

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

殿山 俊吾¹・中村 恭志²・井上 徹教³

¹ 東京工業大学大学院修士課程 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: tonoyama.s.aa@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@depe.titech.ac.jp (Corresponding Author)

³ 正会員 港湾空港技術研究所グループ長 海洋環境情報研究グループ (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)
E-mail: inoue-t@p.mpat.go.jp

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について数値解析を基に検討した。流動とそれによる人体の姿勢変化を連立した人体-流動連成数値モデルを使用し、全幅堰を持つ平坦直線水路について異なる水深、流速、堰高を想定した複数の解析を実施した。人体が堰を越えて下流へ流下する形態には、水中に上昇し堰を越える浮遊形態と、堰に衝突した後に堰を越える転動形態の2種類があった。浮遊形態は堰高に関わらず凡そ1 m/s以上の流速で生じ、流れによる抗力が人体の水中重量を超えると生じた。転動形態は比較的遅い流速0.5m/s以上で生じたが、腕や脚など体の一部が主流域に引き出されることが必要で、堰高が凡そ70cmより高く堰前面の渦に人体の全てが含まれる場合には同形態で堰を越えることは無かった。

Key Words: transport of drowning sufferer, straight water channel, weir-like structure, coupled human fluid numerical model

1. 序論

我が国では毎年1,500名以上の人々が水難事故に遭い、600名を超える命が失われている¹⁾。死者・行方不明者数の30%以上は河川での水難事故(以降、河川事故)が原因となっており、河川事故対策の一層の充実が求められている。水中で被害者が心肺停止状態になると、肺内部へ水が侵入し浮力が失われる。その後、底面上に沈んだ被害者は河川の流れにより流下していくことになる。そのため河川事故の捜索では、流下により被害者が到達した可能性のある河道区間を速やかに推定し、適切に捜索範囲を絞ることが迅速な発見に重要となる。

水底面上を移動する被害者の流下は、底面の粗滑や起伏、設置構造物など、河床の状態に影響されるはずである。時空間的に変化する底面の粗滑や起伏の情報を事故発生時に取得し、流下距離の推測に用いるのは難しいと予想される。一方、堰や床留めなど人工の水理構造物の位置や大きさ等の諸元は平時から変化しない。そのため、各構造物で被害者の流下が停止するかどうかを流速や水深などの水理学的条件から判断できるようにしておけば、

事故発生後速やかに被害者が流下した範囲を水理構造物の位置から絞りこむことが可能になると考えられる。

流水中の人体の力学的な研究には歩行安定性²⁾や転倒の危険性^{3,4)}を評価したものなどがある。しかしながら、完全に水中に没した人体の流下を論じた既往研究は無く、前述の「水理構造物が被害者の流下を阻止する条件」を検討するための知見が現状では殆ど無い。そこで本研究では、最も単純な状況として直線平坦水路と堰状構造物を取り上げ、人体が構造物を飛び越え流下する過程について基礎的な知見を得るとともに、人体の流下を構造物が阻止する条件について検討することとした。人体を対象とした流動実験には種々の困難が伴うため、本研究では流動と人体の運動を連成させた数値解析を研究手段として用いることとした。

