

平成21年度基礎水理シンポジウム

H21.12.21 9:30-17:30 土木学会講堂

植生群落を有する開水路流れの 三次元構造と抵抗特性

熊本大学工学部社会環境工学科
大本照憲

話題提供の内容

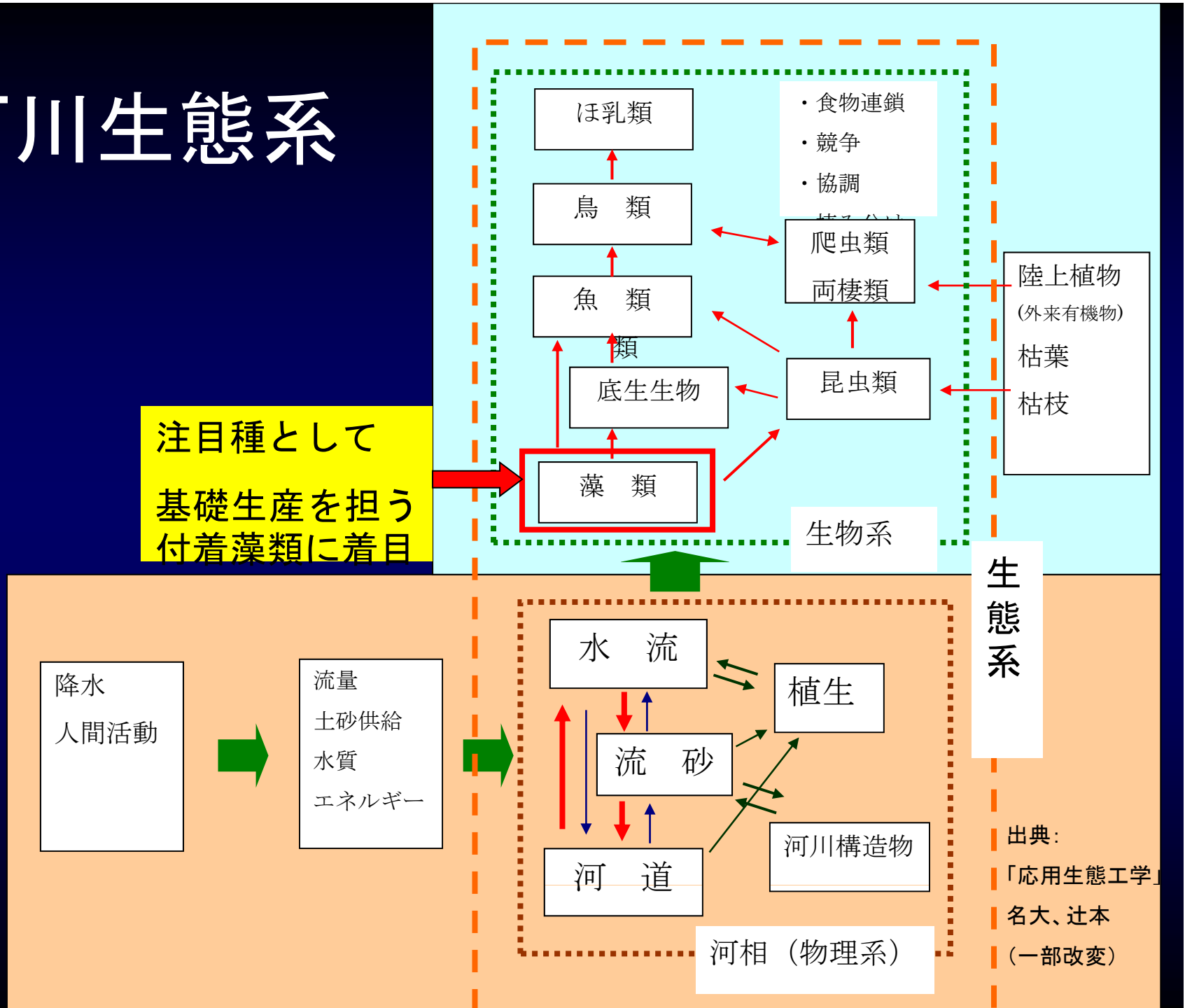
1. 研究背景
2. 種々の植生配置における流れの抵抗特性
3. 水路中央に植生群落を有する開水路流れの流動機構
4. 植生群落を横断する流れの相互作用
5. 側岸凹部を有する植生流れの抵抗特性と流動機構

課 題

様々な配置の植生群落を有する開水路流および河川流における**流れの抵抗特性**および水面変動特性や運動量輸送特性といった**流動機構**を検討する.

河川生態系

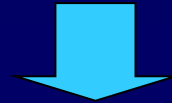
注目種として
基礎生産を担う
付着藻類に着目



研究の背景

植生群落が河川に与える影響

- ・生物の生息, 生育空間の創出
- ・水質や底質の浄化能力の向上
- ・親水性の高い水辺環境の創出
- ・河床洗掘の抑制
- ・藻波現象などの複雑な流れ構造の誘発
- ・洪水時の流水抵抗増大 ← 近年多発する豪雨災害により大きな問題点



治水安全度と環境機能の両立を目的とした植生管理手法を確立する必要がある



木山川 (2007年11月)



緑川(2007年7月)
植生が自然繁茂した河川



御船川(2005年7月)

植生群落を伴う流れの分類

a) 陸生植物群落

b) 水生植物群落(沈水)

c) 水生植物群落(抽水)

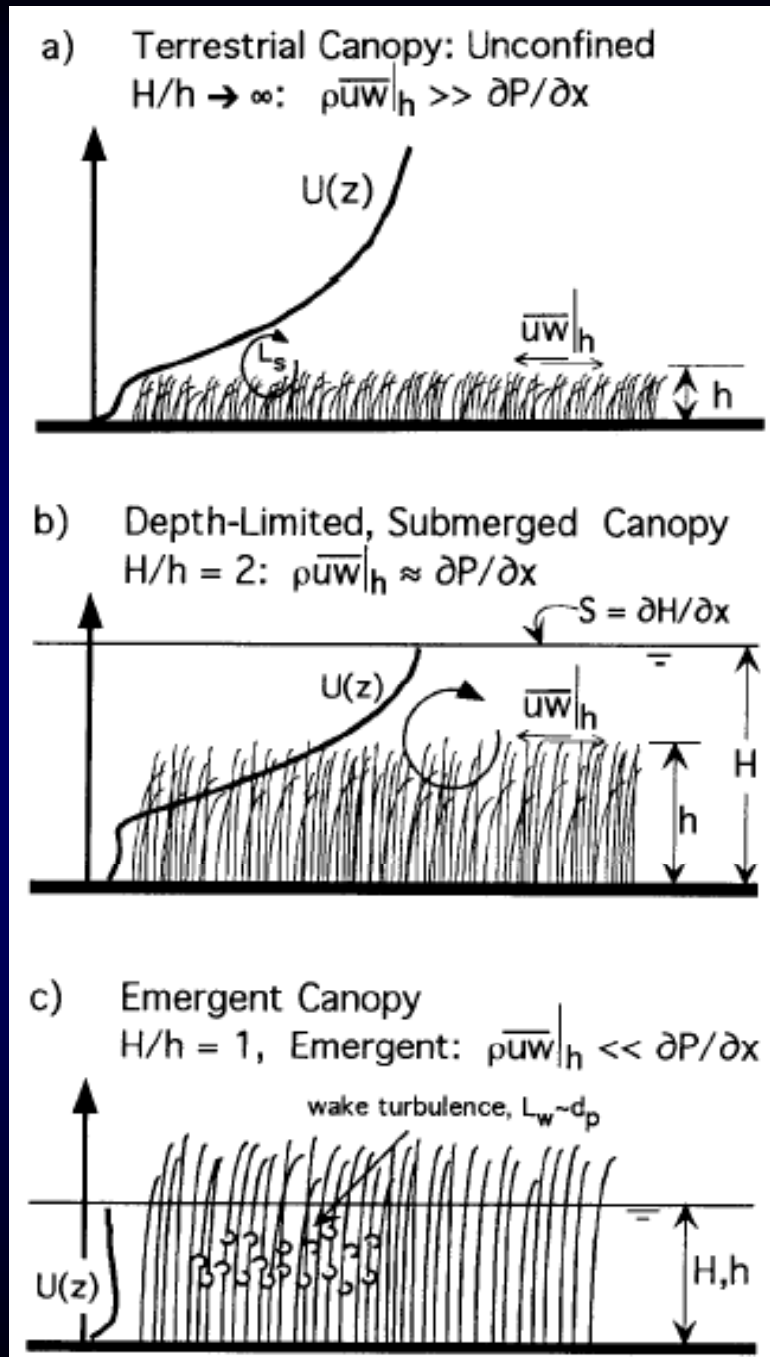
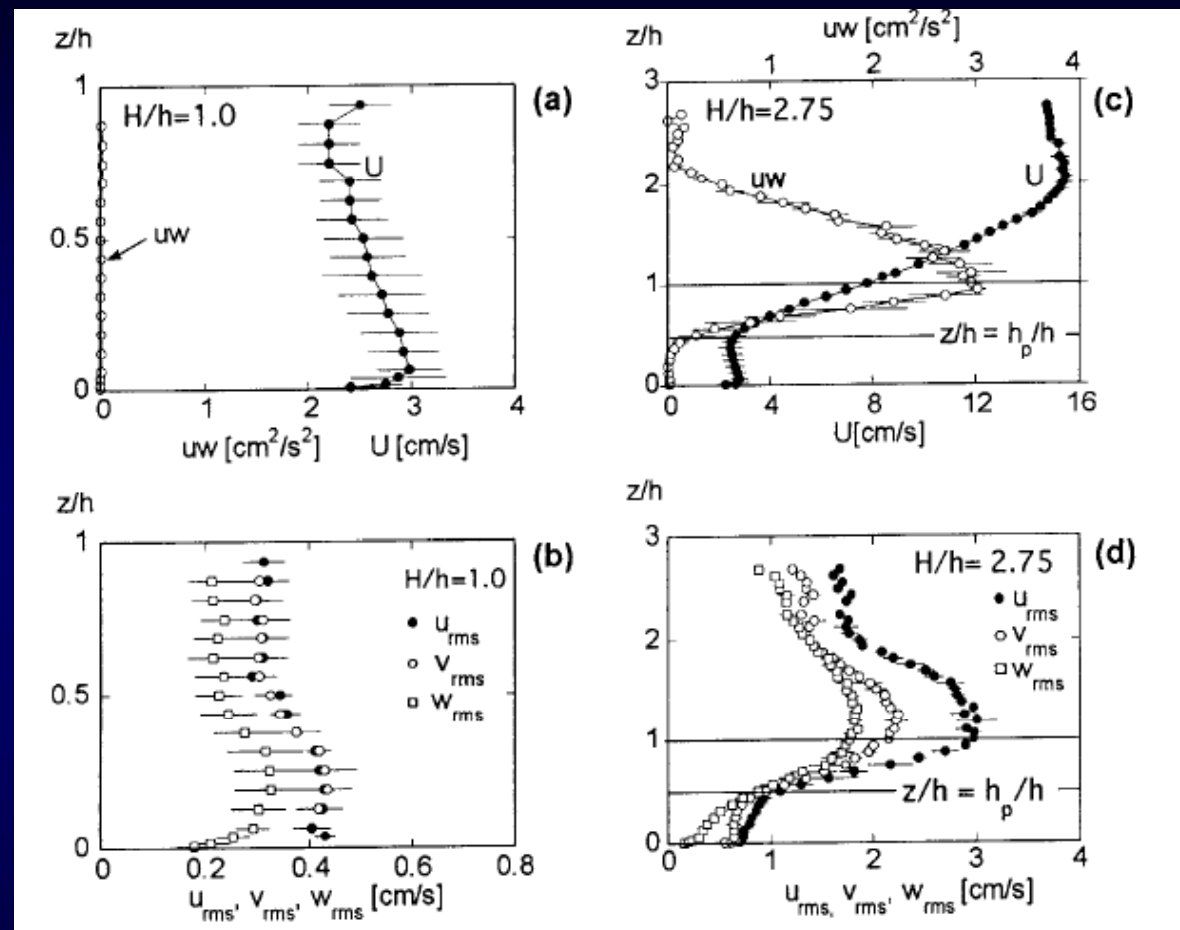


Figure 1. Velocity profiles, $U(z)$, for three depth ratios, H/h , where H is water depth and h is canopy height. (a) Terrestrial canopies represent the unconfined limit, $H/h \rightarrow \infty$, for which vertical turbulent transport of momentum from overlying flow controls flow within the canopy. (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.

平均流速, 乱れのせん断応力, および乱れのrms



Emergent canopy

Submerged canopy

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.

流れに対する植生の揺動(藻波) およびReynolds せん断応力

Flow and transport in channels
with submerged vegetation

Heidi NEPF¹ and Marco GHISALBERTI²

Acta Geophysica

vol. 56, no. 3, pp. 753-777
DOI: 10.2478/s11600-008-0017-y

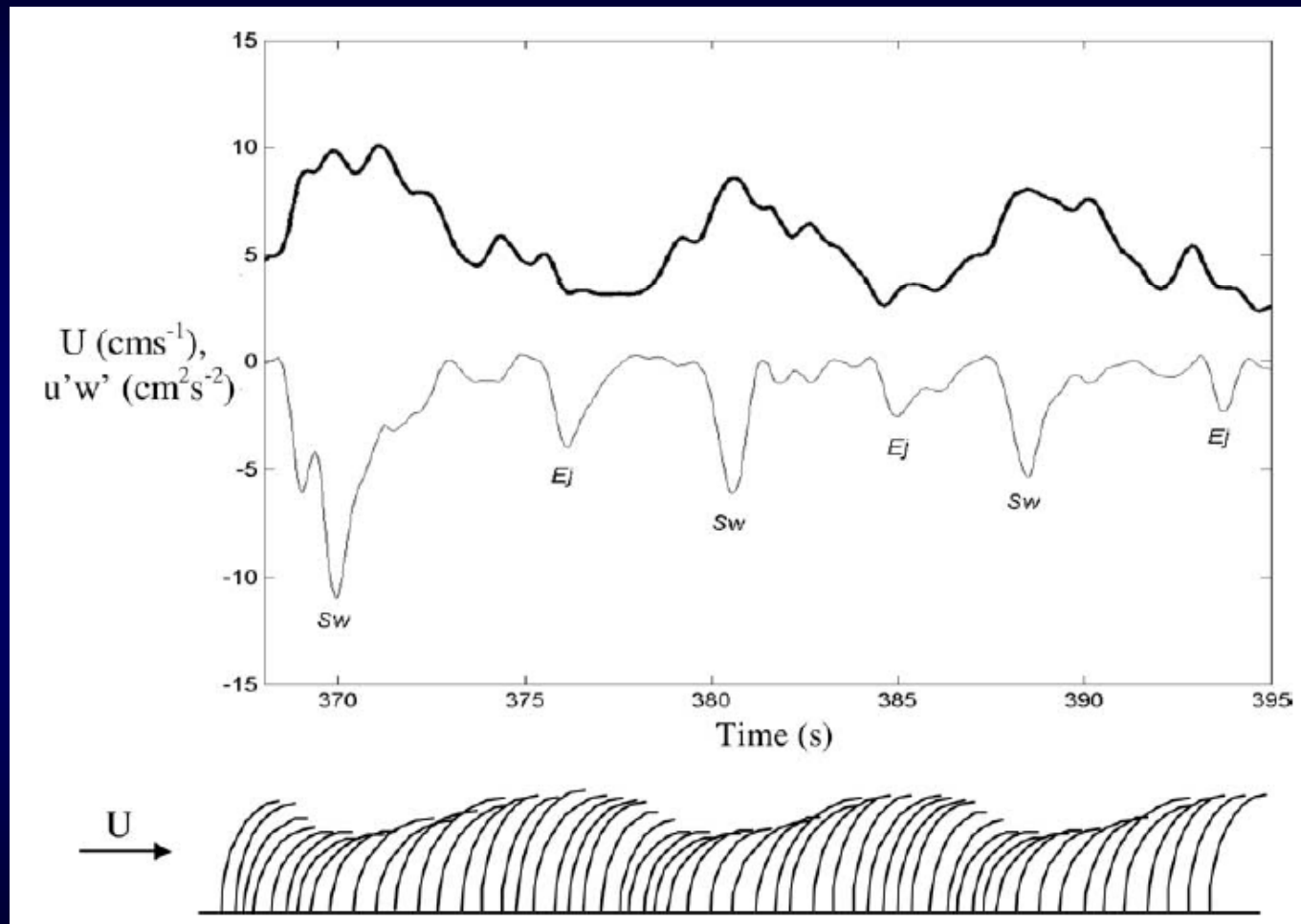


Figure 9. One-second moving averages of strongly oscillatory streamwise velocity (bold line) and Reynolds stress (thin line) records taken at $z/h_d = 0.93$ in scenario G. Strong Reynolds stress events are marked Sw (sweep) ($u' > 0$, $w' < 0$) and Ej (ejection) ($u' < 0$, $w' > 0$). The cartoon depicts the plant response to the flow velocity, which oscillates about a mean of 5.1 cm s^{-1} .

