

水害時の安全避難行動（水中歩行）に関する検討

Preliminary Study on Feasible Safe Evacuation in Flood Disaster

須賀堯三* 上阪恒雄** 吉田高樹** 浜口憲一郎*** 陳志軒***

by Kyozo SUGA, Tsuneo UESAKA, Takaki YOSHIDA, Kenichirou HAMAGUCHI and Zhixuan CHEN

Abstract

This paper is one of the serial study on underwater walking in flood disaster evacuation. By observing the underwater walking speed, the walking posture and people's psychology of every age group in the simulated flood flow, various conditions of walking in the stream are studied. The hydraulic condition of feasible safe evacuation for every age group is obtained.

Keywords: flood disaster evacuation; underwater walking; feasible safe evacuation

1. まえがき

河川の氾濫時における流域住民の安全な避難誘導のためには、氾濫流の危険性についての住民への広報・啓蒙などとともに、浸水深と流速が避難時の心理に及ぼす影響、及び浸水深・流速と歩行避難の限界などを把握することが、氾濫による水害の低減にとっては重要である。歩行避難の限界については、流水の水深・流速以外にも、地形・住民の年齢・気象条件などが影響していると判断される。既往の研究では主に成年男子を対象とした実験により歩行形態・歩行限界の検討^{1) 2)}が行われているが、年齢による歩行形態の変化、歩行速度の検討などは行われていない。本研究においては、実際の避難行動に近い状況を想定した流水中で、各年代の被験者に対し水中歩行実験を実施し、水深・流速などに対する歩行速度の計測・歩行形態の観察と、被験者への歩行状況に対するヒアリングから水中歩行の機構を検討し、安全に避難することの可能な領域について年齢の体力がどのように影響しているかについて検討を行った。

2. 実験の内容

2.1 実験方法及び被験者

実験は建設省土木研究所の大型直線水路を用い実施した。実験では水中での歩行速度の測定、歩行時の流水に対する感じ方をヒアリングすると同時に、水中歩行時の歩行状況をビデオ、写真で撮影した（写真-1）。今回の被験者は35才から61才の5人を対象とし、身長・体重等はほぼ年齢別全国平均値程度である。



写真-1 水中歩行の状況

* 正会員 工博 宇都宮大学教授 工学部建設学科
(〒321 宇都宮市石井2753)

** 正会員 建設省利根川上流工事事務所
(〒349-11 埼玉県北葛飾郡栗橋町北2-19-1)

*** 正会員 パシフィックコンサルタンツ(株) 水工部、筑波実験場
(〒206 東京都多摩市関戸1-7-5)

2.2 実験結果の概要

実験結果を整理すると以下のである。①各年代の被験者とも水深が膝までの場合は流速による影響が少なく60cm/sぐらいの速度で歩行でき、恐怖感もほとんど感じない。②それに対し、水深が股を越えた場合は歩行速度が急に下がり、恐怖感を感じ始める。歩行速度は、水深あるいは流速の増加につれて遅くなるが、流速よりも水深に大きく影響されていると判断される。③60歳の高齢者は流水についての感じ方について、水深が股までの場合、流速が80cm/s以下の範囲であれば恐怖感はあまり感じていないが、水深約1m、流速約1m/sの場合では、歩行に困難さと恐怖感を感じておりロープなどの補助具がなければ歩行不能となっている。④図-2に歩行速度と歩行者年齢の関係を示す。年齢の上昇につれて歩行速度が低下しており、体力・バランス感覚の低下とともに歩行速度が低下していると判断される。⑤水深と流速が増えるにつれて、歩行速度が低下している。これは歩行速度が速い場合は容易に歩行できることを示しており、実験においては20cm/s程度の歩行速度ではほぼ歩行が不可能な状態であることが確認された。

