

2004年7月新潟豪雨水害の洪水氾濫流 による家屋被害

ANALYSIS OF HOUSE DAMAGES DUE TO FLOODING FLOW
OF JULY 13, 2004 NIIGATA HEAVEY RAINFALL

原田賢治¹・越村俊一²・鈴木進吾³・岡本学⁴
・福留邦洋⁵・菅磨志保⁶・河田恵昭⁷

Kenji HARADA, Shunichi KOSHIMURA, Shingo SUZUKI, Manabu OKAMOTO
Kunihiro FUKUTOME, Mashihō SUGA and Yoshiaki KAWATA

¹正会員 博(工) 人と防災未来センター 専任研究員 (〒651-0073 神戸市中央区脇浜海岸通1-5-2)

²正会員 博(工) 東北大学大学院工学研究科災害制御研究センター 助教授 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻青葉6-6-1104)

³学生会員 修(工) 京都大学大学院情報学研究科 博士後期課程 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

⁴非会員 京都大学大学院工学研究科 修士課程 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

⁵非会員 博(都) 人と防災未来センター 専任研究員 (〒651-0073 神戸市中央区脇浜海岸通1-5-2)

⁶非会員 修(社福) 大阪大学コミュニケーションデザイン・センター 特任教員 (〒565-0826 吹田市千里万博公園1-1)

⁷フェロー 工博 京都大学防災研究所 教授 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

This paper presents the fragility function with hydraulic pressure for wooden house obtained from the field investigation of the flood disaster in Nakanoshima town, Niigata prefecture due to the July 13, 2004 Niigata heavy rainfall. The fragility function is constructed using calculated hydraulic force. To calculate numerical simulation, the fine mesh ground data is modeled by using the LP data and the house map data. The numerical simulation results are show good agreement with the field survey data and some interviews.

Key Words : house damage, the 2004 Niigata-Fukushima Heavy Rainfall, Numerical Simulation, field investigation, fluid force, inundation depth

1. はじめに

2004年7月12日夜から13日にかけて、梅雨前線の活発化に伴い、新潟県長岡・三条地域に局地的な豪雨がもたらされ、信濃川支川の河川において破堤、堤防決壊、越水、溢水、漏水による水害で甚大な被害が生じている。災害は外力が防災力を上回ると生じるが、今回の災害も既往最大の降水量を大きく上回る降水量が上流で観測されており、これにより河道の通水能力を越えた水量がもたらされ、河道からの越水を引き金として破堤へと至っている¹⁾。特に、旧中之島町内を流れる信濃川支流刈谷田川左岸の破堤は、町内中心部の住宅地区での破堤であったため、全壊55棟、半壊314棟(2004年9月14日新潟県発表)²⁾と洪水氾濫流による多くの家屋被害がもたらされている。

洪水氾濫流による家屋被害については、浸水深を外力として、被害程度を評価する手法が水害統計調査に基づいて治水経済調査要綱に定められている。また、著者らの既往の研究³⁾でも、浸水深から家屋被害の概略を把握する事を目的として、現地調査結果に基づいた浸水深を外力条件とした家屋の被害関数の算出を、2004年新潟豪雨水害を対象に試みている。しかしながら、本来、洪水氾濫流による家屋被害の発生は、流速の二乗と浸水深の積で求められる氾濫流の流体力と、家屋の力学的耐力との関係から規定されると考えられるが、浸水深との関係と比べ十分な知見が蓄積されているとは言えない。河田・中川⁴⁾は1983年の山陰豪雨災害で、三隅川の洪水氾濫流による家屋被害調査と洪水氾濫流の数値シミュレーション結果を用いて、家屋被害程度と家屋構造、階数、建築年代と流体力の関係性について検討をしてる。また、佐藤ら⁵⁾は洪水氾濫流による家屋被害程度と家屋の抵抗

力について検討している。しかしこれらの流体力と家屋被害の検討における数値計算では、格子サイズが大きく家屋間を流れる氾濫流の流体力を十分に考慮できていない。川口ら⁶⁾や細山田⁷⁾は、レーザープロファイラーによる空間格子間隔2mの詳細な地形データと家屋形状を考慮した、2004年新潟豪雨水害の洪水氾濫流の再現計算を行っており、川口ら⁶⁾は家屋周辺の水位から算出される作用モーメントの合計を用いて家屋流失モデルを導入して洪水氾濫流の再現計算を検討している。

