中山間地域における流下型氾濫現象に適した数値解析モデルの開発

安田　浩保

1.1　目的

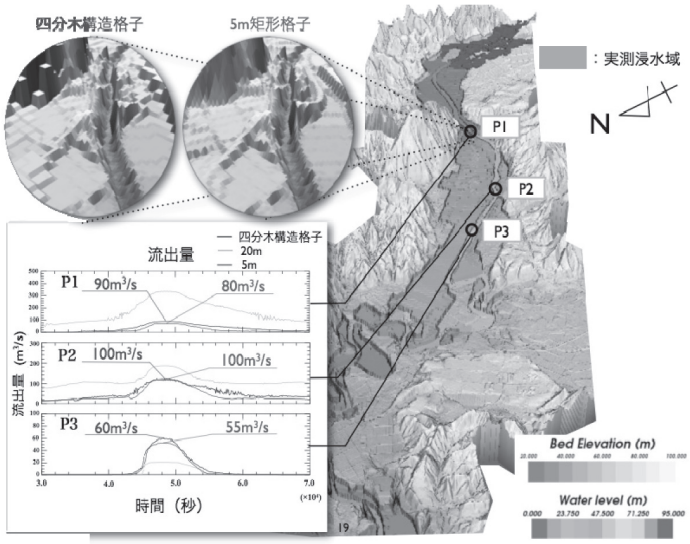
2011年7月の新潟福島豪雨における超過洪水，同年秋からの長期にわたるタイ国の洪水氾濫などの大規模水害は，既往の氾濫解析技術の課題点を浮き彫りとした．上記の水害では複数の破堤点からの越流や，氾濫水の河道への再流入といった現象が共通して確認され，これらは河道と氾濫原との区別が困難な現象と言える．このような現象の扱いに対して，最も簡便な手法の一つは，河道と氾濫原を一体的に扱う平面2次元解析である．しかし，氾濫現象に支配的な影響を与える河道や堤防などの地形形状を忠実に解析に反映するためには，十分に細分化された格子を用いざるを得ず，上述した水害のような川幅に対して広大な浸水域が生じる現象の解析には多大な計算負荷を要する．また，解析のための格子構成を一般座標系や非構造格子により実現しようとすると，格子生成に要する時間的なコストは演算時間と同等かそれ以上に要求される．本研究では，能動的な格子密度制御が可能な四分木構造格子を導入した氾濫解析手法を提案し，計算負荷と格子生成時間の両面の低減を図る．

1.2　研究内容

四分木構造格子は直交座標系を基礎とし，必要に応じて局所的に解像度を柔軟に制御可能な格子構成である．この格子構成により，氾濫現象に支配的な影響を与える河道や堤防などの構造物の形状を効率的に解析に反映することができる．また，規則性が高く，計算機による格子の自動生成が可能である．本研究では，新潟･福島豪雨で流下型氾濫に見舞われた信濃川上流域の塩谷川を対象に再現計算を行い，本手法の再現性の検証と，演算効率の定量的な評価を行う．

1.3　得られた成果

再現計算の結果，本解析手法が浸水域を良好に再現することだけでなく，氾濫原から河道への再流入という既往の手法では扱いが困難な現象も再現し得ることが明らかとなった．さらに，著者らの開発した格子の自動生成法により，今回対象とした6万個程度の格子数であれば数十秒程度で生成可能であった．また，演算時間に関しては，計算領域全体を細分化する場合に比べて少なくとも70%以上CPU時間を削減するという極めて効率性の高い解析法であることが分かった．演算時間の削



減率は，解析領域に対して川幅が狭いほど顕著に現れることから，平均川幅200mの河道に対して18,000km²に及ぶ浸水面積が生じた2011年のタイ国チャオプラヤ川の氾濫など，大領域の氾濫解析において高い優位性を有する手法であると言える．

2. 自然河川の水理解析における一般座標格子が有する打切り誤差の理論的な評価手法

2.1 目的

境界適合に一般座標を導入した河川の流況や河床変動の数値解析法は，精密な水理モデルと適切な格子構成が一対となってはじめて性能が最大化される．水理モデルと格子生成法の交点である格子構成の良否と解の応答特性は，数値解析の信頼性に根幹的な影響を及ぼすにもかかわらず踏み込んで研究が行われることはなかった．そのため，両者の関心が十分に交わることなく現在に至り，学問的な空白域のままとなっている．

境界適合の対象の幾何学形状が複雑なほど一般座標による境界適合が不可欠となる．直交格子からのそれぞれの格子の歪曲の度合はメトリックスにより規定される．数値計算におけるメトリックスの計算は，水理の支配方程式と同様に差分計算されるため，Taylor展開に由来する打切り誤差が不可避なことに細心の注意を払わなければならない．例えば，メトリックスの打切り誤差が大きな格子構成において数値的な水理計算を厳密に行っても方程式を満たす解が得られないばかりか，クーラン数と無関係な計算不安定に見舞われることさえある．また，一般座標による格子構成には無限のパターンが原理的に存在するものの，格子構成に由来する打切り誤差が原因となり，それらから一意の解が得られないことは，重大な問題として広く認識されるべきである．

本研究では，一般座標の格子構成が内包する打切り誤差の定量的な算定法を示し，メトリックスの打切り誤差が水理解析に与える影響について考察した．

2.2 研究内容

Thompsonらが導いた一般座標の格子構成が有する打切り誤差の評価式を自然河川の水理解析に適するように拡張を行う．自然河川の様々な格子構成に対してこの式を適用して打切り誤差を算出するとともに，並行して水理解析を実施する．

2.3 研究結果

一般座標による写像は言うまでもなく理論的には無謬であり，本研究で取り上げたメトリックスの打切り誤差は数値解析にのみ見られる特有の問題である．

本研究では，まず，様々な格子構成に対してメトリックスの打切り誤差の評価式を適用し，それらの格子構成に由来する打切り誤差が大きい計算点と水理解析が不安定になる計算点が一致することを明らかにした．このことは，メトリックスの打切り誤差の評価式だけから安定な水理計算が実施できるかどうかを理論的に推定できることを意味する．また，一般座標による境界適合を実施してもメトリックスの打切り誤差が大きな格子構成では支配方程式を満足する解を得られないことを定量的に示した．