

AQUA-VOFコード開発

AQUAコードへのVOFモデルの組み込みと検証

1995年3月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

この資料は、動燃事業団社内における検討を目的とする社内資料です。ついては複製、転載、引用等を行わないよう、また第三者への開示又は内容漏洩がないよう管理して下さい。また今回の開示目的以外のことには使用しないよう注意して下さい。

本資料についてのご問合せは下記に願います。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

システム開発推進部・技術管理室

AQUA-VOFコード開発

～AQUAコードへのVOFモデルの組み込みと検証～

報告者 松本 英一※
実施責任者 村松 壽晴※※

要 旨

高速増殖炉 (FBR) は、原型炉から実証炉へとその実用化を目指し R&D が進められているが、その戦略は小型化および経済性の向上である。FBRの物量を削減しながら経済性を上げようとするれば、冷却材の流速を上げる必要が生じるが、この場合、機器内に自由表面を有する個所があると液面の揺動や気泡の巻き込みを生ずるおそれがある。ここで、液面の揺動は、ナトリウムの熱伝導率の高さからその位置における構造材の熱疲労の原因となると共に、気泡の巻き込みは反応度の増加の原因となる。

このFBR機器内での自由表面挙動を解析的に評価できるようにするため、多次元コード AQUAにVOFモデルを組み込み、検証を行った。基本検証問題として、2次元矩形容器内液面揺動およびU字管容器内液面揺動を選定し、理想流体を用いた場合の理論解と比較を行い、振動の振幅、周期が比較的良好に模擬できることを確認した。

さらに適用計算として、大型炉炉上部プレナム解析を実施し、原子炉容器壁近傍における自由表面の盛り上がりや、出口配管近傍における自由表面のくぼみを解析的に再現できることを確認した。

※ ;株式会社CSK 情報制御システム第2事業部

※※ ;大洗工学センター安全工学部 原子炉工学室

Development of AQUA - VOF Code

- Implementation and Verification of VOF Model for the AQUA Code -

Ei-ichi Matsumoto* and Toshiharu Muramatsu **

Abstract

The VOF (Volume of Fluid) version of single-phase three-dimensional thermohydraulic analysis code AQUA has been developed to establish an analytical tool for thermohydraulic phenomena with free surface motions in a reactor and other main components of an LMFBR. The version takes basically over fundamental features of the AQUA code such as discretization method, input / output schemes, *etc.*

The incorporated VOF model in the AQUA code has been validated in the analyses of the two isothermal free surface problems: 1) two-dimensional sloshing behavior in a rectangular tank, and 2) U-shaped tube oscillation behavior.

Furthermore, the model has been applied to the upper plenum analysis of a reactor-vessel-head-access-piping system FBR designed by PNC. From the analysis, it was confirmed that the model is applicable to the evaluation of three-dimensional free surface behavior in a complex geometry.

* 2nd Control Systems Division, CSK Corp.

** Reactor Engineering Section, Safety Engineering Division, OEC, PNC

AQUA-VOFコード開発

～AQUAコードへのVOFモデルの組み込みと検証～

目次

第1章	緒言	1
第2章	VOF法	2
2.1	概要	2
2.2	数値解法	2
2.2.1	表面セルの決定	2
2.2.2	表面方向の決定	3
2.2.3	VOF関数Fの移流計算	4
2.2.4	自由表面境界処理	6
第3章	AQUAコードとの結合	15
3.1	AQUAコード流速計算部における改良	15
3.2	AQUA-VOFコード新サブルーチンについて	16
第4章	検証計算	19
4.1	2次元矩形容器内液面揺動	19
4.2	U字管容器内液面振動	21
第5章	適用計算	42
5.1	流入流出境界をもつ矩形容器内液面揺動解析	42
5.2	大型FBR原子炉容器上部プレナム解析	44
第6章	結言	80
	参考文献	81
	APPENDIX	83
1.	入力データ作成方法	84
2.	入力データ作成例	86

List of Table

Table 2.1 Classification of Computational Cell

Table 2.2 Difference Equation of VOF Function F

List of Figure

Figure 2.1 Exceptional Treatment in Classification of Computational Cell

Figure 2.2 Example of Free Surface Shapes used in the Advection of F

Figure 2.3 Free Surface Horizontal Velocity Boundary Condition

Figure 2.4 Definition of Quantities used in Defining Free Surface Pressure Boundary Condition

Figure 3.1 Flow Chart for AQUA-VOF

Figure 4.1 Mesh Arrangement for Two-Dimensional Rectangle Vessel

Figure 4.2 Free Surface Configuration and Velocity Vector

Figure 4.3 Calculated Free Surface Level at Various Locations

Figure 4.4 Mesh Arrangement for U-tube Vessel

Figure 4.5 Free Surface Configuration and Velocity Vector

Figure 4.6 Calculated Free Surface Level at Various Locations

Figure 5.1 Mesh Arrangement for Two-Dimensional Rectangle Vessel with Inlet and Outlet Boundaries

Figure 5.2 Free Surface Configuration and Velocity Vector(Case-1)

Figure 5.3 Free Surface Configuration and Velocity Vector(Case-2)

Figure 5.4 Calculated Free Surface Level at Various Locations

Figure 5.5 Cross-Sectional View of Reactor Vessel

Figure 5.6 Mesh Arrangements for the Upper Plenum with Baffle Ring

Figure 5.7 Free Surface Configuration and Velocity Vector

Figure 5.8 Free Surface Level Distribution in the Upper Plenum

第1章 緒言

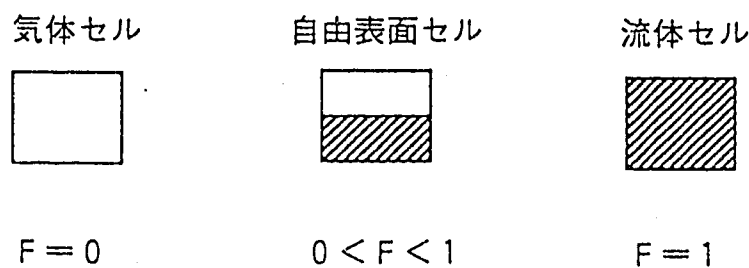
高速増殖炉 (FBR) は、原型炉から実証炉へとその実用化を目指し R&D が進められているが、その戦略は小型化および経済性の向上である。FBRの物量を削減しながら経済性を上げようとするれば、冷却材の流速を上げる必要が生じるが、この場合、機器内に自由表面を有する個所があると液面の揺動や気泡の巻き込みを生ずるおそれがある。ここで、液面の揺動は、ナトリウムの熱伝導率の高さからその位置における構造材の熱疲労の原因となると共に、気泡の巻き込みは反応度の増加の原因となる。したがって、自由表面を有するような構造物の設計に際しては、これをできるだけ避けるよう注意を払う必要がある。

動燃では、FBR開発におけるプラント設計/評価あるいは安全/事故評価時における熱流動現象の把握に際し、単相多次元熱流動解析コードAQUA(Advanced simulation using Quadratic Upstream differencing Algorithm)⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾が開発され、これまで重要な役割を担ってきた。しかしながら本コードを用いて自由表面を有する流れを解析しようとした場合、これまでは何らかの工学的な仮定(すべりなし境界の適用など)を必要としていた。そこで、これら自由表面流れの解析も現実的に可能とすることを目的として、Hirtらが考案した自由表面モデルVOF(Volume of Fluid)法⁽⁴⁾をAQUAコードに組み込み、検証作業を行った。本報はVOF法の数値計算処理、AQUAコードへの組み込み、使用方法、検証結果などについて総合的に述べたものである。

第2章 VOF法

2.1 概要

VOF (Volume of Fluid) 法^{(4),(6)}は Hirt らにより提案された手法であり、多くの自由表面問題に容易に適用が可能なことから多くの解析コードに導入された実績を持つ方法である。VOF法では計算セルごとに流体存在率 $F(V/V_0)$ を定義し、この F の移流方程式を解くことにより自由表面を模擬する。すなわち、 $F=0$ では、その計算セルに流体が存在しないため、これを気体セルと定義し、 $F=1$ では、その計算セルはすべて流体で満たされているため、これを流体セルと定義する。したがって自由表面セルは $0 < F < 1$ の計算セルに割り当てられる。



ここで、VOF関数 F の時間従属は、直交座標系の場合次式により与えられる。

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} + w \frac{\partial F}{\partial z} = 0 \quad (2.1)$$

2.2 数値解法^{(4),(6)}

VOF法の計算を行う場合の流速は、運動量計算により求められた既知量である。その際の既知量の計算領域は次の通りである。連続の式を満足させる計算セルは、流体セルと表面セルである。ただし、表面セルは境界条件処理により連続の式を満足させる。運動方程式は、流体セルに面しているセル界面に対してのみ解き、表面セルと表面セルまたは表面セルと気体セルに挟まれた流速は計算領域外となる。VOF関数 F の移流計算は、全計算セルを対象とする（実質的には気体セルは流速をもたないため無視される）。

以下に、VOF法に関するモジュールやVOF関数 F の移流方程式の解法について説明する。

★

2.2.1 表面セルの決定

VOF法を用いた場合、計算セルは F の値により、気体セル、流体セル、表面セルのいずれ

れかに分類される。その際、表面セルは、必ず気体セルと流体セルの間に挟まれることとする。但し、一時的に自由表面の界面が計算メッシュ界面と一致し、表面セルが消えることがあるがこれは例外として考慮する。本定義より、表面セルに対し境界処理は確実に行われ、またより安定に計算をさせることが可能になる。以下にその決定アルゴリズムを示す。

- (1) すべての計算セルを流体セルとする。
- (2) Fの値が0である計算セルを流体セルに変更する。
- (3) 気体セルに隣接している計算セルを表面セルに変更する。
- (4) 表面セルの中で、気体セルと流体セルには含まれていない計算セルを検索する。
- (5) (4)の表面セルを気体セルに変更する。
- (6) 計算セルがなくなるまで(3)～(5)を繰り返す。

このアルゴリズムを採用した場合、計算セルより小さい気泡が流体内に存在する場合や、液滴が飛散しているような現象は無視される。なお、ここでは液滴が飛散している場合、その液滴は重力方向に最も近い自由表面セルに吸収させることとする。また、計算セルより小さい気泡を、流体として置き換えた場合、その質量はボリュウムエラーとしてコード内に保存させる。

2.2.2 表面方向の決定

前節において決定された表面セルに対し、この表面セルがどの座標方向を向いているかの属性を決定する必要がある。3次元セルの場合、x,y,zそれぞれ+方向と-方向の6つのいずれかの座標方向を向く表面セルと、気体セルおよび流体セルの合わせて8つのいずれかの属性を持つセルに分類される。従って、計算セルの属性を示すフラグNFを用いて分類すると表2.1のようになる。

表面方向がどちらを向いているかは、単純にどちらの座標方向に流体が多く存在するかにより決定する。以下に本決定法のアルゴリズムを示す。

$$SY_{i-1,j,k} + SZ_{i-1,j,k} \text{ が最大の場合} \quad NF = 1$$

$$SY_{j-1,i,k} + SZ_{j-1,i,k} \text{ が最大の場合} \quad NF = 2$$

$$SZ_{i,j-1,k} + SX_{i,j-1,k} \text{ が最大の場合} \quad NF = 3$$

$$SZ_{i,j+1,k} + SX_{i,j+1,k} \text{ が最大の場合} \quad NF = 4$$

$$SX_{i,j,k-1} + SY_{i,j,k-1} \text{ が最大の場合} \quad NF = 5$$

$$SX_{i,j,k+1} + SY_{i,j,k+1} \text{ が最大の場合} \quad NF = 6 \quad (2.2)$$

ここで、

$$SX_{i,j,k} = F_{i-1,j,k} + F_{i,j,k} + F_{i+1,j,k}$$

$$SY_{i,j,k} = F_{i,j-1,k} + F_{i,j,k} + F_{i,j+1,k}$$

$$SZ_{i,j,k} = F_{i,j,k-1} + F_{i,j,k} + F_{i,j,k+1} \quad (2.3)$$

2.2.3 VOF関数Fの移流計算

VOF関数Fの時間従属式(2.1)式

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} + w \frac{\partial F}{\partial z} = 0$$

を時間ステップ δt および計算セルにわたり積分すると、左辺第1項は、

$$\begin{aligned} \int_t^{t+\delta t} \int_V \frac{\partial F}{\partial t} dV &= dx dy dz \frac{(F^n - F^0)}{\delta t} \\ &= V \frac{(F^n - F^0)}{\delta t} \end{aligned} \quad (2.4)$$

左辺第2項は、

$$\begin{aligned} \int_t^{t+\delta t} \int_V u \frac{\partial F}{\partial x} dV &= \int_t^{t+\delta t} \int_V \frac{\partial uF}{\partial x} dx dy dz \\ &= \int_t^{t+\delta t} \int_{A_x} \frac{\partial uF}{\partial x} dA_x \\ &= \int_t^{t+\delta t} \int_{x-1/2\delta x}^{x+1/2\delta x} \frac{\partial uF}{\partial x} dx dy dz \\ &= f_t \left[\left\{ (uF)_{x+1/2\delta x} - (uF)_{x-1/2\delta x} \right\} dy dz \right]^n \\ &\quad + (1 - f_t) \left[\left\{ (uF)_{x+1/2\delta x} - (uF)_{x-1/2\delta x} \right\} dy dz \right]^0 \end{aligned} \quad (2.5)$$

ここで、 $f_t=0$ の場合陽解法、 $f_t=1$ の場合陰解法である。なお、ここでの移流計算においては質量誤差低減のため、陽解法を用いることとする。したがって、

$$\text{与式} = \left\{ (uF)_{x+1/2dx} - (uF)_{x-1/2dx} \right\} dydz \quad (2.6)$$

(以降、時間積分を省略する。) 左辺第3項は、

$$\begin{aligned} & \int_V v \frac{\partial F}{\partial y} dV \\ &= \left\{ (vF)_{y+1/2dy} - (vF)_{y-1/2dy} \right\} dx dz \end{aligned} \quad (2.7)$$

左辺第4項は、

$$\begin{aligned} & \int_V w \frac{\partial F}{\partial z} dV \\ &= \left\{ (wF)_{z+1/2dz} - (wF)_{z-1/2dz} \right\} dx dy \end{aligned} \quad (2.8)$$

以上を整理すると、

$$F^n = F^0 - \frac{dt}{V} \left[\left\{ (QF)_{x+1/2dx} - (QF)_{x-1/2dx} \right\} + \left\{ (QF)_{y+1/2dy} - (QF)_{y-1/2dy} \right\} + \left\{ (QF)_{z+1/2dz} - (QF)_{z-1/2dz} \right\} \right] \quad (2.9)$$

表2.2 に、円筒座標系を含めた一般差分式を示す。

ここで、セル界面における F の移流量 (QF) を通常の1次精度の差分法で評価すると数値拡散が生じるため、ドナーアクセプター法を用いて低減させる。

ドナーアクセプター法の基本的な考えは、計算セルの境界面における表面形状を保つために、上流の F だけでなく下流の F の情報も用いることにある。ある時間ステップ Δt において、セル境界面を横切る体積流量は $V=u \cdot A \cdot \Delta t=Q \cdot \Delta t$ である。ここで u の符号は、ドナーとアクセプター、すなわち体積を減らしたり増やしたりするセルを決定する。例えば、 u が正ならば左側セルはドナーで、右側セルはアクセプターである。ドナーアクセプター法では、ある時間ステップにおいて、セル境界面を横切って流れる F の量は次式で定義さ

れる。

$$Q \cdot F \cdot dt = \text{sign}(Q) \min(|Qdt|F_{AD} + DF, F_D V_D) \quad (2.10)$$

$$DF = \max\{|Qdt|(1 - F_{AD}) - V_D(1 - F_D), 0\} \quad (2.11)$$

添字はアクセプター (A) とドナー (D) セルを示す。また、添字 AD は A または D を表わし、セルの表面方向により決定される (図2.2(a))。

AD=D の場合、すなわち移流面とその風上側の計算セルの表面が垂直に交差している場合、移流面における F の値はドナーセルの F の値と一致する (図2.2(b))。

AD=A の場合、すなわち移流面とその風上側の計算セルの表面が水平の場合、移流面における F の値はアクセプターセルの F の値と一致する (図2.2(c), 図2.2(d))。

図2.2(c) のケースでは、点線と流体境界の間の流体のみアクセプターセルに移流し、それ以上移流すべきではない。これは(2.10)式における min 式の例である。したがって、min 式は、アクセプターに入り得る流体の体積と、ドナーの実際に存在する流体の体積とを比較しチェックする。

一方、図2.2(d) のケースでは、移流するのは気体だけではなく一部流体も含まれるべきである。これは max 式の例である。ここで、点線とセル界面における流体の移流量は DF 値と等しい。よって max 式はアクセプターに入り得る空間の量が実際のドナー空間体積を越えないかチェックする。

上記の方法により決定された F の値は、0 より小さい、または 1 より大きい値をもつことがある。それゆえ、F が 0 より小さい場合は 0 へ、1 より大きい場合は 1 にリセットさせる。

2.2.4 自由表面境界処理

(1) 流速境界条件

流速は、流体セルに接しているセル界面に対して計算されるため、表面セルと表面セルに挟まれたセル界面や、表面セルと気体セルに挟まれたセル界面に対しては境界処理が必要になる。ここで、表面セルに対する境界処理は表面に水平な方向の流速と、表面に垂直な方向の流速とに分けられるが、まず、表面に水平な流速に対する境界処理について説明

する。本境界処理は以下に示す2つの場合が存在する。

1つめは、表面セルと気体セルに挟まれたセル界面の流速であり、これは表面セルのNFの値より示される流体セルの流速を代入する。例えば、計算セル(i,j,k)がNF=5の表面セルで、セル(i+1,j,k)が気体セルとした場合、流体セルはセル(i,j,k-1)より、表面セル(i,j,k)のx方向の流速は、

$$u_{i+1/2,j,k} = u_{i+1/2,j,k-1} \quad (2.12)$$

となる(図2.3参照)。従って、表面セルと気体セルに挟まれたセル界面の流速に対する境界処理は、表面の法線方向に対して自然境界となる。

一方、計算セル界面が、表面セルと表面セルに挟まれている場合は、それぞれの表面セルが指し示す流体セルにおける流速の平均値を、表面セル界面の流速として代入する。例えば、計算セル(i,j,k)がNF=5の表面セルで、計算セル(i+1,j,k)が以下に示すいずれかの方向を示す表面セルの場合、両セルの界面における流速 $u_{i+1/2,j,k}$ は次のようになる。

NF(i+1,j,k)=5,8の場合

$$u_{i+1/2,j,k} = u_{i+1/2,j,k-1} \quad (2.13)$$

NF(i+1,j,k)=3の場合(図2.3参照)

$$u_{i+1/2,j,k} = (u_{i+1/2,j,k-1} + u_{i+1/2,j-1,k})/2 \quad (2.14)$$

NF(i+1,j,k)=4の場合

$$u_{i+1/2,j,k} = (u_{i+1/2,j,k-1} + u_{i+1/2,j+1,k})/2 \quad (2.15)$$

なお、NF(i+1,j,k)=1,2はセル(i,j,k)が表面セルであり、表面セルが気体セルと流体セルに挟まれていなければならないという定義よりありえない。

表面に垂直な流速の境界条件、すなわち表面セルと表面垂直方向における気体セルとに面する流速に関しては、表面に水平な流速の境界処理の後、連続の式を満たすように補正する。

(2) 圧力境界条件

圧力方程式の計算領域は、流体セルのみである。したがって、表面セルにおける圧力に対しては境界処理が必要となる。自由表面における圧力は次式で定義される。

$$P_{surf} = P_{gas} + T_{surf} \quad (2.16)$$

ここで、 P_{gas} はガス空間圧力、 T_{surf} は表面張力を表す。

なお、ここでは、表面張力を考慮していないため、自由表面の圧力はガス空間圧力と等しいと仮定する。なお、ガス空間圧力は一定とする。圧力の定義点はスタガードメッシュの定義より、計算セル中心である。したがって、表面セルの圧力は、表面セルNFの指し示す流体セルの圧力と、表面における圧力（ここではガス空間圧力）が線形に変化すると仮定して内挿または外挿により決定する。例えば、表面セル(i,j,k)のNFが5の場合、表面セルの圧力は次式が用いられる（図2.4 参照）。

$$P_{i,j,k} = (1-\eta)P_{i,j,k-1} + \eta P_{surf} \quad (2.17)$$

$$\eta = \frac{d_c}{d} \quad (2.18)$$

計算では (2.17) 式を連続の式より導かれる圧力方程式の中に組み込み、流体セルの圧力と表面セルの圧力を連立させて解く。

表2.1 計算セルの分類

NF	内容
0	流体セル
1	表面セル；表面が x (r) 軸に垂直で、流体は x (r) 軸の負の方向にある。
2	表面セル；表面が x (r) 軸に垂直で、流体は x (r) 軸の正の方向にある。
3	表面セル；表面が y (θ) 軸に垂直で、流体は y (θ) 軸の負の方向にある。
4	表面セル；表面が y (θ) 軸に垂直で、流体は y (θ) 軸の正の方向にある。
5	表面セル；表面が z 軸に垂直で、流体は z 軸の負の方向にある。
6	表面セル；表面が z 軸に垂直で、流体は z 軸の正の方向にある。
8	気体セル

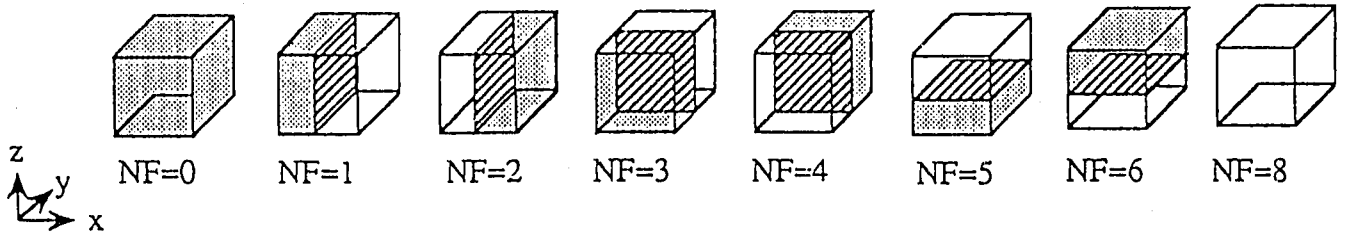


表2.2 VOF関数Fの差分式

$$\begin{aligned}
 F^n = F^0 - \frac{dt}{\gamma_v dx dy dz} & \left[\left\{ (\gamma_x QF)_{x+1/2dx} - (\gamma_x QF)_{x-1/2dx} \right\} \right. \\
 & + \left\{ (\gamma_y QF/r)_{y+1/2dy} - (\gamma_y QF/r)_{y-1/2dy} \right\} \\
 & \left. + \left\{ (\gamma_z QF)_{z+1/2dz} - (\gamma_z QF)_{z-1/2dz} \right\} \right]
 \end{aligned}$$

ここで、

$r = 1$; デカルト座標系

$r = r$; 円筒座標系

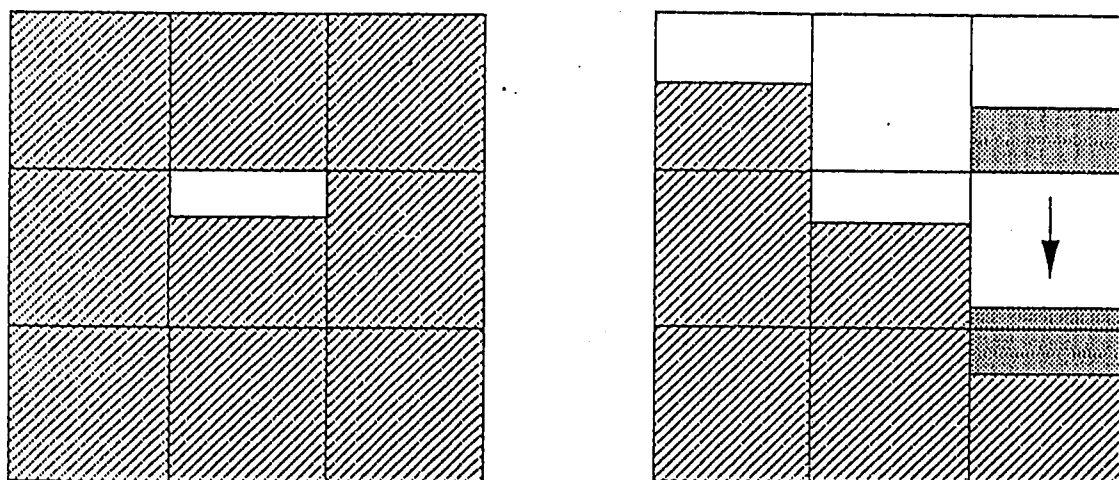
ただし、円筒座標系では、 x, y, z はそれぞれ r, θ, z と読み替えるものとし、またVolume procity γ_v 、Surface permeability $\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z$ は、それぞれ以下のような再定式化をおこなう。

$$\gamma_v = \gamma_v \cdot r$$

$$\gamma_x = \gamma_x \cdot \left(r + \frac{1}{2} dr \right)$$

$$\gamma_y = \gamma_y \cdot r$$

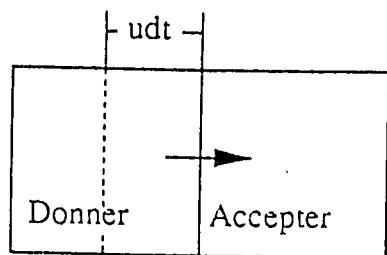
$$\gamma_z = \gamma_z \cdot r$$



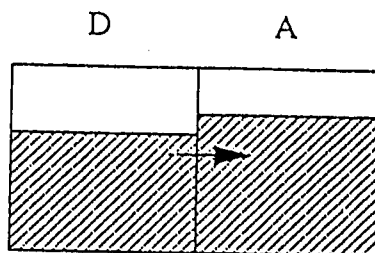
(a)流体セルとみなされる表面セル

(b)気体セルとみなされる表面セル

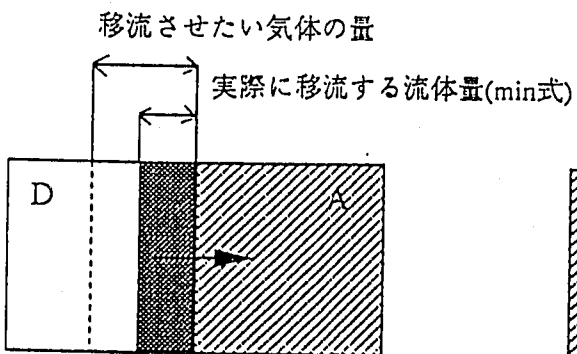
図2.1 計算セル分類における例外処理



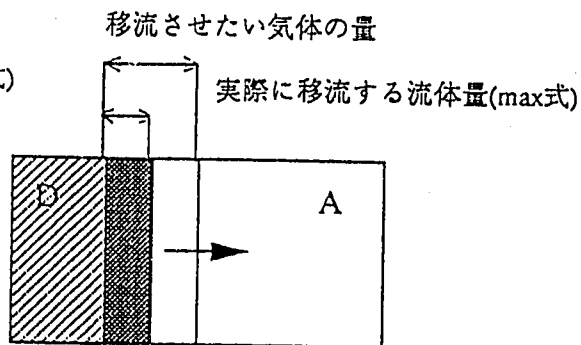
(a)



(b) $AD=D$



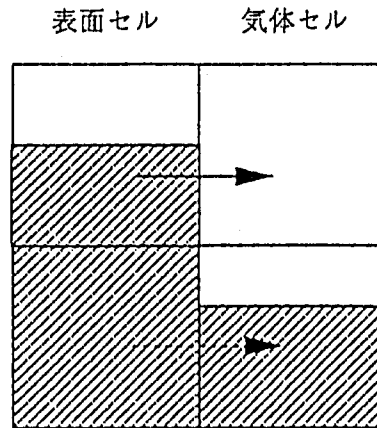
(c) $AD=A$



(d) $AD=A$

図2.2 Fの移流計算で用いられる表面形状

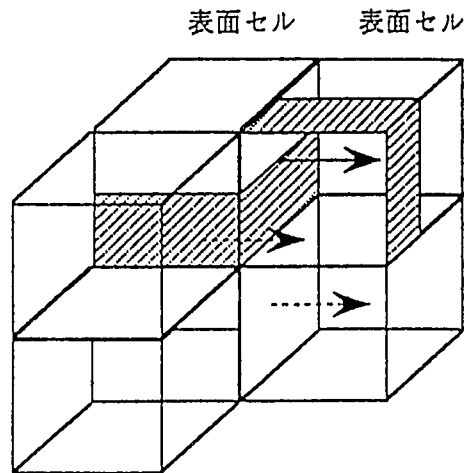
・ 表面セルと気体セルに挟まれている場合



$$u_{i+1/2,j,k} = u_{i+1/2,j,k-1}$$

表面セルの流体のある方向における流速を埋め込む

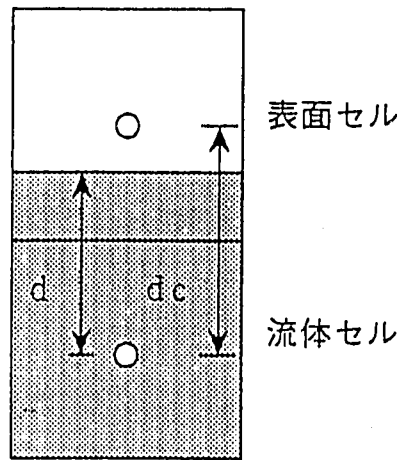
・ 表面セルと表面セルに挟まれている場合



$$u_{i+1/2,j,k} = (u_{i+1/2,j,k-1} + u_{i+1/2,j-1,k})/2$$

それぞれの表面セルの流体のある方向における流速の平均値を代入

図2.3 表面に水平な流速の境界条件



$$P_{i,j,k} = (1 - \eta)P_{i,j,k-1} + \eta P_{surf}$$

$$\eta = \frac{d_c}{d}$$

図2.4 表面セルにおける圧力の定義

第3章 AQUAコードとの結合

本章では、従来のAQUAコード流速計算部との違い、およびVOFモジュールとして新たに加わった新サブルーチンについて述べる。なお、ここでは以下の前提を用いる。

- ・VOFモジュールの結合は完全陰解法ルーチン(SIMPLEST法) に対して実施する。
- ・圧力方程式の改良はP-SOR法を対象とし、ICCG法は未考慮とする。
- ・AQUAコード内エネルギー計算ルーチン、乱流モデルルーチンを未考慮とする。
- ・自由表面における表面張力を未考慮とする。

3.1 AQUAコード流速計算部における改良

前章で述べた通り、運動方程式を解くのは流体セルに面しているセル界面のみであり、その他は計算領域外である。流速の計算部は、基本的には従来のAQUAコードと同一であるが、以下に示すように若干の修正を施している。

(1) 運動方程式中の密度の取り扱いについて

流速は流体セルに面しているセル界面に対して解かれるため、流体セルと表面セルの界面も計算対象となる。しかし、AQUAコードは単相流を対象として開発されたコードであるため、計算セルには流体が全て満たされていることを前提としている。そのため、気相を含む表面セルからの移流量は過大評価され流速の計算に影響をおよぼす可能性がある。そこで、表面セルにおいてもできるだけ現実に近い移流量を計算させるために、表面セルにおける密度を次式で再定義することとする。

$$\rho = \rho_F F_{i,j} + \rho_{air} (1 - F_{i,j}) \quad (3.1)$$

ここで、

ρ_F ; 流体密度

ρ_{air} ; 気相部密度

$F_{i,j}$; 計算セル(i,j)におけるVOF関数F

なお、本密度の再定義においては、表面方向は考慮されていない。

(2) 運動方程式中の圧力の取り扱いについて

運動方程式中の圧力を次式のように分けて考える。

$$P = P_0 + P_a + \rho g h \quad (3.2)$$

ここで、

P_0 ; 基準点での圧力

P_a ; 動圧

$\rho g h$; 水頭圧

AQUAコードでは、圧力方程式を解く際に、桁落ちを防ぐ観点から動圧 P_a のみを用いていたが、例えばU字管の液面振動を解析する場合、水頭圧が考慮されていないと液面は振動しない。そこで、AQUA-VOFコードでは、動圧 P_a と水頭圧の和を圧力方程式を解く際に用いるようプログラムを改良した。

計算開始時における自由表面高さは、液面高さが計算体系内ですべて等しい場合、新しく入力変数として加えたHFREEで入力が可能である。一方、計算開始時より液面高さが異なる場合は、VOF関数Fの初期値入力カードを用いる。

(3) 出口境界の取り扱い

入口と出口を設けた体系内の挙動を計算する場合、入口流量と出口流量が一致しないと液位は変動する。従来のAQUAコードでは、出口面に接する計算セルについて圧力方程式の計算を行っていなかった。しかしながら、対象とする流体は非圧縮性流体であり、自由表面をもっていない密閉空間の計算を対象としていたため、入口流量と出口流量は必然的に一致した。

ところが、自由表面をもった流れを解析する場合、出口圧力をタイムステップごとに規定しないと、入口流量と出口流量は一致するとは限らず、自由表面の液位が変動する可能性が生じる。そこで、AQUA-VOFコードでは、入口流量と出口流量を一致するように出口圧力を調整させる。なおその際、出口境界セルに関してメッシュ分割に工夫が必要となる。すなわち、出口境界セルは、出口面に対して法線方向の流速のみ持つようメッシュ分割をおこなう。例えば、出口面がx方向の場合、その出口セルはu方向の流速のみ持つようメッシュ分割を実施する。

