

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：53901

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04958

研究課題名（和文）土砂濃度を考慮した破堤発生メカニズムと洪水氾濫流挙動の解明

研究課題名（英文）Elucidation of levee breach generation mechanism and flood flow behavior considering sediment concentration

研究代表者

田中 貴幸（Tanaka, Takayuki）

豊田工業高等専門学校・環境都市工学科・准教授

研究者番号：70548437

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：多発する豪雨災害により、破堤による洪水氾濫の発生が頻発している。破堤発生箇所の予見は困難であるため、様々な手法で破堤に関する研究が行われているものの、土砂を多く含む高濃度流に関する研究は少ない。本研究では清水流や高濃度土砂流を対象とした越流を有する河道における流れ構造と破堤発生状況の解明を目的とした。研究結果として、越流を伴う湾曲流について、越流開始場所の傾向は曲率半径の違いに影響を受けること、接線角が大きい程、越流範囲が大きくなること、越流発生箇所で破堤が主に発生することを明らかにした。また、橋脚や植生などの様々な境界条件を有する清水および高濃度流における流れ構造についても解明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

湾曲部を伴う河道の流れ構造や破堤発生メカニズムを明らかにすることで、破堤箇所の想定がより容易となり、河道整備の優先順位を決定する上で重要な知見を得ることができる。

また、様々な流体粘性における流動機構を明らかにすることで、洪水時の実河川の流れ構造を予測するための知見を得ることができる。さらに、橋脚や植生などの境界条件を有する開水路流れの流れ構造を知ることによって、洪水流の挙動についても予見することが可能となる。

研究成果の概要（英文）：Due to frequent heavy rain disasters, floods due to levee breaches are occurring frequently. Since it is difficult to predict where a levee will break, many studies have been conducted on levee breakage using various methods. The purpose of this study is to clarify the flow structure and occurrence of levee breaches in river channels with overflows, such as Shimizu flow and high-concentration sediment flow. As a result of the research, for curved flows with overflow, the tendency of the overflow start point is affected by the difference in the curvature radius, the larger the tangential angle, the larger the overflow range, was found to occur mainly. We also clarified the flow structure in fresh water and high-concentration flow with various boundary conditions such as piers and vegetation.

研究分野：河川防災学

キーワード：河道湾曲流 破堤解析 高濃度流 開水路流

### 1. 研究開始当初の背景

豪雨災害が毎年のように発生し、河川堤防が破堤して洪水氾濫が発生するケースが頻発している。その中で、破堤箇所の形状に注目すると、1945年から2006年の間における国直轄河川の破堤箇所(計432箇所)の法線形状の割合は直線部で最も発生していることが認められた。これは堤防補強の優先度なども影響していると考えられるが、この結果からも破堤発生箇所の予見が困難であることが伺える。

このような背景により、これまでに横越流を伴う開水路流れの三次元構造を明らかにするため、過去の破堤氾濫事例について調査・解析を行うとともに、破堤氾濫の中でその原因の75%を占める越流を対象に越流を伴う開水路流れの三次元構造に関して実験的検討を行っている。しかし、破堤が発生する場合においては土砂を多く含む高濃度流となることが考慮されており、また、直線河道以外の法線形状に関しても流れ構造を把握する必要がある。

### 2. 研究の目的

本研究では、様々な法線形状における破堤時の洪水氾濫挙動について、清水や高濃度流を対象に解明することを目的とする。湾曲部を有する河道において、清水にて破堤発生箇所を明らかにし、河道内の乱流構造を明らかにすることで破堤発生メカニズムについて明らかにする。高濃度流については、まずは基本となる直線河道を対象に、流体粘性の違いが流れ構造に与える影響について解明する。その後、粘性の違いによる破堤発生状況について検討する。さらに、植生群落や側岸凹部などを有する場合の開水路乱流の構造を明らかにすることで、それらが破堤発生に与える影響についても検討する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 湾曲部を有する開水路の流れ構造と破堤氾濫解析に関する研究

破堤氾濫解析においては、土製の堤防模型を用いて実験を行うとともに、河道内の流れについては非越流状態では数値解析、越流状態では木製の堤防模型を用いて実験により解析した。

