

流水中の人体が受ける流体力に関する実験的研究

Experimental Study on a Hydrodynamic Force on a Human Body in Flowing Water

戸田圭一⁽¹⁾・岡本隆明⁽¹⁾・當麻泰史⁽¹⁾

Keiichi TODA⁽¹⁾, Takaaki OKAMOTO⁽¹⁾ and Yasufumi TOUMA⁽¹⁾

(1) 京都大学大学院工学研究科

(1) Graduate School of Engineering, Kyoto University, Japan

Synopsis

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.

キーワード: 流水, 抗力係数, 座位, 立位, 着衣の影響, 水難事故危険状況

Keywords: flood water, drag force coefficient, sitting position, standing position, effect of clothing, critical condition for drowning accident

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(1992)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(1994)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(2011)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(2014)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る歩行危険度の時間空間分布を評価した.

Table 1 Hydraulic condition

	Model scale		Real scale		Fr	Posture of human body model	Effect of clothing
	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	standing, sitting	clothed, unclothed
Case 1-2		0.050		0.50	0.45	standing, sitting	clothed, unclothed
Case 1-3		0.070		0.70	0.38	standing, sitting, supine	clothed, unclothed
Case 2-1	0.474	0.035	1.5	0.35	0.81	standing, sitting	clothed, unclothed
Case 2-2		0.050		0.50	0.68	standing, sitting	clothed, unclothed
Case 2-3		0.070		0.70	0.57	standing, sitting, supine	clothed, unclothed
Case 3-1	0.633	0.035	2.0	0.35	1.08	standing, sitting	clothed, unclothed
Case 3-2		0.050		0.50	0.90	standing, sitting	clothed, unclothed
Case 3-3		0.070		0.70	0.76	standing, sitting, supine	clothed, unclothed

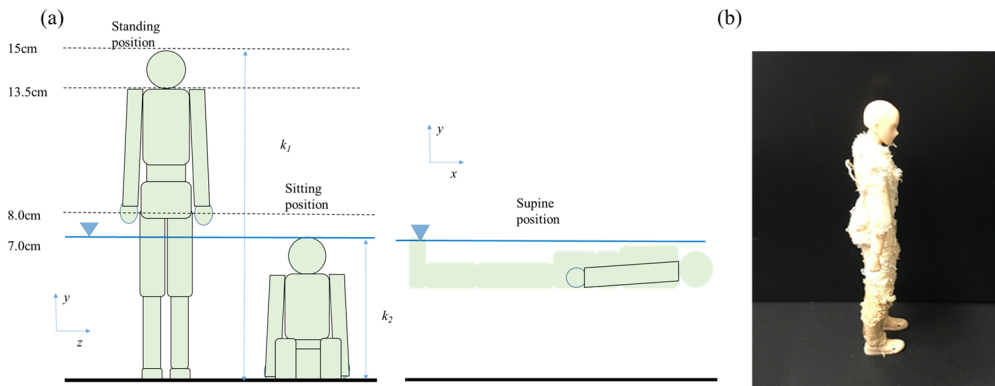


Fig.1(a) Posture change of human body model, Fig.1 (b) Clothed human body model

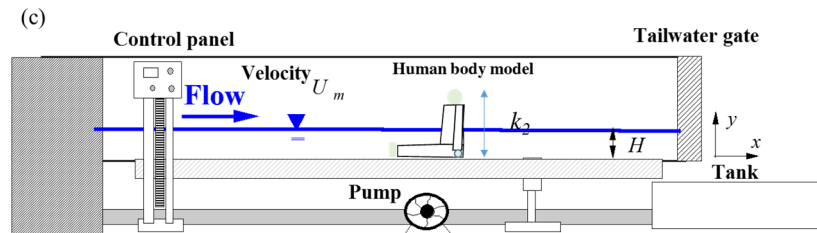


Fig.1 (c) Experimental flume

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(2017)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(2017)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

Fig.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 $k_2=7\text{cm}$ (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Fig.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。

Fig.1(c)に示すように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。鉛直方向の原点($y=0$)は水路底面とした。Fig.2に人体にかかる抗

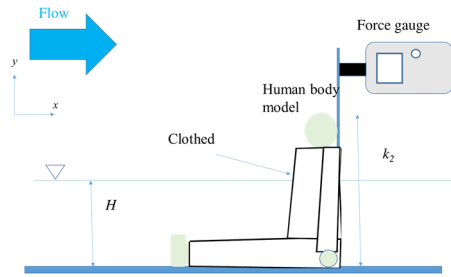


Fig.2 Experimental set up (Drag force measurement)

