HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	河川の流砂トレーサーモデルによる土砂還元の評価技術について
Author(s)	濱木，道大
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	乙第7110号
Issue Date	2020-12-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.r7110
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/80251
Type	doctoral thesis
File Information	Michihiro_Hamaki.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

博士論文

河川の流砂トレーサーモデルによる土砂還元の評価技術について

Tracking Method of the Effect of Sediment Supply on Rivers by Using Bedload Transport Model

2020 年 12 月

濱木　道大

目　次

第 1 章　序 論 1-1
1. 研究の背景 1-1
2. 既往の研究における課題 1-2
3. 研究概要 1-5
第 2 章　湾 曲 水 路 における着 色 流 砂 の追 跡 実 験 2-7
1. はじめに 2-7
2. 実験の目的 2-7
3. 実験条件 2-9
4. 実験結果 2-15
5. 本章のまとめ 2-27
第 3 章　流 砂トレーサーモデルの検 討 3-28
1. はじめに 3-28
2. 流砂トレーサー濃度を考慮した河床変動解析モデル 3-28
3. 鉛直分散を考慮した流砂トレーサーモデルの改良 3-42
4. 直線水路における鉛直分散モデルのモデル特性 3-50
5. 本章のまとめ 3-60
第 4 章　IC タグを用 い た実 河 川 における砂 礫 追 跡 実 験 と計 算 モデルの現 地 適 用 性 について 4-61
1. はじめに 4-61
2. IC タグ技術を用いた砂礫トレーサー追跡技術 4-61
3. 実河川における砂礫トレーサー追跡調査 4-62
4. 流砂トレーサーモデルによる再現検証 4-76
5. 本章のまとめ 4-81
第 5 章　結 論 5-82
1. 本論文のまとめ 5-82
2. 今後の課題と展望 5-83
発 表 論 文 5-84
謝 辞 5-85
参 考 文 献 5-86

図　目　次

図 1.1　河床低下による影響 1-1
図 1.2　IC タグ等の通信方式別の特徴 1-3
図 1.3　本論文の構成 1-6
図 2.1　実験フロー 2-8
図 2.2　実験水路の状況 2-10
図 2.3　給砂状況 2-10
図 2.4　計測状況 2-11
図 2.5　垂直写真撮影架台 2-11
図 2.6　トレーサーの発色状況確認 2-12
図 2.7　トレーサー流下状況 2-12
図 2.8　ブルーライト下での撮影状況 2-13
図 2.9　ブラックライトによるトレーサーの白黒 2 値化 2-13
図 2.10　中規模河床形態の領域区分（山口） 2-14
図 2.11　中規模河床形態の領域区分（黒木・岸） 2-14
図 2.12　実験水路全景＆河床コンター図(m) 2-15
図 2.13　初期河床からの変化量コンター図(m) 2-15
図 2.14　初期河床からの変化量横断図 2-15
図 2.15（1）　横断図（予備通水後） 2-16
図 2.16　垂直写真から識別したトレーサーの分布（Run1） 2-19
図 2.17　垂直写真から識別したトレーサーの分布（Run2） 2-19
図 2.18　垂直写真から識別したトレーサーの分布（Run3） 2-22
図 2.19　表層濃度の縦断分布（実験結果 Run3） 2-23
図 2.20　トレーサーの流下状況（実験結果） 2-24
図 2.21　平均濃度移動距離と標準偏差（実験結果） 2-25
図 3.1　混合粒径の取り扱い（粒径加積曲線） 3-34
図 3.2　多層モデルの概念図 3-37
図 3.3　表層濃度コンター図（再現計算結果） 3-40
図 3.4　表層濃度の縦断分布（再現計算結果） 3-41
図 3.5　平均濃度移動距離と標準偏差の比較（実験結果と計算結果） 3-41
図 3.6　鉛直分散モデルの概念図 3-43
図 3.7　表層濃度コンター図（再現計算結果，鉛直分散なし） 3-45
図 3.8　表層濃度コンター図（再現計算結果，鉛直分散あり） 3-46
図 3.9　表層濃度の縦断分布（再現計算結果，a)鉛直分散なし，b)鉛直分散あり） 3-47
図 3.10　表層濃度の縦断分布（実験結果） 3-47
図 3.11　平均濃度の移動速度 a) と標準偏差 b) の時間変化（再現計算結果） 3-48

図 3.12　1 次元計算と 2 次元計算のイメージ.....3-50
図 3.13　表層濃度の縦断分布（1 次元計算結果，a)鉛直分散なし，b)鉛直分散あり）.....3-51
図 3.14　移動速度 a) と標準偏差 b) の時間変化（1 次元計算結果）.....3-52
図 3.15　表層濃度の縦断分布（2 次元計算結果，a)鉛直分散なし，b)鉛直分散あり）.....3-54
図 3.16　移動速度 a) と標準偏差 b) の時間変化（1 次元計算と 2 次元計算の比較）.....3-55
図 3.17　二次元計算による交互砂州上の流砂トレーサーの計算結果.....3-56
図 3.18　二次元計算による交互砂州の河床変動コンター図.....3-57
図 3.19　二次元計算による交互砂州上の流砂トレーサーの計算結果（鉛直分散なし）.....3-58
図 3.20　二次元計算による交互砂州上の流砂トレーサーの計算結果（鉛直分散あり）.....3-59
図 4.1　IC タグ技術を活用した砂礫追跡技術のイメージ.....4-61
図 4.2　トレーサー材の製作作業状況（粒径 50mm～150mm 程度）.....4-66
図 4.3　発信トレーサー（アクティブ型）.....4-67
図 4.4　発信トレーサー（パッシブ型）.....4-67
図 4.5　トレーサー材の動作確認・設置状況.....4-68
図 4.5　トレーサー材の設置状況.....4-69
図 4.6　トレーサー配置平面図.....4-70
図 4.7　トレーサー配置平面図（拡大）.....4-70
図 4.8　調査中看板の設置.....4-70
図 4.9　トレーサー材の追跡調査状況.....4-71
図 4.10　発見した発信トレーサーの状況.....4-73
図 4.11　発信トレーサーの発見位置と移動経路.....4-74
図 4.12　発見した発信トレーサーの粒径と移動距離（直線距離）.....4-75
図 4.13　鉛直分散モデルの概念図（再掲）.....4-76
図 4.14　計算に用いた粒度分布.....4-78
図 4.15　計算に用いた流量.....4-78
図 4.16　計算表層トレーサー濃度コンター図（Case1，単一粒径）.....4-79
図 4.17　計算表層トレーサー濃度コンター図（Case2，混合粒径）.....4-80

表　目　次

表 1.1　主な土砂還元実施河川・ダム 1-2
表 2.1　実験水路の水理諸量 2-9
表 2.2　トレーサー投入トライアルケース一覧 2-18
表 2.3　各断面の表層濃度（実験結果 Run1，Run2） 2-20
表 2.4　各断面の表層濃度（実験結果 Run3） 2-23
表 3.1　計算条件（モデル特性比較における格子間隔と計算時間間隔） 3-50
表 4.1　使用した IC タグの諸元 4-63
表 4.2（1）　使用した IC タグの粒径と設置箇所 4-64
表 4.3　発見した発信トレーサーの移動距離 4-72
表 4.4　計算条件 4-77

第 1 章　序論

1. 研究の背景

高度成長期以降，治山・砂防事業，治水事業，水資源開発事業等による上流域からの土砂供給量の減少，河道掘削や砂利採取による直接的な改変，堤防・護岸整備に伴う掃流力上昇等により，全国的に河床低下傾向となっている河川が増加している．

河床低下には，流下能力の向上という利点はあるものの，図 1.1 に示すように治水安全度低下（低水護岸の機能喪失等）や河川環境への悪影響（産卵床の減少，魚類移動性阻害等）等が顕在化し，総合土砂管理の考え方に基づく流域一貫の対策が求められている [1]．

河床低下の要因の一つである土砂供給量減少を解消する方策として，ダム堆積土や河道掘削土砂を下流河川に置土し，洪水時にフラッシュさせる土砂還元が実施されている [2]．しかし，還元した土砂がどのように流送され，どこに堆積するか等の流送課程については，河床高の測量や河床材料調査だけでは把握することが困難であり，IC タグトレーサーや発信機等の手法は調査に労力がかかることや粒径がある程度大きくないと使えない等，モニタリング手法に課題が残っている．

このため，置土の効果を把握する手法としては，数値解析による手法が有効と考えられ，数多く実施されている [3][4][5][6]．ただし，一般的な河床変動解析モデルでは，流出した土砂が移動分散しながら流下・堆積する過程を直接的に追跡・表現しているわけではない．つまり，置土の有無による河床変動傾向の変化は比較することが可能であるが，ある地点の粒度構成に対する置土材料の寄与率やある地点までの置土材料の到達時間等を把握するには，流砂の移動過程，流下時間，影響範囲などをより直接的に表現出来るモデルを併用することが有効である．

根固めの被災

護岸の被災

露岩を伴う河床低下

橋脚の露出

図 1.1　河床低下による影響

2. 既往の研究における課題

2.1 土砂還元の試み事例

現在，総合土砂管理の理念に基づき，流域内において土砂の連続性を確保する試みが数多く実施されている．その代表的な例として，ダム排砂や置き土等により余剰な土砂を下流に流下させ，河床高さの改善や粗粒化した河床環境の回復等を期待する試みがある．表 1.1 に示すように全国で多数の事例があり，二風谷ダムや三春ダム等で実施されている[2)]． これらは主にダム下流の河川環境改善を目的としたものが多いが，河床低下対策として実施されているものもある．モニタリングとして定期縦横断測量や河床材料調査，底生生物調査などが行われているが，現地河川において土砂還元に対する河床や粒度のレスポンスをモニタリングすることは非常に困難である．土砂還元の影響評価する際の効果検証技術が確立されていないことが，課題となっている．

表 1.1　主な土砂還元実施河川・ダム

設置河川名・ダム名	土砂還元の目的	還元土砂採取箇所
★長島ダム 大井川水系大井川	①長島ダムの年間土砂還元計画の基礎資料把握 ②下流河川環境へ与える影響の把握	塩郷堰堤直上流堆積土砂 （将来的には貯砂ダム上流を使用予定）
★秋葉ダム 天竜川水系天竜川	①洪水時に土砂を流下させることによるダム下流河道への各種影響把握	秋葉ダム貯水池堆積土砂
★三春ダム 阿武隈川水系 大滝根川	①下流河川の河床低下対策 ②河床構成材の粗粒化の防止 ※H23 以降土砂還元中断中	前貯水池堆積土砂
★浦山ダム 荒川水系浦山川	①魚類の生息環境改善（漁協からの要望） ②粗粒化防止	貯砂ダム堆積土砂
★二瀬（ふたせ）ダム 荒川水系荒川	①ダム堆砂の対策，岩床が露出した箇所への土砂投入による魚類の生息場の創出	貯砂ダム堆積土砂
★一庫（ひとくら）ダム 淀川水系猪名川	土砂還元とフラッシュ放流の組み合わせよるアユの生活環境の改善．特に下記に着目 ①産卵床の形成 ②付着藻類の剥離更新	下流河川工事発生土
★下久保ダム 利根川水系神流川	①ダム下流の天然記念物「三波石峡」の景観保全	貯砂ダム堆積土砂
★蓮（はちす）ダム 櫛田川水系蓮川	①アユの生活環境改善（漁協から要望） ②河床低下防止	貯砂ダム堆積土砂
★川治ダム 利根川水系鬼怒川	①魚類（アマゴ）の生息環境改善	貯砂ダム堆積土砂
★二風谷（にぶたに）ダム 沙流川水系沙流川	①貯砂ダム堆積土砂の処理 ②下流河川環境改善 （シシャモ産卵床）	貯砂ダム堆積部 河道掘削土砂
★長安口ダム 那賀川水系那賀川	①下流域の環境改善	長安口ダム貯水池末端堆積土砂
★三保ダム 酒匂川水系酒匂川	①下流域の環境改善 ②海岸の保全	貯定堆積土砂
★磯部頭首工 相模川水系相模川	①河道や海岸に不足している粒径成分を対処的に供給する	①H18：置き砂設置地点の高水敷土砂 ②H19：下流砂州上の土砂を上層に設置 ③H20：相模ダムの浚渫土を 20%程度混入

※第 2 回相模川川づくりのための土砂環境整備検討会資料[7)]をもとに抜粋

https://www.ktr.mlit.go.jp/keihin/keihin00017.html

2.2 IC タグ等の発信器を用いたトレーサーによるモニタリング手法の研究

河川における土砂動態のモニタリング手法として，IC タグ等の発信器を用いたトレーサー手法が数多く実施されており，角ら[8)9)10)]や福島ら[11)]の研究がある．手法としては，図 1.2 に示すようにパッシブ型 IC タグを砂礫試料に埋め込み，実際に移動する試料をアンテナで待受け計測する方法[9)]や，アクティブ型 IC タグを砂礫試料に埋め込み，出水後に可搬型探知機により探査する方法[12)]などがある．これらは，測定期間内に移動した土砂の移動距離や分布を把握出来る有力な手法といえるが，一般に調査コストが高いこと，トレーサーの発見率が低いことが問題点としてあげられる．

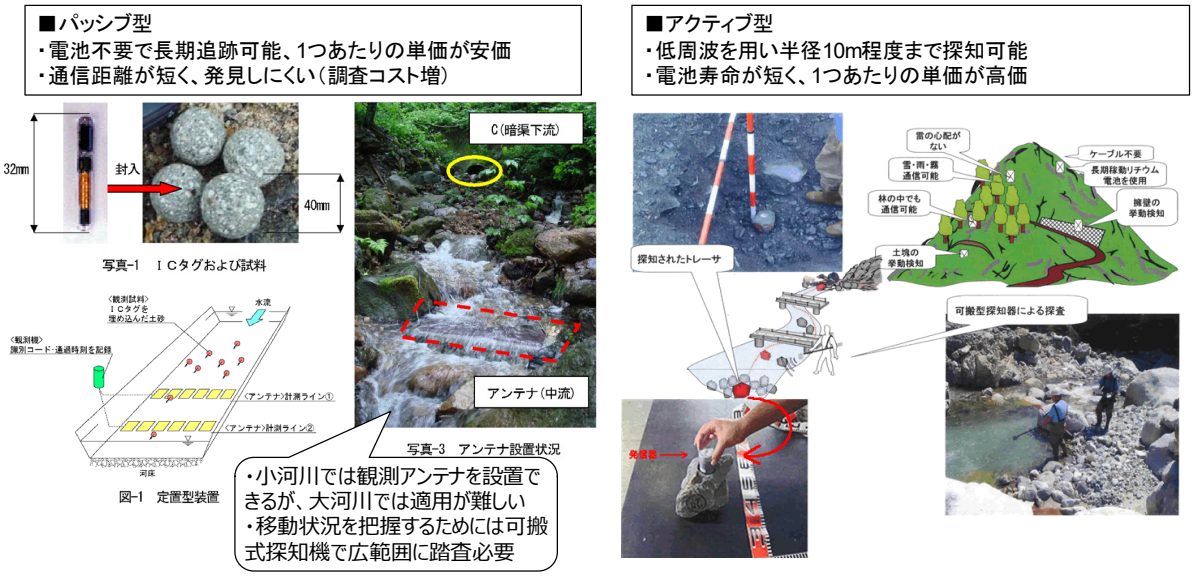


図 1.2　IC タグ等の通信方式別の特徴

2.3 数値計算モデルにより，土砂還元の影響を明らかにする研究

置土の効果を把握する手法としては,数値解析による手法が有効と考えられ,数多く実施されている．実河川を対象とした解析事例としては，植木ら[3]による多摩川の事例，佐々木ら[4]による三春ダムの事例，武藏ら[5]による那珂川の事例，有光ら[6]による水理模型実験を踏まえた解析事例等がある．ただし，これらの事例は一般的な河床変動解析モデルを用いた事例であり，流出した土砂が移動分散しながら流下・堆積する過程を直接的に追跡・表現しているわけではない．つまり，置土の有無による河床変動傾向の変化は比較することが可能であるが，ある地点の粒度構成に対する置土材料の寄与率やある地点までの置土材料の到達時間等を把握するには，流砂の移動過程，流下時間，影響範囲などをより直接的に表現できるモデルを併用することが有効である．

2.4 流砂トレーサーによる土砂移動過程の把握

数値解析で土砂還元等による置土の下流への流送現象を追跡する手法としては岩崎ら[13]の研究があるが，移動速度に関して実測値や水路実験との比較を行っていない．

流砂の移動速度等を把握する手法としては，着色砂のような流砂トレーサーを土砂移動過程の把握に用いることが常套手段の一つであり，例えば佐藤ら[14]は着色したトレーサーを用いて河床変動場における土砂輸送過程を可視化し，流砂現象の理解と掃流砂量の把握等を行っている．一方で，このようなトレーサーの輸送過程を数値モデルにより再現し，土砂の移動過程や河床変動との因果関係を明らかにしようとする研究は未だ事例が多いとはいえず，実現象をどのように合理的に表現するかについては今後更なる検討が必要である．

3. 研究概要

3.1 研究目的

本論文は，上記のような背景を踏まえ，数値解析により土砂還元の効果を把握するため，流砂トレーサーモデルによる土砂還元の評価技術の開発を行ったものである．流砂トレーサーモデルの構築にあたり，室内湾曲水路を用いた着色流砂実験による流砂の移動分散状況の把握，鉛直方向の分散を考慮した流砂トレーサーモデルの改良，実河川における IC タグ砂礫トレーサーを用いたモデルの精度検証を行う．

3.2 論文の構成

第 1 章では，本論文の序論として本研究の背景，既往研究における課題，研究の目的・概要を整理する．

第 2 章では，流砂の移動分散状況を把握するため，室内湾曲水路を用いて蛍光塗料で着色した流砂（以下，トレーサー）の追跡実験を行う．把握手法は，ブラックライト下で連続撮影した垂直写真からトレーサーの表層濃度（占有率）を数値化して評価する．実験結果から，トレーサーの移動分散状況等を観測し，数値化した表層濃度から，平均濃度移動距離（平均濃度位置の上流端からの移動距離）と，分散（標準偏差），平均的な流砂の移動速度を求め，モデル検証の基礎資料とする．

第 3 章では，トレーサー実験結果を再現対象として，一般的な交換層モデルを改良しトレーサー濃度を考慮した平面 2 次元河床変動解析モデル（以下，流砂トレーサーモデル）を構築し，トレーサーの移動分散状況の再現を試みる．再現計算からトレーサーの移動分散状況を再現する上での課題を抽出し，実験でも観測された鉛直方向の分散に起因する移動速度変化と分散拡大に着目し，モデルの改良を行う．

さらに，直線水路における 1 次元計算と 2 次元計算により交互砂州の有無がトレーサーの鉛直方向の分散に与える影響について比較検討し，モデル特性を把握する．

第 4 章では，実河川において IC タグ技術を用いた置き土土砂の追跡調査を実施し，実河川における土砂移動状況の把握を試みる．さらに，構築した流砂トレーサーモデルによる再現計算をとおし，流砂トレーサーモデルの現地適用性を検証する．

第 5 章では，本論文で得られた成果をまとめ，今後の課題と展望について述べ結論とする．

第1章　序論
・背景，既往研究における課題，研究概要（目的，構成）

▼

第2章　湾曲水路における着色流砂の追跡実験
・室内水路実験による着色流砂の移動分散状況の把握
・表層濃度の移動速度，分散（標準偏差）を数値化

▼

第3章　流砂トレーサーモデルの検討
・流砂トレーサー濃度を考慮した河床変動解析モデル
・鉛直方向の分散を考慮したモデル改良
・着色流砂実験の再現検証
・モデル特性の把握

▼

第4章　ICタグを用いた実河川における砂礫追跡実験とモデルの現地適用性について
・実河川におけるトレーサー追跡調査
・実河川における再現検証

▼

第5章　結論

図 1.3　本論文の構成

第 2 章　湾曲水路における着色流砂の追跡実験

1. はじめに

流砂の移動分散状況や移動速度等を把握する手法としては，着色砂のような流砂トレーサーを用い，水路実験により土砂移動過程の把握を行う手法[14]がある．室内水路による流砂の追跡実験を行うことで，数値計算の検証材料とすることが可能である．

第 2 章では，流砂の移動分散状況を把握しモデル検証の基礎資料とするため，室内湾曲水路を用いて蛍光塗料で着色したトレーサーの追跡実験を行った．

2. 実験の目的

実河川に投入された置土からの流出土砂は，様々な影響を受けて移動分散していく．土砂を分散させる要因としては，粒子スケールの確率的な挙動から，流れ・土砂移動の平面的な分布，河床波の発達による表層と下層の土砂交換など多岐にわたる．

そのような複雑な場を表現し，置土材料の移動分散状況を把握し数値計算の検証材料とすることを目的として，室内湾曲水路を用いて蛍光塗料で着色した流砂（トレーサー）の追跡実験を行い，定常状態におけるトレーサー群の平均移動速度及び分散状況を把握した．

実験は，図 2.1 に示す実験フローのように以下の手順で実施し，⑤⑥を数値計算の検証材料とした．

① 湾曲水路に定常状態になるまで通水
② 着色流砂（トレーサー）を投入
③ トレーサー移動分散状況を経時的に撮影
④ 画像処理による白黒 2 値化
⑤ 表層濃度の平均濃度移動距離（平均濃度位置の上流端からの移動距離）と標準偏差（分散）を算出
⑥ 平均的な流砂の移動速度を算出

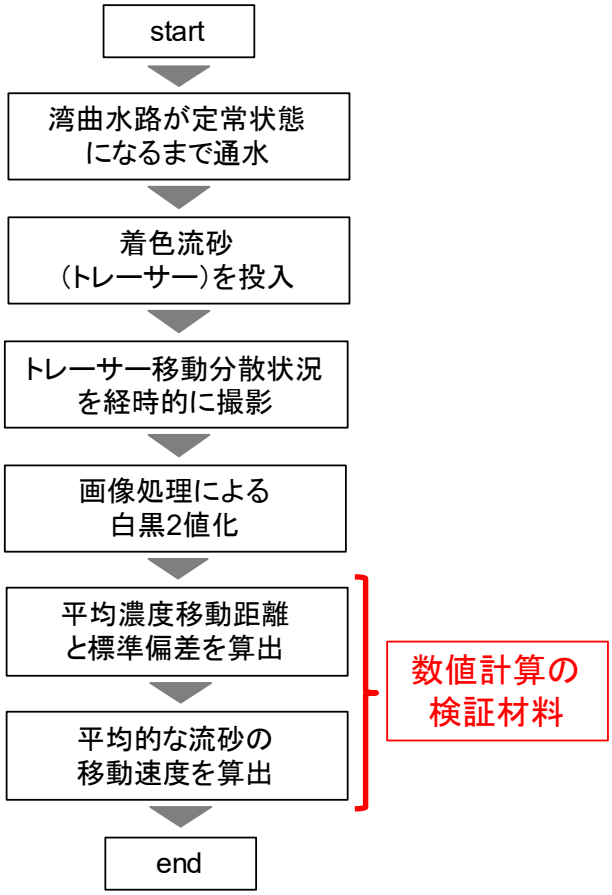

start
湾曲水路が定常状態
になるまで通水
着色流砂
(トレーサー)を投入
トレーサー移動分散状況
を経時的に撮影
画像処理による
白黒2値化
平均濃度移動距離
と標準偏差を算出
平均的な流砂の
移動速度を算出
end
数値計算の
検証材料

図 2.1　実験フロー

3. 実験条件

模型水路は，水路幅 B=0.2m，延長 L=5.24m，勾配 1/173，曲率半径 5.0m の湾曲水路とし，上下流に給水槽と排水槽を設けポンプで水を循環させた．移動床は黒色に着色した流砂（3 号珪砂）を横断方向に平坦に設定した状態から，河床高が安定するまで予備通水した動的平衡の河床高を平衡河床とした．

実験ケースは，平衡河床上に蛍光ピンクで着色したトレーサー（3 号珪砂）を投入し，ブラックライト下で垂直写真を連続撮影することにより，移動分散状況の時系列変化を確認した．トレーサーは，着色前と比重がほぼ同等であることを確認し，トライアルによりトレーサー群の分散状況がわかりやすい投入地点・量を設定した．表 2.1 に実験水路の水理諸量一覧を，図 2.2～図 2.5 に実験状況を，図 2.6～図 2.9 にブラックライトによる発光状況と白黒 2 値化の手順を示す．

また，実験条件における水理量（等流計算による平均粒径と最大粒径）の砂州の発生領域区分（図 2.10，図 2.11）によると，非砂州発生領域にプロットされる．

表 2.1　実験水路の水理諸量

項目	諸元	備考
河幅 B (m)	0.20	
水路延長　(m)	5.24	曲率半径 $R = 5.0$m
水路勾配 I	1/173	
粒径 d (mm)	1.05	トレーサー，3 号珪砂，水中比重 $s = 1.59$
粗度係数 n	0.015	マニングストリックラー型，$k_s = 2d$
流量 Q (m^3/s)	0.00353	3.53 l/s
水深 h (m)	0.034	外岸側 0.045～0.050，内岸側 0.025～0.030
流速 v (m/s)	0.53	等流計算による計算値
フルード数 F_r	0.92	等流計算による計算値
無次元掃流力 τ_*	0.116	等流計算による計算値
河幅水深比 B/H	5.97	
$Bi^{0.2}/H$	2.13	
給砂量 Q_b (m^3/s)	2.39×10^{-6}	空隙率 λ=0.488，700ml/150sec を人力で投入
単位幅給砂量 q_b (m^2/s)	1.19×10^{-5}	$q_b = (1 - \lambda)\, Q_b / B$
トレーサー投入量 V_1 (ml)	150	横断 No.16 地点に投入
通水時間 (s)	1200	平衡状態になるまで 900s 程度通水後

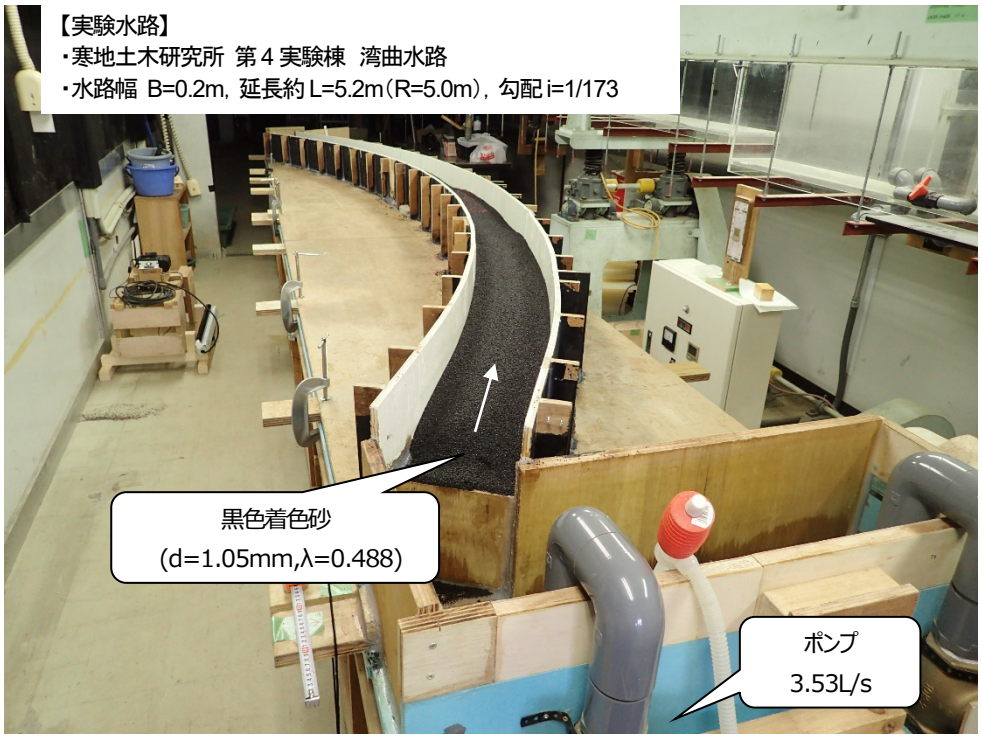


図 2.2　実験水路の状況

【給砂状況】
・黒く着色した d=1.05mm の３号珪砂を使用
・動的平衡状態となるように 700ml/150sec（λ=0.488）で給砂

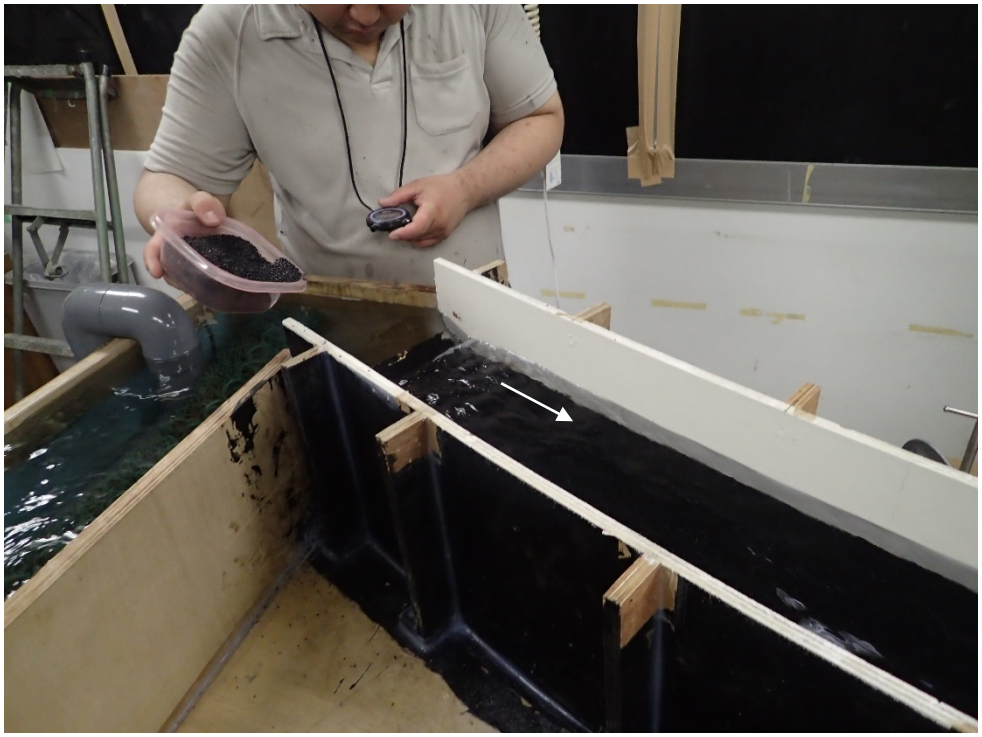


図 2.3　給砂状況

【計測状況】
・水深（外岸側，内岸側）
・河床は通水後にレーザースキャナにより計測

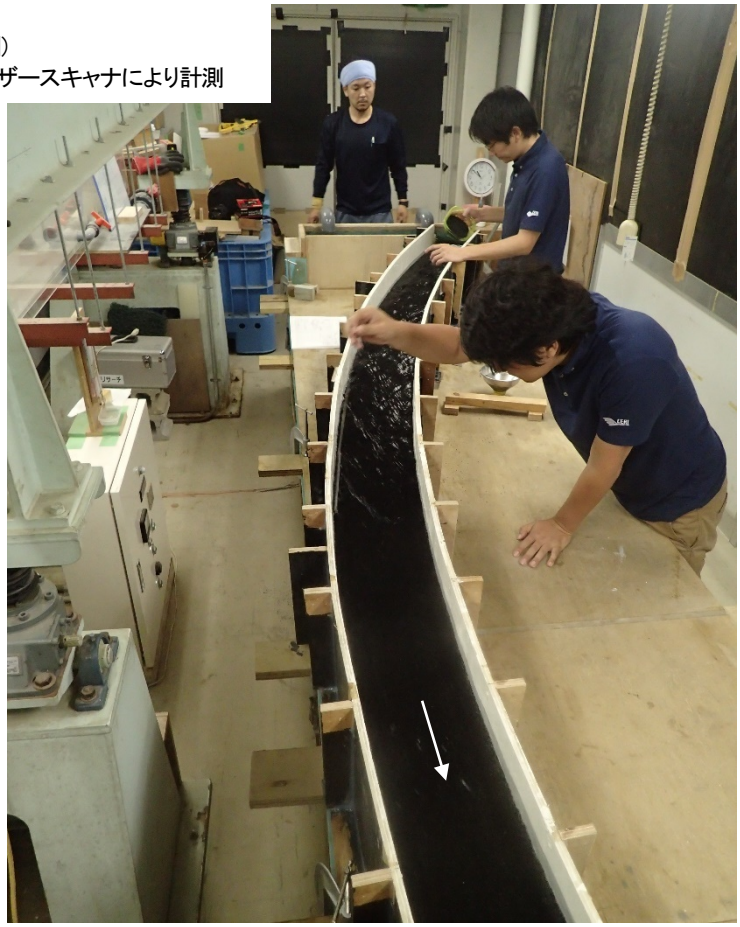


図 2.4　計測状況

【垂直写真】
・ブラックライト下で連続写真撮影
※架台を移動させながら撮影

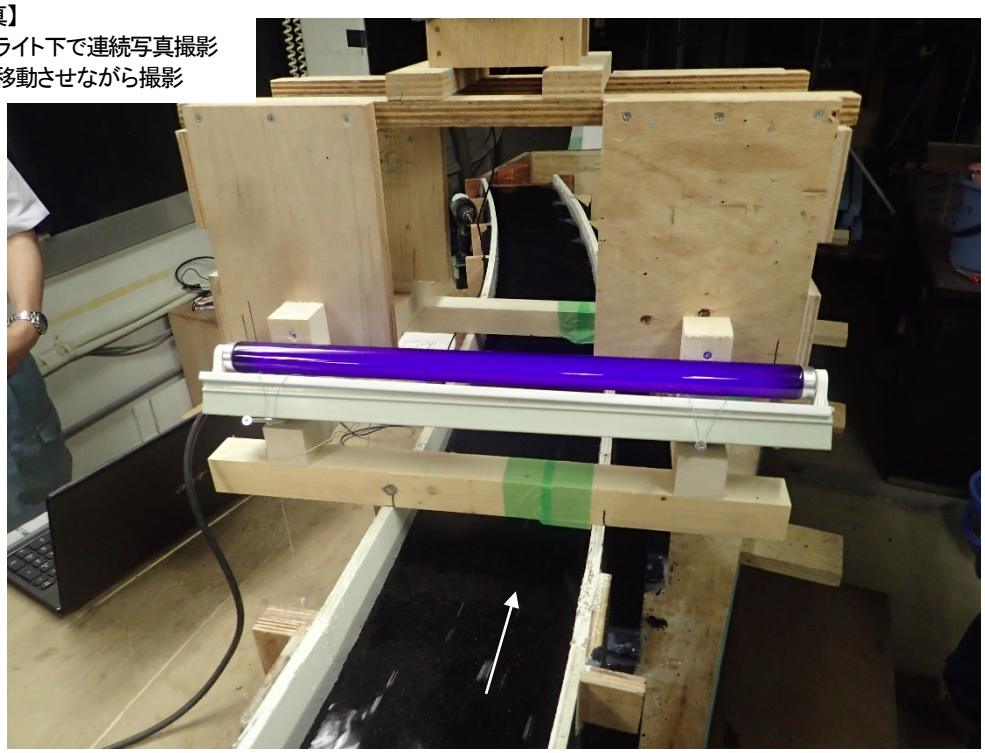


図 2.5　垂直写真撮影架台

【着色流砂(トレーサー)colored bedload tracer】
・蛍光ピンクで着色した d=1.05mm の 3 号珪砂を使用
・ブラックライト下での判読しやすさを考慮して色を選択

