

植生を伴う河床上の掃流砂量に関する研究 Bed-Load Rate on Movable Beds with Vegetation

岡部健士 *, 湯城豊勝 **, 児島 眞 ***

By Takeshi OKABE, Toyokatsu YUUKI and Maki KOJIMA

This paper is concerned with bed-load rate on movable beds accompanied by vegetation. Firstly, some flume experiments are carried out with two kinds of plant-models which are cylindrical and curved to downstream, and branched and inclined also to downstream. Secondly, a one-dimensional $k-\epsilon$ turbulent flow model is composed in order to estimate the efficient tractive force of bed-load. Model qualification is performed based on velocity data collected in the above experiments. Relation between the efficient tractive force evaluated by the present $k-\epsilon$ model and measured bed-load rate is represented satisfactorily well by Ashida-Michiue's bed-load formula.

Keywords: bed-load, vegetation, efficient tractive force, $k-\epsilon$ model.

1 まえがき

植生を伴う河床上においては、流れの土砂輸送能が通常の砂礫河床におけるよりも著しく減少し、一般には河床上昇が生じる。これは、植物群の流体抵抗の効果により、河床砂礫に実際に作用する掃流力（以下、有効掃流力と呼ぶ）が水深とエネルギー勾配から評価される見かけの掃流力より低下するためと解釈できるが、このような場における流砂量の特性あるいはその定量的な評価法については残された課題が多い。有効掃流力の評価法との関連では、近年、植生水理の分野において植生を伴う流れの諸特性とその解析法の研究^{1)~3)}に長足の進歩が認められる。ただし、それらの大半は、円柱状で直立性という最も単純な条件の植生を対象にしたものであって、各個体の形状が複雑で、しかも、流体力を受ければ変形する植物群を通過する流れの全容が十分に明らかにされているわけではない。一方、流砂量の特性に関しては、流れそのものの場合に比して、意外なほど基礎的研究の事例が少ない。浮遊砂はともかく、掃流砂の場合には、有効掃流力を的確に評価すれば、既存の流砂量式によりその特性をかなりの程度まで説明できるものと期待されるが、この点に関する実証的な検討も未だ十分にはなされていない。

以上のような植生を伴う河床上の掃流砂に関する研究の現状を鑑み、本研究では、まず、植物の屈倒性と分枝性を考慮した植生モデルを用いて系統的な水理実験を行い、流れの内部構造と流砂量特性に関する基礎的資料を集積した。ついで、新たに1次元の $k-\epsilon$ 乱流解析モデルを構築して実験での計測が困難な有効掃流力を推算し、これを用いて従来の流砂量式に基づく流砂量計算法の適用性を検討した。

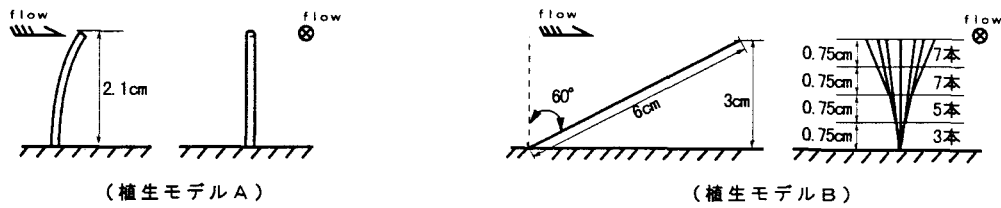
* 正会員 工博 徳島大学助教授 工学部建設工学科 (〒770 徳島市南常三島町2-1)

