

◆ 特集：自然災害リスクの評価と軽減 ◆

都市域氾濫解析モデル (NILIM) の開発

山岸陽介* 野仲典理** 中村徹立***

1. はじめに

永年の河川整備の進捗により全国の洪水氾濫面積は着実に減少しているものの、平成11年、15年の福岡水害(写真-1)、平成12年の東海豪雨、平成17年の東京・埼玉水害など、近年、都市水害が増加している。

この原因としては、都市部の地表面がコンクリートやアスファルトで被覆され雨水が浸透しにくく直接流出量が増加していること、時間雨量100mmを超えるような集中豪雨が多発していることなどが考えられるが、都市部には人口・資産が集中しており、地下開発などの土地利用の高度化も相まって、一度洪水に見舞われるとその社会経済的ダメージは非常に大きいため、都市水害対策の充実喫緊の課題である。

都市水害対策を講じるにあたっては、ハード対策(施設整備)を着実に推進し、起こりうる災害を未然に防止することが重要であるが、その進捗状況は依然として低く、今後も長期間にわたって膨大な費用が必要となり、緊急的にハード対策を完了することは現実的には困難である。また、近年頻発している都市水害では、施設の計画規模を上回る集中豪雨により甚大な被害が発生するなど、

ハードのみの対応では被害を食い止められないケースも発生している。

そこで、将来的にはハードによる対応を前提としつつも、緊急的に都市水害対策を充実させるためためには、いわゆる「公助」としての行政によるハード対策の強化を着実に進める一方で、住民自らが災害対応を行う、いわゆる「自助」・「共助」を促進することにより被害の最小化を図ることが必要である¹⁾。

効果的な「自助」・「共助」を導くためには、住民的確な対応を促すためのハザードマップの公表²⁾や事前の防災教育などによるソフト対策(情報提供、避難支援)が重要となる。

国土技術政策総合研究所 水害研究室では、都市浸水想定区域図の算定や、ハザードマップの作成において必要とされる氾濫解析モデルについて、標準的な技術的事項を示した「都市域氾濫解析モデル活用ガイドライン(案)」³⁾を作成するとともに、当研究室で開発した都市域氾濫解析モデルNILIM(New Integrated Lowland Model:以降、NILIMモデルという)のプロトタイプを公表した。さらに、実際の適用の際には、その精度が問題となることから、学識経験者を中心とした「都市浸水に関する検討会」(委員長:福岡捷二教



写真-1 平成11年福岡水害

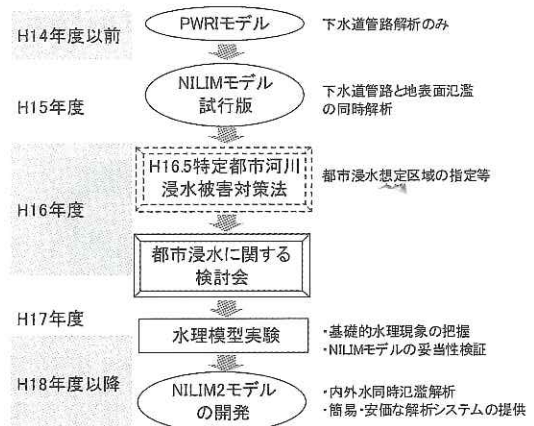


図-1 NILIMモデルの開発経緯

授(中央大学研究開発機構))を設置し、NILIMモデルプロトタイプの改良・拡充に向けて検討を重ねている⁴⁾(図-1)。

本報では、NILIMモデルの概要を紹介するとともに、モデルの妥当性検証及び精度向上に向けた水理模型実験について報告する。

2. 都市域氾濫解析モデル(NILIM)の概要

NILIMモデルは、以下に示す「地表面の流出計算」、「下水道中の流出計算」、「マンホール等からの溢水・流入の計算」、「地表面の氾濫計算」の大きく4つの計算モデルより構成されている(図-2)。

2.1 地表面の流出計算モデル

雨は農地・森林等に降ると地中に良く浸透し河川や下水道への流出量は小さく、家屋の屋根や舗装された道路等に降るとほとんど浸透せず河川や下水道への流出量は大きくなる。また、農地・森林等では流出時間が遅く、道路等では速い。このような地表面特性による流出特性の違いを考慮するため、本モデルの地表面の流出計算においては、運動方程式は運動波近似式(Kinematic Wave式)を採用した。

