

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

EXPERIMENTAL STUDY ON HYDRODYNAMIC FORCE ON HUMAN BODY IN FLOWING WATER AND RISK OF WATER ACCIDENT

岡本隆明¹・戸田圭一²・當麻泰史³

Takaaki OKAMOTO, Keiichi TODA and Yasufumi TOUMA

¹正会員 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 助教 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

²フェロー会員 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 教授 (同上)

³学生会員 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (同上)

Climate change increases the frequency of torrential rains and drowning accident frequently occurs. Therefore, it is very important to study the hydrodynamic force exerted on the human body in flood water. In this study, two kinds of the flume experiments were conducted using a small-scale model of the human body (1/10 scale). First, we measured the drag force exerted on the human body in flood water. The experiment data showed that the drag force exerted on the human body in a sitting position is 2-3 times larger than that in a standing position. Second, we measured the flow velocity around the human body by using the electromagnetic current meter. The results revealed that the drag force exerted on the human body increases due to the clothing. The results can be used as primary assessment to define the drowning risk in a river or a channel after torrential rain.

Key Words : *flood water, drag force coefficient, sitting position, standing position, effect of clothing, wake behind human body*

1. はじめに

近年, 局地的豪雨が増加傾向にあり, 中小河川において河川水難事故が頻発している. 平成20年7月兵庫県都賀川において5名が亡くなるという水難事故が発生した. 中小河川では極めて短時間で水位が上昇し, 数10cm程度の増水でも外力が急に大きくなる可能性が指摘されている. これまで洪水シミュレーションや避難対策については, 多くの既往研究がみられ様々な場で報告がなされている.

高橋ら¹⁾は人を被験者として実スケールの流れを水槽内で再現して水理実験を実施し, 越波水と人の転倒を定量的に評価した. 須賀ら²⁾は水害避難を想定した水中歩行実験を行い, 歩行者の心理状態と歩行速度を測定し安全避難歩行領域を求めた.

藤田ら³⁾は洪水時の避難行動に対してこれまで提案されている歩行限界パラメータを比較し整理した. さらに布を脚に巻き付けてバネばかりで引っ張ることで, 立位状態における転倒への抵抗限界値を評価した. 小川ら⁴⁾

は徒歩による避難を想定し歩行が困難となる度合いを人体抗力と地面との摩擦力の比によって定量的に評価し, 水深, 身長, 流速, 歩行速度の組み合わせによる歩行避難危険度の等値線図を作成した. さらに2009年佐用川の氾濫解析結果と組み合わせて歩行危険度の時間空間分布を評価した.

しかしながら, これまでの研究は立っている状態の人体を解析したものがほとんどである. 北村・西田⁵⁾は水流によって転倒することで, 座位姿勢では人体にかかる抗力が増加し水難事故の危険性が増すことを指摘している. しかしながら, 人体の抗力係数や水深変化までは評価してないため, 水難事故危険性の指標となる限界の流速や水深までは算出できていない. そこで本研究では1/10スケールの人体模型を用いて水理実験をおこない, 北村・西田⁵⁾の研究を参考にして様々な姿勢の人体にかかる抗力を計測し流水による転倒時の水難事故の危険性について調べる. また服を着せた状態の人体模型についても抗力計測, 電磁流速計による流速計測を行い, 着衣による人体抗力の変化を把握する. さらに人体に作用する流体力の抗力係数を直接評価し, 洪水時の避難指標と

表-1 実験条件

	模型スケール		実スケール		Fr	人体模型の姿勢	着衣の影響
	U_m (m/s)	H (m)	U_m (m/s)	H (m)			
Case 1-1	0.316	0.035	1.0	0.35	0.54	立位, 座位	着衣, 非着衣
Case 1-2		0.050		0.50	0.45	立位, 座位	着衣, 非着衣
Case 1-3		0.070		0.70	0.38	立位, 座位, 臥位	着衣, 非着衣
Case 2-1	0.474	0.035	1.5	0.35	0.81	立位, 座位	着衣, 非着衣
Case 2-2		0.050		0.50	0.68	立位, 座位	着衣, 非着衣
Case 2-3		0.070		0.70	0.57	立位, 座位, 臥位	着衣, 非着衣
Case 3-1	0.633	0.035	2.0	0.35	1.08	立位, 座位	着衣, 非着衣
Case 3-2		0.050		0.50	0.90	立位, 座位	着衣, 非着衣
Case 3-3		0.070		0.70	0.76	立位, 座位, 臥位	着衣, 非着衣

