
TITech-WARM 貯水池シミュレータ

User Manual

Takashi Nakamura
Department of Environmental Science & Technology
Tokyo Institute of Technology
March, 2012

目次

概要	6
計算空間	7
座標系	7
計算領域	8
実地形の直線化（計算空間）	9
Soroban格子	11
並列計算	14
領域分割法	14
基礎方程式	16
3次元k- ϵ 乱流モデル	16
運動方程式	17
非圧縮条件	18
輸送方程式（水温、塩分、スカラー量）	18
乱流方程式	19
水面方程式	21
境界条件	22
水面上	22
底面上	24
側岸面	25
上流・下流端境界	26
熱収支モデル	30

<i>TITech-WARM - User Manual</i>	2
水面上	30
水中	32
暴気モデル	34
鉛直 1 次元ダブルプルームモデルにおける暴気過程の記述	35
鉛直 1 次元ダブルプルームモデルの基礎方程式	36
鉛直 1 次元ダブルプルームモデルの計算手順	37
流動モデルへの組み込み	40
計算方法	43
変数配置	43
Soroban格子上でのCIP空間補間	44
Soroban格子上での空間差分近似	46
x方向空間差分式	46
y方向空間差分式	50
z方向空間差分式	51
計算フロー	51
Time Splitting Method(時分割法)	51
Step0-1 メモリ確保	54
Step0-2 初期条件の設定	54
Step1:時間刻み幅の決定	54
Step2:移流相	54
Step3:水位変化計算相	55
Step4:陸地化判定相	56
Step5:Soroban格子の再配置相	59
Step6:乱流相	61

<i>TITech-WARM - User Manual</i>	3
Step7:拡散相	62
Step8:その他計算相	63
Step9:圧力修正相	64
計算条件の設定	65
基本設定ファイル(define.inc)	65
時間条件に関する項目	66
出力に関する項目	67
Soroban格子点の設定に関する項目	68
乱流計算に関する項目	69
水面変動計算に関する項目	70
圧力修正相の計算に関する項目	70
各種物理量に関する項目	71
入力地形条件に関する項目	71
入力風場データに関する項目	71
熱収支計算に関する項目	72
暴気モデルに関する項目	73
ユーザー定義物理量に関する項目	75
ユーザー入力データ（1次元時系列データ）に関する項目	76
ユーザー入力データ（2次元時系列データ）に関する項目	78
初期条件に関する項目	79
境界条件に関する項目	81
地形条件入力ファイル	84
横断面リストファイル	84
横断地形ファイル	87

<i>TTTech-WARM - User Manual</i>	4
風場入力データ	93
空間一様の風場の場合	94
2次元分布を持つ非一様風場の場合	95
風応力を考慮しない場合	97
境界条件入力ファイル	98
ゲート条件入力ファイル	100
初期条件入力ファイル	102
初期水位分布入力ファイル	102
3次元物理量の初期条件入力ファイル	103
ユーザー入力時系列データファイル	106
ユーザー入力 1次元時系列データ	106
ユーザー入力 2次元時系列データ	107
気象条件（気温／日射量／湿度／雲量）時系列データファイル	110
気温 1次元時系列データ	110
日射量 1次元時系列データ	110
雲量 1次元時系列データ	110
湿度 1次元時系列データ	111
プログラム修正を伴う設定	112
ユーザー定義物理量のソース項設定	112
ユーザー定義物理量の水面／河床面境界条件の設定	114
出力ファイル	117
timestep.dat	117
Grid_Position.dat	118
Tec_TimeDependentData.plt	119

<i>TTech-WARM - User Manual</i>	5
Tec_SurfaceData_time_xxx.plt 及び Tec_SurfaceData_step_xxx.plt	120
Tec_VolumeData_time_xxx.plt 及び Tec_VolumeData_step_xxx.plt	121
ファイル圧縮について	122
計算実行	122
必要環境	123
TTech-Warmのインストール	125
コンパイル	125
実行	126
出力データファイルの消去	126
連絡先：	127

概要

本書はTokyo Institute of Technology Water Reservoir Model(TITech-WARM)貯水池シミュレータの概要について纏めたものである。水温成層や汽水湖などにおける3次元密度流を解析可能な、非静水圧・自由水面モデルである。繊細な自由水面形状と、密度流に伴う成層界面の詳細な記述を可能とするSoroban格子法を高精度移流数値解法であるCIP法と組み合わせたCIP-Soroban法を基礎としている。Soroban格子法の採用により鉛直方向の格子解像度を自由、且つ動的に調整可能である。また計算格子点が存在する横断面位置とその面内での計算点座標も自由に設定可能であるなど、Soroban格子法を用いることで計算格子の設定は大幅に自由度の高いものとなっている。また、MPIライブラリを用いた並列計算プログラムとして実装を行っており、マルチコアPCやネットワーク接続されたPCクラスターにおいて並列計算による大規模・高速化がそのまま可能である。以下本書では、シミュレータの概要と実際に使用する際に必要となる各種設定方法について紹介を行う。プログラムで使用されている変数や関数などの詳細な仕様については別書の詳細仕様書を参照されたい。

計算空間

座標系

シミュレータ内では図1に示すように滞筋（主流軸）に沿って x 座標軸を定義する。また、 y 座標軸は x 座標軸に垂直方向に取る。各 y 軸は滞筋との交点を y 座標の原点($y=0$)とする。図1に示すように計算空間内における y 軸は実際の空間では滞（主流軸）に垂直な横断方向に向いており、 y 座標は各横断面における滞筋からの横断面内での距離に相当することになる。また、鉛直方向には上向きに z 座標軸をとる。

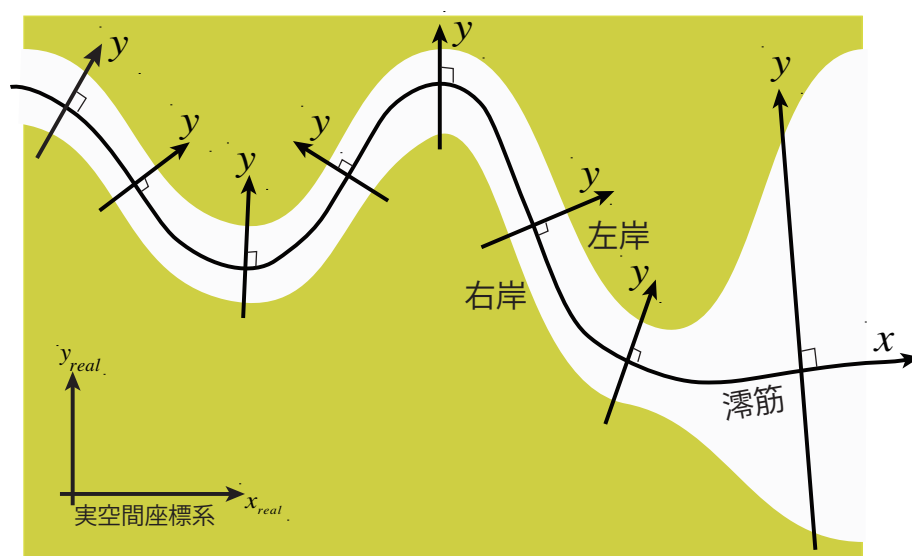


図1 モデル内の計算空間内の座標系

計算領域

計算領域は計算開始時に入力する地形データファイルにより指定する。図2のように $-x$ 側の計算領域境界を $X_{\min}$, $+x$ 側の境界を $X_{\max}$ と表記する。また、 y 方向の境界は各 x 地点における側岸の位置で与えられると考え、 $-y$ 側の側岸の境界座標を $Y_{\min}(x)$, $+y$ 側の側岸位置を $Y_{\max}(x)$ と表記する。 $Y_{\min}$ 及び $Y_{\max}$ は x 座標の関数である。

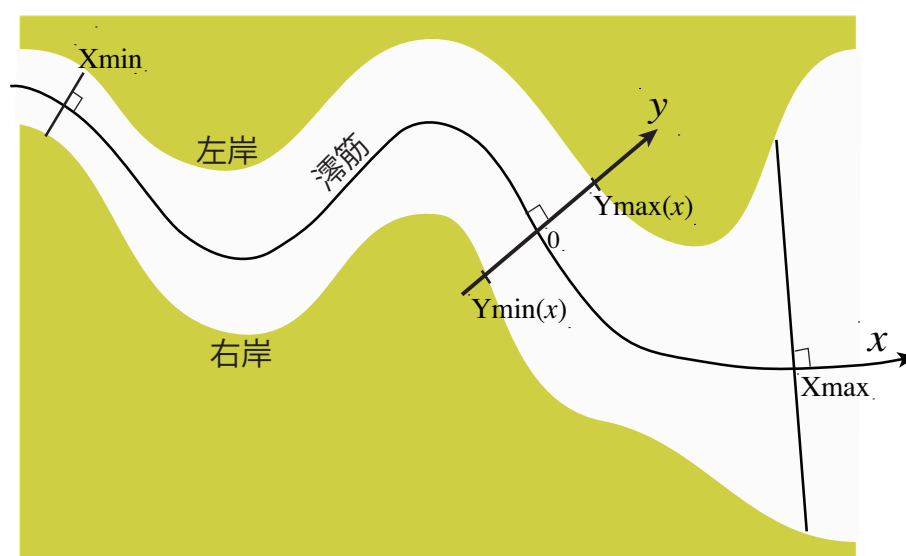


図2 プログラム内での計算座標

実地形の直線化（計算空間）

図1に示すような計算空間座標系を用いて計算を行う。計算空間は図3に示すように計算空間内座標 x (主流軸方向座標)と y (横断方向座標)からなる直交座標系内で計算を行うことになり、これは水系を直線化して考えることに相当する。ただし、実際の地形の屈曲による影響は、後述するように曲率をパラメータとして、流速の運動方程式に遠心力項を加味することで考慮する。

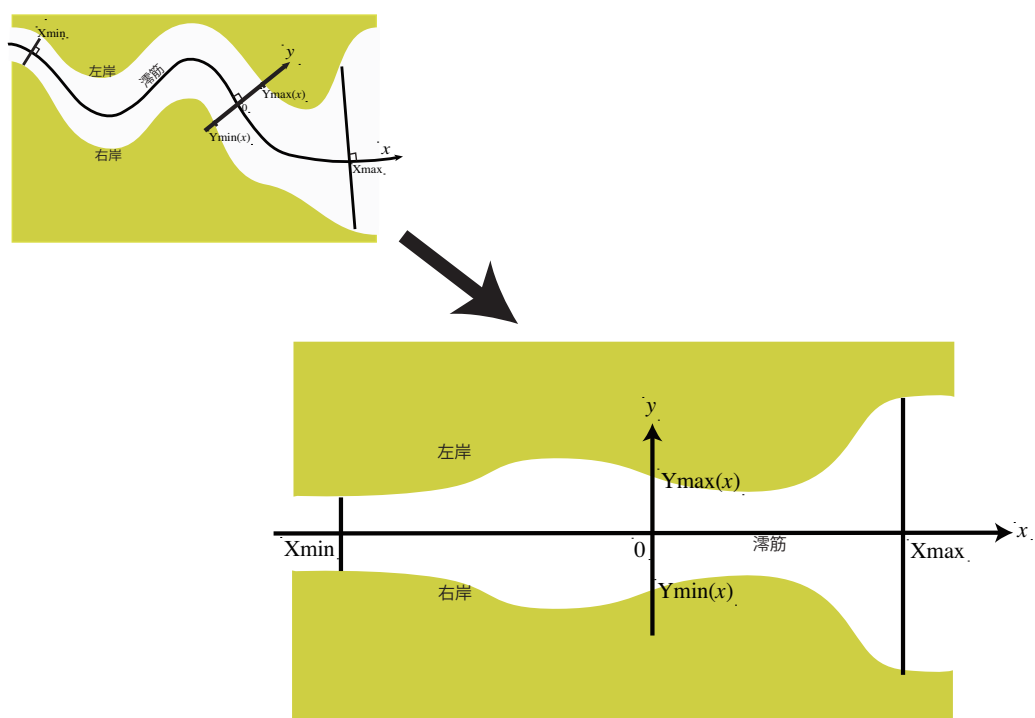


図3 直線化された計算領域で計算を行う

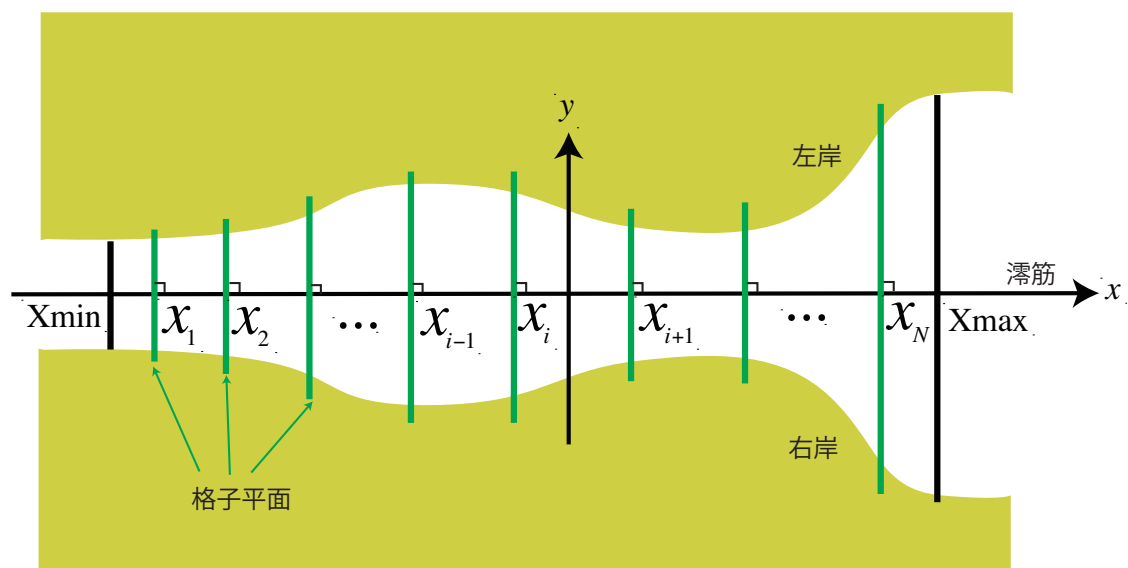


図 4 (a) 計算空間内の格子平面

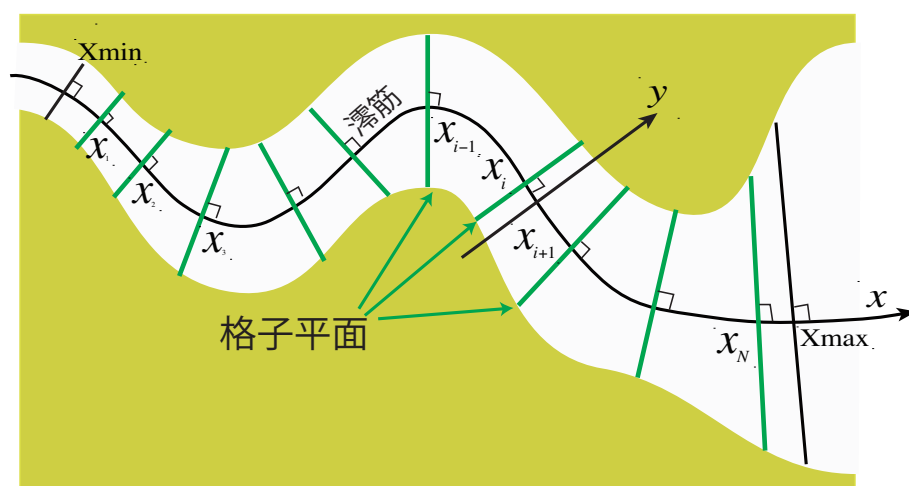


図 4 (b) 実空間内での格子平面

SOROBAN格子

図3に示すような直線化された水平方向座標(x, y)と鉛直方向座標 z からなる3次元計算空間を、Soroban格子により離散化を行う。Soroban格子による計算空間の離散化の概念図を図4(a)～(d)に示す。xyz空間におけるSoroban格子は複数の格子平面、格子平面上の格子軸、そして格子軸上の格子点から成る。まず図4(a)に示すように、主流軸方向、即ち計算空間座標 x 方向に垂直な平面を設定する。実際の指定は後述する入力地形データファイル内で指定する。格子平面は計算空間内部に設定し、 x 方向境界 $Xmin$ 及び $Xmax$ には一致させない。主流軸方向に垂直な平面を設定することは、図4(b)に示すように、実空間内で主流軸に垂直な横断平面を設定することに相当している。

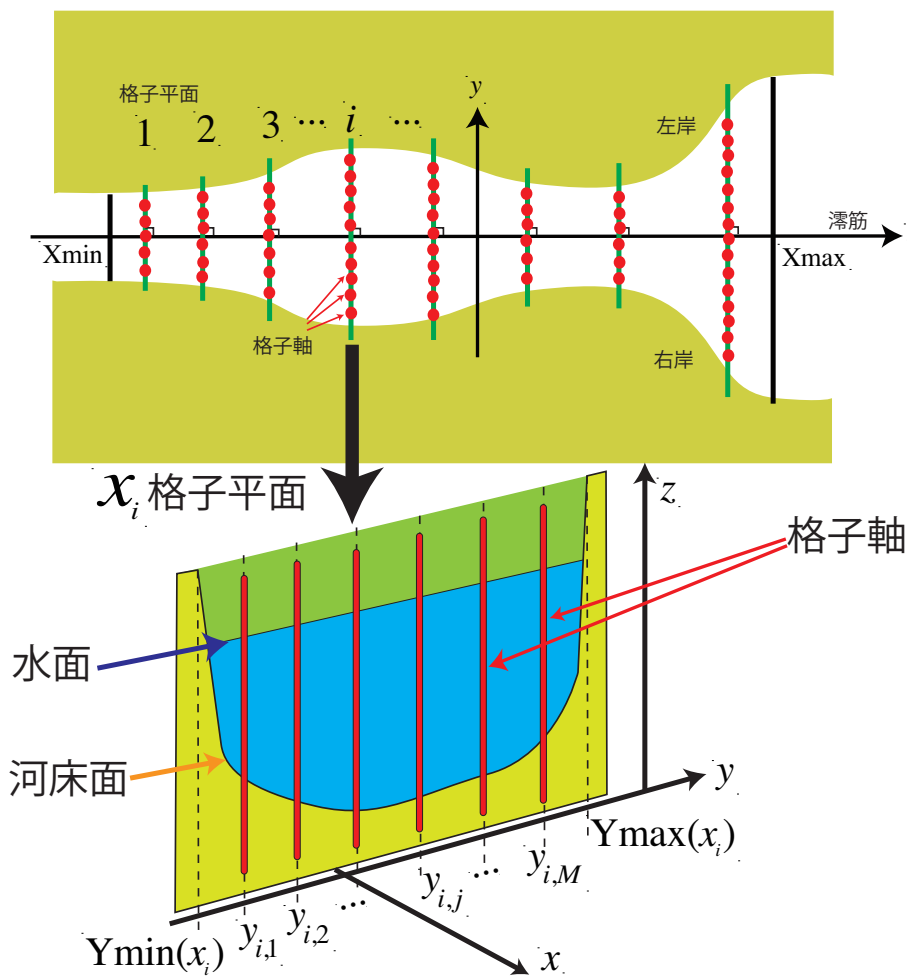


図 4 (c) 計算空間内での格子軸

各格子平面はx軸に垂直、即ちy方向に平行に設定されるので、格子平面内の全ての点は同じ主軸方向の座標 x_i を持つ。格子平面の番号は以後、特別に断らない限り添え字“i”で表す。

次に格子平面上に格子軸が設定される。図4(c)に示すように各格子平面上には、鉛直z方向に平行な複数の格子軸を設定する。格子軸の x_i 平面上でのy座標は入力地形データファイルで指定する。格子軸の間隔や位置は任意に取ることが可能であるが、x方向と同様に格子軸は側岸位置YminとYmaxとは一致させない。 x_i 平面上での格子軸の番号は以後、特別に断らない限り添え字“j”で表す。 x_i 平面上での格子軸のj番目の格子軸のy座標は、 y_{ij} と表す。i平面j軸の座標は (x_i, y_{ij}) と書かれる。水面や河床高などの2次元変数はこのxy平面内における格子軸座標 (x_i, y_{ij}) ごとに定義されているとして計算が行われる。

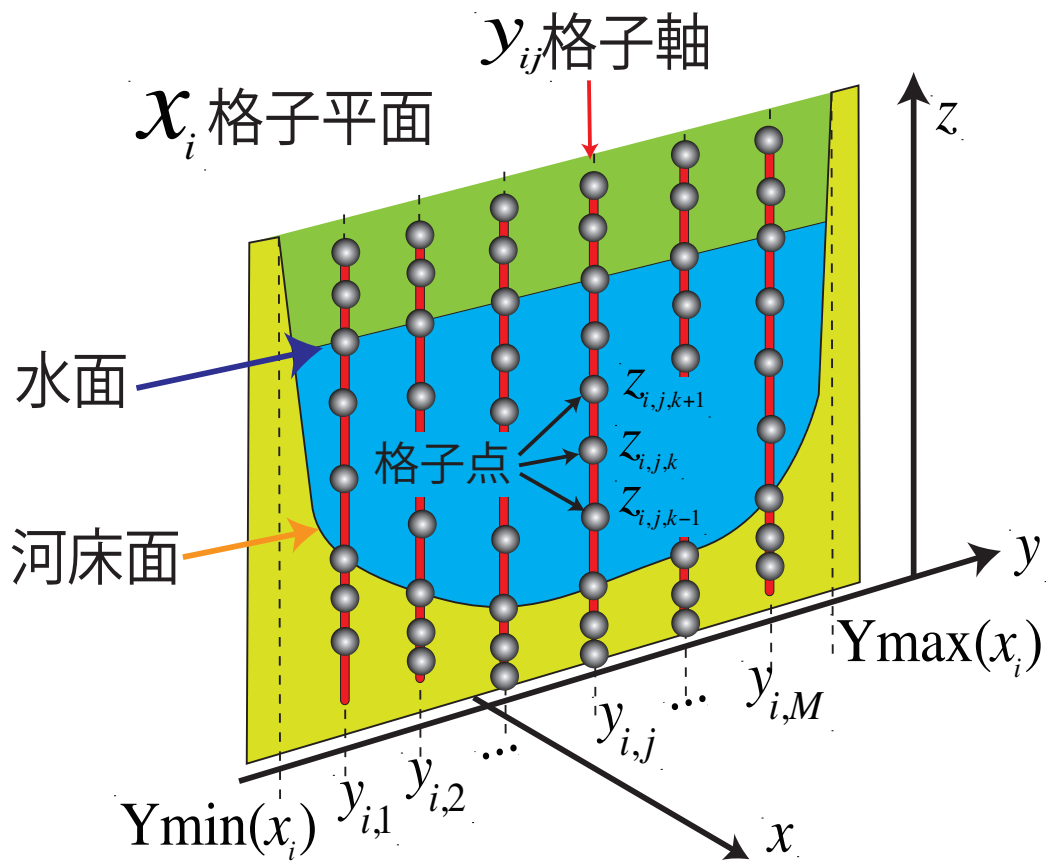


図 4 (d) 計算空間内での格子点

最後に各軸上に流速や水温、塩分などの3次元物理量を計算するための計算格子点が配置される。図4(d)に示すように各格子軸上には、入力地形データファイルで指定された個数の計算格子点が設置される。格子点の位置は密度などの物理量の鉛直方向の勾配を元にして、着目する物理量の鉛直方向の変化が大きい領域に集中して配置されることになる。また、水面上と底面上には、動力学及び力学条件を導入するために格子点が必ず各計算ステップで一致するように格子点のz座標が調整されることになる。また、本モデルでは内部境界条件法の考えに基づき、水面上及び底面以下の流速も非圧縮性を仮定して水塊内部と同様に解くことから、水面上及び底面以下の空間にも格子点を2点ずつ配置している。i平面上に位置するj軸上の格子点の番号は添え字kで表し、i平面上j番目格子軸上のk番目の格子点の3次元座標は (x_i, y_{ij}, z_{ijk}) で表せられる。

並列計算

本モデルはMessage Passing Interface (MPI)ライブラリを用いた並列計算プログラムとして実装されている。並列計算の実現には領域分割法を用いており、以下同法による並列計算の実際について概要を説明する。

領域分割法

並列計算の基本的なコンセプトは計算を複数のPC或いはCPU（コア）で分担して行い、一つのPC (CPU, コア)あたりの計算量を減らし、計算の高速化を実現することにある。領域分割法は計算の分割を空間を基準に行う手法である。図5に領域分割法による計算の分割の概念図を示す。まず、地形入力データを読み込み格子平面・軸の位置と各平面・軸に含まれる格子点の数をプログラム内に格納する。その後、格子平面を単位として、x方向に計算領域をプログラム実行時に指定（mpirun の実行時に-np オプション等で指定する数）される数の子領域（サブドメイン）に分割する。その際には、各サブドメインに含まれる格子点の総数が出来るだけ同じ程度になるようにサブドメインの範囲を調整する。分割された各サブドメインはそれぞれ一つのCPU（実際にはCPU上のプロセス、あるいはランクとも呼ぶ）で計算されることになる。各サブドメイン（プロセス、ランク）はMPIにより一意の整数(myid=0,1,2,...)が付与されて、自身が全計算領域中でどの領域を担当しているのかを判断することになる。本プログラムでは、myid=0がXmin側の端のサブドメインを示し、以下myid=1, myid=2,...の順に+X方向に並んでいるとする。なお、計算ルーチンの制約から、各サブドメインに含まれる格子平面数は3以上となる。並列数を増加させた場合、平面数が3以下となる場合には計算は開始されない。

各サブドメイン内部の格子点の計算にはサブドメインの境界外に位置する、隣接するサブドメインが担当している格子点上の値が必要になる。そのため、サブドメイン間では計算により値が変化するたびに、必要に応じて境界値の転送をMPI関数で行うように成っている（実際にはupdate_boundary_value...関数を呼ぶことで実行される）。各サブドメイン内での格子平面の番号は、各サブドメイン内で担当する平面に対して順番に付与されており、プログラム中では図6の様にplane_start, plane_end, line_start[i], line_end[i], point_start[i][j], point_end[i][j]が格子平面・軸・点の開始番号と終了番号を格納している。

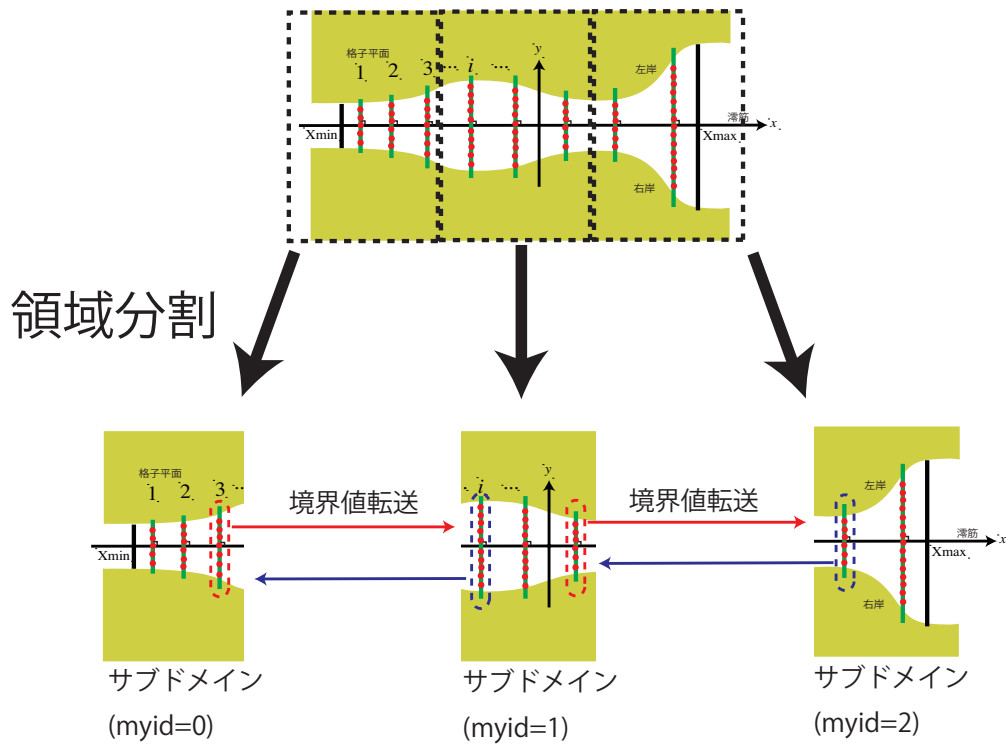


図5 領域分割による並列計算(総並列数3の場合)

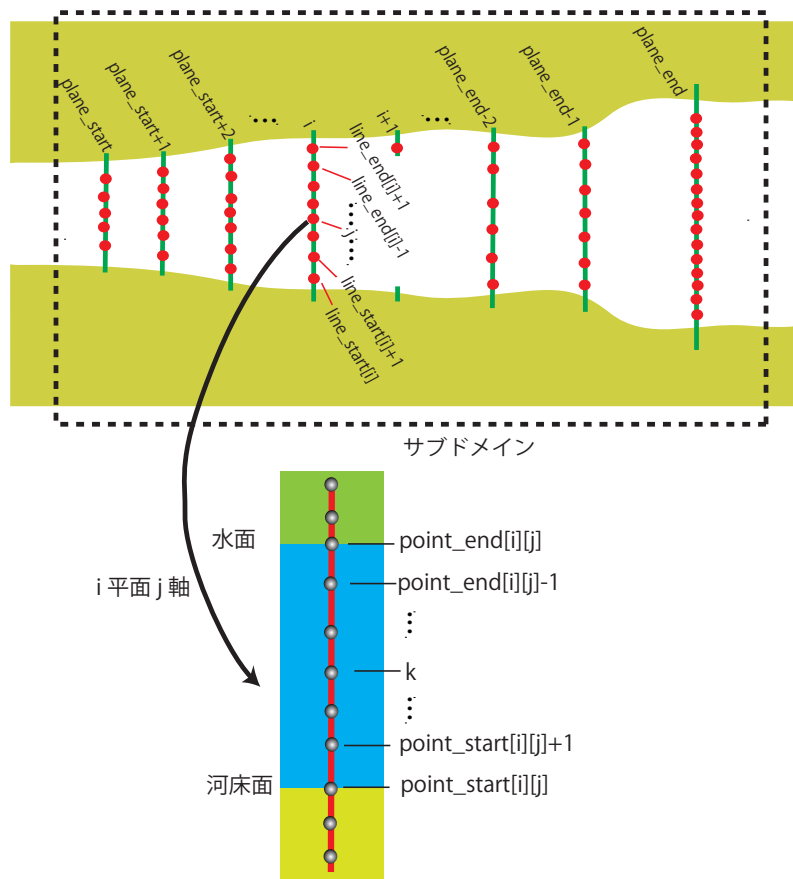


図6 各サブドメイン内での格子番号の開始・終了番号

基礎方程式

基礎方程式について以下に概要を述べる。

3次元K-E乱流モデル

基礎方程式は3次元k-ε乱流モデルを基礎にしており、流速（x,y,z方向成分 $u(t,x,y,z)$, $v(t,x,y,z)$, $w(t,x,y,z)$ ）と水温 $T(t,x,y,z)$ 、塩分 $s(t,x,y,z)$ 、乱流エネルギー $k(t,x,y,z)$ 、乱流エネルギー散逸率 $\varepsilon(t,x,y,z)$ 、及びユーザー定義物理量 $\phi_{sp}(t,x,y,z)$ について3次元Soroban格子 (x_i, y_{ij}, z_{ijk}) 上での時間発展が計算される。これら3次元変数に対する基礎方程式は以下の通りである。

