

# CADMAS-SURF/3D プログラム説明書

# 目 次

1. 開発概要 .....	1- 1
2. 解析モデル .....	2- 1
2.1 座標系と差分格子 .....	2- 1
2.2 3次元非圧縮性流体の基礎方程式 .....	2- 2
2.3 自由表面解析モデル .....	2- 3
2.4 造波モデル .....	2- 4
2.5 無反射モデル .....	2- 5
2.6 乱流モデル .....	2- 7
2.7 エネルギー方程式 .....	2- 8
2.8 濃度輸送方程式 .....	2- 8
2.9 境界条件 .....	2- 9
3. 数値解法 .....	3- 1
3.1 離散化の方針 .....	3- 1
3.2 時間方向の離散化 .....	3- 1
3.3 空間方向の離散化 .....	3- 4
3.4 連立1次方程式の解法 .....	3-24
3.5 時間刻み幅 .....	3-25
3.6 空気圧計算モデル .....	3-25
4. プログラムの内容 .....	4- 1
4.1 処理フロー .....	4- 1
4.2 並列化の方針と通信領域 .....	4- 2
4.3 コーディングスタイル .....	4- 4
4.4 データ構造一覧と詳細説明 .....	4- 8
5. プログラムの使用方法 .....	5- 1
5.1 制限事項 .....	5- 1
5.2 入力ファイル .....	5- 2
5.3 リストファイル .....	5-22
5.4 時系列ファイル .....	5-26
5.5 計算情報ファイル .....	5-26
5.6 マトリクスデータファイル .....	5-27
5.7 空隙率ファイル .....	5-28
5.8 MG 環境ファイル .....	5-29
5.9 描画部 .....	5-29
6. 参考文献 .....	6- 1

## 1. 開発概要

### (1) 開発方針

2次元を対象とした CADMAS-SURF<sup>1)</sup> をベースとして開発した 3次元コード (CADMAS-SURF/3D) を以下の方針で並列化した。

#### (a) 開発言語

解析部の開発言語には、「動的配列をとる」および「名称の文字数を 6 文字以上にする」ため、Fortran90 を使用する。ただし、通常のコーディングは FORTRAN77 に準拠する。

#### (b) 並列化の方法

同一のプログラムが複数ノードで稼動する SPMD (Single Program Multiple Data) モデルを用いて並列化する。データの取り扱いには、大規模計算に適した領域分割法を採用する。

#### (c) 対象とする並列計算機

複数の PC をネットワーク接続した PC クラスターを対象とする。よって、並列計算機の種類としては分散メモリー型とする。メッセージ交換ライブラリーは MPI (Message Passing Interface) とする。

### (2) システム構成

並列版 (CADMAS-SURF/3D) でも 1つのプロセッサで動作し、その場合は単体版 (CADMAS-SURF/3D) と同様の動作となるようにした。よって、CADMAS-SURF/3D のシステム構成は単一プロセッサの場合 (図-1.1) と複数プロセッサの場合 (図-1.2) の 2つに分けられる。

なお、3次元計算ではデータが大規模になるため、指定した領域のみの結果を出力する図化ファイルを追加し、図化に利用することとした。また、全領域の結果を出力する詳細ファイルはリスタートのみに利用することとした。

### (3) 機能

機能一覧を表-1.1 に示す。

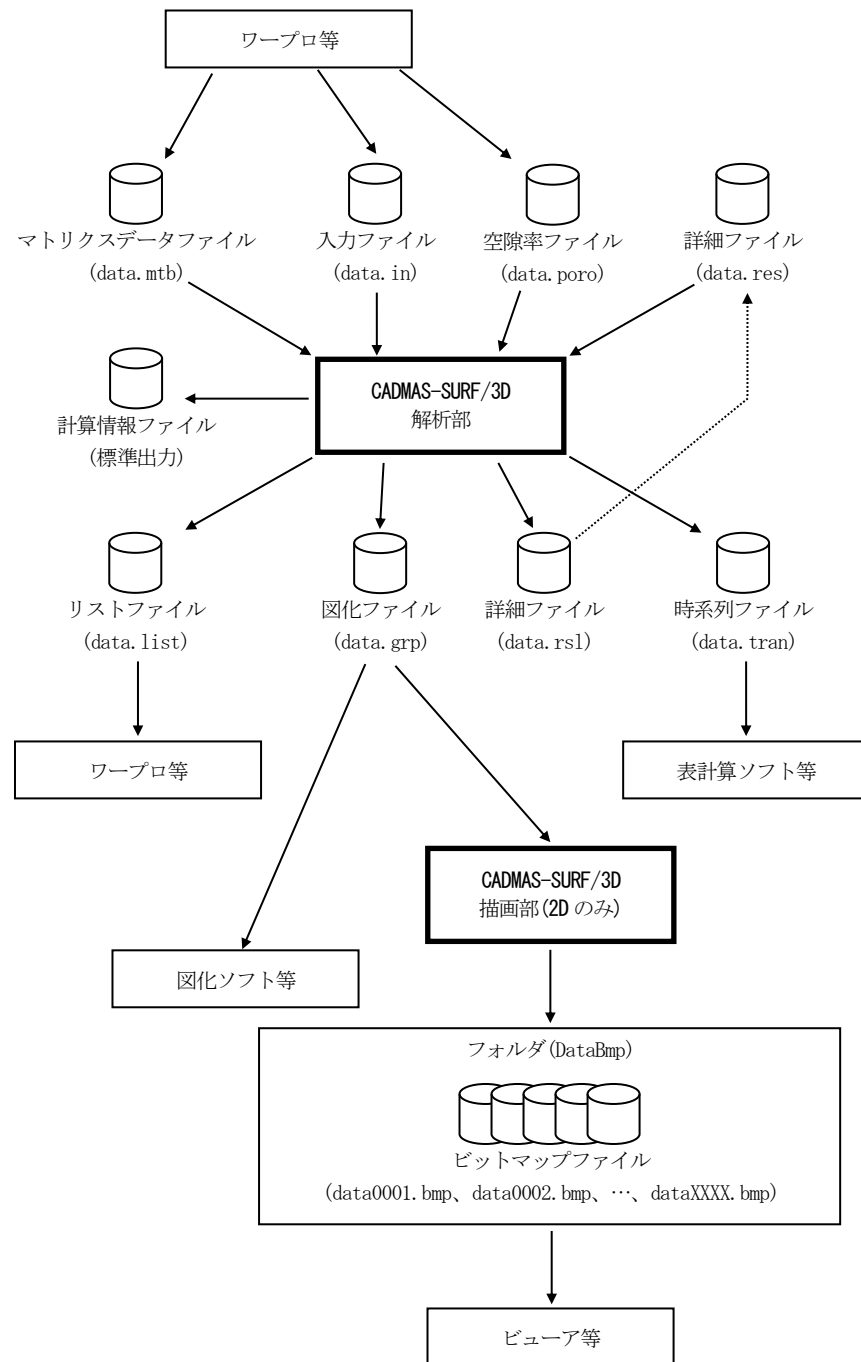
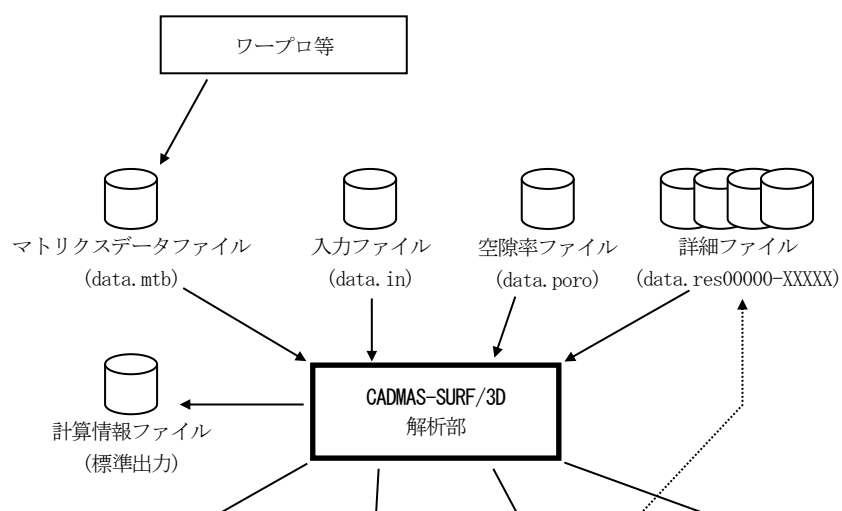


図-1.1 単一プロセッサの場合のシステム構成



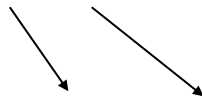


図-1.2 複数プロセッサの場合のシステム構成

表-1.1 機能一覧

	項 目	機 能
物 理 モ デ ル	解析対象	・自由表面が多価関数となる複雑な流れ
	基礎方程式	・3次元非圧縮性粘性流体の Navier-Stokes 方程式と連続の式をポーラスモデルに基づいて拡張した式
	座標系	・デカルト座標
	自由表面解析モデル	・Volume of Fluid 法 (VOF 法)
	乱流モデル	・高 Re 型 $k-\varepsilon$ 2 方程式モデル
	造波モデル	・造波境界 ・造波ソース (それぞれの造波モデルに以下の造波関数を適用可能)
	造波関数	・ストークス波第 5 次近似解 (定形進行波) ・クノイド波第 3 次近似解 (定形進行波) ・流れ関数法 B による数値解 (定形進行波) ・マトリクスデータ (任意波形)
	無反射モデル	・Sommerfeld の放射境界 ・エネルギー減衰帯
	スカラー量の移流拡散	・エネルギー方程式 ・多成分の濃度輸送方程式
	一般の境界条件 (造波境界と放射境界以外)	・セル単位で任意の位置に構造物を設定可能 ・構造物表面の任意の位置に境界条件を設定可能 ・境界条件の種別は入力データで選択可能
数 値 解 法 と ア ル ゴ リ ズ ム	離散化	・スタガード・メッシュを用いた差分法 ・ポーラスモデルを用いた形状近似
	時間積分	・Euler 法 ・Simplified Marker and Cell 法 (SMAC 法)
	移流項 (対流項)	・VOF 関数 F 以外の移流項 (対流項) は以下のいずれかを選択可能 ①1 次精度風上差分 ②2 次精度中心差分 ③DONOR スキーム (①と②のハイブリッド形式) ・VOF 関数 F の移流項は以下のいずれかを選択可能 ①ドナー・アクセプタ法 ②界面の傾きを考慮した方法
	表面セルの流速の設定方法	・外挿 (流体側の 2 点の流速から外挿する) ・勾配ゼロ (流体側の流速と同じにする)
	表面の方向の決定方法	・NASA-VOF3D の方法を採用
	気泡と水滴の処理	・TimerDoor 法
	連立 1 次方程式の解法	・MILU-BiCGSTAB 法
	時間刻み幅の制御	・入力値固定 ・自動時間刻み幅
	描 画 機 能	
描 画 機 能	指定した時刻の指定した領域 のデータ (描画部では 2D のみ)	・流速ベクトル ・各種物理量の等値線 ・等値線による自由表面 ・流体の存在領域の塗り潰し
	時系列データ (表計算ソフトを利用)	・指定個所の初期水面からの水位変動 ・指定個所の計算値、他

## 2. 解析モデル

本章では、3次元非圧縮性流体の基礎方程式、自由表面解析モデルおよび造波モデル等、CADMAS-SURF/3Dの解析モデルについて示す。

### 2.1 座標系と差分格子

座標系はデカルト座標系とし、解析領域を長方形の差分セルで分割する（図-2.1 参照）。各変数の配置には、スカラー量はセルの中心、 $x$  方向流速は  $x$  軸に垂直なセル界面の中心、 $y$  方向流速は  $y$  軸に垂直なセル界面の中心、 $z$  方向流速は  $z$  軸に垂直なセル界面の中心、とするスタガード格子系を採用した（図-2.2 参照）。なお、サフィックスの整合性および境界条件処理等のため、解析領域の外側に仮想セルを設けた。

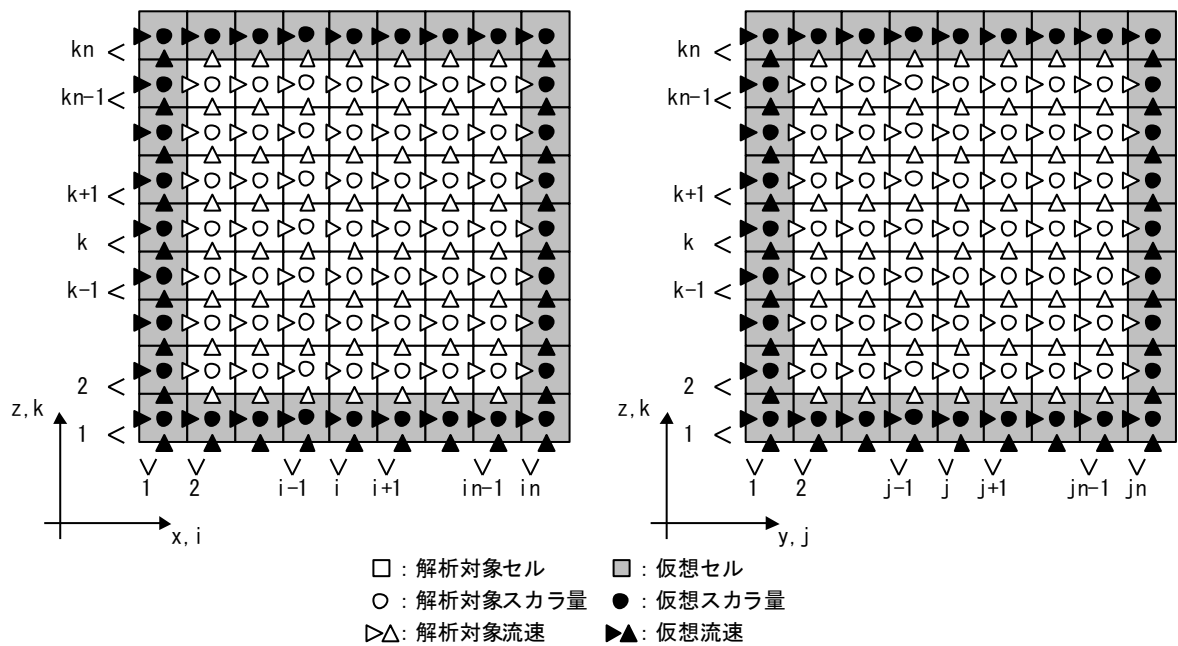


図-2.1 座標系と差分セル

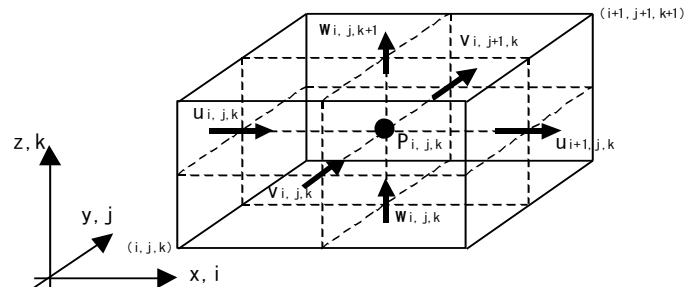


図-2.2 スタガード格子系における変数配置

## 2.2 3次元非圧縮性流体の基礎方程式

海岸域における波浪場の解析では、海底斜面や透過性消波構造物等の複雑な形状を取り扱えることが必須となる。このため、CADMAS-SURF/3D の基礎方程式には、3次元非圧縮性粘性流体を対象とした連続式および Navier-Stokes 方程式をポーラスモデル<sup>2)</sup>に基づいて拡張した式(2.1)から式(2.4)を採用した。

・連続式

$$\frac{\partial \gamma_x u}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_y v}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_z w}{\partial z} = \gamma_v S_\rho \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

・Navier-Stokes 方程式

$$\begin{aligned} \lambda_v \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u u}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_y v u}{\partial y} + \frac{\partial \lambda_z w u}{\partial z} = & -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x v_e \left( 2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \gamma_y v_e \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z v_e \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right\} - \gamma_v D_x u - R_x + \gamma_v S_u \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

$$\begin{aligned} \lambda_v \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u v}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_y v v}{\partial y} + \frac{\partial \lambda_z w v}{\partial z} = & -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x v_e \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \gamma_y v_e \left( 2 \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z v_e \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right\} - \gamma_v D_y v - R_y + \gamma_v S_v \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

$$\begin{aligned} \lambda_v \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u w}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_y v w}{\partial y} + \frac{\partial \lambda_z w w}{\partial z} = & -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x v_e \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \gamma_y v_e \left( \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z v_e \left( 2 \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} \\ & - \gamma_v D_z w - R_z + \gamma_v S_w - \frac{\gamma_v \rho^* g}{\rho} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

ここで、 $t$  : 時間、 $x, y$  : 水平方向座標、 $z$  : 鉛直方向座標、 $u, v, w$  :  $x, y, z$  方向の流速成分、 $\rho$  : 規準密度、 $\rho^*$  : 浮力を考慮する密度、 $p$  : 圧力、 $v_e$  : 分子動粘性係数 $\nu$ と渦動粘性係数 $\nu_t$ の和、 $g$  : 重力加速度、 $\gamma_v$  : 空隙率、 $\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z$  :  $x, y, z$  方向の面積透過率である。 $\lambda_v, \lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$  は $C_M$ を慣性力係数とし次のように表され、右辺第2項が構造物から受ける慣性力の効果となる。

$$\left. \begin{aligned} \lambda_v &= \gamma_v + (1 - \gamma_v) C_M \\ \lambda_x &= \gamma_x + (1 - \gamma_x) C_M \\ \lambda_y &= \gamma_y + (1 - \gamma_y) C_M \\ \lambda_z &= \gamma_z + (1 - \gamma_z) C_M \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

$D_x, D_y, D_z$  はエネルギー減衰帯のための係数、 $S_\rho, S_u, S_v, S_w$  は造波ソースのためのソース項であり、後述する。また、 $C_D$ を抵抗係数として多孔質体からの抵抗力 $R_x, R_y, R_z$ は、次のように流速の2乗に比例する形でモデル化した。



$$\left. \begin{aligned} R_x &= \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta x} (1 - \gamma_x) u \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \\ R_y &= \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta y} (1 - \gamma_y) v \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \\ R_z &= \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta z} (1 - \gamma_z) w \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.6)$$

ここで、 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  は  $x, y, z$  方向の格子間隔である。

## 2.3 自由表面解析モデル

自由表面解析モデルには、汎用性が高く、複雑な表面形状を解析可能である VOF 法<sup>3), 4)</sup>を採用した。VOF 法による自由表面のモデル化の概念図を図-2.3 に示す。VOF 法では、本来ステップ関数となる「流体である・ない」を表す関数を計算セル毎に平均化した VOF 関数  $F$  の移流方程式と、表面の向きを逐次的に計算することにより、自由表面の挙動を解析する。ポーラスモデルに基づく VOF 関数  $F$  の移流方程式を以下に示す。

$$\gamma_v \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial \gamma_x u F}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_y v F}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_z w F}{\partial z} = \gamma_v S_F \dots\dots\dots (2.7)$$

ここで、 $S_F$  は造波のためのソース項であり後述する。

なお、図-2.4 に示すように、VOF 関数  $F$  は 2 相流解析等で用いられるボイド率とは異なり、自由表面をシャープに表現するための関数であり、その移流方程式の離散化には、表面がぼやけないために特別に工夫されたドナー・アクセプタ法が用いられる。また、界面の傾きを考慮した方法も選択可能である。ドナー・アクセプタ法、界面の傾きを考慮した方法および表面の向きの決定方法については後述する。

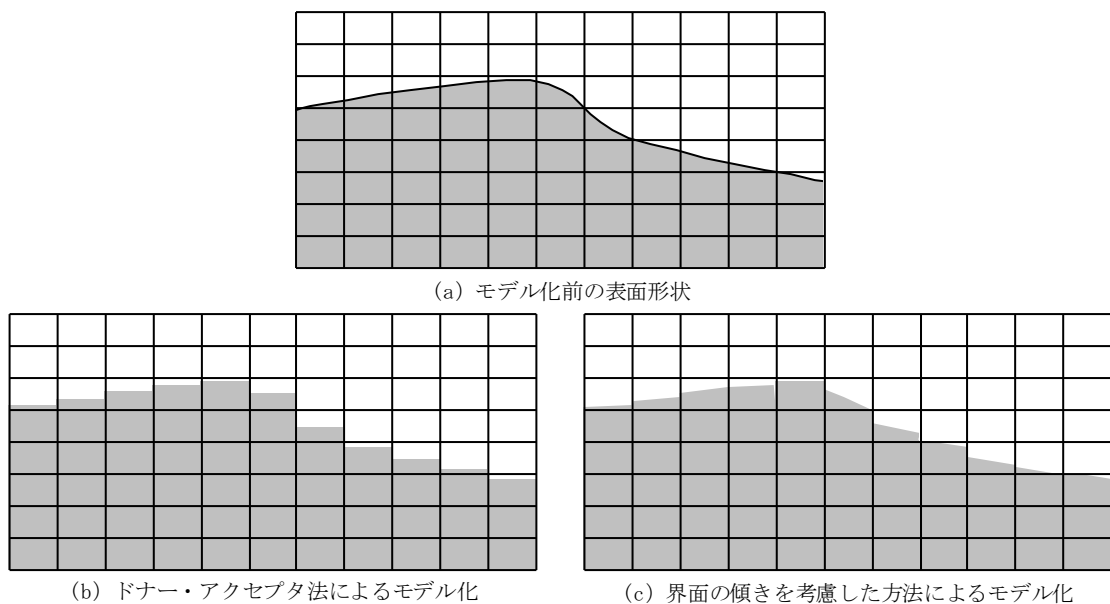


図-2.3 VOF 法による自由表面のモデル化

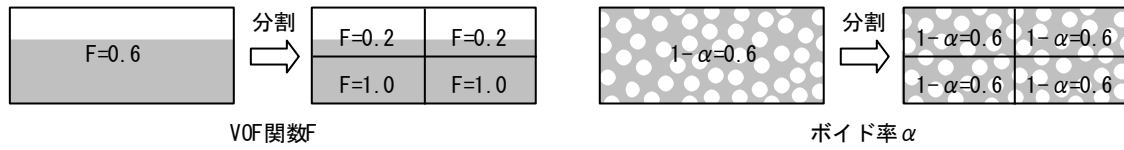


図-2.4 VOF 関数  $F$  とボイド率  $\alpha$  の差異

## 2.4 造波モデル

### (1) 造波用の水位と流速

CADMAS-SURF/3D では、規則波の水位や流速の計算方法として

- ・ ストークス波第 5 次近似解<sup>5)</sup>
- ・ クノイド波第 3 次近似解<sup>5)</sup>
- ・ 流れ関数法 B による数値解<sup>6)</sup>

の 3 つを採用した。ここでの Dean の流れ関数法 B の適用においては、波速の第 2 定義に基づいて導かれたストークス波やクノイド波の摂動解と同様に、波速の第 2 定義に基づく物理量(水位変動、流速、圧力、波速)を与えるものとした。また、不規則波の生成を目的として、ユーザが作成する任意の水位と流速のデータ(マトリクスデータ)を読み込み、時間方向および空間方向に補間しながら計算する方法を採用した。

上記の方法で求めた水位  $\eta_0(t)$  および流速  $U_0(z, t)$  を用いて造波させようとすると、特に造波開始直後に、想定している水位  $\eta_0(t)$  と計算上の水位  $\eta_s(t)$  にずれが起こる。よって、実際の計算に用いる  $x$  方向または  $y$  方向の造波用流速  $U(z, t)$  には、以下のスケーリングを施し、造波位置での流入出量を合わせるようにした。

$$U(z, t) = U_0(z^*, t) \cdot \left( \frac{\eta_0 + h}{\eta_s + h} \right) \dots\dots\dots (2.8)$$

$$z^* = \frac{\eta_0 + h}{\eta_s + h} (z + h) - h \dots\dots\dots (2.9)$$

ここで、 $h$  は水深である。

CADMAS-SURF/3D では、これらの造波用流速  $U(z, t)$  を用いた造波モデルとして、以下に示す造波境界と造波ソースの 2 つを採用した。

### (2) 造波境界

造波境界では、図-2.5 に示すとおり、造波用流速  $U(z, t)$  を  $x$  方向または  $y$  方向の流速指定境界条件として設定する。なお、条件過多となることを防ぐため、VOF 関数  $F$  値および圧力(実際には圧力増分)について

は勾配ゼロを設定する。

### (3) 造波ソース

指定したセルの中心位置 ( $x = x_s$  または  $y = y_s$ ) に造波のためのソース<sup>7)</sup>を設定する (図-2.6 参照)。造波ソースは流速や水位を直接指定する方法ではないため、構造物や斜面等からの反射波を通過させることができ、後述する無反射モデルと組み合わせることで、無反射造波が可能となる。以下では式(2.1)から式(2.4)、および、式(2.7)のソース項のみを示す。

$$S_\rho = q(z, t) \quad \text{.....} \quad (2.10)$$

$$S_u = uq(z, t) \quad \text{.....} \quad (2.11)$$

$$S_v = vq(z, t) \quad \text{.....} \quad (2.12)$$

$$S_w = wq(z, t) + \frac{v}{3} \frac{\partial q(z, t)}{\partial z} \quad \text{.....} \quad (2.13)$$

$$S_F = Fq(z, t) \quad \text{.....} \quad (2.14)$$

ここで、 $q(z, t)$  は  $x = x_s$  での格子間隔を  $\Delta x_s$  として次式で表される ( $x$  方向に造波させる場合)。

$$q(z, t) = 2U(z, t) / \Delta x_s \quad \text{.....} \quad (2.15)$$

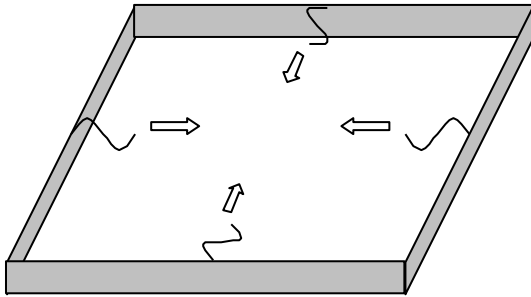


図-2.5 造波境界

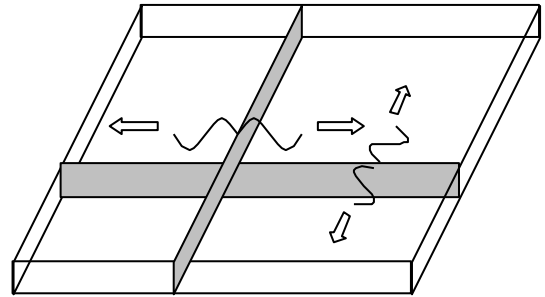


図-2.6 造波ソース

## 2.5 無反射モデル

不規則波の場合はもちろんのこと、規則波においても構造物の反射波や浅水変形等が安定に形成されるまでには長時間の解析が必要となる。このとき、人為的に設定せざるを得ない解析領域の両端の影響を極力抑えるモデル (無反射モデル) が必要となる。

CADMAS-SURF/3D-MP では、無反射モデルとして以下の2つを採用した。

### (1) Sommerfeld の放射境界

境界条件として以下に示す Sommerfeld の放射条件を採用した (図-2.7 参照)。

$$\frac{\partial f}{\partial t} + C \frac{\partial f}{\partial x} = 0, \text{ または, } \frac{\partial f}{\partial t} + C \frac{\partial f}{\partial y} = 0 \quad (2.16)$$

ここで、 $f$  は流速等の物理量、 $C$  は波速である。なお、波速  $C$  には微小振幅波の波速を用いる。

### (2) エネルギー減衰帯

エネルギー減衰帯は、1 から 3 波長程度の領域を用いて波のエネルギーを徐々に減衰させることで無反射を実現するものである (図-2.8 参照)。このため、計算領域を余分に必要とするが、様々な波形に対して適用可能であり、かつ、安定な計算結果が得易いという利点がある。

CADMAS-SURF/3D-MP ではエネルギー減衰帯として、式(2.2)から式(2.4)の Navier-Stokes 方程式に、以下に示す流速に比例する減衰項<sup>8)</sup>を付加した。

$$\bullet \text{ } x \text{ 方向流速の減衰項} = -D_x u \quad (2.17)$$

$$D_x = \theta_{xy} \sqrt{\frac{g}{h}} (N+1) \left( \frac{\max(|x-x_0|, |y-y_0|)}{l} \right)^N$$

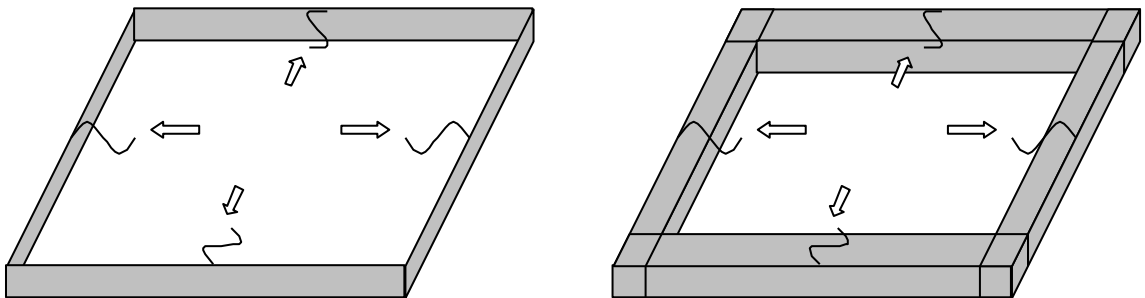
$$\bullet \text{ } y \text{ 方向流速の減衰項} = -D_y v \quad (2.18)$$

$$D_y = \theta_{xy} \sqrt{\frac{g}{h}} (N+1) \left( \frac{\max(|x-x_0|, |y-y_0|)}{l} \right)^N$$

$$\bullet \text{ } z \text{ 方向流速の減衰項} = -D_z w \quad (2.19)$$

$$D_z = \theta_z \sqrt{\frac{g}{h}} (N+1) \left( \frac{\max(|x-x_0|, |y-y_0|)}{l} \right)^N$$

ここで、 $h$  は水深、 $l$  と  $x_0$  (または  $y_0$ ) はエネルギー減衰帯の広さと開始位置、 $N$  は分布関数の次数、 $\theta_{xy}$  と  $\theta_z$  は無次元の係数である。



## 2.6 乱流モデル

乱流モデルには、実用性が高く様々な分野で用いられている高 Re 型  $k-\varepsilon$  2 方程式モデル<sup>9)</sup>を採用した。高 Re 型  $k-\varepsilon$  2 方程式モデルでは、流速の変動量 ( $u'$ ,  $v'$ ,  $w'$ ,) を用いて乱流エネルギー  $k$  と乱流エネルギー散逸  $\varepsilon$  を

$$k = \frac{1}{2} (u'^2 + v'^2 + w'^2) \quad \dots\dots\dots (2.20)$$

$$\varepsilon = \nu \left[ 2 \left\{ \left( \frac{\partial u'}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v'}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w'}{\partial z} \right)^2 \right\} + \left( \frac{\partial u'}{\partial y} + \frac{\partial v'}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v'}{\partial z} + \frac{\partial w'}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w'}{\partial x} + \frac{\partial u'}{\partial z} \right)^2 \right] \quad \dots\dots\dots (2.21)$$

と定義し、以下に示す移流拡散方程式を解いて求める。

$$\begin{aligned} \gamma_v \frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial \gamma_x u k}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_y v k}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_z w k}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left( \gamma_x \nu_k \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \gamma_y \nu_k \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \gamma_z \nu_k \frac{\partial k}{\partial z} \right) + \gamma_v (G_s + G_T - \varepsilon) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (2.22)$$

$$\begin{aligned} \gamma_v \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \gamma_x u \varepsilon}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_y v \varepsilon}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_z w \varepsilon}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left( \gamma_x \nu_\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \gamma_y \nu_\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \gamma_z \nu_\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + \gamma_v \left\{ C_1 \frac{\varepsilon}{k} (G_s + G_T) (1 + C_3 R_f) - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \right\} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (2.23)$$

$$G_s = \nu_t \left[ 2 \left\{ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right\} + \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right] \quad \dots\dots\dots (2.24)$$

$$G_T = - \frac{\nu_t}{\rho \sigma_t} \left( g \frac{\partial \rho^*}{\partial z} \right) \quad \dots\dots\dots (2.25)$$

$$R_f = \frac{-G_T}{G_s + G_T} \quad \dots\dots\dots (2.26)$$

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad \dots\dots\dots (2.27)$$

$$\nu_k = \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \quad \dots\dots\dots (2.28)$$

$$\nu_\varepsilon = \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \quad \dots\dots\dots (2.29)$$

ここで、式(2.22)から式(2.29)中に含まれる定数は経験定数であり、通常  $C_\mu = 0.09$ ,  $\sigma_k = 1.00$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1.30$ ,

$C_1 = 1.44$ ,  $C_2 = 1.92$ ,  $C_3 = 0.0$  が用いられる。なお、これらの式を用いて計算された乱流の効果は、運動

方程式の粘性項の実効動粘性係数を

$$\nu_e = \nu + \nu_t \quad \text{.....} \quad (2.30)$$

と、また、圧力項の圧力を

$$p' = p + \frac{2}{3} \rho k \quad \text{.....} \quad (2.31)$$

と、取り扱うことによって流速および圧力に反映される。

## 2.7 エネルギー方程式

密度および定圧比熱の変化が微小であることを仮定して、温度を主変数とした以下のエネルギー方程式を採用した。

$$\begin{aligned} \gamma_v \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\gamma_x u T) + \frac{\partial}{\partial y} (\gamma_y v T) + \frac{\partial}{\partial z} (\gamma_z w T) = \\ \frac{1}{\rho c_p} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left( \gamma_x \lambda_e \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \gamma_y \lambda_e \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \gamma_z \lambda_e \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \gamma_v S_T \right\} \quad \text{.....} \end{aligned} \quad (2.32)$$

$$\lambda_e = \lambda + \frac{\rho c_p \nu_t}{Pr_t} \quad \text{.....} \quad (2.33)$$

$$S_T = \rho c_p T q(z, t) \quad \text{.....} \quad (2.34)$$

ここで、 $T$  : 温度、 $c_p$  : 定圧比熱、 $\lambda$  : 熱伝導率、 $Pr_t$  : 乱流 Prandtl 数 (入力値) である。

