

波浪場における遊泳中の人体の挙動に関する研究

水圏防災工学研究室 渋谷 航平

指導教員 犬飼 直之

1. はじめに

日本は、四方を海に囲まれていることや海水浴場が多いことから、海における水難事故が毎年多く発生している。警察庁の報告¹⁾より、昨年の令和3年度では、水難事故発生件数が1395件、水難者が1625人、死者・行方不明者が744人であった。海での水難事故が多いため、様々な水域で事故の調査及び解析が実施されており、既往解析²⁾では、数値解析により、水難事故発生場所での水面や波浪、流況を再現している。この数値解析では、水面変動のみを考慮しており、人体の挙動は考慮されていないため、人体の溺水状況はおおよそで考察している。そのため、水面変動の挙動とその影響による溺水状態前の人体の上下方向の挙動を把握する数値モデルが必要であると考え。また、他の既往研究調査として、河川内に入水したときに砂地が急傾斜となっており、足を取られ、急に河川内に沈んでしまう水難事故の現象も確認されている。そのため、落水及び沈水したときの人体の上下方向の運動挙動についても把握することが重要であると考え。

本研究では、胴体や頭部、手足等の人体の部位の体積や浮力を考慮し、波浪場における人体の挙動を把握するための数値モデルを作成した後、実験を行い、数値モデルの確からしさを検証することを目的とした。

2. 数値モデルの構築

水面付近における水面変動時の人体の挙動を把握するための数値モデルを構築した。水面が変動する際の人体の上下運動を静水状態、浮上状態、沈下状態の3つの状態で考えた(図-1)。静水状態は、浮力と重量が釣り合っている状態で人体が静

止している状態を示す。浮上状態は、水面より下に人体が降下したときに浮力が重量に比べて増すことで、人体が上昇し、水面に浮上する状態を示す。沈下状態は、人体が浮上状態のときに水面からの露出部分が増すことで、浮力が減少し、重量が増すことで再度水面より下に人体が降下する状態を示す。これらの状態を繰り返すことにより、水面変動時に人体の上下運動が生じていると考えた。この考え方等から、水面変動時の人体の上下挙動を把握するために浮力や速度、加速度等を用いて、変位時間あたりの頭頂部位置の移動距離の計算を行った(図-2)。このとき、浮力は物体の排除した水の重量と等しいことから、人体の部位を水面上と水中に分けて考えた。水面上では、人体の部位の露出量に従った重量、水中では、人体の部位の水深に応じた浮力と重量を計算した。このとき、抗力 F_D の計算式は高木らの研究³⁾を参考にした。

人体について、

楕円面積=人体部位の長径×人体部位の短径× π

体積=楕円面積×人体の部位の長さ

質量=体積×密度

重量=質量×重力加速度(9.8 m/s²)

浮力=水面下の人体の体積×海水密度×重力加速度

変位時間あたりの頭頂部位置について、

加速度 a_{now} =(重量-浮力)/体重

速度 $v_{now}=v_{old} + a_{now}\Delta t$ ×抗力 F_D

$$F_D = C_D \frac{1}{2} \rho v_{old}^2 S$$

$$C_D = \frac{F_D}{0.5 \rho v_{old}^2 S}$$

$$F_D = 2.74 v^{1.91}$$

変位時間あたりの移動距離= $v_{now}\Delta t + \frac{1}{2} a_{now}\Delta t^2$

ここで、 C_D ：抗力係数、 S ：投射断面積であり、

抗力係数は形状抵抗，摩擦抵抗，うず抵抗等を示す。

また，数値モデルを構築するための計算で用いた人体のモデルは成人男性を参考に身長や頭部，胴体等の各部位の長さ，体積，重量等を推算し，全身の浮力を推算した．中村らの研究⁴⁾を参考にモデル化を行った．数値モデルに用いた人体の各部位について図-3に示す。

波高 0.3 m，周期 4 秒での水面挙動と人体の挙動計算例の結果（図-2）より，水面変動とそれに伴う頭頂部の位置を確認できた。

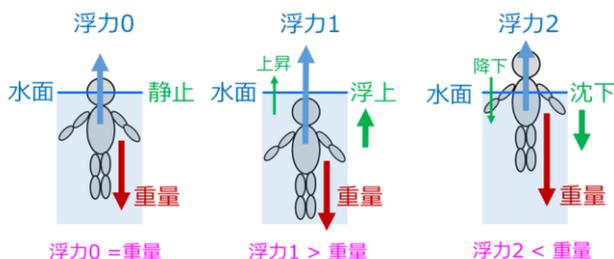


図-1 水面変動時の人体の上下運動の考え方
(左:静水状態，中:浮上状態，右:沈下状態)

