

河床上における存在量を考慮した 浮遊微細粒子輸送モデル

A TRANSPORT MODEL OF FINE SUSPENDED PARTICLES CONSIDERING
THE AVAILABILITY ON THE BED

泉 典洋¹・ピライラー シタン²・田中 仁³
Norihiro IZUMI, Sitang PILAILAR and Hitoshi TANAKA

¹正会員 Ph.D. 東北大学大学院工学研究科 土木工学専攻 (〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 06)

²学生会員 M.S. 東北大学大学院工学研究科 土木工学専攻 (同上)

³正会員 工博 東北大学大学院工学研究科 土木工学専攻 (同上)

The understanding of the transport process of suspended fine particles in rivers becomes important from a viewpoint of biological environment in rivers. In this study, we propose a new transport model of suspended fine particles in rivers considering the availability of fine sediment on the bed. An availability function of fine sediment on the bed is introduced to take into account the reduction of the entrainment rate through lack of fine sediment on the bed. In a sample calculation with the assumption that the flow is in the unsteady normal flow condition, it is shown that the model can delineate an important fact that the SS concentration increases only up to some limit even if the bed shear stress increases. In addition, we applied the model to a field observation and show that the model can describe an important feature that the SS concentration is higher at the beginning of a flood and decreases afterward despite large discharge.

Key Words : *suspended fine particles, SS, washload, fine sediment transport*

1. はじめに

河川流による浮遊砂の輸送過程については土砂輸送や各種移動床現象解明の観点から歴史的に数多くの研究が行われてきた。一方で、河床と交換せず下流へと流送されると考えられてきたウォッシュロードの輸送過程については、工学的な重要性が低かったことから、研究が行われるようになったのは比較的最近のことに過ぎない。近年、窒素やリンなどの様々な栄養物質が細粒成分に吸着されて輸送されること、また河口部や沿岸部における生物環境に大きな影響を与える有機物の大部分が浮遊微細粒子の状態で輸送されることなどが次々と明らかとなるに至って、ウォッシュロードのような微細粒子の輸送は環境問題の観点から注目を集めるようになってきている。これまでもいくつか浮遊微細粒子の輸送モデルが提案されているが、そのほとんどは流量のべき乗で簡易的に表す取り扱いや、浮遊砂に準じた取り扱いであった^{1),2),3)}。そのようなモデルでは、ウォッシュロードの濃度はハイドログラフとほぼ同様の挙動をすることになり、後述するような、流量と SS 濃度の間に見られるヒステリシスや多価関係を十分に再現することはできない。

従来の浮遊砂の理論では、浮遊可能な土砂が河床上

に豊富に存在することを前提としてきた。河床上の細砂やシルトが流水中に巻き上げられても、河床上からなくなることは想定されていない。実際、河床変動が起こるような礫や粗砂まで含めた大規模な土砂輸送現象では、河床が低下すると河床表層下に堆積していた土砂が現れる。通常は表層下の堆積土砂も細粒成分を有しており、河床からの細砂供給がなくなることはほとんどない。このような状況下においては、河床材料の粒度別構成比に空間的な分布が存在したとしても、河床からの浮遊砂の巻上量を支配する最も大きな要因は底面剪断力や摩擦速度といった流れのパラメータであると考えて大きな誤りは生じないであろう。

ところがウォッシュロードと呼ばれるような更に細かい細粒成分の場合、その存在量に大きな空間的偏りが存在する。流速の大きな河道中央部や瀬ではウォッシュロードに相当する細粒成分はほとんど河床に存在しないにも関わらず、流速の小さい側岸部近傍や淵には豊富に存在していることがわかっている⁴⁾。

このような細粒成分の空間的な偏在は、次のようなことを示唆している。細粒成分の輸送過程を考える場合、洪水時など底面剪断力が大きい状況下で河床上の細粒成分の大部分が巻き上げられるようなことが起こると、河床上の細粒成分の量は大きく減少するはずで

