

開水路流における iRIC UTT (粒子追跡) モデルに関する精度検証

Accuracy verification of iRIC UTT (Universal Tracer Tracker) model in channel flow

北海道工学部 環境社会工学科 国土政策学コース ○学生員 樋口智哉(Tomoya Higuchi)
富山県立大学 工学部 環境・社会基盤工学科 准教授 久加朋子(Tomoko Kyuka)
国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 寒地水圏研究グループ 寒地河川チーム 川村里実(Satomi Kawamura)
北海道大学院工学研究院 環境フィールド工学部門 教授 フェロー 清水康行(Yasuyuki Shimizu)

1. はじめに

河川を流れる物質がどの程度時間をかけ、どのように輸送されるかを把握することは、河川環境や河道内物理環境変化を予測するうえで有益な情報を与える。当研究室では昨年より、フリーソフト iRIC ソフトウェア¹⁾において粒子の軌跡を追跡するための UTT (Universal Tracer Tracker) モデル²⁾を公開している。本モデルは iRIC に実装されている各種ソルバーの計算結果を用いて、その上にユーザーが指定する様々な物質を載せ、その軌跡を追跡・可視化するツールである。UTT は既往報告でのモデル³⁾にランダムウォークモデル等を導入したものであり、格子以下乱れスケールの影響を粒子の追跡に反映させることが可能となっている。また、可視化においては、分裂や結合を考慮した重み付き粒子濃度の表示に対応しており、より現実的な粒子追跡や濃度拡散の検証が可能となっている。しかしながら、現時点において、UTT モデルを用いた粒子追跡に関するモデル検証は未報告である。そこで、本研究では水路実験にて蛇行流路内での粒子の軌跡を確認すると共に、河川の水深平均 2 次元の計算結果を擬似的に 3 次元流れとして計算する iRIC Nays2d+⁴⁾の結果を用いて、UTT による粒子追跡の精度検証を行うことを目的とした。

2. 水路実験

2.1 実験水路

実験は、国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所所有の全長 11.7 m、幅 3 m、水路勾配が 1/100 の長方形矩形水路を利用した。河床材料には平均粒径 0.77 mm の一様砂を使用し、水路全体に河床材料を敷設した後、図-1 に示す初期水路を整形した。初期水路の平面形状は蛇行長 4.71 m、低水路幅 0.45 m、蛇行角 28.7° の 2 波長分の蛇行流路であり、蛇行流路の上下流域には直線区間を設けている。この直線区間の距離は、上流側が 1.70 m、下流側が 1.19 m である。水路の断面形状は、河岸高 0.02 m、河岸勾配 1:2 の台形とした。実験水路の上下流端には、モルタルで固定床領域を設け、通水により初期河床高が変化しないようにした。実験の流量は定常流 ($Q=0.00276 \text{ m}^3/\text{s}$) とし、無次元掃流力は 0.111 程度になるように設定した。通水中は上流端の河床変動が生じないように、河床材料と同じ粒形の一様砂を常

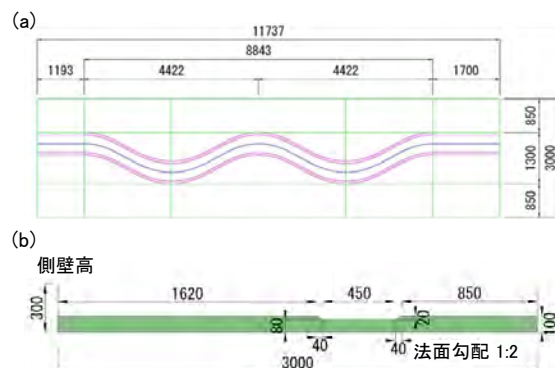


図-1 実験水路概略図 (単位: mm)
a) 平面図, b) 断面図 (上流側直線部)

時供給しつづけた。

2.2 実験ケース

実験は 1 ケースとし、実験開始から 30 分経過後、水の流れと浮遊粒子の輸送経路を追跡するため、緑色の着色水および発砲スチロール製の白い浮遊粒子を水路の上流端から供給 (散布) した。ただし、浮遊粒子は低水路全面への散布を行ったが、緑の着色水は水路上流端の左岸半分部分より供給している。これは、着色水を用いて流れの経路および流下に伴う流れの拡散を確認するためである。

