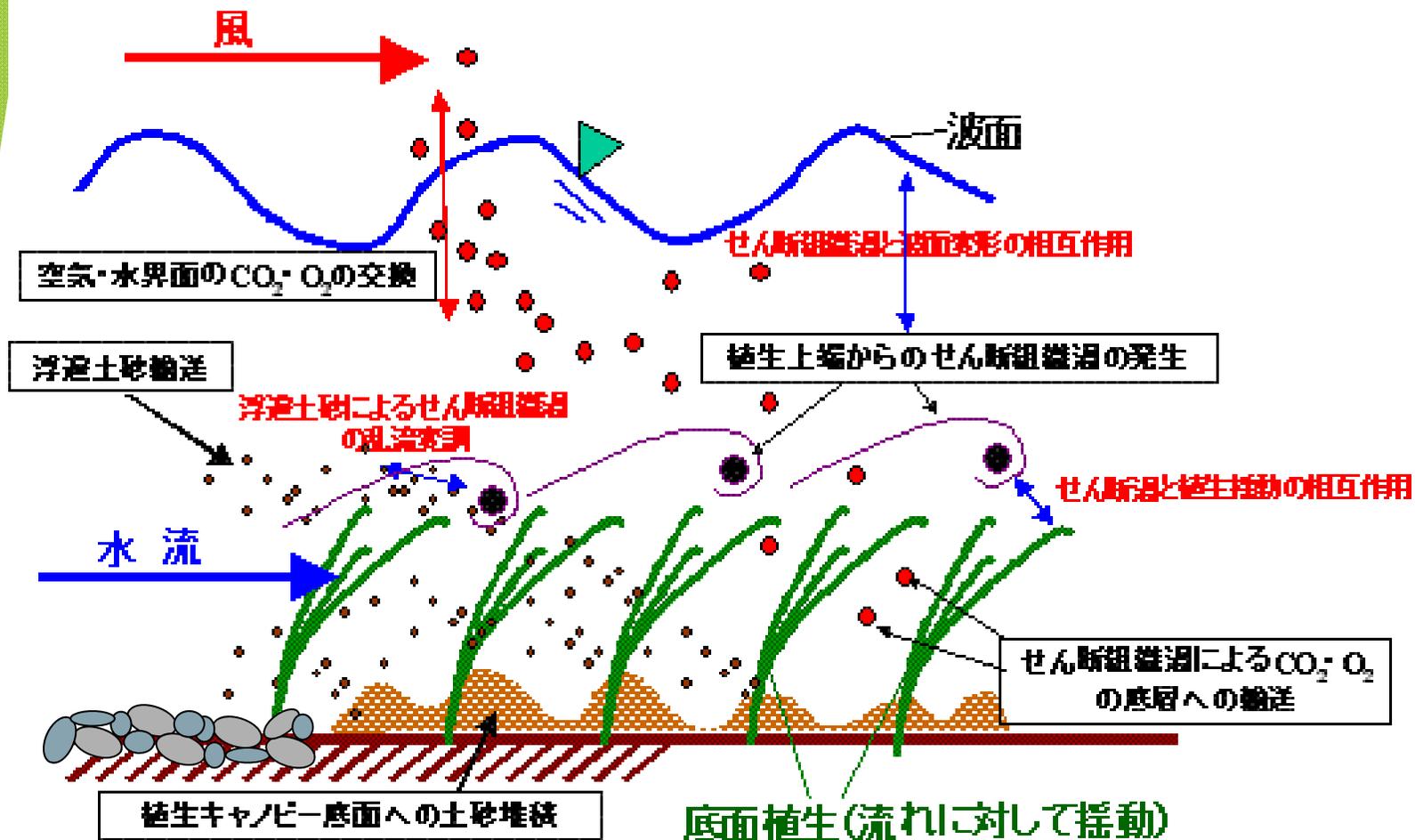


粗面境界層の乱流構造と輸送現象について

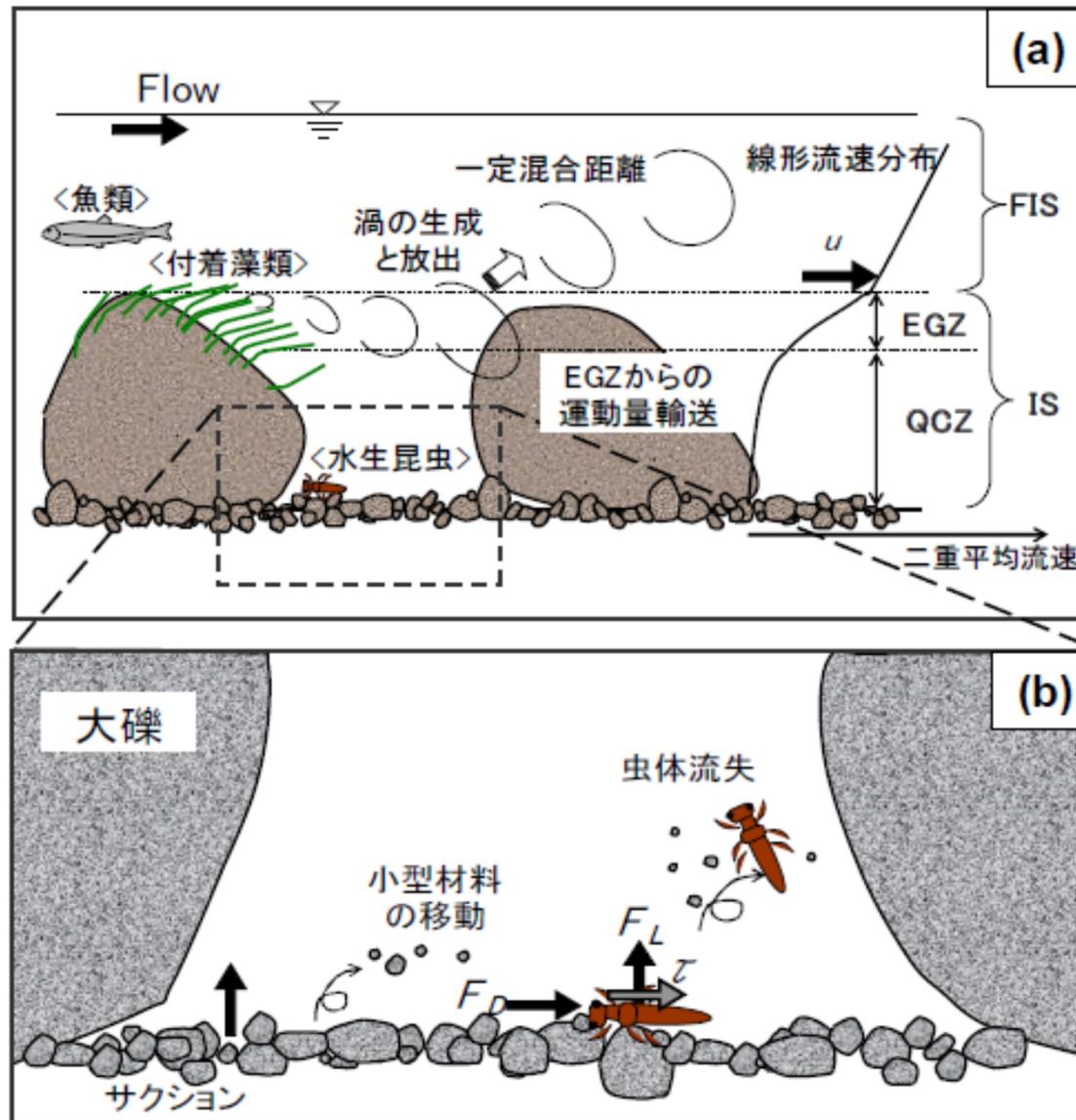
－ 実験水理学の立場から

京都大学大学院工学研究科 社会基盤工学専攻 山上 路生

河川流れにおける様々な環境要因

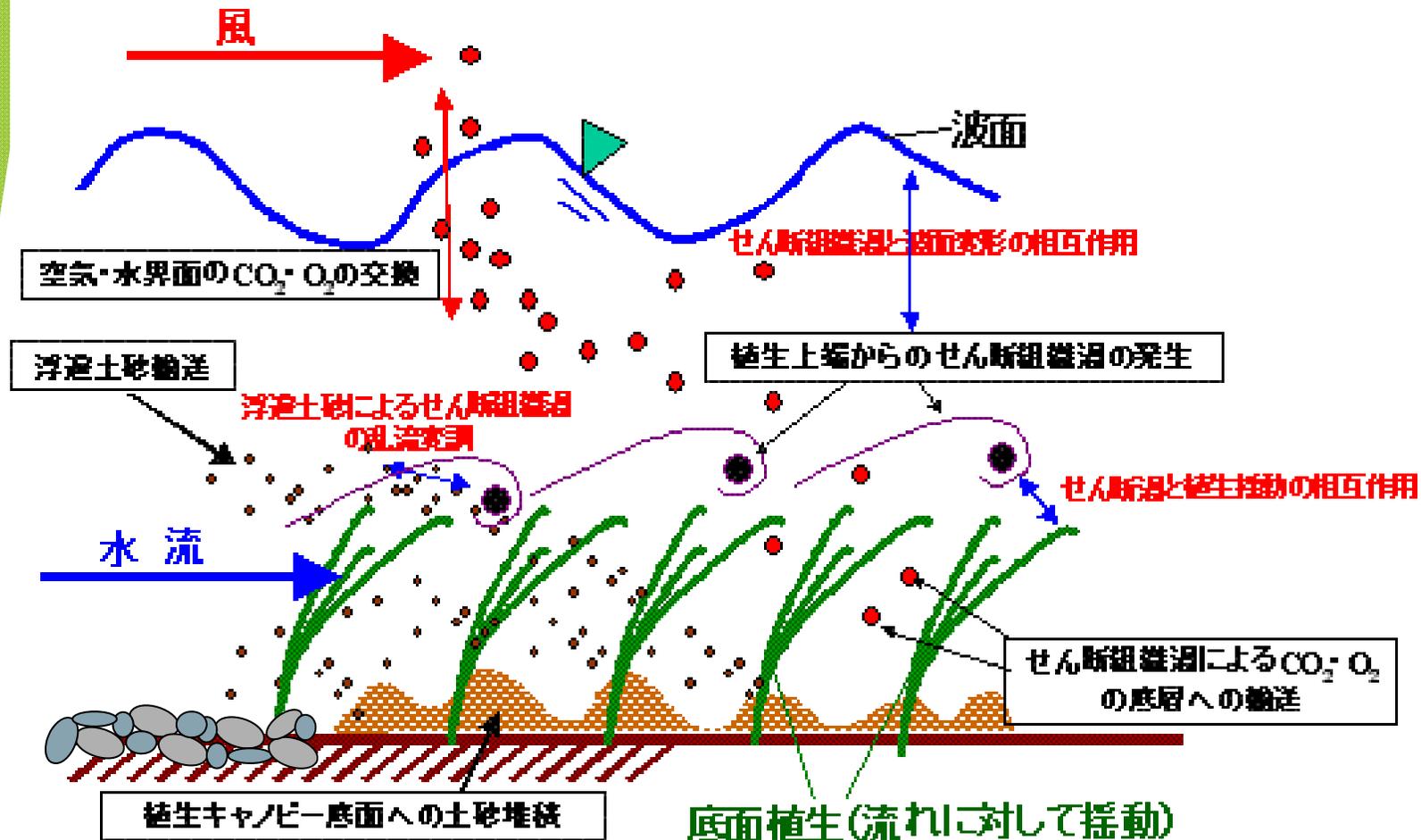


河川底層（礫層）とハビタット



田中・古里2014 ながれ33号より抜粋

河川流れにおける乱流輸送

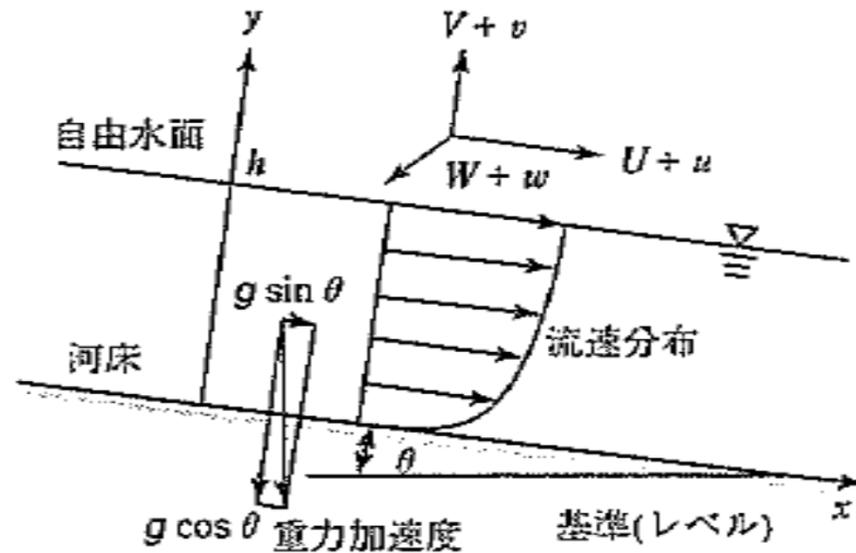


本日本話する内容

- 乱流境界層の基本特性
(既往の基礎研究成果より)
- 河川乱流の実態と未解明課題
- 底層のキャビティ粗度と乱流輸送
(棧粗度と沈水植生に注目して)
- 界面領域と底層の関係
(溶存ガスの乱流輸送の立場から)
- 今後の課題

－話題 1－

乱流境界層の基本特性 (フラット床と粗度床の比較)

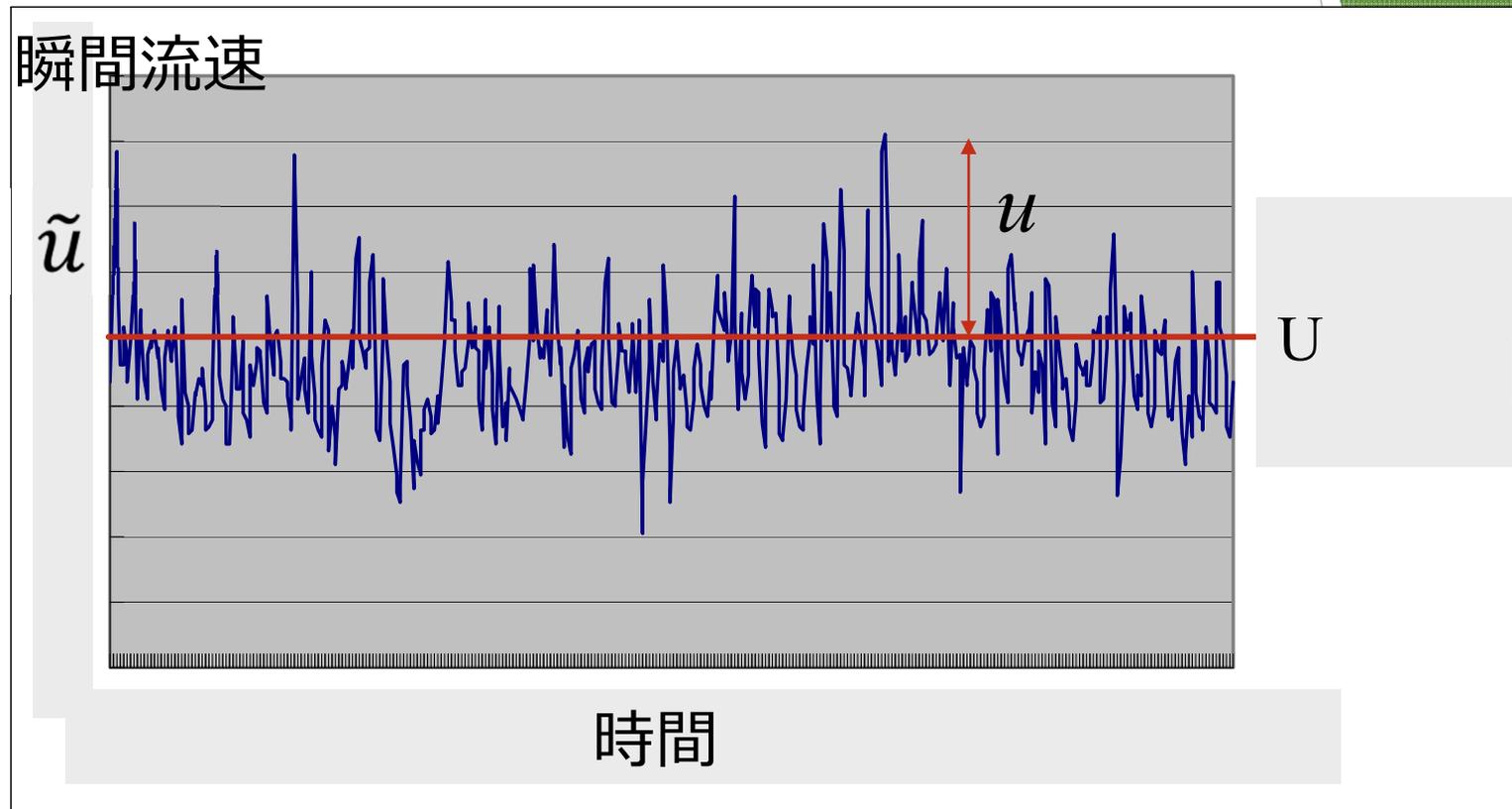


話題 1

滑面（フラット床）境界層の 乱流構造（鉛直2D）

話題 1

レイノルズ分解と乱流解析



レイノルズ分解 $\tilde{u}(t) = U + u$

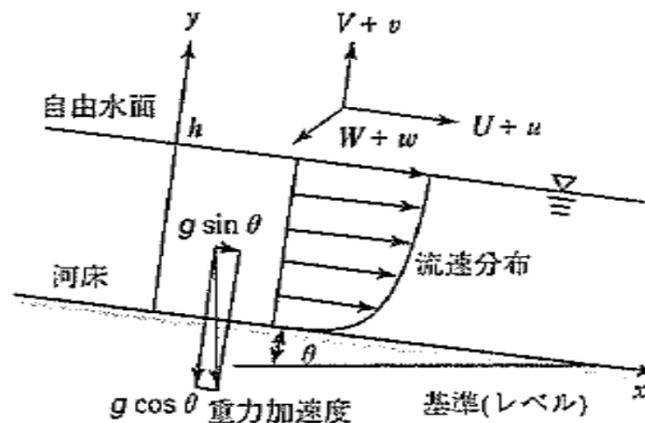
瞬間流速 = 平均流速 + 乱れ

話題 1

流速分布 (壁法則)

$$\frac{dU^+}{dy^+} = \frac{2(1-\xi)}{1 + \sqrt{1 + 4l^{+2}(1-\xi)}}$$

$$(U^+ \equiv U/U_*, y^+ \equiv \nu U_* / \nu, l^+ \equiv lU_* / \nu, \xi \equiv \nu/h)$$



