

浮子による流量観測精度に 水路平面形, 横断面形の与える影響評価

EFFECT OF PLAN AND CROSS SECTIONAL SHAPES
ON ACCURACY OF DISCHARGE MEASUREMENT BY MEANS OF FLOATS

福岡捷二¹・渡邊明英²・高次 渉³・坂本博紀⁴

Shoji FUKUOKA, Akihide WATANABE,
Wataru TAKATSUGU and Hiroki SAKAMOTO

¹フェロー会員 工博 Ph.D 広島大学大学院教授 工学研究科社会環境システム専攻 (〒739-8526 広島市鏡山1-4-1)

²正会員 工博 広島大学大学院助教授 工学研究科社会環境システム専攻 (同上)

³正会員 工修 大成建設株式会社 (〒450-0002 名古屋市中村区名駅5-25-17)

⁴学生会員 広島大学大学院 環境工学専攻 博士課程前期 (〒739-8526 広島市鏡山1-4-1)

Discharge measurement is one of the most important subjects for river planning. The measurement through floating device, which is a typical method as the Lagrangian method, is being adopted extensively. Most of the rivers in Japan are compound meandering channels, which have complex flow field. Many of these rivers have phase difference between main channel and levee, and the flow fields due to phase differences become more complex. Therefore, we have to check the accuracy of the discharge measurements of those compound channels.

In this paper, we have presented the method of three-dimensional analysis of compound meandering channel. And we have checked the accuracy of discharge measurements. It is observed that the measurement values of those channels with phase difference have large errors. Those errors might be reduced by increasing the number of floating devices in the flood channel.

Key Words : *discharge measurement, compound meandering channel, numerical analysis, path line*

1. 序論

河川の流量は、河川の計画をたてるうえで最も基本的な情報である。このために流量、特に洪水流量を正確に測定する観測技術の確立は最優先に解決すべき課題に位置付けられる。

現在、一般的に流量観測は浮子を用いて行われている。浮子による流量観測は、その簡便さと、浮子に替わる有力な技術がないために慣用されているといってもよいであろう。流量は浮子の移動速度と浮子が流れる要素断面積の積から要素断面流量を求め、これを川幅全体に積分して求めている。わが国の河川の横断面形状は主に低水路と高水敷からなる複断面形である。複断面蛇行流路¹⁾²⁾では洪水時には、高水敷上の流れは堤防に沿って流れ、高水敷高さから下の低水路内の流れは低水路に沿って流れるという特性をもつ。このため浮子を用いた洪水流量の観測精度には、観測断面の選び方、浮子の流れ方、測定点数などによって求め

られる流量の精度が異なることが考えられる。このため、流量の観測精度を水理学的に評価しておくことが必要である。

福岡ら⁶⁾は固定平坦床複断面蛇行流路に三次元数値解析手法³⁾を適用し、Euler的観測とLagrange的観測の2つの方法によって求まる流量の観測精度の検討を行った。その結果、Euler的観測では最大曲率断面における流量観測が最も誤差が小さくなること、変曲断面付近では流速と観測断面の組合せによっては大きな誤差を生じる可能性があることを明らかにした。Lagrange的観測では、浮子を用いた洪水流量観測は、原理的には精度の高いものであることを示し、直線堤防を有する複断面河道では要素断面、区間長の選定法が浮子観測の精度にはほとんど影響しないことを明らかにした。

しかし、検討された複断面蛇行流路の堤防は直線であるため、高水敷上の流れは直線的であり、結果的に流量観測に誤差が生じにくい条件であった。より一般的な平面形状である堤防が蛇行して、低水路に対し

表-1 解析対象

ケース	低水路 蛇行度	堤防 蛇行度	位相差	相対水深
Case1	1.17	1.04	$\pi/2$ 先行	0.49
Case2	1.17	1.04	$\pi/2$ 後行	0.49
Case3	1.17	1.04	なし	0.49