## 2.8 濃度輸送方程式

混入物質の濃度が微量で、かつ、流体運動に対する影響が無視できることを仮定して、以下の濃度の輸送方程式を採用した。

$$\begin{aligned} \gamma_v \frac{\partial c_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\gamma_x u c_i) + \frac{\partial}{\partial y} (\gamma_y v c_i) + \frac{\partial}{\partial z} (\gamma_z w c_i) = \\ \frac{\partial}{\partial x} \left( \gamma_x D_{ie} \frac{\partial c_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \gamma_y D_{ie} \frac{\partial c_i}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \gamma_z D_{ie} \frac{\partial c_i}{\partial z} \right) + \gamma_v S_{c_i} \quad \text{.....} \end{aligned} \quad (2.35)$$

$$D_{ie} = D_i + \frac{\nu_t}{S_{CT}} \quad \text{.....} \quad (2.36)$$

$$S_{c_i} = c_i q(z, t) \quad \text{.....} \quad (2.37)$$

ここで、 $c_i$  : 第  $i$  成分の濃度 (体積分率)、 $D_i$  : 第  $i$  成分の拡散係数、 $S_{CT}$  : 乱流 Schmidt 数 (入力値) である。



2.9 境界条件

CADMAS-SURF/3D-MP では、前述した造波境界や Sommerfeld の放射境界以外に、値指定境界や対数則境界等を利用可能とした。壁面上および自由表面上でのサフィックスを図-2.9 のように表した場合の、流速・圧力に関する境界条件一覧を表-2.1 に、スカラ量に関する境界条件一覧を表-2.2 に示す。

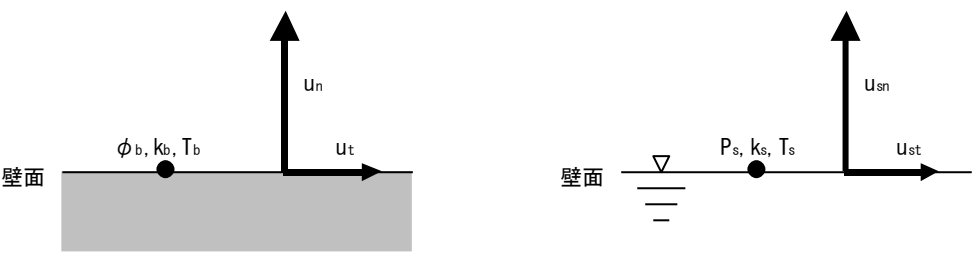


図-2.9 壁面上および自由表面上でのサフィックス



表-2.1 流速・圧力に関する境界条件一覧

境界条件	流速	圧力
スリップ	$u_n = 0$ 、 $\frac{\partial u_t}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial \phi_b}{\partial n} = 0$
ノンスリップ	$u_n = 0$ 、 $u_t = 0$	$\frac{\partial \phi_b}{\partial n} = 0$
値指定（含む造波境界）	$u_n = u_{nin}$ 、 $u_t = u_{tin}$	$\frac{\partial \phi_b}{\partial n} = 0$
フリー	$\frac{\partial u_n}{\partial n} = 0$ （ポテンシャル関数計算後に補正）、 $\frac{\partial u_t}{\partial n} = 0$	$\phi_b = 0$
放射境界	$\frac{\partial u_n}{\partial t} + C \frac{\partial u_n}{\partial n} = 0$ 、 $\frac{\partial u_t}{\partial t} + C \frac{\partial u_t}{\partial n} = 0$ 波速 C は微小振幅波から求める	$\frac{\partial \phi_b}{\partial n} = 0$
対数則	$u_n = 0$ 、 $\frac{u}{u^*} = \frac{1}{\kappa} \log \left( \frac{u^* y}{\nu} \right) + A$ 、 $u^* = \sqrt{\tau / \rho} = \text{摩擦速度}$ $\kappa = 0.4$ 、 $A = 5.5$ $y = \text{壁面からの距離}$ 、 $u = \text{接線方向流速（}y\text{の位置）}$	$\frac{\partial \phi_b}{\partial n} = 0$
完全粗面	$u_n = 0$ 、 $\frac{u}{u^*} = \frac{1}{\kappa} \log \left( \frac{y}{k_s} \right) + A + 3.0$ 、 $u^* = \sqrt{\tau / \rho} = \text{摩擦速度}$ $k_s = \text{壁面の粗度}$ 、 $\kappa = 0.4$ 、 $A = 5.5$ $y = \text{壁面からの距離}$ 、 $u = \text{接線方向流速（}y\text{の位置）}$	$\frac{\partial \phi_b}{\partial n} = 0$
自由表面境界	法線方向は、連続の式、勾配ゼロ、外挿、から適宜計算する 接線方向は、勾配ゼロ、外挿、から適宜計算する	$p_s = p_{GAS}$

注) 壁面上の圧力の境界条件はポテンシャル関数  $\phi$  の境界条件として表す

注) サフィックス (in) は入力値

表-2.2 スカラ量に関する境界条件一覧

境界条件	乱流量	温度	濃度
値指定	$k_b = k_{in}$ 、 $\varepsilon_b = \varepsilon_{in}$	$T_b = T_{in}$	$c_{ib} = c_{iin}$
フリー (勾配ゼロ、断熱)	$\frac{\partial k_b}{\partial n} = 0$ 、 $\frac{\partial \varepsilon_b}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial T_b}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial c_{ib}}{\partial n} = 0$
熱流束 (拡散流束)	—	$-\lambda_e \frac{\partial T}{\partial n} \Big _b = q_{in}$	$-D_{ie} \frac{\partial c_i}{\partial n} \Big _b = q_{in}$
熱伝達 (物質移動)	—	$-\lambda_e \frac{\partial T}{\partial n} \Big _b = h(T_b - T_\infty)$  $h$ は熱伝達係数 $T_\infty$ は外部温度	$-D_{ie} \frac{\partial c_i}{\partial n} \Big _b = k_i(c_{ib} - c_{i\infty})$  $k_i$ は物質移動係数 $c_{i\infty}$ は外部濃度
対数則および 完全粗面	$k_c = \frac{(u^*)^2}{\sqrt{C_\mu}}$ 、 $\varepsilon_c = \frac{(u^*)^3}{\kappa y}$  $k_c$ 、 $\varepsilon_c$ は境界面に接するセル の値	—	—
放射境界	$\frac{\partial k_b}{\partial t} + C \frac{\partial k_b}{\partial n} = 0$  $\frac{\partial \varepsilon_b}{\partial t} + C \frac{\partial \varepsilon_b}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial T_b}{\partial t} + C \frac{\partial T_b}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial c_{ib}}{\partial t} + C \frac{\partial c_{ib}}{\partial n} = 0$
自由表面境界	$\frac{\partial k_s}{\partial n} = 0$ 、 $\frac{\partial \varepsilon_s}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial T_s}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial c_{is}}{\partial n} = 0$

注) サフィックス (in) は入力値

### 3. 数値解法

本章では、時間方向の離散化、空間方向の離散化および連立 1 次方程式の解法等、CADMAS-SURF/3D の数値解法<sup>10), 11)</sup> について示す。

#### 3.1 離散化の方針

CADMAS-SURF/3D の開発にあたり、離散化の方針を以下のとおりとした。

- ①2.1 節に示したスタガード格子系を採用する。
- ②格子幅を自由に設定できる可変格子幅を採用する。
- ③保存形式で記述された基礎方程式をコントロール・ボリューム法で離散化する。
- ④移流項以外の空間方向の差分は 2 次精度の中心差分、移流項以外は風上差分等とする。
- ⑤補間方法には線形補間および面積補間を用いる。
- ⑥時間方向の離散化は Euler 法を基本とし、運動方程式と連続の式の連成には、圧力項を陰的に評価する SMAC (Simplified Marker and Cell) 法<sup>12)</sup> を採用する。

#### 3.2 時間方向の離散化

ある時刻  $t$  の物理量  $f^n$  から、新しい時刻  $t + \Delta t$  の物理量  $f^{n+1}$  を計算するための時間方向の離散化は、Euler 法（陽解法）を基本とし、運動方程式と連続の式の連成には、圧力項を陰的に評価する SMAC 法を採用した。時間方向の離散化の概念図を図-3.1 に示す。

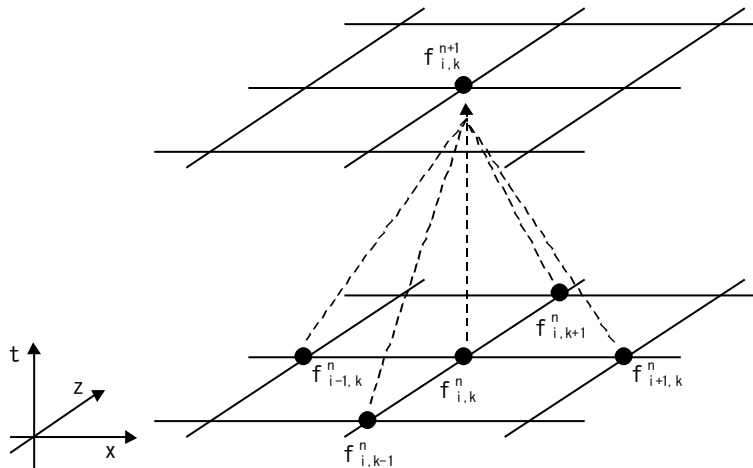


図-3.1 時間方向の離散化の概念

### 3.2.1 Euler 法

Euler 法は最も基本的な陽解法であり、基礎方程式を

$$\frac{\partial f}{\partial t} = G(f) \quad \text{.....} \quad (3.1)$$

として離散化すると次式となる。

$$f^{n+1} = f^n + \Delta t G(f^n) \quad \text{.....} \quad (3.2)$$

### 3.2.2 SMAC 法

Navier-Stokes 方程式および連続の式には圧力の時間変動項がなく、SMAC 法では圧力項を陰的に評価することで、新しい時刻の圧力を求める。式(2.1)から式(2.4)の基礎方程式を SMAC 法により時間方向に離散化すると

$$\frac{\partial \gamma_x u^{n+1}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_y v^{n+1}}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_z w^{n+1}}{\partial z} = \gamma_v S_\rho \quad \text{.....} \quad (3.3)$$

$$u^{n+1} = u^n + \frac{\Delta t}{\lambda_v} \left\{ -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial P^{n+1}}{\partial x} + G_x(u^n, v^n, w^n) \right\} \quad \text{.....} \quad (3.4)$$

$$v^{n+1} = v^n + \frac{\Delta t}{\lambda_v} \left\{ -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial P^{n+1}}{\partial y} + G_y(u^n, v^n, w^n) \right\} \quad \text{.....} \quad (3.5)$$

$$w^{n+1} = w^n + \frac{\Delta t}{\lambda_v} \left\{ -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial P^{n+1}}{\partial z} + G_z(u^n, v^n, w^n) \right\} \quad \text{.....} \quad (3.6)$$

となる。なお、式(2.2)から式(2.4)の時間項と圧力項以外の項を、それぞれ  $G_x(u^n, v^n, w^n)$ 、 $G_y(u^n, v^n, w^n)$ 、 $G_z(u^n, v^n, w^n)$  とまとめて表記した。

ここで、仮流速 ( $u^\sim$ ,  $v^\sim$ ,  $w^\sim$ ) およびポテンシャル関数  $\phi$

$$u^\sim = u^n + \frac{\Delta t}{\lambda_v} \left\{ -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial P^n}{\partial x} + G_x(u^n, v^n, w^n) \right\} \quad \text{.....} \quad (3.7)$$

$$v^\sim = v^n + \frac{\Delta t}{\lambda_v} \left\{ -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial P^n}{\partial y} + G_y(u^n, v^n, w^n) \right\} \quad \text{.....} \quad (3.8)$$

$$w^\sim = w^n + \frac{\Delta t}{\lambda_v} \left\{ -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial P^n}{\partial z} + G_z(u^n, v^n, w^n) \right\} \quad \text{.....} \quad (3.9)$$

$$\phi = -\frac{\Delta t}{\rho} (P^{n+1} - P^n) \quad \text{.....} \quad (3.10)$$

を用いて式(3.4)から式(3.6)を変形すると

$$u^{n+1} - u^{\sim} = \frac{\Delta t}{\lambda_v} \left( -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial P^{n+1} - P^n}{\partial x} \right) = \frac{\gamma_v}{\lambda_v} \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad \text{.....} \quad (3.11)$$

$$v^{n+1} - v^{\sim} = \frac{\Delta t}{\lambda_v} \left( -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial P^{n+1} - P^n}{\partial y} \right) = \frac{\gamma_v}{\lambda_v} \frac{\partial \phi}{\partial y} \quad \text{.....} \quad (3.12)$$

$$w^{n+1} - w^{\sim} = \frac{\Delta t}{\lambda_v} \left( -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial P^{n+1} - P^n}{\partial z} \right) = \frac{\gamma_v}{\lambda_v} \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad \text{.....} \quad (3.13)$$

となる。この式(3.11)から式(3.13)にそれぞれ  $\frac{\partial}{\partial x} \gamma_x$ 、 $\frac{\partial}{\partial y} \gamma_y$  および  $\frac{\partial}{\partial z} \gamma_z$  を乗じ、和をとると

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left( \gamma_x \frac{\gamma_v}{\lambda_v} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \gamma_y \frac{\gamma_v}{\lambda_v} \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \gamma_z \frac{\gamma_v}{\lambda_v} \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) \\ &= \left( \frac{\partial \gamma_x u^{n+1}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_y v^{n+1}}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_z w^{n+1}}{\partial z} \right) - \left( \frac{\partial \gamma_x u^{\sim}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_y v^{\sim}}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_z w^{\sim}}{\partial z} \right) \quad \text{.....} \end{aligned} \quad (3.14)$$

となり、式(3.14)の右辺第1項に式(3.3)を代入することで、以下のSMAC法のアルゴリズムが得られる。

①仮流速 ( $u^{\sim}$ ,  $v^{\sim}$ ,  $w^{\sim}$ ) を次式を用いて求める。

$$u^{\sim} = u^n + \frac{\Delta t}{\lambda_v} \left\{ -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial P^n}{\partial x} + G_x(u^n, v^n, w^n) \right\} \quad \text{.....} \quad (3.15)$$

$$v^{\sim} = v^n + \frac{\Delta t}{\lambda_v} \left\{ -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial P^n}{\partial y} + G_y(u^n, v^n, w^n) \right\} \quad \text{.....} \quad (3.16)$$

$$w^{\sim} = w^n + \frac{\Delta t}{\lambda_v} \left\{ -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial P^n}{\partial z} + G_z(u^n, v^n, w^n) \right\} \quad \text{.....} \quad (3.17)$$

②次のPoisson方程式を解きポテンシャル関数 $\phi$ を求める。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \gamma_x \frac{\gamma_v}{\lambda_v} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \gamma_y \frac{\gamma_v}{\lambda_v} \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \gamma_z \frac{\gamma_v}{\lambda_v} \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) = \gamma_v S_\rho - \left( \frac{\partial \gamma_x u^{\sim}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_y v^{\sim}}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_z w^{\sim}}{\partial z} \right) \quad \text{.....} \quad (3.18)$$

③新しい時刻の $u^{n+1}$ ,  $v^{n+1}$ ,  $w^{n+1}$  および  $P^{n+1}$  を次式を用いて求め、必要な時刻まで①～③を繰り返す。

$$u^{n+1} = u^{\sim} + \frac{\gamma_v}{\lambda_v} \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad \text{.....} \quad (3.19)$$

$$v^{n+1} = v^{\sim} + \frac{\gamma_v}{\lambda_v} \frac{\partial \phi}{\partial y} \quad \text{.....} \quad (3.20)$$

$$w^{n+1} = w^{\sim} + \frac{\gamma_v}{\lambda_v} \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad \text{.....} \quad (3.21)$$

$$P^{n+1} = P^n - \frac{\rho}{\Delta t} \phi \quad \text{.....} \quad (3.22)$$

### 3.3 空間方向の離散化

#### 3.3.1 離散式の記述方法

これまで、時間方向のサフィックスである  $n$ 、 $n+1$  を用いて既知の物理量を  $f^n$ 、新しい時刻の物理量を  $f^{n+1}$  と記述してきたが、以下では、簡略化のために既知の物理量は  $f$  と記述することとする。

また、空間方向の離散化に先立ち、**図-3.2** に示すように、空間方向の微小量を以下のとおり定義する。

$$\Delta x_i = x_{i+1} - x_i \quad \text{.....} \quad (3.23)$$

$$\Delta y_j = y_{j+1} - y_j \quad \text{.....} \quad (3.24)$$

$$\Delta z_k = z_{k+1} - z_k \quad \text{.....} \quad (3.25)$$

$$\delta x_i = \frac{\Delta x_{i-1} + \Delta x_i}{2} \quad \text{.....} \quad (3.26)$$

$$\delta y_j = \frac{\Delta y_{j-1} + \Delta y_j}{2} \quad \text{.....} \quad (3.27)$$

$$\delta z_k = \frac{\Delta z_{k-1} + \Delta z_k}{2} \quad \text{.....} \quad (3.28)$$

ここで、 $\Delta$  付きの量はセルの幅であり、 $\delta$  付きの値はセル中心間の幅である。また、離散式の簡略化のために補間する変数  $f$  を  $\{ \}$  および  $\lfloor \rfloor$  で囲み、そのサフィックスによって

$$\{f\}_{i,j,k}^{\Delta x} = \frac{\Delta x_{i-1}}{\Delta x_{i-1} + \Delta x_i} f_{i,j,k} + \frac{\Delta x_i}{\Delta x_{i-1} + \Delta x_i} f_{i-1,j,k} \quad \text{.....} \quad (3.29)$$

$$\lfloor f \rfloor_{i,j,k}^{\Delta x} = \frac{\Delta x_i}{\Delta x_{i-1} + \Delta x_i} f_{i,j,k} + \frac{\Delta x_{i-1}}{\Delta x_{i-1} + \Delta x_i} f_{i-1,j,k} \quad \text{.....} \quad (3.30)$$

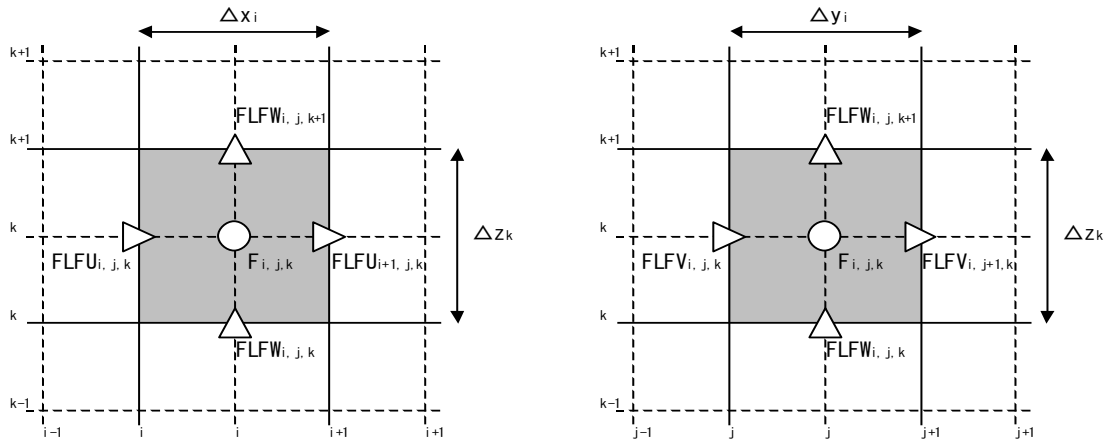
$$\{f\}_{i,j,k}^{\delta x} = \lfloor f \rfloor_{i,j,k}^{\delta x} = \frac{1}{2} f_{i+1,j,k} + \frac{1}{2} f_{i,j,k} \quad \text{.....} \quad (3.31)$$

と記述する。このとき、式(3.29)はセル中心で定義された値をセル界面に線形補間する場合、式(3.30)はセル中心で定義された値をセル界面に面積補間する場合、式(3.31)はセル界面で定義された値をセル中心に線形補間（面積補間も同じ）する場合に対応する。例えば、式(3.29)の記述を用いると、セル中心で定義された値を  $x$ - $z$  面上の格子点に線形補間する場合には、以下のように2重の  $\{ \}$  を用いて記述できる。

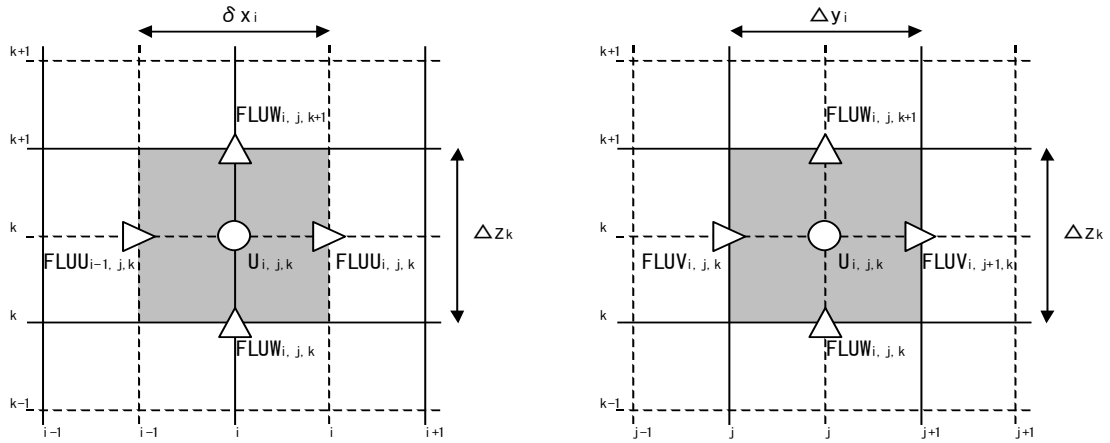
$$\begin{aligned} \{f\}_{i,j,k}^{\Delta x} \Big|_{i,j,k}^{\Delta z} &= \frac{\Delta x_{i-1}}{\Delta x_{i-1} + \Delta x_i} \frac{\Delta z_{k-1}}{\Delta z_{k-1} + \Delta z_k} f_{i,j,k} + \frac{\Delta x_i}{\Delta x_{i-1} + \Delta x_i} \frac{\Delta z_{k-1}}{\Delta z_{k-1} + \Delta z_k} f_{i-1,j,k} \\ &+ \frac{\Delta x_{i-1}}{\Delta x_{i-1} + \Delta x_i} \frac{\Delta z_k}{\Delta z_{k-1} + \Delta z_k} f_{i,j,k-1} + \frac{\Delta x_i}{\Delta x_{i-1} + \Delta x_i} \frac{\Delta z_k}{\Delta z_{k-1} + \Delta z_k} f_{i-1,j,k-1} \end{aligned} \quad (3.32)$$

また、1次風上差分のための以下の記述も用意する。

$$\langle c|a,b \rangle = \begin{cases} ca: (c \geq 0) \\ cb: (c < 0) \end{cases} \quad (3.33)$$



(a) スカラ量



(b) x 方向流速

図-3.2 空間方向の微小量とコントロールボリューム

### 3.3.2 コントロール・ボリューム法にもとづく変形

コントロール・ボリューム法<sup>13)</sup>では、求めるべき物理量 ( $u_{i,j,k}$ ,  $v_{i,j,k}$ ,  $w_{i,j,k}$ ,  $F_{i,j,k}$ ) の周囲にコント



ロール・ボリュームを設定し、その界面をとおして流入出する量およびコントロール・ボリューム内で生成消滅する量を考える。なお、図-3.2 に示したように、スタガード格子系では物理量によってコントロール・ボリュームの設定位置が異なる。

コントロール・ボリューム法により空間方向の離散化を行うため、式(3.15)から式(3.17)およびEuler 法により離散化した式(2.7)を以下のように変形する。

$$\begin{aligned} u^{\sim} = u + \frac{\Delta t}{\lambda_v} \frac{\partial}{\partial x} \left\{ -\lambda_x uu + \gamma_x v_e \left( 2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\Delta t}{\lambda_v} \frac{\partial}{\partial y} \left\{ -\lambda_y vu + \gamma_y v_e \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right\} \\ + \frac{\Delta t}{\lambda_v} \frac{\partial}{\partial z} \left\{ -\lambda_z wu + \gamma_z v_e \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\Delta t}{\lambda_v} \left( -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \gamma_v D_x u - R_x + \gamma_v S_u \right) \end{aligned} \quad (3.34)$$

$$\begin{aligned} v^{\sim} = v + \frac{\Delta t}{\lambda_v} \frac{\partial}{\partial x} \left\{ -\lambda_x uv + \gamma_x v_e \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right\} + \frac{\Delta t}{\lambda_v} \frac{\partial}{\partial y} \left\{ -\lambda_y vv + \gamma_y v_e \left( 2 \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right\} \\ + \frac{\Delta t}{\lambda_v} \frac{\partial}{\partial z} \left\{ -\lambda_z wv + \gamma_z v_e \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right\} + \frac{\Delta t}{\lambda_v} \left( -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - \gamma_v D_y v - R_y + \gamma_v S_v \right) \end{aligned} \quad (3.35)$$

$$\begin{aligned} w^{\sim} = w + \frac{\Delta t}{\lambda_v} \frac{\partial}{\partial x} \left\{ -\lambda_x uw + \gamma_x v_e \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right\} + \frac{\Delta t}{\lambda_v} \frac{\partial}{\partial y} \left\{ -\lambda_y vw + \gamma_y v_e \left( \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right\} \\ + \frac{\Delta t}{\lambda_v} \frac{\partial}{\partial z} \left\{ -\lambda_z ww + \gamma_z v_e \left( 2 \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} + \frac{\Delta t}{\lambda_v} \left( -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - \gamma_v D_z w - R_z + \gamma_v S_w - \frac{\gamma_v \rho^* g}{\rho} \right) \end{aligned} \quad (3.36)$$

$$F^{n+1} = F + \frac{\Delta t}{\gamma_v} \frac{\partial}{\partial x} (-\gamma_x u F) + \frac{\Delta t}{\gamma_v} \frac{\partial}{\partial y} (-\gamma_y v F) + \frac{\Delta t}{\gamma_v} \frac{\partial}{\partial z} (-\gamma_z w F) + \Delta t S_F \quad (3.37)$$

ここで、各式の右辺の第2項から第4項が界面をとおして流入出する量、第5項がコントロール・ボリューム内で生成消滅する量となる。

### 3.3.3 Navier-Stokes 方程式：x 方向流速

界面をとおして流入出する量を図-3.2 内の記号で、また、コントロール・ボリューム内で生成消滅する量を  $QU_{i,j,k}$  と記述することとし、式(3.34)を離散化すると

$$u^{\sim} = u + \left[ \frac{\Delta t}{\lambda_v} \right]_{i,j,k} \left\{ \frac{1}{\Delta x_i} (FLUU_{i,j,k} - FLUU_{i-1,j,k}) + \frac{1}{\Delta y_j} (FLUV_{i,j+1,k} - FLUV_{i,j,k}) \right. \\ \left. + \frac{1}{\Delta z_k} (FLUW_{i,j,k+1} - FLUW_{i,j,k}) + QU_{i,j,k} \right\} \quad (3.38)$$

となる。以下、 $(i, j, k)$  の項について示す。

$$\textcircled{1} FLUU_{i,j,k} = \left\{ -\lambda_x uu + \gamma_x v_e \left( 2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\}_{i,j,k}$$

$$\left(\lambda_x uu\right)_{i,j,k} = \left\langle \left\{ \lambda_x u \right\}_{i,j,k}^{\delta x} \middle| u_{i,j,k}, u_{i+1,j,k} \right\rangle \dots\dots\dots (3.39)$$

$$\left\{ \gamma_x v_e \left( 2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\}_{i,j,k} = \left\{ \gamma_x \right\}_{i,j,k}^{\delta x} v_{e,i,j,k} \left[ 2 \frac{u_{i+1,j,k} - u_{i,j,k}}{\Delta x_i} \right] \dots\dots\dots (3.40)$$

$$\textcircled{2} FLUV_{i,j,k} = \left\{ -\lambda_y vu + \gamma_y v_e \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right\}_{i,j,k}$$

$$\left(\lambda_y vu\right)_{i,j,k} = \left\langle \left[ \lambda_y v \right]_{i,j,k}^{\Delta x} \middle| u_{i,j-1,k}, u_{i,j,k} \right\rangle \dots\dots\dots (3.41)$$

$$\left\{ \gamma_y v_e \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right\}_{i,j,k} = \left[ \gamma_y \right]_{i,j,k}^{\Delta x} \left\{ \left\{ v_e \right\}_{i,j,k}^{\Delta x} \right\}_{i,j,k}^{\Delta y} \left[ \frac{u_{i,j,k} - u_{i,j-1,k}}{\delta y_j} + \frac{v_{i,j,k} - v_{i-1,j,k}}{\delta x_i} \right] \dots\dots\dots (3.42)$$

$$\textcircled{3} FLUW_{i,j,k} = \left\{ -\lambda_z wu + \gamma_z v_e \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right\}_{i,j,k}$$

$$\left(\lambda_z wu\right)_{i,j,k} = \left\langle \left[ \lambda_z w \right]_{i,j,k}^{\Delta x} \middle| u_{i,j,k-1}, u_{i,j,k} \right\rangle \dots\dots\dots (3.43)$$

$$\left\{ \gamma_z v_e \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right\}_{i,j,k} = \left[ \gamma_z \right]_{i,j,k}^{\Delta x} \left\{ \left\{ v_e \right\}_{i,j,k}^{\Delta x} \right\}_{i,j,k}^{\Delta z} \left[ \frac{u_{i,j,k} - u_{i,j,k-1}}{\delta z_k} + \frac{w_{i,j,k} - w_{i-1,j,k}}{\delta x_i} \right] \dots\dots\dots (3.44)$$

$$\textcircled{4} QU_{i,j,k} = \left( -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \gamma_v D_x u - R_x + \gamma_v S_u \right)_{i,j,k}$$

$$\left( \frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \right)_{i,j,k} = \frac{\left[ \gamma_v \right]_{i,j,k}^{\Delta x}}{\rho} \left[ \frac{P_{i,j,k} - P_{i-1,j,k}}{\delta x_i} \right] \dots\dots\dots (3.45)$$

$$\left( \gamma_v D_x u \right)_{i,j,k} = \left[ \gamma_v \right]_{i,j,k}^{\Delta x} D_{xi,j,k} u_{i,j,k}^{n+1} \dots\dots\dots (3.46)$$

$$\left( R_x \right)_{i,j,k} = \frac{1}{2} \frac{\left[ C_D \right]_{i,j,k}^{\Delta x}}{\delta x_i} \left( 1 - \gamma_{xi,j,k} \right) u_{i,j,k} \sqrt{u_{i,j,k}^2 + \left( \left\{ \left\{ v \right\}_{i,j,k}^{\delta y} \right\}_{i,j,k}^{\Delta x} \right)^2 + \left( \left\{ \left\{ w \right\}_{i,j,k}^{\delta z} \right\}_{i,j,k}^{\Delta x} \right)^2} \dots\dots\dots (3.47)$$

$$\left( \gamma_v S_u \right)_{i,j,k} = \left[ \gamma_v \right]_{i,j,k}^{\Delta x} u_{i,j,k} q_k \frac{\Delta x_s}{2 \delta x_i} \dots\dots\dots (3.48)$$

ここで、人為的に設定したエネルギー減衰項が計算を不安定にさせないよう、式(3.46)は陰的に取り扱うことにした。また、式(3.48)は造波ソースを設定したセルの左右で計算されるため、ソース量を格子間隔に合わせて配分した。

### 3.3.4 Navier-Stokes 方程式：y 方向流速

界面をとおして流入出する量を図-3.2 内の記号と同様に  $FLVU_{i,j,k}$  および  $FLVW_{i,j,k}$  等と、また、コントロール・ボリューム内で生成消滅する量を  $QV_{i,j,k}$  と記述することとし、式(3.35)を離散化すると

$$v^{\sim} = v + \left[ \lambda_v \right]_{i,j,k}^{\Delta y} \left\{ \frac{1}{\Delta x_i} (FLVU_{i+1,j,k} - FLVU_{i,j,k}) + \frac{1}{\delta y_j} (FLVV_{i,j,k} - FLVV_{i,j-1,k}) \right. \\ \left. + \frac{1}{\Delta z_k} (FLVW_{i,j,k+1} - FLVW_{i,j,k}) + QV_{i,j,k} \right\} \dots\dots\dots (3.49)$$