破堤解析に関する実験は、全長180cm、幅90cmの模型台上に、川幅が20cmとなるように、幅5cm、高さ10cmの堤防模型を作成して行った。図1のように、実験では曲率半径  $R$  を90cmと60cm、接線角  $\theta$  を45°と60°とする河道湾曲形状を対象とした。

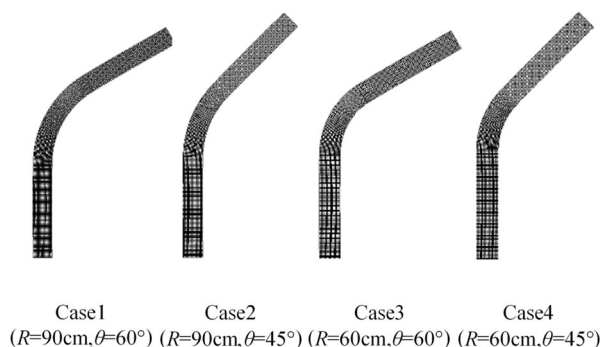


図1 実験水路の河道形状

土製堤防の材料には、珪砂と藤森粘土を2:1で混合したものを用いた。締固めは、土質の締固め試験のC法により作成し、土の乾燥密度は1.742g/cm<sup>3</sup>~1.936g/cm<sup>3</sup>の範囲で行った。模型作成後、模型に水を流して破堤箇所の検討を行い、さらに木製の堤防模型を用いて水位や流速を計測する。流速の点計測にはI、L型の電磁流速計を用いた。流速の多点同時計測についてはビデオカメラによるPIV (Particle Image Velocimetry) 法を用い、水表面の流速を計測した。さらに、非越流状態についてはiRICソフトウェアのNaysCUBEソルバーを用いて数値解析を行った。

#### (2) 様々な流体粘性による種々の境界条件を有する開水路流の流動機構に関する研究

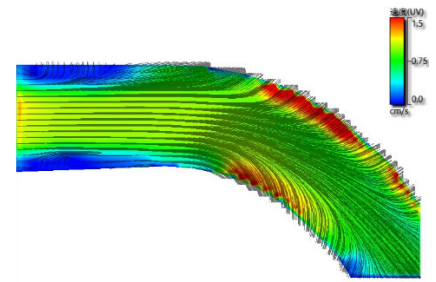
様々な粘性流体を対象に、種々の境界条件を有する開水路流の流れ構造解析を行う。粘性流体として、PSA (ポリアクリル酸ソーダ) 水溶液を用い、粘性を変化させて開水路流の流れ構造解析を実験により行う。粘度の測定にはFungilab社製の粘度計Viscolead Advanceを用いた。開水路実験においては、長さ10m、幅40cm、高さ25cmの開水路に0mg/l~700mg/lでの濃度を対象とした。境界条件としては小判型の橋脚や様々な形状の柱状物体、あるいは植生群落や側岸凹部などを有する条件において、PIV法や電磁流速計などを用いて実験を行った。

小判型橋脚を有する実験においては、楕円形の小判型とし、横幅3cm、流下方向長さ15cm、高さ15cmのポリ塩化ビニル製を使用する。様々な形状の柱状物体を有する実験においては、円柱、正三角柱、正四角柱、菱形柱、逆正三角柱を対象とし、高さは15cmとした。また、いずれの柱状物体も流れ方向における投影幅は4cmとした。植生帯を有する実験においては、プラスチック板に水流に追従して撓む6.10ナイロンブリュウスル(直径0.242mm、曲げ剛性1.45×104g・cm<sup>2</sup>)を6.5cmの高さに揃え、0.5cm間隔で貼り付けた模型を使用した。不透過性の側岸凹部流れに関しては、水路左岸側にアクリル板によって遮断物を設置して側岸凹部を形成した。遮断物高さも植生帯と同様に6.5cmとし、遮断物内に水が浸入しない構造とした。植生帯および遮断物の幅は10cmとし、植生帯および遮断物の流下方向長さは30cmに設定した。

