

津波氾濫流速の簡易推定法に関する基礎的研究

Fundamental Study on Simple Method for Estimating Inundated Flow Velocity of Tsunamis

岡本憲助¹・松富英夫²

Kensuke OKAMOTO and Hideo MATSUTOMI

Based on field data of inundated depth and inundated flow velocity that is estimated by using the Bernoulli's theorem and the inundated depth, fundamental characteristics of relation between the inundated flow velocity and the inundated depth is examined, and simple and practical relations are presented for two cases that the inundated flow velocity would exert the largest and smallest fluid forces on structures and so on. Fundamental characteristics of velocity coefficient that is newly defined and implicitly included in the relations and distribution of waterline around/on typical objects such as square pillar, corn and column are also examined through hydraulic experiments.

1. はじめに

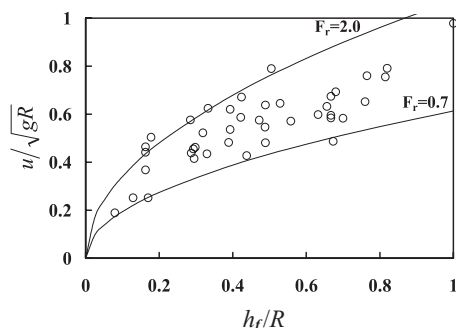
津波氾濫流速は津波被害の実態把握、個々の建物などに働く流体力、漂流物の移動速度や衝突力などの推定が必要である（首藤ら，2007）。しかし、氾濫流速は氾濫水深（以下、浸水深とも言う）、氾濫水面勾配、地面勾配、地面粗度など多くの要因に依存するため、その推定は意外と難しい。その解決法として数値計算の利用が考えられるが、労のわりに推定精度がまだよくない。

これらを背景に、氾濫流速と氾濫水深の関係式が現地調査（松富・首藤，1994）や実験（松富・飯塚，1998；松富ら，2008）に基づいて検討された。しかし、関係式に含まれる流速係数や建物などの水際線（津波痕跡線）分布などがいまだに不明で、課題として残っている。

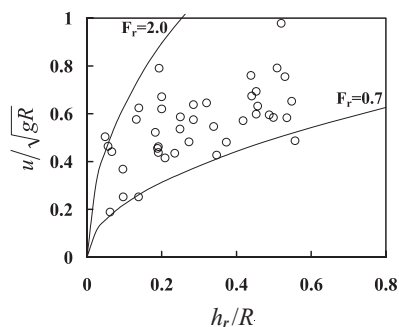
本研究は、まず現地調査データに基づいた氾濫流速と氾濫水深の関係式の再考察を行う。次に、新たな実験を加えて、建物などの模型の水際線分布などを再検討し、模型形状や流れ場に応じた流速係数を再評価し、実際の簡単な津波氾濫流速の推定式を示す。既報（松富・飯塚，1998）では、建物などを流れ横断方向に対称と想定し、水路側壁に密着させた半分模型と水路の中心に据えた全体模型で同じ結果が得られると考えて、半分模型で実験を行った。本研究では半分模型と全体模型で実験を行い、両結果の比較・検討も行う。

2. 現地調査に基づいた津波氾濫流速

現地調査に基づいた氾濫流速 u と浸水深 h の関係の最新結果を図-1に示す（松富ら，2008）。図中、 g は重力加速度、 R は浸水深の測点やその近傍での津波来襲時の海面からの津波高、 $F_r (= u/\sqrt{gh_r})$ はフルード数、氾濫流速



(a) 前面水深を浸水深とした場合



(b) 背面水深を浸水深とした場合

図-1 氾濫流速と浸水深の関係

は次式のベルヌーイの定理により評価されている。

$$u = \sqrt{2g(h_f - h_r)} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 h_f と h_r は建物などに氾濫流が作用する面（以下、前面と言う）とその背面での最大浸水深（各面での平均的なもの）である。実線は全データを包含する線で、流速係数 $C_v (= u/\sqrt{g(h_f - h_r)}) = 1.0$ 、 $F_r=0.7$ と2.0としたときの理論曲線（松富・飯塚，1998）である。実際の流速係数の値については実験に基づいて4. で論じる。

