有限要素法を用いた
流況・拡散計算（生態系モデル）
可変境界層マルチモデル（仮称）

有限会社　蒲生インテリジェントテクノロジー

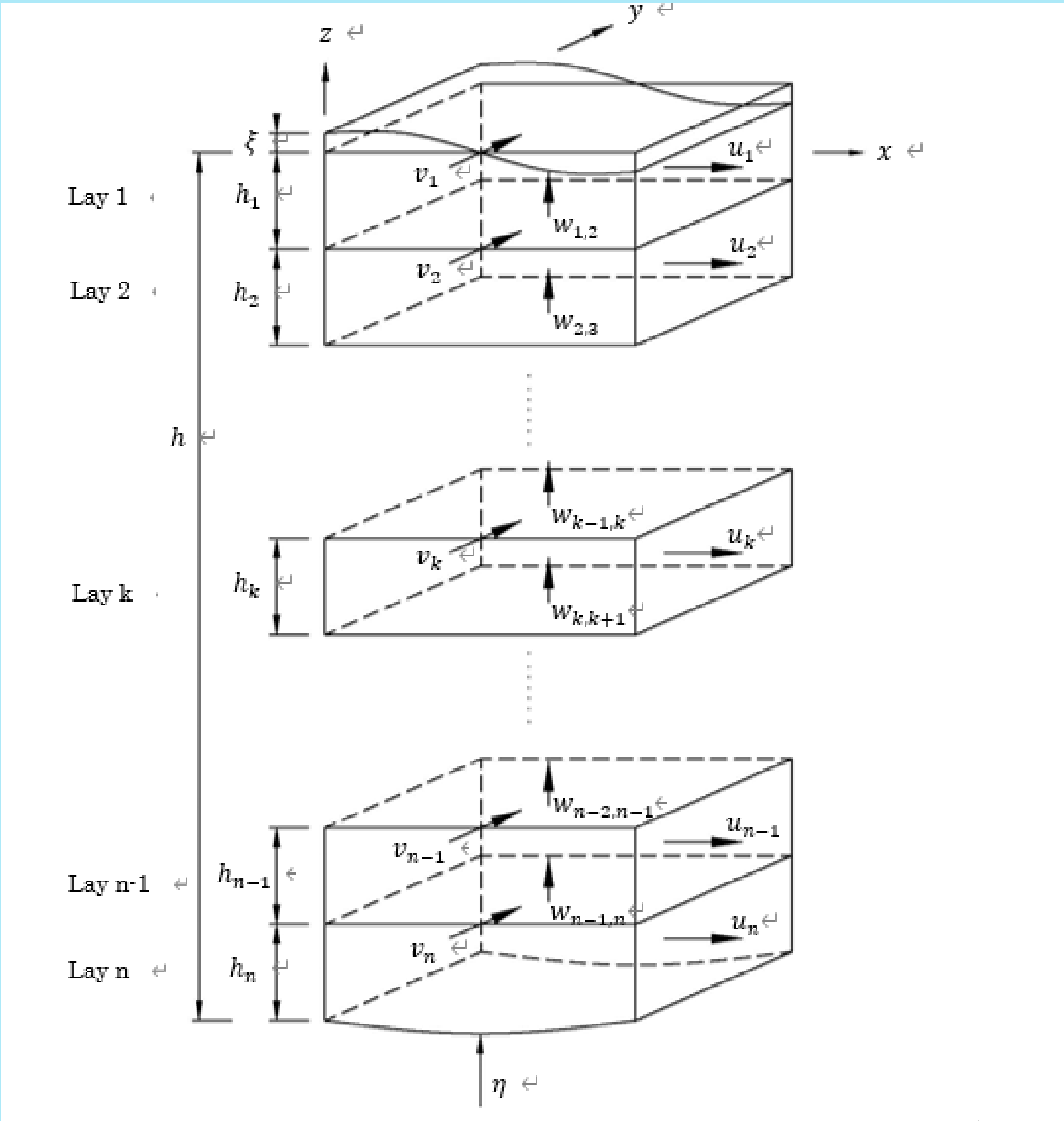
どのようなプログラム？

- 平面2次元多層レベルモデルがベースモデル
- 鉛直方向の層分割を変動させることができる
- 海域、河口域、河川中上流部すべてに適用可能

何ができるプログラム？

- 流況計算
- 密度流計算
- 物質拡散（生態系モデル）
- 河床変動計算

一般的な平面2次元多層レベルモデル



- 各層の層厚(h_k)は固定
- 境界層は水平

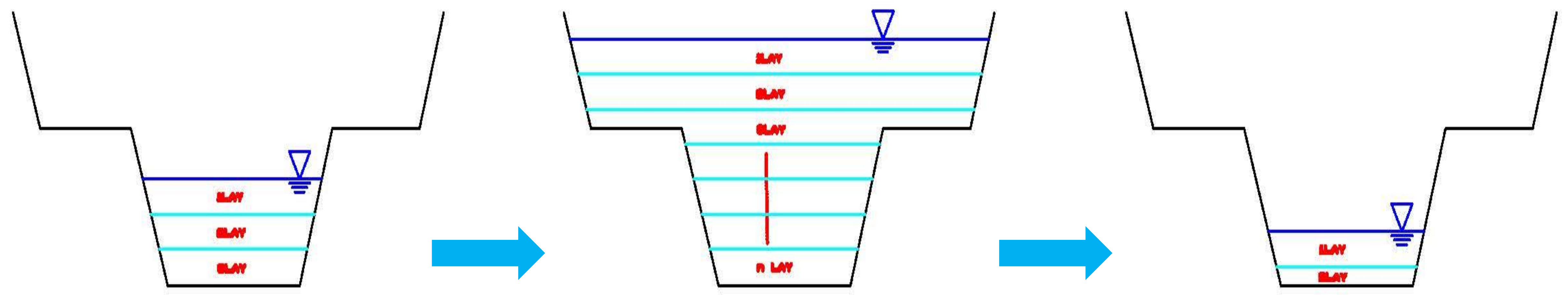
表層の層厚(h_1)　>　水面変動の振幅(ξ)

あるいは

水深(h)　≫　水面変動の振幅(ξ)