土地利用データより地表特性(粗度係数、勾配、形状等)を算出し、浸透等の損失雨量や流出時間を考慮した下水道への流入量の計算が可能である。

2.2 下水道中の流出計算モデル

下水道は一般的に管路で計画されている。平常時は、管路断面に余裕があり開水路流れである。

しかし、計画降雨を上回るような洪水時には、管路内水位が上昇し満管状態の圧力流れとなる。

本モデルの下水道中の流出計算においては、下記の通り、運動方程式は、計算時間の短縮のため、慣性項を省略した拡散波近似式(Diffusion wave式)を採用し、連続式はラテラルモデル⁵⁾を採用し、開水路流れと圧力流れの両者の計算が可能である。

運動方程式：

$$\frac{\partial h}{\partial x} = S_0 - S_f = S_0 - \frac{n^2}{R^{4/3}} \cdot \frac{Q^2}{A^2} \quad (1)$$

連続式：

$$\text{開水路} \quad \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$\text{圧力管} \quad \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{C^2}{g} \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

- Q : 下水道の流量
- h : 下水道の動水位
- A : 下水道の通水断面積
- C : 圧力波伝播速度
- n : 下水道の粗度係数
- R : 下水道の径深
- S_0 : 下水道の管路勾配
- S_f : 下水道の摩擦損失勾配
- x : 下水道内の流れの方向
- u : x 方向の流速
- t : 時間
- g : 重力加速度

2.3 マンホール等からの溢水・流入の計算モデル

降雨が激しくなり下水道の流量が増え、下水道管路内エネルギーが地表面エネルギーを超えた場合、下水道と地表面との接続部(マンホールや雨水ます)から溢水し、地表面の浸水位が増加する。その後、降雨が緩まり下水道管路内エネルギーが地表面エネルギーより下がった場合、地表面から接続部を通して下水道に流量が戻る⁶⁾。

本モデルのマンホール等からの溢水・流入の計算においては、下水道管路内エネルギー勾配または地表面エネルギー勾配から下水道可能最大流量を仮定し、上流側下水道からの流入量、地表面か

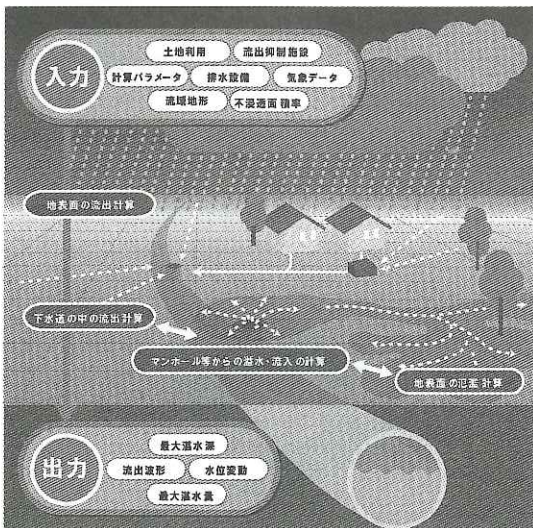


図-2 NILIMモデルの概要

らの流入量の収支を計算することによりマンホール等からの溢水・流入量の計算が可能である(図-3)。下水道可能最大流量は、(4)式で与え、マンホール部での連続式は(5)式のようにになっている。

運動方程式：

$$Q_{\max} = A \cdot \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2} \quad (4)$$

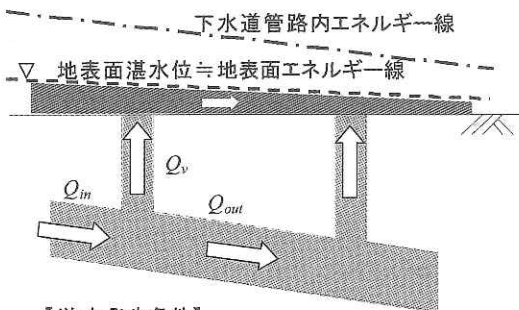
連続式：

$$Q_{in} + Q_v = Q_{out} \leq Q_{\max} \quad (5)$$

- Q_{\max} : 下水道可能最大流量
- Q_{out} : 下水道流量
- Q_{in} : 上流側下水道及び地表面からの流入量
- Q_v : マンホール等からの溢水・流入量
(流入を正とする)
- A : 下水道の通水断面積
- I : 下水道可能最大流量算出動水勾配
- n : 下水道の粗度係数
- R : 下水道の径深
- S_0 : 下水道の管路勾配
- S_f : 下水道の摩擦損失勾配

