

河川や側溝・用水路での水難事故発生の危険性に関する実験的研究

京都大学大学院工学研究科 岡本隆明・戸田圭一・當麻泰史・岡宗佑

1. はじめに

河川で子供が水遊びをしているときに流されてしまう事故が多々発生している。また側溝や用水路では子供だけでなく大人も水難事故にあう危険性が指摘されている。

一体どのような流れの条件、すなわち、どのような流速や水深の条件で、人間が流されてしまうのかという研究は以前からなされてきた。人体に及ぼす流れの力、すなわち流体力と、人間が発揮する抵抗力が釣り合うときが、人が流される限界と考えられてきたり。ここでもこの考え方に立つこととするが、従来は立った状態（立位）の大人をベースにした解析がほとんどであった。

ここでは人間の特徴や属性に基づいて水難事故の危険度を評価することを考え、人間の姿勢（立位・座位）、衣服の有無（着衣・非着衣）を考慮した実験を実施した。また実験結果の縮尺を読み替えることにより、身長 120 cm の子供、身長 150 cm の小学校高学年または小柄な成人女性、身長 180 cm の成人男性の危険度の違いについても検討している。さらに、幅の狭い側溝での子供の水難事故危険性についても検討を加えている。

2. 実験概要

人体模型を用いて流水中の人体に掛かる力を様々な姿勢で計測し、特に座位の姿勢での漂流危険性²⁾について調べた。子供が水遊びをしているとき、あるいは大人が立っている時からバランスを崩したときの姿勢として座位姿勢を考えている。同様に着衣による影響を調べるために、抗力計測に加え、電磁流速計による流速計測を行った。

図-1 に人体模型にかかる流体力計測実験の装置図を示す。水路は全長 10m、幅 0.4m、高さ 0.5m の可変勾配型水路である。人体模型への水路幅の影響はない。 x は流下方向、 y は水深方向を示す。 H は全水深、 k は人体模型の高さを示している。水路床との摩擦力の影響をなくすため、図のように水路上面の支柱から模型を吊り下げ、底面から 2mm 程度浮かせて固定し、流体力計測にはフォースゲージを用いた。

人体模型は立位の姿勢で全長 $k_1=15\text{cm}$ 、座位では $k_2=7\text{cm}$ で、本実験では人体模型を身長 150cm、座高 70cm の人間の 1/10 スケールと想定した上で、各種実験条件を設定した。ここで用いた人体模型は関節部分が可動であるため、様々な姿勢をとらせることができる。実験では流水による転倒を考慮し、立位時と座位時に変化させた。また着衣を考慮するため、厚さ約 1mm 程度の薄い木綿を切って模型に巻き付け計測を行った。実験での水理条件は表-1 に示す。実スケールに換算して、水深 0.35m、0.50m、0.70m、流速 1.0m/s、1.5m/s、2.0m/s となるように設定した。

図-2 に人体模型背後の流速計測実験の装置図を示す。電磁流速計と I 型センサーを用いて人体模型背後の流れ方向の流速を計測した。センサーは流下・横断方向(図中の x, z 方向)に可動するように設置した。