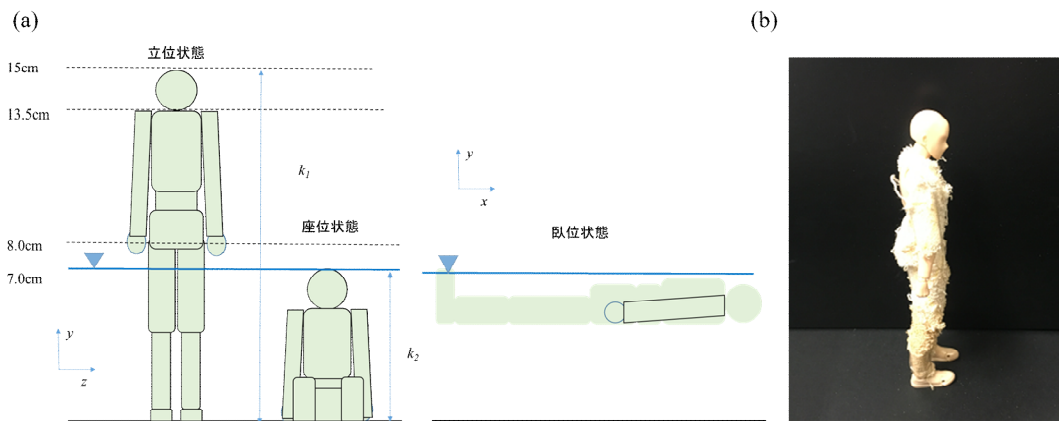


図-1 (a) 人体模型の姿勢変化, (b) 着衣状態の人体模型

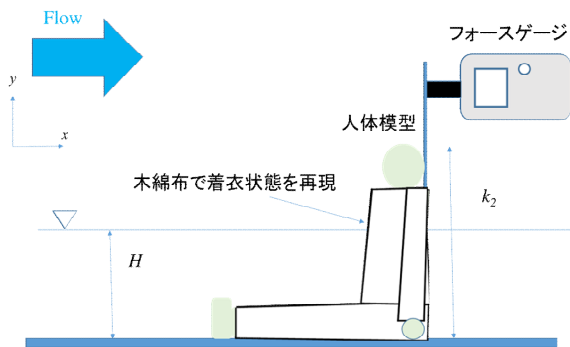


図-2 人体にかかる抗力計測実験装置

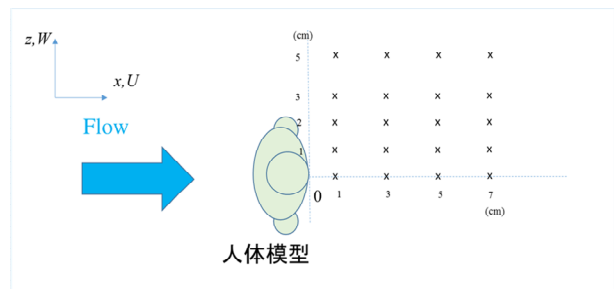


図-3 電磁流速計による人体周りの流れの計測

なる実スケールでの水難事故に遭う危険水位, 流速を求めた。

2. 実験装置, 実験方法

図-1 (a) に水理実験に使用した人体模型の姿勢変化を示す。人体模型(プラスチック製: 1/10スケール)の関節部分は可動で、氾濫水による転倒を想定して立位, 座位, 臥位状態に変化させることが可能である。立位時の模型高さは $k_1=15\text{cm}$ (実スケール1.5m), 座位時の模型高さは $k_2=7\text{cm}$ (実スケール0.7m)である。また着衣の影響についても考察するために図-1 (b) のように木綿を切って作成した服を着せた状態の人体模型についても抗力計測を行った。

