

人工魚巣の水理特性

黒川, 昇平

九州大学大学院生物資源環境科学府生産環境科学専攻生産環境情報学研究室

<https://hdl.handle.net/2324/1498270>

出版情報：九州大学, 2005, 修士, 修士
バージョン：
権利関係：

修士論文

人工魚巣の水理特性

九州大学大学院生物資源環境科学府生産環境科学専攻

生産環境情報学研究室

黒川 昇平

2006年3月

目次

第 1 章 序論

1.1 はじめに	1
1.2 人工魚巣について	
1.2.1 人工魚巣の形状	3
1.2.2 人工魚巣施工の現状	4
1.2.3 人工魚巣の有すべき機能	5

第 2 章 既往の研究と本研究の位置づけ

2.1 数値実験の位置づけ	6
2.2 人工魚巣の水理学特性に関する既往の研究	7

第 3 章 基礎方程式と解析方法

3.1 基礎方程式	9
3.2 基礎方程式の離散化	11
3.3 計算条件	
3.3.1 初期条件	26
3.3.2 境界条件	
3.3.3 パラメータ値の設定	27

第 4 章 数値モデルの妥当性

4.1 流速 u の主流横断方向時間平均流速分布による検証	28
4.2 主流方向の流速変動による検証	
4.3 開口部上流端における主流横断方向の流速 u, v の乱れ強度による検証	29

第 5 章　主流部および人工魚巣の水理特性	
5.1　流速ベクトルと水深分布の時間変化	35
5.2　水面振動特性	
5.2.1　水面振動	38
5.2.2　水面振動と流体交換速度	45
5.3　流速変動特性	
5.3.1　流速変動	50
5.3.2　流速変動の乱れ強度と流体交換速度	57
第 6 章　結論	63
謝辞	64
参考文献	65
APPENDIX	66

第1章 序論

1.1 はじめに

従来の河川改修断面の特徴は、都市化の進行に伴う流出量増大と河川用地の取得難から、単断面のコンクリートウォールによる直立護岸が多い。また、河道の直線化も顕著な傾向である。これは、経済的・効率的であるという一定の水準が確保できるような、人工物を基調とした画一的施設整備が進められてきた結果である。したがって過去の河川および水路改修には、当時の時代を反映した功罪がみられる。

このコンクリート三面張りの單一的な河川改修は、洪水時の外力に対しては抵抗力が大きいが、護岸形態が単調になり、粗度が減少して流速が早くなると遮蔽物がないために、魚類や水中生物等のエコシステムも容易に破壊あるいは流出するようになる。これらのことが河川の周辺にみられる多様な自然環境を損なわせ、歪んだ生態系を創出させ、単に水が流れるだけの水路へと川を変えてきた。治水・利水に重きを置かざるを得なかった結果、川の姿は大きく変化し本来の美しさや機能を奪う結果となってしまったのである。

しかし近年、河川の果たす役割は多様化しつつあり、治水・利水といった従来からの河川の機能に加えて、自然機能を充分に活用した「水と緑の空間」の確保等、人々に親しみやすく生物にとっても住みやすい河川、いわゆる「多自然型河川」としての機能が求められている。このように近年、自然環境に対する関心が高まってきているが、その中でも河川を含めた水環境というものには特に関心が集まっている。

前述のように、河川改修・整備事業においては、これまで水路機能を優先して開発されてきたが、近年では多自然型水路が推進されるようになり、その一環として、魚にやさしい、安らぎのある水路づくりに対する要望が高まってきた。そこで本来の整備目的を逸脱しないように、両方の機能をかねそなえた「魚巣ブロック」の開発がのぞまれている。このため、各河川の特性に応じた水辺環境の

保全・創出を図るために被覆土による緑化、自然石を利用した河床及び護岸工、多種魚類の生息しやすい魚巣ブロック等の採用など、自然環境や 多様な生態系に配慮した多自然型川づくりが推進されている。

この状況において、いくつかの河川にはすでに魚巣ブロックが設置されている。しかしながら、そうして設置された魚巣ブロックが十分に機能しているかというと、必ずしもそうではないように思われる。その効果については不明な部分も多く、施工においても手探り状態にあるのが現状である。それに加え、河川に多様な空間を設けることには上述のようなメリットがある一方で、従来の河川機能を妨げる可能性がある。例えば、植生を伴う流れ、複断面水路の流れ、側岸に死水域を伴う流れなど、大きな流速勾配の存在する流れ場にはせん断不安定に起因する波動と渦が発生し、河川の流れに影響を及ぼす。したがって、魚巣内の水理学特性や、主流と魚巣の間の物質交換などを解明することは重要である。

人工魚巣内の流れは、水理学的にはキャビティー流れに類似しており、開水路主流と魚巣の間に形成されるせん断層および組織渦、あるいは魚巣内の循環流を形成するなど複雑な乱流場である。また、魚巣内は流速が小さく、汚濁物質の停留に伴う水質悪化が懸念されるため、主流・魚巣域間の物質交換現象についての検討も重要なと思われる。

本研究は、人工魚巣の水理学特性、中でも魚巣内外での物質交換を中心に関水路平面2次元流の基礎式を用いて、数値計算により検討したものである。

1.2 人工魚巣について

1.2.1 人工魚巣の形状

ここで、本研究の数値実験の対象としている人工魚巣についての説明を行う。人工魚巣（魚巣ブロック）とは、魚や多様な生物が住めるように中を空洞化したブロックのことである。これまでのコンクリート三面張りの単一的な河川改修のために、水路・河川周辺の自然環境、生態系を失った反省から、従来の護岸の機能を有しつつ、かつ河川生態系の保全親水護岸となる魚巣ブロックは近年その施工数、規模を増やしつつあり、規模の大きい河川から農業用水路まで、さまざまな場所で見ることができる。

実際の魚巣ブロックの形状を Photo.1-1,1-2 に例示する。このようなブロックを護岸の下に複数個並べることで生物生息に適した環境を作り出している。特定の種類の魚に占領されないよう、ブロックの空洞の形や大きさを変えるなどの工夫をしている。また、植物で覆う護岸などソフトなブロックや籠マットを施工して昆虫などのすむ川辺作りも考えられている。魚巣のタイプによっては、魚巣の中に自然石を入れて魚巣内に多様な間隙を作り出し、さまざまな生物の生息場を確保できるようにしたものもある。



Photo.1-1 魚巣ブロック(フリーグラス)

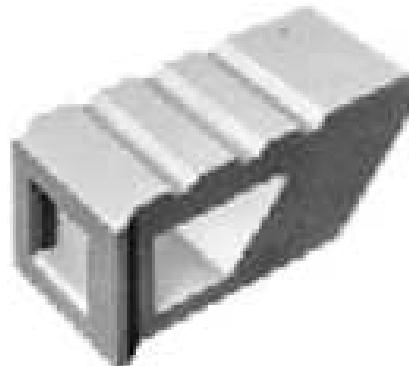


Photo.1-2 段岸魚巣ブロック

1.2.2 人工魚巣施工の現状

実際の人工魚巣施工例を Photo.1-3,1-4 に示す .

Photo.1-3 のように開

口部の形に特徴をもたせ ,

さらに内部に自然石を詰

めているものもあり , 自

然の生物の生息空間を再

現しようという工夫が見

られる . また , Photo.1-4

に示すように藻類を付着

させ , 水の浄化を可能に

した魚巣もある . 魚巣の

上方には植生ブロックが

施工されていることが多

く , そこに植物が生息し ,

河川周辺の自然保護に一

役買っているといえる .

このような , 人の手によ

る整備が進んでいて変化

に乏しい河川において魚



Photo.1-3 三重県宮川の施工例



Photo.1-4 岐阜県福富川の施工例

巣は多様な生物環境を育める可能性を秘めていると言えよう .

しかし ,中には Photo.1-5 の左岸部のように施工後の魚巣に土砂が堆積し , 魚巣が本来の機能を発揮できなくなっている , という事例も見られる . 土砂の堆積しやすい場所にわざわざ施工している , というものもあるが , 魚巣内の環境の解明のみならず , 施工時の妥当性の水理学的な検証や , 維持管理の方法を検討する必要性



Photo.1-5 土砂の堆積した例

があるだろう .

1.2.3 人工魚巣の有すべき機能

魚巣ブロックに要求される機能として , 流水の減勢や内部形状の複雑化による生物生息空間のできる限りの拡大 , 確保といったものもあるが , 基本的機能として生物生息に耐える魚巣内外の物質交換というものがある . 各ブロックの空孔部は連続していて隣のブロックとの物質交換が可能となっているが , 河川本流との物質交換の中心となるのはブロック正面の開口部である . したがって , 本研究で解明すべきは開口部の流れが中心になろう . また , その形状については , 魚巣内の物質停滞 , 土砂の堆積に関わる重要な問題となるため , 魚巣内の循環流の解明も必要となってこよう .

第2章 既往の研究と本研究の位置づけ

2.1 数値実験の位置づけ

これまで，人工魚巣を含む非定常開水路流に関する研究の多くは実験および野外観測で行われたものであり，乱流モデルを用いた数値実験から非定常の内部構造に関する詳細な検討はあまりみられない．一般に，実験によって非定常の乱流構造を全水域にわたって詳細に測定することは多大な時間と労力を要し，さらに壁面・底面領域における各物理量の測定も簡単ではない．また，レイノルズ数が高い場合，粘性底層の実寸はより薄くなるため測定は制限され，壁面近傍領域の速度や乱れの減衰効果を評価することは難しくなる．このような現況から，数値実験的なアプローチは有用であると考えられる．

2.2 人工魚巣の水理学特性に関する既往の研究

ここで，人工魚巣の水理学特性に関する既往の研究について考察する．

牧平（2000）は室内水理学実験により，魚巣内の大まかな流れの解明，開口部における物質交換のメカニズムの解明を行った．実験の内容としては流れの可視化により質量交換の速度を，魚巣内の水面変動と開口部の流速の測定と合わせることにより，水面変動と剥離渦の相関関係を明らかにした．そして，フルード数が大きくなるほど魚巣開口部における水面変動の乱れ強度，渦のエネルギー，質量交換が増大する（ $Fr = 0.5 \sim 0.6$ がピーク）と報告した．さらに，剥離渦の発生周期が $0.8 \sim 0.9(s)$ との報告もある．

山本(2001)も同様の水理学実験を行い、開口部に形成されるせん断層の乱流構造、魚巣内の水面変動に関する研究を行った。実験で魚巣開口部周辺の詳細な流速変動、水面変動の測定を行っている。そして、以下の結果を報告している。

- (1) 開口部せん断層はフルード数が大きくなるほど魚巣内部に侵入する。
- (2) 主流と魚巣の境界における平均流速は主流部における平均流速の1/2程度である。
- (3) 主流と魚巣との流体交換はフルード数の大きさに依存する。
- (4) フルード数の増加、流下距離の増加と共に乱れ強度が増幅される。
- (5) $Fr > 0.5$ では、主流と魚巣の境界面近傍における流速変動の卓越周期と魚巣内の水面変動の卓越周期はほぼ一致する。このことは剪断不安定による変動がセイシュと共鳴したことによる。
- (6) 魚巣内の水面変動はフルード数に依存し、 $Fr > 0.4$ ではセイシュの基本モード周期を持つ振動であり、 $Fr > 0.7$ ではモード2の振動がみられた。

ただし、(6)について、ワンドのような死水域の流れ実験では水面変動の周期がセイシュの理論周期の2倍と一致することが報告されているが、この報告とは一致していない。

中島(2002)は、フルード数をパラメータとして流速変動の時系列の測定を行い、河川と人工魚巣の境界に形成される乱流剪断層に発生する渦の特性を検証している。実験は流れの可視化に重点を置いている。そして、以下の結果を報告している。

- (1) フルード数が大きくなるほど人工魚巣開口部周辺に発生する組織渦の渦径は大きくなり発生周期も早くなる。また、流下とともにその渦径は大きくなる。
- (2) 水路壁面近傍の流速は人工魚巣開口部周辺を流下する際に減衰するが、連結されている、次の人工魚巣に差し掛かるまでにその流速は回復されている。
- (3) 主流横断方向のレイノルズ応力は0付近の値を指し、乱れが小さいことを示す。

(4) 魚巣開口部周辺の剪断層は流下とともにその乱れを増す .

以上のように既往の研究では ,フルード数と流速変動や水面変動の特性および相関関係 ,開口部上流端で発生する剥離渦の発生周期 ,渦径などが明らかにされている .一方 ,魚巣開口部幅や魚巣奥行きと流速変動や水面変動の特性および相関関係等は明らかにされていないが ,数値計算モデルの構築やその妥当性の検証に有用であると考えられる .

そこで ,本研究では ,まずこれらの実験結果を用いて ,本研究における開水路 2 次元流れに基づく数値計算モデルの妥当性の検証を行い ,次いでこのモデルを用いて ,人工魚巣の水理特性 ,特に魚巣内外の流体交換を中心に検討を行った .

第3章 基礎方程式と解析方法

3.1 基礎方程式

本研究では、Fig.3-1に示したような水路部と人工魚巣部からなる領域を計算対象とする。流れは平面2次元流とし、このような流れを解析する基礎式として、以下に示す圧力に勢水圧分布を仮定し、流線の湾曲による2次元流を考慮しない平面2次元流れの開水路における以下の基礎式を用いる。

[連続式]

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (3.1)$$

[運動方程式]

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial \beta u M}{\partial x} + \frac{\partial \beta v M}{\partial y} + gh \frac{\partial h}{\partial x} \\ = gh \sin \theta - \frac{f}{2} u \sqrt{u^2 + v^2} + \frac{\partial(\overline{-u'^2} h)}{\partial x} + \frac{\partial(\overline{-u'v'} h)}{\partial y} + \nu_l \left(\frac{\partial}{\partial x} h \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} h \frac{\partial u}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial \beta u N}{\partial x} + \frac{\partial \beta v N}{\partial y} + gh \frac{\partial h}{\partial y} \\ = -\frac{f}{2} v \sqrt{u^2 + v^2} + \frac{\partial(\overline{-u'v'} h)}{\partial x} + \frac{\partial(\overline{-v'^2} h)}{\partial y} + \nu_l \left(\frac{\partial}{\partial x} h \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} h \frac{\partial v}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (3.3)$$

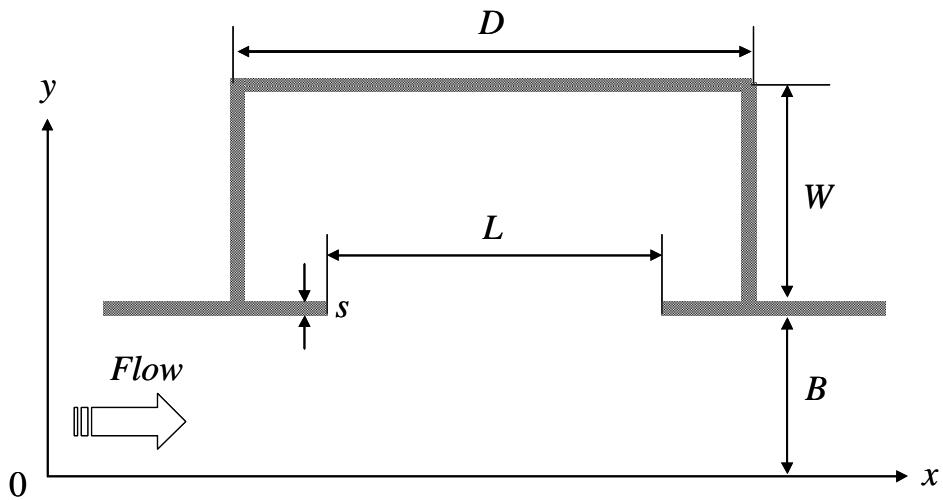


Fig.3-1 解析対象水域

数値実験モデルは、Fig.3-1 に示すように、水路左岸に幅 D 、奥行き W 、開口部 L のアクリル製の人工魚巣を設け、水路に沿って右向きに x 軸、鉛直上向きに y 軸をとり、現象を平面 2 次元とした。

ここに、 h ：水深、 (u, v) ：水深平均ベクトルの (x, y) 方向成分、 (M, N) ：各々、 $M=hu$ 、 $N=hv$ で定義される流量フラックス、 $-\overline{u'_i u'_j}$ ：水深平均されたレイノルズ応力テンソル (i, j はともに 1, 2 の値をとり、1 は x 方向、2 は y 方向を意味する.)、 ν_l ：動粘性係数、 θ ：水路床勾配、 f ：摩擦損失係数、 β ：運動量係数で層流の場合 1.2、乱流で 1.0、 (x, y) ：空間座標、 t ：時間である。

水深平均レイノルズ応力テンソル $-\overline{u'_i u'_j}$ は、次式で表される。

$$-\overline{u'_i u'_j} = D_h \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (3.4)$$

$$D_h = \alpha h u_* \quad (3.5)$$

D_h : 渦動粘性係数 , u_* : 摩擦速度 ($\equiv \sqrt{f(u^2 + v^2)/2}$) , k : 水深平均乱れエネルギー , α : 定数である。なお、乱れエネルギー k は局所的な u_* を用いて瀬津の提案する実験式

$$\frac{k}{u_*^2} = 4.78 \exp\left(-2 \cdot \frac{z}{h}\right) \quad (3.6)$$

を水深積分して得られる $2.07u_*^2$ で評価する。また、摩擦損失係数 f は局所的なレイノルズ数 Re' の関数とし、その関係は Blasius の式により表される。

$$f = 0.0791 \cdot Re'^{-0.25} \quad (3 \times 10^3 < Re' < 10^5) \quad (3.7)$$

3.2 基礎方程式の離散化

Fig.3-2 に示すような Staggered Mesh を用いて未知量 u, v, h を配置した。そして(3.1) ~ (3.3)をコントロールボリューム法を用いて離散化し、陽解法により時間方向に計算を進めた。基礎方程式の離散化の方法としては移流項には 1 次制度の風上差分を用い、時間積分には Euler 前進差分法を採用した。

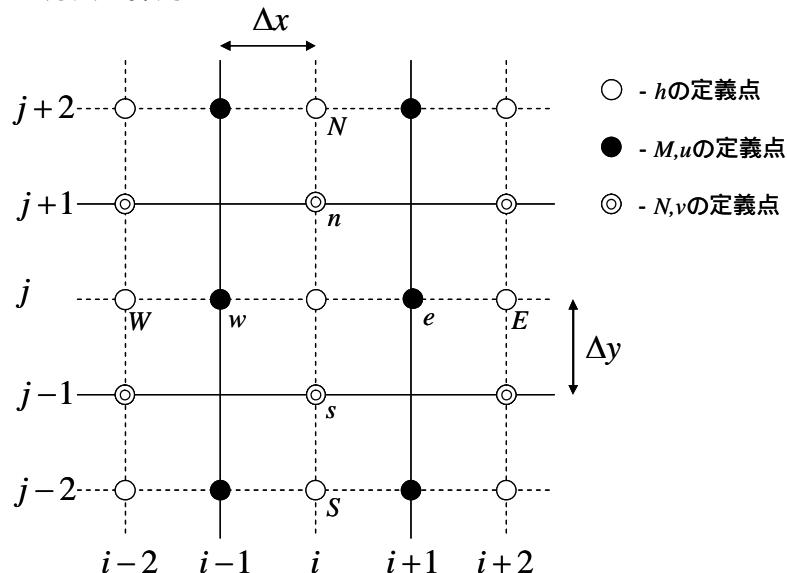


Fig.3-2 staggered mesh

各々の方程式の離散化を以下に示す。ここに、右上の添字は時間ステップ数を表し、いま、 n ステップまで既知であるとする。また、右下の添字は定義点を表す。

(連続式)

$$\iiint \frac{\partial h}{\partial t} dt dx dy + \iiint \frac{\partial M}{\partial x} dt dx dy + \iiint \frac{\partial N}{\partial y} dt dx dy = 0 \quad (3.8)$$

$$2\Delta x \cdot 2\Delta y \{h_{i,j}^{n+1} - h_{i,j}^n\} + \Delta t \cdot 2\Delta y \{(M)_e - (M)_w\} + \Delta t \cdot 2\Delta x \{(N)_n - (N)_s\} = 0$$

$$2\Delta x \cdot 2\Delta y \{h_{i,j}^{n+1} - h_{i,j}^n\} = -\Delta t \cdot 2\Delta y \{M_{i+1,j} - M_{i-1,j}\} - \Delta t \cdot 2\Delta x \{N_{i,j+1} - N_{i,j-1}\}$$

$$h_{i,j}^{n+1} = h_{i,j}^n - \Delta t \cdot \left(\frac{M_{i+1,j} - M_{i-1,j}}{2\Delta x} + \frac{N_{i,j+1} - N_{i,j-1}}{2\Delta y} \right) \quad (3.9)$$

(x 方向運動方程式)

非定常項

$$\iiint \frac{\partial M}{\partial t} dt dx dy = 2\Delta x \cdot 2\Delta y (M_{i,j}^{n+1} - M_{i,j}^n) \quad (3.10)$$

対流項 ($\beta = 1.0$)

x 方向(CNVUX)

$$\iiint \frac{\partial (uM)}{\partial x} dt dx dy = \Delta t \cdot 2\Delta y \{(uM)_e - (uM)_w\} \quad (3.11)$$

風上差分を適用

$$u_e = u_{i+1,j} \geq 0 \text{ のとき} \quad CNVUX_e = (uM)_e = u_{i+1,j} \cdot M_{i,j} \quad (3.12)$$

$$u_e = u_{i+1,j} < 0 \text{ のとき} \quad CNVUX_e = (uM)_e = u_{i+1,j} \cdot M_{i+2,j} \quad (3.13)$$

$$\text{ただし, } u_{i+1,j} = \frac{u_{i+2,j} + u_{i,j}}{2}$$

$$u_w = u_{i-1,j} \geq 0 \text{ のとき} \quad CNVUX_w = (uM)_w = u_{i-1,j} \cdot M_{i-2,j} \quad (3.14)$$

$$u_w = u_{i-1,j} < 0 \text{ のとき} \quad CNVUX_w = (uM)_w = u_{i-1,j} \cdot M_{i,j} \quad (3.15)$$

$$\text{ただし , } u_{i-1,j} = \frac{u_{i,j} + u_{i-2,j}}{2}$$

(3.11) ~ (3.15)より ,

$$CNVUX = \Delta t \cdot 2\Delta y (CNVUX_e - CNVUX_w) \quad (3.16)$$

y 方向(CNVUY)

$$\iiint \frac{\partial(vM)}{\partial y} dt dx dy = \Delta t \cdot 2\Delta x \{ (vM)_n - (vM)_s \} \quad (3.17)$$

風上差分を適用

$$v_n = v_{i,j+1} \geq 0 \text{ のとき} \quad CNVUY_n = (vM)_n = v_{i,j+1} \cdot M_{i,j} \quad (3.18)$$

$$v_n = v_{i,j+1} < 0 \text{ のとき} \quad CNVUY_n = (vM)_n = v_{i,j+1} \cdot M_{i,j+2} \quad (3.19)$$

$$\text{ただし , } v_{i,j+1} = \frac{v_{i+1,j+1} + v_{i-1,j+1}}{2}$$

$$v_s = v_{i,j-1} \geq 0 \text{ のとき} \quad CNVUY_s = (vM)_s = v_{i,j-1} \cdot M_{i,j-2} \quad (3.20)$$

$$v_s = v_{i,j-1} < 0 \text{ のとき} \quad CNVUY_s = (vM)_s = v_{i,j-1} \cdot M_{i,j} \quad (3.21)$$

$$\text{ただし , } v_{i,j-1} = \frac{v_{i+1,j-1} + v_{i-1,j-1}}{2}$$

(3.17) ~ (3.21)より ,

$$CNVUY = \Delta t \cdot 2\Delta x (CNVUY_n - CNVUY_s) \quad (3.22)$$

圧力項(HDX)

$$\begin{aligned}
\iiint g h \frac{\partial h}{\partial x} dt dx dy &= \iiint \frac{1}{2} g \frac{\partial h^2}{\partial x} dt dx dy \\
&= \frac{g}{2} \Delta t \cdot 2 \Delta y \left(\left(h^2 \right)_e - \left(h^2 \right)_w \right) \\
&= \frac{g}{2} \Delta t \cdot 2 \Delta y \left(h_{i+1,j}^2 - h_{i-1,j}^2 \right) = HIDX
\end{aligned} \tag{3.23}$$

勾配項

$$\begin{aligned}
\iiint g h \sin \theta dt dx dy &= \Delta t \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot g \cdot h_{i,j} \cdot \sin \theta \\
&= \Delta t \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot g \cdot \frac{h_{i+1,j} - h_{i-1,j}}{2} \cdot \sin \theta = cx1
\end{aligned} \tag{3.24}$$

底面摩擦項

$$\begin{aligned}
\iiint -\frac{f}{2} u \sqrt{u^2 + v^2} dt dx dy &= \Delta t \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \left(-\frac{f}{2} \right) \cdot u_{i,j} \sqrt{u_{i,j}^2 + v_{i,j}^2} = cx2 \\
\text{ただし, } v_{i,j} &= \frac{1}{4} (v_{i+1,j+1} + v_{i+1,j-1} + v_{i-1,j+1} + v_{i-1,j-1})
\end{aligned} \tag{3.25}$$

レイノルズ応力項

(x 方向)

$$\iiint \frac{\partial (-\overline{u'^2} h)}{\partial x} dt dx dy = \Delta t \cdot 2 \Delta y \left(\left(-\overline{u'^2} h \right)_e - \left(-\overline{u'^2} h \right)_w \right) \tag{3.26}$$

$$\begin{aligned}
-\overline{u'^2} h &= -\overline{u' u'} h = D_h h \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \right) - \frac{2}{3} k h \delta_{1,1} \\
&= \alpha h^2 u_* \cdot 2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \cdot 2.07 \cdot h u_*^2 \\
&= 2 \cdot 0.3 \cdot \sqrt{\frac{f}{2}} \cdot h^2 \sqrt{u^2 + v^2} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \cdot 2.07 \cdot \frac{f}{2} \cdot h (u^2 + v^2)
\end{aligned} \tag{3.27}$$

(式(2.27) 右辺第1項の離散化)

$$2 \cdot 0.3 \cdot \sqrt{\frac{f}{2}} = cx31 \tag{3.28}$$

$$\begin{aligned} \left(h^2 \sqrt{u^2 + v^2} \frac{\partial u}{\partial x} \right)_e &= h_{i+1,j}^2 \sqrt{u_{i+1,j}^2 + v_{i+1,j}^2} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_{i+1,j} \\ \text{左辺}, u_{i+1,j}^2 + v_{i+1,j}^2 &= \left(\frac{u_{i+2,j} + u_{i,j}}{2} \right)^2 + \left(\frac{v_{i+1,j+1} + v_{i+1,j-1}}{2} \right)^2 = cx32 \end{aligned} \quad (3.29)$$

$$\begin{aligned} \left(h^2 \sqrt{u^2 + v^2} \frac{\partial u}{\partial x} \right)_e &= h_{i+1,j}^2 \sqrt{cx32} \frac{u_{i+2,j} - u_{i,j}}{2\Delta x} = cx33 \\ (3.30) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \left(h^2 \sqrt{u^2 + v^2} \frac{\partial u}{\partial x} \right)_w &= h_{i-1,j}^2 \sqrt{u_{i-1,j}^2 + v_{i-1,j}^2} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_{i-1,j} \\ \text{左辺}, u_{i-1,j}^2 + v_{i-1,j}^2 &= \left(\frac{u_{i,j} + u_{i-2,j}}{2} \right)^2 + \left(\frac{v_{i-1,j+1} + v_{i-1,j-1}}{2} \right)^2 = cx34 \end{aligned} \quad (3.31)$$

$$\left(h^2 \sqrt{u^2 + v^2} \frac{\partial u}{\partial x} \right)_w = h_{i-1,j}^2 \sqrt{cx34} \frac{u_{i,j} - u_{i-2,j}}{2\Delta x} = cx35 \quad (3.32)$$

