

家屋群に作用する氾濫流の流体力に関する実験的研究

Experimental Study of Hydrodynamic Forces Acting on a Group of Buildings

福岡捷二*・川島幹雄**・横山洋***・水口雅教****

By Shoji FUKUOKA, Mikio KAWASHIMA,

Hiroshi YOKOYAMA, Masanori MIZUGUCHI

In order to analyze flood induced flow, it is very important to estimate hydrodynamic force acting around a house in group of houses.

In this paper, model houses are assumed to be in a flood induced flow. These model houses represent an urban district in a flood plain, where hydrodynamic force, water level and velocity were measured.

Hydrodynamic force is connected with velocity and especially the difference in square of water level between the front and the back of these model houses. And drag coefficient is calculated from this experiment.

Keywords: *inundation, hydrodynamic force, group of houses, road network, drag coefficient*

1. 序論

氾濫時に家屋が流れから受ける流体力の評価は、家屋が受ける被害予測のため、また氾濫流全体の挙動に及ぼす家屋抵抗の影響を理解しモデル化する上で重要である。

複数の物体が存在する場における流体力の研究は、今までに様々な目的、様々な形状のものについてなされてきた。例えば足立¹⁾は棧粗度群が配置された場の流れの抵抗を見積もるために、様々な棧間隔において相当粗度の大きさを調べている。首藤ら²⁾は氾濫原が流れに及ぼす抵抗を各格子ごとに土地利用形態に応じて算定した抗力係数を用い、氾濫計算を行っている。この中で家屋は格子内の家屋数、家屋面積に応じて1つの正方形に単純化し、孤立した正方形の抗力係数を用いてその抵抗を評価している。中川³⁾は家屋が単体で存在するときの抗力と抗力係数、および近傍の家屋が及ぼす影響について主流および横断方向の家屋間隔を変化させたときの抗力との関係を考察している。また、末次ら⁴⁾は、家屋単体のとき、および家屋が密に整列配置されたときの抗力、抗力係数と家屋間隔の関係を調べている。しかし、既往の研究は実際の家屋配置に比べて極めて単純化された場合であり、流体力と周辺の水理状況（流速、水位分布）の関係について十分に検討されていない。このためこれらの流体力を氾濫流の解析に用いるには不十分である。

* 正会員 工博、Ph. D 広島大学教授 工学部第四類（建設系）（〒739 広島県東広島市鏡山 1-4-1）

** 正会員 広島大学大学院工学研究科 博士課程後期

*** 学生員 広島大学大学院工学研究科 博士課程前期

**** 学生員 広島大学工学部

本研究では家屋模型に作用する流体力を直接計測し、家屋近傍および家屋配置領域全体での流速、水位と流体力の関係を考察する。家屋群内にある家屋に作用する流体力の評価のため、一般的な抗力係数を算出する方法と自由表面のある氾濫流の特性を生かし、家屋前面と後面の水位差を用いて抗力を計算する2つの方法について考察する。

2. 流体力測定実験

2.1 実験装置および実験方法

流体力測定実験水路を写真-1に示す。実験は全長270cm、幅135cm、高さ20cmの木製水路を用い、勾配1/700、粗度0.012の条件で行った。上流端より150cm、兩岸から67.5cmの場所を中心にして大きさ20cm×30cm、深さ26cmのピットを設置し、そこに家屋模型に作用する流体力を計測するための3分力計(F_x, F_y, F_z を検出する)を取り付けた。3分力計を水平になるように設置し、1辺15cm正方形の木製四角柱の家屋模型をアルミニウム製フランジ(高さ6cm)により検出器の測定部に接続している(図-1)。流速は電磁流速計により、水位はポイントゲージにより測定を行った。実験流量は10.2(l/s)、15.3(l/s)の2ケースである。各ケースについて家屋に作用する流体力、家屋近傍の流速、水位を、また必要に応じて模型配置領域全体の水位、流速を測定し、流体力と家屋付近の水利との関係を検討した。流体力の主流方向成分は抗力 F_x であり、抗力係数 C_D は以下のように定義した。

