

礫・シルト充填河床モデルを用いた 礫河道の準二次元河床変動解析

SEMI-TWO DIMENSIONAL NUMERICAL ANALYSIS OF BED EVOLUTION USING A GRAVEL-SILT PACKED BED MODEL

関根正人¹・林 将宏²

Masato SEKINE¹ and Masahiro HAYASHI²

1 正会員 工博 早稲田大学教授 理工学部社会環境工学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

2 学生会員 早稲田大学大学院 理工学研究科 (同上)

The knowledge about an actual condition of sediment transport at any local point in river is now needed as basic information before we discuss the preferable state of river system. In this study, semi-2D numerical model was developed to make the long-term prediction of river bed deformation as well as the local sediment sorting be possible. Gravel-silt packed bed model(2005) was included in the developed numerical model, which was applied to Sakawa River, which was a steep gravel bed river in Kanagawa Prefecture. Based on the result of sample calculation, the numerical model was found to work fairly well in terms of qualitative consideration.

key word : bed deformation, sediment sorting, gravel bed river, gravel-silt packed bed model.

1. 序論

近年、「水系一貫土砂管理」という考え方が提唱されるようになったが、現在ならびに今後の河川のあるべき姿を考えると、その河川の土砂収支の実態を把握しておくことは極めて重要である。すなわち、河川上流の山地流域における土砂生産から、河道内の土砂輸送、さらには河口を経て海域への土砂供給に到るまで、一連の土砂の移動量ならびに粒度分布を縦断的に捉えること、ならびにこれが将来健全な流砂系となるように考えていくこと、などが求められている。しかし、これを実現するためには、数多くの知識と決断とが必要であることは言うまでもなく、土砂水理学的には次の二点に関する早急な取り組みが必要であると認識している。第一は、土砂移動実態を把握するためのモニターリングである。これは、土砂の移動量という量的なものにあわせて、粒径に関する質的な情報もあわせて蓄積していくことも含まれる。第二に、この土砂移動量ならびに河道の地形変動過程を数 10 年単位の長期にわたって予測する解析手法の確立を挙げることができる。河道システムの上流端から流入する水および土

砂の量および質が与えられたとき、あるいは河道に人為的なインパクトが加えられたときに、この河川地形にどのような応答が生じるかを予測できるようにしておくことが望ましく、そのための数値予測手法の開発が必要がある。

このような点に鑑み、本研究では、これまでの二次元あるいは平面二次元の解析手法とも異なる「準二次元河床変動解析手法」を考案することにした。これは、河道を低水路と高水敷とに分け、その各々における水ならびに土砂の輸送を解析した上で、それぞれの河床変動過程を予測しようとするものである。さらに、本論文では、この予測手法を神奈川県西部を流れる二級河川である酒匂川に適用し、その妥当性について考察を加えている。

2. 解析概要

(1) 数値解析の基本的な考え方

解析モデルの概要を説明する前に前述の酒匂川の特徴について簡単にふれておくことにする。模式図を図-1 に示す。酒匂川を上流に向かって遡ると、一方は静岡県から流れ出る鮎沢川に到り、もう一方

は河口から約 28.4km 上流の地点に建設された三保ダムに到る。また、河口から 2.2 km 付近に飯泉取水堰があり、ここで水位等の制御が行われている。そこで、本研究では、三保ダム直下を上流端とし、飯泉取水堰を下流端とする全長 26.2 km の区間を数値解析の対象とすることにした。また、支川に関しては、流量規模から判断して、河口から 23.5 km の地点で合流する鮎沢川と、10.0 km 地点で合流する川音川の二つの影響を考慮する。図-1 よりわかるとおり酒匂川はかなりの急勾配河川であり、典型的な礫床河川とも言える。この河川に関して注目すべきことは、ダム直下の河川上流域での河床低下と、川音川との合流点付近から下流の区域で近年指摘されるようになった河床材料の細粒化、の二点である。特に、後者の区域では高水敷上に砂あるいはシルトの堆積が目立ち、時空間的な河床変動と合わせて河床構成材料の分級も顕著に生じている。