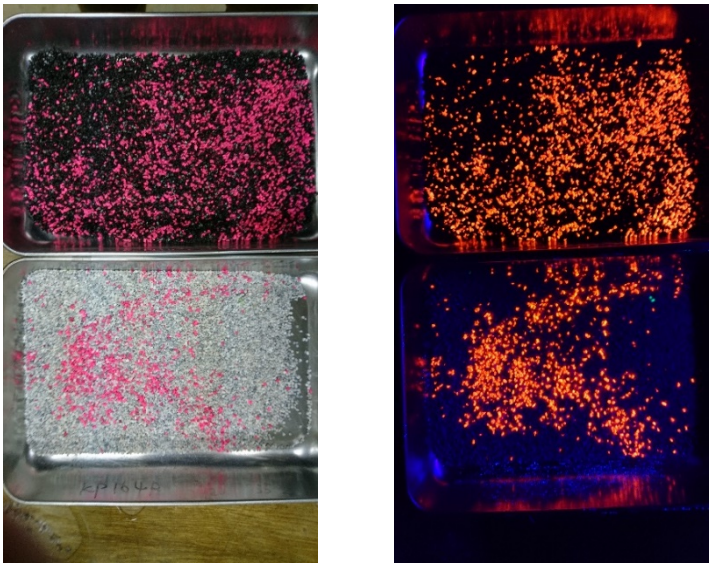


図 2.6　トレーサーの発色状況確認

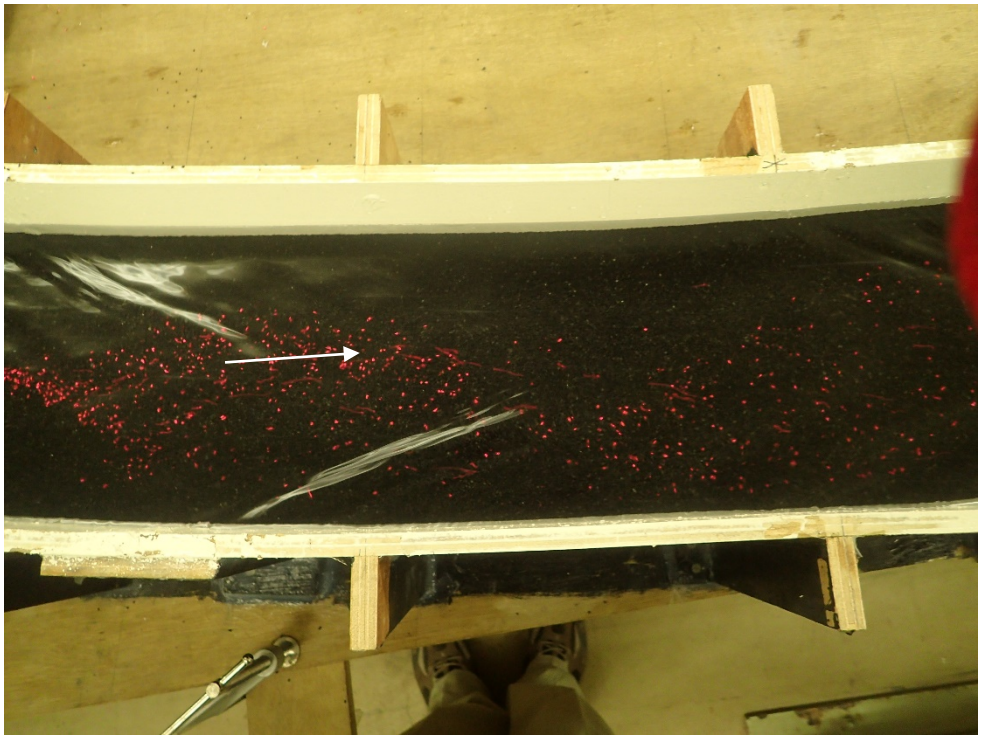


図 2.7　トレーサー流下状況

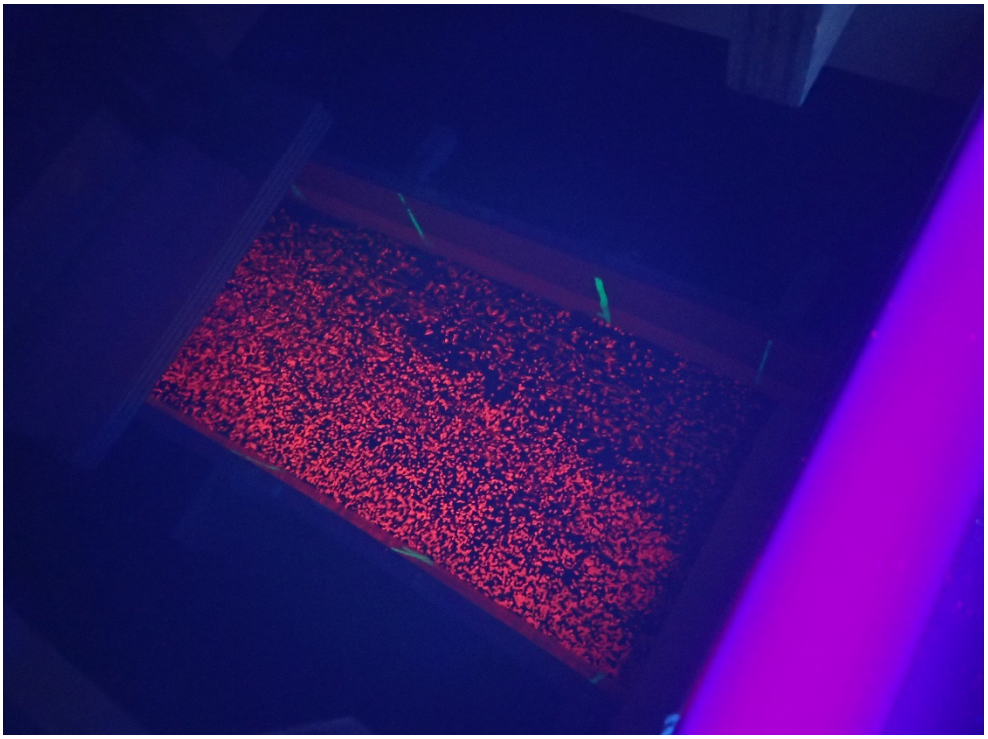


図 2.8　ブルーライト下での撮影状況

【表層面積計測】
・ブラックライト下での撮影画像の河床部分を切り取り，色域選択後白黒２値化してピクセル計測
（Photoshop で連続バッチ処理+黒ピクセル自動計測フリーソフトで，処理をほぼ自動化）

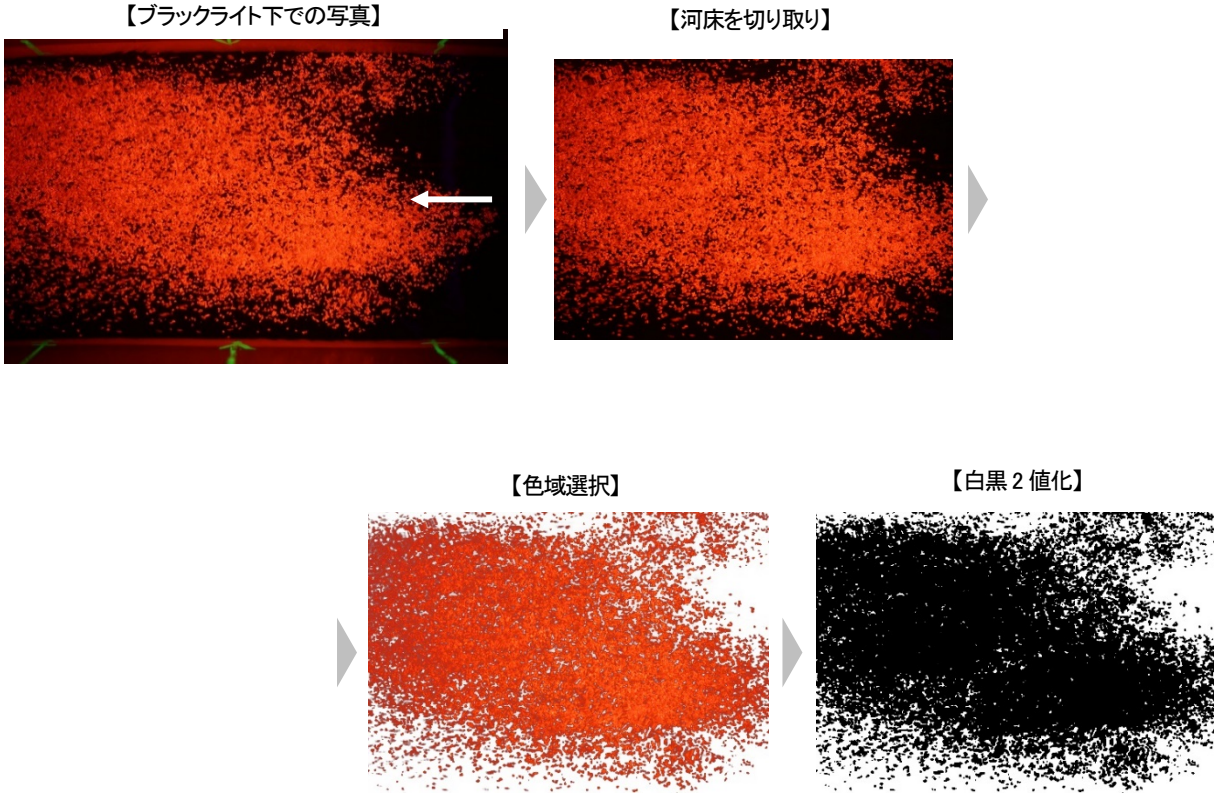


図 2.9　ブラックライトによるトレーサーの白黒２値化

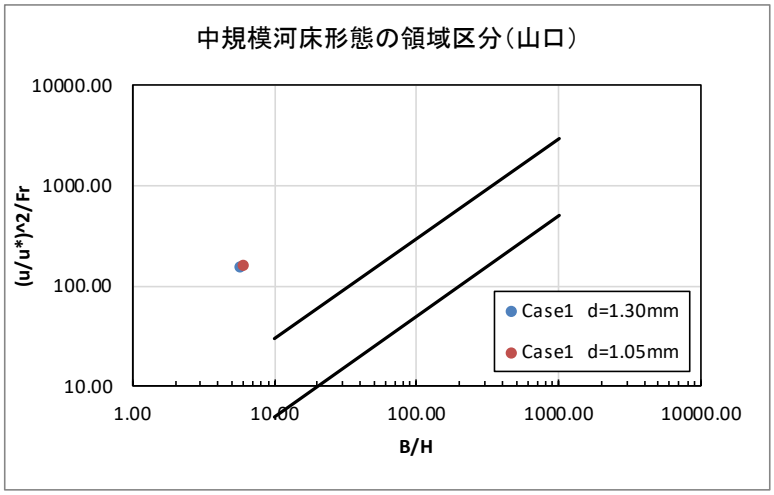


図 2.10　中規模河床形態の領域区分（山口）

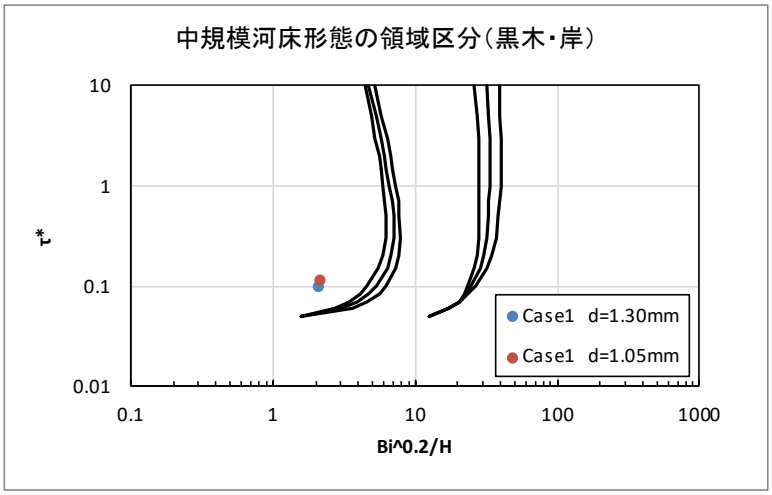


図 2.11　中規模河床形態の領域区分（黒木・岸）

4. 実験結果

4.1 予備通水結果

4.1.1 河床形状

平衡状態の水深は，内岸側が 0.025～0.030m，外岸側が 0.045～0.050m（等流計算による平均水深は 0.034m）であった．平衡状態の河床高は，予備通水終了後にレーザースキャナで計測した．レーザースキャナで取得した点群データについて，図 2.12 に実験水路全景&河床コンター図を，図 2.13 に初期河床からの変化量コンター図を，図 2.14 に初期河床（横断方向に平坦）からの変化量横断図を，図 2.15 に断面毎の横断図（レーザースキャナおよび写真測量結果）を示す．

水路の水理量は非砂州発生領域に分類される（図 2.10，図 2.11）が，図 2.13 によると，No.6～15 の範囲に波長 0.8m 程度の河床波が形成されている．また，図 2.14 によると，上流側の方が下流側よりもやや堆積傾向となっている．ただし，上下流端の影響を受けにくい水路中央付近の 11 断面を平均すると，やや堆積傾向だが平均河床高はほぼ初期河床高と同程度であり，横断勾配が 1/10 程度，内側・外岸の平均標高差は 0.020m となった．

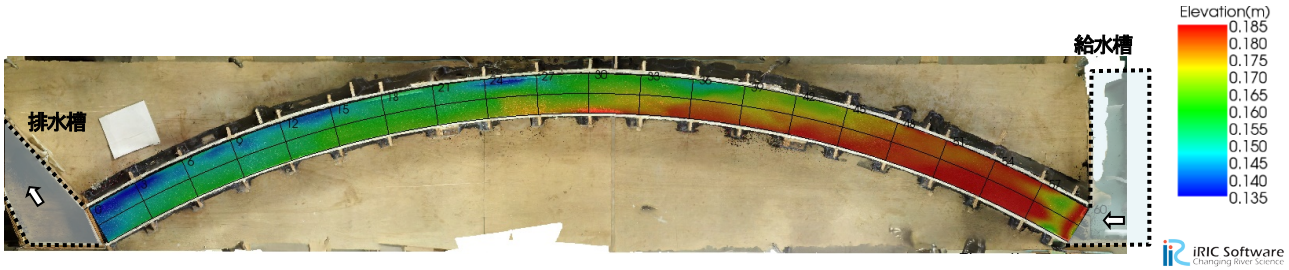


図 2. 12　実験水路全景＆河床コンター図(m)

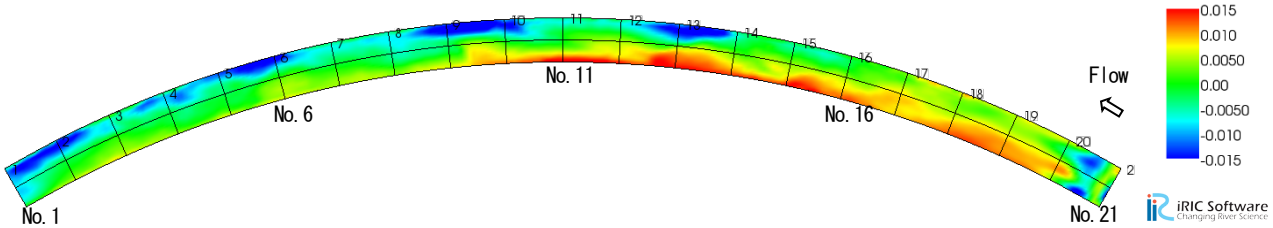
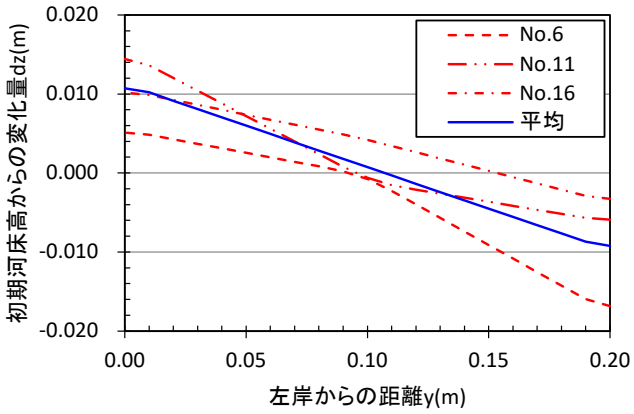


図 2. 13　初期河床からの変化量コンター図(m)



※横断図は，水路流下方向に 20 分割して作成．平均は No.6 から No.16 までの 11 断面の平均値．

図 2. 14　初期河床からの変化量横断図

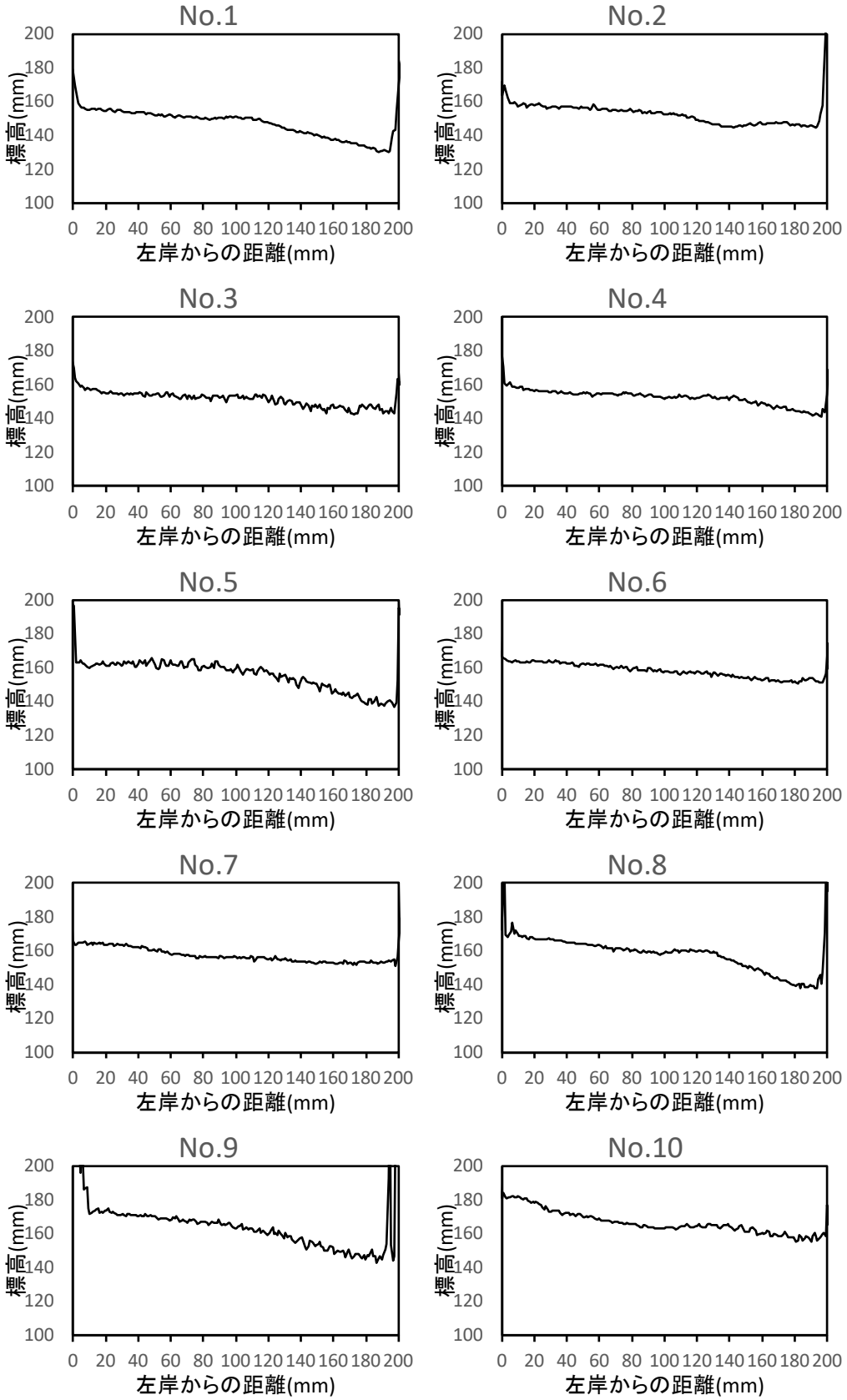


図 2.15 (1)　横断図（予備通水後）

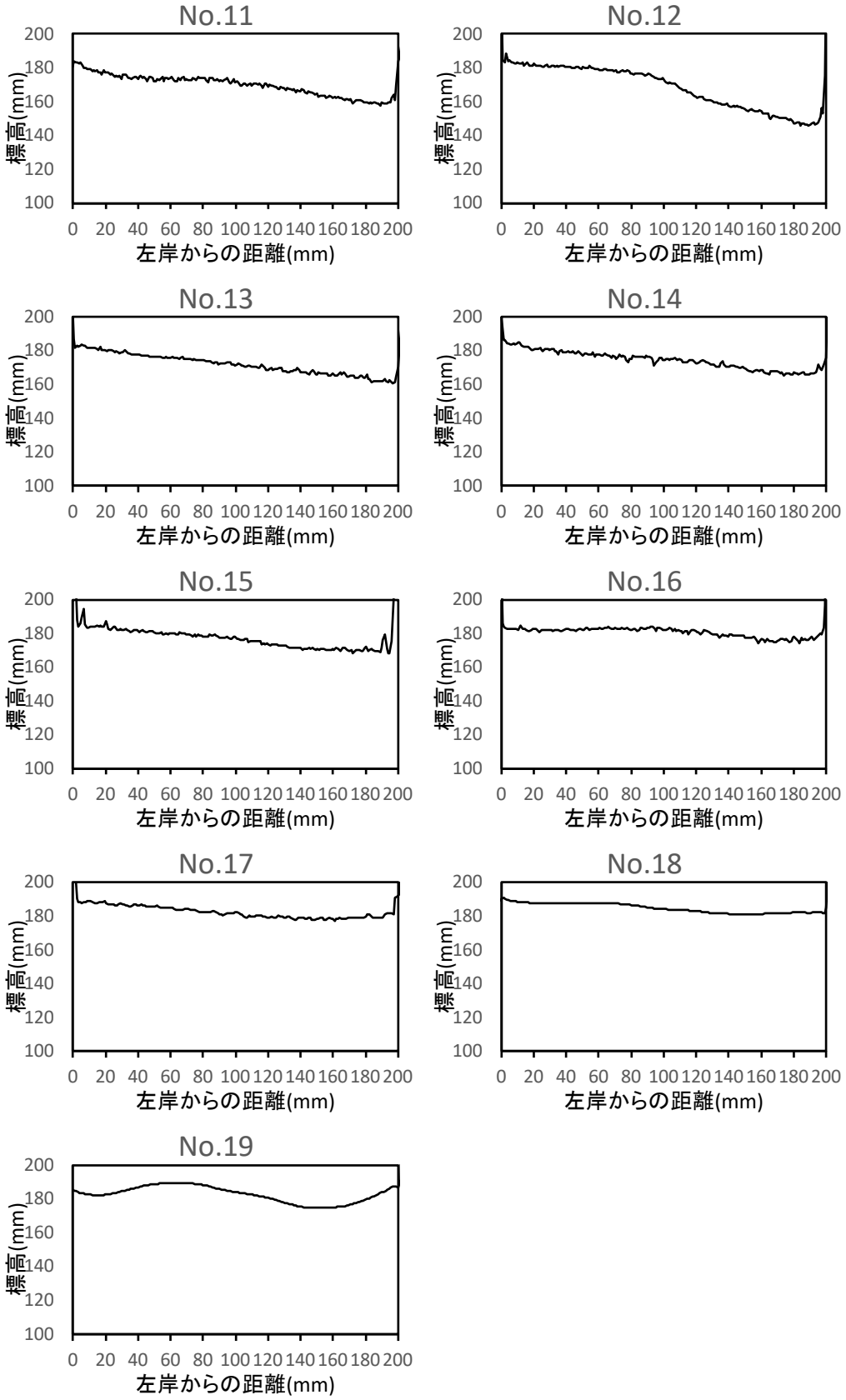


図 2.15 (2)　横断図（予備通水後）

4.1.2 トレーサー投入トライアル結果

トレーサー投入実験は，予備通水（通水時間 900sec 程度）により河床形状がほぼ定常状態に達したことを確認し，No.16 地点（上流端から 1.31m 地点）の表層に通水を中断することなく投入した．トレーサー投入量，計測タイミングは，トライアルによりトレーサー群の分散状況がわかりやすい量と計測タイミングを設定した．表 2.2 にトレーサー量のトライアルケース一覧を示す．

図 2.16，図 2.17 は，Run1 と Run2 の垂直写真から識別したトレーサー分布の経時変化である．写真はブラックライト下で撮影した画像を，白黒 2 値化して識別度を向上させたものである．表 2.3 は，図 2.16，図 2.17 の画像から横断毎に白黒ピクセル計測した表層濃度である．

これらによると，Run1 では通水後の状況しか撮影しておらず通水中のトレーサーの移動分散状況が把握できない．また，Run2 ではトレーサーが水路中央部に集中して投入されたため，Run3 では極力均一な厚さ（0.003m）となるよう投入することとした．

以上より，Run3 を本実験結果として採用し次節以降に詳細な分析結果を整理した．

表 2.2　トレーサー投入トライアルケース一覧

ケース	投入地点	トレーサー投入量（ml）	通水時間（s）	計測タイミング（s）
Run1	No.16 地点	20	360	通水後
Run2	No.16 地点	60	400	0，30，90，150，240，330，通水後
Run3	No.16 地点	150	1200	0，45，105，180，270，390，510，690，930，1170，通水後