本研究では、洪水氾濫流と家屋被害の関係についてのさらなる理解のため、2004年新潟豪雨水害を対象として、詳細な地形データと家屋形状を考慮した氾濫数値シミュレーションを行い、家屋被害の現地調査結果との比較を行った。さらに、洪水氾濫流の流体力と家屋被害状況についての相関性を検討し、洪水氾濫流の流体力による家屋被害関数の算出を検討した。

2. 豪雨水害による被害状況

(1) 中之島地区の被害の特徴

2004年新潟豪雨水害において、中之島地区の破堤力からの氾濫流により、流失・倒壊を生じさせるような家屋被害が多く生じたことは注目すべき事象である。特に中之島地区での家屋被害は、全壊55棟、半壊314棟（新潟県発表、9月14日）であり、他の被災市町村と比較して家屋被害数が圧倒的に多いことが特徴である。中之島地区の地形は河川堤防を除き勾配の緩やかな平地であるため、信濃川支流の刈谷田川からの氾濫流を主要な外力として家屋被害が生じている。山間部で見られるような土砂崩れや斜面崩壊を伴って家屋被害が生じる場合と家屋被害の発生過程が異なる事は、被害を考える上で重要である。さらに、住宅街では家屋間を氾濫流が流れ、洪水氾濫流の流速は大きくなるので、洪水氾濫流の流体力による家屋被害を検討するためには、家屋の影響を無視することは出来ない。

(2) 現地調査と家屋被害判定

現地調査は、災害後の2004年7月23、24日に中之島町の被災地を訪れ、(1)家屋壁面に残された浸水痕跡による浸水深の測定、(2)流失・倒壊を免れた家屋の外観写真の撮影と外観目視による被害程度の判定、(3)氾濫流の挙動や被災時の対応などに関する住民の目撃証言の収集を行った。現地調査結果については、著者らの論文³⁾およびWebページ (<http://www.drs.dpri.kyoto-u.ac.jp/niigata/>) に詳しいので参照されたい。

氾濫流による被災家屋の損傷程度の判定は、1993年北海道南西沖地震津波の被害調査で使用された首藤⁸⁾に代表される判定基準を用いた。判定基準を表-1に示す。

調査の結果、全壊・流失・大破と判定された家屋は、

破堤部と流失した寺の建物の延長線上に位置する家屋が多く流失・全壊の被害を受けており、地盤の洗掘による水溜りが見られ氾濫洪水流が相当強かったことが伺われる。さらに、住民からの聞き取り証言では、洪水氾濫流により流失した家屋が漂流物となり、他の家屋への被害の原因となったことが分かった。(図-1、写真-1)

表-1 家屋被害ランクの分類とその判定基準

ランク	分類	判定基準
1	全壊・流失 大破	壁および柱の大部分以上が壊れ、あるいは失われている。
2	中破	柱は残っている。壁の大部分は破壊されている。
3	小破	窓等は破壊されても、壁の大部分は残っている。
4	浸水のみ	浸水が判断されるが、壁・柱・窓に損壊は見当たらない。

