

植生帯周辺での分級縦筋の形成

Longitudinal Stripe of Sorting along Vegetation Zone in Open Channel

辻本哲郎*・北村忠紀**・中川博次***

By Tetsuro TSUJIMOTO, Tadanori KITAMURA and Hiroji NAKAGAWA

In fluvial stream with vegetated zone, lateral bed-load transport is induced by low-frequency fluctuation of transverse velocity and a longitudinal sand ridge is formed along the boundary of vegetation zone. In case of graded material, it accompanies a longitudinal sorting, and a longitudinal stripe is characteristic where is covered by fine materials. Flume experiment is conducted to demonstrate the above sorting process, and it is explained by using the non-equilibrium bed-load transport model for each grain size.

Keywords: fractional bed-load transport, graded materials, sorting, flow with vegetation, longitudinal stripes of sorting

1. まえがき

植生の水理に関する研究は近年活発に行なわれるようになってきており、単に流れのみでなく流砂現象及びそれに伴う河床変動の研究へと進展しつつある。池田ら¹⁾は側岸に植生群落を伴う直線流路の平均流場を巧みに表現し、勾配拡散型の取扱から浮遊粒子の横断濃度分布とそれによる河床変動を予測している。著者ら^{2)~4)}はこうした場での低周波流速変動による横断混合機構を実験的に検討し、掃流砂の運動にさえこうした低周波流速変動が影響し、掃流砂の横断方向フラックスを生じさせることに着目している。すなわち、移動床実験において、低周波流速変動による掃流砂の横断方向フラックスが存在すること、それによって植生帯近傍に sand ridge が形成されることを確認し、一方、横断方向の非平衡掃流砂過程をモデル化して、こうした現象を説明している。さて、河床は一般に単一粒径の砂礫で構成されていることはほとんどなく、混合砂礫で構成されており、混合砂礫の流送の際には粒径ごとの砂礫の運動特性が異なるために様々なタイプの分級現象が出現し、移動床過程の重要な側面となっている^{5)~7)}。植生を伴う流路においてはこのような混合砂礫床特有の現象が助長されることが推測される。

本研究では、混合砂礫で構成された矩形断面直線流路の側岸に植生群落を伴う流れが十分に発達した場を対象とし、まず、2 粒径で代表した粗砂・細砂からなる混合砂礫での移動床実験において、植生帯近傍に分級縦筋が出現したことを報告する。こうした分級縦筋の形成は植生帯近傍での低周波流速変動による掃流砂

* 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 2-4 0-2 0)

** 正会員 工修 京都大学助手 工学部環境地球工学教室
(〒606 京都市左京区吉田本町)

*** 正会員 工博 京都大学教授 工学部環境地球工学教室

の横断方向フラックスが粒径ごとに異なることに起因すると考えられ、著者らの解析^{3), 4)}を混合砂礫の粒径別に適用することによって分級縦筋の形成過程の記述を試みる。こうした分級縦筋は粒径ごとに偏在する河床に異なる植生が選択的に繁茂する状況を生じさせる可能性もあり、植生を含む河川形態学の基礎となるものと期待される。

2. 移動床実験

移動床実験は長さ12m、幅50cmの矩形断面直線水路において、高さ10cm、直径 $D=0.25\text{cm}$ 、中心間隔 $s=2\text{cm}$ の円柱群で模擬された植生群落モデル（透過係数 $K_T=160\text{cm/s}$ ）を水路上流端より6mの位置から下流端まで（6m区間）、水路片側に幅25cmだけ設置して行った。このうち、移動床部分は植生群落モデル設置上流端から2mの位置から5mの位置までの3m区間であり、移動床厚は4cmである。また、流砂運動、河床状態の観察と計測は植生群落モデル設置上流端より4mの位置で行なった。通水前の移動床は固定床と同一高さになるようにならされている（図1参照）。実験に用いた砂礫は、粗砂として中央粒径 $d_1=0.088\text{cm}$ 、細砂として中央粒径 $d_2=0.034\text{cm}$ のほぼ均一砂を体積割合でそれぞれ50%ずつ混ぜ合わせたものである。