図-2に人体にかかる抗力計測実験装置図を示す。実験に用いた水路は全長10m, 幅0.4m, 高さ0.5mの可変勾配型水路であり, 等流状態になるように水路勾配を変化させている。 x, y および z は, それぞれ流下方向, 鉛直方向および横断方向である。人体模型の設置位置を $x=0$, 水路床を $y=0$, 水路中央を $z=0$ とした。 H は全水深, k_1, k_2 はそれぞれ立位, 座位状態の人体模型高さである。鉛直

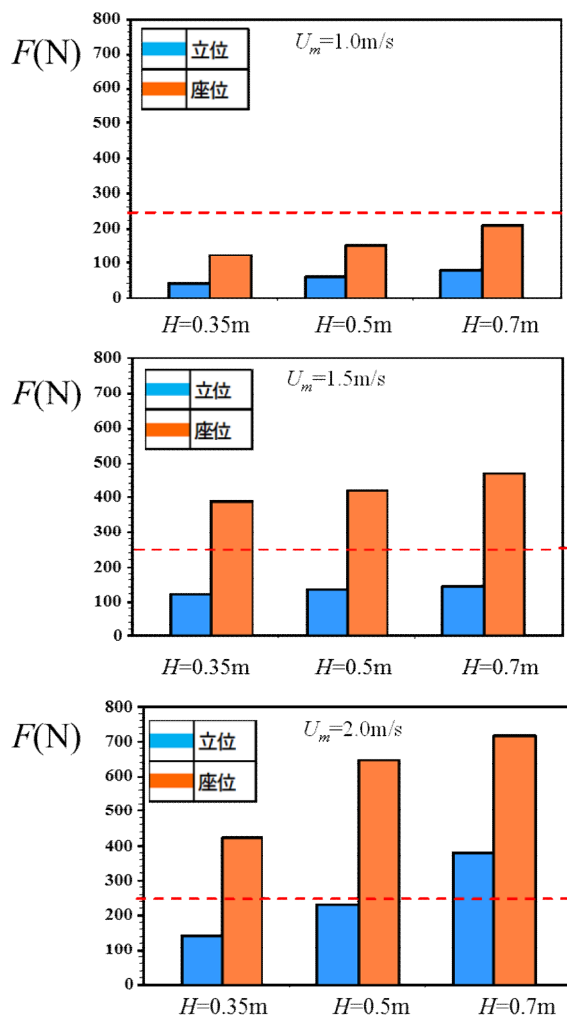


図-4 流水中の転倒による人体抗力の増加(非着衣状態)

方向の原点($y=0$)は水路底面とした。抗力計測時に底面摩擦の影響をなくすため、図のように人体模型を上から支柱によって吊り下げ、底面から2mm程度浮かした状態で固定した。

人体模型にかかる抗力計測にはデジタルプッシュプルフォースゲージ(分解能1/1000N, 日本電産シンゴ製FGP-0.5)を用いた。抗力計測実験では図-2に示す通り水平方向に設置したフォースゲージに支持棒を介して人体模型を取り付けており、模型が水流から受ける抗力 D は金属棒を中継してフォースゲージで計測される。サンプリングレートは10Hz, サンプリング時間は60sである。

図-3に流速計測実験装置図を示す。 U , V および W は、それぞれ流下方向、鉛直方向および横断方向の時間平均流速である。電磁流速計(VP-1500)とI型のセンサーを用い、人体模型の背後領域： $x=0\sim0.05\text{m}$ (実スケールで $0\sim0.5\text{m}$)の点計測を行った。計測点の鉛直方向位置は $y=1\text{cm}$ (実スケールで底面から0.1m)である。サンプリングレートは30Hz, サンプリング時間は40sである。