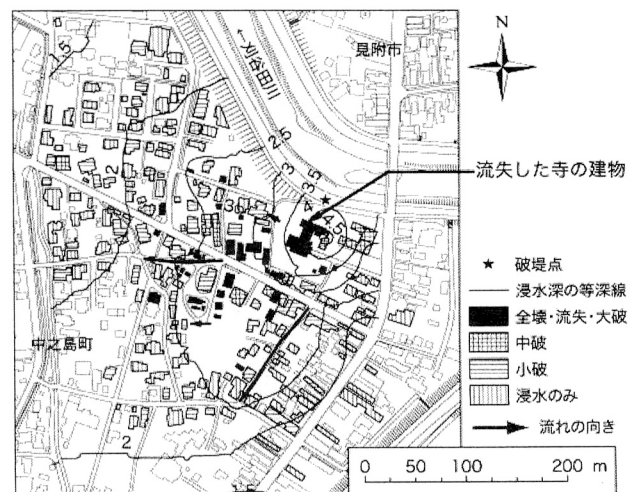


図-1 現地調査結果と家屋被害程度の分布



写真-1 被災家屋の状況



図-2 数値計算に用いた地形データ

3. 家屋を含む地形データの作成

(1) 洪水氾濫時の地形データの作成

数値シミュレーションに用いる地形データは、レーザプロファイラにより計測された空間解像度2mのメッシュの地盤標高データ（以降LPデータ）を基礎データとした。LPデータの撮影は発災後10日目の2004年7月23日に行われており、破堤部周辺は仮堤防工事後の地盤データである。破堤時の地盤データは新潟県が行った被災直後の破堤カ所付近の横断測量結果¹⁾および7月14日、23日に撮影された航空写真を用いて修正を行った。地盤データの修正は、GISを用いて航空写真を幾何補正し、各撮影時の水溜まり水際線位置と断面測量の測線の交点の地盤高を用いて破堤カ所周辺の地盤高を補間・修正した。破堤堤防幅は現地調査の測量結果により設定した。

(2) 家屋データ

住宅街に見られる家屋の大きさは通常一辺あたり十数mあるので、2mの計算格子を用いれば家屋はいくつかの計算格子に分割されて形状を表現することができる。数値シミュレーションでは、家屋形状を計算格子で表現し、家屋の存在する格子には氾濫流が通過しないと仮定した。家屋形状は、まず、住宅地図と被災前の航空写真をGISに取り込み、航空写真を基に住宅地図の家屋形状と位置の修正を行った。次に、家屋形状データと2mの計算格子を重ね合わせ、格子中心点が家屋形状データ内に位置するメッシュ番号を抽出し、家屋形状を表わす計算格子

とした。家屋格子位置では、地盤データに加えて洪水氾濫流が家屋を越えないように家屋高さを加えて数値シミュレーションを行った。流失・全壊の家屋については、家屋格子へ家屋高さを加えないことで考慮することが可能である。図-2に作成された家屋データを含む地形データ（空間格子間隔2m, 600×800mesh）を示す。領域は刈谷田川左岸と高速道路に囲まれる領域である。

4. 洪水氾濫流の数値シミュレーション

(1) 数値モデルの概要

破堤ヶ所からの氾濫流の数値シミュレーションは連続式および2次元浅水流方程式を基礎方程式とし、Staggered Leap-flog差分法を用いて行った。従来の空間解像度が数十から数百mの氾濫解析では、土地利用状況や家屋占有率に応じた粗度係数を各計算格子に設定するが、計算格子間隔よりも住宅街内の小さな道路や家屋間を流れる氾濫流を検討するには不十分である。本研究では空間解像度2mの詳細なデータを用いることで、家屋をいくつかのメッシュで分割し家屋内を氾濫流が通過しないと仮定するため、家屋間を流れる氾濫流の状況や家屋の影響を検討することが可能である。家屋以外の計算格子にはManningの粗度係数として0.025を与えた。

(2) 破堤箇所からの氾濫流入条件

境界条件として破堤部水位と地盤高から本間の越流公式を用いて河川からの流入流量を算出した。目撃証言によると¹⁾、12:20頃に堤防上を約0.3m越流し、その後12:50頃に幅2、3mで破堤し、16:30から17:00にかけて最終的な破堤幅50mまで破堤部が拡大している。堤防の破堤進行過程については十分な情報が得られないため証言情報に基づき、数値シミュレーションでは12:20に破堤カ所堤防上0.3mとなるように河川の水位を19.80m（堤防天端高は約19.5m）とし、破堤幅は2から50mまで12:50から16:30の3時間40分かけて拡大すると仮定した（表-2）。

表-2 河川水位の設定状況

時間	大堰観測水位	破堤ヶ所推定水位	破堤幅	目撃情報
12:00	19.77			
12:20	(19.97)	19.80		0.3m越流
12:50	(20.26)	20.09	2m	破堤開始
13:00	20.36	20.19		
14:00	20.12	19.95		
15:00	19.98	19.81		
16:00	19.92	19.75		
16:30	(19.78)	19.61	50m	破堤幅最大
17:00	19.64	19.47		

