

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：32660

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2021～2022

課題番号：21K20451

研究課題名（和文）スーパー台風を想定した暴風条件下における河川洪水流の水力特性の解明

研究課題名（英文）Hydraulic Characteristics of River Flood Flows under Storm Conditions Assuming a Super Typhoon

研究代表者

柏田 仁（Kashiwada, Jin）

東京理科大学・理工学部土木工学科・助教

研究者番号：10774549

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、スーパー台風襲来時の洪水・強風同時発生時の河川洪水流の水力特性の解明を行った。風が洪水流に及ぼす影響を精緻に評価するために、理想的な仮想水路と実河道を対象に、河川自流水方向に対して順風・逆風・横断方向の風が作用した場合における吹送流の発達や吹き寄せに関する三次元流動計算を行った。実河道において、現況の風でも流速および水位に影響を及ぼし、さらに、風速の増大によって増水期に生じた水位上昇が水面波として伝播し、洪水ピーク時まで影響を残す可能性が示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

気候変動の影響予測は水工学における重要なテーマの一つである。将来の洪水氾濫リスクを評価する研究では、降水量の増大はモデル上流端流量の増大として、河口部における気圧低下や風の作用はモデル下流端水位（潮位）の上昇として、境界条件を見直す形で考慮されているが、河川水表面への風応力の作用について考慮した研究例はない。すなわち、既往研究では風影響を無視しており、気候変動影響下における風の取扱いの妥当性には自ずと疑問が生じる。本研究では、洪水流と暴風の同時生起を想定した三次元流動計算を行うことで、風が流動に与える影響を定量的に評価した。その結果は、今後の河川流計算における風影響の考慮の重要性を示唆した。

研究成果の概要（英文）：This study investigated the hydraulic characteristics of river flood flows during the simultaneous occurrence of flooding and strong winds during a super-typhoon attack. To accurately evaluate the effects of wind on flood flows, three-dimensional flow simulations were performed for an ideal channel and an actual river channel. The analysis focused on the development of the drift current and the increase in water level in several wind conditions; forward, headwind, and crosswind in the direction of the river's own flow. In the actual river, the results indicate that the wind influences the flow velocity and the water level, and that the increase in water level caused by the wind during the rising stage could propagate as surface waves and remain until the peak of the flood.

研究分野：水工学

キーワード：スーパー台風 気候変動 氾濫リスク 三次元河川流計算モデル 吹送流 風影響

1. 研究開始当初の背景

令和元年に千葉県を中心に大規模な風害を発生させた台風15号(令和元年房総半島台風)や、千曲川の堤防決壊・大規模氾濫を発生させた台風19号(令和元年東日本台風)は記憶に新しい。これらを上回る規模のスーパー台風は広域かつ高強度の雨域と暴風域を有し、河川流域に多量の降雨と長時間の暴風をもたらす。従来規模の台風では流出時間差により洪水と暴風の同時生起は注視されていなかったが、スーパー台風では同時生起のリスクが有る。河川水面上を風が吹き抜けると、水面に風応力が作用し吹送流が発生するが、風が水面上を吹き抜けながら風応力を作用させる距離(吹送距離)の長短が吹送流の発達に影響する。このような大気が水に与える影響、あるいは相互作用は海洋分野において重要視され、大気-海洋結合モデルとして認知・普及している。これは、海洋では吹送流が発達するために必要な吹送距離を十分に有し、風が重要な駆動力となるためである。一方で、河川では地形の影響が無視できず吹送距離が制限されるため、これまで風の影響は殆ど無視されてきた。