** 正会員 工修 阿南工業高等専門学校助教授 建設システム工学科 (〒774 阿南市見能林町青木265)

*** 学生会員 徳島大学大学院 工学研究科 (〒770 徳島市南常三島町2-1)

2 植生モデルを用いた水理実験

2.1 実験概要



図－1 水路床に設置した植生モデルの概要

実験には、幅 40cm、長さ 12m の長方形断面・可変勾配水路を用いた。図－1 に植生モデルの概要を示す。植生モデル A は、草本や竹類を模擬したもので、直径 1mm のシリコンチューブを切断して作成し、1cm × 1cm あるいは 2cm × 2cm の正方形メッシュの格子点に配列した。各単体は、水路床近傍ではこれに垂直であるが、上方では下流側に湾曲し、先端では、水路床と 50～55° の角度をなす。以下、メッシュの辺長が 1cm、2cm の実験をそれぞれケース A-1、A-2 と呼ぶ。一方、植生モデル B は、灌木状の木本類を模擬しており、直径 0.85mm の真鍮線を結合して作成し、縦・横断方向間隔がそれぞれ 6cm と 3cm、あるいは 12cm と 6cm の千鳥状配列となるように、しかも水深方向から下流側に約 60° 傾けて設置した。以下、これら 2 種の配列様式での実験をそれぞれケース B-1 あるいは B-2 と呼ぶ。なお、ケース A-1、A-2、B-1 および B-2 における植生モデルの水路床単位面積当たりの流れ方向投影面積 a_D は、それぞれ 0.21、0.0525、0.0782 および 0.0212 であった。

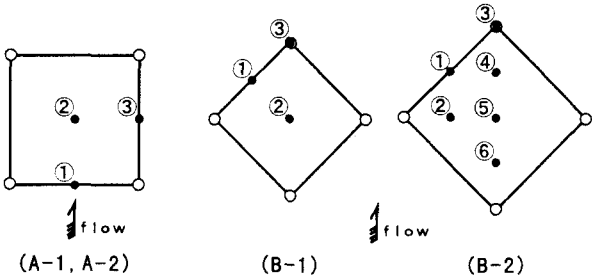
実験では、まず、上述の水路に等流を作り、図－2 の番号付きの“●”が示す位置に設定した測線上で、ピトー管による流速計測を行った。以下、この実験を固定床実験と呼ぶ。ついで、水路床に一樣砂を均一な厚さで敷き詰め、多様な流量 Q と勾配 i の条件下で、等流状態を維持しつつ通水し、平均水深 h_m と単位幅掃流砂量 q_B を計測した。 q_B は、テスト区間の下流端において、水路全幅の約半分の幅の採砂箱で計測した流砂量をその幅で除して求めた。以下、この実験を移動床実験と呼ぶ。実験砂の平均粒径 d_m と砂層の厚さ δ_s は、植生モデル A を用いた実験では $d_m = 0.6\text{mm}$ および $\delta_s = 5\text{mm}$ 、植生モデル B の場合には $d_m = 0.8\text{mm}$ および $\delta_s = 10\text{mm}$ であった。なお、砂を敷き詰めたために、ケース A-1、A-2、B-1 および B-2 の a_D は、上記のものから減少し、それぞれ 0.16、0.04、0.0664 および 0.0180 となった。

2.2 実験結果

2.2.1 固定床実験

表－1 固定床実験の水理条件

Run no.	Q (ℓ/sec)	i ($-$)	h_m (cm)
A-1-1	4.0	1/800	6.08
A-1-2	8.0	1/800	8.54
A-2-1	4.0	1/800	4.87
A-2-2	8.0	1/800	6.92
B-1-1	6.3	1/232	5.10
B-2-1	6.6	1/400	5.00



図－2 流速計測を行った測線の位置

固定床実験の水理条件を表－1 にとりまとめている。また、代表例として Run A-1-1 と Run B-1-1 の各測線上の流速分布を描くと図－3 のようである。いずれの測線に沿う流速分布も、植生モデル頂部の高さで変曲点を持つ tangent hyperbolic 型に近い形態を呈しているが、一部には、水路床の壁面効果が顕著で、流れが 2 層の重力

剪断流からなっていると見られるものもある。また、分枝状の植生モデルを用いた Run B-1-1 では、植生モデルから発生する後流や縮・拡流の効果が混合し尽くさずに残留しているようであって、流速分布の場所的变化が大きく、また、植生層内の流速分布に極大・極小点の存在が認められる。とくに、水路床直上の流速値の場所的变化は、底面剪断応力の場所的变化をもたらし、結果として流砂量特性にも何らかの影響を及ぼすものと推察される。