3.2 AQUA-VOFコード新サブルーチンについて

AQUA-VOFの概略フローを図3.1に示す。ハッチを施してあるサブルーチンが、AQUAコードに新たに加わったものである。以下にこれらのサブルーチンの機能について示す。ま

たAQUA-VOFコードにおける新入力変数と入力データ作成例をAPPENDIXに示す。

- (1)DIFNF ・ 計算セルの属性（流体セル、気体セル、表面セル）を決定し、表面セルについては表面方向を決定する。
 ・ ボリュームエラーを検出、修正し、修正量を保存する。

- (2)BCVOF ・ 自由表面境界における流速をこれに隣接する流体セル流速より算出する。

- (3)BCFS ・ 自由表面法線方向流速を連続の式を用い、再定義する。

- (4)BCPFS ・ 表面セル圧力をこれに隣接する流体セル圧力の値と気相圧力より内挿（または外挿）により算出する。

- (5)VFCONF ・ VOF関数Fの移流計算をドナーアクセプター法を用いて実施する。
 ・ ボリュームエラーを検出、修正し、修正量を保存する。

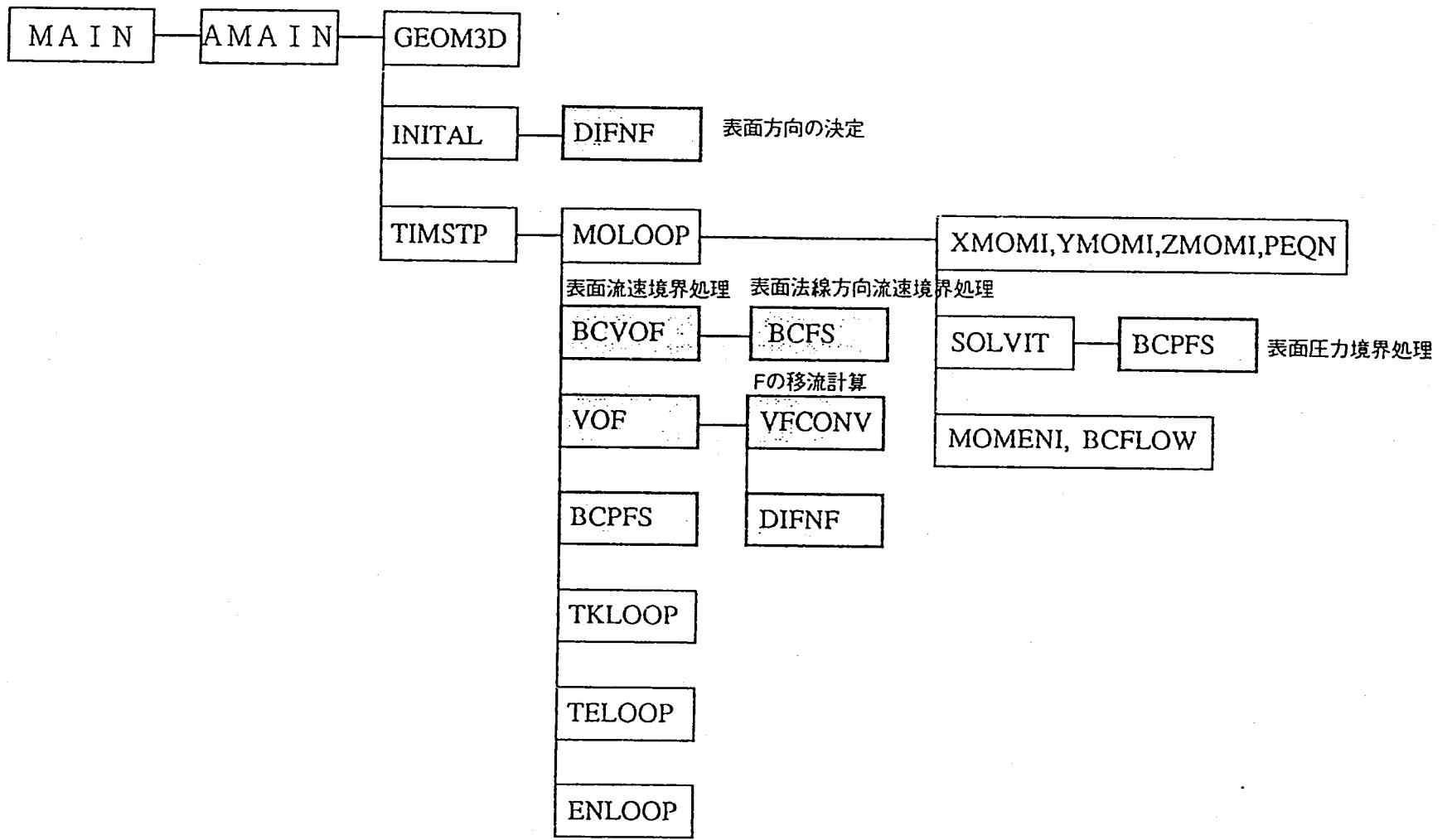


図3.1 AQUA-VOF概略フロー

第4章 検証計算

本章では、AQUA-VOFコードの検証計算結果を示す。基本的検証として選定した問題は、理論解が存在する2次元矩形容器内液面揺動およびU字管容器内液面振動である。

4.1 2次元矩形容器内液面揺動⁽⁷⁾

本解析で用いたメッシュ分割図を図4.1に示す。また計算条件は以下の通りである。

計算体系	H=0.15m W=0.12m y ₁ =0.125m y ₂ =0.115m
物性値	水 (20°C); 密度:997.8kg/m ³ 粘性:1.015×10 ⁻³ Pa·s
初期条件	流速 u=v=0 m/s 水位差 y ₁ -y ₂ =0.01m 圧力 気相 大気圧 液中 静水圧分布
境界条件	壁面 スリップ 自由表面 大気開放
数値計算条件	メッシュ分割 x=24×0.005m y=30×0.005m 時間ステップ 0.001秒 重力加速度 g=-9.8 m/s ²

図4.2に0秒から3秒までの液面形状とベクトル図を示す。計算開始と同時に、流体は液位の高い方から低い方へ移流する。この時、流体の移流は自由表面近傍で多く行われており、容器底部においてはその移流は小さい。その後反対側へ移流した流体は、重力とのバランスにより静止し、再び液位の低くなった方向へ移動し、自由表面は振動する。この時、容器中心においては、自由表面の液位はほとんど変化しない。

図4.3に自由表面各点における液位時間変動を示す。本解析では、粘性流体を対象としているため、時間と共に振動振幅は減衰している。

矩形容器液面振動は、二次元体系で非粘性流体を仮定した場合次式で与えられる。

$$f_m^2 = \frac{g}{4\pi} \frac{m}{a} \tanh\left(\pi h \frac{m}{a}\right) \quad (4.1)$$

ここで、

a ; 容器の幅 (m)

h ; 容器の高さ (m)

m ; 横方向の振動モード

である。

$$a=h=0.12$$

$$m=1$$

を代入すると、

$$f_m=2.545 \text{ Hz}$$

$$T=0.393 \text{ (s)}$$

本解析における液位振動周期は $T_{\text{calc}}=0.442 \text{ (s)}$ であり、非粘性流体における理論値よりも若干大きい結果となったが、比較的振動挙動を再現している。

4.2 U字管容器内液面振動⁷⁾

図 4.4 にU字管容器のメッシュ分割図を示す。また計算条件は以下の通りである。

計算体系	H=0.15m W=0.12m y ₁ =0.125m y ₂ =0.115m D=0.05m
物性値	水 (20°C); 密度:997.8kg/m ³ 粘性:1.015×10 ⁻³ Pa·s
初期条件	流速 u=v=0 m/s 水位差 y ₁ -y ₂ =0.01m 圧力 気相 大気圧 液中 静水圧分布
境界条件	壁面 スリップ 自由表面 大気開放
数値計算条件	メッシュ分割 x=24×0.005m y=30×0.005m 時間ステップ 0.001秒 重力加速度 g=-9.8 m/s ²

図 4.5 に 0 秒から 10 秒までの表面形状とベクトル図を示す。計算開始と同時に流体は、水頭圧差により液位の高い管から低い管の方へ移流を開始する。この時、U字管内を流れる流体は最短ルートを通り移流しようとすることから、流速はU字管底部壁面より上部壁面において大きくなる。反対側の管に移流した流体は、上方向に流れる際に均一化されており、自由表面近傍において流速の差はほとんど見られない。またその際の自由表面もほぼ水平であることがわかる。

図4.6 にU字管中心における自由表面の時間変動を示す。

ここで、理想流体に対するU字管振動周期は次式で与えられる。

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{2g}} \quad (4.2)$$

l; 液柱長さ(m)

より、l = 0.26 (m) を代入すると、自由表面振動周期は

$$T = 0.724(\text{s})$$

である。本解析結果は、粘性流体であるため、液位の振幅は徐々に減衰しているが振動周期は $T_{\text{calc}}=0.737(\text{s})$ であり理想流体における理論値と極めて近い結果となった。

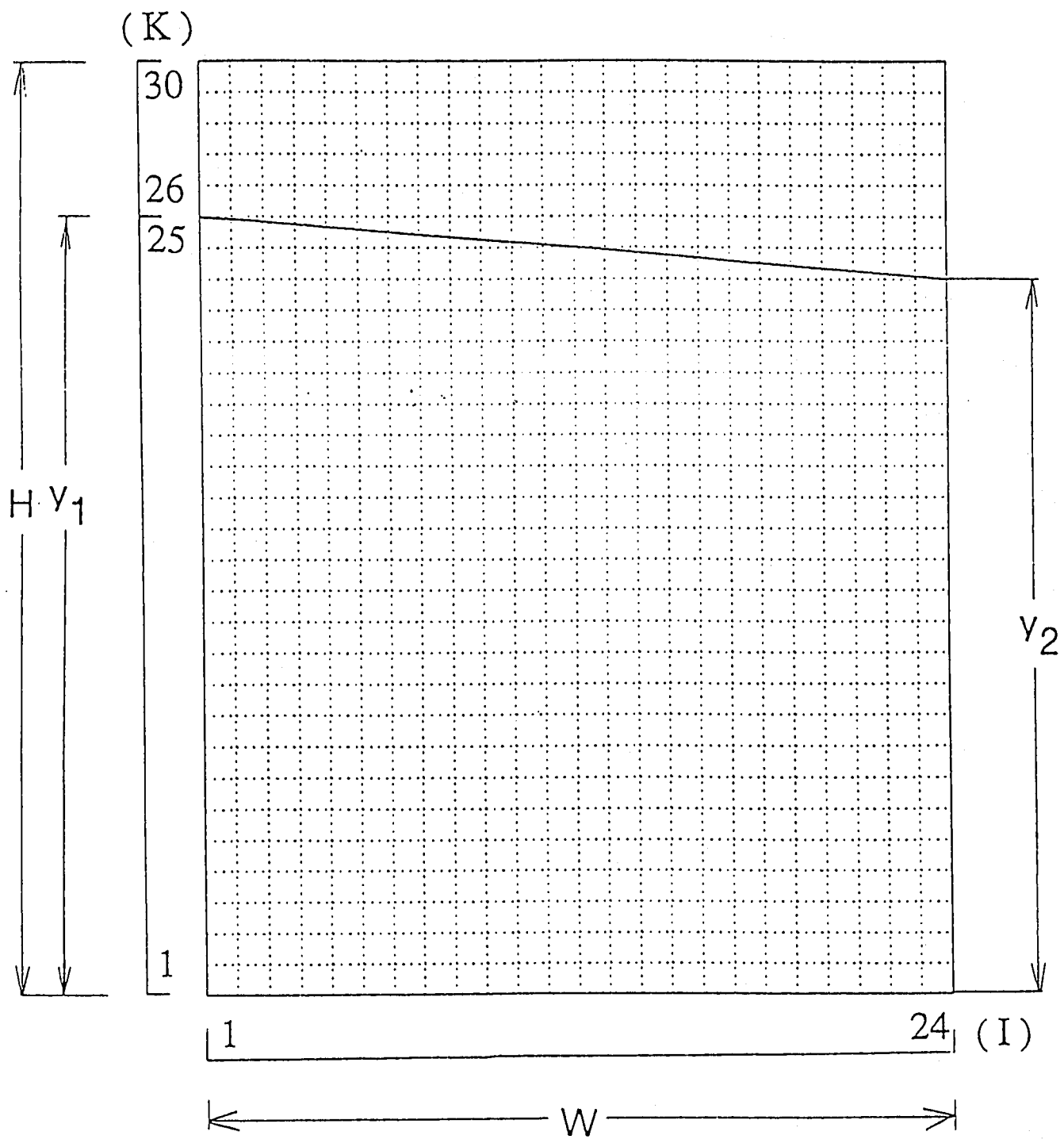


図4.1 二次元矩形容器メッシュ分割図

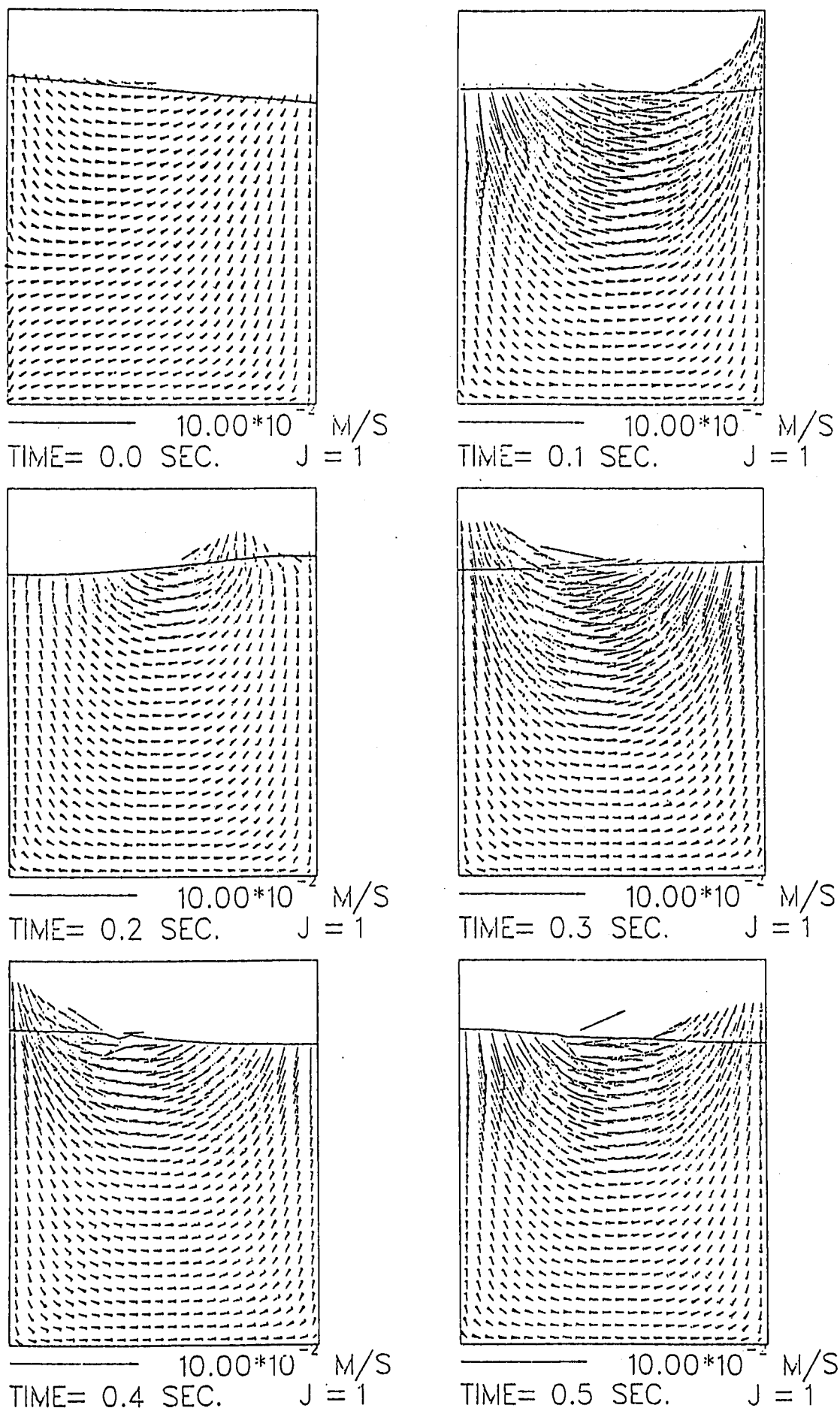
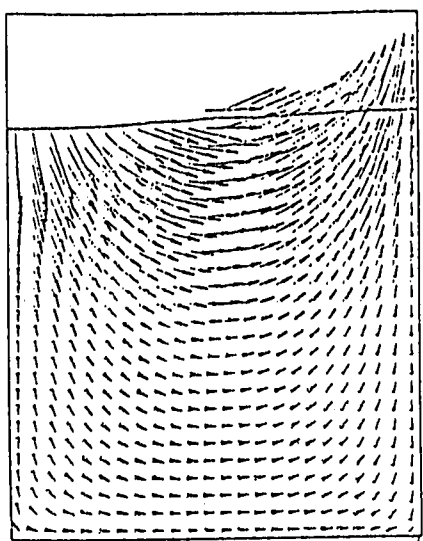
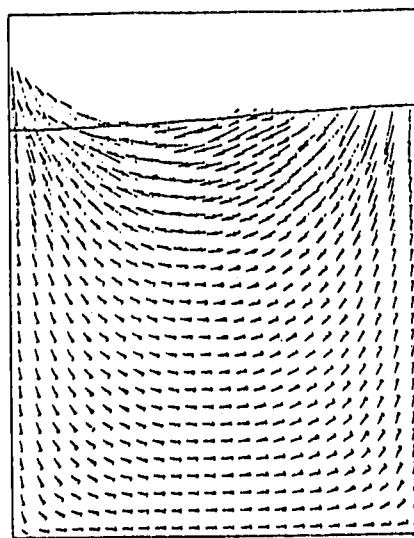


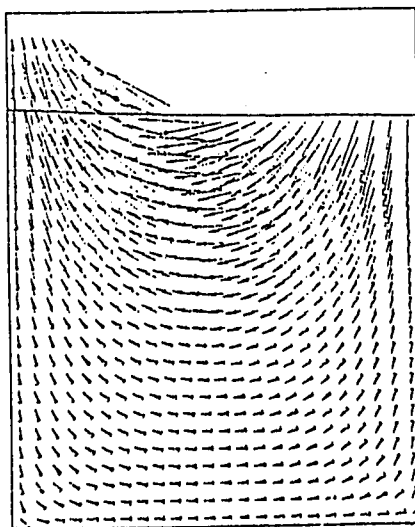
図4.2 自由表面形状および流速ベクトル(1)



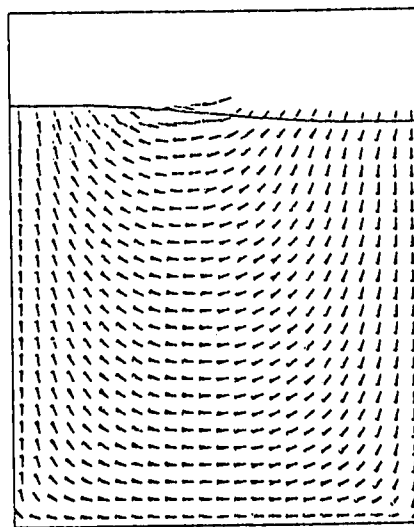
TIME= 0.6 SEC. J = 1



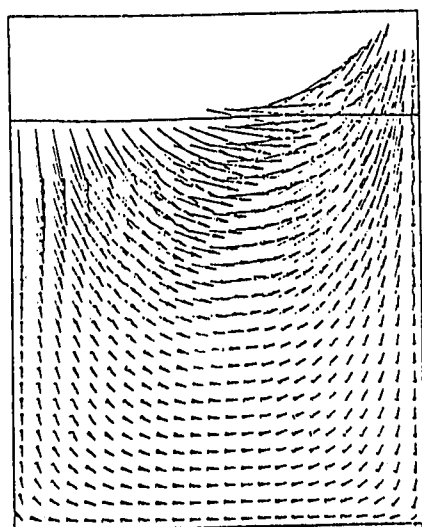
TIME= 0.7 SEC. J = 1



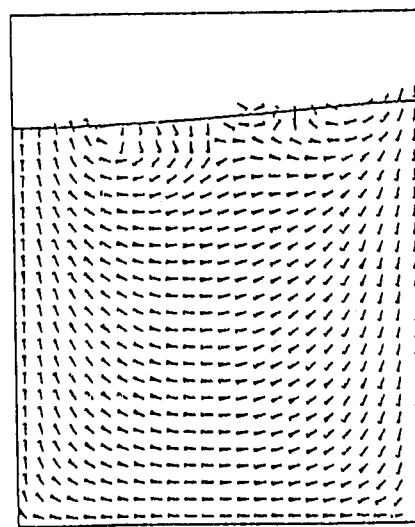
TIME= 0.8 SEC. J = 1



TIME= 0.9 SEC. J = 1



TIME= 1.0 SEC. J = 1



TIME= 1.1 SEC. J = 1

図4.2 自由表面形状および流速ベクトル(2)

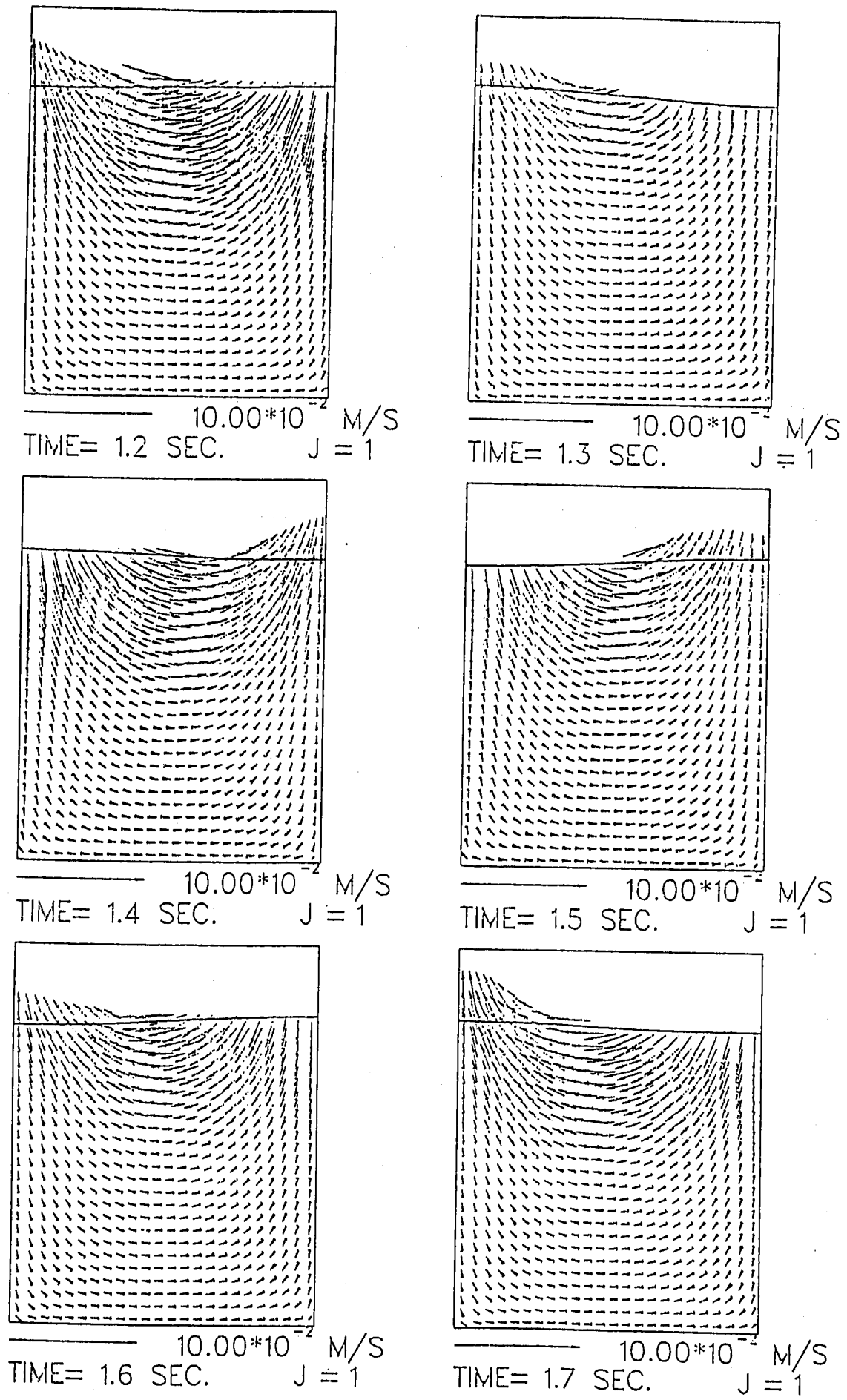


図4.2 自由表面形状および流速ベクトル(3)

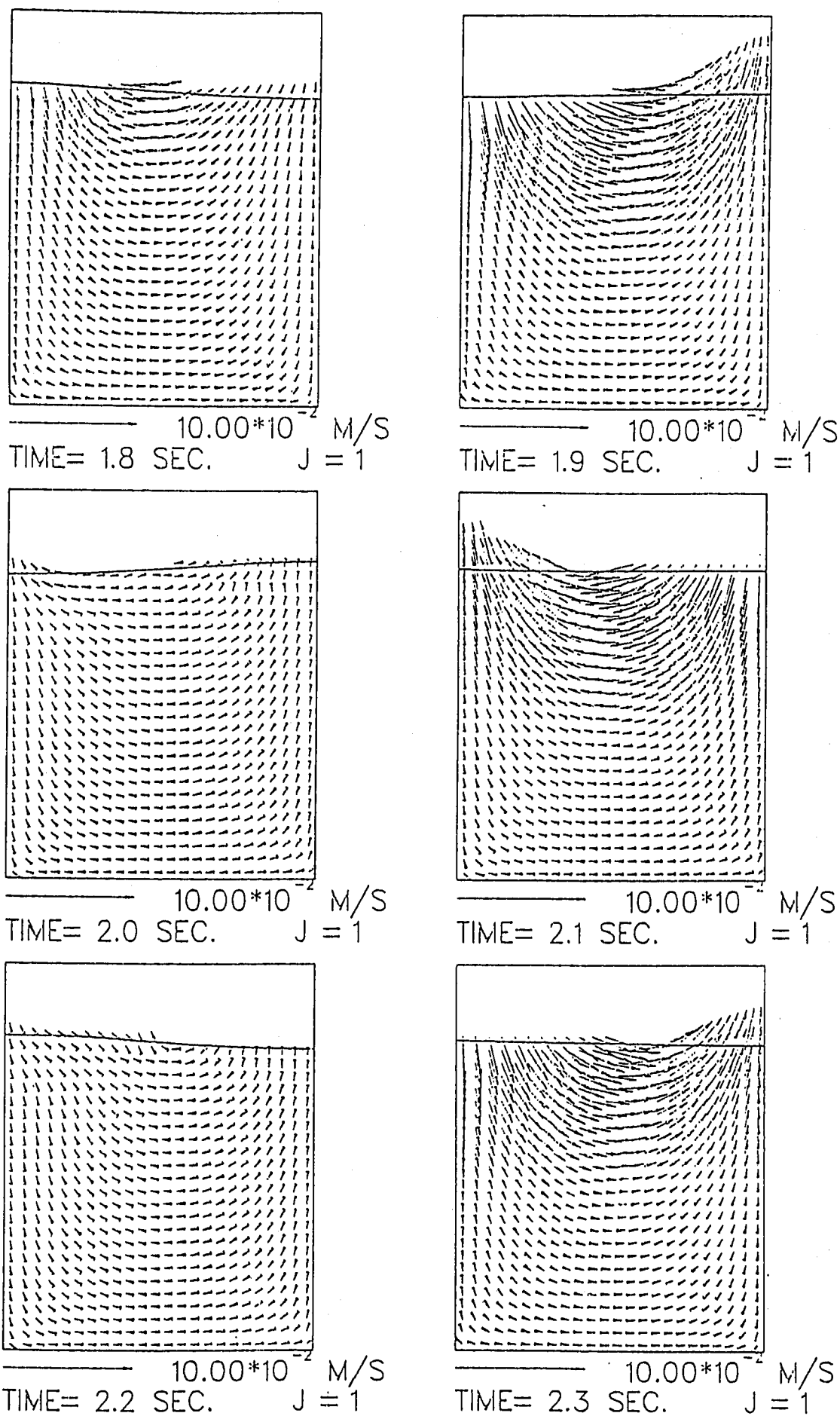


図4.2 自由表面形状および流速ベクトル(4)

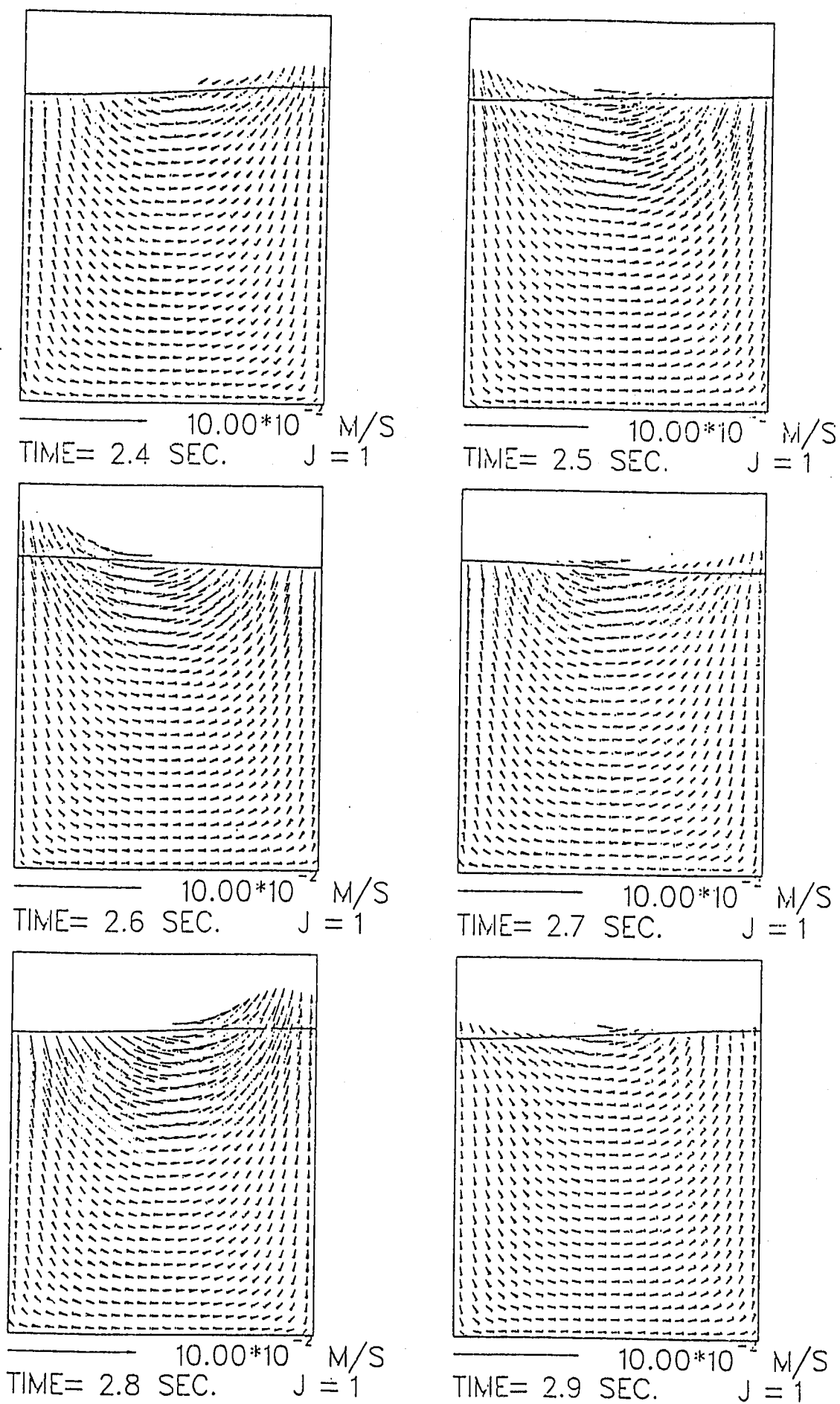


図4.2 自由表面形状および流速ベクトル(5)

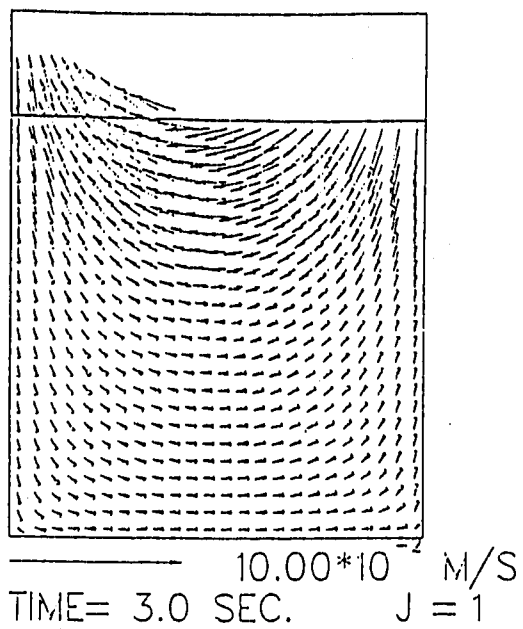


図4.2 自由表面形状および流速ベクトル(6)

