

貯水池の水位変化を伴う貯水池の排砂に関する研究

STUDY OF SEDIMENT DISCHARGE IN A RESEVOIR BY AN OPERATION OF WATER SURFACE ELEVATION.

井上卓也¹・清水康行²

Takuya INOUE and Yasuyuki SHIMIZU

¹ 学生会員 北海道大学大学院工学研究科 (〒 060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

² 正会員 工博 北海道大学大学院工学研究科助教授

Sediment accumulation in reservoirs is one of the serious problems in the dam management works in Japan. In this paper, two series of experiments are conducted to simulate the sediment release from the dam reservoir with an operation of water surface elevation of the reservoir. One-dimensional numerical calculation is tested using the experimental condition. It is found that the one-dimensional model can predict the behavior of the sediment movement. However, it is suggested that two-dimensional model is required to predict more accurate sediment movement. **keyword:** *numerical model, reservoir, sediment release.*

1. はじめに

わが国の河川は急流であることに加えて降雨量も多いため、土砂生産および流出する土砂量が多い。このような河川にダムを建設する場合、流れを遮断するため水理条件が変化し、ダム下流における河床高の低下や貯水池内での堆砂が生じる。ダム堆砂は貯水池の貯水容量を減少させ、利水および治水機能の低下につながる深刻な問題である。

本研究では沙流川二風谷ダムを例に、沖積河川の中流部にダムが建設された場合に生じる土砂輸送環境の変化を坊野ら¹⁾、井上ら²⁾³⁾の研究に引き継ぎ検討したものである。

坊野ら¹⁾は出水時における連続土砂観測や河床形状、河床材料の調査結果に基づき、河床変動モデルを作成し、長期的な堆砂量予測を行っている。井上ら²⁾は貯水池内に既に堆砂している土砂をゲート操作で貯水位を下げるにより排砂する可能性を示している。また、井上ら³⁾はオリフィスゲート放流を伴う鉛直2次元流れの計算モデルを構築し、実験と比較・検討を行い、その妥当性を示している。

しかしながら、二風谷ダムで過去に排砂を目的とした、貯水池の水位を下げるゲート操作を行っていない為、河

床変動計算の妥当性を検証できていない。そこで、本研究ではダム排砂模擬実験を行い、同じ条件での計算と実験を行い結果を比較することにより、モデルの妥当性の検証を行うものである。

2. 実験の概要

実験は図-1に示す水路を用いて行われた。水路の下流端から1m上流にオリフィスゲートを設置した。河床変動計算の境界条件として、上流端流量(流入流量)とゲート地点(上流側)の水位が必要となる。流入流量は上流端の水槽に設置されている圧力式水銀計で、水槽内の水位を測定し、あらかじめ検定済みの水位～流量曲線により、流量を求めた。ゲート地点の水位は測定が困難であった為、ゲート上流10cmの水位を測定し、これと等しいと仮定する。

図-2に示すような2通りの初期河床形状で実験を行った。即ち、堆砂が貯水池中央部にあることを想定した実験1と、堆砂がゲート近くにあることを想定した実験2である。河床変動量は砂を敷き詰めた後、通水を始め、ゲートの開度が1cmで、流入流量と放流流量とが等しくなるまで、徐々に流入流量を増加させた。水位が安定し動的平衡状態が出来た時点で、河床高を水路幅の中

央で流下方向 10cm 毎に計測した。ただし、砂を山状に盛った地点では 1cm 毎に計測し、実験前の河床高とした。実験開始と共にゲート近傍の水位を図-3 のように変動させる、水位が再び安定したところで実験前と同じ点を計測し、実験後の河床高とした。実験前後の河床高は数値計算による計算結果との比較、検証に用いることとした。