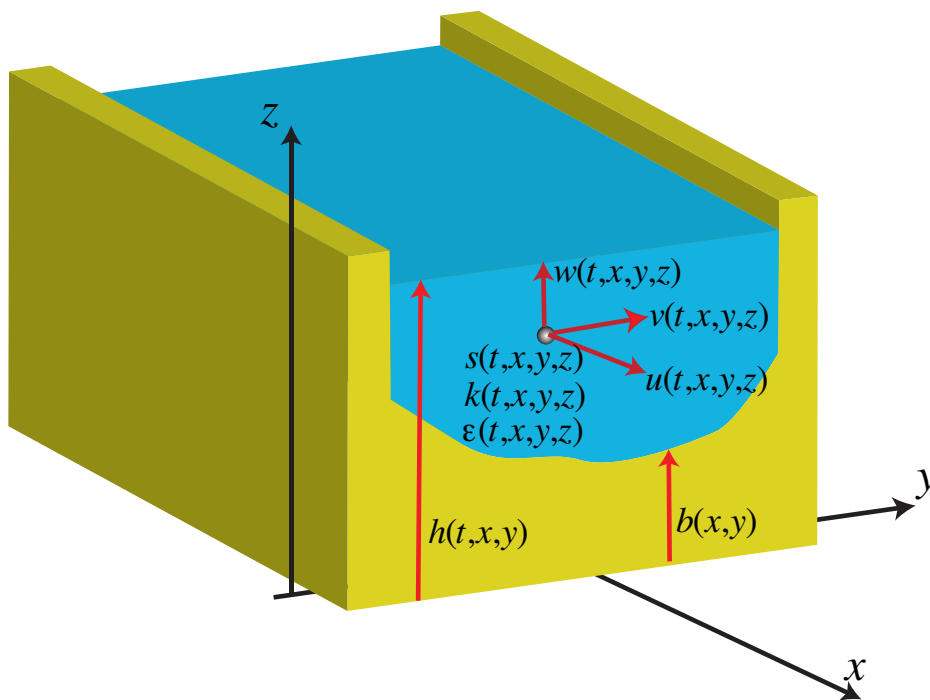


図7 変数

運動方程式

水塊の流速は以下の運動方程式に従い計算される。

$$\frac{Du}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{2}{3} \frac{\partial k}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_{lic_M} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_{lic_M} \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_{eff} \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{uv}{R} + f_{co} v + \frac{\tau_x}{\rho} \quad (1.1)$$

$$\frac{Dv}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{2}{3} \frac{\partial k}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_{lic_M} \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_{lic_M} \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_{eff} \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \frac{u^2}{R} - f_{co} u + \frac{\tau_y}{\rho} \quad (1.2)$$

$$\frac{Dw}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{2}{3} \frac{\partial k}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_{lic_M} \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_{lic_M} \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_{eff} \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{\tau_z}{\rho} - g \quad (1.3)$$

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z}$$

式(1.1)～(1.16)は主流方向 x 、横断方向 y 、および鉛直方向 z からなる計算空間 (x, y, z) において定義されており、式(1.1)および(1.2)には主流方向の曲率 $1/R$ を用いて実空間における遠心力の効果が考慮されている。各変数の意味は以下の通りである。

t : 時刻[sec]

x : 計算空間座標（主流方向）[m]

y : 計算空間座標（横断方向）[m]

z : 計算空間座標（鉛直方向）[m]

$u(t, x, y, z)$: 流速（ x 方向、主流方向）[m/sec]

$v(t, x, y, z)$: 流速（ y 方向、横断方向）[m/sec]

$w(t, x, y, z)$: 流速（ z 方向、鉛直方向）[m/sec]

$p(t, x, y, z)$: 圧力[Pa]

$\rho(t, x, y, z)$: 密度[kg/m³]

$k(t, x, y, z)$: 乱流エネルギー[J]

$v_{lic_M}(x, y)$: 水平方向渦粘性係数[m²/sec]

$v_{eff}(t, x, y, z)$: 鉛直方向有効拡散係数[m²/sec]

$R(x)$: 曲率半径[m]

f_{co} : コリオリパラメータ ($f_{co} = 2 \times 7.27 \times 10^{-5} \sin(\text{緯度})$)

g : 重力加速度[m/sec²]

$\tau_x(t, x, y, z), \tau_y(t, x, y, z), \tau_z(t, x, y, z)$: 水面・川床面上・側岸面上での各方向応力

非圧縮条件

本モデルでは非圧縮性を仮定し、以下の条件式が各時刻において満足されるように流速の時間発展が計算される。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1.4)$$

輸送方程式（水温、塩分、スカラー量）

水温、塩分及びユーザー定義物理量（DO、SS...）は以下の輸送方程式に従い計算が行われる。

$$\frac{DT}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{v_{lic}}{\sigma_t} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{v_{lic}}{\sigma_t} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v_{eff}}{\sigma_t} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S_T \quad (1.5)$$

$$\frac{Ds}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{v_{lic}}{\sigma_t} \frac{\partial s}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{v_{lic}}{\sigma_t} \frac{\partial s}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v_{eff}}{\sigma_t} \frac{\partial s}{\partial z} \right) \quad (1.6)$$

$$\frac{D\phi_{sp}}{Dt} = w_{settlement} \frac{\partial \phi_{sp}}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{v_{lic}}{\sigma_{\phi sp}} \frac{\partial \phi_{sp}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{v_{lic}}{\sigma_{\phi sp}} \frac{\partial \phi_{sp}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v_{eff}}{\sigma_{\phi sp}} \frac{\partial \phi_{sp}}{\partial z} \right) + S_{\phi sp} \quad (1.7)$$

各変数の意味は以下のとおりである。

$T(t, x, y, z)$: 水温[°C]

$s(t, x, y, z)$: 塩分[psu]

$\phi_{sp}(t, x, y, z)$: ユーザー定義物理量 (sp 種)

$\nu_{lic}(x, y)$: 水平方向渦拡散係数[m²/sec]

σ_t : 標準 $k-\varepsilon$ モデル定数 (水温及び塩分)

$\sigma_{\phi sp}$: 定数 (スカラー量 (sp 種))

$S_T(t, x, y, z)$: 日射等による水温変化ソース項 (熱収支項)

$S_{\phi sp}(t, x, y, z)$: 生成項 (スカラー量 (sp 種))

$w_{settlement}$: 沈降速度 (スカラー量 (sp 種)) [m/sec]

乱流方程式

$k-\varepsilon$ 乱流モデルに従い以下の基礎方程式に従い計算される。

$$\frac{Dk}{Dt} = P_k - \varepsilon + G_k + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\nu_{lic}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\nu_{lic}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\nu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) \quad (1.8)$$

$$\frac{D\varepsilon}{Dt} = (C_1 P_k - C_2 \varepsilon) \frac{\varepsilon}{k} + C_1 (1 - C_3) \frac{\varepsilon}{k} G_k + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\nu_{lic}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\nu_{lic}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\nu_{eff}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) \quad (1.9)$$

ここで、

$k(t, x, y, z)$: 乱流エネルギー[J/kg]

$\varepsilon(t, x, y, z)$: 乱流エネルギー散逸率[J/kg/sec]

σ_k : 標準 $k-\varepsilon$ モデル定数 (乱流エネルギー)

σ_ε : 標準 $k-\varepsilon$ モデル定数 (散逸率)

P_k : 乱流エネルギー生成項[J/kg/sec]

G_k : 密度成層による乱流抑制項[J/kg/sec]

C_1, C_2, C_3 : 標準 $k-\varepsilon$ モデル定数

乱流生成項は、標準 $k-\varepsilon$ モデルを基に水平流速の鉛直シアーが卓越すると仮定し、以下の様に定式化した。

$$P_k = \nu_{turb} \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right\} \quad (1.10)$$

密度成層による乱流抑制項は以下の通りとした。

$$G_k = \frac{g}{\rho} \frac{\nu_{eff}}{\sigma_t} \min \left(\frac{\partial \rho}{\partial z}, 0 \right) \quad (1.11)$$

ここで、関数 $\min(a,b)$ は a と b のうち小さい方を与えるものであり、式(1.12)では密度成層による乱流エネルギーの消滅（乱流の抑制）のみ考慮することとしている。

拡散係数は水平方向と鉛直方向の空間スケールが大きく異なることから、水平方向に関してはリチャードソンの4/3乗則を用いて拡散係数を与え、鉛直方向のみ $k-\varepsilon$ モデルに基づく乱流拡散係数を与えることとした。

$$\nu_{lic} = \nu_0 D^{4/3} \quad (1.12)$$

D は水平方向の渦の代表長さであり、計算格子の水平方向の間隔の最大値で与えることとした。

$$D = \max \left(\Delta x_i, \Delta y_{ij} \right) \quad (1.13)$$

なお、海洋における観測結果から標準的な ν_0 の値は0.01である。水平方向の渦粘性係数については、式(1.12)により拡散係数を求めた後、乱流シュミット数 S_c を仮定して、

$$\nu_{lic_M} = S_c \times \nu_{lic} \quad (1.14)$$

から決定することとした。乱流シュミット数 S_c は通常1より大きいとされているが、計算条件として任意の値を使用できるようにしている。

鉛直方向の乱流拡散（粘性）係数は以下の式で与える。

$$\nu_{eff} = \nu_{mol} + \nu_{turb} \quad (1.15)$$

ここで、 ν_{mol} は運動量、塩分、水温それぞれに対する水の分子粘性（拡散）係数であり、乱流粘性係数 ν_{turb} は乱流粘性、拡散に依らず

$$\nu_{turb} = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (1.16)$$

と計算する。

水面方程式

水面は波の巻き込みや追い越しが生じない、すなわち、水平座標 x, y の1価関数と仮定する。水平座標 x, y における時刻 t での水面の鉛直位置 $h(t, x, y)$ は以下の式に従い時間発展が計算される。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial m}{\partial x} + \frac{\partial n}{\partial y} = 0 \quad (1.17)$$

ここで、 m, n は水平座標 x, y における x, y 方向への単位幅流量であり、式(1.1)及び(1.2)より計算された u, v を用いて以下のように推定される。

$$m(t, x, y) = \int_{b(x, y)}^{h(t, x, y)} u(t, x, y, z) dz \quad (1.18)$$

$$n(t, x, y) = \int_{b(x, y)}^{h(t, x, y)} v(t, x, y, z) dz \quad (1.19)$$

ここで、 $b(x, y)$ は水平座標 x, y における地底面の鉛直位置である。

境界条件

以上の基礎方程式は以下に示す水面・底面上、及び側岸面、上流・下流端での境界条件とともに時間発展は計算される。

水面上

内部境界条件法の考えに従い水面上の領域に関しても水が充填されているとして上記の基礎方程式に従い水塊と同様に時間発展が計算される。その一方で、水塊内部における流動の妥当性を担保するため、水面では以下の力学的条件を水面上の圧力に対して課す。

$$p(t, x, y, h(t, x, y)) = 0 \quad (1.20)$$

塩分の水面上での境界条件としては、水面を通じた塩分輸送は存在しないことから以下の条件を課す。

$$\left(\frac{\partial s}{\partial z} \right)_{(t, x, y, h(t, x, y))} = 0 \quad (1.21)$$

水温に関しては日射等の外部気象条件による水温変化は別途ソース項で計算することとし、拡散や移流過程においては外部からの熱量授受は存在しないとして、以下の条件を課す。

$$\left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{(t, x, y, h(t, x, y))} = 0 \quad (1.22)$$

風応力による影響は以下のように考慮する。x 方向（主軸方向）及び y 方向（横断方向）流速成分 u , v に関しては風場のデータが入力されていない場合には風応力の影響を無視して、

$$\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)_{(t,x,y,h(t,x,y))} = 0 \quad (1.23)$$

$$\left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)_{(t,x,y,h(t,x,y))} = 0 \quad (1.24)$$

を課す。一方、入力データとして風場の時系列データが与えられる場合には、 U_x, U_y を 10 m 風の速の x 方向（主軸）及び y (横断) 方向成分として、

$$v_{turb} \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)_{(t,x,y,h(t,x,y))} = - \frac{\tau_{Wind}}{\rho_{water}} \frac{U_x}{\sqrt{U_x^2 + U_y^2}} \quad (1.25)$$

$$v_{turb} \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)_{(t,x,y,h(t,x,y))} = - \frac{\tau_{Wind}}{\rho_{water}} \frac{U_y}{\sqrt{U_x^2 + U_y^2}} \quad (1.26)$$

τ_{Wind} は風の摩擦応力で以下の式で見積もる。
を課す。ここで、

$$\tau_{Wind} = \rho_{air} C_D U^2 \quad (1.27)$$

ρ_{air} は大気密度 $\rho_{air} = 1.3 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ 、 ρ_{water} [kg/m³] は水密度であり、 U は風速 $\sqrt{U_x^2 + U_y^2}$ である。

抗力係数 C_D は近藤らⁱによる以下のバルク式を使用している。

$$10^3 \times C_D = \begin{cases} 1.08U^{-0.15} & \text{for } U < 2.2 \text{ [m/s]} \\ 0.771 + 0.0858U & \text{for } 2.2 < U < 5 \text{ [m/s]} \\ 0.867 + 0.0667U & \text{for } 5 < U < 8 \text{ [m/s]} \\ 1.2 + 0.025U & \text{for } 8 < U < 25 \text{ [m/s]} \\ 0.073U & \text{for } 25 \text{ [m/s]} < U \end{cases} \quad (1.28)$$

乱流エネルギー及び散逸率は水面のごく近傍では応力によるエネルギー生成と散逸が釣り合うと仮定し、壁条件に基づき以下の固定値を与える。

$$k = \frac{1}{\sqrt{C_\mu}} \frac{\tau_{Wind}}{\rho_{water}} \quad (1.29)$$

$$\varepsilon = \frac{\left(\sqrt{C_\mu} k\right)^{3/2}}{\kappa z_s / 2} \quad (1.30)$$

ここで κ はカルマン常数(0.4)で、 z_s は水面からの距離である。本モデルでは水面上に格子点が配置されるため本来は $z_s = 0$ であるが、計算の安定性の為に z_s は水面での鉛直格子幅を用いている。

ユーザー定義物理量 $\phi_{sp}(t, x, y, z)$ に対する水面上の境界条件は後述するように各種条件が設定可能である。

底面上

底面上では以下の運動力学的条件を課して圧力を推定する。

$$u_n(t, x, y, b(t, x, y)) = 0 \quad (1.31)$$

ここで u_n は底面に垂直な流速成分である。これに加え底面上の流速成分に関して底面摩擦の効果として、

$$v_{turb} \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)_{(t, x, y, b(t, x, y))} = -f_b u_b u \quad (1.32)$$

$$v_{turb} \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)_{(t, x, y, b(t, x, y))} = -f_b u_b v \quad (1.33)$$

$$v_{turb} \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)_{(t, x, y, b(t, x, y))} = -f_b u_b w \quad (1.34)$$

を課す。ここでは f_b 摩擦係数で計算条件として任意の値が設定可能であり、 u_b は底面上での流速値を表す。

水温、塩分に関しては底面を通じての輸送は行われずとして以下の条件を課す。

$$\left(\frac{\partial s}{\partial z} \right)_{(t, x, y, b(t, x, y))} = \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{(t, x, y, b(t, x, y))} = 0 \quad (1.35)$$

乱流エネルギー及び散逸率については、”*.inc”設定ファイル中KE_BED_BOUNDARY_MODELの値により以下の二通りの境界条件が選択可能となっている。

KE_BED_BOUNDARY_MODEL=0の場合

固定値を壁条件から与える。水面上と同様に底面付近では摩擦応力による乱流生成と散逸が釣り合っていると仮定し、底面での応力が

$$\tau_{bim} = \rho_{water} f_b (u_b^2 + v_b^2 + w_b^2) \quad (1.36)$$

で与えられるとして、

$$k = \frac{1}{\sqrt{C_\mu}} \frac{\tau_{bim}}{\rho_{water}} \quad (1.37)$$

$$\varepsilon = \frac{(\sqrt{C_\mu} k)^{3/2}}{\kappa z_b / 2} \quad (1.38)$$

と固定値を与える。 z_b は底面からの距離である。本モデルでは底面上に格子点が配置されるため本来は $z_b = 0$ であるが、計算の安定性の為に z_b は底面での鉛直格子幅を用いている。

KE_BED_BOUNDARY_MODEL=1の場合

斜面上を流下する密度プルームを対象として、石川と盛林²⁴らはプルームの相似性を用いた解析を行い、以下の乱流エネルギー及び散逸率の底面からの供給フラックスモデルを定式化している。KE_BED_BOUNDARY_MODEL=1の場合にはこれが選択される。

$$v_{turb} \left(\frac{\partial k}{\partial z} \right)_{(t,x,y,b(t,x,y))} = \alpha f_b (u_b^2 + v_b^2 + w_b^2)^{3/2} \quad (1.39)$$

$$v_{turb} \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right)_{(t,x,y,b(t,x,y))} = \beta f_b (u_b^2 + v_b^2 + w_b^2)^{3/2} \varepsilon / k \quad (1.40)$$

ここで α 及び β は摩擦係数 f_b 及び k - ε の定数 C_1, C_2 から決定される定数であり、

set_stress_and_flux_on_surface関数内で自動で決定されるものである。

ユーザー定義物理量 $\phi_{sp}(t, x, y, z)$ に対する底面上の境界条件は後述するように、水面上の境界条件と同様に各種条件が設定可能である。

側岸面

各格子平面における $y=Ymin$ 及び $Ymax$ の側岸に接する格子点では底面における摩擦と同様に以下の境界条件を考慮する。

$$\left(\frac{\partial u}{\partial n}\right) = -f_b u_s u \quad (1.41)$$

$$\left(\frac{\partial v}{\partial n}\right) = -f_b u_s v \quad (1.42)$$

$$\left(\frac{\partial w}{\partial n}\right) = -f_b u_s w \quad (1.43)$$

ここで n は側岸面への垂直ベクトルであり、 u_s は側岸面に接する格子点上の流速である。また以上の摩擦項は側岸面のみならず、陸地化した領域に接する格子点についても付加して計算する。

水温、塩分、乱流諸量に関しては側岸面からの輸送は存在しないとして、

$$\left(\frac{\partial T}{\partial n}\right) = \left(\frac{\partial s}{\partial n}\right) = \left(\frac{\partial k}{\partial n}\right) = \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial n}\right) = 0 \quad (1.44)$$

として計算する。

上流・下流端境界

$x=Xmin$ 及び $Xmax$ の上・下流端境界面ではユーザーが境界値の時系列データを与えることで x 方向流速、水温、塩分及びユーザー定義物理量について任意の境界条件を設定できる。

図8に示すように、流入or流出河川が複数に分かれる場合に対応するため、 $Xmin$ 及び $Xmax$ 境界において夫々複数の”境界領域”を設定する。境界領域の最大数は10領域まで $Xmin$ 及び $Xmax$ それぞれで設定可能である。各境界領域の範囲は、基本設定ファイル”*.inc”内で各領域のY座標(計算空間内での座標)の範囲を、Y座標の最小値(YMIN_?)及び最大値(YMAX_?)を指定することで設定する(?は境界領域の番号)。

図9は境界 $Xmin$ 及び $Xmax$ でのy-z断面を示したものである。流量、水温、塩分等の境界値について、異なる時系列データファイルを境界領域1と境界領域2で設定することで、境界領域ごとに異なる境界条件を設定可能となっている。それぞれの境界領域では、流量の境界条件データが入力された場合には、境界断面において主流速が一樣として流量を断面積で除した値が設定される。同様にユーザー定義物理量及び水温・塩分について境界値の時系列データが指定された場合には、境界断面で入力された値がそれぞれに一樣に設定される。水位も同様に、境界における水位の時系列データが入力された場合にはその値は断面一樣に与えら

れることになる。上記物理量について境界値データが入力されない場合や、乱流量については x 方向に自由境界条件 $\partial f / \partial x = 0$ が課される。

さらに、夫々の境界領域で境界値が断面一様で無い場合にはゲート条件を課すことで、ゲート等により一部範囲のみ流入or流出するように制限を加えることが可能である。図10にゲート条件の模式図を示す。流入or流出が生じる範囲（解放領域、ゲート）は複数設定可能で、各時刻における解放領域の数とそれぞれの領域の y - z 範囲を記載したゲート条件ファイルを基本設定ファイル "*.in" 内で指定することでゲート条件を有効化できる。解放領域（ゲート）の形は四角形であり、計算空間における隅点の座標 $(y_{\min}^{G?}, z_{\min}^{G?})$ と $(y_{\max}^{G?}, z_{\max}^{G?})$ を指定することで各解放領域の範囲が設定される。なお、解放領域（ゲート）の隅点の座標は水面上（図10ゲート1を参照）や底面下（図10ゲート2を参照）にも設定可能であり、これにより上層や下層放流を再現できる。ゲート条件が指定された場合には、解放領域（ゲート）以外の領域では壁が存在するとして流出入は許されなくなり、流速や水温・塩分などの境界条件ファイルが指定された場合

なお、当該境界領域で流量が指定された場合には、各時刻における境界領域に含まれる解放領域の総面積で流量を除して流速に変換される。

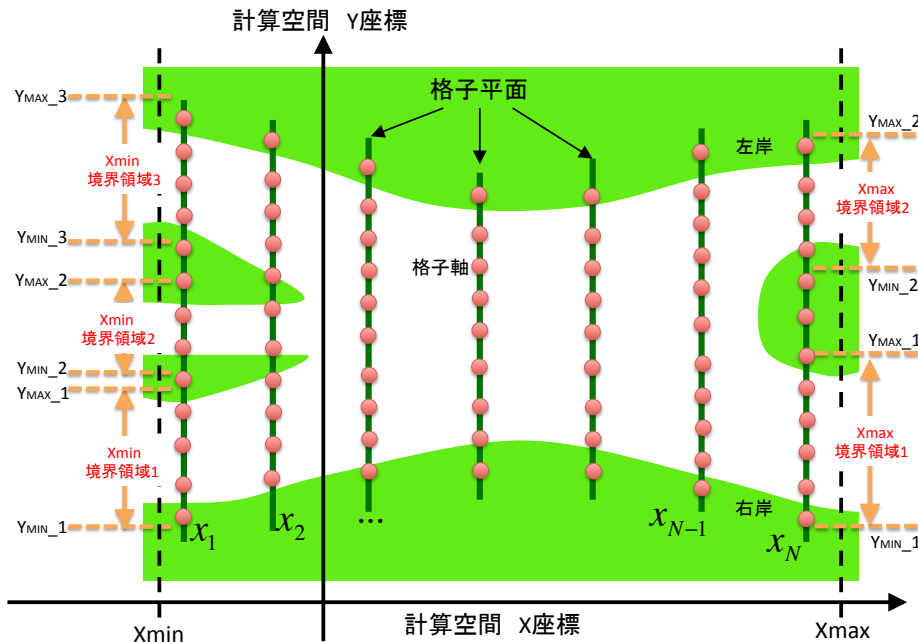


図8 X境界における境界領域の設定

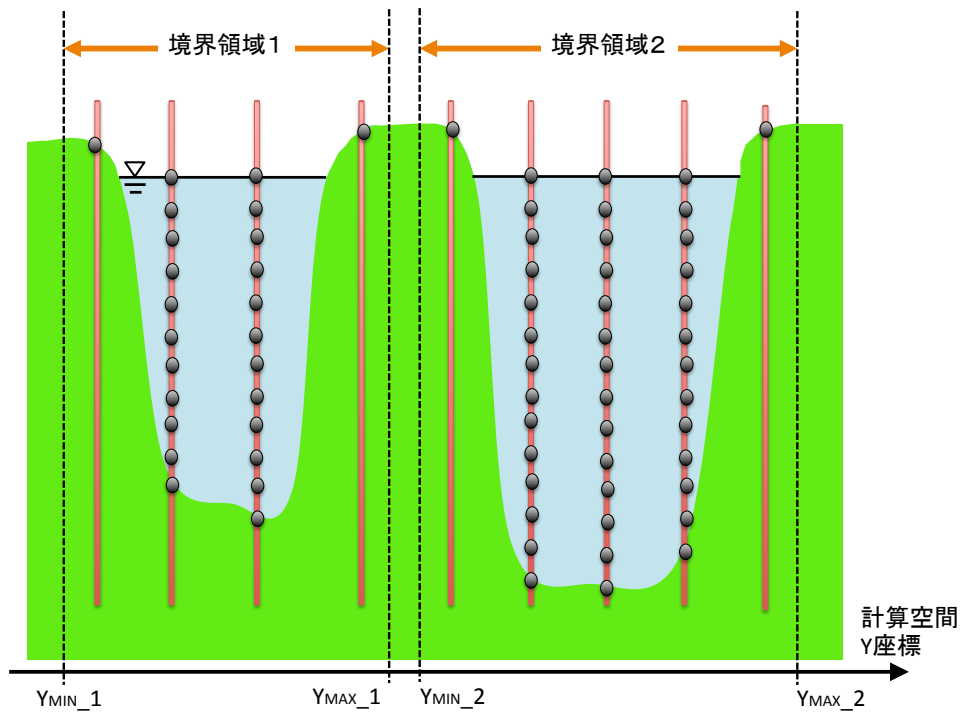


図9 X境界断面における境界領域

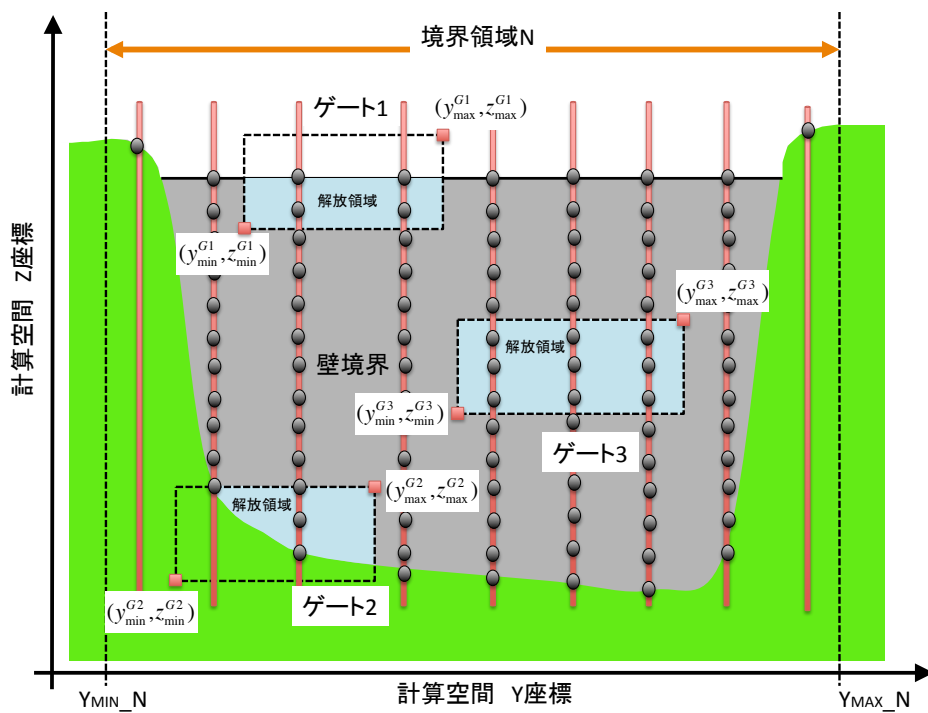


図10 境界領域におけるゲート条件の設定

ⁱ 近藤純正, 水環境の気象学, 朝倉書店 (1994) pp.169-170.

ⁱⁱ 盛林哲, 傾斜ブルームの連行則に関する解析的研究, 東京工業大学大学院総合理工学研究科平成十年修士論文, (1999).