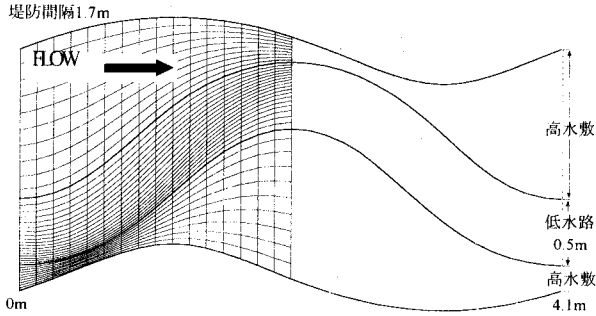


図-1 計算メッシュ

位相差をもつような場合⁵⁾では、流跡線が流れの速い領域に集まりやすく、速い流速を持つ流跡線の支配する面積が大きく評価される可能性がある。

そこで、本研究では最初に著者らが行った堤防と低水路に位相差のある実験⁵⁾について、三次元数値解析を適用し、解析解がLagrange的観測の検討を行うのに十分な精度がある事を示す。次に、その結果を用いて堤防と低水路の位相差が浮子の観測流量の精度に与える影響について検討を行う。

2. 解析方法

(1) 解析対象

表-1に示したCaseについて解析を行う。水路諸元は、堤防幅1.7m、低水路幅0.5m、高水敷高さ0.045m、堤防蛇行度1.04、低水路蛇行度1.17、勾配1/600である。

(2) 解析方法

流れ場の解析に用いた三次元モデルについては既報³⁾⁴⁾⁵⁾で述べられているので、ここでは要点のみを示す。解析は、前述の複断面蛇行流路に対して行い、この低水路蛇行の1波長を対象区間とする。水路の境界形状が周期的であることから、この区間の縦断方向に周期境界条件を適用し、スペクトル展開を行っている。解析に用いたスペクトル選点の計算メッシュは図-1に示すように一般曲線座標を用い、縦断方向に32分割、横断方向に39分割、鉛直方向に9分割(高水敷高さ以下5分割)している。

流れ場の解析には運動方程式、連続式が用いられ、SMACスキームにより圧力場を求め、2次精度の時間積分法のHeun法で流速と水位変動のスペクトルを時間積分している。また、渦動粘性係数には摩擦速度と水深の積にカルマン定数を掛けたものを与えている。

【基礎方程式】

[ξ 方向 (流下方向) 運動方程式]

$$\frac{Du}{Dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + U \frac{\partial u}{\partial \xi} + V \frac{\partial u}{\partial \eta} + W \frac{\partial u}{\partial z}$$

$$= g_x + \frac{1}{\rho} \xi_x \frac{\partial P}{\partial \xi} + \eta_x \frac{\partial P}{\partial \eta} + v_T \nabla^2 u + \frac{\partial}{\partial z} v_T \frac{\partial u}{\partial z} \quad (1)$$

[η 方向 (横断方向) 運動方程式]

$$\frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial v}{\partial t} + U \frac{\partial v}{\partial \xi} + V \frac{\partial v}{\partial \eta} + W \frac{\partial v}{\partial z}$$

$$= g_y + \frac{1}{\rho} \xi_y \frac{\partial P}{\partial \xi} + \eta_y \frac{\partial P}{\partial \eta} + v_T \nabla^2 v + \frac{\partial}{\partial z} v_T \frac{\partial v}{\partial z} \quad (2)$$

[z 方向 (鉛直方向) 運動方程式]

$$\frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial w}{\partial t} + U \frac{\partial w}{\partial \xi} + V \frac{\partial w}{\partial \eta} + W \frac{\partial w}{\partial z}$$

$$= g_z + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + v_T \nabla^2 w + \frac{\partial}{\partial z} v_T \frac{\partial w}{\partial z} \quad (3)$$

$$\nabla^2 = (\xi_x^2 + \xi_y^2) \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} + 2(\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y) \frac{\partial^2}{\partial \xi \partial \eta} + (\eta_x^2 + \eta_y^2) \frac{\partial^2}{\partial \eta^2} + (\xi_{xx} + \xi_{yy}) \frac{\partial}{\partial \xi} + (\eta_{xx} + \eta_{yy}) \frac{\partial}{\partial \eta} \quad (4)$$

【渦動粘性係数】

$$v_T = \kappa u_* z' (1 - z'/h) \quad (5)$$

【連続式】

$$\frac{\partial J' U}{\partial \xi} + \frac{\partial J' V}{\partial \eta} + \frac{\partial J' W}{\partial z} = 0 \quad (6)$$

方程式(1)~(6)について、 z 軸は鉛直上向きを正にとり、 t は時間を、下付き文字はその座標軸における微分を意味している。また、その他の説明は以下のとおりである。