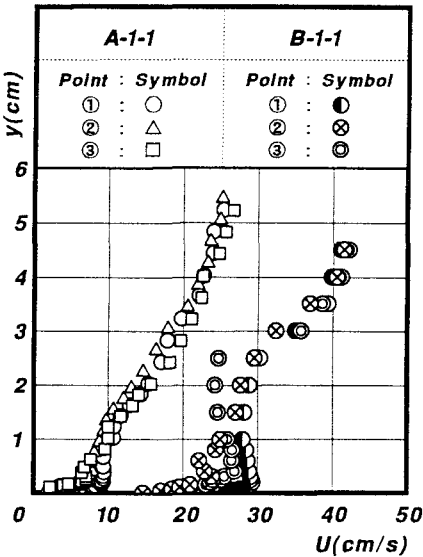


図-3 流速分布の実測例

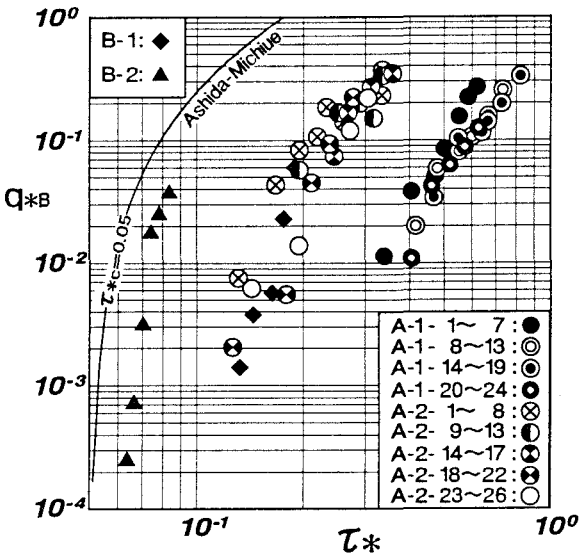


図-4 移動床実験の結果

2.2.2 移動床実験

Aシリーズの実験では流量を数種設定し、各流量のもとで勾配を段階的に変化させ、Bシリーズでは、一つの配列形式において勾配を固定し、流量のみ数種に変化させた。図-4は、実験結果を見かけの無次元掃流力 τ_{*0} と無次元単位幅掃流砂量 q_{*B} の関係図上に整理したものである。ここに、 τ_{*0} は、 i と h_m に基づく見かけの摩擦速度 u_{*0} から計算し（砂の水中比重 $s = 1.65$ とした）、 q_{*B} は、実測の単位幅掃流砂量 q_B を $q_{*B} = q_B / (u_{*0} d_m)$ と無次元化したものである。また、図中には、無次元移動限界掃流力 $\tau_{*C} = 0.05$ として計算された芦田・道上⁴⁾の流砂量曲線も示している。さて、描点群は芦田・道上式の曲線より大きく右にずれた位置に分布しており、植生モデルによる有効掃流力 τ_{*E} の低減効果の大きさがうかがえる。さらに、描点群の分布性状が植生モデルの幾何条件ごとに相違していることは当然であるが、とくに、A-1シリーズにおいては、流量の条件によっても描点群の傾向がかなり変化しており、有効掃流力の低減特性はかなり複雑なものであると思われる。