U : 時間平均流速

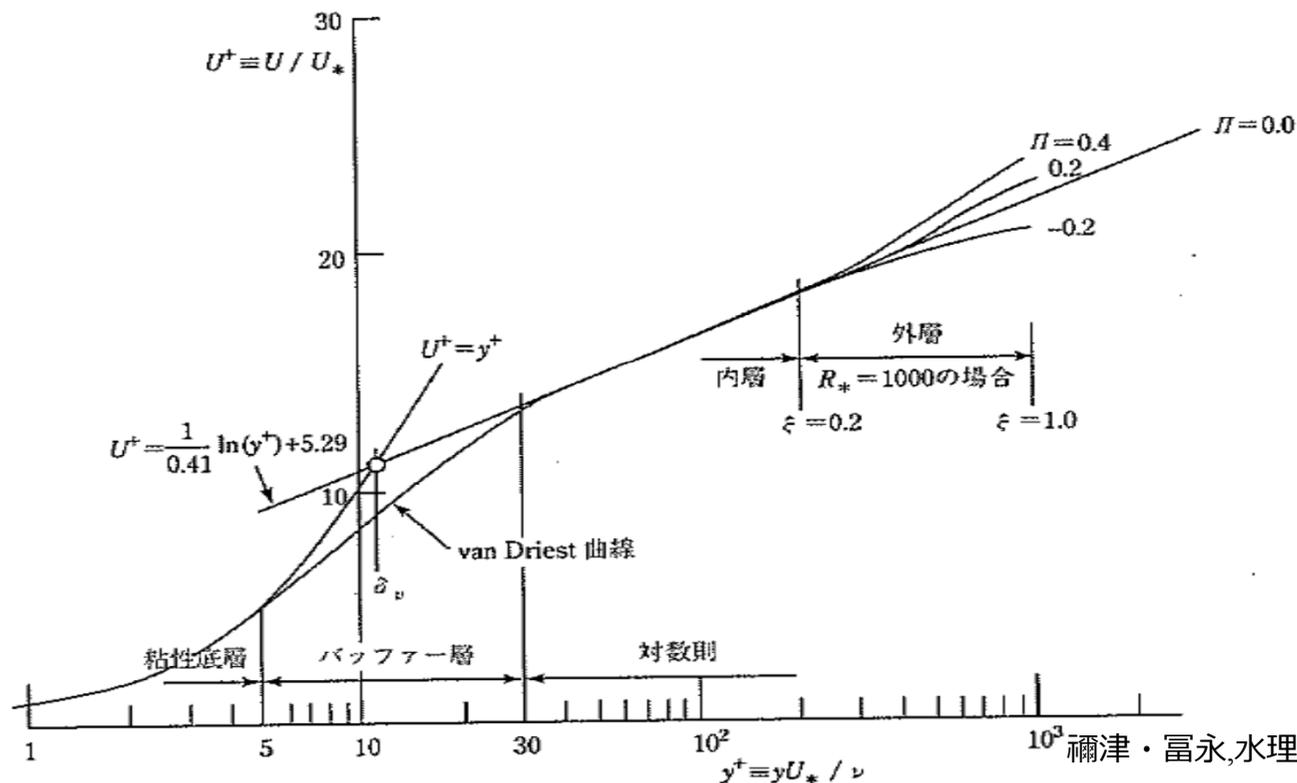
h : 水深

U_* : 摩擦速度

l : 混合距離

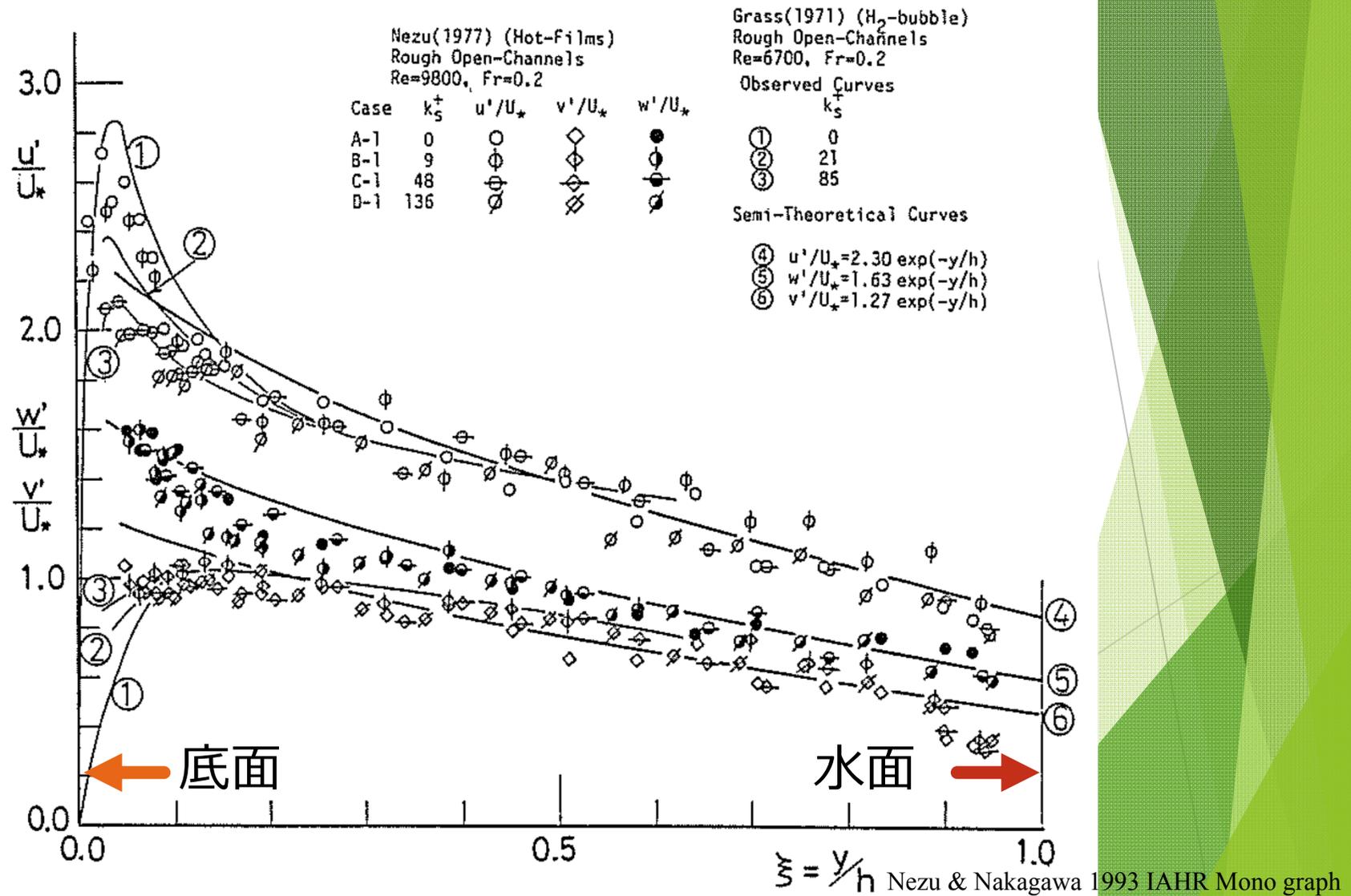
y : 水深方向座標

ν : 動粘性係数



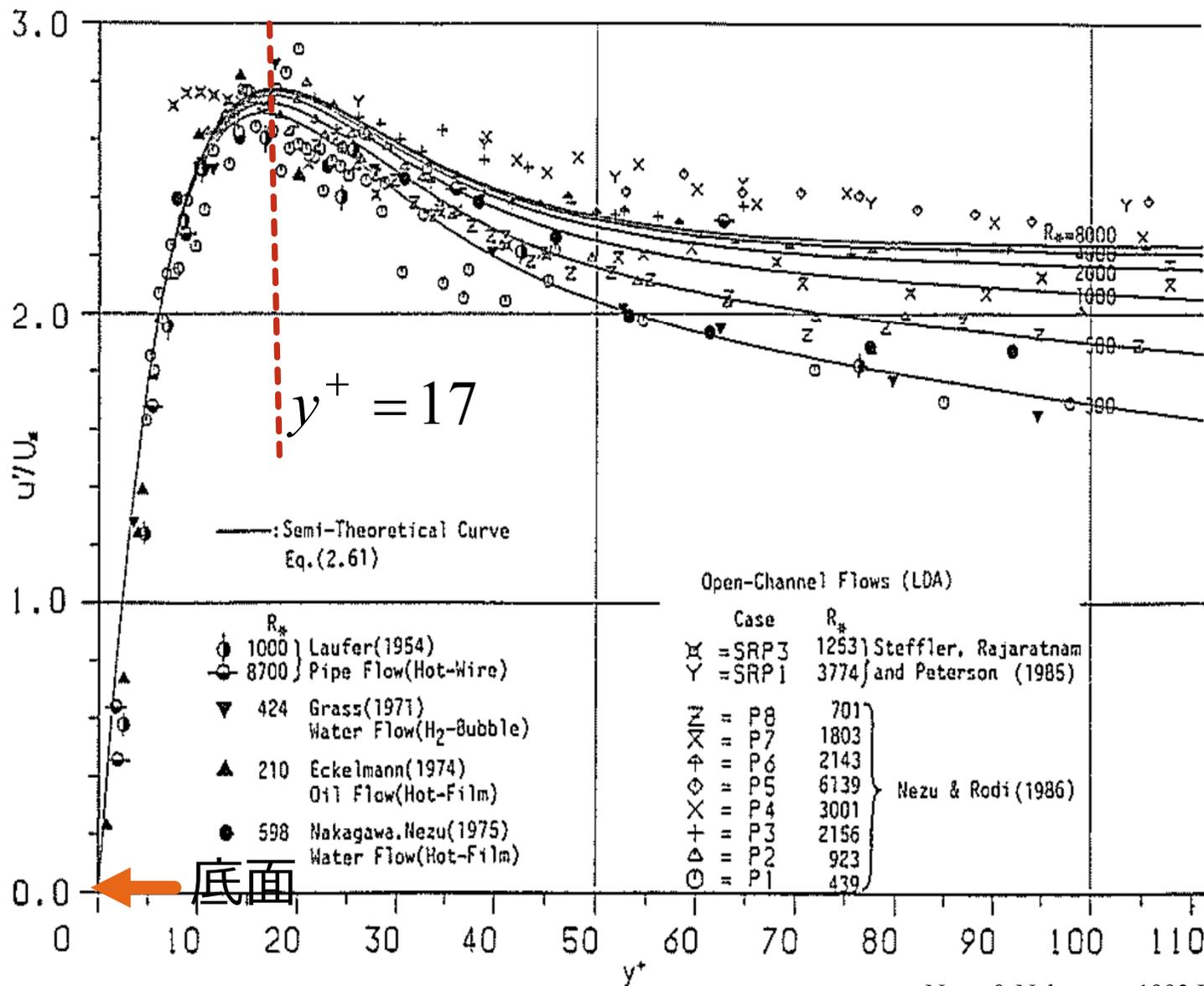
話題 1

乱れ統計量 (乱れ強度) の水深方向分布



話題1

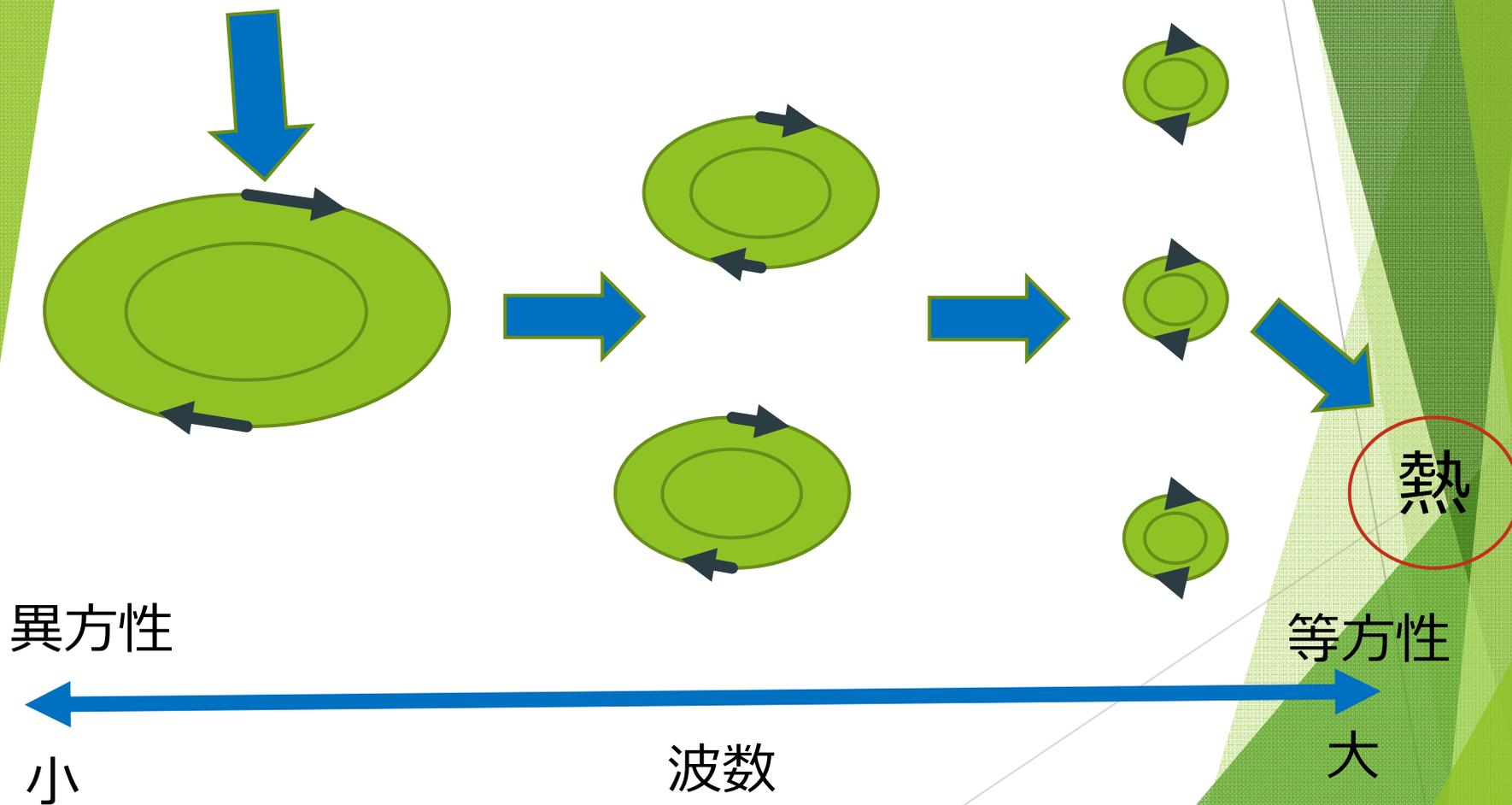
主流方向乱れ強度の壁面極近傍の分布



話題 1

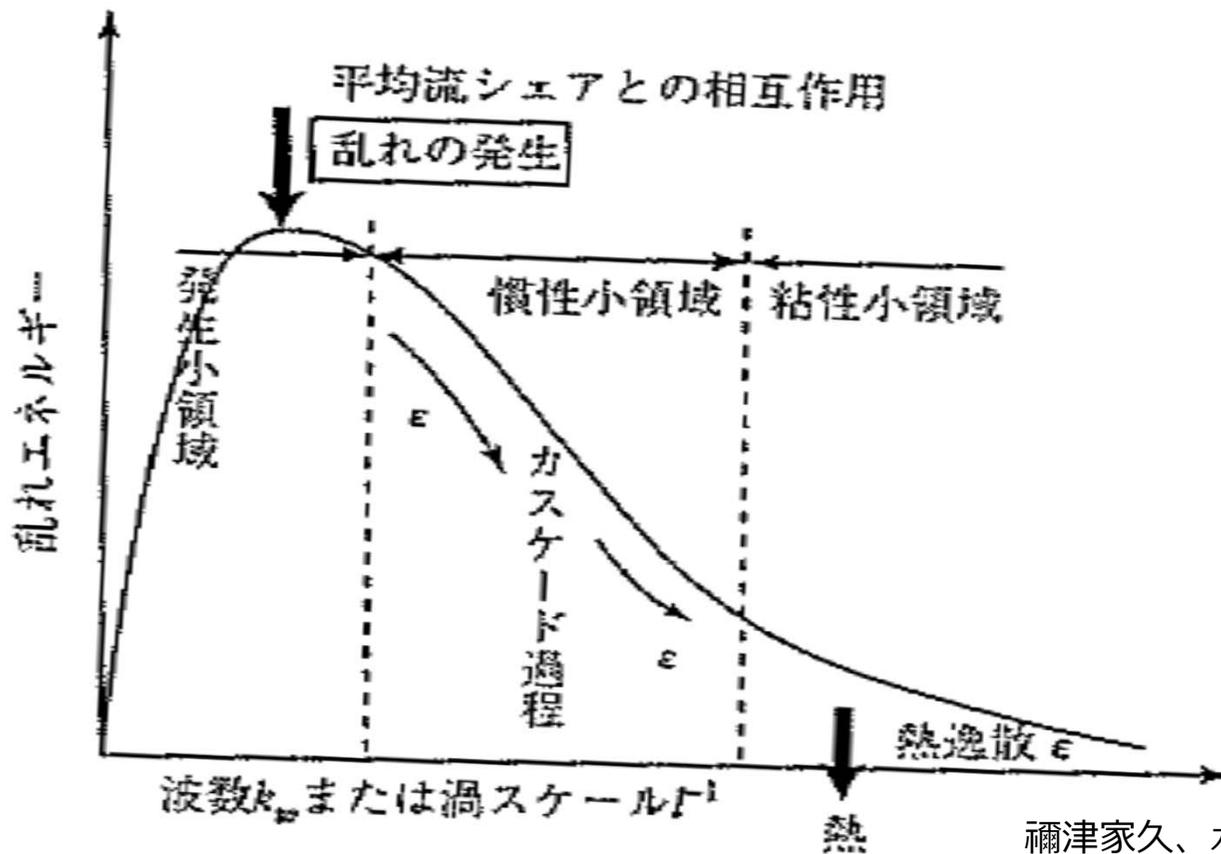
マルチスケール特性 -カスケード過程-

平均流からのエネルギー供給



話題 1

マルチスケール特性 — スペクトル解析と5/3乗則 —



禰津家久、水理学・流体力学

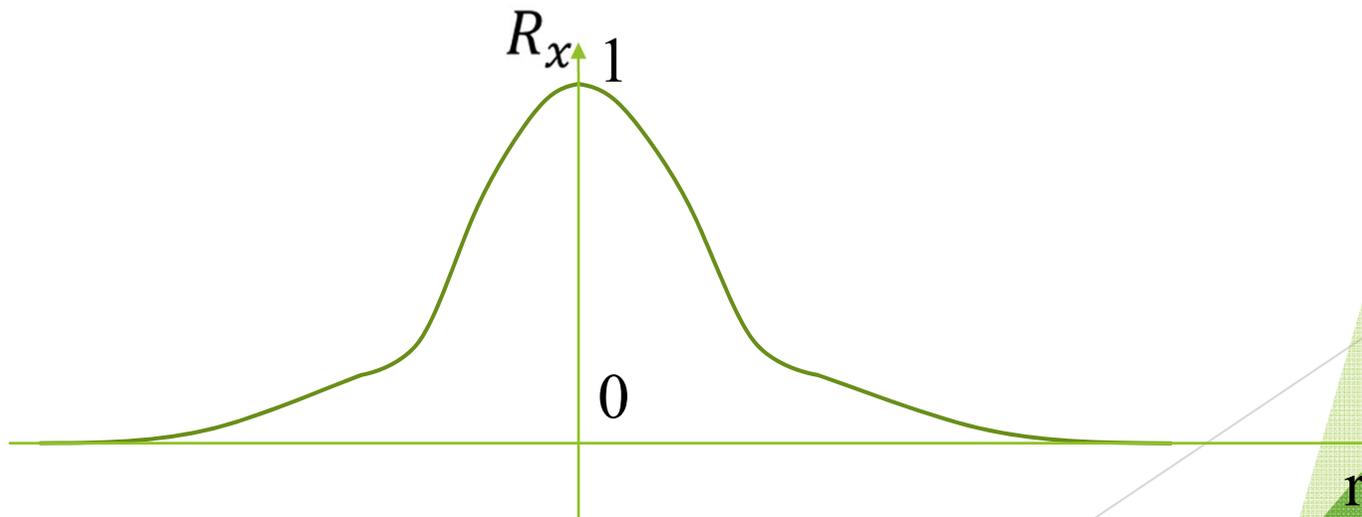
$$S(k_w) = C \epsilon^{2/3} k_w^{-5/3}$$

話題 1

積分スケール（大渦スケール）

$$L_x \equiv \int_0^{\infty} R_x dr$$

$$R_x(r) \equiv \frac{\overline{u(x+r) \cdot u(x)}}{u'^2}$$



話題 1

コルモゴロフスケール (小渦スケール)

粘性により無限小の渦は存在しない →
最小渦が定義できる。

長さ $\eta \equiv (\nu^3/\varepsilon)^{1/4}$

時間 $\tau \equiv (\nu/\varepsilon)^{1/2}$

速度 $v \equiv (\nu\varepsilon)^{1/4}$

話題 1

大小スケール比 –ダイナミックレンジ–

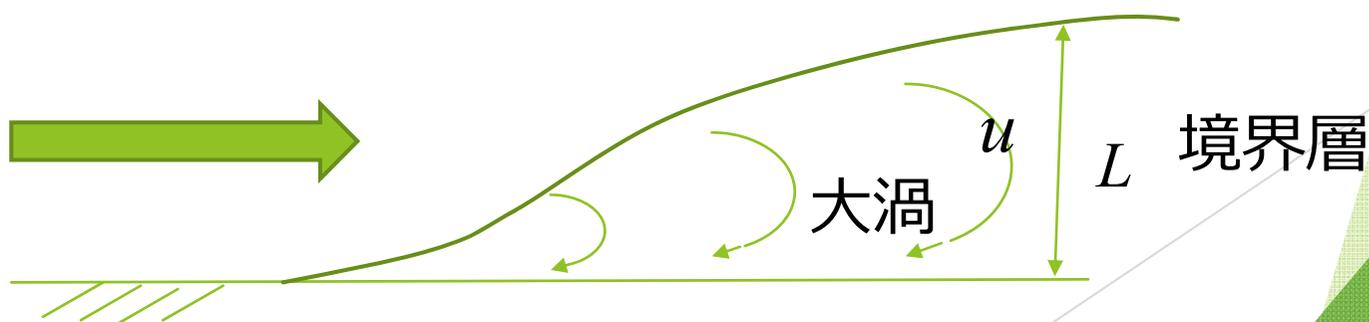
ε を大スケール渦より推定する。

(仮定)

「大渦から小渦へのエネルギー供給率」

\propto

「大渦の時間スケールの逆数 (周期)」



話題 1

大小スケール比 -ダイナミックレンジ-

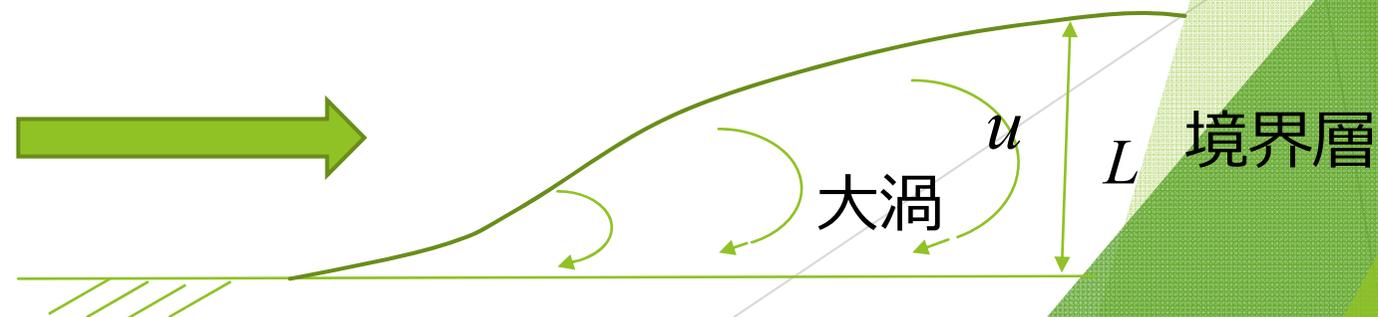
大渦のもつ単位質量あたりの運動エネルギーは、 u^2

そのうち、小スケールへ供給されるエネルギーの割合は、 u/L に比例

∴大→小へのエネルギー供給量は、 $u^2 \times u/L = u^3/L$

これがエネルギー散逸に等しいと考えて

$$\varepsilon \sim u^3/L$$

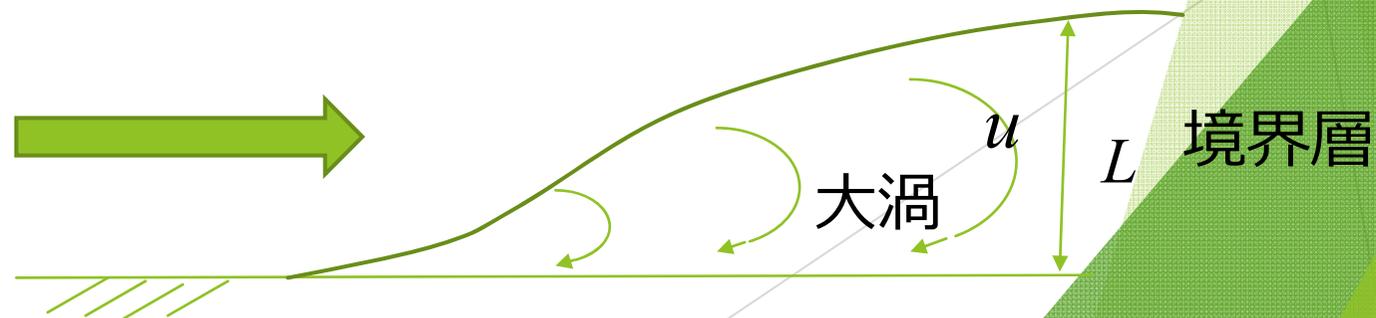


話題 1

大小スケール比 –ダイナミックレンジ–

最大渦と最小渦の長さ比

$$\frac{\eta}{L} \sim \left(\frac{uL}{\nu} \right)^{-3/4} = Re^{-3/4}$$

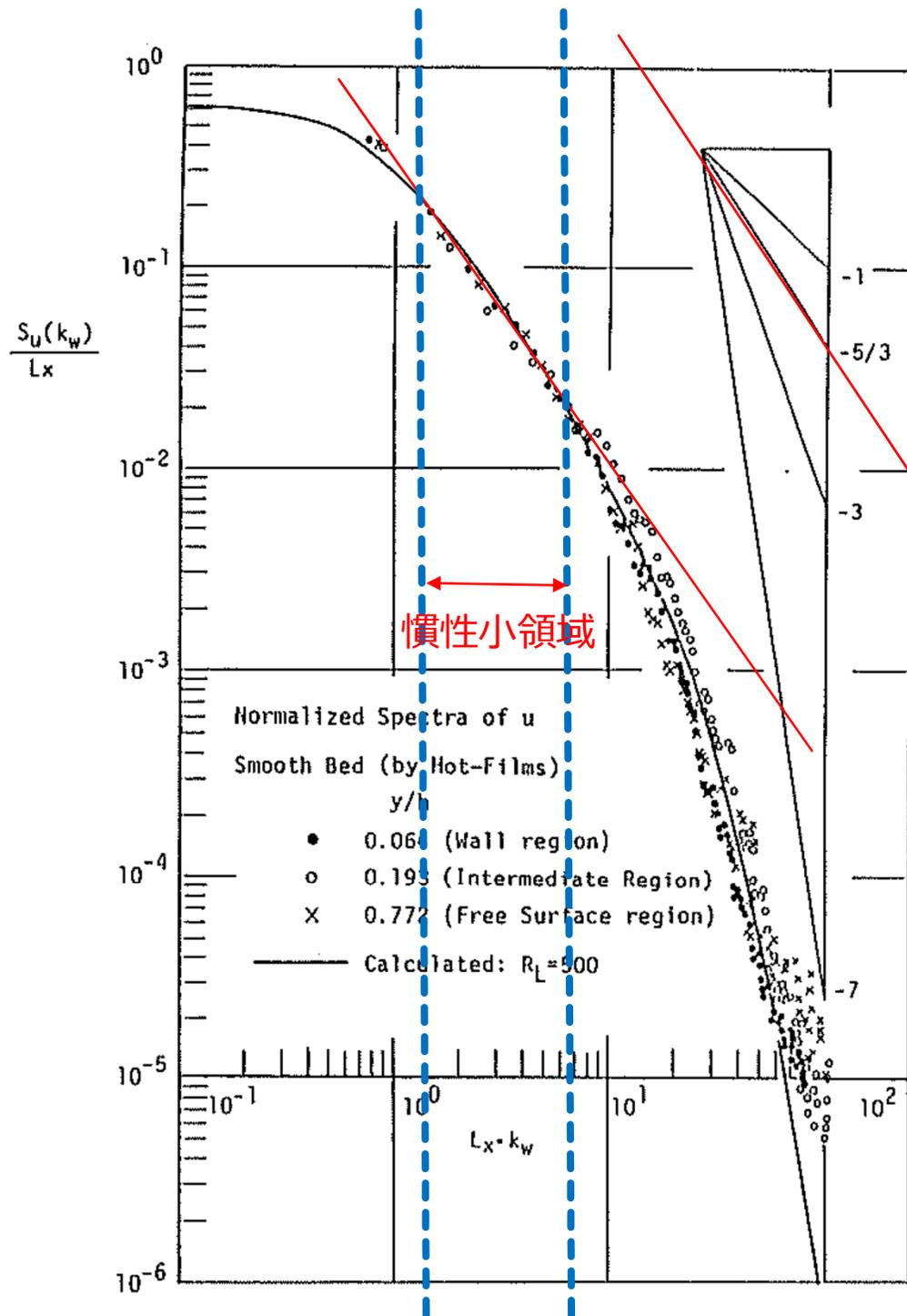


話題 1

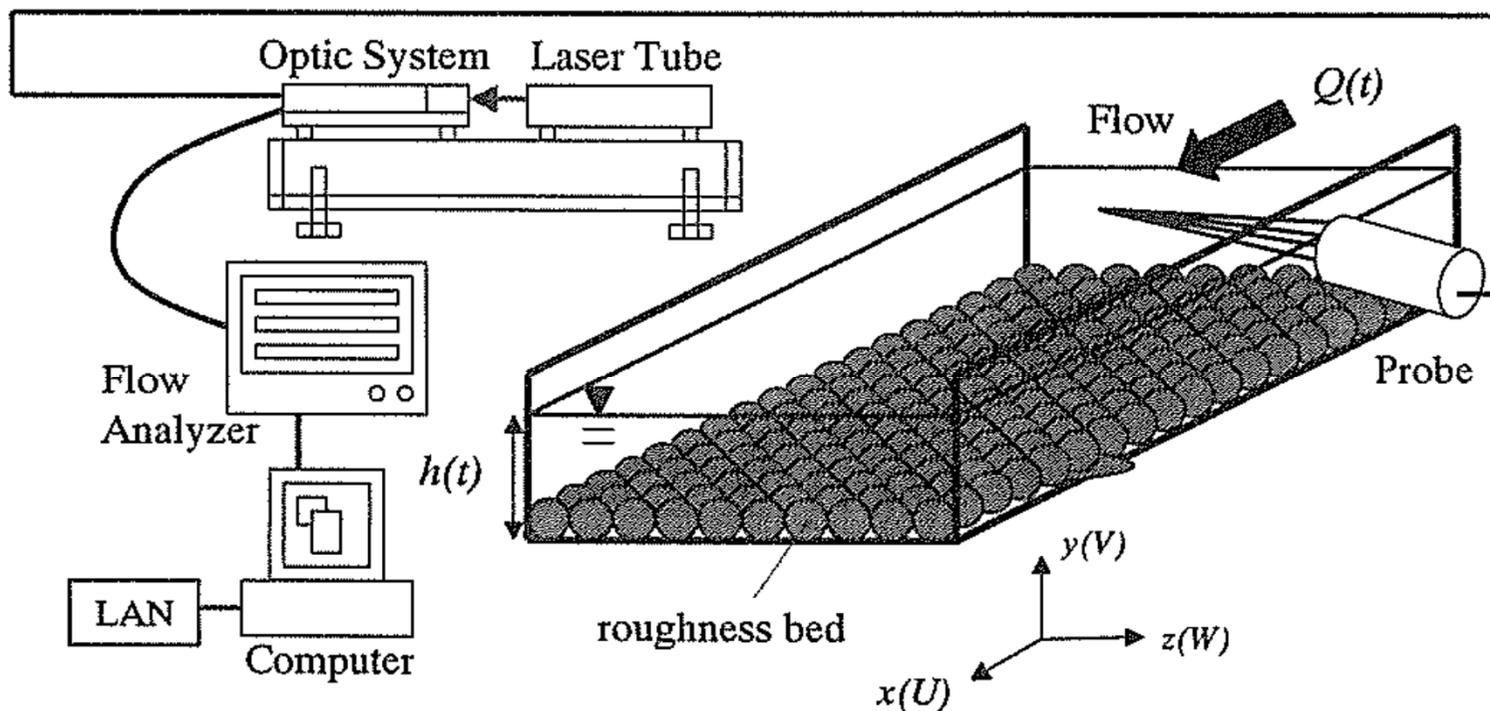
水路と河川のダイナミックレンジ

	代表流速	水深	レイノルズ数	ダイナミックレンジ
	U(cm/s)	H(cm)	Re	$Re^{**(-3/4)}$
室内水路	20	10	20000	5.95E-04
実河川	200	100	2000000	1.88E-05

話題 1

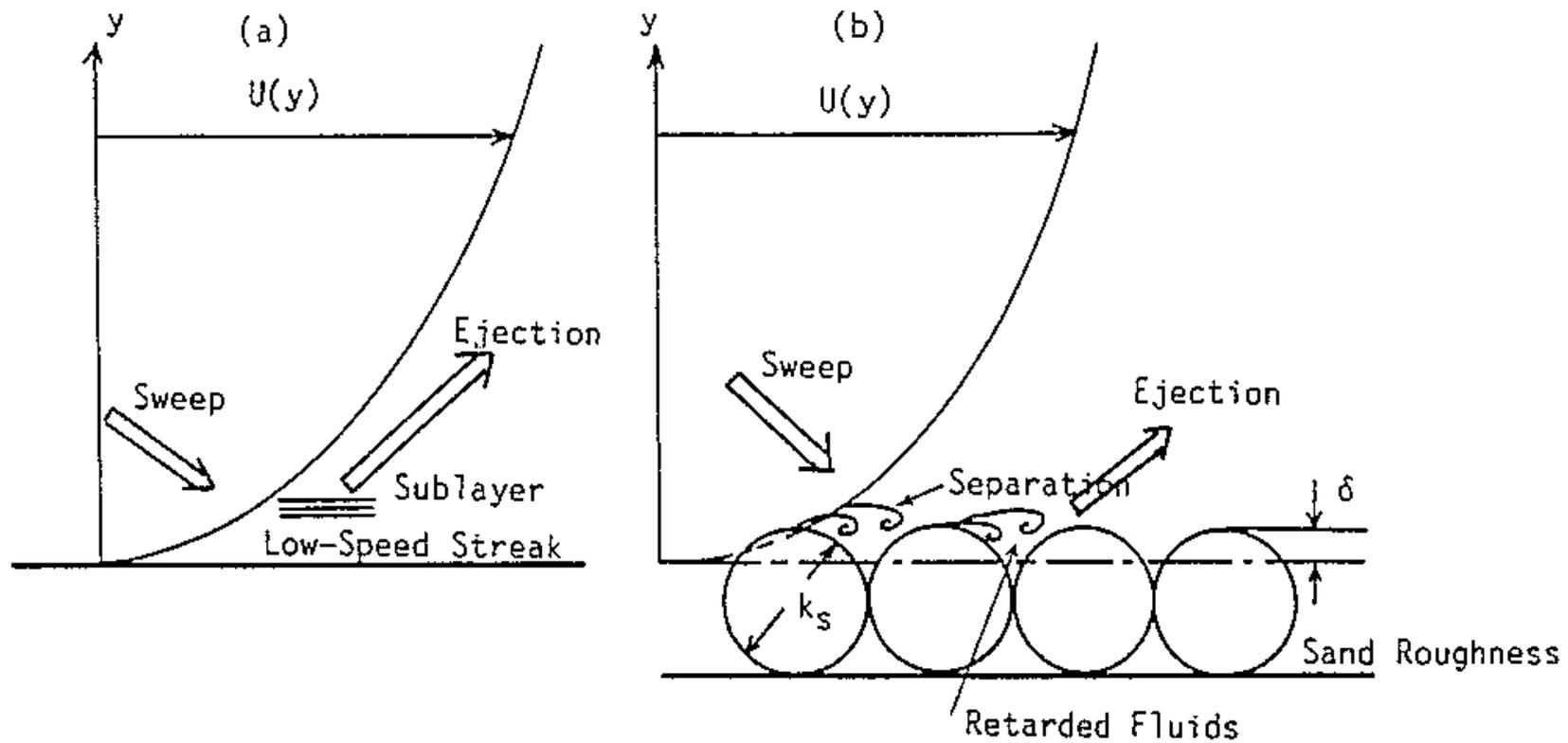


粗面境界層の乱流構造



話題 1

粗面境界層の乱流構造



平均流速分布（粗と滑面比較）

$$U^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(y/k_s) + A_r + w(\xi)$$

$$A_r(k_s^+) = \frac{1}{\kappa} \ln(k_s^+) + A$$

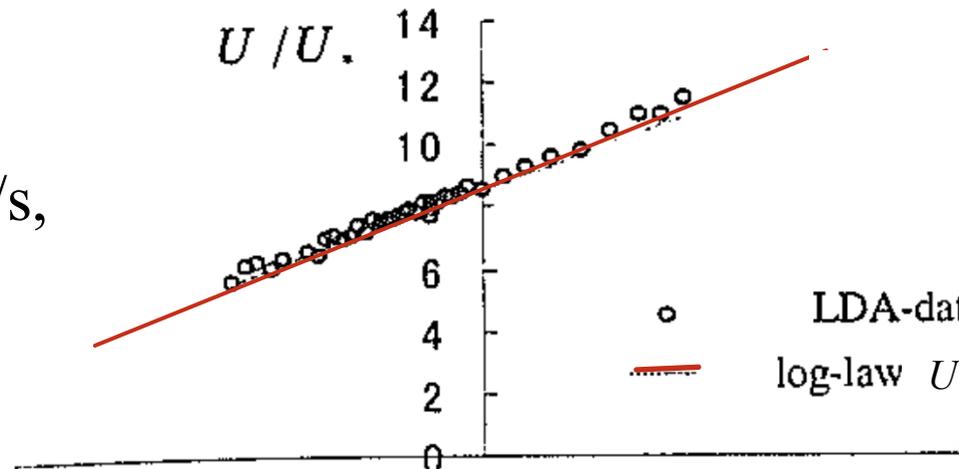
k_s : 等価砂粗度

$k_s^+ \equiv k_s U_* / \nu$: 粗度レイノルズ数

話題 1

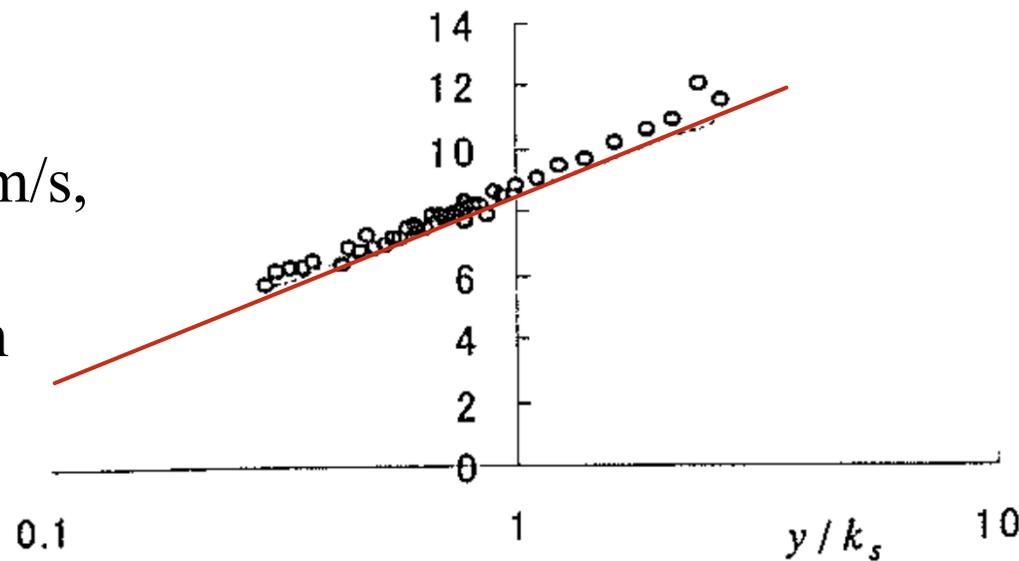
平均流速分布 (粗面開水路)