藻波を伴うせん断層と自由せん断層との比較

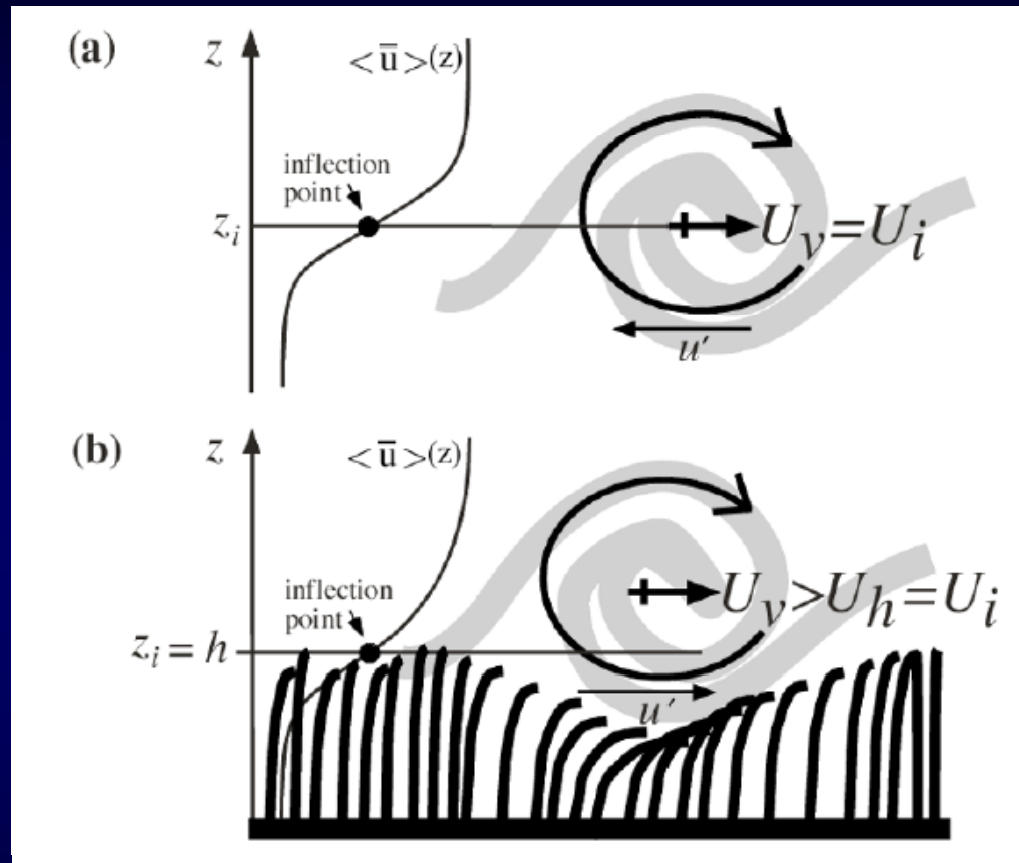


Fig. 4. Comparison of (a) free shear layer (FSL) and (b) canopy shear layer (CSL) vortices. The vortices translate with speed U_v , which is defined by the time required, T , for the vortex center to move distance L downstream, $U_v = L/T$. (a) In a FSL the vortex is symmetric about the inflection point, 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, $U_v > U_h = U_i = \langle \bar{u} \rangle_{z=h}$.

Reynolds せん断応力の鉛直分布

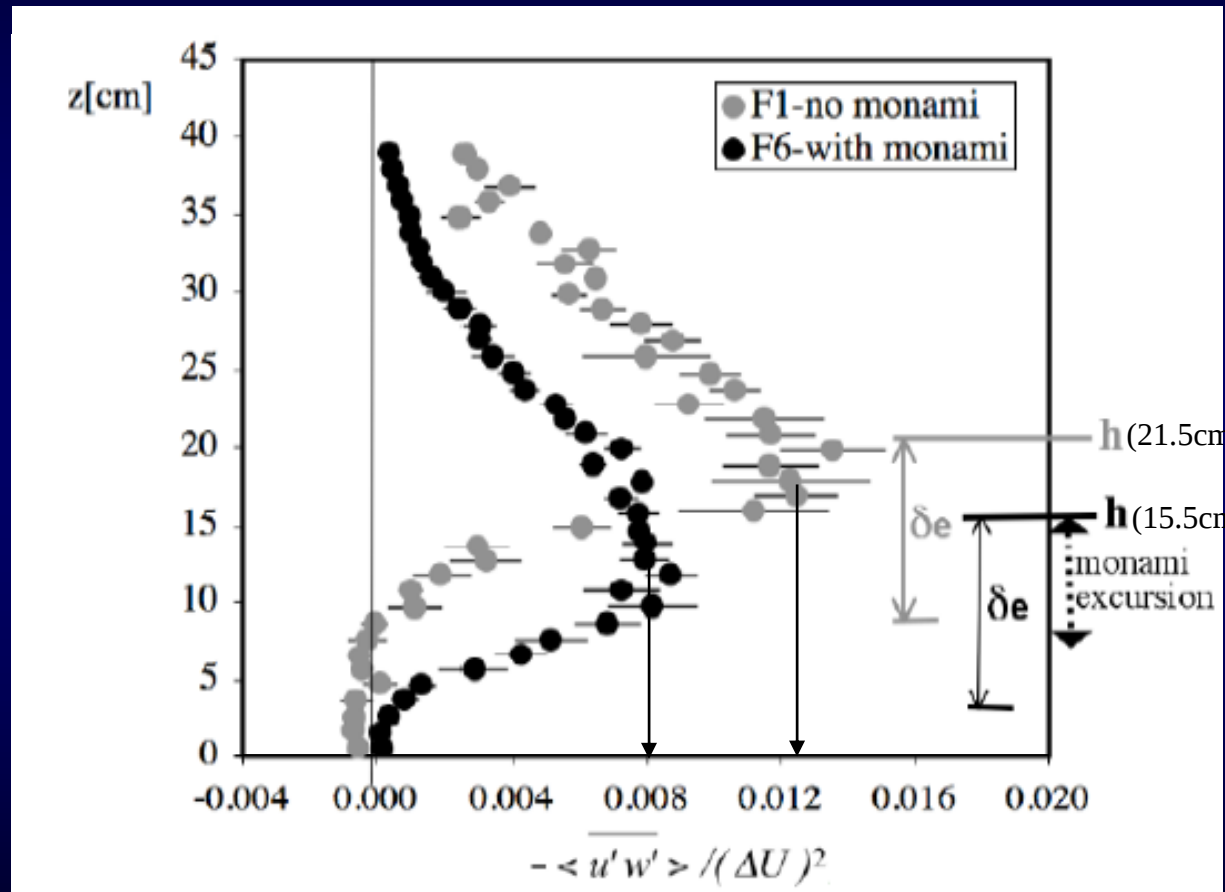


Fig. 5. Profiles of normalized turbulent stress measured in and above a flexible canopy under two flow conditions; with (F6) and without (F1) canopy waving, termed *monami*.

沈水性植物群落における主流速の鉛直分布

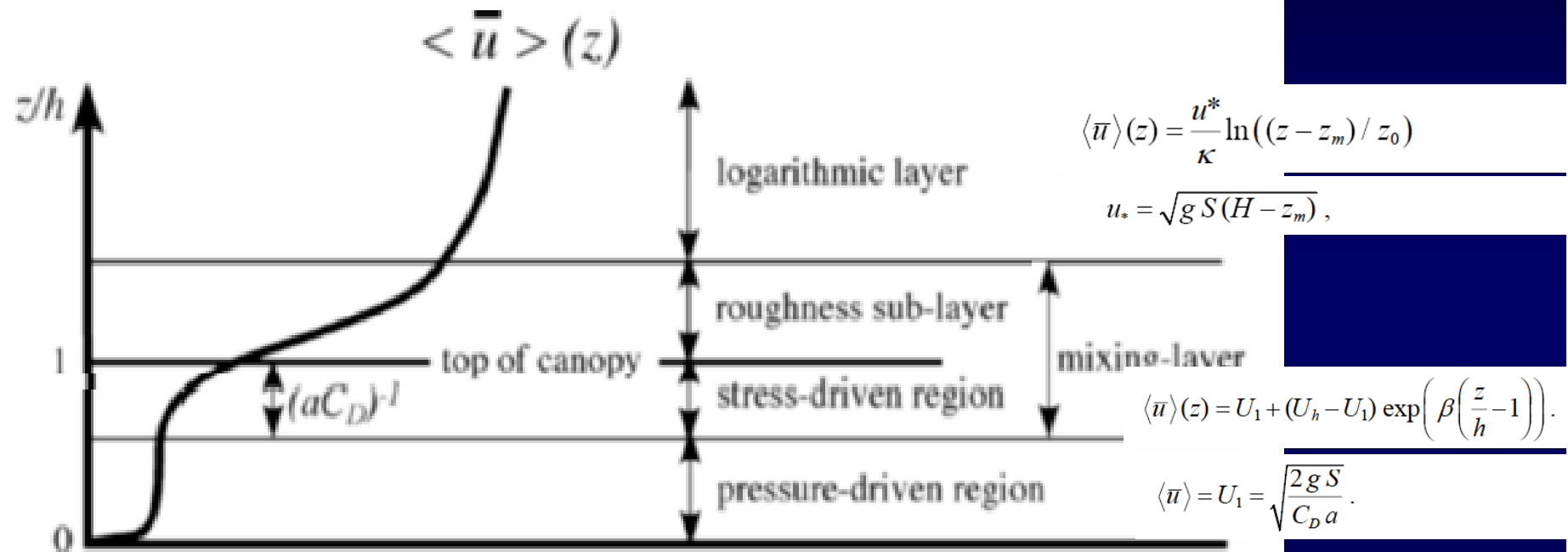


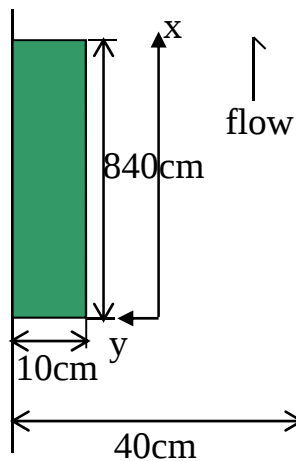
Figure 6.9: Velocity profile in and above a submerged canopy. In the upper portion of the canopy flow is predominantly driven by turbulent *stress*, which penetrates downward into the canopy over attenuation scale $(aC_D)^{-1}$. Below this flow is driven by potential gradients due to bed- or pressure gradients. At the top of the canopy the discontinuity in drag generates a mixing-layer. Above this the profile transitions to a logarithmic boundary layer profile.

2. 種々の植生配置における流れの抵抗特性

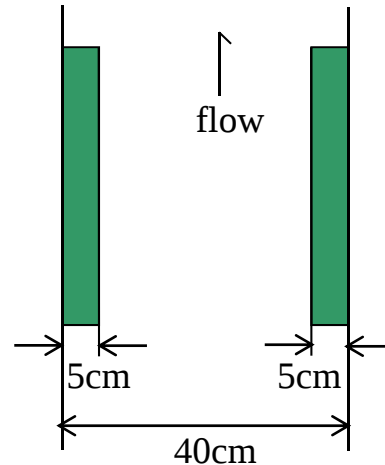
研究目的

流下方向に連なった有限幅の植生群落を有する開水路流れにおいて、様々な植生配置における流れの抵抗特性と表面流況について検討を行う。

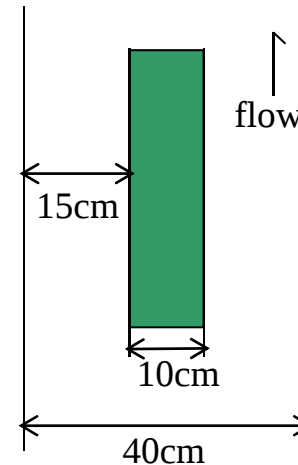
実験条件



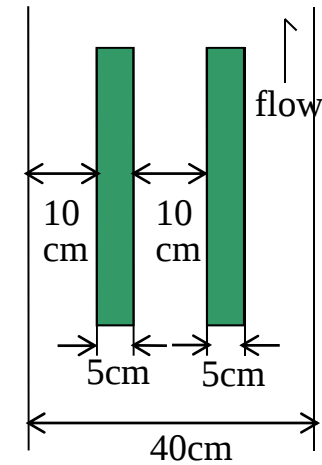
Pattern 1



Pattern 2



Pattern 3



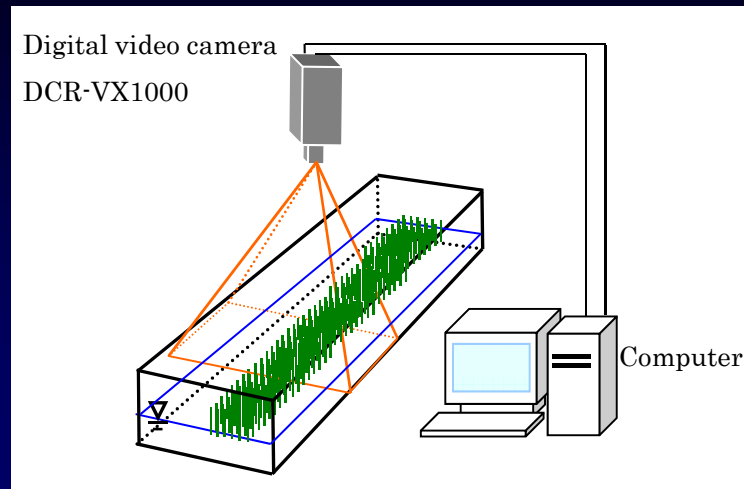
Pattern 4

実験水路概要

実験条件

Pattern	Bed slope I		Vegetation height H_v (cm)	Vegetation diameter d (mm)	Vegetation width B_v (cm)	Vegetation material
	1/1,000	1/500, 1/300				
	Flow Discharge Q (l/s)					
1~4	1~8	1~13	7.5	0.242	10	nylon strings

実験方法・装置



ビデオ撮影によるPIV (Particle image velocimetry)システム

＜模擬植生について＞

対象:ヨシなどの植生高さの高い草本類

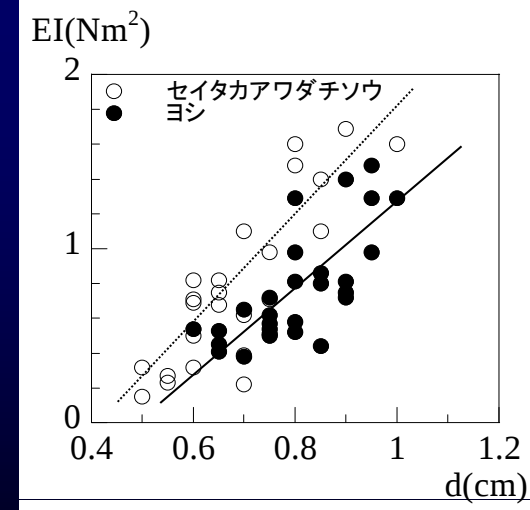
模擬植生: 直径0.242mm

曲げ剛性 $EI=1.45 \times 10^4 \text{ gf} \cdot \text{cm}^2$
 $=1.45 \times 10^{-2} \text{ N} \cdot \text{m}^2$

中川ら(1995):実河川(木津川, 桂川)の河川敷に生息するヨシ, セイタカアワダチソウの剛性, 密生度を調査した.

