

津波浸水時の避難条件に関する実験的研究

西畑 剛* ・ 森屋陽一** ・ 田村 保***
瀧本浩一**** ・ 三浦 房紀*****

浸水災害下における人間の水中での避難条件を決定するため、水路内に所定の水位と流速を発生させた中を人間が歩く水中歩行実験を行った。実験は様々な年齢・性別からなる被験者の歩行速度の測定および避難可否の決定を行った。さらに着衣や歩行距離を変えた場合の歩行速度も測定した。一方、水路内に荷重計を取り付けたマネキンを配置して流体力を測定し、歩行時に人体にかかる力を推定した。これらの結果から、年齢や性別などに起因する身体能力差を考慮した避難条件についてまとめる。また実験を行っていない年代に対しても体力に関する統計資料から避難条件を推定する方法を提案する。

1. はじめに

近年、津波による陸上遡上を再現する浸水シミュレーション解析が一般的に行われるようになり、浸水計算結果を外力条件として津波災害時の人間の避難行動を模擬する避難シミュレーションの研究もなされている(例えば今村ら, 2004)。この避難シミュレーションにより、津波による人的被害の推定が様々な条件下(想定地震や発生時間等)で可能となった。しかしながら、浸水災害時における水中での人間の避難速度や避難可否条件の決定に際し、参考のできる実証的な研究としては須賀ら(1995)等が挙げられるものの、まだまだ研究例が少ないのが現状である。こうした条件は浸水時における避難シミュレーションの実施に際して重要なパラメータであり、実験データの蓄積と解析は今後の津波防災を考える上で必要であると言える。

本研究は人工的に水位と流速を作成した実験水路内を実際に人間に歩行させ、水中での歩行速度を測定した(写真-1)。一方、マネキンによる流体力の測定も行い(写真-2)、津波浸水下における歩行速度及び避難可否を年齢や性別に起因する体力差を踏まえて考察することを目的とする。

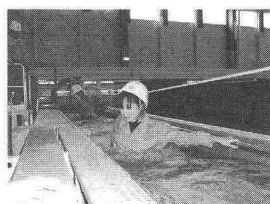


写真-1 歩行状況

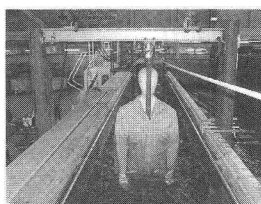


写真-2 流体力の測定

2. 実験装置・条件

(1) 実験装置

実験は平面水槽内に幅1m、高さ1.5mの水路を作成し、その中に水中ポンプにて定常流を発生させることにより行った。図-1に水路平面・断面模式図を示す。水路は平面水槽壁面と擁壁によって作成し、水路床はモルタル敷きである。水中ポンプは10吋を3台(最大流量 $24 \text{ m}^3/\text{分}$)で水槽内に循環流れを発生させることによって水路内を定常流にした。上流側のポンプ吐き出し直下には整流版を配置し、下流側には高さを10cm刻みで変更できる刃形堰を設置して越流させた。水路内流量はポンプ稼働台数と各ポンプのバルブの開閉調節により行った。また水位は下流側の刃形堰の高さを変えることにより越流水深を変化させることにより調整した。これにより水路内に様々な水位と流速からなる流れを発生させることができる。

(2) 実験条件

実験はポンプにより $2 \text{ m}^3/\text{分}$ 刻みに流量を与えた。土木学会水理公式集(1999)の刃形堰の公式から堰高を変えた水位と流速を図-2の通りに作成し、容量式波高計と電磁流速計により水位と流速を測定した。以後、流量 $X (\text{m}^3/\text{分})$ 、堰高 $H (\text{m})$ のケースをQX-Hと示す。水路内は水位 $0.17 \text{ m} \sim 1.36 \text{ m}$ 、流速 $0.03 \text{ m/s} \sim 1.01 \text{ m/s}$ の範囲の定常流となる。

