令和 7 年度　修士論文

人体-流動連成数値解析による救命胴衣形状が水難事故の生存性に与える影響の検討

指導教官　中村 恭志　准教授

東京科学大学
環境・社会理工学院　融合理工学系
地球環境共創コース

23M51628
一ノ瀬 航平

目次

第 1 章　序論 ..... - 4 -

1.1　研究背景 ..... - 4 -

1.1.1　水難事故の発生状況と特徴 ..... - 4 -

1.1.2　救命胴衣の形状多様化と安全性に関する課題 ..... - 4 -

1.2　既往研究 ..... - 5 -

1.3　本研究の目的と構成 ..... - 5 -

1.3.1　本研究の目的 ..... - 5 -

1.3.2　論文の構成 ..... - 6 -

第 2 章　救命胴衣の現状 ..... - 8 -

2.1　救命胴衣の性能基準 ..... - 8 -

2.1.1　型式承認制度（桜マーク）と性能区分 ..... - 8 -

2.1.2　国際規格（ISO 12402 シリーズ）との整合性 ..... - 8 -

2.1.3　現行試験基準の制約と評価環境の課題 ..... - 8 -

2.2　販売状況と市場の動向 ..... - 9 -

2.2.1　E コマースにおける流通状況 ..... - 9 -

2.2.2　救命胴衣の形状別特徴 ..... - 9 -

2.2.3　消費者の選定基準 ..... - 10 -

第 3 章　救命胴衣の性能の確認実験 ..... - 18 -

3.1　使用する救命胴衣 ..... - 18 -

3.2　水中での浮力測定 ..... - 18 -

3.2.1　計測方法 ..... - 18 -

3.2.2　結果 ..... - 19 -

3.3　装着者の姿勢の記録 ..... - 19 -

3.3.1　計測方法 ..... - 19 -

3.3.2　実験結果 ..... - 19 -

第 4 章　シミュレーションモデル ..... - 29 -

4.1　計算手法 ..... - 29 -

4.1.1　概要 ..... - 29 -

4.1.2　人体と流体の相互作用 ..... - 29 -

4.1.3　流体から人体への作用 ..... - 29 -

4.2 人体 ..... - 30 -
4.2.1 人体形状 ..... - 30 -
4.2.2 基礎方程式 ..... - 30 -
4.2.3 関節のモデル化 ..... - 30 -
4.2.4 壁との相互作用 ..... - 33 -
4.3 流体 ..... - 33 -
4.3.1 基礎方程式 ..... - 33 -
4.3.2 流動計算 ..... - 34 -
4.4 まとめ ..... - 37 -
第５章 形状特性が生存性に与える影響の検討 ..... - 45 -
5.1 計算条件 ..... - 45 -
5.1.1 計算領域 ..... - 45 -
5.1.2 救命胴衣の設定 ..... - 45 -
5.1.3 人体の設定 ..... - 45 -
5.2 計算結果 ..... - 45 -
5.2.1 浮力の検証 ..... - 45 -
5.2.2 静水中の場合 ..... - 46 -
5.2.3 波浪中の（風速 5m/s）の場合 ..... - 46 -
5.2.4 波浪中の（風速 10m/s）の場合 ..... - 47 -
5.3 生存性指標 ..... - 48 -
5.4 結果 ..... - 49 -
5.5 考察 ..... - 49 -
第６章 結論 ..... - 70 -
6.1 本研究の結論 ..... - 70 -
6.2 今後の課題 ..... - 70 -

第1章　序論

1.1　研究背景

1.1.1　水難事故の発生状況と特徴

四方を海に囲まれ，内陸にも多くの河川や湖沼を有する日本において，水難事故は依然として深刻な社会問題である．水難事故統計[1][2]によれば，年間の水難事故発生件数は1,535 件に達し，死者・行方不明者数は 816 名を数える．特筆すべきは，発生件数に対する死者・行方不明者の割合（致命率）が約 55.2%という高い数値を示している点である．これは，一度水難事故に遭遇した場合，半数以上の確率で生命に関わる結果を招くことを示唆しており，予防対策の重要性を物語っている．

事故原因の内訳を詳細に見ると，「川遊び」「魚釣り」「ボート遊び」といった，意図的な水辺の利用（レジャー活動）に伴う事故が全体の約 60%を占めていることが報告されている[1]．これらは台風や津波といった不可抗力の自然災害とは異なり，利用者の安全意識の向上や，適切な安全装備の準備によって未然に防ぎ得る「予防可能な事故」である側面が強い．したがって，水辺のレジャー活動における安全対策の徹底と，その実効性を高めることは，水難事故による犠牲者を減らすための課題であるといえる．

こうした状況に対し，水難事故時の生存率を向上させるための直接的な対策として，救命胴衣の着用が推進されている．海上保安庁の統計によれば，船舶からの海中転落事故における救命胴衣着用者の死亡率は約 7%であるのに対し，非着用者の死亡率は約 28%と約 4 倍の差が報告されており，救命胴衣の着用は落水時の生存可能性を高める有効な手段であるといえる[3]．

行政においても，これら救命胴衣の有効性を背景とした法整備が進められてきた．国土交通省は，2018 年 2 月より「船舶職員及び小型船舶操縦者法施行規則」を改正し，小型船舶の船室外に乗船する全ての者に，国の安全基準に適合した救命胴衣（型式承認試験を通過した「桜マーク」付き製品）の着用を義務付けている[4]．この改正により，船長（小型船舶操縦者）には乗船者全員に救命胴衣を着用させる義務が課され，違反時には行政処分（違反点数の付与）の対象となるなど，制度面からの安全対策が強化されている．

1.1.2　救命胴衣の形状多様化と安全性に関する課題

水難事故に対する最も有効な予防策の一つとして，救命胴衣（ライフジャケット）の着用が挙げられる．近年，通販サイトの拡大に伴い，一般消費者がインターネットを通じて容易に救命胴衣を購入できる環境が整っている．実際に大手通販サイトにおいて「救命胴衣」や「ライフジャケット」と検索すると，8,000 件以上もの商品がヒットし，価格帯や形状も多種多様である．

これらの製品の多くは，商品説明において「浮力の大きさ」や「法定備品基準（桜マー

ク）の有無」を主要な性能指標として強調する傾向にある．消費者は「浮力が大きければ安全である」という認識を持ちがちであるが，形状の違いが水中での姿勢安定性や呼吸確保にどのような影響を与えるかについての科学的な知見は，販売現場においてほとんど提供されていないのが現状である．

1.2 既往研究

救命胴衣の必要性を前述したが，救命胴衣の安全性を定量的に検討することは必要不可欠である．しかし，大きな空間的スケールの流れ場を実験で再現することは困難である．そこで，水難事故における救命胴衣の効果に対する定量的な評価にあたっては，数値シミュレーションの活用が期待される．

中村らは人体-流体連成数値モデル DRowing hUman Model (DRUM) を開発している[5]．自由水面を伴う気体・液体・個体の三次元混相流解析を CIP-CUP 法により行い，人体を関節で接続された複数の剛体部で表現するリンクモデルを導入し，流体力を姿勢変化の相互作用を考慮し，流体と人体運動・姿勢変化の非定常解析が可能となっている．

実地での実験に関しては，馬場らが急流河川である豊平川において，人体模型を用いた漂流実験を行っている[6]．この研究では，床止工下流に発生するバックウォッシュ（循環流）や護岸形状が人体に及ぼす危険性を定量的に計測し，河道構造物と水難事故の関連性を考察している．実験ケースには救命胴衣に相当する浮力体の有無や浮力の違いも含まれているが，全体としては浮力体の有無に関わらず脱出時間に明確な差は見られないと報告されている．しかし，この検証は主に河川の流況や構造物のフェイルセーフ機能に焦点を当てたものであり，救命胴衣の具体的な着用方法や形状が生存性に及ぼす影響については詳細な検討がなされていない．

また，Kurisu らは，大型の水槽においてベスト型の救命胴衣を着用したダミーを用いて救命胴衣の安全性を検討しており，救命胴衣の着用が津波時の溺死防止に有効な手段であることを明らかにしている[7]．

これに対し，関谷らは DRUM を用いて，水難事故の多発地点であるローヘッドダム（堰状構造物）における溺水危険性の基礎的検討を行っている[8]．この研究では，救命胴衣の着用を想定した解析が行われているが，そのモデル化は胸部内の密度を一様に低下させることで，標準的な救命胴衣に相当する浮力を付与する手法にとどまっている．したがって，救命胴衣の具体的な幾何学的形状までは再現されておらず，形状の違いが水中姿勢や呼吸確保に及ぼす影響については検討の余地が残されている．以上のように，救命胴衣の形状に着目して，それぞれの安全性を詳細に検討した研究はこれまで行われていない．

1.3 本研究の目的と構成

1.3.1 本研究の目的

以上の背景を踏まえ，本研究では，形状の異なる代表的な 3 種類の救命胴衣（ベスト

型，肩掛け型，腰巻き型）を対象とし，人体-流動連成数値解析を用いて，その水難事故における生存性を定量的に比較・評価することを目的とする．具体的には，以下の手順で研究を行う．

1. 実機計測：プール実験において各救命胴衣の実質的な浮力を計測し，シミュレーションモデルへの入力パラメータを決定する．
2. 性能評価：静水および風速 5m/s，10m/s 相当の波浪条件下において，落水者が「脱力状態」にあると仮定した場合の浮遊姿勢，呼吸確保の可否（口元の水面露出時間），および窒息の危険性を算出する．

本研究の特色は，単に浮力の大きさを比較するのではなく，救命胴衣の形状が，波浪中での人体の回転運動や姿勢維持に与える影響に着目する点にある．本研究の成果は，一般消費者がより安全な救命胴衣を選択するための科学的根拠を示すとともに，水難事故死者数の低減に寄与するものと期待される．

1.3.2　論文の構成

本論文は以下の 6 章で構成される．

第 1 章では，日本における水難事故の現状と救命胴衣着用の重要性について述べるとともに，既往の研究における課題を整理し，本研究の目的と意義を明らかにする．第 2 章では，現行の性能基準を整理し，E コマースサイトにおける市場調査および口コミ分析の結果から，消費者の選定基準が陸上での利便性に偏重している実態を示す．第 3 章では，解析の入力パラメータとするための浮力計測実験，およびプール内での脱力状態における人体の浮遊姿勢計測の結果について記述する．第 4 章では，本研究で用いる人体-流動連成解析モデル DRUM の基礎方程式，および関節・体節・流体の計算手法について詳述する．第 5 章では，構築したモデルを用いた静水および波浪下での解析結果を示し，救命胴衣の形状が人体の回転運動や呼吸確保に及ぼす影響を定量的な生存性指標に基づいて評価する．第 6 章では，一連の検討から得られた知見を総括し，本研究の結論と今後の課題について述べる．

参考文献

[1] 警察庁：令和 6 年における水難の状況,
https://www.npa.go.jp/publications/statistics/safetylife/r06_suinan_gaikyou.pdf
（2026/01/20 参照）

[2] 河川財団：全国の水難事故マップ，https://www.kasen.or.jp/mizube/tabid118.html
（2026/01/20 参照）

[3] 海上保安庁：令和 5 年 海難の現状と対策
https://www6.kaiho.mlit.go.jp/info/keihatsu/20240614_state_measure01.pdf
（2026/01/20 参照）

[4] 国土交通省：ライフジャケットの着用義務拡大,
https://www.mlit.go.jp/maritime/maritime_fr6_000018.html（2026/01/20 参照）

[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), 73：pp.I_601-I_606, 2017.

[6] 馬場 仁志，佐藤 耕治：水難事故における河川のフェイルセーフ機能に関する研究，土木技術資料，40-3：pp.297-302，1998.

[7] A. Kurisu, H. Suga, Z. Prochazka, K. Suzuki, K. Oguri, and T. Inoue: Potential technique for improving the survival of victims of tsunamis, PLoS one, Vol. 13, p. e0197498, 2018

[8] 関谷 宏紀，中村 恭志：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，土木学会論文集 B1（水工学），Vol. 78，No. 2，pp.I_211-I_216，2022.

第2章　救命胴衣の現状

2.1　救命胴衣の性能基準

救命胴衣の性能は，国内の型式承認制度および国際規格である ISO 12402 シリーズによって規定されている．本節では，それぞれの性能区分と基準の整合性，および現行基準における評価環境の制約について記述する．

2.1.1　型式承認制度（桜マーク）と性能区分

救命胴衣の性能を規定する国内基準として，国土交通省が定める「型式承認試験基準」が存在する[1]．全航行区域を対象とする「タイプ A」の浮力要件では，成人用において 7.5kg（約 74N）の鉄片を吊り下げて淡水中に 24 時間以上浮遊し続けることが義務付けられている．また，水中性能試験においては，意識不明時を想定した「復正試験」が規定されており，頭を下にした完全に脱力した状態から，5 秒以内に口元が水面上に露出することが合格条件として定義されている．その他，供試体を着用した状態で高さ 1m 以上から垂直に飛び込んだ際，脱落や着用者への危害がないことも判定基準に含まれる．

2.1.2　国際規格（ISO 12402 シリーズ）との整合性

国内の型式承認基準は，強度試験や材料部品に関する試験方法において ISO 12402 シリーズを引用しており，技術的な整合性が図られている．ISO 12402-4 では，100N の浮力要件とともに，静的バランス時における水中姿勢の詳細な規定が設けられている．具体的には，体幹角度（Trunk angle）を垂直から後方へ平均 30° 以上保持し，顔平面角度（Face plane angle）を水平に対して正の値に保つことが要求される．さらに，口元高さについては，国内基準が静水中で「0cm 以上」と規定しているのに対し ，ISO では大人で 80mm 以上の確保が義務付けられている．このように，試験の枠組みや強度評価の手法については国際規格との整合が図られているが，最終的な水中姿勢の判定値については国内独自の数値設定がなされている．

2.1.3　現行試験基準の制約と評価環境の課題

認定基準において主眼とされるのは規定の浮力数値であるが，実効的な安全性を評価する上では，その浮力が「人体のどの位置に配置されているか（形状）」が重要となる．同一の浮力値であっても，浮力体の幾何学的形状や取付位置によって人体に作用する復正モーメントの特性は異なり，これが最終的な浮遊姿勢の安定性を決定付けるためである．しかし，現行の水中性能試験は，一貫して「淡水中で波のない状態（静水）」で行うことが規定されている[1][2]．この評価環境は，波浪による揺動や周期的な外力が加わる実環境を反映したものではない．静水中において基準をクリアした製品であっても，特定の形状によ

っては，波浪下で意図した復正性能を維持できず，呼吸器が水没するリスクが懸念される．したがって，静水試験に基づく現行基準のみでは，形状要因や環境要因が複雑に絡み合う動的な流況下での安全性を定量的に評価するには至っていない．

こうした背景から，近年では静水域に限定されない実環境を想定した独自の認定基準を策定する動きが始まっている．その代表的な事例が，NPO 法人川に学ぶ体験活動協議会（RAC）による「RAC 川育ライフジャケット認定ガイドライン」である[3]．本ガイドラインでは，川という自然環境下特有のリスクを考慮し，使用環境の流速や水深に基づいて「急流エリア」「流水エリア」「静水エリア」の 3 段階の認定区分（R1〜R3）を設けている．特に，ホワイトウォーター部における浮力の低下や，アンダーカット等の地形による強力な引き込みといった，複雑な流れに伴うリスクが明記されている．このように，単なる静水中での姿勢維持のみならず，複雑な流れによる引き込み力や浮力低下のリスクを承知した上での安全設計を求める動きは，現行の試験基準の課題を補完する重要な視点であるといえる．

2.2　販売状況と市場の動向

救命胴衣の市場は，近年のレジャー需要の拡大に伴い，多種多様な形状の製品が流通している．本節では，市場における流通実態と製品形状ごとの物理的な特徴，および消費者の選定基準について記述する．

2.2.1　E コマースにおける流通状況

救命胴衣の流通状況を把握するため，2026 年 1 月に E コマースサイトの Amazon.co.jp において調査を実施した．検索キーワードを「救命胴衣　ライフジャケット」と設定し，消費者による選択頻度の高い「人気順」の上位 100 件を抽出して製品形状の集計を行った．その結果，市場に流通する製品は「ベスト型」42 件，「腰巻き型」37 件，「肩掛け型」21 件の 3 タイプに集約されていた．この結果から，現在の市場においては特定の 1 形状が独占的なシェアを占めているわけではなく，これら 3 つの異なる形状が主要な選択肢として定着していることが分かった．このように，消費者が日常的に目にする製品群はこれら 3 つの代表的な形状に大別されており，市場の選択肢が明確に構造化されていることが確認された．

2.2.2　救命胴衣の形状別特徴

前節の調査によって特定された 3 種類の形状は，それぞれ独自の形状特性を有しており，これらは着用時の利便性や落水時における人体の浮遊状態に影響を及ぼす要因となる．

ベスト型は，図 2-1 に示されるように固形式の浮力体を内蔵し，衣類と同様の要領で着用するタイプである．この形状は，胴体の前後に浮力体が配置される構造となっており，

着用者の体幹を包み込むことで落水直後から操作を介さずに安定した浮力を提供する．本調査における上位 30 件の平均浮力は 8.0kg であり，平均価格は 5,231 円であった．物理的な特徴としては，浮力体が一定の厚みを持つため他の形状に比して容積が大きく，着用時の作業性や通気性に制約が生じる側面がある．

肩掛け型は，図 2-2 に示されるように U 字型のカバー内に膨張式気室を収納して首から肩にかけて配置する構造を持つ．落水時にはガスシリンダーが作動して胸部から首周りに気室が展開される．本調査における平均浮力は 13.5kg，平均価格は 9,769 円であった．非膨張時はコンパクトであり，腕の可動域を妨げないため，ベスト型と比較して機動性に優れる点が市場における特徴となっている．

腰巻き型は，図 2-3 のようにベルト状のカバー内に膨張式気室を収納して腰部に装着するタイプであり，上半身を拘束しないため 3 形状の中で最も高い機動性を有する．本調査における平均浮力は 10.3kg，平均価格は 9,143 円であった．本形状は適切に着用した場合であっても，浮力が発生する部位が腰部から腹部付近に限定されるため，他の 2 形状とは浮力の作用する位置が異なる．この物理的な特徴は，夏場の不快感を軽減する利点としてレジャー層に広く受け入れられている．

2.2.3　消費者の選定基準

消費者が救命胴衣を選定する際の基準は，製品本来の安全性能や形状ごとの物理特性よりも，販売側が提示する数値情報や陸上での利便性に依存する傾向が強い．

まず，E コマースサイトにおける販売実態を確認すると，図 2-4 や図 2-5 のように「浮力 110N 以上」といった数値的なスペックを最大の訴求点として掲げる商品が目立つ．これは，型式承認基準で定められた 7.5kg（約 74N）という浮力要件を大きく上回る数値を提示することで，安全性を定量的に強調する傾向にあることを示唆している．実際に，商品説明欄に浮力を明記している製品のうち，図 2-4，図 2-5 のように「浮力が大きいこと」を主要な宣伝材料として用いているものは，腰巻き型で 24 件中 11 件（約 46%，表 2-3），肩掛け型で 15 件中 5 件（約 33%，表 2-2）に達していた． しかし，これらの広告表現はあくまで静水中での浮遊維持能力（浮力量）のみを対象としたものである．

次に，購入者の意識について形状別のユーザーレビューを分析すると，選定の動機が形状ごとに明確に分かれていることが分かる．

ベスト型（認証付き）においては，「船舶検査への適合」や「法定備品としての数合わせ」が主要な購入理由として挙げられている．これらは常時着用を目的とするよりも，認定基準である桜マークを備えた製品を低価格で揃えることが優先される傾向にあり，利用者からは「真夏は暑い」「暑苦しい」といった陸上での不快感に関する否定的な評価が散見される．実際に，着用時の快適さに言及したものは 30 件中 2 件（約 7%）に留まっている．

一方で，膨張式である腰巻き型は，陸上における快適性と機動性を極めて重視する層に

支持されている．ユーザーレビューを分析した結果，30 件中 15 件（50%）が「着けていることを忘れるほどノーストレスである」といった装着感を高く評価していた．しかし，安全性については「実際に作動するかは分からないが，装着していることで安心感がある」といった評価に留まっており，適切に着用した状態でその形状が水中姿勢に及ぼす影響を懸念する記述は限定的である．

これらに対し，肩掛け型は機動性と安全性能の「折衷案」として選択される事例が多い．「腰巻き型では落水時に不安があるが，ベスト型は暑い」というユーザーが，首回りを支える構造に一定の信頼を置いて選択する傾向が確認された．口コミにおいても 30 件中 9 件（30%）が着用時の快適さに言及しており，機動性と安全性のバランスの中で形状が選択されている．

このように，救命胴衣の選定においては「陸上での快適性」や「浮力量の有無」が重視されている実態が分かった．しかし，一連の調査において，「水中姿勢の維持能力」や「波浪下での安定性」といった救命胴衣の形状そのものがもたらす動的な性能について言及している製品や口コミは，調査した範囲では一点も見られなかった． すなわち，現在の市場においては，形状の違いが水中での生存可能性に及ぼす影響について，販売・購入の双方において十分な認識がなされていないと言える．

参考文献

[1] 国土交通省：小型船舶用救命胴衣（膨脹式及び呼気併用式以外のもの）の型式承認試験基準，小型船舶安全規則第 53 条第 1 項関連資料.

[2] ISO 12402-4:2020, Personal flotation devices -- Part 4: Lifejackets, performance level 100 -- Safety requirements, 2020.

[3] NPO 法人川に学ぶ体験活動協議会：RAC 川育ライフジャケット認定ガイドライン IV，2025.

