

地下浸水時の人体に作用する流体力とその危険性に関する実験的研究

EXPERIMENT STUDY ON DRAG FORCE EXERTED ON HUMAN BODY AND DROWING RISK IN FLOODED UNDERGROUND AREA

岡本 隆明¹・戸田 圭一²・當麻 泰史³・石垣 泰輔⁴

Takaaki OKAMOTO¹, Keiichi TODA², Yasufumi TOUMA³, Taisuke ISHIGAKI⁴

Climate change increases the frequency of torrential rains and the rainfall events cause flash floods in underground area. Therefore, it is very important to study the hydrodynamic force exerted on the human body in flood water. In this study, the flume experiments were conducted using a small-scale model of the human body (1/10 scale). 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. The results can be used as primary assessment to define the drowning risk in underground area after torrential rain.

Key Words : *underground inundation, drag force coefficient of human body, sitting position , drowning risk*

1. はじめに

近年，計画規模を超える集中豪雨が増加傾向にあり各地で内水氾濫が頻発している．特に都市部では限られた土地を有効利用するために地下構造物が多く存在し，ひとたび地上が氾濫すると地下空間に氾濫水が浸入する．地下空間は最深部に位置し，氾濫水が最終的に集中することから(井上ら(2002)¹⁾，甚大な人的被害が生じると予測される．地下空間浸水時における被害の抑止には，迅速かつ安全な避難行動が不可欠で，適切な避難計画を策定する必要がある．これまで地下浸水シミュレーション¹⁾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．

しかしながら，地下浸水を含む水害時の避難に関する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．高橋ら(1992)²⁾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．藤田ら(2011)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．浅井ら(2009)⁴⁾は地下から地上への避難について，実物大階段模型と通路模型を用いた避難体験実験を行い，高齢者を含めた避難困難度の定量的な評価および避難困難度指標を求めた．

北村・西田(2017)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路実験をおこない，北村・西田(2017)⁵⁾の研究を参考に様々な姿勢の人体にかかる抗力を計測し，氾濫水による転倒を考慮した地下空間での水難事故の危険性について調べる．さらに人体に作用する流体力の抗力係数を直

キーワード：地下浸水，人体の抗力係数，流水による転倒，水難事故危険性

¹正会員 京都大学大学院工学研究科助教 Assistant professor, Graduate School of Engineering, Kyoto University (okamoto.takaaki.8x@kyoto-u.ac.jp)

²フェロー会員 京都大学大学院工学研究科教授 Professor, Graduate School of Engineering, Kyoto University

³学生会員 京都大学大学院工学研究科大学院生 Graduate student, Graduate School of Engineering, Kyoto University

⁴正会員 関西大学環境都市工学部都市システム工学科教授 Professor, Faculty of Environmental and Urban Engineering, Kansai University

表-1 実験条件 (1/10 スケール)

	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	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	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	着衣, 非着衣



図-1 (a) 人体模型 (1/10 スケール) の姿勢変化, (b) 抗力計測

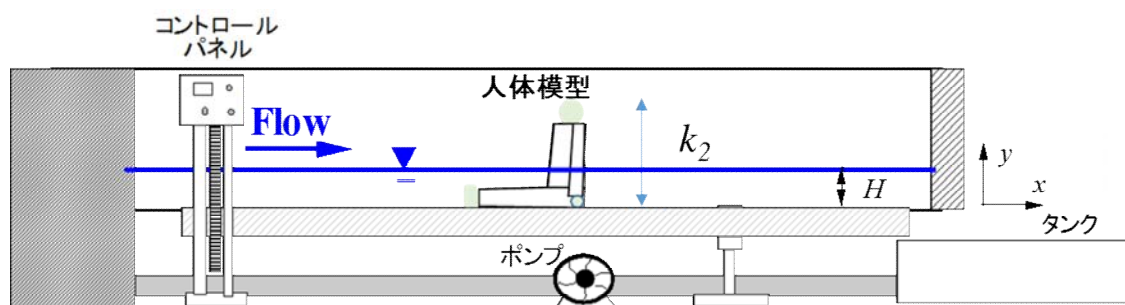


図-2 人体模型 (1/10 スケール) を用いた水路実験

接評価し、地下空間での避難限界指標となる実スケールでの危険水位、流速を求めた。

2. 実験装置

図-1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。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-1(b)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-2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。

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。水深は $H=0.035, 0.05, 0.07\text{m}$ (実スケールで0.35, 0.5, 0.7m)の