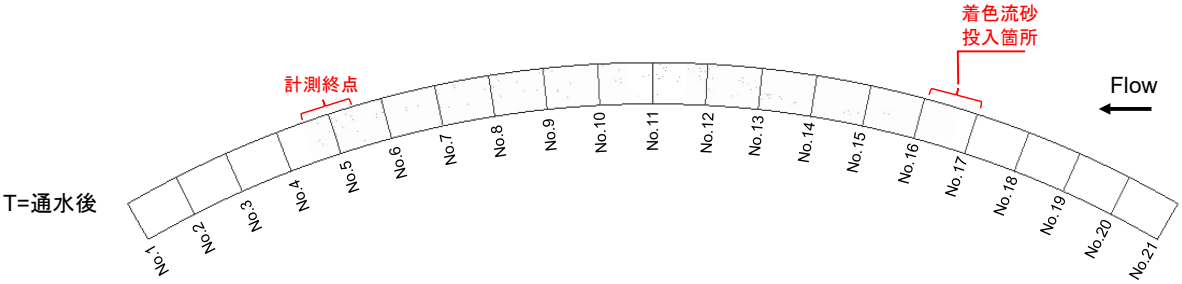


図 2.16　垂直写真から識別したトレーサーの分布（Run1）

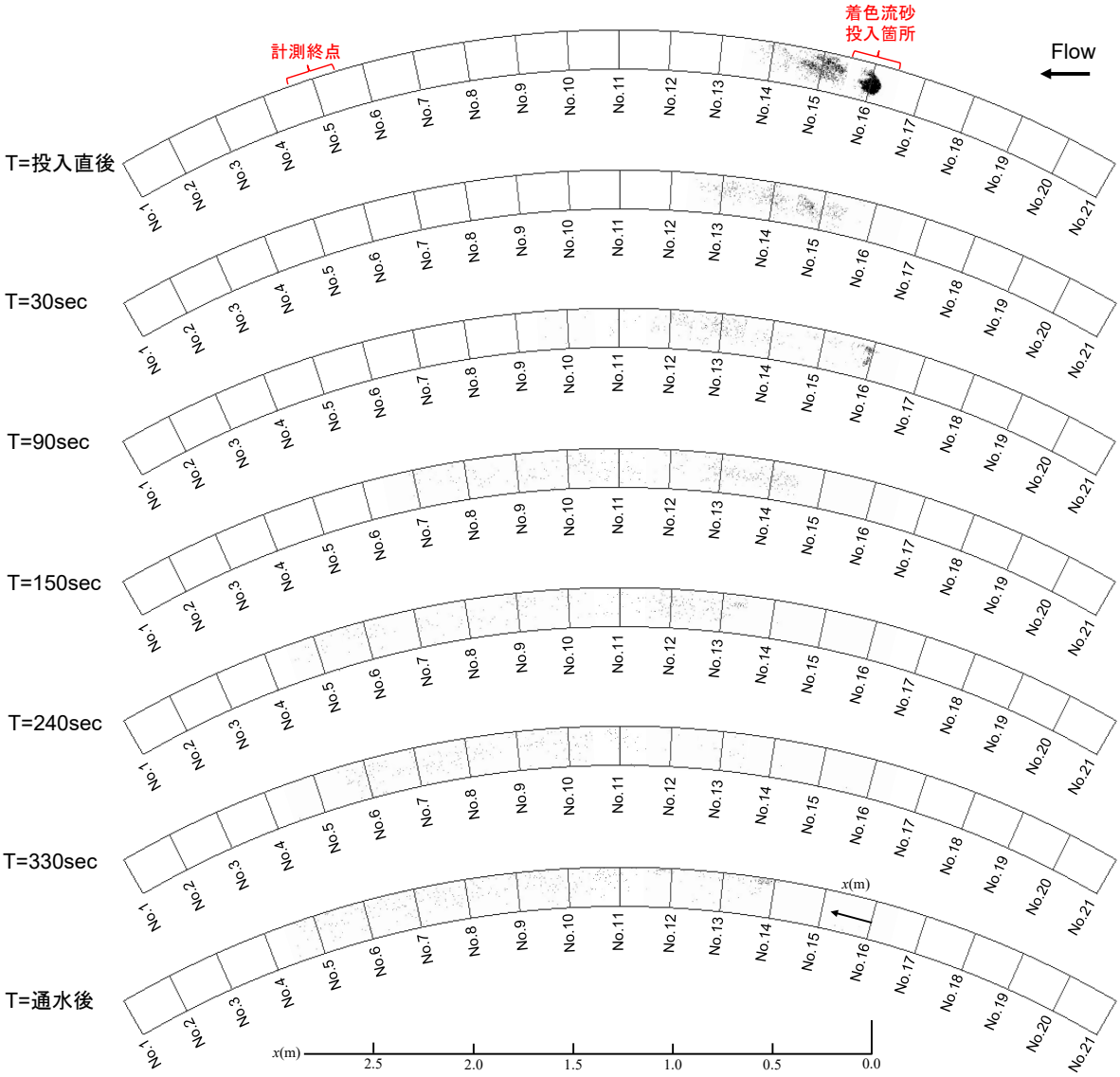


図 2.17　垂直写真から識別したトレーサーの分布（Run2）

表 2.3　各断面の表層濃度（実験結果 Run1, Run2）

Run1

													投入	
断面番号	No.	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	備考
角度	(degree)	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	
投入後(sec)	0 sec	0.0%	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	No.16に20ml投入
	360 sec	0.2%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.2%	0.3%	0.0%	0.1%	0.0%	通水後

Run2

													投入	
断面番号	No.	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	備考
角度	(degree)	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	
投入後(sec)	0 sec	−	−	−	−	−	−	−	−	−	1.9%	15.8%	12.6%	No.16に60ml投入
	30 sec	−	−	−	−	−	−	−	−	1.5%	2.0%	3.2%	0.0%	
	90 sec	−	−	−	−	−	0.1%	0.2%	0.8%	1.8%	0.5%	0.2%	1.6%	
	150 sec	−	−	0.3%	0.4%	0.3%	0.6%	0.7%	0.1%	1.3%	1.6%	0.0%	0.0%	
	240 sec	0.3%	0.3%	0.2%	0.1%	0.4%	0.3%	0.3%	1.2%	1.1%	0.0%	0.0%	0.0%	
	330 sec	0.0%	0.6%	0.6%	0.5%	0.4%	0.6%	0.3%	0.0%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	
	400 sec	0.5%	0.6%	0.7%	0.7%	0.6%	0.8%	0.8%	0.4%	0.4%	1.0%	0.0%	0.0%	通水後
	401 sec	−	−	−	−	−	−	0.0%	−	−	−	−	−	通水後（表層1cm下）

4.2 本実験結果（Run3）

4.2.1 トレーサー流下状況

トレーサー投入実験 Run3 は，予備通水（通水時間 900sec 程度）により河床形状がほぼ定常状態に達したことを確認し，No.16 地点（上流端から 1.31m 地点）の表層に通水を中断することなく面的に投入した．Run3 の投入量は 150ml（空隙率λ=0.488），投入範囲面積はおよそ 0.052m^2 であり，極力均一な厚さ（0.003m）となるよう投入した．

図 2.18 は，垂直写真から識別したトレーサー分布の経時変化である．写真はブラックライト下で撮影した画像を，白黒 2 値化して識別度を向上させたものである．また，図 2.19 は，各横断の表層濃度縦断分布の経時変化である．表層濃度は，図 2.18 の画像から横断毎に白黒ピクセル計測（表 2.4）を行うことで算出した．

これらによると，トレーサーが徐々に下流側に移動分散しており，通水後には，表層濃度は 5%以下となり，大部分が計測終点より下流に流下している．また，湾曲の影響で外岸側の方が移動速度がやや速い傾向にあるが，2 次流の影響で外岸側から内岸側へ移動するトレーサーは明確に確認することはできなかった．本実験は，湾曲の影響による横断河床勾配が形成された平衡状態で行った実験であるためであり，砂州が形成される過程などでは底面付近の 2 次流の影響がトレーサーの移動にも大きく影響すると考える．

No.16 付近では，105sec 後には低下した表層濃度が，180sec 後には再度上昇しているが，これはの図 2.20 ように上流からの流砂がトレーサーの表層を覆った後，再度トレーサーが露出したものである．今回の実験では，No.6～15 の範囲で河床波が形成されており，その河床波の堆積と洗掘の影響で，トレーサーが鉛直方向にも分散し，トレーサーの移動速度や分散に影響を与えているものと考える．

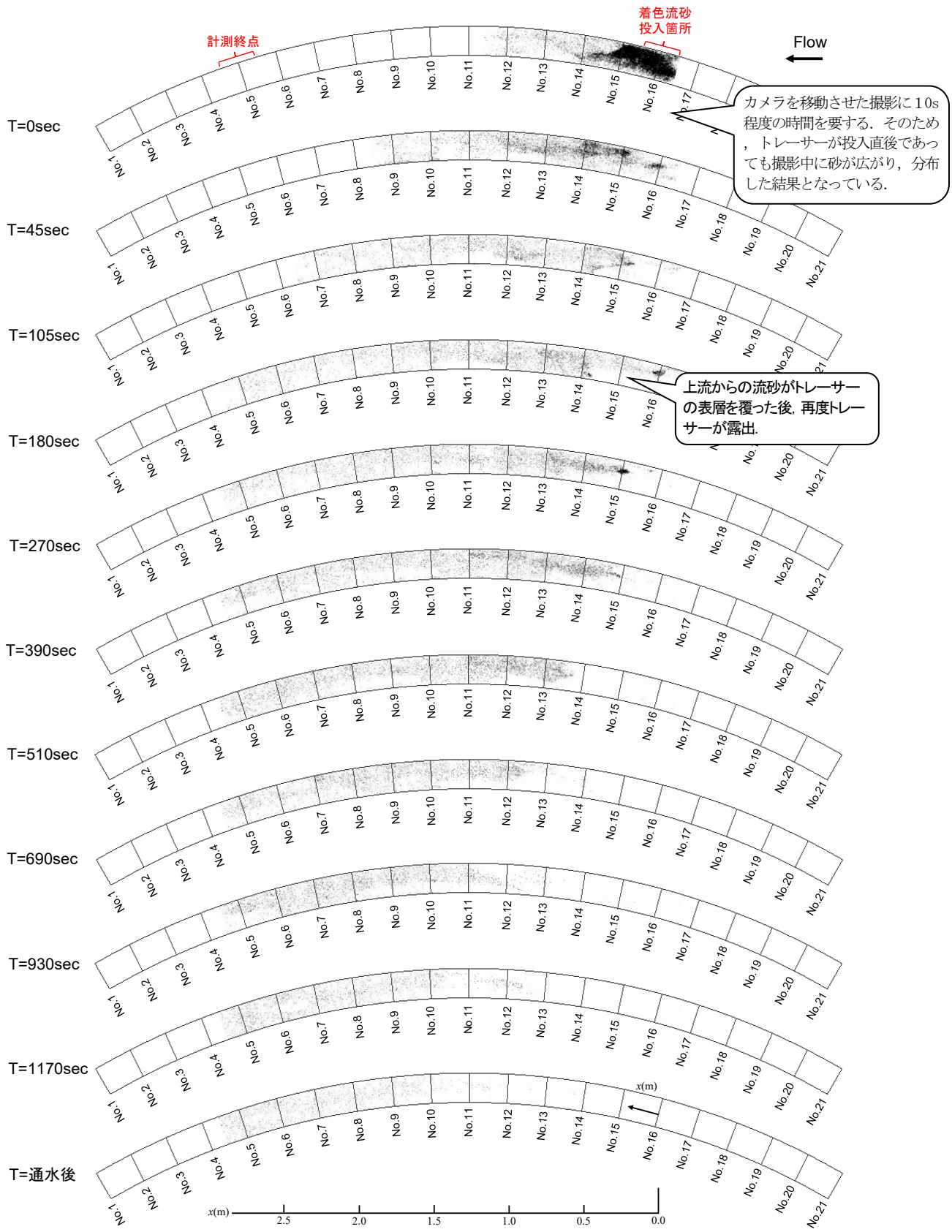


図 2.18　垂直写真から識別したトレーサーの分布（Run3）

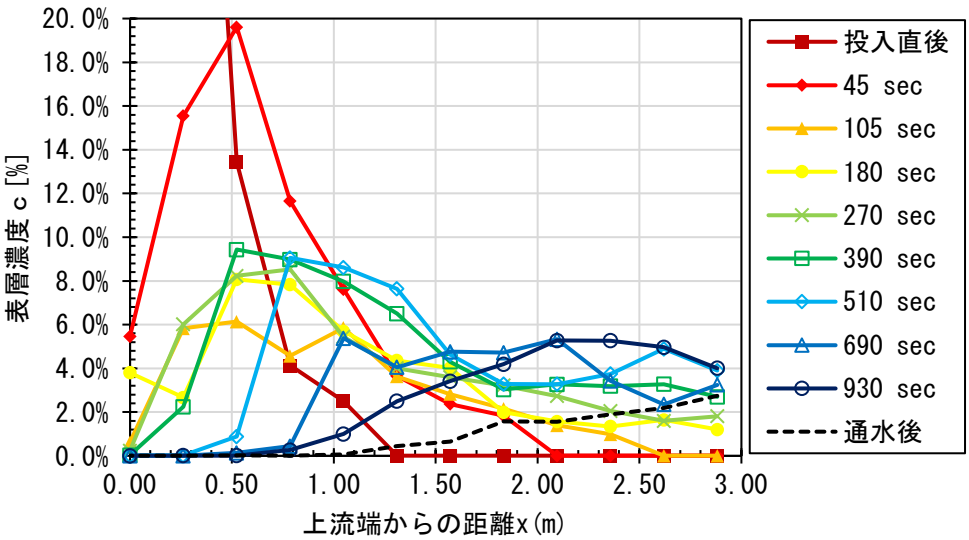


図 2.19　表層濃度の縦断分布（実験結果 Run3）

表 2.4　各断面の表層濃度（実験結果 Run3）

断面番号	No.	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	備考
角度	(degree)	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	
投入後(sec)	0 sec	–	–	–	–	–	–	–	2.5%	4.1%	13.4%	51.1%	68.3%	No.16に150ml投入
	45 sec	–	–	–	–	1.8%	2.4%	3.7%	7.6%	11.7%	19.6%	15.5%	5.5%	
	105 sec	–	–	1.0%	1.4%	2.2%	2.8%	3.6%	5.9%	4.6%	6.1%	5.8%	0.6%	
	180 sec	1.2%	1.6%	1.3%	1.6%	2.0%	4.0%	4.4%	5.7%	7.8%	8.1%	2.7%	3.8%	
	270 sec	1.8%	1.6%	2.1%	2.7%	3.2%	3.6%	4.0%	5.4%	8.5%	8.2%	6.0%	0.2%	
	390 sec	2.7%	3.3%	3.2%	3.3%	3.0%	4.3%	6.5%	8.0%	9.0%	9.4%	2.2%	0.0%	
	510 sec	3.9%	4.9%	3.7%	3.3%	3.3%	4.6%	7.6%	8.6%	9.1%	0.9%	0.0%	0.0%	
	690 sec	3.2%	2.4%	3.4%	5.3%	4.7%	4.8%	4.0%	5.4%	0.4%	0.1%	0.0%	0.0%	
	930 sec	4.0%	5.0%	5.3%	5.3%	4.2%	3.4%	2.5%	1.0%	0.3%	0.0%	0.0%	0.0%	
	1170 sec	4.1%	3.1%	2.8%	2.7%	2.0%	1.8%	0.5%	1.2%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	
	1200 sec	2.7%	2.2%	1.9%	1.6%	1.6%	0.6%	0.4%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	通水後
	1201 sec	–	0.7%	–	–	–	–	0.1%	–	–	–	–	0.1%	通水後（表層1cm下）

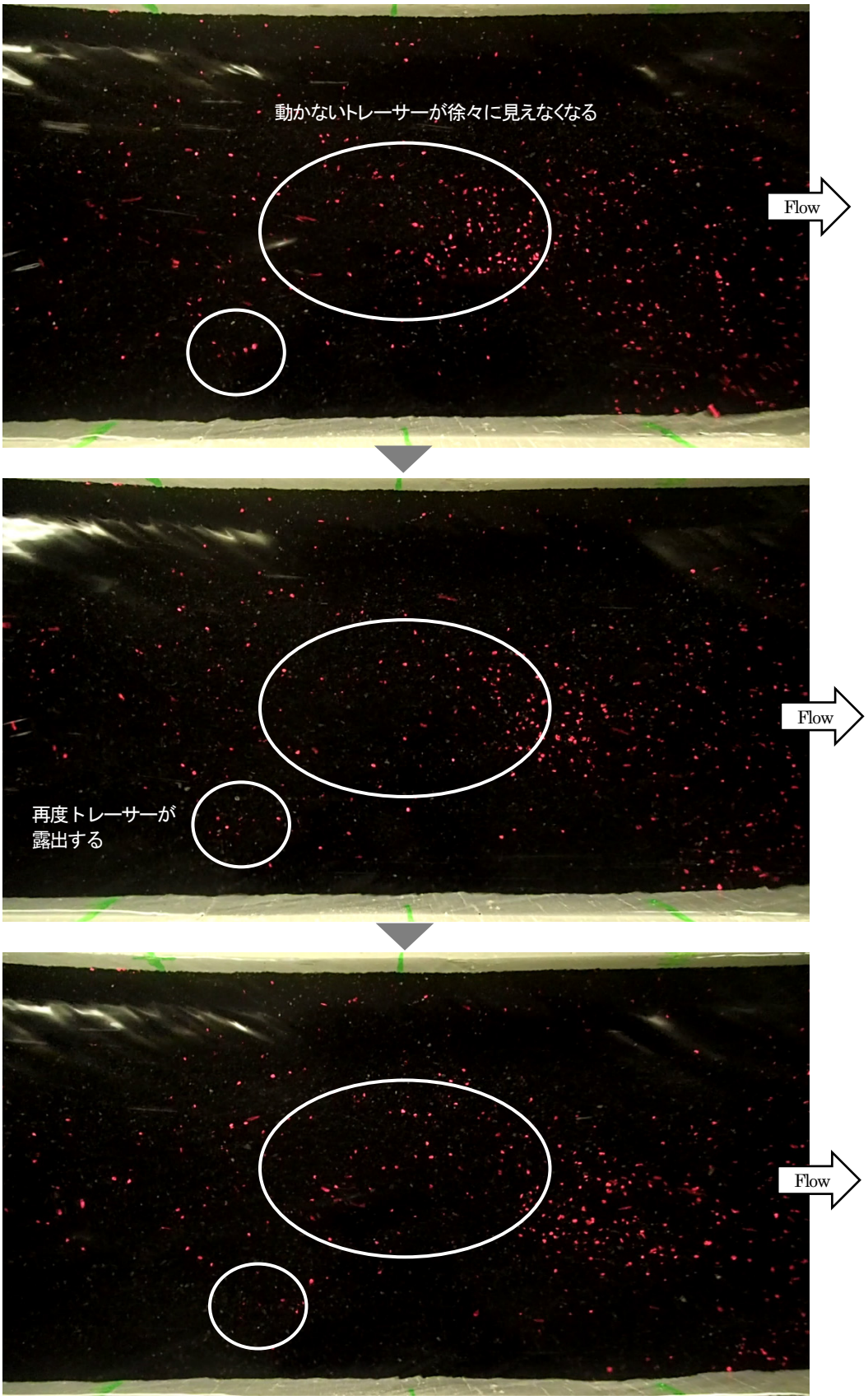


図 2.20　トレーサーの流下状況（実験結果）

4.2.1 表層濃度の平均移動距離と標準偏差

写真から判読出来るトレーサーの表層濃度は保存性が低く，トレーサー群全体の移動分散過程を表現するにはいくつかの問題が懸念される．しかし，表層濃度から捉えたトレーサーの移動過程は，図 2.19 に示すように，移動分散の様相を呈しており，実験結果の定性的な表現には十分な情報を与えている．そこで，この表層濃度に対して次式を使って平均濃度位置の上流端からの移動距離 $\bar{x}$（以下，平均濃度移動距離）と標準偏差 σ を算出し，実験結果を評価することとした．

$$\bar{x} = \frac{\int_0^L x \cdot c(x) \cdot dx}{\int_0^L c(x) \cdot dx} \tag{2-1}$$

$$\sigma^2 = \frac{\int_0^L (x - \bar{x})^2 \cdot c(x) \cdot dx}{\int_0^L c(x) \cdot dx} \tag{2-2}$$

ここで，x：投入地点（No.16）からの距離，L：投入地点から計測終点までの距離，$c(x)$：距離 x におけるトレーサーの表層濃度である．

図 2.21 は，平均濃度移動距離と標準偏差の経時変化を示した図である．これによると，100sec 後までは移動速度が速く平均濃度移動距離は約 1m（およそ No.12 付近）に到達した後，100sec 以降はやや移動速度が低下し，通水後から 1200sec 後までに平均濃度移動距離が約 2.3m（No.7）の地点に到達している．通水直後に移動速度が高いのは，着色トレーサーを投入したことによるせき上げの影響で流速が上昇したためである．一方，図 2.19 の 1200sec 後の波形を見ると，明らかに濃度のピークが計測終点（No.5, $x = 2.88$m ）より下流に移動しており，表面濃度の波形を正しく捉えていない．また，表面濃度の分散状況を示す標準偏差についても，390sec 後までは徐々に拡大しているが，510sec 後からは減少している．これは，濃度分布の大半が計測範囲より下流に流下したためである．

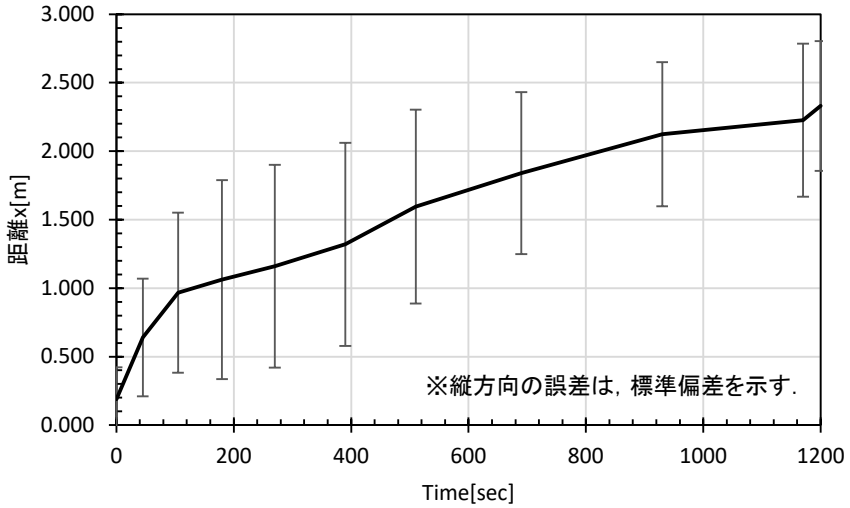


図 2.21　平均濃度移動距離と標準偏差（実験結果）

4.2.2 流砂の移動速度と分散

トレーサーが分散する要因としては，粒子の確率的な挙動，湾曲作用による流速差，河床波に起因する鉛直方向の分散等が複雑に関係している．今回の実験では，100sec 後までの移動速度が速い領域では跳動等の粒子の確率的な挙動の影響が大きく，その後は流速差や河床波がトレーサーの分散に影響しているものと考える．特にトレーサー投入直後は，トレーサーによって一時的に水位が堰上げられ流速が早くなった影響で移動速度が速くなった可能性が高い．ただし，それらの影響を分離できないため，濃度分布を適切に計測できている 510sec 後までの平均濃度移動距離を参考に，平均的な流砂の移動速度 V_{qb} を求めることとした．その結果，V_{qb} = 2.8mm/s となった．

また，通水後に河床表面を均一に剥がして鉛直方向の分散状況を確認したところ，河床下 0.010m 以下にはトレーサーは確認されず，鉛直方向の分散範囲は 0.010m 以下であることを確認した．

5. 本章のまとめ

第 2 章では，流砂の移動分散状況を把握するため，室内湾曲水路を用いて蛍光塗料で着色した流砂（トレーサー）の追跡実験を行った．把握手法は，ブラックライト下で連続撮影した垂直写真からトレーサーの表層濃度（占有率）を数値化して評価することとした．実験結果から，トレーサーが徐々に下流側に移動分散する状況や湾曲に起因する外岸側と内岸側の移動速度の差などが観測できた．また，河床波に起因するトレーサーの鉛直方向の分散（上流からの流砂と交換することで，一度低下した表層濃度が時間経過とともに再度上昇する現象）なども確認できた．また，数値化した表層濃度から，平均濃度移動距離（平均濃度位置の上流端からの移動距離）と分散（標準偏差），平均的な流砂の移動速度（V_{qb}= 0.0028m/s）を求め，モデル検証の基礎資料とした．

第 3 章 流砂トレーサーモデルの検討

1. はじめに

置土の効果を把握する手法としては，数値解析による手法が有効と考えられ，数多く[3)4)5)6)]実施されている．これらの解析事例は一般的な河床変動解析モデル（いわゆる平野モデル[15)]）を用いた事例であるが，流出した土砂の粒子を直接的に追跡し，流下・分散状況を表現しているわけではない．数値解析で土砂還元等による置土の下流への流送現象を追跡する手法としては岩崎ら[13)]の研究があるが，移動速度に関して実測値や水路実験との比較を行っていない．

第 3 章では，トレーサー実験結果を再現対象として，一般的な交換層モデルを改良しトレーサー濃度を考慮した平面 2 次元河床変動解析モデル（流砂トレーサーモデル）を構築し，トレーサーの移動分散状況の再現を試みた．

2. 流砂トレーサー濃度を考慮した河床変動解析モデル

2.1 流砂トレーサー濃度を考慮したモデル改良

流砂トレーサー濃度を考慮した河床変動解析モデルは，河川の流れ・河床変動解析ソフトウェア iRIC（International River Interface Cooperative）[16)]のうち，非定常平面 2 次元河床変動解析モデル[17)]である「Nays2DH」を改良して用いた．

2.1.1 基礎式

「Nays2DH」の基礎式を以下に示す．

(1) 流れの基礎方程式

$(x,\ y)$ を直交座標として 2 次元流れの基礎式を以下のように表す．

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial (hu)}{\partial x}+\frac{\partial (hv)}{\partial y}=0 \tag{3-1}$$

$$\frac{\partial (uh)}{\partial t}+\frac{\partial (hu^2)}{\partial x}+\frac{\partial (huv)}{\partial y}=-gh\frac{\partial H}{\partial x}-\frac{\tau_x}{\rho}+D^x-\frac{F_x}{\rho} \tag{3-2}$$

$$\frac{\partial (vh)}{\partial t}+\frac{\partial (huv)}{\partial x}+\frac{\partial (hv^2)}{\partial y}=-gh\frac{\partial H}{\partial y}-\frac{\tau_y}{\rho}+D^y-\frac{F_y}{\rho} \tag{3-3}$$

ただし，

$$\frac{\tau_x}{\rho}=C_f u\sqrt{u^2+v^2} \qquad \frac{\tau_y}{\rho}=C_f v\sqrt{u^2+v^2} \tag{3-4}$$

$$D^x=\frac{\partial}{\partial x}\left[\nu_t h\frac{\partial u}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[\nu_t h\frac{\partial u}{\partial y}\right] \tag{3-5}$$

$$D^y=\frac{\partial}{\partial x}\left[\nu_t h\frac{\partial v}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[\nu_t h\frac{\partial v}{\partial y}\right] \tag{3-6}$$

$$\frac{F_x}{\rho}=\frac{1}{2}C_D a_s h_v u\sqrt{u^2+v^2} \qquad \frac{F_y}{\rho}=\frac{1}{2}C_D a_s h_v v\sqrt{u^2+v^2} \tag{3-7}$$

ここで，h は水深，t は時間，u，v は x，y 方向の水深平均流速，g は重力加速度，H は水位，τ_x，τ_y は x，y 方向の河床せん断力，F_x，F_y は，x，y 方向の植生による抵抗力，C_f は河床せん断係数，ν_t は渦動粘性係数，C_D は植生の抗力係数，a_s は単位体積に占める植生の遮断面積，h_v は植生高さと水深の小さい方である．

次に直行座標における 2 次元流れの基礎式を一般座標(ξ，η)に変換する．一般座標に変換することにより，任意形状（境界条件に沿って）に計算メッシュを設定可能となる．

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{h}{J}\right)+\frac{\partial}{\partial \xi}\left(\frac{hu^{\xi}}{J}\right)+\frac{\partial}{\partial \eta}\left(\frac{hu^{\eta}}{J}\right)=0 \tag{3-8}$$

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial u^{\xi}}{\partial t}+u^{\xi}\frac{\partial u^{\xi}}{\partial \xi}+u^{\eta}\frac{\partial u^{\xi}}{\partial \eta}+\alpha_1 u^{\xi}u^{\xi}+\alpha_2 u^{\xi}u^{\eta}+\alpha_3 u^{\eta}u^{\eta}= \\
&-g\left[\left(\xi_x^2+\xi_y^2\right)\frac{\partial H}{\partial \xi}+\left(\xi_x\eta_x+\xi_y\eta_y\right)\frac{\partial H}{\partial \eta}\right] \\
&-\left(C_f+\frac{1}{2}C_D a_s h\right)\frac{u^{\xi}}{hJ}\sqrt{\left(\eta_y u^{\xi}-\xi_y u^{\eta}\right)^2+\left(-\eta_x u^{\xi}+\xi_x u^{\eta}\right)^2}+D^{\xi}
\end{aligned} \tag{3-9}$$

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial u^{\eta}}{\partial t}+u^{\xi}\frac{\partial u^{\eta}}{\partial \xi}+u^{\eta}\frac{\partial u^{\eta}}{\partial \eta}+\alpha_4 u^{\xi}u^{\xi}+\alpha_5 u^{\xi}u^{\eta}+\alpha_6 u^{\eta}u^{\eta}= \\
&-g\left[\left(\eta_x\xi_x+\eta_y\xi_y\right)\frac{\partial H}{\partial \xi}+\left(\eta_x^2+\eta_y^2\right)\frac{\partial H}{\partial \eta}\right] \\
&-\left(C_f+\frac{1}{2}C_D a_s h\right)\frac{u^{\eta}}{hJ}\sqrt{\left(\eta_y u^{\xi}-\xi_y u^{\eta}\right)^2+\left(-\eta_x u^{\xi}+\xi_x u^{\eta}\right)^2}+D^{\eta}
\end{aligned} \tag{3-10}$$

ただし，

$$\alpha_1=\xi_x\frac{\partial^2 x}{\partial \xi^2}+\xi_y\frac{\partial^2 y}{\partial \xi^2},\quad \alpha_2=2\left(\xi_x\frac{\partial^2 x}{\partial \xi\partial \eta}+\xi_y\frac{\partial^2 y}{\partial \xi\partial \eta}\right),\quad \alpha_3=\xi_x\frac{\partial^2 x}{\partial \eta^2}+\xi_y\frac{\partial^2 y}{\partial \eta^2} \tag{3-11}$$

$$\alpha_4=\eta_x\frac{\partial^2 x}{\partial \xi^2}+\eta_y\frac{\partial^2 y}{\partial \xi^2},\quad \alpha_5=2\left(\eta_x\frac{\partial^2 x}{\partial \xi\partial \eta}+\eta_y\frac{\partial^2 y}{\partial \xi\partial \eta}\right),\quad \alpha_6=\eta_x\frac{\partial^2 x}{\partial \eta^2}+\eta_y\frac{\partial^2 y}{\partial \eta^2} \tag{3-12}$$

$$\begin{aligned}
&D^{\xi}= \\
&\left(\xi_x\frac{\partial}{\partial \xi}+\eta_x\frac{\partial}{\partial \eta}\right)\left[\nu_t\left(\xi_x\frac{\partial u^{\xi}}{\partial \xi}+\eta_x\frac{\partial u^{\xi}}{\partial \eta}\right)\right]+\left(\xi_y\frac{\partial}{\partial \xi}+\eta_y\frac{\partial}{\partial \eta}\right)\left[\nu_t\left(\xi_y\frac{\partial u^{\xi}}{\partial \xi}+\eta_y\frac{\partial u^{\xi}}{\partial \eta}\right)\right]
\end{aligned} \tag{3-13}$$

$$\begin{aligned}
&D^{\eta}= \\
&\left(\xi_x\frac{\partial}{\partial \xi}+\eta_x\frac{\partial}{\partial \eta}\right)\left[\nu_t\left(\xi_x\frac{\partial u^{\eta}}{\partial \xi}+\eta_x\frac{\partial u^{\eta}}{\partial \eta}\right)\right]+\left(\xi_y\frac{\partial}{\partial \xi}+\eta_y\frac{\partial}{\partial \eta}\right)\left[\nu_t\left(\xi_y\frac{\partial u^{\eta}}{\partial \xi}+\eta_y\frac{\partial u^{\eta}}{\partial \eta}\right)\right]
\end{aligned} \tag{3-14}$$

$$\xi_x = \frac{\partial \xi}{\partial x}, \quad \xi_y = \frac{\partial \xi}{\partial y}, \quad \eta_x = \frac{\partial \eta}{\partial x}, \quad \eta_y = \frac{\partial \eta}{\partial y} \tag{3-15}$$

$$u^{\xi} = \xi_x u + \xi_y v, \quad u^{\eta} = \eta_x u + \eta_y v \tag{3-16}$$

$$J = \frac{1}{x_{\xi} y_{\eta} - x_{\eta} y_{\xi}} \tag{3-17}$$

また，一般座標の運動方程式中の拡散項D^{ξ}，D^{η}については，展開すると項の数が膨大になるので以下の様な条件を仮定して簡略化を行う．

1.メトリック係数の２階微分量を局所的にゼロとする．
2.局所的に擬似直交座標として扱う．

この結果，拡散項は近似的に以下のように表せる．

$$D^{\xi} \simeq \frac{\partial}{\partial \xi}\left(\nu_t \xi_r^2 \frac{\partial u^{\xi}}{\partial \xi}\right) + \frac{\partial}{\partial \eta}\left(\nu_t \eta_r^2 \frac{\partial u^{\xi}}{\partial \eta}\right) \tag{3-18}$$

$$D^{\eta} \simeq \frac{\partial}{\partial \xi}\left(\nu_t \xi_r^2 \frac{\partial u^{\eta}}{\partial \xi}\right) + \frac{\partial}{\partial \eta}\left(\nu_t \eta_r^2 \frac{\partial u^{\eta}}{\partial \eta}\right) \tag{3-19}$$

