

“水のみち” による都市域水害軽減の提案

A PROPOSAL FOR FLOOD DAMAGE REDUCTION IN URBAN AREA BY “WATER PATHWAY”

黄光偉¹・磯部雅彦²
Guangwei HUANG, Masahiko ISOBE

¹正会員 工博 東京大学助教授 大学院新領域創成科学研究科 (〒113-0033 東京都文京区本郷7-3-1)

²フェロー 工博 東京大学教授 大学院新領域創成科学研究科 (〒113-0033 東京都文京区本郷7-3-1)

By analogy to the concept of “Wind Ventilation Lane” used in urban heat island studies, the present paper proposes a new approach to reduce flood damage in urban areas, which is hereafter referred to as “Water Pathway”. The basic idea is to take advantage of the urban flooding characteristics that flood water tends to concentrate in roads and thus to channel flood water to designated areas where flood damage could be minimized or controlled.

For feasibility study, a hybrid model is constructed, which combines a 2-D inundation model with a 1-D model for “Water Pathway”. The application to the Sanjo city flooding, which occurred last summer, shows clearly that the water pathway approach is promising. Besides, we propose that PTSD (Posttraumatic Stress Disorder) should be dealt with as an important factor in flood damage reduction planning.

Key Words : Water Pathway, urban flood, damage reduction, hybrid model, PTSD

1. まえがき

日本では、河川氾濫区域内に60%の人口と70%の資産が集中している。よって治水安全度の向上が求められているのだが、地表面の不浸透化にともなう保水能力の低下という都市水循環の変化により、都市水害メカニズムが形成されている。さらに、図-1²⁾に示すように、近年、短時間で集中的な降雨が増加傾向にあるため、下水道が整備された地域においても都市型水害が頻発する事態になっている。また、都市地域の河川はひとたび堤防が決壊すると、甚大な被害をもたらす。昨年の新潟・福島豪雨でも、五十嵐川と刈谷田川が破堤し、多数の水死者と家屋の全・半壊という激甚な被害を発生させた。

都市域水害を回避・軽減するため、河道整備(築堤や浚渫など)や遊水地などの河川改修、自然地の保全や貯留施設の設置などの流域対策、警戒避難体制の整備などの被害軽減対策を複合的に行ってきた。しかしながら、「都市型水害に関する緊急提言」と「総合的な豪雨災害対策の推進について(提言)」¹⁾が唱えたように治水システムの新たな展開と地域防災力の再構築が求められている。本研究では、このような背景を踏まえて、“水のみち”の構築による水害軽減という新しい減災技術開発の提案を目的とする。

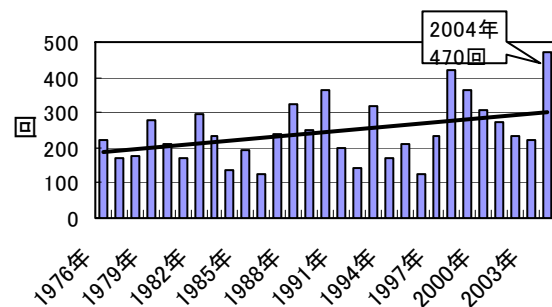


図-1 時間雨量50mm以上の降雨発生回数

2. “水のみち” のコンセプト

ドイツを中心とするヨーロッパでは、「風の道」による都市熱環境を緩和する都市計画案が作成され³⁾、その案に基づいた建築規制や都市整備を実施している。そこでは、道路、公園、森林、建築物などの再配置により、市街地の風通しを確保することによって熱暑の緩和や大気の浄化という機能を狙っている。最近、日本でも「風の道」を都市マスタープランに位置づける自治体が出て⁴⁾いる。本研究では、この「風の道」の真髄を都市水害軽減へ応用し、“水のみち”という概念を提案する。一言で説明すると、道路や建築物などの再配置により、洪

水の流れを公園や農業地などへ誘導して市街地の浸水深を抑えるという考えである。

日本の治水史を振り返ると、江戸時代から開発された霞堤は一種の「水のみち」と考えられる。霞堤のひとつの働きは、上流で越水や破堤が起こっても、氾濫した洪水は周辺に広がらず霞堤の開口部より川に戻ることである。これは、洪水を指定地に誘導したとも言える。