表 2-1　ベスト型救命胴衣の製品スペックと広告の特徴

	浮力[kgf]	価格	浮力の大小を強調する広告の有無
1	7.5	¥2,365	-
2	7.5	¥13,874	-
3	7.5	¥2,599	-
4	7	¥4,480	-
5	8	¥3,190	-
6	7.5	¥2,000	-
7	9	¥5,280	-
8	8.7	¥3,564	-
9	8	¥6,666	-
10	8	¥7,658	-
11	8	¥7,391	-
12	8.7	¥3,710	-

表 2-2　肩掛け型救命胴衣の製品スペックと広告の特徴

	浮力[kgf]	価格	浮力の大小を強調する広告の有無
1	15	¥5,680	有
2	9	¥13,729	-
3	15.3	¥4,390	有
4	15.3	¥3,980	-
5	15	¥5,980	有
6	9	¥14,500	-
7	15.3	¥4,830	有
8	11.7	¥4,089	有
9	18	¥15,730	-
10	15	¥6,504	-
11	15	¥4,300	-
12	16.2	¥6,000	-
13	10.5	¥15,877	-
14	10	¥23,409	-
15	12	¥17,541	-

表 2-3　腰巻き型救命胴衣の製品スペックと広告の特徴

	浮力[kgf]	価格	浮力の大小を強調する広告の有無
1	11	¥4,580	有
2	7.5	¥17,275	-
3	11.7	¥3,580	有
4	7.5	¥11,800	有
5	11.2	¥3,980	有
6	11	¥5,980	有
7	11.7	¥3,850	有
8	15.3	¥2,716	-
9	11	¥4,980	有
10	11.7	¥3,790	有
11	12.2	¥2,699	有
12	11	¥13,800	-
13	7.5	¥18,867	-
14	11	¥4,980	有
15	7.5	¥21,195	-
16	8	¥4,980	-
17	16.2	¥8,000	-
18	9	¥12,360	-
19	9.8	¥13,311	-
20	11.2	¥4,180	有
21	9	¥13,300	-
22	7.5	¥20,800	-
23	7.7	¥3,480	-
24	9	¥14,959	-



図 2-1　「ベスト型」救命胴衣



図 2-2　「肩掛け型」救命胴衣



図 2-3　「腰巻き型」救命胴衣



図 2-4　性能指標として数値を強調する広告表現の例（A 社製品）



図 2-5　浮力を訴求点とした販売サイトの掲載例（B 社製品）

第3章　救命胴衣の性能の確認実験

本章では，救命胴衣の特性を検討するための一連の実験について記述する．まず 3.2 節で実験対象となる救命胴衣の種類について述べる．次に 3.3 節で救命胴衣の浮力の計測をする実験について述べ，3.4 節で救命胴衣を着用した人体の水中での姿勢を計測する実験について述べる．

3.1　使用する救命胴衣

実験では，以下の 3 種類の救命胴衣を用いる．

(a) **ベスト型**（プロックス，小型船舶用救命胴衣検定品型式承認品, TK-30RS, 2,932 円）
前後に固形式の浮力体が縫い込まれた最も古典的な形状の救命胴衣である(図 3-1)．本製品は商品説明において「浮力 7.5 kg 以上」と表記されており，これは一般的な救命胴衣の認定基準に準拠した数値である ．装着方法については，製品の付属説明書に基づき，図 3-2 に示されるように前面のファスナーを閉じた上で，二箇所の紐を結ぶことで人体に固定する．

(b) **肩掛け型**（EYSON，ライフジャケット ベストタイプ, B00XJNXZD4, 4,980 円）
落水時に炭酸ガスによって胸部前方へ気室が膨らむ構造を持つタイプである(図 3-3)．本製品の商品説明における浮力は 15kg と表記されている．装着に際しては，説明書の指示に従い胴体前方のバックルを閉じた上で，ベルトの長さを個々の体形に合わせて調整する(図 3-4)．

(c) **腰巻き型**（EYSON，ライフジャケット ベルトタイプ, B00XIF2GZG, 4,280 円）
落水時に炭酸ガスによって腰周りに浮き輪状の気室が展開される，腰部に巻いて装着するタイプの救命胴衣である(図 3-5)．商品説明における浮力は 11 kg と表記されている．本形状の装着方法も肩掛け型と同様に，胴体前方のバックルを閉じた上で，ベルトの長さを調整することで人体に固定する仕様となっている（図 3-6)．

3.2　水中での浮力測定

それぞれの救命胴衣の実際の水中での浮力を，プールにおいてばねはかりを用いて計測した．

3.2.1　計測方法

実験は，東京科学大学大岡山キャンパスのプールにおいて実施した．このプールの水深

は 2.2m である．プールの底に十分な重さの重りを設置し，重りにばねはかりを取り付けた．測定ではシュノーケルを装着した実験者 2 名がプールに入り，1 名が水中へ救命胴衣を引き込み水に浸して空気を抜いた後ばねはかりにひっかけ，他 1 名が水中でばねはかりのメモリを読み取った．図 3-7 に概略図を示す.

3.2.2 結果

計測結果は表 3-1 の通りである．

表 3-1: 救命胴衣の水中での浮力

	種類	浮力 [kgf]
(a)	ベスト型	9.4
(b)	肩掛け型	16.6
(c)	腰巻き型	15.4

3.3 装着者の姿勢の記録

それぞれの救命胴衣について装着者が水中でとる姿勢を画像にて記録した．

3.3.1 計測方法

それぞれの救命胴衣を着用し，プール内で脱力し十分な時間がたった後の体の姿勢を記録した．プールにはシュノーケルを装着した実験者 2 名が入る．実験者 1 名は救命胴衣を着用して水面に浮かび，他 1 名はこれを補助する．プールに入る 1 名の他に 1 名がプールサイドの陸上に三脚を設置し，水面上での被験者の様子を動画にて撮影する．(1)最初からうつ伏せで水面に浮かぶ場合に加え，(2)仰向けで水面に浮かんだ場合のその後の姿勢変化を動画にて記録する．

3.3.2 実験結果

以下に実験で得られた結果を示す.

うつ伏せ姿勢をとった場合

(a) **ベスト型**

図 3-8 に示すように，うつ伏せの姿勢から開始した場合，その後の姿勢に変化は認められず，顔面が水没した状態が継続した．自発的な復正は確認されなかった．

(b) **肩掛け型**

図 3-9 に示すように，うつ伏せの姿勢をとった直後に身体が回転を開始し，速やかに仰向けの姿勢へと変化した．形状に起因する復元力が働き，人体の向きを自動的に修

正する挙動が確認された．

(c) 腰巻き型

図 3-10 に示すように，うつ伏せの状態では救命胴衣が身体から脱落しやすいため，本実験では腕で保持した状態で記録を行った．姿勢に変化は認められず，顔面が水没した状態が継続した．自発的な復正は確認されなかった．

仰向け姿勢をとった場合

(a) **ベスト型**

図 3-8 に示すように，胴体の前方および後方に配置された浮体が体幹を持ち上げることで，胸部および頭部前方が水面上に浮上した．浮力が胴体全体に分散されているため，安定した浮遊姿勢が維持された．

(b) **肩掛け型**

図 3-9 に示すように，首周りおよび胴体前方に位置する浮体によって，頭部が水面上に高く持ち上げられた．3 形状の中で最も頭部の露出高さが確保される傾向が確認された．

(c) 腰巻き型

図 3-10 に示すように，救命胴衣が腰部を持ち上げることで，人体がのけぞるような姿勢となった．他の形状と比較して頭部の位置が低く，背中が反るような不安定な浮遊状態を示した．

また，腰巻き型を着用時に，呼吸を確保するために上体を垂直に保とうとすると，容易にバランスを崩し，うつ伏せ姿勢へと回転する挙動が見てとれた（図 3-11）．



図 3-1　ベスト型救命胴衣の装着時の様子

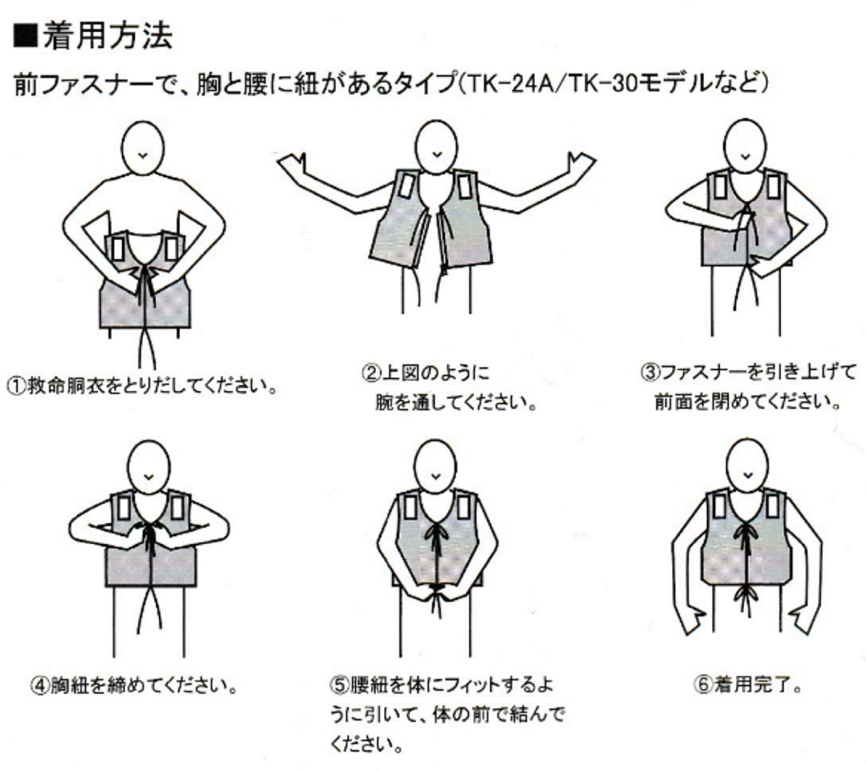


図 3-2　ベスト型救命胴衣の着用方法を示す説明書



図 3-3　肩掛け型救命胴衣の装着時の様子（上段：通常時，下段：膨張時）



三．使用前の準備、点検

この救命胴衣を安全に使用するためには、その都度必ず次の点について点検し異常がある場合は使用しないでください。

1．点検要領

ベスト式自動タイプで例を挙げて説明します。

①縫製部にほつれ、糸切れがないか確認してください。

②膨張装置が装備されているか、ボンベが装備されていて、きちんと締め込んで有るか、自動タイプの場合はスプールが装備されているか。確認して下さい。

③膨張装置に緑色のピンが付いているか確認して下さい。

⑥気室及びカバー布に穴、傷がないか確認して下さい。

⑦エアー吸入補充バルブが破損していないか確認して下さい。

⑧ベルトに傷がないか確認して下さい。

⑨バックルに傷がないか確認して下さい。

⑩手動レバーが締込部下ら少し出ていて、緊急時にすぐ引ける常態か確認して下さい。

O　X　　O　X

④ボンベの封板に穴が開いていないか確認。開いていたら交換してください。また、自動タイプ場合はスプールを確認し、使用済み奈良交換してください。

※ボンベ・スプールに異常がなくても、購入後（交換後）3年以上経過している場合は交換してください。

⑤ボンベの受け穴にパッキン（黒部分）があるか確認して下さい。

※パッキンが紛失もしくは破損している場合はメーカに問合せて交換してください。

エアー漏れの点検方法

①補充送気管のキャップを外し、いきを吹き込んで膨張させます。

②そのまま 24 時間放置してください。

③24 時間たってもエアが漏れていなければ異常なしです。
※エアが逃げていたら使用を中止してください。

④完全に空気を抜き、ボンベを取付膨張装置を点検した後、正しく折畳んで保管してください。

四．着用方法

警告　気室を破損させる恐れのあるもの（ブローチ、ボールペン、安全ピン）などは、膨張式救命胴衣を着用する前に必ず衣服から取り外して下さい。
この製品は外衣として着用して下さい。着衣の下に着用しますと、膨張時に胸と腹を圧迫して呼吸が出来なくなる恐れがあります。
この製品の推奨ウエストサイズは 80～110ｃｍです。体型に合わせて正しく着用して下さい。正しく着用されていないと、安定した浮遊姿勢を得られない可能性があります。

1、ウエスト式着用方法

着用方法

1　前後を間違えないようにしてバックルを閉じて下さい

2　ベルトを締めて調整して下さい

3　位置を確認して下さい

4　本部部分が背中側に来るように装着して下さい

2、ベスト式着用方法

着用方法　ベスト：手順を守って正しく着用してください。

①　左腕を通します

②右腕を通します

③　バックルをしっかり差し込みます

④　ベルトの長さを調整します

五．作動方法

手動膨張と自動膨張 2 つの方法により膨張します。

・手動膨張

救命胴衣から出ている手動レバー（紐）を強く引くことにより膨張させます。

・自動膨張

落水した時、膨張装置のスプールが水に反応し作動することで、炭酸ガスボンベから気室に炭酸ガスが充填され自動的に膨張します。万が一作動しない場合には手動レバー(紐)を強く引いてください。

警告　自動膨張で使用してもスプールが水と反応出来ない場合、例えば浮遊物につかまってセンサーが水没しない状態、ウェダーや合羽がスプールとの接触を妨げている状態では作動、膨張しません。

図 3-4　肩掛け型救命胴衣の着用方法を示す説明書



図 3-5　腰巻き型救命胴衣の装着時の様子（上段：通常時，下段：膨張時）



図 3-6　腰巻き型救命胴衣の着用方法を示す説明書

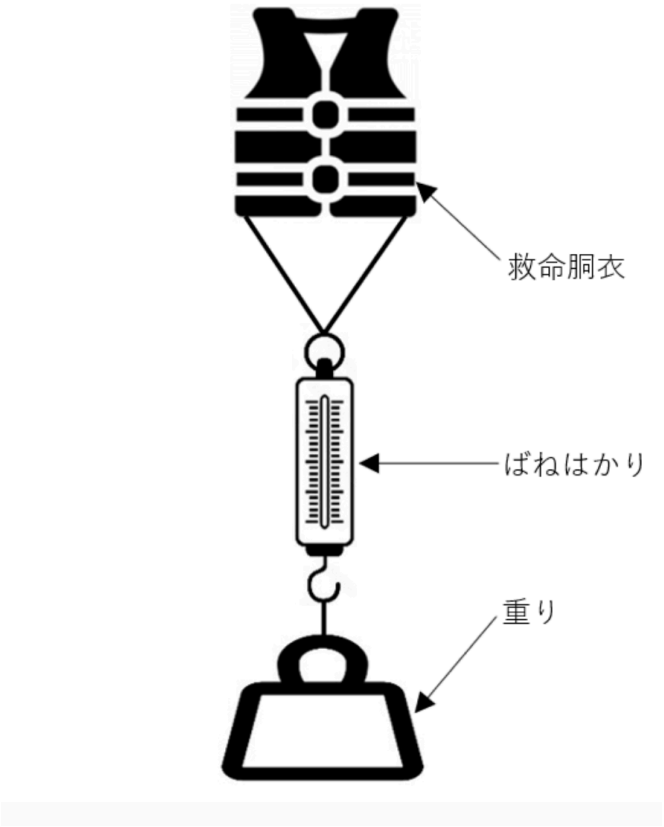


図 3-7　浮力計測の概略図

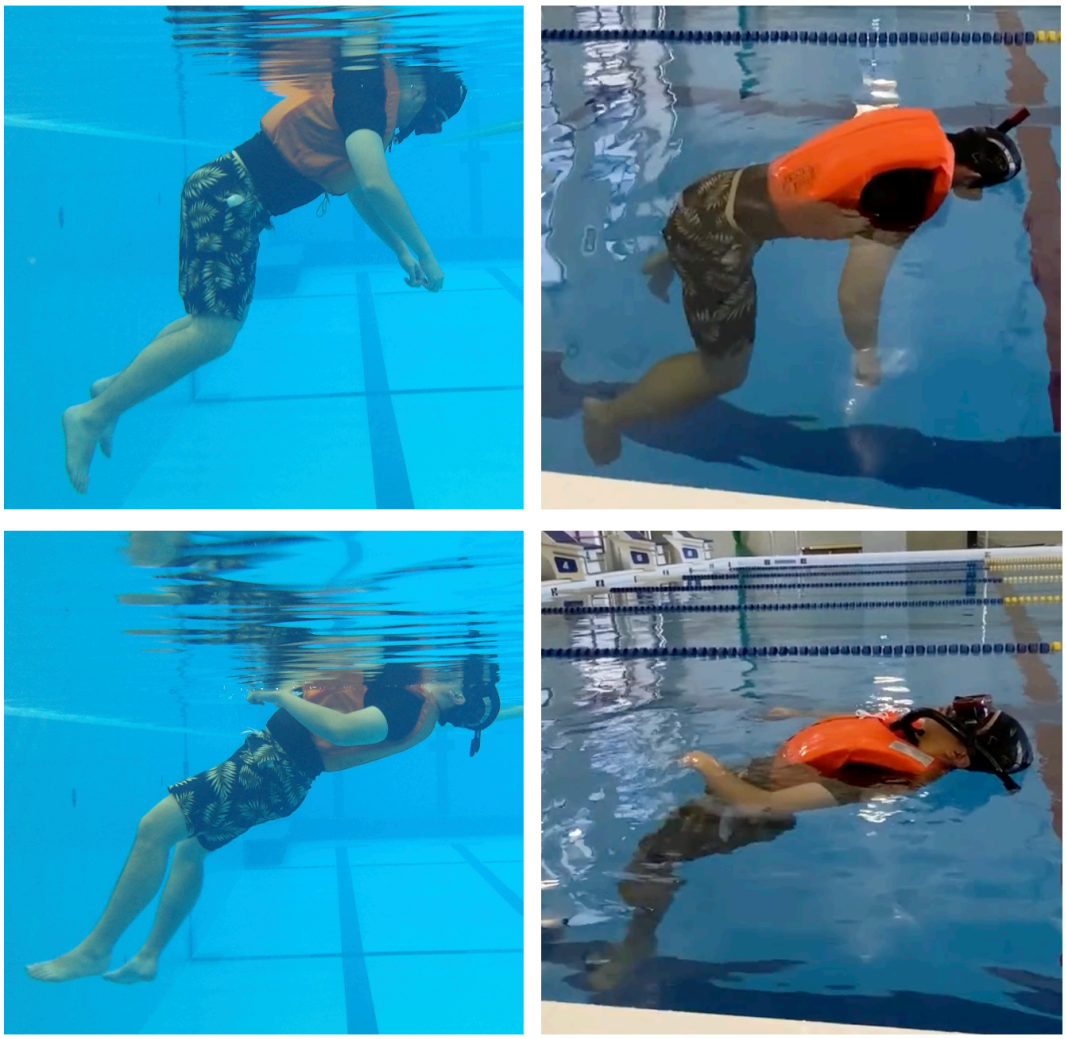


図 3-8　ベスト型着用時の水中での姿勢（上段：うつ伏せ，下段：仰向け）

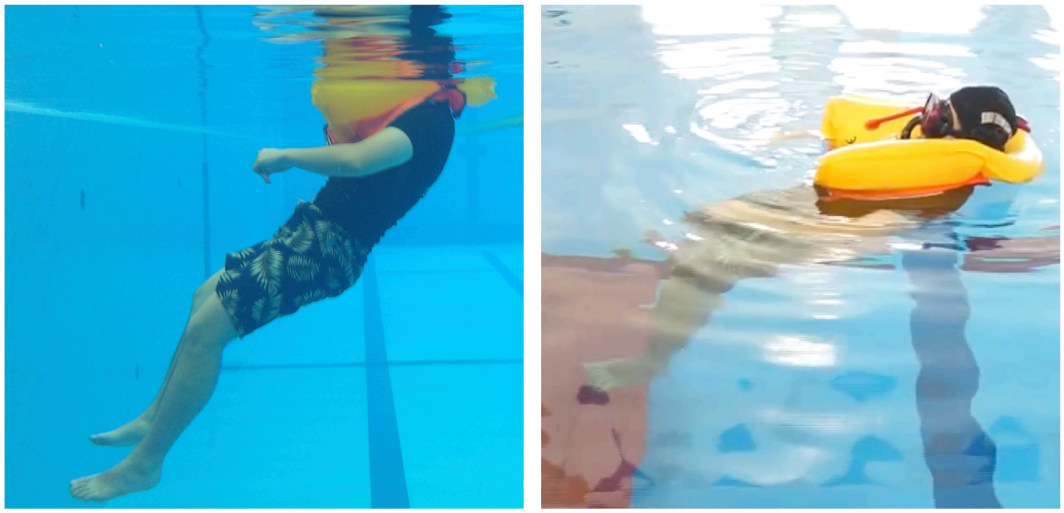


図 3-9　肩掛け型着用時の水中での姿勢

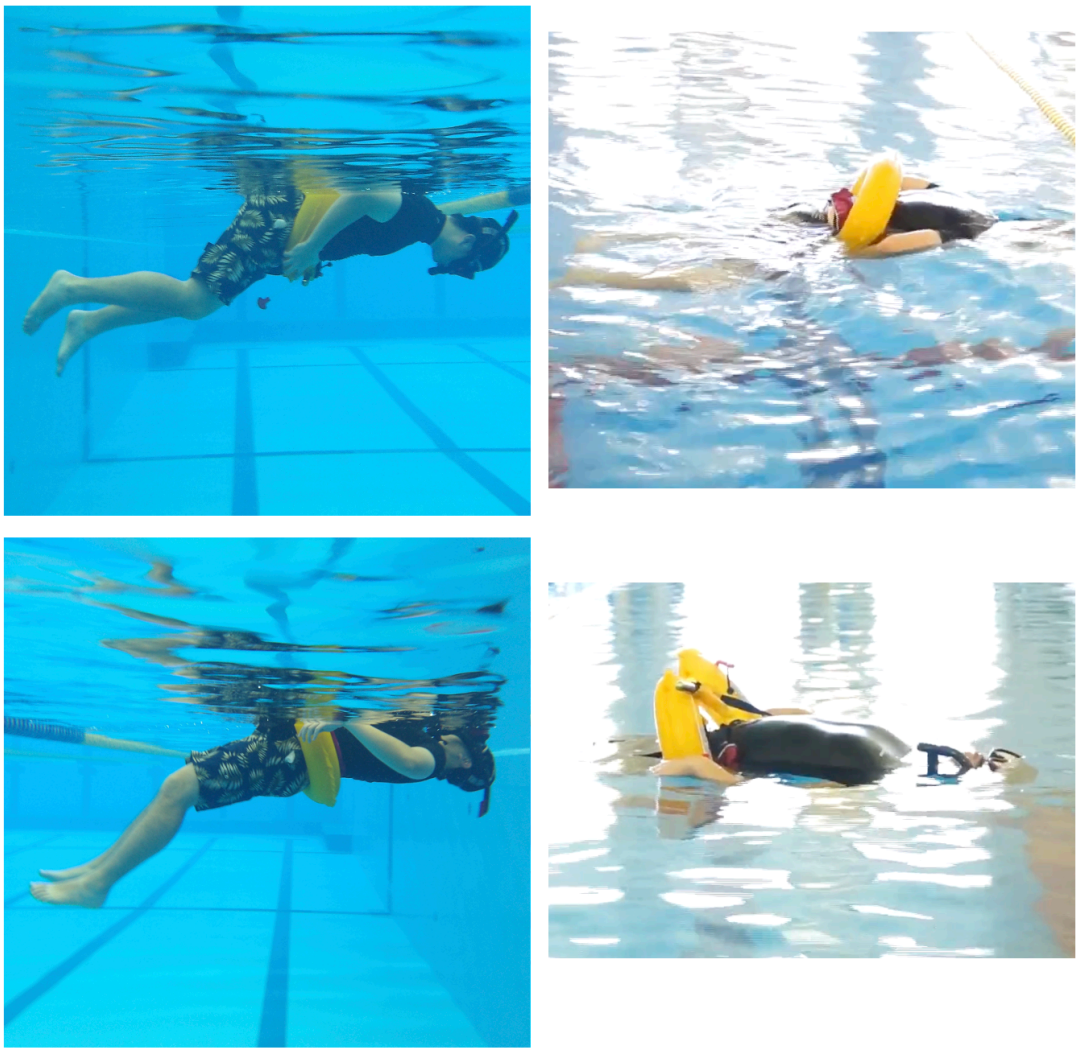


図 3-10　腰巻き型着用時の水中での姿勢（上段：うつ伏せ，下段：仰向け）



図 3-11　腰巻き型着用時の不安定な姿勢の様子

第4章　シミュレーションモデル

本研究では，流れと人体運動を同時に解析可能なシミュレーションモデル，DRowning hUman Model（DRUM）を用いて，落水時における人体の運動をシミュレーションした．本章では DRUM の概要と人体・流体の計算手法を示す.