3 k-εモデルによる有効掃流力の計算

3.1 基礎式

清水ら¹⁾は、植生を伴う定常・鉛直2次元開水路不等流について、空間平均化されたレイノルズ方程式ならびに乱流エネルギーとエネルギー逸散率の保存式を導いている。これらを等流の条件下で単純化すれば、次のような1次元 $k-\epsilon$ モデルの基礎式が得られる。

$$0 = \frac{d}{dy} \left\{ (\nu_t + \nu_m) \frac{dU}{dy} \right\} - \frac{1}{2} C_D \lambda |U|U + g \sin \theta \tag{1}$$

$$0 = \frac{d}{dy} \left\{ \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} + \nu_m \right) \frac{dk}{dy} \right\} - \epsilon + \nu_t \left(\frac{dU}{dy} \right)^2 + C_{fk} \frac{1}{2} C_D \lambda |U|U^2 \tag{2}$$

$$0 = \frac{d}{dy} \left\{ \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} + \nu_m \right) \frac{d\epsilon}{dy} \right\} - C_2 \frac{\epsilon^2}{k} + C_1 \frac{\epsilon}{k} \left\{ \nu_t \left(\frac{dU}{dy} \right)^2 + C_{f\epsilon} \frac{1}{2} C_D \lambda |U|U^2 \right\} \tag{3}$$

$$\text{ただし, } \nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (4)$$

ここに、 y = 河床面からの距離、 U = 時間平均流速、 k = 乱れエネルギー、 ϵ = 乱れエネルギーの逸散率、 ν_t および ν_m = それぞれ渦動粘性係数および動粘性係数、 λ および C_D = それぞれ植生の局所的な密生度（流れの単位容積当たりの遮蔽面積）および抗力係数、 g = 重力の加速度であり、 σ_k 、 σ_ϵ 、 C_1 、 C_2 、 C_μ 、 C_{fk} および $C_{f\epsilon}$ は、いずれもモデル定数である。これら7個のモデル定数のうち、はじめの5個については、主として植生のない流れへの適用を通して、 $\sigma_k = 1.0$ 、 $\sigma_\epsilon = 1.3$ 、 $C_1 = 1.44$ 、 $C_2 = 1.92$ 、 $C_\mu = 0.09$ のような標準値がほぼ確立されている。残りの2個のモデル定数 C_{fk} および $C_{f\epsilon}$ は、それぞれ植生の形状抵抗が乱れエネルギーの発生と逸散に及ぼす影響を評価するためのものであり、清水ら¹⁾によれば、直立性の円柱状植生モデルの場合には、 $C_{fk} = 0.07$ および $C_{f\epsilon} = 0.16$ とするのが適当である。

3.2 数値計算法

数値計算の際には、前もって基礎式を同一形式の輸送方程式に書き直したのち、Patankar⁵⁾の積分法で離散化した。ついで、Patankar・Spalding⁶⁾のSIMPLEアルゴリズムと同様に、まず等流水深 h_m や未知変数 U 、 k および ϵ の分布を適当に仮定して、離散化式と境界条件（後述）から未知変数のより適正な近似値を求め、ついで U の近似値と連続式に基づいて h_m を修正するという2段階の計算作業を逐次繰り返した。そして、未知変数に加えるべき修正量が、いずれも直前の近似値の0.1%以内に収まる条件で収束解を求めた。なお、計算対象領域は $y = y_B \sim h_m$ の範囲とし、計算格子点をこの間に等間隔で配置した。ここで、 y_B は、粒径 d_m の砂粒粗面の場合には $y_B = 2d_m$ とし、滑面の場合には、水路床上での摩擦速度 u_{*B} に基づく無次元高さ $y_B^+ (= u_{*B} y_B / \nu_m)$ が30（完全乱流域の下限に相当）となるように調節した。

境界条件は以下のように取り扱った。まず、底面条件については、水路床に最も近い control volume 内の流れが u_{*B} に規定される平衡壁面乱流になるものと仮定し、下記のように設定した。

$$\begin{cases} \text{for } y = y_B/2; & (\nu_t + \nu_m) dU/dy = \alpha u_{*B}^2 \\ \text{for } y = y_B; & k = \beta u_{*B}^2 \quad \text{and} \quad \epsilon = u_{*B}^3 / (\kappa y_B) \end{cases} \quad (5)$$

