

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

STUDY ON THE ACCURACY OF DISCHARGE MEASUREMENTS IN A COMPOUND MEANDERING CHANNEL BY 3-D NUMERICAL ANALYSIS

福岡捷二¹・渡辺明英²・高次 渉³

Shoji FUKUOKA, Akihide WATANABE and Wataru TAKATSUGU

¹フェロー会員 工博, Ph.D. 広島大学教授 工学部第四類 (建設系) (〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1)

²正会員 工博 広島大学助教授 工学部第四類 (建設系) (同上)

³学生会員 広島大学大学院 工学研究科 環境工学専攻 博士課程前期 (同上)

The discharge measurement is one of the most important works for river engineer. For the present, we usually carry out two types of discharge measurement, those are the Eulerian and the Lagrangian methods. Especially, the measurement through floating device, which is typical as the Lagrange method, is adopted extensively. But most of the rivers in Japan are compound meandering channels, which have complex flow field. So, we have to check the accuracy of discharge measurements of those compound channels.

In this paper, we have investigated the accuracy of discharge measurements in a compound meandering channel by using a three dimensional numerical analysis. The accuracy of the discharge measurement is clarified from the Eulerian and the Lagrangian methods.

Key Words : Discharge Measurement, Compound Meandering Channel, Float Observation, Sinuosity

1. 序論

河川の流量は、河川の計画をたてるうえで最も重要な情報である。このために流量、特に洪水流量を正しく測定するための観測技術の改良は最優先の課題のひとつである。

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、水理学的に流量の観測精度を評価しておくことが必要である。

そこで本研究では、特に河道の蛇行と横断面形状が浮子の移動速度にどのような影響を与え、結果として流量精度にどのような影響を与えるかを調べる。この解析に、福岡、渡辺³⁾による複断面蛇行流路の三次元解析モデルを用いる。福岡らのモデルは、蛇行度や相対水深など種々の特性を持つ複断面蛇行流路の流れ場を精度よく説明できることがわかっている。

最初にEuler的な考察から、流量観測断面の違いによる低水路内流量、高水敷上流量の縦断変化を明らかにし、複断面蛇行流路における流量観測の観測断面の選定法について考察する。次に、浮子を用いるLagrange的な流量観測の方法による流量算定の精度を調べる。福岡らの解析モデルによって、複断面蛇行流路における流跡線を計算し、浮子がこの流跡線に従って移動すると仮定する。これより、浮子流下速度を求め、観測区間ごとの計測流量を算出し、浮子観測の流量精度について考察する。また、低水路蛇行度の違いによる流量観測精度を調べる。