となる。以下、 $(i, j, k)$ の項について示す。

$$\textcircled{1} FLVU_{i,j,k} = \left\{ -\lambda_x uv + \gamma_x v_e \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right\}_{i,j,k} \\ (\lambda_x uv)_{i,j,k} = \left\langle \left[ \lambda_x u \right]_{i,j,k}^{\Delta x} \middle| v_{i-1,j,k}, v_{i,j,k} \right\rangle \dots\dots\dots (3.50)$$

$$\left\{ \gamma_x v_e \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right\}_{i,j,k} = \left[ \gamma_x \right]_{i,j,k}^{\Delta x} \left\{ \left\{ v_e \right\}_{i,j,k}^{\Delta x} \right\}_{i,j,k}^{\Delta y} \left[ \frac{v_{i,j,k} - v_{i-1,j,k}}{\delta x_i} + \frac{u_{i,j,k} - u_{i,j-1,k}}{\delta y_i} \right] \dots\dots\dots (3.51)$$

$$\textcircled{2} FLVV_{i,j,k} = \left\{ -\lambda_y vv + \gamma_y v_e \left( 2 \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right\}_{i,j,k} \\ (\lambda_y vv)_{i,j,k} = \left\langle \left\{ \lambda_y v \right\}_{i,j,k}^{\delta y} \middle| v_{i,j,k}, v_{i,j+1,k} \right\rangle \dots\dots\dots (3.52)$$

$$\left\{ \gamma_y v_e \left( 2 \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right\}_{i,j,k} = \left\{ \gamma_y \right\}_{i,j,k}^{\delta y} v_{e,i,j,k} \left[ 2 \frac{v_{i,j+1,k} - v_{i,j,k}}{\Delta y_j} \right] \dots\dots\dots (3.53)$$

$$\textcircled{3} FLVW_{i,j,k} = \left\{ -\lambda_z wv + \gamma_z v_e \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right\}_{i,j,k} \\ (\lambda_z wv)_{i,j,k} = \left\langle \left[ \lambda_z w \right]_{i,j,k}^{\Delta z} \middle| v_{i,j,k-1}, v_{i,j,k} \right\rangle \dots\dots\dots (3.54)$$

$$\left\{ \gamma_z v_e \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right\}_{i,j,k} = \left[ \gamma_z \right]_{i,j,k}^{\Delta z} \left\{ \left\{ v_e \right\}_{i,j,k}^{\Delta x} \right\}_{i,j,k}^{\Delta z} \left[ \frac{v_{i,j,k} - v_{i,j,k-1}}{\delta z_k} + \frac{w_{i,j,k} - w_{i,j-1,k}}{\delta y_i} \right] \dots\dots\dots (3.55)$$

$$\textcircled{4} QV_{i,j,k} = \left( -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - \gamma_v D_y v - R_y + \gamma_v S_v \right)_{i,j,k} \\ \left( \frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \right)_{i,j,k} = \frac{\left[ \gamma_v \right]_{i,j,k}^{\Delta y}}{\rho} \left[ \frac{P_{i,j,k} - P_{i,j-1,k}}{\delta y_j} \right] \dots\dots\dots (3.56)$$

$$(\gamma_v D_y v)_{i,j,k} = \left[ \gamma_v \right]_{i,j,k}^{\Delta y} D_{yi,j,k} v_{i,j,k}^{n+1} \dots\dots\dots (3.57)$$

$$(R_y)_{i,j,k} = \frac{1}{2} \frac{[C_D]_{i,j,k}^{\Delta y}}{\delta y_j} (1 - \gamma_{yi,j,k}) v_{i,j,k} \sqrt{\left( \left\{ \{u\}_{i,j,k}^{\delta x} \right\}_{i,j,k}^{\Delta y} \right)^2 + v_{i,j,k}^2 + \left( \left\{ \{w\}_{i,j,k}^{\delta z} \right\}_{i,j,k}^{\Delta y} \right)^2} \quad (3.58)$$

$$(\gamma_v S_v)_{i,j,k} = [\gamma_v]_{i,j,k}^{\Delta y} v_{i,j,k} q_k \frac{\Delta y_s}{2 \delta y_j} \quad (3.59)$$

### 3.3.5 Navier-Stokes 方程式 : z 方向流速

界面をとおして流入出する量を図-3.2 内の記号と同様に  $FLWU_{i,j,k}$  および  $FLWW_{i,j,k}$  等と、また、コントロール・ボリューム内で生成消滅する量を  $QW_{i,j,k}$  と記述することとし、式(3.36)を離散化すると

$$w^{\sim} = w + \left[ \lambda_v \right]_{i,j,k}^{\Delta z} \left\{ \frac{1}{\Delta x_i} (FLWU_{i+1,j,k} - FLWU_{i,j,k}) + \frac{1}{\Delta y_j} (FLWV_{i,j+1,k} - FLWV_{i,j,k}) \right. \\ \left. + \frac{1}{\delta z_k} (FLWW_{i,j,k} - FLWW_{i,j,k-1}) + QW_{i,j,k} \right\} \quad (3.60)$$

となる。以下、 $(i, j, k)$  の項について示す。

$$\textcircled{1} FLWU_{i,j,k} = \left\{ -\lambda_x u w + \gamma_x v_e \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right\}_{i,j,k}$$

$$(\lambda_x u w)_{i,j,k} = \left\langle [\lambda_x u]_{i,j,k}^{\Delta x} w_{i-1,j,k}, w_{i,j,k} \right\rangle \quad (3.61)$$

$$\left\{ \gamma_x v_e \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right\}_{i,j,k} = [\gamma_x]_{i,j,k}^{\Delta x} \left\{ \{v_e\}_{i,j,k}^{\Delta x} \right\}_{i,j,k}^{\Delta z} \left[ \frac{w_{i,j,k} - w_{i-1,j,k}}{\delta x_i} + \frac{u_{i,j,k} - u_{i,j,k-1}}{\delta z_k} \right] \quad (3.62)$$

$$\textcircled{2} FLWV_{i,j,k} = \left\{ -\lambda_y v w + \gamma_y v_e \left( \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right\}_{i,j,k}$$

$$(\lambda_y v w)_{i,j,k} = \left\langle [\lambda_y v]_{i,j,k}^{\Delta y} w_{i,j-1,k}, w_{i,j,k} \right\rangle \quad (3.63)$$

$$\left\{ \gamma_y v_e \left( \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right\}_{i,j,k} = [\gamma_y]_{i,j,k}^{\Delta y} \left\{ \{v_e\}_{i,j,k}^{\Delta y} \right\}_{i,j,k}^{\Delta z} \left[ \frac{w_{i,j,k} - w_{i,j-1,k}}{\delta y_j} + \frac{v_{i,j,k} - v_{i,j,k-1}}{\delta z_k} \right] \quad (3.64)$$

$$\textcircled{3} FLWW_{i,j,k} = \left\{ -\lambda_z w w + \gamma_z v_e \left( 2 \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\}_{i,j,k}$$

$$(\lambda_z w w)_{i,j,k} = \left\langle \{ \lambda_z w \}_{i,j,k}^{\delta w} w_{i,j,k}, w_{i,j,k+1} \right\rangle \quad (3.65)$$

$$\left\{ \gamma_z v_e \left( 2 \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\}_{i,j,k} = \{ \gamma_z \}_{i,j,k}^{\delta z} v_{e,i,j,k} \left[ 2 \frac{w_{i,j,k+1} - w_{i,j,k}}{\Delta z_k} \right] \quad (3.66)$$

$$\textcircled{4} QW_{i,j,k} = \left( -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial \hat{p}}{\partial z} - \gamma_v D_z w - R_z + \gamma_v S_w - \frac{\gamma_v \rho^* g}{\rho} \right)_{i,j,k}$$

$$\left( \frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial \hat{p}}{\partial z} \right)_{i,j,k} = \frac{\lfloor \gamma_v \rfloor_{i,j,k}^{\Delta z}}{\rho} \left[ \frac{P_{i,j,k} - P_{i,j,k-1}}{\delta z_k} \right] \dots\dots\dots (3.67)$$

$$(\gamma_v D_z w)_{i,j,k} = \lfloor \gamma_v \rfloor_{i,j,k}^{\Delta z} D_{zi,j,k} w_{i,j,k}^{n+1} \dots\dots\dots (3.68)$$

$$(R_z)_{i,j,k} = \frac{1}{2} \frac{\lfloor C_D \rfloor_{i,j,k}^{\Delta z}}{\delta z_k} (1 - \gamma_{zi,j,k}) v_{i,j,k} \sqrt{\left( \left\{ \{u\}_{i,j,k}^{\delta x} \right\}_{i,j,k}^{\Delta z} \right)^2 + \left( \left\{ \{v\}_{i,j,k}^{\delta y} \right\}_{i,j,k}^{\Delta z} \right)^2 + w_{i,j,k}^2} \dots\dots\dots (3.69)$$

$$(\gamma_v S_w)_{i,j,k} = \lfloor \gamma_v \rfloor_{i,j,k}^{\Delta z} \left( w_{i,j,k} \frac{q_k + q_{k-1}}{2} + \frac{v}{3} \frac{q_k - q_{k-1}}{\delta z_k} \right) \dots\dots\dots (3.70)$$

$$\left( \frac{\gamma_v \rho^* g}{\rho} \right)_{i,j,k} = \left[ \gamma_v \frac{\rho^*}{\rho} \right]_{i,j,k}^{\Delta z} g \dots\dots\dots (3.71)$$

### 3.3.6 ポテンシャル関数 $\phi$ のPoisson方程式

式(3.18)に示したポテンシャル関数 $\phi$ のPoisson方程式の外側の微分を離散化し、連立1次方程式の係数行列の対称性を保つために両辺にセルの体積 $\Delta x_i \Delta y_j \Delta z_k$ を乗じると

$$\Delta y_j \Delta z_k \left\{ \left( \alpha_x \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_{i+1/2,j,k} - \left( \alpha_x \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_{i-1/2,j,k} \right\} + \Delta x_i \Delta z_k \left\{ \left( \alpha_y \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_{i,j+1/2,k} - \left( \alpha_y \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_{i,j-1/2,k} \right\}$$

$$+ \Delta x_i \Delta y_j \left\{ \left( \alpha_z \frac{\partial \phi}{\partial z} \right)_{i,j,k+1/2} - \left( \alpha_z \frac{\partial \phi}{\partial z} \right)_{i,j,k-1/2} \right\} = \Delta x_i \Delta y_j \Delta z_k \beta_{i,j,k} \dots\dots\dots (3.72)$$

となる。ここで、簡略化のために各係数を $\alpha$ および $\beta$ とまとめた。次に内側の微分を離散化すると

$$\Delta y_j \Delta z_k \left( \alpha_x \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_{i+1/2,j,k} = \frac{\Delta y_j \Delta z_k \alpha_{xi+1/2,j,k}}{\delta x_{i+1}} (\phi_{i+1,j,k} - \phi_{i,j,k}) \dots\dots\dots (3.73)$$

$$\Delta y_j \Delta z_k \left( \alpha_x \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_{i-1/2,j,k} = \frac{\Delta y_j \Delta z_k \alpha_{xi-1/2,j,k}}{\delta x_i} (\phi_{i,j,k} - \phi_{i-1,j,k}) \dots\dots\dots (3.74)$$

$$\Delta x_i \Delta z_k \left( \alpha_y \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_{i,j+1/2,k} = \frac{\Delta x_i \Delta z_k \alpha_{yi,j+1/2,k}}{\delta y_{j+1}} (\phi_{i,j+1,k} - \phi_{i,j,k}) \dots\dots\dots (3.75)$$

$$\Delta x_i \Delta z_k \left( \alpha_y \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_{i,j-1/2,k} = \frac{\Delta x_i \Delta z_k \alpha_{yi,j-1/2,k}}{\delta y_j} (\phi_{i,j,k} - \phi_{i,j-1,k}) \dots\dots\dots (3.76)$$

$$\Delta x_i \Delta y_j \left( \alpha_z \frac{\partial \phi}{\partial z} \right)_{i,j,k+1/2} = \frac{\Delta x_i \Delta y_j \alpha_{zi,j,k+1/2}}{\delta z_{k+1}} (\phi_{i,j,k+1} - \phi_{i,j,k}) \quad (3.77)$$

$$\Delta x_i \Delta y_j \left( \alpha_z \frac{\partial \phi}{\partial z} \right)_{i,j,k-1/2} = \frac{\Delta x_i \Delta y_j \alpha_{zi,j,k-1/2}}{\delta z_k} (\phi_{i,j,k} - \phi_{i,j,k-1}) \quad (3.78)$$

となる。これらをまとめて、連立1次方程式を書き下すと以下ようになる。

$$\begin{aligned} & A_{i,j,k}^{KM} \phi_{i,j,k-1} + A_{i,j,k}^{JM} \phi_{i,j-1,k} + A_{i,j,k}^{IM} \phi_{i-1,j,k} + A_{i,j,k}^D \phi_{i,j,k} \\ & + A_{i,j,k}^{IP} \phi_{i+1,j,k} + A_{i,j,k}^{JP} \phi_{i,j+1,k} + A_{i,j,k}^{KP} \phi_{i,j,k+1} = B_{i,j,k} \end{aligned} \quad (3.79)$$

ここで

$$A_{i,j,k}^{KM} = \frac{\Delta x_i \Delta y_j \alpha_{zi,j,k-1/2}}{\delta z_k} \quad (3.80)$$

$$A_{i,j,k}^{JM} = \frac{\Delta x_i \Delta z_j \alpha_{yi,j-1/2,k}}{\delta y_j} \quad (3.81)$$

$$A_{i,j,k}^{IM} = \frac{\Delta y_j \Delta z_i \alpha_{xi-1/2,j,k}}{\delta x_i} \quad (3.82)$$

$$A_{i,j,k}^{IP} = \frac{\Delta y_j \Delta z_i \alpha_{xi+1/2,j,k}}{\delta x_{i+1}} \quad (3.83)$$

$$A_{i,j,k}^{JP} = \frac{\Delta x_i \Delta z_j \alpha_{yi,j+1/2,k}}{\delta y_{j+1}} \quad (3.84)$$

$$A_{i,j,k}^{KP} = \frac{\Delta x_i \Delta y_j \alpha_{zi,j,k+1/2}}{\delta z_{k+1}} \quad (3.85)$$

$$A_{i,j,k}^D = - \left( A_{i,j,k}^{KM} + A_{i,j,k}^{JM} + A_{i,j,k}^{IM} + A_{i,j,k}^{IP} + A_{i,j,k}^{JP} + A_{i,j,k}^{KP} \right) \quad (3.86)$$

$$\alpha_{xi-1/2,j,k} = \gamma_{xi,j,k} \left[ \frac{\gamma_v}{\lambda_v} \right]_{i,j,k}^{\Delta x} \quad (3.87)$$

$$\alpha_{yi,j-1/2,k} = \gamma_{yi,j,k} \left[ \frac{\gamma_v}{\lambda_v} \right]_{i,j,k}^{\Delta y} \quad (3.88)$$

$$\alpha_{zi,j,k-1/2} = \gamma_{zi,j,k} \left[ \frac{\gamma_v}{\lambda_v} \right]_{i,j,k}^{\Delta z} \quad (3.89)$$

$$B_{i,j,k} = \Delta x_i \Delta y_j \Delta z_k \left( \gamma_v S_\rho \right)_{i,j,k} - \left[ \begin{aligned} & \frac{\gamma_{xi+1,j,k} \tilde{u}_{i+1,j,k} - \gamma_{xi,j,k} \tilde{u}_{i,j,k}}{\Delta x_i} \\ & + \frac{\gamma_{yi,j+1,k} \tilde{v}_{i,j+1,k} - \gamma_{yi,j,k} \tilde{v}_{i,j,k}}{\Delta y_k} \\ & + \frac{\gamma_{zi,j,k+1} \tilde{w}_{i,j,k+1} - \gamma_{zi,j,k} \tilde{w}_{i,j,k}}{\Delta z_k} \end{aligned} \right] \quad (3.90)$$

### 3.3.7 流速および圧力補正式

式(3.19)から式(3.22)に示した流速および圧力補正式を離散化すると以下のとおりとなる。

$$u_{i,j,k}^{n+1} = \tilde{u}_{i,j,k} + \left[ \frac{\gamma_v}{\lambda_v} \right]_{i,j,k}^{\Delta x} \frac{\phi_{i,j,k} - \phi_{i-1,j,k}}{\delta x_i} \quad \text{..... (3.91)}$$

$$v_{i,j,k}^{n+1} = \tilde{v}_{i,j,k} + \left[ \frac{\gamma_v}{\lambda_v} \right]_{i,j,k}^{\Delta y} \frac{\phi_{i,j,k} - \phi_{i,j-1,k}}{\delta y_j} \quad \text{..... (3.92)}$$

$$w_{i,j,k}^{n+1} = \tilde{w}_{i,j,k} + \left[ \frac{\gamma_v}{\lambda_v} \right]_{i,j,k}^{\Delta z} \frac{\phi_{i,j,k} - \phi_{i,j,k-1}}{\delta z_k} \quad \text{..... (3.93)}$$

$$P_{i,j,k}^{n+1} = P_{i,j,k} - \frac{\rho}{\Delta t} \phi_{i,j,k} \quad \text{..... (3.94)}$$

### 3.3.8 VOF 関数 F の移流方程式

VOF 法では、表面の向きを示すフラグ NF と VOF 関数 F の移流方程式を逐次計算することで、自由表面の挙動を解析する。このため、表面の向きと移流方程式の離散化は非常に密接に関連している。以下では、まず表面の向きの決定方法を示し、その後にドナー・アクセプタ法および界面の傾きを考慮した方法による移流方程式の離散化を示す。

#### (1) 表面の向きの決定方法

VOF 法では、計算セル毎に流体セル、気体セルおよび表面セルの分類を行う。また、表面セルは離散化された向き（x 軸に垂直、y 軸に垂直または z 軸に垂直）を持ち、フラグ NF は

NF=0：流体セル

NF=1：表面セル（表面は x 軸に垂直で、かつ、x 軸の負の方向に流体がある）

NF=2：表面セル（表面は x 軸に垂直で、かつ、x 軸の正の方向に流体がある）

NF=3：表面セル（表面は y 軸に垂直で、かつ、y 軸の負の方向に流体がある）

NF=4：表面セル（表面は y 軸に垂直で、かつ、y 軸の正の方向に流体がある）

NF=5：表面セル（表面は z 軸に垂直で、かつ、z 軸の負の方向に流体がある）

NF=6：表面セル（表面は z 軸に垂直で、かつ、z 軸の正の方向に流体がある）

NF=8：気体セル

と設定される。フラグ NF によるセルの分類を図-3.3（a）に示す。

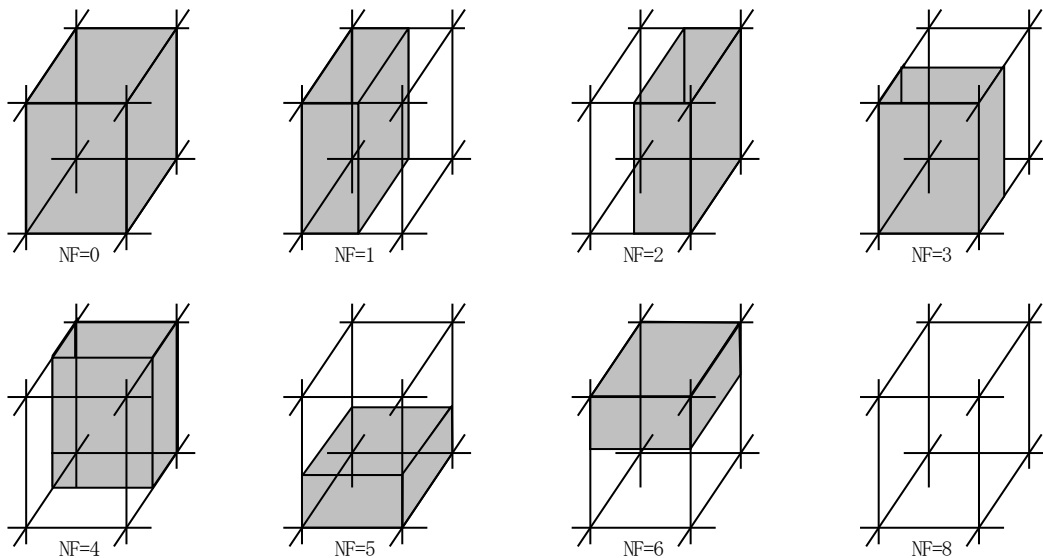
計算セルを流体セル、気体セルおよび表面セルに分類するときには注意が必要なことは、自由表面における境界条件の処理が意味のあるものとするものである。このため、表面セルが満足すべき条件として、 $0 < F < 1$  であることに加えて、表面セルは流体セルと気体セルに挟まれている必要がある。これらの条件を満足するような表面セルを以下の方法で決定した。

- ①全ての計算セルを流体セルとする
- ② $F=0$  ならば気体セルとする
- ③気体セルに隣接したセルを表面セルとする
- ④表面セルのうち流体セルに隣接していないセルを気体セルとする
- ⑤表面セルのうち流体セルと気体セルに挟まれていないセルを検索する
- ⑥⑤で検索されたセルを気体セルに変更する
- ⑦⑥の操作で変更されるセルがなくなるまで③から⑤を繰り返す

これらの処理で決定される表面セルには、図-3.3 (b) に示すような例の  $0 < F < 1$  のセルは含まれない。しながら、図-3.3 (b) に示したような例は格子の解像度以下になった液滴や気泡を無視することであり、計算を安定に進めるためには止むを得ない処理である。

上記の処理で表面セルと分類されたセルについて、以下の方法で表面の向きを決定した。

- ①流体セルー表面セルー気体セルの並びが一意ならばその方向とする
- ②流体セルー表面セルー気体セルを満足する方向のうち、周囲の  $F$  の値が大きい方向に流体があるものとする





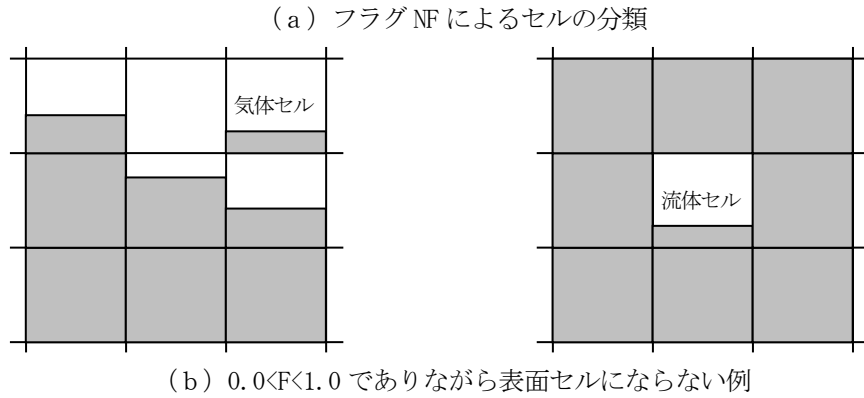


図-3.3 計算セルの分類

## (2) ドナー・アクセプタ法

ドナー・アクセプタ法では、表面の向きにより見かけ上の風上差分と風下差分を使い分け、表面がぼやけることを防ぐ。また、ドナーセルに含まれる水の量を上限として移流量を決定する。ドナー・アクセプタ法の概念を図-3.4 に、離散式を以下に示す。

界面をとおして流入出する量を図-3.2 内の記号で、また、コントロール・ボリューム内で生成消滅する量を  $QF_{i,j,k}$  と記述することとし、式(3.37)を離散化すると

$$F_{i,j,k}^{n+1} = F_{i,j,k}^n + \frac{1}{\gamma_{v,i,j,k}} \left( \frac{1}{\Delta x_i} [FLFU_{i+1,j,k} - FLFU_{i,j,k}] + \frac{1}{\Delta y_j} [FLFV_{i,j+1,k} - FLFV_{i,j,k}] + \frac{1}{\Delta z_k} [FLFW_{i,j,k+1} - FLFW_{i,j,k}] + \Delta t QF_{i,j,k} \right) \quad (3.95)$$

となる。なお、ドナー・アクセプタ法を用いるため、界面から流入出する量に  $\Delta t$  を含ませた。以下、 $FLFU_{i,j,k}$  と  $\Delta t QF_{i,j,k}$  の項についてのみ示すが、 $F$  はセル中心で定義されているため、界面をとおして流入出する量の離散式には方向依存性がなく、サフィックスを読み替えることで記述が可能である。

$$\textcircled{1} FLFU_{i,j,k} = (-\Delta t \gamma_x u F)_{i,j,k}$$

$$(\Delta t \gamma_x u F)_{i,j,k} = \text{sign}(C) \min(F_{AD} |C| + CFX, F_D \Delta x_D \gamma_{vD}) \quad (3.96)$$

$$CFX = \max[(F_{DM} - F_{AD})|C| - (F_{DM} - F_D) \Delta x_D \gamma_{vD}, 0]$$

$$C = \Delta t \gamma_{xi,j,k} u_{i,j,k}$$

$$F_{AD} = \begin{cases} F_D: \text{界面とドナー側の水面が垂直} \\ F_A: \text{上記以外} \end{cases}$$

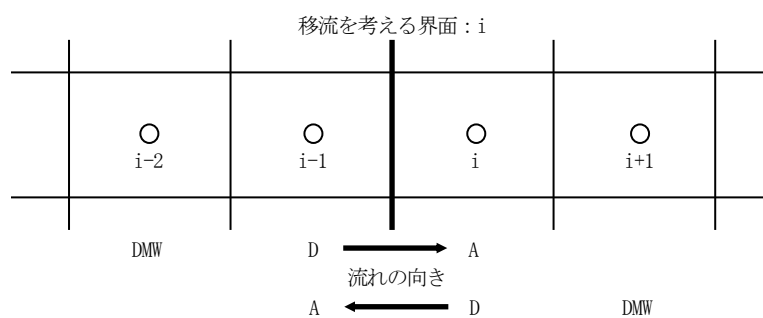
$$F_{DM} = \max(F_{DMW}, F_D)$$

$$C \geq 0 : DMW = i-2, D = i-1, A = i$$

$$C < 0 : DMW = i+1, D = i, A = i-1$$

$$\textcircled{2} QF_{i,j,k} = (S_F)_{i,j,k}$$

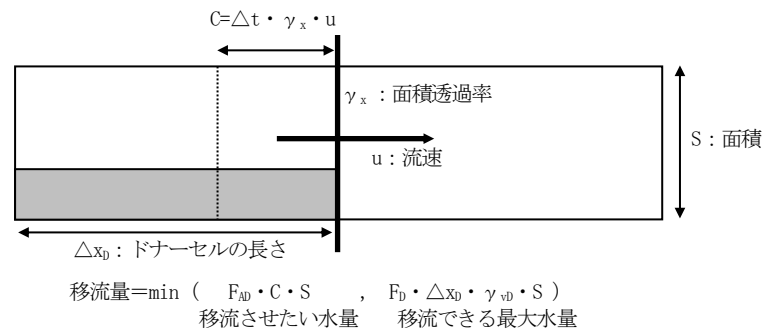
$$(S_F)_{i,j,k} = F_{i,j,k} q_{i,j,k} \quad \text{-----} \quad (3.97)$$



(a) 界面の流速の正負によるサフィックスの変化

	表面が界面に垂直	表面が界面に水平	
表面形状			
移流量	 サフィックス AD を D とする	 サフィックス AD を A とする	 サフィックス AD を A とする
	見かけ上の風上差分	見かけ上の風下差分	

(b) 界面を基準とした表面セルの分類と移流量



(c) 制限付きの移流量 (サフィックス AD は A または D)

図-3.4 ドナー・アクセプタ法の概念

### (3) 界面の傾きを考慮した方法

ドナー・アクセプタ法では、図-3.5(b)に示すとおり、界面を計算格子に垂直に設定するため移流量の精度が低下するという問題がある。この問題に対処するため、図-3.5(c)に示すとおり、界面を1次関数（3次元では平面）で表現し、その傾きを考慮する方法<sup>14)</sup>を導入した。なお、傾きを考慮するのはVOF関数Fの移流項についてであり、界面における流速の設定や圧力に関する計算は既存の方法で行うこととした。

界面の傾きを考慮した方法の計算手順は以下のとおりとなる。

- ①法線ベクトルの算出：VOF関数Fを数値微分し界面の法線ベクトルを算出する
- ②界面パターンの分類：法線の向きおよび移流方向から界面のパターン进行分类する
- ③界面の決定：計算セルに含まれる流体の量から界面の方程式を決定する
- ④移流量の算出：界面の方程式および移流速度から移流量を算出する

なお、簡単のため、以下では2次元（界面は1次関数）で記述する。

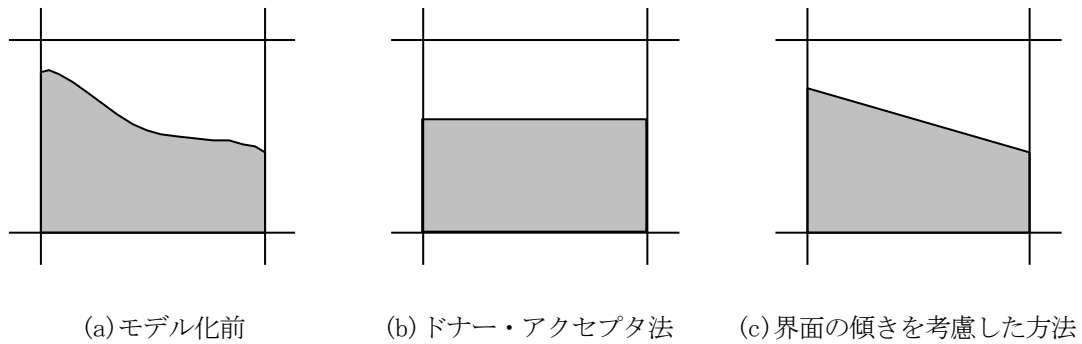


図-3.5 界面のモデル化

#### ①法線ベクトルの算出

界面の法線ベクトルの算出方法としては、図-3.6に示すとおり

- ・セル中心で算出する
- ・格子点で算出し、セル中心の値は周りの格子点の値の平均とする

の2つが考えられるが、CADMAS-SURF/3D-MPの境界値の確保位置との整合性から、次式を用いてセル中心で算出した。

$$n_{xi,k} = -\frac{\partial F}{\partial x} = \frac{F_{i-1,k} - F_{i+1,k}}{\delta x_i + \delta x_{i+1}} \quad \text{..... (3.98)}$$

$$n_{zi,k} = -\frac{\partial F}{\partial z} = \frac{F_{i,k-1} - F_{i,k+1}}{\delta z_k + \delta z_{k+1}} \quad \text{..... (3.99)}$$

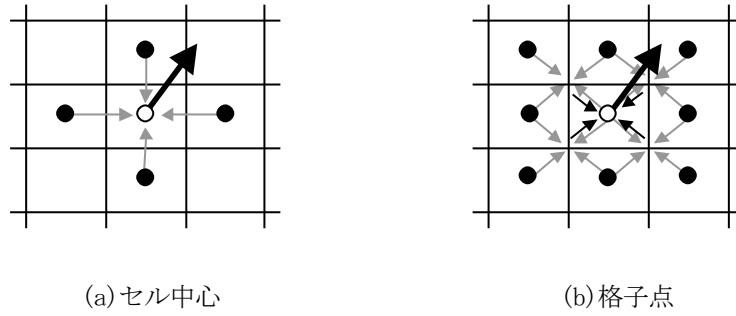


図-3.6 法線ベクトルの算出

## ②界面パターンの分類

処理が複雑になることを避けるため、法線の向きおよび移流方向から界面のパターン进行分类する。まず、図-3.7 に示すとおり、移流方向を水平方向と考え、流体を供給する側のセルの左右のどちら側から流出するか、のフラグ  $ISW$  を設定する。次に、界面の法線ベクトルの成分を常に正として考えられるように、法線ベクトルの向きから、フラグ  $ISW$  および法線ベクトル成分の正負を逆転する（図-3.8 参照）。

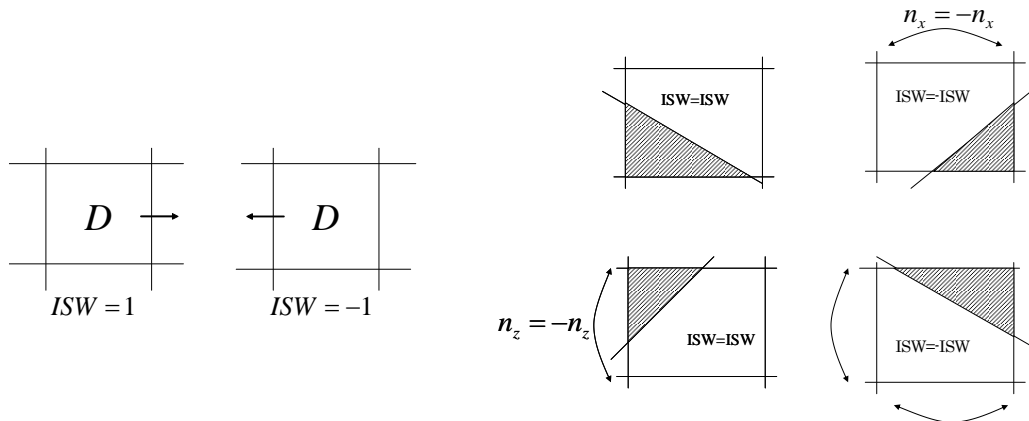


図-3.7 フラグ  $ISW$

図-3.8 正負の逆転

上記の処理により、水平方向の座標を  $c_1$ 、鉛直方向の座標を  $c_2$  とし、それぞれの方向の格子間隔を  $\Delta c_1$ 、 $\Delta c_2$  とすると、対象とするセルと考えるべき界面（1 次関数）は下図のとおりとなる。

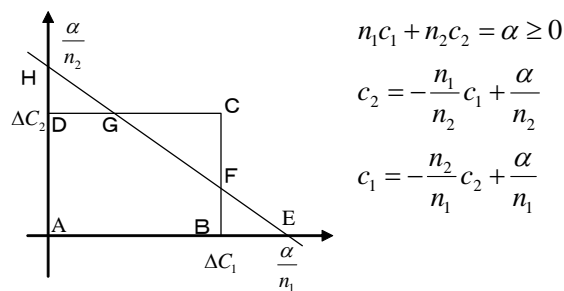


図-3.9 対象とするセルと考えるべき界面

なお、原点をゼロとし流体が占める面積（ABFGD）をゼロ以上とすれば、図-3.8 の 1 次関数の定数  $\alpha$  はゼロ以上となる。

対象とするセルと考えるべき界面が決定したため、最後に界面のパターン进行分类する。法線ベクトルの長さがゼロ（流体セルや気体セル）や、移流方向に垂直または水平であれば、ドナー・アクセプタ法と同様に計算する（図-3.10 参照）。

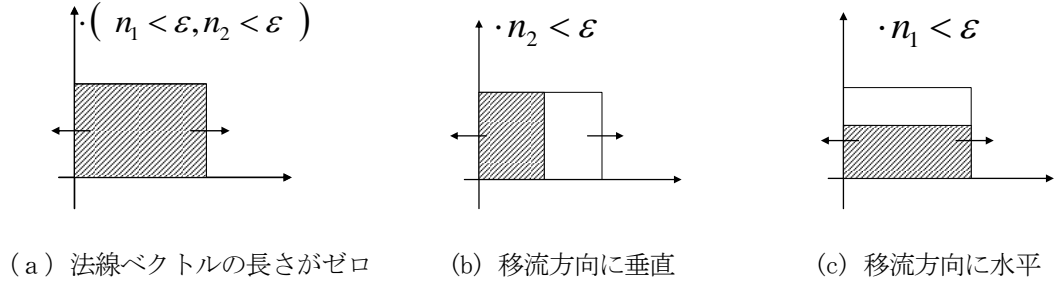


図-3.10 ドナー・アクセプタ法と同様に計算するパターン

界面が傾斜している場合には、以下の 6 パターンに分類する。

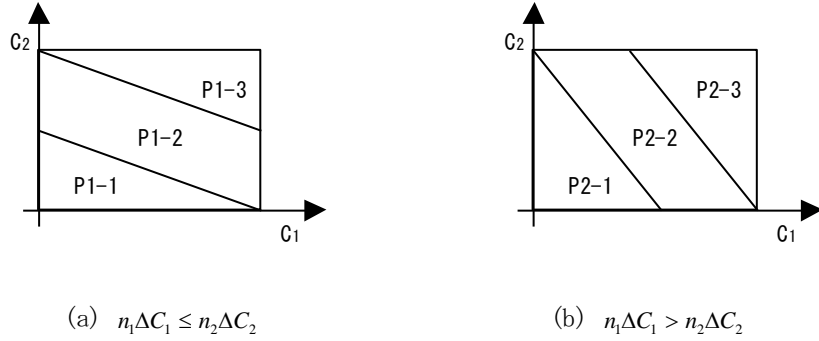


図-3.11 界面が傾斜している場合のパターン

流体が占める面積を  $V_{give}$  とすると、この分類の詳細は以下のとおりとなる。

●図-3.11(a) の場合 ( $n_1 \Delta C_1 \leq n_2 \Delta C_2$ )