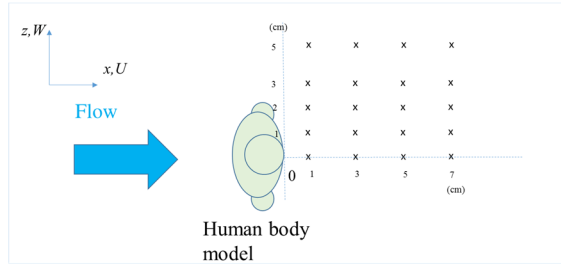


Fig.3 Velocity measurement by electro-magnetic current meter

力計測実験装置図を示す。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, 日本電産シンポ製FGP-0.5)を用いた。抗力計測実験ではFig.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。

Fig.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： $x=0\sim 0.05\text{m}$ (実スケールで $0\sim 0.5\text{m}$)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。

Table 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。水深は $H=0.035, 0.05, 0.07\text{m}$ (実スケールで $0.35, 0.5, 0.7\text{m}$)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 $1.0, 1.5, 2.0\text{m/s}$)の3通りに変化させている。また洪水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

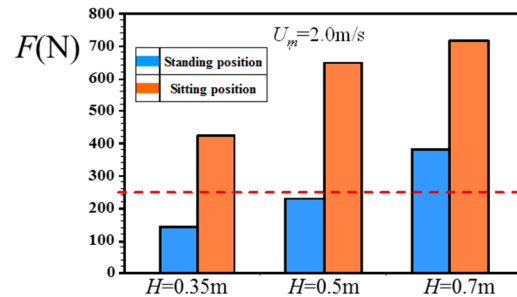
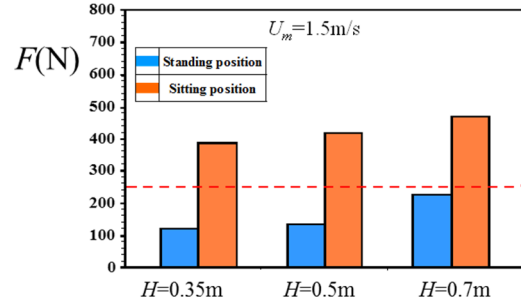
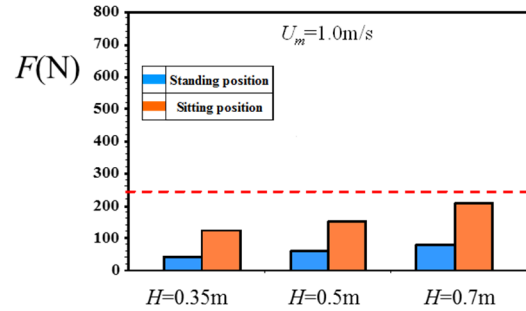


Fig.4 Drag force exerted on human body (effect of posture change)

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(Fig.1(a)), 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

3.1 流水中の転倒による人体抗力の変化

Fig.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 $F(\text{N})$ 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(2011)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。

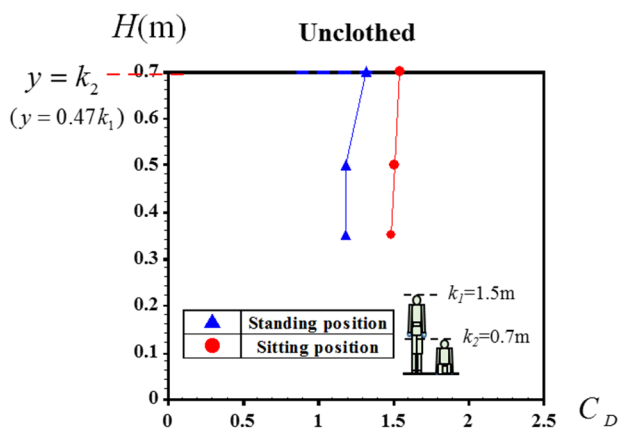


Fig.5 Drag force coefficient of human body (effect of posture change)

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。Fig.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一様で、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。

3.2 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Fig.6に着衣と非着衣状態の人体模型にかかる抗力値 $F(N)$ 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(2006)は階段型水路において脚型模型にかかる流体力を計測し、スニーカ