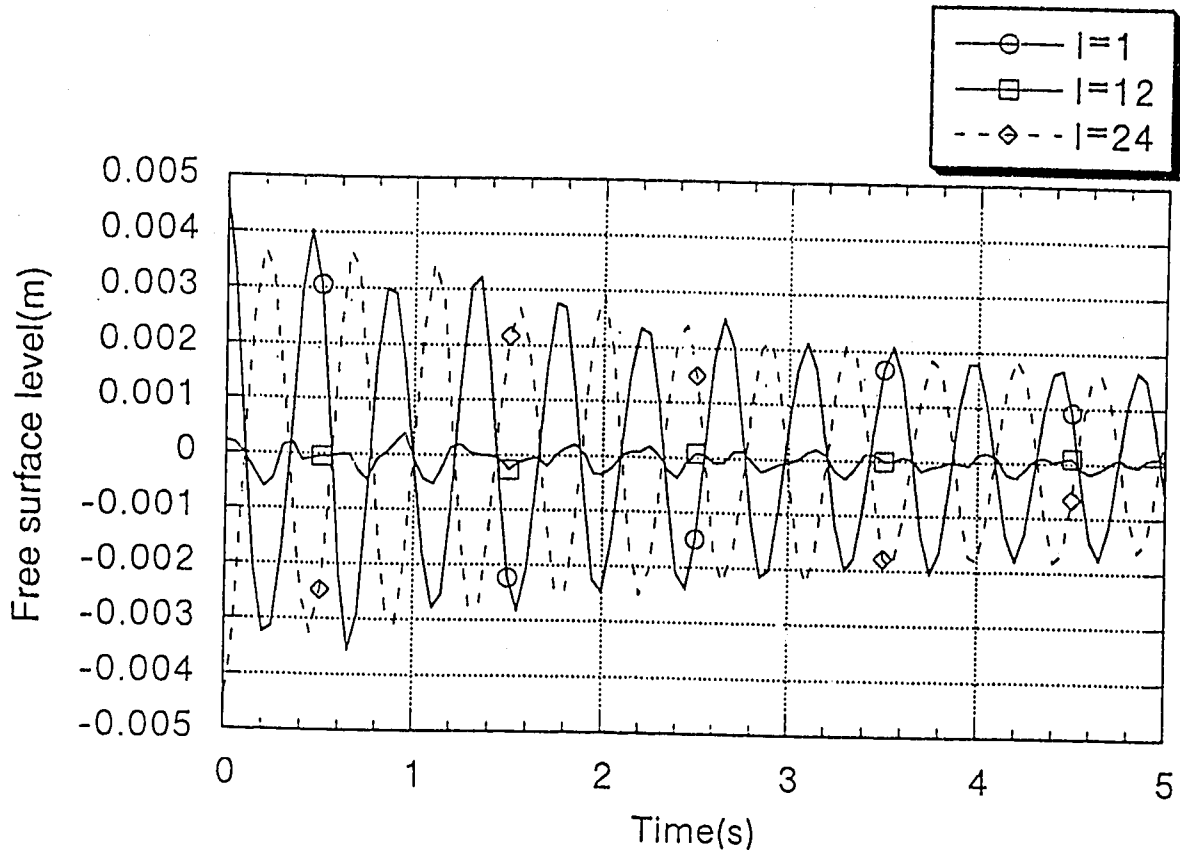


図4.3 自由表面各点における液位時間変動

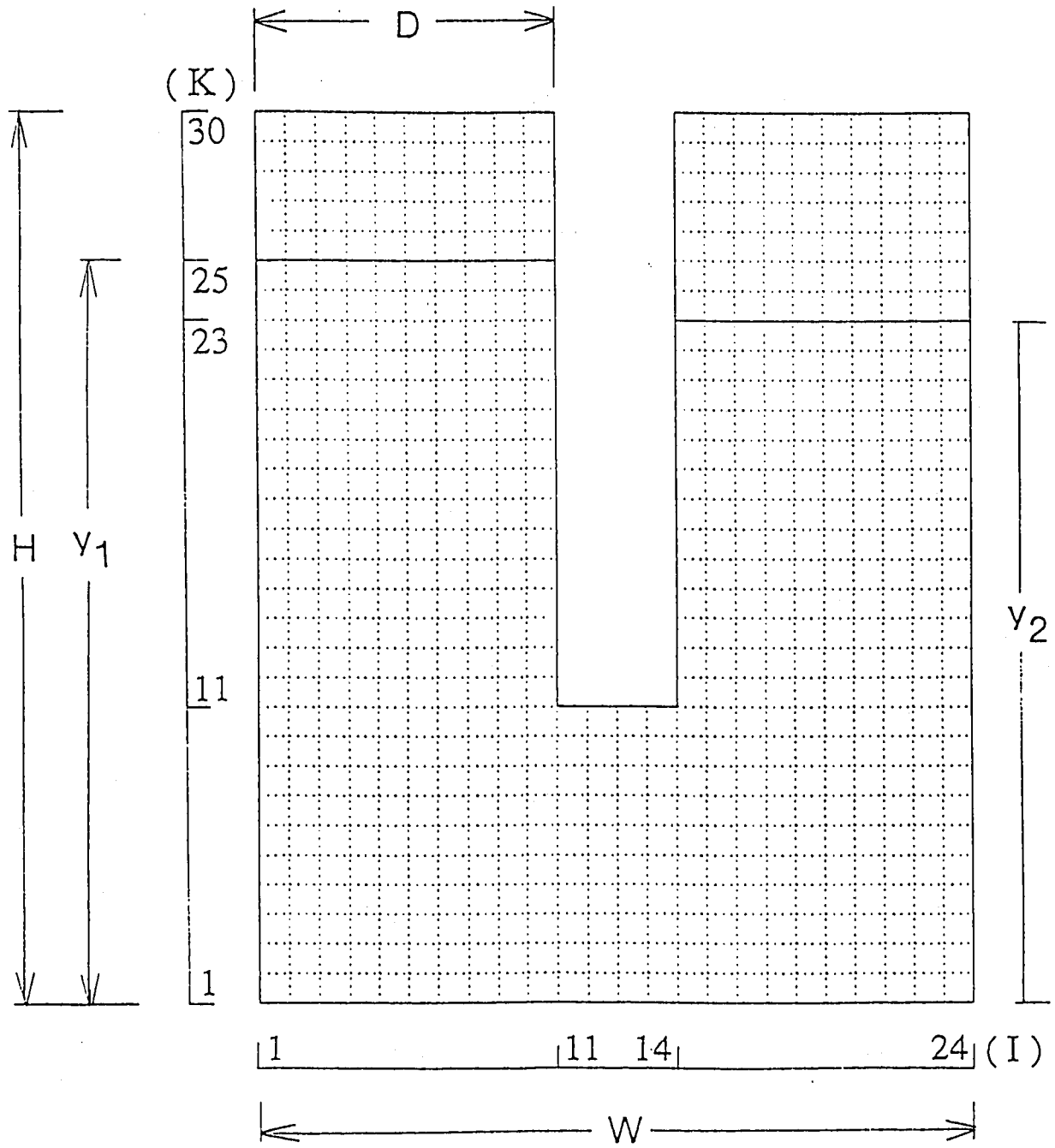
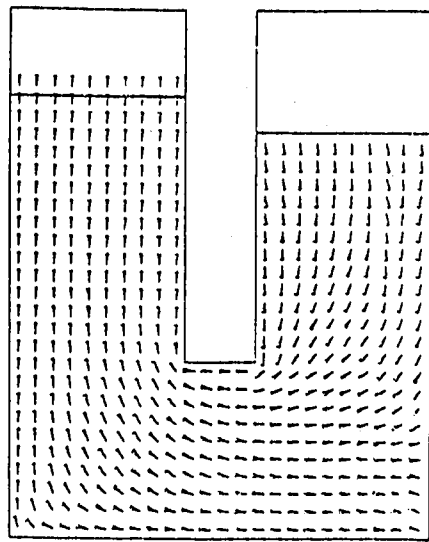
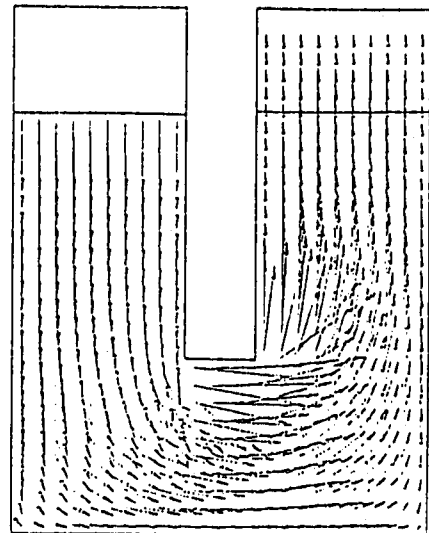


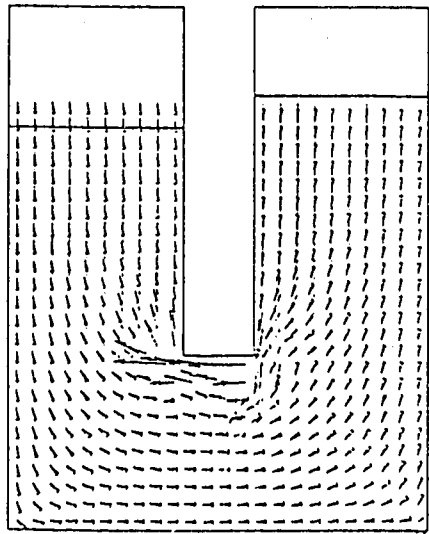
図4.4 U字管状水槽メッシュ分割図



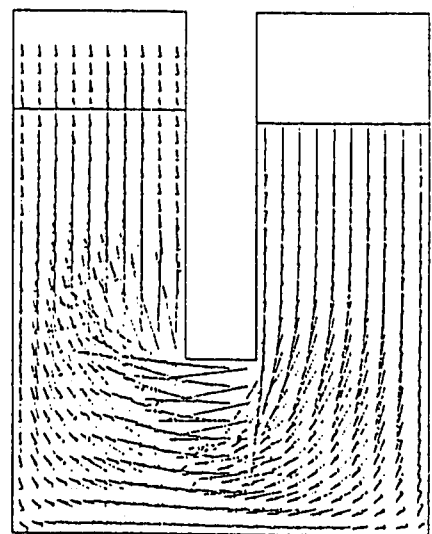
10.00*10⁻² M/S
TIME= 0.0 SEC. J = 1



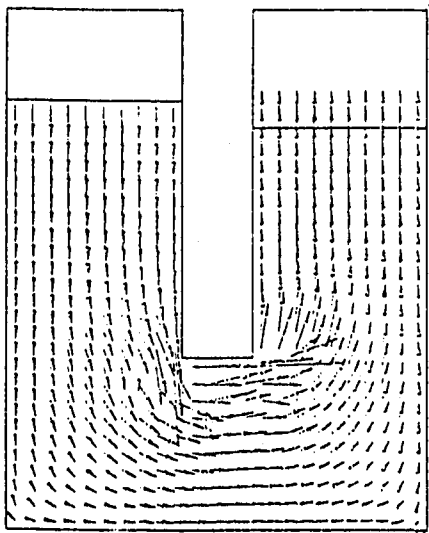
10.00*10⁻² M/S
TIME= 0.2 SEC. J = 1



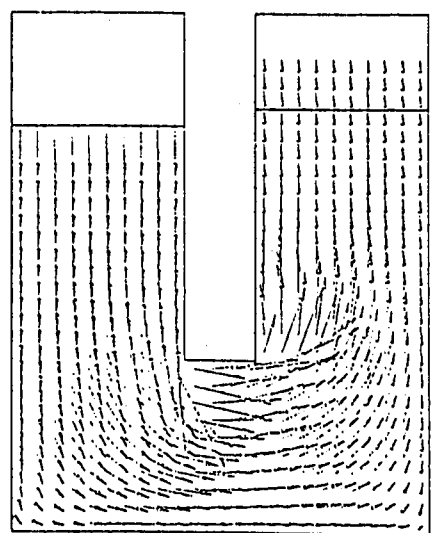
10.00*10⁻² M/S
TIME= 0.4 SEC. J = 1



10.00*10⁻² M/S
TIME= 0.6 SEC. J = 1



10.00*10⁻² M/S
TIME= 0.8 SEC. J = 1



10.00*10⁻² M/S
TIME= 1.0 SEC. J = 1

図4.5 自由表面形状および流速ベクトル(1)

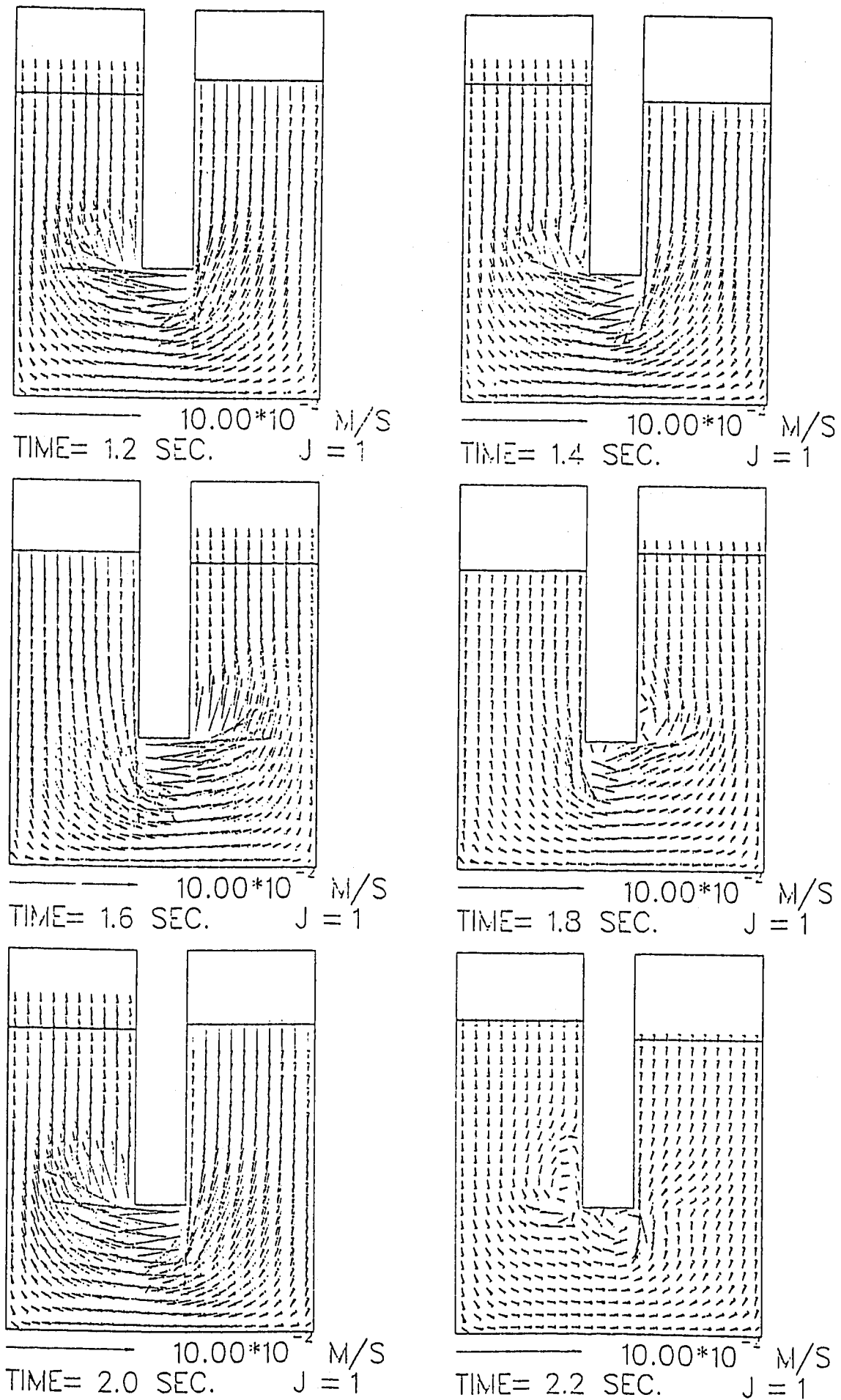


図4.5 自由表面形状および流速ベクトル(2)

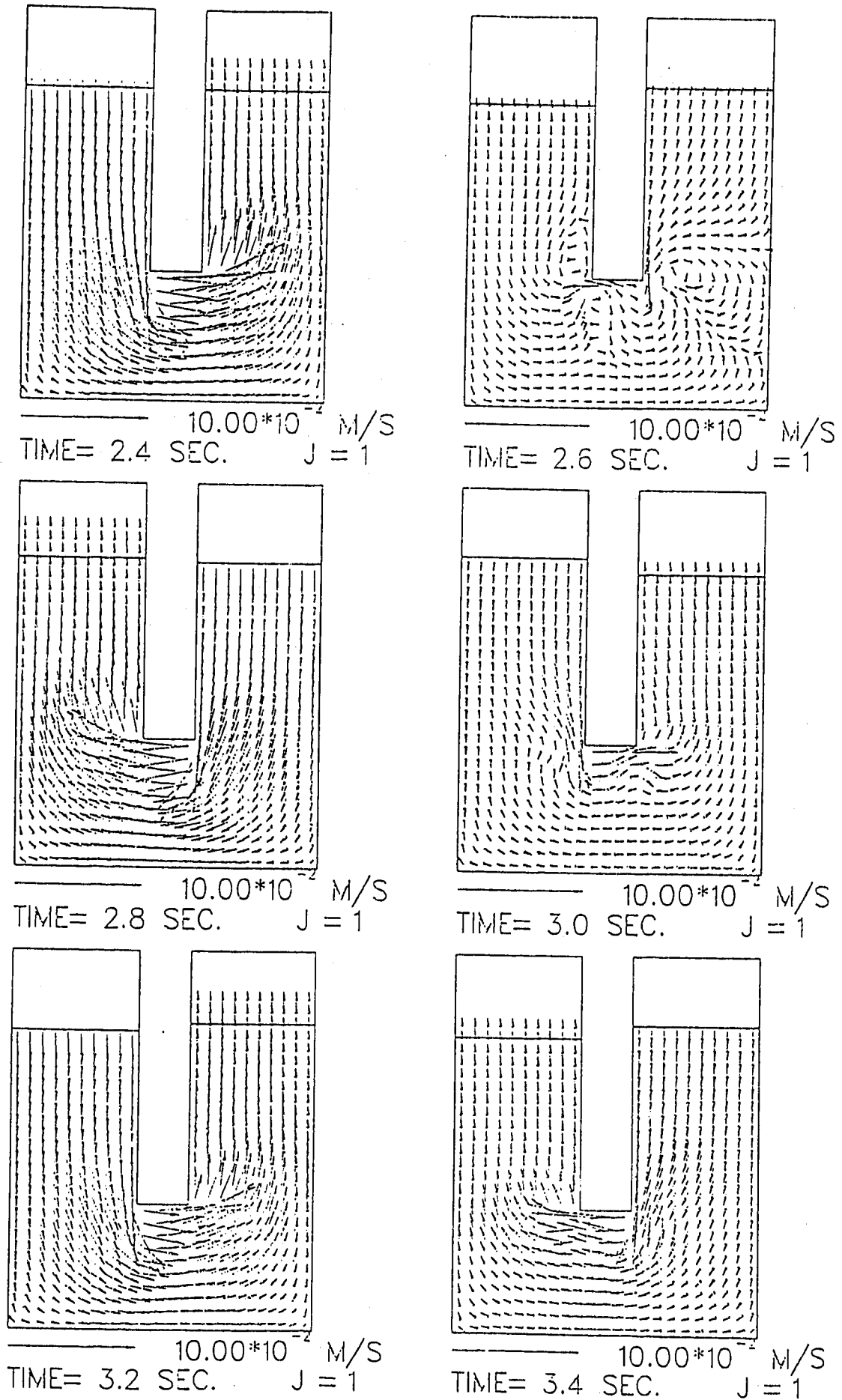
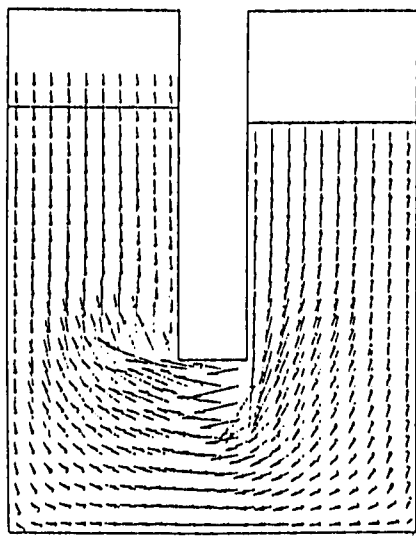
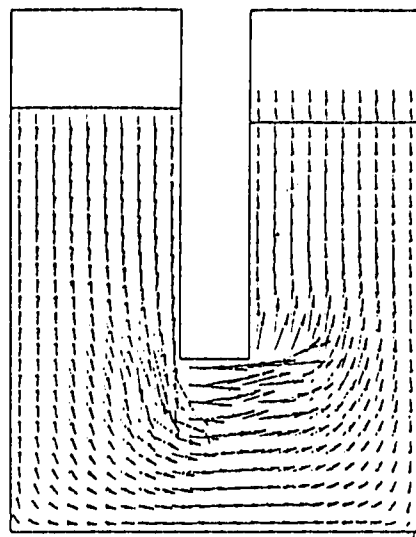


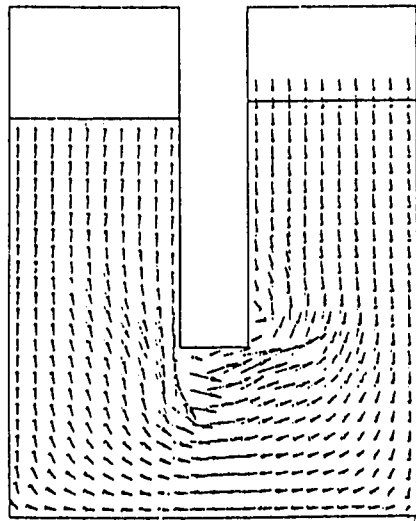
図4.5 自由表面形状および流速ベクトル(3)



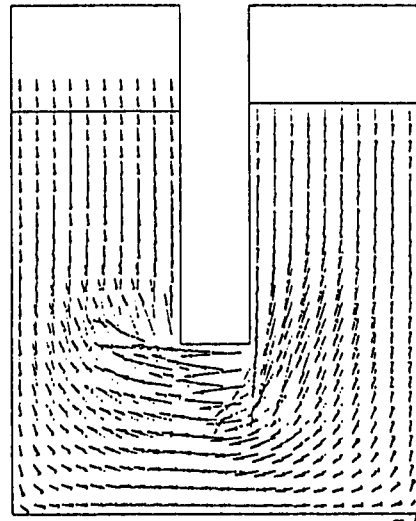
TIME= 3.6 SEC. $10.00 \cdot 10^{-2}$ M/S
J = 1



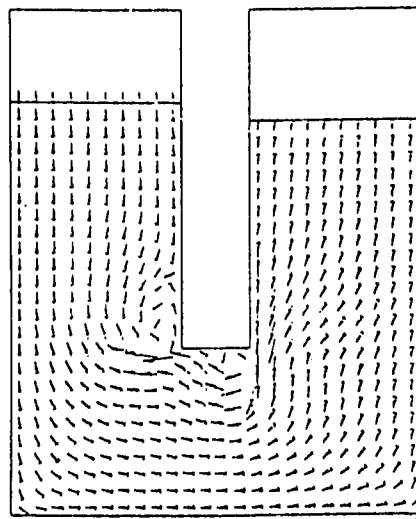
TIME= 3.8 SEC. $10.00 \cdot 10^{-2}$ M/S
J = 1



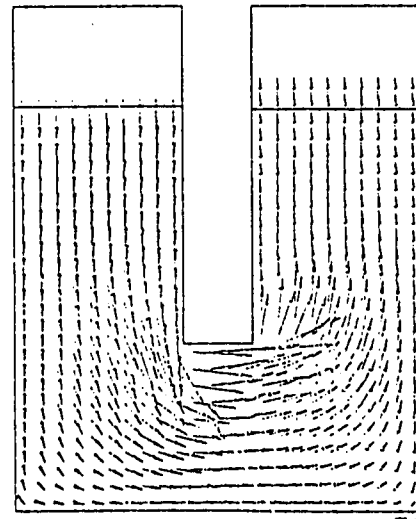
TIME= 4.0 SEC. $10.00 \cdot 10^{-2}$ M/S
J = 1



TIME= 4.2 SEC. $10.00 \cdot 10^{-2}$ M/S
J = 1



TIME= 4.4 SEC. $10.00 \cdot 10^{-2}$ M/S
J = 1



TIME= 4.6 SEC. $10.00 \cdot 10^{-2}$ M/S
J = 1

図4.5 自由表面形状および流速ベクトル(4)

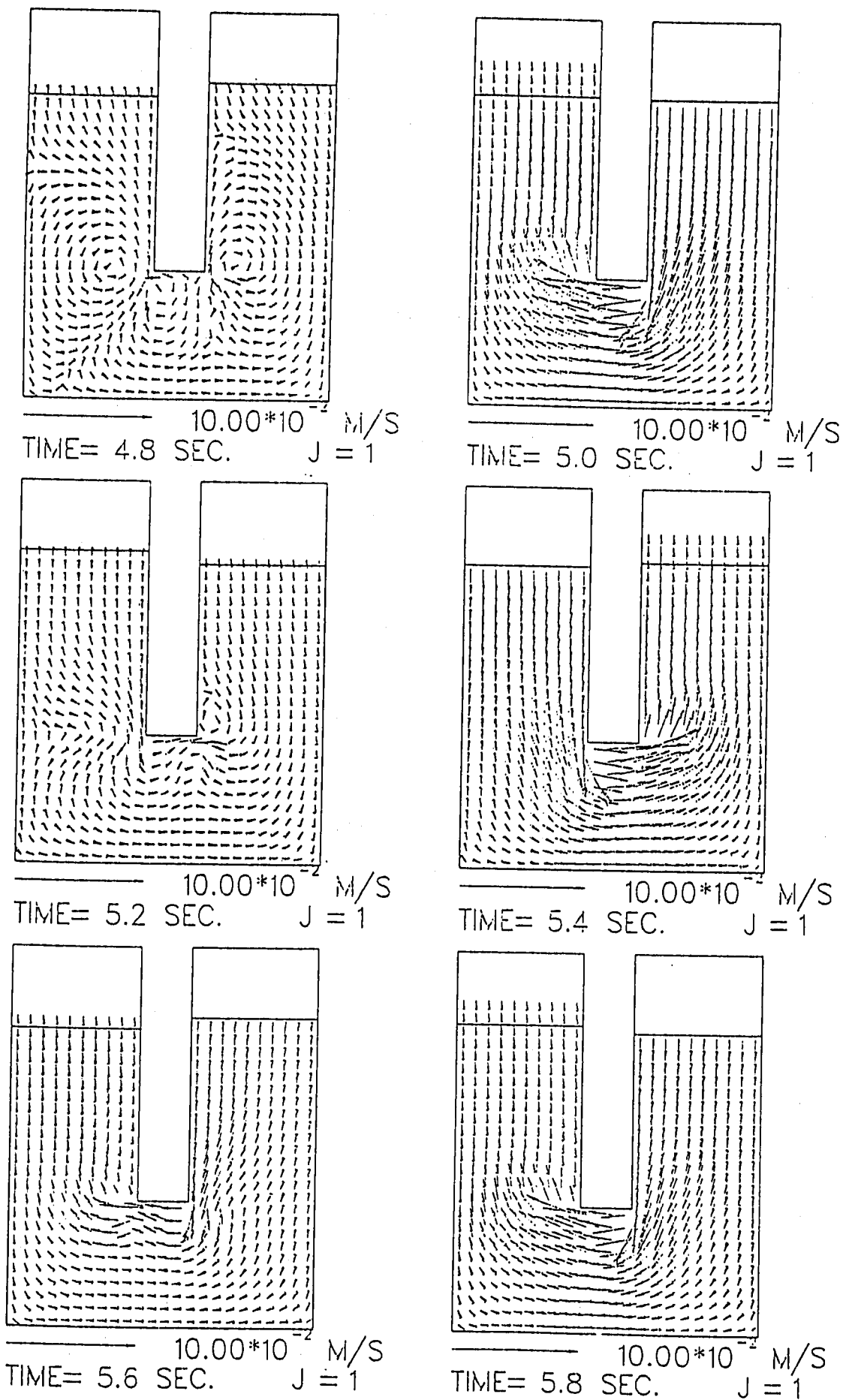
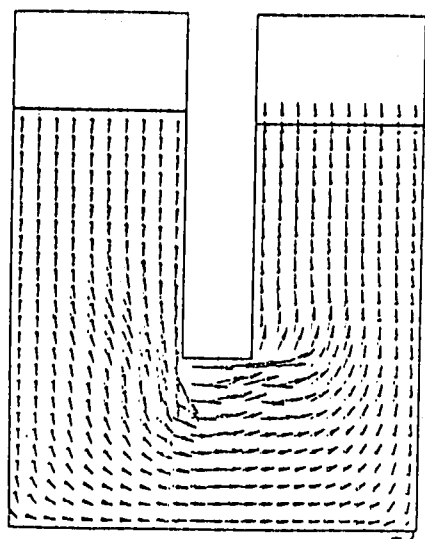
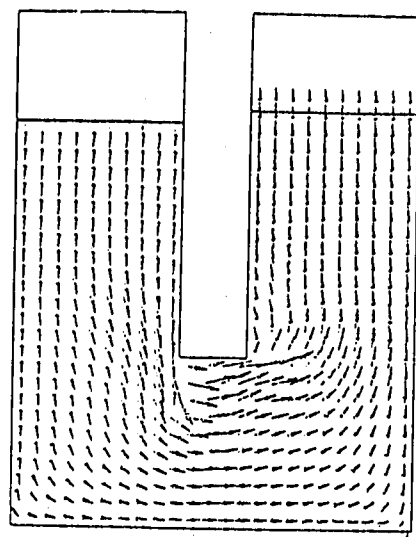


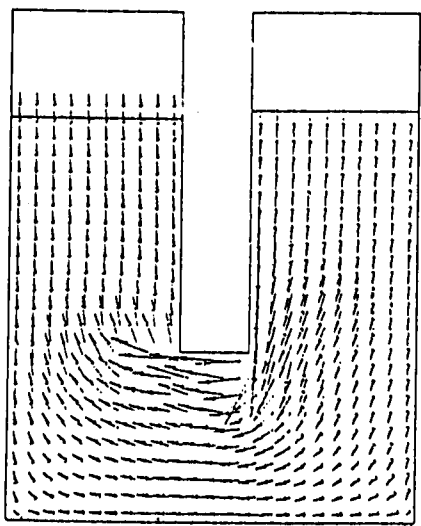
図4.5 自由表面形状および流速ベクトル(5)



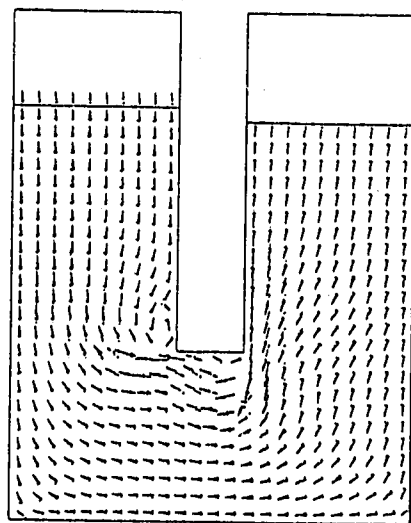
TIME= 6.0 SEC. $10.00 \cdot 10^{-2}$ M/S
J = 1



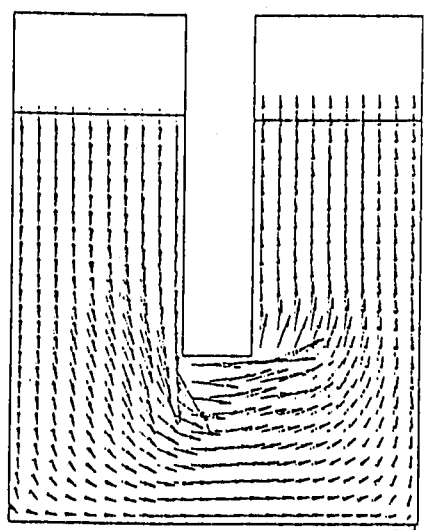
TIME= 6.2 SEC. $10.00 \cdot 10^{-2}$ M/S
J = 1



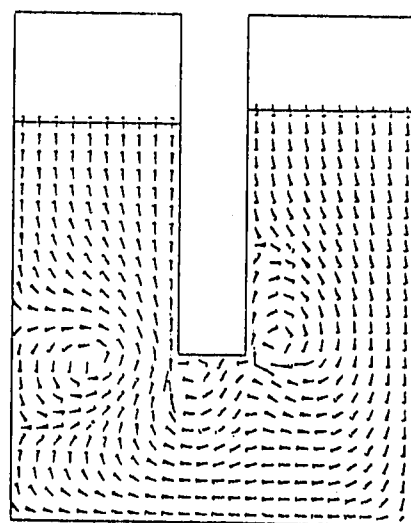
TIME= 6.4 SEC. $10.00 \cdot 10^{-2}$ M/S
J = 1



