

横越流堰周辺の流れに関する数値シミュレーション

道上 正規・檜谷 治

土木工学科

(1996年 8月28日受理)

Numerical Simulation of Flow around Side-weir

by

Masanori MICHIE and Osamu HINOKIDANI

Department of Civil Engineering

(Received August 28, 1996)

In this paper, the characteristics of 3-dimensional flow and water level around side-weir in open channel are investigated experimentally and analytically. In the experiment, the water level around side-weir and overflow discharge rate through the side-weir are observed. In the simulation, 3-dimensional model of flow are used. The boundary condition at side-weir is discussed. And also, The overflow discharge rate and coefficient of overflow discharge are investigated by means of 1-dimensional flow model.

Key words : Numerical simulation, Open channel flow, 3-dimensional analysis, Side-weir

1. はじめに

横越流堰は、河川から水を取水するための構造物として古くから建設されており、それに伴って、越流流量の評価に関する研究、あるいは越流水深の評価に関する研究が数多く行われ、多くの公式が提案されている¹⁾。しかしながら、それらのほとんどの研究は、越流流量（流量配分比）、横越流部での越流水深の特性に主眼をおき、流れに関する運動方程式を、流下方向の1次元解析することによって解析的に検討したものである。

一方、近年この横越流堰を用いて、河川分流計画が行われようとしているが、その場合越流流量が大きくなるため、越流堰周辺の3次元な流れは、河床変動にも大きく影響するものと考えられる。したがって、従来の1次元的な解析では不十分で、3次元的な数値解析法の開発が必要となる。

そこで本研究では、越流堰を含んだ開水路流れの3次元解析を行うことによって、流れの詳細な検討を試みることを目的とし、解析を行うにあたって必要となってくる越流部断面での境界条件について検討する。

2. 実験水路での横越流実験

本研究では、3次元数値モデルの妥当性を検討する目的で、実験水路による横越流実験を行っている。ここではまず、その実験結果について説明する。

2.1 実験の概要

実験水路は、図-1に示される、長さ310cm、幅21cmの長方形断面水路であり、右岸に堰高2cm、幅10cmの越流堰が設置されている。

実験条件は、表-1および表-2に示すとおりであり、電磁流速計を用いた流速分布の測定および水面形を測定したRun-1と越流量分布を測定したRun-2からなる。水路床は平均粒径0.6mmの砂を接着し粗度を付け、河床勾配1/1000、越流堰下流190cmに高さ2.8cmの堰を設け、水深を堰上げした状態で全ての実験を行っている。

(1) 流速分布

まず、平面的な流況を見たものが図-2である。図中の実線は分流境界を示したものである。越流部の流れは、全体的に堰下流端に向かう流れが卓越しているようであるが、底面付近の方がより越流部の影響を受けていることがわかる。また、堰直下流の底面付近では逆流が生じている様子が見られる。

つぎに、代表的な断面での横断方向流速 v と鉛直方向流速 w のベクトル図を示したものが図-3である。堰上流5cmの位置では v はほとんど発達していないが、越流部では、右岸に近づくにつれて大きくなり、右岸の堰底面付近では上昇流が生じていることがわかる。一方、堰より下流5cmの位置では、時計回りの渦が形成されているが、この原因は、上流側で右岸（越流部）に向かった流れが右岸側壁にあたって底面に潜るためであると考えられる。

(2) 水面形

水深コンター図を図-4に示す。越流区間では上流端で急激に水位が低下し、下流端付近ではほぼ横断方向の水深と一致している。一方、直下流部では急激な水位上昇が生じているが、この原因は上述したように右岸曲げられた流れが側壁に衝突するためである。

