人体-流動連成数値解析によるローヘッドダムにおける溺水危険性の基礎的検討

関谷　宏紀[1]・中村　恭志[2]

[1]学生会員　東京工業大学修士課程　環境社会理工学院　地球環境共創コース
（〒226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259）
E-mail: sekiya.h.ad@m.titech.ac.jp

[2]正会員　東京工業大学准教授　融合理工学系（〒226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259）
E-mail: tnakamur@tse.ens.titech.ac.jp (Corresponding Author)

河川での水難事故多発箇所である堰状構造物（ローヘッドダム）における流れへの転落事故を想定し，堰越流の３次元流動計算と，人体各部位への流体力と浮力を考慮し落水者の姿勢変化と運動を計算した．堰の上・下流水深を変化させ流動様式の異なる流れを再現し，人体は救命胴衣着用を想定してモデル化した．溺水原因とされる鉛直循環流は，従来注目されていた submerged jump に加え wave jump でも生じ，水面に加え河床付近にも形成された．submerged jump の鉛直循環流への捕捉は長時間になる傾向があった．wave jump での捕捉は短時間となるが，submerged jump よりも人体が激しく煽られた．この場合，たとえ救命胴衣を着用していても水面上に浮き続けることができないケースも確認された．

Key Words: *low-head dam, drowning, life jacket, recirculation, multiphase flow analysis*

1.　序論

我が国では毎年 1,000 件以上の水難事故が発生し，死者・行方不明者数は毎年 700 人に上る [1]．死者・行方不明者の発生水域別内訳では，河川は約 32 %と大きな部分を占めるなど，河川における水難事故の対策の高度化が求められている [2]．河川における事故の特徴として，複雑な流れが生じる河川構造物付近で多発していることが挙げられる．中でも比較的低い堰高で河道を横断して設置される，頭首工など堰状構造物（以降，ローヘッドダム）は水難事故が多発する箇所として，drowning machines と呼ばれ恐れられている [3]．

通常，ローヘッドダム下流には越流水の減勢工としてバッフルブロックやエンドシル等が設置され，堰下流には跳水が形成される．跳水の形態や発生位置など堰下流の流動様式は水槽実験等により調べられ，水深など水理学的条件に応じ，堰下流の流動様式が変化することが報告されている [4]．堰下流の流動様式のうち，submerged jump では堰直下に鉛直循環流が形成されるとされている．堰直下に鉛直循環流が存在する場合の危険性は過去の水難事故事例をもとに経験的に議論されており，循環流内の水難者は水面付近の逆流と底層付近の順流で上流と下流へ交互に押し流されるため循環流からの脱出は困難であり，溺水リスクが最も高まるとされてきた．そのため，従来，鉛直循環流を伴う submerged jump のみが危険なものとされ，ローヘッドダムのその他の流動様式についての溺水リスクは軽視されてきた傾向にある．また，上記のように水理学的な研究は見られるものの，流動に呑まれた被害者に着目し，その体が流れの中でどのように運動するのかを力学的視点から調べた研究は見られず，ローヘッドダムにおける溺水の危険性は十分評価されていない．本研究では，流動と人体の運動を連立し，両者を同時に解析可能な数値モデルをローヘッドダムに適用し，ローヘッドダム下流に生じる一連の流動様式を再現するとともに，それぞれの流動様式における流水中の人体の運動を解析して溺水の危険性を評価することとした．また，近年水難事故対策として救命胴衣着用の奨励が行われているが，ローヘッドダムでその有効性を確認することは今後の着用の奨励活動に重要な情報となるはずである．そこで，人体は救命胴衣の着用を想定したモデル化を行うこととした．また，幾つかの解析ケースでは，救命胴衣の非着用を想定した人体モデルでの解析と比較し，救命胴衣の着用がローヘッドダムでの溺水過程に及ぼす影響を検討した．

