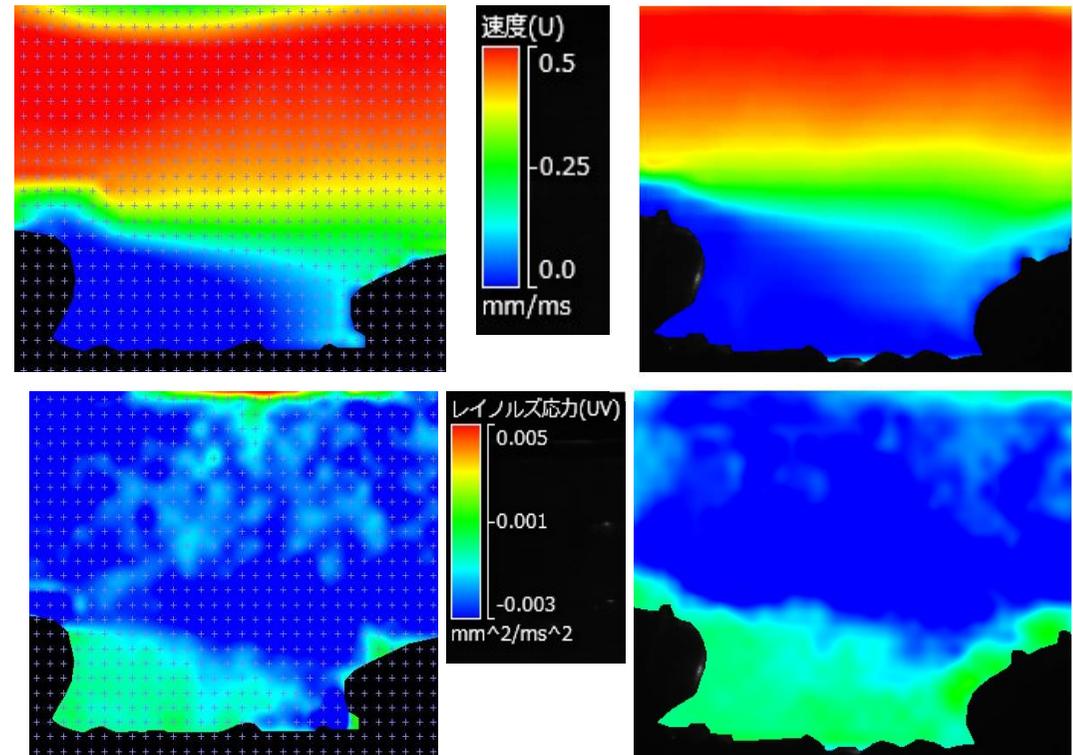
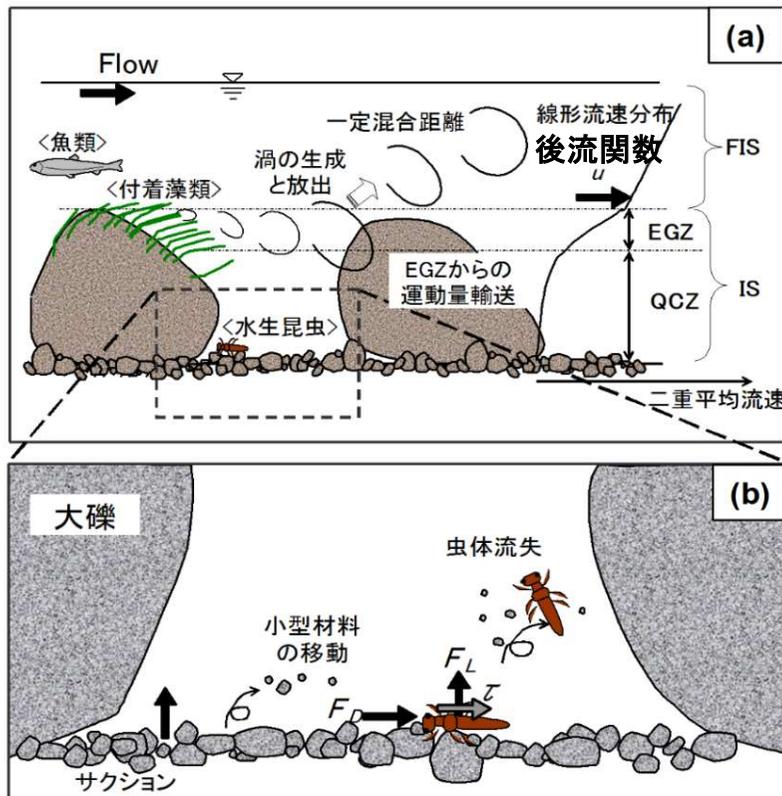