表-1に実験条件を示す。氾濫流水深と流速を系統的に変化させて、様々な条件下で抗力計測実験を行った。水

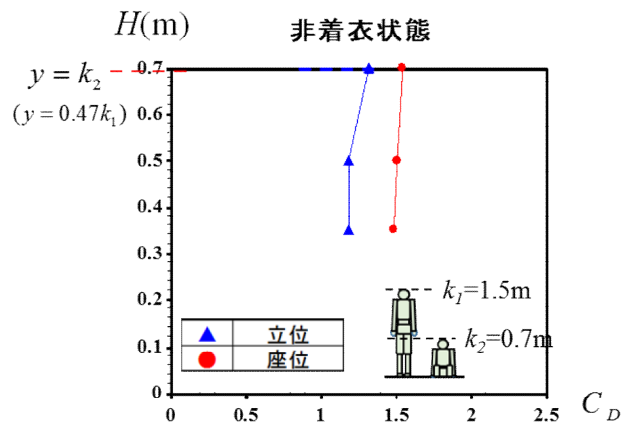


図-5 人体の姿勢による抗力係数の変化

深は $H=0.035, 0.05, 0.07\text{m}$ (実スケールで0.35, 0.5, 0.7m)の3通り、断面平均流速 U_m も $U_m=0.32, 0.47, 0.63\text{m/s}$ (実スケールで1.0, 1.5, 2.0m/s)の3通りに変化させている。また洪水流による転倒を想定して人体模型の姿勢を立位、座位、臥位状態、着衣の影響を調べるために着衣、非着衣状態に変化させている。水深 $H=0.07\text{m}$ では立位状態では脚部のみ水没し(図-1)、座位、臥位状態では人体模型は全水没している。臥位ケースでは水難事故時の水流によって人体が押し流された状態を想定している。

3. 実験結果

(1) 流水中の転倒による人体抗力の変化

図-4に非着衣状態での座位と立位状態の人体模型にかかる抗力値 $F(\text{kgf})$ の変化を示す。抗力値はフルード相似則を用いて実スケール換算している。また図中には藤田ら³⁾の布を脚に巻き付けてバネばかりで引っ張ることで評価した、立位状態における転倒への抵抗限界値を示している。非着衣状態のみを考慮すると実スケール流速1.0m/sでは立位状態の転倒への抵抗限界値よりも抗力が小さく、転倒の危険性は少ないが、流速2.0m/sになると水深0.5mで転倒する危険性が高い。

流水によって転倒して座位状態になると立位状態と比較して人体にかかる抗力値は2.0~3.0倍となっており、転倒すると水流によって押し流される危険性が増すことを示している。座位状態と立位状態の抗力値の差は水深の小さなケースほど顕著にみられた。これは転倒して座位状態になると水中部分の x 方向の投影面積が急激に大きくなるのが一因である。

