

河岸植生付近の横断混合流れの位相平均解析 Ensemble Analysis of Periodic Flow Field at the Boundary of Vegetated Area

石川忠晴*・高橋和明**・細井俊一***

By Tadaharu ISHIKAWA, Kazuaki TAKAHASHI and Shunichi HOSOI

A detailed measurement is conducted on a periodic flow with lateral momentum exchange between the main flow and vegetated area along the channel. Time-series of velocity and water stage are divided into individual waves referring a water stage at a base point, and the operation of ensemble average gives a pattern of fluctuated components of the flow. The order of terms in equation of momentum balance is estimated from the ensemble averaged data.

Keywords: flow with vegetation, lateral momentum exchange, ensemble average, order estimation.

1. はじめに

主流と河岸植生の間のほぼ周期的な運動量交換が、河川水理学上の重要な研究課題として指摘され^{1)・2)}、近年、実験的研究が進められている。また、池田ら³⁾、辻本ら⁴⁾は不安定解析によって周期特性の理論的な説明を試みており、今後、この現象についての理論的アプローチがさらに進められものと考えられる。

さて、この現象はほぼ周期的とは言っても、波長や波形は必ずしも一定していない。このため、従来の研究では、平均周期を求める以外は、乱れ成分の整理と同様の解析を行っている。^{2)・4)}しかし、この現象を“元来”周期的な運動と考えれば、波の研究において行われるように、位相ごとの平均に基づいて解析することもひとつの方法と言えよう。理論解析では通常は周期解が仮定されるわけだから、その方が将来の理論解析に役立つ資料を提供できる可能性がある。このような考えに基づき、本論文では、位相ごとに平均化されたデータを作成し、流れの時空間分布を図化するとともに、植生境界における局所的な横流出入が運動量収支に及ぼす影響を調べた。

* 正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科
(〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉)

** 学生会員 東北大学大学院 工学研究科修士課程土木工学専攻
(同上)

*** 学生会員 東北大学大学院 工学研究科修士課程土木工学専攻
(同上)

2. 実験の概要

長さ16.9m、幅80cmの矩形断面水路の左岸側壁沿いに、幅30cmの灌木群模型を長さ10mにわたって配置した。樹木模型の材質は福岡、藤田²⁾らが使用した超多孔体のひとつである。灌木模型の諸元と水理条件を各々表-1、表-2に示す。

流速測定には小型電磁流速計（センサー部直径5mm、長さ25mmで、平面2方向の同時測定が可能）、水位測定には容量式波高計を用いた。測定点の平面配置を図-1に示す。基準点Aに固定された波高計の出力を基準にして後述のデータ解析を行った。なお、辻本が調べているように⁴⁾、植生模型境界の横流出入は平面性の強い現象であるので、本実験でも半水深（底から3cm）の流速で平均流速を代表させた。念のため電磁流速計で測定可能な範囲で横流出入速度の鉛直分布を測定したところ、ほぼ同じ運動が観測された。

以上のように、実験方法自体は、過去の研究と大きく異なっていたところはなく、したがって、流れの平均的特性は既に報告されているもの^{2), 4)}と定性的には同じであるので、主なものを図-3に示す。また波動特性を表-3に示す。なお、波速は植生境界から5cmだけ主流に入った地点の流速にほぼ等しく、後に述べるように、水面変動の中心は、ちょうどこの位置にある。