2017年6月16日(金)14:30~16:30 特定課題オーガナイズドセッション2(OS2)

「河川環境にかかわる基礎・応用研究と河川管理の実務をつなぐ」

境界層水理学と河川低水路の環境管理



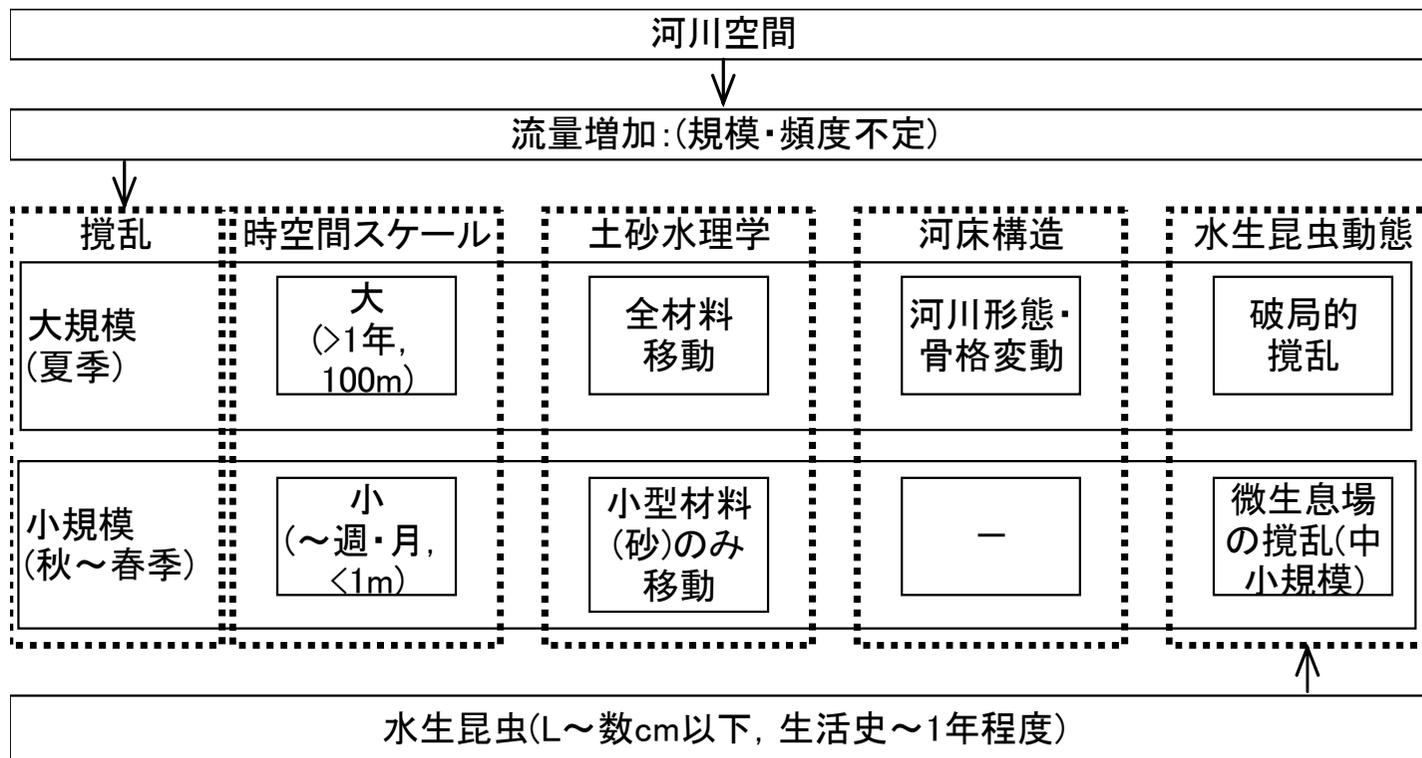
埼玉大学大学院理工学研究科

田中規夫

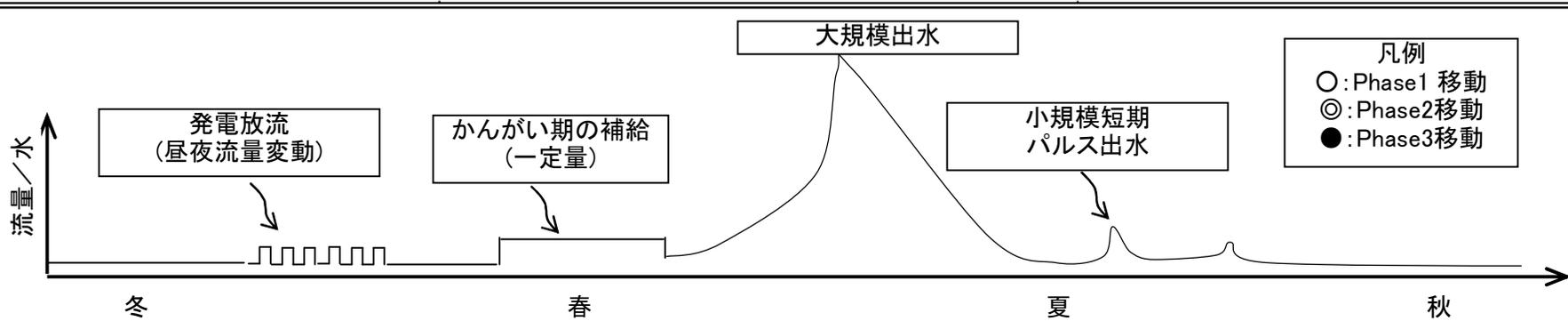
1. はじめに (1)河川低水路生態系の特徴の1つ =強い攪乱が生じる河川空間を基盤とすること