本研究では人体にかかる流体力 F を計測しているため、抗力係数 C_D を直接計算することが可能である。 F は

$$F = 0.5\rho C_D U_m^2 A_x \quad (1)$$

と表現される。ここで、 ρ : 水の密度、 U_m : 断面平均流

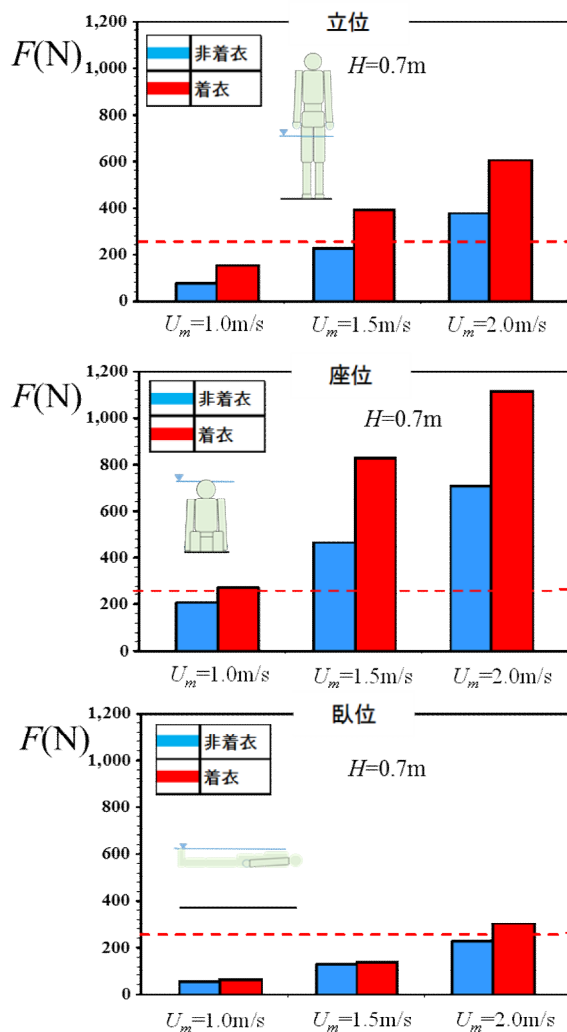


図-6 着衣による人体抗力の増加

速, $A_x(y)$: 人体が水没している部分のx方向の投影面積である. 図-5に座位と立位状態の人体模型の抗力係数の鉛直プロット $C_D(y)$ を示す. 立位状態では抗力係数プロットは鉛直方向にほぼ様な分布となり, $C_D=1.2$ となった. これは単一の円柱の抗力係数に近い値である. 座位状態でも抗力係数プロットは鉛直方向に様で, 角柱の抗力係数に近い $C_D=1.5$ となる. すなわち, 立位状態よりも抗力係数が大きくなっている. 座位状態で人体抗力が大きくなる要因は, 人体の水中の投影面積が大きくなるだけでなく, 形状が変化して抗力係数が増加するため(形状効果)だとわかった.

(2) 人体抗力に及ぼす着衣の影響

次に着衣による人体抗力の変化について考察するために図-6に着衣と非着衣状態の人体模型にかかる抗力値 $F(\text{kgf})$ の変化を示す. 抗力値は実スケール換算している. 着衣状態では非着衣状態よりも抗力値が30-70%増加している. 石垣ら⁹⁾は階段型水路において脚型模型にかか

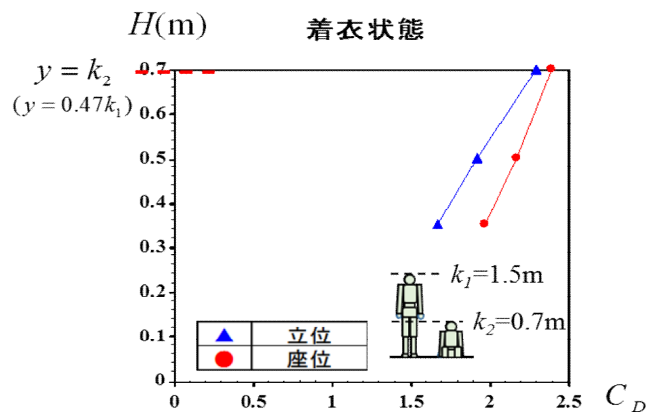


図-7 着衣による人体抗力係数の変化

る流体力を計測し, スニーカーやズボンをはいていると流体力が増加することを示しており, 本研究の実験結果と一致している. これらの結果から水難事故の危険性を評価する上で着衣の影響は無視できないことが示された. 着衣による抗力増加について姿勢ごとに整理すると, 立位では全ケースで平均して57%, 座位では全ケースで平均して42%, 臥位ケースでは全ケースで平均して17%抗力値が増加している. 立位時 $U_m=1.5\text{m/s}$ では非着衣状態では転倒しないが, 着衣の影響を考えると転倒する危険性が高い.

図-7に着衣と非着衣状態の人体模型の抗力係数の鉛直プロット $C_D(y)$ を示す. 本研究で用いた人体模型の衣服は流水中でも大きくゆらぐことはなくx方向の投影面積にあまり大きな差はみられなかった. 着衣状態でも非着衣状態と投影面積は同じであるとして抗力係数を算出している. 非着衣状態よりも着衣状態の抗力係数は大きくなり, 立位状態では $C_D=1.7\sim 2.2$, 座位状態では $C_D=2.0\sim 2.3$ となった.