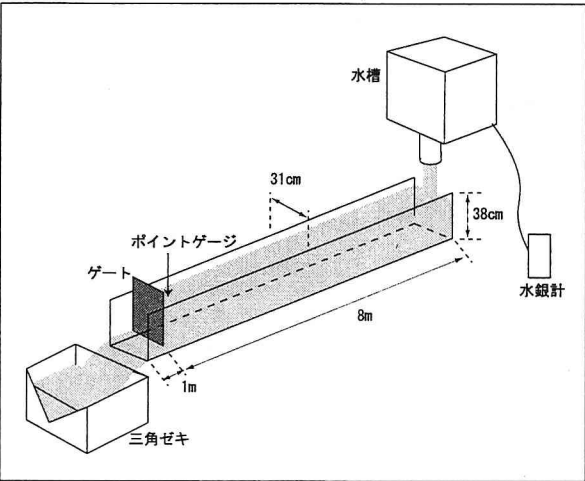


図-1 実験水路模式図

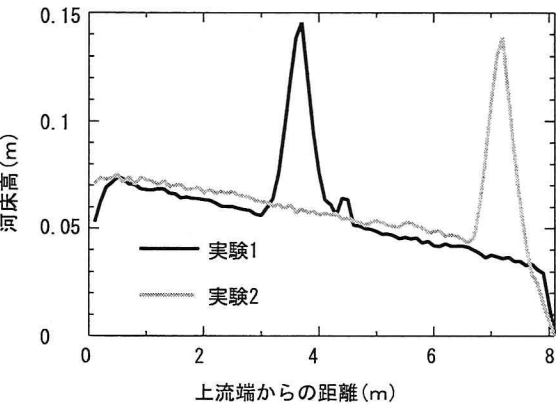


図-2 初期河床高縦断分布

表-1 は実験条件をまとめたものであるが、補足として下記の説明を加える。

一般的に河川の河床材料は混合粒径であるが、二風谷ダム貯水池内に堆積している土砂のほとんどはウォシュロードが沈降したもので粒径分布は狭い為、本実験はケイ砂 6 号のみで行い、計算上の粒径分布はケイ砂 6 号の粒径分布を用いた。粒径及び比重は無次元掃流力が実際のダムと近くなる様に設定した。

図-4 の灰色の破線 (初期河床高) と灰色の実線 (実験後の河床高) を比較すると、砂を山状に盛った地点以外

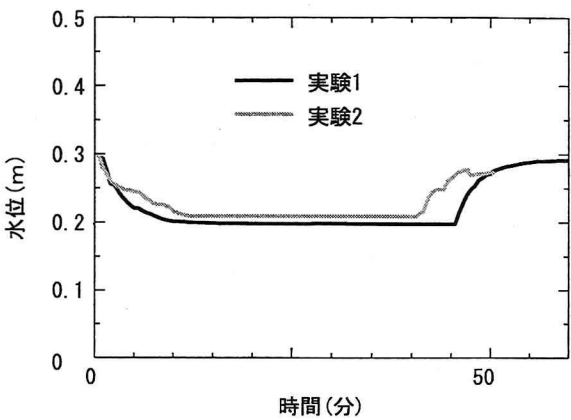


図-3 ゲート近傍の水位

表-1 実験条件

	実際のダム	実験条件
流下方向距離	5800m	8m
平均幅	455m	31cm
勾配	1/500	1/200
粒径 (50 %粒径)	0.02 ~ 1.5mm	0.17mm (6 号ケイ砂)
比重	2.65	2.50
流入流量	約 500m ³ /sec (出水時)	11.2 l/sec(実験 1) 15.2 l/sec(実験 2)
実験時間		60 分 (実験 1) 50 分 (実験 2)

は河床がほとんど変動していない。これは、平坦河床地点は変動しない条件で実験を行ったためである。このような条件で実験を行った理由は、平坦河床地点を変動させると写真-1 のような砂連が形成され、10cm 間隔の測定では河床変動の把握が困難となる為と、河床変動が平面 2 次元的になり、1 次元河床変動計算の検証データとして適さないからである。実験 2 も同様の条件で行った。

3. 1 次元河床変動計算

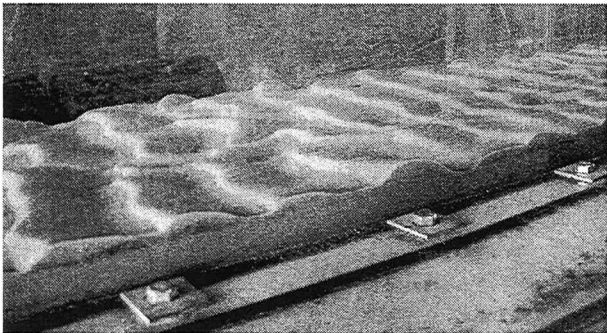


写真-1 砂連 (予備実験)

