

環境水理学私史と 水工学への期待

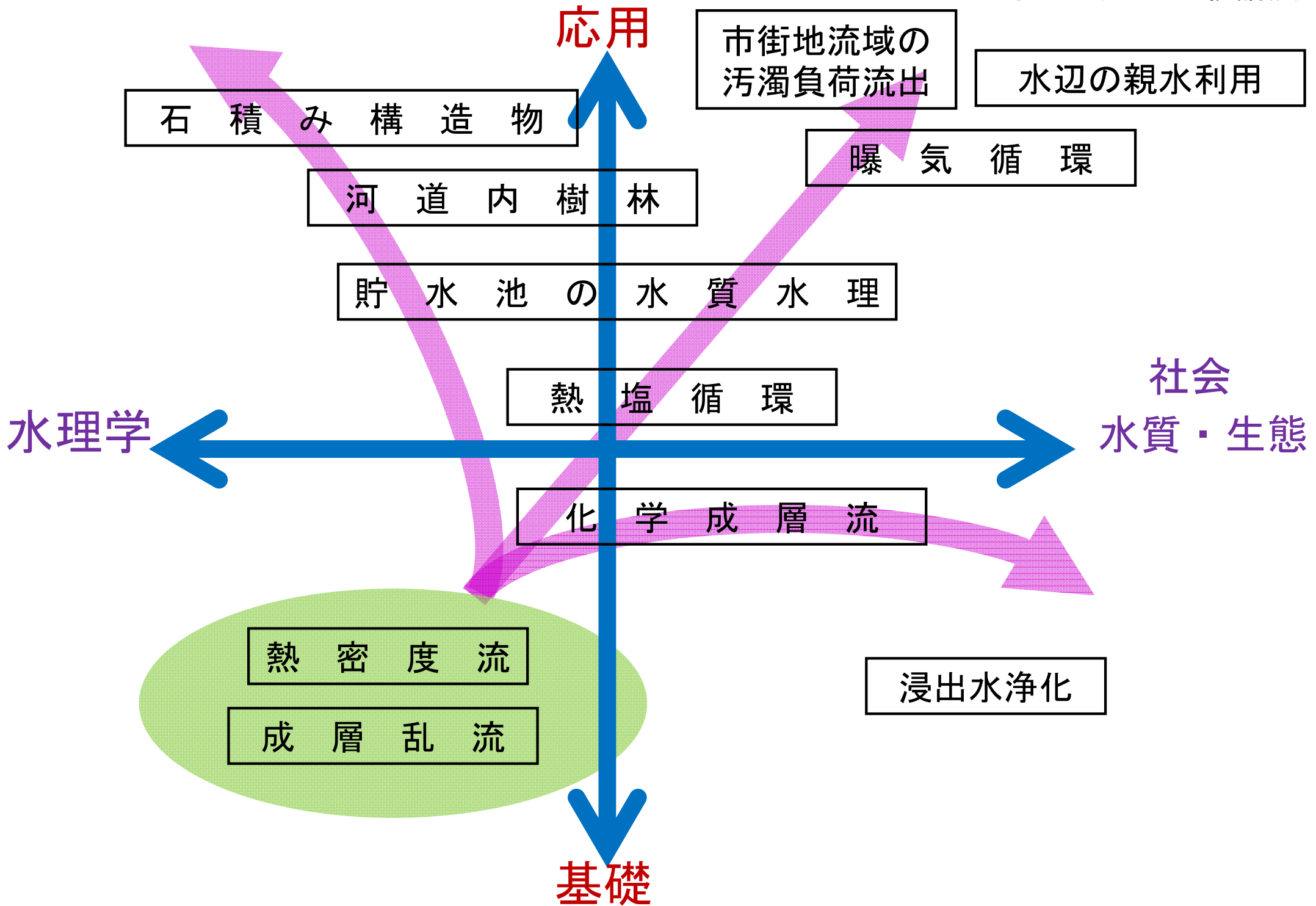
法政大学デザイン工学部
都市環境デザイン工学科 道奥康治

令和5年10月27日(金), 18:00-20:00

Curriculum Vitae

道奥康治（みちおくこうじ）

- 1977年3月 大阪大学工学部土木工学科卒業
- 1979年3月 同大学院工学研究科前期課程土木工学専攻修了
- 1979年4月 大阪大学工学部助手（土木工学科）
- 1988年4月 神戸大学助教授（工学部土木工学科）
- 2001年5月 神戸大学教授（工学部建設学科）
- 2014年4月 法政大学教授（都市環境デザイン工学科）
- 現在に至る



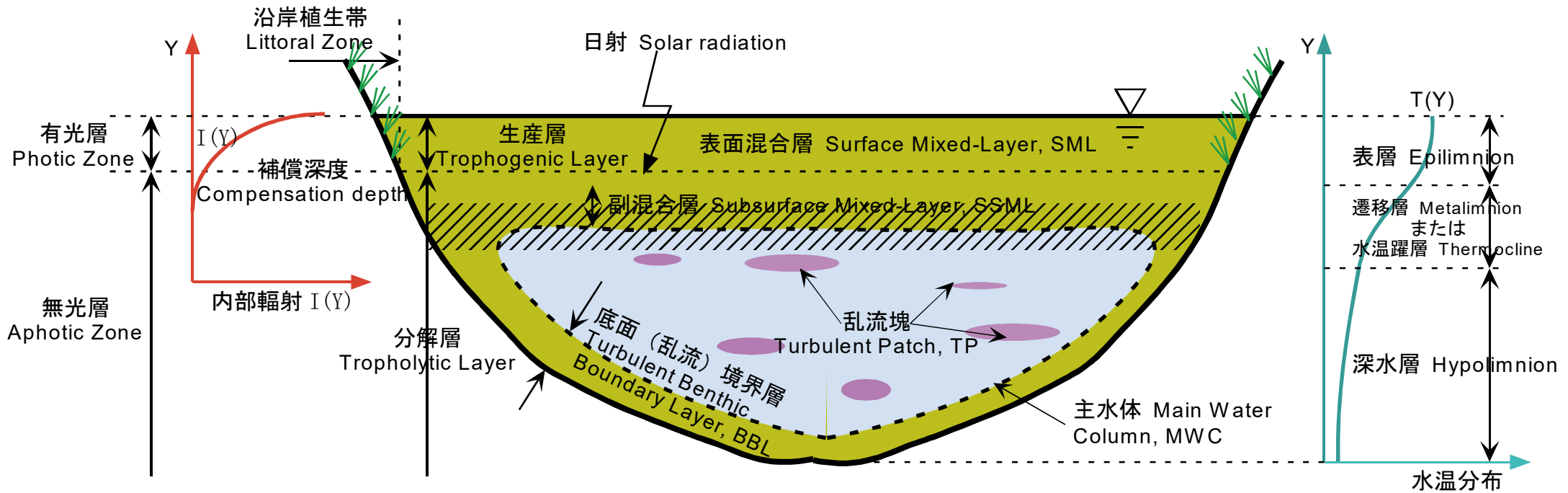
本日の話題

- 内部砕波
- 密度成層の鉛直混合（受熱・放熱時）
- 三層系の取水流
- 乱流モデルによる鉛直混合解析
- 熱塩対流（二重拡散）
- 対流混合層の秩序構造
- 貯水池表層の自然対流
- 成層型貯水池の内部波解析
- 富栄養貯水池の部分循環特性
- 貧酸素深水層の熱塩対流
- 化学成層流
- 石積み堰の環境水理
- 石積み水制
- 河道内植生
- 水工学への期待

本日の話題

- **内部砕波**
- 密度成層の鉛直混合（受熱・放熱時）
- 三層系の取水流
- 乱流モデルによる鉛直混合解析
- 熱塩対流（二重拡散）
- 対流混合層の秩序構造
- 貯水池表層の自然対流
- 成層型貯水池の内部波解析
- 富栄養貯水池の部分循環特性
- 貧酸素深水層の熱塩対流
- 化学成層流
- 石積み堰の環境水理
- 石積み水制
- 河道内植生
- 水工学への期待

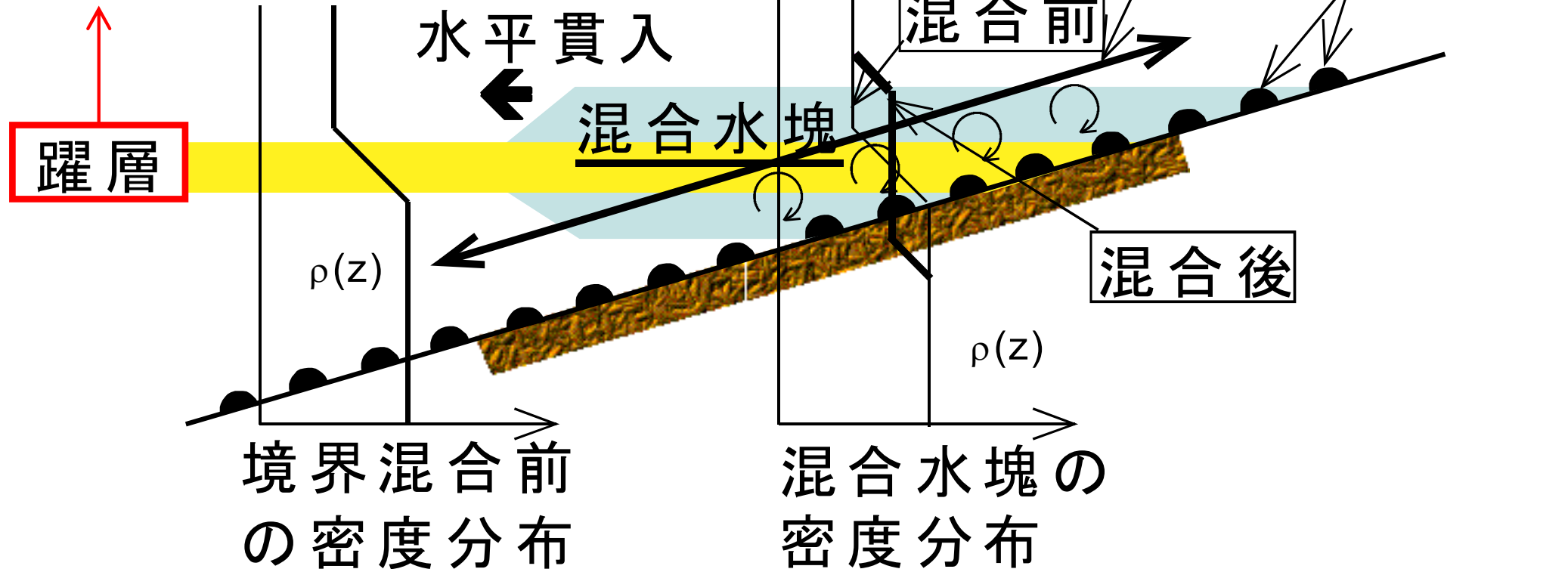
湖沼・貯水池内の乱流構造



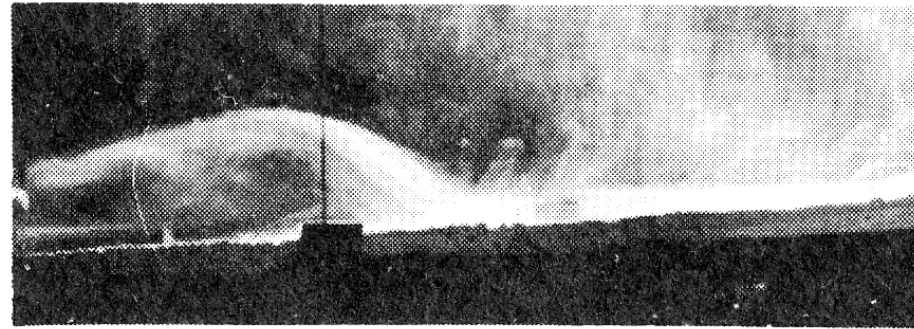
境界混合による水質輸送

- Thermocline (温度)
- Pycnocline (密度)
- Oxycline (酸素)
- Chemocline (水質)

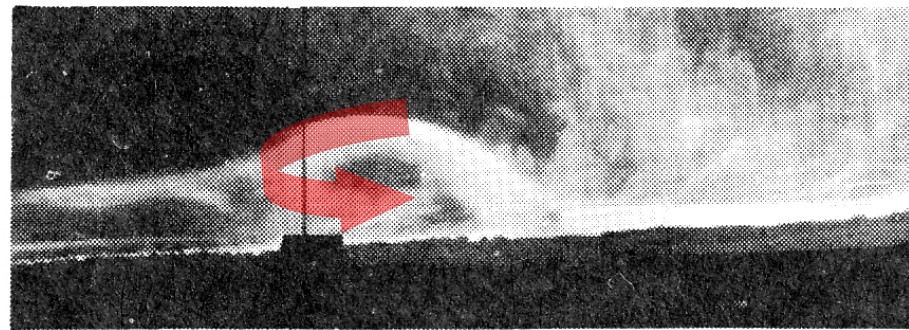
内部セイシュにともなう振動



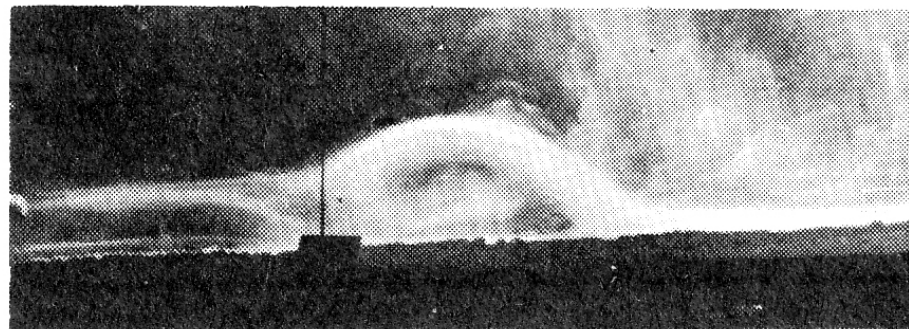
斜面上の内部砕波



(a) $t=0.0$ sec 10cm

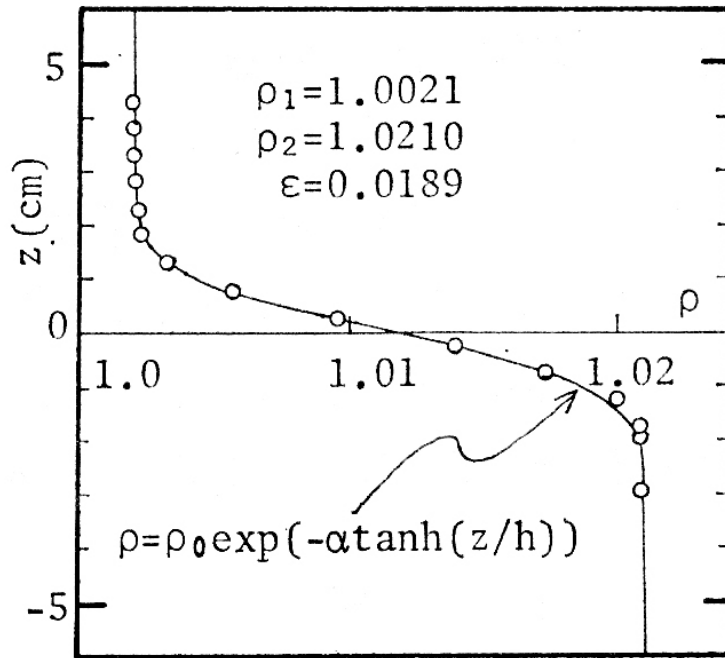


(b) $t=0.5$

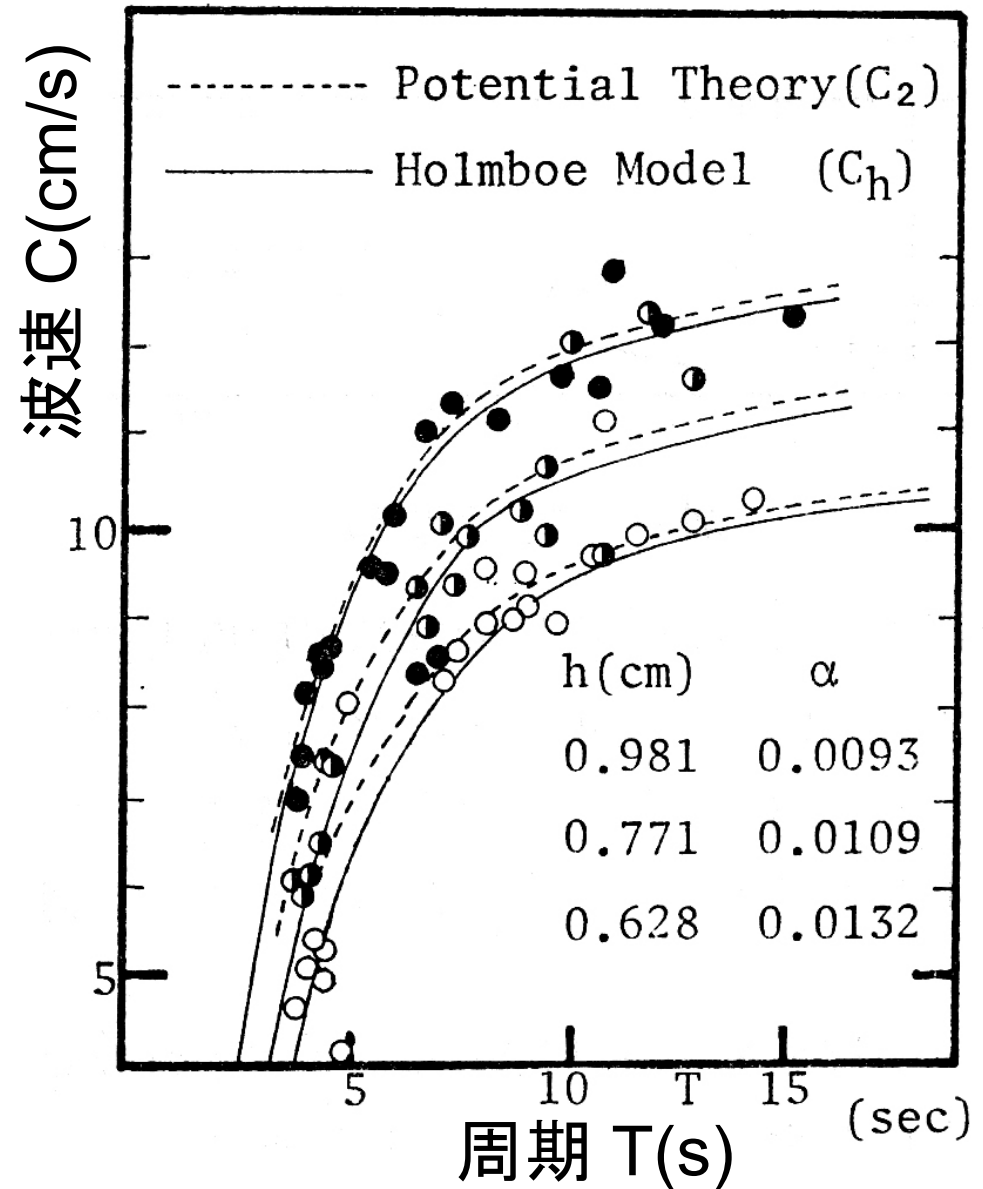


(c) $t=1.0$

二層系内部波の伝播速度

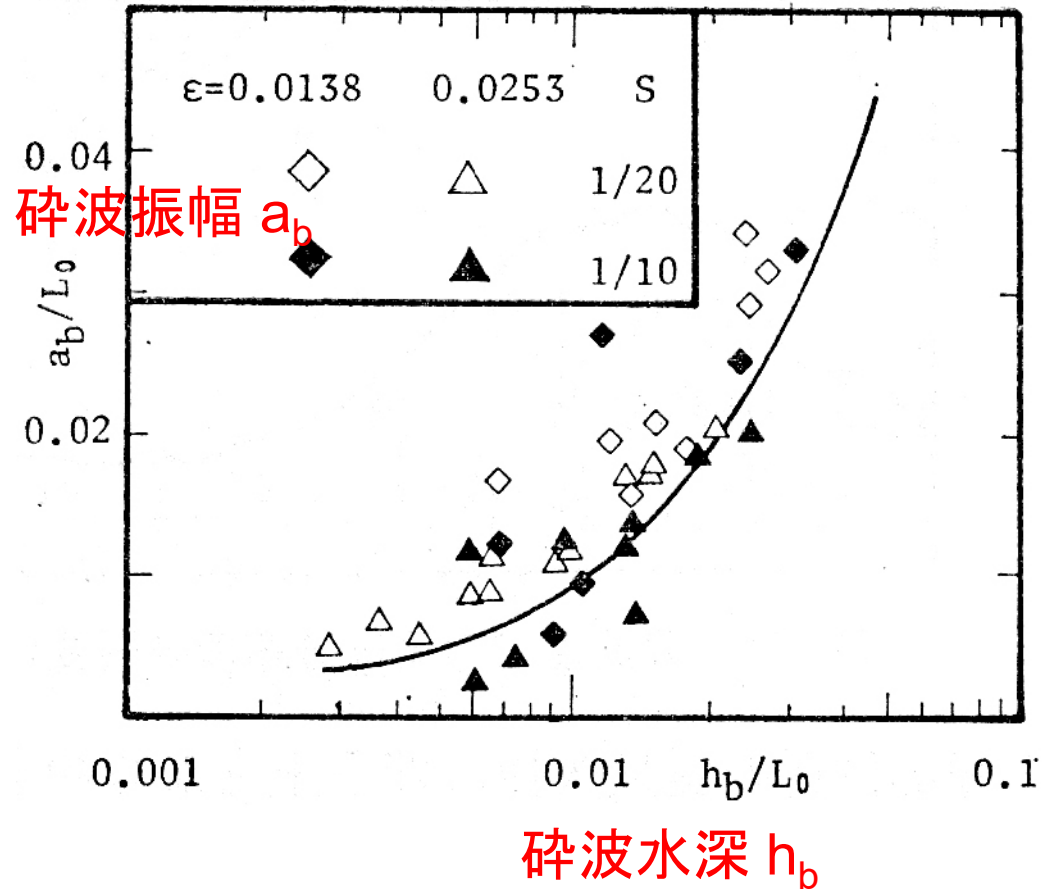
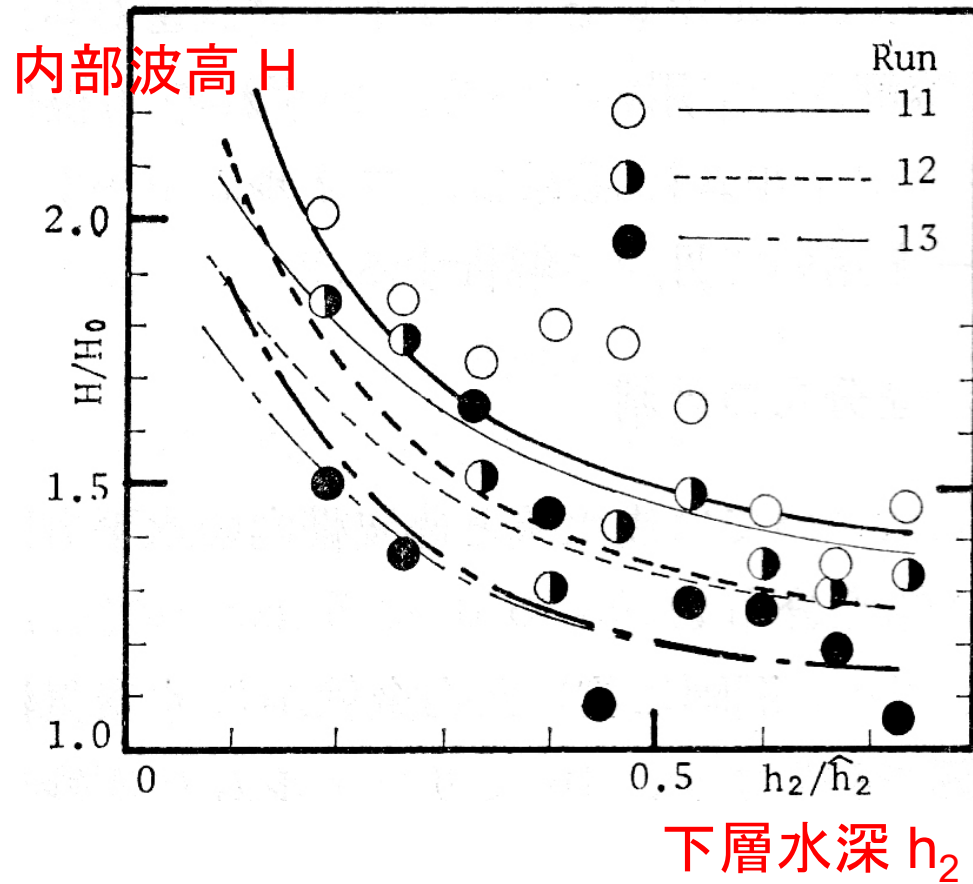


Holmboeの密度分布



内部波のshoaling, 碎波条件

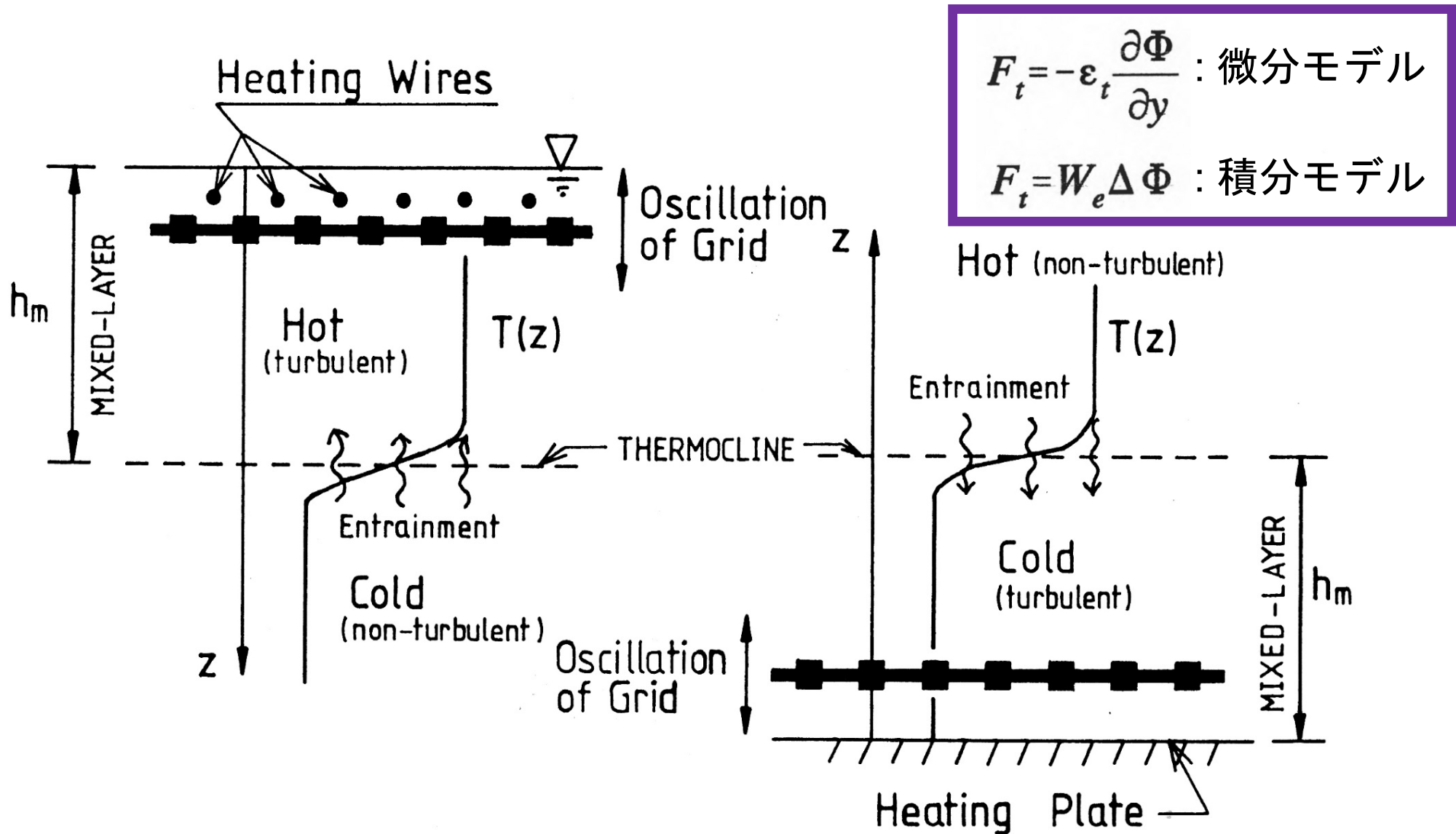
(流速 = 伝播速度)



本日の話題

- 内部砕波
- 密度成層の鉛直混合（受熱・放熱時）
- 三層系の取水流
- 乱流モデルによる鉛直混合解析
- 熱塩対流（二重拡散）
- 対流混合層の秩序構造
- 貯水池表層の自然対流
- 成層型貯水池の内部波解析
- 富栄養貯水池の部分循環特性
- 貧酸素深水層の熱塩対流
- 化学成層流
- 石積み堰の環境水理
- 石積み水制
- 河道内植生
- 水工学への期待

水温成層の鉛直混合 : 連行速度 W_e の定量化



受熱期の鉛直混合モデル

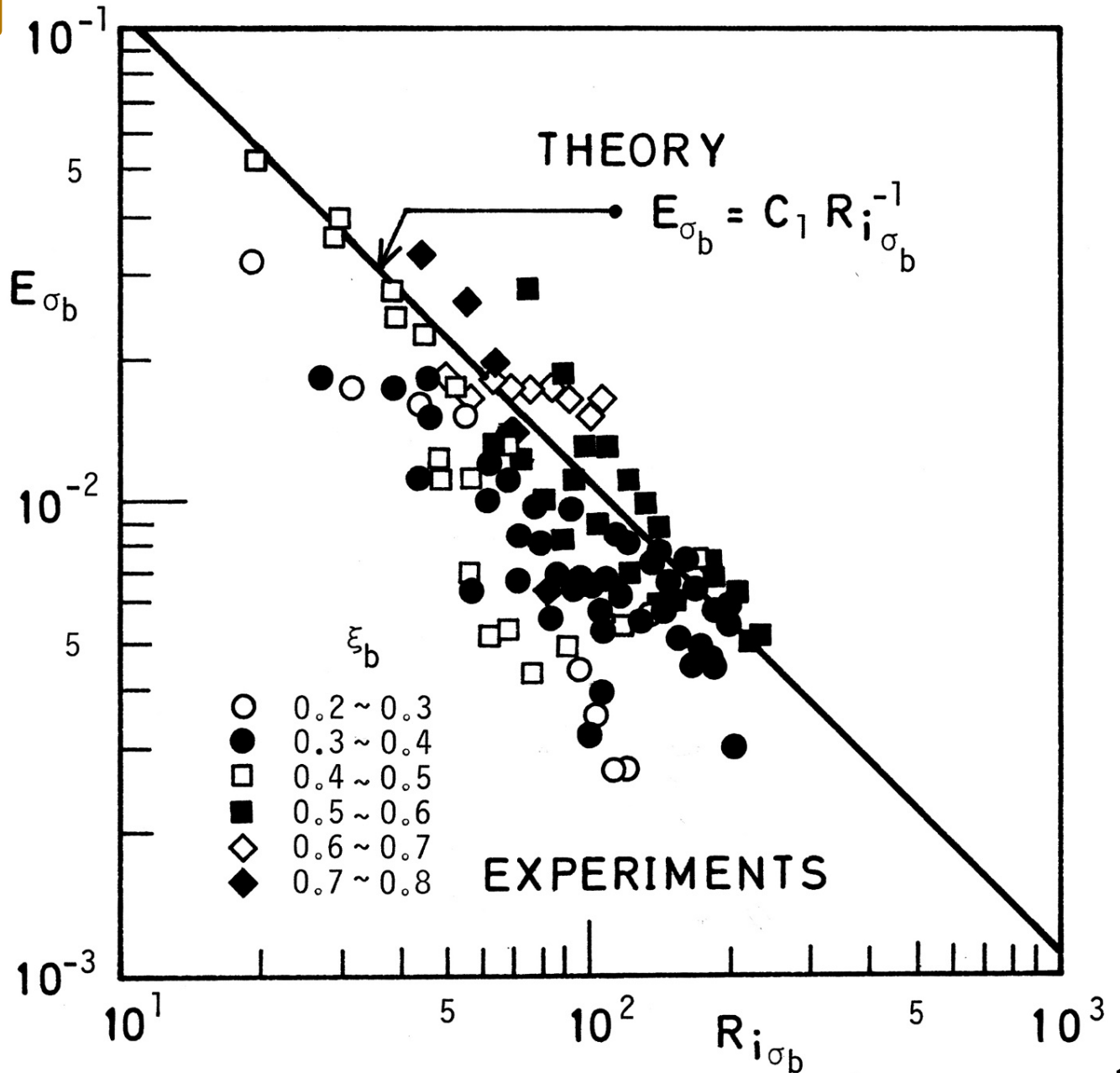
放熱期の鉛直混合モデル

受熱期の連行則

$$E_{\sigma_b} = \frac{W_e}{\sigma_b} : \text{連行係数}$$

$$Ri_{\sigma_b} = \frac{\varepsilon g h_m}{\sigma_b^2} : \text{Richardson数}$$

$$\sigma_b = (C_1 u_*^3 - C_3 u_b^3)^{1/3} : \text{擾乱速度}$$

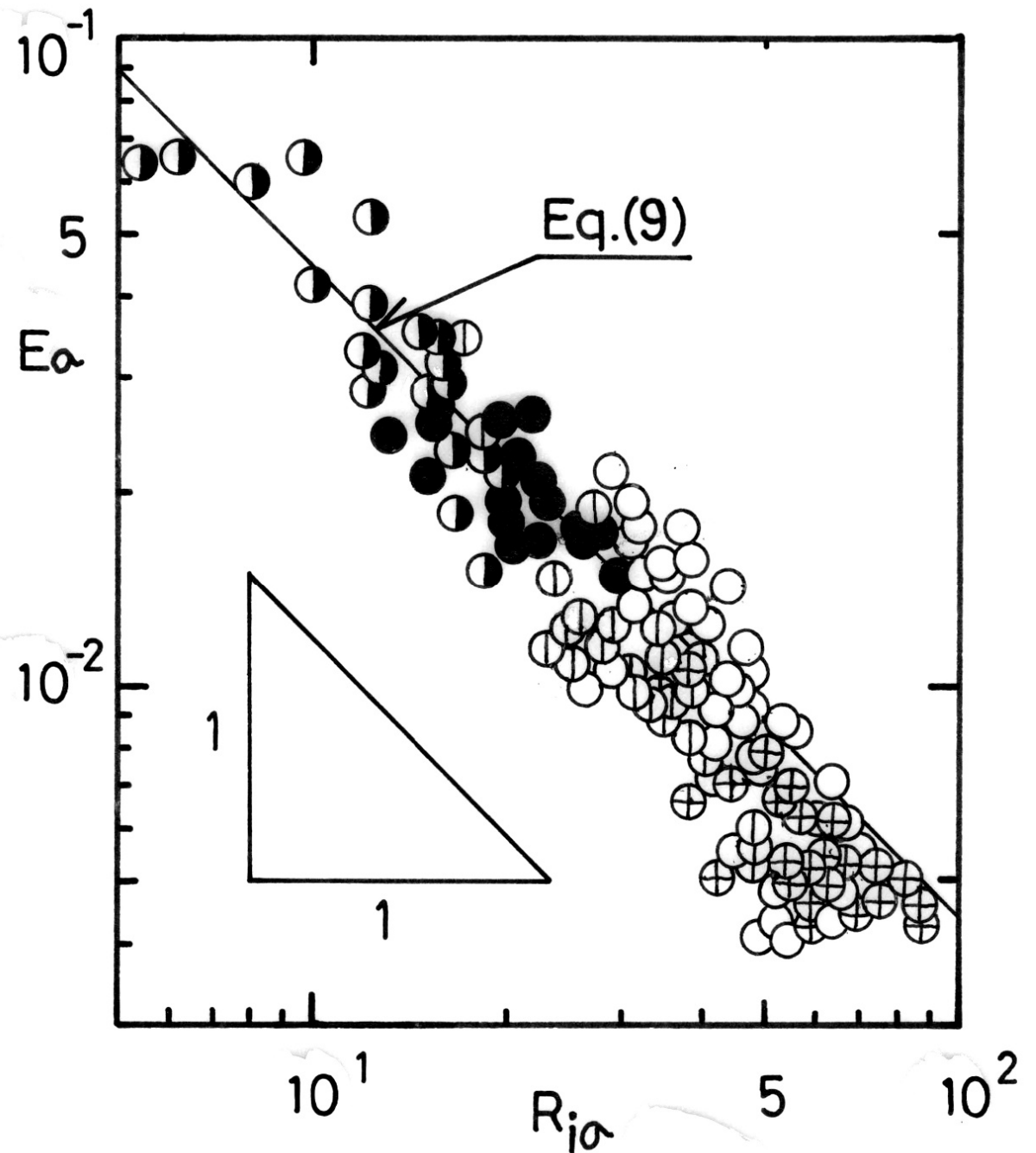


放熱期の連行則

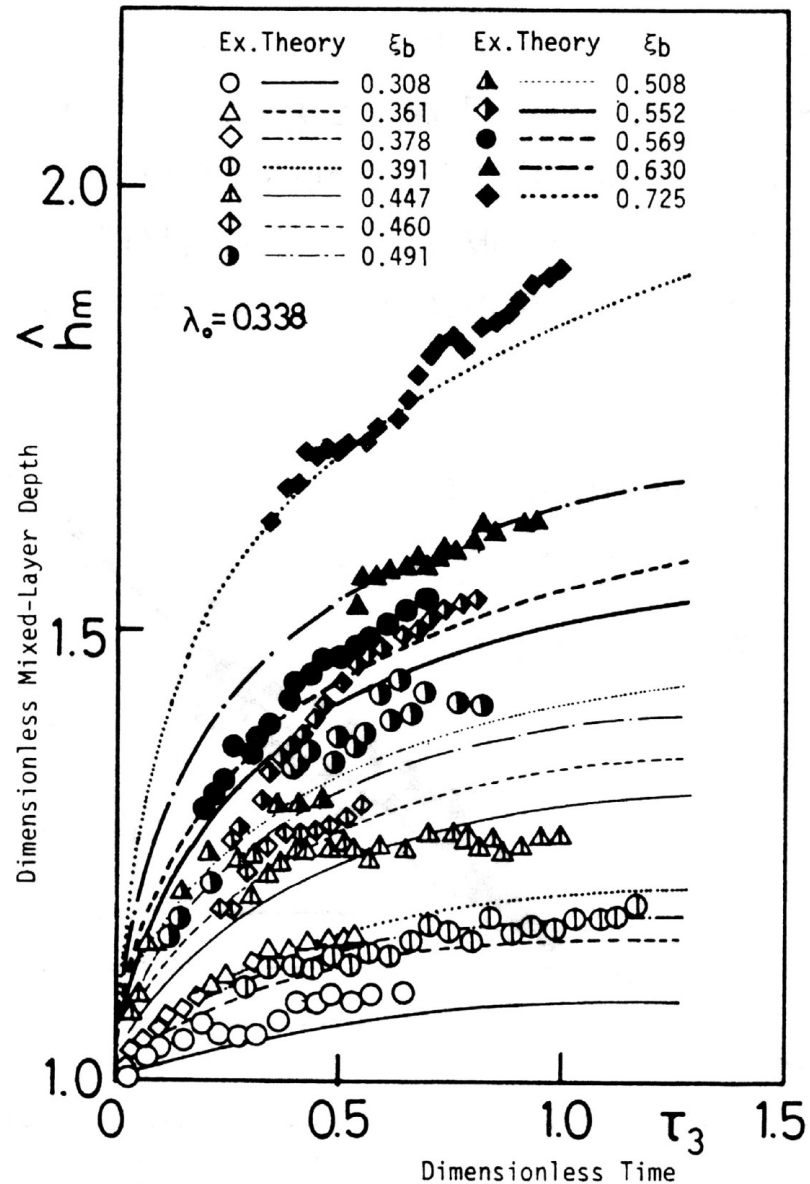
$$E_{\sigma} = \frac{W_e}{\sigma} : \text{連行係数}$$

$$Ri_{\sigma} = \frac{\varepsilon g h_m}{\sigma^2} : \text{Richardson数}$$

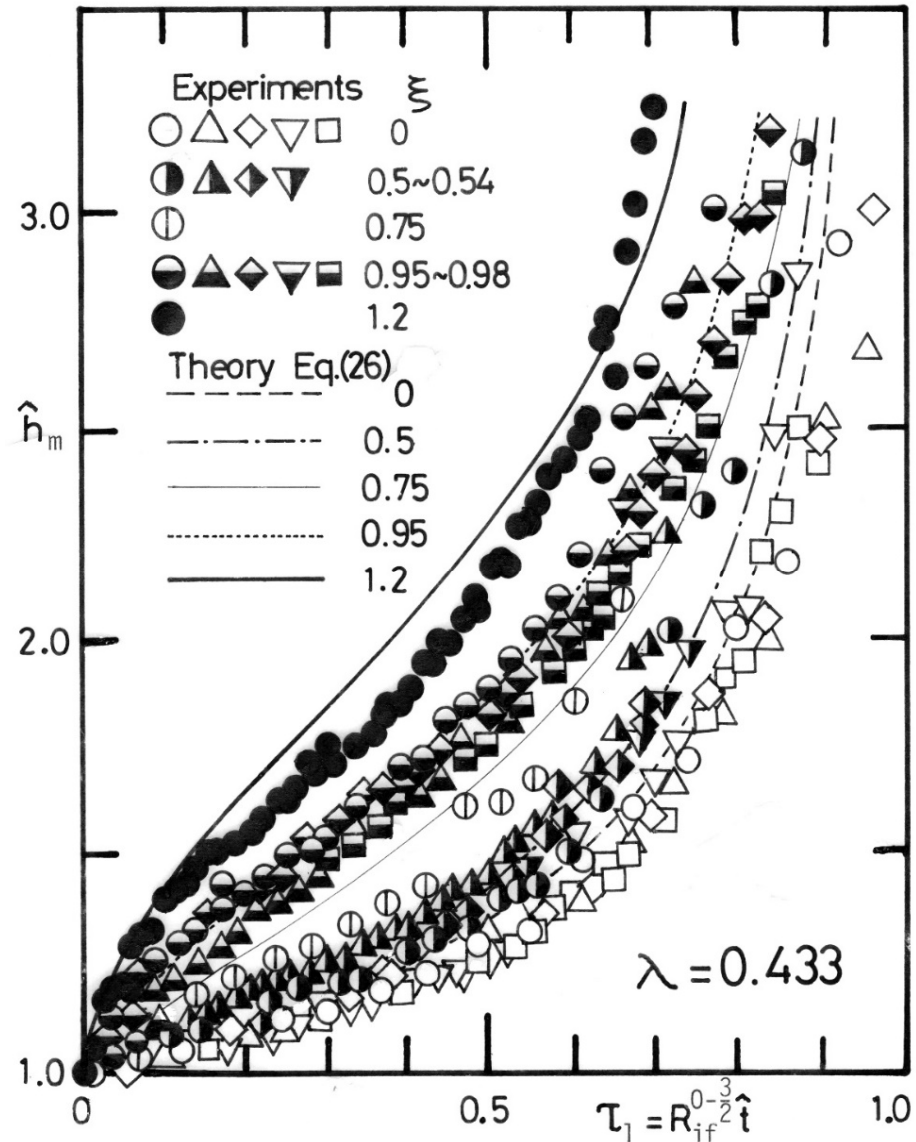
$$\sigma = (C_1 u_*^3 + C_3 u_f^3)^{1/3} : \text{擾乱速度}$$