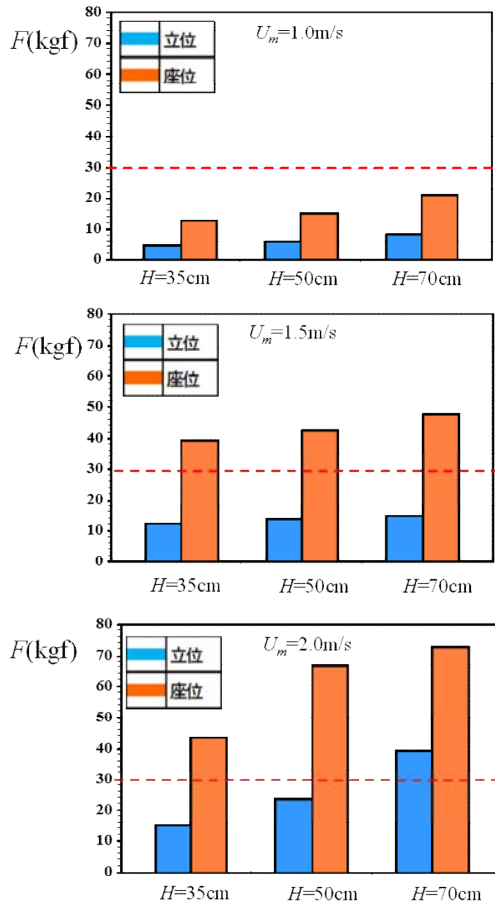


図-3 流水中の転倒による人体抗力の増加

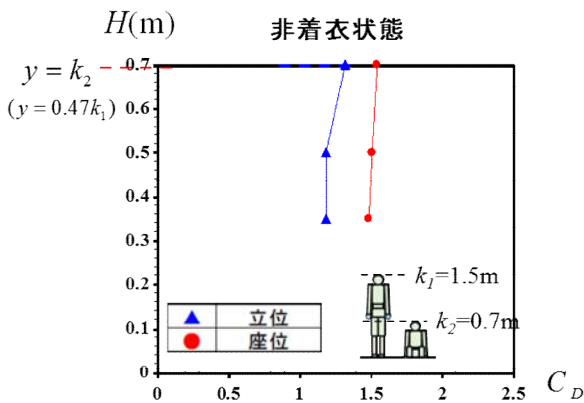


図-4 人体の姿勢による抗力係数の変化

3通り、断面平均流速 U_m も $U_m=0.32, 0.47, 0.63$ m/s (実スケールで 1.0, 1.5, 2.0 m/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 $H=0.07$ m では立位状態では脚部のみ水没し、座位状態では人体模型は全水没している。

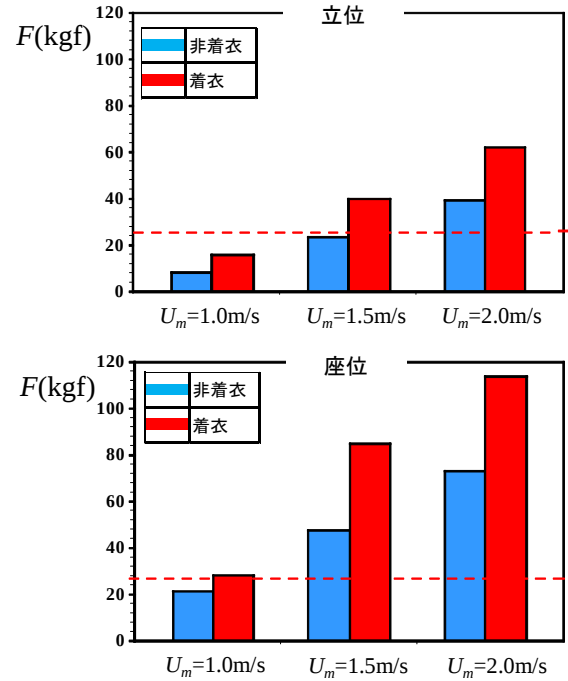


図-5 着衣による人体抗力の増加

3. 流水中の転倒による人体抗力の変化

図-3 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 (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によって評価した、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 1.0 m/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 2.0 m/s になると水深 0.5 m 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20～30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。図-4 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一様な分布となり、 $C_D=1.2$ とな

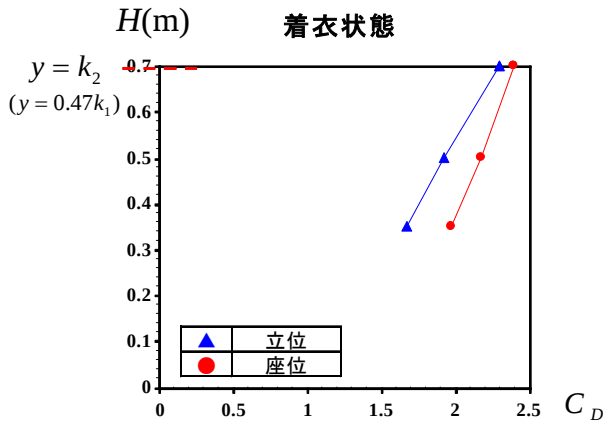


図-6 着衣による抗力係数の変化

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樣で、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はなく、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。

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-5 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。水深 0.7m で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。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%抗力値が増加している。立位時 $U_m=1.5m/s$ 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-6 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。