着衣による人体抗力の変化についてさらに詳細に考察するために図-8に立位状態の人体模型の後流域の時間平均主流速 U のx-z水平面コンターを示す. 流速値は実スケール換算している. 計測点の鉛直方向位置は $y=1\text{cm}$ (実スケールで底面から0.1m) なので, 立位状態の人体模型の2本の脚部を図中に併示している. 電磁流速計による流速計測実験では断面平均流速 $U_m=0.47\text{m/s}$ (実スケールで1.5m/s) 水深は $H=0.05\text{m}$ (実スケールで0.5m) とした. 着衣ケースと非着衣ケースで投影面積に大きな変化はみられなかったが, 後流域の流速分布に大きな差がみられた. すなわち, 着衣状態では非着衣状態よりも人体背後の流速値が小さく, 後流域も大きくなることがわかった. この結果は図-6の着衣ケースで非着衣ケースよりも人体抗力が大きくなることと対応している. 着衣ケースで後流域が大きくなることから, 表面抵抗と形状抵抗の両方が氾濫水中で人体が受ける流体力に大きな影響を及ぼしている可能性が示唆された.

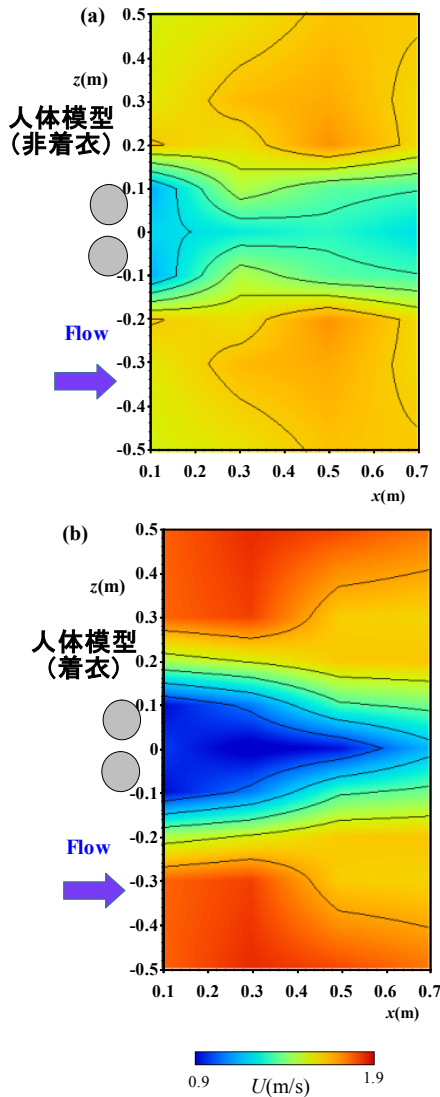


図-8 立位時の人体模型背後の流速水平面コンター(a)非着衣状態、(b)着衣状態 (実スケールに換算)

(3) 転倒を考慮した水難事故の危険水深、流速の評価

前節で得られた抗力係数をもとに水難事故の危険水深、流速を算出する。水難事故時、人間は身体に作用する流体力に対して、ここでは摩擦力 S のみで抵抗すると仮定する⁹⁾。

$$F = S = \mu(Mg - F_b) \quad (2)$$

ここで μ ：人体と地面の静止摩擦係数、 M ：人体の質量(身長 1.5m の児童の体重は 46kg とした)、 g ：重力加速度、 F_b ：人体模型に作用する浮力である。浮力 F_b は次式で計算される。