P : 圧力, t : 時間,

g_x, g_y, g_z : x, y, z 方向の重力加速度

u : x 方向流速, v : y 方向流速, w : z 方向流速

$U = \xi_x u + \xi_y v$: ξ 方向流速,

$V = \eta_x u + \eta_y v$: η 方向流速,

$W = w$: z 方向流速

h : 基準面からの水深, z' : 河床からの高さ

u_* : 底面摩擦速度

$J' = x_\xi y_\eta + y_\xi x_\eta$: Jacobian(ヤコビアン)

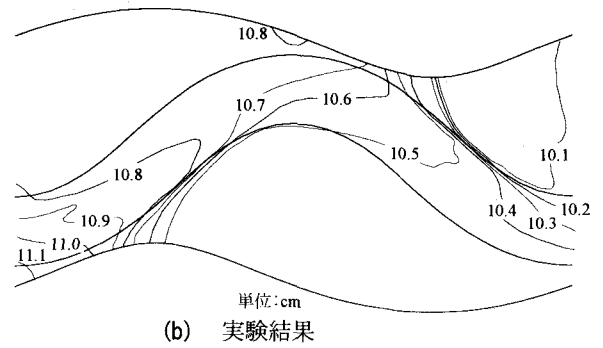
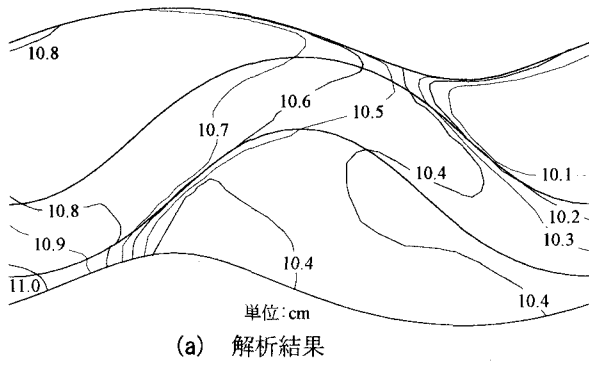


図-2 Case1における水位コンターの実験結果と解析結果の比較

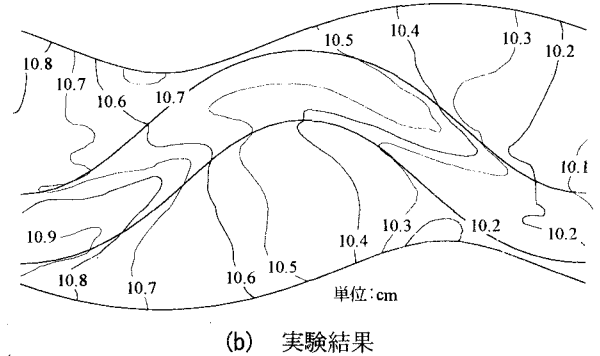
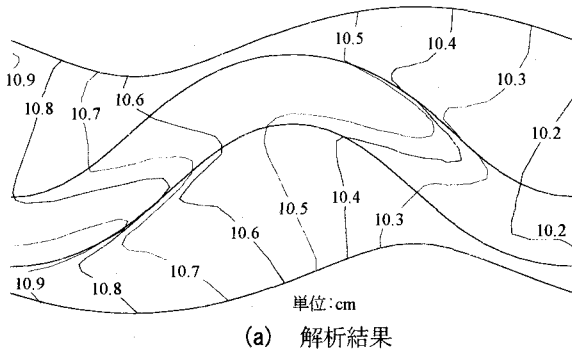


