンが関係したと考えられるが、2011年豪雨時は下げ潮により流下が促された可能性もある。

4. 高水位調査

豪雨発生の約1か月後に現地調査を実施した。主目的は洪水の痕跡を調べて、上流から河口までの高水位分布を調査することである。このため、高梁川沿いの高梁、総社、倉敷の各市で光波測距器や測量スタッフ、GNSS測量機器などを用いて測量を行った。水位は調査時点の河川水面あるいは海水面からの高さである。調査は記録的な猛暑が続いた期間で雨も降らず、河川は平水時に近い状態であった。図-6は各地点の高水位の計測値であり、少なくともここまでは水が上がってきたという目安である。同図にはRTK-GPS測量により計測した標高値、またその測量を行っていない地点は国土地理院の5mメッシュ標高データの値を示している。

図-7に調査時の状況を示す。水位の到達点は、橋脚、ガードレール、階段手すり、立ち木、ネット、堤防等に引っかかった流木・枝葉・ゴミ(図-7a, b, e, f, g, h, i, k)、窓ガラスの破損(c)、建物壁に付着した泥土(d)、コンクリート護岸の変色(j, k)より判断した。図-5aの水位データからもわかるように、2018年豪雨時、高梁川では複数回高水位のピークが出現している。現地調査でも地点jで2つのピークを確認したが、今回は高い方の水位線を計測した。

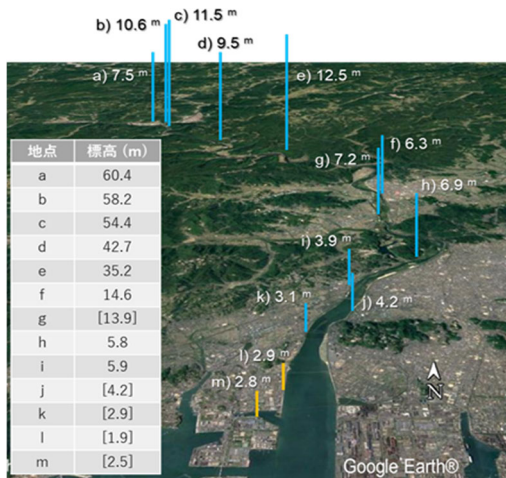


図-6 高梁川沿いの推定水位(調査時の河川水面・海水面から測定した高さ)と計測地点の標高(カッコ内は国土地理院基盤地図情報, それ以外はRTK-GPS測量の結果)



図-7 現地調査で高水位の痕跡を確認した地点の状況

地点a~eは山間の場所で、川幅も比較的狭く、急峻な山肌を降雨が一気に流れて、水位上昇は急激であったと推測される。竹をはじめ川岸の木々が流下方向に大きくなぎ倒されていた。一方、真備町に近い地点f~hは、河川敷や中洲が広がる場所で木々が生き茂った場所が多かったが、大規模に植生が流失しているような状況ではなかった。流積も大きく、地点a~eに比べると水位は低く、流れも比較的緩やかであったと予想される。

地点lとmは、臨海工業地帯に挟まれた河口部の状況である。両地点とも目立った被害はないが、満潮位程度と考えられる高さに流木や枝木が漂着していた。現地調査は干潮の時間帯であったため、護岸基礎が露出していた。捨石の途中で明瞭な変色を確認したが、今回の豪雨ではなく、日々の潮位差に起因すると考えられる。地点lの新設パラペットにも海水の上昇を示す変色はなく、地点m周辺の道路上にも浸水の痕跡は認められなかった。よって、この2地点は他とは異なり、洪水起因の水位変化は小さく、潮汐で最高水位が決まったと考えられる。このため、先に述べたように洪水時であっても天文潮位が河口水位を支配し、河川下流端の強制的な境界条件になることが裏付けられる。