3. 水のみちの研究手法

「水のみち」の提案において、道路が中心である。従来のデカルト座標に基づく洪水氾濫解析モデルは、道路を陽的に扱わないため、「水のみち」の評価に適していない。非構造格子氾濫解析モデルを用いた場合、道路を適切に表現できるが、実務に応用する際、高分解能の標高と土地利用データが不可欠である。また、現在国土院が公表している細密な土地利用情報は東京と大阪および名古屋3大都市圏に限られている。さらにデータの精度と非構造格子生成に必要な労力を考えれば、非構造格子モデルの普及は時間と更なる努力が要すると言える。したがって、本研究では、2次元デカルト座標モデルと一次元水路モデルとの組み合わせにより、「水のみち」による水害軽減効果を評価する。基礎方程式は次のように与えられる。

氾濫域においては

$$(1-\lambda)\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial \beta M}{\partial x} + \frac{\partial \beta N}{\partial y} = q \quad (1)$$

$$(1-\lambda)\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial \beta U M}{\partial x} + \frac{\partial \beta V M}{\partial y} = -gh(1-\lambda)\frac{\partial(h+z)}{\partial x} - (1-\lambda)\frac{gn^2 M \sqrt{U^2 + V^2}}{h^{4/3}} \quad (2)$$

$$(1-\lambda)\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial \beta U N}{\partial x} + \frac{\partial \beta V N}{\partial y} = -gh(1-\lambda)\frac{\partial(h+z)}{\partial y} - (1-\lambda)\frac{gn^2 N \sqrt{U^2 + V^2}}{h^{4/3}} \quad (3)$$

ここに、 M 、 $N=x$ と y 方向の流量フラックス、 U 、 $V=x$ と y 方向の流速、 h =水深、 λ =家屋占有率、 β =メッシュ界面における通過率、 q =横流量、 z =地盤高。水路においては、拡散波解析手法を採用する。

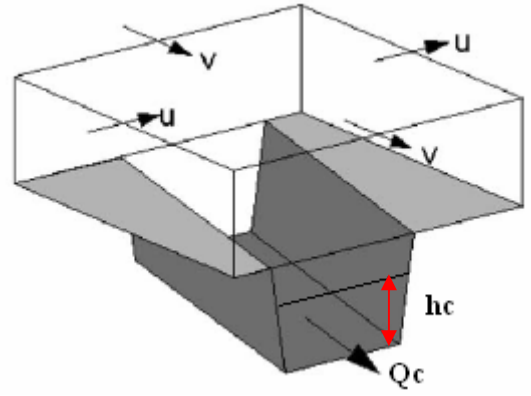


図-2 ハイブリットモデル構造

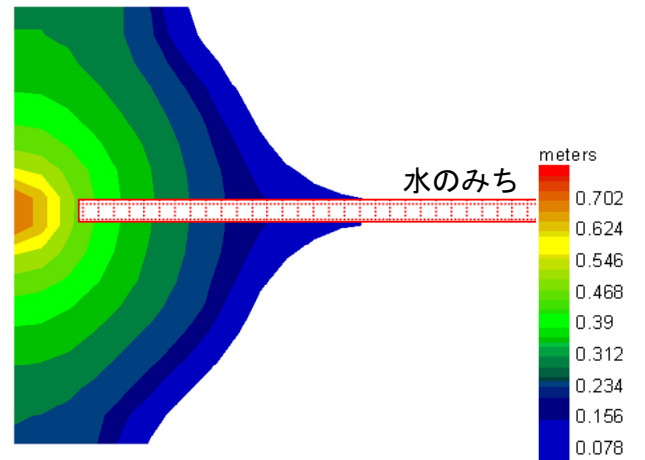


図-3 水のみちの導流効果

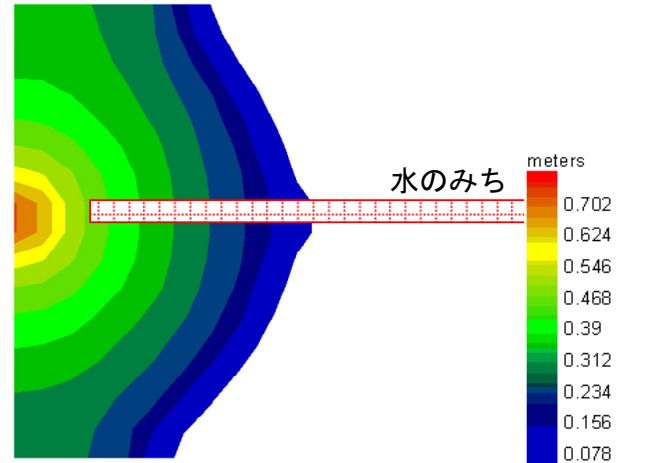


図-4 幅の減少による導流効果の変化

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (4)$$

$$S_0 - \frac{n^2 P^{4/3} Q^2}{A^{10/3}} - \frac{\partial h}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