図-3 Case2における水位コンターの実験結果と解析結果の比較

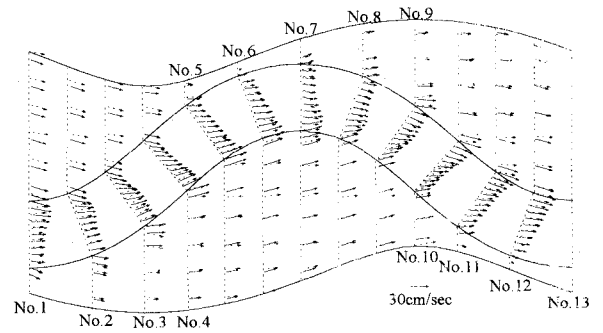
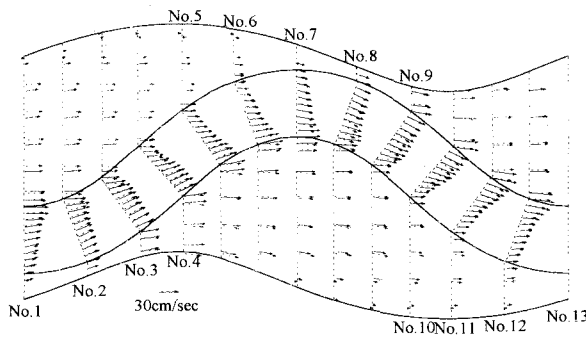


図-4 流速場の解析結果と実験結果の比較
(実線：解析，破線：実験)

3. 解析解と実験値の比較

既報³⁾⁴⁾⁵⁾により，本研究で用いた3次元数値解析モデルは，複断面蛇行流路の特性を極めてよく示すことが確認されている．本章で適用するケースは既報³⁾⁴⁾⁵⁾で確認された水路よりも更に複雑な水路線形をもつ．そこで，まず各Caseの解析解と実験値を比較し，解析結果が流量観測精度の検討を行うために，十分な精度である事を示す．

詳しくは次章に示すが，Lagrange的観測では流速ベクトルと水深を用いて各断面の流量を算出している．そこで本章では，特に水位と流速場の再現性について示す．紙面の関係上，平面形の影響が特に大きく現れるCase1,2について検討を行う．図-2から図-4は実験結果と解析結果の比較を示す．

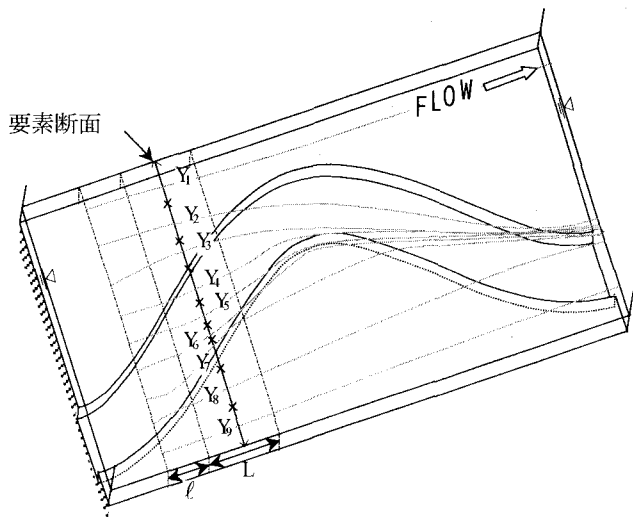
(1) 水位コンター

図-2, 3にCase1,2の水位コンター図を示す．Case1は低水路流れが高水敷に流出する場所で，コンター線が非常に密になるという特長を再現できている．Case2については解析結果は，外岸側で水面勾配が大きくなるという実験結果の特徴を精度よく再現できている．

(2) 流速分布

図-4にCase1, 2の流速ベクトル図を示す．ここでは，位相差をもたらす影響は主に上層で生じる事が分かっており⁵⁾，また流量計算に用いる流跡線は表面付近の流速を用いて算出しているという理由から，流速場については高水敷高さより上層についてのみ示す．

Case1の堤防が $\pi/2$ 先行するケースは，堤防頂部付近に死水域が発生し，高水敷上の流れは流下方向に



ℓ : 助走区間
 L : 観測区間長
 t_n : 区間通過時間
 Y_n : 要素断面幅
 v_n : 代表流速
 h_n : 代表水深

[流量算出式]

$$v_n = L/t_n \quad (1)$$

$$q_n = v_n \times Y_n \times h_n \quad (2)$$

$$Q = \sum q_n$$

図-5 流跡線を用いた流量算出の模式図と算出式

蛇行帯幅で直線的に流れるという事が明らかにされている⁵⁾。図より、解析結果はこれらの特徴を精度よく表す事ができている。Case2においても、流れが堤防に沿って河道全体を使って流れるという特徴⁶⁾を精度良く再現できている。Case1とCase2の低水路内の流速分布についても解析モデルと実験の対応は良いことを確認している。