$U^*=0.9\text{cm/s}$,
 $h=6.9\text{cm}$,
 $k_s=1.2\text{cm}$



$$U^+ = \frac{1}{0.41} \ln(y/k_s) + 8.5$$

$U^*=1.9\text{cm/s}$,
 $h=9.7\text{cm}$,
 $k_s=1.2\text{cm}$

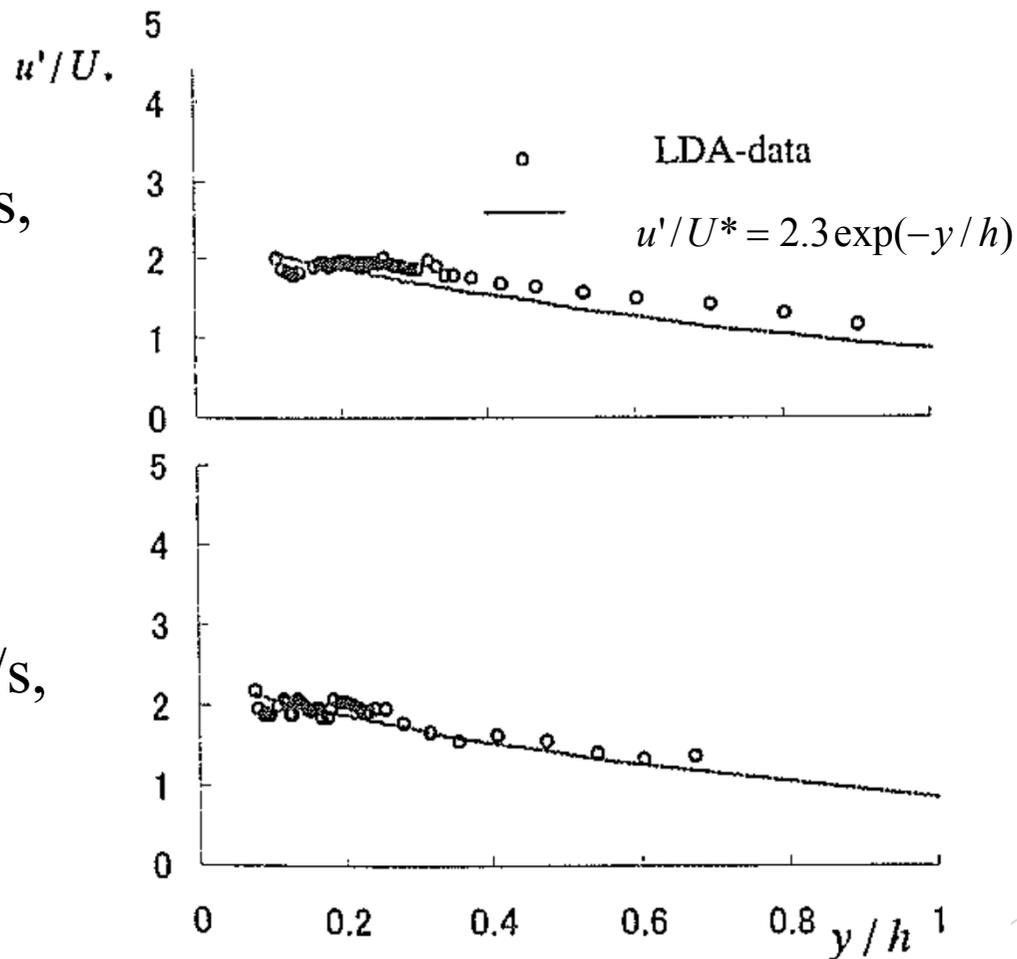


話題 1

乱れ統計量分布 (粗面開水路)

$U^*=0.9\text{cm/s}$,
 $h=6.9\text{cm}$,
 $ks=1.2\text{cm}$

$U^*=1.9\text{cm/s}$,
 $h=9.7\text{cm}$,
 $ks=1.2\text{cm}$



ただし キャビティ内は未解明

乱れ統計量分布 (粗と滑の比較)

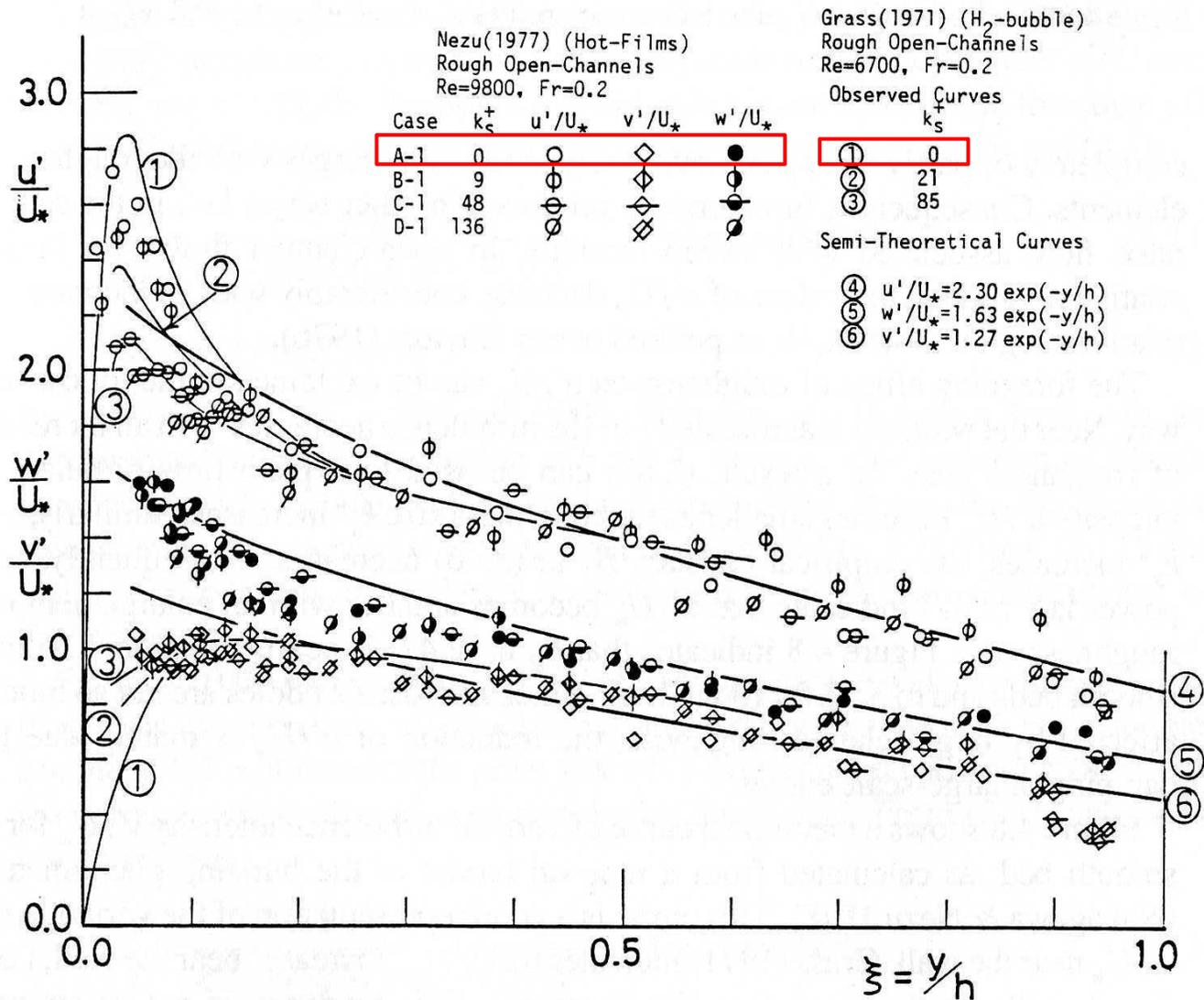
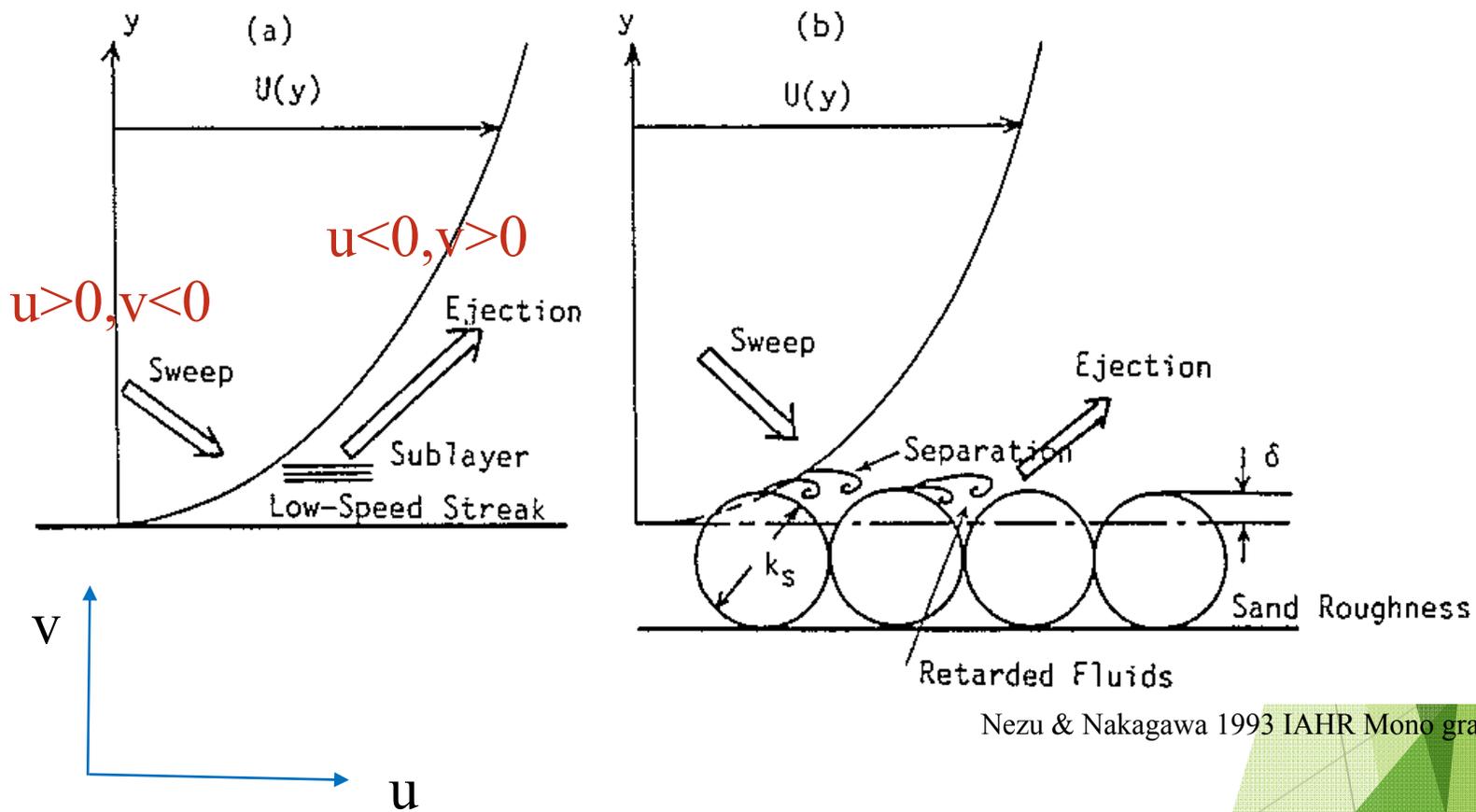


Figure 4.7 Variation of turbulence intensities u' , v' and w' over smooth and rough beds as a function of y/h and roughness k_s^+ .
Nezu & Nakagawa 1993 IAHR Mono graph

組織乱流構造 (バースティング)



Nezu & Nakagawa 1993 IAHR Mono graph

u, v : 平均流からの偏差

話題1

バースティングとヘアピン渦モデル)

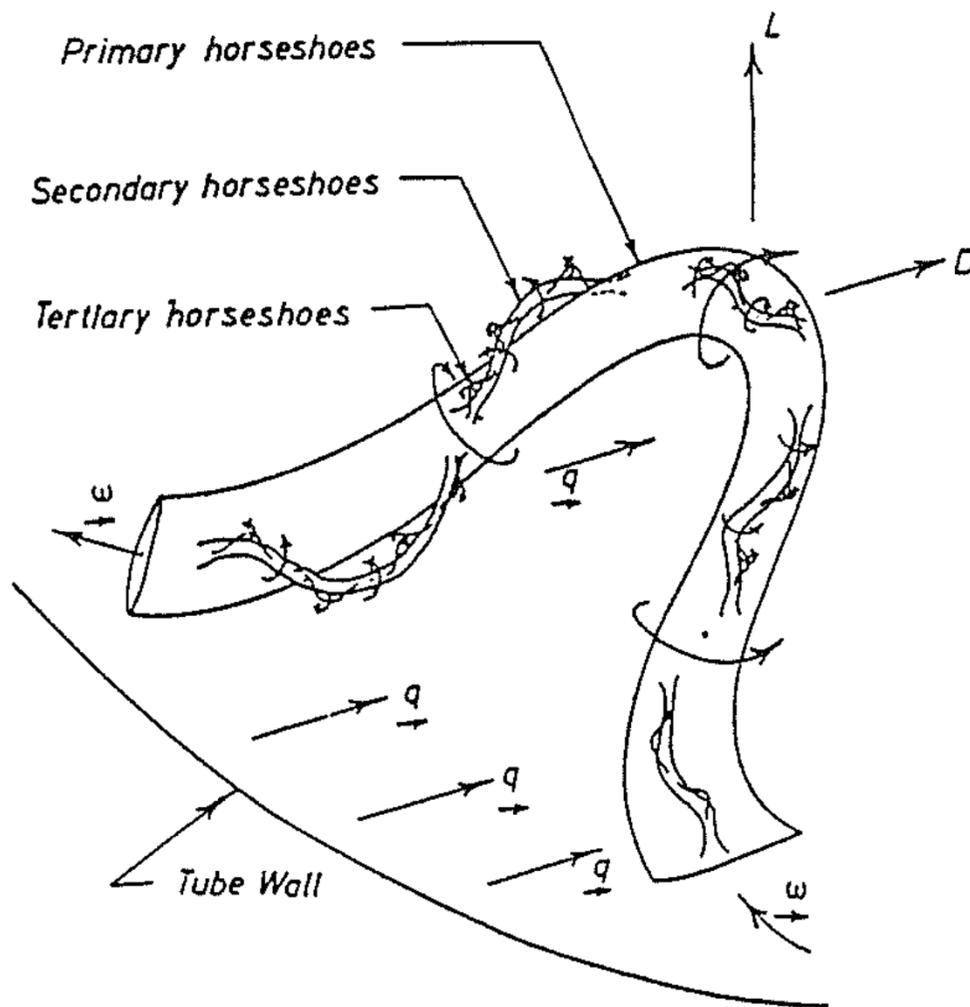
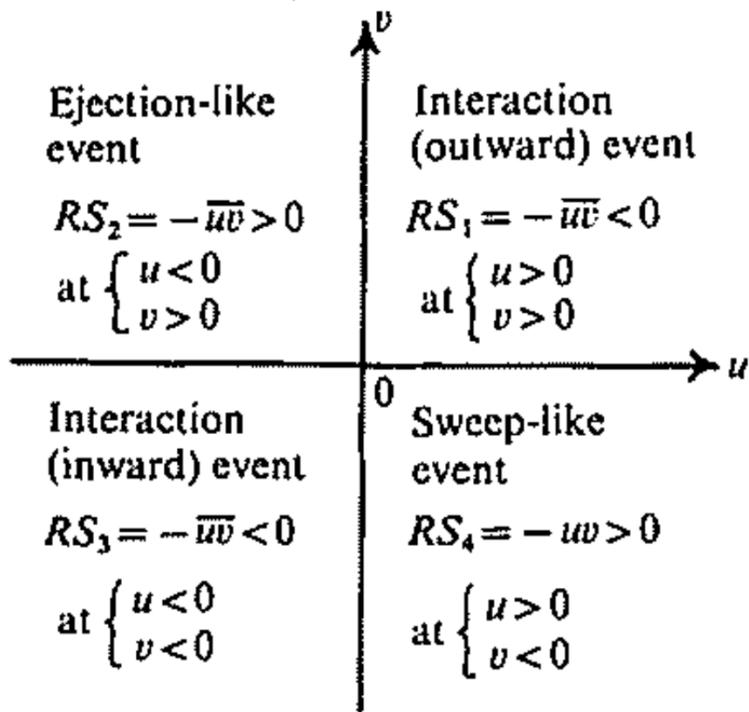


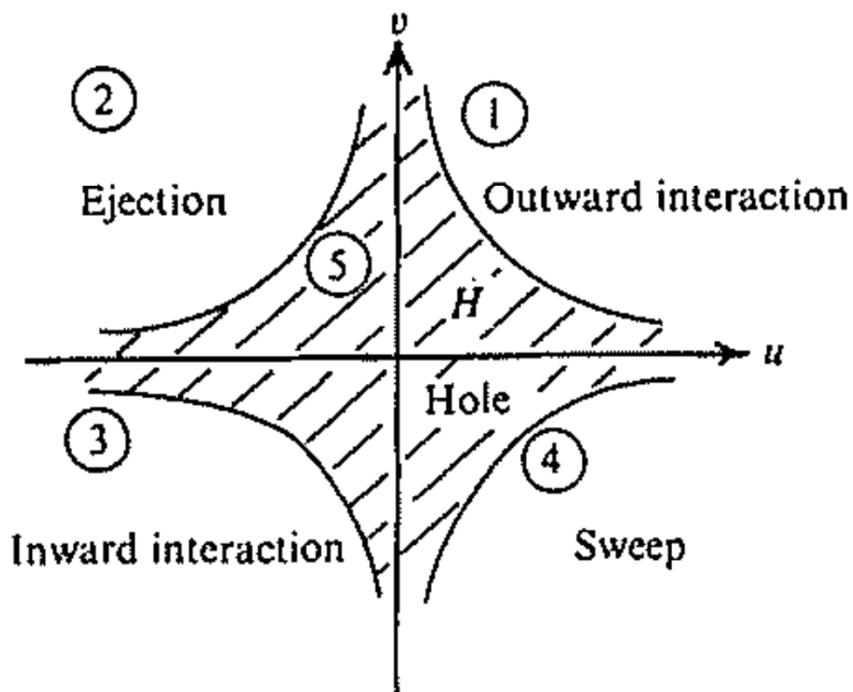
Figure 8.3 Horseshoe-hairpin vortex model of wall turbulence, (Theodorsen 1955).

4象限区分解析

Bursting phenomenon: $H=0$



(a)



(b)

滑面では

Ejection > Sweep

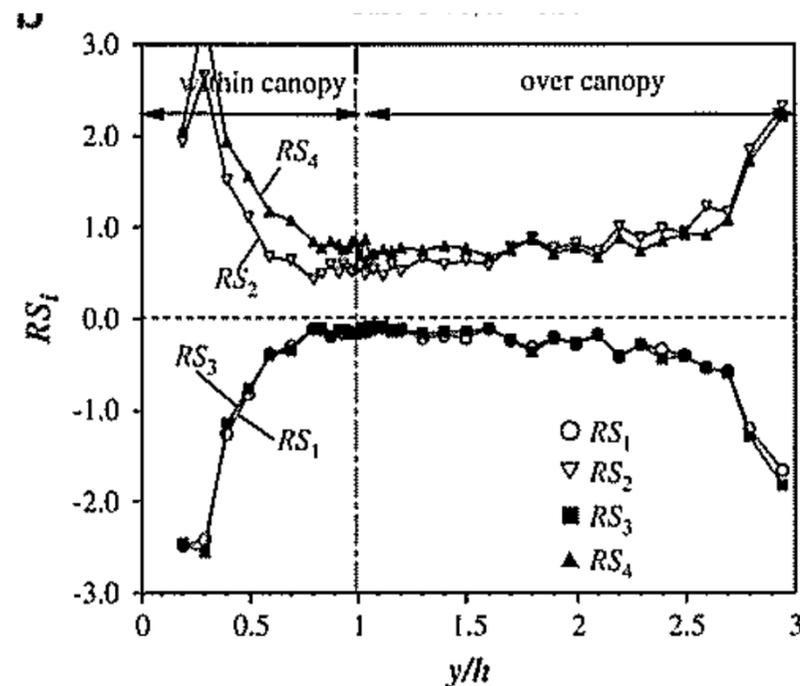
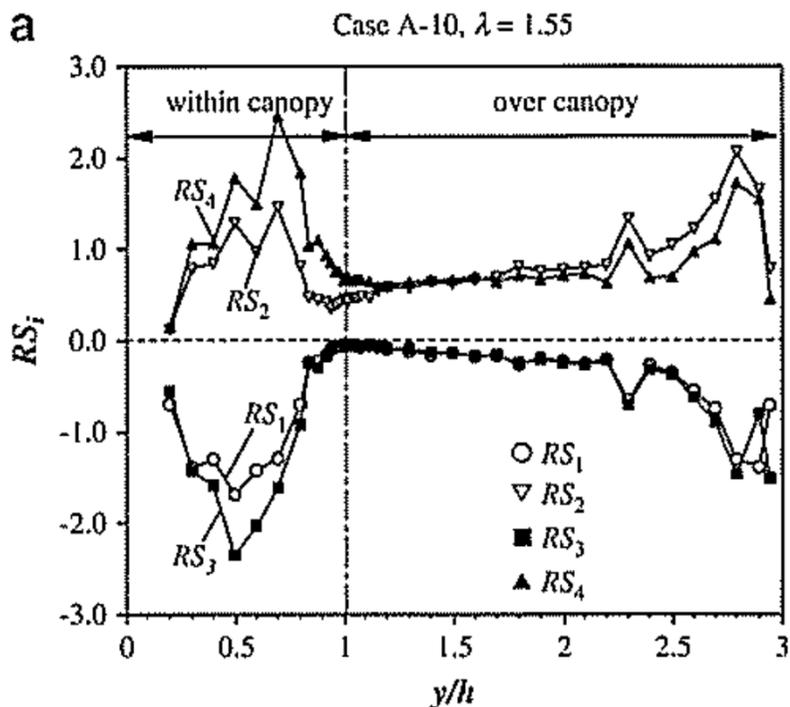
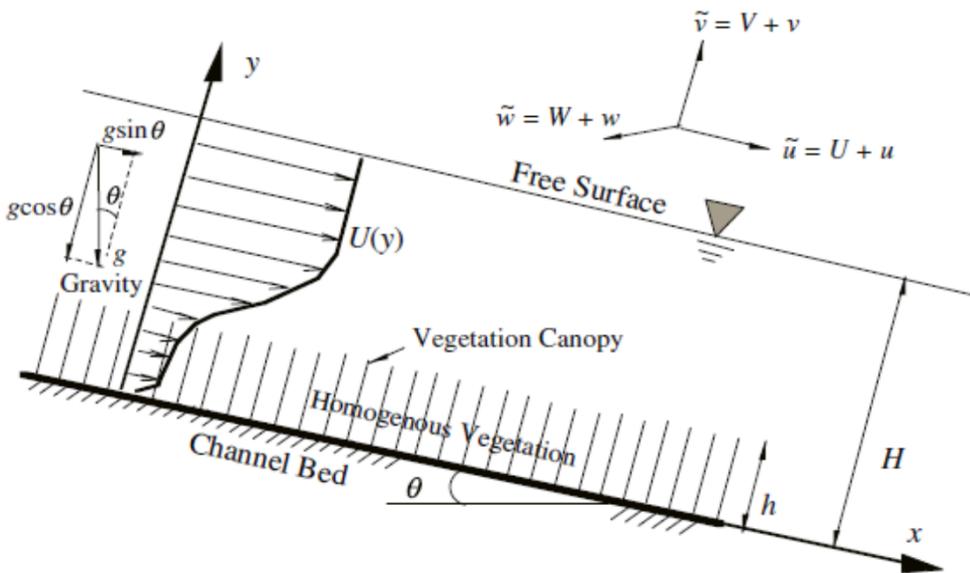
粗面では

Sweep > Ejection

Nezu & Nakagawa 1993 IAHR Mono graph

話題 1

植生粗度のバースト



Nezu & Sanjou 2008 J.Hydro-envir. Res.

植生粗度でも

Sweep > Ejection

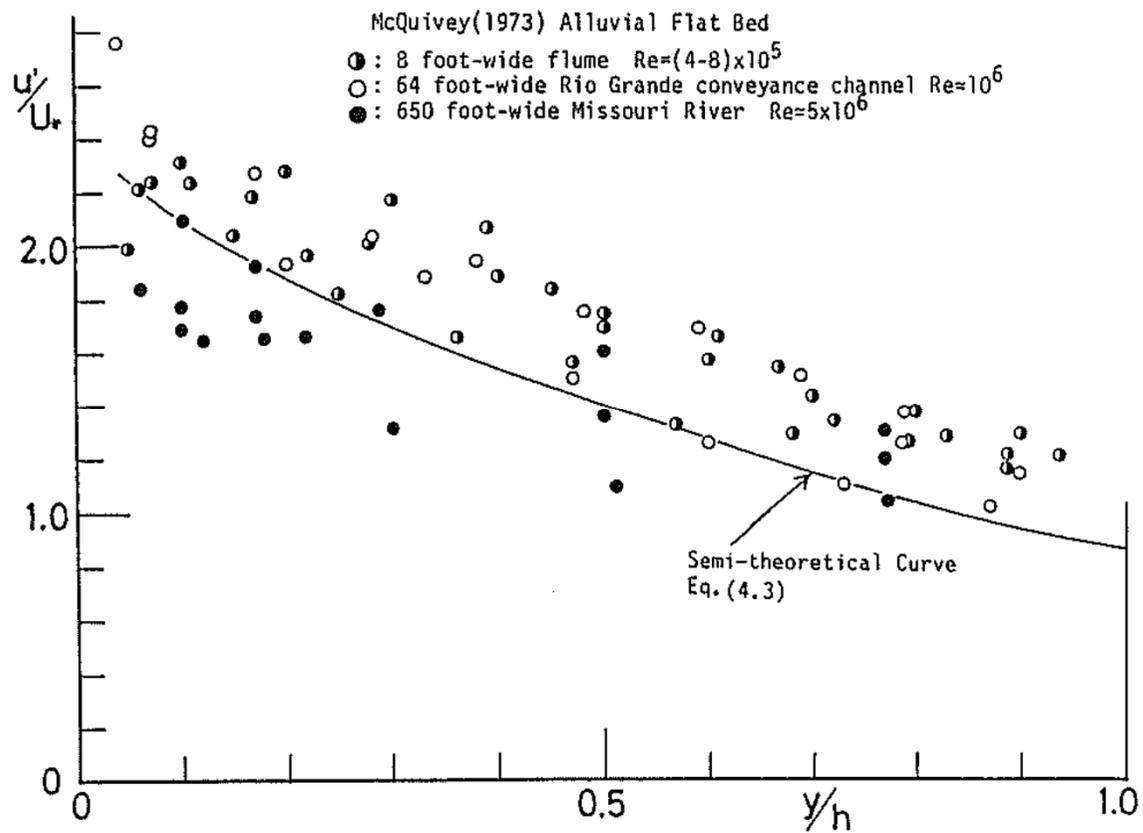
話題2

－話題2－

河川の乱流構造

実河川の乱流計測

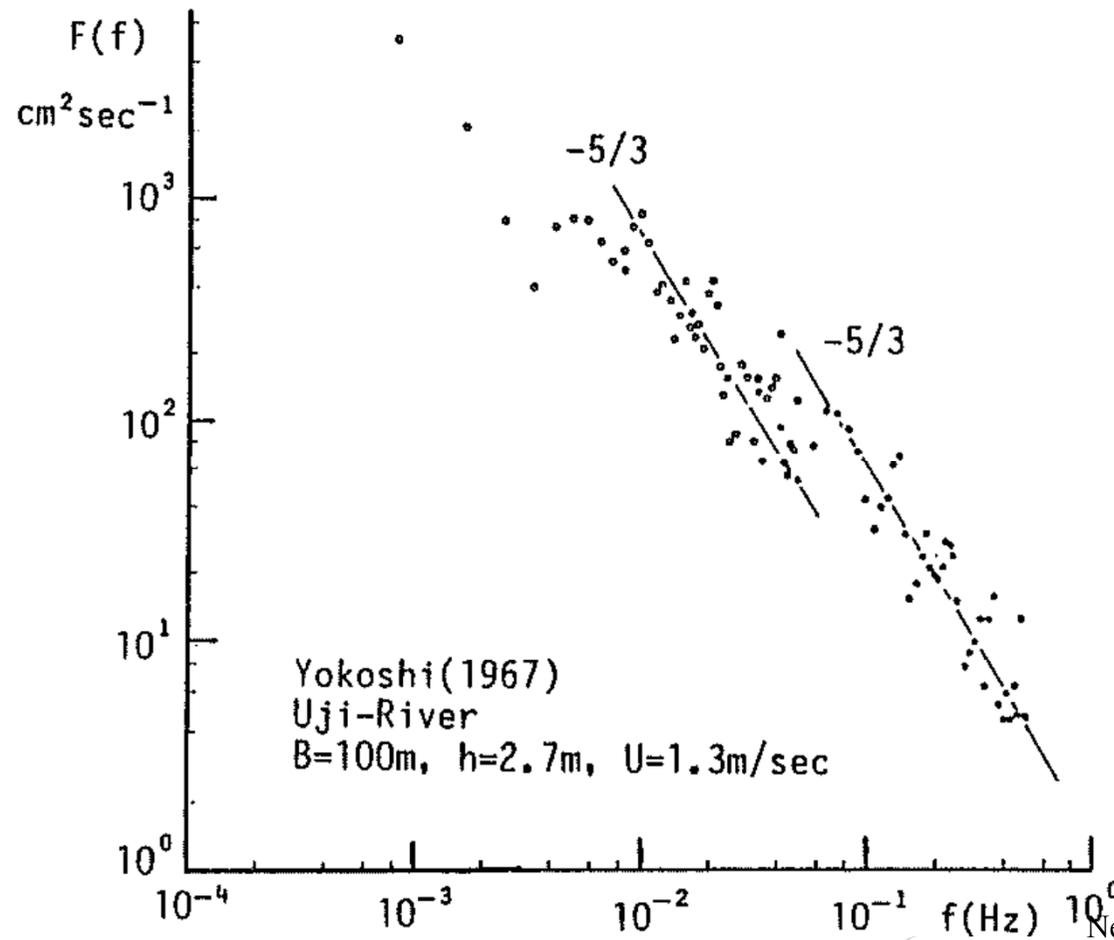
初期の研究成果例（乱れ強度の水深方向分布）



話題2

実河川の乱流計測

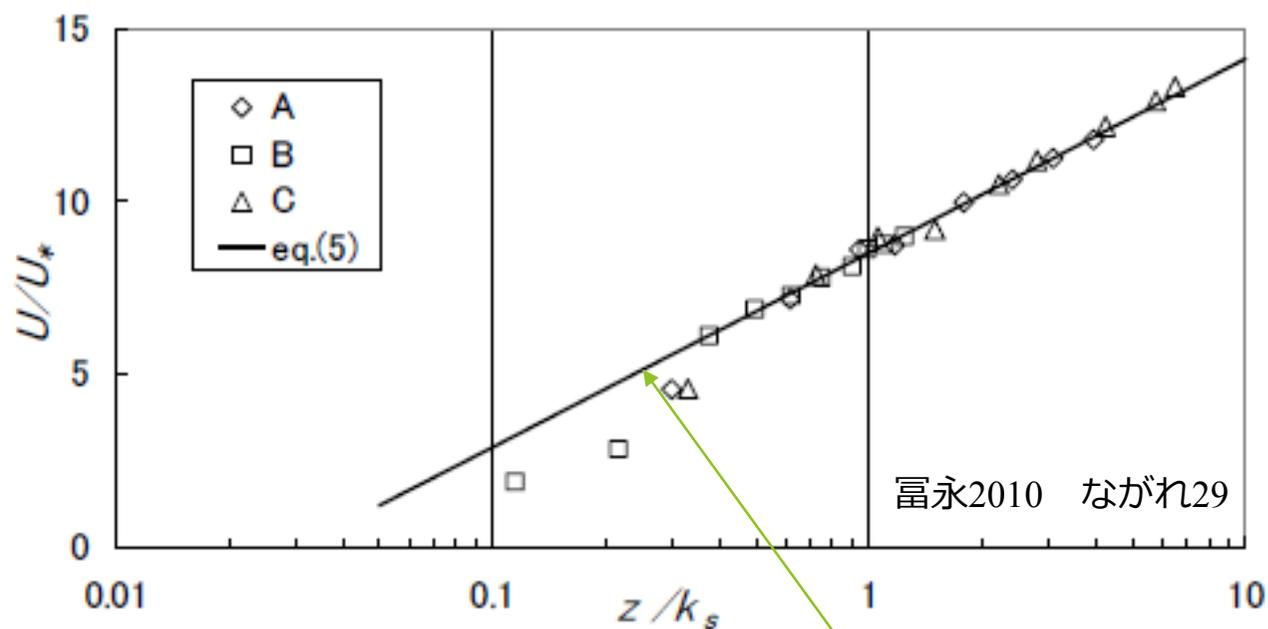
初期の研究成果例（主流速のパワースペクトル）



話題2

ADVによる実河川乱流のプロファイル (富永の野外計測結果)