実験中、着色水や浮遊粒子の移動経路を確認するため、門型クレーンにカメラ架台を設置することで水路の真上に 4K ビデオカメラ (Sony FDR-AX55) を 2 台配置した。撮影範囲はほぼ水路全域であり、撮影フレームレートは 30 fps と設定した。得られた高解像度映像は、フリーソフト Fudaa-LSPiV⁵⁾を用いて浮遊トレーサーの移動速度と方向を求めた。着色水と浮遊粒子を供給する直前の河床高については、通水 30 分経過後に一度通水を停止し、超高精細インラインプロファイル測定器 (KEYANCE LJ-X8900) による河床高の計測を行った。得られた河床高データは点群数が非常に密であるため、内挿処理にて 4 mm 格子の DEM (Digital Elevation Model) への変換を行った。

3. Nays2D+を用いた準 3 次元流れの計算

3.1 計算条件

水路内の流れの計算には、iRIC Nays2D+を用いた。計

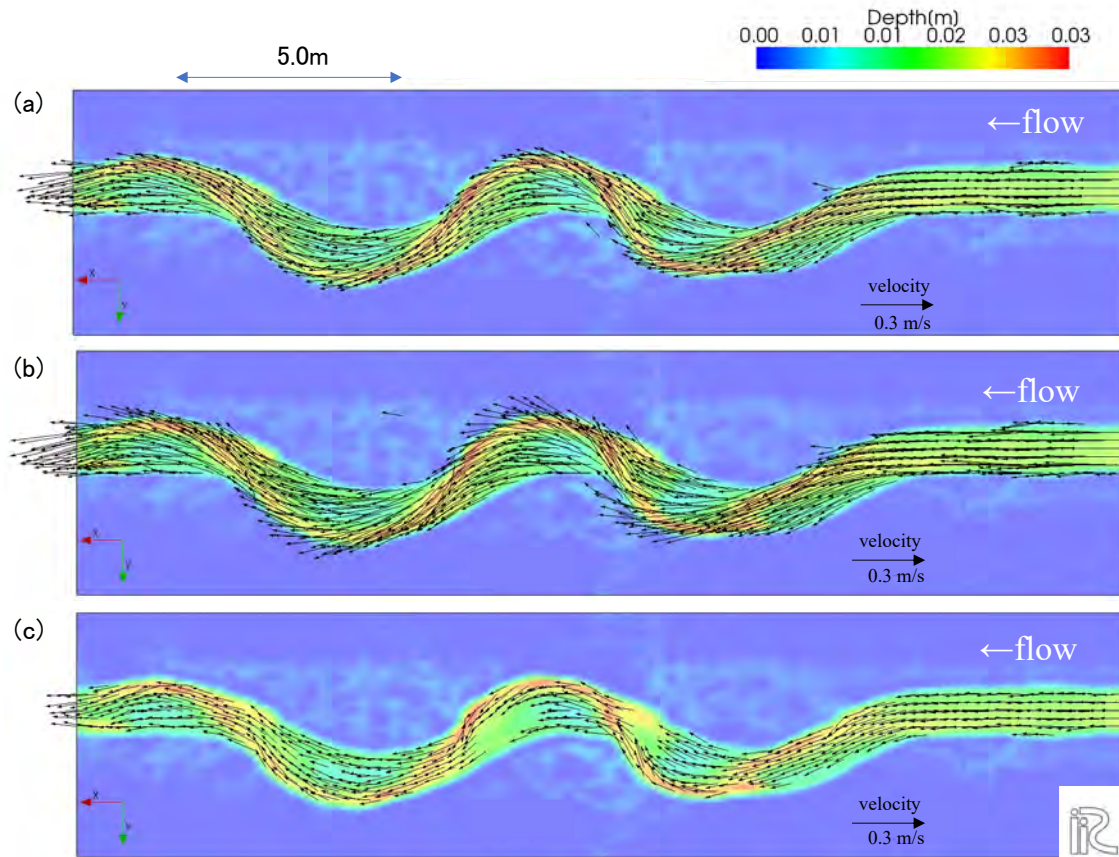


図-2 水深コンター図に流速ベクトルを重ねた図

a) 平均水深流速ベクトル, b) 表面流速ベクトル, c) 底面流速ベクトル

算には 2 章にて説明した水路実験を検証用データとして用いる．計算格子は縦断方向に 5.82 cm, 横断方向に 4.59 cm とし, マニングの粗度係数には 0.014 を与えている．ただし, 本実験では高水敷上の植生を繁茂させているため, 植生が繁茂していた高水敷に該当する格子のみ, 粗度係数を 0.025 としている (運動方程式への植生項は考慮していない)．その他の水力条件は水路実験と同じ値を与えている．

