

階段式魚道における汎用的な流況予測のための数値解析手法

Numerical Analysis Method for General-use Forecast of Flow in the Pool and Weir Type Fishway

浪平 篤*・後藤真宏**

Atsushi NAMIHIRA and Masahiro GOTO

* 正会員 農修 農村工学研究所 施設資源部水源施設水理研究室 (〒305-8609 つくば市観音台2-1-6)

** 農博 農村工学研究所 施設資源部水源施設水理研究室 (〒305-8609 つくば市観音台2-1-6)

The guide of design for the pool and weir type fishway, which has a lot of numbers of adoptions in weirs of our country, has been almost established. However, general-use forecast method of the flow in this type fishway, plunging flow or streaming flow, has not been established. It is necessary to develop the forecast method in order to achieve a more appropriate design, because the difference of such a flow influences the upstream migrating behavior of the fish. In this research, it is clarified that the simulated results by the numerical analysis method, using the VOF method in generalized curvilinear coordinate and the standard $k-\varepsilon$ model to which the modified LK model and the Durbin model are applied, are in good agreement with experimental measurements using a full-size hydraulic model of a various shape. This method will be general-use forecast method of the flow in this type fishway for actual design.

Key Words : pool and weir type fishway, Plunging flow, Streaming flow, Generalized curvilinear coordinate, VOF

1. はじめに

近年の河川法の改正に見られるように、河川や水路等の整備においても生態系への配慮の重要性が高まっている。これに対し、農業用水等の取水のため河川に建設される堰では、河川生物、特に遡河性または降河性魚類の移動に対して支障とならないよう、魚道が付設されることが多い。

堰の魚道は、水理学的メカニズムの違いにより、階段式やアイスバーン式等のプールタイプ、粗石付き斜路式等の水路タイプ、バーチカルスロット式やデニール式等の粗流板式等に分類される¹⁾。このうち、我が国の農業用取水堰における魚道として最も採用数が多いのは階段式である^{2) 3)}。設計のための指針も概ね纏められており^{1) 4)}、本形式が今後も建設される可能性は低くないと考えられる。

階段式魚道内の流況形態は、流量や勾配等の違いにより、落下流(Plunging Flow)、表面流(Streaming Flow)、および両者の遷移状態となることが知られている⁵⁾。ここで、落下流とは隔壁からの越流水がプール底まで潜り込む流れ、表面流とは隔壁からの越流水がプール内に潜り込まず水面付近を流下する流れをいう。階段式魚道ではプール内での減勢効果が期待されていること、また、アユ⁶⁾やウグイ^{7) 8)}は隔壁を越える際、流れに逆らって、プール底から隔壁に沿って水面付近へ遊泳すること等を考えると、表面流および遷移状態は避けることが望ましい流況形態といえる。

この表面流の発生条件は、Rajaratnam et al.⁹⁾や鬼束ら

¹⁰⁾により定式化されている。しかし、隔壁天端が矩形である場合を対象にしたRajaratnam et al.の式は円弧形状である場合には対応できないこと¹¹⁾や、隔壁天端の形状が異なれば魚道内における流況形態が異なること⁸⁾も確認されており、実務設計のためのより汎用的な判別方法が必要と考えられる。

一方、近年の計算機能力の向上に伴い、数値解析手法が非常に進歩している。数値解析には、水理模型実験とは異なって条件の変更に多大な時間および費用を必要としない、水理模型実験では測定が困難な情報を得られる等の長所があり、水理構造物の設計手法の一つとして扱われつつある¹²⁾。階段式魚道内の流況についても数値解析により精度良く再現できれば、表面流発生の予測だけでなく、魚道内の流速が魚類等の遡上に対して許容範囲内であるか等の予測も可能となり、より適切な設計ができるようになると思われる。

これまでに著者ら¹³⁾は、隔壁天端の円弧形状を再現するため一般座標に適用したVOF法と、実物規模で乱れの大きな流れを安定して解析するため改良LKモデルとDurbinモデルを適用した標準型 $k-\varepsilon$ モデルを用いて、階段式魚道内の流況の数値解析を行い、水理模型実験により得られた流量変化に伴う流況形態の違いを本手法が再現できることを示している。しかし、一つの魚道構造のみが数値解析の対象であるため、本手法の汎用性は十分に検証されていない。そこで本研究では、本手法による階段式魚道内の流況の数値解析を、複数の魚道構造を対象として行い、本手法の実務設計としての有効性および汎用性を評価する。さらに、解析結果をもとに、隔壁天端が円弧形状の階段式魚道における構造諸元および水理

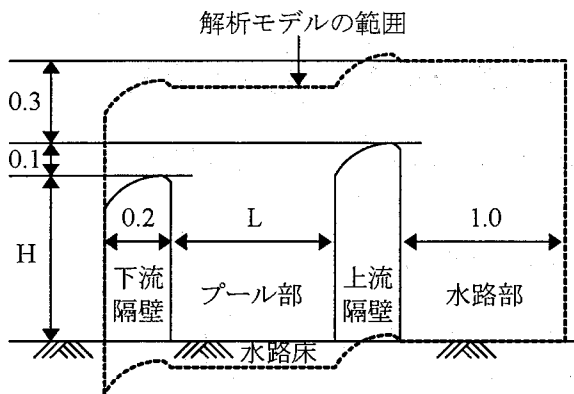


図-1 林田ら^{7,8)}による実験模型の縦断面図と解析モデルの範囲(単位:m)

表-1 林田ら^{7,8)}による実験ケース(単位:m)