(1) 基礎式

計算モデルに用いた基礎式は以下に示す。流れの計算は1次元非圧縮流体に対する運動方程式、連続の式を用いて行われる。

$$\frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{gA} \frac{\partial Au^2}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial x} + i_e = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

ただし、 H は水位、 x は流下方向距離、 Q は流量、 g は重力加速度、 A は流積、 t は時間、 i_e はエネルギー勾配であり、マンニングの粗度係数を用いた次式で算出されている。

$$i_e = \frac{n^2 u^2}{R^{4/3}} \quad (3)$$

ここで、 n : マニングの粗度係数、 u : 平均流速、 R : 径深である。

運動方程式は分離解法により、移流項、圧力項、粘性項に分離され、移流項計算において CIP 法⁴⁾ が用いられている。

掃流砂量計算は芦田・道上の式⁵⁾ が用いられている。

$$\frac{q_{Bi}}{\sqrt{sgd_i^3}} = p_i 17 \tau_{*i}^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_{*ci}}{\tau_{*i}}\right) \left(1 - \frac{u_{*ci}}{u_*}\right) \quad (4)$$

s は砂の水中比重、 τ_{*i} は粒径別無次元掃流力 (河床せん断力) ($= u_*^2 / sgd_i$)、 τ_{*ci} は粒径別無次元限界摩擦速度 ($= u_{*ci}^2 / sgd_i$)、 u_{*ci} は粒径別限界摩擦速度であり浅田の式⁶⁾ で求める。

$$\frac{u_{*ci}^2}{u_{*cm}^2} = \left[\frac{\log 23}{\log \left(21 \frac{d_i}{d_m} + 2\right)} \right]^2 \frac{d_i}{d_m} \quad (5)$$

ただし、 d_m は河床材料の平均粒径 ($= \sum_i d_i p_i$)、 u_{*cm} は d_m に対する限界摩擦速度は岩垣の式⁷⁾ を用いて与えることにする。

浮遊砂浮上量計算は板倉・岸の式⁸⁾ が用いられている。

$$q_{sui} = p_i K \left(\alpha_* \frac{\rho_s - \rho}{\rho_s} \frac{gd_i}{u_*} \Omega_i - w_{fi} \right) \quad (6)$$

$$\Omega_i = \frac{\tau_{*i} \alpha'}{B_{*i} \int_{\alpha'}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-\xi^2) d\xi} + \frac{\tau_{*i}}{B_{*i} \eta_0} - 1 \quad (7)$$

ただし、 $\alpha' = B_{*i} / \tau_{*i} - 1 / \eta_0$ 、 $\eta_0 = 0.5$ 、 $K = 0.008$ 、 $\alpha_* = 0.14$ 、 ρ_s は浮遊粒子の密度、 ρ は水の密度、 τ_{*i} は粒径別無次元有効掃流力 (有効河床せん断力) ($= u_*'^2 / sgd_i$)、 u_*' は有効摩擦速度 (粒子摩擦速度) であり、河床波のない場合は摩擦速度 u_* に等しくなるが、河床波が存在する場合は u_* から形状抵抗分を除いた値となる。 B_{*i} は揚力算定の際の速度に摩擦速度 u_* を適用するための換算係数であり、沖・黒木の式⁹⁾¹⁰⁾ で与える。 B_{*i} は揚力算定の際の速度に摩擦速度 u_* を適用するための換算係数であり、均一粒径の場合は $B_{*i} = 0.143$ の一定値が用いられるが、混合粒径の場合に拡張する際に、遮蔽効果を考慮して次式で与える。

$$B_{*i} = \xi_i B_{*0} \quad (8)$$

$$\xi_i = \frac{\tau_{*ci}}{\tau_{*ci0}} \quad (9)$$

ただし、 $B_{*0} = 0.143$ 、 $\tau_{*ci} = u_{*ci}^2 / sgd_i$ 、 $\tau_{*ci0} = u_{*ci0}^2 / sgd_i$ である。 u_{*ci0} は粒径 d_i の均一粒径の場合の限界摩擦速度である。なお、式 (4) および式 (6) は、坊野ら¹⁾ の研究で使われており、貯水池内の流砂量計算に実績があることから採用した。また、本実験における適用性に関しては、後に行う実験結果と計算結果の河床高の比較をもって検討することとする。