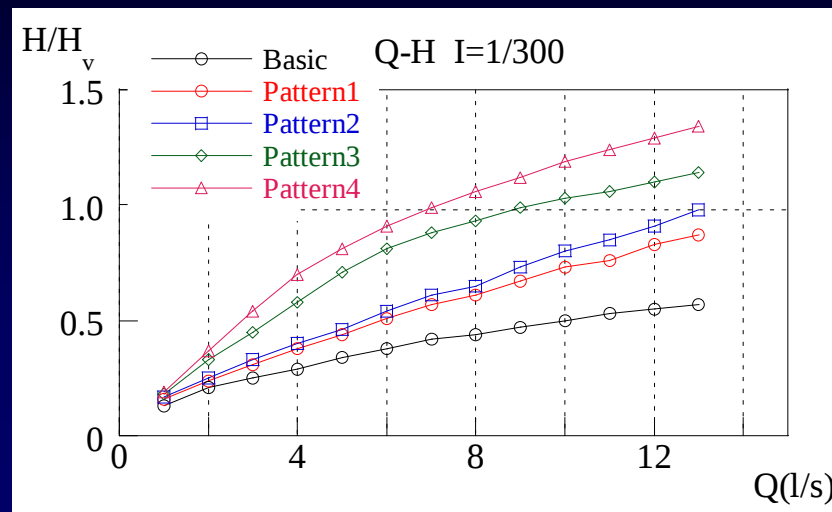
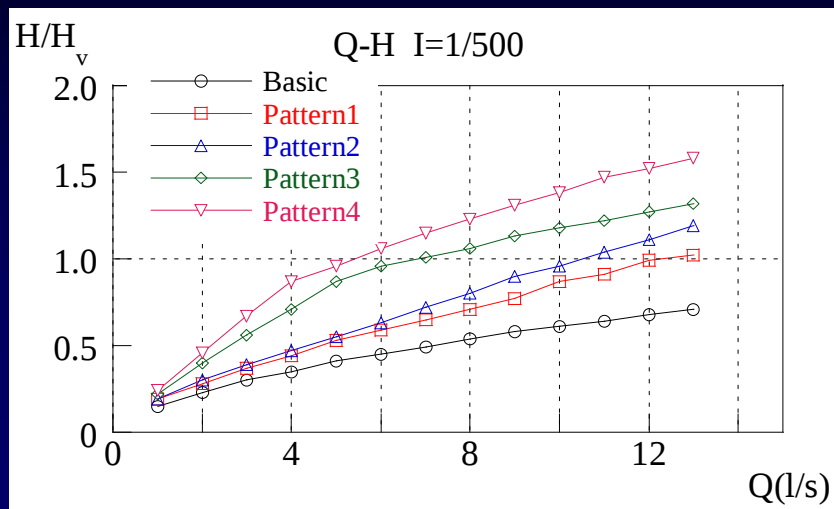
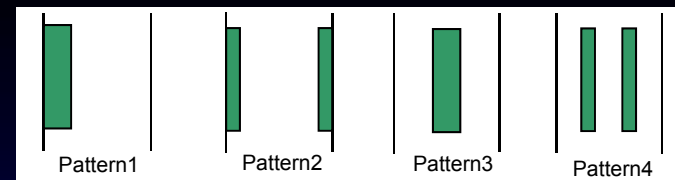


模擬植生

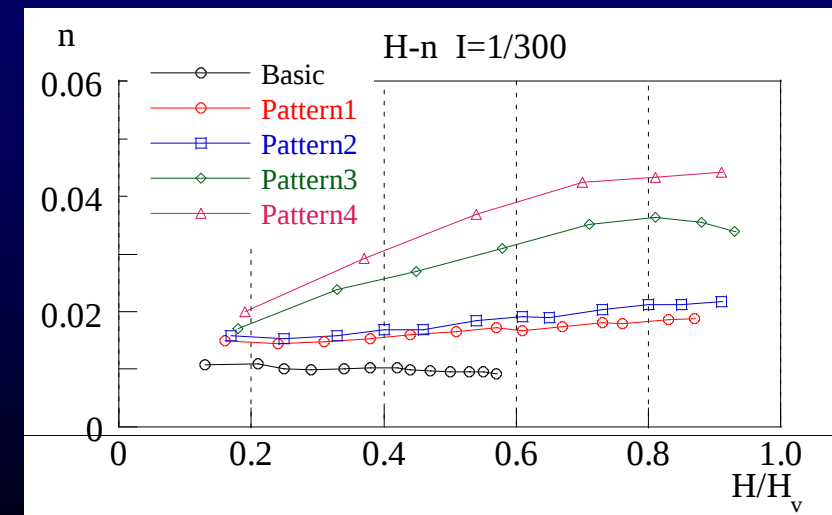
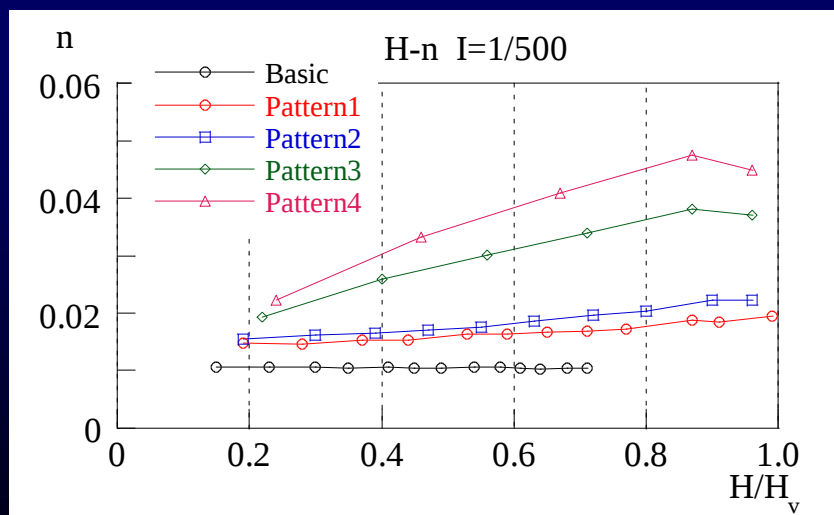


植生の直径と剛性の関係

各植生配置における流れの抵抗特性(1)



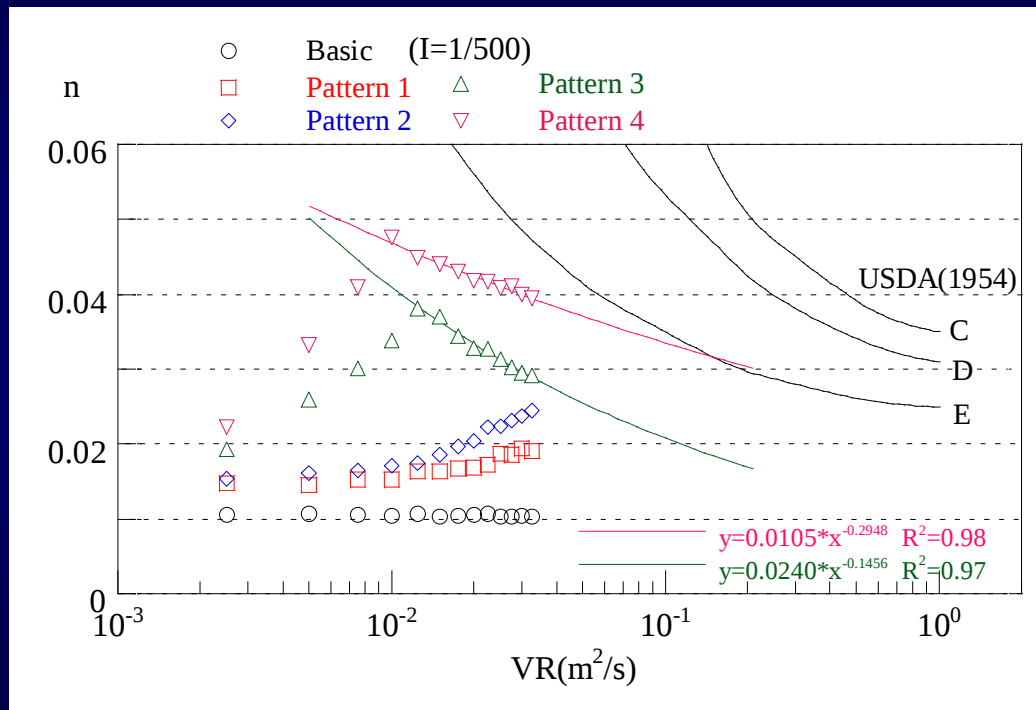
流量 - 水深曲線



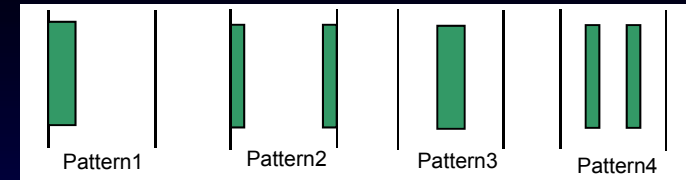
水深 - 粗度係数曲線

各植生配置における流れの抵抗特性(2)

<n-VR曲線>



n-VR曲線 (※ V:時間平均流速, R:径深)



USDA(アメリカ農務省:1954)における
植生高さに注目した植生種の分類

Average grass length	Grass retardance categories
150 mm to 250 mm	C
50 mm to 150mm	D
Less than 50 mm	E

各植生配置における流れの抵抗特性(3)

<レイノルズ数と抗力係数の関係>

流れ方向における重力 F_G

$$F_G = \rho g (AL) I$$

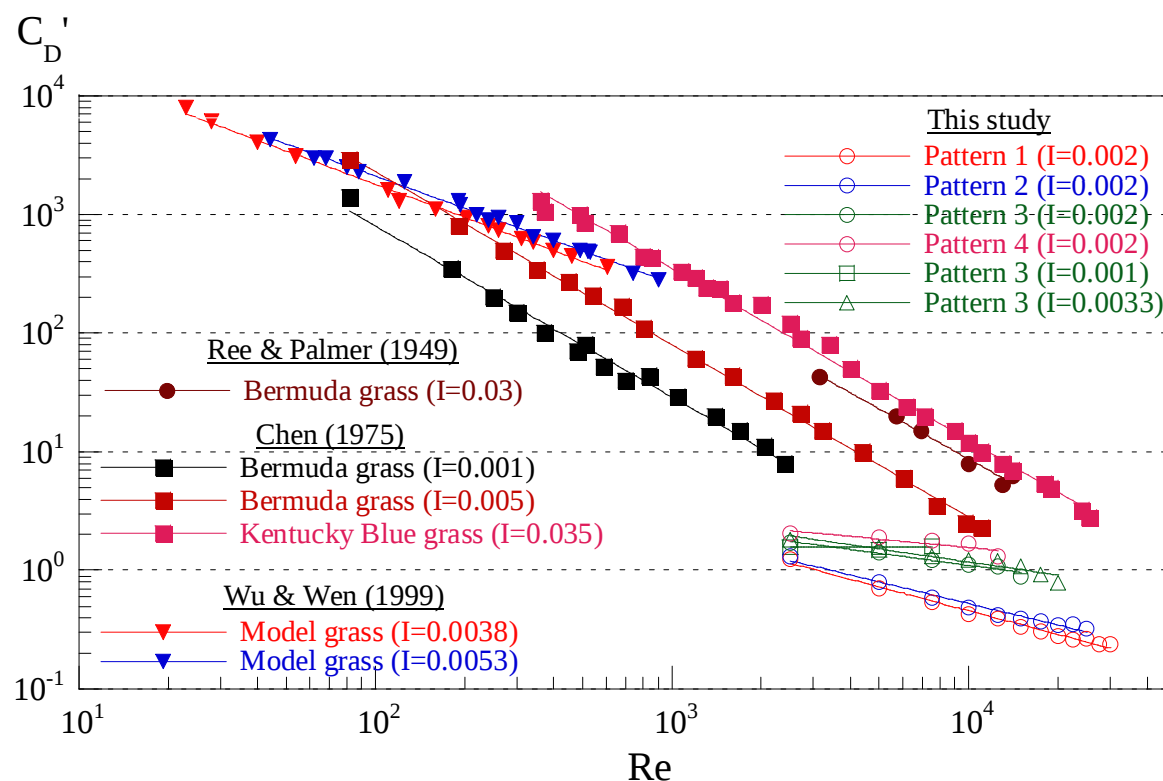
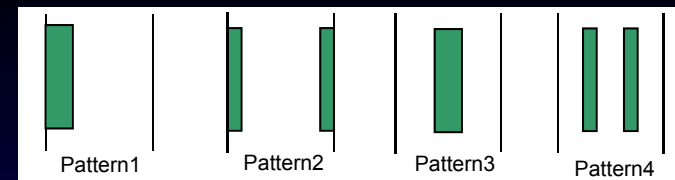
植生による抗力 F_D

$$F_D = C_D (\lambda AL) \frac{\rho U_m^2}{2}$$

C_D : 抗力係数 A : 流積
 λ : 植生面積係数 ρ : 水の密度
 L : 等流場の流下方向長さ

$F_D = F_G$ より(Fenzlら:1962),
 植生による抗力係数 C_D'

$$C_D' = \frac{2gI}{U_m^2}$$



非越流状態におけるレイノルズ数 Re と
 抗力係数 C_D' の関係

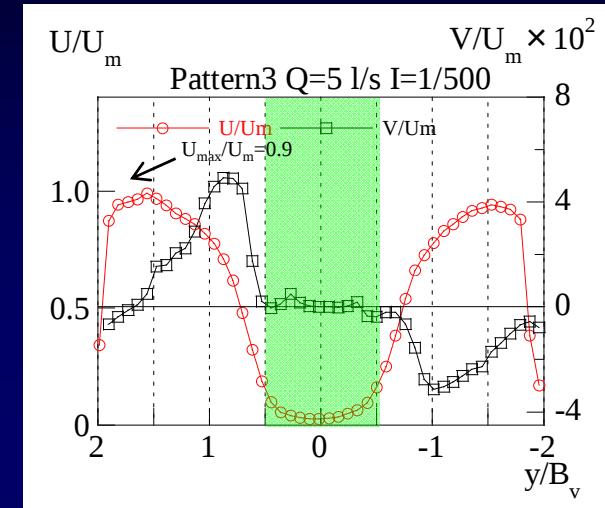
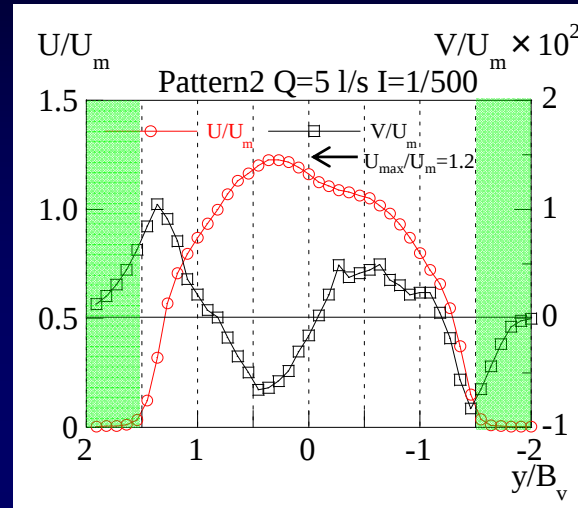
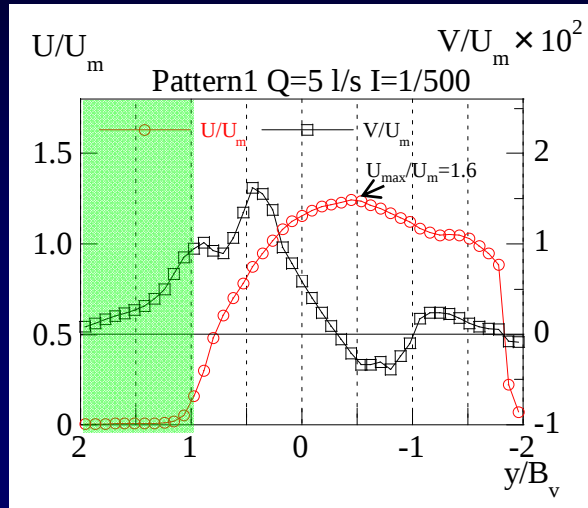
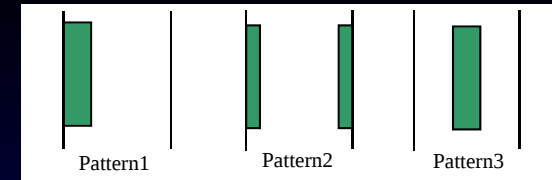
※Bermuda grass(ギョウギシバ)