CASE	L	H	勾配	越流水深 ※	※
1	0.5	0.2	1/7	0.10	0.15
2	1.0	0.2	1/12	0.10	0.15
3	2.0	0.2	1/22	0.10	0.15
4	0.5	0.5	1/7	0.10	0.15
5	1.0	0.5	1/12	0.10	0.15
6	2.0	0.5	1/22	0.10	0.15
7	0.5	0.8	1/7	0.10	0.15
8	1.0	0.8	1/12	0.10	0.15
9	2.0	0.8	1/22	0.10	0.15

※ 越流水深は上流隔壁に対する値である

条件と流況形態の関係を明らかにする。

2. 解析手法

2.1 解析モデル

解析モデルは、比較的詳細な流速分布および水面形状の計測が多く、魚道構造を対象として行われていることから、林田ら^{7,8)}の実験を模擬して作成することとした。林田らの実験では、幅0.6mの2次元直線水路に、図-1のように厚さ0.2mの隔壁を2基設置することにより、階段式魚道における最上流のプールを再現している。隔壁天端は、円弧を組み合わせた形状¹⁴⁾であり、横断方向の全てが同一形状である。プール延長Lおよびプール水深H(図-1)を表-1のように変化させ、中央縦断面で流速分布および水面形状の計測が行われている。なお、これらのケースは全て実物規模として想定されている。

解析モデルでは、隔壁天端の円弧形状を表現する必要がある。このようなモデルを扱う流れの数値解析手法として様々なものが考えられるが、既報¹³⁾と同様、縦断2次元の一般座標にVOF法(Volume of Fluid Method)¹⁵⁾を適用することとした。流れについては、レイノルズ平均流れとして扱うこととした。これらは、①解析対象の魚道では縦断面における流れは横断面と比較して卓越し

ている、②一般座標では隔壁天端の円弧形状を比較的容易に表現できる、③格子を用いたレイノルズ平均流れの解析は比較的短時間で実施できる、と考えられたためである。このような手法については、解析事例が非常に少なく、再現性の検証も十分に行われていないため、その有効性を示すことも本研究の目的の一つである。

なお、VOF法を用いた階段式魚道内の流況の数値解析は、これまでに諏訪ら¹⁶⁾、前野ら¹⁷⁾、前野・小川¹⁸⁾によっても行われている。しかし、これらの事例では、天端が矩形の隔壁を対象としてデカルト座標で解析が行われている。一方、デカルト座標で傾斜面を有する構造物を表現するため、計算格子の空隙率および格子界面の開口率を0~1の範囲で任意に与える手法¹⁹⁾も提案されているが、円弧形状の表現は複雑になると考えられる。

解析モデルは、計算格子の水平方向幅は0.0125mで一定、鉛直方向幅は0.01mで一定のデカルト座標の格子のうち水平方向の格子軸を曲げるにより作成した。その範囲を図-1に示す。このようなモデルは σ 座標²⁰⁾における基礎式を用いて解析することも可能であるが、汎用性をもたせるため一般座標における基礎式を用いることとした。また、計算格子は形状変化の激しい箇所や、流れの変化の激しい箇所を密に、そうでない箇所は粗になるよう形成するのが一般的であるが、本研究では、実際の設計のように流れの変化が激しくなる箇所がわからないという前提で、一様の密度としている。

なお、前述のように、本研究の解析モデルでは階段式魚道における最上流のプールのみが対象となるため、上流から二つ目以降のプール内の流況の再現性を検証できない。しかし、複数のプールを有する場合については、一つの魚道構造のみが対象であるが、既報¹³⁾でプール毎の流況の違いを再現できることが確認されている。

2.2 基礎式

流れの基礎式として、時間平均流れを効率よく得るため、式(1)、(2)の一般座標におけるレイノルズ平均を施した連続式とNavier-Stokes方程式(以下、N-S方程式という)を用いた。

$$\frac{1}{J} \frac{\partial (JU_i)}{\partial \xi_i} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{1}{J} \frac{\partial (JU_k u_i)}{\partial \xi_k} = & -\frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \xi_k} \left\{ J \frac{\partial \xi_k}{\partial x_i} \left(\frac{p}{\rho} \right) \right\} \\ & + \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \xi_k} \left\{ J \frac{\partial \xi_k}{\partial x_j} (2\nu D_{ij} - \overline{u_i u_j}) \right\} + G_i \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 $\bar{\cdot}$ はレイノルズ平均を表し、 t は時間、 x_i は水平方向座標、 x_2 は鉛直方向座標、 u_i は x_i 軸方向の流速成分($i=1, 2$)、 ξ_i は一般座標($i=1, 2$)、 U_i は ξ_i 軸方向の流速の反変成分、 J は座標変換のヤコビアン、 p は圧力、 ρ は密度、 ν は動粘性係数、 D_{ij} はひずみ速度テンソル、 $-\overline{u_i u_j}$ はレイノルズ応力、 G_i は x_i 軸方向の外力成分($i=1,$

2)であり、繰り返し添字は総和規約に従うものとする。 J は次のように定義されている。

$$J = \frac{\partial x_1}{\partial \xi_1} \frac{\partial x_2}{\partial \xi_2} - \frac{\partial x_1}{\partial \xi_2} \frac{\partial x_2}{\partial \xi_1} \quad (3)$$

また、 $\overline{D_{ij}}$ は次のように表記される。

$$\overline{D_{ij}} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \xi_k} \left(J \frac{\partial \xi_k}{\partial x_j} \overline{u_i} \right) + \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \xi_k} \left(J \frac{\partial \xi_k}{\partial x_i} \overline{u_j} \right) \right\} \quad (4)$$