3.2 流れの計算結果

図-2 に, 計算水路内における水深コンター図に流速ベクトルを重ねた図を示す．上から順に, (a) 平均水深流速ベクトル, (b) 表面流速ベクトル, (c) 底面流速ベクトルである．図-2 からそれぞれの流速ベクトルを比較すると, 表面, 平均水深, 底面の順に流速ベクトルが大きい領域が増え, 表層付近ほど速い流れが形成されていることが分かる．ならびに, 蛇行部での内岸・外岸の流速差を比較すると, 表層付近ほど流速差が大きく, より強い流れが蛇行外岸側を通過することが分かる．これは, 表層ほど強い遠心力が働くためである．

続いて, 図-2 から流速ベクトルの流向を比較すると, 蛇行部における表面流速ベクトルと平均水深流速ベクトルとの流向は類似することが分かる．しかしながら,

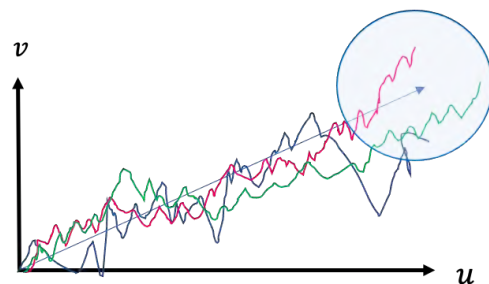


図-3 不定流を移動する粒子の様子²⁾

このように流速ベクトルの流向が類似する場合であっても, 表層では強く遠心力が働くために蛇行外岸側へ向かう流れが強く, 浮遊粒子の軌跡は蛇行外岸側へと偏向し, 外岸を集中的に通過するような影響を及ぼすものと推察される．

4. UTT を用いた粒子の追跡

4.1 モデルの概説

UTT において用いられるトレーサーの位置ベクトル \mathbf{r} は次式で表される．

$$\mathbf{r}(\mathbf{t} + \Delta\mathbf{t}) = \mathbf{r}(\mathbf{t}) + \mathbf{U}\Delta\mathbf{t} + L\sqrt{2K\Delta\mathbf{t}} \quad (1)$$

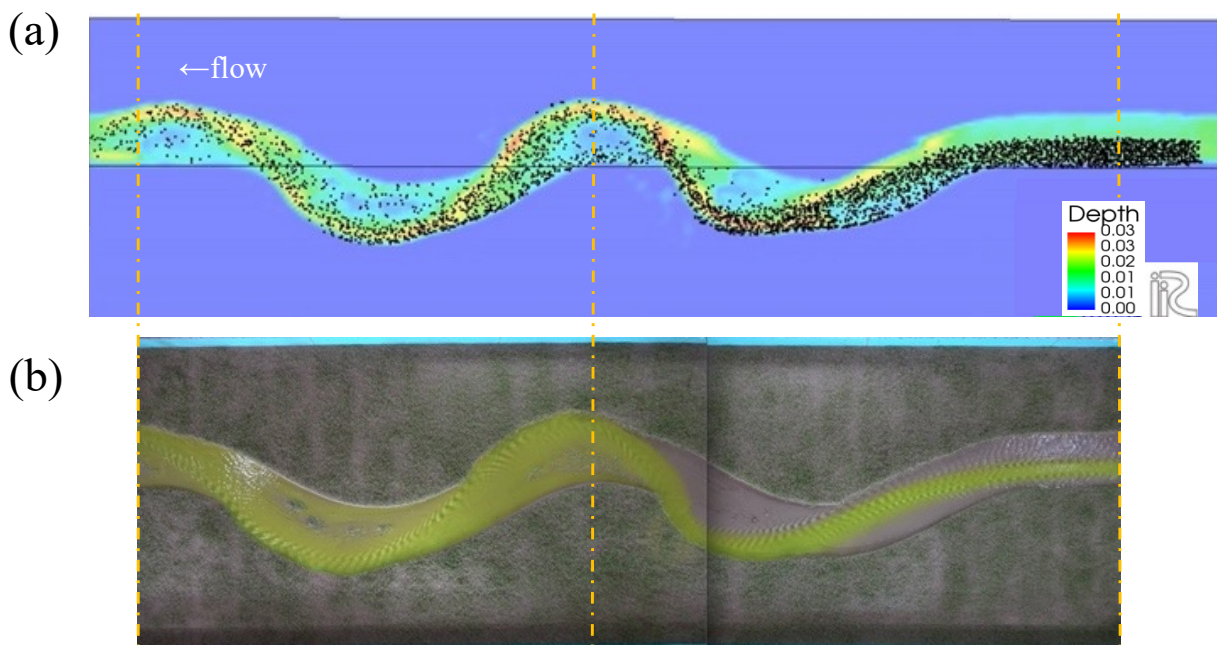


図-4 UTT による水深平均流速ベクトルを用いたトレーサーの軌跡，
a) UTT の計算結果，b) 水路実験における流れのルート

ここに、 \mathbf{r} は粒子の位置ベクトル、 \mathbf{U} は流速ベクトル、 Δt は微小時間、 \mathbf{L} はランダムウォークモデルに関するパラメーターであり、Box-Muller 変換を適用すると二次元の場合は次式(2)と式(3)のように表される⁶⁾。