熱収支モデル

水温成層の消長を再現する際に必要となる日射・気温・風などの気象条件に基づく熱収支項のモデル化について説明する。水温の輸送方程式

$$\frac{DT}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\nu_{lic}}{\sigma_i} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\nu_{lic}}{\sigma_i} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\nu_{eff}}{\sigma_i} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S_r \quad (1.5)$$

右辺の S_r は、水面を通じて外部大気から付与される熱フラックスを ϕ [kcal/m²/sec] とすれば、

$$S_r = \frac{\phi}{\rho C_w} \quad (1.45)$$

により与えられる。ここで C_w は水の比熱である。熱フラックス ϕ による水塊外部との熱量授受には、短波と長波放射からなる日射、及び水面からの蒸発・凝固に伴う潜熱・顕熱を考慮する。また、潜熱・顕熱フラックスや長波放射等は水面に影響する一方、水面下の水塊では太陽からの短波日射のみが影響することから、水面上と水面下の水塊について各々異なる取り扱いを行う。

水面上

図 1-1 に貯水池水面付近及び水中における熱収支の模式図を示す。水面は太陽からの短波放射(全天日射量) ϕ_I 、大気や雲からの長波放射 ϕ_{Ldn} によりエネルギーを受け、また水面自体の長波放射によりエネルギー ϕ_{Lup} を大気へと放出している。さらに、水面-大気間では顕熱、潜熱による熱の輸送が行われている。この二つの熱輸送は乱流フラックスと呼ばれ、顕熱は熱伝導と対流によって輸送される熱、潜熱は水の蒸発熱により輸送される熱のことであり、それぞれの熱輸送量を顕熱フラックス ϕ_e 、顕熱フラックス ϕ_c と呼ぶ。日射による短波放射 ϕ_I は水面の反射によって $(1-\alpha)\phi_I$ となって貯水池内に伝達されていくが、このうち半分程が表面で吸収され、残りが指数関数的に減衰しながら貯水池深部に到達する。つまり、水表面の熱フラックス ϕ_{surf} は以下のようにモデル化される。

$$\phi_{surf} = \beta(1-\alpha)\phi_I - C_l \left\{ (\phi_{Lup} - \phi_{Ldn}) + (\phi_e + \phi_c) \right\} \quad (1.46)$$

ここで、 α は水面反射率（アルベド）、 β は短波日射の水面における吸収率である。 α 及び β は対象とする水域ごとの透明度などから調整される定数であり、反射率 α は 0.03~0.04 程度、吸収

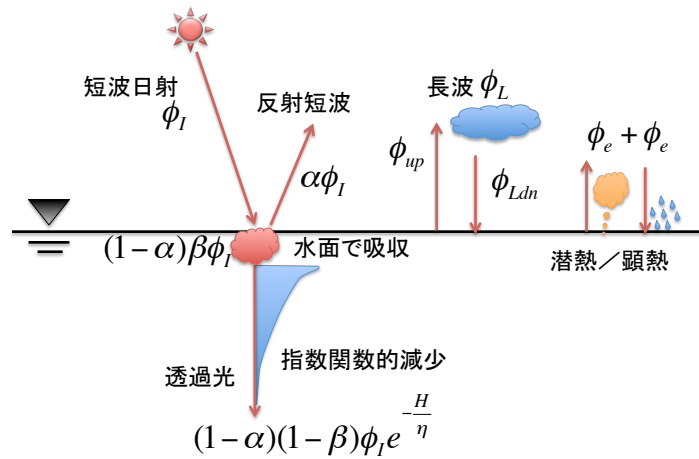


図11 熱収支における各フラックス

率 β は0.4~0.6程度の値を取ることが示唆されているⁱ。また C_l は短波以外の熱フラックスの大きさを調整するパラメータであり、 $C_l = 1$ が標準値である。水面付近での夜間や強風時の冷却等が実際より強い場合などに調整するパラメータである。長波に関するものの総和(有効長波放射量) $\phi_L = \phi_{Lup} - \phi_{Ldn}$ 及び、潜熱と顕熱の総和($\phi_e + \phi_c$)は実験や観測に基づいて経験的に推定するモデルが提案されている。本モデルでは、有効長波放射量 $\phi_L = \phi_{Lup} - \phi_{Ldn}$ はSwinbank式ⁱⁱ、潜熱・顕熱成分($\phi_e + \phi_c$)はRowher式ⁱⁱⁱに従い推定することとした。

Swinbank:

$$\phi_L = 0.97\sigma_s \left[T_w^4 - 0.937 \times 10^{-5} T_A^6 \left(1.0 + 0.17 \left(\frac{C}{10} \right)^2 \right) \right] \quad (1.47)$$

Rowher:

$$\phi_e + \phi_c = (0.000308 + 0.000185 U_{15cm}) \rho (e_s - \psi e_a) \left[L_v + C_w T_s + \frac{269.1(T_s - T_a)}{(e_s - \psi e_a)} \right] \quad (1.48)$$

ここで、 σ_s はStefan Boltzman($=1.171 \times 10^{-6}$ [kcal/m²day,K])常数である。 T_w は貯水池の表面水温[K]であり、 T_A は気温[K]である。 C は曇量(範囲0~10)である。また、 U_{15cm} は風速(水面上15cm風速)[m/s]であり、 e_s は表面水温に相当する飽和蒸気圧[mmHg]であり、 e_a は気温に

相当する飽和蒸気圧[mmHg]である。 ψ は相対湿度[%]であり、 L_v は蒸発の潜熱[kcal/kg]である。 T_s は表面水温[°C]であり、 T_a は気温[°C]である。表面水温、気温に相当する飽和蒸気圧はTetens式に従い、 e_s, e_a はそれぞれ次式で与えられる。貯水池で想定される気温(-30°Cから+40°C)では、水面と氷表面においてTetens式は実用的に正しい値を得られる事が確認されている^{iv}。

$$e_s \mid 6.112'' 10^{\frac{7.5T_s}{T_s + 2237.3}} \quad (1.49)$$

$$e_a \mid 6.112'' 10^{\frac{7.5T_a}{T_a + 2237.3}} \quad (1.50)$$

なお、蒸発の潜熱 L_v は以下の近似式で与えられる。

$$L_v \mid 43.766'' 10^{44} T_s^2 + 5.440'' 10^{41} T_s + 5.97'' 10^2 \quad (1.51)$$

また、15cm高風速 U_{15cm} は水面付近で風速は対数分布

$$U(z) = \frac{u^*}{\kappa} \log \left(\frac{z}{z_0} \right)$$

であると仮定し、10m高度風速 U_{10m} から

$$U_{15cm} = U_{10m} + \frac{u^*}{\kappa} \log \left(\frac{15cm}{10m} \right)$$

による変換する。ここで摩擦速度 u^* は式(1.28)のCdを用いて、

$$u^* = \sqrt{C_d} U_{10m}$$

で推定される。

水中

水面下の水塊は水面上と異なり、蒸発潜熱や顕熱は生じず主に日射の吸収が水塊の熱量の変化に寄与する。水など透過物質での透過光強度は、透過距離すなわち水深Hに対して指数関数的に減少することがLambert-Beerの法則として知られている。そこで、図11に示すように、短波放射成分 ϕ_l のうち、水面で反射されず、また水面上の水塊で吸収もされなかった成

分 $(1-\alpha)(1-\beta)\phi_l$ が水中に透過するとして、次式により水深 $H = h - z$ における透過光の熱フラックス ϕ_d を推定した。

$$\phi_d = (1-\beta)(1-\alpha)\phi_l \exp\left(-\frac{H}{\eta}\right) \quad (1.52)$$

ここで、 η は減衰長（透過光がⁱ1/e倍となる距離）、 h は水面高さ[m]である。実際の環境下では、水塊の濁りや懸濁物質濃度などにより減衰長は時間・空間的に変化すると考えられるが、本研究では減衰長は定数として取り扱うこととした。

ⁱ例えば、梅田信、池上迅、ダム貯水池の水温成層に関する鉛直二次元数値解析、水工学論文集、第51巻 (2007) pp.1349-1354.

ⁱⁱ Swinbank, W.C.: Long-wave radiation from clear skies. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 89, (1963) pp.330-348.

ⁱⁱⁱ Rohwer, C.: Evaporation from Free Water Surface, U.S. Department of Agriculture, *Technical Bulletin* No.271 (1931).

^{iv} Craig L. Stevens and Gregory A. Lawrence: Estimation of wind-forced internal seiche amplitudes in lake and reservoir, with data from British Columbia, Canada, *Aquat. sci.* 59, (1997) pp.115-134.

暴気モデル

暴気装置の流動モデルへの導入を以下に説明する。なお本モデルでは散気管などを用いて上方へ微小気泡群を連続的に放出する「散気暴気方式」を念頭に置いている。図12に示す様に散気管から放出された気泡群は上昇し、気泡コアを形成する。気泡コアは周辺水を連行し、気泡コア付近に上昇する内部プルーム(Inner Plume)を生じさせる。内部プルームは周辺水と連行により希釈されながら上昇し、浮力と連行により運動量を全て失った高さで静止し、負の浮力により内部プルーム外側を下降する外部プルーム (Outer Plume)を形成する。外部プルームは周辺水が同じ密度となる水深まで下降し、周辺へ水平貫入 (イントルージョン) を生じる。気泡の上昇速度は数十cm/sec程度であることから、以上のプルーム過程は貯水池内部の流動の時間スケールに比べ短時間となる。また、各プルームの大きさ (直径) は精々10m程度であり、貯水池流動の空間 (格子) スケールに比べ小さくなる。そこで本モデルでは、暴気によるプルーム形成と貯水池流動の計算を分離し、プルーム計算は1次元モデルにより行うこととした。

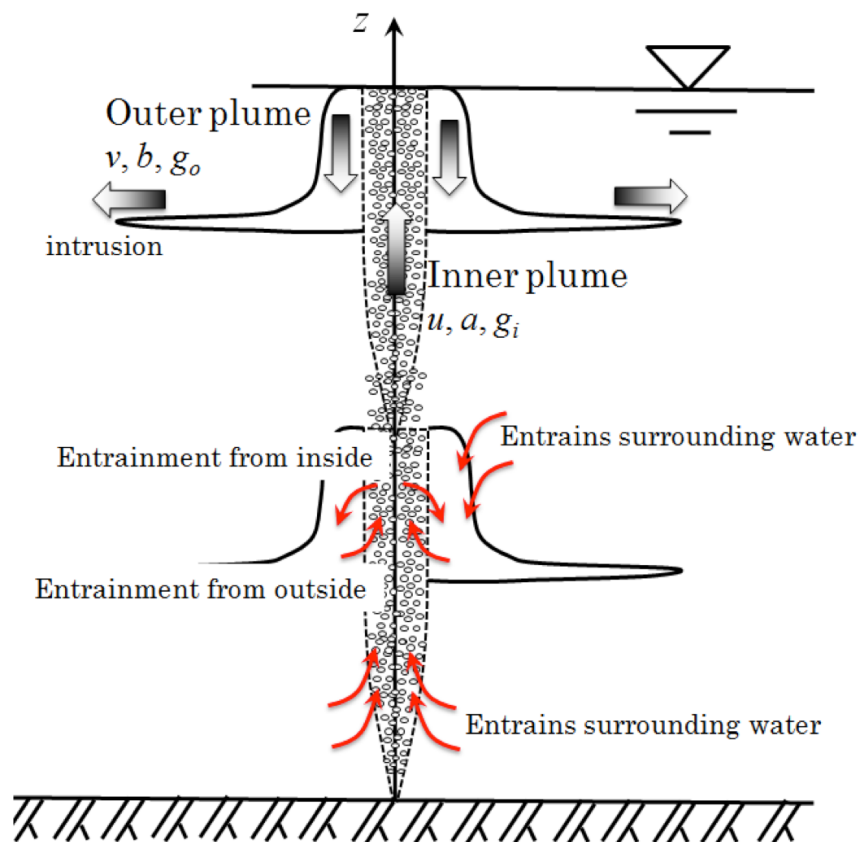


図12 散気暴気装置の概念

つまり、「貯水池流動計算の各時間ステップにおいて暴気装置上方の密度鉛直分布を推定し、その分布を入力条件として定常状態を仮定した鉛直 1 次元プルーム解析を行い、その結果得られる各深度での見かけ上の吸い込みとわき出しを流動モデルに反映させる」方針を取る。以下に使用するプルームモデルについて説明を行い、次いで流動モデルとの連成方法を述べる。

鉛直 1 次元ダブルプルームモデルにおける暴気過程の記述

水温等による鉛直方向密度勾配の存在化でのプルームモデルとして Asaeda&Imberger のダブルプルームモデルを用いる。以下に基礎方程式を述べる。図12に示すように上昇(内部)プルームとその外部に下降(外部)プルームを考える。一般にプルームの上昇速度数十 cm/s であり、水深数十 m の貯水池では数十秒程度の時間スケールで水面まで達する。これがプルームモデルの代表時間スケールであり、実際の貯水池の流動の時間スケールと比べ非常に短いものである。そこで、以下のダブルプルームでは周辺水の密度構造などがプルームの時間スケール内では変化しないと見なし、定常状態のプルームを解析する。鉛直方向に座標 z 軸を考える。内部プルームと外部プルームはともに鉛直軸対象であるとし、それぞれ $a(z)$, $b(z)$ の半径を持つ円筒形をしていると仮定する。周辺水は鉛直方向に密度 $\rho_a(z)$ で成層しているとする。内部プルーム及び外部プルームの物理量として、それぞれについて各水深における鉛直方向への流速 $u(z)$, $v(z)$, プルーム半径 $a(z)$, $b(z)$, 及び相対浮力 $g'(z)$, $g''(z)$ に対する方程式をモデル化する。上昇する水塊の上向きの運動量は全て内部プルームに含まれるとし、下降する運動量は外部プルームに含まれると考える。図12に示すように放出された気泡群に連行されて内部プルームは上昇を始める。外部プルームが存在しない水深では周辺水は静止しているとして、内部プルームの上昇速度 $u(z)$ に比例する量 $\beta u(z)$ を周辺水から連行により取り込みながら上昇する。ここで、 β は内部プルームの周辺水からの連行係数である。上昇を続け、周辺に下降する外部プルームが存在するようになると、内部プルームは外部プルームとの間で連行による水塊交換を行うと仮定する。実験の結果から内部プルーム内における乱流生成は外部プルームとの速度差により励起されることが報告されている。一方、外部プルーム内における乱流生成は静止周辺水と外部プルームの下降速度 $v(z)$ との速度差により励起されることが示唆されている。そこで、ダブルプルームモデルにおける内部プルームと外部プルーム間の連行過程では、外部から内部への連行は内部－外部プルーム間の速度差 $u(z) - v(z)$ に比例する量 $\beta(u(z) - v(z))$ が取り込まれ、内部から外部へは外部プルームの速度 $v(z)$ に比例する量 $\gamma v(z)$ を連行すると考える。連行により内部プルームの相対浮力・運動量は減少していく。そして運動量 $u(z)$ がゼロとなる水深において内部プルームは気泡群から剥がれ、下降プルームとして反転して下降していくと考える。下降開始点では外部プルームの相対浮力は底層から輪

送されて来たため、周辺水より重く、負の浮力を持っている。負の浮力で外部ブルームは下降していく。その過程で外部ブルームは内部ブルームから連行するとともに、自身より軽い周辺水を連行係数 α で連行していく。その結果、相対浮力は連行が進むとともに減少し、外部ブルームの相対浮力がゼロとなり周辺水と密度差が無くなる水深で水平方向に貫入(イントルージョン)すると考える。

鉛直 1 次元ダブルブルームモデルの基礎方程式

以上のような仮定を基に、内部ブルームについて体積フラックス、運動量フラックス及び浮力フラックスの保存式を考えると、以下の方程式が導出される。

内部ブルーム

$$\frac{d(a^2 u)}{dz} = 2a\beta(u-v) - 2\alpha\gamma v \quad (1.53)$$

$$\frac{d(a u^2)}{dz} = a^2 g' + 2a\beta v(u-v) - 2\alpha\gamma uv \quad (1.54)$$

$$\frac{d(a^2 u g')}{dz} = a^2 u \frac{g}{\rho} \frac{d\rho_a}{dz} - 2a\beta(u-v)g'' + 2\alpha\gamma v \tilde{g} + \frac{d(a^2 g u F)}{dz} \quad (1.55)$$

外部ブルーム

$$\frac{d}{dz} \left[(b^2 - a^2) v \right] = -2a\beta(u-v) - 2\alpha\gamma v - 2b\alpha v \quad (1.56)$$

$$\frac{d}{dz} \left[(b^2 - a^2) v^2 \right] = -(b^2 - a^2) g'' - 2a\beta v(u-v) - 2\alpha\gamma uv \quad (1.57)$$

$$\frac{d}{dz} \left[(b^2 - a^2) g'' v \right] = \frac{g}{\rho} \frac{d\rho_a}{dz} (b^2 - a^2) v - 2a\beta(u-v)g'' + 2\alpha\gamma v \tilde{g} \quad (1.58)$$

ここで、 z は気泡放出口からの鉛直高さ[m]である。 $u(z)$ 、 $v(z)$ は上昇ブルーム及び下降ブルームの平均上昇・下降速度[m/s]であり、 $g'(z)$ 、 $g''(z)$ は上昇ブルーム及び下降ブルームの周囲流体に対する浮力[m/s²]である。 α, β, γ は各々周辺水から外部ブルームへの連行係数、

外部ブルームから内部ブルームへの連行係数，内部ブルームから外部ブルームへの連行係数である。

また，上昇ブルーム及び下降ブルームの周囲流体に対する浮力は以下の式で定義される，

$$g' = g(\rho_a - \rho_i)\bar{\rho} \quad (1.59)$$

$$g'' = g(\rho_0 - \rho_a)\bar{\rho} \quad (1.60)$$

ここで， ρ_a, ρ_i, ρ_0 は各々周囲水，内部ブルーム，外部ブルームの密度[kg/m³] である。 $\bar{\rho}$ は基準密度[kg/m³]であり暴気装置上方の密度分布の鉛直平均値を用いる。

また， $\tilde{g}$ は g' のうち水に起因する割合であり， F を内部ブルーム断面中の気体含有率， Q_H を水深 H における気体流量とした時，以下の式により算出される。

$$\tilde{g} = g' - gF = g' - g \frac{Q_H}{\pi(a\lambda)^2(u + u_s)} \quad (1.61)$$

ここで， λ は内部ブルームと中央の気泡ブルームの半径の比であり， u_s はスリップ速度[m/s] である。連行係数など各パラメータの標準値はAsaeda&Imbergerらにより以下の値が示されている。

$$\alpha = 0.083, \beta = 0.042, \gamma = 0.083, u_s = 0.3, \lambda = 0.72 \quad (1.62)$$

鉛直 1 次元ダブルブルームモデルの計算手順

上記のダブルブルームモデルの基礎方程式から，仮定した内部ブルームと外部ブルームについてそれぞれの半径，流速，浮力を求めることになる。実際に計算でこれらの方程式を解く際には，各変数をまず以下のように無次元化して扱う。

$$A = \frac{a}{2\alpha H} \quad , \quad B = \frac{b}{2\alpha H} \quad , \quad U = \frac{u}{u_s M_H^{-1/3}} \quad , \quad V = \frac{v}{u_s M_H^{-1/3}}$$

$$G' = \frac{g'H}{u_s^2 M_H^{2/3}} \quad , \quad G'' = \frac{g''H}{u_s^2 M_H^{2/3}} \quad , \quad S^2 = B^2 - A^2 \quad , \quad Z = \frac{z}{H}$$

$$B = \frac{\beta}{\alpha} \quad , \quad \Gamma = \frac{\gamma}{\alpha} \quad , \quad \tilde{G} = G' - \frac{1}{(1 - xH_R)\left(U + M_H^{-1/3}\right)\tilde{A}^2}$$

$$C_H = (4\pi)^{2/3} \alpha^{4/3} P_N^{2/3} \quad (1.63)$$

$$H_R = H / (H_A + H) \quad (1.64)$$

$$P_N = N^3 H^4 / Q_B g \quad (1.65)$$

$$M_H = Q_B g / 4\pi \alpha^3 H u_s^3 \quad (1.66)$$

ここで、 H_A は大気圧の水頭[m]である。また、 P_N 及び M_H は無次元パラメータであり、成層強度及び気泡放出量と曝気形態の関係を表すものである。 N は浮力振動数であり、 H は全水深[m]である。 Q_B は放出空気量[m³/s]である。これらを用いて式(1.53)~式(1.58)を書き換え

内部ブルーム

$$\frac{d(A^2 U)}{dZ} = BA(U - V) + \Gamma AV \quad (1.67)$$

$$\frac{d(A^2 U^2)}{dZ} = A^2 G' + BAV(U - V) + \Gamma AUV \quad (1.68)$$

$$\frac{d(A^2 UG')}{dZ} = -A^2 UC_H - BAG''(U - V) + \Gamma AV\tilde{G} + \frac{d}{dZ} \left[\frac{A^2 U}{\tilde{A}^2 (1 - xH_R) \left(U + M_H^{-1/3} \right)} \right] \quad (1.69)$$

外部ブルーム

$$\frac{d(S^2V)}{dZ} = -BA(U - V) - \Gamma AV - BV \quad (1.70)$$

$$\frac{d(S^2V^2)}{dZ} = -S^2G'' - BAV(U - V) - \Gamma AUV \quad (1.71)$$

$$\frac{d(S^2VG'')}{dZ} = S^2VC_H - BAG''(U - V) + \Gamma AV\tilde{G} \quad (1.72)$$

式(1.67)~式(1.72)を連立させ、4次精度ルンゲ・クッタ法で各方程式を積分し解く。まず、内部プルームの初期条件 A , AU , A^2UG' は Asaeda & Imberger と同様に以下の級数解を用いた初期条件を与える。

$$A = Z \left[0.6 + 0.01719 M_H^{-1/3} Z^{1/3} - 0.002527 M_H^{-2/3} Z^{2/3} + Z \left(-0.04609 + 0.000031 M_H^{-1} \right) + \dots \right] \quad (1.73)$$

$$U = Z^{-1/3} \left[1.609 - 0.3195 M_H^{-1/3} Z^{1/3} + 0.06693 M_H^{-2/3} Z^{2/3} + Z \left(0.4536 - 0.0105 M_H^{-1} \right) + \dots \right] \quad (1.74)$$

$$A^2UG' = -C_H A^2UZ + \frac{A^2U}{\tilde{A}^2 (1 - ZH_R) (U + M_H^{-1/3})} \quad (1.75)$$

なお、 Z は放出項からの無次元距離であるが、モデルではプルームモデルで使用する鉛直格子幅と同じとした。まず、式(1.73)~式(1.75)を最下部での初期条件として、内部プルームの上昇速度 $U(z)$ が0になる高さまで上向きに積分を行う。次に、この高さにおいて内部プルームは下降に転じるとして、外部プルームの計算を行う。外部プルームの初期条件は、内部プルームと体積流量は保存される以下の条件を用いる。

$$S^2V = A^2U \quad (1.76)$$

内部プルームが水面まで達した場合には、水面付近で水平に広がった後下降プルームを形成する。その結果、水面下で下降に転じた場合に比べて水面で下降し始めた場合には、水面付近で多くの水を連行し下降プルームの体積フラックスが増加するとされている。そこで、Asaeda&Imbergerらに従い、水面で下降し始める場合にのみ以下の体積フラックスを加えて計算することとした。

$$Q_e = \frac{C_e Q_0^{3/4}}{g N^{-5/4}} \quad (1.77)$$

ここで Q_0 は大気圧下での空気放出量であり、 C_e は 1 程度の任意定数である。また、外部ブルームの運動量フラックスの初期条件は、下降し始めた直後にはほとんど連行が見られないことから、式(1.71)右辺の第2項と第3項を0として、外部ブルームの計算を開始する地点Zから外部ブルームが発生する高さ $\tilde{Z}$ まで式(1.71)を積分して以下の条件を与える。

$$S^2 V^2 = S^2 G'' (\tilde{Z} - Z) \quad (1.78)$$

最後に、下降する外部フラックスの相対浮力の初期条件は、内部ブルームの相対浮力から気泡に起因する浮力を差し引いたもので与えられると考え、浮力フラックスの初期条件として式(1.70)と式(1.72)を片々引いた以下の条件により与える。

$$S^2 V G'' = A^2 U G' - \frac{U A^2}{(1 - Z H_R) (U + M_H^{-1/3}) \tilde{A}^2} \quad (1.79)$$

この初期条件をもとに外部ブルームを下向きに積分して計算していき、外部ブルームの浮力 G'' が0になる高さまで計算を行う。以上の手順に従い、式(1.67)~式(1.72)の積分を繰り返し行い、各変量が収束するまで反復計算が行われる。

また気泡は水面に達して大気中に放出されるまで無くなることはないため、外部ブルームが発生する高さから、また新たに水を連行し内部ブルームを形成し上昇していく。そこで、1段目の外部ブルームが発生した水深を新たな気泡放出水深と見なして、再び式 (1.73)~式(1.75)を初期値として与え、式 (1.67)~式(1.72) から上部領域についてブルームの計算を行っていくことになる。

流動モデルへの組み込み

一般に暴気に伴うブルーム半径は高だか10m程度である。一方、流動解析の空間スケールは通常大きく、計算格子の水平間隔よりも暴気ブルーム半径は小さくなり、図13に示すように暴気ブルームを格子間に存在する鉛直小領域(I)と見なすことができる。一方、ダブルブルームモデルの計算結果から鉛直方向体積フラックスの鉛直分布が以下のように計算できる。

$$Q_{total}(z) = \pi a^2 u - \pi (b^2 - a^2) v \quad (1.80)$$

上式を z で微分した dQ_{total}/dz はブルーム体積の増加量を示しており、鉛直方向1m当たりの周辺水からの（連行による）吸い込み量を与えるものである。つまり図13に示すように、暴気装置を含む格子セル内では仮想的な吸い込みと湧き出しが水深ごとに生じていると考えることができる。そこで、本モデルでは以下の様な方策により流動モデルと連成させることとした。

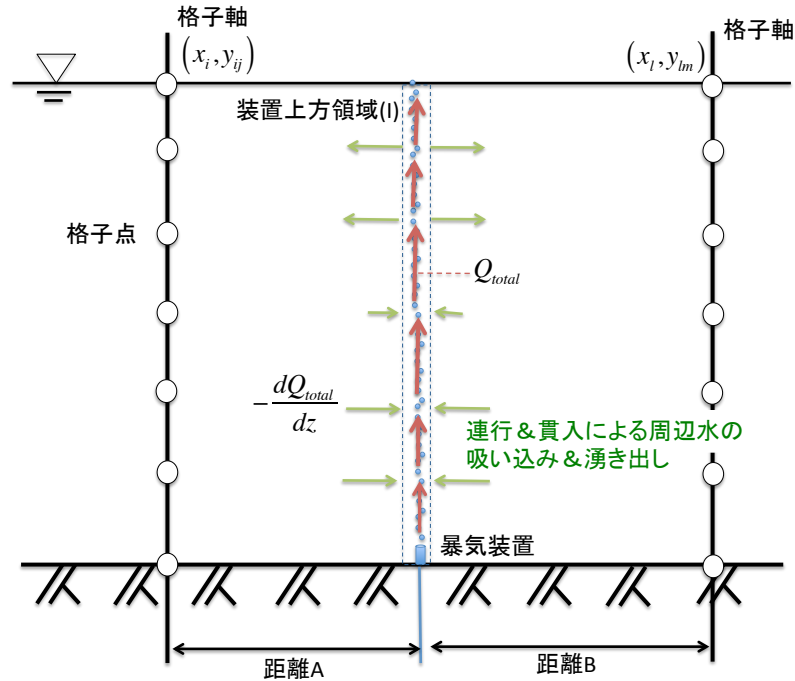


図13 暴気ブルームと流動計算格子の概念図

- ① 暴気装置を格子軸間を含む格子セルを決定する。
- ② 暴気装置放出口から水面間で等間隔格子を設定し、周辺のSoroban格子点上の流動計算結果から、密度 $\rho_a(z)$ を補間により求める。
- ③ 密度 $\rho_a(z)$ を入力としてダブルブルームモデルでの計算を行う。計算の結果得られた $Q_{total}(z)$ から、暴気装置への吸い込み（湧き出し）量 dQ_{total}/dz を算出する。
- ④ 距離を重みとして流動計算で用いる隣接計算格子軸上へ吸い込み（湧き出し）量 dQ_{total}/dz を分配し、連続条件式を以下の様に修正して、暴気装置による吸い込みと湧き出しの影響を考慮して圧力場（流速場）を計算する。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{B}{A+B} \frac{dQ_{total}}{dz} \quad \text{格子軸}(x_i, y_{ij}) \text{上の格子点}$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{A}{A+B} \frac{dQ_{total}}{dz} \quad \text{格子軸}(x_l, y_{lm}) \text{上の格子点}$$

⑤次の時間ステップにおいて、移流等を計算した後、①からの手順を繰り返す。

ⁱ Asaeda, T. and Imberger, J.: Structure of bubble plumes in linearly stratified environments, *J. Fluid Mech.*, vol.249 (1993) pp.35-57.