(3.27) ~ (3.32) より

$$cx31 \cdot (cx33 - cx35) = cx36 \quad (3.33)$$

(式(3.27) 右辺第 2 項の離散化)

$$\frac{2}{3} \cdot 2.07 \cdot \frac{f}{2} = cx37 \quad (3.34)$$

$$\begin{aligned} \left(h(u^2 + v^2) \right)_e &= h_{i+1,j} (u_{i+1,j}^2 + v_{i+1,j}^2) \\ &= h_{i+1,j} \cdot cx32 \end{aligned} \quad (3.35)$$

$$\begin{aligned} \left(h(u^2 + v^2) \right)_w &= h_{i-1,j} (u_{i-1,j}^2 + v_{i-1,j}^2) \\ &= h_{i-1,j} \cdot cx34 \end{aligned} \quad (3.36)$$

(3.34) ~ (3.36) より

$$cx37 \cdot (h_{i+1,j} \cdot cx32 - h_{i-1,j} \cdot cx34) = cx38 \quad (3.37)$$

(3.26), (3.33), (3.37) より

$$\iiint \frac{\partial(\overline{-u'^2}h)}{\partial x} dt dx dy = \Delta t \cdot 2\Delta y \cdot (cx36 - cx38) = cx3 \quad (3.38)$$

(y 方向)

$$\iiint \frac{\partial(\overline{-u'v'}h)}{\partial y} dt dx dy = \Delta t \cdot 2\Delta x \left\{ (\overline{-u'v'}h)_n - (\overline{-u'v'}h)_s \right\} \quad (3.39)$$

$$\begin{aligned} \overline{-u'v'}h &= D_h h \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) - \frac{2}{3} kh \delta_{1,2} \\ &= \alpha h^2 u_* \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ &= 2 \cdot 0.3 \cdot \sqrt{\frac{f}{2}} \cdot h^2 \sqrt{u^2 + v^2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \end{aligned} \quad (3.40)$$

$$2 \cdot 0.3 \cdot \sqrt{\frac{f}{2}} = cx41 \quad (3.41)$$

$$\begin{aligned} \left(h^2 \sqrt{u^2 + v^2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right)_n &= h_{i,j+1}^2 \sqrt{u_{i,j+1}^2 + v_{i,j+1}^2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)_{i,j+1} \\ \therefore \therefore \overline{u}_{i,j+1}^2 + v_{i,j+1}^2 &= \left(\frac{u_{i,j+2} + u_{i,j}}{2} \right)^2 + \left(\frac{v_{i+1,j+1} + v_{i-1,j+1}}{2} \right)^2 = cx42 \end{aligned} \quad (3.42)$$

$$h_{i,j+1} = \frac{1}{4} (h_{i+1,j+2} + h_{i+1,j} + h_{i-1,j+2} + h_{i-1,j-1}) = hx1 \quad (3.43)$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)_{i,j+1} = \frac{u_{i,j+2} - u_{i,j}}{2\Delta y} + \frac{v_{i+1,j+1} - v_{i-1,j+1}}{2\Delta x} = cx43 \quad (3.44)$$

(3.42) ~ (3.44) より ,

$$\left(h^2 \sqrt{u^2 + v^2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right)_n = hx1^2 \sqrt{cx42} \cdot cx43 \quad (3.45)$$

$$\begin{aligned} & \left(h^2 \sqrt{u^2 + v^2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right)_s = h_{i,j-1}^2 \sqrt{u_{i,j-1}^2 + v_{i,j-1}^2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)_{i,j-1} \\ & \vdash \quad \vdash \quad \text{て} \quad , \quad u_{i,j-1}^2 + v_{i,j-1}^2 = \left(\frac{u_{i,j} + u_{i,j-2}}{2} \right)^2 + \left(\frac{v_{i+1,j-1} + v_{i-1,j-1}}{2} \right)^2 = cx44 \end{aligned} \quad (3.46)$$

$$h_{i,j-1} = \frac{1}{4} (h_{i+1,j} + h_{i+1,j-2} + h_{i-1,j} + h_{i-1,j-2}) = hx2 \quad (3.47)$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)_{i,j-1} = \frac{u_{i,j+2} - u_{i,j}}{2\Delta y} + \frac{v_{i+1,j-1} - v_{i-1,j-1}}{2\Delta x} = cx45 \quad (3.48)$$

(3.46) ~ (3.48) より ,

$$\left(h^2 \sqrt{u^2 + v^2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right)_s = hx2^2 \sqrt{cx44} \cdot cx45 \quad (3.49)$$

(3.39) ~ (3.49) より

$$\begin{aligned} & \iiint \frac{\partial(-u'v'h)}{\partial y} dt dx dy \\ & = \Delta t \cdot 2\Delta x \cdot cx41 \{ hx1^2 \sqrt{cx42} \cdot cx43 - hx2^2 \sqrt{cx44} \cdot cx45 \} = cx4 \end{aligned} \quad (3.50)$$

$$CIMX = cx1 + cx2 + cx3 + cx4 \quad (3.51)$$

拡散項(DIFU)

(x 方向)

$$\iiint \frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{\partial u}{\partial x} \right) dt dx dy = \Delta t \cdot 2\Delta y \left\{ \left(h \frac{\partial u}{\partial x} \right)_e - \left(h \frac{\partial u}{\partial x} \right)_w \right\} \quad (3.52)$$

$$\begin{aligned} \Delta t \cdot 2\Delta y \cdot \left(h \frac{\partial u}{\partial x} \right)_e &= \Delta t \cdot 2\Delta y \cdot h_{i+1,j} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_{i+1,j} \\ &= \Delta t \cdot 2\Delta y \cdot h_{i+1,j} \cdot \frac{u_{i+2,j} - u_{i,j}}{2\Delta x} = bx1 \end{aligned} \quad (3.53)$$

$$\begin{aligned} \Delta t \cdot 2\Delta y \cdot \left(h \frac{\partial u}{\partial x} \right)_w &= \Delta t \cdot 2\Delta y \cdot h_{i-1,j} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_{i-1,j} \\ &= \Delta t \cdot 2\Delta y \cdot h_{i-1,j} \cdot \frac{u_{i,j} - u_{i-2,j}}{2\Delta x} = bx2 \end{aligned} \quad (3.54)$$

$$bx1 - bx2 = DIFUX \quad (3.55)$$

(y 方向)

$$\iiint \frac{\partial}{\partial y} \left(h \frac{\partial u}{\partial y} \right) dt dx dy = \Delta t \cdot 2\Delta x \left\{ \left(h \frac{\partial u}{\partial y} \right)_n - \left(h \frac{\partial u}{\partial y} \right)_s \right\} \quad (3.56)$$

$$\begin{aligned} \Delta t \cdot 2\Delta x \cdot \left(h \frac{\partial u}{\partial y} \right)_n &= h_{i,j+1} \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_{i,j+1} \\ &= \Delta t \cdot 2\Delta x \cdot hx1 \cdot \frac{u_{i,j+2} - u_{i,j}}{2\Delta y} = by1 \end{aligned} \quad (3.57)$$

$$\begin{aligned} \Delta t \cdot 2\Delta x \cdot \left(h \frac{\partial u}{\partial y} \right)_s &= \Delta t \cdot 2\Delta x \cdot h_{i,j-1} \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_{i,j-1} \\ &= \Delta t \cdot 2\Delta x \cdot hx2 \cdot \frac{u_{i,j} - u_{i,j-2}}{2\Delta y} = by2 \end{aligned} \quad (3.58)$$

$$by1 - by2 = DIFUY \quad (3.59)$$

(3.56) ~ (3.59) より ,

$$DIFU = DIFUX + DIFUY \quad (3.60)$$

(3.10) ~ (3.60) より ,

$$\begin{aligned} & 2\Delta x \cdot 2\Delta y (M_{i,j}^{n+1} - M_{i,j}^n) + CNVUX + CNVUY + HIDX = CIMX + DIFU \\ & M_{i,j}^{n+1} = M_{i,j}^n + \frac{1}{2\Delta x \cdot 2\Delta y} (-CNVUX - CNVUY - HIDX + CIMX + DIFU) \end{aligned} \quad (3.61)$$

(y 方向運動方程式)

非定常項

$$\iiint \frac{\partial N}{\partial t} dt dx dy = 2\Delta x \cdot 2\Delta y (N_{i,j}^{n+1} - N_{i,j}^n) \quad (3.62)$$

対流項 ($\beta = 1.0$)

x 方向(CNVVX)

$$\iiint \frac{\partial (uN)}{\partial x} dt dx dy = \Delta t \cdot 2\Delta y \{(uN)_e - (uN)_w\} \quad (3.63)$$

風上差分を適用

$$u_e = u_{i+1,j} \geq 0 \text{ のとき} \quad CNVVX_e = (uN)_e = u_{i+1,j} \cdot N_{i,j} \quad (3.64)$$

$$u_e = u_{i+1,j} < 0 \text{ のとき} \quad CNVVX_e = (uN)_e = u_{i+1,j} \cdot N_{i+2,j} \quad (3.65)$$

$$\text{ただし , } u_{i+1,j} = \frac{u_{i+1,j+1} + u_{i+1,j-1}}{2}$$

$$u_w = u_{i-1,j} \geq 0 \text{ のとき} \quad CNVVX_w = (uN)_w = u_{i-1,j} \cdot N_{i-2,j} \quad (3.66)$$

$$u_w = u_{i-1,j} < 0 \text{ のとき} \quad CNVVX_w = (uN)_w = u_{i-1,j} \cdot N_{i,j} \quad (3.67)$$

ただし , $u_{i-1,j} = \frac{u_{i-1,j+1} + u_{i-1,j-1}}{2}$

(3.62) ~ (3.66) より ,

$$CNVVX = \Delta t \cdot 2\Delta y (CNVVX_e - CNVVX_w) \quad (3.68)$$

y 方向($CNVVY$)

$$\iiint \frac{\partial(vN)}{\partial y} dt dx dy = \Delta t \cdot 2\Delta x \{(vN)_n - (vN)_s\} \quad (3.69)$$

風上差分を適用

$$v_n = v_{i,j+1} \geq 0 \text{ のとき} \quad CNVVY_n = (vM)_n = v_{i,j+1} \cdot N_{i,j} \quad (3.70)$$

$$v_n = v_{i,j+1} < 0 \text{ のとき} \quad CNVVY_n = (vM)_n = v_{i,j+1} \cdot N_{i,j+2} \quad (3.71)$$

ただし , $v_{i,j+1} = \frac{v_{i,j+2} + v_{i,j}}{2}$

$$v_s = v_{i,j-1} \geq 0 \text{ のとき} \quad CNVVY_s = (vN)_s = v_{i,j-1} \cdot N_{i,j-2} \quad (3.72)$$

$$v_s = v_{i,j-1} < 0 \text{ のとき} \quad CNVVY_s = (vN)_s = v_{i,j-1} \cdot N_{i,j} \quad (3.73)$$

ただし , $v_{i,j-1} = \frac{v_{i,j} + v_{i,j-2}}{2}$

(3.68) ~ (3.72) より ,

$$CNVVY = \Delta t \cdot 2\Delta x (CNVVY_n - CNVVY_s) \quad (3.74)$$

圧力項(HIDY)

$$\begin{aligned} \iiint gh \frac{\partial h}{\partial y} dt dx dy &= \iiint \frac{1}{2} g \frac{\partial h^2}{\partial y} dt dx dy \\ &= \frac{g}{2} \Delta t \cdot 2\Delta x \{(h^2)_n - (h^2)_s\} \end{aligned}$$

$$= \frac{g}{2} \Delta t \cdot 2 \Delta x (h_{i,j+1}^2 - h_{i,j-1}^2) = HIDY \quad (3.75)$$

底面摩擦項

$$\iiint -\frac{f}{2} v \sqrt{u^2 + v^2} dt dx dy = \Delta t \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \left(-\frac{f}{2} \right) \cdot v_{i,j} \sqrt{u_{i,j}^2 + v_{i,j}^2} = cy2 \quad (3.76)$$

$$\text{ただし}, u_{i,j} = \frac{1}{4} (u_{i+1,j+1} + u_{i+1,j-1} + u_{i-1,j+1} + u_{i-1,j-1})$$

レイノルズ応力項

(x 方向)

$$\iiint \frac{\partial(-u'v'h)}{\partial x} dt dx dy = \Delta t \cdot 2 \Delta x \left\{ (-u'v'h)_e - (-u'v'h)_w \right\} \quad (3.77)$$

$$-u'v'h = D_h h \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) - \frac{2}{3} kh \delta_{1,2}$$

$$= \alpha h^2 u_* \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)$$

$$= 2 \cdot 0.3 \cdot \sqrt{\frac{f}{2}} \cdot h^2 \sqrt{u^2 + v^2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (3.78)$$

$$2 \cdot 0.3 \cdot \sqrt{\frac{f}{2}} = cy31 \quad (3.79)$$

$$\left(h^2 \sqrt{u^2 + v^2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right)_e = h_{i+1,j}^2 \sqrt{u_{i+1,j}^2 + v_{i+1,j}^2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)_{i+1,j}$$

$$\therefore \therefore \therefore, u_{i+1,j}^2 + v_{i+1,j}^2 = \left(\frac{u_{i+1,j+1} + u_{i+1,j-1}}{2} \right)^2 + \left(\frac{v_{i+2,j} + v_{i,j}}{2} \right)^2 = cy32 \quad (3.80)$$

$$h_{i+1,j} = \frac{1}{4} (h_{i+2,j+1} + h_{i+2,j-1} + h_{i-1,j+1} + h_{i-1,j-1}) = hy1 \quad (3.81)$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)_{i+1,j} = \frac{u_{i+1,j+1} - u_{i+1,j-1}}{2\Delta y} + \frac{v_{i+2,j} - v_{i,j}}{2\Delta x} = cy33 \quad (3.82)$$

(3.80) ~ (3.82) より ,

$$\left(h^2 \sqrt{u^2 + v^2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right)_e = hy1^2 \sqrt{cy32} \cdot cy33 \quad (3.83)$$

$$\left(h^2 \sqrt{u^2 + v^2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right)_w = h_{i-1,j}^2 \sqrt{u_{i-1,j}^2 + v_{i-1,j}^2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)_{i-1,j}$$

$$u_{i-1,j}^2 + v_{i-1,j}^2 = \left(\frac{u_{i-1,j+1} + u_{i-1,j-1}}{2} \right)^2 + \left(\frac{v_{i,j} + v_{i-2,j}}{2} \right)^2 = cy34 \quad (3.84)$$

$$h_{i-1,j} = \frac{1}{4} (h_{i,j+1} + h_{i,j-1} + h_{i-2,j+1} + h_{i-2,j-1}) = hy2 \quad (3.85)$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)_{i-1,j} = \frac{u_{i-1,j+1} - u_{i-1,j-1}}{2\Delta y} + \frac{v_{i,j} - v_{i-2,j}}{2\Delta x} = cy35 \quad (3.86)$$

(3.84) ~ (3.86) より ,

$$\left(h^2 \sqrt{u^2 + v^2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right)_w = hy2^2 \sqrt{cy34} \cdot cy35 \quad (3.87)$$

(3.77) ~ (3.87) より

$$\begin{aligned} & \iiint \frac{\partial(-u'v'h)}{\partial x} dt dx dy \\ &= \Delta t \cdot 2\Delta y \cdot cy31 \left\{ hy1^2 \sqrt{cy32} \cdot cy33 - hy2^2 \sqrt{cy34} \cdot cy35 \right\} = cy3 \end{aligned} \quad (3.88)$$

(y 方向)

$$\iiint \frac{\partial(\overline{-v'^2}h)}{\partial y} dt dx dy = \Delta t \cdot 2\Delta x \left(\overline{-v'^2}h_n - \overline{-v'^2}h_s \right) \quad (3.89)$$

$$\begin{aligned} \overline{-v'^2}h &= \overline{-v'v'}h = D_h h \left(\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{2}{3} kh \delta_{1,1} \\ &= \alpha h^2 u_* \cdot 2 \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \cdot 2.07 \cdot h u_*^2 \\ &= 2 \cdot 0.3 \cdot \sqrt{\frac{f}{2}} \cdot h^2 \sqrt{u^2 + v^2} \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \cdot 2.07 \cdot \frac{f}{2} \cdot h \cdot (u^2 + v^2) \end{aligned} \quad (3.90)$$

(式(3.90) 右辺第1項の離散化)

$$2 \cdot 0.3 \cdot \sqrt{\frac{f}{2}} = cy41 \quad (3.91)$$

$$\begin{aligned} \left(h^2 \sqrt{u^2 + v^2} \frac{\partial v}{\partial y} \right)_n &= h_{i,j+1}^2 \sqrt{u_{i,j+1}^2 + v_{i,j+1}^2} \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)_{i,j+1} \\ \text{左辺}, u_{i,j+1}^2 + v_{i,j+1}^2 &= \left(\frac{u_{i+1,j+1} + u_{i-1,j+1}}{2} \right)^2 + \left(\frac{v_{i,j+2} + v_{i,j}}{2} \right)^2 = cy42 \end{aligned} \quad (3.92)$$

$$\left(h^2 \sqrt{u^2 + v^2} \frac{\partial v}{\partial y} \right)_n = h_{i,j+1}^2 \sqrt{cy42} \frac{v_{i,j+2} - v_{i,j}}{2\Delta y} = cy43 \quad (3.93)$$

$$\begin{aligned} \left(h^2 \sqrt{u^2 + v^2} \frac{\partial v}{\partial y} \right)_s &= h_{i,j-1}^2 \sqrt{u_{i,j-1}^2 + v_{i,j-1}^2} \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)_{i,j-1} \\ \text{左辺}, u_{i,j-1}^2 + v_{i,j-1}^2 &= \left(\frac{u_{i+1,j-1} + u_{i-1,j-1}}{2} \right)^2 + \left(\frac{v_{i,j} + v_{i,j-2}}{2} \right)^2 = cy44 \end{aligned} \quad (3.94)$$

$$\left(h^2 \sqrt{u^2 + v^2} \frac{\partial u}{\partial x} \right)_s = h_{i,j-1}^2 \sqrt{cy44} \frac{v_{i,j} - v_{i,j-2}}{2\Delta y} = cy45 \quad (3.95)$$

(3.90) ~ (3.95) より

$$cy41 \cdot (cy43 - cy45) = cy46 \quad (3.96)$$

(式(3.90) 右辺第 2 項の離散化)

$$\frac{2}{3} \cdot 2.07 \cdot \frac{f}{2} = cy47 \quad (3.97)$$

$$\begin{aligned} (h(u^2 + v^2))_n &= h_{i,j+1}(u_{i,j+1}^2 + v_{i,j+1}^2) \\ &= h_{i,j+1} \cdot cy42 \end{aligned} \quad (3.98)$$

$$\begin{aligned} (h(u^2 + v^2))_s &= h_{i,j-1}(u_{i,j-1}^2 + v_{i,j-1}^2) \\ &= h_{i,j-1} \cdot cy44 \end{aligned} \quad (3.99)$$

(3.97) ~ (3.99) より

$$cy47 \cdot (h_{i,j+1} \cdot cy42 - h_{i,j-1} \cdot cy44) = cy48 \quad (3.100)$$

(3.89), (3.96), (3.100) より

$$\iiint \frac{\partial(\overline{-u'^2}h)}{\partial x} dt dx dy = \Delta t \cdot 2\Delta x \cdot (cy46 - cy48) = cy4 \quad (3.101)$$

$$CIMY = cy2 + cy3 + cy4 \quad (3.102)$$

拡散項(DIFV)

(x 方向)

$$\iiint \frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{\partial v}{\partial x} \right) dt dx dy = \Delta t \cdot 2\Delta y \left\{ \left(h \frac{\partial v}{\partial x} \right)_e - \left(h \frac{\partial v}{\partial x} \right)_w \right\} \quad (3.103)$$

$$\begin{aligned} \Delta t \cdot 2\Delta y \cdot \left(h \frac{\partial v}{\partial x} \right)_e &= \Delta t \cdot 2\Delta y \cdot h_{i+1,j} \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)_{i+1,j} \\ &= \Delta t \cdot 2\Delta y \cdot hy1 \cdot \frac{v_{i+2,j} - v_{i,j}}{2\Delta x} = bx3 \end{aligned} \quad (3.104)$$

$$\begin{aligned} \Delta t \cdot 2\Delta y \cdot \left(h \frac{\partial u}{\partial x} \right)_w &= \Delta t \cdot 2\Delta y \cdot h_{i-1,j} \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)_{i-1,j} \\ &= \Delta t \cdot 2\Delta y \cdot hy2 \cdot \frac{v_{i,j} - v_{i-2,j}}{2\Delta x} = bx3 \end{aligned} \quad (3.105)$$

$$bx3 - bx4 = DIFVX \quad (3.106)$$

(y方向)

$$\iiint \frac{\partial}{\partial y} \left(h \frac{\partial v}{\partial y} \right) dt dx dy = \Delta t \cdot 2\Delta x \left\{ \left(h \frac{\partial v}{\partial y} \right)_n - \left(h \frac{\partial v}{\partial y} \right)_s \right\} \quad (3.107)$$

$$\begin{aligned} \Delta t \cdot 2\Delta x \cdot \left(h \frac{\partial v}{\partial y} \right)_n &= h_{i,j+1} \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)_{i,j+1} \\ &= \Delta t \cdot 2\Delta x \cdot h_{i,j+1} \cdot \frac{v_{i,j+2} - v_{i,j}}{2\Delta y} = by3 \end{aligned} \quad (3.108)$$

$$\begin{aligned} \Delta t \cdot 2\Delta x \cdot \left(h \frac{\partial v}{\partial y} \right)_s &= \Delta t \cdot 2\Delta x \cdot h_{i,j-1} \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)_{i,j-1} \\ &= \Delta t \cdot 2\Delta x \cdot h_{i,j-1} \cdot \frac{v_{i,j} - v_{i,j-2}}{2\Delta y} = by4 \end{aligned} \quad (3.109)$$

$$by3 - by4 = DIFVY \quad (3.110)$$

(3.107) ~ (3.110) より ,

$$DIFV = DIFVX + DIFVY \quad (3.111)$$

(3.62) ~ (3.111)より ,

$$2\Delta x \cdot 2\Delta y (N_{i,j}^{n+1} - N_{i,j}^n) + CNVVX + CNVYY + HIDY = CIMY + DIFV$$

$$N_{i,j}^{n+1} = N_{i,j}^n + \frac{1}{2\Delta x \cdot 2\Delta y} (-CNVVX - CNVYY - HIDY + CIMY + DIFV) \quad (3.112)$$

3.3 計算条件

3.3.1 初期条件

ここで , 計算領域を Fig.3-3 に示す . 計算領域の左端は $x=0.0\text{cm}$, 右端は $x=24.6\text{cm}$, 下端は $y=0.0\text{cm}$, 上端は $y=15.8\text{cm}$ で , アクリル板の厚さ : $s=0.4\text{cm}$ も計算上で考慮した .

魚巣部

$$M = 0 \quad , \quad N = 0 \quad , \quad h = h_e$$

主流部

$$M = M_0 \quad , \quad N = 0 \quad , \quad h = h_e$$

3.3.2 境界条件

主流部上流端

$$M = M_0 \quad , \quad N = 0$$

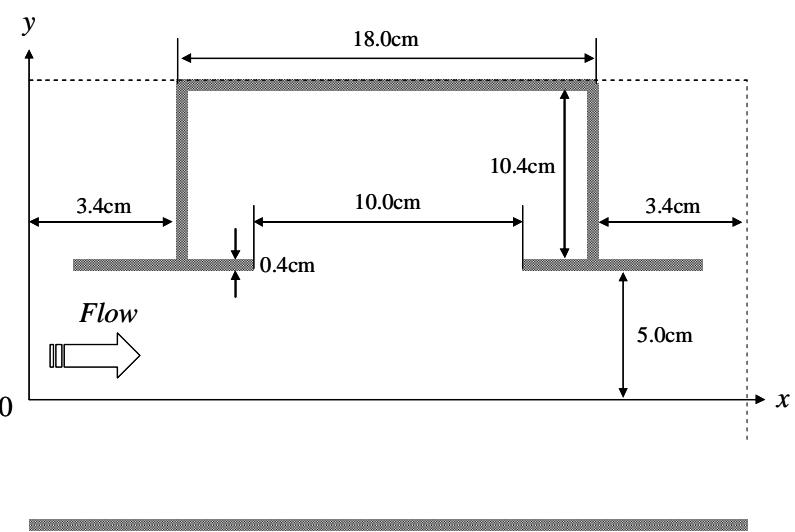


Fig.3-3 計算領域

主流部下流端

$$h = h_e \quad , \quad \frac{\partial M}{\partial x} = \frac{\partial N}{\partial x} = 0$$

主流部右岸 ($y = 0$) : *slip* 条件

壁面 : *non-slip* 条件

3.3.3 パラメータ値の設定

数値実験で共通して使用した物理パラメータを Table.3-1 に示す .