混合層厚さの時間変化: 実験vs理論



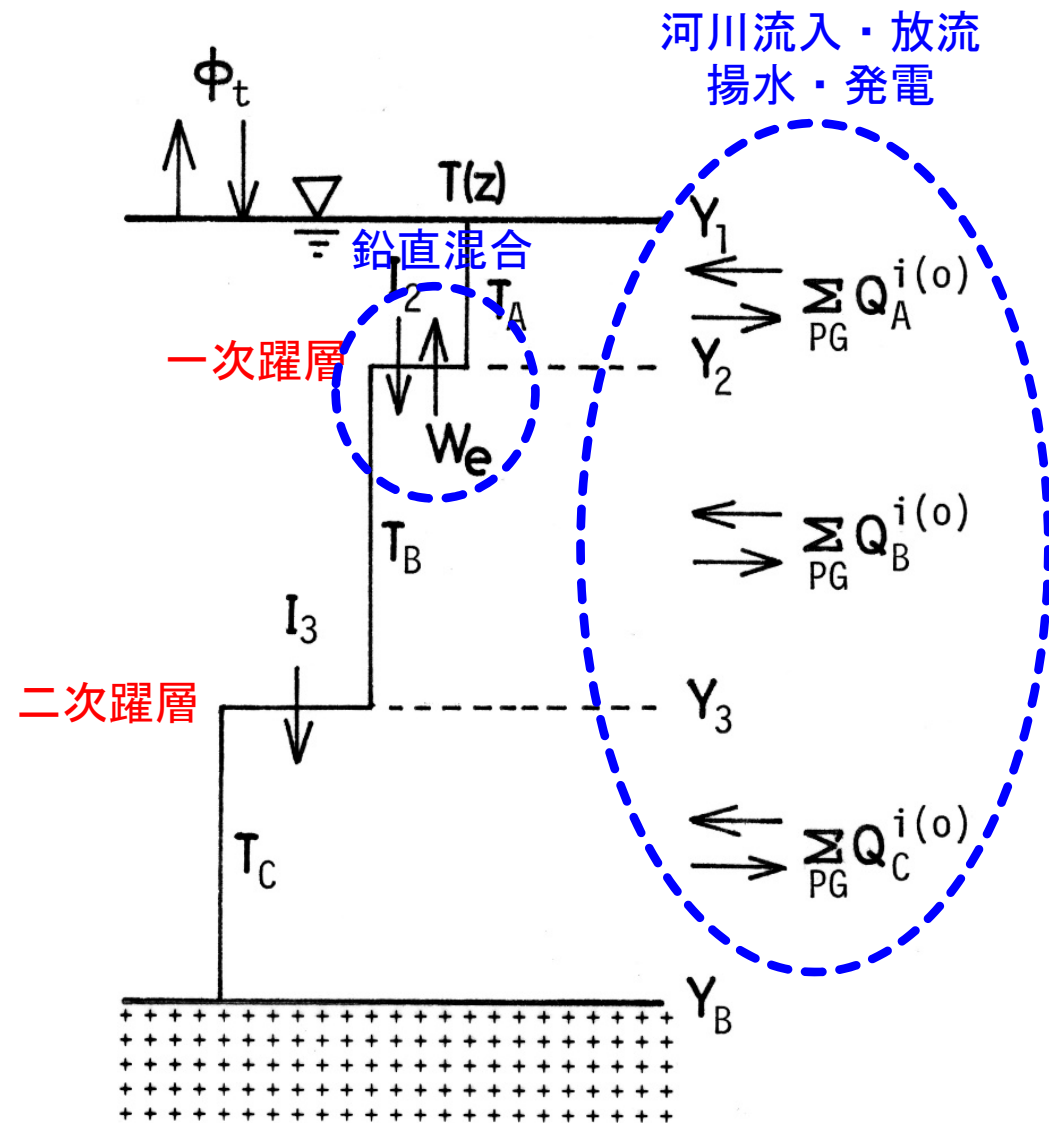
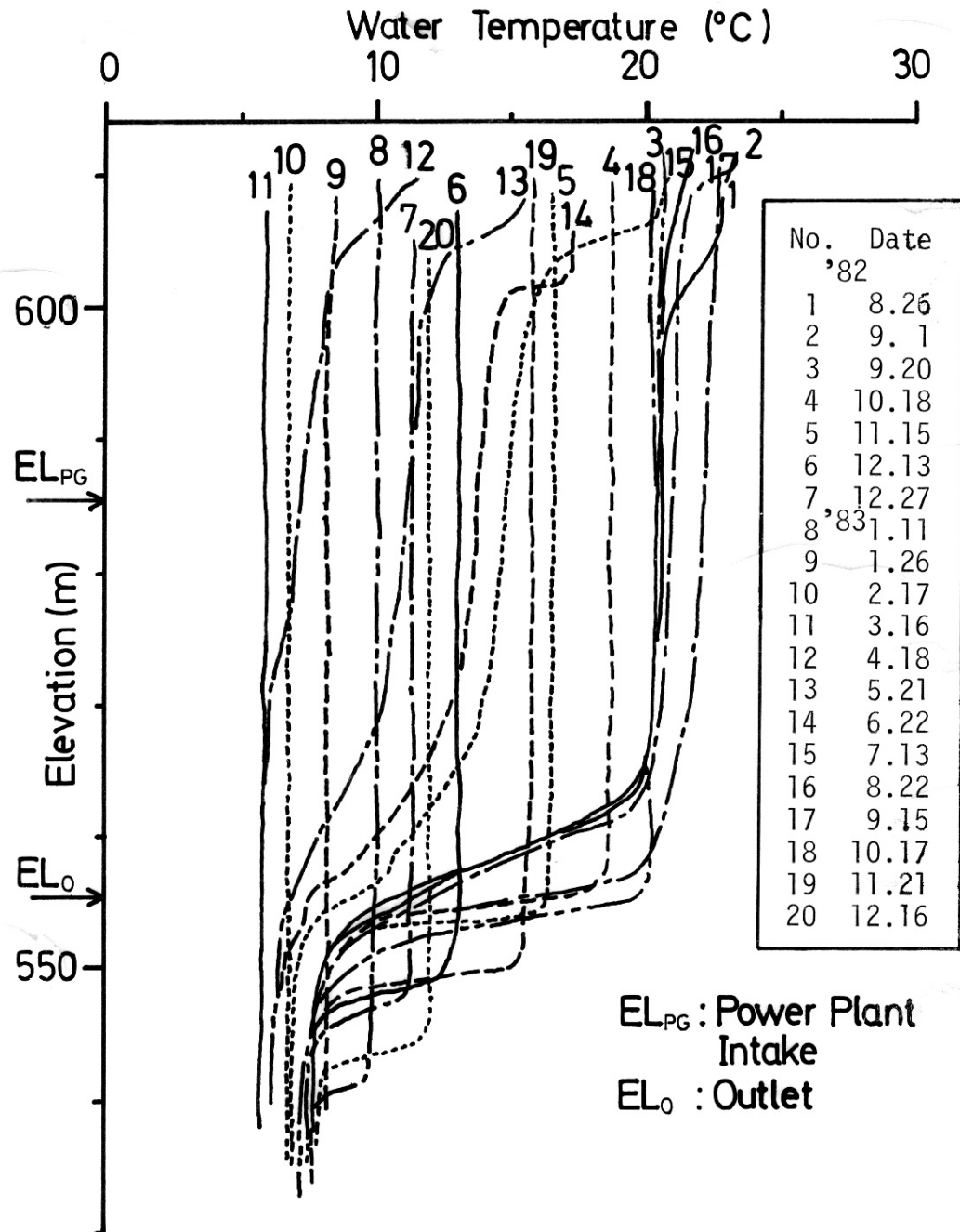
受熱期モデル

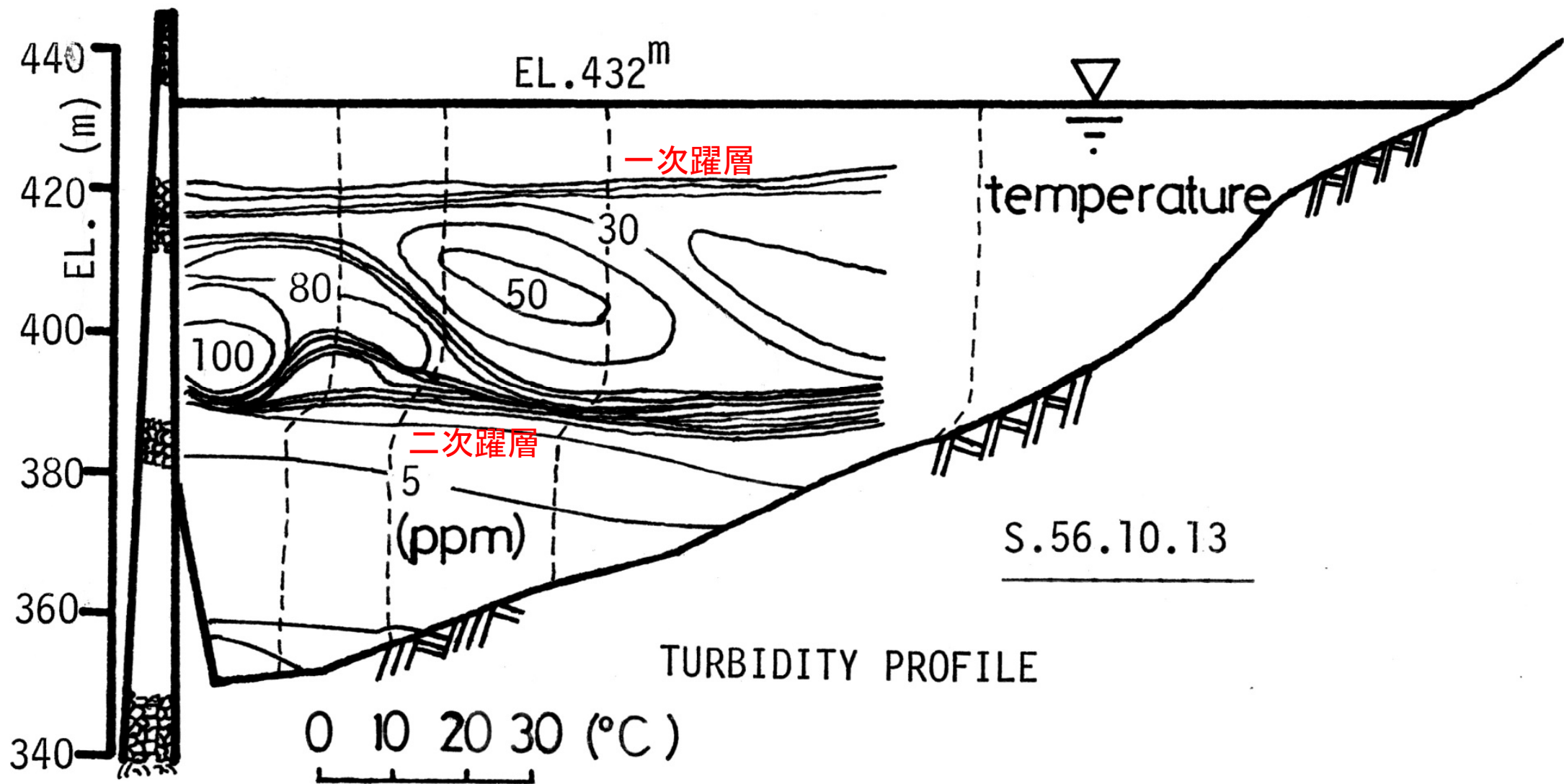


放熱期モデル

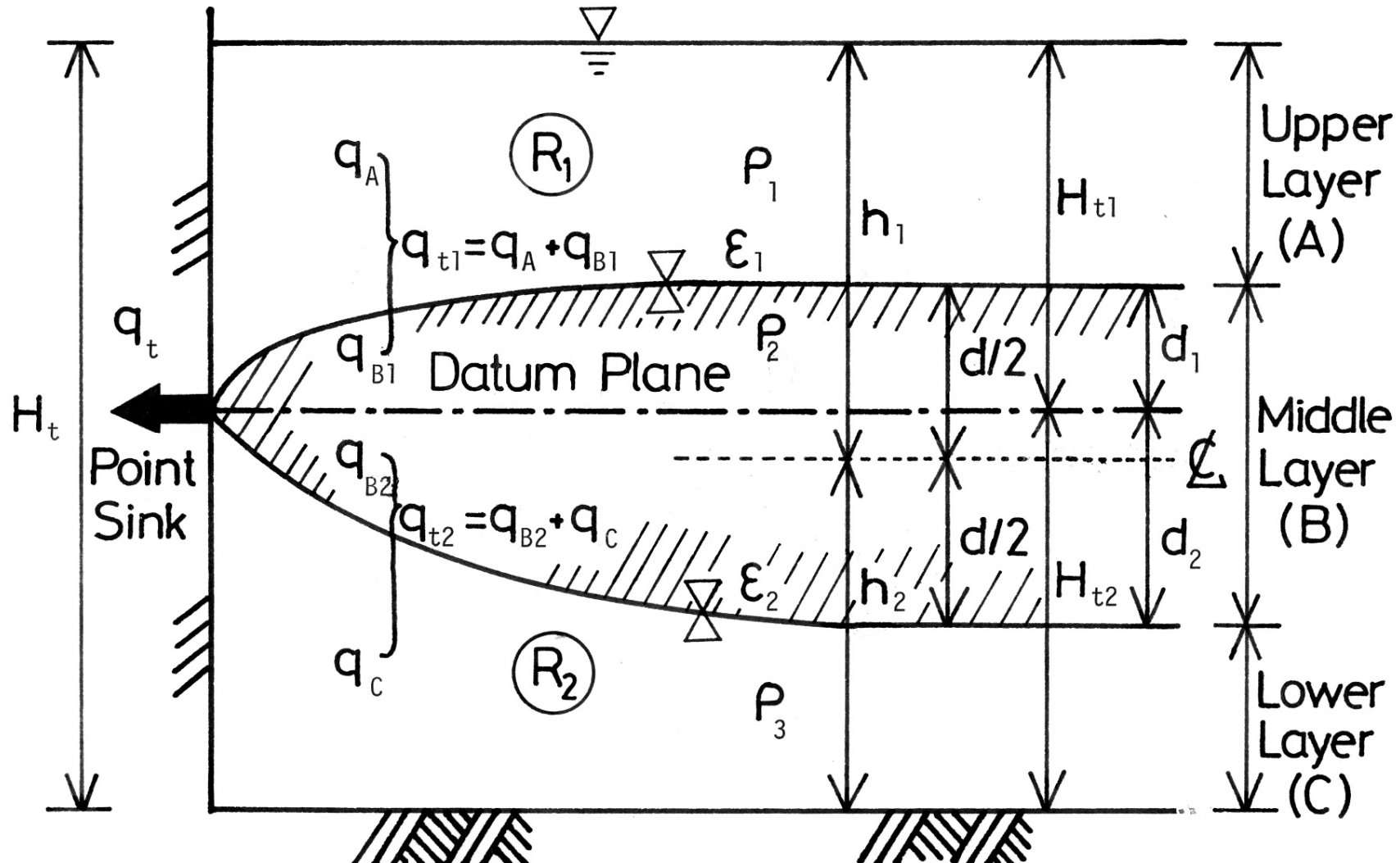
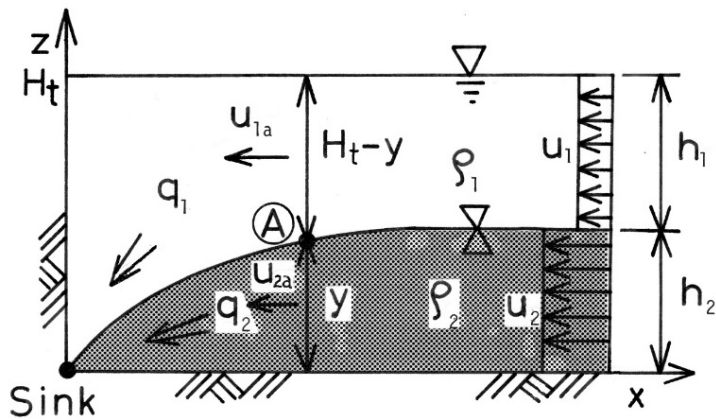
本日の話題

- 内部砕波
- 密度成層の鉛直混合（受熱・放熱時）
- 三層系の取水流
- 乱流モデルによる鉛直混合解析
- 熱塩対流（二重拡散）
- 対流混合層の秩序構造
- 貯水池表層の自然対流
- 成層型貯水池の内部波解析
- 富栄養貯水池の部分循環特性
- 貧酸素深水層の熱塩対流
- 化学成層流
- 石積み堰の環境水理
- 石積み水制
- 河道内植生
- 水工学への期待

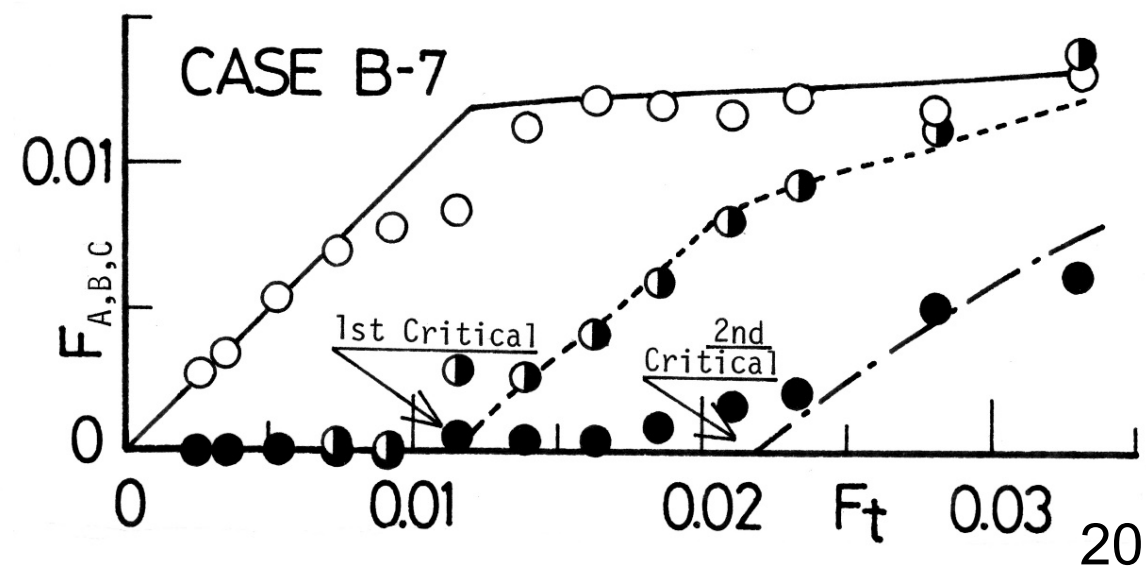
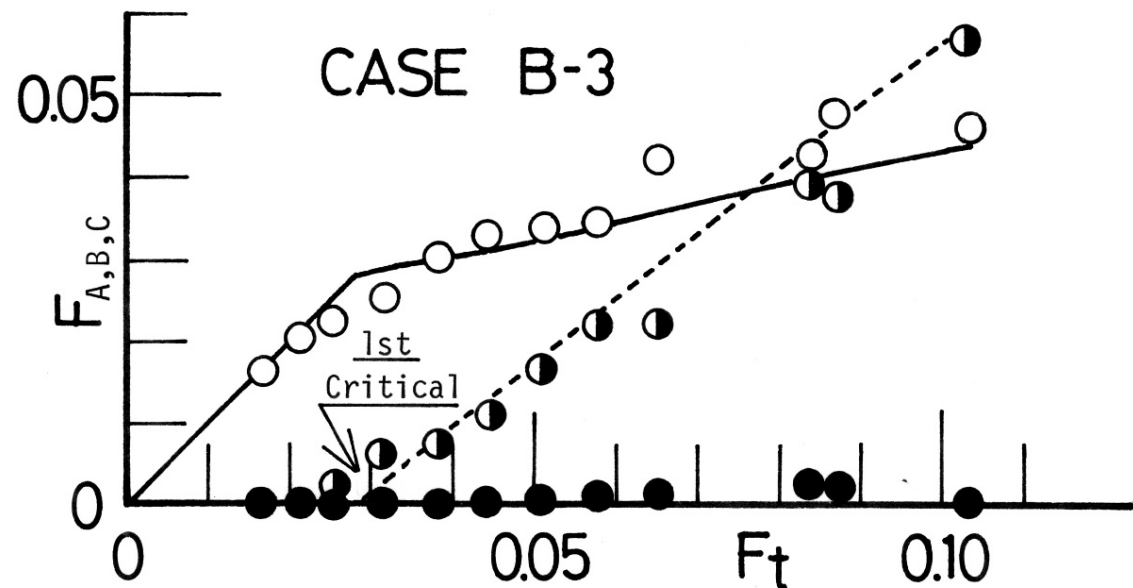
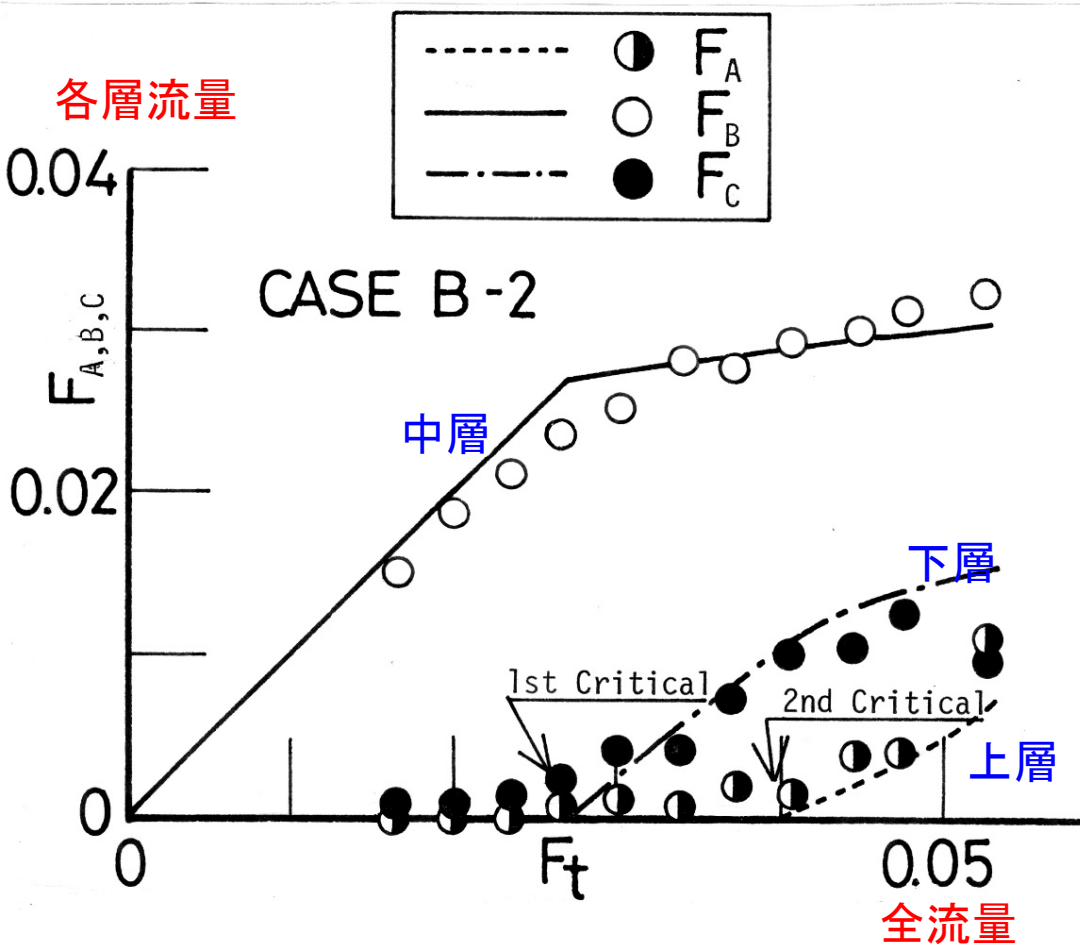




三層系取水flow



全流量 F_t と各層流量 $F_{A,B,C}$



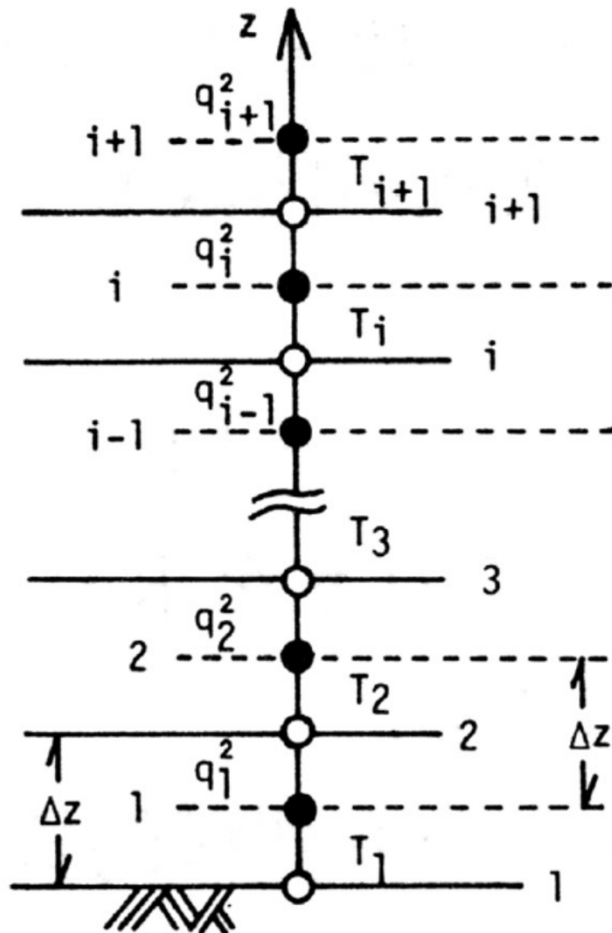
本日の話題

- 内部砕波
- 密度成層の鉛直混合（受熱・放熱時）
- 三層系の取水流
- 乱流モデルによる鉛直混合解析
- 熱塩対流（二重拡散）
- 対流混合層の秩序構造
- 貯水池表層の自然対流
- 成層型貯水池の内部波解析
- 富栄養貯水池の部分循環特性
- 貧酸素深水層の熱塩対流
- 化学成層流
- 石積み堰の環境水理
- 石積み水制
- 河道内植生
- 水工学への期待

Mellor & Yamadaの乱流モデル

$$F_t = -\varepsilon_t \frac{\partial \Phi}{\partial y} : \text{微分モデル}$$

$$F_t = W_e \Delta \Phi : \text{積分モデル}$$



$$\frac{\partial q^2}{\partial t} = \underbrace{\frac{5}{3} \frac{\partial}{\partial z} \left[q \lambda_1 \frac{\partial q^2}{\partial z} \right]}_{\text{(I) Diffusion}} + \underbrace{2 \alpha g \bar{w} \bar{\theta}}_{\text{(II) Buoyancy}} - \underbrace{\frac{2 q^3}{\Lambda_1}}_{\text{(III) Dissipation}} \dots \dots \dots \text{(A.1)}$$

(I) Diffusion (II) Buoyancy (III) Dissipation

$$\bar{u}^2 = \bar{v}^2 = \frac{q^2}{3} - \frac{2 l_1}{q} \alpha g \bar{w} \bar{\theta} \dots \dots \dots \text{(A.2)}$$

$$\bar{w}^2 = \frac{q^2}{3} + \frac{4 l_1}{q} \alpha g \bar{w} \bar{\theta} \dots \dots \dots \text{(A.3)}$$

$$-\bar{w} \bar{\theta} = \frac{3 l_2}{q} \left(\bar{w}^2 \frac{\partial T}{\partial z} - \alpha g \bar{\theta}^2 \right) \dots \dots \dots \text{(A.4)}$$

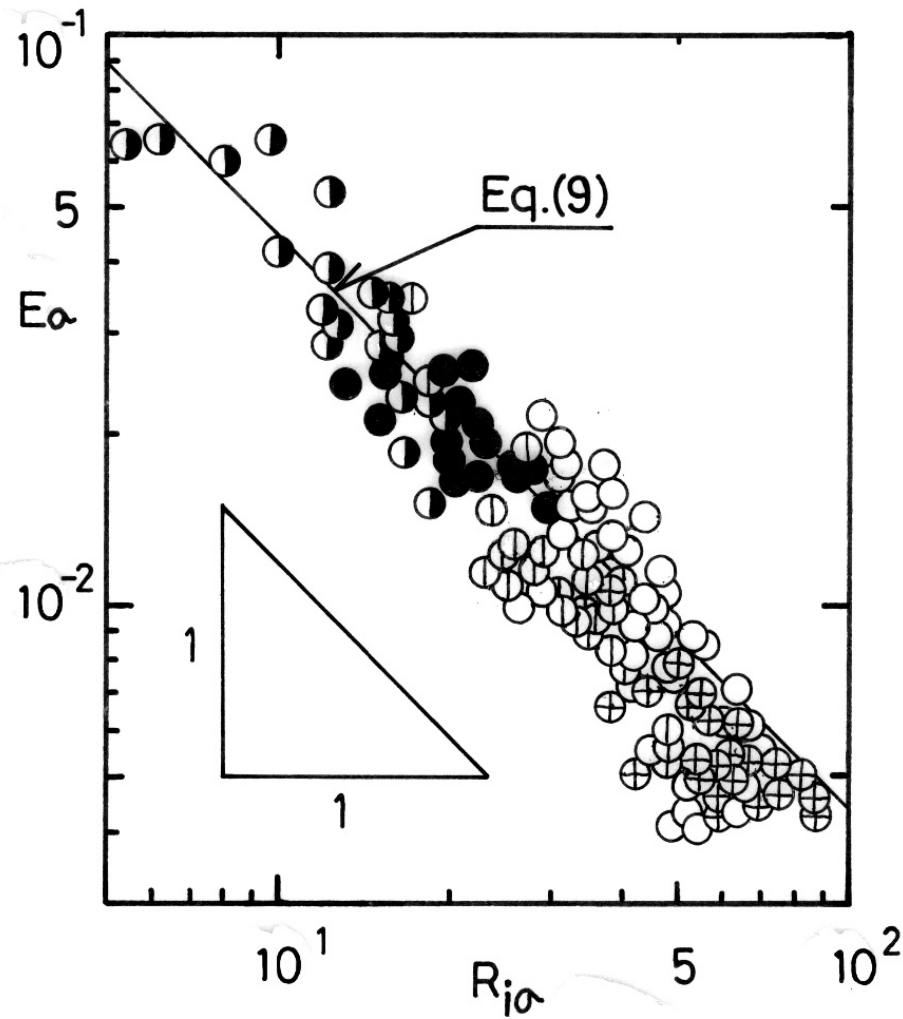
$$\bar{\theta}^2 = -\frac{\Lambda_2}{q} \bar{w} \bar{\theta} \frac{\partial T}{\partial z} \dots \dots \dots \text{(A.5)}$$

ここで、 α ：熱膨張係数， g ：重力加速度，である．上式群に含まれる乱れの特徴長はおの次のように基本特性長 l の定数倍で与えられる．

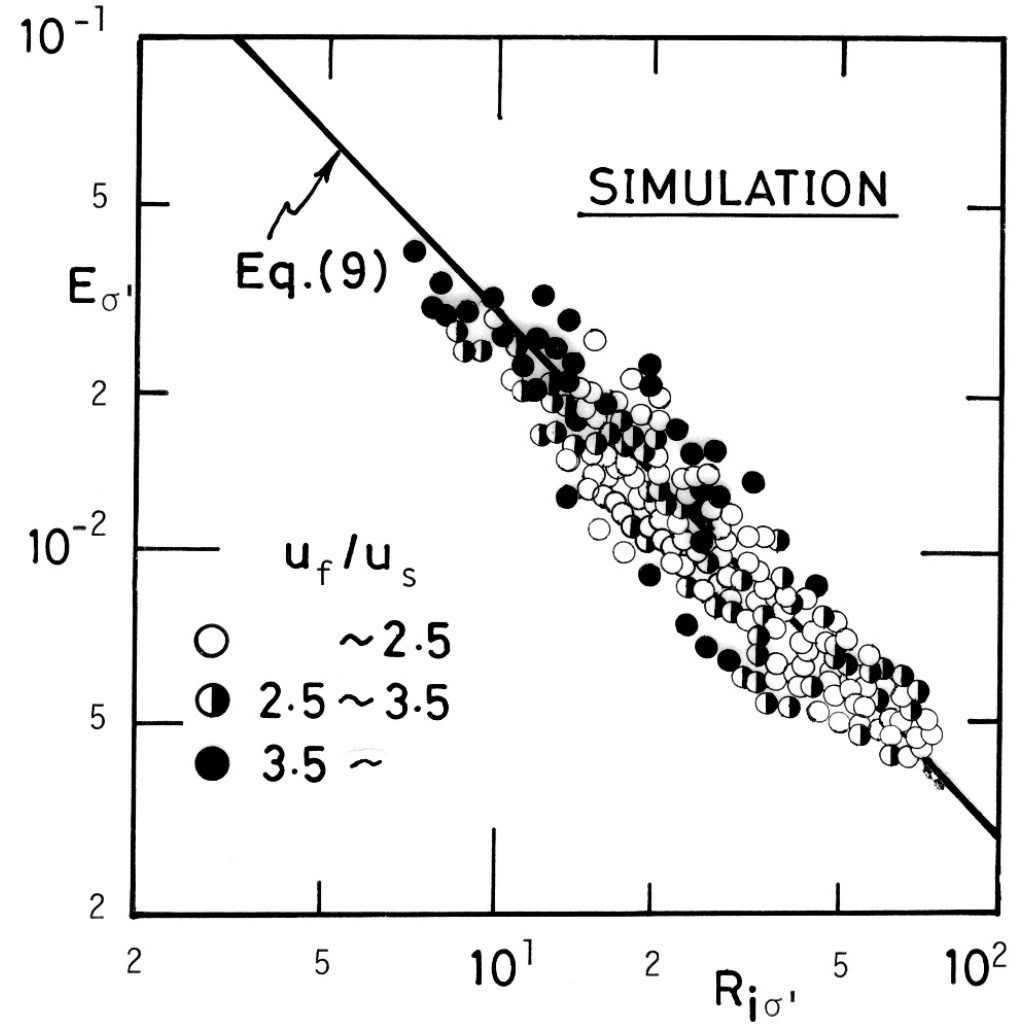
$$(l_1, l_2, \Lambda_1, \Lambda_2, \lambda_1) = (A_1, A_2, B_1, B_2, D_1) l \dots \dots \dots \text{(A.6)}$$

$$l = \frac{\kappa z}{1 + \kappa z / l_0}, \quad l_0 = \gamma \frac{\int_0^\infty q z dz}{\int_0^\infty q dz} \dots \dots \dots \text{(A.7)}$$

複合擾乱（放熱期モデル）の連行則



水理実験

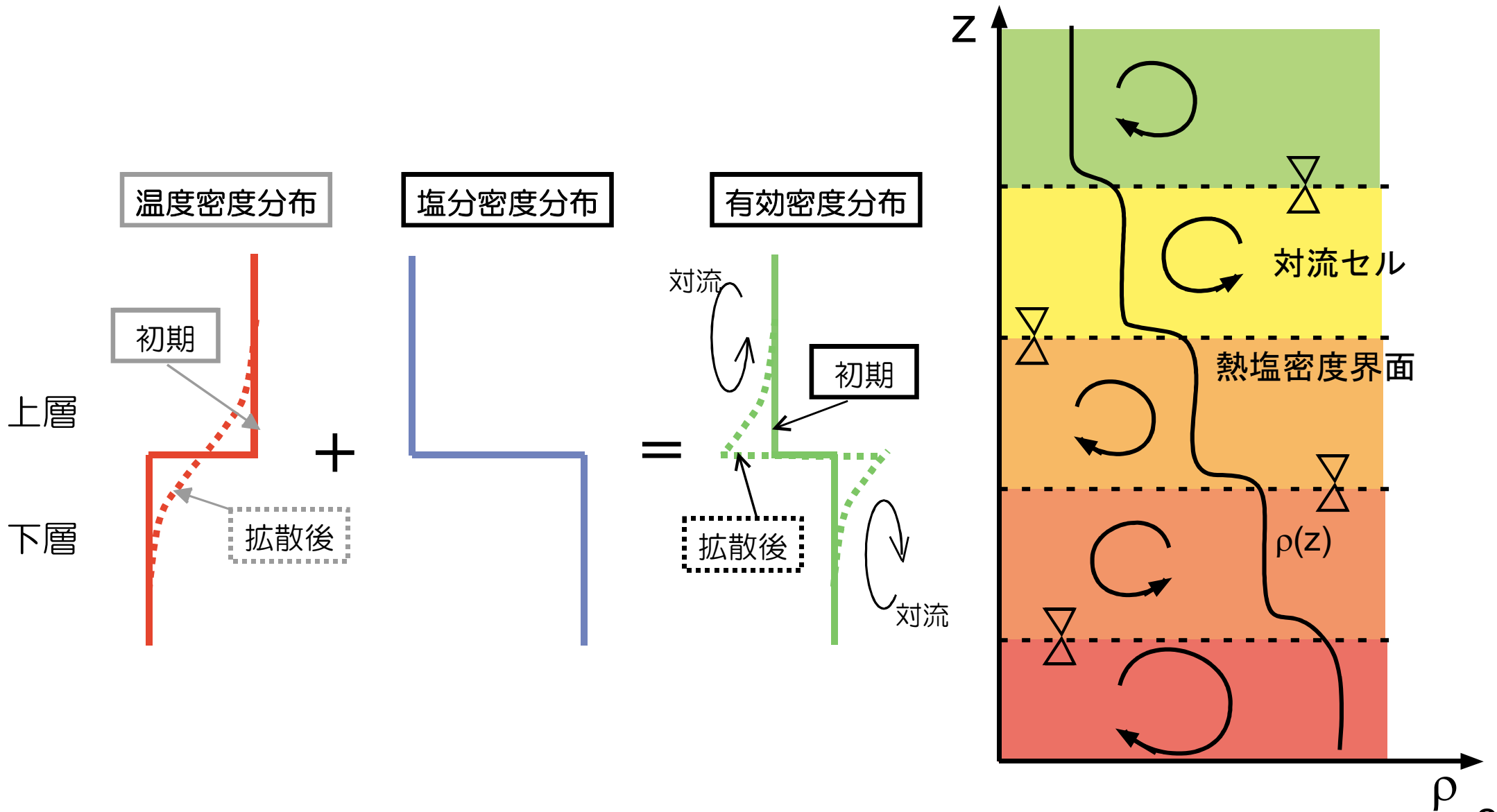


乱流モデル

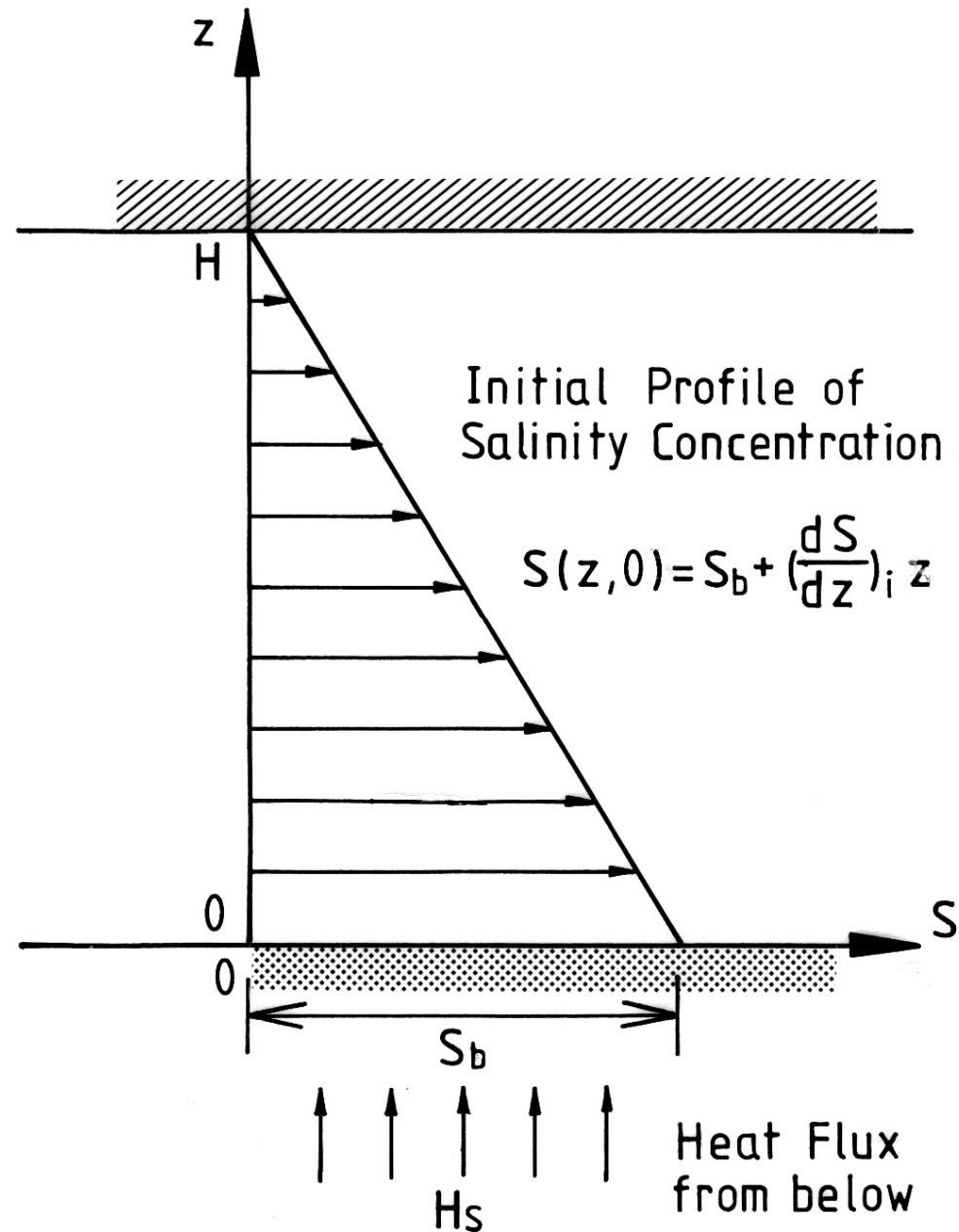
本日の話題

- 内部砕波
- 密度成層の鉛直混合（受熱・放熱時）
- 三層系の取水流
- 乱流モデルによる鉛直混合解析
- 熱塩対流（二重拡散）
- 対流混合層の秩序構造
- 貯水池表層の自然対流
- 成層型貯水池の内部波解析
- 富栄養貯水池の部分循環特性
- 貧酸素深水層の熱塩対流
- 化学成層流
- 石積み堰の環境水理
- 石積み水制
- 河道内植生
- 水工学への期待