*括弧内の大堰水位は補間値

また、破堤カ所より約1.4km上流の大堰において、13:00に20.63mの最大河川水位を観測しており、破堤カ所での水位の時間変化は12:20の破堤カ所水位と大堰観測水位の差を大堰観測水位から全時間に渡り差し引いて求めた(図-3)。

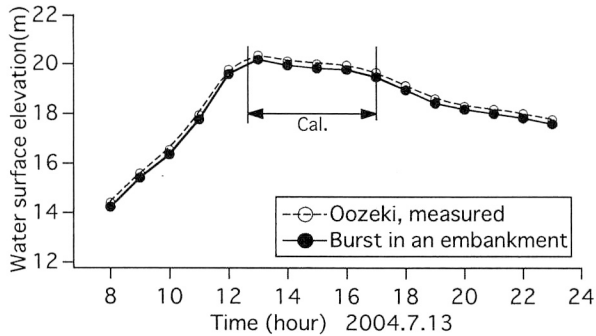


図-3 河川水位

(2) 家屋の数値シミュレーション条件

計算領域は刈谷田川左岸と北陸自動車道に囲まれる1200×1600mの領域とし、計算に用いた空間格子間隔は $dx=dy=2.0m$ 、時間格子間隔は $dt=0.1sec$ とした。破堤箇所の位置や目撃証言²⁾から、家屋の破壊がその後の時間の氾濫流の挙動および背後の住宅街の被害に大きく影響を受けると考えられる。住宅街における氾濫流の挙動を検討するために、流失・全壊の家屋の有無についていくつか設定条件を変えて数値シミュレーションを行った。氾濫流により流失・全壊した建物が無かったとした場合としてCase1を設定した。破堤箇所近くの流失した寺の建物は通常の住宅よりも大きく、氾濫流への影響も大きいと予想されるので、流失した寺の建物のみが無い場合としてCase2を設定した。また、現地調査により流失・全壊と判定された家屋が全て無い場合としてCase3を設定している。さらに、破堤幅の拡大を考慮した場合としてCase4を設定した。比較のために家屋が全て無い条件(Case0)についても数値シミュレーションを行っている。(表-2)。

表-2 計算ケース

	家屋条件	破堤カ所条件
Case0	家屋なし (地盤高のみ)	T=0 secより 破堤幅50m
Case1	全家屋 (地盤高+家屋)	T=0 secより 破堤幅50m
Case2	寺を除く全家屋	T=0 secより 破堤幅50m
Case3	流失・全壊家屋 を除く全家屋	T=0 secより 破堤幅50m
Case4	流失・全壊家屋 を除く全家屋	T=0secから3時間40分で 破堤幅は2から50mに拡大

5. 計算結果

(1) 家屋による氾濫流への影響

破堤部付近の家屋による氾濫流への影響を検討するために、Case1,2,3における破堤箇所近傍の最大浸水深の分布および最大浸水深が3.0mとなる等深線を図-4に示す。Case1,2,3の順に浸水深が3.0m以上となる領域が拡大しているのが分かる。特に、Case1とCase2から、大きな建物であるが寺院1棟のみによる影響で浸水の広がり状況が大きく異なる事が分かる。また、Case2とCase3から、破堤ヶ所からの氾濫流の流下方向と直行する方向に通っている主要道路沿いの家屋の有無による浸水状況を見ると、道路沿いの家屋が道路を越えて拡大しようとする氾濫流を妨げる働きをしていることが氾濫流の広がり状況から分かる。この様に、流失・全壊を受けた家屋の存在していた位置には、氾濫流の拡大に大きな影響を与えるような大きな外力が集中していた地点であったと言える。氾濫流の拡大状況に家屋破壊状況が大きく影響を与えることが分かる。また、周辺家屋の被害状況により、家屋被害の状況も変化し得ることが推測される。