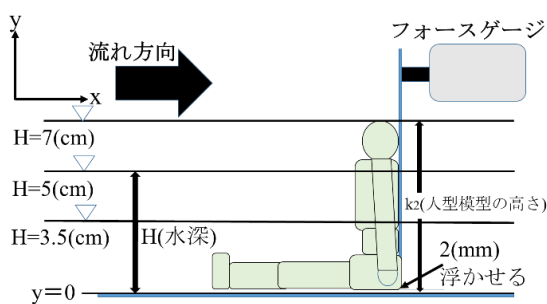


図-1 人体にかかる流体力計測装置図

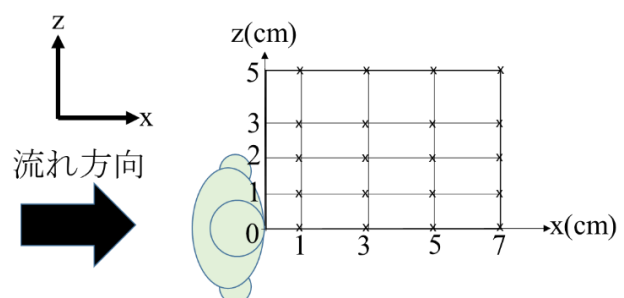


図-2 電磁流速計による流速計測

表-1 実スケール換算した水力条件と実験時の水力条件

実スケール		実験時の条件			Fr
流速(m/s)	水深(m)	流速(m/s)	水深(m)	流量(l/s)	
1.0	0.35	0.316	0.035	4.427	0.540
	0.50		0.050	6.325	0.452
	0.70		0.070	8.854	0.382
1.5	0.35	0.474	0.035	6.641	0.810
	0.50		0.050	9.487	0.677
	0.70		0.070	13.28	0.572
2.0	0.35	0.633	0.035	8.854	1.079
	0.50		0.050	12.65	0.903
	0.70		0.070	17.71	0.763

3. 実験結果

図-3 に立位時と座位時の人体にかかる流体力を示す。図中に立位状態での転倒への抵抗限界値³⁾を示す。立位時と座位時の差は水深が小さいほど大きくなり、座位時の流体力が立位時より 2~3 倍程度大きい。流水中で転倒した場合、あるいは座っている場合に、押し流される危険性が高いことを示している。これは座位の水中の投影面積が立位より大きいことと、後述する抗力係数の値そのものが座位のほうが立位よりも大きくなることの 2 つの理由による。

また、非着衣時より着衣時の方が人体模型の受ける流体力が大きい。着衣の影響について検討するために、図-4 に $y=1\text{cm}$ で計測した立位時の時間平均をとった流れ方向の流速の水平面コンター図を示す。着衣時では非着衣時より人体の後方の流速が小さくなっており、抗力計測の結果と対応している。水中投影面積は着衣時と非着衣時で大きな変化はないことから、形状抵抗と表面抵抗、とくに形状抵抗に相当するものが流水中で人体が受ける流体力に影響を及ぼしている可能性が示唆された。なお詳細な検討は今後の課題である。

図-5 に人間の体重と浮力を考慮した静止摩擦力と流体力のつり合い式から求めた、流される限界の流速と水深の関係を示す。限界流速 U_c の算出には以下の式(1)を用いた。

$$\mu(mg - \rho V_o g) = \frac{1}{2} C_D \rho A U_c^2 \quad (1)$$

人体に対する地面の静止摩擦係数 μ は 0.7⁴⁾、 m は平均身長 150cm の 12 歳児の平均体重 46kg、 ρ は水の密度、 V_o は人体の水没部分の体積、 g は重力加速度である。 C_D は抗力係数で、 A は水深ごとに求めた x 方向の投影面積である。図に示した曲線より右上は流される危険領域、左下はそうでない領域を示している。立位時より座位時の方が流される限界の流速値が小さく、転倒した場合、流れやすいことを示している。