5. 潮汐の潮止堰遡上に関する数値解析

高梁川河口では半日周潮の潮汐振動が卓越しているため、上げ潮が約6時間継続する。したがって、上げ潮の時間と一致すると、前節で考察したよう洪水流の流下を妨げる要因になりうる。本節ではこのような現象、すなわち潮汐起因のせき上げ背水について検討を行う。2018年豪雨時の河川流量が不明なため、ここでは計画高水流量13,400 m³/sを想定した。これは平均流量44m³/s¹⁰⁾の約300倍の猛烈な出水である。その他検討条件を表-1に示す。

本検証では、特に高梁川河口に設置されている潮止堰に着目する。潮止堰は落差があり、平水時はこの部分で射流が生じて潮汐の影響が上流に及ぶことはない。国土交通省の河川整備計画⁹⁾でも、潮止堰より下流が感潮区間と想定されている。これに対して、図-8は潮止堰の左岸取付部(図-7(k)の対岸にあたる)の豪雨後の状況であり、洪水による流れは、潮止堰を大きく乗り越えていたことを表している。図-7(k)の地点で観察した限り、少なくとも河川敷上で2~3m程度の浸水が発生していた。

そこで、洪水時に潮止堰を乗り越えて潮汐の影響が上流に及ぶことがありえるか、近年多方面で活用が進む数値流体モデルOpenFOAMを使用して解析を行った。非圧縮性流ソルバーのうち、interFoamを用いてVOF法に基づく気液2相流解析を行った。潮止堰の越流で生じる激しい乱流を再現するため、乱流モデルにはLESを選択した。ただし、計算負荷軽減のため、断面2次元で奥行方向の流れは無視し、潮止堰を含む90mの範囲のみ詳細に解析した(図-9)。短距離のためこの区間の河床勾配は無視して水平床を仮定した。潮止堰は現地調査で測量スタッフを用いて計測した概略値として、天端高2.4m、天端幅2mの台形状とした。また、一部に魚道や減勢工が設置されているが、このような付帯工は考慮していない。



図-8 高梁川河口潮止堰の豪雨後の状況(右上方向が上流)