の場合は適用可能

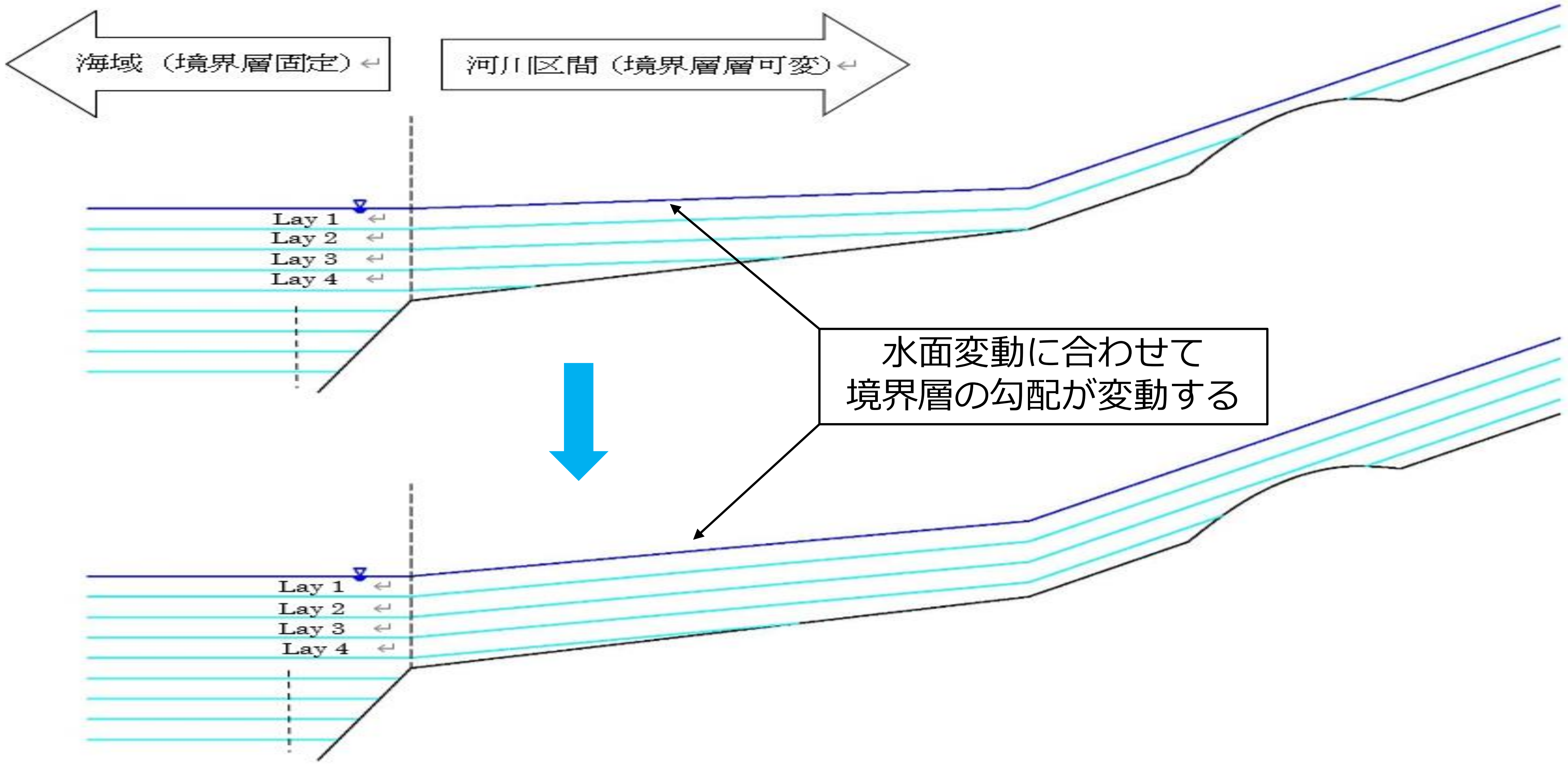
可変境界層モデルの特徴　①



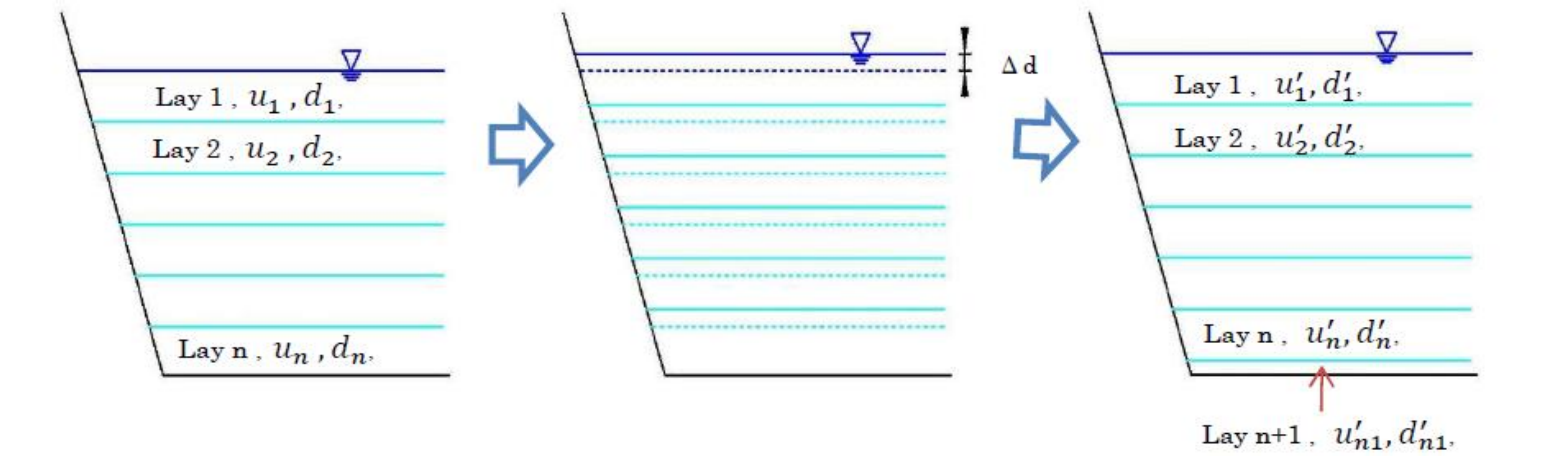
水面変動に合わせて
・境界層の数
・境界層の位置（高さ）
が変動が変動する

水深　≅　水面変動幅
の場合でも適用可能

可変境界層モデルの特徴　②



可変境界層モデルの考え方①　（水位上昇時）



$u_1' = u_1$
$u_2' = \{u_1 * \Delta d + u_2(h_1 - \Delta d)\}/h_2$

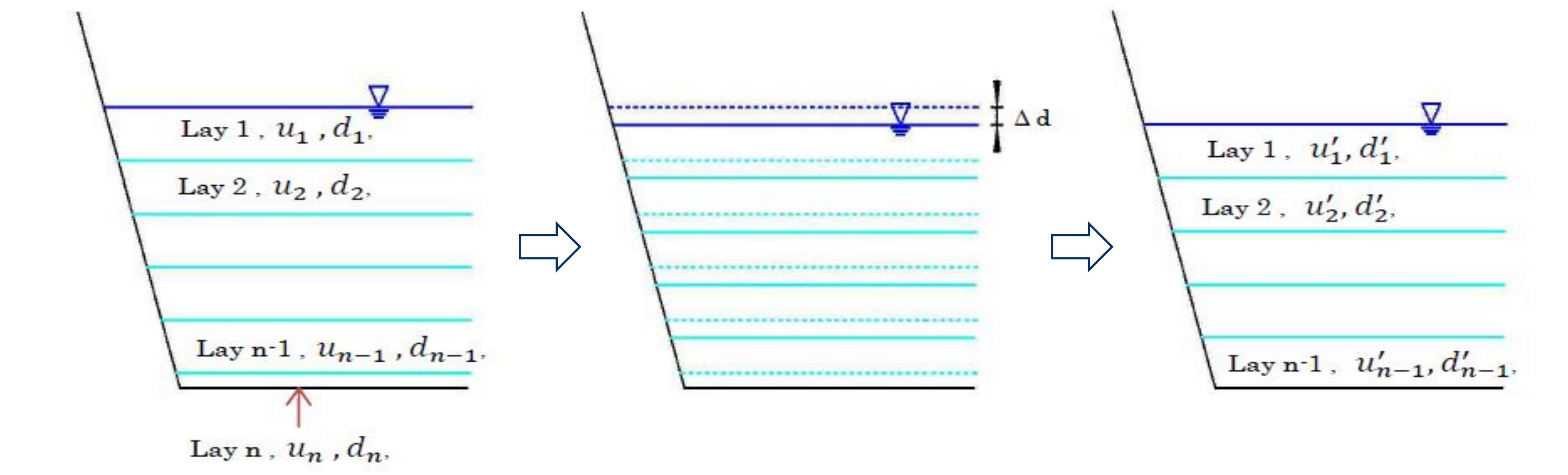
$u_n' = (u_{n-1} * \Delta d + u_n * d_n)/(\Delta d + d_n)$
$d_n' = \Delta d + d_n$

