

流出-氾濫の物理過程の統一的解析法の構築

新潟大学大学院 自然科学研究科 学生会員 ○佐々木 靖幸
 新潟大学災害・復興科学研究所 正会員 安田 浩保

1 はじめに

21世紀に入り地球温暖化の影響は気候変動という形で如実に現れている。変容した気候がもたらす頻度と規模が増大した降雨現象により、近年では毎年のように日本各地で堤防が破堤に至るほどの洪水が発生している。日本ではこのような背景に対して、流域全体をもって流出抑制対策を講じる「流域治水」が治水対策の軸に据えられた。

広大な面積を持つ流域の流出抑制効果の定量的な評価を行うためには、降雨流出過程を記述する流出解析モデルが必要である。一般に分布型流出解析モデルは、流域全域を高解像な平面二次元で記述することが現行計算機の制約により困難であることから、その多くは流域の各段階（集水域、河道、氾濫原）で独立したモデルをつなぎ合わせている¹⁾。しかし、一連の流体の動きを妥当に近似するのであれば一つの格子上で統一的に解くことが望ましい。また流出抑制効果の定量的な評価には、対策の規模や立地（河川からの距離）の違いに対応できる計算格子の設定が必要である。安田ら²⁾が提案する四分木構造格子は局所的高解像度化が可能な多層構造の格子構成であり、流出解析における局所的流出抑制効果の定量的な評価と流域の統一的解析を同時に満足する可能性がある。

本研究では、四分木構造格子を用いた統一的流出解析法の構築に向け、四分木構造格子を用いた様々な格子サイズごとの解析結果を比較し、地形近似の程度の差異が解析に与える影響の分析を行う。

2 四分木構造格子を用いた分布型流出解析手法の構築

2.1 四分木構造格子の概要と水理解析手法

2.1.1 四分木構造の格子構成

図-1に四分木構造格子の模式図を示す。四分木構造格子(Quad Tree Grid)は2次元空間を再帰的に4つに分割する分割規則に基づいた多層の格子層の重ね合わせ構成である。この特徴から四分木構造格子は空間情報の観点では、局所的に空間解像度を増減させることが可能な柔軟かつ高効率な格子構成であるため、水理解析において局所的な精度向上や格子数の大幅な縮減に寄与する。また、図-2に示すように、格子の面積の大きさに応じて格子レベルを

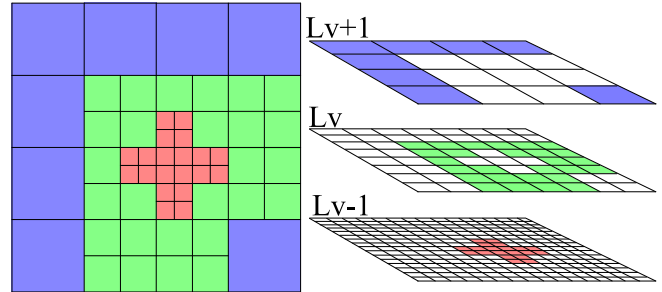


図-1 四分木構造格子の模式図

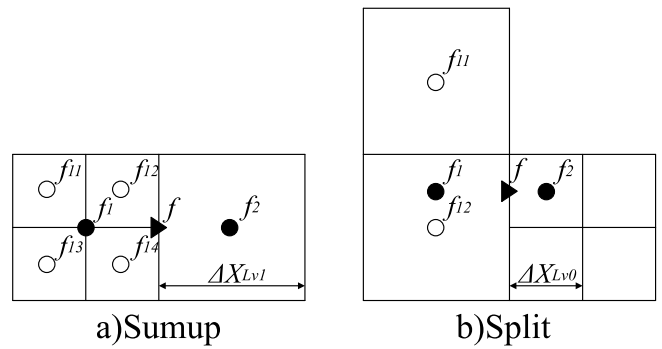


図-2 分割規則に基づいた物理量の連続性の確保

規定すると隣接する格子のレベルは同一か±1の大きさの3パターンしか存在しない。そのため、格子レベル間の物理量の規則的交換と、接続形態ごとの打ち切り誤差の評価が可能であり、物理量の連続性を確保される。