TIME= 6.6 SEC. $10.00 \cdot 10^{-2}$ M/S
J = 1



TIME= 6.8 SEC. $10.00 \cdot 10^{-2}$ M/S
J = 1



TIME= 7.0 SEC. $10.00 \cdot 10^{-2}$ M/S
J = 1

図4.5 自由表面形状および流速ベクトル(6)

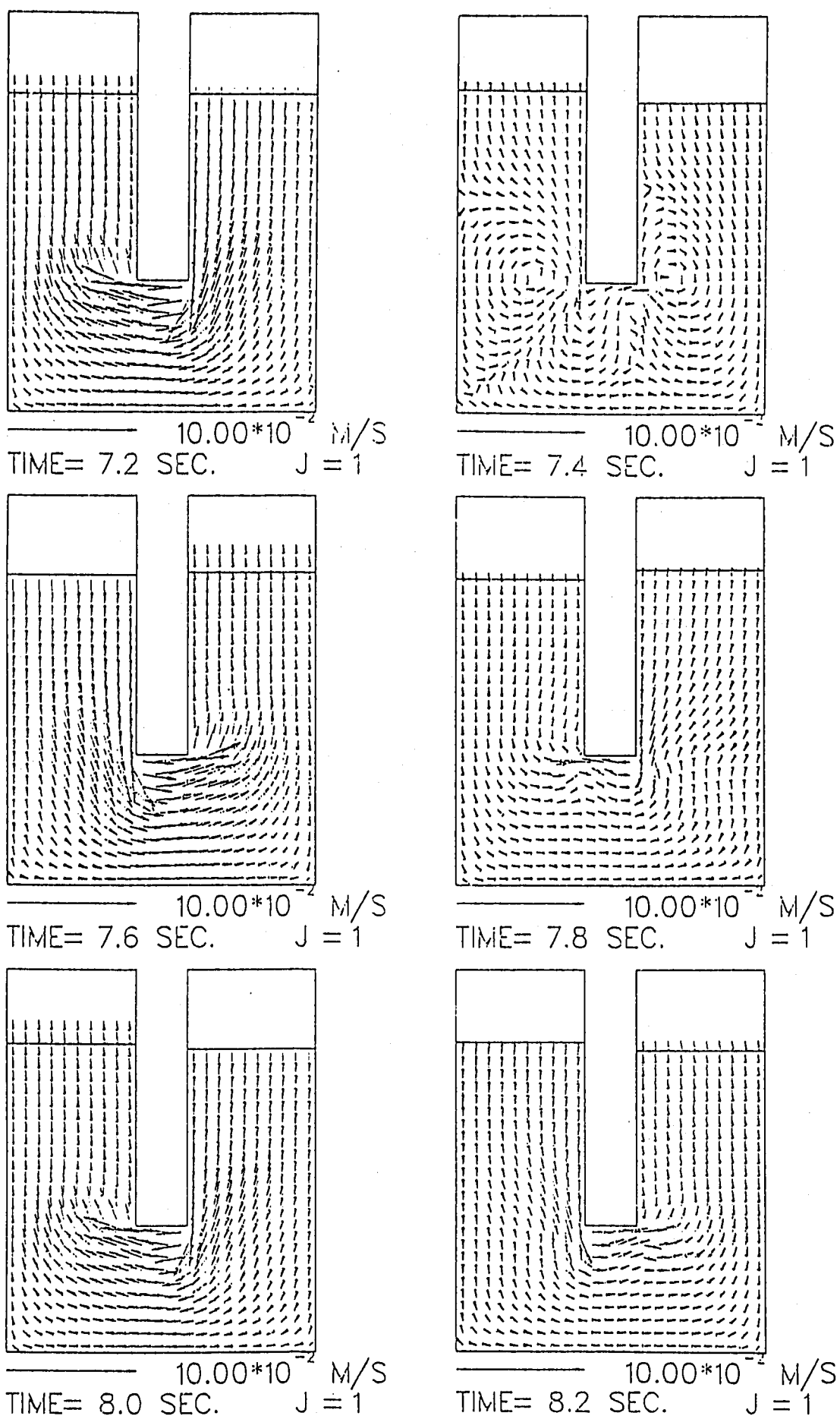


図4.5 自由表面形状および流速ベクトル(7)

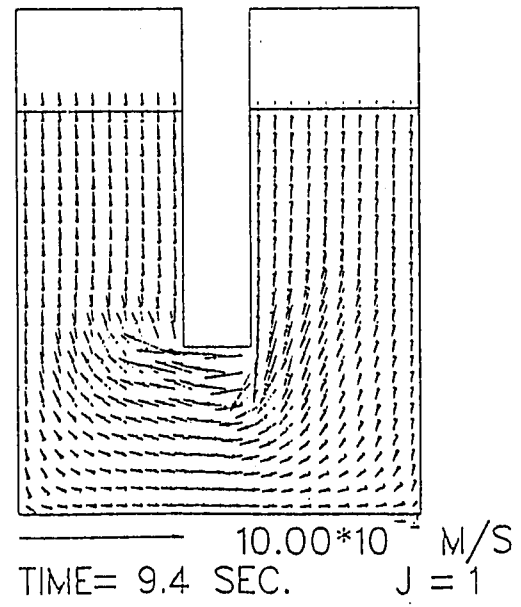
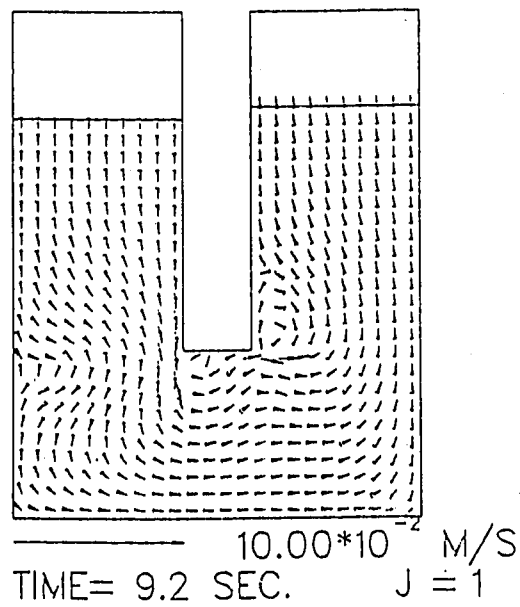
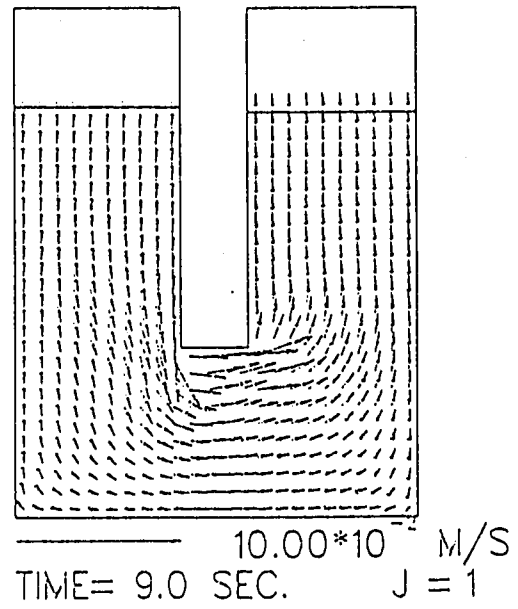
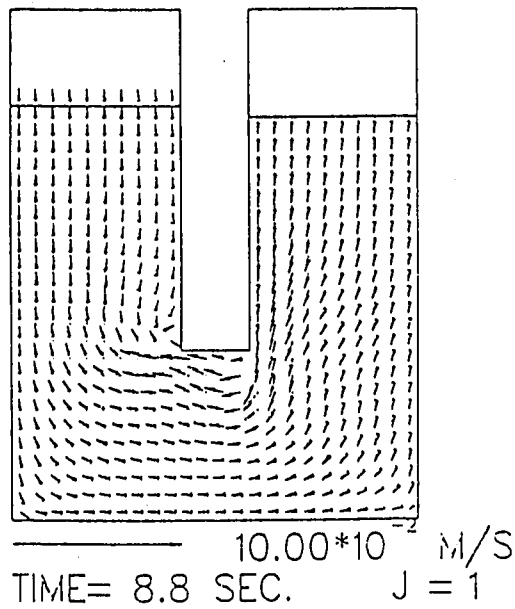
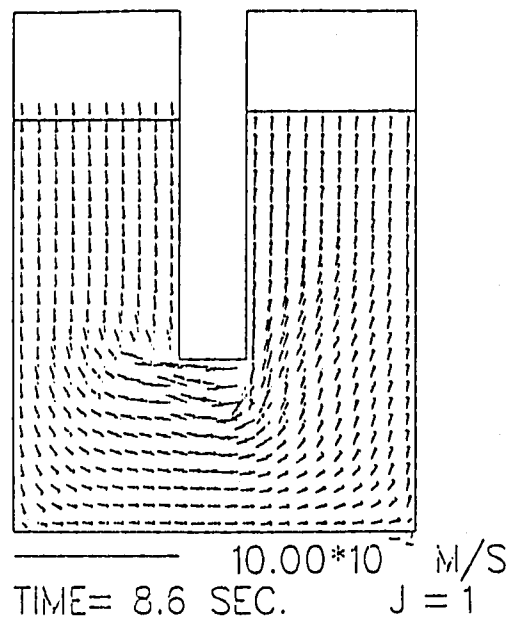
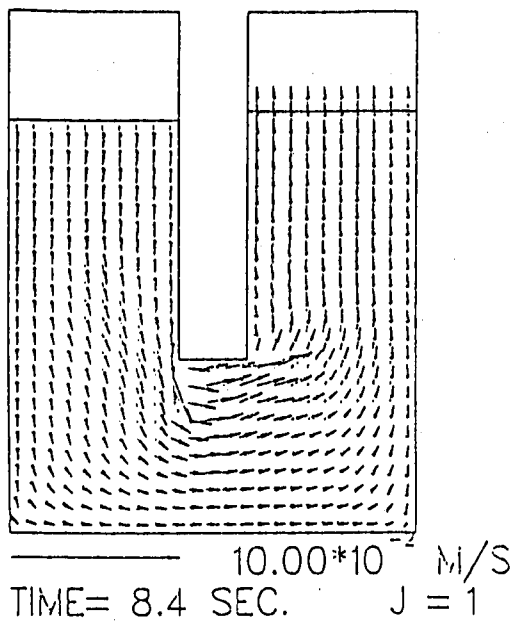


図4.5 自由表面形状および流速ベクトル(8)

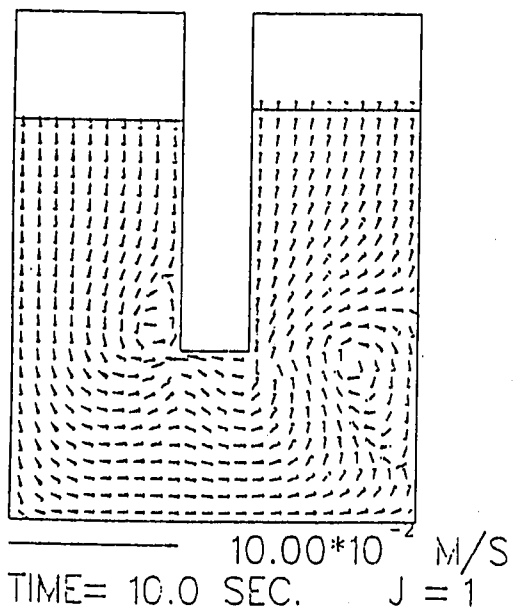
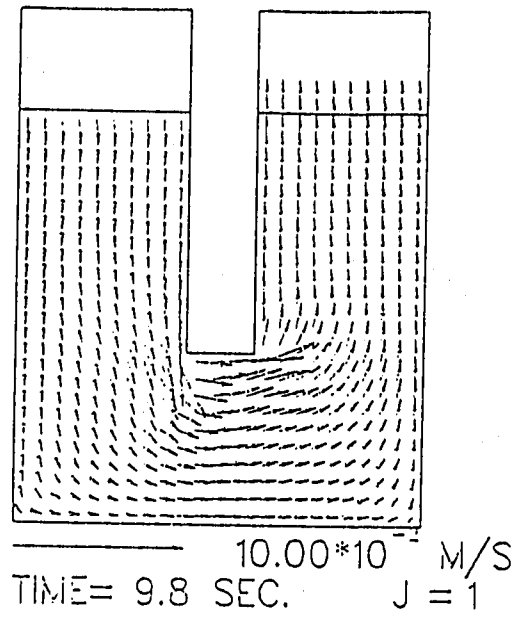
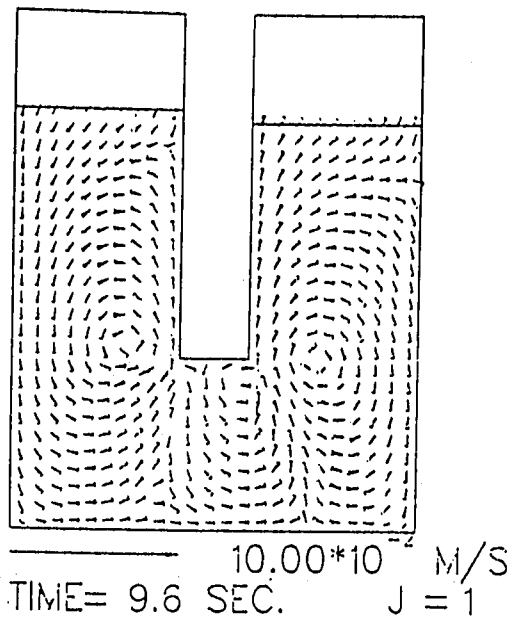


図4.5 自由表面形状および流速ベクトル(9)

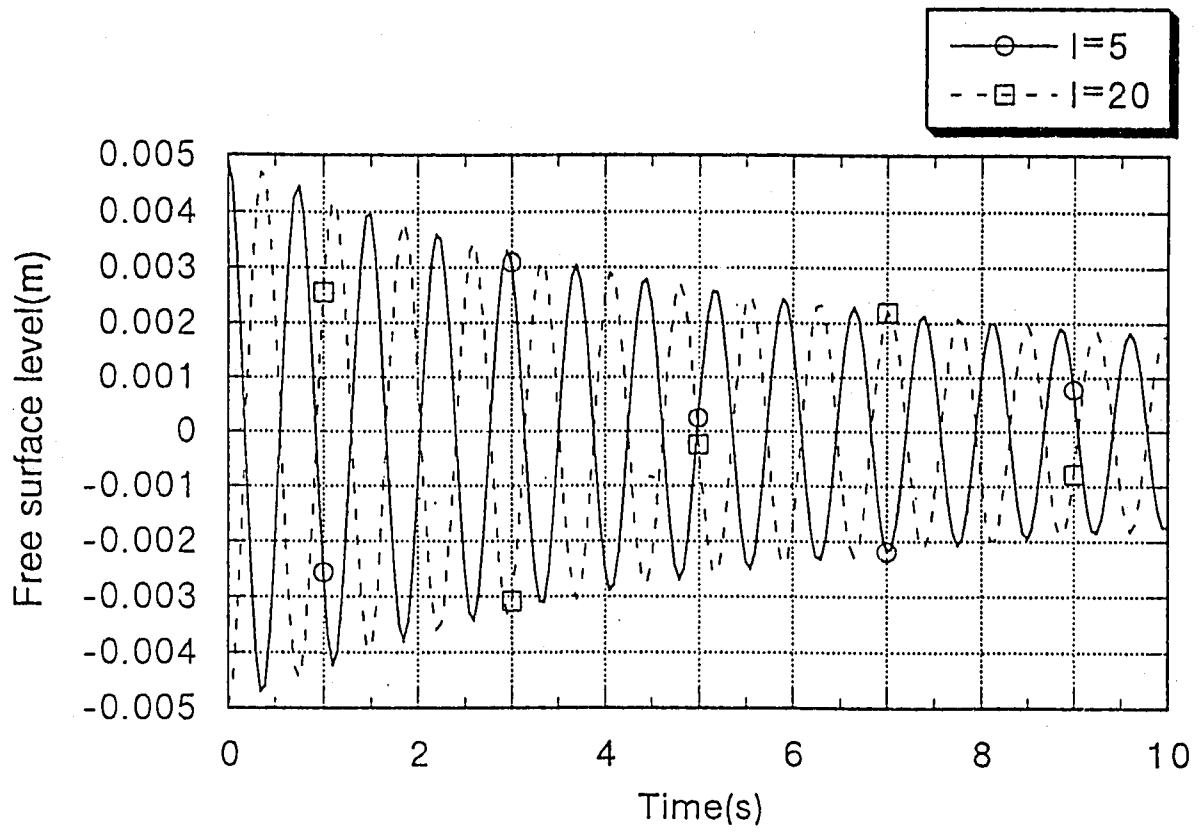


図4.6 自由表面各点における液位時間変動

第5章 適用計算

本章では、適用計算として、流入流出境界をもつ矩形容器内液面揺動解析、および大型炉炉心上部プレナム解析の結果について示す。

5.1 流入流出境界をもつ矩形容器内の液面揺動⁶⁾

図 5.1 に流入流出境界をもつ矩形容器のメッシュ分割図を示す。また、計算条件は以下の通りである。

計算体系	Case-1 H=1.15m W=1.00m $y_1=0.50\text{m}$ $y_2=0.25\text{m}$ D=0.10m	Case-2 $y_1=0.20\text{m}$
物性値	水 (20°C); 密度: 997.8kg/m^3 粘性: $1.015 \times 10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$	
初期条件	流速 $u=v=0\text{ m/s}$ 圧力 気相 大気圧 液中 静水圧分布	
境界条件	入口流速 $u=1.0\text{ m/s}$ 壁面 スリップ 自由表面 大気開放	
数値計算条件	メッシュ分割 $x=20 \times 0.05\text{m}$ $y=23 \times 0.05\text{m}$ 時間ステップ 0.001秒 重力加速度 $g=-9.8\text{ m/s}^2$	

本解析では、流入口からの水位が $y_1=0.5\text{m}$ のケース(Case-1) と $y_1=0.2\text{m}$ のケース(Case-2) について実施した。図 5.2 にCase-1における0秒から10秒までの液面形状とベクトル図を、図 5.3 にCase-2における液面形状とベクトル図を示す。

計算開始と同時に流体は、左側壁面より流入する。この流入により左側壁面近傍において液面は隆起し、隆起した流体は右側へ移動しながら最終的に壁面にぶつかり振動を始める。流入した流体は水平方向に直線的に移動せず、流出口にひきこまれているのがわかる。また、流入口と流出口の間における主流の上下では渦ができており、6.6秒以降においては、左側壁面の自由液面近傍において停留渦が発生している。この渦はCase-2ではみら

れない。Case-1とCase-2との違いは計算初期における自由表面液位の振幅である。これは、Case-2の方が流入口と自由液面までの距離が近いため、液面が大きく振動することに起因する。図5.4に左側壁面、容器中心、右側壁面における自由液面の時間変動を示す。Case-2では約1秒時点において、左側壁面と右側壁面の液位差が7cm近くにあることがわかる。この液位差も徐々に解消し、10秒時点において0.7cmとなりCase-1とほぼ等しくなる。

5. 2 大型炉炉心上部プレナム解析⁹⁾

本解析で計算対象とする原子炉は、図5.5に示す電気出力60万kW級の大型高速炉であり、この内、上部プレナム内における熱流動挙動を解析対象とする。これまでの解析により得られている知見によれば、定格負荷運転時の原子炉容器上部プレナム液面近傍では、炉容器壁から炉心上部機構壁に向かう液面流速が1m/s程度となり、炉心上部機構壁近傍での下降流の存在により、冷却材中へのカバーストックの発生が懸念されている。この時、炉容器壁近傍における自由表面の一部は上向き流の存在により盛り上がりがあるとされている。本解析では、この自由表面の盛り上がり再現できるかどうかを目的とする。図5.6にメッシュ分割図を示す。また計算条件は以下の通りである。

数値計算条件	メッシュ分割； $29^i \times 72^j \times 44^k$ 時間ステップ；0.0001
境界条件	入口流速；平衡炉心第5サイクル末期条件 壁面；ノースリップ 自由表面；大気開放

図5.7に液面形状とベクトル図を示す。炉心より流出した冷却材は、原子炉容器壁を上昇し、この上昇流により自由表面を盛り上げる。その後、流れは中心方向に向かい、炉心上部機構壁より下降流に転ずる。但し、炉心上部機構壁近傍における自由表面液位は、計算初期における基準液位より上昇している。一方、原子炉出口配管壁(J=18,19)においては、冷却材の強い引き込みにより液位は下がっている。

図5.8に自由表面における基準高さからの液位の等値線(単位はcm)を示す。原子炉容器壁近傍および炉心上部機構壁近傍において液面は盛り上がり、出口配管近傍において最も低下していることがわかる。なお、液位最高値は、23.11cm($l=11, J=24$)であり、最低値は-15.16cm($l=18, J=30$)である。

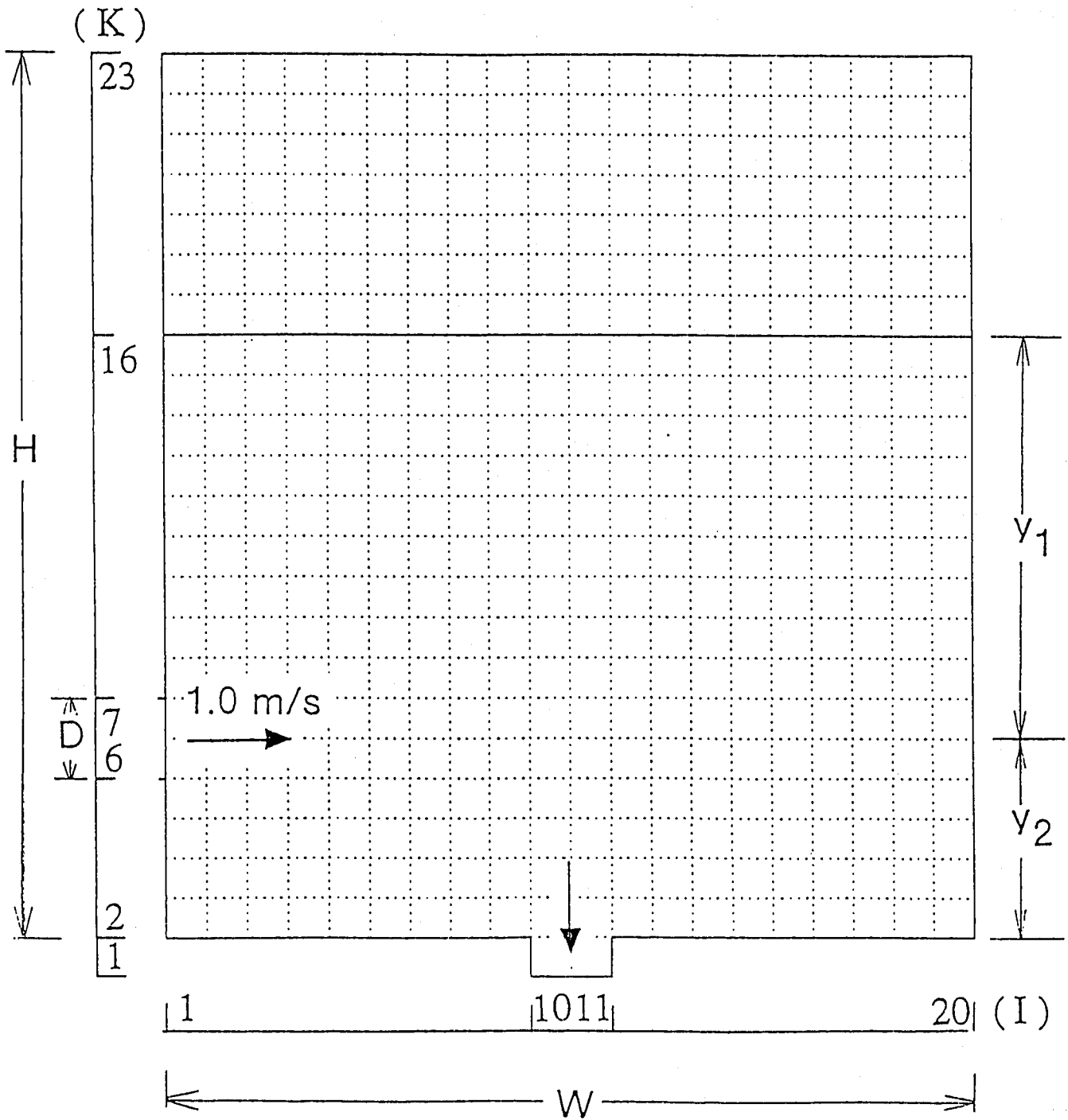


図5.1 流入流出境界をもつ二次元矩形容器メッシュ分割図

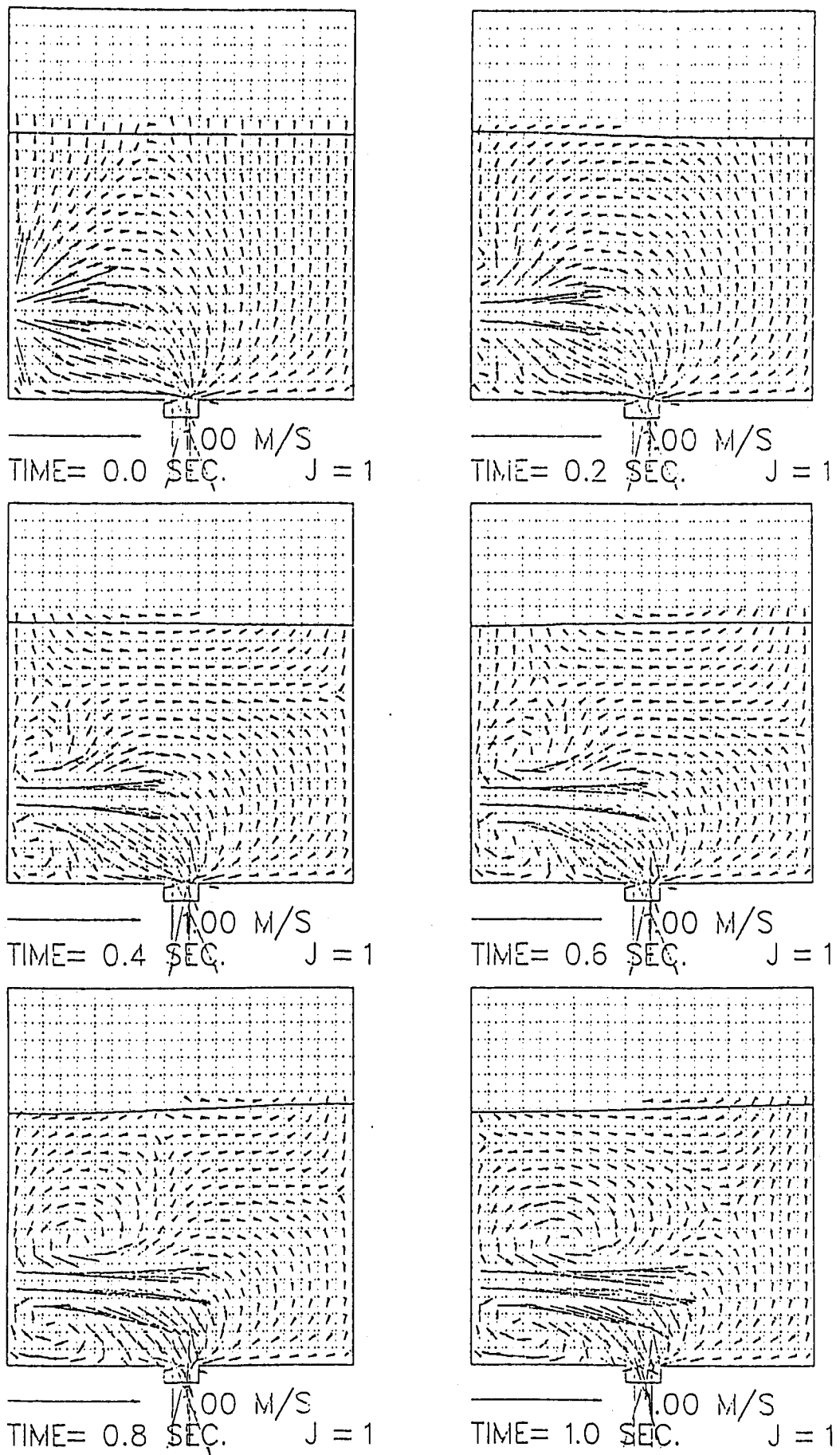


図5.2 自由表面形状および流速ベクトル(Case-1)(1)

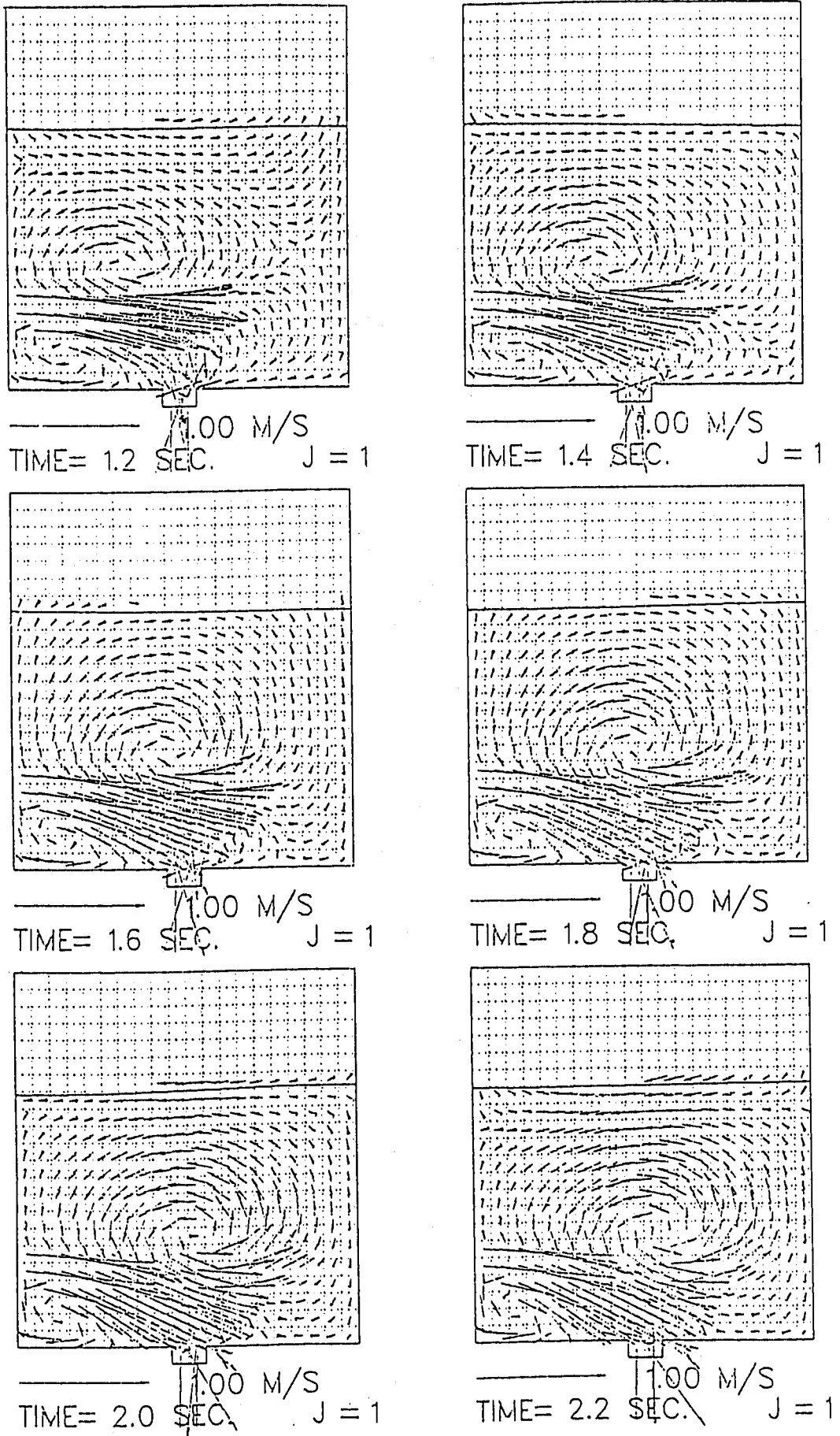


図5.2 自由表面形状および流速ベクトル(Case-1)(2)

