

# 混合砂礫床の粗粒化について

## ARMORING AND PAVEMENT FORMATION

辻本 哲郎\*・本橋 健\*\*

By Tetsuro TSUJIMOTO and Ken MOTOHASHI

When the sediment supply from the upstream region is suppressed, the bed-surface composed of graded material becomes coarsened as self-adjustment of fluvial bed so as to make the bed-load discharge on it equivalent to the supplied load through non-equilibrium process of bed-load transport for each grain size. When no sediment is supplied, the bed is "armored"; while for finite but suppressed sediment supply the bed is "paved". Under equilibrium states, no sediment is transported on armored bed, but some on paved bed. Although these two coarsened beds have different properties, both processes can be reasonably described without any difference by a model constituted by pick-up rate and step length for each grain size. Several properties empirically induced from laboratory-experiments and field-observations are discussed based on the present analytical model.

*Keywords: sediment transport, bed-load, graded material, armor, pavement, sorting*

### 1. 序 論

河床のほとんどは粒度分布をもった混合砂礫から構成されており、流砂運動は河床表層粒度構成との関連なしには論じることのできないことが多い。

特に、ダム下流部など上流からの土砂供給のないところでは顕著な粗粒化が生じ、armor, armor coat formation とよばれる。Gessler<sup>1)</sup>は上流からの給砂が抑制される場合に生じる河床低下を、混合砂礫床の粗粒化によって相当に抑えられる parallel degradation と、粗粒化を余り起こさず河床勾配の顕著な変化として出現する rotational degradation に分類している。芦田・道上<sup>2)</sup>は、Egiazaroff<sup>3)</sup>による粒径別限界掃流力が粗い粒径の砂礫ほど移動に大きい掃流力を要することを表わしていることに着目、armor の生じる条件、言い換えれば parallel degradation の生じる条件を、河床材料の最小粒径の限界掃流力より大きく、最大粒径の限界掃流力よりも小さい掃流力と限定している。このとき、河床表層砂礫の細かい方の部分だけが選択的に pick-up されて流されることから河床は上流から順次粗粒化する (armor

coat の下流への伝播)。掃流力が最大粒径の限界掃流力よりも大きくなれば、粒径ごとの移動特性の差がなくなり河床粒度の分級は生じないと考えた。あるいはそれゆえ給砂の遮断はこのとき rotational degradation を引き起こさざるを得ない。このように考えると、大出水のときには armor coat は破壊され減水時に再度形成されることが想定されるが (Bayazit<sup>4)</sup>, 道上・鈴木<sup>5)</sup>), 一方観測に基づいた出水中の armor coat 存続説 (Harrison<sup>6)</sup>, Kellerhals<sup>7)</sup>) もある<sup>8)</sup>。

Parker ら<sup>9), 10)</sup>は水路実験により、水路の上流より若干の給砂を行った場合、河床に存在するすべての粒径の砂礫の移動がみられる状態でも河床表層が粗粒化しているという平衡状態の存在を確認した。armor は平衡状態でその上の流砂量は 0 となるという意味で static armor とよび、それに対し動的平衡状態としての粗粒化河床を mobile pavement とよんで、これらの区別を強調した。

Fig. 1 は Parker<sup>8)</sup> が示した動的粗粒化を理解するうえで興味深い思考実験である。図に示すように河床のある区間を考え、その上の流れが定常等流で、粒度分布 ( $f_i$ ) を有する平衡流砂量  $q_T$  が供給されている水路において、給砂量を  $1/\Omega$  ( $\Omega=1, 2, 3, 4, \dots$ ) と順次減らしていったときの動的平衡状態 (考えている河床区間下流端での

\* 正会員 工博 金沢大学助教授 工学部土木建設工学科  
(〒920 金沢市小立野 2-40-20)

\*\* 正会員 工修 (株) 日水コン

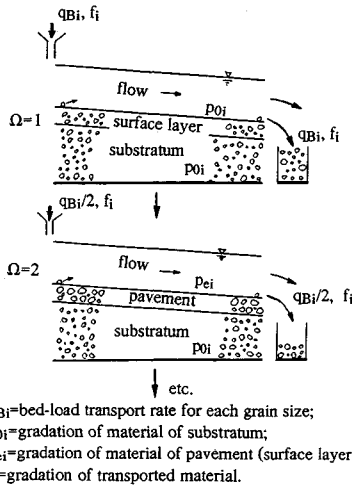


Fig. 1 Parker's thought experiments of pavement formation.

流砂量が給砂量に等しい状態)の表層粒度についての問いかけで、 $\Omega$ を大きくするに従って河床の粗粒化は著しくなる。河床(貯累層, substratum)の粒度( $p_{0i}$ )と、河床表層(あるいは交換層とよばれる流砂運動によって交換の生じる層)の平衡状態でのそれ( $p_{ei}$ )は、 $\Omega=1$ の場合、すなわち初期の表層粒度に固有の平衡流砂量が給砂されるときに限って等しい(ただし機械的沈み込み, parcolationの効果は無視する)。一方、 $\Omega$ を無限に大きくしたときがstatic armoringに相当する。 $\Omega$ が有限の場合mobile pavementが形成される。Fig. 1は、混合砂礫床は給砂に応じて河床表層粒度構成を自己調整することを意味する。すなわち初期河床の粒度分布に応じた平衡流砂量より給砂量が少ない場合、河床表層は粗粒化して給砂量に見合った流砂量しか流せないように自己調整する。もちろん実際には河床勾配の変化(rotational degradationに相当)でも流砂能を調整できるから、現実の河川ではさまざまなバリエーションが出現するだろう。