ここで，ξ_r，η_rは一般座標上の局所的な格子サイズと，実距離の比率を表す係数で，次式で定義される．

$$\frac{\Delta \xi}{\Delta \tilde{\xi}} = \xi_r, \quad \frac{\Delta \eta}{\Delta \tilde{\eta}} = \eta_r \tag{3-20}$$

なお，上記D^{ξ}，D^{η}の近似式の誘導には局所的な直行関係の仮定より以下の関係が用いられている．

$$\xi_x^2 + \xi_y^2 = \xi_r^2\left(\tilde{\xi}_x^{\,2} + \tilde{\xi}_y^{\,2}\right) = \xi_r^2\left(sin^2\,\theta + cos^2\,\theta\right) = \xi_r^2 \tag{3-21}$$

$$\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y = \xi_r \eta_r\left(\tilde{\xi}_x \tilde{\eta}_x + \tilde{\xi}_y \tilde{\eta}_y\right) = \xi_r \eta_r\left(-\cos\theta \sin\theta + \cos\theta \sin\theta\right) = 0 \tag{3-22}$$

$$\eta_x^2 + \eta_y^2 = \eta_r^2\left(\tilde{\eta}_x^{\,2} + \tilde{\eta}_y^{\,2}\right) = \eta_r^2\left(sin^2\,\theta + cos^2\,\theta\right) = \eta_r^2 \tag{3-23}$$

$$J = \xi_x \eta_y - \xi_y \eta_x = \xi_r \eta_r\left(\tilde{\xi}_x \tilde{\eta}_y - \tilde{\xi}_y \tilde{\eta}_x\right) = \xi_r \eta_r\left(sin^2\,\theta + cos^2\,sin\,\theta\right) = \xi_r \eta_r \tag{3-24}$$

ただし，θはx軸とξ軸(または，y軸とη軸)のなす角度である．

(2) 渦動粘性係数

乱流場の計算方法は，ゼロ方程式モデルとする．渦動粘性係数ν_tは，カルマン係数κ（0.4），摩擦速度u_*を用いて次式のようになる．

$$\nu_t = \frac{\kappa}{6} u_* h \tag{3-25}$$

(3) 底面摩擦

底面摩擦はマニングの粗度係数を用いて設定する．平均流速公式にマニング則を適用すると，河床せん断係数C_fは，次式のようになる．

$$C_f = \frac{g n_m^{\ 2}}{h^{1/3}} \tag{3-26}$$

また，マニングの粗度係数は Manning-Strickler[18)]により次式のように相対粗度高さ k_s と関連付けることができる．

$$n_m = \frac{k_s^{\ 1/6}}{7.66\sqrt{g}} \tag{3-27}$$

ここで，k_sは相対粗度高さ（相当粗度）で河床材料粒径の 1～3 倍程度，gは重力加速度である．

(4) 植生の抵抗

植生の抵抗は，植生の抗力係数C_Dと単位体積に占める植生の遮断面積a_sを用いて設定する．

単位体積に占める植生の遮断面積a_sは清水ら[19]が提案した以下の式を用いて算出する．

$$a_s = \frac{n_s D_s}{S_s^{\ 2}} \tag{3-28}$$

ここで，n_sは植生本数，D_sは植生の平均幹径，S_sはサンプリング格子幅である．

なお，単位体積に占める植生の遮断面積a_sは，以下の投影面積密生度a_wと同義であり，透過係数k_sとして次式のように表される．

$$a_w = \frac{N}{A} \cdot \frac{a_f}{h_f} \tag{3-29}$$

$$k_s = \frac{1}{\sqrt{a_w C_d / 2g}} \tag{3-30}$$

ここで，Nは単位面積あたりの植生本数，Aは単位面積，a_fは投影面積，h_fは樹木水深である．

(5) 河床近傍の流速の算定

水深平均流の流れに沿って，水深平均流速 V と河床近傍の流速の関係を次式のような単純な関係式を仮定する．

$$\tilde{u}_b^s = \beta V \tag{3-31}$$

ただし，$\tilde{u}_b^s$ は水深平均流の流線(以下単純に流線と呼ぶ)に沿った河川近傍の流速である．Engelund[20] によれば，水深方向の流速分布に放物線分布を用いた場合，β は次式となる．

$$\beta = 3\frac{1-\sigma}{3-\sigma}, \quad \sigma = \frac{3}{\phi_0\kappa + 1} \tag{3-32}$$

ただし，ϕ_0 は流速係数(=V/u_*)，κ はカルマン係数(=0.4)である．

一般に，流線が曲っている場合には 2 次流(螺旋流)が発生する．ここではこの 2 次流による河床近傍の流速の算定に次式を用いる．

$$\tilde{u}_b^n = \tilde{u}_b^s N_* \frac{h}{r_s} \tag{3-33}$$

ただし，$\tilde{u}_b^n$ は流線の方向に直交する方向(流線方向から反時計周りに 90 度の方向)の河床近傍の流速，r_s は流線の曲率半径，N_* は Engelund[20]による定数（=7）ある．

よって V_b は，以下のようになる．

$$V_b = \sqrt{\tilde{u}_b^{s\,2} + \tilde{u}_b^{n\,2}} \approx \tilde{u}_b^s \tag{3-34}$$

なお，上式の近似は，一般に $\tilde{u}_b^n$ は $\tilde{u}_b^s$ より 1 オーダー小さい値となるためである．

$\tilde{u}_b^\xi$ および $\tilde{u}_b^\eta$ は以下の変換により求められる．

$$\begin{aligned}
\tilde{u}_b^\xi &= \frac{\partial\tilde{\xi}}{\partial s}\tilde{u}_b^s + \frac{\partial\tilde{\xi}}{\partial n}\tilde{u}_b^n = \left(\frac{\partial x}{\partial s}\frac{\partial\tilde{\xi}}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial s}\frac{\partial\tilde{\xi}}{\partial y}\right)\tilde{u}_b^s + \left(\frac{\partial x}{\partial n}\frac{\partial\tilde{\xi}}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial n}\frac{\partial\tilde{\xi}}{\partial y}\right)\tilde{u}_b^n \\
&= \left(\cos\theta_s\tilde{\xi}_x + \sin\theta_s\tilde{\xi}_y\right)\tilde{u}_b^s + \left(-\sin\theta_s\tilde{\xi}_x + \cos\theta_s\tilde{\xi}_y\right)\tilde{u}_b^n \\
&= \frac{1}{\xi_r}\left\{\left(\cos\theta_s\xi_x + \sin\theta_s\xi_y\right)\tilde{u}_b^s + \left(-\sin\theta_s\xi_x + \cos\theta_s\xi_y\right)\tilde{u}_b^n\right\}
\end{aligned} \tag{3-35}$$

$$\begin{aligned}
\tilde{u}_b^\eta &= \frac{\partial\tilde{\eta}}{\partial s}\tilde{u}_b^s + \frac{\partial\tilde{\eta}}{\partial n}\tilde{u}_b^n = \left(\frac{\partial x}{\partial s}\frac{\partial\tilde{\eta}}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial s}\frac{\partial\tilde{\eta}}{\partial y}\right)\tilde{u}_b^s + \left(\frac{\partial x}{\partial n}\frac{\partial\tilde{\eta}}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial n}\frac{\partial\tilde{\eta}}{\partial y}\right)\tilde{u}_b^n \\
&= \left(\cos\theta_s\tilde{\eta}_x + \sin\theta_s\tilde{\eta}_y\right)\tilde{u}_b^s + \left(-\sin\theta_s\tilde{\eta}_x + \cos\theta_s\tilde{\eta}_y\right)\tilde{u}_b^n \\
&= \frac{1}{\eta_r}\left\{\left(\cos\theta_s\eta_x + \sin\theta_s\eta_y\right)\tilde{u}_b^s + \left(-\sin\theta_s\eta_x + \cos\theta_s\eta_y\right)\tilde{u}_b^n\right\}
\end{aligned} \tag{3-36}$$

ただし，s および n はそれぞれ流線およびこれに直交する方向を表し，流線と x 軸のなす角度を θ_s として，以下の関係を用いている．

$$\frac{\partial x}{\partial n} = -\frac{v}{V} = -\sin\theta_s, \quad \frac{\partial y}{\partial n} = \frac{u}{V} = \cos\theta_s \tag{3-37}$$

$$\frac{\partial x}{\partial s} = -\frac{u}{V} = \cos\theta_s, \quad \frac{\partial y}{\partial s} = \frac{v}{V} = \sin\theta_s \tag{3-38}$$

(6) 流線の曲率

流線の曲率(1/曲率半径)は次式で求められる．

$$\frac{1}{r_s} = \frac{\partial\theta_s}{\partial s} \tag{3-39}$$

ここで，θ_s は x 軸と s 方向の角度なので，曲率は以下のようになる．

$$\theta_s = \tan^{-1}\left(\frac{v}{u}\right) \tag{3-40}$$

$$\frac{1}{r_s} = \frac{\partial}{\partial s}\left[\tan^{-1}(T)\right] = \frac{\partial}{\partial T}\left[\tan^{-1}(T)\right]\frac{\partial T}{\partial s} = \frac{1}{1+T^2}\frac{\partial T}{\partial s} \tag{3-41}$$

ただし，$T = v/u$ である．ここで，

$$\frac{1}{1+T^2} = \frac{1}{1+\left(\frac{v}{u}\right)^2} = \frac{u^2}{u^2+v^2} = \frac{u^2}{V^2} \tag{3-42}$$

$$\frac{\partial T}{\partial s} = \frac{\partial}{\partial s}\left(\frac{v}{u}\right) = \frac{u\frac{\partial v}{\partial s} - v\frac{\partial u}{\partial s}}{u^2} \tag{3-43}$$

$$\frac{\partial}{\partial s} = \frac{\partial x}{\partial s}\frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial s}\frac{\partial}{\partial y} = \frac{u}{V}\frac{\partial}{\partial x} + \frac{v}{V}\frac{\partial}{\partial y} = \frac{u}{V}\left(\xi_x\frac{\partial}{\partial\xi} + \eta_x\frac{\partial}{\partial\eta}\right) + \frac{v}{V}\left(\xi_y\frac{\partial}{\partial\xi} + \eta_y\frac{\partial}{\partial\eta}\right) \tag{3-44}$$

となり，曲率 $1/r_s$ は次式で表される．

$$\frac{1}{r_s} = \frac{1}{V^3}\left[u^2\left(\xi_x\frac{\partial v}{\partial\xi} + \eta_x\frac{\partial v}{\partial\eta}\right) + uv\left(\xi_y\frac{\partial v}{\partial\xi} + \eta_y\frac{\partial v}{\partial\eta}\right) - uv\left(\xi_x\frac{\partial u}{\partial\xi} + \eta_x\frac{\partial u}{\partial\eta}\right) - v^2\left(\xi_y\frac{\partial u}{\partial\xi} + \eta_y\frac{\partial u}{\partial\eta}\right)\right] \tag{3-45}$$

(7) 混合粒径の取り扱い

混合粒径の粒度分布は，下図に示すような河床材料の粒径加積曲線を n 階層に分割し，各階層を代表粒径 d_k とその代表粒子の存在比率 p_k で表す．なお，下付き添字 k は k 階層の粒径階の物理量であること意味し，平均粒径 d_m は次式で定義される．

$$d_m = \sum_{k=1}^{n} P_k d_k \tag{3-46}$$

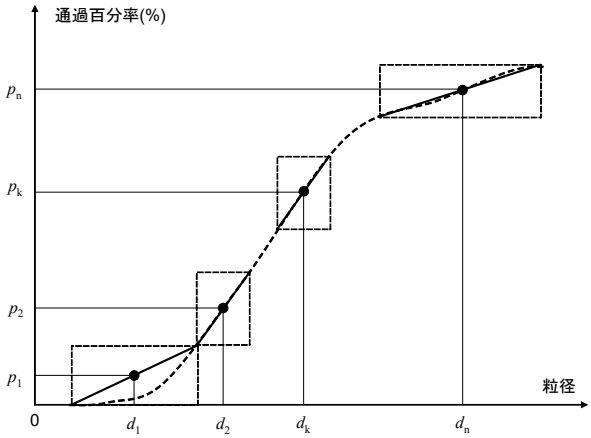


図 3.1　混合粒径の取り扱い（粒径加積曲線）

(8) 掃流砂量式

1) 単一粒径の場合

単一粒径の掃流砂量式は，以下の Meyer-Peter and Muller 式[21]を用いる．

$$q_b = 8(\tau_* - \tau_{*c})^{1.5}\sqrt{s_g g d^3}\, r_b \tag{3-47}$$

2) 混合粒径の場合

混合粒径の掃流砂量式は，勾配の影響を考慮した芦田・道上の式[22)23)24)]を用いる．

$$q_{bk} = 17 p_{mk} \tau_{*ek}^{1.5}\left(1 - K_c \frac{\tau_{*ck}}{\tau_{*k}}\right)\left(1 - \sqrt{K_c \frac{\tau_{*ck}}{\tau_{*k}}}\right)\sqrt{s_g g d_k^3}\, r_b \tag{3-48}$$

ここで，τ_{*k} は粒径別の無次元掃流力，τ_{*ck} は粒径別の無次元限界掃流力，τ_{*ek} は粒径別の有効無次元掃流力，p_{mk} は交換層における k 階層粒子の占有率であり，τ_{*ek} は以下のように求める．

$$u_{*em}^2 = \frac{V^2}{\left(6 + 2.5\ln\dfrac{h}{d_m(1+2\tau_{*m})}\right)^2}, \quad \tau_{*ek} = \frac{u_{*em}^2}{s_g g d_k} \tag{3-49}$$

ここで，s_g は砂礫の水中比重（≒1.65），下付き添字 m は平均粒径に対する物理量であることを意味する．

遮蔽効果を考慮した各粒径の無次元限界掃流力 τ_{*ck} には，Egiazaroff の式を修正した芦田・道上[22]の式を用いる．

$$\frac{\tau_{*ck}}{\tau_{*cm}}=\begin{cases}\left\{\dfrac{\log 19}{\log(19d_k/d_m)}\right\}^2 & (d_k/d_m \geqq 0.4)\\ 0.85\left(\dfrac{d_m}{d_k}\right) & (d_k/d_m < 0.4)\end{cases} \tag{3-50}$$

なお，τ_{*cm} は以下の岩垣の式[25]で求める．

$$\begin{aligned}
&0.3030 \leqq d && ;\quad u_{*c}{}^2 = 80.9d\\
&0.1180 \leqq d \leqq 0.3030 && ;\quad = 134.6d^{31/22}\\
&0.0565 \leqq d \leqq 0.1180 && ;\quad = 55.0d\\
&0.0065 \leqq d \leqq 0.0565 && ;\quad = 8.41d^{11/32}\\
&d \leqq 0.0065 && ;\quad = 226d
\end{aligned} \tag{3-51}$$

なお，上式の使用単位は *cm-s* である．

以上の式により求められた全流砂量を，流線曲率による二次流と河床勾配の影響を考慮して ξ，η 方向に変換する．渡邉ら[26]によれば，ξ，η 方向の掃流砂量は次式で与えられる．

$$\tilde{q}_{bk}{}^{\xi} = q_{bk}\left[\frac{\tilde{u}_b^{\xi}}{V_b} - \gamma\left(\frac{\partial z}{\partial \tilde{\xi}} + \cos\theta\frac{\partial z}{\partial \tilde{\eta}}\right)\right] \tag{3-52}$$

$$\tilde{q}_{bk}{}^{\eta} = q_{bk}\left[\frac{\tilde{u}_b^{\eta}}{V_b} - \gamma\left(\frac{\partial z}{\partial \tilde{\eta}} + \cos\theta\frac{\partial z}{\partial \tilde{\xi}}\right)\right] \tag{3-53}$$

ただし，$\tilde{u}_b^{\xi}$ および $\tilde{u}_b^{\eta}$ はそれぞれ ξ および η 方向の河床近傍の流速，V_b は河床近傍の合成流速，θ は ξ 軸と η 軸のなす角度である．

γ は斜面勾配による流砂の補正係数であり，長谷川[27]によれば次式で与えられる．

$$\gamma = \sqrt{\frac{\tau_{*ck}}{\mu_s \mu_k \tau_{*k}}} \tag{3-54}$$

ただし，μ_s および μ_k は河床材料の静止摩擦係数および動摩擦係数である．

(9) 流砂連続式

次式に，一般座標系におけるにおける流砂の連続式を示す．

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{c_m E_m}{J}\right) + \frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{z}{J}\right) + \frac{1}{1-\lambda}\left[\frac{\partial}{\partial \xi}\left(\frac{\sum q_{bk}{}^{\xi}}{J}\right) + \frac{\partial}{\partial \eta}\left(\frac{\sum q_{bk}{}^{\eta}}{J}\right)\right] = 0 \quad \cdots \quad E_{sd} \geq E_{be}\frac{c_m}{1-\lambda} \tag{3-55}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{z}{J}\right)=0 \quad \cdots \quad E_{sd} \le E_{be}\frac{c_m}{1-\lambda} \tag{3-56}$$

ただし，t は時間，c_m は交換層の土砂濃度，z は河床高，${q_{bk}}^{\xi}$，${q_{bk}}^{\eta}$ は ξ，η 方向の単位幅掃流砂量の反変成分，λ は河床材料の空隙率，E_m は交換層厚，E_{sd} は土層厚，E_{be} は平衡交換層厚である．なお，下付き添字 k は k 階層の粒径階の物理量であること意味する．

(10) 粒度連続式

混合粒径河床での分級現象を再現するため，芦田・江頭・劉ら[28]が提唱した多層モデルを採用した．これは，下図のように河床を掃流層，遷移層および堆積層に分割し，次式により粒度分布の時間変化を計算するものである．

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{c_m E_m P_{mk}}{J}\right)+(1-\lambda)P_{bk}\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{z}{J}\right)+\left[\frac{\partial}{\partial \xi}\left(\frac{{q_{bk}}^{\xi}}{J}\right)+\frac{\partial}{\partial \eta}\left(\frac{{q_{bk}}^{\eta}}{J}\right)\right]=0$$

$$\begin{cases} P_{bk}=P_{tk}, \ \dfrac{\partial z}{\partial t}\le 0, \ E_{sd}\ge E_{be}\dfrac{c_b}{1-\lambda} \\ P_{bk}=0, \ \dfrac{\partial z}{\partial t}\le 0, \ E_{sd}< E_{be}\dfrac{c_b}{1-\lambda} \\ P_{bk}=P_{mk}, \ \dfrac{\partial z}{\partial t}>0, \end{cases} \tag{3-57}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{E_{d1}p_{d1k}}{J}\right)-p_{dk}\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{E_{d1}}{J}\right)=0$$

$$\begin{cases} p_{dk}=0, & \dfrac{\partial z}{\partial t}<0 \\ p_{dk}=p_{mk}, & \dfrac{\partial z}{\partial t}>0 \end{cases} \tag{3-58}$$

ここに，p_{mtk} は掃流砂層内の粒径階 k の存在率，p_{dtk} は遷移層内の粒径階 k の存在率，p_{dmk} は交換層底面から m 番目の堆積層内の粒径階 k の存在率である．E_{be} は平衡交換層厚であり，以下の関係より求める．

$$\frac{E_{be}}{d_m}=\frac{1}{c_m\cos\theta(\tan\phi-\tan\theta)}\tau_{*m} \tag{3-59}$$

ここに，E_{sd} は土層厚，E_m は交換層厚であり，以下のようになる．

$$E_m=E_{be} \qquad E_{sd}\ge E_{be}\frac{c_m}{1-\lambda} \tag{3-60}$$

$$E_m=E_{sd}\frac{1-\lambda}{c_m} \qquad E_{sd}\le E_{be}\frac{c_m}{1-\lambda} \tag{3-61}$$

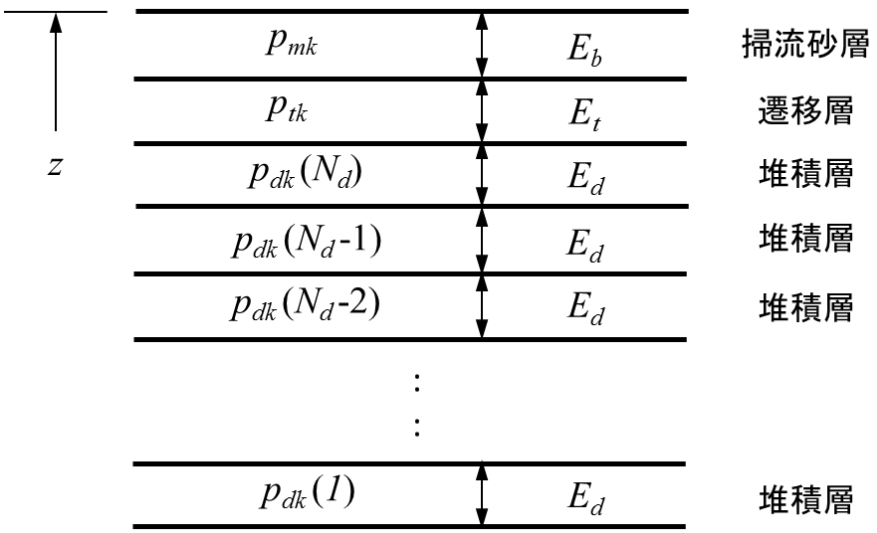


図 3.2　多層モデルの概念図

2.1.2 流砂トレーサー濃度

流砂トレーサーの移動を表現するモデルは，従来用いられている混合粒径の交換層モデル（平野モデル）[15]を利用した岩崎ら[13]によるモデルを用いた．このモデルは，流砂トレーサーを，着色した土砂のように他の土粒子とは区別可能であるが，土粒子の運動は他の土砂粒子と差がないものとして扱うモデルである．本モデルでは，交換層における流砂トレーサー体積濃度をf_mと定義し，交換層におけるトレーサー粒子の質量保存を考えることで，トレーサー濃度に関する支配方程式は以下のように導かれる．

$$(1-\lambda)\left(E_m\frac{\partial f_m}{\partial t}+f_I\frac{\partial z}{\partial t}\right)+\frac{\partial q_b f_m}{\partial x}=0 \tag{3-62}$$

$$f_I=f_m:\frac{\partial z}{\partial t}>0,\ f_I=f_t:\frac{\partial z}{\partial t}<0 \tag{3-63}$$

ここで，λ：空隙率，E_m：交換層厚，f_m：交換層におけるトレーサー濃度，f_I：交換層と遷移層の間のトレーサー濃度，z：河床高，t：時間，q_b：単位幅流砂量である．

2.2 流砂トレーサーモデルによる河床変動計算

2.2.1 計算条件

前節で構築した流砂トレーサーモデルにより，第 2 章で実施したトレーサー実験の再現検証を行った．計算条件は，実験条件を参考に予備通水後の河岸勾配を再現できるよう，動摩擦係数・静止摩擦係数を 0.9 とした．計算格子間隔は，流下方向 0.020m，横断方向 0.010m，計算時間間隔は 0.005sec とした．掃流砂量式は，実験における動的平衡の給砂量となるよう Meyer-Peter and Muller の係数を調整（8→3.97）して用いた．これは同じ M.P.M 型の Wong and Parker の式[29]と同様の式である．

交換層モデルでは，交換層厚 E_mは流砂量 q_b と流砂の平均移動速度 V_{qb} と密接に関係し，以下の関係にある[13]．

$$V_{q_b} = \frac{q_b}{(1-\lambda)\cdot E_m} \tag{3-64}$$

実験結果による流砂の平均移動速度 V_{qb}= 0.0028m/s をもとに，実験における給砂量＝流砂量 q_b として交換層厚を逆算すると E_m = 0.0084m となる．

一般に交換層厚は，d90 から最大粒径程度（平坦河床の場合）となるが，河床波が形成されている場合は，土砂の移動形態が複雑となり，河床波の波高が交換層を決定する目安[30]となる．小規模河床波が生じている場合は，小規模河床波の波高の 1/2 程度（平均水深の 2 割以下を目安）[30]とされており，実験結果における平均水深や河床波の形成傾向とも一致する．

また，今回の実験結果では，トレーサーの分散要因が複数あり，それらがトレーサーの移動速度に影響を与えていると考える．しかし，本研究で採用した流砂トレーサーのモデルは，交換層厚をコントロールボリュームとし，平衡流砂量により土砂の移動をモデル化しているため，土粒子移動のバラツキや掃流層と遷移層の鉛直方向の分散などが考慮されない．このため，平均的な流砂の移動速度から逆算した交換層厚を，計算領域全体に一様に設定することとした．

2.2.2 計算結果

計算結果について，図 3.3 に表層濃度コンター図の経時変化を，図 3.4 に表層濃度縦断分布の経時変化を示す．これらによると，時間経過とともにトレーサーが徐々に下流側に移動分散している．特に外岸側の方が分散が進行しており，実験結果の傾向と概略一致する．しかし，実験結果における分散状況を精度良く再現しているとは言えない．図 3.5 の計算結果の平均濃度距離と標準偏差の経時変化を示した図を見ても，500sec 後の平均濃度距離が実験結果・計算結果ともに約 1.5m 地点に到達しており，平均濃度の移動速度（到達距離）の再現はできたものの，表層濃度の絶対値や標準偏差を比較すると計算結果では実験結果ほど分散していない．これらは，前述のモデル特性によるものであり，本計算結果におけるトレーサー分散作用は，湾曲作用による掃流砂量の空間的変動と数値拡散による影響である．

平均濃度の移動速度については，交換層厚の設定に実験結果からの逆算値を使用しているため，一致して当然であり，移動速度が交換層厚の設定に依存してしまう問題が残っている．また，トレーサーの分散現象を物理的にモデルに組み込むには，流砂運動の確率性を考慮し平面的な分散作用を表現できるモデル[13]や，鉛直方向の分散作用[31]を考慮したモデルを採用する必要がある．

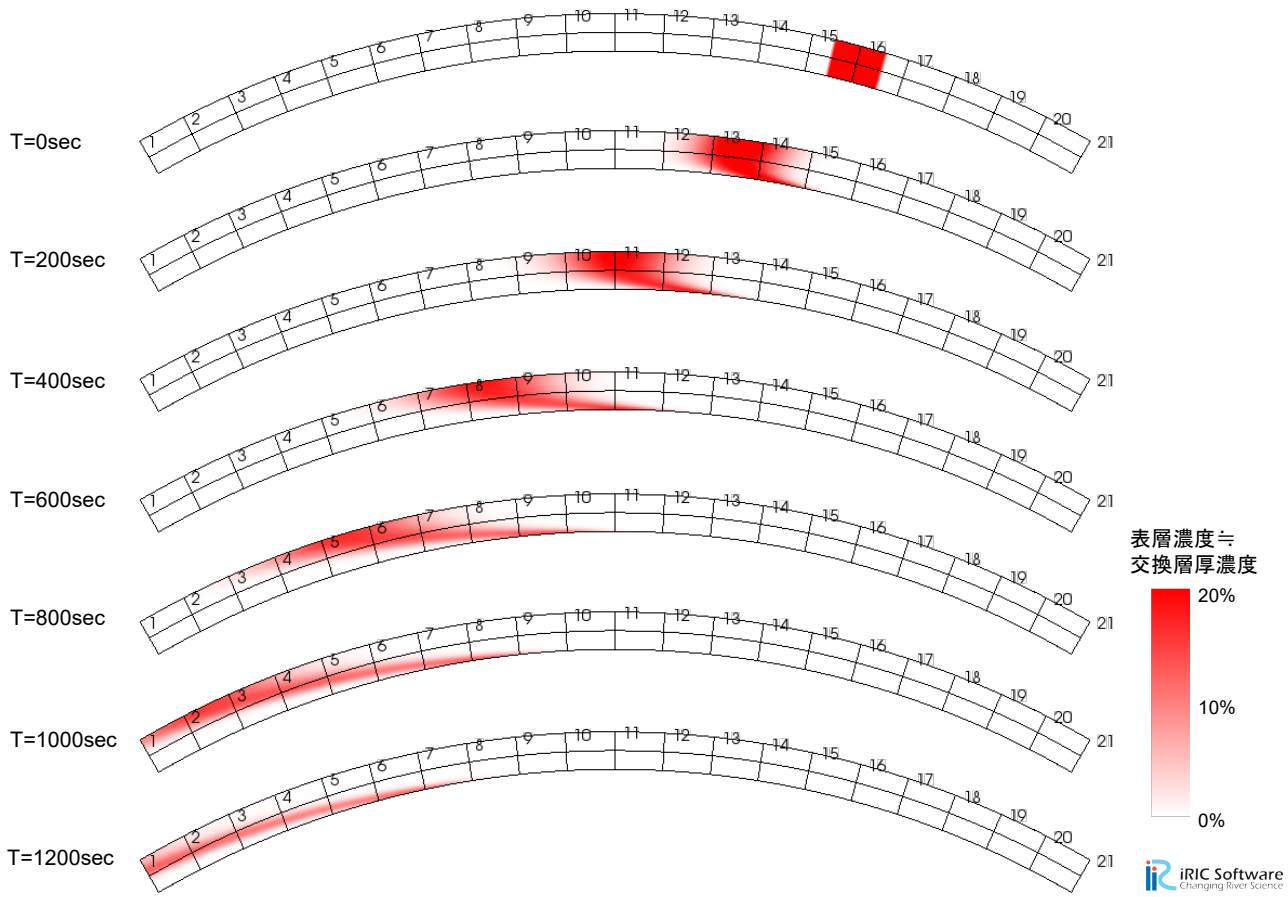


図 3.3　表層濃度コンター図（再現計算結果）

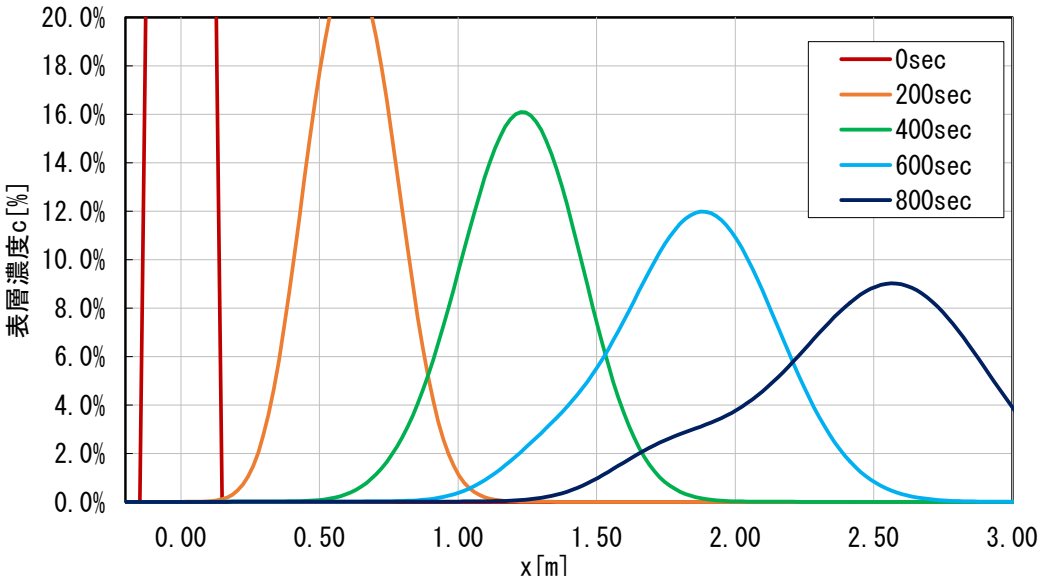


図 3.4　表層濃度の縦断分布（再現計算結果）

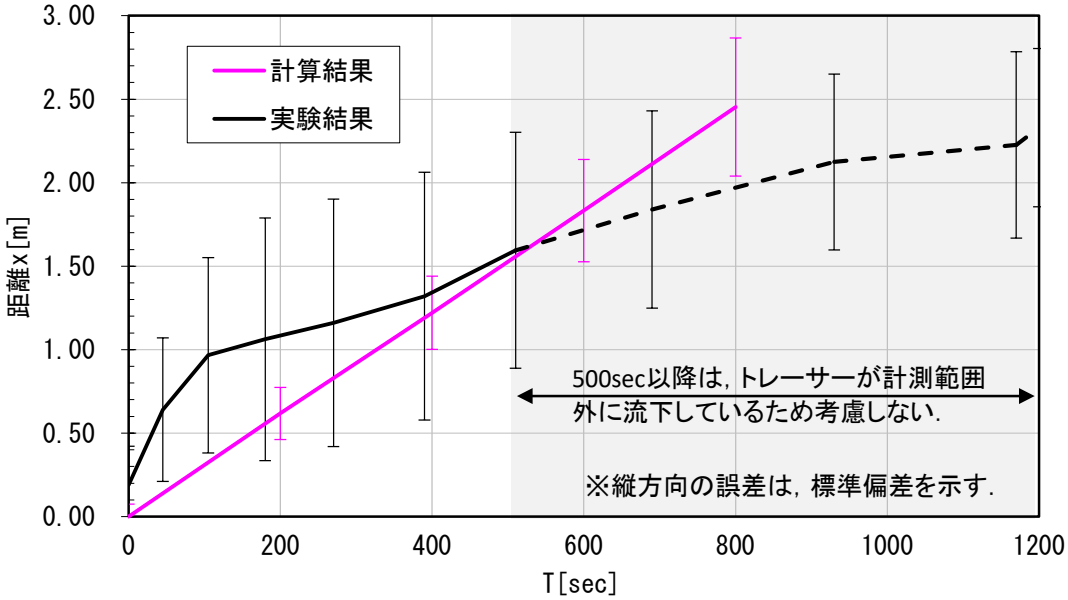


図 3.5　平均濃度移動距離と標準偏差の比較（実験結果と計算結果）

3. 鉛直分散を考慮した流砂トレーサーモデルの改良

3.1 鉛直分散を考慮したモデル改良

3.1.1 鉛直分散の考慮

前節の流砂トレーサーモデルは，均一粒径河床における土砂収支を，交換層モデルを基本として考え，着色砂のようなトレーサーの移動をオイラー的な観点からモデル化している．このとき，流砂トレーサーを移動させる掃流砂の移動は平衡流砂量式によりモデル化されているため，土粒子移動のバラツキや掃流層と遷移層の鉛直方向の分散などが考慮されない．このため，前節では，湾曲作用による掃流砂量の空間的変動や数値拡散による影響でしかトレーサー群が移動分散せず，流砂トレーサーの移動速度は交換層厚の設定に依存していた．