2.4 地表面の氾濫計算モデル

マンホールから溢水した水が地表面を氾濫する場合、宅地等で家屋が密集しているところは抵抗が大きく氾濫速度が遅い、また道路等抵抗が小さいところは速いなど、地表特性により氾濫状況が



【溢水発生条件】

下水道管路内エネルギー > 地表面エネルギー線
 $Q_{in} > Q_{out}$

【流入発生条件】

下水道管路内エネルギー < 地表面エネルギー線
 $Q_{in} < Q_{out}$

図-3 マンホール等からの溢水・流入の計算モデル

異なる。

本モデルの地表面の氾濫計算においては、地表面をメッシュ(構造格子)に分割し、土地利用データより地表特性(粗度係数、建物占有面積率等)を算定し(図-4)、平面2次元不定流計算を用いて、メッシュごとの湛水深、湛水量の計算が可能である。

3. 下水道水理模型実験

下水道を対象とする浸水現象は、下水道から地表面へ溢水する現象、地表面に湛水または氾濫する現象、地表面から下水道に戻る現象からなっており、これらの現象が時々刻々と変化しながら発生する。このような非定常現象においては、下水道管路内エネルギー線と地表面エネルギー線の2つエネルギー線が存在すると考えられる(図-3)。

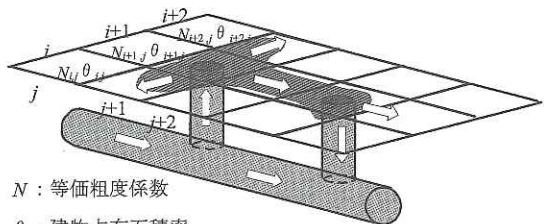
前述の通り、これら2つのエネルギーは下水道からの噴出し・戻り量に深く関係していると考えられる。

そこで、図-5に示すような水理模型を作製し、下水道の溢水・流入に関する基礎的水理現象を把握するとともに、溢水・流入量と前述の2つのエネルギーとの関係を整理することを目的として、実験を行った。

3.1 実験装置の概要

高さが異なる上下2つの氾濫水路と直径200mm(概ね1/5縮尺)の下水道管を設け、直径200mmの垂直管で接続した。上下の氾濫水路の間には可動堰を設けて氾濫水路の水位を調整可能な構造とした。上流側の氾濫水路及び下水道管には、水を供給可能な構造とし、下流側の氾濫水路及び下水道管で流量を計測した。

また、図-5に示す位置にピエゾメーターを設置し、圧力水位を計測した。さらに、氾濫水路には水位計を設置し、噴出し部の水位を計測した。



- N : 等価粗度係数
- θ : 建物占有面積率

図-4 地表面の氾濫計算モデル

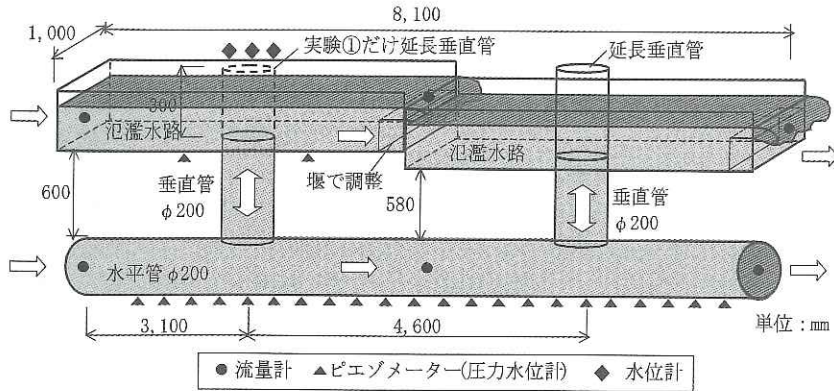


図-5 実験施設の概要

表-2 実験ケースと噴出し・戻り量

実験ケース	内容	概念図	噴出し・戻り量
①噴出し+湛水位なし	水平管への流入量変化に伴う噴出し量の把握		5~14 (l/s)
②噴出し+湛水位あり 堰:5,10,15,20cm	地表面湛水位の変化に伴う噴出し量の把握		3~11 (l/s)
③戻り+湛水位あり 堰:5,10,15,20cm	地表面湛水位の変化に伴う戻り量の把握		5~10 (l/s)