図-1 (a) と (b) 中の上側の包含する線は、建物などに

1 修(工) 伊藤組土建(株)
2 正会員 工博 秋田大学工学資源学部附属地域防災力
研究センター長

最大の流体力を及ぼす氾濫流速を与え、各々次式である。

$$u/\sqrt{gR} = 1.1\sqrt{h_f/R} \quad \cdots\cdots(2)$$

$$u/\sqrt{gR} = 2.0\sqrt{h_f/R} \quad \cdots\cdots(3)$$

下側の包含する線は、建物などに最小の流体力を及ぼす氾濫流速を与え、各々次式である。

$$u/\sqrt{gR} = 0.6\sqrt{h_f/R} \quad \cdots\cdots(4)$$

$$u/\sqrt{gR} = 0.7\sqrt{h_f/R} \quad \cdots\cdots(5)$$

建物などに最大の流体力を及ぼす氾濫流速を与える式(2)と(3)を等置すれば、 h_f/h_r の値として式(6)を得る。

$$h_f/h_r \cong 3.3 \quad \cdots\cdots(6)$$

建物などに最小の流体力を及ぼす氾濫流速を与える式(4)と(5)を等置すれば、 h_f/h_r の値として式(7)を得る。

$$h_f/h_r \cong 1.3 \quad \cdots\cdots(7)$$

3. 実験

実験は非定常な氾濫流実験と未知要素の少ない定常な定常流実験の2種類を行った。

(1) 氾濫流実験

実験水路の概略などを図-2に示す。幅0.3m、高さ0.5m、長さ11.0mの水平に設置された両面ガラス張り鋼製矩形水路である。氾濫流は一様水深部、一様勾配斜面部を伝播した後、平坦な陸上部を氾濫するゲート急開流れて模擬した。貯水長は5.0m(貯水深 h_1)、一様水深部(水深 h_{00})と一様勾配斜面部(勾配 S)、平坦な陸上部の長さは各々2.0mである。水路下流端の壁は撤去してあり、氾濫流はそこで反射を起こさずに通過できる。

建物を模擬した角柱模型をゲートの下流5.1m地点に配置した。水路横断方向の配置は図-3に示す2通りで(後述の定常流実験でも同じ)、模型の半分を水路側壁に密着させた場合と模型を水路中央に配置した場合(以下、各々を半分模型、全体模型と言う)である。

図-4に計測機器の配置を示す。半分模型では、浸水深は容量式波高計(計測技研)、氾濫流速はプロペラ流速計(直径3mm、中村製作所)で測定した。波高計は蓋付きの深さ0.1mの水槽に入れ、模型の前・背面から0.5cm離して配置した。流速計は模型の下流端から0.5cm、側面から2cm離して配置し、その水面からの深さはそこでの各実験ケースにおける最大浸水深の6割(1点法)とした。全体模型では、浸水深は超音波式波高計(キーエンス)で測定し、波高計は模型の前・背面から2.5cm離し

表-1 氾濫流実験の条件

角柱模型諸元 (cm)	半分模型	$W=5, L=10, H=17$
	全体模型	$W=10, L=10, H=10$
開度 λ (%)	半分模型	83
	全体模型	67
斜面勾配 S	1/26	
貯水深 h_1 (cm)	15, 16	
一様水深 h_{00} (cm)	1 ~ 7 (1 cm 刻み)	

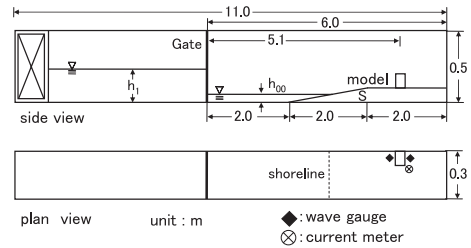


図-2 氾濫流実験の水路、計測機器の配置と諸記号の定義

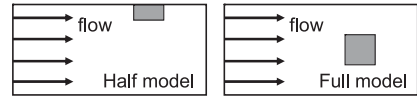
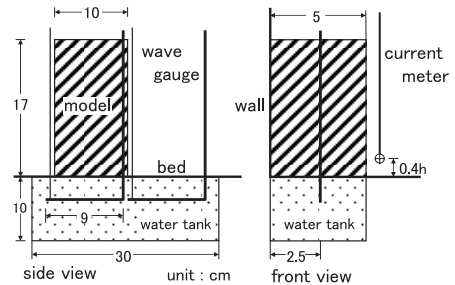
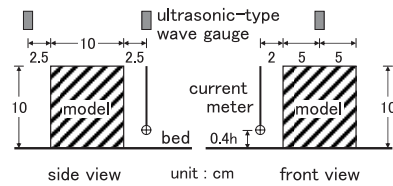


図-3 氾濫流実験と定常流実験における模型の配置



(a) 半分模型 (斜線部)