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

ここで、 ρ : 水の密度、 u : 模型前面での流速、
 b : 家屋幅(=15cm)、 h : 模型前面での水深である。

家屋前面の流速は図-2に示すように家屋幅 b の1/2上流側断面での実測流速を①3点を平均、あるいは②5点から求めた値を用いている。なお①と②の測定値を同一のケースで比較した結果、ほぼ同じ値であったので、ともに代表流速として用いている。この位置で代表流速をとったのは、種々の検討の結果、この位置の流速を用いることが流体力の係数を安定的に計算するのに適しているからである。家屋前面および後面の水深はできる限り家屋壁面に近い位置で測定し横断面平均値を用いた。

2.2 家屋群のモデル化

実際の密集市街地構造にもとづき、家屋群のモデル化を図る。末次ら^{4), 5)}によれば、全国の中核都市の家

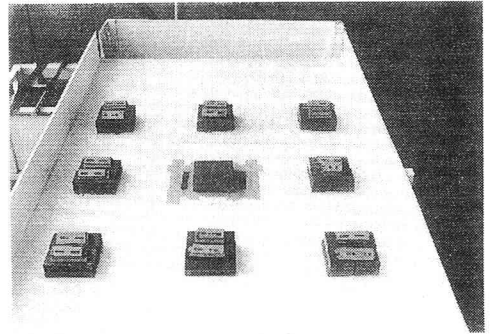


写真-1 流体力測定実験水路

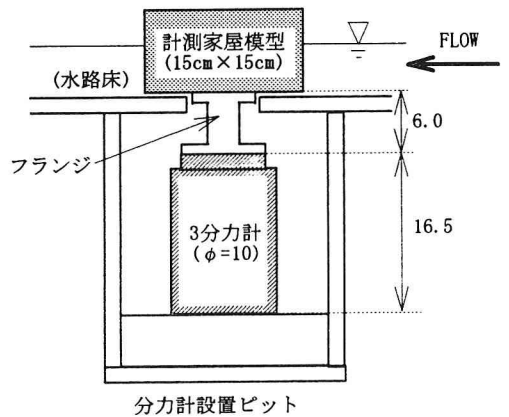
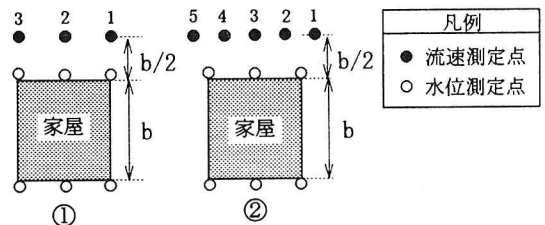
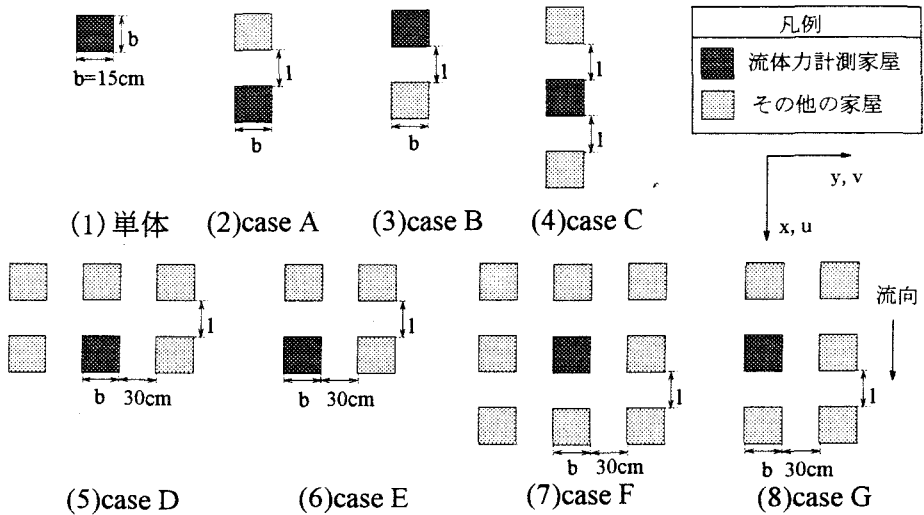