※Kentucky Blue grass(ナガハグサ)

表面流況

<時間平均流速>

植生域



主流速Uと横断方向流速Vの横断方向分布(非越流状態)

<見かけのせん断力>

$$T = \sum_{i=1}^n \tau_v \cdot H$$

n: 非植生域と植生域の境界面の数

τ_v : 境界せん断力

	Pattern1	Pattern2	Pattern3
単位長さ当りのせん断力 [g/(cm·s ²)·cm]	3.4	37.9	133.0

約4倍

約10倍

約40倍

2. まとめ

植生群落の配置の違いによる抵抗特性とその流動機構について検討した結果、

- ・抵抗特性を粗度係数 n などを用いて評価すると、植生帯を横断する流れを両境界で許容するような植生配置では、片岸や両岸に配置する場合に比べ流れの抵抗が大きくなることが明らかとなった。
- ・既往の植生流れの抵抗特性に関する研究と比較すると、USDAにおける n -VR曲線は越流状態および植生が河床に一面に繁茂した状態にのみ適用できること、抗力係数は水路勾配やレイノルズ数に依存することが認められた。
- ・流れの抵抗特性を平衡状態における流下方向の単位長さあたりに働くせん断力により表現すると、片岸配置に比べ両岸配置は約10倍、中央1列配置は約40倍もの値を示す。

3. 水路中央に植生群落を有する 開水路流れの流動機構

研究目的

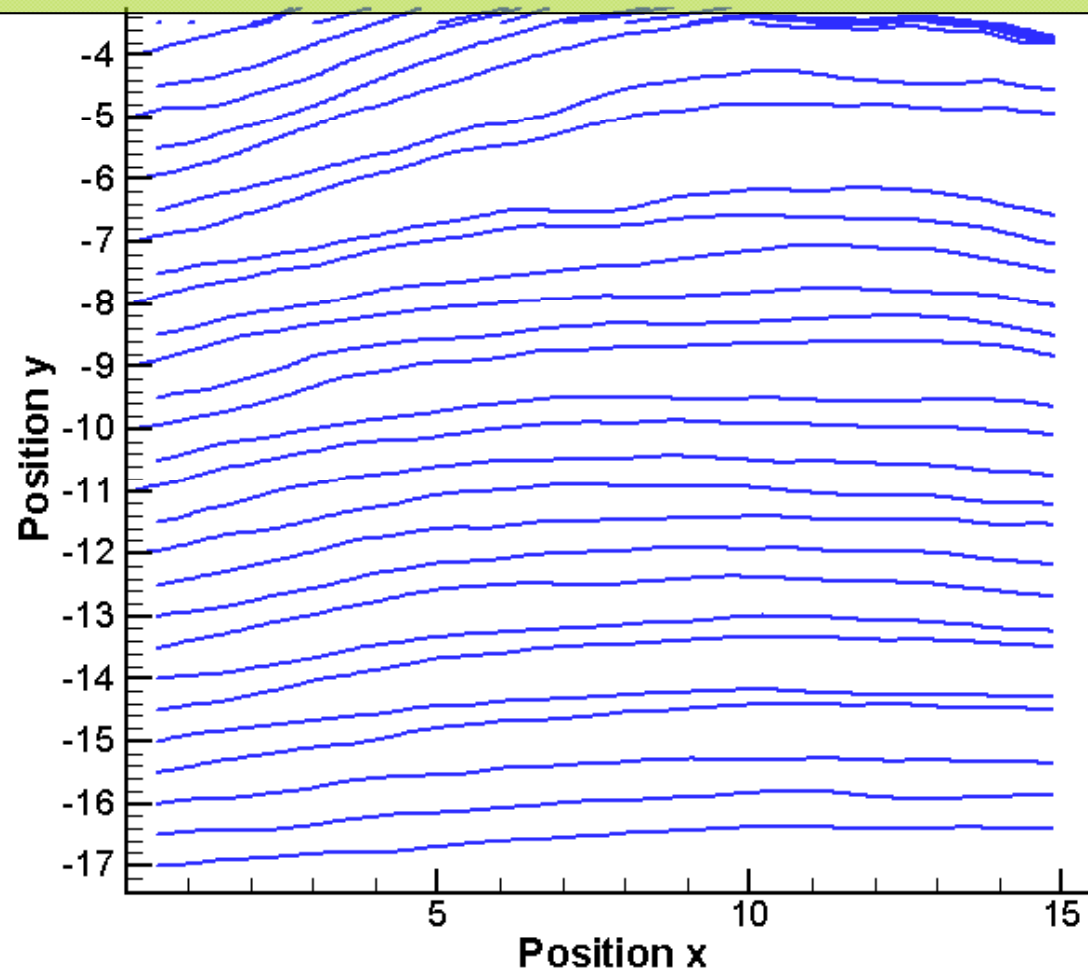
水路中央に有限幅の植生群落を有する流れの流動機構について検討し、さらに遮断板により植生群落を横断する流れを遮断することで、植生群落を横断する流れが水面変動や運動量輸送に与える影響について検討を行う。

水平面における瞬間流線 (Run1 柔軟 非越流)

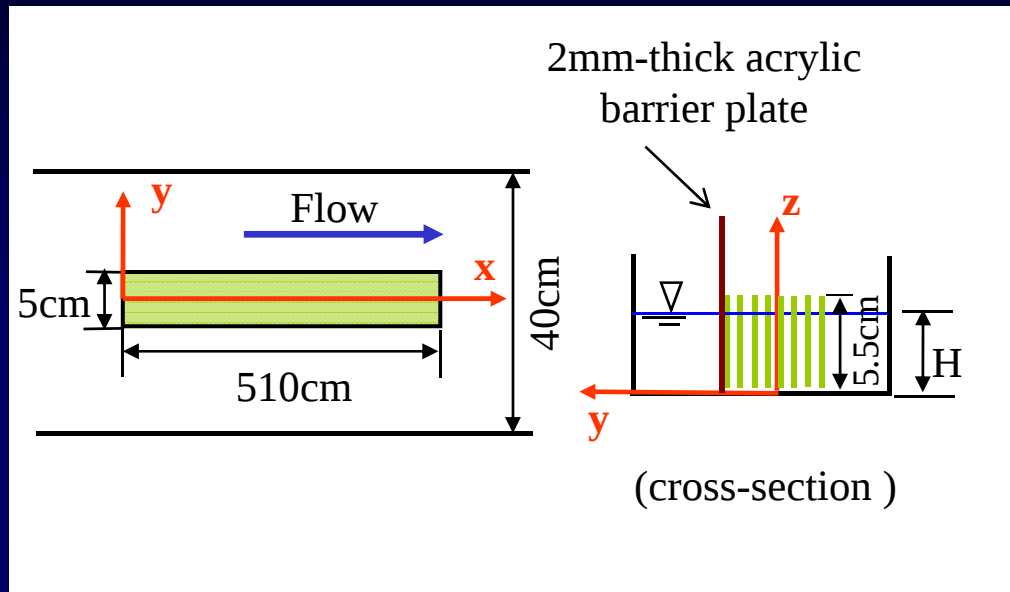
Flow



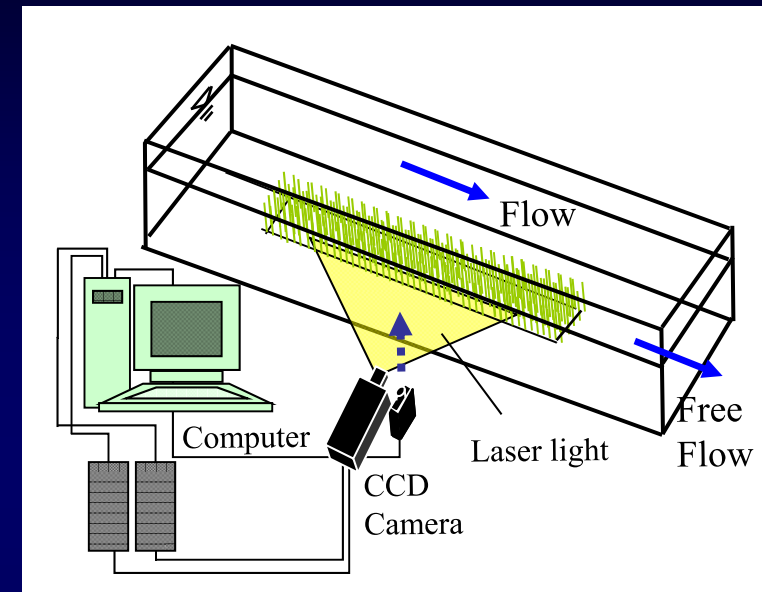
植生帯



実験条件



実験水路概要



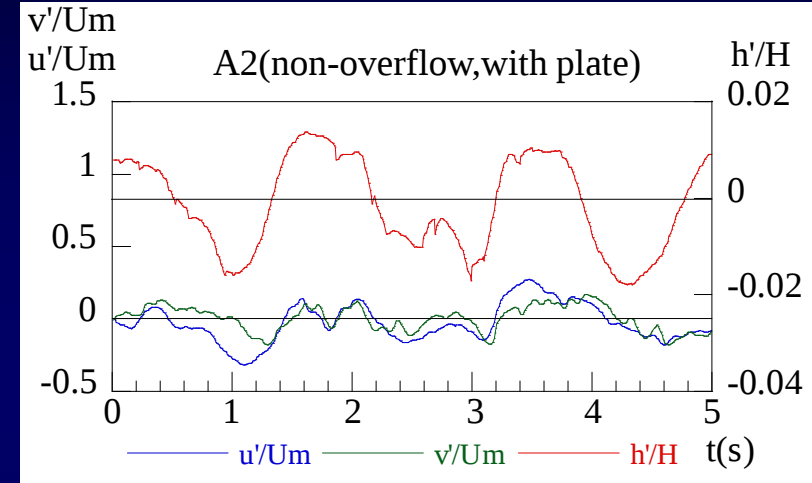
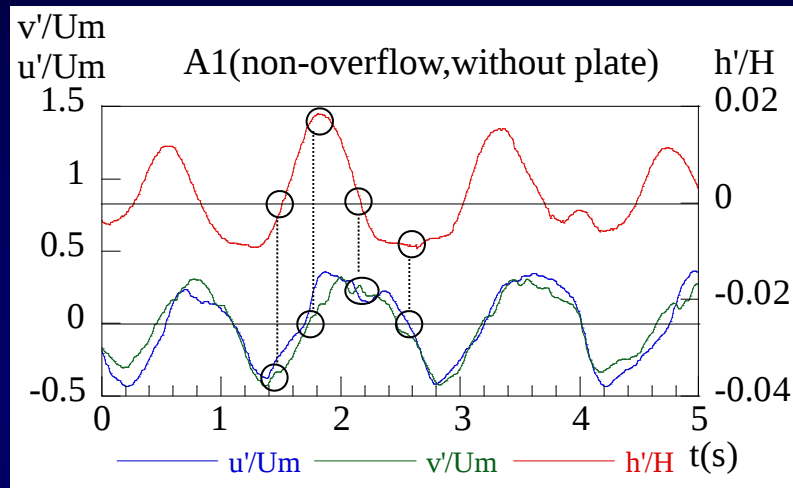
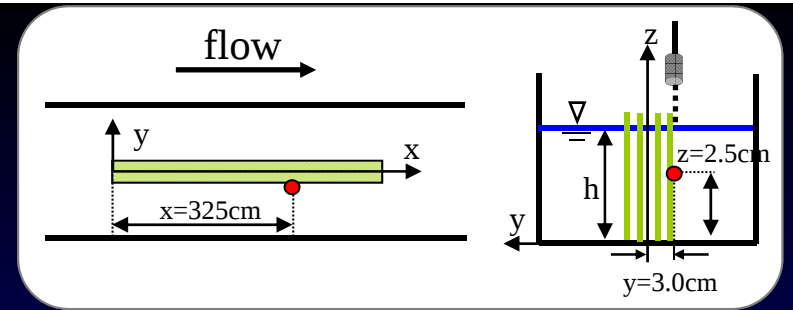
PIV システム

実験条件

Case	Flow Discharge Q (l/s)	Flow depth H (cm)	Mean cross-section velocity U_m (cm/s)	Barrier plate	Bed slope I	Vegetation height H_v (cm)	Vegetation diameter d (mm)	Froude number Fr	Reynolds number Re
A1	5.6	5	28.0	without barrier plate	1/1000	5.5	0.242	0.40	12000
A2	5.6	4.4	31.8	with barrier plate	1/1000	5.5	0.242	0.48	12000
B1	12.4	8.5	36.5	without barrier plate	1/1000	5.5	0.242	0.40	27000
B2	12.4	8.3	37.3	with barrier plate	1/1000	5.5	0.242	0.41	27000

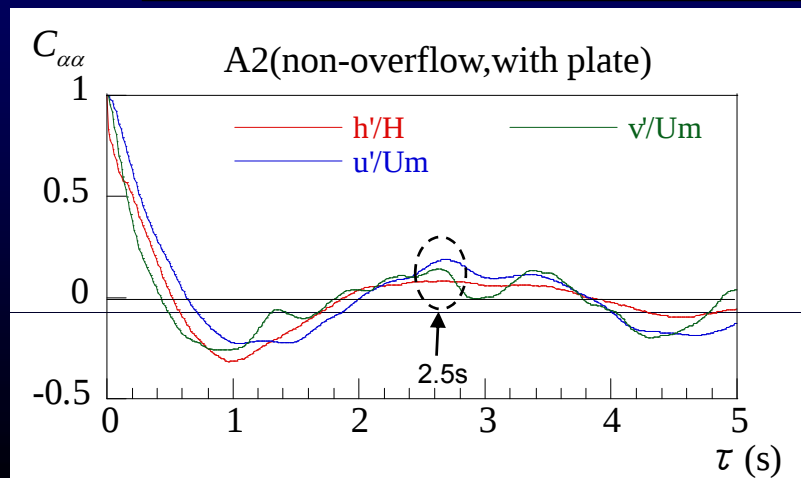
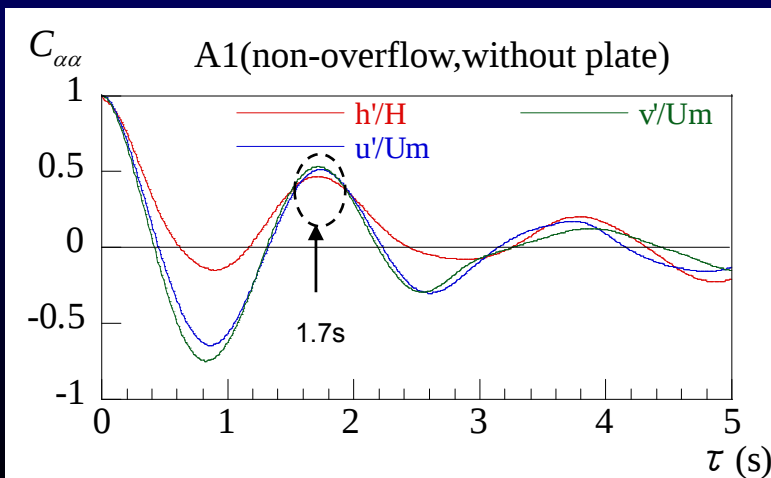
水面変動と流速変動の同時計測