$\Delta d + d_n > h_n$　の場合

$u_{n+1} = u_n'$
$d_n' = h_n$
$d_{n+1} = (\Delta d + d_n) - h_n$

h_1～h_n　：1~n層の層厚
d_n, d_{n+1}　：n,n+1層（最下層）の層厚
$(d_n, d_{n+1} \leq h_n, h_{n+1})$

可変境界層モデルの考え方②　（水位下降時）



$$u_1' = \{u_1 * (h_1 - \Delta d) + u_2 * \Delta d\}/h_1$$
$$u_2' = \{u_2 * (h_2 - \Delta d) + u_3 * \Delta d\}/h_2$$

$d_n - \Delta d \geq 0$　の場合

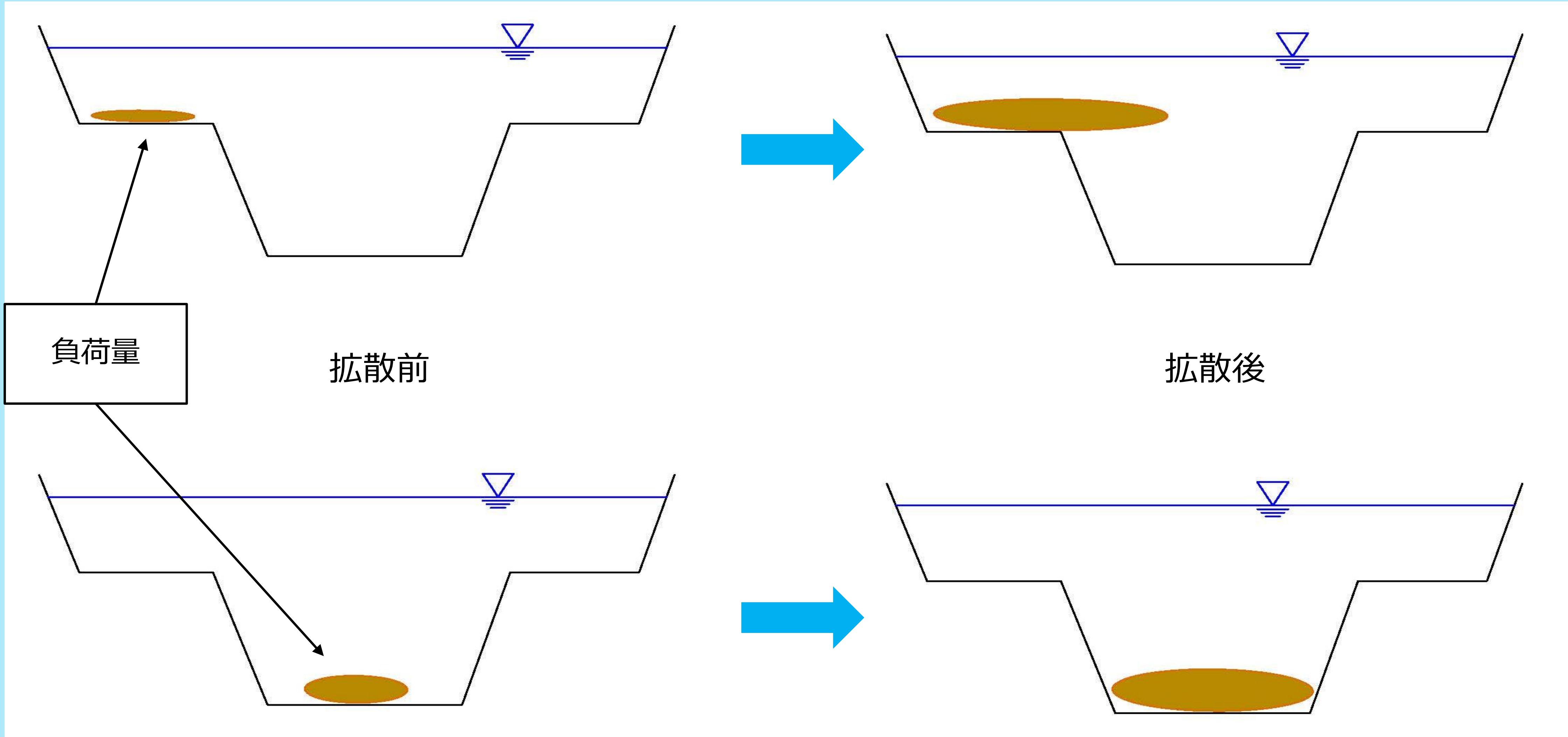
$$u_{n-1}' = \frac{u_{n-1} * (h_{n-1} - \Delta d) + u_n * \Delta d}{h_{n-1}}$$
$$u_n' = u_n$$
$$d_n' = d_n - \Delta d$$

$d_n - \Delta d < 0$　の場合

$$d_{n-1}' = (h_{n-1} + d_n) - \Delta d$$
$$u_{n-1}' = \frac{(u_{n-1} * \Delta d + u_n * d_n)}{d_{n-1}'}$$
$$u_n' = 0$$
$$d_n' = 0$$

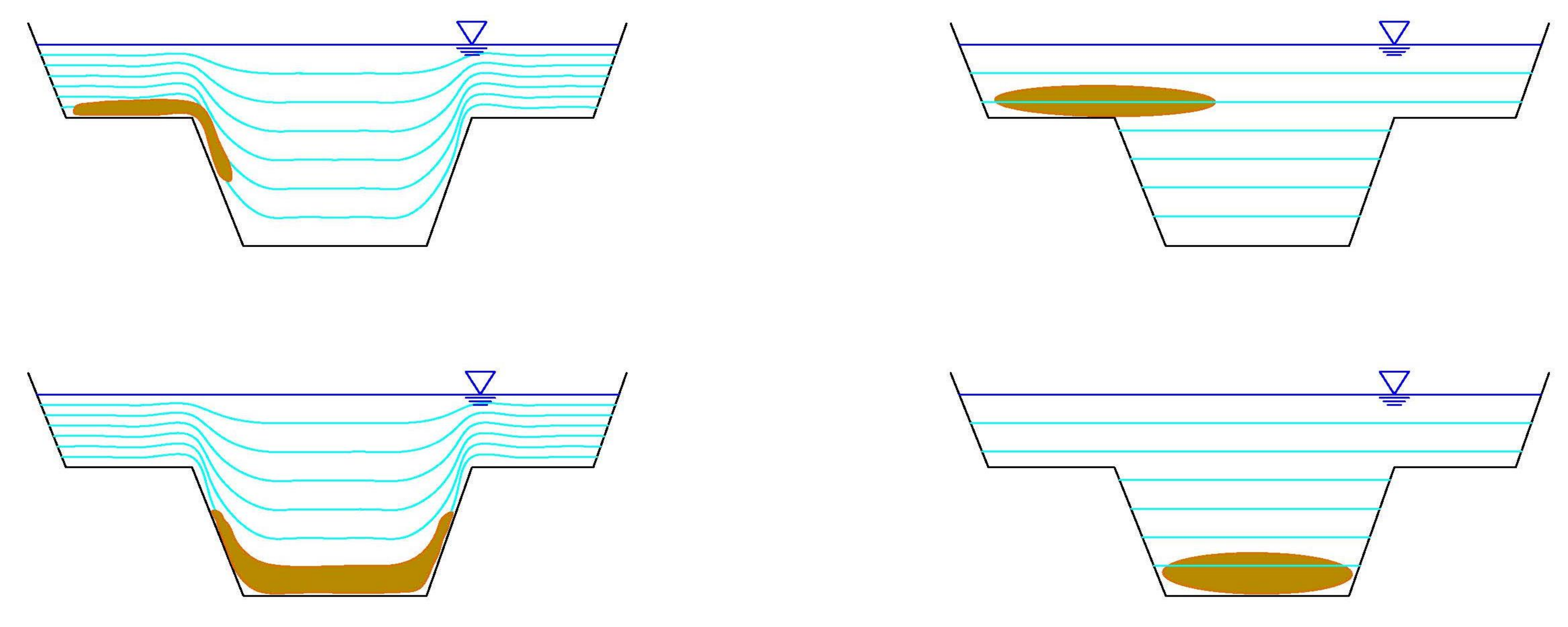
発想の出発点　①

一般の拡散イメージ



発想の出発点　②

Mflow_03（非公開モデル）との比較（イメージ）



Mflow_03での拡散計算結果
（イメージ）

可変境界層モデルでの拡散計算結果
（イメージ）

連続式

第１層（表層）

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\{(\xi + h_1)u_1\} + \frac{\partial}{\partial y}\{(\xi + h_1)v_1\} - w_{1,2} = 0$$