しかし、申請者がこれまで流量観測を目的に実施してきた水表面流速観測結果から、河川における吹送流の発生は明白である。スーパー台風での暴風・洪水同時生起条件下では、風が河川洪水流に影響を及ぼし、水理特性に変化が生じる事が予想される。しかしながら、その際の吹送流の時空間発展過程や水面勾配については、十分な知見がない状況である。気候変動以前の河川計画論では、計画流量を計画高水位(HWL)以下で流下させるための河道改修を行った上で、風の影響はHWL~堤防天端の余裕高でカバーする思想であり、曖昧さが許容されてきた。しかし、気候変動影響下では流下能力を上回る洪水も想定する必要がある、水位がHWLを超過する状態で猛烈な風が作用した場合に、風応力が駆動力または抵抗力として洪水流現象に有意な影響を与えると考えられる。このため、風は氾濫リスクに関わる重要なファクターであり、暴風条件下における河川洪水流の水理特性を解明する必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、スーパー台風による暴風・洪水同時生起に伴う洪水氾濫リスク解明を最終目標として、暴風条件下における河川洪水流の水理特性に関する基礎的知見を得ることを目的とする。

3. 研究の方法

まず、長さ30kmの一樣断面を有する理想的な仮想矩形開水路における洪水流に対して、定常・一樣な風向・風速を変えた数値実験を実施する。その結果に基づいて、風速・風向条件に対する水位・流速変化量や非定常応答特性を検討する。次に、実河川洪水流における風影響を評価することを目的として、令和元年東日本台風時における江戸川を対象に風影響に関する数値実験を実施する。ここでは、同台風時における風速の実測値を用いたケースに加えて、風速レベルや風速の継続時間を引き延ばしたケースの検討も行い、台風の大規模化による影響について感度分析する。また、河川流に対する風影響としては河川水表面上の風応力に加えて、河口域の水位上昇も想定されるため、後者に関しては、東京湾潮位に関する過去の台風時におけるデータを収集して検討する。

4. 研究成果

ここでは、実河川を対象とした観測データ分析および数値実験結果について記述する。

(1) 東京湾流入河川における観測データに基づく風影響分析

台風による気象場が河川の流動に与える影響を分析するために、観測データの分析と江戸川を対象にした数値実験を行う。気象データとしては、東京(1961~2020年、1989年以前は3時間毎データ)、江戸川臨海(1976~2020年)の時間データを収集した。また、1950年以降の主要な高潮位・高水位・高風速イベントを抽出し、東京湾に流入する江戸川・荒川・多摩川、その他の水位データ(60分間隔)を水文水質データベースより入手した。詳細な時間変動の分析を行う場合には、CommonMP水文水質データ取得ツールを用いて10分データを入手した。収集および分析の対象とする観測データの空間分布を図-1に示す。記録的な潮位偏差が発生したイベントでは極めて強い風が湾内や河川水表面上に作用したことが推察されることから、同イベントの河川水位データを収集し、水位の時間変動と気象場の比較を行った。図-2に令