ここに、 S_0 =水路勾配、 n =マンニング粗度係数、 P =潤辺長、 A =断面積。

図-2に示すように、道路が入っているメッシュにおいて、平面流量フラックスとともにチャンネル流量を求める。水深もメッシュ平均水深とチャンネル水深をそれぞれ計算する。氾濫域とチャンネルの接続はriver-type横越流式を用いて行う。

$$q = \frac{h_{\max}^{5/3}}{n} \left(\frac{\Delta WL}{\Delta L} \right)^{1/2} \quad (6)$$

ΔWL , ΔL は、それぞれ氾濫域とチャンネルとの水面差とその間の距離である。 $h_{\max}$ は氾濫域とチャンネル間交換し得る水深である¹²⁾。その定義を水のみちにあてはめると

$$h_{\max} = \text{Max}(\text{メッシュ水深}, \text{チャンネル水深}) \quad (7)$$

ーメッシュ地盤高

以上の組み合わせをハイブリットモデルと名づける。

モデルテストとして、単純な長方形氾濫域で一本の道路があったシナリオを検討した。メッシュサイズは50m、道路幅は30m、縁石高さは20cmとした。図-3に示すように、氾濫水の先端は道路に集中して伝播する様子が計算された。このような氾濫流の挙動は福岡⁵⁾や中川⁶⁾らの氾濫実験また様々な被災現場の映像でも明らかにされており、ハイブリットモデルはこの現象を定性的に再現できた。図-4には、道路幅と縁石高さを5mと10cmに設定した場合の計算結果を示す。道路幅が狭くなると、道路に流れが集中する傾向は弱まったことがわかった。

道路にはマンホールが多くあり、道路を陽的に扱うことによって、下水道網との結合も比較的容易にできるが、このこともハイブリットモデルのメリットである。

4. ケース・スタディー新潟県三条市の氾濫

(1) 背景

平成16年7月新潟・福島豪雨では、日本海から新潟県付近にかけて停滞していた梅雨前線が7月12日夜から活発化し、翌13日に新潟県中越地方を中心として記録的な大雨をもたらした。この豪雨によって、五十嵐川左岸三条市諏訪新田において破堤し、激流が人家を襲い、水死者9名、床下・床上浸水、半壊併せて14,767棟などの激甚な被害が生じた⁷⁾。

(2) 氾濫再現シミュレーション

まず、一次元河川不定流解析と洪水実測水位との組み合わせにより、破堤流量ハイドログラフを推定した⁵⁾。その結果は図-5に示す。氾濫計算領域は五十嵐川堤防決壊地点周辺の5km×5km区域である。土地利用情報の制限でメッシュ大きさは100mとした。標高データは国土地理院の50mメッシュデータより作成した。家屋占有率は、1/200の住宅地図を用いて100×100mメッシュ毎にプランメーターで測った。三条市中心部において家屋占