水位は植生高さ以下の約4cmとし、植生帯を伴う流れが十分に発達する領域（植生群落モデル設置上流端から下流約3.5m以上離れた領域）で、疑似等流状態となるように下流端の堰を調節した。実験は水路勾配 i_b を1/150、1/300の2通りで行なった。実験条件を表1に示す（表中、 h_0 ：河床が変形する前の平均水深、 $\Omega=0.5C_D\lambda h_0=gh_0/K_T^2$ ：植生の密生度を表すパラメータ、 $\lambda=D/s^2$ ：植生の単位体積あたりの水流に対する遮蔽面積、 C_D ：植生の抗力係数、 $u_{*0}=\sqrt{gh_0i_b}$ 、 g ：重力加速度、 p_{10} ：粗砂の初期体積割合である）。通水後、適当な時間ごとに注意深く

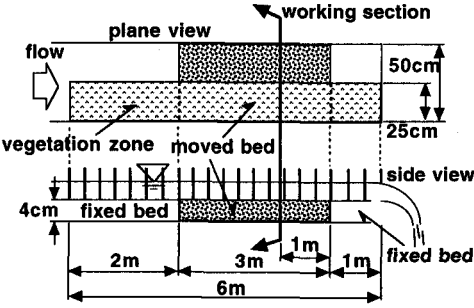


図1 実験水路図

表1 実験条件表

RUN	i_b	h_0 (cm)	Ω	u_{*0} (cm/s)	d_1 (cm)	d_2 (cm)	p_{10}
RUN 1	1/150	4.0	0.152	5.11	0.088	0.034	0.5
RUN 2	1/300	4.0	0.152	3.61	0.088	0.034	0.5

通水を止め、河床高さの変化をポイントゲージを用いて計測するとともに、河床状態を写真撮影によって記録し、河床高さ、河床状態の時間変化が調べられた。なお、通水中、給砂は行なっておらず、実験は固定床、移動床の接続部の洗掘が顕著になってくる前に終了した。

RUN 1における河床状態の時間変化は写真1に示すとおりである。 $t=180\text{s}$ では植生帯境界付近にはんやりと細砂の縦筋が形成され、 $t=600\text{s}$ ではそれがはっきりと確認されるようになり、 $t=1500\text{s}$ では植生帯内部へとその位置をずらしている。また、非植生域では縦断方向の交互分級（diffuse gravel sheet⁸⁾）が形成されるが全体としてはほぼ初

