救命胴衣形状が生存性に与える影響の数値流動解析による検討

Study on the influence of lifejacket shape on survivability by using a coupled human-flow simulation

○ 一ノ瀬航平，科学大，神奈川県横浜市緑区長津田町 4259 番, E-mail:ichinose.k.cf51@m.isct.ac.jp
中村恭志，科学大，神奈川県横浜市緑区長津田町 4259 番, E-mail:tnakamur@tse.esn.titech.ac.jp
Kohei Ichinose, Institute of Science Tokyo, 4259 Nagatsuta, Midori, Yokohama, Japan
Takashi Nakamura, Institute of Science Tokyo, 4259 Nagatsuta, Midori, Yokohama, Japan

Influence of shape of lifejacket on drowning risk is studied by using a coupled human-flow simulation. Lifejackets of 3 different shapes commonly sold in commercial web site are modeled with voxel. In assuming a human falling into calm water, as well as rough water with a wind speed of 5m/s and 10m/s, posture and head position of a human body in the water are checked for each life jacket type. Ratio of safe time, in that the mouth can arises above the water surface at least once during 30 sec, is evaluated as index to represent survivability. A series of simulations shows that the posture in the water strongly depends on the shape of lifejacket even in the calm situation. While the shoulder type shows the highest survivability among the treated shapes, the vest type and waist belt type caused frequent body rotation, and specifically, the waist belt type seemed to keep the head pointed downward, which could obstruct breathing.

1．諸言

水難事故により例年多くの死者が出ている．我が国における 2024 年の水難事故発生件数は 1535 件，死者行方不明者は 816 名にも上る[1]．死亡原因の殆どは溺水とされ，水面上へ顔を浮上させ呼吸を確保することが，事故からの生還を左右する条件となる．意識の有無や運動能力の巧拙に関わらず，被害者を強制的に水面へ浮上させうる救命胴衣は主要な対策として期待されてきた．継続的な広報活動により釣りやボートなどを楽しむ際の必需品として認識され，今日では専門店に限らず，Web 通販サイトの小売店でも，安価に，かつ様々な形式のものが気軽に購入できる．国土交通省は性能基準を定め，それを満足するものには「桜マーク」の使用を許可するなど，十分な性能を持つ救命胴衣の明確化と普及に取り組んでいる[2]．主な基準には「7.5kgf 以上の浮力」など救命胴衣自体の性能に加え，「垂直より後傾の姿勢で浮遊する」や「口元の最も低い位置が水面より上方に位置する」など，着用者が呼吸を継続できることが要求されている．一方，Web 通販サイトなど多くの小売店では，「桜マーク」認定は重視されていない．安全性より価格の安さ，あるいは装着の手軽さが多いに宣伝され，性能認定の無い救命胴衣がベストセラー商品として販売されている．このような状況は「どのような救命胴衣でも着用すれば安全」との誤解を生み出しかねない．本研究では Web 通販サイトにて販売されるものから，形状と装着方法が代表的な救命胴衣を取り上げ，それらの安全性を人体と流動の連成数値解析により検討することとした．

2．対象救命胴衣と数値解析モデル

2・1　対象とした救命胴衣

形状と装着方法が異なる代表的な 3 つを研究対象とした(Fig.1)．①ベスト型(vest type)は従来から普及しているもので，発泡樹脂を胸部前背面に配置するものである．②肩掛け型(shoulder type)と③腰巻き型(waist type)は落水時に圧縮空気で膨張し浮力を確保するもので，釣りなどの邪魔にならないことから近年人気の方式である．救命胴衣はプールに沈め，バネばかりにて浮力を計測した．

①ベスト型 (9.4kgf, ¥3,000)　②肩掛け型 (16.6kgf, ¥5,000)　③腰巻き型 (11.5kgf, ¥4,300)