第k層 (2～n-1層)

$$\frac{\partial}{\partial x}(h_k u_k) + \frac{\partial}{\partial y}(h_k v_k) + w_{k-1,k} - w_{k,k+1} = 0$$

第n層（底層）

$$\frac{\partial}{\partial x}(h_n u_n) + \frac{\partial}{\partial y}(h_n v_n) + w_{n-1,n} = 0$$

t ： 時間(s)
ξ ： 水位変動量(m)
h_k ： 第k層の層厚(m) （k=1, 2, …,n)
u_k ： 第k層の 方向の流速成分(m/s) （k=1, 2, …,n)
v_k ： 第k層の y 方向の流速成分(m/s) （k=1, 2, …,n)
$w_{k,k+1}$ ： 第k,k+1間の w 方向の流速成分(m/s) （k=1, 2, …,n-1)

運動方程式　（u成分のみ）

第１層（表層）

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} + u_1\frac{\partial u_1}{\partial x} + v_1\frac{\partial u_1}{\partial y} + \frac{w_{12}(u_1-u_2)}{(h_1+\xi)} =$$
$$f v_1 - gI_{x1} - \frac{1}{\rho_{01}}\frac{\partial P_1}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\nu_{x1}\frac{\partial u_1}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y}\nu_{y1}\frac{\partial u_1}{\partial y} + \frac{1}{(h_1+\xi)}\left(\frac{\tau_{sx}}{\rho_1} - \frac{\tau_{ix12}}{\rho_1}\right)$$

第k層（2～n-1層）

$$\frac{\partial u_k}{\partial t} + u_k\frac{\partial u_k}{\partial x} + v_k\frac{\partial u_k}{\partial y} + \frac{w_{k-1,k}(u_{k-1}-u_k)}{h_k} + \frac{w_{k,k+1}(u_k-u_{k+1})}{h_k} =$$
$$f v_k - gI_{xk} - \frac{1}{\rho_{0k}}\frac{\partial P_k}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\nu_{xk}\frac{\partial u_k}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y}\nu_{yk}\frac{\partial u_k}{\partial y} + \frac{1}{h_k}\left(\frac{\tau_{ixk-1,k}}{\rho_k} - \frac{\tau_{ixk,k+1}}{\rho_k}\right)$$

第n層（底層）

$$\frac{\partial u_n}{\partial t} + u_n\frac{\partial u_n}{\partial x} + v_n\frac{\partial u_n}{\partial y} + \frac{w_{n-1,n}(u_{n-1}-u_n)}{h_n} =$$
$$f v_n - gI_{xn} - \frac{1}{\rho_{0n}}\frac{\partial P_n}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\nu_{xn}\frac{\partial u_n}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y}\nu_{yn}\frac{\partial u_n}{\partial y} + \frac{1}{h_n}\left(\frac{\tau_{ixn-1,n}}{\rho_n} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_n}\right)$$

ρ_k	:	第k層の水の密度(Kg/m^3)　(k=1, 2, …,n)
ρ_{0k}	:	第k層の各層の水の平均密度(Kg/m^3)　(k=1, 2, …,n) （各層ごとにブシネスク(Boussinesq)近似を仮定）
P_k	:	第k層の圧力(N)　(k=1, 2, …,n)
g	:	重力加速度(m/s^2)
f	:	コリオリのパラメーター($1/s$)
I_{xn} , I_{yn}	:	境界層のx , y 方向勾配（k=1,2,…,n）
ν_{xk} , ν_{yk}	:	第k層のx , y方向の渦動粘性係数（k=1,2,…,n）
τ_{sx} , τ_{sy} , τ_{bx} , τ_{by}	:	水面、水底でのx , y 方向の剪断力
$\tau_{ixk,k+1}$ $\tau_{iyk,k+1}$	:	第k,k+1層間の境界層でのx , y 方向の剪断力（k=1,2,…,n-1）

密度（水温・塩素量）の拡散方程式

第１層（表層）

$$(h_1+\xi)\frac{\partial T_1}{\partial t} + (h_1+\xi)u_1\frac{\partial T_1}{\partial x} + (h_1+\xi)v_1\frac{\partial T_1}{\partial y} + w_{1,2}(T_1-T_2) =$$
$$(h_1+\xi)\frac{\partial}{\partial x}\varepsilon_{t\_x1}\frac{\partial T_1}{\partial x} + (h_1+\xi)\frac{\partial}{\partial y}\varepsilon_{t\_y1}\frac{\partial T_1}{\partial y} - D_{t\_1,2}(T_1-T_2) + \frac{Q}{\rho_1 C_w}$$

第k層（2～n-1層）

$$h_k\frac{\partial T_k}{\partial t} + h_k u_k\frac{\partial T_k}{\partial x} + h_k v_k\frac{\partial T_k}{\partial y} + w_{k-1,k}(T_{k-1}-T_k) + w_{k,k+1}(T_k-T_{k+1})$$
$$\frac{\partial}{\partial x}\varepsilon_{t\_xk}\frac{\partial T_k}{\partial x} + h_k\frac{\partial}{\partial y}\varepsilon_{t\_yk}\frac{\partial T_k}{\partial y} + D_{t\_k-1,k}(T_{k-1}-T_k) - D_{t\_k,k+1}(T_k-T_{k+1})$$

第n層（底層）

$$h_n\frac{\partial T_n}{\partial t} + h_n u_n\frac{\partial T_n}{\partial x} + h_n v_n\frac{\partial T_n}{\partial y} + w_{n-1,n}(T_{n-1}-T_n) =$$
$$h_n\frac{\partial}{\partial x}\varepsilon_{t\_xn}\frac{\partial T_n}{\partial x} + h_n\frac{\partial}{\partial y}\varepsilon_{t\_yn}\frac{\partial T_n}{\partial y} + D_{t\_n-1,n}(T_{n-1}-T_n)$$

T_k	：第k層の水温(K)または塩素量(‰)（k=1,2,…,n）
ε_{t_xk}，ε_{t_y2}	：第k層の x,y 方向の拡散係数 (m^2/s) （k=1, 2, …,n）
$D_{t,k,k+1}$	：第k,k+1層間の境界層での鉛直混合係数（k=1,2,…,n-1）
Q	：水面における熱量$(cal/m^3/s)$ （水温のみ）
C_w	：水の比熱$(cal/g/K)$ （水温のみ）

密度算出式

$$\rho = 1 + 10^{-3} * \sigma_t$$
$$\sigma_t = \frac{(T-3.98)^2}{503.57}\cdot\frac{T+283.0}{T+67.26} + (\sigma_0+0.1324)\cdot\{1.0 - A_t + B_t(\sigma_0-0.1324)\}$$
$$\sigma_0 = -0.069 + 1.4708\,CL - 0.001570\,CL^2 + 0.0000398\,CL^3$$
$$A_t = T(4.7867 - 0.098185\,T + 0.0010843\,T^2)\cdot 10^{-3}$$
$$B_t = T(10.030 - 0.0816\,T + 0.01667\,T^2)\cdot 10^{-6}$$