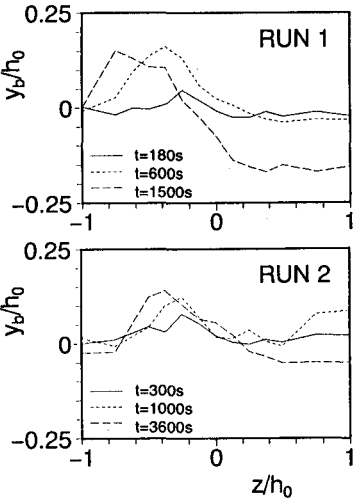


図2 横断河床形状の時間変化

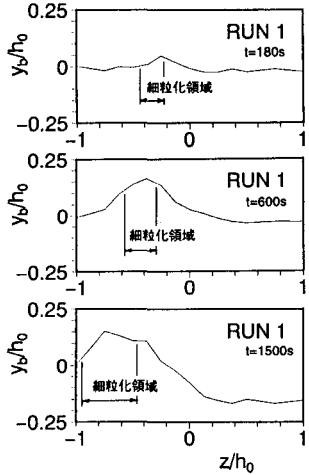


図3 細粒化領域の時間変化

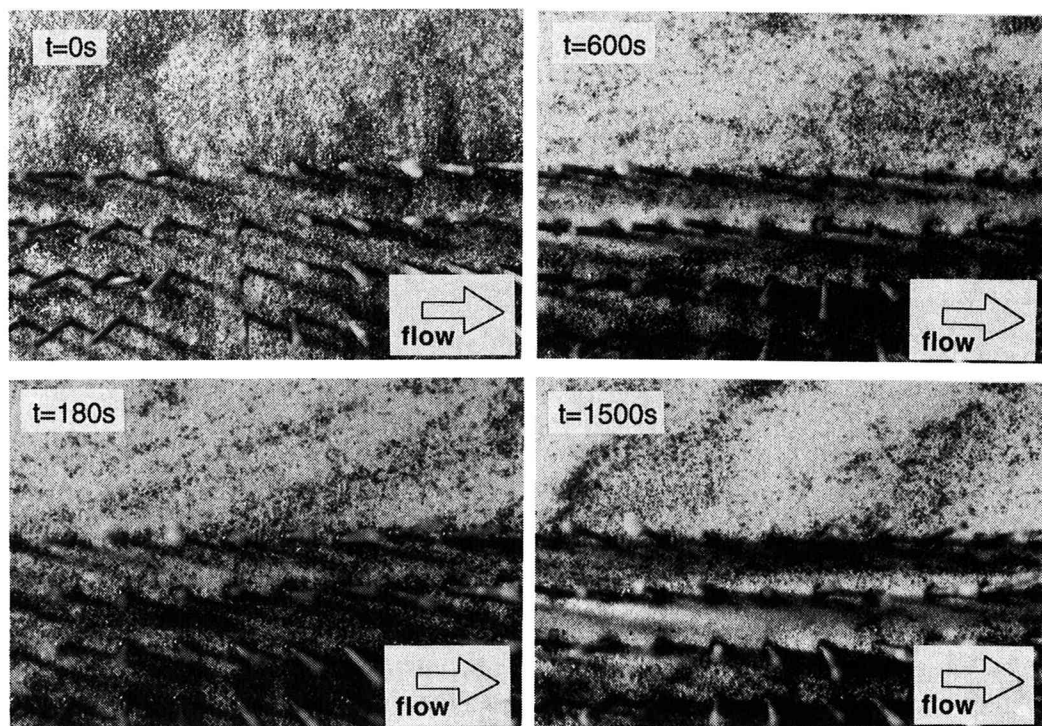


写真1 河床状態の時間変化

期粒度構成を保つようである。図2は植生帯境界付近の横断河床形状の時間変化を示したものであるが（ $z=0$ は植生帯境界、 $z<0$ は植生域内を表す）、植生帯境界付近の植生域内に砂礫が堆積し、sand ridgeが形成されていく様子が分かる。このsand ridgeは時間の経過とともに植生帯内部へと位置をずらしていく。また、図3は写真1より読み取られた細砂の筋の位置の時間変化を示したものであり、その形成位置は植生帯内部へ移動するが、sand ridgeのクレスト部分にほぼ対応している。

3. 粒径別非平衡掃流砂モデルの適用

植生帯内外の混合現象が低周波の流速変動によっていることから、掃流砂の運動もその影響を受け、横断方向の掃流砂フラックスが生じる。著者ら^{3), 4)}は低周波の横断方向流速変動 W の振幅を振幅が変動の標準偏差の矩形波で近似し、 $W>0$ 、 $W<0$ それぞれの場合に対して掃流砂の運動軌跡に沿って中川・辻本⁸⁾の非平衡掃流砂モデルを適用することから、均一砂の場合の横断方向掃流砂フラックスとそれによる河床変形を予測し、実験値との良好な一致を得ている。ここでは、上述の考え方に様々な分級現象を巧みに説明できる辻本ら^{5), 6)}の粒径別非平衡掃流砂モデルを適用する。

河床表層に占める粒径 d_i の砂礫の体積含有率を p_i 、そのクラスの砂礫のpick-up rateを p_{si} とし、砂礫粒子のstep lengthの確率密度関数が粒径別に平均値 Λ_i の指数分布に従うものとする、粒径別の非平衡掃流砂量の横断方向成分は $W>0$ 、 $W<0$ の場合について、それぞれ次のように書ける。

$$q_{bzi+}(z) = \frac{A_3 d_i}{A_2} \int_0^{\infty} p_i(z-\xi) p_{si}(z-\xi) \exp\left[-\frac{\xi}{\Lambda_i \sin|\phi_{i+}(z)|}\right] d\xi \quad (W>0) \quad (1)$$

$$q_{bzi-}(z) = -\frac{A_3 d_i}{A_2} \int_0^{\infty} p_i(z+\xi) p_{si}(z+\xi) \exp\left[-\frac{\xi}{\Lambda_i \sin|\phi_{i-}(z)|}\right] d\xi \quad (W<0) \quad (2)$$

ここで、 A_2, A_3 :それぞれ砂の2次元, 3次元形状係数, ϕ_+, ϕ_- :それぞれ $W>0, W<0$ の場合の流砂の方向角である。流砂の方向角 ϕ は平坦河床では流れの方向角 ϕ と一致し、 $U(z)$ を主流速、 $W_{rms}(z)$ を横断方向流速変動の標準偏差として、 $U(z) \gg W_{rms}(z)$ ならば、

$$|\phi_+(z)| = |\phi_-(z)| = \phi(z) \equiv \frac{W_{rms}(z)}{U(z)} \quad (3)$$

と近似される。一周期の流体運動によるnetの横断方向掃流砂量は次のように表される。

$$q_{bzi}^{net}(z) = [q_{bzi+}(z) + q_{bzi-}(z)]/2 \quad (4)$$

粒径別pick-up rateは辻本ら^{5), 6)}に従い、

$$p_{si} = 0.03\tau_{*i} \left(1 - \frac{0.7\tau_{*ci}}{\tau_{*i}}\right)^3 \sqrt{(\sigma/\rho - 1)g/d_i} \quad (5)$$