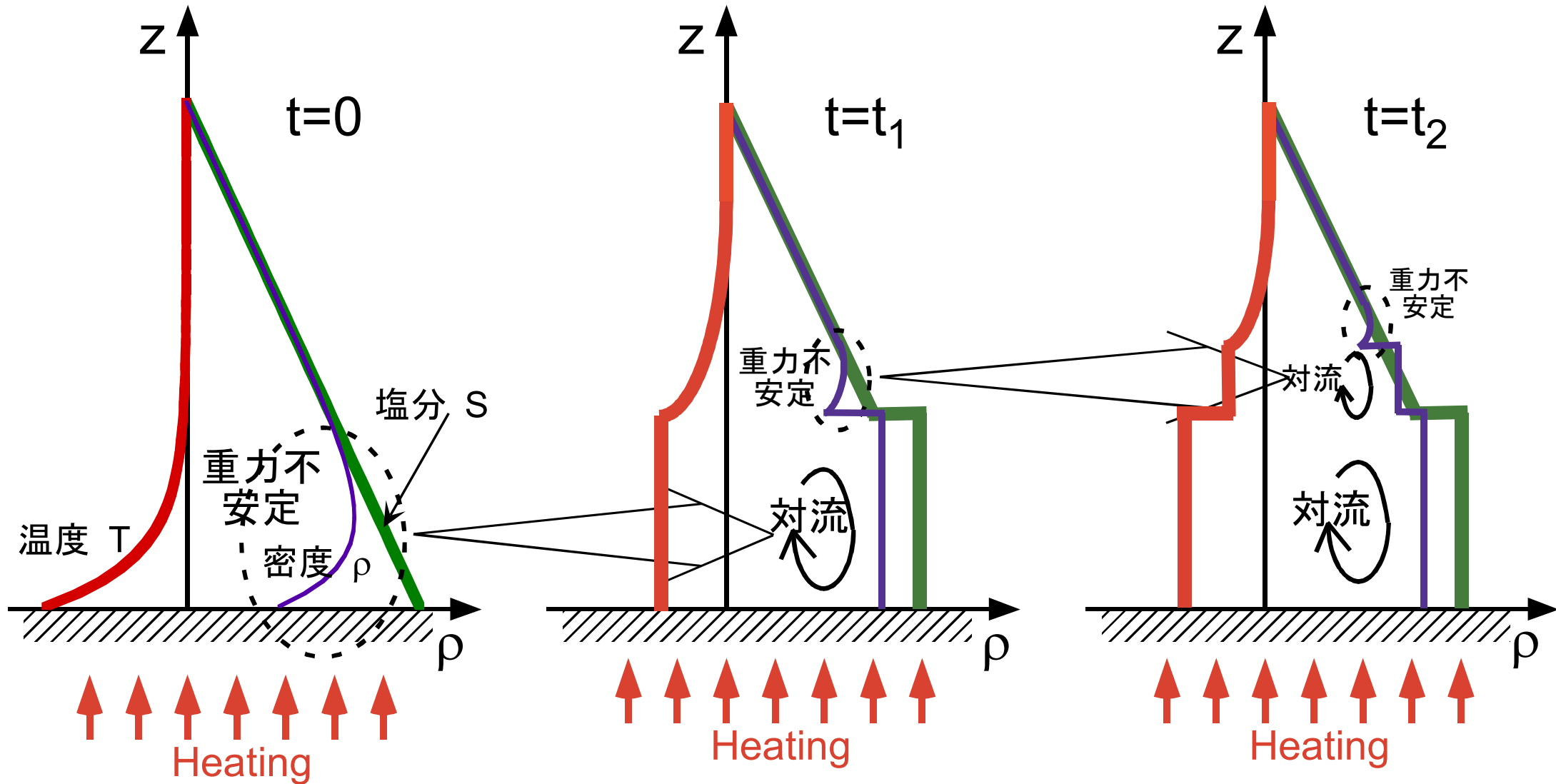
熱塩対流（「過剰安定型」二重拡散）



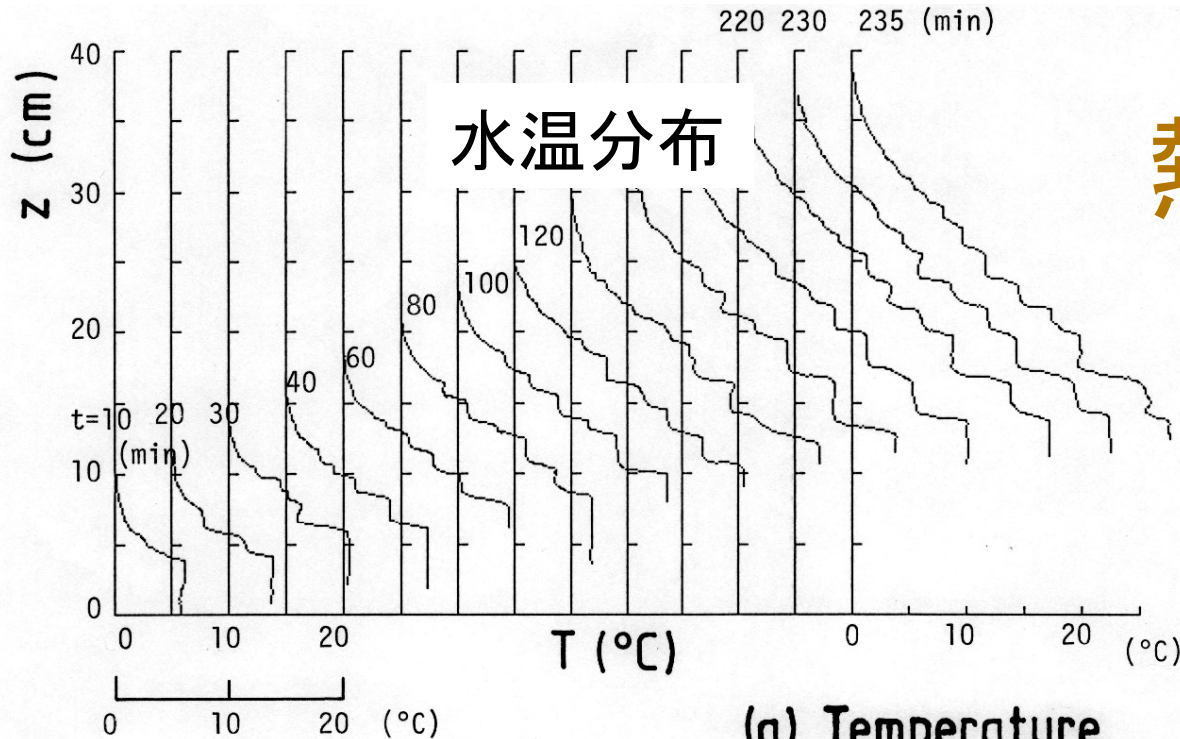
熱塩対流の実験・解析（初期条件）



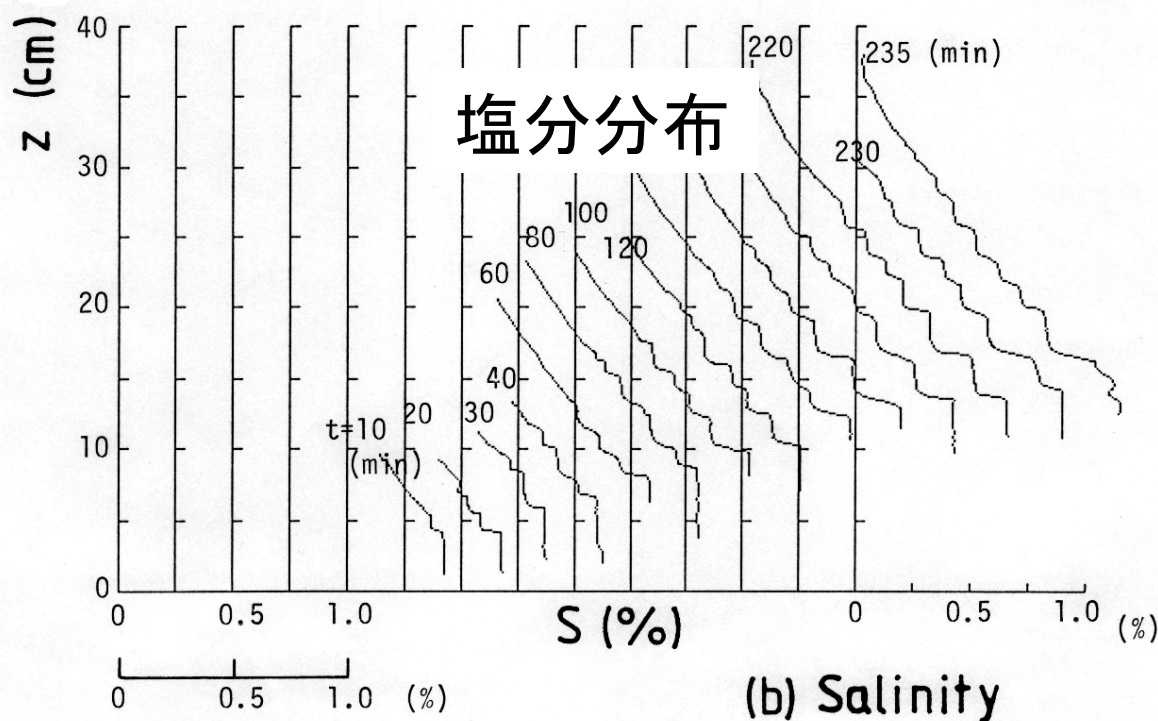
熱塩対流のメカニズム



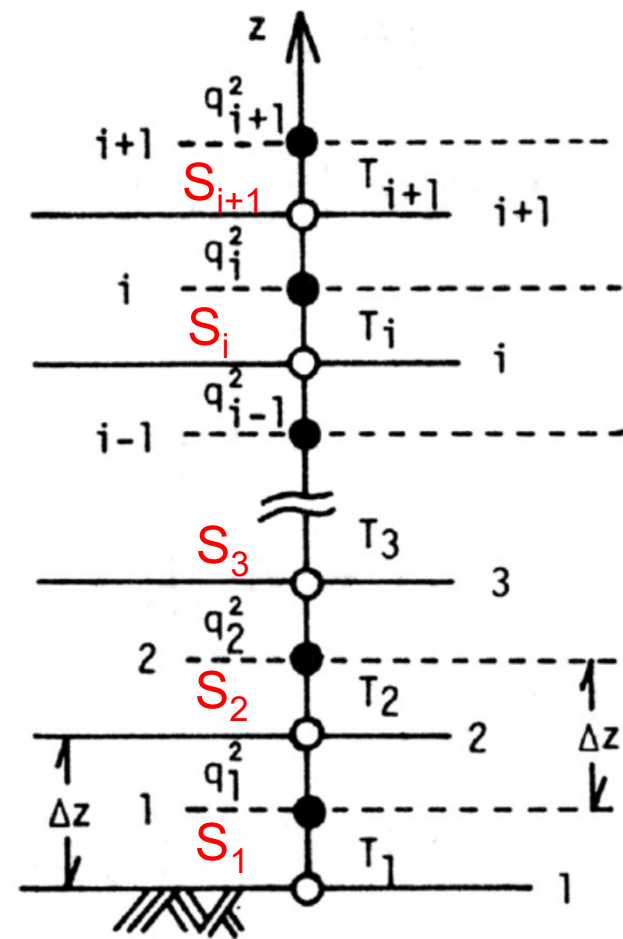
熱塩対流の実験



水理実験

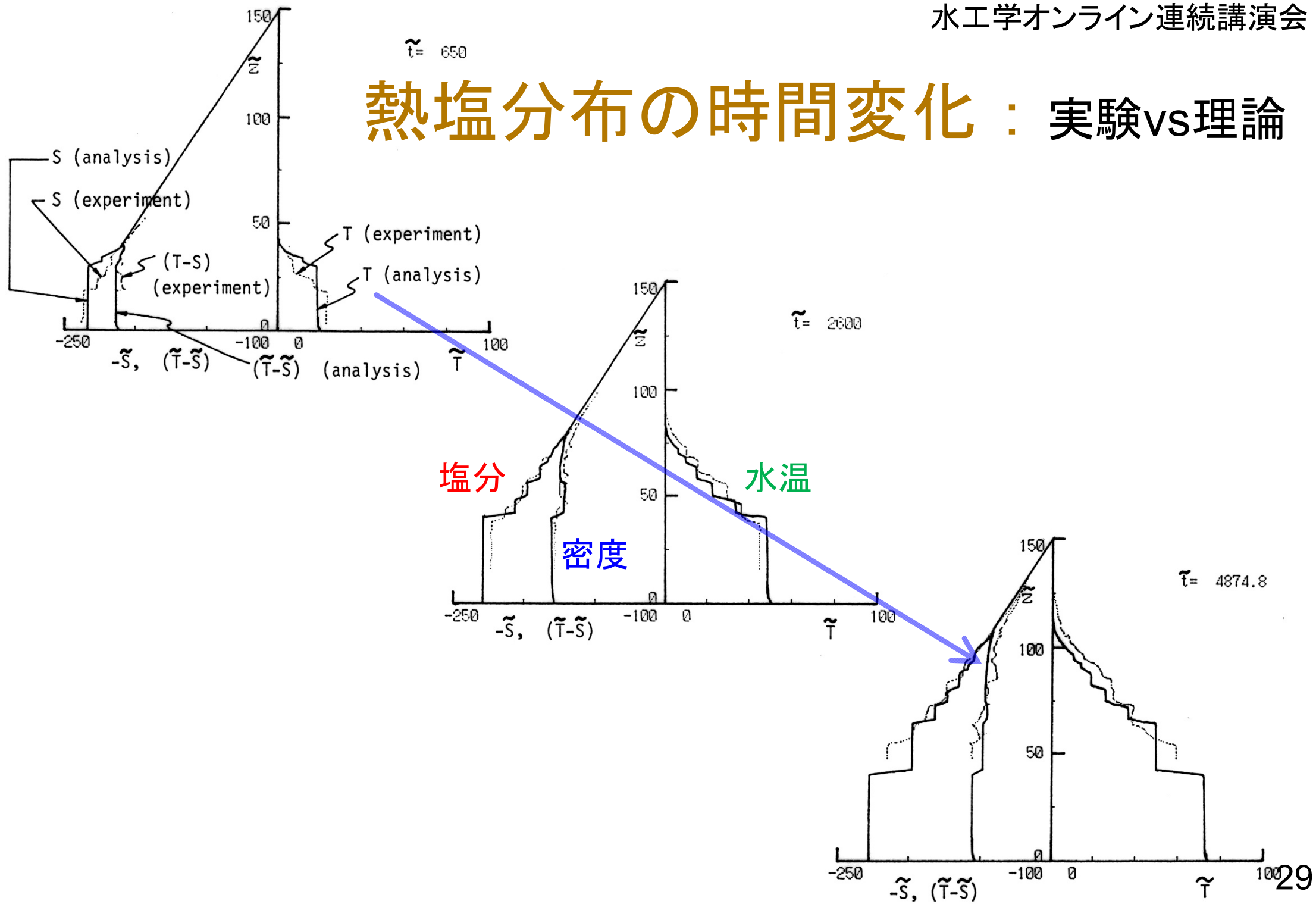


熱・塩分拡散： K_T, K_S



熱塩乱流モデル

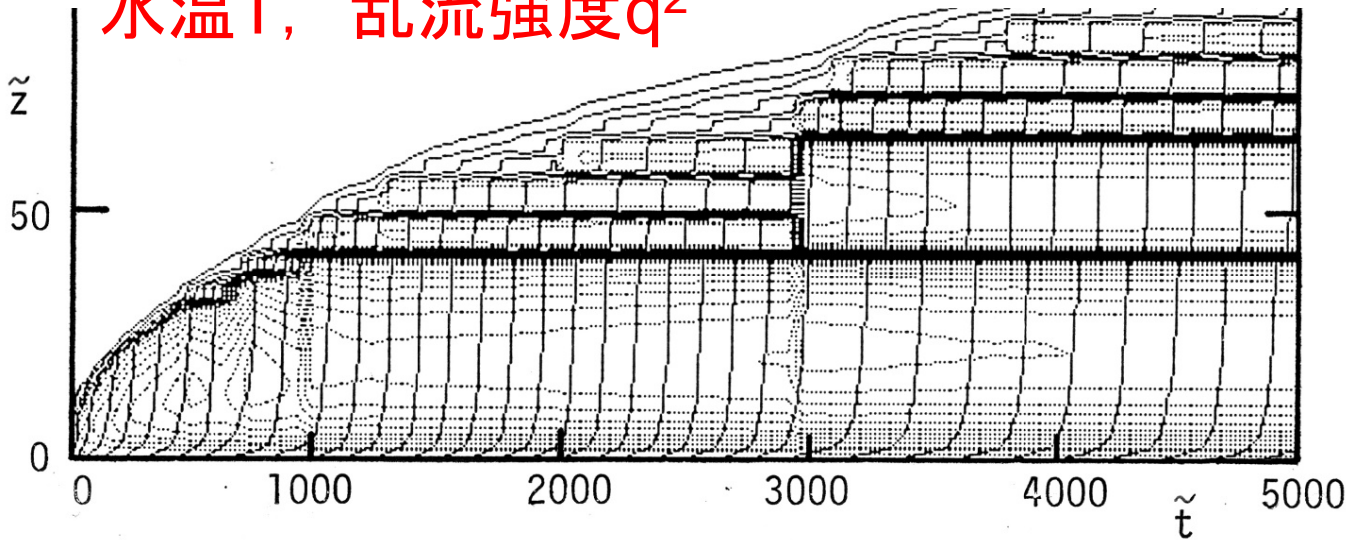
熱塩分布の時間変化：実験vs理論



熱塩時空間分布

乱流モデル

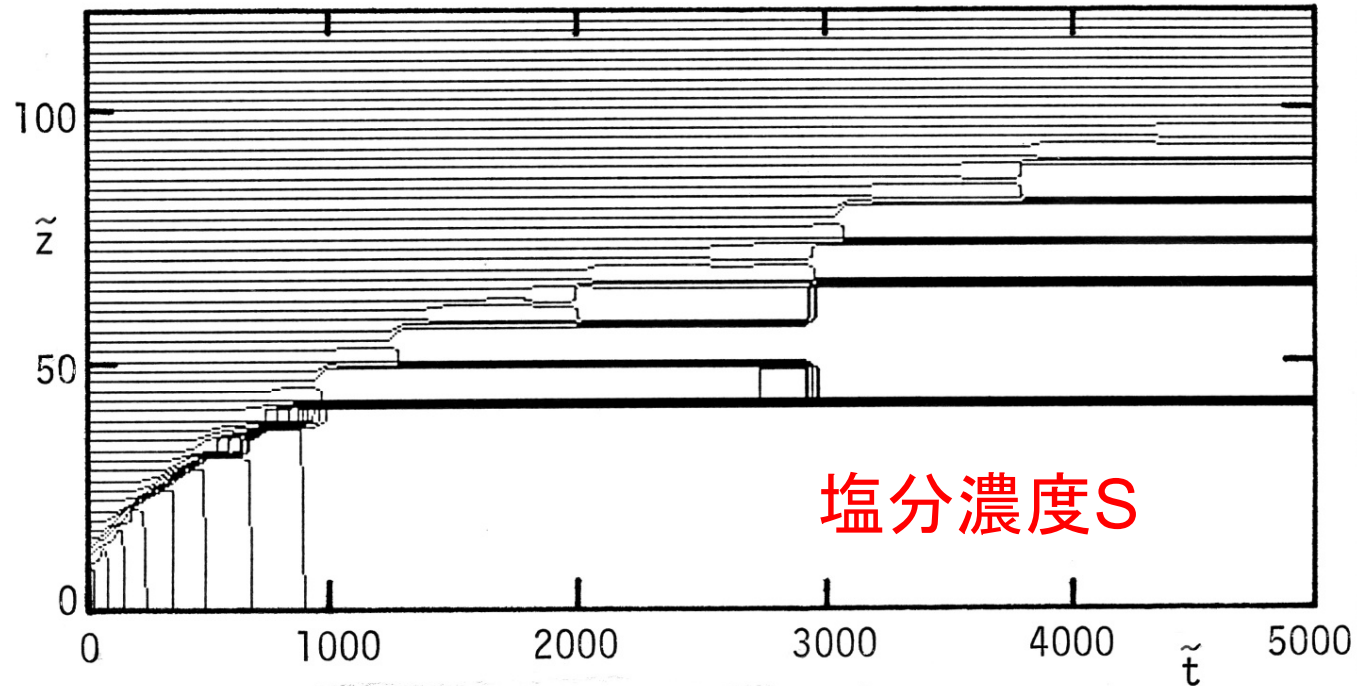
水温 T , 乱流強度 q^2



(Case-6 $Pe_T=19.02$, $\tau=0.01$)

$\Delta\tilde{T}=2.0$ (Solid Lines)

$\Delta\tilde{q}^2=1.0$ (Dotted Lines)



塩分濃度 S

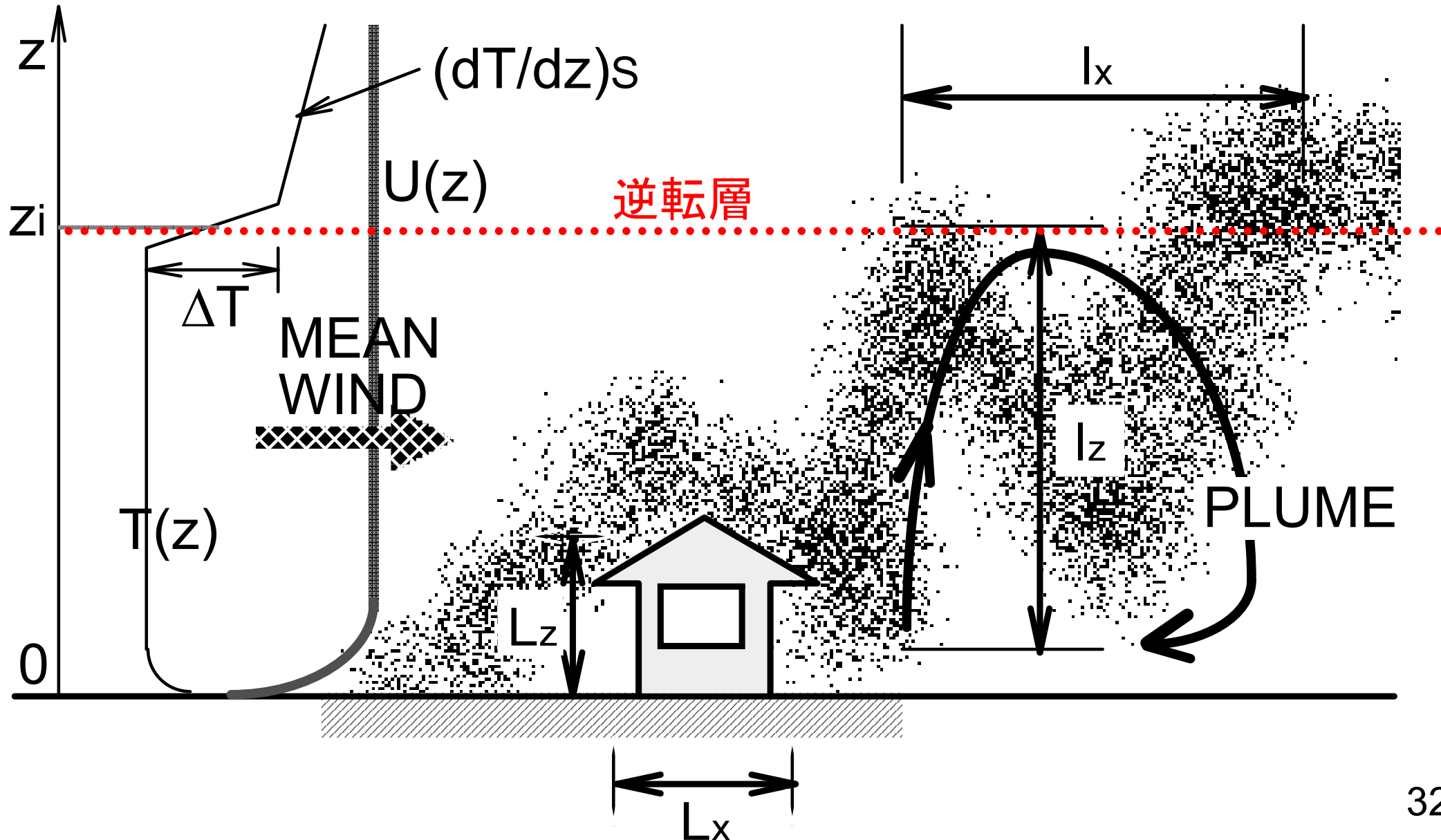
(Case-6 $Pe_T=19.02$, $\tau=0.01$)

$\Delta\tilde{S}=2.0$

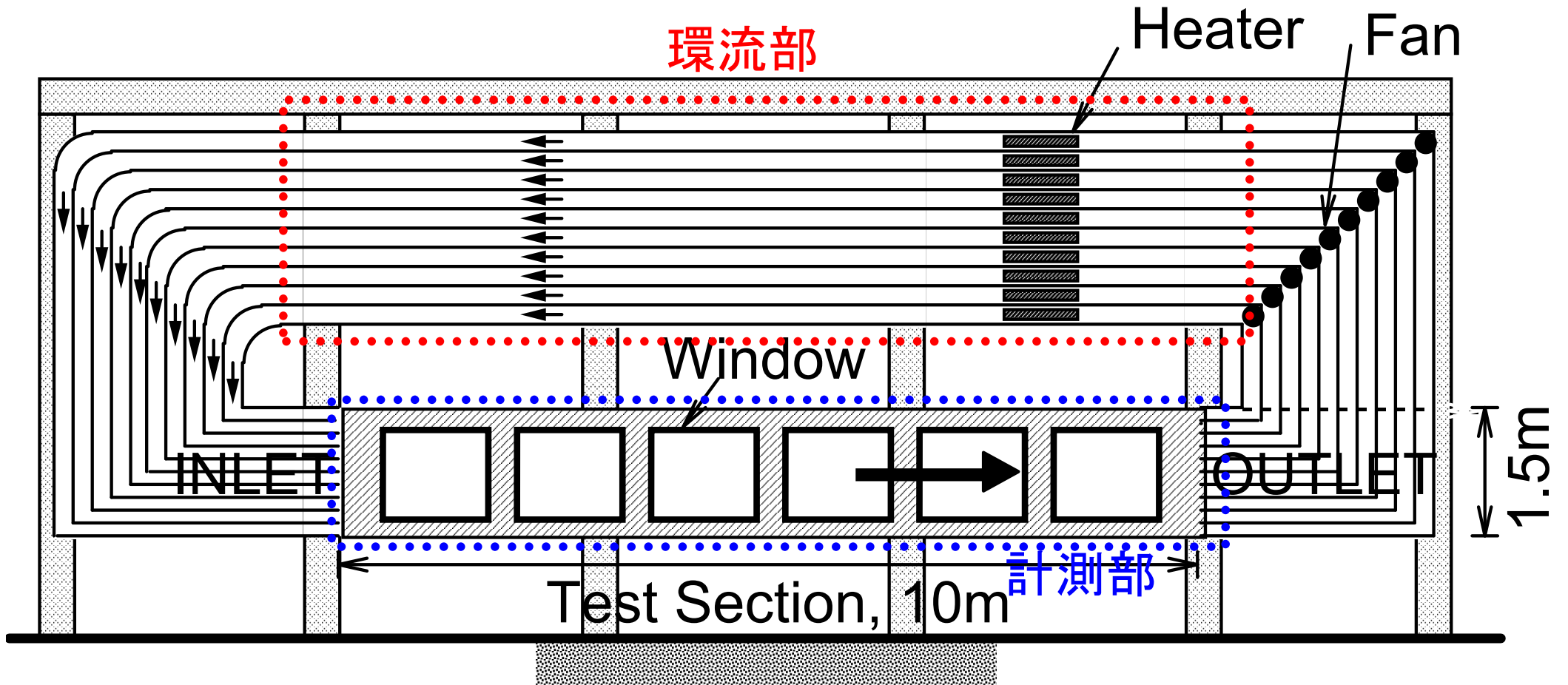
本日の話題

- 内部碎波
- 密度成層の鉛直混合（受熱・放熱時）
- 三層系の取水流
- 乱流モデルによる鉛直混合解析
- 熱塩対流（二重拡散）
- 対流混合層の秩序構造
- 貯水池表層の自然対流
- 成層型貯水池の内部波解析
- 富栄養貯水池の部分循環特性
- 貧酸素深水層の熱塩対流
- 化学成層流
- 石積み堰の環境水理
- 石積み水制
- 河道内植生
- 水工学への期待

対流境界層, Convective Boundary Layer

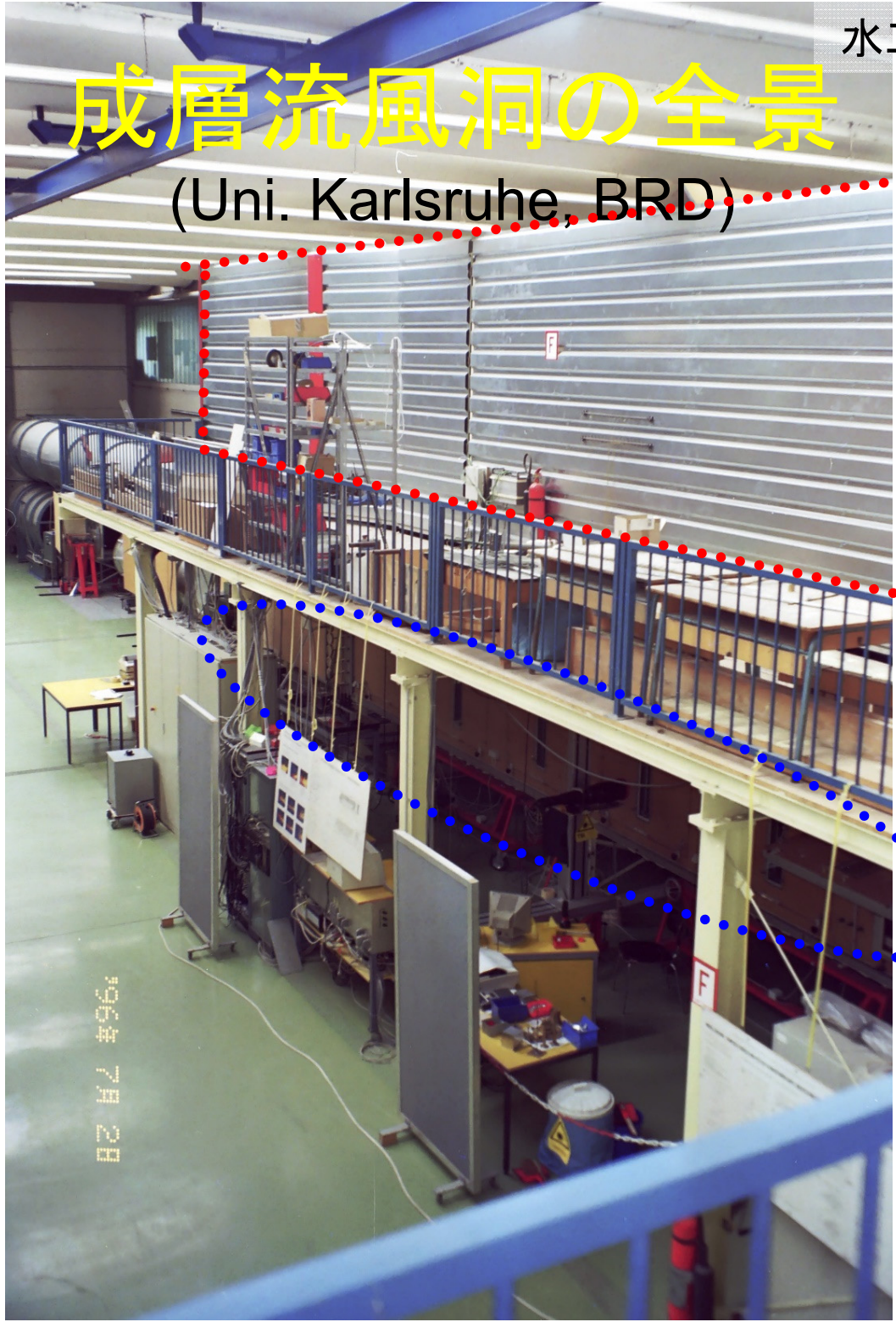


成層流風洞 (Uni.Karlsruhe, BRD)



成層流風洞の全景

(Uni. Karlsruhe, BRD)

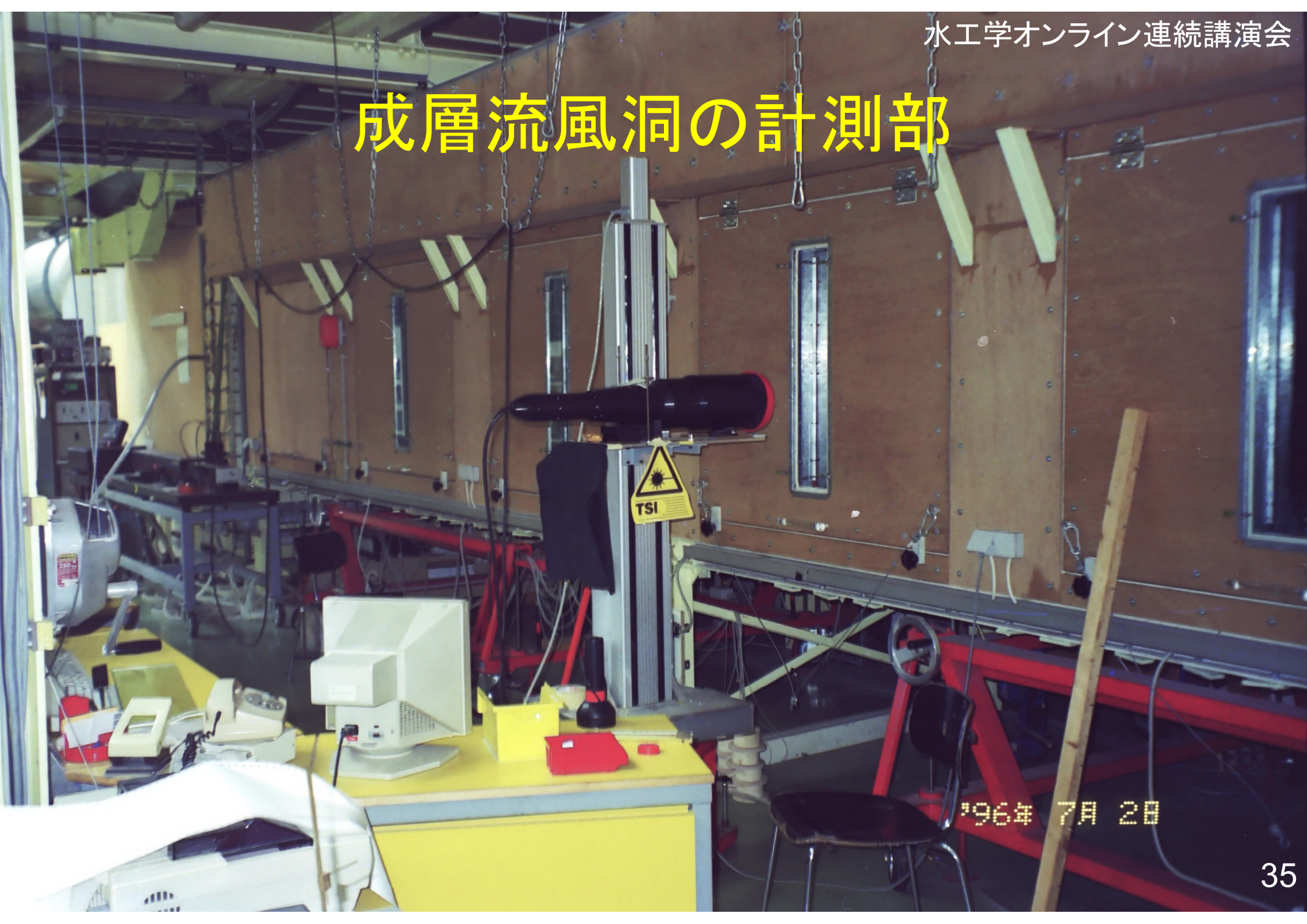


環流部

計測部

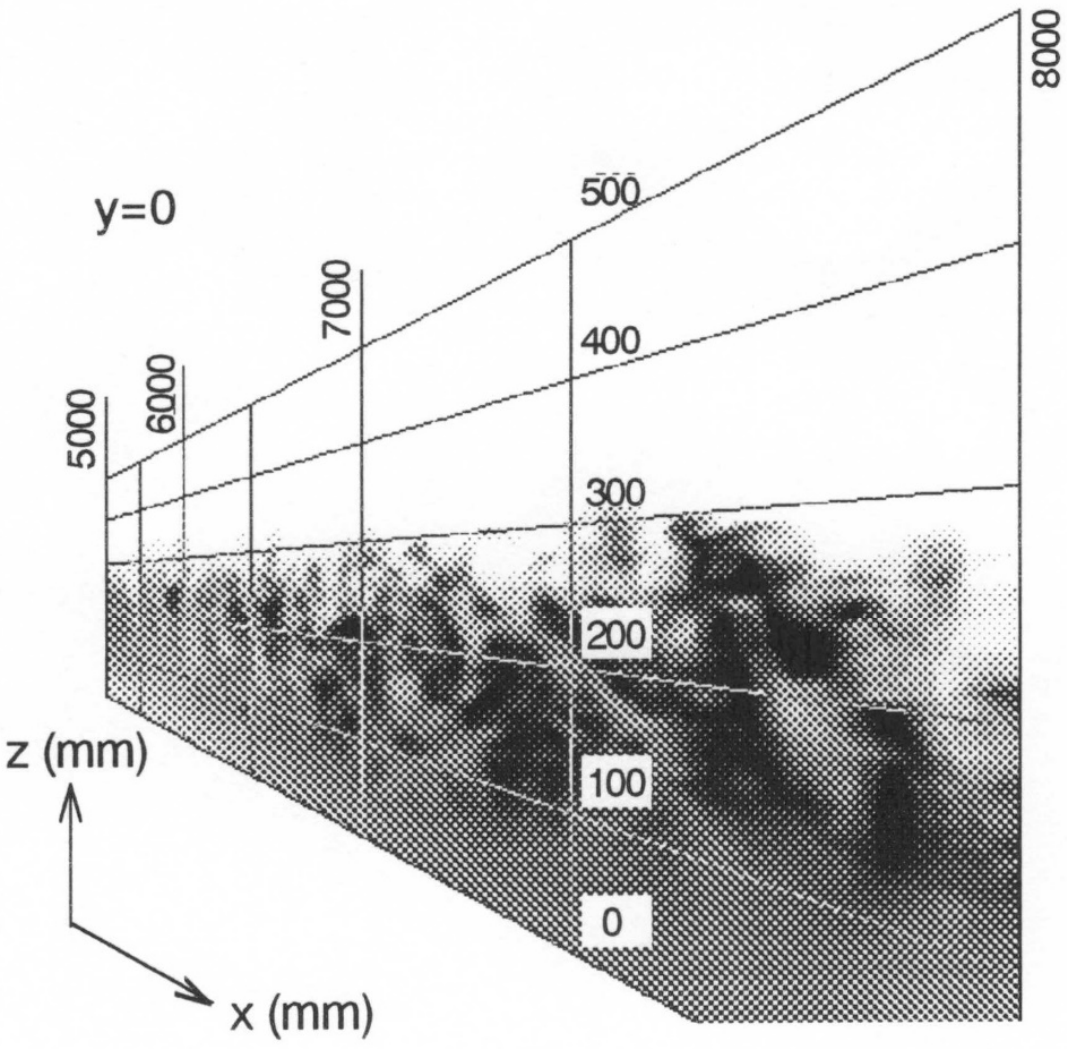
1968 7月 28

成層流風洞の計測部

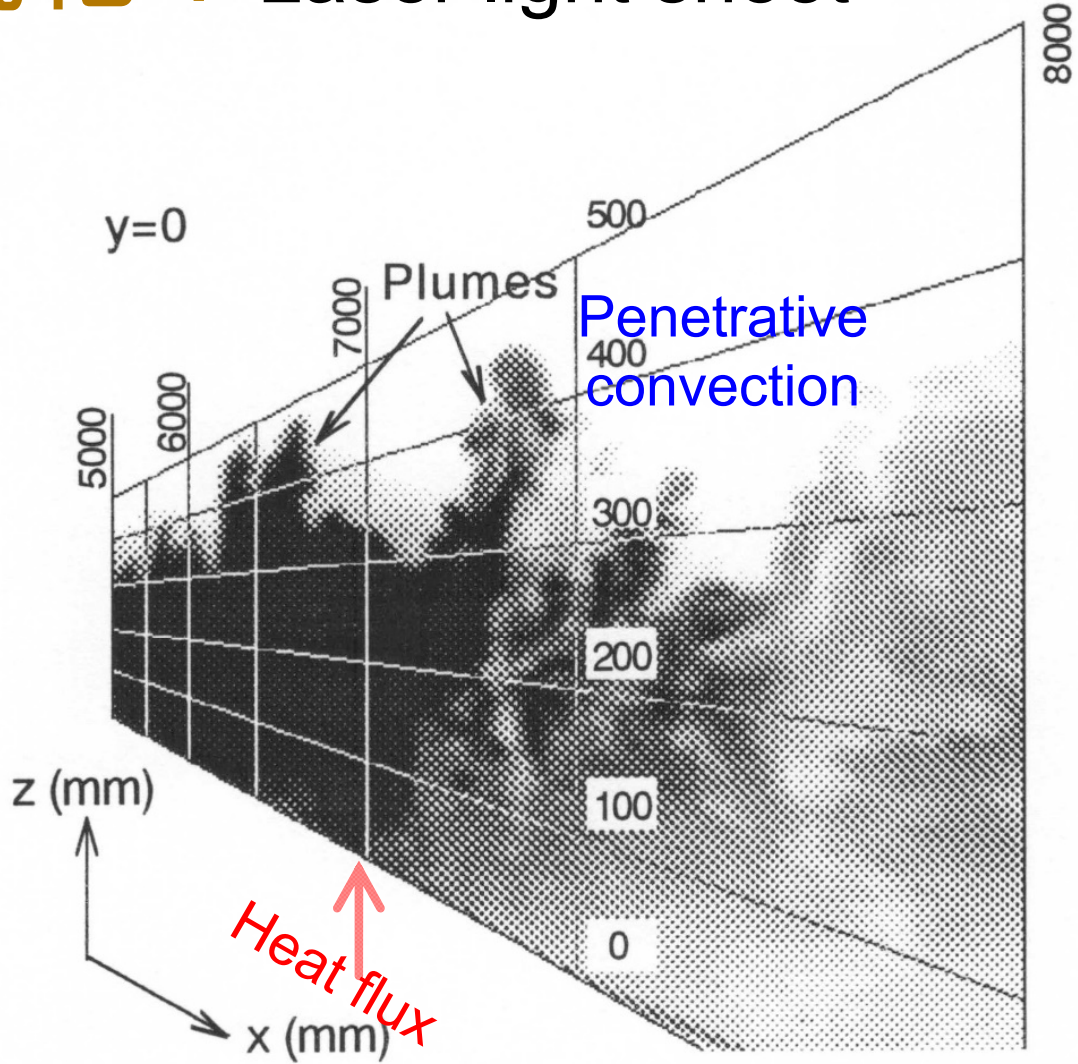


'96年 7月 2日

大気成層流の可視化 : Laser light sheet



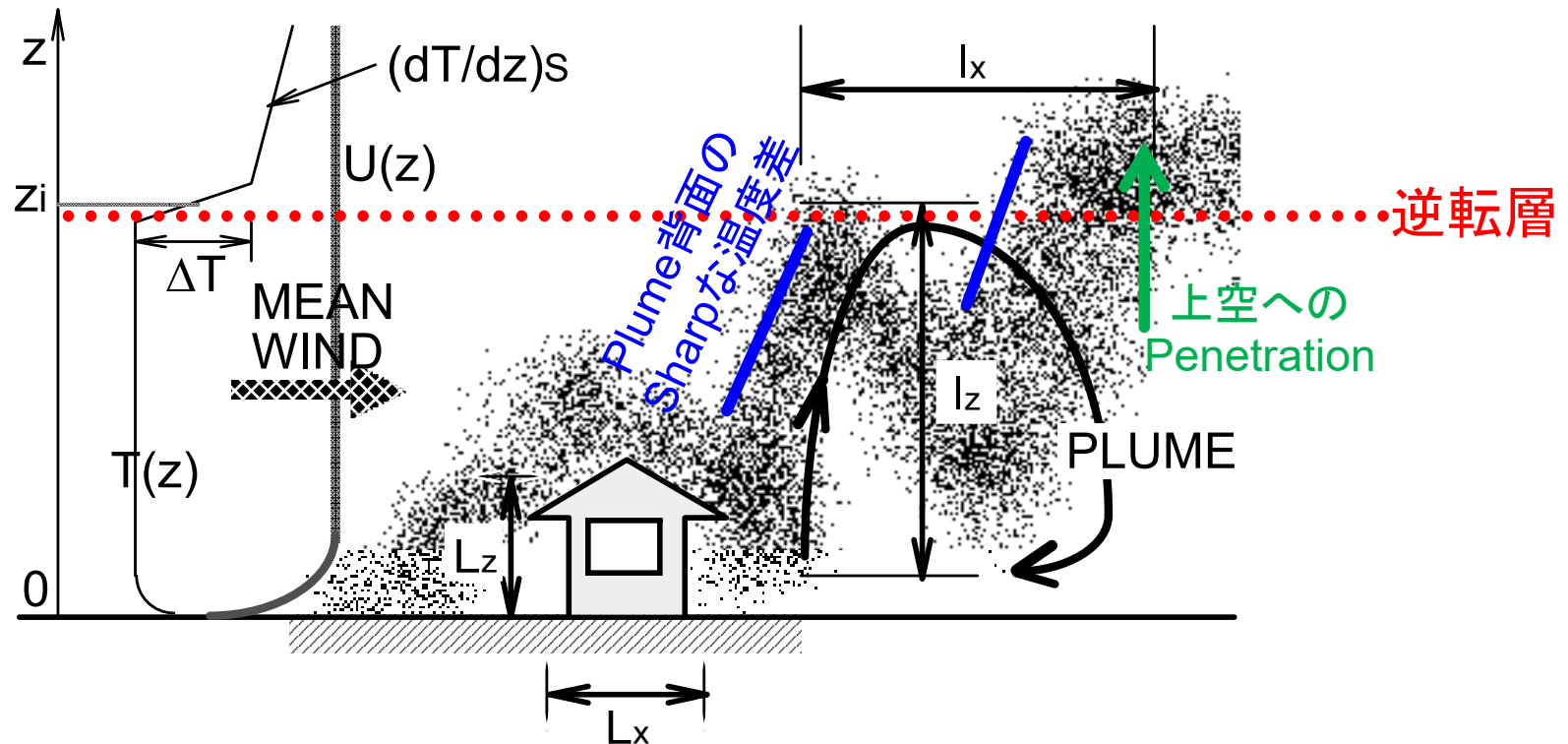
(a) Stratified flow without bottom heating
 $\Delta T=30^\circ\text{C}$, $Q_S=0 \text{ W/m}^2$
 成層流 (底面加熱なし)



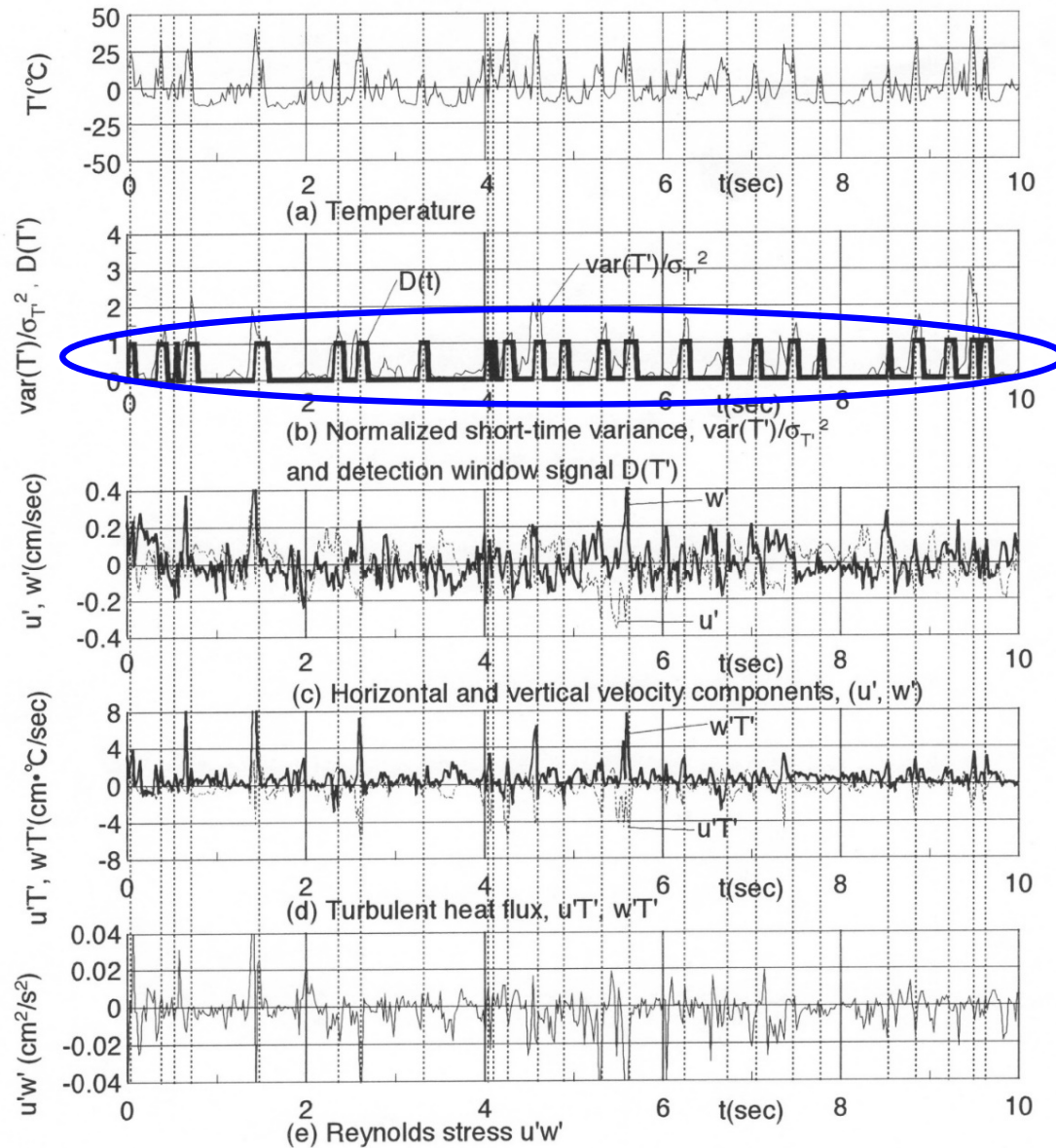
(b) Convective boundary layer
 $\Delta T=30^\circ\text{C}$, $Q_S=1,250 \text{ W/m}^2$
 対流境界層: CBL (底面加熱あり)