物質の拡散方程式

第１層（表層）

$$(h_1+\xi)\frac{\partial C_1}{\partial t} + (h_1+\xi)u_1\frac{\partial C_1}{\partial x} + (h_1+\xi)v_1\frac{\partial C_1}{\partial y} + w_{1,2}(C_1-C_2) =$$
$$(h_1+\xi)\frac{\partial}{\partial x}\varepsilon_{c\_x1}\frac{\partial C_1}{\partial x} + (h_1+\xi)\frac{\partial}{\partial y}\varepsilon_{c\_y1}\frac{\partial C_1}{\partial y} - D_{c\_1,2}(C_1-C_2) + F_{p1}$$

第k層（2～n-1層）

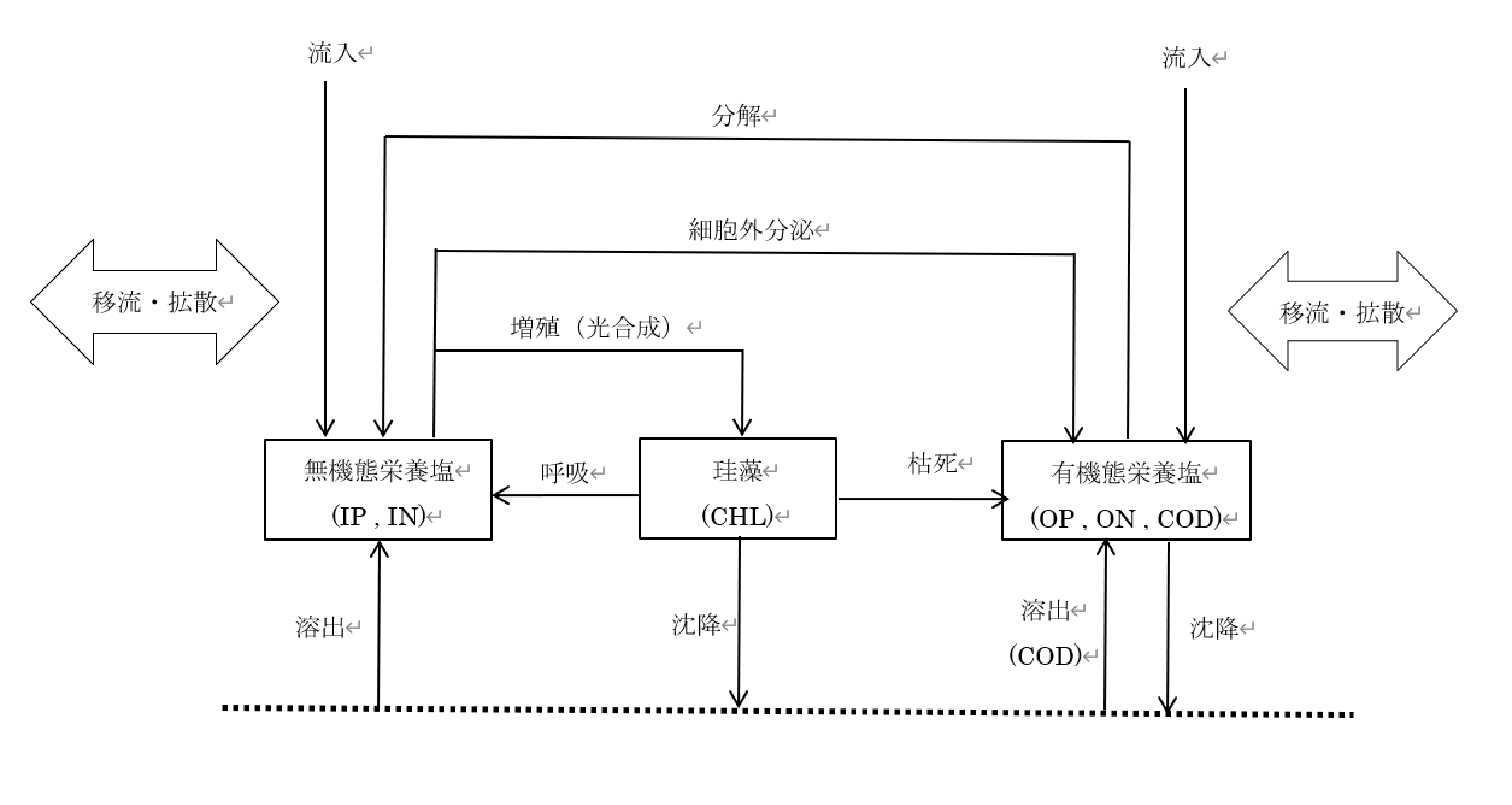
$$h_k\frac{\partial C_k}{\partial t} + h_k u_k\frac{\partial C_k}{\partial x} + h_k v_k\frac{\partial C_k}{\partial y} + w_{k-1.k}(C_{k-1}-C_k) + w_{k,k+1}(C_k-C_{k+1}) =$$
$$h_k\frac{\partial}{\partial x}\varepsilon_{c\_xk}\frac{\partial C_k}{\partial x} + h_k\frac{\partial}{\partial y}\varepsilon_{c\_yk}\frac{\partial C_k}{\partial y} + D_{c\_k-1,k}(C_{k-1}-C_k) - D_{c\_k,k+1}(C_k-C_{k+1}) + F_{pk}$$

第n層（底層）

$$h_n\frac{\partial C_n}{\partial t} + h_n u_n\frac{\partial C_n}{\partial x} + h_n v_n\frac{\partial C_n}{\partial y} + w_{n-1,n}(C_{n-1}-C_n) =$$
$$h_n\frac{\partial}{\partial x}\varepsilon_{c\_xn}\frac{\partial C_n}{\partial x} + h_n\frac{\partial}{\partial y}\varepsilon_{c\_yn}\frac{\partial C_n}{\partial y} + D_{c\_n-1,n}(C_{n-1}-C_n) + F_{pn}$$