本論文では、上述した混合砂礫床の粗粒化についての理解に基づいて、粒径別移動特性量の評価を基礎とした非平衡流砂量則を用いて粗粒化の形成・発達過程を詳細に記述して、現象の特質について検討する。

## 2. 混合砂礫の非平衡流送

混合砂礫の流送は分級に伴って非平衡状態を呈する場合が多い。掃流砂の非平衡流送については、中川・辻本<sup>11)</sup>がpick-up rateとstep lengthを用いたいわゆるstochastic modelのEuler的解釈による表現を提案し、河床波の形成機構の説明などに応用している。また中川ら<sup>12)</sup>はさらにその考え方を混合砂礫の流送についても応用して、いわゆるarmoringの形成・伝播過程の合理的

説明を行っているが、本章ではその考え方をより一般的にpavementの形成にも拡張して定式化・説明する。

河床表層に占める粒径 $d_i$ の砂礫の体積含有率を $p_i$ (表層粒度構成と簡単によぶことにする)、そのクラスの砂礫のpick-up rateを $p_{si}$ 、その砂礫粒子のstep lengthの確率密度関数を $f_{si}(\xi)$ とすると、粒径別の非平衡流砂量は次式のようになる。

$$q_{Bi}(x) = \frac{A_2 d}{A_1} \int_0^\infty p_i(x-\xi) p_{si}(x-\xi) \int_0^\infty f_{si}(\xi) d\xi d\xi + q_{Bi}^m \int_x^\infty f_{si}(\xi) d\xi \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 $q_{Bi}$ : 粒径別流砂量、 $q_{Bi}^m$ : 粒径別給砂量( $x=0$ での流砂量)、 $A_1, A_2$ : 砂礫の形状係数であり、またいわゆるparallel degradationを対象とすることから、交換層あるいは河床表層の粒度構成は河床面での各粒径の面積占有率と同一視した<sup>12)</sup>。また、 $x=0$ は対象とする河道区間の最上流端を表わす。

流砂過程が粒径別に非平衡の場合、表層粒度の変化を生ずるが、これは次のように計算される。河床の単位幅当たりを考え、流下方向に $\Delta x$ の微小区間に分割する。 $\Delta x$ は、最大粒径よりも長く、最小粒径の砂礫の平均step lengthよりも短い程度にとるのが望ましい。この第 $k$ 区間の表層での第 $i$ クラスの砂礫の露出個数(交換層内個数) $n_{ik}$ は、

$$n_{ik} = \Delta x \cdot p_{ik} / (A_2 d_i^2) \dots \dots \dots (2)$$

である。 $p_{ik}$ は第 $k$ 区間の表層粒度構成を表わす。時刻 $t$ から $t+\Delta t$ の微小時間の間に第 $k$ 区間の河床から離脱、またそこへ落下・停止する第 $i$ クラスの砂礫の個数をそれぞれ $\Delta M_{ik}(t)$ 、 $\Delta Q_{ik}(t)$ と書くと、離脱と落下の差によって新規に露出(ここでは河床低下の場合のみ考えている)する個数についても考慮して、 $n_{ik}(t)$ から $n_{ik}(t+\Delta t)$ への変化を次のように表わすことができる。

$$n_{ik}(t+\Delta t) = n_{ik}(t) - \Delta M_{ik}(t) + \Delta Q_{ik}(t) + p_{0i} \left\{ \sum_{j=1}^N [\Delta M_{jk}(t) - \Delta Q_{jk}(t)] \left( \frac{d_j}{d_i} \right)^2 \right\} \dots \dots \dots (3)$$

ただし、 $N$ : 粒度によるクラス数であり、また河床低下して新規に露出する河床の粒度構成は初期河床のそれと同じとし、 $p_{0i}$ と表わした。ところで、 $\Delta M_{ik}$ はpick-up rateを用いて次のように書ける。

$$\Delta M_{ik} = n_{ik} \cdot p_{sik} \cdot \Delta t \dots \dots \dots (4)$$

ただし、 $p_{sik}$ は第 $k$ 区間における粒径別pick-up rateを表わす。一方、 $\Delta Q_{ik}$ については、 $x>0$ の領域からの離脱に起因するもの、上流( $x<0$ )から供給されるもののそれぞれを含めて、次のように書ける。

$$\Delta Q_{ik} = \sum_{s=1}^{k-1} [\Delta M_{is} \cdot \mu_{i,k-s}] + \frac{q_{Bi}^m \Delta t}{A_2 d_i^2 \Delta_i} \cdot \mu_{i,k-1} \dots \dots \dots (5)$$

ただし  $\Lambda_i$  は粒径  $d_i$  の砂礫の平均 step length であり、また  $\mu_{i,m}$  は次のように定義されている。

$$\mu_{i,m} \equiv \int_{m\Delta x}^{(m+1)\Delta x} f_{xi}(\xi) d\xi \dots\dots\dots (6)$$

式 (1) の非平衡流砂量式と、式 (4) と (5) を代入した式 (3) の表層粒度変化を表わす式を併用することで、粒径別の流砂量と表層粒度の時間的・空間的変化を記述することができる。