計算方法

以下本モデルによる計算方法について概略を述べる。

変数配置

3次元空間内での物理量である、流速成分 u, v, w 、水温 T 、塩分 s 、密度 ρ 、圧力 p 、乱流量 k, ε 、及びユーザー定義物理量 ϕ_{sp} はSoroban格子点上にコロケート配置される。即ち、 i 平面 j 軸 k 格子点 (x_i, y_{ij}, z_{ijk}) 上に値 $u_{ijk}^n, v_{ijk}^n, w_{ijk}^n, T_{ijk}^n, s_{ijk}^n, \rho_{ijk}^n, p_{ijk}^n, k_{ijk}^n, \varepsilon_{ijk}^n, (\phi_{sp})_{ijk}^n$ が配置される。プログラム内ではこれら3次元物理量はValueOnVolume構造体の変数として定義されており、たとえば (x_i, y_{ij}, z_{ijk}) 格子点上の流速 u の値は、`uu_p->ff[i][j][k]`と参照される。また、 x, y の関数である2次元量の水位 $h(t, x, y)$ と河床高 $b(x, y)$ については、Soroban格子の軸 (x_i, y_{ij}) 上に配置される。即ち、 i 平面 j 軸上の値が h_{ij}^n, b_{ij}^n と表される。プログラム内でのこれら2次元物理量はValueOnSurface構造体の変数として定義されており、たとえば (x_i, y_{ij}) 軸における水位は、`water_level_p->ff[i][j]`と参照される。3次元物理量のうち流速成分 u, v, w 、水温 T 、塩分 s 、乱流量 k, ε 、及びユーザー定義物理量 ϕ_{sp} はCIP法を用いて3次元Soroban格子上で補間・移流の計算を行う。そのため、これら変数には物理量そのものの他に x, y, z 方向おのおのへの空間勾配 gx, gy, gz が同じく格子点上に配置され、時間発展が計算されることになる。ValueOnVolume構造体変数であるこれら物理量の空間勾配は、プログラム中で、`uu_p->gx[i][j][k], uu_p->gy[i][j][k], uu_p->gz[i][j][k]`のように参照される。

SOROBAN格子上的CIP空間補間

本モデルでは移流項の計算にCIP補間を用いる。ここでは3次元Soroban格子上的CIP補間の手順について紹介する。今、補間される物理量は $f(x,y,z)$, その空間勾配は $g_x(x,y,z), g_y(x,y,z), g_z(x,y,z)$ とする。補間を行う座標は (X_q, Y_q, Z_q) で与えられている。本プログラムではType-Mと呼ばれるCIP補間の方法を用いており、3次元Soroban格子上的補間は1次元CIP補間を以下のように繰り返すことで行われる。

図14に示すように 補間する座標 (X_q, Y_q, Z_q) を内部に含む隣接した格子平面を二分法などを用いて決定する。格子平面番号 iup, idn は以下の関係を満たす。

$$x_{idn} \leq X_q < x_{iup}, \quad iup = idn + 1 \quad (2.1)$$

補間座標 (X_q, Y_q, Z_q) からx方向に各格子平面に垂線を下ろし、その交点を A_{iup}, A_{idn} とする。

A_{iup}, A_{idn} それぞれの座標は $(x_{iup}, Y_q, Z_q), (x_{idn}, Y_q, Z_q)$ で与えられる。次に iup 平面を考え、図15の様

に A_{iup} を内部に含む隣接格子軸 jup_on_iup と jdn_on_idn を決定する。さらに格子軸 jup_on_iup と

jdn_on_idn に向けた垂線の交点B,Cを内部に含む格子点 $kup_on_jdn_on_iup, kdn_on_jdn_on_iup,$

$kup_on_jup_on_iup$ 及び $kdn_on_jup_on_iup$ を決定する。こうして決定されて iup 平面上の4格子

点上の値を用いて、 A_{iup} における値をCIP補間で補間する。まず、 jdn_on_iup 軸上でz方向に

$kup_on_jdn_on_iup$ 及び $kdn_on_jdn_on_iup$ 上の物理量 f とz方向勾配 g_z を用いてB点上の物理量

とz勾配 f^B, g_z^B を1次元CIP法により補間する。その他方向への勾配 g_x, g_y は線形補間を用いて

B点上の勾配 g_x^B, g_y^B を補間する。同様に jup_on_iup 軸上でもz方向補間を行うことで、C点上で

の値と勾配 $(f^C, g_x^C, g_y^C, g_z^C)$ を補間することが出来る。こうして各軸上で補間されたB及びC点上

の値を用いてB-C間でy方向にCIP1次補間を行い A_{iup} 点での値を見積もることが出来る。 A_{iup}

上の値 $f^{A_{iup}}$ とy方向勾配 $g_y^{A_{iup}}$ は1次元CIP補間により、その他の勾配 $g_x^{A_{iup}}, g_z^{A_{iup}}$ はB-C間でそれぞ

れを線形補間することで求められる。

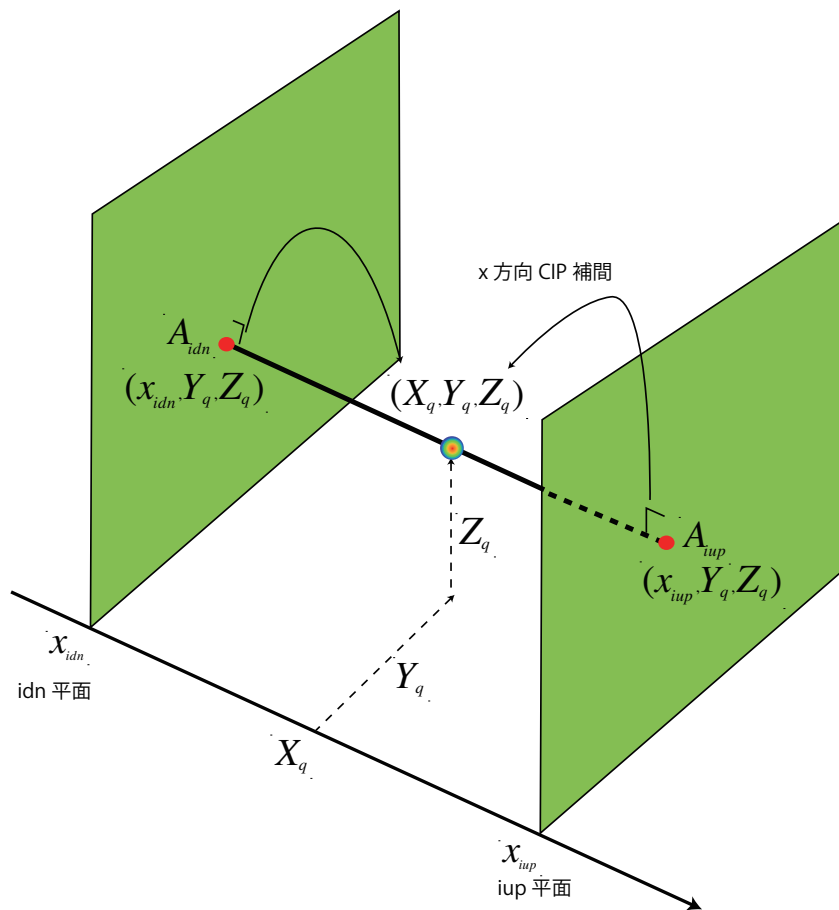


図14 CIP補間における格子平面関

iup 平面

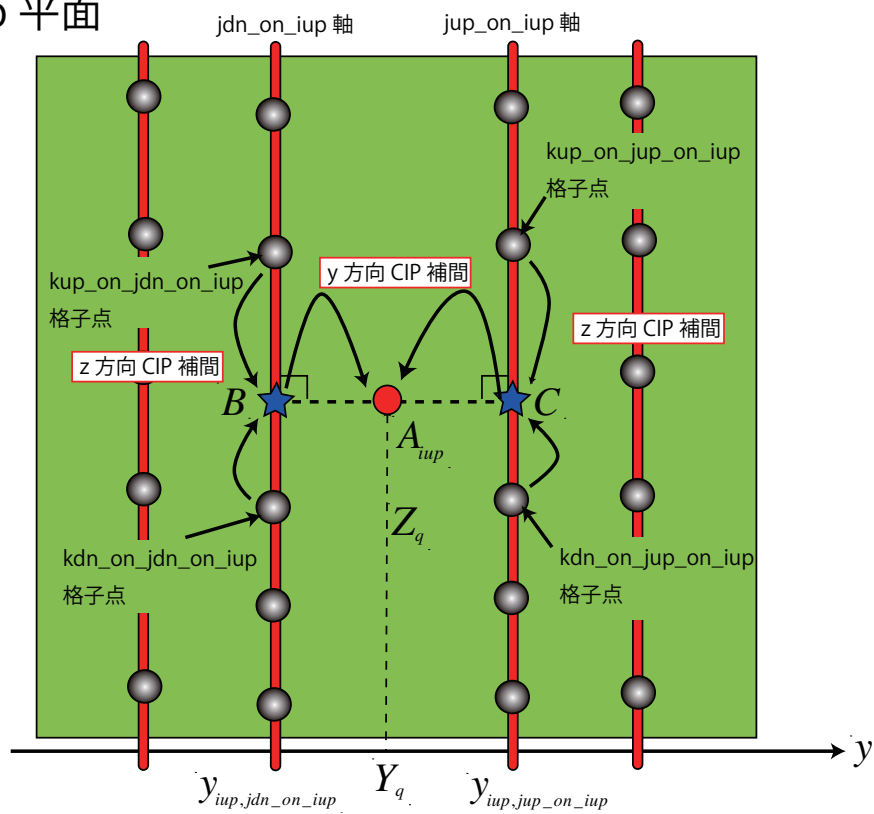


図15 CIP補間における格子面内関

同様にidn平面上においてAidn点での値と勾配 $(f^{A_{idn}}, g_x^{A_{idn}}, g_y^{A_{idn}}, g_z^{A_{idn}})$ を補間する。最後に、
 Aiup,Aidn上での値 $(f^{A_{iup}}, g_x^{A_{iup}})$ 、 $(f^{A_{idn}}, g_x^{A_{idn}})$ をもちいてx方向に1次元CIP補間を施せば、補間座
 標 (X_q, Y_q, Z_q) における値が補間されることになる。

SOROBAN格子上的空間差分近似

拡散計算や乱流生成項の見積もり等は、3次元Soroban格子上で見積もった差分近似により各
 種空間勾配を見積もることによって計算を行う。以下Soroban格子上的空間差分近似式の導出方法
 について紹介する。いま、i平面j軸k格子点における空間勾配を見積もることを考える。

x方向空間差分式

図16に示すように、i平面の+x側及び-x側に隣接する格子平面の番号はiup=i+1, idn=i-1で与えら
 れる。勾配を見積もりたい格子点(i,j,k)より、x方向に隣接する格子平面上に垂線を下ろし、交
 点をAiup,Aidnとする。Aiup,Aidnの座標はそれぞれ $(x_{iup}, y_{ij}, z_{ijk})$ 、 $(x_{idn}, y_{ij}, z_{ijk})$ である。Aidn及び
 Aiup上での物理量 $f^{A_{idn}}, f^{A_{iup}}$ が与えられれば、(i,j,k)格子点における空間差分は以下のように見
 積もることが出来る。

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)_{ijk} &= \frac{f^{A_{iup}} - f^{A_{idn}}}{x_{iup} - x_{idn}} \quad (2.2) \\ \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \right)_{ijk} &= \frac{f^{A_{iup}}}{(x_{iup} - x_i)(x_{iup} - x_{idn})/2} \\ &\quad - \left(\frac{1}{(x_{iup} - x_i)(x_{iup} - x_{idn})/2} + \frac{1}{(x_i - x_{idn})(x_{iup} - x_{idn})/2} \right) f_{ijk} + \frac{f^{A_{idn}}}{(x_i - x_{idn})(x_{iup} - x_{idn})/2} \quad (2.3) \end{aligned}$$

$f^{A_{idn}}, f^{A_{iup}}$ の見積もりにはidn, iup各平面上での線形補間を用いる。たとえば、iup平面上で $f^{A_{iup}}$

を見積もる場合を以下に示す。図17に示すようにAiupの値はB,Cにおける値 f^B, f^C が与えられ
 れば、y方向への線形補間から

$$f^{A_{iup}} = (1 - \alpha_{iup})f^B + \alpha_{iup}f^C \quad (2.4)$$

$$\alpha_{iup} = \frac{y_{ij} - y_{iup,jdn_on_iup}}{(y_{iup,jup_on_iup} - y_{iup,jdn_on_iup})} \quad (2.5)$$

で見積もることが出来る。また、B,C点における値 f^B, f^C はそれぞれが位置する格子軸(jdn_on_iup, jup_on_iup)上でz方向に補間することにより、

$$f^B = (1 - \beta_{jdn_on_iup})f_{iup,jdn_on_iup,kdn_on_jdn_on_iup} + \beta_{jdn_on_iup}f_{iup,jdn_on_iup,kup_on_jdn_on_iup} \quad (2.6)$$

$$\beta_{jdn_on_iup} = \frac{z_{ijk} - z_{iup,jdn_on_iup,kdn_on_jdn_on_iup}}{(z_{iup,jdn_on_iup,kup_on_jdn_on_iup} - z_{iup,jdn_on_iup,kdn_on_jdn_on_iup})} \quad (2.7)$$

$$f^C = (1 - \beta_{jup_on_iup})f_{iup,jup_on_iup,kdn_on_jup_on_iup} + \beta_{jup_on_iup}f_{iup,jup_on_iup,kup_on_jup_on_iup} \quad (2.8)$$

$$\beta_{jup_on_iup} = \frac{z_{ijk} - z_{iup,jup_on_iup,kdn_on_jup_on_iup}}{(z_{iup,jup_on_iup,kup_on_jup_on_iup} - z_{iup,jup_on_iup,kdn_on_jup_on_iup})} \quad (2.9)$$

となる。(2.6)～(2.9)式を(2.4)式に代入してAiup上での値は以下の通り見積もられる。

$$\begin{aligned} f^{A_{iup}} &= (1 - \alpha_{iup})(1 - \beta_{jdn_on_iup})f_{iup,jdn_on_iup,kdn_on_jdn_on_iup} \\ &\quad + (1 - \alpha_{iup})\beta_{jdn_on_iup}f_{iup,jdn_on_iup,kup_on_jdn_on_iup} \\ &\quad + \alpha_{iup}(1 - \beta_{jup_on_iup})f_{iup,jup_on_iup,kdn_on_jup_on_iup} \\ &\quad + \alpha_{iup}\beta_{jup_on_iup}f_{iup,jup_on_iup,kup_on_jup_on_iup} \end{aligned} \quad (2.30)$$

同様にAidn上の値 $f^{A_{idn}}$ もidn上で線形補間を行うことにより見積もることが出来る。

$$\begin{aligned} f^{A_{idn}} &= (1 - \alpha_{idn})(1 - \beta_{jdn_on_idn})f_{idn,jdn_on_idn,kdn_on_jdn_on_idn} \\ &\quad + (1 - \alpha_{idn})\beta_{jdn_on_idn}f_{idn,jdn_on_idn,kup_on_jdn_on_idn} \\ &\quad + \alpha_{idn}(1 - \beta_{jup_on_idn})f_{idn,jup_on_idn,kdn_on_jup_on_idn} \\ &\quad + \alpha_{idn}\beta_{jup_on_idn}f_{idn,jup_on_idn,kup_on_jup_on_idn} \end{aligned}$$

$$+\alpha_{idn}\beta_{jup_on_idn}f_{idn,jup_on_idn,kup_on_jup_on_idn} \quad (2.31)$$

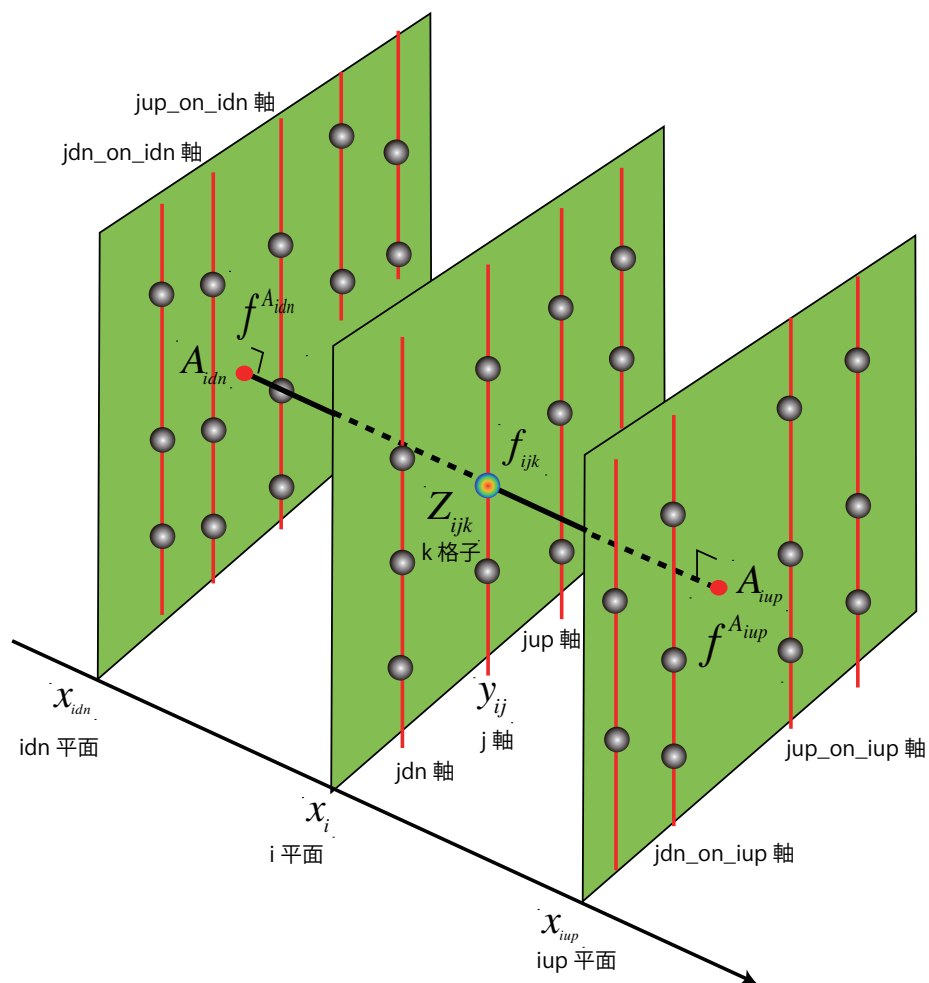


図16 x方向差分の格子面関係

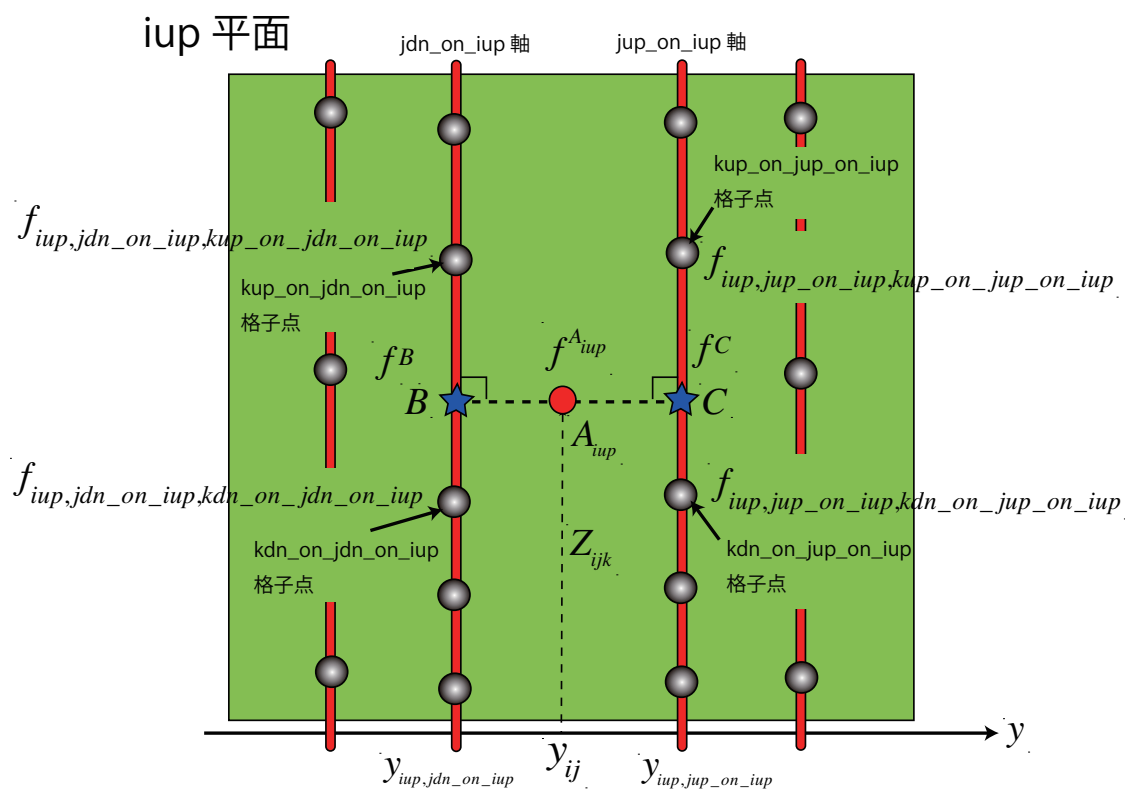


図17 x方向差分の格子点関係

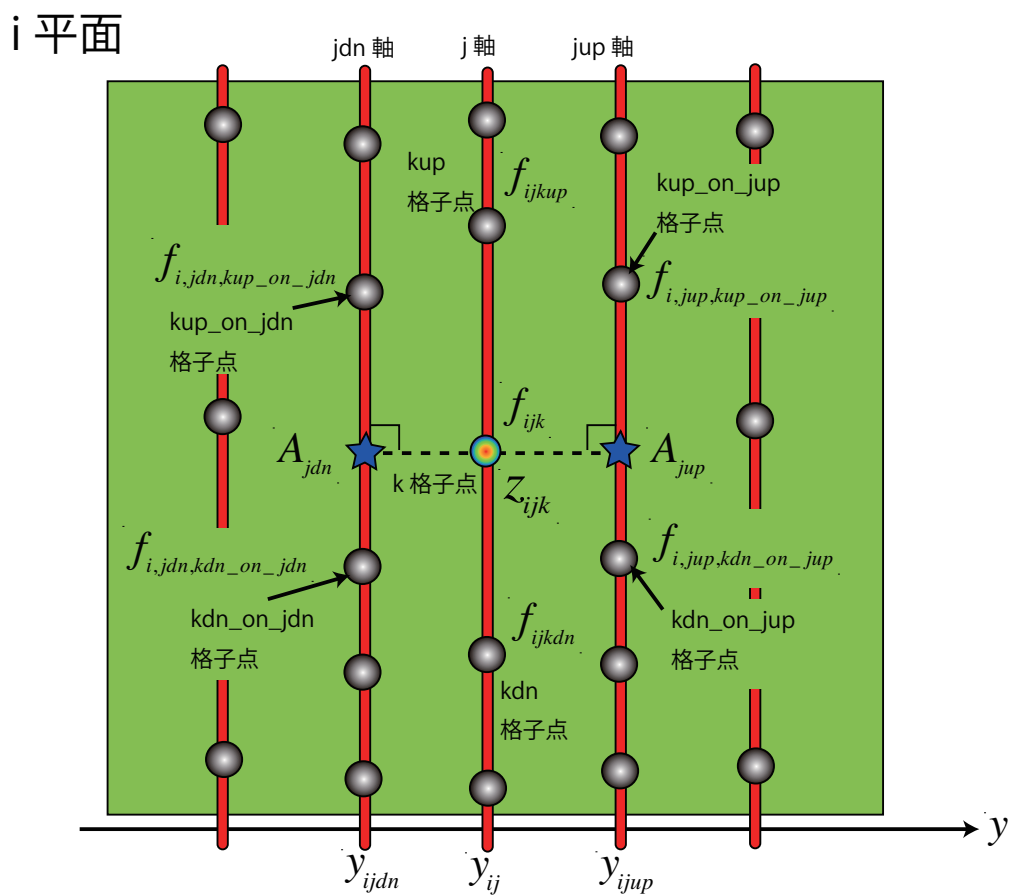


図18 y方向差分の格子点関係

y方向空間差分式

図18に示すように、i平面上の+y側及び-y側に隣接する格子軸の番号はjup=j+1, jdn=j-1で与えられる。勾配を見積もりたい格子点(i,j,k)より、y方向に隣接する格子軸上に垂線を下ろし、交点をAjup, Ajdnとする。Ajdn及びAjup上での物理量 $f^{A_{jdn}}$, $f^{A_{jup}}$ が与えられれば、(i,j,k)格子点におけるy空間差分は以下のように見積もることが出来る。

$$\left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)_{ijk} = \frac{f^{A_{jup}} - f^{A_{jdn}}}{(y_{i,jup} - y_{i,jdn})} \quad (2.32)$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \right)_{ijk} &= \frac{1}{(y_{i,jup} - y_{i,j})(y_{i,jup} - y_{i,jdn})/2} f^{A_{jup}} \\ &\quad - \left(\frac{1}{(y_{i,jup} - y_{i,j})(y_{i,jup} - y_{i,jdn})/2} + \frac{1}{(y_{i,j} - y_{i,jdn})(y_{i,jup} - y_{i,jdn})/2} \right) f_{ijk} \\ &\quad + \frac{1}{(y_{i,j} - y_{i,jdn})(y_{i,jup} - y_{i,jdn})/2} f^{A_{jdn}} \end{aligned} \quad (2.33)$$

$f^{A_{jdn}}$, $f^{A_{jup}}$ の見積もりにはjup, jdn各軸上でのz方向線形補間を用いる。即ち、

$$f^{A_{jdn}} = (1 - \alpha_{jdn}) f_{i,jdn,kdn_on_jdn} + \alpha_{jdn} f_{i,jdn,kup_on_jdn} \quad (2.34)$$

$$\alpha_{jdn} = \frac{z_{ijk} - z_{i,jdn,kdn_on_jdn}}{(z_{i,jdn,kup_on_jdn} - z_{i,jdn,kdn_on_jdn})} \quad (2.35)$$

$$f^{A_{jup}} = (1 - \alpha_{jup}) f_{i,jup,kdn_on_jup} + \alpha_{jup} f_{i,jup,kup_on_jup} \quad (2.36)$$

$$\alpha_{jup} = \frac{z_{ijk} - z_{i,jup,kdn_on_jup}}{(z_{i,jup,kup_on_jup} - z_{i,jup,kdn_on_jup})} \quad (2.37)$$

と見積もられる。

z方向空間差分式

格子軸はz方向に平行であり、z方向の空間差分は同じj軸上の+z側と-z側に位置するkup=k+1, kdn=k-1の格子点番号を持つ隣接格子点から以下のように空間差分を構成出来る。

$$\left(\frac{\partial f}{\partial z} \right)_{ijk} = \frac{f_{ijkup} - f_{ijkdn}}{(z_{i,j,kup} - z_{i,j,kdn})} \quad (2.38)$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial^2 f}{\partial z^2} \right)_{ijk} &= \frac{1}{(z_{i,j,kup} - z_{i,j,k})(z_{i,j,kup} - z_{i,j,kdn})/2} f_{ijkup} \\ &\quad - \left(\frac{1}{(z_{i,j,kup} - z_{i,j,k})(z_{i,j,kup} - z_{i,j,kdn})/2} + \frac{1}{(z_{i,j,k} - z_{i,j,kdn})(z_{i,j,kup} - z_{i,j,kdn})/2} \right) f_{ijk} \\ &\quad + \frac{1}{(z_{i,j,k} - z_{i,j,kdn})(z_{i,j,kup} - z_{i,j,kdn})/2} f_{ijkdn} \end{aligned} \quad (2.39)$$

計算フロー

Time Splitting Method(時分割法)

本モデルでは基礎方程式を移流、拡散、圧力等の物理過程ごとに分割し、順次各物理過程の計算を行うことで時間発展を計算するTime Splitting Method(時分割法)を基としている。基礎方程式を以下再録する。

$$\frac{Du}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{2}{3} \frac{\partial k}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_{lic} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_{lic} \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_{eff} \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{uv}{R} + \frac{\tau_x}{\rho} \quad (2.40)$$

$$\frac{Dv}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{2}{3} \frac{\partial k}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_{lic} \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_{lic} \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_{eff} \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \frac{u^2}{R} + \frac{\tau_y}{\rho} \quad (2.41)$$

$$\frac{Dw}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{2}{3} \frac{\partial k}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_{lic} \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_{lic} \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_{eff} \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{\tau_z}{\rho} - g \quad (2.42)$$

$$\frac{Dk}{Dt} = P_k - \varepsilon + G_k + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\nu_{lic}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\nu_{lic}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\nu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) \quad (2.43)$$

$$\frac{D\varepsilon}{Dt} = (C_1 P_k - C_2 \varepsilon) \frac{\varepsilon}{k} + C_1 (1 - C_3) \frac{\varepsilon}{k} G_k + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\nu_{lic}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\nu_{lic}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\nu_{eff}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) \quad (2.44)$$

$$\frac{Ds}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\nu_{lic}}{\sigma_s} \frac{\partial s}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\nu_{lic}}{\sigma_s} \frac{\partial s}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\nu_{eff}}{\sigma_s} \frac{\partial s}{\partial z} \right) \quad (2.45)$$

$$\frac{DT}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\nu_{lic}}{\sigma_t} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\nu_{lic}}{\sigma_t} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\nu_{eff}}{\sigma_t} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S_T \quad (2.46)$$

$$\frac{D\phi_{sp}}{Dt} = w_{settlement} \frac{\partial \phi_{sp}}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\nu_{lic}}{\sigma_{\phi sp}} \frac{\partial \phi_{sp}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\nu_{lic}}{\sigma_{\phi sp}} \frac{\partial \phi_{sp}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\nu_{eff}}{\sigma_{\phi sp}} \frac{\partial \phi_{sp}}{\partial z} \right) + S_{\phi sp} \quad (2.47)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial m}{\partial x} + \frac{\partial n}{\partial y} = 0 \quad (2.48)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = \begin{cases} 0 & \text{without Aeration} \\ -\frac{dQ_{total}}{dz} & \text{with Aeration} \end{cases} \quad (2.49)$$

$$\rho(t, x, y, z) = \rho(s, T, \phi_{sp})$$

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z}$$

上記基礎方程式は以下の様に分割して時間刻み幅 Δt の時間発展が計算される。図19に本プログラムにおける計算フローを示すとともに、以下に各計算過程の概要について述べる。

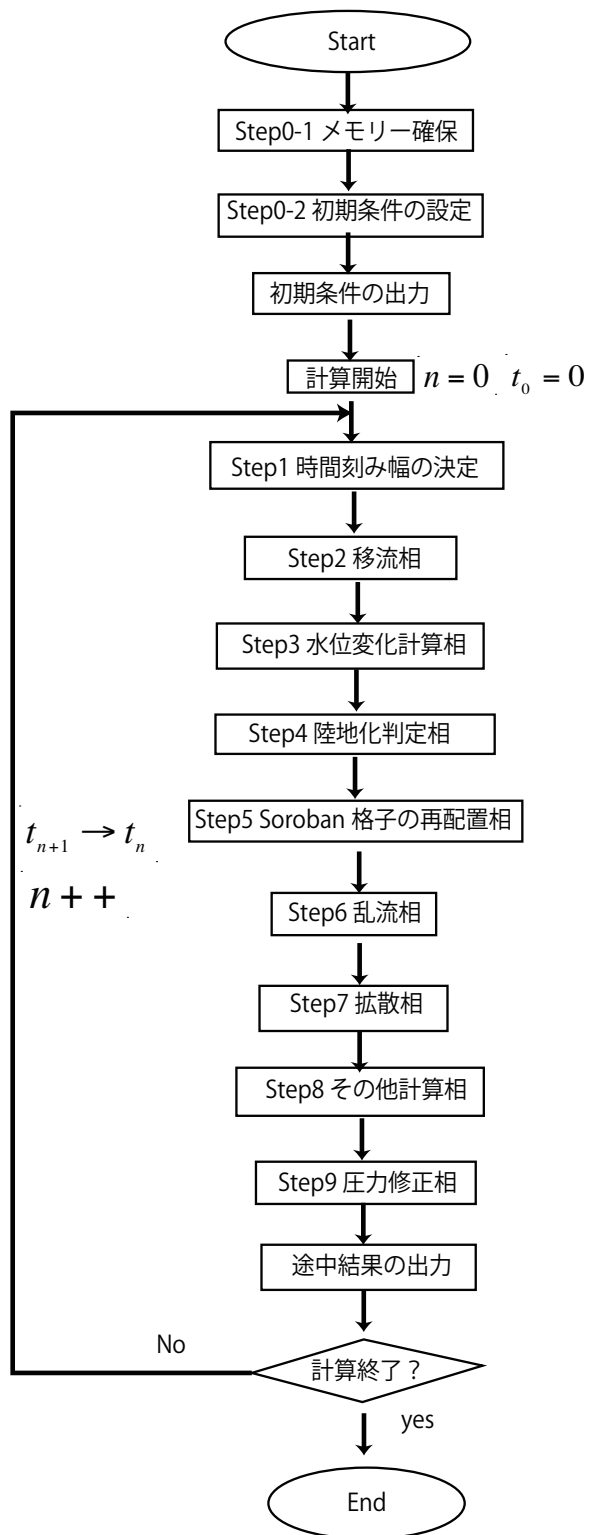


図19 計算フロー

Step0-1 メモリー確保

計算に使用する各種変数のメモリー上での領域確保を行う。また、同時にMPIライブラリを用いる為の初期化操作を行う。プログラム中ではmemory_allocation_phase関数で行われる。

Step0-2 初期条件の設定

地形データを読み込みSoroban格子の設定を行うとともに、並列計算の領域分割範囲の設定、各種物理量の初期条件の設定を行う。プログラム中ではinitial_condition_phase関数で行われる。初期条件の設定方法等は後述する。