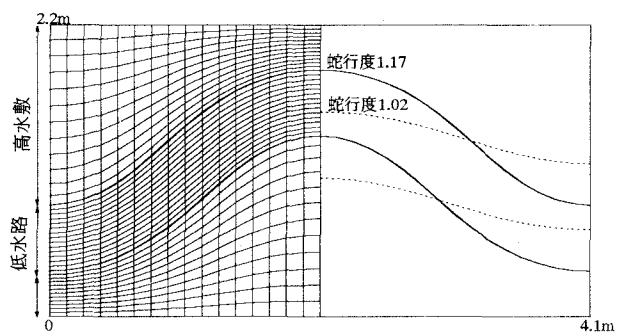


図-1 流路形状と計算メッシュ

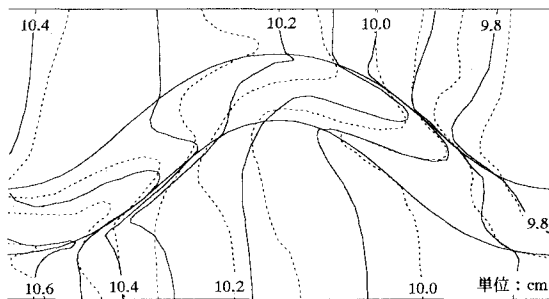
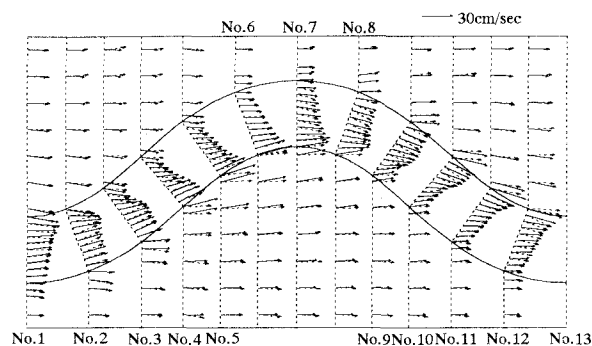
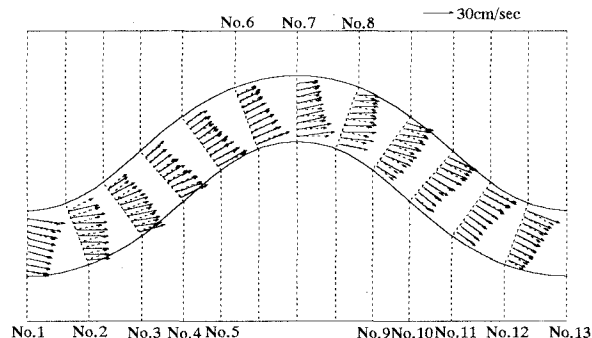


図-2 Case1($Dr=0.47$)における水位コンターの実験結果と解析結果の比較
(実線:解析, 破線:実験)



(a)高水敷高さより上の水深平均流速



(b)高水敷高さより下の水深平均流速

図-3 Case1($Dr=0.47$)における流速分布の実験結果と解析結果の比較(実線:解析, 破線:実験)

2. 解析方法

(1) 解析対象

解析対象として用いた2つの蛇行流路の平面形を図-1に示す。水路は全幅2.2m, 蛇行波長4.1m, 低水路幅0.5m, 高水敷高さ0.045m, 低水路蛇行度1.02と1.17, 底勾配1/600の特性をもつ。

(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⁾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。

Case1の解析結果と実験結果¹⁾の比較を, 図-2, 図-

3に示す。図-2は水位コンター, 図-3は高水敷高さの上層と下層の水深平均流速分布を示す。これらより解析結果は, 複断面蛇行流れの特性をよく表わしていることがわかる。また, これより検討する流量についても精度よく計算されていることが確認されている³⁾。

3. 断面における流量観測(Euler的観測)

流れ場を考えるのにEuler的方法とLagrange的方法の2つの方法があるように, 流量観測の手法もEuler的方法とLagrange的方法に基づいた方法がある。

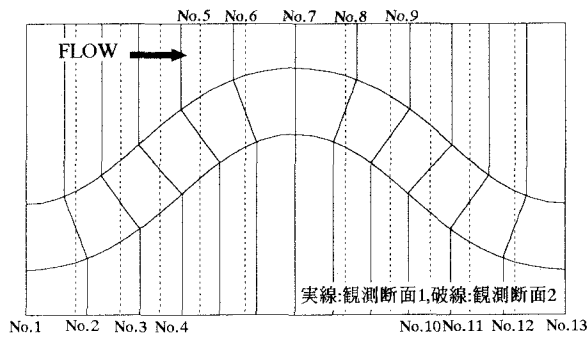
(1) 測定断面

流量は単位時間に断面を通過する流れの容積で定義されることより, 流量の決定には断面積と流速が必要である。本研究では図-4に示す3つの観測断面の取り方, すなわち, 次の3つの観測断面の選び方について流量を検討する。

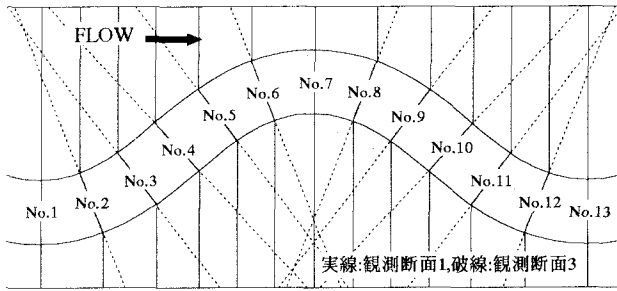
- 1) 低水路, 堤防の両方に直交する観測断面
- 2) 堤防に直交する観測断面
- 3) 低水路に直交する観測断面

それぞれの断面とそれに直交する流速から算出された流量の中で, 1)の観測断面の選び方に基づく流量を基本ケースとする。2), 3) は実河川の流量観測でとられる観測断面に対応している。