4.1　計算手法

4.1.1　概要

DRUM において人体は各体節が関節で連結された剛体とみなす剛体リンクモデルを適用し，流体は固体・液体・気体を多相流として統一的に解く CIP-CUP 法を適用する．人体と流体の相互作用は，人体の表面に作用する流体による圧力を積分し，人体の各部位に働く力を算出することで表現される.

4.1.2　人体と流体の相互作用

人体の各体節が流れ場へ及ぼす作用は，体節の速度を境界条件として与えることにより表現する．ある計算格子が剛体の体節 s を含むとき，s の並進速度$\mathrm{v_s}$・各速度ω_sに対し，当該の格子中心における s の速度u_sは

$$\mathrm{u_s} = \mathrm{v_s} + \widetilde{\omega_s}\mathrm{r_{sP}} \tag{4.1}$$

と表される．ここで$\mathrm{r_{sP}}$は s の重心から当該格子中心への変位を表す．剛体体節と流れ場の間に非滑り条件を与えると，当該格子の流速は以下のように修正される[2].

$$u^{**} = \left(1 - \sum\nolimits_{s\ in\ mesh} \phi_s\right) u^{*} + \sum\nolimits_{s\ in\ mesh} \phi_s\, u_s \tag{4.2}$$

ここで$\mathrm{u^*}$は移流計算により得られた修正前の流速，u^{**}は修正後の流速，$\sum_{s\ in\ mesh}$　は当該格子が含むすべての体節にわたる総和を表す.

4.1.3　流体から人体への作用

流体が人体へ及ぼす作用は，後述の各体節の運動方程式における流体力$F_{s\,|\,fluid}$・流体トルク $T_{s\,|\,fluid}$ の各項により表される．流体力と流体トルクは，計算格子における圧力 $\nabla\mathrm{p}$ と粘性摩擦力 $\tau = \rho\nu\nabla^2\mathrm{u}$ を体節ごとに以下のように積算することで求められる.

$$F_{s\,|\,fluid} = \sum_{meshes} (\nabla p + \tau)\phi_{\mathrm{s}}\,\Delta V \tag{4.3}$$

$$F_{s\,|\,fluid} = \sum_{meshes} \left(\widetilde{r_{sP}}(\nabla p + \tau)\right)\phi_s \Delta V \tag{4.4}$$

4.2 人体

4.2.1 人体形状

本研究において人体形状は成人男性を想定し，産業技術総合研究所の人体寸法・形状データベース（河内・持丸，2006；データ IDF020，23 歳，男性，身長 168cm，体重 61.4kg）[3]より取得し，5mm 角のボクセルを用いて表現した．これを図 4-2 に示す 19 体節（頭，胴体，腰，左右上腕，左右前腕，左右手のひら，左右指二部分，左右上腿，左右下腿，左右足）に分割し，剛体リンクモデルの考えに基づき各体節を 18 関節（首，左右肩，左右肘，指 MP 関節・PIP 関節，左右股関節，左右膝，足首）で接続された剛体とみなして計算を行う[4][5].

4.2.2 基礎方程式

各体節の並進・回転運動は，剛体リンクモデルに基づき，流体や関節が作用する力とトルクを考慮して計算される．体節 s と関節 j には図 4-3 に示すように力とトルクが作用する．このとき並進・回転の運動方程式（Newton-Euler 方程式）は以下の式で表される．

$$M_s \dot{v}_s = F_{s\,|\,fluid} + \sum_{j\ on\ s} F_{s\,|\,fluid} - M_s g \tag{4.5}$$

$$I_s \dot{\omega}_s + \widetilde{\omega_s} I_s \omega_s = T_{s\,|\,fluid} + \sum_{j\ on\ s} \left(\widetilde{r_{sj}} F_{s\,|\,j} + F_{s\,|\,j}\right) \tag{4.6}$$

ここで式(4.5)は静止系，式(4.6)は体節 s の慣性主軸系視点のものとして記述される．M_s，I_sは部位 s の質量及びモーメント，$\boldsymbol{v_s}$，$\boldsymbol{\omega_s}$は体節 s の並進および回転の速度ベクトルである．$F_{s\,|\,fluid}$，$T_{s\,|\,fluid}$は部位 s が流体から受ける力とトルク，$F_{s\,|\,j}$，$T_{s\,|\,j}$は体節 s が関節 j より受ける力とトルク，r_{sj}は体節 s の重心から j までの変位ベクトルである．また $\sum_{j\ on\ s}$ は体節 s が他の体節に接続するすべての関節についての総和である．流体から受ける力とトルク$F_{s\,|\,j}$，$T_{s\,|\,j}$は後述する関節のモデル化の式より求められる．

4.2.3 関節のモデル化

剛体リンクモデル[4][6]に基づき，各体節の連結性と関節の可動域の制限を満たすように，関節が体節に作用する力 F_j^s とトルク T_j^s を決定する．

剛体の連結性

関節部で二つの剛体 s1，s2 が連結するためには，図 4-4 で示すようにそれぞれの剛体上で関節位置の移動速度 ν_j が等しければよい．したがって，各剛体の連結条件式は以下の式(4.7)で表現される．剛体 s1，s2 についてのそれぞれの値について，右上添え字であらわすこととした．

$$\mathrm{v_j} = \mathrm{v_G^{s1}} + \omega^{s1} \times \mathrm{r_{Gj}^{s1}} = \mathrm{v_G^{s2}} + \omega^{s2} \times \mathrm{r_{Gj}^{s2}} \tag{4.7}$$

ここで，式(4.7)は時間積分をとると，式(4.8)のように変形できる．

$$\begin{aligned} \frac{\mathrm{dv_j}}{\mathrm{dt}} &= \frac{\mathrm{dv_G^{s1}}}{\mathrm{dt}} \frac{\mathrm{d`}\omega^{s1}}{\mathrm{dt}} \times \mathrm{r_{Gj}^{s1}} + \omega^{s1} \times \left(\omega^{s1} \times \mathrm{r_{Gj}^{s1}}\right) \\ &= \frac{\mathrm{dv_G^{s2}}}{\mathrm{dt}} + \frac{\mathrm{d`}\omega^{s2}}{\mathrm{dt}} \times \mathrm{r_{Gj}^{s2}} + \omega^{s2} \times \left(\boldsymbol{\omega^{s2}} \times \boldsymbol{r_{Gj}^{s2}}\right) \end{aligned} \tag{4.8}$$

理論上は連結条件式が成立するとき二つの体節の関節位置は一致するはずだが，実際は離散化により必ずしも一致しない．そこで線形粘弾性モデルを導入し，各体節にばね係数による復元力を与えることで，関節位置のずれを修正する．ばね係数κ, c を用いると連結方程式は以下のように書き換えられる．

$$\begin{aligned} &\left(\frac{d\boldsymbol{v_G^{s1}}}{dt} \frac{\mathrm{d`}\boldsymbol{\omega^{s1}}}{dt} \times \boldsymbol{r_{Gj}^{s1}} + \boldsymbol{\omega^{s1}} \times \left(\boldsymbol{\omega^{s1}} \times \boldsymbol{r_{Gj}^{s1}}\right)\right) \\ &-\left(\frac{d\boldsymbol{v_G^{s2}}}{dt} + \frac{\mathrm{d`}\boldsymbol{\omega^{s2}}}{dt} \times \boldsymbol{r_{Gj}^{s2}} + \boldsymbol{\omega^{s2}} \times \left(\boldsymbol{\omega^{s2}} \times \boldsymbol{r_{Gj}^{s2}}\right)\right) \\ &= -\kappa_{\mathrm{j1j2}} - c\nu_j \end{aligned} \tag{4.9}$$

なお，r_{j1j2}は体節 s1,s2 の関節 j1, j2 間の距離である．

関節の可動域

人体の関節は曲がる角度に限界がある[6]ため，関節の可動域を制限する条件を考慮する．体節 s1 と s2 を連結する関節 j に固定された座標軸$\left(\mathrm{e_1^j}, \mathrm{e_2^j}, \mathrm{e_3^j}\right)$を取ると，これらの座標軸を中心軸として α, β, γ だけ回転させる座標変換行列 A は以下のように表される．

$$\mathrm{A}=\begin{pmatrix}\cos\alpha\cos\beta & \sin\alpha\cos\beta & -\sin\beta\\ \cos\alpha\sin\beta\sin\gamma-\sin\alpha\cos\gamma & \sin\alpha\sin\beta\sin\gamma+\cos\alpha\cos\gamma & \cos\beta\sin\gamma\\ \cos\alpha\sin\beta\cos\gamma+\sin\alpha\sin\gamma & \sin\alpha\sin\beta\cos\gamma-\cos\alpha\sin\gamma & \cos\beta\cos\gamma\end{pmatrix} \quad (4.10)$$

関節 j1 に対する関節 j2 の回転速度ベクトル $\boldsymbol{\omega_j}$ は，回転角 $\boldsymbol{\theta}=(\alpha,\beta,\gamma)$ の時間微分 $d\theta/dt$ を用いて以下のように表される．

$$\omega_{\mathrm{j}}^{\mathrm{j1}}=\begin{pmatrix}-\sin\beta & 0 & 1\\ \sin\alpha\cos\beta & \cos\alpha & 0\\ \cos\alpha\cos\beta & -\sin\alpha & 0\end{pmatrix}\frac{d\theta}{dt},\qquad \omega_j^{j2}=\begin{pmatrix}0 & -\sin\gamma & \cos\beta\cos\gamma\\ 0 & \cos\gamma & \cos\beta\sin\gamma\\ 1 & 0 & -\sin\beta\end{pmatrix}\frac{d\theta}{dt} \quad (4.11)$$

ここで計算用行列 $\mathrm{R_{j1}}$，$\boldsymbol{R_{j2}}$ を用いて $d\theta/dt$ をさらに微分すると，以下の式で表される．

$$\frac{\mathrm{d}^2\theta}{\mathrm{dt}^2}=\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{dt}}\left(\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{dt}}\right)=\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{dt}}\left(\left(\mathrm{R_{j1}}\right)^{-1}\right)\omega_j^{j1}+\left(\boldsymbol{R_{j1}}\right)^{-1}\frac{d}{dt}\left(\omega_j^{j1}\right) \quad (4.12)$$

これを $\omega_{\mathrm{j}}=\omega^{\mathrm{s2}}-\omega^{\mathrm{s1}}$ として関節上の静止座標系で表し，Euler 方程式を代入して算出されるのが，以下の関節角方程式である．なお $\mathrm{A}^{0\to\mathrm{j1}}$ は静止座標のから体節 s1 上の座標 j1 への座標変換行列，$\mathrm{A}^{\mathrm{j1}\to\mathrm{o}}$ は体節 s1 上の座標 j1 から静止座標 0 への座標変換行列である．

$$\begin{aligned}\frac{\mathrm{d}^2\theta}{\mathrm{dt}^2}=&\left\{\left(\frac{d}{dt}\left(\boldsymbol{R_{j1}}\right)^{-1}\right)\boldsymbol{A^{j1\to o}}+\left(\boldsymbol{R_{j1}}\right)^{-1}\left(\frac{d}{dt}\boldsymbol{A^{j1\to o}}\right)\right\}\left(\boldsymbol{\omega^{s2}}-\boldsymbol{\omega^{s1}}\right)\\ &+\left(\boldsymbol{R_{j1}}\right)^{-1}\boldsymbol{A^{j1\to o}}\begin{Bmatrix}\dfrac{B^{s2}}{I^{s2}}+\boldsymbol{A^{s2}}\dfrac{T_f^{s2}+\sum\left(r_G^{s2}\times F_j^{s2}+T_j^{s2}\right)}{I^{s2}}\\ -\dfrac{B^{s2}}{I^{s2}}-\boldsymbol{A^{s1}}\dfrac{T_f^{s1}+\sum\left(r_G^{s1}\times F_j^{s1}+T_j^{s1}\right)}{I^{s1}}\end{Bmatrix}\end{aligned} \quad (4.13)$$

一般に，人体の姿勢変化により求まる関節角の各加速度を入力して次式の関節角方程式が解かれる．

$$\frac{d^2\theta}{dt^2}=-\kappa\left(\boldsymbol{\theta}-\theta_{max,min}\right)-c(\boldsymbol{\theta}) \quad (4.14)$$

本研究では簡単のため関節に能動的な力が作用しないと仮定し，指定した関節可動域内 $\left(\theta_{\mathrm{min}}<\theta_{\mathrm{j}}<\theta_{\mathrm{max}}\right)$ ではトルクを 0 とする．関節可動域を超えるような場合にのみ，復元力としてこの式を用いて加速度を与える．

以上の条件式より関節が作用する力 F_j^s とトルク T_j^s を求め, 4.2.2 で述べた並進転の運動方程式を Euler 法で積分することで，時間発展後の値が求められる．

4.2.4　壁との相互作用

地面や障害物を含めた壁との相互作用を考慮するために Discrete Element Method(DEM)を人体モデルに導入する[7]．人体表面のボクセルに，それぞれのボクセル中心を中心座標とする弾性球を配置し，その弾性球が壁に接触したとき弾性球と壁の間で生じる斥力を計算する．DEM を用いることで斥力以外に摩擦力もモデル化することができるが，本研究では簡単のために人体と壁との摩擦力は無視し，平行方向のモデル化は行わない．人体表面のヤング率・ポアソン比は，それぞれ皮膚組織の代表値である 0.5GPa と 0.49 とし[8]，壁の材質はポリプロピレンとして，ヤング率・ポアソン比を 1.47GPa と 0.35 とした．

4.3　流体

4.3.1　基礎方程式

計算格子には直交格子を用い，固体・液体-気体を多相流として統一的に解き，固体に作用する力を格子ごとの体積分率を用いて積算する Constrained Interpolation Profile-Combined Unified Procedure(CIP-CUP)法によって流速・圧力・空気と水の密度を計算する[9]．ここで体積分率について，当該格子の体積 ΔV に対し体節 s の占める体積分率を ϕ_s とし，当該格子からすべての体節を除いた領域に対し空気の占める体積分率を ϕ とする．（図 4-7）各格子の平均密度 ρ，音速 c，分子動粘性 ν_{mol} は，上記の体積分率 ϕ_s, ϕ を用いて以下のように表される．

$$\rho = \left(1 - \sum_{\text{sin mesh}} \phi_s\right)\phi\rho_{\text{air}} + \left(1 - \sum_{\text{sin mesh}} \phi_s\right)(1-\phi)\rho_{water} + \sum_{\text{sin mesh}} \phi_s \rho_s \quad (4.15)$$

$$c = \left(1 - \sum_{\text{sin mesh}} \phi_s\right)\phi c_{air} + \left(1 - \sum_{\text{sin mesh}} \phi_s\right)(1-\phi) c_{water} + \sum_{\text{sin mesh}} \phi_s c_s \quad (4.16)$$

$$\nu_{mol} = \phi\nu_{mol\,air} + (1-\phi)\nu_{mol\,water} \quad (4.17)$$

ただし ν_{mol} について，本研究では体節による粘性力は考慮しないものとした．これらの物性値を用いて，流速u, 圧力 p, 密度ρ の時間発展は以下の基礎方程式で表される．

$$\frac{\mathrm{Du}}{\mathrm{Dt}} = -\frac{1}{\rho}\nabla \mathrm{p} + \rho \mathrm{v}\nabla^2 \mathrm{u} - \mathrm{g} \tag{4.18}$$

$$\frac{\mathrm{D}\rho_\mathrm{l}}{\mathrm{Dt}} = -(\nabla \cdot \mathrm{u}) \quad (l = air, water) \tag{4.19}$$

$$\frac{Dp}{Dt} = -c^2 \rho (\nabla \cdot \boldsymbol{u}) \tag{4.20}$$

g は重力加速度を表し，これらの計算は時間分割法により，移流-粘性-圧力の物理過程ごとに行われる．また水面を追跡するために，以下の移流方程式より空気の体積分率 ϕ_{air} の変化を計算する．

$$\frac{\mathrm{D}\phi_{\mathrm{air}}}{\mathrm{Dt}} = 0 \tag{4.21}$$

4.3.2 流動計算

4.2.2 の基礎方程式は時間分割法[10]により以下の移流項・粘性項・圧力項に分けられ順次計算される．

移流項

$$\frac{\mathrm{D}\phi}{\mathrm{Dt}} = 0, \qquad \frac{\mathrm{Du}}{\mathrm{Dt}} = 0, \qquad \frac{\mathrm{D}\rho_\mathrm{l}}{\mathrm{Dt}} = 0, \qquad \frac{\mathrm{Dp}}{\mathrm{Dt}} = 0 \tag{4.22}$$

粘性項

$$\frac{\partial \mathrm{u}}{\partial \mathrm{t}} = \nabla \cdot (\mathrm{v}\nabla)\mathrm{u} - \mathrm{g} \tag{4.23}$$

圧力項

$$\frac{\partial \mathrm{u}}{\partial \mathrm{t}} = -\frac{\nabla \mathrm{p}}{\rho}, \qquad \frac{\partial \rho_\mathrm{l}}{\partial \mathrm{t}} = -\rho_\mathrm{l} \nabla \cdot \mathrm{u}, \qquad \frac{\partial \mathrm{p}}{\partial \mathrm{t}} = \mathrm{c}\left(\frac{\partial \rho}{\partial \mathrm{t}}\right) \tag{4.24}$$

移流解法

それぞれの移流項は CIP 法[10]により解かれる．はじめに各格子点に対し，移流の原点 $\mathrm{x_{orig}} = \mathrm{x_i} - (\mathrm{u_i} + \mathrm{u_A})\,\Delta \mathrm{t}/2$ を探索する．ここで Δt は時間刻み幅，x_i は格子点位置，u_i は格子点における流速，u_A は位置 $\mathrm{x_A} = \mathrm{x_i} - \mathrm{u_i}\,\Delta \mathrm{t}$ における流速である．
CIP 法では 計算対象の物理量（プロファイルと呼ばれる）$\mathrm{f} = \phi, \mathrm{u}, \rho_\mathrm{l}, \mathrm{p}$ に加え，その空間勾配 $g = \frac{\partial f}{\partial x}$ 変数として導入される．一次元の場合，移流原点のプロファイル$\mathrm{f_{orig}}$

とその空間勾配g_{orig}が，𠮟接する二格子点 iup, idn（流れ場に対し上流側を iup，下流俔を idn とする）における f, g か以下の様に補間される．

$$f_{orig} = a\xi^3 + b\xi^2 + g_{idn}\,\xi + f_{idn} \tag{4.25}$$

$$g_{orig} = 3a\xi^2 + 2b\xi + g_{idn} \tag{4.26}$$

$$a = \frac{g_{idn} + g_{iup}}{D^2} + \frac{2\left(f_{idn} - f_{iup}\right)}{D^3} \tag{4.27}$$

$$b = \frac{3\left(f_{idn} - f_{iup}\right)}{D^2} - \frac{2g_{idn} + g_{iup}}{D} \tag{4.28}$$

$$\xi = x_{orig} - x_{idn} \tag{4.29}$$

$$D = x_{iup} - x_{idn} \tag{4.30}$$

ただし上記は一次元の CIP 法であるため，三次元を取り扱う本研究では移流原点を囲む 8 格子点に対し，上記 CIP 法を各方向で繰り返す．これにより求められるプロファイル f_{orig} の値が，移流先の格子点 x_i におけるプロファイル $f^* = \phi^{n+1}, u^*, p^*, \rho_l^*$ である．

