

複断面水路における移流を考慮した水面形計算法

Water-surface calculation method considering lateral flow effect on the Compound Channel

吉田貢士、島田正志、田中忠次

Koshi Yoshida, Masashi Shimada, Tadatsugu Tanaka

はじめに 生態系や景観的配慮から、水路に粗度や断面形状の変化を持たせる近自然工法が積極的に取り入れられている。そういった水路を設計する際に、複雑な流速や水深の分布を解析できる実用的なモデルが必要とされている。本研究では、既存のモデルの問題点を指摘しつつ、断面間の移流を考慮した新しいモデルを提案する。

既存のモデル 現在実務レベルで用いられているモデルは、福岡らが提案した断面分割法である。これは各分割断面でのエネルギー勾配を一定として解く方法である。しかし、不等流性の強い流れにおいては、各断面でのエネルギー勾配の分布を考慮していないために、流速に大きな誤差を生む。一方、木之瀬ら(1998)は各断面でのエネルギー勾配の分布を考慮したモデルを提案している。両モデルによるエネルギー勾配の計算結果を図1(実験条件は後述)に示す。このモデルの問題点は、各断面での水面勾配が異なる点(図2)である。

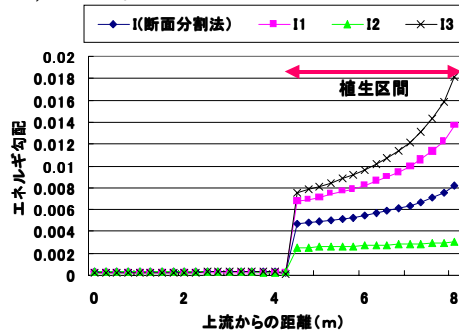


図1 エネルギー勾配Iの変化

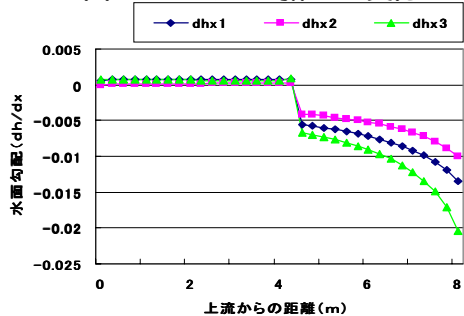


図2 水面勾配(dh/dx)の変化

常流状態での水面勾配は各断面で等しいことが実験によって確かめられている。これは横断方向の連続式(移流)を考慮していないために生じる。

モデルの提案 ここでは、Bertland(1994)により提案された流量交換モデルを用いる。

図3のようなコントロールボリュームにおいては連続式、運動方程式は次のようになる。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial AU}{\partial x} = q = q_{in} - q_{out} \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho AU)}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho AU^2)}{\partial x} + \rho q_{in}u - \rho q_{out}U + \rho gA \cdot (S_o - S_f) - \rho gA \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \quad (2)$$

ここで、A:断面積、U:断面平均流速、h:水深、q:単位幅流量、u:隣接断面の流速、So:水路勾配、Sf:摩擦勾配。定常状態では、式(1)(2)より各断面でのエネルギー勾配Iは次のようになる。

$$I = S_f + \frac{q_{in}(U - u)}{gA} \quad (3)$$

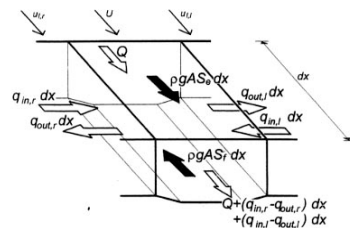


図3 コントロールボリューム

交換流量 交換流量は乱流混合の効果をもつ q_{ex} と移流効果をもつ q_t に分けられる。ここで q_{ex} は流速差起因のせん断力を反映させた式として次のようになる。(f:混合係数、u:断面間流速差)

$$q_{ex} = f \cdot h \cdot \Delta u \quad (4)$$

一方 q_t については水面形方程式により導く。

断面分割 断面分割については図4のように、水深や粗度の分布に基づいた分割()と、木之瀬らと同じく低水路の流量交換の及ばない面での分割((1)(2))を行う。

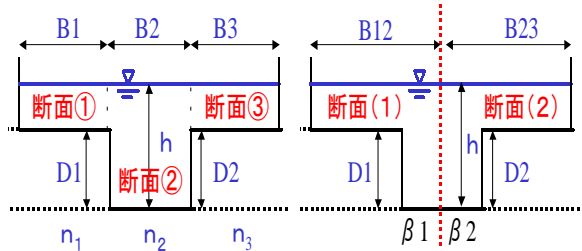


図4 断面の分割方法

各断面 ①では式(3)が成立し、断面(1)(2)では流量交換がないので次の式が成立する。

$$I_{12} = \frac{1}{C_{12}^2 R_{12}} \alpha_{12} U_{12}^2, \quad I_{23} = \frac{1}{C_{23}^2 R_{23}} \alpha_{23} U_{23}^2 \quad (5)$$