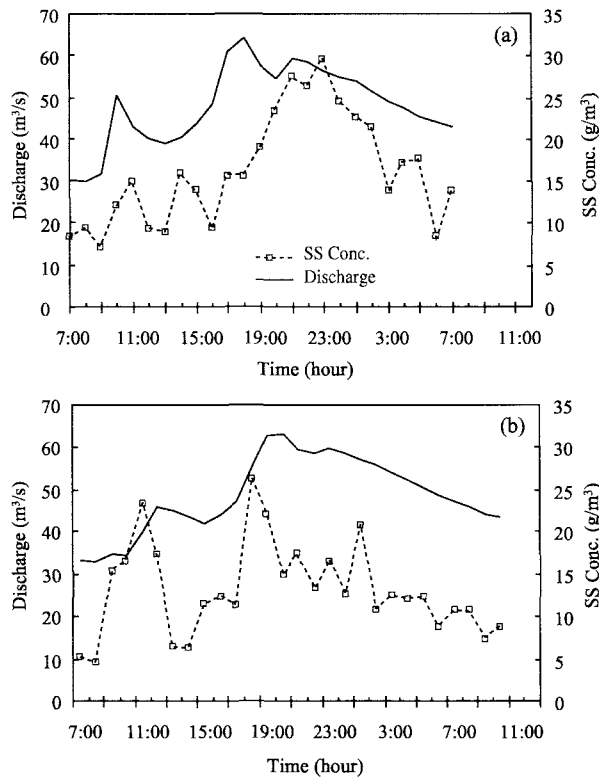


図-1 七北田川（仙台）で観測された水位と SS 濃度の時間変化。(a) Station 1, (b) Station 3. 水位測定地点と SS 濃度測定地点にずれがあることに注意。

ある。そのような場合、河床からの巻上量を支配するのは底面剪断力ではなく、むしろ河床上における細粒成分の存在量であることが推測される。このような場合、浮遊砂の輸送理論を微細粒子の輸送に適用することは大きな誤差を生じることになる。

本研究は、このような考えから、河床上における微細粒子の量が限られているような場合を想定し、河床上における粒子量変化の影響を考慮した新たな微細粒子輸送モデルを提案するものである。

2. 流量と SS 濃度の間に見られるヒステリシス現象

図-1 は、仙台市北部を流れる中小河川七北田川で小規模出水時に観測された SS 濃度と流量の時間変化を表わしたものである。図-1(a) および (b) はそれぞれ Station 1 および 3 での観測結果であり、図-2 にそれぞれの観測地点の位置を示した。また図-3 は Station 1 および 3 における平水時の水深はそれぞれ 1 m および 1.5 m 前後であり、洪水時の水位変化はいずれの地点でも 40-60 cm 程度であった。図-1(a) 中の流量は Station 1 の SS 観測地点より約 0.6 km 上流の市名坂のものであ