Thermal Plumeの条件付抽出：VITA

- 背景乱流よりゆっくりしている→Low pass filter
- $d\theta_0'/dt < 0$: Thermal Plume背面の通過 + 逆転層への Penetrationの際に温度が急低下



乱流諸量の時系列と抽出信号

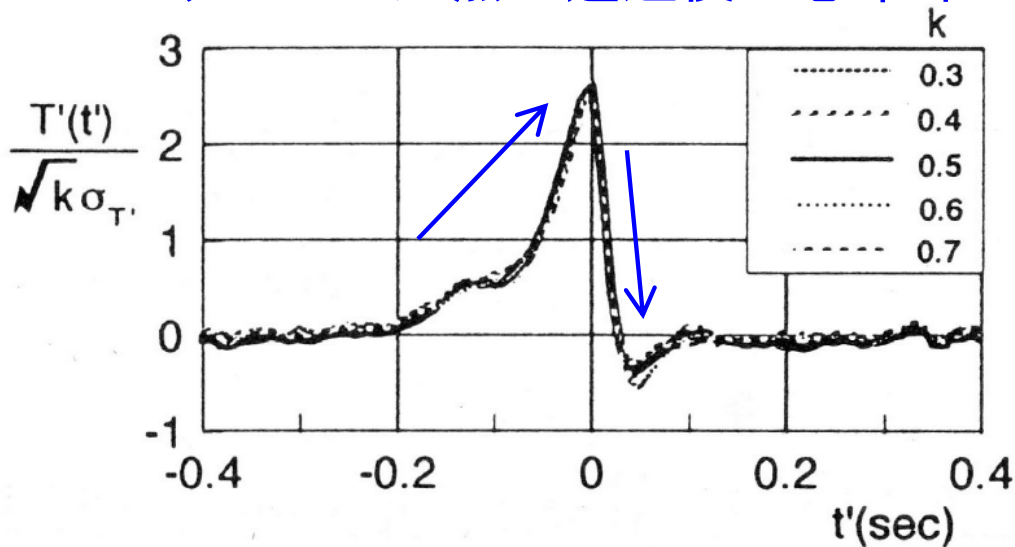


←抽出信号

信号がONの時系列を切り出して平均する

条件付き抽出された温度時系列

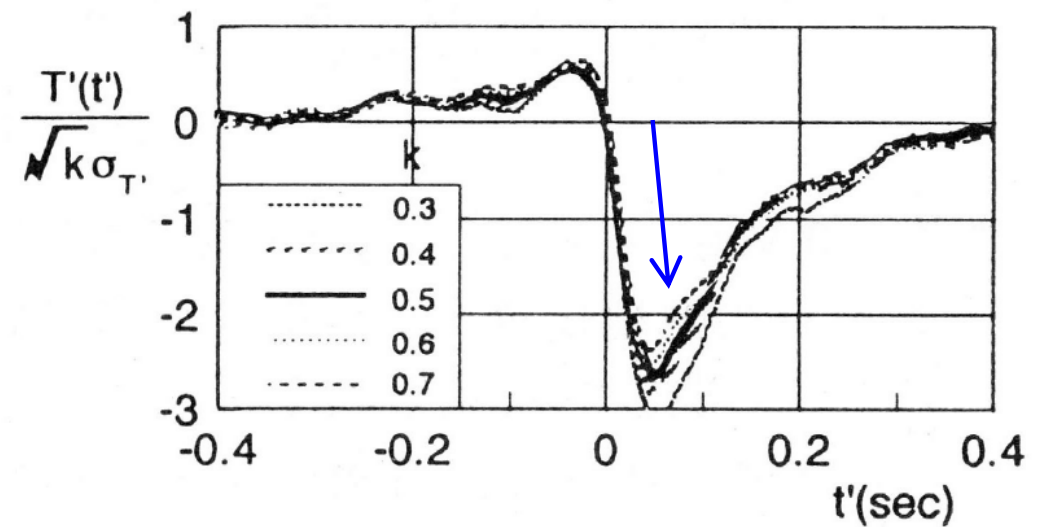
Thermal Plumeの通過時のゆったりとした加熱と通過後の急冷却



(a) Dependency of conditionally averaged time series of T' on the threshold, k ($t_a=0.1\text{sec}$)

地面付近
(貯水池水面)

上層大気の下層連行による急冷却



(a) Dependency of conditionally averaged time series of T' on the threshold, k ($t_a=0.1\text{sec}$)

逆転層
(水温躍層)

条件付き抽出された温度変動強度と 熱フラックスの鉛直分布

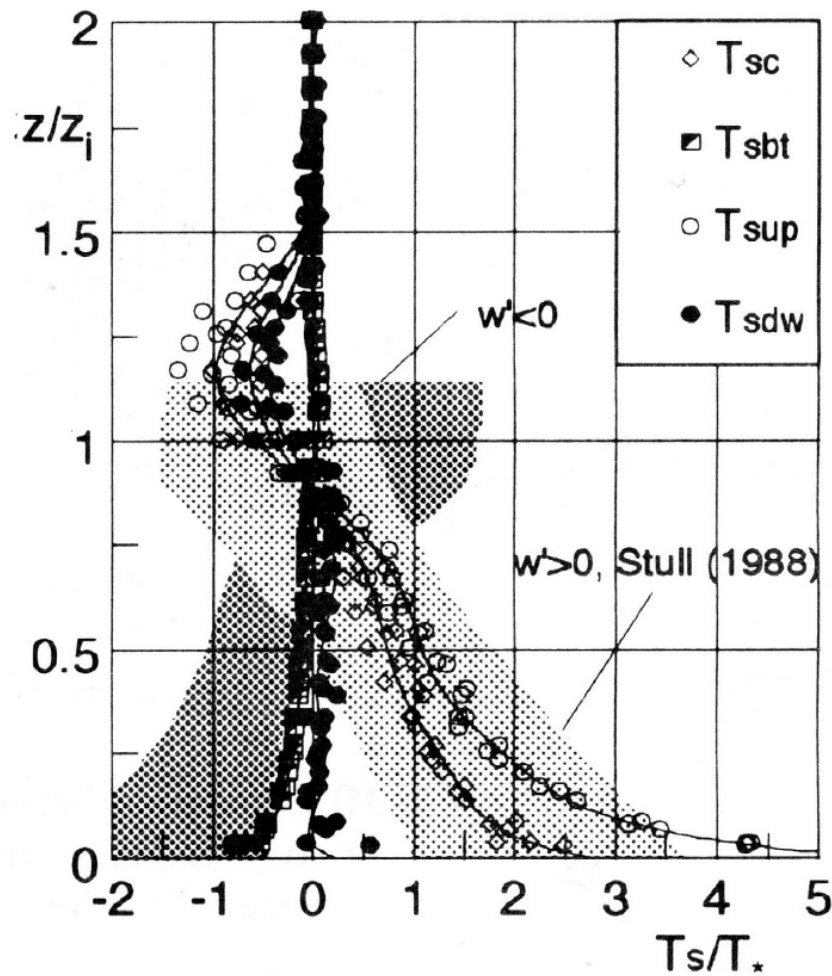


Fig.24 Conditionally averaged profiles of temperature deviation, T_s/T_* .

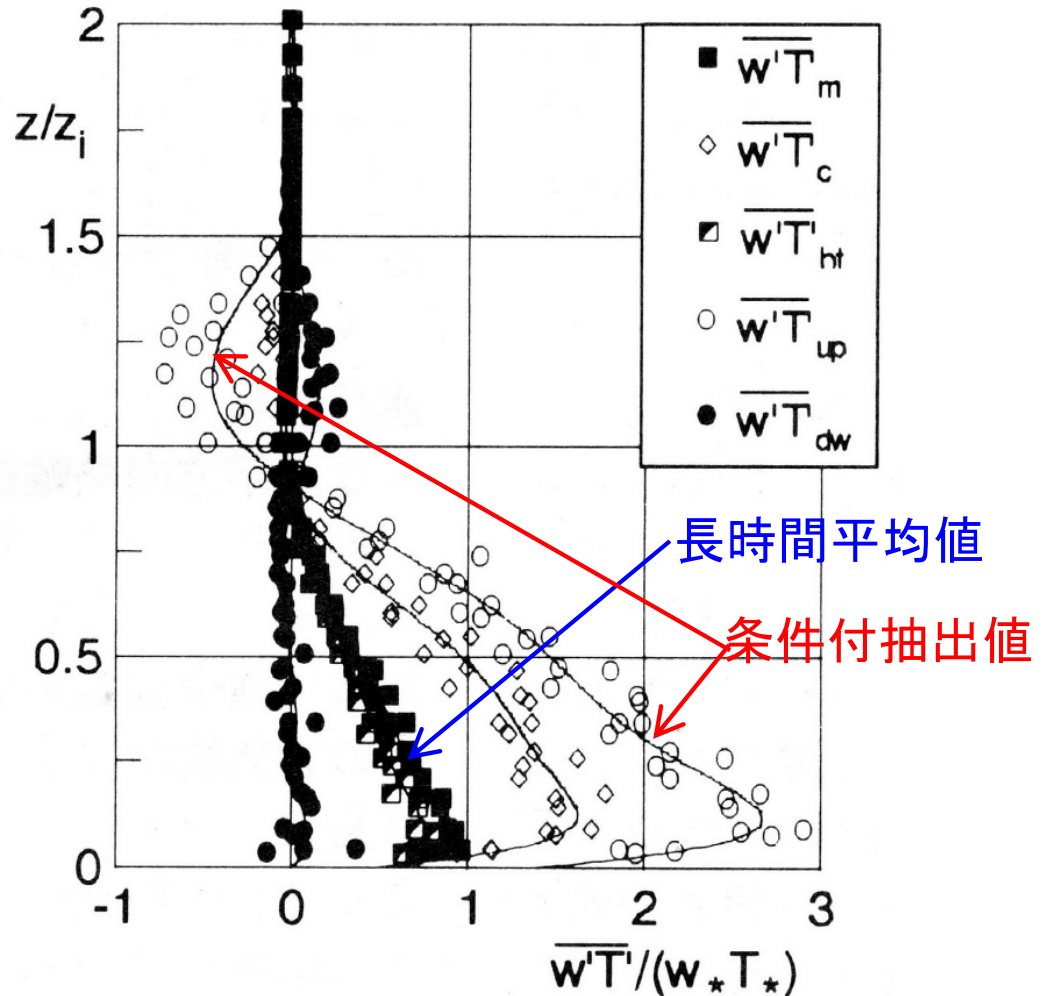


Fig.29 Conditionally averaged vertical component of turbulent heat flux, $\overline{w'T} / (u_* T_*)$.

本日の話題

- 内部砕波
- 密度成層の鉛直混合（受熱・放熱時）
- 三層系の取水流
- 乱流モデルによる鉛直混合解析
- 熱塩対流（二重拡散）
- 対流混合層の秩序構造
- 貯水池表層の自然対流
- 成層型貯水池の内部波解析
- 富栄養貯水池の部分循環特性
- 貧酸素深水層の熱塩対流
- 化学成層流
- 石積み堰の環境水理
- 石積み水制
- 河道内植生
- 水工学への期待

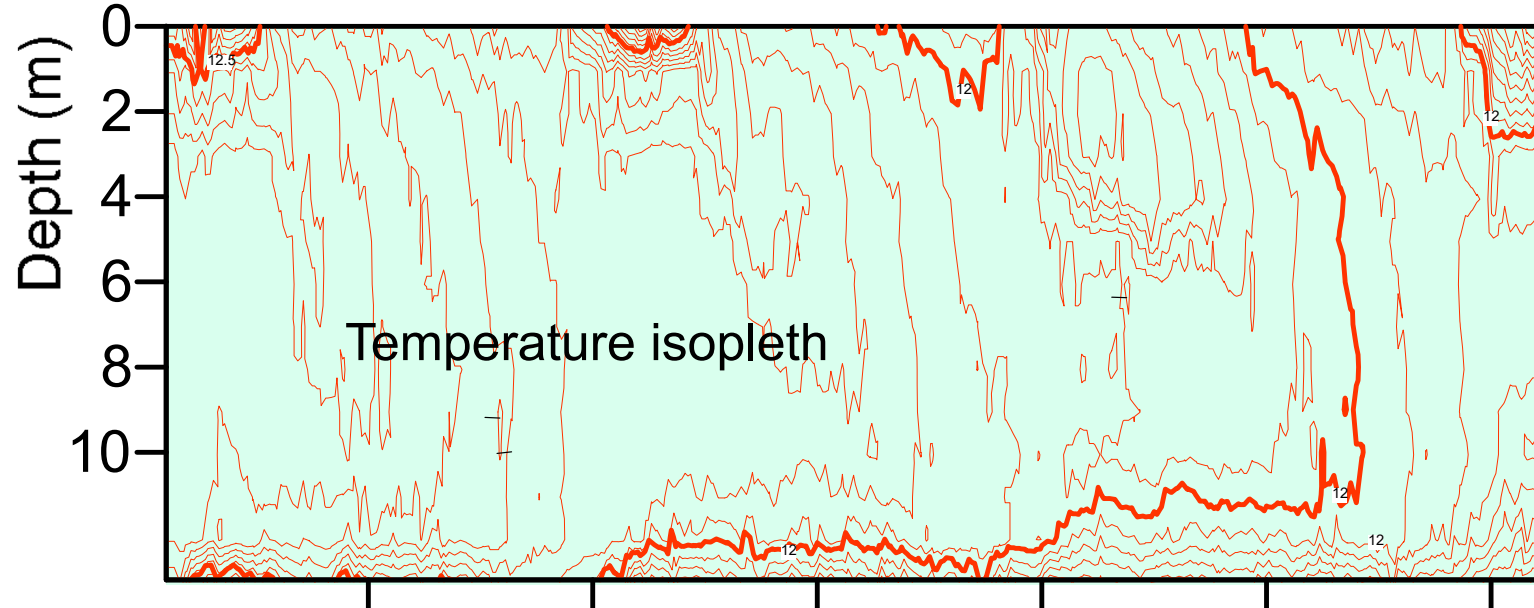
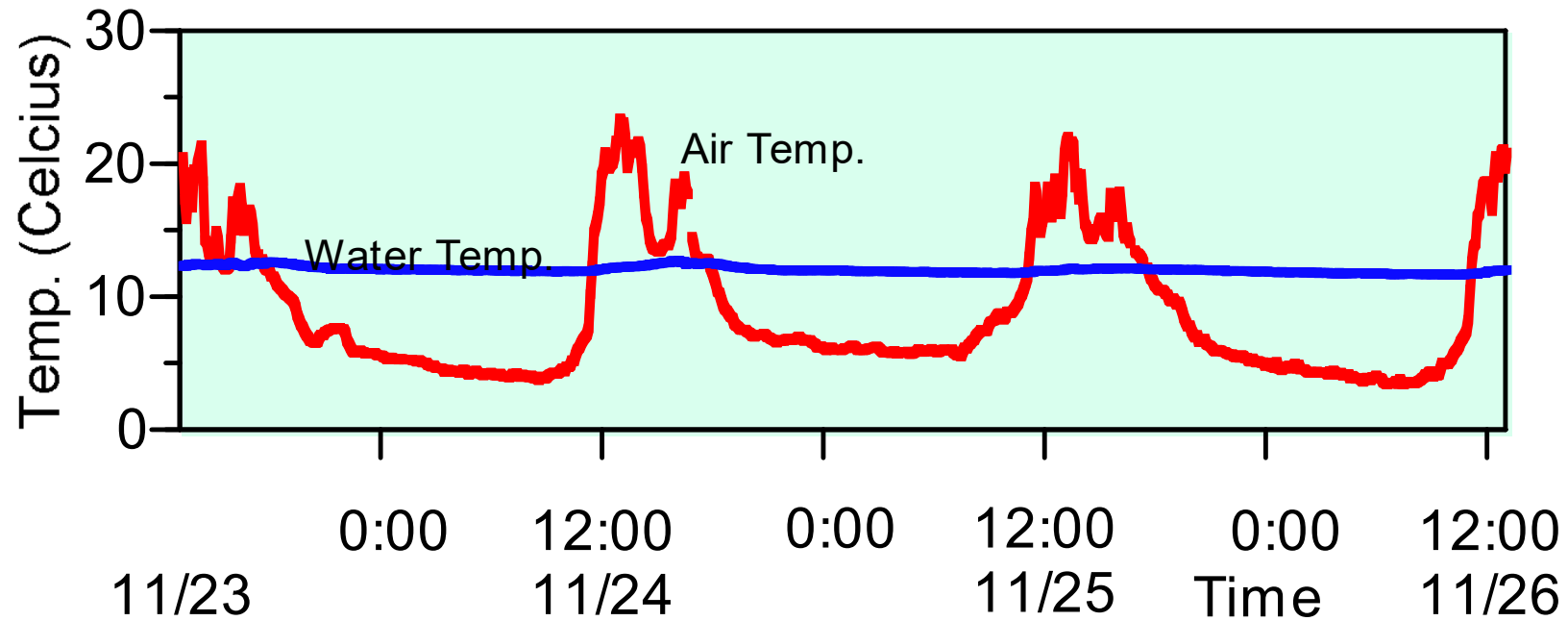
貯水池でのNocturnal Coolingの観測

30 thermistor sensors are installed at 0.5-1.0m spacing in the vertical direction.

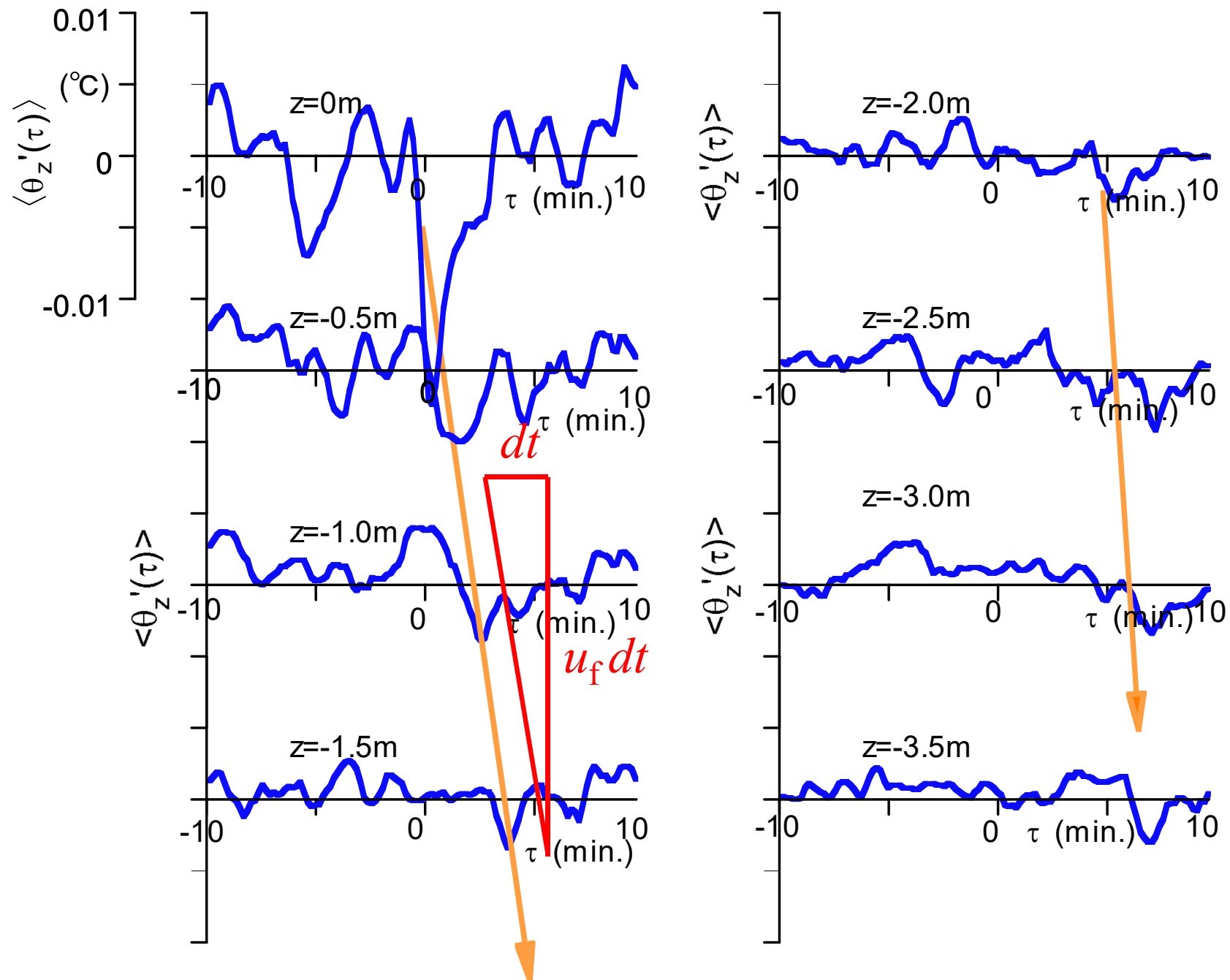
水温連続観測

Sampling interval: 10.5 sec
Time constant: 0.8sec
Accuracy: $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$

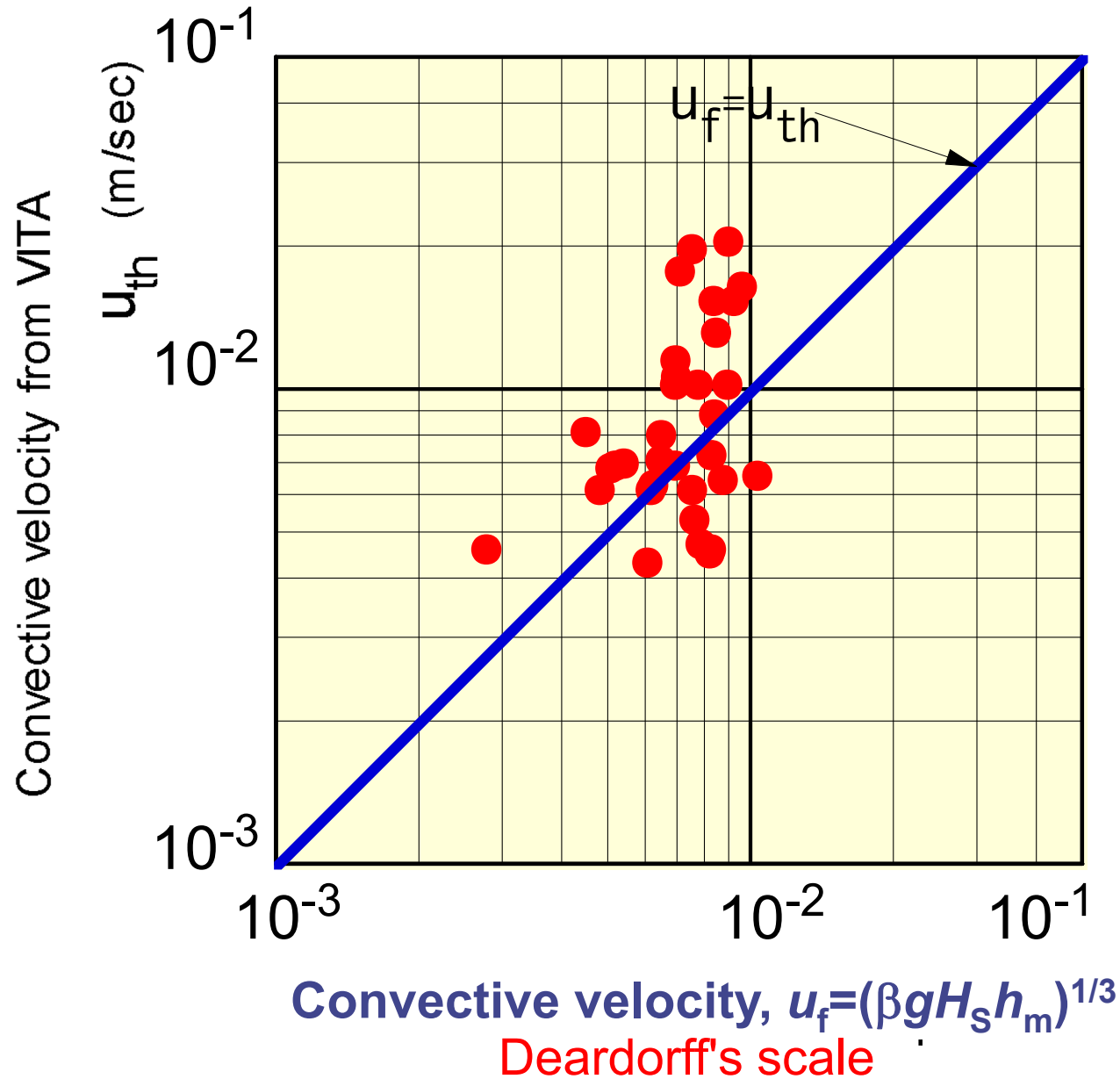
気温・水温の時間変化（3昼夜）



条件付抽出された各層の水温時系列



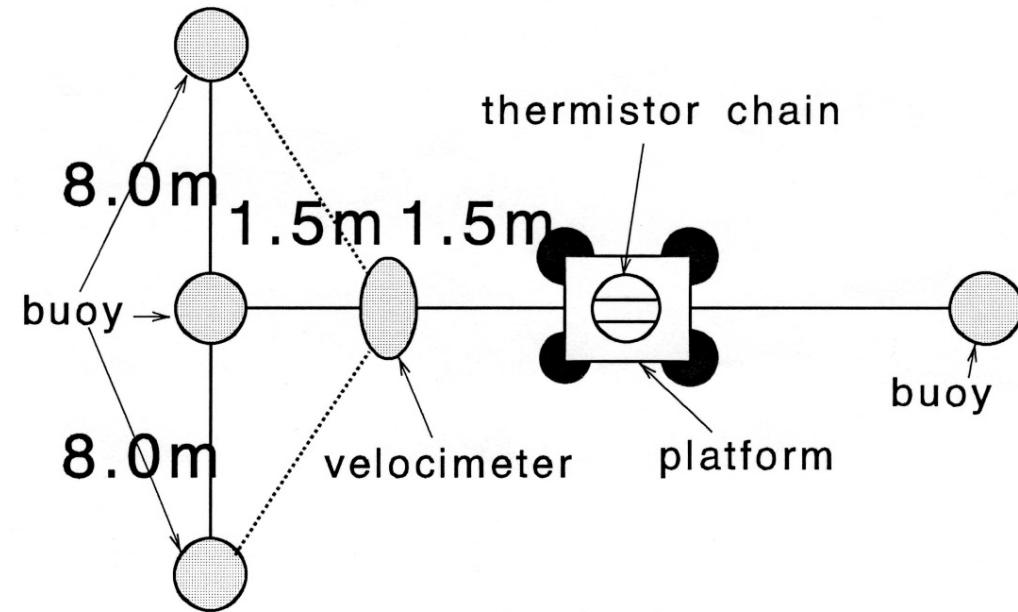
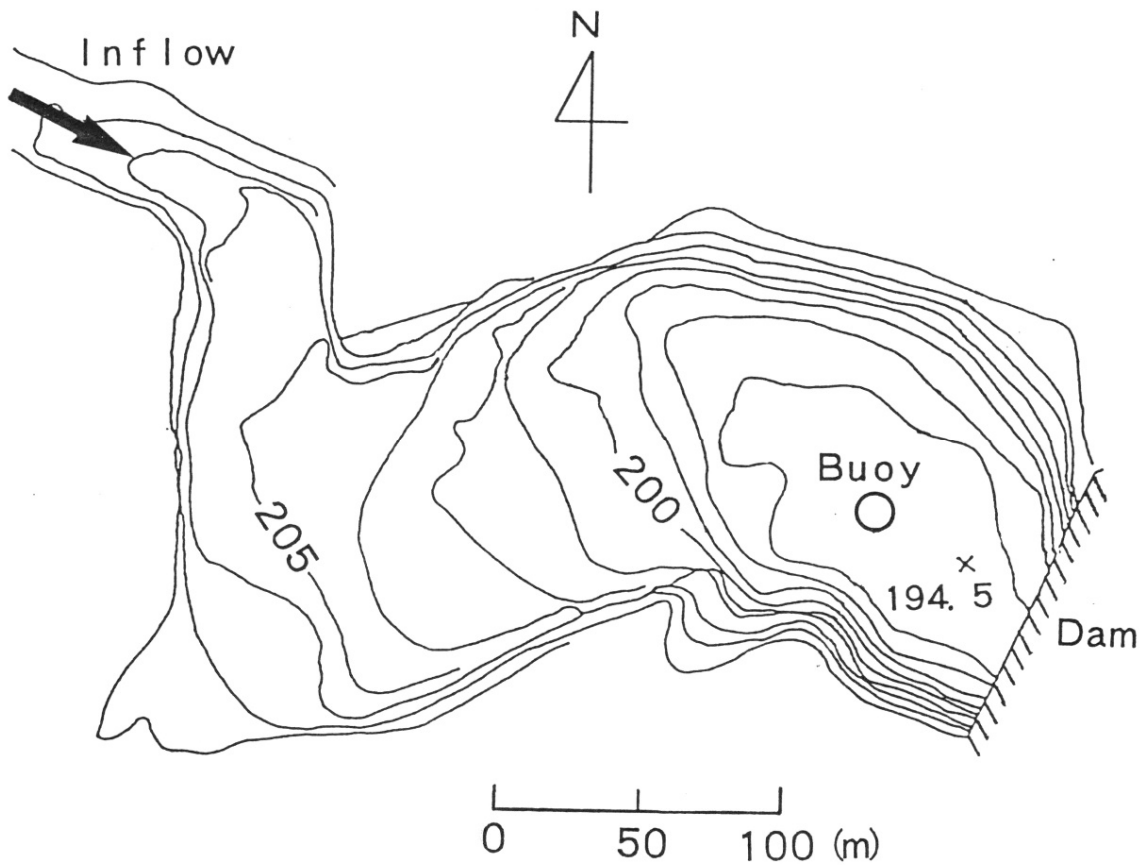
Thermal plumeの速度と Deardorff's scale



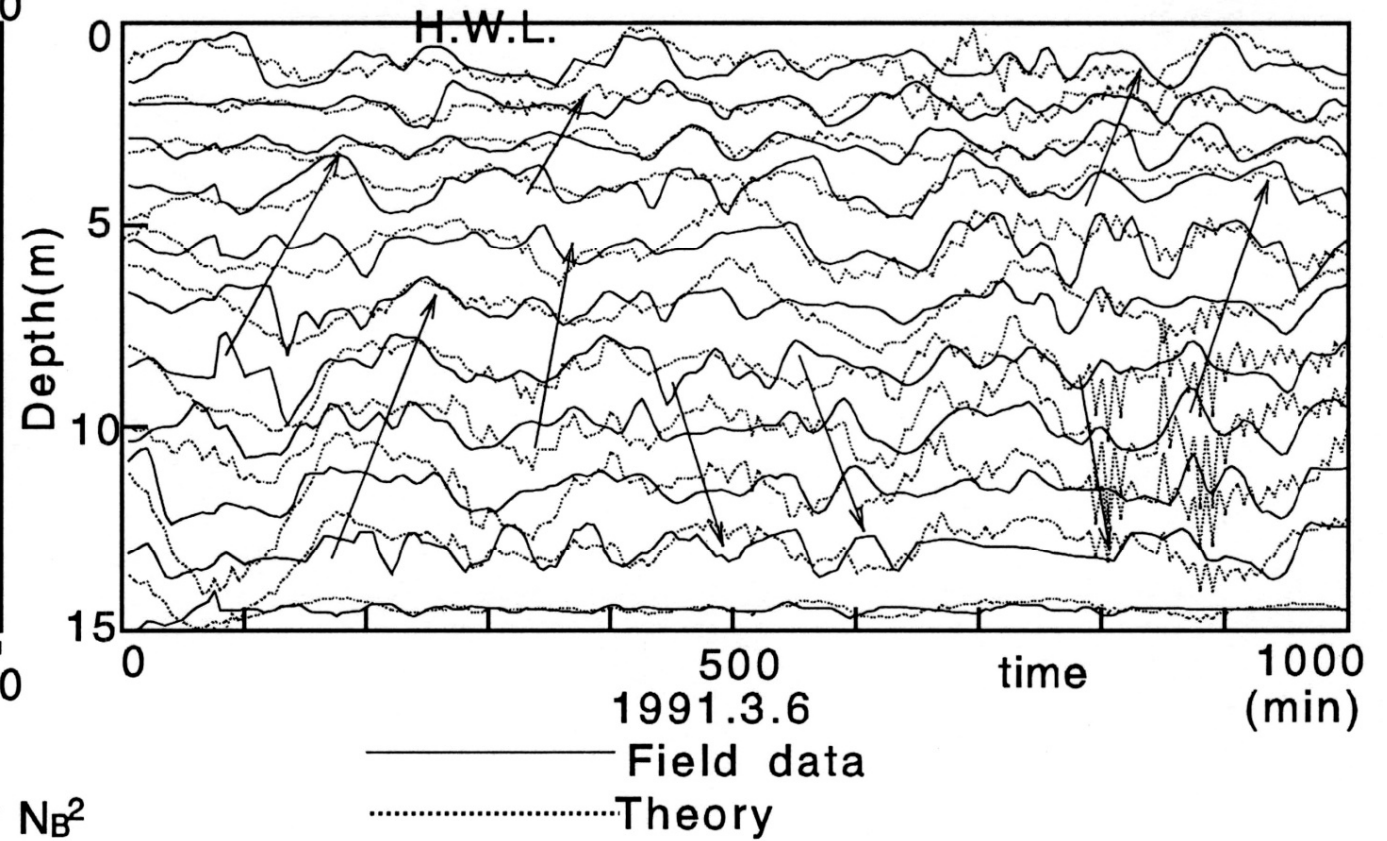
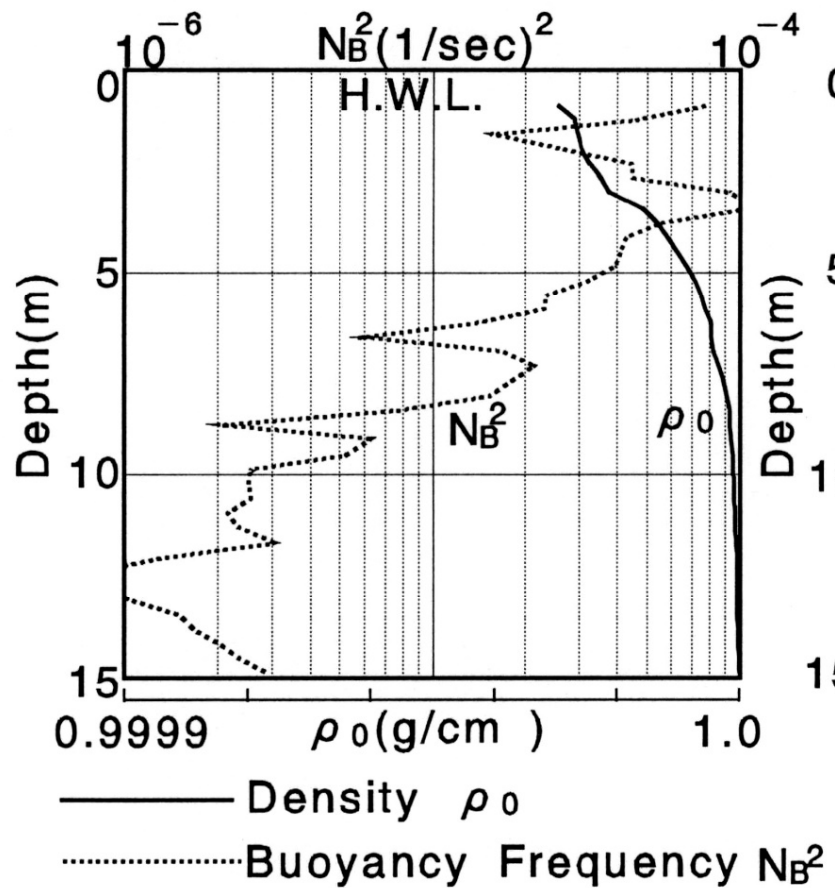
本日の話題

- 内部碎波
- 密度成層の鉛直混合（受熱・放熱時）
- 三層系の取水流
- 乱流モデルによる鉛直混合解析
- 熱塩対流（二重拡散）
- 対流混合層の秩序構造
- 貯水池表層の自然対流
- **成層型貯水池の内部波解析**
- 富栄養貯水池の部分循環特性
- 貧酸素深水層の熱塩対流
- 化学成層流
- 石積み堰の環境水理
- 石積み水制
- 河道内植生
- 水工学への期待

内部波の観測・解析（布引貯水池）



内部波の観測（布引貯水池）



密度と浮力周波数の分布

内部変位（観測vs理論）

内部変位の鉛直分布（理論vs観測）

波動方程式

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2}(\nabla^2 \phi) + \frac{1}{\rho_0} \frac{d\rho_0}{dz} - \frac{\partial^2}{\sigma t^2} \phi_z \left[-\frac{g}{\rho_0} \frac{d\rho_0}{dz} \phi_{xx} \right] = 0$$

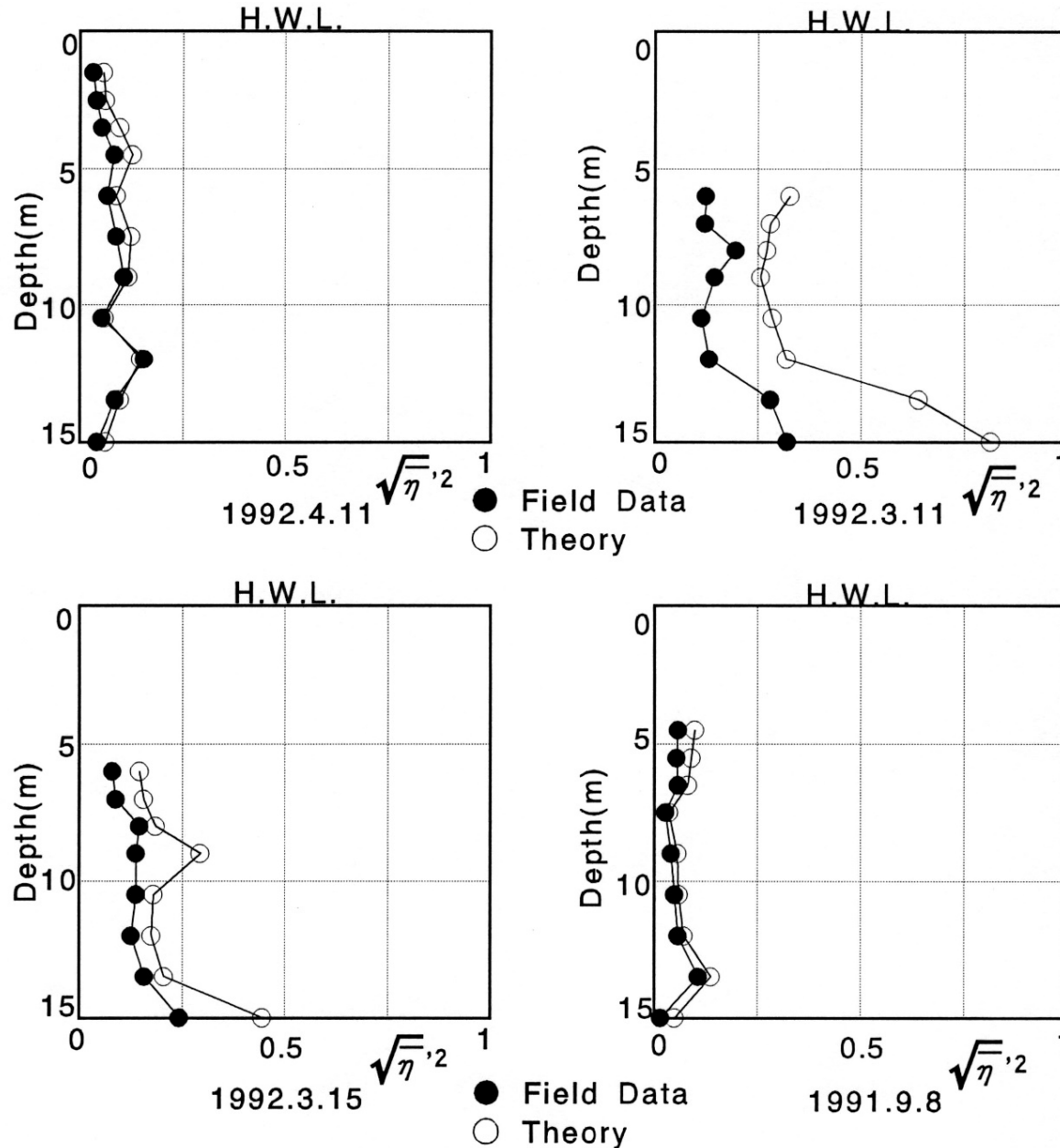
浮力

内部変位

$$\eta(x, z, t) = \int w dt = \int (\partial \phi / \partial x) dt$$

$$= \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \frac{-C_{mn} k_{mn}}{\sqrt{\rho_0} \sigma_m} X_{mn}(z) \exp[i(k_{mn} x - \sigma_m t)]$$

内部変動強度の鉛直分布 (理論vs観測)



本日の話題

- 内部砕波
- 密度成層の鉛直混合（受熱・放熱時）
- 三層系の取水流
- 乱流モデルによる鉛直混合解析
- 熱塩対流（二重拡散）
- 対流混合層の秩序構造
- 貯水池表層の自然対流
- 成層型貯水池の内部波解析
- 富栄養貯水池の部分循環特性
- 貧酸素深水層の熱塩対流
- 化学成層流
- 石積み堰の環境水理
- 石積み水制
- 河道内植生
- 水工学への期待

フード除去前（第II期）

マイクロバブル による深層曝気



大きな気泡

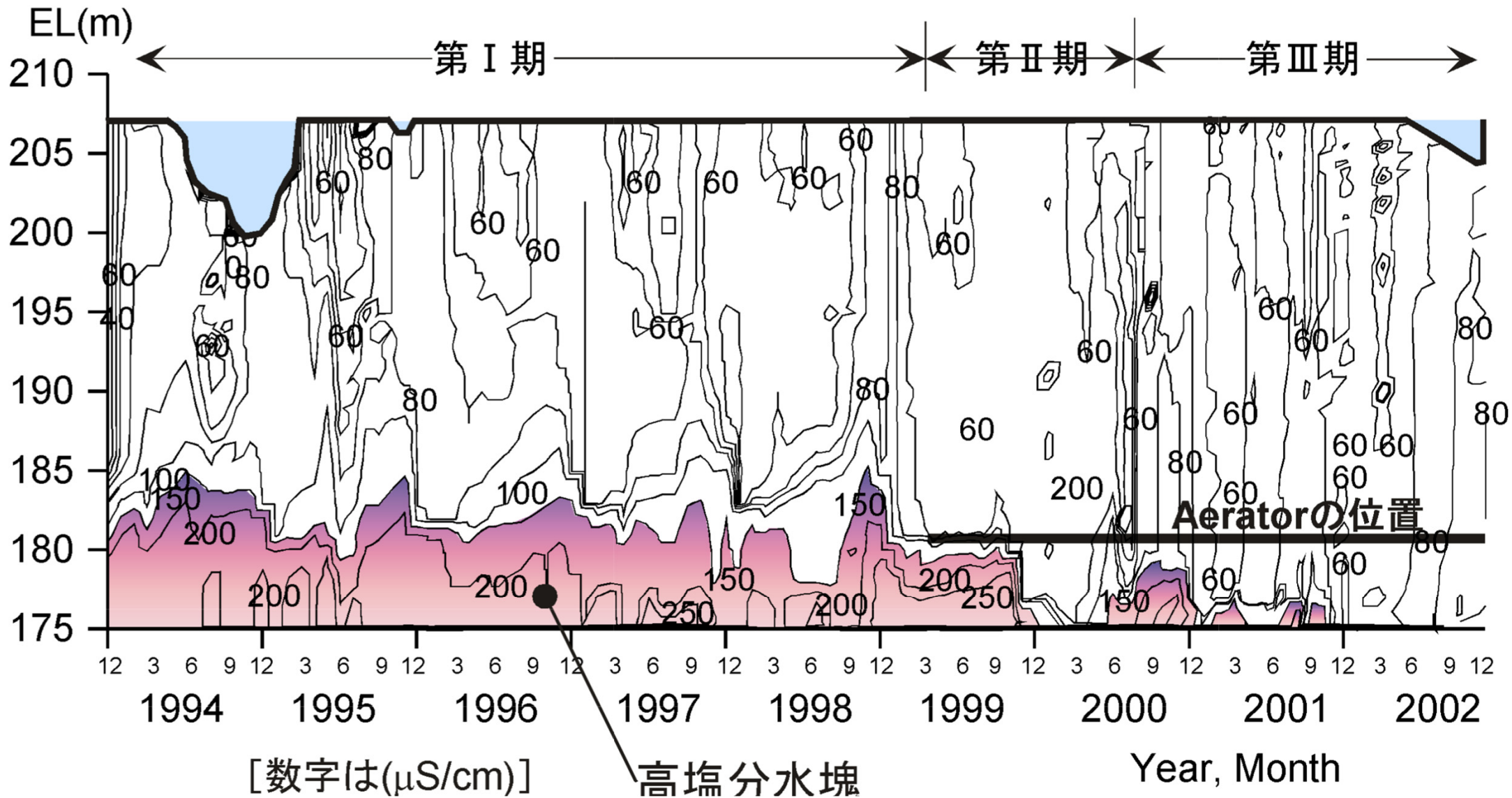
深層曝気の状態 (菅生ダム)