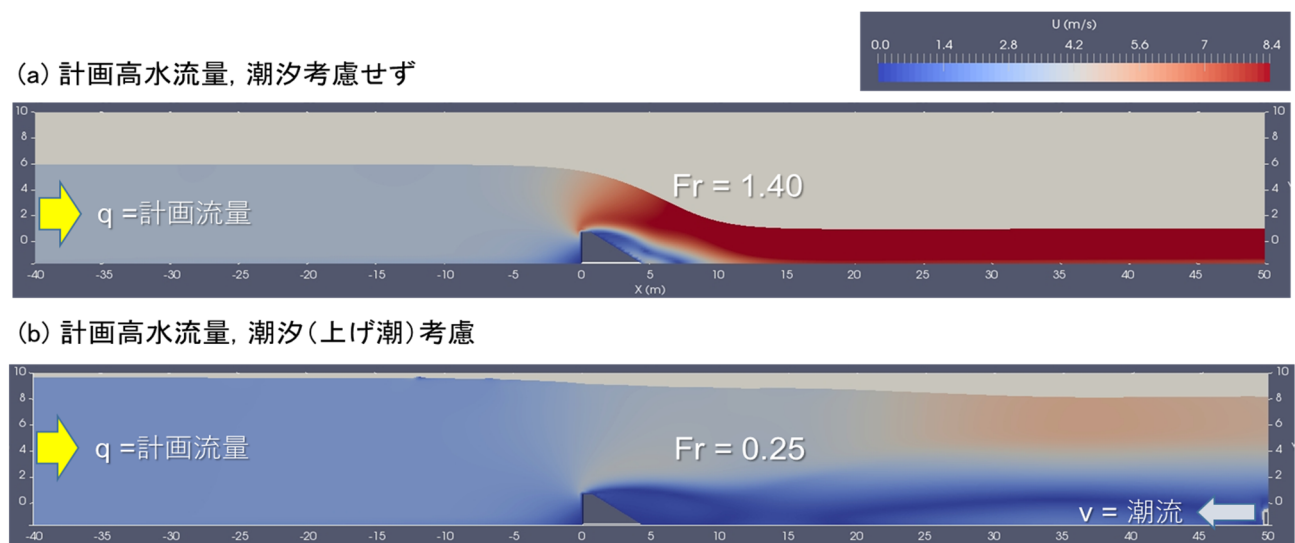


図-9 潮止堰を越える流れの数値解析。図の左側が上流側、右側が河口側。(a)潮流を考慮しない場合。(b)潮流を考慮。

計算格子は20cmの正方格子を設定し、クーラン数が0.5を超えないよう時間ステップを逐次変化させるなど効率化を図った。境界条件として、上流より計画高水流量（単位幅流量25.8m³/s）を流入させて、下流から勾配ゼロで流出させるよう設定した。さらに、潮汐の影響を考慮するケースでは、下流境界の川底から高さ1mの範囲に流速流入境界を配置した。潮流なしでは計算開始から2分程度で流況が安定したが、潮流ありでは7分程度を要した。

洪水時の河口は明らかに強混合型で、成層状態で流れる訳ではないが、互いに交差する河川流と上げ潮流の両方を厳密に再現することは難しく、簡易的な方法としてこのように仮定した。上げ潮流速を想定して、流速流入境界に0.4m/sの流れを与えた。この値は、高梁川河口域で実施された既往の観測結果¹⁷⁾を参考にしている。

解析結果を図-9に示す。フルード数は潮止堰法尻の5m海側（x=10m）における数値である。潮汐を考えないケースは、潮どまりの状況に対応し、堤頂部で射流が発生しフルード数が1を超えている。下流水位が上流に伝わることはなく、潮止堰上流は低下背水曲線となる。

一方、上げ潮を考慮したケースでは、計算直後は越流部で射流が発生するが、すぐに常流へと遷移する。この結果、下流側の水位上昇が上流側へと伝わり、全体的に水位上昇が進む。なお、この射流から常流への遷移は、上げ潮流速を半分に弱めた0.2m/sの解析条件でも生じることを確認しており、微弱な上げ潮流でもこのようなダイナミックな遷移をもたらす可能性を示している。

現地調査で明らかになった潮止堰周囲の状況も今回の解析結果と一致している。図-7(k)の写真に写るコンクリート壁上部の雑草の付着が、潮止堰前後ではほぼ同じ高さで水平に流れている。このことは少なくともピーク水位時に水位が短距離で急落するような状況が生じていないことを示唆している。したがって、潮止堰は平水時には潮汐を遮断する役割を担うが、洪水時には堰を乗り越えて感潮域が上流に延伸する可能性がある。

表-1 検討条件

項目	設定
計画高水流量	13,400 m ³ /s ⁹⁾
平均河床勾配	1/1500 ⁹⁾ (河口～合流点)
平均川幅	800 m ⁶⁾
等流水深 h_0	5.32 m
限界水深 h_c	3.06 m
川幅 (潮止堰地点)	520 m (Google Earthで測定)
潮止堰形状	天端幅2 m, 高さ24 m (現地調査に基づく概略値)
潮止堰越流量	25.8 m ³ /s/m (計画高水流量を潮止堰地点の川幅で除した単位幅流量)
流速流入境界に与えた流速	0.4 m/s ¹⁷⁾

6. 考察

ここでは、潮汐の影響についてさらなる評価を行うため、せき上げ背水による水位上昇量を一次元不等流として試算し、海からの諸影響について考えをまとめる。

(1) せき上げ背水の解析的試算

潮汐は洪水時には潮止堰を乗り越えて上流側の河川水位に影響を及ぼす可能性がある。しかし、今回行った数値解析は潮止堰前後の狭い領域を対象とし、計画高水流量を想定したため、2018年豪雨時に潮汐が原因で真備町など上流側でどの程度のせき上げが生じたか、具体的に示すには至らなかった。