(b) 全体模型 (斜線部)

図-4 半分模型と全体模型における計測機器の配置

て配置した。氾濫流速は半分模型のときと同じプロペラ流速計で測定し、その配置なども同じとした。

実験条件を表-1に示す。表中、 λ ($=100 \times (1 - \text{模型幅} / \text{水路幅})$) は開度、 W と L 、 H は各々模型の幅と長さ、高さである。各ケース3回実験を行った。本実験条件は一様水深部における入射段波高水深比が0.5～4.4の波状や碎波段波津波に相当する。 $h_{00} \geq 0.07\text{m}$ のときは波状

段波, $h_{00} \leq 0.06\text{m}$ のときは碎波段波が形成される。

(2) 定常流実験

実験水路の概略などを図-5 (a) と (b) に示す。開度の影響をみるため、幅0.3m, 高さ0.5m, 長さ12.0mの両面ガラス張り鋼製矩形循環水路と幅1.0m, 高さ0.15m, 長さ8.0mの透明な塩化ビニール樹脂製矩形循環水路の2種類を用いた。両水路とも下流端の壁は撤去してある。

幅の狭い水路での模型の設置位置は水路上流端から5.5m, 幅の広い水路では後述する実験条件のCase1と2が水路上流端から4.5m, Case3が4.1mである。

模型の形状や諸元などを表-2に示す。表中, R_a は円錐模型の底面や円柱模型の半径である。角柱は建物, 円錐は小山, 円柱は両者の中間的なものを想定しており, 全て塩化ビニール樹脂製である。半分模型と全体模型で高さなどが異なっているが, これは全体模型の実験のときに模型が水没するのを防ぐためである。

測定項目は模型中心, 模型中心から上・下流へ0.15mと0.3mの5横断面(図-5)での水深と流速, および模型水際線の水深(角柱, 円柱)や水位(円錐)である。

水深や水位はポイントゲージ, 流速は氾濫流実験の場合と同じ1点法によりプロベラ流速計で測定した。幅の狭い水路での測定横断間隔は, 模型中心と上流側の2横断面では2cm, 下流側の2横断面では1cmとした。幅の広い水路での測定横断間隔は, 上流側の2横断面では模型から30cmまでは3~4cm, それ以降は10cm, 模型中心と下流側の2横断面では模型から30cmまでは2cm, それ以降は10cmとした。模型水際線の水深や水位は, 角柱では前・背面と側面いずれも1cm間隔, 円錐と円柱では模型最上流点を角の起点 $\theta = 0^\circ$ として 30° 間隔で測定した(図-6)。

実験条件を表-3に示す。表中, B は水路幅, Q は流量, S は水路床勾配, u_0 と h_0 は水路に模型が無いときの等流流速と等流水深で, 模型中心を通る横断面での平均値, $F_{r0} (=u_0/\sqrt{gh_0})$ はフルード数である。このフルード数の定義は既述の現地調査や後述の氾濫流実験でのものと異なることに注意を要する。括弧内は円錐の全体模型のみに対する実験条件である。

4. 実験の結果と考察

(1) 氾濫流実験

津波の現地調査で測定される浸水深は一般に各調査地点での最大浸水深である。よって, 各調査地点で推定されるべき氾濫流速は最大浸水深時のものである。

図-7は前面浸水深 h_f の測定点での水路に模型が無いときの氾濫水深 h と氾濫流速 u の一对の経時変化例である。氾濫水深に比べて氾濫流速の立ち上がりが少し遅れているが, これは測定法が1点法だからである。浸水痕跡は最大浸水深時に形成されると考えられるから, 推定すべ

表-2 定常流実験で用いた模型の形状, 種類と諸元

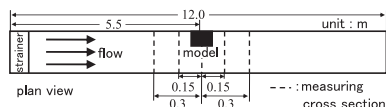
形状	種類	模型諸元(cm)	備考
角柱	半分模型	$W=5.0, L=10.0, H=5.0$	
	全体模型	$W=10.0, L=10.0, H=10.0$	水没防止
円錐	半分模型	$R_a=5.0, H=5.0$	
	全体模型	$R_a=6.9, H=6.9$	水没防止
円柱	半分模型	$R_a=5.0, H=5.0$	
	全体模型	$R_a=5.0, H=7.5$	水没防止