平均流速分布

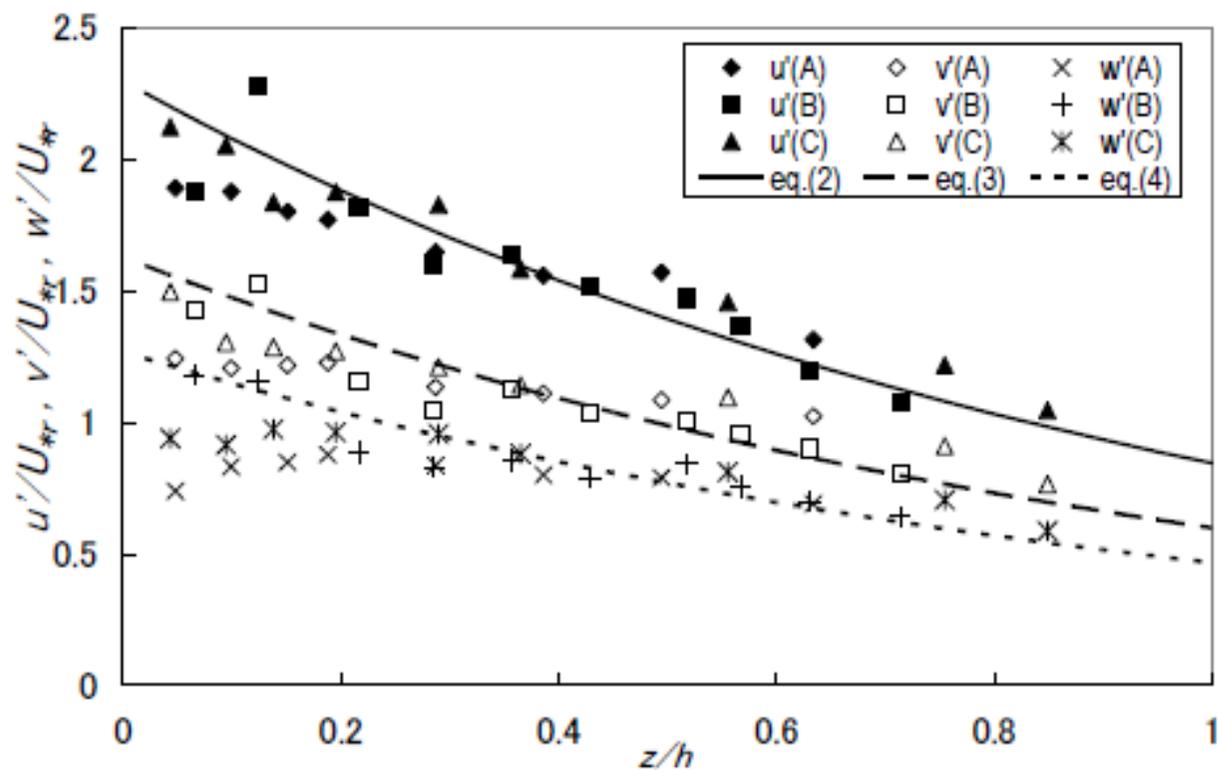


$$\frac{U}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{z + z_d}{k_s} \right) + B$$

話題2

ADVによる実河川乱流のプロファイル (富永の野外計測結果)

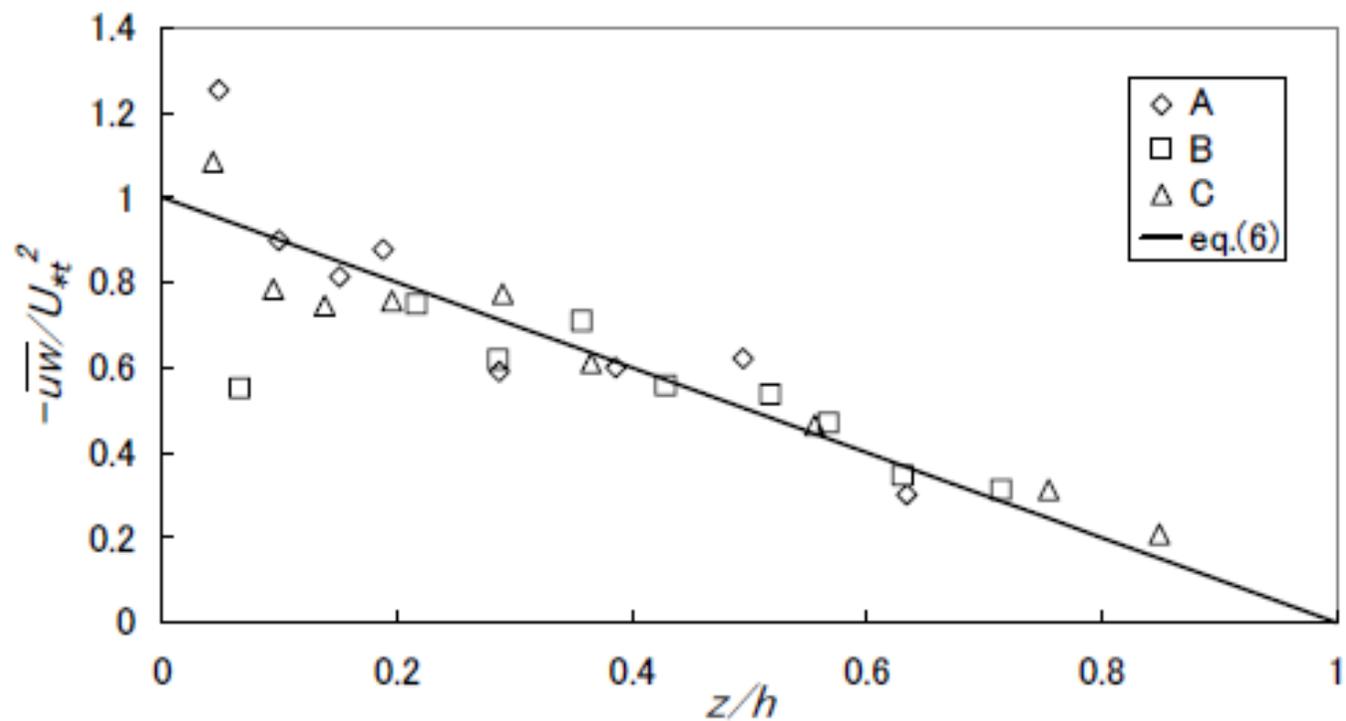
乱れ強度分布



話題2

ADVによる実河川乱流のプロファイル (富永の野外計測結果)

レイノルズ応力分布



話題 2

河川の組織乱流構造 (ボイル渦)

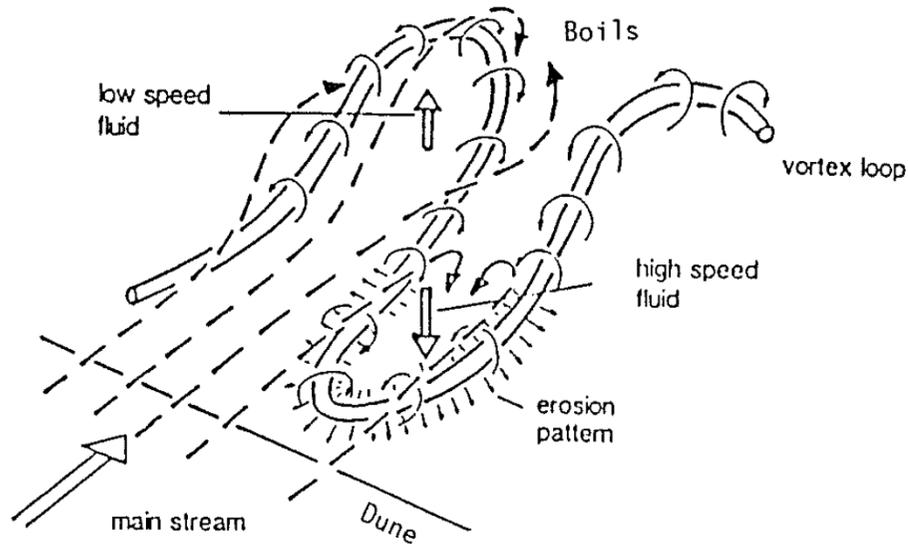


Figure 9.3 Conceptual model of formation and lateral instability of a vortex tube behind dune, (Müller & Gyr 1986).

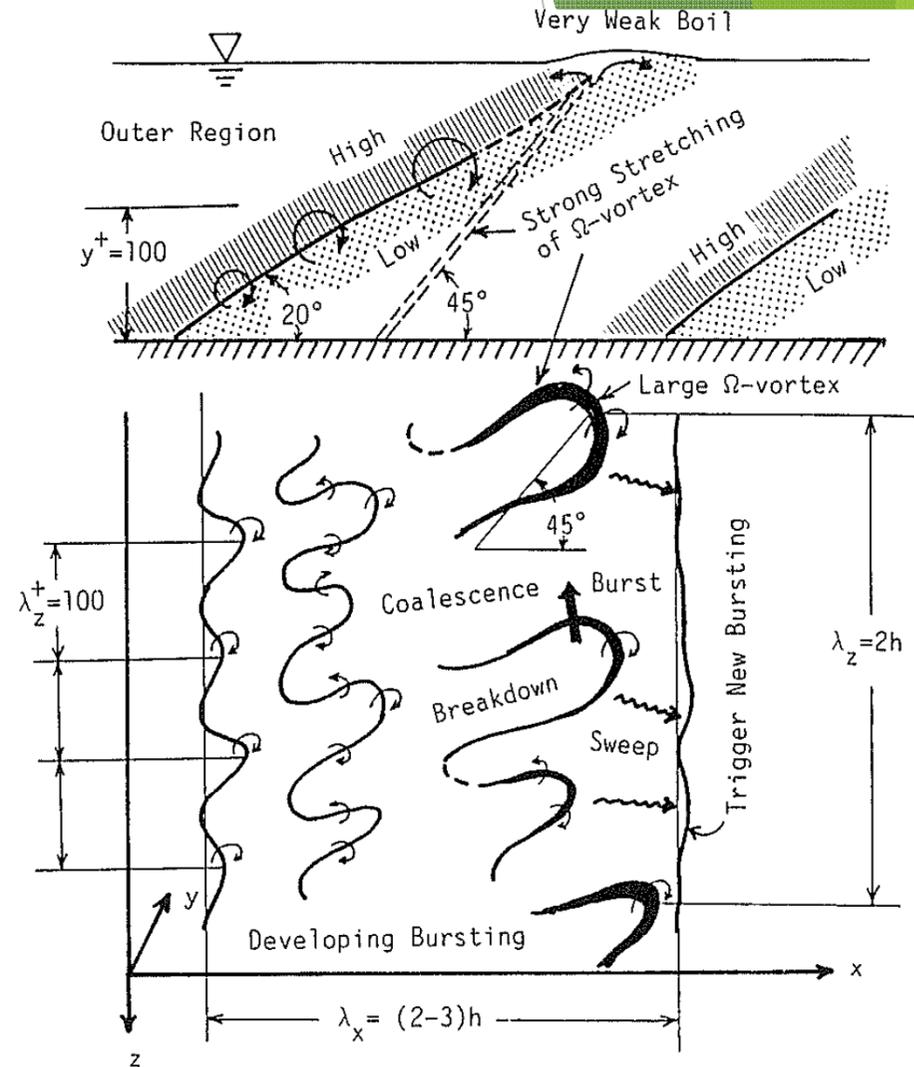


Figure 10.4 New physical model of bursting motions and large-scale vortical motions open-channel flows.

ボイルの分類

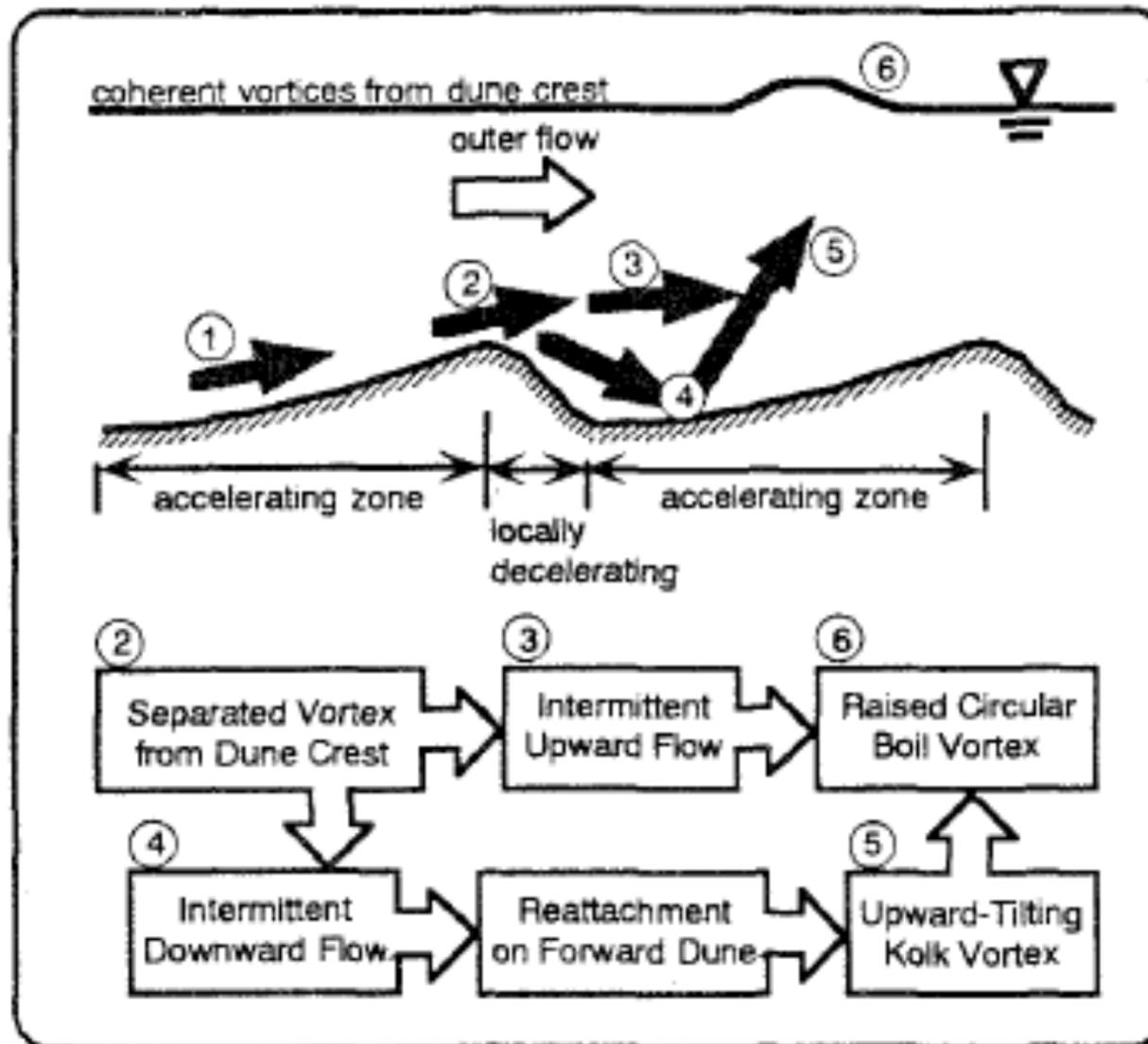
第一種ボイル→ 河床波や段落ち背後に形成、土砂浮上の原因

第二種ボイル→ sandribbonとの相互作用で発生する縦渦によって形成

第三種ボイル→ 河床バーストが水面まで発達したもの

話題 2

河床波背後のボイル渦の発生機構



話題 2

河床波背後のボイル渦 室内水路における水素気泡可視化

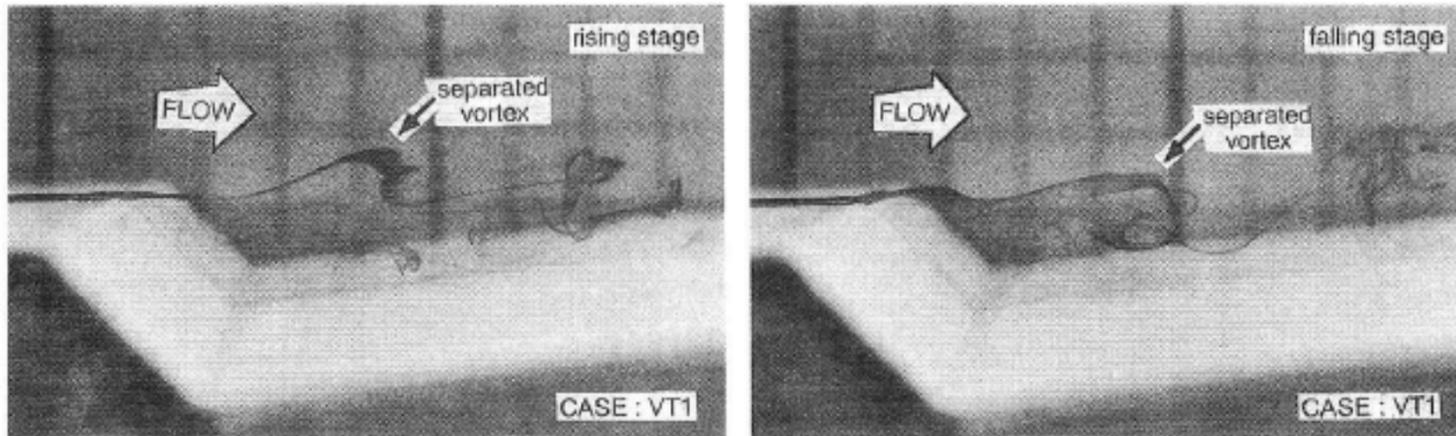
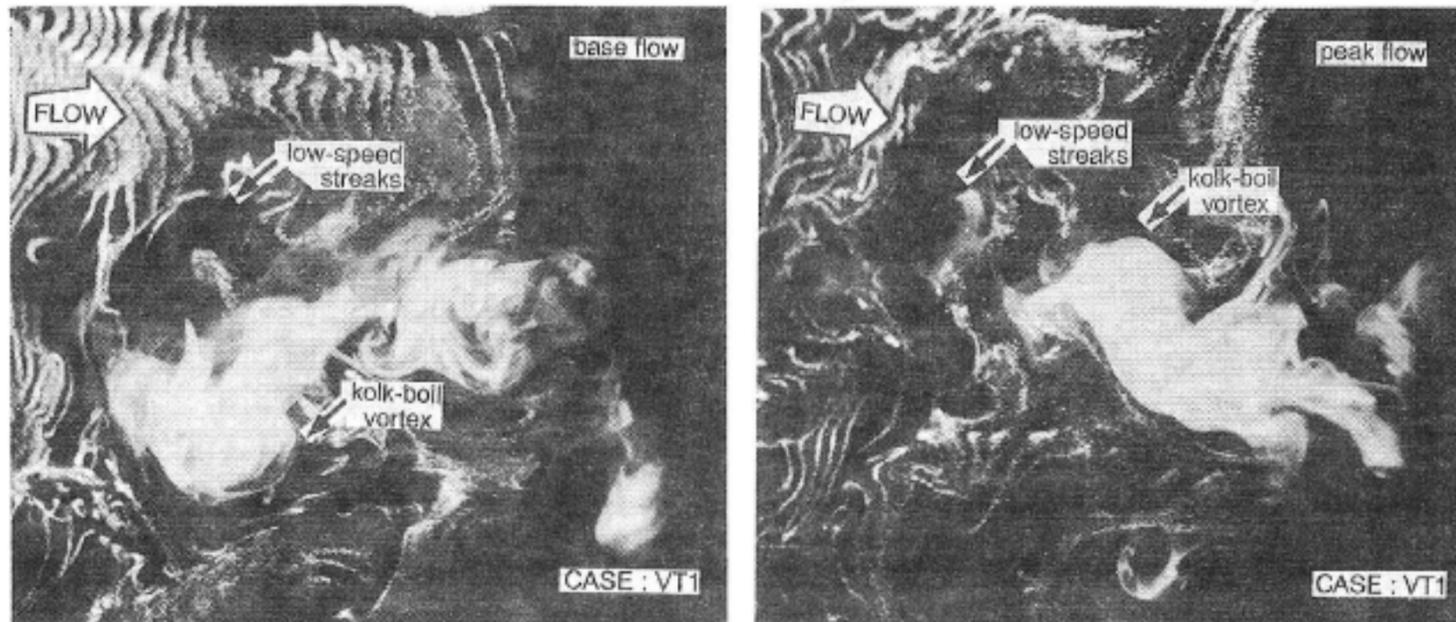


図-3 染料注入法によって可視化された剥離渦 (左図：増水期，右図：減水期)



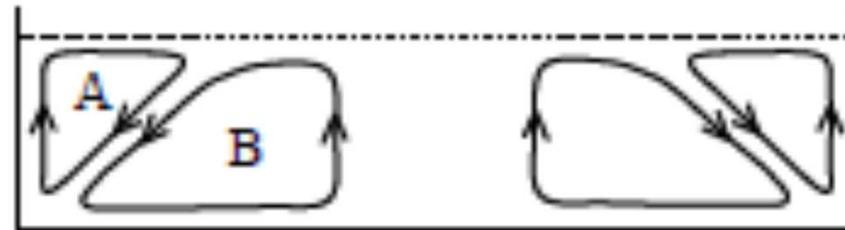
話題 2

ボイル現象のスケーリング

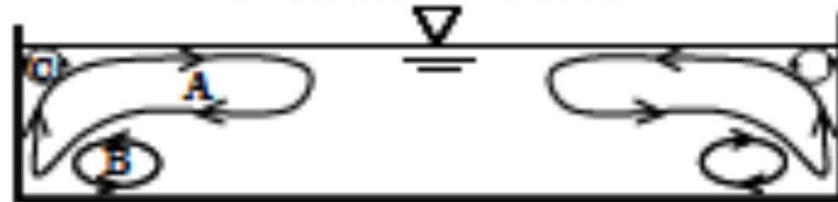
$$\bar{T}_B U_{\max} / h \approx 1.8 \quad \text{Gordon(1975)}$$

発生周期

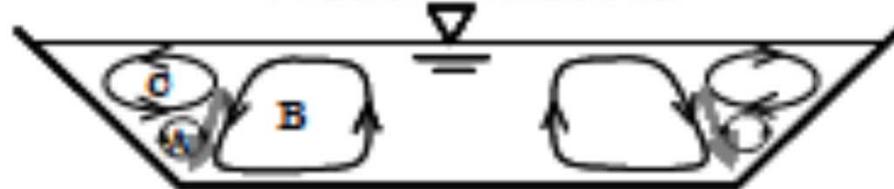
横断面における2次流分布



(a) 長方形断面閉管路



(b) 長方形断面開水路



(c) 台形断面開水路



(c) 複断面開水路

2次流と河床変動

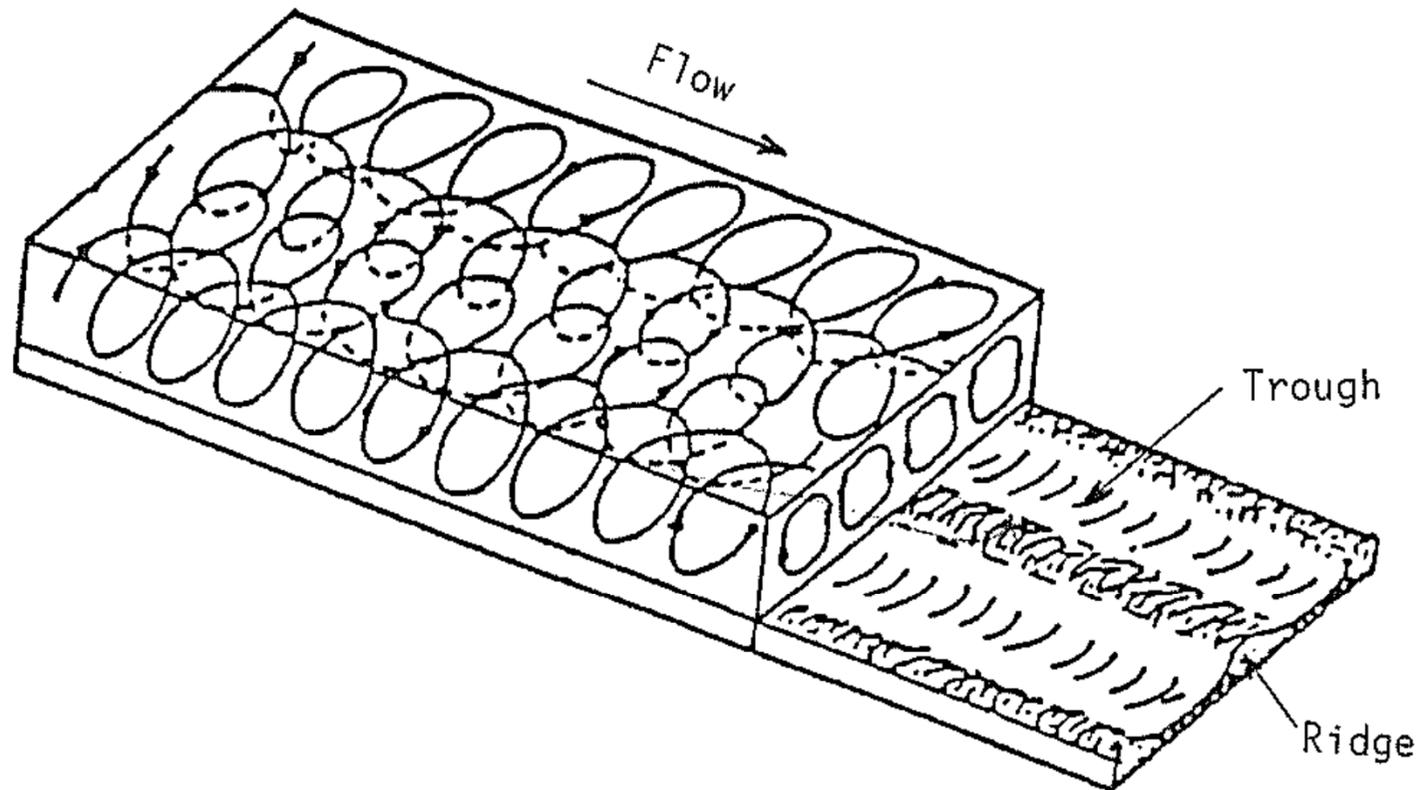


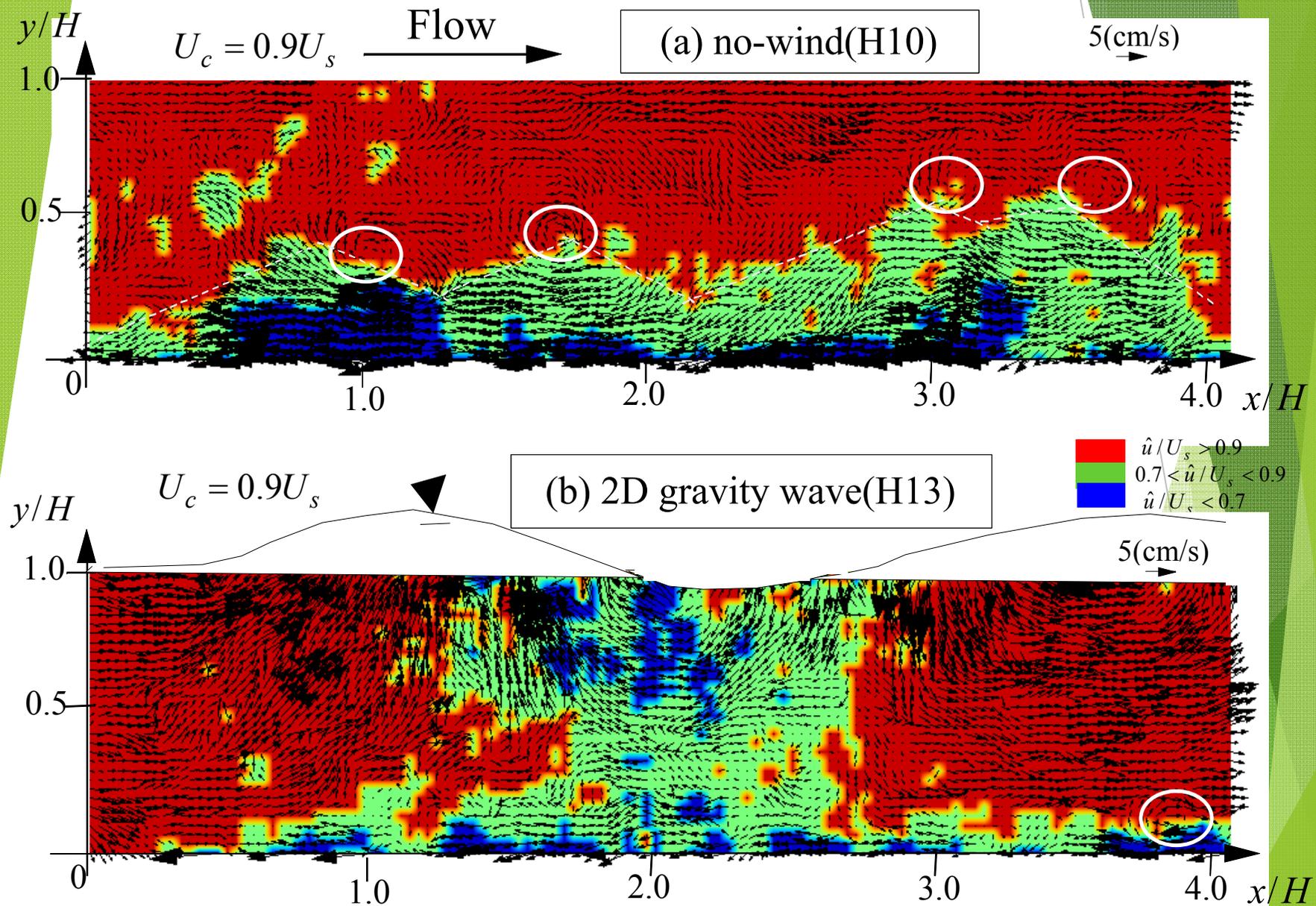
Figure 5.2 Schematic flow and bed patterns of cellular secondary currents and sand ribbons in wide river, (Karcz 1966).