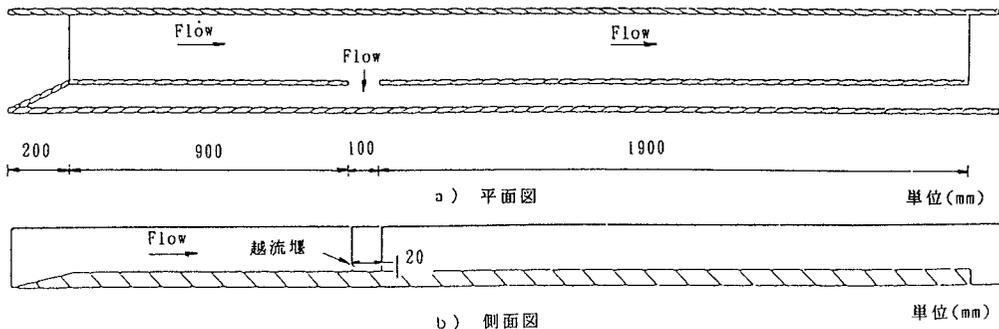


図-1 実験水路

表-1 実験条件 (Run1)

流量 (l/s)	5.0
水路幅 (cm)	21.0
流量配分比	0.312
越流堰高 (cm)	2.0
越流堰長 (cm)	10.0
河床勾配	1/1000
粗度係数	0.0135

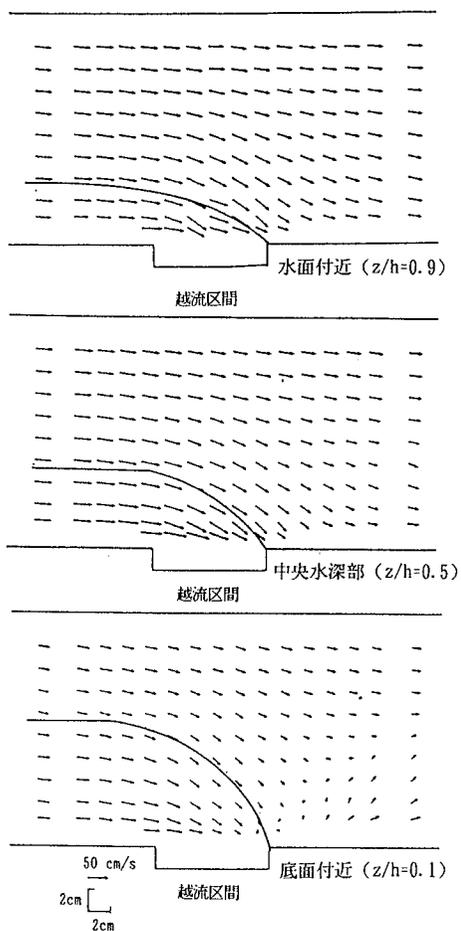


図-2 u-vベクトル図

表-2 実験条件 (Run2)

	流量(l/s)	水深(cm)	越流堰比	越流係数
Case-1	5.0	6.70	0.312	0.378
Case-2	5.0	7.24	0.531	0.367
Case-3	8.3	7.10	0.265	0.373
Case-4	8.3	8.47	0.461	0.391

