

1. はじめに

河道多様性の創出は、魚類や水生生物の生息環境を向上させ、自然に近い形で生態系保全を可能とする。ここに数値計算を導入することが出来れば、事前予測や維持可能性の検討などの点で川づくりへの貢献が期待できる。しかし、局所的洗掘域のような3次元な流れを含む部分の再現は容易ではなく、また、2次元計算による再現性も確立しているとは言い難い。そこで本研究では、2次元河床変動モデルを用い、その再現性および適用範囲について把握するため、障害物を設置した状態での移動床通水実験による河床変動結果と、同条件による数値計算結果との比較・検討を行い、今後、河道多様性創出を行う際の予測ツールとしての有用性および発展可能性について検証した。

2. 実験条件および実験方法

実験水路は、全長 13m、幅 59.3cm、高さ 30cm の勾配可変型長方形断面開水路を用いた。この水路の 4.5m ~ 10.5m の移動床区間に粒径 0.586mm の 4号砂を敷き詰め、障害物を設置した。障害物として、木板を組み合わせて幅 15cm、奥行き 15cm、高さ 30cm の直方体にしたものを用いた。障害物の概形および座標系を図 1 に示す。これを移動床開始地点より 2m55cm 下流に設置し、水路勾配 1/500、流量 6lit/s、下流端水深 3cm、フルード数 0.622 の条件のもと、通水実験を行った。通水時間は障害物を右岸に設置した場合は 30 分および 60 分で、ケース名をそれぞれ Case-RH、Case-RF とし、河道中央に設置した場合は通水時間を 60 分で Case-CF とした。

3. 実験結果と考察

図 - 2 に、各ケースの通水後の河床コンターを示す。3 ケース全てに共通して、障害物前面の先端を中心に局所的な洗掘が広がっていることが分かる。障害物後

方では広い堆積域が見られ、Case-RH、Case-RF では下流に行くに従って水路中央へ、Case-CF では兩岸へとその範囲が徐々に広がっていく傾向が見られる。また、Case-RH から Case-RF での時間経過に伴い、障害物前面部での洗掘はさらに進行するが、流下方向への発達は見られないことから、障害物による洗掘効果は前面部において顕著であることが分かる。しかし、Case-CF での洗掘は Case-RF に比べると小さく、障害物を接岸した方がより大きな洗掘効果が得られると考えられる。

4. 数値計算条件および計算手順

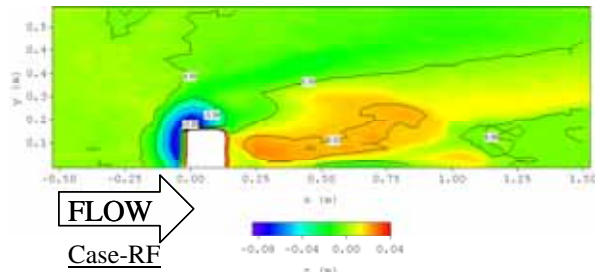
本研究の数値計算では、2次元河床変動モデルを用いた。基礎方程式には、次式で表される水深平均された開水路平面 2次元流れの運動方程式および連続式を用いた。

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu u}{\partial x} + \frac{\partial huv}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial h \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial h \tau_{xy}}{\partial y} \quad (1)$$

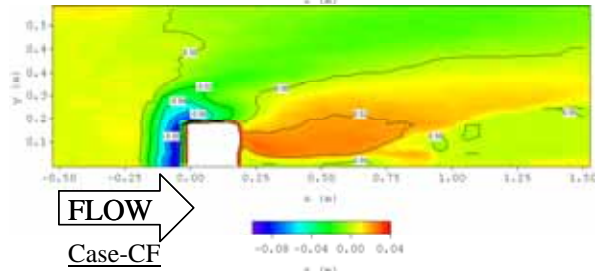
$$\frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial huv}{\partial x} + \frac{\partial hv v}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial h \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial h \tau_{yy}}{\partial y} \quad (2)$$