＜水面変動と流速変動の時系列＞

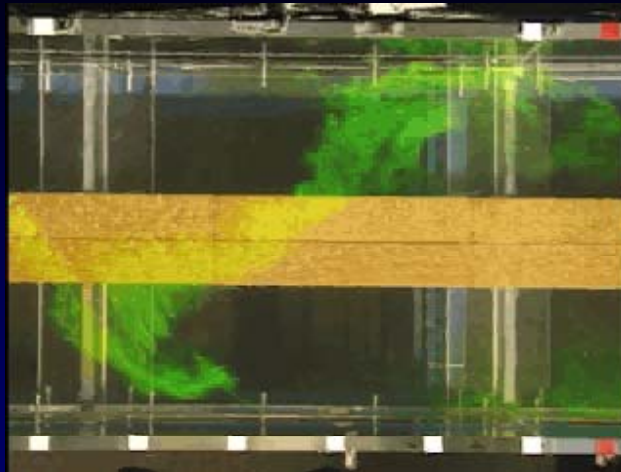


＜水面変動と流速変動の自己相関係数＞

$$C_{\alpha\alpha}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \alpha(t) \alpha(t + \tau) dt$$

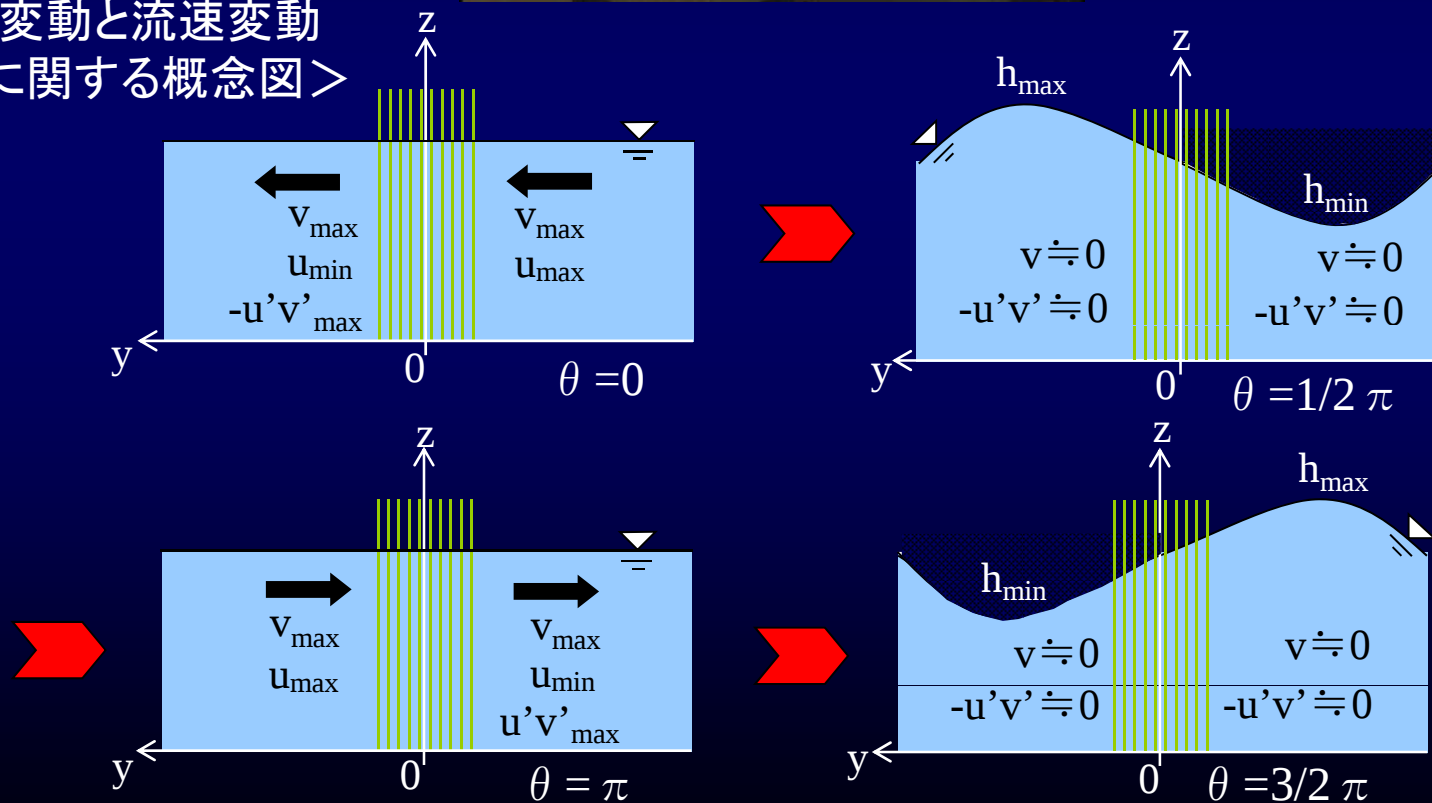


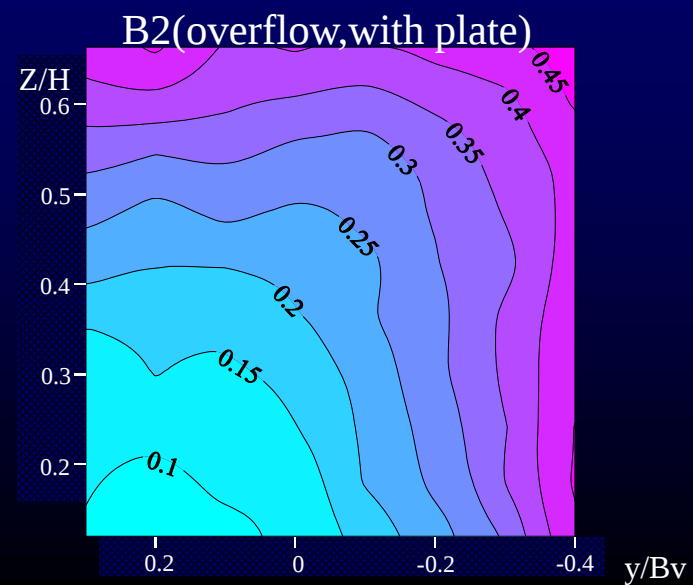
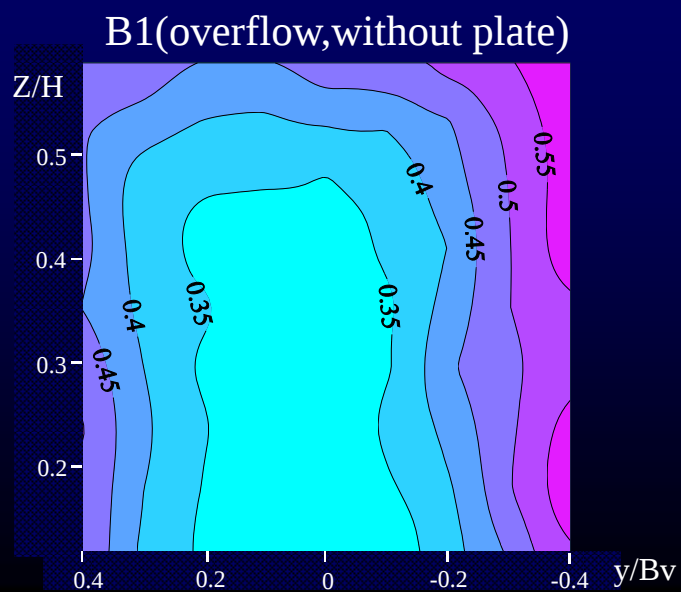
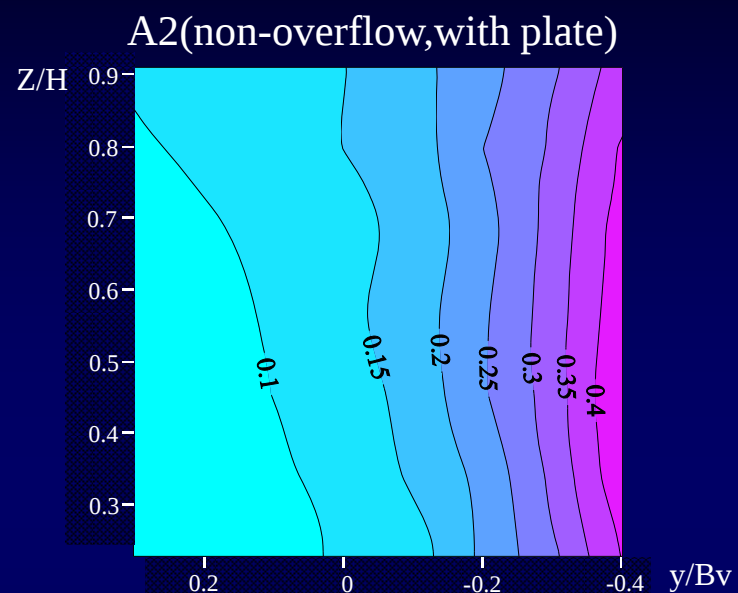
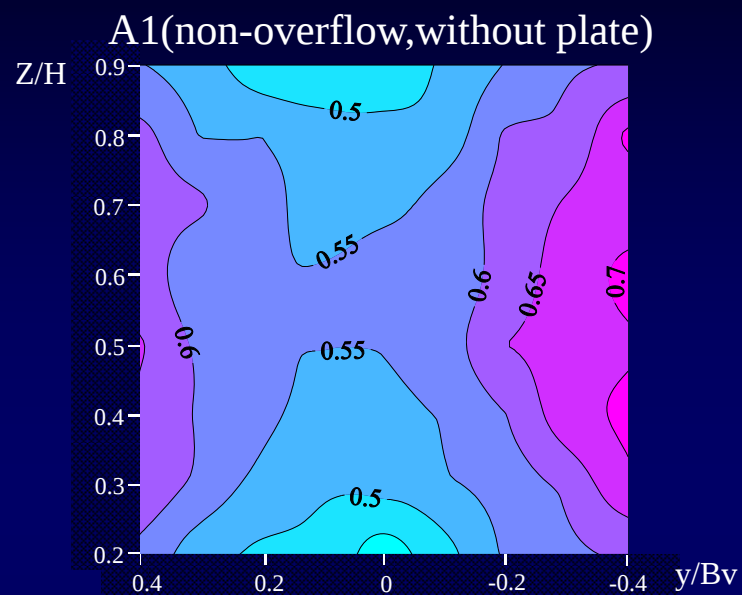
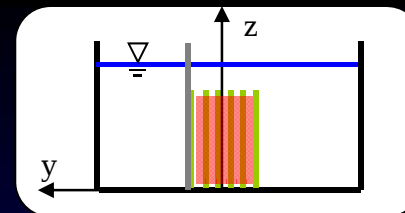
水面変動と流速変動 の関係



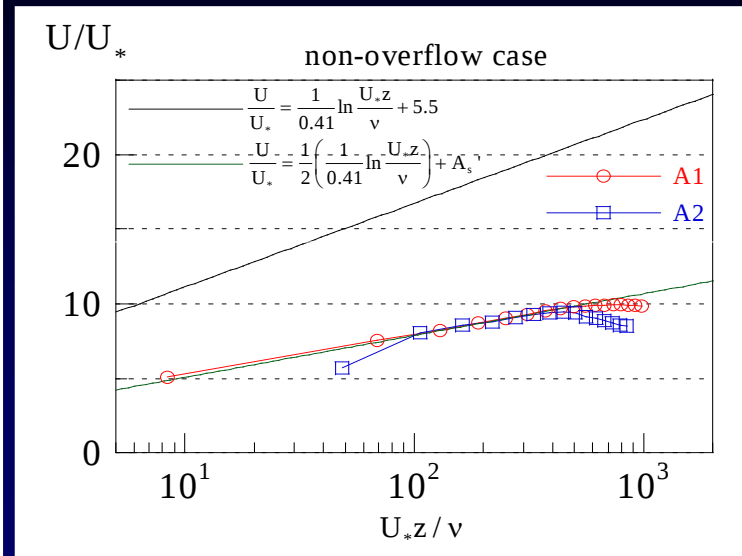
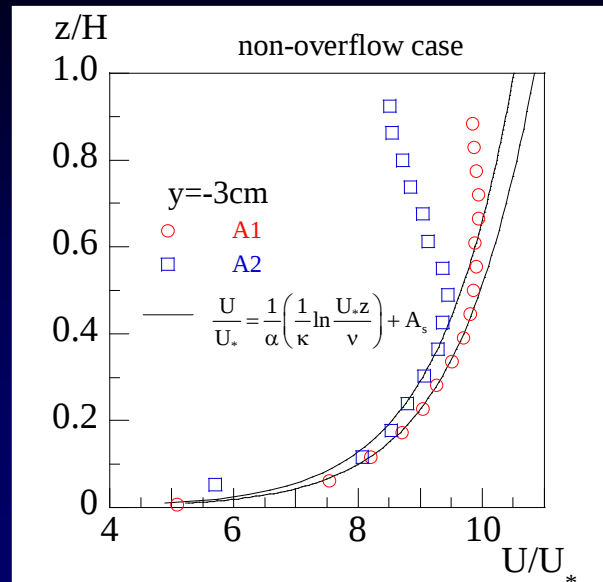
可視化実験

＜水面変動と流速変動
に関する概念図＞

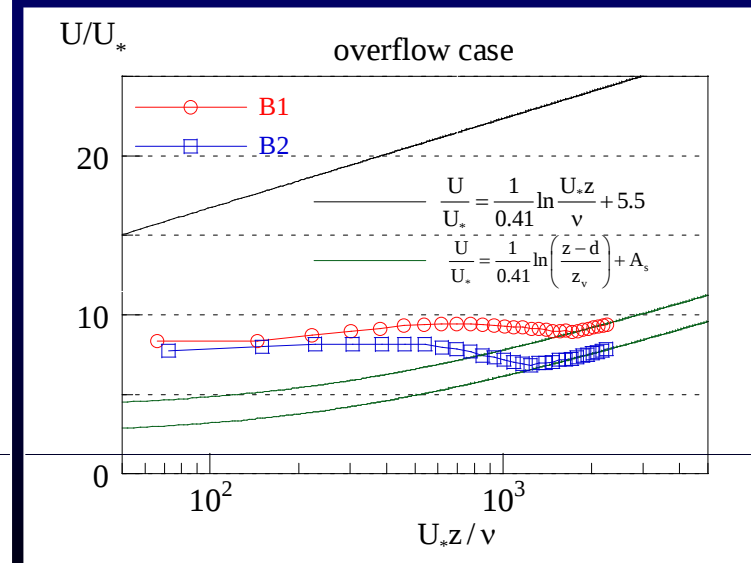
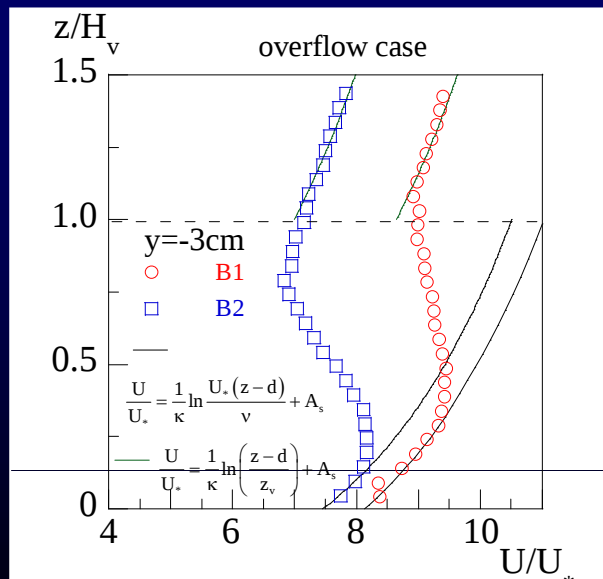