次に、本解析の特徴について、以下簡単に説明する。まず、河床に関しては、礫と細砂の二粒径の材料によって構成されるものとし、その代表粒径を礫については $D_G = 64$ (mm)、細砂については $D_s = 0.25$ (mm) とした。対象とする河道区間全域にわたって河床材料の粒度分布を見ると、上流側の一部区間においていわゆる二峰分布になっているものの、全域でそのようなになっているわけではない。しかし、ここでは、対象区間全域にわたる河床の粒度分布が、二粒径の砂礫のみによってできるだけ良好に近似できるように留意してこれらの代表粒径を定めている。礫床河川における流砂過程の特徴は、礫は掃流砂として輸送される一方で、細砂は浮遊砂として輸送される点にある。掃流砂に関しては、粒度分布の違いによる限界掃流力の変化を考慮した上で Meyer-Peter and Muller の式に基づきその移動量を評価する。一方、微細土砂の輸送に関しては、これまで通り移流拡散方程式に依拠して解析するが、河床面からの微細土砂の巻き上げには、前報¹⁾と同様に 芦田・藤田の式²⁾を導入する。ただし、彼らの関係式を導入するに当たっては、河床表層の土砂の取り扱いを改める必要があり、「礫・シルト充填河床モデル」と名づけた手法³⁾を採用した。

次に、解析手法について説明する。本研究で対象とするような河床変動解析を行う場合、これまでとは主として一次元河床変動解析が行われてきた。しかし、河道の横断面形状が明らかに複断面の特徴を有するほとんどの河川では、自ずと予測精度に限界があり、同じ地点であっても低水路と高水敷とで異なる粒径の土砂が河床を被っているような実態を捉えることができない。また、平水時・洪水時を問わず

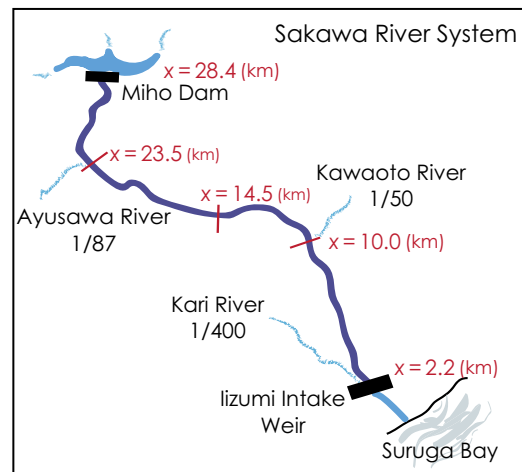


図-1 酒匂川の概要

川幅を一定として取り扱うため、洪水時などの限られた期間しか土砂移動が生じないといった現実とかけ離れた計算を行うことになる。一方、近年広く行われるようになった平面二次元解析では、数 10km にも及ぶ河道の長期変動予測を行うには計算負荷が大きすぎ、現在のコンピュータの性能からして不可能に近い。このような点に鑑み、本研究では上記のような問題点の解消を目指して、準二次元の解析手法をとることにした。なお、準二次元解析に関しては、福岡・藤田³⁾による解析などが報告されているが、これらはいずれも主として流れ場を対象としたものであった。これに対して、本研究では、これまでよりも基礎的に忠実に解析を行おうとしている点、ならびに流れ場のみならず河床変動の解析まで同じ枠組みの中で取り扱おうとしている点に特徴がある。河道横断面形状に関わる模式図を図-2 に示す。この図に定義されているように、低水路と高水敷からなる複断面河道を想定する。そして、水位のみ横断面内で一定とするものの、それ以外の流速、流砂量、河床高、粒度分布といった「現象を特徴づける変数」に関しては、流下方向に変化するばかりか、同一の横断面内でも低水路内と高水敷上で異なる値をとるものとした。ただし、低水路幅ならびに高水敷幅については時間によらず一定とし、側岸浸食などによる流路変動とそれに伴う土砂供給についてはこれを考慮しない。

(2) 流れの基礎式とその解析法

本研究では、任意の地点の河道横断面形状を図-2 のように近似し、対称性を考慮して右半分のみについて考える。そして、水位が高水敷高さよりも小さい場合（「流況 i」）と、大きい場合（「流況 ii」）とで異なった取り扱いが必要となる。ただし、