Table.3-1 数値実験に用いた物理パラメータ

下流端水深 h_e (cm)	動粘性係数 ν (cm^2/s)	時間刻み t (s)	格子幅 x (cm)	格子幅 y (cm)	定数
4	0.01	5.0×10^{-5}	0.2	0.2	0.3

第4章 数値モデルの妥当性

本研究で求めた計算値と実測値を比較し、数値モデルの妥当性の検証を行う。ここで、実測値は、長さ5m、幅25cm、開口部長さ10cmのアクリル製長方形断面の循環式水路でRunと同じ条件で行ったものである。

またここで、計算結果と実測結果の比較、および後の計算結果の考察のため、Fig.4-1に示すような魚巣開口部始端を0とした $X'-Y'$ 座標を配置する。

4.1 流速 u の主流横方向時間平均流速分布による検証

Fig.4-2は、RunにおいてFig.4-1の $X'/a=0.2$ における水路横断面での X' 方向の時間平均流速分布を示したものである。計算値は主流部における流速がせん断層において減衰して主流部の約1/2になり、魚巣内でほぼ一定となるという実測値(山本, 2001)の特徴をほぼ再現していると考えられる。なお、ここで用いた U_0 は主流上流端における初期流速を表し、 u は X' 方向の流速を表している。

4.2 主流方向流速変動による検証

次に、魚巣内開口部における流速変動特性について考察する。Fig.4-3はRunのP点($X'=5\text{cm}$, $Y=-1\text{cm}$: Fig.4-1参照)における主流方向の流速変動に関する実測および計算結果である。変動の卓越周期は計算値(1.2s)は実測値(1.35s)より若干短く、その振幅については計算値が実測値より若干大きくなっているが、計算結果は、実測結果をよく再現している。

4.3 開口部上流端における主流横断方向の乱れ強度による検証

次に，魚巣開口部上流端における主流方向の乱れ強度分布について考察する Fig.4-4 は *Run* において Fig.4-1 の $X'/a = 0.2$ における水路横断面での流速 u の乱れ強度 u'/U_0 を， Fig.4-5 は同じ位置における流速 v の乱れ強度 v'/U_0 の分布である。まず u'/U_0 は，計算値は主流部では若干のずれはあるが，開口部付近で乱れが大きくなり，魚巣内ではほぼ一定になるという実測値(山本，2001)の特徴をほぼ再現していると考えられる。また， v'/U_0 であるが，開口部上で乱れが大きくなり，それ以外ではほぼ一定であるという実測値(山本，2001)の特徴をほぼ再現していると考えられる。

以上より，本モデルが魚巣の水理特性把握に有用であることが示された。

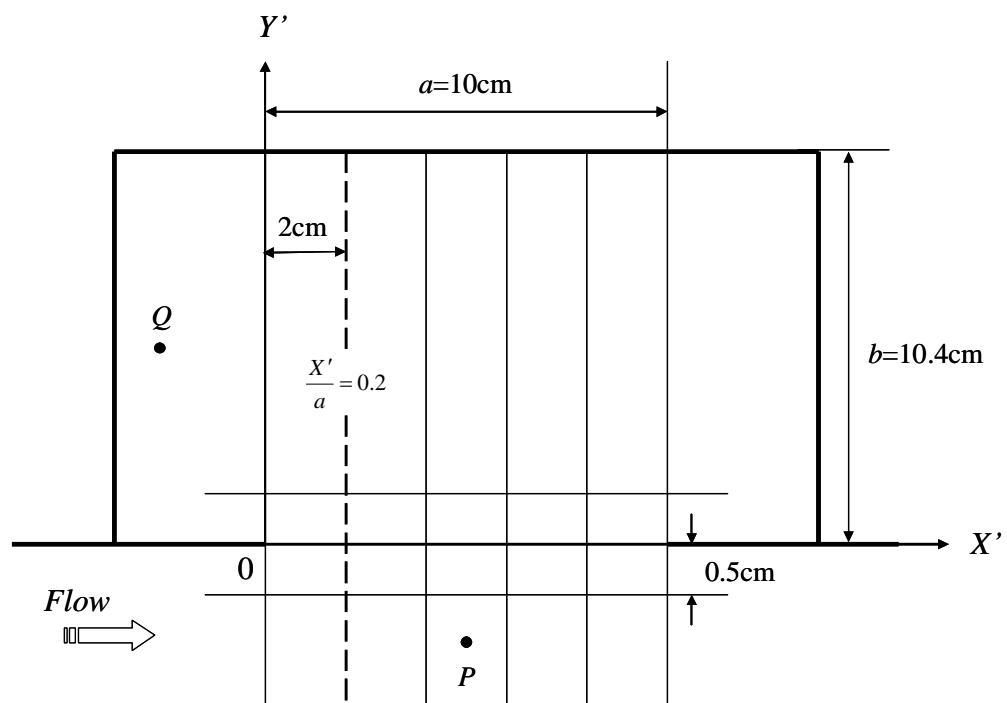


Fig.4-1 測定点

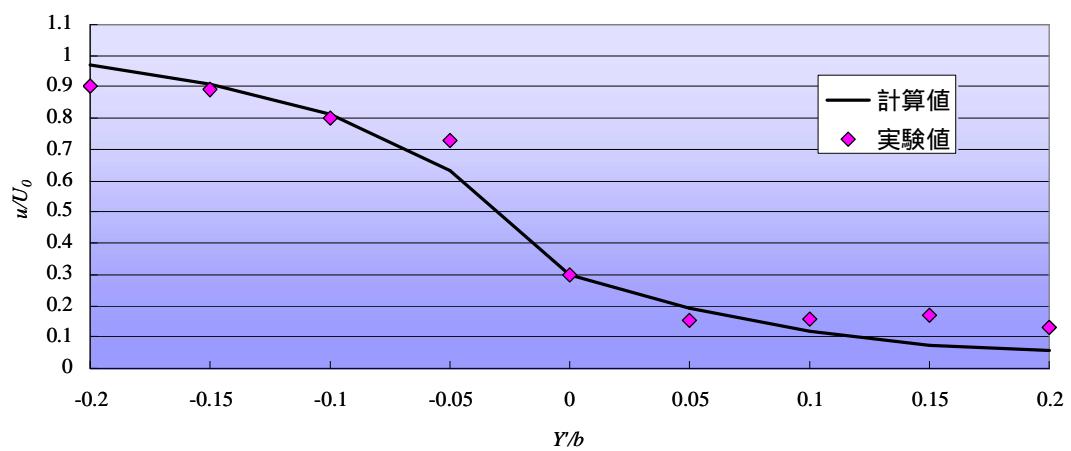


Fig.4-2 流速 u の主流横方向時間平均流速分布($X'/a=0.2$)

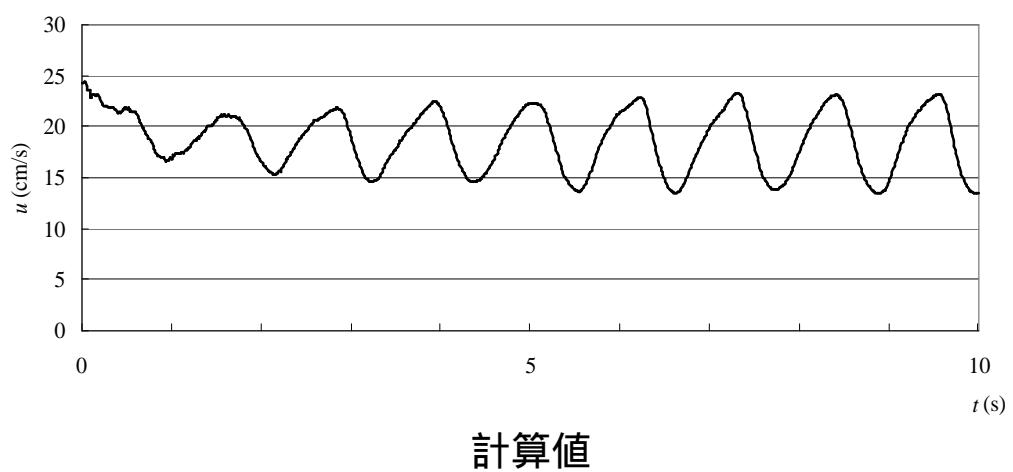
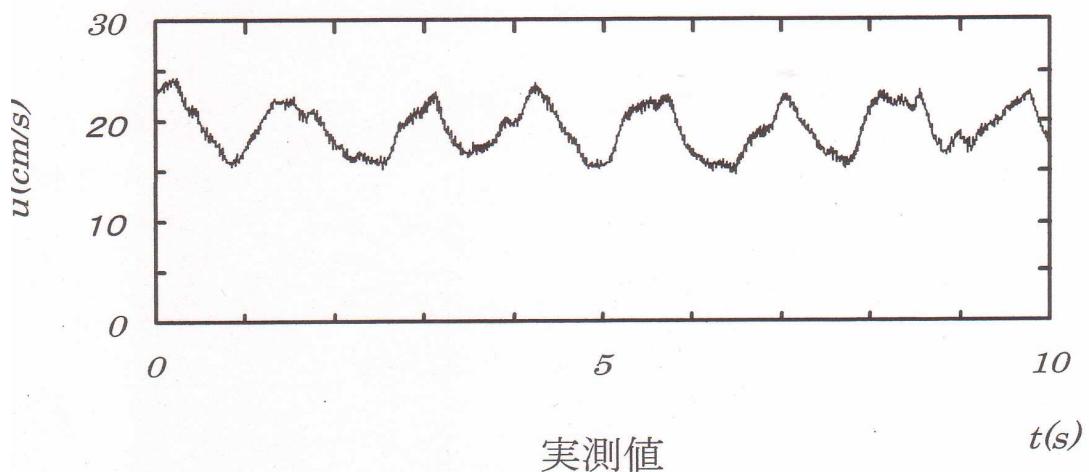


Fig.4-3 点Pでの流速(u)の変動

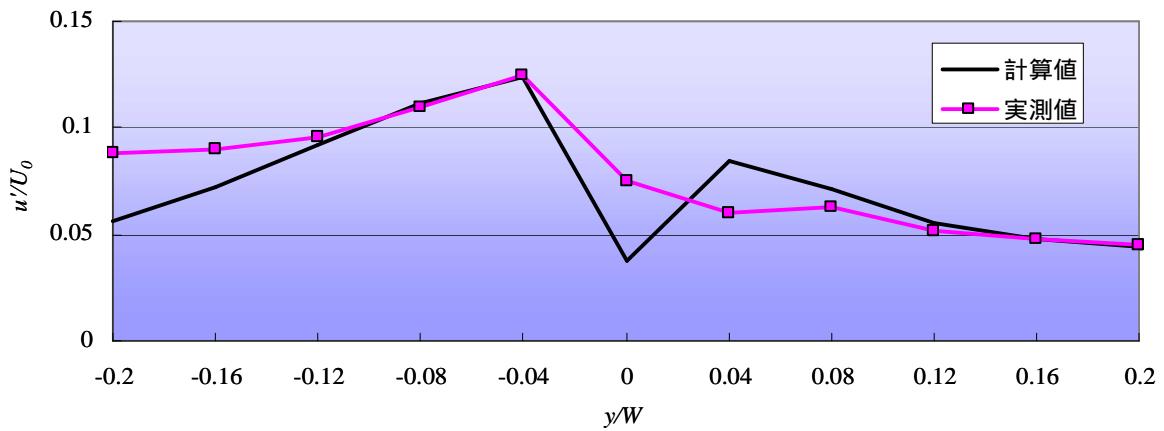


Fig.4-4 開口部上流端における主流横断方向の乱れ強度 u'/U_0

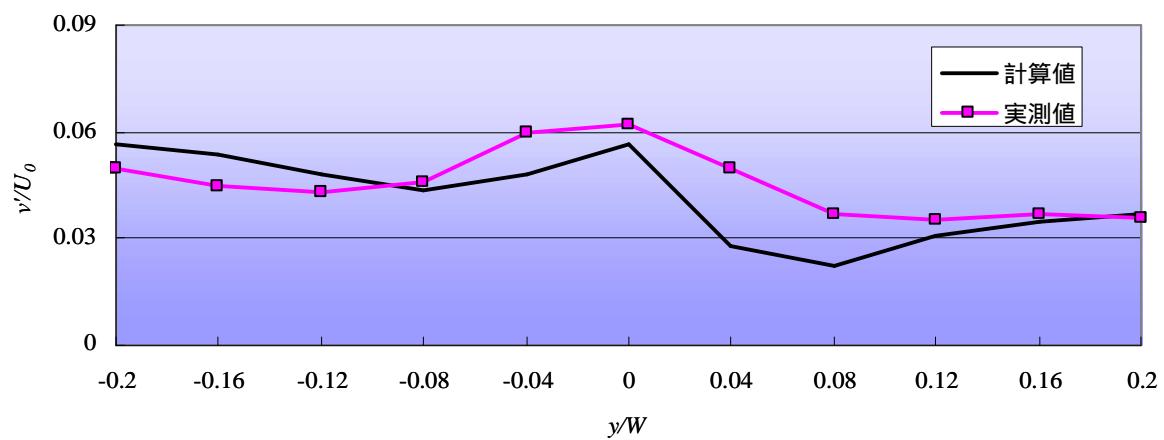


Fig.4-5 開口部上流端における主流横断方向の乱れ強度 v'/U_0

第 5 章 主流部および人工魚巣部の水理特性

ここから，主流部および人工魚巣部の水理特性について以下のような条件の元で数値実験を行い，それによって得られた結果を解析し，考察する．

- 1) フルード数を変化させて，フルード数の違いによる開水路主流部および人工魚巣部の水理特性についての検討．
- 2) 開口度(開口部長さ)を変化させて，開口度の違いによる開水路主流部および人工魚巣部の水理特性についての検討．
- 3) アスペクト比(魚巣奥行き)を変化させて，アスペクト比の違いによる開水路主流部および人工魚巣部の水理特性についての検討．

以上の 3 パターンについての数値実験条件を Table.5-1 ~ 5-3 に示す．ここで，レイノルズ数，フルード数をそれぞれ，

$$Re \equiv \frac{M_0}{\nu_l}, \quad Fr \equiv \frac{M_0}{h_e \sqrt{gh_e}} \text{とした}.$$

また，新たに開口度を $\frac{L}{D}$ ，アスペクト比を $\frac{W}{L}$ と定義する．

Table.5-1 実験条件1

	開口部幅	開口度	魚巣奥行き	初期流速	単位幅流量	フルード数	レイノルズ数
<i>Run</i>	<i>L</i>	<i>L/D</i>	<i>W</i>	<i>U₀</i>	<i>M₀</i>	<i>Fr</i>	<i>Re</i>
	(cm)		(cm)	(cm)	(cm ² /s)		
	10	0.56					
8.4		0.47					
14		0.78	10.4	25	100	0.4	10905
18		1.0					

Table.5-2 実験条件2

フルード数	開口部幅	魚巣奥行き	初期流速	単位幅流量	レイノルズ数
<i>Fr</i>	<i>L</i>	<i>W</i>	<i>U₀</i>	<i>M₀</i>	<i>Re</i>
	(cm)	(cm)	(cm)	(cm ² /s)	
0.1			6.3	25.2	2748
0.2			12.6	50.4	5496
0.3			19	76	8288
0.4	10	10.4	25	100	10905
0.5			31	124	13522
0.6			37	148	16140
0.7			41	164	17784

Table.5-3 実験条件3

	開口部幅	魚巣奥行き	アスペクト比	初期流速	単位幅流量	フルード数	レイノルズ数
<i>Run</i>	<i>L</i>	<i>W</i>	<i>W/L</i>	<i>U₀</i>	<i>M₀</i>	<i>Fr</i>	<i>Re</i>
	(cm)	(cm)		(cm)	(cm ² /s)		
1		10.4	1.04				
2	10	7.2	0.72	25	100	0.4	10905
3		15.2	1.52				

5.1 流速ベクトルと水深分布の時間変化

Fig.5-1, 5-2 はそれぞれ *Run* における、主流部および魚巣部の流速ベクトルおよび水深分布の時間変化である。図は計算開始の 9.8 秒後から 1 周期である 1.2 秒間を 0.2 秒間隔で描いたものである。9.8 秒後に開口部上流端から剥離渦が発生して成長しながら流下した後、魚巣内の主循環流と合体し、開口部下流端に主循環流の一部が衝突するまでの一連の渦の挙動が示されている。この一連の渦の挙動によって水深変動と流速変動が起こり、それによって主流部と魚巣内部との間に流体交換が行われているものと考えられる。また、10.8 秒後の分布から、開口部上の水深変化が一様になったときには流体交換がほぼなくなることがわかる。

上述のような一連の渦の挙動および水深分布の時間変化の傾向は、フルード数・開口度・アスペクト比等の条件が変わっても同様であった。

ただ、渦の発生周期は各条件により異なった。渦の発生周期はフルード数が大きいほど大きくなり、 $Fr=0.5$ で最大となった。また、開口度が小さいほど大きくなり、アスペクト比が大きいほど大きくなかった。

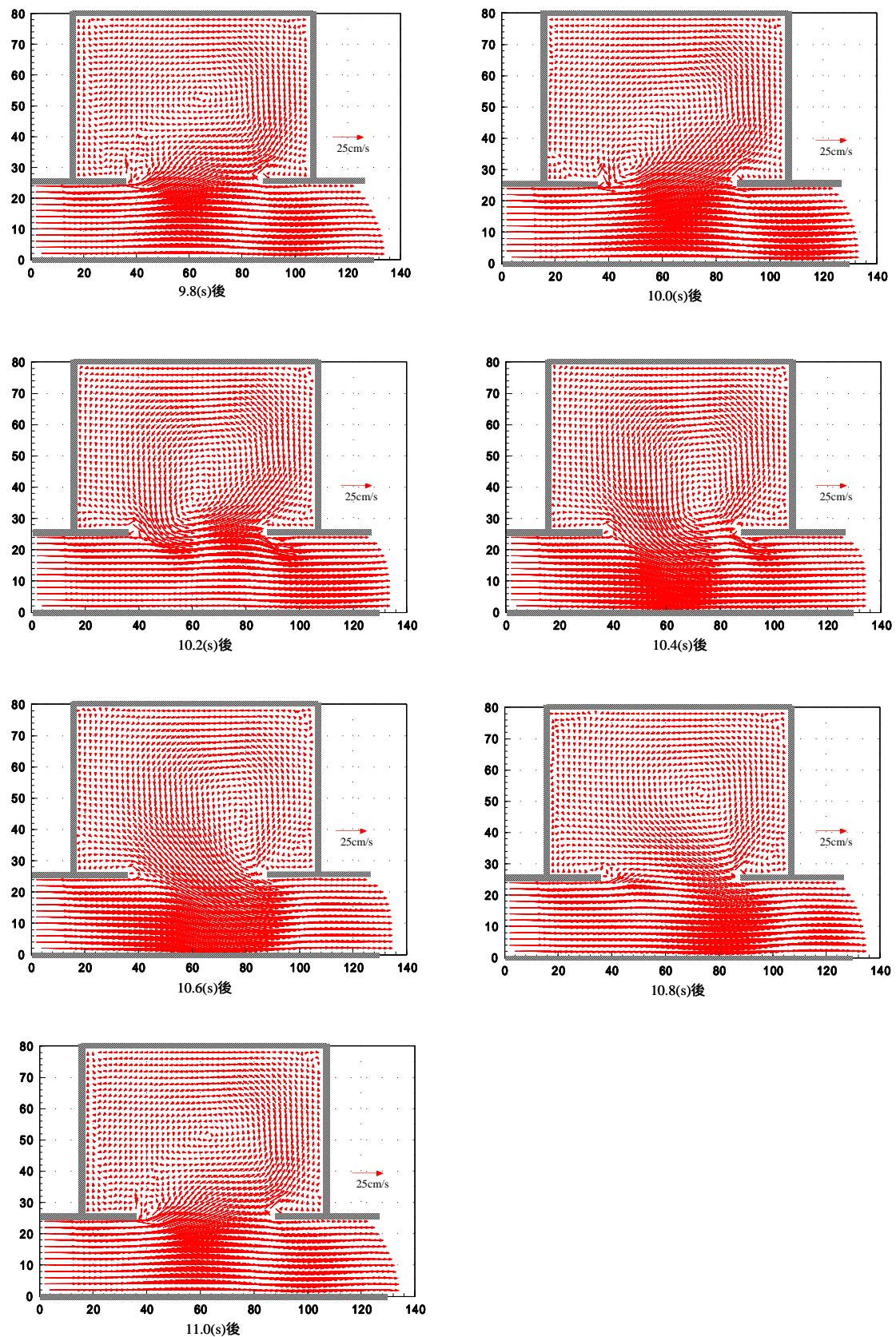


Fig.5-1 流速ベクトルの時間変化

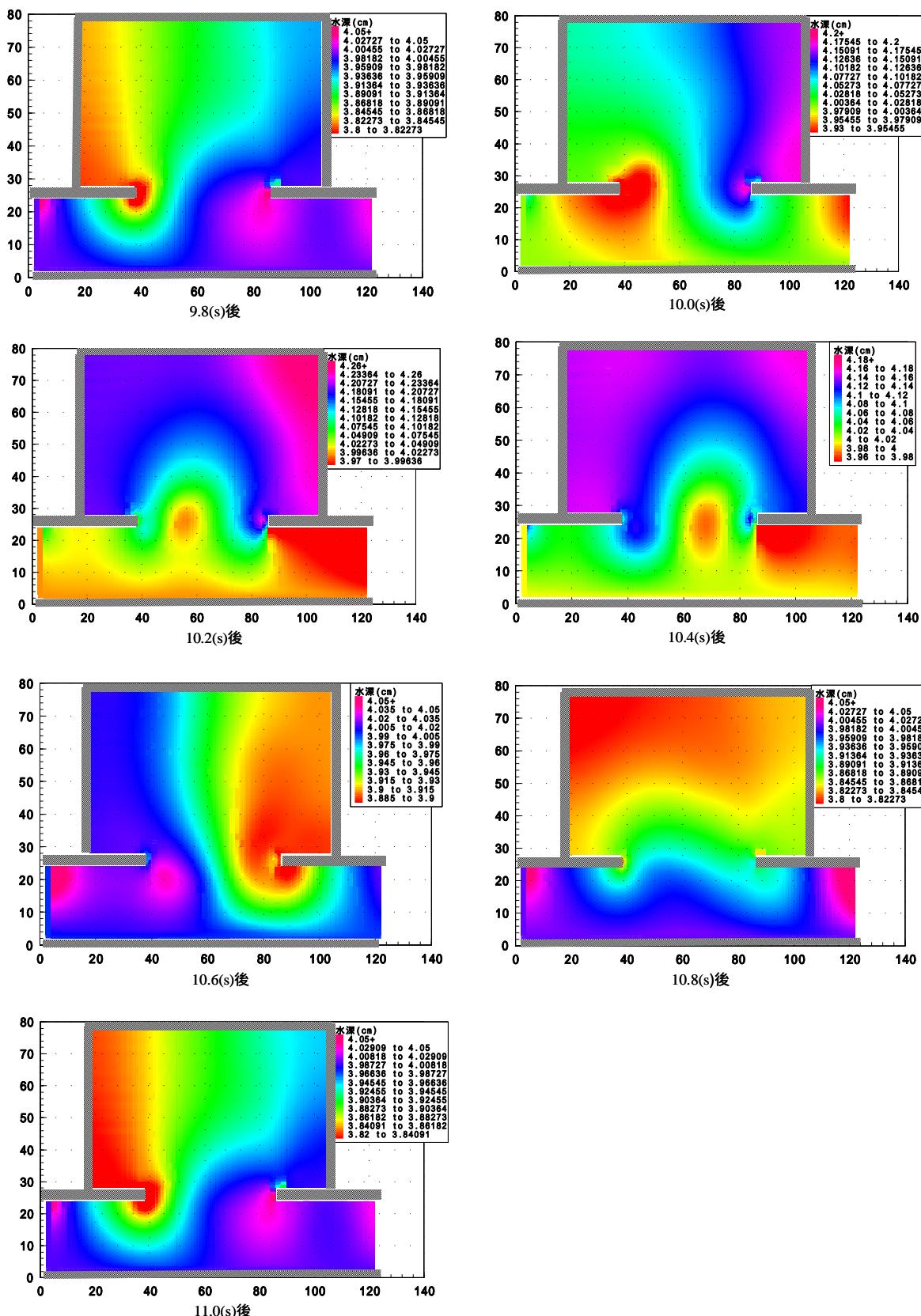


Fig.5-2 水深分布の時間変化

5.2 水面振動特性

5.2.1 水面変動

Fig.5-3 は $Run_1 \sim Run_4$, Fig.5-4 は $Fr=0.1, 0.4, 0.5, 0.7$, Fig.5-5 は $Run_1 \sim 3$ における , 開口部近傍の点 $Q(X=1\text{cm}, Y=5\text{cm})$ での水面高さ h である . また , Fig.5-6 ~ 5-8 はそれぞれの場合の水面変動の乱れ強度 h'/h_e である .

Table.5-4 は開口度別の計算結果である . 開口度が小さいほど水面変動の乱れ強度が大きくなっている . 卓越周期 $T(\text{s})$ については開口度が小さいほど周期が大きくなっている .

水面変動の乱れ強度は Run_1 が Run_4 の約 50% , Run_4 が約 25% となっており , 開口度が 0.56 を超えると乱れ強度に大きな影響を及ぼすものと考えられる .

Table.5-4 開口度別計算結果

	L/D	h'/h_e	$T(\text{s})$
Run_1	0.56	0.0944	1.2
Run_2	0.47	0.106	1.25
Run_3	0.78	0.0481	1.1
Run_4	1.0	0.023	0.9

Table.5-5 はフルード数別の計算結果である . フルード数の変化によっては , $Fr=0.5$ で水面変動の乱れ強度は最大となっている . 卓越周期についても $Fr=0.5$ で最大となり , 水面変動の乱れ強度と同じ傾向となっている . この結果は , 山本(2001)の報告と一致している .

また，フルード数が小さいときは水面変動の規模が小さいことがわかる．

Table.5-5 フルード数別計算結果

Fr	h'/h_e	$T(s)$
0.1	0.0112	0.6
0.2	0.038	0.8
0.3	0.0519	1.1
0.4	0.0944	1.2
0.5	0.097	1.2
0.6	0.0878	1
0.7	0.0416	0.9

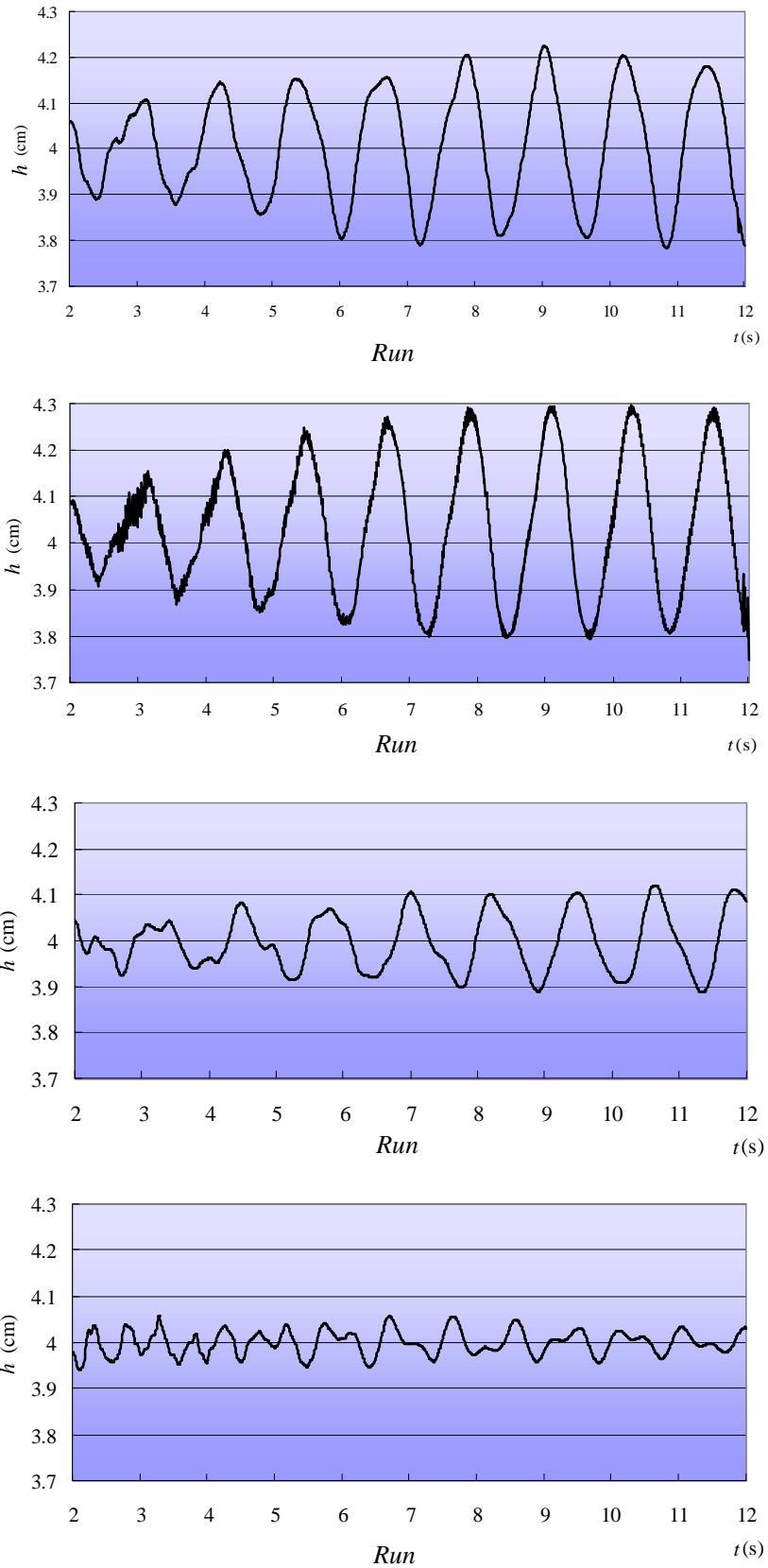
Table.5-6 はアスペクト比別の計算結果である．アスペクト比の変化によっては，アスペクト比が小さくなるほど水面変動の乱れ強度が大きくなっていることがわかり，卓越周期についてはアスペクト比が大きくなると周期が大きくなっている．