で与える。ここで、 $\tau_{*i} \equiv u_*^2 / \{(\sigma/\rho - 1)gd_i\}$ である。粒径別の限界掃流力 τ_{*ci} については、Egiazaroff⁹⁾の研究に代表されるが、ここでは動的分級の解析で辻本ら^{6), 7)}が用いた次式を援用する。

$$\frac{\tau_{*ci}}{\tau_{*cm}} = \left(\frac{d_i}{d_m}\right)^{-1} \quad (6)$$

ここで、 τ_{*cm} :平均粒径 d_m に対する無次元限界掃流力であり、ここでは平均粒径 d_m を次式で定義する。

$$d_m = \sum_{i=1}^n d_i p_i \quad (7)$$

上述の掃流過程の計算に必要な流れ場は、平坦河床を仮定して著者ら^{3), 4)}が実験結果をもとに定式化した方法 (Appendix参照) で表現することとする。このとき、netの粒径別横断方向掃流砂量は例えば本実験のRUN 1に対して図4のように計算される。ただし、非植生域での底面粗度による摩擦損失係数は平均粒径 d_m からManning-Strickler式を用いて逆算した。また、植生境界付近で平均粒径 d_m を用いた砂粒Reynolds数が10~20であることから、 $\tau_{*cm} = 0.034$ とした。各粒径の砂礫の平均step lengthは、混合砂礫床における砂粒運動を検討した中川ら¹⁰⁾の結果から、粒径で無次元化した平均step lengthは $\lambda_1 = 20, \lambda_2 = 100$ ($\lambda_1 \equiv \Lambda_1/d_i$) とした。

図4にはnetの粒径別横断方向掃流砂量の横断方向微分をとったもの (dq_{bzi}^{net}/dz) も併示されているが、植生帯境界から植生帯内部にかけて細砂の方が大きな絶対値を持つ。 $-dq_{bzi}^{net}/dz$ は単位体積あたりの砂の堆積率に比例し、これが細砂の方が大きいということは、細砂の堆積が粗砂に比べて相対的に卓越し、河床が細粒化することを表している。実験で出現した植生群落内での細砂の縦筋は、このように粒径別に横断方向掃流砂フラックスが異なることに起因しており、それは辻本ら^{5)~7)}の粒径別非平衡掃流砂モデルを適用することで説明が可能となる。

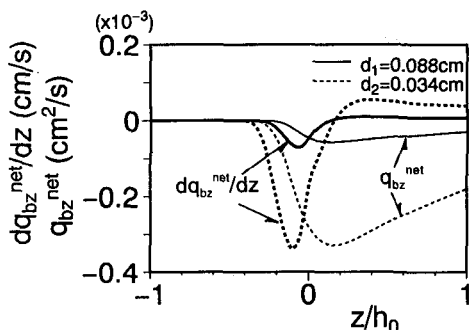


図4 粒径別横断方向掃流砂量

4. 分級縦筋形成のシミュレーション

横断方向掃流砂フラックスの存在により、河床高さ、河床表層の粒度構成が変化し、流れ場も変化するが、ここでは流れの変化が無視しえる段階での解析を進める。

このとき、 Δz 区間で Δt 時間内に堆積または、侵食される粒径 i クラスの砂の見かけのかさ Δq_i は、

$$\Delta q_i = -\frac{1}{1 - \rho_0} \frac{dq_{bzi}^{net}}{dz} \Delta z \Delta t \quad (8)$$

と表される。ここに、 ρ_0 :空隙率である。また、 $\Delta q_i > 0$ が堆積傾向を表す。河床表層における交換層の厚さを θ_e とし、堆積、侵食後に河床高さが変化しても交換層の厚さは一定 (粗砂の粒径程度) とし、その交換層内で混ぜあわされたものを表層における粒度構成と見なす。図5を参考にして、河床低下の場合には、交換