「流況 ii」の場合であっても水位 H は横断面内で一定とすることは既に述べた．解析の基礎となる支配方程式は，浅水流方程式を低水路幅あるいは高水敷幅にわたってそれぞれ積分し平均化した式とし，当然のことながら「流況 ii」の場合には，低水路内ならびに高水敷上の流れの相互作用を考慮しながら連立して解くことになる．諸変数に関しては，既知量である河川の半幅 B や，未知量である流速 U ，水深 h ，土砂濃度 C などの変数名に，低水路内であれば subscript の L を，高水敷上であれば H を付けて表記する．以下，順に基礎式について説明する

まず，運動方程式について説明する．低水路内ならびに高水敷上の流れに適用すべき方程式は，順に以下の通りである．

$$\frac{\partial}{\partial t} (h_L B_L U_L) + \frac{\partial}{\partial x} (h_L B_L U_L^2) = -g (h_L B_L) \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_L}{\rho} (\Delta\eta + B_L) + \Xi_U + B_L \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left(\bar{v}_{tx} \frac{\partial h_L U_L}{\partial x} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (h_H B_H U_H) + \frac{\partial}{\partial x} (h_H B_H U_H^2) = -g (h_H B_H) \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_H}{\rho} (h_H + B_H) - \Xi_U + B_H \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left(\bar{v}_{tx} \frac{\partial h_H U_H}{\partial x} \right) \quad (2)$$

ここに， $\bar{v}_{tx}$ は流下方向への拡散係数であり，摩擦速度と水深の積に比例するものとして，従来通りの方法で与えるものとする．また，式中の右辺第 3 項は，低水路内の流れと高水敷上のものが流速差をもつことにより生じる乱流混合の効果を表す項である．この項は，高水敷上に流れがない場合には 0 となるが，高水敷上に流れが生じる場合には，これを厳密に評価することは難しい．そこで，次式のような近似を導入することにした．

$$\Xi_U = h_H \cdot \nu_{ty} \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_{y=B_L} \approx h_H \times \nu_{ty} \cdot \frac{U_H - U_L}{L_y} \quad (3)$$

ここに， ν_{ty} は低水路と高水敷との境の鉛直面を通じての乱流拡散係数を表す． L_y は混合が起こる幅を表す．ここでは，これを SDS-2DH モデルにおける取り扱いを参考に水深の 10% の値に等しいとおくことにした．こうしたモデル化の是非に関しては今後の検討が必要であり，現時点の課題と考えているが，計算結果を定性的にも定量的にも大きく変えるものではないと予想されることから，現時点ではこのように取り扱うことにした．

また，式中の $\Delta\eta$ は，高水敷に流れがない場合には h_L ，流れがある場合には高水敷と低水路の比高差 $\eta_H - \eta_L$ を表す．式中の τ_L および τ_H は壁面せん断力を表す．

また，連続式に関しては，次のように考える．高水敷上にまで流れが及ぶ場合には，同一断面内の水

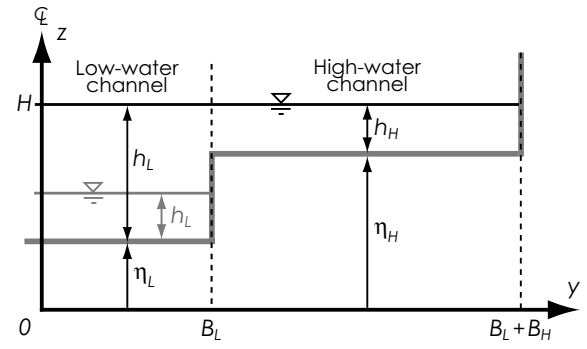


図-2 河道横断面形状に関わる変数の定義

位が横断面内で一定であるとし，図-2 中の記号を用いれば，低水路内の水位 $\eta_L + h_L$ と高水敷上の値 $\eta_H + h_H$ とが等しいものとする．このとき，水位 H に関する基礎式は次のようになる．まず，「流況 i」に対しては，

$$B_L \cdot \frac{\partial h_L}{\partial t} + \frac{\partial Q_L}{\partial x} = q_{sub}^* \quad (4)$$

となる．一方，「流況 ii」に対しては，

$$(B_L + B_H) \cdot \frac{\partial h_L}{\partial t} + \frac{\partial Q_T}{\partial x} = q_{sub}^* + B_H \cdot \frac{\partial (\eta_H - \eta_L)}{\partial t} \quad (5)$$