なお、事前に行った検定から水深の1/2の高さで測定した流速は、ほぼ理論的に計算された断面平均流速と同じ値になっていたため、水深の1/2の高さに設置した2本の流速計の平均値を流速とみなした。また水位は水路縦断方向にほぼ一様であったため、水路下流の1箇所のみの測定とした。実験では水位計と流速計の計測値をADコンバータによってパソコンモニタ上で確認し、ポンプバルブの開閉によって、所定の水位、流速となるよう歩行前に調整を行った。

(3) 被験者

被験者は16歳から59歳までの男女から構成される。表

* 正会員 修(工) 五洋建設(株) 技術研究所
** 正会員 博(工) 五洋建設(株) 技術研究所
*** フェロー 工修 五洋建設(株) 土木設計部
**** 正会員 博(工) 山口大学助教授地域共同研究開発センター次長
***** 正会員 工博 山口大学教授工学部知的情報システム工学科

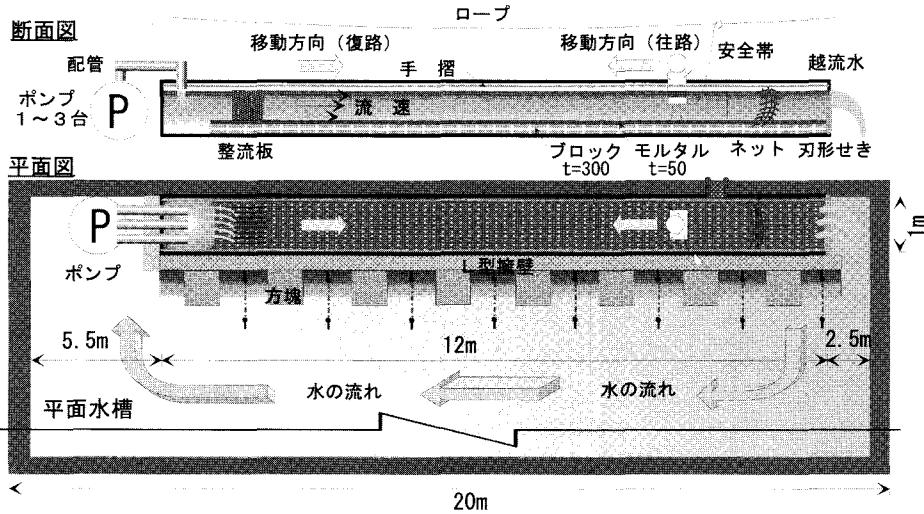


図-1 実験装置の概要

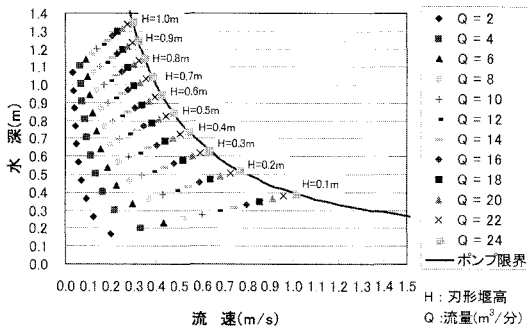


図-2 本実験装置の水位・流速の算定図

表-1 被験者構成

No	性別	年齢	身長	No	性別	年齢	身長
E1	男	21	179	E16	男	35	174
E2	男	26	168	E17	男	38	178
E3	男	27	174	E18	男	45	168
E4	男	27	170	E19	男	45	166
E5	男	27	164	E20	男	53	162
E6	男	27	175	E21	男	55	172
E7	男	28	173	E22	男	56	159
E8	男	28	173	E23	男	57	179
E9	男	28	178	E24	男	59	165
E10	男	30	174	E25	女	16	160
E11	男	30	170	E26	女	24	169
E12	男	30	176	E27	女	25	165
E13	男	31	176	E28	女	28	158
E14	男	31	169	E29	女	30	157
E15	男	31	178	E30	女	31	160