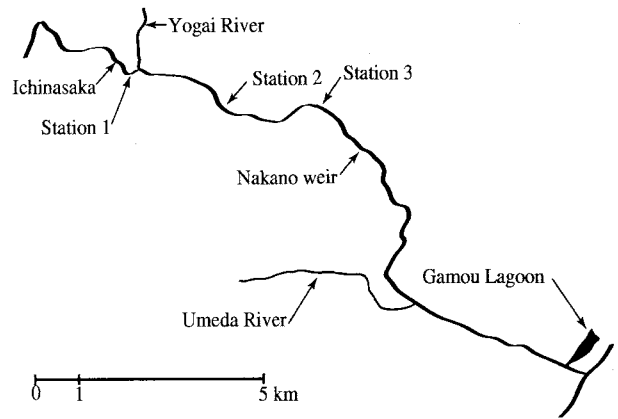


図-2 七北田川と観測地点周辺。

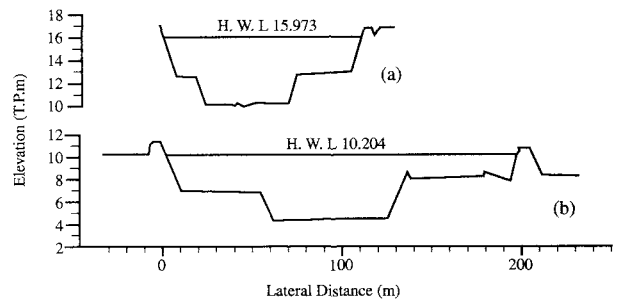


図-3 河道断面形状。(a) Station 1, (b) Station 3.

り、(b) 中の流量は Station 3 の SS 観測地点より約 1.4 km 下流の中野堰のものである。いずれの地点の平均流速も 1 m/s 内外であるから、位置のずれを考慮しても (a) の Station 1 では流量のピークが早く現れ、(b) の Station 3 ではほぼ同じか SS 濃度のピークが僅かに早く現れていることになる。

このように一般に SS 濃度と流量が一對一に対応しない現象は以前より広く知られていた⁵⁾。佐藤、渡邊⁶⁾および著者ら⁷⁾は (a) のように流量のピークが先に現れる原因を洪水波の伝播速度が平均流速の 3/2-5/3 倍になる、いわゆる Kleitz-Seddon の法則によるものであるとしている。一方著者ら⁷⁾は、(b) のように流量と濃度のピークがほとんど同時に現れる現象は、河床上に微細粒子が比較的豊富なため、流量がピークを迎えると河床からの巻き上げも最大となるために生じる現象ではないかとしている。

図-1(b) の場合、ピークの現れる時期については上述の説明が可能である。ところが、比較的流量の小さいピーク前と大きい流量が長く続くピーク後の濃度を比べると、むしろ流量の大きいピーク後の SS 濃度の方が、若干小さくなっていることがわかる。これを説明するための一つの仮説として次のようなことが考えられ

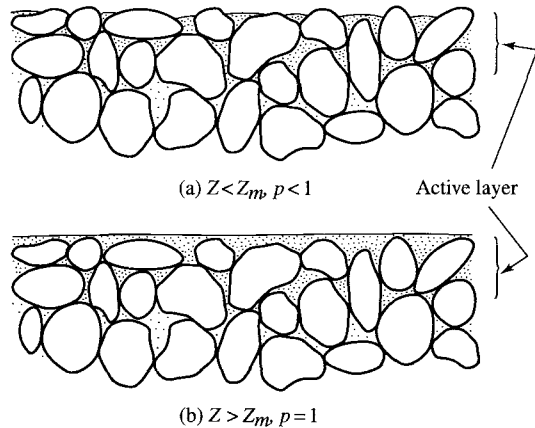


図-4 河床上での微細粒子利用可能度関数 p の概念図。

る。流量ピーク以前に河床上に比較的豊富に存在していた細粒成分は、流量のピークに伴う底面剪断力の上昇によって河床から大量に巻き上げられる。すると河床上の細粒成分は急速に失われ、その後、引き続き流量が増加しても河床からの巻上量は増加できなくなったものと考えられる。

本研究は、この流量と SS 濃度に見られるヒステリシス現象や多価関係が河床上における細粒成分の変化によるものであるとの観点から、その影響を考慮した新たな微細粒子輸送モデルを提案するものである。