Fig. 1　救命胴衣．括弧内は浮力と大凡の購入価格．

2・2　対象とした救命胴衣

人体−流体連成数値モデルである DRowning hU-man Model (DRUM)を用いた[3]．3 次元混相流を計算格子で解くと同時に，関節で接続した剛体群として人体をモデル化し，運動方程式を解いて人体運動と姿勢変化を解く．流動と人体の相互作用は two-way coupling でモデル化する．3D スキャナで救命胴衣の形状データを取得し，成人男性 (23 歳，身長 168cm，体重 61.4kg)の形状データ[4]とともに 5m 角の立方体ボクセルでモデル化した．救命胴衣のボクセルの密度は水中で計測した浮力と一致するよう設定した．4m ×4m の底面を持つ高さ 6m の直方体を計算領域とし，水深 3m の静水へ高さ 50cm 上方から，仰向けとうつ伏せの２種類の姿勢で人体を落下させた．計算領域の側方境界には，静水面に加え，風速 5m/s および 10m/s の沖合で生じる波浪に相当する水位変化を Pierson-Moskowitz スペクトルから推算し，それら水位の時間変化を境界条件として与えた．計算は 5 分間行なった．

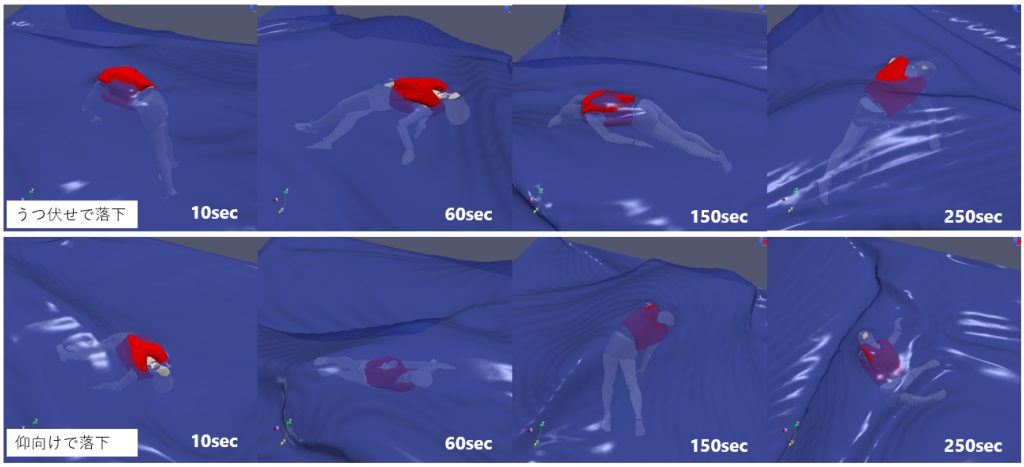
2・3　対象とした救命胴衣

医学的知見によれば，息を止めて堪えうる時間は 20〜30 秒程度とされる[5]．1 秒間連続で口部が水面上に露出した場合に呼吸が可能であったとし，それぞれの時刻での呼吸可能性を判別し，生存率 P_{surv} [%]を算出した．

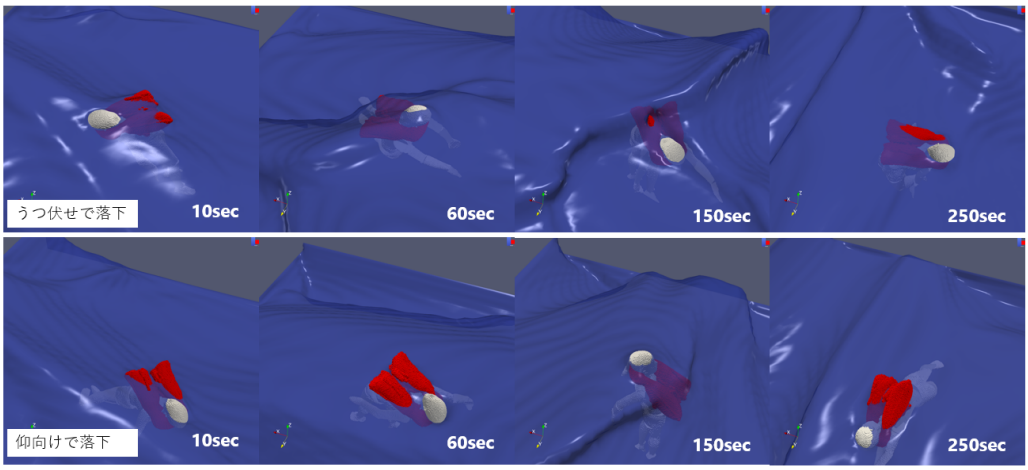
$$P_{\mathrm{surv}} = 100 \times \left(\frac{1}{T} \int_0^T b(t) dt \right) \qquad (1)$$