浮遊砂沈降量計算には Rubey が式を用いられている。

$$\frac{w_{fi}}{\sqrt{sgd_i}} = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36\nu^2}{sgd_i^3}} - \sqrt{\frac{36\nu^2}{sgd_i^3}} \quad (10)$$

ここで、 s ; 浮遊粒子の水中比重 ($=1.65$)、 ν ; 流体の動粘性係数 ($=0.01 \text{ cm}^2/\text{s}$) である。 g ; 重力加速度 ($=980 \text{ cm/s}^2$) である。

浮遊砂の濃度は粒径別に浮遊砂の収支を考慮した連続の式から求める。

$$\frac{\partial}{\partial t} (< c_i > h) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q < c_i >}{B} \right) = q_{sui} - w_{fi} c_{bi} + \frac{q_x c_{xi}}{B} + D_s \frac{\partial^2}{\partial x^2} (< c_i > h) \quad (11)$$

ここで、 h は水深、 $< c_i >$ は水深平均の粒径別浮遊砂濃度であり、水深方向の濃度分布 (次式) から求められる。 D_s は浮遊砂の流下方向の拡散係数である。

$$< c_i > = \frac{1}{h} \int_0^1 c_i d\xi = \frac{c_{bi}}{\beta} (1 - \exp(-\beta)) \quad (12)$$

ただし、 ε は渦動粘性係数である。

河床高の変化および河床 (交換層) における粒径 d_i の存在割合 p_i の変化は次式で与えられる。

$$\delta \frac{\partial p_i}{\partial t} + p_i^* \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left[\frac{1}{B} \frac{\partial (q_{Bi} B)}{\partial x} + q_{sui} - w_{fi} c_{bi} - \frac{q_x c_{Bxi}}{B} \right] = 0 \quad (13)$$

ただし、 δ は交換層の厚さである。

(2) 計算条件

本モデルでは砂を山状に盛った地点は砂堆として扱い、岸・黒木の抵抗則⁹⁾¹⁰⁾の砂堆河床Ⅱ領域を使用し、その他の地点は平坦河床領域を使用した。

$$n = \frac{R^{\frac{1}{6}}}{8.9\sqrt{g}} \quad : \quad \text{砂堆Ⅱ} \quad (14)$$

$$n = \frac{d^{\frac{1}{6}}}{6.8\sqrt{g}} \quad : \quad \text{平坦} \quad (15)$$

境界条件として上流端に実験の流入量、下流端では図-3に示す、ゲート近傍の水位を用いた。計算グリッドはスタガード格子を用い、分割数は80(10cm間隔)。時間刻みは0.01秒とした。初期条件およびその他の条件は実験と同様の条件を用いた。また、 δ は5mmとした。

4. 考察

ここでは、1次元河床変動計算による実験の再現結果を実験結果と比較し、1次元河床変動計算の妥当性について考察を行う。

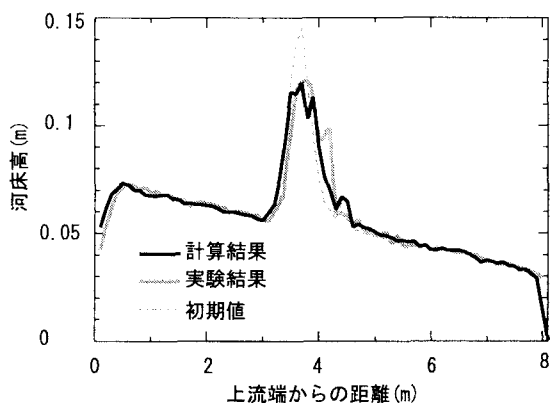


図-4 河床高比較 (実験 1)

図-4、図-5に示すとおり、1次元河床変動計算の計算結果は実験結果をほぼ再現していると言える。平坦河床地点では実験結果と同様に河床変動はほとんど無く、実験後の山の高さも非常に正確に再現している。また、図-6は実験1で実験水路の下流端に設けた三角ゼキで計測された流量と数値計算による下流端の流量である。