3. モデル

(1) 微細粒子の巻上量と河床上の利用可能度関数

河床上は礫や粗砂など容易に浮遊しない粗粒成分と、容易に浮遊する細粒成分によって構成されているものとする。ここで細粒成分には様々な粒径の成分が含まれるが、問題を簡単にするために細粒成分を一まとめに扱うこととする。さらに粗粒成分は動かないものと仮定し、河床表層近くの粗粒分の隙間を細粒分が埋めるような形で存在していると考え。もし細粒分が河床上に豊富に存在し、粗粒分を完全に覆うような状態であれば、河床からの細粒分の巻上量は流れによって生じる底面剪断力によって決定される。ここではよく用いられる次のような形の巻上量式を仮定する。

$$E = \alpha \left(\frac{u^*}{w_s} \right)^\gamma w_s \quad (1)$$

ここで E は巻上量、 u^* は摩擦速度、 w_s は浮遊粒子の沈降速度である。また α および γ は経験的に求められる定数であり、細粒分の物理特性によって変化する。ここでは $\alpha = 1.0 \times 10^{-6}$ 、 $\gamma = 3$ とする。

いま、河床上に細粒成分が豊富に存在しないような状況を考える。細粒成分は河床上の一部や粗粒分の隙

間に存在しているが、河床上を完全に覆ってはいない。このような状況下では、細粒分が豊富に存在する場合に比べて巻上量は減少するはずである。減少した巻上量 E_s を次のように表す。

$$E_s = pE = p\alpha \left(\frac{u^*}{w_s} \right)^\gamma w_s \quad (2)$$

ここで p は、河床表層の交換層 (active layer) において巻上に供することができる細粒成分の率 (微細粒子の利用可能度関数) を表すパラメータであり⁸⁾、細粒分が河床上に豊富に存在する場合 1 の値をとり、豊富に存在しない場合 1 以下の値をとる (図-4 参照)。この p の関数形については不明であるが、河床上における細粒成分の存在量の関数となっていることは間違いがないだろう。そのような関数の内、最も簡単なものは次のような線型関数である。

$$p = \begin{cases} \frac{Z}{Z_m}, & Z < Z_m \\ 1, & Z \geq Z_m \end{cases} \quad (3)$$

ここで Z は河床上の単位面積当たりの交換層内に存在する細粒成分の量 (堆積) を表し長さの次元を持つ変数である。また Z_m は Z がそれ以上の値になっても巻上量が増加しなくなる飽和値を表している。

(2) 微細粒子の堆積量と捕捉量

従来の河床変動モデルでは、浮遊砂の堆積量は河床上での浮遊砂濃度と沈降速度の積によって次のように表わされる。

$$D_p = w_s c_0 \quad (4)$$

Parker⁹⁾は乱泥流を対象とした実験を行い、底面近傍濃度 c_0 と水深平均浮遊砂濃度 C の間に近似的に次のような関係があることを明らかにしている。

$$c_0 = r_0 C \quad (5)$$

ここで r_0 はほぼ一定値の 1.6 とみなすことができる。泉ら¹⁰⁾は実験の結果から、河口噴流による浮遊砂堆積のプロセスでも上式とほぼ同様の関係が成り立つことを明らかにしている。ここでも上式を用いることにする。ただし本論文で考えている微細粒子は浮遊している細かい砂粒子だけでなく、粒状態有機物など砂粒子と比較して比重が小さい粒子も含んでいると考えべきである。比重が水に近い粒子では沈降速度が小さくなるため、式 (4) および (5) から求められる堆積量は非常に小さくなることが予想される。河床にほとんど堆積せず巻上が卓越するとすると SS 濃度は流下方向に上昇を続けることになる。ところが実際の河川ではこのようなことは生じない。なぜなら流水中の SS 濃度が上昇すると、SS の一部が河床にトラップされる別の