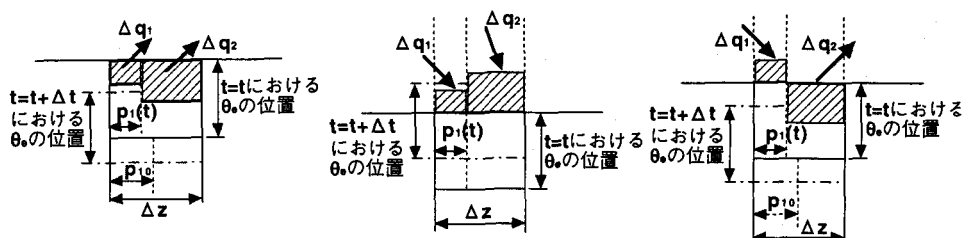


図5 交換層の取扱い

層内で侵食された量にみあう分だけ交換層より下の層の砂礫が露出し、新たな交換層を形成するものとする。このとき、交換層より下の層では初期粒度構成であるものと近似すれば、 Δt 時間後の表層での粗砂 ($i=1$) の体積割合 p_1 は次のように書ける。

$$p_1(t + \Delta t) = \frac{p_1(t)\theta_e \Delta t - p_{10} \sum \Delta q_i + \Delta q_1}{\theta_e \Delta t} \quad (9)$$

ここで、 p_{10} : 粗砂の初期体積割合である。これは河床が単調に低下していく場合にのみ適用されるものであるが、後述のシミュレーション結果から分かるように本シミュレーションでは問題はない。ただし、侵食、堆積が交互に生じるような場合にはさらに工夫する必要がある。河床上昇の場合には、新たに堆積した量にみあう分だけ交換層の位置が上昇するものとし、 Δt 時間後の表層での粗砂の体積割合 p_1 は次のようになる。

$$p_1(t + \Delta t) = \frac{p_1(t) \left[\theta_e \Delta t - \sum \Delta q_i \right] + \Delta q_1}{\theta_e \Delta t} \quad (10)$$

ここで、時間間隔 Δt は各時間ごとに、 $|\sum \Delta q_i| \leq \theta_e \Delta t$ かつ $|\Delta q_i| \leq \theta_e \Delta t$ となるように決めるものとする。また、 $\Delta q_i \leq -p_i(t)\theta_e \Delta t$ となる場合には Δt 時間内には交換層内にある以上の砂はそれ以上侵食されないものとし、 $\Delta q_i = -p_i(t)\theta_e \Delta t$ とするものとする。

図6は実験RUN 1の条件について、代表的な横断位置での河床粒度構成、河床高さの時間変化の計算結果を示したものであり、図7は代表的な時間における河床粒度構成、河床高さの横断方向分布の計算結果を示したものである。これらの図より、形成位置にはややずれがあるものの、sand ridgeや細砂の縦筋が形成され、それが時間の経過とともに植生帯内部へと位置をずらしていく傾向が再現されている。

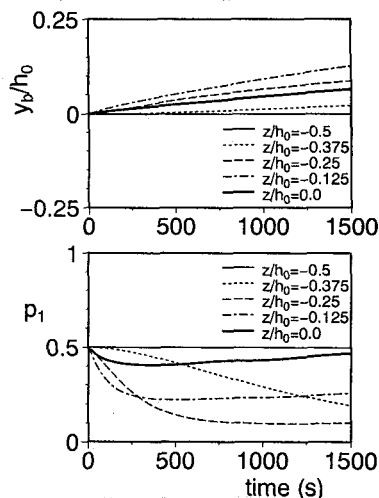


図6 粒度構成・河床高さの時間変化

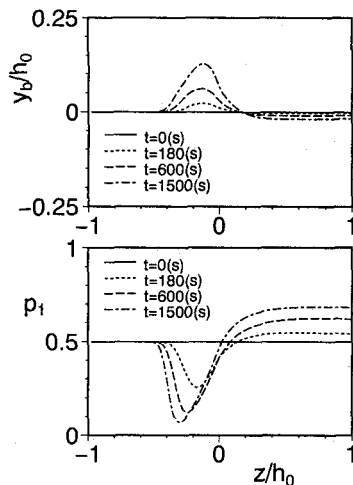


図7 粒度構成・河床高さの横断分布

5. あとがき

本研究では植生帯周辺に形成される分級縦筋を移動床実験の結果によって示し、さらに粒径別非平衡流砂モデルの適用によって、こうした分級縦筋の形成過程を記述した。今後、さらに詳細な記述のためには、流れ場の精度よい評価と、混合砂礫の流送機構に関する詳細な検討が必要である。