以上より、本研究で適用した三次元数値解析モデルは、解析対象とする流れ場について高精度で再現できており、流量について議論を進めるのに十分な精度をもつことが確認できた。

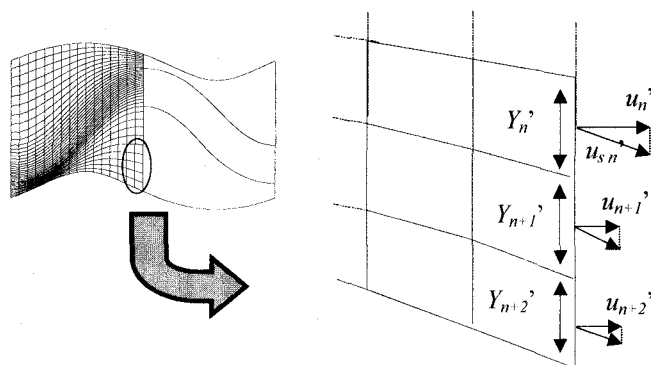
4. Lagrange的流量観測

河川の洪水流量の観測には、浮子観測が用いられることが多い。しかし、Lagrange的観測方法である浮子観測では、浮子は流速の速いところに集まる傾向があり、浮子を一定の横断間隔で流すことは困難である。この方法では横断方向に流速が離散的にし難い得られないため、その精度を確かめる必要がある。そこで図-5に示すように、数値解析モデルから得られた流跡線を浮子の軌道とみなして検討する。

(1) 流量観測の検討方法

図-5を参照して流跡線を用いた流量の算定方法を説明する。なお、流跡線は浮子観測を想定して表面付近の流速を用いて算出した。

観測区間を代表する流速(v_n)は、観測始点断面と観測終点断面の間を流下する時間(t_n)で、観測区間長(L)を除した値であり、各流跡線ごとに求めている。ま



Y_n' : 計算メッシュ幅

u_{sn}' : 評価点の流速

u_n' : 断面に直交する流速成分

h_n : 代表水深

[真の流量の算出式]

$$q_m = u_{sn}' \times Y_n' \times h_n \quad (1)$$

$$Q_f = \sum q_m$$

図-6 真の流量の定義

た実際の浮子観測を想定して助走区間を設けている。そして、求めた流速と要素断面積($Y_n \times h_n$)の積によって区間ごとの流量 q_n を算出し、その和から総流量($Q = \sum q_n$)、高水敷流量 Q_{fp} 、低水路流量 Q_{mc} を算出している。

各流跡線の支配する横断幅は、基本的に隣り合う流跡線との中点までとしている。用いた流跡線の本数は、低水路内で5本、高水敷上で6本の合計11本とした。洪水流量観測は低水路を中心に行われるため、低水路内の流跡線が密になるよう、隣り合う流跡線の間隔を低水路内において高水敷上の約1/2に設定している。

堤防が直線の場合、算出した流量は、縦断的に全観測区間においてほとんど差はなく、流跡線を用いたLagrange的な浮子による流量観測の精度は原理的には高い事が確認されている⁶⁾。本研究ではさらに、低水路と堤防がともに蛇行する複断面流路の場合に、低水路と堤防の間に生じる位相差が、浮子を用いた流量観測精度に与える影響について以下で検討を行う。

5. 堤防と低水路の位相差が浮子観測の精度に及ぼす影響

(1) 浮子の軌道

図-7に各ケースの特徴的な観測区間における浮子の軌道、観測区間における流速ベクトルを示す。流跡線は左岸側から順に流跡線1, 流跡線2, ...とする。

(2) 位相差が流量観測精度に及ぼす影響

前述した方法で算出した各ケースの流量の縦断変化を図-8に、算出した流量と真の流量との比を図-9に示す。真の流量とは、流量の定義に従い、各メッシュごとに、メッシュの横断面に直交する流速成分(u_n')とメッ