表-1 灌木群模型の諸元

模型の形態	透過係数	配置状況
プラスチックの糸が絡み合った超多孔体（空隙率91%）	0.38 (cm/s)	厚さ5cmの模型を2段に重ねて左岸側に配置

表-2 水理条件

流量	平均水深	勾配
0.016m ³ /s	6.7cm	1/400

表-3 波動特性

平均周期	波速	波長
2.45s	35.4cm/s	86.7cm

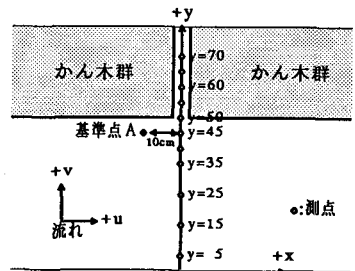


図-1 測点および座標の定義

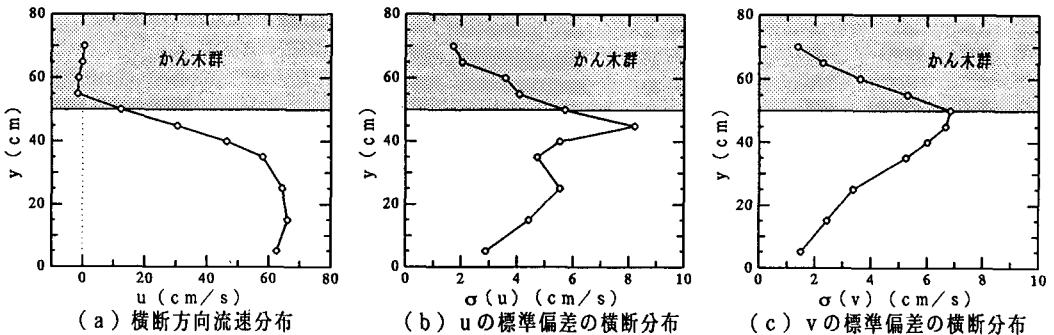


図-2 流れの平均的な特性

3. データ処理方法とアンサンブル平均された運動パターン

以下の手順でデータ処理を行った。（図-3参照）

- ① 基準地点の水位 (h_0) を、ゼロアップクロス法によって、個々波に分割する。
- ② 個々波の時間長さの平均 (m) と標準偏差 (σ) を求め、時間長さが $(m - \sigma)$ と $(m + \sigma)$ の間に入っている波のみを抽出する。
- ③ h_0 を分割したと同じ時刻で、全測定値を分割する。時間長さを個々波の平均値に統一した後、アンサンブル平均する。このようにして得られた波形の例を

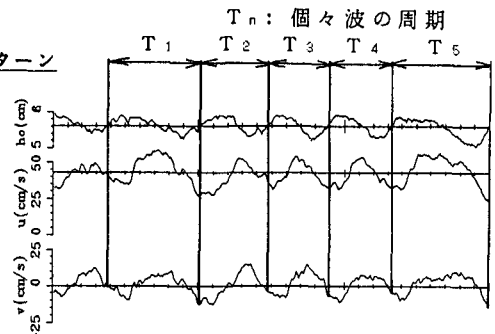


図-3 位相平均する前の h_0, u, v の時系列データ

図-4に示す。

以上のようにして得られたデータから、運動の時空間分布を求めると、図-5のようになる。縦軸は横断方向の測点位置、横軸は位相を表わし、水位変動のコンターマップの上に変動分の流速ベクトルを重ねて表示している。

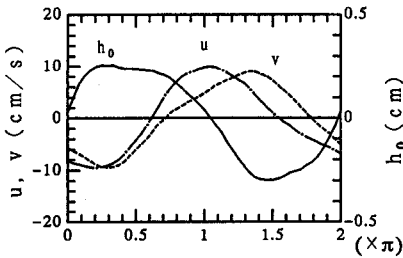


図-4 位相平均された波形 ($y = 45 \text{ cm}$)

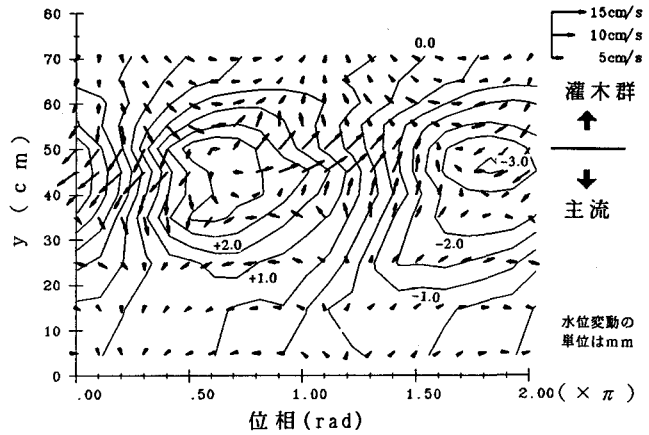


図-5 各位相における流速変動及び水位変動

4. 運動方程式の各項の見積り

水路床の摩擦力が流速の2乗に比例するとすれば、浅水流の運動方程式は次のように書かれる。ただし、運動量補正係数は1とおいている。

$$\begin{array}{cccccc} \textcircled{1} & \textcircled{2} & \textcircled{3} & \textcircled{4} & \textcircled{5} & \textcircled{6} \\ \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial (Mu)}{\partial x} + \frac{\partial (Nu)}{\partial y} + \frac{g}{2} \frac{\partial (h^2)}{\partial x} + f\sqrt{u^2 + v^2} \cdot u - ghI = 0 \end{array} \quad (1)$$

$$\begin{array}{cccccc} \textcircled{1} & \textcircled{2} & \textcircled{3} & \textcircled{4} & \textcircled{5} \\ \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial (Mv)}{\partial x} + \frac{\partial (Nv)}{\partial y} + \frac{g}{2} \frac{\partial (h^2)}{\partial y} + f\sqrt{u^2 + v^2} \cdot v = 0 \end{array} \quad (2)$$

ここに、 u ：水路方向流速、 v ：右岸方向流速、 M ：水路方向線流量、 N ：右岸方向線流量、 h ：水深、 I ：水路勾配、 f ：水路床の抵抗係数、 g ：重力加速度、である。これらの項の各位相における大きさを前節で求めた波形から計算した。変動中心線 ($y = 45 \text{ cm}$) における結果を図-6に示す。横軸は基準点水位 (h_0) の位相である。

主流方向の運動量の収支 (式(1)) では、第①項と第②項が概ね逆位相でバランスし、また、第③項と第④項が概ね逆位相でバランスしている。他の二項 (抵抗項と重力項) はほとんど影響を及ぼしていない。また、横断方向の運動量の収支 (式(2)) では、第①項と第②項が概ねバランスし、他の項は小さい。このように、主要な項が”対”となっている点が興味深い。