粘性解法

移流項を解いた，粘性項を解く前に流速が体節の速度に応じて修正される．当該格子点の修正後の流速を u^{**} とし，その両隣の格子点 iup, idn における流速を u_{iup}^{**}, u_{idn}^{**} とすると，流速の粘性項は離散化されて以下のように表される．

$$\frac{u^{***} - u^{**}}{\Delta t} = \nu \frac{\boldsymbol{u}_{idn}^{**} - 2\boldsymbol{u}^{**} + \boldsymbol{u}_{iup}^{**}}{\Delta x^2} \tag{4.31}$$

Δx は格子幅を表し，本研究では各方向で上式を繰り返して u^{***} を求める．ここで粘性項は空間的には中心差分，時間的には陽解法により離散化される．このため計算の安定性のために時間刻み幅 Δt は制約される．

圧力解法

圧力項でははじめに圧力を求め，それに基づき流速と密度を求める．式(4.15）と式

(4.24-2)から圧力項(4.24-3) 右辺の $\partial\rho/\partial x$ は，移流計算の結果 ϕ^{n+1}とρ^* を用いて以下のように表される．

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \phi_{air}^{n+1}\frac{\partial \rho_{air}}{\partial t} + \phi_{water}^{n+1}\frac{\partial \rho_{water}}{\partial t} + \sum_{sin\ mesh}\left(\phi_s^{n+1}\frac{\partial \rho_s}{\partial t}\right) = -\rho^*(\nabla \cdot u) \tag{4.32}$$

ここで

$$\phi_{air}^{n+1} = \left(1 - \sum_{sin\ mesh}\phi_s^{n+1}\right)\phi^{n+1}, \qquad \phi_{water}^{n+1} = \left(1 - \sum_{sin\ mesh}\phi_s^{n+1}\right)\left(1 - \phi^{n+1}\right) \tag{4.33}$$

であり，ϕ_s^{n+1} は後述する体節配置の結果である.よって式(4.24-3)は陽解法により離散化して以下のように表される．

$$p^{n+1} = p^* - c\rho^*(\nabla \cdot u^{n+1})\,\Delta t \tag{4.34}$$

$$u^{n+1} = u^{***} - \frac{\nabla p^{n+1}}{\rho}\,\Delta t \tag{4.35}$$

この式を先ほどの式(4.34) 右辺に代入して整理することにより，以下の圧力の Poisson 方程式が得られる．

$$\nabla \cdot \left(\frac{\nabla p^{n+1}}{\rho^*}\right) - \frac{p^{n+1} - p^*}{c\rho^*\,\Delta t^2} = \frac{\nabla \cdot u^{***}}{\Delta t} \tag{4.36}$$

DRUM では双共役勾配安定化法[12]による反復計唄で上式より p^{n+1} を求めた後，式(4.35)により u^{n+1} を求め，以下の式より密度 ρ_l^{n+1} を求める．

$$\rho_l^{n+1} = \rho_l^* - c\rho^*\,\Delta t\,(\nabla \cdot u^{n+1}) \tag{4.37}$$

乱流モデル

DRUM では乱流の表現に Smagorinsky model (SGS) と Coherent Structure Model (CSM-SGS) の二種類を用いることができる．本研究では SGS を用いて乱流計算する．SGS において応力テンソル τ_{ij} はひずみ速度テンソル S_{ij} と渦動粘性係数 v_{turb} を用いて以下の式で表される．

$$\tau_{ij} = 2\nu_{turb} S_{ij} \tag{4.38}$$

ここでひずみ速度テンソル S_{ij} と渦動粘性係数 ν_{turb} はそれぞれ以下の式により求められる．

$$S_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right), \nu_{turb} = (C_s \Delta)^2 \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \tag{4.39}$$

なお Δ はメッシュサイズを表しており，SGS 定数 C_s については本研究では $C_s = 0.2$ とした．

4.4 まとめ

以下では計算手法を計算手順（Stage）ごとに整理し，計算全般に関わるその他の事項について補足する．（図 4-8）

Stage0：時間刻み幅の決定

はじめに当該計算ステップにおける時間刻み幅 Δt を，前ステップの計算結果に基づき定め．以下の条件より各々要求される Δt のうち最小のものが，当該計算ステップの時間刻み幅に採用される．

関節角駆動量

1 ステップ当たりの関節角の変化量の最大値が，設定値（本研究では 0.1 rad とした）を超えないよう Δt が規定される．

CFL 条件

各計算格子における CFL 数（クーラン数）

$$CFL = \frac{\boldsymbol{u}\Delta t}{\Delta x} \tag{4.40}$$

粘性計算安定条件

式(4.23)の粘性項は時間的には陽解法，空間的には中心差分により離散化される．このとき von Neumann の安定性解析から，時間発展の際の安定条件として

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x^2}{2v} \tag{4.41}$$

Brunt-Vaisara 振動

成層流体の界面において浮力により生じる Brunt-Vaisara 振動は，振動数が

$$N = \sqrt{-\frac{g}{\rho}\frac{d\rho}{dz}} \tag{4.42}$$

で表される．各格子における Brunt-Vaisara 振動周期 2π/N の最小値に対して，Δt が設定された比率（本研究では 0.5 とした）以下となるよう規定される．

Stage1：移流計算と体節移動

流体の基礎方程式の移流項が CIP 法により解かれる．格子の空気体積分率 ϕ の演算は本ステージで終了し，次ステップにおける値 ϕ^{n+1} より水面位置が決定される．同時に各体節の重心位置・回転角が前ステップで求められた並進速度・回転角速度を時間積分することで更新される．

Stage2：体節配置

更新された各体節の位置に基づき，各格子において体節の体節分率 ϕ_s^{n+1} を定める．その後 3.1.2 項に示す方法により，ϕ_s^{n+1} に基づいて流速を更新することで，人体が流体へ及ぼす作用を加味する．

Stage3：粘性・圧力計算

流体の基礎方程式の粘性項と圧力項が，4.3.2 に示す解法により順次計算される．重力は粘性項を計算する際に算入される．

Stage4：流体力の見積もり

4.1.2 項に示す方法により，人体の基礎方程式中の流体力 F_{fluid}・流体トルク F_{fluid} を定めることで，流体が人体へ及ぼす作用を加味する．

Stage5：関節力の見積もり

人体の運動方程式中の関節力 F_j・関節トルク T_j を，3.2.3 項に示した方法により各関節について見積もる．

Stage6：体節加速

Stage 4 と Stage 5 で求められた各項の値を基に人体の基礎方程式を陽的に評価し，次のステップにおける各体節の並進速度 v_s・角速度 ω_s を求める．

参考文献

[1] Takashi Yabe, Pei-Yuan Wang: Unified Numerical Procedure for Compressible and Incompressible Fluid, Journal of The Physical Society of Japan, Vol.60, No.7, pp.2105-2108, 1991.

[2] Xiao, F.: A computational model for suspended large rigid bodies in 3D unsteady viscous flows, J. Comput. Phys., Vol.60, pp.2105-2108, 1991.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 藤井範久，阿江通良，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.

[6] 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, Vol.14, pp.59-68, 1998

[7] O'sullivan, C., "粒子個別要素法"，鈴木輝一訳，森北出版（2014）.

[8] 林紘三郎，"バイオメカニクス"，コロナ社（2000）.

[9] Yabe, T., and Wang, P. Y., " Unified Numerical Procedure for Compressible and Incompressible fluid ", Journal of The Physical Society of Japan, Vol. 60, No. 7 (1991), pp.2105–2108.

[10] J. Kim and P. Moin: Application of a fractional-step method to incompressible NavierStokes equations, Journal of Computational Physics, Vol. 59, No. 2, pp. 308–323, 1985.

[11] T. Yabe and T. Aoki: A universal solver for hyperbolic-equations by cubic-polynomial interpolation I. one-dimensional solver, Computer Physics Communications, Vol. 66, No. 2-3, pp. 219–232, 1991a

[12] T. Yabe, T. Ishikawa, P. Y. Wang, T. Aoki, Y. Kadota, and F. Ikeda: A universal solver for hyperbolic equations by cubic-polynomial interpolation II. Two- and three-dimensional solvers, Computer Physics Communications, Vol. 66, No. 2-3, pp. 233–242, 1992b.

表 4-1 関節可動域の設定値

関節	軸	方向	名称	設定値 (deg)
首	1	正	右側屈	50
		負	左側屈	-50
	2	正	前屈	0
		負	後屈	0
	3	正	左旋回	60
		負	右旋回	-60
右肩	1	正	内転	0
		負	外転	-180
	2	正	内旋	80
		負	外旋	-60
	3	正	前方挙上	180
		負	後方挙上	-50
左肩	1	正	外転	180
		負	内転	0
	2	正	内旋	80
		負	外旋	-60
	3	正	前方挙上	180
		負	後方挙上	-50
右肘	1	正	伸展	5
		負	屈曲	-145
	2	正	-	0
		負	-	0
	3	正	回外	90
		負	回内	-90
左肘	1	正	屈曲	145
		負	伸展	-5
	2	正	-	0
		負	-	0
	3	正	回外	90
		負	回内	-90
右股関節	1	正	伸展	15
		負	屈曲	-125
	2	正	内転	20
		負	外転	-45
	3	正	外旋	45
		負	内旋	-45
左股関節	1	正	伸展	15
		負	屈曲	-125
	2	正	外転	45
		負	内転	-20
	3	正	内旋	45
		負	外旋	-45
右膝	1	正	屈曲	130
		負	伸展	0
	2	正	-	0
		負	-	0
	3	正	-	0
		負	-	0
左膝	1	正	屈曲	130
		負	伸展	0
	2	正	-	0
		負	-	0
	3	正	-	0
		負	-	0

関節	軸	方向	名称	設定値 (deg)
MP関節 (右)	1	正	-	0
		負	-	0
	2	正	-	0
		負	-	0
	3	正	屈曲	90
		負	伸展	-45
MP関節 (左)	1	正	-	0
		負	-	0
	2	正	-	0
		負	-	0
	3	正	屈曲	90
		負	伸展	-45
PIP関節 (右)	1	正	-	0
		負	-	0
	2	正	-	0
		負	-	0
	3	正	屈曲	100
		負	伸展	0
PIP関節 (左)	1	正	-	0
		負	-	0
	2	正	-	0
		負	-	0
	3	正	屈曲	100
		負	伸展	0
腰	1	正	左側屈	50
		負	右側屈	-50
	2	正	伸展	30
		負	屈曲	-45
	3	正	右回転	40
		負	左回転	-40
右足首	1	正	屈曲	45
		負	伸展	-20
	2	正	内返し	30
		負	外返し	-20
	3	正	-	0
		負	-	0
左足首	1	正	屈曲	45
		負	伸展	-20
	2	正	外返し	20
		負	内返し	-30
	3	正	-	0
		負	-	0
右手首	1	正	屈曲	90
		負	伸展	-70
	2	正	-	0
		負	-	0
	3	正	撓屈	25
		負	尺屈	-55
左手首	1	正	屈曲	90
		負	伸展	-70
	2	正	-	0
		負	-	0
	3	正	尺屈	55
		負	撓屈	-25

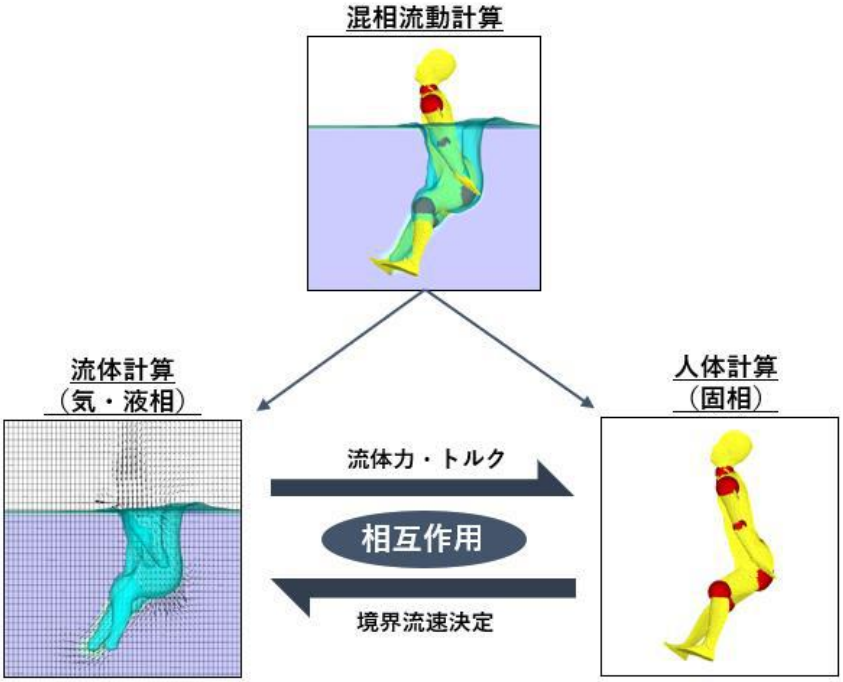


図 4-1　DRUM の概念図

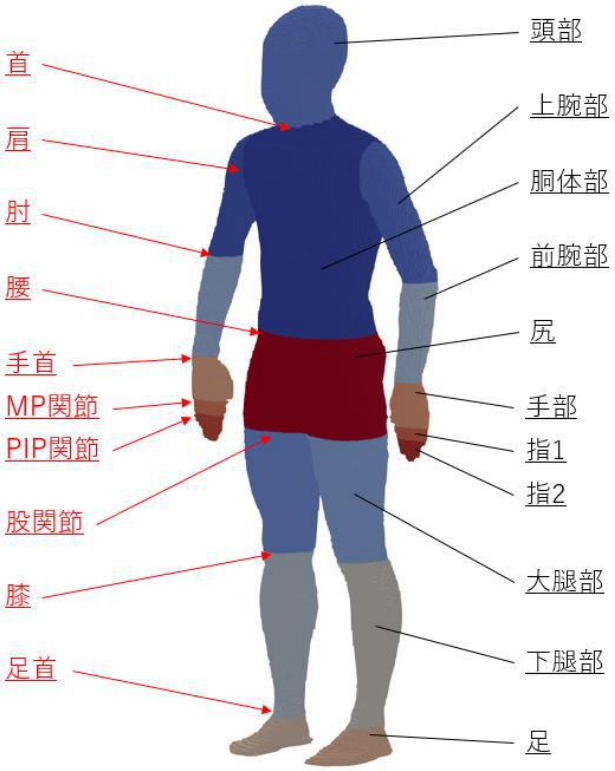


図 4-2　人体モデル（黒字：剛体部，赤字：関節部）

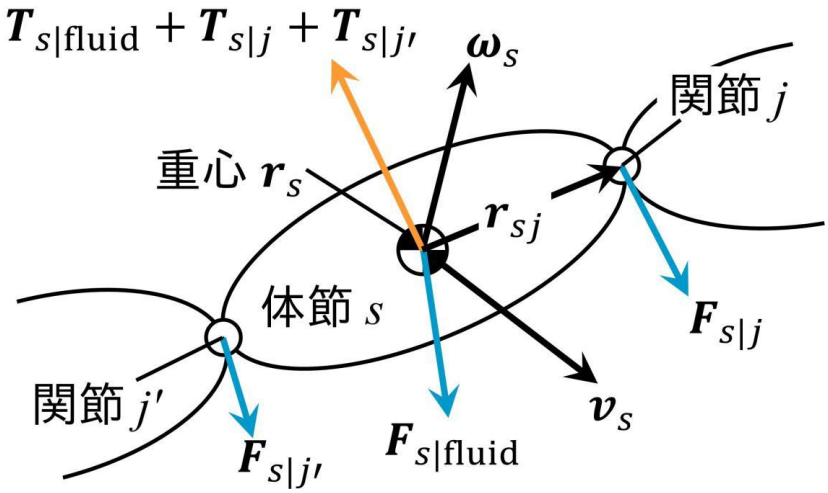


図 4-3　体節が受ける力とトルク

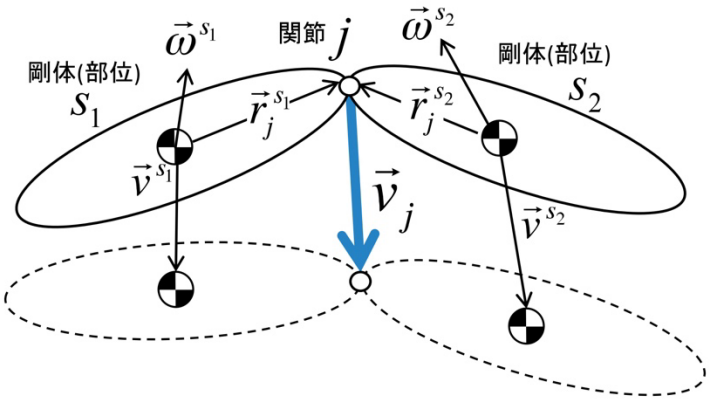


図 4-4　体節の連結条件の概念

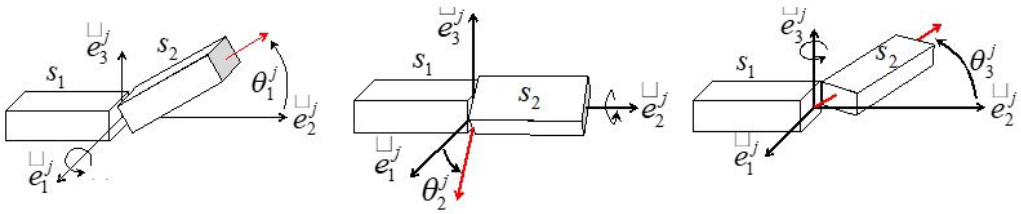


図 4-5　関節角の設定

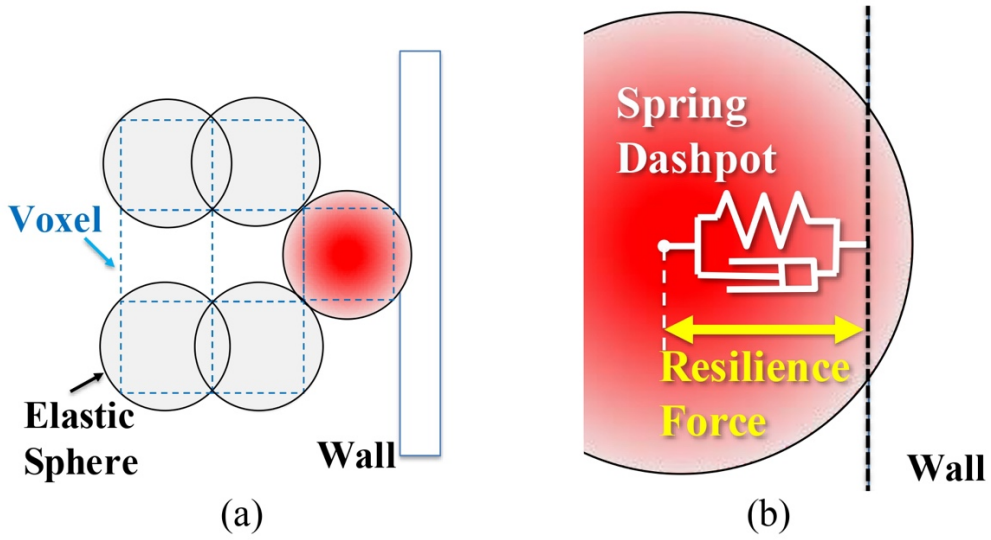


図 4-6　DEM モデル概念図（a：人体表面の簡略図，b：ばねによる衝突の表現）

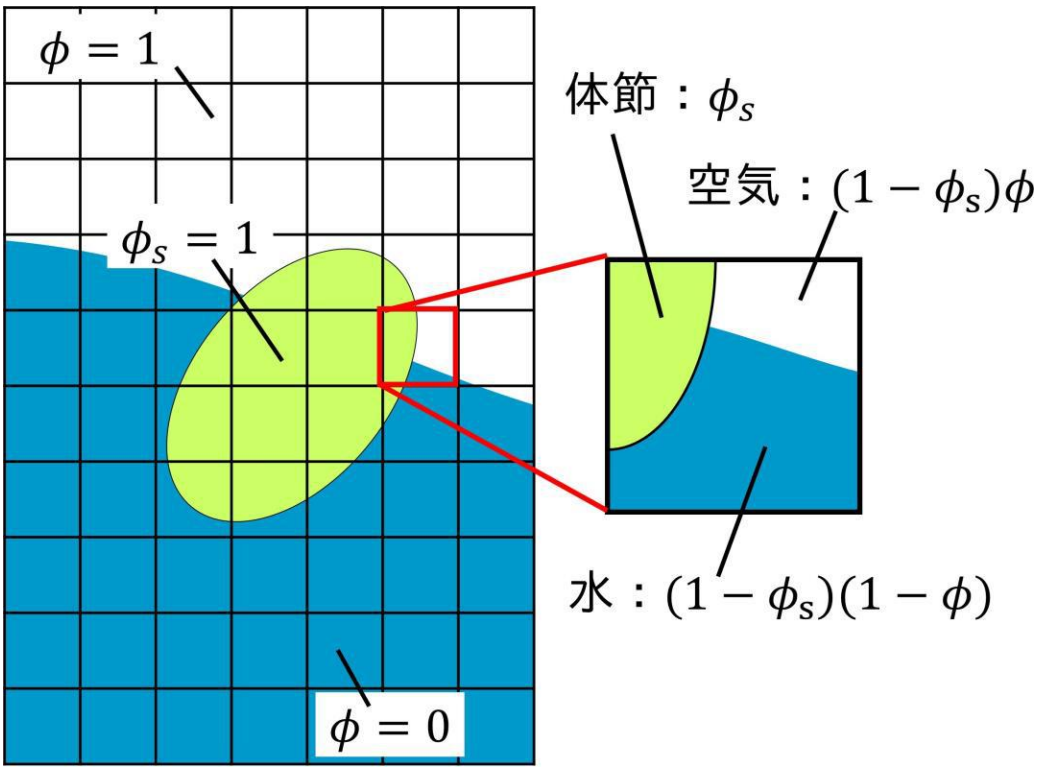


図 4-7 固体・液体・気体（体節）の体積分率

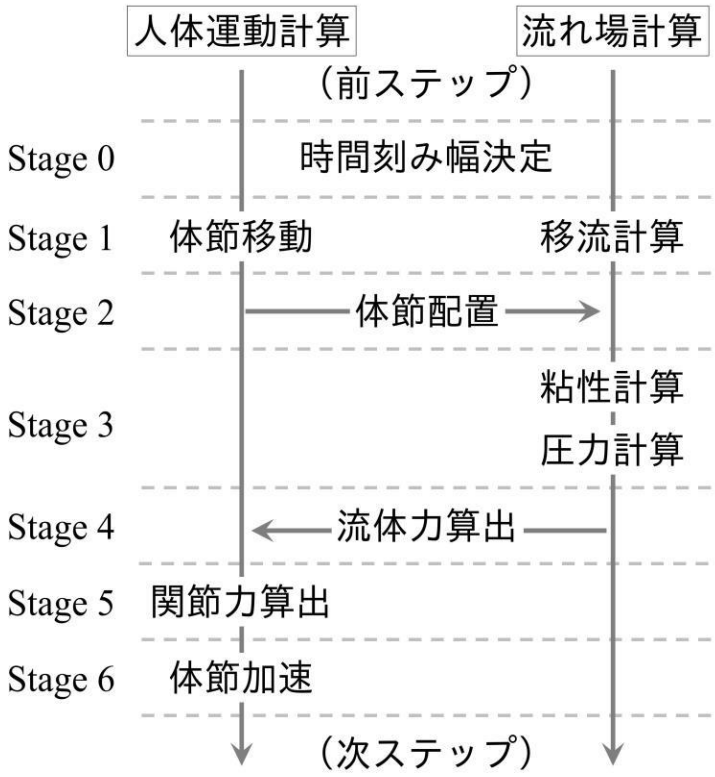

人体運動計算
流れ場計算
（前ステップ）
Stage 0
時間刻み幅決定
Stage 1
体節移動
移流計算
Stage 2
体節配置
Stage 3
粘性計算
圧力計算
Stage 4
流体力算出
Stage 5
関節力算出
Stage 6
体節加速
（次ステップ）

図 4-8　計算手順

第5章　　形状特性が生存性に与える影響の検討

5.1　計算条件

5.1.1　計算領域

空間領域は図に示すように，縦幅 4m，横幅 4m，水深は 3m とした．直交座標系(x,y,z)を用いて，水面の中心に(0,0,0)を定める．また，人体の頭から足の向きに x 軸，その直角方向に y 軸，水面の直角方向に z 軸を定めた．

境界条件については，領域天面を大気圧境界，底面を壁境界とし，側面 4 面はすべて水位境界とした．水位境界条件には，静水および Pierson-Moskowitz 型スペクトルに基づく風速 5m/s と 10m/s の風が吹いている場合の沖合波浪を設定した[1].