2. 想定した水路と数値解析モデル

(1) 想定した水路

図-1に解析の対象として想定した水路を示す。単断面平坦水路は側岸高さ2.5m、幅3mとし、水路上流端か

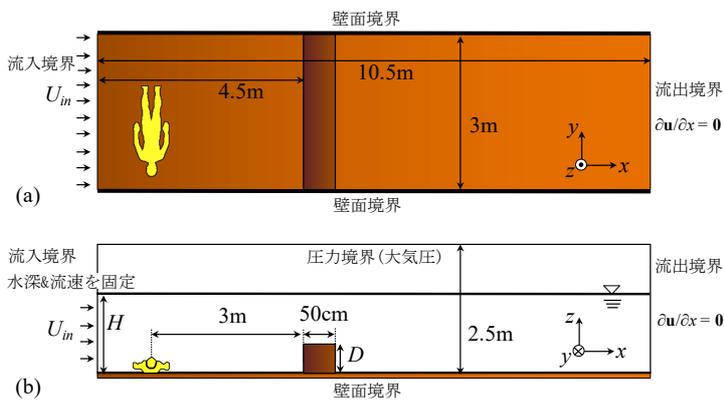


図-1 想定水路の(a)平面図及び(b)側面図

ら4.5 mの位置に全幅堰を模擬した構造物(以下, 堰)を設置した. 上流端は流入境界とし, 横断方向一様に水深 H で固定し, 水中の境界面では流速は U_m に固定し, それ以外は流速0とした. 下流端は流出境界とし, 主流方向流速勾配が0, 即ち $\partial \mathbf{u} / \partial x = 0$ を境界条件とした. 水深は $H=1\text{m}$ と 2m の2種類, 流速 U_m は平水時と洪水時両方を想定して $U_m=0.1, 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.25, 1.5, 2\text{m/s}$ の8種類とした. 堰の主流方向の断面形状は幅50cmの水平な堰頂を持つ矩形形状とした. 堰高 D は15 cm, 30 cm, 40cm, 50cmの4種類とし, 水深 $H=2\text{m}$ の場合のみ70cmと1mの2種類を加えた. 計算開始時には堰から3mの上流に仰臥位で人体を配置し, 足から頭へ向かう軸(上下軸)が堰と平行となるよう配置した.

(2) 数値解析モデル

人体-流体連成数値モデルである DRowing hUman Model (DRUM)を用いた^{5,9)}. DRUMでは自由水面を伴う3次元流動を計算格子を用いた混相流解析で計算すると同時に, 人体を関節で接続された剛体群としてモデル化し, 剛体の運動方程式を解いて人体運動と姿勢変化を計算する(図-2). 流動と人体運動間の相互作用は two-wayカップリングでモデル化される. 各時間ステップでは流動計算で得られた圧力が人体表面で積分され, 人体各部位に加わる流体抗力を考慮して人体運動と姿勢変化が計算される. その後, 更新された人体を含む計算格子の流速と密度を人体各部位の値で上書きし, 流動計算への人体運動の影響を反映させる⁹⁾. 図-3に本研究で用いた人体形状を示す. 水難事故被害者としてもっとも多い成人男性を仮定し, 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61.4kg)から人体各部位の形状と重量を設定した⁷⁾. 人体は黒字で示す計10個の部位と, 赤字で示す計9個の関節を考慮した. 各関節の可動方向と範囲はバネモデルで制限される⁸⁾. 可動範囲は成人の代表値とした⁹⁾. 関節の角速度 θ に比例した受動抵抗トルク $T = -c\dot{\theta}$ ($c=0.005\text{ Nm s/rad}$)を受

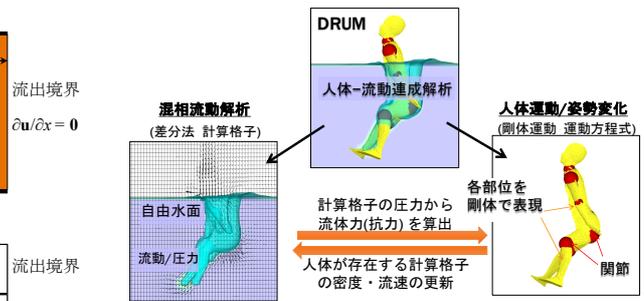


図-2 DRUMによる人体-流体連成解析



図-3 人体のモデル化

けつつ¹⁰⁾, 可動範囲内を関節は滑らかに曲がるとし, 意識消失状態の被害者を想定して能動的に関節を曲げる力やトルクは生じないと仮定した. 人体各部位の密度は部位内で一様とし, 体重に対する標準的な重量率¹¹⁾から各部位の重さを求め, それを形状データによる体積で割って各部位の密度とした. ただし肺体積を 1500cm^3 と仮定し⁸⁾, 肺への水の充填を考慮して胸部の重量を1.5kg増加させた. 人体の平均密度 1040 kg/m^3 は水の密度 998 kg/m^3 より重く, 全身の水中重量は 2.79 kgf であった.

