

17. 都市域における流出・氾濫モデルの開発に関する調査

水害研究室 室 長	中村 徹立
主任研究官	佐々木 淑充
研 究 官	水草 浩一

1. まえがき

現在、都市域では急速な IT 化の進展や地下空間の高度利用がされていることから、これら区域における浸水対策を早急に進めることが急務となっており、特定都市河川浸水被害対策法が制定された。この法では、特定都市河川および特定都市河川流域の指定、都市洪水想定区域・都市浸水想定区域の指定、総合的な浸水被害対策のための流域水害対策計画の策定等を行うこととされているが、こうした政策を進める上で、浸水解析モデルを活用し、都市域の浸水状況把握が極めて重要になっている。

一方、これら都市域では、一般的に下水道等排水路網が高度に発達しており、浸水対策を検討する場合にはこうした排水路網を組み込んだ浸水状況の検討が不可欠である。そのため、地表面と下水道を同時に考慮した浸水解析を行う必要が生じており、また一体型の浸水解析モデルの開発は各方面で試みられている。しかし、水の挙動の表現が非常に複雑となるため、国内ではこうしたモデルの公開・実用化には至っていないのが現状である。また海外には既に市販されたモデルがあるが、本来下水道管路内の流出解析を行うモデルとして開発されたという経緯と、中核の計算部分が非公開とされているなどの理由から、本格的な浸水現象の検討に用いるには解決すべき課題が多い。

そこで水害研究室では、地表面の浸水解析と下水道管路内の流出解析を同時に行うことが可能な公開型モデルとして、『N I L I M (New Integrated Low-land Inundation Model)』の開発を継続的に行ってきた。

2. 調査目的及び内容

水害研究室が開発を行ってきた N I L I M を一般公開し、全国において有効に利用および活用されることを最終目的とする。特に特定都市河川流域における都市浸水想定区域図を作成する際には、都市域における下水道管路の流出解析を含む浸水解析が必要不可欠となるため、N I L I M の貢献度は非常に高い。

モデルの公開に当たっては、精度及び信頼性の高いモデルが求められるため、平成 16 年度は以下のプログラム上の課題を解決するための調査を行った。

1) 解析速度の向上

二次元氾濫解析と管路解析の組合せは、水理挙動が複雑となることと、種々の収束計算を併用するため計算時間がかかることが難点であり、プログラムの非効率なループや収束計算手法の改良等を行った。

2) 逆流及び分流計算への対応

現在の N I L I M で扱える管路網は合流のみで、分流は扱えない。実際の下水道管路は、流出管が複数ある分流も考えられ、これに対応できなければ実現象の再現性向上は図れない。

また、湛水が挙動する中では、満管の圧力状態が次々と変化するため、同じ管路勾配においても水が管路下流方向に流れる順流であっても相当の流下能力を要する場合や、平衡状態となり流下能力がほとんどなくなる場合など、氾濫の挙動により管路の流下能力が変化する。さらに、現在計算できない逆流状態が続くことも想定され、これら複雑な現象にも対応を行った。

3) 開水路網への対応

都市に網目状に存在する開水路（側溝等）の流れは、地表面の氾濫流全体の挙動よりも早く、場合によっては地表面の氾濫流が到達していない氾濫原に浸水を及ぼすこともある。また、暗渠と開水路が混在して流れる排水施設も数多い。

現状の N I L I M の管路モデルは暗渠を前提としており、開水路と混在した場合のモデルとしての特徴も明らかでなく、解析事例も少ない。現在のモデルでの工夫や他の方法との組

み合わせの検討を行った。

4) 雨水のマンホールへの集水方法の改良

現状のN I L I Mでの雨水集水方式は、背負っている集水面積の雨水がすべて順次に一旦管路に入り、呑めなかった量が溢水するモデル化手法を用いている。

表面流出してくる雨水がどのような過程で集水されるかを詳細にモデル化することも現象を捉える要素の一つである。

また、敷設管路をすべてモデル化することは、現実的ではないがゆえに、末端管路での集水をどのように表現するか検討を行った。

3. 調査結果

3.1 プログラムの改良

1) 解析速度の向上

管路モデルにおける解析速度は、管路数などの物理的絶対数も要因のひとつであるが、流量又は水深の収束計算で収束するまでの回数を少なくすることが効果的である。

現状の収束の打ち切り回数は、100回となっているが、特に根拠があるわけでもない。収束しなかった場合は、さらに計算時間間隔 Δt を1/5にし、各々100回の打ち切り回数で収束しなければ、誤差の最小値をとるシステムとなっている。つまり、最後まで収束しなければ、1STEPで最大500回の繰り返し計算を行うこととなり、この繰り返し回数を影響のない範囲で抑えることが必要である。