図-1 流体力計測システム



$$\begin{aligned} \text{① } u &= (u_1 + u_2 + u_3) / 3 \\ \text{② } u &= ((u_1 + u_2) / 2 + u_3 + (u_4 + u_5) / 2) / 3 \end{aligned}$$

図-2 家屋近傍の流速、水位測定点



- (1) 家屋単体の場合
- (2) 上流に家屋が存在する場合(case A)
- (3) 下流に家屋が存在する場合(case B)
- (4) 上流、下流に家屋が存在する場合(case C)
- (5) 上流、両岸に家屋が存在する場合(case D)
- (6) 上流、片側に家屋が存在する場合(case E)
- (7) 上流、下流、両岸に家屋が存在する場合(case F)
- (8) 上流、下流、片側に家屋が存在する場合(case G)

図-3 家屋配置パターン

屋密集地における家屋総面積が対象領域面積に占める割合は10%から40%までがほとんどである。これは家屋が等間隔で整列していると仮定した場合、家屋間隔 l の家屋幅 b に対する比 l/b にすると0.75から2.3に相当する。実際の住宅地には空き地、駐車場、公園等のスペースが存在するため、これよりも間隔が広い場所も少なくない。本実験では以上のことを考慮し、家屋配置は整列配置で代表させ、家屋間隔 $l=15, 30, 45, 60\text{cm}$ ($l/b=1, 2, 3, 4$ に相当)に設置した。また、実際の市街地を1/50スケールでのモデル化を念頭において実験を行っている。図-2に本実験の家屋配置を示す。case A, B, Cは上流あるいは下流に家屋が存在することによる影響を調べることを目的としている。case D, E, F, Gは実際の家屋密集域を考慮した配置である。case Dは下流側が幹線道路等の開けた場所に面している家屋を、case Eは幹線道路の交差点等に面している家屋を、case Fは群内にある家屋を、case Gは家屋の側面が幹線道路等開けた場所に面していることを想定している。また一般に氾濫流では家屋等の構造物は完全水没することは少ないため、本実験では家屋は完全水没はしない状態を考えている。

3. 実験結果および考察

3.1 流体力と家屋近傍の水利状況の考察

図-4は単体配置及びcase A, B, C, D, Fについて抗力 F_x と家屋間隔 l と家屋幅 b の比 l/b の関係を示している。まず流体力計測家屋(以下計測家屋と呼ぶ)の上流及び下流の家屋の影響を調べるために単体配置とcase A, B, Cを比較する。図-4より計測家屋の上流側に家屋があるcase A, Cは家屋間隔が大きくなるにつれて抗力が増加しており、これは中川の実験³⁾と同じ傾向である。表-1に単体配置及びcase A, B, C, D, Fにおける計測家屋前後の平均水位と水位差及び前面平均流速を示す。case Cがcase Aの抗力に比べ小さいのは計測家屋後面の水位がその下流側の家屋の存在によりせき上げられており、計測家屋の前面での水位差が小さくなっているためである。一方case Bでは家屋間隔が大きくなるにつれ抗力は僅かずつであるが減少している。こ

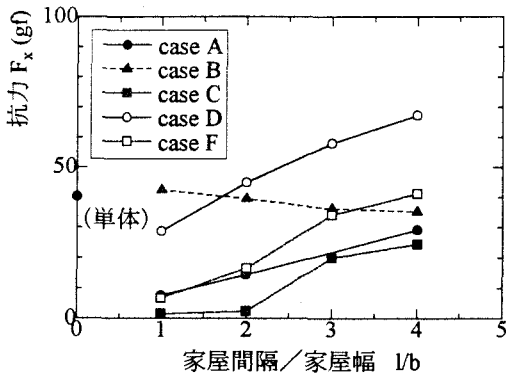


図-4 家屋群内家屋の抗力(Q=10.2l/s)