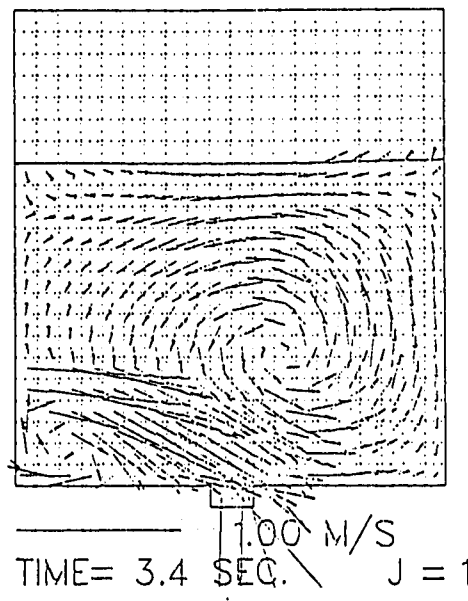
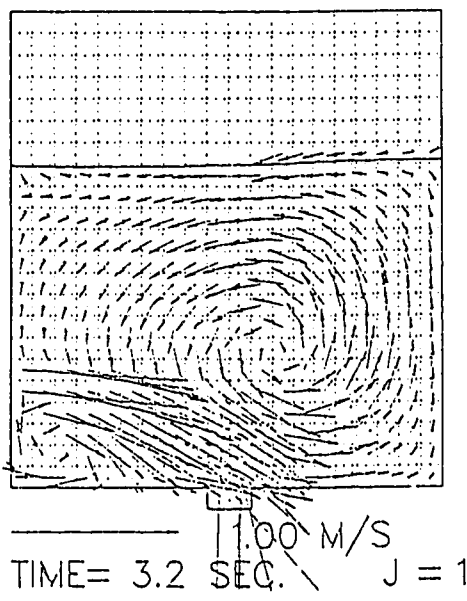
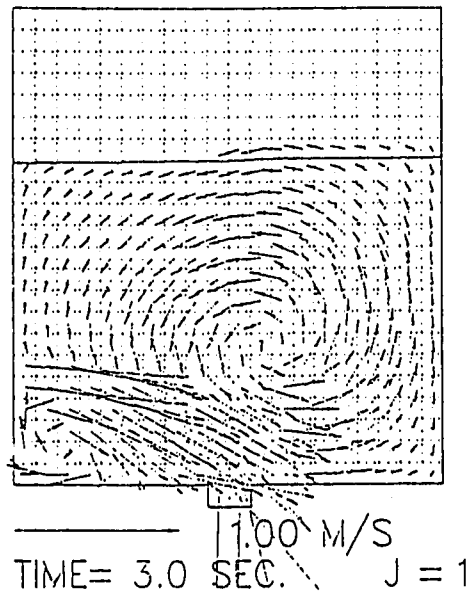
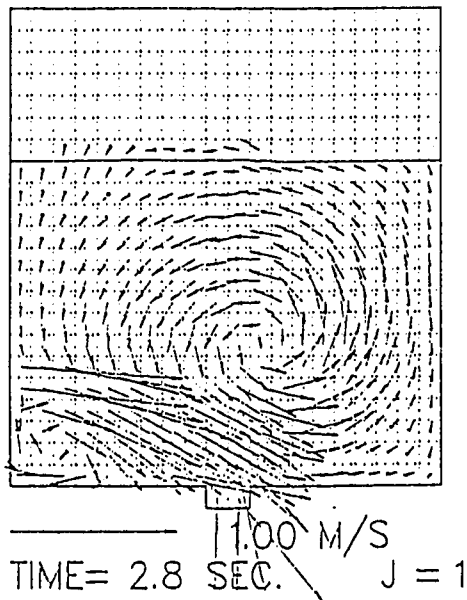
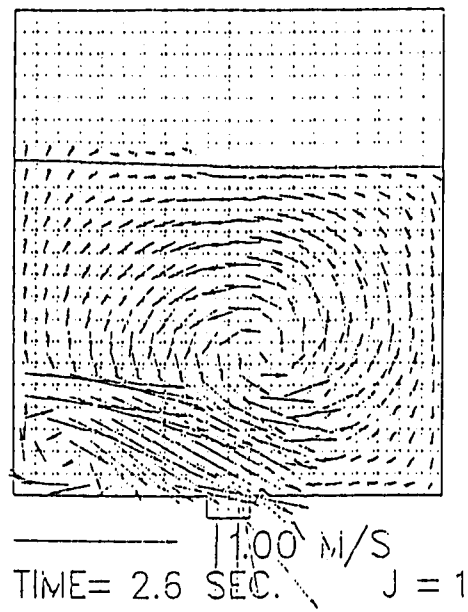
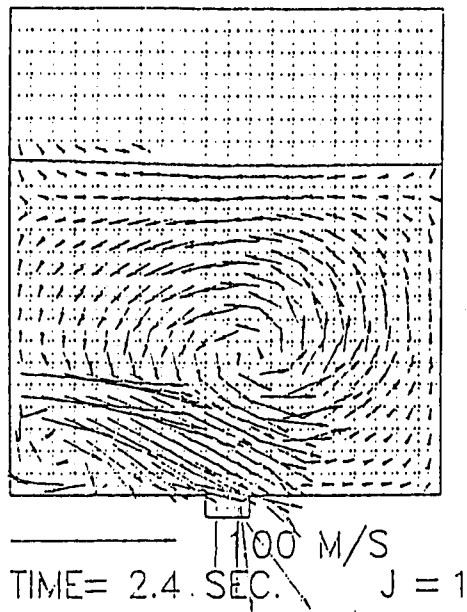


図5.2 自由表面形状および流速ベクトル(Case-1)(3)

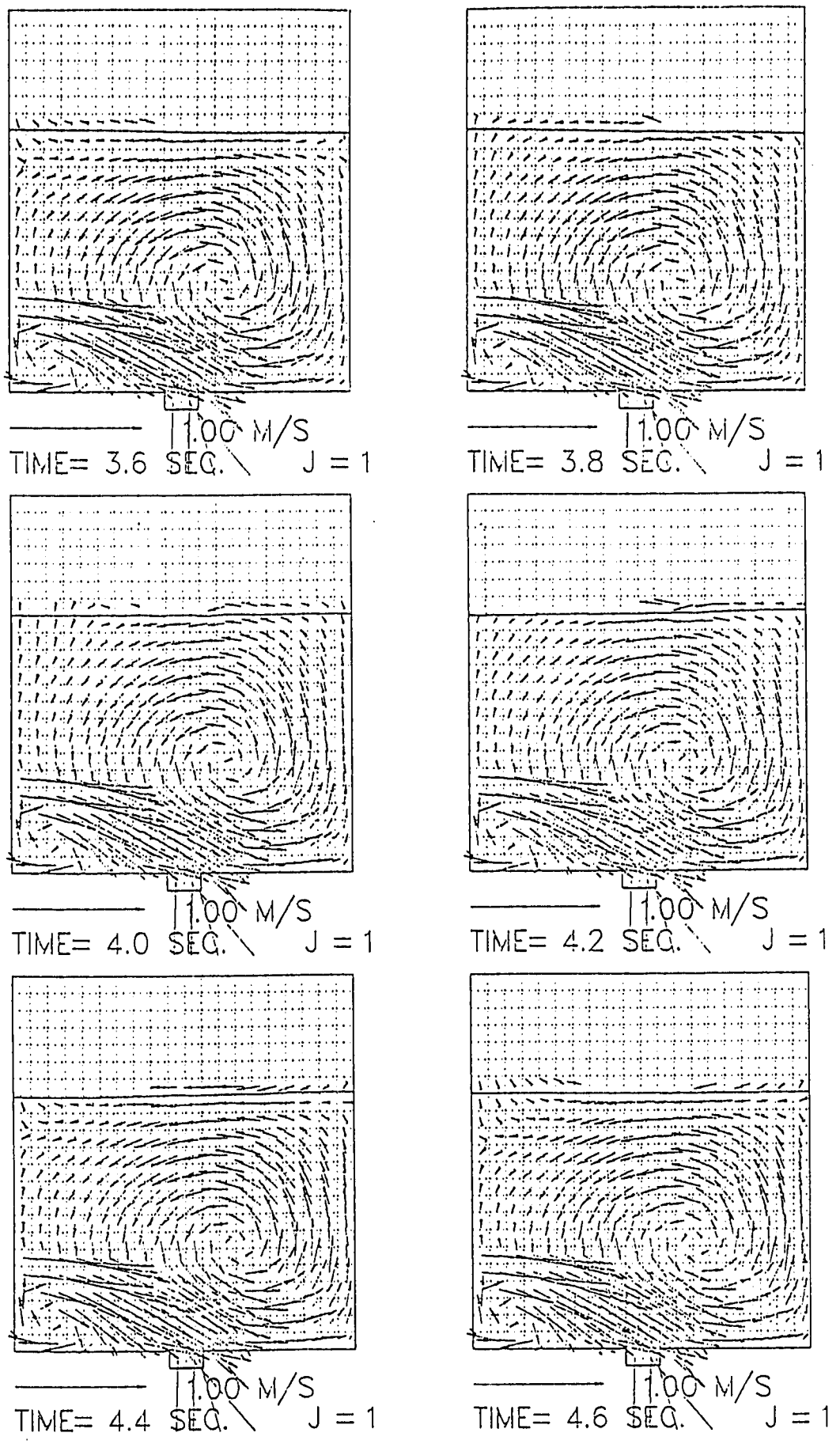


図5.2 自由表面形状および流速ベクトル(Case-1)(4)

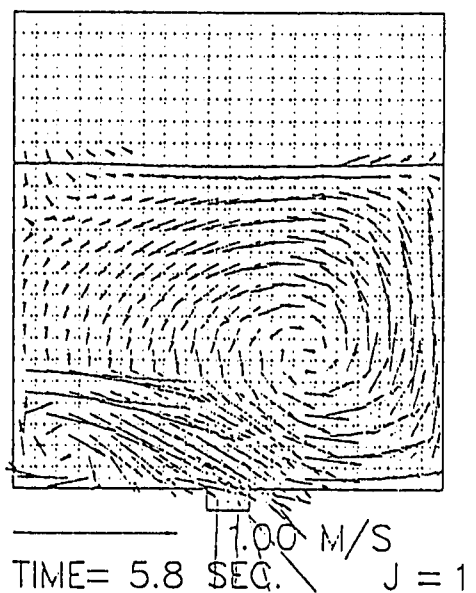
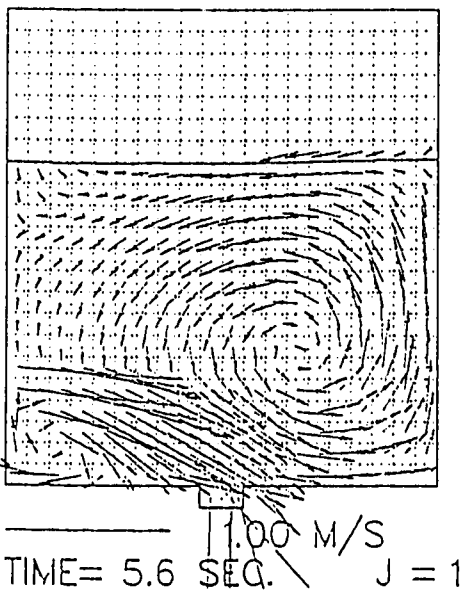
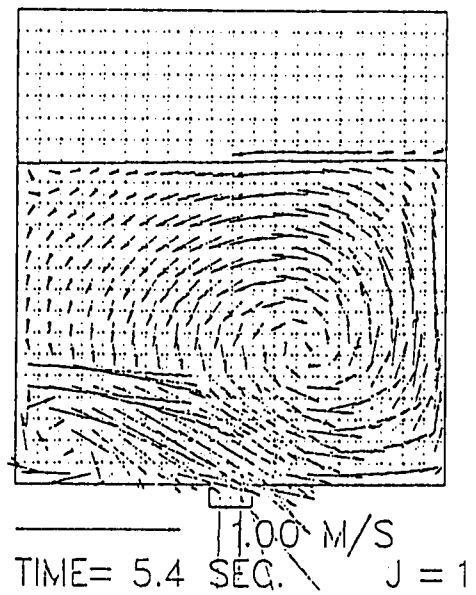
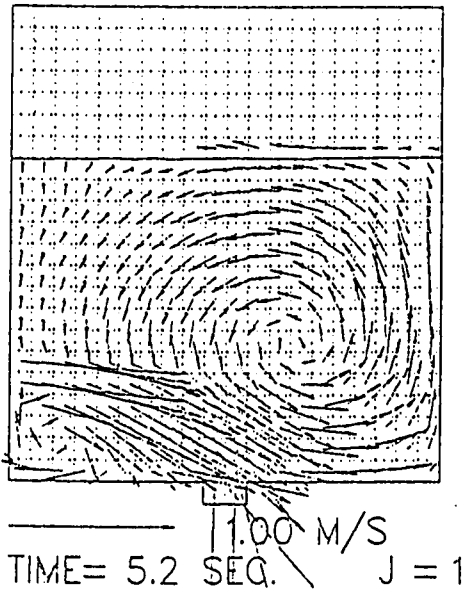
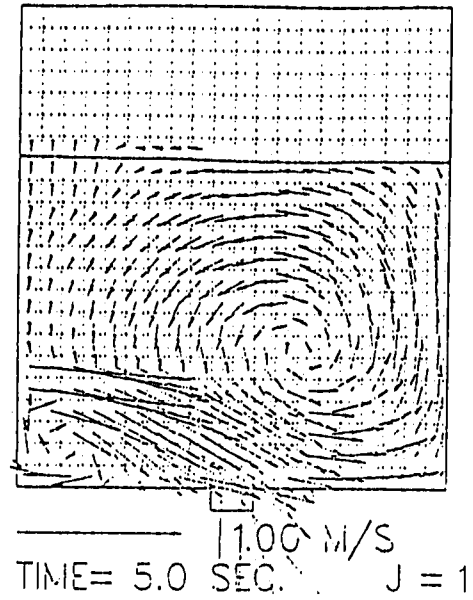
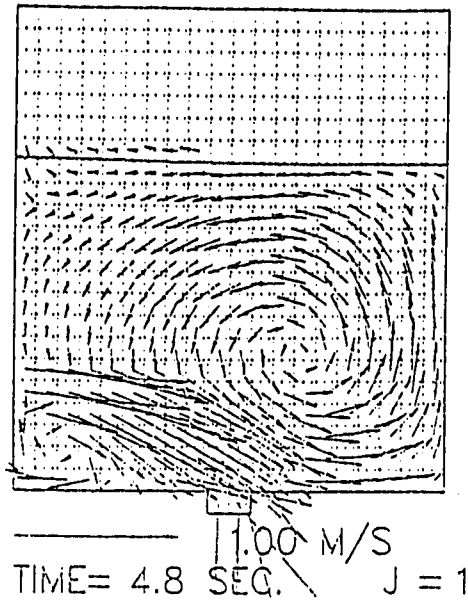


図5.2 自由表面形状および流速ベクトル(Case-1)(5)

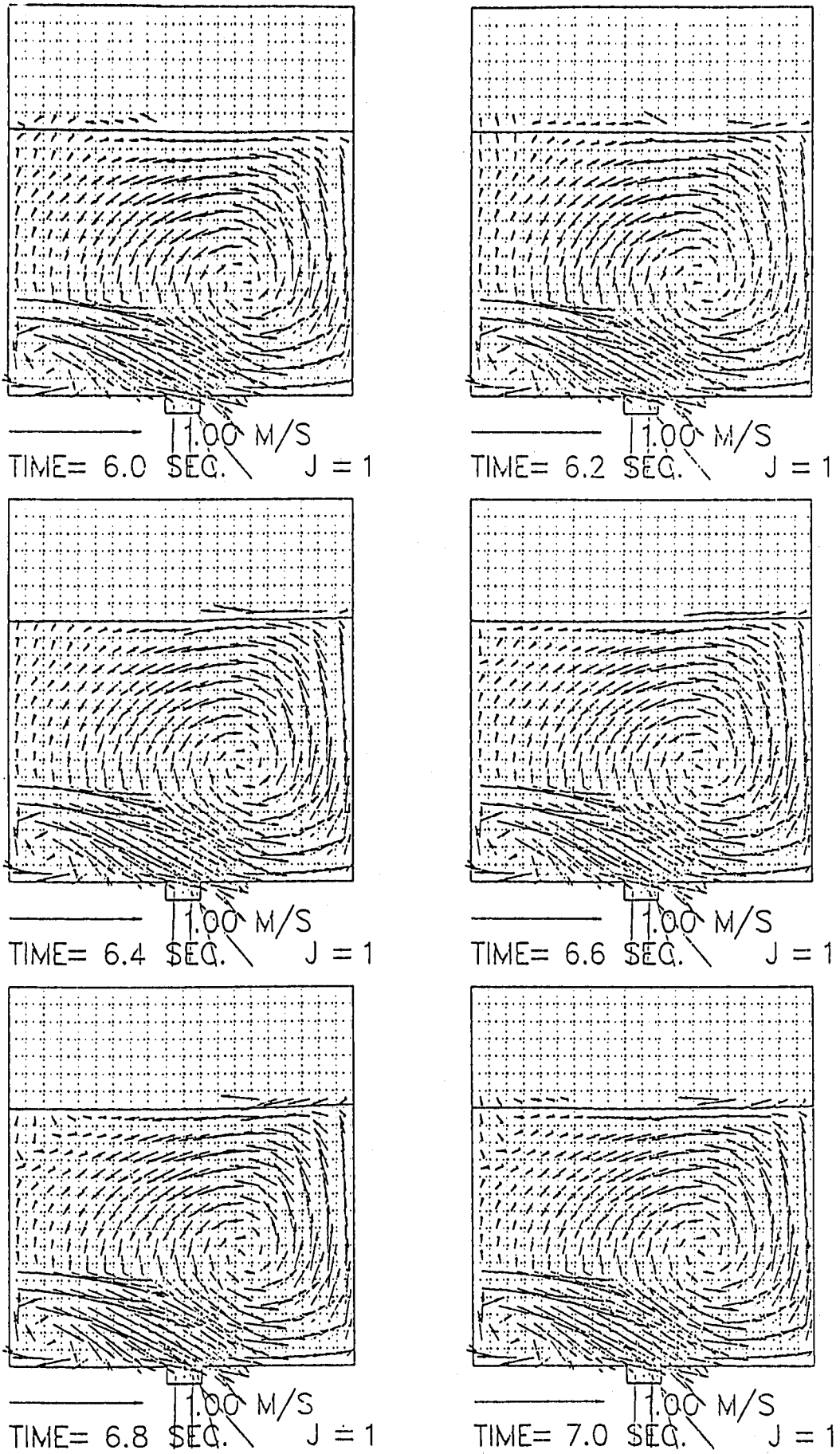


図5.2 自由表面形状および流速ベクトル(Case-1)(6)

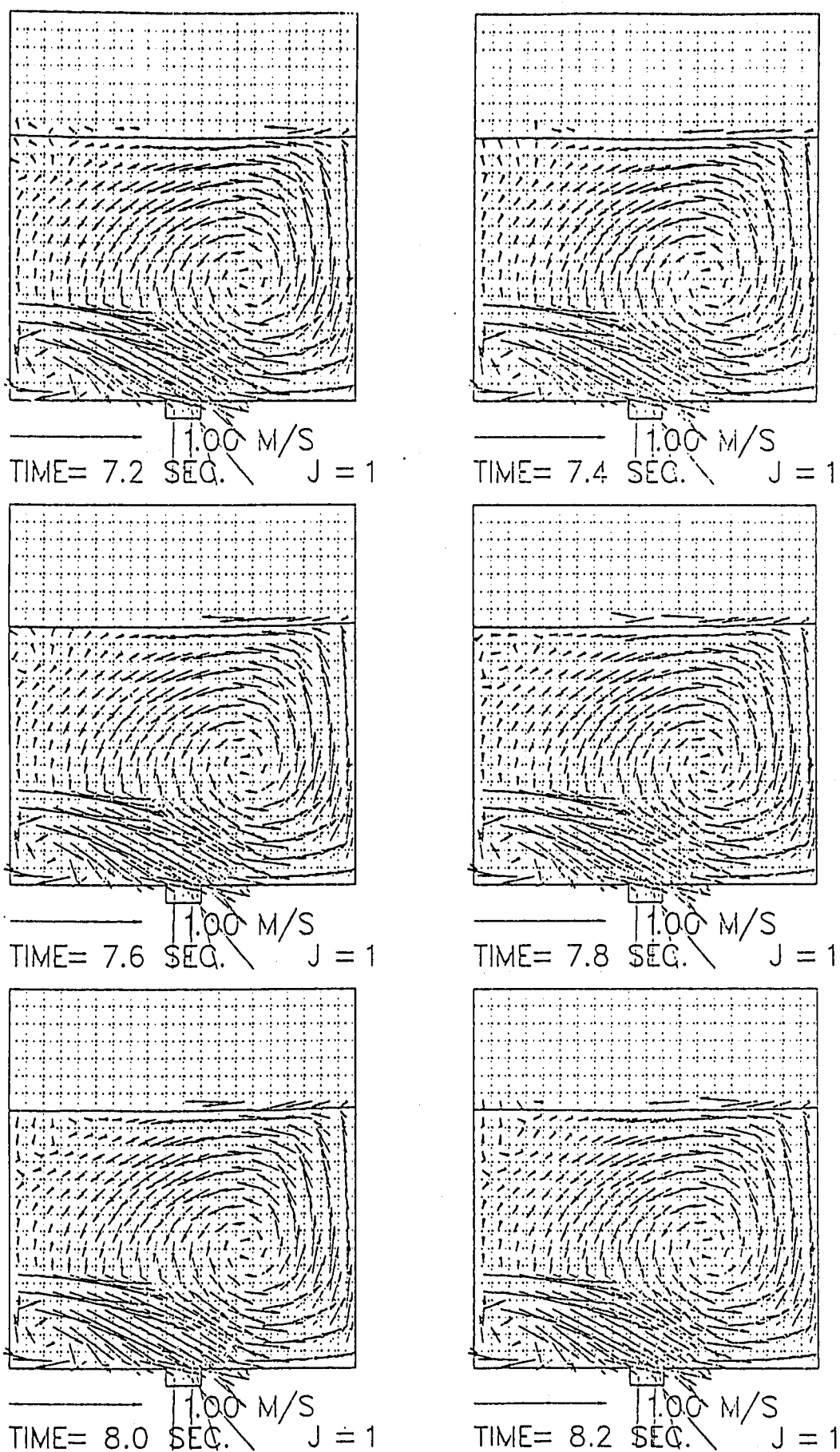
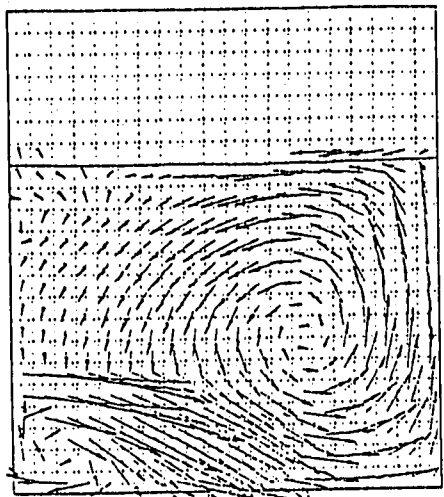
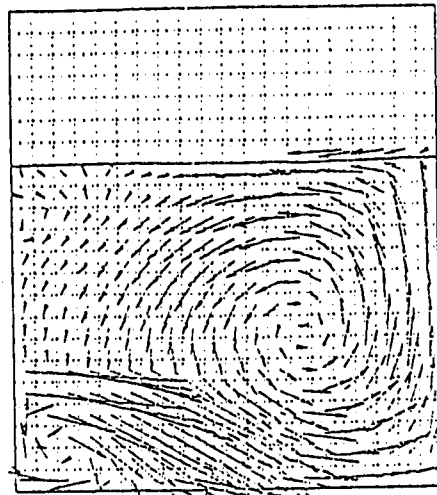


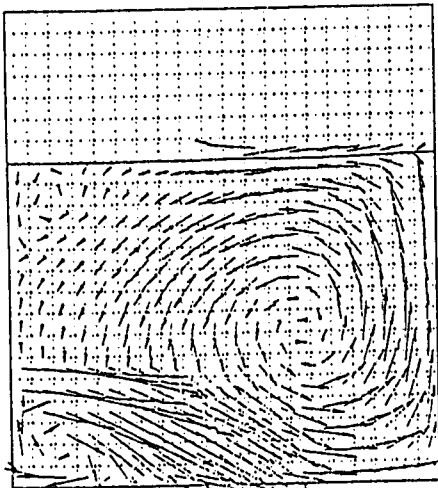
図5.2 自由表面形状および流速ベクトル(Case-1)(7)



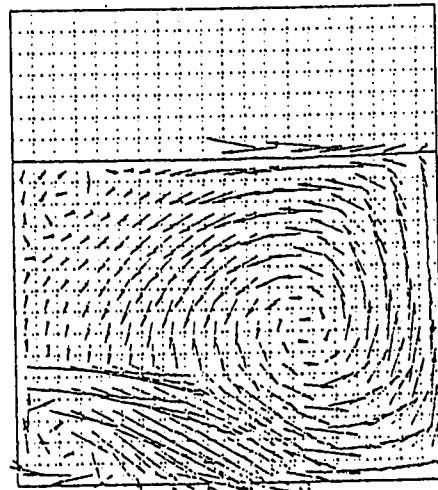
1.00 M/S
TIME= 8.4 SEC. J = 1



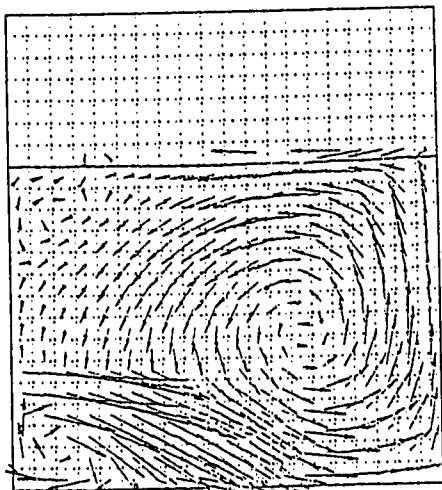
1.00 M/S
TIME= 8.6 SEC. J = 1



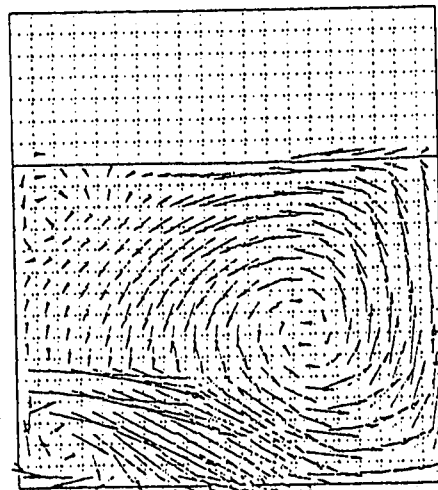
1.00 M/S
TIME= 8.8 SEC. J = 1



1.00 M/S
TIME= 9.0 SEC. J = 1



1.00 M/S
TIME= 9.2 SEC. J = 1



1.00 M/S
TIME= 9.4 SEC. J = 1

図5.2 自由表面形状および流速ベクトル(Case-1)(8)

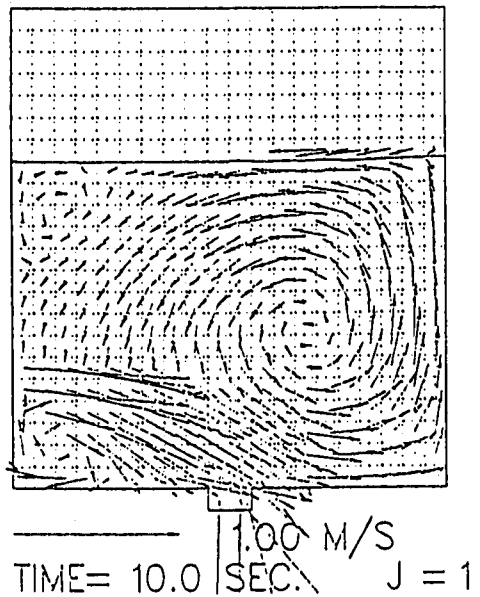
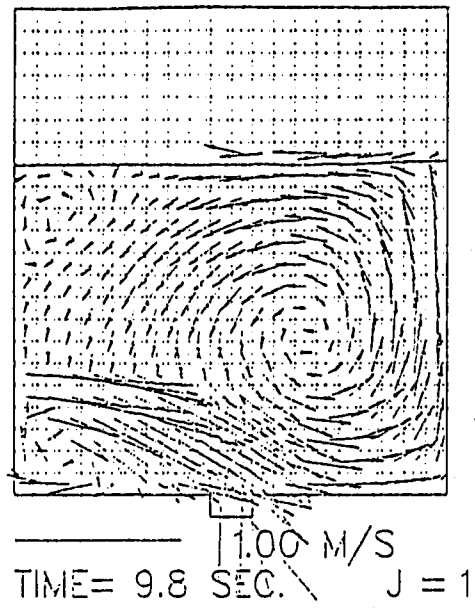
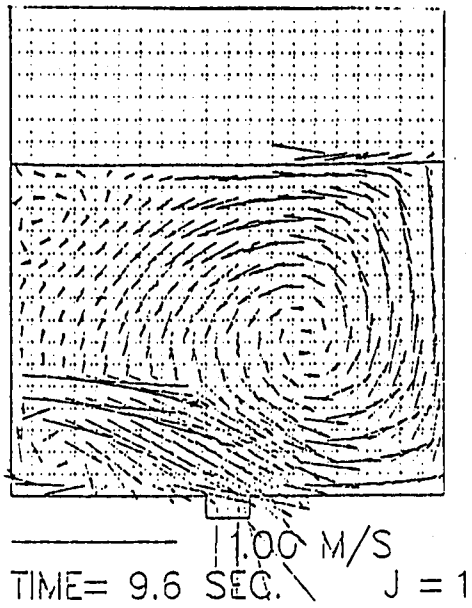


図5.2 自由表面形状および流速ベクトル(Case-1)(9)

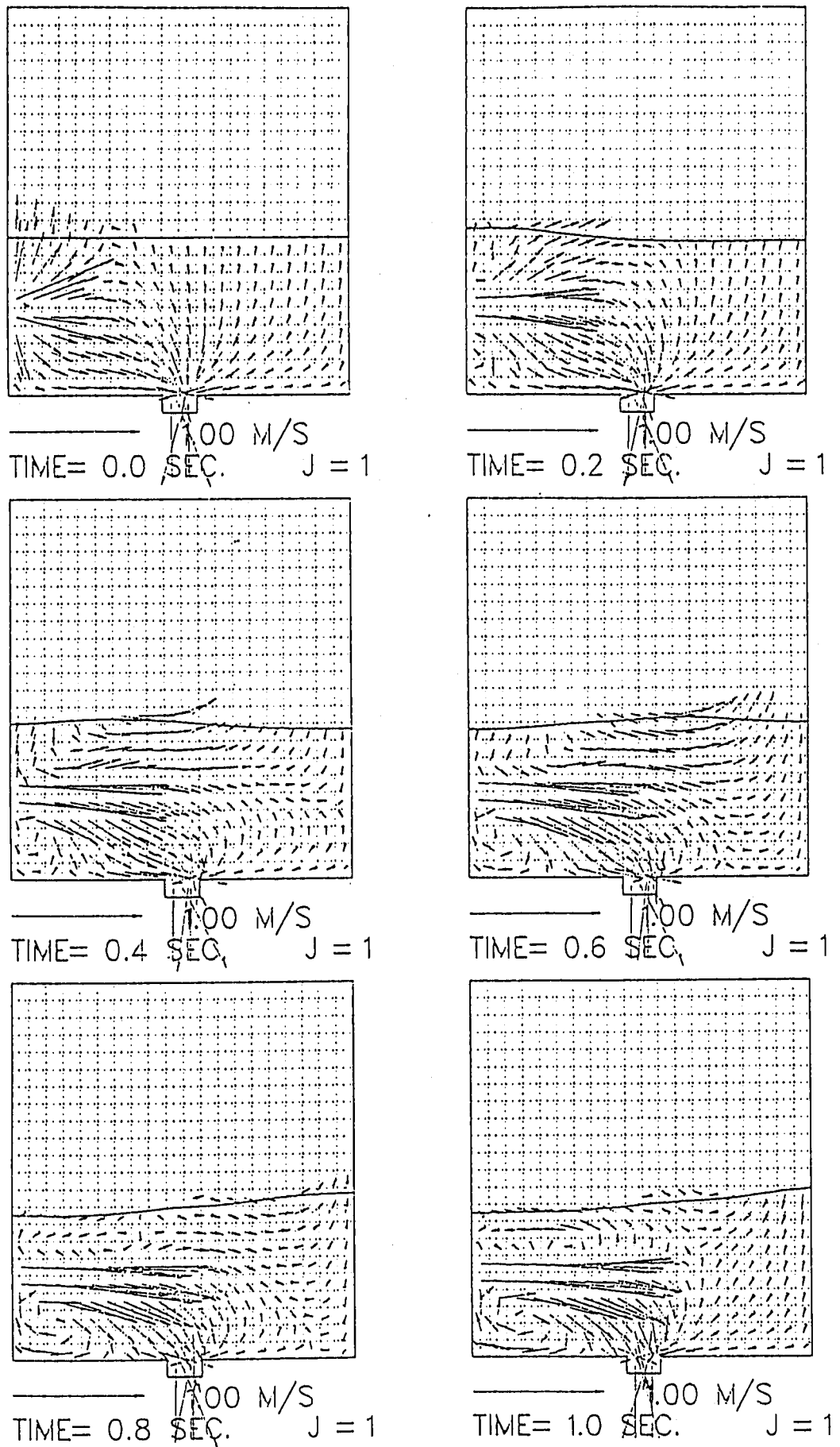


図5.3 自由表面形状および流速ベクトル(Case-2)(1)