そこで、2ha程度の矩形の二次元仮想領域において、ピークで200mm/hrの台形降雨分布を与えた状況時の収束回数の調査を行った(図-3.1~図-3.2)。

収束状況は、安定した水理状態を示す自由水面時は収束も早いことから流出のピーク前後には10回程度が頻率的にも高い。ピークである7000STEP前後では水理状態が不安定であることから収束状態は悪くなる(図-3.1)。図-3.2では概ね30回以内の間で収束する傾向にあることがわかる。

また、現状の流量又は水深の収束計算における収束条件は0.005(無次元)としている¹⁾。収束した際の誤差(前ステップとの差の最小値)と収束回数との関係では、収束条件0.005内に収まっているものは概ね30回内に固まっていることがわかる。繰り返し回数が概ね30回以上のものは、収束条件に収まらず最小の誤差をもって次のステップに進んでいる。

これらのことから、収束の打ち切り回数を30回程度と少なくした。

実際の解析では、管路数や計算桁能力にもよるが以前は実時間の1.2~1.5倍程度かかっていたものが0.7倍程度に短縮された。

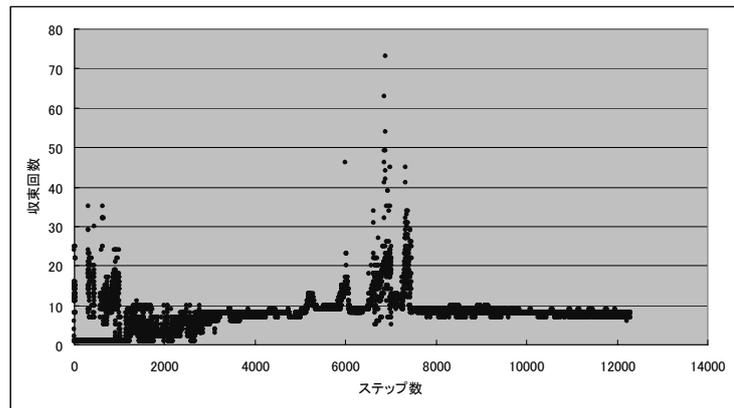


図-3.1 各ステップにおける収束回数

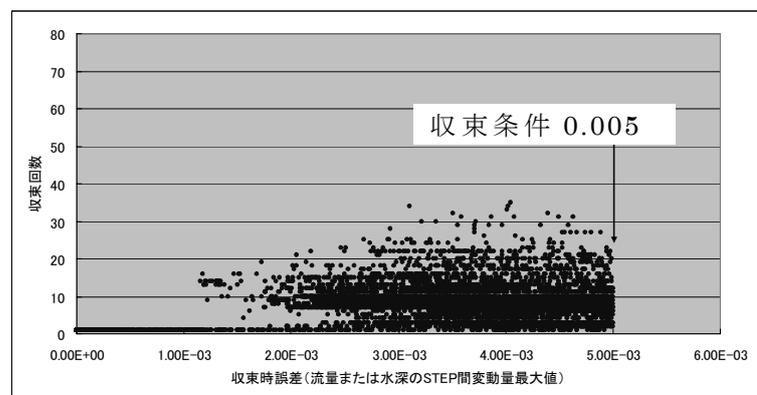


図-3.2 収束回数と収束時の誤差

2) 逆流及び分流計算への対応

① 管路とマンホールデータの分離

分流計算を可能とするためには、現状の管路の上流端マンホールとその下流に接続する管路を一つの管路データとした入力形式では、分流管を合流管の逆とみなして入力データを作成する必要がある等内部処理が複雑となる上に、バイパス管等も扱いにくい。