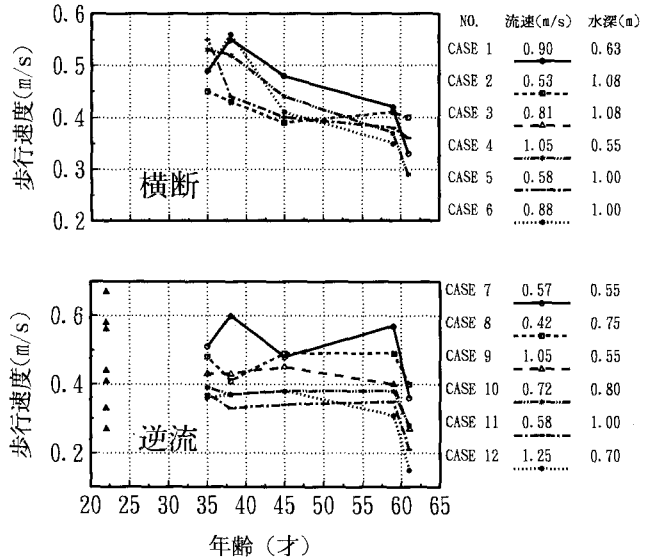


図-1 歩行速度と年齢

3. 実験結果の解析

3.1 水中歩行の機構

水中を歩く場合、流水の抵抗に対し歩行者は体のバランスを取りながら歩行する。バランスの取り方としては、被験者の多くは腕を空中に上げ体を前方に傾けて、流水に抵抗しながら歩行する状況が観察された。水中を歩行する場合、人体に作用する流水による抗力Dは下記の様に表現できる。

$$D = C_d \cdot \frac{\rho (u + v)^2 \cdot A}{2} \quad (1)$$

ここに、D：人体が受ける抗力、 C_d ：抗力係数、A：抗力を受ける面積、v：歩行速度、u：洪水流速

被験者は水中歩行時には底面に作用する摩擦力により流水に対し抵抗し歩行できると考えられる。摩擦力Fは摩擦係数を用いて下記のように表現できる。

$$F = f \cdot (G_0 - W) \quad (2)$$

ここに、f：摩擦係数、 G_0 ：体重、W：浮力。

モーメントの釣り合いを考えれば、次の式が得られる。

$$G_0 H_0 \sin \theta = D H_D + W H_w \sin \theta$$

ここに、 H_0 は人体の重心高さで、 H_D は抗力を受ける高さで、 H_w は浮力を受ける高さである。 θ は歩行時の人体の傾斜角度で、水中歩行時における人体の傾斜角度はモーメントの釣り合いから次式のようにになる。歩行中の傾斜角度 θ は大きければ大きいほどバランスが取り難くなるため、 θ 安全歩行避難を行う最大斜角度を θ_{max} とすれば θ は θ_{max} より小さい値となる。

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{D H_D}{G_0 H_0 - W H_w} \right) \leq \theta_{max}$$

力の釣り合いを考えると、 $F < D$ の場合は歩行不可能であり、 $F \geq D$ の場合は水中歩行が可能であると判

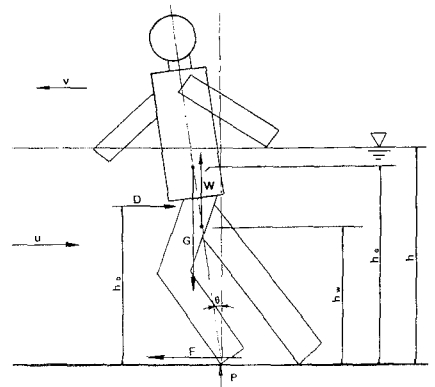


図-2 水中歩行時人体に作用する力の定義図

断される。しかし、実際には歩行者の体力及び流れに対する感じ方によって、歩行能力に影響があると考えられ、安全に歩行により避難するには抗力に対する安全率 α を考慮した摩擦抗力に相当する力が必要となる。

$$F \geq \alpha D$$

従って、安全に避難できる洪水流速の範囲は、式（１）、（２）から（３）式のようになる。

$$u \leq \left[\frac{2 f (G_0 + G_1 - W)}{\alpha C_d \rho A} \right]^{1/2} - v \tag{3}$$