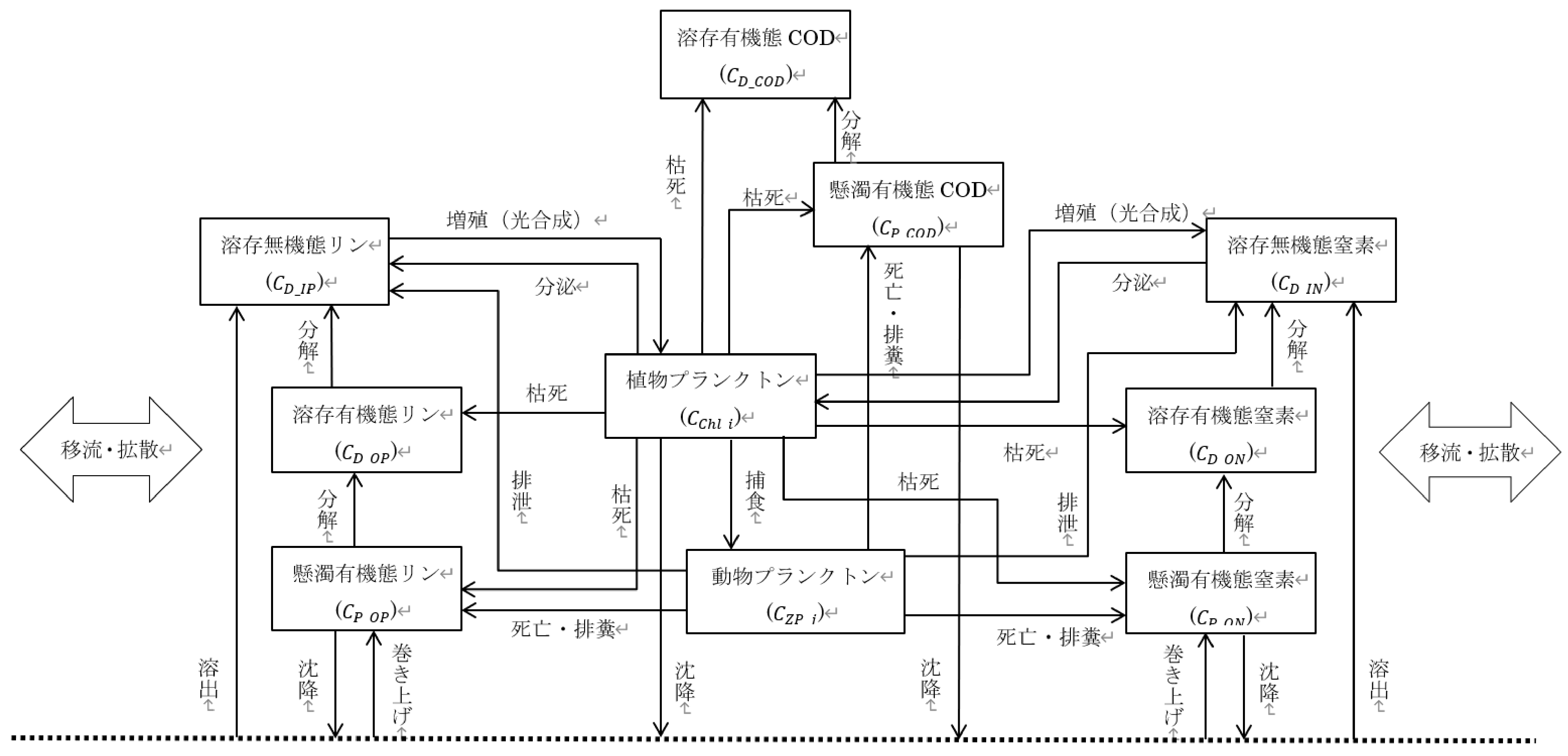
C_k ：第k層の物質濃度(mg/l)（k=1,2,…,n）
F_{pk} ： 第k層の内部生産量 （k=1, 2, …, n）
ε_{c_xk}，ε_{c_y2} ：第k層の x, y 方向の拡散係数 (m^2/s) （k=1, 2, …,n）
$D_{c,k,k+1}$ ：第k,k+1層間の境界層での鉛直混合係数（k=1,2,…,n-1）