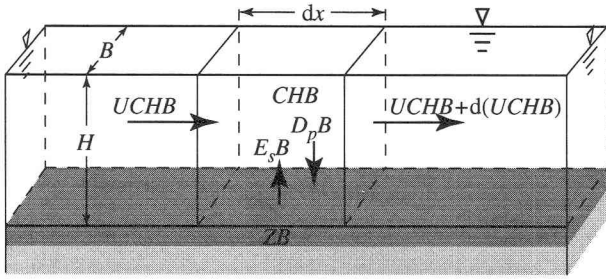


図-5 浮遊粒子の輸送と河床との交換過程の概念図。

機構が存在するからである。Elliott and Brooks^{11),12)}は流水と河床表層下の浸透水の間に周期的な流れが発生し、浮遊粒子の一部が表層の河床材料に濾されることによって河床表層下に捕捉されることを明らかにしている。このような流水の交換過程については未だほとんどわかっていないのが現状であり今後更なる研究が望まれるが、ここではこれまで明らかになった事実を基に河床によるSSの捕捉機構をモデル化してみる。Elliott and Brooksによれば、流水の交換率が等しいと考えられるような場合、SSの捕捉量はSS濃度に比例する。そのとき次式が成立する。

$$T_r = \beta_s C \quad (6)$$

ここで β_s は河床材料の粒径分布や、流れの状態によって変化する速度の次元を持つパラメータであるが、それについて詳細は不明である。ここでは比較的粒径分布や流れの状態が大きく変化しない程度の区間を考えて第一近似的に定数と仮定する。上式は浮遊砂の堆積量を表わす式(4)および(5)とほぼ同じ形をしていることがわかる。すなわち比重が軽い細粒物質も濃度に比例する量だけ河床上に捕捉されることになる。そこで堆積量 D_p と捕捉量 T_r を合わせ、堆積量 D_p によってあらためて次のように表わすことにする。

$$D_p = (w_s r_0 + \beta_s) C = \beta C \quad (7)$$

ここで β は速度の次元を持つパラメータである。

(3) 浮遊粒子の輸送と河床との交換過程

図-5は、微細粒子の輸送過程と河床との交換過程の概念図である。河床からの巻き上げと河床による捕捉によって浮遊粒子は流れと河床の間で交換される。また河床から巻き上げられた微細粒子は流れによって輸送される。水深を H 、川幅を B とし、広幅矩形断面水路を仮定すると、流水中のSS濃度の変化は、巻き上げと堆積(捕捉)の項を導入した次の移流方程式で記述できる。

$$\frac{\partial CHB}{\partial t} + \frac{\partial UCHB}{\partial x} = (E_s - D_p) B \quad (8)$$

同時に河床に存在するSSの量は、次の河床上における微細粒子の連続式によって記述できる。

$$\frac{\partial ZB}{\partial t} = (D_p - E_s) B \quad (9)$$

また河道内の流れは次の浅水流方程式を用いて表わされる。

$$\frac{\partial UHB}{\partial t} + \frac{\partial U^2 HB}{\partial x} = -gHB \frac{\partial H}{\partial x} + gHBS - gn^2 B \frac{U^2}{H^{1/3}} \quad (10)$$

$$\frac{\partial HB}{\partial t} + \frac{\partial UHB}{\partial x} = 0 \quad (11)$$

4. 等流状態における解

上式の意味を明確にするために簡単な場合について解を求めてみる。

式(8)および(9)より次式が得られる。

$$\frac{\partial CHB}{\partial t} + \frac{\partial UCHB}{\partial x} + \frac{\partial ZB}{\partial t} = 0 \quad (12)$$

流量の変化がゆっくりと生じるような、非定常等流状態にある場合を考える。そのとき浮遊粒子濃度および底面における浮遊粒子の存在量は時間的に変化するが、流下方向に一様であると仮定できる。そのとき次式が得られる。

$$\frac{d(CH + Z)B}{dt} = 0 \quad (13)$$

上式は流水中の浮遊粒子量と河床上に存在する微細粒子量の和が時間的に変化しないことを意味している。単位幅当りの和を Z_0 と表わすと次式が成立する。

$$CH + Z = Z_0 \quad (14)$$

このとき式(3)より p は次のように表わされる。

$$p = \frac{Z_0 - CH}{Z_m} \quad (15)$$

ここで Z_0 は Z_m より小さいと仮定している。いま流量の変化が止まり、定常等流状態になったとする。流量の変化が止まって十分な時間が経過すると平衡状態となり、堆積量(捕捉量)と巻き上げ量は等しくなる。したがって次式が成り立つ。

