

河川流のモデリングと河床・河道変動解析

京都大学・工学研究科土木工学専攻 細田 尚(Takashi Hosoda)

Department of Civil Engineering,
Kyoto University

1. はじめに

河川の流れと河床・河道変動の解析法に関する研究は、治水計画、河道計画を策定するために、洪水時の水位予測、河道湾曲部や河川構造物周辺の河床洗掘深の予測、安定（平衡）河道の設計などが必要であるため、水工学の主要な分野として古くから精力的に研究が行われてきた。

研究の方法も、実河川での現象の観測、現象の諸特性の解明を目的とした実験的または理論的研究、現象を再現・予測するための数値解析的研究など多岐にわたっている。最近では、近年のコンピュータのハード的及びソフト的な目覚ましい進歩を反映して、計算結果のコンピュータ・グラフィックスも含めた数値解析的研究が主流となっている。一方、河川流と河床・河道変動のモデリング、非線形解析などの数理水理学的研究の発展も著しく、古くから研究されている分野でありながら、今後の益々の進歩が期待されている。

本稿では、河川流と河床・河道変動のモデリング及び数値解析法について簡単に概説する。

2. 河川流のモデリング

河川流のモデリングは、大別すると断面積分または水深積分型モデルと3次元解析モデルに分類される。前者は、対象としている河川区間が非常に長く、またその途中に瀬や淵などが存在し流れが急激に変化するため、3次元の運動方程式などを断面内または水深方向に積分することで導かれる積分型の基礎式を用いる方法で、水深積分の場合は平面2次元モデルとも呼ばれる。積分の際に、流速分布の相似性などが仮定される。また、乱流のモデルとして水深積分型 $k-\epsilon$ モデルなどを用いる場合もあるが、実用的には経験的な0-方程式モデルを用いることが多い。

水深積分型モデルは3次元の基礎式を積分する際に用いられる仮定によって詳細に分類され、対象とする現象によって使い分けられる。近年、積分型モデルの理論が進展したが、流れの3次元性を水深積分の過程でできるだけ考慮しようとするためモデルが非常に複雑になる場合があり、水深積分 vs 3次元解析の使い分けが最近の研究課題になっている。

水深積分型モデルを誘導する際に用いられる仮定の分類と、対象とする現象に応じた仮定の組み合わせをの例を表-1に示す。

表-1 中、項目4) 圧力分布の鉛直加速度を考慮する場合のモデリングについては、ブシネスク方程式とその修正について主として海岸工学の分野で多くの研究がある。

一方3次元解析は、橋脚や水制など河川構造物周辺の流れと局所洗掘現象のように3次元性の強い流れ場を再現する必要がある場合に用いられる。乱流の取り扱いにはRANS, LES及びDNSが用いられ、実験室スケールの流れ場に対してこれら三通りを適用した研究が多く行われているが、実河川の流れの非常に大きいレイノルズ数などを考慮すると、現時点ではRANSが実用的なように思われる。河床変動と組み合わせた流れ解析の例として、砂州や複断面蛇行流路の河床変動を0方程式モデルで解析した例、構造物周辺の局所洗掘現象を標準型または非線形 $k-\epsilon$ モデルを用いて解析した研究があるが、実河川に適用するモデルとしては、実用性と3次元流れを再現できる能力などの兼ね合いからみて非線形渦粘性モデルが有力と考えられる。