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

Case-RH



Case-RF



Case-CF

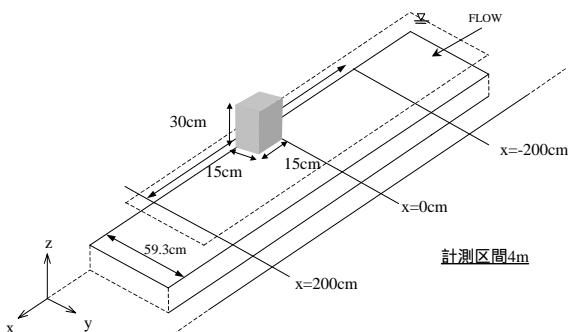
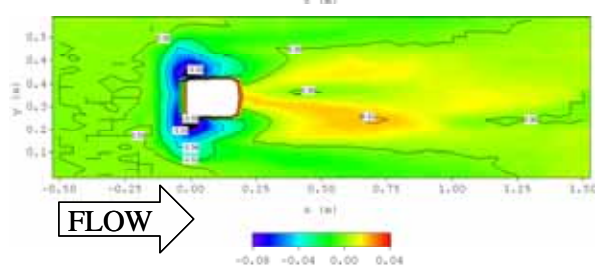


図 1 障害物の概形と座標系

図 2 水路実験河床コンター

乱流モデルには $k-\varepsilon$ モデルを用いた。これをコントロールボリューム法で離散化し、圧力解法には SIMPLE 法を用い、移流拡散の解析にはハイブリッド法を用いた。河床変動計算には流砂の連続式(4)を用い、流砂量式には Meyer-Peter-Müller の式(5)および Einstein の式(6)を用いた。無次元有効せん断応力を求める式に、岸・黒木による式(7)と芦田・道上の式(8)を用いた。以下に順に示す。

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{(1-\lambda)} \left(\frac{\partial q_{Bx}}{\partial s} + \frac{\partial q_{By}}{\partial n} \right) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{q_B}{\sqrt{sgd^3}} = 8(\tau_*' - \tau_{*c}')^{1.5} \quad (5), \quad \frac{q_B}{\sqrt{sgd^3}} = 9.2(\tau_*' - 0.03)^{0.85} \left(\frac{1}{\tau_*'} \right)^{3.85} \quad (6)$$

$$\frac{u_m}{u_*} = 7.66 \left(\frac{h}{2d} \right)^{1/6} \left(\frac{\tau_*'}{\tau_*} \right)^{2/3} \quad (7), \quad \frac{u}{u_{*e}} = 6.0 + 5.75 \log_{10} \frac{R}{d(1+2\tau_*')} \quad (8)$$

$$q_{Bx} = \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}} q_B \quad (9), \quad q_{By} = \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}} q_B \quad (10)$$

ここに q_B : 主流方向の単位幅あたりの流砂量, q_{Bx}, q_{By} : x,y 方向の流砂量, s : 河床材料の水中比重, d : 河床材料粒径, τ_*' : 無次元有効せん断応力, τ_{*c}' : 無次元限界せん断応力, u_* : 摩擦速度, h : 水深, τ_* : 無次元せん断応力, R : 径深である。河床変動値については、差分方法を変化させて比較した。また、流砂量を制御するために、以下に示す式を用いることとした。

$$q_{Be} = \alpha q_B \quad (11), \quad q_{Bye} = \beta q_{By} \quad (12)$$

q_{Be} は有効流砂量であり q_{Bye} は横断方向の有効流砂量である。 α, β はそれぞれ、全流砂量を調整する係数および、横断方向の流砂量が流線の曲がりによる 2 次流によって増大することを考慮した係数である。表 1 に数値計算条件を、表 2 に河床変動計算法と設定係数値を示す。それぞれ囲み番号が対応している。

表 1 数値計算モデル

Model	河床変動値計算	流砂量式 q_B	無次元有効せん断応力*
2dmk1		Meyer-Peter-Muller	岸・黒木の式
2dmk2		Meyer-Peter-Muller	岸・黒木の式
2dmk3		Meyer-Peter-Muller	岸・黒木の式
2dmk4		Meyer-Peter-Muller	岸・黒木の式
2dma		Meyer-Peter-Muller	芦田・道上の式
2dek		Einstein	岸・黒木の式
2dea		Einstein	芦田・道上の式