本研究では人体と堰の衝突のモデルのため Discrete Element Method (DEM)法¹²⁾を新たに導入した. 人体に固定された弾性球(半径5mm)で人体表面を覆い, 弾性球と堰の衝突による斥力をスプリング・ダッシュポットモデルにより計算する. 人体の剛性に関する情報が不足していた為, ポリスチレンに相当するヤング率(1.47 GPa)とポアソン比(0.35)を弾性球に設定した. 流動解析では等間隔直交格子を用い, 各方向とも5cmの格子幅とした. 乱流モデルは標準的なスマゴリンスキーモデルを使用した.

本研究と同じ部位形状と関節の人体モデルは Ajimaらにより等身大人形を用いた水路実験の再現計算に適用され, 津波に伴う渦へのみ込まれる際の人体運動と姿勢変化が良好に再現されることが確認されている⁹⁾. 一方, 本研究の対象ケースのレイノルズ数は堰高を代表長さとして大凡 $10^4 \sim 10^6$ であり, 乱流の非定常性を考慮して計算結果の再現性を担保するには, 試行計算を各ケースについて複数回実行することが望ましいと考えられる. しかし, 3次元モデルのDRUMは比較的に長い計算時間を必要とすること, またケース数を増やして検討対象の範囲

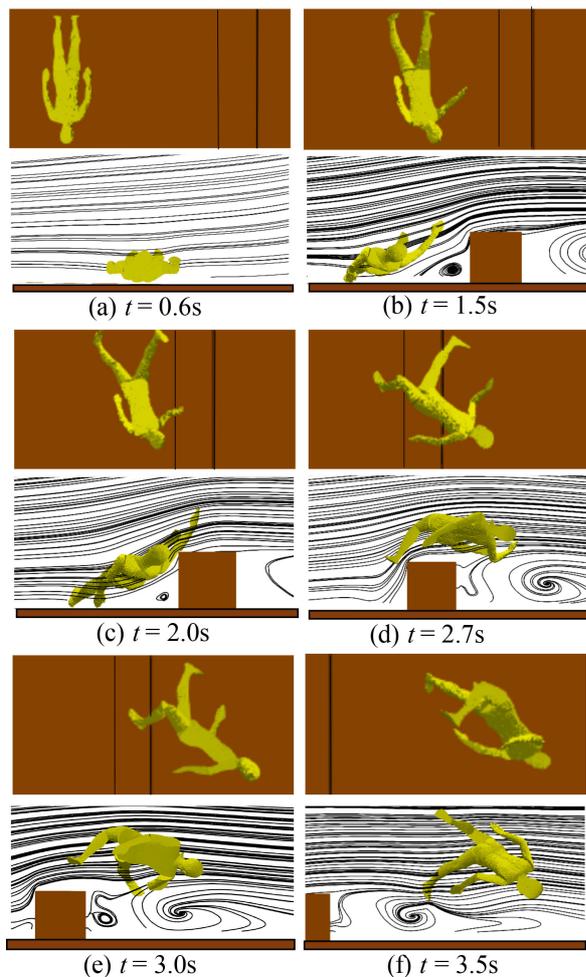


図-4 浮遊形態により堰を越える場合 ($H=2\text{m}$, $U_{ir}=2.0\text{m/s}$, $D=50\text{cm}$) . 人体(黄色)と堰(茶色)に加え黒実線で水路中央の流線を表す.