自由水面の変動を表現する手法としては、前述のように、再現の精度が高く解析例も多いVOF法を適用した。VOF法では、水面形状を各差分セルにおける流体の存在比率 F ($0 \leq F \leq 1$)によって表現し、差分セル間の F 値の輸送は次の移流方程式に基づいて行われる。

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{J} \frac{\partial (J U_i F)}{\partial \xi_i} = 0 \quad (5)$$

式(2)の $-\overline{u_i u_j}$ の評価方法としては、様々な乱流モデルが提案されているが、本研究では水工学の分野で解析事例が多く、実績のある標準型 $k-\varepsilon$ モデルを採用した。標準型 $k-\varepsilon$ モデルでは、 $-\overline{u_i u_j}$ の評価式は次のように定義されている。

$$-\overline{u_i u_j} = \nu_t \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (6)$$

ここで、 ν_t は渦動粘性係数、 k は乱流エネルギー、 δ_{ij} はクロネッカーのデルタ記号である。標準型 $k-\varepsilon$ モデルでは、 ν_t の評価式、一般座標における k および乱流エネルギーの散逸率 ε の輸送方程式はそれぞれ次のように定義されている。

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + \frac{1}{J} \frac{\partial (J U_k k)}{\partial \xi_k} \\ = \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \xi_k} \left\{ J \frac{\partial \xi_k}{\partial x_i} \left(\nu + \frac{\nu_t}{C_k} \right) \left[\frac{\partial}{\partial \xi_j} \left(\frac{\partial \xi_j}{\partial x_i} k \right) \right] \right\} \\ + P_k - \varepsilon \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{1}{J} \frac{\partial (J U_k \varepsilon)}{\partial \xi_k} \\ = \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \xi_k} \left\{ J \frac{\partial \xi_k}{\partial x_i} \left(\nu + \frac{\nu_t}{C_\varepsilon} \right) \left[\frac{\partial}{\partial \xi_j} \left(\frac{\partial \xi_j}{\partial x_i} \varepsilon \right) \right] \right\} \\ + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \varepsilon) \end{aligned} \quad (9)$$

式(8)~(9)の P_k は k の生産項であり、次のように定義されている。

$$P_k = -\overline{u_i u_j} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} = 2 \nu_t \overline{D_{ij}} \quad (10)$$

式(7)~(9)の係数には、標準的な値である $C_\mu = 0.09$ 、 $C_k = 1.00$ 、 $C_\varepsilon = 1.30$ 、 $C_{\varepsilon 1} = 1.44$ 、 $C_{\varepsilon 2} = 1.92$ を与えた。

ところで、標準型 $k-\varepsilon$ モデルでは、衝突領域のよう

に歪み速度テンソルの直交成分が存在する流れ場において、 P_k が過大評価されるという欠点が指摘されている²¹⁾。その改善のため、様々な改良モデルが提案されている。本研究では、そのような改良モデルのうち、 P_k の評価式に対して修正を行う式(11)の改良LKモデル²²⁾を適用した。

$$P_k = \begin{cases} 2 \nu_t \overline{D_{ij}} \overline{D_{ij}} & , \sqrt{\overline{\Omega_{ij} \Omega_{ij}}} / \sqrt{\overline{D_{ij} D_{ij}}} \geq 1 \\ 2 \nu_t \overline{D_{ij}} \overline{\Omega_{ij}} & , \sqrt{\overline{\Omega_{ij} \Omega_{ij}}} / \sqrt{\overline{D_{ij} D_{ij}}} < 1 \end{cases} \quad (11)$$

ここで、 $\overline{\Omega_{ij}}$ は次のように表記される

$$\overline{\Omega_{ij}} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \xi_k} \left(J \frac{\partial \xi_k}{\partial x_j} \overline{u_i} \right) - \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \xi_k} \left(J \frac{\partial \xi_k}{\partial x_i} \overline{u_j} \right) \right\} \quad (12)$$

さらに、 ν_t の評価式に対して修正を行う式(13)のDurbinモデル²³⁾を適用した。

$$\nu_t = C_\mu k \cdot \min \left(\frac{k^2}{\varepsilon}, \frac{\sqrt{2}}{3 C_\mu \sqrt{\overline{D_{ij} D_{ij}}}} \right) \quad (13)$$

これは、既報¹³⁾と同様、改良モデルの適用なし、改良LKモデルのみ適用、Durbinモデルのみ適用、改良LKモデルとDurbinモデルの併用、の4タイプについて予備計算を行った結果、改良モデルを併用した場合の計算が全ての解析ケースに対して最も安定しており、かつ、その結果は最も再現性が高かったためである。

なお、前述のVOF法を用いた階段式魚道内の流況の数値解析事例のうち諏訪ら¹⁶⁾では、乱流モデルの使用に関する記述がない。前野ら¹⁷⁾および前野・小川¹⁸⁾では標準型 $k-\varepsilon$ モデルが使用されているが、解析は実物規模の範囲(表-1)⁷⁾⁸⁾と比較すると小さい模型実験($L=0.38\text{m}$ 、 $H=0.20\text{m}$ 、越流水深 $=0.04 \sim 0.06\text{m}$ 程度)を対象に再現性を検討している。より規模の大きな魚道における流況に対しても同程度の再現性が得られるかは未確認である。

2.3 数値解析スキームと計算条件

基礎式の各変数はコロケート配置し、基礎式は有限差分法により離散化した。時間差分スキームは2次精度Runge-Kutta法、空間差分スキームは2次精度中心差分とした。但し、N-S方程式および k 、 ε の輸送方程式の対流項の離散化にはHarten-Yeeの風上型TVDスキーム²⁴⁾を適用し、VOF関数 F の移流方程式の離散化にはアクセプター・ドナー法¹⁵⁾を用いた。圧力場と連続式のカップリング手法には部分段階法を用い、前処理付Bi-CGStab法²⁵⁾により圧力方程式を解いた。計算時間刻みはCFL条件や圧力収束状況等に応じて変化させた。

