LES による実河川河床掃流力の予測

Calculation of bed drag of real river by LES

柴田良一*・中山昭彦** Ryoichi SHIBATA and Akihiko NAKAYAMA

*学生会員 神戸大学大学院 大学院工学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1) **正会員 Ph.D. 神戸大学大学院教授 大学院工学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

Large Eddy Simulation (LES) method has been applied to estimate the bed drag distribution of a small area of a real river. The simulation area includes complex beds, banks and an area where rare plant species grow due to a subtle balance of drag forces and sediment transport during floods. The drag has been calculated with logarithmic law and Manning's formula for four different cases. The results indicate that complex distributions of the bed drag due to complex three-dimensional flow are calculated fairly well while the absolute values may not be accurately predicted.

Key Words: Large eddy simulation, bed drag, real river, Numerical analysis

1. はじめに

乱流の数値解析法は進歩してきているとはいえ,実スケ ール河川流の3次元流の解析はなかなか進んでいない.流 路形状が複雑な上,河床は固定しておらずまた流れととも に変形する植生があり,さらには水面変動の大きな部分も あるため,3次元運動方程式を用いた数値計算は容易でない.

筆者らは乱流のシミュレーション法であるラージ・エディー・シミュレーション(LES)法を作成し(中山ら¹⁾) 自由水面乱流計算の適用,その計算法の有用性や精度の検 証を行ってきた.LESは大規模乱流運動を直接計算するの で,時間変動する3次元局所流の現実な再現の可能性をも っている.しかし最大の問題は,壁面,底面での抵抗は数 値計算で粘性スケールまで解像してはじめて厳密に算定 できる.通常の計算機で許容できる計算では粘性スケール を解像することはできない.従ってこの方法では底面抵抗 を精度よく算定することはできない.しかし大規模さらに はそれよりやや小さいスケールの局所運動を捉えられる ことは可能であるので,局所流の3次元流況を再現するこ とができ実河川流に適用してみる価値は十分ある.

笠井・中山²の LES 計算は、流路全体の抵抗を実際の値 に合わすことができれば、解像可能なスケールの空間分布 や時間変動はそのスケールの範囲内で十分予測できるこ とを示している.また通常のサブグリッドモデルでも壁面 抵抗が予測できる可能性のあることも示しており、本研究 の目的である底面抵抗の算定も解像可能な範囲で再現で きることを示唆している.そこで本研究では大スケールに 通常用いられる渦粘性サブグリッドモデルを適用した場 合どの程度の精度で底面抵抗が予測できるかを試算する.

近年河川計画には環境, 生態への影響を考慮することが 求められている. 流れの特性, 単に平均的な流速や抵抗力 だけでなく, 降雨パターンにより異なる出水状況により変 化する 3 次元的流れの河床と植生への影響を詳細に評価 することも求められている. 先述のシミュレーション法は こういった評価, 予測に有用な手法になりえる. 実河川で は乱流モデルを使った計算はほとんどなされておらず, 一 般的には 1 次元不等流解析や 2 次元解析が主流である³⁾. 水深積分式に基づく準 3 次元モデルなども提案されてい るが(例えば内田, 福岡⁴⁾) 乱れそのものの変動は再現で きない. LES は乱流の 3 次元数値計算法のひとつであり, 3 次元的な非定常流れを適切にとらえられる可能性がある.

以上のことから、本研究では LES により実河川流の解 析を行い、得られた流況データから河床に働く底面抵抗力 の予測を行い、その妥当性を検討する. LES によって流れ を3次元的に解析することで、場所的・時間的にどのよう に変化しているのか、また、流量・水位などが底面抵抗力 にどのような影響を及ぼしているかを捉えられる可能性 がある.

2. 計算対象領域の概要

本研究の計算対象は、兵庫県西部の瀬戸内海に流れ込む 一級河川である揖保川である. 揖保川水系は図―1のよう な水系で、図―1の実線で示した河川中流域付近が本研究 での計算対象領域である. この領域では河川は大きく右岸 側に湾曲しており、河床形状も流れも複雑に変化している. また、この右岸側の砂礫河原には貴重な植生の生育が確認 されているが、それらは出水の撹乱を受けることで維持されている⁵⁾. こういった生物多様性も河川計画に反映させることも重要となっている.本研究では、特に貴重な植生の群生地となっている、兵庫県宍粟市山崎町の図―2で示される領域の流況の詳細を再現する計算を行った.地形データを得る方法としては、水面より高い地点の地盤高データはレーザープロファイラにより測定する.水面下の地盤高データはレーザープロファイラによっては得られないため、河川の横断測量を行い、その結果から内挿して求めている.図―2(a)中に点線で横断測量に用いられた横断面を示した.図中の数字は河口からの距離(km)を表している.