れは計測家屋前面の流れは家屋間隔に関係なくほぼ同じであるが、計測家屋後面は家屋間隔が大きいと家屋間での抵抗が大きくなり水位が上昇し家屋の前後での水位差が小さくなり、抗力が小さくなるためである。計測家屋上流側の家屋は計測家屋前面の水位を低下させ、下流側の家屋は計測家屋背面の水位を上昇させる。また家屋間隔が広くなると家屋間で後流が発達し、混合による抵抗が大きくなるため家屋間の水位は少しずつ上昇する。

次に密集家屋群での抗力を考察する。図-4より case D と case F を比較すると case F の抗力は case D に比べ明らかに小さい。これは表-1 に示されているように case F においては下流側家屋により計測家屋後面の水位がせき上げられることにより家屋前面と後面の水位差が case D に比べ小さくなるためである。

家屋群内の流れを家屋配置領域全体で考察する。図-5 は case A, D, F について $Q=10.2l/s$ 、家屋間隔 $l=15cm$ のときの家屋配置領域での縦断水位を示している。水位は各横断面平均値である。縦列配置である case A に対して横断方向にも家屋が存在する case D, F では流れが家屋間に集中するため、水位が上昇している。中川³⁾によれば、横断方向に家屋が存在する場合、家屋が一体となって大きな後流域を発生させ、家屋前面の水位を上昇させるが、本実験の結果も同じである。また case D と F を比較すると、両者は計測家屋前面（上流端から 135cm の断面）まで水面形はほぼ一致しているが、case F は下流側家屋の影響により、計測家屋後面（上流端から 165cm の断面）での水面が大きくせき上げられているのがわかる。

次に流体力 F_x, F_y, F_z と家屋前面中央における主流および横断方向流速 u, v の時間変動を図-6 に示す。これは case F で家屋間隔 $l=30cm$ のときのものである。各データのサンプリング時間は 30 秒、サンプリング周波数は 20Hz である。

浮力 F_z が大きく周期的に変動しているが、これは家屋近傍での水位が周期的に変動していることを示している。抗力 F_x は浮力 F_z とほぼ 1/4 波長ずれており、 F_z の変曲点で F_x は極値をとっている。 F_z の変曲点では家屋近傍の水面勾配が最大もしくは最小となっており、この結果は水面勾配が抗力に大きく影響していることを示している。一方家屋前面の u をみると不規則に変動しており、 u と F_x には相関はみられない。また横断方向流速 v と揚力 F_y はほぼ同位相で変動しており、横断方向の流速変動に揚力が密接な関係があることを示している。なお揚力 F_y の時間平均が 0 よりずれているが、これは流れ自体が完全には対称ではないため

表-1 計測家屋近傍の流速及び水深

($Q=10.2l/s, l=30cm$)

配置	前面水深 h_1 (cm)	後面水深 h_2 (cm)	$\Delta h=h_1-h_2$ (cm)	前面流速 u (cm/s)
単体	3.10	1.03	2.07	14.9
case A	2.21	1.30	0.91	7.8
case B	2.89	1.72	1.17	24.6
case C	1.96	2.05	-0.09	11.3
case D	3.18	1.18	2.00	11.6
case F	3.61	3.28	0.33	9.9

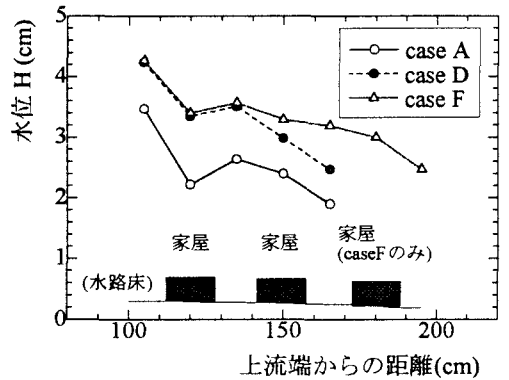


図-5 家屋群領域の縦断水面形(Q=10.2l/s, l=15cm)

あり、また家屋が対称配置の場合においては揚力は抗力に比べ極めて小さいため流れに殆ど影響しない。ここでは示していないが家屋間隔が小さくなるとこの周期的変動も小さくなっている。このことから家屋群内の流れの抵抗を説明するには家屋間の渦の発達についても考慮する必要がある。