$$\beta C = pE = \frac{Z_0 - CH}{Z_m} E \quad (16)$$

上式を C について解くと次式が得られる。

$$C = \frac{Z_0 E}{\beta Z_m + HE} \quad (17)$$

流速が大きく巻き上げが活発になると E が大きくなる。ここで非常に流速が大きくなったときのことを考え、 $E \gg \beta Z_m/H$ の極限を考えると、上式より流水中の浮遊粒子濃度 C は次のように得られる。

$$C = \frac{Z_0}{H} \quad (18)$$

上式を (14) に代入すると河床上の微細粒子量 Z は次のように得られる。

$$Z = 0 \quad (19)$$

上の結果は、流水と河床に存在していたほぼ全ての微細粒子は流水中に巻き上げられ、河床上にはほとんど存在していないことを意味している。このように提案されたモデルを用いると、底面剪断力が増加すると河床から微細粒子が消滅し、流水中の浮遊粒子濃度は限界値以上に大きくならないことがわかる。

一方、河床上の微細粒子の存在量を考慮しない従来のモデルでは、等流状態において次式が成立する。

$$\frac{dCH}{dt} = E - w_s r_0 C \quad (20)$$

流量の時間変化が止まり、十分な時間が経過すると、次の平衡状態が実現する。

$$C = \frac{E}{w_s r_0} \quad (21)$$

E は式 (1) で表わされるから、流量が増加して底面剪断力が増加すると浮遊粒子濃度は底面剪断力に応じて増加することが判る。

5. 観測結果への適用

(1) 計算条件

ここで提案した SS 輸送モデルを、実際に観測された SS 濃度の時間変化図-2 に適用してみる。計算は、流量データが存在する Station 1 の SS 濃度観測地点より約 5 km 上流の市名坂水位観測所を計算領域の上流端とし、下流に向かって計算を行った。Station 1 のデータを input とし、Station 3 で得られる計算結果を output として実測結果と比較する。

流れは一次元の浅水方程式 (10) および (11) を、現地の B および S などの地形データを基に Dynamic Wave モデル¹³⁾を用いて数値的に解いた。その際、境界条件としては市名坂で観測された実測流量を与え、下流端では河口部における実測潮位を与えている。

また SS 濃度 C については、流れと類似の手法で移流方程式 (8) を離散化し数値解析を行った。Station 1 で実測された SS 濃度を上流端境界条件として与え、それより下流に向かって SS 濃度を計算する。また p の境界条件としては、Station 1 で SS 濃度が流下方向に変化しない (空間的に平衡である) と仮定し、 p を次のように与える。

$$p = \frac{\beta C}{E} \quad (22)$$

上式に実測された C と E を適用すると Station 1 における p が求められる。

また計算のためには計算領域全体における p の分布の初期値が必要となるが、これに関する情報がないことと計算を簡単にするために、計算領域全体で一定値を仮定した。その値は、Station 3 における計算結果と実測された SS 濃度が一致するよう 0.01 と決定した。この初期値は定量的な計算結果に少なからず影響を与えるが、定性的な結果に大きな変化はない。

観測地点周辺で行ったサンプリングから、浮遊微細粒子の代表粒径は 0.03 mm 程度であることがわかっている。またその比重は分析の結果によると 1.5-2.0 である¹⁴⁾。比重を 2.0 とすると沈降速度 w_s は 0.49 mm/s と見積もられる。しかし β_s についてはほとんど情報がないので、ここでも計算結果がほぼ一致するよう β を 1.4 mm/s と仮定した。

(2) 計算結果

図-6 に数値シミュレーション結果を示す。図-6(a) は Station 3 における流量および SS 濃度の時間変化である。図中破線が計算された流量の時間変化であり、ひし形のシンボルが SS 濃度の実測値を表している。