・P1-1：界面が点 B をとおる場合の面積を  $V_{lim}$  とすると、 $\frac{\alpha}{n_1} = \Delta C_1$  から  $V_{lim} = \frac{\alpha}{n_1} \times \frac{\alpha}{n_2} \times \frac{1}{2} = \frac{1}{2} \frac{\alpha^2}{n_1 n_2}$  である。

よって、 $V_{give} \leq V_{lim}$  であれば P1-1 のパターンである。後に必要となる値は  $H_1 = H_2 = 0.0$ 。

ここで、 $H_1 = H(\alpha - n_1 \Delta C_1)$ 、 $H_2 = H(\alpha - n_2 \Delta C_2)$ 、 $H(x) = 0$  for  $x \leq 0$ ,  $1$  for  $x > 0$  である。

・P1-3：界面が点 D をとおる場合の面積を  $V_{lim}$  とすると、 $\frac{\alpha}{n_2} = \Delta C_2$  から  $V_{lim} = \frac{\Delta C_1}{2} \left( 2\Delta C_2 - \frac{n_1}{n_2} \Delta C_1 \right)$  である。

よって、 $V_{give} > V_{lim}$  であれば P1-3 のパターンである。後に必要となる値は  $H_1 = 1.0, H_2 = 1.0$ 。

・ P1-2 : P1-1 および P1-3 のパターンでなければ P1-2 である。後に必要となる値は  $H_1 = 1.0, H_2 = 0.0$ 。

● 図-3. 11 (b) の場合 ( $n_1 \Delta C_1 > n_2 \Delta C_2$ )

・ P2-1 : 界面が点 D をとおる場合の面積を  $V_{lim}$  とすると、 $\frac{\alpha}{n_2} = \Delta C_2$  から  $V_{lim} = \frac{\alpha}{n_1} \times \frac{\alpha}{n_2} \times \frac{1}{2} = \frac{1}{2} \frac{\alpha^2}{n_1 n_2}$  である。

よって、 $V_{give} \leq V_{lim}$  であれば P2-1 のパターンである。後に必要となる値は  $H_1 = H_2 = 0.0$ 。

・ P2-3 : 界面が点 B をとおる場合の面積を  $V_{lim}$  とすると、 $\frac{\alpha}{n_1} = \Delta C_1$  から  $V_{lim} = \frac{\Delta C_2}{2} \left( 2\Delta C_1 - \frac{n_2}{n_1} \Delta C_2 \right)$  である。

よって、 $V_{give} > V_{lim}$  であれば P2-3 のパターンである。後に必要となる値は  $H_1 = 1.0, H_2 = 1.0$ 。

・ P2-2 : P2-1 および P2-3 のパターンでなければ P2-2 である。後に必要となる値は  $H_1 = 0.0, H_2 = 1.0$ 。

### ③界面の決定

計算セルに含まれる流体の量  $V_{give}$  から、界面の方程式

$$n_1 c_1 + n_2 c_2 = \alpha \quad \dots\dots\dots (3. 100)$$

の  $\alpha$  を決定する。流体の量  $V(\alpha)$  は前述の  $H_1$ 、 $H_2$  を用いて

$$\begin{aligned} V(\alpha) &= \Delta AEH - H_1 \times \Delta BEF - H_2 \times \Delta DGH \\ &= \frac{1}{2} \times \frac{\alpha}{n_1} \times \frac{\alpha}{n_2} - H_1 \times \frac{1}{2} \left( \frac{\alpha}{n_1} - \Delta C_1 \right) \left( -\frac{n_1}{n_2} \Delta C_1 + \frac{\alpha}{n_2} \right) \\ &\quad - H_2 \times \frac{1}{2} \left( \frac{\alpha}{n_2} - \Delta C_2 \right) \left( -\frac{n_2}{n_1} \Delta C_2 + \frac{\alpha}{n_1} \right) \\ &= \frac{\alpha^2}{2n_1 n_2} - H_1 \times \frac{1}{2} \left( \frac{\alpha - n_1 \Delta C_1}{n_1} \right) \left( \frac{\alpha - n_1 \Delta C_1}{n_2} \right) - H_2 \times \frac{1}{2} \left( \frac{\alpha - n_2 \Delta C_2}{n_2} \right) \left( \frac{\alpha - n_2 \Delta C_2}{n_1} \right) \quad \dots\dots\dots (3. 101) \\ &= \frac{\alpha^2}{2n_1 n_2} - H_1 \times \frac{1}{2n_1 n_2} (\alpha - n_1 \Delta C_1)^2 - H_2 \times \frac{1}{2n_1 n_2} (\alpha - n_2 \Delta C_2)^2 \\ &= \frac{1}{2n_1 n_2} \left\{ \alpha^2 - H_1 (\alpha - n_1 \Delta C_1)^2 - H_2 (\alpha - n_2 \Delta C_2)^2 \right\} \end{aligned}$$

であるから、

$$V_{give} = V(\alpha) = A\alpha^2 + B\alpha + C \quad \dots\dots\dots (3. 102)$$

$$\begin{cases} A = (1 - H_1 - H_2) / 2n_1 n_2 \\ B = (2H_1 n_1 \Delta C_1 + 2H_2 n_2 \Delta C_2) / 2n_1 n_2 \\ C = (-H_1 n_1^2 \Delta C_1^2 - H_2 n_2^2 \Delta C_2^2) / 2n_1 n_2 \end{cases}$$

の 2 次方程式を解くことで、 $\alpha$  を決定することができる。

④移流量の算出

$\alpha$  が決定したことから、水平方向の座標値  $c_1$  を

$$\begin{cases} ISW = 1: c_1 = \Delta c_1 - \Delta t \gamma_1 |u| \\ ISW = -1: c_1 = \Delta t \gamma_1 |u| \end{cases} \quad \dots\dots\dots (3.103)$$

として、移流量  $V_{flx}$  を以下のとおり算出する。

●P1-1 または P2-1 (図-3.12(a) 参照)

$$\begin{cases} c_1 \geq P = \frac{\alpha}{n_1}: V_* = 0 \\ c_1 < P = \frac{\alpha}{n_1}: V_* = \frac{1}{2}(p - c_1) \left( -\frac{n_1}{n_2} c_1 + \frac{\alpha}{n_2} \right) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (3.104)$$

$$\begin{cases} ISW = 1: V_{flx} = V_* \\ ISW = -1: V_{flx} = V_{give} - V_* \end{cases} \quad \dots\dots\dots (3.105)$$

●P1-3 または P2-3 (図-3.12(b) 参照)

$$\begin{cases} c_1 \leq P = -\frac{n_2}{n_1} \Delta c_2 + \frac{\alpha}{n_1}: V_* = 0 \\ c_1 > P = -\frac{n_2}{n_1} \Delta c_2 + \frac{\alpha}{n_1}: V_* = \frac{1}{2}(c_1 - p) \left[ \Delta c_2 - \left( -\frac{n_1}{n_2} c_1 + \frac{\alpha}{n_2} \right) \right] \\ V_{**} = c_1 \Delta c_2 - V_* \end{cases} \quad \dots\dots\dots (3.106)$$

$$\begin{cases} ISW = 1: V_{flx} = V_{give} - V_{**} \\ ISW = -1: V_{flx} = V_{**} \end{cases} \quad \dots\dots\dots (3.107)$$

●P1-2 (図-3.12(c) 参照)

$$\begin{cases} c_{21} = -\frac{n_1}{n_2} 0 + \frac{\alpha}{n_2} = \frac{\alpha}{n_2} \\ c_{22} = -\frac{n_1}{n_2} c_1 + \frac{\alpha}{n_2} \\ V_{**} = \frac{1}{2} c_1 (c_{21} + c_{22}) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (3.108)$$

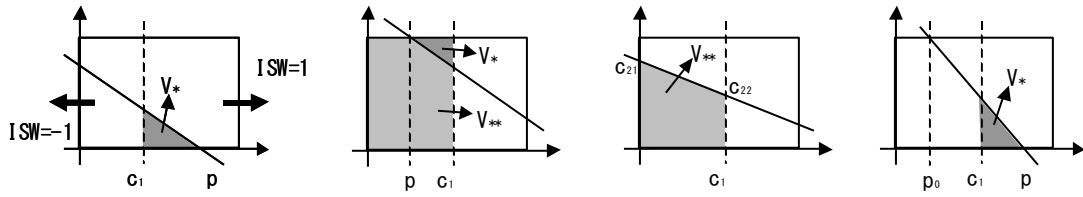
$$\begin{cases} ISW = 1: V_{flx} = V_{give} - V_{**} \\ ISW = -1: V_{flx} = V_{**} \end{cases} \quad \dots\dots\dots (3.109)$$



●P2-2 (図-3.12(d)参照)

$$\begin{cases} p_0 < c_1 \text{ \& } c_1 \geq P = \frac{\alpha}{n_1} : V_* = 0 \\ p_0 < c_1 \text{ \& } c_1 < P = \frac{\alpha}{n_1} : V_* = \frac{1}{2}(p - c_1) \left( -\frac{n_1}{n_2} c_1 + \frac{\alpha}{n_2} \right) \\ p_0 \geq c_1 : V_* = V_{give} - p_0 \Delta c_2 \end{cases} \dots\dots\dots (3.110)$$

$$\begin{cases} ISW = 1 : V_{flx} = V_* \\ ISW = -1 : V_{flx} = V_{give} - V_* \end{cases} \dots\dots\dots (3.111)$$



(a) P1-1 または P2-1

(b) P1-3 または P2-3

(c) P1-2

(d) P2-2

図-3.12 移流量の算出

### 3.3.9 k-ε 2 方程式モデル

界面をとおして流入出する量を図-3.2 内の記号と同様に  $FLKU_{i,j,k}$  および  $FLEU_{i,j,k}$  等と、また、コントロール・ボリューム内で生成消滅する量を  $QK_{i,j,k}$ 、 $QE_{i,j,k}$  と記述することとし、式(2.22)および式(2.23)を離散化すると

$$k_{i,j,k}^{n+1} = k_{i,j,k}^n + \frac{\Delta t}{\gamma_{vi,j,k}} \left( \frac{1}{\Delta x_i} [FLKU_{i+1,j,k} - FLKU_{i,j,k}] + \frac{1}{\Delta y_j} [FLKV_{i,j+1,k} - FLKV_{i,j,k}] + \frac{1}{\Delta z_k} [FLKW_{i,j,k+1} - FLKW_{i,j,k}] + QK_{i,j,k} \right) \dots\dots\dots (3.112)$$

$$\varepsilon_{i,j,k}^{n+1} = \varepsilon_{i,j,k}^n + \frac{\Delta t}{\gamma_{vi,j,k}} \left( \frac{1}{\Delta x_i} [FLEU_{i+1,j,k} - FLEU_{i,j,k}] + \frac{1}{\Delta y_j} [FLEV_{i,j+1,k} - FLEV_{i,j,k}] + \frac{1}{\Delta z_k} [FLEW_{i,j,k+1} - FLEW_{i,j,k}] + QE_{i,j,k} \right) \dots\dots\dots (3.113)$$

となる。なお、k および ε はセル中心で定義されているため、界面をとおして流入出する量の離散式は方向依存性がなく、サフィックスを読み替えることで記述が可能である。よって、以下では  $FLKU_{i,j,k}$ 、 $QK_{i,j,k}$  および  $QE_{i,j,k}$  についてのみ示す。

$$\textcircled{1} FLKU_{i,j,k} = \left( -\gamma_x uk + \gamma_x v_k \left[ \frac{\partial k}{\partial x} \right] \right)_{i,j,k}$$

$$(\gamma_x uk)_{i,j,k} = \langle (\gamma_x u)_{i,j,k} | k_{i-1,j,k}, k_{i,j,k} \rangle \quad \text{-----} \quad (3.114)$$

$$\left( \gamma_x v_k \left[ \frac{\partial k}{\partial x} \right] \right)_{i,j,k} = \gamma_{xi,j,k} \{v_k\}_{i,j,k}^{\Delta x} \left[ \frac{k_{i,j,k} - k_{i-1,j,k}}{\Delta x_i} \right] \quad \text{-----} \quad (3.115)$$

$$\textcircled{2} QK_{i,j,k} = (\gamma_v G_s - \gamma_v \varepsilon)_{i,j,k} = \gamma_{vi,j,k} G_{si,j,k} - \gamma_{vi,j,k} \varepsilon_{i,j,k} \quad \text{-----} \quad (3.116)$$

$$\textcircled{3} QE_{i,j,k} = (\gamma_v C_1 \frac{\varepsilon}{k} G_s - \gamma_v C_2 \frac{\varepsilon^2}{k})_{i,j,k} = \gamma_{vi,j,k} C_1 \frac{\varepsilon_{i,j,k}}{k_{i,j,k}} G_{si,j,k} - \gamma_{vi,j,k} C_2 \frac{\varepsilon_{i,j,k}^2}{k_{i,j,k}} \quad \text{-----} \quad (3.117)$$

なお、式(3.116)と式(3.117)中の $G_{si,k}$ は以下のとおりである。

$$G_{si,j,k} = \left( v_i \left[ 2 \left\{ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right\} + \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right] \right)_{i,j,k}$$

$$= v_{i,j,k} \left( 2 \left[ \left( \frac{u_{i+1,j,k} - u_{i,j,k}}{\Delta x_i} \right)^2 + \left( \frac{v_{i+1,j,k} - v_{i,j,k}}{\Delta y_j} \right)^2 + \left( \frac{w_{i,j,k+1} - w_{i,j,k}}{\Delta z_k} \right)^2 \right] + \left( \frac{\{u\}_{i,j+1,k}^{\Delta y} \}_{i,j,k}^{\partial x} - \{u\}_{i,j,k}^{\Delta y} \}_{i,j,k}^{\partial x}}{\Delta y_j} + \frac{\{v\}_{i+1,j,k}^{\Delta x} \}_{i,j,k}^{\partial y} - \{v\}_{i,j,k}^{\Delta x} \}_{i,j,k}^{\partial y}}{\Delta x_i} \right)^2 + \left( \frac{\{v\}_{i,j,k+1}^{\Delta z} \}_{i,j,k}^{\partial y} - \{v\}_{i,j,k}^{\Delta z} \}_{i,j,k}^{\partial y}}{\Delta z_k} + \frac{\{w\}_{i,j+1,k}^{\Delta y} \}_{i,j,k}^{\partial z} - \{w\}_{i,j,k}^{\Delta y} \}_{i,j,k}^{\partial z}}{\Delta y_j} \right)^2 + \left( \frac{\{w\}_{i+1,j,k}^{\Delta x} \}_{i,j,k}^{\partial z} - \{w\}_{i,j,k}^{\Delta x} \}_{i,j,k}^{\partial z}}{\Delta x_i} + \frac{\{u\}_{i,j,k+1}^{\Delta z} \}_{i,j,k}^{\partial x} - \{u\}_{i,j,k}^{\Delta z} \}_{i,j,k}^{\partial x}}{\Delta z_k} \right)^2 \right) \quad \text{-----} \quad (3.118)$$

### 3.3.10 エネルギー方程式

界面をとおして流入出する量を図-3.2内の記号と同様に $FLTU_{i,j,k}$ および $FLTU_{i,j,k}$ 等と、また、コントロール・ボリューム内で生成消滅する量を $QT_{i,j,k}$ と記述することとし、式(2.32)を離散化すると

$$T_{i,j,k}^{n+1} = T_{i,j,k}^n + \frac{\Delta t}{\gamma_{vi,j,k}} \left( \frac{1}{\Delta x_i} [FLTU_{i+1,j,k} - FLTU_{i,j,k}] + \frac{1}{\Delta y_j} [FLTV_{i,j+1,k} - FLTV_{i,j,k}] + \frac{1}{\Delta z_k} [FLTW_{i,j,k+1} - FLTW_{i,j,k}] + QT_{i,j,k} \right) \quad (3.119)$$

となる。なお、T はセル中心で定義されているため、界面をとおして流入出する量の離散式は方向依存性がなく、サフィックスを読み替えることで記述が可能である。よって、以下では  $FLTU_{i,j,k}$ 、 $QT_{i,j,k}$  についてのみ示す。

$$\textcircled{1} FLTU_{i,j,k} = \left( -\gamma_x u T + \frac{\gamma_x \lambda_e}{\rho_p} \left[ \frac{\partial T}{\partial x} \right] \right)_{i,j,k}$$

$$(\gamma_x u T)_{i,j,k} = \left\langle (\gamma_x u)_{i,j,k} \middle| T_{i-1,j,k}, T_{i,j,k} \right\rangle \quad (3.120)$$

$$\left( \frac{\gamma_x \lambda_e}{\rho_p} \left[ \frac{\partial T}{\partial x} \right] \right)_{i,j,k} = \frac{\gamma_{xi,j,k} \{\lambda_e\}_{i,j,k}^{\Delta x}}{\rho_p} \left[ \frac{T_{i,j,k} - T_{i-1,j,k}}{\delta x_i} \right] \quad (3.121)$$

$$\textcircled{2} QT_{i,j,k} = (\rho_p T q(z,t))_{i,j,k} = \rho_p T_{i,j,k} q(z,t)_{i,j,k} \quad (3.122)$$

### 3.3.11 濃度輸送方程式

界面をとおして流入出する量を図-3.2 内の記号と同様に  $FLCU_{i,j,k}$  および  $FLCV_{i,j,k}$  等と、また、コントロール・ボリューム内で生成消滅する量を  $QC_{i,j,k}$  と記述することとし、式(2.35)を離散化すると

$$c_{i,j,k}^{n+1} = c_{i,j,k}^n + \frac{\Delta t}{\gamma_{vi,j,k}} \left( \frac{1}{\Delta x_i} [FLCU_{i+1,j,k} - FLCU_{i,j,k}] + \frac{1}{\Delta y_j} [FLCV_{i,j+1,k} - FLCV_{i,j,k}] + \frac{1}{\Delta z_k} [FLCW_{i,j,k+1} - FLCW_{i,j,k}] + QC_{i,j,k} \right) \quad (3.123)$$

となる。ここで、濃度の成分を示すサフィックスは省略した。なお、C はセル中心で定義されているため、界面をとおして流入出する量の離散式は方向依存性がなく、サフィックスを読み替えることで記述が可能である。よって、以下では  $FLCU_{i,j,k}$ 、 $QC_{i,j,k}$  についてのみ示す。

$$\textcircled{1} FLCU_{i,j,k} = \left( -\gamma_x u c + \gamma_x D_e \left[ \frac{\partial c}{\partial x} \right] \right)_{i,j,k}$$

$$(\gamma_x u c)_{i,j,k} = \left\langle (\gamma_x u)_{i,j,k} \middle| c_{i-1,j,k}, c_{i,j,k} \right\rangle \quad (3.124)$$

$$\left( \gamma_x D_e \left[ \frac{\partial c}{\partial x} \right] \right)_{i,j,k} = \gamma_{xi,j,k} \{ D_e \}_{i,j,k}^{\Delta x} \left[ \frac{c_{i,j,k} - c_{i-1,j,k}}{\Delta x_i} \right] \dots\dots\dots (3.125)$$

$$\textcircled{2} QC_{i,j,k} = (cq(z,t))_{i,j,k} = c_{i,j,k} q(z,t)_{i,j,k} \dots\dots\dots (3.126)$$

### 3.4 連立1次方程式の解法

SMAC 法では、ポテンシャル関数 $\phi$ に関する非対称の連立1次方程式の解法が全計算時間の多く（7割から9割以上）を占め、かつ、連続の式の精度を通じてスカラー量の保存を大きく左右する。特に、VOF 法においては VOF 関数 F 値の保存則の精度を保つことが、計算体系の全水量を保つことと同意であるため重要となる。

CADMAS-SURF/3D-MP では、非対称の連立1次方程式の解法として収束性および安定性に優れた前処理付き BCGSTAB 法<sup>15)</sup>を採用した。以下に前処理付き BCGSTAB 法のアルゴリズムを示す。

$$\mathbf{x}_0 = \text{初期解ベクトル}, \mathbf{r}_0 = \mathbf{p}_0 = \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{b} - \mathbf{A}\mathbf{x}_0), \quad k = 0$$

$$\textcircled{1} \alpha_k = \frac{(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}_k)}{(\mathbf{r}_0, \mathbf{M}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{p}_k)}$$

$$\textcircled{2} \mathbf{e}_k = \mathbf{r}_k - \alpha_k \mathbf{M}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{p}_k$$

$$\textcircled{3} \omega_k = \frac{(\mathbf{e}_k, \mathbf{M}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{e}_k)}{(\mathbf{M}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{e}_k, \mathbf{M}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{e}_k)}$$

$$\textcircled{4} \mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + \alpha_k \mathbf{p}_k + \omega_k \mathbf{e}_k$$

$$\textcircled{5} \mathbf{r}_{k+1} = \mathbf{e}_k - \omega_k \mathbf{M}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{e}_k$$

$$\textcircled{6} (\mathbf{r}_{k+1}, \mathbf{r}_{k+1}) < \varepsilon(\mathbf{b}, \mathbf{b}) \text{ ならば終了}$$

$$\textcircled{7} \beta_k = \frac{(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}_{k+1})}{\omega_k (\mathbf{r}_0, \mathbf{M}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{p}_k)}$$

$$\textcircled{8} \mathbf{p}_{k+1} = \mathbf{r}_{k+1} + \beta_k (\mathbf{p}_k - \omega_k \mathbf{M}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{p}_k)$$

$$\textcircled{9} k = k + 1$$

$$\textcircled{10} \textcircled{1} \text{へもどる}$$

ここで、 $\mathbf{A}$  : 連立一次方程式の係数行列、 $\mathbf{x}$  : 解ベクトル、 $\mathbf{b}$  : 連立一次方程式の右辺、 $\mathbf{M}$  : 前処理行列である。

### 3.5 時間刻み幅

数値計算上の安定性の問題から、時間刻み幅 $\Delta t$ に関して以下の条件が課せられる。

①CFL 条件

$$\Delta t \leq \min\left(\frac{\Delta x}{u}, \frac{\Delta y}{v}, \frac{\Delta z}{w}\right) = \Delta t_c \quad (3.127)$$

②粘性項の安定条件

$$\Delta t \leq \frac{1}{2} \frac{1}{\nu \left[ \left(\frac{1}{\Delta x}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta y}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta z}\right)^2 \right]} = \Delta t_v \quad (3.128)$$

この条件を常に満足する時間刻み幅 $\Delta t$ をユーザーが決定することは困難であるため、CADMAS-SURF/3D-MP では「自動時間刻み幅」の機能を加えた。「自動時間刻み幅」ではユーザーが入力する安全係数 $\alpha$  ( $0.0 < \alpha < 1.0$ ) を用いて時間刻み幅 $\Delta t$ を以下のように決定した。

$$\Delta t = \alpha \min(\Delta t_c, \Delta t_v) \quad (3.129)$$

### 3.6 空気圧計算モデル

CADMAS-SURF/3D を用いて、空気を取り込まれるような場所に対して計算を行うと、気泡がそのままつぶれて数値的なノイズが発生し、波圧を精度良く計算できないという問題が生じる。この問題を改善することを目的として、取り込まれた空気の内圧及び体積変化を計算し、そのときの内圧を流体表面の圧力境界条件として設定することにより、気泡が抵抗なくつぶれることを回避する機能を追加した。

波により取り込まれた気体が断熱状態で変化すると仮定すると、気体の圧力 $p$ と、体積 $V$ の間には次のような関係がある。

$$pV^\gamma = \text{一定値} \quad (3.130)$$

ここで、 $\gamma$  は比熱比であり、空気の場合にはおよそ 1.403 となる。

したがって、初期における気体の圧力と体積から右辺の一定値を計算しておき、各タイムステップにおいて、気体の体積 $V$ を計算することにより、気体の圧力 $p$ が得られることになる。

しかし、例えば一つの連続した気体領域であったものが、次のタイムステップにおいて2つの異なる気体領域に分裂したときに、それぞれの領域において、この一定値をどのように決定するかが問題となる。逆に、2つの異なる気体領域が合体し、一つになった場合にも同じ問題が生じる。この問題を避けるために、上式の両辺を時間で微分した以下の形式を用いることにする。両辺を $t$ で微分すると

$$\gamma p V^{\gamma-1} \frac{dV}{dt} + V^\gamma \frac{dp}{dt} = 0 \quad (3.131)$$

となり、式を変形すると

$$\frac{dp}{dt} = -\gamma \frac{p}{V} \frac{dV}{dt} \quad \text{.....} \quad (3.132)$$

となる。ここで、気体の体積変化は気泡の表面の移動を面積分したものと捉えることができ

$$\frac{dV}{dt} = \int_S \mathbf{v} \cdot d\mathbf{S} \quad \text{.....} \quad (3.133)$$

と表すことができる。これにガウスの発散定理を適用し、更に離散化すると

$$\frac{dV}{dt} = \int_V \nabla \cdot \mathbf{v} dV = \sum_{ijk \in V} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \Delta V_{ijk} \quad \text{.....} \quad (3.134)$$

と変形できる。ここで、 $ijk$  は計算セルのインデックスであり、その概念図を図-3.13 に示す。気体体積  $V$  についても

$$V = \sum_{ijk \in V} \Delta V_{ijk} \quad \text{.....} \quad (3.135)$$

とできることから、式(3.132)に式(3.134)、式(3.135)を代入して Euler 陰解法で離散化すると

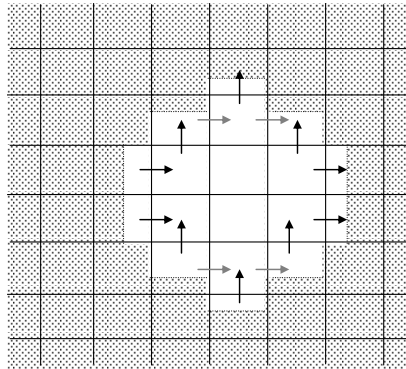
$$\frac{p^{n+1} - p^n}{\Delta t} = -\gamma \frac{p^n}{\sum_{ijk \in V} \Delta V_{ijk}} \sum_{ijk \in V} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \Delta V_{ijk} \quad \text{.....} \quad (3.136)$$

したがって、新しい時刻の圧力は

$$p^{n+1} = p^n \left\{ 1 + \frac{\gamma \Delta t}{\sum_{ijk \in V} \Delta V_{ijk}} \sum_{ijk \in V} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \Delta V_{ijk} \right\}^{-1} \quad \text{.....} \quad (3.137)$$

として計算することができる。

ここで、式(3.137)の右辺の  $p^n$  は前のステップにおける気体の圧力であり、気体が分裂する場合には分裂前の気体の圧力と等しいものとし、気体が合体する場合は合体前の気体の圧力を体積で重み付け平均した値とする。



→の位置の流速は表面セルの発散条件から決まる境界流速

図-3.13 気体領域のセル分割と境界流速の概念図

## 4. プログラムの内容

本章では、処理フローやデータ構造等、CADMAS-SURF/3D のプログラムの内容について示す。

### 4.1 処理フロー

CADMAS-SURF/3D の処理フローを図-4.1 に示す。CADMAS-SURF/3D の処理フローは、デフォルト値の設定やデータ入力等を行う前処理、各時刻における物理量を計算しファイル出力する計算ループ、および、ファイルのクローズ等を行う後処理の3つに大別される。なお、計算ループは、初期値を含めた各種物理量のファイル出力を適切に行うため、中判定反復の形式をとっている。

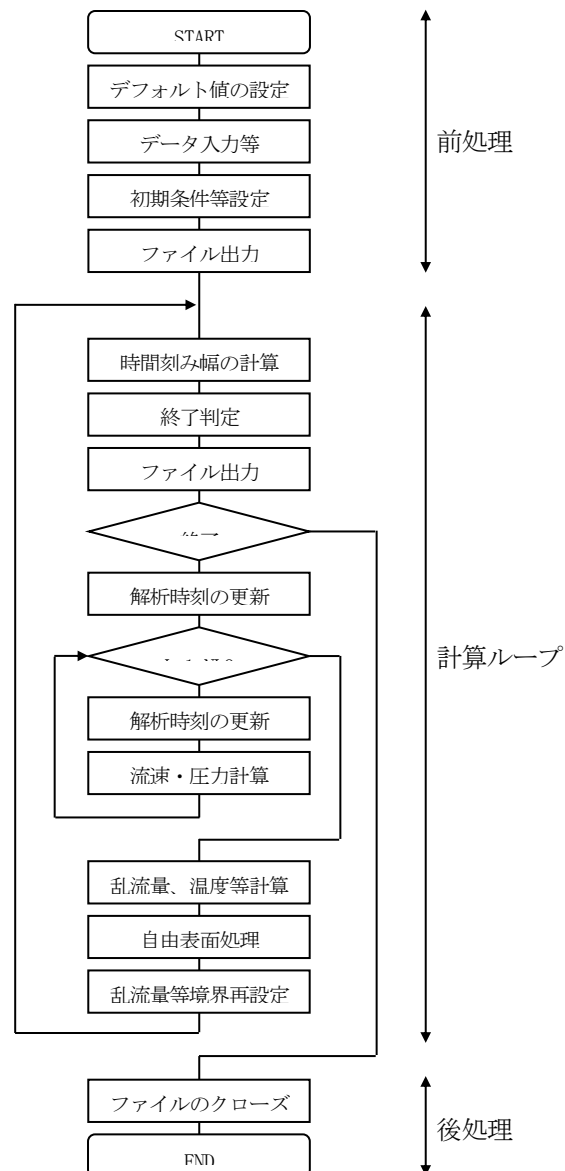


図-4.1 処理フロー



## 4.2 並列化の方針と通信領域

### 4.2.1 並列化の方針

保守および機能拡張の容易性を考慮した場合、並列化されていないプログラム（単体版）と並列化されたプログラム（並列版）の2つのバージョンを持つことは得策ではない。よって、メッセージ交換ライブラリである MPI にマスクをかけ、MPI のサブルーチンやインクルードファイルの呼び出し部分を無効（コメントアウト）にするだけで単体版になるよう配慮した。もちろん、並列版でも1つのプロセッサで動作し、その場合は単体版と同様の動作となるようにした。MPI のマスクのイメージを図-4.2 に示す。

なお、CADMAS-SURF/3D は波浪計算に特化しているため、造波境界や放射境界で鉛直方向（z 方向）に特殊処理を行っている。よって、領域分割は水平方向（x 方向と y 方向）のみで行うこととした。

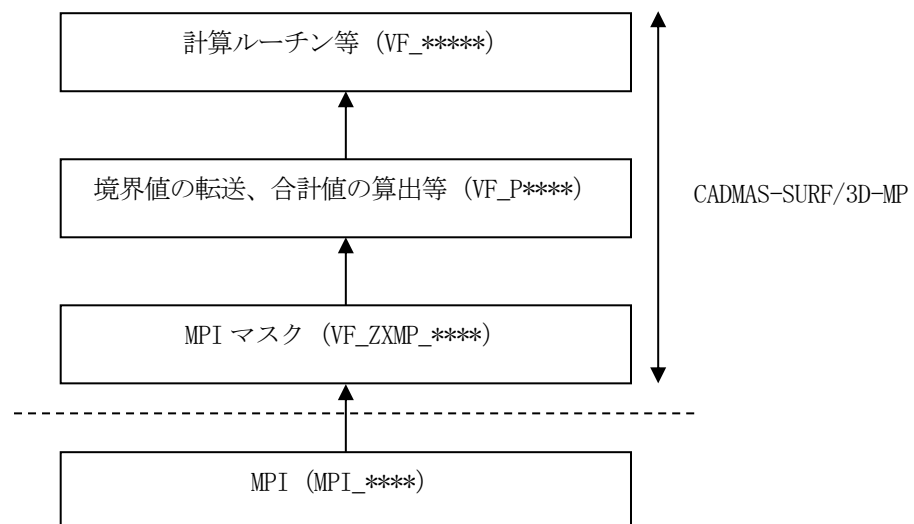


図-4.2 MPI マスクのイメージ

### 4.2.2 各プロセッサの担当領域と通信領域

領域分割法では、各プロセッサは自分が計算を担当する領域とその周辺の通信領域を合わせた領域をメモリ上に配置する。通信領域の幅（層）は計算スキームの参照関係で決まり、例えば1次風上差分であれば自分と隣のセルの関係のみを利用するため1層のみでよい。しかしながら、VOF 法ではドナーアクセプタ法で2つ隣の情報が必要となるため、CADMAS-SURF/3D-MP では2層分の通信を行うこととした（図-4.3、4.4 参照）。