### 3. 混合砂礫の粒径別運動特性量

混合砂礫の運動特性を粒径別に表現することは、すでに Einstein<sup>13)</sup>, Egiazaroff<sup>3)</sup> らの研究に始まる。一方、有効径の概念を用い、代表的な粒径を想定して均一砂についての流砂研究の成果を用いるというやり方も工夫されている<sup>14)</sup>。ここでは、非平衡流送と分級による表層粒度構成の変化を考えるため前者が適している。

Egiazaroff<sup>3)</sup> による粒径別限界掃流力の考え方は、細砂部分について 芦田・道上<sup>2)</sup> による修正を加えるのが望ましいものの、従来の移動限界についての実験結果を良く説明することから広く受け入れられており、またこうした粒径別移動限界を考慮した粒径別流砂量式を用いて 平野<sup>15)</sup> および 芦田・道上<sup>2)</sup> によって、あるいは本研究と基本的に同様の粒径別 pick-up rate と step length を用いた方法で 中川ら<sup>12)</sup> によって、armor coat の形成が比較的うまく説明されていることから、ここでもこれを採用することとする。ただし、中川ら<sup>16)</sup> によるシミュレーションによって想定された粒径オーダーでランダムな河床上の砂礫粒子についての力のつり合いについての解析、Parker ら<sup>17)</sup> による pavement 河床での実測、道上・鈴木<sup>5)</sup> による動的平衡河床での実験によって、Egiazaroff<sup>3)</sup> の方法は若干粒径による移動限界の違いを過大評価している可能性が指摘されており、詳しい検討は今後早急に行う予定である。

芦田・道上<sup>2)</sup> によって修正された Egiazaroff<sup>3)</sup> の考え方による粒径別無次元限界掃流力は、次式で表わされる。

$$\frac{\tau_{*ci}}{\tau_{*cm}} = \begin{cases} (\ln 19 / \ln 19 \zeta_i)^2 & (\zeta_i \geq 0.4) \\ 0.85 / \zeta_i & (\zeta_i < 0.4) \end{cases} \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 $\tau_{*ci}$  : 粒径別無次元限界掃流力;  $\tau_{*cm}$  : 混合砂礫に占める平均粒径の砂礫の無次元限界掃流力 ( $\alpha_m \equiv$

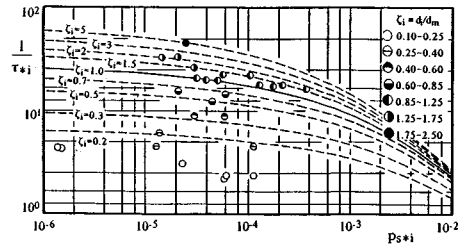


Fig. 2 Pick-up rate for each grain size.

$\tau_{*cm} / \tau_{*c0}$ , ただし  $\tau_{*c0}$  : 均一砂礫の無次元限界掃流力とすると、 $\alpha_m$  は混合砂礫の粒度分布によって変わると考えられる<sup>16)</sup>が、便宜的にこれを 1.0 と近似する);  $\zeta_i \equiv d_i / d_m$ ;  $d_m$  : 平均粒径で次式で求められるものとする。

$$d_m = \sum_{i=1}^N d_i p_i \dots\dots\dots (8)$$

粒径別 pick-up rate は、均一砂に対して導かれた中川・辻本<sup>11)</sup> の推定式において、限界掃流力の部分を粒径別に与えられるものに置き換えて適用できるものと考えられる。すなわち、

$$p_{si} = F_0 \tau_{*i} (1 - k_2 \tau_{*ci} / \tau_{*i})^3 \dots\dots\dots (9)$$

ただし  $p_{si} \equiv p_{st} \sqrt{d_i / (\sigma / \rho - 1) g}$ ;  $\tau_{*i} \equiv u_*^2 / [(\sigma / \rho - 1) g d_i]$ ;  $\sigma$  : 砂礫の密度;  $\rho$  : 水の密度;  $g$  : 重力加速度であり、また係数には均一砂礫に対して定められた値 ( $F_0 = 0.03$ ,  $k_2 = 0.7$ ) を用いる。Fig. 2<sup>12)</sup> に示すように上式と 芦田・道上<sup>2)</sup> によって修正された Egiazaroff 式<sup>3)</sup> とによって、混合砂礫の粒径別 pick-up rate が合理的に推定できる。推定精度の向上は、先にも述べた粒径別限界掃流力のそれにかかる。

一方、step length については、中川らの研究<sup>16)</sup> により、平坦河床においては、粒径別にみると均一砂礫と同様指数分布に良好に適合するが (Fig. 3 は中川らのデータ<sup>16)</sup> を示す)、各粒径で無次元化された平均 step length ( $\lambda \equiv \Lambda_i / d_i$ ) は均一砂礫のそれ (80~250) より小さく 10~30 程度であるが、粒径による差はない。すなわち、

$$f_{xi}(\xi) = \frac{1}{\Lambda_i} \exp\left(-\frac{\xi}{\Lambda_i}\right); \quad \Lambda_i = \lambda d_i \dots\dots\dots (10)$$

と書ける。

### 4. 粗粒化過程の記述

ここでは、armor coat, pavement の形成過程を統一

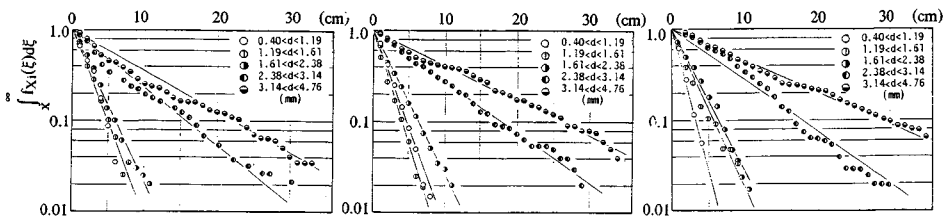


Fig. 3 Distribution of step length for each grain size.

