

津波氾濫流の流体力に関する実験

松 富 英 夫*・大 向 達 也**

1. ま え が き

津波氾濫流の流体力は流れ先端部衝突時の衝撃力にしても、その後の抗力や全揚圧力(浮力+揚圧力)にしても、よく判っていない(松富, 1996). 前者の衝撃力に関しては研究例があるが(福井ら, 1962; 松富, 1991), 後者に関しては全く研究例がない. そこで, 本研究は水理模型実験を通して津波氾濫流の抗力と全揚圧力の基礎的な特性を検討すると共に, 抗力係数の水理量などへの依存性や抗力評価の際の代表水深, ひいては投影面積などについて検討を行うものである.

2. 実 験

津波は一様水深部, それに続く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で模擬した. 実験装置の概略を図-1に示す. 貯水長が5 m, 一様水深部(水深 h_0), 一様勾配斜面部(勾配 s), 平坦な陸上部(地盤高 Z) が各々2 mで, 全長が11 mの両面ガラス張り鋼製矩形水路である. 水路下流端の壁は撤去してあり, 氾濫流はそこを自由に透過できる. 一様勾配斜面部, 平坦な陸上部と抗力・全揚圧力測定の対象となる家屋模型は塩化ビニール樹脂製で, 家屋模型は平坦な陸上部のほぼ中央の水路側壁に密着させて設けた. 家屋と氾

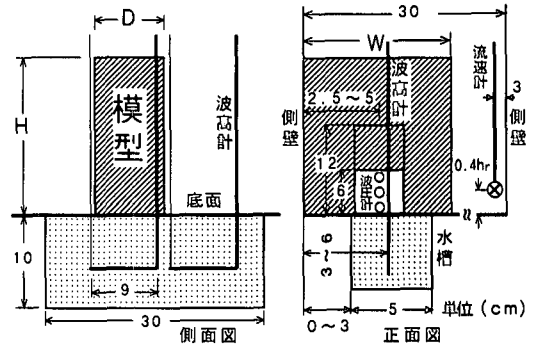


図-2 家屋模型と計測機器の配置

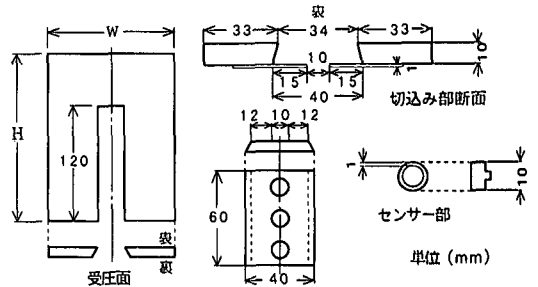


図-3 波圧計の設置方法

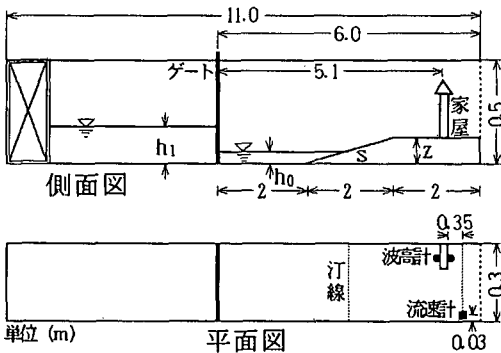


図-1 実験装置の概略

濫流は左右対称と考え, それらの片方半分で現象を代表させていることになる.

浸水深の測定は容量式波高計(計測技研製), 流速の評価は1点法に基づくプロペラ流速計(直径3 mm, 中村製作所製)による方法と松富・飯塚(1998)のベルヌーイの定理(家屋の前・背面浸水深と流速係数の経験式(後述))を用いる方法の2通りで行った. 家屋模型の諸元(高さ H , 半幅 W , 奥行 D)や計測機器の配置などを図-2に示す.