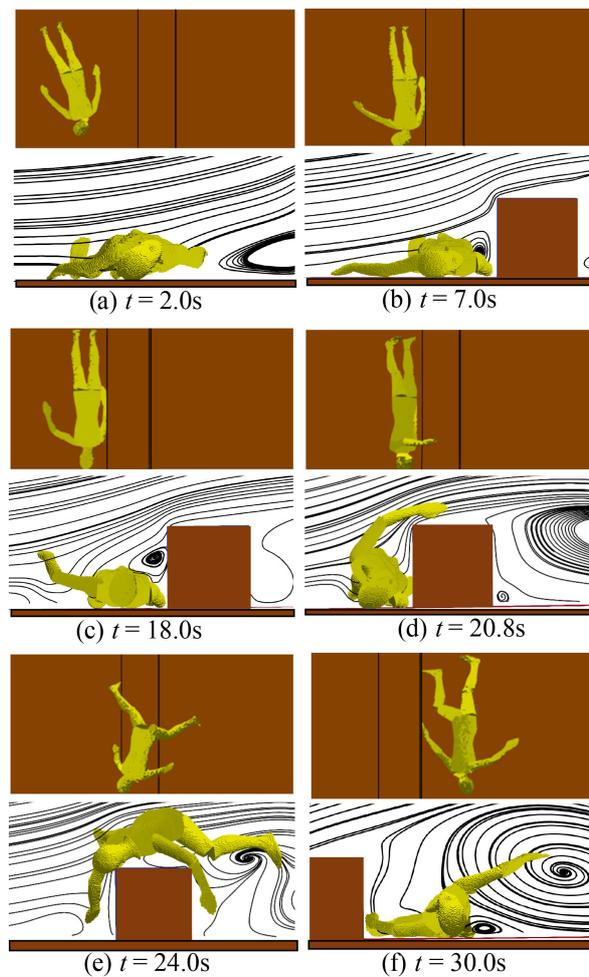


図-5 転動形態により堰を越える場合 ($H=2\text{m}$, $U_{ir}=0.75\text{m/s}$, $D=50\text{cm}$) . 人体(黄色)と堰(茶色)に加え黒実線で水路中央の流線を表す.

を出来るだけ広げるため、本研究では各ケースの計算は1回のみとした。

3. 解析結果

(1) 堰による流下阻止の有無

水深・流速・堰高の異なる全 80 ケースの結果を流下阻止の有無で整理し表-1 に示す. ×印は流下が阻止されたもの, ○及び◎印は堰を越え下流側へ流下したものを示している. 流速 U_m が遅いほど流下は阻止される傾向にあるが, 阻止されず堰を越える最小流速 U_σ には堰高 50cm を境として変化が見られた. 堰高が凡そ 50cm 未満では堰高に関わらず $U_\sigma=0.5\text{ m/s}$ であったが, 堰高が 50cm を超えると $U_\sigma=1\text{ m/s}$ へと増加し, より速い流速が堰を越えるために必要となっている.

人体が堰をどのように越えるかは浮遊形態と転動形態の 2 種類に分類された. 図-4 と図-5 に浮遊形態と転動形態の例をそれぞれ示す. 浮遊形態では堰に接触する以前に水中へ上昇し, 堰上方の速度の速い主流域を浮遊し

表-1 堰による人体の流下阻止の有無

(a) 水深 $H=2\text{m}$		流速 U_m [m/s]							
		0.1	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	2
堰高 D [cm]	100	×	×	×	×	◎	◎	◎	◎
	70	×	×	×	×	◎	◎	◎	◎
	50	×	×	×	○	◎	◎	◎	◎
	40	×	×	○	○	◎	◎	◎	◎
	30	×	×	○	○	◎	◎	◎	◎
	15	×	×	○	○	◎	◎	◎	◎
(b) 水深 $H=1\text{m}$									
		0.1	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	2
堰高 D [cm]	50	×	×	○	○	◎	◎	◎	◎
	40	×	×	○	○	◎	◎	◎	◎
	30	×	×	○	○	◎	◎	◎	◎
	15	×	×	○	○	◎	◎	◎	◎

×: 堰前面で停止 ○: 堰を越え流下(転動) ◎: 堰を越え流下(浮遊)