ここに、 κ = Kármán 定数、 α および β は係数である。 α および β の値は水路床の粗・滑に応じて、それぞれ $\alpha = 1$ および $\beta = 4$ （粗面）あるいは $\alpha = 2$ および $\beta = 8$ （滑面）とするのが適当と思われる。滑面の場合に $\alpha = 2$ とするのは、buffer 層の対数速度勾配が完全乱流域のものの約2倍になるという経験的知見⁷⁾に基づいている。一方、水面の境界条件については、柳津・中川⁸⁾のモデルなども参考に、次のように設定した。

$$U_{im} - U_{(im-1)} = u_{*0} \Delta y / (\kappa h_m); \quad k_{im} = (2/3) k_{(im-1)}; \quad \epsilon_{im} = (2/3) \epsilon_{(im-1)} \quad (6)$$

ただし、 im = 水面上に位置する計算格子点の番号、 Δy = 格子点間隔である。 U の条件式は、 u_{*0} に規定される対数型流速分布則から導かれている。また、 k および ϵ の条件は、柳津・中川⁸⁾と同様に、水面付近では乱流構造がほぼ等方性だが、水面上では水深方向の変動流速が無くなると仮定するものである。

3.3 固定床実験結果に基づくモデルの同定

$k - \epsilon$ モデルの適用に当たっては、各モデル定数ならびに抗力係数 C_D の与え方が問題となる。この点について、固定床実験の流速分布の再現計算を通して検討してみたところ、モデル定数のうち、 C_μ と C_{fk} に若干の修正を加える必要性が認められた。まず、(4) 式の C_μ を0.09に固定するならば、植生層内の ν_t を過大評価し、計算結果の速度勾配が実測のものより小さくなることが分かった。これは、水路床を被覆する形態の植生が水深方向の乱流混合を抑制しているためと推察し、(4) 式に

$$\nu_t = C_\mu (k^2 / \epsilon) \{1 - K_{\nu t} (y/h_v)^3\} \quad (7)$$

のような修正を加えることにした。ここに、 K_{vt} は、植生の河床被覆率の大小に応じ、 $0 \sim 1$ の間で変化させるべき係数である。一方、 C_{fk} については、植生モデルAの場合には清水らの推奨値を用いることで十分であったが、モデルBの場合には $C_{fk} = 0.1$ と若干大きくするする必要があった。これは、より複雑な形状の抵抗体がより大きいエネルギーを生成すると見なすことに相当する。さらに、 C_D については、水路床面に対する局所的な傾斜角 ϑ_v° との関係を、 $30^\circ \leq \vartheta_v \leq 90^\circ$ の範囲において、 $C_D = 0.65 + 0.45\vartheta_v/90$ のように近似できることが分かった。

図-5は、同定された $k-\epsilon$ モデルによる流速分布の計算値と実験値の比較を行ったものである。 K_{vt} には、植生モデル A-1、A-2、B-1 および B-2 において、それぞれ 0.6、0.2、0.3 および 0.1 のように異なる数値を与えている。なお、流速の実験値は、数本の測線上の計測値を適当な重みで平均化したものである。計算結果と実験結果の適合性は概ね良好で、本モデルの妥当性がうかがえる。