2. 計算条件

(1) 数値解析モデル

人体―流動連成数値モデルである Drowning hUman Model (DRUM)を用いてシミュレーションを行った[5,6]．自由水面を伴う三次元流動を計算格子を用いた混相流解析で計算する一方，人体の各部位を剛体とみなし，運動方程式に従いそれらの並進・回転運動を計算することで人体の姿勢の変化と運動を計算する．各時間ステップでは，混相流解析で計算される圧力を人体の各部位の領域で積分し，各部位に作用する流体力を考慮した人体の姿勢変化と運動が計算される．同時に，各時間ステップにおいて，人体各部位の速度は計算格子へ上書きされ，それを境界条件として流速の時間発展を計算することにより人体の存在と運動の影響が流動へ反映される[6]．

計算格子にはスタガード配置の直交格子を用い，混相流解析では Constrained Interpolation Profile-Combined Unified Procedure (CIP-CUP)法が用いられる[7]．本研究では水面位置の追跡をタンジェント変換[8]を用いて行うこととし，跳水に伴う気泡連行は考慮しないこととした．一方，人体は，**図-1** のように複数の部位と，各部位を接続する関節でモデル化される[9]．多くの場合，水難事故の被害者はパニックに陥り泳動など合理的な運動を行うことは難しいとされている．さらに，最も危険性が高くなるであろう意識消失状態を想定して溺水危険性を評価するため，本研究では関節は能動的に動作せず，接続する部位の運動に応じ，関節それぞれの可動範囲で自由に曲がると仮定した．関節の可動範囲は成人男性の代表値とした[10]．

(2) 計算条件

計算領域を**図-2** に示す．主流(x軸)方向 32m, 横断(y軸)方向 4m の矩形水路を想定し，上流端から 5m 下流に高さ 2.653m の固定堰を配置し，下流端から 5m 上流には高さ 0.5m の減勢工を設置した．固定堰と減勢工の形状及び配置は，水難事故が多発する K 県 S 河の頭首工と同じとした．水路側岸の境界条件はスリップ境界条件とした．上流の境界では，流速は自由境界，水位は初期水位に固定する境界条件とした．下流は流速と水位ともに自由境界条件とした．x軸方向の格子間隔は不等間隔とし，堰下流の鉛直循環流が発生する範囲は細かい格子幅(Δx = 3cm)とする一方，それ以外の領域は上下流端に向けて一定割合で格子幅を広げた．y 軸及び z 軸方向の格子幅は等間隔とした(Δy = 10cm, Δz = 7.5cm)．モデルとした頭首工付近の水位記録から平水時及び洪水時に想定される範囲を検討し，計算対象とする水深を決定した．初期水深として，堰より上流側は 3.0，3.5，4.0，4.5 m の 4 ケース，堰より下流側は 0.5，1.0，1.5，2.0，2.5 m の 5 ケースを想定し，上流・下流の水深の組み合わせ全て(計 20 ケース)

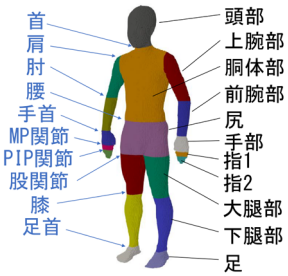

図-1 人体モデル．黒字は部位，青字は関節を表す．

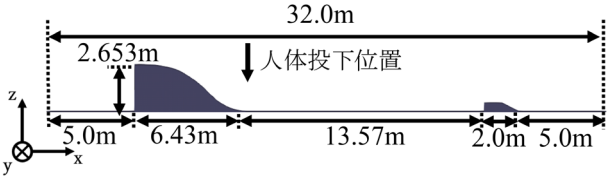

図-2 計算領域の模式図

について計算を行った．初期流速は鉛直・横断方向ともに零とし，主流方向は堰頂で限界水深となる条件から水深方向に一様な流速を設定した．人体は成人男性を想定した．産業総合技術研究所のデータベース（データ ID F020，23 歳，身長 168 cm，体重 61.4 kg）[11]から形状を取得し，19の部位と18の関節によりモデル化した（**図-1**）．また，救命胴衣には浮力 7.5 kgf の標準的なものを想定し，水中で同じ浮力が胸部に加わるよう，胸部内の密度を一様に低下させることでモデル化をおこなった．これにより，人体全身の水中浮力は 6.22 kgf となる．救命胴衣を着用しない場合の全身の水中浮力は-1.28kgf である．計算開始後に助走計算を行い，流れ場が安定してから堰下流側で人体を水面上方から水中へ自由落下させた．人体が落水してから速やかに流下した場合，計算領域下流端に達する時間は 30 秒程度であったことから，計算時間は人体の投下から 35 秒間とした．