抗力や全揚圧力評価のための鉛直方向圧力分布の測定は, 2 cm 間隔で3台の波圧計を埋め込んだ小板を, 切り込みを入れた家屋前面壁内で上下に滑动させることにより行った(松富, 1991). 使用した波圧計(ST 研究所製)は内径が8 mm, 定格容量が200 gf/cm²である. 切り込み部の残りの空隙は他の小板で塞いだ. 圧力の測定間隔は

* 正会員 工博 秋田大学助教授 工学資源学部土木環境工学科
** 学生会員 秋田大学大学院

表-1 実験条件

家屋 ($H \times W \times D$) (cm)	17×10×10		17×5×10	
開度 λ (%)	67		83	
斜面勾配 S	1/67	1/40	1/26	1/18
地盤高 Z (cm)	3	5	7.7	11
一様部水深 h_0 (cm)	1~3	1~5	1~7	1~10
貯留水深 h_1 (cm)	11, 12	13, 14	15, 16	18, 19

1 cm で、測定範囲は底面上 $Z_0=1\sim 6$ cm である。図-3 に波圧計の設置方法を示す。

実験ケースを表-1 にまとめて示す。開度 λ の定義は $\lambda=100 \times (1 - \text{家屋模型幅}/\text{水路幅})$ 、地盤高 Z は沖の水平底からの高さである。各ケース 10 回ずつ実験を行った。縮尺は 1/200 を想定しており、本条件は周期約 7~9 分の津波に相当する (松富ら, 1998)。

3. 実験結果とその考察

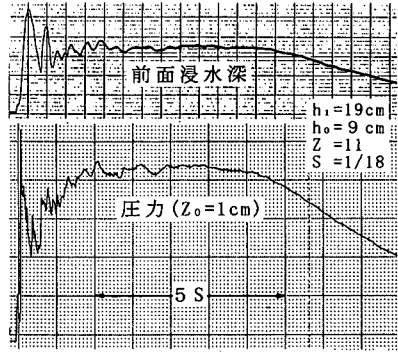
3.1 浸水深と圧力の経時変化

家屋の前面浸水深 h_f と $Z_0=1$ cm での圧力 p の経時変化例を図-4(a) と (b) に示す。横軸の時間スケールはどの図も同じである。図-4(a) は流れ先端部が分裂した場合、図-4(b) は分裂しなかった場合で、流れ先端部背後の定常的な浸水深が同程度のものである。図から、浸水深と圧力の経時変化が比較的よく対応していることが判る。しかし、分裂した部分では浸水深の割に圧力が小さく (3.3 項参照)、背後の定常的な部分での圧力の方が大きいことが判る。分裂しなかった場合も、流れ先端部衝突後のしばらくの間は浸水深の割に圧力が小さいが、分裂した場合ほどではない。これは衝突後上方へ水塊が投げ出されることによる (松富, 1991)。これらの傾向は他の Z_0 においても同じである。

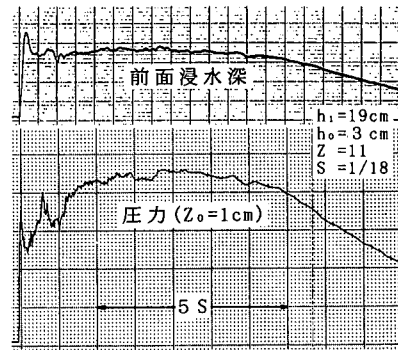
3.2 圧力分布

流れ先端部背後の定常的な部分で、家屋前面での全圧力 (積分値) が最大となる時の家屋前・背面に働く圧力の分布例を図-5 に示す。図中、 ρ は水の密度、 g は重力加速度、 h_r は家屋背面浸水深である。実験値は 10 回の平均で、これは以下の図においても同じである。また、背面では圧力を測定しておらず、静水圧分布を仮定している。本図は図-4(a) に示したケースのもので、前面圧力は静水圧よりかなり大きめとなっていることが判る。