表-1 水深積分型モデルの分類

基礎式の誘導に用いられる仮定の分類
<p>1. 平面座標系 (1) 基準水平面上の直角座標系, (2) 基準水平面上の(移動)一般座標系, (3) 任意曲面上に設定された一般座標系</p> <p>2. 圧力分布 (1) 静水圧, (2) 鉛直加速度考慮(ブシネスク方程式原型), (3) 曲面の曲がりによる遠心力</p> <p>3. 流速分布及び底面せん断応力の評価 (1) 主流流速分布の一様性または自己相似性, (2) 主流流速分布の局所的变化をモデル化して考慮, (3) 流線湾曲の効果を考慮(二次流と運動量輸送)</p> <p>4. 乱流モデル (1) 経験的0-方程式モデル, (2) 水深積分型$k-\epsilon$モデル</p> <p>5. 積分する層の数(三層以上は三次元に分類) (1) 平面一層モデル, (2) 平面二層モデル</p>
対象とする現象を再現するための仮定の組み合わせの例
<p>A. 砂堆・反砂堆 基準水平面上の直角座標系+鉛直加速度考慮+局所的变化をモデル化して考慮+経験的0-方程式モデル+平面一層モデル</p> <p>B. 河川湾曲部の流れ 基準水平面上の一般座標系+静水圧+流線湾曲の効果を考慮(二次流による運動量輸送も考慮)+経験的0-方程式モデル+平面一層モデル</p> <p>C. 側岸侵食と河川蛇行 基準水平面上の移動一般座標系+静水圧+主流流速分布の一様性+流線湾曲の効果を考慮+経験的0-方程式モデル+平面一層モデル</p> <p>D. 任意曲面上の流れ 任意曲面上の一般座標系+曲面の曲がりによる遠心力+主流流速分布の一様性+経験的0-方程式モデル+平面一層モデル</p> <p>E. 開水路流れのせん断不安定渦(鳴門の渦潮など) 基準水平面上の直角座標系+静水圧+主流流速分布の一様性+経験的0-方程式モデル+平面一層モデル</p> <p>F. 複断面流れの大規模渦 基準水平面上の直角座標系 or 一般座標系+静水圧+主流流速分布の一様性+経験的0-方程式モデル+平面二層モデル</p>

3. 土砂の輸送と河床・河道変動のモデリング

河床の変動を解析するためには、流水中の土砂の輸送過程をモデル化する必要がある。流れによって輸送される土砂は、輸送形態によって大きく次のように分類されている。

- ・掃流砂：河床に存在する砂礫で構成され、流れの抗力と揚力の効果で河床上を転動、滑動、サルテーション（小跳躍）を繰り返しながら輸送される。
- ・浮遊砂：乱れの作用の下で、河床に存在する砂粒が浮遊し、不規則に変動しながら長時間流水中に保持されながら輸送される。ただし、沈降と浮遊を通して河床砂礫との交換が行われる。
- ・ウォッシュロード：河床に存在しない微小な粒径範囲の土砂の成分で上流の土砂生産地から流出してきたものがそのまま流送される。河床砂礫との交換が行われない。

上記の輸送形態のうち、掃流砂の輸送過程について簡単に説明する。

ある地点に静止していた粒子群は、変動する流れの抗力と揚力の作用で確率的に動き始める。その後、転動やサルテーションによって短時間移動して停止し長時間休止することが知られている。この一連の過程を、河床表面の砂粒が単位時間に移動開始する確率密度であるピックアップ・レート(pick-up rate)と、動き始めた砂粒が河床に停止するまでの距離であるステップ・レングス(step-length)を用いて確率的に表現する方法を非平衡流砂モデル、または確率過程モデルと呼ぶ。

この方法はさらに、砂粒が移動する短い時間を無視する移動速度無限大のモデルと、移動過程も砂粒群の運動方程式を解くなどして考慮するモデルに分けられる。

非平衡流砂モデルはある地点を通過する砂粒の時空間的履歴をある程度忠実に考慮しようとしており、小規模河床波や河川構造物周辺の局所洗掘のような、河床変動の空間的スケールが砂粒移動のスケールと同等のオーダーの時に適用される。

一方、河床変動の空間的スケールが砂粒移動のスケールより十分大きい場合、ある地点を通過する単位時間あたりの砂粒群の体積（流砂量）を、過去の履歴に関係なく局所的な水理量（流速、水深、底面せん断応力など）で評価する平衡流砂モデルを用いることが多い。流砂量を評価するために、これまで砂粒に作用する抗力や揚力とそれに抵抗する力の関係から導かれたもの、次元解析的に導かれたものなど多くの関係式が提案され、実験的に検証されてきた。