初期条件として、2つの隔壁に挟まれたプール部および上流隔壁より上流側の水路部とともに満水状態とした。その際、圧力は静水圧分布とし、流速は全ての位置でゼロとした。

上流端の境界条件として、上流隔壁に対する越流水深が表-1の0.10mまたは0.15mを満足するよう一定の水深

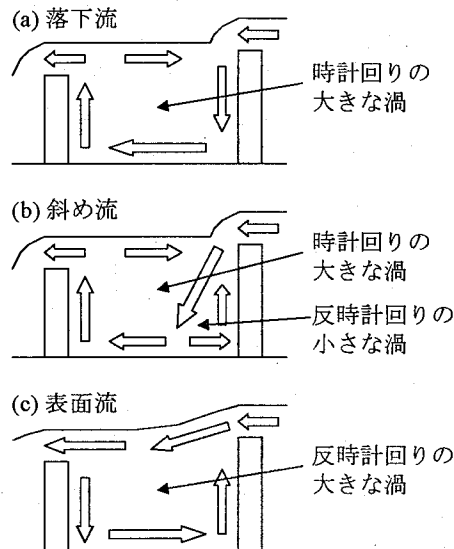


図-2 プール内流況の概念図(左岸側から)

および流速を与えた。但し、計算開始時点では初期条件と同じく、水深は上流隔壁の天端と同じ高さ、流速はゼロであるため、計算開始後20秒間でそれらを前述の一定値まで直線的に増加させた。

また、下流端の境界条件は自由流出とし、壁面の境界条件には対数則²⁰⁾を適用した。自由水面における k および ϵ の境界条件は対象境界とした。

解析は、流況がほぼ定常とみなせるようになった後に終了させた。それには、上流端における水深と流速が所定値となった後、30～60秒程度要した。以降では、流速ベクトルおよび水面形状の解析結果として、計算終了時の値を用いる。

2.4 流況形態の分類

階段式魚道内の流況形態は、一般に落下流(Plunging Flow)、表面流(Streaming Flow)、および両者の遷移状態に分類されていることは既に述べた。一方、解析モデルの模擬対象とした林田ら⁷⁾⁸⁾の実験では、落下流をさらに2つの形態に分けて、図-2のように、①上流隔壁を越えて鉛直下向きに落下した水脈が、上流隔壁、プール底面、下流隔壁に沿って流下し、プール内には左岸側から見て時計回りの大きな渦が形成される落下流、②上流隔壁を越えてプールに対して斜め向きに落下した水脈が、プール底面、下流隔壁に沿って流下し、プール内には左岸側から見て時計回りの大きな渦と反時計回りの小さな渦が形成される斜め流、③上流隔壁を越えた水脈が水面付近を走って流下し、プール内には左岸側から見て反時計回りの大きな渦が形成される表面流、の3つに分類されている。本研究においても、これに倣って流況形態を分類する。

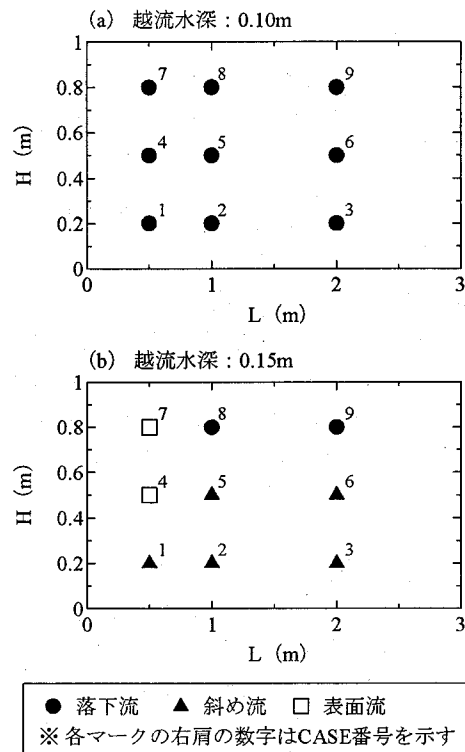


図-3 プールの形状諸元と流況形態⁸⁾

3. 解析結果および考察

3.1 越流水深 0.10m

林田ら⁷⁾⁸⁾の実験では、越流水深0.10mのときの流況形態は、図-3(a)のように、魚道構造に関わらず全て落下流となった。その際の流況は図-4のようであった。なお、CASE 6の流況は掲載された報告がないため、ここで掲載できなかった。

本研究における流況の解析結果を図-5に示す。流況形態は図-3(a)と同じく、全て落下流となった。流速ベクトル分布および水面形状には、図-4の実験結果と同様の傾向が確認される。個々の流速値についても、実験結果とほぼ同値とみなせる。特に、CASE 1およびCASE 4では水面形状が強い逆勾配となること、CASE 2およびCASE 3ではプール内の渦の中心はプール中央付近ではなく、図の水平方向軸で0～0.5mの位置にあること等が再現されている。

一方、CASE 7におけるプール内の渦の中心は、実験結果では図の水平方向軸で0～0.2mの位置にあるのに対し、解析結果ではプール中央付近の0.2～0.3mにあること、解析結果では全体的に水面形状の逆勾配が実験結果より強くなる傾向がある等の違いも見られる。しかし、この程度の差異は、実務設計における階段式魚道内の流況予測としては許容できると考えられる。