この関係を解き明かすためには、広い流域で水理・水文と潮汐遡上を連成的に解いて、洪水波と潮汐波の時間的推移を追いかける必要がある。また、河川流と潮汐流の干渉は非常に非線形性の強い現象であり、河口形状に応じて潮汐の増幅や減衰が生じる^{18),19)}。正確な予測には、乱流モデルを組み込み、淡水、海水、空気からなる混相流を考慮できるモデルによる検討が必要になり容易ではないが、今後の課題としたい。

諸々の制限はあるが、背水の現象を最も単純化すると広幅長方形断面水路の問題になり、以下の運動方程式と連続式を解くことで求めることができる。

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{v^2}{2g} \right) + \frac{dh}{dx} + I - \left(\frac{n^2 v^2}{h^3} \right) = 0 \quad (1)$$

$$q = hv \quad (2)$$

ここで、 h は水深、 q は単位幅流量、 v は断面平均流速、 I は水路勾配、 n はマンニングの係数である。この解を求めるためには水深に関して境界条件が一つ必要であるが、流れが常流ならば下流端で、射流ならば上流端で与える。

高梁川の場合、計画高水流量でも水路は緩勾配の常流（等流水深>限界水深）であり、下流端に境界を与えることで求まる。不等流水面形はせき上げ背水曲線（M1曲線）を描くため、上流側で水位上昇が予想される。

表-1に示した高梁川の諸条件に対する計算例として、上式の第3次近似解²⁰⁾を用いて、水面形の概略を推定した結果を図-10に示す。下流境界には、高梁川河口の潮位として1~3mを入力した。上流では水面形は等流水深に一致するが、河口付近では顕著なせき上げが生じる。

等流水深を越える部分をせき上げ背水面とすると、そのせき上げ量は、河口から5kmの地点では、潮位1mで10cm程度であるが、潮位2mでは38cm、潮位3mでは82cmにも達する。

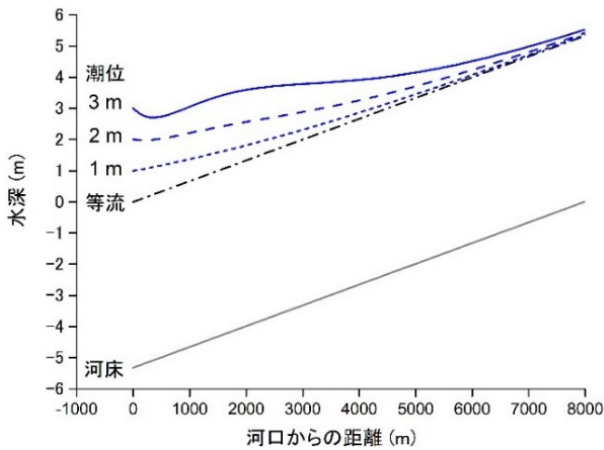


図-10 せき上げ背水曲線の計算例

このように潮位が高くなるにつれてせき上げが大きくなるのは、式(1)が示す非線形性のためである。同様に、潮位が高いと下流端での水位拘束条件が強く働き、水面形に波状が現れる。

したがって、特に瀬戸内海中央部のように日潮差が大きい場所では、潮汐起因のせき上げで、河口から少なくとも数kmの範囲でせき上げの影響が現れると考える必要がある。高梁川の場合、河口部の川幅は広いが、小田川との合流地点は狭窄部になっているため、なおさら水位が上昇しやすい条件にある。

水位ピークが上げ潮の時間帯に一致することで、水位上昇が助長される可能性もある。例えば酒津の避難判断水位はT.P.+11.6mであり、氾濫危険水位のT.P.+12.0mまで40cmの猶予しかない。この間の水位上昇速度は、上げ潮に重なればさらに急速になるかもしれない。当然この違いが避難時間の猶予に直結する。

(2) 河川水位への海からの諸影響

以上の結果を踏まえると河川への海からの影響として、少なくとも以下のような要因を挙げることができる。

- (a) 潮汐波の直接の伝播・遡上
- (b) 河口水位上昇に伴う河川水位勾配の低下と流量の減少
- (c) 河口水位上昇に伴うせき上げ背水面の形成
- (d) 上げ潮など流下阻害要因が引き起こす堰越流状態の遷移（射流から常流へ）
- (e) 潜り越流や不完全越流がもたらす下流側水位の上流側水位への部分的影響

