



iRIC Software

Changing River Science

Morpho2DH ver.2

Solver Manual

- Debris/Mud flow -

Produced by Hiroshi Takebayashi

目次

I. 概要.....	2
I.1 MORPHO2DH とは	2
I.2 計算モデルの特徴.....	3
II. 基礎式	3
II.1 一般座標系による基礎式.....	3
<参考文献>	6
III. 計算条件.....	7
III.1 計算の種類とデータ出力時間等の設定	7
III.2 計算条件の設定	9
III.3 河床材料の設定	11
III.4 植生の設定.....	12
III.5 障害物の設定	13
III.6 新規・継続計算の設定.....	14

I. 概要

I.1 Morpho2DH とは

Morpho2DH は Morpho2D に土石流・泥流モデルを加えた計算ソルバです。

Morpho2D は一般曲線座標で境界適合座標^{*1}を用いた非定常平面 2 次元流れと掃流砂・浮遊砂を対象とした河床変動の解析用ソルバであり，その原型は 2000 年代より京都大学の竹林洋史によって開発が開始され，数々の改良の後，2009 年に（財）北海道河川防災研究センターの河床変動計算用プリポストソフトウェアーRIC-Nasy に搭載された計算ソルバです(Version 1.0)．その後，いくつかの機能追加等の修正が行われ，2011 年 3 月に iRIC Version2.0 用の計算ソルバとして登録されました(Version 2.0)．2014 年 4 月に Nays2D と統合して Nays2DH となったのを機に開発を停止していました。

Morpho2DH は平面二次元の土石流・泥流モデルを主体とした解析ソルバであり，斜面崩壊を初期条件とした土石流・泥流の流動・堆積過程を表現可能なモデルです．砂防ダム，堰，家屋などの構造物や地盤の浸食深さの平面分布などを考慮した解析が可能です。

なお，Morpho2D で解析可能であった非定常平面 2 次元流れと掃流砂・浮遊砂を対象とした河床変動の解析も継続して使用可能です。

^{*1}直交座標系（デカルト座標系）では曲がった複雑な境界を表現することが困難なため，境界面に沿って座標軸を設定する座標系のことです．デカルト座標系で記述された支配方程式を一般座標に変換（写像）した方程式を計算する必要があります．その特徴から境界適合座標系とも呼ばれます。

I.2 計算モデルの特徴

- ① 運動方程式の移流項の差分法は、TVD-MacCormack 法（2次精度）を使用しています。
- ② 河床面付近に層流，その上に乱流が形成された二層モデルによる構成則を用いてエネルギー散逸を計算しています。
- ③ 土石流の初期条件は，斜面崩壊による水と土砂の混合物の流動を与える方法を用いています。
- ④ 地盤の最大浸食深さは，空間的に分布を与えることが可能です。
- ⑤ 砂防ダムや堰などの河川構造物については，河川構造物が存在する計算セルをポリゴンで指定し，構造物の表面の高さデータを固定床の高さとして考慮できます。河川構造物を簡単に計算に取り入れることができます。
- ⑥ 家屋や建物は河川構造物と同様に，固定床高さとして考慮できるため，建物の上への土砂の堆積や土石流・泥流の通過を計算できます。また，非常に高さの高い障害物については，障害物が存在する計算セルをポリゴンで指定し，障害物として認識させることにより考慮できます。
- ⑦ 斜面崩壊の発生時間は，斜面崩壊ごとに変えることができます。

II. 基礎式

II.1 一般座標系による基礎式¹⁾

デカルト座標系と一般座標系との関係は，以下のようである。

$$J = \frac{1}{\begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} \frac{\partial y}{\partial \eta} - \frac{\partial x}{\partial \eta} \frac{\partial y}{\partial \xi} \end{pmatrix}} \quad (1-1)$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial x} = J \frac{\partial y}{\partial \eta} \quad (1-2)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial x} = -J \frac{\partial y}{\partial \xi} \quad (1-3)$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial y} = -J \frac{\partial x}{\partial \eta} \quad (1-4)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial y} = J \frac{\partial x}{\partial \xi} \quad (1-5)$$