----- 地表面エネルギー線

----- 地表面エネルギー線

3.2 実験ケース

今回の実験では、上流側垂直管だけで噴出し・戻り現象を把握する基礎実験を行った。そのため、下流側垂直管に延長垂直管を設置し、下流側垂直管からの水の噴出し・戻りが起こらない構造にした。ただし、実験①についてのみ、湛水位の影響を受けないようにするため、上流側垂直管にも延長管（高さ300mm）を設置した（図-6）。

実施した実験ケースは表2に示すように、①噴出し+湛水位なし、②噴出し+湛水位あり（堰5、10、15、20cm）、③戻り+湛水位あり（堰5、10、15、20cm）となっている。各実験ケースにおいては、下水道管路への流入量を変化させることで、噴出し・戻り量は変化している。また、実験③では、氾濫水路へ一定量流入させることで、湛水深を一定に保った。

3.3 実験結果及び考察

各実験ケースにおける下水道管のピエゾ水頭を図-7に示す。なお、各グラフの複数の線は、下

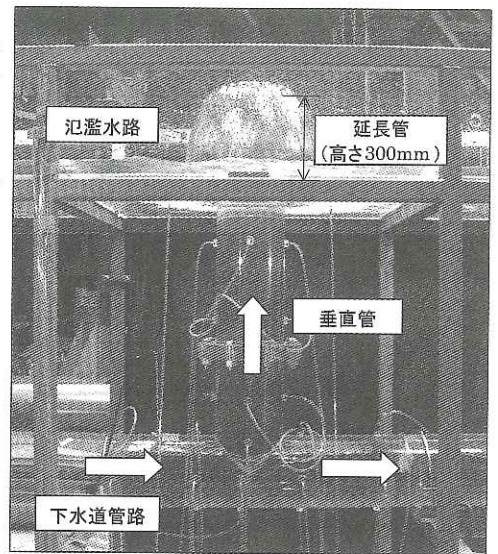


図-6 実験の様子（実験ケース①）

水道管路の流量の違いを示している。

実験①、実験②は垂直管からの噴出しにより垂直管下流側の流量が減少し、管路内の流速が小さくなるため、垂直管下流側のピエゾ水頭は噴出し前より概ね速度水頭分だけ高い値を示した。実験③は氾濫水路からの流入により、垂直管下流側の流量が流入前より増加し、流速が大きくなるため、速度水頭分だけ低い値を示した。したがって、2.2で示した下水道の中の流出計算モデルについて、このようなピエゾ水頭の変化を考慮すべきか検討する必要がある。

図-8に各実験ケースにおける噴出し・戻り量と垂直管部におけるエネルギー差（図-9）の関係を示す。垂直管部における下水道管路内エネルギーは垂直管部下流の下水道管路内エネルギー（ピエゾ水頭+速度水頭）の近似直線から推定した。

縦軸に噴出し・戻り量を、横軸にエネルギー差の1/2乗を取ると、両者には比例関係が見られ、オリフィスの式で噴出し・戻り量を算定できる可能性が示唆された。

さらに、ガルデルの式⁷⁾によって求められた下水道管と垂直管のT字部における分合流の損失を考慮して検討を行った。下水道管路内エネルギーと地表面エネルギーの差を $\Delta h1$ とし、T字部の損失を考慮したエネルギー差を $\Delta h2$ とする(図-9)。 $\Delta h1$ 、 $\Delta h2$ と噴出し・戻り量の相関係数を比較すると、実験①においては、 $\Delta h2$ との相関の方が高くなっている。一方、実験②においては、両