3. 数値計算法

本研究では、中山ら¹⁾により自由水面乱流計算に用いら れ、検証されている LES 法を適用する. 従来の方法では 乱流モデルを使った計算はほとんどなされておらず、複雑 な3次元流を精度よく捉えるには限界があった. LES 法で は格子解像度により大スケール乱れはうまく捉えられる 可能性がある. この計算手法の概要は以下のようである.

3.1 基礎方程式

基礎式は非圧縮性流体の空間平均された質量保存式(連続の式)と運動方程式



図ー1 揖保川水系 (http://www.mlit.go.jp/river/toukei_chousa/kasen/jiten/nih on kawa/86064/86064-1.htmlより)



(a) 揖保川中流域の航空写真(実線は計算対象領域, 点線は横断測量地点,数字は河口からの距離)



<u>100m</u> (b) 計算対象領域の航空写真

図-2 計算対象領域

$$\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u}_i \overline{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + v \frac{\partial^2 \overline{u}_i}{\partial x_j^2} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \delta_{i3}g \quad (2)$$

$$\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \overline{u_i u_j}$$
(3)

である.ここで、 x_i は物理空間での直交座標、 \overline{u}_i は空間平 均された x_i 方向の流速成分、 \overline{p} は空間平均された圧力を密 度で除したもの、tは時間、 ν は水の動粘性係数、 τ_{ij} は Sub Grid Scale (SGS) 応力、 δ_{ij} はクロネッカーのデルタ、gは重力加速度である.また、上付きバーは空間平均された 値であることを示している.SGS 応力には標準 Smagorinsky モデルを用いる.標準 Smagorinsky モデルは SGS モデルとして歴史も古く、かつ一般的に使われている モデルである.本計算ではSmagorinsky定数は0.13とした.

数値解法は水面計算を組み込んだ HSMAC 法⁶を用いた もので概要は表—1に示すとおりである.移流項には3次 精度風上差分,時間進行は3次精度 Adams-Bashforth 法を 用いている.差分による離散化は不等間隔直交座標上で行 い,計算格子はスタッガード格子を用いている.底面では, 粘着条件を用いているが粘性底層を解像していない.粘性 底層を解像する場合,渦粘性を減衰させれば良い結果が出 るとされているが,減衰させず粘着条件を用いてもそこそ この結果が出るとの報告²もある.

本計算法の精度は実験室スケールの平坦開水路および 段落ち流れなどの単純な形状流れで検証され, RANS 法の 2 方程式モデルとも比較されている¹⁾. 平均量については 境界近傍の低レイノルズ数領域で調節されている RANS 法の結果に比べて必ずしも優れているとは言えないが,乱 流応力の非線形性,非等方性は実験に近い結果を示し,瞬 時乱れ構造が良好に再現できており,実河川流のように3 次元性,非定常性の強い流れの計算には適していると言え る.

3.2 河床掃流力の計算

上記の底面抵抗は計算結果から直接出るが、ここでは底 面近傍の流速より次に示す方法で河床に働く掃流力を計 算する.

(1) 対数則

開水路粗面上における乱流の流速分布式(対数則)は以下の式(4)で表される.

$$\frac{U_1}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{z_1}{k_0} + A$$
(4)

ここで、 U_l は底面最近傍格子における速度の主流方向、 奥行き方向、鉛直方向の合成成分、u*は摩擦速度、 z_l は底 面最近傍格子における鉛直方向距離、 κ はカルマン定数、 A は積分定数(=5.2)である. k_0 は粗度高さであり本研究では 揖保川中流部の河床代表粒径約 90~130mm を参考にし、 $k_0=0.001$ を河床全体に一様に与えている.これより底面抵 抗力は

$$\tau_w = \frac{\rho}{\left(\frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{z_1}{k_0}\right) + A\right)^2} U_1^2 \tag{5}$$

で求められる.