ここで表-1に計算検討ケースと観測断面の選び方



(a)観測断面1と観測断面2の選び方



(b)観測断面1と観測断面3の選び方

図-4 流量観測断面

表-1 検討ケースと観測断面の選び方

計算検討ケース	1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	2-3
観測断面の選び方	1	2	3	1	2	3
低水路蛇行度	1.17			1.02		
相対水深	0.47					

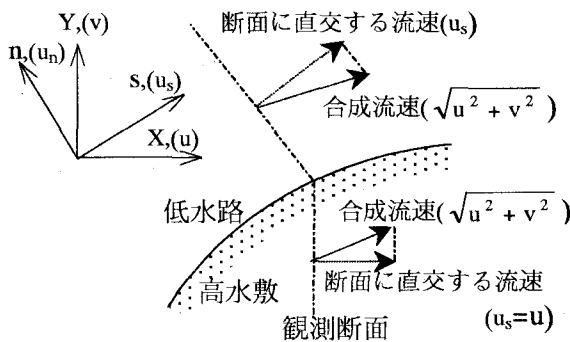


図-5 断面に直交する流速と合成流速の定義

の対応関係を示す。また、図-5に座標系と本検討で用いる2つの観測断面に直交する流速 u_s と合成流速 $\sqrt{u^2 + v^2}$ の定義を示す。

(2) 観測断面に直交する流速を用いた流量の比較

まず、観測断面に直交する流速を用い、流量を算出する。Case1-1における直交流速は図-5に示される u_s 、Case1-2では u を用いる。図-6にCase1-1、Case1-2を、

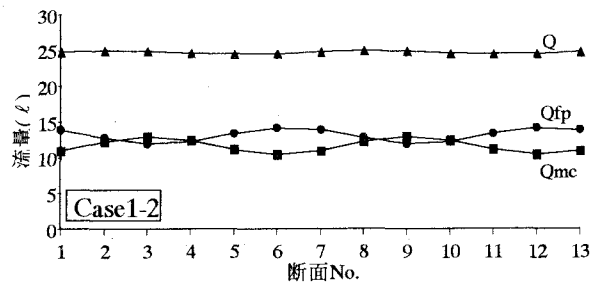
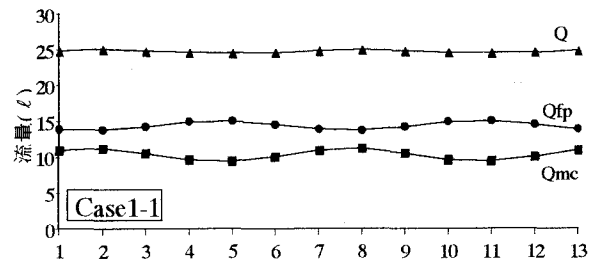


図-6 Case1-1, Case1-2の流量の縦断変化
-直交流速成分-

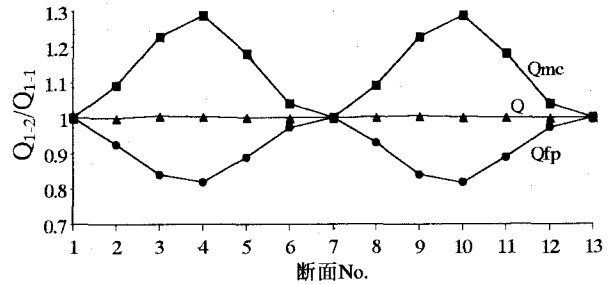


図-7 Case1-1, Case1-2の流量比の縦断変化

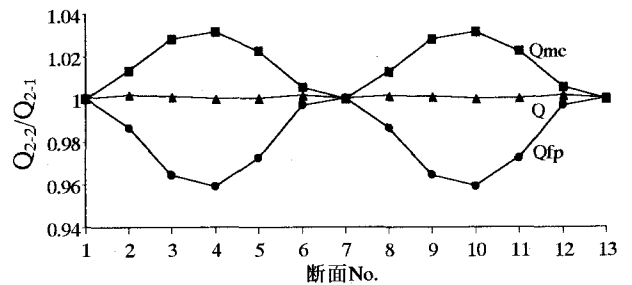


図-8 Case2-1, Case2-2の流量比の縦断変化

図-7にCase1-2をCase1-1で無次元化した図を示す。また蛇行度の影響をみるため、図-8にCase2-2をCase2-1で無次元化した図を示す。ここで計算に用いた観測断面3による方法は、観測断面1の方法と同じ結果を示すため省略する。

