九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

山田堰における2次元単層モデルを用いた流況解析

井上，光宏
九州大学大学院生物資源環境科学府

田畑，俊範
九州大学大学院農学研究院

平松，和昭
九州大学大学院農学研究院

原田，昌佳
九州大学大学院農学研究院

https://hdl.handle.net/2324/1916211

出版情報：農業農村工学会九州沖縄支部大会講演要旨集. H29, pp.4-5, 2017-11-01. 農業農村工学会九州沖縄支部
バージョン：
権利関係：本論文の著作権は(公社) 農業農村工学会に帰属します

KYUSHU UNIVERSITY

山田堰における2次元単層モデルを用いた流況解析

九州大学大学院生物資源環境科学府　○（学）井上光宏，
九州大学大学院農学研究院（正）田畑俊範，（正）平松和昭，（正）原田昌佳

1. はじめに　福岡県朝倉市の筑後川中流に位置する山田堰は，江戸時代に築造された日本唯一の傾斜堰床式石張堰である．**図1**に山田堰の全体写真を示す．山田堰は築造から約200年間その原形を保ち，堰として利用されている．その理由として，傾斜堰床式石張堰という特殊な構造に起因する高い耐久性を有していたためだと考えられる．その特殊な構造とは，**図1**のように堰が主流方向に対して斜めに設置され，中舟通し，南舟通しの2つの水路からの水流を堰末端部で合流させていることである．これにより，暴れ川と称される筑後川の水流を減勢しつつ取水口へ水を導いている．このような特徴が着目され，アフガニスタンでは山田堰をモデルにした堰が造られ，灌漑復興事業に貢献した．さらに，堰の築造に重機が不要であること，取水時に電力が不要であることから傾斜堰床式石張堰の発展途上国への適用が期待されている．しかし，山田堰を対象に流況解析を行った既往の研究は皆無であり，傾斜堰床式石張堰を発展途上国に適用するためには山田堰の水理学的特徴を把握する必要がある．また，アフガニスタンに造られた堰では土砂の堆積が問題となっており，その原因解明のためにも山田堰での土砂の挙動を把握することも必要である．そこで，本研究では，発展途上国への適用に向けた第一歩として，山田堰の水理学的特徴を把握することを目的に水理モデルを用いて流況解析を行った．

2. 数値解析手法　山田堰の流況解析には2次元単層モデルを用いる．支配方程式は3次元レイノルズ方程式を水深方向に積分した連続方程式ならびに運動方程式である．以下にその支配方程式を示す．

$$\frac{\partial \eta}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\{U(h+\eta)\}+\frac{\partial}{\partial y}\{V(h+\eta)\}=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial U}{\partial t}+U\frac{\partial U}{\partial x}+V\frac{\partial U}{\partial y}=fV-g\frac{\partial \eta}{\partial x}+A_h\left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 U}{\partial y^2}\right)+\frac{\rho_a\gamma_s^2 U_{10}\sqrt{U_{10}^2+V_{10}^2}}{h+\eta}-\frac{gn^2U\sqrt{U^2+V^2}}{(h+\eta)^{4/3}} \tag{2}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t}+U\frac{\partial V}{\partial x}+V\frac{\partial V}{\partial y}=-fU-g\frac{\partial \eta}{\partial y}+A_h\left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 V}{\partial y^2}\right)+\frac{\rho_a\gamma_s^2 V_{10}\sqrt{U_{10}^2+V_{10}^2}}{h+\eta}-\frac{gn^2V\sqrt{U^2+V^2}}{(h+\eta)^{4/3}} \tag{3}$$

ここで，tは時間（s），U，Vはそれぞれx，y方向における水深平均の流速（m/s），hは河床標高（m），ηは水位（m），fはコリオリパラメータ（1/s），gは重力加速度（m/s^2），A_hは水平渦動粘性係数（m^2/s），nはManningの粗度係数（s/m$^{1/3}$），ρ_aは空気の密度（kg/m^3），γ_s^2は水面の摩擦係数，U_{10}，V_{10}は水面上10mの高さの風速(m/s)である．運動方程式の右辺第4項の