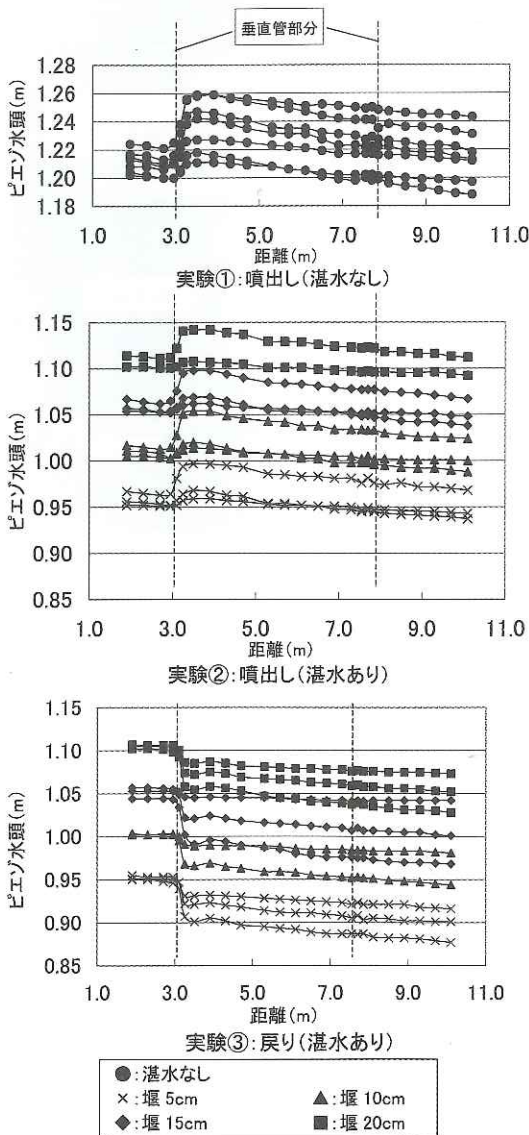


図-7 ピエゾ水頭

者の間に差は見られず、また、実験③においては、 $\Delta h2$ との相関係数の方が低い値となっている。実験①は湛水がなく、実験②、③では湛水が有るということ を考慮すると、実験②、③については、T字損失だけでなく、氾濫水路からの垂直管への流入時の損失、垂直管から氾濫水路への流出時の損失や、その損失量に湛水深の大小が与える影響についても検討する必要があると考えられる。

今回の実験により、噴出し・戻り量がエネルギー差によって表現できるという示唆が得られたが、まだ、実験結果に若干の偏りがあるため、今後はさらに詳細な流量設定を行い、データを追加して精査していく必要がある。

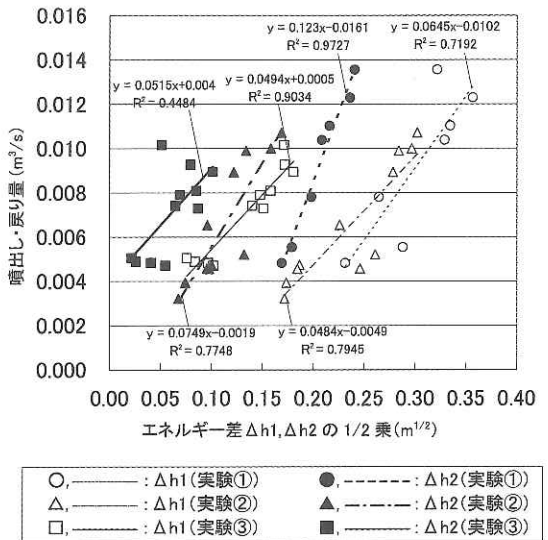


図-8 エネルギー差 Δh と噴出し・戻り量の関係

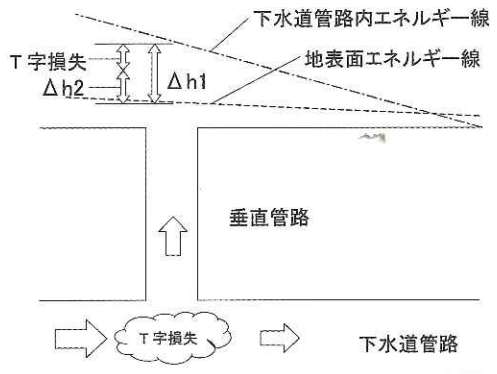


図-9 エネルギー差 Δh の考え方

4. おわりに

今回の実験は、噴出し・戻りの基礎的な水理現象を把握するため、1つの垂直管で定常状態の実験を行った。今後は、2つの垂直管を用いた複合実験および流量を時系列で変化させる非定常実験を行い、より複雑な水理現象を把握するとともに、その実験結果を踏まえてNILIMモデルの改良を行っていく予定である。