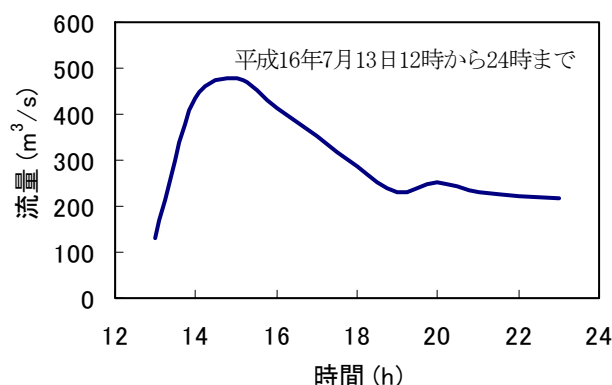


図-5 破堤流量ハイドログラフ

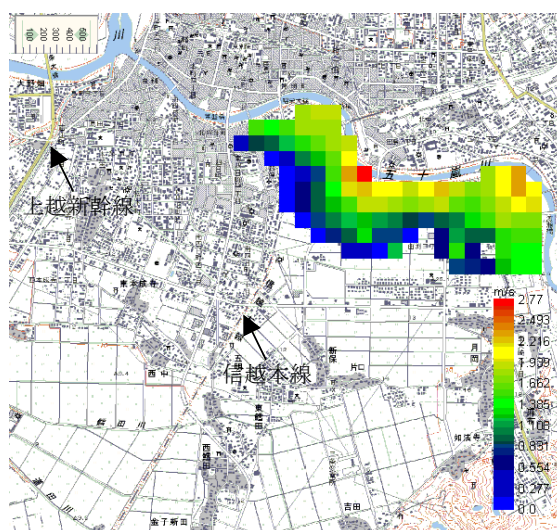


図-6 破堤1時間後の浸水深

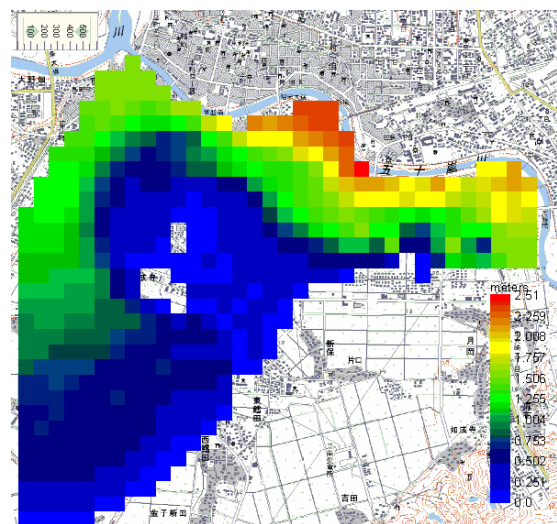


図-7 破堤3時間後の浸水深

有率は大体3割であるため、本計算では、市街地における占有率と通過率はそれぞれ0.3と0.5を与えた。市街地の粗度係数は0.067とした⁹⁾。また計算時間ステップは5秒とした。

図-6, 7 には、浸水深の時間変化を示す。計算では、

氾濫水は二つのルートで広がった。1つは五十嵐川に沿って東から西に広がって、国道8号線の盛土により止められた。もう1つは信越本線に沿って南下した。3時間で氾濫全域が形成され、曲渕周辺には2m以上浸水したことが計算された。実現現象では、破堤前に大雨が降り、外水と内水氾濫が混在したため、外水氾濫解析精度を定量的に評価するのは困難であった。しかし、聞き取り調査で川付近住民から氾濫水が2階の高さまで迫ってきた証言があり、2m位の氾濫痕跡も数多く残ったことから、数値解析は最大浸水深をおおよそ再現できたと考えられる。図-8 には新潟県土木部が作成した7月13日の浸水エリアを示す。氾濫解析と比べると、床上浸水が多いエリアは氾濫解析による浸水区域と概ね一致したことが分かった。外水氾濫は床上浸水への寄与が大きいことを考えれば、数値解析は河川水の氾濫区域を概ね反映できたと考えられる。

(3) 水のみちによる軽減効果

図-9に示すように深く浸水した曲渕から南向きの水のみち2本を設定した。本計算では、水のみちによる都市域水害軽減の可能性を示すことを目的とするため、水のみち設定箇所の物理的実現性の検討は行わない。すなわち、五十嵐川に近い曲渕から浸水の軽い三条市南部につながる水のみちが構築されたと仮定したわけである。設定した水のみちは縁石高さが20cm、平均勾配が1/5000とし、幅10m、30m、50mの3ケースについてシミュレーションを行った。図-9、10に示すように、水のみちの導入により、中心市街地の非浸水区域が広がった。道路幅を10mから30mに広げた場合、中心市街地の非浸水区域がさらに広くなり、図-8の非浸水面積の2倍になった。しかし、道路幅を30mから50mに拡大した場合、図-11のように、非浸水区域は西側に若干シフトしたが、面積はほとんど変わらなかった。道路に走る氾濫流の最大流速を調べると、道路幅が30mと50m場合それぞれ約1.3m/sと1.0m/sであった。すなわち、道路幅がある程度を超えると、流速が減り、誘導効果はほぼ一定となる。なお、歩行者の危険を最小限にする観点から考えると、幅の広い水のみちの構築が望ましいと思われる。

水のみちにより、中心市街地は助けられるが、南部の農地の冠水はかえってひどくなる。新潟県の7.13水害における農作物被害は48億78百万円に達した。氾濫水を農地に誘導することによって農作物被害額が増大と想定できる。したがって、水のみちを検討する際、総合的な議論を通じて、さまざまな被害軽減ニーズに対して、優先順位をつける視点が必要である。本論で提案するのは、ただの資産損害額で議論することではなく、災害後ストレス障害 (Posttraumatic Stress Disorder, PTSD) を含めた多角的な議論を行った上で、減災計画を立案することである。大きな災害でショッキングなことがあった場合、それが深く心の傷となってさまざまな症状が表れてくる^{10,11)}。被災者の精神健康への影響を減災計画に考慮