主流速の鉛直方向分布



非越流状態



越流状態

滑面における対数則

$$\frac{U}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{U_* z}{\nu} + A_s$$

非越流状態の植生帯境界における対数則

$$\frac{U}{U_*} = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{1}{\kappa} \ln \frac{U_* z}{\nu} \right) + A_s$$

粗面における対数則

$$\frac{U}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{z-d}{z_v} \right) + A_s$$

U_* : 摩擦速度 ν : 動粘性係数

k : カルマン定数(0.41)

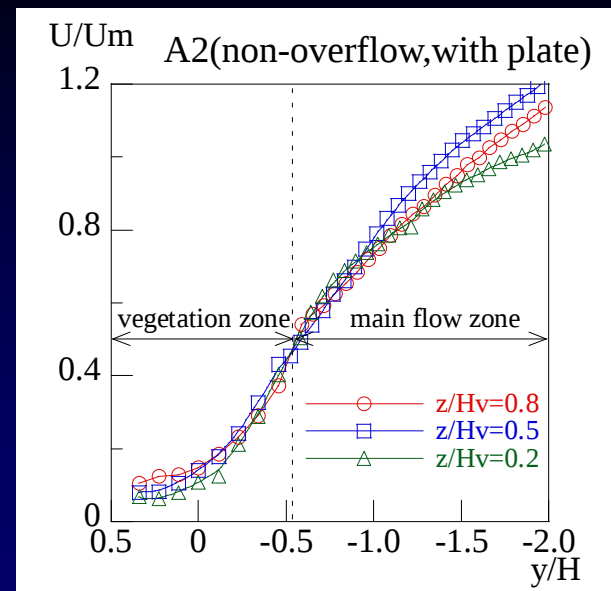
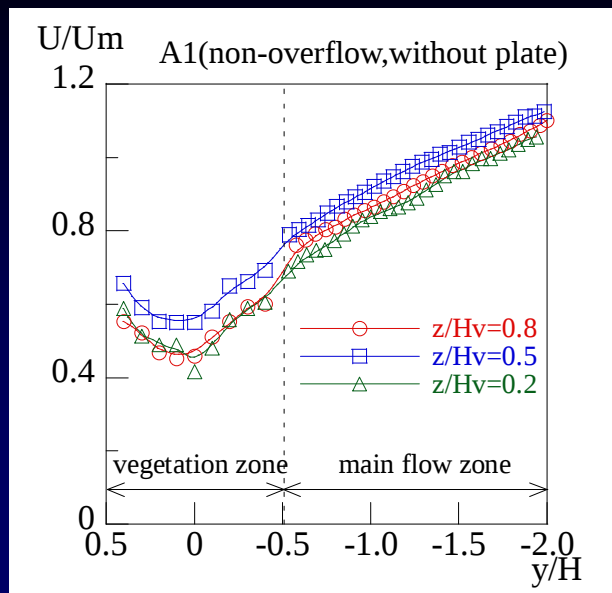
A_s : 定数(滑面:5.5, 粗面:8.5)

α : 定数(植生帯境界からの距離に依存)

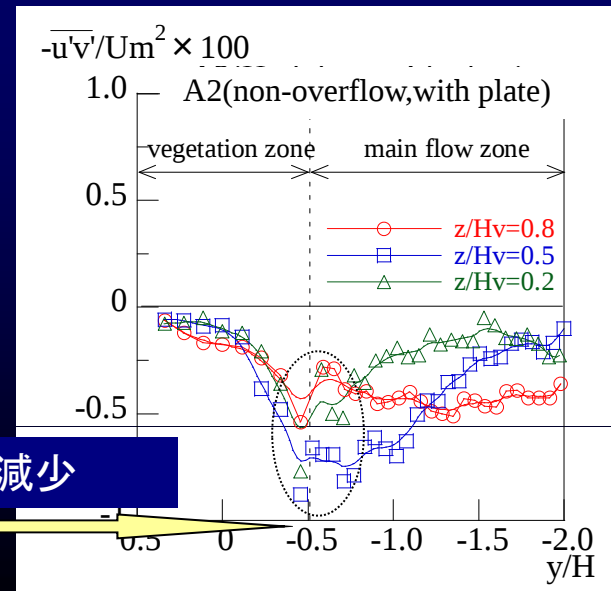
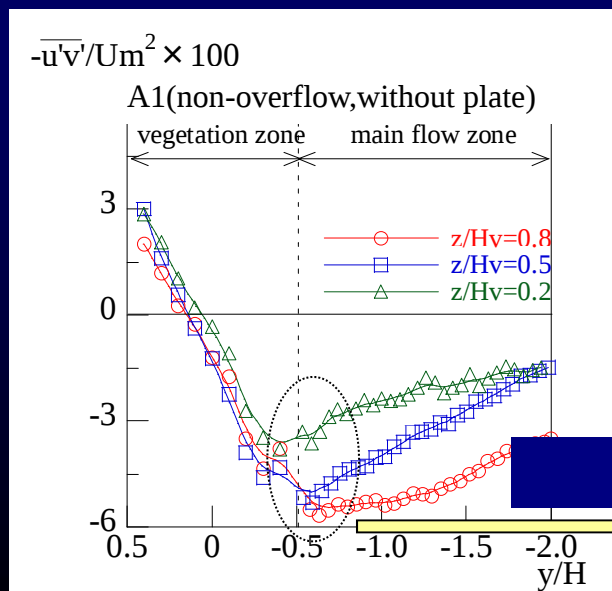
d : 原点補正量

z_d : 粗度高

主流速の横断方向分布 U/U_m



レイノルズ応力の横断方向分布 $-\overline{u'v'}/U_m^2$



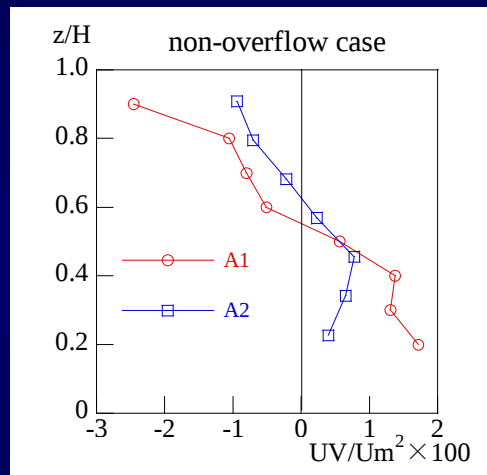
約80%減少

植生帯境界における運動量輸送

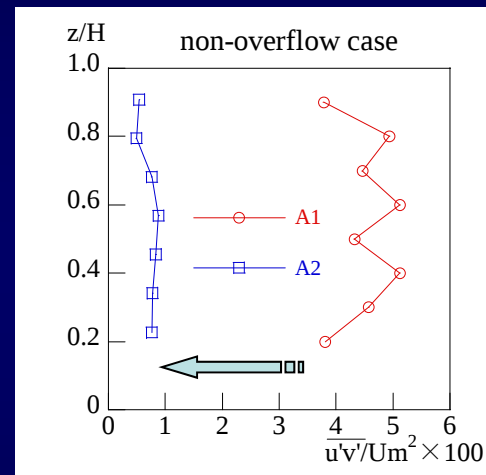
$$\overline{uv} = \overline{(U + u')(V + v')} \quad UV : \text{移流による運動量輸送}$$

$$= UV + \overline{u'v'} \quad \overline{u'v'} : \text{流速変動による運動量輸送}$$

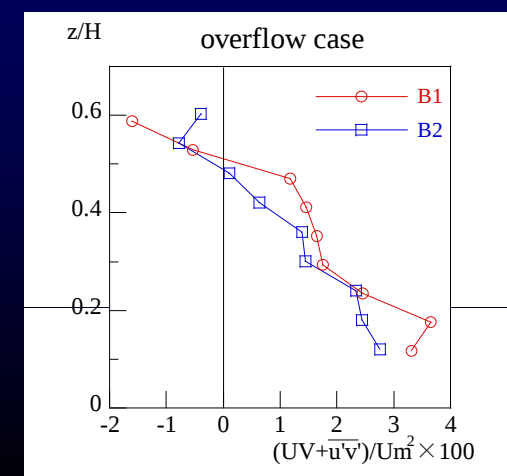
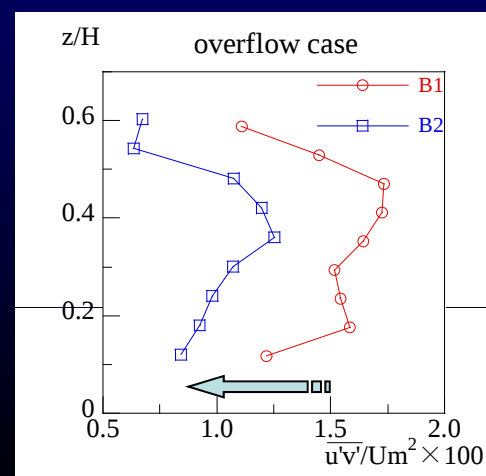
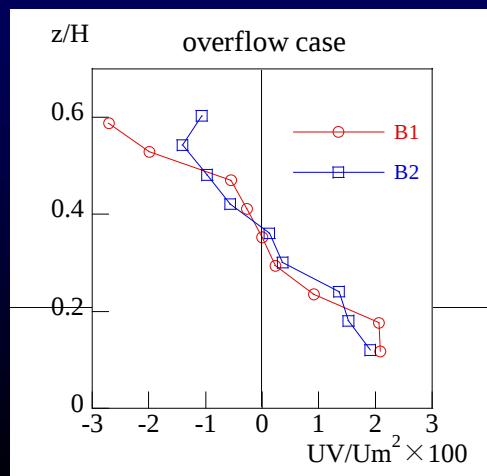
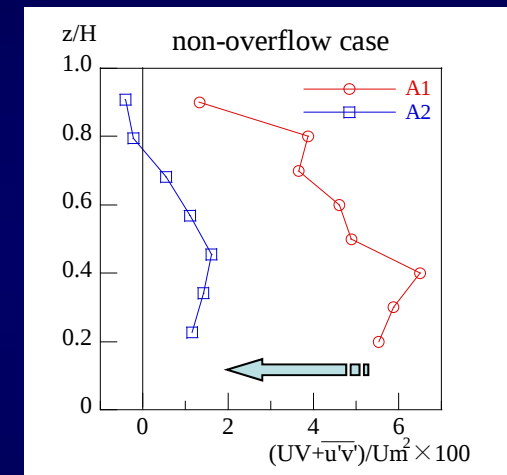
UV



$\overline{u'v'}$



$\overline{uv}$



植生帯内外の境界混合特性

植生帯境界に作用するせん断力

$$\tau_v = \rho f (\Delta U^2)$$

$$\Delta U = U_m - U_p$$

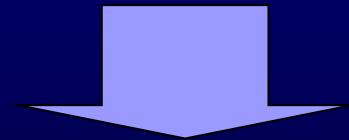
ρ : 水の密度

f : 混合の強さを表す境界混合係数

U_m : 主流部の平均流速

U_p : 植生帯内の平均流速

ここで、境界せん断応力 τ_v に実測した全運動量輸送 $\overline{uv}$ を代入



境界混合係数

	A1	A2	B1	B2
Boundary mixing coefficient f	0.146	0.011	0.036	0.017

約90%減少

約50%減少

3. まとめ

植生帯を横断する流れを遮断すると、

- ・ 非越流状態では水面変動の周期が長くなることが明らかになった。また、主流速方向の流速成分と横断方向の流速成分は周期性が弱まり、振幅は約50%程度低減する。また、遮断板を設置することにより水深が下がることがあきらかになった。
- ・ 移流による運動量輸送に比べ、流速変動による運動量輸送に大きな影響を与えることが認められた。それは特に非越流状態で顕著に見られる。
- ・ 植生帯境界における運動量輸送を境界混合係数によって定量的に評価すると、本実験条件においては非越流状態で約90%、越流状態で約50%の低減を示した。

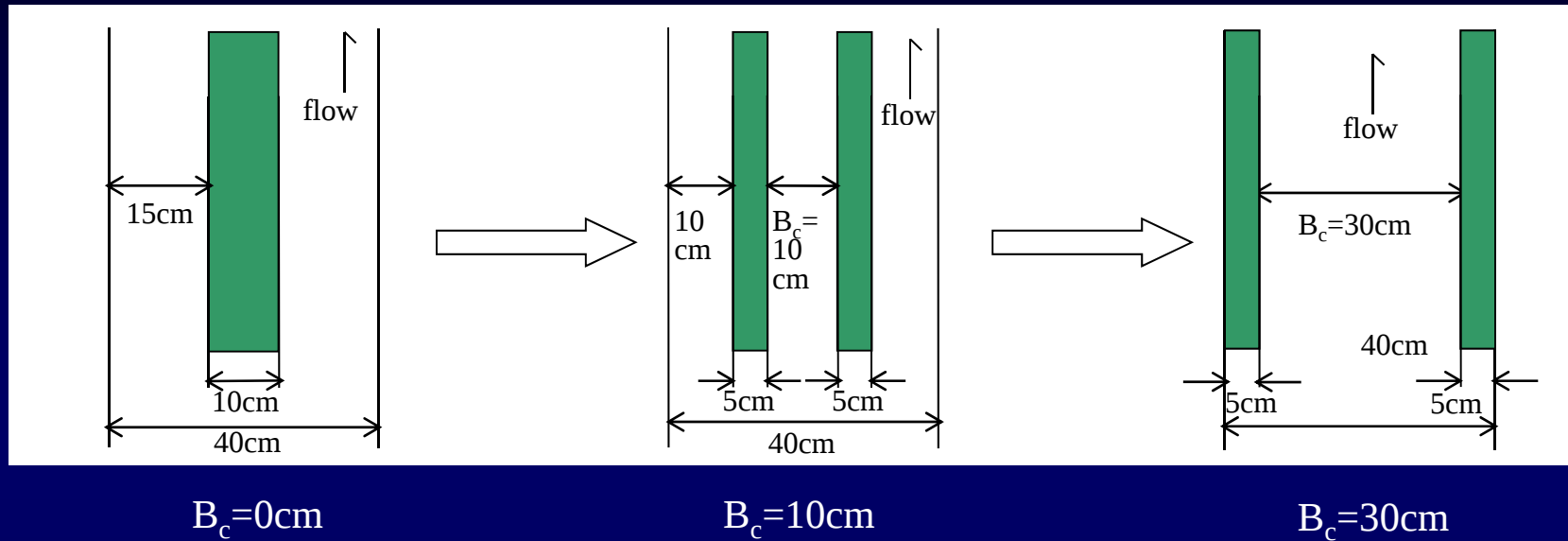
植生帯を横断する流れは、植生帯内外の質量および運動量輸送を促進することが明らかになった。

4. 植生群落を横断する流れの相互作用効果

研究目的

植生帯を横断方向に対称性を有するように2列に配置し、その植生帯の間隔を変化させることで、植生帯の間隔の違いによる流れの抵抗特性を把握し、さらに流動機構の検討を行うことで植生群落を横断する流れの相互作用効果を明らかにする。