$$F_b = \rho g V_o \quad (3)$$

ここで V_o ：水中に水没した人体模型の体積で、水深 H によって変化させている。抗力係数 C_D は前節の実験値を用

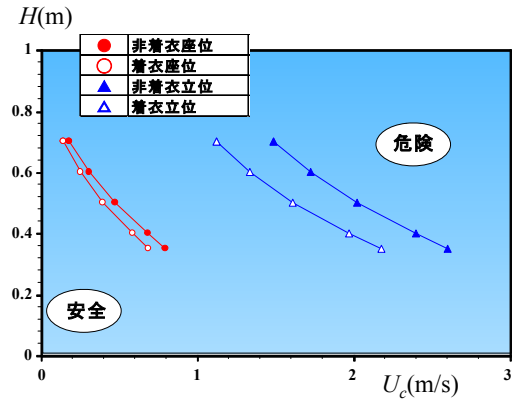


図-9 水難事故危険水位、流速判読図 (12歳児を対象とし、流水による転倒、着衣の影響を考慮)

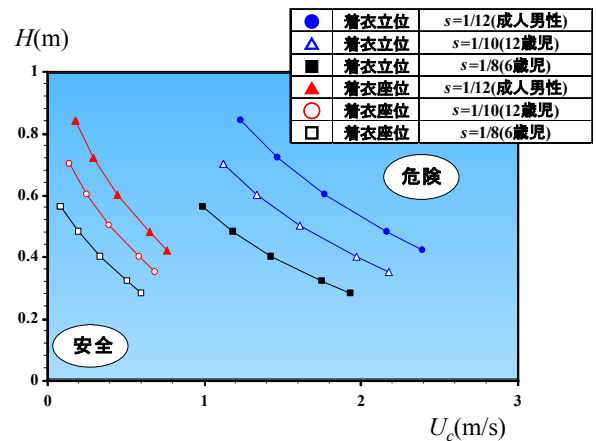


図-10 水難事故危険水位、流速判読図 (6歳児、12歳児、成人男性を対象)

いる。人体と地面の静止摩擦係数は0.7としている¹⁾。本研究では式(2)の左辺の水流から受ける流体力が右辺の摩擦力と釣り合った時の流速を水難事故に遭遇する限界流速として算出する。水難事故の危険水深と流速の判読図を図-9に示す。本実験では実スケール水深は $H=0.35, 0.5, 0.7$ mの3通りに変化させているが、それ以外のケースについては図-5、7の抗力係数の鉛直プロットから内挿して抗力係数を求め、式(1)、(2)から水難事故危険流速(限界流速 U_0)を算出した。

着衣の影響を考慮すると立位状態では水深0.35mでは2.2m/s程度の流速、水深0.7mでは1.2m/s程度の流速で水難事故に遭う危険性が高い。これに対して、座位時は立位時に比べて限界流速が小さい。すなわち、子どもが河川で転倒したり用水路に転落して倒れ込むような状況では0.4~0.7m/s程度の流速でも水難事故に遭う危険性が考えられる。これは図-4で考察したように人が転倒して座位になると水流から受ける抗力が2.0~3.0倍になるためである。また座位状態では人体の水没体積が大きくなって浮力が増加し、式(2)から身体に作用する流体力に対して、抵抗する摩擦力が小さくなることも原因として考えられる。

本研究では人体モデルのスケールを1/10として実スケールでは身長1.5mの児童を想定して実験を行った。実験のスケール、体重を読み替えることで成人男性(身長1.8m, 体重80kg: 1/12スケール)やさらに小さい児童(身長1.2m, 体重23kg: 1/8スケール)の水難事故危険流速も評価することができる。着衣時の座位、立位、各ケースの水難事故の危険水深と流速の判読図を図-10に示す。

着衣の影響を考慮すると成人男性でも立位状態で水深0.4mでは2.5m/s程度の流速、水深0.8mでは1.5m/s程度の流速で水難事故に遭う危険性が高い。用水路に転落して倒れ込むような状況では0.8m/s程度の流速でも水難事故に遭う危険性が考えられる。

本研究で作成された判読図と水理解析結果を組み合わせることで、特定の地域での水難事故の危険性について評価することができると考えられる。

4. おわりに

本研究では人体模型を用いて水理実験をおこない、様々な姿勢の人体にかかる抗力を計測して流水による転倒時の水難事故の危険性について調べた。また服を着せた状態の人体模型についても抗力計測、電磁流速計による流速計測を行い、着衣による人体抗力の変化についても考察した。さらに人体に作用する流体力の抗力係数を直接評価し、洪水時実スケールでの水難事故に遭う危険水位、流速を求めた。得られた主な結論は以下のとおりである。