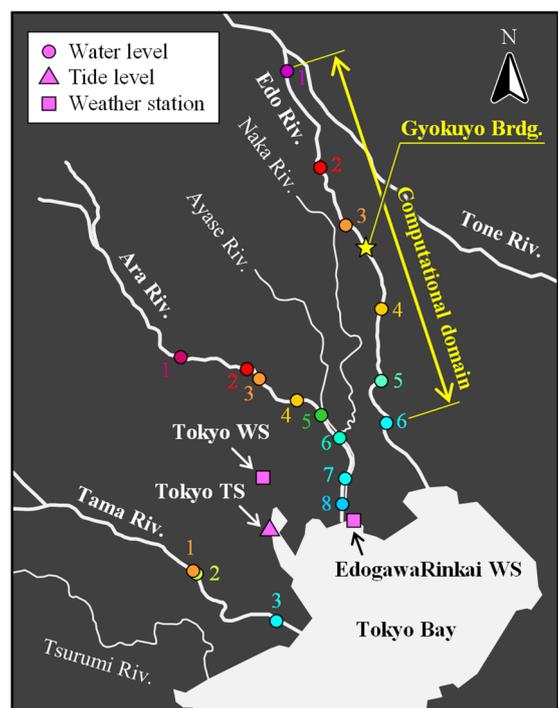


図-1 分析対象観測データの空間分布と計算範囲

和元年東日本台風（台風 19 号）時の海面気圧（東京）、風速（江戸川臨海）、河川水位の時間変化を例示する。同図(c)~(e)にはそれぞれ江戸川・荒川・多摩川の水位を示し、T.P. 表示に統一している。水位ハイドロの系列色を図-1 の配置図の配色と一致させ、黒実線・破線で実績潮位と天文潮位を合わせて示している。10 分データとしては、海面気圧は 21:10 に最低気圧 967.3hPa を記録した。台風の通過に伴って、風向は概ね東から南、西へと変化し、風速は 21:20 に平均 31.8、最大瞬間 43.8m/s（風向：南）を記録した。観測記録としては、海面気圧 966.8hPa（観測史上 7 位）、風速 32.6m/s、最大瞬間風速 43.8m/s（同 1 位）、最大潮位偏差 1.59m（同 1 位、順位は著者推計）であり、これらは 10/12 の 21 時~22 時にかけて発生したが、同刻は概ね干潮時であったため、最高潮位は翌 4 時の満潮時に発生し、1.61T.P.m（同 7 位）であった。このような気象量ピークと河川水位ハイドロを比較すると、河川ごとに様相が異なる。江戸川・荒川では強風時間帯は増水期の比較的早い段階に相当し、ピーク水位への影響は考えづらい。一方、多摩川では、増水期の全ての時間帯で東~南東の風を受け続け、水位ピーク時と風速ピークが一致している。図面は省略したが、流域面積が相対的に小さい鶴見川、中川、綾瀬川では洪水ピークと風速ピークは概ね一致した。

次に、風速ピーク時間帯の荒川の水位の応答に着目する。図-3 に 10/12 19 時~10/13 1 時の荒川水位、海面気圧、風速の時間変化を示す。ここでは、10 分データを表示している（潮位・天文潮位のみ時間データである）。この間、天文潮位は下げ潮、干潮、上げ潮の変化を示すが、吸い上げと吹き寄せの効果により潮位偏差が生じ、潮位は右肩下がりとなった。上流の St.1 では水位は漸増、下流の潮位は漸減しているにも関わらず、河川水位は特異な波形を示している。St.6~St8 ではほぼ同刻に水位上昇しピークを迎え、それに遅れる形で上流側の St.5, 4, 3, 2 の水位が上昇している。この一時的な水位上昇の発生した時間帯には、約 30m/s の南風が定常的に作用しており、水位上昇は水表面に大きな剪断力が作用したことに起因すると推察される。一時的な水位上昇量を定量化するために、水位ハイドロの接線（図中の灰色破線）を設定し、接線に対する変位を水位上昇量と定義する。この水位上昇量は、最下流の St.8（南砂町）で 0.55m、St.6（中川水門）で最大値 0.68m をとり、上流になるに伴い漸減する。風速を 30m/s、吹送距離として河口からの St.6 までの北方向距離 8.5km を用い、水深を 5m と仮定した場合の Colding の式による吹き寄せ水位上昇量の計算値は 0.73m となる。実績の水位上昇量と概算値のオーダーが一致し、水位の時間変動特性も鑑みると、St.6~8 では吹き寄せによる水位上昇が発生し、St.2~5 では背水効果として伝播した可能性が示唆された。

このように、令和元年東日本台風の風速ピーク時には荒川下流部における顕著な水面変動の発生が示唆された。東京湾では、令和元年東日本台風での潮位偏差 1.59m を大きく上回る高潮偏差 3.0m を計画値としている。このような顕著な高潮が生じる極端気象場では、出発水位上昇による河川水位の上昇に加えて、風作用による河川流動現象への影響も考慮すべきであると考えられる。

(2) 実河道を対象にした数値実験

概ね南北に流れる線形を有し、風影響が生じやすいと考えられる江戸川を対象に風影響の数値実験を行う。解析には、Delft3D FLOW を使用し、風を作用させた形で洪水流の三次元計算を行う。計算期間は 2019/10/12 0 時~2019/10/14 0 時とし、近年の主要な台風性出水イベントであり、かつ、東京湾の既往最大潮位偏差の発生した令和元年東日本台風を対象とする。計算区間については、市川~西関宿の 45km 区間とする。数値実験における境界条件を図-4 に示す。上流端境界と下流端境界には、それぞれ西関宿、市川観測所の流量と水位（水文水質 DB）を与える。風向風速データは、旧江戸川河口部に位置する江戸川臨海観測所の観測値をベース（Case 1）として複数ケースを想定する。具体には、風速を 2 倍に引き延ばした Case 2、10/12 0 時を起点