となる．ここに， Q_L は低水路内の流量の半分， Q_T は高水敷上まで含めた全流量の半分を表す．また，支川が合流してくる地点ではその流量の影響を考慮することが必要になり，本川の単位距離当たりに換算した支川流量の半分の q_{sub}^* と表している．支川の合流がない地点ではこの値が 0 となることは言うまでもない．

浮遊土砂の輸送に関わる移流拡散方程式は，次のようになる．まず，低水路内の流れに関しては，

$$\frac{\partial}{\partial t} (h_L B_L C_L) + \frac{\partial}{\partial x} (h_L B_L C_L U_L) = B_L \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left(\bar{\epsilon}_{sx} \frac{\partial h_L C_L}{\partial x} \right) + w_o B_L (\hat{E}_{sL} - C_{bL}) + \Xi_C + q_{Ssub} \quad (6)$$

が成り立つ．一方，高水敷上の流れに関しては，

$$\frac{\partial}{\partial t} (h_H B_H C_H) + \frac{\partial}{\partial x} (h_H B_H C_H U_H) = B_H \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left(\bar{\epsilon}_{sx} \frac{\partial h_H C_H}{\partial x} \right) + w_o B_H (\hat{E}_{sH} - C_{bH}) - \Xi_C \quad (7)$$

が成り立つ．ここに， E_s および C_b は河床からのシルトの無次元巻き上げ速度ならびに底面近傍濃度を表し，前者は後述する式(9)により算定される．また，式中の右辺第 3 項は低水路と高水敷との境である $y = B_L$ における拡散フラックスを表し，次式で定義される．

$$\Xi_C = h_H \cdot \epsilon_y \cdot \left(\frac{\partial c}{\partial y} \right)_{y=B_L} \approx h_H \times \epsilon_y \cdot \frac{C_H - C_L}{L_y} \quad (8)$$

式(3)～(8)の解法に際しては，これらを有限差

分法の考え方に従って離散化することにし、計算格子としてスタッガード格子を採用した。また、式(1)、(2)および(6)、(7)の解法に当たっては、これらの式を保存形から移流形に直し、その移流項の取り扱いにCIP法を適用した。

(3) 礫・シルト充填河床モデル

本研究では、河床を大礫と微細土砂の二粒径で構成されると仮定しているが、このように粒径差が大きい場合には、礫床からの微細土砂の巻き上げを芦田・藤田²⁾による「巻き上げ速度式」により評価するほかない。なぜならば、これまでよく使われてきた例えば Itakura & Kishi⁴⁾ の式のような推定式は、主として粒度幅のあまり大きくない砂床河川を対象として導かれたものであり、その適用性に限界があると考えられるからである。芦田・藤田²⁾によれば、図-3に示すような礫(粒径 D_G)とシルト(あるいは細砂、粒径 D_S)からなる河床からのシルトの巻き上げ速度式は次のように定式化される。ここで重要なことは、粒径 D_S のシルトの巻き上げ量が、その上の水流の掃流力に加えて、礫頂部からシルト層上面までの鉛直距離 Δ_s の影響を顕著に受けるということである。これは、シルトの巻き上げに及ぼす礫による遮蔽効果が無視し得ないためである。芦田・藤田による巻き上げ速度式を整理して示すと、次のようになる。

$$E_s = \frac{2}{3} K F_s \sqrt{\frac{3}{R_s + 1}} \frac{1}{\pi} \frac{\sqrt{ck^2}}{\xi_o} \int_{\chi_o}^{\infty} \sqrt{\chi - \chi_o} e^{-\frac{\chi^2}{2}} d\chi$$

$$\xi_o = \frac{w_o}{u_*}, \quad \chi_o = \frac{\pi}{8} C_{Do} \frac{\xi_o^2}{ck^2}, \quad C_{Do} = 2 + \frac{24}{\frac{w_o D_s}{\nu}} \quad (9)$$

ここに、 E_s は単位時間・単位面積当たりに巻き上げられるシルトの体積をその最終沈降速度 w_o で除した無次元量を表す。また、式中の c は揚圧力係数、 k は遮蔽係数であり、前者は平均粒径を D_m として $R_c^* = u^* D_m / \nu$ の関数となり、後者は Δ_s / D_G の関数となる。また、 R_s はシルトの水中比重、 ν は水の動粘性係数、 C_{Do} は抗力係数であり、 K は定数 (=0.035) である。