1) 流水中で転倒して座位状態になると立位状態と比較して人体にかかる抗力値は2.0~3.0倍となった。このことから転倒すると水流によって押し流される危険性が増すことがわかった。座位状態と立位状態の抗力値の差は水深の小さなケースほど顕著にみられた。

2) 非着衣状態では立位ケースの人体の抗力係数の鉛直方向分布はほぼ一様で、単一の円柱の抗力係数に近い $C_D=1.2$ となった。座位状態では抗力係数は角柱の抗力係数に近い $C_D=1.5$ で、立位状態よりも抗力係数が大きくなった。座位状態で人体抗力が大きくなる要因は、人体の投影面積の増加だけではなく、形状が変化して抗力係数が大きくなるためだとわかった。

3) 着衣状態では非着衣状態よりも人体にかかる抗力値が30-70%増加しており、水難事故の危険性を評価する上で着衣の影響は無視できないことが示された。着衣による抗力増加について人体の姿勢ごとに整理すると、立位では全ケースで平均して57%、座位では全ケースで平均して42%、臥位ケースでは全ケースで平均して17%抗力値が増加している。

4) 着衣ケースと非着衣ケースで人体モデルの投影面積に大きな変化はないが、着衣状態では非着衣状態よりも人体背後の流速値が小さく、後流域も大きくなることがわかった。この結果は着衣ケースで人体抗力が大きくなることと一致しており、表面抵抗と形状抵抗の両方が流水中で受ける流体力に大きな影響を及ぼしている可能性が示唆された。

5) 人体に作用する流体力と摩擦力のつりあいから水難事故の危険水深、流速を評価した。座位時は立位時に比べて危険流速が小さくなっている。これは人が転倒して座位になると水流から受ける抗力が増加するだけではなく、浮力が増加し身体に作用する流体力に対して抵抗する摩擦力が小さくなるためである。特に子どもが転倒して座りこむと水深0.5m, 0.5m/s程度の流速でも水難事故に遭う危険性が示唆された。

本研究では人体を流れの上流側に向けた状態で実験している。しかしながら、流れに対する身体の向きによっても抗力が変化すると考えられるため、水理条件を増やしてさらに詳細に研究する必要がある。さらに本論文では静止摩擦力で流体力に対して抵抗するとしたが、実際には摩擦力だけでなく筋力を使つての抵抗力も働く想定される。今後実スケールの人を被験者としてバネばかりで引っ張ることで立位状態、座位状態の洪水流への抵抗力を正確に計測する。

参考文献

- 1) 高橋重雄・遠藤仁彦・室善一朗：越波時における防波堤上の人々の転倒に関する研究(第2報) -親水性港湾構造物に関する水工的研究、港湾技術研究所報告、第31巻、pp.3-32, 1992.
- 2) 須賀堯三・上坂恒雄・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, 1994.
- 3) 藤田一郎・伊藤崇博：平成21年8月兵庫県佐用町河川災害における氾濫解析と避難行動判断基準に関する研究、河川技術論文集、第17巻、pp.431-436, 2011.
- 4) 小川芳也・瀬良昌憲・澤井健二・足立考之・小笠原裕介・正岡聡：氾濫解析とリンクした洪水時の避難判断支援情報の提供に関する研究、自然災害科学、No.33-1, pp.43-52, 2014.
- 5) 北村光司・西田佳史：河川の流水による子どもの流れ状況の再現実験とライフジャケット着用の必要性に関する研究、日本子ども安全学会第四回大会資料、2017.
- 6) 石垣泰輔・戸田圭一・馬場康之・井上和也・中川一：実物大模型を用いた地下空間からの避難に関する実験的検討、水工学論文集、第60巻、pp.583-588, 2006.

(2018. 4. 3受付)