3. 計算結果

(1) 流動様式と鉛直循環流の形成

図-3 に本研究で計算された代表的な流動様式を示す．既往研究によれば，堰下流における流動様式は主に surface flow, submerged jump, swept-out jump に分類され，堰上下流の水位差 ΔH の増加に伴い後者の流動様式が出現しやすいとされている[4]．本研究でも ΔH の変化に対して同様の流動様式の遷移が見られた．これらに加え，本研究では**図-3**(c)に示すような堰直下の底層に循環流を伴う流動様式が見られた．この流動様式は ΔH が大きい場合に段落ち部に発生する跳水で見られるもので，wave jump と呼ばれる[12]．既往研究では主流方向に厚みの薄い刃型堰を主に想定していた一方，本研究では実際の頭首工を模擬した台形形状の堰を用いたため，堰形状の差異

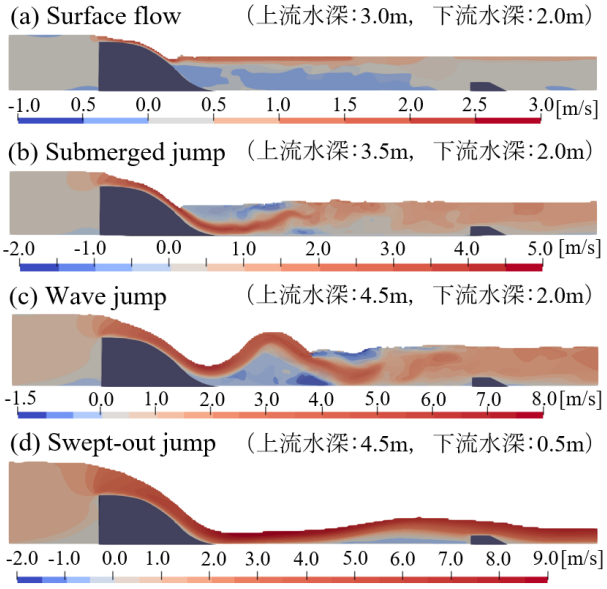

図-3 代表的な流動様式における主流方向流速分布.

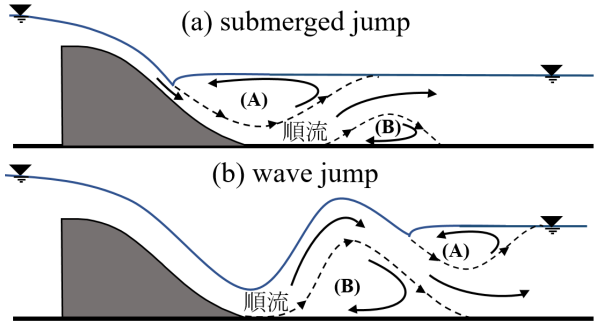

図-4 (a) submerged jump, (b)wave jump の流動様式の模式図. 図中の(A)と(B)は水面循環流と河床循環流を表している.

により wave jump の流動様式が得られたと考えられる. 小さいΔHでは越流水は遅く, 下流側では底層に潜りこめず, 水面付近を流下する surface flow を形成した(図-3(a)). ΔHが増加すると越流水は速くなり, 下流側で底層に潜り込み, 堰直下の水面付近に鉛直循環流を形成する submerged jump となった(図-3(b)). さらにΔHが大きい場合には, 高速な越流水は下流側で底面で何度も反射しつつ主流域が上下に蛇行する wave jump となり(図-3(c)), 特に下流側水深が浅い場合には, 高速な越流水が下流側の水を押し流す swept-out jump の流動様式が見られた(図-3(d)). 表-1 に計算条件ごとの流動様式を各カラムの色で示す. 流動様式ごとに鉛直循環流形成の有無を確認したところ, surface flow と swept-out jump では鉛直循環流は形成されない一方, 図-3(b)と(c)に示すように, 従来から危険だと注目されてきた submerged jump に加え, wave jump でも強い鉛直循環流の形成が確認された. 図-4 は submerged jump と wave jump の循環流の模式図を示しており, 水面付近に生じる循環流(水面循環流)に加え, 底層でも循環流(河床循環流)が形成されていた

表-1 流動様式と鉛直循環流への捕捉の有無. 各カラムの背景色は流動様式を表す. ●と■はそれぞれ水面循環流と河床循環流への人体の捕捉の有無を表し, 数字は捕捉された秒数, ×は計算終了まで捕捉されたことを表す.