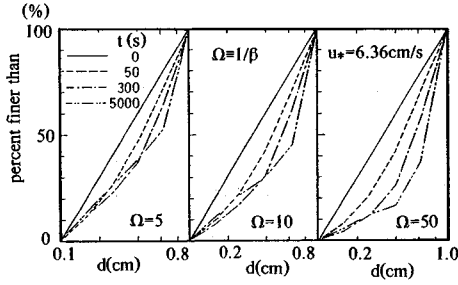


Fig. 4 Pavement formation.

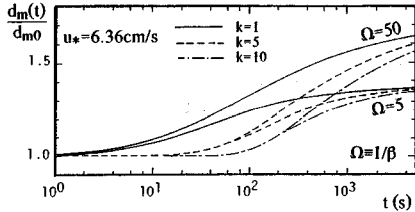


Fig. 5 Temporal variation of mean diameter of surface layer.

的に記述することを考え、また Fig. 1 に示したような Parker<sup>3)</sup> による思考実験との対応を考えて、対象とする河道区間への給砂量を次のように表す。

$$q_{Bt}^m = \beta (A_3/A_2) d_i p_{oi} p_{soi} \Lambda_i \dots \dots \dots (11)$$

すなわち、初期河床に固有の空間的平衡流砂量が、どの粒径成分についても  $\beta$  倍 ( $\beta < 1$ ) されるものとする。また  $\beta$  は Parker の思考実験<sup>3)</sup> のパラメーター  $\Omega$  の逆数である。一般的には、給砂の形態により  $\beta$  は粒径別に与えられよう。

3. の方法で計算された河床表層の粒度分布の時間的変化の例を Fig. 4 に示す。なお本章の計算例では、実験水路を対象とした規模の有次元量で表現されているが、次のような無次元化で普遍表示し得るものである。

$t_* = t \sqrt{(\sigma/\rho - 1)g/d_{m0}}$ ;  $u_* / u_{*c m0}$ ;  $d/d_{m0}$  であり、 $d_{m0}$  は貯累層の平均粒径、 $u_{*c m0}$  は貯累層の平均粒径の砂礫の限界掃流力に対する摩擦速度である。本計算例では、水流の摩擦速度を最大粒径の移動限界 (6.2 cm/s) をわずかに上回る値とした。Fig. 4 の例は対象河道の最上流端 ( $k=1$ ) での計算結果である。これより下流にいくに従って粗粒化の進行は遅れる。このことを平均粒径で代表して示したのが Fig. 5 である。Fig. 5 では平均粒径の時間的変化を上流からの距離をいくつか変えて示してある。Fig. 4 によると、 $\beta$  を小さくするにつれて粗粒化の進行の激しいことがわかる。このことは最終的な (動的平衡状態での) 表層平均粒径  $d_{me}$  の  $\beta$  に対する変化を示した Fig. 6 によってより強調して示されている。Fig. 6 ではさらに平衡状態の表層平均粒径が水流の摩擦速度とともに大きくなること、すなわち粗粒化の粒度が大きくなることも示されている。

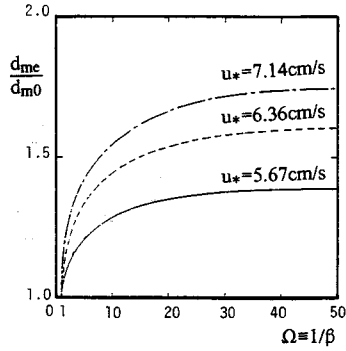


Fig. 6 Mean diameter of paved bed surface.

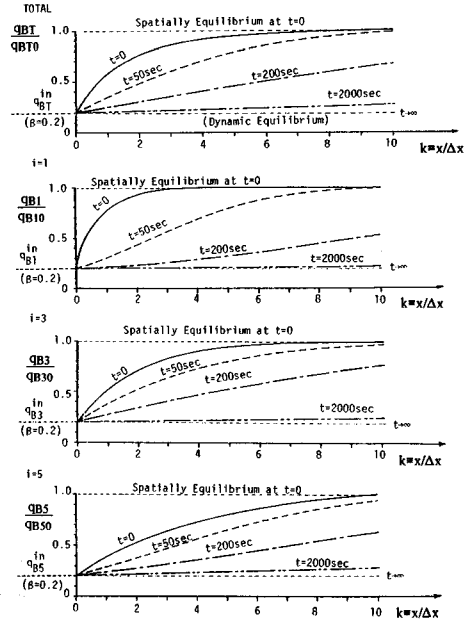


Fig. 7 Temporal and spatial variation of bed-load transport.