このように式(9)を適用して土砂の巻き上げ量を評価しようとする、摩擦速度 u^* に加えて河床面からシルト上面までの鉛直距離 Δ_s をも既知量として与える必要がある。そこで、式(9)を組み込んだ河床変動解析を行うためには、河床表面の高さや河床表層の粒度分布ばかりでなく、 Δ_s をも同時に評価していくことが求められる。これを可能とするためには、従来の河床変動計算で用いられてきた「交換層」の取り扱いに代わる方法を導入する必要がある。このような取り扱いを可能とするため、著者ら

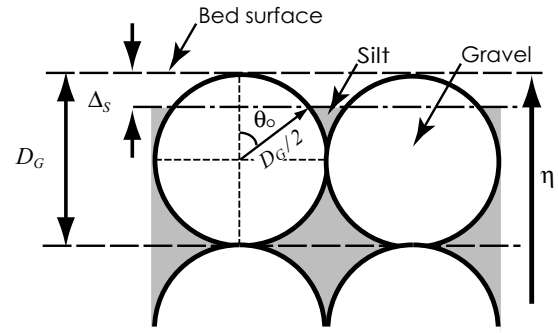


図-3 礫・シルト充填河床の概念図

は「礫・シルト充填河床モデル (Gravel-Silt packed bed model)」と名づけた方法を考案しており、ここではこれを導入する。このモデルの詳細については前報¹⁾で既に報告されているため、ここではその概要のみ記すことにする。基本的な考え方は、以下の通りである。(a) 河床は原則として礫群によりその骨格が形作られるとして、礫のみによる河床変動計算によって礫頂部の高さを算定する、(b) シルトは礫骨格の間隙を充填するように存在するが、間隙を充填して余りある量のシルトがある場合には、礫頂部を越えてシルトだけの堆積層が形成される、というものである。具体的には、河床表面下の浸食が及ばない深さに基準面をとり、その上方の河床面まで及ぶ単位面積当たりの土砂の柱をコントロール・ボリュームにとり、その中の土砂の体積保存を考える。その際、礫間に取り込まれたシルトはこのコントロール・ボリューム内の下方から順に充填されていくとする。また、芦田・藤田によれば、礫間からのシルトの巻き上げは Δ_s が礫径 D_G 以上になるとほとんど生じないとされることから、ここでは礫径に相当する厚さの表層を河床表面下にとって、この中でシルト充填状況、いいかえれば体積比率を知ること、前述のパラメータ Δ_s を評価することにした。

3. 河床変動解析結果

解析結果を図-4に示す。これは、酒匂川の本川ならびに支川にそれぞれ一定の流量の水が流れるとして行った河床変動解析の一例であり、それぞれの流量は実データを参考に定めた。すなわち、本川上流端からの流量を $90\text{m}^3/\text{s}$ 、鮎沢川ならびに川音川からの合流流量をそれぞれ $15\text{m}^3/\text{s}$ とした。これは、この河川にとって年に数回程度発生する洪水に相当する。また、本川上流側からの土砂供給はなく、支