上流水深 [m] ＼ 下流水深 [m]	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
3.0	● 17	● ×	● ×		
3.5	● 32	● ×	● ×	● ×	
4.0		■ 15	● 12		● 25
4.5					● 7

submerged jump　wave jump　swept-out jump
surface flow

(2) 人体の鉛直循環流への捕捉傾向

ローヘッドダムでは鉛直循環流の存在が溺水危険性を高めているとされる. そこで, 人体の姿勢・運動の計算結果から, それぞれの流動様式ごとに鉛直循環流の内部に人体が捕捉されるかどうかを確認した. 鉛直循環流を形成しない surface flow と swept-out jump では, 人体は水中に落下後すみやかに浮上し, 水面上をそのまま下流へと流下していった. 一方, 鉛直循環流が形成される submerged jump 及び wave jump では, 両方で循環流への捕捉が見られた. 表-1 では水面循環流に捕捉されたケースを●で, 河床循環流に捕捉されたものを■で示している. 各印の下の数字は捕捉された秒数で, ×は計算終了まで脱出できなかったことを示している. 表からは以下の傾向が確認される.

- submerged jump の全てのケースで人体は水面循環流に捕捉され, 下流側水深が浅い(0.5m)場合を除き, 捕捉は長時間となり計算終了まで継続する.
- wave jump の場合も循環流へ捕捉され, 水面循環流に加え河床循環流に捕捉されることもある. ただし, 上流水深 4.0m の場合のように, 下流水深 1.5m 及び 2.5m で捕捉されるが, その中間の 2.0m では捕捉されないなど, 捕捉されるケースと捕捉されないケースの間には, 水深による系統的な傾向は見られない. また, 水面循環流と河床循環流のいずれでも捕捉は数十秒間以下で終了する.

(3) 流動場に基づく人体の鉛直循環流への捕捉傾向の考察

a) submerged jump

図-5 に submerged jump で下流側水深が比較的深いケース(上流水深 3.5m, 下流水深 2.0m)の水面循環流への捕捉の様子を示す. 主流方向流速をカラーコンターで示し, 青色は逆流方向, 赤色は順流方向の領域を示す. 人体は