$$\mathbf{L}_0 = (-2 \log \mathbf{U}_1)^{\frac{1}{2}} \cos(2\pi \mathbf{U}_2) \quad (2)$$

$$\mathbf{L}_1 = (-2 \log \mathbf{U}_1)^{\frac{1}{2}} \sin(2\pi \mathbf{U}_2) \quad (3)$$

ここに、 \mathbf{U}_1 と \mathbf{U}_2 は互いに独立な0～1の正規乱数である。得られた \mathbf{L}_0 と \mathbf{L}_1 は式(1)へ適用する。これより、不定流を流れる粒子が輸送される時、同じ場所を出発した粒子でも異なるベクトルを持ち、それぞれランダムな場所へ到達することを表現する(図-3)。なお、式(1)の K は流れの乱れの強さに依存する値であり、本モデルでは K を渦動粘性係数 ν_t の一次関数として式(4)のように表している。

$$K = \alpha \nu_t \quad (\alpha \text{は定数}) \quad (4)$$

4.2 UTT モデルの計算条件

Nays2D+の計算結果である表面流速ベクトル、平均水深ベクトルを用いて、水路の上流域から供給したトレーサーの追跡を行う。計算でのトレーサー供給条件は、実験水路と同様の地点(計算水路の上流端、左岸半分部分)から粒子を供給するものとし、供給するトレーサー数は計 10,000 個とする。トレーサーの横断方向の投入間隔は 5.6 cm、投入時間の間隔は 0.1 秒である。式(4)における α の値は 5 と設定した。

4.3 粒子追跡結果・実験との比較

図-4 に、平均水深流速ベクトルを用いたトレーサー追跡結果および水路実験における低水路の位置(緑の着色水が流れる場所)を示す。図-4 より、計算と実験のいずれにおいても、水路左岸側から投入したトレーサーや着色水は、水路を流下するに従い低水路全面に渡って拡散していくことが分かる。ただし、低水路が蛇行しているため、トレーサーおよび着色水は蛇行外岸側を流れるものが多く、内側への拡散は比較的少ない。計算結果は、実験結果の着色水が拡散する速度の再現もある程度できており(ページ数の関係上省略)、比較的良い精度で現象を再現していると考えられる。

続いて、図-5 に、表面流速ベクトルを用いたトレーサー追跡結果および水路実験における浮遊粒子の輸送経路、PIV による流向と浮遊粒子流速ベクトルの結果を示す。図-5 によると、表面流速ベクトルにて計算したトレーサー移動経路は、水路実験の浮遊粒子に比べて水路横断方向への拡散が幾分多いことが確認される(実験での浮遊粒子はより集中して流れる)。また、本計算では多くのトレーサーが下流にたどり着く前に消失している。これは、計算でのトレーサーは速度が 0 になると停止と判断され、可視化画面から消えるように設定しているためである。本結果は、計算では多数の粒子が浮州などに捕捉されたことを示すものである。つまり、表層流速を用いたトレーサー追跡については、計算と実験にて幾分相違があることが分かる。これは、表面流速の流向を流線の曲率モデルより近似的に求めているため、蛇行部のように2次流の発達する場所ほど、

