

博士論文の要旨及び審査結果の要旨

氏名 星野 剛
 学位 博士 (工学)
 学位記番号 新大院博(工)第415号
 学位授与の日付 平成26年9月22日
 学位授与の要件 学位規則第4条第1項該当
 博士論文名 階層型構造格子を導入した数値水理解析法の適用性に関する研究

論文審査委員 主査 教授・福岡 浩
 副査 教授・泉宮 尊司
 副査 教授・佐伯 竜彦
 副査 群馬大学教授・清水 義彦
 副査 准教授・安田 浩保

博士論文の要旨

河川の流れ、洪水氾濫流、津波をはじめとした浅水域における水理は、現在では数値計算によって現象の予測や再現が行われることがほとんどである。水理の支配方程式から厳密解を得るための求解手法として1980年代以前までは理論計算が中心的な役割を果たしていた。しかし、水理の理論計算は厳しい数学的な制約を受け、一様勾配などの単純地形における水理の厳密解を得ることさえ困難で、実地形における水理解析の厳密解が得られるのはごく限られた問題だけである。1980年代の後半になると水理解析の求解手法の主流は理論計算から数値計算へと遷移していく。このような遷移は、理論計算が限定的な求解手法であるにもかかわらず、実地形における水理の把握が次第に社会的に求められるようになるとともに、折しもこの時期以降から電子計算機の演算能力と記憶容量の継続的かつ冪級数的な向上が始まり、実地形を反映した水理解析を実現するための技術的な環境が提供されてきたこととの重複の結果である。特に浅水域においては地形の起伏形状と平面形状が水理に支配的な影響を及ぼすため、これらの地形形状の水理解析への反映が不可欠となる。とりわけ水深方向に流れを一様と仮定する浅水流解析においては地形の平面形状の反映が極めて重要となる。地形形状を忠実かつ効率的に記述して水理解析に反映させるための数学的な手続は境界適合法と称され、これまでに一般座標や非構造格子を導入した境界適合法が提案され、解析対象の飛躍的な拡張に多大な貢献を果たしてきた。

境界適合法を導入した水理の数値計算の研究開発の黎明期とこのような数値計算の技術が実用に供されるようになっておよそ20年が経過した現在とでは、電子計算機の性能向上を要因とした技術的な環境や課題は変質している。まず、技術的な環境の変質としては、数値計算に対して高速かつ大容量の演算の実現の恩恵をもたらすだけにとどまらず、計測技術に対しても多大な恩恵をもたらし、その代表的な事例としては我が国においては2000年代の中頃までに高解像度の地形標高の数値情報が急速に整備されたことが挙げられる。また、技術的な課題としては、従前では解析精度の確保が数値計算における最優先の課題とされてきたことに対し、近年では整備された高解像度の地形数値情報を活用した数値計算においては、従来から課題と目されてきた解析精度の確保と同時に演算コストを如何に軽減するかという複合的課題の解決が求められている。このうち、電子計算機の演算速度が向上しているにもかかわらず演算コストの軽減に着眼されなければならないのは、数メートル間隔の格子状の地形標高の数値情報を最大限に活用した場合は、最新の電子計算機でさえ演算速度は十分とは言えず、演算時間はしばしば実時間の数十倍に

達するためである。また、計算点の配置間隔は理論的には滑らかで連続的な望ましいとされているが、計算点の配置間隔が細密になるほど配置間隔の連続性の確保が困難となり、このような不連続性は水理的合理性を欠く解を与えるほどの誤差要因となることが知られるようになってきている。

本論文は、以上の技術的な背景を踏まえ、浅海域における水理の数値解析において解析精度の確保と同時に演算コストを軽減するための境界適合法としての階層型構造格子の適用性についての研究をまとめたものである。各章の要旨は下記の通りである。

第 1 章では研究の背景と目的を示し、水理解析が潜在的に有する課題である打ち切り誤差および境界適合法について整理した。また、両者を両立可能な格子構成法である階層型構造格子の既往の研究について整理し、実現象に対しての適用事例が限定的であり、本研究で対象とする事例に対して適用性および有用性が調べられていないという課題について述べた。

第 2 章では差分化および階層型構造格子における解像度の異なる格子間で生じる打ち切り誤差について整理した。具体的には打ち切り誤差を擬似微分方程式の形で導出し、その誤差の大きさを理論的に評価した。また、数値実験によって打ち切り誤差が解に及ぼす影響を評価した。一般座標系の計算格子が有する打ち切り誤差に対しては計算点配置の良否を判定する式を構築し、その適用性を数値解析により明らかにした。さらに、一般座標系の打ち切り誤差の緩和手法についても研究し、自然河川の境界適合に際して、打ち切り誤差を緩和した計算点の再配置法を確立し、その有用性を示した。

第 3 章ではデカルト座標系において階層型構造格子の一つである四分木構造格子を導入した浅水流解析法を種々の解析対象に対して適用し、その有用性を示した。対象は分岐や合流部を有する河川および河道網での水理、河道と氾濫原での水の授受が生じる流下型洪水氾濫現象、複雑な湾地形に侵入した津波とし、階層型構造格子の適用性と有効性を明らかにし、それぞれの数値解析により把握された物理現象についても考察した。

第 4 章ではデカルト座標系と比べ、境界適合がより忠実に行える一般座標系において階層型構造格子を導入した浅水流解析法を構築し、境界近傍での詳細な流れの把握が要求される水理に対して、その適用性を明らかにした。対象としたのは水制工を設置した蛇行流路の水理解析とし、階層型構造格子の適用性および有用性を明らかにした。

第 5 章は各章の主な研究成果をまとめ、階層型構造格子の利点や有効となる対象について整理した。

審査結果の要旨

本研究は、階層型構造格子の導入により、実現象を対象とした数値水理解析において課題となる解析精度の確保と演算負荷の軽減の両立を目的としている。階層型構造格子を導入した水理解析法を種々の事例に適用し、その有用性を明らかにした。特に下記の 2 点に新規性が認められる。

(1) これまで階層型構造格子による解析が適用されていない河川の分岐合流、流下型洪水氾濫、人工物を有する複雑地形の水理解析に対して洪水や津波の再現計算を行い、階層型構造格子を用いた水理解析の妥当性を明らかにするとともに演算コストの削減率に言及し、その有用性を明らかにした。

(2) 一般座標系において階層型構造格子を導入した水理解析手法を構築し、その適用性を数値実験により明らかにした。この手法により境界形状を忠実に反映した境界周りの流れの把握が低演算コストで可能となり、水制周りの流れなどの水理解析に対して極めて有効な解析手法となることを明らかとした。

以上 2 点の指摘により、階層型構造格子を導入した水理解析は実地形を対象とした水理解析の簡便化や適用性の拡張を可能とするものであり、洪水や津波等の災害時の水理を簡便に把握可能とするものである。本研究で明らかにした知見は水防災に寄与するものであり、水工学の研究として工学領域に資するものである。

よって本論文は博士（工学）の博士論文として十分であると認定した。