田中規夫・内田龍彦・山上路生:境界層水理学が生態系保全に果たす役割, 河川技術論文集(2017)に記載した内容を中心に説明する

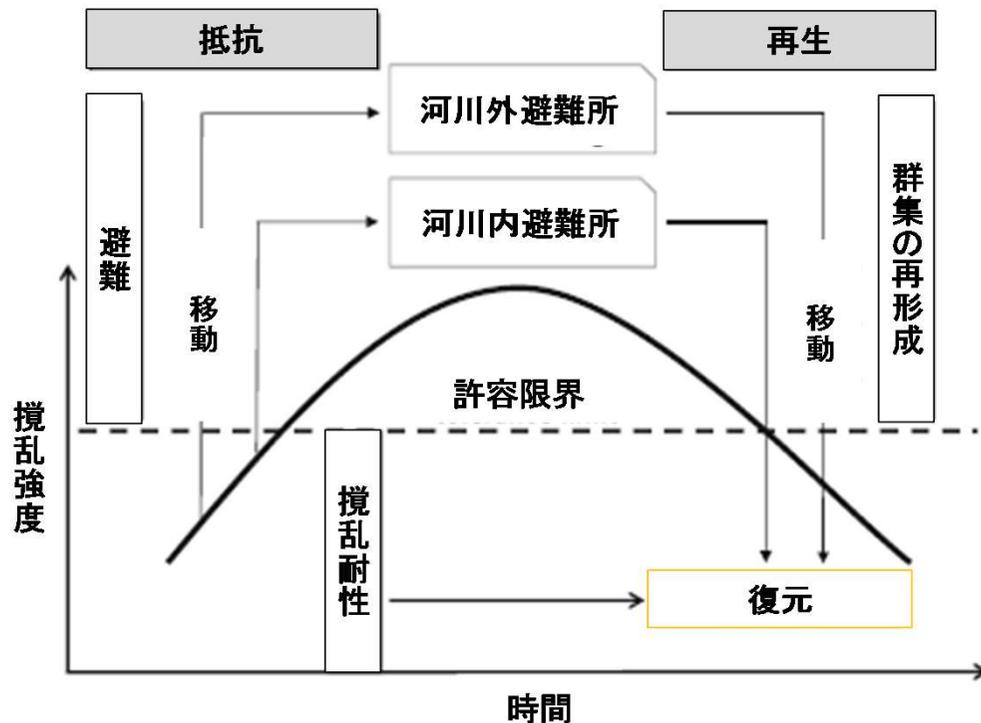
- ・河川上中流域に話を限定する。
- ・河床勾配が急で出水が極めて短時間におこり, かつ水位変動が大きい。一方で, 河床材料が大きく水生昆虫の避難場所を提供できるスケールである。
- ・水深と河床材料の比が小さく出水時に大きく変動→流れの構造も劇的に変化
- ・中小規模出水: 付着藻類の繁茂箇所の下(多くの場合、仮想原点よりも下)を砂礫が通過する場合もある