ここで T は計算期間（300sec），$b(t)$ は時刻 t における直近の生存性を示す関数で，時刻 t の直前 30 秒間に 1 度でも呼吸をしていれば $b(t) = 1$ ，それ以外は $b(t) = 0$ とする．

(a) ベスト型 風速 10m/s の波浪



(b) 肩掛け型 風速 10m/s の波浪



(c)腰巻き型 風速 10m/s の波浪

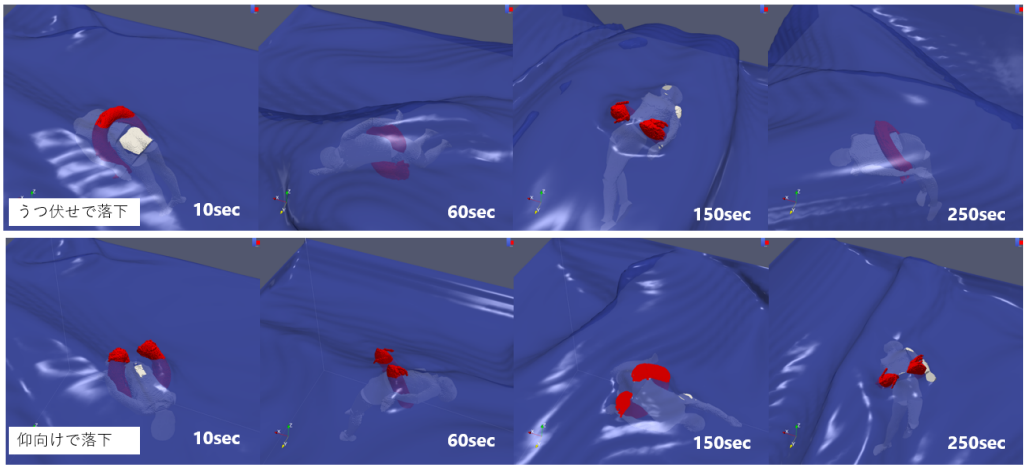


Fig. 2　風速 10m/s の波浪中での人体の姿勢変化（赤色：救命胴衣，白色：人体）

3．計算結果

3・1　静水中での人体姿勢

① **ベスト型：**仰向けで落下した場合，水中では浮体により胴体が持ち上げられることで口部が水面上に浮上する．落下時の初期姿勢がうつ伏せの場合，体の向きが仰向けに変わることはなく，常に水中に顔前面を浸した状態で浮遊する．なお，仰向けで落下した場合も体の向きがうつ伏せに変化することはなかった．これは，浮体が胴体の前方及び後方に満遍なく装着されているため，静水中では体の回転を引き起こさない為と考えられる．

② **肩掛け型：**落下後には，初期姿勢に関わらず，顔全体が水面上に浮上する安全な姿勢となる．これは，首回り及び胴体前方に装着された浮体により，頭部が水面上に持ち上げられるためと考えられる．なお，うつ伏せで落下した場合も，水中で直ちに体軸を回転し，仰向けとなる．

③ **腰巻き型**：波浪により体の向きが変化することはなかった．

Table 1 救命胴衣の方ごとの生存率 P_{surv}

		①ベスト型	②肩掛け型	③腰巻き型
風速 5m/s	うつ伏せで落下	0%	99%	0%
	あお向けで落下	100%	100%	21%
風速 10m/s	うつ伏せで落下	80%	99%	68%
	あお向けで落下	93%	100%	87%

浮体により腰が持ち上げられることで，特に仰向けの状態では頭部が沈み込んだ姿勢をとった．

３・２　波浪中（風速 5m/s）での人体姿勢

① **ベスト型：**波浪により体の向きが変化することはなかった．浮体により胴体が持ち上げられることで，特に仰向けの場合は口部が水面上に浮上した．

② **肩掛け型：**波浪による体の回転は生じず，仰向け姿勢が保持された．頭部は深く沈まず水面近くに常にあり，口部は頻繁に水面上に出ていた．浮力が最も大きく，浮体が胸部前方に首を覆うように配置されているため，仰向け姿勢が自然と作られ，頭部が水面上に持ち上げられたと考えられる．