ここに， ξ と η は一般座標系における流下方向と横断方向の座標であり， x と y はデカルト座標系での座標である。

水深平均された平面二次元流れの支配方程式を用いる。水及び土砂の混合物の質量保存則は以下のようである¹⁾。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{h}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{hU}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{hV}{J} \right) = \frac{E}{c_* J} \quad (2)$$

ここに、 t は時間、 z は水位、 h は表面流の水深である。 U と V は ξ と η 方向における反変速度成分であり、以下のように定義される。

$$U = \frac{\partial \xi}{\partial x} u + \frac{\partial \xi}{\partial y} v \quad (3)$$

$$V = \frac{\partial \eta}{\partial x} u + \frac{\partial \eta}{\partial y} v \quad (4)$$

ここに、 u と v は x と y 方向における流速成分、 c_* は静止堆積層の砂礫の堆積濃度、 E は河床の浸食速度であり、以下の式²⁾を用いる。

$$\frac{E}{\sqrt{u^2 + v^2}} = c_* \tan(\theta - \theta_e) \quad (5)$$

ここに、 θ は流動方向の河床勾配であり、以下の関係がある。

$$\sin \theta = \frac{u \sin \theta_x + v \sin \theta_y}{\sqrt{u^2 + v^2}} \quad (6)$$

ここに、 θ_x は x 方向の河床勾配、 θ_y は y 方向の河床勾配である。 θ_e は水及び土砂の混合物中の鉛直平均土砂濃度 \bar{c} に関する流動方向の平衡河床勾配であり、以下の関係を用いる。

$$\tan \theta_e = \frac{\left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) \bar{c}}{\left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) \bar{c} + 1} \frac{h_s}{h} \tan \phi_s \quad (7)$$

ここに、 ϕ_s は土砂の内部摩擦角である。流体中の土砂の質量保存則は以下のようである。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\bar{c}h}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{\bar{c}hU}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{\bar{c}hV}{J} \right) = \frac{E}{J} \quad (8)$$

運動量保存則は以下のようである。

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{hU}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(U \frac{hU}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(V \frac{hU}{J} \right) \\
& - \frac{hu}{J} \left(U \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \right) + V \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \right) \right) - \frac{hv}{J} \left(U \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{\partial \xi}{\partial y} \right) + V \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{\partial \xi}{\partial y} \right) \right) \\
& = -gh \left(\frac{1}{J} \left(\left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \xi}{\partial y} \right)^2 \right) \frac{\partial z_b}{\partial \xi} + \frac{1}{J} \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial \xi}{\partial y} \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) \frac{\partial z_b}{\partial \eta} \right) \\
& - \frac{1}{\rho_m} \left(\frac{1}{J} \left(\left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \xi}{\partial y} \right)^2 \right) \frac{\partial P}{\partial \xi} + \frac{1}{J} \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial \xi}{\partial y} \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) \frac{\partial P}{\partial \eta} \right) - \frac{\tau_{b\xi}}{\rho_m J}
\end{aligned} \tag{9}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{hV}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(U \frac{hV}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(V \frac{hV}{J} \right) \\
& - \frac{hu}{J} \left(U \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{\partial \eta}{\partial x} \right) + V \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{\partial \eta}{\partial x} \right) \right) - \frac{hv}{J} \left(U \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{\partial \eta}{\partial y} \right) + V \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{\partial \eta}{\partial y} \right) \right) \\
& = -gh \left(\frac{1}{J} \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial \xi}{\partial y} \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) \frac{\partial z_b}{\partial \xi} + \frac{1}{J} \left(\left(\frac{\partial \eta}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial y} \right)^2 \right) \frac{\partial z_b}{\partial \eta} \right) \\
& - \frac{1}{\rho_m} \left(\frac{1}{J} \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial \xi}{\partial y} \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) \frac{\partial P}{\partial \xi} + \frac{1}{J} \left(\left(\frac{\partial \eta}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial y} \right)^2 \right) \frac{\partial P}{\partial \eta} \right) - \frac{\tau_{b\eta}}{\rho_m J}
\end{aligned} \tag{10}$$