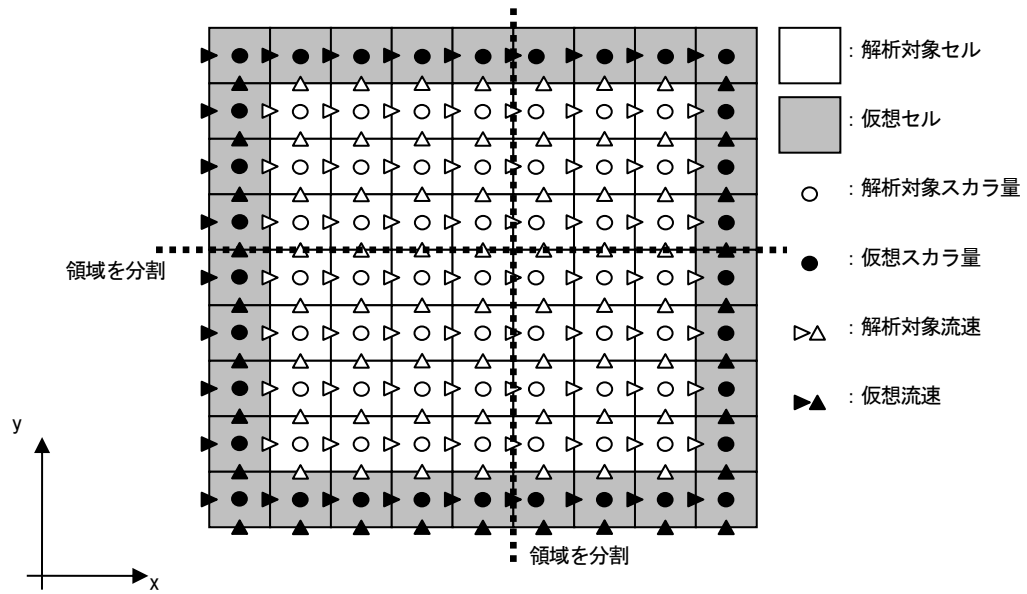


図-4.3 全体領域と変数の定義位置

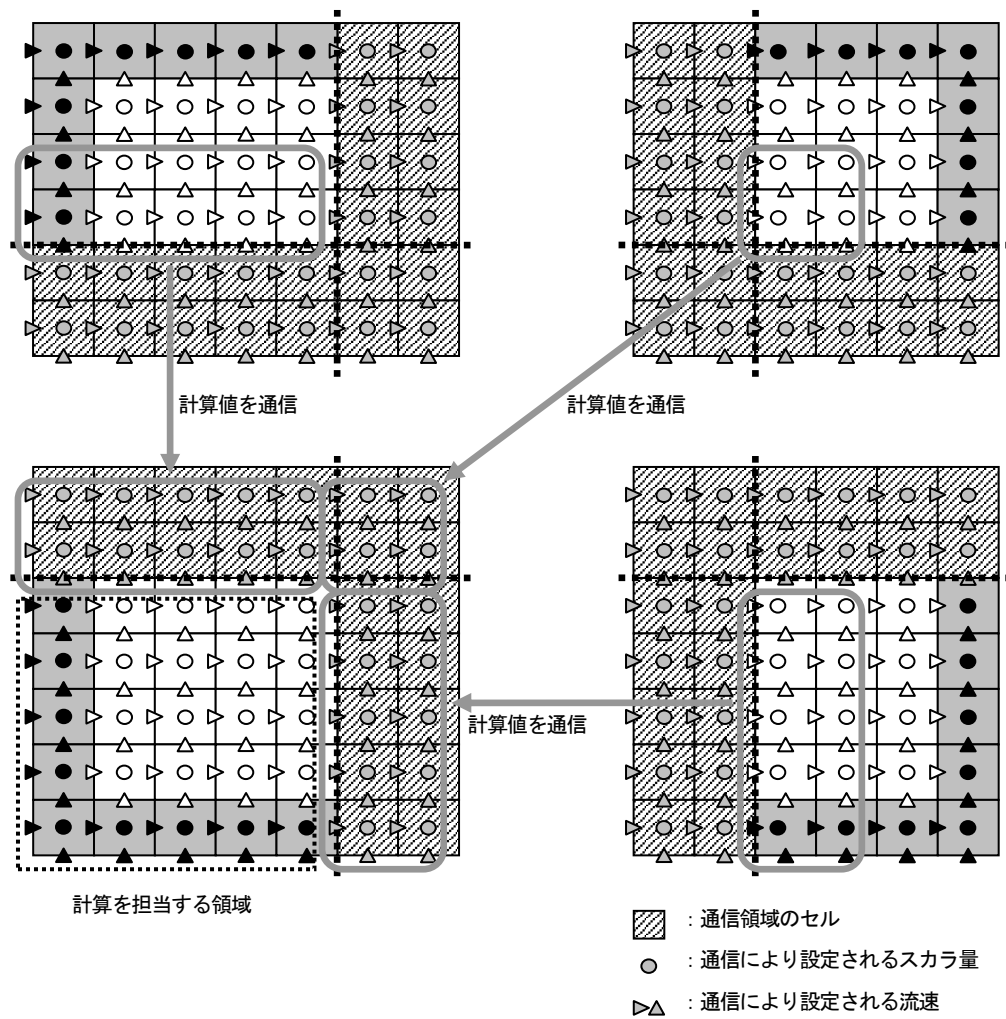


図-4.4 分割後の担当領域と通信領域

## 4.3 コーディングスタイル

### 4.3.1 ファイル名の分類

ファイル名の分類を表-4.1 に示す。CADMAS-SURF/3D を構成するファイルは、インクルードファイルとソースファイルの2つの区分からなり、その区分および内容によりファイル名の先頭4文字が異なる。

表-4.1 ファイル名の分類

先頭4文字	区別	内容
VF_A	インクルード	パラメータ文およびコモン文
vf_a	ソース	メインルーチンおよび制御関連
vf_b	ソース	境界条件関連
vf_c	ソース	各種計算および設定
vf_d	ソース	(未使用)
vf_e	ソース	(未使用)
vf_f	ソース	VOF 関数 F の計算
vf_g	ソース	(未使用)
vf_h	ソース	(未使用)
vf_i	ソース	ファイル入力関連
vf_j	ソース	(未使用)
vf_k	ソース	$k-\varepsilon$ 2 方程式モデルの計算
vf_l	ソース	(未使用)
vf_m	ソース	連立1次方程式の解法関連
vf_n	ソース	(未使用)
vf_o	ソース	ファイル出力関連
vf_p	ソース	並列用の境界値の転送、合計値の算出等
vf_q	ソース	(未使用)
vf_r	ソース	(未使用)
vf_s	ソース	濃度の計算
vf_t	ソース	温度の計算
vf_u	ソース	(未使用)
vf_v	ソース	流速および圧力の計算
vf_w	ソース	造波波形、流速等の計算
vf_x	ソース	(未使用)
vf_y	ソース	(未使用)
vf_z	ソース	汎用的サブルーチン ：VF_ZXMP_****は MPI マスク

### 4.3.2 インクルードファイル

インクルードファイルのコーディングスタイルを表-4.2に示す。インクルードファイルには、パラメータ文およびコモン文が記述され、コモン変数の型はソースファイルの先頭に記述された大域型（整数は4バイト、実数は8バイト）で決定される。また、インクルードファイルの概要および各変数の内容は、ファイル中にコメントとして記述される。

インクルードファイルを用いることで、コモン変数の不整合や変数名の不用意な変更等を避けることが可能となる。

表-4.2 インクルードファイルのコーディングスタイル

コーディングスタイル	説明
<pre>PARAMETER (@@@@@@-@@@, @@@@@@=@@@)  CD== 概要 =====  CDT  VF_AOPRM.h:PARAMETER 文を集めたファイル  C=== 内容 =====  CD  @@@@@@ : PRM : I*4   : @@@@@@@@@@@@@@@@ CD  @@@@@@ : PRM : R*8   : @@@@@@@@@@@@@@@@</pre>	パラメータ文（パラメータ用）  概要の説明   内容の説明  PRM：パラメータ
<pre>COMMON /VF_AXXXXI/ @@@@@@, @@@@@@, &amp;                  @@@@@@, @@@@@@  CD== 概要 =====  CDT  VF_AXXXXI.h:@@ CD    (1) @@@ CD    (2) @@@  C=== 内容 =====  CD  @@@@@@ : CNS : I*4 : @@@@@@@@@@@@@@@@ CD  @@@@@@ : TRN : I*4 : @@@@@@@@@@@@@@@@</pre>	コモン文（整数型用）  概要の説明   内容の説明  CNS：前処理後変更されない TRN：前処理後変更される
<pre>COMMON /VF_AXXXXR/ @@@@@@, @@@@@@, &amp;                  @@@@@@, @@@@@@  CD== 概要 =====  CDT  VF_AXXXXR.h:@@ CD    (1) @@@ CD    (2) @@@  C=== 内容 =====  CD  @@@@@@ : CNS : R*8 : @@@@@@@@@@@@@@@@ CD  @@@@@@ : TRN : R*8 : @@@@@@@@@@@@@@@@</pre>	コモン文（実数型用）  概要の説明   内容の説明  CNS：前処理後変更されない TRN：前処理後変更される

### 4.3.3 ソースファイル

ソースファイルのコーディングスタイルを表-4.3 に示す。ソースファイルの先頭には、プログラム文またはサブルーチン文を記述し、そのすぐ下にルーチンの概要をコメント文で記述する。

次に、各種宣言文を、大域型、大域変数（インクルード文によるコモン変数の取り込み）、引数、局所変数（宣言が必要な場合のみ）の順で記述し、特に引数に関しては参照（IN）・代入（OUT）および型等についてコメント文で記述する。

続いて、実行文、ファイル関連エラー処理（処理の飛び越しが必要）、フォーマット文、終了処理の順で記述する。

表-4.3 ソースファイルのコーディングスタイル

コーディングスタイル	説明
<pre>SUBROUTINE VF_XXXXX (@@@@@)  CD== 概要 =====  CDT VF_XXXXX: @@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@ CD   (1) @@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@ CD   (2) @@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@  C=== 宣言 =====  C   -- 大域型 --       IMPLICIT INTEGER (I-N), DOUBLE PRECISION (A-H, O-Z)  C   -- 大域変数 --       INCLUDE 'VF_A@@@@.h'  CD   -- 引数 -- CD   @@@@ : IN  : C*(*) : @@@@@@@@@@@@@@ CD   @@@@ : OUT : I*4   : @@@@@@@@@@@@@@ CD   @@@@ : OUT : R*8   : @@@@@@@@@@@@@@       DIMENSION @@@@@@  CD   -- 局所変数 -- CD   @@@@      : C*(*) : @@@@@@@@@@@@@@ CD   @@@@      : R*8   : @@@@@@@@@@@@@@       DIMENSION @@@@@@  C=== 実行 =====  CD   -- @@@@@@ --  CD   -- @@@@@@ --  C   -- 実行文の終了 --       9000 CONTINUE       GOTO 9999  C=== ファイル関連エラー処理 =====        9010 CONTINUE       CALL A2ERR(' @@@@@', 'I/O ERROR. ')       GOTO 9999  C=== フォーマット文 =====        9510 FORMAT(' ', ' @@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@')  C=== 終了 =====        9999 CONTINUE       RETURN       END</pre>	<p>サブルーチン文</p> <p>概要の説明</p> <p>各種宣言文</p> <p>大域型の宣言</p> <p>大域変数の宣言</p> <p>引数の説明と宣言</p> <p>局所変数の説明と宣言（必要な場合のみ）</p> <p>実行文の開始</p> <p>実行文の終了</p> <p>ファイル関連エラー処理（必要な場合のみ）</p> <p>フォーマット文（必要な場合のみ）</p> <p>終了処理</p>

4.3.4 プログラムの実行終了

プログラムの実行を終了させるためのストップ文は、メインルーチンである VF\_A1MAIN およびエラーメッセージを出力する VF\_A2ERR に記述される。このため、図-4.5 に示すとおり、プログラムが正常終了する場合に VF\_A1MAIN のストップ文が、異常終了（プログラムが感知できる入力エラー等）する場合に VF\_A2ERR のストップ文が実行される。

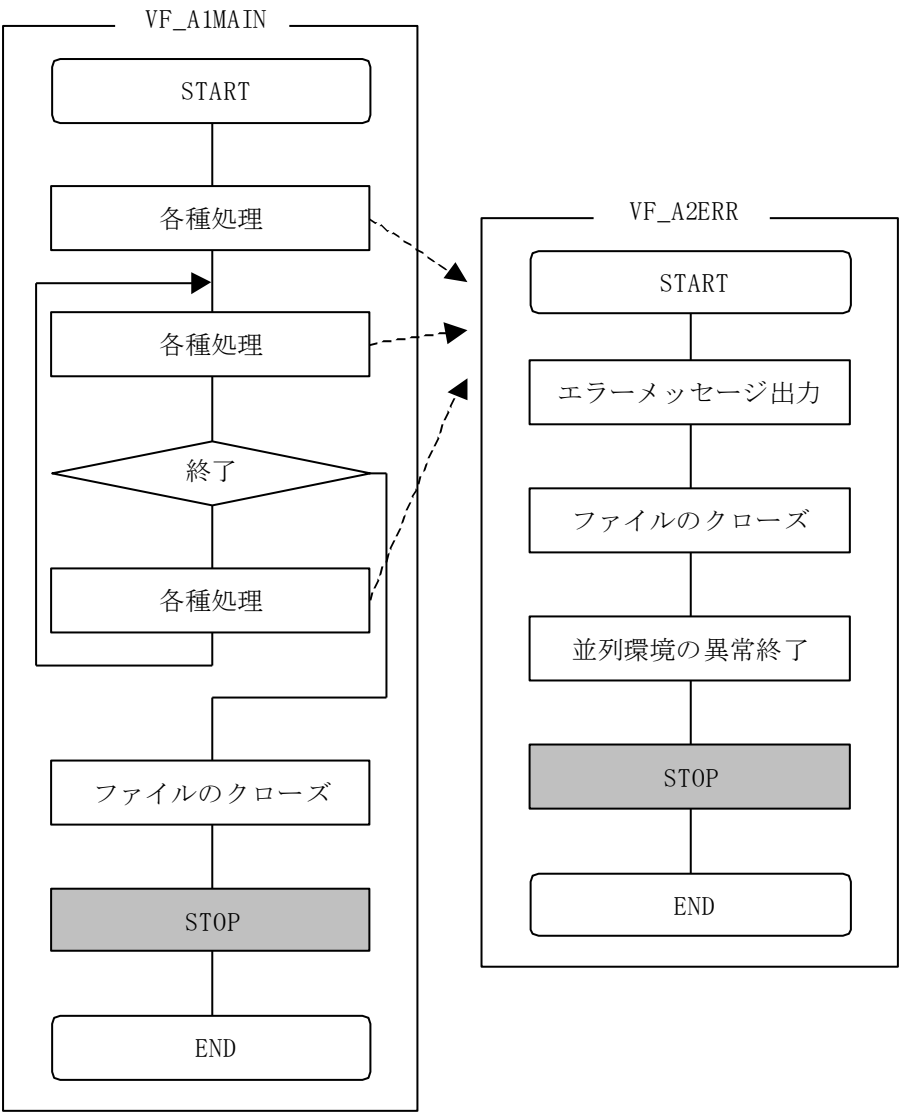


図-4.5 プログラムの実行終了

## 4.4 データ構造一覧と詳細説明

### 4.4.1 データ構造一覧

CADMAS-SURF/3D-MP が利用する大域的データは、以下のように大別される。

- ①コモンによる大域変数
- ②メインルーチンが宣言する実質的な大域変数

表-4.4 にコモン名等のデータ構造一覧を示す。

表-4.4 データ構造一覧

名称	タイプ	ファイル名	概要
—	定数	VF_A0PRM. h	PARAMETER 文を集めたファイル
VF_ACOMPI	コモン	VF_ACOMPI. h	数値解法関連(各種パラメータおよび反復回数等):整数
VF_ACOMPR	コモン	VF_ACOMPR. h	数値解法関連(各種パラメータおよび反復回数等):実数
VF_ACPUTR	定数とコモン	VF_ACPUTR. h	CPU 時間の計測関連(CPU 時間等):パラメータと実数
VF_ADBGI	コモン	VF_ADBGI. h	デバッグ関連:整数
VF_ADBGR	コモン	VF_ADBGR. h	デバッグ関連:実数
VF_AFILEI	コモン	VF_AFILEI. h	ファイル関連(ファイル番号および出力制御等):整数
VF_AFILER	コモン	VF_AFILER. h	ファイル関連(出力時間間隔等):実数
VF_ANUMBI	コモン	VF_ANUMBI. h	データ数関連(配列サイズおよび格子数等):整数
VF_APARAI	コモン	VF_APARAI. h	並列化関連:整数
VF_APARAR	コモン	VF_APARAR. h	並列化関連:実数
VF_APHYSI	コモン	VF_APHYSI. h	物理事象関連(物理量および物理モデル等):整数
VF_APHYSR	コモン	VF_APHYSR. h	物理事象関連(物理量および物理モデル等):実数
VF_ETIMEI	コモン	VF_ETIMEI. h	時間制御関連(解析時刻および時間刻み幅等):整数
VF_ETIMER	コモン	VF_ETIMER. h	時間制御関連(解析時刻および時間刻み幅等):実数

### 4.4.2 コモンによる大域変数の詳細説明

表-4.5 にコモンによる大域変数の詳細説明を示す。コモンによる大域変数は、そのほとんどが単独の変数である。

表-4.5 コモンによる大域変数の詳細説明 (1/15)

ファイル名 : VF_A0PRM. h		概要 : PARAMETER 文を集めたファイル	
変数名	タイプ	型	内容
IVR001	PRM	I*4	バージョンの 1 桁目
IVR002	PRM	I*4	バージョンの 2 桁目
MAXNPI	PRM	I*4	x 方向最大プロセス数(並列用)
MAXNPJ	PRM	I*4	y 方向最大プロセス数(並列用)
MAXBUF	PRM	I*4	バッファ用データの本数(並列用)
MFILIN	PRM	I*4	入力ファイルのファイル番号
MFILMT	PRM	I*4	マトリクスデータファイルのファイル番号
MFILRE	PRM	I*4	リスタートファイルのファイル番号
MFILPR	PRM	I*4	時間依存型空隙率ファイルのファイル番号
MFILLP	PRM	I*4	リストファイルのファイル番号
MFILGR	PRM	I*4	図化ファイルのファイル番号
MFILRS	PRM	I*4	詳細ファイルのファイル番号
MFILTR	PRM	I*4	時系列ファイルのファイル番号
MAXCHR	PRM	I*4	1 行の最大文字数(入力ファイル)
MAXWDS	PRM	I*4	1 行の最大単語数(入力ファイル)
MAXG1	PRM	I*4	XX, YY および ZZ の第 1 配列サイズ
MAXB1	PRM	I*4	INDB の第 1 配列サイズ
MAXNC	PRM	I*4	濃度の最大成分数
MAXTR	PRM	I*4	時系列ファイルへの出力対象データ最大数
MAXTR1	PRM	I*4	ITRPRM の第 1 配列サイズ
MAXPRB	PRM	I*4	時間依存型空隙率の空間ブロックの最大数
MAXPVC	PRM	I*4	気泡の最大数(:空気圧計算用)
MAXDRG	PRM	I*4	Dupuit-Forheimer 式の係数の最大数
ZERO	PRM	R*8	ゼロ判定値
ZEROG	PRM	R*8	ゼロ判定値(格子間隔判定用)
PI	PRM	R*8	円周率

表-4.5 コモンによる大域変数の詳細説明 (2/15)

ファイル名 : VF_ACOMPI. h		概要 : 数値解法関連(各種パラメータおよび反復回数等):整数	
変数名	タイプ	型	内容
ICGTYP	CNS	I*4	連立 1 次方程式の解法の前処理の種類 = 0: 不完全 LU 分解 (ILU) !=0: 修正不完全 LU 分解 (MILU)
ICGMAX	CNS	I*4	連立 1 次方程式の解法の最大反復回数
ICGTR	TRN	I*4	連立 1 次方程式の解法の反復回数
ISCMVP	CNS	I*4	流速の対流項の差分スキーム = 0: DONOR !=0: 高次スキーム (未整備)
ISCMFF	CNS	I*4	VOF 関数 F の移流項の差分スキーム = 0: ドナー・アクセプタ法 !=0: 界面の傾きを考慮した方法
ISCMK	CNS	I*4	$k-\epsilon$ の移流項の差分スキーム: 同 ISCMVP
ISCMT	CNS	I*4	温度の移流項の差分スキーム: 同 ISCMVP
ISCMC (MAXNC)	CNS	I*4	濃度の移流項の差分スキーム: 同 ISCMVP
IBSUWO	CNS	I*4	表面セルの流速計算法 = 0: 流体側から補外できる場合は線形補外



			!=0: 勾配ゼロ
--	--	--	-----------

表-4.5 コモンによる大域変数の詳細説明 (3/15)

ファイル名 : VF_ACOMPR. h		概要 : 数値解法関連(各種パラメータおよび反復回数等) : 実数	
変数名	タイプ	型	内容
CGPARA	CNS	R*8	連立 1 次方程式の解法の MILU 用パラメータ
CGEPSA	CNS	R*8	連立 1 次方程式の解法の収束判定値(絶対誤差)
CGEPSR	CNS	R*8	連立 1 次方程式の解法の収束判定値(相対誤差)
CGDIV	CNS	R*8	連立 1 次方程式の解法の発散判定値
CGBNRM	TRN	R*8	連立 1 次方程式の解法の右辺のノルム
CGXNRM	TRN	R*8	連立 1 次方程式の解法の残差のノルム
FEPS	CNS	R*8	VOF 関数 F のゼロ判定値
FLOWER	CNS	R*8	VOF 関数 F の下限値
FUPPER	CNS	R*8	VOF 関数 F の上限値
FSUM	TRN	R*8	VOF 関数 F の空間積分値
FCUT	TRN	R*8	VOF 関数 F のカットオフ値
PLOWER	CNS	R*8	ポラス値の下限値
SCMVP	CNS	R*8	DONOR スキームのパラメータ (0.0-1.0:流速用) =0.0:2 次中心 =1.0:1 次風上
SCMK	CNS	R*8	DONOR スキームのパラメータ (k-ε 用) : 同 SCMVP
SCMT	CNS	R*8	DONOR スキームのパラメータ (温度用) : 同 SCMVP
SCMC (MAXNC)	CNS	R*8	DONOR スキームのパラメータ (濃度用) : 同 SCMVP

表-4.5 コモンによる大域変数の詳細説明 (4/15)

ファイル名 : VF_ACPUTR. h		概要 : CPU 時間の計測関連(CPU 時間等) : パラメータと実数	
変数名	タイプ	型	内容
ICPUIN	PRM	I*4	タイマー処理フラグ(初期化)
ICPUST	PRM	I*4	タイマー処理フラグ(スタート)
ICPUEN	PRM	I*4	タイマー処理フラグ(止めて, 合計をとる)
ICPUOU	PRM	I*4	タイマー処理フラグ(CPU 時間を出力する)
KCPOAL	PRM	I*4	タイマー種別フラグ(全体, 種別フラグ数を兼ねる)
KCP***	PRM	I*4	タイマー種別フラグ(各種処理)
CPUS (KCPOAL)	TRN	R*8	CPU 時間の合計
CPUW (KCPOAL)	TRN	R*8	タイマーが起動された時間

表-4.5 コモンによる大域変数の詳細説明 (5/15)

ファイル名 : VF_ADBGI. h		概要 : デバッグ関連:整数	
変数名	タイプ	型	内容
IDBGF (6)	CNS	I*4	矩形ボックスへの F 値指定データ (1):始点の x 方向セル番号 (2):始点の y 方向セル番号 (3):始点の z 方向セル番号 (4):終点の x 方向セル番号 (5):終点の y 方向セル番号 (6):終点の z 方向セル番号
IDBGTD (6)	CNS	I*4	矩形ボックスへの TD 用速度指定データ

			(1):始点の x 方向セル番号 (2):始点の y 方向セル番号 (3):始点の z 方向セル番号 (4):終点の x 方向セル番号 (5):終点の y 方向セル番号 (6):終点の z 方向セル番号
--	--	--	--

表-4.5 コモンによる大域変数の詳細説明 (6/15)

ファイル名：VF_ADBGR. h		概要：デバッグ関連:実数	
変数名	タイプ	型	内容
RDBGF	CNS	I*4	矩形ボックスへの F 値指定データ (F 値)
RBDGTD (3)	CNS	I*4	矩形ボックスへの TD 用速度指定データ (V 値) (1):x 方向速度 (2):y 方向速度 (3):z 方向速度

表-4.5 コモンによる大域変数の詳細説明 (7/15)

ファイル名：VF_AFILEI. h(1/3)		概要：ファイル関連(ファイル番号および出力制御等):整数	
変数名	タイプ	型	内容
IINFIL	CNS	I*4	入力ファイルのファイル番号(0=未 open)
IMTFIL	CNS	I*4	マトリクスデータファイルのファイル番号
IREFIL	CNS	I*4	リスタートファイルのファイル番号
IPRFIL	CNS	I*4	時間依存型空隙率ファイルのファイル番号
ILPFIL	CNS	I*4	リストファイルのファイル番号
IGRFIL	CNS	I*4	図化ファイルのファイル番号
IRSFIL	CNS	I*4	詳細ファイルのファイル番号
ITRFIL	CNS	I*4	時系列ファイルのファイル番号
ILPTYP	CNS	I*4	リストファイルの出力方法 =0:出力しない =1:ステップ間隔 =2:解析時間間隔
ILPTRN (3)	CNS	I*4	リストファイルの出力ステップ情報 (1):出力開始ステップ (2):出力終了ステップ (3):出力ステップ間隔
ILPARA (3)	CNS	I*4	リストファイルの出力断面情報 (1):出力断面 =1:xy 断面, =2:xz 断面, =3:yz 断面 =4:yx 断面, =5:zx 断面, =6:zy 断面 (2):出力断面のセル番号 (3):出力断面の格子番号
ILPON(21)	CNS	I*4	リストファイルへの出力/非出力 ( 1 ):障害物 =0:出力しない, !=0:出力する ( 2 ):境界条件に関するインデックス =0:出力しない, !=0:出力する ( 3 ):慣性力係数 =0:出力しない, !=0:出力する

			( 4 ):抵抗係数 =0:出力しない, !=0:出力する ( 5 ):ポアラス値 =0:出力しない, !=0:出力する ( 6 ):GLV, GLX, GLZ =0:出力しない, !=0:出力する ( 7 ):NF =0:出力しない, !=0:出力する ( 8 ):VOF 関数 F =0:出力しない, !=0:出力する ( 9 ):流速 =0:出力しない, !=0:出力する (10):圧力 =0:出力しない, !=0:出力する (11):分子動粘性係数と渦動粘性係数の和 =0:出力しない, !=0:出力する (12):境界値 =0:出力しない, !=0:出力する (13):温度 =0:出力しない, !=0:出力する (14):熱伝導率 =0:出力しない, !=0:出力する (15):濃度 =0:出力しない, !=0:出力する (16):拡散係数 =0:出力しない, !=0:出力する (17):乱流エネルギー =0:出力しない, !=0:出力する (18):乱流エネルギー散逸 =0:出力しない, !=0:出力する (19):渦動粘性係数 =0:出力しない, !=0:出力する (20):空気圧の計算用インデックス =0:出力しない, !=0:出力する (21):空気圧の計算用の圧力 =0:出力しない, !=0:出力する
IGRTYP	CNS	I*4	図化ファイルの出力方法 =0:出力しない =1:ステップ間隔 =2:解析時間間隔
IGTRN(3)	CNS	I*4	図化ファイルの出カステップ情報 (1):出力開始ステップ (2):出力終了ステップ (3):出カステップ間隔
IGRARA(6)	CNS	I*4	リストファイルの出力断面情報 (1):始点の x 方向セル番号 (2):始点の y 方向セル番号 (3):始点の z 方向セル番号 (4):終点の x 方向セル番号 (5):終点の y 方向セル番号

			(6): 終点の z 方向セル番号
IGRVOR	CNS	I*4	図化ファイルへ渦度を出力するか = 0: 出力しない !=0: 出力する
IRSTYP	CNS	I*4	詳細ファイルの出力方法 =0: 出力しない =1: ステップ間隔 =2: 解析時間間隔
IRSTRN (3)	CNS	I*4	詳細ファイルの出力ステップ情報 (1): 出力開始ステップ (2): 出力終了ステップ (3): 出力ステップ間隔
IRETYP	CNS	I*4	リスタートの方法 < 0: リスタートしない >=0: リスタートステップ
ITRTYP	CNS	I*4	時系列ファイルの出力方法 =0: 出力しない =1: ステップ間隔 =2: 解析時間間隔
ITRTRN (3)	CNS	I*4	時系列ファイルの出力ステップ情報 (1): 出力開始ステップ (2): 出力終了ステップ (3): 出力ステップ間隔
ITRNUM	CNS	I*4	時系列ファイルへの出力対象データ数
ITRPRM (MAXTR1, MAXTR)	CNS	I*4	時系列ファイルのパラメータ (1, *): 値の算出方法 = 0: 初期水面からの水位変動 = 1: 指定点の値 = 2: 指定領域の最小値 = 3: 指定領域の最大値 = 4: 指定領域の体積平均値 = 5: 指定領域の体積積分値 =11: 障害物への波力 (2, *): 物理量の種別 < 0: 濃度(成分番号×(-1)) = 0: 初期水面からの水位変動 = 1: x 方向流速 = 2: y 方向流速 = 3: z 方向流速 = 4: 圧力 = 5: F 値 = 6: 乱流エネルギー = 7: 乱流エネルギー散逸 = 8: 温度 =11: 障害物への x の負方向の波力 =12: 障害物への x の正方向の波力 =13: 障害物への y の負方向の波力 =14: 障害物への y の正方向の波力 =15: 障害物への z の負方向の波力 =16: 障害物への z の正方向の波力 =17: 渦度(x 方向成分)

			=18:渦度(y 方向成分) =19:渦度(z 方向成分) (3,*) : x 方向格子またはセル番号(I1) =-1: x 座標最小位置の造波境界の解 =-2: x 座標最大位置の造波境界の解 =-3: y 座標最小位置の造波境界の解 =-4: y 座標最大位置の造波境界の解 (4,*) : y 方向格子またはセル番号(J1) (5,*) : z 方向格子またはセル番号(K1) (6,*) : x 方向格子またはセル番号(I2) (7,*) : y 方向格子またはセル番号(J2) (8,*) : z 方向格子またはセル番号(K2)
IPRNT	CNS	I*4	空隙率の時間方向のデータ数 =0:空隙率ファイルを読み込まない =1:時間依存データでは無い >1:時間依存データ
IPRNB	CNS	I*4	時間依存型空隙率の空間ブロックの最大数
IPRNP	CNS	I*4	時間依存型空隙率の設定セル数
IPRARA (6, MAXPRB)	CNS	I*4	時間依存型空隙率の空間ブロック情報 (1,*) : 始点の x 方向セル番号 (2,*) : 始点の y 方向セル番号 (3,*) : 始点の z 方向セル番号 (4,*) : 終点の x 方向セル番号 (5,*) : 終点の y 方向セル番号 (6,*) : 終点の z 方向セル番号
IPRIT	TRN	I*4	現在の読み込んでいる時刻ブロック
MTBTYP	CNS	I*4	マトリクスデータのタイプ =0:使用しない =1:水位と流速指定 =2:流速指定 =3:水位指定
MTBTT	CNS	I*4	マトリクスデータの位相方向のデータ数
MTBZZ	CNS	I*4	マトリクスデータの水深方向のデータ数
MTBNOW	TRN	I*4	マトリクスデータの位相方向の現在位置

表-4.5 コモンによる大域変数の詳細説明 (8/15)

ファイル名 : VF_AFILER. h		概要 : ファイル関連(出力時間間隔等) : 実数	
変数名	タイプ	型	内容
RLPTRN (4)	TRN	R*8	リストファイルの出力時間情報 (1) : 出力開始時刻 (2) : 出力終了時刻 (3) : 出力時間間隔 (4) : 次の出力時刻
RGRTRN (4)	TRN	R*8	図化ファイルの出力時間情報 (1) : 出力開始時刻 (2) : 出力終了時刻 (3) : 出力時間間隔 (4) : 次の出力時刻
RRSTRN (4)	TRN	R*8	詳細ファイルの出力時間情報

			(1):出力開始時刻 (2):出力終了時刻 (3):出力時間間隔 (4):次の出力時刻
RTRTRN(4)	TRN	R*8	時系列ファイルの出力時間情報 (1):出力開始時刻 (2):出力終了時刻 (3):出力時間間隔 (4):次の出力時刻
RTRVAL(MAXTR)	TRN	R*8	時系列ファイルへ出力する計算値
PRTOLD	TRN	R*8	前の空隙率ブロックの時刻
PRTNOW	TRN	R*8	現在の空隙率ブロックの時刻
DMTBT0	CNS	R*8	マトリクスデータの初期無次元位相

表-4.5 コモンによる大域変数の詳細説明(9/15)

ファイル名:VF_ANUMBI.h		概要:データ数関連(配列サイズおよび格子数等):整数	
変数名	タイプ	型	内容
NUMI	CNS	I*4	x 方向格子数+1(x 方向セル数+2)
NUMJ	CNS	I*4	y 方向格子数+1(y 方向セル数+2)
NUMK	CNS	I*4	z 方向格子数+1(z 方向セル数+2)
NUMB	CNS	I*4	境界面の数
NUMS	TRN	I*4	表面セルの数
LEQK	CNS	I*4	k-ε を計算するかしないか = 0:計算しない !=0:計算する
LEQT	CNS	I*4	温度を計算するかしないか = 0:計算しない !=0:計算する
LEQC	CNS	I*4	濃度を計算するかしないか = 0:計算しない >=1:成分数
NUMIJ	CNS	I*4	造波ソース用水平方向格子数+1

表-4.5 コモンによる大域変数の詳細説明(10/15)

ファイル名:VF_APARAI.h		概要:並列化関連:整数	
変数名	タイプ	型	内容
NPROCS	CNS	I*4	プロセス数
NUMNPI	CNS	I*4	x 方向プロセス数
NUMNPJ	CNS	I*4	y 方向プロセス数
MYRANK	CNS	I*4	自分のランク
MYRI	CNS	I*4	自分の x 方向ランク
MYRJ	CNS	I*4	自分の y 方向ランク
NUMIO	CNS	I*4	全体の x 方向格子数+1
NUMJO	CNS	I*4	全体の y 方向格子数+1
MYIS	CNS	I*4	x 方向セル番号(開始, 仮想含まず, 局所)
MYIE	CNS	I*4	x 方向セル番号(終了, 仮想含まず, 局所)
MYJS	CNS	I*4	y 方向セル番号(開始, 仮想含まず, 局所)
MYJE	CNS	I*4	y 方向セル番号(終了, 仮想含まず, 局所)