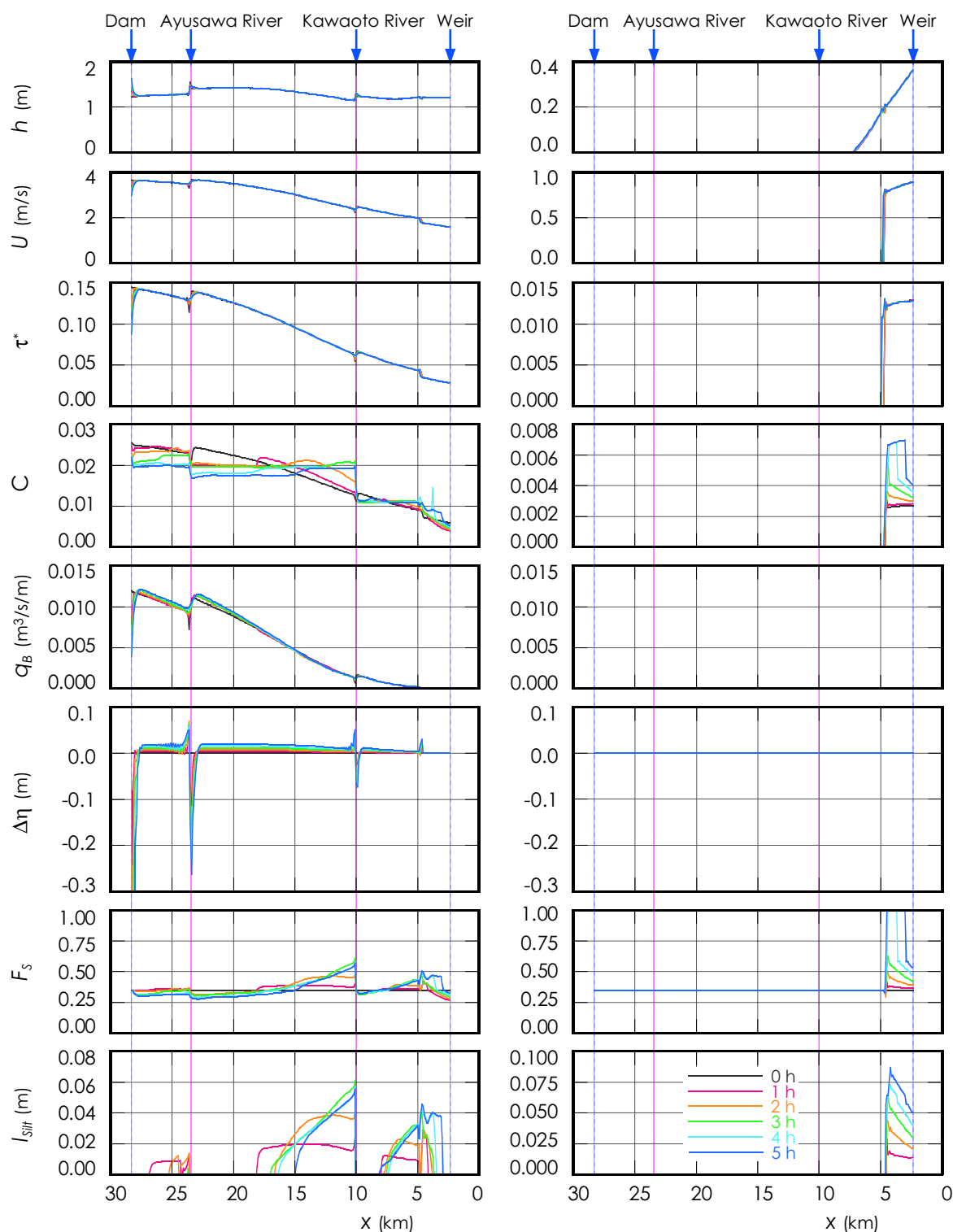


図-4 河床変動解析結果：左側が低水路内，右が高水敷上の諸量の時間変化を表す．図の横軸は河口を原点としたものである．
 h ：水深， U ：流速， τ^* ：無次元掃流力， C ：浮遊砂濃度， q_B ：単位幅掃流砂量， $\Delta\eta$ ：初期河床からの河床変動量， F_s ：細砂の含有比率， l_{sil} ：細砂層の厚さ

川である鮎沢川からは掃流力に見合った量の礫を、川音川からは同じく砂をそれぞれ流入させることにした。なお、計算に当たって必要となる酒匂川の川幅、初期状態での低水路高さならびに高水敷と低水路の比高差の縦断方向データについては図-5に示す通りである。初期河床は、河床骨格を構成する礫

の間隙が全て細砂で充填されている条件とした。図-4の結果を解釈する上で注目すべき地点は以下の通りである。低水路に関しては、図-5に示されているように15～20kmの区間で川幅が急増しており、上流側に比べてこの区間ならびにその下流側で掃流力が低下している。高水敷に関しては、7.2km

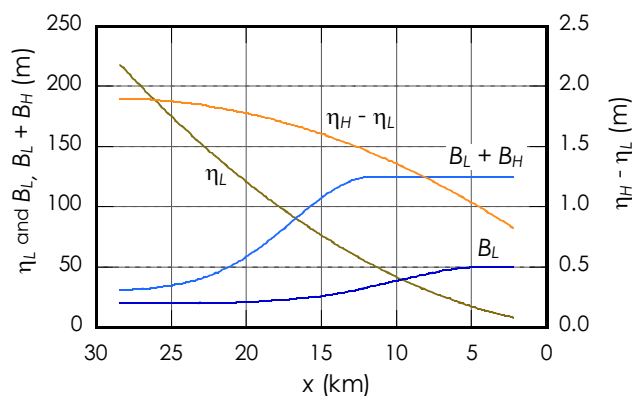


図-5 計算に用いた初期河床高ならびに川幅 $\eta_H - \eta_L$ は高水敷と低水路の比高差を表す。

地点付近でそれまで低水路に限られていた流れが高水敷上にまで及ぶようになり、下流端までこの状態を保つことになる。こうしたことを踏まえて、得られた解析結果を整理すると以下のようになる。