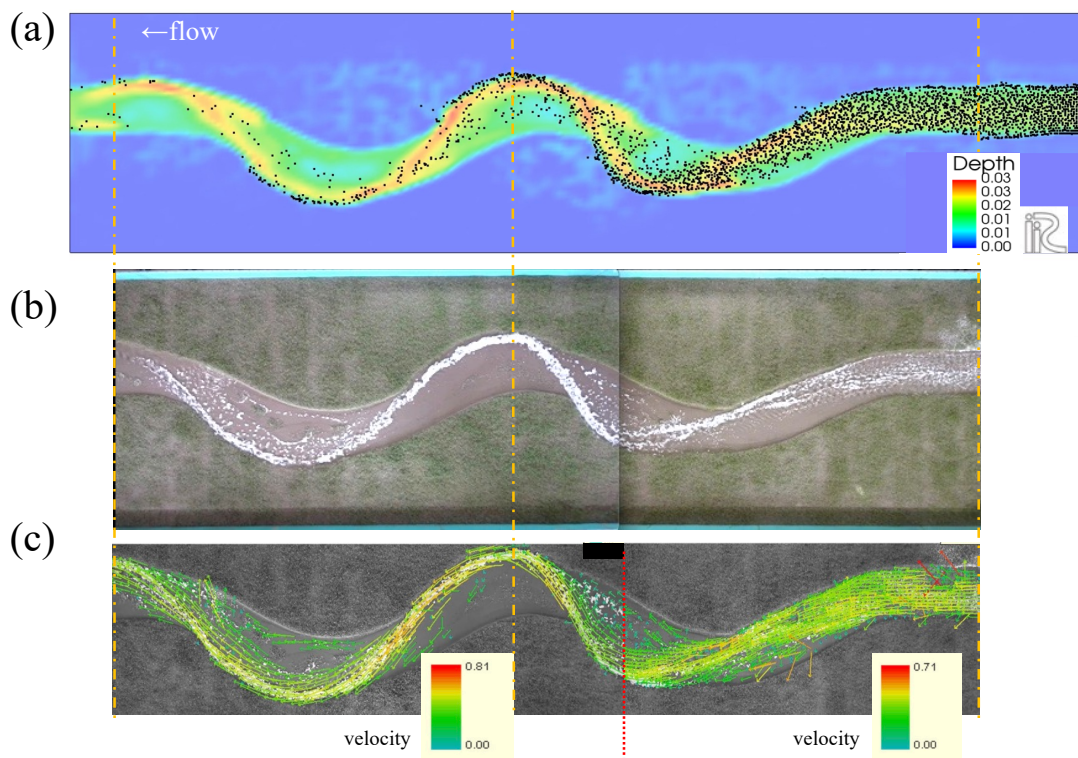


図-5 粒子輸送, a) 表面流速ベクトルを用いた粒子移動ルート, b) 水路実験における浮遊粒子の流れるルート, c) 水路実験におけるPIV解析結果(流向と流速ベクトル), ただし赤線の左右で凡例が異なることに注意

遠心力に伴う蛇行外岸側への流れの集中を再現することが難しくなるためと考えられる。その他, ランダムウォークモデルのパラメーター等の設定条件の影響による可能性も考えられるため, 本モデルの修正および精度検証について, 引き続きの検討を進める。

5. 結論

本研究では, 開水路流における iRIC UTT を用いた粒子輸送追跡モデルの精度の検討を目的とし, 水路実験の結果と計算結果を比較した。結果, UTT において Nays2D+ で求めた水深平均流速を用いた粒子追跡を行った場合, 流れの拡散やその速度を比較的高い精度で再現できることが確認された。一方, 表面流速ベクトルを用いた粒子追跡については, 現状モデルでは水路横断方向への拡散が強すぎることを確認された。今後, モデルの修正等による精度向上を試みる。

謝辞

本研究は, 公益財団法人河川財団 R3 河川基金, 富山県立大学 R3 重点研究支援 (久加朋子) 支援を頂いた。ここに謝意を表す。

参考文献

1) Shimizu, Y., Nelson, J., Ferrel, A, K., Asahi, K., Giri, S., Inoue, T., Iwasaki, T., Jang, C., Kang, T., Kimura, I.,

Kyuka, T., Mishra, J., Nabi, M., Patsinghasanee, S. and Yamaguchi, S.: Advances in computational morphodynamics using the International River Interface Cooperative (iRIC) software, *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol.45, pp.11-37, 2019, doi.org/10.1002/esp.4653

2) Nelson, J., Shimizu, Y., Kyuka, T., Charlton, S.: A General Lagrangian Tracking Methodology for Riverine Flow and Transport, *Earth Surface Processes and Landforms*, 1-17, 2022, doi.org/10.1002/esp.5458.

3) 吉沢朋樹, 久加朋子, 清水康行, 加藤一夫, サムナー圭希, 今日出人: 準三次元流れにおける流木の挙動に関する研究, 土木学会北海道支部 論文報告集 第75号, B-47, 2018.

4) 清水康行, “Nays2d+マニュアル・事例集”. iRIC 研究会. <https://i-ric.org/solvers/nays2d-2/>, (2022.12.11)

5) Coz, J, L., Jodeau, M., Hauet, A., Marchand, B., and Boursicaud, R, L.: Image-based velocity and discharge measurements in field and laboratory river engineering studies using the free FUDAA-LSPIV software, *River Flow*, Sep 2014, Lausanne, Switzerland, pp.7, 2014. hal.inrae.fr/hal-02600735

6) Box, G, E, P., Muller, and M, E.: A Note on the Generation of Random Normal Deviates, 1958. doi: 10.1214/aoms/1177706645