式（３）を無次元化すると以下のようである。

$$F_r = \frac{u}{(gh)^{1/2}} \leq \left[\frac{2 f (G_0 + G_1 - W)}{\alpha C_d \rho gh A} \right]^{1/2} - \frac{v}{(gh)^{1/2}} \tag{4}$$

実験結果の解析においては、この抗力・摩擦抗力と歩行速度、歩行時の感じ方について整理を行い歩行限界の解析を行った。

3.2 諸係数について

(a) 抗力係数と摩擦係数

抗力係数は、実験領域のレイノルズ数が 10^5 程度の範囲であり一般的に抗力係数は1.0程度とした。摩擦係数 f は歩行者の靴と歩行面の材料により求められるが、現地での摩擦係数実験によると、摩擦係数はコンクリートや鉄板などの歩行面に0.7で、砂や普段の土面などに0.5で、玉石、砂利などに0.4である。

(b) H_G , H_D , H_W の値

重心高さ・抗力作用高さ・浮心高さは人体の投影面積と水中体積の関係から次の通りに定めた。

$$H_G = 0.55 H \quad H_D = 0.60 h \quad H_W = 0.58 h \quad (H: \text{身長}, h: \text{水深})$$

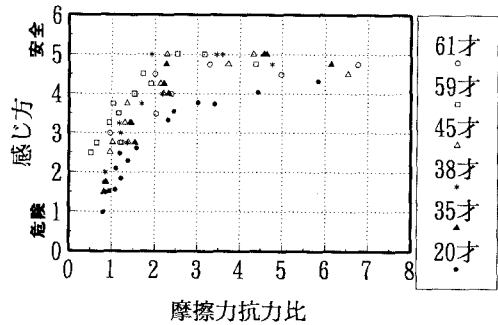
3.3 解析の結果

(a) 歩行者の心理と安全率

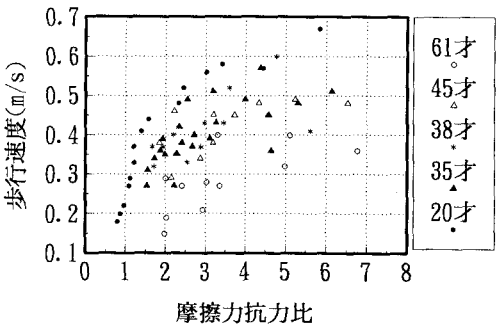
歩行時の恐怖感は流れの強さと歩行の安定度などから影響を受ける。水深が増加し、浮力を受けて安定感がなくなると急激に恐怖感を感じるようになる。水深が増加し流速が速くなり、流れの抗力を大きく受けると流される恐怖感から歩行が困難になっている。青年男子の実験結果により、安全率 α が2より大きい場合には、歩行時の恐怖感はほぼ感じず安全に歩行できるとされている¹⁾。摩擦抗力比と感じ方を図－3に示すが、成年も高齢者もほぼ同様な傾向を示し、摩擦係数抗力比が2程度で変化が見られ摩擦抗力が抗力の2倍程度となると恐怖感が少なくなっていることを示している。次に、今回の各年代歩行者の歩行速度と摩擦抗力比 α との関係を図－4に示す。図－4によると摩擦抗力比と歩行速度の関係については年齢的に変化が見られ、同じ抗力に対しても年齢によっては大きな摩擦抗力がないと安定して歩行することが困難なことを示している。

表－1 年齢別安全率

年齢	安全率	
	範囲	平均値
20才	2.0～2.2	2.1
40才	2.6～3.0	2.80
60才	4.0～5.0	4.5



図－3 摩擦抗力比と感じ方



図－4 摩擦抗力比と歩行速度

(b) 歩行速度と傾斜角度

一般的には体を傾斜させた方が速く歩けることになるが、水中歩行においては流水に抵抗するため体を傾斜させ歩行する。そのため流水の抵抗が大きくなり歩行が困難になるほど体の傾斜角度が大きくなり歩行速度は低下する。図-5に傾斜角度と歩行速度の関係を示す。歩行が限界となる20 cm/s程度の歩行速度では青年は体の傾斜は13度程度であるが、60歳の高齢者においては6度程度であり、高齢者にとっては体を傾斜させることにより流水に対し体のバランスを保つことが困難であることが分かる。