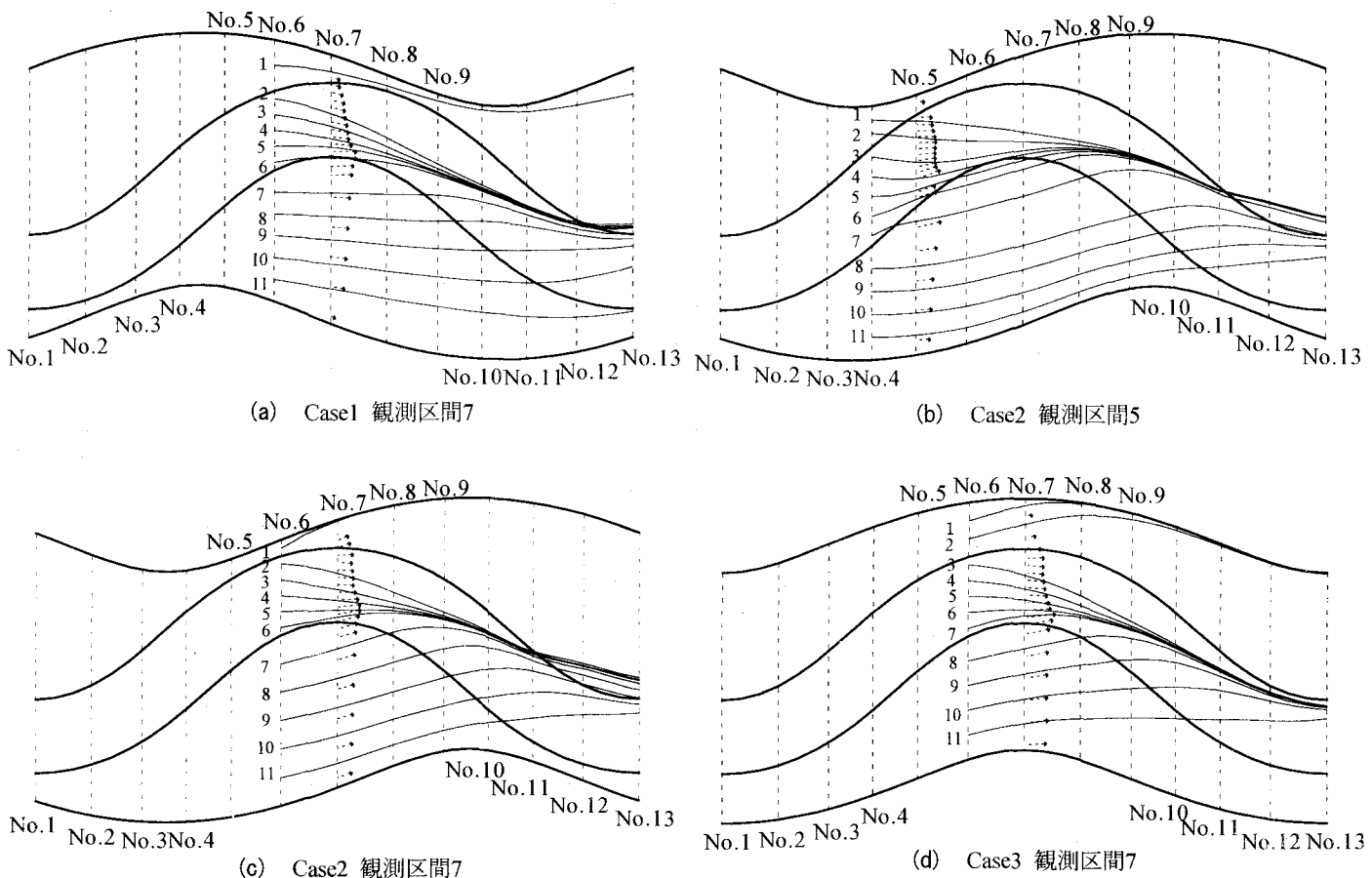


図-7 流跡線及び観測区間の流速ベクトル

シュの断面積 ($Y_n \times h_n$) との積によってメッシュを通過する流量を求め、観測断面で積分する事で算出している(図-6参照)。図-8, 9よりCase1とCase2は、位相差をもたない場合に比べて変動の幅が大きく、Case1では最大約13%、Case2では約15%の誤差をもつ。一方、位相差をもたないCase3は観測流量の変動が小さく、誤差は約10%である。また、全ケースを通じて流量が大きめに算出されている。これらの誤差の原因について、図-4、図-7を用いて検討する。

a) 堤防が低水路に対して $\pi/2$ 先行する場合

Case1の流跡線により算出された流量の誤差は、図-4に示した堤防頂部付近における死水域の存在に起因している。図-7(a)に区間No.7の流跡線を示しているが、右岸側の死水域を受け持つ流跡線11は死水域の外側の領域を通過している事が分かる。このように区間No.5,6,7では死水域を受け持つ流跡線1が流速の早い領域を通るため、高水敷を流れる流量が大きめに算出される。このため全流量も大きく算出されている(図-8参照)。この例のように壁面近くの流速の遅い領域は全て最も近くの流線によって代表されるため、全体的に流量は大きめに算定されたと考えられる。