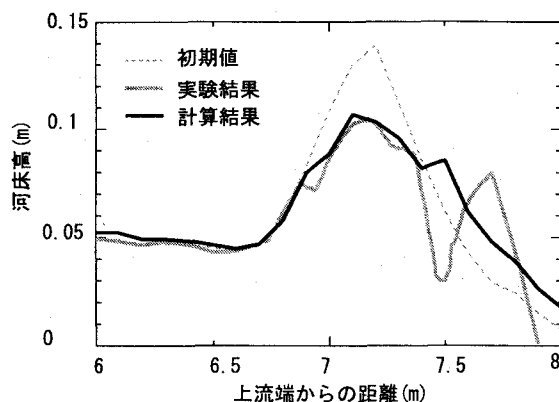


図-5 河床高比較 (実験 2)

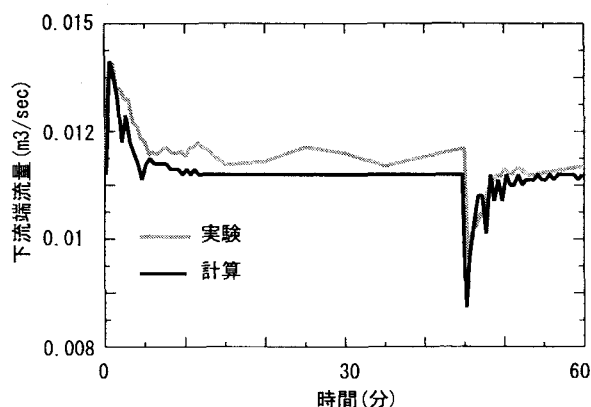


図-6 下流端流量比較 (実験 1)

水位を下げるとともに流出流量も増え、水位を上げるとともに流出流量も減る様子が再現されている。しかし、計算結果が実験結果を再現出来ていない点が2つある。

まず一つ目は、実験1、実験2の実験後の河床形状は山がふたこぼになっている、計算結果もふたこぼになっているが、ふたつ目の山の位置、形状などが異なっている点である。実験の観察から、山状の初期河床形状によって、山頂の下流で剥離が起こり、砂粒子が剥離流に乗って浮上、沈降をしているためと思われる。

そこで、井上³⁾の鉛直2次元流れ計算を用い、実験2の流れの再現をおこなった。計算は水路上流端から6mの位置からゲートまで間で行い、分割数は流下方向に100、鉛直方向に50とした。境界条件として、2次元計算の上流端(水路上流端から6m)には、1次元計算によって求められた流量から求めた流速を対数分布にしたがって与え、下流端(ゲート上流)には水位(図-3)を与えた。なお、ゲートからの流出量 Q は境界条件として与えた下流端(ゲート上流)の水位から次式を用いて算出される。

$$Q = C a B \sqrt{2gh_0} \quad (16)$$

ただし、 C は流量係数、 a はゲートの開度、 B は水路幅、

g は重力加速度, h_0 は下流端 (ゲート上流) の水深である。ここで使われている流量係数 C は水路ごとに異なる。本研究では流量係数を, 実験開始前の流出量, ゲート開度, ゲート上流の水深から逆算して求めた。

図-7 は鉛直 2 次元流れの流線を示している。図-8 は鉛直 2 次元流れのベクトルを示している。図-8 においてベクトルは流下方向に 10cm 間隔, 鉛直方向に 50 点プロットしている。図-7, 図-8 のとおり, 流れは山頂を過ぎると剥離を起こし, 剥離した流れの内部では渦が生じている。

1 次元河床変動計算の計算結果が山頂の下流側の河床変動を正確に再現できないのは, 剥離や渦を再現できないからと言える。

図-5 において, ゲートの上流 (ゲートからおおよそ 20cm 以内の地点) では, 実験結果のほうが 1 次元河床変動計算の結果より, 河床が洗掘されている。これは, オリフィスゲートに引き込まれる強い流速による flashing を再現できないためと考えられる。実際, 鉛直 2 次元流れの計算ではオリフィスゲートによる引き込みが再現されている (図-8 の一番右のベクトル鉛直方向分布)。