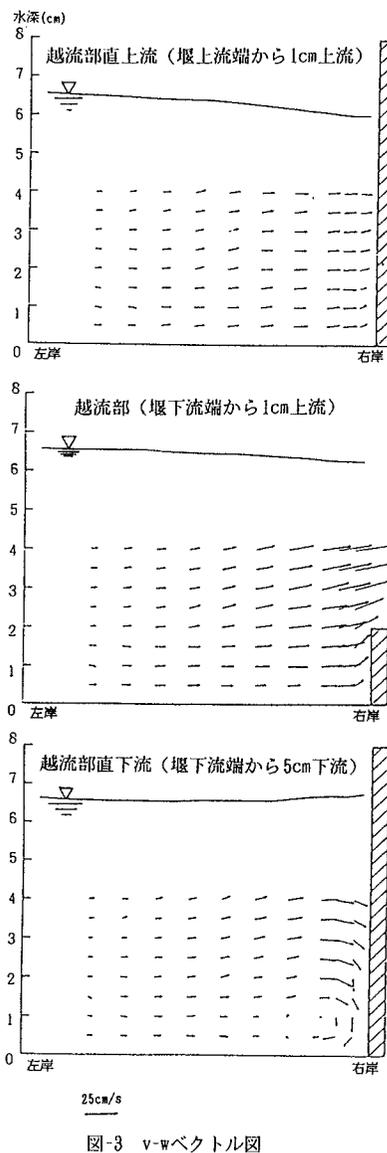


図-3 v-wベクトル図

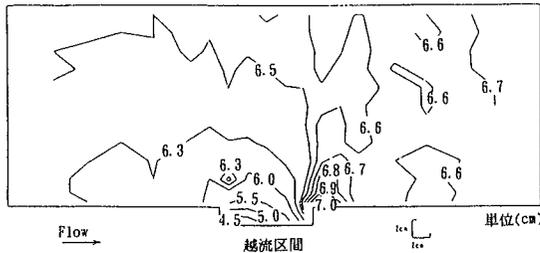


図-4 水深コンター図 (実験結果)

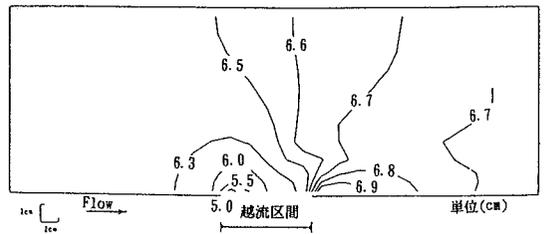


図-9(b) 水深コンター図 (ケース2)

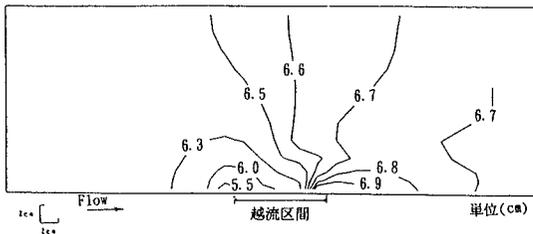


図-9(a) 水深コンター図 (ケース1)

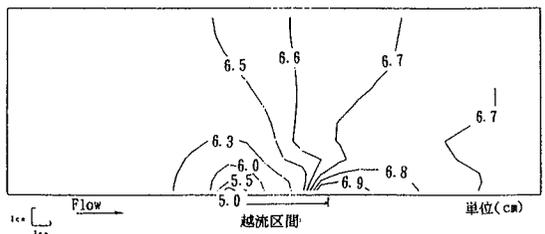


図-9(c) 水深コンター図 (ケース3)

(3) 平均的な越流係数

横越流堰の横越流量に関しては、次式に示している中川・宇民の実験式¹⁾が提案されている。

$$q_* = \frac{2\sqrt{2}g}{3} C [\{ (h-s) + u^2/2g \}^{1.5} - (u^2/2g)^{1.5}] \quad (1)$$

$$C = 0.94 - 0.83Fr \quad (Fr \leq 0.6)$$

$$= 0.5 - 0.1Fr \quad (Fr \geq 0.6)$$

ここに、 q_* ：単位幅越流量、 C ：越流係数、 h ：横越流堰上流端における平均水深、 s ：堰高、 u ：横越流堰上流端における流下方向流速、 Fr ：横越流堰上流端におけるフルード数である。

上式で示されている越流係数は、越流堰上での平均的な越流係数である。この式中の越流係数と(1)式から逆算した実験での越流係数を比較したものが図-5である。図から、実験値はほぼ中川・宇民式で再現できているが、同一フルード数で最大0.2程度ばらついている。

(4) 越流係数の分布

つぎに、実験では越流区間を5分割して越流量を測定しているので、中川・宇民の越流量式から各区間の越流係数について逆算し、越流係数の分布について検討する。なお、式中の水深は横断方向の平均水深を用いた。