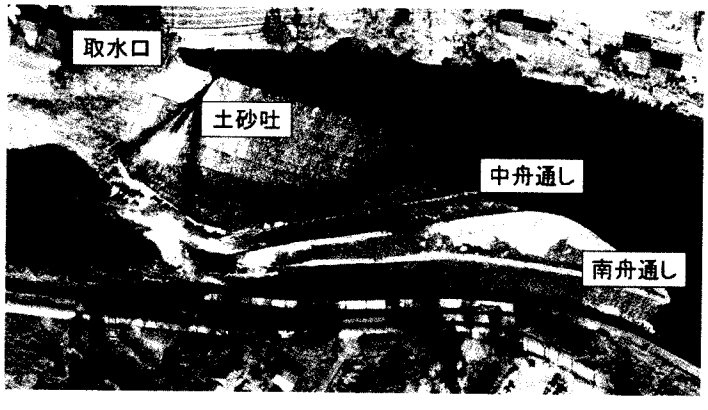

図1　山田堰

風応力項は流れへの影響は小さいものとして無視した．数値解法には有限差分法を用い，水理量はスタッガードメッシュ系に配置した．水平渦動粘性係数の評価には Smagorinsky モデルを導入した．また，堰を越流する流れを正確に再現するため，干出・冠水スキームを導入した．土砂の掃流機能は底面せん断応力により評価し，Manning の平均流速公式より得られる次式で計算した．

$$\tau_b = \frac{\rho g n^2 \left(U^2 + V^2\right)}{\left(h+\eta\right)^{1/3}} \qquad (4)$$

ここで，τ_b は底面せん断応力（N/m^2），ρ（= 1000 kg/m^3）は水の密度である．流況解析に用いる地形の標高データは，観測データから逆距離加重法による空間内挿を用いて作成した．上下流端の境界条件として必要な水位・流量の連続観測データが得られなかったため，計算は定常流の場合を考え，前後数日間の流量が概ね一定であった 2012 年 9 月 5 日における観測値を用いた．取水量には実測流量を境界条件として与えた．

3. 流況解析結果　**図 2** に計算結果の流速ベクトル，**図 3** に流速分布，**図 4** に底面せん断応力分布を示す．まず，**図 2** では，3 本の水路の流況や堰の干出，土砂吐からの水流が扇状に広がって流れていく様子が示されている．現場での目視の観測や**図 1** と比較しても，山田堰の流況を良好に再現できたと考えられる．つぎに，**図 3** より中舟通し，南舟通しからの水流が衝突し，減勢していることが分かる．そして，**図 4** からは 3 本の水路で底面せん断応力が大きいことから，各水路の排砂機能が確認された．また，土砂吐により取水口方向へ流れていた土砂が堰下流に排出される構造になっていることも分かる．堰下流部の土砂堆積状況から判断して，排砂された土砂の一部は堰下流の両岸に堆積していると考えられる．