なお、CASE 3では、越流水脈のプールへの突入部で微小なオーバーハングが生じているが、これは直ちに上

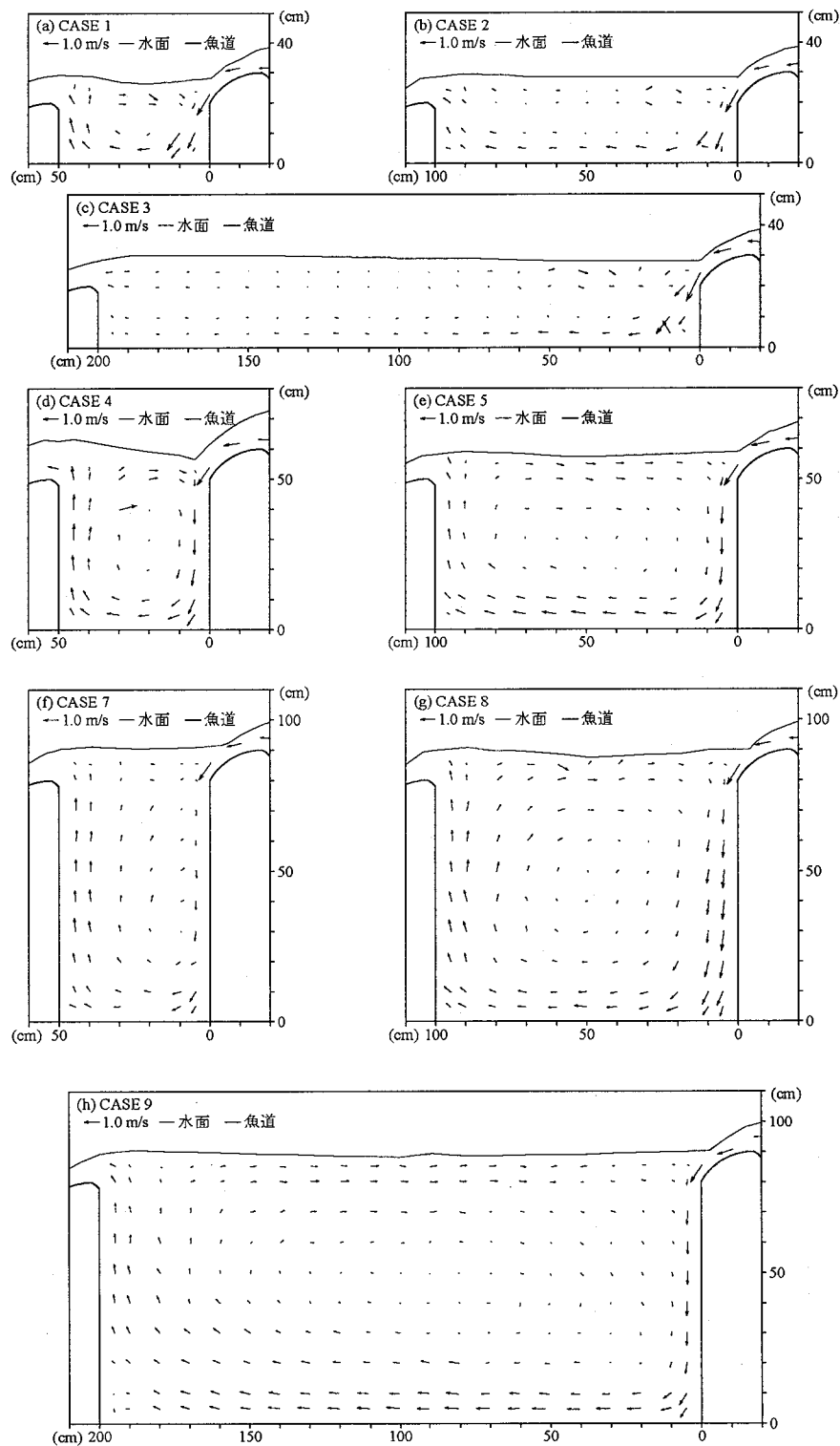


図-4 越流水深0.10mのときの流況の実験結果⁷⁾

流側へ移動し、越流水脈に吸収されるように消失した。このようなオーバーハングは繰り返し発生し、プール内の流況がほぼ定常となった後も若干の水面変動は続いた。図-4には現れていないが他のケースでも同様であった。

3.2 越流水深 0.15m

林田ら^{7) 8)}の実験では、越流水深0.15mのときの流況形態は、図-3(b)のように、プールの形状諸元の変化に

伴って流況形態に違いが生じた。なお、その際の流況は掲載された報告がないため、ここで掲載できなかった。

本研究における流況の解析結果を図-6に示す。これより、落下流はCASE 8~9、斜め流はCASE 1~3, 5~6、表面流はCASE 4, 7となり、図-3(b)の実験結果と同じ流況形態となった。CASE 8~9については、上流隔壁の下部で反時計回りの小さな渦が形成されているが、上流隔壁を越えた水脈は、プールへの突入部では上流隔壁に