図-6はCase-1に関する結果を示したものであるが、本川の平均水位はほとんど変化していないが、越流量は上流側で最も少なく下流に行くほど多くなっている。したがって、越流係数は下流に行くほど大きなものとなり、分布を持っていることがわかる。

後述する流れのシミュレーションでは、境界条件として越流量分布を与えることが有力であり、中川・宇民式を用いて正確な越流量分布を推定するためには、越流係数の分布形を定める必要がある。

図-7はすべてのケースについて越流係数の分布を平均的な越流係数で無次元化したものであり、ほぼ直線関係にあることがわかる。したがって、この図からある程度の分布形を推定することが可能であると考えられる。

3. 越流流量分布の推定法

上述したように、流れを数値シミュレーションするためには越流流量分布を推定することが重要である。そこで、中川・宇民の越流量式と一般的な一次元不等流計算法を用いて、越流量分布の推定法について検討する。

3.1 1次元解析の方法

(1) 基礎方程式および境界条件

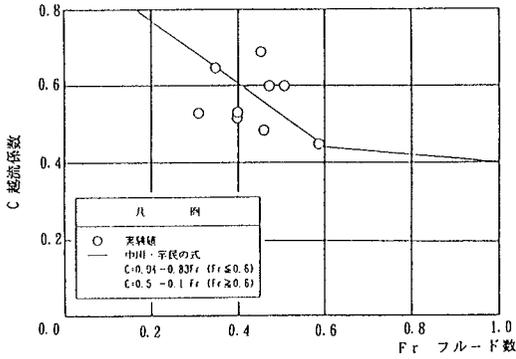


図-5 越流係数とフルード数の関係

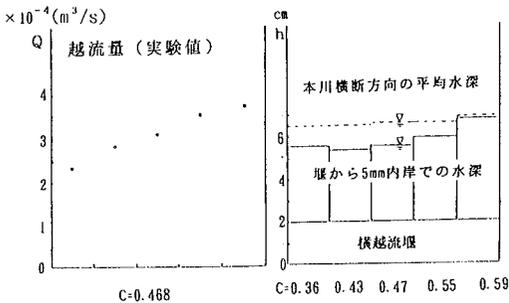


図-6 越流量および越流係数の分布

< 仮定 >

越流区間においては、底勾配や摩擦抵抗の影響は小さい。そのため、越流区間において、比エネルギーは一定に保たれる。

< 基礎方程式 >

$$E = \frac{Q^2}{2g b^2 h^2} + h = \text{Const} \quad (2)$$

$$\frac{dh}{dx} = \frac{Q q \cdot h}{g b^2 h^3 - Q^2} \quad (3)$$

ここで、 Q ：主水路の上流側流量、 b ：主水路幅、 H ：水位、 $q \cdot$ ：単位幅越流流量である。なお、越流区間における単位幅の越流流量 $q \cdot$ は、上述した中川・宇民の式を用いる。ただし、越流係数 C は簡単のために越流区間において一定とする。