Step1:時間刻み幅の決定

CFL条件等から時間刻み幅の決定を行う。プログラム中ではtime_progress_phase関数で行う。時間刻み幅の決定方法の詳細はtime_control関数を参照されたい。

Step2:移流相

時刻 t_n における値を基に基礎方程式(2.40)～(2.47)の左辺の移流項のみからなる以下の方程式を解き、流速 u, v, w 、水温 T 、塩分 s 、乱流量 k, ε 、およびユーザー定義物理量 ϕ_{sp} の移流後の値 $u^{adv} v^{adv} w^{adv} T^{adv} s^{adv} k^{adv} \varepsilon^{adv} (\phi_{sp})^{adv}$ を計算する。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u^n \frac{\partial u}{\partial x} + v^n \frac{\partial u}{\partial y} + w^n \frac{\partial u}{\partial z} = 0 \quad (2.50)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u^n \frac{\partial v}{\partial x} + v^n \frac{\partial v}{\partial y} + w^n \frac{\partial v}{\partial z} = 0 \quad (2.51)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u^n \frac{\partial w}{\partial x} + v^n \frac{\partial w}{\partial y} + w^n \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.52)$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} + u^n \frac{\partial s}{\partial x} + v^n \frac{\partial s}{\partial y} + w^n \frac{\partial s}{\partial z} = 0 \quad (2.53)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u^n \frac{\partial T}{\partial x} + v^n \frac{\partial T}{\partial y} + w^n \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (2.54)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u^n \frac{\partial k}{\partial x} + v^n \frac{\partial k}{\partial y} + w^n \frac{\partial k}{\partial z} = 0 \quad (2.55)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u^n \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + v^n \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} + w^n \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} = 0 \quad (2.56)$$

$$\frac{\partial \phi_{sp}}{\partial t} + u^n \frac{\partial \phi_{sp}}{\partial x} + v^n \frac{\partial \phi_{sp}}{\partial y} + w^n \frac{\partial \phi_{sp}}{\partial z} = 0 \quad (2.57)$$

上記方程式の解法には、移流方程式の局所解析解が

$$u_{jik}^{adv} = u(t_n + \Delta t, x_i, y_{ij}, z_{ijk}) = u(t_n, x_i - u_{jik}^n \Delta t, y_{ij} - v_{jik}^n \Delta t, z_{ijk} - w_{jik}^n \Delta t) \quad (2.58)$$

$$v_{jik}^{adv} = v(t_n + \Delta t, x_i, y_{ij}, z_{ijk}) = v(t_n, x_i - u_{jik}^n \Delta t, y_{ij} - v_{jik}^n \Delta t, z_{ijk} - w_{jik}^n \Delta t) \quad (2.59)$$

$$w_{jik}^{adv} = w(t_n + \Delta t, x_i, y_{ij}, z_{ijk}) = w(t_n, x_i - u_{jik}^n \Delta t, y_{ij} - v_{jik}^n \Delta t, z_{ijk} - w_{jik}^n \Delta t) \quad (2.60)$$

$$s_{jik}^{adv} = s(t_n + \Delta t, x_i, y_{ij}, z_{ijk}) = s(t_n, x_i - u_{jik}^n \Delta t, y_{ij} - v_{jik}^n \Delta t, z_{ijk} - w_{jik}^n \Delta t) \quad (2.61)$$

$$T_{jik}^{adv} = T(t_n + \Delta t, x_i, y_{ij}, z_{ijk}) = T(t_n, x_i - u_{jik}^n \Delta t, y_{ij} - v_{jik}^n \Delta t, z_{ijk} - w_{jik}^n \Delta t) \quad (2.62)$$

$$k_{jik}^{adv} = k(t_n + \Delta t, x_i, y_{ij}, z_{ijk}) = k(t_n, x_i - u_{jik}^n \Delta t, y_{ij} - v_{jik}^n \Delta t, z_{ijk} - w_{jik}^n \Delta t) \quad (2.63)$$

$$\varepsilon_{jik}^{adv} = \varepsilon(t_n + \Delta t, x_i, y_{ij}, z_{ijk}) = \varepsilon(t_n, x_i - u_{jik}^n \Delta t, y_{ij} - v_{jik}^n \Delta t, z_{ijk} - w_{jik}^n \Delta t) \quad (2.64)$$

$$\left(\phi_{sp} \right)_{jik}^{adv} = \phi_{sp}(t_n + \Delta t, x_i, y_{ij}, z_{ijk}) = \phi_{sp}(t_n, x_i - (u_{sp})_{jik}^n \Delta t, y_{ij} - (v_{sp})_{jik}^n \Delta t, z_{ijk} - (w_{sp})_{jik}^n \Delta t) \quad (2.65)$$

により与えられることを利用して、上式右辺の移流原点 $(x_i - u_{jik}^n \Delta t, y_{ij} - v_{jik}^n \Delta t, z_{ijk} - w_{jik}^n \Delta t)$ での値をCIP補間することにより計算する。プログラム中ではadvection_phase関数で計算が行われる。

Step3:水位変化計算相

水位の変化を計算する。基礎方程式は単位幅断面流量を用いた以下の式である。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial m}{\partial x} + \frac{\partial n}{\partial y} = 0 \quad (2.66)$$

$$m(t, x, y) = \int_{b(x, y)}^{h(t, x, y)} u^{other} dz \quad (2.67)$$

$$n(t, x, y) = \int_{b(x, y)}^{h(t_n, x, y)} v^{other} dz \quad (2.68)$$

式(2.66)を解き、次時刻 t_{n+1} における水位 $h_{ij}^{n+1} = h(t_{n+1}, x_i, y_{ij})$ を計算する。水面波の波速は一般に流速 u, v, w より大きな値となるため、式(2.66)の解法には陰解法を用いて計算を行う。プログラム中では`water_propagation_phase`関数で行われる。式(2.66)の陰解法による詳細な計算手法に関しては`water_surface_propagation`関数を参照されたい。

Step4:陸地化判定相

水位変化計算相で更新された次時刻における水位 $h_{ij}^{n+1} = h(t_{n+1}, x_i, y_{ij})$ を基に、設定された最小水深を基準として陸地化、或いは新たに水没した格子軸の判定を行う。プログラム中では`sub-merge_and_emerge_phase`関数で行われる。陸地化・水没判定の実際には`update_land_mask`関数も参照されたい。

プログラム中では陸地化している領域の判定は格子軸単位で行い、陸地化していると判定された格子軸に関しては流速等の物理量の時間発展は一切計算しない。図20に概念図を示す。陸地化マスク関数 $land_mask_{ij}^n = land_mask(t_n, x_i, y_{ij})$ を用いて陸地化の判定を行う。陸地化している領域には $land_mask_{ij}^n = 1$ を、陸地化していない水塊の存在領域には $land_mask_{ij}^n = 0$ を設定する（実際のプログラム中では陸地化マスク関数の値は`grid_p->land_mask[i][j]`配列に格納される）。

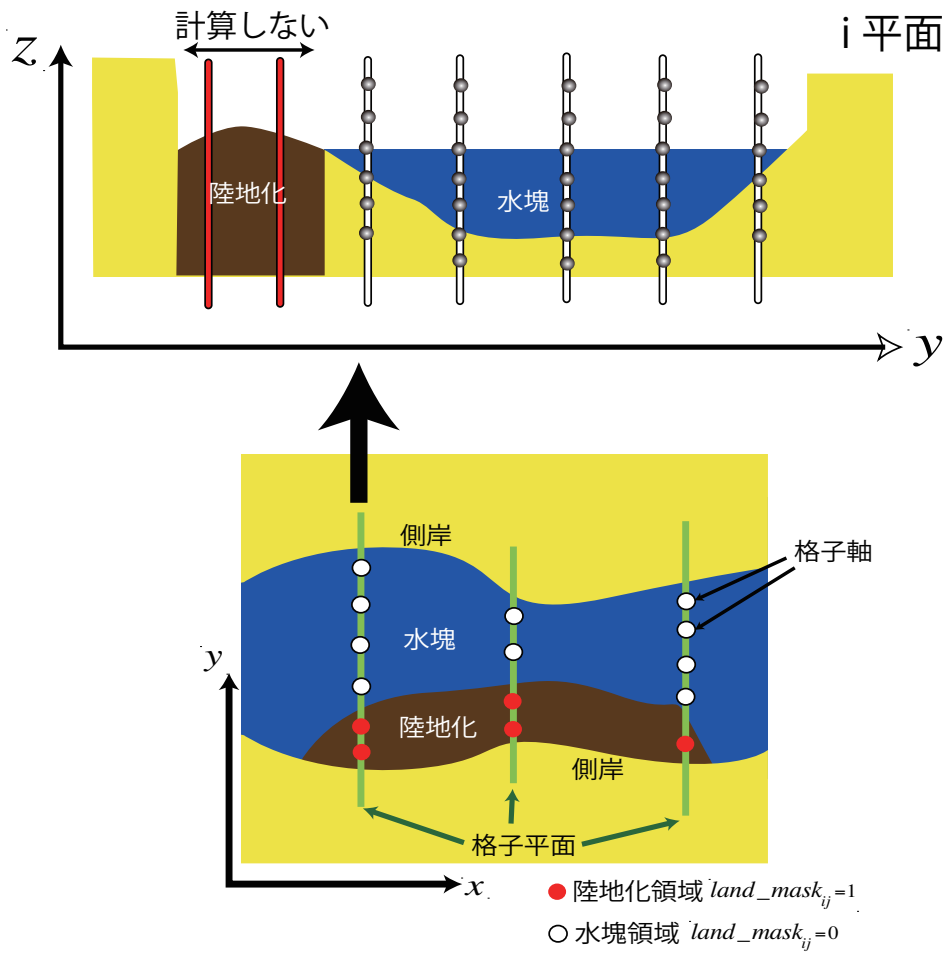


図20 陸地化判定マスク

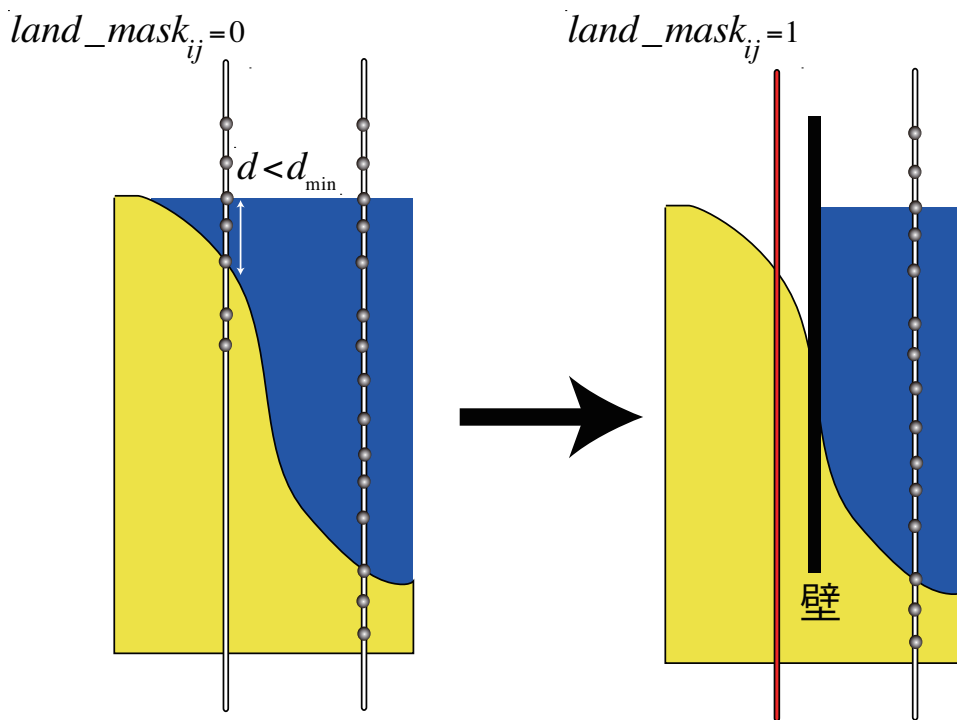


図21 陸地化

水際線の移動は以下のように行う。

陸地化する場合：

入力条件として指定された最小水深 $d_{\min}$ より水深 $d = h_{ij}^{n+1} - b_{ij}$ が浅くなった場合 ($d < d_{\min}$) には格子軸 (x_i, y_{ij}) の地点は陸地化したとして、 $land_mask_{ij} = 1$ をセットし計算から除くとともに、陸地化した領域との間には壁が存在するとして側岸に対する境界条件を課しながら水塊部分の計算が行われることになる。図21に概念図を示す。図21ではy-z平面の2次元で説明を行っているが、プログラム中ではx方向にも同様に考慮する。

水没する場合：

陸地化している格子軸について隣接する格子軸における水位との関係から水没化の判定を行う。図22に水没化判定の概念図を示す。隣接格子点の水位が h_{lm}^{n+1} で与えられるとすると、隣接格子軸上の水位がひとつでも、陸地化している格子軸地点における河床高との差 $d^* = h_{lm}^{n+1} - b_{ij}$ が最小水深 $d_{\min}$ より大きくなった場合 ($d^* > d_{\min}$) には格子軸 (x_i, y_{ij}) の地点は水没したとして、 $land_mask_{ij} = 0$ をセットし水塊として以後の計算を行う。図22ではy-z平面の2次元で説明を行っているが、プログラム中ではx方向にも同様に考慮する。

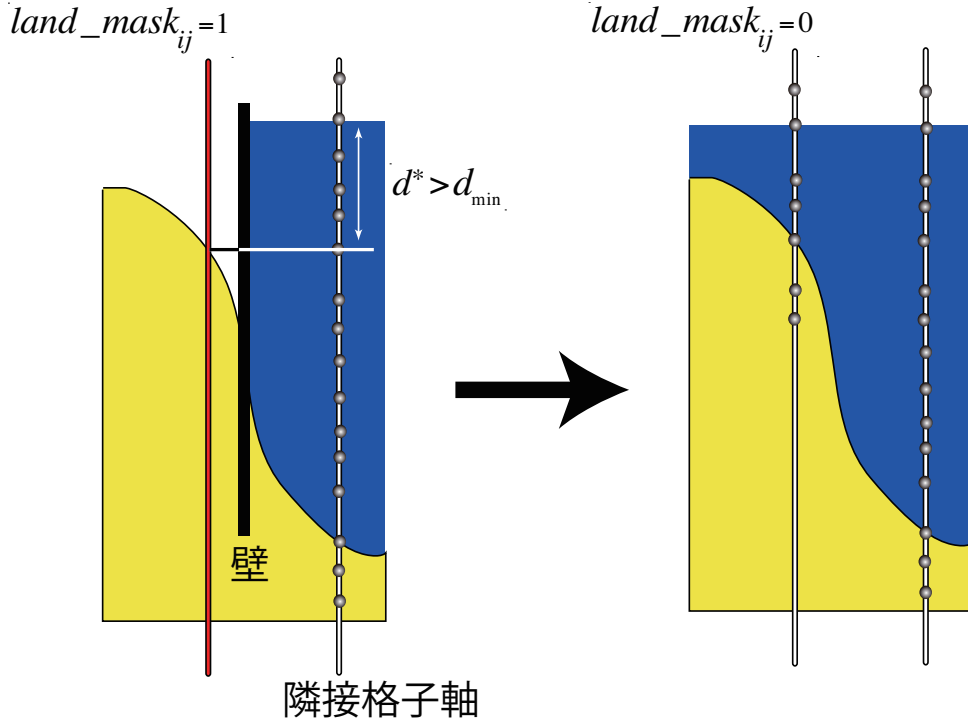


図22 水没化

Step5: Soroban格子の再配置相

更新された物理量分布と水位 $h_{ij}^{n+1} = h(t_{n+1}, x_i, y_{ij})$ を基にSoroban格子の各格子軸上での格子点鉛直位置の再配置を行う。プログラム中ではsoroban_update_phase関数で行われる。Soroban格子の格子点の鉛直位置 z_{ijk} はモニター関数 M を用いて自動で行われる。図23に概念図を示す。

今、更新前の古い格子点の鉛直座標は z_{ijk}^n 、新しい格子点の鉛直座標は z_{ijk}^{n+1} で表されるとする。格子点を集中配置し鉛直方向の変動を詳細に記述したい物理量が $f^{n+1}(x, y, z)$ であったとする。このときモニター関数は以下のように各軸上で古い格子点上の値 $f^{n+1}(x, y, z)$ を用いて計算される。

$$M(x_i, y_{ij}, z) = \sqrt{1 + w_z \left| \frac{\partial f^{n+1}(x_i, y_{ij}, z^n)}{\partial z} \right|} \quad (2.69)$$

このモニター関数を $N_z - 1$ の区間に面積が等しくなるように分割する。ここで N_z は計算開始時に地形入力条件の一つとして指定した各軸上の格子点数である。当面積に分割された区間の境界位置を新しい格子点の鉛直座標 z_{ijk}^{n+1} として採用することにより、格子点は必ず新しい水

面 $h_{ij}^{n+1} = h(t_{n+1}, x_i, y_{ij})$ 上に位置し、且つ注目している物理量 $f^{n+1}(x, y, z)$ の鉛直変動が大きい領域に集中して配置されるようになる。式(2.69)における w_z は格子点の集中度合いを規定するパラメータで、 w_z が大きい程格子点は $f^{n+1}(x, y, z)$ の変動領域に集中するようになる。また、 w_z が大きい場合や、水深が浅い場合には鉛直格子間隔が極端に小さくなる場合がある。このような軸上で再配置した格子点の一部でも予め設定した最小鉛直格子幅以下になった場合には、格子点数 N_z を一つずつ減少させながら、最小鉛直格子幅以上になるまで格子点の再配置を行う。Soroban格子点の鉛直座標が z_{ijk}^{n+1} に更新された後、各軸上で鉛直方向の1次元CIP補間を行うことで、古い格子点 z_{ijk}^n 上に位置していた各種3次元物理量（流速 u, v, w , 塩分 s , 乱流量 k, ε , ユーザー定義物理量）を新しい格子点座標 z_{ijk}^{n+1} 上に再配置して以後の計算に続くことになる。

更新前の格子点

更新後の格子点

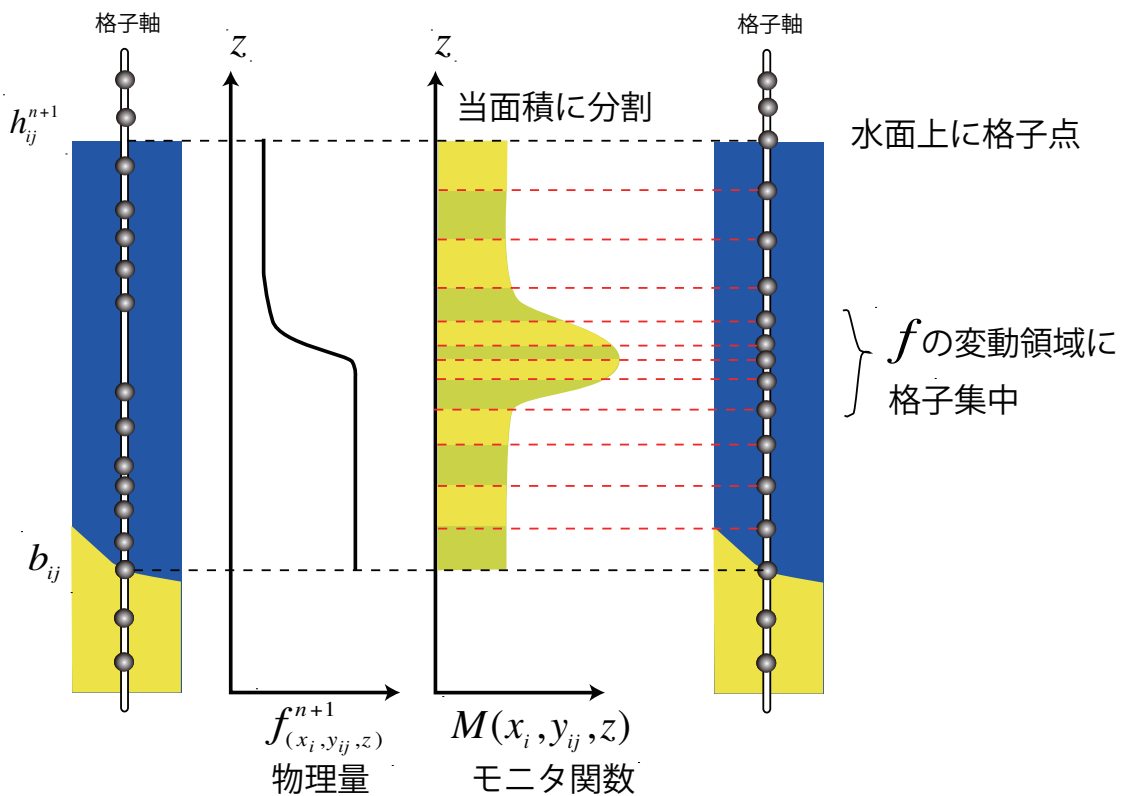


図23 Soroban格子の鉛直位置更新

Step6:乱流相

移流相の計算結果 $u^{adv} v^{adv} w^{adv} T^{adv} s^{adv} k^{adv} (\phi_{sp})^{adv}$ の値を基に、基礎方程式(2.40)～(2.47)の右辺

の乱流生成項からなる以下の方程式を解き、流速 u, v, w 、水温 T 、塩分 s 、乱流量 k, ε 、およ

びユーザー定義物理量 ϕ_{sp} の乱流生成過程後の値 $u^{tur} v^{tur} w^{tur} s^{tur} k^{tur} (\phi_{sp})^{tur}$ を計算する。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = 0 \quad (2.70)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = 0 \quad (2.71)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = 0 \quad (2.72)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (2.73)$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} = 0 \quad (2.74)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} = P_k + G_k - \varepsilon \quad (2.75)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = C_1 \frac{\varepsilon}{k} P_k + C_1 (1 - C_3) \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.76)$$

$$\frac{\partial \phi_{sp}}{\partial t} = 0 \quad (2.77)$$

上記方程式はSoroban格子上での空間差分により乱流生成項 P_k, G_k 及び風応力による生成項を求めた後、Euler陽解法により k, ε の方程式が離散化され計算される。プログラム中では `turbulence_phase` 関数により計算が行われる。

Step7:拡散相

乱流相の計算結果 $u^{turb} v^{turb} w^{turb} T^{turb} s^{turb} k^{turb} \varepsilon^{turb} (\phi_{sp})^{turb}$ の値を基に、基礎方程式(2.40)～(2.47)

の右辺の拡散項のみからなる以下の方程式を解き、流速 u, v, w 、水温 T 、塩分 s 、乱流量

k, ε 、およびユーザー定義物理量 ϕ_{sp} の拡散後の値 $u^{dif} v^{dif} w^{dif} T^{dif} s^{dif} k^{dif} \varepsilon^{dif} (\phi_{sp})^{dif}$ を計算する。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_{lic_M} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_{lic_M} \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_{eff} \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\tau_x}{\rho} \quad (2.78)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_{lic_M} \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_{lic_M} \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_{eff} \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{\tau_y}{\rho} \quad (2.79)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_{lic_M} \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_{lic_M} \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_{eff} \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{\tau_z}{\rho} \quad (2.80)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\nu_{lic}}{\sigma_t} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\nu_{lic}}{\sigma_t} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\nu_{eff}}{\sigma_t} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2.81)$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\nu_{lic}}{\sigma_s} \frac{\partial s}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\nu_{lic}}{\sigma_s} \frac{\partial s}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\nu_{eff}}{\sigma_s} \frac{\partial s}{\partial z} \right) \quad (2.82)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\nu_{lic}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\nu_{lic}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\nu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) \quad (2.83)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\nu_{lic}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\nu_{lic}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\nu_{eff}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) \quad (2.84)$$

$$\frac{\partial \phi_{sp}}{\partial t} = w_{settlement} \frac{\partial \phi_{sp}}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\nu_{lic}}{\sigma_{\phi sp}} \frac{\partial \phi_{sp}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\nu_{lic}}{\sigma_{\phi sp}} \frac{\partial \phi_{sp}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\nu_{eff}}{\sigma_{\phi sp}} \frac{\partial \phi_{sp}}{\partial z} \right) \quad (2.85)$$

上記方程式は空間スケールが鉛直方向と水平方向で大きく異なることから、さらに鉛直方向

と水平方向の拡散過程に分割して、鉛直方向と水平方向の拡散を順次計算することで拡散項

の計算を行う。プログラム中ではdiffusion_phase関数で計算が行われる。なお、ユーザー定義

物理量については、沈降速度（一定値）による効果も鉛直方向拡散計算と同時に計算を行う。

Step8:その他計算相

拡散相の計算結果 u^{dif} v^{dif} w^{dif} T^{dif} s^{dif} k^{dif} ε^{dif} $(\phi_{sp})^{dif}$ の値を基に、基礎方程式(2.40)～(2.47)の右辺の水温の熱収支項、遠心力項、コリオリ力及びユーザー定義物理量のソース項からなる以下の方程式を解き、流速 u, v, w 、水温 T 、塩分 s 、乱流量 k, ε 、およびユーザー定義物理量 ϕ_{sp} の乱流生成過程後の値 u^{other} v^{other} w^{other} T^{other} s^{other} k^{other} ε^{other} ϕ_{sp}^{other} を計算する。

$$\left(\frac{\partial u}{\partial t} \right) = \frac{1}{R} u^{dif} v^{dif} + f_{co} v^{dif} \quad (2.86)$$

$$\left(\frac{\partial v}{\partial t} \right) = -\frac{1}{R} u^{dif} u^{dif} - f_{co} u^{dif} \quad (2.87)$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) = S_T \quad (2.88)$$

$$\left(\frac{\partial \phi_{sp}}{\partial t} \right) = S_{\phi_{sp}} \quad (2.89)$$

式(2.86),(2.87)はEuler陽解法を用いて計算される。式(2.88)の熱収支項はheat_budget_water_temperature 関数にて計算を行い、熱収支計算用に微小時間ステップを導入して積分を行う。一方、式(2.89)によるソース項の計算はプログラム中ではsource_term_of_user_defined_scalars関数内にユーザーが適当な計算プログラムを書き込むことで定義される。

Step9: 圧力修正相

再配置された格子上での流速を基に圧力を求め、圧力による速度の加速・修正を行う。また、圧力場を計算する前に暴気装置ごとに鉛直 1 次元ブルーム解析を行い、その結果から暴気装置を含む格子上には暴気ブルームによる見かけの吸込みを発散として考慮する。基礎方程式は以下の通り。

$$\left(\frac{\partial u}{\partial t} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p^{n+1}}{\partial x} \quad (2.90)$$

$$\left(\frac{\partial v}{\partial t} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p^{n+1}}{\partial y} \quad (2.91)$$

$$\left(\frac{\partial w}{\partial t} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p^{n+1}}{\partial z} - g \quad (2.92)$$

$$\frac{\partial u^{n+1}}{\partial x} + \frac{\partial v^{n+1}}{\partial y} + \frac{\partial w^{n+1}}{\partial z} = \begin{cases} -\frac{dQ_{total}}{dz} & \text{with Aeration} \\ 0 & \text{without Aeration} \end{cases} \quad (2.93)$$

ここで $-dQ_{total}/dz$ は暴気ブルームの解析の結果得られる見かけの吸込み量であり、暴気装置を含む格子軸以外では連続条件式を満たすように式(2.93)右辺は0とする。圧力は非圧縮性条件を基に導出される Poisson 方程式を Soroban 格子上で離散化した行列方程式を不完全LU分解前処理付き BiCGstab 法で解く。離散化時には境界条件式(1.20),(1.29)を満足するように圧力は解かれる。プログラム中では pressure_phase 関数により計算が行われる。

計算条件の設定

計算条件の設定は以下の入力データファイルにより指定される。

- 1.基本設定ファイル
- 2.地形条件入力ファイル
- 3.風場データ入力ファイル
- 4.境界条件入力ファイル
- 5.初期条件入力ファイル
- 6.ユーザー入力時系列データファイル

以上のデータファイルを与える他、ユーザー定義物理量のソース項の計算についてはプログラム中で該当する関数を直接編集することで計算条件の設定を行う。以下に詳細を述べる。

基本設定ファイル(DEFINE.INC)

基本設定ファイルは各種入力データファイルの指定や、CFL条件（時間刻み幅）、シュミット数、出力間隔などの各種条件を設定することに使用する。デフォルトではdefine.incファイルとして用意されており、プログラム実行時に

```
#> mpirun -np 8 titech_warm define.inc
```

などとして用いる基本設定ファイル名を指定する。ファイル名は任意のものを使用できる。ファイル中で”#”で始まる行は注釈として扱われ、プログラム実行時には読み込まれない。以下に基本設定ファイルで指定する項目について列記する。

時間条件に関する項目

MAXIMUM_TIME

浮動小数点で表記する。単位は秒。計算を終了する計算時間を与える。MAXIMUM_TIMEを計算時刻 t_n が超えるか、MAXIMUM_TIME_STEPを計算ステップ数 n が超えた場合に計算が終了する。

MAXIMUM_TIME_STEP

整数を与える。計算を終了する計算ステップ数を与える。MAXIMUM_TIMEを計算時刻 t_n が超えるか、MAXIMUM_TIME_STEPを計算ステップ数 n が超えた場合に計算が終了する。

DT_AT_INITIAL_STEP

小数で与える。単位は秒。計算開始時の最初の計算ステップにおける時間刻み幅を指定する。

MAXIMUM_DT

小数で与える。単位は秒。時間刻み Δt の最大値を指定する。CFL数等の条件から決定される時間刻み幅がこの値を超える場合にも、この最大値が優先される。

MAXIMUM_CFL

小数で与える。各計算ステップにおける流速に対するCFL数の最大値を指定する。時間刻み幅 Δt は全計算格子点においてこのCFL数を下回る様に決定される。この値は**0.5未満の値を必ず指定する**。

MAXIMUM_CFL_FOR_WAVE

小数で与える。各計算ステップにおける水面波の波速に対するCFL数の最大値を指定する。時間刻み幅 Δt は全計算格子点においてこのCFL数を下回る様に決定される。水面の変形は陰解法で行うため、この値は1を超えてもかまわない。

SAFETY_COEFFICIENT_FOR_EXPLICIT_VISCOSITY_CALCULATION

小数で与える。拡散相における水平方向の拡散を時間陽解法で計算する際の、時間刻み幅に対する安全係数 α を指定する。上記計算はMulti-Time Stepを用いて行うが、その際に使用する仮想時間刻み幅 $\Delta t_{virtual}$ は

$$\Delta t_{virtual} < \alpha \min\left(\frac{\Delta x^2}{2v_x}, \frac{\Delta y^2}{2v_y}\right)$$