つつ通過する(図-4). 一方, 転動形態では上昇せず流下し, 堰に接触して一度停止した後, 堰表面に接しな

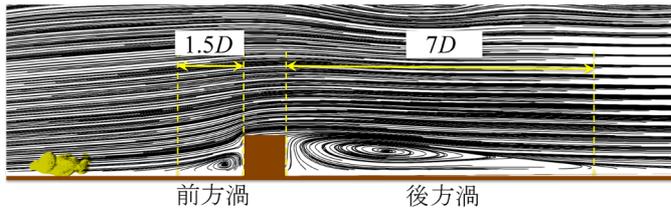


図-6 水路内での渦の形成。黒実線で流線を表す。

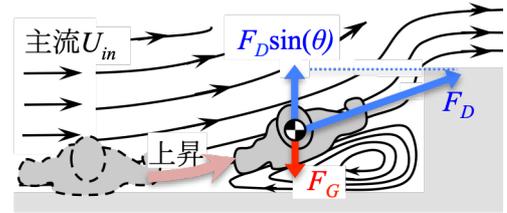


図-7 浮遊形態の発生機構

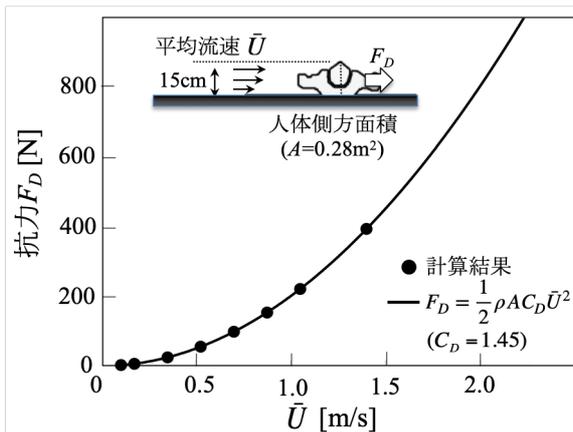


図-8 平坦水路で人体が受ける抗力

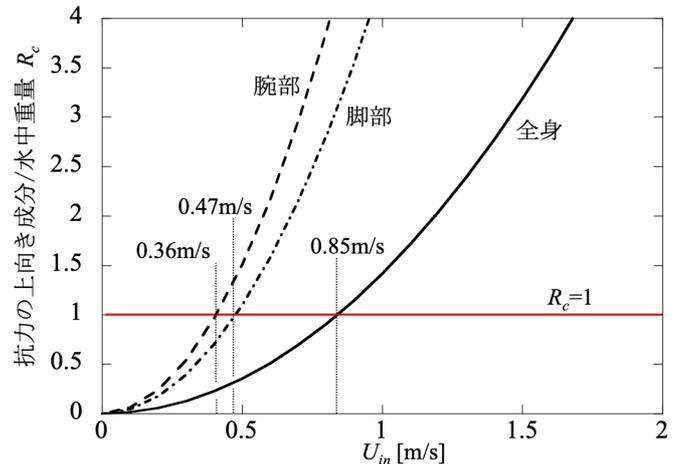


図-9 全身(実線), 腕部(破線)及び脚部(一点鎖線)の R_c

がら堰を越え下流側へ移動する(図-4)。表-1の◎印に示すように、浮遊形態は全ての堰高において流速 U_m が 1.0m/s 以上で見られたが、○印の転動形態は凡そ 50cm 未満の堰高、且つ流速が比較的遅い $0.5\text{m/s} \leq U_m \leq 0.75\text{m/s}$ でのみ生じていた。

(2) 浮遊形態の発生条件

解析の全ケースで堰の上流と下流の双方で渦の形成が見られた(図-6)。渦の大きさは堰高に比例し、堰上流側の渦(以降、前方渦)は堰上流の面より約 $1.5D$ の範囲で生じ、堰下流側の渦(後背渦)は堰下流の面から $7D$ の範囲に生じていた。これら渦の発生は Martinuzzi らによる閉水路での実験¹³⁾でも報告されており、渦の大きさも概ね一致している。これら渦のうち、前方渦と人体の関係を確認したところ、浮遊形態の全ケースで、人体は前方渦に接触するタイミングで水中への上昇を開始しており(図-4(b))、前方渦の境界に沿う様に斜め上方へ上昇していた(図-4(c))。このことから、前方渦上面に生じる斜め上方への流れが人体を押し上げる駆動力であると推測し、重力とのバランスから浮遊形態の発生条件の考察を行なった。図-7に考察の概念図を示す。人体には重力と浮力の合力(水中重量)が鉛直下向きに働き、その大きさは $F_G = 2.79\text{kgf}$ である。 F_D は渦外縁に沿った流れによる抗力である。抗力の鉛直成分が水中重量を上回る場合に人体は上昇すると仮定すれば、上昇力と水中重量の