参考文献

- 1) 池田・太田・長谷川：側岸部植生帯が流れ及び粒子態物質の輸送に及ぼす影響，土木学会論文報告集，No.447/II-19，pp.25-34，1992.
- 2) 辻本・北村：側岸に沿って植生群落がある流路での水面変動を伴う横断混合，水工学論文集，第36巻，pp.273-280，1992.
- 3) 辻本・北村・中川：植生群落周辺の掃流砂運動と河川敷地形の形成，水工学論文集，第37巻，pp.687-692，1993.
- 4) Tsujimoto, T. and T. Kitamura : Lateral transport of bed-load near vegetation zone and river-morphological change during flood, *Proc. XXIV IAHR Congress*, Tokyo, Vol.2, pp.485-492, 1993.
- 5) 辻本・本橋：混合砂礫床の粗粒化について，土木学会論文報告集，No.417/II-13，pp.91-98，1990.
- 6) 辻本：河床表層粒度構成の不安定現象としての縦断交互分級の形成機構，土木学会論文報告集，No.411/II-12，pp.143-150，1989.
- 7) 辻本：2次流による分級縦筋の形成，水工学論文集，第33巻，pp.403-408，1989.
- 8) 中川・辻本：移動床流れの水理，技報堂出版，1986.
- 9) Egiazaroff, I. V. : Calculation of nonuniform sediment concentration, *Jour. of the Hydraulic Division, ASCE*, Vol.2, pp.73-80, 1965.
- 10) Nakagawa, H., T. Tsujimoto and S. Nakano : Characteristics of sediment motion for respective grain sizes of sand mixtures, *Bulletin, Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto University*, Vol.32, pp.1-32, 1982.

Appendix

主流速の横断方向分布は次のように与え、底面粗度係数を一定として各横断位置での掃流力を求める。

$$\begin{aligned} U_{\#}(z) &= 1 + (\sqrt{\gamma} - 1) \exp(-z/B_m) & (z > 0) ; \\ U_{\#}(z) &= \gamma + (\sqrt{\gamma} - \gamma) \exp(z/B_s) & (z < 0) \end{aligned} \quad (A-1)$$

ここで、

$$\gamma = \sqrt{C_f / (C_f + \Omega)} \quad (A-2)$$

$$B_m/h_0 = \sqrt{\varepsilon_{M*} / 2 C_f^{1/4}} ; \quad B_s/h_0 = \sqrt{\varepsilon_{M*} / 2 (C_f + \Omega)^{1/4}} \quad (A-3)$$

であり、 $z > 0$ が非植生域、 $z < 0$ が植生域を表している。また、 $U_{\#} \equiv U/U_{m0}$ 、 $U_{m0} \equiv \sqrt{1/C_f} u_{*0}$ ：非植生域で水平せん断の及ばない領域の主流速値、 C_f ：非植生域での底面粗度による摩擦損失係数、 B_m 、 B_s ：それぞれ非植生域、植生域の混合領域幅スケール、 $\varepsilon_{M*} \equiv \varepsilon_M / u_{*0} h_0$ 、 ε_M ：渦動粘性係数である。渦動粘性係数については、

$$\varepsilon_{M*} = f C_f^{1/2} (1 - \gamma) (B_m + B_s) / h_0 \quad (A-4)$$

で与える。ここに、 f ：比例定数であり、実験値をもとに次の経験式で与える。

$$f = 0.03 \exp[-4.0 \exp(-6.0\gamma)] \quad (A-5)$$

また、横断方向乱れ強度の横断方向分布については次のように与える。

$$\begin{aligned} W_{rms}(z) &= W_{rms0} + [W_{rms}(0) - W_{rms0}] \exp\left[-(z/B_m)^2\right] & (z > 0) ; \\ W_{rms}(z) &= W_{rms}(0) \exp\left[-(z/B_s)^2\right] & (z < 0) \end{aligned} \quad (A-6)$$

ここで、 W_{rms0} ：非植生域で水平せん断の影響のない領域の横断方向乱れ強度の水深平均値で、 $W_{rms0} \equiv C_f^{1/2} U_{m0}$ となる。また、 $W_{rms}(0)$ ：植生境界での横断方向乱れ強度で、 f 値を用いて次のように与える。

$$W_{rms}(0) = \pi \varepsilon U_{m0} (1 - \gamma) f \quad (A-7)$$

これらの詳細については、文献^{3), 4)}を参照されたい。