まず、図-7よりCase1-1とCase1-2を比較すると、全流量(Q)は、観測断面の断面積とそれに直交する流速成分を用いるという流量の定義に沿うため、両者は等しい。しかし、図-6では、それぞれの断面の高水敷流量(Qfp)と低水路流量(Qmc)は断面積が異なるため差が生じ、Case1-2ではQmcがQfpを超える断面が存在することがわかる。

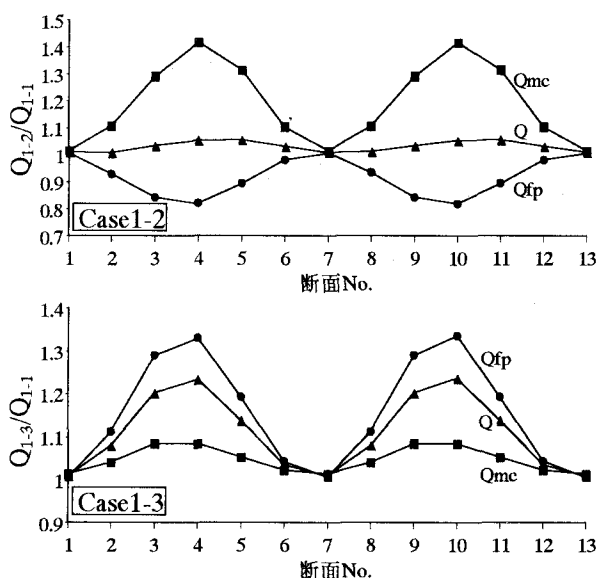


図-9 Case1-2, Case1-3(合成流速)のCase1-1 (直交流速)に対する比

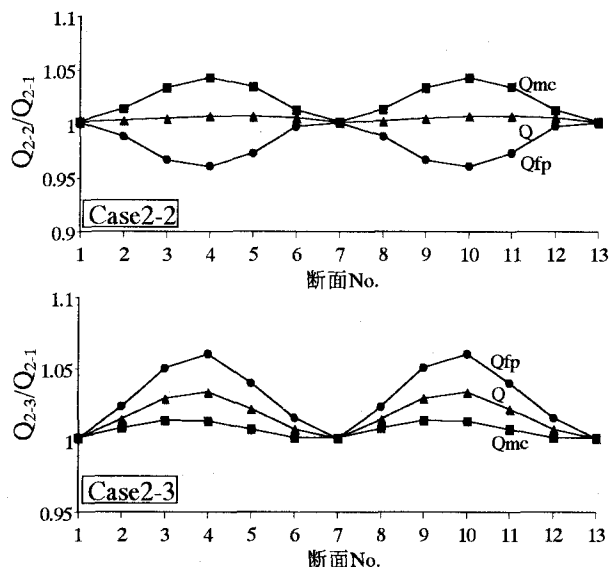


図-10 Case2-2, Case2-3(合成流速)のCase2-1 (直交流速)に対する比

次にCase2-1とCase2-2を比較すると、図-8よりQmc、Qfpとも差は小さく、その差はQmcで最大約+4%、Qfpで最大約-4%程度である。これより低水路蛇行度が大きければ大きいほど、観測断面積の縦断的变化により、Qmc、Qfpに差が生じるが、低水路蛇行度が小さいと観測断面積の差の影響が小さくなるため、両者の差も小さい。

(3) 合成流速を用いた流量の比較

3-(2)では観測断面に直交する流速で流量を求めたが、実際の洪水流量観測においては、流量観測に用いる橋が適切な場所がないことなどにより、流れと直交する観測断面を選ぶことができない場合があり、このようなとき流速の直交成分が必ずしも求まらないことになる。ここでは図-5で定義した合成流速から流量を算出する。そして、このようにして求めた流量が、断面ごとに最大でどのくらいの誤差を生ずるかを検討する。図-9、図-10にそれぞれの算出流量を真の流量Case1-1、Case2-1で無次元化して示す。