水面変動の乱れ強度は $Run - 2$ では $Run - 1$ よりやや大きいほどで大きな変化はないが， $Run - 3$ で $Run - 1$ の約 50%となり，アスペクト比が 1.04 より大きくなると乱れ強度に大きな影響を及ぼすことがわかる．

Table.5-6 アスペクト比別計算結果

	W/L	h'/h_e	$T(s)$
$Run - 1$	1.04	0.0944	1.2
$Run - 2$	0.72	0.1	1.1
$Run - 3$	1.52	0.0466	1.4

各条件における魚巣内の水面変動の周期は、魚巣内におけるセイシユの理論値(0.57s)の約2倍となっている。よって本研究の条件の範囲では、セイシユの2倍周期の変動が生じていると考えられる。



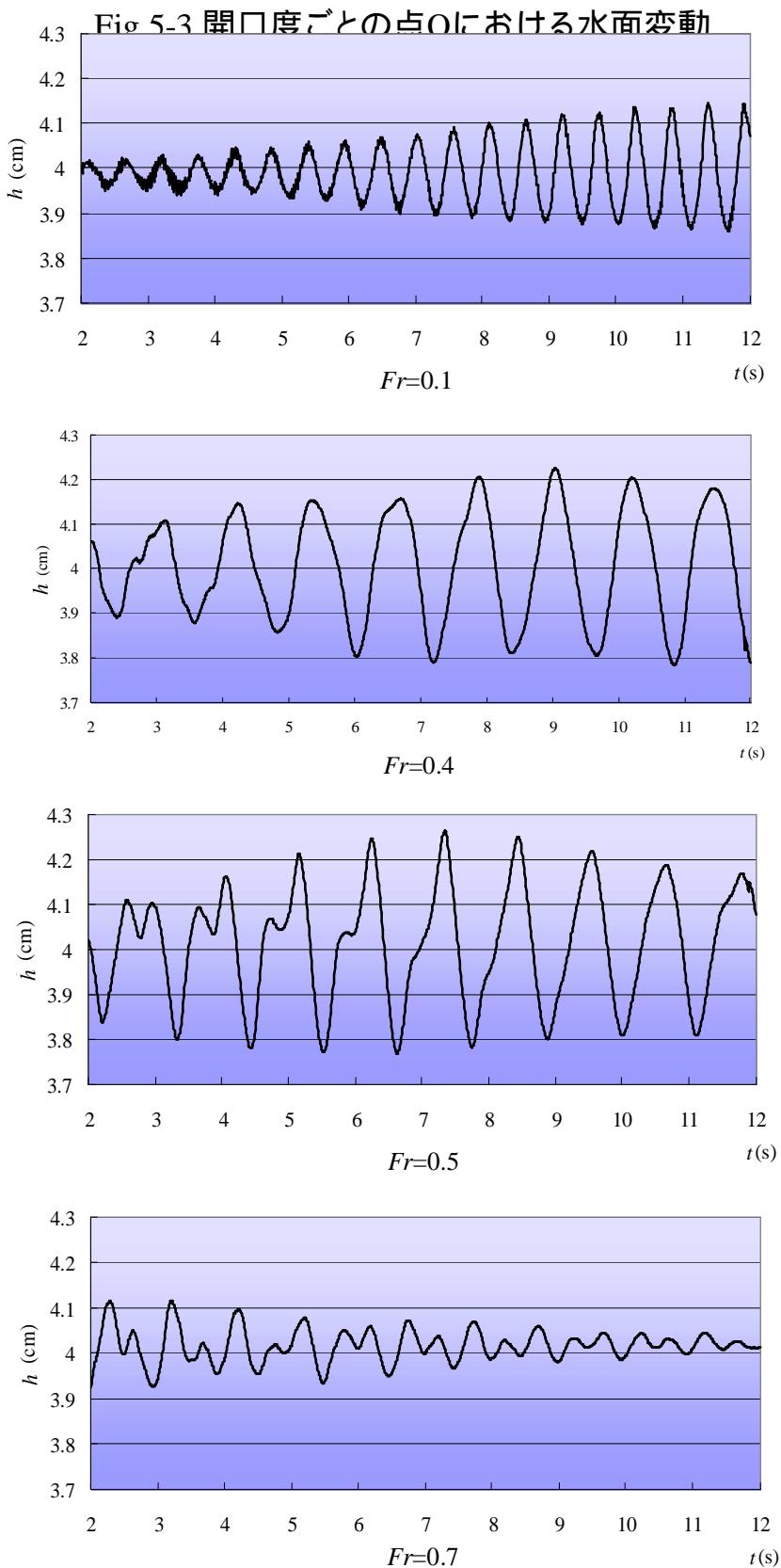


Fig. 5.4 フルード数ごとの占のにおける水面変動

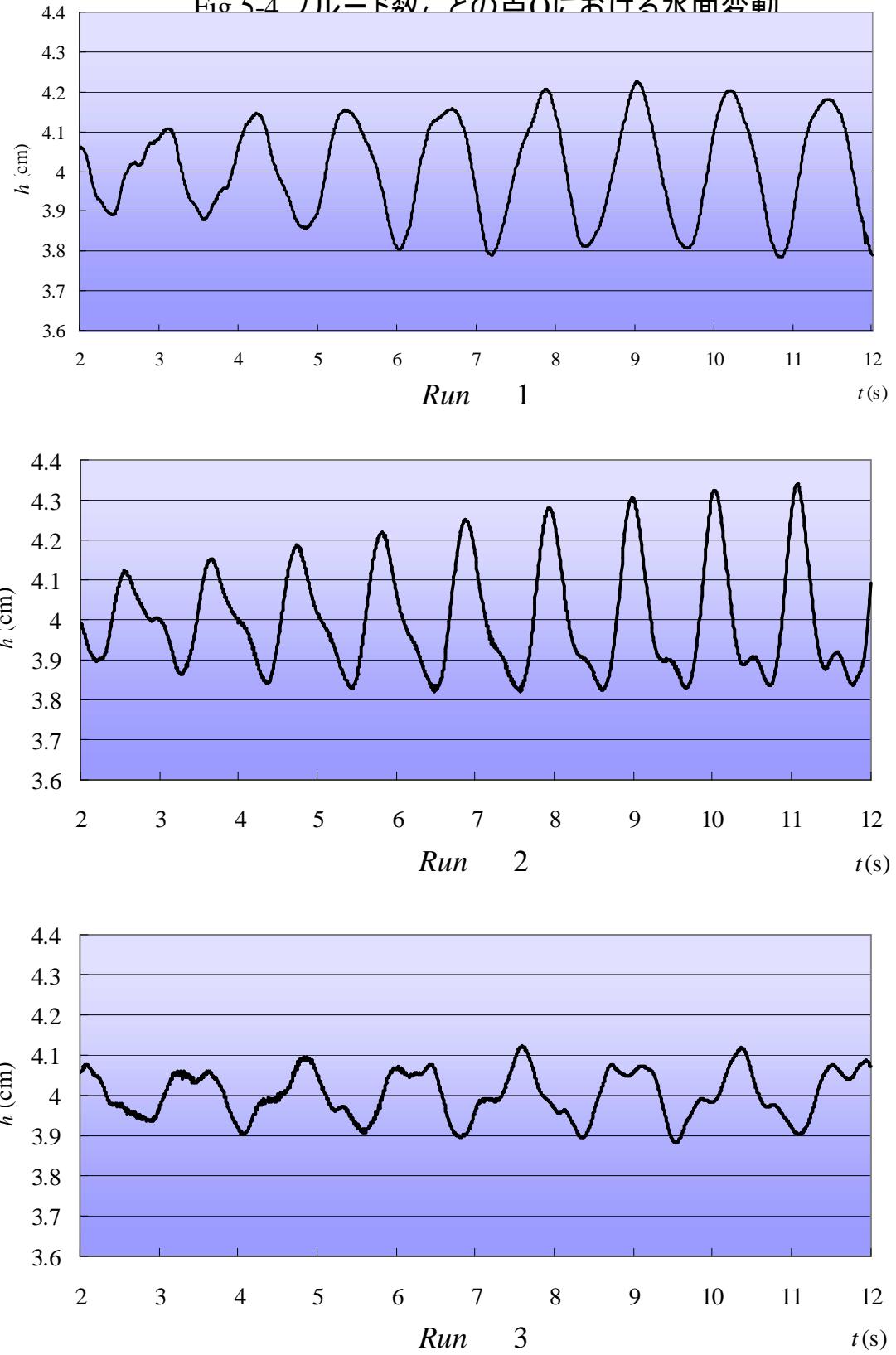


Fig.5-5 アスペクト比ごとの点Qにおける水面変動

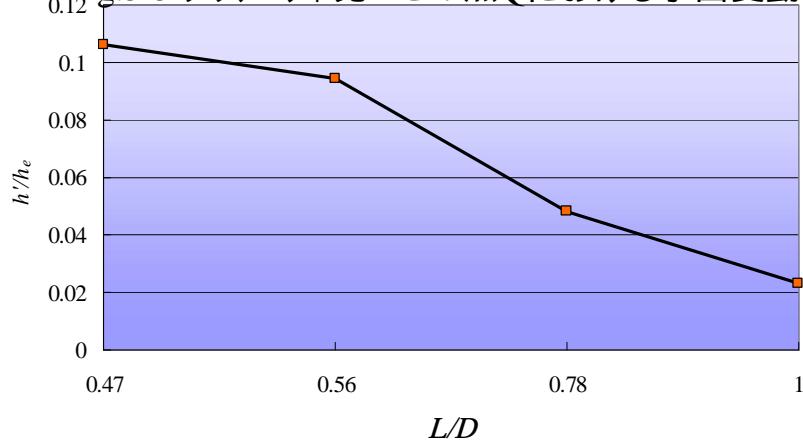


Fig.5-6 開口度ごとの点Qにおける水面振動の乱れ強度

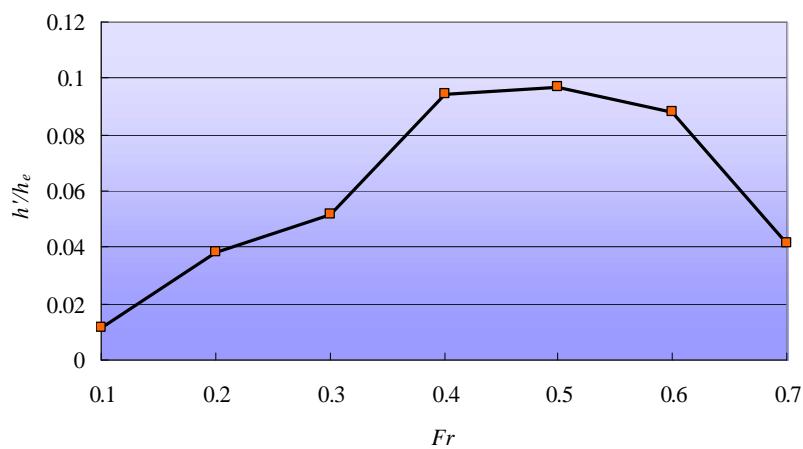


Fig.5-7 フルード数ごとの点Qにおける水面振動の乱れ強度

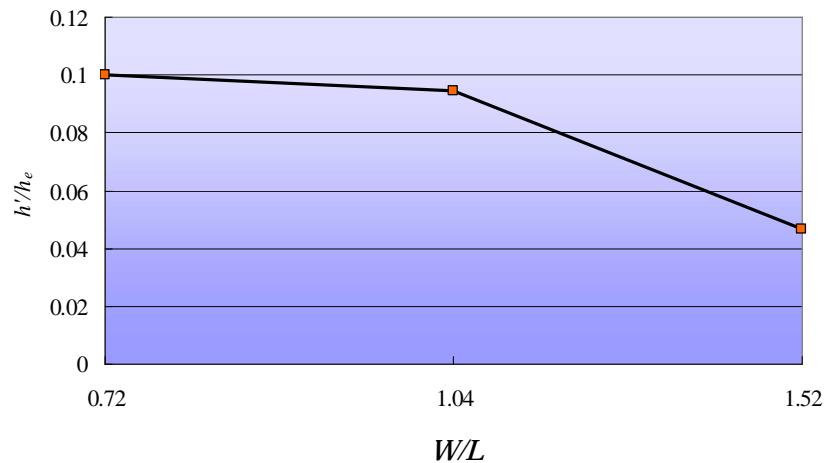


Fig.5-8 アスペクト比ごとの点Qにおける水面振動の乱れ強度

5.2.2 水面変動と流体交換速度

前節で、各条件と水面変動の乱れ強度・周期との関係が明らかになった。次に、水面振動特性と流体交換速度との関係を見ていきたい。

ここで、流体交換速度 k をそれぞれ

$$1) \text{ 開口度ごとの無次元流体交換速度 : } k'_1 = \frac{1}{U_0 L} \int |\bar{v}| dx \quad (5.1)$$

$$2) \text{ フルード数ごとの無次元流体交換速度 : } k'_2 = \frac{1}{U_0 L} \int |\bar{v}| dx \quad (5.2)$$

$$3) \text{ アスペクト比ごとの無次元流体交換速度 : } k'_3 = \frac{1}{U_0 W} \int |\bar{v}| dx \quad (5.3)$$

と定義する。

ただし、 \bar{v} ：開口部上の流速 v の時間平均成分である。

Fig.5-9,10, Fig.5-11,12, Fig.5-13,14 はそれぞれ開口度、フルード数、アスペクト比ごとの点 P における水面変動の乱れ強度と周期、そして流体交換速度である。

Table.5-7 は開口度別の計算結果である。流体交換速度は開口度が小さいほど大きくなり、水面変動の乱れ強度・周期と同じ傾向を示した。流体交換速度は Run が Run の約 50%, Run が約 35% となっており、開口度が 0.56 を超えると乱れ強度に大きな影響を及ぼすものと考えられる。

Table.5-7 開口度別計算結果

	L/D	k'_1
<i>Run</i>	0.56	0.0112
<i>Run</i>	0.47	0.0124
<i>Run</i>	0.78	0.0056
<i>Run</i>	1.0	0.004

Table.5-8 はフルード数別の計算結果である。フ

ルード数の変化において流体交換速度は $Fr=0.5$ で最大となり、水面変動の乱れ強度・周期と同じ傾向を示した。この結果は、牧平(2000)の報告と一致している。

Table.5-8 フルード数別計算結果

	Fr	k'_2
	0.1	0.85
	0.2	0.88
	0.3	0.95
	0.4	1.12
	0.5	1.2
	0.6	0.62
	0.7	0.42

Table.5-9 はアスペクト比別の計算結果である。流体交換速度はアスペクト比が小さいほど大きくなり、水面変動の乱れ強度・周期と同じ傾向を示した。

流体交換速度は *Run -2* では *Run -1* よりやや大きいほどで大きな変化はないが、*Run -3* で *Run -1* の約 60% となり、アスペクト比が 1.04 より大きくなると流体交換速度に大きな影響を及ぼすことがわかる。

Table.5-9 アスペクト比別計算結果

	W/L	k'_3
<i>Run -1</i>	1.04	0.0108
<i>Run -2</i>	0.72	0.0116
<i>Run -3</i>	1.52	0.0064

この結果から水面変動の乱れ強度と流体交換速度の関係が明らかになった。つまり、水面変動の乱れ強度が大きいほど流体交換速度も大きくなるといえる。

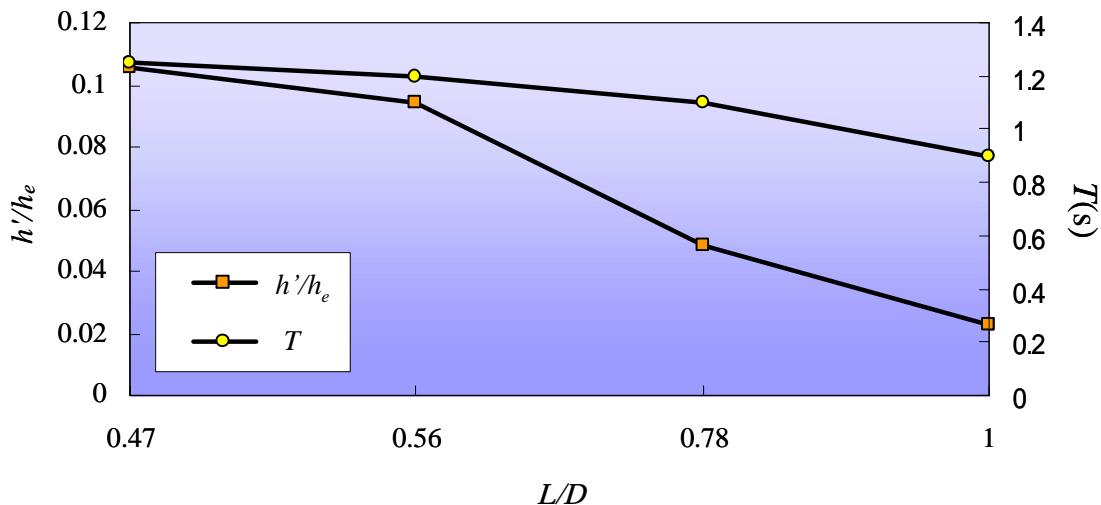


Fig.5-9 開口度ごとの水面変動の乱れ強度と周期

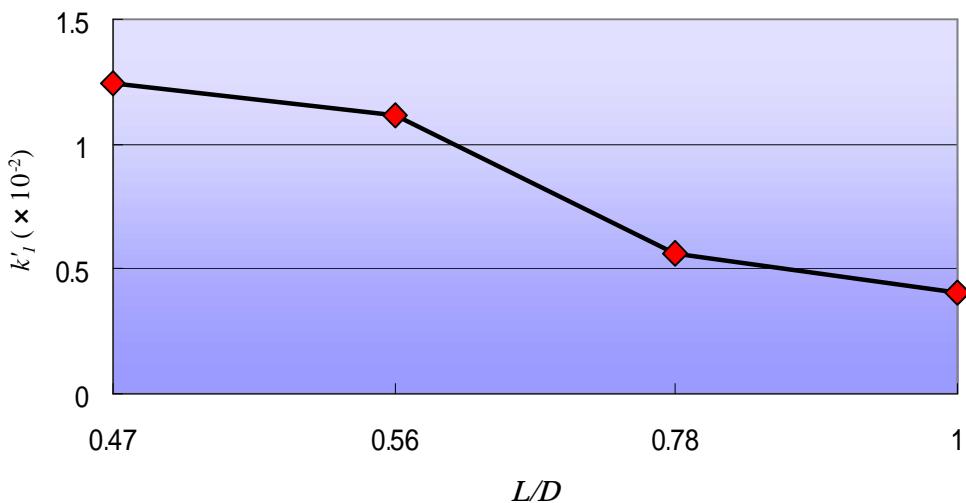


Fig.5-10 開口度ごとの無次元流体交換速度

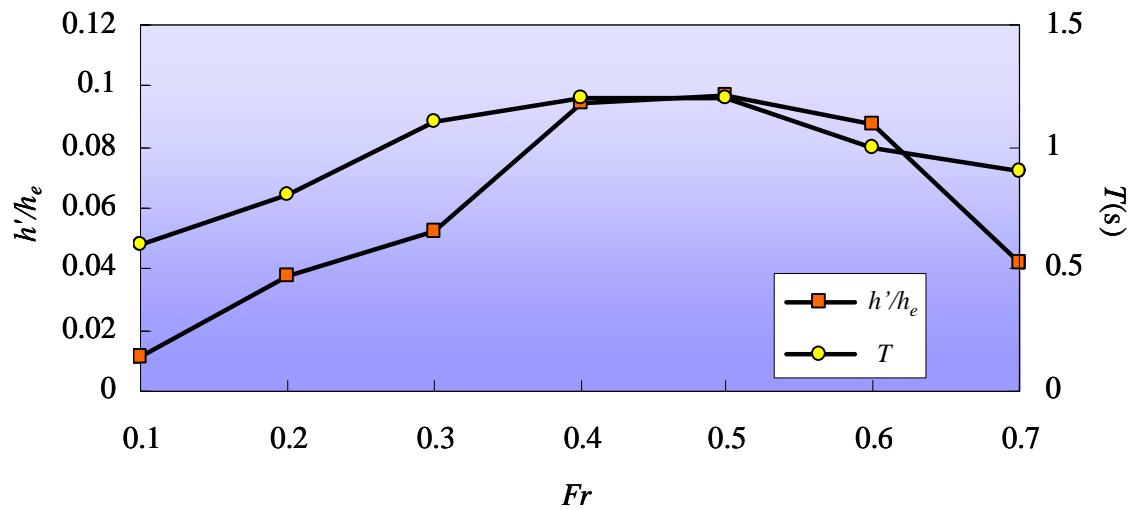


Fig.5-11 フルード数ごとの水面変動の乱れ強度と周期

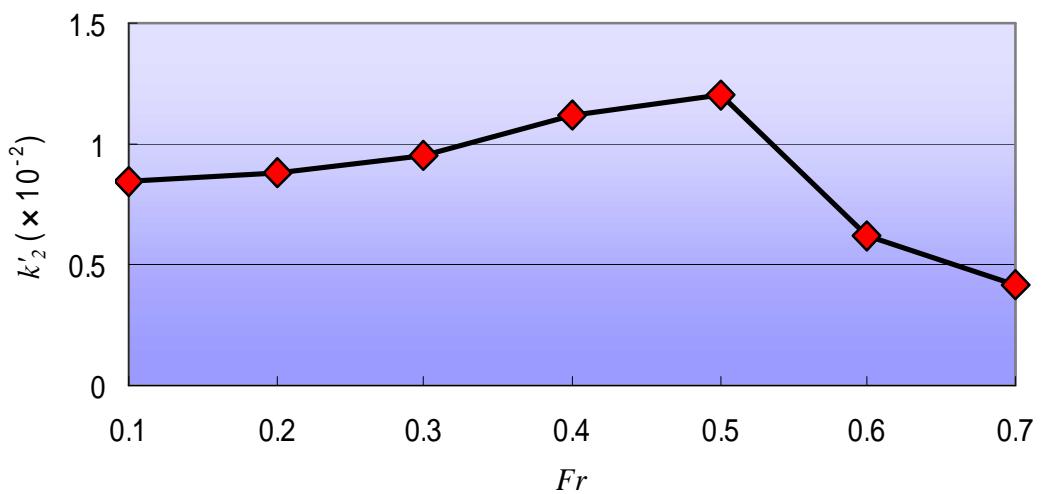


Fig.5-12 フルード数ごとの無次元流体交換速度

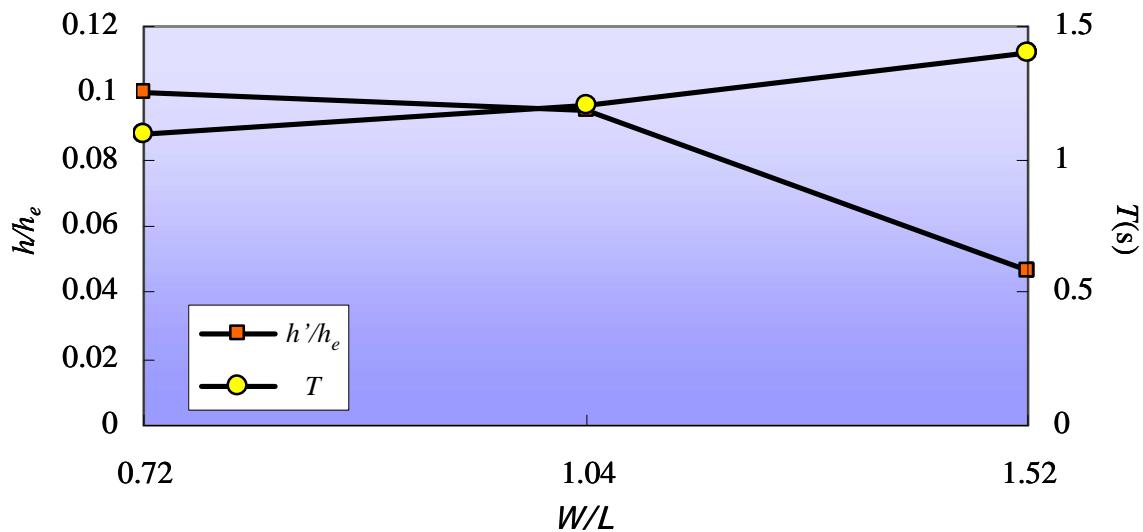


Fig.5-13 アスペクト比ごとの水面変動の乱れ強度と周期

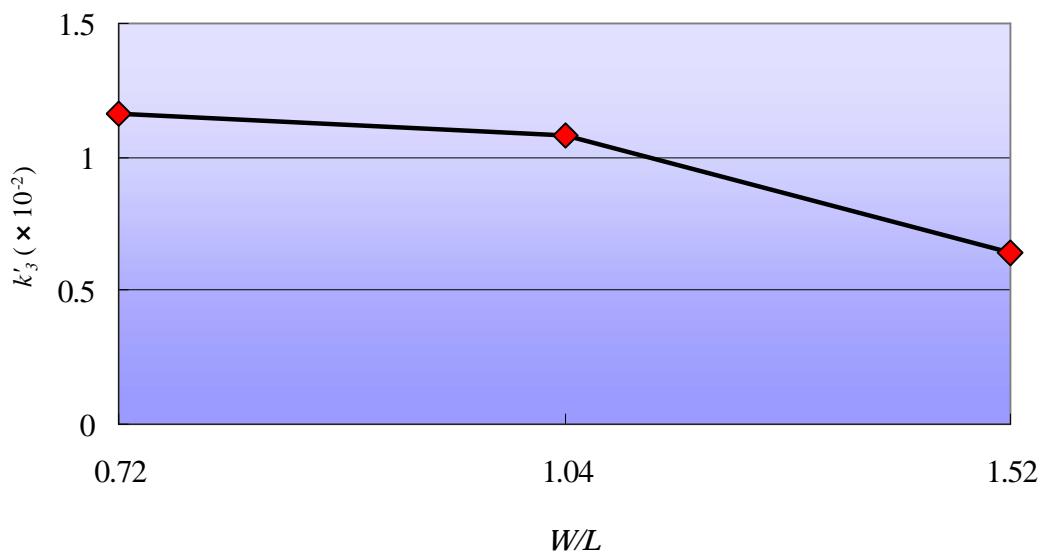


Fig.5-14 アスペクト比ごとの無次元流体交換速度

5.3 流速変動特性

5.3.1 流速変動

Fig.5-15,16 は $Run \sim Run$, Fig.5-17,18 は $Fr=0.1,0.4,0.5,0.7$, Fig.5-19,20 は Run

1 ~ 3 の点 P における流速 u,v の時間変動である .

卓越周期については , Run で 1.2(s) , Run で 1.25(s) , Run で 1.1(s) , Run で 0.9(s) となっており , 開口度が小さくなると周期が大きくなっている .

フルード数の変化によっては , 卓越周期は $Fr=0.5$ で最大となっている .

アスペクト比の変化によっては $Run \quad 1$ で 1.2(s) , $Run \quad 2$ で 1.1(s) , $Run \quad 3$ で 1.4(s) となっており , アスペクト比が大きくなると周期が大きくなっている .

また , いずれのケースでも流速変動の周期は開口部の水面変動の周期とほぼ一致している . このことから , 水面変動と流速変動はいずれも開口部における渦の一連の拳動と深い関係にあると考えられる .