そこで、管路とマンホールデータの分離を行った(図-3.4)。

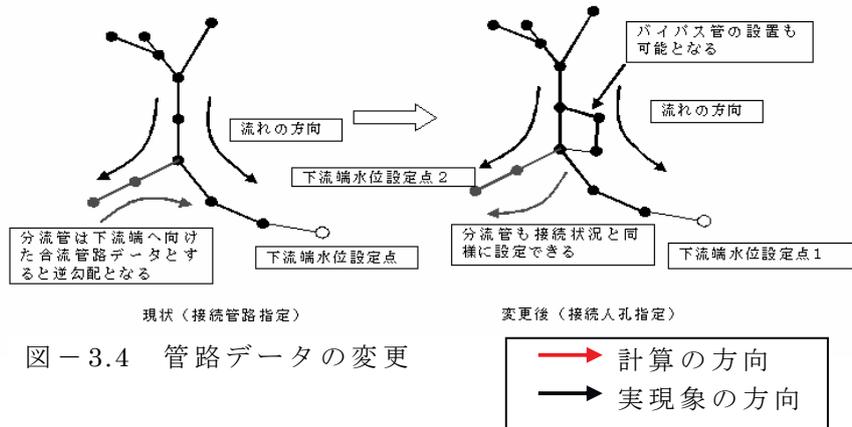


図-3.4 管路データの変更

② マンホールにおける流出入パターンの分類

NILIMは下流端水位を設定しながら上流へ計算を進める手法であるため、分流を含めた計算を行うには、各STEPにおいてマンホールにおける流出入パターンを分類し、常に下流から順に計算を行う必要がある。これにより、逆流計算への対応も可能になる。

そこで、図-3.5の4つのパターンに分類を行った。

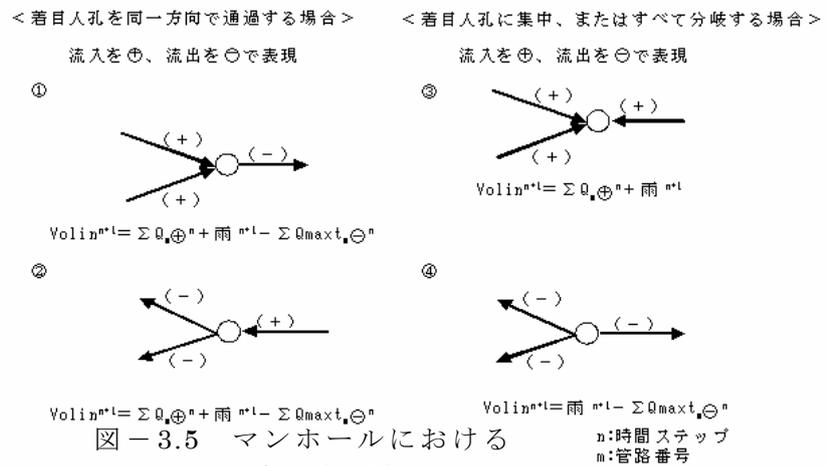


図-3.5 マンホールにおける流出入パターン

③ Duple-Sweep法における計算順序の逆転

NILIMのdiffusion wave法における漸化式は流れの上流に流量を与えることを前提としているから、流れの方向が変われば、計算順序も逆転させる必要がある。従来は下流側に負の値に最大流下能力を与えており、流れ方向の下流側における流量境界条件では対象管路内の流量を規定することにならない。

具体的には、以下のように管路の上端と下端の番号を規定している変数IBとIEの境界条件と計算順序を変更した。

これにより、図-3.5に示す流出入パターンから、管路の計算順序を以下のように変更する。

・管路の下流端または上流端及び水位が谷底状態になる点（逆流状態、流入集中＝上記パターン3）から計算を開始する。

・同パターン1の状態は下流から計算すれば問題ない。

・次に流入が1つ以上ある分流点（＝同パターン2）での計算で水位を設定する。

・最後にすべて流出する分流点（同パターン4）での計算を行う。

・上流端および谷底地点ではその地点の雨量（流出量）を水位に変換して（流出量／マンホ

（境界条件）ibに流量、ieに水位
（算出順序）ib→ieへ係数、ie→ibへdh、dq
↓ 逆順に変更

（境界条件）ieに流量、ibに水位
（算出順序）ie→ibへ係数、ib→ieへdh、dq

ール断面積) 現時刻水位に足しこむ(湛水位があれば湛水位をとる)。

3) 開水路網への対応

ある程度の規模の開水路の場合、通常の外水氾濫解析で使われている水路モデルの構築を図るほうが合理的な場合がある。そこで、土木研究所「氾濫シミュレーションマニュアル」に基づいた水路モデルを付加した。