Nezu & Nakagawa 1993 IAHR mono graph

風波の影響

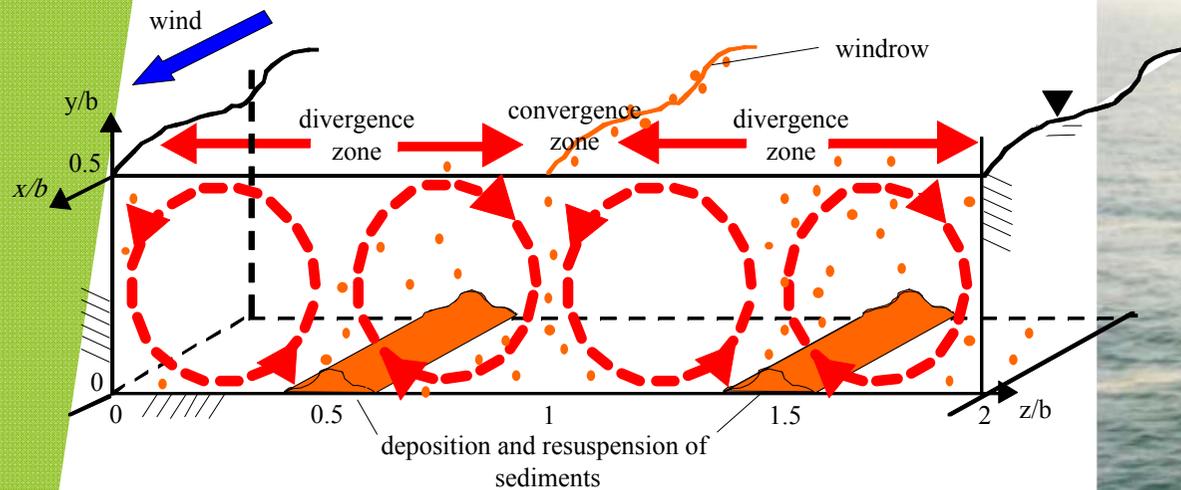
- ・ 台風襲来時、流量増加だけでなく暴風の影響も重要
- ・ 水面を介するガス輸送が促進
- ・ 波によるダウンバーストが底層へ影響を与える

話題2 風波による底層乱流構造への影響



話題 2

ラングミュア循環流



現象イメージ

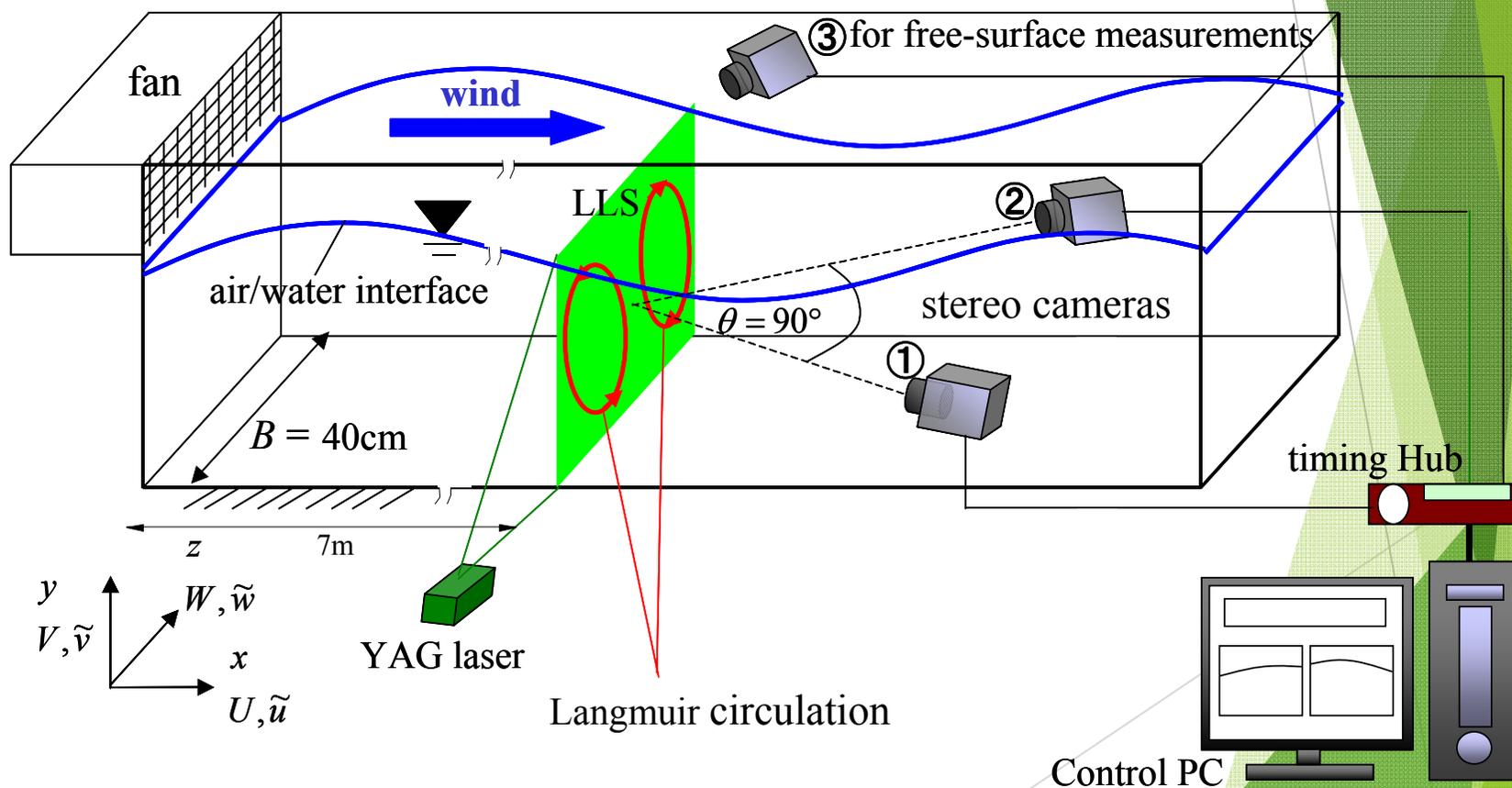


藻類によって可視化されたストリーク
(S.A. Thorpe, JFM, 2004)

実河川での報告例もあり

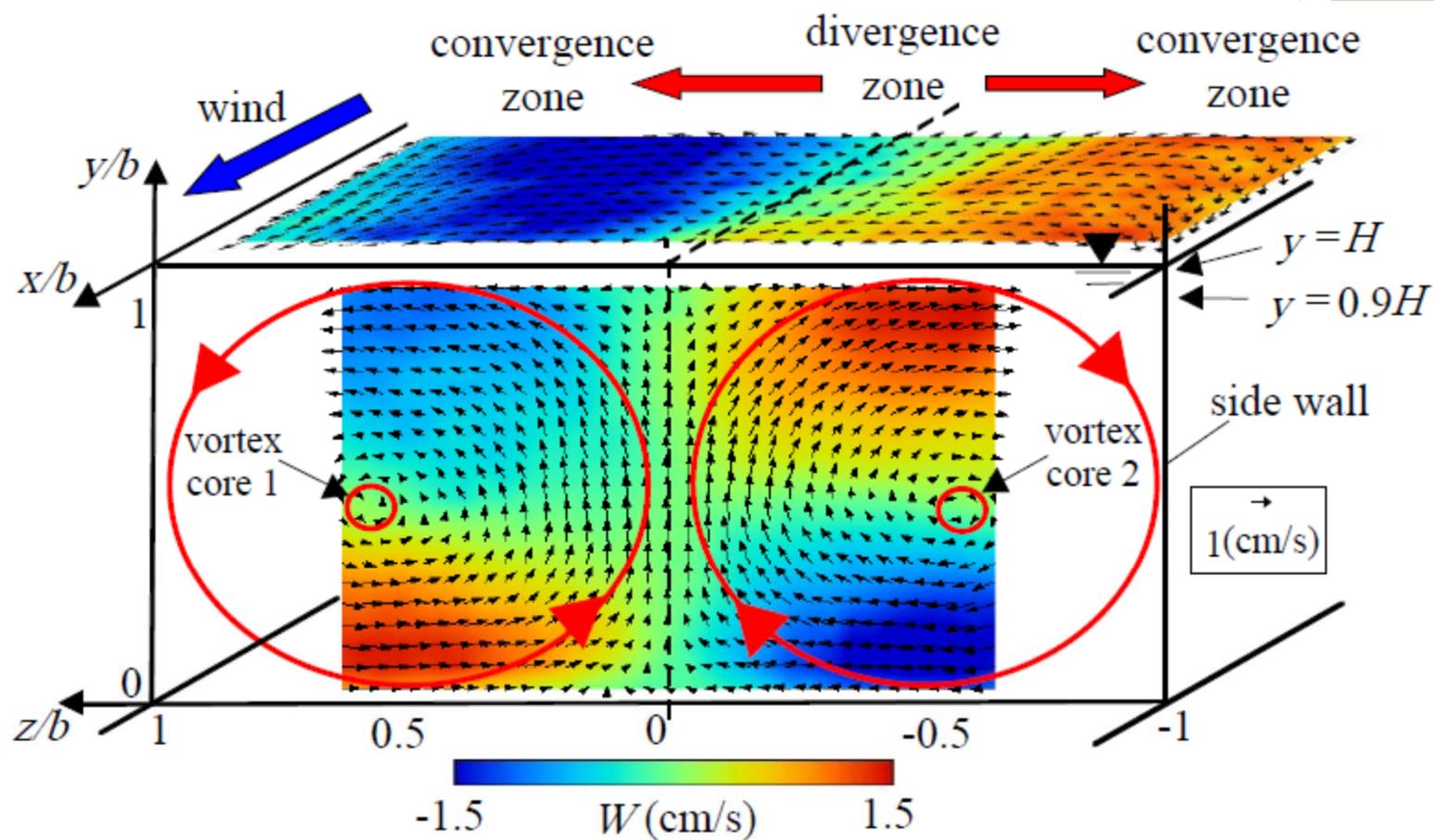
話題 2

水路実験における2次流の計測 ステレオPIVの導入



話題2

水路実験における2次流の計測 PIV計測結果



フィールドワークの重要性

- 河川 → 大きなRe数
→水路実験の限界
- ダイナミックレンジ → 大
慣性小領域が広い → ε の算出には有利
- 底層の流れ特性 → 未解明
生態学的には
内部の組織運動の解明が必須か？
- 治水の立場 → 流量観測を重視
- 今後は組織渦運動などの瞬間構造観測も重要

話題3

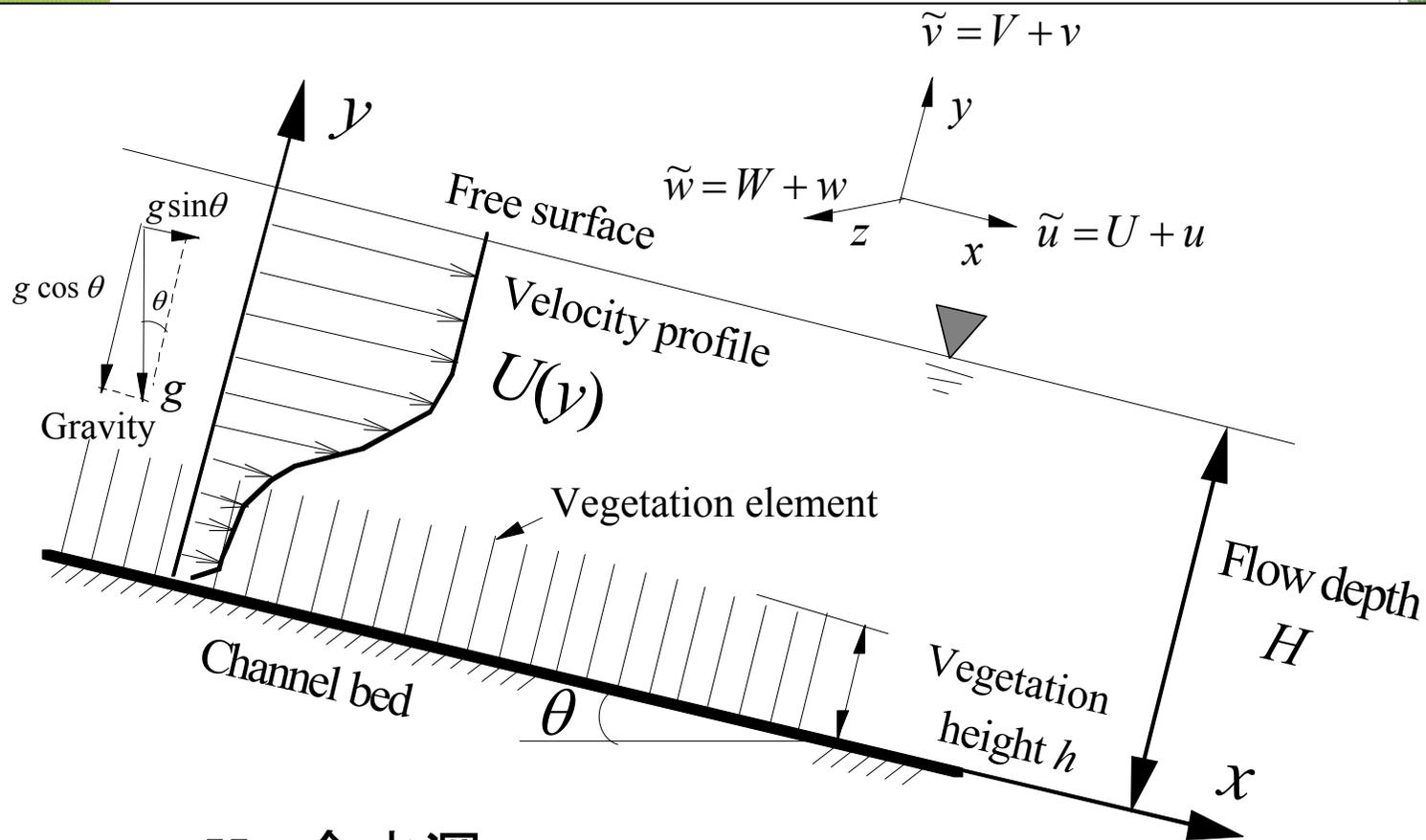
－話題3－

植生粗度と乱流輸送



話題 3

植生キャノピー流れのイメージ



H : 全水深

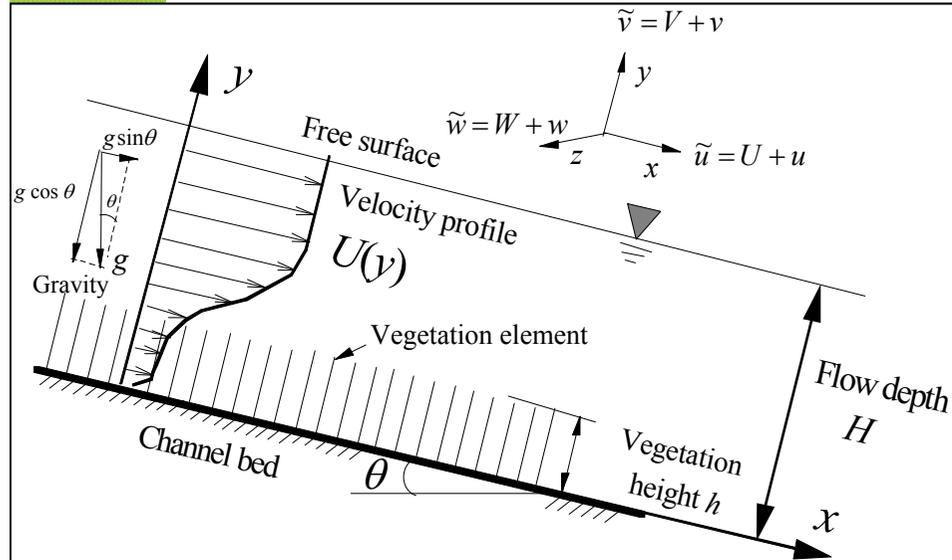
h : 植生高さ

H/h : かぶり水深

a : 植生密度

話題 3

植生密度の定義



a : 植生密度

$$a = \frac{\text{total frontal area}}{\text{volume of vegetation layer}} = \frac{A}{V} = \frac{nhb}{h \cdot S} \quad [1/\text{m}]$$

ここで S は面積, n は面積 S の領域上に存在する植生要素の総数

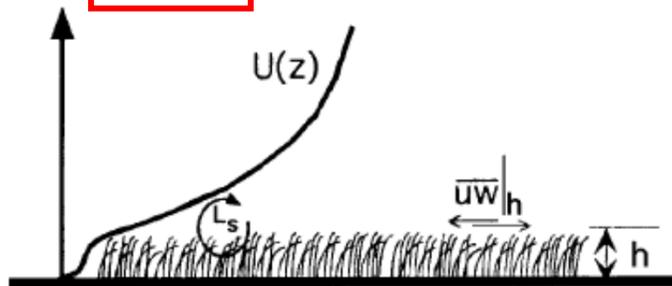
無次元した植生密度は

$$\lambda \equiv ah$$

植生流れの分類

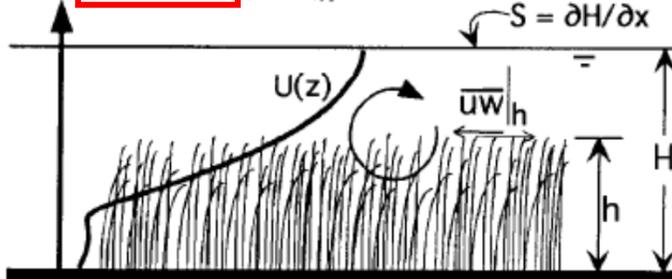
a) Terrestrial Canopy: Unconfined

$H/h \rightarrow \infty: \rho \overline{uw}|_h \gg \partial P / \partial x$



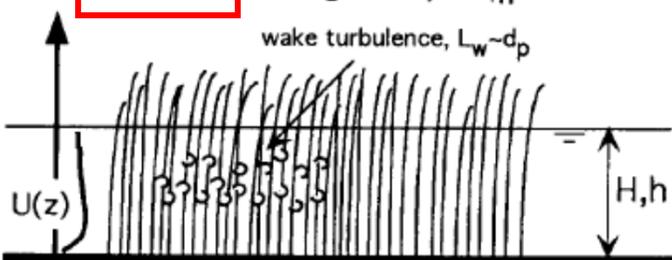
b) Depth-Limited, Submerged Canopy

$H/h = 2: \rho \overline{uw}|_h \approx \partial P / \partial x$



c) Emergent Canopy

$H/h = 1, \text{ Emergent: } \rho \overline{uw}|_h \ll \partial P / \partial x$



a) 陸生植生群落

b) 水生植生群落 $H/h > 1.0$

(沈水： 全水没)

c) 水生植生群落 $H/h < 1.0$

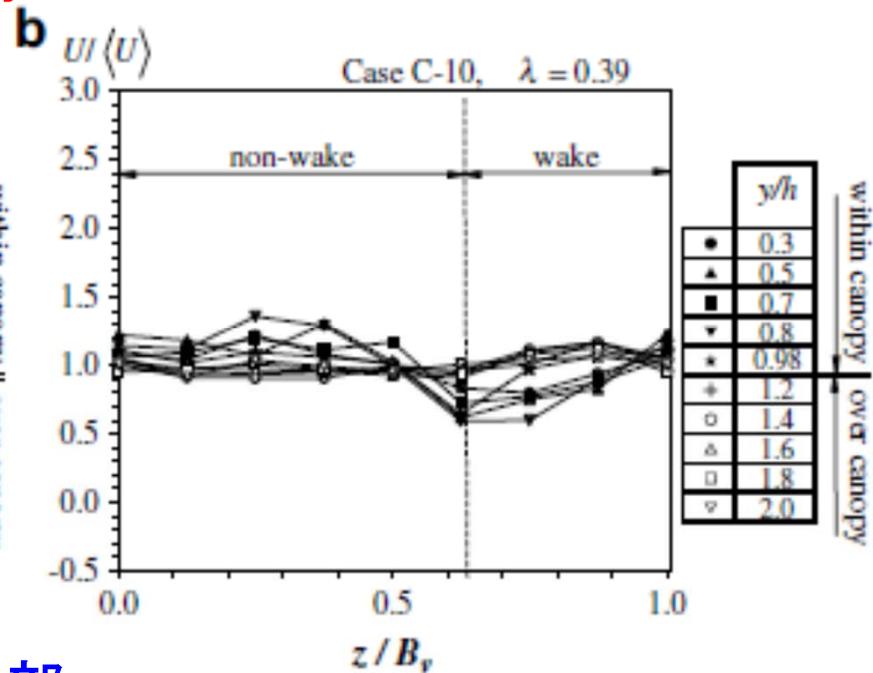
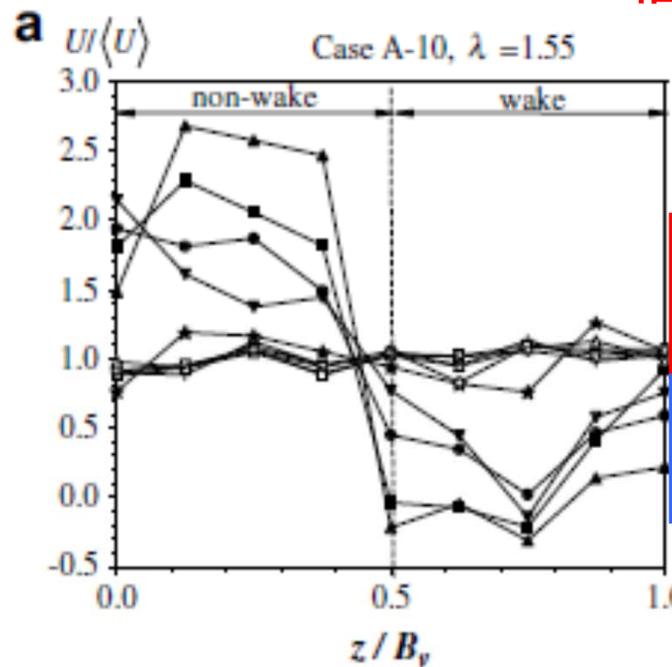
(抽水： 非水没)

Figure 1. Velocity profiles, $U(z)$, for three depth ratios, H/h , where H is water depth and h is canopy height. (a) Terrestrial canopies represent the unconfined limit, $H/h \rightarrow \infty$, for which vertical turbulent transport of momentum from overlying flow controls flow within the canopy. (b) As the depth ratio decreases, pressure gradients, $\partial P / \partial x$, within the canopy become comparable to turbulent stress, $\rho \overline{uw}|_h$. (c) As the depth ratio declines toward the emergent limit, $H/h = 1$, the turbulence scale shifts from predominantly shear generated, L_s , to predominantly wake generated, L_w , signaling a reduction in eddy scale.

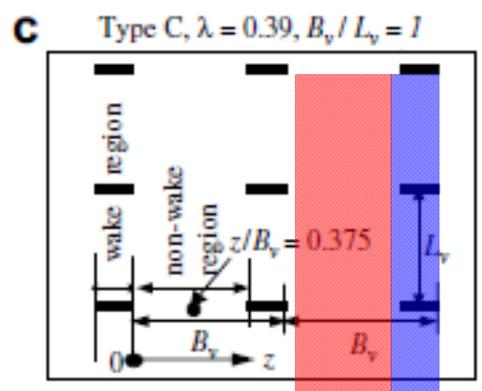
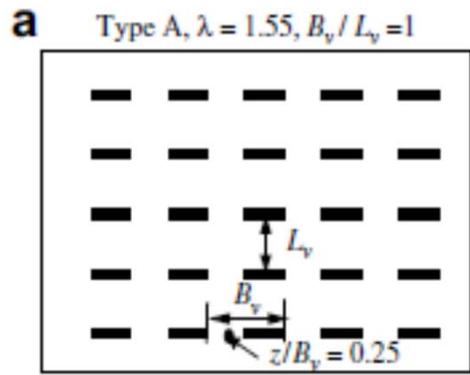
話題 3

植生流れの平均流の横断分布

植生内部



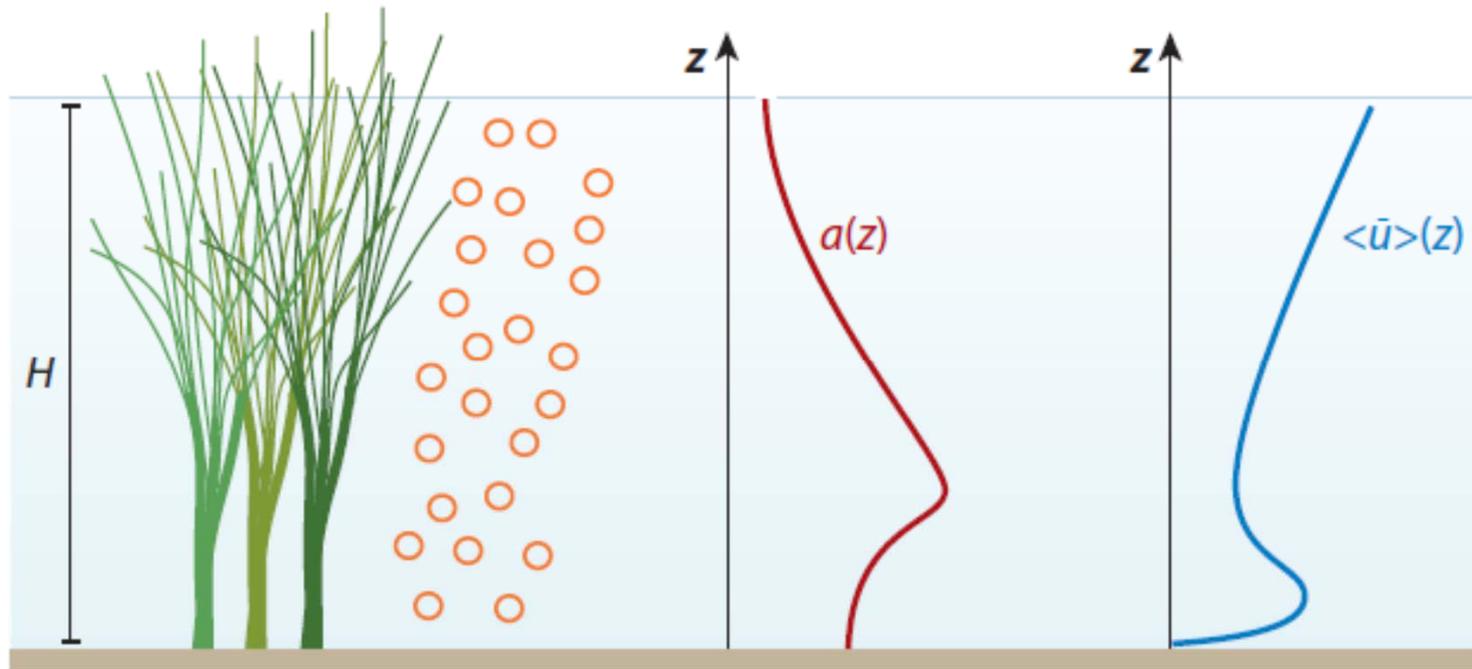
植生外部



Nonwake zone

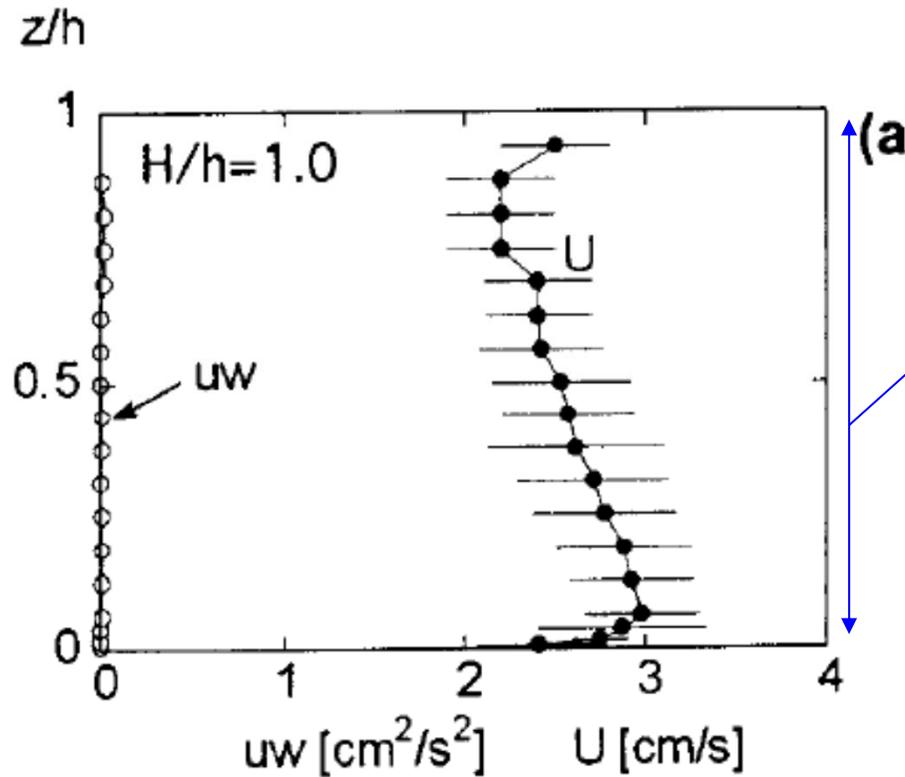
Wake zone

非水没流れ



Element-scale turbulence

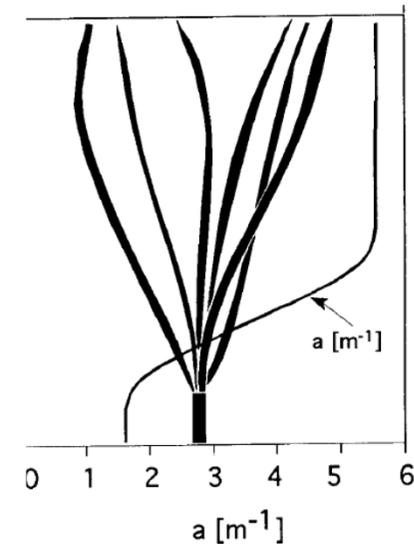
$a [m^{-1}]$



Longitudinal exchange zone
(Wake Zone)