2.1.2 支配方程式

一般に分布型流出解析では土中への浸透を考慮してダルシー則などを層構造として使用した複雑な物理モデルを適用すること多い¹⁾。しかし層構造における解析プロセスは煩雑となる上、流域の浸透プロセスは現象として複雑であり、既存の物理モデルで妥当に現象を近似できる段階にない可能性が高い。また、本研究では地形表現の差異による影響の分析を行うことを目的に据えている。以上の理由から支配方程式は式(1)~(3)に示す二次元の浅水流方程式のみを使用することにした。本研究は、地形表現の違いを調べることを主目的とするもので、土中への浸透プロセスの考慮の必要性を否定するものではないことに留意されたい。

$$\frac{\partial h_k}{\partial t} + \frac{\partial M_k}{\partial x_k} + \frac{\partial N_k}{\partial y_k} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial M_k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\frac{M_k^2}{h_k} \right) + gh_k \frac{\partial H_k}{\partial x_k} = -\frac{gn^2 M_k}{h_k^{7/3}} \sqrt{M_k^2 + N_k^2} \quad (2)$$

$$\frac{\partial N_k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y_k} \left(\frac{N_k^2}{h_k} \right) + gh_k \frac{\partial H_k}{\partial y_k} = -\frac{gn^2 N_k}{h_k^{7/3}} \sqrt{M_k^2 + N_k^2} \quad (3)$$

ここに、 M, N は x, y 方向の流量フラックス、 t は時間座標、 x, y は平面座標、 h は水深、 g は重力加速度、 n は Manning の粗度係数、 H は水位、それぞれの変数に下添えされた k は格子面積レベルである。

2.1.3 解析アルゴリズムの一次元配列化

本研究では解析の高速化を目的として解析アルゴリズムを格子番号のみの1次元配列で実装した。これにより、解析アルゴリズム内において走査距離と使用 RAM が削減され、 i 方向と j 方向、四分木構造格子に特有の格子レベル方向 lv 、の3次元の配列 (lv, i, j) を持たせた場合より高速にアルゴリズムが動作させられる。

2.2 流域を表現する四分木構造格子の生成法

本研究で生成した格子の一例を図-3 に示す。四分木構造格子を生成する際に必要になる情報は1) 格子の分割の基準線データ、2) 格子に付与する標高データである。さらに流域の解析にあたっては、解析範囲を流域に形取るために3) 流域の輪郭形状のデータが必要である。

2.2.1 分割基準線

従来の格子長が一樣な矩形格子を用いた解析では、現行計算機の性能が制約条件となり、河道の局所的な形状を忠実に再現する格子を使用できない。一方、四分木構造格子では河道部に沿って局所的な高解像度化を施せば、河道の局所的な形状を忠実に再現することが可能となり、集水域と河道部、氾濫原を区別して解析を行わずに、同一の物理モデルを用いてそれらを統一的に解析することが可能となる。本研究ではオープンデータである OpenStreetMaps³⁾ から取得した河道網データに基づいて、河道部に沿った四分木構造格子の局所的高解像度化を行う。

2.2.2 標高情報

流域に着水した降雨は第一次近似的には底面勾配に沿って重力により降下する。このため、流域の降雨流出現象の近似には正確な標高情報の付与は不可欠である。現在、国土地理院が提供する数値標高データ⁴⁾のうち最も高精度かつ解像度が高いものは、航空レーザ測量を用いた5mメッシュのDEM5Aである。しかし、数百メートルスケールの矩形格子を用いて流域の地形を表現する従来の地形近似手法では、付与する標高情報もそれに合わせてダウンスケールする必要があり、流域の降雨流出現象に多大に影響する

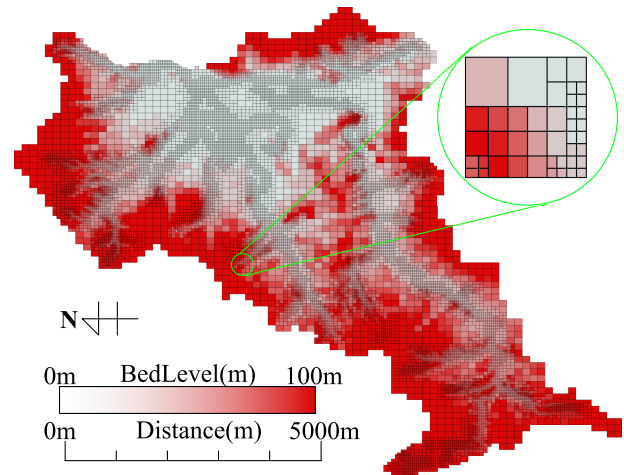


図-3 流域を記述する四分木構造格子

と考えられる河道の局所的な形状を表現できない。一方、四分木構造格子で局所的に高分解能に構成される箇所では標高情報をダウンスケールすることなく付与可能である。言い換えれば四分木構造格子の階層ごとの分解能に対応した標高情報が必要になる。本研究では国土地理院が公表する数値標高データのDEM5Aを使用し、データ欠測部にはDEM5B、DEM10Bを補完した。

