Copyright©2021 一般社団法人 日本機械学会

U00012

人体流動連成シミュレーションによる ローヘッドダム循環流での溺水危険性評価

RISK ASSESSMENT OF DROWNING IN RECIRCULATON FLOW AT LOW-HEAD DAM BY USING A COUPLED HUMAN FLOW SIMULATION MODEL

○関谷 宏紀[*1]，正 中村 恭志[*1]
Hiroki SEKIYA[*1], Takashi NAKAMURA[*2]
[*1] 東京工業大学 Tokyo Institute of Technology

River structures such as headworks installed in channels are called low-head dams. They are known to cause water accidents frequently due to the circulating flow that occurs at the downstream neighboring the weirs. In this study, the risk of drowning due to the circulating flow at the low-head dam was investigated by using a simulation model that can simultaneously solve the flow and human movement. From a series of simulation with different hydraulic conditions, it was found that the circulating flow can occur at both the surface and the riverbed, that a victim can continue to float on the surface by wearing a life jacket even if he is trapped by the current while he can be trapped by the circular current for a long time.

Key Words : Low-head dam, Drowning, Life jacket, Hydraulic jump, Recirculation, Multiphase flow analysis

1. 緒 言

我が国では年間約 1300 件の水難事故が発生しており，水難者数は 1500 人を超える（警察庁生活安全局生活安全企画課, 2020）．うち死者・行方不明者数は約 700 人であり，水難事故は深刻な事故に繋がりやすいことが指摘されている．水辺での活動は釣りやボート，遊泳，自然観察，環境教育など幅広く，特に河川は居住域に広く隣接していることから人々の暮らしに密接していると言える．そのため河川では水難事故が多発し，河川での水難事故による死者・行方不明者数は海や湖沼，プールなども含めた水難事故全体の死者・行方不明者数の約 32%を占める（河川環境管理財団, 2008）．さらに中学生以下の子どもに限定した場合 47%を占め，これは海での死者・行方不明者数の 2 倍である．河川はそれだけ子どもにとって身近であるとともに，不慮の事故に遭いやすいと言える．特に，河川構造物付近では複雑な流れが生じやすいことから水難事故が多発しており，その中でもローヘッドダムと呼ばれる堰状構造物で発生しやすいことが指摘されている．

ローヘッドダムとは頭首工，落差工などの落差の小さなダムを指し，灌漑や河床の洗堀防止など様々な目的のために設置される．ローヘッドダムは水難事故が頻発しやすい特徴から，”drowning machines”（Borland-Coogan, 1980）とも呼ばれ，これまで多くの研究者によって周辺での流れ特性が調べられてきた．ローヘッドダムには刃型，段落ち，階段，スロープなど様々な形状が存在するが，いずれの堰形状においても，流れは堰直下での流速の減勢に伴い水位が増大することで射流から常流へと遷移する．これは跳水現象と呼ばれ，多くのローヘッドダムにおいて流下する水のエネルギーを弱め，洗堀を防止する目的で強制的に跳水が引き起こされるよう設計されている．ローヘッドダムでの跳水形態は流量一定のもとでいくつかに分けられる．Leutheusser と Birk の研究（Leutheusser and Birk, 1991）によれば跳水形態は図 1 に示す 4 通りに分類される．流量一定の条件の下では，下流水深の増加に伴い swept-out jump，optimum jump，submerged jump，surface flow へと連続的に形態が遷移する．swept-out jump は下流水深が小さいことで跳水位置は下流に押し出され，射流の露出域が長くなる．（図 1, (a)）．swept-out jump が生じている状態から下流水深を増加させると，堰直下で跳水を発生する optimum jump へと遷移する（図 1, (b)）．さらに下流水深を増加させると，流入射流は下流水面に潜り込み，submerged jump を発生させる（図 1, (c)）．そして，下流水深が堰高に近づくと surface flow と呼ばれる跳水を伴わない流れとなる（図 1, (d)）．

Copyright©2021 一般社団法人 日本機械学会

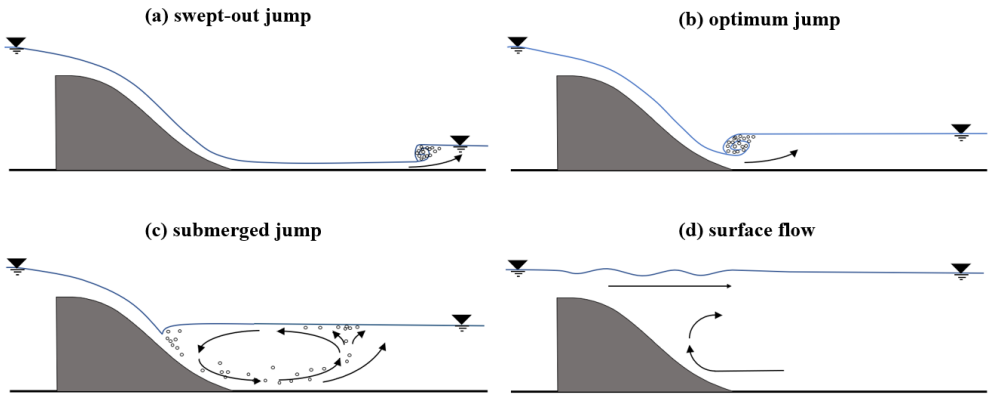


Fig. 1 Diagrams of the various regimes of weir flow.

これら 4 つの形態のうち，submerged jump が最も危険な流況であることが経験的に知られている．submerged jump が危険であると考えられている要因は循環流の形成と空気連行，これら 2 つの特徴にある．submerged jump の跳水始端では流入射流が下流水面に対して潜り込むことで，強い逆流を伴う循環流が発生する．この循環流が生み出す順流と逆流により犠牲者が疲れ果てるまで交互に押し流されることで，循環流から脱出することは困難となり，溺水リスクが高まるとされている．また，循環流の発生と同時に，強い乱れによって多量の気泡が循環流内に取り込まれることで人体に加わる浮力が減少し溺水しやすい状況となる．

実際に，カヌーの教則や河川でのレスキュー活動においてもローヘッドダムで発生する流れへの注意喚起がされている．また，頭部を水面上に保つために水回りで活動する際には救命胴衣の着用が推奨されている．救命胴衣には人体を浮かせることで気道を確保できるほか，発見・救出しやすくする効果がある．