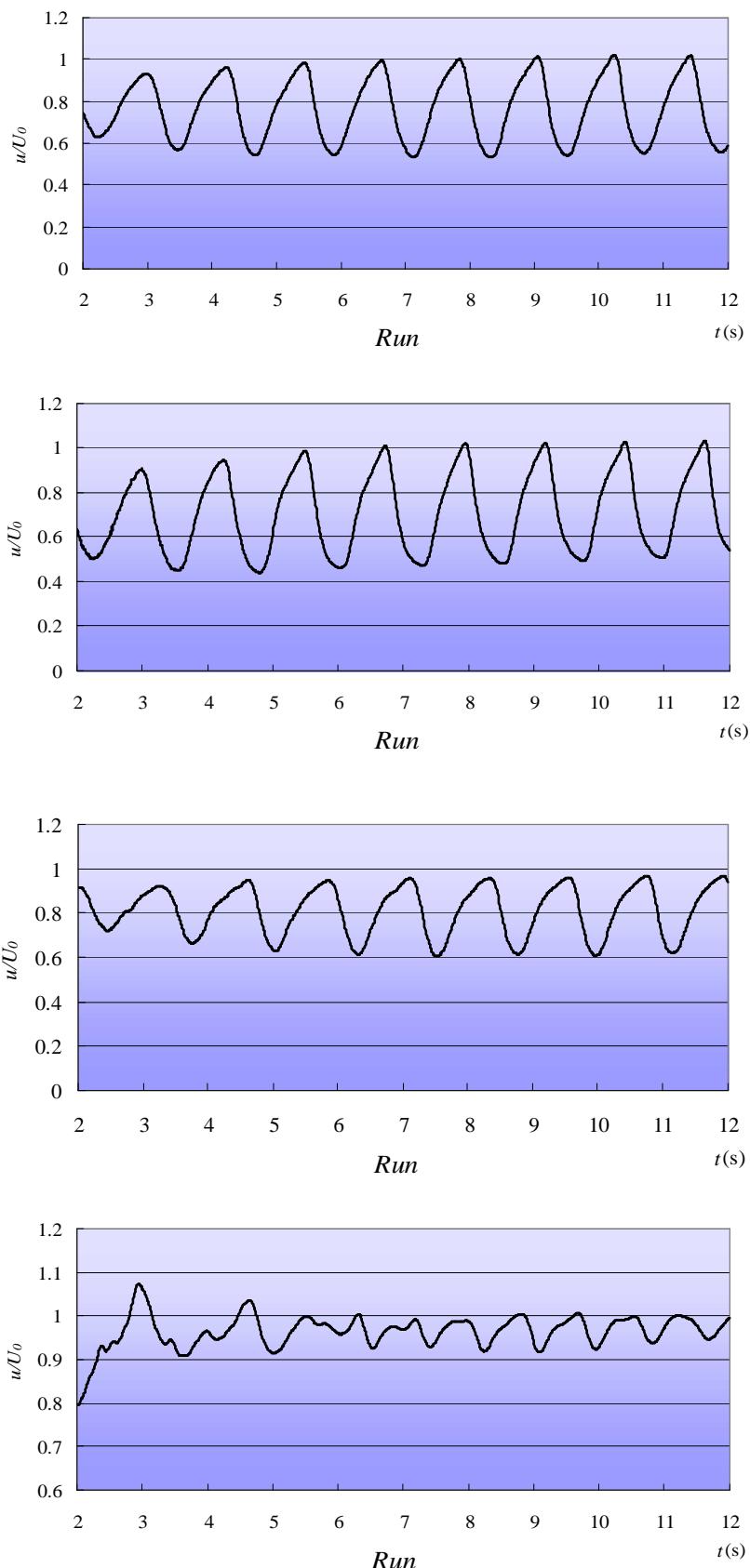


Fig.5-15 点Pにおける u の流速変動

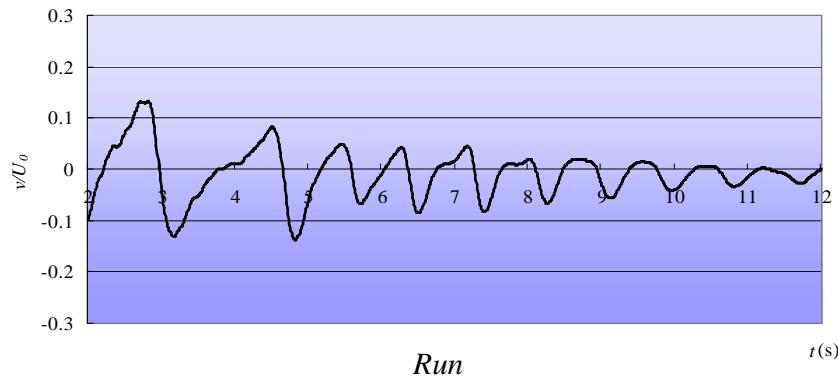
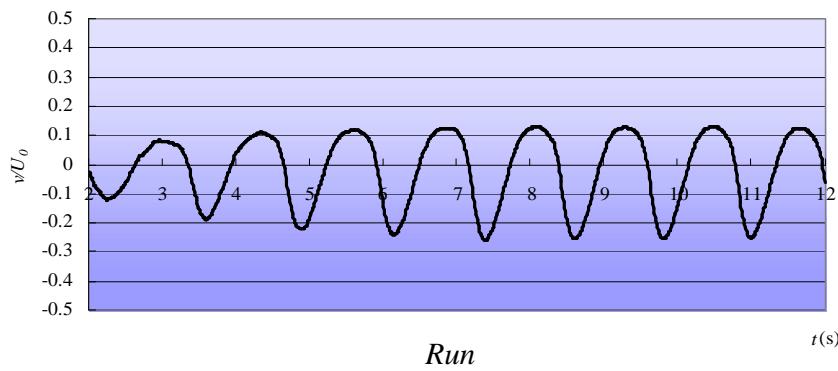
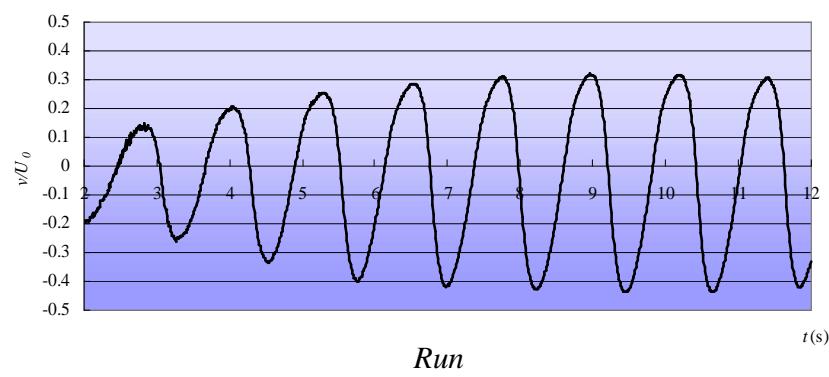
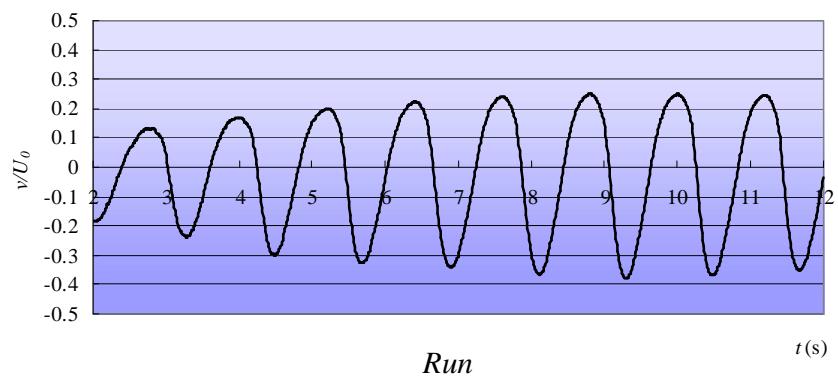


Fig.5-16 点Pにおける v の流速変動

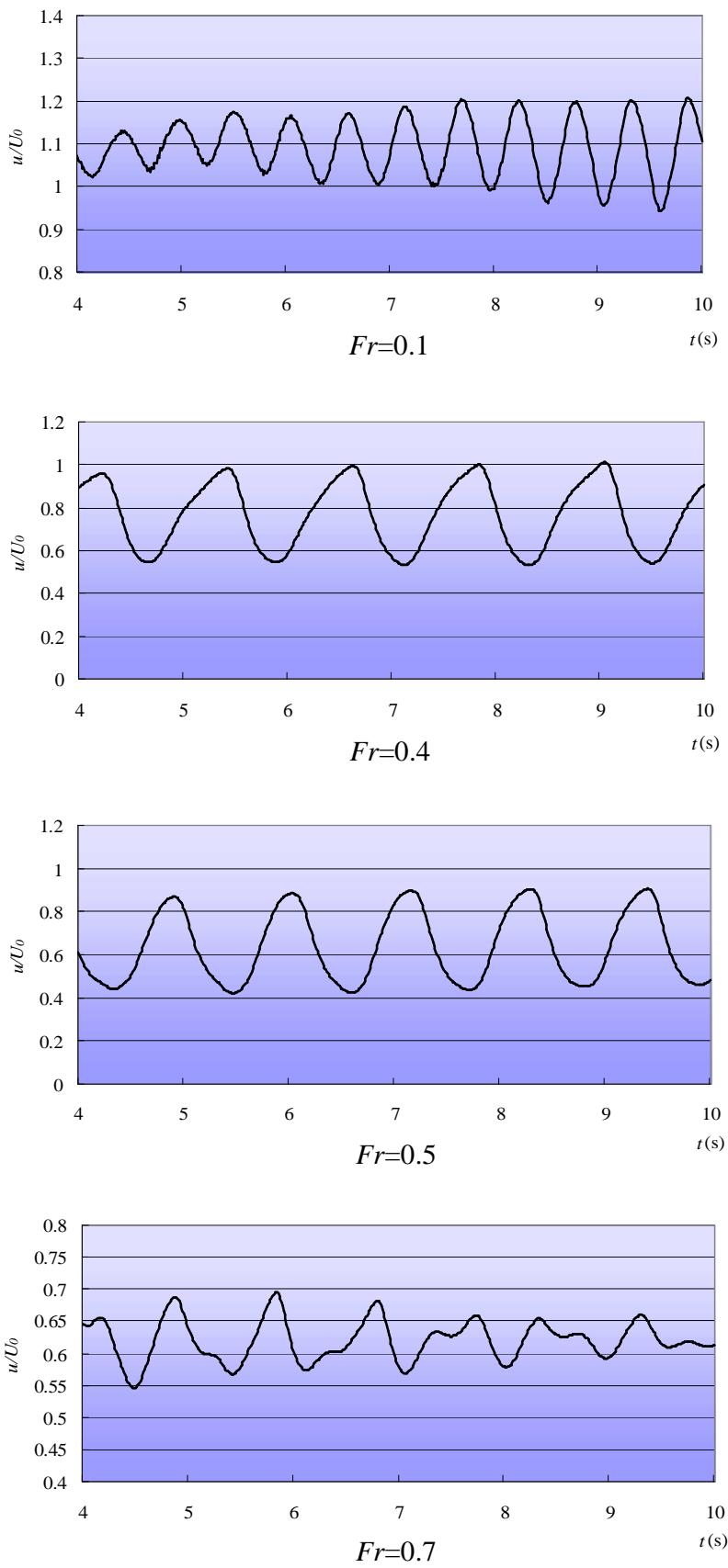


Fig.5-17 点Pにおける u の流速変動

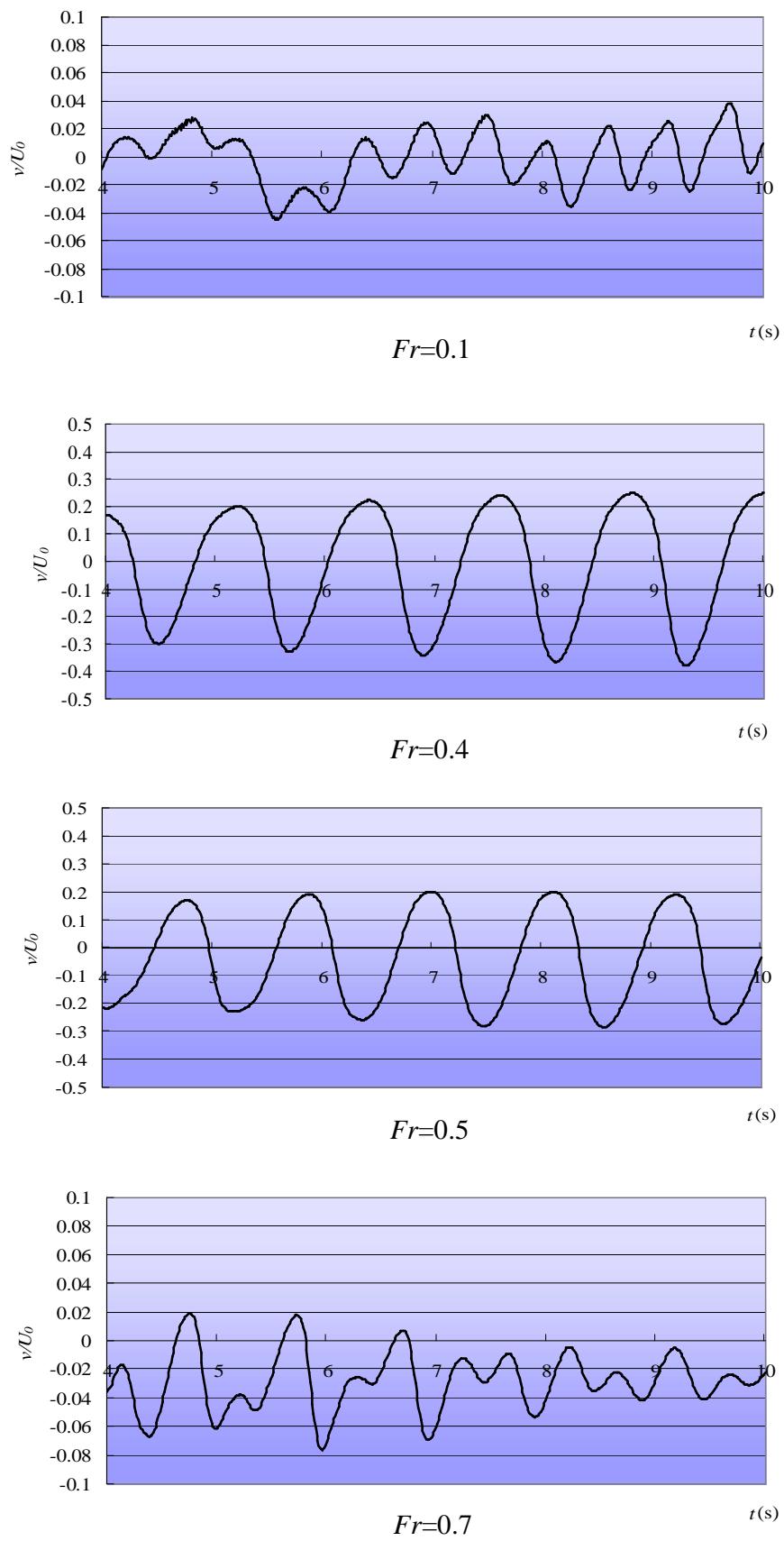
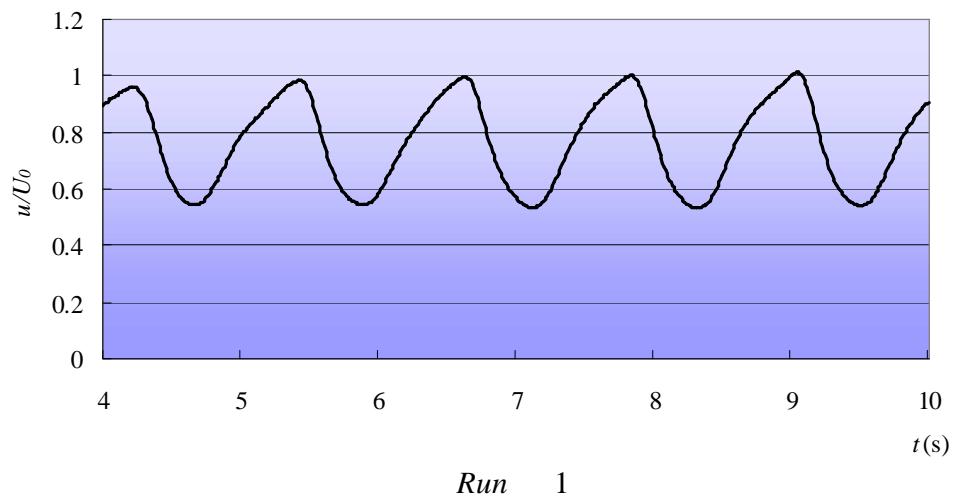
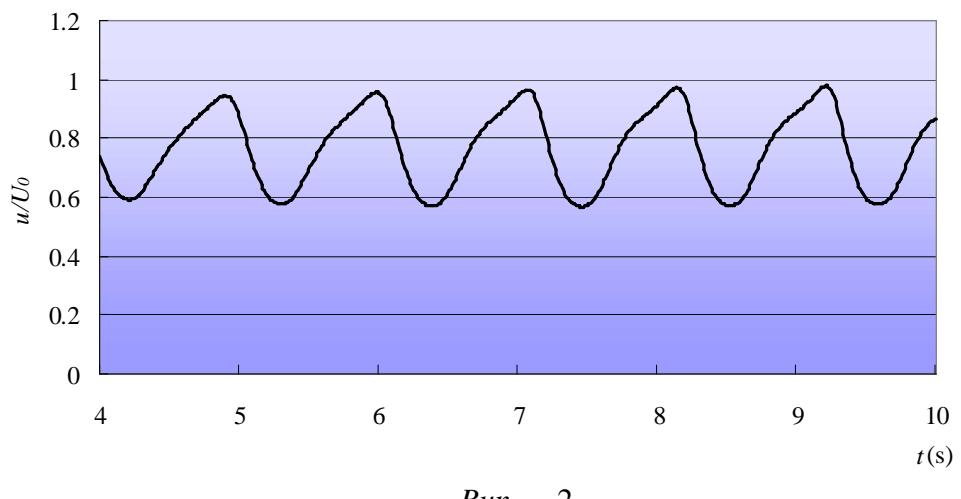


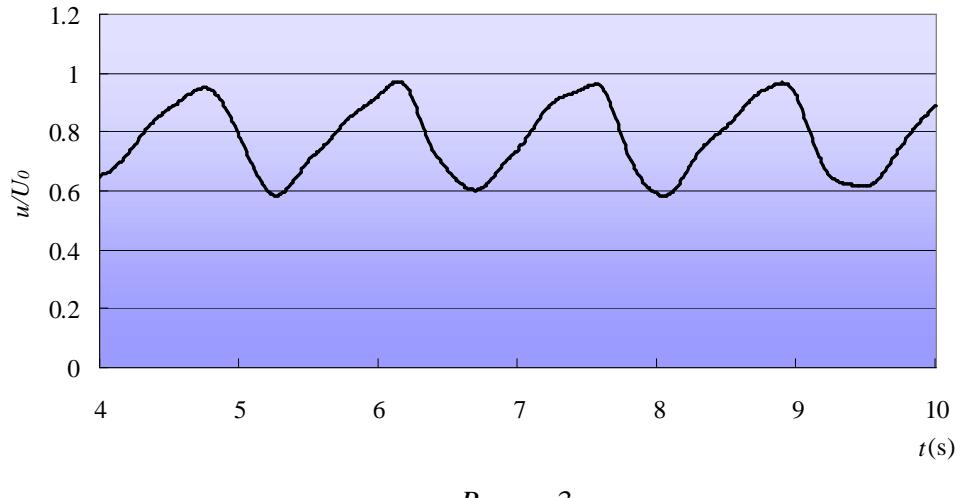
Fig.5-18 点Pにおける v の流速変動



Run 1

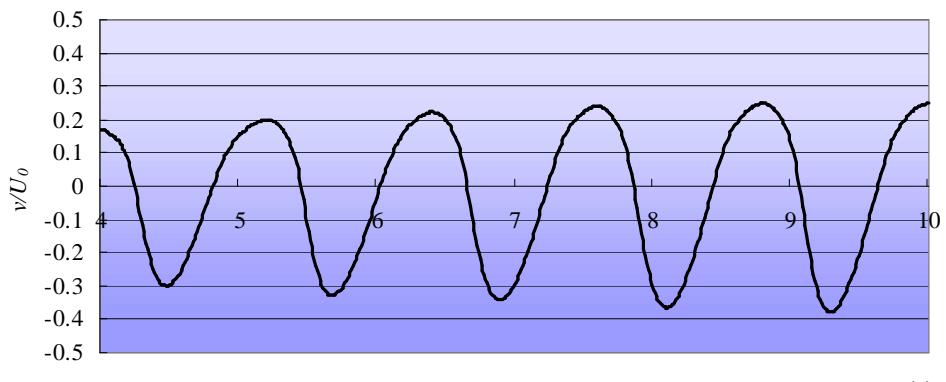


Run 2

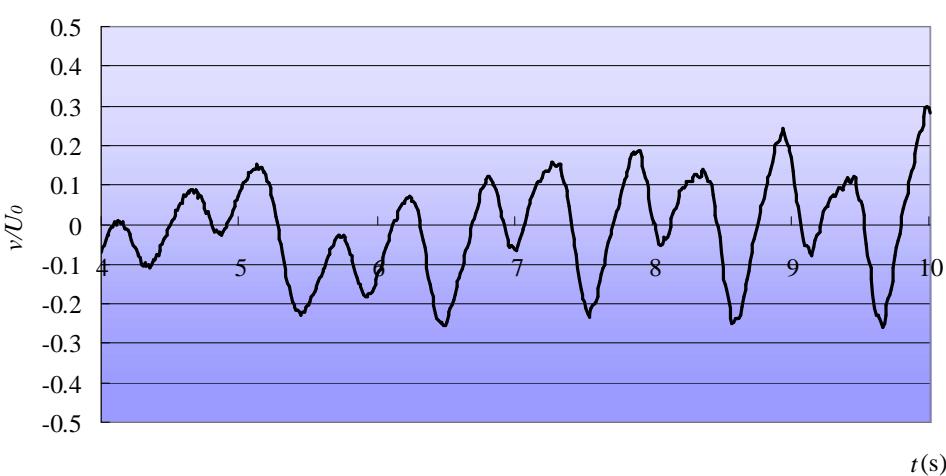


Run 3

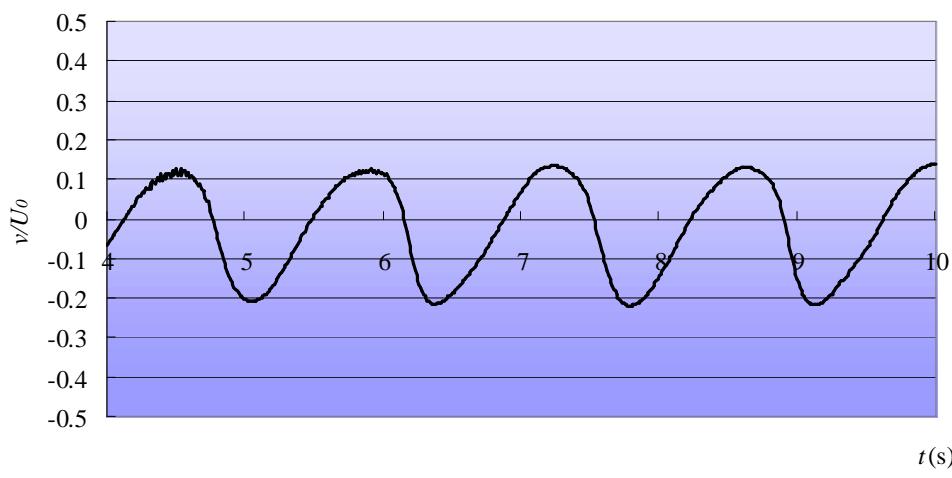
Fig.5-19 点Pにおける u の流速変動



Run 1



Run 2



Run 3

Fig.5-20 点Pにおける v の流速変動

5.3.2 流速変動の乱れ強度と流体交換速度

ここからは、点 P における流速変動の乱れ強度と流体交換速度との関係を見ていきたい。なお、無次元流体交換速度 $k'_1 \sim k'_3$ は前節と同様、(5.1) ~ (5.3)式で与えるものとする。また、ここで、比較検討のため乱れエネルギー E' を

$$E' = \frac{1}{2U_0^2} (\bar{u'}^2 + \bar{v'}^2) \quad (5.4)$$

で定義する。

Fig.5-21,22,23, Fig.5-24,25,26, Fig.5-27,28,29 はそれぞれ開口度、フルード数、アスペクト比ごとの点 P における流速変動の乱れ強度 $u'/U_0, v'/U_0$ 、流速変動の乱れエネルギー E' 、そして流体交換速度 $k'_1 \sim k'_3$ である。

Table.5-10 は開口度別の計算結果である。流体交換速度は開口度が小さいほど大きくなり、流速変動の乱れ強度・乱れエネルギーと同じ傾向を示した。乱れエネルギー、流体交換速度はそれぞれ、Run が Run の約 50%、Run が約 10%、35% となっており、開口度が 0.56 を超えると乱れエネルギー、流体交換速度に大きな影響を及ぼすものと考えられる。

Table.5-10 開口度別計算結果

	L/D	u'/U_0	v'/U_0	E'	k'_1	$T(s)$
Run	0.56	0.14	0.16	0.022	0.0112	1.2
Run	0.47	0.155	0.165	0.026	0.0124	1.25
Run	0.78	0.11	0.1	0.011	0.0056	1.1
Run	1	0.05	0.04	0.0021	0.004	0.9

Table.5-11 はフルード数別の計算結果である。フルード数の変化においては、流体交換速度は $Fr=0.5$ で最大となり、流速変動の乱れ強度・乱れエネルギーと同じ傾向を示した。乱れ強度・乱れエネルギーの小さい $Fr=0.1, 0.2$ で流体交換速度が大きくなっているのは、卓越周期が魚巣内におけるセイシュ(モード 1)の周期と一致し、共鳴したためと考えられる。

Table.5-11 フルード数別計算結果

Fr	u'/U_0	v'/U_0	E'	k'_2	$T(s)$
0.1	0.06	0.059	0.0035	0.85	0.6
0.2	0.04	0.031	0.0012	0.88	0.8
0.3	0.11	0.12	0.013	0.95	1.1
0.4	0.1384	0.16	0.022	1.12	1.2
0.5	0.1385	0.17	0.024	1.2	1.2
0.6	0.09	0.063	0.006	0.62	1
0.7	0.04	0.024	0.0011	0.42	0.9

Table.5-12 はアスペクト比別の計算結果である。流体交換速度は開口度が小さいほど大きくなり、流速変動の乱れ強度・乱れエネルギーと同じ傾向を示した。乱れエネルギー、流体交換速度は $Run - 2$ では $Run - 1$ よりやや大きいほどで大きな変化はないが、 $Run - 3$ で $Run - 1$ の約 50% となり、アスペクト比が 1.04 より大きくなると乱れ強度に大きな影響を及ぼすことがわかる。

Table.5-12 アスペクト比別計算結果

	W/L	u'/U_0	v'/U_0	E'	k'_3	$T(s)$
Run -1	1.04	0.14	0.16	0.022	0.011	1.2
Run -2	0.72	0.155	0.172	0.027	0.012	1.1
Run -3	1.52	0.12	0.1	0.012	0.0064	1.4

また、いずれの条件の場合でも流体交換速度が大きいときには、 v'/U_0 のほうが u'/U_0 よりも大きいことがわかる。よって流体交換には v 方向の乱れ成分が大きな影響を及ぼしているといえる。このことから、本研究の条件の範囲内において開口度は 0.7 以内、フルード数は 0.27 ~ 0.56、アスペクト比は 1.25 以内が効率よく流体交換を行える範囲であると考えられる。