-1 に被験者の年齢, 性別, 身長を記す。

(2) に記した方法で設定した水位・流速下を被験者が下流から上流に向かって 8 m 歩行するのに要した時間を測定し, 歩行速度を算出した。被験者は原則, 上下長袖の作業着と運動靴を身につけた状態で歩行し, 一部の被験者には着衣量を増やした歩行実験も行った。

一方, 人体にかかる流体力を測定するために, マネキン (身長 170 cm) に荷重計を設置し水平方向の抗力を測定した。

3. 測定結果

(1) 歩行速度の測定結果

人員の手配の関係で歩行速度の測定は被験者毎に全条件を測定することはできなかったため, 多くの被験者に対しては主に流量 $Q = 14 \text{ m}^3/\text{分}$ および $18 \text{ m}^3/\text{分}$ で水位・流速を作成したケースについて実験し, その他のケースは一部の被験者のみ実験した。例として図-3 に $Q = 18 \text{ m}^3/\text{分}$ において越流水深を変化させた場合の水位と歩行速度の関係を示す。なお, 水位は被験者の身長で割った

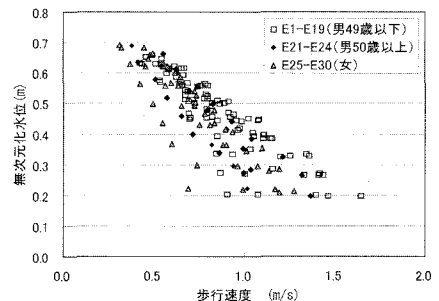


図-3 歩行速度と水位の関係

無次元化水位である。被験者の年齢が高い、あるいは女性である場合に歩行速度が低下している傾向が読みとれる。

(2) 着衣量による歩行速度差

被験者 E7, E10 に対しての同一の水位、流速下で着衣を増やして実験・比較を行った。着衣量は写真-3, 4 の通り、作業着のみの場合とその上に防寒着を着た場合で変化させた。図-4 に歩行速度の違いを示す。着衣量が増加すると歩行速度が低下することが読みとれる。

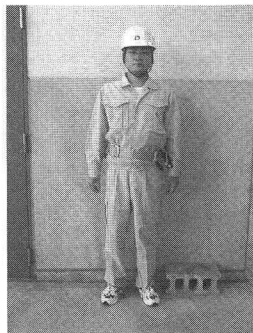


写真-3 作業着

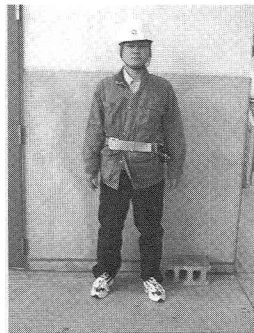


写真-4 防寒着

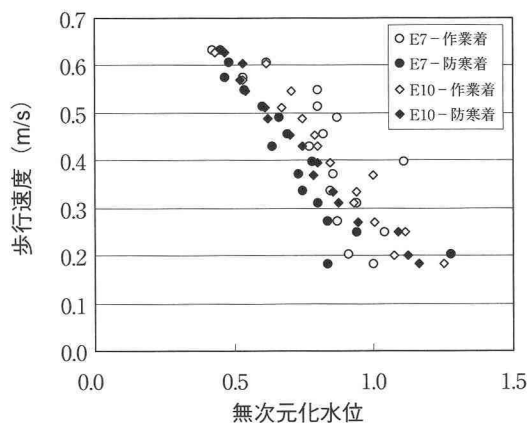


図-4 服装による歩行速度の違い

(3) 長距離歩行時の歩行速度

Q18-60 のケースについて被験者 E1 (21歳男), E10 (30歳男) を水路内30往復 (累積480 m) 歩行させた。そして各往路、復路における歩行速度を測定した。図-5 に累積距離と歩行速度を示す。E10は歩行距離が伸びるにつれて歩行速度が減少するが、E1の歩行速度はほぼ一定 (微減) であり、避難距離が長くなると個人の持久力に応じて歩行速度が低下するようである。