- ・流速分布がほぼ一定であり，水平方向の輸送が卓越する。

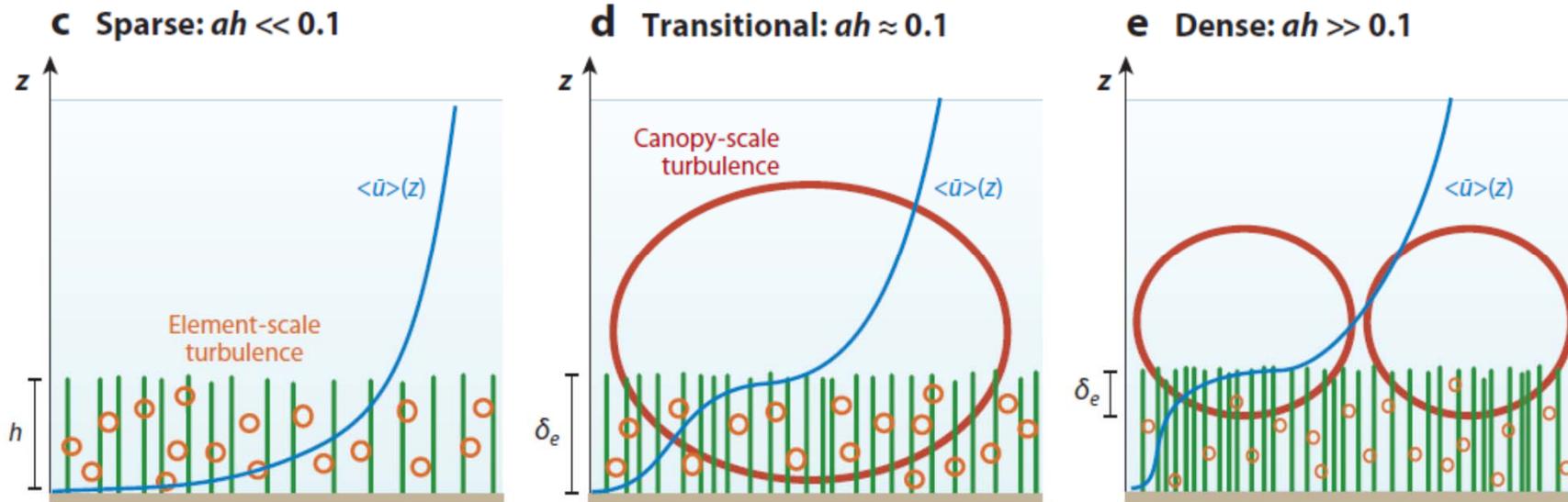
Figure 4. Mean velocity, turbulent stress, and turbulent rms observed for (a, and b) emergent ($H/h = 1.0$) and (c, and d) submerged ($H/h = 2.75$) canopies. Each measurement represents the average of three lateral positions. Horizontal bars indicate the variability between lateral positions.



Nepf & Vivoni (2000)
の植生モデル

全水没植生流れ

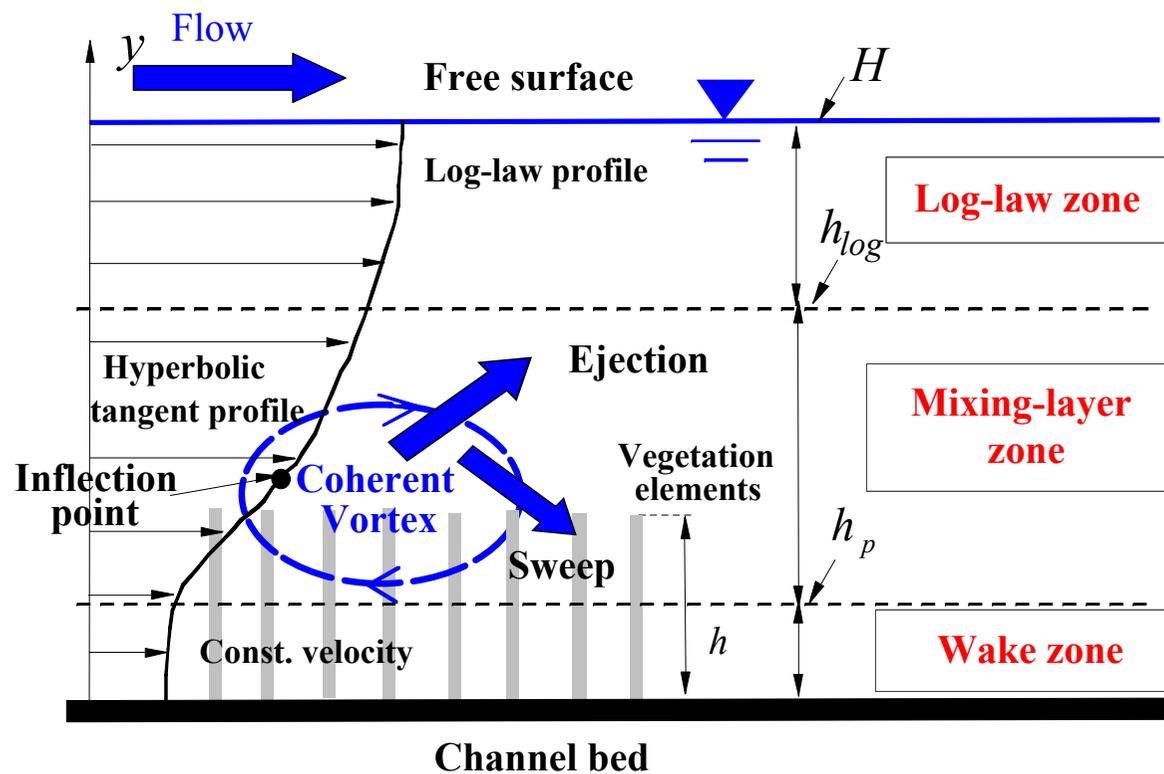
植生密度があるしきい値を越えると植生先端部にせん断層が形成される

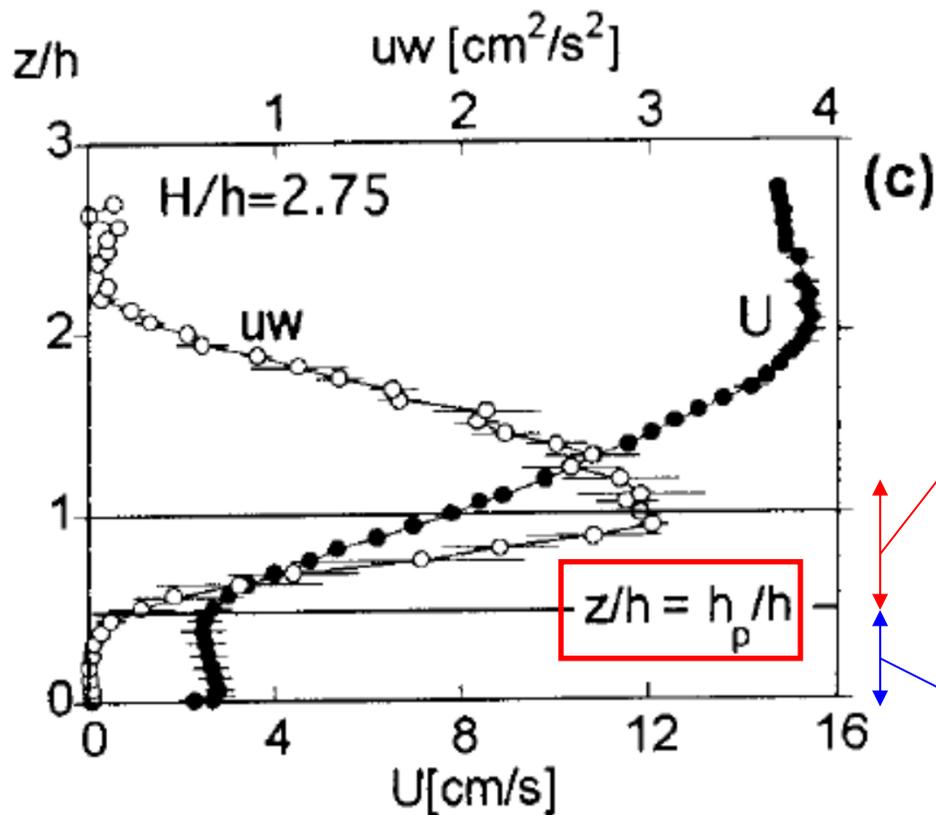


$$ah \geq 0.1$$

全水没植生流れの領域分け

- **Log-law zone** ($h_{\log} \leq y \leq H$)
- **Mixing-layer zone** ($h_p \leq y \leq h_{\log}$)
- **Wake zone** ($0 \leq y \leq h_p$)





h_p : 運動量の浸透高さ

→ レイノルズ応力のピーク値の10%となる高さ

Vertical exchange zone
(Mixing-layer Zone)

- ・ 組織渦が発生し、鉛直方向の輸送が大きい
- ・ 流速シアーが大きい

Longitudinal exchange zone
(Wake Zone)

- ・ 非水没植生流れに類似した特性を持つ
- ・ 流速分布がほぼ一定であり、水平方向の輸送が卓越する。

Figure 4. Mean velocity, turbulent stress, and turbulent rms observed for (a, and b) emergent ($H/h = 1.0$) and (c, and d) submerged ($H/h = 2.75$) canopies. Each measurement represents the average of three lateral positions. Horizontal bars indicate the variability between lateral positions.

植生内部の渦構造

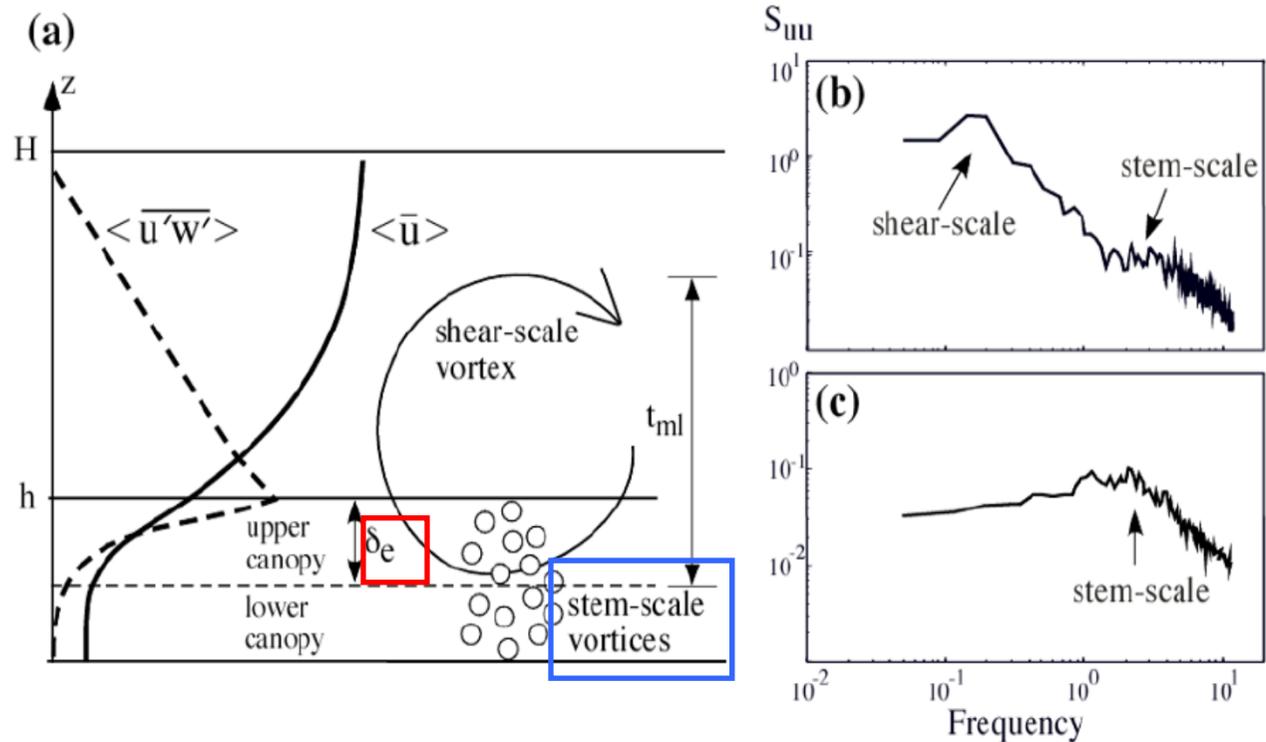


Fig. 1. Flow within and above a submerged canopy of height h in water depth H . (a) Profiles of mean velocity (solid line) and turbulent stress (dashed line). The canopy-induced shear layer generates shear-scale vortices that penetrate a distance δ_e into the canopy. (b) Velocity spectra in the upper canopy ($z > h - \delta_e$) show both the shear-scale and stem-scale turbulence. (c) Velocity spectra in the lower canopy ($z < h - \delta_e$) show only stem-scale turbulence.

陸生と水生の渦比較

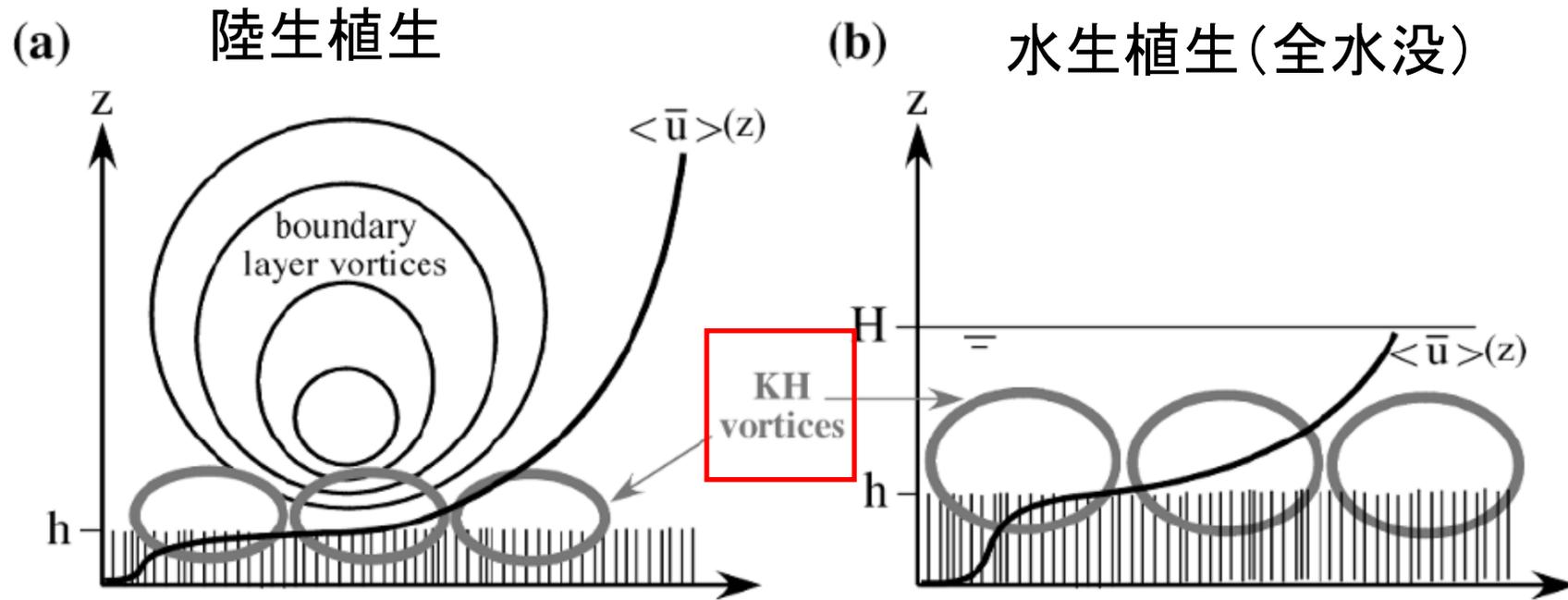
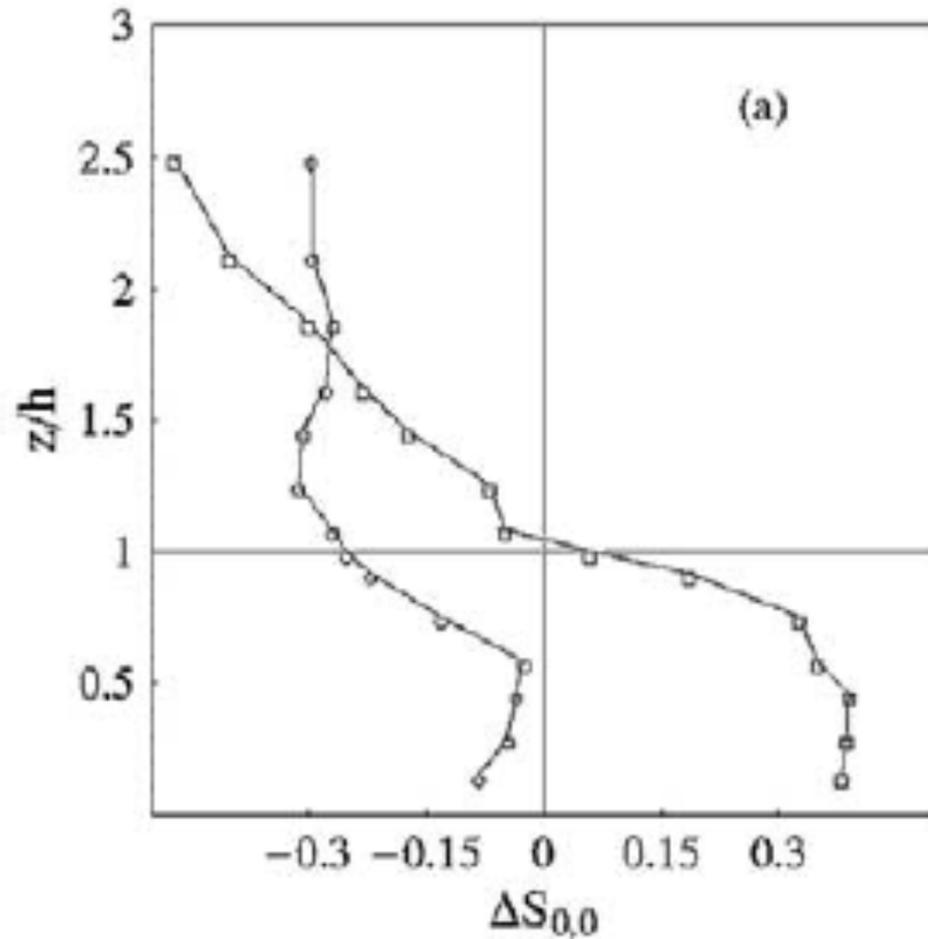


Fig. 2. A canopy of height h generates a velocity profile with an inflection point at $z = h$, which produces vortices *via* the Kelvin-Helmholtz (KH) instability: (a) When the canopy is unconfined, the KH vortices interact with larger-scale boundary layer vortices; (b) When the depth of submergence, H/h , is small, the KH vortices dominate the entire flow domain.

話題3

スweepとエジェクション



Over canopy:
Ejectionが卓越
($\Delta RS < 0$)

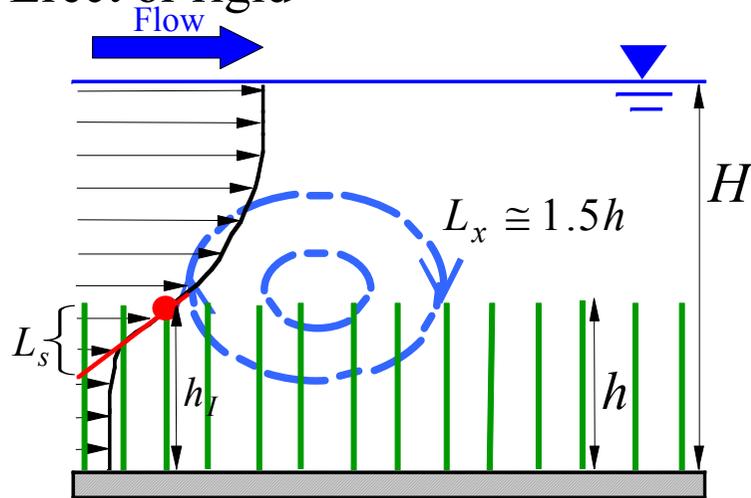
Within canopy
Sweepが卓越
($\Delta RS > 0$)

$$\Delta S = RS_4 - RS_2$$

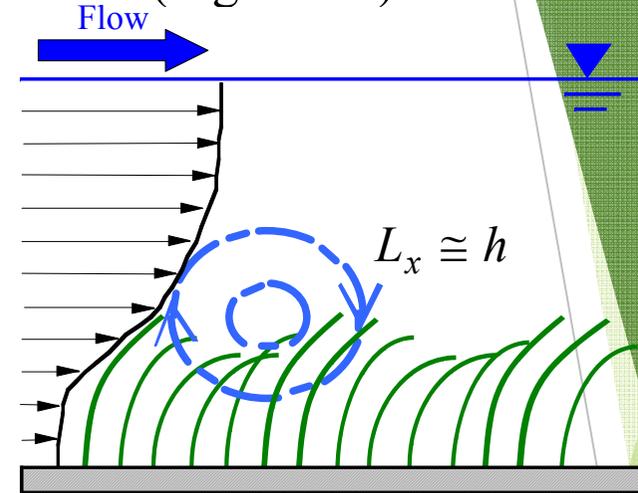
話題 3

変形を伴う植生粗度

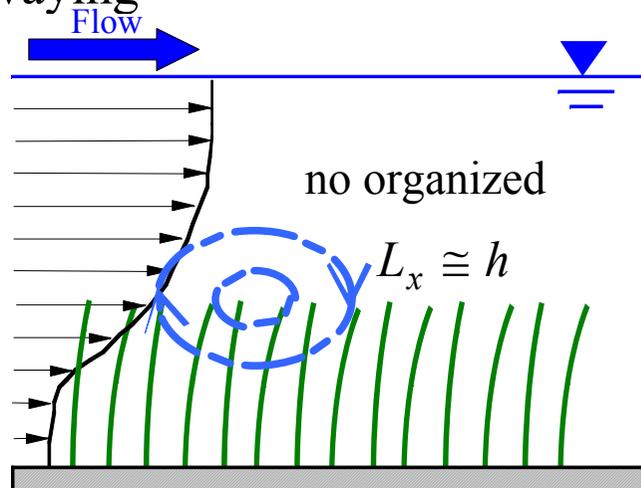
a) Erect or rigid



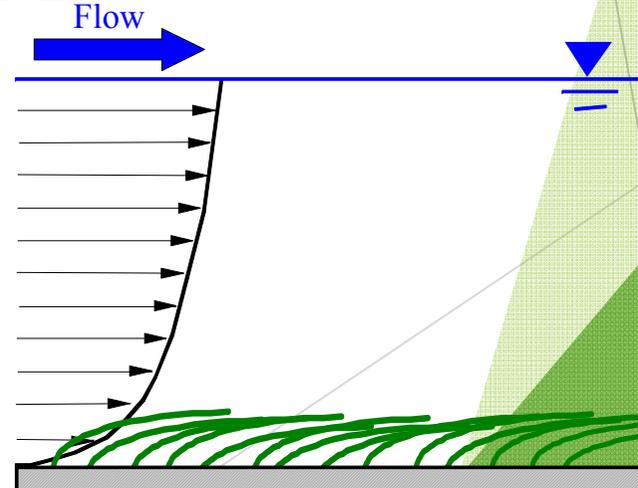
c) Monami (organized)



b) Swaying



d) Prone



藻波 (monami) 現象

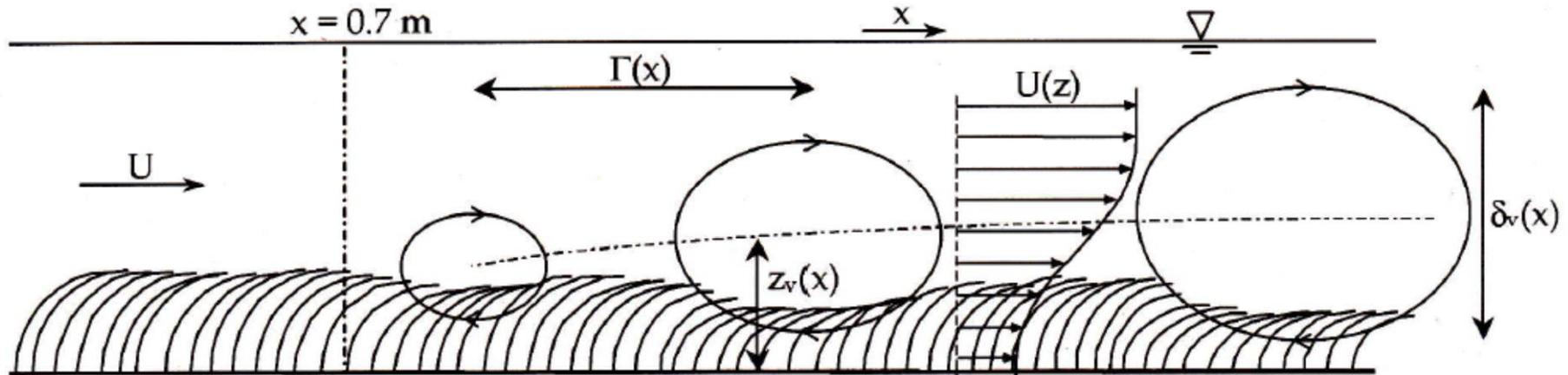


Figure 12. Schematic diagram (exaggerated vertically) of vortex characteristics in vegetated flows. The value of z_v increases with x because of the redirection of flow over the top of the canopy. The monami is observed as the downstream progression of localized areas of forward plant deflection as a result of high vortex velocities.