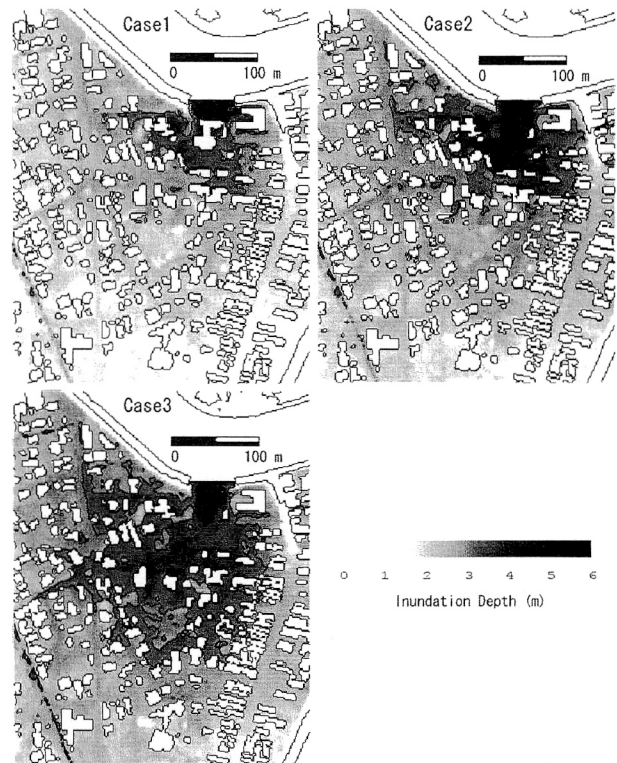


図-4 最大浸水深の分布

(2) 計測水位と計算結果の比較

数値シミュレーション結果の妥当性を検討するために、現地調査より得られた痕跡浸水深と流失・全壊家屋を除く全ての家屋を考慮したCase4の計算結果の最大浸水深との比較結果を図-5に示す。現地調査で得られた痕跡

浸水深は家屋壁面，家屋内含めて合計94地点得られているが，数値シミュレーションでは家屋内への流入を計算していないため家屋内の計算値が0になる地点が5地点ある。また，計算値が計測値よりも小さく算出されている地点は破堤ヶ所に近接した家屋の計測点であり，破堤ヶ所より氾濫流が急拡して流れる付近の状況を数値シミュレーションでは十分に再現できていないためであると考えられる。以上を除けば，全体的に計算値が計測値より大きく算出される傾向にあるが，計測地と計算値が一致する45度の実線と平行な破線を中心として分布しており，妥当な計算結果であると言える。今回の数値シミュレーションでは，破堤ヶ所周辺の地形データを被災後に計測されたLPデータと破堤部の断面測量結果を基に作成しているため，周辺地盤高よりも1~2m程度洗掘された地形となっている。実際の破堤箇所からの流入量よりも，洗掘された地盤高と河川水位から越流公式により算出される流入量が大きくなるため，計算浸水深が計測浸水深よりも全体的に大きくなる結果となったと考えられる。



図-5 痕跡浸水深と計算浸水深の比較

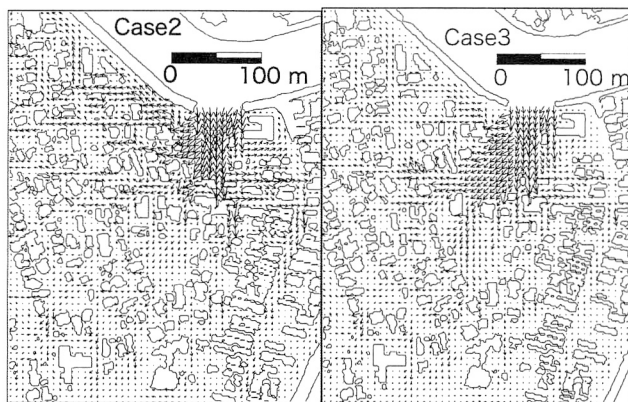


図-6 計算された流速・流況 (Case2, Case3)