表 2 河床変動値計算法

計算法	x軸方向	y軸方向		
	前進	中央	1	1
	風上	風上	1	1
	前進	中央	0.5	2
	風上	風上	0.5	1

5. 数値計算結果と考察

図 3 に、Case-RH の条件による数値計算の河床コンターを示す。河床変動値の計算法による比較を行うため、2dmk1~2dmk4 に着目する。この 4 モデルのうち、最も実験結果に近い傾向を示しているのが 2dmk3 であるが、実験における特徴であった流下方向への洗

掘の未発達や、障害物手前における高い洗掘効果の再現には至っていない。しかし、他の 3 モデルでは堆積が生じる障害物前面にて唯一堆積が生じていない点は評価でき、さらなる改善により洗掘の再現可能性も示唆される。次に、流砂量式および無次元せん断応力式の違いによる影響について検討を行うため 2dmk1, 2dmk2, 2dmk4 を除いたその他のモデルに着目する。障害物後方の堆積形状を見てみると、2dek および 2dea では、堆積の集中する箇所が実験値や他のモデルに比べ、水路中央寄りであることが分かる。また、2dma および 2dea では、堆積域が下流に行くにしたがって水路中央へと向かう傾向がより強く現れている。このことから、Einstein の式および芦田・道上の式を用いることによって、堆積の生じる箇所が障害物後方から遠ざかる影響があると考えられる。そのため、この 2 式を用いている 2dea では、堆積の生じる位置が他のモデルに比べて全体的に水路中央寄りである。これは、水路実験の特徴としての「障害物後方に大きく堆積が見られる」という結果にそぐわないため、再現性の向上には、この 2 式の併用は不相当と考えられる。水路全体における傾向を比較してみると、2dmk1, 2dmk2 の障害物側面部の洗掘が左岸方向へ広がる傾向が強く見られ、この傾向は、障害物より下流方向への発達が支配的なその他のモデルと異なっている。そのため、この 2 モデルの洗掘は、河床変動値の計算法における設定係数の違いが影響していると考えられる。

次に、障害物を設置する位置が河床変動に及ぼす影響について検討するため、Case-CF の条件による計算結果の河床コンターを図 4 に示す。実験結果と比較して、2dea を除く全てのモデルにおいて、障害物前面で堆積が見られ、実験と逆の傾向が見られる。障害物を右岸に設置した Case-RH の際も、障害物前面における洗掘の再現には至らなかったことから、水衝部となる障害物前面の再現性向上のためには、式の見直しが必要である。また、2dmk2 および 2dmk4 では、障害物の両側面部における洗掘範囲が両岸方向へ広がる傾向が見られる。この 2 モデルのみに適用しているのが、逆流を考慮した x 軸方向および y 軸方向での風上差分法であり、その影響と考えられる。堆積域については、障害物の後方にて、堆積の集中する場所が 2 つの長い峰状に対称的に流下方向へ延びており、概ね実験と同じ傾向と言える。以上のことから、障害物周辺の河床変動の再現性については、側面から下流側にかけては良好な再現性が得られる可能性が高く、水衝部となる障害物前面においては、堆積が生じる場合もあり、これは流砂量式によって十分な砂の輸送が得られていないためと考えられる。