Fig. 7 では、流砂量の場所的・時間的変化が、総流砂量・粒径別流砂量について示されている。添字  $i$  は粒径の小さい方からつけてある。Fig. 7 によると、通水初期では初期河床粒度構成に応じた空間的平衡流砂量への緩和過程がみられ、その緩和距離は粒径別 step length に相当するため、細砂の方が短い。時間とともに上流端から下流への粗粒化の伝播が進み、順次空間的平衡流砂量が減じ局所流砂量はそれに対して漸近的挙動を呈するが、いずれ空間的平衡流砂量が給砂量に等しくなると、時間的にも変化のない動的平衡状態が確立される。なお、先に述べたように、初期の非平衡流砂量の緩和距離は step length に相当する短いスケールであったが、時間とともに表層粒度構成が変化 (粗粒化) するときには、非平衡流砂量の空間的緩和距離は step length より格段に延びることに注意しなければならない。

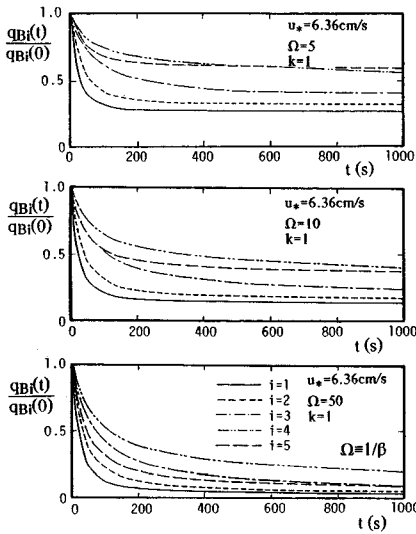


Fig. 8 Temporal variation of fractional bed-load transport.

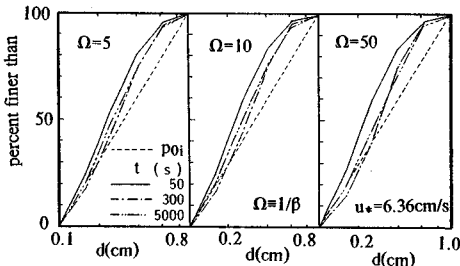


Fig. 9 Temporal change of gradation curve of bed-load.

Fig. 8 は上流端近傍での粒径別流砂量の時間的変化を給砂量の程度を示すパラメーター  $\beta$  を変化させて調べたものである。検査地点が下流になるにつれ、流砂量の変化が遅れることは Fig. 7 などから容易に推測される。さらに、Fig. 9 は流砂量の粒度構成の時間的変化を、 $\beta$  を変えて調べたものである。これによると、初期では河床の表層粒度に比べて流砂量のそれは相当に細粒化しているが、河床表層の粗粒化に伴って流砂量の粒度構成はしだいに粗くなり、初期の河床粒度構成に近づいてくる。これは、Parker<sup>8)</sup> が Harrison<sup>6)</sup>、Proffitt<sup>18)</sup>、Parker<sup>9)</sup> による混合砂の給砂実験の興味深い結果として注目している、河床低下末期状態での流砂量の粒度構成が近似的に初期河床のそれと一致していることを、理論的にあるいは解析的に示すものである。

上述のように動的平衡状態としての粗粒化河床の形成過程が混合砂の粒径別非平衡流送モデルに基づいて記述された。給砂量がゼロの場合、本モデルが armor coat の形成を記述し得ることは容易にわかるであろう。すなわち本モデルでは、armor coat、pavement の形成、言い換えれば静的・動的粗粒化を原理的に区別する必要が

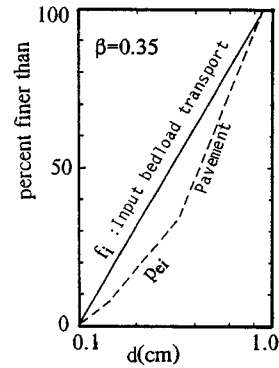


Fig. 10 Gradation curves of input bed-load and paved bed-surface.

ない。

平衡状態にのみ着目すると、そこでの量に添字  $e$  を付して次の式を書くことができる。

$$Q_{bei} = (A_2/A_1) p_{ei} p_{set} \Lambda_i d_i \dots \dots \dots (12)$$

水流の摩擦速度が与えられると、 $p_{set}$  は  $p_{ei}$  の関数として書けるため、給砂量と与えられると  $p_{ei}$  すなわち動的平衡河床 (pavement) の粒度構成を、非平衡過程の計算を経ないで求めることができる。この式はそれが初期粒度構成に独立であることを示している。Fig. 10 は式 (12) によって求められた給砂と pavement の粒度構成の比較例である。実際には給砂と河床 (貯累層) の粒度範囲は合わせておかないと式 (12) は解をもたないなどのことが起こる。また静的粗粒化では給砂量 (式 (12) の左辺) がゼロとなるため式 (12) によって直接 armor coat の粒度構成を求めることはできない。

### 5. 実験・観測データとの比較

本章では、本研究の成果を利用して従来の実験・観測データの説明を試みる。

まず Fig. 11 には、本研究のひな型である armor ing の形成・伝播モデルを用いて、芦田・道上<sup>2)</sup>の実験結果を説明したもの<sup>19)</sup>を再録した。芦田・道上<sup>2)</sup>の実験では armor coat が上流から順次形成される様がうまく実験によってとらえられており、また本モデルはそれを精度良く記述し得ている。計算にあたっては、 $\Delta x = 5 \text{ cm}$ 、 $\Delta t$  は  $p_{set} \Delta t$  が 0.1 を越えないように設定した。