以上のようにローヘッドダムで発生する流れ場の特性については流体力学の視点から研究されているものの，その多くは経験的な知見を基に溺水の危険性が主張されており，力学的視点で人体の運動を科学的に考察した事例は少ない．実際の循環流内での人体の運動や，救命胴衣を着用した場合の循環流に対する危険性の変化を明らかにすることは水難事故防止の観点で大きな意義を持つ．また，救命胴衣の性能は主に浮力で評価され，あらゆる流況に対応するよう設計されていない．循環流に対する救命胴衣の性能を検討することは救命胴衣の設計に示唆を与える．そこで本研究では，ローヘッドダムでの溺水時の人体挙動について新たな知見を得るとともに，溺水危険性が高くなる水理学的条件を検討し，循環流に対する救命胴衣の有効性も併せて検討することとした．

一般に人体の溺水過程を模型実験で再現して人体挙動を検討することには大きな困難を伴うことから，数値解析による手法が有効である．著者の所属する研究室では，人体―流体連成数値モデル Drowning hUman Model（DRUM）の開発を行っている（中村他, 2017）．Ajima らは大規模水路にてマネキンを用いて津波による巻き込み実験を行い，DRUM による再現計算との比較によるモデルの妥当性を確認したのち，津波災害時の救命胴衣の有効性についていくつかの津波を模擬した流れ場を適用し定量的な評価を行った（Ajima et.al., 2019）．また殿山らは同シミュレーションモデルを用いて堰状構造物が水路底面上の人体の流下を阻止する過程とその際の条件を検討している（殿山他，2020）．本研究でもこのモデルを使用し、実河川で設置されているローヘッドダムを対象として、溺水危険性の評価を行うこととした。

2. 人体―流体連成数値モデル DRUM

本研究では人体―流体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．図 2 に DRUM の概念図を示す．自由水面を伴う三次元流動は計算格子上で計算される．一方で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変化と運動は求まる．両者の連成は時間ステップ毎に以下のように双方向的に行われる．人体の存在する格子の流速を人体各部の運動速度に上書きすることで人体から流れへの影響が考慮される．一方で流体計算から求められた圧力と応力を

Copyright©2021 一般社団法人 日本機械学会

人体各部位の領域で積分することで流体から人体へ作用する流体力とトルクが求められ，それらを運動方程式に加えることで流体から人体への影響が考慮される．

2・1 流れ場の計算

流れ場の計算は計算格子にスタガード配置の直交格子を採用し，混相流解析手法である Constrained Interpolation Profile-Combined Unified Procedure (CIP-CUP)法（Yabe, T. and Wang, P. Y., 1991）に基づき計算される．CIP-CUP 法では流速$\vec{u}$, 圧力p, 密度ρは以下の式(1) (2) (3)を解くことで求められる．

$$\frac{D\vec{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \rho\nu\nabla^2\vec{u} - \vec{g} \tag{1}$$

$$\frac{Dp}{Dt} = -C^2\rho(\nabla\cdot\vec{u}) \tag{2}$$

$$\frac{D\rho_l}{Dt} = -(\nabla\cdot\vec{u}) \quad (l = air, water) \tag{3}$$

ここで，$\vec{g}$は重力加速度，Cは音速，ρ_{air}及びρ_{water}はそれぞれ空気及び水の密度である．水面位置の追跡には空気の体積分率ϕ_{air}を用いる．以下の移流方程式に従い体積分率ϕ_{air}の変化を計算し，水面を追跡する．

$$\frac{D\phi_{air}}{Dt} = 0. \tag{4}$$

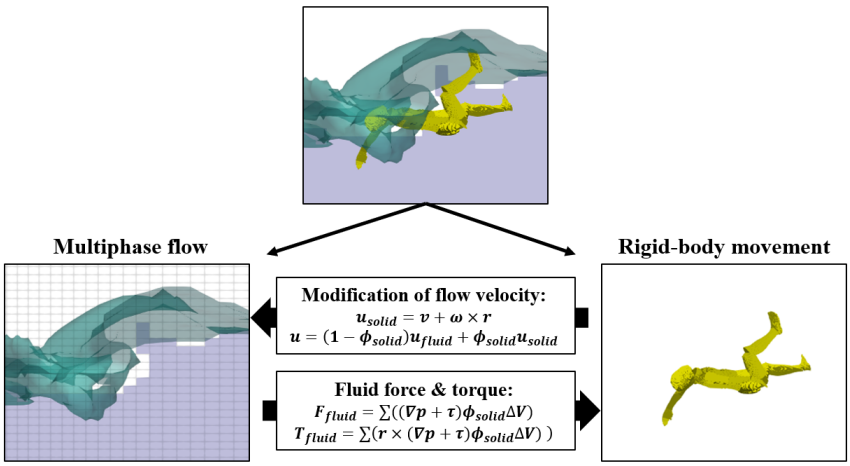


Fig. 2 Conceptual diagram of CIP-CUP scheme adaptation.

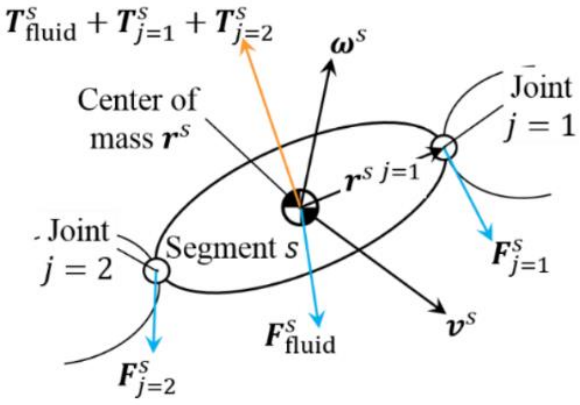


Fig. 3 Force and torque applied to a segment s that is connected with other segments at joint $j = 1,2$.

Copyright©2021 一般社団法人 日本機械学会

2・2 人体の姿勢変化・運動の計算

人体の各部位は剛体と仮定し，剛体リンクモデル（藤井他，1995）をもとに各部位の運動について定式化を行った．リンクモデルでは人体の各部位を可動域を持つ関節によって結合された剛体をみなすことで，各部位の並進・回転運動を計算できる．部位sが関節j_1，j_2により他の部位と接続されているとき（図 3），並進速度v_sと各速度ω_sについて，運動方程式と Euler 方程式がそれぞれ以下(5)(6)のように与えられる．

$$M_s \frac{d\overrightarrow{v_S}}{dt} = \vec{F}^s_{fluid} + \sum_{j\ on\ s} \vec{F}^s_j - M^s \vec{g} \tag{5}$$

$$I^s_\lambda \frac{d\omega^s_\lambda}{dt} = B^s_\lambda + \vec{e}^s_\lambda \cdot \vec{T}^s_{fluid} + \vec{e}^s_\lambda \cdot \sum_{j\ on\ s} \left(\vec{r}^s_j \times \vec{F}^s_j + T^s_j\right) \tag{6}$$