フード除去後（第III期）



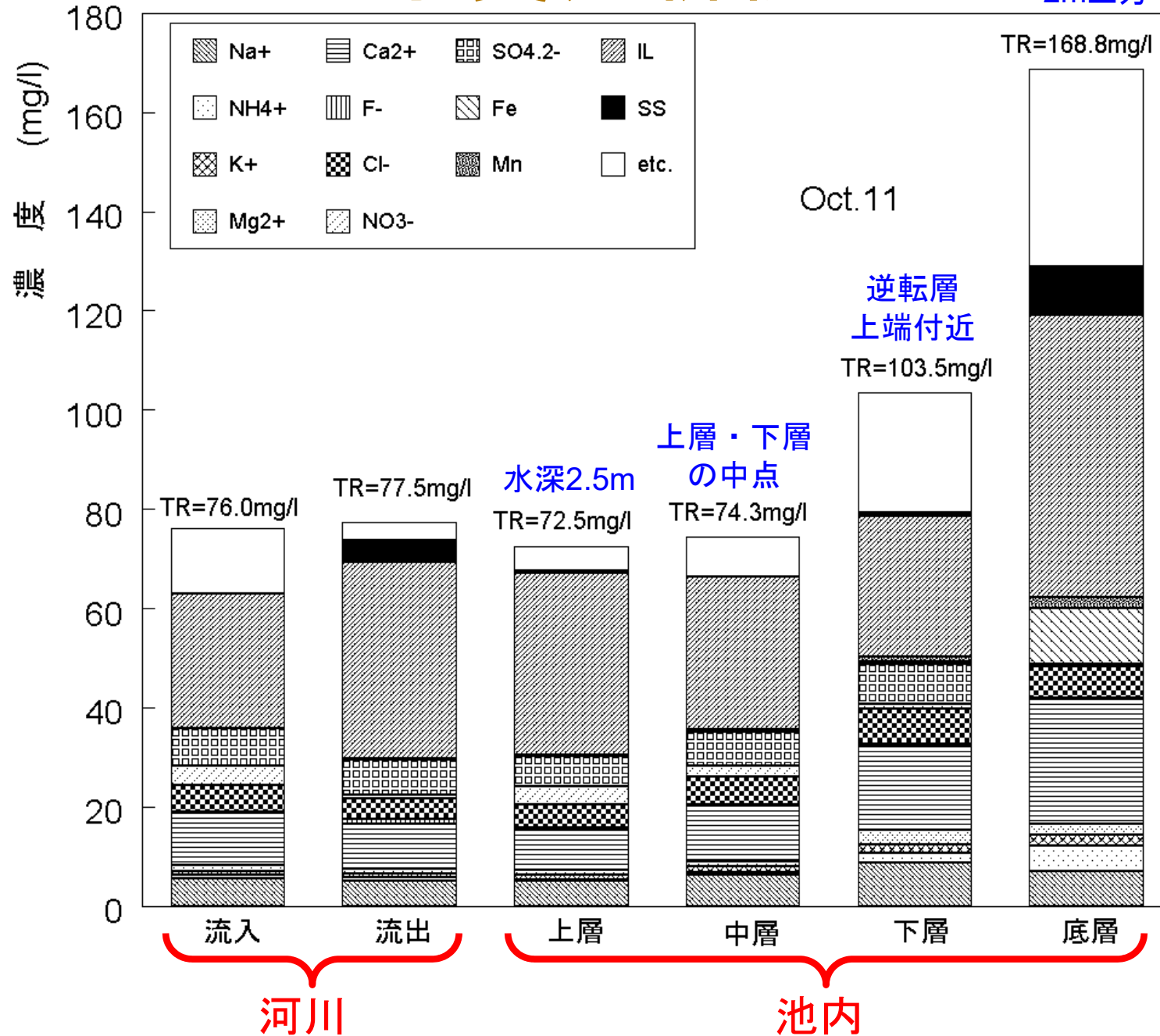
マイクロバブル

電気伝導度（≒塩分）の季節変化

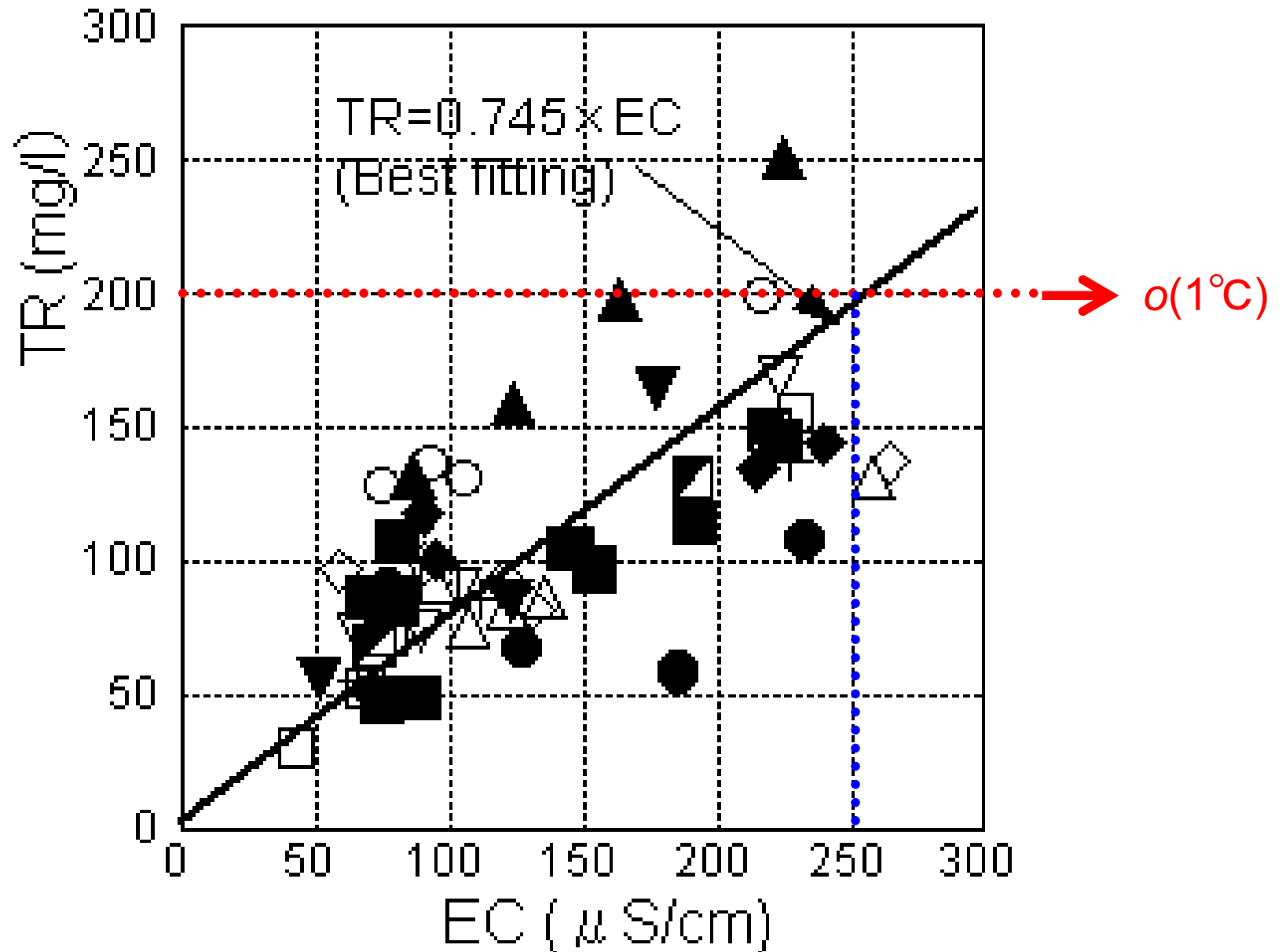


水質分析例

湖底より
2m上方

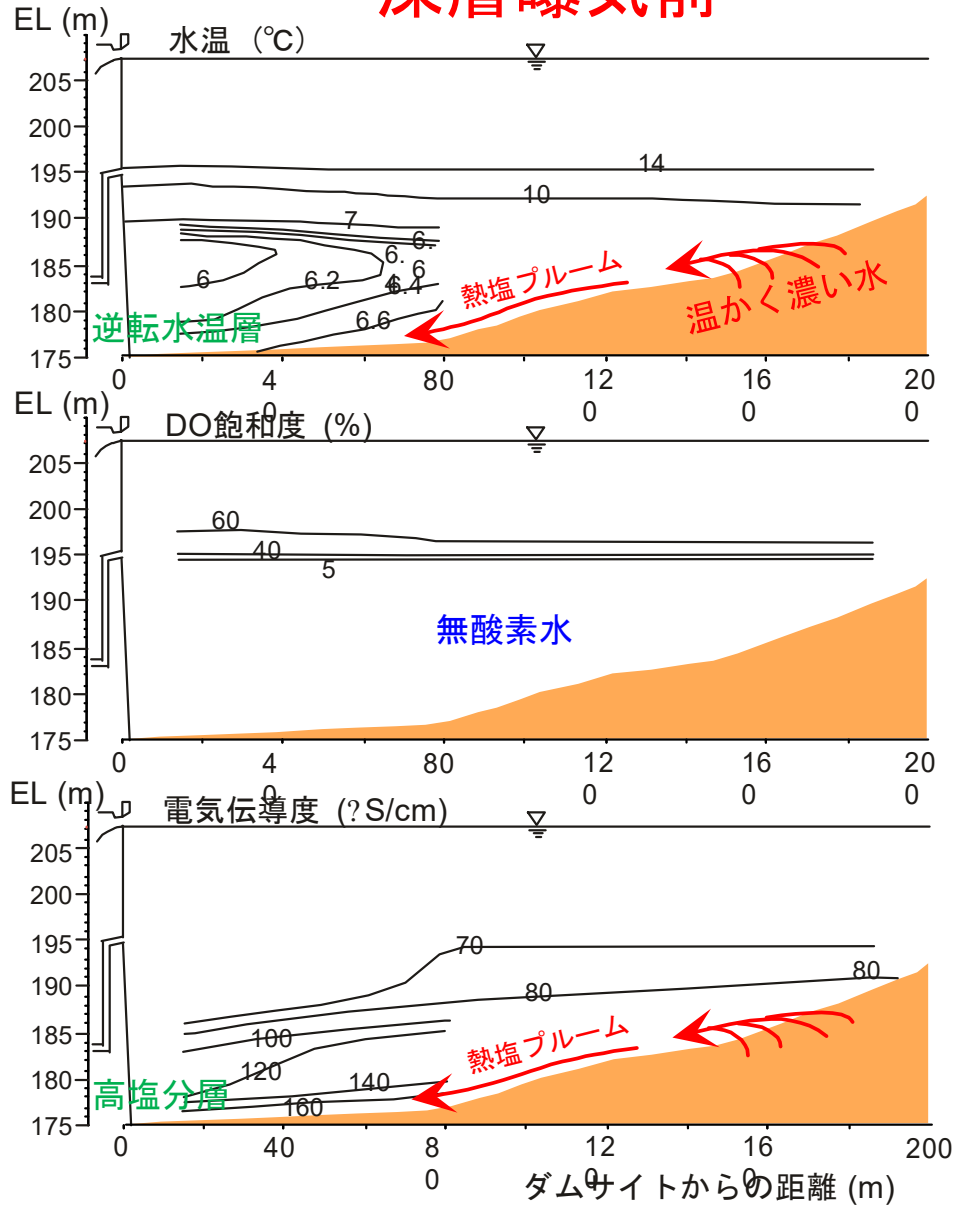


電気伝導度（塩分）と密度の相関



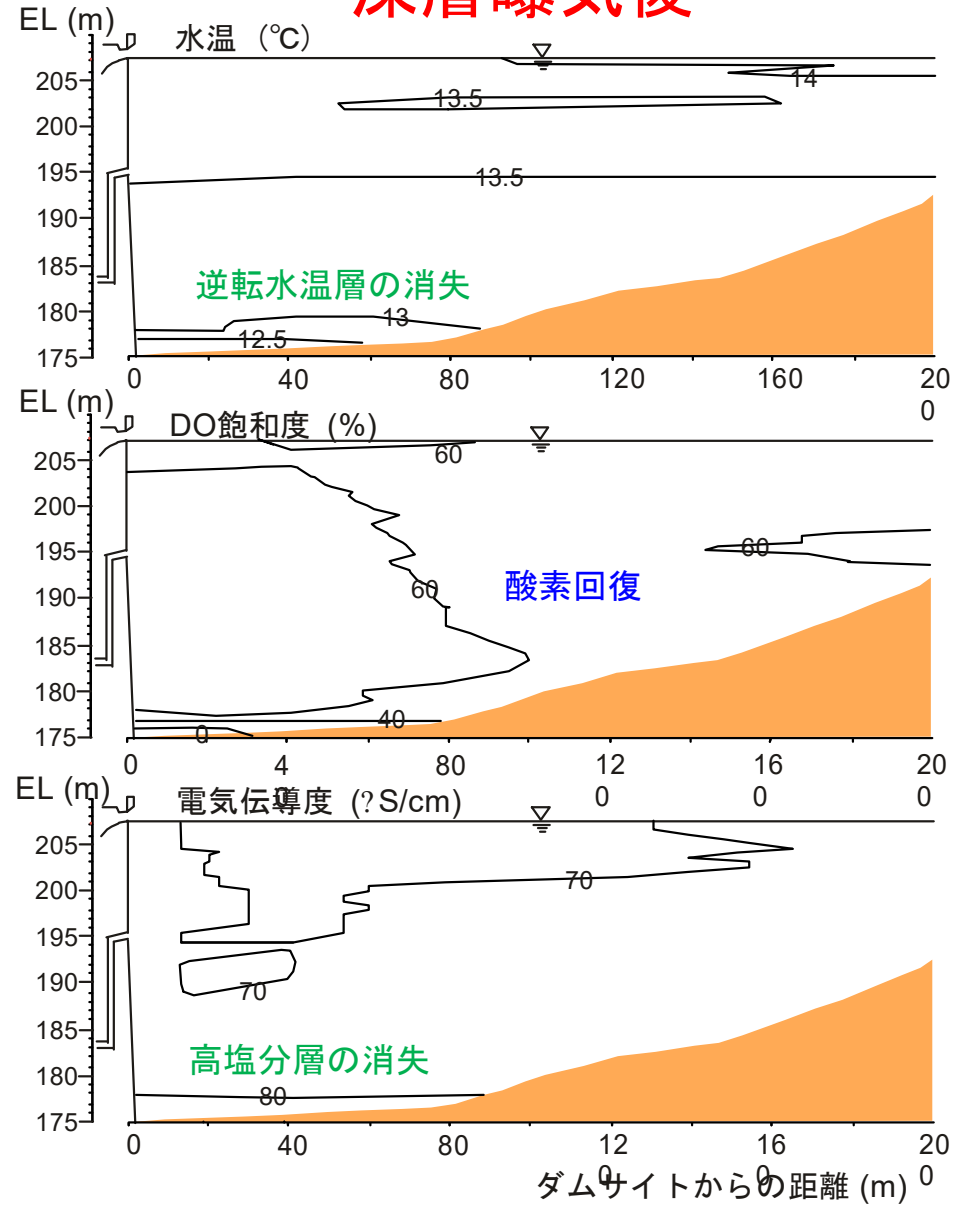
水質の縦断構造

深層曝気前

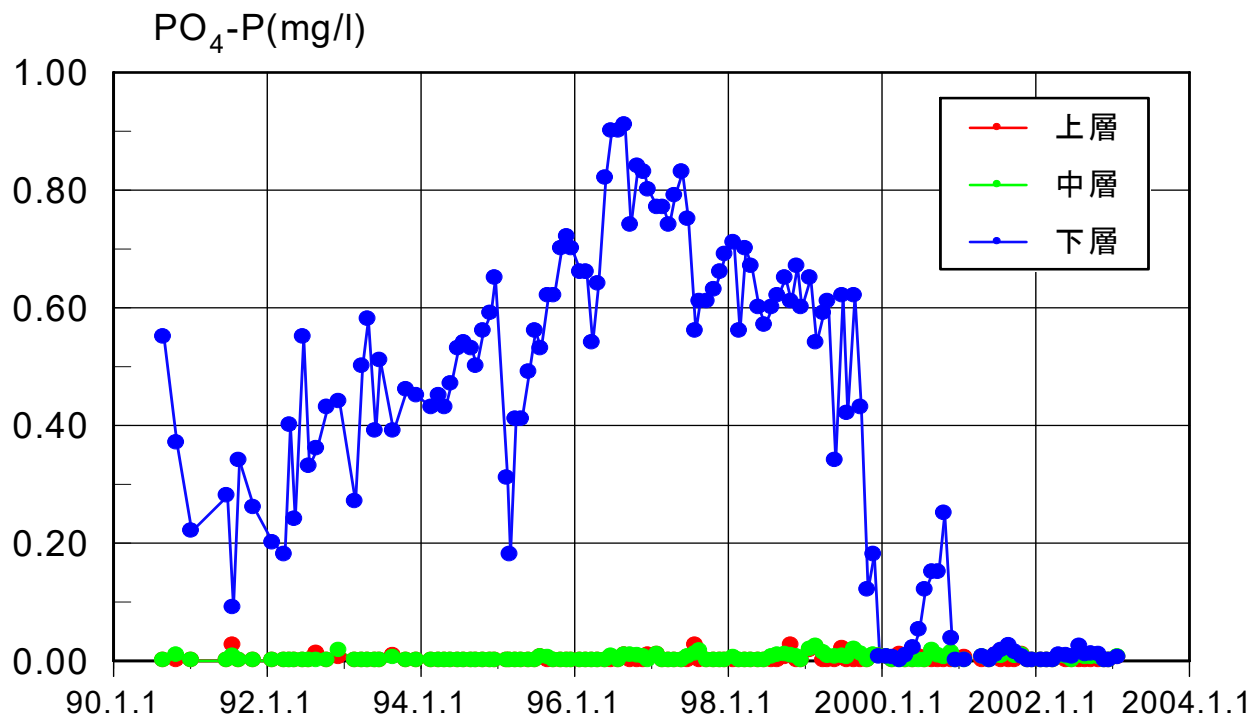


1998年11月

深層曝気後



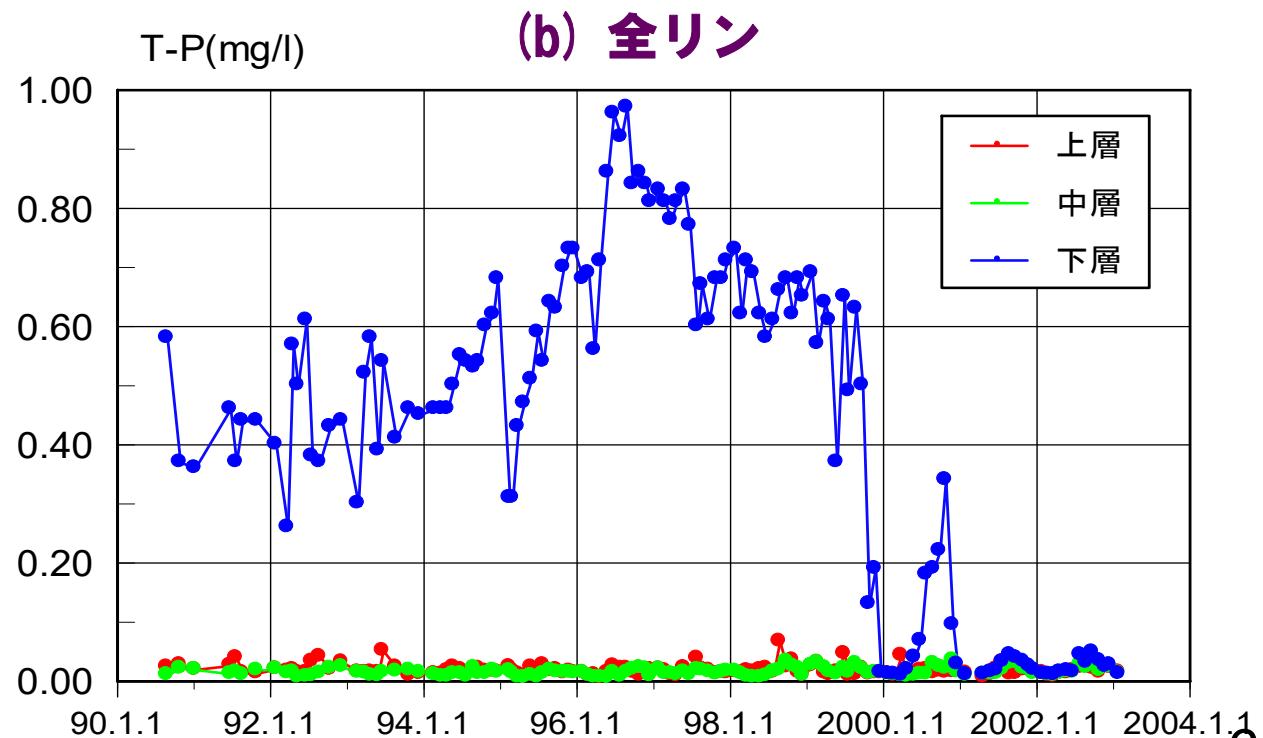
2001年11月



(a) 溶存態リン

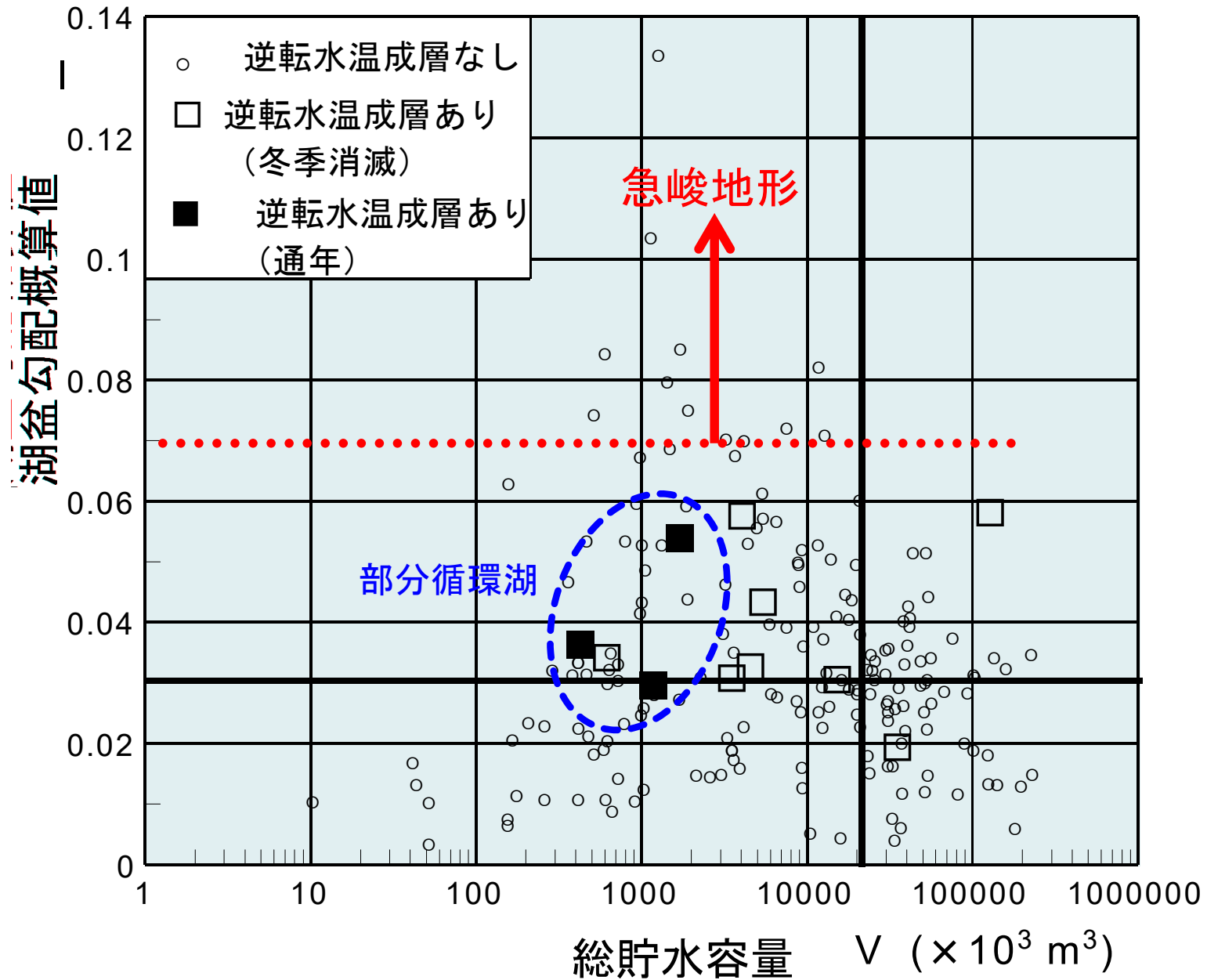
曝気開始前，底泥からの溶出によって溶存態リンが高濃度であった（懸濁態リンはほとんどなし）。
 深層曝気によりリンの溶出が抑制。

深層曝気による 底層リンの削減



(b) 全リン

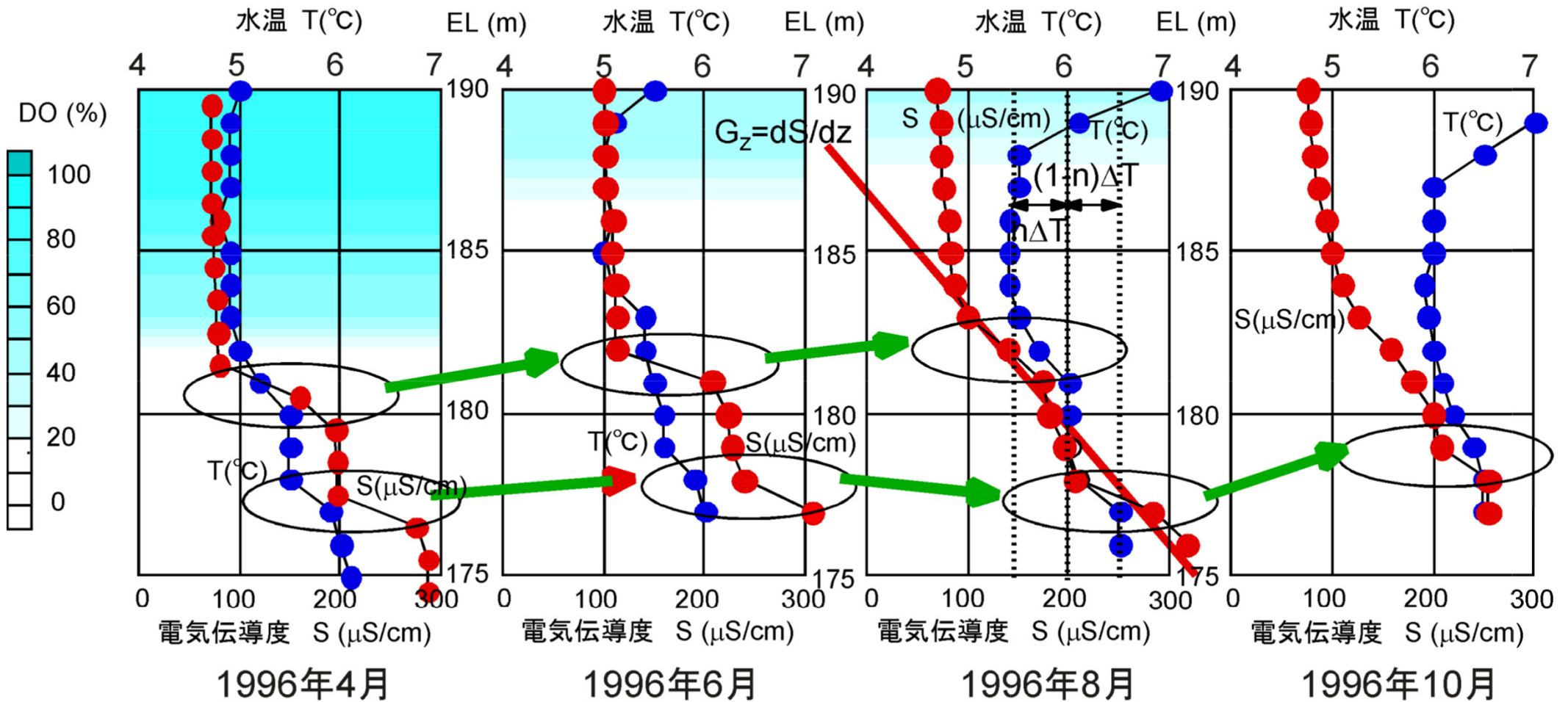
逆転水温層と湖盆条件



本日の話題

- 内部碎波
- 密度成層の鉛直混合（受熱・放熱時）
- 三層系の取水流
- 乱流モデルによる鉛直混合解析
- 熱塩対流（二重拡散）
- 対流混合層の秩序構造
- 貯水池表層の自然対流
- 成層型貯水池の内部波解析
- 富栄養貯水池の部分循環特性
- 貧酸素深水層の熱塩対流
- 化学成層流
- 石積み堰の環境水理
- 石積み水制
- 河道内植生
- 水工学への期待

深水層における熱塩構造



Turner Angle T_u の定義

$$T_u = \text{Tan}^{-1} \left[\frac{N_T^2 - N_S^2}{N_T^2 + N_S^2} \right]$$

$T_u = -\pi/2$ に近いほど熱塩対流強度は大きく、 $T_u = -\pi/4$ に近いほど小さい

ここで、

$$N_S^2 = -\frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho_s}{\partial Y} = -\beta g \frac{\partial S}{\partial Y} \quad N_T^2 = -\frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho_T}{\partial Y} = \alpha g \frac{\partial T}{\partial Y}$$

- $-\pi/2 < T_u < -\pi/4$

過剰安定型の熱塩対流

- $T_u < |-\pi/4|$

重力的安定

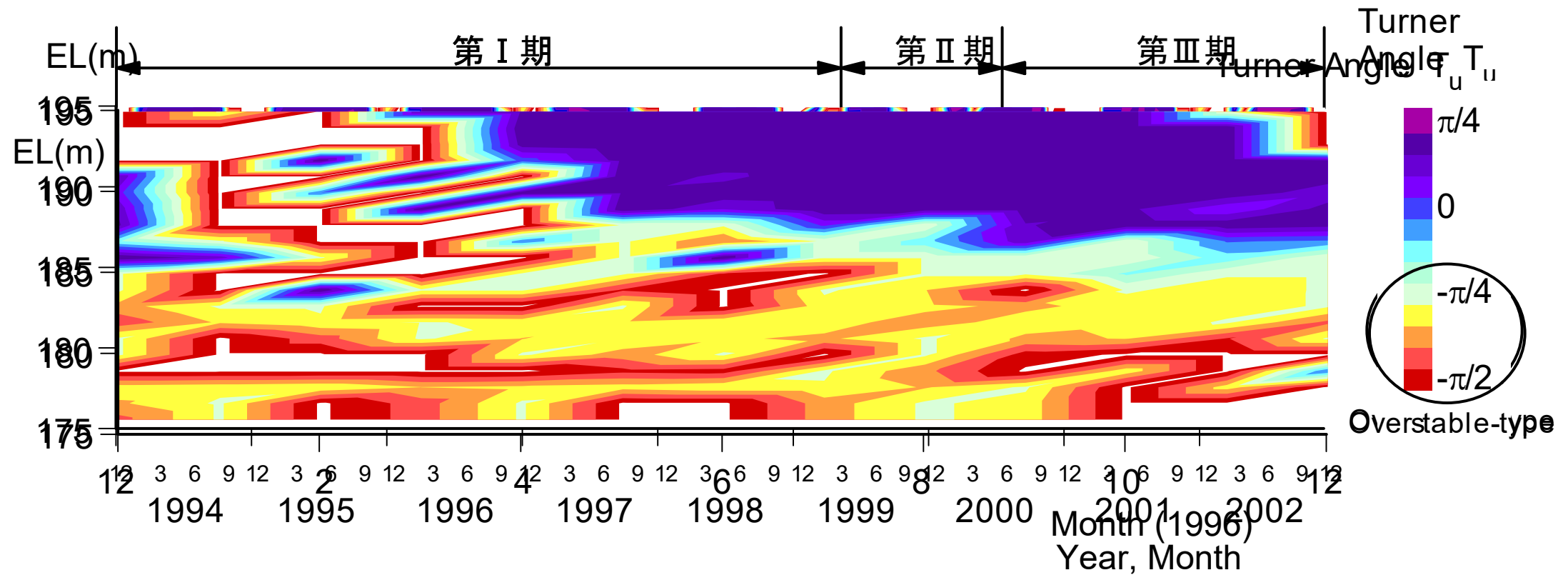
- $\pi/4 < T_u < \pi/2$

Salt finger 型の熱塩対流

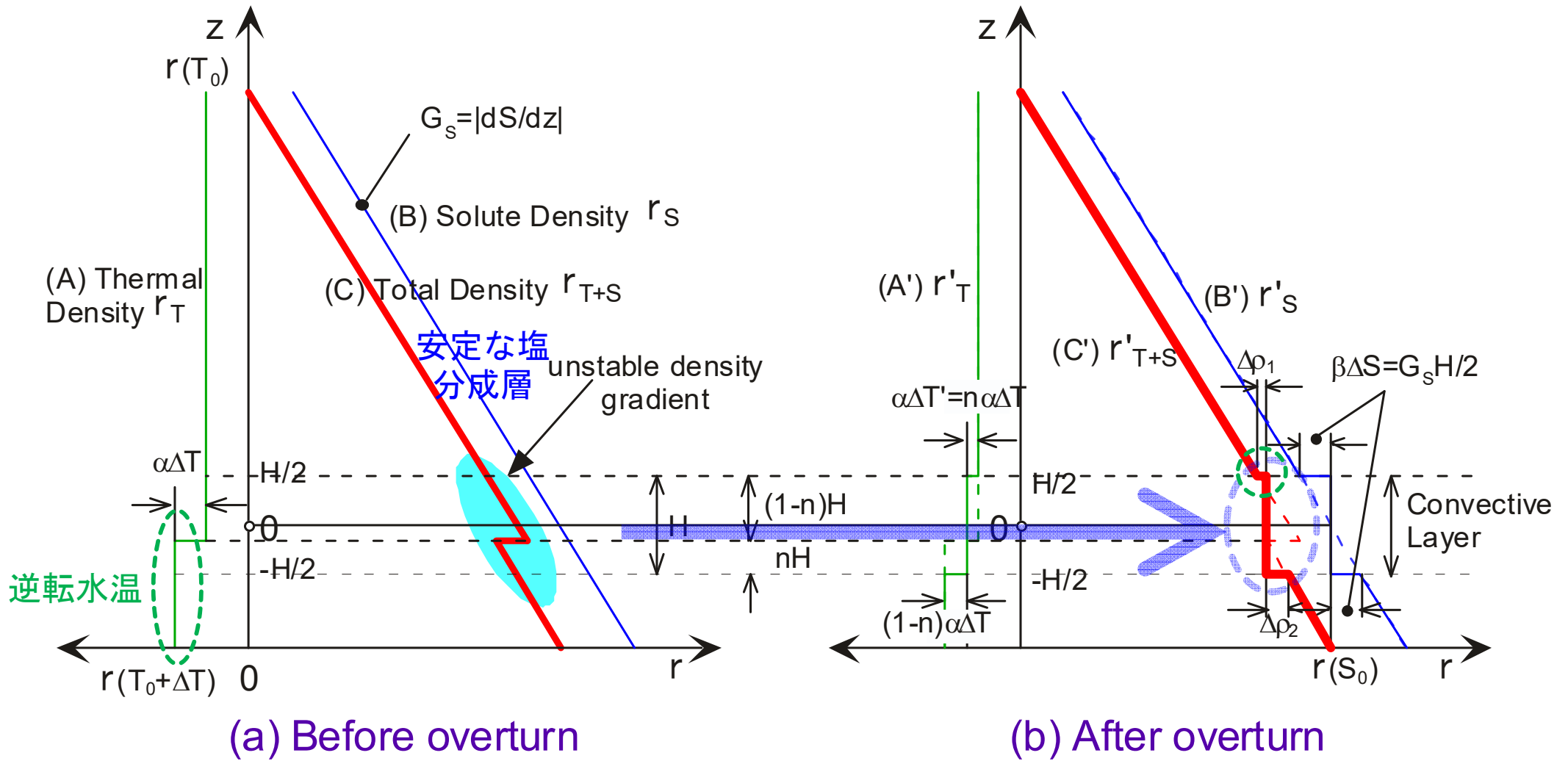
- $T_u > |\pi/2|$

重力的不安定

Turner Angleの季節変化



熱塩対流層の推算



$G_s = |dS/dz|$: 塩分勾配
 ΔT : 暖水塊の水温

熱塩対流層の厚さ

対流層の重力的安定

$$\frac{2\alpha n\Delta T}{\beta G_s} \leq H \leq \frac{6\alpha\Delta T n(1-n)}{\beta G_s}$$

対流前のポテンシャルエネルギー

$$\alpha\Delta T \doteq \{\rho(5.5^\circ\text{C}) - \rho(6.5^\circ\text{C})\} / \rho(5.5^\circ\text{C}) = 3.13 \times 10^{-5},$$

$$\begin{aligned} \beta G_s &= \beta |dS/dz| = 7.45 \times 10^{-7} (\mu\text{S}/\text{cm})^{-1} \\ &\times \{(300-100)(\mu\text{S}/\text{cm})/8\text{m}\} = 1.86 \times 10^{-5} \text{m}^{-1} \end{aligned}$$

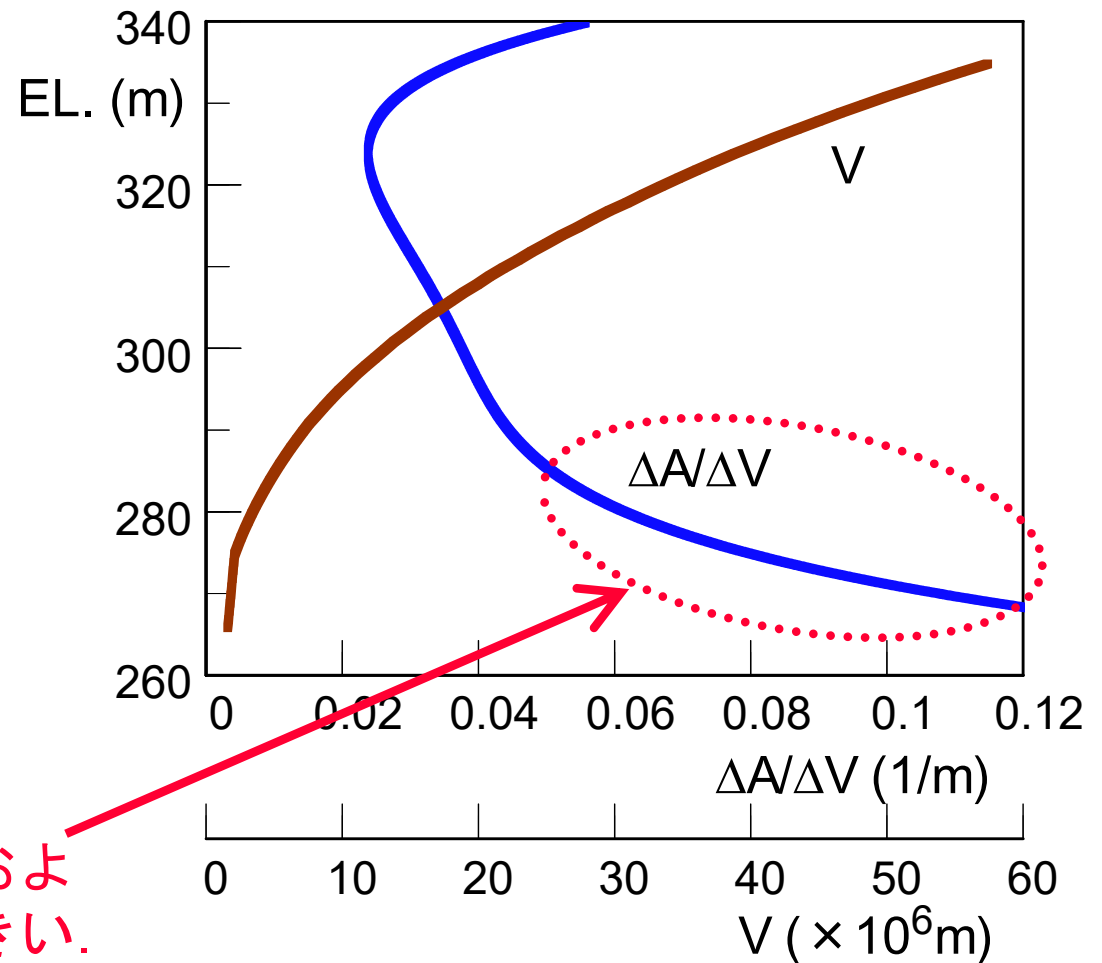
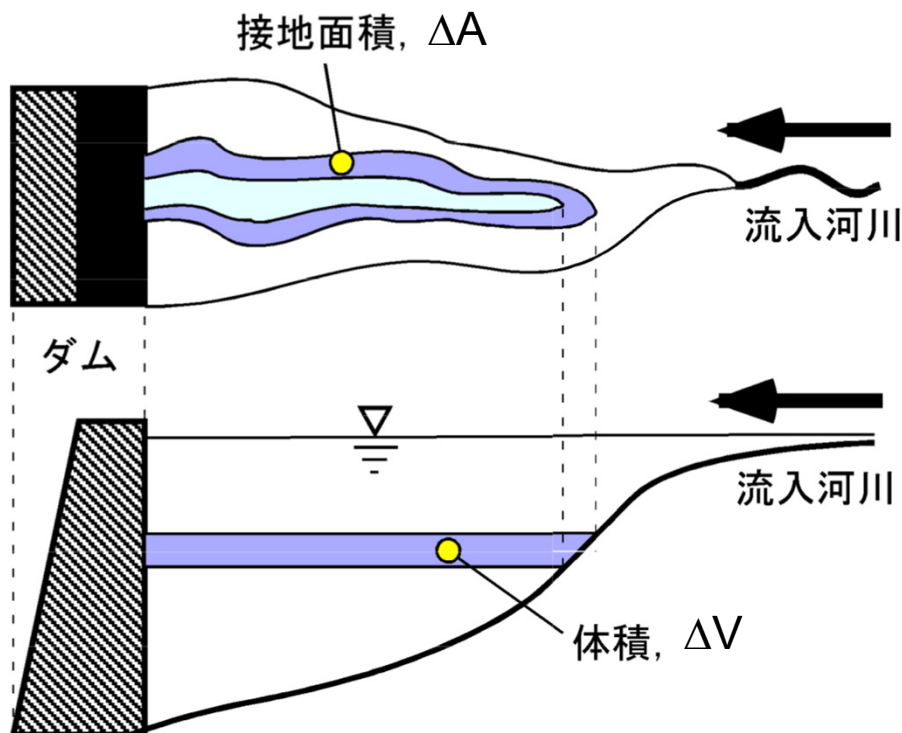
$$\begin{aligned} \frac{2 \times 0.5 \times 3.13 \times 10^{-5}}{1.86 \times 10^{-5}} \text{m} &\cong 1.68\text{m} \leq H \\ &\leq \frac{6 \times 3.13 \times 10^{-5} \times 0.5 \times (1-0.5)}{1.86 \times 10^{-5}} \text{m} \cong 2.52\text{m} \end{aligned}$$

本日の話題

- 内部砕波
- 密度成層の鉛直混合（受熱・放熱時）
- 三層系の取水流
- 乱流モデルによる鉛直混合解析
- 熱塩対流（二重拡散）
- 対流混合層の秩序構造
- 貯水池表層の自然対流
- 成層型貯水池の内部波解析
- 富栄養貯水池の部分循環特性
- 貧酸素深水層の熱塩対流
- **化学成層流**
- 石積み堰の環境水理
- 石積み水制
- 河道内植生
- 水工学への期待