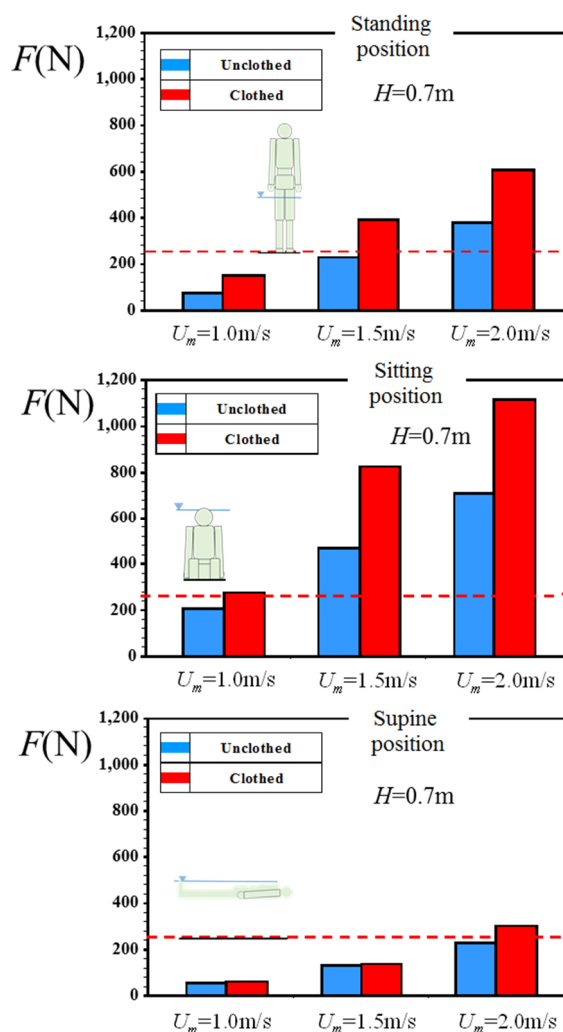


Fig.6 Drag force exerted on human body (effect of clothing)

ーやズボンをはいていると流体力が增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。

Fig.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。

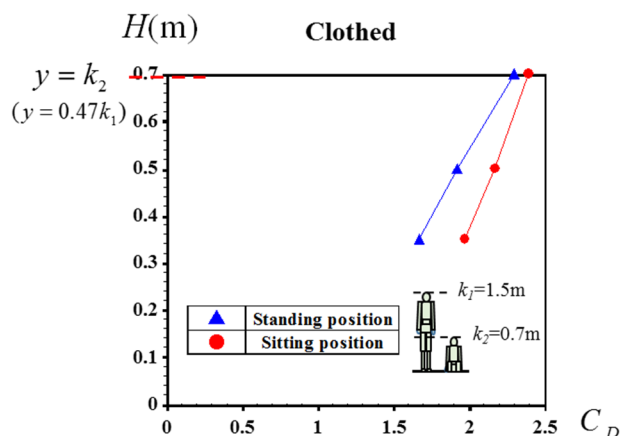


Fig.7 Drag force coefficient of human body (effect of clothing)

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Fig.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Fig.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汜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。

3.3 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。

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

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 ：人体に作用する浮力である。浮力 F_b は次式で計算される。

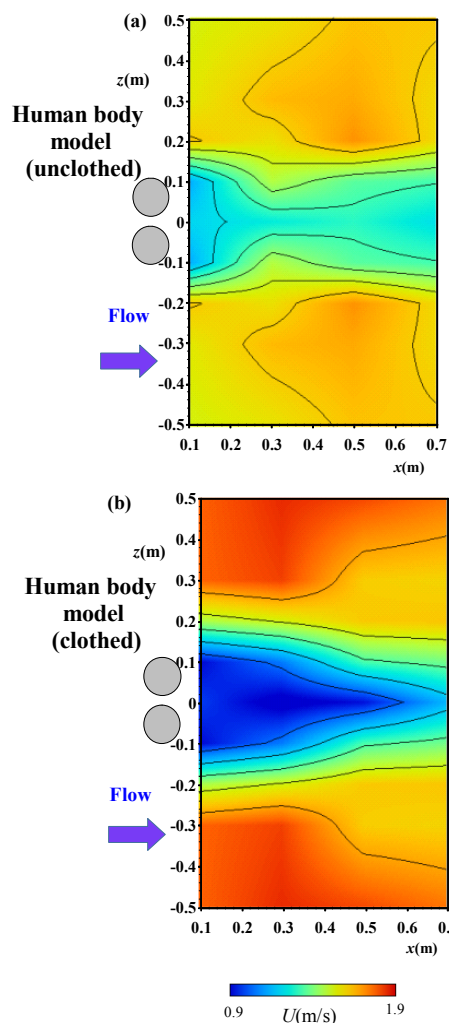


Fig.8 Horizontal contour of streamwise velocity behind the human body in a standing position of (a) unclothed case and (b) clothed case