5. 結論

(I) 本研究の 1 次元河床変動計算は貯水池の水位変化を伴う, 貯水池内の河床変動を十分再現できると言える。しかし, 河床形状やゲート放流により流れが複雑になっている地点では, その再現性は低くなる。

(II) 河床形状やゲート放流により流れが複雑になっている地点の河床変動をより正確に把握するためには, 鉛直 2 次元流れによる河床変動モデルの構築が必要である。

謝辞: 本研究は北海道開発局室蘭開発建設部沙流川ダム建設事務所, 二風谷ダム管理所, 事業所, 開発土木研究所河川研究室などの非常に多くの方々の協力により実施されたものです。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 坊野聡子, 清水康之, 斎藤大作, 吉田義一: “ダムを含む沖積河川の土砂輸送について”, 水工学論文集, 第 43 号, pp.581-586, 1999.
- 2) 井上卓也, 坊野聡子, 船木淳悟, 清水康之: “貯水池の水位変化を伴うダム堆砂量予測計算”, 土木学会北海道支部論文報告集, 第 56 号 (B), pp.100-105, 2000.
- 3) 井上卓也, 清水康之: “オリフィスゲート放流を伴う鉛直 2 次元流れの計算”, 水工学論文集, 第 45 号, pp.433-438, 2001.
- 4) Yabe, T and Aoki, T: “A universal solver for hyperbolic equations by cubic-polynomial interpolation I. One-

dimensional solver, Comp. Phys. Comm., Vol66, pp219-232, 1991.”

- 5) 芦田和男, 道上正規: “移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究”, 土木学会論文集, 第 206 巻, pp.59-69, 1972.
- 6) 浅田宏: “山地河川の流砂量と貯水池の堆砂過程に関する研究”, 電力中央研究所報告総合研究報告, No.2, 1976.
- 7) 岩垣雄一: “限界掃流力の流体力学的研究”, 土木学会論文集, 第 41 巻, pp.1-21, 1956.
- 8) Itakura, T. Kishi T.: “Open channel flow with suspended sediments”, Proc. of ASCE, HY8, pp.1325-1343, 1980.
- 9) 水理委員会移動床流れの抵抗と河床形状研究小委員会: “移動床流れにおける河床形態と粗度”, 土木学会論文集, 第 210 巻, pp.65-91, 1973.
- 10) 岸力, 黒木幹男: “移動床流れにおける河床形状と流体抵抗”, 北海道大学工学部研究報告, No.67, 1973.

(2001. 10. 1 受付)