図-8 氾濫区域（新潟県土木部より）

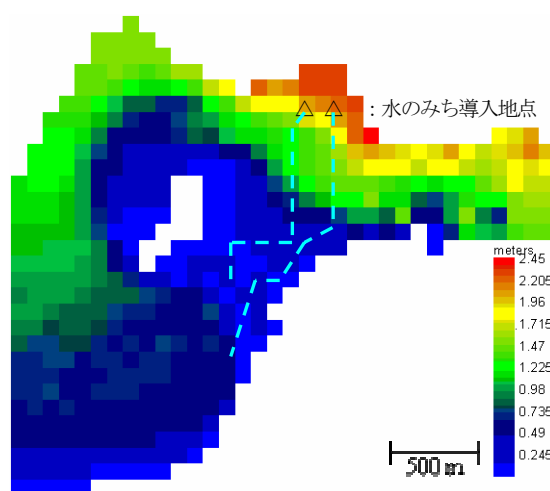


図-9 水のみちによる軽減効果（幅10m）

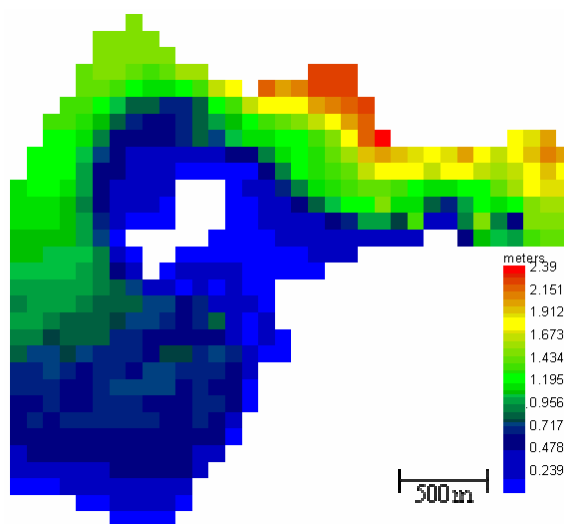
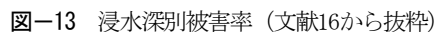
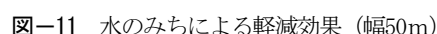


図-10 水のみちによる軽減効果（幅30m）

しなければならない。特に子供や少年の場合には、心の抵抗力が低いために強く影響を受ける。最初の反応として、眠れなくなったり、怖い夢を観たり、いろいろな心身症が起こる。そして、それ以降3カ月とか3年先になっ

洪水氾濫による被害状況に関しては、流速が小さい場合、主に浸水深に依存し、流速が大きい場合、浸水深および流速に依存することは既往の報告により明らかにされている¹⁵⁾。すなわち、水害のひどさは、水深と流速の組み合わせによって評価できる。親の反応や家族のケアなどの評価方法としては点数化が考えられる。災害の曝露度の評価指標としては氾濫水到達時間を用いる。すなわち、氾濫水が襲いかかって来る速さで評価する。以上の考えに基づいて、本研究では、次のように水害による子供のPTSDリスク評価式を提案する。



ここで、 P_b , h_b , Fr_b は地区における人口、平均浸水深およびフルード数である。 PA_b は地区における大人の被害に対する反応点数。ハザードマップの整備状況と防災意識に応じて0.1から1.0の範囲で変動させる。 CA_b は災害後コミュニティや学校のケアの点数である。コンセリン

グやPTSD防止対策が十分に実施される場合0.1, 全くない場合1.0とする。 T_i は破堤地点から*i*地区まで洪水の到達時間である。

学齢期前の子供たちは言葉で精神的な苦痛を説明する能力が足りないため、遅れて発症する、もしくは遅れて発覚される可能性がある。そこで、この年齢層のリスク評価にMonodタイプ時間因子 ($t/(t+t_0)$) を導入した。

14歳から19歳までの青少年は自立志向を持ち始めっており、また独自の判断・行動力もある。すなわち、この年齢層の青少年にとっては、大人の反応による影響は薄いと考えられる。したがって、14歳から19歳までの青少年のPTSDリスク評価式においては、大人の影響因子を外した。