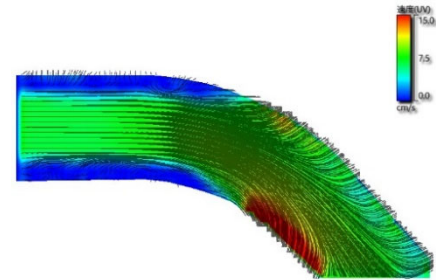
#### 4. 研究成果

(1) 湾曲部を有する開水路の流れ構造と破堤氾濫解析に関する研究

越流状態を対象に清水にて行った実験により得られた、Case1 および 2 における表面流速強度の等値線および流線を図 2 に示す。Case1 では湾曲部両岸で流速強度が大きな値を示しており、特に外岸側で強くなっている。Case2 は湾曲部外岸側において越流が発生しているが、湾曲後内岸側で大きな値を示している。図では省略しているが、Case3 ( $R=60\text{cm}$ ,  $\theta=60^\circ$ ) では湾曲前内岸側と湾曲後外岸側で流速強度は大きくなった。Case4 ( $R=60\text{cm}$ ,  $\theta=45^\circ$ ) は湾曲部内岸側のみ流速強度は大きな値を示した。これらより、曲率半径が大きいと外岸側で広く越流が発生することが認められる。また、接線角  $60^\circ$  の河道は湾曲部外岸側での越流が強く発生するが、接線角  $45^\circ$  の河道は湾曲後内岸側での越流が強いことが伺える。以上より、越流が強く発生する箇所は接線角の違いに影響を受けると考えられる。土製の破堤実験については、越流が発生した箇所にて堤防が越流による浸透によって破堤する様子を確認した。また、越流による氾濫を伴う河道内の流れ構造についても解析し、主流速及び二次流ベクトル分布の結果により、接線角が大きい河道では流れが湾曲の影響を強く受け、三次元的になることを確認し、さらに曲率半径の違いが主流速分布の遷移に影響を与えることを明らかにした。



Case1 ( $R=90\text{cm}$ ,  $\theta=60^\circ$ )



Case2 ( $R=90\text{cm}$ ,  $\theta=45^\circ$ )

図 2 越流状態における表面流速強度の等値線及び流線

(2) 様々な流体粘性による種々の境界条件を有する開水路の流動機構に関する研究

① 橋脚を有する開水路流の流動機構に関する研究

小判型の橋脚を有する開水路流れにおいて、流体粘性を変化させたときの平均流特性や乱れ特性、運動量輸送特性について検討した。図 3 に体積濃度  $0\text{mg/l}$  および  $400\text{mg/l}$  において、半水深での水平面における横断方向流速  $V$  の等値線および流線分布を示す。いずれも橋脚上流付近において迂回流が、橋脚下流付近では水路中央に向かう流れが発生している。 $0\text{mg/l}$  においてはその他のケースに比べ橋脚中央付近にて橋脚から離れる迂回流が強く発生した。粘性が高まると、橋脚が横断方向流速に与える影響はほとんど見られなくなることを確認した。また、運動量輸送特性に関して、乱れに比べ移流による運動量輸送が卓越し、粘性が高まることで乱れによる運動量輸送量は極端に抑えられることが明らかになった。

② 様々な形状の柱状物体を有する開水路流の流動機構に関する研究

本研究では、様々な形状の柱状物体を有する開水路にて、粘性の違いが流動機構に与える影響について実験的に検討した。水平面の計測結果より、粘性が高まると後流渦の影響が抑制されるとともに、乱れが極端に小さくなることを明らかにした。縦断面においては、柱状物体前方ではいずれの条件においても下降流を示すものの、後方では粘性の違いにより流速の分布傾向が異なることを明らかにした。

③ 植生、側岸凹部等を有する開水路流の流動機構に関する研究

河道内に存在する植生群落や側岸凹部領域は、河川における生物の多様性や親水性を育む上で重要な役割を担っている。本研究では流下方向に植生群落や側岸凹部を連続的に配置した条件において、凹部アスペクト比の違いおよび越流高さの違いが流れの抵抗特性や流動機構に与える影響について実験的に検討した。