図-5 と同じ定義時刻の単位幅あたりの全圧力 P (背面の全圧力を差し引いたもの) と家屋前・背面浸水深の 2 乗差の関係を図-6 に示す。図中の実線は家屋前・背面共に静水圧分布を仮定した場合の全圧力を示す。図によると、実験値と静水圧分布を仮定した場合の値に顕著な差が認められる。福岡ら (1997) は洪水氾濫流の実験で



(a) 分裂した場合



(b) 分裂しなかった場合

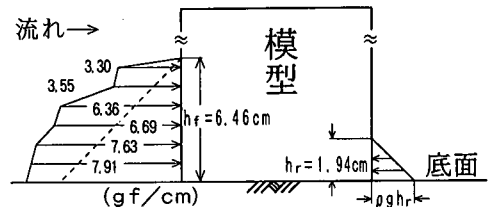
図-4 前面浸水深と圧力の経時変化例 ($\lambda=67\%$)

図-5 圧力分布例

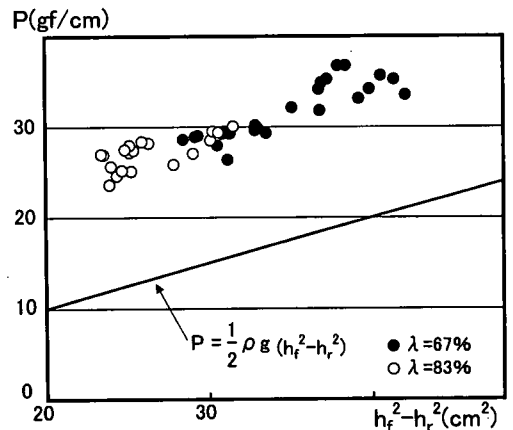


図-6 全圧力と家屋前・背面浸水深の 2 乗差の関係

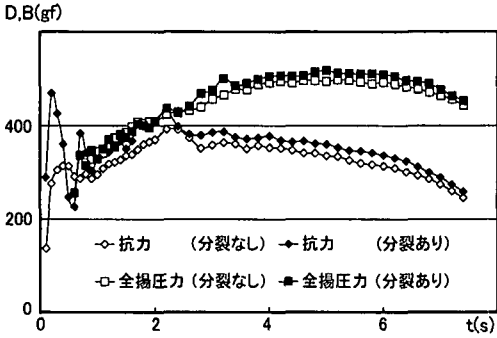


図-7 抗力と全揚圧力の経時変化例

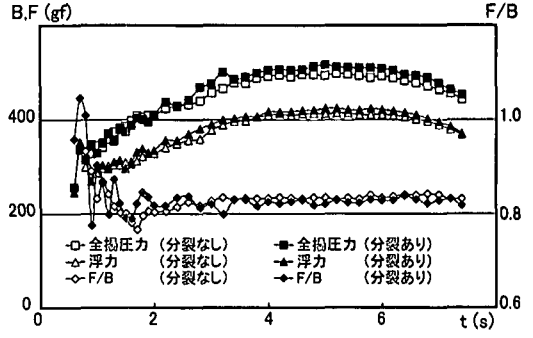


図-9 全揚圧力と浮力および両者の比の経時変化例

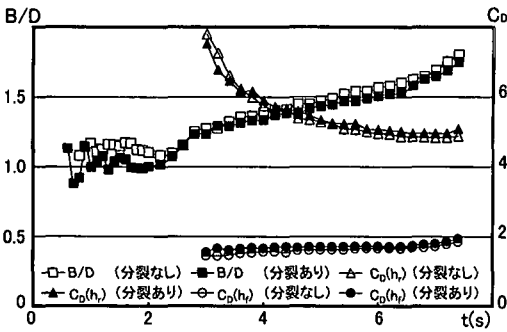


図-8 全揚圧力と抗力の比および抗力係数の経時変化例

両者はほぼ一致することを報告している。彼らの結果との違いの理由として、①非定常性の影響、②フルード数の影響、③家屋半分中央の1鉛直線での比較、④波圧計の測定精度の問題（定格容量 200 gf/cm²に対して、作用圧力は高々 10 gf/cm²程度）などが考えられる。②については、福岡らと著者らのフルード数の評価場所が異なるため、厳密な比較はできないが、著者らのフルード数の方がずっと大きい。また、④が理由だとすると、それにしては従来の知見から推定される抗力係数とほぼ同じ妥当なものが見られている（後述）。

