

高度な長波方程式を用いた物質輸送解析

神戸大学大学院工学研究科 中川椎菜
神戸大学大学院工学研究科教授 中山恵介

1. 研究の背景と目的

近年、気候変動に伴う記録的な豪雨の発生が増加しており、それに起因する河川氾濫や都市域における浸水被害が全国各地で深刻化している。このような水害リスクの増大に対して、洪水や氾濫といった水理現象を事前に高精度で予測し、被害を最小限に抑えるための対策を講じることは、防災・減災の観点から極めて重要な課題である。現在、河川や浅い湖における流れの解析には、実用性が高いことから、長波方程式が広く用いられている。しかし、同方程式は急激な水深変化により計算が不安定になることや、非静水圧効果を十分に再現できないことなど、多くの課題を有している¹⁾。特に、洪水氾濫のように流況が急激に変化し、複雑な挙動を示す水理現象を対象とする場合、数値解析の精度や安定性に関する問題が顕在化しやすい。そのため、長波方程式の適用性をさらに高めるためには、数値解析手法の精度向上が不可欠である。そこで本研究では、長波方程式による水理現象の再現精度向上のため、既存スキームの精度と安定性を評価し、さらに、それらのスキームを組み合わせることによってより実用的な計算手法を提案することを目的とする。

2. 研究手法

まず、時間積分スキームとして、EP (Explicit) スキームと中山らによって提案されたNIP (Novel Implicit) スキーム²⁾の精度および安定性を、長波方程式を用いたダムブレイク再現によって理論解³⁾と比較する。この段階における移流項の計算には、基礎的な検討として一次風上差分法を用いる。次に、高精度移流スキームとして、矢部らによるCIP (Cubic Interpolated Propagation) スキーム⁴⁾およびB.P.LeonardによるUQ (Ultimate Quickest) スキーム⁵⁾の精度および安定性を、矩形移流問題を解くことにより比較する。そして、時間積分スキームであるEPスキームとNIPスキームに、高精度移流スキームであるCIPスキームとUQスキームを組み合わせた複合スキームを構築し、ダムブレイク再現を行うことで、各組み合わせが数値解の精度および安定性に及ぼす影響を評価する。

3. 結果と考察

時間積分スキームの比較では、EPスキームに比べてNIPスキームの方が水面形が比較的滑らかに遷移し、時間が経過しても数値振動が抑えられた。これは、水深更新時に反復計算を行うことで、数値的安定性が向上したためであると考えられる。高精

度移流スキームの比較では、平坦部では UQ スキームが、勾配部では CIP スキームがそれぞれ理論解に近い結果を示した。UQ スキームでは単調性リミッターを適用しているため、平坦部において数値振動が抑制され、理論解に近い結果が得られたと考えられる。一方、勾配部においては、CIP スキームが変数の値だけではなく勾配も同時に更新する手法であるため、勾配の変化を伴う流れ場をより適切に表現できたと考えられる。ただし、総合的な精度評価においては、CIP スキームでエイリアシングの発生が確認されたことから、全体として UQ スキームの方が高い精度を有しているといえる。

時間積分スキームと高精度移流スキームを組み合わせた複合スキームの精度比較においては、移流項の計算に一次風上差分法を用いた場合と比べて大幅に精度が向上した。中でも、NIP スキームと UQ スキームの組み合わせが最も安定し、かつ精度の高い結果を得た。今後は、長波方程式では再現困難な波の分散性を考慮するため、変分原理に基づいた新たな方程式の構築を行う。この新しい方程式に対して、本研究で有効性が示された NIP スキームと UQ スキームの複合スキームを適用することで、さらなる再現精度の向上を目指す。

参考文献

- 1) 小林健一郎, 中山恵介, 阪口詩乃: 洪水氾濫解析を対象とした浅水流方程式の適用性に関する検討, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.73, No.4, pp. I_1405-I_1410, 2017.
- 2) 中山恵介, 佐藤圭洋, 堀川康志: CIP 法を用いた浅水流方程式の数値計算手法の開発, 水工学論文集, Vol.42, pp.1159-1164, 1998.
- 3) 本間仁, 安芸皎一 (編): 物部水理学, 岩波書店, 1962, pp.310-315.
- 4) 矢部孝, 内海隆行, 尾形陽一: CIP 法—原子から宇宙までを解くマルチスケール解法—, 森北出版, 2003.
- 5) B. P. Leonard.: The ULTIMATE conservative difference scheme applied to unsteady one-dimensional advection, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 88, pp.17-74, 1991.