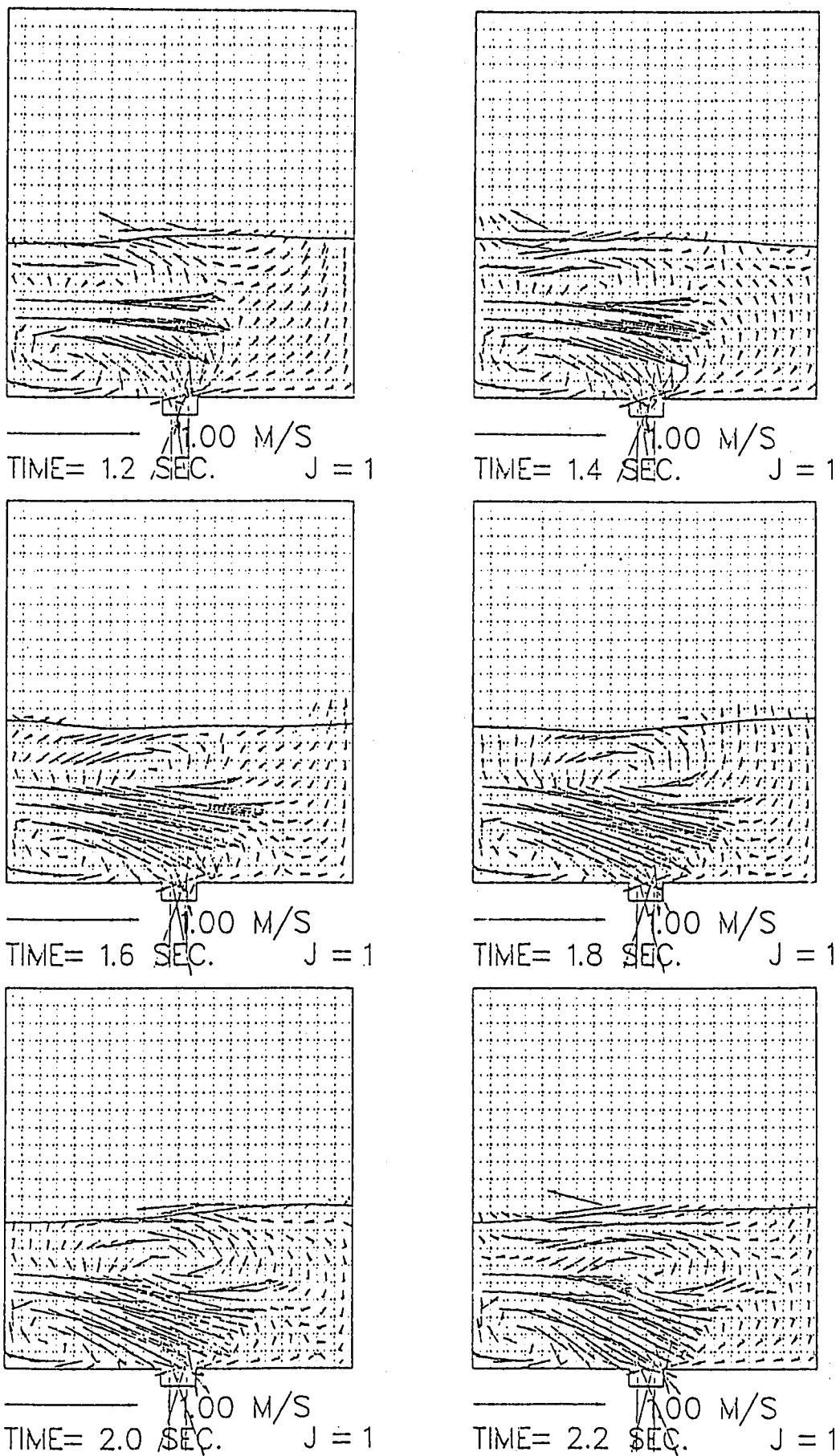


図5.3 自由表面形状および流速ベクトル(Case-2)(2)

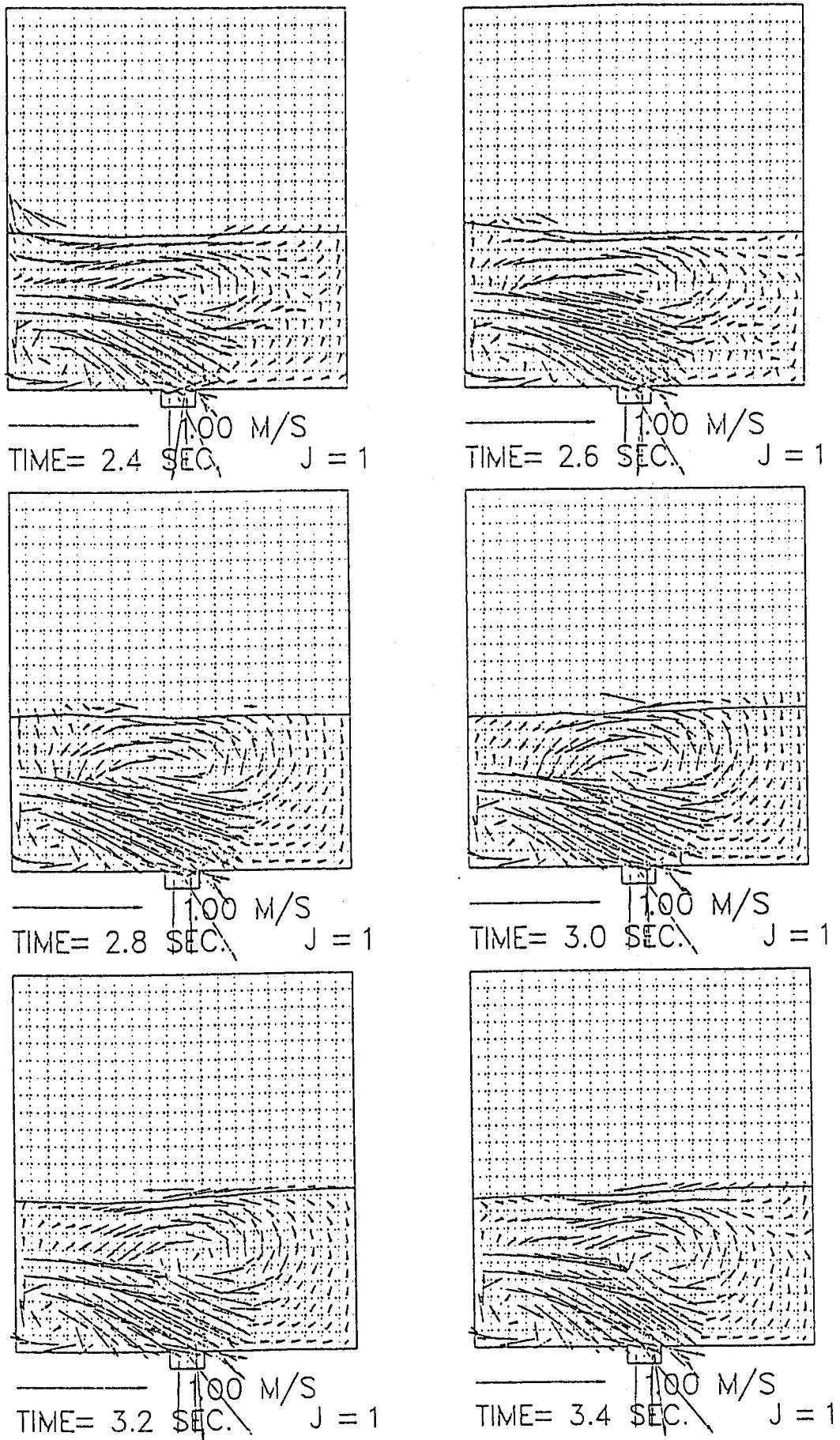


図5.3 自由表面形状および流速ベクトル(Case-2)(3)

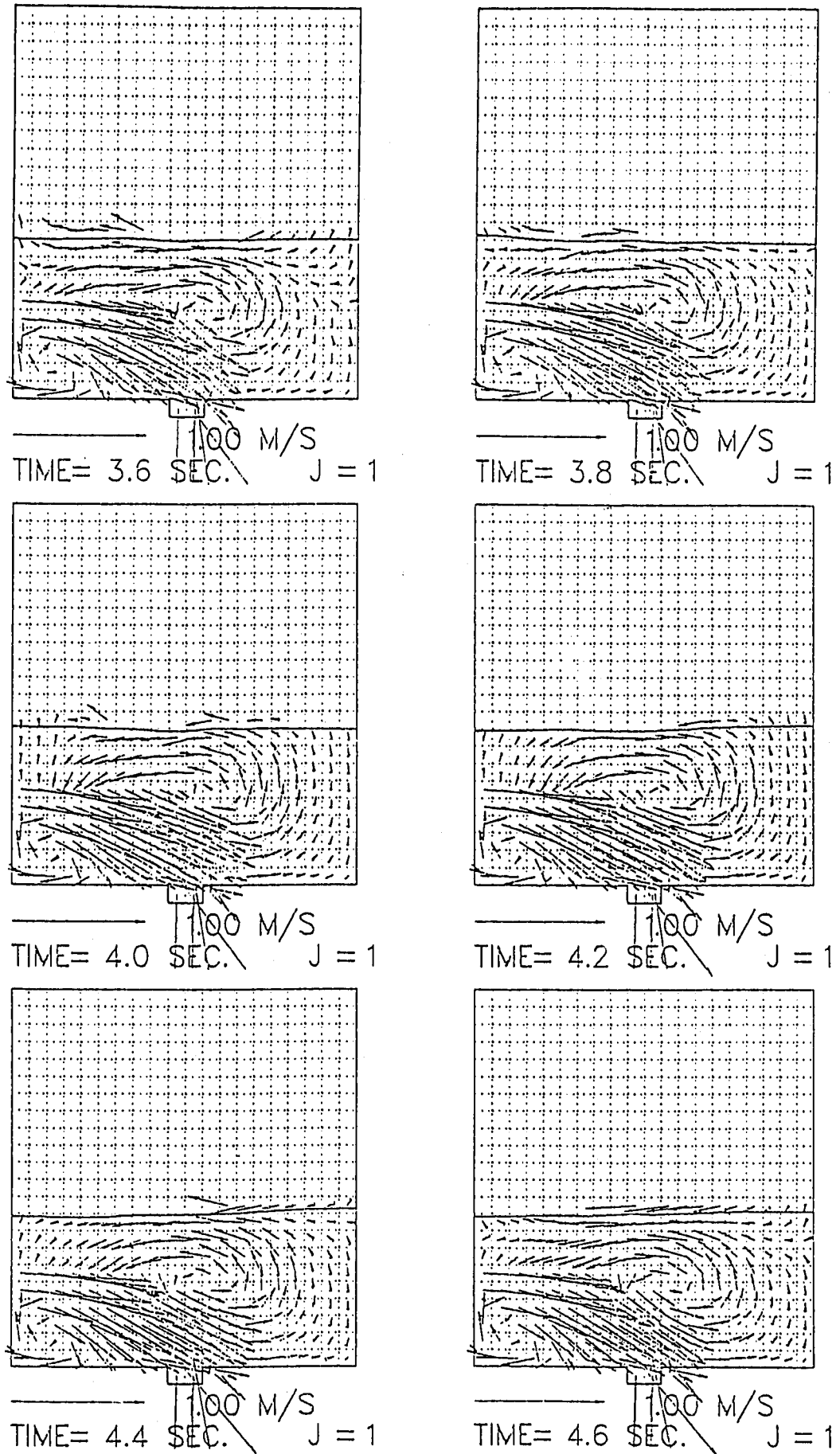
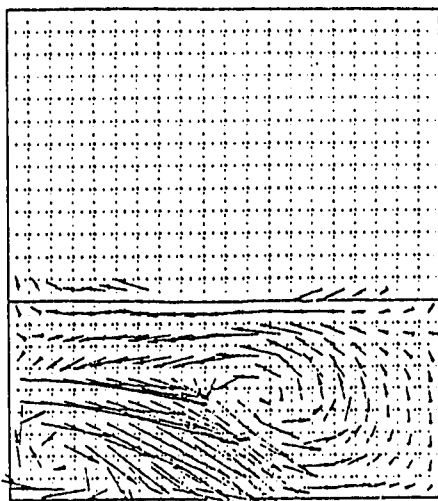
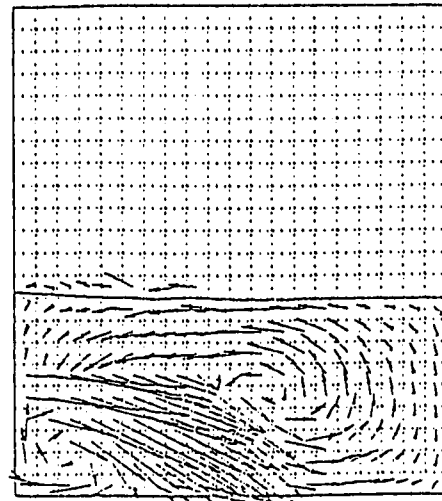


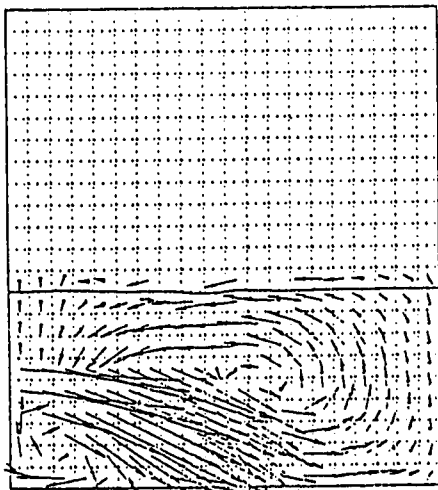
図5.3 自由表面形状および流速ベクトル(Case-2)(4)



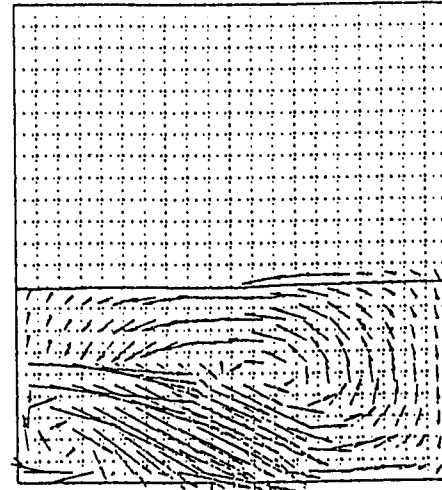
1.00 M/S
TIME= 4.8 SEC. J = 1



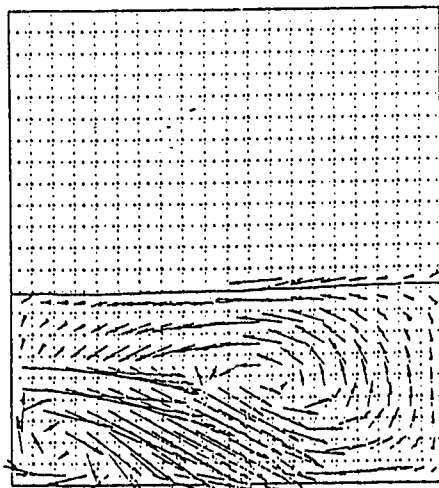
1.00 M/S
TIME= 5.0 SEC. J = 1



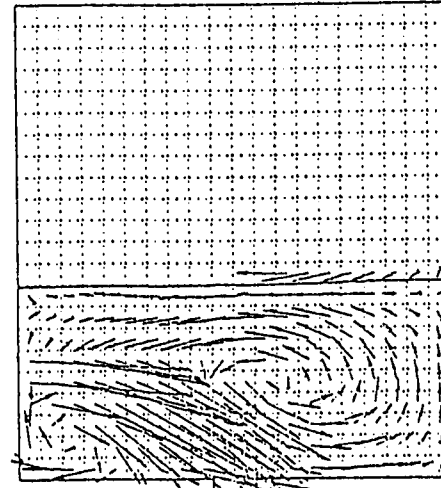
1.00 M/S
TIME= 5.2 SEC. J = 1



1.00 M/S
TIME= 5.4 SEC. J = 1



1.00 M/S
TIME= 5.6 SEC. J = 1



1.00 M/S
TIME= 5.8 SEC. J = 1

図5.3 自由表面形状および流速ベクトル(Case-2)(5)

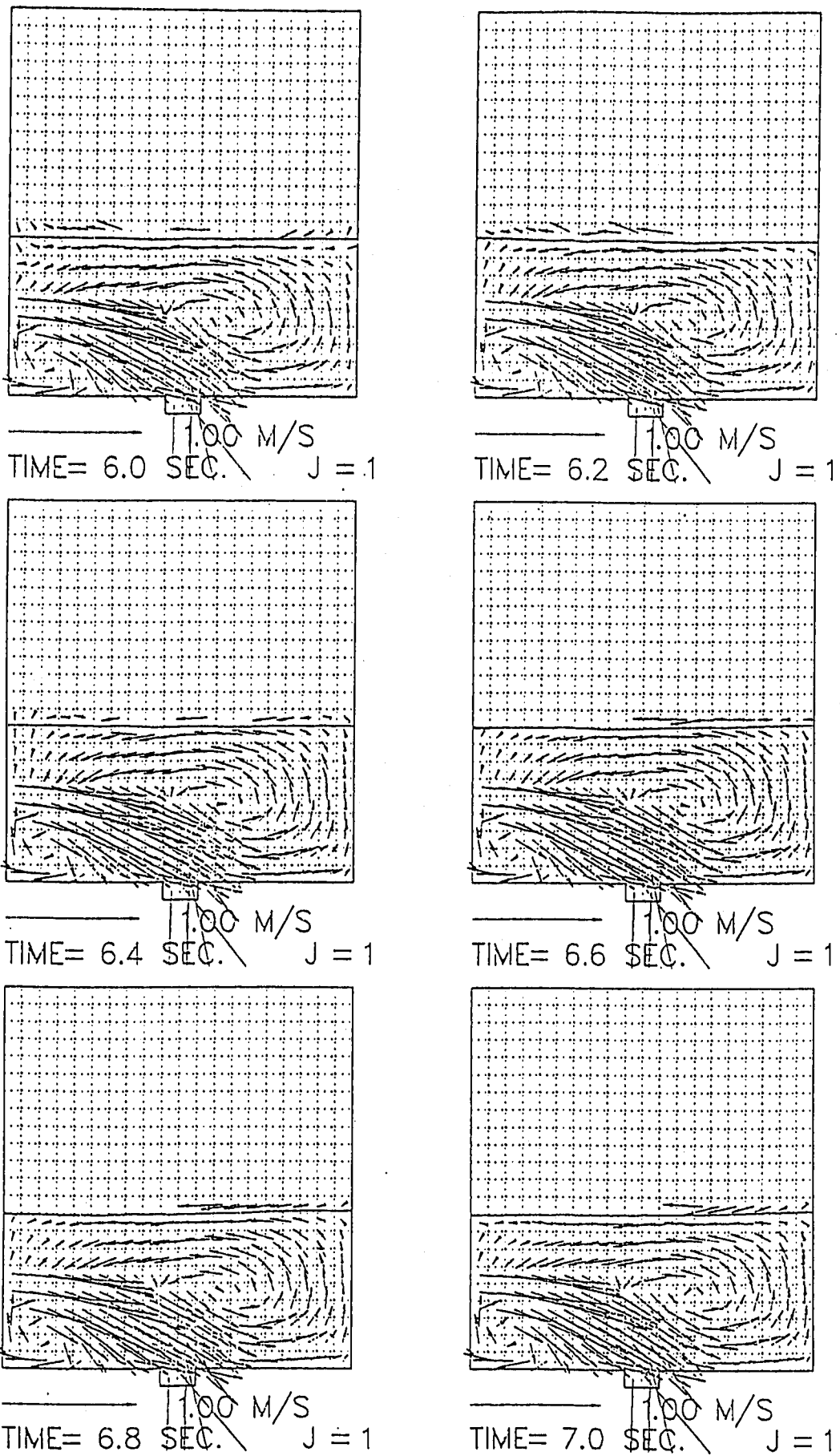


図5.3 自由表面形状および流速ベクトル(Case-2)(6)

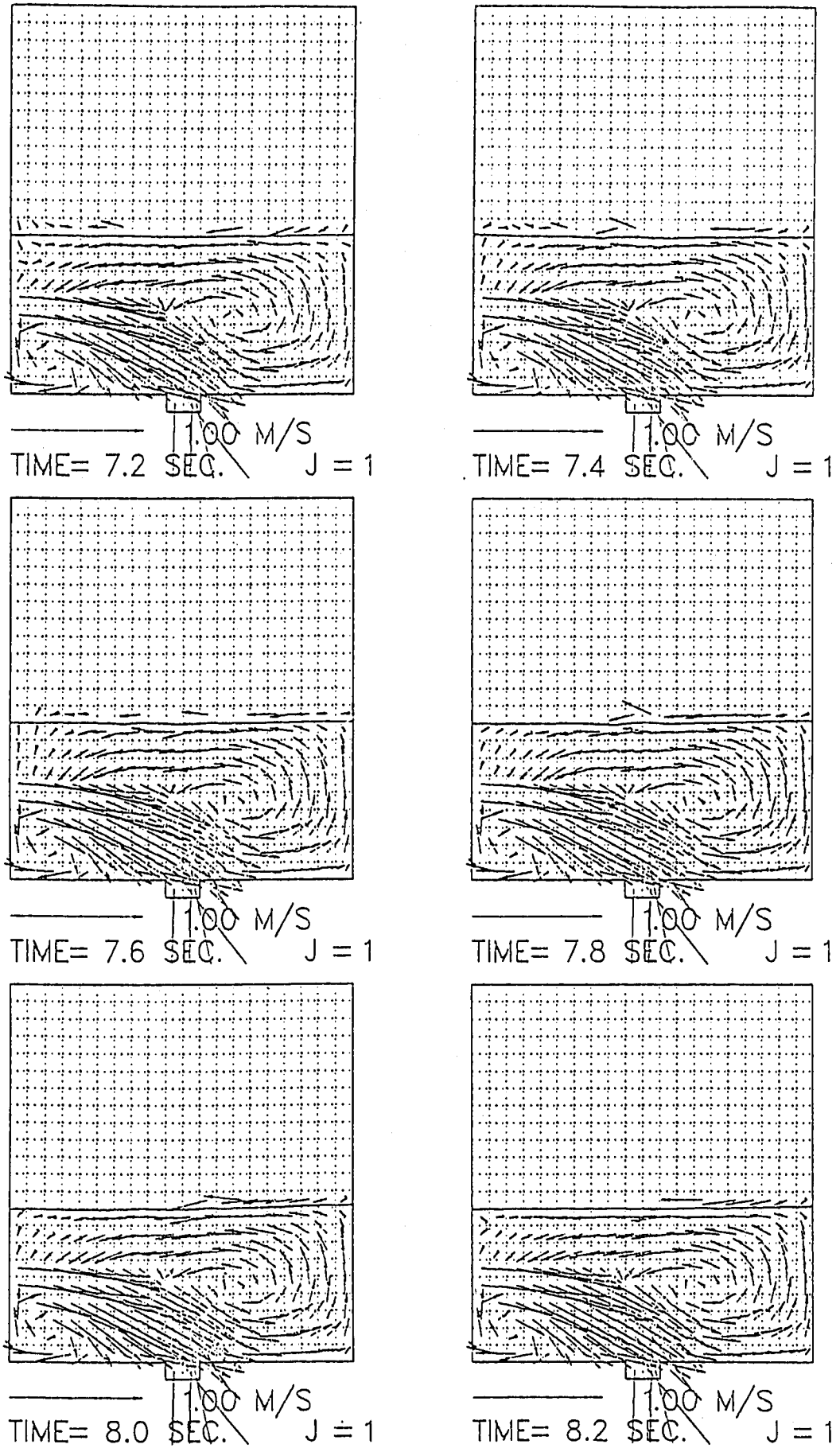


図5.3 自由表面形状および流速ベクトル(Case-2)(7)

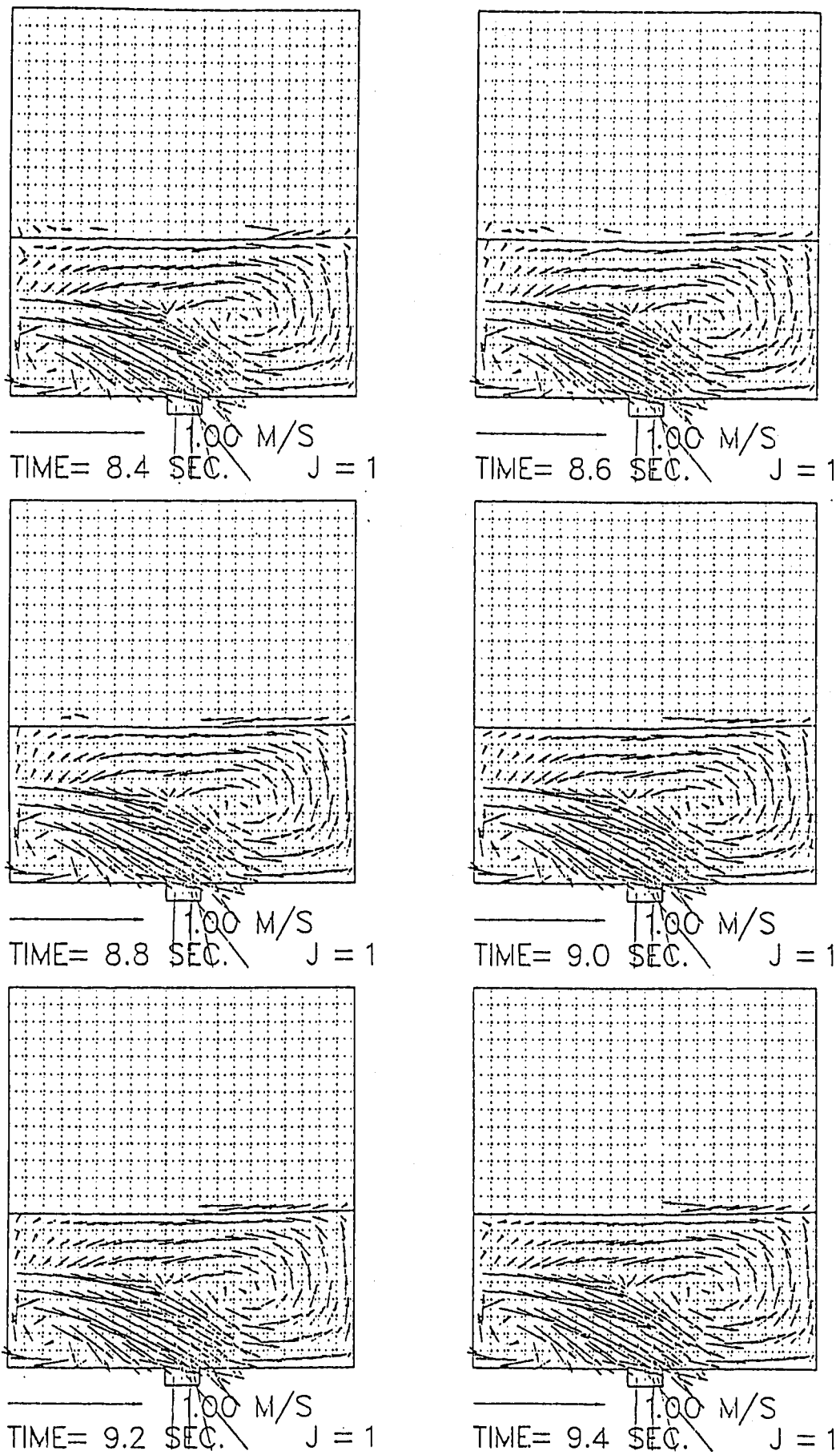


図5.3 自由表面形状および流速ベクトル(Case-2)(8)

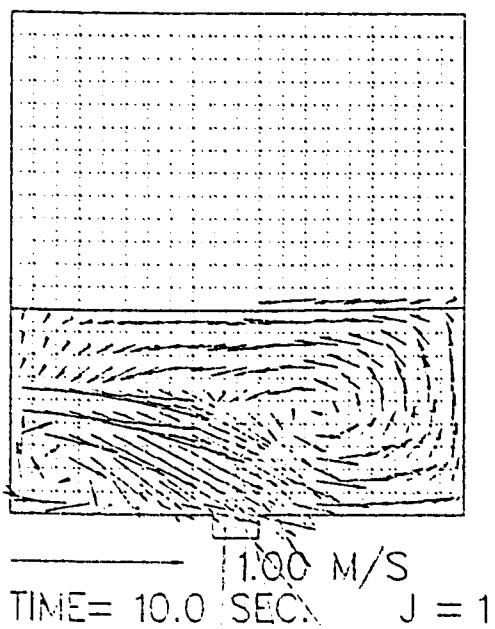
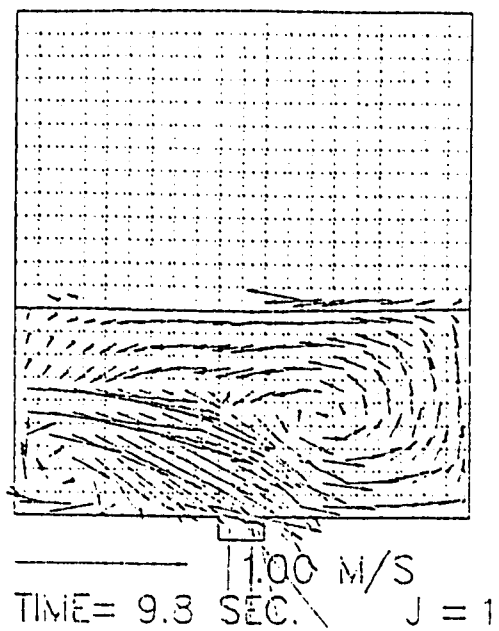
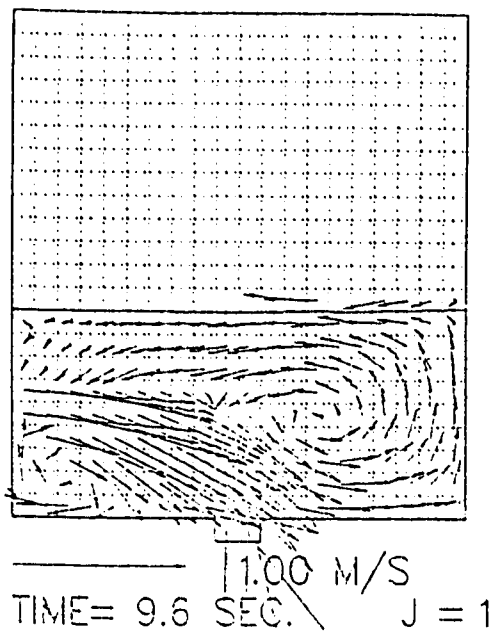


図5.3 自由表面形状および流速ベクトル(Case-2)(9)

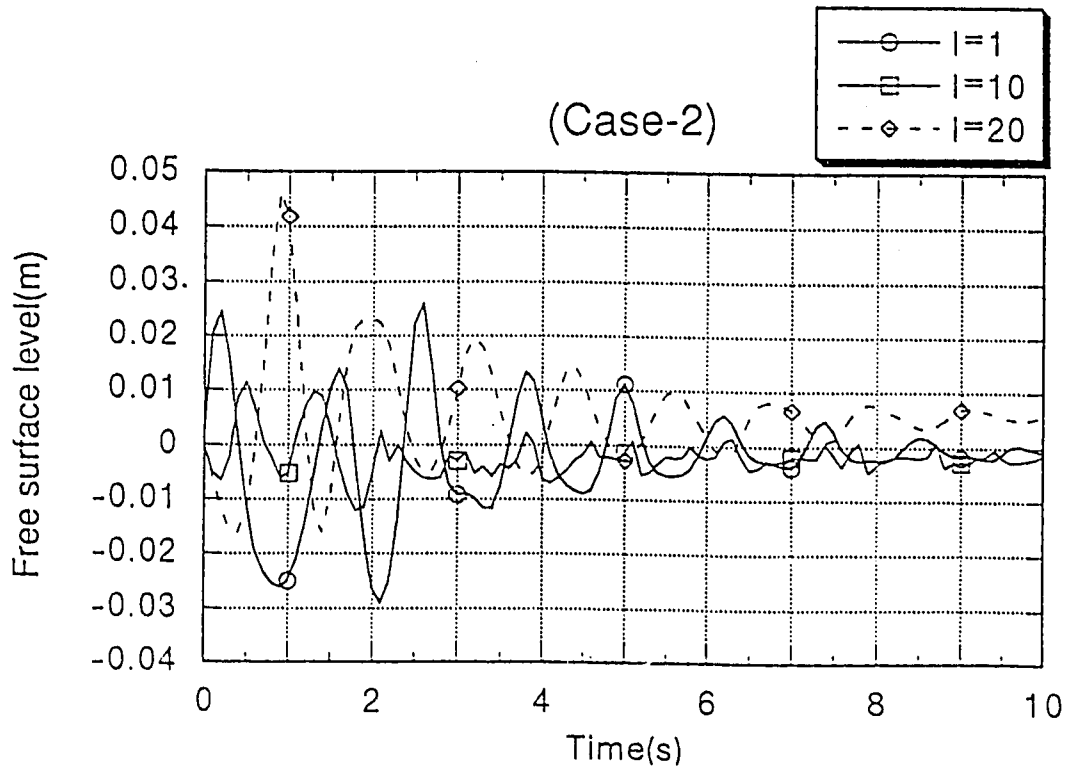
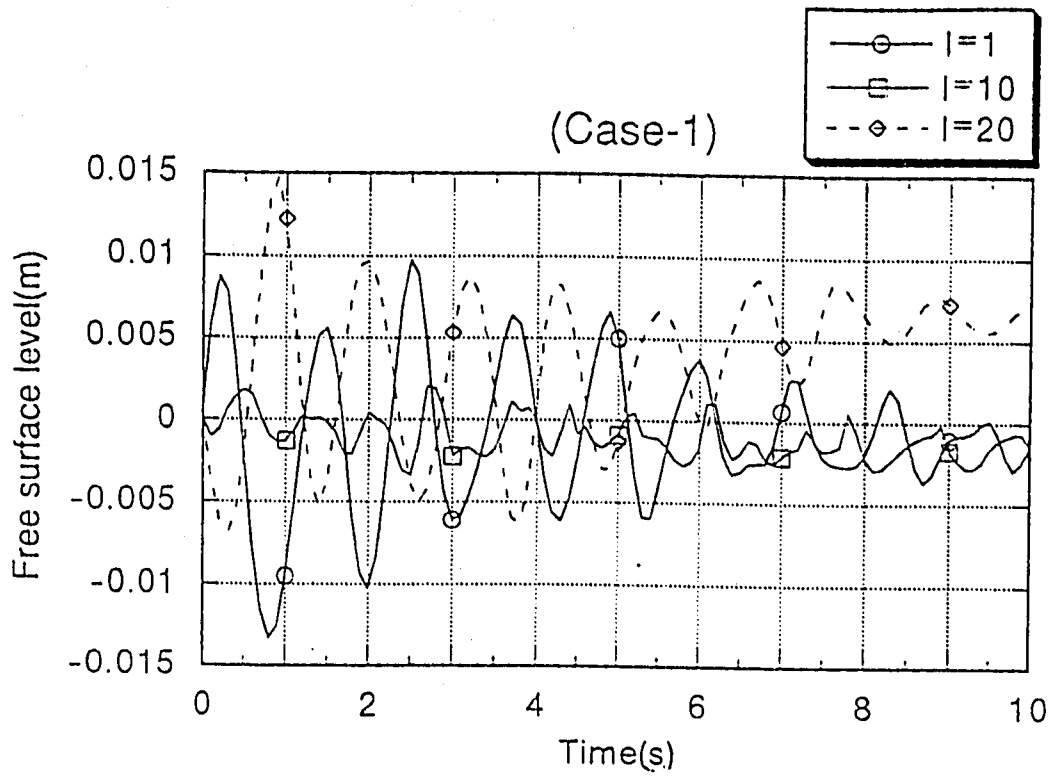