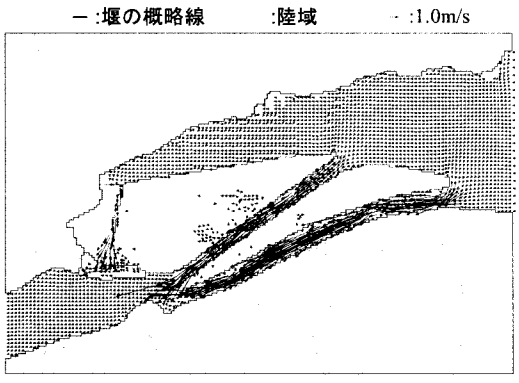

図 2　流速ベクトル図

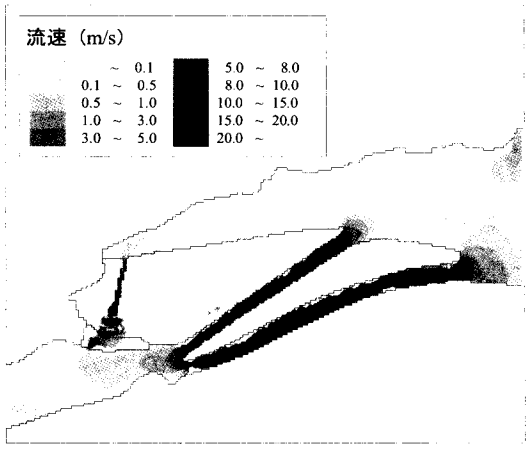

図 3　流速分布図

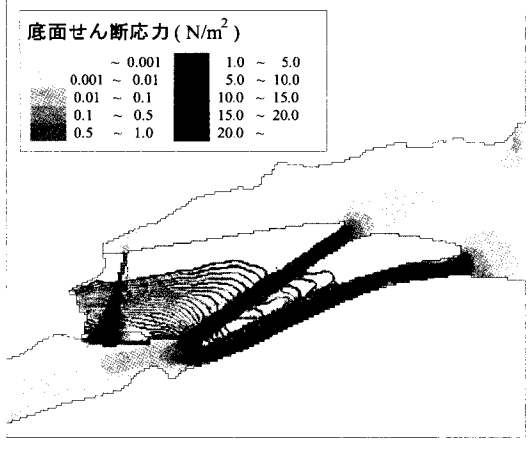

図 4　底面せん断応力分布図

4. おわりに　流況解析より山田堰における水流の減勢メカニズム，排砂機能などの水理学的特徴について考察した．山田堰が築造から現在まで堰として機能している理由として，取水時に土砂の流入を防ぐ構造をしており，上流からの勢いのある水流は水路の配置により堰末端部で減勢させられていることが考えられる．今後の研究課題として，観測データの不足を補うため，1 次元漸変流モデルで推定した境界条件を上下流端に用いることで，非定常流解析を行う．また，河床の土砂粒径のデータ収集を行い土砂の挙動追跡を目指し，最終的に傾斜堰床式石張堰の発展途上国への適用可能性について考察を行う．

山田堰における 2 次元単層モデルを用いた流況解析

九州大学大学院生物資源環境科学府　○（学）井上光宏，
九州大学大学院農学研究院（正）田畑俊範，（正）平松和昭，（正）原田昌佳

1. はじめに　福岡県朝倉市の筑後川中流に位置する山田堰は，江戸時代に築造された日本唯一の傾斜堰床式石張堰である．**図 1** に山田堰の全体写真を示す．山田堰は築造から約 200 年間その原形を保ち，堰として利用されている．その理由として，傾斜堰床式石張堰という特殊な構造に起因する高い耐久性を有していたためだと考えられる．その特殊な構造とは，**図 1** のように堰が主流方向に対して斜めに設置され，中舟通し，南舟通しの 2 つの水路からの水流を堰末端部で合流させていることである．これにより，暴れ川と称される筑後川の水流を減勢しつつ取水口へ水を導いている．このような特徴が着目され，アフガニスタンでは山田堰をモデルにした堰が造られ，灌漑復興事業に貢献した．さらに，堰の築造に重機が不要であること，取水時に電力が不要であることから傾斜堰床式石張堰の発展途上国への適用が期待されている．しかし，山田堰を対象に流況解析を行った既往の研究は皆無であり，傾斜堰床式石張堰を発展途上国に適用するためには山田堰の水理学的特徴を把握する必要がある．また，アフガニスタンに造られた堰では土砂の堆積が問題となっており，その原因解明のためにも山田堰での土砂の挙動を把握することも必要である．そこで，本研究では，発展途上国への適用に向けた第一歩として，山田堰の水理学的特徴を把握することを目的に水理モデルを用いて流況解析を行った．

2. 数値解析手法　山田堰の流況解析には 2 次元単層モデルを用いる．支配方程式は 3 次元レイノルズ方程式を水深方向に積分した連続方程式ならびに運動方程式である．以下にその支配方程式を示す．

$$\frac{\partial \eta}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\{U(h+\eta)\}+\frac{\partial}{\partial y}\{V(h+\eta)\}=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial U}{\partial t}+U\frac{\partial U}{\partial x}+V\frac{\partial U}{\partial y}=fV-g\frac{\partial \eta}{\partial x}+A_h\left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 U}{\partial y^2}\right)+\frac{\rho_a\gamma_s^2 U_{10}\sqrt{U_{10}^2+V_{10}^2}}{h+\eta}-\frac{gn^2U\sqrt{U^2+V^2}}{(h+\eta)^{4/3}} \tag{2}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t}+U\frac{\partial V}{\partial x}+V\frac{\partial V}{\partial y}=-fU-g\frac{\partial \eta}{\partial y}+A_h\left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 V}{\partial y^2}\right)+\frac{\rho_a\gamma_s^2 V_{10}\sqrt{U_{10}^2+V_{10}^2}}{h+\eta}-\frac{gn^2V\sqrt{U^2+V^2}}{(h+\eta)^{4/3}} \tag{3}$$

ここで，t は時間（s），U，V はそれぞれ x，y 方向における水深平均の流速（m/s），h は河床標高（m），η は水位（m），f はコリオリパラメータ（1/s），g は重力加速度（m/s^2），A_h は水平渦動粘性係数（m^2/s），n は Manning の粗度係数（s/m$^{1/3}$），ρ_a は空気の密度（kg/m^3），γ_s^2 は水面の摩擦係数，U_{10}，V_{10} は水面上 10m の高さの風速（m/s）である．運動方程式の右辺第 4 項の