(2) Manning 則

Manningの平均流速公式は、平均流速と抵抗を結びつける式で形が簡便であり比較的よく合うことから広く一般的に用いられている式であり、式(6)のようである.

$$U_1 = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} i^{\frac{1}{2}}$$
(6)

ここで、nは Manning の粗度係数(=0.040)であり^{η}、河床全体に一様に与える. R は径深で流れ断面積と摩擦のかかる辺の比である. LES で底面近傍の空間平均的な流れが分か

表―1 計算法の概要				
要点	手法			
圧力解法	HSMAC 法			
水面計算法	圧力・速度と同時緩和			
移流項の差分	3 次精度風上差分			
時間進行	3 次精度 A-B 法			
座標	直交座標			
計算格子	スタッガード格子			
SGS モデル	標準 Smagorinsky			
底面境界	粘着条件			

っている場合,この式を底面最近傍の計算セルに適用し, *i* に河床勾配 $\tau_{,,\prime}/\rho g$, *R* に計算セルの流れ方向断面積とセ ルの横方向長さの比, U_l に底面最近傍セルの流速をとる と局所抵抗 $\tau_{,v}$ は

$$\tau_{w} = \rho g n^{2} R^{-\frac{1}{3}} U_{1}^{2}$$
(7)

で求められる.

4. 計算条件

計算領域,計算格子は図-3に示す.なお,図の煩雑化 をさけるため,格子点は一本おきの表示としている.計算 領域は図-2(b)で示した領域を直交座標不等間隔格子で 分割したもので,(南北方向長さ,東西方向長さ,鉛直方 向長さ)=(113m, 145m, 13m)である.図-3には解析に 用いられる座標系(南北方向にx,東西方向にy,鉛直上 方向にz)も示している.なお,x,y,z方向流速成分はu,v,wで表す.計算格子は不等間隔スタッガード格子で,格子間 隔は Δx =1.0m, Δy =1.0m, Δz =0.2m である.鉛直方向の 格子数に関しては,水面が一時的に,また局所的に上昇す るため,平均水面よりも上方向に多めに格子点を取っている.



図-3 計算格子と格子数

境界条件は次のようであるが,流入面流速分布に発達した滑面開水路等流の対数則分布

$$u(z) = u_* \left(\frac{1}{0.41} \log \frac{(z - z_b)u_*}{v} + 5.2 \right)$$
(8)

を仮定する. ここで 2,6 は底面の位置である. 河床形状には 凹凸があり計算が進めば乱れは自然と発生するので流入 変動は導入していない. 下流端では自由流出条件を設定し ている. 下流端での水深は固定せず,初期条件の仮定と水 路勾配および流入流量の調節により決まる. 壁面条件には 粘着条件を用いている. 従って,初期に与えた水深と流量 で実際に観測されている水位流量関係に落ち着けば全体 の抵抗は再現されたと考えられる. 本計算ではほぼ定常に なった段階の結果を示す. 現地観測データがないため表— 2のように Case-1 から Case-4 までの条件を与えて計算を 行った.

ここで、基準点とは、図―4に示した点であり、横断測 量の際に基準点としたものと同一である.また、この領域 の河原に貴重な植生の生育が確認されており、それらは出 水により浸水し、適度に攪乱を受けることで維持されてい るため、数値計算においても生育地となる河原への浸水の 有無を考慮に入れる必要があり、初期条件として与えた水 深もこの点を考慮して設定している.

5. 計算結果

図—5に Case-1 の水面最近傍格子における平均流速ベクトルの分布を示す.湾曲部外岸側で流速が大きく河原のある内岸側では流速は遅くまた逆流も見られる.

5.1 河床掃流力分布

シミュレーション結果より前述の方法にて求めた河床 掃流力の絶対値の分布を図—6,7,8,9に示す.(a) は対数則を基に底面抵抗を求めたもの,(b)は Manning 則 を基に底面抵抗を求めたものとなっている.底面抵抗は等 高線によって図示され,その間隔は2.0N/m²として描かれ ている.