この結果から流速変動の乱れ強度と流体交換速度の関係が明らかになった。つまり、流速変動の乱れ強度が大きいほど流体交換速度も大きくなるといえる。

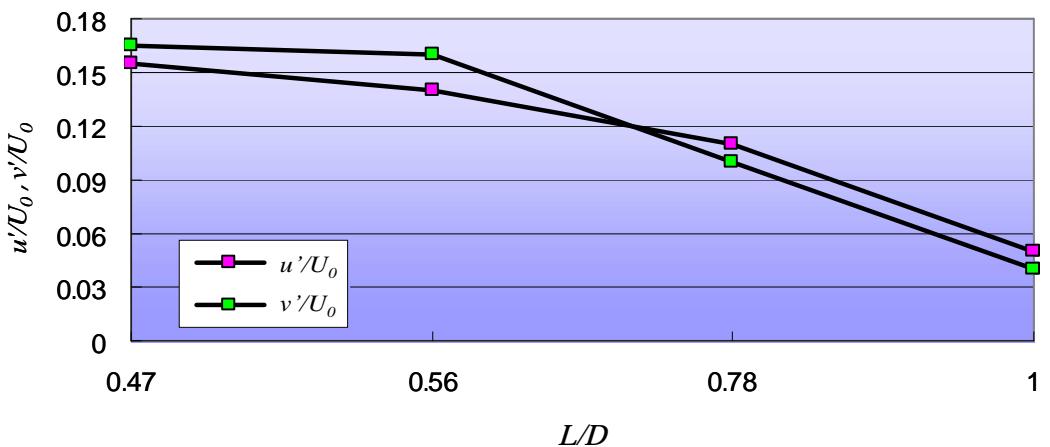


Fig.5-21 開口度ごとの流速変動の乱れ強度

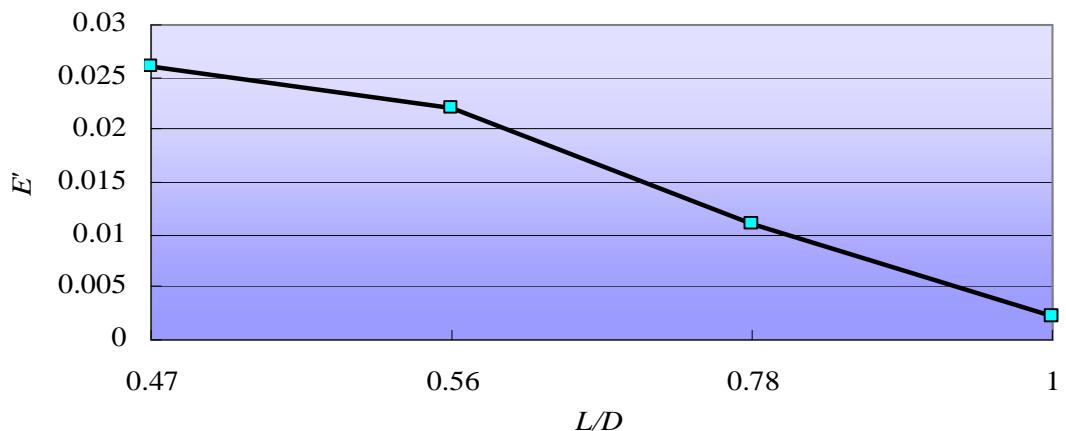


Fig.5-22 開口度ごとの流速変動の乱れエネルギー

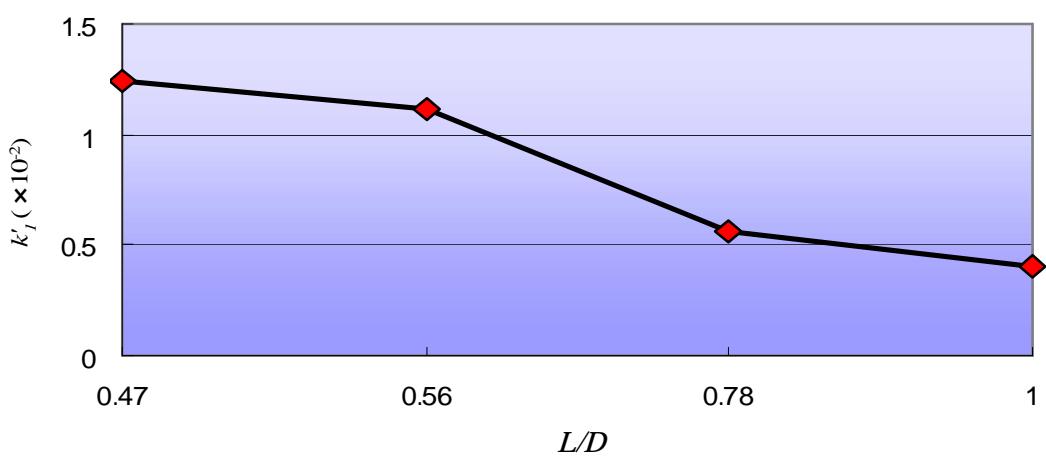


Fig.5-23 開口度ごとの無次元流体交換速度

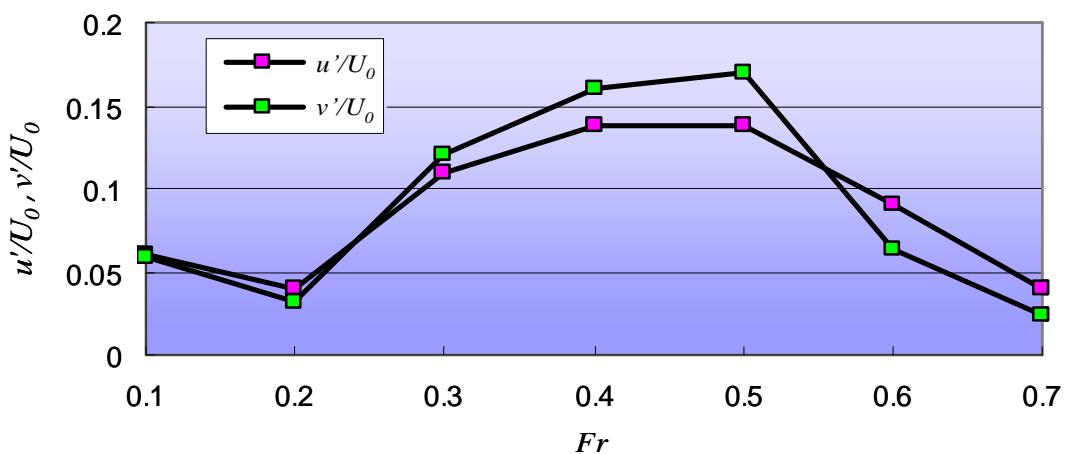


Fig.5-24 フルード数ごとの流速変動の乱れ強度

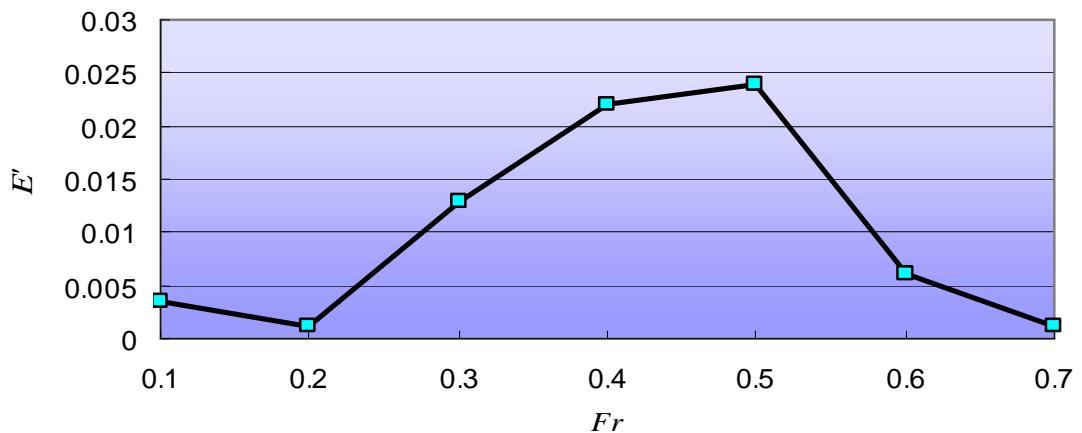


Fig.5-25 フルード数ごとの流速変動の乱れエネルギー

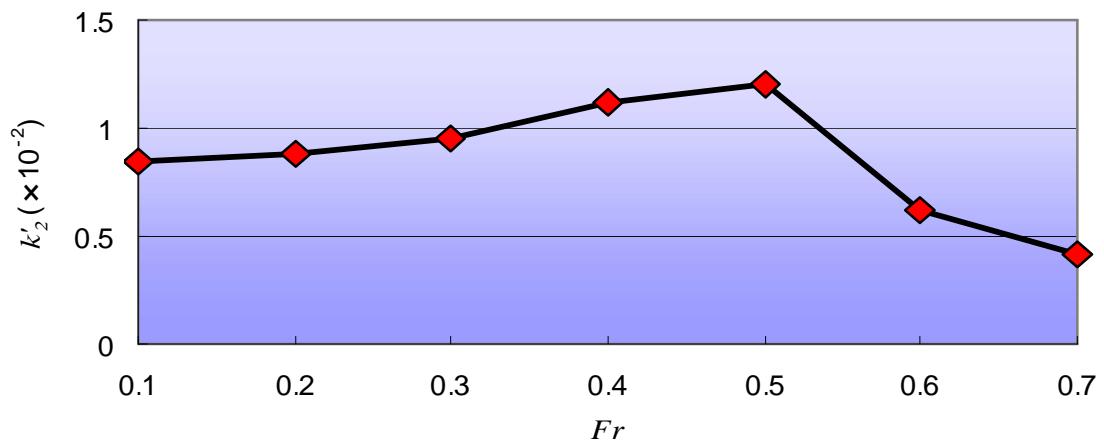


Fig.5-26 フルード数ごとの無次元流体交換速度

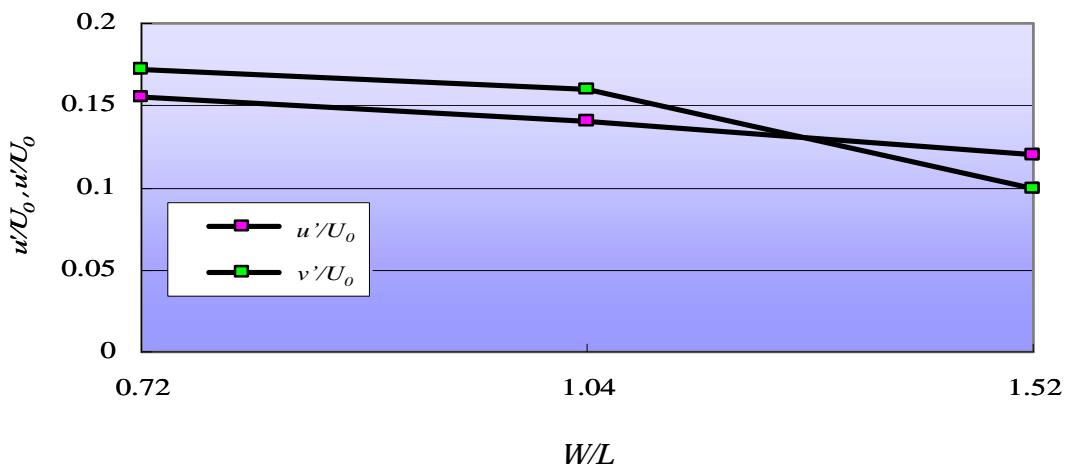


Fig.5-27 アスペクト比ごとの流速変動の乱れ強度

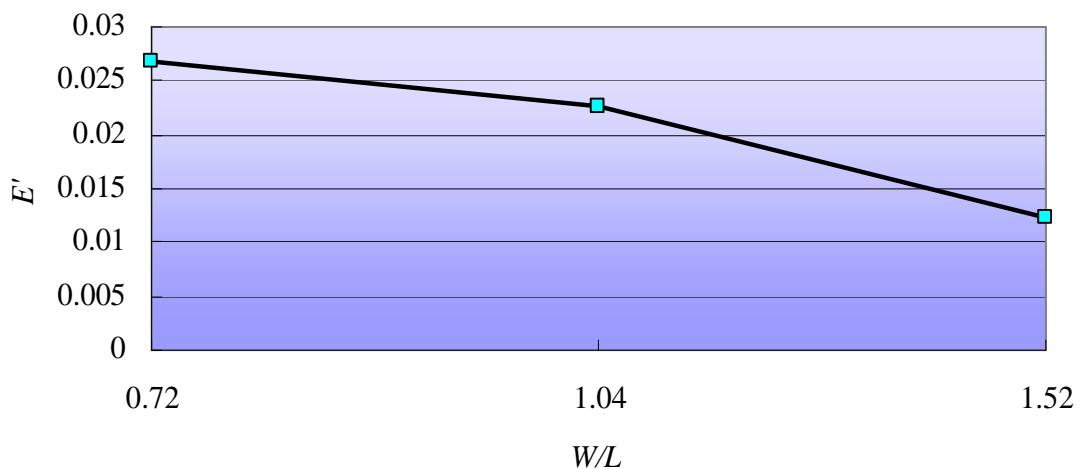


Fig.5-28 アスペクト比ごとの流速変動の乱れエネルギー

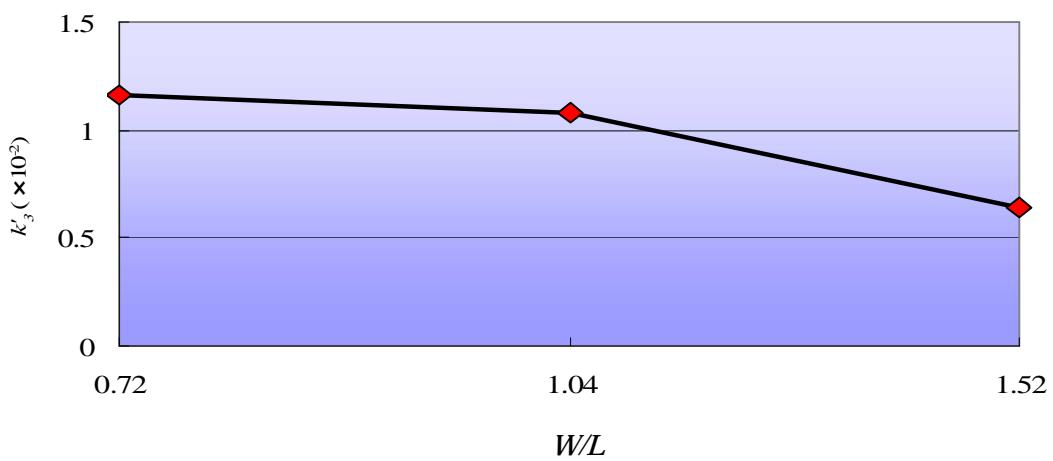


Fig.5-29 アスペクト比ごとの無次元流体交換速度

第6章 結論

本研究は、人工魚巣が存在する流れ場を対象に、開口部を含む魚巣内の水面振動特性、流速変動特性および主流・魚巣域間の流体交換特性について、開水路2次元流れの基礎式を用いた数値実験に基づき考察したものである。その結果、以下のようなことが明らかになった。

- 1) 流れ場による水面変動は、開口部上流端で発生する剥離渦に基づく水面変動と流速変動に強く依存する。
- 2) 水面変動の乱れ強度および流速変動の乱れ強度・乱れエネルギーは、今研究で数値実験を行った $Fr=0.1 \sim 0.7$ の範囲では $Fr=0.5$ のときに最大となる。また、水面変動の周期も $Fr=0.5$ のときに最大となる。
- 3) 水面変動の乱れ強度および流速変動の乱れ強度・乱れエネルギーは開口度が小さいほど大きくなり、水面変動の周期も開口度が小さいほど大きくなる。
- 4) 水面変動の乱れ強度および流速変動の乱れ強度・乱れエネルギーはアスペクト比が小さいほど大きくなり、水面変動の周期はアスペクト比が小さいほど小さくなる。
- 5) 流体交換速度は水面変動の乱れ強度、流速変動の乱れ強度が大きいほど大きくなる。

謝辞

本研究を作成するにあたり，ご多忙の中，ご指導，ご協力を承りました九州大学大学院生物資源環境科学府生産環境科学部門生産環境情報学研究室，森 健教授に深く感謝し，厚く御礼申し上げます。

また，九州大学大学院生物資源環境科学府生産環境科学部門生産環境情報学研究室博士課程尾崎 彰則氏には熱意あふれるご助言，御教示をいただき心より御礼申し上げます。

また，多方面にわたり広くご意見，ご協力をいたいた同生産環境情報学研究室の博士課程 Bui Quoc Lap 氏，修士課程濱上 邦彦氏，田上 賢吾氏，陳 元氏，山崎 寛史氏，すべての皆様に深く感謝いたします。

最後に，いつもかけながら協力，激励してくださった家族に心より感謝の意を捧げて結びとさせていただきます。

参考文献

- 有田 正光：流れの科学，東京電機大学出版，1998
- 椿 東一郎：水理学，森北出版株式会社，1995
- 中島 央晶：人工魚巣開口部における乱流剪断層の水理特性，九州大学農学部平成14年卒業論文，2002
- 牧平 朋大：人工魚巣の水理環境，九州大学農学部平成12年卒業論文，2000
- 山本 貴則：人口魚巣開口部における剪断層の乱流構造，九州大学農学部平成13年卒業論文，2001
- 三宅 裕・藤井貴広：粗面壁乱流の平面離散要素モデル，第17回 数値流体力学シンポジウム，A4-1，2003
- 木村 一郎・細田 尚・安永 良・村本 嘉雄：開水路流れ死水域周辺の水面変動・流体混合特性，水工学論文集，第41巻 pp.711～716，1997
- 木村 一郎・細田 尚・友近 文志：開水路流れ混合層におけるせん断不安定波動の空間的增幅特性，土木学会論文集，No.509/-30,pp.99～109，1995
- 細田 尚・木村 一郎：開水路急拡部の流れにおける渦の発生・発達に関する二,三の検討，水工学論文集，第37巻，pp.463～468，1993
- 木村 一郎・細田 尚・友近 文志：死水域を伴う開水路流れの非定常振動特性，水工学論文集，第38巻，pp.425～430，1994
- 木村 一郎・細田 尚・村本 嘉雄・安永 良：開水路流れにおける死水域の流体振動に及ぼす水理パラメータの効果，水工学論文集，第39巻，pp.779～784，1995

APPENDIX

人工魚巣の水理特性プログラム

```
!!!!!!  
!!!  
!!! 人工魚巣水理特性プログラム  
!!!  
!!!!!!
```

```
!!!!!! main program !!!!!!!
```

```
program main
integer,parameter :: nx=124,ny=79          !終点
integer,parameter :: mx1=17,mx4=107,my1=25,my2=27 !サイズ設定
integer,parameter :: mx2=37,mx3=87          !開口部上下流端
integer :: i,j,k,m,n,t,tt,tend
integer :: iend,jend                         !格子全体
real(8) :: lx,ly
real(8) :: dx,dy,dt                          !格子幅,時間刻み
real(8) :: vis,g,ustart,Mstart,he           !流体特性値
real(8) :: CNVUXe,CNVUXw,CNVUX,CNVUYn,CNVUYs,CNVUY
real(8) :: HIDX,CIMX,DIFU,DIFUX,DIFUY
real(8) :: CNVVXe,CNVVXw,CNVVX,CNVVYn,CNVVYs,CNVVY
real(8) :: HIDY,CIMY,DIFV,DIFVX,DIFVY
real(8) :: cx1,cx2,cx3,cx4,cx31,cx32,cx33,cx34,cx35,cx36,cx37,cx38,cx41 &
,cx42,cx43,cx44,cx45,cx46,cx47
real(8) :: cy2,cy3,cy4,cy31,cy32,cy33,cy34,cy35,cy36,cy37,cy41,cy42 &
,cy43,cy44,cy45,cy46,cy47,cy48
real(8) :: hx1,hx2,hy1,hy2
real(8) :: f,Re
real(8) :: MM1,uu1,vv1
real(8) :: bx1,bx2,bx3,bx4,by1,by2,by3,by4
real(8),dimension(nx,ny+1) :: M_old,M_new,u,u_pro,uu,u_ave,u_bar
real(8),dimension(nx,ny+2) :: N_old,N_new,v,v_pro,vv,v_ave,v_bar
real(8),dimension(nx,ny+1) :: h_old,h_new,h_pro,hh,h_ave
integer,dimension(nx,ny) :: xx,yy           !x 座標,y 座標
```

! 格子と初期値の設定

! 格子

lx = 24.6	!水路長さ(cm)
ly = 15.8	!水路幅(cm),魚巣奥行き(cm)
m = 123	!x 方向格子数
n = 79	!y 方向格子数
iend = m+1	!終点
jend = n	!終点
dx = lx/real(m)	!x 方向格子幅(0.2cm)
dy = ly/real(n)	!y 方向格子幅(0.2cm)

! 時間ステップ設定

```

dt      =5.0D-5          !時間刻み幅
tend = 240000            !計算終了サイクル数

! 流体特性パラメータ設定
vis     = 0.01           !動粘性係数(cm2/s)
g       = 980.665         !重力加速度(cm/s2)
ustart = 25.0             !x 方向初流速(cm/s)
Mstart = 100.0            !初期単位幅流量(cm2/s)
he      = 4.0              !下流端水深(cm)

open (1,file='L=10_1.txt',status='old')
open (2,file='L=10_2.txt',status='old')
open (3,file='L=10_3.txt',status='old')
open (4,file='h_main.txt',status='old')
open (5,file='h_gyo.txt',status='old')
open (7,file='turb_1.txt',status='old')
open (8,file='turb_2.txt',status='old')
open (9,file='turb_3.txt',status='old')
open (10,file='u_cross.txt',status='old')
open (11,file='v_cross.txt',status='old')
open (12,file='v_level.txt',status='old')
open (13,file='u(61,22).txt',status='old')
open (14,file='h(22,56).txt',status='old')
open (15,file='h(102,56).txt',status='old')
open (16,file='v(mx2+5,27).txt',status='old')
open (17,file='v(60,27).txt',status='old')
open (18,file='v(mx3-5,27).txt',status='old')
open (19,file='u(61,26).txt',status='old')
open (20,file='u(61,30).txt',status='old')
open (21,file='v_enter.txt',status='old')
open (22,file='ave.txt',status='old')
open (23,file='u_bar.txt',status='old')
open (24,file='v_bar.txt',status='old')

! 初期条件の設定
call init

do t=1,tend

! 境界条件の設定
call bound

! 主流部の速度場の計算
call cal_main
! 開口部の速度場の計算
call cal_enter

```

```

! 魚巣内の速度場の計算
call cal_gyo

! 時間進行
call adv

! 補完計算
call prout

! 時間平均流速計算
call average

! 乱れ強度計算
call turb

! 出力
call output

write(6,*) t,'step'

end do

stop
contains
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!初期条件サブルーチン!!!!!!!!!!!!!!
subroutine init
implicit none
! 流速，水深の初期設定
! 主流部
do i=1,iend-1,2
  do j=2,my1-1,2
    M_old(i,j) = Mstart
    u(i,j) = ustart
  end do
end do

do i=2,iend,2
  do j=1,my1,2
    N_old(i,j) = 0.0
    v(i,j) = 0.0
  end do
end do
do i=2,iend,2
  do j=2,my1-1,2
    h_old(i,j) = he
  end do
end do

```

```

    end do
end do
! 開口部，魚巣内部
do i=mx1, mx4, 2
    do j=my1+1, jend-1, 2
        M_old(i,j) = 0.0
        u(i,j) = 0.0
    end do
end do

do i=mx1+1, mx4-1, 2
    do j=my1+2, jend, 2
        N_old(i,j) = 0.0
        v(i,j) = 0.0
    end do
end do

do i=mx1+1, mx4-1, 2
    do j=my1+1, jend-1, 2
        h_old(i,j) = he
    end do
end do

return
end subroutine init

```

!!!!!!!!!!!!!! 境界条件サブルーチン !!!!!!!