ここで，M_sとI_sは部位sの質量と主慣性モーメント，$\vec{F}^s_{fluid}$と$\vec{T}^s_{fluid}$は部位sが流れ場から受ける力とトルク，$\vec{F}^s_j$ とT^s_jは部位sが関節jより受ける力とトルク，$\vec{e}^s_\lambda$は流体計算を行う静止座標系における慣性主軸の各方向基底ベクトル，$B^s_1 = -(I^s_3 - I^s_2)\omega^s_2\omega^s_3$, $B^s_2 = -(I^s_1 - I^s_3)\omega^s_3\omega^s_1$, $B^s_3 = -(I^s_2 - I^s_1)\omega^s_1\omega^s_2$, $\vec{r}^s_j$は部位sの重心から関節jまでの変位，$\Sigma_{j\ on\ s}$は部位sが他の部位に接続する全ての関節について総和をとることを意味する．

流れ場から受ける力$\vec{F}^s_{fluid}$とトルク$\vec{T}^s_{fluid}$は流体格子上で計算されている圧力pと粘性応力τを積分することで計算される．

$$\boldsymbol{F}^s_{\mathrm{fluid}} = \sum \left((\nabla p + \boldsymbol{\tau})\phi_{\mathrm{solid}} \Delta V\right) \tag{7}$$

$$\boldsymbol{T}^s_{\mathrm{fluid}} = \sum \left(\boldsymbol{r}^{s\mathrm{P}} \times (\nabla p + \boldsymbol{\tau})\phi_{\mathrm{solid}} \Delta V\right) \tag{8}$$

ここで，ϕ_{solid}は人体各部位が計算格子上で占める体積率であり，総和Σは全ての格子について行われる．$\tau = \rho\nu\nabla^2\boldsymbol{u}$は粘性力，$\Delta V = \Delta x \Delta y \Delta z$は格子体積である．関節角がその可動域内にある場合は抵抗が働かないとして$\boldsymbol{T}^s_j = \boldsymbol{0}$を仮定し，関節角が可動域を外れた場合にはバネ・ダッシュポット系の復元力が働くものとした．これら関節角の制限に加え，関節における各部位の連結は常に維持されるとの条件を課すことにより，力$\boldsymbol{F}^s_j$とトルク$\boldsymbol{T}^s_j$を決定することができる(Ajima, et al.,2019)．関節の可動域については成人の代表的値を参考に設定している(中村隆一, 2016).

3. ローヘッドダムでの溺水の数値解析

ローヘッドダムに限らず，溺水過程において人体が水中へ沈んでしまうと，呼吸ができないことのほか，救助や捜索も困難となる．また，強い流れによって水中に引き込まれた場合，パニックに陥ることで多量の水を飲み込み肺が水で満たされるまでの時間は極めて短い．以上から，人体が循環流に巻き込まれた際には人体が水面に浮かび続けることができるかどうかが危険性評価の重要な観点となる．本章では計算条件，計算結果について示したのち，溺水危険性について検討する．

3・1 計算条件

本研究では堰形状を 1 つに定め，上流水深と初期下流水深を変化させることで様々な流況を再現した．堰形状は相模川に位置する磯部頭首工の固定堰を参考にスロープ形状とし，跳水の発生を誘起する副ダムも再現した．この磯部頭首工付近では過去に 4 件の水難事故が発生しており，危険な場所として知られている．モデル化した堰

Copyright©2021 一般社団法人 日本機械学会

形状と計算領域を図 4 に示す．計算領域はx軸方向に 32m，y方向に 4m とした．$x-z$断面両端の境界条件にはミラー条件を採用した．堰と副ダム間の距離は 13.57m とした．x軸方向には不等間隔メッシュを採用し，循環流が発生する堰直下の領域（$x=9.0\sim15.0$[m]）にメッシュを集中させた($\Delta x=3$[cm])．y，z軸方向のメッシュはそれぞれy軸方向 10.0cm，z軸方向 7.5cm の等間隔直行格子とした．水深条件は平水時から洪水時までを想定し，上流水深は 3.0，3.5，4.0，4.5m の 4 ケース，初期下流水深は 0.5，1.0，1.5，2.0，2.5m の 5 ケースを設定した．各上流水深について$x=0$[m]断面で与えた流速を表 1 に示す．上流水深の最大値 4.5m については磯部頭首工位置での計画高水位（国土交通省河川局，2007）を参考に設定している．submerged jump の特徴の 1 つである空気連行に関してシミュレーションによる気泡の再現が困難であることから，これを考慮しないものとした．意図しない液相と気相の混相を避けるため，界面捕獲にタンジェント変換（Yabe and Xiao, 1993）を用いた．人体モデルの投下は流れ場が安定した後，循環流付近にて水面上方 30-50cm から自由落下させた．計算時間は投下時刻から 35 秒間とした．人体形状は成人男性の体形を産業総合技術研究所(AIST)のデータベース（河内・持丸，2006；データ ID F020，23 歳，男性，身長 168 cm，体重 61.4kg）より取得し，19 の部位と 18 の関節を適応することでモデル化した（図 5）．また救命胴衣は浮力 7.5kgf とし，胸部（chest）の密度を一様に減少させ人体重量を 53.9kg とすることで適応した．これにより，救命胴衣非着用・着用時の人体モデルの水中重量はそれぞれ 1.28kgf，-6.22kgf となる．以上，上流水深，初期下流水深，救命胴衣の有無を含め計 40 ケースのシミュレーションを行った．

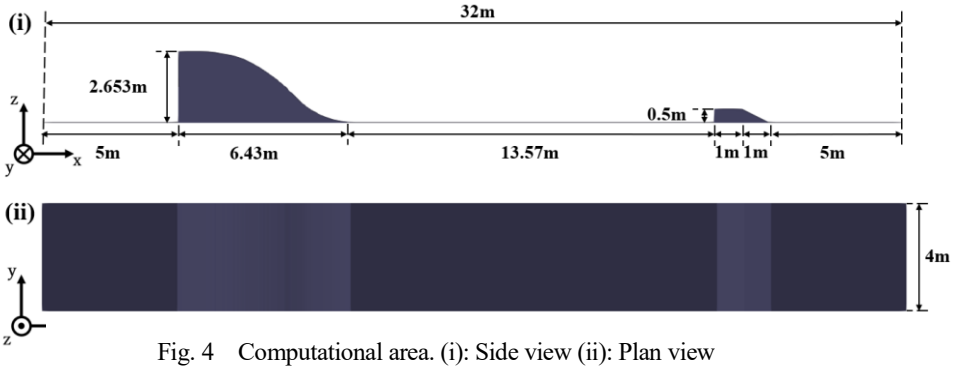


Fig. 4　Computational area. (i): Side view (ii): Plan view

Table 1　Upstream flow conditions. Flow velocity have only a longitudinal component.