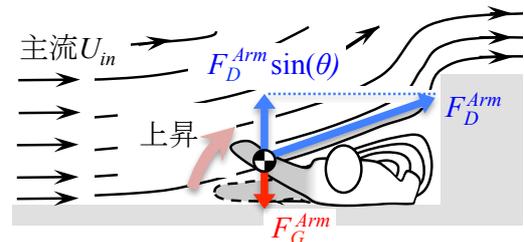


図-10 転動形態の発生機構

比

$$R_c = F_D \sin(\theta) / F_G \quad (1)$$

を用いて浮遊形態の発生条件が

$$R_c > 1 \quad (2)$$

と書くことができる。ここで θ は渦の上方外縁の傾きで、流速と堰高に関わらず大凡 22° であった。堰を取り除いた平坦水路で別途計算を行い、仰臥位の人体が受ける抗力を求めたところ、図-8の実線で示すように一般的な表式

$$F_D = \frac{1}{2} \rho A C_D \bar{U}^2 \quad (3)$$

により抗力は表せられた。ここで \bar{U} は人体の厚みに相当する底面から 15cm の範囲の平均流速である。 A は人体の側方への投影面積(0.28m^2)であり、抗力係数 C_D は 1.45 であった。式(3)の F_D を用いて算出した R_c を図-9実線に示す。 $R_c > 1$ となり浮遊形態が発生するであろう流速は 0.85m/s より速い場合となる。この推定された閾値は表-

表-2 堰による人体の流下阻止の有無(縦向き姿勢)

堰高 D [cm]	水深 $H=2m$ 流速 U_m [m/s]							
	0.1	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	2
100	×	×	×	×	◎	-	-	◎
70	×	×	×	×	◎	-	-	◎
50	×	×	×	×	◎	-	-	◎
40	×	×	×	○	◎	-	-	◎
30	×	×	○	○	◎	-	-	◎
15	-	-	-	-	-	-	-	-

—: 解析未実施

1で示された「浮遊形態は流速1m/s以上で生じる」という事実と整合しており、「堰接触前の人体上昇は前方渦による抗力で生じる」との浮遊形態の発生機構の推定は妥当なものであったと推測される。

(3) 転動形態の発生条件

転動形態では人体が堰を越える過程が以下の様に行進していた。①前方渦に接触しても上昇することなく流下を続け(図-5(a)), ②堰の上流面に接触して一旦停止し(図-5(b)), ③前方渦の外部に位置する下流側の左腕が渦上面の上昇流で上昇して引き起こされ(図-5(c)), ④上方の主流域に突出した左腕に引っ張られて体が上昇と回転を始め(図-5(d)), ⑤堰に接触しながら堰を越えて行く(図-5(e))。以上の様子から、前方渦の外部に存在する腕が上昇し、引き起こされることが転動形態を引き起こす条件であると推測した。浮遊形態での考察と同様に、腕が上昇する条件を検討してみる(図-10)。肩から指先までの腕に加わる抗力 F_D^{Arm} を円柱に対する抗力係数($C_b=1.2$)を用いて算出し、腕の水中重量 $F_G^{Arm}=0.138\text{ kgf}$ を用いて計算した R_c を図-9に破線で示す。 $R_c > 1$ となり腕が上昇するであろう流速は0.36 m/sより速い場合となる。このことは表-1で転動形態が流速0.5 m/s以上で見られることと整合している。表-1では流速0.5 m/s以上でも50cmを超える堰高では転動形態が生じていない。図-11は流速0.5 m/sで堰高1mの状況を示している。前方渦の大きさは凡そ $1.5D$ と堰高 D に比例して増加するため、図-11に示すように堰高が高くなると全身が前方渦の内部に含まれるようになり、腕の上昇・引き起こしが生じなくなる。このことが堰高70cm以上で転動形態が生じなくなる原因と推測される。

