

Freshwater Carbon と計算・シミュレーション技術

神戸大学 中山恵介

2050年カーボンニュートラルを目指して、海洋生態系の光合成を利用したブルーカーボンが世界的に成されている。加えて、陸水の生態系を利用した“Freshwater Carbon”も注目されるようになってきた¹⁾⁻⁵⁾。Nagatomo et al. (2023)³⁾は、成層流動場の物質輸送と生物化学的变化がバランスすることで水中二酸化炭素分圧が決定されており、関連研究の重要性について提案した。そこで本報告では、基礎となる積分型の方程式を利用した現在の計算技術、および今後、取り組むべき研究の方向性について提案する。

もっとも単純な水深積分型方程式は、長波方程式である。その数値解法に関しては、古くは MacCormack や TVD を利用した方法などが存在する。土木の分野に限ると、安定して方程式を解けるようになったのは、井上ら (2000)⁶⁾によるスキーム (オリジナルは防災研究所研究報告)、西森ら (2001)⁷⁾による FDS の適用、中山ら (1998)⁸⁾による功績が大きい。井上らの方法は矩形グリッドに限ったスキームである。西森らの FDS は、理論的な裏付けが完璧であるが、膨張衝撃波の再現のための工夫が必要である。中山らのスキームは、有限要素法にも拡張されており、実現象の再現に最も適している。一方で、長波方程式は単純な流動場のみでの再現にとどまるため、多くの研究者が動圧成分の組み込みに取り組んできた⁹⁾。その中で、最高精度を有するモデルの一つとして、変分原理に基づくモデルが提案された¹⁰⁾⁻¹³⁾。

近年の長波方程式の解法に関して見渡してみると、西森らの FDS より優れた理論に基づく解法は提案されていないように思える。非構造格子が多く用いられるようになってきているため、論点が曖昧になっているようにも感じる。中山ら (2003)¹⁴⁾は、非構造格子を利用した長波方程式の安定解法の開発に成功している (図-1)。

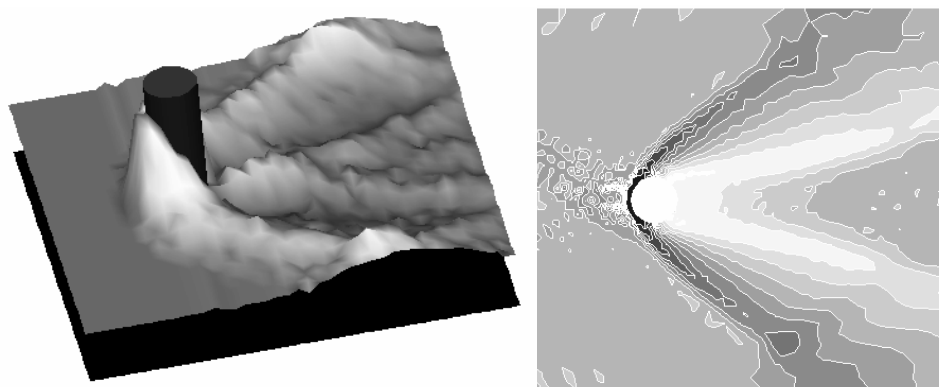


図-1 円柱周りに発生する衝撃波 (左図) と非構造格子を利用したその再現 (右図)

Freshwater Carbon のみならず、水質環境の解析に計算・シミュレーション技術は重要な役割を果たすため、過去の研究成果を正確に踏まえた上で、今後の研究を行っていく必要があると感じる。なお、本報告では、変分原理を除き、長波方程式の研究については約 25 年前の成果を参照している。そのため、最新の優れた技術を参照できていない可能性がある。

Reference

- 1) H.C. Lin, K. Nakayama, J.W. Tsai, C.Y. Chiu, Conceptual models of dissolved carbon fluxes in a two-layer stratified lake: interannual typhoon responses under extreme climates, *Biogeosciences*, 20, 4359–4376, (2023)
- 2) J. Sakaguchi, K. Nakayama, K. Komai, A. Kubo, T. Shimizu, J. Omori, K. Uno, T. Fujii, Carbon dioxide uptake in a eutrophic stratified reservoir: Freshwater carbon sequestration potential, *Heliyon*, 9(10), E20322, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20322>, (2023)
- 3) K. Nagatomo, K. Nakayama, K. Komai, H. Matsumoto, K. Watanabe, A. Kubo, K. Tada, Y. Maruya, K. Yajima, J.W. Tsai, H.C. Lin, M.P. Vilas, M.R. Hipsey, A spatially integrated dissolved inorganic carbon (SiDIC) model for aquatic ecosystems considering submerged vegetation, *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, 128(2), e2022JG007032, (2023)
- 4) (25) S. Watanabe, Y. Maruya, S. Yano, K. Nakayama, Perceptions of practitioners on the importance and achievement of research and social implementation activities on marine and freshwater carbon, *Frontiers in Marine Science*, 9:1036248., (2023)
- 5) H.C. Lin, J.W. Tsai, K. Tada, H. Matsumoto, C.Y. Chiu, K. Nakayama, The impacts of the hydraulic retention effect and typhoon disturbance on the carbon flux in shallow subtropical mountain lakes, *Science of the Total Environment*, 803, 150044, (2022)
- 6) 井上和也, 戸田圭一, 前田修, 河川網が発達した領域での氾濫解析法とそのメコンデルタへの適用, *水工学会論文集 No.44*, 485-490, (2000)
- 7) 西本直史, 森明巨, 板倉忠興, 金澤克己, FDS 法による 1 次元開水路流れの数値解析, *土木学会論文集 No. 670/II-54*, 25-36, (2001)
- 8) 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, 1159-1164, (1998)
- 9) C.C. Mei, B. Le Mehaute, B. Note on the equations of long waves over an uneven bottom, *Journal of Geophysical Research*, 71, 393–400 (1966).
- 10) K. Nakayama and T. Kakinuma, Internal waves in a two-layer system using fully nonlinear internal-wave equations, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol.62, pp.574-590 (2010)
- 11) K. Nakayama, T. Kakinuma, H. Tsuji, Oblique reflection of large internal solitary wave, *European Journal of Mechanics (B)*, Vol.74, pp.81-91, (2019)
- 12) K. Nakayama, H. Tsuji, Resonance of multiple solitary waves, *Physics of Fluids*, 33, 086602, (2021)
- 13) K. Nakayama, K. Lamb, Breather interactions in a three-layer fluid, *Journal of Fluid Mechanics*, 957, A40, (2023)
- 14) 中山恵介, 森下正志, 岡田知也, 有限要素 CIP-m スキームを用いた流況予測シミュレーション, *計算工学講演会論文集*, Vol.8, B-10-4, 4pp. (2003)