Upstream water depth [m]	Flow velocity [m/s]
3.0	0.115
3.5	0.385
4.0	0.685
4.5	0.990

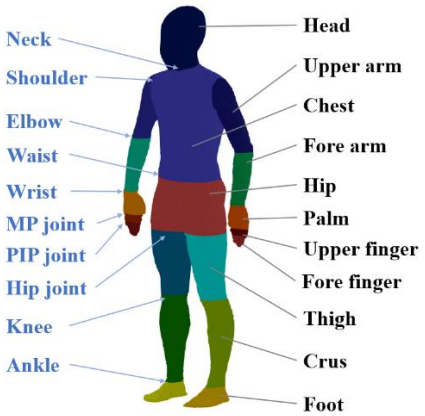


Fig. 5　Rigid-body segments (black descriptions) and joints (blue descriptions) of the modeled human body.

Copyright©2021 一般社団法人 日本機械学会

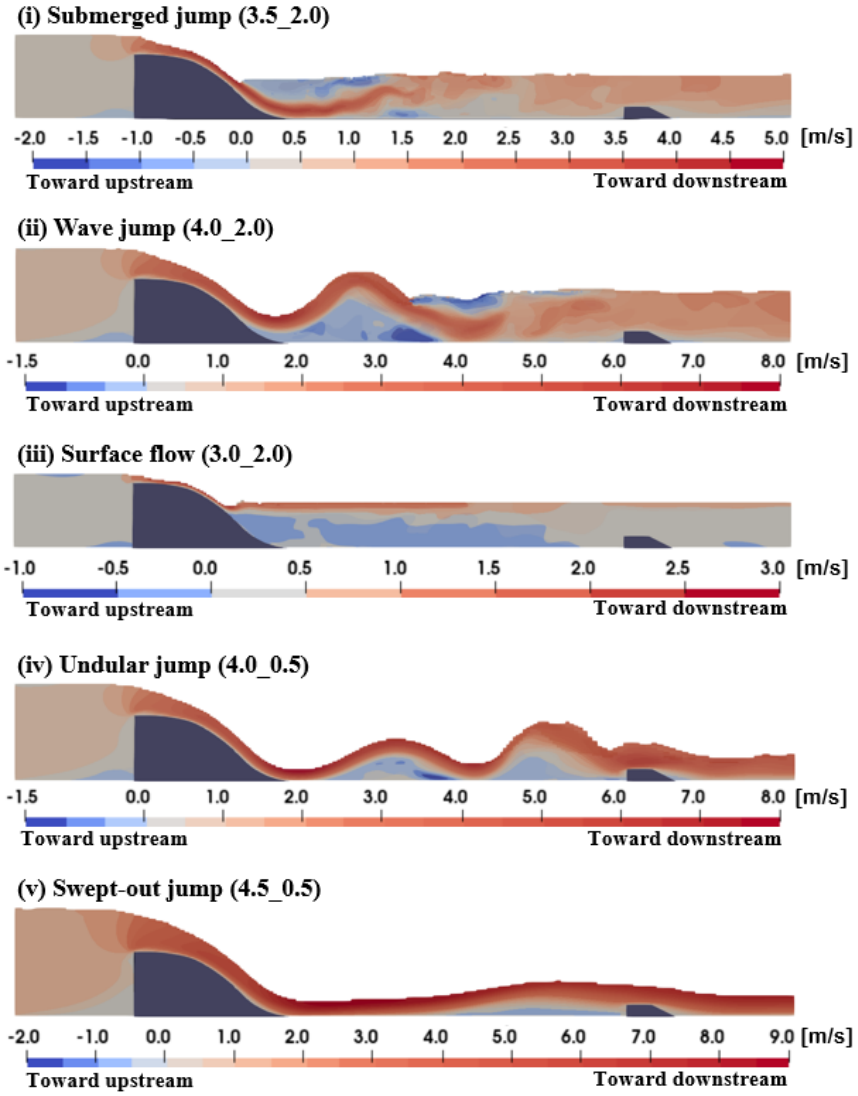


Fig. 6　Classification of flow regimes.

3・2　結果と考察

以降，計算した各ケースは上流水深と初期下流水深の組み合わせで表記する．例えば，上流水深 3.0m・初期下流水深 0.5m のケースの場合には 3.0_0.5 と記す．

3・2・1　流れ形態の分類

図 6 に示すように，得られたシミュレーション結果から流れ場を 5 つの形態に分類し，それぞれ(i)submerged jump，(ii)wave jump，(iii)surface flow，(iv)undular jump，(v)swept-out jump とした．wave jump は Leutheusser らの研究では分類されていないが，段落部における跳水形態として図 7 に示す類似した流況が Ohtsu らによって発見されている（Ohtsu and Yasuda，1991）．これらの流況はいずれも$0.5\sim1.5 \leq L/h_1 \leq 8.0\sim9.0$ (L: 堰高，h_1: 流入射流水深) の低段落部で発生するとされている．本研究での堰形状と流況からLを堰頂高さ，h_1を wave jump の流入射流水深に置き換えると，L/h_1はおよそ 3.2~5.2 程度となり，発生条件も類似していることが分かる．各ケースについての跳水前後のフルード数を表 2 に示す．wave jump と undular jump では下流での水面変動が大きいため，おおよその値となっている．表 2 より下流でのフルード数は流入射流と比較して大幅に減少しており，いずれのケースにおいても跳水を発生していると言える．また，表 3 にすべての計算ケースにおける循環流への人体の捕捉の有無を示す．これらの流れ場の中で最も頻繁に人体が捕捉されたのは submerged jump と wave jump