水路モデルの入力形態は、盛土モデルと同様にメッシュの一边で定義される線上形式であるが、水路長の変化にも対応が可能である。ただし、水路形状は矩形のみである。

本モデルでは不定流式を用いて、氾濫計算を行っている。

また、暗渠と開水路が混在する水路網にも対応できるように開水路への対応を図った。

その際、暗渠と同様に接続点では仮想のマンホールを設定する必要があるが地表面への溢水がマンホールで出入りする形態は、暗渠と同様であるため、1つの開水路でマンホール間を長距離に設定してしまうと、浸水箇所が実現象と相違が生じる。そこで、通過するメッシュに最低1つは仮想マンホールを設定している(図-3.6)。

また、地表面以上の水位計算の際には、安定化を図るため、プライスマンスロットと同様に水路高以上は微小幅のスリットを与え、径深を設定している(図-3.7)。

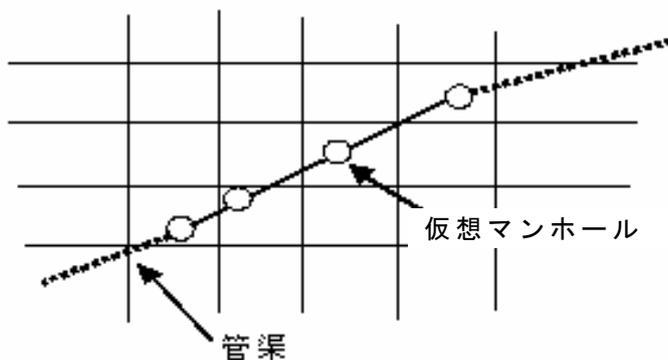


図-3.6 管路モデルにおける
開水路仮想マンホールの設置

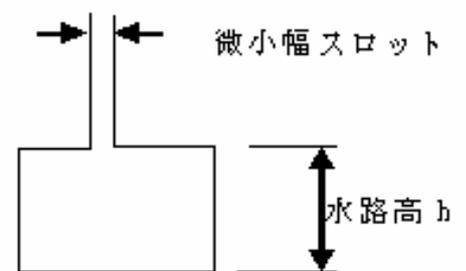


図-3.7 水路高以上の開水路
計算時の処置

4) 雨水のマンホールへの集水方法の改良

マンホールへの集水は、自身の集水域の降雨のみを扱う手法だけでは、地形条件による表面流出現象に対応できない上に、マンホールのあるメッシュからの溢水浸水しか表現できず、マンホールが無いメッシュから溢水浸水を表現できない。しかし、枝管路まですべてモデル化することは時間的、経済的にも現実的ではない。一方、実際には枝管が集水している集水域におけるマンホールから離れた地点からは、ある程度の遅れ時間を考慮しなければならない。

そこで、これら集水域からの流入現象を簡略化した手法として、以下のような手法を組み込んだ。

- ・ メッシュに直接、降雨を降らせ、各メッシュには集水するマンホールを割り当てた。
- ・ マンホールが負担する雨水集水範囲のメッシュから直接流入マンホールまで仮想水路を内部で想定した(φ250mm程度)。
- ・ 遅れを考慮するため kinematic wave 法で行った。
- ・ 流入するメッシュまでの降雨流入距離を斜面長とした。
- ・ 流速から Manning 式で逆算し、斜面勾配を設定。断面は満管状態を想定した。粗度係数は管種をヒューム管と考え、0.013とした。
- ・ 降雨集水面積は、1メッシュ分とした。
- ・ 下水道の計画降雨等を設定し、それ以上の流入は管路には流入せず地表面流出させた。

これにより、ある程度簡略化して管路をモデル化することが可能となり、マンホールのあるメッシュ以外からの溢水・吸引を表現することが可能となった。設定したφ250mm程度の管路での勾配は、約0.01程度となり都市域における商業地等における斜面