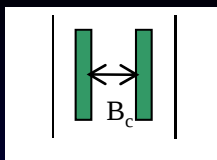
実験条件



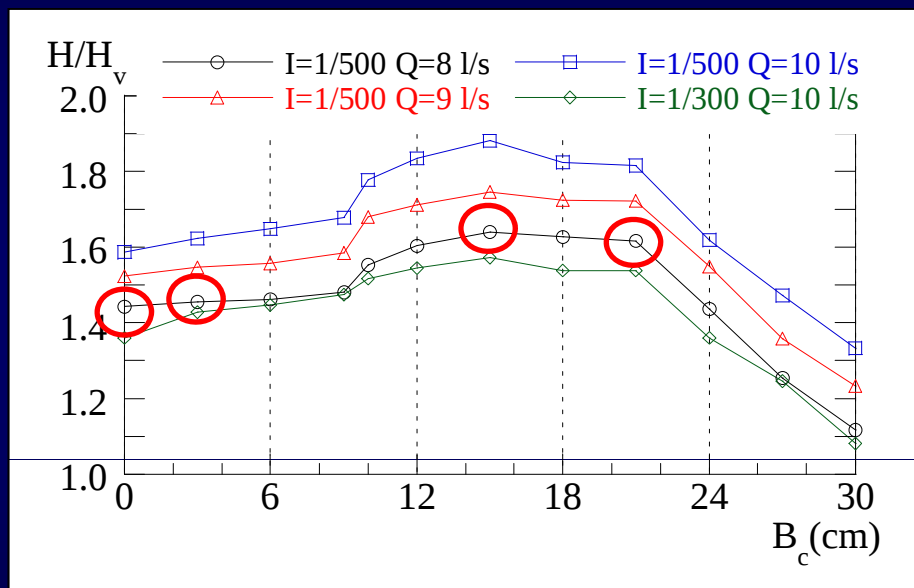
実験水路概要

実験条件

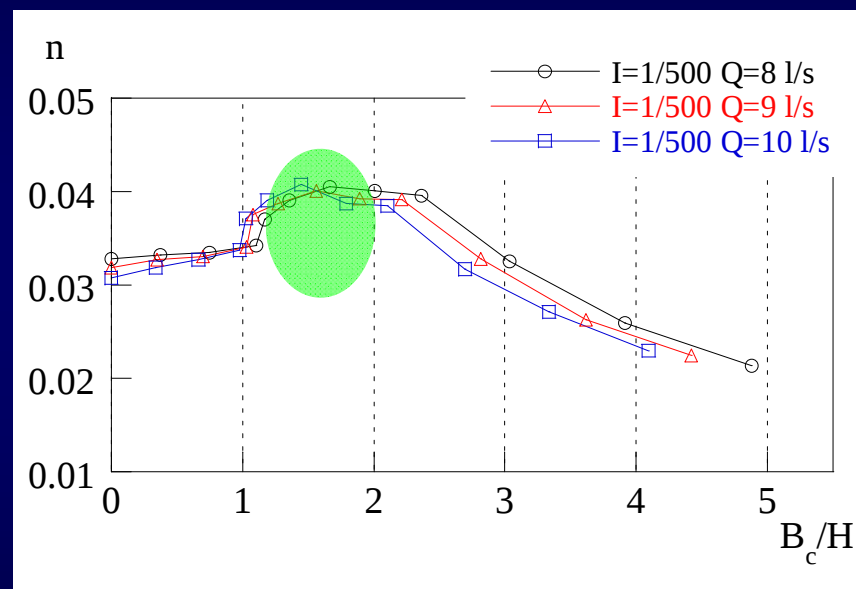
	non-overflow case		overflow case	
Distance between vegetation zone B_c (cm)	0~30	0~30	0~30	0~30
Bed slope I	1/500	1/300	1/500	1/300
Flow discharge Q (l/s)	4, 5	5, 6	8, 9, 10	10
Vegetation height H_v (cm)	7.5	7.5	5.5	7.5
Vegetation diameter d (mm)	0.242	0.242	0.242	0.242
Vegetation width B_v (cm)	10	10	10	10



植生帯間の距離の変化に伴う流れの抵抗特性

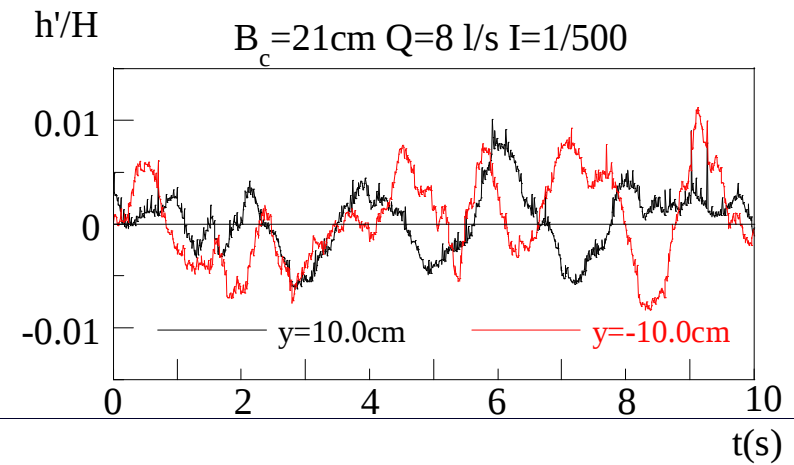
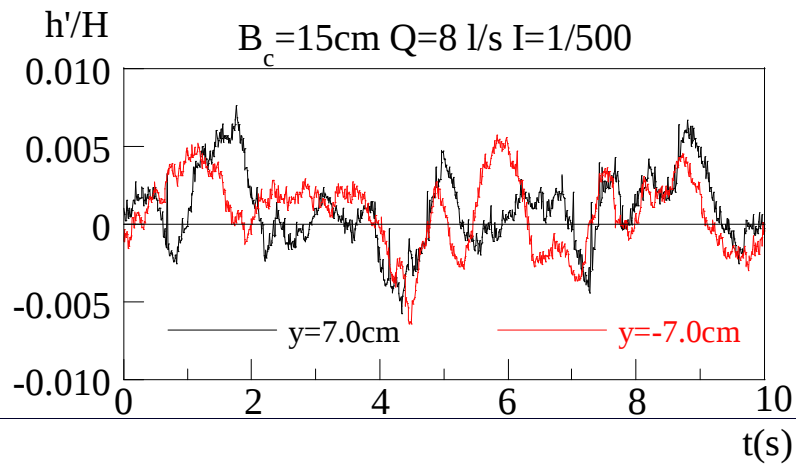
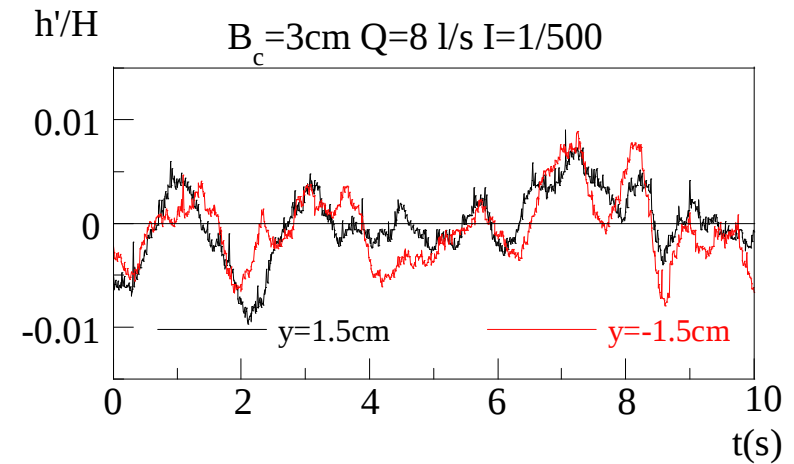
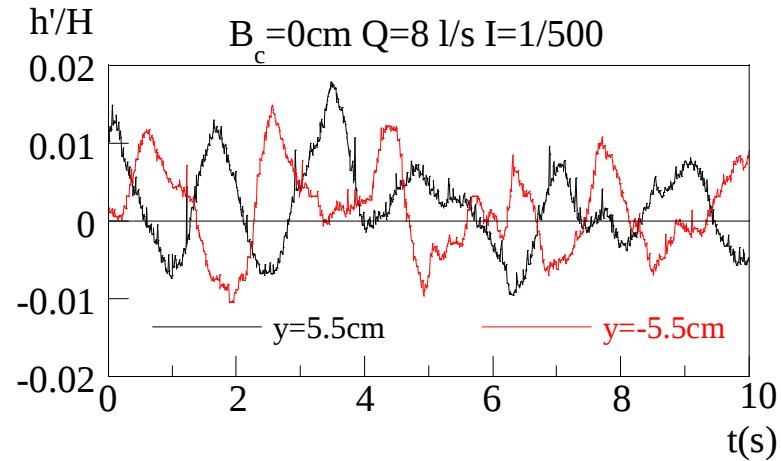
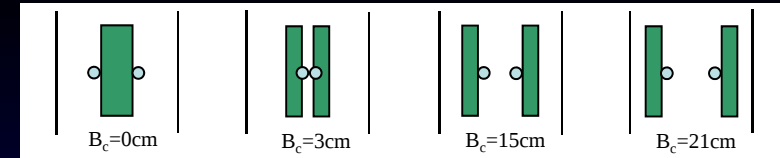


植生帯間の距離の変化に伴う水深変化

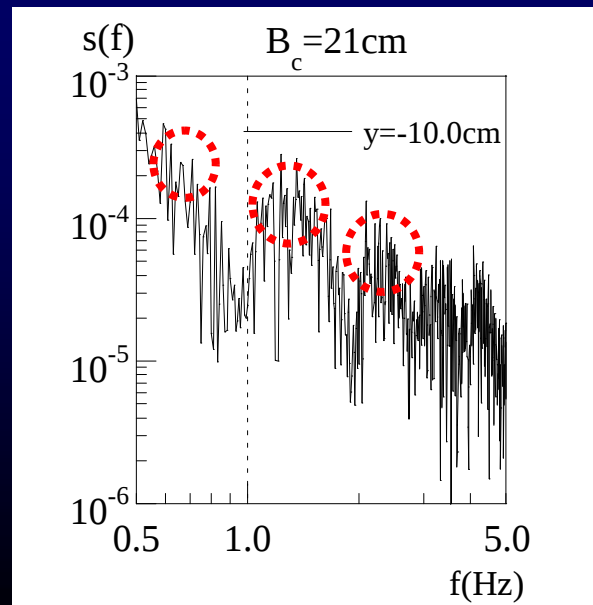
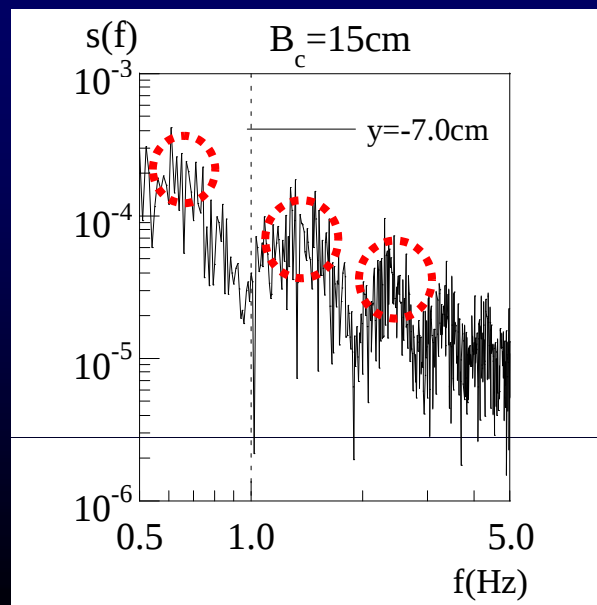
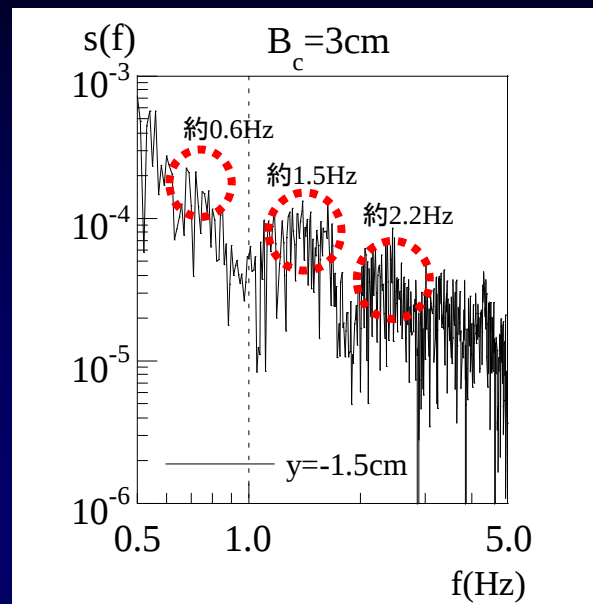
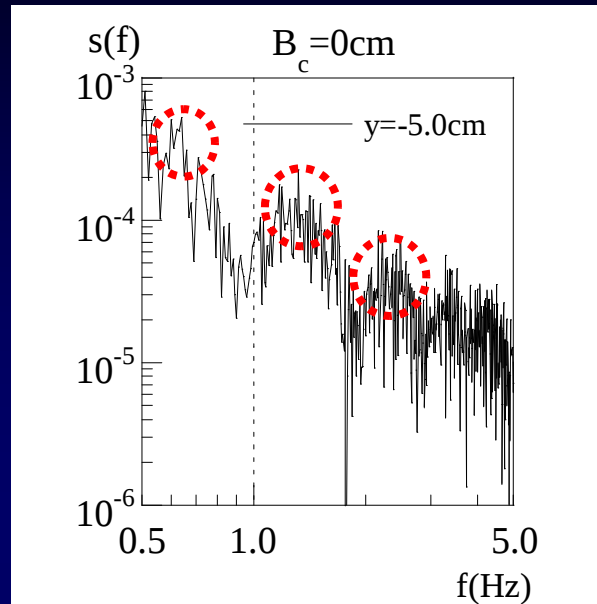
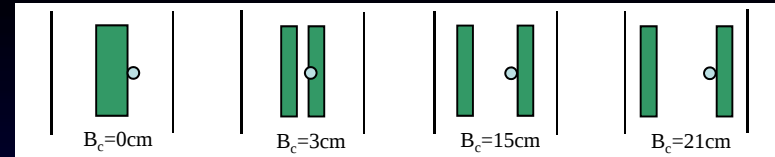


植生帯間の距離と粗度係数の関係

水面変動の時系列



水面変動スペクトル



セイシュの周期

$$T = \frac{2L}{m\sqrt{gH}}$$

T : 振動周期 H : 水深

L : 水域の長さスケール

m : 振動モード($m=1,2$)