(4) 人体の向きの影響

以上の検討では、人体の初期姿勢は上下軸を水路横断方向と仮定していた(以降、横向き)。人体の向きの影響を調べる為、初期姿勢の上下軸を主流方向に変更し(以降、縦向き)、頭から堰へ向かい流下する状況について解析を行なった。水深 $H=2m$ の結果を表-2に示す。堰

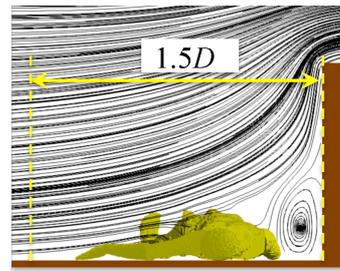


図-11 全身が前方渦に含まれる場合($H=2m, U_m=0.5m/s, D=1m$)

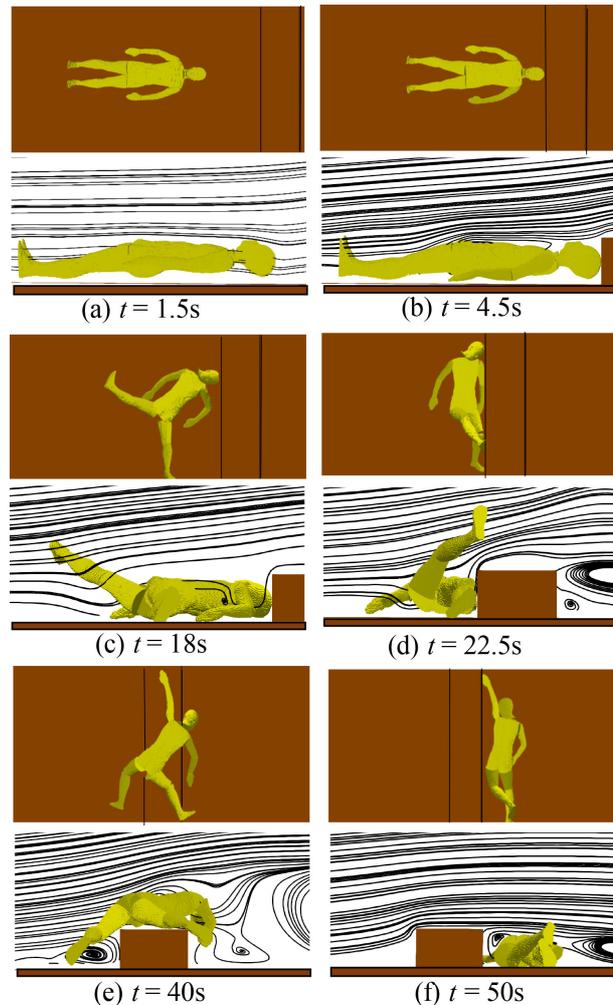


図-12 縦向きで堰を越える場合 ($H=2m, U_m=0.5m/s, D=30cm$)。人体(黄色)と堰(茶色)に加え黒実線で水路中央の流線を表す。

高30cmでは堰を越える最小流速 U_{cr} が0.5 m/sであること、堰高が50cmを超えると U_{cr} は1 m/sに増加することなど堰を越えるために必要な流速値とその堰高による変化は横向きの場合(表-1)と同様であった。ただし横向き姿勢と異なり、浮遊形態は見られず、全ケースで人体は堰へ衝突した。これは縦向きの場合には主流方向に対する断面積が横向きに比べ減少するためと考えられる。

また図-12に示すように、腕部の代わりに脚部が引き起こされ(図-12(c)), 脚部に引っ張られて堰を越える(図-

12(d)転動形態が見られた。腕部に対する考察と同様に、太ももから足先までの脚部に加わる抗力 F_D^{Leg} を円柱に対する抗力係数($C_D=1.2$)を用いて算出し、脚部水中重量 $F_G^{Leg}=0.546\text{ kgf}$ と垂直抗力との比 R_c を計算すると図-9一点鎖線となった。 $R_c > 1$ となり脚部が上昇しうる最低流速は 0.47 m/s と腕部(0.36 m/s)と同程度となっており、脚部が引き起こされる場合であっても、腕部と同様に凡そ 0.5 m/s 以上が堰を越える条件と推測される。