2.2.3 流域の輪郭形状データ

流域を長方形の解析範囲に収めた場合、解析の必要がない流域外も解析範囲に含まれて冗長となる。本研究では四分木構造格子の解析アルゴリズムの一次元配列化により任意形状の解析範囲を指定することが容易であるため、流域形状データをインプットし解析範囲を流域形状に適合させた。なお、この流域形状データは国土地理院が公表している国土数値情報の流域界及び非集水域のポリゴンデータを使用した。

2.2.4 格子生成プロセスの自動化

一般的な矩形格子では隣接する格子の大きさは一樣であり、格子間の物理量受け渡しは一樣な規則で行われる。一方で、四分木構造格子は隣接する格子のサイズが3パターンあるため、解析アルゴリズムはそれに応じて格子間の物理量受け渡し規則を定義する必要がある。この作業は解析アルゴリズム内で逐一隣接格子の検索を行うことでも可能であるが、格子数が数万を超える場合にはその処理は莫大になり、演算速度の低下を招く。この問題を回避するため、格子間の物理量受け渡し規則の定義は、そのパラメータを予め格子データと関連付けておくことが望ましい。以上の理由から格子生成プロセスには前節までの格子形状の確定に加え、格子間の物理量受け渡しパラメータの準備を行う。また、格子数が数万を優に越える本研究ではこれら作業を手作業で実施することは非現実的であるため、一連の格子

表-1 数値実験ケース

数値実験ケース	40Lv0	10Lv0	40Lv2	10Lv4
最小格子サイズ	40[m]	10[m]	40[m]	10[m]
最大格子サイズ	-	-	160[m]	160[m]
分割数	1	1	3	5
格子数	42805	681887	15942	101057

生成プロセスは自動的な処理が可能な格子生成アルゴリズムを用いた。

3 四分木構造格子を用いた流出解析手法の評価

四分木構造格子を用いた分布型流出解析を用いて、格子サイズの差異による地形近似の程度が解析結果に与える影響を分析する。なお、本解析は2021年8月に甚大な水災害被害を被った佐賀県六角川流域の上流部へ適用した。

3.1 解析条件

数値実験の地形近似の条件は、地形近似の程度の差異を明確にすることに留意して、表-1に示す4ケースを設定した。数値実験ケース名の [○Lv #] は QuadTree 表示であり、○の数値は最小サイズの格子の格子長を、#は格子の分割レベルを表している。例として40Lv0なら40[m]のみの1段階の四分木構造格子（一般にこれは矩形格子）を、40Lv2なら40[m], 80[m], 160[m]の3段階の四分木構造格子を意味している。留意すべきは分割レベルはLv0からカウントする点である。以降、数値実験の各ケースはQuadTree表示で呼称する。

本研究は地形近似の違いが解析結果に与える影響を評価することが目的である。そこで本研究では、境界条件として観測雨量は与えず、その代わりに初期5時間に20[mm/h]の計100[mm]の擬似降雨を与えた。この擬似降雨は実降雨として十分に起こりうる規模であることを確認している。以下の比較計算では、それぞれ24時間分の計算を行った。

3.2 解析結果及び考察

図-4に各ケースの最終時刻の水深の解析値の空間分布を、図-5に図-4の赤×印で示す潮見橋水位観測所地点における各ケースの水位の経時変化を、図-6に図-4の緑×印で示す六角川及び庭木川の合流部における各ケースの水位の経時変化を示す。なお図-5には参考値として、2021年8月豪雨時の潮見橋水位観測所の観測水位を合わせて記載した。