ここに、 g は重力、 z_b は河床位である。 P は圧力であり、以下の関係を用いる。

$$P = \int_0^h \rho_m g (h - z) \cos \theta dz \tag{11}$$

ここに、 z は鉛直方向の軸である。 ρ_m は以下の関係がある。

$$\rho_m = (\sigma - \rho) \bar{c} + \rho \tag{12}$$

ここに、 ρ は水の密度、 σ は土砂の密度である。 $\tau_{b\xi}$ と $\tau_{b\eta}$ は ξ と η 方向における反変掃流力成分であり、以下のように定義される。

$$\tau_{b\xi} = \frac{\partial \xi}{\partial x} \tau_{bx} + \frac{\partial \xi}{\partial y} \tau_{by} \tag{13}$$

$$\tau_{b\eta} = \frac{\partial \eta}{\partial x} \tau_{bx} + \frac{\partial \eta}{\partial y} \tau_{by} \tag{14}$$

ここに、 τ_x と τ_y は x と y 方向における掃流力成分であり、以下のものである。

$$\tau_{bx} = \left\{ \tau_y + \rho f_b (u^2 + v^2) \right\} \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}} \tag{15}$$

$$\tau_{by} = \left\{ \tau_y + \rho f_b (u^2 + v^2) \right\} \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}} \tag{16}$$

ここに、 τ_y は降伏応力であり、以下の関係³⁾を用いる。

$$\tau_y = \left(\frac{\bar{c}}{c_*} \right)^{\frac{1}{n}} (\sigma - \rho) \bar{c} g h \cos \theta \tan \phi_s \quad (17)$$

ここに、 n は常数であり、ここでは5を用いる。 f_b は抵抗係数であり、土石流の場合の以下の関係を用いる。

$$f_b = 72\alpha^2, \quad \alpha = \frac{\kappa}{6} \quad (\text{乱流域}) \quad (18)$$

$$f_b = \frac{25}{4} \left\{ k_f \frac{(1-\bar{c})^{\frac{3}{4}}}{\bar{c}^{\frac{2}{3}}} + k_d \frac{\sigma}{\rho} (1-e^2) \bar{c}^{-\frac{1}{3}} \right\} \left(\frac{h}{d} \right)^{-2} \quad (\text{層流域})^3 \quad (19)$$

ここに、 $k_f=0.16$, $k_d=0.0828$, e は粒子の反発係数、 d は土砂の平均粒径である。河床位の時間変化は以下のようなになる。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{z_b}{J} \right) = -\frac{E}{c_* J} \quad (20)$$

ここに、 z_b は河床位である。

<参考文献>

- 1) Hiroshi Takebayashi, Masaharu Fujita, Koichiro Ohgushi: Numerical modeling of debris flows using basic equations in generalized curvilinear coordinate system and its application to debris flows in Kinryu River Basin in Saga City, Japan, Journal of Hydrology, 615, Part A, 128636, 2022.
- 2) Egashira, S., Ashida, K., 1992. Unified view of the mechanics of debris flow and bed-load, in: Stud. Appl. Mech. Elsevier 31, 391-400.
- 3) 江頭進治, 伊藤隆郭: 土石流の数値シミュレーション, 日本流体力学会数値流体力学部門Web会誌, 第12巻, 第2号, pp. 33-43, 2004.