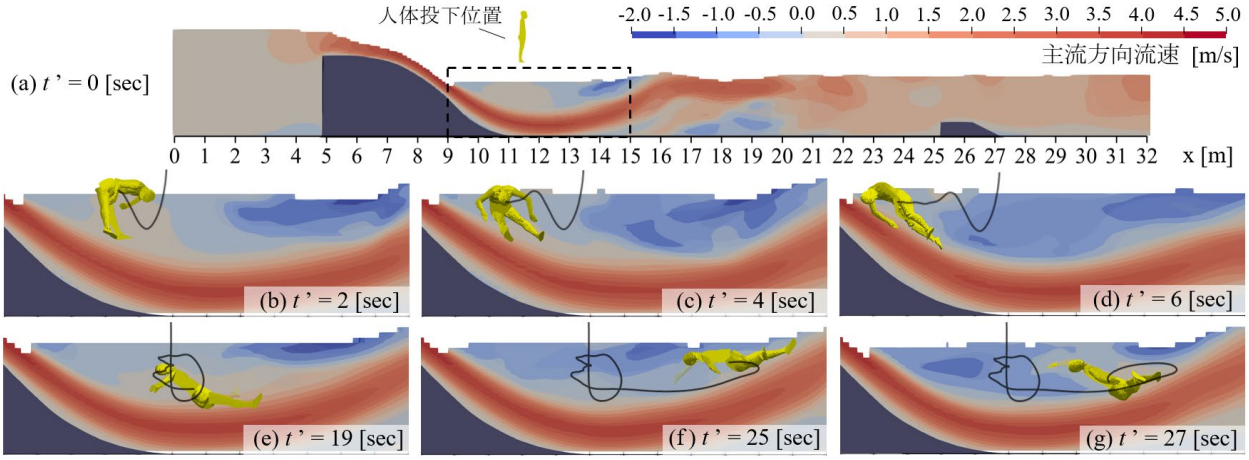

図-5 submerged jump の水面循環流への捕捉（下流水深が深い場合）．全体図(a)の破線の領域を(b)～(g)は拡大している．(b)～(d)は救命胴衣着用，(e)～(g)は救命胴衣非着用の場合を示す．

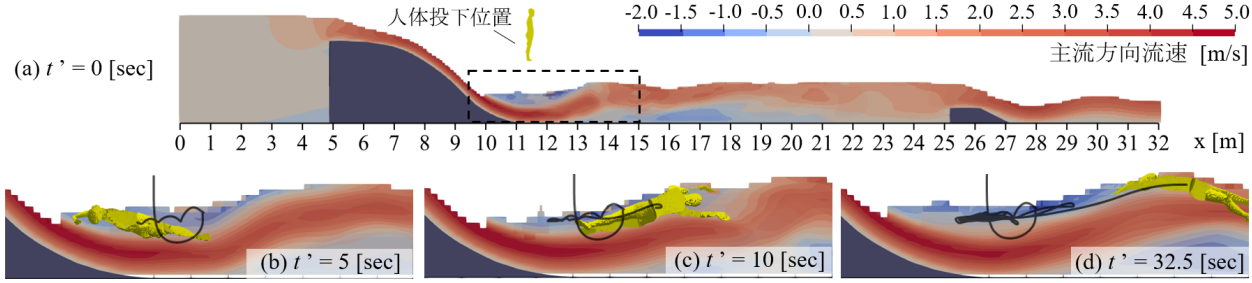

図-6 submerged jump の水面循環流への捕捉（下流水深が浅い場合）．全体図(a)の破線の領域を(b)～(d)は拡大している．

黄色で示し，黒字線で人体全身の重心位置の軌跡を表している．t 'は人体の落下開始からの時間である．水面落下後，救命胴衣の浮力により水面付近に浮上するが(**図-5**(b))，循環流による水面付近の逆流により堰方向へ押し流されて行く(**図-5**(c))．逆流の流速は青年男子の平均泳速(1.3m/s程度[13])よりも速く，逆流に逆らいつつ被害者が泳いで循環流から脱出することは困難であると考えられる．逆流により堰直下まで到達した後は，堰面上を流下する越流水と逆流とに挟まれるように，水面上に浮上したまま，堰直下で移動しなくなる(**図-5**(d))．この時，人体の全身は逆流となっている水面付近に含まれ，底層付近を流れる高速な順流による連行は見られなかった．救命胴衣非着用を想定した人体モデルの計算結果を**図-5**(e)~(g)に示す．水中へ落下後，①負の浮力を持つ人体は水面に浮上し続けることができず沈み(**図-5**(e))，②順流の流脈に体の一部が侵入すると人体は水中で下流へ連行され(**図-5**(f))，③水面まで連行された人体は水面循環流の強い逆流に捕捉され，沈みつつ再度上流へ運ばれる(**図-5**(g))．以上の①～③の過程は何度も繰り返され，被害者は順流による水中への連行を何度も被ることとなる．一方，救命胴衣を着用した場合(**図-5**(b)~(d))，循環流からの脱出は困難であるものの，水面上に人体は浮上し続けており，救命胴衣を着用することは水面循環流による溺水リスクを低下させると考えられる．一方，**図-6**に示すように，同じ submerged jump でも下流側水深が浅い場合(上流水深 3.5m，下流水深 0.5m)には，人体は水面に浮上し続ける一方，浅い水深のため脚部など体の一部が常に底層の順流域に侵入していた．その結果，「順流域の連行」と「水面付近の逆流」により，人体は上流と下流への移動を不規則に生じるとともに(**図-6**(b), (c))，順流域への体の侵入が大きくなったタイミング(**図-6**(d))で，人体は下流へ強く連行され，循環流外部へと運ばれることが確認された．以上のように，下流側の水深により底層の順流による連行の有無が変化することが，同じ submerged jump でも下流側水深が浅い場合には水面循環流への捕捉は短時間で，下流側水深が深い場合には長時間となる原因と考えられる．