内部生産項①（一般モデル）



一般モデルの物質循環

内部生産項②（詳細モデル）



詳細モデルの物質循環

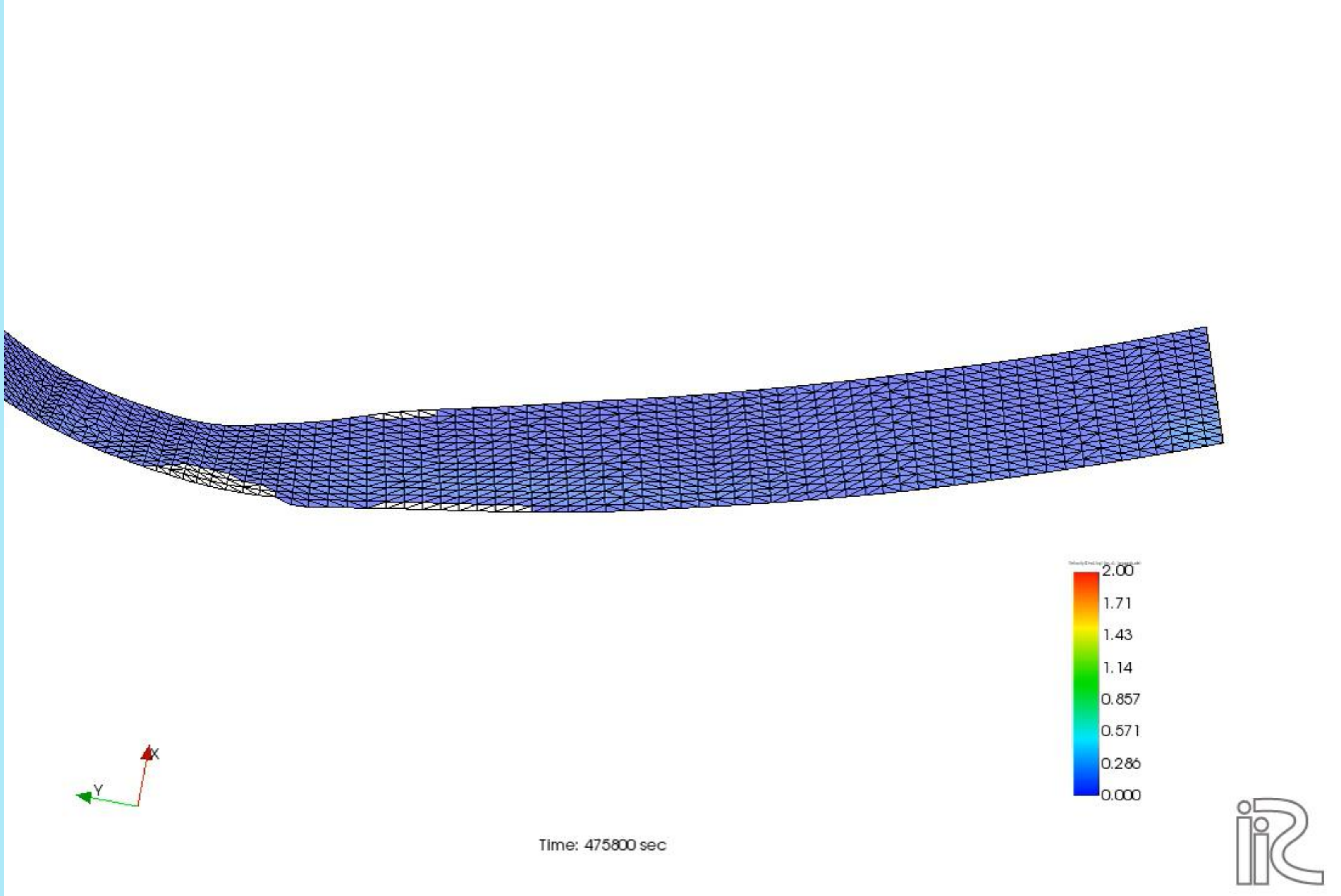
河床変動

- 掃流砂
  芦田・道上式
  Meyer-Peter-Muller 式

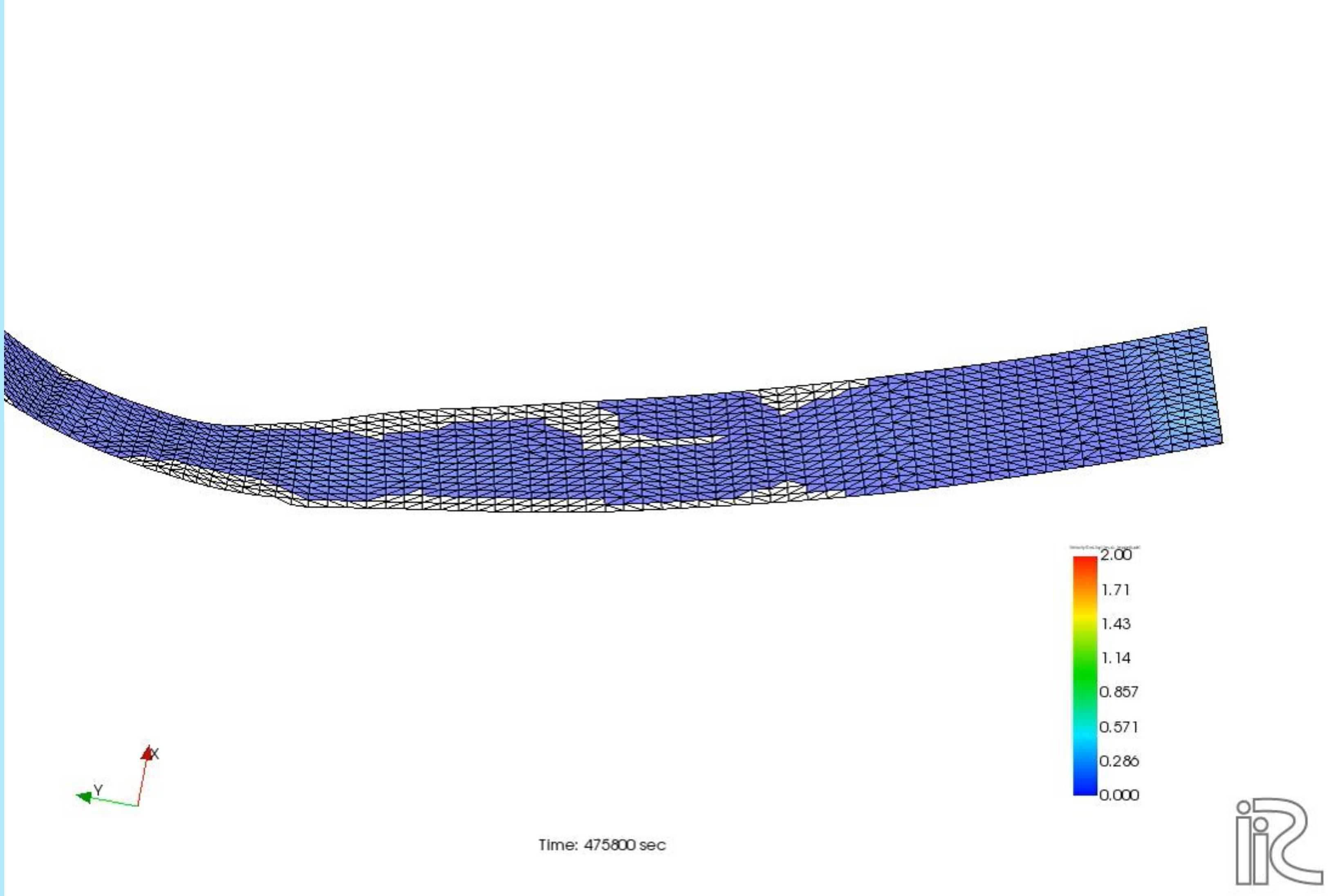
- 浮遊砂
  巻き上げ速度　：　板倉・岸式
  基準点濃度　：　Lane-Kalinske 式