河床変動の解析を行うには、平面的な格子を考え、その格子から単位時間にピックアップされる砂粒量と上流からその格子に堆積する砂粒量を非平衡流砂モデルで評価して河床面の高さを計算する方法、格子の上流側と下流側断面を通過する流砂量の差で計算する方法が用いられる。後者は厳密には静止している河床面ではなく掃流砂層も含んだ高さを評価していることになる。

一方、蛇行などの流路の変動を解析する場合には、河道内の流れと河床変動を上記の方法で計算するとともに、何らかの河岸侵食・崩壊モデルを組み込む必要がある。たとえば、側岸侵食量を側岸での摩擦速度や断面平均流速からの偏差で評価する方法、間歇的河岸崩壊をモデル化する方法が用いられ、直線流路の拡幅、蛇行の発生・発達過程の理論解析や数値シミュレーションが行われている。

4. 計算例

計算例として、一般座標系での水深積分モデルを用いた河川洪水流の計算結果を図-1 に、侵食性河岸を有する流路の変動過程のシミュレーション結果を図-2 に示す。

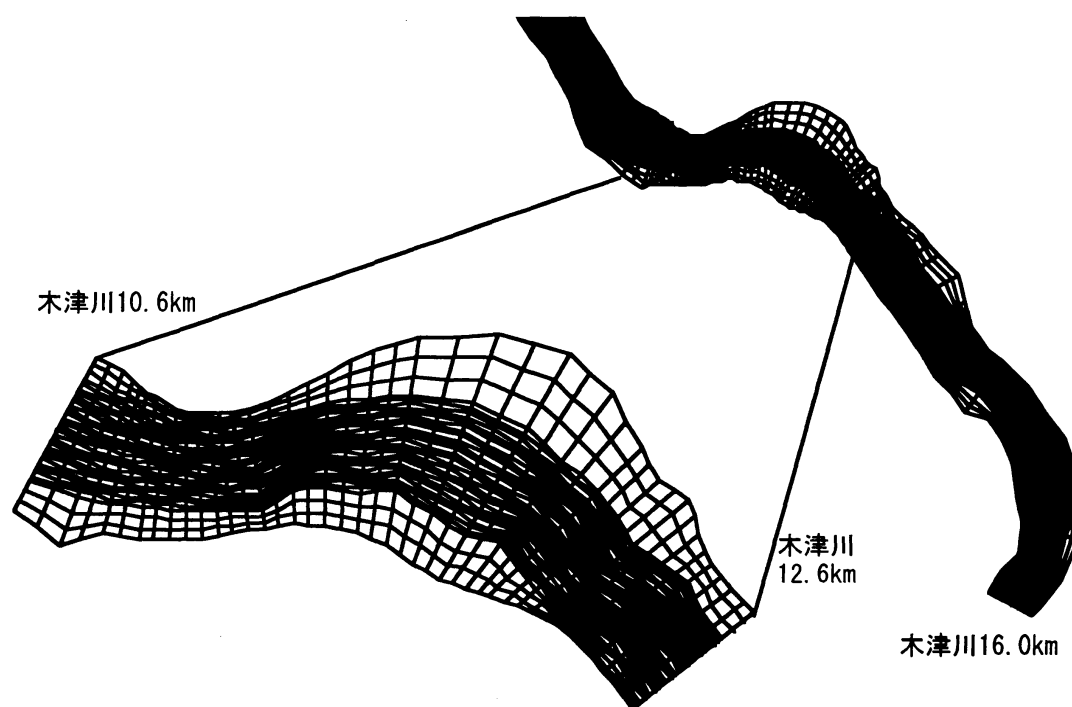
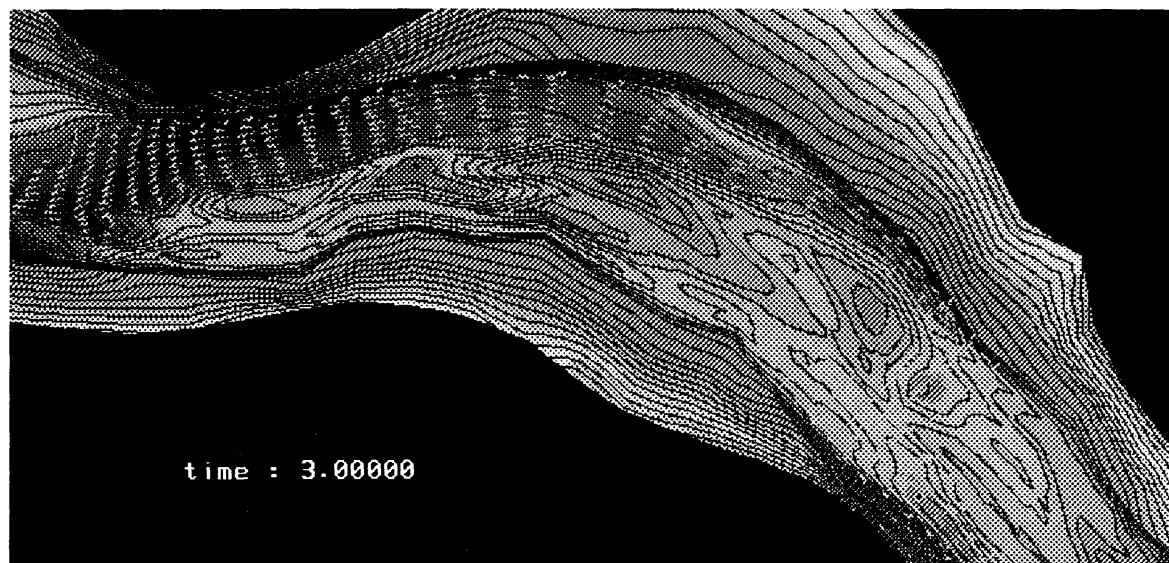