計算ケース	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4
流入面の基準 点からの最大 水位 <i>h_{in}(m)</i>	0.14	0.37	-2.17	-1.96
流入面の平均 流量 Q _{in} (m ³ /sec)	65.4	77.5	40.4	70.0
流入面の平均 流速 <i>v_{in}(m/sec)</i>	1.33	1.59	1.37	2.34
河原の状態	浸水		非浸水	

表―2 計算ケース







図―6の Case-1 は、河原は浸水し、かつ流速の低いケ ースを想定している.計算領域は河川の蛇行部であるため、 外側の流速が大きく、内側の流速は小さくなっている.図 ー6の(a)(b)を見ると、ともに外側に大きな河床掃流力が働 いていることが示されており、流速の大きな地点で底面抵 抗も大きくなる傾向が捉えられている. Case-1 で浸水して いる河原は普段は浸水しないため、上流からの砂礫が堆積 しており鉛直方向高さが上昇するとともに水深が急激に 減少する地点となっている. このような地点では流速が急 激に上昇することが知られているが、そのような地点での 河床掃流力の増加傾向も捉えられている.

図一7の Case-2 では、河原は浸水し、かつ流速は速め である場合を想定している. Case-1 に比べ、より外側に大 きな流速が集中するためか、河床掃流力も Case-1 のとき にくらべ外側に集中している傾向が見られる. また、浸水 している河原に働く河床掃流力に注目すると、Case-1 のと きにくらべて広範囲に分布しているものの、高い値を示し ている範囲は狭くなっている. このことが植生にどのよう に影響するかは、現地観測によって出水時の流量と植生の 流出傾向を捉える必要があるが、今後さまざまな計算ケー スを想定することで、流量と底面抵抗および植生の流出傾 向を捉えられる可能性がある.



図-8に Case-3、図-9に Case-4 の計算結果を示す. 図-8、図-9ともに得られた河床掃流力の絶対値が Case-1、Case-2 に比べて大きな値となっていたため、等値 線の最大値を 10 倍にして描いている. なお、等値線の間 隔も図-6、7から 10 倍とし、20.0N/m²である. 河床掃 流力は式(5)および式(7)より底面最近傍格子の流速が大き いほど大きな値を示すが、Case-3、Case-4 は河原が非浸水 の状態を想定しているため、平均水深および平均断面積が 小さくなり、流入面での初期流速を遅めに与えたにもかか わらず、計算領域全体の平均流速が想定より増大してしま い、河床掃流力も増大してしまっているものと考えられる. 図-8の Case-3 は、河原は浸水せず、Case-4 と比べて 流入面の初期流速を遅めに与えているケースである。図-8では Case-1, Case-2 と比べ、河川の中央に河床掃流力の 大きな範囲が集中していることが見てとれる。これは流入 水深を小さくしたことで断面積が減少し、壁面の影響を受 けやすくなったものと考えられる。また、流入面付近の河 床掃流力が特に大きい傾向がある。

図―9の Case-4 では河原は浸水しないものの流入速度 を大きく与え、流入面での平均流量を Case-2 に近づけて いる. Case-3 と同様に河床掃流力は河川中央に大きな傾向 を示していることに加えて、Case-3 に比べて広い範囲で大 きな河床掃流力を示している.







5.2 断面 2 次流速ベクトル

以上で示した河床の掃流力分布と流れの3次元性との関係を調べるために図—11,12,13,14に断面2次 流流速ベクトルと流速の等値線を示す.ここで示す断面は 図—10において実線で示した断面であり,それぞれ(a) x=0, (b)x=28.5m, (c)x=57m, (d)x=85.5m, (e)x=114mの 断面を表す.いずれの場合も,等値線は内挿されているの で境界近傍では境界の外側にも見える.また,等値線の間 隔は0.2m/sec である.

図―11は Case-1 の場合である.いずれの断面も右岸 側と左岸側の二箇所に流下方向の流速が大きくなる傾向 が見られる.断面(c)は浸水した河原を含む断面であるが, 浸水した河原の範囲に等値線が密になっており,流下方向 に大きな流速が作用している.左岸側の断面2次流速ベク トルは河道中央方向へ向かっているのに対し,河道中央部



を境に流速方向が右岸側から河道中央方向に変化してお り、それに伴って左回りの渦が生じている. 断面(c)におい て右岸側に存在する河原の影響が現れているものと考え られる. 断面(d)で蛇行部の外側となる左岸側で断面2次流 流速ベクトルが大きくなっている他、旋回流も見られ、河 川の蛇行に加え河原の浸水による水深の急激な変化によ って乱れが生じている様子が見られる.

図-12の Case-2 においては Case-1 のときに見られた 傾向がさらに顕著にみられる他,壁面近傍の等値線がより 密になっている. 断面(c)の浸水した河原では一箇所に流下 方向の流速が集中しているものの、Case-1 ほど底面近傍は 密に分布しておらず,河床掃流力は広範囲に分布するもの のその値はCase-1 ほど大きくないという傾向と一致する.