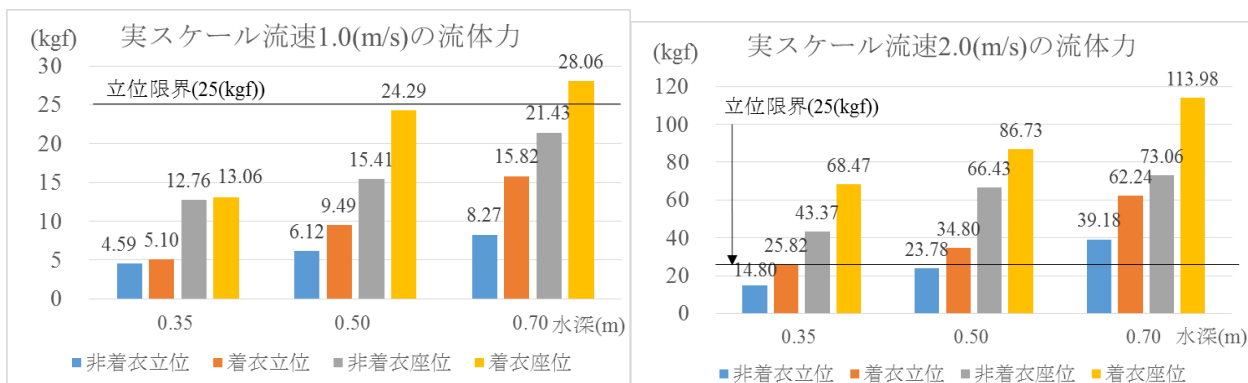


図-3 立位時と座位時の人体にかかる流体力

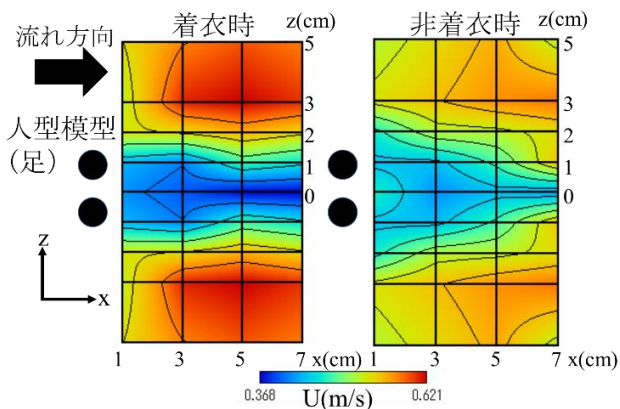


図-4 人体背後の時間平均主流速水平面コンター図

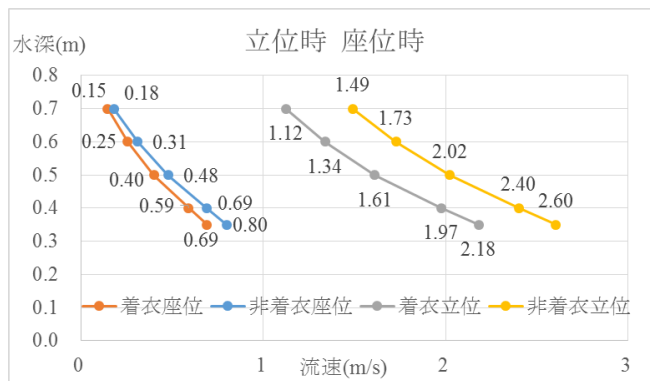


図-5 水難事故危険流況判読図 (身長 150 cm)

これは、立位、座位時の抗力係数の変化と水中の投影面積が立位時より座位時が大きいことに加えて、水没部分の体積も座位時が立位時より大きいいため、浮力が増加し静止摩擦力が小さくなるためである。図より着衣の座位姿勢では、身長 150cm の人間で、水深が 0.35m、流速が 0.7m/s 程度が流される限界状況であることがわかる。

さらに、人間の体形が相似形であるとの仮定の下で、身長 150cm 相当の人間に対する縮尺 1/10 の実験結果を、身長 120cm 相当の人間 (体重 23kg) の縮尺 1/8 の実験、身長 180cm 相当の人間 (体重 80kg) に対する縮尺 1/12 の実験と読み替えると、図-6 のような結果が得られる。身長 120cm の子供の場合、着衣で座位時の場合に、とくに危険な状況になることが明らかとなった。