MYMIS	CNS	I*4	x 方向セル番号(開始, 仮想の厚み)
MYMIE	CNS	I*4	x 方向セル番号(終了, 仮想の厚み)
MYMJS	CNS	I*4	y 方向セル番号(開始, 仮想の厚み)
MYMJE	CNS	I*4	y 方向セル番号(終了, 仮想の厚み)
MYGIS	CNS	I*4	x 方向セル番号(開始, 仮想含む, 大域)
MYGIE	CNS	I*4	x 方向セル番号(終了, 仮想含む, 大域)
MYGJS	CNS	I*4	y 方向セル番号(開始, 仮想含む, 大域)
MYGJE	CNS	I*4	y 方向セル番号(終了, 仮想含む, 大域)
NUMBUF	CNS	I*4	バッファ用データの数(1 本分)
IPROC5 (0:MAXNPI)	CNS	I*4	x 方向の終了セル番号
JPROC5 (0:MAXNPJ)	CNS	I*4	y 方向の終了セル番号

表-4.5 コモンによる大域変数の詳細説明(11/15)

ファイル名 : VF_APARAR. h		概要 : 並列化関連:実数	
変数名	タイプ	型	内容
GLXMIN	CNS	R*8	全体の x 方向格子座標の最小値
GLXMAX	CNS	R*8	全体の x 方向格子座標の最大値
GLYMIN	CNS	R*8	全体の y 方向格子座標の最小値
GLYMAX	CNS	R*8	全体の y 方向格子座標の最大値

表-4.5 コモンによる大域変数の詳細説明(12/15)

ファイル名 : VF_APHYSI. h		概要 : 物理事象関連(物理量および物理モデル等):整数	
変数名	タイプ	型	内容
IBCTYP (2, 4)	CNS	I*4	特殊境界に関する情報 (*, 1):x 座標最小位置の境界 (*, 2):x 座標最大位置の境界 (*, 3):y 座標最小位置の境界 (*, 4):y 座標最大位置の境界 (1, *):特殊境界の種別 =0:無し =1:法線方向への造波境界 =2:法線方向への開境界 (2, *):特殊境界の種別の詳細 造波境界の場合 =-3:マトリクスデータ =-2:Stokes 波(第 5 次近似解) =-1:Cnoidal 波(第 3 次近似解) = 0:Stokes 波または Cnoidal 波 > 0:流れ関数法 B とその次数 開境界の場合 = 0:放射境界(微小振幅波の波速) (3, *):特殊境界の始点セル番号 (4, *):特殊境界の終点セル番号
IDAMP (4)	CNS	I*4	減衰領域の設定フラグ (1):x 座標最小位置近傍 (2):x 座標最大位置近傍 (3):y 座標最小位置近傍 (4):y 座標最大位置近傍

			=-1:使用しない >=0:使用する, かつ, 減衰関数の次数
IDROP	CNS	I*4	水滴の自由落下処理(TimerDoor 法) =0:処理を行わない =1:処理を行う
ISCTYP (2)	CNS	I*4	造波ソースに関する情報 (1):造波ソースの種別 =0:無し >0:x 方向への造波ソース (ABS=I) <0:y 方向への造波ソース (ABS=J) (2):造波関数 =-3:マトリクスデータ =-2:Stokes 波(第5次近似解) =-1:Cnoidal 波(第3次近似解) = 0:Stokes 波または Cnoidal 波 > 0:流れ関数法 B とその次数
NPVCB	TRN	I*4	気泡の数(:空気圧計算用)
IPVCBC (MAXPVC)	TRN	I*4	空気圧計算用のワーク
IDRGN	CNS	I*4	Dupuit-Forheimer 式による抵抗力 =0:抵抗力は既存の処理 >0:Dupuit-Forheimer 式(粒経の入力数)

表-4.5 コモンによる大域変数の詳細説明(13/15)

ファイル名: VF_APHYSR. h		概要: 物理事象関連(物理量および物理モデル等):実数	
変数名	タイプ	型	内容
UINI	CNS	R*8	x 方向流速の初期値
VINI	CNS	R*8	y 方向流速の初期値
WINI	CNS	R*8	z 方向流速の初期値
RH00	CNS	R*8	密度
ANU0	CNS	R*8	分子動粘性係数
GRZ0	CNS	R*8	重力加速度の z 成分(負方向)
WVLVL	CNS	R*8	初期水面の高さ(z 座標)
AKMINK	CNS	R*8	乱流エネルギーの最小値
AKMINE	CNS	R*8	乱流エネルギー散逸の最小値
AKINIK	CNS	R*8	乱流エネルギーの初期値
AKINIE	CNS	R*8	乱流エネルギー散逸の初期値
AKCMU	CNS	R*8	$C \mu$
AKSGK	CNS	R*8	$\sigma k$
AKSGE	CNS	R*8	$\sigma e$
AKC1	CNS	R*8	C1
AKC2	CNS	R*8	C2
AKC3	CNS	R*8	C3
AKK0	CNS	R*8	対数則の $\kappa$
AKA0	CNS	R*8	対数則の A
AKPR	CNS	R*8	乱流 Prandtl 数
AKSM (MAXNC)	CNS	R*8	乱流 Schmidt 数
TINI	CNS	R*8	温度の初期値
TCPO	CNS	R*8	定圧比熱
TCNO	CNS	R*8	熱伝導率



TDT0	CNS	R*8	浮力計算のための基準温度
TDRO	CNS	R*8	密度の温度微分
CINI (MAXNC)	CNS	R*8	濃度の初期値
CDFO (MAXNC)	CNS	R*8	拡散係数
CDC0 (MAXNC)	CNS	R*8	浮力計算のための基準濃度
CDRO (MAXNC)	CNS	R*8	密度の濃度微分
BCTYP (11, 4)	TRN	R*8	特殊境界に関する情報 (*, 1) : x 座標最小位置の境界 (*, 2) : x 座標最大位置の境界 (*, 3) : y 座標最小位置の境界 (*, 4) : y 座標最大位置の境界 造波境界の場合 (1, *) : 水深 (2, *) : 波高 (3, *) : 周期 (4, *) : 波長 (5, *) : Ursell 数 (6, *) : 水位変動ゼロ時の無次元位相 (7, *) : 造波したい現在の波高さ (8, *) : 何周期かけて増幅するか (9, *) : 入射角度(法線方向ゼロ) (10, *) : 基準点の x 座標値 (11, *) : 基準点の y 座標値
			開境界の場合 (1, *) : 水深 (2, *) : ダミー (3, *) : 周期 (4, *) : 波長 (5, *) : ダミー (6, *) : 波速 (7, *) : ダミー (8, *) : ダミー (9, *) : ダミー (10, *) : ダミー (11, *) : ダミー
DAMP (4, 4)	CNS	R*8	減衰領域に関する情報 (*, 1) : x 座標最小位置近傍 (*, 2) : x 座標最大位置近傍 (*, 3) : y 座標最小位置近傍 (*, 4) : y 座標最大位置近傍 (1, *) : 減衰関数の水平方向パラメータ (2, *) : 減衰関数の鉛直方向パラメータ (3, *) : 減衰領域の幅 (4, *) : 減衰領域の水深
WBUB	CNS	R*8	気泡の上昇速度(TimerDoor 法) < ZERO: 処理を行わない >=ZERO: 処理を行う
SCTYP (8)	TRN	R*8	造波ソースに関する情報 (1) : 水深 (2) : 波高

			(3):周期 (4):波長 (5):Ursell 数 (6):水位変動ゼロ時の無次元位相 (7):造波したい現在の波の高さ (8):何周期かけて増幅するか
PVCP0	CNS	R*8	大気圧(=0.0:空気圧の計算を行わない)
PVCGM	CNS	R*8	比熱比
PVCDIV (MAXPVC)	TRN	R*8	空気圧計算用のワーク
PVCPES (MAXPVC)	TRN	R*8	空気圧計算用のワーク
PVCPFS (MAXPVC)	TRN	R*8	空気圧計算用のワーク
PVCVES (MAXPVC)	TRN	R*8	空気圧計算用のワーク
PVCVFS (MAXPVC)	TRN	R*8	空気圧計算用のワーク
DRGYU	CNS	R*8	Dupuit-Forheimer 式の動粘性係数
DRGDR (MAXDRG)	CNS	R*8	Dupuit-Forheimer 式の捨石の粒経
DRGAP (MAXDRG)	CNS	R*8	Dupuit-Forheimer 式の係数 $\alpha$
DRGBT (MAXDRG)	CNS	R*8	Dupuit-Forheimer 式の係数 $\beta$

表-4.5 コモンによる大域変数の詳細説明(14/15)

ファイル名: VF_ATIMEI. h		概要: 時間制御関連(解析時刻および時間刻み幅等): 整数	
変数名	タイプ	型	内容
NEND	CNS	I*4	解析終了ステップ
NNOW	TRN	I*4	解析ステップ
IDTTYP	CNS	I*4	時間刻み幅の計算方法 = 0: 一定 !=0: 自動
LOOPS	CNS	I*4	流速・圧力計算のサブループ回数 =1: 通常計算 >1: サブループ有り

表-4.5 コモンによる大域変数の詳細説明(15/15)

ファイル名: VF_ATIMER. h		概要: 時間制御関連(解析時刻および時間刻み幅等): 実数	
変数名	タイプ	型	内容
TEND	CNS	R*8	解析終了時刻
TNOW	TRN	R*8	解析時刻
DTNOW	TRN	R*8	時間刻み幅
DTCNST	CNS	R*8	時間刻み幅の一定値
DTINIT	CNS	R*8	時間刻み幅の初期値
DTMIN	CNS	R*8	時間刻み幅の最小値
DTMAX	CNS	R*8	時間刻み幅の最大値
DTSAFE	CNS	R*8	時間刻み幅の安全率

#### 4.4.3 メインルーチンが宣言する実質的な大域変数の詳細説明

表-4.6 にメインルーチンが宣言する実質的な大域変数の詳細説明を示す。メインルーチンが宣言する大域変数は、その全てが配列変数（流速、圧力等）であり、その大きさは動的に決定される。

表-4.6 メインルーチンが宣言する実質的な大域変数の詳細説明 (1/2)

変数名	型	内容	参考図
XX (MAXG1, NUMI)	R*8	x 方向格子座標等 (1, I) : 格子座標 x (I) (2, I) : $dx = x(I+1) - x(I)$ (3, I) : $cx = (dx(I) + dx(I-1)) / 2.0$ (4, I) : $1.0 / dx$ (5, I) : $1.0 / cx$ (6, I) : $1.0 / (dx(I) + dx(I-1))$	—
YY (MAXG1, NUMJ)	R*8	y 方向格子座標等 (1, J) : 格子座標 y (J) (2, J) : $dy = y(J+1) - y(J)$ (3, J) : $cy = (dy(J) + dy(J-1)) / 2.0$ (4, J) : $1.0 / dy$ (5, J) : $1.0 / cy$ (6, J) : $1.0 / (dy(J) + dy(J-1))$	—
ZZ (MAXG1, NUMK)	R*8	z 方向格子座標等 (1, K) : 格子座標 z (K) (2, K) : $dz = z(K+1) - z(K)$ (3, K) : $cz = (dz(K) + dz(K-1)) / 2.0$ (4, K) : $1.0 / dz$ (5, K) : $1.0 / cz$ (6, K) : $1.0 / (dz(K) + dz(K-1))$	—
UU (NUMI, NUMJ, NUMK)	R*8	x 方向流速	図-4.6
VV (NUMI, NUMJ, NUMK)	R*8	y 方向流速	図-4.7
WW (NUMI, NUMJ, NUMK)	R*8	z 方向流速	図-4.8
PP (NUMI, NUMJ, NUMK)	R*8	圧力	図-4.9
FF (NUMI, NUMJ, NUMK)	R*8	VOF 関数 F	図-4.9
ANU (NUMI, NUMJ, NUMK)	R*8	分子動粘性係数と渦動粘性係数の和	図-4.9
CMO (NUMI, NUMJ, NUMK)	R*8	慣性力係数	図-4.9
CDO (NUMI, NUMJ, NUMK)	R*8	抵抗係数	図-4.9
GGV (NUMI, NUMJ, NUMK)	R*8	空隙率	図-4.9
GGX (NUMI, NUMJ, NUMK)	R*8	x 方向面積透過率	図-4.6
GGY (NUMI, NUMJ, NUMK)	R*8	y 方向面積透過率	図-4.7
GGZ (NUMI, NUMJ, NUMK)	R*8	z 方向面積透過率	図-4.8
GLV (NUMI, NUMJ, NUMK)	R*8	$=GGV + (1 - GGV) * CM$	図-4.9
GLX (NUMI, NUMJ, NUMK)	R*8	$=GGX + (1 - GGX) * CM$	図-4.6
GLY (NUMI, NUMJ, NUMK)	R*8	$=GGY + (1 - GGY) * CM$	図-4.7
GLZ (NUMI, NUMJ, NUMK)	R*8	$=GGZ + (1 - GGZ) * CM$	図-4.8
BCU (NUMB)	R*8	x 方向流速の境界値	図-4.13
BCV (NUMB)	R*8	y 方向流速の境界値	図-4.13
BCW (NUMB)	R*8	z 方向流速の境界値	図-4.13

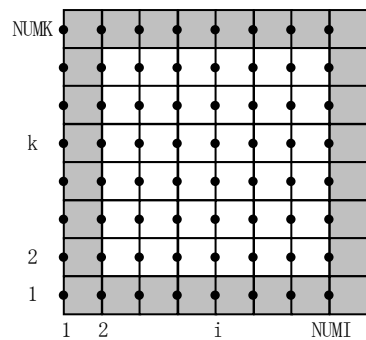
BCP (NUMB)	R*8	圧力の境界値	図-4.13
BCF (NUMB)	R*8	VOF 関数 F の境界値	図-4.13
BCVI (NUMB)	R*8	流速の境界条件(壁面の粗さ)	図-4.13
TBUB (NUMK)	R*8	気泡上昇処理を最後に行った時間	—
DROPTX (NUMI, NUMJ, NUMK)	R*8	自由落下処理を最後に行った時間 (x)	図-4.9
DROPTY (NUMI, NUMJ, NUMK)	R*8	自由落下処理を最後に行った時間 (y)	図-4.9
DROPTZ (NUMI, NUMJ, NUMK)	R*8	自由落下処理を最後に行った時間 (z)	図-4.9
DROPUU (NUMI, NUMJ, NUMK)	R*8	自由落下の x 方向速度	図-4.9
DROPVV (NUMI, NUMJ, NUMK)	R*8	自由落下の y 方向速度	図-4.9
DROPWW (NUMI, NUMJ, NUMK)	R*8	自由落下の z 方向速度	図-4.9
GGVOLD (IPRNP)	R*8	前の時刻ブロックの空隙率	—
GGVNOW (IPRNP)	R*8	現在の時刻ブロックの空隙率	—
GGVO (NUMI, NUMJ, NUMK)	R*8	空隙率(時間依存用)	図-4.9
GLVO (NUMI, NUMJ, NUMK)	R*8	$=GGV + (1 - GGV) * CM$ (時間依存用)	図-4.9
ANUT (NUMI, NUMJ, NUMK)	R*8	渦動粘性係数 $\nu_t$	図-4.9
AK (NUMI, NUMJ, NUMK)	R*8	乱流エネルギー	図-4.9
AE (NUMI, NUMJ, NUMK)	R*8	乱流エネルギー散逸	図-4.9
BCK (NUMB)	R*8	乱流エネルギーの境界値	図-4.13
BCE (NUMB)	R*8	乱流エネルギー散逸の境界値	図-4.13
TT (NUMI, NUMJ, NUMK)	R*8	温度	図-4.9
ALM (NUMI, NUMJ, NUMK)	R*8	熱伝導率と乱流熱伝導率の和	図-4.9
BCT (NUMB)	R*8	温度の境界値	図-4.13
BCTI (2, NUMB)	R*8 R*8 R*8	温度の境界条件 (1, L): 熱伝達係数 or 熱流束 (2, L): 外部温度	図-4.13
CC (NUMI, NUMJ, NUMK, LEQC)	R*8	濃度	図-4.9
DD (NUMI, NUMJ, NUMK, LEQC)	R*8	拡散係数と乱流拡散係数の和	図-4.9
BCC (NUMB, LEQC)	R*8	濃度の境界値	図-4.13
BCCI (2, NUMB, LEQC)	R*8 R*8 R*8	濃度の境界条件 (1, L): 物質移動係数 or 拡散流束 (2, L): 外部濃度	図-4.13
DMTBT (MTBTT)	R*8	マトリクスデータの無次元位相	—
DMTBZZ (MTBZZ)	R*8	マトリクスデータの z 座標(平均水位をゼロ)	—
DMTBHH (MTBTT)	R*8	マトリクスデータの水位	—
DMTBUN (MTBZZ, MTBTT)	R*8	マトリクスデータの水平方向流速	—
DMTBUT (MTBZZ, MTBTT)	R*8	マトリクスデータの鉛直方向流速	—
DBUF (NUMBUF*MAXBUF)	R*8	並列用のバッファ	—
SRCUV (NUMI, NUMJ, NUMK)	R*8	造波ソース用水平方向流速	—
PPPVC (NUMI, NUMJ, NUMK)	R*8	空気圧の計算用の圧力 (E, S セルに気圧)	—
WK01-17 (NUMI, NUMJ, NUMK)	R*8	ワーク配列	—
WKBC (NUMB)	R*8	ワーク配列	—

表-4.6 メインルーチンが宣言する実質的な大域変数の詳細説明(2/2)

変数名	型	内容	参考図
NF (NUMI, NUMJ, NUMK)	I*4	セルの状態を示すインデックス = -1: 障害物セル = 0: 流体セル = 1: 表面セル: x 負方向に流体 = 2: 表面セル: x 正方向に流体	図-4.9

		= 3:表面セル:y 負方向に流体 = 4:表面セル:y 正方向に流体 = 5:表面セル:z 負方向に流体 = 6:表面セル:z 正方向に流体 = 8:気体セル	
INDX (NUMI, NUMJ, NUMK)	I*4	x 面の状態を示すインデックス =-1:障害物面 = 0:通常面 >=1:境界面 (INDB へのポインタ)	図-4. 10
INDY (NUMI, NUMJ, NUMK)	I*4	y 面の状態を示すインデックス =-1:障害物面 = 0:通常面 >=1:境界面 (INDB へのポインタ)	図-4. 11
INDZ (NUMI, NUMJ, NUMK)	I*4	z 面の状態を示すインデックス =-1:障害物面 = 0:通常面 >=1:境界面 (INDB へのポインタ)	図-4. 12
INDC (NUMI, NUMJ, NUMK)	I*4	セルの計算状態を示すインデックス =-1:非計算セル(障害物または気体) = 0:計算セル(流体または表面)	図-4. 14
INDB (MAXB1, NUMB)	I*4	境界面のインデックス (1, L):境界面の I, J, K 座標の 1 次元表記 (I+NUMI*(J-1)+NUMI*NUMJ*(K-1)) (2, L):境界面の向き =1:x 方向負側に構造物 =2:x 方向正側に構造物 =3:y 方向負側に構造物 =4:y 方向正側に構造物 =5:z 方向負側に構造物 =6:z 方向正側に構造物 (3, L):流速・圧力の境界条件 =0:未定義 =1:スリップ =2:ノンスリップ =3:流速固定 =4:フリー =5:造波境界 =6:対数則 =7:放射境界 =8:完全粗面境界 (4, L):VOF 関数 F の境界条件 =0:未定義 =1:値固定 =2:フリー =5:造波境界 =7:放射境界	図-4. 13
INDS (NUMI*NUMJ*NUMK)	I*4	表面セルの I, J, K 座標 (I+NUMI*(J-1)+NUMI*NUMJ*(K-1))	図-4. 15
INDBK (NUMB)	I*4	乱流エネルギーの境界条件 =-2:勾配ゼロ(移流項を評価しない)	図-4. 13

		=-1:値固定(移流項を評価しない) = 0:未定義 = 1:値固定(移流項を評価する) = 2:勾配ゼロ移流項を評価する) = 6:対数則 = 8:完全粗面境界	
INDBE (NUMB)	I*4	乱流エネルギー散逸の境界条件 =-2:勾配ゼロ(移流項を評価しない) =-1:値固定(移流項を評価しない) = 0:未定義 = 1:値固定(移流項を評価する) = 2:勾配ゼロ移流項を評価する) = 6:対数則 = 8:完全粗面境界	図-4. 13
INDBT (NUMB)	I*4	温度の境界条件 =-4:熱伝達(移流項を評価しない) =-3:熱流束(移流項を評価しない) =-2:断熱(移流項を評価しない) =-1:温度固定(移流項を評価しない) = 0:未定義 = 1:温度固定(移流項を評価する) = 2:断熱(移流項を評価する) = 3:熱流束(移流項を評価する) = 4:熱伝達(移流項を評価する)	図-4. 13
INDBC (NUMB, LEQC)	I*4	濃度の境界条件 =-4:物質移動(移流項を評価しない) =-3:拡散流束(移流項を評価しない) =-2:勾配ゼロ(移流項を評価しない) =-1:濃度固定(移流項を評価しない) = 0:未定義 = 1:濃度固定(移流項を評価する) = 2:勾配ゼロ(移流項を評価する) = 3:拡散流束(移流項を評価する) = 4:物質移動(移流項を評価する)	図-4. 13
IPVC (NUMI, NUMJ, NUMK)	I*4	空気圧の計算用インデックス = 0:非気泡セル >=1:気泡番号	
IBUF (NUMBUF*MAXBUF)	I*4	並列用のバッファ	—
NWK1 (NUMI, NUMJ, NUMK)	I*4	ワーク配列	—
NWKBC (NUMB)	I*4	ワーク配列	—

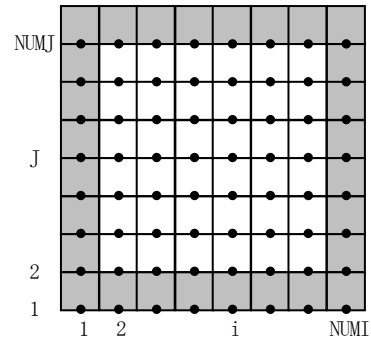


```

      DO 120 K=2, NUMK-1
        DO 110 J=2, NUMK-1
          DO 100 I=3, NUMI-1
            .....
          100    CONTINUE
        110    CONTINUE
      120    CONTINUE

```

図-4.6 x 面上で定義される配列

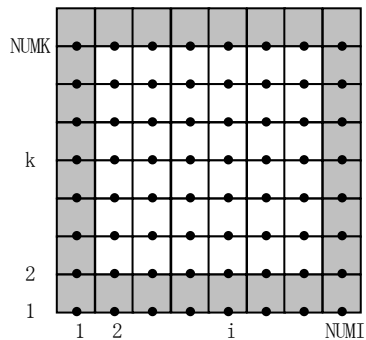


```

      DO 120 K=2, NUMK-1
        DO 110 J=3, NUMK-1
          DO 100 I=2, NUMI-1
            .....
          100    CONTINUE
        111    CONTINUE
      120    CONTINUE

```

図-4.7 y 面上で定義される配列

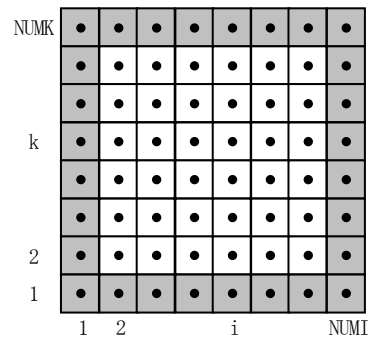


```

      DO 120 K=3, NUMK-1
        DO 110 J=2, NUMK-1
          DO 100 I=2, NUMI-1
            .....
          100    CONTINUE
        112    CONTINUE
      120    CONTINUE

```

図-4.8 z 面上で定義される配列



```

      DO 120 K=2, NUMK-1
        DO 110 J=2, NUMK-1
          DO 100 I=2, NUMI-1
            .....
          100    CONTINUE
        113    CONTINUE
      120    CONTINUE

```

図-4.9 セル中心で定義される配列

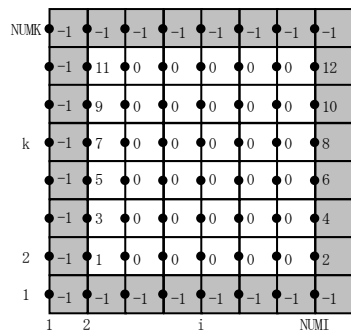


図-4.10 INDX

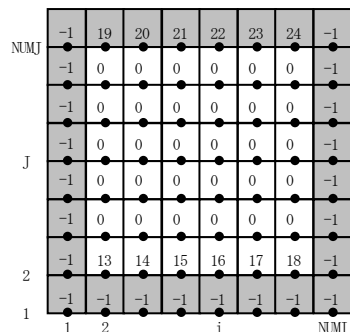


図-4.11 INDY

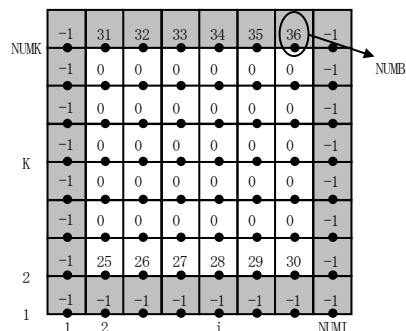


図-4.12 INDZ

<境界面情報の参照>

```

1 INDB(*, 1) BCU( 1) BCW( 1) . . .
2 INDB(*, 2) BCU( 2) BCW( 2) . . .
. . . . .
35 INDB(*, 35) BCU(35) BCW(35) . . .
36 INDB(*, 36) BCU(36) BCW(36) . . .

```

<境界面のみのループ例>

```

DO 100 L=1, NUMB
  IJK=INDB(L, L)
  K = (IJK-1) / (NUMI*NUMJ) + 1
  IJK=IJK-NUMI*NUMJ*(K-1)
  J = (IJK-1) / NUMI + 1
  I = IJK-NUMI*(J-1)
  . . . . .
100 CONTINUE

```

図-4.13 INDB、境界値

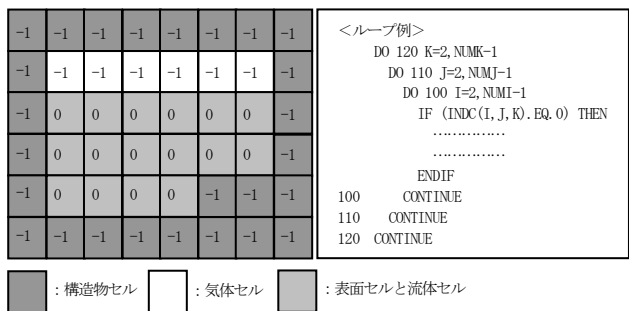


図-4.14 INDC

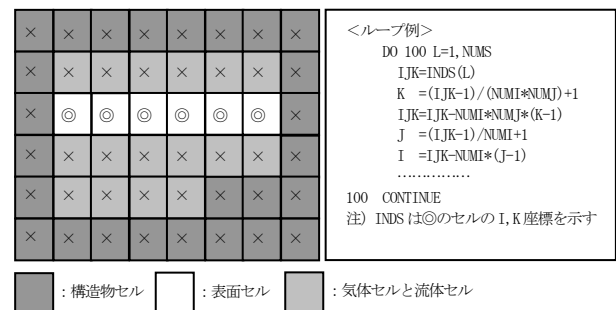


図-4.15 INDS



## 5. プログラムの使用方法

本章では、制限事項、入出力ファイルおよび描画部等、CADMAS-SURF/3D-MP のプログラムの使用方法について示す。

### 5.1 制限事項

CADMAS-SURF/3D-MP は、FORTRAN90 を基本として開発したため、配列の動的割当てに対応している。よって、格子数や境界面数についての制限はない（メモリの許す限り）。ただし、以下に示すいくつかの制限があるため、ユーザは必要に応じて、データ数の上限等を変更し、再コンパイルする必要がある。

●MAXNPI : x 方向最大プロセス数(並列用)

ファイル VF\_AOPRM. h のなかにパラメータ文で記述されている。変更時には全コンパイルを行う。デフォルトは 10 である

●MAXNPJ : y 方向最大プロセス数(並列用)

ファイル VF\_AOPRM. h のなかにパラメータ文で記述されている。変更時には全コンパイルを行う。デフォルトは 10 である

●MAXCHR : 1 行の最大文字数(入力ファイル)

ファイル VF\_AOPRM. h のなかにパラメータ文で記述されている。変更時には全コンパイルを行う。デフォルトは 256 である。

●MAXWDS : 1 行の最大単語数(入力ファイル)

ファイル VF\_AOPRM. h のなかにパラメータ文で記述されている。変更時には全コンパイルを行う。デフォルトは 128 である。

●MAXNC : 濃度の最大成分数

ファイル VF\_AOPRM. h のなかにパラメータ文で記述されている。変更時には全コンパイルを行う。デフォルトは 10 である。

●MAXTR : 時系列ファイルへの出力対象データ最大数

ファイル VF\_AOPRM. h のなかにパラメータ文で記述されている。変更時には全コンパイルを行う。デフォルト

トは 10000 である。

●MAXPRB：時間依存型空隙率の空間ブロックの最大数

ファイル VF\_AOPRM.h のなかにパラメータ文で記述されている。変更時には全コンパイルを行う。デフォルトは 10 である。

●MAXPVC：気泡の最大数(:空気圧計算用)

ファイル VF\_AOPRM.h のなかにパラメータ文で記述されている。変更時には全コンパイルを行う。デフォルトは 500 である。

●MAXDR：Dupuit-Forheimer 式の係数の最大数

ファイル VF\_AOPRM.h のなかにパラメータ文で記述されている。変更時には全コンパイルを行う。デフォルトは 10 である。

5.2 入力ファイル

5.2.1 入力ファイルの例

入力ファイルは解析条件を入力するためのファイルであり、市販のワープロソフト等を用いて作成する。ファイル名は data.in とし、テキスト形式のファイルである。なお、入力ファイルはリスタート計算時にも必要であり、時間刻み幅の初期値が無効となること、および、構造物・境界条件を変更してはいけないこと以外の制限はなく、ほとんどの項目が変更可能である。以下に入力ファイルの例を示す。

表-5.1 入力ファイルの例

入力ファイル	内 容
##### # TEST DATA #####  PARALLEL X 100 PARALLEL X 200 PARALLEL X 300  TIME AUTO 0.001 0.20 TIME LIMIT 1.0D-5 0.05 TIME END 999999 40.1  MATE W-LEVEL 10.0 MATE DENSITY 1000.0 MATE K-VISC 0.0 MATE GRAVITY 9.8 MATE I.C. V 0.0 0.0 0.0	コメント   並列制御データ   時間制御データ   物性値等データ

MODEL WAVE-BC X- FUNC STREAM 5 MODEL WAVE-BC X- DEPTH 10.0 MODEL WAVE-BC X- HEIGHT 4.0 MODEL WAVE-BC X- PERIOD 8.007 MODEL WAVE-BC X- AMPL 2.0	造波モデルデータ
MODEL DAMP X+ DEGREE 2 MODEL DAMP X+ PARAM-XY 0.6 MODEL DAMP X+ PARAM-Z 0.6 MODEL DAMP X+ WIDTH 146.0804 MODEL DAMP X+ DEPTH 10.0	減衰領域データ
MODEL OPEN-BC X+ FUNC TYPE1 MODEL OPEN-BC X+ DEPTH 10.0 MODEL OPEN-BC X+ PERIOD 8.007	開境界データ
COMP SCHM VP-DONOR 0.2 COMP MTRX M-ILUBCGSTAB 0.95 COMP MTRX MAX-ITR 500 COMP MTRX A-ERROR 1.0D-12 COMP MTRX R-ERROR 1.0D-10	数値解法関連データ
GRID X 0.00000000 0.91300250 1.82600500 2.73900750 3.65201000 ~~~~~ 省略 ~~~~~ 360.63598750 361.54899000 362.46199250 363.37499500 364.28799750 365.20100000 END  GRID Y 0.00 1.00 END  GRID Z 0.000 0.400 0.800 1.200 1.600 ~~~~~ 省略 ~~~~~ 18.000 18.400 18.800 19.200 19.600 20.000 END	格子座標データ
B.C. D VP SLIP B.C. D F FREE	境界条件データ
FILE L/P AREA XZ 1 1 FILE L/P OFF OBST FILE L/P OFF BC-IND FILE L/P OFF CMO FILE L/P OFF NF FILE L/P OFF F FILE L/P OFF V FILE L/P OFF P FILE L/P OFF VISC FILE L/P OFF BC  FILE GRP TIME 0.0 9999.9 8.007  FILE TRN STEP 0 999999 1 FILE TRN W-LEVEL ANS X- FILE TRN W-LEVEL 1 1 FILE TRN W-LEVEL 81 1 FILE TRN W-LEVEL 321 1 FILE TRN W-LEVEL 400 1	ファイル制御データ
OPTION T-DOOR BUB OFF OPTION T-DOOR DROP OFF	オプションデータ

### 5.2.2 入力ファイルの規則

入力ファイルは、行単位で構成され、1つ以上の空白により単語に分解される。行の内部は全てフリーフォーマットであり、以下の部分は無視される。入力データの順序の規則はない。

- 空白行
- 行の先頭から連続する空白
- 「#」以降の文字（コメント用）
- 文法上有効な最後の単語以降の文字

また、1行の最大文字数はファイル VF\_AOPRM.h の MAXCHR、1行の最大単語数はファイル VF\_AOPRM.h の MAXWDS である。なお、ダブ等の特殊文字は判定していないので注意が必要である。