よってここに、横断方向に対する流砂量を限定的に多く設定し、障害物前面における洗掘を促す効果を期

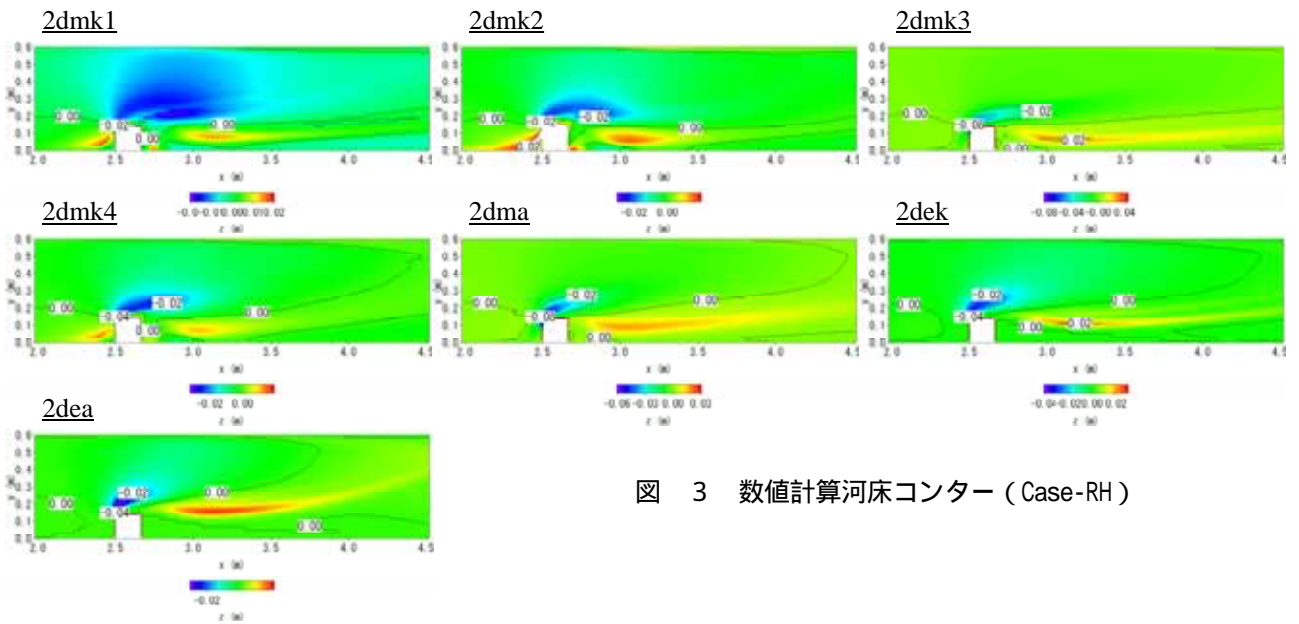


図 3 数値計算河床コンター (Case-RH)

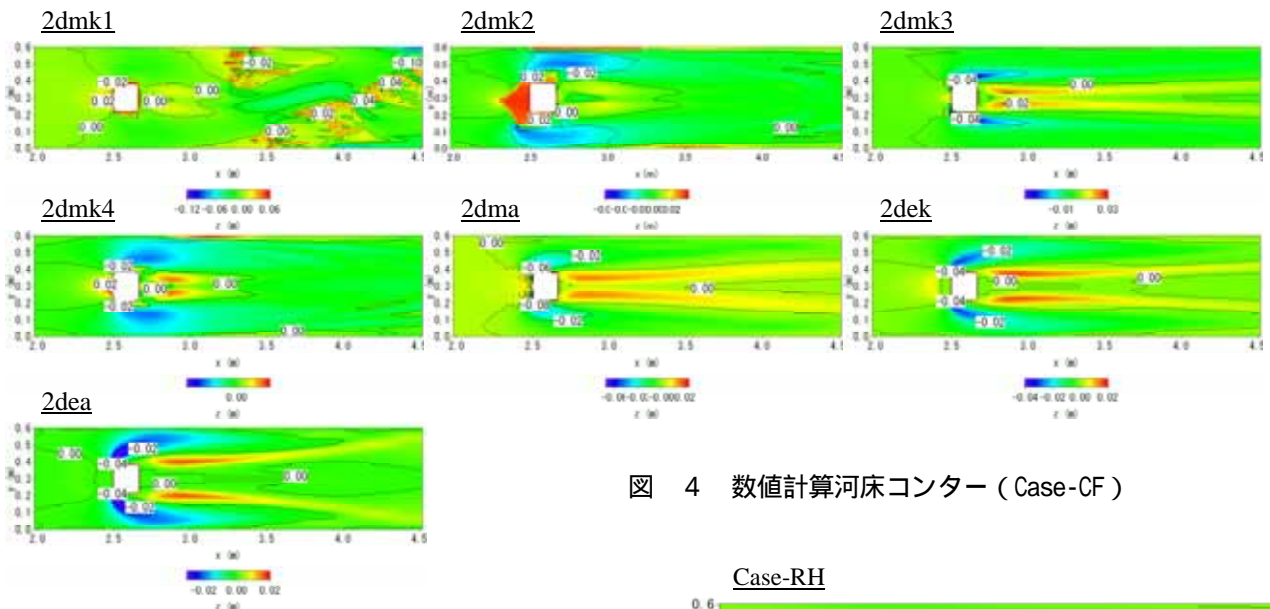


図 4 数値計算河床コンター (Case-CF)