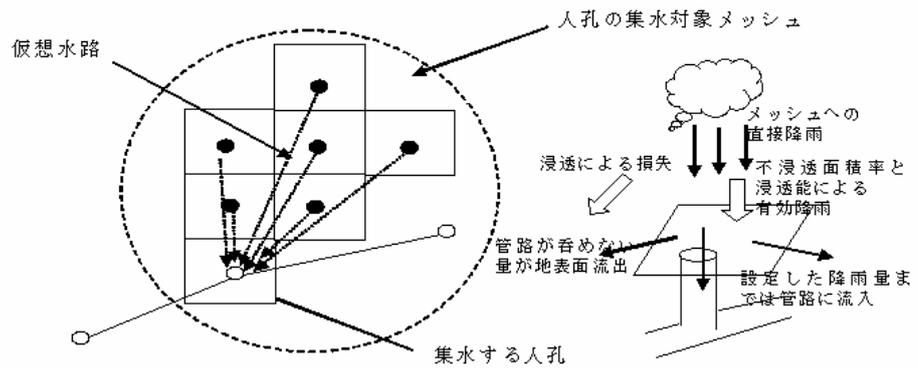


図-3.8 設定したマンホールへの集水手法

勾配の設定値とほぼ同様となる。また、浸水再現状況から、この仮想管路の勾配や粗度係数、計画降雨量の値等をパラメータとして合わせこむことが可能となると考えられる。

3.2 実績と解析との比較

解析対象とする流域は、福井県福井市春日地先の足羽川左岸における内水浸水区域とする。位置図を図-3.9に示す。なお、対象区域は平成16年の市街部実績浸水域に下水道排水区割りを考慮した範囲とした。図-3.10に浸水状況写真を示す。