Case1-2についてみると、Qmcは最大約+40%、Qfpは最大約-20%と非常に大きな誤差を含むことがわかる。中でもQfpは流れが断面とほぼ直交方向を向いていることから、観測断面積の大きさの影響が大きい。低水路の蛇行により選んだ断面に対し、流れが直交していないことと観測断面積の大きな場所が変曲点付近で現れていることの2つの影響が重なるため、Qmcには大きな誤差が含まれることになる。また、堤防が直線で一定幅のため、全流量QにはQfpとQmcのプラス・マイナスの誤差が打ち消すように働き、ほとんど誤差を生じない。

Case1-3ではQfpに大きな誤差が見られる。ここでもQfpには観測断面に流れが直交しないため、観測断面

の取り方の影響を受ける。しかし、QmcはQfpに比べて観測断面の影響は受けず、直交流速と合成流速の差のみの影響を受ける。また、Case1-2と異なり、QfpとQmcはともにプラスの誤差となり、全流量Qの誤差は大きくなる。

Case2-2、Case2-3を見ると、前述のCase1-2、Case1-3より誤差が小さくなる。誤差の要因はCase1-2、Case1-3と同じであるが、低水路蛇行度が小さいことが、誤差を小さくしている要因である。

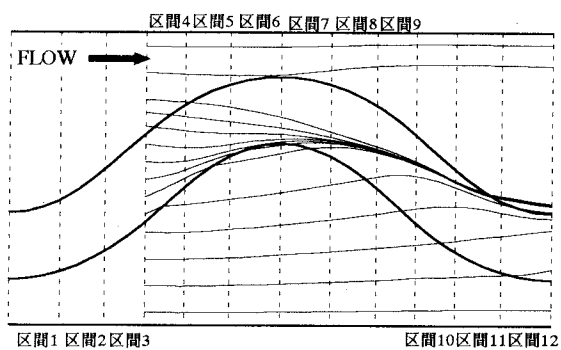
合成流速を用いた流量は、流速の観測断面に対するずれの程度など観測断面の取り方によって誤差の大きさに差が生じる。特に、低水路に直交する観測断面3の方法で流量観測を行う場合は、全流量にも誤差を伴うので注意を払う必要がある。特に高水敷幅の広い複断面蛇行流路における洪水流量観測は、低水路流れより高水敷流れに着目した断面の選定を優先することが、全流量の誤差は小さくすることになる。

以上、Euler的に流量を測定したとき、低水路の最大曲率断面では観測断面に平行な流速成分が小さくほとんど誤差を含まないこと、変曲点付近では、観測断面の選定によっては観測断面に平行な流速成分が大きくなることもあり、結果として大きな誤差が生じることが明らかとなった。

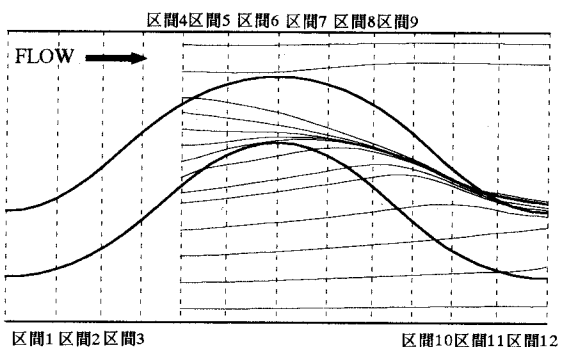
4. 区間における流量観測(Lagrange的観測)

Euler的方法による流量観測に対して、もう1つの手法であるLagrange的方法による流量観測について考察する。

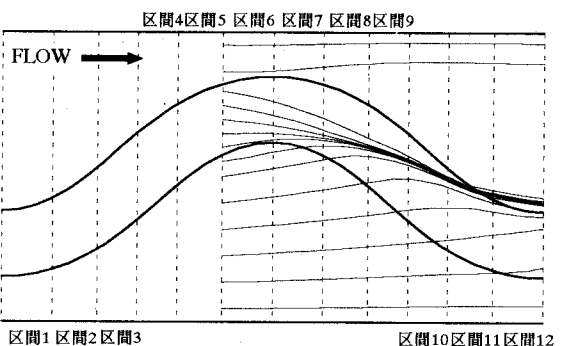
実河川の洪水の流量観測は、浮子観測が用いられることが多い。しかし、Lagrange的観測方法である浮子