初期条件として，水深は 3m の静水とし，人体モデルを仰向けおよびうつ伏せの姿勢で，水面上方 50cm の高さから自由落下させた．計算期間は，落水後の姿勢変化と呼吸確保の可否を十分に評価するため，300 秒間とした．

5.1.2　救命胴衣の設定

3D スキャナー（OPT MX）により，それぞれの救命胴衣の 3D モデルを取得し，5mm 角のボクセルを用いて表現した．また，3.2.2 で述べた浮力になるように各救命胴衣の密度を設定した．特にベスト型に関しては，実製品における前後の浮体の体積を個別に確認した．これにより，胴体の前後の浮力比率が製品仕様と一致するように調整し，実際の製品特性を正確に反映したモデルを作成した．

5.1.3　人体の設定

人体は前章で述べたように成人男性を想定し，身長は 1.68m，体重は 62.7kg である．人体の重心が x=-0.85m，y=0m，z=0.5 になる位置から水面に落下させた．

ベスト型，肩掛け型，腰巻き型の救命胴衣は人体の胴体に密着するように設定した．

5.2　計算結果

5.2.1　浮力の検証

本解析における浮力計算の妥当性を評価するため，静水中においてベスト型救命胴衣を着用した人体モデルが，うつ伏せ姿勢で安定して浮遊している定常状態を対象とした検証を行った．具体的には，アルキメデスの原理に基づき，人体と救命胴衣の合計質量から算出される理論的な水面位置 z_{actual} と，シミュレーション結果における実際の位置を照合した．本解析では，計算格子の解像度を考慮し，理論値と計算値の差が格子幅である 5cm を下回ることを精度の評価基準とした．

理論的な水面位置の算出にあたっては，人体モデルを構成する 5mm 角のボクセルを Z

座標の昇順に整列させ，人体の合計質量 M_{total} が排除する水の体積（$V = M_{total} / \rho_{water}$）と，水面下のボクセル体積の総和が一致する境界の Z 座標を $z_{theoretical}$ と定義した．

一方，シミュレーションにおける実際の位置 z_{actual} は，計算領域内の自由表面の Z 座標の平均値として算出した．この際，人体周囲の局所的な水面の乱れが生じている領域を計算対象から除外することで，定常状態における正確な水位を抽出した．

検証の結果，合計質量 M_{total} に対する理論的な水面位置 $z_{theoretical}$ は 0.0250m であったのに対し，シミュレーション上の実際の位置 z_{actual} は 0.0253m であった．両者の誤差は 0.03cm であり，計算格子幅である 5cm を下回っていることを確認した．

以上の結果から，本モデルは動的な流況下における姿勢変化を解析する上で，十分な計算精度を有していると判断した．

5.2.2　静水中の場合

境界条件として水位変動を与えない静水を想定した場合の計算結果から，救命胴衣各形式の水中での人体姿勢の基本的特徴を検討した．以下，各形式についてそれぞれ述べる．

(a) **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(図 5-2(a))．この時，口部は水面上 3.3cm に位置している．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(図 5-3(a))．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．

(b) **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(図 5-2(b))．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(図 5-3(b))．この時，口部は水面上 7.5cm に位置している．

(c) **腰巻き型：** ベスト型と同じく，落下後に体の向きが変化することはなかった(図 5-2(c)) (図 5-3(c))．初期姿勢が仰向けの状態では，腰回りに装着された浮体が腰部を持ち上げる一方で，浮体のない胴体が沈み込むため，水中で仰向けの姿勢となっても背中が反って頭部が沈む姿勢となる．そのため，仰向け時の口部は水面下 0.6cm に沈む．

5.2.3　波浪中の（風速 5m/s）の場合

風速 5m/s の波浪を想定した水位変化を境界条件に与えた場合の計算結果について述べる．計算領域中央では最大 0.5m 程度の波高の波に人体は晒された．以下，水中での人体運動と姿勢変化の特徴について述べる．

仰向けで落下した場合

(a) **ベスト型**：波浪により体の向きが変化することはなく，仰向けの姿勢をとり続けた．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(図 5-(a))．

(b) **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上に常にあり，口部は頻繁に水面上に出ていた(図 5-(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．

(c) **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(図 5-(c))．

うつ伏せで落下した場合

(a) **ベスト型**：波浪により体の向きが変化することはなく，うつ伏せの姿勢をとり続けた(図 5-(a))．

(b) **肩掛け型**： 落下後，直ちに体が回転し仰向け姿勢となった．その後は，仰向けで落下した際と同様に，安全な姿勢をとり続けた(図 5-(b))．

(c) **腰巻き型**：波浪により体の向きが変化することはなく，うつ伏せの姿勢をとり続けた(図 5-(c))．

5.2.4 波浪中の（風速 10m/s）の場合

風速 10m/s の波浪を想定した水位変化を境界条件に与えた場合の計算結果について述べる．計算領域中央では最大 2m 程度の波高の波に人体は晒された．水中での人体運動と姿勢変化の特徴について述べる．

仰向けで落下した場合

(a) **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 5 分間で 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(図 5-(a))．

(b) **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．強い波浪の中であっても，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(図5-(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．

(c) **腰巻き型：**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，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(図5-(c))．

うつ伏せで落下した場合

(a) **ベスト型：**仰向け落下の際と同様に，水面へ落下後不規則な波に煽られて体を回転させた．仰向けとうつ伏せの姿勢変化が，5分間で5回起こった．仰向け姿勢では頻繁に口部は水面上に浮上した(図5-(a))．

(b) **肩掛け型：** 落下後，直ちに体が回転し仰向け姿勢となった．その後は，仰向け落下の際と同様に，安全な姿勢をとり続けた(図5-(b))．

(c) **腰巻き型：**仰向け落下の際と同様に，水面へ落下後不規則な波に煽られて体を回転させた．仰向けとうつ伏せの姿勢変化が，5分間で6回起こった．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(図5-(c))．

5.3 生存性指標

本研究では，それぞれの計算条件における救命胴衣の安全性を定量的に評価するため，「人体の姿勢」,「呼吸可能性」,「溺水リスク」の3項目で構成されるグラフを作成した（図5-6，図5-7)．

まず「人体の姿勢」については，シミュレーション中の各時刻において，人体が仰向けか，うつ伏せかを判別した．次に「呼吸可能性」については，医学的知見に基づき，口部が水面上に1秒間以上連続して露出した場合を「呼吸可能」，それ以外を「呼吸不可能」と定義した．最後に「溺水リスク」については，息を止めて堪えうる時間は20〜30秒程度とされる[2]ことから，ある時点から遡って直近30秒以内に一度でも呼吸が可能であった時間を「安全時間（青)」，30秒以上継続して呼吸ができていない状態を「危険時間（赤)」と定義した．最終的な生存率P_{surv} [%]は，計算期間 T（300秒）に対する安全時間の割合として，次式により算出した．

$$P_{surv} = 100 \times \left(\int_0^T b(t)dt \right) \tag{5.1}$$

ここでTは計算期間（300秒），$b(t)$ 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．

5.4 結果

最も安全性が高いものは(b)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．

一方で，(a)ベスト型と(c)腰巻き型は，風速5 m/sの波浪下では落下時の姿勢を維持する傾向が見られた．図5-4，図5-5，図5-8および図5-9に示すタイムラプス画像の通り，計算時間の300秒間を通して，仰向けで落下した場合は仰向けのまま，うつ伏せの場合はうつ伏せのまま推移している．

特に仰向けで落下した際の(a)ベスト型に着目すると，図5-4の t=10, 30, 90, 240, 270 sの各時点で見られるように，波に揺られながらも浮体が胴体を支えることで口部が水面上に露出している．この傾向は定量的なグラフである図5-16(a)とも一致しており，頻繁な呼吸確保により，常に「安全時間（青帯）」が維持されていることが確認できる．

対照的に，(c)腰巻き型は静水中と同様のリスクが確認された．図5-8のように頭部が水上に出ている時間は短く，特に t=150 s の時点を見ると，腰部の浮力により身体がのけぞる（背屈する）姿勢となり，頭部が深く水中に沈み込んでいる．図5-16(c)のリボングラフにおいても，姿勢バーは「仰向け」を示しているにもかかわらず，呼吸バーは空白が続き，結果として大部分が「危険時間（赤帯）」で占められている．したがって，腰巻き型は低い生存率を示した．

風速10 m/sの波浪下では，(a)ベスト型と(c)腰巻き型は不規則な波の影響で頻繁に体が回転した．例えば(a)ベスト型（図5-10）を見ると，t=10 s では仰向けであったが，t=30 s ではうつ伏せに変化している．同様に(c)腰巻き型についても，t=240 s では仰向けであったが，t=300 s ではうつ伏せに転じている．これは，図5-18に示すように，強い波浪に揉まれることで身体に回転モーメントが働き，姿勢が反転するためである．うつ伏せ姿勢の間は呼吸が不可能となるため，生存率は低下する．

ああさらに，姿勢が仰向けに戻った局面においても，(c)腰巻き型は前述の「のけぞり」が生じるため，図5-17(a)と(c)を比較すると，ベスト型に比べて呼吸頻度が低く，生存率も低水準に留まる結果となった．先述のように，(c)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10 m/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．

5.5 考察

本研究の計算結果から，救命胴衣の形状特性が生存性に与える影響について考察する．まず，全条件下で最も高い生存率を示した肩掛け型については，首周りから胴体前方にか

けて浮体が集中する形状特性が，安全性の確保に寄与していると考えられる．この浮体配置は，静水中および波浪中において人体の重心に対して強力な復元モーメントを発生させ，初期姿勢に関わらず頭部を水面上へ持ち上げるため，安定して呼吸可能な姿勢を維持できることが分かった．

一方で，ベスト型および腰巻き型については，風速 10m/s のような強い波浪下において，仰向けからうつ伏せへと体が回転する挙動が確認された．

さらに，腰巻き型をベスト型と比較すると，仰向けの状態であっても生存率が低いという結果を示した．ベスト型は仰向け姿勢を維持できれば一定の呼吸時間を確保できるのに対し，腰巻き型は腰部に浮力が集中することで身体が「のけぞる」ような姿勢となり，頭部が水面下に沈み込む傾向がある．このため，たとえ仰向けの状態であっても口部が水面上に露出する頻度が少なく，継続的な呼吸が困難となる．以上のことから，検討した 3 形状の中では肩掛け型の安全性が最も高く，逆に波浪による回転リスクと，仰向け時ののけぞり姿勢による頭部沈下のリスクを持つ腰巻き型が，生存性の観点から最も危険であると判断される．

参考文献

[1] 山本吉道：技術者のための海岸工学，理工図書，p11-12，2023.
[2] 高取健彦，長尾正崇(2019)：法医学 第 6 版，医歯薬出版，p154-155，2019.

表 5-1 仰向け姿勢時の呼吸可能な時間の割合

		(a)ベスト型	(b)肩掛け型	(c)腰巻き型
風速 5m/s	うつ伏せで落下	-	29%	-
	仰向けで落下	4.6%	18%	0.6%
風速 10m/s	うつ伏せで落下	11%	30%	2.0%
	仰向けで落下	12%	29%	5.4%

表 5-2 救命胴衣の型ごとの生存率P_{surv}

		(a)ベスト型	(b)肩掛け型	(c)腰巻き型
風速 5m/s	うつ伏せで落下	0%	99%	0%
	仰向けで落下	100%	100%	21%
風速 10m/s	うつ伏せで落下	80%	99%	68%
	仰向けで落下	93%	100%	87%