表-3 定常流実験の条件

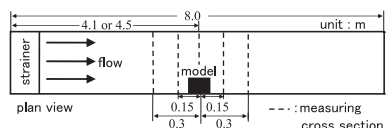
	B (cm)	Q (cm ³ /s)	S	u_0 (cm/s)	h_0 (cm)	F_{r0}	備考
Case 1	100	7100	1/2900	25.9	2.75	0.5	半分模型 全体模型
Case 2		8500	1/320	38.8	2.18	0.84	
Case 3		14700	1/127	64.6	2.27	1.37	
Case 4	30	4700 (3900)	1/150 (1/150)	51.7 (48.5)	3.04 (2.66)	0.95 (0.95)	半分模型 全体模型 ()内は円錐の 全体模型のみ
Case 5		4700 (4700)	1/80 (1/80)	69.3 (68.5)	2.26 (2.29)	1.47 (1.45)	

表-4 推定すべき氾濫水深と氾濫流速

h_{00} (cm)	$h_1=15$ cm			$h_1=16$ cm		
	h_0 (cm)	u_0 (cm/s)	F_{r0}	h_0 (cm)	u_0 (cm/s)	F_{r0}
1	3.28	43.5	0.77	3.78	46.4	0.76
2	3.39	48.3	0.84	3.82	47.9	0.78
3	3.38	41.4	0.72	3.88	53.0	0.86
4	3.38	41.9	0.73	3.88	50.8	0.82
5	3.52	47.8	0.81	3.95	51.3	0.82
6	3.52	45.6	0.78	3.98	51.5	0.82
7	3.54	44.7	0.76	4.06	49.6	0.79



(a) 幅の狭い水路



(b) 幅の広い水路

図-5 定常流実験の水路と測定横断面位置 (破線)

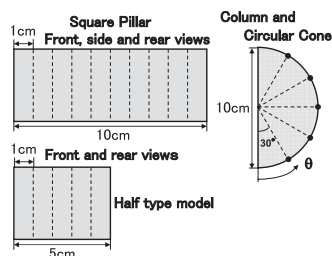


図-6 定常流実験における各模型水際線の測定間隔

き入射氾濫水深 $h = h_0$ と入射氾濫流速 $u = u_0$ は図中の矢印時のものである。厳密には, 建物などからの反射の影響により, 入射氾濫水深が最大に達する前に最大浸水深に達するため(図-8), 推定すべき入射氾濫流速は図-7に

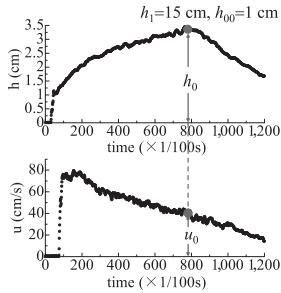
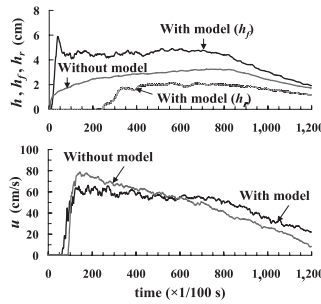
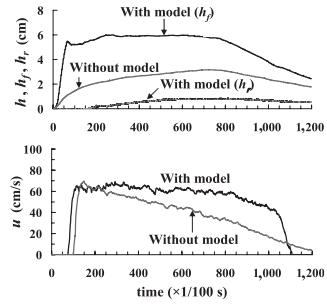


図-7 h_f の測定点での模型が無いときの
氾濫水深と氾濫流速の経時変化例



(a) 半分模型



(b) 全体模型

図-8 模型有無時の氾濫水深と氾濫流速の経時変化の比較例 ($h_1=15\text{cm}$, $h_{00}=1\text{cm}$)

示したものより大きいであろう。この定義の氾濫水深、
氾濫流速とこれらによるフルード数 F_{r0} の結果を表-4に示
す。本実験条件と本定義の F_{r0} は1以下である。

図-8は角柱模型が水路に無いときと有るときの氾濫水
深 h , h_f , h_r と氾濫流速 u の経時変化の比較例である。半
分模型の前面浸水深の初期に氾濫流衝突直後の水の上方
へのスプラッシュ現象(松富ら, 2008)が認められる。
全体模型ではその現象が不鮮明である。これは波高計の
配置場所と機種の違いに起因する。また、全体模型の最
大前面浸水深は半分模型のそれに比べて大きく、最大背
面浸水深は逆に小さいことが判る。これらの差の一部分
は開度の違いに起因している(表-6の考察②を参照)。