一方，交換層内の土砂移動は，河床変動がない動的平衡状態においても，下層と交換しながら移動していくことが知られており，著者らの実験においても鉛直方向の分散に起因する移動速度の変化と平面的な分散拡大が観測されている．しなしながら，一般的な交換層を用いたモデルにおいては，交換層と遷移層間の土砂移動は河床変動がある場合にしか生じず，このような土砂フラックスの交換を何らかの形でモデル化する必要がある．以下では，交換層と遷移層内に生じる土砂交換を，既往の研究[32, 33]を参考に比較的簡単な形で導入し（ここでは，鉛直分散モデルと称する），再現精度の向上を試みた．

3.1.2 鉛直分散モデルの改良

鉛直分散モデルでは，前節の流砂トレーサーモデルを改良し，図 3.6 に示すように交換層における水平方向のトレーサー粒子の質量保存に加え，交換層下部を流砂が移動することによって生じる交換層－遷移層間のトレーサー粒子の交換を考慮した．鉛直分散を考慮したトレーサー濃度に関する支配方程式を以下に示す．

$$(1-\lambda)\left(E_m \frac{\partial f_m}{\partial t} + f_I \frac{\partial z}{\partial t}\right) + \frac{\partial q_b f_m}{\partial x} + D \cdot f_m - E \cdot f_t = 0 \tag{3-65}$$

$$f_I = f_m : \frac{\partial z}{\partial t} > 0 \ , \ f_I = f_t : \frac{\partial z}{\partial t} < 0 \tag{3-66}$$

ここで，λ：空隙率，E_m：交換層厚，f_m：交換層におけるトレーサー濃度，f_I：交換層と遷移層の間のトレーサー濃度，f_t：遷移層におけるトレーサー濃度，z：河床高，t：時間，q_b：単位幅流砂量，D：交換層から遷移層への堆積量，E：遷移層から交換層への巻き上げ量である．

交換層と遷移層の土砂交換量である D，E は，図 3.6 のモデル概念図のように，交換層内を流砂が移動することによって生じる巻き上げ量 E と沈降量 D であり，通常異なる値となるが，ここではまず簡単のため平衡状態を考えて，E=D の関係にあるとする．そのため，交換層と遷移層間の土砂収支は常にバランスしており，河床高さの変化に対する影響はないが，交換層と遷移層のトレーサー濃度は異なるため，トレーサーの計算には影響する．本研究では，Turowski and Hodge[32]を参考に流砂量の関数として以下のようにモデル化する．

$$E = D = \frac{q_b}{\alpha \cdot ls}\left[1 - e^{-(1-\lambda)}\right] \tag{3-67}$$

ここで，α：モデル係数，ls：流砂の平均 step length である．このモデルは，遷移層から交換層への巻き上げが流砂の step length スケールで発生する pickup-rate と空隙率の関数として表現したモデルである．モデル係数の α は，流砂の分散度合いを示す定数であり，詳細な実験などから同定する必要がある．現時点では，このモデル定数を同定するデータが乏しいために，ここでは $\alpha = 1$ とする．また，ls は平均的な値として粒径の 100 倍とする．

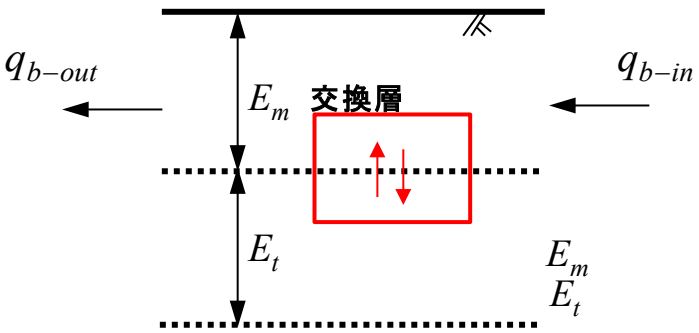


図 3.6　鉛直分散モデルの概念図

3.2 鉛直分散を考慮した流砂トレーサーモデルによる河床変動計算

3.2.1 計算条件

計算条件は，水路幅 B=0.2m，延長 L=5.24m，勾配 1/173，曲率半径 5.0m の湾曲水路とし，その他の条件は第 2 章の実験条件を参考に設定する．計算格子間隔等は，前節と同様に流下方向 0.020m，横断方向 0.010m，計算時間間隔は 0.005sec とする．

交換層モデルでは，交換層厚の設定が流砂の平均移動速度に大きく影響する．前節では実験で見られた小規模河床波が流砂トレーサーの河床における分散現象を支配しているとの考察より，トレーサーが巨視的に見れば小規模河床波スケールの層で移動していると見なして，実験結果による流砂トレーサーの平均移動速度をもとに交換層厚を逆算して設定していた．逆算値であるため，平均的な流砂トレーサーの移動速度は再現できているが，一般的な交換層厚の設定値（d90 から最大粒径程度）よりも大きな値となっていた．また，粒子の確率的挙動を含めていないため，交換層厚を大きくしても分散は実測より小さい値となっていた．

ここでは，交換層厚・堆積層厚をより一般的な値である粒径の 2 倍（層厚設定に係る任意性を排除）とし，小規模河床波と粒子の確率的挙動による流砂トレーサーの鉛直分散効果について，新たに導入した鉛直分散モデルでどの程度表現できるかを検討する．小規模河床波や粒子の確率的挙動は，平面二次元モデルやオイラー的な河床変動モデルでは考慮できないため，本研究のように鉛直分散を考慮する必要が生じる．

3.2.2 計算結果

上記の計算条件をもとに，鉛直分散を考慮しない場合と鉛直分散を考慮する場合について，第 2 章のの実験結果と比較した．図 3.7，図 3.8 に表層濃度コンター図の経時変化を，図 3.9 に表層濃度縦断分布の経時変化を示す．実験における表層濃度は，流砂トレーサーが移動しているものと静止しているものの両方が観測されたものであるため，計算においても交換層及び遷移層の両方に含まれるトレーサー量と比較する．これらによると，どちらのケースも時間経過とともにトレーサーが徐々に下流側に移動分散していく状況を表現しているが，図 3.9a（鉛直分散なし）の方が濃度波形の移動速度が速く，流下方向の分散も小さい傾向にある．例えば，実験結果を見ると 270sec の濃度分布のピークは，0.5 m 付近にあるが，計算では 200sec ですでに 2.5m 付近まで移動している．一方，図 3.9b（鉛直分散あり）ではその移動分散過程の中で，移動速度が速い成分（300sec 後には水路終点に到達）と，鉛直分散により投入地点付近に残る成分が表現されており，図 3.10 に示す実験結果の傾向に近い結果となっている．これは鉛直方向への分散効果を考慮したことにより，河床の中に潜り込むトレーサーの成分を表現できたためと思われる．ただし，200sec 以降では実験結果よりも濃度減少が大きくなっており，計算では移動速度が速い成分の影響で濃度変化も速くなっているものと考える．

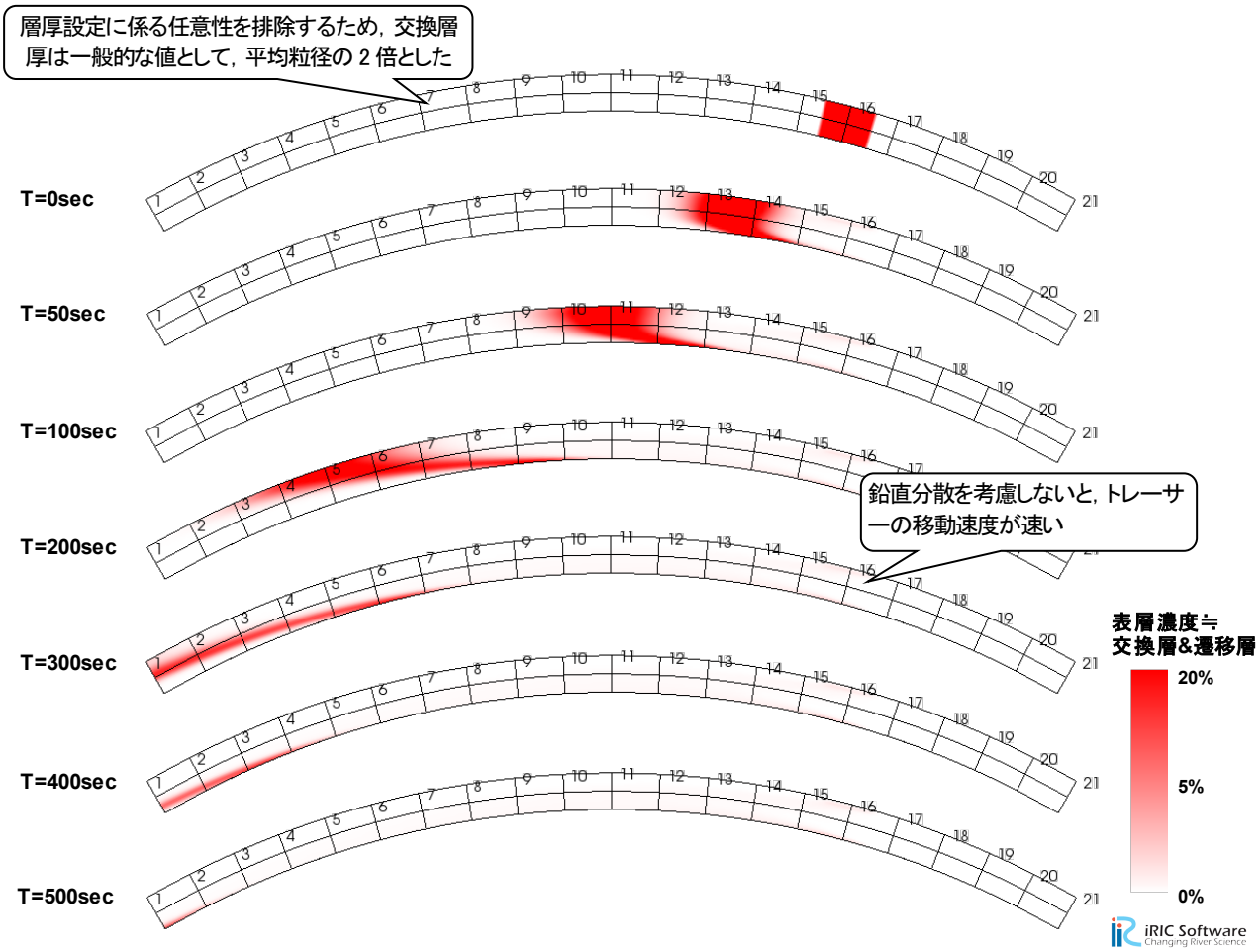


図 3.7　表層濃度コンター図（再現計算結果，鉛直分散なし）

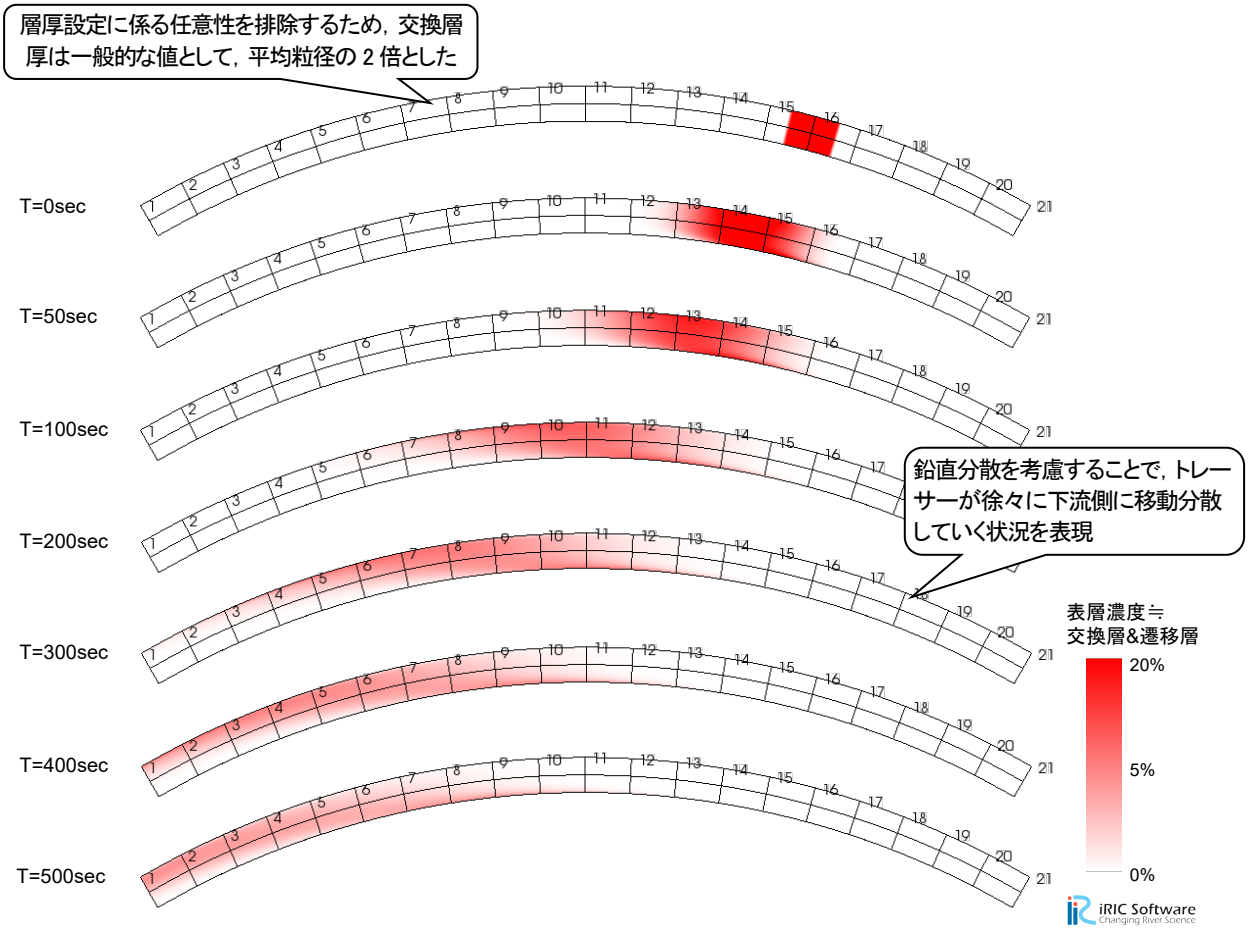


図 3.8　表層濃度コンター図（再現計算結果，鉛直分散あり）

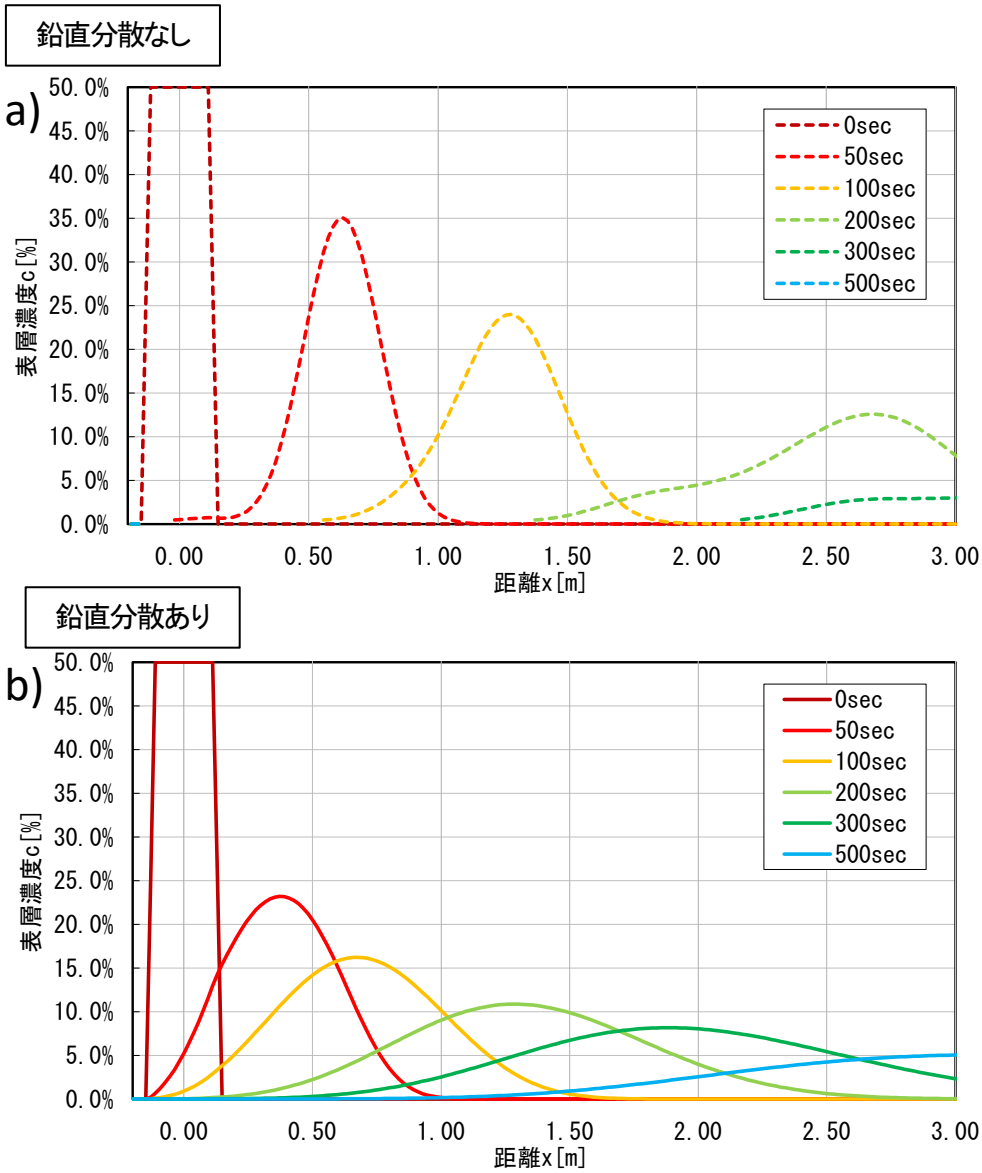


図 3.9　表層濃度の縦断分布（再現計算結果，a)鉛直分散なし，b)鉛直分散あり）

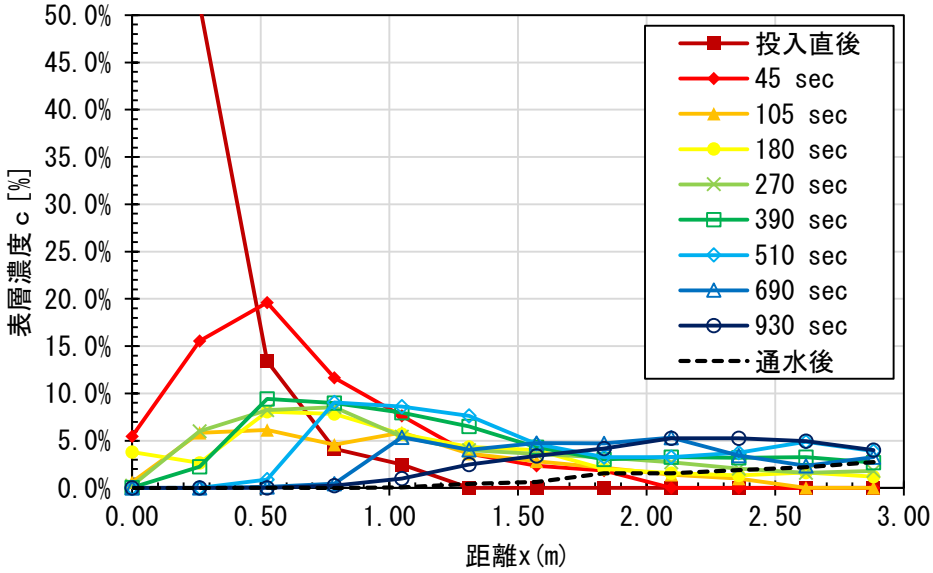


図 3.10　表層濃度の縦断分布（実験結果）

これらの移動分散現象を定量的に評価するために，この表層濃度に対して式(1)，(2)を使って平均濃度位置の上流端からの移動距離 $\bar{x}$ （以下，平均濃度移動距離）と標準偏差 σ を算出し，実験結果と比較する．移動速度は平均濃度移動距離の時間変化から求める．なお，実験結果では 500sec 後以降，計算結果の鉛直分散なしでは 200sec 後以降，鉛直分散ありでは 300sec 後以降には表層濃度のピークが計測範囲外に流下している．このため，主に 200sec までの計算結果と 500sec 後までの実験結果で比較する．

図 3.11a の移動速度の時間変化によると，鉛直分散なしでは実験値に対して移動速度が速すぎるのに対し，鉛直分散ありでは移動速度が約半分程度に低下し実験結果に近くなっている．

図 3.11b の標準偏差の経時変化では，やや鉛直分散ありのほうが大きくなっているが鉛直分散の有無で大きな差はなく，実験結果と比べ半分程度の値となっている．これは，実験ではトレーサー投入時の堰上げの影響等で 100～200sec 後までの移動速度が速いこと，計算では湾曲水路に起因する内岸と外岸の流速差が流砂トレーサーの平面的な分散に大きく影響したものと考える．

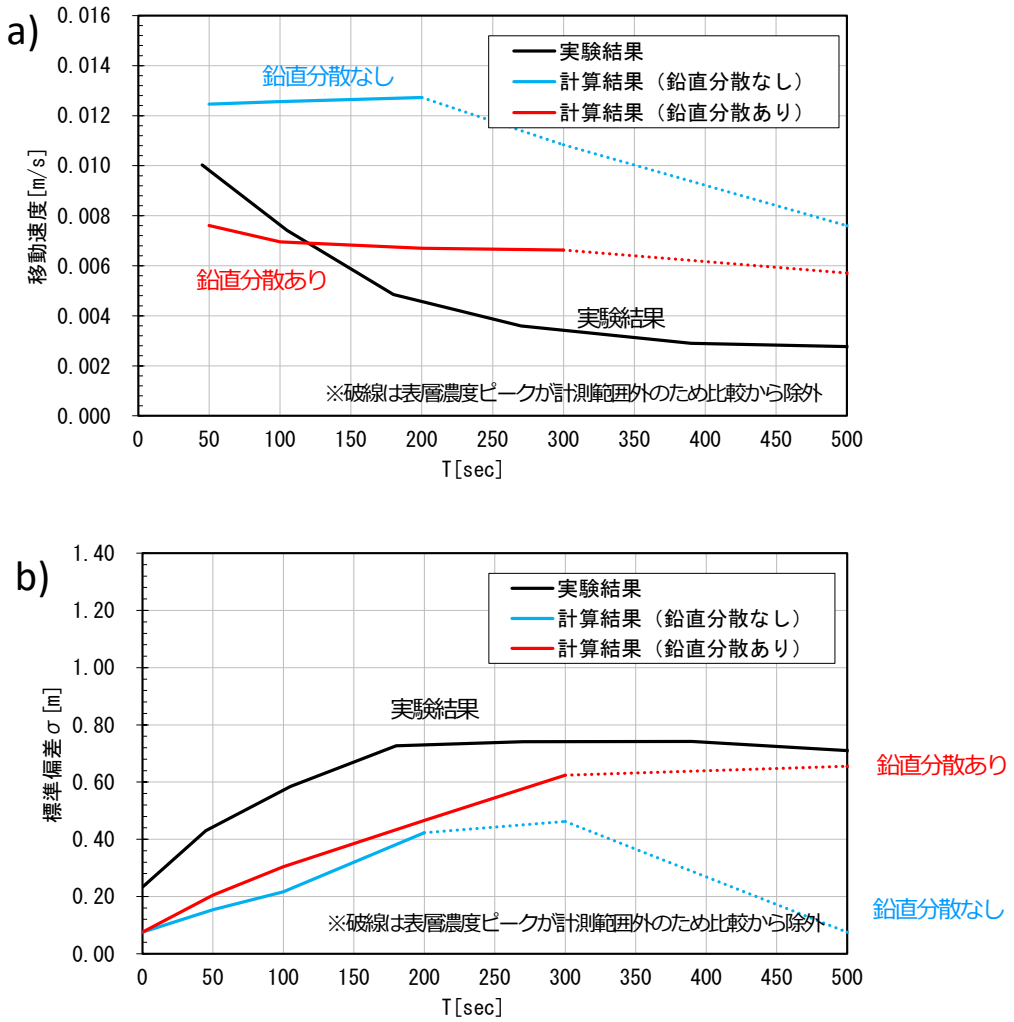


図 3.11　平均濃度の移動速度 a) と標準偏差 b) の時間変化（再現計算結果）

※表層濃度のピークが計測範囲画に流下するまで（200sec 後まで）の結果を比較

3.3 トレーサー実験の再現性に関するまとめ

一般的な交換層モデルを改良し，流砂トレーサーを考慮した平面 2 次元河床変動解析モデル構築することで，トレーサーの移動分散を可視化した．トレーサー実験結果から得られた平均的な流砂の移動速度から逆算した交換層厚を用い再現計算を行ったところ，表層濃度の平均移動速度は概ね再現できたが，分散状況は十分な精度の結果を得ることができなかった．

そこで，土粒子移動のバラツキの影響も大きいと考えるが，実験でも観測された交換層内における鉛直方向の分散に起因する移動速度変化と分散拡大に着目し，モデル改良を行った．

モデル改良は，水平方向のトレーサー粒子の質量保存に加え，交換層を流砂が移動することによって生じる交換層と遷移層間のトレーサー粒子の交換を考慮した．鉛直分散のモデル化及びモデル係数の設定に課題は残るものの，鉛直分散を考慮することにより，流砂トレーサーの移動分散状況をある程度表現可能とした．モデル係数や交換層厚（堆積層厚）の設定によって再現精度がさらに向上する可能性があるが，恣意的な精度向上となるためここでは行っていない．ただし，交換層厚や遷移層厚を大きくすることによってトレーサーの平均移動速度を遅くする効果がある．また，モデル係数 α を変化させ鉛直分散の効果を調整することで，平均移動速度や平面的な分散効果に影響を与えることができる．具体的には，鉛直分散を少なくすると上流側に残った成分が再度巻き上げられる量が減るため平面的な分散効果は大きくなる傾向にあり，鉛直分散を多くすると上流側に残った成分がすぐに巻き上げられるため，平面的な分散効果は小さくなる傾向（鉛直分散で堆積層に沈降してもすぐに巻き上げられる）にある．今回の実験では湾曲水路を用いており，湾曲による流速差が平面的な分散に大きく影響していることから，これらのモデル定数同定には，直線水路を用いて同様の着色流砂の追跡実験等を行う必要がある．

さらに，モデルの特性を把握するため，直線水路において鉛直分散の有無や顕著なトレーサー分散作用を持つ交互砂州の有無が流砂トレーサーの分散に与える影響について検討する．

4. 直線水路における鉛直分散モデルのモデル特性

4.1 計算条件

実河川に投入された置土からの流出土砂は，様々な影響を受けて移動分散していく．土砂を分散させる要因としては，粒子スケールの確率的な挙動から，湾曲等の影響による流れ・土砂移動の平面的な分布，河床波に起因する鉛直方向の分散等が複雑に関係している．前項の前述の再現計算では，安定河床形状を初期条件としているため，河床変動は発生しないが湾曲水路に起因する流速差が流砂トレーサーの平面的な分散に大きく影響している．この影響を排除し，さらに，モデルの特性を把握するため，前述の再現計算における平均水理量と同一の直線水路における図 3.12 のような一次元計算と二次元計算を行い，式(1)，(2)を用いてトレーサーの分散過程を比較する．ただし，式(1)，(2)の表層濃度 $c(x)$は，ここでは河床鉛直方向に積分した全トレーサー量とする．

一次元計算は一定勾配の平衡状態を想定したものであり，二次元計算では交互砂州が形成されるまで，一定時間河床変動計算を行った後にトレーサーを投入する．また，計算格子間隔に起因する数値分散の影響を極力排除するため，ここでの格子間隔は表 3.1 のように 1 次元計算で 0.0025m，2 次元計算で 0.01m となるように前節より細分化した．

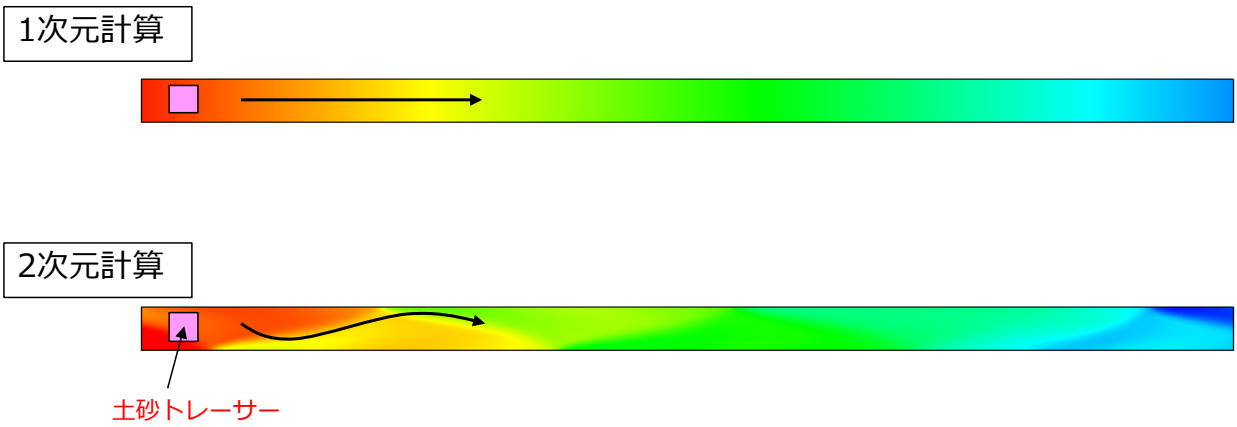


図 3.12　1 次元計算と 2 次元計算のイメージ

表 3.1　計算条件（モデル特性比較における格子間隔と計算時間間隔）

計算ケース	流下方向格子間隔	横断方向格子間隔	計算時間間隔
1 次元計算	0.0025m	－	0.002sec
2 次元計算	0.010m	0.010m	0.005sec