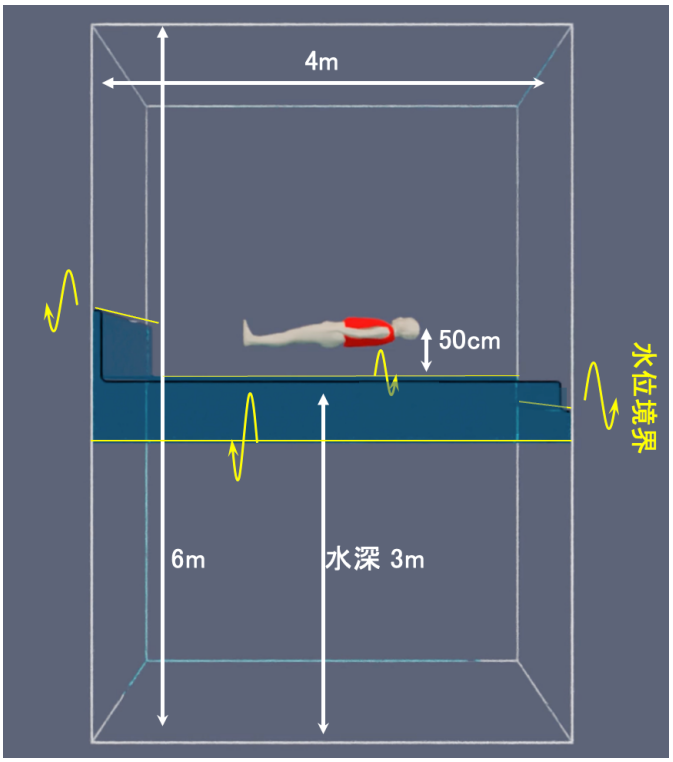


図 5-1　空間領域の側面図

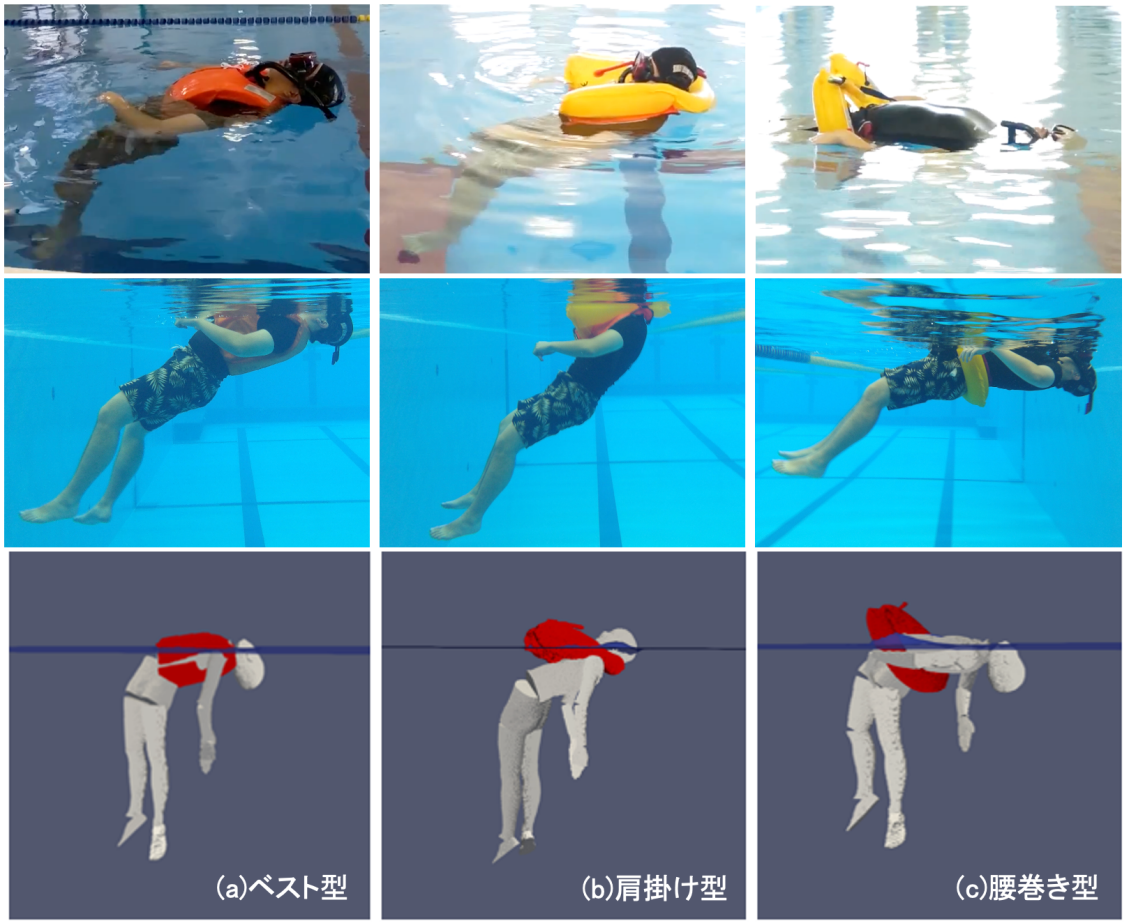


図 5-2　静水に仰向けで落下した際の計算結果（上段，中段は実験での姿勢）

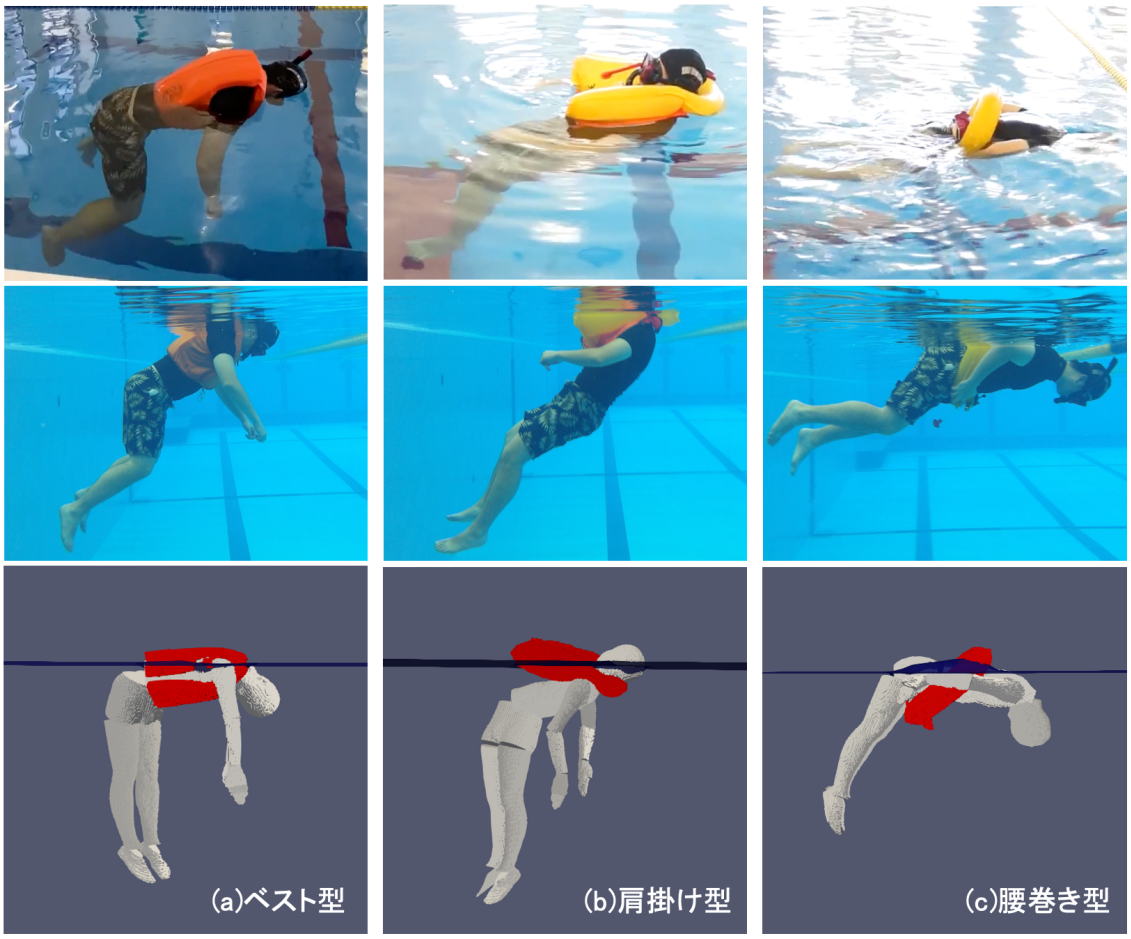


図 5-3　静水にうつ伏せで落下した際の計算結果（上段，中段は実験での姿勢）

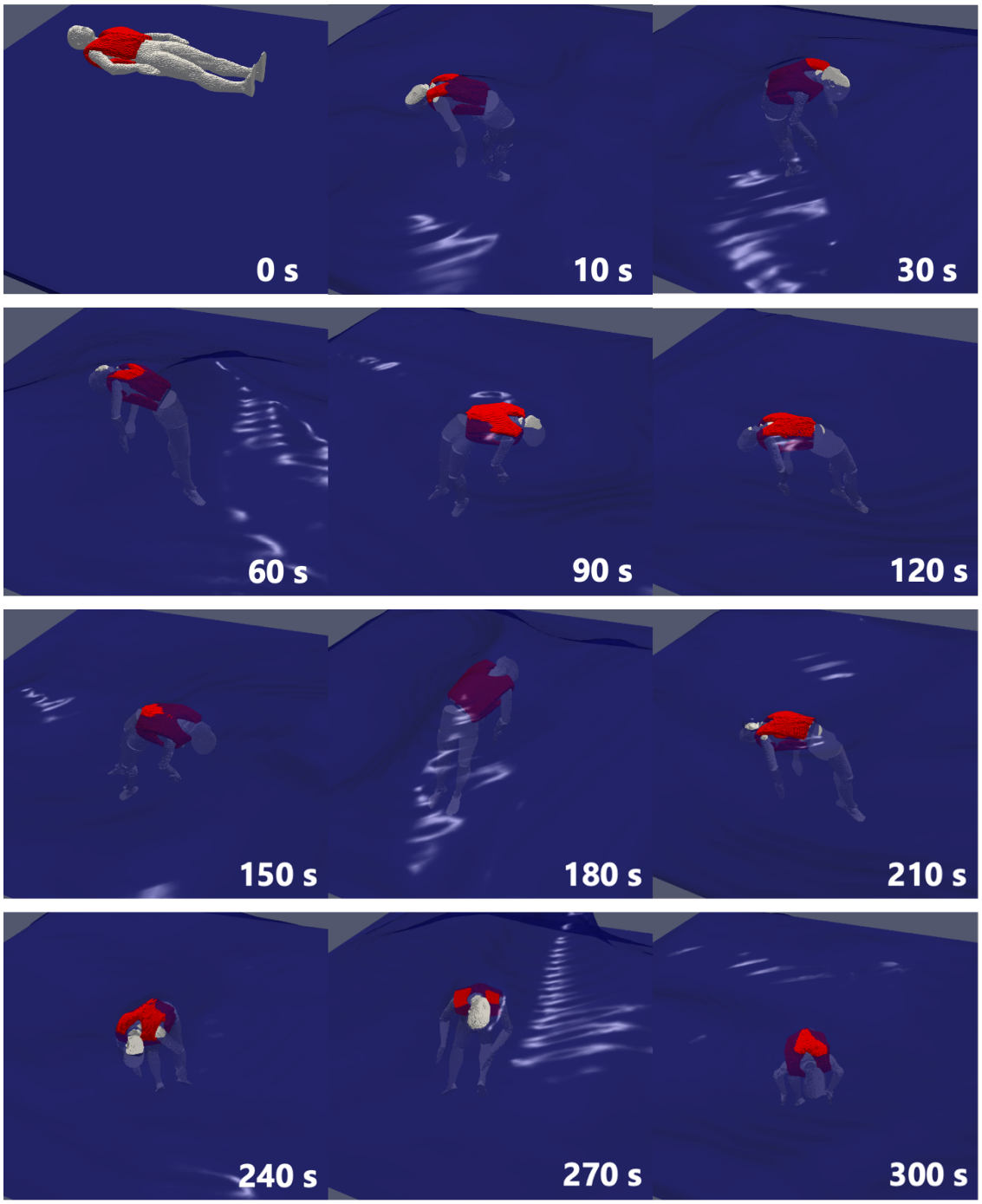


図 5-4　風速 5m/s の波浪中における人体の姿勢変化
（ベスト型，仰向け落下，赤色：救命胴衣，白色：人体）

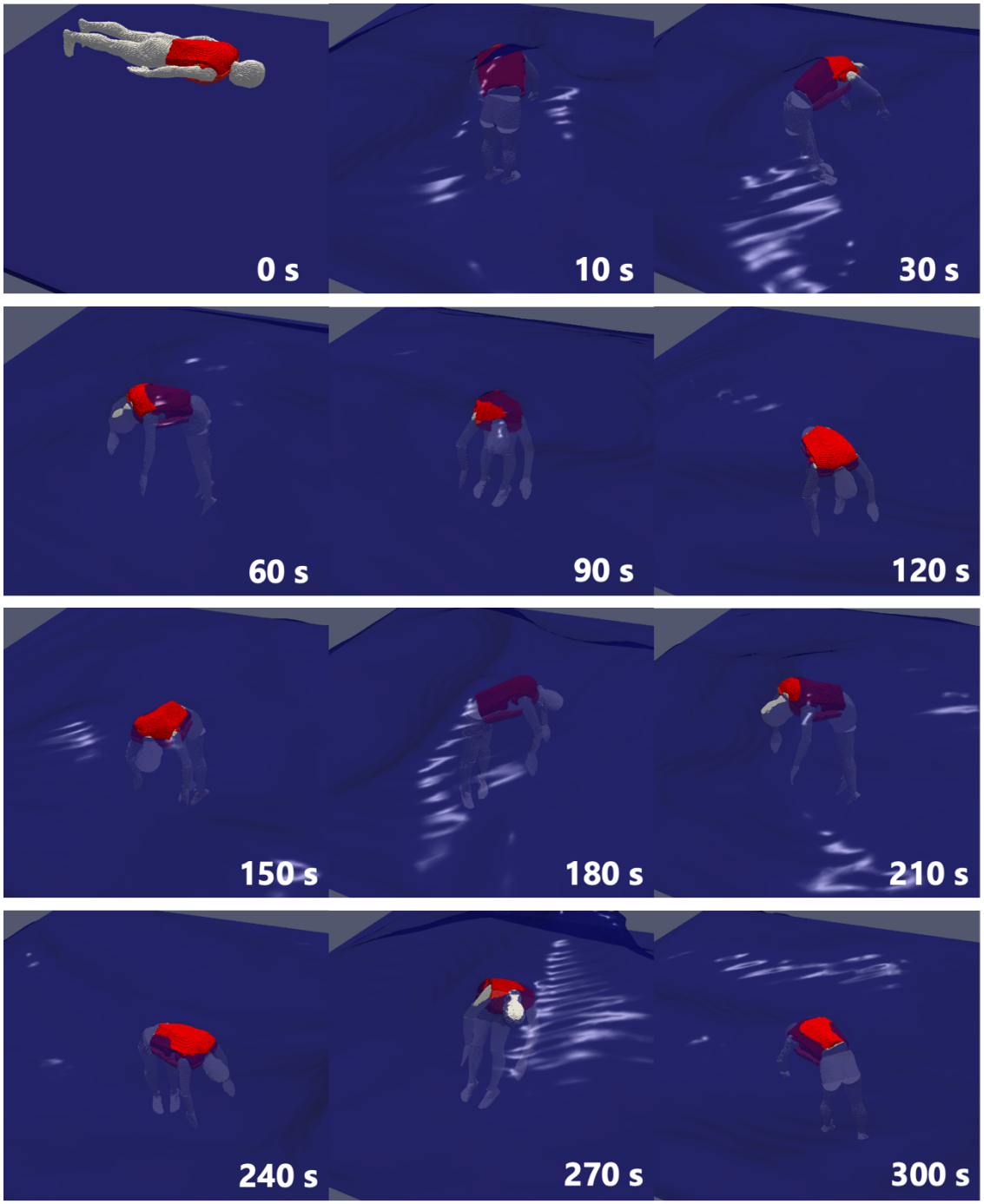


図 5-5　風速 5m/s の波浪中における人体の姿勢変化
（ベスト型，うつ伏せ落下，赤色：救命胴衣，白色：人体）

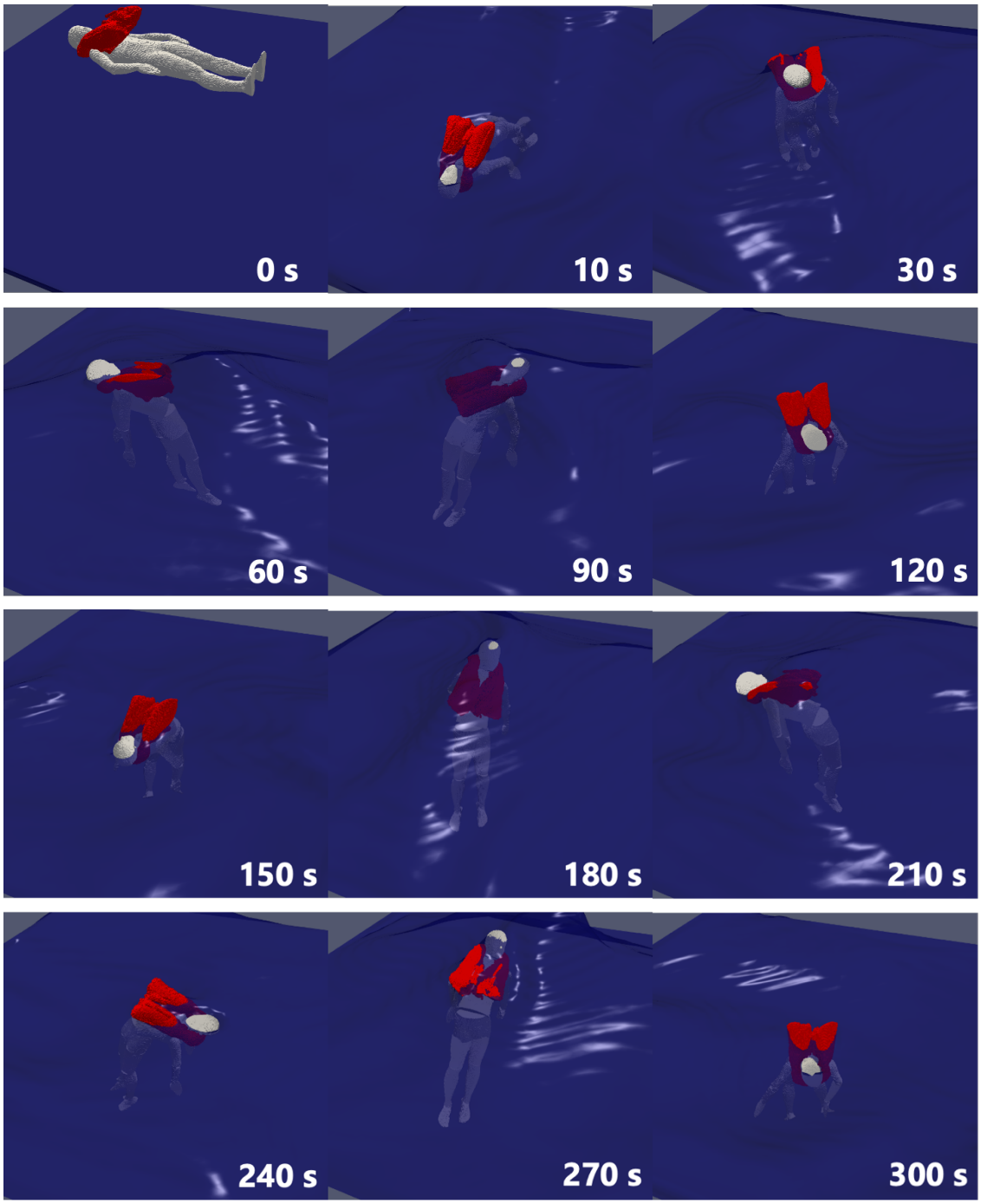


図 5-6　風速 5m/s の波浪中における人体の姿勢変化
（肩掛け型，仰向け落下，赤色：救命胴衣，白色：人体）

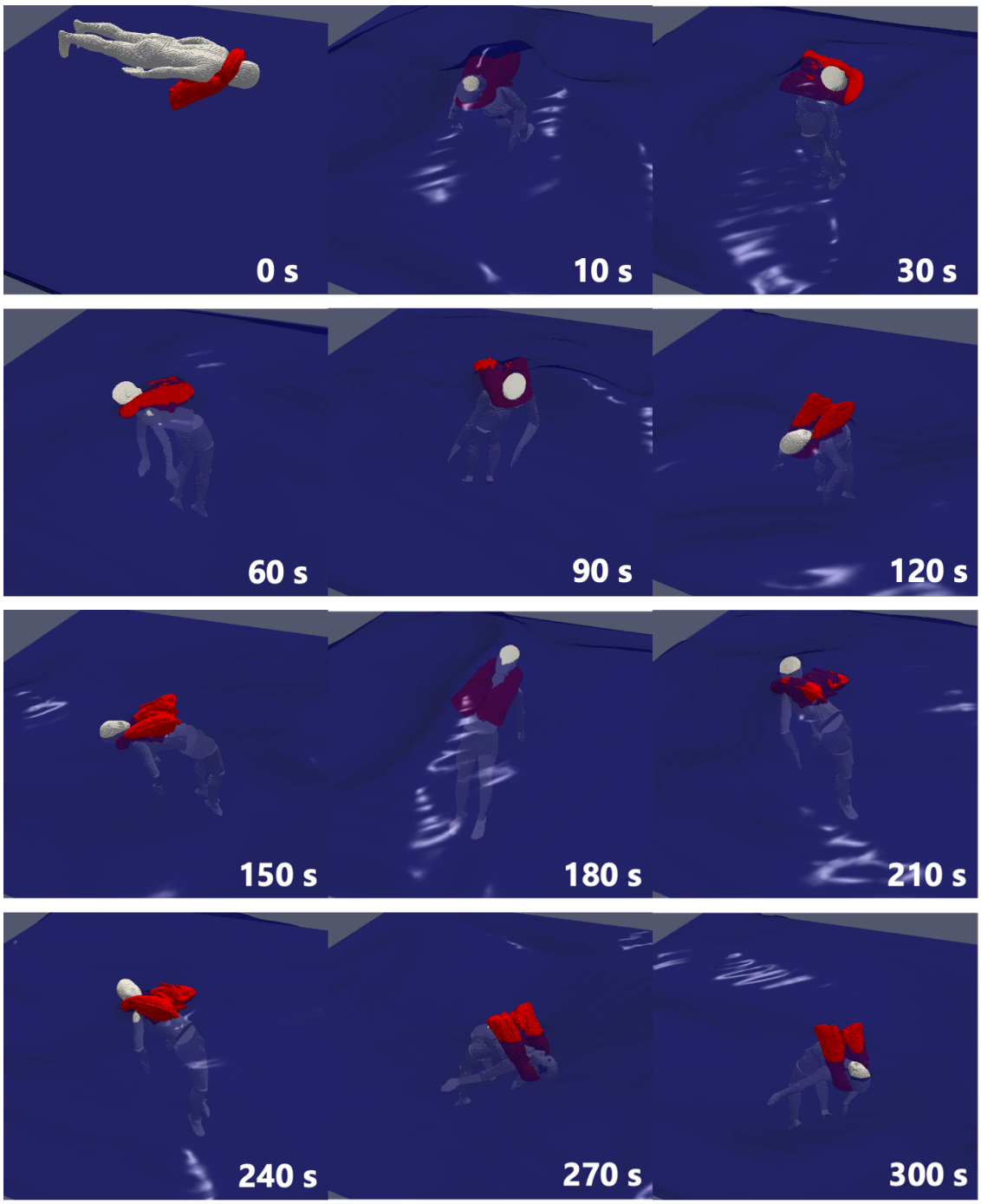


図 5-7　風速 5m/s の波浪中における人体の姿勢変化
（肩掛け型，うつ伏せ落下，赤色：救命胴衣，白色：人体）

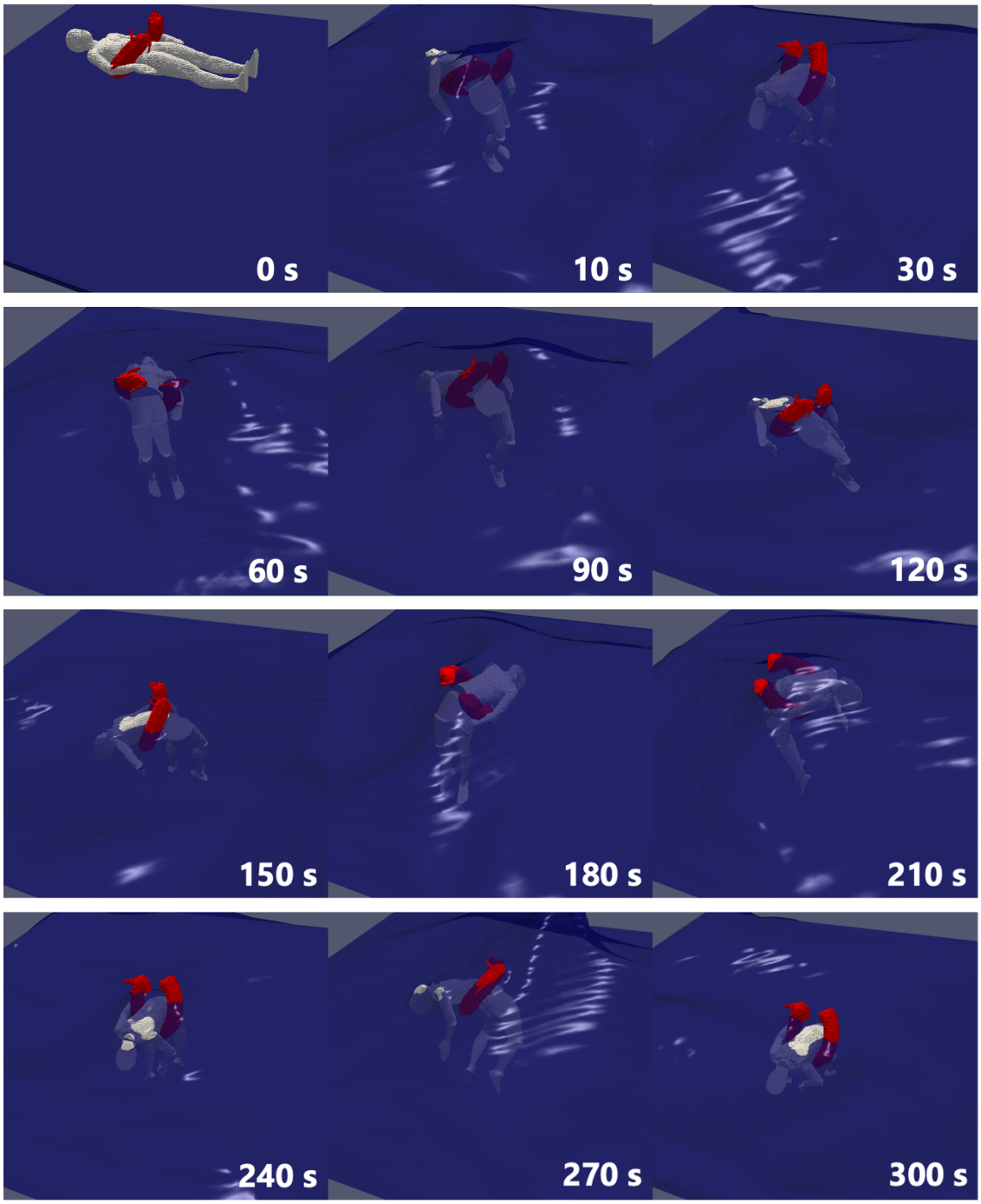


図 5-8　風速 5m/s の波浪中における人体の姿勢変化
（腰巻き型，仰向け落下，赤色：救命胴衣，白色：人体）

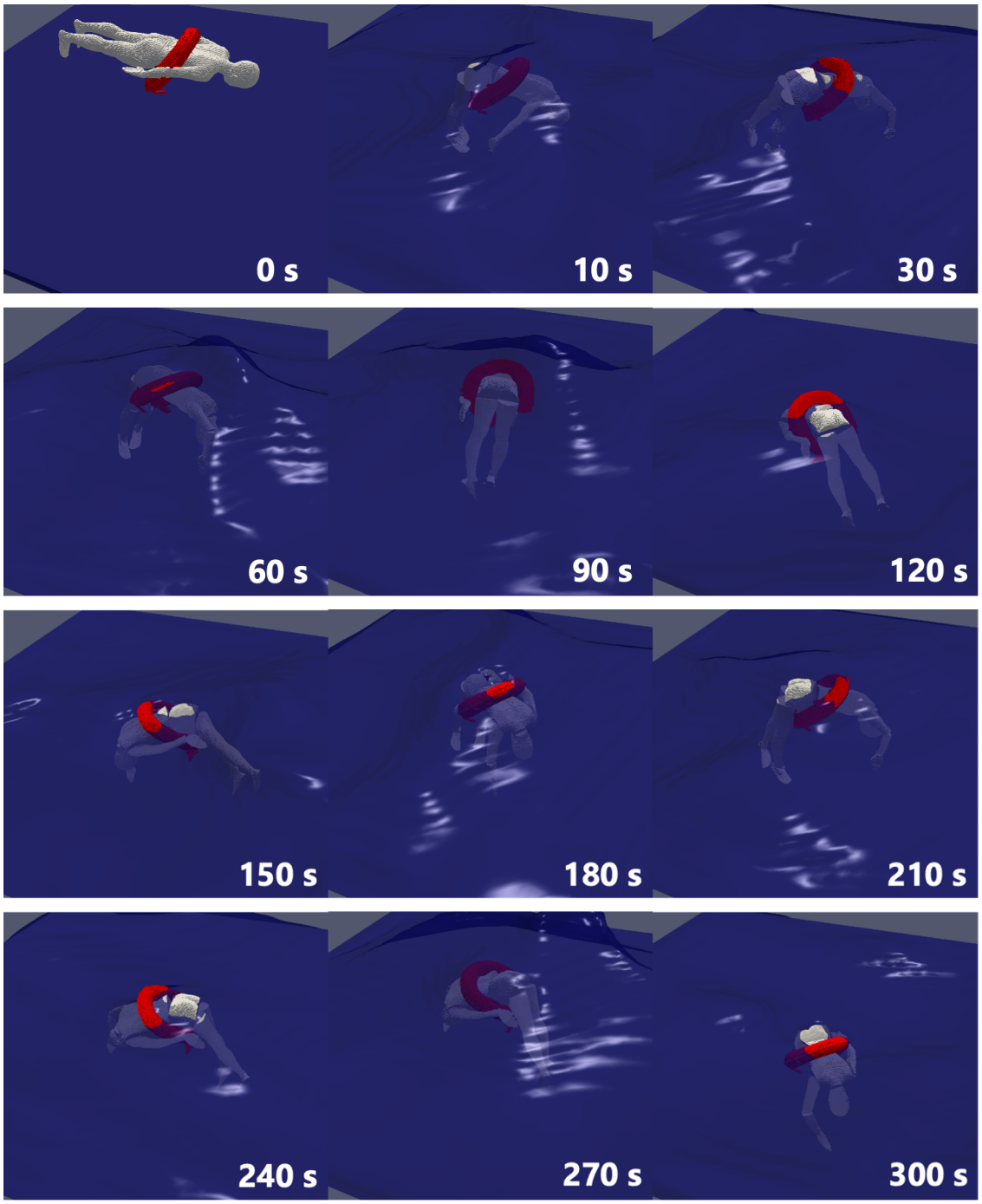


図 5-9　風速 5m/s の波浪中における人体の姿勢変化
（腰巻き型，うつ伏せ落下，赤色：救命胴衣，白色：人体）

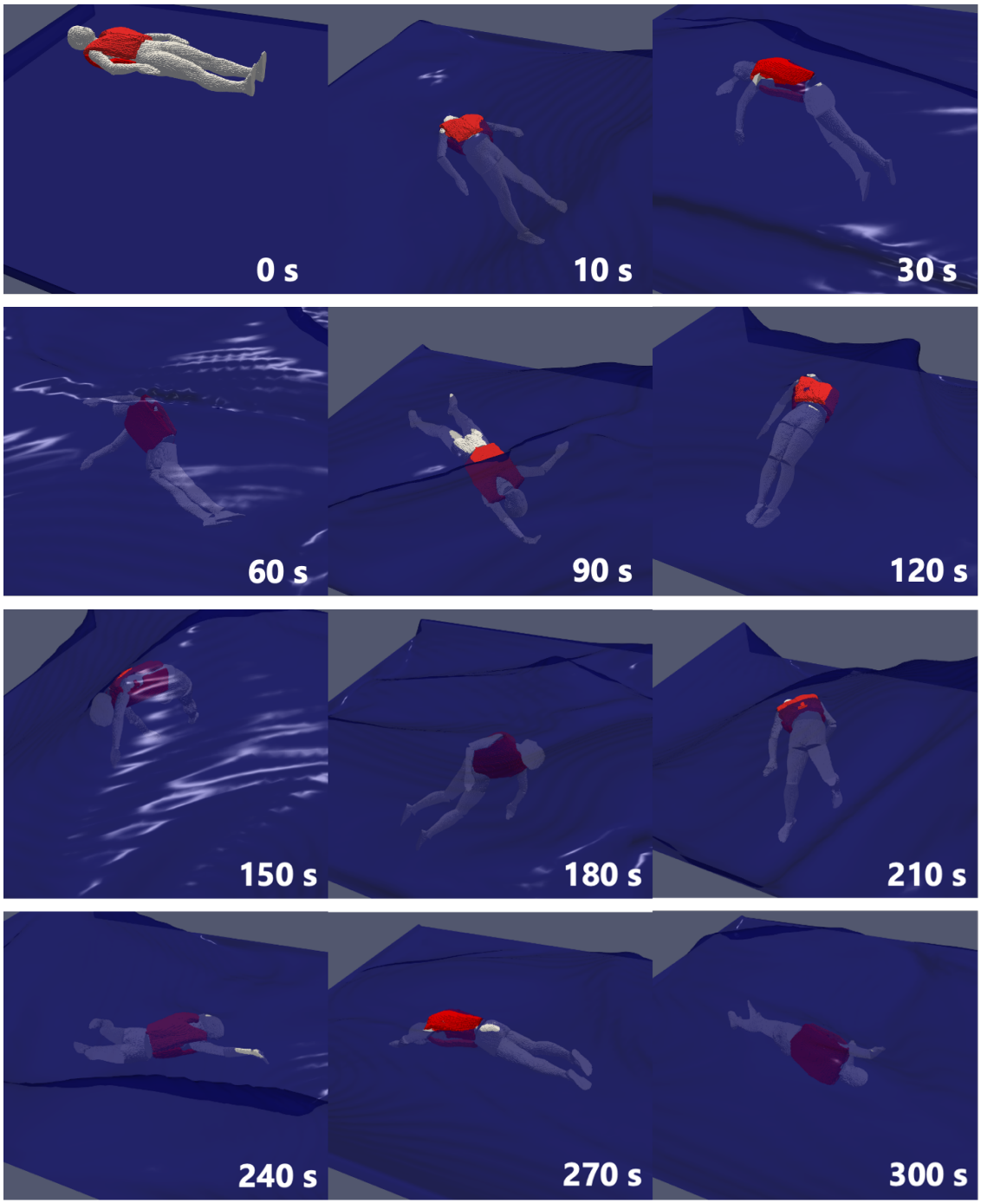


図 5-10　風速 10m/s の波浪中における人体の姿勢変化
（ベスト型，仰向け落下，赤色：救命胴衣，白色：人体）

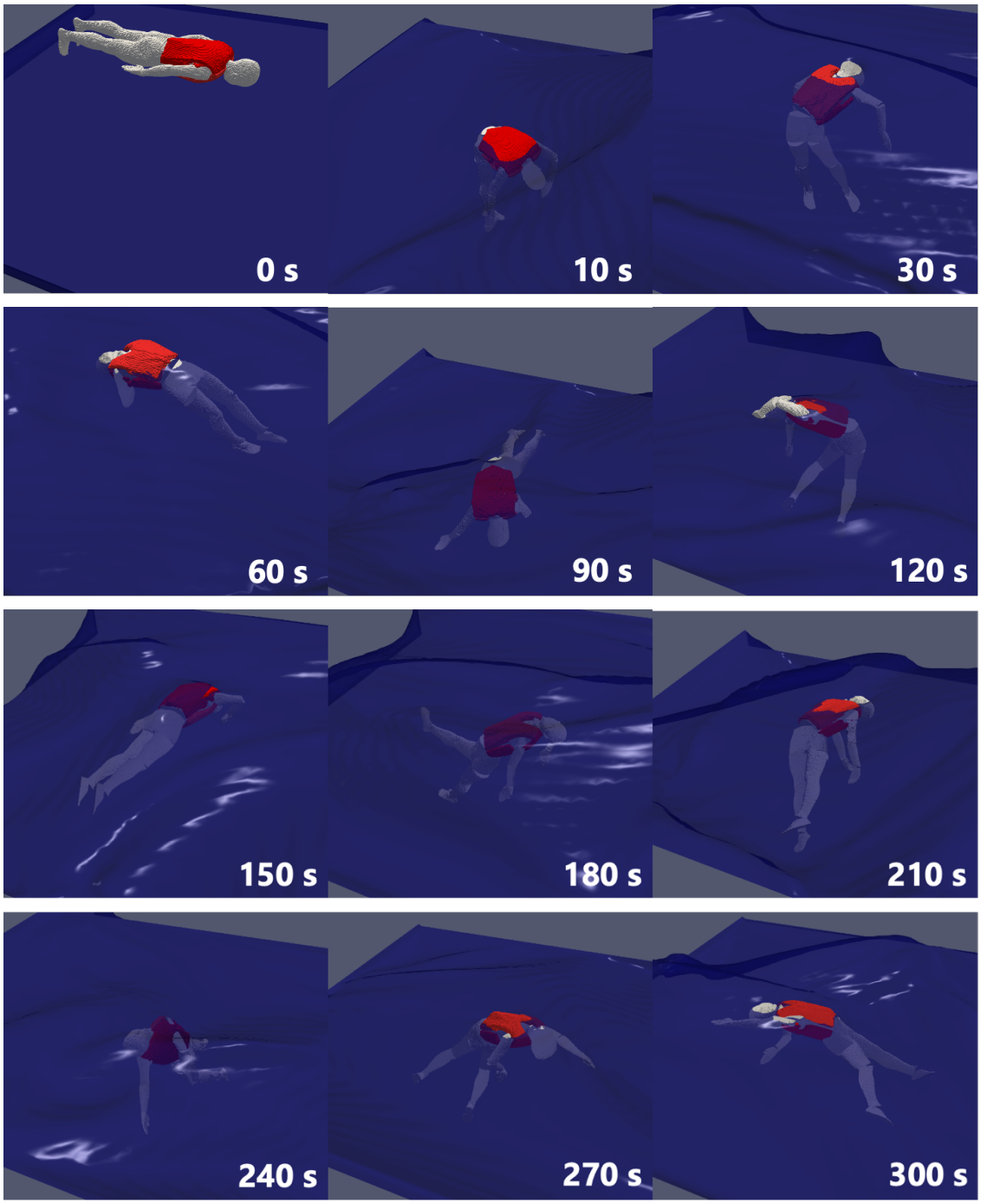


図 5-11　風速 10m/s の波浪中における人体の姿勢変化
（ベスト型，うつ伏せ落下，赤色：救命胴衣，白色：人体）

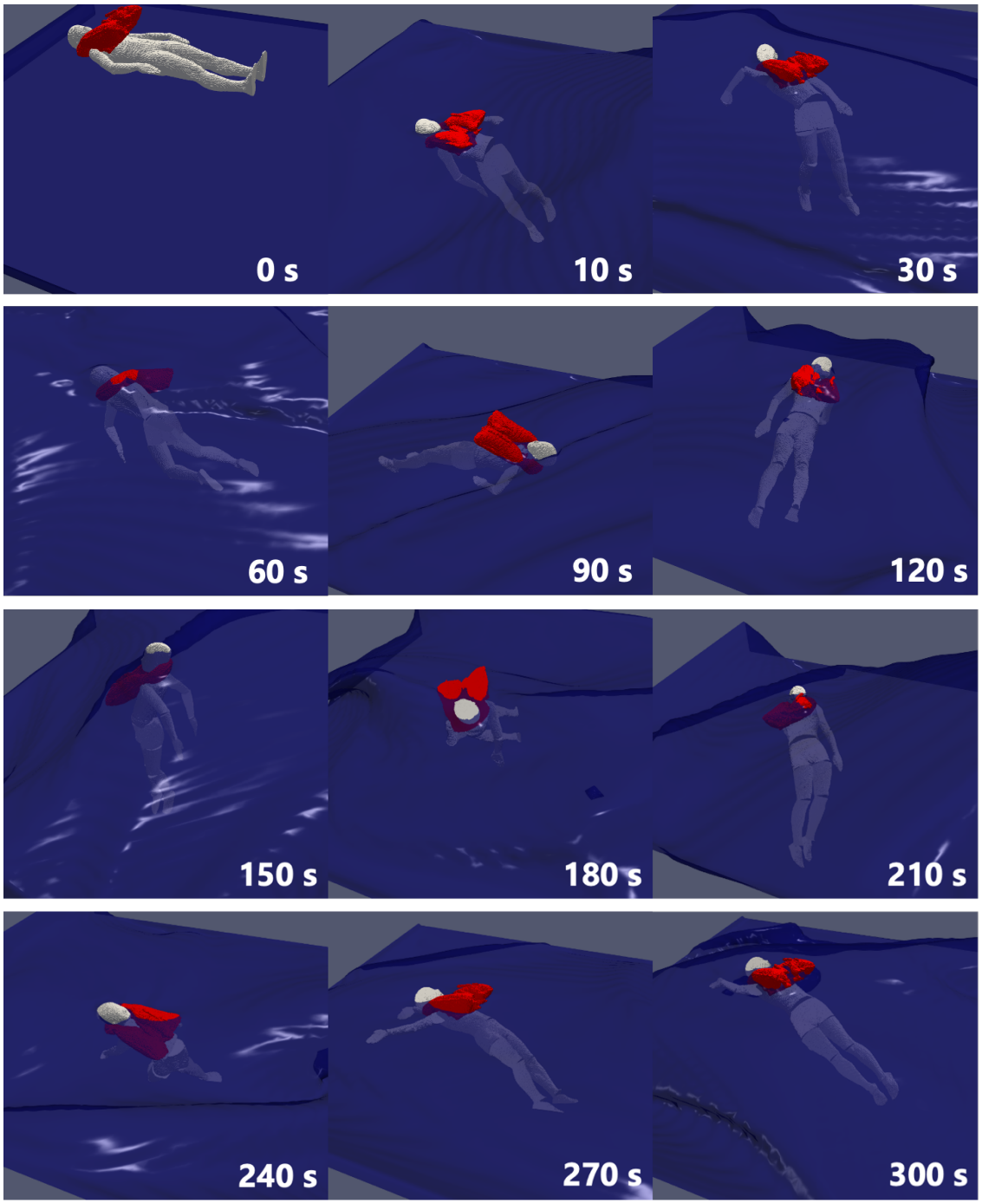


図 5-12　風速 10m/s の波浪中における人体の姿勢変化
（肩掛け型，仰向け落下，赤色：救命胴衣，白色：人体）

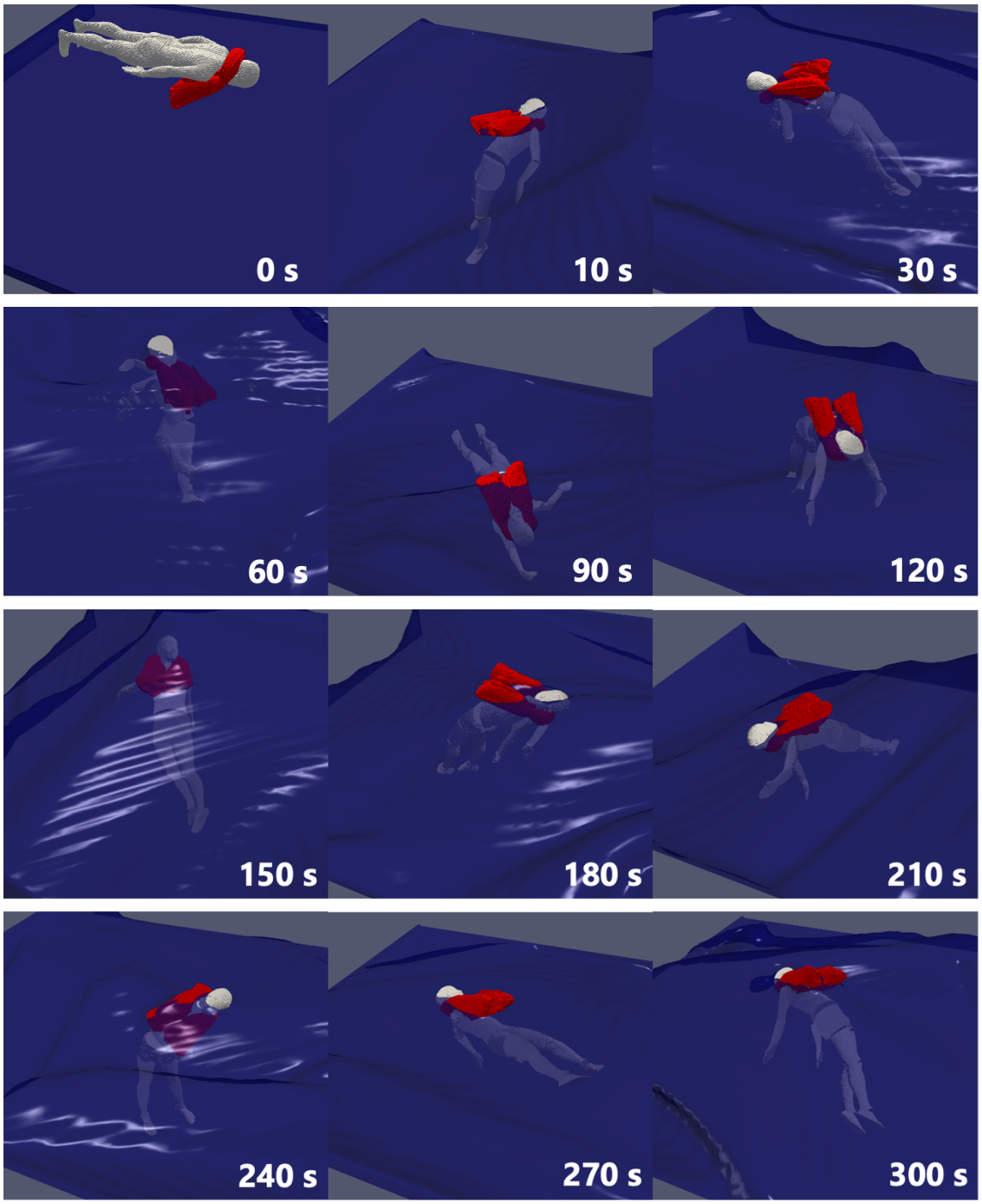


図 5-13　風速 10m/s の波浪中における人体の姿勢変化
（肩掛け型，うつ伏せ落下，赤色：救命胴衣，白色：人体）

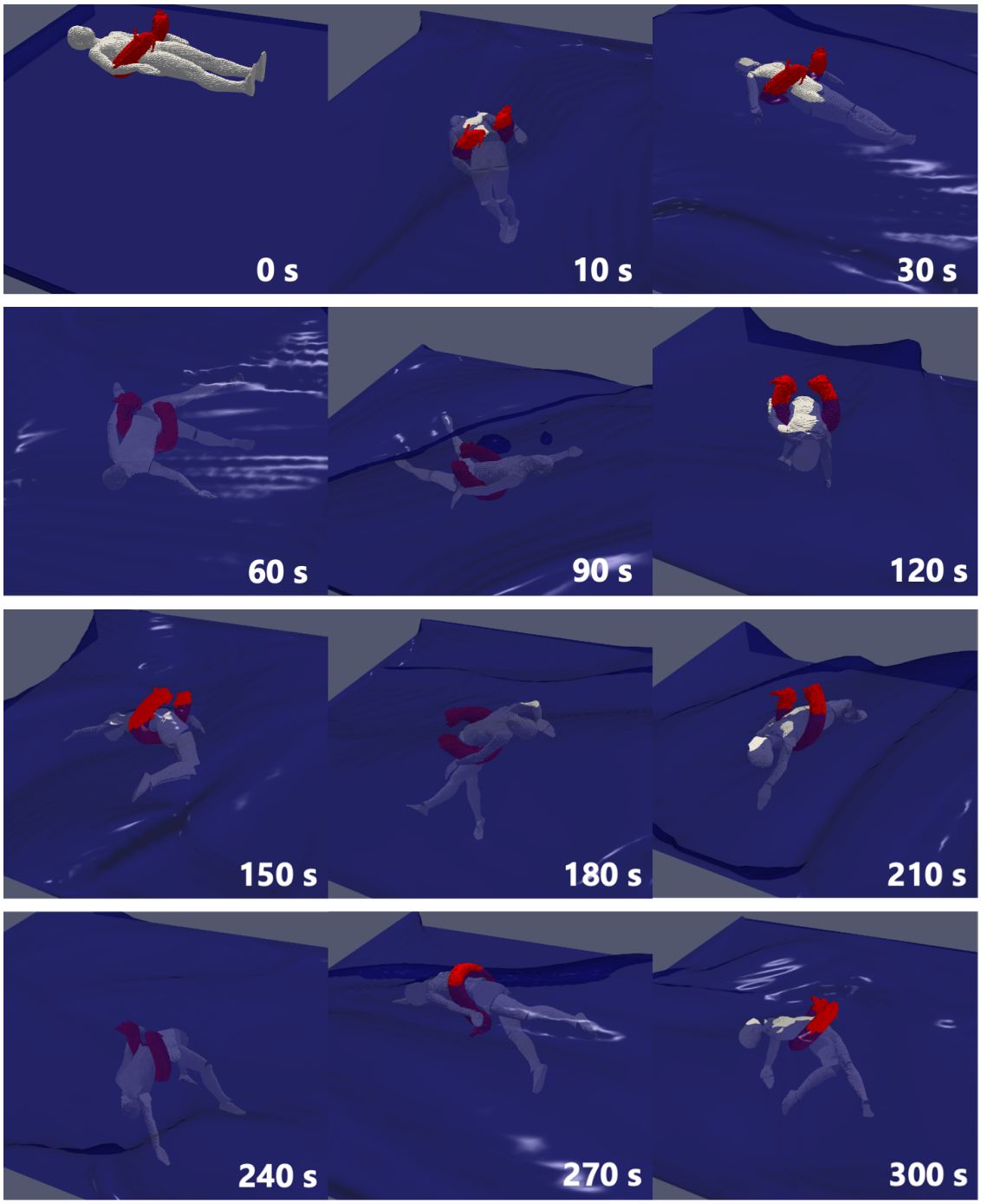


図 5-14　風速 10m/s の波浪中における人体の姿勢変化
（腰巻き型，仰向け落下，赤色：救命胴衣，白色：人体）

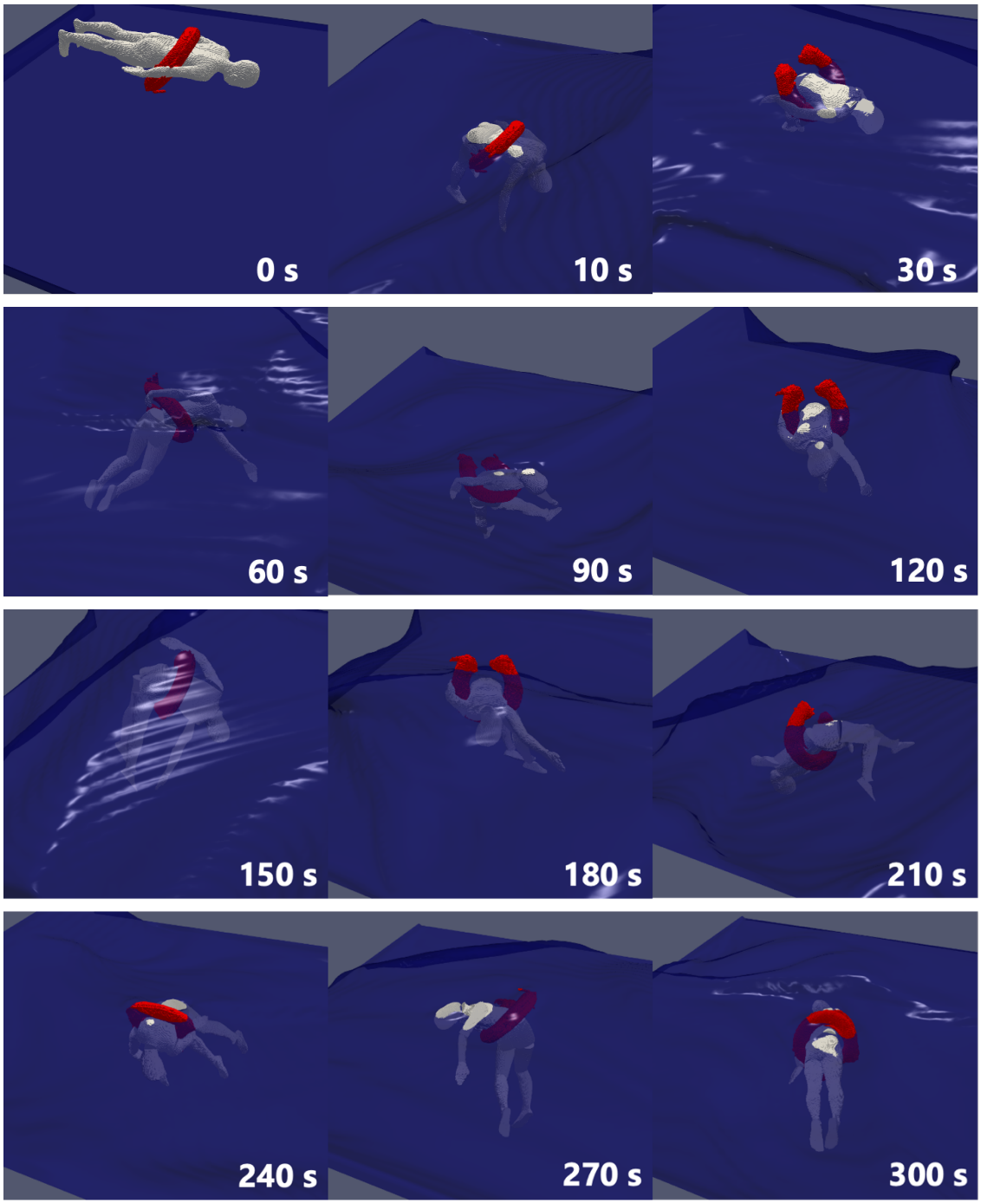
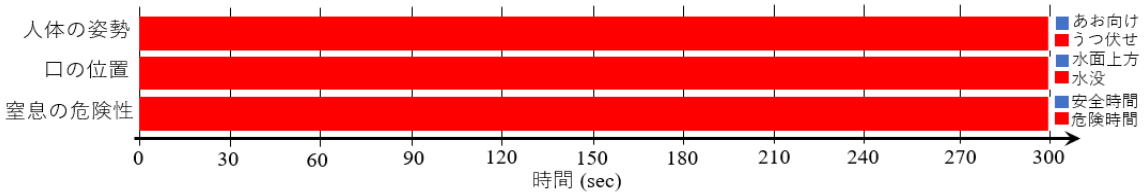


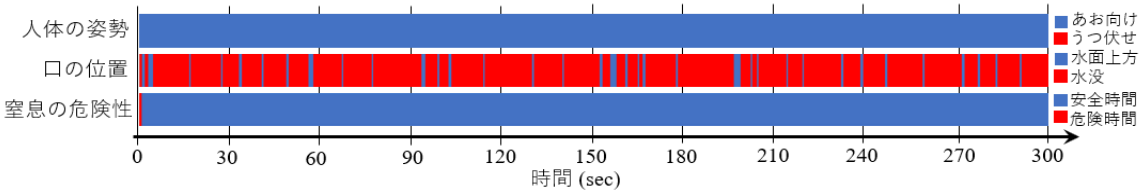
図 5-15　風速 10m/s の波浪中における人体の姿勢変化
（腰巻き型，うつ伏せ落下，赤色：救命胴衣，白色：人体）

(a)ベスト型　風速5m/s

うつ伏せで落下