3.2.1 河道部

図-4の河道部に着目し各ケースを比較すると、河道部の格子長が最小で10[m]のb)10Lv0とd)10Lv4は、同格

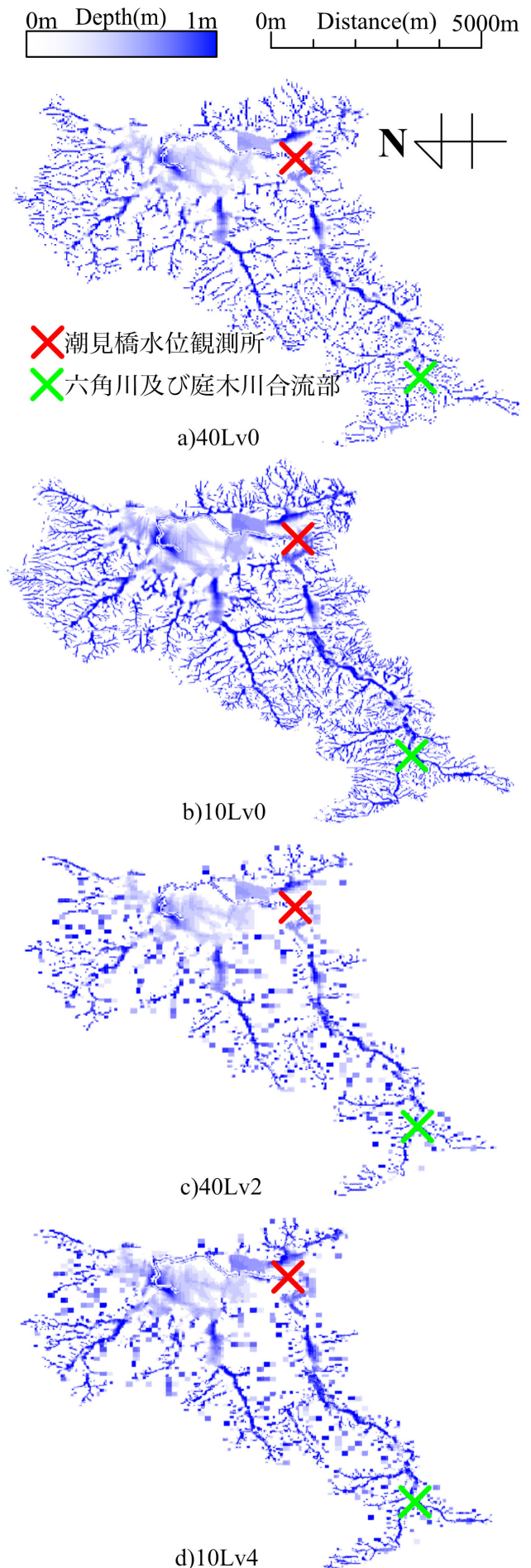


図-4 各ケースの最終時刻の水深の空間分布

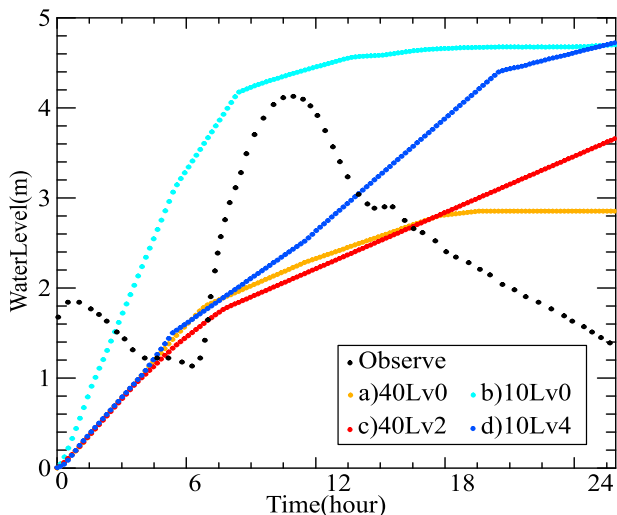


図-5 潮見橋水位観測所地点における水位の経時変化

子長が最小で 40[m] の a)40Lv0 と c)40Lv2 よりも、河道部の形状に沿って水深が分布している。また、図-5 の各ケースを比較すると、全ケースとも実現象との完全な一致は見られないものの、ピーク水位のオーダーが実現象から大きく乖離することはなかった。一方、各ケースを比較すると、最小格子サイズが 40[m] の a)40Lv0 と c)40Lv2 よりも最小格子サイズが 10[m] の b)10Lv0 と d)10Lv4 の方が、ピーク水位が 1~2[m] 程度大きく出る結果となった。