### 5.2.3 入力ファイルの内容

以下に入力ファイルの内容を示す。なお、図-5.1 に示すとおり、入力ファイルにおけるサフィックスには仮想セルを含ませない。

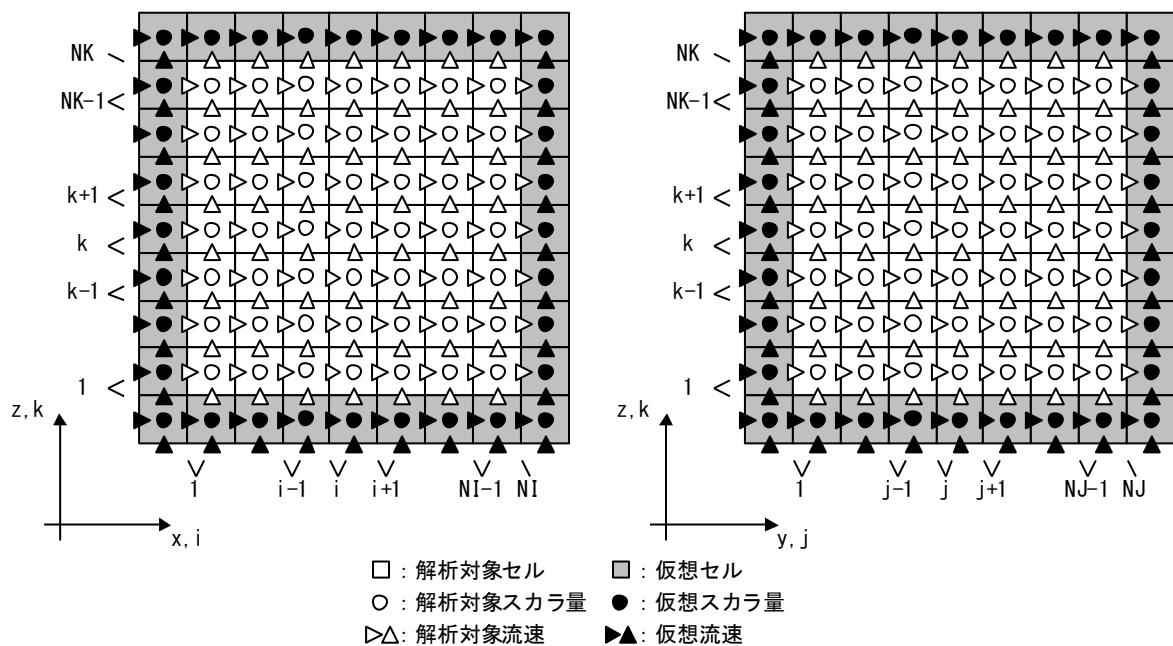


図-5.1 入力ファイルにおけるサフィックス（NI、NJ、NK は格子座標の入力数）

===== 並列制御データ =====

■並列制御データ

PARALLEL X [IC]

PARALLEL Y [JC]

変数名	意味	型	デフォルト	制限事項
IC	x 方向終了セル番号	I*4	-	2=<IC=<NI-2
JC	y 方向終了セル番号	I*4	-	2=<JC=<NJ-2

注)本データの方向毎の入力数+1 が方向別のプロセス数

===== 方程式制御データ =====

■方程式制御データ

EQUATION K-EPS {ISW}

EQUATION TEMPERATURE {ISW}

EQUATION CONCENTRATION [NC]

変数名	意味	型	デフォルト	制限事項
{ISW}	計算するかしないかの選択 'NOCALC' : 計算しない 'CALC' : 計算する	C*(*)	-	指定文字列のみ
[NC]	成分数	I*4	0	0=<NC=<MAXNC

注)デフォルトでは計算しない

NS=0 の場合は計算しない

===== 時間制御データ =====

■時間制御データ

TIME CONST [DTCNST]

TIME AUTO [DTINIT] [DTSAFE]

TIME LIMIT [DTMIN] [DTMAX]

TIME END [NEND] [TEND]

変数名	意味	型	デフォルト	制限事項
DTCNST	時間刻み幅の一定値[s]	R*8	1.0D-3	DTCNST>=ZERO
DTINIT	時間刻み幅の初期値[s]	R*8	1.0D-6	DTINIT>=ZERO
DTSAFE	時間刻み幅の安全率[-]	R*8	1.0D-1	DTSAFE>=ZERO
DTMIN	時間刻み幅の最小値[s]	R*8	ZERO	ZERO=<DTMIN=<DTMAX

DTMAX	時間刻み幅の最大値[s]	R*8	1. 0D0/ZERO	ZERO=<DTMIN=<DTMAX
NEND	解析終了ステップ[-]	I*4	0	NEND>=0
TEND	解析終了時刻[s]	R*8	0. 0D0	TEND>=0. 0D0

注)デフォルトは「AUTO」

「AUTO」では波速による制限は考慮していない

リスタート時には初期値は無効となる

=====

===== 物性値等データ =====

=====

## ■物性値等データ

### <流動場用>

MATE W-LEVEL [WVLVL]  
MATE DENSITY [RH00]  
MATE K-VISC [ANU0]  
MATE GRAVITY [GRZ0]  
MATE I. C. V [UINI] [VINI] [WINI]

### <k-ε用>

MATE I. C. KE [AKINI] [AEINI]

### <温度場用>

MATE S-HEAT [CP]  
MATE T-COND [TC]  
MATE T-DENS [T0] [DRDT]  
MATE I. C. T [TINI]

### <濃度場用>

MATE DIFFUS [LC] [DF]  
MATE C-DENS [LC] [C0] [DRDC]  
MATE I. C. C [LC] [CINI]

変数名	意味	型	デフォルト	制限事項
WVLVL	初期水面の高さ[m]	R*8	0. 0D0	-
RH00	密度[kg/m3]	R*8	1. 0D+3	RH00>=ZERO
ANU0	分子動粘性係数[m2/s]	R*8	1. 0D-6	ANU0>=0. 0
GRZ0	重力加速度[m/s2]	R*8	9. 8	GZRO>=0. 0
UINI	x 方向流速の初期値[m/s]	R*8	0. 0	-
VINI	y 方向流速の初期値[m/s]	R*8	0. 0	-
WINI	z 方向流速の初期値[m/s]	R*8	0. 0	-
AKINI	乱流エネルギーの初期値[m2/s2]	R*8	ZERO	AKINI>=ZERO
AEINI	乱流エネルギー散逸の初期値[m2/s3]	R*8	ZERO	AEINI>=ZERO
CP	定圧比熱[J/K/kg]	R*8	4. 2D+3	CP>=ZERO
TC	熱伝導率[W/m/K]	R*8	5. 7D-1	TC>=ZERO
T0	浮力計算のための基準温度[K]	R*8	2. 73D+2	-
DRDT	密度の温度微分[kg/m3/K]	R*8	1. 5D-1	-
TINI	温度の初期値[K]	R*8	2. 73D+2	-

LC	濃度の成分番号	R*8	-	1=<LS=<NS
DF	拡散係数[m <sup>2</sup> /s]	R*8	-	DF>=ZERO
C0	浮力計算のための基準濃度[-]	R*8	0.0D0	-
DRDC	密度の濃度微分[kg/m <sup>3</sup> ]	R*8	0.0D0	-
CINI	濃度の初期値[K]	R*8	0.0D0	-

注) 造波モデル使用時の重力加速度は 9.8 でなければならない  
 浮力用密度は  $RH0 = RH00 - DRDT * (T - T0) - DRDC * (C - C0)$  から計算する

=====

===== モデル等データ =====

=====

## ■造波モデルデータ

```

MODEL WAVE-BC {DIR} FUNC STREAM [N]
MODEL WAVE-BC {DIR} FUNC {TYPE}
MODEL WAVE-BC {DIR} DEPTH [D]
MODEL WAVE-BC {DIR} HEIGHT [H]
MODEL WAVE-BC {DIR} PERIOD [T]
MODEL WAVE-BC {DIR} AMPL [A]
MODEL WAVE-BC {DIR} AREA [LC1] [LC2]
MODEL WAVE-BC {DIR} ANGLE [ANG] [X0] [Y0]
MODEL WAVE-SRC {DIR2} [LC]
MODEL WAVE-SRC FUNC STREAM [N]
MODEL WAVE-SRC FUNC {TYPE}
MODEL WAVE-SRC DEPTH [D]
MODEL WAVE-SRC HEIGHT [H]
MODEL WAVE-SRC PERIOD [T]
MODEL WAVE-SRC AMPL [A]

```

変数名	意味	型	デフォルト	制限事項
{DIR}	造波境界の位置と伝播方向 'X-' : x 座標最小位置から法線方向へ 'X+' : x 座標最大位置から法線方向へ 'Y-' : y 座標最小位置から法線方向へ 'Y+' : y 座標最大位置から法線方向へ	C*(*)	-	指定文字列のみ
{DIR2}	造波ソースの伝播方向 'X' : x 方向へ 'Y' : y 方向へ	C*(*)	-	指定文字列のみ
N	流れ関数法 B の次数	I*4	-	1=<N=<22
{TYPE}	流れ関数法 B 以外の造波関数 'STK-CND' : ストークス波またはクノイド波 'STOKES' : ストークス波 'CNOIDAL' : クノイド波 'MATRIX' : マトリクスデータ-1 'MATRIX2' : マトリクスデータ-2 (BC のみ)	C*(*)	-	指定文字列のみ
D	水深[m]	R*8	-	D>=ZERO
H	波高[m]	R*8	-	H>=ZERO
T	周期[s]	R*8	-	T>=ZERO

A	何周期かけて増幅するか	R*8	0.0	-
LC1	{DIR} が 'Y+' か 'Y-' の場合 x 方向セル番号(始点)	I*4	1	1=<LC1=<LC2=<NI-1
	{DIR} が 'X+' か 'X-' の場合 y 方向セル番号(始点)	I*4	1	1=<LC1=<LC2=<NJ-1
LC2	{DIR} が 'Y+' か 'Y-' の場合 x 方向セル番号(終点)	I*4	NI-1	1=<LC1=<LC2=<NI-1
	{DIR} が 'X+' か 'X-' の場合 y 方向セル番号(終点)	I*4	NJ-1	1=<LC1=<LC2=<NJ-1
LC	{DIR2} が 'X' の場合 x 方向セル番号	I*4	-	1=<LC=<NI-1
	{DIR2} が 'Y' の場合 y 方向セル番号	I*4	-	1=<LC=<NJ-1
ANG	各境界面の法線方向をゼロと した半時計周りの角度[DEG]	R*8	0.0	-
X0	位相計算の基準点(x 座標[m])	R*8	-	-
Y0	位相計算の基準点(y 座標[m])	R*8	-	-

注) 造波関数のデフォルトは 'STK-CND'

マトリクスデータ以外の造波関数使用する場合は、水深、波高および周期が必須  
マトリクスデータでは以下が必須となる

水位／流速：水深と周期が必須

流速：周期が必須

水位：周期が必須(造波ソースでは使用不可)

A<ZERO の場合、最初から所定の造波を行う

AREA のデフォルトは全域

ANG はマトリクスデータでは使用できない

ANG のデフォルトはゼロ

|ANG|=<ZERO の場合は基準点は使用しない

## ■開境界データ

MODEL OPEN-BC {DIR} FUNC {TYPE}  
MODEL OPEN-BC {DIR} DEPTH [D]  
MODEL OPEN-BC {DIR} PERIOD [T]

変数名	意味	型	デフォルト	制限事項
{DIR}	開境界の位置と伝播方向 'X-' : x 座標最小位置から法線方向へ 'X+' : x 座標最大位置から法線方向へ 'Y-' : y 座標最小位置から法線方向へ 'Y+' : y 座標最大位置から法線方向へ	C*(*)	-	指定文字列のみ
{TYPE}	開境界の種類 'TYPE1' : 微小振幅波による放射境界	C*(*)	-	指定文字列のみ
D	水深[m]	R*8	-	D>=ZERO
T	周期[s]	R*8	-	T>=ZERO

注) TYPE1 を使用する場合は、水深と周期が必須

## ■減衰領域データ



MODEL DAMP {DIR} DEGREE [N]  
 MODEL DAMP {DIR} PARAM-XY [PXY]  
 MODEL DAMP {DIR} PARAM-Z [PZ]  
 MODEL DAMP {DIR} WIDTH [W]  
 MODEL DAMP {DIR} DEPTH [D]

変数名	意味	型	デフォルト	制限事項
{DIR}	減衰領域の位置 'X-' : x 座標最小位置近傍 'X+' : x 座標最大位置近傍 'Y-' : y 座標最小位置近傍 'Y+' : y 座標最大位置近傍	C*(*)	-	指定文字列のみ
N	減衰関数の次数	[-] I*4	-	N>=0
PXY	減衰関数の水平方向パラメータ	[-] R*8	0.6	PXY>=ZERO
PZ	減衰関数の鉛直方向パラメータ	[-] R*8	0.6	PZ >=ZERO
W	減衰領域の幅	[m] R*8	-	W >=ZERO
D	減衰領域の水深	[m] R*8	-	D >=ZERO

注)減衰領域を使用する場合には、次数、幅および水深が必須

減衰関数の次数の推奨値は2

減衰関数のデフォルト値は、領域の幅を2波長としたときの推奨値

## ■乱流モデルデータ

MODEL K-EPS LIM [AKMIN] [AEMIN]  
 MODEL K-EPS PARAMETER [CMU] [SGK] [SGE] [C1] [C2] [C3]  
 MODEL K-EPS LOG-LAW [K0] [A0]  
 MODEL K-EPS PRANDTL [PR]  
 MODEL K-EPS SCHMIDT [LC] [SM]

変数名	意味	型	デフォルト	制限事項
AKMIN	乱流エネルギーの最小値[m2/s2]	R*8	ZERO	>=ZERO
AEMIN	乱流エネルギー散逸の最小値[m2/s3]	R*8	ZERO	>=ZERO
CMU	$C_\mu$ [-]	R*8	0.09	>=ZERO
SGK	$\sigma_k$ [-]	R*8	1.0	>=ZERO
SGE	$\sigma_\epsilon$ [-]	R*8	1.3	>=ZERO
C1	C1[-]	R*8	1.44	>=0.0
C2	C2[-]	R*8	1.92	>=0.0
C3	C3[-]	R*8	0.0	>=0.0
K0	$\kappa$ [-]	R*8	0.4	>=ZERO
A0	A[-]	R*8	5.5	>=ZERO
PR	乱流 Prandtl 数[-]	R*8	1.0D0	PR>=ZERO
LC	濃度の成分番号	R*8	-	1<=LS<=NS
SM	乱流 Schmidt 数[-]	R*8	1.0D0	SM>=ZERO

===== 数値解法関連データ =====

## ■数値解法関連データ

```

COMP SCHM VP-DONOR      [SCMVP]
COMP SCHM FF-DN-AC
COMP SCHM FF-SLOPE
COMP SCHM KE-DONOR      [SCMK]
COMP SCHM T-DONOR       [SCMT]
COMP SCHM C-DONOR [LC]  [SCMC]
COMP MTRX ILUBCGSTAB
COMP MTRX M-ILUBCGSTAB [CGPARA]
COMP MTRX MAX-ITR       [ICGMAT]
COMP MTRX A-ERROR       [CGEPSA]
COMP MTRX R-ERROR       [CGEPSR]

```

変数名	意味	型	デフォルト	制限事項
SCMVP	移流項の差分スキームパラメータ	R*8	1.0	0.0=<SCMVP=<1.0
SCMK	移流項の差分スキームパラメータ	R*8	1.0	0.0=<SCMK=<1.0
SCMT	移流項の差分スキームパラメータ	R*8	1.0	0.0=<SCMT=<1.0
LC	濃度の成分番号	R*8	-	1=<LS=<NS
SCMC	移流項の差分スキームパラメータ	R*8	1.0	0.0=<SCMC=<1.0
CGPARA	MILU 用パラメータ [-]	R*8	0.95	0.0=<CGPARA=<1.0
ICGMAT	最大反復回数 [-]	I*4	500	ICGMAT>=0
CGEPSA	収束判定値 (絶対誤差) [-]	R*8	1.0D-15	CGEPSA>=0.0
CGEPSR	収束判定値 (相対誤差) [-]	R*8	1.0D-12	CGEPSR>=0.0

注) 差分スキームのデフォルトは DONOR

「ILUBCGSTAB」または「M-ILUBCGSTAB」が選択可能であり、デフォルトは「M-ILUBCGSTAB」

```

=====
===== 格子座標データ =====
=====

```

## ■格子座標データ (必須)

```

GRID {COORD} [S(1)] [S(2)] .....
.....
..... [S(N)] END

```

変数名	意味	型	デフォルト	制限事項
{COORD}	座標の種別 'X' : x 座標 'Y' : y 座標 'Z' : z 座標	C*(*)	-	指定文字列のみ
S(i)	座標値[m]	R*8	-	S(i)-S(i-1)>=ZEROG
N	格子数	I*4	-	N>=2

注) 入力は1度でなければならない

1行あたりの座標値の入力数は任意

N(NI、NJ または NK) は明示的な入力ではなく、座標値の総入力数

=====

===== 障害物データ =====

=====

■障害物データ(ファイル入力)

OBST FILE {FILE}

変数名	意味	型	デフォルト	制限事項
{FILE}	外部ファイル名	C*(*)	-	-

このオプションを指定した場合、OBST データを外部ファイルから読み込む  
外部ファイルは既存のデータの OBST で始まる行をカット&ペーストして作成する

■障害物データ (矩形入力)

OBST [IC1] [JC1] [KC1] [IC2] [JC2] [KC2]

変数名	意味	型	デフォルト	制限事項
IC1	x 方向セル番号(矩形の始点)	I*4	-	1=<IC1=<IC2=<NI-1
JC1	y 方向セル番号(矩形の始点)	I*4	-	1=<JC1=<JC2=<NJ-1
KC1	z 方向セル番号(矩形の始点)	I*4	-	1=<KC1=<KC2=<NK-1
IC2	x 方向セル番号(矩形の終点)	I*4	-	1=<IC1=<IC2=<NI-1
JC2	y 方向セル番号(矩形の終点)	I*4	-	1=<JC1=<JC2=<NJ-1
KC2	z 方向セル番号(矩形の終点)	I*4	-	1=<KC1=<KC2=<NK-1

=====

===== ポーラス関連データ =====

=====

■ポーラス値データ

POROUS FILE {FILE}

変数名	意味	型	デフォルト	制限事項
{FILE}	外部ファイル名	C*(*)	-	-

このオプションを指定した場合、POROUS データを外部ファイルから読み込む  
外部ファイルは既存のデータの POROUS で始まる行をカット&ペーストして作成する

■ポーラス値の下限値データ

POROUS LIM [PL]

■空隙率

POROUS V [IC1] [JC1] [KC1] [IC2] [JC2] [KC2] [V1] [V2]

■x 方向面積透過率

POROUS X [IG1] [JC1] [KC1] [IG2] [JC2] [KC2] [V1] [V2]

■y 方向面積透過率

POROUS Y [IC1] [JG1] [KC1] [IC2] [JG2] [KC2] [V1] [V2]

■z 方向面積透過率

POROUS Z [IC1] [JC1] [KG1] [IC2] [JC2] [KG2] [V1] [V2]

■慣性力係数

POROUS CM [IC1] [JC1] [KC1] [IC2] [JC2] [KC2] [CM]

■抵抗係数

POROUS CD [IC1] [JC1] [KC1] [IC2] [JC2] [KC2] [CD]

変数名	意味	型	デフォルト	制限事項
PL	ポーラス値の下限值[-]	R*8	1. 0D-4	ZERO=<PL=<1. 0
IG1	x 方向格子番号(矩形の始点)	I*4	-	1=<IG1=<IG2=<NI
JG1	y 方向格子番号(矩形の始点)	I*4	-	1=<JG1=<JG2=<NJ
KG1	z 方向格子番号(矩形の始点)	I*4	-	1=<KG1=<KG2=<NK
IG2	x 方向格子番号(矩形の終点)	I*4	-	1=<IG1=<IG2=<NI
JG2	y 方向格子番号(矩形の終点)	I*4	-	1=<JG1=<JG2=<NJ
KG2	z 方向格子番号(矩形の終点)	I*4	-	1=<KG1=<KG2=<NK
IC1	x 方向セル番号(矩形の始点)	I*4	-	1=<IC1=<IC2=<NI-1
JC1	y 方向セル番号(矩形の始点)	I*4	-	1=<JC1=<JC2=<NJ-1
KC1	z 方向セル番号(矩形の始点)	I*4	-	1=<KC1=<KC2=<NK-1
IC2	x 方向セル番号(矩形の終点)	I*4	-	1=<IC1=<IC2=<NI-1
JC2	y 方向セル番号(矩形の終点)	I*4	-	1=<JC1=<JC2=<NJ-1
KC2	z 方向セル番号(矩形の終点)	I*4	-	1=<KC1=<KC2=<NK-1
V1	構造物内の水の割合[-]	R*8	-	0. 0=<V1=<1. 0
V2	形状による水の割合[-]	R*8	-	0. 0=<V2=<1. 0
CM	慣性力係数[-]	R*8	-	CM>=0. 0
CD	抵抗係数[-]	R*8	-	CD>=0. 0

注)PL 以下のポーラス値が入力された場合は PL で置き換える  
指定した矩形の障害物以外の部分に設定(障害物の表面には設定可)  
 $PL=<水の割合=V2+(1. 0-V2)*V1=<1. 0$

=====

===== 境界条件データ =====

=====

■境界条件データ(必須)

B. C. D {BC}

B. C. X [IG1] [JC1] [KC1] [IG2] [JC2] [KC2] {BC}

B. C. Y [IC1] [JG1] [KC1] [IC2] [JG2] [KC2] {BC}

B. C. Z [IC1] [JC1] [KG1] [IC2] [JC2] [KG2] {BC}

変数名	意味	型	デフォルト	制限事項
IG1	x 方向格子番号(矩形の始点)	I*4	-	1=<IG1=<IG2=<NI
JG1	y 方向格子番号(矩形の始点)	I*4	-	1=<JG1=<JG2=<NJ
KG1	z 方向格子番号(矩形の始点)	I*4	-	1=<KG1=<KG2=<NK
IG2	x 方向格子番号(矩形の終点)	I*4	-	1=<IG1=<IG2=<NI
JG2	y 方向格子番号(矩形の終点)	I*4	-	1=<JG1=<JG2=<NJ
KG2	z 方向格子番号(矩形の終点)	I*4	-	1=<KG1=<KG2=<NK
IC1	x 方向セル番号(矩形の始点)	I*4	-	1=<IC1=<IC2=<NI-1
JC1	y 方向セル番号(矩形の始点)	I*4	-	1=<JC1=<JC2=<NJ-1
KC1	z 方向セル番号(矩形の始点)	I*4	-	1=<KC1=<KC2=<NK-1
IC2	x 方向セル番号(矩形の終点)	I*4	-	1=<IC1=<IC2=<NI-1
JC2	y 方向セル番号(矩形の終点)	I*4	-	1=<JC1=<JC2=<NJ-1
KC2	z 方向セル番号(矩形の終点)	I*4	-	1=<KC1=<KC2=<NK-1
{BC}	境界条件の種別	C*(*)	-	指定文字列と値の組合せ

#### 流速・圧力の境界条件

スリップ : VP SLIP  
 ノンスリップ : VP NON-S  
 流速固定 : VP FIX-V [BU] [BV] [BW]  
 フリー : VP FREE  
 対数則 : VP LOG  
 完全粗面 : VP LOG-KS [KS]

#### VOF 関数 F の境界条件

スリップ : F FIX [BF]  
 スリップ : F FREE

#### 乱流エネルギーの境界条件

値固定(-A) : K FIX-A [BK]  
 値固定(+A) : K FIX+A [BK]  
 勾配ゼロ(-A) : K FREE-A  
 勾配ゼロ(+A) : K FREE+A

#### 乱流エネルギー散逸の境界条件

値固定(-A) : E FIX-A [BE]  
 値固定(+A) : E FIX+A [BE]  
 勾配ゼロ(-A) : E FREE-A  
 勾配ゼロ(+A) : E FREE+A

#### 温度の境界条件

温度固定(-A) : T FIX-A [BT]  
 温度固定(+A) : T FIX+A [BT]  
 断熱(-A) : T FREE-A  
 断熱(+A) : T FREE+A  
 熱流束(-A) : T FLUX-A [BTQ]  
 熱流束(+A) : T FLUX+A [BTQ]  
 熱伝達(-A) : T TRAN-A [BTH] [BT0]  
 熱伝達(+A) : T TRAN+A [BTH] [BT0]

#### 濃度の境界条件

濃度固定(-A) : C [LC] FIX-A [BC]  
 濃度固定(+A) : C [LC] FIX+A [BC]  
 勾配ゼロ(-A) : C [LC] FREE-A  
 勾配ゼロ(+A) : C [LC] FREE+A

	拡散流束(-A) : C [LC] FLUX-A [BCQ]			
	拡散流束(+A) : C [LC] FLUX+A [BCQ]			
	物質移動(-A) : C [LC] TRAN-A [BCH] [BC0]			
	物質移動(+A) : C [LC] TRAN+A [BCH] [BC0]			
BU	x 方向流速値[m/s]	R*8	-	-
BV	y 方向流速値[m/s]	R*8	-	-
BW	z 方向流速値[m/s]	R*8	-	-
KS	壁面の粗さ[m]	R*8	-	>=ZERO
BF	VOF 関数 F の値[-]	R*8	-	-
BK	乱流エネルギー[m2/s2]	R*8	-	>=ZERO
BE	乱流エネルギー散逸[m2/s3]	R*8	-	>=ZERO
BT	温度[K]	R*8	-	-
BTQ	熱流束[W/m2]	R*8	-	-
BTH	熱伝達係数[W/m2/K]	R*8	-	BTH>=ZERO
BT0	外部温度[K]	R*8	-	-
LC	濃度の成分番号	R*8	-	1<LS<NS
BC	濃度[-]	R*8	-	-
BCQ	拡散流束[m/s]	R*8	-	-
BCH	物質移動係数[m/s]	R*8	-	BCH>=ZERO
BC0	外部濃度[-]	R*8	-	-

注) 指定した矩形内の境界面に設定される

造波境界および開境界を別途指定した場合には、造波境界および開境界が優先される  
流速に対数則および完全粗面を指定した面では、乱流量に関しても同じ境界となる  
[+A]は移流項の評価時に境界のスカラ量が流れ込む(指定した流束等以外にも流入)  
[-A]は移流項の評価時に境界のスカラ量が流れ込まない

=====

===== ファイル制御データ =====

=====

## ■ リスタート時の地形データの読み込み方法の指定

FILE OBS {FLAG}

変数名	意味	型	デフォルト	制限事項
FLAG	リスタート時地形データを用いるか否か	C*(*)	OFF	OFF または ON

注) このオプションを ON にすると、初回計算時に各 PE の担当領域の地形データ (OBST, POROUS) を obs ファイルに出力し、リスタート計算時に obs ファイルを読み込み、OBST や POROUS ヘッダは無視する。

このオプションを用いた高速化が効果を発揮するためには、OBST FILE 及び POROUS FILE を指定して、OBST データと POROUS データを外部ファイルにしておく必要がある。そうしないと、OBST や POROUS ヘッダの読み込み時間を削減できないためである。

なお、外部ファイル化しない場合、OBST 及び POROUS ヘッダの読み込みの回数は 3 回であり、外部ファイル化した場合には 1 回になる。更に FILE RES AUTO とした場合には、リスタート計算時の読み込みの回数が 0 回になる。

## ■リスタートファイル制御データ

FILE RES [ISTEP]

FILE RES AUTO

変数名	意味	型	デフォルト	制限事項
ISTEP	リスタートするステップ[-]	I*4	-	ISTEP>=0

注) リスタート時には、時間刻み幅の初期値は無効となる

構造物の位置の変更は不可(プログラムではチェックしていない)

境界条件の変更は不可(プログラムではチェックしていない)

AUTO とした場合は、ars ファイルから ISTEP の値を読み込む。

ars ファイルからの読み込みが行えない場合は、リスタート計算ではなく

初回計算を行う。AUTO の機能は、FILE RSL ELAPSE の指定とセットで

使うことが望ましい。

## ■リストファイル出力制御データ

FILE L/P STEP [ISTR] [IEND] [ISTEP]

FILE L/P TIME [TSTR] [TEND] [TSTEP]

FILE L/P AREA {SECT} [IJKC] [IJKG]

FILE L/P ON {PHYS}

FILE L/P OFF {PHYS}

変数名	意味	型	デフォルト	制限事項
ISTR	出力開始ステップ[-]	I*4	-	ISTR=<IEND
IEND	出力終了ステップ[-]	I*4	-	ISTR=<IEND
ISTEP	出力ステップ間隔[-]	I*4	-	ISTEP>0
TSTR	出力開始時刻[s]	R*8	-	TSTR=<TEND
TEND	出力終了時刻[s]	R*8	-	TSTR=<TEND
TSTEP	出力時間間隔[s]	R*8	-	TSTEP>0.0
{SECT}	出力断面 'XY' : xy 断面 'XZ' : xz 断面 'YZ' : yz 断面 'YX' : yx 断面 'ZX' : zx 断面 'ZY' : zy 断面	C*(*)	'XY'	指定文字列のみ
IJKC	出力断面のセル番号	I*4	0	0=<IJKC=<N-1
IJKG	出力断面の格子番号	I*4	0	0=<IJKG=<N
{PHYS}	出力/非出力指定量 'OBST' : 障害物 'BC-IND' : 境界条件に関するインデックス 'CMO' : 慣性力係数 'CDO' : 抵抗係数 'POROUS' : ポーラス値 'LAMBDA' : GLV, GLX, GLZ 'NF' : NF 'F' : VOF 関数 F 'V' : 流速	C*(*)	-	指定文字列のみ

'P' : 圧力  
 'K' : 乱流エネルギー  
 'E' : 乱流エネルギー散逸  
 'VISC-T' : 渦動粘性係数  
 'VISC' : 分子動粘性係数と渦動粘性係数の和  
 'T' : 温度  
 'T-COND' : 熱伝導率  
 'C' : 濃度  
 'DIFFUS' : 拡散係数  
 'BC' : 境界値  
 'IPVC' : 空気圧の計算用インデックス  
 'PPVC' : 空気圧 (S セルも空気圧)

注) STEP または TIME で指定された間隔で出力 (デフォルトでは出力しない)  
 IJKC=0 の場合はセル中心で定義された物理量を 0=<IJKC=<N の全てで出力  
 IJCG=0 の場合はセル界面中心で定義された物理量を 0=<IJCG=<N の全てで出力  
 デフォルトでは全ての量は非出力

## ■図化ファイル出力制御データ

FILE GRP STEP [ISTR] [IEND] [ISTEP]  
 FILE GRP TIME [TSTR] [TEND] [TSTEP]  
 FILE GRP AREA [IC1] [JC1] [KC1] [IC2] [JC2] [KC]  
 FILE GRP ON VORT  
 FILE GRP OFF VORT

変数名	意味	型	デフォルト	制限事項
ISTR	出力開始ステップ[-]	I*4	-	ISTR=<IEND
IEND	出力終了ステップ[-]	I*4	-	ISTR=<IEND
ISTEP	出力ステップ間隔[-]	I*4	-	ISTEP>0
TSTR	出力開始時刻[s]	R*8	-	TSTR=<TEND
TEND	出力終了時刻[s]	R*8	-	TSTR=<TEND
TSTEP	出力時間間隔[s]	R*8	-	TSTEP>0.0
IC1	始点の x 方向セル番号[-]	I*4	1	1=<IC1=<IC2<NI-1
JC1	始点の y 方向セル番号[-]	I*4	1	1=<JC1=<JC2<NJ-1
KC1	始点の z 方向セル番号[-]	I*4	1	1=<KC1=<KC2<NK-1
IC2	終点の x 方向セル番号[-]	I*4	NI-1	1=<IC1=<IC2<NI-1
JC2	終点の y 方向セル番号[-]	I*4	NJ-1	1=<JC1=<JC2<NJ-1
KC2	終点の z 方向セル番号[-]	I*4	NK-1	1=<KC1=<KC2<NK-1

注) STEP または TIME で指定された間隔で出力 (デフォルトでは出力しない)  
 出力する領域は AREA で指定 (デフォルトでは全領域)  
 最低でも 2×2 セルの領域が必要 (セル数が 1 の方向は図化しない)  
 [\*c1=<0] ならば [\*c1=1]、[\*c2=<0] ならば [\*c2=N-1] と解釈する  
 渦度は描画部では濃度の成分数 [+1] から [+3] の 3 成分で代用される  
 渦度はデフォルトでは出力しない

## ■詳細ファイル出力制御データ

FILE RSL STEP [ISTR] [IEND] [ISTEP]



FILE RSL TIME [TSTR] [TEND] [TSTEP]  
 FILE RSL ELAPSE [ETIME]

変数名	意味	型	デフォルト	制限事項
ISTR	出力開始ステップ[-]	I*4	-	ISTR=<IEND
IEND	出力終了ステップ[-]	I*4	-	ISTR=<IEND
ISTEP	出力ステップ間隔[-]	I*4	-	ISTEP>0
TSTR	出力開始時刻[s]	R*8	-	TSTR=<TEND
TEND	出力終了時刻[s]	R*8	-	TSTR=<TEND
TSTEP	出力時間間隔[s]	R*8	-	TSTEP>0. 0
ETIME	計算開始からの経過時間(s)	R*8	-	ETIME>0. 0

注)STEP または TIME で指定された間隔で出力(デフォルトでは出力しない)  
 ELAPSE は TIME や STEP の指定と重複しても構わない。  
 ELAPSE を指定した場合、時間積分ループの中で毎ステップ経過時間が  
 ETIME を超えているかどうかを確認し、超えた場合にはリスタートファイルと  
 ars ファイルを出力して計算を終了する。  
 ELAPSE の機能は、FILE RES AUTO の指定とセットで使うことが望ましい。

#### ■時系列ファイル出力制御データ

FILE TRN STEP [ISTR] [IEND] [ISTEP]  
 FILE TRN TIME [TSTR] [TEND] [TSTEP]  
 FILE TRN W-LEVEL ANS {DIR}  
 FILE TRN W-LEVEL [IC1] [JC1]  
 FILE TRN FORCE {FDIR} [IC1] [JC1] [KC1] [IC2] [JC2] [KC2]  
 FILE TRN POINT {PHY} [I1] [J1] [K1]  
 FILE TRN POINT VORT-X [IC1] [JC1] [KC1]  
 FILE TRN POINT VORT-Y [IC1] [JC1] [KC1]  
 FILE TRN POINT VORT-Z [IC1] [JC1] [KC1]  
 FILE TRN {CALC} {PHY} [IC1] [JC1] [KC1] [IC2] [JC2] [KC2]