ここで、シェジ係数 C は等流状態での C₀ から推定する。添え字 12 は断面 ①の平均量を示す。以上5つの式と連続式を連立して解くことにより、各断面の流速・エネルギー勾配が求まる(詳しくは文献1参照)。

移流量の決定 以上までの計算によって得た解は、先に述べたように横断方向の連続式を満たしていない(各断面での水面勾配が異なる)。ここでは横流入のある水面形方程式から移流量 q_t を導く。例えば断面 ①では、水面形方程式は次のようになる。

$$\frac{dh_1}{dx} = \frac{S_o - S_f - \frac{u_1}{gA_1} (2q_{in} - q_{out}) + \frac{u_2}{gA_1} q_{out}}{1 - \frac{B_1 u_1^2}{gA_1}} \quad (6)$$

各断面の水面勾配が等しくなるように移流量 q_t を決定する。

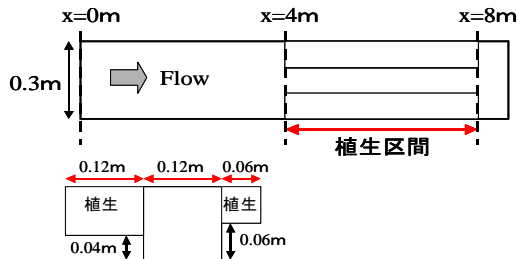


図5 実験水路および断面形状

表1 実験条件

	流量	下流端水深	混合係数 f
Run3	9.76 (l/s)	9.83 (cm)	0.03

モデルの検証 モデルの検証には木之瀬ら(1998)が行った実験結果を用いる。実験水路形状を図5、実験条件を表1に示す。計算は実測の下流端水深を与えて行った。本研究の目的は、移流の効果があるかを定量化することであるので、混合係数 f は木之瀬らの0.03をそのまま用いた。

考察 図6に水面形の計算結果を示す。木之瀬らがフィッティングした混合係数 f の効果に加えて、移流の効果により抵抗が増し、計算結果が実測値より大きな水深をとっている。図7に移流係数 t の変化を示す。移流係数 t は混合係数 f との相対的な大きさを比較するために次の式により算定した(添え字の12は断面 ①と ②の間での水理量を表す)。

$$t_{12} = \frac{qt_{12}}{h \cdot \Delta u_{12}} \quad (7)$$

植生区間では不等流性が強いいため大きな移流効果が生じ、混合係数 f = 0.03 に対して最大2倍程度となった。これまで混合の強さは f の値によって調節されてきたが、移流を考慮することにより混合強度の変化が物理的に表現できた。これにより実務においては等流時混合係数 f を決めれば、不等流時の抵抗増加を見積もることが可能である。

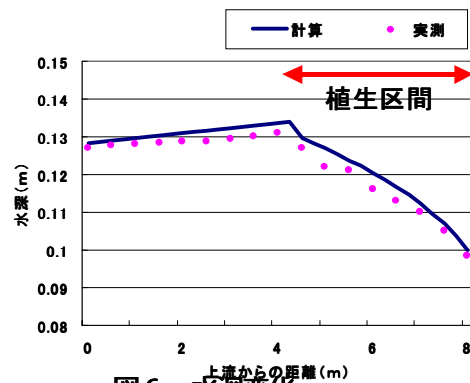


図6 水深変化

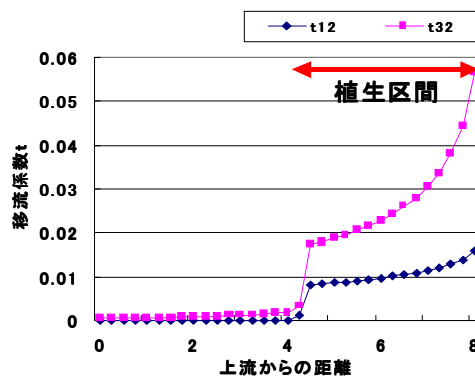


図7 移流係数 t の変化

参考文献: 木之瀬ら(1998)、農土論集(197)、p.9-19