b) wave jump

図-7に wave jump で水面循環流に捕捉されたケース(上流水深 4.0m，下流水深 2.5m)を示す．人体の水面への投入は堰直下の下流としたが(**図-7**(a))，wave jump では堰直下に水面循環流は形成されないことから，堰面上を流れ降った越流水の強い順流に人体は投入され，そのまま下流へ運ばれることになる．その後，鉛直循環流に捕捉されたケースでは，順流の流脈中央から人体がはずれ，流脈外部に突出した脚部等が流脈に隣接する鉛直循環流に引っかかることで，順流の流脈から引き出され鉛直循環流へ捕捉されていた(**図-7**(b))．このように，順流で運ばれる際の人体の姿勢・位置の微妙な差異が捕捉の有無を決定することが，wave jump では水深による系統的な傾

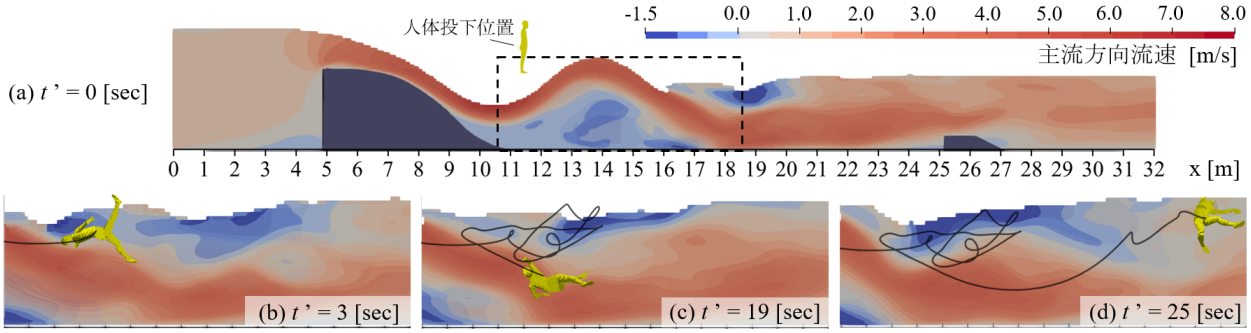

図-7 wave jump の水面循環流への捕捉．全体図(a)の破線の領域を(b)～(d)は拡大している．

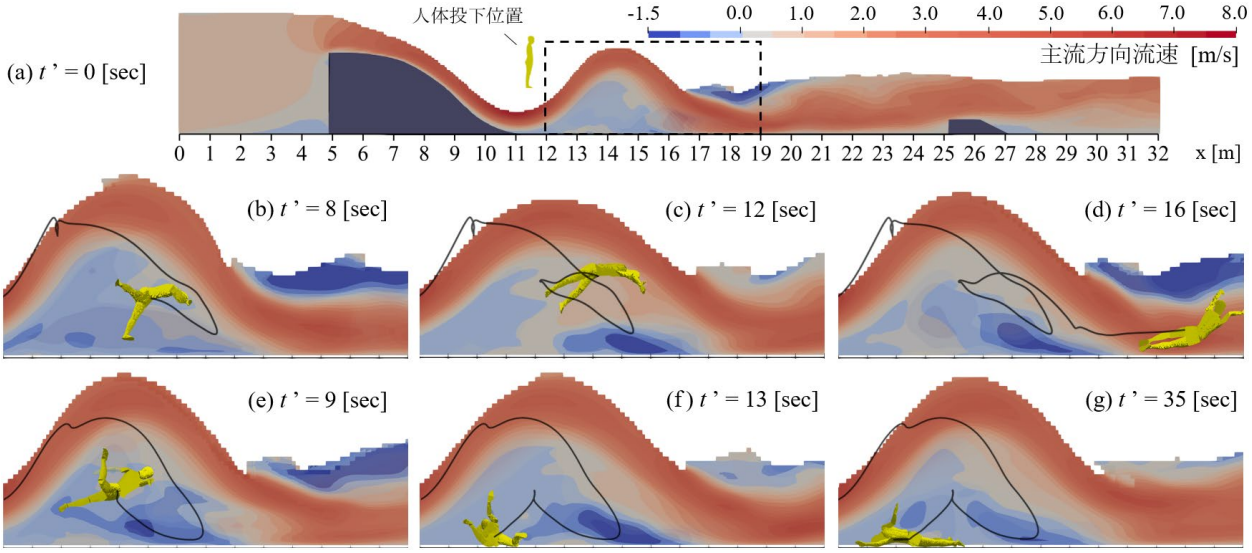

図-8 wave jump の河床循環流への捕捉．全体図(a)の破線の領域を(b)～(d)は拡大している．(b)～(d)は救命胴衣着用，(e)～(g)は救命胴衣非着用の場合を示す．

向が見られない原因と考えられる．submerged jump では水面循環流の大きさは安定していたが，wave jump では順流の流脈が上下に揺動して水面循環流の大きさは常に変化していた(**図-7**(b), (c), (d))．揺動する順流に人体の一部が頻繁に接触を繰り返すため，人体は循環流内部で激しく振り回され水面上に浮かび続けることができない．このことから，水面循環流へ捕捉された後の溺水に至る危険性は，水面に比較的安定して浮かび続けられる submerged jump に比べ，wave jump の方が高いと考えられる．その一方，順流へ頻繁に接触するため，順流による下流への連行が強くなったタイミングで，人体は速やかに循環流の外へ運び出された(**図-7**(d))．このことが，wave jump では捕捉される時間は数十秒以下と短時間となる原因と考えられる．**図-8** は wave jump で河床循環流へ捕捉されたケース(上流水深 4.0m，下流水深 1.0m)を示している．河床循環流は水面循環流に比べ大きく，循環流内部に全身を含まれた人体は循環流の内部を大きな軌跡で回転する(**図-8**(b))．