- 斜面崩壊
  関根による斜面崩壊モデル

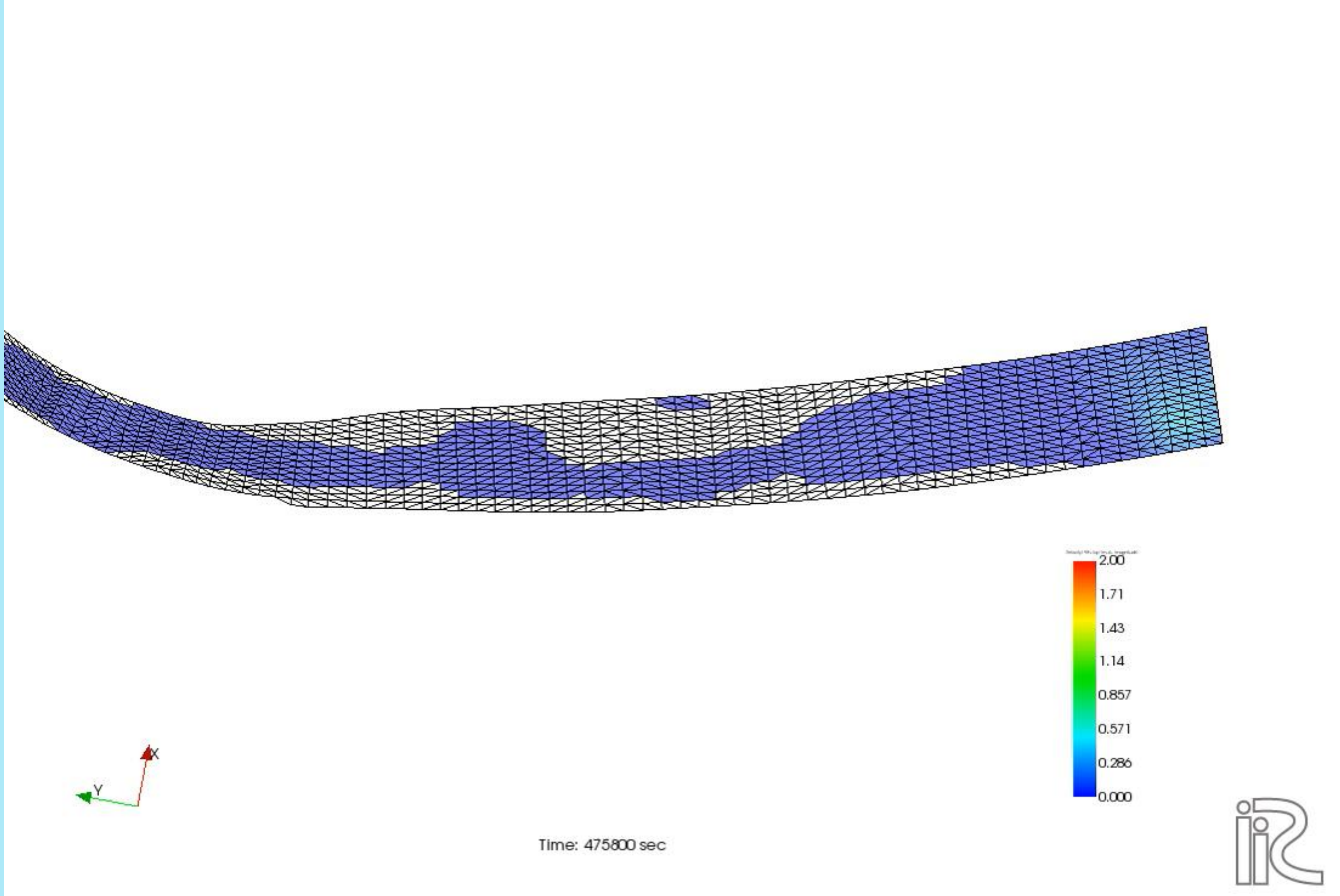
計算結果出力事例　①　（第2層の流速）



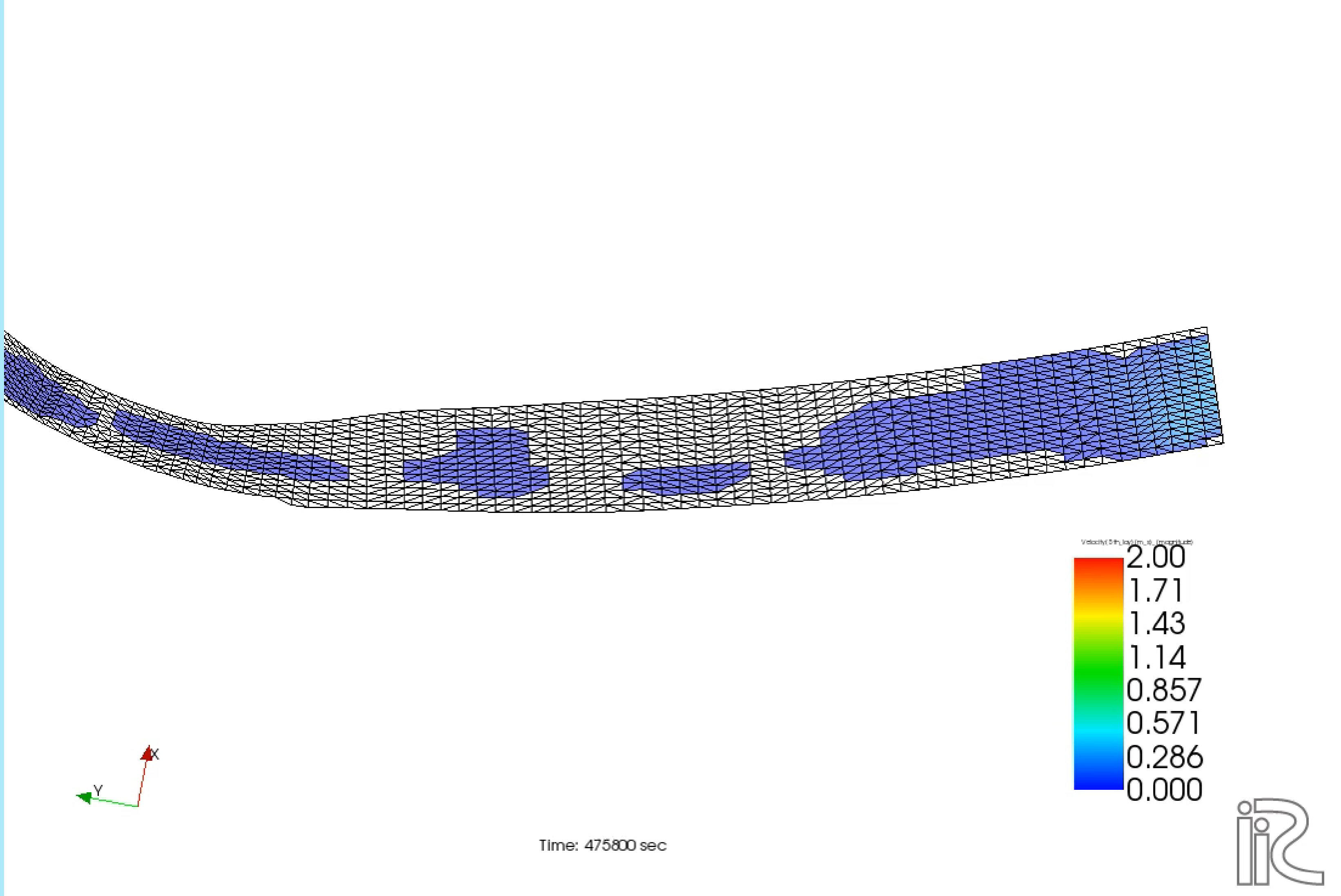
計算結果出力事例　②　（第3層の流速）



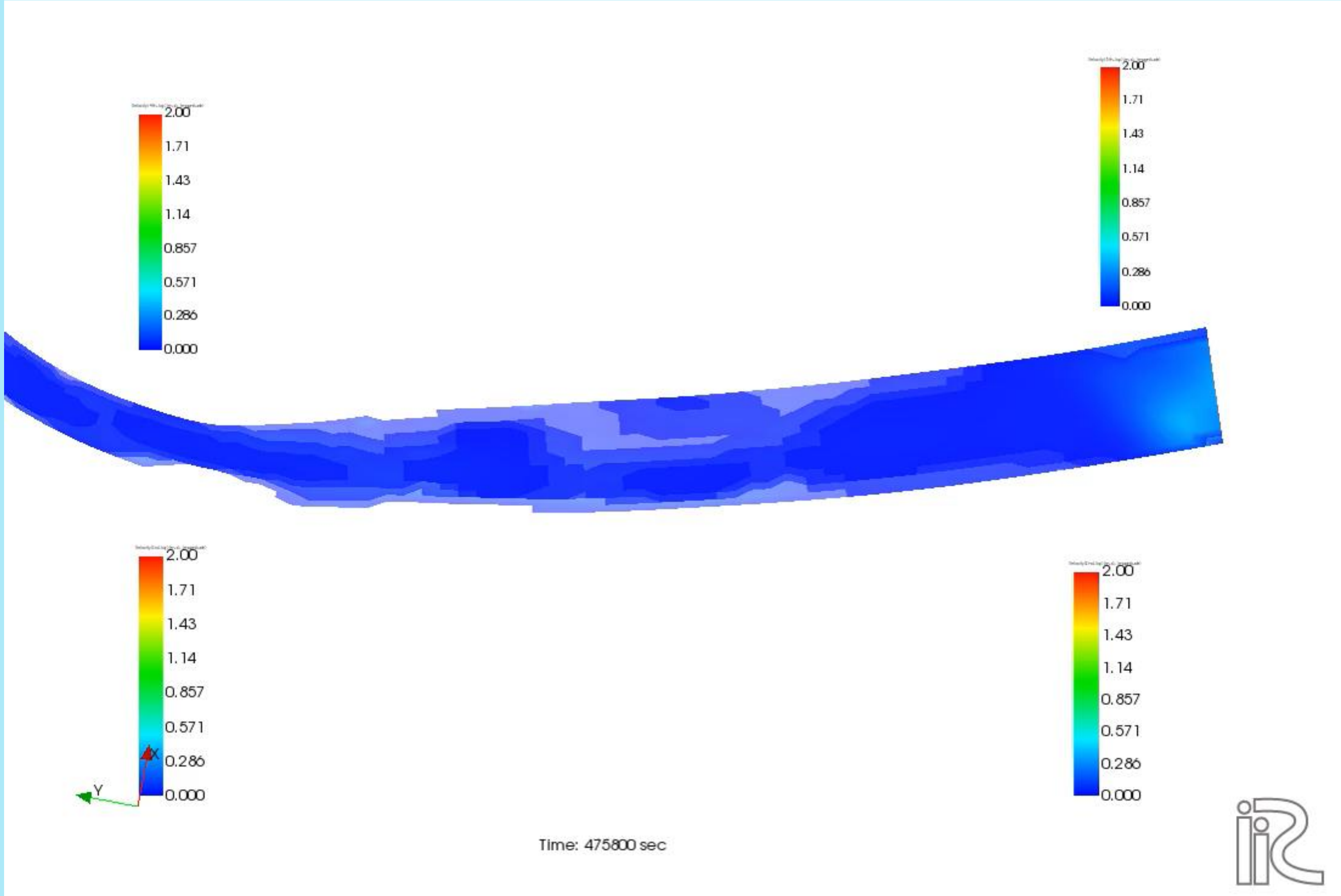
計算結果出力事例　③　（第4層の流速）



計算結果出力事例　④　（第5層の流速）



計算結果出力事例　⑤　（第2～5層の流速の重ね合わせ）



お願い

１．モニター募集

　可変境界層モデルを使用して検証計算をしてくださる方にプログラムを提供します。
　計算結果はプログラムの向上に役立てるため、どのような結果であっても蒲生まで連絡してくださるようお願いいたします。
　なお、計算条件の設定が複雑なためMflow_02 で分合流の計算ができる方が望ましいです。

２．英訳してくださる方募集

　今後 iRIC での公開準備としてマニュアルを整備していく予定ですが、マニュアル英訳をしてくださる方を募集いたします。プログラムが多岐にわたる内容のため、一部分の英訳でも構いません。

３．協力者募集

　プログラム開発に協力してくださる方、考え方、たとえば拡散計算部分についてアドバイスしてくださる方がいらっしゃればご連絡ください。
　また、今後のプログラム開発に対して出資してくださる方も歓迎いたしますのでご連絡ください