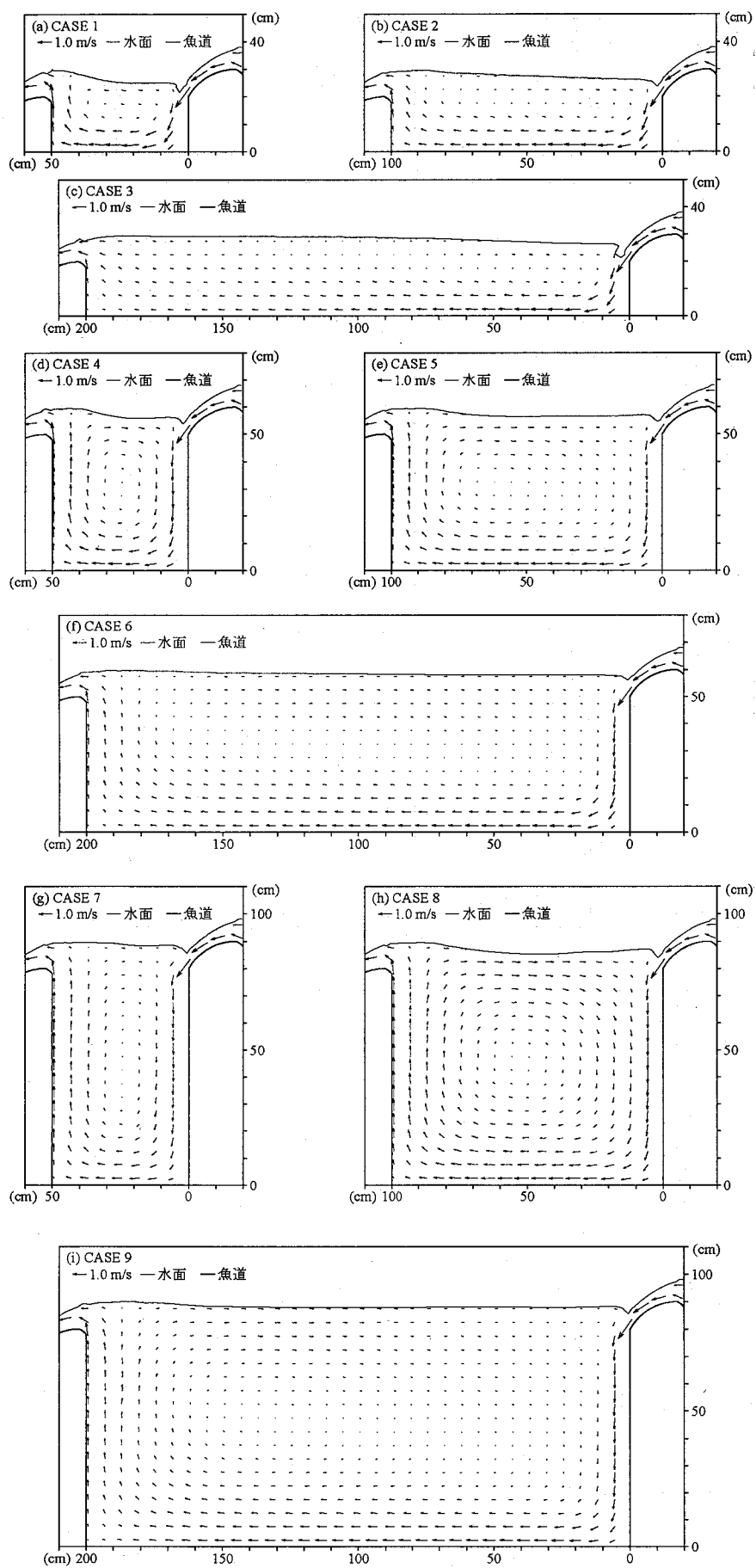


図-5 越流水深0.10mのときの流況の解析結果

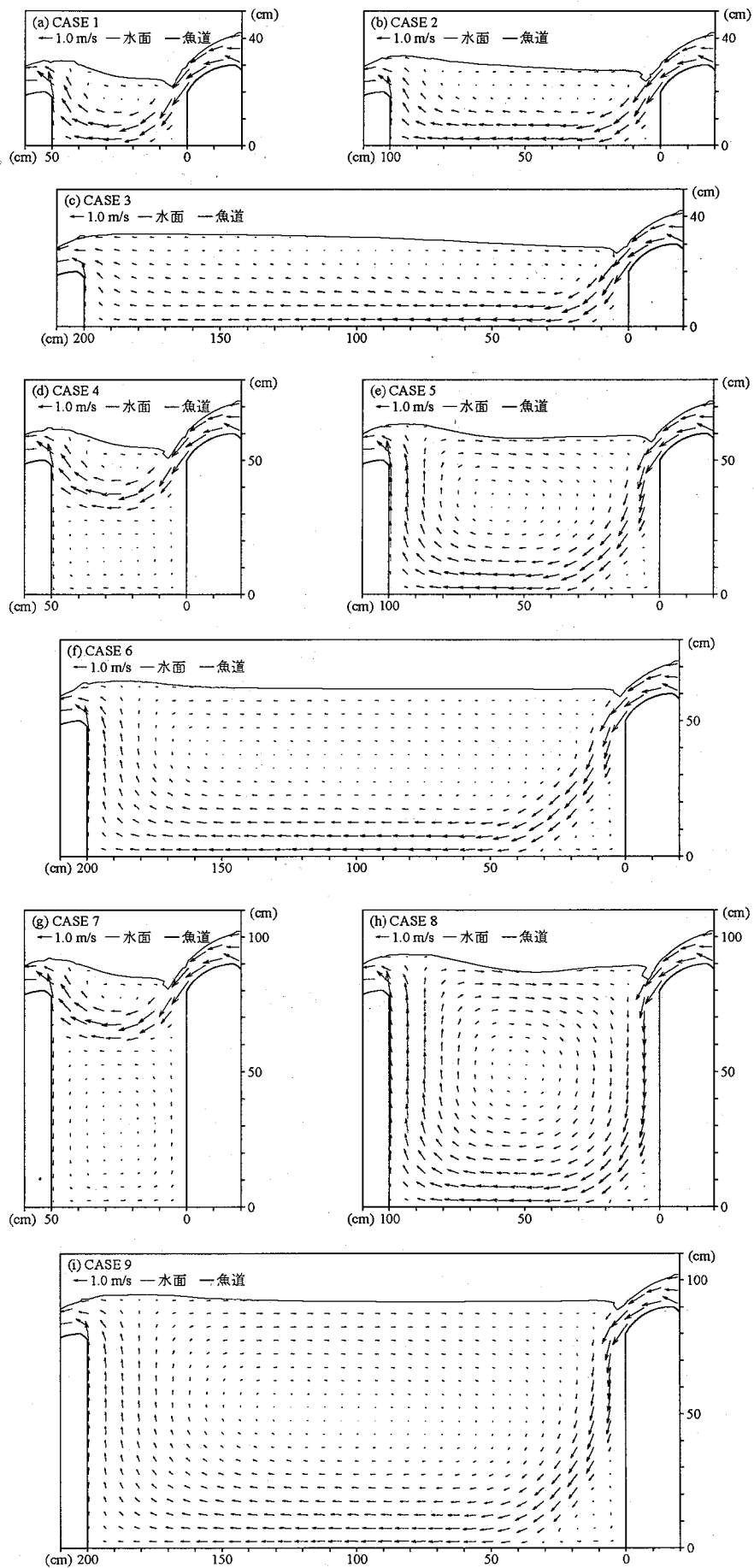


図-6 越流水深0.15mのときの流況の解析結果

沿って落下しているため、落下流と判断した。

なお、CASE 2, 4, 7~9で生じているオーバーハングや水面変動は、越流水深0.10mのときと同様である。

以上より、越流水深が変化した場合、流況形態に生じる変化は魚道構造によって異なるが、本研究における解析手法はそのような変化を精度良く再現できることが示された。

3.3 構造諸元および水理条件と流況形態の関係

前節までで本研究における解析手法の汎用性が示されたので、林田ら^{7) 8)}の実験では対象とされていない越流水深0.125mおよび0.20mについても解析を行った。そして、全ての解析結果について、流況形態毎に $L/(H+\Delta h)$ と $\Delta h/\Delta y$ の関係をプロットし、隔壁天端が円弧形状の階段式魚道における構造諸元および水理条件と流況形態の関係の解明を試みた(図-7)。ここで、 L および H はそれぞれプール延長、プール水深(図-1)、 Δy はプール間落差、 Δh は越流水深である。なお、本研究では、全て $\Delta y=0.10\text{m}$ である。 $L/(H+\Delta h)$ と $\Delta h/\Delta y$ については、流況形態の支配パラメータとなることが鬼束ら¹⁰⁾によって理論的に導かれており、図-7の点線および矢印で示すように、隔壁天端が矩形の場合における表面流の発生条件が提案されている。

なお、表面流の発生条件を明らかにする手段としてRajaratnam et al.⁹⁾による方法を利用しなかったのは、本方法では流況形態を規定する係数 Cd (式(14))の算出に H が扱われていないためである。越流水深0.15mのときのCASE 1とCASE 4のように(図-3(b)、図-6)、 H の他の条件は全て同一でも H の違いにより流況形態が異なることが確認されている。