図 1　山田堰

風応力項は流れへの影響は小さいものとして無視した．数値解法には有限差分法を用い，水理量はスタッガードメッシュ系に配置した．水平渦動粘性係数の評価には Smagorinsky モデルを導入した．また，堰を越流する流れを正確に再現するため，干出・冠水スキームを導入した．土砂の掃流機能は底面せん断応力により評価し，Manning の平均流速公式より得られる次式で計算した．

$$\tau_b = \frac{\rho g n^2 \left(U^2 + V^2\right)}{\left(h+\eta\right)^{1/3}} \qquad (4)$$

ここで，τ_b は底面せん断応力（N/m^2），ρ（= 1000 kg/m^3）は水の密度である．流況解析に用いる地形の標高データは，観測データから逆距離加重法による空間内挿を用いて作成した．上下流端の境界条件として必要な水位・流量の連続観測データが得られなかったため，計算は定常流の場合を考え，前後数日間の流量が概ね一定であった 2012 年 9 月 5 日における観測値を用いた．取水量には実測流量を境界条件として与えた．

3．流況解析結果　**図 2** に計算結果の流速ベクトル，**図 3** に流速分布，**図 4** に底面せん断応力分布を示す．まず，**図 2** では，3 本の水路の流況や堰の干出，土砂吐からの水流が扇状に広がって流れていく様子が示されている．現場での目視の観測や**図 1** と比較しても，山田堰の流況を良好に再現できたと考えられる．つぎに，**図 3** より中舟通し，南舟通しからの水流が衝突し，減勢していることが分かる．そして，**図 4** からは 3 本の水路で底面せん断応力が大きいことから，各水路の排砂機能が確認された．また，土砂吐により取水口方向へ流れていた土砂が堰下流に排出される構造になっていることも分かる．堰下流部の土砂堆積状況から判断して，排砂された土砂の一部は堰下流の両岸に堆積していると考えられる．

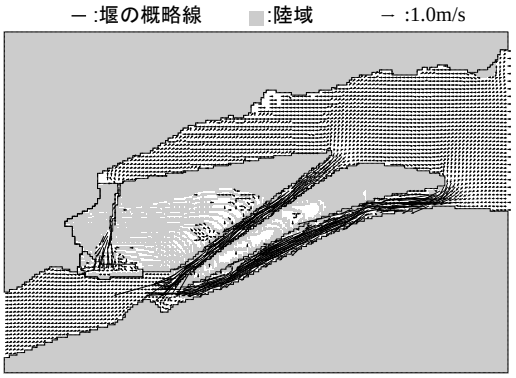

図 2　流速ベクトル図

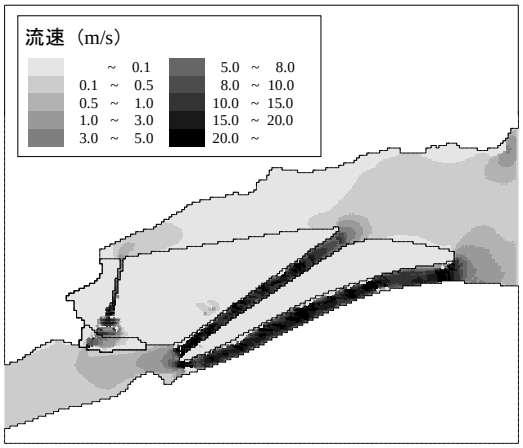

図 3　流速分布図

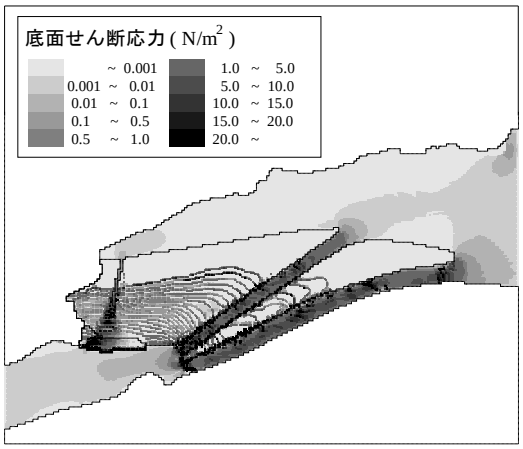

図 4　底面せん断応力分布図

4．おわりに　流況解析より山田堰における水流の減勢メカニズム，排砂機能などの水理学的特徴について考察した．山田堰が築造から現在まで堰として機能している理由として，取水時に土砂の流入を防ぐ構造をしており，上流からの勢いのある水流は水路の配置により堰末端部で減勢させられていることが考えられる．今後の研究課題として，観測データの不足を補うため，1 次元漸変流モデルで推定した境界条件を上下流端に用いることで，非定常流解析を行う．また，河床の土砂粒径のデータ収集を行い土砂の挙動追跡を目指し，最終的に傾斜堰床式石張堰の発展途上国への適用可能性について考察を行う．