図-1 一般座標系での水深積分モデルによる河川洪水流の数値シミュレーション

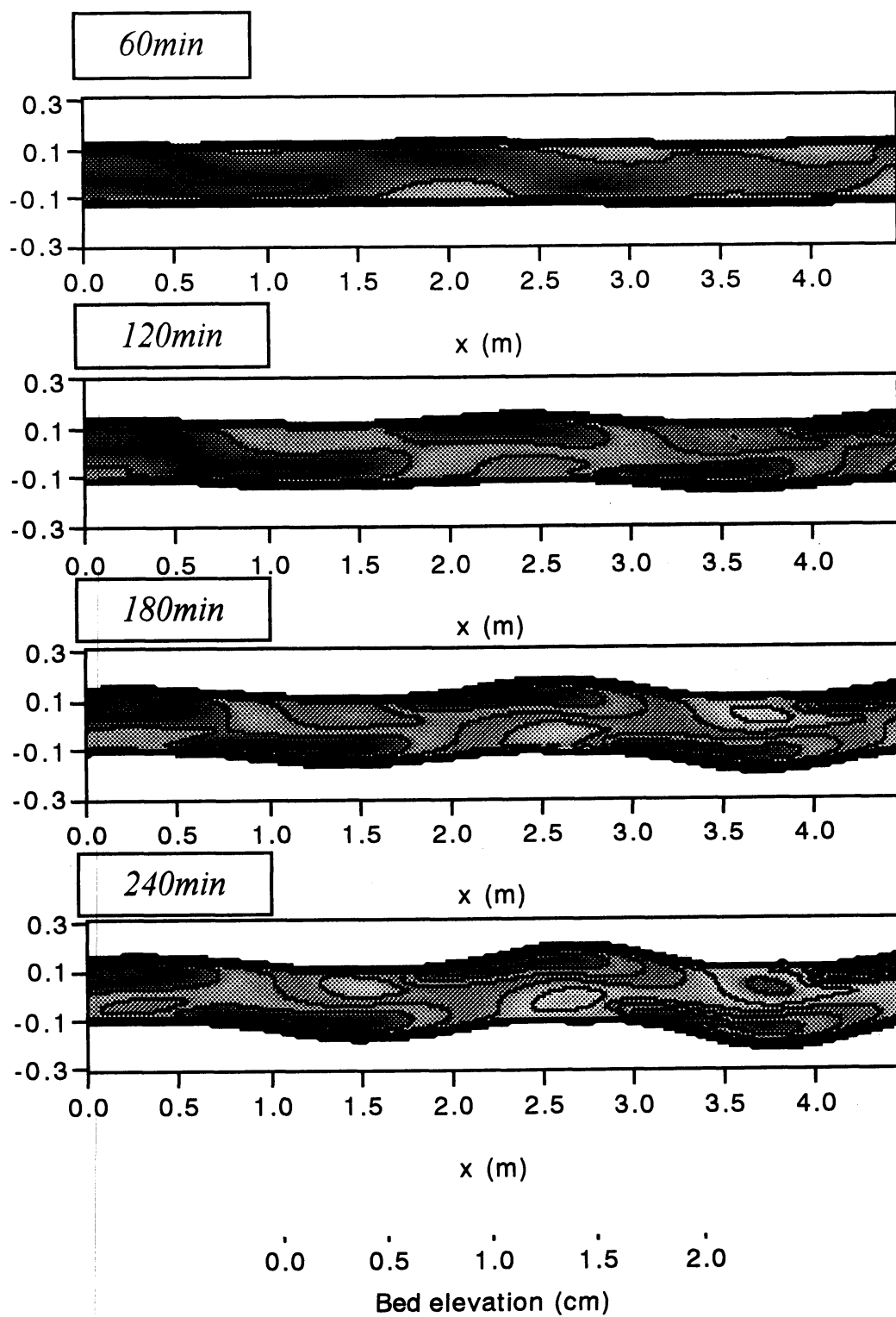


図-2 流路蛇行の数値シミュレーション

5. おわりに

本報では、河川や人工水路で見られる河床変動や河川蛇行のシミュレーションについて、まず流れと流砂過程の実用的なモデル化を概説するとともに、シミュレーション結果の例を示した。今後、流れと流砂過程に関して、粒子法などを適用したより精緻なシミュレーションの研究がより進展すると考えられる。それと同時に、河川源流域から河口までの長距離・長時間の土砂動態を連続して取り扱うことができる、3次元的效果を考慮した水深積分型モデルの高精度化の進展も実用的観点から期待される。

参考文献

(全般)

土木学会関西支部編：川のなんでも小事典～川を巡る自然・生活・技術，講談社ブルーバックス，1998

細田 尚：河川流のモデリングと河床・河道変動解析の進歩，水工学シリーズ 02（水工学に関する夏期研修会講義集），土木学会水理委員会・海岸工学委員会，pp.A-2-1～A-2-22,2002.

細田 尚：(特集：粒子と流れ) 河川流と河床・河道変動の数値シミュレーション，日本流体力学会誌「ながれ」，第21巻第3号，pp.260-268, 2002.

(河川流のシミュレーション)

土木学会編：CD-ROM 水理公式集例題プログラム集，第2編河川編，土木学会，2002.

(河床・河道変動関係)

土木学会水理委員会移動床流れの抵抗と河床形状研究小委員会：移動床流れにおける河床形態と粗度，土木学会論文報告集，第210号，pp.65-91, 1973.

吉川秀夫編：流砂の水理学，丸善，1985.

中川博次・辻本哲郎：土木学会編 新体系土木工学 23 移動床流れの水理，技報堂出版，1986.

土木学会水理委員会「洪水流の三次元流況と流路形態」研究小委員会：洪水流の三次元流況と流路形態に関する研究（小委員会報告書），1982.

土木学会水理委員会「流砂量と河床形状」研究小委員会：流砂量と河床形状に関する研究（小委員会報告書），1990.

長田信寿，細田尚，村本嘉雄：河岸侵食を伴う河道変動の特性とその数値解析手法に関する研究，土木学会論文集，No.621/II-47, pp.23-39, 1999.