4.2 一次元計算における鉛直分散モデルの影響

図 3.13 に示す表層濃度の縦断分布の経時変化や，図 3.14 に示す流砂トレーサーの移動速度と標準偏差の時間変化によると，一次元の鉛直分散なし（青破線）では移動速度を一定に保ち，計算格子間隔に依存する数値拡散分以外ほぼ分散しないのに対し，一次元の鉛直分散あり（赤破線）では時間とともに標準偏差が拡大し，移動速度が徐々に低下する結果となっている．鉛直分散を考慮することで移動速度が約半分になっているが，これは交換層のみ（平均粒径の 2 倍）で移動していた土砂が，交換層+遷移層（平均粒径の 4 倍）で分散しながら移動しているためである．前述の湾曲水路の再現計算では鉛直分散なしでも 300sec 後まで標準偏差が拡大しているが，これは湾曲に起因する流速差の影響である．鉛直分散を考慮することで，流砂トレーサーの分散過程に大きな違いが発生するため，モデル係数 α の設定に課題が残るものの，平坦河床等比較的単調な河道条件下における流砂トレーサーの追跡精度の向上が期待される．

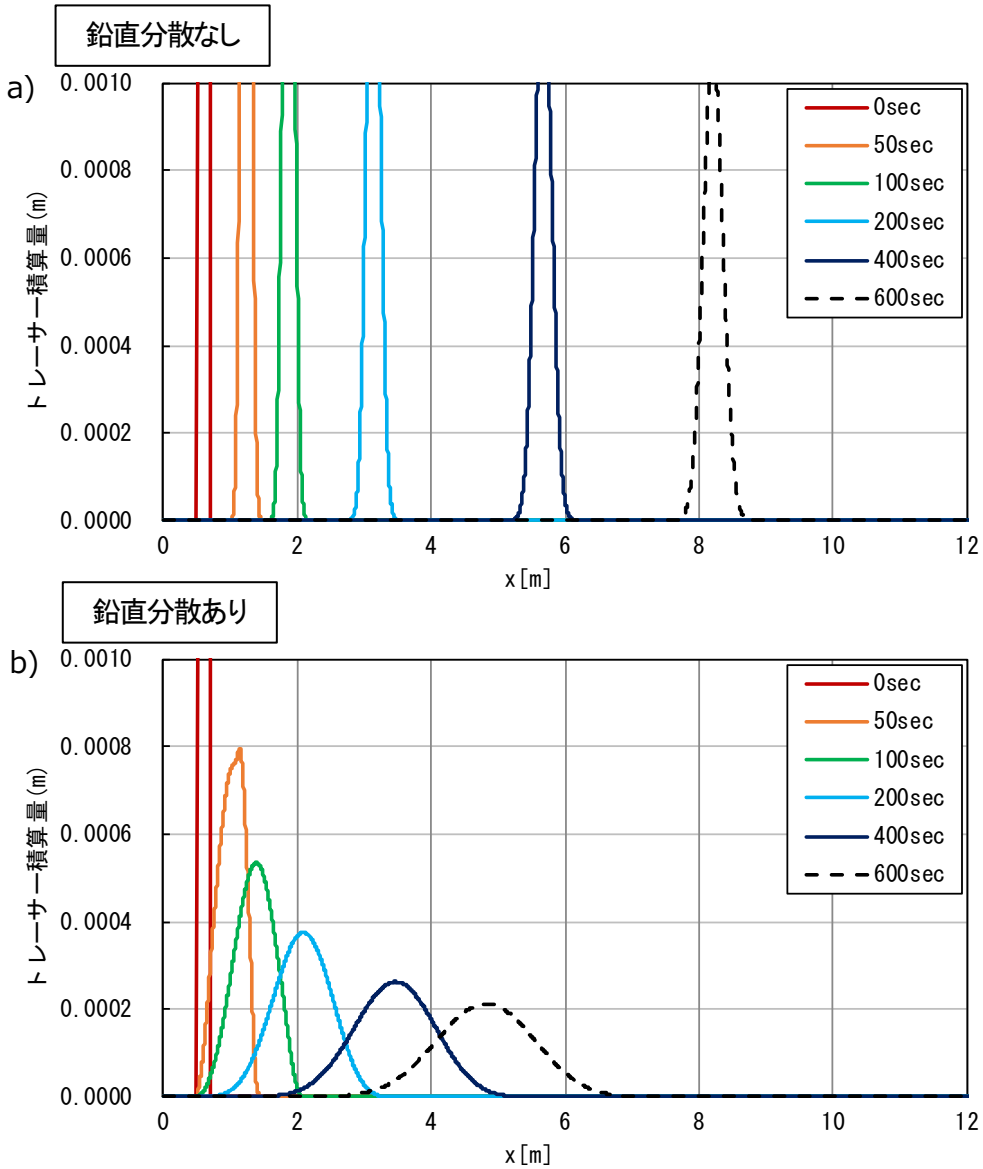


図 3.13　表層濃度の縦断分布（1 次元計算結果，a)鉛直分散なし，b)鉛直分散あり）

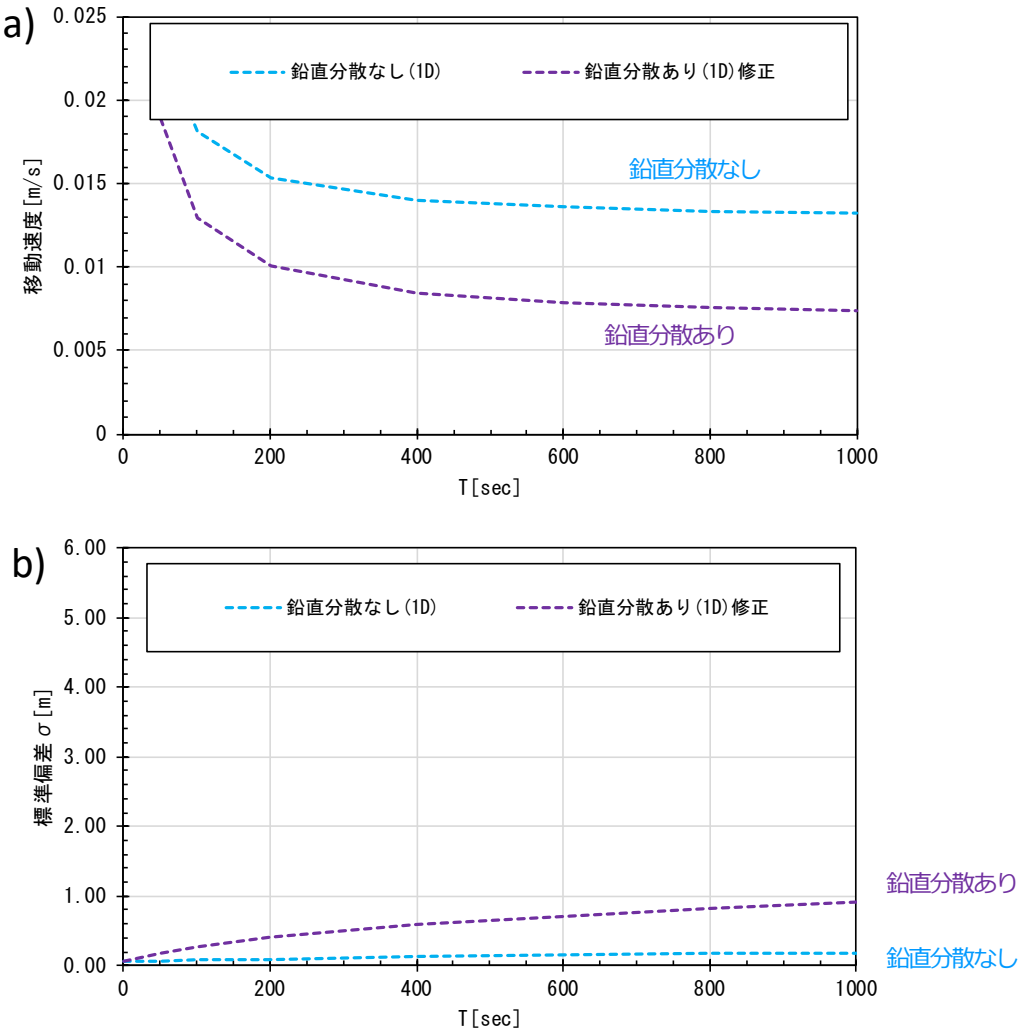


図 3.14　移動速度 a)と標準偏差 b)の時間変化（1 次元計算結果）

4.3 二次元計算における交互砂州の影響

図 3.15 に示す表層濃度の縦断分布の経時変化や，図 3.16 に示す流砂トレーサーの移動速度と標準偏差の時間変化によると，二次元計算では，一次元計算で見られたような両モデルにおけるトレーサーの移動速度の差は小さくなる一方，鉛直分散の有無にかかわらずどちらも分散が大きくなっている．

移動速度については，図 3.17 に示す二次元計算による交互砂州上の流砂トレーサーの計算結果に示すとおり，流砂トレーサーが砂州の前縁付近に集中し捕捉されるために全体的な移動速度が低下している影響である．

分散については，交互砂州の影響により，流れの集中部と堆積域ができるため，水みちに沿って流下しようとする成分と砂州上へ堆積しようとする成分が同時に発生する．この作用により，流下方向に対してトレーサー分布が引き伸ばされ，空間的な分散が促進されることになる．このため，1 次元計算ではほぼ分散しなかった鉛直分散なしでも分散が促進され，鉛直分散ありよりも分散が大きくなっている．これは，鉛直分散を考慮しない方が砂州表層を流下する流砂トレーサーが多く，比較的下流まで流砂トレーサーが到達した影響である．特に，交互砂州上では，鉛直分散の有無によらず砂州前縁にトレーサーが堆積した後，砂州移動に伴い埋没し動かなくなることで縦断方向の分散が促進される．鉛直分散を考慮するとトレーサーの移動速度が遅くなるので，下流側への影響も小さくなり鉛直分散を考慮しないほうが空間的な分散は強くなっている．

参考に，計算ケース毎の 2 次元計算による河床変動コンター図と流砂トレーサー量のコンター図を図 3.18，図 3.19，図 3.20 に示す．

このように，流砂トレーサーの移動分散には，交互砂州の移動など川幅スケールの動的な河床変動過程が大きく影響することが指摘[13)]されている．動的な河床変動が活発な場合には，粒子スケールの鉛直分散を考慮した効果は相対的に小さい．つまり，砂州や小規模河床波が形成される場合，それらの形成を数値解析モデルが再現できれば，鉛直分散を考慮する必要性は低くなる．一方，砂州や小規模河床波が発生しない場合，またはそれらを再現できないモデルを使う場合は，鉛直分散を考慮する価値が生じる．

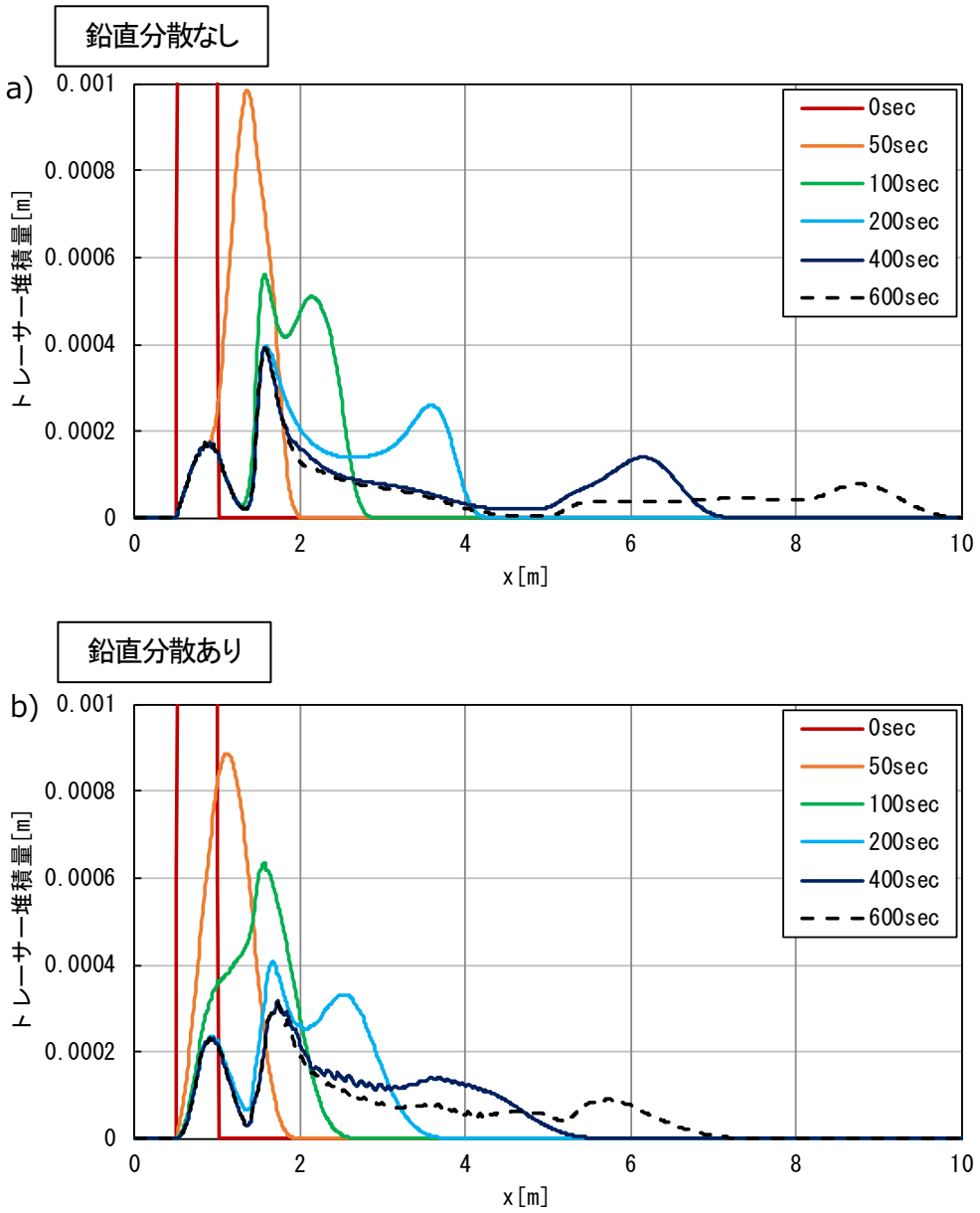


図 3.15　表層濃度の縦断分布（2 次元計算結果，a)鉛直分散なし，b)鉛直分散あり）

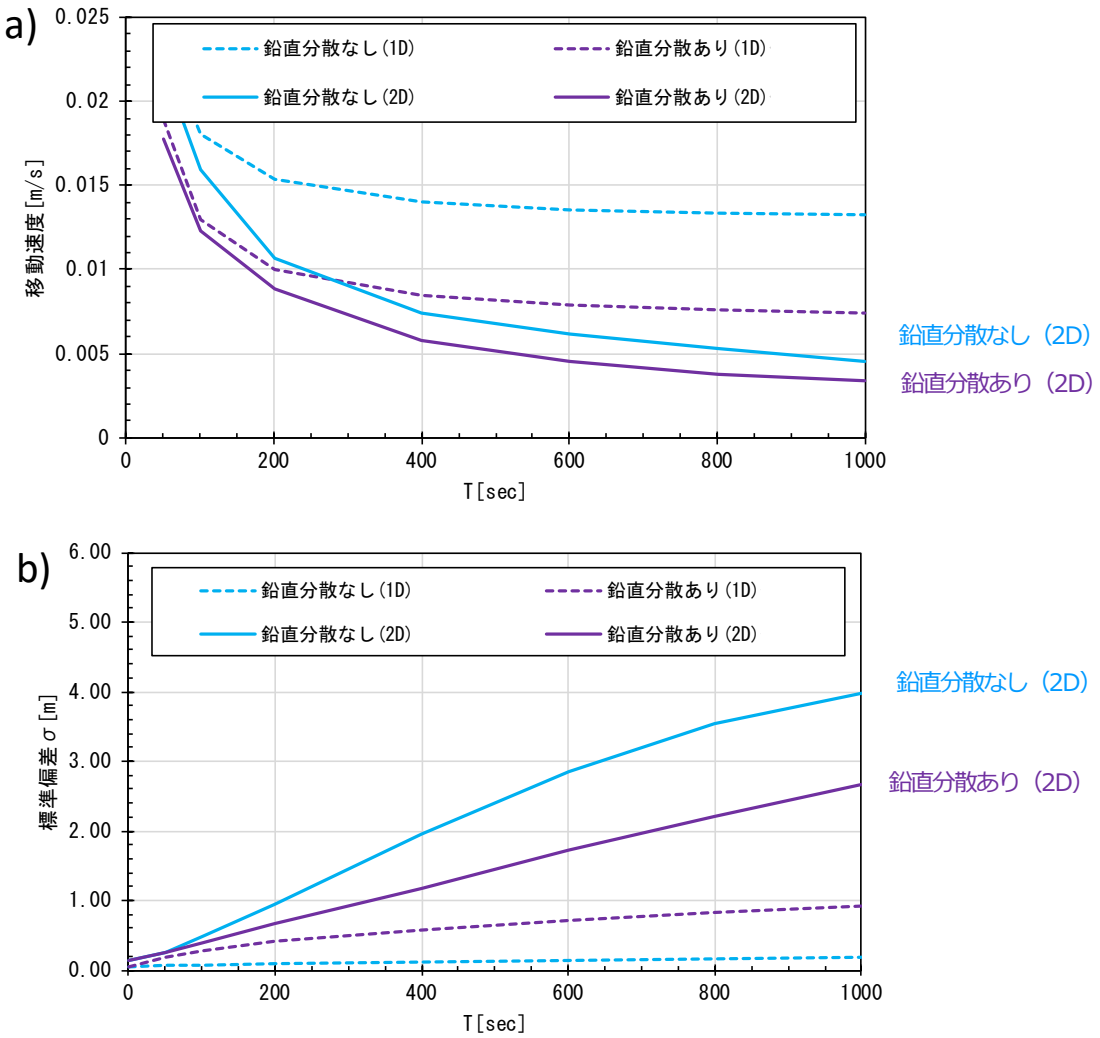
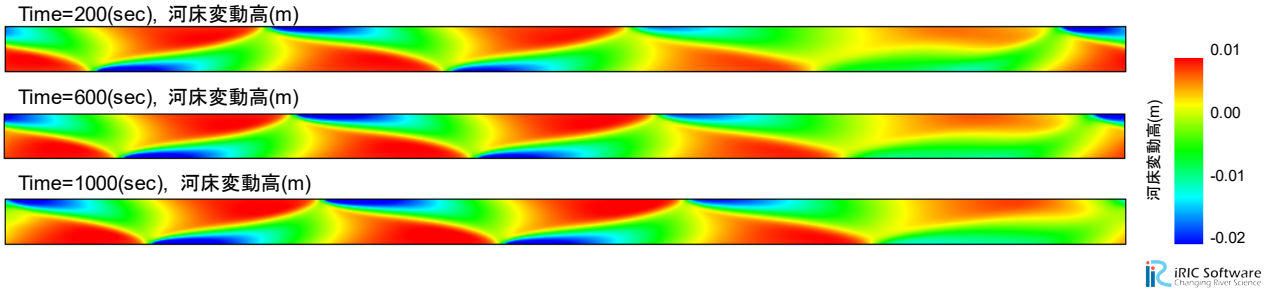
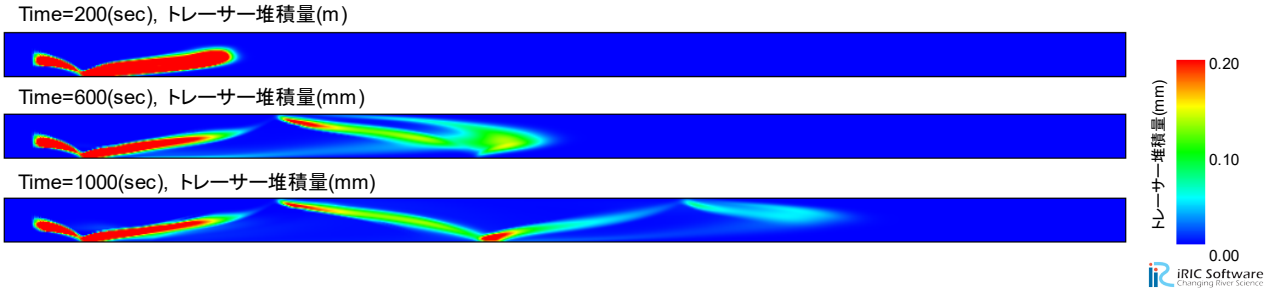


図 3.16　移動速度 a) と標準偏差 b) の時間変化（1 次元計算と 2 次元計算の比較）

■河床高コンター図



■トレーサー堆積量コンター図（鉛直分散あり）



■トレーサー堆積量コンター図（鉛直分散あり）

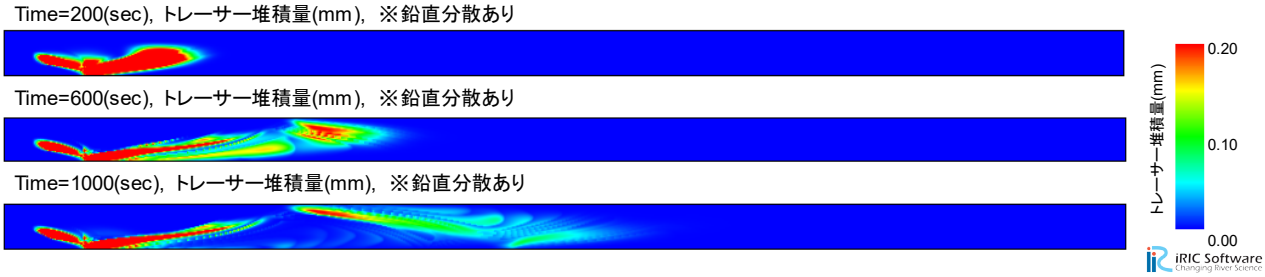


図 3.17　二次元計算による交互砂州上の流砂トレーサーの計算結果

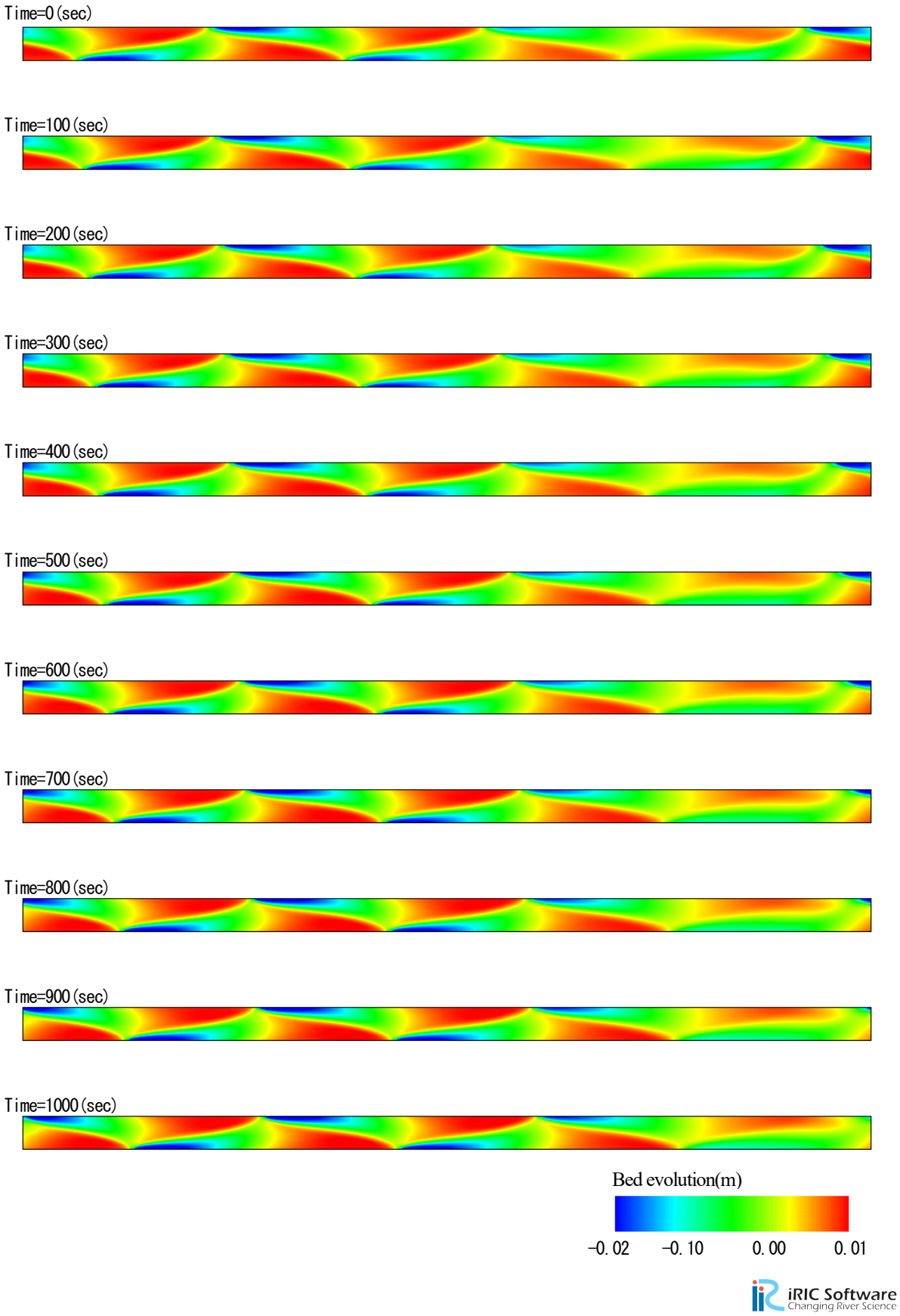


図 3.18　二次元計算による交互砂州の河床変動コンター図

※河床変動の結果は，鉛直分散の有無にかかわらず，同じ結果となる

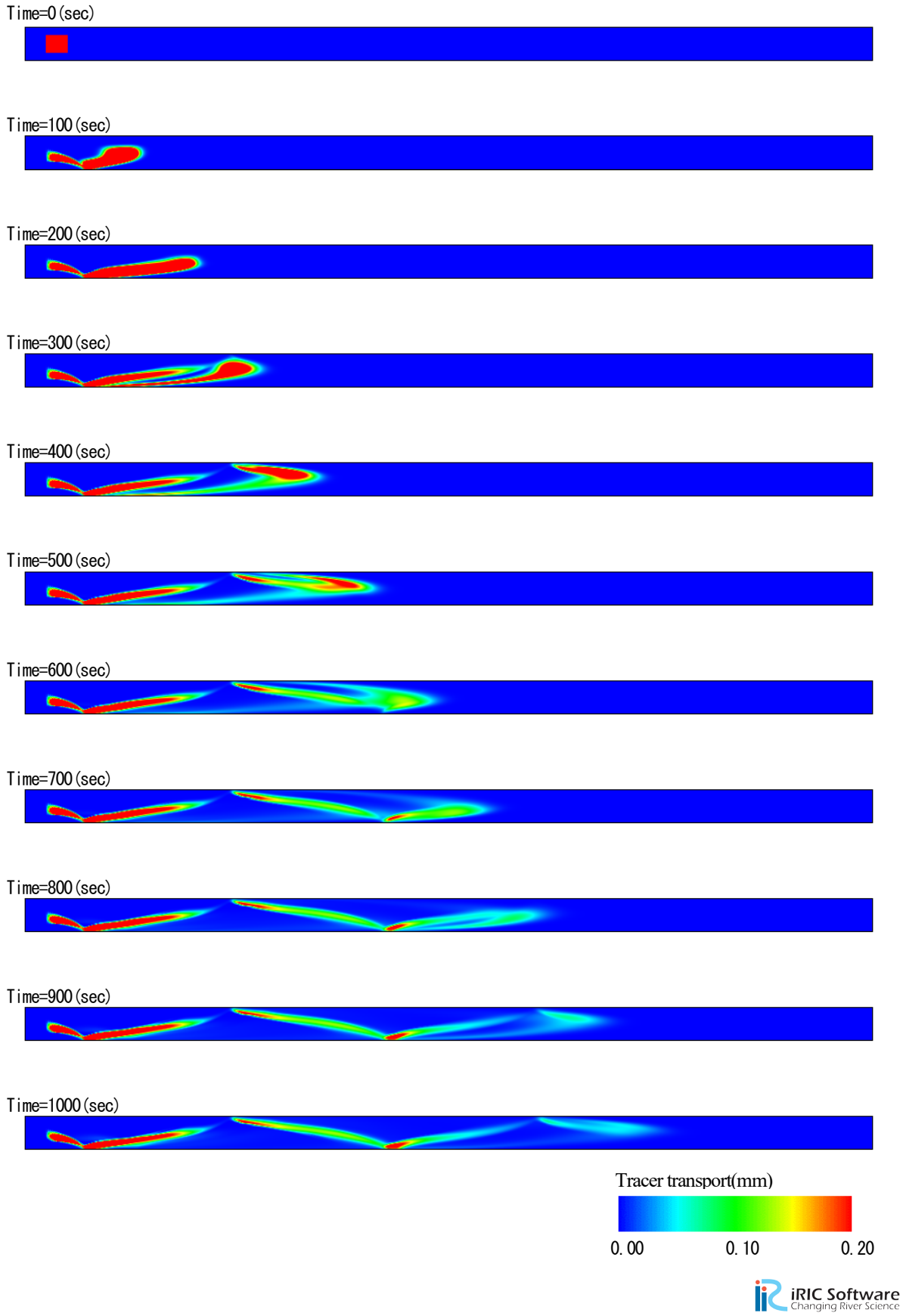


図 3.19　二次元計算による交互砂州上の流砂トレーサーの計算結果（鉛直分散なし）

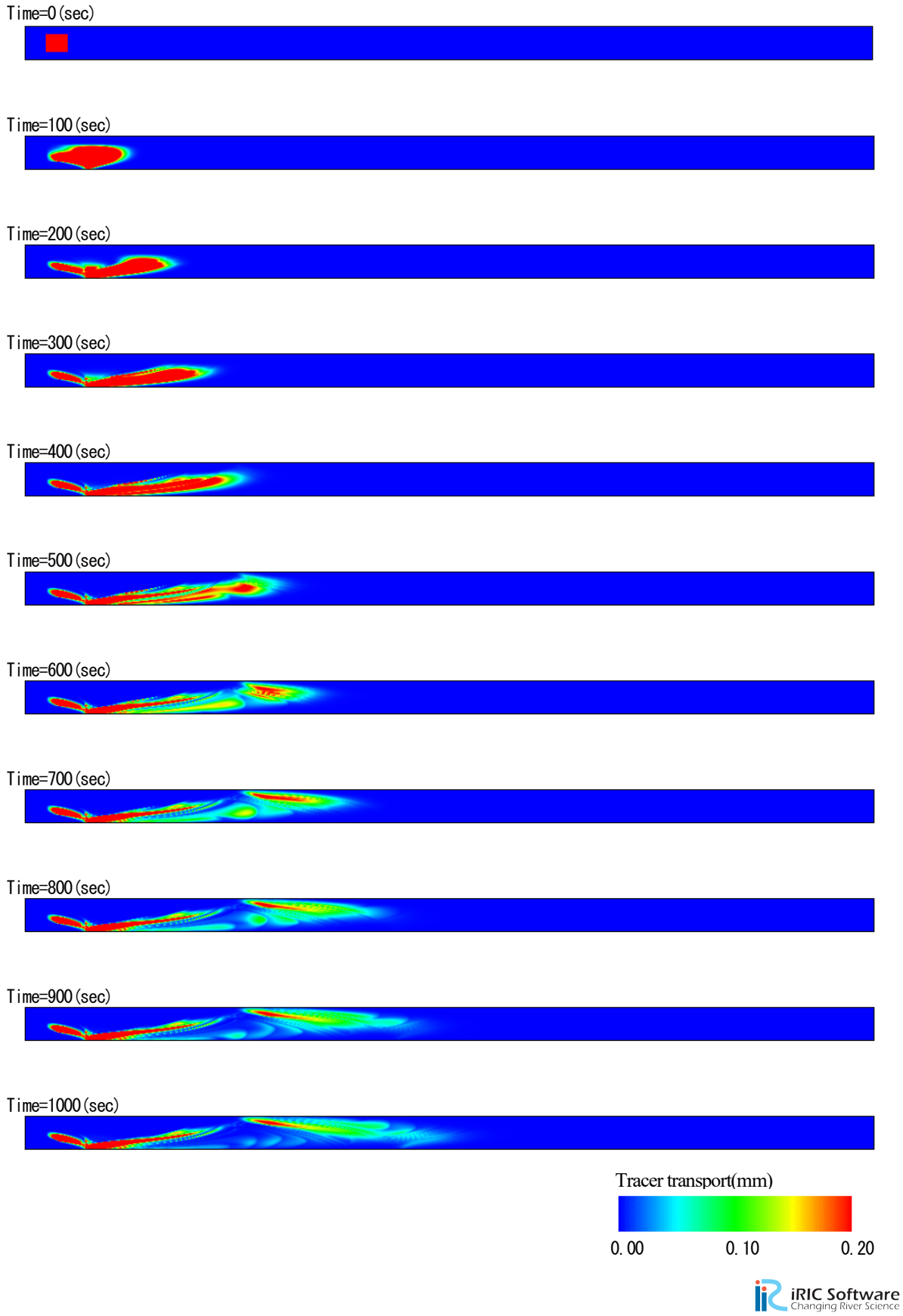


図 3.20　二次元計算による交互砂州上の流砂トレーサーの計算結果（鉛直分散あり）

5. 本章のまとめ

第3章では，トレーサー実験結果を再現対象として，一般的な交換層モデルを改良しトレーサー濃度を考慮した平面2次元河床変動解析モデル（流砂トレーサーモデル）を構築し，トレーサーの移動分散状況の再現を試みた．トレーサー実験結果から得られた平均的な流砂の移動速度から逆算した交換層厚を用い再現計算を行ったところ，表層濃度の平均移動速度は概ね再現できたが，分散状況は十分な精度の結果を得ることができなかった．これは，一般的な交換層モデルでは，平衡流砂量式をもとにモデル化されているため，土粒子移動のバラツキや掃流層と遷移層の鉛直方向の土砂移動（巻き上げと沈降）の影響などが考慮されず，トレーサーの移動速度が交換層厚の設定に依存してしまうことによるものである．

一方，交換層内の土砂移動は，河床変動がない動的平衡状態においても，下層と交換しながら移動していくことが知られており，実験でも同様の現象が観測されている．このことを踏まえ，鉛直方向の分散に起因する移動速度変化と分散拡大に着目し，モデルの改良を行った．モデル改良は，水平方向のトレーサー粒子の質量保存に加え，交換層を流砂が移動することによって生じる交換層と遷移層間の鉛直方向のトレーサー粒子の交換を考慮することとした．鉛直方向の分散のモデル化及びモデル定数の設定に課題は残っているが，鉛直方向の分散を考慮することにより，トレーサーの移動分散状況をある程度表現可能とした．

さらに，直線水路における1次元計算と2次元計算により交互砂州の有無がトレーサーの鉛直方向の分散に与える影響について比較検討した．これにより，トレーサーの移動分散は，交互砂州の移動など川幅スケールの動的な河床変動過程が支配的な場合の影響は相対的に小さくなるが，実験水路などの平坦河床やみお筋部が連続するような箇所等，比較的単調な河道条件下では再現性向上が期待できることがわかった．

第 4 章　IC タグを用いた実河川における砂礫追跡実験と計算モデルの現地適用性について

1. はじめに

河川における土砂動態のモニタリング手法として，IC タグ等の発信器を用いたトレーサー手法が数多く実施され，角ら[8)9)10)]や福島ら[11)]の研究があり，手法や特徴については第 1 章 2.2 で整理した.