国土交通省の危険水位及び氾濫危険水位の設定要領²¹⁾では「水位上昇速度については、近年の主要な洪水や河川整備計画の策定に用いたハイドロ等のうち、高水位部分の上昇速度が最も速いものを用いて設定する等、個々の河川の出水特性等を考慮して安全側で設定するものとする」とあり、水位上昇速度について明記されている。

一方、潮汐の影響は、同感潮区間の取り扱いの中で、「感潮区間における箇所毎の危険水位から洪水予報観測所での水位への換算にあたり、一定の精度が確保できない場合は、洪水予報観測所以外の、危険水位を設定した箇所近傍の観測所で危険水位換算水位を定めるとともに、この水位情報についても提供に努めるものとする」とあり、潮汐の影響を考慮しているともとれるが、明示的ではない。今回の検討結果が示すように、潮止堰が設置されていたとしても、洪水時には感潮区間が上流側に延伸する可能性があるため、平水時の感潮区間を基準にする洪水予報に誤差をもたらす恐れがある。

このため、水位の上昇ピークが上げ潮のタイミングに一致するときには、警報や避難指示により迅速な対応が求められる。例えば、台風時の気象予報や報道では、満潮時刻と重なる場合、特別に注意を促すような場面が一般的になってきた。同様に、河川洪水においても、上げ潮に一致し、悪条件が予想される場合、より迅速に避難を喚起するような予報・警報のあり方が検討されるべきと考える。洪水時であっても河口水位は天文潮位が支配的であるため、潮汐条件を数時間前の避難判断に加味することは少なくとも論理的には可能である。

7. 結論

高梁川河口には潮止堰が設置されており、平水時は越流で生じる射流のため潮汐の影響が上流に及ぶことはない。しかし、2018年豪雨の後に実施した現地調査では、最高水位は潮止堰を大きく越え、その前後の水位はほぼ一定で、射流が示す水位の急変は生じていないことがわかった。また、河川流と上げ潮の干渉を簡易的に考慮した数値解析でも、潮止堰付近の流れが短時間で射流から常流に遷移し、下流側の水位が上流側に伝わることを示された。すなわち、洪水時には感潮域が上流に延伸する可能性がある。さらに、河川水位ピークと上げ潮のタイミングが一致していたことや、瀬戸内海でも特に日潮差が大きい場所であること、近年河口域が著しく広がっている状況などを総合的に考えると、潮汐が2018年7月豪雨時の高梁川の河川水位とも関係していた可能性がある。

潮汐は河川水位の上昇を助長・加速する可能性がある。特に避難判断水位と氾濫危険水位の差が小さいような河川では、住民の避難猶予時間に少なからず影響を及ぼす懸念がある。台風時には高潮偏差が加わり、せき上げ背水がさらに顕著化する可能性もある。このような点も含めて、河川洪水に及ぼす海からの諸影響について一層の検証・考慮が必要と考える。