$$Cd = q / (S \cdot L^{3/2} \cdot \sqrt{g}) \quad (14)$$

ここで、 q は単位幅流量(m^2/s)、 S は魚道の勾配である。

隔壁天端が円弧形状の場合は、矩形の場合と比較して、表面流が発生しにくいことはこれまでも指摘されていたが^{9) 11)}、図-7より、円弧形状および矩形それぞれの場合における表面流の発生領域の違いが明示された。

落下流と斜め流の発生領域の境界は、表面流の発生領域の境界とは異なり、明瞭ではなかった。落下流と斜め流の発生条件の違いについては、表面流とそれ以外の発生条件の違いを示すための鬼束ら¹⁰⁾の方法では判別できない可能性も考えられる。なお、この境界付近には、越流水深0.15mのときのCASE 9が位置しているが、この条件における解析では斜め流に近い形態の落下流(図-6(i))となった。実験結果では、詳細な流況は不明だが、落下流と判定されている(図-3(b))。このような境界付近では、隔壁の材質が異なった場合の粗度の違いによって流況形態は変化し、また、数値解析においてそのような粗度の違いに対応するのは非常に困難であると考えられる。

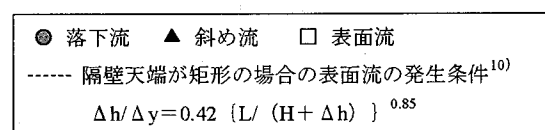
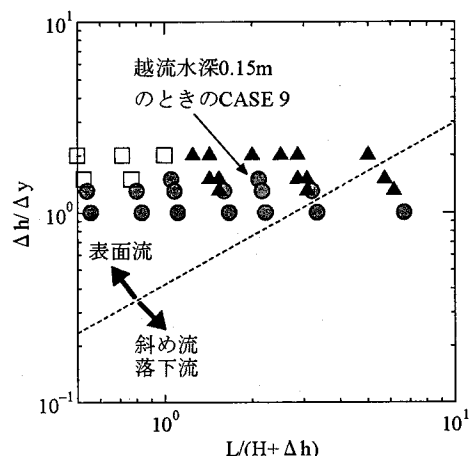


図-7 構造諸元および水理条件と流況形態の関係

従って、各流況形態の発生領域の境界付近では流況形態の予測精度が低下する可能性が高いことを踏まえて、図-7をもとにプールの形状や越流水深を検討すれば、隔壁天端が円弧形状の階段式魚道における流況形態を設計段階で把握できると考えられる。詳細な流況を知る必要がある場合には、一般座標におけるVOF法を用いた数値解析が有効である。