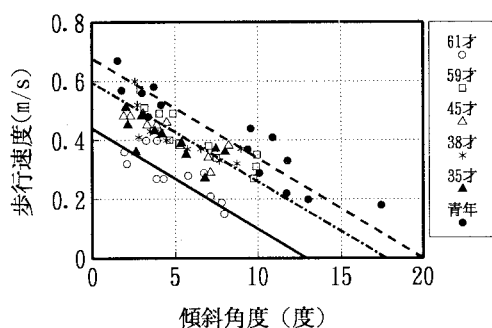


図-5 傾斜角度と歩行速度

4. 安全避難領域について

4.1 安全避難歩行速度

既往の避難に関するアンケートにおける避難速度は概ね40～70 cm/sである²⁾。成年男子の実験では摩擦力抗力比 $\sigma = 2$ は安全避難の限界になり、計画避難最低歩行速度は40 cm/s程度と判断されている¹⁾。本実験での感じ方と歩行速度を図-6に示す。恐怖感を感じず歩行可能な歩行速度については成年と同等40 cm/s程度の歩行速度であると判断される。

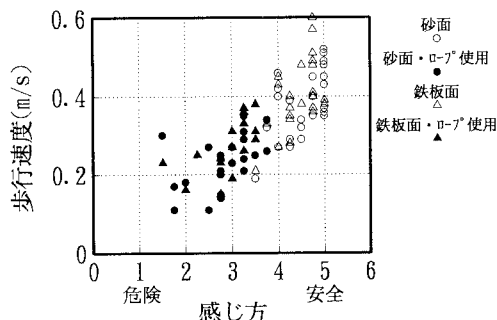


図-6 歩行速度と感じ方

4.2 安全避難領域図

式(4)から安全率 α を算定し、計画避難歩行速度 $v = 40$ cm/sとして求められる安全避難領域を示すと図-7のようになり、年齢により安全歩行領域が低下しており、60歳程度の高齢者においては成年男子に比べ、同じ水深に対しては50%程度の流速でしか安全な歩行が困難となっていることが分かる。

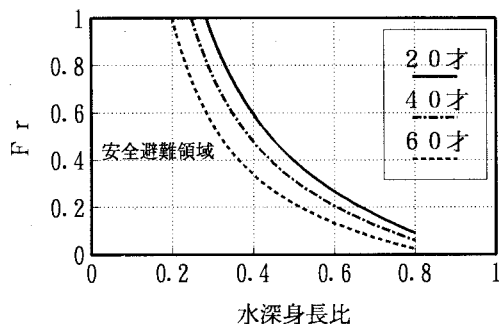


図-7 安全避難領域図(年齢別)

5. おわりに

本文では、水害避難時を想定した水中歩行実験を行い、年齢別の被験者について安全に歩行避難領域可能な領域について求めた。この結果に関しては、今後の流域の避難計画を考える際にある程度の目安を提示できるものと考えられる。この種の実験には、水路規模や実験条件の制限があり、長距離歩行の場合の歩行速度の低下、氾濫時の風雨・日没後の歩行のような不確定要素による心理的影響度の把握等については実験を行えなかった。様々な条件下で生じる洪水時の避難に関しては解明すべき項目も多く、実際の氾濫による経験者のヒアリング・現地測定などにより避難誘導に関する基礎資料を収集・解析し、水防計画を策定することが必要であると思われる。

参考文献

- 1) 須賀堯三・上阪恒雄・白井勝二・高木茂知・浜口憲一郎・陳志軒：避難時の水中歩行に関する実験、水工学論文集(第38巻)，1994年2月
- 2) 水害時の避難体制の強化に関する研究，建設省土木研究所，昭和63年3月