III. 計算条件

この章では、Morpho2DH ソルバーの計算条件について、iRIC の計算条件の設定ダイアログを示しながら説明します。

III.1 計算の種類とデータ出力時間等の設定

計算時間などの各種条件を設定します。

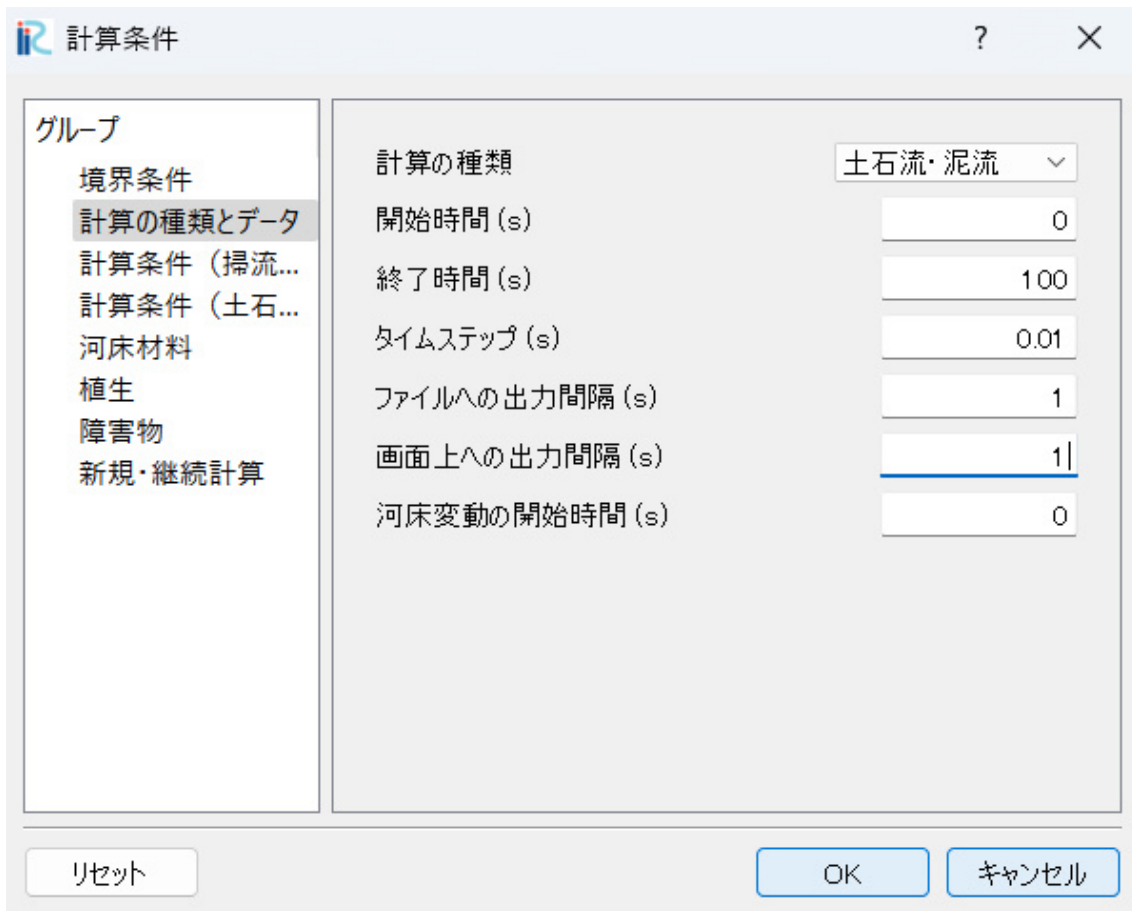


図 III-1 計算の種類とデータの設定画面

表 III-1 計算の種類とデータの設定の説明

#	項目	設定方法	注意事項
1	計算の種類	水の流れの計算のみを行う[流れのみ]と掃流砂・浮遊砂による河床変動計算を行う[掃流砂・浮遊砂], 土石流・泥流による河床変動計算を行う[土石流・泥流]のいずれかを選択します。	
2	開始時間(s)	計算を開始する時間を設定。	単位は秒。
3	終了時間(s)	計算を終了する時間を設定。	単位は秒。
4	タイムステップ(s)	タイムステップ Δt を設定。	単位は秒。CFL 条件を満たす必要があります。