しかし，人体は浮力により回転しつつも浮上を続けるため，上方を流れる順流の流脈に達した後(**図-8**(c))，順流に連行され循環流の外部へ運び出された(**図-8**(d))．救命胴衣非着用を想定した人体モデルの計算結果を**図-8**(e) ~(g)に示す．河床循環流に捕捉された人体は，救命胴衣着用の場合と同様に循環流内部を大きな軌跡で回転するものの(**図-8**(e))，人体は負の浮力により河床へ沈降し，上方の順流域に触れることはなく(**図-8**(f))，計算終了まで河床循環流内部に捕捉され続けた(**図-8**(g))．以上のように救命胴衣の着用は水面への浮上に加え，河床循環流からの被害者の早期の脱出を可能とすることから，救命胴衣の着用は河床循環流による溺水リスクを低下させると考えられる．

4. 結論

本研究で得られた主要な知見と今後の課題は以下の通りである．

- 流動様式の中で submerged jump に加え，wave jump においても鉛直循環流が形成され，水面付近と河床付近にそれぞれ鉛直循環流が形成される．循環流に捕捉された場合は泳動により脱出することは困難と考えられる．
- 鉛直循環流は形成されない surface flow と swept-out jump では，落水者は速やかに下流へ押し流される．

・submerged jump では，水面循環流へ落水者が捕捉され，河床循環流へは捕捉されない．下流水深が深い場合，逆流で堰直下に押しつけられ，長時間にわたり水面循環流に捕捉される．一方，下流水深が浅い場合，人体の順流への連行により，循環流内への捕捉は数十秒以下と比較的短くなる．
・wave jump では，落水者は水面循環流に加え，河床循環流にも捕捉される．また，捕捉されず下流へ流される場合もある．水面循環流に捕捉された人体は激しく振り回され，submerged jump よりも溺水に至る危険性が高い．水面循環流と河床循環流いずれでも，循環流内への捕捉は数十秒以下と比較的短い．
・救命胴衣非着用の解析と比較した結果，救命胴衣の着用は submerged jump の水面循環流における水面への浮上の継続，ならびに wave jump の河床循環流からの速やかな脱出に有効であることが確認された．救命胴衣着用はローヘッドダムにおける溺水リスク低減に役立つと考えられる．
・本研究では鉛直循環流への捕捉に注目した．しかし，実際の溺水事故では呼吸の確保が重要であり，顔の水面上への露出に着目して，危険性評価を行う必要がある．救命胴衣の形状により水中での人体の姿勢は変化すると考えられることから，今後は様々な形状の救命胴衣に対し，呼吸確保の観点から危険性評価を引き続き進める予定である．