第 4 章では，流砂トレーサーモデルの実河川における現地適用性を検証するため，実河川において IC タグ技術を用いた置き土土砂の追跡調査を実施し，実河川における土砂移動状況の把握を試みた.

2. IC タグ技術を用いた砂礫トレーサー追跡技術

ここでは，対象とした実河川の河道特性（平常時の低水路幅・水深，河床材料粒径 etc）を考慮し，図 4.1 のように IC タグを埋め込んだトレーサー材を増水前に河道内に設置し，出水により流下したトレーサー材を可搬型探知機による探査する手法を用いた.

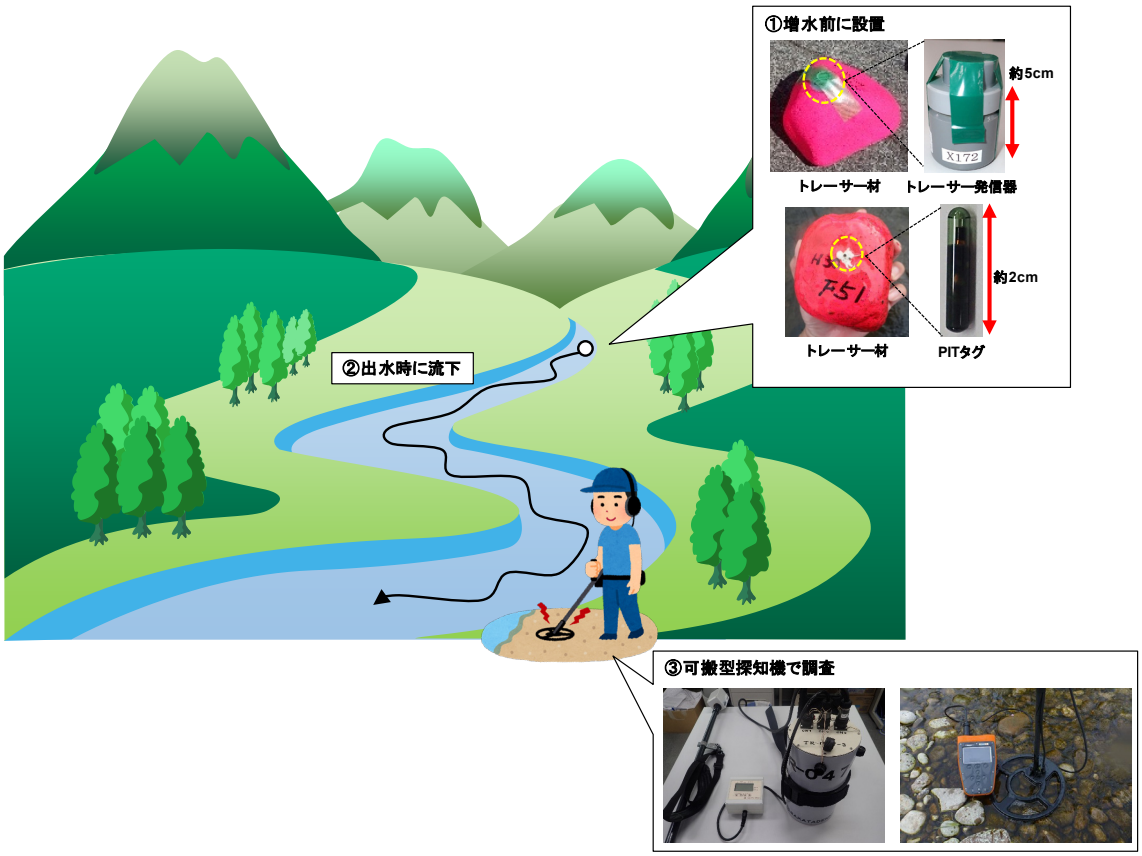


図 4.1　IC タグ技術を活用した砂礫追跡技術のイメージ

3. 実河川における砂礫トレーサー追跡調査

3.1 対象河川

置き土追跡調査の対象河川は，河床勾配 1/160，代表粒径 100～150mm，セグメント 1 の 1 級河川であり，近年河床低下が進行し問題となっている河川である．上流域ではダムや砂防堰堤が整備されていることに加え，対象区間の直上流 1～2km の区間で露岩箇所が点在しており，将来的な土砂供給の増加がほとんど見込めない区間である．特に河床低下に伴う 2 極化（最深河床高の低下，砂州上の樹林化）が問題となっており，河床低下対策が検討され置き土試験等が実施されている．

3.2 調査方法

3.2.1 IC タグトレーサー

IC タグトレーサーには，高価だが電池内蔵で探査範囲が広いアクティブ型（TR-052，大きさ約 5cm，探査範囲約 10m）と，安価だが電池非内蔵で探査範囲が狭いパッシブ型（HPT23，大きさ約 2cm，探査範囲約 0.3m）の 2 種類の IC タグを使用した．表 4.1 に使用した IC タグの諸元を，表 4.2 に使用した使用した IC タグの粒径と設置箇所を示す．

表 4.1　使用した IC タグの諸元

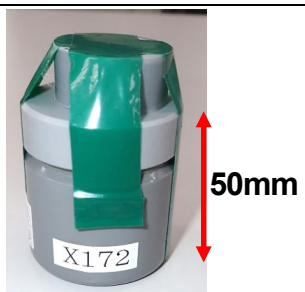
項目	アクティブ型	パッシブ型
型番	TR-052	HPT23
大きさ(mm)	φ46×H51	φ3.85×H23
周波数(kHz)	8～20	134.2
探査可能範囲	約10m	約0.15～0.30m
探査方法	可搬型探知機による直接探査	可搬型探知機による直接探査
電池	内蔵	非内蔵
有効期間	約2ヶ月	半永久
個体識別	個別ID設定可能	個別ID設定可能
設置方法	現地の最大粒径程度(d=200～300mm) の礫に埋込み	現地のD_{50}程度(d=50～150mm) の礫に埋込み
設置数	5	100
発信方法	増水により転倒することで発信開始	探知機から無線信号を受信してIDを伝送
トレーサー機器		
探査機器		
長所・短所	■長所 ・探査範囲が10m程度であり，発信マーカーを発見しやすい ■短所 ・比較的大きな礫にしか埋め込みできない ・電池が，移動開始後2～3か月しか持たない ・比較的高価	■長所 ・識別番号，位置情報を取得可能 ・電池ではないので半永久的に調査可能 ・小型なので平均粒径程度の礫にも設置可能 ・比較的安価 ■短所 ・接近しないと反応しないため，発見しにくい

表 4.2 (1)　使用した IC タグの粒径と設置箇所

No.	粒径(mm)			平均粒径	設置位置			品番	寸法	ID	備考
	長径	中径	短径	(mm)	X	Y	測線		(mm)		
1	313	241	215	253	-110101	-73748	KP20.8	TR-052	φ46×H51	W132	最大粒径φ=300mm程度
2	292	236	199	239	-110098	-73759	KP20.8			W133	〃
3	295	178	169	207	-110096	-73764	KP20.8			W134	〃
4	255	203	156	201	-110099	-73753	KP20.8			W136	最大粒径φ=200mm程度
5	238	175	109	166	-110094	-73768	KP20.8			X172	〃
6	213	142	94	142	-110186	-73781	SP20980	HPT23TM	φ3.85×H23	0018541F35	代表粒径φ=100～150mm程度
7	157	149	76	121	-110185	-73783	SP20980			0018541F36	〃
8	163	148	118	142	-110185	-73784	SP20980			0018541F37	〃
9	182	148	75	126	-110184	-73786	SP20980			0018541F38	〃
10	158	128	105	129	-110184	-73788	SP20980			0018541F39	〃
11	198	122	100	134	-110183	-73789	SP20980			0018541F3A	〃
12	148	128	87	118	-110183	-73791	SP20980			0018541F3B	〃
13	157	120	76	113	-110182	-73793	SP20980			0018541F3D	〃
14	146	132	82	116	-110181	-73795	SP20980			0018541F3E	〃
15	168	149	62	116	-110181	-73796	SP20980			0018541F3F	〃
16	158	128	97	125	-110100	-73749	KP20.8			0018541F40	〃
17	150	132	73	113	-110100	-73749	KP20.8			0018541F41	〃
18	158	139	82	122	-110100	-73750	KP20.8			0018541F42	〃
19	162	151	93	132	-110100	-73750	KP20.8			0018541F43	〃
20	153	131	79	117	-110100	-73750	KP20.8			0018541F44	〃
21	167	138	98	131	-110099	-73751	KP20.8			0018541F45	〃
22	158	107	58	99	-110099	-73751	KP20.8			0018541F46	〃
23	141	129	74	110	-110099	-73752	KP20.8			0018541F47	〃
24	154	144	78	120	-110099	-73752	KP20.8			0018541F48	〃
25	156	140	103	131	-110099	-73752	KP20.8			0018541F49	〃
26	164	116	103	125	-110099	-73754	KP20.8			0018541F4A	〃
27	153	128	86	119	-110099	-73754	KP20.8			0018541F4B	〃
28	138	118	64	101	-110099	-73754	KP20.8			0018541F4C	〃
29	133	118	93	113	-110099	-73755	KP20.8			0018541F4D	〃
30	150	127	63	106	-110099	-73755	KP20.8			0018541F4E	〃
31	142	128	85	116	-110099	-73756	KP20.8			0018541F4F	〃
32	141	119	82	111	-110098	-73757	KP20.8			0018541F50	〃
33	128	105	82	103	-110098	-73757	KP20.8			0018541F51	〃
34	164	121	66	109	-110098	-73758	KP20.8			0018541F52	〃
35	144	130	75	112	-110098	-73758	KP20.8			0018541F53	〃
36	125	106	68	97	-110098	-73760	KP20.8			0018541F54	〃
37	163	114	65	106	-110098	-73760	KP20.8			0018541F55	〃
38	174	122	66	112	-110098	-73760	KP20.8			0018541F56	〃
39	145	97	87	107	-110098	-73761	KP20.8			0018541F57	〃
40	135	115	86	110	-110097	-73761	KP20.8			0018541F58	〃
41	151	116	58	101	-110097	-73762	KP20.8			0018541F59	〃
42	159	108	65	104	-110097	-73762	KP20.8			0018541F5B	〃
43	148	113	81	111	-110097	-73763	KP20.8			0018541F5C	〃
44	145	102	90	110	-110097	-73763	KP20.8			0018541F5D	〃
45	132	123	69	104	-110097	-73764	KP20.8			0018541F5E	〃
46	136	122	55	97	-110096	-73764	KP20.8			0018541F5F	〃
47	115	103	85	100	-110096	-73765	KP20.8			0018541F60	〃
48	127	113	77	103	-110096	-73765	KP20.8			0018541F61	〃
49	120	112	95	108	-110096	-73766	KP20.8			0018541F62	〃
50	135	89	82	100	-110096	-73766	KP20.8			0018541F63	〃
51	123	113	56	92	-110095	-73766	KP20.8			0018541F64	〃
52	150	96	72	101	-110095	-73767	KP20.8			0018541F65	〃
53	132	113	67	100	-110095	-73767	KP20.8			0018541F66	〃
54	116	103	65	92	-110095	-73768	KP20.8			0018541F67	〃
55	139	98	66	97	-110095	-73768	KP20.8			0018541F68	〃

表 4.2 (2)　使用した IC タグの粒径と設置箇所

No.	粒径(mm)			平均粒径	設置位置			品番	寸法	ID	備考
	長径	中径	短径	(mm)	X	Y	測線		(mm)		
56	113	83	61	83	-110100	-73748	KP20.8			0018541F69	d50粒径以下φ=50～100mm程度
57	109	94	68	89	-110100	-73749	KP20.8			0018541F6A	〃
58	101	78	46	71	-110100	-73749	KP20.8			0018541F6B	〃
59	104	91	66	85	-110100	-73750	KP20.8			0018541F6C	〃
60	122	92	59	87	-110100	-73750	KP20.8			0018541F6D	〃
61	147	78	54	85	-110100	-73751	KP20.8			0018541F6E	〃
62	108	91	51	79	-110100	-73751	KP20.8			0018541F6F	〃
63	90	88	38	67	-110099	-73751	KP20.8			0018541F70	〃
64	106	85	66	84	-110099	-73752	KP20.8			0018541F71	〃
65	98	96	64	84	-110099	-73752	KP20.8			0018541F72	〃
66	95	83	66	80	-110099	-73754	KP20.8			0018541F73	〃
67	85	76	54	70	-110099	-73754	KP20.8			0018541F75	〃
68	106	79	56	78	-110099	-73755	KP20.8			0018541F76	〃
69	103	78	42	70	-110099	-73755	KP20.8			0018541F77	〃
70	93	88	45	72	-110099	-73756	KP20.8			0018541F78	〃
71	96	93	51	77	-110099	-73756	KP20.8			0018541F79	〃
72	99	87	53	77	-110098	-73757	KP20.8			0018541F7A	〃
73	106	85	36	69	-110098	-73757	KP20.8			0018541F7B	〃
74	106	94	75	91	-110098	-73758	KP20.8			0018541F7C	〃
75	116	77	63	83	-110098	-73759	KP20.8			0018541F7D	〃
76	88	83	54	73	-110098	-73759	KP20.8			0018541F7E	〃
77	102	82	51	75	-110098	-73760	KP20.8			0018541F7F	〃
78	97	63	43	64	-110098	-73760	KP20.8			0018541F80	〃
79	94	71	53	71	-110098	-73761	KP20.8			0018541F81	〃
80	97	81	48	72	-110097	-73761	KP20.8			0018541F83	〃
81	98	91	65	83	-110097	-73762	KP20.8			0018541F84	〃
82	108	89	41	73	-110097	-73762	KP20.8			0018541F85	〃
83	102	52	39	59	-110097	-73763	KP20.8			0018541F86	〃
84	92	77	68	78	-110097	-73763	KP20.8			0018541F87	〃
85	117	101	59	89	-110097	-73763	KP20.8			0018541F88	〃
86	102	78	45	71	-110096	-73765	KP20.8			0018541F89	〃
87	67	64	48	59	-110096	-73765	KP20.8			0018541F8A	〃
88	96	71	43	66	-110096	-73766	KP20.8			0018541F8B	〃
89	76	58	29	50	-110096	-73765	KP20.8			0018541F8C	〃
90	97	77	41	67	-110095	-73766	KP20.8			0018541F8D	〃
91	104	82	35	67	-110095	-73766	KP20.8			0018541F8E	〃
92	110	76	66	82	-110095	-73767	KP20.8			0018541F8F	〃
93	88	66	56	69	-110186	-73782	SP20980			0018541F90	〃
94	102	91	48	76	-110185	-73784	SP20980			0018541F91	〃
95	104	83	34	66	-110184	-73785	SP20980			0018541F92	〃
96	105	74	59	77	-110184	-73787	SP20980			0018541F93	〃
97	92	86	52	74	-110184	-73789	SP20980			0018541F94	〃
98	106	69	35	63	-110183	-73790	SP20980			0018541F95	〃
99	101	66	35	62	-110183	-73792	SP20980			0018541F96	〃
100	81	66	43	61	-110182	-73793	SP20980			0018541F97	〃
101	78	59	36	55	-110181	-73795	SP20980			0018541F98	〃
102	108	68	36	64	-110180	-73797	SP20980			0018541F99	〃
103	87	69	42	63	-110095	-73768	KP20.8			0018541F9A	〃
104	88	65	35	58	-110095	-73768	KP20.8			0018541F9B	〃
105	98	63	53	69	-110095	-73768	KP20.8			0018541F9C	〃

3.2.2 設置方法

設置方法は，以下の手順で実施した．図 4.2 に①～⑤の作業状況を示す．

① 現地材料の採取・洗浄・削孔

② 蛍光塗料で着色

③ IC タグの埋め込み

④ ID の記載

⑤ 粒径の計測記録

⑥ 現地横断測線上への設置

現地材料は最大粒径程度(d=200～300mm)の礫を 5 個，D_{50}～代表粒径程度(d=50～150mm)の礫を 100 個採取し，IC タグの大きさを考慮して，最大粒径程度の礫にアクティブ型を，D_{50}～代表粒径程度の礫にパッシブ型を図 4.3，図 4.4 のように埋め込んだ．

設置測線は，設置後の横断変化を把握するため，経年的に測量されている大横断測量断面と，置き土箇所の直近の測量測線の 2 測線とした．図 4.5，図 4.6 に設置状況を，図 4.7，図 4.8 に配置平面図を示す．地域住民の利用が盛んな箇所であったため，第 3 者による不用意な改変を予防するため，すべて水中に設置するとともに，図 4.9 のように看板等を設置した．

図 4.2　トレーサー材の製作作業状況（粒径 50mm～150mm 程度）

図 4.3　発信トレーサー（アクティブ型）

図 4.4　発信トレーサー（パッシブ型）

図 4.5　トレーサー材の動作確認・設置状況

図 4.6　トレーサー材の設置状況

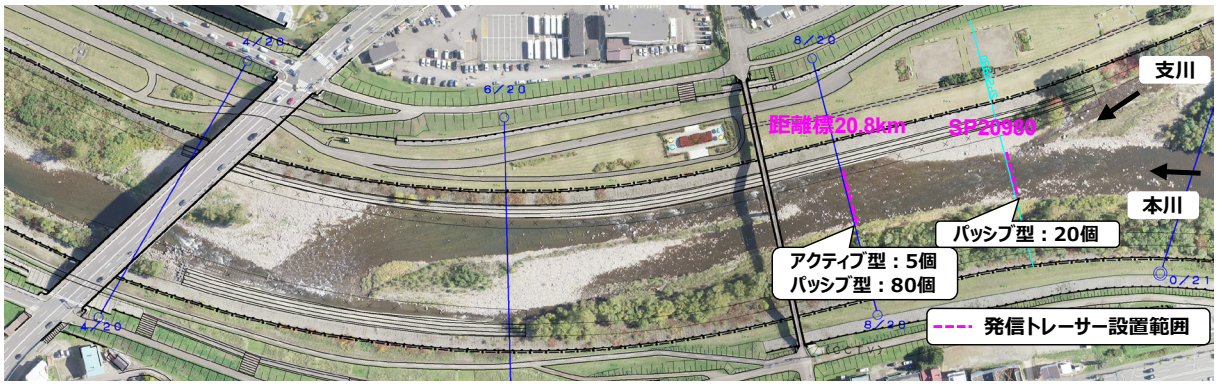


図 4.7　トレーサー配置平面図

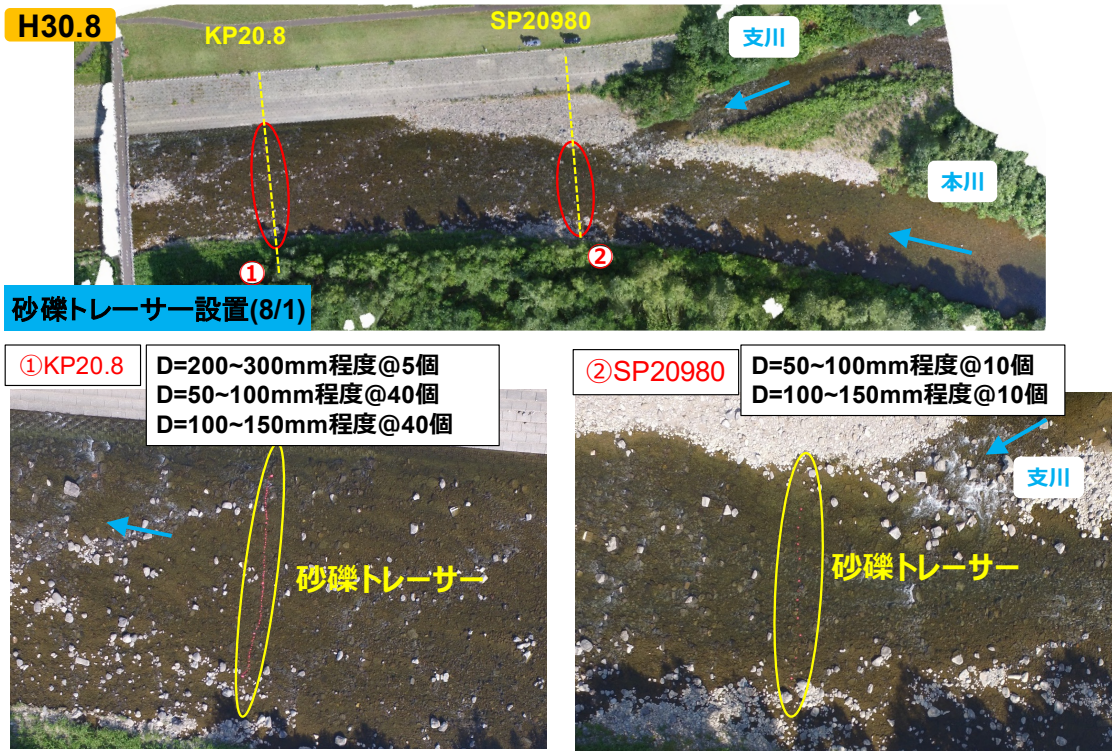


図 4.8　トレーサー配置平面図（拡大）

図 4.9　調査中看板の設置

3.2.3 調査方法

調査方法は，出水後に現地を徒歩により踏査し，図 4.10 のように IC タグの探知機を用いて直接捜索し，発見した発信トレーサーの識別 ID と GPS 情報を記録した．パッシブ型の発信トレーサーは，接近しないと反応しないため徒歩で踏査する必要があるが，探査機器は防水仕様となっていないため澪筋など水深の深い箇所での調査は不十分となっている．

発信トレーサーは 8 月に設置し，9 月に平均年最大流量以上の出水があったため，10 月に調査を行った．

図 4.10　トレーサー材の追跡調査状況

3.3 調査結果

3.3.1 発見状況

調査の結果，表 4.3 に示すように最大粒径程度のアクティブ型は 5 個中 4 個，D_{50}～代表粒径程度のパッシブ型は 100 個中 10 個を発見した．パッシブ型の発見率が低かった要因として，探査可能範囲が 0.15～0.30m と小さいため，砂州中に深く埋没したトレーサーや水深の深い箇所に堆積したトレーサーは発見できなかったことが挙げられる．

また，発見した発信トレーサーは，図 4.11 のように表面の塗装と記載した ID が摩耗によりほとんど剥げており，探査機を用いなければ ID の識別が不可能な状態であった．

表 4.3　発見した発信トレーサーの移動距離

No.	設置測線	粒径 (mm)	移動距離 (m)	発見箇所	形式※	備考
1	20.8km	253	7	水深1m以上	A	最大粒径程度
2	20.8km	239	142	水深1m以上	A	最大粒径程度
3	20.8km	207	393	水深1m以上	A	最大粒径程度
5	20.8km	166	48	水深1m以上	A	最大粒径程度
34	20.8km	109	63	水深1m未満	P	代表粒径程度
49	20.8km	108	197	砂州上	P	代表粒径程度
61	20.8km	85	309	砂州上	P	D_{50}粒径程度
82	20.8km	73	173	砂州上	P	D_{50}粒径程度
104	20.8km	58	160	砂州上	P	D_{50}粒径程度
9	SP20980	126	2	水深1m未満	P	代表粒径程度
10	SP20980	129	59	水深1m未満	P	代表粒径程度
11	SP20980	134	215	砂州上	P	代表粒径程度
12	SP20980	118	248	砂州上	P	代表粒径程度
96	SP20980	77	217	砂州上	P	D_{50}粒径程度

■アクティブ型

■パッシブ型

図 4.11　発見した発信トレーサーの状況

3.3.2 トレーサーの移動経路と移動距離

図 4.12 に発信トレーサーの発見場所と移動経路，図 4.13 に発見した発信トレーサーの粒径と移動距離（直線距離）の関係を示す．図 4.12 は発見した発信トレーサーの移動経路を直線で表示したものである．移動経路は出水前後の位置情報しか分からないため，設置時と発見時の位置を直線で結んでいる．図 4.13 のプロットの右側の数値は ID 識別 No.である．

トレーサーの発見された位置を比較すると，最大粒径程度のトレーサーの全てが水中部または水際で発見されており，砂州上で発見されなかった．一方，平均粒径程度のトレーサーは 10 個中 7 個が砂州上で発見された．このことから，今回の出水において，最大粒径程度の礫はみお筋部を移動し，平均粒径程度の礫はみお筋だけでなく，砂州の上も移動したことが伺える．

移動経路に着目すると，河道中央から左岸側に設置した IC タグは比較的直線的に流下し KP20.6 の砂州に堆積したものが多く発見されている．一方，左岸側（No.3），右岸側（No.61）に設置した IC タグは，主流部を流れたことによって比較的移動距離が長くなったと考える．

粒径と移動距離の関係は，粒径が小さいほど移動距離が増加すると想定していたが，粒径と移動距離に明確な傾向は見えなかった．特に，粒径の大きいアクティブ型の No.3 が最も移動距離が長くなっており，事前の想定とは異なる結果となった．この要因として，距離標 20.4km より下流では，みお筋部の水深が深く，そこにパッシブ型のトレーサー（平均粒径程度）が堆積しても，センサーが反応せず発見できなかった可能性もあるが，前述の移動経路での傾向のように設置箇所の流況が移動距離に大きく影響している可能性が挙げられる．

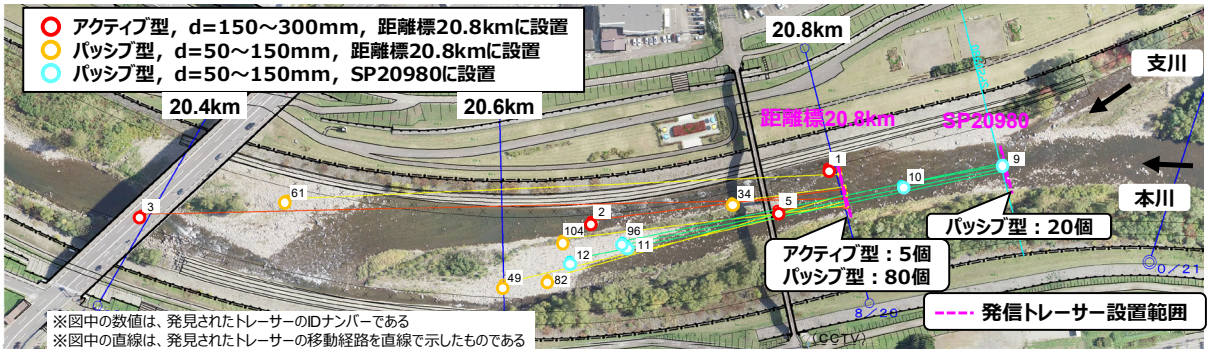


図 4.12　発信トレーサーの発見位置と移動経路

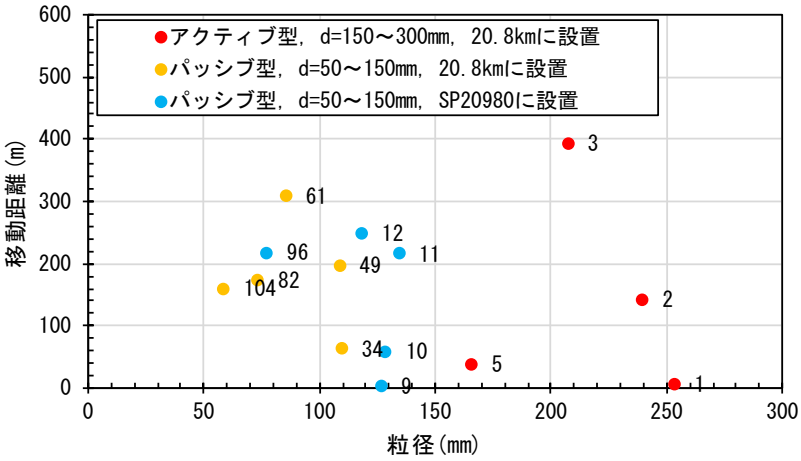


図 4.13　発見した発信トレーサーの粒径と移動距離（直線距離）

4. 流砂トレーサーモデルによる再現検証

実河川を対象とした再現検証は，単一粒径河床を対象として構築した第 3 章の流砂トレーサーモデルを用いる．流砂トレーサーモデルにおける鉛直分散を考慮したトレーサー濃度に関する支配方程式を以下に再掲する．式(4-1)～(4-3)は，式(3-65)～(3-67)と同じ式であり，変数等は第 3 章 3.1.2 に示したとおりである．この流砂トレーサーモデルは，一般的な河床変動モデルに，着色した土砂のようなトレーサーの移動分布を計算可能なモデルを導入したものである．このモデルでは，ある体積の土砂に含まれるトレーサーの割合を交換層モデルにおける土砂の連続関係より計算し，通常ラグランジュ的に追跡することが望ましいトレーサーの移動を，トレーサー濃度の時空間変化としてオイラー的に計算していることに特徴がある．