3.3 抗力と全揚圧力

水平横断方向に浸水深と圧力は変化しないと仮定して評価した抗力 D と家屋前・背面間の底面圧力は直線分布すると仮定して評価した全揚圧力 B の経時変化例を図-7 に示す。流れ先端部衝突時を $t=0$ としており、これは以下の図においても同じである。流れ先端部が分裂した場合としなかった場合の両方を示しており、図-4(a) と (b) に示したケースのものである。

図-8 は図-7 に示したケースの全揚圧力と抗力の比 (B/D) や抗力係数 C_D の経時変化を示したものである。ただし、抗力係数評価の際に必要な投影面積 A の算定浸水深として、家屋前面浸水深 h_f と背面浸水深 h_r を採用した場合の両方を示している。抗力係数の定義は次

式である。

$$C_D = 2D/\rho u^2 A \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 u は氾濫流速で、家屋の前・背面浸水深と流速係数の経験式（後述）から評価している。流れ先端部衝突後しばらくしてから抗力係数が評価されているが、これはこの時間あたりから前面浸水深が定常的と判断されたからである。

これらの図から、次のことが判断される。

① 流れ先端部背後では、家屋の奥行にもよるが、全揚圧力が主体的である。

② これまでの家屋に対する抗力係数から推して（例えば、高橋ら、1985）、また、これまでに蓄積されたデータの有効利用を考えると、抗力評価の際の投影面積の算定には前面と背面浸水深の間のもので、前面浸水深に近いものを採用すべきである。

③ 流れ先端部では全揚圧力が評価できないため、抗力との大小関係は議論できない。

全揚圧力 B とそれに占める浮力 F および両者の比 (F/B) の経時変化例を図-9 に示す。流れ先端部が分裂した場合としなかった場合の両方を示しており、図-7 や 8 に示したケースのものである。図から、次のことが判断される。

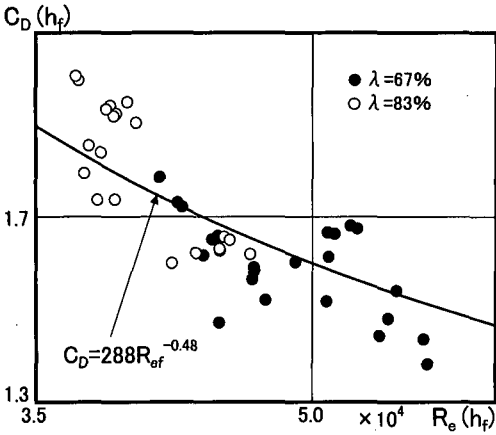
① 流れ先端部が分裂した場合は、流れ先端部衝突後のしばらくの間、全揚圧力よりも浮力大きい。

② 流れ先端部背後では、全揚圧力の大部分（本ケースの場合、8割以上）が浮力で、その割合は時間が経過してもほとんど変化しない。

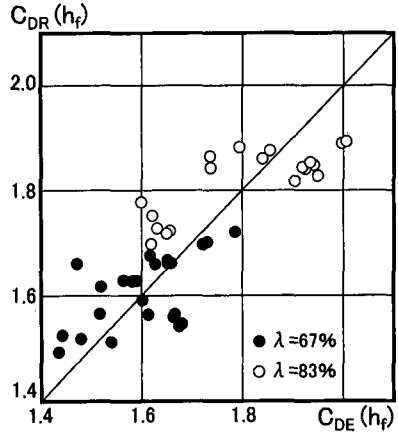
①は、図-4(a)の考察においても言及したように、浸水深の割に圧力が小さいためである。②の経時変化傾向は流速係数の場合（松富ら、1998）と同じである。