細い実線が河床上の微細粒子の存在量を考慮しないモデルを用いて計算された SS 濃度である。ここでは河床上の微細粒子の存在量が時間的に変化しないと仮定し、計算期間中常に $p = 0.01$ の定数を与えている。河床上における微細粒子の存在量に制限がないため、流量にほぼ連動した SS 濃度となっている。

一方、太い実線が本論文で提案したモデルを用いた計算結果である。最初の三時間ほどは、ほとんど従来のモデルと同じ結果となっているが、その後、時間とともに結果が大きく異なってくるのがわかる。新しいモデルでは最初の流量増加後、河床上の微細粒子量が減少しているため、流量が増加しても SS 濃度はあまり増加していない。二度目の流量のピークが最大の流量であるにも関わらず、SS 濃度が最大となっているのはむしろ一度目の流量ピーク時である。このような傾向は実測結果とも一致している。また洪水後半には流量が大きいかにも関わらず、SS 濃度は顕著に低下している様子が実測によって観察されているが、シミュレーションでも良好に表現されていることがわかる。

図-6(b) に、Station 3 における p の時間変化を示した。時間の経過とともに減少していく様子がわかる。実測では Station 3 では洪水前後で微細粒子の存在量が半分以下になっていたことがわかっている⁷⁾。微細粒子の存在量と p の関数関係がよくわからない現在、定量的な比較に意味は無いが、定性的特徴は再現されている。

もちろん図-6(a) の細部を見ると、計算結果と実測結果の一致は必ずしも良くない。最大の流量ピークが発生する 10 時間以降の濃度は比較的良好に表されている

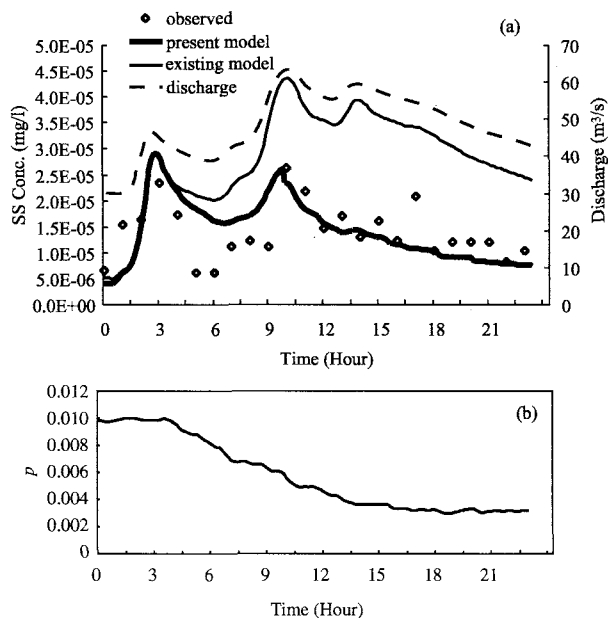


図-6 数値シミュレーションによって再現された Station 3 における (a) SS 濃度と (b) p の時間変化。

が、最初のピーク発生後の 5 時間から 9 時間の間は計算値は実測値を大きく上回っている。このシミュレーションではいくつかのパラメータを計算結果と実測結果が一致するように決めたと述べたが、必ずしも最適パラメータを求めたわけではない。本モデルには未だ不明なパラメータが多くそれらを任意に決めるとすると自由度が大きいため、全パラメータの最適値を注意深く選べばもっと計算結果と実測結果の一致は良くなるものと考えられる。しかしそのような試みにはあまり意味がないであろう。この数値シミュレーションは、新たなモデル構築の第一歩として、実測された SS 濃度変化の定性的な特徴が提案されたモデルによって表せるか否かについて、その可能性を調べるために行ったものである。その意味では、モデルは実測データの定性的な特徴を十分再現することができたと言えるだろう。