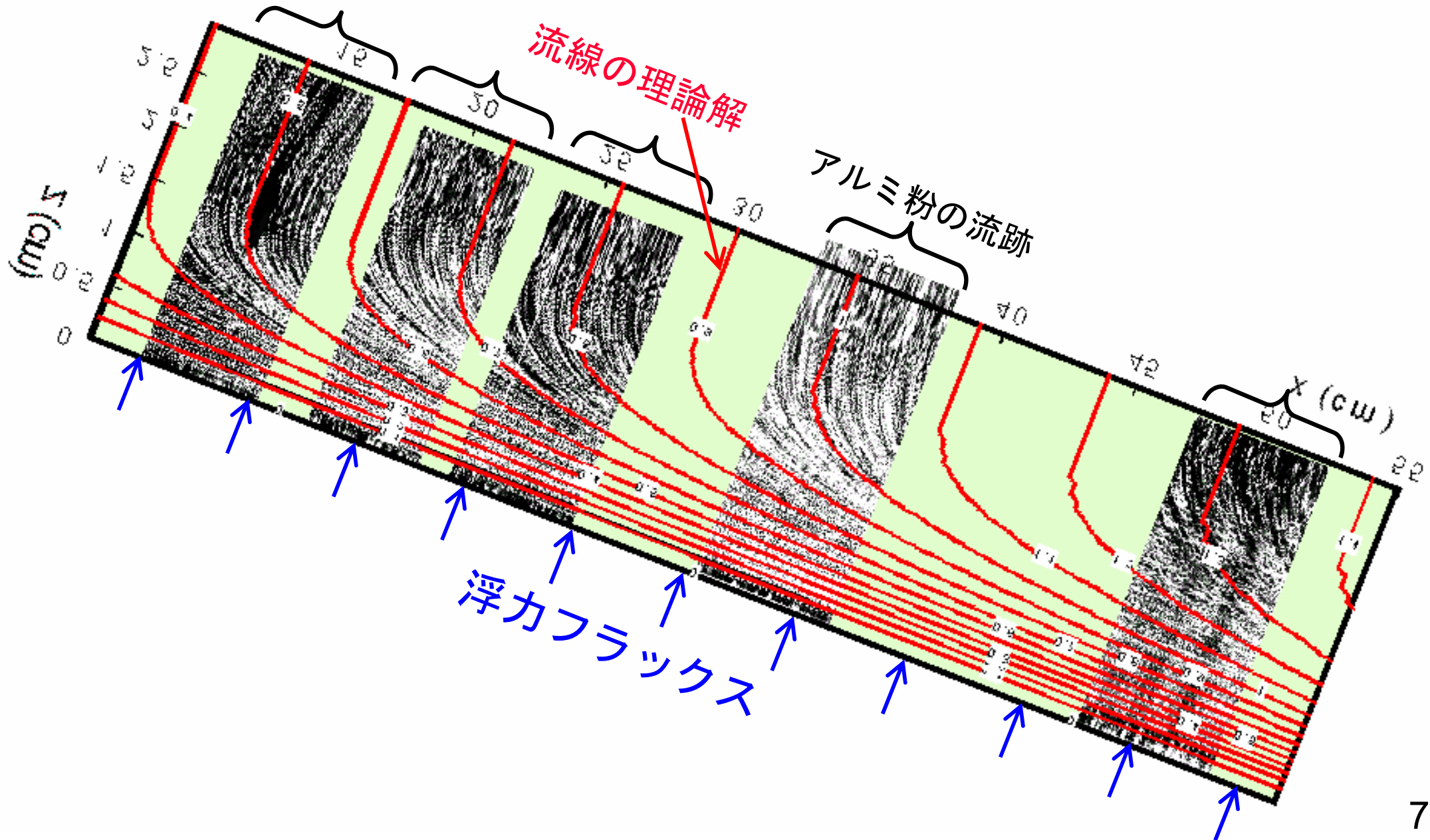
水塊容積あたりの接地面積

— 「水—堆積層」間の物質交換の影響 —

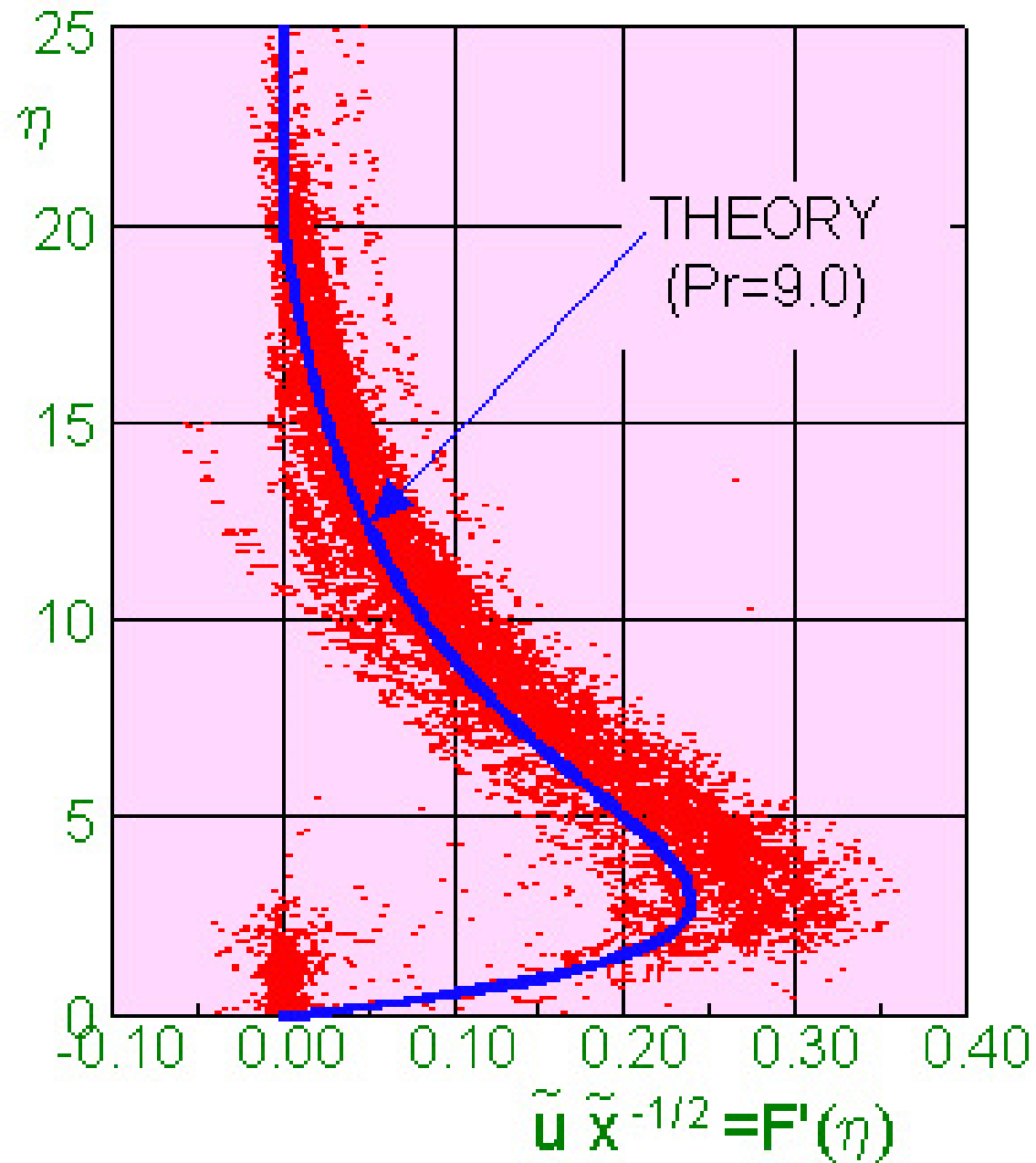


深層ほど水質汚濁におよぼす底泥の影響が大きい。

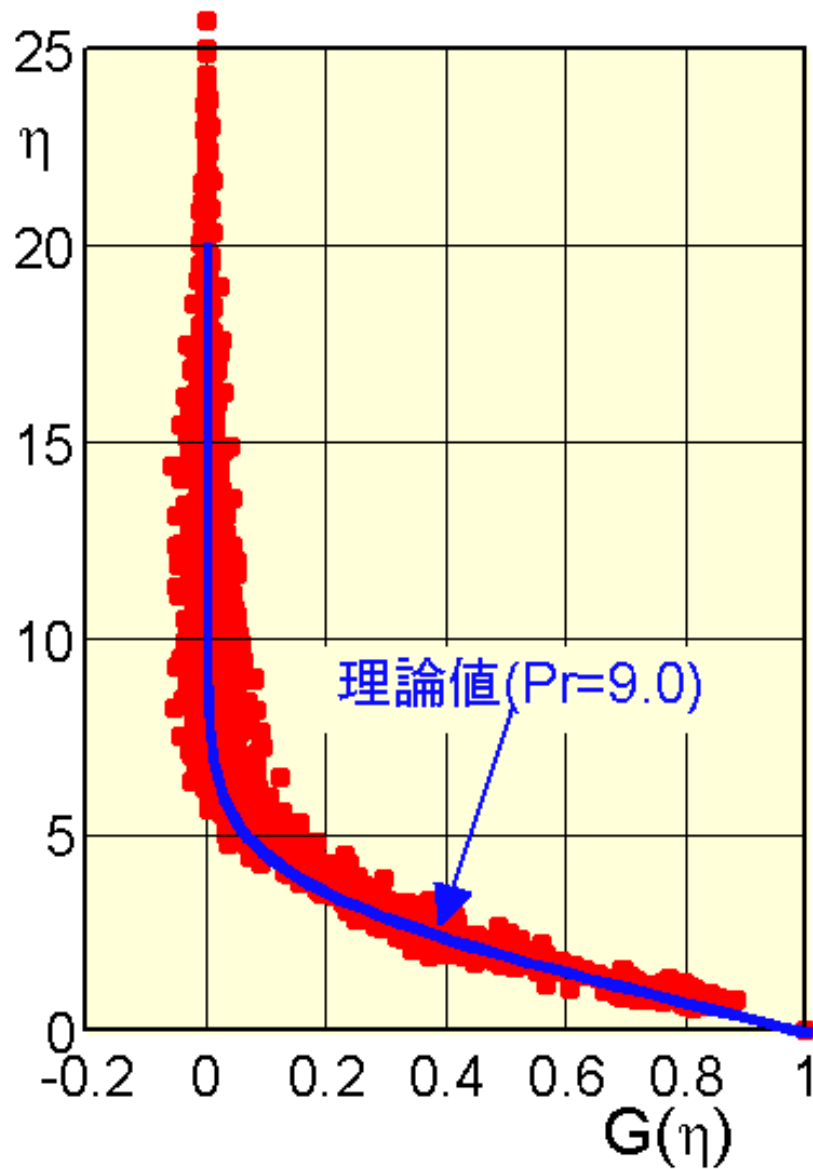
浮力フラックスによる傾斜壁面プルーム



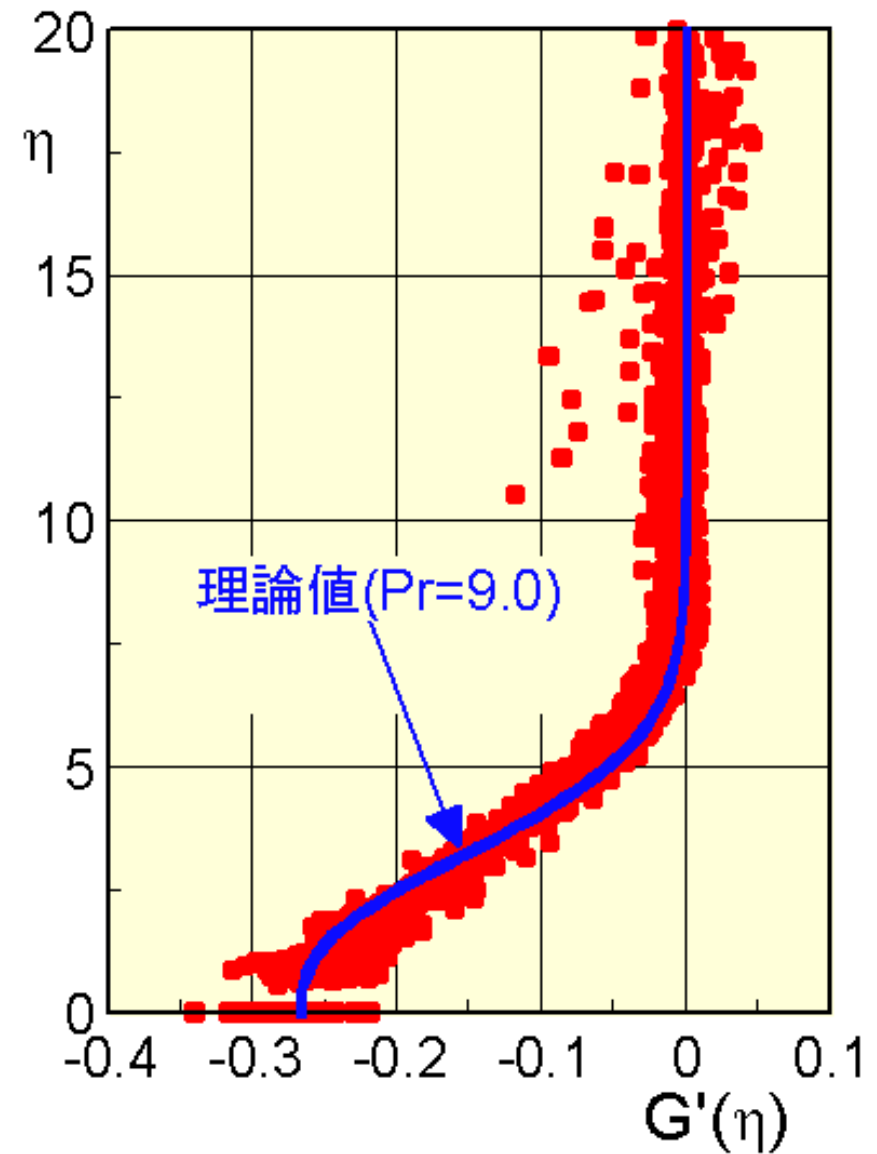
流速分布



浮力（水温）と浮力勾配の分布



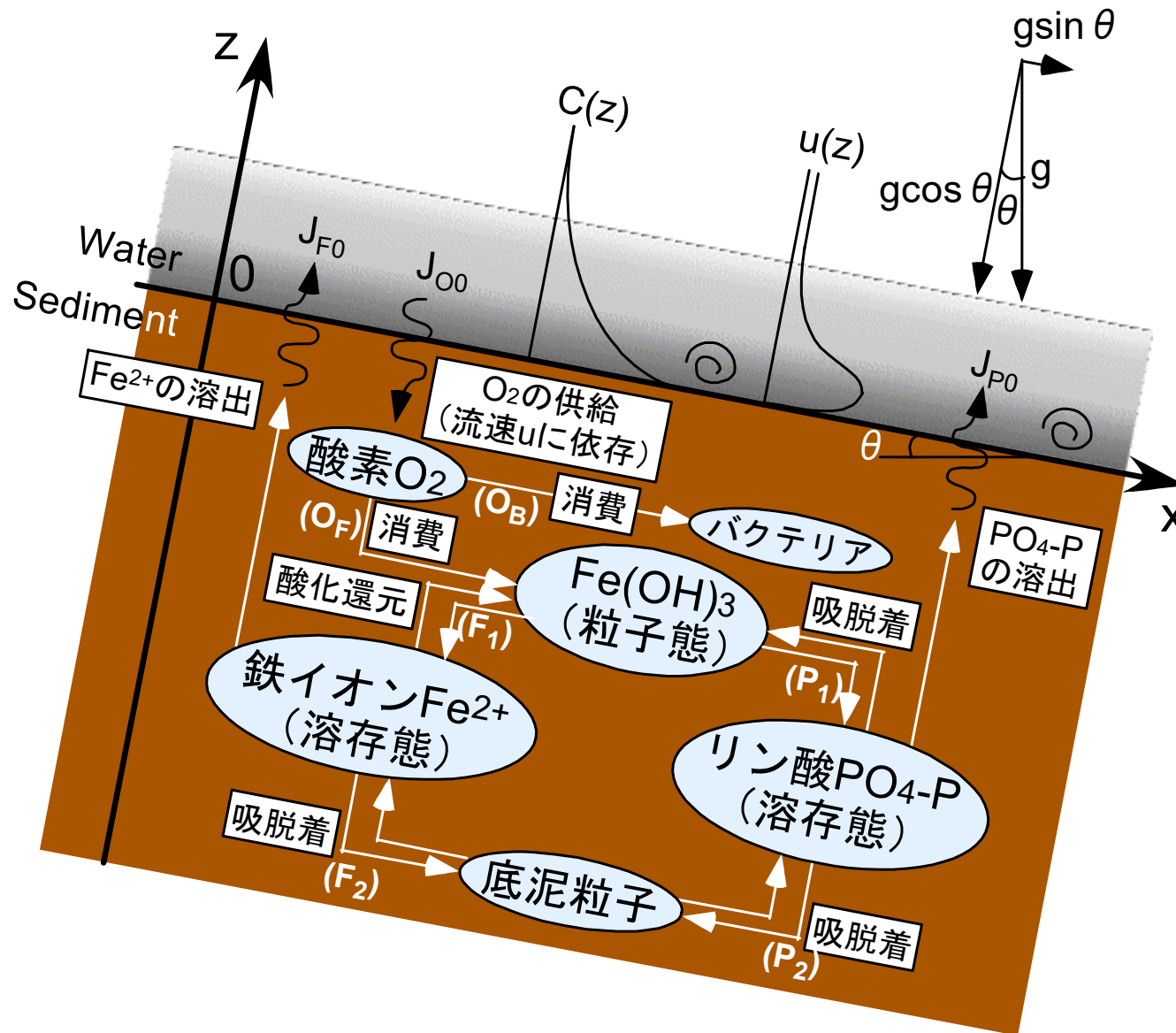
無次元水温分布



無次元水温勾配

嫌氣的溶出にともなう化学成層流の解析

—底泥上の流れと底泥内の生物化学反応の連成解析—



傾斜底泥境界層に発生する
化学成層流(水理学)



Interaction

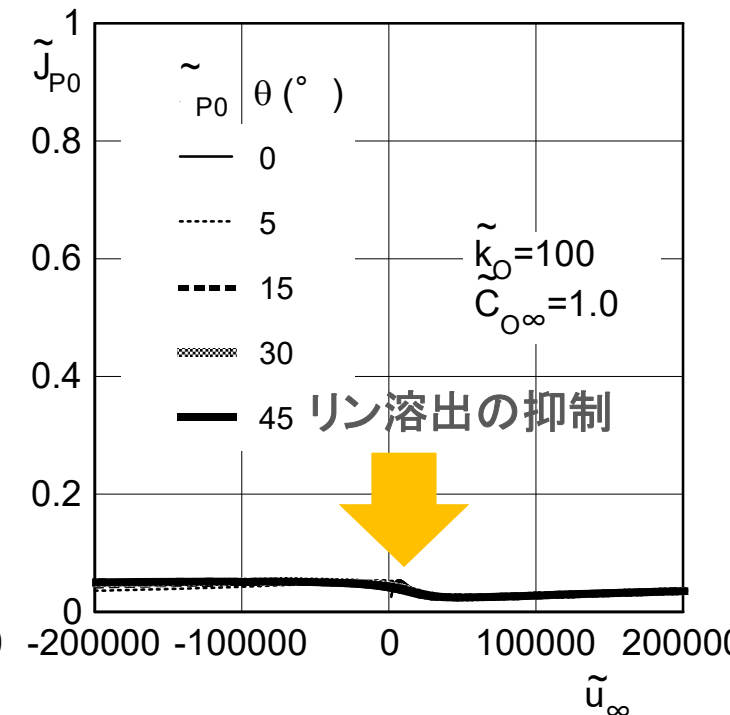
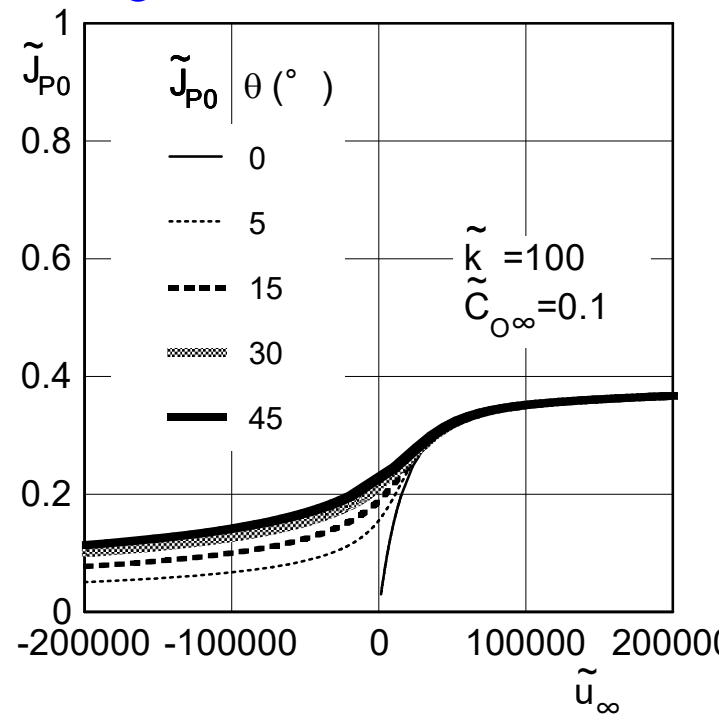
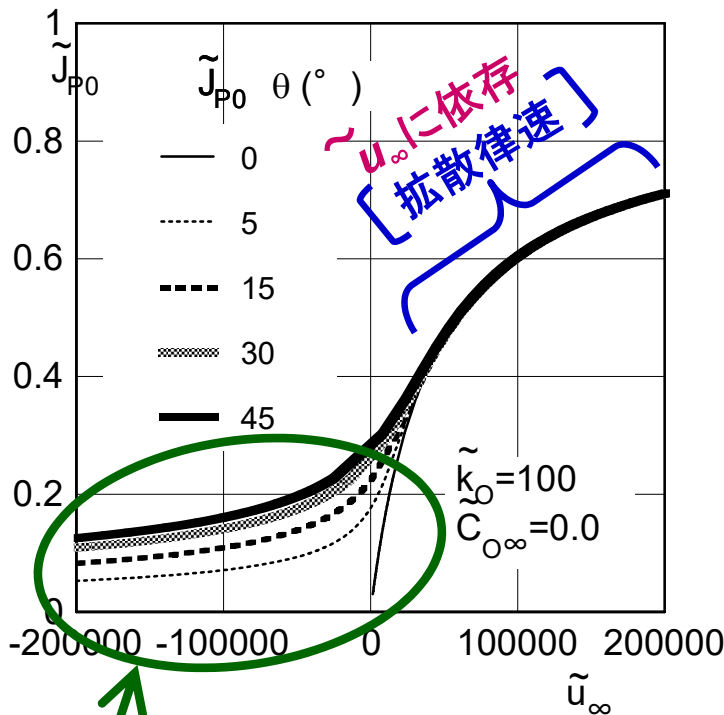
底泥内の水質生態系反応
(化学・生物化学)

リン溶出の溶出フラックス： \tilde{J}_{P0}

θ : 傾斜角度（底面勾配）

\tilde{u}_∞ : 周囲水の流速

$\tilde{C}_{O\infty}$: 周囲水の酸素濃度



傾斜角 θ に依存

(a) $\tilde{C}_{O\infty} = 0.0$

(b) $\tilde{C}_{O\infty} = 0.1$

(c) $\tilde{C}_{O\infty} = 1.0$

[重力流律速] [無酸素水]

[貧酸素水]

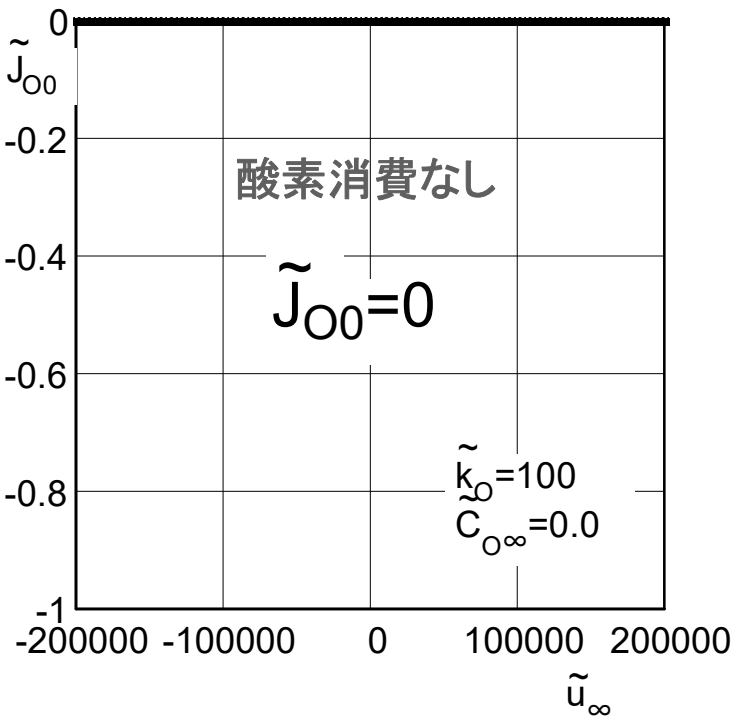
[豊酸素水]

堆積層の酸素フラックス(消費速度): \tilde{J}_{O_0}

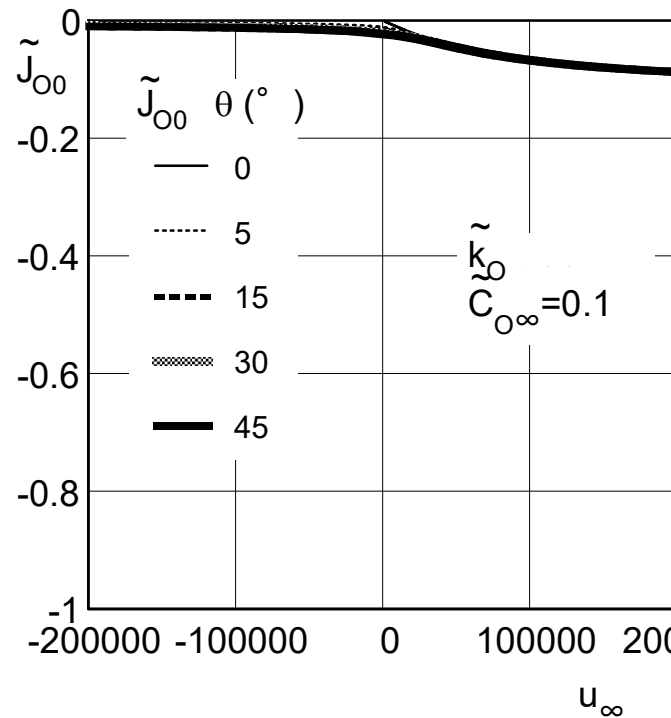
θ : 傾斜角度 (底面勾配)

\tilde{u}_∞ : 周囲水の流速

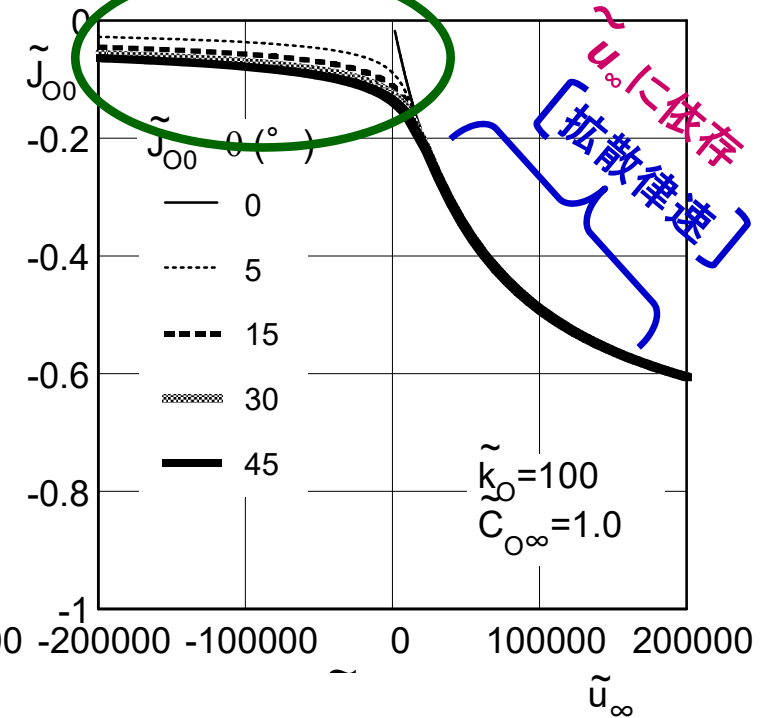
\tilde{C}_{O_∞} : 周囲水の酸素濃度 傾斜角 θ に依存 [重力流律速]



(a) $\tilde{C}_{O_\infty}=0.0$
[無酸素水]



(b) $\tilde{C}_{O_\infty}=0.1$
[貧酸素水]



(c) $\tilde{C}_{O_\infty}=1.0$
[豊酸素水]

底層リン濃度の概算

貯水池の深水層(底面積 $A_P: 10^3\text{m}^2$, 容量 $V_P: 10^4\text{m}^3$, 無酸素期間 $T_P: 50\text{day}$)を想定する.

リン溶出量の試算 $C_P = J_{P0} A_P T_P / V_P$
 ($\tilde{C}_{O_\infty} = 0.0, \theta = 30^\circ$, 表-1の物性量とリン濃度 $C_{P\infty}$
 を用いた場合: $L_r = 0.11\text{cm}, U_r = 3.0 \times 10^{-5}\text{cm/sec}$)

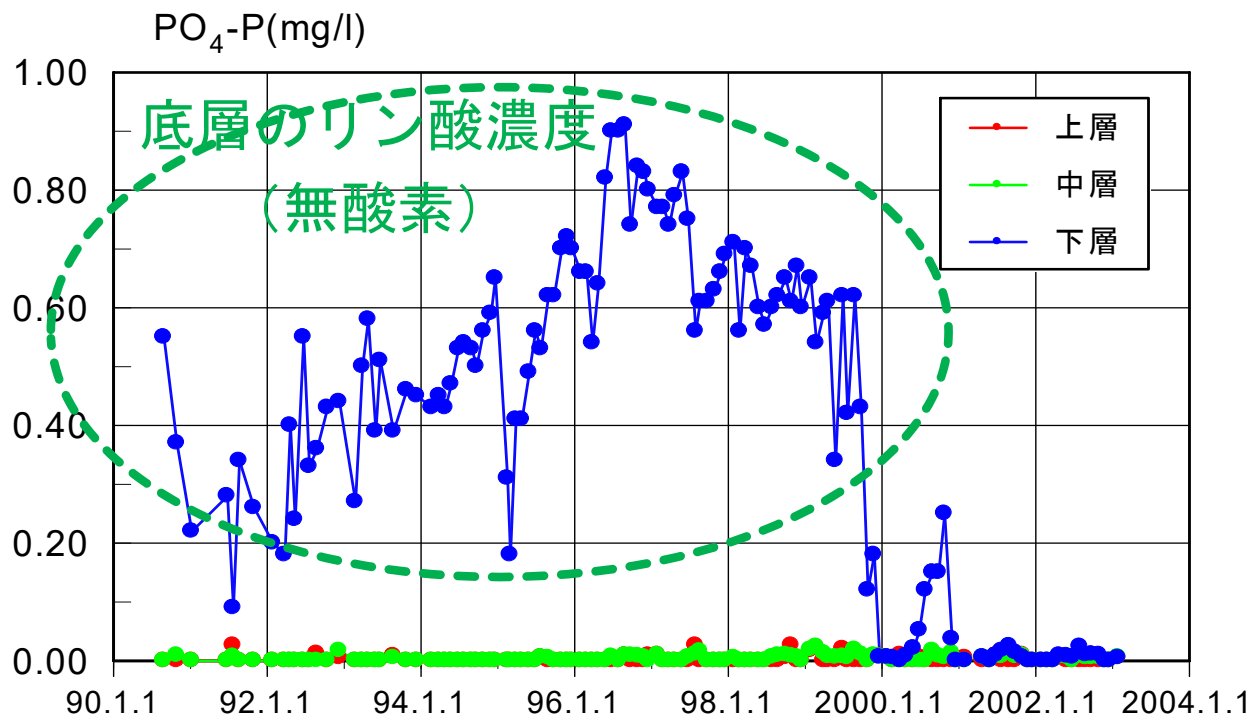
	Case-1	Case-2	Case-3
① \tilde{u}_∞	-1.0×10^5	0.0	1.0×10^5
② u_∞ (cm/sec)	-3.0	0.0	3.0
③ \tilde{J}_{P0}	0.15	0.28	0.6
④ J_{P0} (mg/l·cm/sec)	0.56×10^{-4}	1.04×10^{-4}	2.2×10^{-4}
⑤ C_P (mg/l)	0.24	0.45	0.95
⑤' $C_{P'}$ (mg/l)	0	0	0.95

化学成層流を
考慮した場合



化学成層流を考
慮しない場合

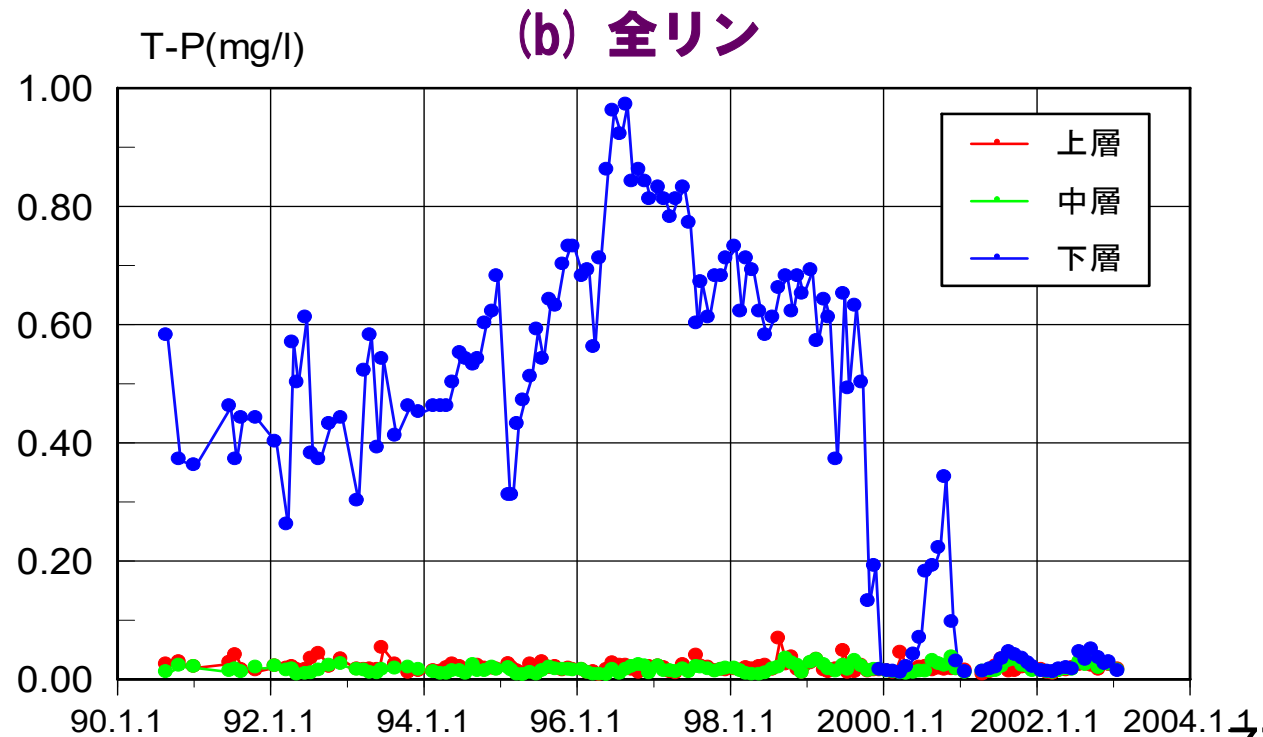




(a) 溶存態リン

曝気開始前，底泥からの溶出によって溶存態リンが高濃度であった（懸濁態リンはほとんどなし）。
 深層曝気によりリンの溶出が抑制。

深層曝気による
 底層リンの削減



本日の話題

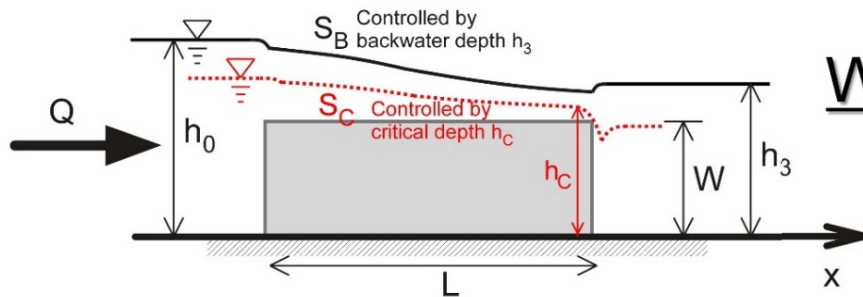
- 内部砕波
- 密度成層の鉛直混合（受熱・放熱時）
- 三層系の取水流
- 乱流モデルによる鉛直混合解析
- 熱塩対流（二重拡散）
- 対流混合層の秩序構造
- 貯水池表層の自然対流
- 成層型貯水池の内部波解析
- 富栄養貯水池の部分循環特性
- 貧酸素深水層の熱塩対流
- 化学成層流
- 石積み堰の環境水理
- 石積み水制
- 河道内植生
- 水工学への期待

石積み堰の環境水理

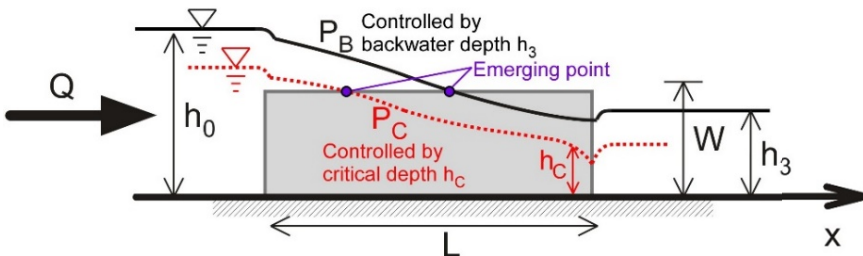
(笛吹川：山梨県山梨市)



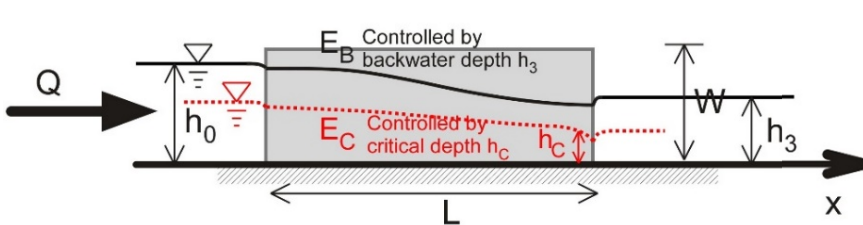
6種類の流況 : Flow regime



(a) **S**ubmerged



(b) **P**artially submerged



(c) **E**merged

Weir is Submerged

Regime-S

Partially submerged

Regime-P

Emerged

Regime-E

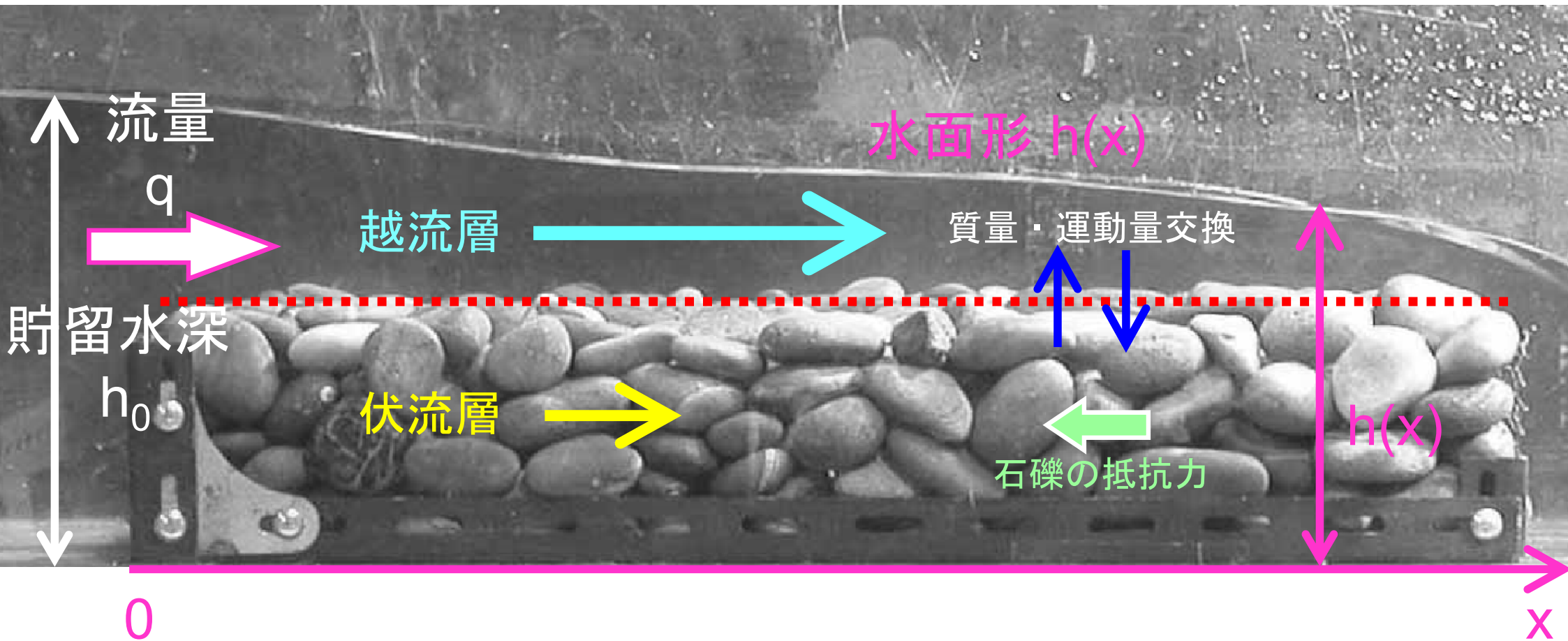
Controlled by

Backwater
B-Flow

Critical depth
C-Flow



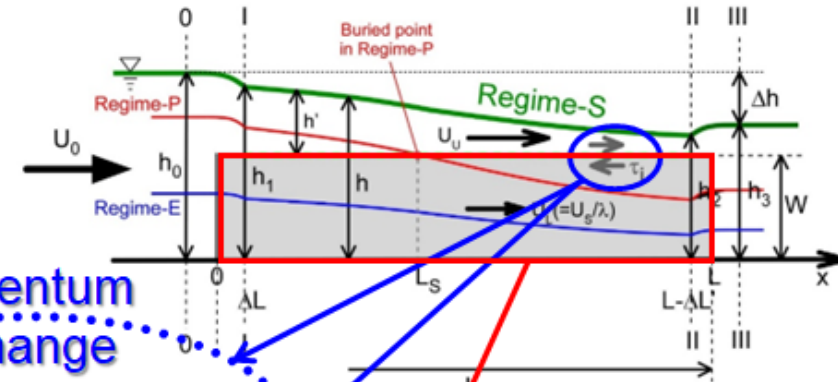
石積み堰の透過・伏没・越流特性



二層流モデルの基礎方程式

Continuity:

$$\frac{d}{dx}(U_U h') = -\frac{d}{dx}(U_L \lambda W) = -\frac{d}{dx}(U_S W)$$



Momentum:

● Upper layer:

$$\underbrace{\frac{d}{dx}\left(\frac{U_U^2}{2g}\right)}_{(I)} + \underbrace{\frac{dh'}{dx}}_{(II)} - \underbrace{l_0}_{(III)} + \underbrace{\frac{\tau_W P_U}{\rho g A_U}}_{(IV)} + \underbrace{\frac{f_i}{gh'} |U_U - U_S| (U_U - U_S)}_{(V)} = 0$$