を超えないように設定されることになる。

出力に関する項目

OUTPUT_INTERVAL_SWITCH

0か1を指定する。途中結果の出力の時間間隔の取り方を指定する。値が1の場合には計算時間 OUTPUT_TIME_INTERVAL ごとに途中結果を出力する。値が0の場合には、計算ステップ数 OUTPUT_STEP_INTERVAL ごとに途中結果を出力する。

OUTPUT_TIME_INTERVAL

小数を指定する。単位は秒数。OUTPUT_INTERVAL_SWITCH=1の場合に、途中結果を出力する計算時間間隔を指定する。

OUTPUT_STEP_INTERVAL

整数を指定する。単位は時間ステップ数。OUTPUT_INTERVAL_SWITCH=0の場合に、途中結果を出力する計算時間ステップ数の間隔を指定する。

RUN_ONLY_FOR_OUTPUT_GRID_POSITION_SWITCH

0か1を指定する。値1を指定した場合には地形条件を読み込み、格子軸の位置が決定された段階で計算を終了し、計算本体の時間発展ルーチンは実行されない。風場など入力データの用意時に計算格子の位置を知るために使用する。普段は0を指定する。

OUTPUT_COMPRESSION_SWITCH

0か1を指定する。値1を指定した場合にはTecDataディレクトリ中に出力された途中結果のTec-Plotファイルをbzip形式で圧縮して保存する。

OUTPUT_GROUND_LEVEL

小数で与える。単位はメートル。3次元データの途中結果ファイル(Tec_VolumeData_...) で出力される地形面データ(ZONE=Bottom Surface) の水塊外部（側岸）の高さを指定する。計算自体には関与しない。想定される水位の最大値より大きな値を指定しておく。

Soroban格子点の設定に関する項目

MAX_ITER_NUM_OF_INITIAL_CONDITION

整数で与える。初期条件を基にSoroban格子を生成する際の反復計算の繰り返し数を指定する。

WEIGHTING_PARAMETER_TO_GATHER_GRID_POINT

小数で与える。無次元数。Soroban格子の格子点鉛直座標をモニター関数を基に決定する際に使用する。モニター関数の推定時の物理量の鉛直勾配に掛かる重み係数。式(2.83)中の w_z である。この値が大きい程格子点は鉛直変動の大きい領域に集中配置され、0の場合には水面と底面間が等間隔になるよう格子点が配置される。

MINIMUM_VERTICAL_GRID_WIDTH

小数を与える。単位はメートル。Soroban格子点の鉛直方向の格子点間隔の最小値を指定する。この値以下にならないように格子点の鉛直位置が決定される。

MAX_ITER_NUM_OF_SMOOTHING_MONITORING_FUNCTION_IN_X

整数を与える。鉛直分布を基に推算されたモニター関数は、ここで指定された回数だけx方向に3点移動平均を行った後にSoroban格子点の鉛直座標決定に使用される。この値が大きいほど各軸上での格子点の配置状況はx方向に連続になる。

MAX_ITER_NUM_OF_SMOOTHING_MONITORING_FUNCTION_IN_Y

整数を与える。鉛直分布を基に推算されたモニター関数は、ここで指定された回数だけy方向に3点移動平均を行った後にSoroban格子点の鉛直座標決定に使用される。この値が大きいほど各軸上での格子点の配置状況はy方向に連続になる。

MAX_ITER_NUM_OF_SMOOTHING_MONITORING_FUNCTION_IN_Z

整数を与える。式(2.83)を基に推算されたモニター関数は、ここで指定された回数だけz方向に3点移動平均を行った後にSoroban格子点の鉛直座標決定に使用される。この値が大きいほど各軸上での鉛直格子間隔の変化は穏やかになる。

MINIMUM_WATER_DEPTH

小数を与える。単位はメートル。陸地化したと判定する最小水深を指定する。水深がこの値以下に成った場合には陸地化したとして計算から除外する。

乱流計算に関する項目

VISCOSITY_MOLECULAR

小数で与える。単位は[m²/sec]。水の分子粘性係数を指定する。

VISCOSITY_MOLECULAR_SALINITY

小数で与える。単位は[m²/sec]。塩分の分子拡散係数を指定する。

HEAT_CONDUCTIVITY

小数で与える。単位は[m²/sec]。水温の温度拡散率 α を指定する。熱伝導率 k [J/s/m/K] とは

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$$

の関係がある。ここで ρ [kg/m³] は水密度、 c_p は比熱容量[J/kg/K] である。

KE_RICHARDSON_RAW_COEFFICIENT

小数で与える。リチャードソンの 4 / 3 乗則の係数を指定する。式(1.13)の ν_0 である。

KE_SCHMIDT_NUMBER_FOR_HORIZONTAL

小数で与える。水平方向への粘性係数 ν_{lic_M} を求める際に使用する乱流シュミット数。式(1.14)の S_c である。

KE_CMYU

小数で与える。k- ϵ モデルにおける C_μ の値。

KE_C1

小数で与える。k- ϵ モデルにおける C_1 の値。

KE_C2

小数で与える。k- ϵ モデルにおける C_2 の値。

KE_C3

小数で与える。k-εモデルにおける C_3 の値。

KE_SIGMA_K

小数で与える。k-εモデルにおける乱流エネルギーkに対する乱流シュミット数 σ_k の値。

KE_SIGMA_E

小数で与える。k-εモデル乱流エネルギー散逸率εに対する乱流プラントル数 σ_ϵ の値。

KE_SIGMA_T

小数で与える。k-εモデルにおける塩分（密度）に対する乱流プラントル数 σ_s の値。

KE_BED_BOUNDARY_MODEL

整数で与える。k-εモデルにおける乱流諸量の底面境界条件のモデルを選択するスイッチ。0の場合には壁条件に基づく定数値をk及びεの境界値として与える。一方1の場合には、石川と盛林らによる密度ブルーム解析に基づく乱流生成フラックスを境界条件として与える。詳しくは22～23ページを参照のこと。

水面変動計算に関する項目**MAX_ITER_NUM_OF_BICGSTAB_SOLUTION_IN_WATER_SURFACE_PROPAGATION**

整数で与える。水位変動の陰解法時に使用するILU-BiCGstab行列解法の最大反復回数。

EPSILON_OF_BICGSTAB_SOLUTION_IN_WATER_SURFACE_PROPAGATION

小数で与える。水位変動の陰解法時に使用するILU-BiCGstab行列解法の収束判定条件。

圧力修正相の計算に関する項目**MAX_ITER_NUM_OF_BICGSTAB_SOLUTION_IN_PRESSURE_PHASE**

整数で与える。圧力の推算時に使用するILU-BiCGstab行列解法の最大反復回数。

EPSILON_OF_BICGSTAB_SOLUTION_IN_PRESSURE_PHASE

小数で与える。圧力の推算時に使用するILU-BiCGstab行列解法の収束判定条件。

各種物理量に関する項目

GRAVITY_ACCE

小数で与える。単位は[m/sec²]。重力加速度の大きさ。

FRICTION_COEFFICIENT

小数で与える。壁面&底面における摩擦計算時に使用する摩擦係数の値を指定する。式(1.30)～(1.32)及び式(1.34)～(1.36)における f_b の値。

SALINITY_ENABLE_SWITCH

整数で与える。塩分の計算を行うかどうかを選択する。0の場合には塩分に関する計算は一切行われず、1の場合には計算を行う。

WATER_TEMPERATURE_ENABLE_SWITCH

整数で与える。水温の計算を行うかどうかを選択する。0の場合には水温に関する計算は一切行われず、1の場合には計算を行う。

入力地形条件に関する項目

NAME_OF_LIST_FILE_OF_TOPOGRAPHY_CROSS_SECTION

ファイル名を指定する。河床高と格子条件を指定する地形データファイルの名前を指定する。

LATITUDE

少数で与える。コリオリパラメータを決定する際に使用する緯度。北緯を正として”度”で与える。

入力風場データに関する項目

NAME_OF_LIST_FILE_OF_2D_WIND_FIELD

ファイル名を指定する。各格子軸上の風場の時系列データを2次元分布として与える際に、そのデータファイル名を指定する。次のFILE_OF_UNIFORM_WIND_FILEとは排他的に使用する。

FILE_OF_UNIFORM_WIND_FIELD

ファイル名を指定する。各格子軸上の風場は一樣だとして、風の時系列データを与える際に、そのデータファイル名を指定する。前のNAME_OF_LIST_FILE_OF_2D_WIND_FIELDとは排他的に使用する。

熱収支計算に関する項目

HEAT_BUDGET_ENABLE_SW

整数を与える。heat_budget_water_temperature関数による熱収支計算を有効化するスイッチ。0の場合には計算しない。1を指定する時計算が行われる。

HEAT_BUDGET_DT

少数を与える。heat_budget_water_temperature関数による熱収支計算で時間積分を行う場合に使用する時間刻み幅（秒数）。その他の移流計算で使用される計算時間間隔を超える値が指定された場合には、移流計算で使用される計算時間間隔を使用して積分を行う。

HEAT_BUDGET_ALBEDO

少数を与える。短波日射の水面での反射率（アルベド）の値を指定する。

HEAT_BUDGET_ABSORPTION_RATE_AT_WATER_SURFACE

少数を与える。反射されなかった短波日射のうち、水面で吸収される割合を与える。

HEAT_BUDGET_BUDGET_ATTENUATION_LENGTH_OF_SHORT_WAVE

少数を与える。水面下に透過した短波日射の減衰長（ $1/e$ に減衰する距離）を指定する。単位は[m]。

HEAT_BUDGET_BUDGET_BUDGET_EMPIRICAL_COEFFICIENT_OF_LONG_WAVE

少数を与える。長波／潜熱／顕熱フラックスによる水面からの熱輸送量を調整するパラメータ。式(1.46)における C_1 。ページ21～22を参照のこと。通常は1を指定する。

FILE_OF_AIR_TEMPERATURE

ファイル名（文字列）を指定する。熱収支計算で用いる気温[°C]の時系列データのファイル名をここで指定する。指定されない場合には熱収支計算は行われない。

FILE_OF_AIR_CLOUDINESS

ファイル名（文字列）を指定する。熱収支計算で用いる雲量(0～10)の時系列データのファイル名をここで指定する。指定されない場合には熱収支計算は行われない。

FILE_OF_AIR_HUMIDITY

ファイル名（文字列）を指定する。熱収支計算で用いる湿度[%]の時系列データのファイル名をここで指定する。指定されない場合には熱収支計算は行われない。

FILE_OF_AIR_SOLOR_RADIATION

ファイル名（文字列）を指定する。熱収支計算で用いる短波日射量[MJ/m2/day]の時系列データのファイル名をここで指定する。指定されない場合には熱収支計算は行われない。

暴気モデルに関する項目

以下に暴気モデルに関する各種パラメータと複数の暴気装置の位置や放出量等を指定する。

暴気装置の位置と放出量は複数の暴気装置について同様の書式で指定可能である。暴気装置の最大個数は25個まで。

AERATION_ATM_WATER_HEAD

少数を与える。大気圧水頭。単位は[m]。

AERATION_SURFACE_TENSION_COFF

少数を与える。水の表面張力係数。

AERATION_DZ_FOR_PLUME_MODEL

少数を与える。暴気ブルームの鉛直1次元解析で用いる格子幅。単位は[m]。Soroban格子の鉛直幅より小さいものが望ましいことから、MINIMUM_VERTICAL_GRID_WIDTHで指定された値より小さい値を使用する。

AERATION_ENTRAINMENT_COFF_ALPHA

少数を与える。周辺水とブルーム間の連行係数 α 。30～32ページを参照のこと。

AERATION_ENTRAINMENT_COFF_BETA

少数を与える。内部ブルームの周辺水からの連行、及び外部ブルームから内部ブルームへの連行の連行係数 β 。30～32ページを参照のこと。

AERATION_ENTRAINMENT_COFF_GAMMA

少数を与える。内部ブルームから外部ブルームへの連行係数 γ 。30～32ページを参照のこと。

AERATION_EMPIRICAL_COFF_FOR_WATER_SURFACE

少数を与える。水面においてブルームが下降を開始する際の連行量増加に関するパラメータ。式(1.77)における C_e 。この値が大きいくほど水面からの連行が大きくなる。標準は1.0。35ページを参照のこと。

AERATION_BUBBLE_PLUME_SLIP_VELOCITY

少数を与える。暴気（気泡）コアのスリップ速度[m/s]。

AERATION_MAX_ITER_NUM

整数を与える。ダブルブルームモデルでの最大反復回数。

AERATION_EPSIRON_OF_ITER

少数を与える。ダブルブルームモデルでの反復を終了する条件定数。

AERATION_MAX_ITER_NUM_OF_NEWTON_FOR_INITIAL_PLUME

整数を与える。内部ブルームの初期値を決定する際のNewton反復法の最大反復回数。

AERATION_EPSIRON_OF_ITER

少数を与える。内部ブルームの初期値を決定する際のNewton反復法の収束判定条件。

AERATION_DEVICE_1_SWITCH

整数を与える。暴気装置1番を有効化するスイッチ(0:計算しない、1:計算する)。

AERATION_DEVICE_1_X

少数を与える。暴気装置1番の計算空間でのX座標[m]を指定する。

AERATION_DEVICE_1_Y

少数を与える。暴気装置 1 番の計算空間でのY座標[m]を指定する。

AERATION_DEVICE_1_Z

少数を与える。暴気装置 1 番の空気放出口のZ座標（計算空間）を指定する。

AERATION_DEVICE_1_BUBBLE_VOLUME_FLUX

少数を与える。暴気装置 1 番の空気放出量を指定する。単位は[m³/sec]である。

※複数の暴気装置を設定する場合には、それぞれの暴気装置について、**AERATION_DEVICE_??_SWITCH, AERATION_DEVICE_??_X, AERATION_DEVICE_??_X, AERATION_DEVICE_??_X, AERATION_DEVICE_??_BUBBLE_VOLUME_FLUX**を同様に設定する。ここで“??”は2～25の暴気装置の番号。

ユーザー定義物理量に関する項目

以下、使用するユーザー定義物理量を記述するここで宣言されることによりユーザー定義物理量がプログラム中で計算されることになる。ユーザー定義物理量は最大25種類まで定義可能である。

NAME_OF_USER_DEFINED_SCALAR_1

文字列を与える。ユーザー定義物理量 1 の時間発展を計算する場合に、その変数の名称を与える。ここで名称を指定することによりユーザー定義物理量 1 の時間発展がプログラム中で行われるようになる。

KE_SIGMA_USER_DEFINED_SCALAR_1

小数を与える。ユーザー定義物理量 1 の乱流シュミット数 $\sigma_{\phi 1}$ 。この値が負の場合には拡散を計算しない。

VISCOSITY_MOLECULAR_USER_DEFINED_SCALAR_1

小数を与える。ユーザー定義物理量 1 の乱流以外（分子拡散）による拡散の拡散係数。単位は[m²/sec]。

SETTLING_SPEED_USER_DEFINED_SCALAR_1

小数を与える。ユーザー定義物理量 1 の沈降速度。単位は[m/sec]で、下向きを正として指定する。指定しない場合には0と見なされる。

※複数のユーザー定義物理量を設定する場合には、それぞれについて、

NAME_OF_USER_DEFINED_SCALAR_??, KE_SIGMA_USER_DEFINED_SCALAR_??, VISCOSITY_MOLECULAR_USER_DEFINED_SCALAR_??, SET-TLING_SPEED_USER_DEFINED_SCALAR_?? を同様に設定する。ここで“??”は2～25の番号。

ユーザー入力データ（1次元時系列データ）に関する項目

NAME_OF_USER_INPUT_DATA_1

文字列を与える。ユーザーが任意に指定する追加時系列1次元データの名称を指定する。ここで名称を指定することにより、以下のFILE_OF_USER_INPUT_DATA_1で指定されるファイルから値が読み込まれるようになる。

FILE_OF_USER_INPUT_DATA_1

文字列を与える。ユーザーが任意に指定する追加時系列1次元データのファイル名を指定する。

NAME_OF_USER_INPUT_DATA_2

NAME_OF_USER_INPUT_DATA_1と同様。

FILE_OF_USER_INPUT_DATA_2

FILE_OF_USER_INPUT_DATA_1と同様。

NAME_OF_USER_INPUT_DATA_3

NAME_OF_USER_INPUT_DATA_1と同様。

FILE_OF_USER_INPUT_DATA_3

FILE_OF_USER_INPUT_DATA_1と同様。

NAME_OF_USER_INPUT_DATA_4

NAME_OF_USER_INPUT_DATA_1と同様。

FILE_OF_USER_INPUT_DATA_4

FILE_OF_USER_INPUT_DATA_1と同様。

NAME_OF_USER_INPUT_DATA_5

NAME_OF_USER_INPUT_DATA_1と同様。

FILE_OF_USER_INPUT_DATA_5

FILE_OF_USER_INPUT_DATA_1と同様。

NAME_OF_USER_INPUT_DATA_6

NAME_OF_USER_INPUT_DATA_1と同様。

FILE_OF_USER_INPUT_DATA_6

FILE_OF_USER_INPUT_DATA_1と同様。

NAME_OF_USER_INPUT_DATA_7

NAME_OF_USER_INPUT_DATA_1と同様。

FILE_OF_USER_INPUT_DATA_7

FILE_OF_USER_INPUT_DATA_1と同様。

NAME_OF_USER_INPUT_DATA_8

NAME_OF_USER_INPUT_DATA_1と同様。

FILE_OF_USER_INPUT_DATA_8

FILE_OF_USER_INPUT_DATA_1と同様。

NAME_OF_USER_INPUT_DATA_9

NAME_OF_USER_INPUT_DATA_1と同様。

FILE_OF_USER_INPUT_DATA_9

FILE_OF_USER_INPUT_DATA_1と同様。

NAME_OF_USER_INPUT_DATA_10

NAME_OF_USER_INPUT_DATA_1と同様。

FILE_OF_USER_INPUT_DATA_10

FILE_OF_USER_INPUT_DATA_1と同様。

ユーザー入力データ（2次元時系列データ）に関する項目

NAME_OF_USER_INPUT_2D_DATA_1

文字列を与える。ユーザーが任意に指定する時系列2次元データの名称を指定する。ここで名称を指定することにより、以下のNAME_OF_LIST_FILE_OF_USER_INPUT_2D_DATA_1で指定されるファイルから値が読み込まれるようになる。

NAME_OF_LIST_FILE_OF_USER_INPUT_2D_DATA_1

文字列を与える。ユーザーが任意に指定する時系列2次元データの一覧を与えるファイル名を指定する。

NAME_OF_USER_INPUT_2D_DATA_2

NAME_OF_USER_INPUT_2D_DATA_1と同様。

NAME_OF_LIST_FILE_OF_USER_INPUT_2D_DATA_2

NAME_OF_LIST_FILE_OF_USER_INPUT_2D_DATA_1と同様。

NAME_OF_USER_INPUT_2D_DATA_3

NAME_OF_USER_INPUT_2D_DATA_1と同様。

NAME_OF_LIST_FILE_OF_USER_INPUT_2D_DATA_3

NAME_OF_LIST_FILE_OF_USER_INPUT_2D_DATA_1と同様。

NAME_OF_USER_INPUT_2D_DATA_4

NAME_OF_USER_INPUT_2D_DATA_1と同様。

NAME_OF_LIST_FILE_OF_USER_INPUT_2D_DATA_4

NAME_OF_LIST_FILE_OF_USER_INPUT_2D_DATA_1と同様。

NAME_OF_USER_INPUT_2D_DATA_5

NAME_OF_USER_INPUT_2D_DATA_1と同様。

NAME_OF_LIST_FILE_OF_USER_INPUT_2D_DATA_5

NAME_OF_LIST_FILE_OF_USER_INPUT_2D_DATA_1と同様。

NAME_OF_USER_INPUT_2D_DATA_6

NAME_OF_USER_INPUT_2D_DATA_1と同様。

NAME_OF_LIST_FILE_OF_USER_INPUT_2D_DATA_6

NAME_OF_LIST_FILE_OF_USER_INPUT_2D_DATA_1と同様。

NAME_OF_USER_INPUT_2D_DATA_7

NAME_OF_USER_INPUT_2D_DATA_1と同様。

NAME_OF_LIST_FILE_OF_USER_INPUT_2D_DATA_7

NAME_OF_LIST_FILE_OF_USER_INPUT_2D_DATA_1と同様。

NAME_OF_USER_INPUT_2D_DATA_8

NAME_OF_USER_INPUT_2D_DATA_1と同様。

NAME_OF_LIST_FILE_OF_USER_INPUT_2D_DATA_8

NAME_OF_LIST_FILE_OF_USER_INPUT_2D_DATA_1と同様。

NAME_OF_USER_INPUT_2D_DATA_9

NAME_OF_USER_INPUT_2D_DATA_1と同様。

NAME_OF_LIST_FILE_OF_USER_INPUT_2D_DATA_9

NAME_OF_LIST_FILE_OF_USER_INPUT_2D_DATA_1と同様。

NAME_OF_USER_INPUT_2D_DATA_10

NAME_OF_USER_INPUT_2D_DATA_1と同様。

NAME_OF_LIST_FILE_OF_USER_INPUT_2D_DATA_10

NAME_OF_LIST_FILE_OF_USER_INPUT_2D_DATA_1と同様。

初期条件に関する項目**FILE_OF_INITIAL_WATER_LEVEL**

文字列を与える。水位の初期値データを与えるデータファイルの名称を指定する。この項目が#でコメントアウトされた場合には、ファイルから読み込まれず、water_level_initialization関数内で指定した値を初期値として計算される。

NAME_OF_LIST_FILE_OF_INITIAL_VELOCITY_X

文字列を与える。主流速(計算空間内x方向流速成分u)の初期鉛直分布を与えるデータファイルの一覧を記述したファイルの名称を指定する。この項目が#でコメントアウトされた場合には、初期条件はファイルから読み込まれず、set_initial_condition_of_ValueOnVolume関数内で指定した値を初期条件として計算される。

NAME_OF_LIST_FILE_OF_INITIAL_VELOCITY_Y

文字列を与える。計算空間内y方向流速成分vの初期鉛直分布を与えるデータファイルの一覧を記述したファイルの名称を指定する。この項目が#でコメントアウトされた場合には、初期条件はファイルから読み込まれず、set_initial_condition_of_ValueOnVolume関数内で指定した値を初期条件として計算される。

NAME_OF_LIST_FILE_OF_INITIAL_VELOCITY_Z

文字列を与える。計算空間内z方向流速成分wの初期鉛直分布を与えるデータファイルの一覧を記述したファイルの名称を指定する。この項目が#でコメントアウトされた場合には、初期条件はファイルから読み込まれず、set_initial_condition_of_ValueOnVolume関数内で指定した値を初期条件として計算される。

NAME_OF_LIST_FILE_OF_INITIAL_SALINITY

文字列を与える。塩分の初期鉛直分布を与えるデータファイルの一覧を記述したファイルの名称を指定する。この項目が#でコメントアウトされた場合には、初期条件はファイルから読み込まれず、set_initial_condition_of_ValueOnVolume関数内で指定した値を初期条件として計算される。

NAME_OF_LIST_FILE_OF_WATER_TEMPERATURE

文字列を与える。水温の初期鉛直分布を与えるデータファイルの一覧を記述したファイルの名称を指定する。この項目が#でコメントアウトされた場合には、初期条件はファイルから読み込まれず、set_initial_condition_of_ValueOnVolume関数内で指定した値を初期条件として計算される。

NAME_OF_LIST_FILE_OF_INITIAL_USER_DEFINED_SCALAR_1

文字列を与える。ユーザー定義物理量 1 の初期鉛直分布を与えるデータファイルの一覧を記述したファイルの名称を指定する。この項目が#でコメントアウトされた場合には、初期条件はファイルから読み込まれず、set_initial_condition_of_ValueOnVolume関数内で指定した値を初期条件として計算される。

※ほかのユーザー定義物理量についても、初期条件ファイルを **NAME_OF_LIST_-FILE_OF_INITIAL_USER_DEFINED_SCALAR_??** に指定することで同様に設定可能である。ここで??はユーザー定義物理量の番号。

境界条件に関する項目

-X側の境界Xminと、+X側境界Xmaxで同様に設定を行う。複数河川の流入や流出に対応するため、まずXmin,Xmax夫々の境界面において、異なる境界条件を課す領域（境界領域と呼ぶ）をY座標の範囲を指定して設定する。次いで、おのこの境界領域における夫々の物理量の境界条件を指定することとなる。なお、各境界領域ではゲート等による流入&流出範囲の制限を別途ゲート条件ファイルにより指定できるようになってる。

Xmax側境界条件の設定

①境界領域の範囲の設定

BOUNDARY_POSITION_YMIN_AT_XMAX_1

少数を与える。Xmax境界面において境界領域1を設定する。境界領域1の範囲のY座標最小値を指定する。この座標と **BOUNDARY_POSITION_YMAX_AT_XMAX_1**間が”境界領域 1”となる。

BOUNDARY_POSITION_YMAX_AT_XMAX_1

少数を与える。Xmax境界面において境界領域1を設定する。境界領域1の範囲のY座標最大値を指定する。この座標と **BOUNDARY_POSITION_YMIN_AT_XMAX_1**間が”境界領域 1”となる。

※以上と同様に、Xmaxにおける境界領域は 1 ～ 10 まで設定可能である。

②各境界領域でのゲート条件の設定

FILE_OF_BOUNDARY_CONDITION_FOR_GATE_AT_XMAX_1

ファイル名を与える。①で定義したXmax境界面の境界領域1について、ゲートによる流入or流出範囲の設定を行う場合には、ここでの解放範囲の時系列データを格納したファイルを指定する指定しない場合には、断面一様として境界条件が課される。

※以上と同様に、Xmaxにおける境界領域1～10について設定可能である。

③各境界領域での境界条件の指定**FILE_OF_BOUNDARY_CONDITION_FOR_WATER_LEVEL_AT_XMAX_1**

文字列を与える。Xmax境界の境界領域1における水位の時系列データファイルの名称を与える。ここでファイル名を指定した場合には境界において一様に入力データで与えられる水位が境界条件として課される。#でコメントアウトした場合には自由境界条件が課される。

FILE_OF_BOUNDARY_CONDITION_FOR_Q_AT_XMAX_1

文字列を与える。Xmax境界の境界領域1における流入流量の時系列データファイルの名称を与える。ここでファイル名を指定した場合には境界において、入力データを断面積（ゲート条件が設定されている場合にはゲート解放面積）で割った一様流速の値が境界条件として主流速に課される。#でコメントアウトした場合には自由境界条件が課される。

FILE_OF_BOUNDARY_CONDITION_FOR_SALINITY_AT_XMAX_1

文字列を与える。Xmax境界の境界領域1における塩分の時系列データファイルの名称を与える。ここでファイル名を指定した場合には境界において一様に入力データで与えられる塩分が境界条件として課される。#でコメントアウトした場合には自由境界条件が課される。

FILE_OF_BOUNDARY_CONDITION_FOR_WATER_TEMPERATURE_AT_XMAX_1

文字列を与える。Xmax境界の境界領域1における水温の時系列データファイルの名称を与える。ここでファイル名を指定した場合には境界において一様に入力データで与えられる塩分が境界条件として課される。#でコメントアウトした場合には自由境界条件が課される。

FILE_OF_BOUNDARY_CONDITION_FOR_USER_DEFINED_SCALAR_??_AT_XMAX_1

ファイル名を指定する。ユーザー定義物理量??(1～25の数字)の+X側境界（Xmax）の境界領域1における境界値を入力データファイルにより指定する際に、そのデータファイル名をここ

で指定する。この項目を#でコメントアウトした場合には、境界には自由境界条件が課される。

※以上と同様に、Xmaxにおける境界領域 1 ～ 1 0 について設定可能である。

Xmin側境界条件の設定

Xmax側境界の設定と同様に行う。説明は省略する。

地形条件入力ファイル

河床高データと、Soroban格子の位置や格子点数、計算領域の範囲などを指定する地形条件入力ファイルについて説明を行う。地形条件入力ファイルは複数のファイルからなり、格子平面を置くx地点ごとに横断方向の河床高等のデータを纏めた複数の「横断地形ファイル」と、それらを列記した「横断面リストファイル」からなる。

横断面リストファイル

基本設定ファイル内でNAME_OF_LIST_FILE_OF_TOPOGRAPHY_CROSS_SECTIONで指定されるデータファイルで、計算に使用する「横断地形ファイル」を列記したものである。図24に例を示す。#で始まる行は注釈行である。それ以外の項目の意味は以下の通り。

2行目：Xmin

計算領域のXmin境界面の位置（計算空間座標）を指定する。単位はメートル。

4行目：Xmax

計算領域のXmax境界面の位置（計算空間座標）を指定する。単位はメートル。

6行目：NUMBER_OF_TOPOGRAPHY_CROSS_SECTION

横断地形ファイルの総数。NAME_OF_TOPOGRAPHY_CROSS_SECTION_FILEの総数と同じで無ければならない。横断地形ファイルで指定される場所に格子平面が置かれることから、これは計算で使用する格子平面数に等しい。

8行目以降：NAME_OF_TOPOGRAPHY_CROSS_SECTION_FILE

格子平面を置くx地点ごとに横断方向の河床高等のデータを纏めた「横断地形ファイル」を-X側から順番に指定する。横断地形ファイルで指定される横断面に格子平面は置かれる。

```

#Boundary Position At Xminimum Along Main Stream Gut
Xmin=-100.

#Boundary Position At Xmaximum Along Main Stream Gut
Xmax=2000.

#Number of Data File of Cross Secotion
NUMBER_OF_TOPOGRAPHY_CROSS_SECTION=100

#Name of CrossSection Data File
NAME_OF_TOPOGRAPHY_CROSS_SECTION_FILE=cross_section_1.geo
NAME_OF_TOPOGRAPHY_CROSS_SECTION_FILE=cross_section_2.geo
NAME_OF_TOPOGRAPHY_CROSS_SECTION_FILE=cross_section_3.geo
NAME_OF_TOPOGRAPHY_CROSS_SECTION_FILE=cross_section_4p.geo
NAME_OF_TOPOGRAPHY_CROSS_SECTION_FILE=cross_section_5.geo
...
NAME_OF_TOPOGRAPHY_CROSS_SECTION_FILE=cross_section_river_98.geo
NAME_OF_TOPOGRAPHY_CROSS_SECTION_FILE=cross_section_river_99.geo
NAME_OF_TOPOGRAPHY_CROSS_SECTION_FILE=cross_section_river_100.geo