図-7に、運動量収支の各項の絶対値の和と残差を、基準点水位の位相を横軸に取って示す。2節で述べたように、本実験では、半水深の流速を代表流速としており、また3節のアンサンブル平均で多少波形が鈍るから、完全な収支は取れていない。しかし、残差の割合は2割以下に収まっているので、図-6に示した各項の相対関係は、それほど大きく違わないものと推定される。(図-7-(b)の位相が 0.3π 付近で誤差が100%に近くなるのは、図-6-(b)ですべての項がゼロに近づくからである。)

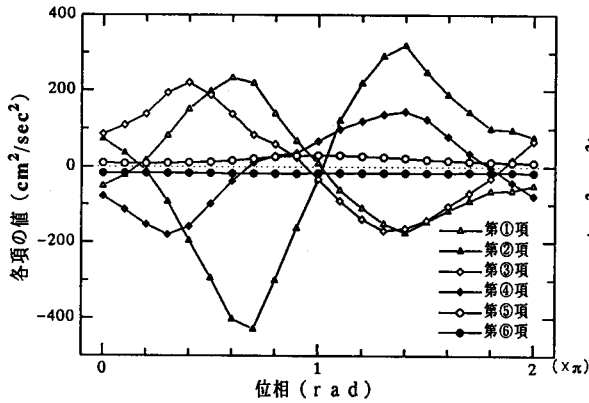


図-6 (a) (1) 式における各項の値

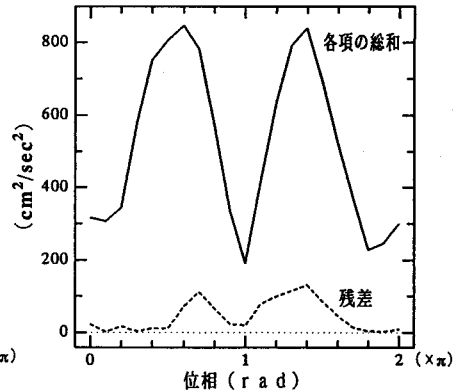


図-7 (a) (1) 式における各項の総和及び残差

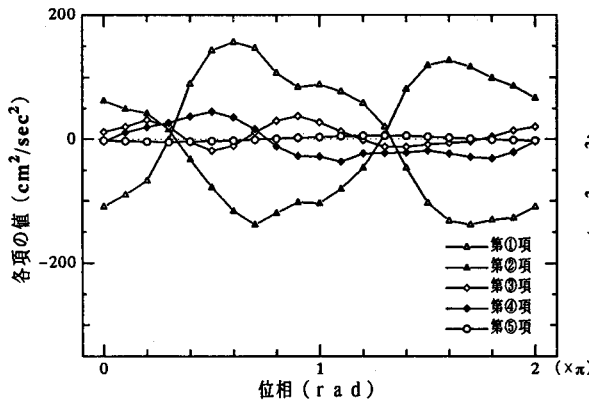


図-6 (b) (2) 式における各項の値

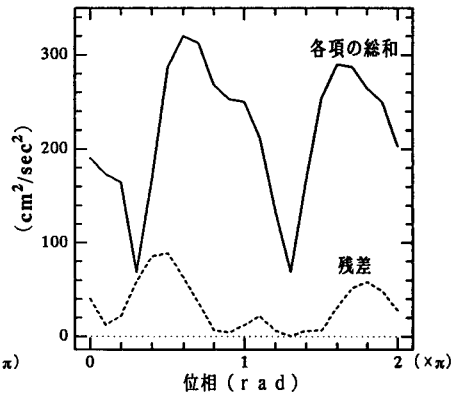


図-7 (b) (2) 式における各項の総和及び残差

5. おわりに

本研究では、植生境界付近の流れの変動を（ある意味ではやや強引に）位相ごとに平均して解析してみた。この方法は、生データ上の時間をぶつ切りにし且つ多少伸縮させる。また、波形のディテールを鈍らせる。しかし、その反面、かなり容易に運動の時空間的パターンが得られ、また、運動量の収支式における各項の大きさを見積ることができた。実験ケースがひとつだけなので、これのみから即断はできないが、現象の解析モデルを構築する上での有為な資料を提供できたと考える。

本実験を行うにあたり、東北大学工学部学生 山浦勝明君の助力をいただいた。また、本研究は、河川環境管理財団及び科学研究費（一般研究C：代表石川忠晴）の補助を受けている。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 石川、田中：開水路流中のかん木の抵抗特性に関する研究、第31回水理講演会論文集、pp. 329-333、1987。
- 2) 福岡、藤田：洪水流の横断方向流速差がもたらす付加的抵抗の評価、第33回水理講演会論文集、pp. 301-306、1989。
- 3) 池田、太田、長谷川：側岸部植生境界の周期渦の発生機構、土木学会論文集、443号、pp. 47-54、1992。
- 4) 辻本、北村：側岸に沿って植生群落のある流路での水面変動を伴う横断混合、第36回水理講演会論文集、pp. 273-280、1992。