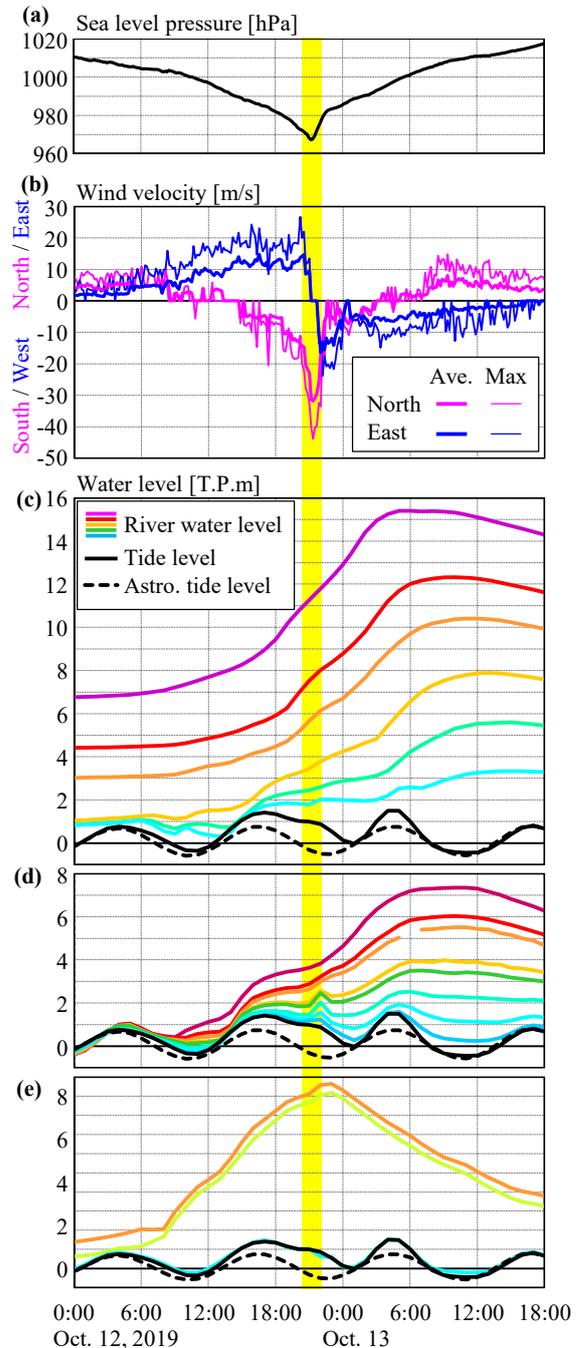


図-2 令和元年東日本台風時における(a)海面気圧、(b)風速、(c)江戸川、(d)荒川、(e)多摩川における水位の時間変化

図-2 令和元年東日本台風時における(a)海面気圧、(b)風速、(c)江戸川、(d)荒川、(e)多摩川における水位の時間変化

に時間を1.5倍に引き延ばした Case 3, 風速・時間ともに引き延ばした Case 4 を設定した. ここで, 江戸川臨海観測所から上流端の西関宿観測所までは約 50km の空間的な隔離があるが, 風向風速は一樣であると仮定し, 全ての計算メッシュに一樣に与える. また, 風の影響を評価する際には, 無風の Case 0 の計算結果を基準とする.

鉛直座標系には σ 座標系を用い, 風による水表面剪断力を流動に適切に反映するために, 鉛直方向のメッシュ数は 50 とした. また, 乱流モデルには $k-\epsilon$ モデルを適用した. 風による水表面剪断力の算出には, 風による水表面剪断力の算出には, 次式を用いた.

$$\tau_a = \rho_a C_d U_{wind} \times |U_{wind}| \quad (1)$$

ここで, ρ_a は空気密度 (1.2kg/m^3), C_d は水面抵抗係数, U_{wind} は水面から高さ 10m の風速である. U_{wind} には江戸川臨海観測所の観測風速をそのまま与えた. また, 水面抵抗係数は既往文献に倣って風速に応じて与えた. 縦断・横断方向のメッシュサイズは, それぞれ約 200m, 10m である.