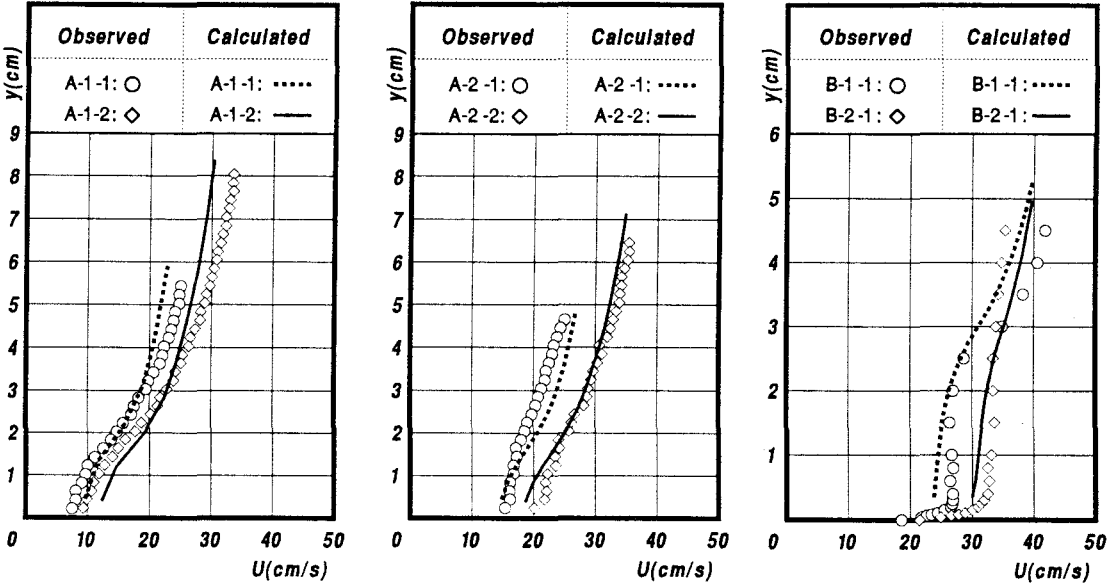


図-5 $k-\epsilon$ モデルによる流速分布の計算結果と実験結果との比較

3.4 有効掃流力による移動床実験結果の再整理

図-6は、本 $k-\epsilon$ モデルを適用して推算された u_{*B} に基づいて無次元有効掃流力 τ_{*E} と無次元単位幅流砂量 q_{*BE} を求め、移動床実験結果を再整理するとともに、芦田・道上の流砂量曲線と比較したものである。図-4では、描点群の全てが理論曲線の右方に大きくずれて分散していたが、図-6では、全てが理論曲線の近くに寄せられている。また、植生モデル単体の形状が異なるA、B両シリーズごとに見れば、植生モデルの設置密度ならびに勾配や流量という実験条件の相違にはほとんど無関係に、全ての描点がほぼ同一の傾向線上に分布している。そして、AおよびBシリーズの描点群には、 τ_{*C} をそれぞれ 0.05 および 0.04 とした芦田・道上式を当てはめることができる。Bシリーズでは、Aシリーズに比して相当する τ_{*C} が小さく、相対的に流砂量が增大している原因は、図-3に示されているように、Bシリーズでは、底面上の局所的な掃流力が平均掃流力 ($k-\epsilon$ モデルはこれを与える) を上回る傾向がAシリーズの場合よりも顕著であるためと推察される。

4 あとがき

本研究では、非直立性で、しかも高さにより幾何条件が異なる植生モデルについて、これが流れの流速分布と掃流砂量に及ぼす影響を実験的に検討するとともに、1次元の $k-\epsilon$ モデルを用いて両者の特性の説明を試みた。実験の結果としては、まず、個体のスケールが大きく、複雑な形状をした植生の場合に、流速分布の場所的変化