(3) 流速・流況

流速・流況の計算結果として，図-6にCase2, Case3の破堤部付近における流速・流況のベクトル図を示す。破

堤部から洪水氾濫流が流れ出る箇所で非常に大きな流速が算出されている。Case2では，氾濫流が破堤部正面の家屋に大きな流速で突入していることが分かる。また，堤防沿いにも大きな流れが見られる。Case3では，破堤部から全壊流失した家屋のあった方向へ強い流れが生じることが分かる。特に，氾濫流が現地調査のヒアリングで得られた(1)道路沿いの流れの方向，(2)大きな水溜りが見られた洗掘箇所，(3)被害が大きかった箇所で，大きな流速となり，現地調査結果を指示する計算結果が得られた。これらの数値計算の結果ように，家屋により洪水氾濫流の流況は大きく変化する事が示され，被害の分布状況は周辺家屋にも影響を受けることが想定できる。

7. 流圧力による家屋被害関数

ここでは，著者らが実施した被害調査³⁾で得られた家屋被害程度と浸水深の関係と同様の整理を数値計算によって求めた流圧力についても行い，過去に行われた同種の研究成果と比較・検討する。被害調査からは対象家屋各々について，表-1に示す4ランクの被害程度が判定されている。各計算格子について流圧力を出力し，被害程度が判定されている家屋の周囲1格子分の範囲内の最大流圧力をもって，その家屋の代表値とした。

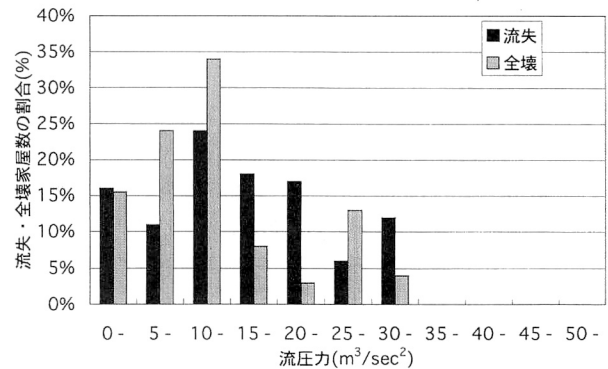


図-7 三隅川の洪水災害における流圧力と家屋被害

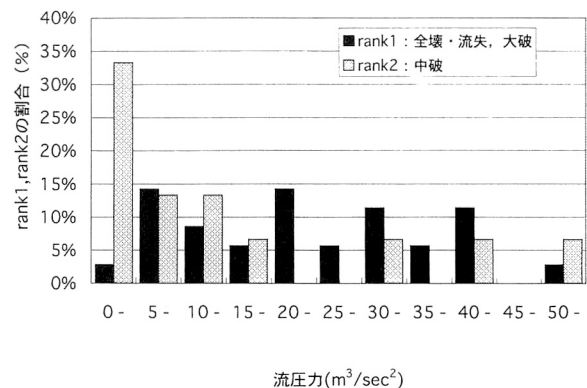


図-8 新潟豪雨水害における流圧力と家屋被害

河田・中川⁴⁾による三隅川の洪水災害における流圧力と家屋被害の相関性を図-7に、2004年新潟豪雨水害における流圧力と家屋被害の相関図を図-8に示す。横軸は5.0(m³/s²)ごとの流圧力であり、縦軸はその流圧力となった流失・全壊家屋数の全流失・全壊家屋数に対する割合である。河田、中川の家屋被害判定の基準が本研究と異なっており、本研究ではランク1にまとめられる流失と全壊を分けているが、どちらの場合も被害の程度が大きくなると流圧力の分布が大きい方に移動する傾向がみられ、両者に相関のあることが認められる。また、流圧力の絶対値については本研究の計算結果が非常に大きい値まで分布しているが、本研究での数値計算は家屋形状を考慮しており、家屋間を氾濫流が流れることによる大きな流速を評価できているためである。

また、羽鳥⁹⁾は次式に示される家屋の破壊率： R_D を定義し、津波による家屋被害を家屋棟数の割合として論じている。

$$R_D = (a + 0.5b) / (a + b + c) \times 100, \quad (\%) \quad (1)$$

ここで、 a はランク1に分類される家屋数、 b はランク2に分類される家屋数、 c はランク3および4に分類される家屋数である。この定義に準じてある流圧力に対応する家屋被害率を算定し、流圧力による家屋被害を表現する被害関数の構築を試みた(算出方法については著者らの論文³⁾に詳しい)。その際、流圧力を外力とした家屋被害率の分布型として、次式で表される対数正規分布を仮定した。

$$P_D = \Phi((\ln x - \lambda) / \xi) \quad (2)$$

ここで λ 、 ξ はそれぞれ $\ln x$ の平均値、標準偏差である。これにより算出された流圧力に関する家屋被害関数は図-9に示す様に求められる。平均値は3.67、標準偏差は1.29である。これにより流圧力の増加に伴い家屋被害率の増加を推定することが可能である。