③ **腰巻き型**：波浪により体の向きが変化することはなかった．浮体により腰が持ち上げられることで，特に仰向けの状態では頭部が沈み込んだ姿勢をとった．

３・３　波浪中（風速 10m/s）での人体姿勢

① **ベスト型：**水面へ落下後不規則な波に煽られて体を回転させ，前面を下にするうつ伏せ姿勢へ変化した．その後も，仰向けとうつ伏せの姿勢変化を繰り返し，初期姿勢がうつ伏せの場合は 5 分間で 5 回，初期姿勢が仰向けの場合は 2 回の回転が見られた．仰向け姿勢では頻繁に口部は水面上に浮上した(Fig. 2(a))．

② **肩掛け型：**波による体の回転は生じず，仰向け姿勢が保持された．頭部は深く沈まず水面近くに常にあり，口部は頻繁に水面上に出ていた(Fig. 2(b))．浮力が最も大きく，浮体が胸部前方に首を覆うように配置されているため，仰向け姿勢が自然と作られ，頭部が水面上に持ち上げられたと考えられる．

③ **腰巻き型**：波水面へ落下後不規則な波に煽られて体を回転させ，前面を下にするうつ伏せ姿勢へ変化した．その後も，仰向けとうつ伏せの姿勢変化を繰り返し，初期姿勢に関わらず 5 分間で 6 回もの回転が見られた．仰向け姿勢の際には，ベスト型に比べ呼吸が可能となる時間の頻度は少なかった(Fig. 2(c))．

３・４　呼吸可能性と生存率

Table 1 には生存率P_{surv}の計算結果を示した．最も安全性が高いものは②肩掛け型であった．水中では安定して仰向け姿勢を保持し，波浪下でも頻繁に呼吸が可能であったため，生存率は 90%を超えた．①ベスト型と③腰巻き型は，風速 5m/s の波浪下では落下時の姿勢を維持した．特に仰向けで落下した際，①ベスト型は頻繁に呼吸可能な時間があり，高い生存率を示したのに対して，③腰巻き型は静水中と同様に頭部が沈み込む姿勢を作るため，呼吸可能な時間は少なく，低い生存率を示した．風速 10m/s の波浪下では，①ベスト型と③腰巻き型は不規則な波で頻繁に体が回転した．これにより，①ベスト型と③腰巻き型では仰向けから呼吸が困難となるうつ伏せ姿勢に転じることがあり，生存率が低下している．先述のように，③腰巻き型は仰向け姿勢でも頭部が水に没する傾向があるため，風速 10m/s の波浪の場合でも，検討した 3 種類の中で最も危険性が高いと判断された．

４．おわりに

本研究で得られた主要な知見は以下の通りである．

- 救命胴衣の形状や装着方法に応じて，水中での人体の姿勢や，その姿勢の安定性は大きく変化する．
- 呼吸確保の面から安全性を検討した場合，肩掛け型が最も優れていた．波浪中であっても，首回り及び胴体前方に装着された浮体が口部を水面上に持ち上げ，頻繁な呼吸を可能にした．
- 腰巻き型が最も低い安全性を示した．静水及び波高 0.5m 程度の水中では，仰向けで落下する際はその姿勢を維持するものの，頭部が沈み込むためにほとんど呼吸を行うことができなかった．激しい波浪中では，頻繁に体が回転し，仰向けから呼吸が困難なうつ伏せ姿勢に転じることがあった．
- 救命胴衣を利用する際には，浮力の大小など救命胴衣自体の性能に加え，適切な形状と装着方法であるか確認することが重要となると考えられる．

謝辞

本研究は公益財団法人河川財団の河川基金の助成を受け実施した(助成番号 2025-5211-020)．ここに記し心より感謝申し上げます．

参考文献

(1) 警察庁生活安全局生活安全企画課，令和 6 年における水難の状況，https://www.npa.go.jp/news/release/2025/r06_suinan_gaikyou.pdf (2025/09/18 参照)

(2) 国土交通省，小型船舶用救命胴衣（膨張式）の型式承認試験基準，https://www.mlit.go.jp/maritime/maritime_tk6_000009.html (2025/09/18 参照)

(3) Ajima, D., Nakamura, T., Araki, T., Inoue, T. and Kurisu, A., Journal of Biomechanical Science and Engineering, Vol. 14 (2019), p.18-00321.

(4) 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 (2006), H18PRO-503.

(5) 高取健彦，長尾正崇，法医学 第 6 版 (2019), pp.154-155.