3.4 抗力係数の水理量への依存性

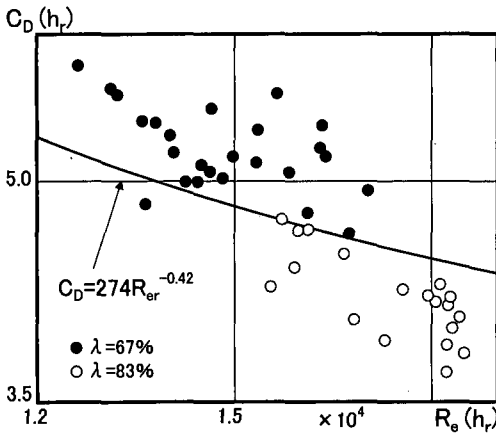
抗力係数 C_D とレイノルズ数 Re の関係を図-10(a) と (b) に示す。ただし、抗力係数、レイノルズ数、フルード数（後述）などは図-5 と同じ定義（家屋前面での全圧力が最大）時刻のもので、氾濫流速は家屋の前・背面浸



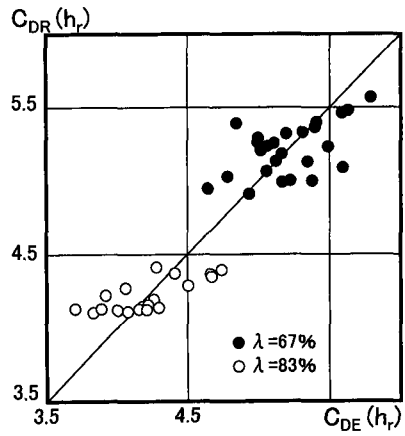
(a) 前面浸水深を採用した場合



(a) 前面浸水深を採用した場合



(b) 背面浸水深を採用した場合



(b) 背面浸水深を採用した場合

図-10 抗力係数のレイノルズ数への依存性

図-11 抗力係数の回帰値と実験値の比較

水深と流速係数の経験式から評価している。図-10(a)はレイノルズ数の代表長として前面浸水深 h_f 、図-10(b)は背面浸水深 h_r を採用している。動粘性係数は一律に $0.01 \text{ cm}^2/\text{s}$ を採用している。

図から明らかなように、実規模のものに比べて、実験でのレイノルズ数が非常に小さい。実規模のレイノルズ数範囲では、抗力係数はレイノルズ数にほとんど依存しないと思われる。この点で、本検討は非実際的と思われるかもしれないが、本検討の目的に代表長や実験値の妥当性の検討が含まれていることを理解されたい。

本図と図-6から、開度 λ が大きくなるにつれて、前面浸水深は小さく、背面浸水深は大きくなるのが判断される。

開度に関しては2種類のみであるが、抗力係数のレイノルズ数、フルード数 F_r 、開度への依存性を検討したところ、次式を得た。

$$C_D = 1050 R_e^{-0.48} F_r^{-0.42} \lambda^{-0.25} \dots\dots\dots (2)$$

$$C_D = 1550 R_e^{-0.42} F_r^{0.24} \lambda^{-0.43} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $F_r = u/(gh_r)^{0.5}$ である。レイノルズ数の添字 f と r は家屋前・背面の区別、すなわち、式(2)は代表長として h_f 、式(3)は h_r を採用していることを示す。代表長として家屋半幅 W を採用した場合は、有効な回帰式が得られなかった。

図-10(a)と(b)中の実線は、実験での開度の平均値(75%)とフルード数の平均値(開度67%の場合は1.85、開度83%の場合は1.48、全体では1.69)を採用した時の式(2)と(3)である。

式(2)と(3)の妥当性を検討したものを各々図-11(a)と(b)に示す。縦軸(添字 R)が回帰式からの計算値、横軸(添字 E)が実験値である。図から、式(2)と(3)は共に妥当な回帰式であることが判断される。