以上より、堤防が低水路に対して $\pi/2$ 先行する場合の浮子を用いた流量観測では、死水域をどのように評価するかが重要になる。死水域部を有効断面と考え、得られ

た浮子流速から流量計算を行うと、最大で約13%程度の誤差が生じることになる。

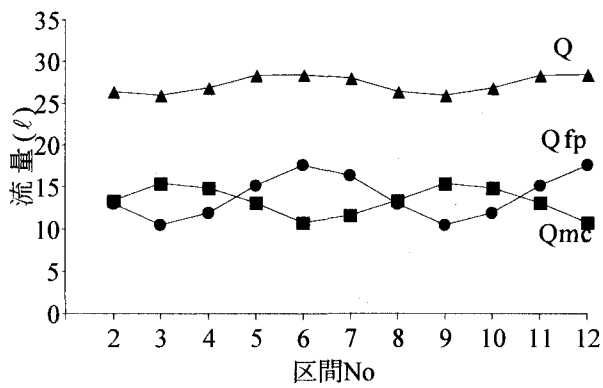
b) 堤防が低水路に対して $\pi/2$ 後行する場合

Case2の場合、区間No.4,5で観測誤差は大きく、区間No.7,8で小さい値を示している。区間No.4,5では左岸側高水敷を代表する流跡線1が堤防の線形の影響によって流速の大きい低水路に集中するため、流量が大きく算出される(図-7(b)、図-8(b)参照)。一方、区間No.7,8では、最も左岸側の流跡線1は壁面を沿っているため、この流跡線上の流速は壁面の影響により非常に小さい。にも関わらず、低水路内の流跡線2~6が低水路中央部に集中するため、左岸側の高水敷流れを流跡線1で代表して流量を計算することになり、流量は小さく算出されたと考えられる(図-7(c)、図-8(b)参照)。

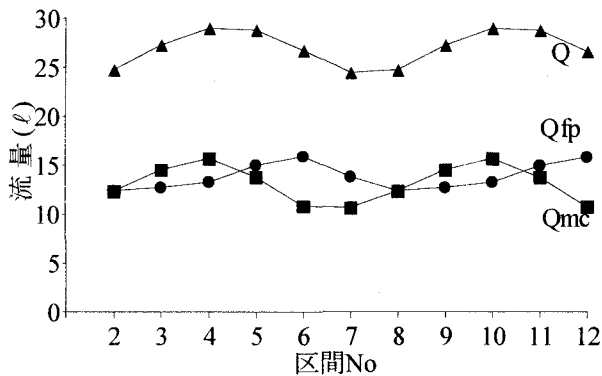
以上より、堤防が低水路に対して $\pi/2$ 後行する場合における流量観測では、流れが高水敷から低水路に集中する部分や、堤防付近の高水敷流速が著しく小さくなる部分では、一つの浮子に広い面積に割り振らない等の注意が必要である。

c) 堤防と低水路が同位相の場合

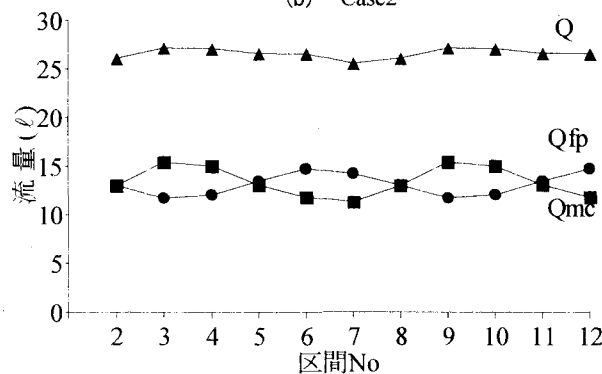
Case3は流量の縦断方向の変動幅は小さい。図-7(d)から高水敷上の流跡線は隣り合う流跡線と一定間隔を保ち、流跡線の集中の影響は低水路のみで現れる。また、堤防近傍において流跡線は堤防に近づいていないため、高水敷上の流跡線は、ほぼ等間隔に分布していることが