			す。ある程度試行錯誤によりこの値を設定する必要がある。
5	ファイルへの出力間隔(s)	ファイルにデータを出力する時間間隔を設定。	単位は秒。時間的になめらかな動画を作成したいときは、短い出力間隔に設定する方が良いです。
6	画面上への出力間隔(s)	画面上への計算条件を出力する時間間隔を設定。	単位は秒。あまり短い時間間隔で出力させると、計算が遅くなることがあります。
7	河床変動の開始時間(s)	河床変動を開始する時間を設定します。土石流・泥流の計算では0秒とします。	

III.2 計算条件の設定

流砂に関する各種条件を設定します。

図 III-2 計算条件の設定画面

表 III-2 計算条件の設定の説明

#	項目	設定方法	注意事項
1	土砂濃度	濃度の時空間的な変化を考慮する場合は[変化]を選択し、考慮しない場合は[一定]を選択する。	
2	土砂濃度の値	[土砂濃度]で[一定]を選択した場合に入力する。	
3	水の密度	水の密度を入力。水温 20 度で 1 程度の値となる。	単位は g/cm^3 。
4	土砂の密度	土砂の平均密度を入力。真砂土などであれば 2.65 程度の値となる。	単位は g/cm^3 。
5	静止堆積濃度	0.54~0.8 程度の値となる。	
6	液体として振る舞う土砂の割合	液体として振る舞う微細土砂の割合を入力する。	0.2mm 程度以下ぐらいの土砂の割合が一つの目安。
7	最小流動深(m)	土石流・泥流の最小の深さを入力する。	単位は m。
8	土砂の内部摩擦角 (degree)	対象とした土砂の内部摩擦角を入力する。	単位は degree。
9	層流層の厚さ	層流層の厚さの時空間的な変化を考慮するかしないかを選択する。	
10	層流層の厚さの比	直前の[層流層の厚さ]で[一定]を選択	

		した場合に、全流動層に対する層流層の厚さの比を入力する。	
11	抵抗係数	乱流域の抵抗係数を泥流の流動の状況を見ながら決定し、72 程度の値を設定します。	
12	固定床高さ	砂防ダムなどの浸食されない河川・砂防構造物が存在する場合に[使用する]を選択します。[使用する]を選択するときは、固定床高さ領域のポリゴンを設定し、固定床高さを設定する必要があります。	