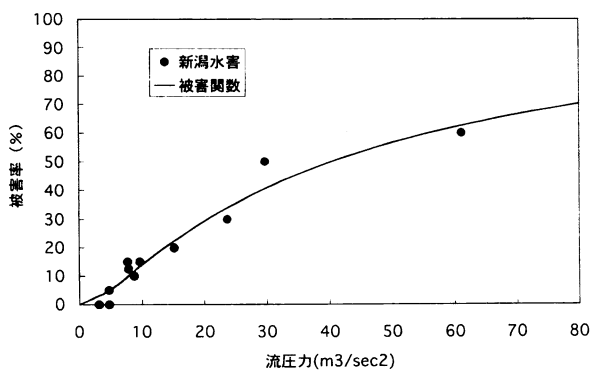


図-9 流圧力に関する被害関数

8. おわりに

本研究では、LPデータを基に2mメッシュの詳細な地形データおよびTELMAPと航空写真から家屋形状の抽出を行い、空間解像度2mの詳細な氾濫解析により、家屋が氾濫流に与える影響について検討を行った。その結果、家屋の被災状況により氾濫流の流況が大きく変化する事がしめされ、被害家屋の分布には周辺家屋の被災状況によっても変化する事を指摘することが出来た。

さらに、この詳細な地形データを用いた数値計算結果と家屋被害に関する現地調査結果より、家屋に働く流圧力と家屋被害率に関する被害関数の算出を試みた。これにより、数値計算により求められた流圧力から家屋被害率を推定する事が出来る。ただし、新潟豪雨水害の中之島の事例のみで被害関数を求めているため、他の事例との比較が今後必要である。

謝辞：中之島町の町民の方々には、被災後の復旧作業で大変忙しい最中にも関わらず、本研究の調査にご協力頂いた。ここに記して謝意を表す。また、本研究は文部科学省の大都市大震災軽減化特別プロジェクト(代表：河田恵昭)の一環として行われたものである。

参考文献

- 1) 新潟県「7.13新潟豪雨洪水災害調査委員会」資料、http://www.pref.niigata.jp/doboku/sosiki/honch/kak/kak_r/kak_r_68.html, 2004.
- 2) 新潟県災害対策本部：7月13日からの大雨による被害状況について、<http://www.pref.niigata.jp.seikatsukankyo/bosai/7.13/new/1.pdf>, 2004.
- 3) 鈴木進吾, 越村俊一, 原田賢治, 岡本学, 福留邦洋, 菅磨志保, 河田恵昭：新潟豪雨水害の被害調査と氾濫流による家屋被害関数の提案, 水工学論文集, 第49巻, pp.439-444, 2005.
- 4) 河田恵昭, 中川 一：三隅川の洪水災害—洪水氾濫と家屋の被害—, 京都大学防災研究所年報, 第27号B-2, pp.179-196, 1984.
- 5) 佐藤智, 今村文彦, 首藤伸夫：洪水氾濫流の数値計算および家屋被害について—8610号台風による吉田川の場合—, 水理講演会論文集, 第33回, pp.331-336, 1989.
- 6) 川口広司, 末次忠司, 福留康智：2004年7月新潟県刈谷田川洪水・破堤氾濫流に関する研究, 水工学論文集, 第49巻, pp.577-582, 2005.
- 7) 細山田得三：7.13新潟豪雨災害での住宅区域の氾濫流解析, 水工学論文集, 第49巻, pp.589-594, 2005.
- 8) 首藤伸夫：北海道南西沖地震津波による家屋の被害, 津波工学研究報告, 第11号, pp.11-28, 1994.
- 9) 羽鳥徳太郎：津波による家屋の破壊率, 地震研究所集報, Vol.59, pp.433-439, 1984.

(2005. 4. 7 受付)