(1) 低水路では、上流端付近ならびに二つの支川合流点下流側において顕著な河床低下が生じる。特に上流端付近では、浸食の範囲が時間とともに下流側に拡大し、その浸食深は図-4には描かれていないものの最大で1.8mとなった。また、これらの区域で浸食された礫の多くは、上記の支川合流点付近を除くほぼ全域に堆積しており、特に合流点の上流側付近ならびに高水敷に水がのりあげる地点において顕著なものとなった。一方、17～10kmの区間ならびに7.2～3kmの区間で細砂の堆積が生じ、この区間で河床が細粒化することがわかる。

(2) 高水敷上では、4.8kmより下流で顕著な細砂の堆積が進み、一部区間では河床表層が砂のみで構成されることになった。

上記(1)の7.2～3km区間での細砂の堆積には、直上流で合流する川音川からの細砂の流入がその一因と考えられるほか、高水敷へ水がのりあげることと関連して生じる掃流力の低下に伴い、上流から輸送されてきた細砂がこの区間で堆積するほかなくなるためと考えられる。また、川音川との合流点の下流側で細砂の堆積が生じないのは、礫の浸食が顕著であるために、礫の間隙を充填する細砂も同時に浸食を受けるためである。一方、(2)の高水敷上の細砂の堆積は、低水路から高水敷上への浮遊土砂の横断方向乱流拡散の結果と考えられる。なお、上記のような細砂のみで表層が形成されていく過程を合理的に再現するためには、本研究で適用した「礫・シルト充填河床モデル」が有効であるものとする。なお、高水敷上では、礫を移動させるほどの掃流力がなく、結果として礫が堆積も浸食も起こすことは

なかった。

このように、17kmより下流側では川音川との合流点直下の限られた区間を除き、河床が細粒化することが確認された。このことは、現地で確認されている事実とも符合するものであり、今後さらなる検証が必要であるものの、本解析により現象をかなり合理的に再現できることを示唆するものと言える。

4. 結論

本研究では、実河川の河床変動過程を長期予測する手法について検討し、低水路内の流れと高水敷上のものとのそれぞれ別々に解いていく準二次元解析法を考案した。また、礫床河川の河床変動を合理的に取り扱うための新たな考え方として、「礫・シルト充填河床モデル」と名づけた方法を導入した。本論文では、この解析手法を酒匂川に適用して、洪水に相当する一定流量が流れる条件下で河床変動解析結果を示した。その他の条件でのものとあわせて判断すると、概ね合理的な解析結果と考えることができ、解析手法の有効性が示唆された。今後は、実際のハイドログラフを入力情報として、本来の目的である長期予測計算を行い、実河川の土砂動態を明らかにしていく予定である。なお、その際には、低水路の河岸の浸食とそれに伴う川幅の時空間的变化についてもあわせて考慮することが望ましい。今後は、この点も含めて、解析手法の更なる精緻化に努めていく予定である。

謝辞：本研究の遂行に当たり、神奈川県県土整備部河川課からデータの提供を受けた。また、当時当大学学生の平佐田純也君、星野壮一君の協力を得た。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 関根正人，矢島英明：礫・シルト充填河床モデルを用いた植生を伴う流路の変動解析，水工学論文集，第48巻，991-996，2005。
- 2) 藤田正治，芦田和男：平衡・非平衡浮遊砂量算定の確率モデル，土木学会論文集，No. 375 / II-6，107-115，1986。
- 3) 福岡捷二，藤田光一，新井田浩：樹木群を有する河道の洪水水位予測，土木学会論集，No. 447 / II -19，17-24，1992。
- 4) Itakura, T. and Kishi, T. : Open channel flow with suspended sediments, Proc. of ASCE, 106, HY8, 1325-1343, 1980。

(2006. 9. 30 受付)