これにより、水平面における時間平均流速特性については、植生高さ以下にて流れの抵抗が大きくなった千鳥配置で主流部から凹部に向かう流れが強く発生することが明らかになった。また、植生高さ以上の位置にて凹部域、植生帯域に向かう流れが強く発生し、非越流状態に比べ移流効果が大きくなることが認められた。横断面においては、いずれの配置も流下方向に非植生域を有することで、流下方向に二次流分布特性が変化する様子を詳細に明らかにした。運動量輸送特性について、今回計測した植生帯境界付近においては並列および千鳥配置は乱れに比べ移流による運動量輸送が卓越することが明らかになった。また、片岸配置に比べ流れの抵抗が大きくなった並列および千鳥配置において運動量輸送量の極値は大きな値を示し、植生帯周辺における運動量輸送特性によりある程度流れの抵抗特性を説明できることが示唆された。

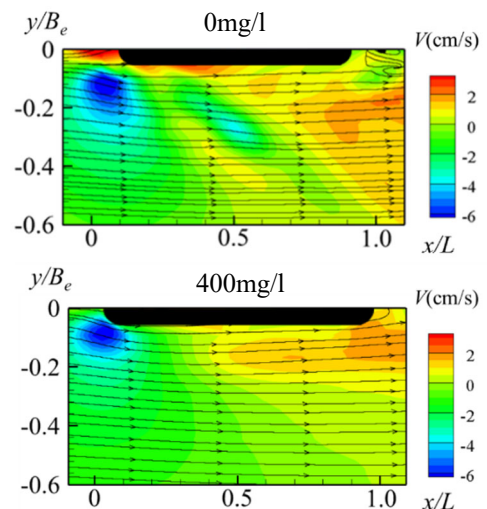


図 3 湾曲部を有する流れの数値解析 (流速強度)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 6件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

|  |                           |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名<br>田中貴幸, 原田龍希, 大本照憲                             | 4. 巻<br>Vol. 77           |
| 2. 論文標題<br>流体粘性の違いが橋脚を有する開水路流れに与える影響                   | 5. 発行年<br>2021年           |
| 3. 雑誌名<br>土木学会論文集 B1(水工学)                              | 6. 最初と最後の頁<br>I_859-I_864 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.2208/jscejhe.77.2_I_859 | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>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<br>-                 |

|  |                       |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名<br>Takayuki Tanaka, Syunya Hazama, and Ryuki Harata   | 4. 巻<br>-             |
| 2. 論文標題<br>Study on the physical habitat of river channel vegetation designated as an endangered species | 5. 発行年<br>2021年       |
| 3. 雑誌名<br>9th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENVIRONMENTAL HYDRAULICS  | 6. 最初と最後の頁<br>121-123 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし   | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>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<br>-             |

|   |                    |
|---|--------------------|
| 1. 著者名<br>狭間俊哉, 田中貴幸, 酒井大輝, 筒井駿                           | 4. 巻<br>第54号       |
| 2. 論文標題<br>河道湾曲形状の違いが越流を伴う開水路乱流に与える影響                     | 5. 発行年<br>2022年    |
| 3. 雑誌名<br>豊田工業高等専門学校研究紀要                                  | 6. 最初と最後の頁<br>9-16 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.20692/toyotakosenkiyo.54-3 | 査読の有無<br>無         |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている (また、その予定である)                    | 国際共著<br>-          |

|   |                      |
|---|----------------------|
| 1. 著者名<br>田中 貴幸, 澤 洸太, 狭間 俊哉                              | 4. 巻<br>52巻          |
| 2. 論文標題<br>河道湾曲部周辺における破堤発生状況と非越流状態における洪水流挙動解析             | 5. 発行年<br>2020年      |
| 3. 雑誌名<br>豊田工業高等専門学校研究紀要                                  | 6. 最初と最後の頁<br>pp.1-7 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.20692/toyotakosenkiyo.52-1 | 査読の有無<br>無           |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている (また、その予定である)                    | 国際共著<br>-            |

|   |                            |
|---|----------------------------|
| 1. 著者名<br>TAKAYUKI TANAKA, TERUNORI OHMOTO  | 4. 巻<br>-                  |
| 2. 論文標題<br>TURBULENT STRUCTURE IN OPEN CHANNEL WITH LONGITUDINALLY CONTINUOUS SIDE CAVITIES | 5. 発行年<br>2019年            |
| 3. 雑誌名<br>38th IAHR World Congress  | 6. 最初と最後の頁<br>pp.5137-5144 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.3850/38WC092019-0640   | 査読の有無<br>有                 |
| オープンアクセス<br>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<br>-                  |