以上から、河川堤防や河道部の形状を格子上である程度良好に近似できているものの、各ケースの河道部の近似の程度により、流出の推定に差異が生じると考えられる。流出解析において河道部形状の近似の正確性は、流出量や水位の推定機能に直結する重要な要素であると考えられる。このため、実用に供する河道部の近似に要求される分解能の検討は今後の重要な課題である。

3.2.2 山間部

図-4 の流域上流の山間部に着目して各ケースを比較すると、解析領域全域が 10[m] の格子である b)10Lv0 が、もっとも明瞭に山稜に沿って水深が分布しており、格子上で分水界を良好に近似できていると考えられる。一方、山間部で最大 160[m] の格子長に分割される c)40Lv2 と d)10Lv4 では b)10Lv0 のような明瞭な分水界はみられず、解析領域全域が 40[m] の格子長である a)40Lv0 では両者の中間の様相を呈した。また、図-6 に示した六角側と庭木川の合流部における各ケースの水位を見ると、山間部を含めた解析領域全域を 10m の格子長で近似している b)10Lv0 と、山間部を最大 160[m] の格子長で近似している d)10Lv4 は、解析開始 10 時間以降常に 10[cm] 程度の差異を有しながら推移している。

以上の結果から、山間部の地形の近似度と流出の推定精

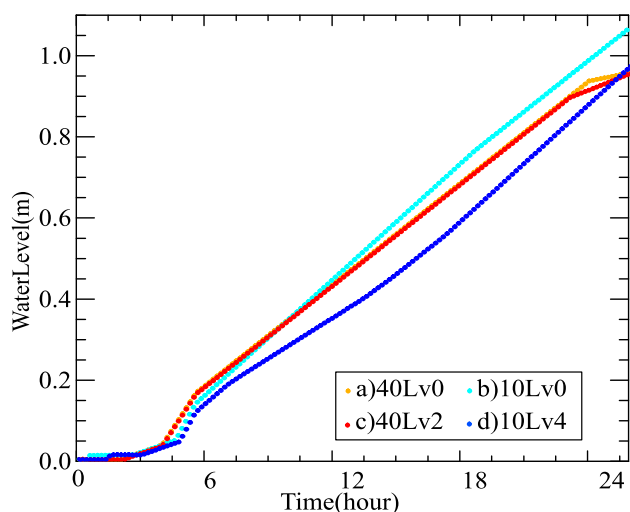


図-6 六角川及び庭木川合流部における水位の経時変化

度の間には密接な関係があることが推測される。つまり、既往⁵⁾の山間部を含めた解析領域全域を数百メートルの格子で地形近似するモデルでは流出解析の妥当性の担保が難しいことが示唆される。このため、山間部の地形近似の妥当な分解能の検討は重要な課題である。これに関して、地形勾配に応じて分解能を可変とする改善案に着意している。

4 終わりに

本研究では、四分木構造格子を用いた統一的流出解析法により、地形近似の程度の差異が解析結果に与える影響の分析を行った。

- 1) 河道部の局所的な高解像度化により河道部の形状の近似度が向上し、河道の形状に沿った水深の空間分布が得られた。
- 2) 山頂の源流から河口までを四分木構造格子により一体的に記述でき、実現象と同オーダーのピーク水位が得られた。
- 3) 河道部と山間部の地形の近似度と流出の推定精度の間には密接な関係があることが示唆される。

参考文献

- 1) 佐山敬洋, 岩見洋一: 降雨流出氾濫 (RRI) モデルの開発と応用, 土木技術資料 56-6, 2014.
- 2) 安田浩保, 星野剛: 四分木構造格子による局所的な高解像度格子を導入した浅水方程式の数値解析法, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.67, No.2(応用力学論文集 Vol.14), I693-I702, 2011.
- 3) OpenStreetMap : <http://openstreetmap.org/> (2021.10.14 参照)
- 4) 国土交通省国土政策局, 国土数値情報 : <http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/> (2021.10.14 参照)
- 5) 山本浩大, 佐山敬洋, 近者敦彦, 中村要介, 三宅慎太郎, 寶馨: 千種川流域を対象にした RRI モデルによる降雨流出・洪水氾濫統合型解析, 自然災害科学 J.JSND, 36, 特別号, 139-151, 2017.