3.2 家屋群内の抗力係数の考察

2.1 で示した式 (1) を用いて流体力の実測値より抗力係数を算出し、家屋群内における家屋の抗力係数について考察を行った。

図-7に家屋が単体配置及び密集配置である case D, E, F, G における抗力係数を示す。密集配置の抗力係数は各ケースごとにばらつきがあり、また家屋間隔によっても変動している。case D の抗力係数が他のケースに比べ大きくその変動も大きい。その他の密集配置である case E, F, G では抗力係数はほぼ一定の範囲内になっている。図-7 より抗力係数は最小で 2.3、最大で 15.8 であり、家屋密集地において最も一般的な $l/b \leq 2$ の範囲についてみると case D では 8~16、その他のケースはおよそ 2~8 である。以上より、家屋群内での抗力係数には平均して約 5、下流側に幹線道路等の空地を有する家屋 (case D) ではその 2 倍強の値を用いれば抗力は概ね見積もることができる。

3.3 抗力と家屋前面と後面の水深の関係

家屋に作用する流体力には家屋前面のみではなく、家屋後面の水利状況も大きく影響することが明らかとなった。しかし、抗力係数の定義である(1)式には家屋前面の流速と水深のみが考慮されており、家屋後面の流れが家屋配置あるいは家屋間隔により変化する影響が十分に入っていない。そこで家屋前面及び後面で静水圧分布を仮定し、家屋に作用する抗力 D を次の(2)式で与える。

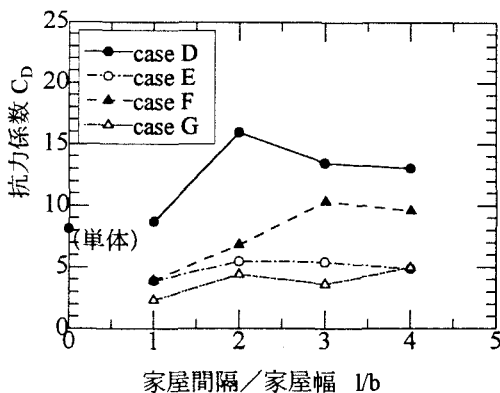


図-7 密集家屋群内家屋の抗力係数(Q=10.21/s)

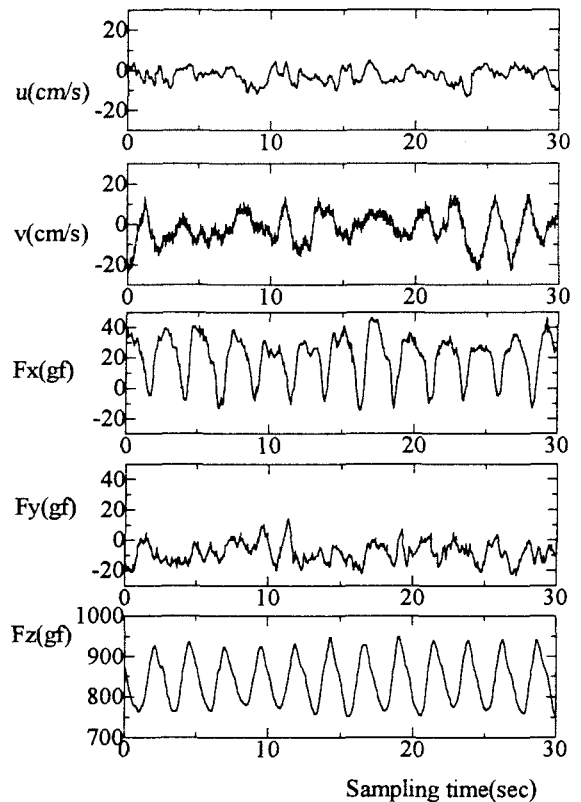


図-6 流体力と家屋直前の流速の時間変動 (Q=10.21/s, case F, l=30cm)