Copyright©2021 一般社団法人 日本機械学会

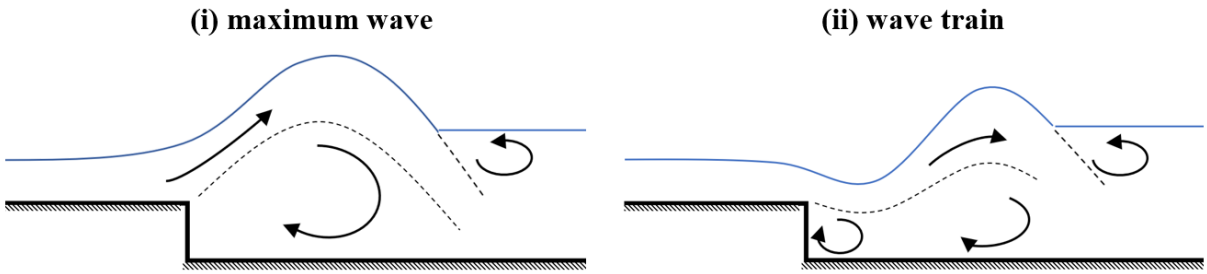


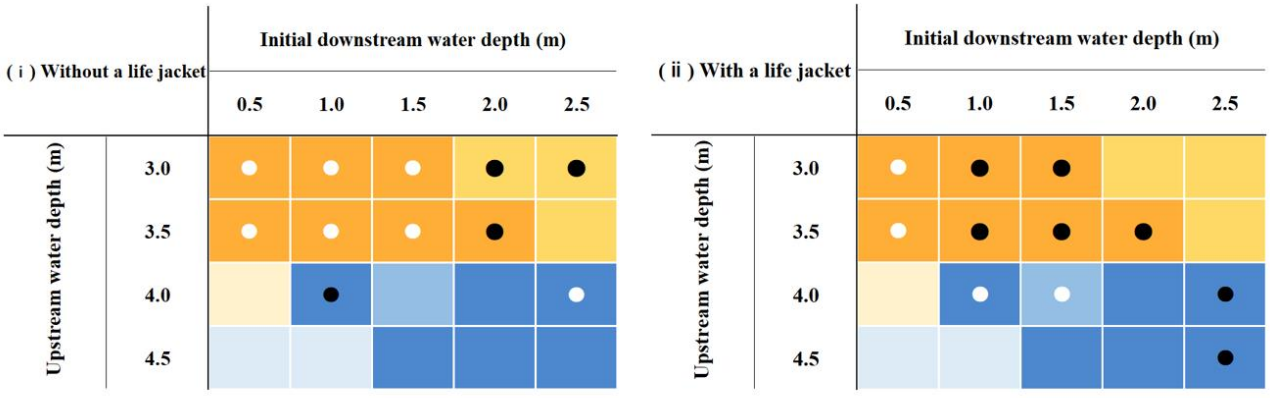
Fig. 7 Flow regimes at a backstep. (i) and (ii) are named as maximum wave and wave train, respectively (Ohtsu and Yasuda, 1991).

Table 2 The Froude number before and after the hydraulic jump. The Froude number before jump is represented in black letter while that of after jump in red.

Upstream water depth (m)	Initial downstream water depth (m) 0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
3.0	1.35 0.19	1.53 0.19	1.42 0.11	1.13 0.05	1.01 0.02
3.5	2.12 0.34	2.07 0.34	2.06 0.28	1.89 0.17	1.67 0.12
4.0	2.82 0.94	1.43 0.37	2.29 0.38	2.03 0.32	1.89 0.27
4.5	2.96 0.81	2.91 1.17	1.78 0.37	1.90 0.40	1.85 0.39

Flow regime
Submerged jump
Wave jump
Between submerged jump and wave jump
Surface flow
Undular jump
Swept out jump

Table 3 Case where the human body was captured. The symbol "○" refers to the case where the human body was trapped while the symbol "●" refers to the case where the human body was trapped for more than 30 seconds.



Copyright©2021 一般社団法人 日本機械学会

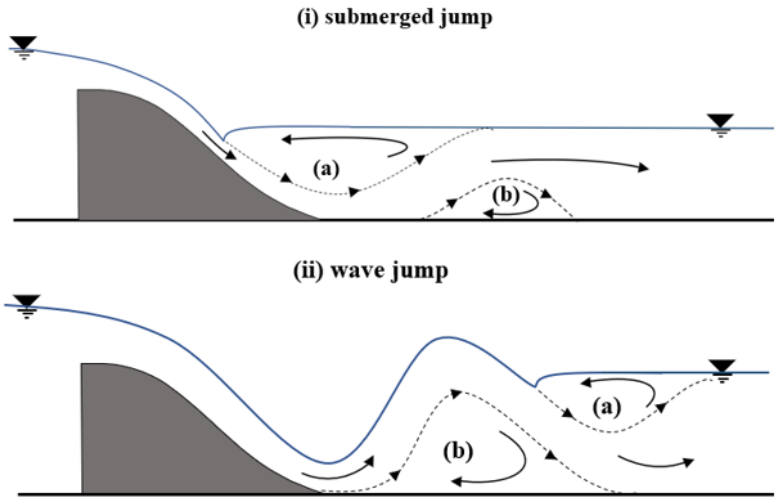


Fig. 8 Schematic diagrams of circulating flow.
(a): Water surface-forming recirculation, (b): Riverbed-forming recirculation.

であった．以降ではこれら 2 つの形態で発生する循環流に焦点を当て，人体の捕捉について考察する．図 8 は submerged jump と wave jump の循環流の模式図を示しており，それぞれ 2 か所での循環流の発生が確認された．水面で発生する循環流を水面形成型循環流，河床付近で発生する循環流を河床形成型循環流とした．これら 2 つの循環流は submerged jump と wave jump において水平位置が異なる．submerged jump では水面形成型循環流が上流側に形成されるが，wave jump では河床形成型循環流が上流側に形成される．

3・2・2 循環流による人体の捕捉

submerged jump, wave jump それぞれで発生する水面形成型循環流と河床形成型循環流に人体が捕捉されたときの循環流内での人体の運動を検討する．

submerged jump が発生した流況では，救命胴衣の着用および非着用に関わらず全てのケースで人体は水面形成型循環流に捕捉された．図 9 に 3.5_2.0 における救命胴衣着用および非着用条件での循環流内での人体運動を示す．救命胴衣を着用した場合，人体は浮力により水面付近に浮上できるが，逆流の影響を強く受けることで，循環流前方で拘束され長い時間捕捉される（図 9，(ii) $t' = 15\sim34$）．このとき，短い周期で逆流と順流に交互に流されることで，人体は水平方向に小さい移動を繰り返す（図 9，(ii) 黄色実線）．図 10 に 3.5_1.0 および 3.5_0.5 における救命胴衣着用条件での人体運動を示す．下流水深が小さく，循環流の厚さが薄いときには，たとえ人体が水面に浮いていても脚部や腕部が順流に取り込まれることで，この移動の幅は大きくなる（図 10，(i)）．さらに下流水深が小さいときには，人体の幅に対して循環流の厚さが相対的に小さくなることで，順流を受ける体の面積が広くなり，循環流から離脱しやすくなる（図 10，(ii)）．長い時間循環流に捕捉された場合，体温維持が困難となり低体温症や脱水症状を発症するリスクが高まる．さらに，順流と逆流により人体が煽られることで水難者の体力はさらに奪われ続け，溺水しやすい危険な状況となる．一方で救命胴衣を着用しない場合，人体は水面に浮上することができないため，順流の影響を受け循環流後方で捕捉される．このとき，逆流と順流の影響を交互に受けることで人体は水平方向に激しく煽られる（図 9，(i) $t' = 25\sim34$）．また，順流が上方に押し上げる力と人体の持つ水中重量により下方に引き込まれる力の両方を受けることで鉛直方向にも運動する（図 9，(i)黄色実線）．頭部を水面に保つことができない状態で，水平および鉛直方向の流れに激しく煽られることは，方向感覚の喪失により肺が水で満たされる時間が短くなることに繋がり，溺死のリスクを高める危険な状況と言える．また，救命胴衣を着用した場合と同様，下流水深が小さく循環流の厚みが薄いときには体の一部が順流に巻き込まれることにより循環流から離脱するケースも多く見られた．