III.3 河床材料の設定

河床材料に関する各種条件を設定します。

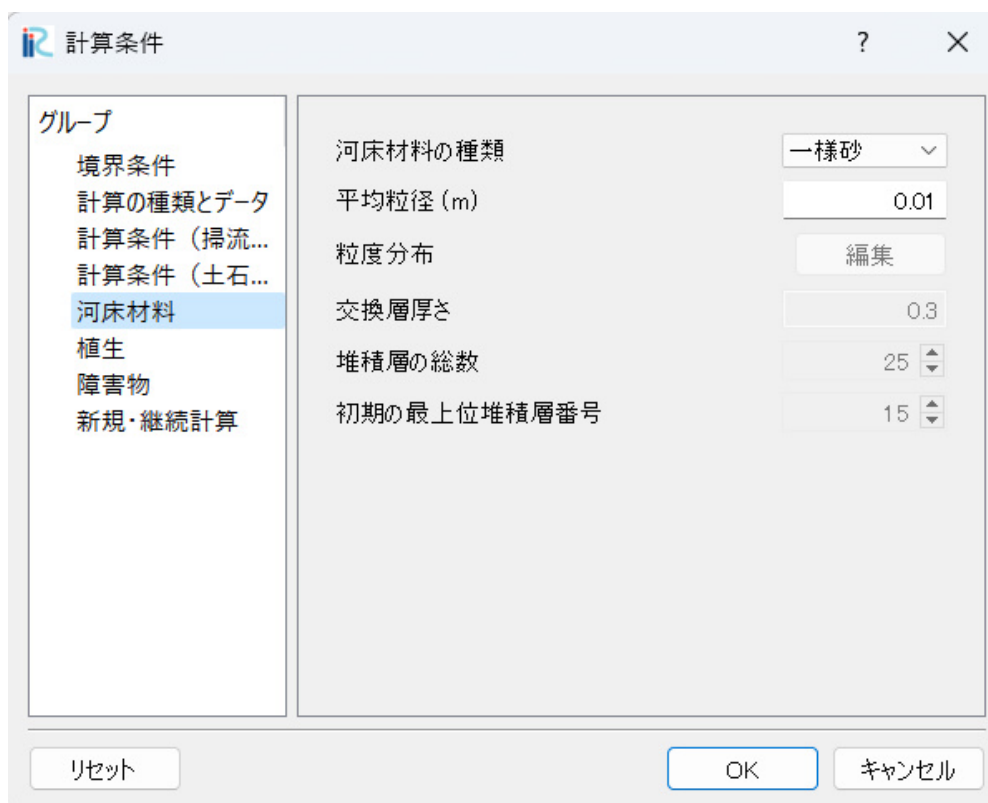


図 III-3 河床材料の設定画面

表 III-3 河床材料の設定の説明

#	項目	設定方法	注意事項
1	河床材料の種類	土石流・泥流の計算では[一様砂]を選択します。	
2	平均粒径(m)	液化しない土砂の平均粒径を入力。	単位は m.

III.4 植生の設定

植生に関する各種条件を設定します。なお、本機能は現時点では流れのみの計算、掃流砂・浮遊砂を対象とした河床変動計算のみ有効な機能です。

The screenshot shows a software window titled '計算条件' (Calculation Conditions). On the left, there is a sidebar with a 'グループ' (Group) list containing: '境界条件', '計算の種類とデータ', '計算条件 (掃流砂・浮遊砂)', '計算条件 (土石流・泥流)', '河床材料', '植生' (highlighted), '障害物', and '新規・継続計算'. The main area on the right contains three settings: '植生密生度' (Vegetation Density) with a dropdown menu set to '使用しない' (Do not use), '植生高さ' (Vegetation Height) with a dropdown menu set to '使用しない' (Do not use), and '植生流失浸食深(m)' (Vegetation Erosion Depth) with a text input field containing '0.3'. At the bottom, there are three buttons: 'リセット' (Reset), 'OK', and 'キャンセル' (Cancel).

図 III-4 植生の選択画面

表 III-4 植生の設定に関する説明

#	項目	設定方法	注意事項
1	植生密生度	植生を考慮するときに[使用する]を選択肢、植生密生度データを読み込む。植生密生度を設定する領域のポリゴンを作成し、植生密生度の値を入力する必要があります。	植生を考慮するときは必ず[使用する]を選択する。
2	植生高さ	植生の高さデータを読み込むか読み込まないかを選択する。[使用する]を選択するときは、植生高さを設定する領域のポリゴンを作成し、植生高さの値を入力する必要があります。植生を考慮する場合においても植生の高さデータが無い場合はデータを設定する必要はありません。	植生の高さデータを読み込まない場合は、植生の高さは無限大となり、植生は常に排水状態で計算されます。
3	植生流失浸食深	地盤の浸食による植生流出の条件。初期河床からこの値以上に地盤が浸食されると植生が流出したと見なし、植生密生度がゼロとなります。	