待する計算モデルを、新たに 2dmk5 として試験的に導入し、他の 7 モデルと同様に比較していく。条件として Case-RH, Case-RF では $2.34 < x < 2.5$, $0.14 < y < 0.46$ の範囲で、Case-CF では $2.34 < x < 2.5$, $0 < y < 0.235$ の範囲で、3 次元的な流れ構造を考慮して式(12)の係数を 8 とした。図 5 に、2dmk5 による Case-RH, Case-CF の条件での計算結果の河床コンター図を示す。障害物前面における洗掘効果が十分に得られており、係数変更による影響も少なく、水路実験の特徴も維持されたままである。このことから、流砂量式の改編によって、その再現性が大いに改善される余地があることが示唆された。

障害物まわりにおける詳細な比較を行うために、図 6 に $x = -0.05\text{m}$, 0m , 0.2m における河床形状横断面図を示す。障害物の前面にあたる $x = -0.05\text{m}$ において、いずれの計算値も実験値を上回っており、障害物の設置箇所に近い位置ほど顕著に表れている。しかし、新たに加えた 2dmk5 モデルに着目すると、実験値に及ば

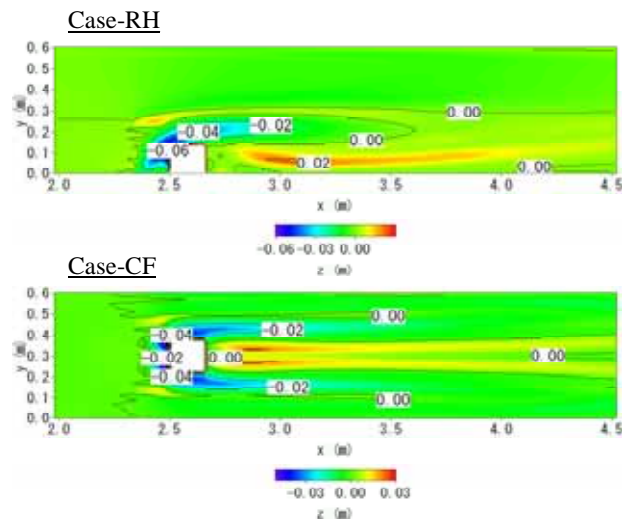


図 5 数値計算河床コンター

ないまでも非常に似た横断面形状を示しており、この結果は他のどのモデルと比較しても圧倒的に再現性が高い。このことから、2dmk5 の計算モデルによって、障害物まわりの洗掘効果と、その河床形状において良好