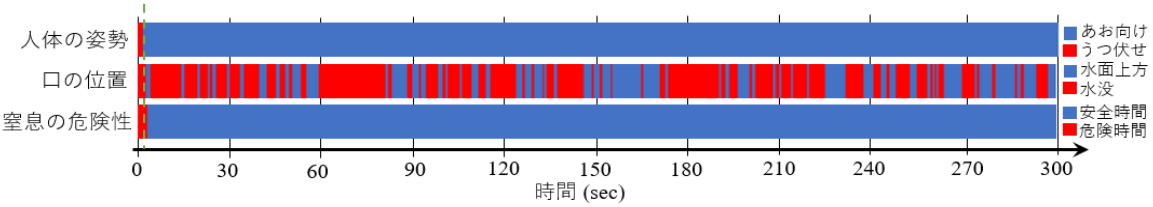


あお向けで落下

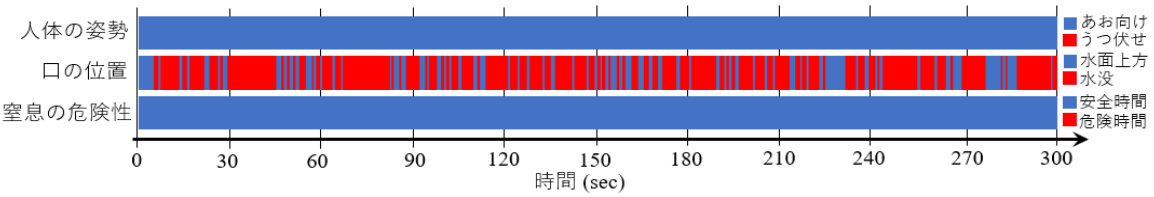


(b)肩掛け型　風速5m/s

うつ伏せで落下

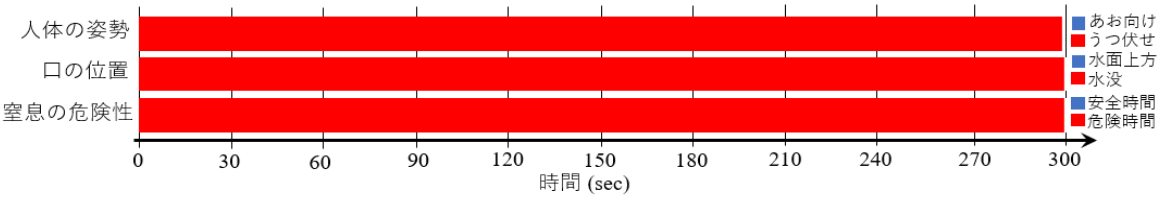


あお向けで落下



(c)腰巻き型　風速5m/s

うつ伏せで落下



あお向けで落下

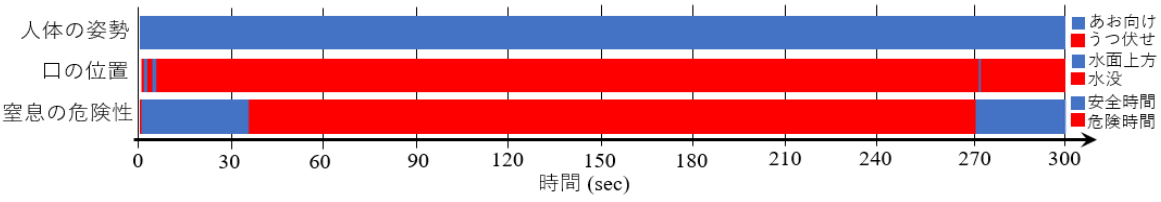
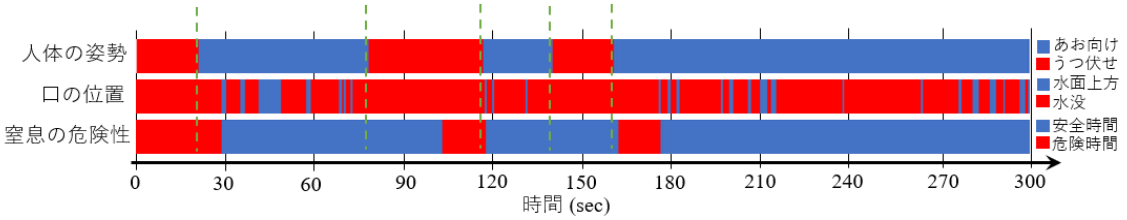


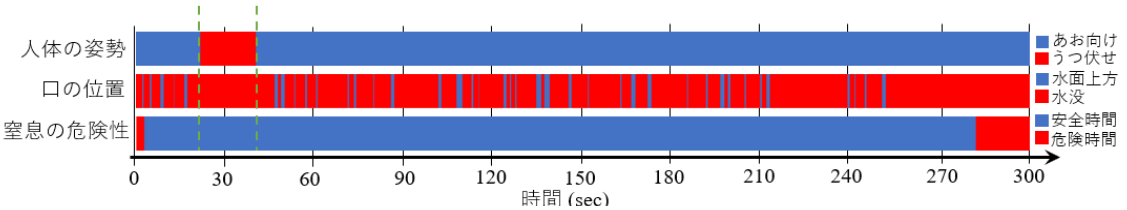
図 5-16　風速 5m/s の波浪中における人体の姿勢，口の位置，窒息の危険性

(a)ベスト型　風速10m/s

うつ伏せで落下

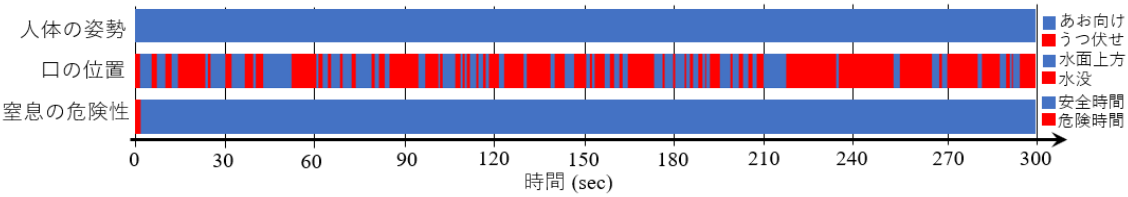


あお向けで落下

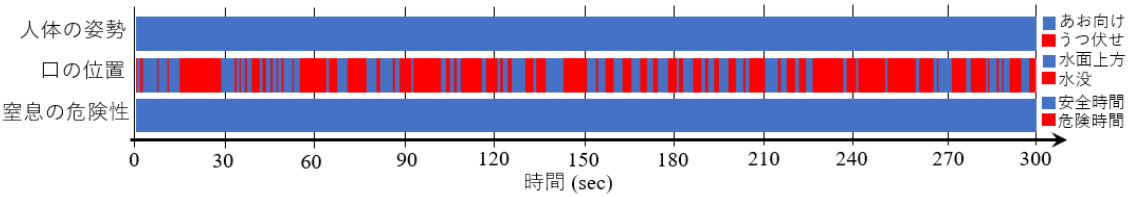


(b)肩掛け型　風速10m/s

うつ伏せで落下

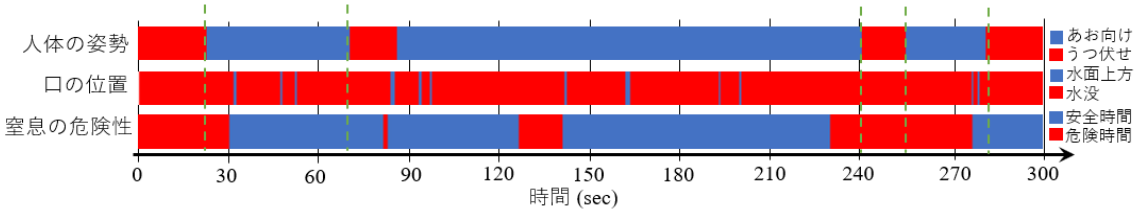


あお向けで落下



(c)腰巻き型　風速10m/s

うつ伏せで落下



あお向けで落下

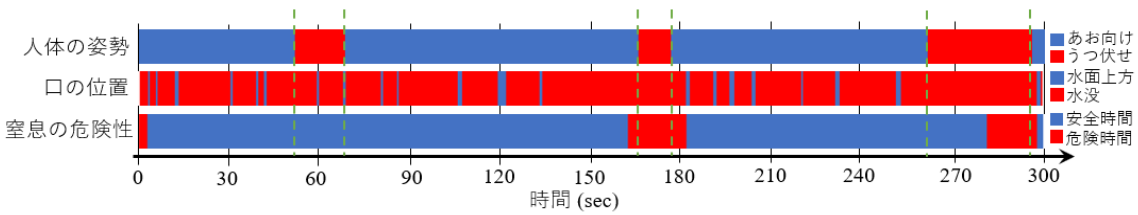


図 5-17　風速 10m/s の波浪中における人体の姿勢，口の位置，窒息の危険性

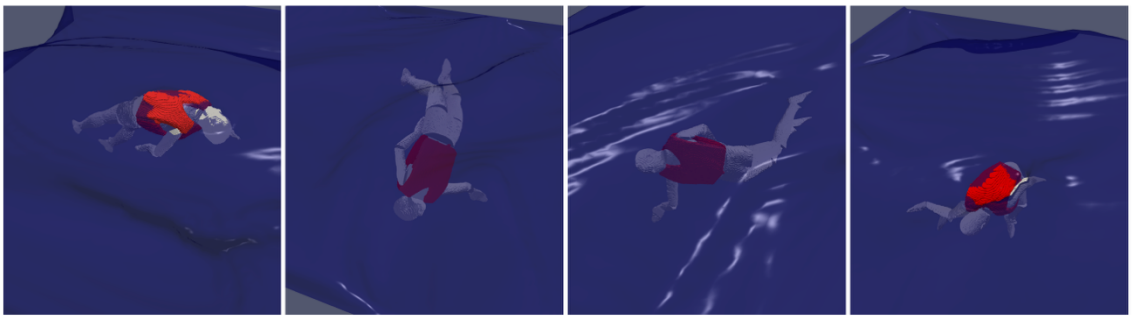


図 5-18　風速 10m/s の波浪による仰向けからうつ伏せへの姿勢変化
（初期姿勢：うつ伏せ，t = 76～79s）

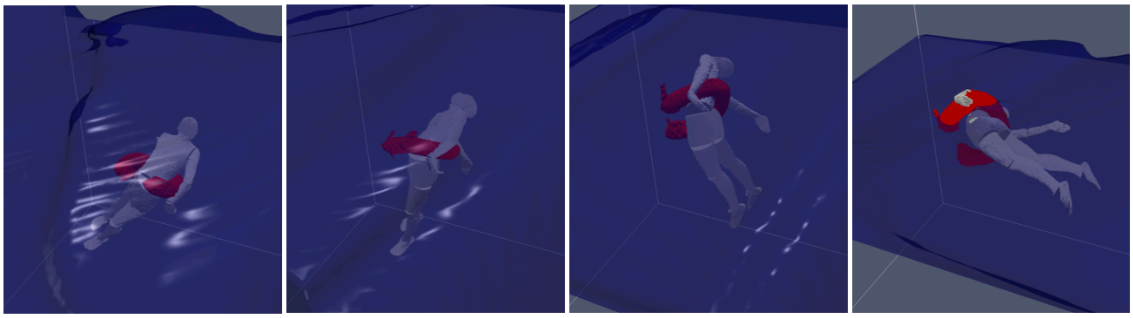


図 5-19　風速 10m/s の波浪による仰向けからうつ伏せへの姿勢変化
（初期姿勢：うつ伏せ，t = 135～138s）

第6章　結論

6.1　本研究の結論

本研究では，E コマースサイトにおける市場調査を通じ，現在の救命胴衣市場において「ベスト型」「肩掛け型」「腰巻き型」の 3 形状が主要な選択肢となっている実態を明らかにした．調査の結果，販売側は浮力の数値的スペックを安全性の根拠として強調する傾向にあり，一方で消費者は陸上での快適性や機動性を優先の選定基準とする傾向があることが確認された．しかし，これら形状の違いが落水時の水中姿勢や呼吸確保に及ぼす動的な影響については，販売・購入の双方において十分な認識がなされていないのが現状である．以上の背景を踏まえ，本研究ではこれら 3 形状を対象としたプール実験および人体-流動連成数値解析を実施し，水難事故時における生存性を定量的に評価した．一連の検討により得られた結論を以下に述べる．

第一に，検討した 3 形状の中で，肩掛け型が最も高い安全性を有することが示された．肩掛け型は，首周りから胸部前方にかけて浮体が配置されているため，静水中および波浪下のいずれにおいても人体を仰向けに維持する復元力が働く．この形状特性により，落水時の初期姿勢に関わらず速やかに呼吸が可能な姿勢へと復正し，高い生存率を維持することが確認された．

第二に，ベスト型および腰巻き型は，波浪条件下において肩掛け型よりも生存率が低下する傾向が確認された．これらの形状は，波の周期的な外力を受ける環境下において，人体が仰向けからうつ伏せへと回転する挙動を抑制できず，顔面が水没する時間を増加させる要因となった．この結果から，波浪の影響を受ける実環境においては，肩掛け型と比較してこれら 2 形状の性能は限定的であると判断される．