III.5 障害物の設定

障害物に関する各種条件を設定します。

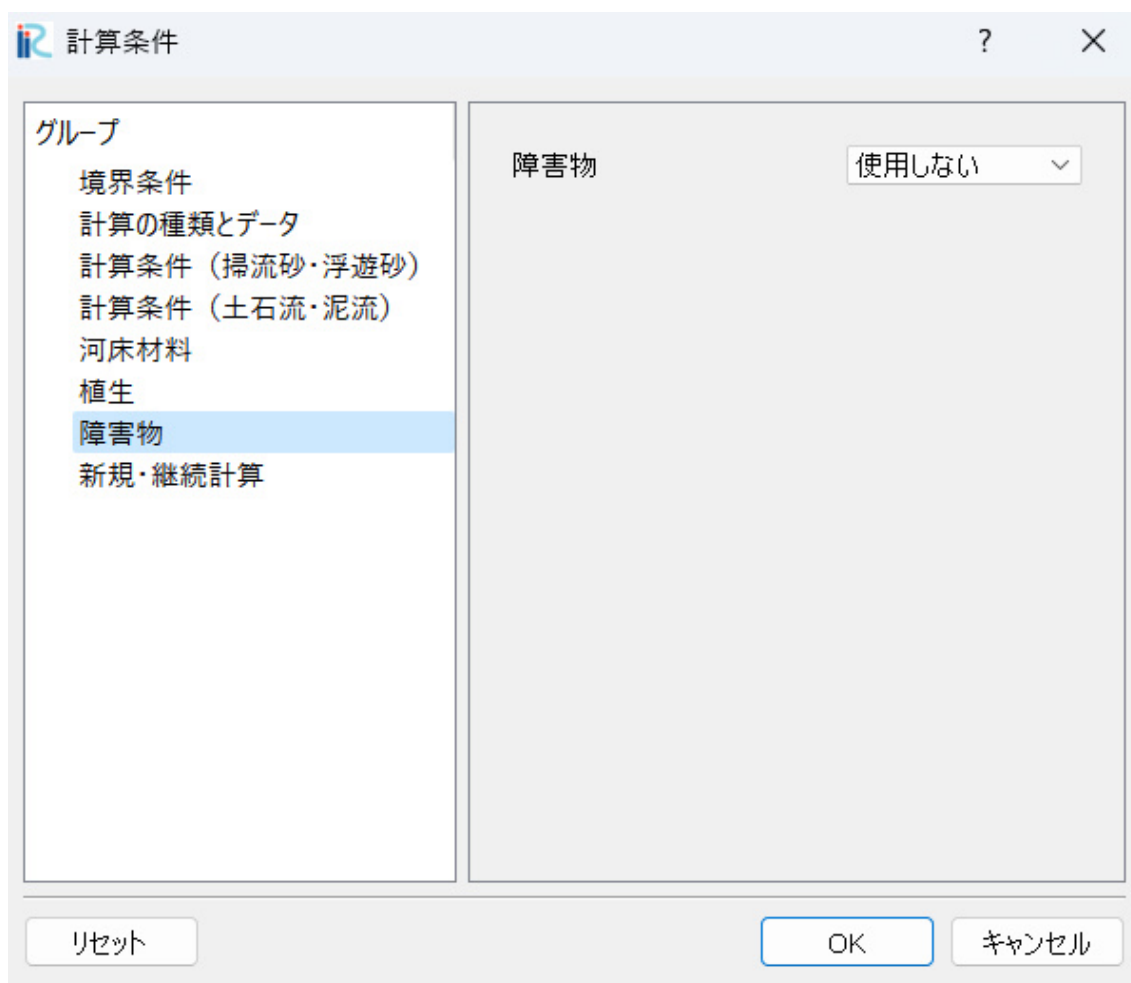


図 III-5 障害物の選択画面

表 III-5 障害物設定に関する説明

#	項目	設定方法	注意事項
1	障害物	障害物を考慮するかしないかを選択する。障害物を考慮するときに[使用する]を選択します。[使用する]を選択するときは、障害物を設定する領域のポリゴンを作成する必要があります。	

III.6 新規・継続計算の設定