!!!!!!!!!!!!!! u に関する境界条件 !!!!!!!

```

subroutine bound
    implicit none
! 主流部
! 上流端
    do j=2, my1-1, 2
        M_old(1,j) = Mstart
        u(1,j) = ustарт
    end do
! 下流端
    do j=2, my1-1, 2
        M_old(iend-1,j) = M_old(iend-3,j)
        u(iend-1,j) = u(iend-3,j)
    end do
! 下面
    do i=1, iend-1, 2
        M_old(i,2) = M_old(i,4)
        u(i,2) = u(i,4)
    end do

```

```

end do

! 壁面
! 開口部
j=26
M_old(mx2,j) = 0.0
u(mx2,j) = 0.0
M_old(mx3,j) = 0.0
u(mx3,j) = 0.0

! 魚巣内部
do j=my2+1,jend-1,2
M_old(mx1,j) = 0.0
u(mx1,j) = 0.0
M_old(mx4,j) = 0.0
u(mx4,j) = 0.0
end do

!!!!!!!!!!!!!! v に関する境界条件 !!!!!!!!!

! 上流端
do j=1,my1-2,2
N_old(2,j) = 0.0
v(2,j) = 0.0
end do

! 下流端
do j=1,my1-2,2
N_old(iend,j) = N_old(iend-2,j)
v(iend,j) = v(iend-2,j)
end do

! 下面
do i=2,iend,2
N_old(1,j) = N_old(i,3)
v(1,j) = v(i,3)
end do

! 壁面
! 主流部
do i=2,mx2-1,2
N_old(i,my1) = 0.0
v(i,my1) = 0.0
end do

do i=mx3+1,iend,2
N_old(i,my1) = 0.0
v(i,my1) = 0.0
end do

```

```
! 魚巣内部
do i=mx1+1, mx4-1, 2
    N_old(i,jend) = 0.0
    v(i,jend) = 0.0
end do
```

```
do i=mx1+1, mx2-1, 2
    N_old(i,my2) = 0.0
    v(i,my2) = 0.0
end do
```

```
do i=mx3+1, mx4-1, 2
    N_old(i,my2) = 0.0
    v(i,my2) = 0.0
end do
```

```
!!!!!!!!!!!!!! h に関する境界条件 !!!!!!!
```

```
! 下流端
do j=2, my1-1, 2
    h_old(iend,j) = he
end do
```

```
return
```

```
end subroutine bound
```

```
!!!!!!!!!!!!!! 速度場計算サブルーチン !!!!!!!
```

```
!!!!!!!!!!!!!! 主流部計算のサブルーチン !!!!!!!
!!!!!!
```

```
subroutine cal_main
implicit none
```

```
! 境界(上流側の上壁)
```

```
do i=1, mx2, 2
    M_old(i,my1+1) = -M_old(i,my1-1)
    u(i,my1+1) = -u(i,my1-1)
end do
```

```
do i=2, mx2-1, 2
    N_old(i,my1+2) = -N_old(i,my1-2)
    v(i,my1+2) = -v(i,my1-2)
end do
```

```
do i=2, mx2-1, 2
```

```

    h_old(i,my1+1) = h_old(i,my1-1)
end do

! 境界(下流側の上壁)
do i=mx3,iend-1,2
    M_old(i,my1+1) = -M_old(i,my1-1)
    u(i,my1+1) = -u(i,my1-1)
end do

do i=mx3+1,iend,2
    N_old(i,my1+2) = -N_old(i,my1-2)
    v(i,my1+2) = -v(i,my1-2)
end do

do i=mx3+1,iend,2
    h_old(i,my1+1) = h_old(i,my1-1)
end do

!!!!!!!!!!!!!! Mの計算 !!!!!!!!!

do i=3,iend-3,2
    do j=4,my1-1,2

! 局所レイノルズ数の計算

if(t==1) then
    Re = Mstart/vis
else
    Re = abs(M_old(i,j))/vis
end if

f = 0.0791*(Re**(-0.25))

vv1 = 0.25D0*(v(i+1,j+1)+v(i+1,j-1)+v(i-1,j+1)+v(i-1,j-1))
hx1 = 0.25D0*(h_old(i+1,j+2)+h_old(i+1,j)+h_old(i-1,j+2)+h_old(i-1,j))
hx2 = 0.25D0*(h_old(i+1,j)+h_old(i+1,j-2)+h_old(i-1,j)+h_old(i-1,j-2))

! 対流項(1次精度風上差分)
! x 方向

u(i+1,j) = 0.5*(u(i+2,j)+u(i,j))
u(i-1,j) = 0.5*(u(i,j)+u(i-2,j))

if(u(i+1,j) >= 0) then

```

```

CNVUXe = u(i+1,j)*M_old(i,j)

else

CNVUXe = u(i+1,j)*M_old(i+2,j)

end if

if(u(i-1,j) >= 0) then

CNVUXw = u(i-1,j)*M_old(i-2,j)

else

CNVUXw = u(i-1,j)*M_old(i,j)

end if

CNVUX = (CNVUXe - CNVUXw)/(2.0*dx)

! y 方向
v(i,j+1) = 0.5*(v(i+1,j+1)+v(i-1,j+1))
v(i,j-1) = 0.5*(v(i+1,j-1)+v(i-1,j-1))

if(v(i,j+1) >= 0) then

CNVUYn = v(i,j+1)*M_old(i,j)

else

CNVUYn = v(i,j+1)*M_old(i,j+2)

end if

if(v(i,j-1) >= 0) then

CNVUYs = v(i,j-1)*M_old(i,j-2)
else

CNVUYs = v(i,j-1)*M_old(i,j)

end if

CNVUY = (CNVUYn - CNVUYs)/(2.0*dy)

```

! 壓力項

$$HDX = 0.5 * g * (h_{old}(i+1,j) ** 2 - h_{old}(i-1,j) ** 2) / (2.0 * dx)$$

! 勾配工

$$cx1 = g * 0.5 * (h_{old}(i+1,j) + h_{old}(i-1,j)) * 0.002$$

! 底面摩擦項

$$cx2 = -0.5 * f * u(i,j) * sqrt(u(i,j) ** 2 + v(i,j) ** 2)$$

! レイノルズ応力項

$$cx31 = 0.3 * sqrt(0.5 * f) / dx$$

$$cx32 = 0.25 * (u(i+2,j) + u(i,j)) ** 2 + 0.25 * (v(i+1,j+1) + v(i+1,j-1)) ** 2$$

$$cx33 = h_{old}(i+1,j) ** 2 * sqrt(cx32) * (u(i+2,j) - u(i,j)) / (2.0 * dx)$$

$$cx34 = 0.25 * (u(i,j) + u(i-2,j)) ** 2 + 0.25 * (v(i-1,j+1) + v(i-1,j-1)) ** 2$$

$$cx35 = h_{old}(i-1,j) ** 2 * sqrt(cx34) * (u(i,j) - u(i-2,j)) / (2.0 * dx)$$

$$cx36 = cx31 * (cx33 - cx35)$$

$$cx37 = (1.0 / 3.0) * 2.07 * (0.5 * f) / dx$$

$$cx38 = cx37 * (h_{old}(i+1,j) * cx32 - h_{old}(i-1,j) * cx34)$$

$$cx3 = cx36 - cx38$$

$$cx41 = 0.3 * sqrt(0.5 * f) / (2.0 * dy)$$

$$cx42 = 0.25 * (u(i,j+2) + u(i,j)) ** 2 + 0.25 * (v(i+1,j+1) + v(i-1,j+1)) ** 2$$

$$cx43 = (u(i,j+2) - u(i,j)) / (2.0 * dy) + (v(i+1,j+1) - v(i-1,j+1)) / (2.0 * dx)$$

$$cx44 = 0.25 * (u(i,j) + u(i,j-2)) ** 2 + 0.25 * (v(i+1,j-1) + v(i-1,j-1)) ** 2$$

$$cx45 = (u(i,j) - u(i,j-2)) / (2.0 * dy) + (v(i+1,j-1) - v(i-1,j-1)) / (2.0 * dx)$$

$$cx46 = u(i,j) ** 2 + 0.25 * (v(i+1,j+1) + v(i-1,j+1)) ** 2$$

! 壁面とそれ以外の流れ場の取り扱い

if(3<=i .and. i<=mx2 .and. j==my1-1 .or. mx3<=i .and. i<=iend-3 .and.j==my1-1) then

$$cx4 = cx41 * (hx1 ** 2 * sqrt(cx46) * cx43 - hx2 ** 2 * sqrt(cx44) * cx45)$$

else

$$cx4 = cx41 * (hx1 ** 2 * sqrt(cx42) * cx43 - hx2 ** 2 * sqrt(cx44) * cx45)$$

end if

$$CIMX = cx1 + cx2 + cx3 + cx4$$

! 拡散項

$$bx1 = h_{old}(i+1,j) * (u(i+2,j) - u(i,j)) / (2.0 * dx)$$

$$bx2 = h_{old}(i-1,j) * (u(i,j) - u(i-2,j)) / (2.0 * dx)$$

$$DIFUX = (bx1 - bx2) / (2.0 * dx)$$

$$by1 = hx1 * (u(i,j+2) - u(i,j)) / (2.0 * dx)$$

$$by2 = hx2 * (u(i,j) - u(i,j-2)) / (2.0 * dx)$$

```
DIFUY = (by1-by2)/(2.0*dy)
```

```
DIFU = vis*(DIFUX + DIFUY)
```

```
! 新しいステップの流量計算
```

```
M_new(i,j) = M_old(i,j)+dt*(-CNVUX-CNVUY-HIDX+CIMX+DIFU)
```

```
end do  
end do
```

```
!!!!!!!!!!!!!! N の計算 !!!!!!!
```

```
do i=4,iend-2,2  
    do j=3,my1-2,2
```

```
! 局所レイノルズ数の計算
```

```
if(t==1) then  
    Re = Mstart/vis  
else  
    MM1 = 0.25D0*(M_old(i+1,j+1)+M_old(i+1,j-1)+M_old(i-1,j+1)+M_old(i-1,j-1))  
    Re = abs(MM1)/vis  
end if
```

```
f = 0.0791*(Re**(-0.25))
```

```
uu1 = 0.25D0*(u(i+1,j+1)+u(i+1,j-1)+u(i-1,j+1)+u(i-1,j-1))
```

```
hy1 = 0.25D0*(h_old(i+2,j+1)+h_old(i+2,j-1)+h_old(i,j+1)+h_old(i,j-1))  
hy2 = 0.25D0*(h_old(i,j+1)+h_old(i,j-1)+h_old(i-2,j+1)+h_old(i-2,j-1))
```

```
! 対流項( 1 次精度風上差分)
```

```
! x 方向
```

```
u(i+1,j) = 0.5*(u(i+1,j+1)+u(i+1,j-1))  
u(i-1,j) = 0.5*(u(i-1,j+1)+u(i-1,j-1))
```

```
if(u(i+1,j) >= 0) then
```

```
CNVVXe = u(i+1,j)*N_old(i,j)  
else
```

```
CNVVXe = u(i+1,j)*N_old(i+2,j)
```

```
end if
```

```
if(u(i-1,j) >= 0) then
```

```
CNVVXw = u(i-1,j)*N_old(i-2,j)
```

```

else
    CNVVXw = u(i-1,j)*N_old(i,j)

end if

CNVVX = (CNVVXe - CNVVXw)/(2.0*dx)

! y 方向
v(i,j+1) = 0.5*(v(i,j+2)+v(i,j))
v(i,j-1) = 0.5*(v(i,j)+v(i,j-2))

if(v(i,j+1) >= 0) then
    CNVYYn = v(i,j+1)*N_old(i,j)
else
    CNVYYn = v(i,j+1)*N_old(i,j+2)
end if

if(v(i,j-1) >= 0) then
    CNVYYs = v(i,j-1)*N_old(i,j-2)
else
    CNVYYs = v(i,j-1)*N_old(i,j)
end if

CNVYY = (CNVYYn - CNVYYs)/(2.0*dy)

! 壓力項
HIDY = 0.5*g*(h_old(i,j+1)**2-h_old(i,j-1)**2)/(2.0*dy)

! 底面摩擦項
cy2 = -0.5*f*v(i,j)*sqrt(uu1**2+v(i,j)**2)

! レイノルズ応力項
cy31 = 0.3*sqrt(0.5*f)/(2.0*dx)
cy32 = 0.25*(u(i+1,j+1)+u(i+1,j-1))**2+0.25*(v(i+2,j)+v(i,j))**2
cy33 = (u(i+1,j+1)-u(i+1,j-1))/(2.0*dy)+(v(i+2,j)-v(i,j))/(2.0*dx)
cy34 = 0.25*((u(i-1,j+1)+u(i-1,j-1))**2+0.25*(v(i,j)+v(i-2,j))**2)

```

```

cy35 = (u(i-1,j+1)-u(i-1,j-1))/(2.0*dy)+(v(i,j)-v(i-2,j))/(2.0*dx)
cy3 = cy31*(hy1**2*sqrt(cy32)*cy33-hy2**2*sqrt(cy34)*cy35)

cy41 = 0.3*sqrt(0.5*f)/dy
cy42 = 0.25*(u(i+1,j+1)+u(i-1,j+1))**2+0.25*(v(i,j+2)+v(i,j))**2
cy43 = h_old(i,j+1)**2*sqrt(cy42)*(v(i,j+2)-v(i,j))/(2.0*dy)
cy44 = 0.25*(u(i+1,j-1)+u(i-1,j-1))**2+0.25*(v(i,j)+v(i,j-2))**2
cy45 = h_old(i,j-1)**2*sqrt(cy44)*(v(i,j)-v(i,j-2))/(2.0*dy)
cy46 = cy41*(cy43-cy45)
cy47 = (2.0/3.0)*2.07*(0.5*f)/(2.0*dy)
cy48 = cy47*(h_old(i,j+1)*cy42-h_old(i,j-1)*cy44)
cy4 = cy46-cy48

```

CIMY = cy2+cy3+cy4

! 拡散項

```

bx3 = hy1*(v(i+2,j)-v(i,j))/(2.0*dx)
bx4 = hy2*(v(i,j)-v(i-2,j))/(2.0*dx)
DIFVX = (bx3-bx4)/(2.0*dx)

by3 = h_old(i,j+1)*(v(i,j+2)-v(i,j))/(2.0*dy)
by4 = h_old(i,j-1)*(v(i,j)-v(i,j-2))/(2.0*dy)
DIFVY = (by3-by4)/(2.0*dy)

DIFV = vis*(DIFVX + DIFVY)

```

!新しいステップの流量計算

N_new(i,j) = N_old(i,j)+dt*(-CNVVX-CNVVY-HIDY+CIMY+DIFV)

```

end do
end do

```

```

!!!!!!!!!!!!!! H の計算 !!!!!!!
do i=4,iend-2,2
  do j=4,my1-1,2
    h_new(i,j) = h_old(i,j)-0.5*dt*((M_old(i+1,j)-M_old(i-1,j))/dx &
      +(N_old(i,j+1)-N_old(i,j-1))/dy)
  end do
end do

return
end subroutine cal_main

```

!!!!!!!!!!!!!!

```

!!!!!!      開口部計算のサブルーチン      !!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

subroutine cal_enter
    implicit none
! 境界(側壁)
    j=26
    M_old(mx2-2,j) = -M_old(mx2+2,j)
    u(mx2-2,j) = -u(mx2+2,j)

    M_old(mx3+2,j) = -M_old(mx3-2,j)
    u(mx3+2,j) = -u(mx3-2,j)

    do j=my1,my2,2
        N_old(mx2-1,j) = -N_old(mx2+1,j)
        v(mx2-1,j) = -v(mx2+1,j)

        N_old(mx3+1,j) = -N_old(mx3-1,j)
        v(mx3+1,j) = -v(mx3-1,j)
    end do

    j=26
    h_old(mx2-1,j) = h_old(mx2+1,j)
    h_old(mx3+1,j) = h_old(mx3-1,j)

!!!!!!!!!!!!!! Mの計算 !!!!!!!
do i=mx2+2,mx3-2,2
    j=26
! 局所レイノルズ数の計算
    if(t==1) then
        Re = Mstart/vis
    else
        Re = abs(M_old(i,j))/vis
    end if
    f = 0.0791*(Re**(-0.25))

    vv1 = 0.25D0*(v(i+1,j+1)+v(i+1,j-1)+v(i-1,j+1)+v(i-1,j-1))
    hx1 = 0.25D0*(h_old(i+1,j+2)+h_old(i+1,j)+h_old(i-1,j+2)+h_old(i-1,j))
    hx2 = 0.25D0*(h_old(i+1,j)+h_old(i+1,j-2)+h_old(i-1,j)+h_old(i-1,j-2))

! 対流項(1次精度風上差分)
! x 方向
    u(i+1,j) = 0.5*(u(i+2,j)+u(i,j))
    u(i-1,j) = 0.5*(u(i,j)+u(i-2,j))

    if(u(i+1,j) >= 0) then

```

```

CNVUXe = u(i+1,j)*M_old(i,j)

else

CNVUXe = u(i+1,j)*M_old(i+2,j)

end if

if(u(i-1,j) >= 0) then

CNVUXw = u(i-1,j)*M_old(i-2,j)

else

CNVUXw = u(i-1,j)*M_old(i,j)

end if

CNVUX = (CNVUXe - CNVUXw)/(2.0*dx)

! y 方向
v(i,j+1) = 0.5*(v(i+1,j+1)+v(i-1,j+1))
v(i,j-1) = 0.5*(v(i+1,j-1)+v(i-1,j-1))

if(v(i,j+1) >= 0) then

CNVUYn = v(i,j+1)*M_old(i,j)

else

CNVUYn = v(i,j+1)*M_old(i,j+2)
end if

if(v(i,j-1) >= 0) then

CNVUYs = v(i,j-1)*M_old(i,j-2)

else

CNVUYs = v(i,j-1)*M_old(i,j)

end if

CNVUY = (CNVUYn - CNVUYs)/(2.0*dy)

! 壓力項
HIDX = 0.5*g*(h_old(i+1,j)**2-h_old(i-1,j)**2)/(2.0*dx)

```

! 勾配項

$$cx1 = g * 0.5 * (h_old(i+1,j) + h_old(i-1,j)) * 0.002$$

! 底面摩擦項

$$cx2 = -0.5 * f * u(i,j) * sqrt(u(i,j)^2 + v^2)$$

! レイノルズ応力項

$$cx31 = 0.3 * sqrt(0.5 * f) / dx$$

$$cx32 = 0.25 * (u(i+2,j) + u(i,j))^2 + 0.25 * (v(i+1,j+1) + v(i+1,j-1))^2$$

$$cx33 = h_old(i+1,j) * 2 * sqrt(cx32) * (u(i+2,j) - u(i,j)) / (2.0 * dx)$$

$$cx34 = 0.25 * (u(i,j) + u(i-2,j))^2 + 0.25 * (v(i-1,j+1) + v(i-1,j-1))^2$$

$$cx35 = h_old(i-1,j) * 2 * sqrt(cx34) * (u(i,j) - u(i-2,j)) / (2.0 * dx)$$

$$cx36 = cx31 * (cx33 - cx35)$$

$$cx37 = (1.0 / 3.0) * 2.07 * (0.5 * f) / dx$$

$$cx38 = cx37 * (h_old(i+1,j) * cx32 - h_old(i-1,j) * cx34)$$

$$cx3 = cx36 - cx38$$

$$cx41 = 0.3 * sqrt(0.5 * f) / (2.0 * dy)$$

$$cx42 = 0.25 * (u(i,j+2) + u(i,j))^2 + 0.25 * (v(i+1,j+1) + v(i-1,j+1))^2$$

$$cx43 = (u(i,j+2) - u(i,j)) / (2.0 * dy) + (v(i+1,j+1) - v(i-1,j+1)) / (2.0 * dx)$$

$$cx44 = 0.25 * (u(i,j) + u(i,j-2))^2 + 0.25 * (v(i+1,j-1) + v(i-1,j-1))^2$$

$$cx45 = (u(i,j) - u(i,j-2)) / (2.0 * dy) + (v(i+1,j-1) - v(i-1,j-1)) / (2.0 * dx)$$

$$cx4 = cx41 * (hx1 * 2 * sqrt(cx42) * cx43 - hx2 * 2 * sqrt(cx44) * cx45)$$

$$CIMX = cx1 + cx2 + cx3 + cx4$$

! 拡散項

$$bx1 = h_old(i+1,j) * (u(i+2,j) - u(i,j)) / (2.0 * dx)$$

$$bx2 = h_old(i-1,j) * (u(i,j) - u(i-2,j)) / (2.0 * dx)$$

$$DIFUX = (bx1 - bx2) / (2.0 * dx)$$

$$by1 = hx1 * (u(i,j+2) - u(i,j)) / (2.0 * dx)$$

$$by2 = hx2 * (u(i,j) - u(i,j-2)) / (2.0 * dx)$$

$$DIFUY = (by1 - by2) / (2.0 * dy)$$

$$DIFU = vis * (DIFUX + DIFUY)$$

! 新しいステップの流量計算

$$M_new(i,j) = M_old(i,j) + dt * (-CNVUX - CNVUY - HIDX + CIMX + DIFU)$$

end do

!!!!!!!!!!!!!! N の計算 !!!!!!!

do i=mx2+1, mx3-1, 2

 do j=my1, my2, 2

```

! 局所レイノルズ数の計算
if(t==1) then
    Re = Mstart/vis
else
    MM1 = 0.25D0*(M_old(i+1,j+1)+M_old(i+1,j-1)+M_old(i-1,j+1)+M_old(i-1,j-1))
    Re = abs(MM1)/vis
end if

f = 0.0791*(Re**(-0.25))

uu1 = 0.25D0*(u(i+1,j+1)+u(i+1,j-1)+u(i-1,j+1)+u(i-1,j-1))

hy1 = 0.25D0*(h_old(i+2,j+1)+h_old(i+2,j-1)+h_old(i,j+1)+h_old(i,j-1))
hy2 = 0.25D0*(h_old(i,j+1)+h_old(i,j-1)+h_old(i-2,j+1)+h_old(i-2,j-1))

! 対流項(1次精度風上差分)
! x 方向
u(i+1,j) = 0.5*(u(i+1,j+1)+u(i+1,j-1))
u(i-1,j) = 0.5*(u(i-1,j+1)+u(i-1,j-1))

if(u(i+1,j) >= 0) then
    CNVVXe = u(i+1,j)*N_old(i,j)
else
    CNVVXe = u(i+1,j)*N_old(i+2,j)
end if
if(u(i-1,j) >= 0) then
    CNVVXw = u(i-1,j)*N_old(i-2,j)
else
    CNVVXw = u(i-1,j)*N_old(i,j)
end if

CNVvx = (CNVVXe - CNVVXw)/(2.0*dx)

! y 方向
v(i,j+1) = 0.5*(v(i,j+2)+v(i,j))
v(i,j-1) = 0.5*(v(i,j)+v(i,j-2))

```

```

if(v(i,j+1) >= 0) then
    CNVVYn = v(i,j+1)*N_old(i,j)
else
    CNVVYn = v(i,j+1)*N_old(i,j+2)
end if

if(v(i,j-1) >= 0) then
    CNVVYs = v(i,j-1)*N_old(i,j-2)
else
    CNVVYs = v(i,j-1)*N_old(i,j)
end if

CNVVY = (CNVVYn - CNVVYs)/(2.0*dy)

! 壓力項
HIDY = 0.5*g*(h_old(i,j+1)**2-h_old(i,j-1)**2)/(2.0*dy)

! 底面摩擦項
cy2 = -0.5*f*v(i,j)*sqrt(uu1**2+v(i,j)**2)

! レイノルズ応力項
cy31 = 0.3*sqrt(0.5*f)/(2.0*dx)
cy32 = 0.25*(u(i+1,j+1)+u(i+1,j-1))**2+0.25*(v(i+2,j)+v(i,j))**2
cy33 = (u(i+1,j+1)-u(i+1,j-1))/(2.0*dy)+(v(i+2,j)-v(i,j))/(2.0*dx)
cy34 = 0.25*((u(i-1,j+1)+u(i-1,j-1))**2+0.25*(v(i,j)+v(i-2,j))**2)
cy35 = (u(i-1,j+1)-u(i-1,j-1))/(2.0*dy)+(v(i,j)-v(i-2,j))/(2.0*dx)
cy36 = 0.25*(u(i-1,j+1)+u(i-1,j-1))**2+v(i,j)**2
cy37 = 0.25*(u(i+1,j+1)+u(i+1,j-1))**2+v(i,j)**2

! 壁面とそれ以外の流れ場の取り扱い
if(i==mx2+1) then
    cy3 = cy31*(hy1**2*sqrt(cy32)*cy33-hy2**2*sqrt(cy36)*cy35)
else if(i==mx3-1) then
    cy3 = cy31*(hy1**2*sqrt(cy37)*cy33-hy2**2*sqrt(cy34)*cy35)

```

```
else
```

$$cy3 = cy31 * (hy1**2 * sqrt(cy32) * cy33 - hy2**2 * sqrt(cy34) * cy35)$$

```
end if
```

$$cy41 = 0.3 * sqrt(0.5 * f) / dy$$

$$cy42 = 0.25 * (u(i+1,j+1) + u(i-1,j+1))**2 + 0.25 * (v(i,j+2) + v(i,j))**2$$

$$cy43 = h_{old}(i,j+1)**2 * sqrt(cy42) * (v(i,j+2) - v(i,j)) / (2.0 * dy)$$

$$cy44 = 0.25 * (u(i+1,j-1) + u(i-1,j-1))**2 + 0.25 * (v(i,j) + v(i,j-2))**2$$

$$cy45 = h_{old}(i,j-1)**2 * sqrt(cy44) * (v(i,j) - v(i,j-2)) / (2.0 * dy)$$

$$cy46 = cy41 * (cy43 - cy45)$$

$$cy47 = (2.0 / 3.0) * 2.07 * (0.5 * f) / (2.0 * dy)$$

$$cy48 = cy47 * (h_{old}(i,j+1) * cy42 - h_{old}(i,j-1) * cy44)$$

$$cy4 = cy46 - cy48$$

$$CIMY = cy2 + cy3 + cy4$$

```
! 拡散項
```

$$bx3 = hy1 * (v(i+2,j) - v(i,j)) / (2.0 * dx)$$

$$bx4 = hy2 * (v(i,j) - v(i-2,j)) / (2.0 * dx)$$

$$DIFVX = (bx3 - bx4) / (2.0 * dx)$$

$$by3 = h_{old}(i,j+1) * (v(i,j+2) - v(i,j)) / (2.0 * dy)$$

$$by4 = h_{old}(i,j-1) * (v(i,j) - v(i,j-2)) / (2.0 * dy)$$

$$DIFVY = (by3 - by4) / (2.0 * dy)$$

$$DIFV = vis * (DIFVX + DIFVY)$$

```
! 新しいステップの流量計算
```

$$N_{new}(i,j) = N_{old}(i,j) + dt * (-CNVXX - CNVVY - HIDY + CIMY + DIFV)$$

```
end do
```

```
end do
```

```
!!!!!!!!!!!!!! H の計算 !!!!!!!
```

```
do i=mx2+1, mx3-1, 2
```

```
    j=26
```

$$h_{new}(i,j) = h_{old}(i,j) - 0.5 * dt * ((M_{old}(i+1,j) - M_{old}(i-1,j)) / dx & \\ + (N_{old}(i,j+1) - N_{old}(i,j-1)) / dy)$$

```
end do
```

```
return
```

```
end subroutine cal_enter
```

```

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!      魚巣内計算のサブルーチン      !!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

subroutine cal_gyo
implicit none

! 境界(上壁)
do i=mx1, mx4, 2
    M_old(i,jend+1) = -M_old(i,jend-1)
    u(i,jend+1) = -u(i,jend-1)
end do

do i=mx1+1, mx4-1, 2
    h_old(i,jend+1) = h_old(i,jend-1)
end do

! 境界(側壁)
do j=my2+1, jend-1, 2
    M_old(mx1-2,j) = -M_old(mx1+2,j)
    u(mx1-2,j) = -u(mx1+2,j)

    M_old(mx4+2,j) = -M_old(mx4-2,j)
    u(mx4+2,j) = -u(mx4-2,j)
end do

do j=my2, jend, 2
    N_old(mx1-1,j) = -N_old(mx1+1,j)
    v(mx1-1,j) = -v(mx1+1,j)
    N_old(mx4+1,j) = -N_old(mx4-1,j)
    v(mx4+1,j) = -v(mx4-1,j)
end do

do j=my2+1, jend-1, 2
    h_old(mx1-1,j) = h_old(mx1+1,j)
    h_old(mx4+1,j) = h_old(mx4-1,j)
end do

! 下壁
do i=mx1, mx2, 2
    M_old(i,my2-1) = -M_old(i,my2+1)
    u(i,my2-1) = -u(i,my2+1)
end do

do i=mx3, mx4, 2

```

```

M_old(i,my2-1) = -M_old(i,my2+1)
u(i,my2-1) = -u(i,my2+1)
end do

do i=mx1+1,mx2-1,2
N_old(i,my2-2) = -N_old(i,my2+2)
v(i,my2-2) = -v(i,my2+2)
end do

do i=mx3+1,mx4-1,2
N_old(i,my2-2) = -N_old(i,my2+2)
v(i,my2-2) = -v(i,my2+2)
end do

do i=mx1+1,mx2-1,2
h_old(i,my2-1) = h_old(i,my2+1)
end do

do i=mx3+1,mx4-1,2
h_old(i,my2-1) = h_old(i,my2+1)
end do

!!!!!!!!!!!!!! Mの計算 !!!!!!!
do i=mx1+2,mx4-2,2
do j=my2+1,jend-1,2

! 局所レイノルズ数の計算
if(t==1) then
  Re = Mstart/vis
else
  Re = abs(M_old(i,j))/vis
end if

f = 0.0791*(Re**(-0.25))

vv1 = 0.25D0*(v(i+1,j+1)+v(i+1,j-1)+v(i-1,j+1)+v(i-1,j-1))
hx1 = 0.25D0*(h_old(i+1,j+2)+h_old(i+1,j)+h_old(i-1,j+2)+h_old(i-1,j))
hx2 = 0.25D0*(h_old(i+1,j)+h_old(i+1,j-2)+h_old(i-1,j)+h_old(i-1,j-2))

! 対流項(1次精度風上差分)
! x 方向

u(i+1,j) = 0.5*(u(i+2,j)+u(i,j))
u(i-1,j) = 0.5*(u(i,j)+u(i-2,j))

if(u(i+1,j) >= 0) then

```

```

CNVUXe = u(i+1,j)*M_old(i,j)

else

CNVUXe = u(i+1,j)*M_old(i+2,j)

end if

if(u(i-1,j) >= 0) then

CNVUXw = u(i-1,j)*M_old(i-2,j)

else

CNVUXw = u(i-1,j)*M_old(i,j)

end if

CNVUX = (CNVUXe - CNVUXw)/(2.0*dx)

! y 方向
v(i,j+1) = 0.5*(v(i+1,j+1)+v(i-1,j+1))
v(i,j-1) = 0.5*(v(i+1,j-1)+v(i-1,j-1))

if(v(i,j+1) >= 0) then

CNVUYn = v(i,j+1)*M_old(i,j)

else

CNVUYn = v(i,j+1)*M_old(i,j+2)

end if

if(v(i,j-1) >= 0) then

CNVUYs = v(i,j-1)*M_old(i,j-2)

else

CNVUYs = v(i,j-1)*M_old(i,j)

end if

CNVUY = (CNVUYn - CNVUYs)/(2.0*dy)