境界条件は、越流堰下流端の水位であるが、この水位については、下流部の断面から不等流計算によって求める。

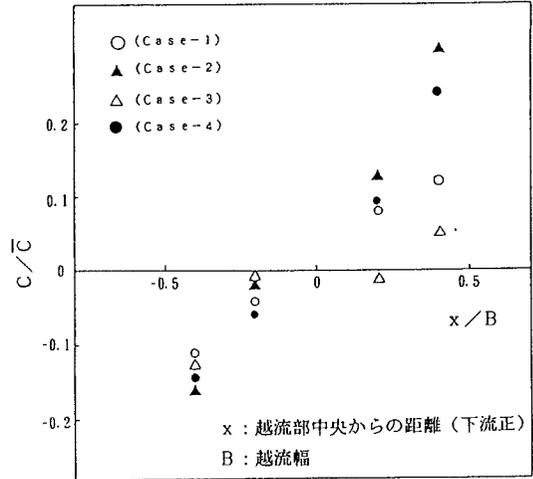


図-7 越流係数分布

(2) 基礎方程式の解法

各諸量に関する詳しい配置位置を図-8に示す。図中の Q_T 、 Q_M はそれぞれ流入流量、越流後の流量である。計算手順を示すと以下のようである。

- 1) 下流端水深を水深 h_{02} をする。この h_{02} が下流端における境界条件とである。
 - 2) 下流から水面形を逐次計算する。すなわち、図-8中の h_{i+1} より h_i を算定する方向で計算が行われる。
- 式(3)の差分式は次のようになる。

$$h_i = h_{i+1} - \Delta x_i \frac{Q_i q_{i+1} h_i}{g b^2 h_i^3 - Q_i^2} \quad (4)$$

ここで、

$$Q_i = Q_T(1 - \kappa) + \Delta Q + q_{i+1} \Delta x_{i+1} + q_{i+1} \Delta x_i / 2 \quad (5)$$

- 3) まず、 h_i を仮定し単位幅越流流量 q_{i+1} を求める。この h_i 、 q_{i+1} を式(4)式に代入し、等号を満足する h_i を見つけた。
- 4) この手順を上流端まで行う。

3. 2 越流量および越流係数の推定

上述した1次元解析法を利用して越流量と越流係数を推定する手順を次に示す。

- 1) 流量配分比 κ および越流係数 C を仮定する。

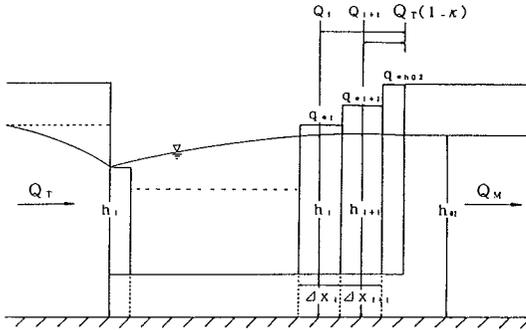


図-8 1次元計算の概要図

- 2) 下流部での流量から堰下流端での水深 h_{02} を算定する。
- 3) 1次元解析によって水面形の計算を行う。
- 4) 越流流量から流量配分比 κ' を求める。
- 5) 上流端のフルード数より越流係数 C' を求める。
- 6) 仮定した κ および C と計算された κ' と C を比較する。ある程度の精度以内でなければ新たな κ と C を仮定し、2)に戻る。

以上の手順を繰り返すことによって越流量と越流係数を推定することができる。

表-3は越流係数と流量配分比に関して推定値と実験値を比較したものであるが、中川・宇民式中の越流係数の精度のため流量配分に換算して最大2割程度の誤差が生じているが、本手法によって越流流量の推定が可能であることがわかる。

表-3 越流係数と流量配分比

	越流係数 C			流量配分比 κ		
	実験値 ①	計算値 ②	②-① ①	実験値 ③	計算値 ④	④-③ ③
Case-1	0.468	0.546	0.17	0.312	0.374	0.20
Case-2	0.515	0.643	0.25	0.531	0.616	0.16
Case-3	0.432	0.473	0.09	0.265	0.330	0.25
Case-4	0.511	0.570	0.12	0.461	0.500	0.08

4. 3次元計算における境界条件の検討

横越流堰周辺の流れを数値解析するためには、越流部で何らかの境界条件を設定する必要がある。この境界条件としては

- 1) 水位を与える。
- 2) 流量を与える。

の2通りが考えられるが、越流部では水位は場所的に非常に変化するため、水位を境界条件とすることは非常に困難である。したがって、ここでは、上述した1次元解析による越流量を境界条件として設定する方法を提案し、その妥当性を検討する。