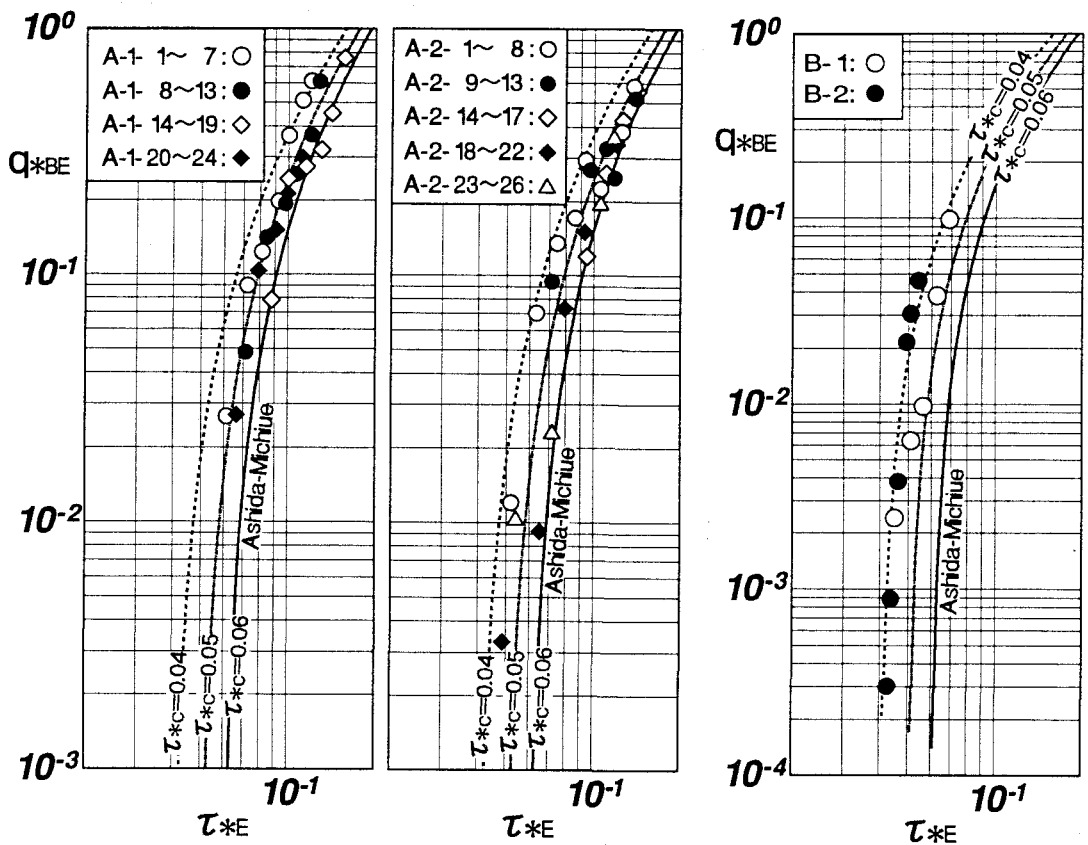


図-6 推算された有効掃流力を用いて描いた流砂量特性図

が顕著で、これによって流砂量特性も複雑化する可能性が高いことを指摘した。また、見かけの掃流力に基づいて流砂量特性を整理したところ、植生の幾何条件の相違によるところは当然のことながら、流量や勾配などによっても変化する多様な傾向が認められ、有効掃流力の的確な評価の重要性が示唆された。

1 次元の $k-\epsilon$ モデルは、清水らのものを基礎にして構築された。そして、流速分布の実験資料を用いてその同定を行ったところ、本研究の植生モデルの場合には、一部のモデル定数に対する既存の標準あるいは推奨値に若干の修正を加える必要性のあることが認められた。最後に、本 $k-\epsilon$ モデルで求まる有効掃流力を用いて流砂量実験資料を再整理した結果、このような有効掃流力を使うならば、既存の流砂量式によるだけでも流砂量特性の説明がある程度可能であることが示された。

参考文献

- 1) 清水・辻本・中川：直立性植生層を伴う流れ場の数値計算に関する研究，土論集，No.447/II-19，pp.35-44，1992.
- 2) 渡辺・北條・清水：樹木の存在する河道の流況特性，水工論，第 35 巻，pp.471-476，1991.
- 3) 湯城・岡部：植生を持つ河床上の流れの抵抗則に関する基礎的研究，水工論，第 39 巻，pp.471-476，1991.
- 4) 芦田・道上：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究，土論集，第 206 号，pp.59-70，1972.
- 5) Patankar : Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Taylor & Francis, Chap.5, pp.79-111, 1980.
- 6) Patankar・Spalding : A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows, Int. Jour. Heat Mass Transfer, Vol.15, pp.1787-1806, 1972.
- 7) 藤本：流体力学，養賢堂，第 9 章，p.232，1970.
- 8) 瀬津・中川：修正 $k-\epsilon$ 乱流モデルによる開水路乱流の数値計算，土論集，第 387 号，pp.125-136，1988.