一方、給砂のある場合の粗粒化については、系統的な実験は少ない。Parker ら<sup>10)</sup>は、動的粗粒化 (河床表層が粗粒化してなおかつその上に流砂がみられる) 状態の Oak Creek の水理模型実験として給砂のある粗粒化実験を行っている。そこでは初期河床粒度構成と同一視される貯累層の粒度分布 ( $p_{oi}$ ) のほか、動的平衡状態での河床表層粒度構成 ( $p_{ei}$ )、粒径別流砂量 ( $Q_{bei}$ ) が実測された。Fig. 12, 13 に動的平衡河床の表層粒度分布、

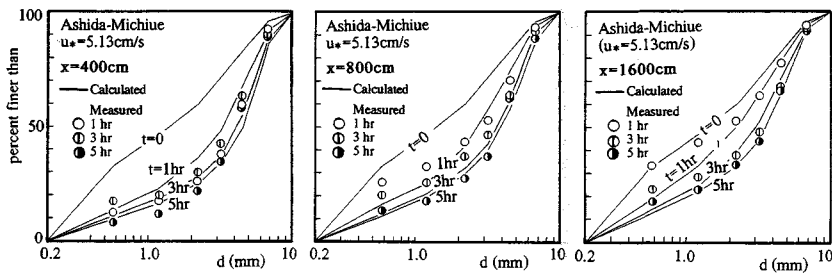


Fig. 11 Formation and propagation of armoring.

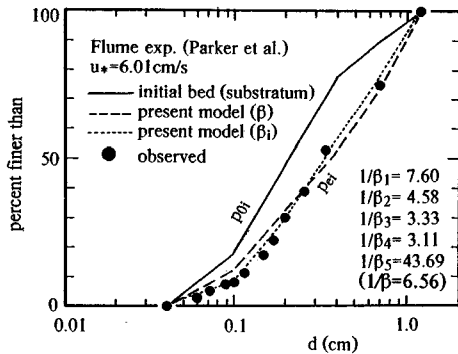


Fig. 12 Distribution of substratum and paved bed-surface.

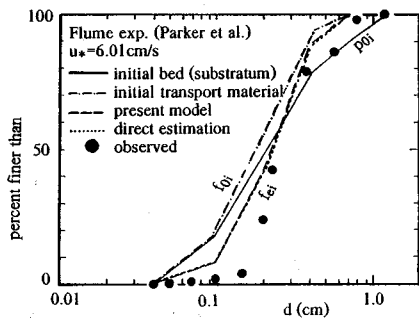


Fig. 13 Gradation curve of bed-load over paved bed.

流砂量の粒度分布 ( $f_{ei}$ ) を粒径加積曲線としてプロットした。 $f_{ei}$  は動的平衡状態の粒径別流砂量から次式によって求められた。

$$f_{ei} = q_{Bi} / \sum_{j=1}^N q_{Bj} \dots \dots \dots (13)$$

ところで初期河床に対する空間的平衡流砂量 ( $q_{B0i}$ ) は、 $q_{B0i} = (A_3/A_2) p_{0i} p_{s0i} A_i d_i \dots \dots \dots (14)$  と計算される。動的平衡状態ではその上の流砂量 ( $q_{Bei}$ ) が給砂量 ( $q_{Bi}^n$ ) に等しいから給砂の目安を表わすパラメーター  $\beta$  を次のように粒径別に求めることができる。

$$\beta_i = q_{Bei} / q_{B0i} \dots \dots \dots (15)$$

粒径別の  $\beta$  の値 ( $\beta_i$ ) の計算値は、Fig. 12 中に示されているように最大粒径以外はだいたい粒径別の値がそろっている。また初期の空間的平衡流砂量の粒度分布  $f_{0i}$  は次式によって計算される。

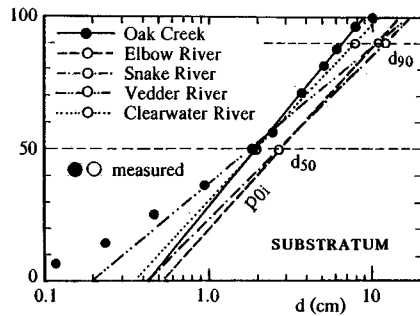


Fig. 14 Size-distribution of substrata of paved streams.

$$f_{0i} = q_{B0i} / \sum_{j=1}^N q_{B0j} \dots \dots \dots (16)$$

さて、本研究で開発されたモデルによって非平衡過程を計算することにより、動的平衡河床の粒度構成およびその上の流砂量の粒度分布が計算されるが、これらを Fig. 12, 13 に併示したところ、実験データとの一致は良好であった。なお先に述べたように  $\beta_i$  の値が粒径別にそろっているから総流砂量でみた給砂量の初期空間平衡値に対する比で定義した平均的な  $\beta$  を用いて簡略計算しても、Fig. 12 に破線で示したように近似的に動的平衡状態を予測できると考えられる。また、Fig. 13 では前章で述べた方法による非平衡過程の計算を経ない直接的な動的平衡状態の予測が非平衡計算の結果と全く一致していることも示されている。なお、Fig. 13 では動的平衡流砂量の粒度分布と初期河床あるいは貯累層のその比較も示しているが、この例では Parker<sup>8)</sup> が指摘するようなこれらの一致はそれほどよくない。

次に、Parker ら<sup>17)</sup> が収集した Oak Creek をはじめとするいくつかの野外データを検討してみる。そこでは動的平衡状態とみられる pavement と貯累層の粒度構成が実測された。ただし貯累層のデータの一部には 50% および 90% 粒径しかわからないものがあり、これらについては粒径加積曲線を片対数紙上で直線近似した (Fig. 14 の一部参照) ものを想定した。さらにいくつかの水力データより支配的な摩擦速度が Table 1 のように推定されているので、本研究の方法を用いると、給砂の指標  $\beta$  をパラメーターとした動的平衡状態の予測が

Table 1 Some parameters for paved streams.