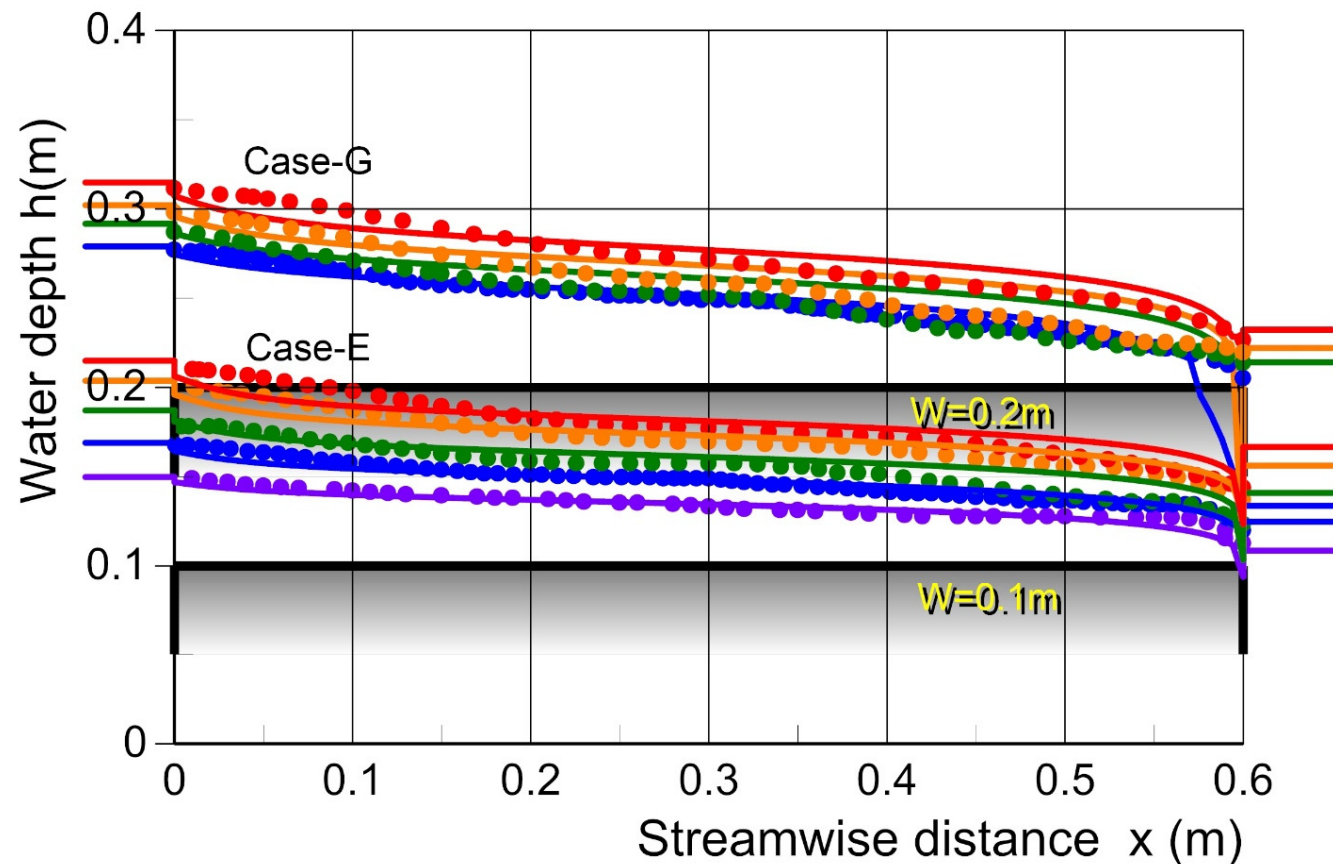
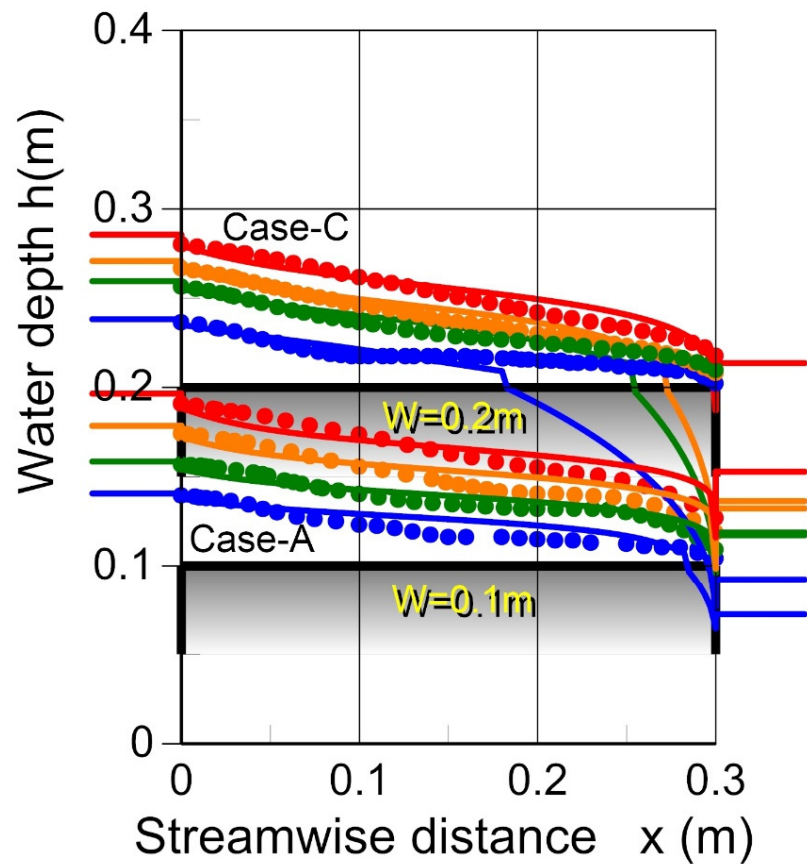
● Lower layer:

$$\underbrace{\frac{d}{dx}\left(\frac{U_L^2}{2g}\right)}_{(I)} + \underbrace{\frac{dh'}{dx}}_{(II)} - \underbrace{l_0}_{(III)} - \underbrace{\frac{f_i}{gh'} |U_U - U_S| (U_U - U_S)}_{(IV)} + \underbrace{(C_1 U_S + C_2 U_S^2)}_{(V)} = 0$$

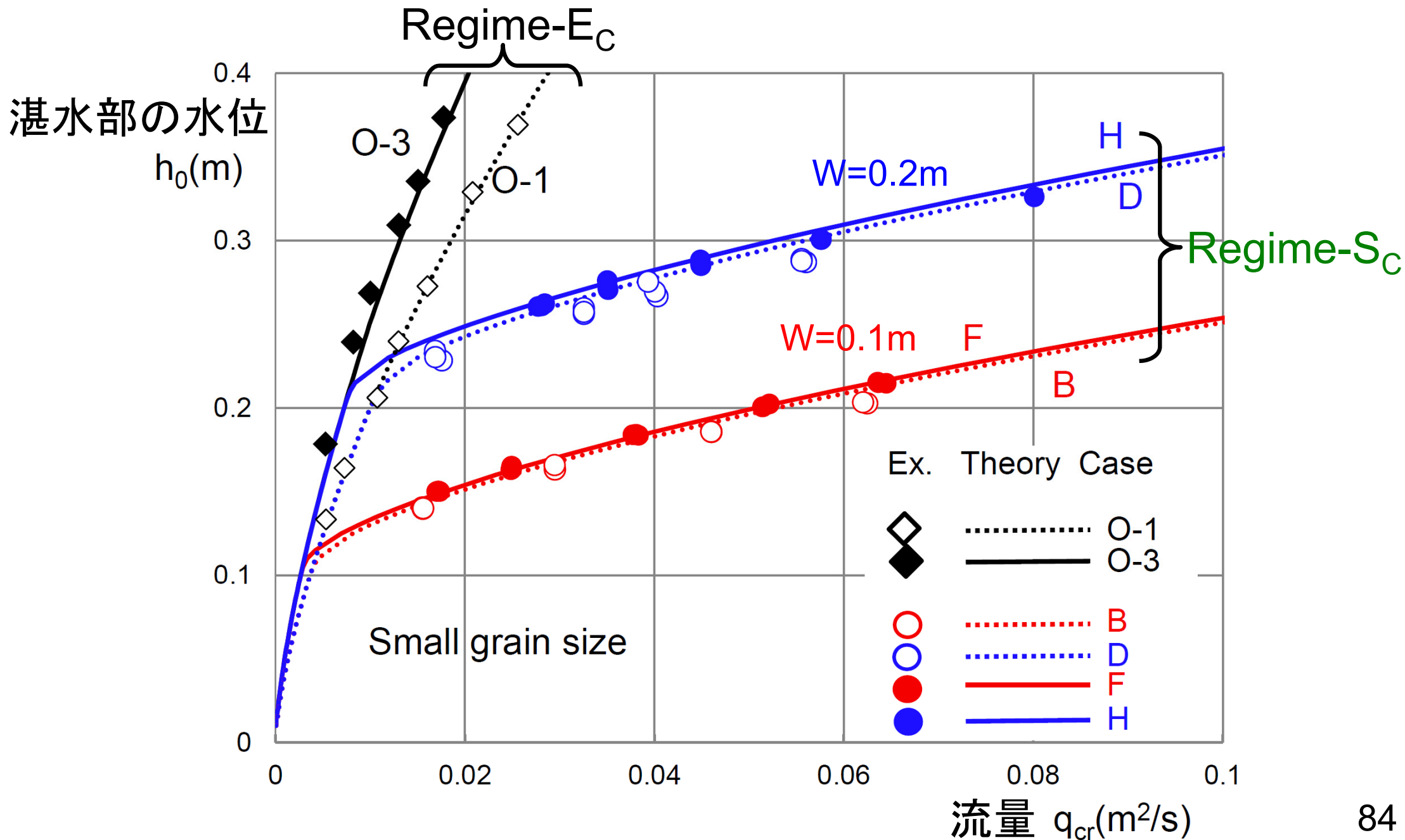
Internal drag force

Momentum exchange

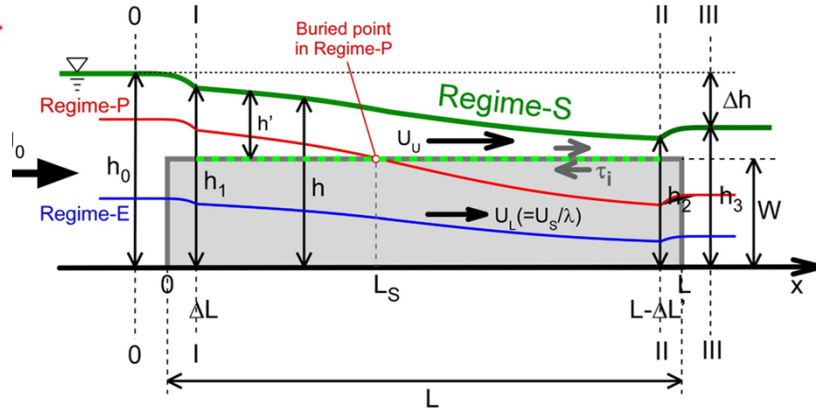
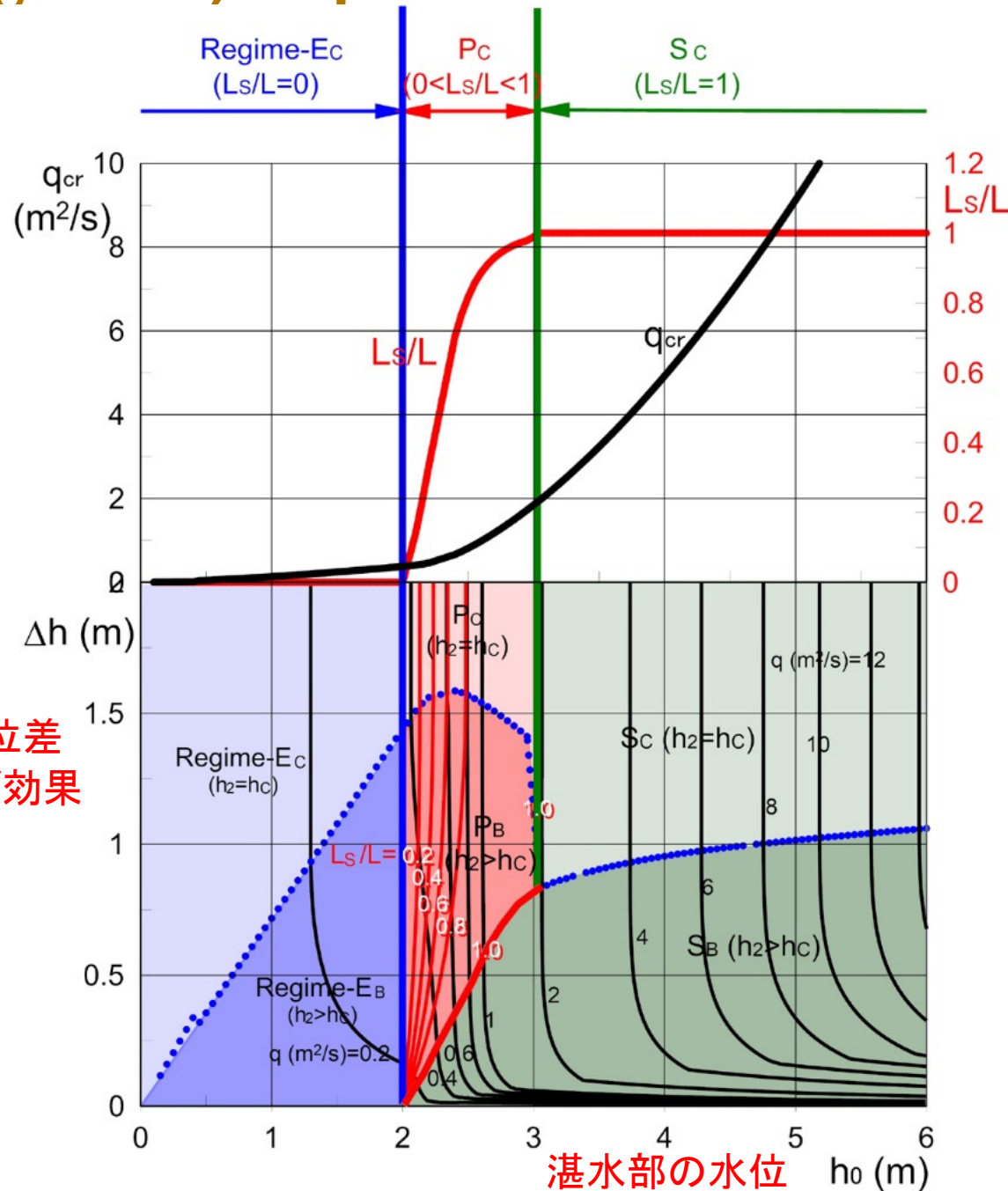
水面形 $h(x)$ の実験値との比較例



「水位－流量」 曲線の例



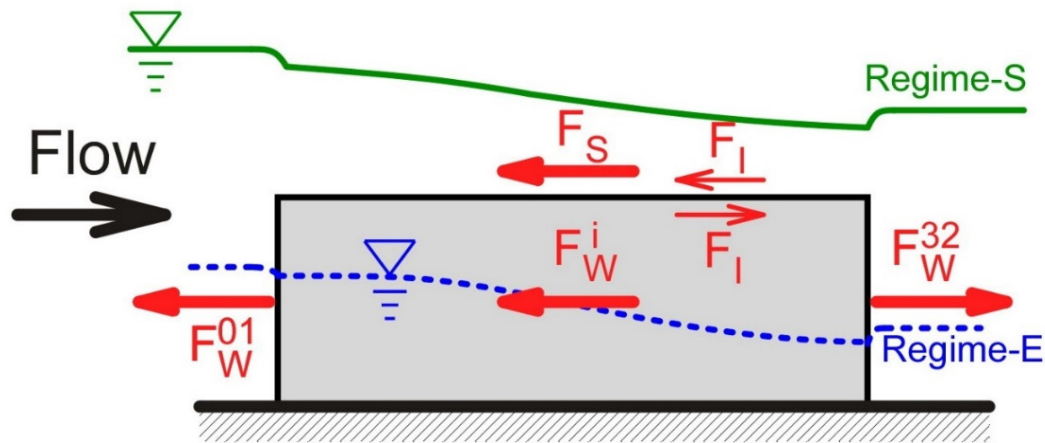
$(h_0, \Delta h) \sim q$ の曲線におけるRegime分類



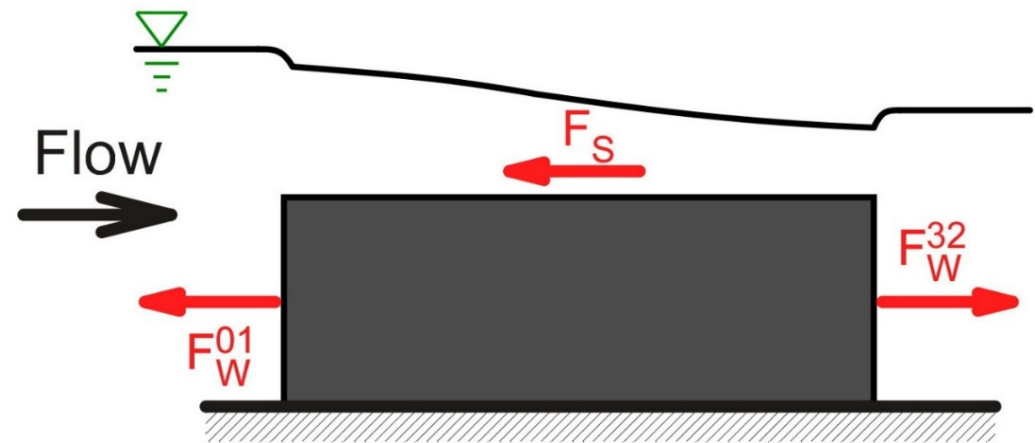
限界流
(下流の影響を受けない)

せき上げ流
(下流からせき上げられる)

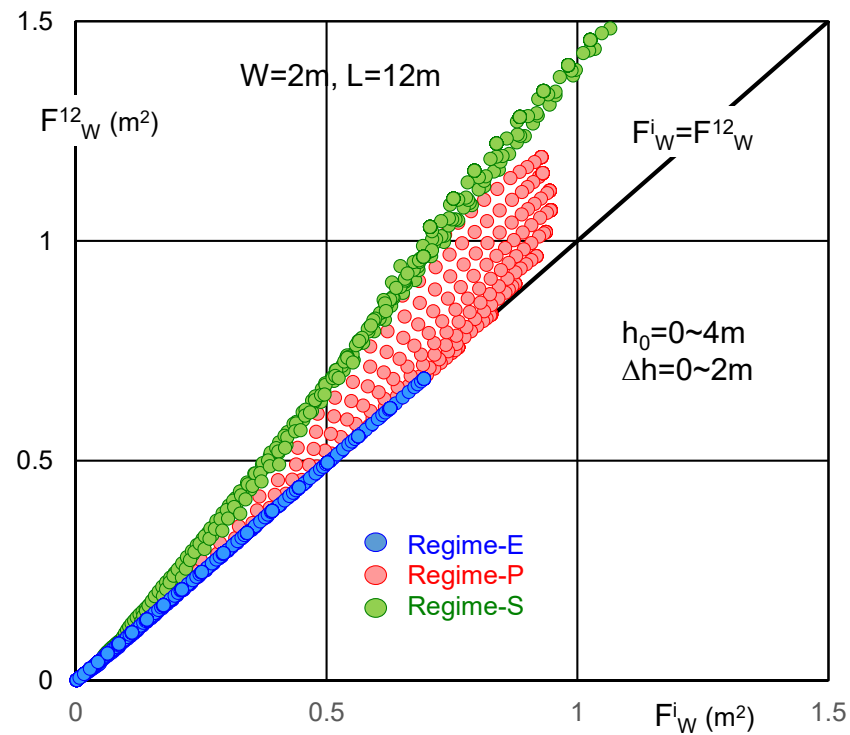
流体力 (vs不透過堰)



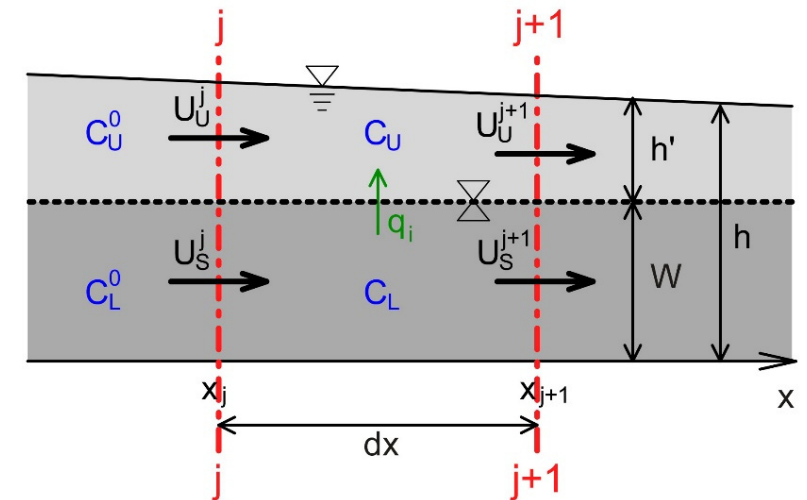
(a) 石積み堰



(b) 不透過堰



浄化率



Mass continuity:

● Upper layer:

$$U_U^i h^i C_U^i + \left(\frac{q_i + |q_i|}{2} C_S^{i+1} + \frac{q_i - |q_i|}{2} C_U^{i+1} \right) dx = U_U^{i+1} h^{i+1} C_U^{i+1}$$

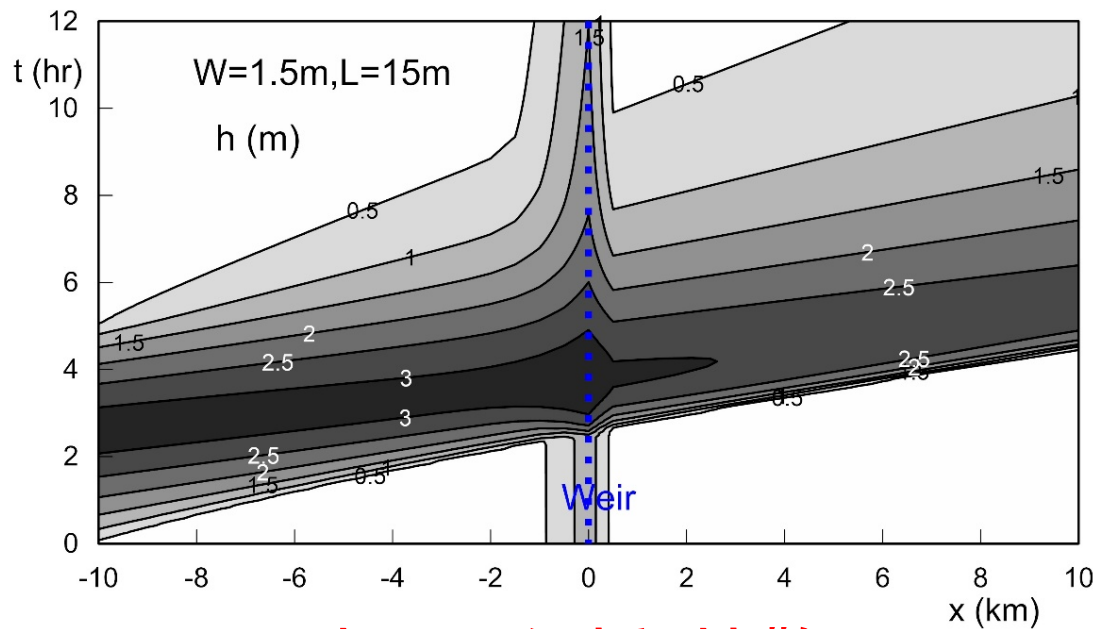
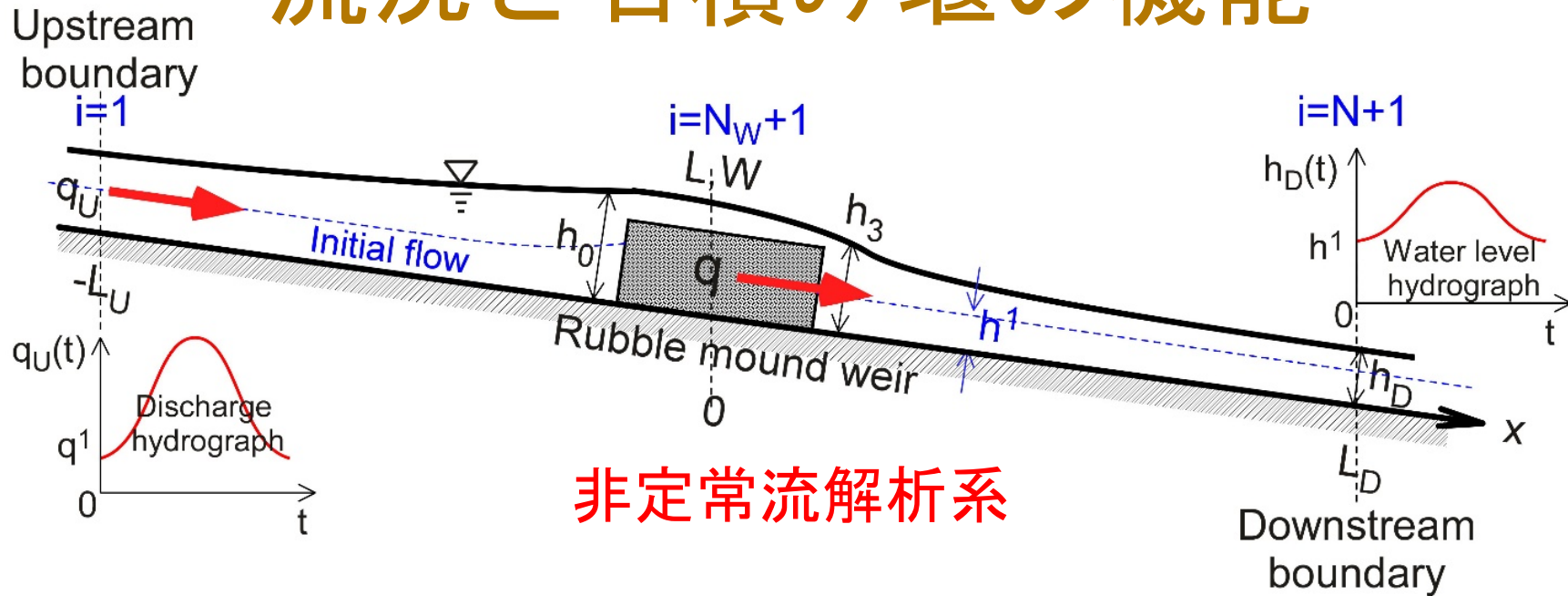
● Lower layer:

Primary biochemical reaction
in the rubble mound

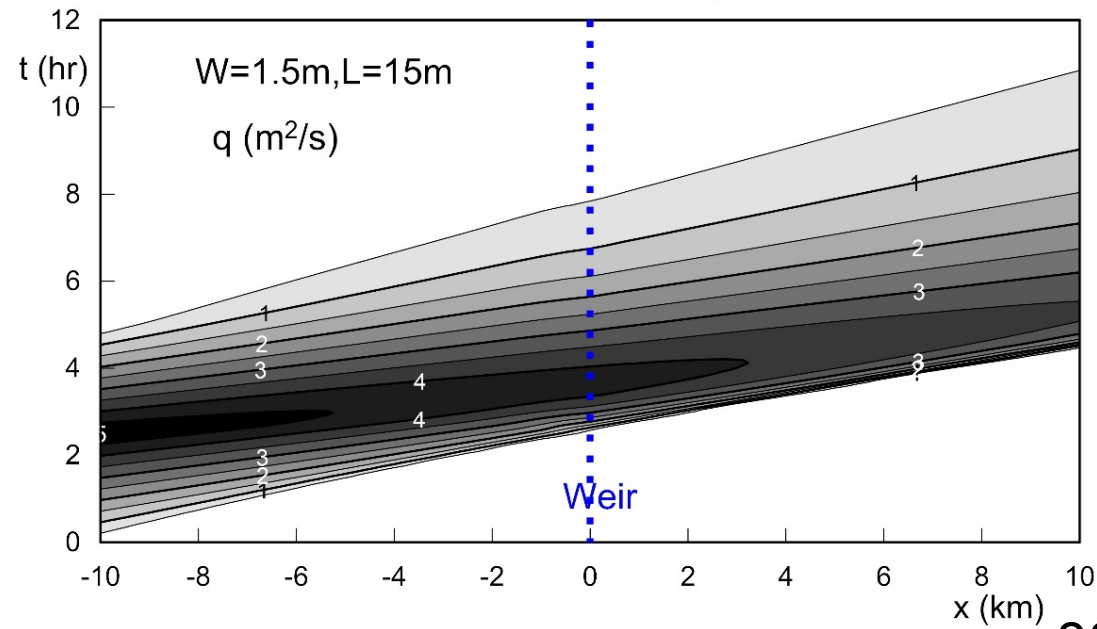
$$U_S^i W C_S^i - \left(\frac{q_i + |q_i|}{2} C_S^{i+1} + \frac{q_i - |q_i|}{2} C_U^{i+1} \right) dx - \lambda k C_S^{i+1} W dx = U_S^{i+1} W C_S^{i+1}$$

Entrainment velocity: $q_i = -\frac{(U_S^{i+1} - U_S^i)W}{dx}$

流況と石積み堰の機能

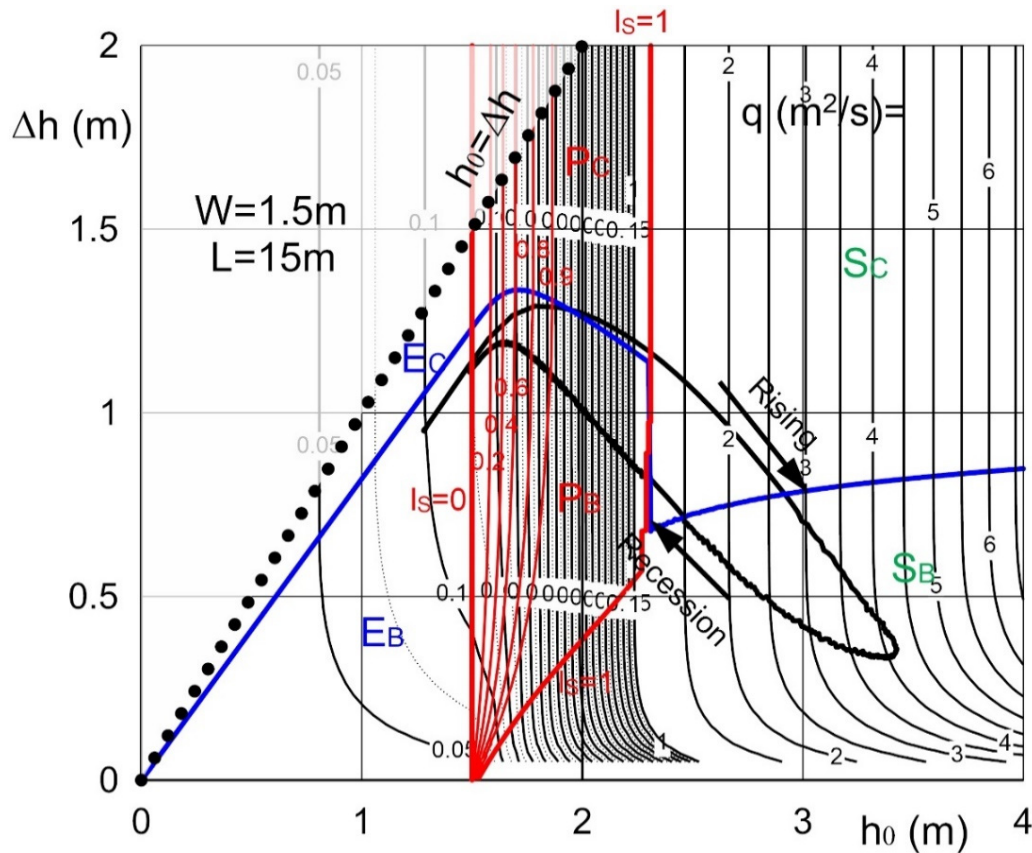


水深の伝播・拡散

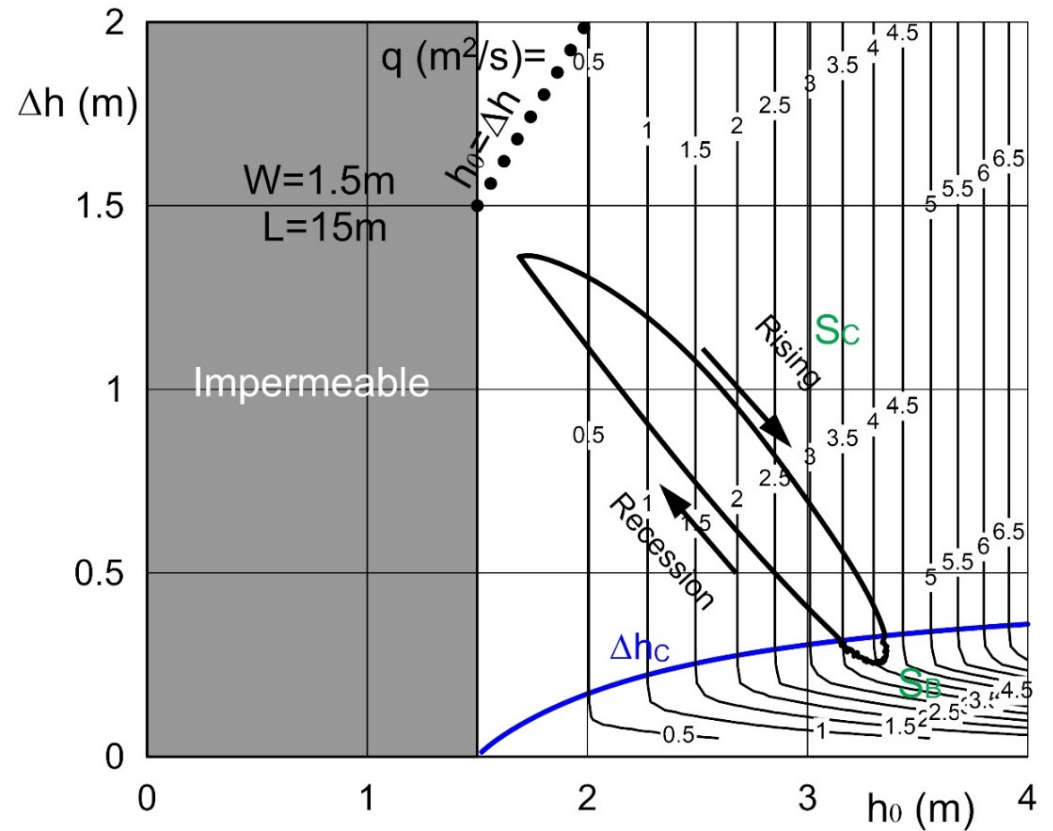


流量の伝播・拡散

貯留・疎通機能 (vs不透過堰)

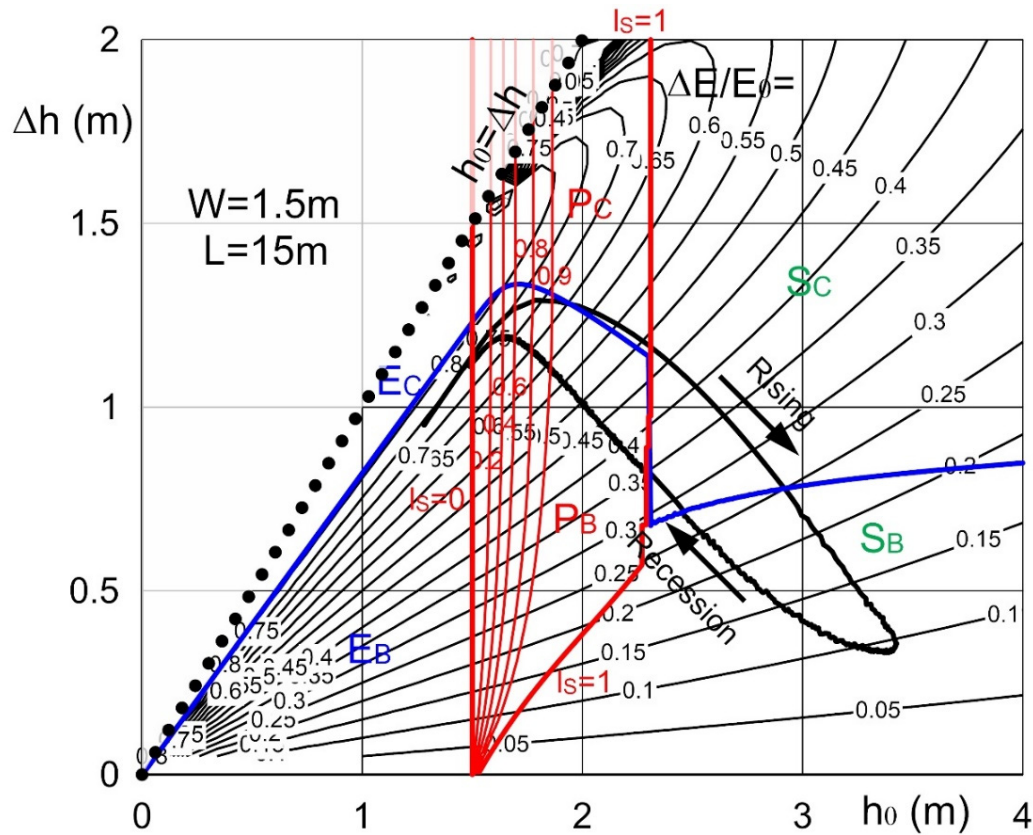


(a) 石積み堰

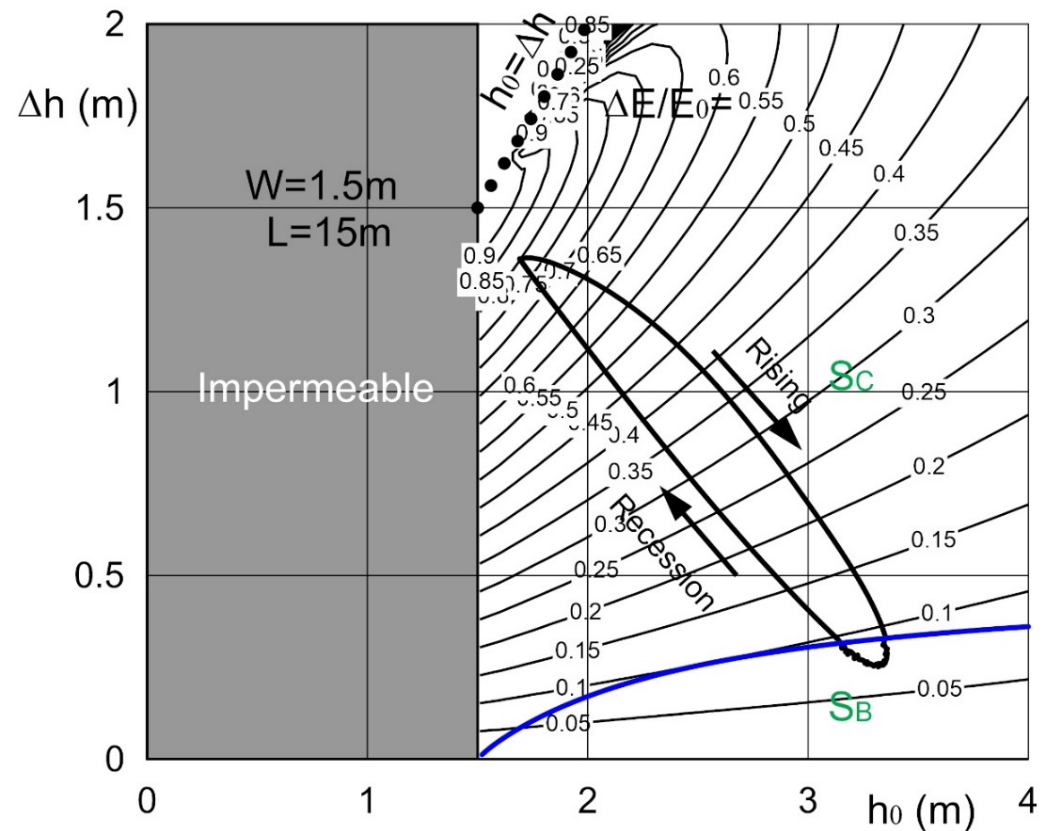


(b) 不透過堰

エネルギー減衰率 $\Delta E/E_0$ (vs不透過堰)

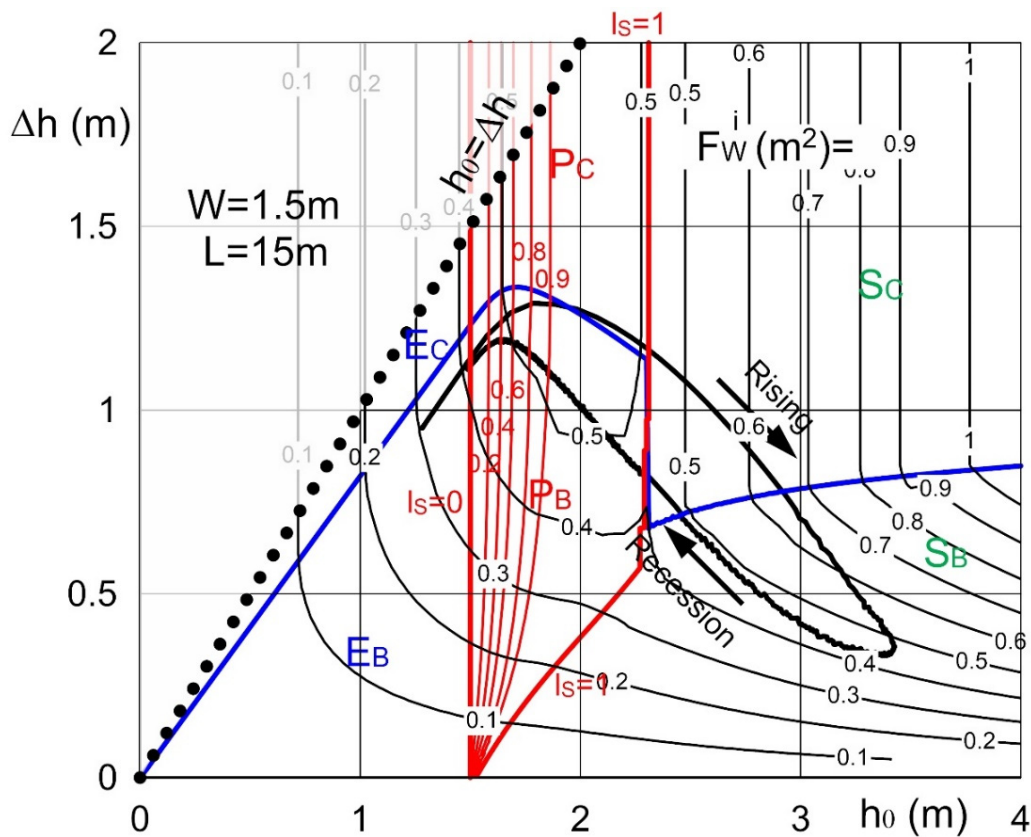


(a) 石積み堰

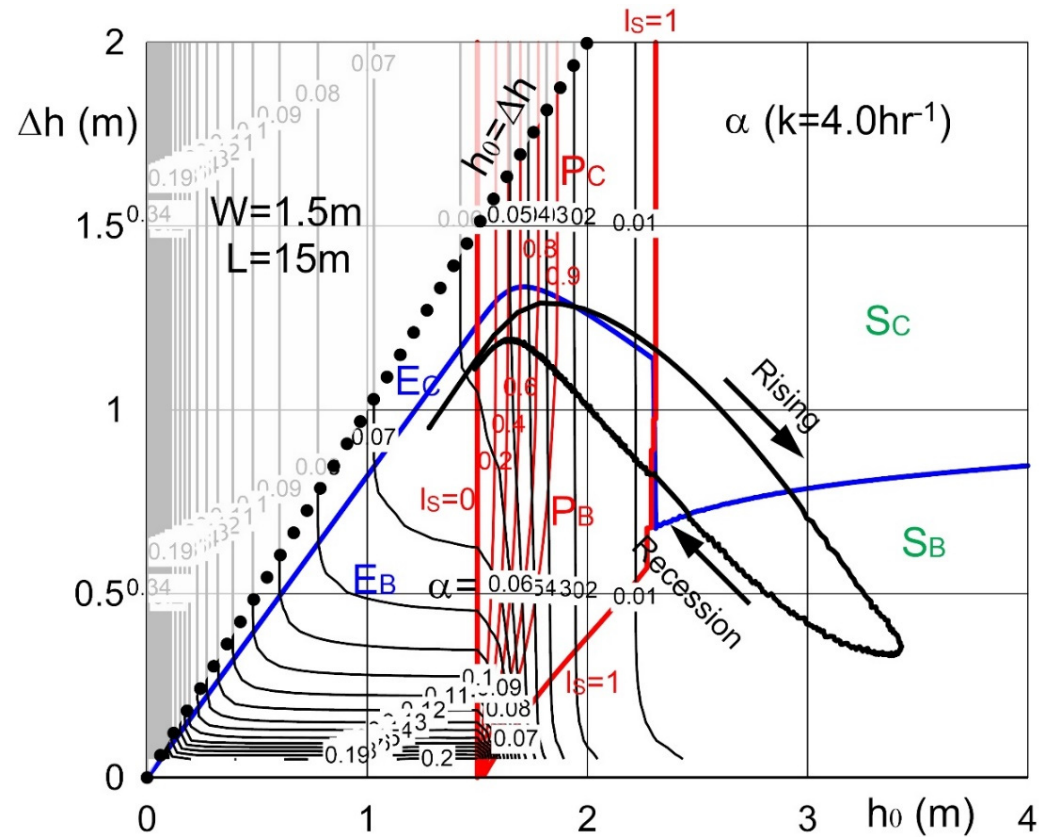


(b) 不透過堰

耐荷力, 環境機能 (石積み堰)