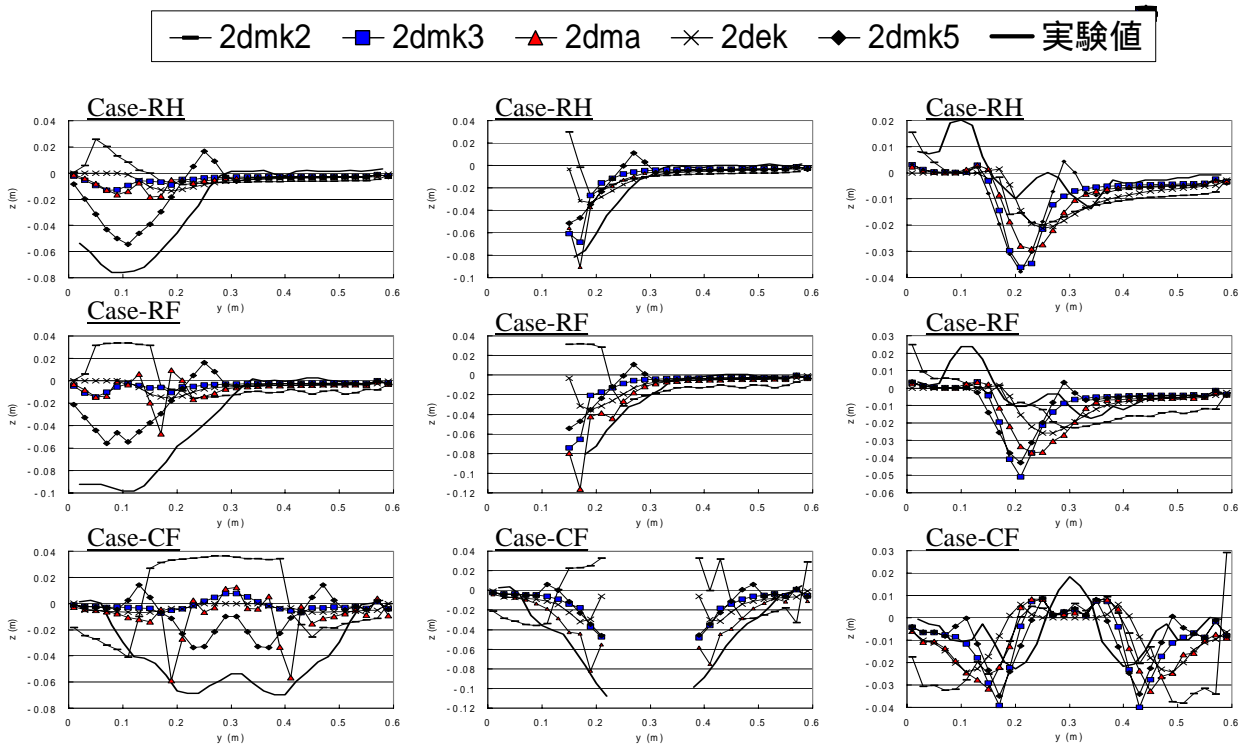


図 6 $x = -0.05\text{m}$ (左), $x=0\text{m}$ (中央), $x=0.2\text{m}$ (右) における河床形状横断面図

な再現性が得られることが分かる。この再現性は、いずれのケースにおいても維持されていることから、障害物を右岸・水路中央、どちらに設置しても適応可能なモデルであると言える。次に、障害物のちょうど側面にあたる $x=0\text{m}$ において、2dmk5 では依然として高い再現性を得ており、加えて 2dmk3 や 2dma のモデルに関しても、実験値に近い形状が見られるようになる。このことから、障害物の側面部の再現性は、前面に比べると飛躍的に高くなり、障害物に近いほど良好であると言える。また、Case-RH, Case-RF での左岸側および、Case-CF における両岸側では障害物の影響も少なく、実験値と一致する傾向がある、障害物後方にあたる $x=0.2\text{m}$ では、障害物を右岸に設置した Case-RH および Case-RF において、実験値では主に右岸側の堆積が特徴として見られる。しかし計算値では堆積はほとんど確認出来ず、実験値を上回るほどの大きな洗掘が現れている。特に $y=0.2\text{m}$ では、ここより上流にある障害物の洗掘効果が引き続き得られている計算値に対して、実験値ではすでに堆積の傾向が始まっていることが分かる。ゆえに、この部分における洗掘、堆積の再現性向上のためには、障害物後方における洗掘効果を軽減させるかもしくは、障害物から下流にかけて発達する洗掘作用を前面部のある横断方向へと向けさせることが重要と考えられる。その再現性向上のもとに、この断面における堆積効果も現れてくるのではないかと考えられる。次に、障害物を水路中央に設置した Case-CF であるが、水路中央で堆積量が最大に達する

実験値に対し、計算値の堆積最大点はその両脇に位置しており、再現性には若干誤差がある。また、計算値では障害物の洗掘が依然として強く現れている点も Case-RH, Case-RF の時と同様である。

6. おわりに

本研究では、2次元河床計算モデルを用いて、その再現性、適応性、発展可能性に関する検討を行った。数値計算による障害物周辺の再現性は、流れが流下方向に支配的である側面や後方に比べ、水衝部となっている前面において特に困難であることが分かった。そこで横断方向への流砂量を増大させた計算モデルの適用により、洗掘の効果およびその河床形状に関して高い再現性が得られた。ただし、実験では洗掘は局部的であるのに対し、数値計算ではその影響が時間経過とともに流下方向へ広がるため、改善が必要である。今後の課題としては、再現性に難が見られた障害物前面において、より自然な形での洗掘を導くことが出来る計算モデルの検討や、流速や流れ構造における再現性の検討および式の見直しが挙げられる。

参考文献

- 「土砂水理学」 河村三郎 森北出版
- 「コンピュータによる熱移動と流れの数値解析」 スハス V. パタンカー 原著
水谷幸夫 香月正司 共訳 森北出版