```

図24 横断面リストファイルの例

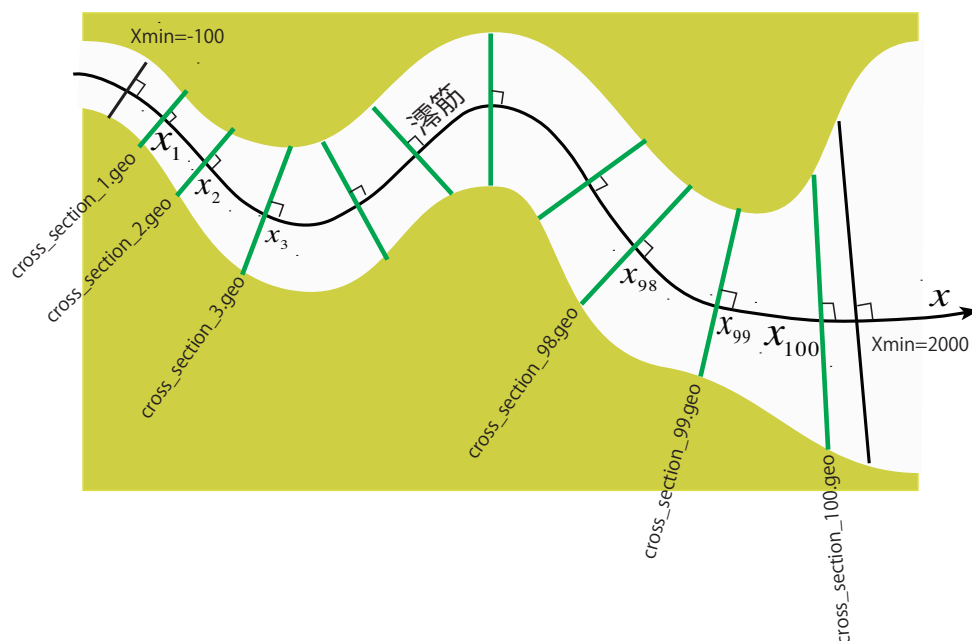


図25 横断面リストファイルと計算領域の対応

```

CROSS_SECTION_NUMBER
26
POSITION_ALONG_MAIN_STREAM_GUT[m]
-1.200000e+04
POSITION_OF_MAIN_STREAM_GUT_(X_Y)_IN_REAL_SPACE[m]
4.432400e+04 -1.199000e+03
COUNTERCLOCKWARD_ANGLE_FROM_Y_AXIS_IN_REALSPACE_TO_Y_AXIS_IN_COMPTSPACE[rad]
8.024614e-01
CURVATURE(STREAM_TOWARD_+X_CURVING_LEFTWARD_IS_POSITIVE)[1/m]
2.644414e-04
DISTANCE_FROM_MAIN_STREAM_GUT_TO_YMIN_SIDEWALL[m]
-1.425400e+02
DISTANCE_FROM_MAIN_STREAM_GUT_TO_YMAX_SIDEWALL[m]
1.495400e+02
NUMBER_OF_SOROBAN_GRID_AXES
12
DISTANCE_FROM_MAIN_STREAM_GUT[m] MAX_NUMBER_OF_GRID_POINTS
RIVER_BED_LEVEL[m]
-1.303700e+02 26 -1.651400e+00
-1.060300e+02 32 -2.481400e+00
-8.169000e+01 30 -2.394200e+00
-5.735000e+01 24 -1.444000e+00
-3.301000e+01 38 -3.355000e+00
-8.670001e+00 38 -3.545000e+00
1.567000e+01 40 -3.740200e+00
4.001000e+01 38 -3.426200e+00
6.435000e+01 40 -3.687400e+00
8.869000e+01 40 -3.745000e+00
1.130300e+02 36 -3.189800e+00

```

図26 横断地形ファイルの例(cross_section_26.geo)

横断地形ファイル

横断地形ファイルの例を図26に示す。以下に各項目の説明を行う。

(注意) 文字列は修正してはいけない。各項目の数字のみ変更してください。

1～2行目

CROSS_SECTION_NUMBER
26

横断地形ファイルが「横断面リストファイル」中で何番目の横断面かを指定する。上記例では-X側から26番目の横断面であることを指定している。

3～4行目

POSITION_ALONG_MAIN_STREAM_GUT[m]
-1.200000e+04

この横断地形ファイルで指定される横断面の計算空間内（主流軸方向）でのX座標 x_i を指定する(図25を参照)。

5～6行目

POSITION_OF_MAIN_STREAM_GUT(X_Y)_IN_REAL_SPACE[m]
4.432400e+04 -1.199000e+03



Xc



Yc

この横断面と計算空間x軸、即ち滞筋（主流軸）との交点の座標(Xc, Yc)を指定する。Xc, Ycは計算空間内では無く、実空間内での座標で指定する(図27)。

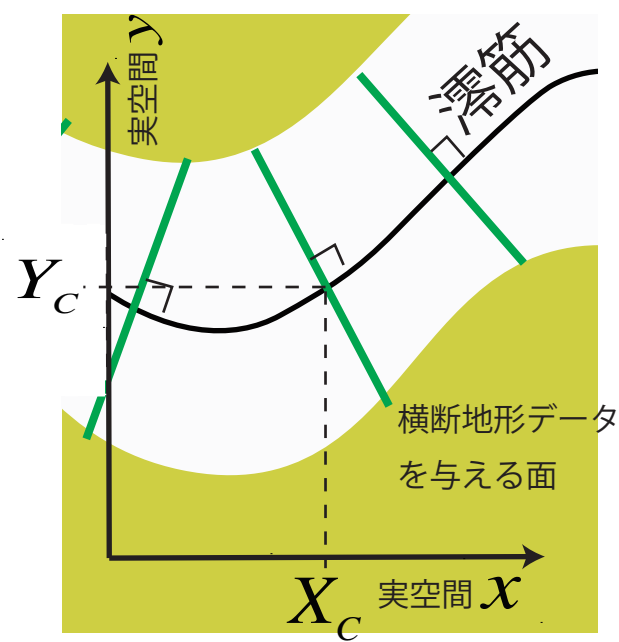


図27 X_c, Y_c の定義

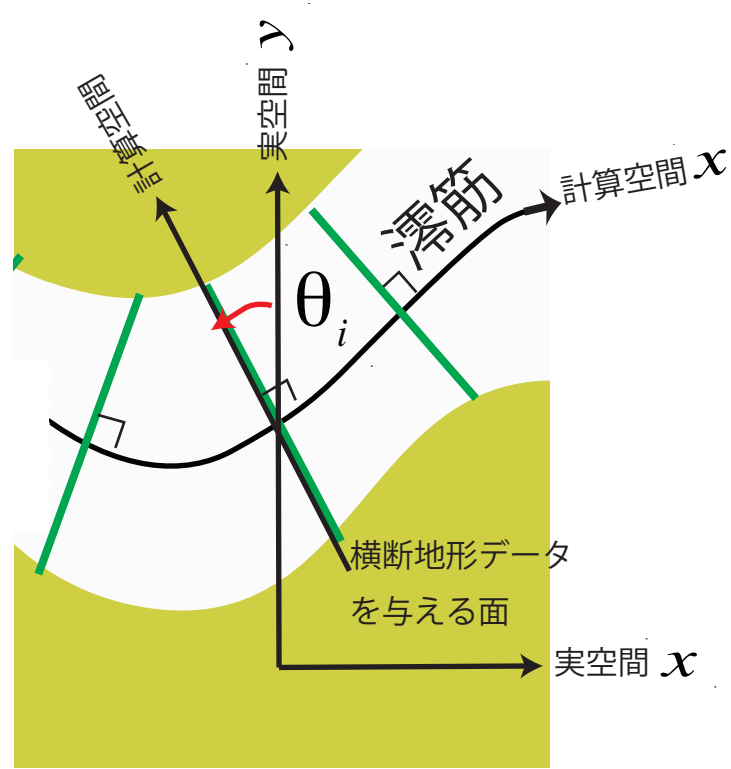


図28 θ の定義

7～8行目

COUNTERCLOCKWARD_ANGLE_FROM_Y_AXIS_IN_REALSPACE_TO_Y_AXIS_IN_COMPTSPACE[radian] 8.024614e-01

この横断面の方向、即ち計算空間内でのY軸と実空間内でのY軸との角度 θ_i をラジアンで指定する。角度は実空間Y軸から反時計回りの方向を正として定義する(図28参照)。

9～10行目

CURVATURE(STREAM_TOWARD_+X_CURVING_LEFTWARD_IS_POSITIVE)[1/m] 2.644414e-04

この横断面付近の曲率 $1/R$ を指定する。曲率は流れ（+X方向）が+Y側に曲がっていく場合を正、-Y側に曲がっていく場合を負の符号を付けて区別する(図29参照)。

11～14行目

DISTANCE_FROM_MAIN_STREAM_GUT_TO_YMIN_SIDEWALL[m] -1.425400e+02
DISTANCE_FROM_MAIN_STREAM_GUT_TO_YMAX_SIDEWALL[m] 1.495400e+02

横断面位置における側岸の位置を指定する。YminとYmaxの値である。Ymin及びYmaxの値は計算空間内y座標（横断面方向）で指定する。即ち、横断面が滞筋（主流軸）と交差する点を $y=0$ の原点とし、その交点からの横断面内でのy軸方向の距離で表すことになる(図30参照)。

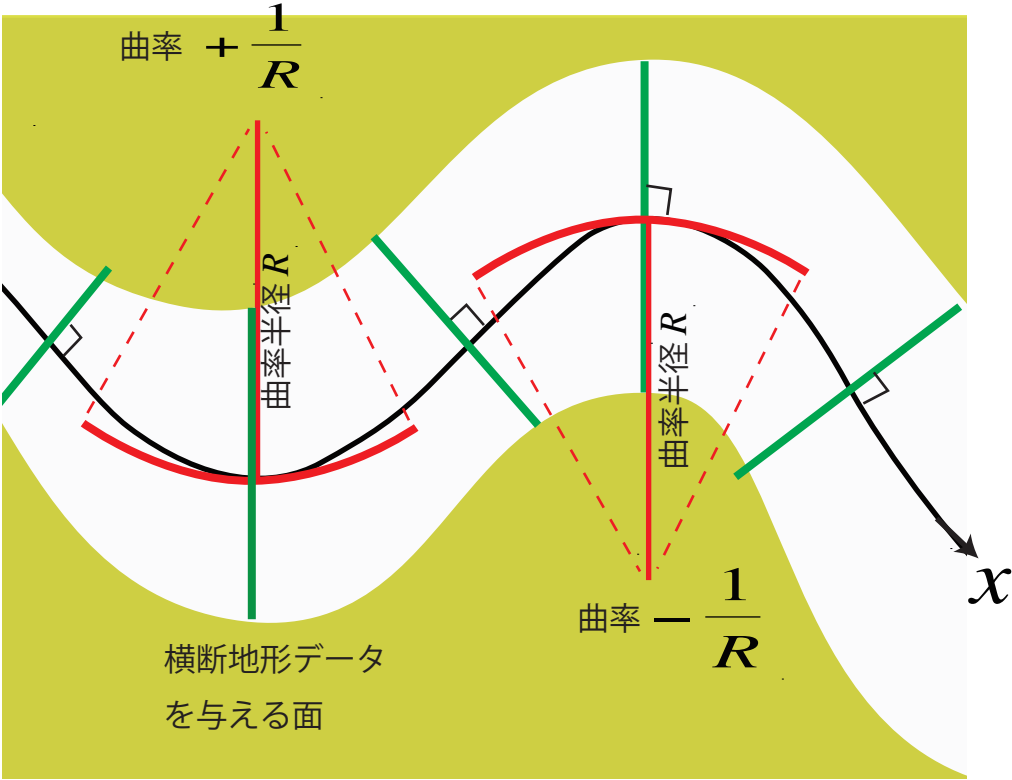


図29 曲率の定義

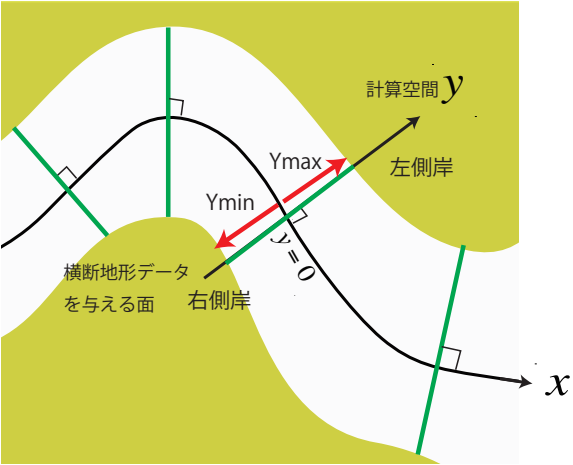


図30 Ymin,Ymaxの定義

15～16行目

NUMBER_OF_SOROBAN_GRID_AXES

12

横断面内に設定する格子軸の本数 $(N_y)_i$ を与える（図31参照）。

17行目～

DISTANCE_FROM_MAIN_STREAM_GUT[m]	MAX_NUMBER_OF_GRID_POINTS
RIVER_BED_LEVEL[m]	
-1.303700e+02	26 -1.651400e+00
-1.060300e+02	32 -2.481400e+00
-8.169000e+01	30 -2.394200e+00
-5.735000e+01	24 -1.444000e+00
-3.301000e+01	38 -3.355000e+00
-8.670001e+00	38 -3.545000e+00
1.567000e+01	40 -3.740200e+00
4.001000e+01	38 -3.426200e+00
6.435000e+01	40 -3.687400e+00
8.869000e+01	40 -3.745000e+00
1.130300e+02	36 -3.189800e+00
1.373700e+02	34 -2.813400e+00

格子軸の計算空間内y座標 y_{ij} と各軸上に配置する格子点の総数 $(N_z)_{ij}$ 、各軸位置における河床高 b_{ij} を1行として、-y側から列記する。地点数は15～16行目で指定した軸の本数と同じでなければならない（図31参照）。

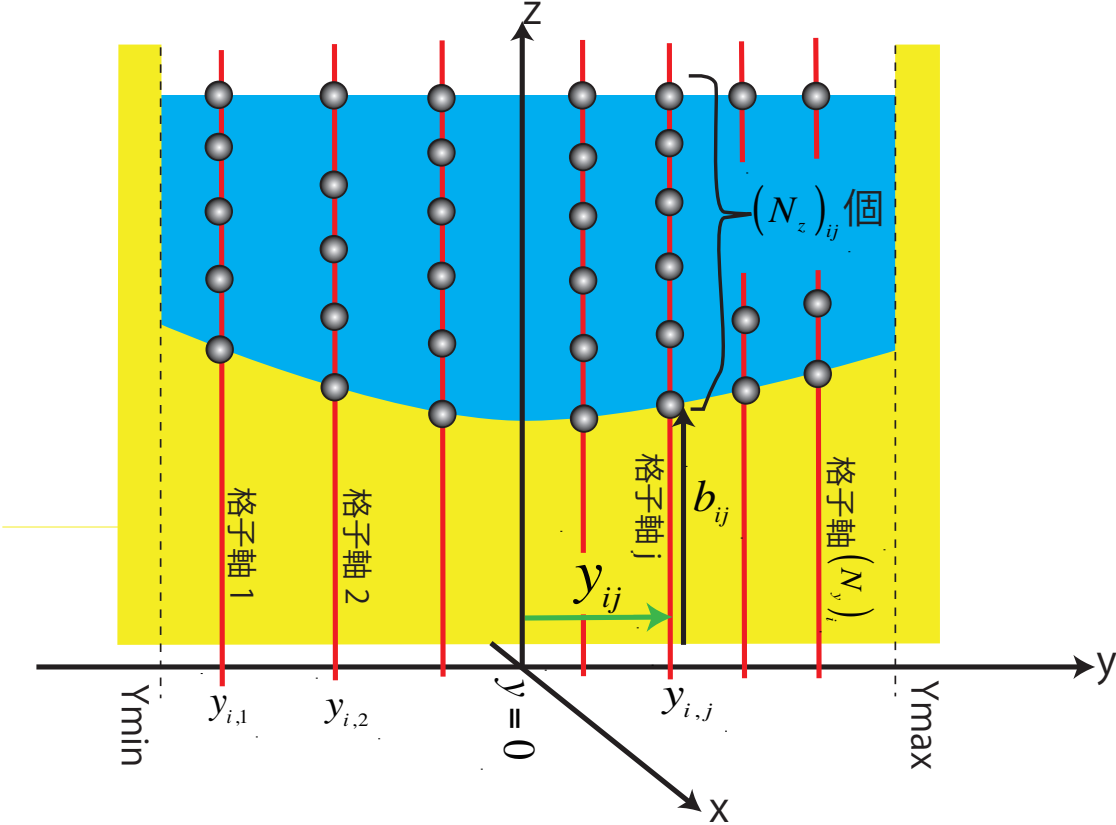
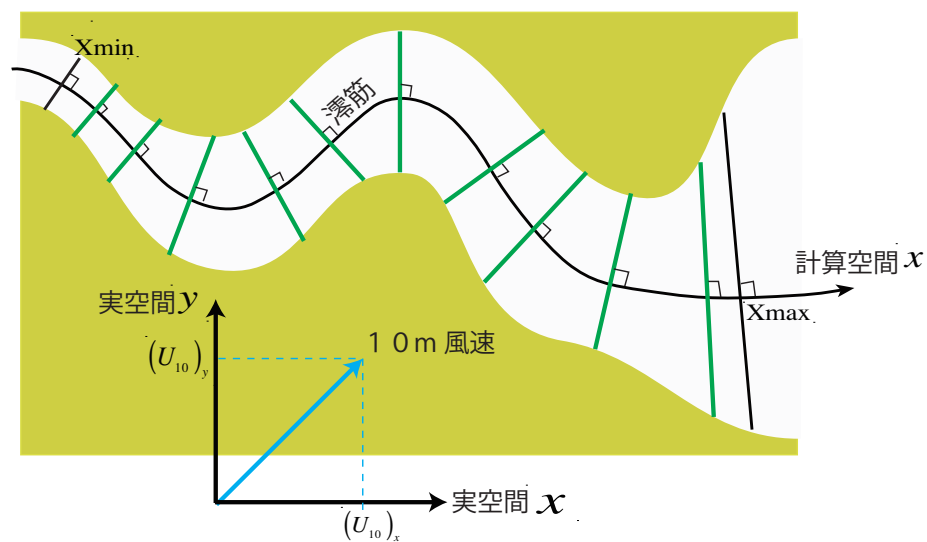


図31 の定義

風場入力データ

風場は基本設定ファイル内で、**NAME_OF_LIST_FILE_OF_2D_WIND_FIELD**あるいは**FILE_OF_UNIFORM_WIND_FIELD**にファイル名を指定することで入力される。これら項目の指定の仕方で以下のように考慮する風場が異なる。なお、風場の入力データは一様／非一様風場いずれの場合にも、高度10m風速のデータを入力することとし、**実空間内でのx座標およびy座標方向の風速成分** $(U_{10})_x$ 、 $(U_{10})_y$ を入力することになる（図32）。

図32 実空間内座標での風場成分



空間一様の風場の場合

基本設定ファイル中の**FILE_OF_UNIFORM_WIND_FIELD** にデータファイルを指定し、**NAME_OF_LIST_FILE_OF_2D_WIND_FIELD** を#でコメントアウトすることで風場は空間一様であると思なされる。**FILE_OF_UNIFORM_WIND_FIELD**で指定されるデータファイルから一様風場の時系列データが読み込まれる。この場合の風場のデータ形式は以下の通りで、データ時刻とその時刻での10m風速 $(U_{10})_x, (U_{10})_y$ を1組にして、行ごとに纏めて記述する。

読み込まれたデータは時間方向に線形補間を行うことで、現在の計算時刻 t_n での風速場を決定する。また、計算が進展し計算時刻 t_n がデータの最後の時刻 t_N を超えた場合には、それ以後の計算では風場は時刻 t_N の値が計算終了まで継続するとして計算が実行される。

時刻[秒]	x方向風速[m/s]	y方向風速[m/s]
時刻[秒]	x方向風速[m/s]	y方向風速[m/s]
時刻[秒]	x方向風速[m/s]	y方向風速[m/s]
・	・	・
・	・	・
・	・	・
時刻[秒]	x方向風速[m/s]	y方向風速[m/s]

図33 一様風場の時系列 1次元データ

2次元分布を持つ非一様風場の場合

基本設定ファイル中の**NAME_OF_LIST_FILE_OF_2D_WIND_FIELD**に2次元風分布のデータファイルを指定し、**FILE_OF_UNIFORM_WIND_FIELD**を#でコメントアウトすることで風場は空間一様であると思なされる。**NAME_OF_LIST_FILE_OF_2D_WIND_FIELD**で指定されるデータファイルから風場の時系列2次元分布データが読み込まれる。この場合の風場のデータは、ある時刻における2次元風分布を与える複数の「風分布データファイル」と、それらデータファイルの一覧を記述した「風分布データリスト」から指定される。

「風分布データリスト」は基本設定ファイルの **NAME_OF_LIST_FILE_OF_2D_WIND_FIELD** で指定されるものであり、図34に示すように、データの与えられる時刻とその時刻における2次元風分布を与える「風分布データファイル」の名称(Wind_on_Grid_1.geo, Wind_on_Grid_2.geo, ...)を行ごとに記述したものである。上記「風分布データリスト」に記載される各時刻における「風分布データファイル」は図35のような書式で、全ての格子軸上での風速データを記述したものである。

0	Wind_on_Grid_0.geo
10800	Wind_on_Grid_1.geo
21600	Wind_on_Grid_2.geo
32400	Wind_on_Grid_3.geo
43200	Wind_on_Grid_4.geo
54000	Wind_on_Grid_5.geo
64800	Wind_on_Grid_6.geo
75600	Wind_on_Grid_7.geo
.	.
.	.
.	.
時刻[sec]	風分布データファイル名
.	.
.	.

図34 風分布データリスト

1	1	6.466936e-02	5.804900e-01
1	2	7.192096e-02	1.391544e+00
1	3	6.803382e-02	1.281178e+00
1	4	6.803382e-02	1.281178e+00
1	5	6.803382e-02	1.281178e+00
2	1	1.957665e-01	1.185633e+00
2	2	1.957665e-01	1.185633e+00
2	3	1.957665e-01	1.185633e+00
2	4	3.859721e-02	1.156766e+00
2	5	3.859721e-02	1.156766e+00
2	6	3.859721e-02	1.156766e+00
3	1	9.430469e-02	6.400581e-01
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
格子平面番号i	格子軸番号j	x方向風速[m/s]	y方向風速[m/s]
.	.	.	.
.	.	.	.

図35 風分布データファイル

風応力を考慮しない場合

NAME_OF_LIST_FILE_OF_2D_WIND_FIELDと **FILE_OF_UNIFORM_WIND_FIELD** 両方を#でコメントアウトすることで風応力の影響を無視した計算が実行される。

境界条件入力ファイル

境界条件はupdate_boundary_value_for_...関数により設定されるが、基本設定ファイル中の項目

FILE_OF_BOUNDARY_CONDITION_FOR_WATER_LEVEL_AT_XMAX_??

FILE_OF_BOUNDARY_CONDITION_FOR_WATER_LEVEL_AT_XMIN_??

FILE_OF_BOUNDARY_CONDITION_FOR_Q_AT_XMAX_??

FILE_OF_BOUNDARY_CONDITION_FOR_Q_AT_XMIN_??

FILE_OF_BOUNDARY_CONDITION_FOR_SALINITY_AT_XMAX_??

FILE_OF_BOUNDARY_CONDITION_FOR_SALINITY_AT_XMIN_??

FILE_OF_BOUNDARY_CONDITION_FOR_USER_DEFINED_SCALAR_1_AT_XMAX_??

FILE_OF_BOUNDARY_CONDITION_FOR_USER_DEFINED_SCALAR_1_AT_XMIN_??

...

(??は境界面での境界領域の番号)

にファイル名を指定することで、Xmin及びXmax上での水位、塩分、流量（流速）、ユーザー定義物理量の境界値を時系列データとして指定することもできる。境界には指定したデータの値が境界断面内一様（もしくはゲート開放領域で一様）であるとして設定されることになる。上記項目を#でコメントアウトすれば該当する物理量の境界条件は自由境界 $\partial f / \partial x = 0$ であるとして計算が行われる。データファイルの書式はいずれの場合も同様に、図36のように与えられる（流量はXmaxで外側に向かう流出量を正、Xmin境界では内側に向かう流入量を正に取り、単位は[t/sec]である）。読み込まれたデータは時間方向に線形補間を行うことで、現在の計算時刻 t_n での境界値を決定する。また、計算が進展し計算時刻 t_n がデータの最後の時刻 t_N を超えた場合には、それ以後の計算では時刻 t_N の値が計算終了まで継続するとして計算が実行される。

時刻[秒]	での境界値
時刻[秒]	での境界値
時刻[秒]	での境界値
•	•
•	•
•	•
時刻[秒]	での境界値

図36 境界条件データファイル

ゲート条件入力ファイル

基本設定ファイル”*.inc”内でBOUNDARY_POSITION_YMIN_AT_XMAX_?, BOUNDARY_POSITION_YMAX_AT_XMAX_?, BOUNDARY_POSITION_YMIN_AT_XMIN_?, BOUNDARY_POSITION_YMAX_AT_XMIN_?によりXmax及びXmin境界での”境界領域”の範囲が指定される(?は境界領域の番号, 27と82ページを参照のこと)。基本設定ファイル”*.inc”内で

FILE_OF_BOUNDARY_CONDITION_FOR_GATE_AT_XMAX_?

或は

FILE_OF_BOUNDARY_CONDITION_FOR_GATE_AT_XMIN_?

(?は境界領域の番号)

によりゲート条件ファイルを指定することで、各境界領域のy-z断面に解放領域と壁の範囲を設定できる。ゲート条件ファイルの書式は図37に示す通りである。

第1列目は時刻[秒]であり、第2列目はゲート（解放領域）の数である。第3列目以降は各ゲート（解放領域）の四角形範囲を指定する隅点の座標($y_{\min}^{G?}$ $z_{\min}^{G?}$), ($y_{\max}^{G?}$ $z_{\max}^{G?}$)を $y_{\min}^{G?}$ $z_{\min}^{G?}$ $y_{\max}^{G?}$ $z_{\max}^{G?}$ の順番にゲート（解放領域）数だけ並べる。ゲート（解放領域）は10まで指定できる。なお、図37では時刻 t_3 においてゲート数を”0”としているが、この場合には全ての範囲で壁境界であると見なし、境界条件の種類によらず壁境界が課されることになる。

計算の各ステップでは、指定された時刻 t_i でゲート操作が行われたと解釈し、ゲート条件ファイルに記載されている次の時刻 t_{i+1} までは、常に時刻 t_i で指定されたゲート条件が継続されることになる。図37の場合、現在の計算時刻 t_n が t_1 と t_2 の間（ $t_1 \leq t_n < t_2$ ）であれば、時刻 t_1 での条件（ゲート数1）が適用されることになる。

また、計算が進展し計算時刻 t_n がデータの最後の時刻 t_{Max} を超えた場合には、それ以後の計算では時刻 t_{Max} の状態が計算終了まで継続するとして計算が実行される。

t ₁	1	y ^{G1} _{min}	z ^{G1} _{min}	y ^{G1} _{max}	z ^{G1} _{max}												
t ₂	3	y ^{G1} _{min}	z ^{G1} _{min}	y ^{G1} _{max}	z ^{G1} _{max}	y ^{G2} _{min}	z ^{G2} _{min}	y ^{G2} _{max}	z ^{G2} _{max}	y ^{G3} _{min}	z ^{G3} _{min}	y ^{G3} _{max}	z ^{G3} _{max}				
t ₃	0																
t ₄	2	y ^{G1} _{min}	z ^{G1} _{min}	y ^{G1} _{max}	z ^{G1} _{max}	y ^{G2} _{min}	z ^{G2} _{min}	y ^{G2} _{max}	z ^{G2} _{max}								
....																	
t _i	N	y ^{G1} _{min}	z ^{G1} _{min}	y ^{G1} _{max}	z ^{G1} _{max}	y ^{G2} _{min}	z ^{G2} _{min}	y ^{G2} _{max}	z ^{G2} _{max}	y ^{GN} _{min} z ^{GN} _{min} y ^{GN} _{max} z ^{GN} _{max}							
t _{Max}	1	y ^{G1} _{min}	z ^{G1} _{min}	y ^{G1} _{max}	z ^{G1} _{max}												

図37 ゲート条件

初期条件入力ファイル

初期条件は、水位はwater_level_initilization関数、その他3次元物理量に関してはset_initial_condition_of_ValueOnVolume関数内で設定可能である。また、初期条件をデータファイルを入力することにより指定することもできる。以下データファイルによる指定について、水位、3次元物理量の各項目ごとに詳細を説明する。

初期水位分布入力ファイル

水位の初期分布を与えるファイルで、基本設定ファイル中 **FILE_OF_INITIAL_WATER_LEVEL** でファイル名を指定する。書式は図40の通り。**第1行目は注釈でここは修正しない**。続く2行目以降に初期水位データを記述する。各行にはデータの与えられる計算空間内座標 (X_l, Y_l) 、そこでの初期水位 H_l 、補間に用いるx方向補間距離 $w_{x,l}$ 、y方向補間距離 $w_{y,l}$ をセットにして記述する。入力データ地点数は任意である。入力された値を用いて初期水位分布は以下の式で計算される。

$$h_{ij}^0 = h(t_0, x_i, y_{ij}) = \frac{\sum_{l=1}^N H_l \exp\left(-\frac{|x_i - X_l|}{w_{x,l}}\right) \exp\left(-\frac{|y_{ij} - Y_l|}{w_{y,l}}\right)}{\sum_{l=1}^N \exp\left(-\frac{|x_i - X_l|}{w_{x,l}}\right) \exp\left(-\frac{|y_{ij} - Y_l|}{w_{y,l}}\right)} \quad (3.1)$$

X_in_Compt	Y_in_Compt	WaterLevel	Weight_in_X	Weight_in_Y
[計算空間X座標]	[計算空間Y座標]	[水位m]	[X補間距離]	[Y補間距離]
[計算空間X座標]	[計算空間Y座標]	[水位m]	[X補間距離]	[Y補間距離]
[計算空間X座標]	[計算空間Y座標]	[水位m]	[X補間距離]	[Y補間距離]
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
[計算空間X座標]	[計算空間Y座標]	[水位m]	[X補間距離]	[Y補間距離]

図40 水位初期条件入力ファイルの書式

3次元物理量の初期条件入力ファイル

流速各成分、塩分、ユーザー定義物理量 1 ～ 5 に関して複数の地点における初期鉛直分布データを指定して、計算開始時の初期条件を設定することができる。これら物理量のデータファイルの書式は同一であり、おのこの物理量について基本設定ファイル中で該当する項目にデータファイル名を与えることで設定することができる。基本設定ファイル該当項目の説明も参照されたい。これら 3次元物理量に対する初期条件データファイルは、各地点における鉛直分布を与える複数の「初期鉛直分布データファイル」と、それらファイルの一覧である「初期分布データリスト」により入力される。「初期分布データリスト」は基本設定ファイル中で初期条件に関する項目

```
NAME_OF_LIST_FILE_OF_INITIAL_VELOCITY_X
NAME_OF_LIST_FILE_OF_INITIAL_VELOCITY_Y
NAME_OF_LIST_FILE_OF_INITIAL_VELOCITY_Z
NAME_OF_LIST_FILE_OF_INITIAL_SALINITY
NAME_OF_LIST_FILE_OF_WATER_TEMPERATURE
NAME_OF_LIST_FILE_OF_INITIAL_USER_DEFINED_SCALAR_1
```

...