参考文献

1) 警察庁生活安全局生活安全企画課：令和元年における水難の概況，警察庁，2020.
2) 河川環境管理財団 河川環境総合研究所：河川環境総合研究報告書 No.14，河川環境管理財団，2008.
3) Borland-Coogan Associates.: The Drowning Machine, *Filmspace Productions,* 1980.
4) Leutheusser, H. J. and Birk, W .M.: Drownproofing of Low Overflow Structures, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol.117, No.2, 1991.
5) 中村恭志，安嶋大稀，相澤敦武，井上徹教：人体流動連成解析に基づく溺水数値解析シミュレーションモデルの開発，土木学会論文集 B1(水工学), Vol.73, pp.I_601-I_606, 2017.
6) Ajima, D., Nakamura, T., Araki, T., Inoue, T. and Kurisu, A.: Development of a coupled human fluid numerical model for the evaluation of tsunami drowning hazards, *Journal of Biomechanical Science and Engineering*, Vol. 14, pp.18-00321, 2019.
7) Yabe, T. and Wang, P.Y.: Unified numerical procedure for compressible and incompressible fluid, *Journal of the Physical Society of Japan*, Vol.60, pp.2105-2108, 1991.
8) Yabe, T. and Xiao, F.: Description of Complex and Sharp Interface during Shock Wave Interaction with Liquid Drop, *Journal of the Physical Society of Japan*, Vol. 62, pp.2537-2540, 1993.
9) 藤井範久，阿江道良，宮下 憲：剛体リンクモデルによる身体運動シミュレーションシステムの構築とスポーツ運動への応用，筑波大学体育科学系紀要，Vol.18，pp.117-126, 1995.
10) 中村隆一，齋藤宏，長崎浩：基礎運動学第 6 版，医歯薬出版，2016.
11) 河内まき子，持丸正明: AIST/HQL 人体寸法・形状データベース 2003，産業技術総合研究所 H18PRO-503, 2006.
12) Ohtsu, I. Yasuda, Y.: Transition from supercritical to subcritical flow at an abrupt drop, *Journal of Hydraulic Research*, *IAHR*, Vol.29, No.2, pp.309-328, 1991.
13) 鎌田安久，栗林徹，山下芳男，北田雅子，“水泳におけるプルの能力と泳力”，岩手大学教育学部研究年報，Vol.52，No.2，pp.89-102, 1995.

(Received May 31, 2022)
(Accepted September 1, 2022)

BASIC STUDY ON DROWNING RISK AT A LOW-HEAD DAM BY USING A COUPLED HUMAN FLOW SIMULATION

Hiroki SEKIYA, Takashi NAKAMURA

Numerical analysis of a water accident at a low-head dam was conducted. In assuming a human-body falling to a overflow weir, posture change and movement of human-body were simulated by being combined with a solution of 3D multi-phase flow. From a series of simulations conducted with different combinations of upstream depth and downstream depth, it was found that “wave jump” regime has vertical circulational flow in addition to “submerged jump” regime, which has been regarded as danger. While a human-body is trapped in a long time in a circulation flow of “submerged jump” regime, trapping in “wave jump” regime tends to be shorter. Because a human-body is strongly shaken in “wave jump” regime, “wave jump” regime seems to be more danger than “submerged jump” regime. A human-body was modeled to have the bouyancy that is caused by a standard lifejacket. Simulation results show that while the wearing of lifejacket might contributes to the prevention of drowning at low-head dam, the buoyancy of a standard lifejacket might be insufficient to keep a human-body floating on a water surface in the cases trapped in a circulation flow of “wave jump” regime.