より詳細で定量的なモデルの検証を行うためには河床上における微細粒子の存在量に関するより詳しいデータや p の具体的な関数形、 β の値などが必要となる。それらは現地で測定するのはほとんど不可能であろう。工夫を凝らした詳細な実験が必要となる。今後の課題である。

6. 結論

本研究では、河床上において微細粒子があまり豊富に存在せず存在量に限界が存在するような場合に適用可能な、新たな浮遊微細粒子の輸送モデルを提案した。

河床上における微細粒子の利用可能度関数 p を導入することによって、粒子量の減少によって巻上量が減少する効果を取り入れている。このモデルによって、底面剪断力が増加しても浮遊粒子濃度は存在量に応じた限界値までしか増加できないことが、非定常等流状態を想定した簡単なモデル計算によって示された。またこのモデルを用いて小出水時における浮遊粒子濃度の時間変化に関する数値シミュレーションを行い、実測結果の定性的な特徴を再現することができた。シミュレーションでは多くの仮定が行われており、モデルの妥当性が定量的に検証できたとは言い難いが、河床上における微細粒子の存在量を考慮した新たなモデル構築の方向へ可能性が示されたと考えられる。

参考文献

- 清水康行, 嵯峨 浩, 早川 博, 品川 守: 石狩川の土砂流出に関する研究, 水工学論文集 Vol. 42, pp. 1039-1044, 1998.
- 赤松良久, 池田駿介, 中嶋洋平, 戸田祐嗣: マングローブ水域における出水時の粒子態物質の輸送に関する研究, 土木学会論文集 No. 756/II-68, pp. 179-191, 2004.
- 富樫 昇, 真野 明: 阿武隈川の洪水時における浮遊土砂輸送, 水工学論文集 Vol. 48(2), pp. 949-954, 2004.
- Pilailar, S., et al.: The characteristic change of fine particulate organic matter due to a flood in the Nanakita River, *Annual J. Hyd. Eng., JSCE*, Vol. 47, pp. 1033-1038, 2003.
- Guy, H. P.: An analysis of some storm-period variables affecting stream sediment transport, *USGS Professional Paper 462-E*, 1964.
- 佐藤耕治, 渡邊康玄: 洪水時における微細砂の縦断方向輸送, 水工学論文集, Vol. 45, pp. 673-679, 2001.
- Pilailar, S., et al.: Effects of hydrologic fluctuations on the transport of fine particulate organic matter in the Nanakita River, *Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE*, Vol. 48, pp. 1519-1524, 2003.
- 泉 典洋, Parker, G.: 浮遊砂を輸送する礫床河川の平衡横断面形状, 土木学会論文集 No. 565/II-39, pp. 43-55, 1997.
- Parker, G., Fukushima, Y. and Pantin, H. M.: Self-accelerating turbidity currents, *J. Fluid Mech.*, Vol. 171, pp. 145-181, 1986.
- 泉 典洋, 田中 仁, 坪井宏介, 伊達政直: 河川流が卓越する河口テラスの初期堆積形状に関する実験, 土木学会論文集 No. 740/II-64, pp. 109-120, 2003.
- Elliott, A. H. and Brooks, N. H.: Transfer of nonsorbing solutes to a streambed with bed forms: Theory, *Wat. Res. Research*, Vol. 33, No. 1, pp. 123-136, 1997.
- Elliott, A. H. and Brooks, N. H.: Transfer of nonsorbing solutes to a streambed with bed forms: Laboratory experiments, *Wat. Res. Research*, Vol. 33, No. 1, pp. 137-151, 1997.
- 水理公式集例題プログラム集 (CD-ROM), 水理委員会編集, 土木学会, 2001.
- Pilailar, S. et al.: Settling velocity of natural fine particles, 平成 14 年度東北支部技術研究発表会講演概要, pp. 126-127, 2003.

(2004. 9. 30 受付)