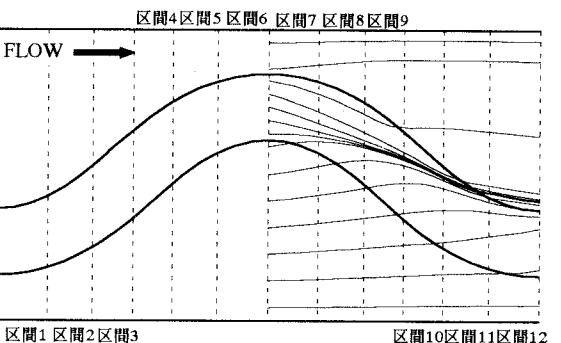
(a) 変曲断面(区間4の左端)を始点とする流跡線



(b) 区間5の左端を始点とする流跡線



(c) 区間6の左端を始点とする流跡線



(d) 最大曲率断面(区間7の左端)を始点とする流跡線

図-11 表面流速を用いて算出した流跡線

観測では、浮子は流速の速いところに集まる傾向があるため、数多くの浮子を一定の横断間隔で流すことは困難である。このため、この方法では横断方向に流速が離散的にしか得られないため、その精度を確かめる必要がある。そこで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。

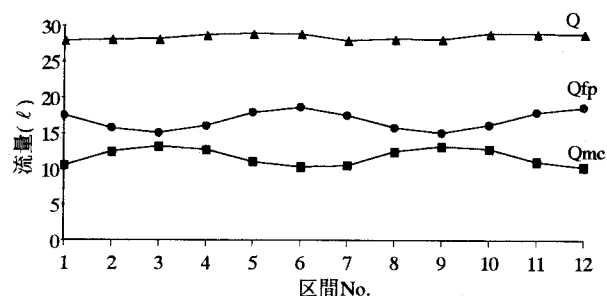


図-12 Case1の流跡線から算出した流量
(要素断面：区間中央の断面)

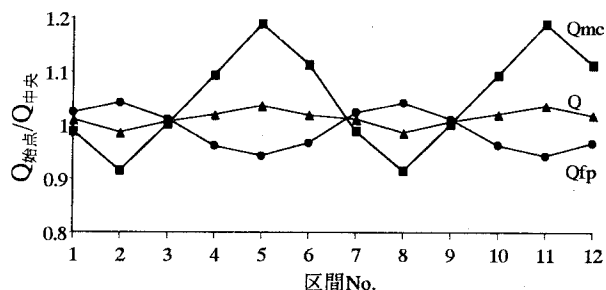


図-13 要素断面積を変えた場合の流量比

(1) 浮子による流量観測

図-11にCase1についての解析結果から得られた変曲断面から最大曲率断面を始点とする流跡線の変化を示す。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ている。

流跡線を用いた各区間の流量の算出方法は、観測区間上流端を始点として、各流跡線が観測区間の下流端を通過するまでに要する時間を計算し、その時間で区間長を割ることによって、各流線の1区間ごとの平均流速を算出する。そして、求めた流速と要素断面積の積によって区間ごとの高水敷流量 Q_{fp} と低水路流量 Q_{mc} を算出し、その和を総流量 Q として算出している。ここで用いた流跡線の数、洪水流量観測は低水路を中心に行われることを考えて、隣り合う流跡線の間隔が低水路内において高水敷上の約1/2になるように低水路内で5本、高水敷上で9本の合計14本とした。各流跡線の支配する横断幅は、基本的に隣り合う流跡線の midpoint までとしている。

流跡線から算出された流量の縦断変化図を図-12に示す。流跡線から得られた Q は、縦断的にみて、全観測区間においてほとんど差はなく、表面での流跡線を用いたことの影響を除けば、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といえる。