3次元流れの計算モデルは、著者らが提案している差分法と有限要素法を組み合わせたものであり、鉛直方向の運動方程式に対しては静水圧分布を仮定しているものの、流速の3成分が計算できる。このモデルに関しては紙面の都合上省略し、詳細については参考文献[2,3]を参照願いたい。

計算条件としては、上述した実験のRun-1とし、シミュレーションに用いた諸条件を表-4に示す。

境界条件としては、以下の3ケースとした。

ケース1：実験値を与える。

ケース2：1次元解析の越流量分布を与える。

ケース3：1次元解析の平均越流量を一定値で与える。

計算では実験と同様越流区間を5分割しているが、計算に用いる各ケースの越流量を表-5に示す。なお、ケース2およびケース3では、総越流量を実験値と一致させるために、流量配分比に関しては実験値を仮定し、越流係数のみを変化させて求めたものである。分布形について実験値と解析値を比較すると、1次元解析では越流区間

表-4 計算条件

メッシュ分割数		18 × 12
流下方向メッシュ最小間隔	Δx (cm)	2.0
横断方向メッシュ最小間隔	Δy (cm)	1.0
流 量	Q (ℓ/s)	5.0
水路幅	(cm)	21.0
流量配分比	κ	0.312
越流堰高	(cm)	2.0
越流区間長	(cm)	10.0
河床勾配	l	1/1000
粗度係数	n	0.0135
下流端水深	h_d (cm)	6.70
流れの計算時間間隔	ΔT_i (sec)	0.003

表-5 越流量分布

	実験値 ケース1	1次元解析 ケース2	一定値 ケース3
断面 I = 8	0.2317	0.2910	0.31
断面 I = 9	0.2806	0.3017	0.31
断面 I = 10	0.3180	0.3113	0.31
断面 I = 11	0.3522	0.3202	0.31
断面 I = 12	0.3721	0.3281	0.31
平均	0.3109	0.3105	0.31

(単位: $l/sec \cdot m^2$)

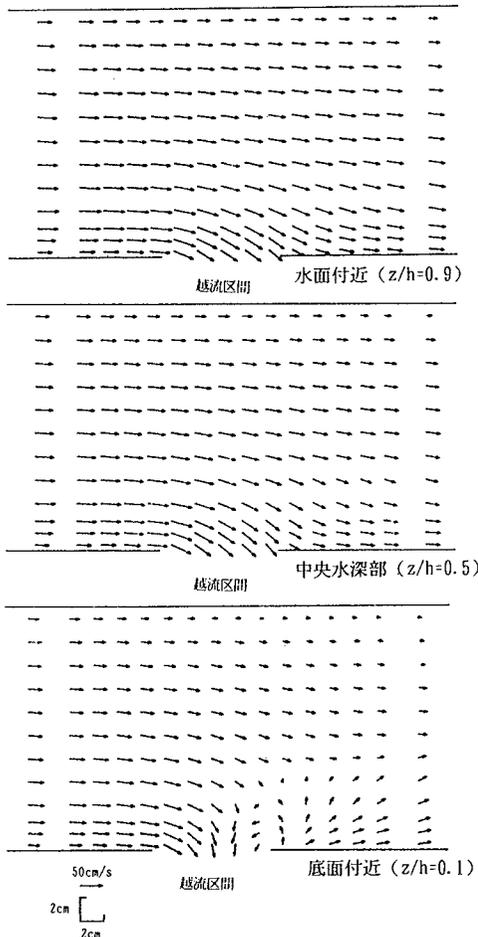


図-10 u-vベクトル図

で越流係数を一定値と仮定しているために、やや実験値と異なっているが、全体的な傾向は再現できている。

4. 1 実験結果との比較

(1) 水面形の比較

図-9は計算による水面形に関して計算結果と実験結果を比較したものである。

まず、計算結果を比較すると、越流量分布形の違いで、越流部上流端でやや異なるが、全体的にはほぼ同様な結果を示していることがわかる。つぎに、実験結果と比較すると実験値で見られる堰直下流部の急激な堰上げ現象が計算ではややなまった形になっているが、全体的にはよく再現できていると思われる。