また、流速が1.0 m/sを超えると家屋に被害がでる可能性が高くなるため¹⁵⁾、1.0 m/sを境目にしてそれぞれの評価式を考えた。

本論文でもうひとつ提起したいことは、氾濫水の受け皿の面積を考慮した水害軽減計画である。三条市の西側に走った氾濫水は国道8号線に止められ、西南側にある栄町には浸水の被害は無かった。しかし、栄町における人口密度を考察すると、低いことがわかった(図-12)。破堤流量ハイドログラフを積分すれば、全氾濫水量は約1千万立米と推定された。氾濫面積10km²とすれば、平均浸水深は1mである。もし、今回の洪水は8号線にくぐって栄町に広がり、氾濫面積を1割増と仮定した場合、平均水深は1m以下になる。図-13に示すように、1mはひとつ境目であり、1m以下になると、被害率は一段下がる。つまり、氾濫の受け皿を広くして被害を分散すれば、トータルの被害が軽減できる可能性がある。このような検討はこれからの都市域水害軽減計画過程に必要であると考えられる。

5. まとめ

本研究では、都市気象分野で提案された「風の道」の計画手法を都市域洪水解析に導入し、水のみちによる都市域水害軽減策を提案した。すなわち、氾濫時に、洪水を誘導する機能を備える多目的道路整備の提案である。昨年夏の新潟・福島豪雨による三条市の氾濫シミュレーションを通じて、中小河川流域の整備において、水のみちの効果があることを示した。また、水害軽減の目標については、資産被害額の最小化のみならず、災害後の精神症候群、特に青少年のPTSDを考慮することを提唱した。

豪雨災害対策総合政策委員会の「緊急提言」において、集中豪雨の影響を受けやすい中小河川流域の減災対策が課題として取り上げられ、特に人口・資産が集積した市街地部での氾濫をできるだけ回避できるように提言された。水のみちの提案はこの呼びかけに対するひとつの答えである。なお、実用に向けて次の課題が挙げられる。

- 水のみちと下水道との連携を図るための結合モデルの開発。
- 対象河川において、氾濫しやすい箇所の分布を示すGISシステムの構築。
- 対象都市における遊水地の計画および遊水地へ氾濫水を誘導する道路の計画を行う際、考慮すべき項目および最適解を求める手法の検討。
- 水のみちによる氾濫水誘導先に対する補償制度の検討。

謝辞：本研究は、土木学会水工学委員会河川懇談会の活動を通じて進められてきたものであり、ここでの議論が非常に参考になった。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) <http://www.mlit.go.jp/river/>
- 2) <http://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/h16/hakusho/h17/>
- 3) CD-ROM "URBAN CLIMATE 21" Stuttgart, Version 4.
- 4) 山口県都市計画区域マスタープランー熊毛都市計画区域, 2004.
- 5) 福岡捷二, 川島幹雄, 松永宜夫, 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, No.491/II-27, pp.51-60, 1994.
- 6) 中川一ら: 都市における洪水氾濫一大規模な洪水氾濫模型装置を用いた実験と解析一, 京都大学防災研究所年報, 第46号B, pp.575-584, 2003.
- 7) 土木学会: 平成16年7月北陸豪雨災害緊急調査団報告書, 2005.
- 8) 黄 光偉, 泉宮尊司, 玉井信行: 7.13新潟・福島豪雨水害時の五十嵐川洪水の再現とその特性, 土木学会河川技術論文集, Vol.11, pp.127-132, 2005.
- 9) 水理公式集: 土木学会編, 1999.
- 10) 太田保之ら: 災害ストレスと心のケア, 医歯薬出版株式会社, 1996.
- 11) 新潟県教育総合研究センター: トラウマ・急性ストレス反応・PTSDに関するハンドブッケー災害を体験した子どもたち, 2004.
- 12) Bates, P.D. et al.: Simplified two-dimensional numerical modeling of coastal flooding and example applications, Coastal Engineering Vol.52, pp.793-810, 2005.
- 13) Chemtob, C. M, Nakashima, J. and Carlson, J. G.: Disaster-Related Posttraumatic Stress Disorder: A Field Study, Journal of Clinical Psychology, Vol.58, Issue 1, pp.99-112, 2002.
- 14) Hamblen J.: PTSD in Children and Adolescents, Fact sheet, National Center for PTSD.
- 15) 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-8610号台風による吉田川の場合-, 水工学論文集, 第33巻, pp.331-336, 1989.
- 16) 建設省河川局: 治水経済マニュアル(案), 2002.

(2005. 9. 30受付)