風向風速に対する水表面流速の応答を評価するために, 上流端である西関宿地点 (図-1 中の St.1) と, 計算区間の概ね中央に位置する玉葉橋地点 (図-1 中の星印) の水表面流速の時間変化を図-5 に示す. これより, Case 1~4 のいずれでも南風の作用により, 水表面流速の低減が発生している. 流速低減の発生時刻については, 両地点で差はなく, 風速ピーク時刻に流速低減量もピーク値をとる. このような水表面流速の時間的な応答の早さは仮想水路と一致する. 流速低減量に着目すると, Case 1~4 それぞれの最大値は, 西関宿地点では 0.17, 0.84, 0.19, 0.88 m/s, 玉葉橋地点では 0.41, 2.18, 0.16, 1.43 m/s であった. 風速規模が異なる Case 1 と 2, 3 と 4 の流速低減量の比は 5~9 倍と大きく変化した. これは, 風による水表面剪断力が風速の二乗の関数で与えられることに加え, 水面抵抗係数も風速に伴って増加するためと考えられる. また, 増水期の序盤に強風が作用した玉葉橋では特に大きな流速低減が生じた.

次に, 西関宿, 玉葉橋地点の水位の時間変化を図-6 に示す. 水表面流速の応答と比較すると, 風速規模が小さい Case 1, 3 では水位の応答は乏しく, 同図のスケールでは無風時 (Case 0) とほぼ一致する. 一方, 風速が 2 倍の Case 2, 4 では大きな水位偏差が認められる. Case 1~4 の水位偏差の最大値は, 西関宿地点でそれぞれ 0.14, 1.23, 0.16, 1.41 m, 玉葉橋地点で 0.05, 0.41, 0.10, 0.85 m であった. また, 最大水位偏差発生時刻も西関宿地点の方が早く, 上流から水位上昇が発生し, 徐々に下流に伝播する形態が確認された.

このような水面縦断形の伝播について詳細に分析するために, Case 2 を対象に図-7 (a) に水位変動の主要因となる時々刻々の北風速と, 同図 (b) には水位偏差縦断分布を示す. 21 時には 40m/s を超える南風が大きな抵抗として作用したことで上流端付近を中心に水位が大きく上昇している. その後, 南風が減衰し, 無風, 北風に転じた後も 21 時に形成された水面波が下流に伝播しており, 水位ピーク時まで影響を残した.

さらに, 洪水ピーク時に風が作用した場合の氾濫リスクの増大に与える影響を俯瞰するために, Case 3, 4 と Case 0 を比較した結果として, 最高水位および最大水位偏差の縦断分布を図-8 に示す. 実際に発生した風速規模の Case 3 でも長区間にわたって最高水位が 10cm 以上上昇した. Case 4 では水位上昇はより顕著となり, 上流端地点において 1.25m となった. また, 最大水位偏差の縦断分布は Case 3, 4 ともに右肩下がりの分布となっており, 風による水表面剪断力が抵抗として水面全体に抵抗として作用したことで, 粗度の増大に類似した変化を示した.