submerged jump の河床形成型循環流への人体の捕捉は救命胴衣非着用条件での 3.0_1.5 のケースのみであった．このケースでは水面形成型循環流から脱した後，人体モデルの持つ水中重量により人体が下方に沈むことで河床形成型循環流に捕捉された．

Copyright©2021 一般社団法人 日本機械学会

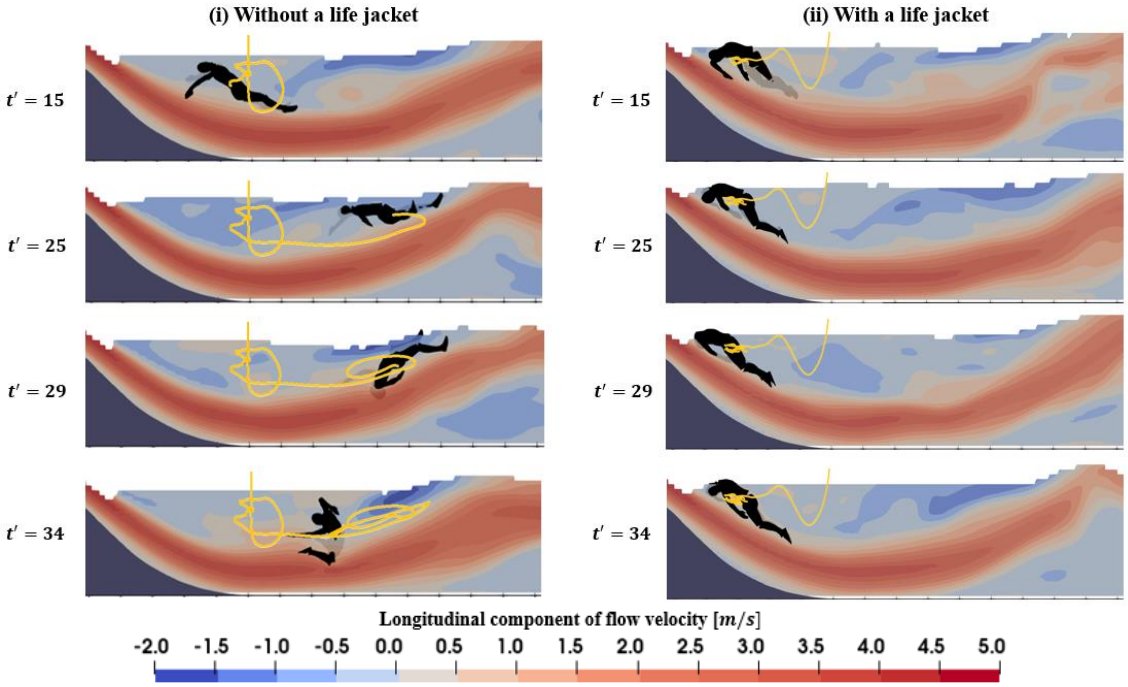


Fig. 9 Motion of the human body in the case of 3.5_2.0 (submerged jump, water surface-forming recirculation) . (i): The case of not wearing a life jacket. (ii): The case of wearing a life jacket. t'[s]: Time after the human was dropped. Yellow solid line: The trajectory of the center of the body mass.

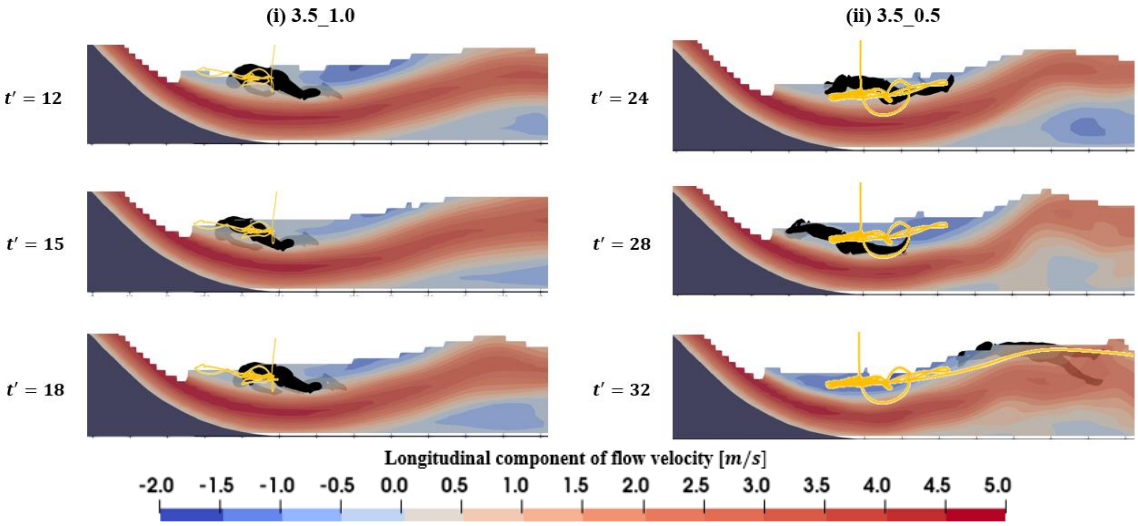


Fig. 10 Motion of the human body in the case of 3.5_1.0 and 3.5_0.5 (submerged jump, water surface-forming recirculation, wearing a life jacket) . (i): The case of 3.5_1.0. (ii): The case of 3.5_0.5. t'[s]: Time after the human was dropped. Yellow solid line: The trajectory of the center of the body mass.