表-5に推定すべき入射氾濫流速 u を u_0 としたときの流
速係数 C_v の値を示す。 C_v の評価式は次式である。

$$C_v = u_0 / \sqrt{2g(h_f - h_r)} \quad \cdots \cdots \cdots (8)$$

ここで、 h_f と h_r は模型前・背面での最大浸水深(各面
での平均的なもの)である。氾濫流実験での流速係数は全
体模型で約0.5(平均0.46)、半分模型で約0.6(0.62)で、
半分模型の方が大きい。この結果と図-8で述べた最大
浸水深の傾向は、実験の大縮尺化、簡素化や経費節減で
全体模型の代わりに半分模型がしばしば用いられるが、
両実験が異なったものであることを示している。

(2) 定常流実験

図-9～11に角柱、円錐、円柱模型における水際線の水
深や水位の分布を示す。図中、 h は水路底面から水際線ま
での高さ、 h_0 は等流水深、 y は模型前面(左図)では模型
左端(幅の広い水路における半分模型では右端)、模型背
面(右図)では模型右端(左端)を原点とする水平距離
座標で、模型幅 W で無次元化され、 x は模型右(左)側面
に沿い、模型上流端を原点とする距離座標で、模型長さ L
で無次元化されている。これらの図から次のことが言え
る。①フルード数が大きくなるにつれて、また開度 λ が小
さくなるにつれて、 $x/L=0$ または $\theta=0^\circ$ の h_f/h_0 は大きく、
 $x/L=1$ または $\theta=180^\circ$ の h_r/h_0 は小さくなる。 h_f/h_0 のこ
の傾向は全体模型で顕著で、しかも角柱>円柱>円錐の順

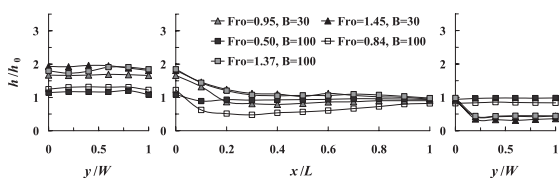
表-5 氾濫流実験における流速係数 C_v

全体模型			半分模型		
h_1 (cm)	h_{00} (cm)	C_v	h_1 (cm)	h_{00} (cm)	C_v
15	1	0.43	15	1	0.62
	2	0.48		2	0.68
	3	0.41		3	0.56
	4	0.43		4	0.57
	5	0.48		5	0.64
	6	0.45		6	0.61
	7	0.44		7	0.58
16	1	0.44	16	1	0.62
	2	0.45		2	0.62
	3	0.50		3	0.68
	4	0.48		4	0.64
	5	0.48		5	0.64
	6	0.49		6	0.64
	7	0.47		7	0.62

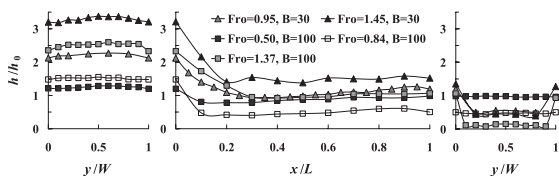
で強い。 h_r/h_0 のこの傾向は全体模型で顕著であるが、模
型形状にあまり依存しない。② h_r/h_0 は1より小さく、フ
ルード数が小さくなるにつれて1に漸近する。③角柱の全
体模型における h_f/h_0 の最大値と最小値は式(6)と(7)
に示された h_f/h_r のそれらとほぼ同じである。

表-6に式(8)と u_0 , h_f , h_r の実験値を用いて評価した
流速係数 C_v の値を示す。表から次のことが言える。①全
体模型の流速係数は角柱で0.52～0.66(平均0.61)、円錐
で0.51～0.63(0.58)、円柱で0.50～0.63(0.58)である。
半分模型の流速係数は角柱で0.60～0.89(0.80)、円錐で
0.64～0.94(0.81)、円柱で0.59～0.92(0.80)である。
本実験条件の範囲では、流速係数は全体模型と半分模型
ともに模型形状にほとんど依存せず、半分模型でその変
動幅が広い。②開度やフルード数がほぼ同じ条件下の全
体模型の流速係数と半分模型のその比は約0.7で、流
速係数も全体模型と半分模型の実験が異なったものであ
ることを示している。

津波氾濫域の建物や小山などはほとんどが独立してい
る。よって、全体模型による実験結果がより重要である。
氾濫流実験における角柱の全体模型の流速係数は約0.5
である。定常流実験における角柱、円錐、円柱の全体模
型の流速係数は約0.6である。危険側を採用、津波の周
期などの要素を総合的に考えれば、実際の流速係数と