このように, 本数値実験では, 今後見込まれる風速の増大が河川の流動に大きな影響を与え得ることと, 増水期に発

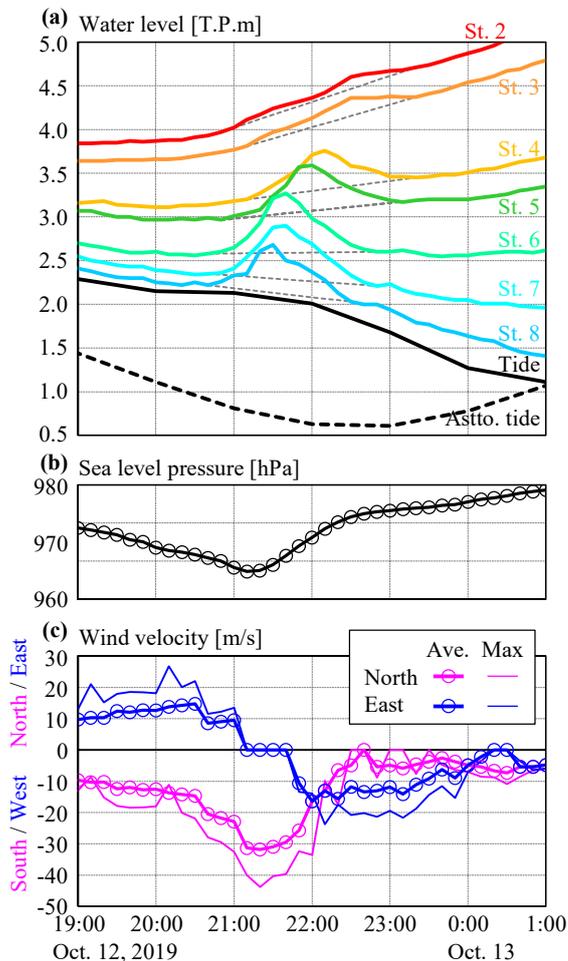


図-3 風速ピーク期における (a) 荒川の水位および (b) 海面気圧, (c) 風速の時間変化

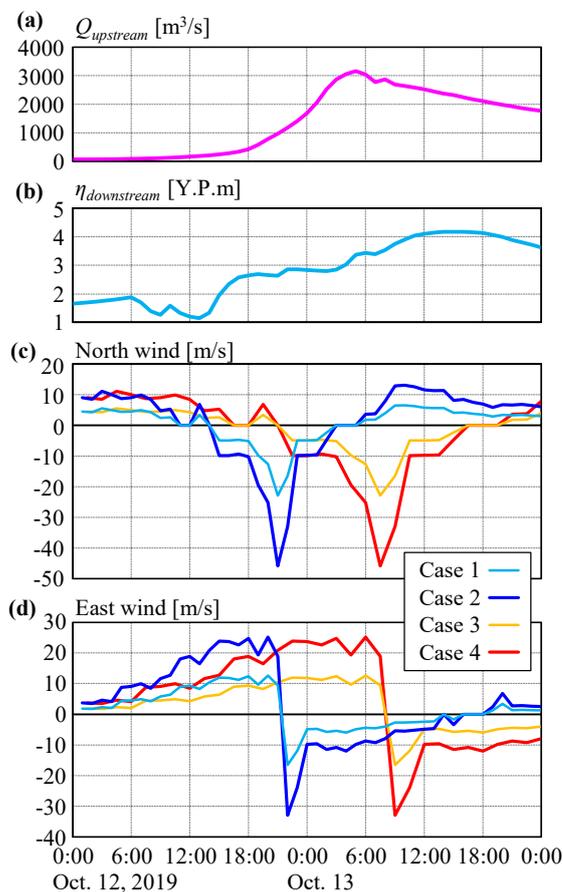


図-4 江戸川における数値実験の境界条件

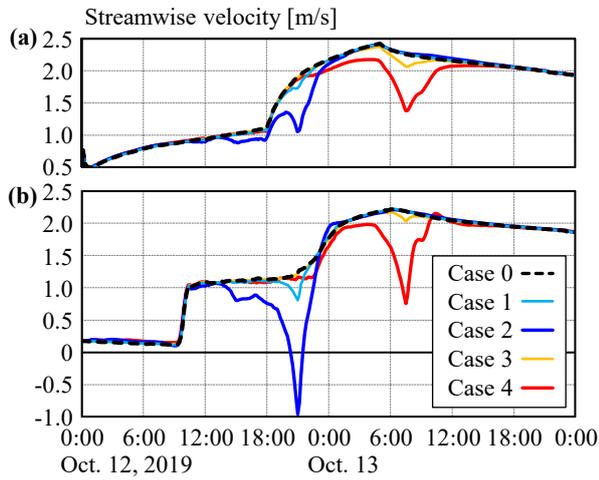


図-5 (a)西関宿, (b)玉葉橋における水表面流速の時間変化

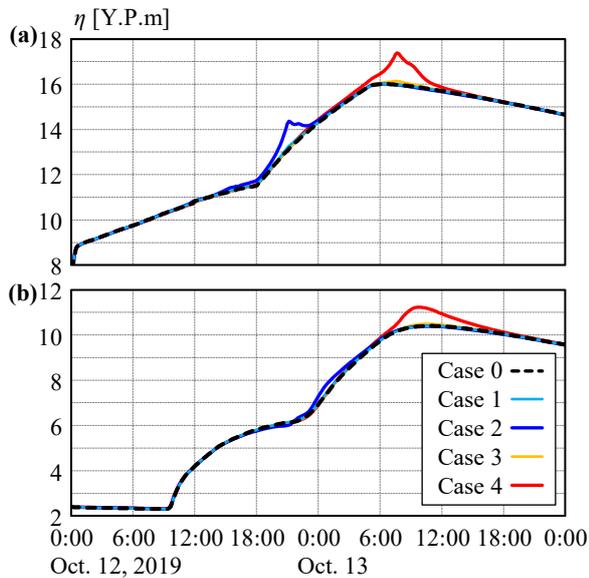


図-6 (a)西関宿, (b)玉葉橋における水位の時間変化

生じた影響がピーク時まで残り、氾濫リスクの増大に影響する可能性を示唆した。また、現況風速であっても風速と洪水のピークが重なると 10cm 以上の水位上昇を引き起こし、その影響は風速の増大によって著しく大きくなることが示唆された。

(4) 結論

1950 年以降の潮位・水位・海面気圧・風向風速の観測データを収集整理し、観測史上 1 位の潮位偏差を記録した令和元年東日本台風時の気象場と河川水位の比較により、荒川下流域において風に起因するとみられる最大 0.68m の水位上昇を確認した。

江戸川を対象とした数値実験により、現況の風でも流速および水位に影響を及ぼしていることが示唆された。さらに、風速の増大によって、増水期に生じた水位上昇が水面波として伝播し、洪水ピーク時まで影響を残す可能性が示唆された。

本研究では、風向風速の空間一様性を仮定しており、課題がある。一方で、河道が風道となる可能性や、本研究では風浪や越波、碎波による水位上昇等を加味しておらず、よりシビアな条件となる可能性もある。また、風速の増大は潮位上昇と風浪をもたらすため、市川観測所を下流端とする本検討には課題がある。これら課題に対しては、気象モデルと河川モデル、海洋・海岸モデルの連成が不可欠であり、今後の気候変動影響評価における重要な技術開発テーマと言えよう。