変数名	意味	型	デフォルト	制限事項
ISTR	出力開始ステップ[-]	I*4	-	ISTR=<IEND
IEND	出力終了ステップ[-]	I*4	-	ISTR=<IEND
ISTEP	出力ステップ間隔[-]	I*4	-	ISTEP>0
TSTR	出力開始時刻[s]	R*8	-	TSTR=<TEND
TEND	出力終了時刻[s]	R*8	-	TSTR=<TEND
TSTEP	出力時間間隔[s]	R*8	-	TSTEP>0. 0
I1	x 方向格子またはセル番号 (U の場合のみ格子番号)	I*4	-	セル番号 : 1=<I1=<NI-1 格子番号 : 1=<I1=<NI
J1	y 方向格子またはセル番号 (V の場合のみ格子番号)	I*4	-	セル番号 : 1=<J1=<NJ-1 格子番号 : 1=<J1=<NJ
K1	z 方向格子またはセル番号 (W の場合のみ格子番号)	I*4	-	セル番号 : 1=<K1=<NK-1 格子番号 : 1=<K1=<NK
IC1	x 方向セル番号	I*4	-	1=<IC=<NI-1
JC1	y 方向セル番号	I*4	-	1=<JC=<NJ-1
KC1	z 方向セル番号	I*4	-	1=<KC=<NK-1
IC2	x 方向セル番号	I*4	-	1=<IC=<NI-1
JC2	y 方向セル番号	I*4	-	1=<JC=<NJ-1

KC2	z 方向セル番号	I*4	-	1=<KC=<NK-1
{DIR}	造波境界の位置と伝播方向	C*(*)	-	指定文字列のみ
	'X-' : x 座標最小位置の造波境界の解			
	'X+' : x 座標最大位置の造波境界の解			
	'Y-' : y 座標最小位置の造波境界の解			
	'Y+' : y 座標最大位置の造波境界の解			
	'SRC' : 造波ソースの解			
{FDIR}	力の方向	C*(*)	-	指定文字列のみ
	'X-' : 障害物への x の負方向の波力			
	'X+' : 障害物への x の正方向の波力			
	'Y-' : 障害物への y の負方向の波力			
	'Y+' : 障害物への y の正方向の波力			
	'Z-' : 障害物への z の負方向の波力			
	'Z+' : 障害物への z の正方向の波力			
{PHY}	出力する物理量	C*(*)	-	指定文字列のみ
	'U' : x 方向流速			
	'V' : y 方向流速			
	'W' : z 方向流速			
	'P' : 圧力			
	'F' : F 値			
	'K' : 乱流エネルギー			
	'E' : 乱流エネルギー散逸			
	'T' : 温度			
	'C' [LC] : 濃度 (LC については下記)			
{CALC}	演算方法	C*(*)	-	指定文字列のみ
	'MIN' : 最小値			
	'MAX' : 最大値			
	'AV' : 体積平均値			
	'INT' : 体積積分値			
LC	濃度の成分番号	R*8	-	1=<LS=<NS

注) 渦度に関する値の意味は以下のとおり

VORT-X:@w/@y-@v/@z

VORT-Y:@u/@z-@w/@x

VORT-Z:@v/@x-@u/@y

並列計算時の最小値は 1. 0D+30 までの制限有り

並列計算時の最大値は-1. 0D+30 までの制限有り

#### ■時間依存型空隙率ファイル制御データ

FILE PORO [NT]

変数名	意味	型	デフォルト	制限事項
NT	空隙率の時間方向のデータ数	I*4	0	>=0

注) NT=0 の場合は空隙率ファイルを読み込まない

NT=1 の場合は時間依存データでは無い(空隙率のファイル読み込み機能として利用可)

#### ■エージェントモデル用出力制御データ

FILE MAM STEP [ISTR] [IEND] [ISTEP]  
FILE MAM TIME [TSTR] [TEND] [TSTEP]

変数名	意味	型	デフォルト	制限事項
ISTR	出力開始ステップ[-]	I*4	-	ISTR=<IEND
IEND	出力終了ステップ[-]	I*4	-	ISTR=<IEND
ISTEP	出力ステップ間隔[-]	I*4	-	ISTEP>0
TSTR	出力開始時刻[s]	R*8	-	TSTR=<TEND
TEND	出力終了時刻[s]	R*8	-	TSTR=<TEND
TSTEP	出力時間間隔[s]	R*8	-	TSTEP>0. 0

注)STEP または TIME で指定された間隔で出力(デフォルトでは出力しない)

=====

===== オプションデータ =====

=====

■気泡に関する処理を行わない

OPTION T-DOOR BUB OFF

■気泡を上昇させる(TimerDoor 法)

OPTION T-DOOR BUB [WBUB]

変数名	意味	型	デフォルト	制限事項
WBUB	気泡の上昇速度[m/s]	R*8	0. 2	WBUB>=ZERO

注)デフォルトでは、0. 2[m/s]で上昇させる

■水滴に関する処理を行わない(TimerDoor 法)

OPTION T-DOOR DROP OFF

■水滴に関する処理を行う(TimerDoor 法)

OPTION T-DOOR DROP FREE-RUNDOWN

■表面セルの流速を勾配ゼロで求める

OPTION S-CELL-VEL DU=0

■表面セルの流速を補外で求める

OPTION S-CELL-VEL D2U=0

■流速・圧力計算のサブループデータ

OPTION SUB-LOOP [LOOP]

変数名	意味	型	デフォルト	制限事項
LOOP	サブループの回数	I*4	1	LOOP>=1

注) サブループが 1 回の場合は通常の計算と同じ

## ■空気圧の計算を行う

OPTION PV=CONST [PVCPO] [PVCGM]

変数名	意味	型	デフォルト	制限事項
PVCPO	大気圧[Pa]	R*8	-	PVCPO>=ZERO
PVCGM	比熱比[-]	R*8	-	PVCGM>=1.0

注) L/P 出力等で出力される圧力値は大気圧分が差し引かれている  
造波、放射、フリーに接する気泡は大気圧とする

## ■Dupuit-Forheimer 式による抵抗力計算を行う

OPTION DRAG-DF [YU] [N]  
[DR1] [AP1] [BT1]  
[DR2] [AP2] [BT2]  
.....  
[DRi] [APi] [BTi]  
.....  
[DRN] [APN] [BTN]

変数名	意味	型	デフォルト	制限事項
YU	動粘性係数[m <sup>2</sup> /s]	R*8	-	>0.0
N	係数の入力数	I*4	-	>0
DRi	捨石の粒経[m]	R*8	-	>0.0
APi	係数 $\alpha_0$	R*8	-	>=0.0
BTi	係数 $\beta_0$	R*8	-	>=0.0

0.0<DR<=DR1 のとき  $\alpha_0=0.0$ 、 $\beta_0=0.0$

DR1<DR<=DR2 のとき  $\alpha_0=AP1$ 、 $\beta_0=BT1$

DR2<DR<=DR3 のとき  $\alpha_0=AP2$ 、 $\beta_0=BT2$

.....

DRN<DR のとき  $\alpha_0=APN$ 、 $\beta_0=BTN$

- \* 「OPTION DRAG-DF」行以下[N]行はコメント行や空白行は不可
- \* 既存の CD0 の意味が捨石の粒経[m]となるので注意する
- \* 動粘性係数は「MATE K-VISC」とは別に入力する
- \* 現在は N<10 (VF\_AOPRM.h の MAXDRG=10)

## ■水位変動量データを設定しない

OPTION SEA-BOTTOM OFF

## ■水位変動量データを設定する(sbt ファイル読み込み)

OPTION SEA-BOTTOM ON

■水位変動量データを断層パラメータから計算する (fault\_cad.txt ファイル読み込み)

OPTION SEA-BOTTOM CALC

注) 合わせて、計算格子の座標系の指定 (OPTION COORDINATE) も行う必要あり  
また、必要に応じて測地系の指定 (OPTION FAULT-SYSTEM, OPTION GRID-SYSTEM) の指定も行う

■計算格子の座標系を指定する (平面直角座標系の場合)

OPTION COORDINATE JAPAN-PLANE-RECTANGULAR [ICoord]

変数名	意味	型	デフォルト	制限事項
ICoord	平面直角座標系の地域番号	I*4	-	1<=ICoord<=19

注) OPTION SEA-BOTTOM CALC の場合のみ有効

■計算格子の座標系を指定する (UTM 座標系の場合)

OPTION COORDINATE UTM [LC\_DEG]

変数名	意味	型	デフォルト	制限事項
LC_DEG	UTM 座標系の中央経線の経度 (度)	R*8	-	0<=LC_DEG<360

注) OPTION SEA-BOTTOM CALC の場合のみ有効

■断層パラメータの測地系を指定する

OPTION FAULT-SYSTEM {SYS}

変数名	意味	型	デフォルト	制限事項
SYS	測地系の名称	C*(*)	JGD2000	TOKYO, JGD2000, WGS84 のいずれか

注) OPTION SEA-BOTTOM CALC の場合のみ有効

■計算格子の測地系を指定する

OPTION GRID-SYSTEM {SYS}

変数名	意味	型	デフォルト	制限事項
SYS	測地系の名称	C*(*)	JGD2000	TOKYO, JGD2000, WGS84 のいずれか

注) OPTION SEA-BOTTOM CALC の場合のみ有効

■流速の制限値を指定する

OPTION MAX-VELOCITY [VVMAX]

変数名	意味	型	デフォルト	制限事項
-----	----	---	-------	------

VVMAX 流速の制限値 R\*8 - 0<VVMAX

注) 仮流速の計算後に制限値が適用される

=====

===== デバッグ用データ =====

=====

#### ■矩形ボックスへのF 値指定データ

DEBUG F-BOX [IC1] [JC1] [KC1] [IC2] [JC2] [KC2] [FF]

変数名	意味	型	デフォルト	制限事項
IC1	x 方向セル番号(矩形の始点)	I*4	-	1=<IC1=<IC2=<NI-1
JC1	y 方向セル番号(矩形の始点)	I*4	-	1=<JC1=<JC2=<NJ-1
KC1	z 方向セル番号(矩形の始点)	I*4	-	1=<KC1=<KC2=<NK-1
IC2	x 方向セル番号(矩形の終点)	I*4	-	1=<IC1=<IC2=<NI-1
JC2	y 方向セル番号(矩形の終点)	I*4	-	1=<JC1=<JC2=<NJ-1
KC2	z 方向セル番号(矩形の終点)	I*4	-	1=<KC1=<KC2=<NK-1
FF	F 値	R*8	-	0=<FF=<1. 0

注)最後に入力された一つのボックスのみ

#### ■矩形ボックスへのTD 用速度指定データ

DEBUG TD-VEL [IC1] [JC1] [KC1] [IC2] [JC2] [KC2] [U] [V] [W]

変数名	意味	型	デフォルト	制限事項
IC1	x 方向セル番号(矩形の始点)	I*4	-	1=<IC1=<IC2=<NI-1
JC1	y 方向セル番号(矩形の始点)	I*4	-	1=<JC1=<JC2=<NJ-1
KC1	z 方向セル番号(矩形の始点)	I*4	-	1=<KC1=<KC2=<NK-1
IC2	x 方向セル番号(矩形の終点)	I*4	-	1=<IC1=<IC2=<NI-1
JC2	y 方向セル番号(矩形の終点)	I*4	-	1=<JC1=<JC2=<NJ-1
KC2	z 方向セル番号(矩形の終点)	I*4	-	1=<KC1=<KC2=<NK-1
U	x 方向速度	R*8	-	-
V	y 方向速度	R*8	-	-
W	z 方向速度	R*8	-	-

注)最後に入力された一つのボックスのみ

### 5.3 リストファイル

解析ステップ毎の物理時間や BiCGSTAB 法の反復回数等を入力するファイルであり、市販のワープロソフト等を用いて表示する。ファイル名は data.list とし、テキスト形式のファイルである。以下にリストファイルの例を示す。

リストファイル	内 容
##### CADMAS-SURF/3D-MP Ver. 1.0 START. #####	実行開始コメント
##### MYRANK=   0   /    4	ランクとプロセッサ数
##### DEFAULT.	デフォルトの設定
##### INPUT-DATA.	入力ファイルの読み込み
## INPUT-LEVEL= 0 [PARALLEL] [X] [100] [PARALLEL] [X] [200] [PARALLEL] [X] [300] [GRID] [X] & [0. 00000000] [0. 91300250] [1. 82600500] [2. 73900750] [3. 65201000] ~~~~~ 省略 ~~~~~ & [18. 000] [18. 400] [18. 800] [19. 200] [19. 600] [20. 000] & [END]	入力レベル 0 (格子数の決定等) 並列制御データのエコー  格子データのエコー
## INPUT-LEVEL= 1	入力レベル 1 (境界面数の決定)
## INPUT-LEVEL= 2 [TIME] [AUTO] [0. 001] [0. 20] [TIME] [LIMIT] [1. 0D-5] [0. 05] ~~~~~ 省略 ~~~~~ [OPTION] [T-DOOR] [DROP] [OFF]	入力レベル 2 (各種データの入力) 各種データのエコー
##### SETUP.	各種情報の構築
##### CONDITION.	解析条件を出力
— PARALLEL — NPROCS       [-] =       4 NPI, NPJ [-] =       4     1 MYRANK       [-] =       0 MYI, MYJ [-] =       1     1 CELL-X(ALL) [-] =     400 ICS, ICE [-] =       1     100 CELL-Y(ALL) [-] =       1 JCS, JCE [-] =       1     1 CELL-Z(ALL) [-] =     50 KCS, KCE [-] =       1     50	並列制御データ
— EQUATION — K-EPS           = NOCALC TEMPERATURE    = NOCALC CONCENTRATION   = NOCALC	方程式制御データ
— TIME CONTROL — DT     TYPE    = AUTO SAFE [-] =  2. 00000E-01 INIT [S] =  1. 00000E-03 MIN  [S] =  1. 00000E-05 MAX  [S] =  5. 00000E-02 END    STEP [-] = 999999 TIME [S] =  4. 01000E+01	時間制御データ
— MATERIAL — W-LEVEL       [M] =  1. 00000E+01 DENSITY [KG/M3] =  1. 00000E+03 K-VISC       [M2/S] =  0. 00000E+00 GRAVITY       [M/S2] =  9. 80000E+00 I. C.    U   [M/S] =  0. 00000E+00 V   [M/S] =  0. 00000E+00 W   [M/S] =  0. 00000E+00	物性値等データ
— MODEL —	モデル等データ





<pre> ##### CALCULATION. STEP=      0 : TIME=  0.00000E+00 : DT =  0.00000E+00  ~~~~ 省略 ~~~ ~       : !B! =  0.00000E+00 : !R! =  0.00000E+00 : ITR =      0 &gt;&gt; FILE-GRP : OUT : STEP=      0 : TIME=  0.00000E+00 ~~~~~ 省略 ~~~~~ STEP=   918 : TIME=  4.00203E+01 : DT =  4.00600E-02  ~~~~ 省略 ~~~~       : !B! =  6.66105E-01 : !R! =  3.53342E-11 : ITR =     46 &gt;&gt; FILE-GRP : OUT : STEP=   918 : TIME=  4.00203E+01 STEP=   919 : TIME=  4.00614E+01 : DT =  4.11181E-02  ~~~~ 省略 ~~~~       : !B! =  6.38653E-01 : !R! =  5.91756E-11 : ITR =     47 STEP=   920 : TIME=  4.01016E+01 : DT =  4.02112E-02  ~~~~ 省略 ~~~~       : !B! =  7.00378E-01 : !R! =  3.73344E-11 : ITR =     44  ##### CPU TIME [S] #####  ##  &lt;&lt;FLOW&gt;&gt; ##  TOTAL                                117.65 ##  +- PRE PROCESS                        0.10 ##  +- CALCULATION                       117.55 ##      +- FILE I/O                      1.25 ##      +- VELO &amp; PRES                   105.42 ##          +- CONV &amp; VISC                4.08 ##          +- GENERATION                 1.26 ##          +- INTEGRATION                2.27 ##          +- POISSON COEF               2.53 ##          +- POISSON SOLV              82.84 ##          +- V &amp; P MODIF                1.33 ##          +- E. T. C.                  11.11 ##      +- TEMPERATURE                   0.00 ##      +- CONCENTRATION                  0.00 ##      +- K-EPSIRON                      0.00 ##      +- VOF FUNCTION                   9.06 ##          +- CONVECTION                 1.84 ##          +- INTEGRATION                0.50 ##          +- MODIF &amp; CUT                0.85 ##          +- NF &amp; T-DOOR               1.14 ##          +- E. T. C.                   4.74 ##      +- E. T. C.                      1.82 ##  +- E. T. C.                          0.00  ##  &lt;&lt;ROUTINE&gt;&gt; ##  +- VF_P*****                       36.32 ##  +- VF_M1BCGS                        82.77 ##  +- VF_FDROPF                        0.00  ##### NORMAL END. ##### </pre>	<p>計算開始 ステップ情報</p> <p>グラフィックファイルへ計算結果を出力</p> <p>ステップ情報</p> <p>グラフィックファイルへ計算結果を出力</p> <p>ステップ情報</p> <p>ステップ情報</p> <p>CPU 時間の出力</p> <p>終了メッセージ（正常終了）</p>
--	--

注) ステップ情報

STEP : 計算ステップ

TIME : 物理時間

DT : 時間刻み幅 ( $=t^n - t^{n-1}$ )

FSUM : (VOF 関数 F 値×セル面積) の和

FCUT : (カットオフした VOF 関数 F 値×セル面積) の和

!VD! : (発散×セル面積) の 2 乗ノルム

!B! : 連立 1 次方程式の右辺ベクトルの 2 乗ノルム

!R! : 連立 1 次方程式の最終残差ベクトルの 2 乗ノルム

ITR : 連立 1 次方程式の解法の反復回数

## 5.4 時系列ファイル

時系列ファイルは時間依存データを出力するファイルであり、市販の表計算ソフト等を用いて表示する。ファイル名は data.tran とし、テキスト形式のファイルである。以下に時系列ファイルの例を示す。

時系列ファイル										内 容
1 W-LEVEL	ANS	X-	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	出力番号、出力項目、格子（セル）番号
2 W-LEVEL	-----	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
3 W-LEVEL	-----	81	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
4 W-LEVEL	-----	161	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
5 W-LEVEL	-----	241	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
6 W-LEVEL	-----	321	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
7 W-LEVEL	-----	400	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
TIME		1	2	3	～～	省略	～			出力番号
0.00000000E+00	0.00000000E+00	0.00000000E+00	0.00000000E+00	0.00000000E+00	～～	省略	～			物理時間、計算値 1、計算値 2・・・
1.20000000E-03	-2.46385964E-11	0.00000000E+00	0.00000000E+00	0.00000000E+00	～～	省略	～			
2.64000000E-03	-2.62285111E-10	0.00000000E+00	0.00000000E+00	0.00000000E+00	～～	省略	～			
4.36800000E-03	-1.18715773E-09	0.00000000E+00	0.00000000E+00	0.00000000E+00	～～	省略	～			
～～～～～～～～～～	～～～～～～～～～～	～～～～～～～～～～	～～～～～～～～～～	～～～～～～～～～～	～～	省略	～			
3.99802361E+01	8.27479959E-02	5.85501252E-02	4.41974665E-02	～～	省略	～				
4.00202958E+01	2.19142791E-02	-1.57292475E-02	-1.99720589E-02	～～	省略	～				
4.00614144E+01	-3.88083644E-02	-8.98002349E-02	-8.41081049E-02	～～	省略	～				
4.01016249E+01	-9.65151936E-02	-1.60249489E-01	-1.45746660E-01	～～	省略	～				

## 5.5 計算情報ファイル

計算情報ファイルはユーザが計算の進行状況を把握するためのファイルであり、コンソール等（標準出力）に出力される。よって、ファイル名は特に指定されていない、テキスト形式のファイルである。以下に計算情報ファイルの例を示す。

計算情報ファイル	内 容
##### CADMAS-SURF/3D-MP Ver. 1.0 START. #####	実行開始コメント
##### DEFAULT.	デフォルトの設定
##### INPUT-DATA.	入力ファイルの読み込み
##### SETUP.	各種情報の構築
##### CONDITION.	解析条件を出力
##### INITIAL.	初期条件の設定
##### CALCULATION.	計算開始
STEP= 0 : TIME= 0.00000E+00 : DT = 0.00000E+00	ステップ情報
STEP= 1 : TIME= 1.20000E-03 : DT = 1.20000E-03	
STEP= 2 : TIME= 2.64000E-03 : DT = 1.44000E-03	
STEP= 3 : TIME= 4.36800E-03 : DT = 1.72800E-03	
～～～～～～～～～～ 省略 ～	
STEP= 919 : TIME= 4.00614E+01 : DT = 4.11186E-02	
STEP= 920 : TIME= 4.01016E+01 : DT = 4.02105E-02	
##### NORMAL END. #####	終了メッセージ（正常終了）

5.6 マトリクスデータファイル

任意波形の造波を行うための、水位、流速等を入力するファイルであり、市販のワープロソフト等を用いて作成する。ファイル名は data.mtb とし、テキスト形式のファイルである。以下にマトリクスデータファイルのフォーマットについて示す。

水位と流速が与えられる場合	流速のみが与えられる場合	水位のみが与えられる場合
LEVEL-ON [nz] [nt] [T0] [Z1] [Z2] . . . [Znz] T [T1] [e1] [u1] [w1] [u2] [w2] . . [unz] [wnz] T [T2] [e2] .	LEVEL-OFF [nz] [nt] [T0] [Z1] [Z2] . . . [Znz] T [T1] [u1] [w1] [u2] [w2] . . [unz] [wnz] T [T2] .	LEVEL-ONLY [nt] [T0] T [T1] [e1] T [T2] [e2] . . . . . . .

[nz]鉛直方向のデータ数、[nt]：位相方向のデータ数、[T0]：初期無次元位相、  
[Z\*]：平均水位をゼロとした鉛直座標、[T\*]：無次元位相、[e\*]：平均水位をゼロとした水位、  
[u\*]：x 方向流速、[w\*]：z 方向流速、区切り文字 T：ある位相のデータの始まりを示しプロ  
グラム内ではデータの個数チェックに利用

無次元位相[T\*]は  $0.0 \leq [T*] \leq 1.0$  であり、時間の進行とともに無次元位相は小さくなることに注意する。なお、プログラム内では、位相方向および空間方向に各種物理量の補間を行っているため、マトリクスデータ内の[Z\*]や[T\*]と入力データで指定している格子座標や時刻が一致している必要はない。また、位相方向に t1 から t2 までのデータが入力され、プログラムがその範囲外の t の値を参照しようとした場合には

- ・  $t < t1$  ならば t1 の値を使用する
- ・  $t > t2$  ならば t2 の値を使用する

という処理になる（空間方向も同様）。  
例として、水位が与えられる場合のデータを以下に示す。

```
LEVEL-ON      31          101    0.796345000
-1.00000E+01  -9.50000E+00  -9.00000E+00  -8.50000E+00  -8.00000E+00
-7.50000E+00  -7.00000E+00  -6.50000E+00  -6.00000E+00  -5.50000E+00
~~~~~
2.50000E+00   3.00000E+00   3.50000E+00   4.00000E+00   4.50000E+00
5.00000E+00
T    0.00000E+00  2.57121E+00
1.42074E+00  0.00000E+00
1.42190E+00  0.00000E+00
~~~~~
4.12557E+00  0.00000E+00
```

5.7 空隙率ファイル

空隙率ファイルは、ユーザが指定した時刻における空隙率のデータを入力するためのファイルであり、ユーザが別途作成する。ファイル名は data.poro とし、バイナリ形式のファイルである。以下に空隙率ファイルのフォーマットについて示す。

①空隙率ファイルの概要

初期ブロック

第 1 時刻ブロック
第 2 時刻ブロック
・ ・ ・ ・ ・
第 M 時刻ブロック

## ②初期ブロックの詳細

レコード	書式	変数名	型	内容
1	NB, ISW1, ISW2, ISW3, ISW4	NB ISW1 ISW2 ISW3 ISW4	I*4 I*4 I*4 I*4 I*4	矩形領域の数 将来の拡張のためのフラグ (当面は 0) 将来の拡張のためのフラグ (当面は 0) 将来の拡張のためのフラグ (当面は 0) 将来の拡張のためのフラグ (当面は 0)
2-(NB+1)	I1 (IB), J1 (IB), K1 (IB), I2 (IB), J2 (IB), K2 (IB)	I1 (IB) J1 (IB) K1 (IB) I2 (IB) J2 (IB) K2 (IB)	I*4 I*4 I*4 I*4 I*4 I*4	IB 番目の矩形領域の x 方向の始点 (セル番号) IB 番目の矩形領域の y 方向の始点 (セル番号) IB 番目の矩形領域の z 方向の始点 (セル番号) IB 番目の矩形領域の x 方向の終点 (セル番号) IB 番目の矩形領域の y 方向の終点 (セル番号) IB 番目の矩形領域の z 方向の終点 (セル番号)

## ③第 I 時刻ブロックの詳細

レコード	書式	変数名	型	内容
1	TIME, JSW1, JSW2, JSW3, JSW4	TIME JSW1 JSW2 JSW3 JSW4	R*8 I*4 I*4 I*4 I*4	時刻 将来の拡張のためのフラグ (当面は 0) 将来の拡張のためのフラグ (当面は 0) 将来の拡張のためのフラグ (当面は 0) 将来の拡張のためのフラグ (当面は 0)
2-(NB+1)	((GGV (I, J, K), I=I1 (IB), I2 (IB)), J=J1 (IB), J2 (IB)), K=K1 (IB), K2 (IB)))	GGV (I, J, K)	R*4	セル番号 I, J, K の位置の空隙率

## ④時間方向の補間および面積透過率

時間方向の補間は線形補間とする。なお、ファイルに含まれる時刻を  $t_1 \leq t \leq t_2$  とした場合、 $t_1$  より前の時刻の値が必要なときは  $t_1$  の値を、 $t_2$  より後の時刻の値が必要なときは  $t_2$  の値を使用する。

面積透過率は、ファイルが大きくなることを防ぐために入力せず (今後、ファイル入力が必要になったら、拡張のためのフラグを用いて、対応する)、面をはさむセルの空隙率の小さい方の値とする。

## 5.8 MG 環境ファイル

MG 環境ファイルは、CADMAS-SURF/3D-MP の複数の解析領域をネスティングして利用するための条件を入力するためのファイルであり、ユーザが別途作成する。ファイル名は data.env とし、テキスト形式のファイルである。以下に、図-5.2 に示す領域を想定した場合の MG 環境ファイルの例を示す。

← ネスティング領域の数			
'edata-pr'	1	0	
'edata-ch'	2	1	
領域名	領域毎の PE 数	親の領域番号 (=0: 親無し、-1 のとき STOC-IC と連成)	

MG 環境で利用する場合には、各領域用の入出力ファイル名は、data.\*\*\*ではなく、data.env 内で指定する『領域名』+拡張子（.in, .list, .mtb など）とする。ただし、リストやグラフィック出力ファイルについては分割した領域毎に出力するため、PE 数が 1 より大きい場合には、ファイル名は『領域名』+PE 番号+拡張子となる。例えば上記の例の場合、edata-ch000000.list のようになる。

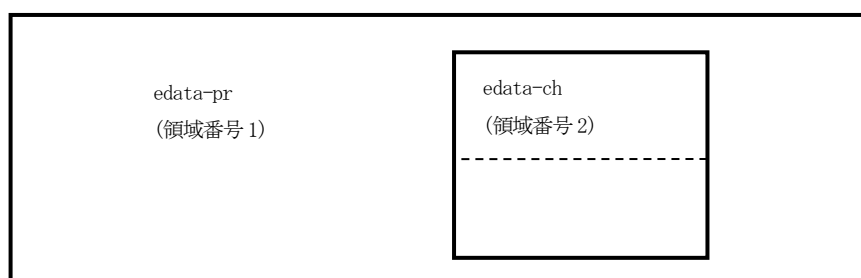


図-5.2 想定している領域

## 5.9 描画部

CADMAS-SURF/3D-MP の描画部の画面イメージを図-5.3 に示す。図-5.3 に示すとおり、描画部の画面は、

- ①コマンド領域 : ユーザが各種操作を行う領域
- ②メイン描画領域 : 解析結果を描画する領域（描画比の変更可）
- ③サブ描画領域 : 解析領域と描画領域の関係を描画する領域

の 3 つの領域に大別される。なお、画面には表示されていないが、メイン描画領域では

- ①コントロールキー+マウスのドラッグ → 拡大
- ②シフトキー +マウスのドラッグ → 移動

の 2 つの操作が可能である。図-5.4 に示すとおり、コマンド領域内の物理量制御コマンドは、オプションボタンをクリックすることで切り替えることができる。

なお、テキストボックスにキー入力を行った場合、最後に「Enter」キーを押すことで入力が反映される。

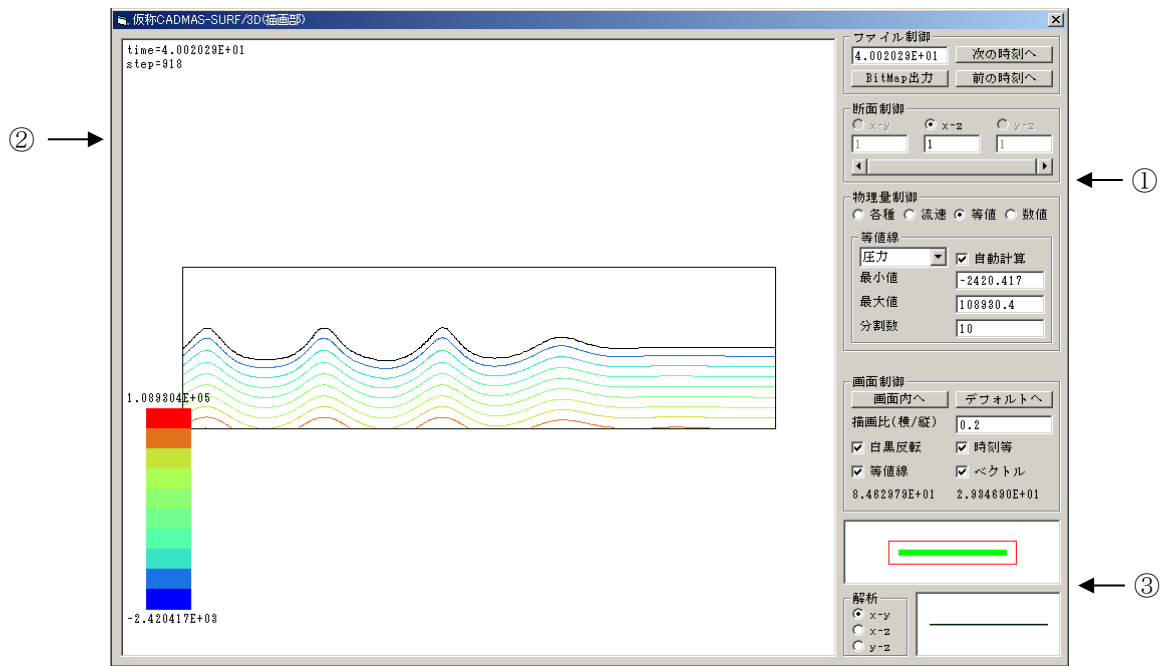


図-5.3 描画部の画面イメージ

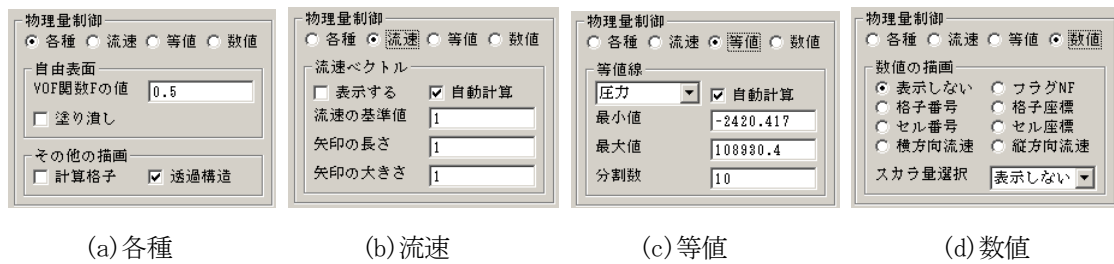


図-5.4 物理量制御コマンドの切り替え

## 6. 参考文献

- (1) (財)沿岸開発技術研究センター(2001) : 数値波動水路の研究・開発、沿岸開発技術ライブラリ、No. 12
- (2) 榊山勉・阿部宣行・鹿島遼一(1990) : ポーラスモデルによる透過性構造物周辺の非線型波動解析、海岸工学論文集、第 37 巻、pp. 554-558
- (3) C.W.Hirt and B.D.Nichols (1981) : Volume of Fluid(VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries, Journal of Computational Physics, Vol.39, pp. 201-225
- (4) M.D.Torrey, R.C.Mjolsness and L.R.Stein (1987) : NASA-VOF3D:A Three-Dimensional Computer Program for Incompressible Flows with Free Surface, LA11009-MS
- (5) 磯部雅彦・西村仁嗣・堀川清司(1978) : 保存波の摂動解の波高による表示、第 33 回年次学術講演会概要集、II、pp. 760-761
- (6) Dean, R. G. (1965) : Stream Function Representation of Nonlinear Ocean Waves, J. Geophys. Res., vol. 70, No. 18, pp. 4561-4572
- (7) 岩田好一郎・川崎浩司・金度三(1994) : 水中構造物による砕波の数値計算、海岸工学論文集、第 42 巻、pp. 781-785
- (8) Eric Cruz・横木裕宗・磯部雅彦・渡辺晃(1993) : 非線形波動方程式に対する無反射境界条件について、海岸工学論文集、第 40 巻、pp. 46-50
- (9) 数値流体力学編集委員会編(1995) : 数値流体力学シリーズ 3 乱流解析、東京大学出版会
- (10) 島田昭男・中台佳徳・秋山実(1992) : 非圧縮性流体解析モジュール I(デカルト・円筒座標系)、富士総研技法、Vol. 3 No. 1、pp. 88-99
- (11) 山崎昇(1992) : 自由表面を含む非圧縮性流体解析モジュール、富士総研技法、Vol. 3 No. 1、pp. 131-146
- (12) 高橋亮一(1982) : コンピュータによる流体力学 (演習)、企画センター
- (13) P. J. Roache(1978) : コンピュータによる流体力学、高橋亮一他訳、企画センター
- (14) Denis Gueyffier, Jie Li, Ali Nadim, Ruben Scardovelli and Stephane Zaleski (1999) : Volume-of-Fluid Interface Tracking with Smoothed Surface Stress Methods for Three-Dimensional Flows, Journal of Computational Physics, Vol.152, pp. 423-456
- (15) 藤野清次(1991) : 熱流体解析で現れる非対称連立 1 次方程式の新解法、第 28 回日本伝熱シンポジウム講演論文集、II、pp. 622-624