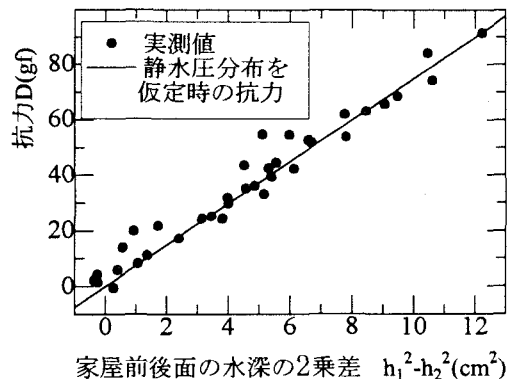


図-8 実測抗力と水深の 2 乗差の関係

$$D = \frac{1}{2} \rho g (h_1^2 - h_2^2) b \quad \dots\dots(2)$$

ここで h_1 : 家屋前面の平均水深、 h_2 : 家屋背後の平均水深、 b : 家屋幅(=15cm)である。

この(2)式で計算した抗力と実測した抗力の関係をプロットしたものが図-8である。抗力の実測値と(2)式による計算値はよい一致をみており、非水没家屋に作用する抗力は(2)式でほぼ表わせることがわかる。

なお、本実験は実際の家屋配置を縮尺 1/50 でモデル化している。実験での水位は約 2~4cm、流速は家屋間で約 40cm/s であり、これをフルード相似則により実スケールに換算すると、家屋幅は 7.5m、水深は約 1~2m、流速は約 2.8m/s に相当している。

4. 結論

本実験の主要な結論は以下のとおりである。

氾濫流の抗力は家屋近傍の水利状況、特に家屋前面と後面の水位差に大きく依存している。下流側に存在する家屋は家屋後面の水位をせき上げ、家屋前面と後面の水位差を小さくするため、抗力を小さくする作用がある。また、横断方向に存在する家屋は流れを狭めることになり、家屋配置領域の水位を全体的に上昇させる。

家屋群内では家屋間に発達する渦が周期的な水位変動を引き起こしており、流体力に大きく影響している。したがって家屋群内の流れの抵抗を説明するには、渦の発達を考慮する必要がある。

一般的な密集家屋域では、家屋群内にある家屋の抗力係数は平均して約 5 であり、下流側が開けた場所にある家屋の場合はその 2 倍強の値を用いればよい。また、非水没家屋では家屋の前面と後面で静水圧分布を仮定して計算した抗力は実測抗力値とほぼ一致している。

5. おわりに

今後の課題は以下のとおりである。本実験では市街地モデル化にあたって、家屋は等間隔で整列配置であるとした。しかし市街地氾濫流では家屋域内の街路網が流れに大きく影響している⁶⁾。今後、街路網の影響を考慮に入れた家屋密集模型実験によって、流れと流体力を検討する必要がある。また、家屋群内の氾濫流の解析にあたっては家屋群の流れに及ぼす流体力のみではなく、家屋群の配置によって付加される渦動粘性係数の評価も行う必要がある⁷⁾、これらについて今後検討し、より一般性の高い市街地における氾濫流のモデルを構築する予定である。

参考文献

- 1) 足立昭平：開水路における棧型人工粗度の実験的研究、京都大学防災研究所年報第3号、pp17-33、1959
- 2) 佐藤智、今村文彦、首藤伸夫：洪水氾濫の数値計算および家屋被害について、第33回水理講演会論文集、pp331-336、1989
- 3) 中川一：洪水および土砂氾濫災害の危険度評価に関する研究、京都大学博士論文、1989
- 4) 栗城稔、末次忠司、海野仁、田中義人、小林裕明：氾濫シミュレーションマニュアル(案)、土木研究所資料第3400号、1996
- 5) 末次忠司：氾濫原管理のための氾濫流制御と避難体制の強化、氾濫原危機管理国際ワークショップ論文集 pp173-185、1996
- 6) 福岡捷二、川島幹雄、松永宣夫、前内永敏：密集市街地の氾濫流に関する研究、土木学会論文集 No491/II-27、pp51-60、1994
- 7) Shoji FUKUOKA and Mikio KAWASHIMA: Prediction of Flood-induced Flows in Urban Resident Areas and Damage Reduction, International Workshop on Floodplain Risk Management, pp187-203, 1996