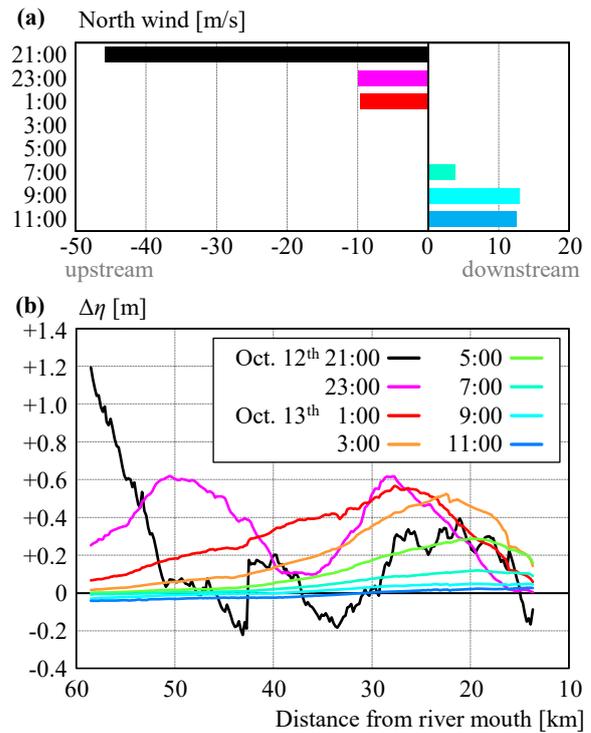


図-7 Case2 における各時刻における(a)北風速および(b)Case 0 に対する水位偏差の縦断分布

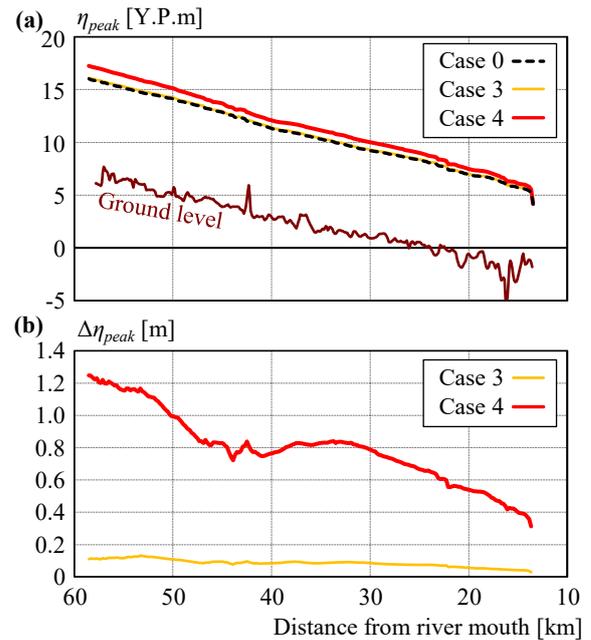


図-8 Case 3, 4 の(a)最高水位および(b)最大水位偏差の縦断分布

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Jin Kashiwada and Yasuo Nihei	4. 巻 39
2. 論文標題 A HIGH ACCURATE AND EFFICIENT 3D RIVER FLOW MODEL WITH A NEW MODE-SPLITTING TECHNIQUE	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 39th IAHR World Congress	6. 最初と最後の頁 **
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3850/IAHR-39WC2521711920221420	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 柏田仁, 尾形勇紀, 二瓶泰雄, 山田真史, 佐山敬洋	4. 巻 77
2. 論文標題 三次元河川流・氾濫流一体解析による球磨川水害における家屋被災リスクの分析	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 土木学会年次学術講演会	6. 最初と最後の頁 **
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 遊佐 望海, 柏田 仁, 二瓶 泰雄	4. 巻 78
2. 論文標題 暴風作用下における河川洪水流の流速・水位応答に関する三次元数値解析	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 土木学会論文集B1（水工学）	6. 最初と最後の頁 I_13-I_18
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2208/jscejhe.78.2_I_13	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 柏田仁, 窪田利久, 平本達典, 山田真史, 佐山敬洋, 二瓶泰雄	4. 巻 29
2. 論文標題 河川流・氾濫流一体解析による令和2年球磨川水害における建物流失率の検討	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 河川技術論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 柏田 仁, 二瓶 泰雄	4. 巻 29
2. 論文標題 国内外の河川流・氾濫流解析モデルのレビュー～3次元モデルに着目して～	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 河川技術論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 Jin Kashiwada
2. 発表標題 A HIGH ACCURATE AND EFFICIENT 3D RIVER FLOW MODEL WITH A NEW MODE-SPLITTING TECHNIQUE
3. 学会等名 Proceedings of the 39th IAHR World Congress (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 柏田仁
2. 発表標題 三次元河川流・氾濫流一体解析による球磨川水害における家屋被災リスクの分析
3. 学会等名 第77回土木学会年次学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 遊佐望海
2. 発表標題 暴風作用下における河川洪水流の流速・水位応答に関する三次元数値解析
3. 学会等名 第67回水工学講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 柏田仁
2. 発表標題 河川流・氾濫流一体解析による令和2年球磨川水害における建物流失率の検討
3. 学会等名 2023年度河川技術に関するシンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 二瓶泰雄
2. 発表標題 国内外の河川流・氾濫流解析モデルのレビュー～3次元モデルに着目して～
3. 学会等名 2023年度河川技術に関するシンポジウム
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関