4. 結論

本研究では、隔壁天端の円弧形状を再現するため一般座標に適用したVOF法と、実物規模で乱れの大きな流れを安定して解析するため改良LKモデルとDubinモデルを適用した標準型 $k-\varepsilon$ モデルを用い、階段式魚道内の流況の数値解析を行った。その結果、本手法は、魚道構造および越流水深の変化に伴って生じる落下流、斜め流、表面流といった流況形態の違いを精度良く再現できることが示された。本手法は、階段式魚道における汎用的な流況予測として有効な手段であると考えられる。さらに、解析結果をもとに、隔壁天端が円弧形状の階段式魚道における構造諸元および水理条件と流況形態の関係を明らかにした。

ただし、現時点では縦断2次元で解析を行っている。図-7もその結果に基づいている。一方、実際に建設される階段式魚道の隔壁は切り欠き部と水平部からなるため、プール内の流況は3次元になる。詳細な設計検討では、これを無視できない。従って、今後は本手法を3次元化し、その再現性を検証する必要がある。さらに、本手法による乱流エネルギー k の再現性についても検証していきたい。

参考文献

- 1) ダム水源地環境整備センター：最新 魚道の設計—魚道と関連施設—，信山社サイテック，1988.
- 2) 農業土木学会：農業土木工事図譜 第4集 頭首工編，農業土木学会，pp.14-41，1990.
- 3) 農林水産省構造改善局：基幹水利施設整備状況調査結果全国編，農林水産省構造改善局，p.25，1997.
- 4) 和田吉弘：言いたい放題 魚道見聞録，山海堂，2003.
- 5) Clay, C. H. : *Design of fishways and other fish facilities*, Dep. of Fisheries of Canada, Ottawa, Ontario, Canada, 1961.
- 6) 高嶋信博，中村俊六：魚道内のアユの挙動に関する実験的研究，第28回水理講演会論文集，pp.353-358，1984.
- 7) 林田寿文，本田隆秀，萱場祐一，島谷幸宏：階段式魚道のプール内流況とウグイの遊泳行動，水工学論文集，第44巻，pp.1191-1196，2000.
- 8) 林田寿文，本田隆秀，萱場祐一，島谷幸宏：階段式魚道における落下流と表面流の発生特性とウグイの遡上行動，環境システム研究論文集，Vol.28，pp.333-338，2000.
- 9) Rajaratnam, N. and Katopodis, C. and Mainali, A. : Plunging and streaming flows in pool and weir fishway, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.114, No.8, ASCE, pp.939-944, 1988.
- 10) 鬼束幸樹，秋山壽一郎，木内大介，川良典彰：階段式魚道におけるプランジングフローとストリーミングフローの発生条件に関する研究，水工学論文集，第49巻，pp.817-822，2005.
- 11) 高須修二，箱石憲昭，村岡敬子，田中和浩，尾寄佳史：階段式魚道の水理特性に関する研究，水工学論文集，第38巻，pp.351-356，1994.
- 12) 磯部雅彦，高橋重雄，余 錫平，榊山 努，藤間功司，川崎浩司，蔣 勤，秋山 実，大山洋志：数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究—VOF法基本プログラムの作成—，海洋開発論文集，第15巻，pp.321-326，1999.
- 13) 浪平 篤，後藤真宏，小林宏康：一般座標系におけるVOF法を用いた階段式魚道内の流況の数値解析，農業土木学会論文集，242，pp.57-65，2006.
- 14) 柏井条介，村岡敬子，田中和浩：階段式魚道の水理特性，土木技術資料，Vol.36，No.11，32-37，1994.
- 15) C. W. Hirt, B. D. Nichols : Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries, *Journal of computational physics*, Vol.29, pp.201-225, 1981.
- 16) 諏訪好英，細野成一，林 秀郎：らせん魚道のプール内流況に関する数値シミュレーション，国際魚道会議 '95 ぎふ，87-92，1995.
- 17) 前野詩朗，尾上博則，宮内洋介：VOF法による階段式魚道の流れの数値解析，水工学論文集，第45巻，421-426，2001.
- 18) 前野詩朗，小川 信：プールタイプ魚道の流れの数値解析，水工学論文集，第46巻，421-426，2002.
- 19) 榊山 努，鹿島遼一，阿部宣之：傾斜堤周辺の波動場解析へのポララスモデルの適用性，海岸工学論文集，第38巻，546-550，1991.
- 20) Phillips, N. A. : A coordinate system having some special advantages for numerical forecasting, *Journal of Meteorology*, Vol.14, pp.184-185, 1957.
- 21) 村上周三，持田 灯，林吉彦： $k-\varepsilon$ モデルにおける建物風上の k の過大評価とモデルの改良，第10回風工学シンポジウム，pp.199-204，1988.
- 22) 村上周三，持田 灯，近藤宏二：改良 $k-\varepsilon$ モデルによる2次元建物モデル周辺気流の数値計算，生産研究，47巻，2号，pp.107-111，1995.
- 23) Durbin, P. A. : On the $k-\varepsilon$ stagnation point anomaly, *International Journal of Heat and Fluid flow*, Vol.17, pp.89-90, 1996.
- 24) Yee, H. C. : Linearized form of implicit TVD schemes for the multidimensional Euler and Navier-Stokes equations, *Computers & Mathematics with Applications*, 12A, 4/5, pp.413-432, 1986.
- 25) 小国力 編著：行列計算ソフトウェア，丸善株式会社，p.196，1991.
- 26) 梶島岳夫：乱流の数値シミュレーション，養賢堂，pp.195-198，1999.

(2006年4月13日受付)