(4) 抗力の測定と抗力係数の算定

Q14, Q18および Q22のケースについて、被験者を模したマネキンに荷重計を取りつけて流れから受ける抗力を測定した。図-6 に測定した抗力を示す。

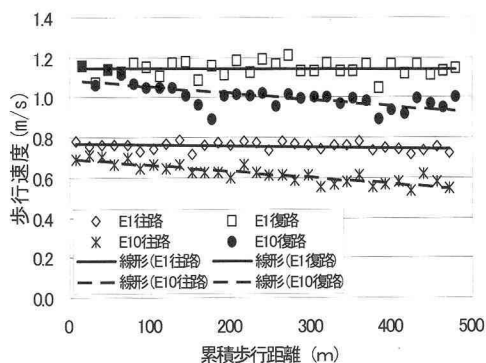


図-5 歩行距離と歩行速度

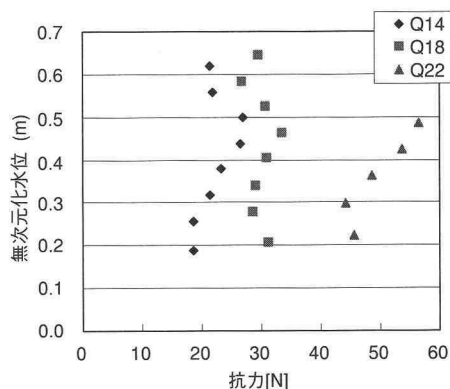


図-6 測定抗力

一方、抗力係数の算定は次式による。

$$F_x = C_D A \frac{\rho u^2}{2} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 F_x : 抗力 (N), C_D : 抗力係数, A : 投影断面積 (m^2), ρ : 流体密度 (kg/m^3), u : 流速 (m/s) であり、投影面積は水位により変化するため、投影面積はその実測値を用いて水位 h (m) の3次関数で近似し、評価することとした。

$$A(h) = -0.1756h^3 + 0.5173h^2 - 0.0375h \dots \dots (2)$$

図-7 にレイノルズ数と抗力係数の関係を示す。抗力

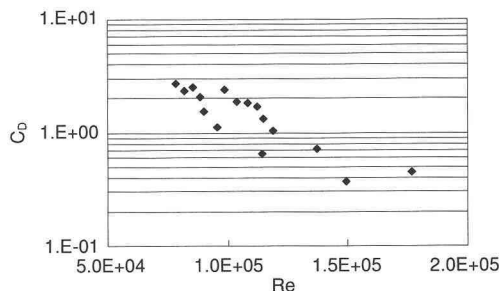


図-7 レイノルズ数と抗力係数

係数は1.0前後の値を取ることがわかる。レイノルズ数算定時の代表長さは投影面積を水位で除した値を用い、動粘性係数は、実験時の水温24度より $9.2 \times 10^{-7} (\text{m}^2/\text{s})$ を用いた。

4. 水位と歩行速度の関係

実験結果との比較により、水中の歩行速度の算定手法を構築する。須賀ら(1995)は水位、流水中で人体に作用する抗力、摩擦力の釣り合いから、氾濫流速と歩行速度の関係((3)式)を提案している。本検討でも須賀らに従い(3)式を用いることとする。

$$u \leq \sqrt{\frac{2f(G-W)}{aC_d\rho A}} + v \quad (3)$$

ここで、 u :流速(m/s)、 v :歩行速度(m/s)、 f :摩擦係数、 G :避難者重量($\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$)、 W :浮力($\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$)、 a :安全率、 C_d :抗力係数、 ρ :流体密度(kg/m^3)、 A :投影断面積(m^2)である。避難者毎の投影断面積は、その実測値を用いて(4)式に示すように無次元化水位の関数として再構築し、評価した。ここで、投影断面積は体重の2/3乗に比例すると仮定した。

$$A(h') = (-0.8627h'^3 + 1.495h'^2 - 0.0638h') * (G/70)^{2/3} \quad (4)$$

また、浮力は人体の海水に対する比重を1.0として、次の通り定義した。

$$W = G(A(h')/A(1))^{3/2} \quad (5)$$

ここで安全率 a は1m/s以下の歩行速度領域で計算値と実測値が合うように被験者毎に決めた。表-2に各被験者に与えた安全率を年代別・性別平均で記す。安全率の値としては、須賀らの結果(20才:2.0-2.2, 40才:2.6-3.0, 60才:4.0-5.0)とほぼ対応するものとなった。