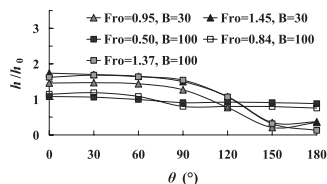


(a) 半分模型

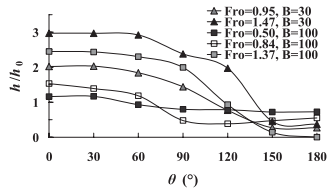


(b) 全体模型

図-9 角柱模型水際線の水深分布

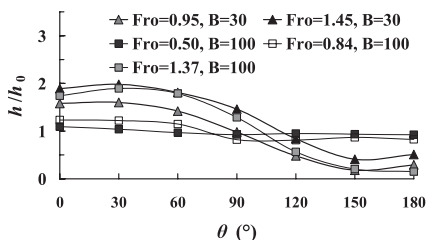


(a) 半分模型

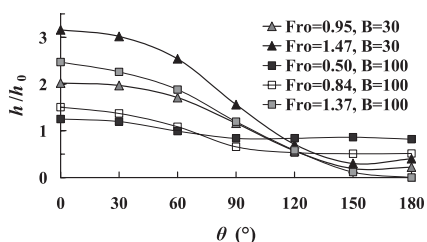


(b) 全体模型

図-10 円錐模型水際線の水位分布



(a) 半分模型



(b) 全体模型

図-11 円柱模型水際線の水深分布

表-6 定常流実験における流速係数 C_v

全体模型					半分模型				
水路幅	形状	λ (%)	F_{r0}	C_v	水路幅	形状	λ (%)	F_{r0}	C_v
30cm	角柱	67	0.95	0.52	30cm	角柱	83	0.95	0.60
		67	1.45	0.65			83	1.45	0.89
	円錐	65	0.95	0.51		円錐	88	0.95	0.64
		64	1.47	0.63			87	1.45	0.89
	円柱	67	0.95	0.50		円柱	83	0.95	0.59
		67	1.45	0.63			83	1.45	0.89
		90	0.5	0.66			95	0.5	0.82
		90	0.84	0.58			95	0.84	0.89
		90	1.37	0.63			95	1.37	0.82
		91	0.5	0.54			96	0.5	0.79
100cm	円錐	91	0.84	0.60	100cm	円錐	96	0.84	0.94
		91	1.37	0.62			96	1.37	0.79
		90	0.5	0.54			95	0.5	0.85
		90	0.84	0.60			95	0.84	0.92
	円柱	90	0.84	0.60		円柱	95	0.84	0.92
		90	1.37	0.62			95	1.37	0.77

氾濫流実験でやや小さい。総合的に考えれば、本研究定義の実際的な流速係数として0.6が推奨される。

③現地調査と実験に基づいて、2つの実際的な簡単な氾濫流速推定式 (9) と (10) を示した。

④代表的な3模型の水際線 (津波痕跡線) 分布の基礎特性を定常流実験に基づいて総合的に検討した。

⑤半分模型を密着させた側の水路側壁の影響のため、半分模型と全体模型で前・背面浸水深や流速係数が異なり、両模型の実験は異なったものと考えらるべきである。

謝辞：平成20年度の科研費基盤研究 (C) と北東北3大学連携研究プロジェクトの補助を受けた。謝意を表する。

参考文献

- 首藤伸夫・今村文彦・越村俊一・佐竹健治・松富英夫編 (2007)：津波の事典，朝倉書店，pp. 161-215。
 松富英夫・首藤伸夫 (1994)：津波の浸水深，流速と家屋被害，海岸工学論文集，第41巻，pp. 246-250。
 松富英夫・飯塚秀則 (1998)：津波の陸上流速とその簡易推定法，海岸工学論文集，第45巻，pp. 361-365。
 松富英夫・岡本憲助・佐藤和典 (2008)：浸水痕跡に基づく簡易氾濫流速推定法の基礎的検討，水工学論文集，第52巻，pp. 673-678。

5. おわりに

本研究で得られた主な結果は次の通りである。

- ① 現地調査データによれば， $u = \sqrt{2g(h_f - h_r)}$ とし， $F_r = u / \sqrt{gh_r}$ で定義されるフルード数は0.7～2.0である。
- ② 流速係数 C_v は，氾濫流実験では全体模型で約0.4，半分模型で約0.6，定常流実験では模型形状にほとんど依存せず，全体模型で0.5～0.6，半分模型で0.6～0.9で，