図5.4 自由表面各点における液位時間変動

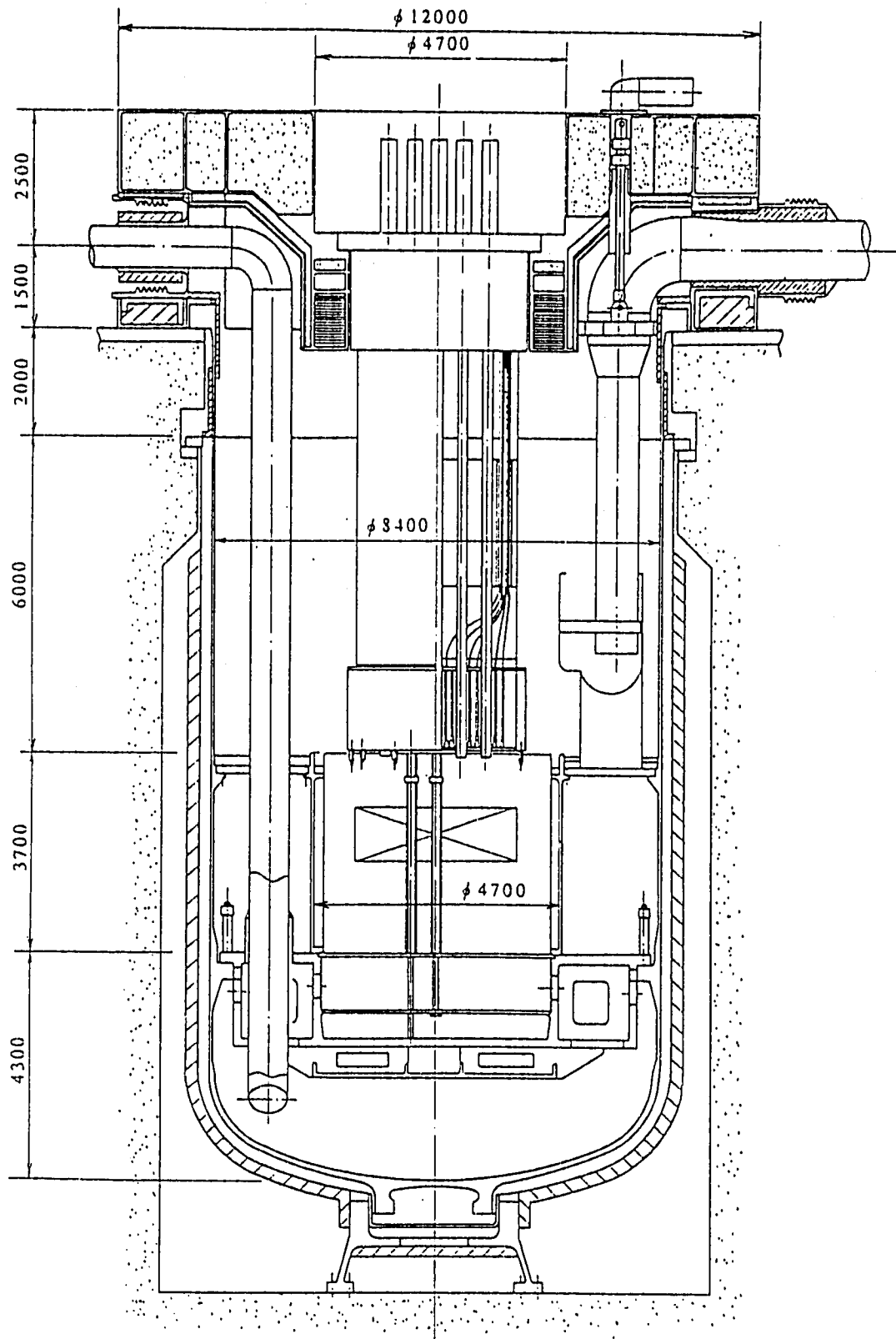
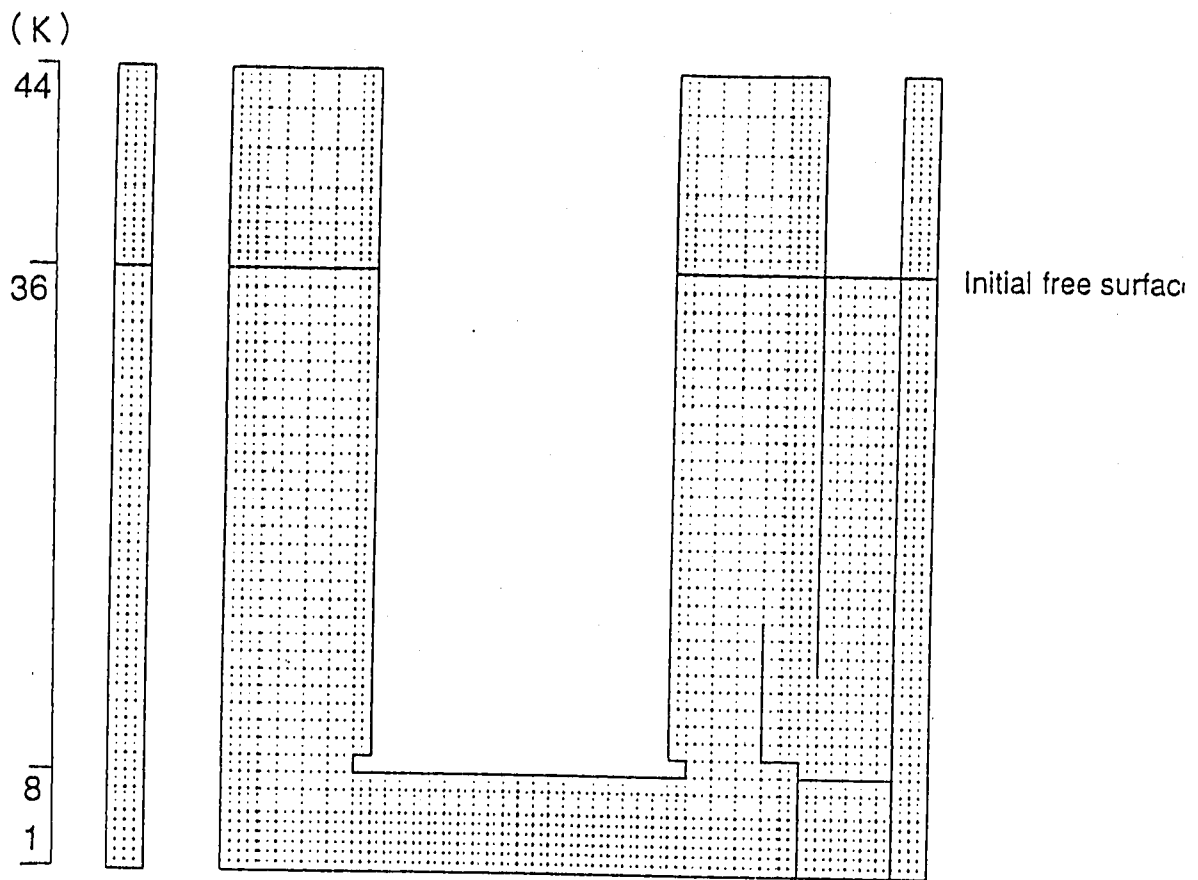


図5.5 電気出力60万kW級大型炉炉心断面



$J = 7, 18$ | 1 10 | 18 | 29 | (I)

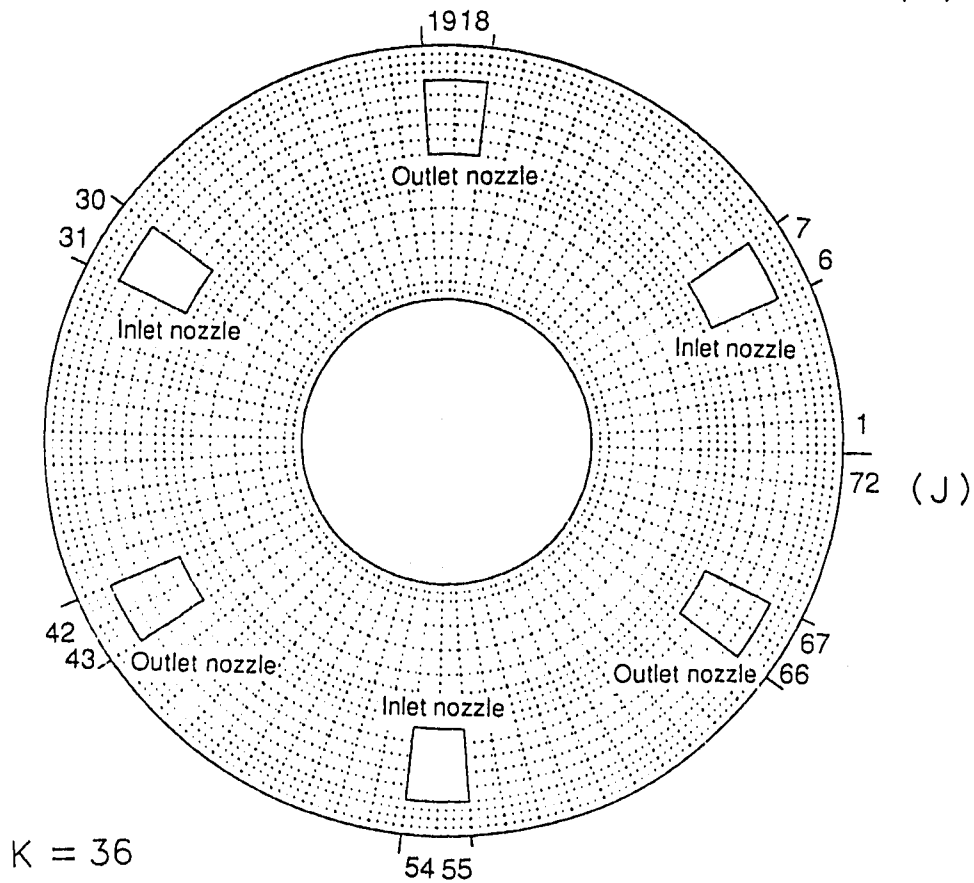
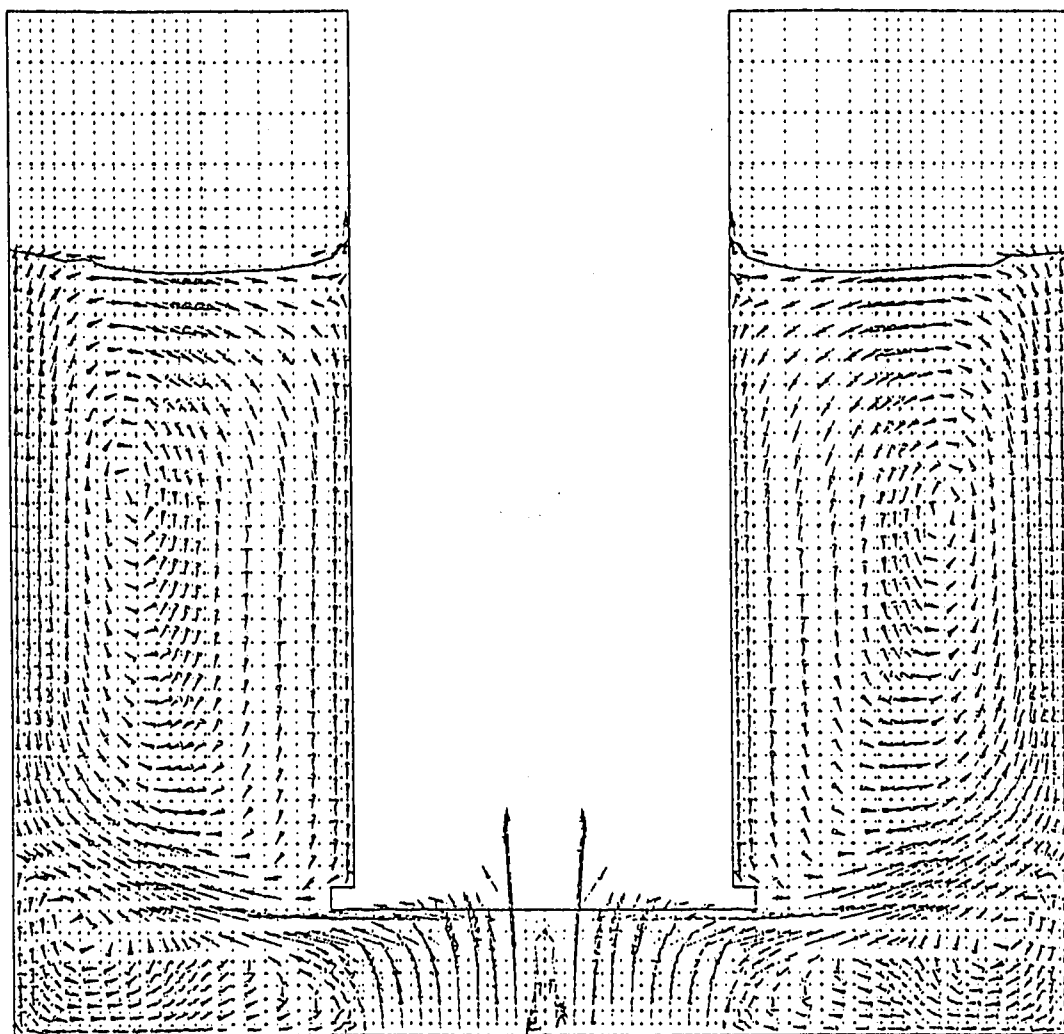
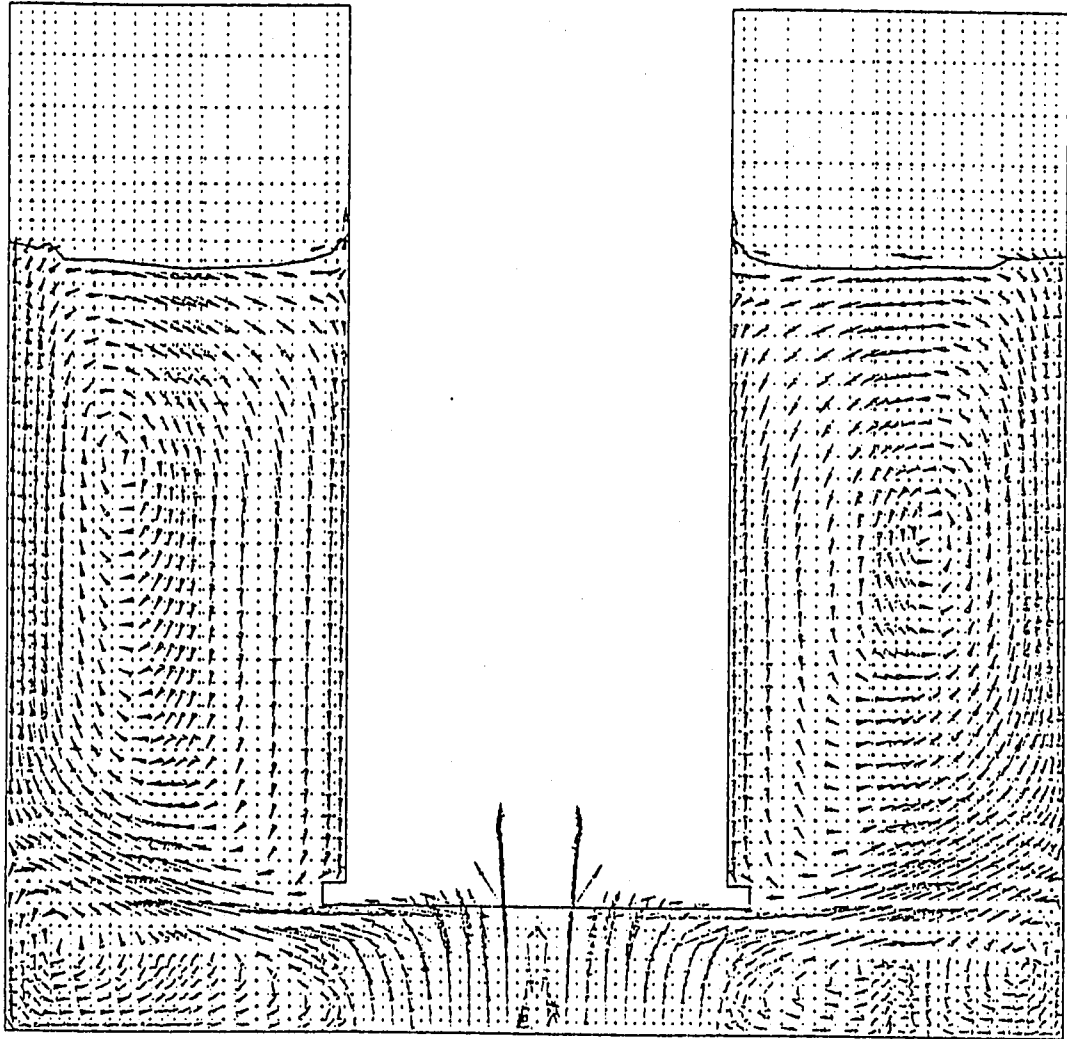


図5.6 炉心上部プレナムメッシュ分割図



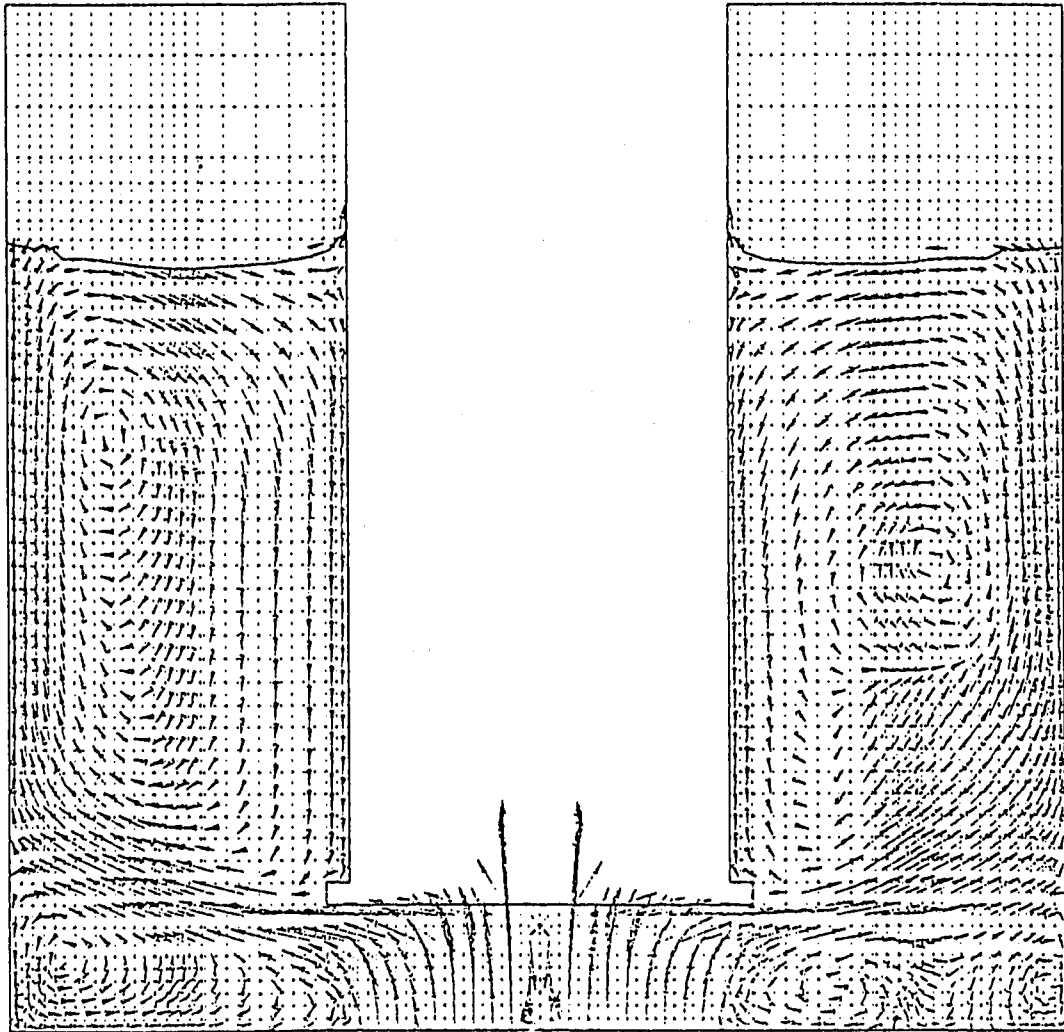
$J = 1, 24$
→ 10.00 M/S

図5.7 自由表面形状および流速ベクトル(1)



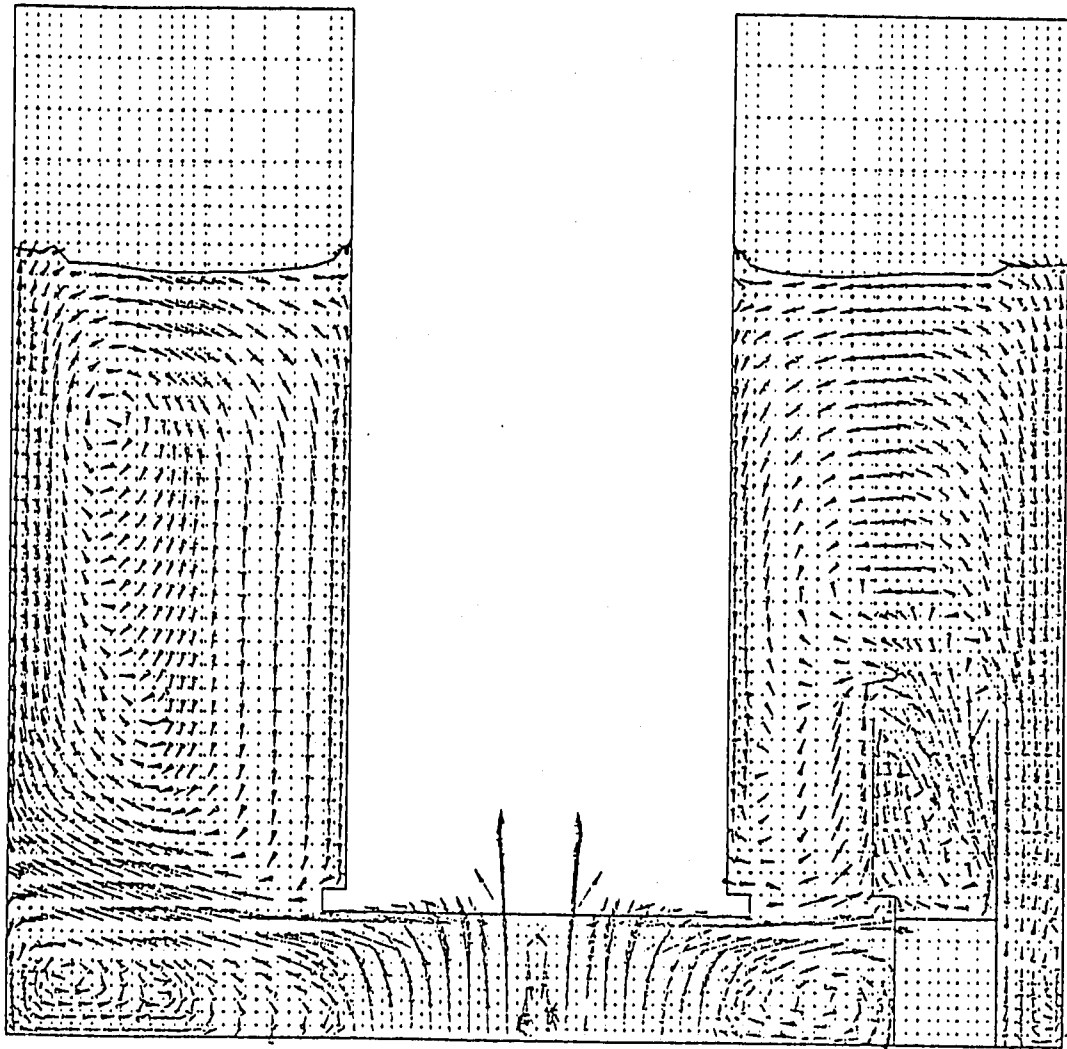
$\frac{J = 2, 23}{10.00 \text{ M/S}}$

図5.7 自由表面形状および流速ベクトル(2)



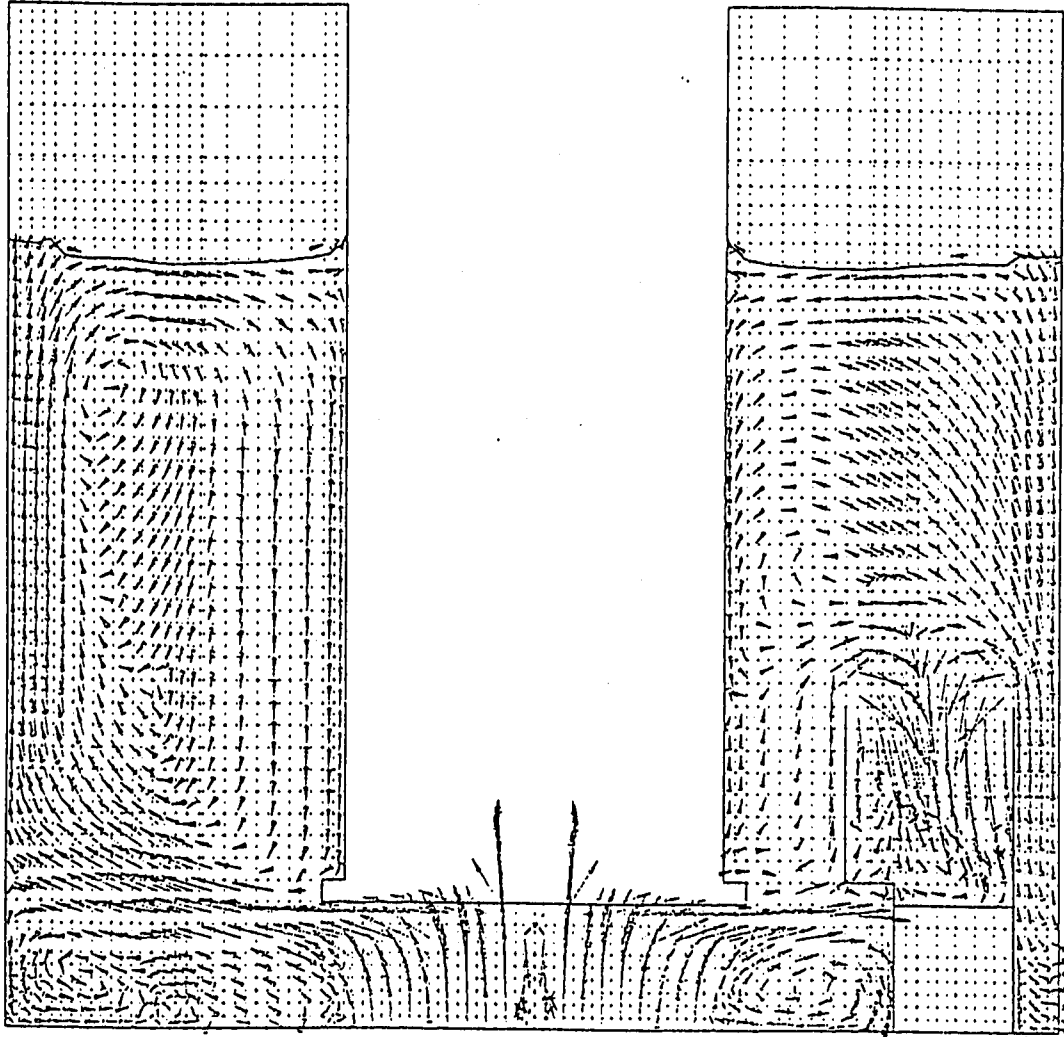
$J = 3, 22$
10.00 M/S

図5.7 自由表面形状および流速ベクトル(3)



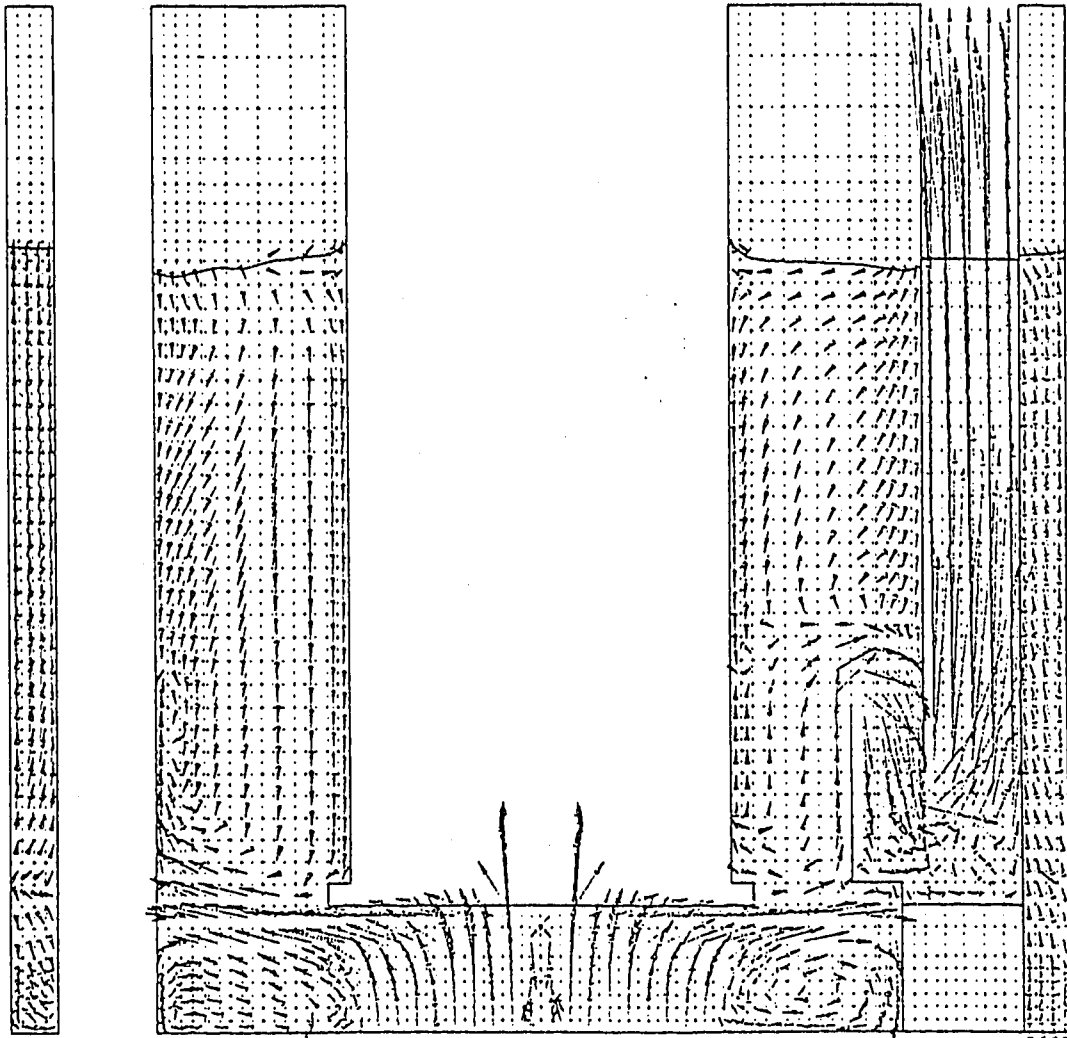
$J = 4, 21$
10.00 M/S

図5.7 自由表面形状および流速ベクトル(4)