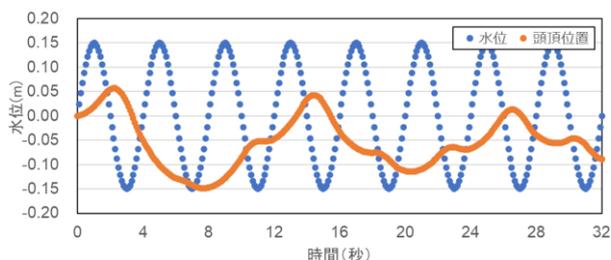


図-2 水面変動と人体の挙動の計算例



図-3 モデル化を行った人体の各部位

3. プールを用いた人体の挙動把握実験

構築した数値モデルの確からしさの検証及び水

面付近での人体の挙動を把握するために，新潟県長岡市内にある室内プールにて普段それほど運動をしない24歳の成人男性2名で実験を行った。

実験では，落水及び沈水を想定し，プール床から足を離れたときの時間変動と水面付近で浮沈している人体を防水ビデオカメラで記録し，水面を基準とし，水面に対しての時間変動による頭頂部位置の変位で人体の上下挙動を把握した。

数値モデルから得られた計算値とプールを用いた水面付近での人体の挙動把握実験から得られた実験値を比較し，数値モデルの確からしさを検証した（図-4）。計算値と実験値を比較した結果，同様の挙動を再現できていることから，数値モデルの確からしさを検証することができた。実験結果から，水面が静水時での落水及び沈水を想定した人体の上下挙動は，数値モデルを用いることで把握が可能になった。

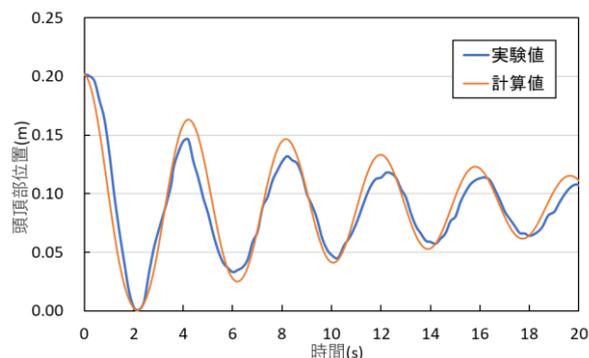


図-4 プールを用いた実験の計算値と実験値の比較

4. 造波水路を用いた人体の挙動把握実験

数値モデルの確からしさの検証及び波浪場を想定した水面付近での水面変動と人体の挙動を把握するために，造波水路を用いて実験を行った。実験では，疑似人体として用いたペットボトルの水面変動時の挙動と造波水路装置によって発生した波を波高計，波高計アンプ，AD変換器，PCを用いて記録し，水面変動時の疑似人体の挙動を把握した。数値モデルから得られた計算値と造波水路を用いた水面付近での水面変動と疑似人体の挙

動把握実験から得られた実験値を比較し、数値モデルの確からしさを検証した(図-5)。計算で用いた疑似人体(ペットボトル)の各部位の計算値を表-1に示す。このとき、ペットボトルのキャップ部を頭部、本体部を胴体として計算を行った。計算値と実験値を比較した結果、上下振動挙動の上昇量及び下降量で差が出ている箇所はみられたが、上昇及び下降タイミングは同様の挙動が確認できた。そのため、波浪場における水面変動の挙動と溺水状態前の人体の上下挙動に関して、構築した数値モデルを用いることで水面変動と人の呼吸タイミングを把握することができると考える。

表-1 疑似人体(ペットボトル)の各部位の計算値

部位	長さ(m)	体積(m ³)	密度(kg/m ³)	質量(kg)	重量(N)	海水密度(kg/m ³)	浮力(N)
キャップ部	0.020	2.49×10 ⁻⁶	900	0.0022	0.022	1030	0.025
本体部	0.243	8.94×10 ⁻⁴	1084	0.9685	9.491	1030	9.022
計	0.263	8.96×10 ⁻⁴	-	0.9707	9.513	-	9.047

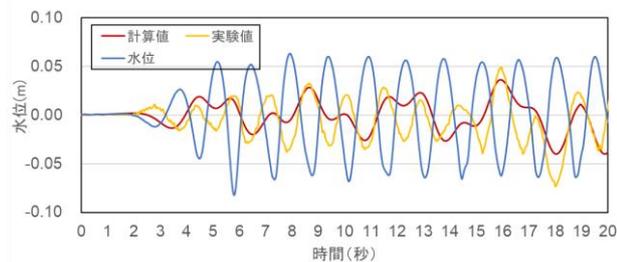


図-5 造波水路実験の計算値と実験値の比較

波浪場を想定した造波水路実験を実験ケース(ペットボトルの容量、波の周期及び波高)別にまとめた結果の一例を表-2に示す。ここで、Hは波高、Tは周期、hは水深である。また、ペットボトルの大きさ別の波高変化による1波長あたりの平均上昇高と周期変化による1波長あたりの平均上昇時間をまとめた結果を図-6、図-7に示す。

ペットボトルの容量別の波高変化による1波長あたりの平均上昇高と周期変化による1波長あたりの平均上昇時間をまとめた結果より、ペットボ

トルの容量が大きい程、波高が増大しても1波長あたりのペットボトルの平均上昇高は変化しづらく、ペットボトルの容量が小さい程、波高が増大すると1波長あたりのペットボトルの平均上昇高が変化しやすい傾向がみられた。また、周期が増大するとペットボトルの容量の大きさに関係なく1波長あたりのペットボトルの平均浮上時間が増加する傾向がみられた。