検証降雨は図-3.11に示す福井地方気象台のH16.7.18の降雨データを対象とした。

また、境界条件は図-3.12に示す足羽川上下流の河川の水位および下水道施設の下流ポンプの排水量を与えた。

木田橋付近左岸が破堤し、外水氾濫が発生する13:45頃までの内水浸水状態での最大湛水深と浸水範囲との比較を行った。

実績と解析との比較の結果、湛水深については若干の誤差があるものの、浸水範囲については概ね一致している(図-3.13・14)。



図-3.9 位置図

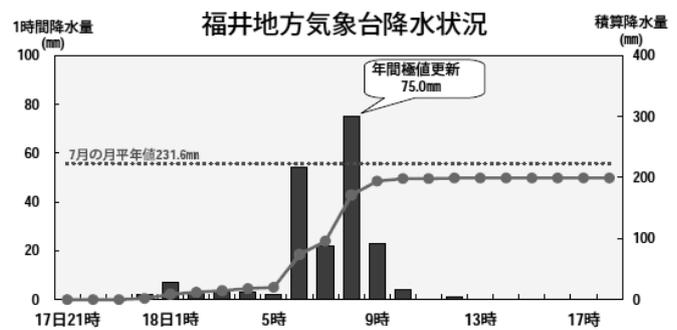


図-3.11 降雨データ



図-3.10 足羽川左岸の浸水状況写真

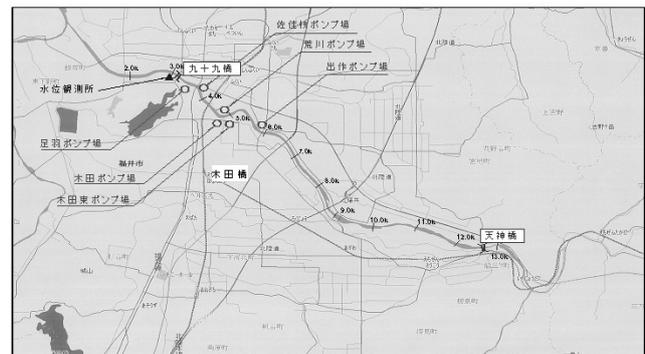
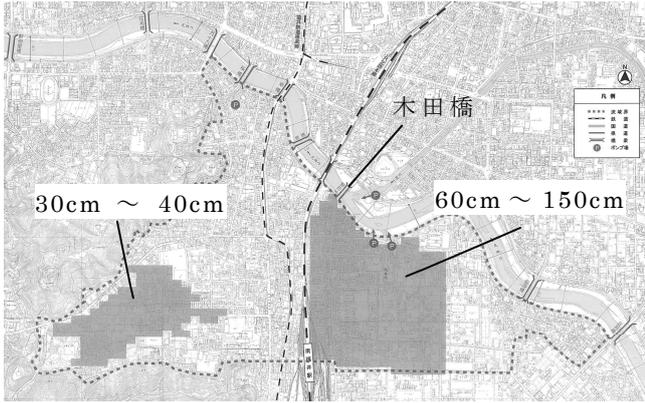
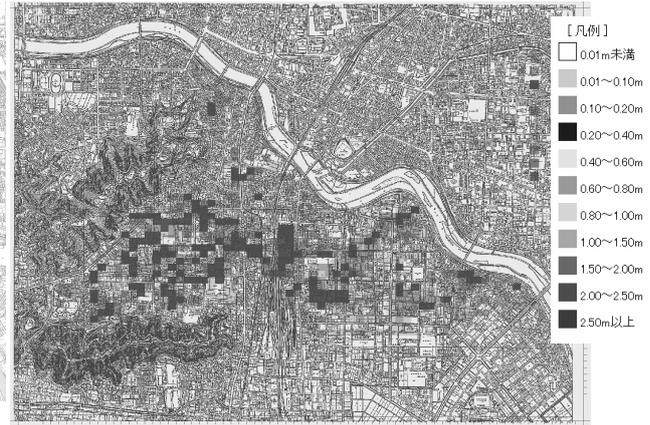


図-3.12 境界条件



図－3.13 実績最大湛水深（破堤前）



図－3.14 解析最大湛水深（破堤前）

5.まとめ

今回の調査により、地表面の氾濫解析と下水道管路内の流出解析を同時に行うことが可能なNILIMモデルの精度および信頼性の向上が図られた。

そのうち、NILIMが市販モデルに比較して特に優位な点としては、以下のことが挙げられる。

- ・マンホールからの溢水が地表面を流下し、別のマンホールへ流入して下水道に環流する現象を、水収支にもとづく物理量によって表現することが可能である。
- ・地表面の氾濫解析に2次元メッシュを使用しており、1次元氾濫解析の諸条件の設定が必要な市販モデルと比較して、使用者による主観の影響を受けにくい¹⁾。
- ・浸水範囲の解析結果を出力する場合には、メッシュでそのまま表現可能なため、浸水の時系列変化や、浸水の範囲の全体把握が容易である。

また今回の調査により、以下のような課題が抽出された。

1) 地表面湛水流入の妥当性検証

現状のシステムでは、湛水深がマンホール上にあると瞬時に下水道内に流入するという前提条件をとっている。しかし、下水道内部の水理状態によってはその前提と異なる可能性があるため、マンホール周辺の水理現象を把握しておく必要がある。

2) メッシュに直接降らせる降雨と亀甲集水域との併用

低平地における氾濫原では、メッシュ直接降雨による集水システムは有効であるが、部分的に丘陵地帯や山地等をもつ氾濫域では集水の遅れを生じることが考えられる。このような流域にも対応できるよう、集水システムを低平地及び丘陵地帯等の両者併用にできるような対応を図っておく必要があると思われる。

3) 流下能力の妥当性検証

流れの下流方向における管路の流下能力計算を図ることで、計算の安定性を保持することができつつあるが、自由水面を有している場合や、管路距離が長い場合等、いろいろな水理状況において管路流下能力の妥当性を実験等で検証する必要がある。

4) 計算時間のさらなる短縮

今後も機能的な要求は尽きないと思われることから、現状あるいは将来的なハード・ソフトを含めた電子計算機技術を活用して、1ケースあたりの計算時間を極力短縮することを先駆けて研究していく必要があると思われる。

具体的には、言語の載せ変え、あるいは並列計算をさせる手法等が考えられる。

参考文献

- 1) 国土交通省 国土技術政策総合研究所：都市域氾濫解析モデル活用ガイドライン（案）－都市浸水－、2004