新規・継続計算に関する各種条件を設定します。本機能は現時点では流れのみの計算，掃流砂・浮遊砂を対象とした河床変動計算のみ有効な機能です。

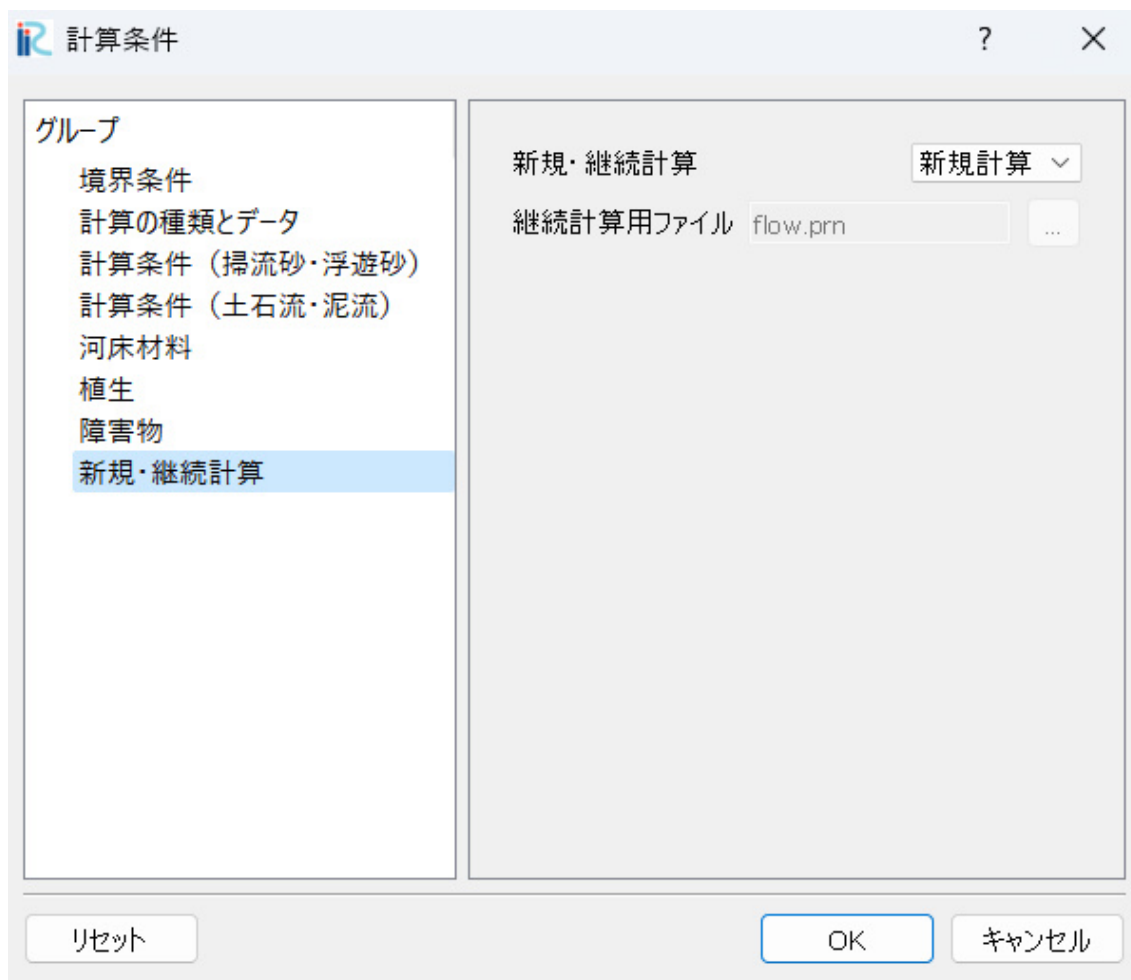


図 III-6 新規・継続計算の情報の設定画面

表 III-6 新規・継続計算の情報の説明

#	項目	設定方法	注意事項
1	新規・継続計算	新規の計算の時は，[新規計算]を選択して下さい。以前，途中まで計算を行い，その続きから計算を行うときは，[継続計算]を選択して下さい。	
2	継続計算用ファイル	継続計算の時，以前計算した時のcgns ファイルを読み込んで下さい。	