表-2 ペットボトルの容量別の波の周期及び波高

種類	波高		
	大	中	小
900ml	H:0.17m T:1.0s h:0.50m	H:0.12m T:0.8s h:0.50m	H:0.08m T:1.8s h:0.50m
500ml	H:0.14m T:1.4s h:0.50m	H:0.13m T:1.4s h:0.50m	H:0.08m T:1.4s h:0.50m
300ml	H:0.14m T:1.3s h:0.50m	H:0.12m T:0.9s h:0.50m	H:0.10m T:1.7s h:0.50m
195ml	H:0.16m T:1.5s h:0.50m	H:0.13m T:1.5s h:0.50m	H:0.08m T:1.7s h:0.50m

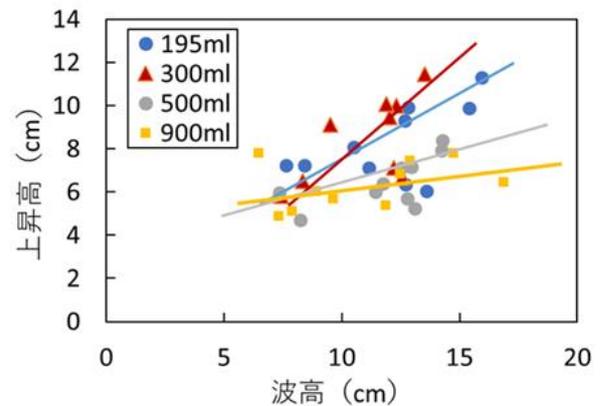


図-6 波高変化による平均上昇高の変化

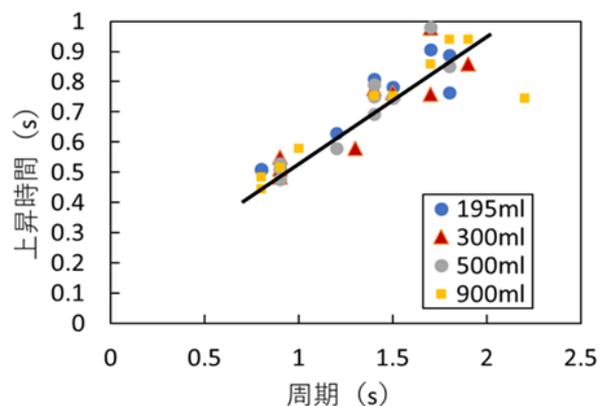


図-7 周期変化による平均上昇時間の変化

5. まとめ

水面付近での水面変動時の人体の上下方向の挙動の数値モデルを構築したことにより、人体の各部位の体積や質量等の数値と水面変動の波の周期や波高等の条件を設定することで水面変動と人体の挙動を把握することができるようになった。また、落水及び沈水を想定したプールにおける水面付近の人体の挙動把握実験から、水面が静水時での人体の浮上挙動について構築した数値モデルを用いることで把握することができるようになった。他に、波浪場を想定した造波水路装置を用いた水面付近の疑似人体の挙動把握実験から、水面変動時における疑似人体であるペットボトルの上下挙動の上昇及び下降のタイミングが計算値と実験値で同様の挙動を確認できた。以上のことから、構築した数値モデルの確からしさを検証することができたと考える。また、既往解析の人体の溺水状況の考察に比べて、今回構築した数値モデルを用いることで人体の溺水状況をより詳細に把握することができるようになったと考える。

6. 今後の課題及び展望

今後の課題として、人体及び疑似人体の上下振動の上昇及び下降量の再現精度を改善する必要があるため、今回の実験では疑似人体としてペットボトルを使用していたが、適切な大きさ及び密度の人形を使用することで数値モデルの確からしさの更なる検証になると考える。ペットボトルの場合は、頭部として計算を実施したキャップ部と胴体部として計算を実施した本体部と計算箇所が2箇所しかなかったことが挙げられる。実際の数値モデルでは、頭部及び胴体の他に、腕や足等人体の部位を詳細に計算しているため、そこで計算値と実験値のずれが生じたと考える。そのため、疑似人体としては、ペットボトルではなく、手足がついている人形の方が適していたと考える。

また、今後の展望として、波浪場での人体上下挙動及び落水、沈水時の人体上下挙動把握の他に、

立ち泳ぎやうつ伏せ状態等の様々な人体挙動の把握を行い、波動数値モデルに組み込み、流況と人体挙動を同時に把握できるようにする必要があると考える。

7. 参考文献

- 1) 警察庁「令和3年における水難の概況」
<https://www.npa.go.jp/publications/statistics/safetylife/sounan.html> (2023.1.5.閲覧)
- 2) 犬飼直之ら「水難事故対策のための幕張の浜の突堤付近での水面および流況の把握」,土木学会論文集 B2 (海岸工学) Vol.77, No.2, I_805-I_810, 2021
- 3) 高木英樹ら「日本人競泳選手の抵抗係数」,体育学研究 41, 484-491, 1997
- 4) 中村恭志ら「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, No.4, I_601-I_606, 2017