wave jump の水面形成型循環流への捕捉は救命胴衣非着用条件で 4.0_2.5，着用条件で 4.0_1.5，4.0_2.5，4.5_2.5 のケースであった．図 11 に 4.0_2.5 の救命胴衣着用および非着用条件での循環流内での人体運動を示す．救命胴衣非着用の場合，循環流に捕捉され上流方向・下流方向の流れに交互に煽られながらも，脚部が順流に捉われることで短時間で脱することができた（図 11，(i) $t' = 8$）．一方で救命胴衣を着用した場合，浮力により水面付近の逆流を強く受けることで，非着用の場合と比べて長時間人体が捕捉され続けた（図 11，(ii) $\boldsymbol{t' = 3\sim16}$）．また，submerged jump の水面形成型循環流の場合と異なり，流速が大きいため救命胴衣を着用していても水面に浮上す

Copyright©2021 一般社団法人 日本機械学会

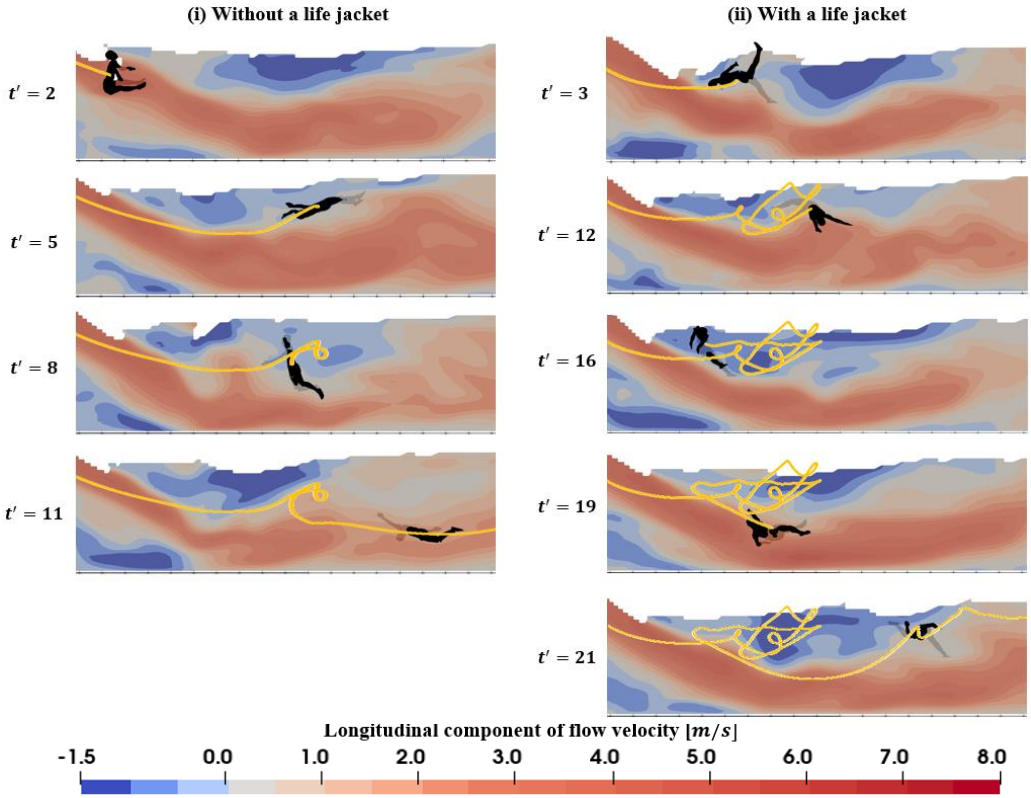


Fig. 11 Motion of the human body in the case of 4.0_2.5 (wave jump, water surface-forming recirculation). (i): The case of not wearing a life jacket. (ii): The case of wearing a life jacket. t'[s]: Time after the human was dropped. Yellow solid line: The trajectory of the center of the body mass.

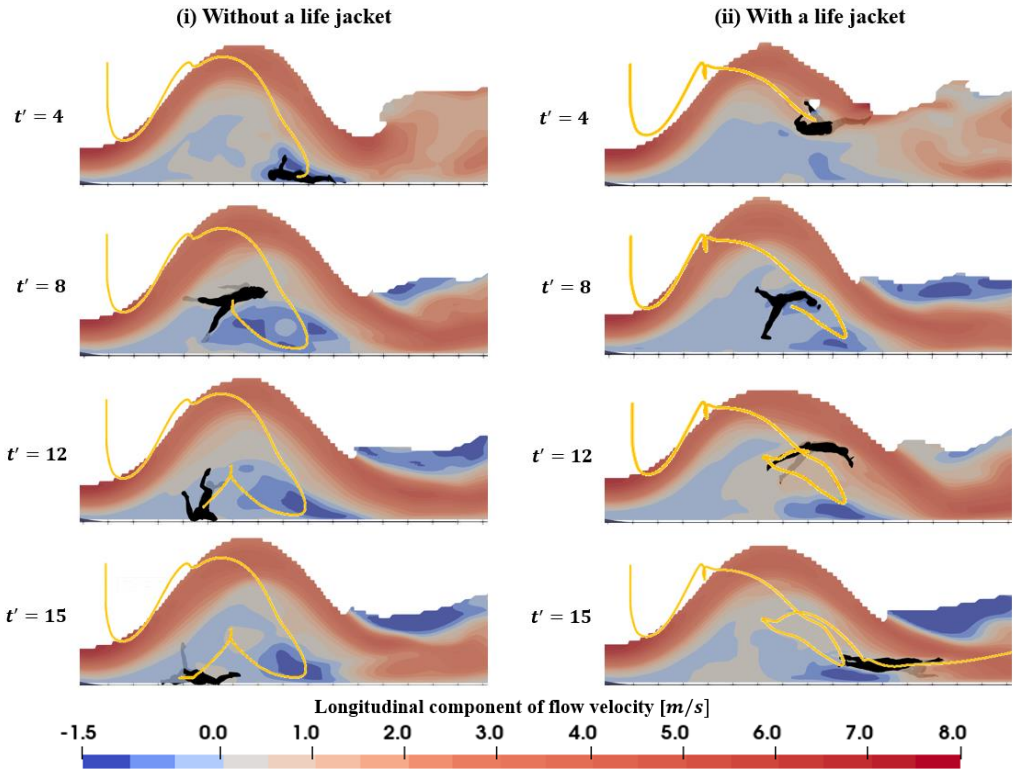


Fig. 12 Motion of the human body in the case of 4.0_1.0 (wave jump, riverbed-forming recirculation). (i): The case of not wearing a life jacket. (ii): The case of wearing a life jacket. t'[s]: Time after the human was dropped. Yellow solid line: The trajectory of the center of the body mass.