式(2)と(3)から、次のことが判断される。

① 抗力係数のレイノルズ数への依存性は、代表長として前面浸水深と背面浸水深のどちらを採用しても同じ

である。

② 抗力係数のフルード数への依存性は代表長によって大きく異なり、背面浸水深を採用した方がフルード数への依存性は小さい。

③ 抗力係数がフルード数に依存しなくなる代表長が存在する。それは前面と背面浸水深の間のもので、背面浸水深に近い。

④ 抗力係数の開度への依存性は、どちらの代表長を採用しても大差ない。

②の正当性は次のように確認できる。

エネルギー損失を考慮した水平床でのベルヌーイの定理から、対象流れに対して次式を得る(松富ら, 1998)。

$$h_f/h_r = F_r^2/2C_v^2 + 1 \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 C_v は流速係数で、その後の実験データを付加し、再整理して、次の経験式を得ている。

$$C_v = 0.37 F_r^{0.29} \lambda^{0.16} \dots\dots\dots (5)$$

式(5)を式(4)に代入すれば、最終的に次式を得る。

$$h_f/h_r = 3.65 F_r^{1.42} \lambda^{-0.32} + 1 \\ \sim F_r^{1.42} \lambda^{-0.32} \dots\dots\dots (6)$$

一方、抗力係数のレイノルズ数への依存性が代表長によらないことから、その依存性を平均的な-0.45乗に比例として、式(2)を式(3)で割れば、次式を得る。

$$h_f/h_r \sim (h_f/h_r)^{-0.45} F_r^{0.66} \lambda^{0.18} \dots\dots\dots (7)$$

式(7)を書き直せば、

$$h_f/h_r \sim F_r^{1.20} \lambda^{-0.33} \dots\dots\dots (8)$$

式(8)は式(6)とほぼ一致している。これは、②が道理にかなったことであり、換言して、実験データが妥当であることを示していると言える。

③については、前面と背面浸水深の平均値を代表長として回帰式を求める(フルード数のべき指数は-0.26であった)ことで確認している。

4. む す び

本研究で得られた主な結論は次の通りである。

① 流れ先端部の分裂した部分では浸水深の割に圧力

が小さく、背後の定常的な部分での圧力の方が大きい。

② 流れ先端部背後では、家屋の奥行にもよるが、抗力よりも全揚圧力が主体的である。

③ 流れ先端部背後では、全揚圧力の大部分(本ケースの場合、8割以上)が浮力で、その割合は時間が経過してもほとんど変わらない。

④ 抗力評価の際の投影面積は前面と背面浸水深の間のもので、前面浸水深に近いものを採用して算定すべきである。

⑤ 抗力係数のレイノルズ数への依存性は、代表長として前面浸水深と背面浸水深のどちらを採用しても同じである。

⑥ 抗力係数のフルード数への依存性はレイノルズ数の代表長によって大きく異なり、背面浸水深を採用した方がフルード数への依存性は小さい。

⑦ 抗力係数がフルード数に依存しなくなる代表長が存在する。それは前面と背面浸水深の間のもので、背面浸水深に近い。

謝辞：実験に際し、本学大学院生 望月章宏君、卒業研究生 金光紀代太君、佐藤直己君、富樫宏二君、穂積拓哉君の助力を得た。ここに記して感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 高橋 保・中川 一・加納茂紀(1985): 洪水氾濫による家屋流失の危険度評価, 京都大学防災研究所年報, 第28号, pp. 455-470.
- 福井芳朗・白石英彦・中村 充・佐々木泰雄(1962): 津波の研究(II), 第9回海岸工学講演会講演集, pp. 50-54.
- 福岡捷二・川島幹雄・横山 洋・水口雅教(1997): 家屋群に作用する氾濫流の流体力に関する実験的研究, 水工学論文集, 第41巻, pp. 693-698.
- 松富英夫(1991): 砕波段波衝突時の圧力分布と全波力, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 626-630.
- 松富英夫(1996): 沿岸域のあり方, 海岸工学委員会地球環境問題研究小委員会, pp. 22-25.
- 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.