1. はじめに (2) 出水時の水生昆虫の避難と出水後の回復



・非出水期とされる秋季から春季の**小規模かつ短期的な出水**により生じる底面粗度層の流れ場の変動や細砂分の移動→水生昆虫にとっては攪乱として作用する

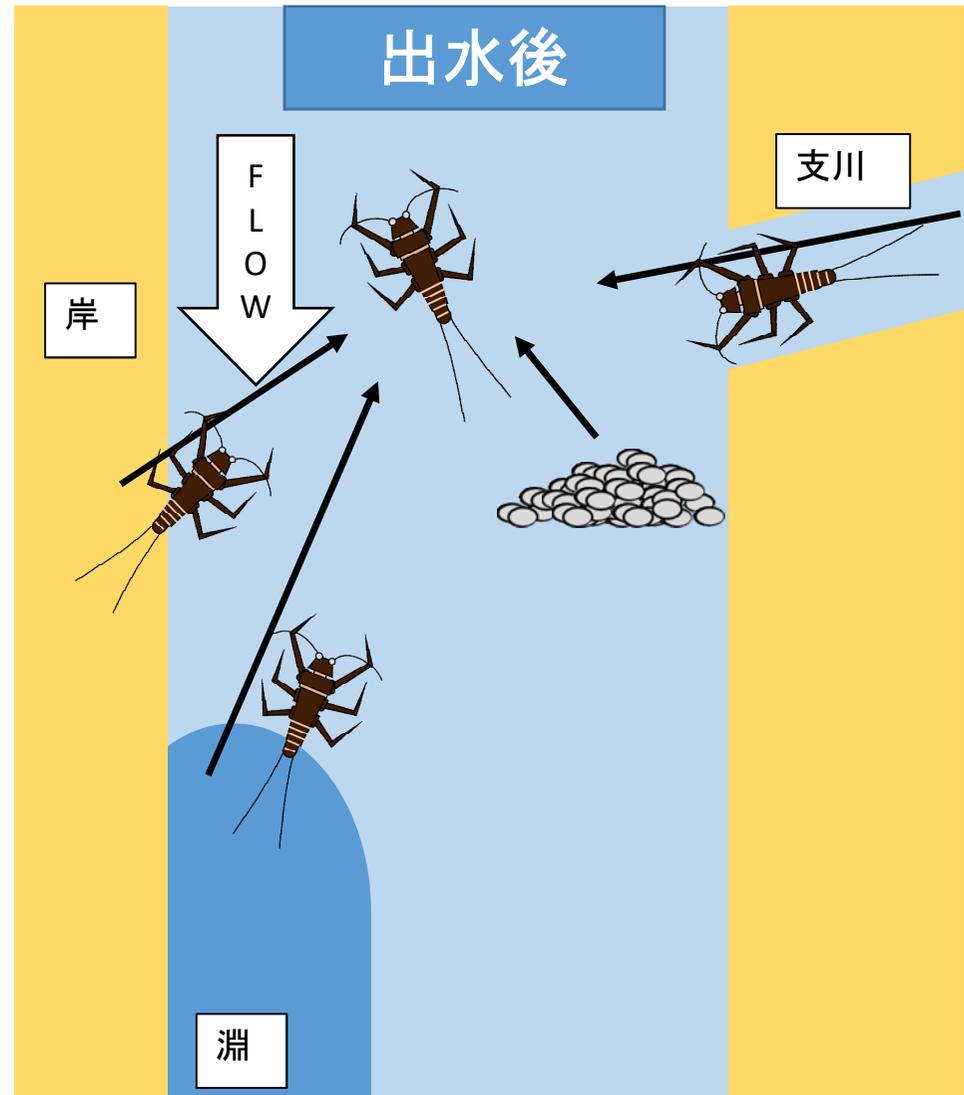
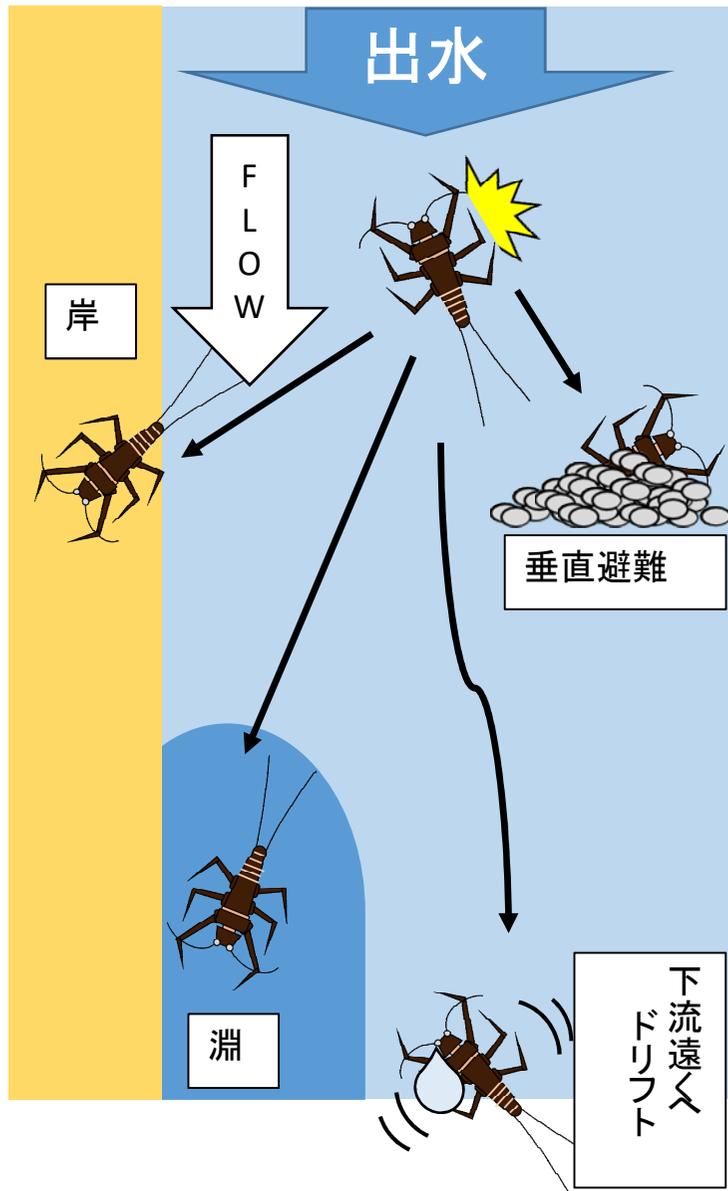