藻波（穂波）の発生諸説

(1) 大気乱流の大規模渦による強制振動(ガストアタック説)

大気境界層で発生した大規模渦の通過によって稲穂が強制的に大きくたわみ、渦の進行とともに稲のたわみが風下側に進行する。

(2) 大気乱流との共鳴振動

稲穂を弾性棒の集合と考えられ、ある固有振動特性をもつ。稲の固有振動特性に対応する大気乱流のスペクトルが十分大きなエネルギーをもつとき、稲穂と大気乱流の共鳴振動として穂波が発生する。

(3) 大気—植生せん断流の変曲点不安定

植生流れでは植生先端部で平均流が変曲点をもつ。せん断不安定性によって発生した大規模渦が通過することで穂波が発生する。

渦の移流速度

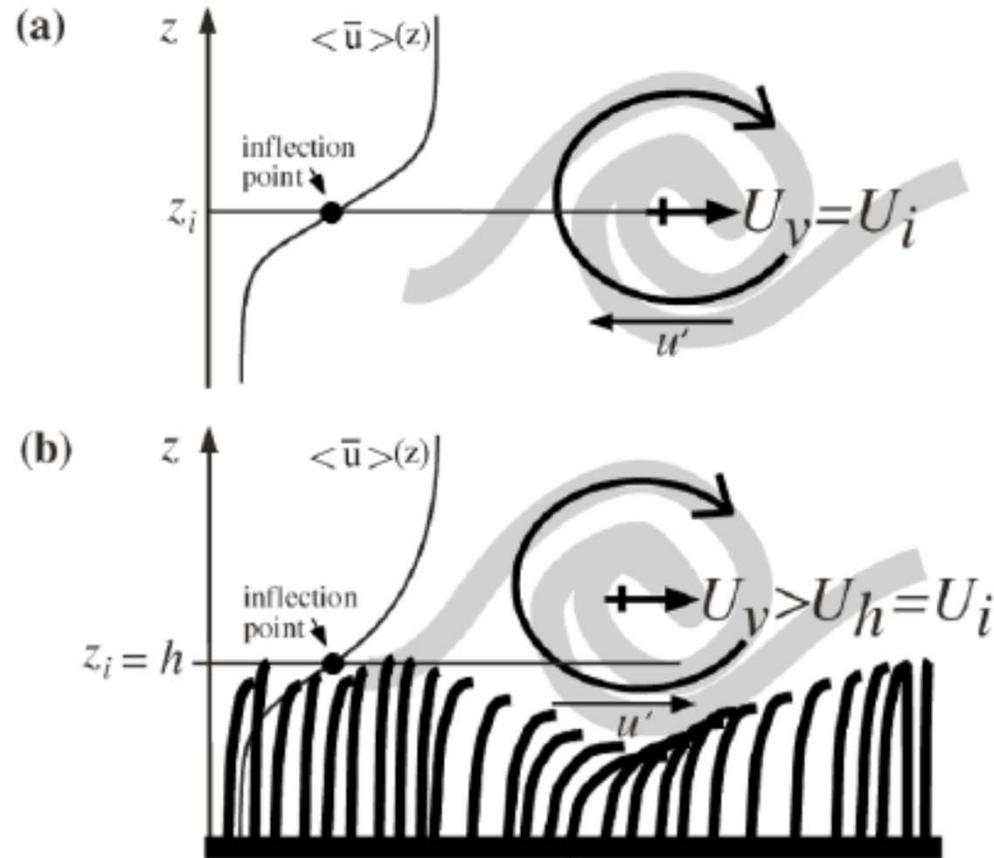
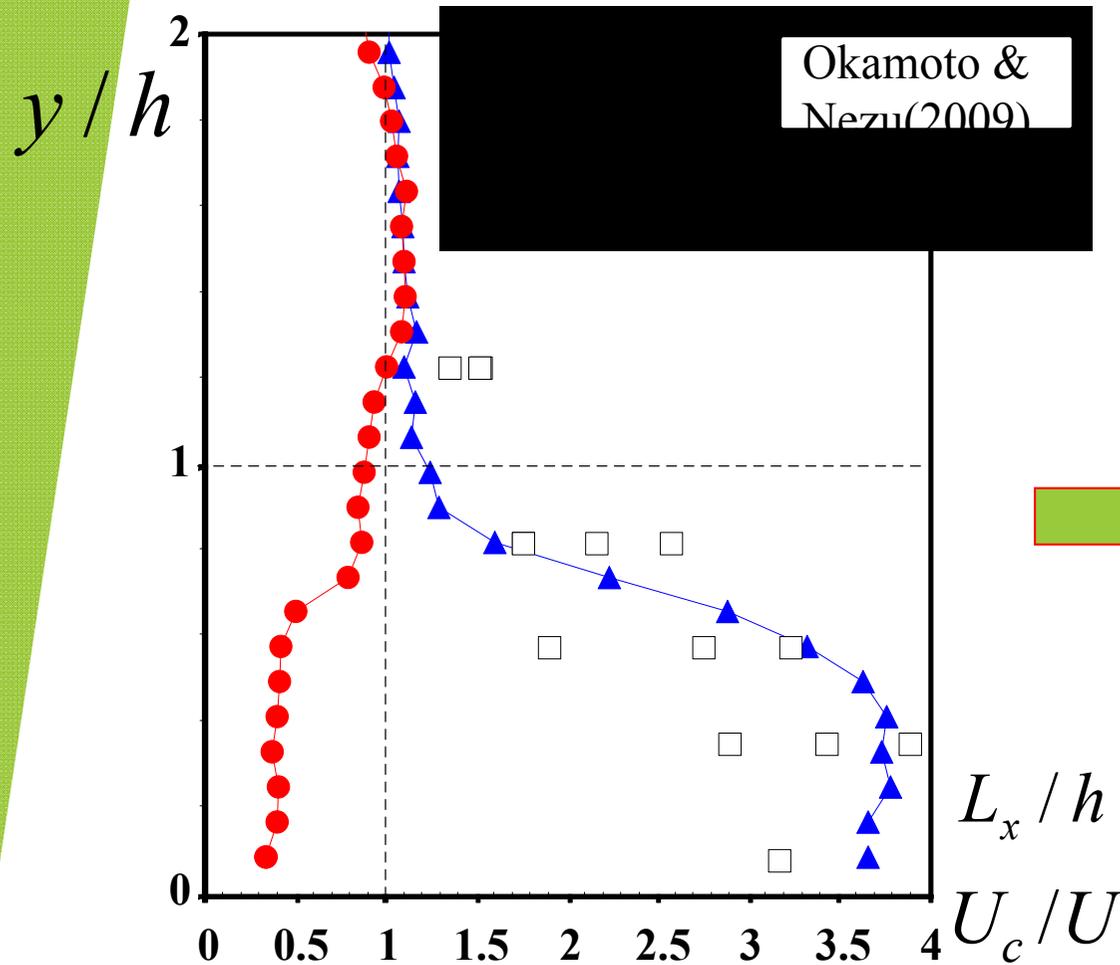


Fig. 4. Comparison of (a) free shear layer (FSL) and (b) canopy shear layer (CSL) vortices. The vortices translate with speed U_v , which is defined by the time required, T , for the vortex center to move distance L downstream, $U_v = L/T$. (a) In a FSL the vortex is symmetric about the inflection point, z_i . The translation speed of the vortex matches the velocity of the inflection point, $U_v = U_i$. (b) In a CSL the inflection point corresponds roughly with the top of the canopy, $z_i = h$. The vortex center is displaced upward relative to the inflection point, and the vortex travels faster than the velocity at the inflection point, which occurs at the top of the canopy, $U_v > U_h = U_i = \langle \bar{u} \rangle_{z=h}$.

話題3

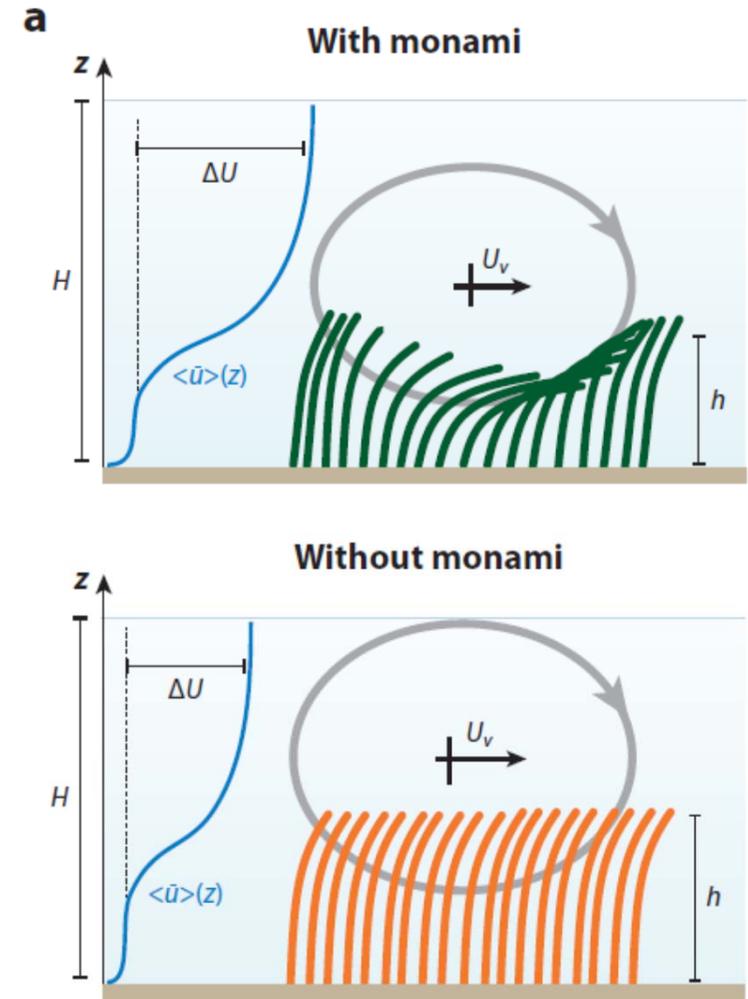
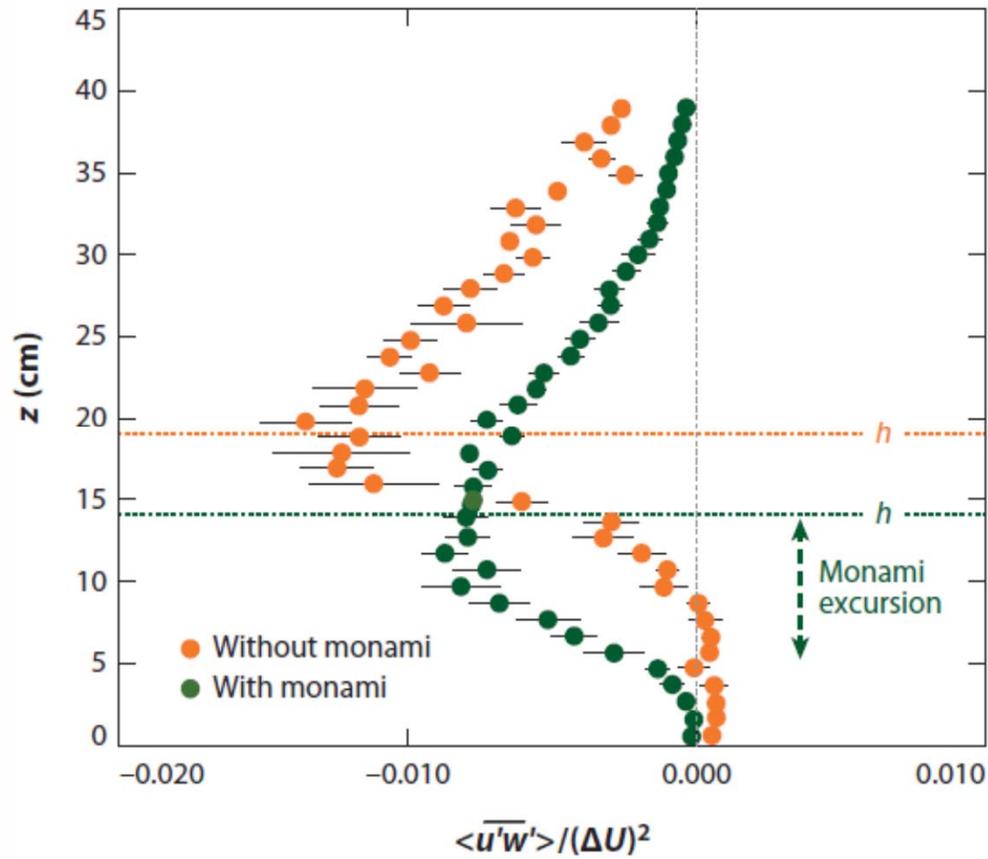
植生キャノピー流れのイメージ



- ・ 植生内部では組織渦の移流速度は平均流速より大きい
- ・ 藻波発生時には移流速度は植生先端部で平均流速の1.5倍程度

話題 3

レイノルズ応力と運動量浸透



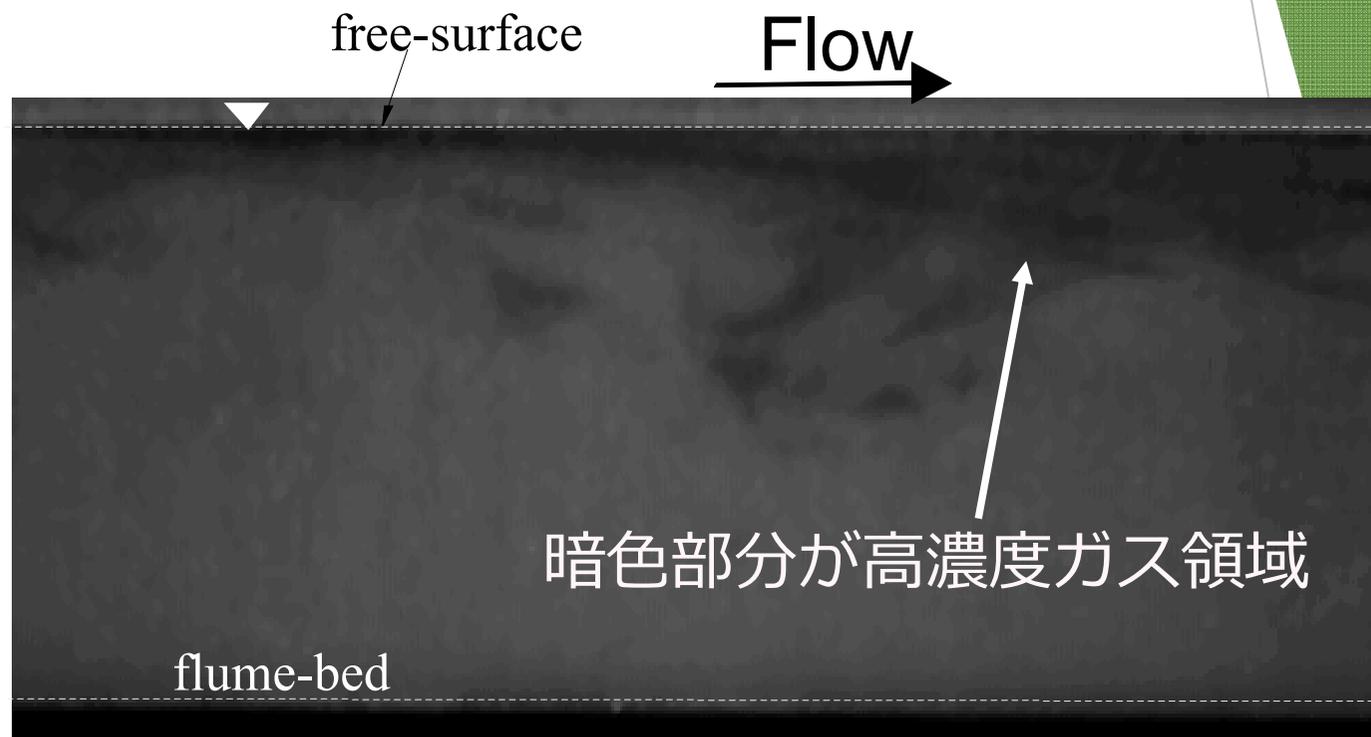
－話題4－

自由水面領域と底面領域の関係
(界面ガス輸送を例にして)

暗色部分が高濃度ガス領域

話題 4

界面を介するガス輸送と底層との関係



既往研究レビュー・乱流とガス輸送の関係

◆浮力・対流による乱流生成

Lee(2000) : LIF計測によって、空気中の O_2 ガスが対流拡散によって水槽に溶解するプロセスを可視化

Eugsterら(2003)は湖沼における CO_2 ガスの輸送フラックスを計測し、水空気界面のガス輸送に及ぼす対流効果を考察

◆水空気界面シアーによる乱流生成

Woodrow&Duke(2002)がLIFを用いて局所的な交換速度の分布を評価しており、瞬時のガス輸送特性と組織乱流構造との関係を考察

◆底面シアーによる乱流生成

Chu&Jirka(1992), McKenna&McGillis(2002), Tsumori & Sugihara(2007)
底面に振動格子を有する水槽による、水空気界面のガス交換の研究
Gulliver&Halverson(1989), Moog&Jirka(2002) 開水路における水空気界面のガス輸送特性の研究

話題 4

ガス輸送速度

ガス輸送速度

$$K_L = J / \Delta C = J / (C_s - C_b)$$

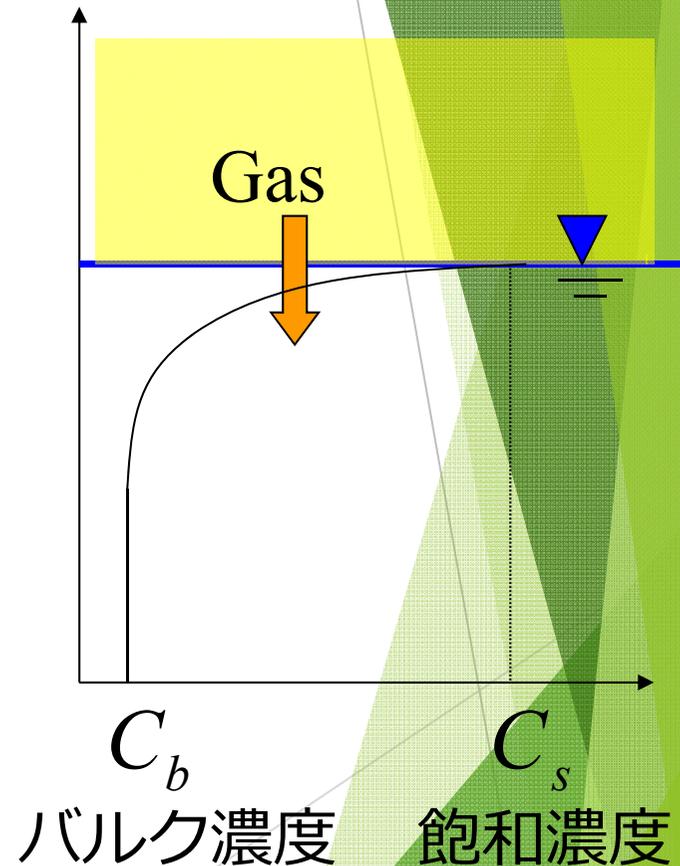
ガスフラックス

$$J = -D \frac{\partial C}{\partial y} + \overline{cv}$$

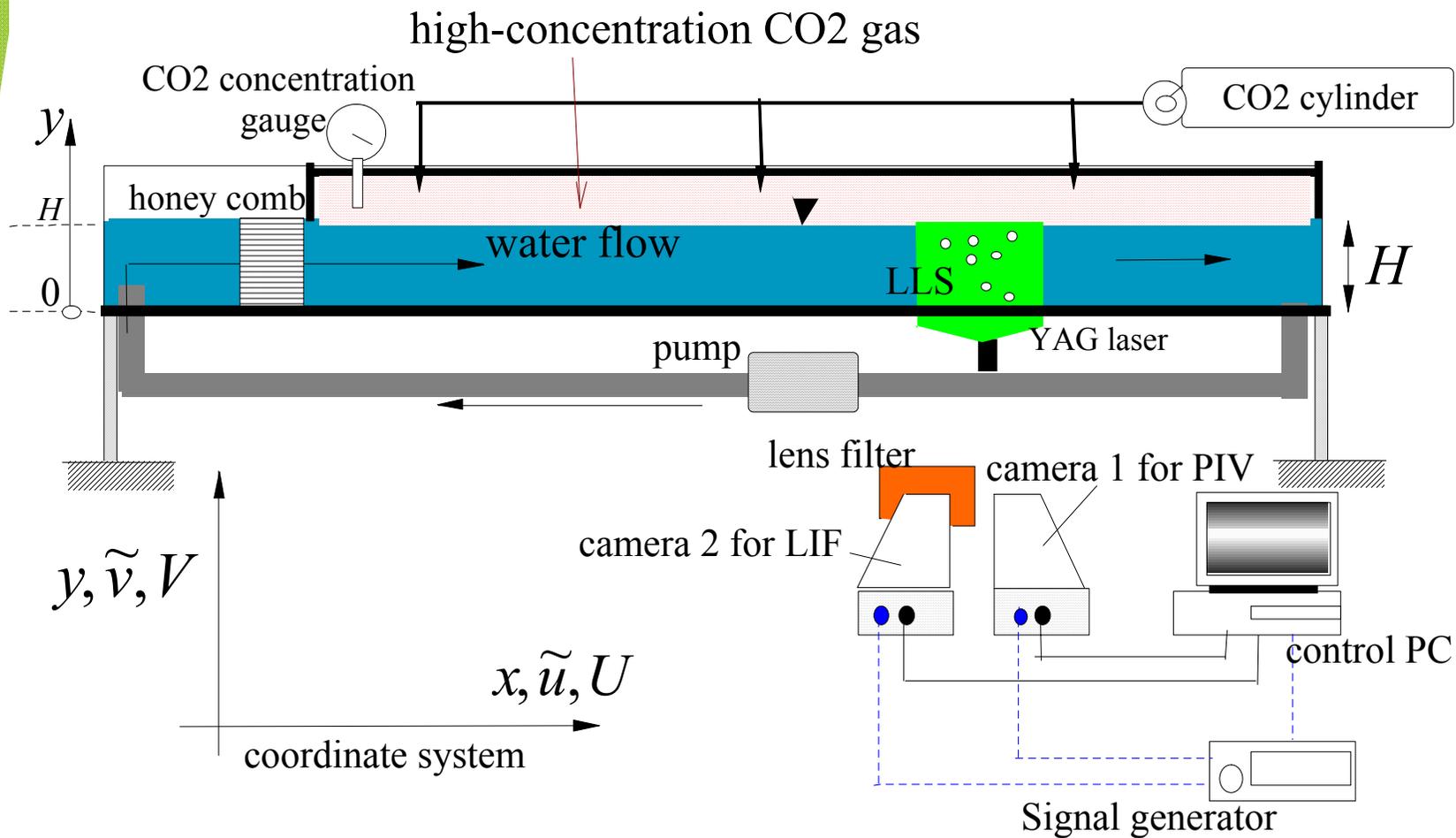
$$\frac{\partial C}{\partial t} + \mathbf{U} \cdot \nabla C = -\nabla \cdot \mathbf{J} = -\nabla \cdot (\overline{\mathbf{u}c} - D \nabla C)$$

再ばっ気係数

$$K_2 = K_L / H$$

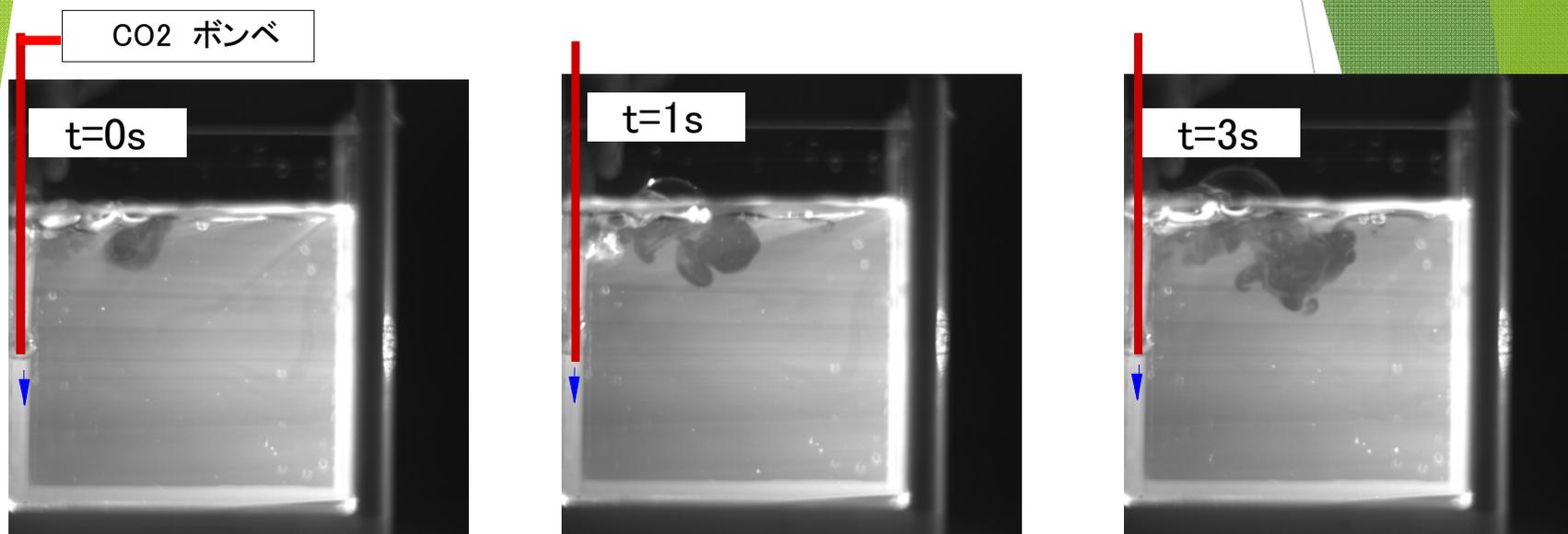


PIV/LIF計測システム



話題 4

LIF（レーザー蛍光法）によるCO₂分布の計測法



レーザー可視化によるCO₂の水中への溶解の様子

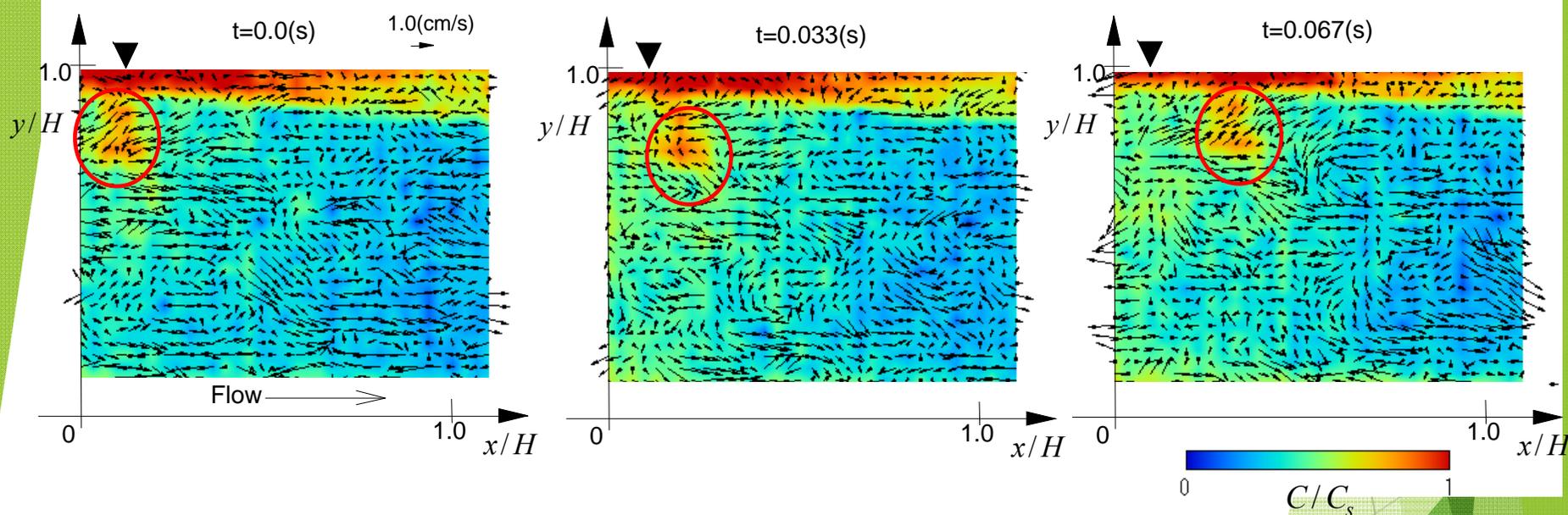
話題4

LIF（レーザー蛍光法）によるCO₂分布の計測法



話題 4

高濃度ガスのバルジ構造

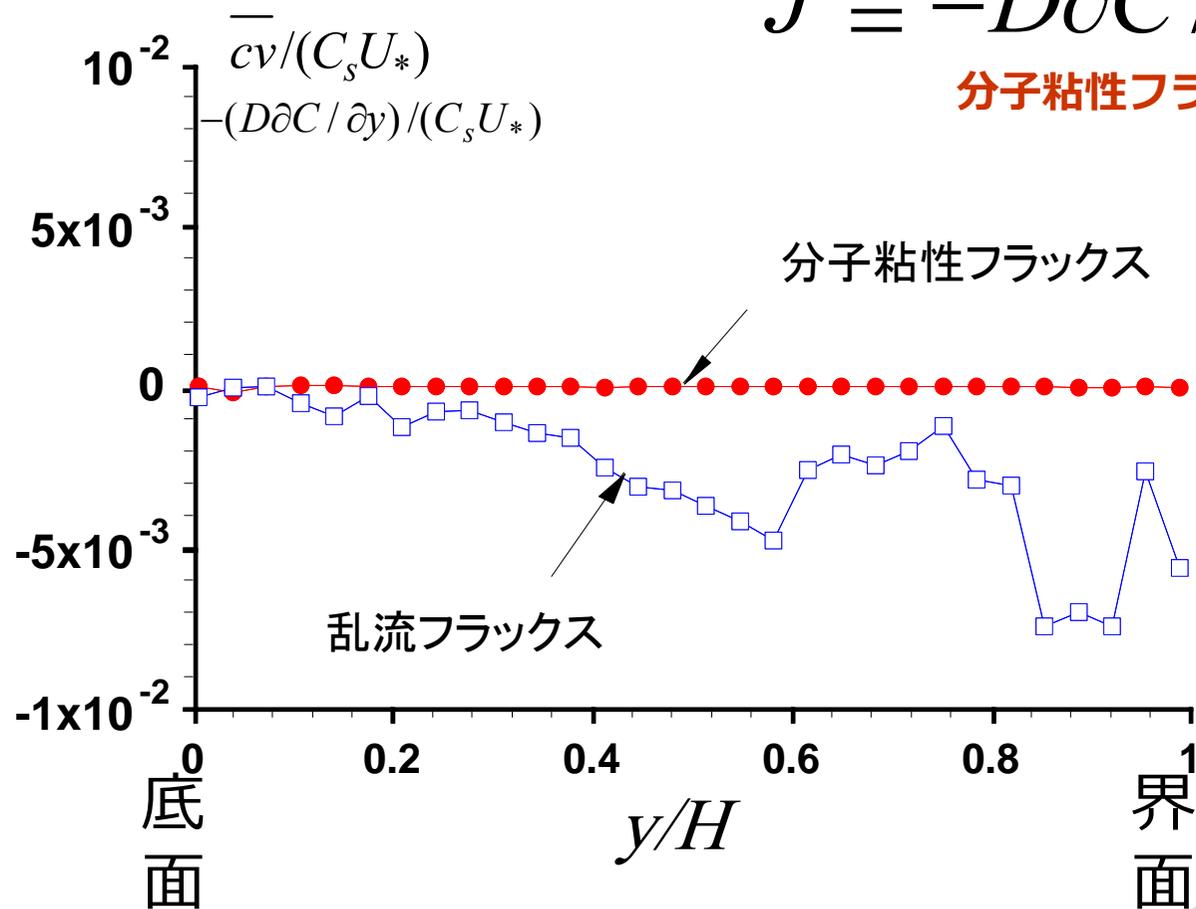


バルジ構造の内部および周囲に瞬間的な下降流が観察される。
時間経過とともに下流側に移流される。

フラックスの評価

$$J \cong -D\partial C / \partial y + \overline{cv}$$

分子粘性フラックス 乱流フラックス



実河川におけるガス輸送速度 (再ばっ気係数)の計測

- ・ガストレーサー法 (1986 港湾研 細川)
- ・2区間DO計測法 (2005 土研 萱場)
- ・チャンバー法 (1998 九大 原田ら)
- ・回帰法 (1995 山梨大 平山ら)