謝辞：本研究は科研費(16KK0121：研究代表者 高木泰士)の支援を受けて行われたことを記す。

参考文献

- 1) 気象庁：平成 30 年 7 月豪雨（前線及び台風第 7 号による大雨等），平成 30 年 7 月 13 日，2018.
- 2) 消防庁：平成 30 年 7 月豪雨による被害状況及び消防機関等の対応状況について（第 58 報），2018.
- 3) 内田和子：岡山県小田川流域における水害予防組合の活動，水利科学，No. 320, pp. 40-55, 2011.
- 4) 毎日新聞：2018 年 7 月 11 日(水)朝刊，2018.
- 5) 山陽新聞：2018 年 7 月 15 日(日)朝刊，2018.
- 6) 国土交通省：高梁川水系河川整備計画（変更），134p., 2017.
- 7) 国土交通省：高梁川水系河川整備基本方針（資料 5-2），18p., 2007.
- 8) 宇野木早苗：河川潮汐の研究 - 第 2 報，第 16 回海岸工学講演会講演集，pp. 377-384, 1969.
- 9) 山口恵一郎ら(編集)：日本図誌大系（中国），朝倉書店，pp. 140-143, 2018.
- 10) 高木泰士，富安良一，荒木健人，松原恭博，真野泰人，巖峰，鈴木正道，石原一郎，森勇造，永瀬翔平，中村友哉：浮上式防潮堤の狭小隙間部から流入する津波・高潮流量の評価手法，土木学会論文集 B3（海洋開発），土木学会，Vol. 73, No. 1, pp. 35-42, 2017.
- 11) Egbert, G. D. and Erofeeva, S. Y.: Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides, *J. Atmos. Ocean. Technol.*, Vol. 19, No. 2, pp. 183-204, 2002.
- 12) 気象庁：平年値（統計期間 1981~2010 年），2011.
- 13) 国土技術研究センター：水文統計ユーティリティ Ver. 1.5 操作マニュアル，23p., 2017.
- 14) 山陽新聞：2018 年 7 月 11 日(水)朝刊，2018.
- 15) 岡山県：岡山県地域防災計画（資料編），第 3 章 予報及び警報等の種類と基準等，2018.
- 16) 宇野木早苗：流系の科学，築地書館，364p., 2010.
- 17) 白木喜章，高尾敏幸，柴木秀之，山下義昭，田中丈裕：岡山県水島港周辺海域における流況・SS 分布予測モデルの開発，海洋開発論文集，第 24 巻，pp. 1069-1074, 2008.
- 18) Savenije, H. H. G.: A simple analytical expression to describe tidal damping or amplification, *Journal of Hydrology*, Vol. 243, pp. 205-215, 2001.
- 19) Takagi, H., Tran T. V., Nguyen, D. T. and Esteban, M.: Ocean tides and the influence of sea-level rise on floods in urban areas of the Mekong Delta, *Journal of Flood Risk Management*, Vol. 8, No. 4, pp. 292-300, 2014.
- 20) 神田徹，浜村吉昭：広幅長方形断面水路におけるせき上げ背水曲線の簡略計算式，土木学会論文集，No. 387, pp. 301-304, 1987.
- 21) 国土交通省：危険水位，特別警戒水位，避難判断水位の設定要領，2014.

(2018. 8. 6 受付)

INTERRELATIONSHIP BETWEEN RIVER WATER LEVEL AND OCEANIC TIDE DURING 2018 WESTERN JAPAN FLOODS: FIELD SURVEY AND NUMERICAL ANALYSIS

Hiroshi TAKAGI, Luc HENRY and Takumi MIZUOCHI

The historical flood that occurred in western Japan in July 2018 claimed over two hundred lives. The river embankment breach caused severe flood damages particularly in Okayama, leading to complete destruction of 2100 houses. According to the engineers who appeared in the news, the flood was likely triggered by fluvial backwaters between Takahashi and Oda River. To understand whether other mechanisms might have been related to this flood event, we investigated the interconnection between tides in Seto Inland Sea and water levels in Takahashi River. This concern originated from two facts: (1) the river mouth of Takahashi River has been expanded because of the extensive river/port development, and (2) the inner part of Seto Inland Sea is subject to high tides due to the two tidal waves from both sides of the sea. We performed a numerical analysis to simulate the strong turbulence induced by the collision of the flood tide and river flow around a submerged weir constructed near the river mouth. The computational result demonstrates that a moderate tidal flow triggers the phase shift of the hydraulic regime from supercritical to subcritical flow, leading to substantial increase in river water levels. The survey we conducted one month after the disaster confirmed that the flood watermark found adjacent to the weir was not remarkably different between the leeward and windward of the structure, which indicates that a supercritical flow did not occur during the flood peak. A hydrological analysis reveals that the timing of peak water levels during the 2018 flood corresponded to the phase of the flood tide. Thus, it is likely that the upstream water level excessively rose because the flood tide seemed to disturb the river outflow. The study findings suggest that the phase of estuary tides should also be considered for river flood risk management.