```

! 圧力項

$$HIDX = 0.5 * g * (h_old(i+1,j)**2 - h_old(i-1,j)**2) / (2.0 * dx)$$

! 勾配項

$$cx1 = g * 0.5 * (h_old(i+1,j) + h_old(i-1,j)) * 0.002$$

! 底面摩擦項

$$cx2 = -0.5 * f * u(i,j) * sqrt(u(i,j)**2 + v(i,j)**2)$$

! レイノルズ応力項

$$cx31 = 0.3 * sqrt(0.5 * f) / dx$$

$$cx32 = 0.25 * (u(i+2,j) + u(i,j))**2 + 0.25 * (v(i+1,j+1) + v(i+1,j-1))**2$$

$$cx33 = h_old(i+1,j)**2 * sqrt(cx32) * (u(i+2,j) - u(i,j)) / (2.0 * dx)$$

$$cx34 = 0.25 * (u(i,j) + u(i-2,j))**2 + 0.25 * (v(i-1,j+1) + v(i-1,j-1))**2$$

$$cx35 = h_old(i-1,j)**2 * sqrt(cx34) * (u(i,j) - u(i-2,j)) / (2.0 * dx)$$

$$cx36 = cx31 * (cx33 - cx35)$$

$$cx37 = (1.0 / 3.0) * 2.07 * (0.5 * f) / dx$$

$$cx38 = cx37 * (h_old(i+1,j) * cx32 - h_old(i-1,j) * cx34)$$

$$cx3 = cx36 - cx38$$

$$cx41 = 0.3 * sqrt(0.5 * f) / (2.0 * dy)$$

$$cx42 = 0.25 * (u(i,j+2) + u(i,j))**2 + 0.25 * (v(i+1,j+1) + v(i-1,j+1))**2$$

$$cx43 = (u(i,j+2) - u(i,j)) / (2.0 * dy) + (v(i+1,j+1) - v(i-1,j+1)) / (2.0 * dx)$$

$$cx44 = 0.25 * (u(i,j) + u(i,j-2))**2 + 0.25 * (v(i+1,j-1) + v(i-1,j-1))**2$$

$$cx45 = (u(i,j) - u(i,j-2)) / (2.0 * dy) + (v(i+1,j-1) - v(i-1,j-1)) / (2.0 * dx)$$

$$cx46 = u(i,j)**2 + 0.25 * (v(i+1,j+1) + v(i-1,j+1))**2$$

$$cx47 = u(i,j)**2 + 0.25 * (v(i+1,j-1) + v(i-1,j-1))**2$$

! 壁面とそれ以外の流れ場の取り扱い

if(j==jend-2) then

$$cx4 = cx41 * (hx1**2 * sqrt(cx46) * cx43 - hx2**2 * sqrt(cx44) * cx45)$$

else if(mx1+2<=i .and. i<=mx2 .and. j==my2+1 .or. mx3<=i .and. i<=mx4-2 .and.j==my2+1) then

$$cx4 = cx41 * (hx1**2 * sqrt(cx42) * cx43 - hx2**2 * sqrt(cx47) * cx45)$$

else

$$cx4 = cx41 * (hx1**2 * sqrt(cx42) * cx43 - hx2**2 * sqrt(cx44) * cx45)$$

end if

$$CIMX = cx1 + cx2 + cx3 + cx4$$

! 拡散項

```
bx1 = h_old(i+1,j)*(u(i+2,j)-u(i,j))/(2.0*dx)
bx2 = h_old(i-1,j)*(u(i,j)-u(i-2,j))/(2.0*dx)
DIFUX = (bx1-bx2)/(2.0*dx)
```

```
by1 = hx1*(u(i,j+2)-u(i,j))/(2.0*dx)
by2 = hx2*(u(i,j)-u(i,j-2))/(2.0*dx)
DIFUY = (by1-by2)/(2.0*dy)
```

```
DIFU = vis*(DIFUX + DIFUY)
```

! 新しいステップの流量計算

```
M_new(i,j) = M_old(i,j)+dt*(-CNVUX-CNVUY-HIDX+CIMX+DIFU)
```

```
end do
```

```
end do
```

!!!!!!!!!!!!!! N の計算 !!!!!!!!!!

```
do i=mx1+1, mx4-1, 2
    do j=my2+2, jend-2, 2
```

! 局所レイノルズ数の計算

```
if(t==1) then
```

```
    Re = Mstart/vis
```

```
else
```

```
    MM1 = 0.25D0*(M_old(i+1,j+1)+M_old(i+1,j-1)+M_old(i-1,j+1)+M_old(i-1,j-1))
```

```
    Re = abs(MM1)/vis
```

```
end if
```

```
f = 0.0791*(Re**(-0.25))
```

```
uu1 = 0.25D0*(u(i+1,j+1)+u(i+1,j-1)+u(i-1,j+1)+u(i-1,j-1))
```

```
hy1 = 0.25D0*(h_old(i+2,j+1)+h_old(i+2,j-1)+h_old(i,j+1)+h_old(i,j-1))
```

```
hy2 = 0.25D0*(h_old(i,j+1)+h_old(i,j-1)+h_old(i-2,j+1)+h_old(i-2,j-1))
```

! 対流項(1次精度風上差分)

! x 方向

```
u(i+1,j) = 0.5*(u(i+1,j+1)+u(i+1,j-1))
```

```
u(i-1,j) = 0.5*(u(i-1,j+1)+u(i-1,j-1))
```

```
if(u(i+1,j) >= 0) then
```

```
CNVVXe = u(i+1,j)*N_old(i,j)
```

```

else
    CNVVXe = u(i+1,j)*N_old(i+2,j)

end if

if(u(i-1,j) >= 0) then
    CNVVXw = u(i-1,j)*N_old(i-2,j)

else
    CNVVXw = u(i-1,j)*N_old(i,j)

end if

CNVVX = (CNVVXe - CNVVXw)/(2.0*dx)

! y 方向
v(i,j+1) = 0.5*(v(i,j+2)+v(i,j))
v(i,j-1) = 0.5*(v(i,j)+v(i,j-2))

if(v(i,j+1) >= 0) then
    CNVYYn = v(i,j+1)*N_old(i,j)

else
    CNVYYn = v(i,j+1)*N_old(i,j+2)

end if

if(v(i,j-1) >= 0) then
    CNVYYs = v(i,j-1)*N_old(i,j-2)

else
    CNVYYs = v(i,j-1)*N_old(i,j)

end if

CNVYY = (CNVYYn - CNVYYs)/(2.0*dy)

! 壓力項
HIDY = 0.5*g*(h_old(i,j+1)**2-h_old(i,j-1)**2)/(2.0*dy)

```

! 底面摩擦項

$$cy2 = -0.5*f*v(i,j)*sqrt(uu1**2+v(i,j)**2)$$

! レイノルズ応力項

$$cy31 = 0.3*sqrt(0.5*f)/(2.0*dx)$$

$$cy32 = 0.25*(u(i+1,j+1)+u(i+1,j-1))**2+0.25*(v(i+2,j)+v(i,j))**2$$

$$cy33 = (u(i+1,j+1)-u(i+1,j-1))/(2.0*dy)+(v(i+2,j)-v(i,j))/(2.0*dx)$$

$$cy34 = 0.25*((u(i-1,j+1)+u(i-1,j-1))**2+0.25*(v(i,j)+v(i-2,j))**2)$$

$$cy35 = (u(i-1,j+1)-u(i-1,j-1))/(2.0*dy)+(v(i,j)-v(i-2,j))/(2.0*dx)$$

$$cy36 = 0.25*(u(i-1,j+1)+u(i-1,j-1))**2+v(i,j)**2$$

$$cy37 = 0.25*(u(i+1,j+1)+u(i+1,j-1))**2+v(i,j)**2$$

! 壁面とそれ以外の流れ場の取り扱い

if(i==mx1+1) then

$$cy3 = cy31*(hy1**2*sqrt(cy32)*cy33-hy2**2*sqrt(cy36)*cy35)$$

else if(i==mx4-1) then

$$cy3 = cy31*(hy1**2*sqrt(cy37)*cy33-hy2**2*sqrt(cy34)*cy35)$$

else

$$cy3 = cy31*(hy1**2*sqrt(cy32)*cy33-hy2**2*sqrt(cy34)*cy35)$$

end if

$$cy41 = 0.3*sqrt(0.5*f)/dy$$

$$cy42 = 0.25*(u(i+1,j+1)+u(i-1,j+1))**2+0.25*(v(i,j+2)+v(i,j))**2$$

$$cy43 = h_old(i,j+1)**2*sqrt(cy42)*(v(i,j+2)-v(i,j))/(2.0*dy)$$

$$cy44 = 0.25*(u(i+1,j-1)+u(i-1,j-1))**2+0.25*(v(i,j)+v(i,j-2))**2$$

$$cy45 = h_old(i,j-1)**2*sqrt(cy44)*(v(i,j)-v(i,j-2))/(2.0*dy)$$

$$cy46 = cy41*(cy43-cy45)$$

$$cy47 = (2.0/3.0)*2.07*(0.5*f)/(2.0*dy)$$

$$cy48 = cy47*(h_old(i,j+1)*cy42-h_old(i,j-1)*cy44)$$

$$cy4 = cy46-cy48$$

$$CIMY = cy2+cy3+cy4$$

! 拡散項

$$bx3 = hy1*(v(i+2,j)-v(i,j))/(2.0*dx)$$

$$bx4 = hy2*(v(i,j)-v(i-2,j))/(2.0*dx)$$

$$DIFVX = (bx3-bx4)/(2.0*dx)$$

$$by3 = h_old(i,j+1)*(v(i,j+2)-v(i,j))/(2.0*dy)$$

$$by4 = h_old(i,j-1)*(v(i,j)-v(i,j-2))/(2.0*dy)$$

```
DIFVY = (by3-by4)/(2.0*dy)
```

```
DIFV = vis*(DIFVX + DIFVY)
```

```
! 新しいステップの流量計算
```

```
N_new(i,j) = N_old(i,j)+dt*(-CNVVX-CNVVY-HIDY+CIMY+DIFV)
```

```
end do  
end do
```

```
!!!!!!!!!!!!!! H の計算 !!!!!!!
```

```
do i=mx1+1, mx4-1, 2  
  do j=my2+1, jend-1, 2  
    h_new(i,j) = h_old(i,j)-0.5*dt*((M_old(i+1,j)-M_old(i-1,j))/dx &  
      +(N_old(i,j+1)-N_old(i,j-1))/dy)  
  end do  
end do
```

```
return  
end subroutine cal_gyo
```

```
!!!!!!!!!!!!!! 時間進行サブルーチン !!!!!!!
```

```
subroutine adv  
  implicit none
```

```
! 主流部
```

```
do i=3, iend-3, 2  
  do j=4, my1-1, 2  
    M_old(i,j) = M_new(i,j)  
    u(i,j) = M_new(i,j) / h_new(i+1,j)  
  end do  
end do
```

```
do i=4, iend-2, 2  
  do j=3, my1-2, 2  
    N_old(i,j) = N_new(i,j)  
    v(i,j) = N_new(i,j) / h_new(i,j+1)  
  end do  
end do
```

```
do i=4, iend-2, 2  
  do j=4, my1-1, 2  
    h_old(i,j) = h_new(i,j)  
  end do  
end do
```

```

! 開口部
do i=mx2+2, mx3-2, 2
    j=26
    M_old(i,j) = M_new(i,j)
    u(i,j) = M_new(i,j) / h_new(i+1,j)
end do

do i=mx2+1, mx3-1, 2
    do j=my1, my2, 2
        N_old(i,j) = N_new(i,j)
        v(i,j) = N_new(i,j) / h_new(i,j+1)
    end do
end do

do i=mx2+1, mx3-1, 2
    j=26
    h_old(i,j) = h_new(i,j)
end do

! 魚巣内部
do i=mx1+2, mx4-2, 2
    do j=my2+1, jend-1, 2
        M_old(i,j) = M_new(i,j)
        u(i,j) = M_new(i,j) / h_new(i+1,j)
    end do
end do

do i=mx1+1, mx4-1, 2
    do j=my2+2, jend-2, 2
        N_old(i,j) = N_new(i,j)
        v(i,j) = N_new(i,j) / h_new(i,j+1)
    end do
end do

do i=mx1+1, mx4-1, 2
    do j=my2+1, jend-1, 2
        h_old(i,j) = h_new(i,j)
    end do
end do

return
end subroutine adv

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!! 補完計算サブルーチン !!!!!!!
subroutine prout

```

```

implicit none

if(MOD(t,2000) == 0) then
! 主流部
do i=2,iend-2,2
  do j=2,my1-1,2
    u_pro(i,j) = 0.5*(u(i-1,j)+u(i+1,j))
    v_pro(i,j) = 0.5*(v(i,j-1)+v(i,j+1))
  end do
end do

! 開口部
do i=mx2+1,mx3-1,2
  j=26
  u_pro(i,j) = 0.5*(u(i-1,j)+u(i+1,j))
  v_pro(i,j) = 0.5*(v(i,j-1)+v(i,j+1))
end do

! 魚巣部
do i=mx1+1,mx4-3,2
  do j=my2+1,jend-1,2
    u_pro(i,j) = 0.5*(u(i-1,j)+u(i+1,j))
    v_pro(i,j) = 0.5*(v(i,j-1)+v(i,j+1))
  end do
end do

end if

return
end subroutine prout

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!! 時間平均流計算サブルーチン !!!!!!!!!!!!!!!
subroutine average
implicit none

if(72000<=t .and. MOD(t,4000) == 0) then
! 主流部
do i=2,iend-2,2
  do j=2,my1-1,2
    uu(i,j) = uu(i,j)+u_pro(i,j)
    vv(i,j) = vv(i,j)+v_pro(i,j)
    hh(i,j) = hh(i,j)+h_old(i,j)
  end do
end do

! 開口部

```

```

do i=mx2+1, mx3-1,2
    j=26
    uu(i,j) = uu(i,j)+u_pro(i,j)
    vv(i,j) = vv(i,j)+v_pro(i,j)
    hh(i,j) = hh(i,j)+h_old(i,j)
end do

! 魚巣部
do i=mx1+1, mx4-3,2
    do j=my2+1, jend-1,2
        uu(i,j) = uu(i,j)+u_pro(i,j)
        vv(i,j) = vv(i,j)+v_pro(i,j)
        hh(i,j) = hh(i,j)+h_old(i,j)
    end do
end do

end if
! 出力

if(t==tend) then
    ! 主流部
    do i=2,iend-2,2
        do j=2,my1-1,2
            u_ave(i,j) = uu(i,j)/43.0
            v_ave(i,j) = vv(i,j)/43.0
            h_ave(i,j) = hh(i,j)/43.0
            xx(i,j) = i
            yy(i,j) = j
            write(22,'(1x,2i5,3f15.10)') xx(i,j),yy(i,j),u_ave(i,j),v_ave(i,j),h_ave(i,j)
        end do
    end do

    ! 開口部
    do i=mx2+1, mx3-1,2
        j=26
        u_ave(i,j) = uu(i,j)/43.0
        v_ave(i,j) = vv(i,j)/43.0
        h_ave(i,j) = hh(i,j)/43.0
        xx(i,j) = i
        yy(i,j) = j
        write(22,'(1x,2i5,3f15.10)') xx(i,j),yy(i,j),u_ave(i,j),v_ave(i,j),h_ave(i,j)
    end do

    ! 魚巣部
    do i=mx1+1, mx4-3,2
        do j=my2+1, jend-1,2

```

```

u_ave(i,j) = uu(i,j)/43.0
v_ave(i,j) = vv(i,j)/43.0
h_ave(i,j) = hh(i,j)/43.0
xx(i,j) = i
yy(i,j) = j
write(22,'(1x,2i5,3f15.10)') xx(i,j),yy(i,j),u_ave(i,j),v_ave(i,j),h_ave(i,j)
end do
end do

end if

```

```
return
```

```
end subroutine average
```

```
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!! u_bar 計算サブルーチン !!!!!!!!!!!!!!!
subroutine turb
implicit none
```

```
if(72000<=t .and. MOD(t,4000) == 0) then
```

```
! 開口部上流端
```

```
    i=mx2+2
    do j=16,36,2
        uu(i,j) = uu(i,j)+u(i,j)
    end do
```

```
    i=mx2+1
    do j=17,37,2
        vv(i,j) = vv(i,j)+v(i,j)
    end do
```

```
! 開口部中央
```

```
    i=61
    do j=16,36,2
        uu(i,j) = uu(i,j)+u(i,j)
    end do
```

```
    i=60
    do j=17,37,2
        vv(i,j) = vv(i,j)+v(i,j)
    end do
```

```
! 開口部下流端
```

```
    i=mx3-2
    do j=16,36,2
```

```

    uu(i,j) = uu(i,j)+u(i,j)
end do

    i=mx3-1
do j=17,37,2
    vv(i,j) = vv(i,j)+v(i,j)
end do

end if

! u_bar の計算
if(t==tend) then

! 開口部上流端
    i=mx2+2
do j=16,36,2
    do k=1,43
        u_bar(i,j) = uu(i,j)/43.0
        xx(i,j) = i
        yy(i,j) = j
        write(23,'(1x,3i5,f15.10)') k,xx(i,j),yy(i,j),u_bar(i,j)
    end do
end do

    i=mx2+1
do j=17,37,2
    do k=1,43
        v_bar(i,j) = vv(i,j)/43.0
        xx(i,j) = i
        yy(i,j) = j
        write(24,'(1x,3i5,f15.10)') k,xx(i,j),yy(i,j),v_bar(i,j)
    end do
end do

! 開口部中央
    i=61
do j=16,36,2
    do k=1,43
        u_bar(i,j) = uu(i,j)/43.0
        xx(i,j) = i
        yy(i,j) = j
        write(23,'(1x,3i5,f15.10)') k,xx(i,j),yy(i,j),u_bar(i,j)
    end do
end do

```

```

i=60
do j=17,37,2
  do k=1,43
    v_bar(i,j) = vv(i,j)/43.0
    xx(i,j) = i
    yy(i,j) = j
    write(24,'(1x,3i5,f15.10)') k,xx(i,j),yy(i,j),v_bar(i,j)
  end do
end do

```

! 開口部下流端

```

i=mx3-2
do j=16,36,2
  do k=1,43
    u_bar(i,j) = uu(i,j)/43.0
    xx(i,j) = i
    yy(i,j) = j
    write(23,'(1x,3i5,f15.10)') k,xx(i,j),yy(i,j),u_bar(i,j)
  end do
end do

```

```

i=mx3-1
do j=17,37,2
  do k=1,43
    v_bar(i,j) = vv(i,j)/43.0
    xx(i,j) = i
    yy(i,j) = j
    write(24,'(1x,3i5,f15.10)') k,xx(i,j),yy(i,j),v_bar(i,j)
  end do
end do

```

end if

! 各点における流速

```

if(72000<=t .and. MOD(t,4000) == 0) then
  tt = (t-68000)/4000

```

! 開口部上流端

```

i=mx2+2
do j=16,36,2
  xx(i,j) = i
  yy(i,j) = j

```

```

        write(7,'(1x,3i5,2f15.10)') tt,xx(i,j),yy(i,j),u(i,j),v(i-1,j+1)
end do

! 開口部中央
      i=61
do j=16,36,2
  xx(i,j) = i
  yy(i,j) = j
  write(8,'(1x,3i5,2f15.10)') tt,xx(i,j),yy(i,j),u(i,j),v(i-1,j+1)
end do

! 開口部下流端
      i=mx3-2
do j=16,36,2
  xx(i,j) = i
  yy(i,j) = j
  write(9,'(1x,3i5,2f15.10)') tt,xx(i,j),yy(i,j),u(i,j),v(i-1,j+1)
end do

end if

return
end subroutine turb

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!! データ出力サブルーチン !!!!!!!!!!!!!!!
subroutine output
  implicit none
! 流れ場全体

! 6.2 ~ 8.0(s)
if(124000<=t .and. t<=160000 .and. MOD(t,4000) == 0) then
! 主流部
  do i=2,iend-2,2
    do j=2,my1-1,2
      xx(i,j) = i
      yy(i,j) = j
      write(1,'(1x,2i5,3f15.10)') xx(i,j),yy(i,j),u_pro(i,j),v_pro(i,j),h_old(i,j)
    end do
  end do

! 開口部
  do i=mx2+1,my1-1,2
    j=26
    xx(i,j) = i

```

```

yy(i,j) = j
write(1,'(1x,2i5,3f15.10)') xx(i,j),yy(i,j),u_pro(i,j),v_pro(i,j),h_old(i,j)
end do

! 魚巣部
do i=mx1+1, mx4-3,2
  do j=my2+1,jend-1,2
    xx(i,j) = i
    yy(i,j) = j
    write(1,'(1x,2i5,3f15.10)') xx(i,j),yy(i,j),u_pro(i,j),v_pro(i,j),h_old(i,j)
  end do
end do
end if

! 8.2 ~ 9.8(s)
if(164000<=t .and. t<=196000 .and. MOD(t,4000) == 0) then
! 主流部
do i=2,iend-2,2
  do j=2,my1-1,2
    xx(i,j) = i
    yy(i,j) = j
    write(2,'(1x,2i5,3f15.10)') xx(i,j),yy(i,j),u_pro(i,j),v_pro(i,j),h_old(i,j)
  end do
end do

! 開口部
do i=mx2+1, mx3-1,2
  j=26
  xx(i,j) = i
  yy(i,j) = j
  write(2,'(1x,2i5,3f15.10)') xx(i,j),yy(i,j),u_pro(i,j),v_pro(i,j),h_old(i,j)
end do

! 魚巣部
do i=mx1+1, mx4-3,2
  do j=my2+1,jend-1,2
    xx(i,j) = i
    yy(i,j) = j
    write(2,'(1x,2i5,3f15.10)') xx(i,j),yy(i,j),u_pro(i,j),v_pro(i,j),h_old(i,j)
  end do
end do

end if

! 10.0 ~ 12.0(s)
if(200000<=t .and. t<=240000 .and. MOD(t,4000) == 0) then

```

```

! 主流部
do i=2,iend-2,2
  do j=2,my1-1,2
    xx(i,j) = i
    yy(i,j) = j
    write(3,'(1x,2i5,3f15.10)') xx(i,j),yy(i,j),u_pro(i,j),v_pro(i,j),h_old(i,j)
  end do
end do

! 開口部
do i=mx2+1, mx3-1,2
  j=26
  xx(i,j) = i
  yy(i,j) = j
  write(3,'(1x,2i5,3f15.10)') xx(i,j),yy(i,j),u_pro(i,j),v_pro(i,j),h_old(i,j)
end do

! 魚巣部
do i=mx1+1, mx4-3,2
  do j=my2+1,jend-1,2
    xx(i,j) = i
    yy(i,j) = j
    write(3,'(1x,2i5,3f15.10)') xx(i,j),yy(i,j),u_pro(i,j),v_pro(i,j),h_old(i,j)
  end do
end do

end if

! 開口部周辺の流況

if(t==tend) then
! u 横断方向
do i=mx2-1, mx3+1,10
  do j=16,36,2
    u_pro(i,j) = u_ave(i,j)/ustart
    xx(i,j) = i
    yy(i,j) = j
    write(10,'(1x,2i5,1f15.10)') xx(i,j),yy(i,j),u_pro(i,j)
  end do
end do

! v 横断方向
do i=mx2-1, mx3+1,10
  do j=16,36,2

```

```

v_pro(i,j) = v_ave(i,j)/ustart
xx(i,j) = i
yy(i,j) = j
write(11,'(1x,2i5,1f15.10)') xx(i,j),yy(i,j),v_pro(i,j)
end do
end do

```

```

! v 水平方向
do j=16,36,2
  do i=mx2-9, mx3+9, 10
    v_pro(i,j) = v_ave(i,j)/ustart
    xx(i,j) = i
    yy(i,j) = j
    write(12,'(1x,2i5,1f15.10)') xx(i,j),yy(i,j),v_pro(i,j)
  end do
end do

```

end if

! 水面振動,流速振動

if(MOD(t,200) == 0) then

```

i=61
j=22
xx(i,j) = i
yy(i,j) = j
write(13,'(1x,2i5,1f15.10)') xx(i,j),yy(i,j),u(i,j)

```

```

i=61
j=26
xx(i,j) = i
yy(i,j) = j
write(19,'(1x,2i5,1f15.10)') xx(i,j),yy(i,j),u(i,j)

```

```

i=61
j=30
xx(i,j) = i
yy(i,j) = j
write(20,'(1x,2i5,1f15.10)') xx(i,j),yy(i,j),u(i,j)

```

```

i=22
j=56
xx(i,j) = i
yy(i,j) = j

```

```

write(14,'(1x,2i5,1f15.10)') xx(i,j),yy(i,j),h_old(i,j)

i=102
j=56
xx(i,j) = i
yy(i,j) = j
write(15,'(1x,2i5,1f15.10)') xx(i,j),yy(i,j),h_old(i,j)

end if
if(MOD(t,200) == 0) then

    i=mx2+5
    j=27
    xx(i,j) = i
    yy(i,j) = j
    write(16,'(1x,2i5,1f15.10)') xx(i,j),yy(i,j),v(i,j)

    i=60
    j=27
    xx(i,j) = i
    yy(i,j) = j
    write(17,'(1x,2i5,1f15.10)') xx(i,j),yy(i,j),v(i,j)

    i=mx3-5
    j=27
    xx(i,j) = i
    yy(i,j) = j
    write(18,'(1x,2i5,1f15.10)') xx(i,j),yy(i,j),v(i,j)

end if

```

! 開口部の v 分布の時間変化

```

if(180000<=t .and. t<=240000.and. MOD(t,4000) == 0) then
    do i=mx2+1,mx3-1,2
        do j=my1,my2,2
            xx(i,j) = i
            yy(i,j) = j
            write(21,'(1x,2i5,f15.6)') xx(i,j),yy(i,j),v(i,j)
        end do
    end do
end if

```

! 流れ場の水面高さ分布

! 補完計算

```

if(MOD(t,4000) == 0) then

```

! 主流部

```
do i=2,iend-2,2
    do j=2,my1-1,2
        h_pro(i,j) = h_old(i,j)
    end do
end do
```

```
do i=2,iend-2,2
    do j=3,my1-2,2
        h_pro(i,j) = 0.5*(h_old(i,j+1)+h_old(i,j-1))
    end do
end do
```

! 開口部

```
do i=mx2+1, mx3-1,2
    j=26
    h_pro(i,j) = h_old(i,j)
end do
do i=mx2+1, mx3-1,2
    do j=my1, my2,2
        h_pro(i,j) = 0.5*(h_old(i,j+1)+h_old(i,j-1))
    end do
end do
```

! 魚巣部

```
do i=mx1+1, mx4-1,2
    do j=my2+1, jend-1,2
        h_pro(i,j) = h_old(i,j)
    end do
end do
```

```
do i=mx1+1, mx4-3,2
    do j=my2+2, jend-2,2
        h_pro(i,j) = 0.5*(h_old(i,j+1)+h_old(i,j-1))
    end do
end do
```

end if

```
do j=0,jend
    h_pro(0,j) = j
end do
```

! 出力

```
if(184000<=t .and. t<=240000.and. MOD(t,4000) == 0) then
```

```

do i=0,iend-2,2
  xx(i,j) = i
  write(4,'(1x,i5,55f15.6)') xx(i,j),h_pro(i,2:my1-1)
end do

do i=mx2+1,mx3-1,2
  xx(i,j) = i
  write(4,'(1x,i5,3f15.6)') xx(i,j),h_pro(i,25:27)
end do

do i=mx1+1,mx4-1,2
  xx(i,j) = i
  write(5,'(1x,i5,55f15.6)') xx(i,j),h_pro(i,my2+1:jend-1)
end do

end if

return

end subroutine output

end program main

```