(a) Case1



(b) Case2



(c) Case3

図-8 流跡線から算出した流量の縦断変化

分かる。このため、流量 Q の縦断方向の変化が小さく流量観測誤差が小さくなる。

6. 結論

(1) 数値解析の妥当性

低水路と堤防がともに蛇行し、両者の間に位相差を持つ複断面蛇行流路に対して、著者らによる三次元数値解析法が、実験結果の流れ場を精度よく再現できる事を示した。

(2) 堤防と低水路の間に位相差がある複断面蛇行流路における浮子観測の観測精度

解析解から得られる流跡線上を浮子が流れるという考えのもとに流量を求め、平面形と位相差の観点から浮子による流量観測精度について検討を行った。

蛇行堤防を有する複断面蛇行流路における浮子を

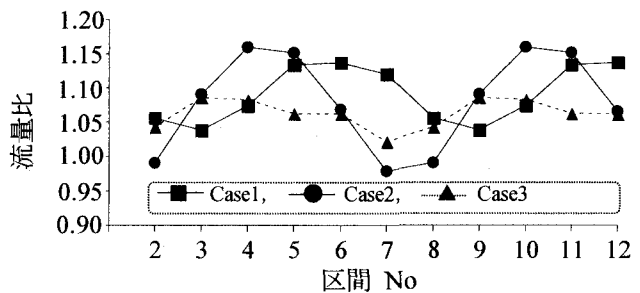


図-9 流跡線から求めた流量と真の流量との比

用いた流量観測では、堤防と低水路の間に位相差を持つ場合に大きな差が生じることが明らかになった。特に、堤防が低水路に対して $\pi/2$ 後行している場合には観測区間によって算出される流量が大きく変化する。二つのケースの誤差は共に、高水敷上の流跡線の数が少ないために生じる高水敷上の流量計算に含まれる誤差が原因となっている。これは高水敷上でも低水路と同程度の間隔で浮子を投入することでかなり改善されると考えられる。堤防と低水路の間に位相差を持たない場合は、前述の2 ケースに比べて、観測区間の選択による流量の変動が小さく、この区間では浮子を用いた流量観測の精度は高いといえる。

(3) まとめ

複断面蛇行河道における浮子を用いた流量観測は堤防が直線である区間でできるだけ行い、蛇行しているならば位相差がある場所を避けて、位相差がない場所で行うことが望ましいといえる。蛇行堤防を有する複断面蛇行流路においては、高水敷と低水路の境界部付近、及び高水敷上の浮子の流れに注意して観測をする必要がある。また河道に樹木群が繁茂している場合には、一層注意した流量観測が必要となる。

このように河道条件が複雑な場合には、浮子観測と本解析法による流量評価を併用する事によって、浮子を用いた観測流量の信頼性を高めることが望まれる。

参考文献

- 1) 武藤裕則, 塩野耕二, 今本博健, 石垣泰輔: 複断面蛇行開水路流れの3次元構造について, 水工学論文集, 第40巻, pp.711-716, 1996.2.
- 2) 福岡捷二, 大串弘哉, 加村大輔, 平生昭二: 複断面蛇行流路における洪水流の水利, 土木学会論文集, No.579/II-41, pp.83-92, 1997.
- 3) 福岡捷二, 渡辺明英: 複断面蛇行水路における流れ場の3次元解析, 土木学会論文集, No.586/II-42, pp.39-50, 1998.2.
- 4) 福岡捷二, 渡辺明英, 川口広司, 安竹悠: 透過型水制工が設置された直線流路における流れと河床変動, 水工学論文集, 第44巻, pp.1047-1052, 2000.2.
- 5) 福岡捷二, 大串弘哉, 岡部博一: 複断面蛇行流れに及ぼす堤防と低水路の蛇行度と位相差の影響, 水工学論文集第42巻, pp.961-966, 1998.2.
- 6) 福岡捷二, 渡辺明英, 高次渉: 三次元解析による複断面蛇行流路の流量観測精度の研究, 水工学論文集, 第45巻, pp.577-582, 2000.2.

(2001. 10. 1受付)