(2) 浮子観測における要素断面の取り方の影響

浮子観測における各浮子に対する要素断面積は、浮子の始点と終点における要素断面積の平均値を用いるのがよいであろう。しかし、複断面蛇行流路のような

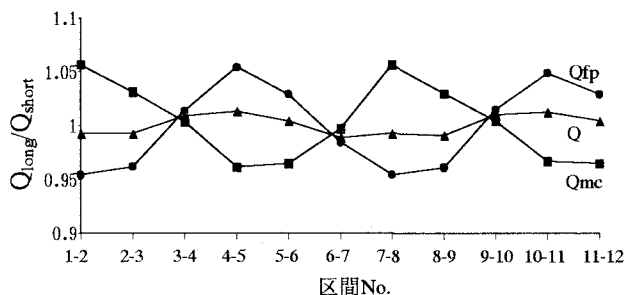


図-14 区間長を延長した場合の流量と元の区間長の場合の流量の比

縦断的に断面積が変化する場合には、このような方法で要素断面積を求めることは困難である。そこで要素断面としては4-(1)で用いた観測区間における中点の断面積と浮子の始点となる断面が考えられる。しかし、実際の洪水流量観測では浮子の軌道を把握することはできず、区間中点を要素断面に選定するのは難しい。そこで、浮子の始点となる断面を要素断面とした場合を考え、比較する。図-13に要素断面に各観測区間の始点と中央を選定したときの流跡線から算出される流量の比を示す。これより、Qmcには大きな影響が現れている。この理由の1つとして図-11より、複断面蛇行流れは内岸側に最大流速線が生じることから、低水路では内岸側に進む速い流速を持つ流跡線が占める要素断面積が大きいためである。しかし、Qに対する要素断面の取り方の影響は小さいことがわかる。

以上より、複断面蛇行流れにおける浮子観測の要素断面の取り方の影響は、Qmc、Qfpに個別には出るが、全流量Qでは若干の幅を持つが小さいといえる。

(3) 観測区間長の影響

流量算出のもう1つの要素は浮子の流速である。これには観測区間長が影響する。これまで観測区間を1区間で考えてきたが、隣り合う2つの区間を1区間として検討する。図-14に区間長を延長した場合の流量を元の短い区間長で得た流量で無次元化した流量比を示す。これより、観測区間長の取り方のQに対する影響は小さいことがわかる。特に、最大曲率断面と変曲断面を含む区間においては、Q、Qmc、Qfpに対する区間長の影響は、小さいことがわかる。

以上より、Lagrange的な立場から流量計測を行ったとき、流量観測の精度が高いことが明らかとなった。しかし、今回検討した複断面蛇行流れの堤防は直線であることから、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。しかし、堤防が蛇行して、位相差を持つような場合⁶⁾では、流跡線が流れの速い領域に集まり、速い流速を持つ流跡線が支配する断面積が過大評価される可能性がある。また、河床が平坦ではない場合には、ここで得られた

結果と必ずしも対応しないことも考えられる。これらについて、さらに検討する必要がある。

5. 結論

本研究では、固定平坦床複断面蛇行流れにおける三次元数値解析手法を適用し、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。主要な結論は次のとおりである。

1) Euler的観測

堤防に直交する観測断面と低水路に直交する観測断面について、直交流速と合成流速を用いた検討を行った。これによって、複断面蛇行流れにおいて流速と観測断面の組合せによって、どの程度の誤差が生じるかを明らかにした。その結果、最大曲率断面における流量観測が全ての場合について最も誤差が小さくなること、変曲断面付近で流速と観測断面の組合せによっては大きな誤差が生じる可能性があることが明らかになった。

2) Lagrange的観測

数値解析結果から得られた流跡線を用いて、浮子が流跡線に沿って流れるという考えのもとに流量値を求め、流量観測精度を議論した。その結果、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が明らかになった。また、要素断面、区間長を変えた場合の検討を行ったが、平坦固定床の複断面蛇行流れでは、浮子観測の精度にはほとんど影響しないことが明らかになった。

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, pp711-716, 1996.2
- 2) 福岡捷二, 大串弘哉, 加村大輔, 平生昭二: 複断面蛇行流れにおける洪水流の水利, 土木学会論文集No.579/II-41, pp83-92, 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, 岡田将治: 静水圧近似3次元解析モデルによる複断面蛇行水路河床変動解析, 水工学論文集第42巻, pp1015-1020, 1998.2
- 5) 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れにおける流れと河床変動, 水工学論文集第44巻, pp1047-1052, 2000.2
- 6) 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, pp961-966, 1998.2

(2000.10.2受付)