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

ここで V_o ：水中に水没した人体の体積で、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いる。人体と地面の静止摩擦係数は 0.7 としている。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Fig.9に示す。本実験では実スケール水深は $H=0.35, 0.5, 0.7\text{m}$ 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Fig.5, Fig.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_c)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

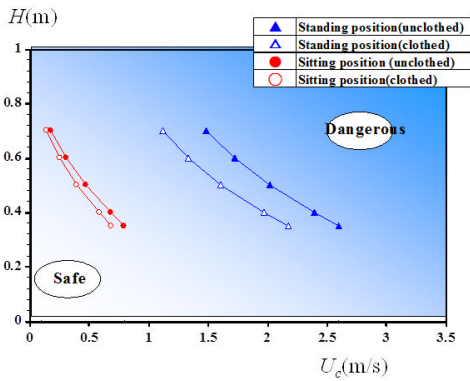


Fig.9 Critical condition for drowning accident (effect of posture change and clothing)

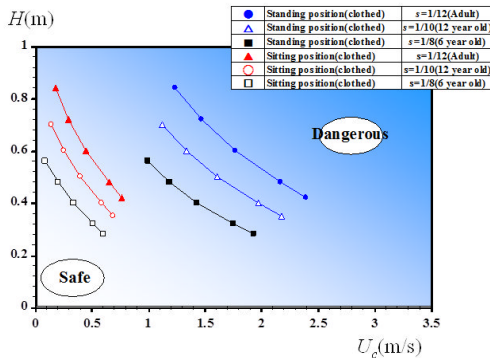


Fig.10 Critical condition for drowning accident (6 year old, 12 year old, adult)

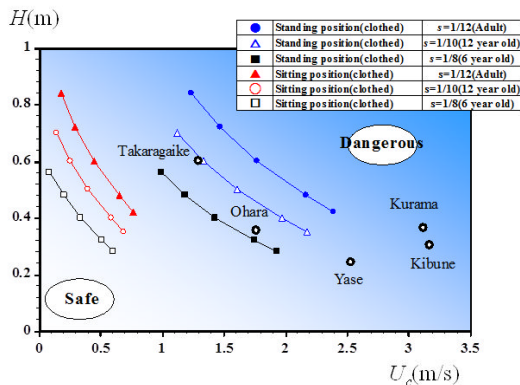


Fig.11 Critical condition for drowning accident and its application

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Fig.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。

本研究では人体模型のスケールを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Fig.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。

最後に本研究で求めた限界流況に関する実スケールでの判読図を戸田ら(2003)の短時間豪雨時(1994年7月26日の降雨を対象)の鴨川出水時の洪水解析結果と組み合わせて水難事故の危険性を具体的に評価する。

戸田ら(2003)は、鴨川上流域での短時間豪雨で、親水性に富んだ河川のいくつかの地点で、流速や水深がどのように変化するかを調べている。5つの地点での最大流速, 最大水深をFig.11に示しているが、このうち、大原, 八瀬, 宝ヶ池では、小学生が、立位の姿勢時には何とか体勢を保てるか、あるいは限界の状態にとどまっている。一方、座位の姿勢の時には、全ての地点で大人であっても流されてしまうことを表している。

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。

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深, 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

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。

参考文献

- 石垣泰輔・戸田圭一・馬場康之・井上和也・中川一(2006): 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.
- 小川芳也・瀬良昌憲・澤井健二・足立考之・小笠原裕介・正岡聡(2014): 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, Vol.33, No.1, pp.43-52.
- 北村光司・西田佳史(2017): 河川の流水による子どもの流さ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
- 須賀堯三・上坂恒雄・吉田高樹・浜口憲一郎・陳志軒(1994): 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.
- 高橋重雄・遠藤仁彦・室善一朗(1992): 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.
- 戸田圭一・徳永智宏・井上和也(2003): 親水河川の出水時の危険度解析, 自然災害科学, Vol.22, No.3, pp.285-297.
- 藤田一郎・伊藤崇博(2011): 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.

(論文受理日: 2018年6月13日)