(2) 流速分布の比較

図-10は平面流況を比較したもので、図-11はv-wベクトル図を示したものである。なお、計算結果に関しては各ケースであまり変化が見られないことからケース1のみ示している。まず、平面流況に関しては、水面付近および中央水深部での流況はよく再現できている。しかし、底面付近では、計算値の方が横断方向流速が卓越した形になっており、直下流部での逆流もやや大きく実験値と異なっている。この原因については不明であるが、実験値の底面付近の流速測定の精度にも問題があると考えられる。

つぎに、v-wベクトル図に関しては、上述した実験値と比較して、直下流部の時計回りの渦等ほぼ実験値を再現できているといえる。

5. おわりに

本研究では、横越流堰周辺の流れに関する数値シミュレーション法を開発することを目的とし、実験および数値解析的に流れの特徴を検討するとともに、横越流量分布・越流係数の推定法および数値シミュレーションにおける境界条件について検討した。得られた結果を要約すると以下のようである。

- 1) 横越流堰へ向かう流れは、底面に近づくほど顕著であり、この流れのために、堰直下流部では横断方向に時計回りの渦が形成される。
- 2) 横越流部周辺での水位は、堰上流側で急激に低下し、下流に向かって回復するような分布を持っており、堰直

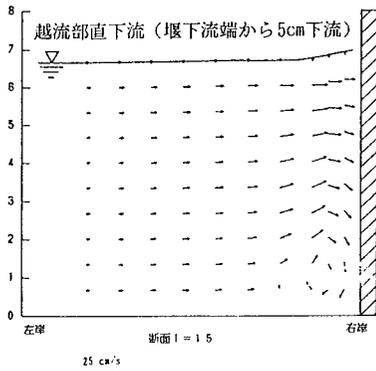
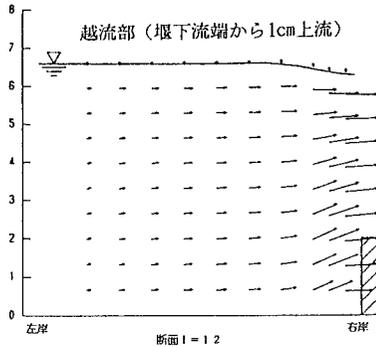
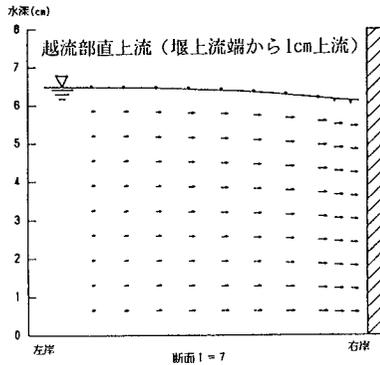


図-11 v-wベクトル図

下流部では逆に急激な堰上げ現象が見られる。

3) 越流量分布に関しては、1次元の不等流解析と中川・宇民の越流量式を用いてある程度評価することができるが、精度を向上させるためには越流区間での越流係数に分布を持たせる必要がある。

4) 3次元の流れの数値シミュレーションに関する境界条件としては、1次元解析によって得られた越流量分布を越流部で与えることによって実験値を再現できることがわかった。また、数値計算結果と実験値はほぼ一致していることから本数値シミュレーション法の妥当性が確認できた。

参考文献

- 1) たとえば、中川・宇民：横越流分水工の機能設計に関する研究、京都大学防災研究所年報、第9号、pp.539-550、1966.
- 2) 檜谷：河川および浅水湖の3次元流れと平面2次元河床変動に関する研究、京都大学学位論文、1992.
- 3) 道上・檜谷：連続湾曲部における三次元流計算、水工論文集、第34巻、pp.295-300、1990.