によりファイル名が指定されるもので、図41のような書式である。**第1行目は注釈でここは修正しない。**続く2行目以降に初期鉛直分布を与えるデータを記述する。各行にはデータの与えられる計算空間内座標 (X_l, Y_l) 、そこでの鉛直分布を与える「初期鉛直分布データファイル」の名称、補間に用いるx方向補間距離 $w_{x,l}$ 、y方向補間距離 $w_{y,l}$ をセットにして記述する。入力データ地点数は任意である。この「初期分布データリスト」に記載される「初期鉛直分布データファイル」の書式は図42の通りで、浅い水深から深い水深の順番で、各水深に対する物理量の値を記載したものである。鉛直分布のデータ数や、水深の間隔等は任意である。

X_in_Compt	Y_in_Compt	Filename	Weight_in_X	Weight_in_Y
[X座標]	[Y座標]	[鉛直分布データファイル名]	[X補間距離]	[Y補間距離]
[X座標]	[Y座標]	[鉛直分布データファイル名]	[X補間距離]	[Y補間距離]
[X座標]	[Y座標]	[鉛直分布データファイル名]	[X補間距離]	[Y補間距離]
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
[X座標]	[Y座標]	[鉛直分布データファイル名]	[X補間距離]	[Y補間距離]

図41 3次元物理量の初期分布データリストの書式

0.1	15.03
0.5	15.81
1.0	18.35
1.5	20.44
2.0	24.27
2.5	25.52
3.0	26.78
3.5	26.78
4.0	26.78
.	.
.	.
.	.
[水深m]	[物理量]
.	.
.	.
.	.

図42 3次元物理量の初期鉛直分布データファイルの書式

以上のデータファイルから、格子点 (x_i, y_{ij}, z_{ijk}) 上の物理量に対する初期分布は以下のように決定される。

$$f_{ijk}^0 = f(t_0, x_i, y_{ij}, z_{ijk}) = \frac{\sum_{l=1}^N F_l(d_{ijk}) \exp\left(-\frac{|x_i - X_l|}{w_{x,l}}\right) \exp\left(-\frac{|y_{ij} - Y_l|}{w_{y,l}}\right)}{\sum_{l=1}^N \exp\left(-\frac{|x_i - X_l|}{w_{x,l}}\right) \exp\left(-\frac{|y_{ij} - Y_l|}{w_{y,l}}\right)} \quad (3.2)$$

ここで、 $F_l(d_{ijk})$ は l 番目の初期鉛直分布データを鉛直方向に補間することで求めた水深

$d_{ijk} = h_{ij}^0 - z_{ijk}$ での値である。

ユーザー入力時系列データファイル

前記境界条件や初期条件などのデータをファイルから入力する他に、ユーザーが任意の時系列データをファイルに入力することが可能となっている。入力データの形式は1次元時系列データと、xy平面上の2次元分布を持つデータの両方を読み込み可能となっている。データファイルの読み込みは基本設定ファイルでデータファイル名をそれぞれ指定するだけでプログラム中で参照可能となる。以下に1次元及び2次元時系列データの書式に関して順次説明を行う。また、1次元データと2次元データを同時に入力することも可能である。

ユーザー入力1次元時系列データ

1次元時系列データは最大10種まで同時に読み込み可能である。基本設定ファイル中に読み込むデータの名称とそれを格納するデータファイルの名称を、それぞれ

NAME_OF_USER_INPUT_DATA_xx と **FILE_OF_USER_INPUT_DATA_xx** に指定することでプログラム中に読み込まれるようになる。ここで、“xx”は1～10の数字で読み込むデータの種別番号である。指定する1次元時系列データの書式を図43に示す。データファイル各行には、データの時刻とその時刻での値を1組にして、行ごとに纏めて記述する。読み込まれたデータは時間方向に線形補間を行うことで、現在の計算時刻 t_n でのデータ値が決定される。各時間ステップにおける値は、Parameters構造体変数であるparam_pを用いて、以下のようにプログラム中で参照可能である。

param_p->user_input_dataxx->current_value

ここで“xx”は1～10の数字で読み込むデータの種別番号である。また、計算が進展し計算時刻 t_n がデータの最後の時刻 t_N を超えた場合には、それ以後の計算では時刻 t_N の値が計算終了まで継続するとして計算が実行される。

0	10.
3600.	20.
4200.	40.
.	.
.	.
.	.
時刻[秒]	での値

図43 ユーザー入力 1 次元データファイル

ユーザー入力 2 次元時系列データ

2 次元時系列データは最大 10 種まで同時に読み込み可能である。基本設定ファイル中に読み込むデータの名称と、各時刻における 2 次元データファイルの一覧を格納する「データリストファイル」の名称を、それぞれ **NAME_OF_USER_INPUT_2D_DATA_xx** と

NAME_OF_LIST_FILE_OF_USER_INPUT_2D_DATA_xx に指定することでプログラム中に読み込まれるようになる。ここで、"xx"は1～10の数字で読み込むデータの種別番号である。

「データリストファイル」の書式は図44の通りで、時刻とその時刻における「2次元分布データファイル」の名前を行ごとに記載する。「2次元分布データファイル」は図45のような書式で、全ての格子軸上でのデータ値を記述したものである。各時間ステップにおける値は、Parameters構造体変数であるuser_input_2d_dataxxを用いて、以下のようにプログラム中で参照可能である。

```
param_p->user_input_2d_dataxx->current_value[i][j]
```

ここで"xx"は1～10の数字で読み込むデータの種別番号である。[i][j]はi平面j軸の位置における値を示す。また、計算が進展し計算時刻 t_n がデータの最後の時刻 t_N を超えた場合には、それ以後の計算では時刻 t_N の値が計算終了まで継続するとして計算が実行される。

0.	user_input_2d_data_0.geo
300.	user_input_2d_data_1.geo
600.	user_input_2d_data_2.geo
.	.
.	.
.	.
時刻[sec]	各時刻における 2 次元データファイル名
.	.
.	.

図44 ユーザ入力 2 次元データリスト

1	1	6.466936e-02
1	2	7.192096e-02
1	3	6.803382e-02
1	4	6.803382e-02
1	5	6.803382e-02
2	1	1.957665e-01
2	2	1.957665e-01
2	3	1.957665e-01
2	4	3.859721e-02
2	5	3.859721e-02
2	6	3.859721e-02
3	1	9.430469e-02
.	.	.
.	.	.
.	.	.
格子平面番号i	格子軸番号j	ij上での値
.	.	.
.	.	.

図45 2次元分布データファイル

気象条件（気温／日射量／湿度／雲量）時系列データファイル

熱収支モデルに基づく外部気象条件による水温変化を計算するためには、気温／日射量／湿度／雲量の全てについて、1次元時系列データを入力しなければならない。

気温 1次元時系列データ

FILE_OF_AIR_TEMPERATUREに指定した1次元時系列データから読み込まれる。データの書式は図43に示すユーザー定義1次元時系列データと同様である。第1列目に時刻[sec]、第2列目には気温[°C]を記載する。各時間ステップにおける値は、Parameters構造体変数であるparam_pを用いて、以下のようにプログラム中で参照可能である。

```
param_p->air_temperature->current_value
```

計算が進展し計算時刻 t_n がデータの最後の時刻 t_N を超えた場合には、それ以後の計算では時刻 t_N の値が計算終了まで継続するとして計算が実行される。

日射量 1次元時系列データ

FILE_OF_SOLAR_RADIATIONに指定した1次元時系列データから読み込まれる。データの書式は図43に示すユーザー定義1次元時系列データと同様である。第1列目に時刻[sec]、第2列目には日射量[MJ/m²/day]を記載する。各時間ステップにおける値は、Parameters構造体変数であるparam_pを用いて、以下のようにプログラム中で参照可能である。

```
param_p->solar_radiation->current_value
```

計算が進展し計算時刻 t_n がデータの最後の時刻 t_N を超えた場合には、それ以後の計算では時刻 t_N の値が計算終了まで継続するとして計算が実行される。

雲量 1次元時系列データ

FILE_OF_SOLAR_CLOUDINESSに指定した1次元時系列データから読み込まれる。データの書式は図43に示すユーザー定義1次元時系列データと同様である。第1列目に時刻[sec]、第

2 列目には0～10の雲量を記載する。各時間ステップにおける値は、Parameters構造体変数であるparam_pを用いて、以下のようにプログラム中で参照可能である。

param_p->cloudiness->current_value

計算が進展し計算時刻 t_n がデータの最後の時刻 t_N を超えた場合には、それ以後の計算では時刻 t_N の値が計算終了まで継続するとして計算が実行される。

湿度 1 次元時系列データ

FILE_OF_SOLAR_HUMIDITYに指定した 1 次元時系列データから読み込まれる。データの書式は図43に示すユーザー定義 1 次元時系列データと同様である。第 1 列目に時刻[sec]、第 2 列目には%表記の湿度を記載する。各時間ステップにおける値は、Parameters構造体変数であるparam_pを用いて、以下のようにプログラム中で参照可能である。

param_p->humidity->current_value

計算が進展し計算時刻 t_n がデータの最後の時刻 t_N を超えた場合には、それ以後の計算では時刻 t_N の値が計算終了まで継続するとして計算が実行される。

プログラム修正を伴う設定

以上の各種入力ファイルの指定による計算条件の設定の他に、ユーザー定義物理量等の計算条件の設定の為に以下に示す項目について、プログラムを修正することで詳細な設定が可能となっている。**プログラムの修正後は実行前に必ずmakeコマンドを実行して、再コンパイルを行う必要がある。**

ユーザー定義物理量のソース項設定

ユーザー定義物理量のソース項は、時間分割法の”Step8:その他計算相”で計算を行う。基礎方程式は

$$\left(\frac{\partial \phi_{sp}}{\partial t} \right) = S_{\phi_{sp}} \quad (2.79)$$

である。上式の計算はユーザーがsource_term_of_user_defined_scalars関数中に直接計算式をプログラムすることで実現する。図46に一例を示す。図50ではユーザー定義物理量2 ϕ_2 に対して、水面上($k=\text{grid_p} \rightarrow \text{end_point}[i][j]$)でのみ

$$\frac{\partial \phi_2}{\partial t} = (\text{user_1d_data}_1(t_n) - \phi_2) \times 10^{-5}$$

を陽解法で離散化したものを計算している。ここで、 $\text{user_1d_data}_1(t_n)$ はユーザー入力1次元時系列データの1番目の種類の現時刻での値を示している。

図50 ユーザー定義

(source_term_of_

```

void source_term_of_user_defined_scalars(SorobanGrid *grid_p,
                                         Parameters *param_p,
                                         MPIParameters *mpi_param_p,
                                         MiscData *data_p,
                                         ComputationalTime *compt_time_p,
                                         Workspace *work_space_p,
                                         double ***uu,
                                         double ***vv,
                                         double ***ww,
                                         double ***density,
                                         double ***salinity,
                                         double ***turb_k,
                                         double ***turb_e,
                                         double ***user_defined_scalar1,
                                         double ***user_defined_scalar2,
                                         double ***user_defined_scalar3,
                                         double ***user_defined_scalar4,
                                         double...)
{
    static int i,j,k;
    static double X,Y,Z;

    // User Defined scalar1
    if(param_p->user_defined_scalar1_active_switch){
        for(i=grid_p->plane_start;i<=grid_p->plane_end;i++){
            for(j=grid_p->line_start[i];j<=grid_p->line_end[i];j++){
                for(k=grid_p->point_start[i][j];k<=grid_p->point_end[i][j];k++){
                    X=grid_p->X[i];
                    Y=grid_p->Y[i][j];
                    Z=grid_p->Z[i][j][k];
                    // user_defined_scalar1[i][j][k]=.....;
                }
            }
        }

    // User Defined scalar2
    if(param_p->user_defined_scalar2_active_switch){
        for(i=grid_p->plane_start;i<=grid_p->plane_end;i++){
            for(j=grid_p->line_start[i];j<=grid_p->line_end[i];j++){
                for(k=grid_p->point_start[i][j];k<=grid_p->point_end[i][j];k++){
                    X=grid_p->X[i];
                    Y=grid_p->Y[i][j];
                    Z=grid_p->Z[i][j][k];
                    if(k==grid_p->point_end[i][j]){
                        user_defined_scalar2[i][j][k]+=
                            (param_p->user_input_data1->current_value
                             -user_defined_scalar2[i][j][k])*1.e-5*compt_time_p->dt;
                    }
                }
            }
        }

        <省略>

    return;
}

```

ユーザー定義物理量の水面／河床面境界条件の設定

ユーザー定義物理量の河床面と水面上における境界条件はset_stress_and_flux_on_surfaces関数内で設定可能である。MiscData構造体変数のdata_pに以下のように設定することで種々の境界条件が導入される。set_stress_and_flux_on_surfaces関数の説明（仕様書428頁）も参照されたい。

1. 水面（河床面）上で輸送フラックスがユーザー定義物理量自身に比例する場合 水面（河床面）上の輸送フラックスが

$$\frac{\partial \phi_{sp}}{\partial z} = \alpha \phi_{sp}$$

のように与えられる場合には、data_p->kind_of_flux_user_defined_scalarxx_on_water_surface (river_bed)に”0”を代入し、data_p->flux_user_defined_scalarxx_on_water_surface (river_bed)[i][j]にi平面j軸での比例係数 α を代入する。図51はユーザ定義物理量 1 に対して、河床面上に比例係数 $\alpha=-1.e-4$ として設定している例である。

<省略>

```
// User Defined scalar1
if(param_p->user_defined_scalar1_active_switch){
    for(i=grid_p->plane_all_start;i<=grid_p->plane_all_end;i++){
        for(j=grid_p->line_all_start[i];j<=grid_p->line_all_end[i];j++){
            data_p->kind_of_flux_user_defined_scalar1_on_water_surface=1;
            data_p->flux_user_defined_scalar1_on_water_surface[i][j]=0.;
            data_p->kind_of_flux_user_defined_scalar1_on_river_bed=0;
            data_p->flux_user_defined_scalar1_on_river_bed[i][j]=-1.e-4;
        }
    }
}
```

<省略>

図51 ユーザー定

2. 水面（河床面）上で輸送フラックスが定数で与えられる場合

水面（河床面）上の輸送フラックスが

$$\frac{\partial \phi_{sp}}{\partial z} = \alpha$$

のように与えられる場合には、data_p->kind_of_flux_user_defined_scalarxx_on_water_surface (river_bed)に”1”を代入し、data_p->flux_user_defined_scalarxx_on_water_surface (river_bed)[i][j]にi平面j軸での定数 α を代入する。図52はユーザ定義物理量 1 に対して、水面上に $\alpha=0$ として設定している例である。

<省略>

```
// User Defined scalar1
if(param_p->user_defined_scalar1_active_switch){
    for(i=grid_p->plane_all_start;i<=grid_p->plane_all_end;i++){
        for(j=grid_p->line_all_start[i];j<=grid_p->line_all_end[i];j++){
            data_p->kind_of_flux_user_defined_scalar1_on_water_surface=1;
            data_p->flux_user_defined_scalar1_on_water_surface[i][j]=0.;
            data_p->kind_of_flux_user_defined_scalar1_on_river_bed=0;
            data_p->flux_user_defined_scalar1_on_river_bed[i][j]=-1.e-4;
        }
    }
}
```

<省略>

図52 ユーザー定

3. 水面（河床面）上でユーザー定義物理量が定数で与えられる場合

水面（河床面）上でユーザー定義物理量が

$$\phi_{sp} = \alpha$$

のように与えられる場合には、data_p->kind_of_flux_user_defined_scalarxx_on_water_surface (river_bed)に”2”を代入し、data_p->flux_user_defined_scalarxx_on_water_surface (river_bed)[i][j]にi平面j軸での定数 α を代入する。図53はユーザ定義物理量 1 に対して、水面上に $\alpha=10$ として設定している例である。

<省略>

```
// User Defined scalar1
if(param_p->user_defined_scalar1_active_switch){
    for(i=grid_p->plane_all_start;i<=grid_p->plane_all_end;i++){
        for(j=grid_p->line_all_start[i];j<=grid_p->line_all_end[i];j++){
            data_p->kind_of_flux_user_defined_scalar1_on_water_surface=2;
            data_p->flux_user_defined_scalar1_on_water_surface[i][j]=10.;
            data_p->kind_of_flux_user_defined_scalar1_on_river_bed=0;
            data_p->flux_user_defined_scalar1_on_river_bed[i][j]=-1.e-4;
        }
    }
}
```

<省略>

図53 ユーザー定義物理量の河床面上設定例3

出力ファイル

実行した結果出力されるデータファイル群について説明する。

timestep.dat

計算を実行したディレクトリに出力される。各計算ステップで時間に関する情報が順次出力される。内容は以下の通りである。

ステップ数	時刻	時間刻み	CFL数	週	日	時間	分	秒	1ステップの実時間	1ステップの実時間 (平均)	総実時間
.											
.											
.											

週、日、時間、分、秒は計算時刻をdate単位に換算したものを表し、実時間は計算を実行するのに要した実際の時間を秒で示すものである。

Grid_Position.dat

計算を実行したディレクトリに出力される。計算に使用したSoroban格子の軸の実空間内での座標が出力される。これを基に風場などの2次元入力データの準備を行う。

1	1	6.466936e-02	5.804900e-01
1	2	7.192096e-02	1.391544e+00
1	3	6.803382e-02	1.281178e+00
1	4	6.803382e-02	1.281178e+00
1	5	6.803382e-02	1.281178e+00
2	1	1.957665e-01	1.185633e+00
2	2	1.957665e-01	1.185633e+00
2	3	1.957665e-01	1.185633e+00
2	4	3.859721e-02	1.156766e+00
2	5	3.859721e-02	1.156766e+00
2	6	3.859721e-02	1.156766e+00
3	1	9.430469e-02	6.400581e-01
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
格子平面番号i	格子軸番号j	実空間X座標[m]	実空間Y座標[m]
.	.	.	.
.	.	.	.

Tec_TimeDependentData.plt

計算を実行したディレクトリに出力される。TecPlot形式の1次元時系列データファイルである。出力される変数は以下のとおりで基本設定ファイルで指定した時間間隔ごとに、その時間ステップにおける値が一行ごとに出力される。

```

時刻 [秒]                (TecPlot上での名称:Time)
ステップ数              (Steps)
出力ファイル番号        (Output_flame_number)
Xmin境界(境界領域1)での水位[m]  (WaterLevel_At_Xmax_1[m])
Xmin境界 (境界領域1) での流量[t/s]  (Q_At_Xmin_1[m^3/s])
Xmin境界 (境界領域1) での主流速[m/s]  (Velocity_At_Xmin_1[m/s])
Xmin境界 (境界領域1) での塩分[psu]  (Salinity_At_Xmin_1[psu])
Xmin境界 (境界領域1) での水温[°C]  (Water_Temperature_At_Xmin_1[psu])
Xmin境界 (境界領域1) でのユーザー定義物理量 1
....
Xmax境界 (境界領域1) での水位[m]  (WaterLevel_At_Xmin_1[m])
Xmax境界 (境界領域1) での流量[t/s]  (Q_At_Xmax_1[m^3/s])
Xmax境界 (境界領域1) での主流速[m/s]  (Velocity_At_Xmax_1[m/s])
Xmax境界 (境界領域1) での塩分[psu]  (Salinity_At_Xmax_1[psu])
Xmax境界 (境界領域1) での水温[°C]  (Water_Temperature_At_Xmax_1[psu])
Xmax境界 (境界領域1) でのユーザー定義物理量 1
. . .
ユーザー入力 1 次元時系列データ 1
ユーザー入力 1 次元時系列データ 2
. . .

```

計算時刻[秒]、ステップ数、出力ファイル番号は必ず出力される。出力ファイル番号は以下に述べるTecPlot形式の途中結果出力ファイル（Tec_VolumeData_xxx.plt, Tec_SurfaceData_xxx.plt）の名称に付加される通し番号である。それ以後の境界値は基本設定ファイルで境界条件のデータファイルが指定された場合にのみ、該当するものが出力される。また、ユーザー入力1次元時系列データの読み込みを基本設定ファイルで指定した場合には、当該時刻における値が出力される。

Tec_SurfaceData_time_xxx.plt 及び Tec_SurfaceData_step_xxx.plt

水位分布や河床高、風速などの2次元分布を持つ物理量について、各格子軸上での値を出力する。計算を実行したディレクトリ下の”TecData”ディレクトリ内に出力される。基本設定ファイルでOUTPUT_INTERVAL_SWITCH=1として一定時間間隔OUTPUT_TIME_INTERVALごとに出力する場合にはTec_SurfaceData_time_xxx.pltと言う名称となり、OUTPUT_INTERVAL_SWITCH=0として一定時間ステップ間隔OUTPUT_STEP_INTERVALごとに出力する場合にはTec_SurfaceData_step_xxx.pltと言う名称が付けられる。前記ファイル名中の”xxx”は出力を行った順に付けられる通し番号で、

Tec_SurfaceData_time(step)_1.plt

初期条件

Tec_SurfaceData_time(step)_2.plt

時刻”OUTPUT_TIME_INTERVAL” (OUTPUT_STEP_INTERVALステップ)

Tec_SurfaceData_time(step)_3.plt

時刻2×”OUTPUT_TIME_INTERVAL” (2×OUTPUT_STEP_INTERVALステップ)

....

の時刻（ステップ数）での出力に対応している。各ファイルに出力される変数は以下の通りである。

X座標（計算空間）	(TecPlot上での名称:X_comp_space)
Y座標（計算空間）	(Y_comp_space)
X座標（実空間）	(X_real_space)
Y座標（実空間）	(Y_real_space)
水位[m]	(Water Level[m])
河床高[m]	(River Bed[m])
水深[m]	(Depth[m])
1 0 m風速（計算座標x成分） [m/s]	(Wind at 10m height (X_comp Component))
1 0 m風速（計算座標 y 成分） [m/s]	(Wind at 10m height (Y_comp Component))
1 0 m風速（実空間座標x成分） [m/s]	(Wind at 10m height (X_real Component))
1 0 m風速（実空間座標 y 成分） [m/s]	(Wind at 10m height (Y_real Component))
ユーザー入力 2次元時系列データ 1	
ユーザー入力 2次元時系列データ 2	
...	

風場データとユーザー入力2次元時系列データが入力された場合のみ、風速等の値は出力される。また、陸地化している領域については出力を行わない。

Tec_VolumeData_time_xxx.plt 及び Tec_VolumeData_step_xxx.plt

塩分、流速成分などの3次元分布を持つ物理量について、各格子点上での値を出力する。計算を実行したディレクトリ下の”TecData”ディレクトリ内に出力される。基本設定ファイルで OUTPUT_INTERVAL_SWITCH=1として一定時間間隔OUTPUT_TIME_INTERVALごとに出力する場合にはTec_VolumeData_time_xxx.pltと言う名称となり、OUTPUT_INTERVAL_SWITCH = 0として一定時間ステップ間隔OUTPUT_STEP_INTERVALごとに出力する場合にはTec_VolumeData_step_xxx.pltと言う名称が付けられる。前記ファイル名中の”xxx”は出力を行った順に付けられる通し番号で、

Tec_VolumeData_time(step)_1.plt

初期条件

Tec_VolumeData_time(step)_2.plt

時刻”OUTPUT_TIME_INTERVAL” (OUTPUT_STEP_INTERVALステップ)

Tec_VolumeData_time(step)_3.plt

時刻2×”OUTPUT_TIME_INTERVAL” (2×OUTPUT_STEP_INTERVALステップ)

....

の時刻（ステップ数）での出力に対応している。各ファイルにはSoroban格子上で計算された物理量を出力するのに加え、河床面・側岸などの地形もTecPlotのZone書式を用いて出力される。Zone名”Volume Data”には、以下の変数が出力される。

X座標（計算空間） [m]	(TecPlot上での名称:X_comp_space)
Y座標（計算空間） [m]	(Y_comp_space)
Z座標（計算空間） [m]	(Z)
X座標（実空間） [m]	(X_real_space)
Y座標（実空間） [m]	(Y_real_space)
水深[m]	(Depth)
計算空間X方向流速成分[m/s]	(U_comp_space[m/s])
計算空間Y方向流速成分[m/s]	(V_comp_space[m/s])
鉛直方向流速[m/s]	(W[m/s])

実空間X方向流速成分[m/s]	(U_real_space[m/s])
実空間Y方向流速成分[m/s]	(V_real_space[m/s])
塩分[psu]	(Salinity[psu])
水温[°C]	(Water_Temperature[degree_Celcius])
圧力[Pa]	(Pressure[Pa])
密度[kg/m ³]	(Density[kg/m ³])
乱流エネルギー	(Turbulent_K)
乱流エネルギー散逸率	(Turbulent_E)
乱流粘性係数	(Turbulent_viscosity_vt)
水平粘性係数(X方向)	(Horizontal_Turbulent_viscosity_X[m ² /s])
水平粘性係数(Y方向)	(Horizontal_Turbulent_viscosity_Y[m ² /s])
ユーザー定義物理量 1	
ユーザー定義物理量 2	
...	

ユーザー定義物理量は基本設定ファイルで指定された場合のみ出力される。また、陸地化している領域については出力を行わない。一方、Zone名”Bottom Surface”には河床面と側岸の形状が出力される。これをTecPlotのShade表示などを用いて可視化すれば良い。

ファイル圧縮について

基本設定ファイルでOUTPUT_COMPRESSION_SWITCH=1が指定された場合には、”TecData”ディレクトリ下に出力されるTec_SurfaceData, Tec_VolumeData...はbzip形式で自動的に圧縮され、拡張子.bz2のついたファイルとして保存される。解凍にはbunzip2コマンドを用いる。

```
bunzip2 -fv <ファイル名>.bz2
```

計算実行

必要環境

本モデルはMPIライブラリを利用するC言語で実装されており、以下の環境が必要である。

- MPIライブラリ (OpenMPI、MPICH、LAM)
- Cコンパイラ (GNU C gcc、Intel Compiler icc)
- bzip2コマンド (出力ファイルの圧縮を行う場合のみ)

OSはLinux(Fedora, SUSE)とMac OS X(10.5)での動作を確認している。また、ネットワーク結合型PCクラスターを用いる場合には、各PC上で上記条件を設定するとともに、

- NFSによるHDD共有
- Giga Bit Ethernet以上の高速ネットワーク
- rlogin, rshの許可設定

を行う必要がある。ネットワーク型PCクラスター上でのMPIプログラムの環境設定については参考書等を参照されるか、ご相談ください(tnakamur@depe.titech.ac.jp)。参考に以下に実際に実行を確認した環境を示します。

MacPro

- Apple社
- Xeon 2.8GHz × 2CPU (計12コア=12並列)
- メモリ6GB
- DevelopmentToolsをダウンロードしインストールするだけで、OpenMPI, gcc, bzip2などの必要環境構築が完了
- 12並列以上の計算にはネットワーク結合PCクラスターを構築する必要あり
- 1台あたり40万円程度
- 添付の釜房貯水池計算で実時間の7倍

Core i7 クラスター（ネットワーク結合PCクラスター）

- 自作
- Core i7 3690K 3.4GHz 6 Cores (計6コア=6並列)
- OpenMPI、Intel Compiler, gcc のインストール
- NFS, rlogin, rshの設定を自分で行う
- 1台当たり20万円
- OS : Fedora 5
- ネットワーク結合で3PC (18core)
- メモリ8GB
- 添付の釜房貯水池計算で実時間の20倍

TITECH-WARMのインストール

インストールには特別な手続きは必要ありません。CD-ROMに含まれるTITech_WARMフォルダを計算を行うディレクトリ内に全部コピーしてください。内部に必要なCソースファイル、ヘッダーファイル、makefile、及び釜房貯水池を例題とした各種設定ファイル一式が内包されています。プログラム内部で使用されている関数群は全て、同名のCソースファイルが用意されていますが、set_pressure関数のみはオブジェクトファイル(set_pressure)のみで提供します。オブジェクトファイルは実行するOS、機種ごとに互換性が無いものですので、ご使用になる環境が準備出来た段階でインストールに伺います。

コンパイル

プログラムを初めて実行する場合や、プログラムを修正した場合にはコンパイルを行う必要があります。コンパイルにはmakefileを用意しておりますのでご利用ください。実際のコンパイルはコマンドラインから

```
#> make
```

を実行することで必要なコンパイルが行われ、実行形式”titech_warm”ファイルが作成されます。コンパイルにはMPIライブラリの一部として提供されているmpiccコマンドを使用しますので、MPIライブラリが適切にインストールされている必要があります。また全ての関数（ファイル）をコンパイルし直したい場合には以下のようにしてください。

```
#> make clean
```

```
#> make
```

“make clean”コマンドによりディレクトリ内にあるオブジェクトファイル(*.o)と実行形式”titech_warm”ファイルが全て消去されます。

実行

並列計算の実行には`mpirun`コマンドを使用します。`mpirun`コマンドのオプションの指定方法は利用するMPIライブラリにより異なります。OpenMPIを使用した場合の実行例を以下に示します。

```
#> mpirun -np 8 titech_warm define.inc
```

上記コマンドでは並列数8 で実行した例であり、`define.inc`は基本設定ファイルの名前です。

出力データファイルの消去

計算の結果出力された計算結果のファイルは以下のコマンドで一括して消去することが出来ます。

```
#> make clean_data
```

TITech_WARMディレクトリ内の全てのデータファイル (*.dat, *.plt, *.log)とTecDataディレクトリ下のデータ(*.plt, *.plt.bz2) を全て消去します。

連絡先：

東京工業大学大学院総合理工学研究科環境理工学創造専攻

准教授 中村 恭志

〒226-8502 横浜市緑区長津田町4259番 G5-3

電話：045-924-5548

Fax: 045-924-5549

mail: tnakamur@depe.titech.ac.jp