Copyright©2021 一般社団法人 日本機械学会

る時間は短く，循環流に大きく煽られた．救命胴衣の浮力により循環流に長時間捕捉される一方で，浮力 7.5kgf では頭部を水面に保つことができない非常に危険な流況である．

wave jump の河床形成型循環流への捕捉は救命胴衣着用および非着用の 4.0_1.0 で確認された．図 12 に 4.0_1.0 の救命胴衣着用および非着用条件における循環流内での人体運動を示す．循環流に捕捉された後，救命胴衣の有無に関わらず人体が水面に浮上できない時間が長く続いた．救命胴衣を着用した場合には，浮力により順流に取り込まれることで循環流から逃れることができたが（図 12，(ii) $t' = 12$~15），救命胴衣を着用しない場合には最終的に循環流内の河床で静止した（図 12，(i) $t' = 15$）．人体が水面に浮上しないことは，呼吸を確保できないほか，発見や救助および溺死後の捜索が困難となることに繋がる．

以上，循環流内での人体の運動について検討した．次に能動的な泳動を行うことができる場合を想定し，泳速と循環流内の流速を比較する．泳力は健康な大学生男子 35 名の短距離クロールの平均泳速 1.28 $\mathbf{m/s}$ を想定した（鎌田他，1995）．表 4 に submerged jump と wave jump での水面形成および河床形成型循環流の最大流速を示す．wave jump の流況では水面形成および河床形成循環流のどちらに捕捉された場合も，泳速に対し循環流の流速が大きいため，逆流に逆らって離脱することは困難であると考えられる．一方 submerged jump の流況では，上流水深の増加に伴い循環流の流速も大きくなり，泳動による離脱は困難となっていく．また，水面形成循環流の方が河床形成型循環流と比べ大きな最大流速の値をとる．上流水深 3.5m の場合，河床形成型循環流の最大流速は泳速とおよそ等しく，水面形成型循環流の最大流速は泳速よりも大きい．上流水深 3.0m の場合，循環流の流速より泳速の方が大きいが，実際には静水条件で泳ぐ場合と異なり，体の一部が順流に巻き込まれることで姿勢変化が起こり，効率よく泳ぐことは難しいと想定される．

Table. 4 The maximum velocity toward upstream (m/s) in the case of submerged jump and wave jump. The velocity of the water surface-forming recirculation is represented in black letter while that of the riverbed-forming recirculation in red.

Upstream water depth (m) \ Initial downstream water depth (m)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
3.0	0.84 0.32	0.89 0.45	0.57 0.27		
3.5	1.91 0.98	1.86 1.21	1.82 1.15	1.99 1.16	
4.0		2.25 2.47		1.93 1.65	1.87 1.71
4.5			1.76 1.95	1.80 2.41	1.85 2.22

Flow regime
Submerged jump
Wave jump
Between submerged jump and wave jump
Surface flow
Undular jump
Swept out jump

3. 結語

本研究で得られた主要な結論は以下の通りである．

1. ローヘッドダム付近で生じる人体が捕捉されやすい流れには submerged jump に加え wave jump が存在し，これらそれぞれの形態において，水面に形成される水面形成型循環流と河床付近に形成される河床形成型循環流が生じる．
2. 救命胴衣を着用せず人体が水面形成型循環流に捕捉された場合，循環流後方で順流と逆流に交互に煽られる．この場合，方向感覚の喪失により溺死のリスクを高める可能性がある．一方で下流水深が小さく循環流の厚みが薄い場合には体の一部が順流に巻き込まれることで脱することができるケースもある．

Copyright©2021 一般社団法人 日本機械学会

3. 救命胴衣を着用して submerged jump の水面形成型循環流に捕捉された場合，水面に浮上することができる一方，逆流の影響を強く受けることで長時間捕捉される場合があり，低体温症や脱水症状により徐々に体力を奪われる危険な状況となる可能性がある．wave jump の水面形成型循環流の場合には，たとえ救命胴衣を着ていても上流方向・下流方向の流れに交互に煽られ，水面に浮上できず呼吸を確保できない時間が長く続く．また，捕捉時間も非着用のケースと比べ長くなる．
4. 救命胴衣を着用せず wave jump の河床形成型循環流に捕捉された場合，最終的に循環流内の河床付近で静止し，水面に浮上することはなかった．水面に長時間浮上できない場合，溺水リスクが高まるほか，救助および捜索が困難となる．救命胴衣を着用することで，順流に乗って下流に脱することができるが，循環流内では強い流れにより人体が煽られ，直ちに水面に浮上できるわけではない．
5. 泳いで循環流から脱出する場合，submerged jump の流況では上流水深の増加に伴い循環流の最大流速が増加し，泳動による離脱が困難となる．wave jump の場合，submerged jump の流況より流速が大きいため循環流から脱出することは困難である．

文　　献

(1) 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 (2019) pp.18-00321.
(2) Borland-Coogan, “The Drowning Machine” (video), *Filmspace Productions*, 1980.
(3) Leutheusser, H. J. and Birk, W. M., “Drownproofing of Low Overflow Structures”, *Journal of Hydraulic Engineering*, *ASCE*, Vol.117, No.2 (1991), pp.205-213.
(4) Ohtsu, I. Yasuda, Y. “Transition from supercritical to subcritical flow at an abrupt drop.”, *Journal of Hydraulic Research*, *IAHR*, Vol.29, No.2 (1991), pp.309-328.
(5) Tschantz, B. A. and Kenneth R. W., “Hidden Dangers and Public Safety at Low-Head Dams”, *Association of State Dam Safety Officials*, *The Journal of Dam Safety*, Vol.9, No.1 (2011)
(6) Yabe, T. and Wang, P.Y., “Unified numerical procedure for compressible and incompressible fluid”, *Journal of the Physical Society of Japan*, Vol.60 (1991), pp.2105-2108.
(7) 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 (1993), pp.2537-2540.
(8) 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 (2008)
(9) 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 (1995)，pp.89-102.
(10) 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).
(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) 国土交通省河川局，“相模川水系河川整備基本方針　基本高水等に関する資料（案）”，国土交通省，2007
(13) 殿山俊吾，中村恭志，井上徹教，”堰状構造物による水難事故被害者の流下阻止に関する基礎的検討”，土木学会論文集 B1(水工学), Vol.76 (2020), pp.I_919-I_924.
(14) 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 (2017), pp.I_601-I_606.
(15) 中村 隆一, 齋藤 宏, 長崎 浩, “基礎運動学 第 6 版”, 医歯薬出版 (2016).
(16) 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 (1995)，pp.117-126.