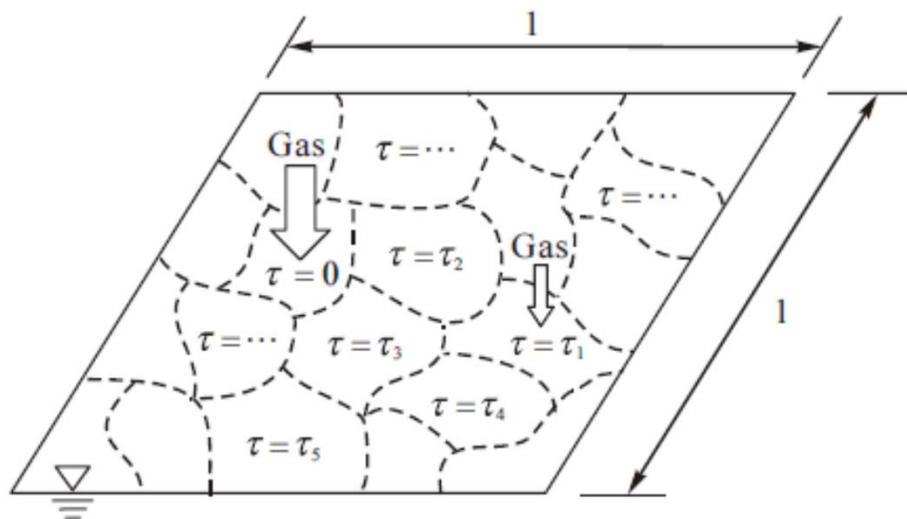
(室内の循環水路)

水層を脱気して、ガス濃度の時間・空間変化より算出する方法が一般的

ガス輸送係数のモデル化

Danckwertzの表面更新モデル

$$k_L = \sqrt{Dr}$$



杉原・山上(2011) ながれVol.30より抜粋

界面発散に注目したモデル

McCreadyの表面発散モデル(SDモデル)

$$k_L = \alpha \sqrt{D\beta'}$$

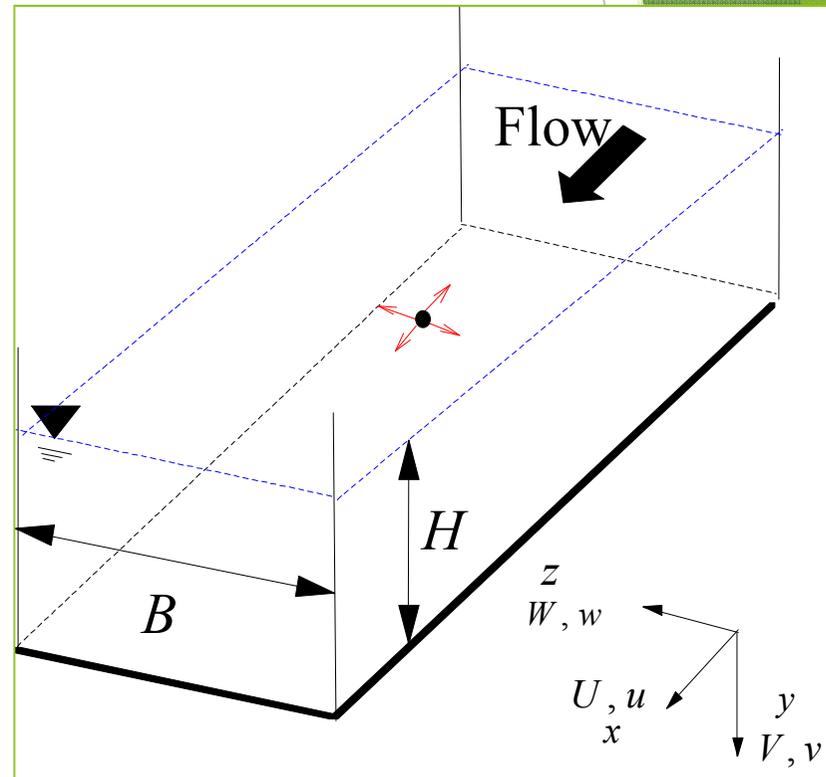
β' : 界面流速発散の rms 値

話題 4

◆ 界面流速発散とは

界面流速発散の瞬間値 $\tilde{\beta}$ は次のように表される。

$$\tilde{\beta} = \frac{\partial \tilde{u}}{\partial x} + \frac{\partial \tilde{w}}{\partial z} = -\frac{\partial \tilde{v}}{\partial y}$$



話題 4

◆ なぜ界面流速発散を使うのか？

- ▶ 水中の濃度分布は図1のようになっている。
- ▶ 濃度境界層の厚さは数十 μm ～数百 μm 程度。
 - 水面はほぼ飽和状態にあるが、
水面下はほぼ酸素が溶けていない
状態であると考えられる。
- ▶ ガス交換は気液界面を通して行われるので、
- ▶ 上昇流が起これなければ、
 - ガス交換は進まない。
 - 上昇流が起きれば、
界面流速発散が発生。(図2)

図1

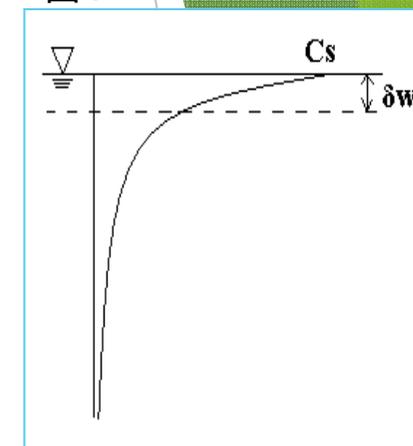
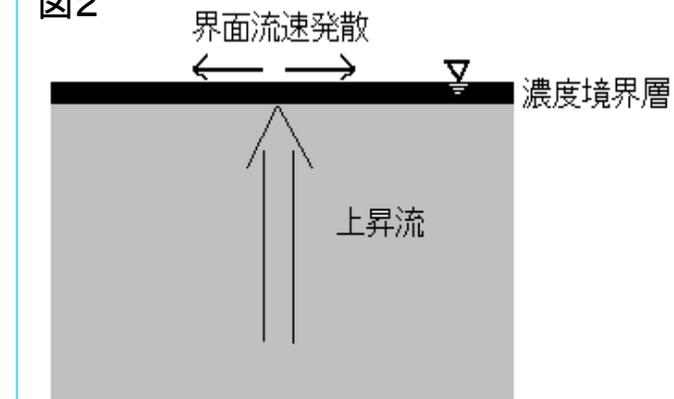


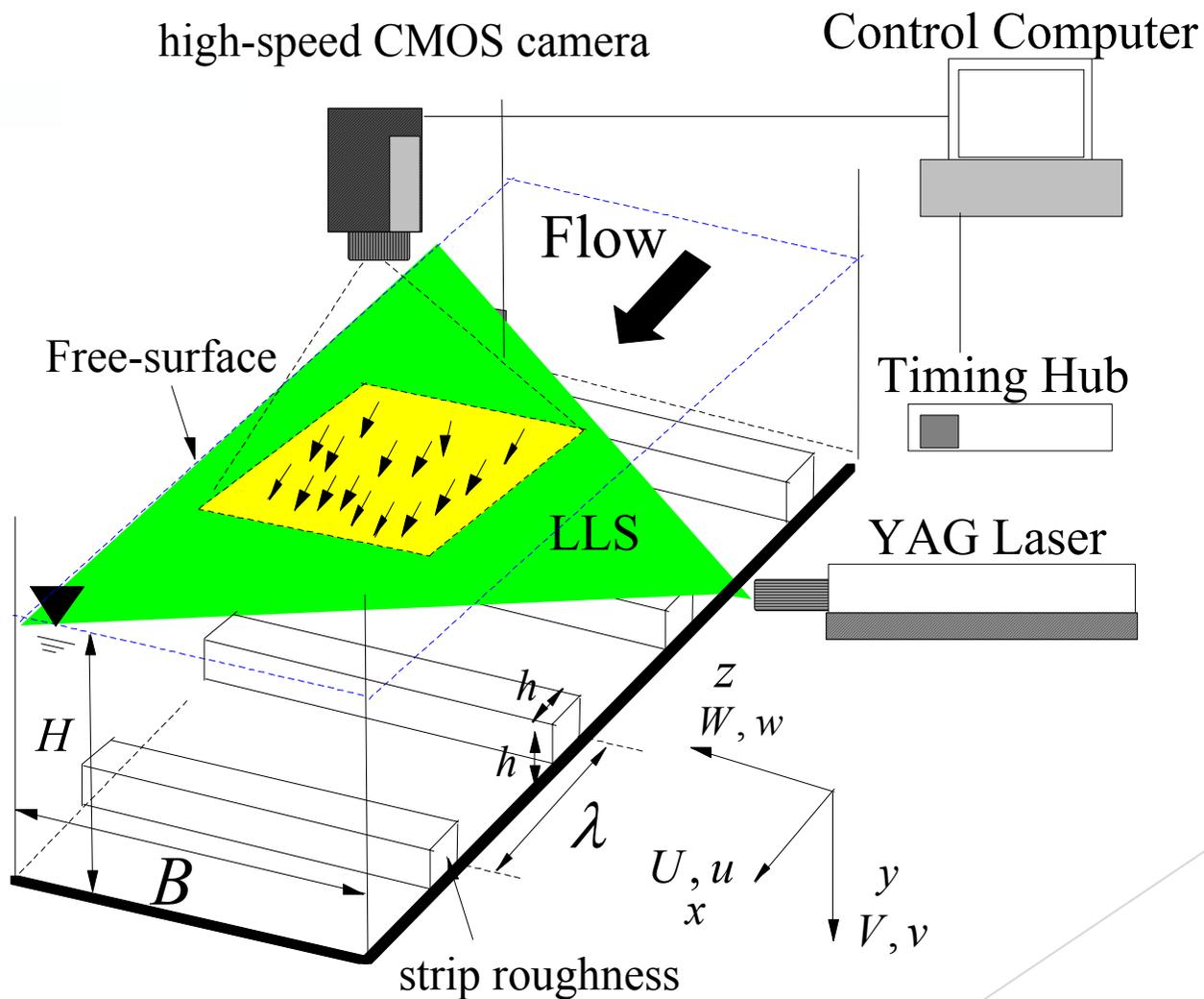
図2



話題 4

◆ PIV実験方法

- ▶ 図のように、自由水面に対して PIV を実施



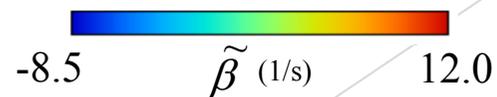
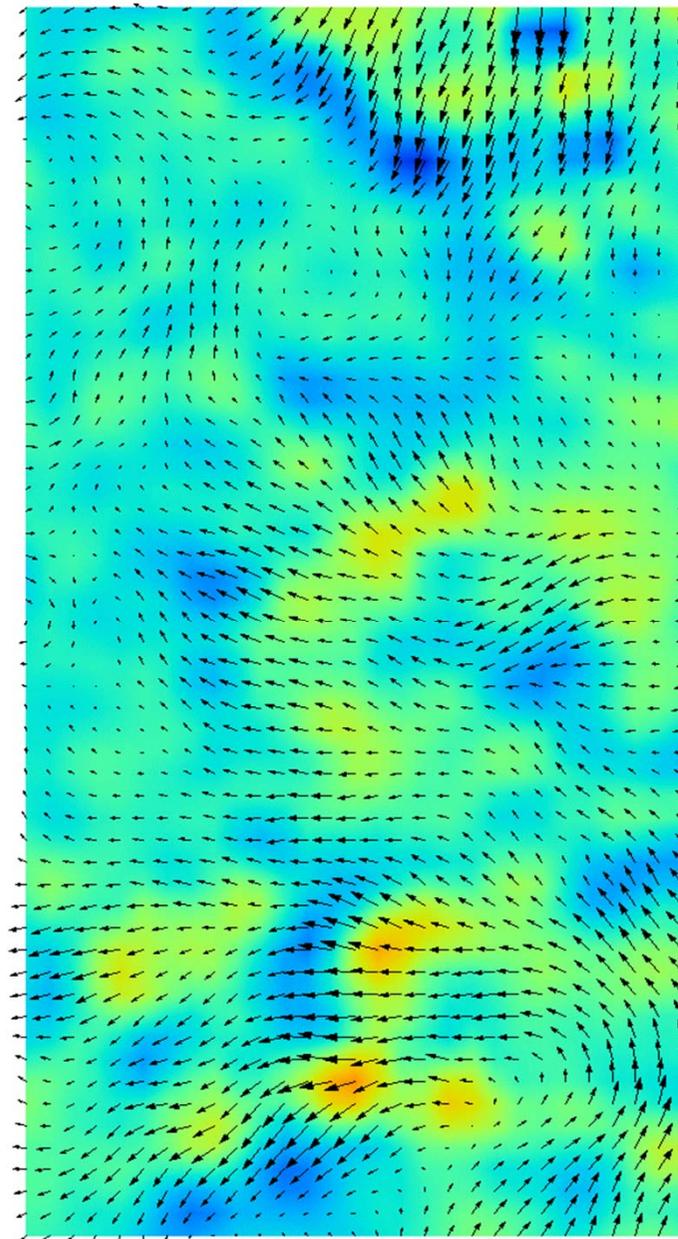
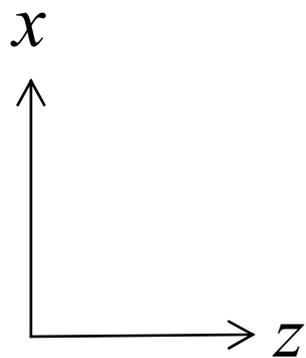
◆ 瞬間流速特性

$\tilde{\beta}$ の時間変化

$$\phi = 8.0$$

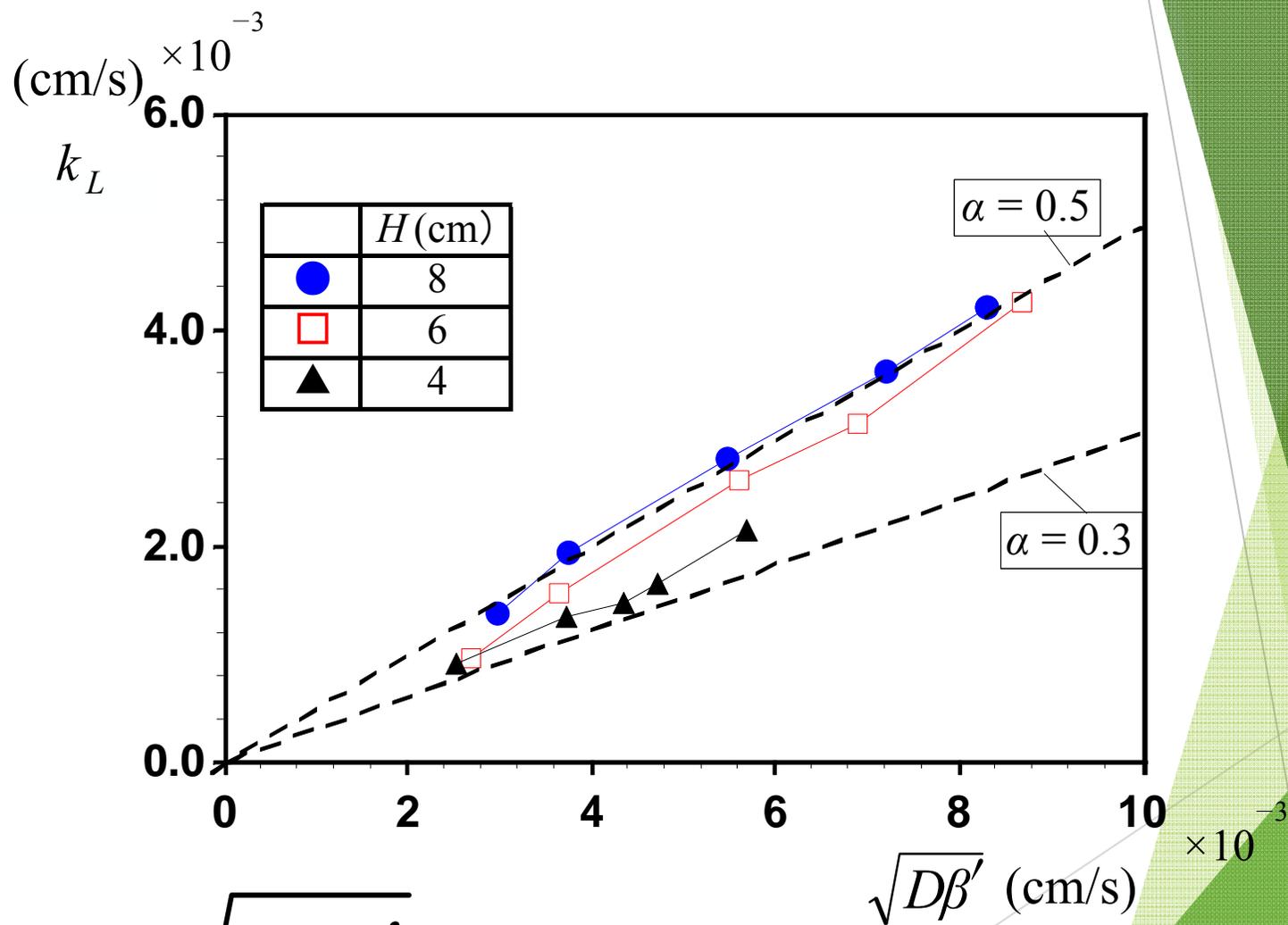
$$U_m = 20 \text{ (cm/s)}$$

$$y = 12.0 \text{ (cm)}$$



↑
Flow

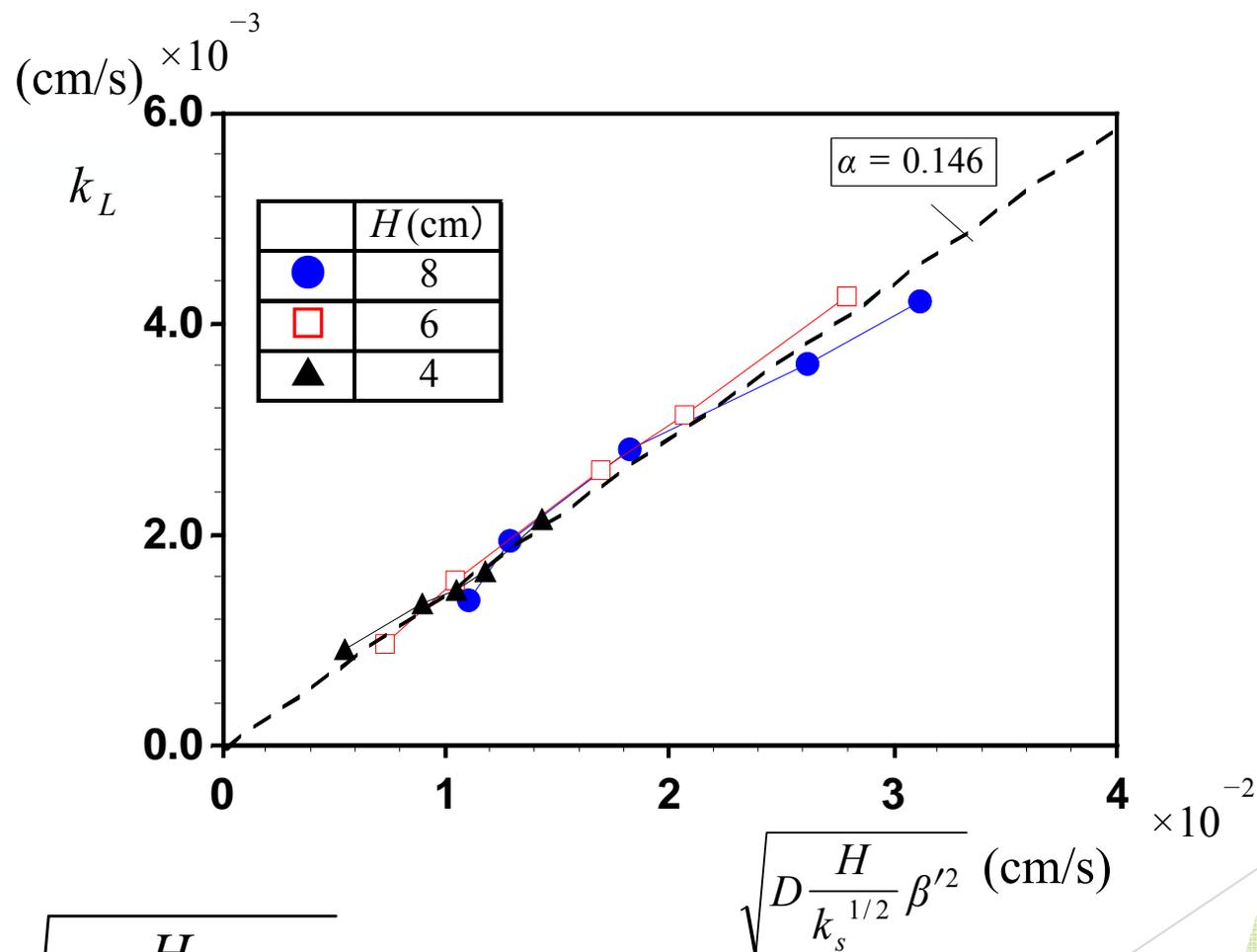
◆ 開水路乱流へのSDモデルの適用



$$k_L = \alpha \sqrt{D\beta'}$$

話題 4

◆ 開水路乱流への修正SDモデルの適用

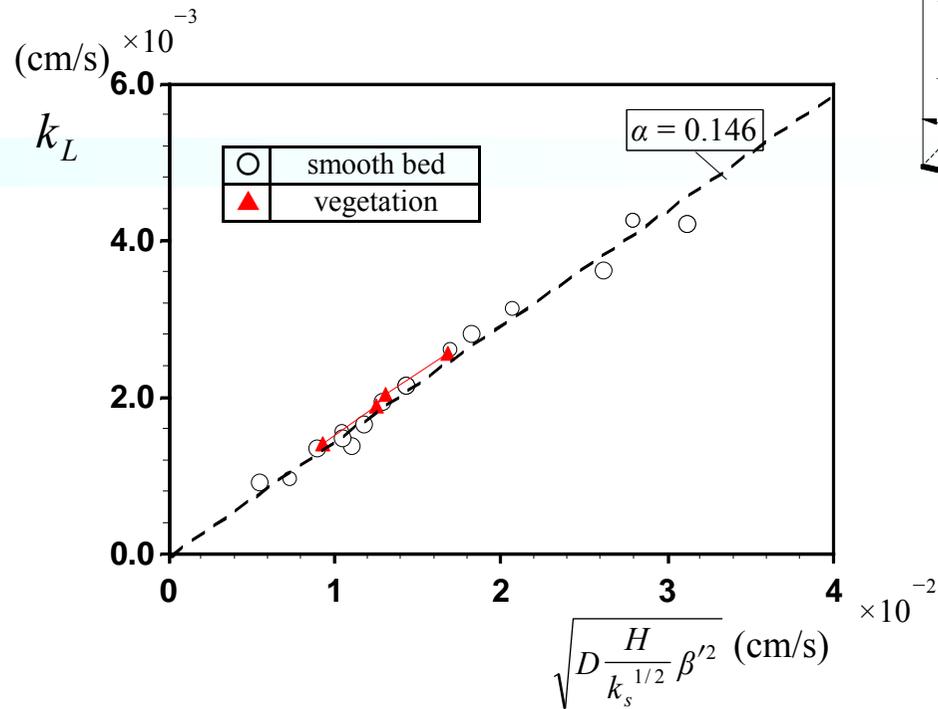


$$k_L \propto \sqrt{D \frac{H}{k_s^{1/2}} \beta'^2}$$

k_s : 水面における乱れエネルギー

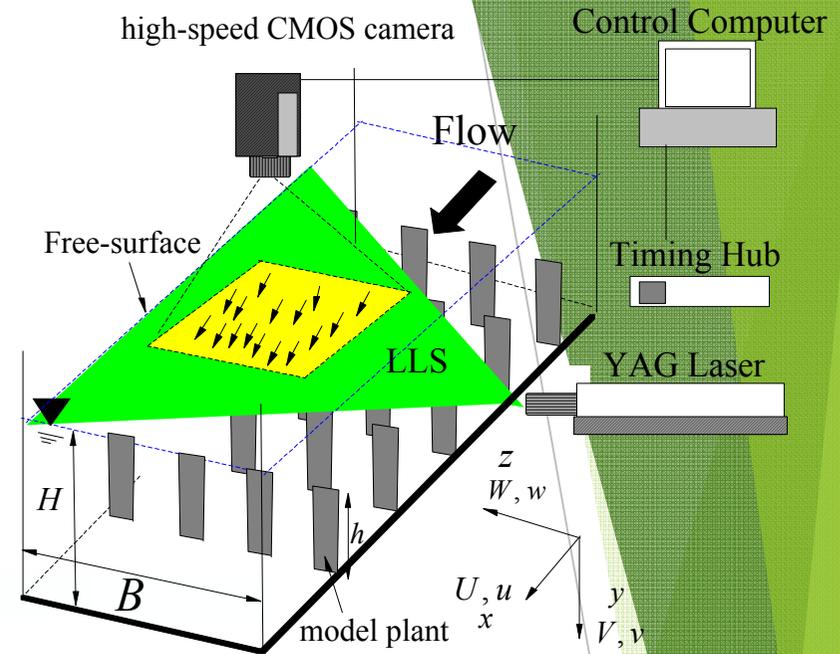
話題 4

◆ 植生流れの適用



$$k_L \propto \sqrt{D \frac{H}{k_s^{1/2}} \beta'^2}$$

k_s : 水面における乱れエネルギー



◆ 今後の課題(実河川への適用)

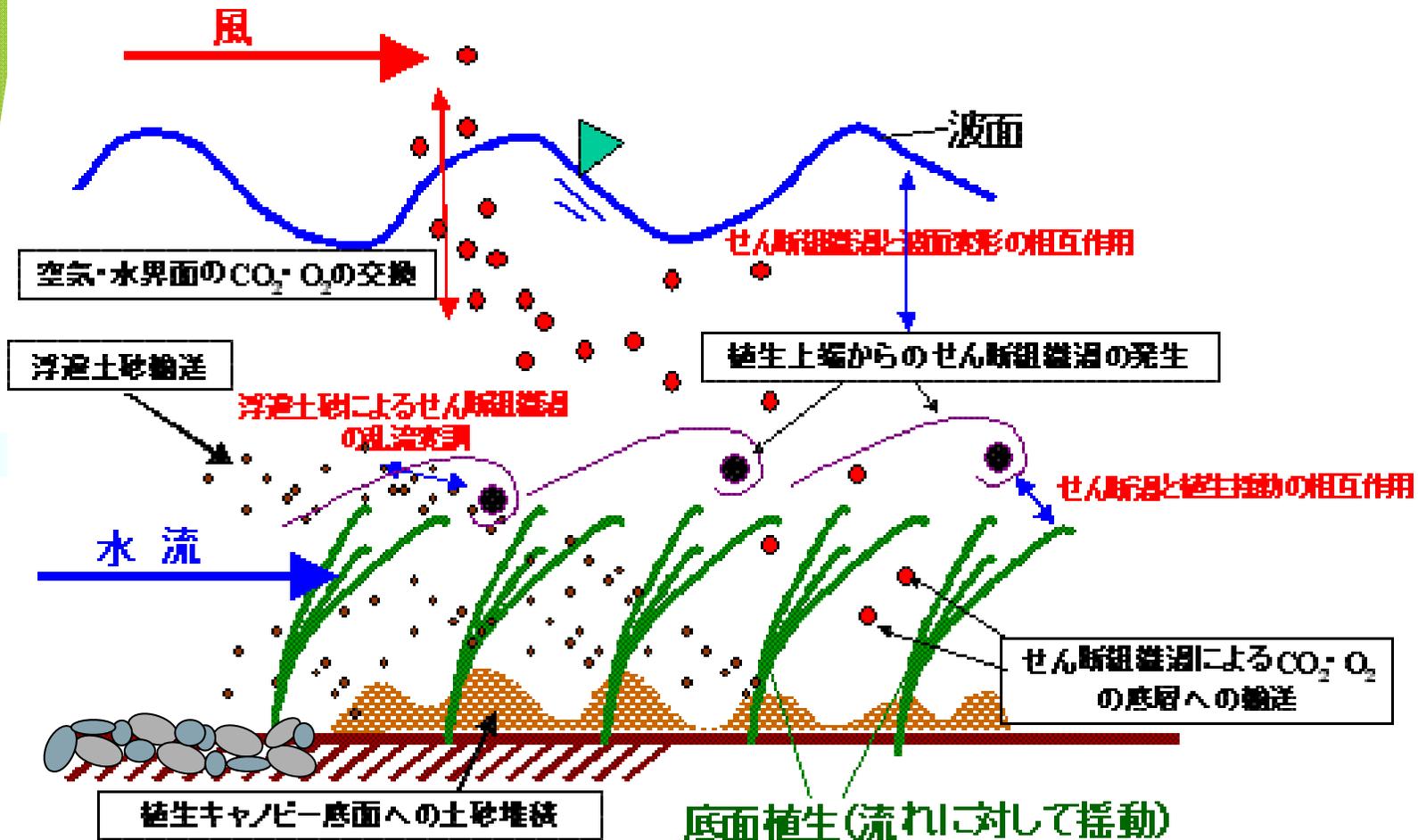
(修正SDモデル) $k_L \propto \sqrt{D \frac{H}{k_s^{1/2}} \beta'^2}$

(実河川ガス輸送に関する実用公式 例)

Thackson and Krankel (1969) $k_L \propto U^*$

Wilson and Mcleod (1974) $k_2 = CU^n / H^m$

◆ まとめ



- ・ 各イベントの研究は進んでいるが、イベント間の相互作用や連携特性については未解明点が多い！
- ・ 生態工学とのつながりも鋭意研究すべき
- ・ 基礎的知見の現場（実河川）への貢献が乏しいことも課題の一つ