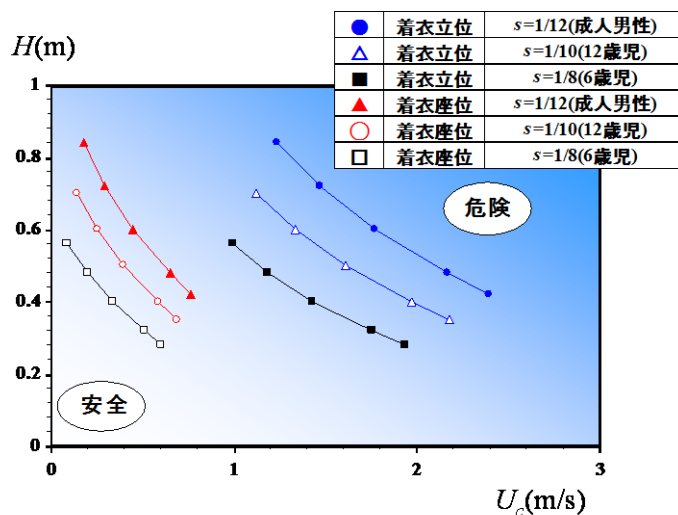


図-6 水難事故危険流況判読図

4. 側溝・用水路での子供の水難事故の危険性

さらに幅の狭い側溝、用水路での子供の水難事故に焦点をあてて、身長 120cm の子供を対象とした縮尺 1/4 の模型を用いた追加実験を行った。水路幅を実スケールで 0.4m と想定して実験を実施した。

図-7 に示すように、水路幅が狭くなると、人間の身体で流れがせき止められる傾向となり、上流部で水深が増加して、静水圧差が効いてきて人体に作用する流体力が増大するとともに、浮力が増して抵抗力が小さくなる。図-8 に水路幅 0.4m のときの、流体力と抵抗力がつりあう条件での子供の水難事故危険流況曲線を点線で

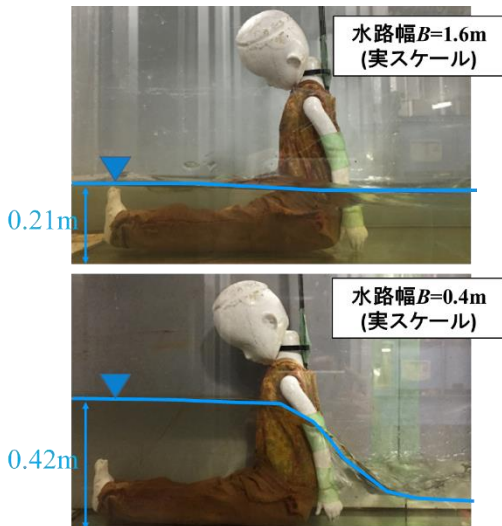


図-7 側溝内での座位姿勢の子供周辺の流れの様子

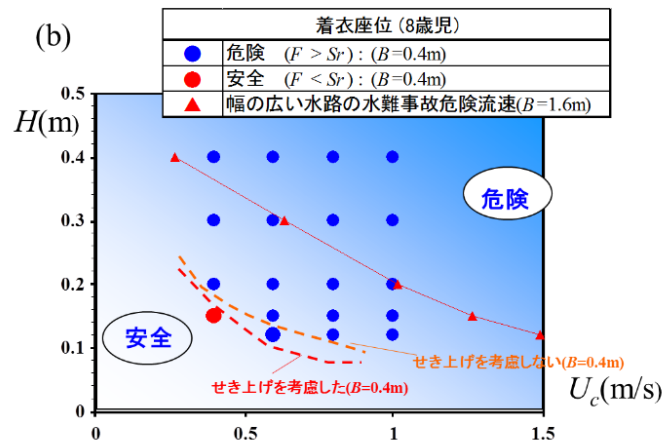


図-8 幅の狭い側溝 (幅 0.4m) での子供の水難事故危険流況判読図

示しているが、水深が 0.1m 程度でも、流速が 0.6m/s を超えると、子供が流される危険性があらわれる結果となっている。

4. おわりに

座位姿勢で着衣の状態では、従来考えているよりも水に流されやすいことが明らかとなった。小さな子供が川で遊ぶときには保護者が十分、目を配る必要がある。また小さな子供は雨の時には決して側溝や用水路に近づかないよう、防災教育をとおして注意することが重要である。

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への人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) 北村光司・西田佳史, 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4回大会資料, 2017.
- 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) 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, 1995.

(備考)

本原稿は以下の2編の論文内容を要約して編集したものである。

- (a) 岡本隆明・戸田圭一・當麻泰史：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, 河川技術論文集第24巻, 土木学会水工学委員会河川部会, pp.493-498, 2018.
- (b) 岡本隆明・戸田圭一・岡宗佑・當麻泰史：側溝・用水路での水難事故の発生危険性の増大に関する実験的研究, 河川技術論文集第25巻, 土木学会水工学委員会河川部会, pp.73-78, 2019.