|   |                         |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名<br>Takayuki Tanaka, Ryuki Harata and Syun Tsutsui                                      | 4. 巻<br>-               |
| 2. 論文標題<br>Bank Breakage Around River Bends and Flood Flow Behavior in Non-Overflow Condition | 5. 発行年<br>2022年         |
| 3. 雑誌名<br>39th IAHR World Congress  | 6. 最初と最後の頁<br>4968-4974 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.3850/IAHR-39WC252171192022105                                  | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>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<br>-               |

|  |                           |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名<br>田中貴幸, 市原大暉, 大本照憲                             | 4. 巻<br>Vol. 78           |
| 2. 論文標題<br>越流状態における流下方向に不連続的植生群落を伴う開水路流の流動機構           | 5. 発行年<br>2022年           |
| 3. 雑誌名<br>土木学会論文集 B1(水工学)                              | 6. 最初と最後の頁<br>I_601-I_606 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.2208/jscejhe.78.2_I_601 | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>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<br>-                 |

〔学会発表〕 計11件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>筒井 駿, 田中 貴幸, 原田 龍希            |
| 2. 発表標題<br>流体粘性の違いが橋脚を有する開水路流の流動機構に与える影響 |
| 3. 学会等名<br>令和3年度 土木学会中部支部研究発表会           |
| 4. 発表年<br>2022年                          |

|                                       |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>酒井 大輝, 狭間 俊哉, 田中 貴幸, 北畠 正巳 |
| 2. 発表標題<br>越流を伴う河道湾曲流の流れ構造解析          |
| 3. 学会等名<br>令和3年度 土木学会中部支部研究発表会        |
| 4. 発表年<br>2022年                       |

|                                |
|--------------------------------|
| 1. 発表者名<br>原田 龍希, 田中貴幸         |
| 2. 発表標題<br>橋脚を有する高濃度流の流動機構     |
| 3. 学会等名<br>令和2年度 土木学会中部支部研究発表会 |
| 4. 発表年<br>2021年                |

|                                      |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>青木 慶吾, 田中貴幸               |
| 2. 発表標題<br>越流状態における植生開水路流れの三次元乱流構造解析 |
| 3. 学会等名<br>令和2年度 土木学会中部支部研究発表会       |
| 4. 発表年<br>2021年                      |

|                                     |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>狭間 俊哉, 田中貴幸, 船橋 良太       |
| 2. 発表標題<br>河道湾曲形状の違いが汜濫流の流れ構造に与える影響 |
| 3. 学会等名<br>令和2年度 土木学会中部支部研究発表会      |
| 4. 発表年<br>2021年                     |

|                                  |
|----------------------------------|
| 1. 発表者名<br>狭間 俊哉, 田中 貴幸, 炭竈 大輔   |
| 2. 発表標題<br>様々な河道湾曲形状における洪水氾濫挙動解析 |
| 3. 学会等名<br>令和元年度 土木学会中部支部研究発表会   |
| 4. 発表年<br>2020年                  |

|                                    |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>志智 海斗, 田中 貴幸, 青木 慶吾     |
| 2. 発表標題<br>様々な植生配置における越流状態の開水路流動機構 |
| 3. 学会等名<br>令和元年度 土木学会中部支部研究発表会     |
| 4. 発表年<br>2020年                    |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>大本照憲, 安達幹治, 田中貴幸                 |
| 2. 発表標題<br>粗面開水路流れにおける高濃度土砂の抵抗特性および流れ場与える影響 |
| 3. 学会等名<br>日本流体力学会年会2022                    |
| 4. 発表年<br>2022年                             |

|                                  |
|----------------------------------|
| 1. 発表者名<br>市園泰寿, 田中貴幸, 筒井駿       |
| 2. 発表標題<br>様々な柱状物体を有する開水路の流れ構造解析 |
| 3. 学会等名<br>令和4年度 土木学会中部支部研究発表会   |
| 4. 発表年<br>2022年                  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>中根堅太, 田中貴幸, 筒井駿                      |
| 2. 発表標題<br>流体粘性の変化が様々な橋脚配置条件における開水路流の流動機構に与える影響 |
| 3. 学会等名<br>令和4年度 土木学会中部支部研究発表会                  |
| 4. 発表年<br>2022年                                 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(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 |
|---------|---------|
|         |         |