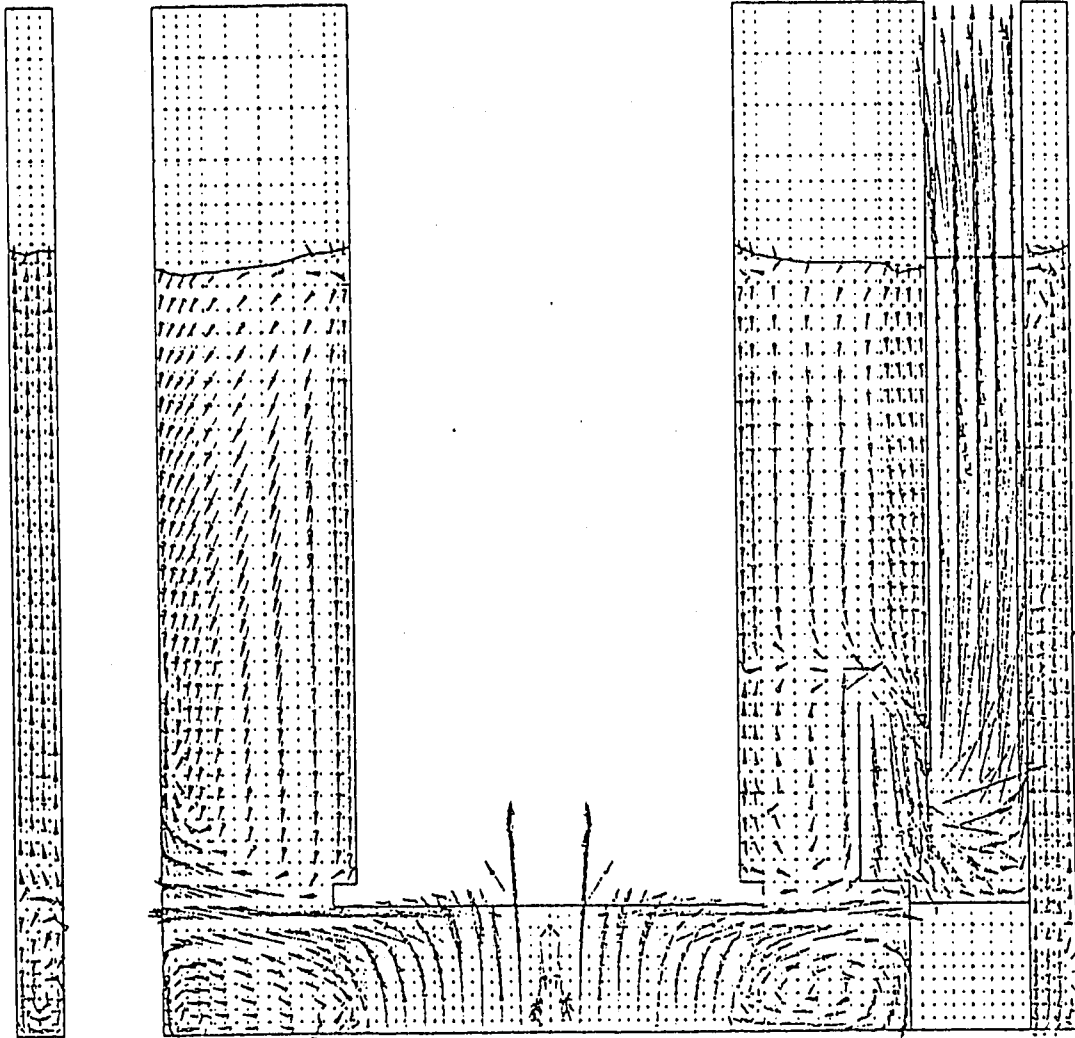
$J = 5, 20$
10.00 M/S

図5.7 自由表面形状および流速ベクトル(5)



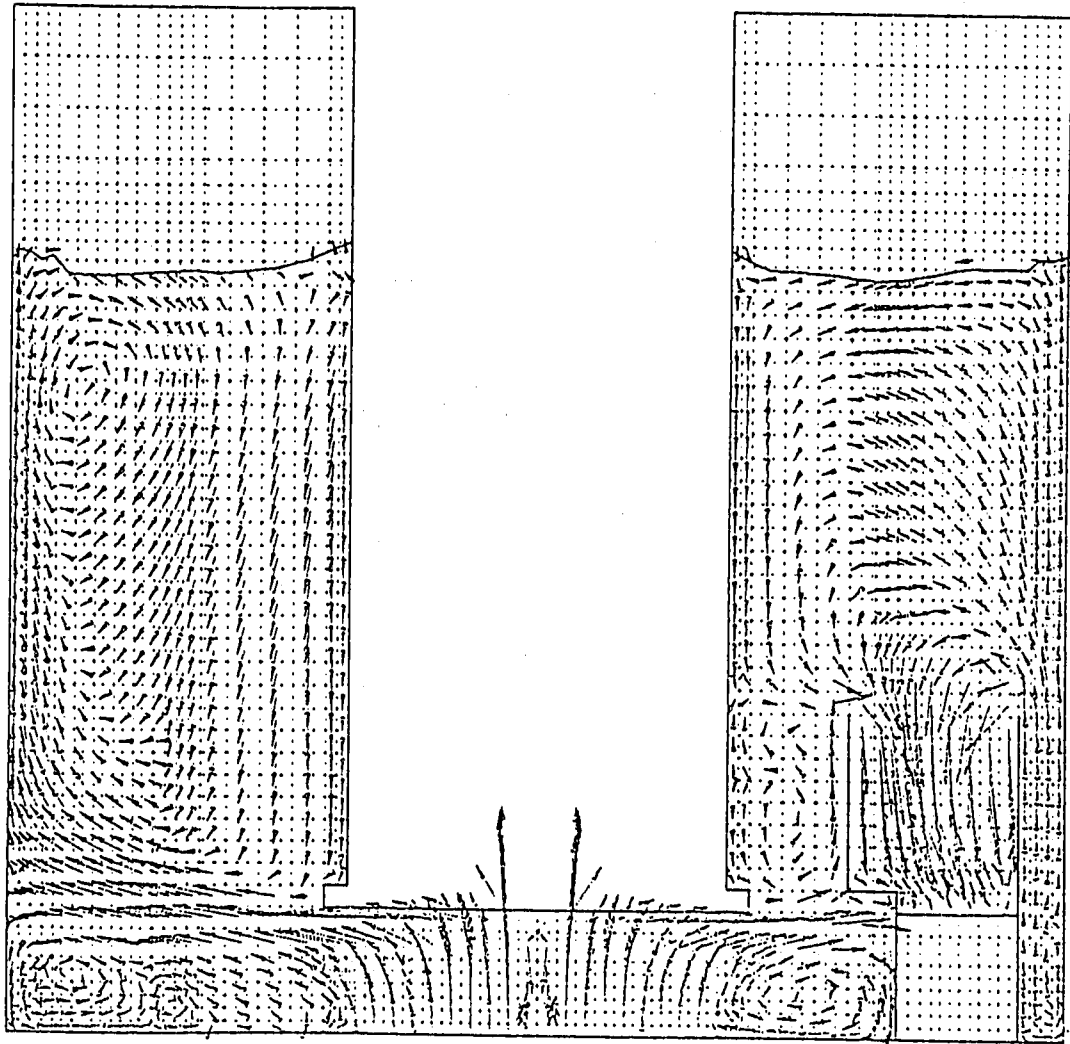
$J = 6, 19$
→ 10.00 M/S

図5.7 自由表面形状および流速ベクトル(6)



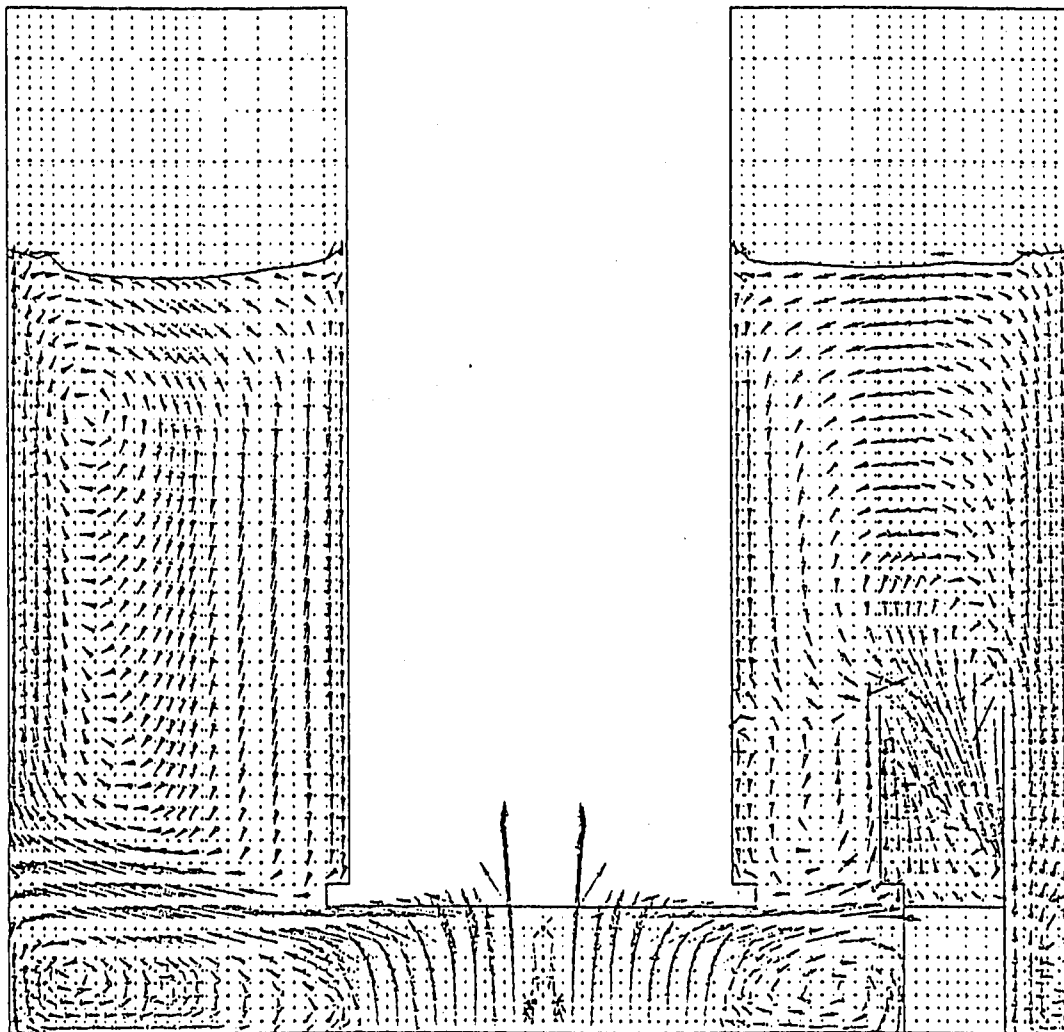
$J = 7, 18$
10.00 M/S

図5.7 自由表面形状および流速ベクトル(7)



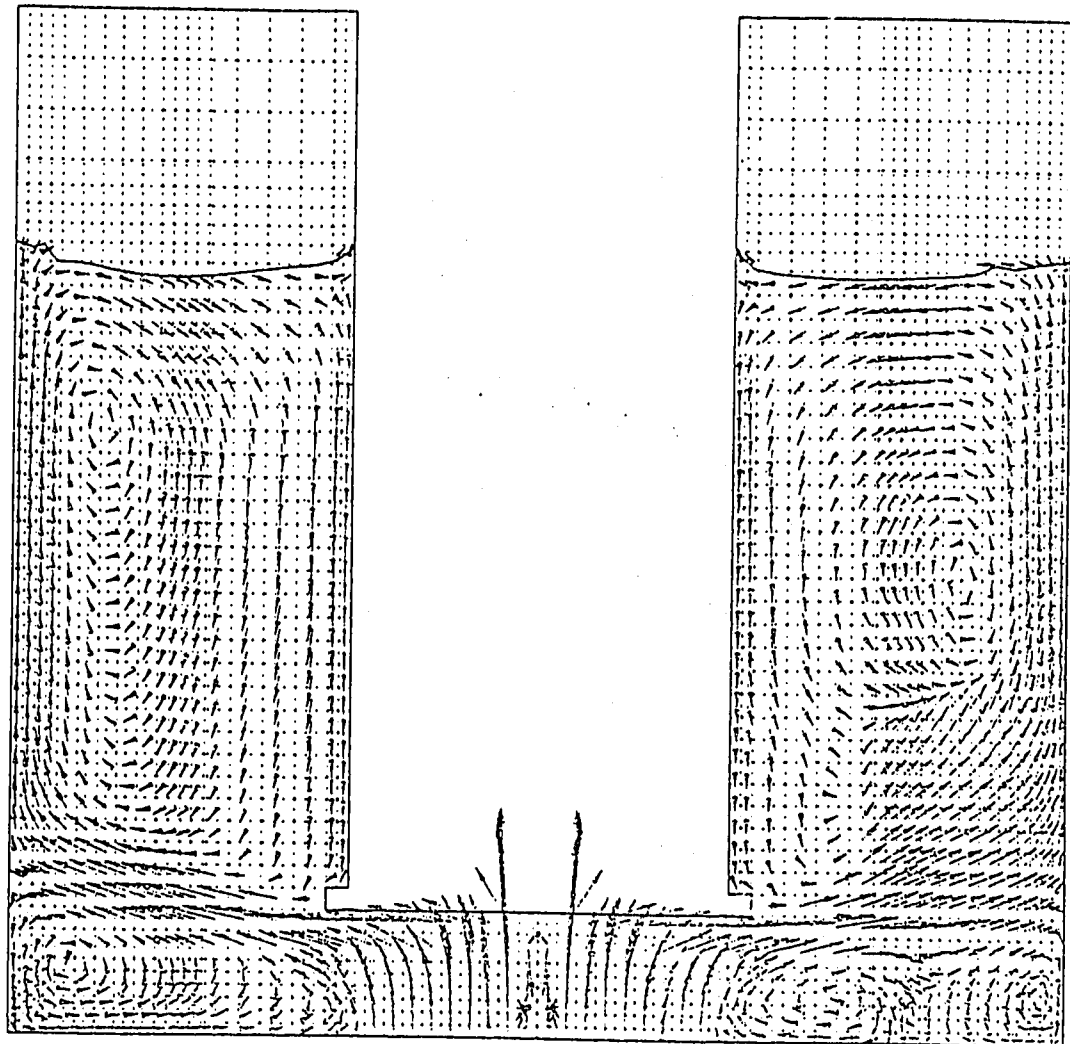
$J = 8, 17$
→ 10.00 M/S

図5.7 自由表面形状および流速ベクトル(8)



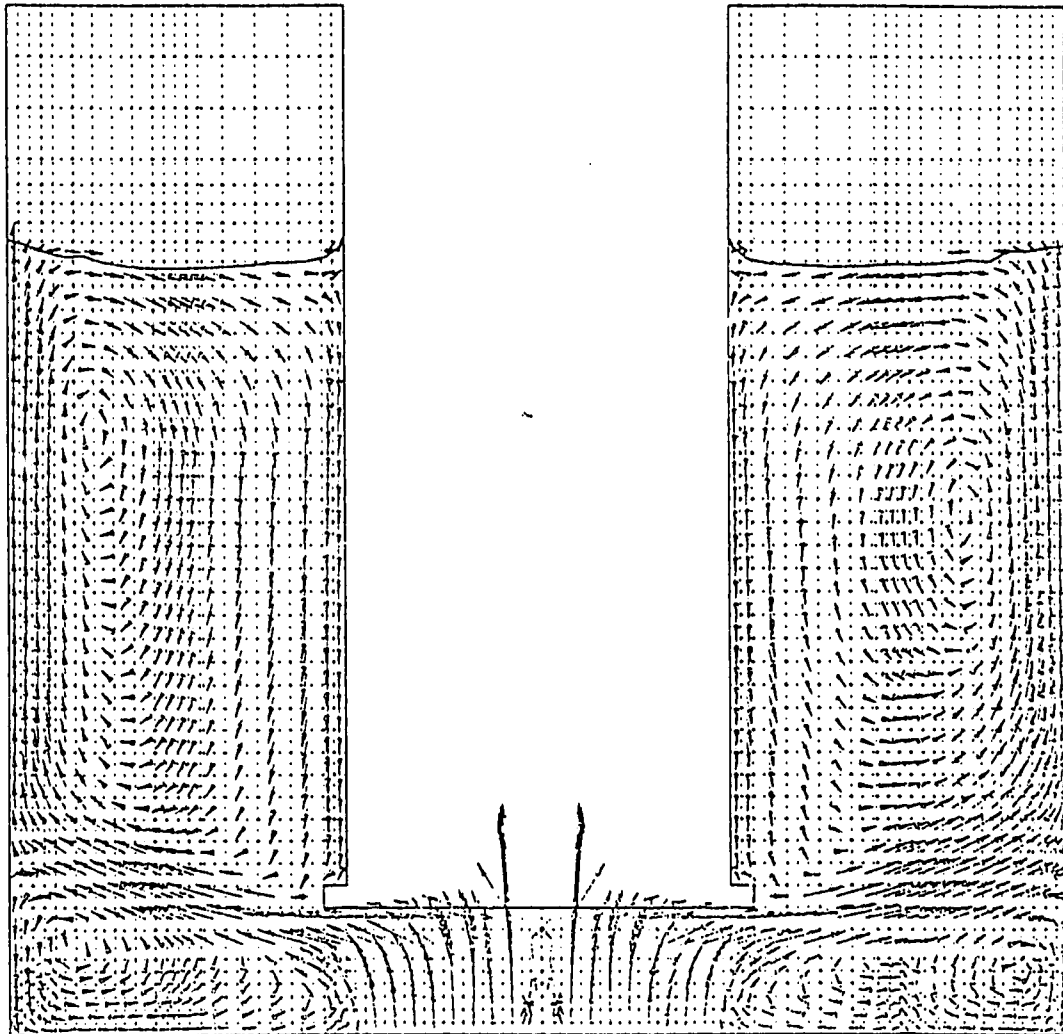
$J = 9, 16$
10.00 M/S

図5.7 自由表面形状および流速ベクトル(9)



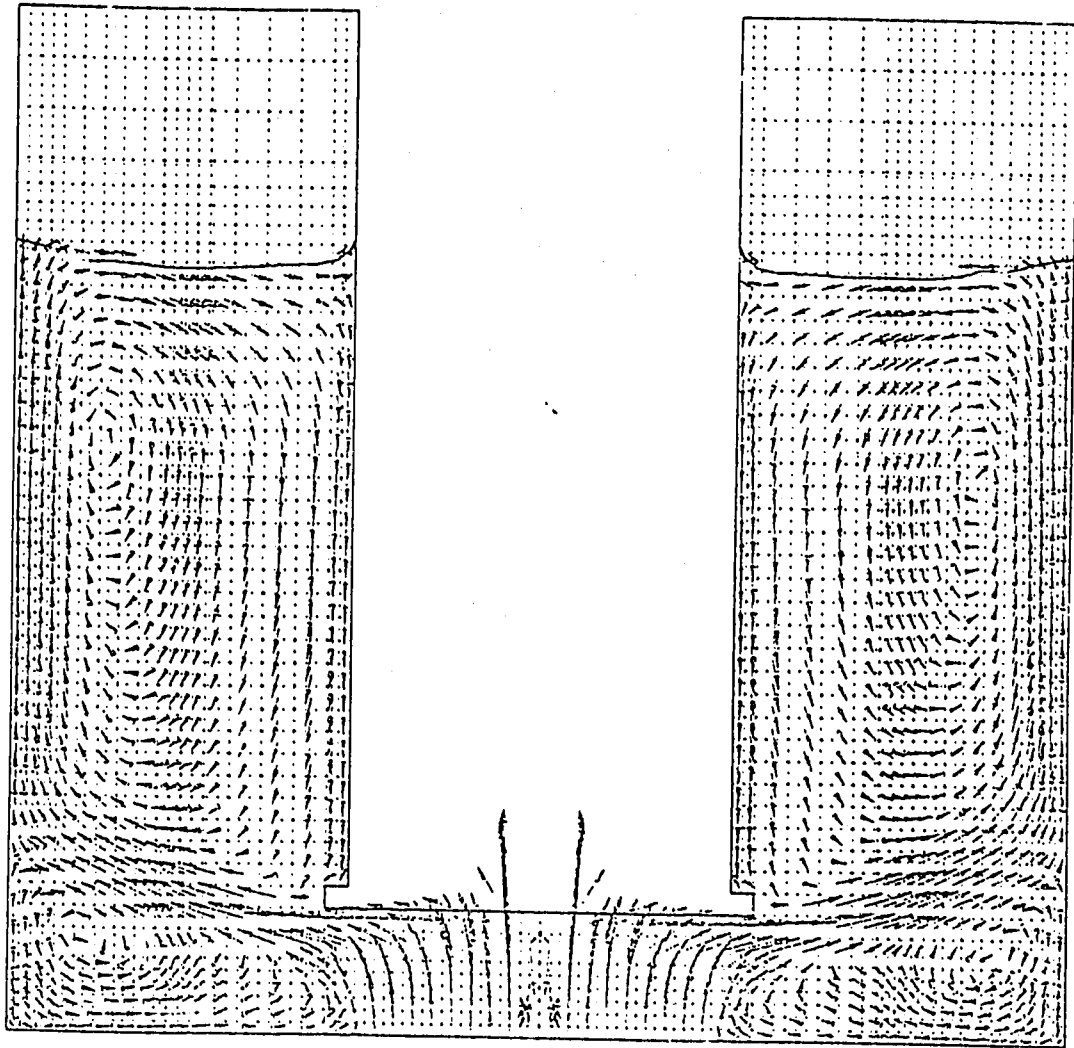
$J = 10, 15$
10.00 M/S

図5.7 自由表面形状および流速ベクトル(10)



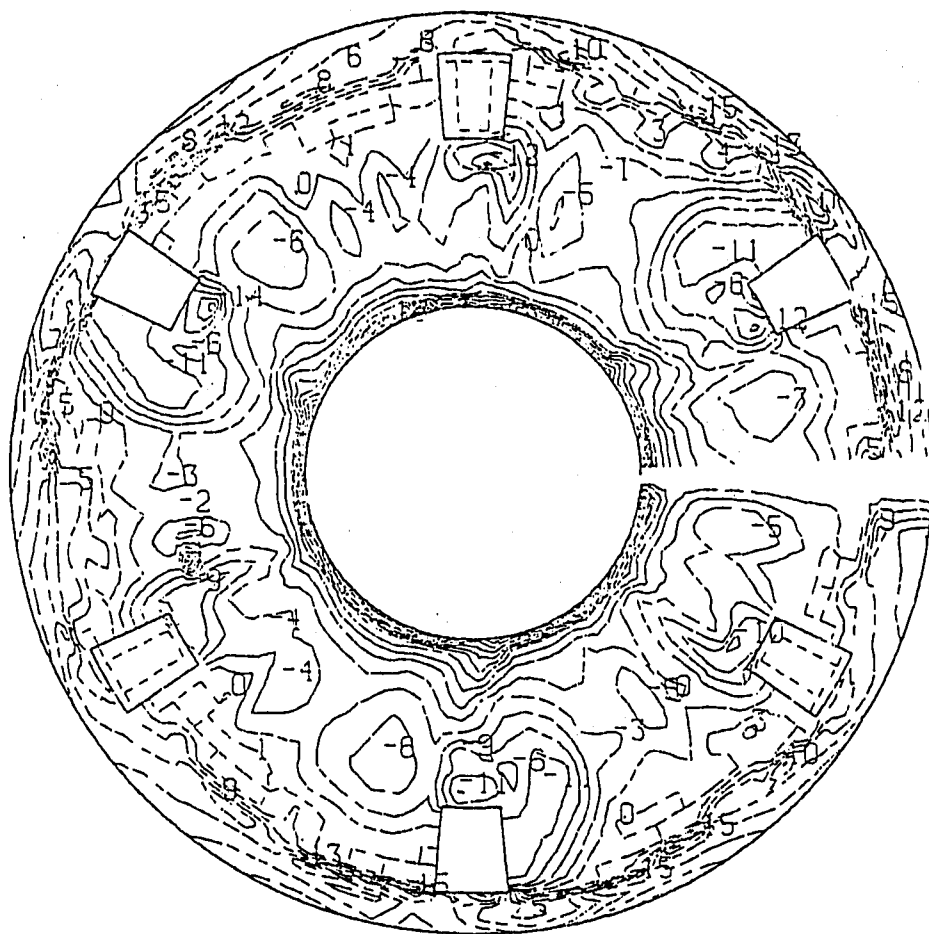
$J = 11, 14$
10.00 M/S

図5.7 自由表面形状および流速ベクトル(11)



$J = 12, 13$
10.00 M/S

図5.7 自由表面形状および流速ベクトル(12)



$K = 36$

図5.8 自由表面における基準高さからの液位等値線図

第6章 結言

FBR機器内での自由表面挙動を解析的に評価できるようにするため、多次元コードAQUAにVOFモデルを組み込み、検証を行った。基本検証問題として、2次元矩形容器内液面揺動およびU字管容器内液面振動を選定し、理想流体を用いた場合の理論解と比較を行い、振動の振幅、周期が比較的良好に模擬できることを確認した。

さらに適用計算として、大型炉炉上部プレナム解析を実施し、原子炉容器壁近傍における自由表面の盛り上がりや、出口配管近傍における自由表面のくぼみを解析的に再現できることを確認した。

参考文献

- 1) 村松 寿晴、前川 勇、松本 雅彦、二ノ方 寿
単相多次元熱流動解析コードAQUA入力マニュアル PNC N9520 87-011
- 2) 前川 勇、村松 寿晴、松本 雅彦、二ノ方 寿
単相多次元熱流動解析コードAQUA数値計算法説明書 PNC N9520 87-012
- 3) 村松 寿晴、前川 勇、松本 雅彦、二ノ方 寿
単相多次元熱流動解析コードAQUAプログラム解説書 PNC N9520 87-013
- 4) B.D.Nichols、C.W.Hirt、R.S.Hotchkiss、SOLA-VOF: A Solution Algorithm for
Transient , Fluid Flow with Multiple Free Boundaries、LA-8355
- 5) 班目 春樹、萩原 剛
高速増殖炉の炉型選択に関する基礎研究 熱流動設計PhaseV 平成元年3月
- 6) 汎用3次元流体解析システム α -FLOW
富士総研技報 Vol.3 No1 1992
- 7) 機械工学便覧 A5 流体工学
- 8) 班目 春樹、萩原 剛
高速増殖炉の炉型選択に関する基礎研究 熱流動設計PhaseVI 平成2年3月
- 9) 村松 寿晴、一宮 正和、山口 彰、中大路 道彦、永田 敬、菅原 悟
大型FBRにおける原子炉容器プレナムガス巻き込み防止対策の検討(2)
PNC N9410 92-352

APPENDIX

1. 入力データ作成方法
2. 入力データ作成例

1. 入力データ作成方法

AQUA-VOFコードで用いられる新たな入力データは、AQUAコードで用いた入力データ構造をそのまま用い、この中に含ませることにする。すなわち、新入力変数は、NAMELIST /GEOM/およびNAMELIST /DATA/ および内部セル初期条件規定カードを用いることとする。以下に新入力変数について示す。

NAMELIST /GEOM/

入力変数	内容	初期値
IFVOF	(=0) 自由液面の計算を行わない。 (=1) 自由液面の計算を行う。	0
HFREE	自由表面液面高さ(m) (本データまたは境界値初期化カードを用いて自由表面初期状態を入力する。)	0

NAMELIST /DATA/

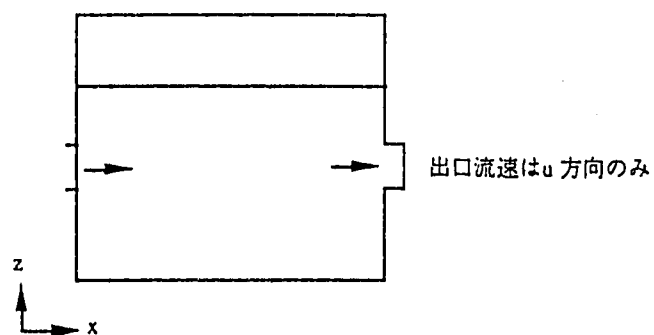
入力変数	内容	初期値
IVFBUG	(=0) デバッグライトを行わない。 (=1) デバッグライトを行う。	0
RAIR	気相部密度(kg/m ³)	0.456
TAIR	気相部温度(°C)	20
PSURF	気相部圧力(Pa)	0 (1気圧)
NTHPR	計算開始後印刷する物理量コードの指定 物理量の指定は、コードSVVPLLLで行う。 S + ; VVPLLのみ印刷 - ; VVPLL1 からVVPLL2まで印刷する。 V 23 ; VOF関数F 24 ; 計算セル属性フラグNF P 1 ; i面を印刷する。 2 ; j面を印刷する。 3 ; k面を印刷する。 LLL ; 印刷面 (メッシュ番号)	

入力データ作成時注意事項

- (1) 計算開始時における自由表面高さは、液面高さが計算体系内ですべて等しい場合、新しく入力変数として加えたHFREEで入力が可能である。一方、計算開始時より液

面高さが異なる場合は、VOF関数Fの初期値入力カードを用いる。

- (2) PSURFは入力したい値より1気圧減じた値を代入する（基準圧力に大気圧を用いているため）。
- (3) 入口境界と出口境界をもつ場合、出口境界セルに関してメッシュ分割に工夫が必要となる。すなわち、出口境界セルは、出口面に対して法線方向の流速のみ持つようメッシュ分割をおこなう。例えば、出口面がx方向の場合、その出口セルはu方向の流速のみ持つようメッシュを分割する。



2. 入力データ作成例

入力データ作成例として、第6章に示した2次元矩形容器内液面揺動解析で用いた入力データを示す。

```

*****
*   AQUA CODE IS VER.1.18 , NO &TURB DATA]]]           *
*   TEST PROBLEM USING AQUA-VOF CODE.                   *
*   SQUARE SLOSHING PROBLEM.                             *
* COPY FROM ($$SQUARE)                                   *
*                                                         *
*                   DATE : '94.10.18 E.MATSUMOTO *
*****
&GEOM  IGEOM=0,NL1=1550,NM1=720,ISYMH=3,IFITEN=3,
        IFRES= 1,IMAX=24,JMAX= 1,KMAX=30,NSURF=6,
        DX= 24*0.005,
        DY=   6.2831853,
        DZ= 30*0.005,
        XNORML(1)= 1.,-1., 0., 0., 0., 0.,
        YNORML(1)= 0., 0., 1.,-1., 0., 0.,
        ZNORML(1)= 0., 0., 0., 0., 1.,-1.,
        ITURKE=0,IFPCG=0,IFVOF= 1,

&END
REG    -1.0  1  1  1  1  1  30  1
REG    -1.0 24 24  1  1  1  30  2
REG    -1.0  1 24  1  1  1  30  3
REG    -1.0  1 24  1  1  1  30  4
REG    -1.0  1 24  1  1  1  1  5
REG    -1.0  1 24  1  1  30 30  6
END

&DATA  ISTATE=0,IFEHER=0,NTHCON=-1,NTMAX=1,ITMAXP=99,
        IDTIME=0,DT=0.0001,IT1BUG=0,IDLBUG=0,IVFBUG=0,
        IZMBUG=0,IT=1,1,
        IFMMO=0,
        TREST=10.0,
        KFLOW= 6*-3,
        KTEMP= 6*400,
        TEMPO= 20.,
        GRAVZ=-9.807,
        NTPRNT=-500,NTSMRY=100,
        NTPLOT=-100,
        ISTPR =232001,012001,032001,082001,172001,242001,
        NTHPR =232001,
        HYDIN=1.0E20,

&END
END
F  1.0      1  24  1  1  1  23
F  1.0      1  12  1  1  1  24 24
F  0.958    1  1  1  1  1  25 25
F  0.875    2  2  1  1  1  25 25
F  0.792    3  3  1  1  1  25 25
F  0.708    4  4  1  1  1  25 25
F  0.625    5  5  1  1  1  25 25
F  0.542    6  6  1  1  1  25 25
F  0.458    7  7  1  1  1  25 25
F  0.375    8  8  1  1  1  25 25
F  0.292    9  9  1  1  1  25 25
F  0.208   10 10  1  1  1  25 25
F  0.125   11 11  1  1  1  25 25
F  0.042   12 12  1  1  1  25 25
F  0.958   13 13  1  1  1  24 24
F  0.875   14 14  1  1  1  24 24
F  0.792   15 15  1  1  1  24 24
F  0.708   16 16  1  1  1  24 24
F  0.625   17 17  1  1  1  24 24
F  0.542   18 18  1  1  1  24 24
F  0.458   19 19  1  1  1  24 24

```

```
F 0.375    20 20  1  1 24 24
F 0.292    21 21  1  1 24 24
F 0.208    22 22  1  1 24 24
F 0.125    23 23  1  1 24 24
F 0.042    24 24  1  1 24 24
END
```

本解析は、静止流体からの過渡解析であるため、VOFのフラグを立て(IFVOF=1)、1 STEPで計算を止めている。これはできるだけ計算開始時に近い状態を保存させたいためである。この後、NTPLOTでプロット時間間隔を指定し、リスタートする。

一方、定常計算を行う場合、計算初期においては、VOFのフラグは立てず(IFVOF=-1)まず流況を安定させる。その後フラグを立てて自由表面の計算をさせる。この方がボリュームエラーが少なく計算時間も短い。

定常計算、過渡計算いずれにおいても、VOFのフラグを立てた場合、自由表面の計算は陽解法で行われる。したがって、タイムステップはクーラン条件により制限されることに注意を払う必要がある。