Rivers	$u_*$ (cm/s)	$d_{me}$ (cm)	$\Omega=1/\beta$
Oak Creek	19.5	4.91	10.5
Elbow River	23.4	7.43	9.0
Snake River	23.5	6.77	3.7
Clearwater River	16.4	7.77	$\infty$
Vedder River	16.9	4.90	49.5

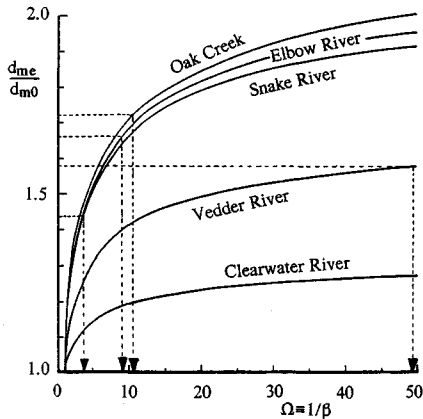


Fig. 15 Estimation of decrease of bed-load supply for paved-streams.

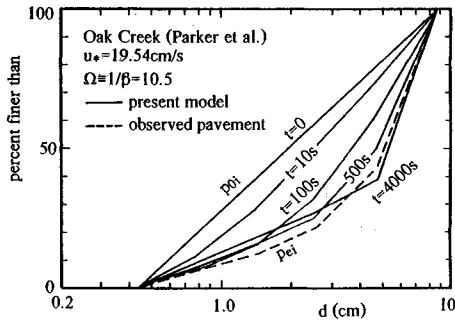


Fig. 16 Formation process of pavement.

できる。動的平衡河床の表層平均粒径を計算したものを Fig. 15 に示す。実測の pavement の平均粒径と一致する条件からそれぞれの河道区間への給砂状況を表わす指標  $\beta$  を推定することができる。その様子が Fig. 15 に示され、得られた  $\beta$  の値も Table 1 に併示した。この結果より Oak Creek, Elbow River, Snake River はいわゆる mobile pavement が、Clearwater River, Vedder River ではむしろ static armor が形成されているものと推定された。なお、Fig. 16 には非平衡計算によって動的平衡状態 (pavement) が形成される過程を再現した。貯累層に等しい表層が露出していたとしても、1 時間程度で pavement が形成されるであろうことが推測される。また、Fig. 17 には計算によって得られた動的平衡状態での流砂量の粒度構成を貯累層のそれと比較して示した。この例では、Parker ら<sup>81,17)</sup> が注目し、またこの

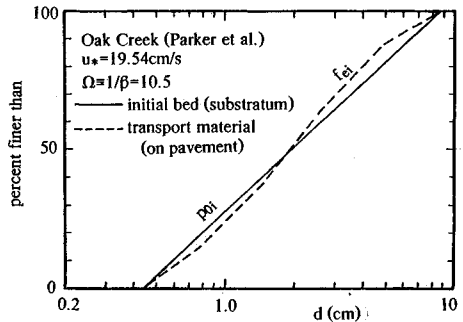


Fig. 17 Gradation curves of substratum and bed-load over paved bed.

事実を用いて一般的に pavement の粒度構成と流砂量予測方法を提案したような「動的平衡状態では流砂量の粒度構成は貯累層のそれに等しい」という仮設が成立している (先に述べたようにいつでも成立するわけではない)。

## 6. 結 論

本研究は、混合砂礫からなる河道での流砂と分級、特に河床表面の粗粒化に着目して、混合砂礫の流送についての理解を深めようとしたものである。特に近年給砂の全くないところで形成される armor coat のほかに、給砂が制限された場合に生ずる pavement が、河床・流路形態の議論に及ばず影響の大きさのために着目されている。armor coat は大粒径のものの限界掃流力の方が大きいという推測から、大粒径のものが動かないままであることを利用して説明されてきたが、同じ考え方では最大粒径も移動するような pavement の形成は説明されない。さらに最近限界掃流力が粒径によって余り変化しないのではないかという指摘もあり、上述の armor ing の説明も苦しくなってきた。もっとも従来のいくつかの解析的研究では限界掃流力がたとえ粒径ごとにも同じでも移動量が違うので armor ing の可能性は失われない。こうした状況にあって粗粒化を上流からの給砂状況に対する河床表層の自己調整作用であるという観点を、著者らの非平衡流砂モデルの利点を生かして認識しようとする研究を行った。以下、本研究で得られた結果を列挙する。

(1) 混合砂礫の粒径別 pick-up rate と step length を用いて、上流からの給砂条件の異なる場での非平衡流砂過程とそれに伴う河床表層の粒度構成の変化過程 (粗粒化過程) を記述するモデルを確立した。これにより、時間・空間緩和過程としての流砂量の変化が記述され、給砂量に対する河床表層の自己調節作用が理解された。

(2) 本モデルでは、粗粒化過程としての armor coat と pavement の形成機構を原理的に区別する必要がない。給砂の程度を示すパラメーターで区分されるだけ