4. 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

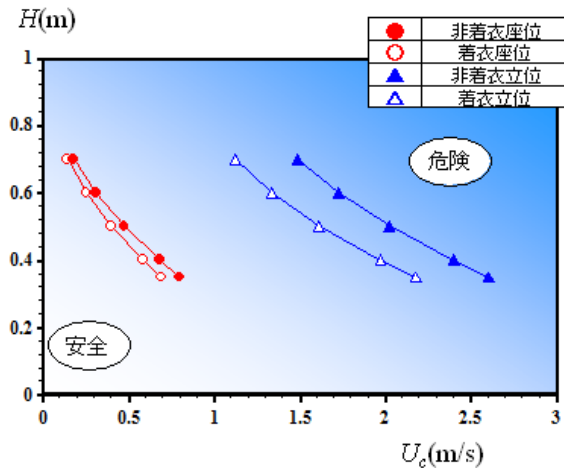


図-7 水難事故危険水位、流速判読図

(12歳児を対象とし、流水による転倒、着衣の影響を考慮)

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²⁾。

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

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。

$$F_b = \rho g V_0 \quad (3)$$

ここで V_0 : 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図-7 に示す。本実験では実スケール水深は $H=0.35, 0.5, 0.7m$ 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-4, 6 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。

立位状態では水深 0.35m では 2.5m/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、子どもが避難時に転倒するような状況では 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-3 で考察したように人が転倒して座位になると氾濫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

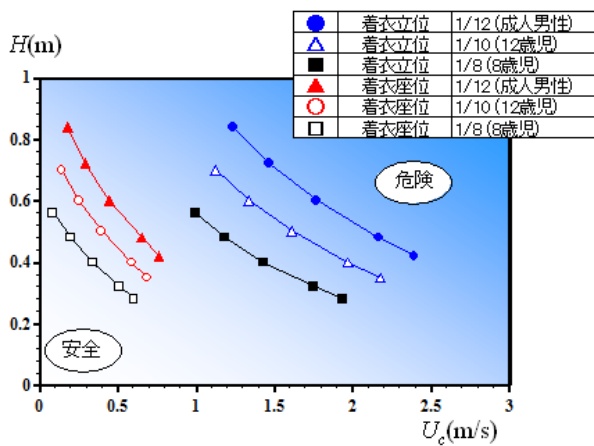


図-8 水難事故危険水位，流速判読図
(6歳児，12歳児，成人男性を対象)

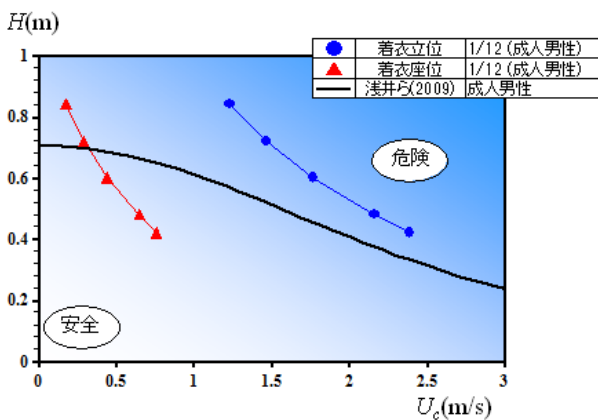


図-9 成人男性の水難事故危険水位，流速判読図
(浅井ら(2009)⁹⁾の避難困難指標と比較)

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-8 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．

図-9 に本研究の成人男性の水難事故に遭う危険流速と浅井ら(2009)⁹⁾の単位幅比力から求めた避難困難指標と比較した．浅井ら(2009)⁹⁾は単位幅比力 M が $0.25(\text{m}^2)$ を上回ると成人男性が避難困難になるとしている．

$$M = \frac{h^2}{2} + \frac{u^2 h}{g} \quad (4)$$

立位時の成人男性の危険水深と流速は単位幅比力から求めた避難困難指標よりやや大きく，本研究の実験結果は妥当であるといえる．これは浅井ら(2009)⁹⁾の結果は避難

困難を示している指標であるのに対し，本研究の危険流速は氾濫流によって流されてしまう限界状態で評価しているためである．

また氾濫流による転倒を考慮すると，座位状態の危険流速・水深は浅井ら(2009)⁹⁾の避難困難指標よりも小さい．このことから地下空間での避難時に階段などで転倒すると従来の避難困難指標よりも小さい氾濫流速(例えば，水深 0.4m で 0.9m/s 程度の流速)で成人男性が押し流されてしまう可能性があることが示唆された．

5. 結論

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地下空間で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，地下空間での避難限界指標となる実スケールでの危険水位，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)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%抗力値が増加している．

(4) 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

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。

- (5) 地下空間での避難時に階段などで転倒すると従来の避難困難指標よりも小さい氾濫流速で成人男性が押し流されてしまう可能性があることが示唆された。

参考文献

- 1) 井上和也, 戸田圭一, 中井勉, 竹村典久, ・大八木亮
地下空間への浸水過程について, 京都大学防災研究所
年報 第 46 号 B, pp.263-273, 2002
- 2) 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.
- 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) 浅井良純, 石垣泰輔, 馬場康之, 戸田圭一: 高齢者を含
めた地下空間浸水時における, 避難経路の安全性に関する
検討, 水工学論文集, 第 53 巻, pp.859-864, 2009.
- 5) 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四回大会資料, 2017.