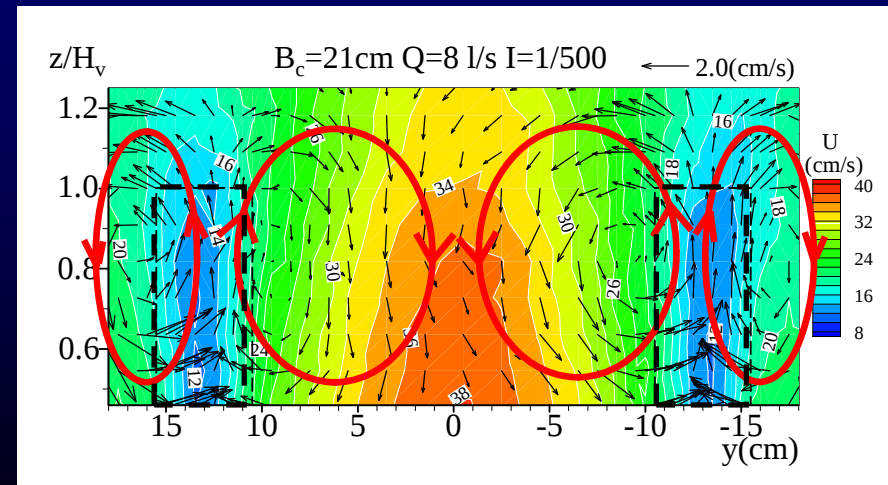
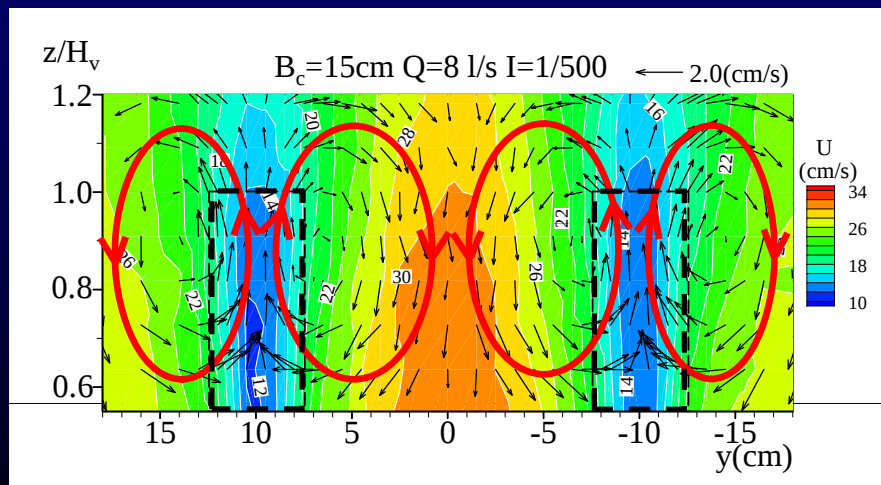
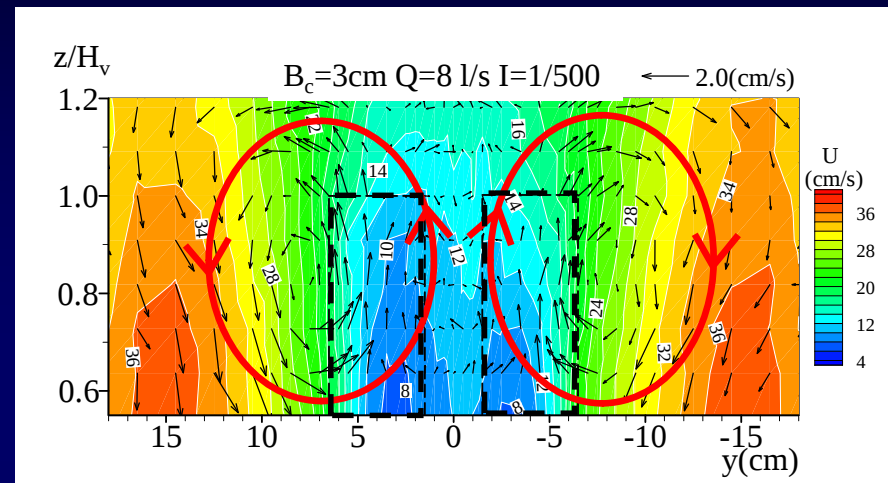
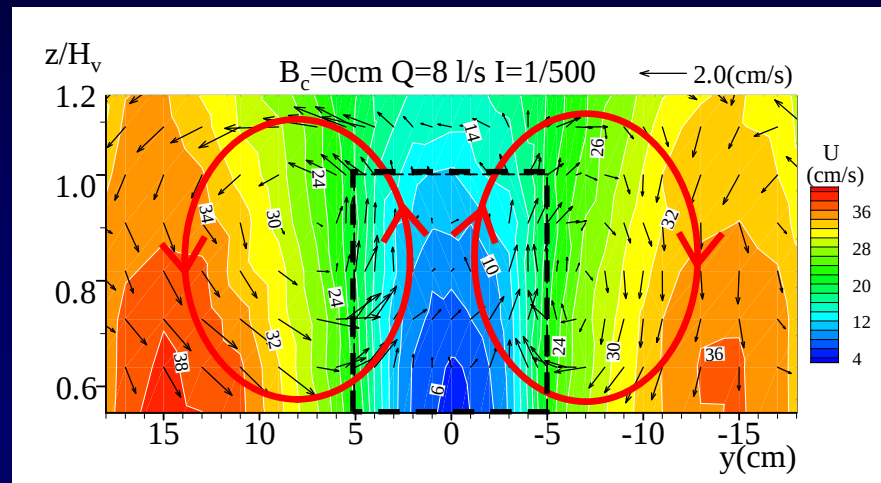
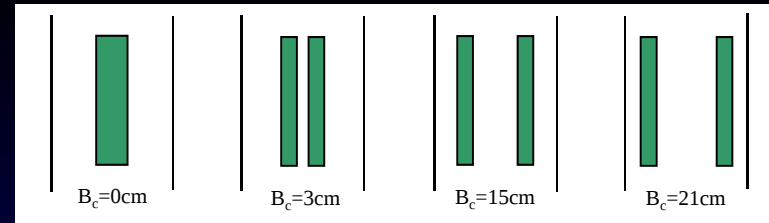
横断方向における セイシュの周期

$m=1$, $L=0.4\text{m}$ より,

$$T=0.9 \text{ s } (1.1\text{Hz})$$

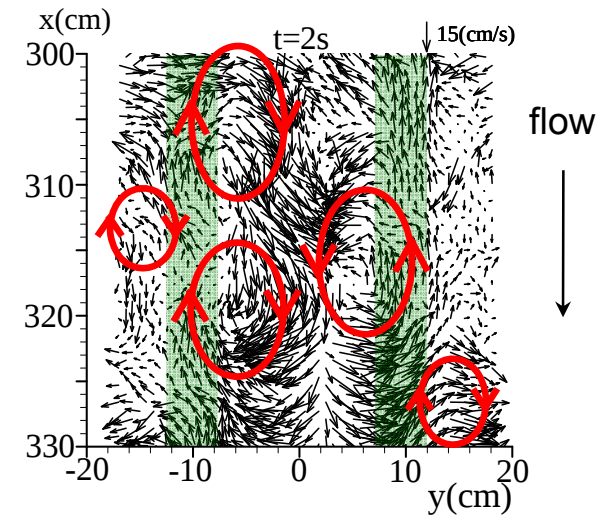
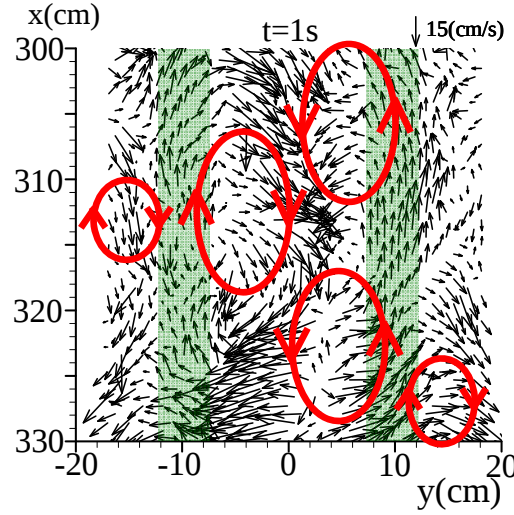
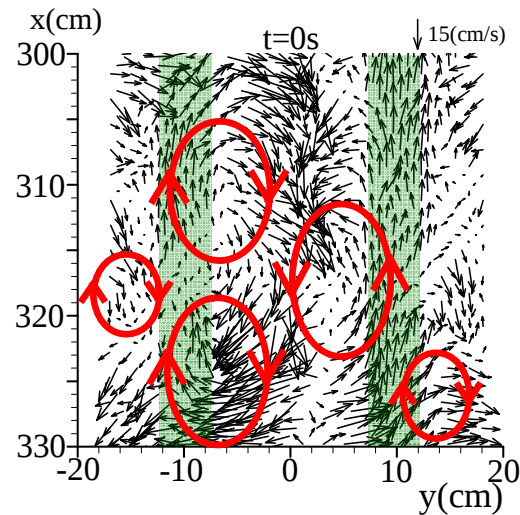
水面変動の卓越周
期はセイシュの周
期と一致しない

主流速の等値線および 二次流ベクトル



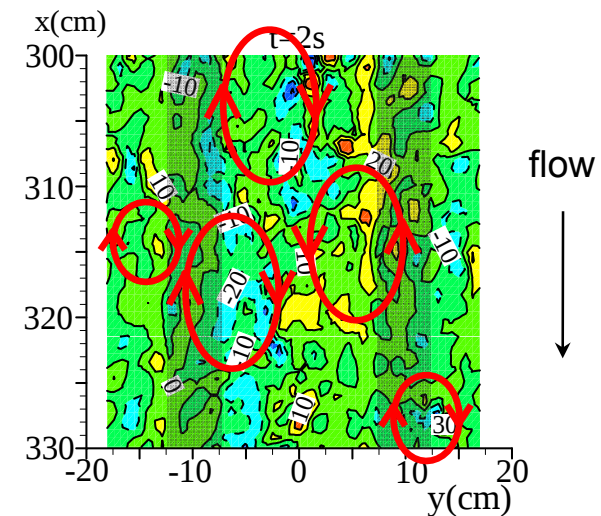
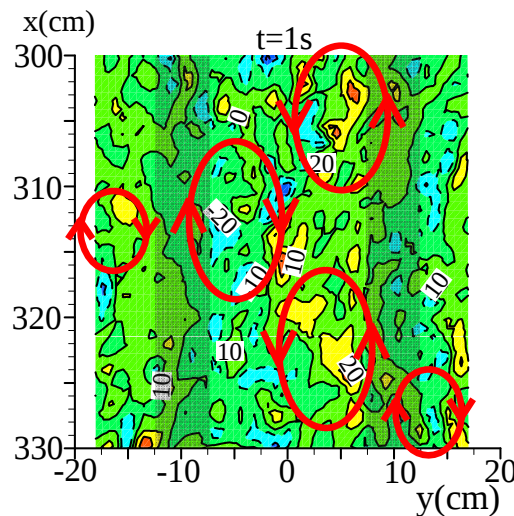
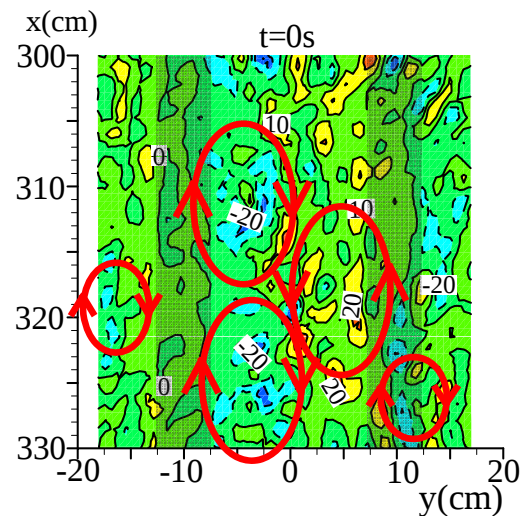
$B_c/B_v=1.5$ における瞬間流速の 移動座標ベクトル

 : 植生帯域

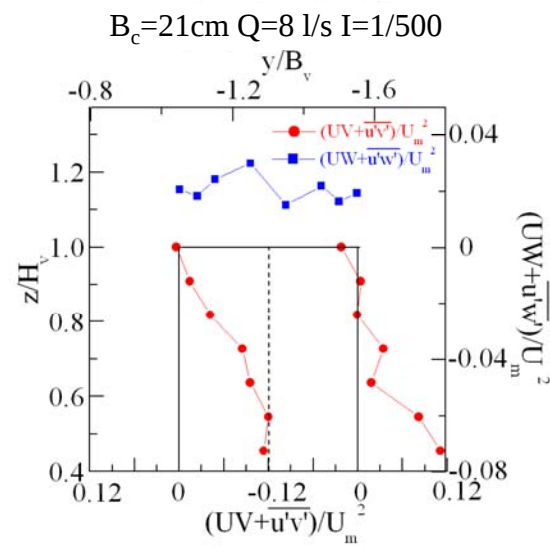
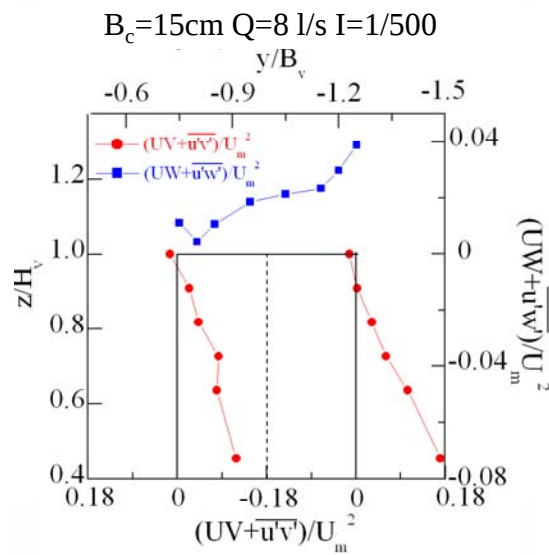
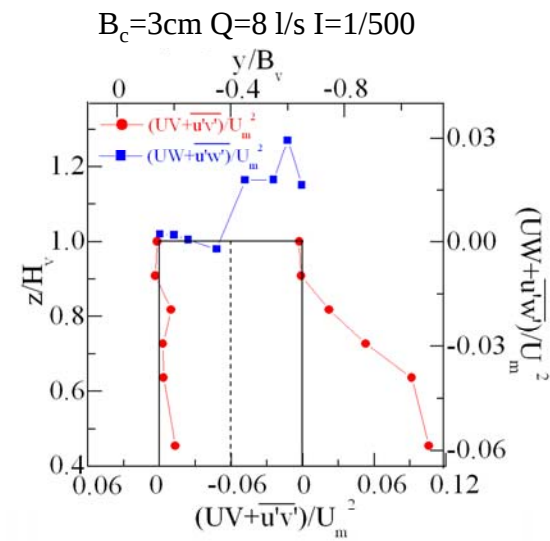
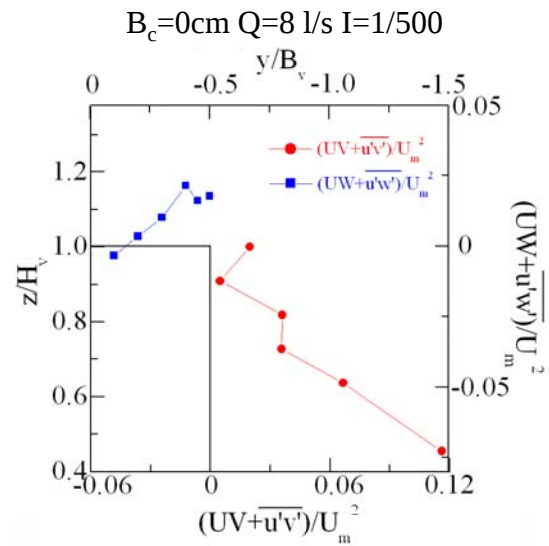
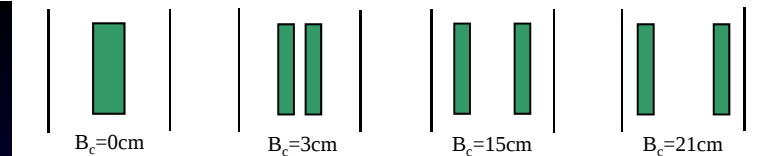


$B_c=15cm$ における渦度

$$\omega_z = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$$



運動量輸送分布



全運動量輸送($UV+\overline{u'v'}$, $UW+\overline{u'w'}$)

4. まとめ

植生帯の間隔の違いによる流れの抵抗特性と流動機構を検討した結果,

- ・流量・勾配の異なる条件下でも水深変化分布は同様の曲線を描いており, ほぼ相似形をなす. 粗度係数 n について見てみると, いずれも植生帯間の距離と水深の比 B_c/H が約1.8で n 値が最大となり, この条件下で最も両植生帯における植生帯を横断する流れの相互作用が最も強くなることが確認できる.

- ・大規模水平渦の挙動に注目すると, 水深が最大値をとった配置では, 水路中央で両植生帯内側境界付近に発生した渦が相互に作用し合いながら流下していく様子が確認された. この相互作用効果により, 運動量交換が促進され, 流れの抵抗が増大することが明らかになった.

- ・二次流ベクトルに注目すると, 水路中央で対を成すローラー状の循環流が最も安定して形成される状態において水深が最も大きくなることが示唆された.

- ・乱れ特性や運動量輸送に注目すると, 植生帯境界における運動量輸送が活発となる条件下において, 流れの抵抗が大きくなることが明らかになった.