である。

(3) 著者らの従来の研究に基づき、混合砂礫の粒径別 pick-up rate, step length の評価法を提案した。

(4) 本モデルに基づいて、典型的な条件での計算例を示し、混合砂礫の流送と河床表層の粗粒化についてこれまで実験的・経験的に推定されている性質を吟味・説明した。たとえば、流砂量は表層粒度より一般的に細粒子が卓越しているが、河床面の粗粒化が進むとともに粗くなり、動的平衡状態では貯累層（初期河床）のそれに近くなることなどが示された。ただし全く一致するとは限らない。

(5) armor coat については、その形成・伝播過程に関する従来の水路実験結果が本モデルで良好に説明された。

(6) 給砂のある条件での pavement の形成についての従来の水路実験での現象が、本モデルで良く再現できた。

(7) Oak Creek など粗粒化のみられる河川での野外データについても、本モデルに基づいた討議を行い、実河川現象についても本研究の考え方が適用されることが確信された。

混合砂礫の流送では、本研究で扱ったような様な分級過程のほか、分級が交互に生ずるものも出現し流砂量変動や河床形態の形成に進行するものもあり<sup>20)~23)</sup>、本研究で得られた混合砂礫の流送と分級機構についての基本的理解のもとに、これらについても研究を進めてゆく予定である。

#### 参 考 文 献

- 1) Gessler, J. : Self-stabilizing tendencies of alluvial channels, *Journal of Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division, ASCE*, Vol. 96, WW 2, pp. 235~249, 1970.
- 2) 芦田和男・道上正規 : 混合砂礫の流砂量と河床変動に関する研究, *京都大学防災研究所年報*, 第 14 号 B, pp. 259~273, 1971.
- 3) Egiazaroff, I. V. : Calculation of nonuniform sediment concentration, *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, Vol. 91, HY 4, pp. 225~247, 1965.
- 4) Bayazit, M. : Simulation of armor coat formation and destruction, *Proc. 17 th Congress of IAHR, Saõ Paulo, Brasil*, Vol. 2, pp. 73~80, 1975.
- 5) 道上正規・鈴木幸一 : 混合砂礫床における増水・減水時の平衡流砂量, *土木学会論文集*, 第 399 号 / II -10, pp. 95~104, 1988.
- 6) Harrison, A. S. : Report on special investigation of bed segregation in a degrading bed, *Inst. of Eng. Res., University of California, Berkeley, USA*, Ser. No. 33, 205 p., 1950 (文献 8) より引用).
- 7) Kellerhals, R. : Gravel rivers with low sediment charge, M.S. Thesis, University of Alberta, Canada, 157 p., 1963 (文献 8) より引用).
- 8) パーカー・ゲイリー : 粗粒化について, *土木学会論文集*, 第 375 号 / II -6, pp. 17~27, 1986.
- 9) Parker, G. : Experiments on the formation of mobile pavement and static armor, Report, Dept. of Civil Engrg., University of Alberta, Canada, 1980 (文献 8) より引用).
- 10) Parker, G., Dhamotharan, S. and Stefan, S. : Model experiments on a mobile, paved gravel bed stream, *Water Resources Research*, Vol. 18, No. 5, pp. 1395~1408, 1982.
- 11) Nakagawa, H. and Tsujimoto, T. : Sand bed instability due to bed load motion, *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, Vol. 106, HY 12, pp. 2029~2051, 1980.
- 12) 中川博次・辻本哲郎・原 稔明 : 混合砂れき床面の粗粒化過程について, *京都大学防災研究所年報*, 第 20 号 B-2, pp. 259~273, 1977.
- 13) Einstein, H. A. : The bed load function for sediment transportation in open channel flows, *Tech. Bulletin, USDA, Soil Conservation Service*, No. 1026, 78 p., 1950.
- 14) Christensen, B. A. : Effective grain size in sediment transport, *Proc. 13 th Congress of IAHR, Kyoto, Japan*, Vol. 3, pp. 223~231, 1969.
- 15) 平野宗夫 : Armoring をともなう河床変動について, *土木学会論文報告集*, 第 195 号, pp. 55~65, 1971.
- 16) Nakagawa, H., Tsujimoto, T. and Nakano, S. : Characteristics of sediment motion for respective grain sizes of sand mixtures, *Bulletin, Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto University*, Vol. 32, pp. 1~32, 1982.
- 17) Parker, G., Klingeman, P. C. and McLean, D. G. : Bedload and size distribution in paved gravel-bed streams, *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, Vol. 108, HY 4, pp. 544~571, 1982.
- 18) Proffitt, G. T. : Selective transport and armoring of non-uniform alluvial sediments, Report No. 80/22, Dept. of Civil Engrg., University of Canterbury, New Zealand, 203 p., 1980.
- 19) 辻本哲郎 : 掃流過程の確率モデルとその移動床問題への応用, *京都大学学位論文*, 178 p., 1978.
- 20) 池田 宏・伊勢屋ふじこ : 混合砂礫の流送に伴う縦断分級, 第 30 回水理講演会論文集, pp. 217~222, 1986.
- 21) Kuhnle, R. and Southard, J. : Bed load transport fluctuations in gravel bed laboratory channel, *Water Resources Research*, Vol. 24, No. 2, pp. 247~260, 1988.
- 22) 辻本哲郎 : 2 次流による分級縦筋の形成, 第 33 回水理講演会論文集, pp. 403~408, 1989.
- 23) 辻本哲郎・本橋 健 : 混合砂礫床における縦断方向の交互分級の形成とその卓越波長, 第 33 回水理講演会論文集, pp. 409~414, 1989.

(1989. 5. 22・受付)