表-2 年代・性別毎の安全率平均

年代・性別	人数	平均安全率
20-29歳男性	9	2.39
30-39歳男性	8	2.50
40-49歳男性	2	2.50
50-59歳男性	5	2.70
16-31歳女性	6	2.83

式(3)-(5)を用いて、被験者毎に最大歩行速度 v を算出し、実験値と比較した結果を図-8に示す。また、年齢が高い被験者層や女性は安全率が高くなる傾向が見られる。須賀らによると安全率(摩擦抗力比)は、年齢が高い程大きな値を、また同じ被験者ならば歩行に余裕があり、歩行速度が速くなる実験条件下ほど大きな値をとる。本実験でも、須賀らの結果と同様に、計算歩行

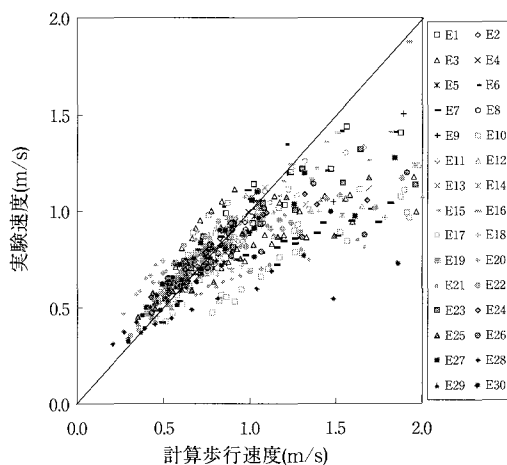


図-8 計算歩行速度と実測値

速度が大きくなるにつれてより大きな安全率を与えないと実験値と合わない傾向が見られる。

一方、避難限界に関しては、被験者への聞き取り調査では歩行速度が0.4~0.5 m/s以下となる場合、実際の災害下では歩行するのが難しいのではという意見が多かった。よって0.5 m/s以下が歩行限界の目安になると考える。

5. 水中歩行時の出力パワー

前章では流水中の力の釣り合いから歩行速度を決めたが、本章ではそれがどのくらいの仕事率に相当するか検討する。

(1) 水中歩行時のパワー

水路内を水流に逆らって歩行する時に被験者がなす仕事は(1)式による抗力と歩行速度の積として次の通りに定義できる。

$$P = F_x v \quad (6)$$

ここで、抗力の算定における流速は相対速度(水流の速度と歩行速度の和)とし、投影面積は(2)式を用いて計算した。

図-9にQ14およびQ18の実験ケースについて被験者別に算定したパワー P を示す。パワーは女性や高齢者ほど小さい値をとっており、被験者の体力を反映すると考えられる。また水位70 cmあたりからパワーは減少していく。これは70 cmが人体の股下付近の高さに相当し、これより上は浮力が大きくなり歩行しづらくなるため、個人の運動能力を十分に発揮できなくなるためと考えられる。図-10に年代別のパワーを記す。年代が上がるほどパワーが減少していることがわかる。

また、被験者からのヒアリングでは、水位が70 cmを

越えてくると水中歩行が難しくなり、災害時に歩行するのは難しいのではないかという意見が多かった。よって、安全側の設定になるが、水位70 cm（股下相当）というのが、避難限界のもう一つの目安となると考えられる。