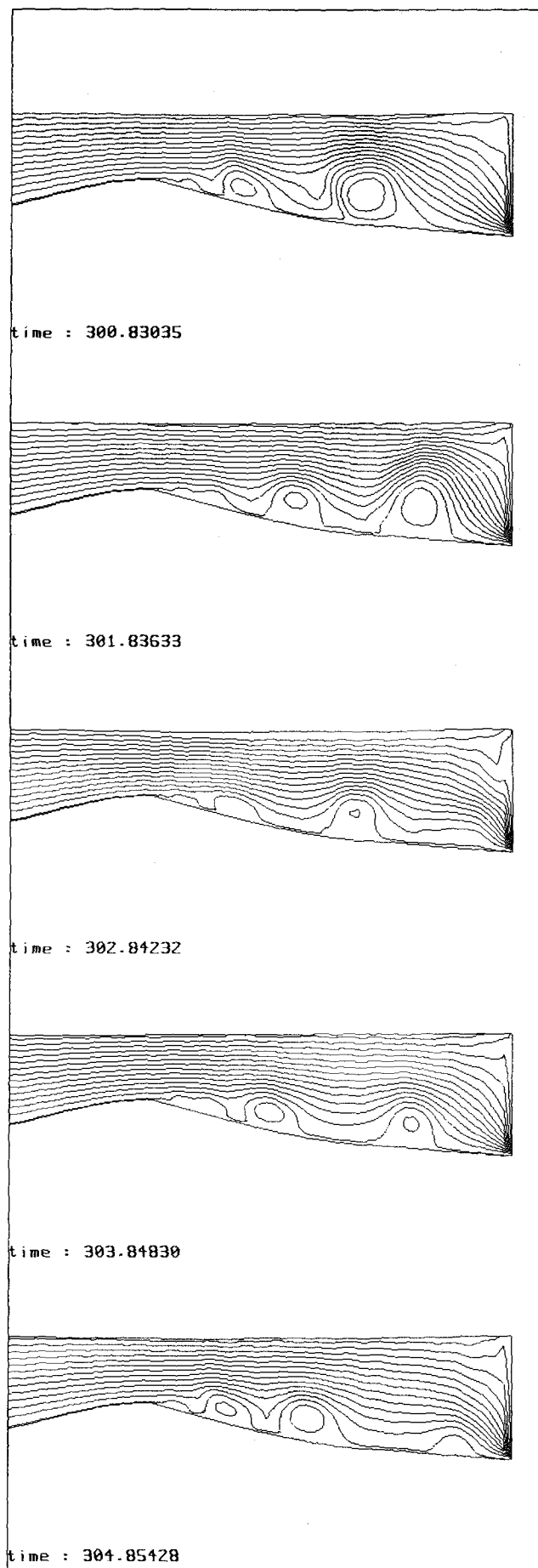


図-7 2次元計算による流線 (実験 2)

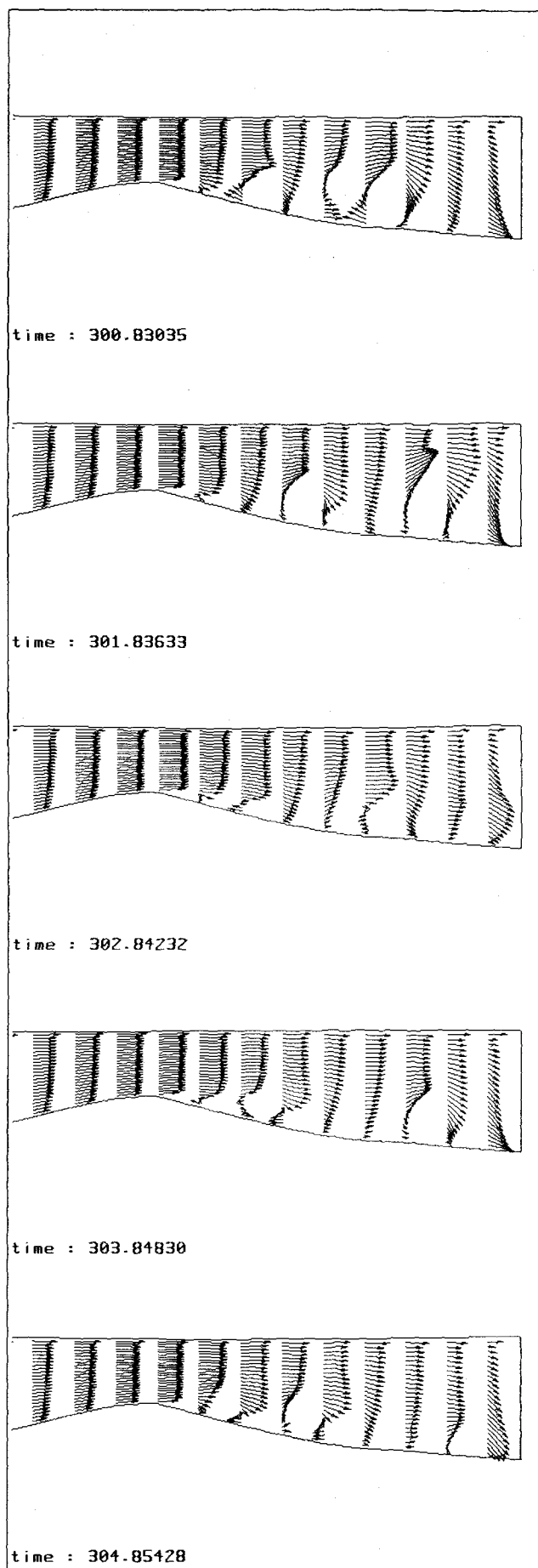


図-8 2次元計算によるベクトル (実験 2)