図-13の Case-3 の場合は断面(a), 断面(b), 断面(c)に おいては河川中央付近の流下方向流速が大きくなってお り、河床掃流力の分布と一致する. 流入断面で中央に凸に

なるような断面形状を有していることが、流入面中央付近 の流速が他と比べて大きくなっている要因の一つと考え られる. Case-3 では河原への浸水を考えないため、初期水 深を Case-1, Case-2 に比べて減じており、必然的に鉛直方 向にとった計算点が少なくなるため、断面2次流流速ベク トルの傾向をとらえきるには多少不十分な面がある.

(m/sec

1.0m

図-14の Case-4 においては、全断面でほぼ Case-3 と 同様の傾向を示している. Case-3 に比べると等値線が多少 は密に底面近傍に分布しているため、底面近傍の流速が Case-3 に比べて大きくなっていると考えられる. 断面(e) では蛇行部の外側で流速が大きくなっており, 内側ではあ まり流速は作用していない.

5.3 河床掃流力計算手法の考察

図-6,7,8,9の(a)と(b)をそれぞれ比較すると、い ずれも得られた河床掃流力の絶対値は(b)の Manning 則を

用いた方が大きく計算パラメータの差異が表れている.式 (5),式(7)を比較すると、いずれも底面抵抗力は底面最近 傍格子の流速成分に比例することを表しており,絶対値は 粗度高さ k₀と Manning の粗度係数 n に依存することを示 している.従って、これらの値を適切に与えることが重要 となる.また、本計算ではこれらの粗度係数の値を全体に 一様に与えており、2 つの値に関連性もないため、今後河 床形状や粒径によって空間的に分布を持たせることによ り、計算結果の差別化を図り、より適切な計算手法の検証 を図ることができる.また、そのためには現地観測による 現場のデータが必要であり、今後の課題といえる.両手法 の関連付け、および、より適切な粗度係数を与える方法と しては、計算領域全体の水位差と底面の抵抗を合わせて考 え、全体がバランスするように計算パラメータを与えるな どといった方法が考えられ、今後検証していく必要がある.

6. 結論

実河川では乱流モデルを使った計算はほとんどなされ ておらず、一般的には1次元不等流解析や2次元解析が主 流であるが、本研究では乱流のラージ・エディー・シミュ レーション(LES)法を適用し、実河川約100メートル四 方の領域を水平方向 lm 鉛直方向20cmの解像度で流れの シミュレーションを行い、その流路内の河床底面掃流力を 算定した.LES法では粘性底層を解像せずには境界摩擦抵 抗をうまく再現することは困難とされているが、全体の抵 抗を実際と合わせ、底面近傍に局所の抵抗則、壁面則を適 用することにより少なくともその相対的分布は予測でき たといえる. 今後現地観測により検証する必要はあるが, 異なる出水状況により変化する 3 次元的流況と河床抵抗 の状況も評価することができ,今後壁面モデルの改良や, 解像度を上げることにより更に詳しい流況を再現するこ とも可能で,植生への影響の予測に発展できることも分か った.

参考文献

- 中山昭彦,江田智行,松村友宏:修正 HSMAC 法による開水路乱流の LES,水工学論文集,第49巻, pp.66 1-666, 2005.
- 2) 笠井大彰,中山昭彦: 複雑境界上乱流のLES 計算における 壁面モデルの検証,水工学論文集,第53巻,pp.1051-1056, 2009.
- Weiming Wu : Computational River Dynamics, Talor & Francis, London, 2008.
- 内田龍彦,福岡捷二:浅水流方程式と渦度方程式を連 立した準三次元モデルの提案と開水路合流部への適 用,水工学論文集,第53巻,pp.1081-1086,2009.
- 5) 大場達之, 宮脇 昭(編):日本の植生, 土木工学大 系3自然環境論(II), 彰国社, 東京, 69-210, 1982.
- Hirt,C.W. and Cook,J.L : Calculating three-dimensional flow around structure and over terrain, *J. Comp. Phys.* pp.324-340,1972.
- 7) (社)日本河川協会(編),建設省河川局(監修): 二訂 建設省河川砂防技術基準(案)調査編,日本河 川協会

(2009年4月9日 受付)