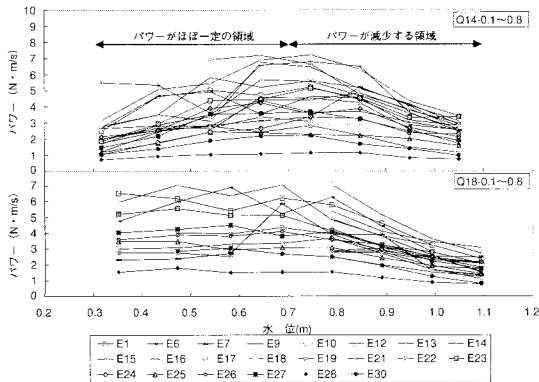


図-9 被験者別パワーと水位の関係

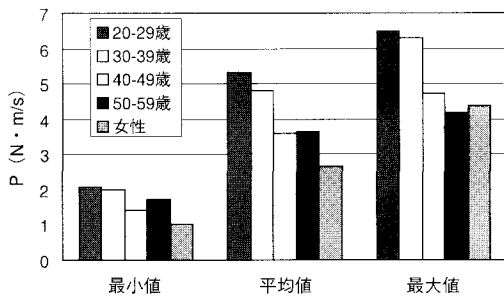


図-10 年代毎のパワー

(2) 統計データとの比較によるパワーの推定

パワーは被験者の運動能力、特に脚部の能力に関係が深いと考え、各被験者の年齢・性別に対応する脚筋力に関する体力統計データ（東京都立大学体力標準値研究会(2000)）と比較した。図-11に水位70 cmまでの被験者別平均パワーと脚筋力 F_L を比較する。脚筋力統計値に分散が求められているものには図中にバーで示した。パワーと脚筋力には相関関係が認められ、相関式を求めると以下の式となる。

$$F_L = 48.78P + 185.73 \dots\dots\dots (7)$$

なお、脚筋力に関するデータは4歳から70歳までの男女について揃っており、実験を行えなかった幼児や老人に対しても(7)式よりパワーを算定することが可能となる。そして身長や体重に関する統計データを参照し、

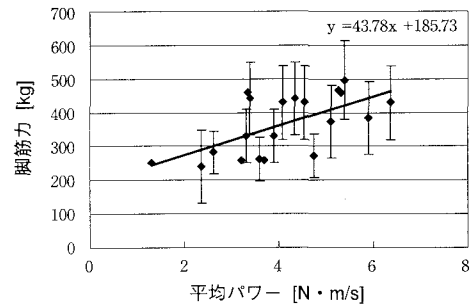


図-11 平均パワーと脚筋力の比較

(1)～(6)式を用いることにより、年齢や性別毎の歩行速度を推定することも可能となる。

6. ま と め

- 1) 水中歩行実験を行うことにより、様々な年齢・性別の人間に対する水中歩行速度、避難可否データを得た。
- 2) 水位、流速を関数とした最大歩行速度を須賀ら(1995)に基づき検証した。実験結果と整合する算定式を得ると共に適用対象範囲を女性へも拡大した。避難限界は最大歩行速度0.5 m/s以下および水位70 cm以上になった時付近と考える。
- 3) 被験者の着衣を変えて歩行速度差を計測した結果、服装により歩行速度に差が生じることがわかった。
- 4) 長距離歩行時(480 m)の歩行速度変化を測定し、歩行速度が歩行距離の増加につれ減少することを認めた。
- 5) 水位が被験者の股下まではほぼ一定だった出力パワーが腰より上の水位0.7～0.8 mでは減少し始める(運動しにくくなる)ことがわかった。
- 6) 日本人の体力に関する統計データとパワーを比較することにより、実験を行っていない年代・性別の人間へ歩行速度を概算推定する方法を提案した。

参 考 文 献

- 今村文彦・藤原誠・進藤一弥・市村強(2004)：臨海都市域に來襲する津波の統合シミュレーション開発，海工論文集，51巻，pp. 291-295。
- 須賀寛三・上阪恒雄・吉田高樹・浜川憲一郎・陳志軒(1995)：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，39巻，pp. 879-882。
- 東京都立大学体力標準値研究会編(2000)：新・日本人の体力標準値，不昧堂出版，pp. 172-175。
- 上木学会編(1999)：水理公式集，pp. 241-243。