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。

- ・堰を越える過程には浮遊形態と転動形態があった。
- ・浮遊形態は横向き姿勢で流下する場合で、堰高に関わらず比較的速い流速(1 m/s 以上)で見られた。人体全身に加わる抗力と水中重量の関係から発生条件が説明されうる。
- ・転動形態は前方渦の外部に腕や脚などが位置し、かつそれを引き起こすのに十分な流速(0.5 m/s 以上)がある場合に生じ、堰高が凡そ 70 cm よりも高い場合には生じない。
- ・堰による流下の阻止が生じる条件は流下時の人体の向きで変化しない可能性がある。
- ・本研究で想定した条件では、堰により人体の流下が阻止されるのは「堰高 50 cm 以下で流速 0.5 m/s 未満」と「堰高 70 cm 以上で流速 1 m/s 未満」であった。
- ・計算負荷低減のため各ケースごとの計算は1回のみとした。そのため得られた計算結果の再現性については、乱流の非定常性や、人体の初期位置・姿勢の影響を確認する必要があると考えられる。今後解析事例を増やして引き続き検討を行う予定である。

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) 須賀堯三, 上阪恒雄, 吉田高樹, 浜口憲一郎, 陳志軒：水害時の安全避難行動(水中歩行)に関する検討, 水工学論文集, 第39巻, pp.879-882, 1995.
- 3) 岡本隆明, 戸田圭一, 當麻泰史：流水によって人体が受ける流体力と水難事故の危険性に関する実験的研究, 河川技術論文集, 第24巻, pp.493-498, 2018.
- 4) 戸田圭一, 岡本隆明, 當麻泰史：流水中の人体が受ける流体力に関する実験的研究, 京都大学防災研究所年報, 第61号, pp.668-674, 2018.
- 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, p.18-00321, 2019.
- 7) 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.
- 8) 瀬尾裕之, 森泰胤, 小林琢哉, 加藤勤, 佐藤功, 高島均, 大川元臣, 田邊正忠: CT を用いた肺体積の計測, 日本医学放射線学会雑誌, Vol.57, pp.608-610, 1997.
- 9) 中村隆一, 齋藤宏, 長崎浩: 基礎運動学第6版, 医歯薬出版, 2016.
- 10) 青木慶, 山崎信寿: 直立2足歩行における関節受動抵抗の意義, バイオメカニズム, 第14巻, pp.59-68, 1998.
- 11) Clauser, C. E.: Weight, volume and center of mass of segments of the human body, AMRL technical report TR-69-70, 1969.
- 12) O'sullivan, C. (鈴木輝一訳): 粒子個別要素法, 森北出版, 2014.
- 13) Martinuzzi, R. and Tropea, C.: The flow around surface-mounted, prismatic obstacles placed in a fully developed channel flow, *Journal of Fluids Engineering*, Vol.115, pp.85-92, 1993.

(Received June 30, 2020)

(Accepted August 28, 2020)

BASIC STUDY ON OBSTRUCTION OF TRANSPORT OF A WATER ACCIDENT SUFFERER WITH A WEIR-LIKE STRUCTURE IN A CHANNEL

Shungo TONUYAMA, Takashi NAKAMURA and Tetsunori INOUE

A coupled human fluid numerical model was applied to transportation of a water accident sufferer in a channel with a weir-like obstacle on the bed. Simulations were conducted with 80 different combinations of water depth, flow velocity and weir height. As a result of the simulations, two different processes for getting over the weir were found. When flow speed exceeds 1 m/s , the sufferer suspends in water and gets over the weir. Otherwise, if flow speed exceeds 0.5 m/s and weir's height is less than 50 cm , the sufferer gets over the weir in rolling on weir's surface.