第三に，腰巻き型は本研究の条件下において最も危険性が高いことが判明した．腰巻き型は，たとえ仰向け姿勢を保持している場合であっても，腰部に浮力が集中するために人体が「のけぞる」ような姿勢を誘発する．この姿勢特性により，口部が水面下に沈み込む頻度が高まり，継続的な呼吸の確保が困難となる．したがって，波浪による回転のリスクと，仰向け時の姿勢に起因する水没のリスクを併せ持つ腰巻き型は，生存性の観点から最も慎重な運用が求められる形状であると結論付けられる．

6.2　今後の課題

本研究では，数値シミュレーションを用いて救命胴衣の形状が生存性に及ぼす影響を明らかにしたが，実環境におけるさらなる安全性の追求に向けては，以下の課題が残されている．

第一に，救命胴衣の固定条件と動的な位置変化の考慮が挙げられる．本研究のシミュレーションでは救命胴衣が人体に対して完全に固定されているものと仮定して解析を行った

が，プールにおける実機実験においては，浮力の影響によって救命胴衣が人体の上方へずり上がる挙動が観察された．特にベスト型や肩掛け型において，浮力体が首元へ押し上げられる現象をモデルに組み込み，人体と救命胴衣の相対的な位置関係の変化を再現することで，より高い再現度での性能評価が可能になるものと考えられる．今後はベルトの緩みや装着状態による「ずれ」を考慮した解析を行うことで，実環境に即したより詳細な挙動の把握が期待される．

次に，人体モデルにおける能動的な呼吸確保動作の導入も検討の余地がある．本研究では，意識不明時等の最も危険な状態を想定し，人体を「完全脱力状態」として解析を行ったが，実際の水難事故においては，落水者が生存のために意識的に頭部を持ち上げたり，もがいたりする能動的な動作を伴うことが多い．このような能動的な運動が波浪下での姿勢安定性に及ぼす影響を解析系に加えることで，より実態に近い条件下での安全性評価につながるだろう．人体の関節駆動を考慮した能動的モデルへと拡張することは，生存メカニズムのさらなる理解に寄与すると考えられる．

さらに，本研究では標準的な成人男性モデルを対象としたが，実際の落水者の体格や着衣条件は多岐にわたる．子供や高齢者といった体格の差異，あるいは冬期の厚着による影響などをパラメータに加えることで，より広範なユーザーに対する安全指針を提示できるだろう．また，砕波が卓越する沿岸域や河川の複雑な流況下へと検証の範囲を広げることで，救命胴衣の形状特性が生存性に及ぼす影響をより多角的に解明できると期待される．

謝辞

本研究を進めるにあたり，指導教員の中村恭志准教授には，学部配属から修士修了までの 4 年間にわたり，温かくご指導いただきました．1 年間の交換留学に際しては，快く後押ししてくださり，留学中も変わらぬサポートをいただきました．おかげで視野を広げるかけがえのない経験ができました．また，学会発表においては，資料作成から発表技術に至るまで手厚くご指導いただきました．これらの貴重な経験は，私にとって大きな財産になるだろうと感じています．研究活動のみならず，私的な面でも親身になって相談に乗っていただき，心より感謝申し上げます．

中村恭志研究室および木内毅研究室の皆様には，合同ゼミにおいて多角的な視点から多くのご意見を頂きました．皆様との議論のおかげで研究を深めることができました．両研究室の先生方，および共に切磋琢磨した学生の皆様に感謝いたします．

最後に，長い学生生活を一番近くで支え，応援し続けてくれた家族に，深く感謝します．