さらに、下水道のみならず河川と連携した総合的な浸水被害対策を考えるために、内水と外水の同時氾濫など、さまざまな氾濫形態について解析可能なNILIM2を開発中であり、また、都市域氾濫計算の入出力データをPCの画面上で簡易に操作・確認可能なインターフェースの構築などの利便性向上を図っている。

平成18年2月に行った全国の下水道管理者へのアンケート調査によると、流出・氾濫解析モデルの普及状況は依然として低く(図-10)、解析モデルを選択する際の重要事項として、解析結果の精度が高い、解析費用が安価、などが高い割合を示している(図-11)。

当研究室では現在もNILIMプロトタイプのパッケージプログラムソースを無償公開しているが、アンケート結果が示す下水道管理者の声に答えるためにも、今後、実験結果を踏まえたプログラムの改良だけでなく、わかりやすいインターフェースについても検討を重ね、インターフェースを備えた拡充版のプログラムを公開する予定である。

参考文献

- 1) 下水道政策研究委員会浸水対策小委員会：都市における浸水対策の新たな展開, 2005.
- 2) 国土交通省都市・地域整備局下水道部：内水ハザ-

【Q1】都市雨水対策を目的として、流出・氾濫解析モデルを使用したことはありますか。またそのモデルは何ですか。

【A1】

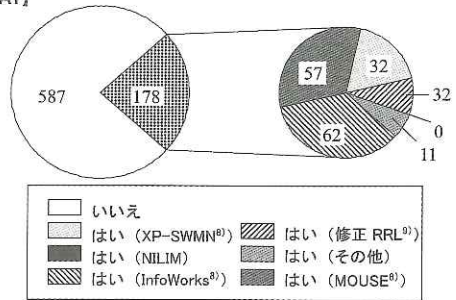


図-10 都市域氾濫解析モデルの普及状況

【Q2】解析モデルを再選定する重要事項は何ですか。

【A2】

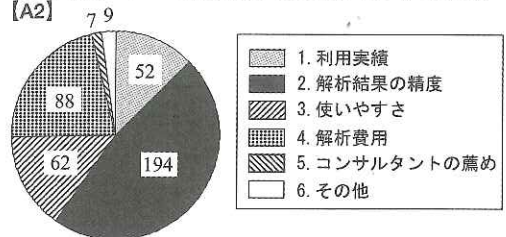


図-11 都市域氾濫解析モデル選定時の重要事項

ドマップ作成の手引き(案), 2006.

- 3) 中村徹立, 佐々木淑充, 水草浩一: 都市域氾濫解析モデル活用ガイドライン(案), 国土技術政策総合研究所資料, 第202号, 2004.
- 4) 水草浩一: 都市域での浸水現象解明のための新しい解析手法, 土木技術資料, Vol.47, No.4, pp.22-25, 2005.
- 5) 渡邊正弘, 江藤剛治, 室田 明: 取付管の調圧効果を考慮した下水管網内の遷移流計算, 土木学会論文集第411号/II-12, pp.81-90, 1989.
- 6) 吉川秀夫: 水理学, 技報堂出版, 1976.
- 7) 土木学会編: 水理公式集, pp.376-377, 1999.
- 8) 財団法人下水道新技術推進機構: 流出解析モデル活用マニュアル(雨水対策における流出解析モデルの運用手引き), 2003.
- 9) 山口高志, 松原重昭, 山守 隆: 都市における降雨流出調査第2報一修正RRL法による流出推定一, 土木技術資料第14巻11号, pp.11-15, 1972.

山岸陽介*



国土交通省国土技術政策総合研究所危機管理技術研究センター
水害研究室 研究官
Yosuke YAMAGISHI

野仲典理**



国土交通省国土技術政策総合研究所危機管理技術研究センター
水害研究室 主任研究官
Tenri NONAKA

中村徹立***



国土交通省国土技術政策総合研究所危機管理技術研究センター
水害研究室 室長
Tetsuya NAKAMURA