これらは均一粒径を対象としたモデルであるが，トレーサー濃度や流砂量を粒径階に区分し，適当な流砂量式を用いることで混合粒径河床に対するモデルとすることができる．実河川を対象とする場合は混合粒径を考慮できるモデルを用いるほうが，実際の河床材料とも整合し合理的である．ただし，第 3 章では，交換層と遷移層間のトレーサー移動（鉛直分散）を規定する E, D について，平衡状態を仮定するため $E=D$ の関係としていたが，混合粒径河床においてはこの関係は一般に成立しない．このため，ここでは単一粒径として鉛直分散の有無と実測のトレーサー移動状況を比較することとした．

また，参考として鉛直分散を無視し混合粒径とした場合の結果も示すこととした．この点については，今後の課題となるが，交換層と遷移層における粒径別の質量保存や流砂量の補正を行うことで解消できる可能性がある．

$$(1-\lambda)\left(E_m \frac{\partial f_m}{\partial t} + f_I \frac{\partial z}{\partial t}\right) + \frac{\partial q_b f_m}{\partial x} + D \cdot f_m - E \cdot f_t = 0 \tag{4-1}$$

$$f_I = f_m : \frac{\partial z}{\partial t} > 0 \ , \ f_I = f_t : \frac{\partial z}{\partial t} < 0 \tag{4-2}$$

$$E = D = \frac{q_b}{\alpha \cdot ls}\left[1 - e^{-(1-\lambda)}\right] \tag{4-3}$$

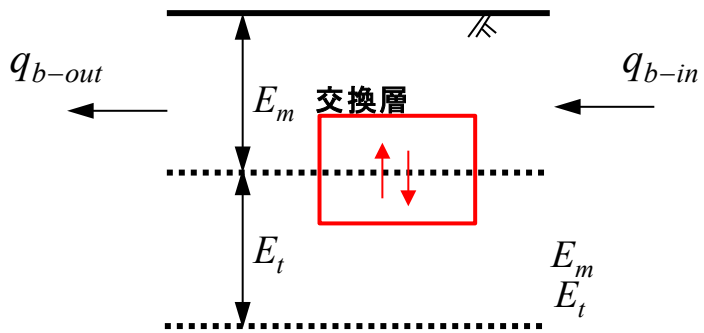


図 4.14　鉛直分散モデルの概念図（再掲）

4.1 計算条件

計算条件は，現地の大横断測量結果から河道形状を設定し，9 月出水時の時刻流量のうち，現地 D_{50}～代表粒径程度の粒径が移動を開始する 200m³/s 以上（融雪期平均流量程度以上）を抽出して設定した．発信トレーサーは距離標 20.8km に設置したものを対象とし，平均粒径の 2 倍程度の交換層厚と同じ表層 0.3m の範囲に設定した．その他の計算条件は，表 4.4 のように設定した．なお，これらの計算条件は既往の主要洪水において再現性の確認を行った[34]ものである．

計算ケースは，河床材料を計算区間の平均粒径 *dm*=118mm で単一粒径とした場合（Case1）と参考として混合粒径として粒径毎に移動範囲を予測した場合（Case2）の 2 通りを実施した．Case2 の混合粒径の粒度分布は図 4.15 のように対象とする各粒径階が 20%程度の比率となるように設定した．Case1 では鉛直方向の分散の有無を比較しているが，Case2 では鉛直方向の分散を考慮していない．

表 4.4　計算条件

項目	設定値
計算区間	発信トレーサー設置箇所を含む5km程度の区間
河道形状	平成27年河道（出水前の最新河道形状）
計算格子	流下方向：約20m間隔，横断方向：約10m間隔
計算時間間隔	0.25sec
粗度係数	マニングストリックラー型により設定
樹木	投影面積密生度a_w=0.28，抗力係数C_d=1.20
橋脚	投影面積密生度として橋脚毎に設定
流量	平成30年9月出水流量ハイドロ（ピーク流量660m³/s） ※融雪期平均流量程度200m³/s以上を抽出して設定（図 4.16） ※平均年最大流量は約480m³/sであり，概ね5年に1度程度の中規模出水
起算水位	等流起算（i=1/160）
河床材料	平成28年度調査結果，計算区間の平均粒径*dm*=118mm
固定点	高水敷，床止工，帯工，根固め
土砂供給	静的平衡（上流区間が露岩区間のため土砂供給なし）
トレーサー	距離標20.8kmの表層0.3mに設定（平均粒径の2倍程度）

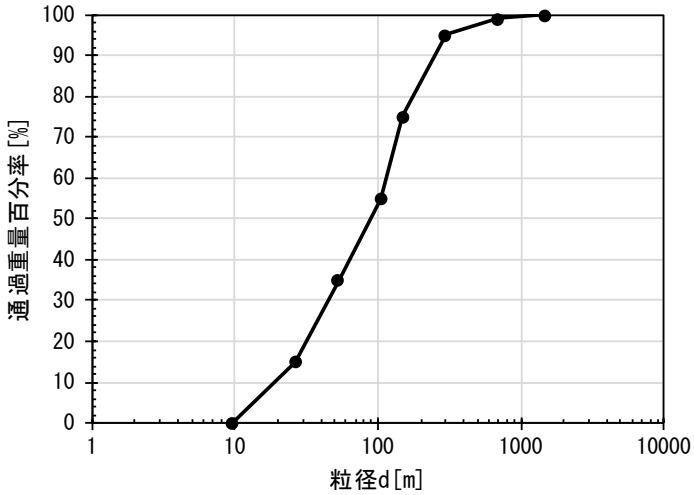


図 4.15　計算に用いた粒度分布

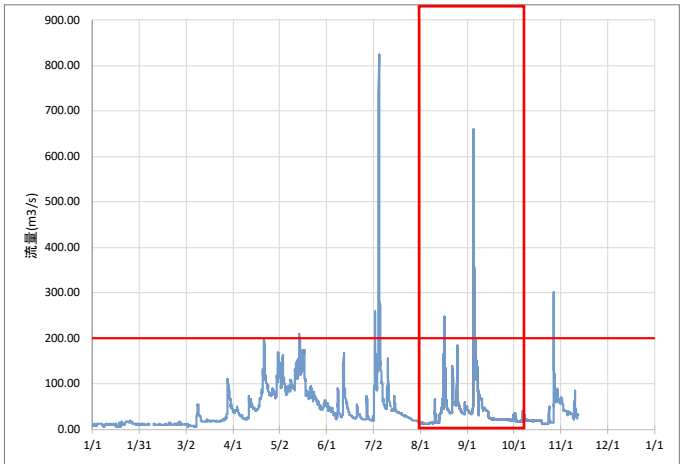


図 4.16　計算に用いた流量

4.2 計算結果

4.2.1 Case1 単一粒径の場合

図 4.17 に Case1 の出水後の計算表層トレーサー濃度コンター図を示す．この流砂トレーサーモデルでは，平衡流砂量式を基本としてトレーサーの移動分散状況を予測しているため，表層濃度の計算結果は平均的なトレーサーの移動分散状況を表しており，粒子の確率的な移動分散は考慮していないが，流れが空間的に変動していることにより，図に示すようにトレーサー濃度に分布が見られる．このコンター図は，トレーサーの表層濃度分布を示しているが，投入したトレーサーが堆積しうる確率分布といえるものである．このため，このトレーサー濃度分布は，現地においてトレーサーが発見されうる範囲との解釈が可能であり，現地で発見されたトレーサー分布との比較を行う．

単一粒径として計算した場合（Case1，図 4.17），鉛直分散の有無によらず砂州近傍では同様の傾向となっており，距離標 20.4km 右岸の砂州上で表層濃度が高く堆積しやすい箇所となっている．この場所には発見されていないトレーサーが埋没している可能性が高い．また，鉛直分散の有無がみお筋を伝わるトレーサーの移動分散に影響を与えている．みお筋部では，水深が深くトレーサーを発見しきれていない可能性もあるが，鉛直分散を考慮したほうが観測値に近い分布となっている．

第 3 章 4 によれば，鉛直方向の分散を考慮することにより，交互砂州の移動など川幅スケールの動的な河床変動過程が支配的な場合の影響は相対的に小さくなるが，実験水路などの平坦河床やみお筋部が連続するような箇所等，比較的単調な河道条件下では再現性向上が期待できるという結果を得ている．これと同様に，今回の計算においても鉛直分散を考慮することでみお筋部での再現性が向上し，観測値に近い結果となったと考える．

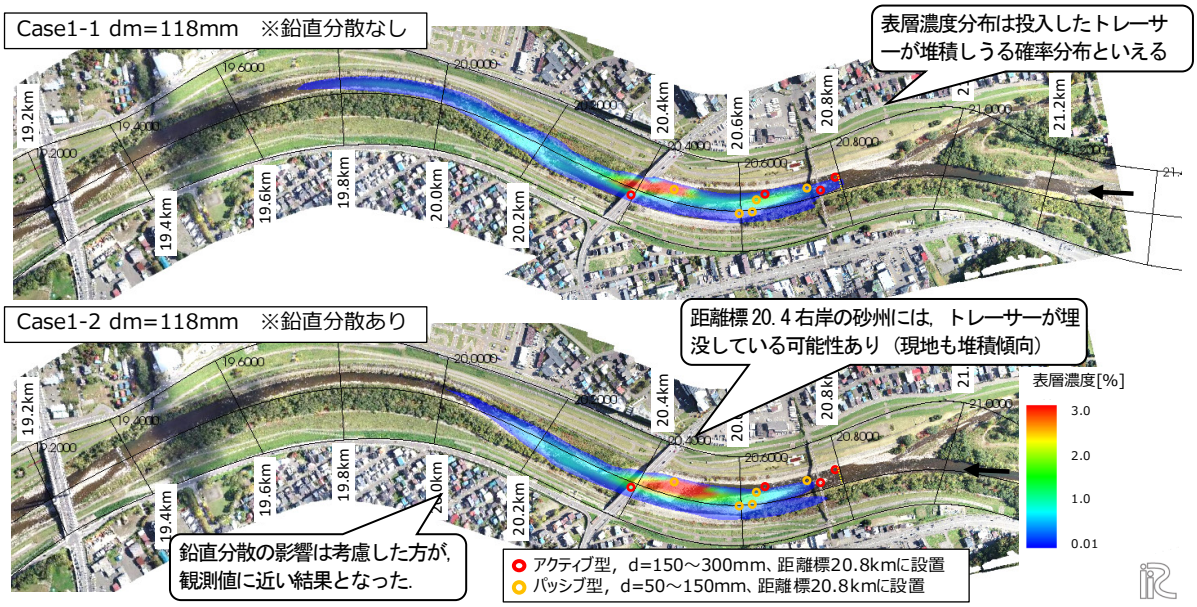


図 4.17　計算表層トレーサー濃度コンター図（Case1，単一粒径）

4.2.2 Case2 混合粒径の場合

図 4.18 に鉛直分散を考慮せず混合粒径とした場合（Case2）の出水後の計算表層トレーサー濃度コンター図を示す.

Case2（図 4.18）では，混合粒径として粒径別のトレーサー移動分散状況を再現することで，粒径によってトレーサーの堆積しやすい場所が異なる傾向が伺える．平均粒径程度の d=125mm の表層濃度は，距離標 20.4km 右岸および距離標 20.6km 左岸の砂州上において高くなっている．一方，最大粒径程度の d=200mm の表層濃度は，20.4km～20.8km のみお筋部で高くなっている．この傾向は，第 2 章の現地観測結果と概ね一致している.

次に粒径別のトレーサーの移動距離を比較する．最大粒径程度の d=200mm は，アクティブ型の追跡調査結果とほぼ同程度まで移動し，発信トレーサーの移動状況を精度良く再現できている．一方，平均粒径程度の d=125mm では，移動距離の予測結果が調査結果よりも大きくなっている．この要因として，第 2 章でも触れたように，距離標 20.4km 下流ではみお筋部の水深が深く，現地観測においてトレーサーを発見できなかった可能性が挙げられる．一方，第 3 章や Case1 の結果でも見られたように鉛直分散を考慮していないため，みお筋部のトレーサー移動が過大に評価されている可能性もある.

このように，混合粒径モデルとして解析することで，粒径別の移動分散状況を予測することができる利点があるが，混合粒径における鉛直分散のモデル化が今後の課題である.

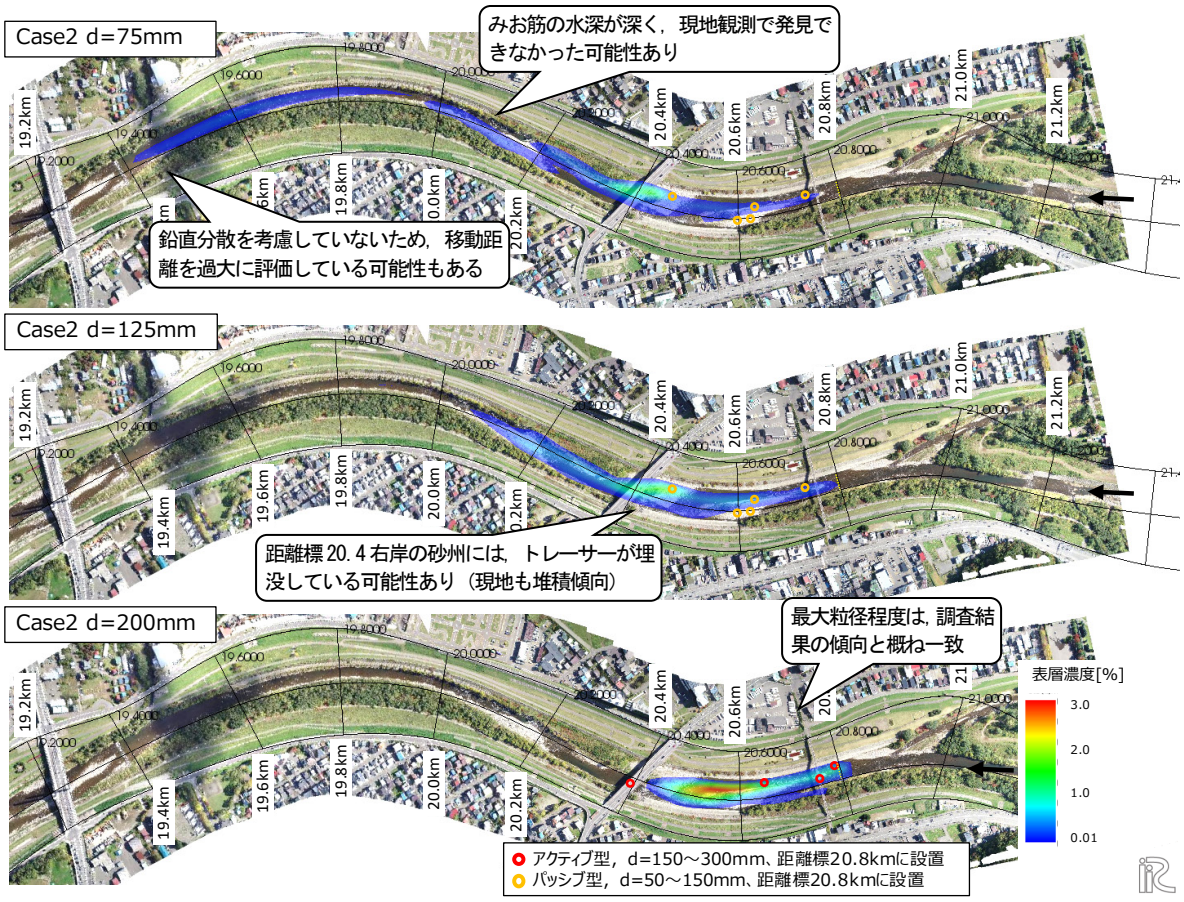


図 4.18　計算表層トレーサー濃度コンター図（Case2，混合粒径）

5. 本章のまとめ

第 4 章では，実河川において IC タグ技術を用いた置き土土砂の追跡調査を実施し，土砂移動に対し支配的な流量と言われる平均年最大流量以上の出水時における土砂移動状況，特に 1 洪水あたりの移動距離や分布などの貴重なデータを得ることができた．また，調査結果から，最大粒径程度の河床材料はみお筋を移動し，平均粒径程度の礫はみお筋だけでなく砂州上を含め低水路全体にわたり移動した形跡が伺えた．

さらに，構築した流砂トレーサーモデルによる再現計算を試み，これらの土砂移動状況をある程度予測可能であることも確認した．

第 5 章 結論

1. 本論文のまとめ

第 1 章では，本論文の序論として本研究の背景，既往研究における課題，研究の目的・概要を整理した．

第 2 章では，流砂の移動分散状況を把握するため，室内湾曲水路を用いて蛍光塗料で着色した流砂（トレーサー）の追跡実験を行った． 把握手法は，ブラックライト下で連続撮影した垂直写真からトレーサーの表層濃度（占有率）を数値化して評価することとした．実験結果から，トレーサーが徐々に下流側に移動分散する状況や湾曲に起因する外岸側と内岸側の移動速度の差などが観測できた．また，河床波に起因するトレーサーの鉛直方向の分散（上流からの流砂と交換することで，一度低下した表層濃度が時間経過とともに再度上昇する現象）なども確認できた．また，数値化した表層濃度から，平均濃度移動距離（平均濃度位置の上流端からの移動距離）と，分散（標準偏差），平均的な流砂の移動速度を求めた．

第 3 章では，トレーサー実験結果を再現対象として，一般的な交換層モデルを改良しトレーサー濃度を考慮した平面 2 次元河床変動解析モデル（流砂トレーサーモデル）を構築し，トレーサーの移動分散状況の再現を試みた．トレーサー実験結果から得られた平均的な流砂の移動速度から逆算した交換層厚を用い再現計算を行ったところ，表層濃度の平均移動速度は概ね再現できたが，分散状況は十分な精度の結果を得ることができなかった．これは，一般的な交換層モデルでは，平衡流砂量式をもとにモデル化されているため，土粒子移動のバラツキや掃流層と遷移層の鉛直方向の土砂移動（巻き上げと沈降）の影響などが考慮されず，トレーサーの移動速度が交換層厚の設定に依存してしまうことによるものである．

一方，交換層内の土砂移動は，河床変動がない動的平衡状態においても，下層と交換しながら移動していくことが知られており，実験でも同様の現象が観測されている．このことを踏まえ，鉛直方向の分散に起因する移動速度変化と分散拡大に着目し，モデルの改良を行った．モデル改良は，水平方向のトレーサー粒子の質量保存に加え，交換層を流砂が移動することによって生じる交換層と遷移層間の鉛直方向のトレーサー粒子の交換を考慮することとした．鉛直方向の分散のモデル化及びモデル定数の設定に課題は残っているが，鉛直方向の分散を考慮することにより，トレーサーの移動分散状況をある程度表現可能とした．

さらに，直線水路における 1 次元計算と 2 次元計算により交互砂州の有無がトレーサーの鉛直方向の分散に与える影響について比較検討した．これにより，トレーサーの移動分散は，交互砂州の移動など川幅スケールの動的な河床変動過程が支配的な場合の影響は相対的に小さくなるが，実験水路などの平坦河床やみお筋部が連続するような箇所等，比較的単調な河道条件下では再現性向上が期待できることがわかった．

第 4 章では，実河川において IC タグ技術を用いた置き土土砂の追跡調査を実施し，土砂移動に対し支配的な流量と言われる平均年最大流量以上の出水時における土砂移動状況，特に 1 洪水あたりの移動距離や分布などの貴重なデータを得ることができた．また，調査結果から，最大粒径程度の河床材料はみお筋を移動し，平均粒径程度の礫はみお筋だけでなく砂州上を含め低水路全体にわたり移動した形跡が伺えた．

さらに，構築した流砂トレーサーモデルによる再現計算を試み，これらの土砂移動状況をある程度予測可能であることも確認した．このことから，土砂還元効果の検証手法として本モデルの有用性を検証することができた．

2. 今後の課題と展望

本論文で構築した平面2次元河床変動解析モデルを改良した流砂トレーサーモデルには,

① 鉛直方向の分散のモデル化,

② モデル定数の同定

③ 混合粒径への拡張

に課題が残っている．このうち，①②については，データ不足を解消するべく，第2章で行ったような基礎的な流砂実験によるデータの蓄積と第3章，第4章で行ったような再現検証が必要である．また，③については交換層と遷移層における粒径別の質量保存や流砂量の補正を行うことで解消できる可能性がある．具体的には，粒径別の巻き上げ量について，粒径別に遷移層の保有量以上にならないように制限し，流砂量を補正して河床変動に反映する方法などがある．特に③の混合粒径への拡張については，粒径別の移動分散状況を予測することが可能となるため，例えばICタグ等での現地検証が困難な砂等の小粒径土砂の影響を把握することができ，ダム堆積土砂の排砂が下流の河川環境へ与える影響予測や，流砂トレーサーモデルの浮遊砂対応改良など，今後の流砂トレーサーモデルの適用範囲を広げることが可能となる.

今後，実務等により流砂トレーサーモデルの適用事例を蓄積し，より精度の高い評価技術となれば,置き土やダム排砂などの土砂還元対策検討において，対策効果を検証する有用な解析手法としての活用が期待される.

発表論文

本研究に関する発表論文を以下に示す.

■水工学論文集

（1）濱木道大, 岩崎理樹, 井上卓也, 佐藤大介, サムナー圭希, 清水康行：着色流砂実験によるトレーサーの移動分散現象に関する実験と数値計算,土木学会論文集 B1(水工学) Vol.74, No.4,I_1033-I_1038, 2018.

（2）濱木道大, 岩崎理樹, 井上卓也, 清水康行：土砂トレーサーの鉛直方向の分散を考慮した数値計算, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.74, No.5, I_955-I_960, 2018.

■河川技術論文集

（3）濱木道大, 岩崎理樹, 井上卓也, 清水康行：現地河川における IC タグ技術を用いた置き土追跡調査と数値解析による土砂移動状況の再現計算, 河川技術論文集, 第 25 巻, pp741-746, 2019.6.

謝辞

本研究は，河床低下対策等により実施される土砂還元の効果を把握するため，流砂トレーサーモデルによる土砂還元の追跡技術の開発を行ったもので，実際の業務等への活用を考慮し実務レベルで扱いやすい技術のモデル化を目指したものです.

研究を進めるにあたり，北海道大学清水康行教授からは長年に渡りご指導いただき心から感謝しております．特に博士論文の執筆について，折に触れ熱心に勧めていただき，大変感謝しております．清水先生の熱意に負け執筆を決意いたしましたが，執筆が終了した今となってはすべてが良い経験で，自身の成長の糧となったと感じています.

北海道大学岩崎理樹准教授，寒地土木研究所井上卓也主任研究員には，着色流砂実験から流砂トレーサーモデルの構築，鉛直分散のモデル化，論文執筆・学会発表に至るまで，熱心に助言・指導をしていただき，心から感謝しております．お二人の助言・指導がなければこの研究は完成しておりません．今後も相談させていただきたいと考えておりますので，どうぞよろしくお願い申し上げます.

北海道大学泉典洋教授，北海道大学今日出人特任教授には，論文審査を通し本研究の核心から細部に渡り，専門的なご指摘や実務に通じるご指摘を数多くいただき，多くを学ばせていただきました．心から感謝しております.

北海道大学渡部靖典教授には，学位授与審議にあたり，数値解析に関する専門的なご指摘をいただきました．心から感謝しております．また，公開論文発表会では，北海道大学山下俊彦特任教授，北海道大学山田明人准教授，北海道大学久加朋子特任准教授から貴重なご意見をいただき，博士論文をより良いものとすることが出来ました．心から感謝しております.

北海道開発局札幌開発建設部の皆様，室蘭開発建設部の皆様には，データ提供や現地検証において多大なるご協力をいただきました．心から感謝しております.

株式会社水工リサーチの皆様，特に加藤一夫氏，佐藤大介氏，サムナー圭希氏には，着色流砂実験，現地での IC タグトレーサー作成等に関し多大なるご協力をしていただきました．心から感謝しております.

株式会社開発工営社の上司・同僚・後輩の皆様には，博士論文の執筆にご理解をいただき，データ整理や現地検証などを含め多大なるご支援をいただきました．特に後輩の清家拓哉氏，後藤悠和氏，森田大詞氏には，水中でのトレーサー設置や探査などの過酷な現場作業にご協力いただきました．心から感謝しております.

最後に，私の研究に関わってくださったすべての方々，休日の執筆作業に協力してくれた家族に心から御礼申し上げます．大変ありがとうございました.

参考文献

1) 濱木道大, 戸村翔, 渡邊康玄, 井上卓也, 安田裕一, 古溝幸永：水理模型実験と現地試験施工を踏まえた軟岩露出河川に対する河床低下対策工の検討, 河川技術論文集, 第 23 巻, PP477-482, 2017.6

2) 国土交通省 河川局 河川環境課：下流河川土砂還元マニュアル（案）第 2 版, 2011.3

3) 植木真生, 福島雅紀, 山下武宣：河道掘削及び砂礫の敷設供給に対する河床の応答, 河川技術論文集, 第 12 巻, pp.415-420, 2006.

4) 佐々木崇憲, 櫻井寿之, 箱石憲昭：三春ダム直下流における置土侵食の平面 2 次元河床変動解析, 土木学会第 63 回年次学術講演会講演概要集, pp.253-254, 2008.

5) 武藏由育, 志宇知誠, 山下正浩, 竹林洋史, 湯城豊勝, 鎌田磨人, 赤松良久, 河口洋一, 中田泰輔：置土された土砂の流下過程の数値解析モデルの構築と実河川における適用, 土木学会論文集 B1（水工学）Vol67, No.4, I_817-I_822, 2011.

6) 有光 剛, 出口 恭, 大東秀光, 大江一也：置土を用いた湾曲部内岸の河床維持対策に関する研究, 土木学会論文集 B1（水工学）Vol67, No.4, I_811-I_816, 2011.

7) https://www.ktr.mlit.go.jp/keihin/keihin00017.html

8) 角 哲也, 石田裕哉, 佐竹宣憲：IC タグ技術を応用した砂礫移動に関するトレーサ調査手法の開発, 水工学論文集, 第 51 巻, pp.631-636, 2007.

9) 角 哲也, 石田裕哉, 佐竹宣憲：IC タグ技術を用いたトレーサ調査手法による砂礫移動観測, 水工学論文集, 第 52 巻, pp.889-894, 2008.

10) 角 哲也, 石田裕哉, 佐竹宣憲：アクティブタグ技術を応用した砂礫移動に関するトレーサ調査手法の開発, 水工学論文集, 第 54 巻, pp.1123-1128, 2010.

11) 福島雅紀, 武内慶了, 箱石憲昭：砂礫の敷設・供給が下流河道へ与える影響とその応答速度, 河川技術論文集, 第 15 巻, pp.477-482, 2009.

12) http://www.sakatadenki.co.jp/product/_sareki/sareki.html

13) 岩崎理樹, Gary PARKER, 清水康行：自由砂州の影響を受けるトレーサーの移動分散に関する数値計算, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.71, No.4, I_877-I_882, 2015.

14) 佐藤清一, 吉川秀夫, 芦田和男：河床砂礫の掃流運搬に関する研究(1), 建設省土木研究所報告, 第 98 号, 1958.

15) 平野宗夫：Armoring を伴う河床低下について, 土木学会論文報告集, 第 195 号, pp.55-65, 1971.

16) http://i-ric.org/index.html

17) 清水康行：河道平面形状の形成における河床・河岸の変動特性の相互関係について, 水工学論文集, 第 47 巻, PP643-648, 2003

18) 岸力・黒木幹男：移動床流における河床形状と流体抵抗（I）, 工学部研究報告第 67 号, 北海道大学, 1973

19) 清水義彦, 木葉竹重機・新船隆行：樹林化河道の洪水流況と浮遊砂輸送に関する数値計算, 水工学論文集, 第 44 巻, pp.819-824, 2000.

[20] Engelund, F.:Flow and Bed Topography in Channel Bend, Jour.of Hydr.Div. , ASCE, Vol.100. HY11, pp.1631-1648, 1974.

[21] Meyer-Peter, E and Muller, R. : Formulas for bedload transport, IAHSR, Report on the Second Meeting, Vol. 3, pp.39-64, 1948.

[22] 芦田和男, 道上正規: 移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究, 土木学会論文集, 第 206 号, pp.59-69, 1972.

[23] Kovacs, A. and Parker, G. A new vectorial bedload formulation and its application to the time evolution of straight river channels. *J. Fluid Mech*. Vol. 267, pp. 153-183, 1994.

[24] Liu, B.Y. Study on Sediment Transport and Bed Evolution in Compound Channels. Thesis presented to Kyoto University, 1991.

[25] 岩垣雄一：限界掃流力の流体力学的研究, 土木学会論文集, 第 41 号, pp.1-21, 1956.

[26] 渡邉明英, 福岡捷二, 安竹悠, 川口広司：河道湾曲部における河床変動を抑制する樹木群水制の配置方法,河川技術論文集, 第 7 巻, pp.285-290, 2001.

[27] 長谷川和義：沖積蛇行の平面および河床形状と流れに関する水理学的研究, 北海道大学博士論文, pp.1-184, 1984.

[28] 芦田和男・江頭進治・劉炳義・梅本正樹：蛇行流路における Sorting 現象および平行河床形状に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第 33 号, B-2, pp.261-279, 1990.

[29] M. Wong, G. Parker：Reanalysis and Correction of Bed-Load Relation of Meyer-Peter and Müller Using Their Own Database , *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(11),pp.1159-1168, 2006.

[30] 山本晃一編著：総合土砂管理計画 流砂系の健全化に向けて, pp.246-248, 2014.

[31] Pelosi, A., R. Schumer, G. Parker, and R.I.Feruson：The cause of advective slowdown of tracer pebbles in rivers：Implication of Exner based master equation for coevolving streamwise and vertical dispersion, *Journal of Geoghysical Research*, 121(3), doi:10.1002/2015JF003497,2016.

[32] Turowski, J.M. and Hodge, R.：A probabilistic frame-work for the cover effect in bedrock erosion, *Earth Surf. Dynam*., Vol.5, pp.311-330, 2017.

[33] Lajeunesse, E., Devauchelle, O. and James, F.: Advection and dispersion of bed load tracers, *Earth Surf. Dynam*., Vol.6, pp.389-399, 2018.

[34] 濱木道大, 田代隆志, 白戸暢彦, 清水康行, 木村一郎：iRIC(Nays2DH)による豊平川昭和 56 年 8 月洪水の河床変動再現計算, 土木学会第 71 回年次学術講演会, II-074, pp147-148, 2016.9