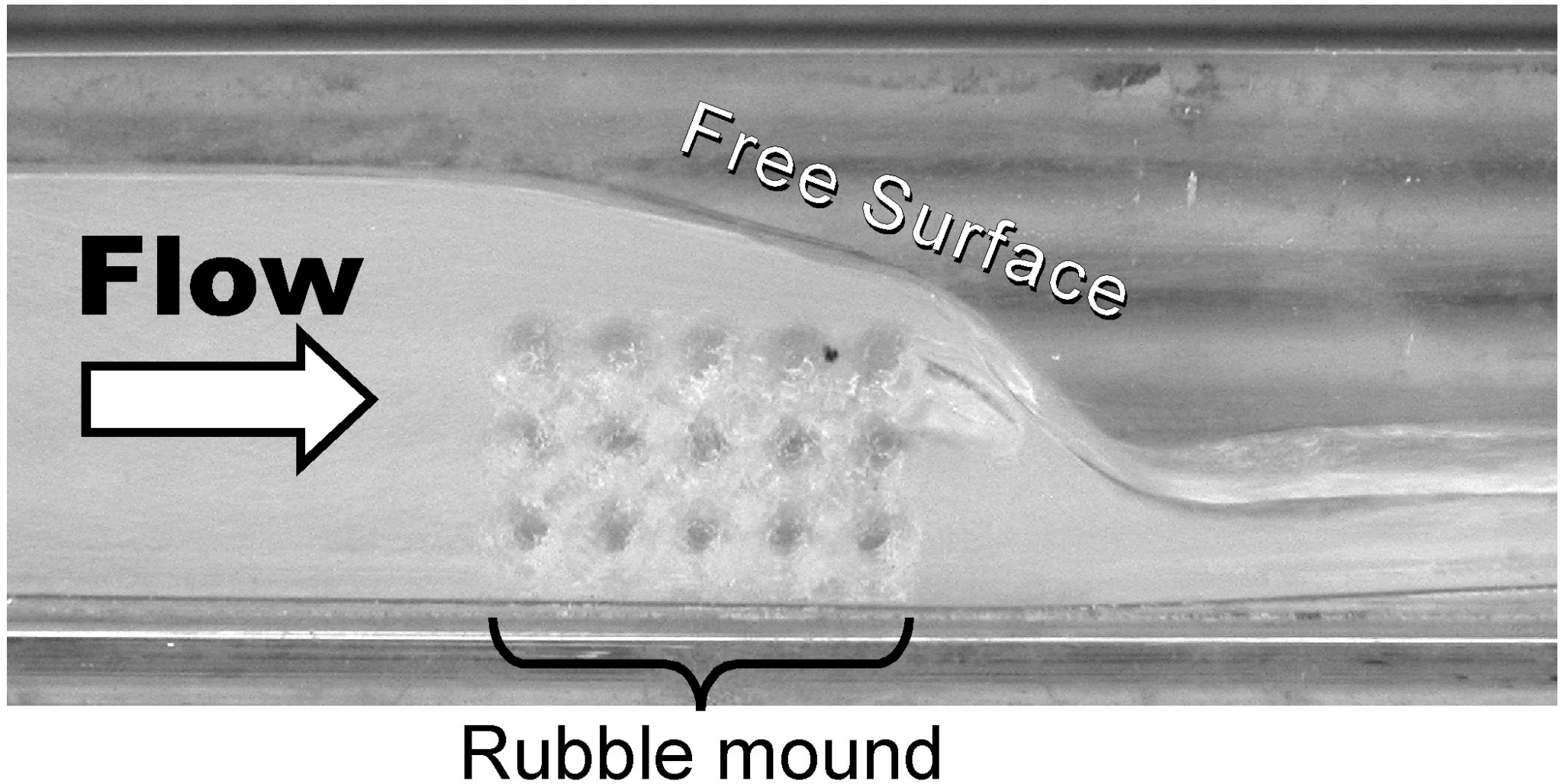


(a) 内部抗力 F_w^i

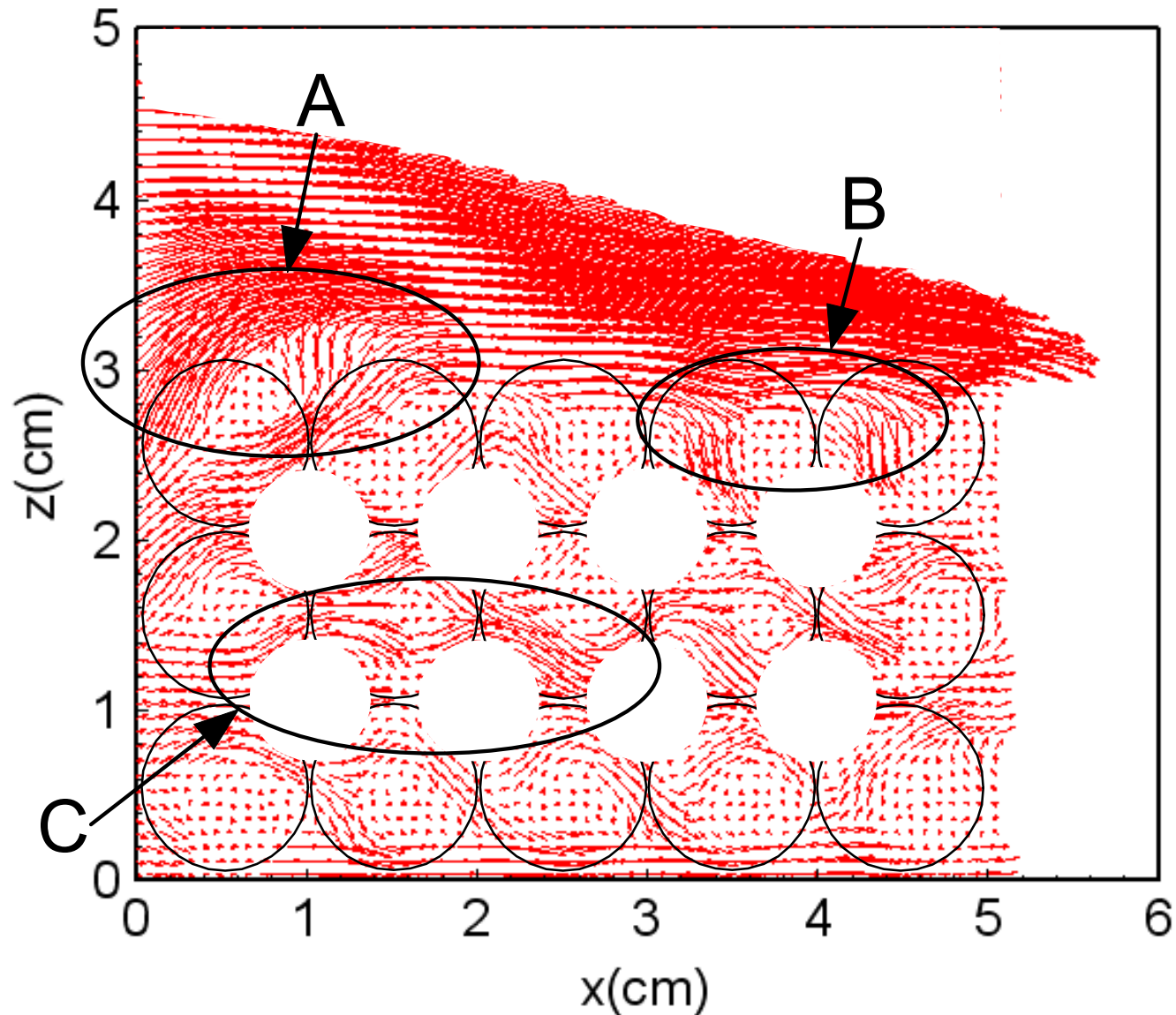


(b) 浄化率 α

石積み内部の可視化



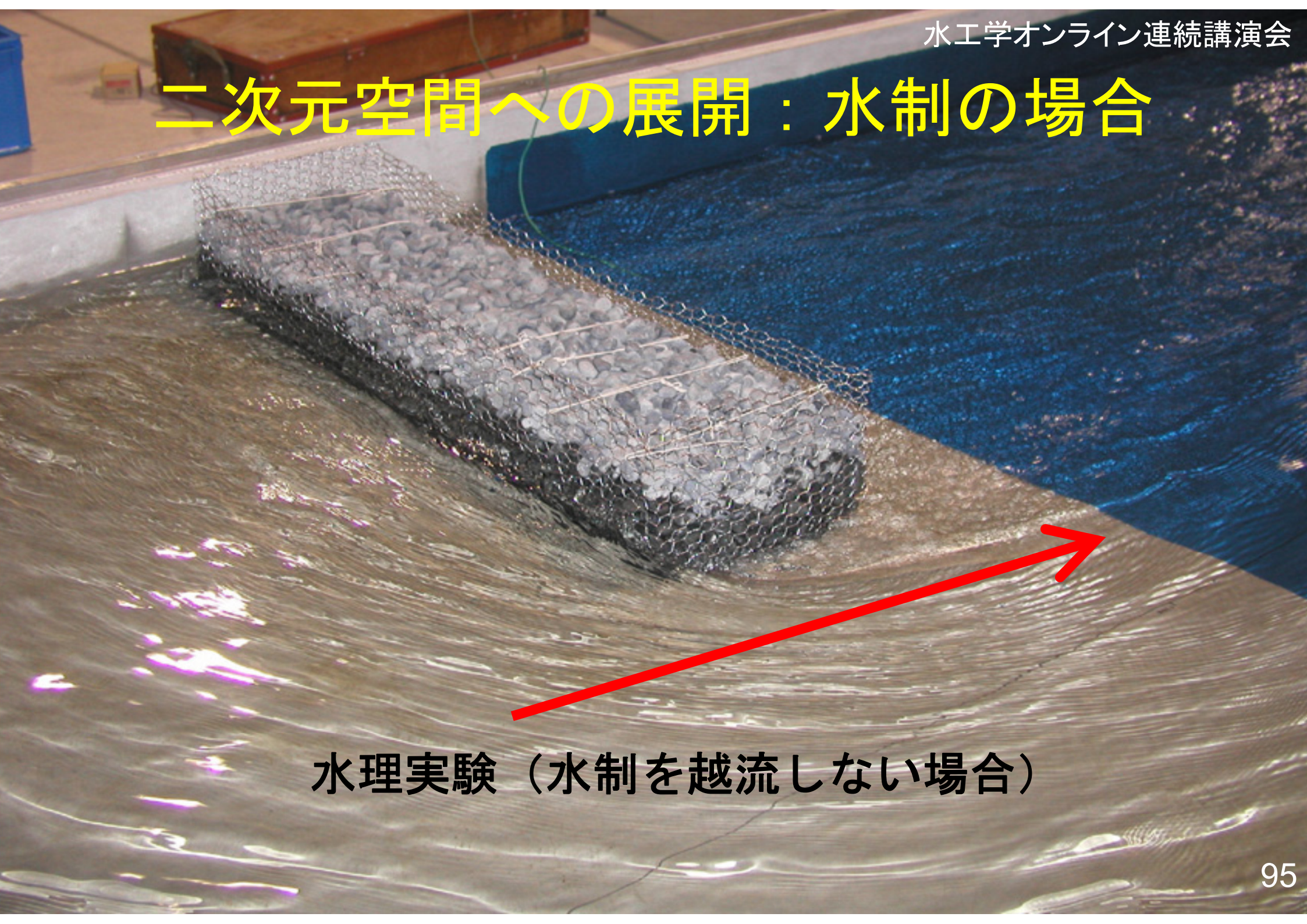
石積み内部の流速ベクトル(PTV)



本日の話題

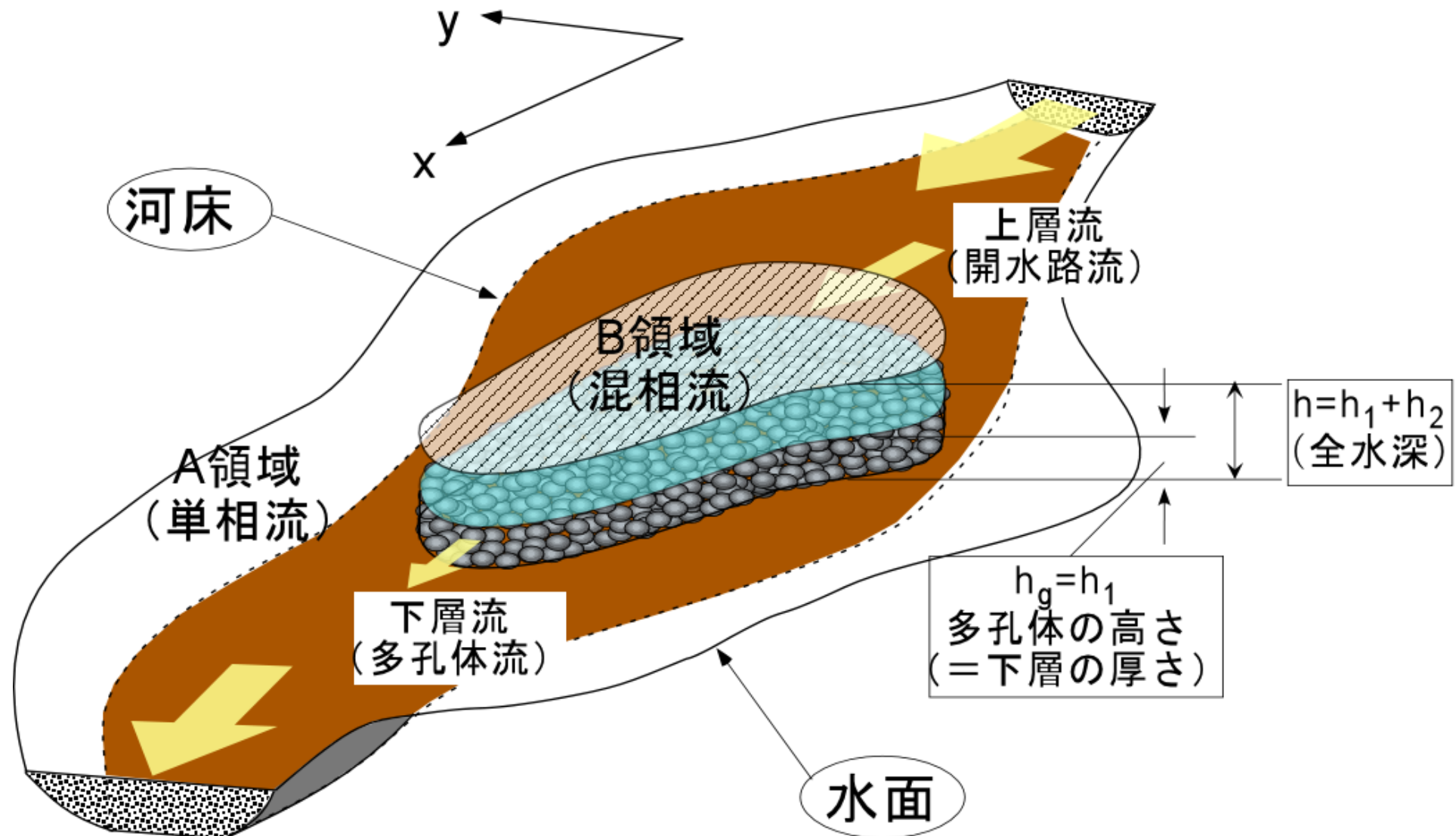
- 内部砕波
- 密度成層の鉛直混合（受熱・放熱時）
- 三層系の取水流
- 乱流モデルによる鉛直混合解析
- 熱塩対流（二重拡散）
- 対流混合層の秩序構造
- 貯水池表層の自然対流
- 成層型貯水池の内部波解析
- 富栄養貯水池の部分循環特性
- 貧酸素深水層の熱塩対流
- 化学成層流
- 石積み堰の環境水理
- 石積み水制
- 河道内植生
- 水工学への期待

二次元空間への展開：水制の場合



水理実験（水制を越流しない場合）

二次元二層流の解析系

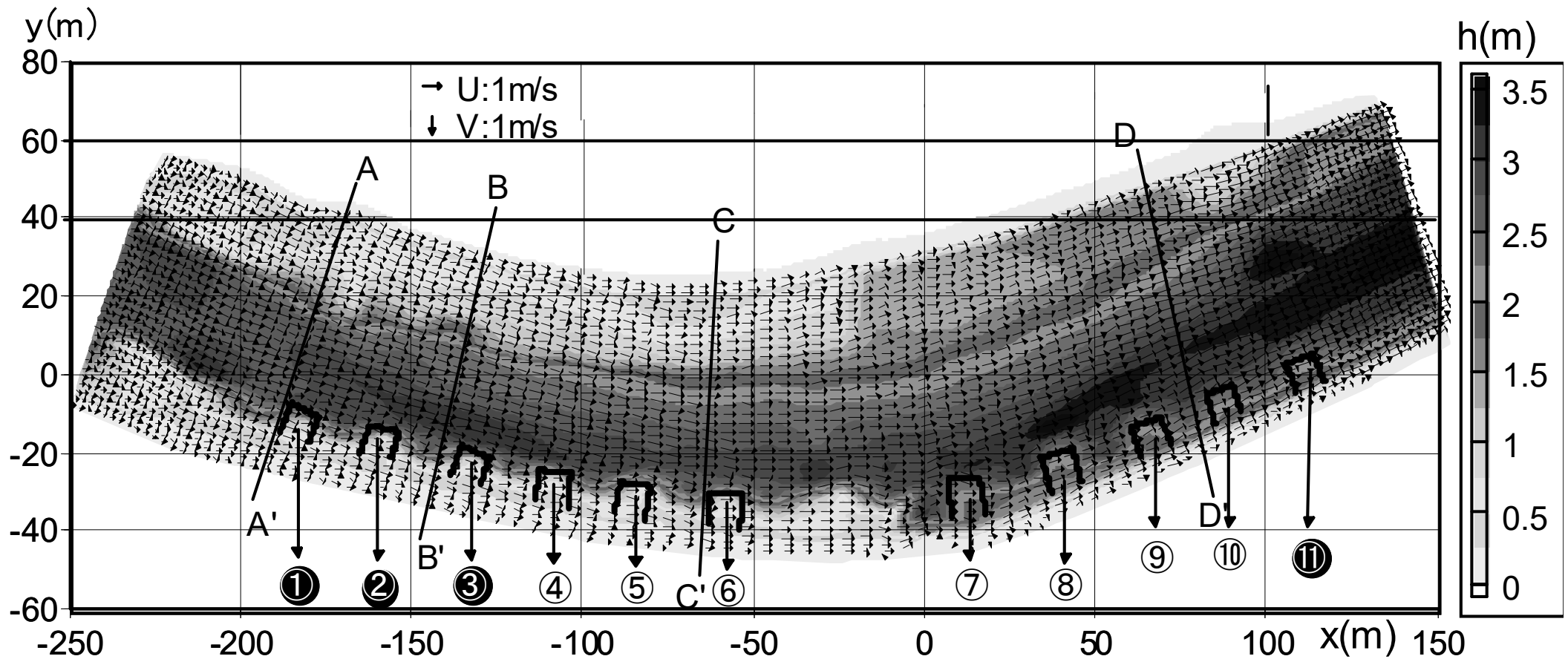


明石川の連続石積み水制



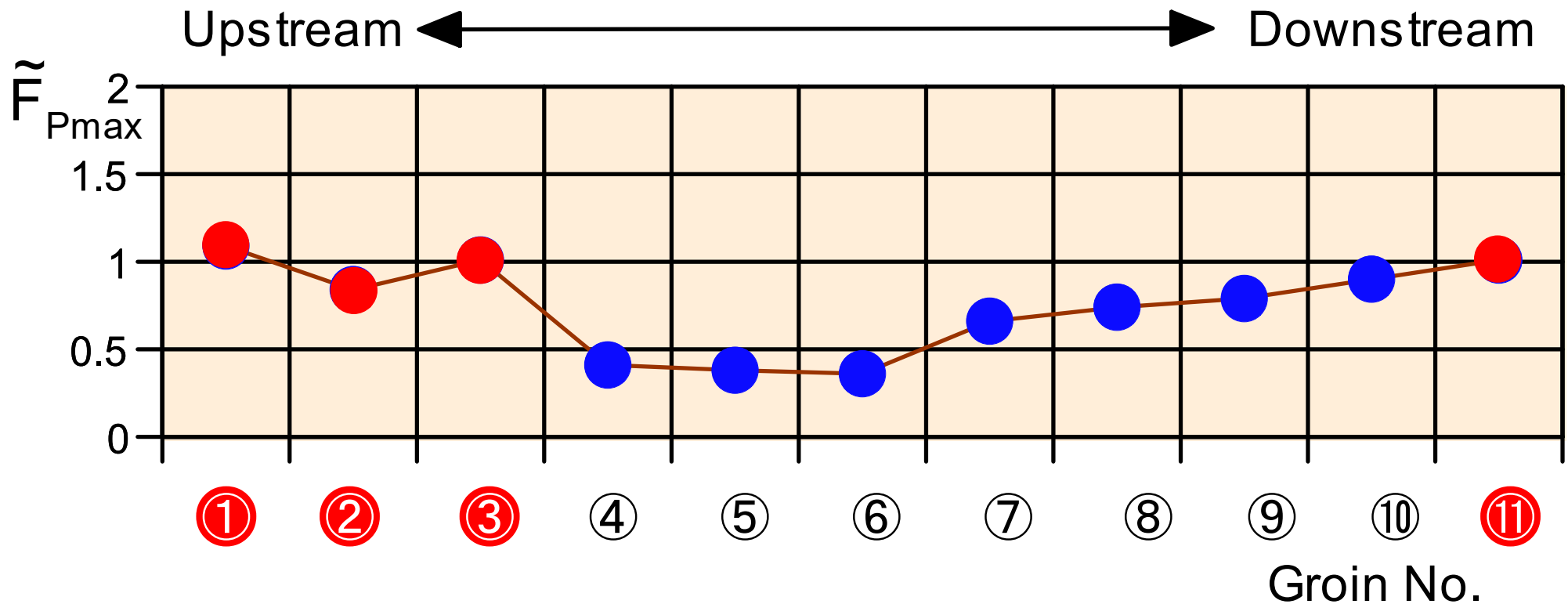
出水時の流速ベクトル

(丸数字は水制番号, 黒塗りの番号は出水によって被災した水制)



各水制に作用する無次元流体力

(丸数字は水制番号, 赤塗りの番号は出水によって被災した水制)



木材・粗朶の水制：ドナウ川(Straubing)



Open Channel Hydraulics, River Hydraulics Structures and Fluvial Geomorphology

Artur Radecki-Pawlik, Stefano Pagliara, Jan Hradecky

August 13, 2017 **Forthcoming** by CRC Press

Reference - 544 Pages - 20 Color & 257 B/W Illustrations

ISBN 9781498730822 - CAT# K26156

Features

- Marries hydraulic engineering principles with fluvial geomorphological concepts
- Provides professional insights on how to deal with and protect rivers and streams of the world
- Serves as a text as well as a practical guide

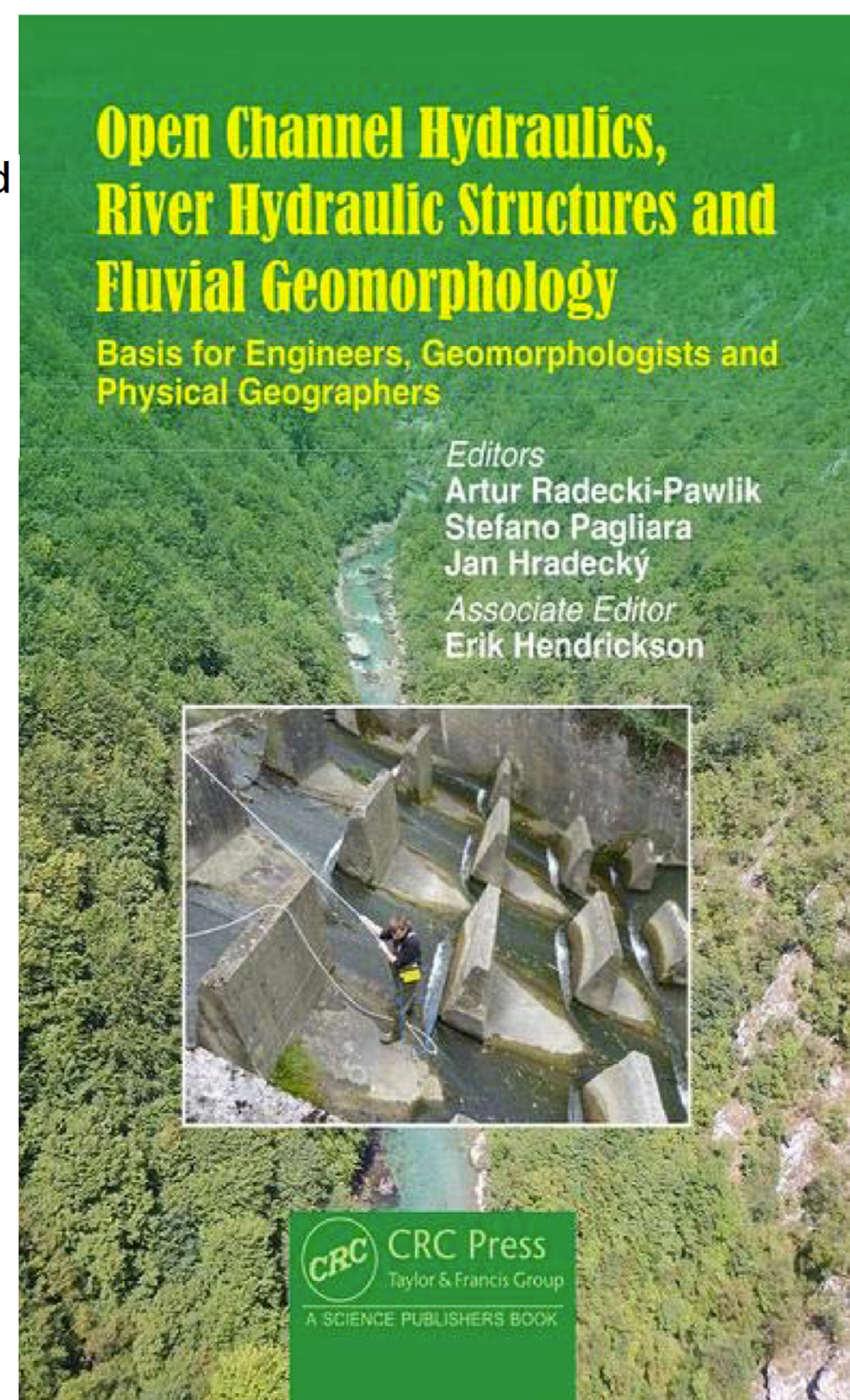
Summary

This book presents practical hydraulic and river engineering research along with fluvial geomorphological concepts, and links the theoretical and practical knowledge of people working every day with rivers, streams, and hydraulic structures to fluvial geomorphology. Besides providing a guide for professionals, this book also provides material for students to acquire the knowledge and skills to rehabilitate rivers, streams, and waterways.

CHAPTER 4

Hydrodynamics of River Structures Constructed with Natural Materials

Kohji Michioku



本日の話題

- 内部碎波
- 密度成層の鉛直混合（受熱・放熱時）
- 三層系の取水流
- 乱流モデルによる鉛直混合解析
- 熱塩対流（二重拡散）
- 対流混合層の秩序構造
- 貯水池表層の自然対流
- 成層型貯水池の内部波解析
- 富栄養貯水池の部分循環特性
- 貧酸素深水層の熱塩対流
- 化学成層流
- 石積み堰の環境水理
- 石積み水制
- 河道内植生
- 水工学への期待

樹林化したライン川における出水

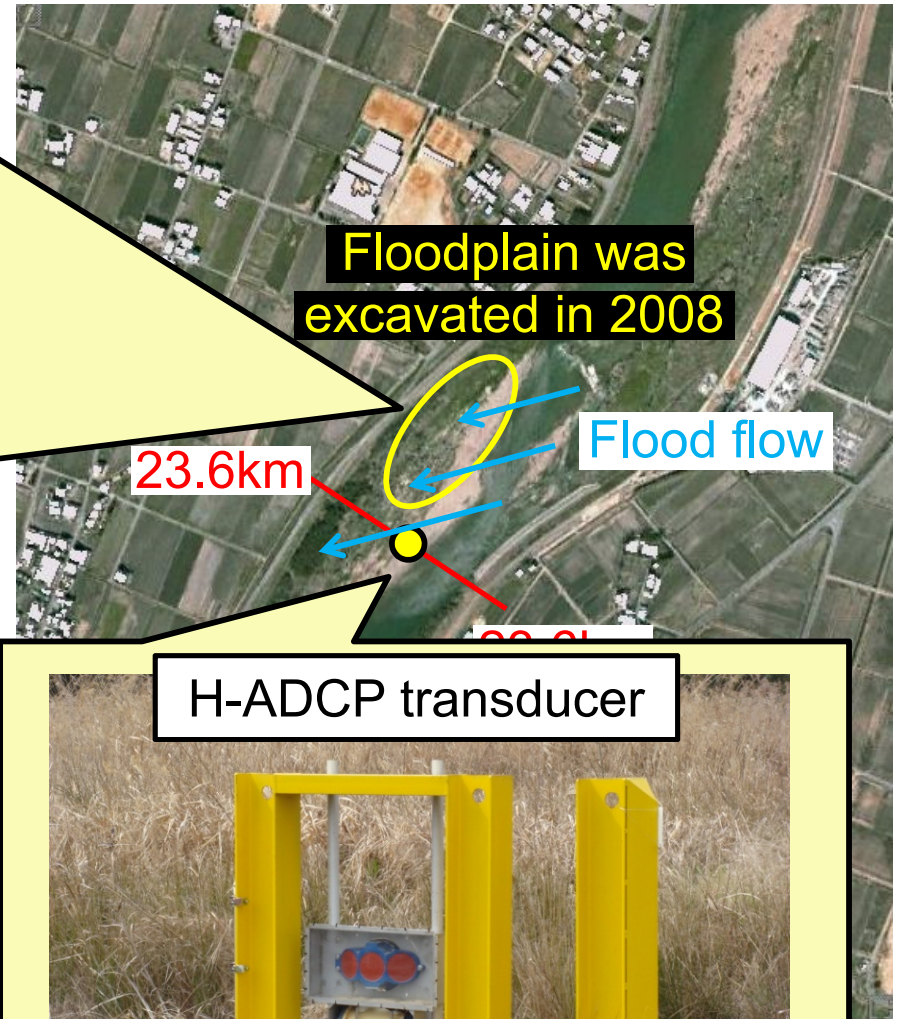


砂州が樹林化した加古川での洪水観測

Before the excavation



After the excavation



Floodplain was excavated in 2008

Flood flow

23.6km

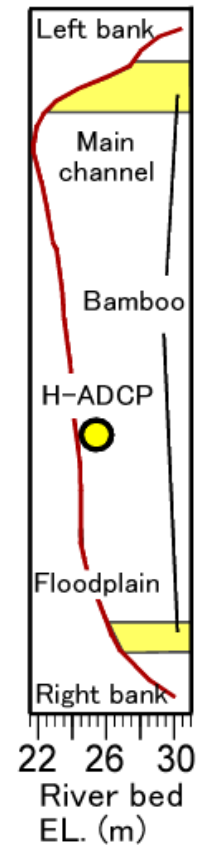
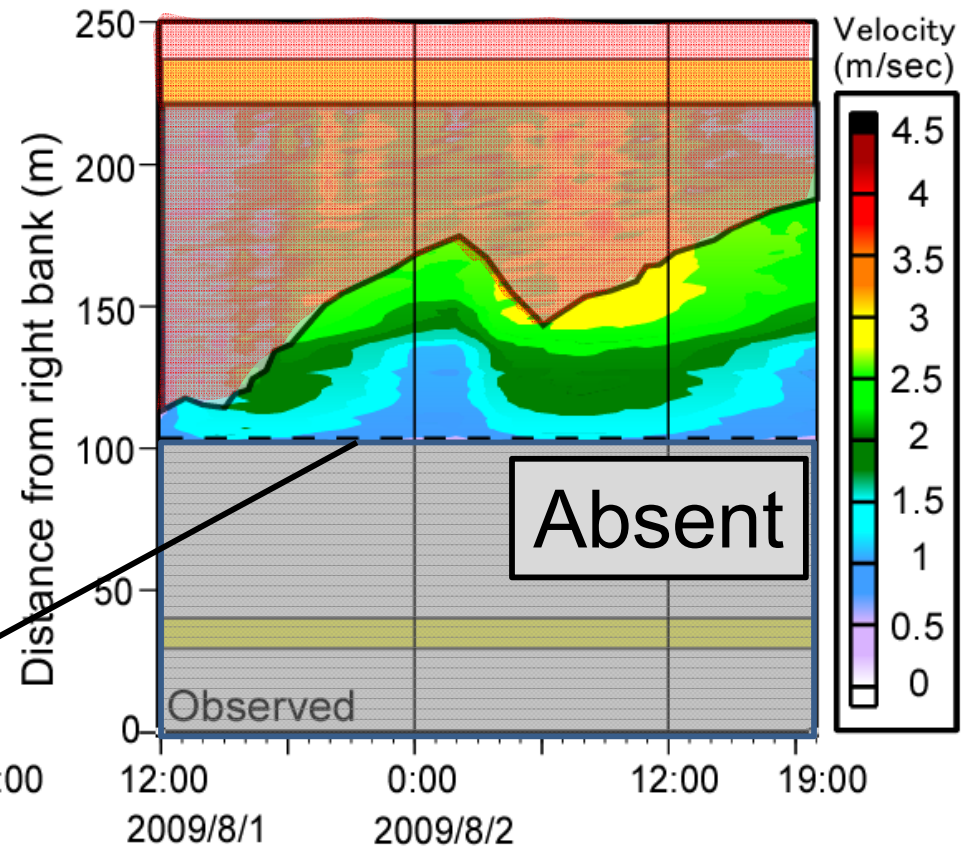
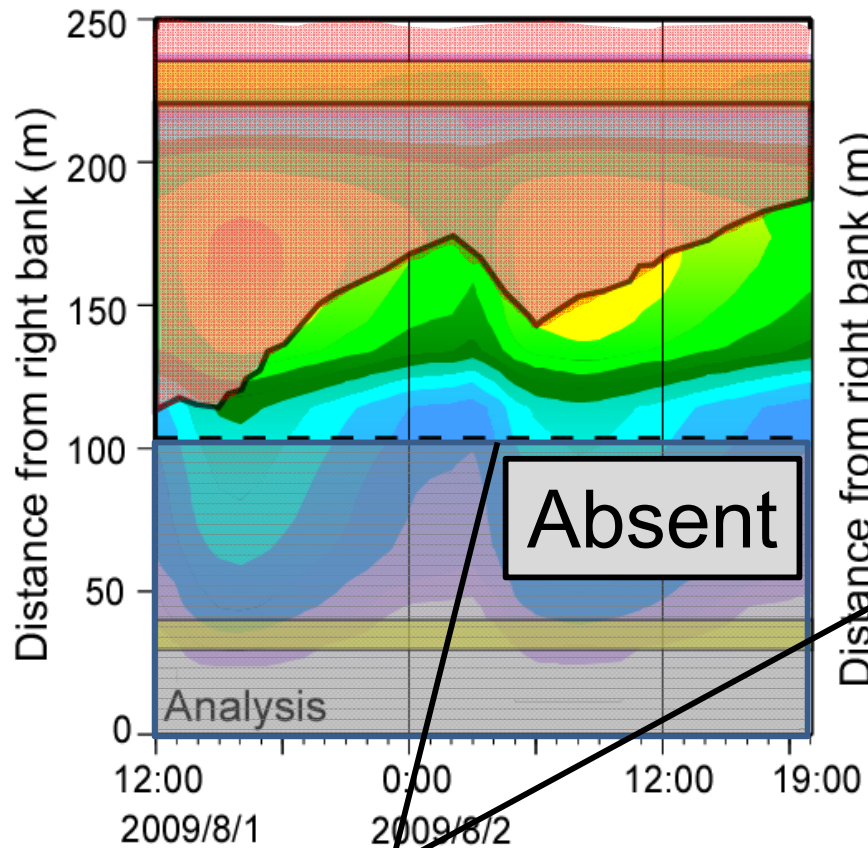
H-ADCP transducer

Measure velocity

流速横断分布の経時変化

数値解析

H-ADCP

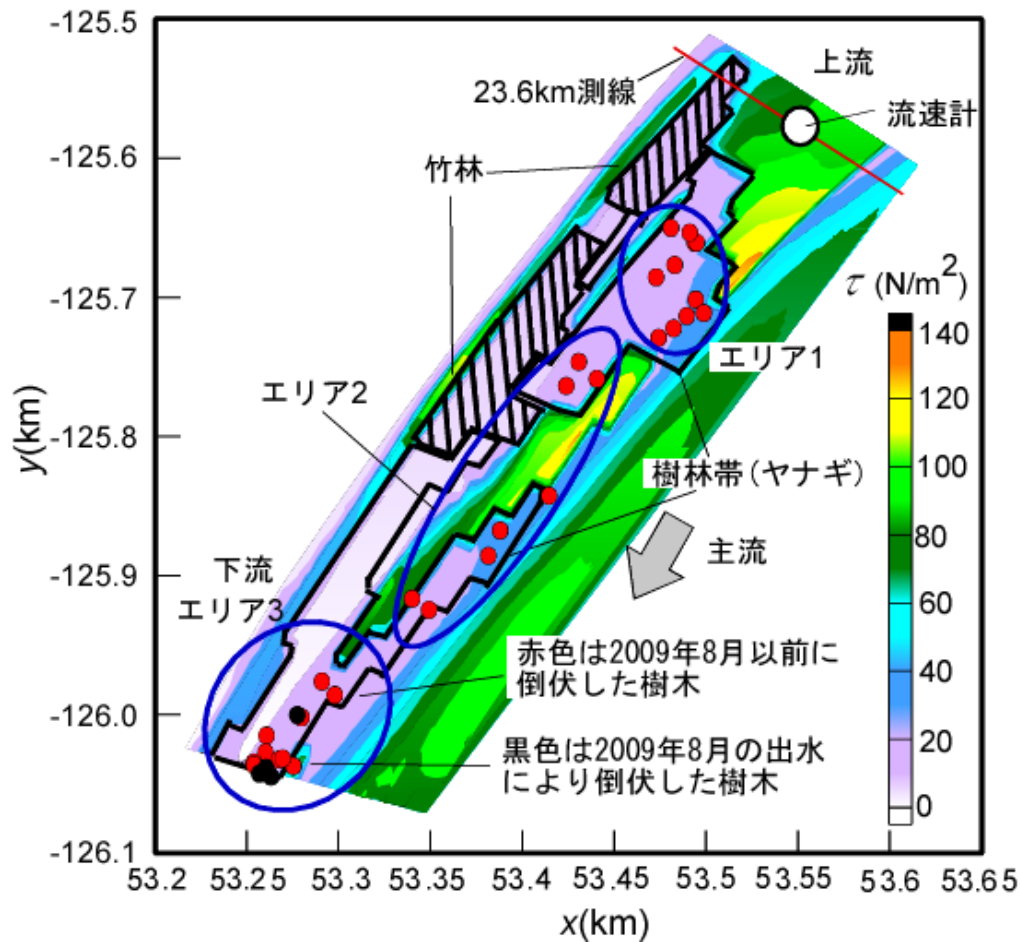


Location of H-ADCP
transducer

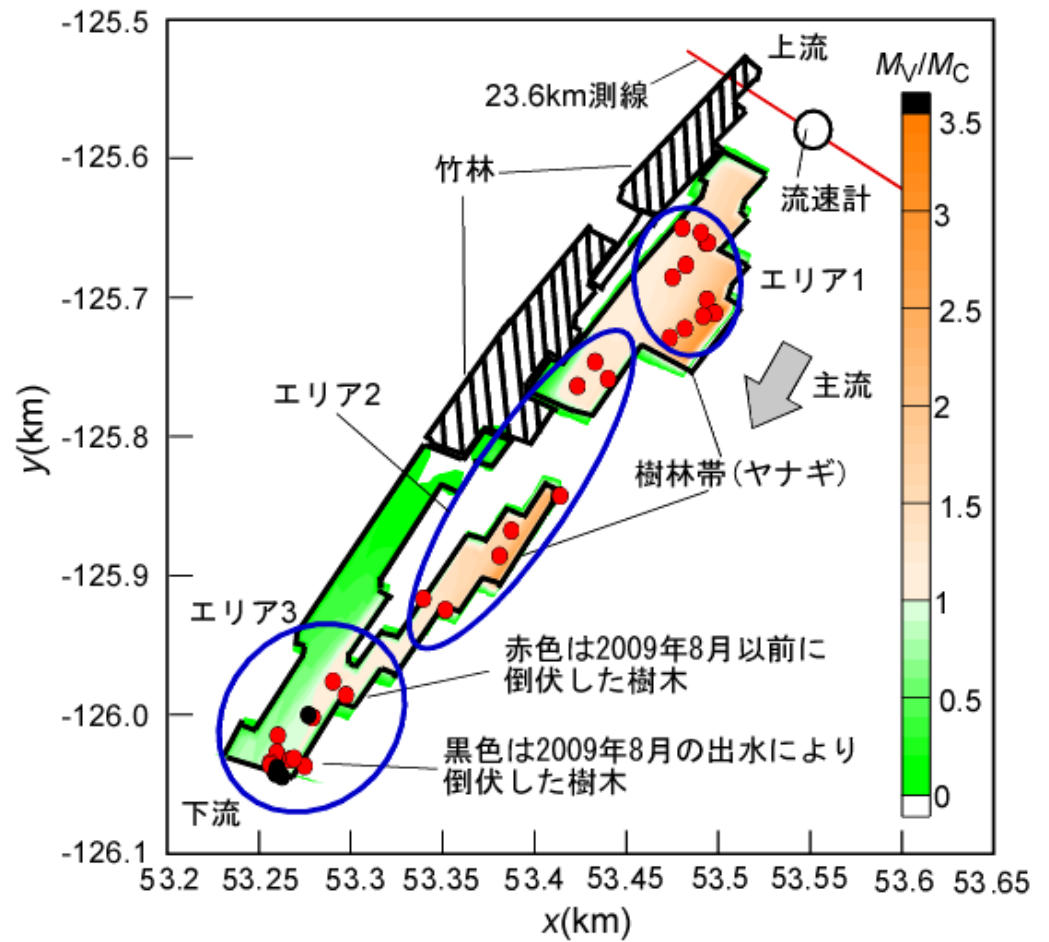
2009/8/1-2

樹木倒伏実績に基づく解析モデルの検証

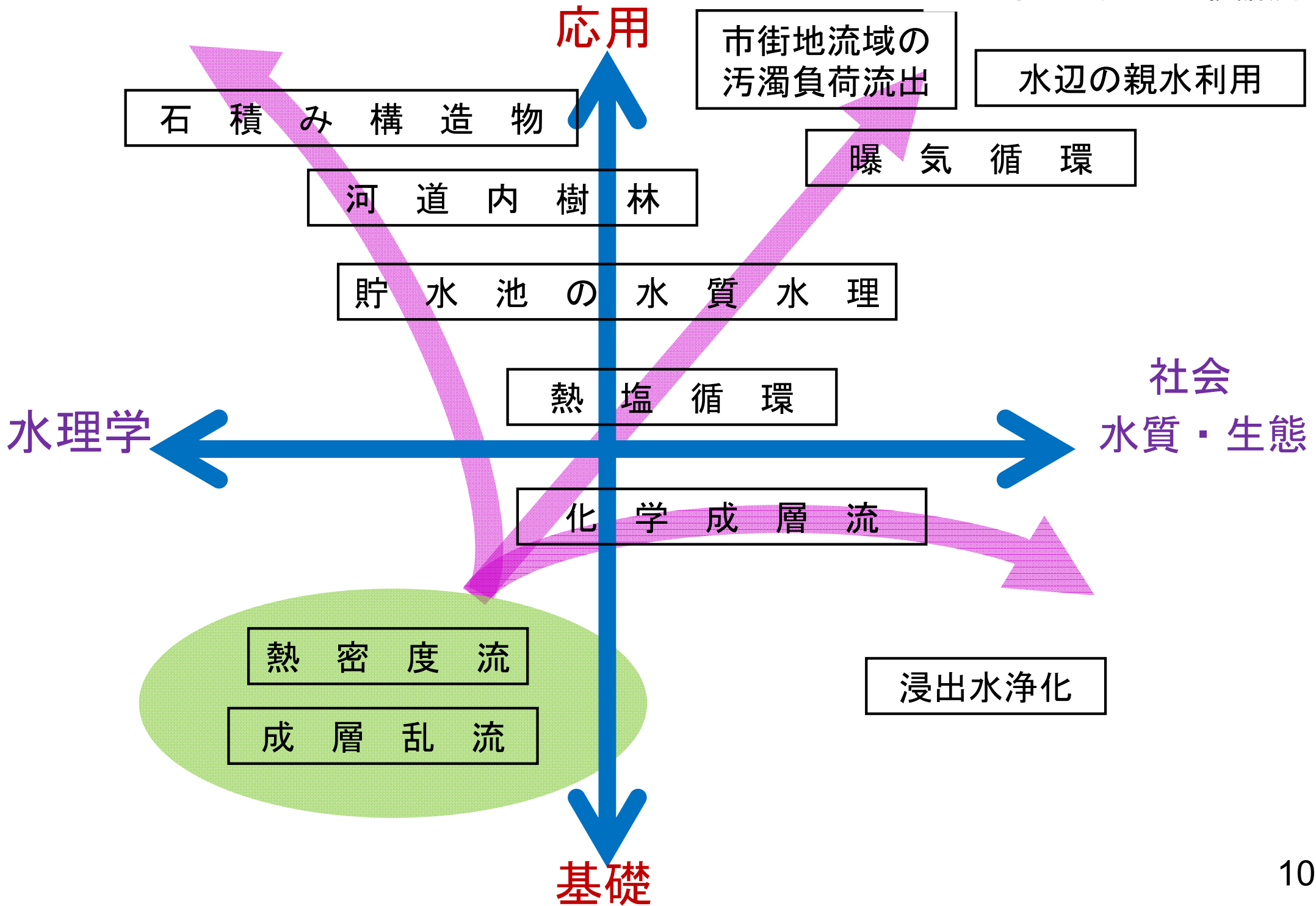
0423号台風時 (Q=4,400m³/s)



τ_* と倒伏樹木位置



M_V/M_C と倒伏樹木



本日の話題

- 内部砕波
- 密度成層の鉛直混合（受熱・放熱時）
- 三層系の取水流
- 乱流モデルによる鉛直混合解析
- 熱塩対流（二重拡散）
- 対流混合層の秩序構造
- 貯水池表層の自然対流
- 成層型貯水池の内部波解析
- 富栄養貯水池の部分循環特性
- 貧酸素深水層の熱塩対流
- 化学成層流
- 石積み堰の環境水理
- 石積み水制
- 河道内植生
- 水工学への期待

水工学体系の変遷

空間規模

全球
大陸
流域
地先

国際化

Scale hierarchy
Diversity

自然科学

力学物理⇒エコ・社会
ハード⇒ソフト
防災⇒減災
基礎研究⇒応用研究

工学

人文・社会科学

土木工学

学際化

超学際化

(旧)水工学

水文学
河川工学
水理学

海岸工学
土木計画学

情報システム

水質生物

科学分野

市民

社会

水工学に見られる半世紀の変化

- 水理講演会講演集→水理講演会論文集→水工学論文集
→土木学会論文集
 - 計測・解析技術の高度化
 - FieldのOpen化
 - 河川管理者との連携
- 行政機関，河川懇談会など関係者の貢献

基礎研究→応用研究
室内実験→現地観測
物理模型→数値模型

水工学を推進するためのincentive

INCOME → PROCESS → OUTCOME
 課題 研究 成果

高度化
 深化
 複雑化
 広範化

資質向上
 経験蓄積
 チームワーク力
 ↑
 分業化
 手段の目的化

客観的評価
 社会への実装性
 ↓
 個人貢献度の相対的低下
 研究本質の希薄化
 成果の見えにくい研究？

成果至上主義の弊害

水工学の広範化・高度化→

- ・ 研究の空洞化（Processの希薄化）への懸念
- ・ 評価軸の多様化(ex. 水工学理＋市民連携, 社会活動, 人材育成, etc.)
- ・ Outcome（成果主義）＋Process（本質）の評価が必要

ご静聴ありがとうございました