避難や再生に必要な移動性

攪乱に対する耐性

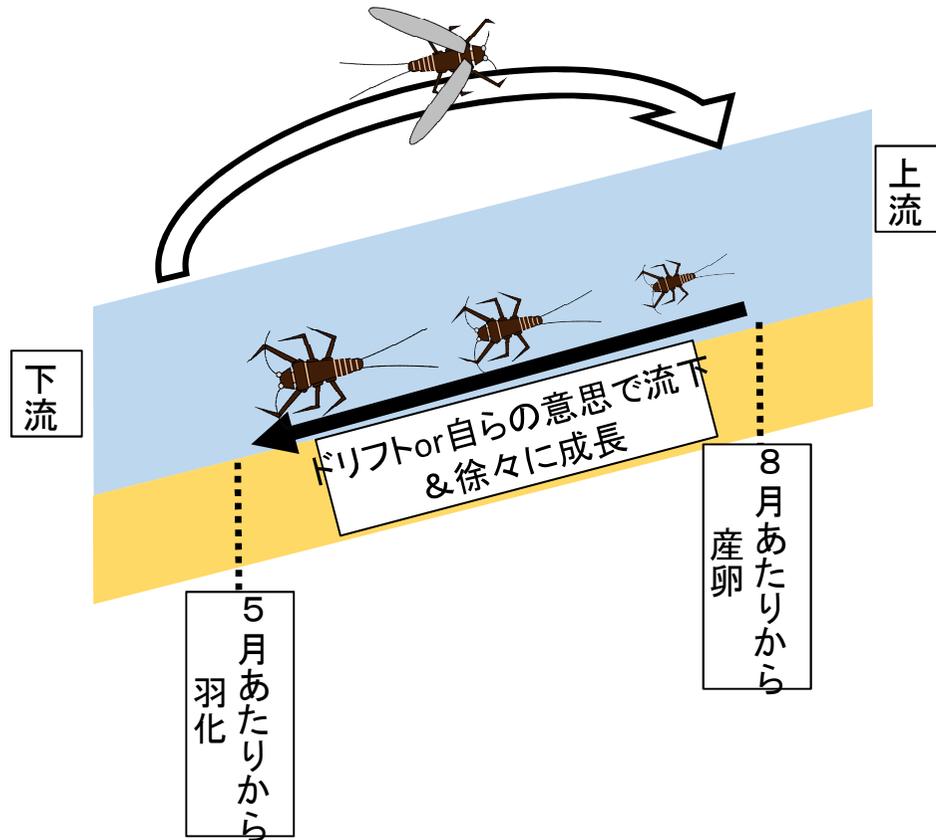
Hershkovitzら(2012)をもとに作成

1. はじめに (3) 出水時の水生昆虫の避難と出水後の回帰



1. はじめに (4)水生昆虫は河川とどう付き合っているのか

水生昆虫の生活史(一例)



水生昆虫のドリフト: 能動的・受動的の2種類

能動的: 新たな生息場の探索と分散

受動的: 夜間と昼間等の時間帯, 捕食者に加え, 発電放流に伴う流量変動などが影響を与える.

水路実験により, 河床が不安定な条件でドリフト量が増加

現地実験により, 小型河床材料移動性がドリフト現象には重要

土砂移動等の流水の作用営力とドリフトとの関係を明らかにすることで, 人為的攪乱(土砂供給の減少、土砂還元)によって生じた生態系の変化についての理解が深まる.

1. はじめに (5)水生昆虫と攪乱

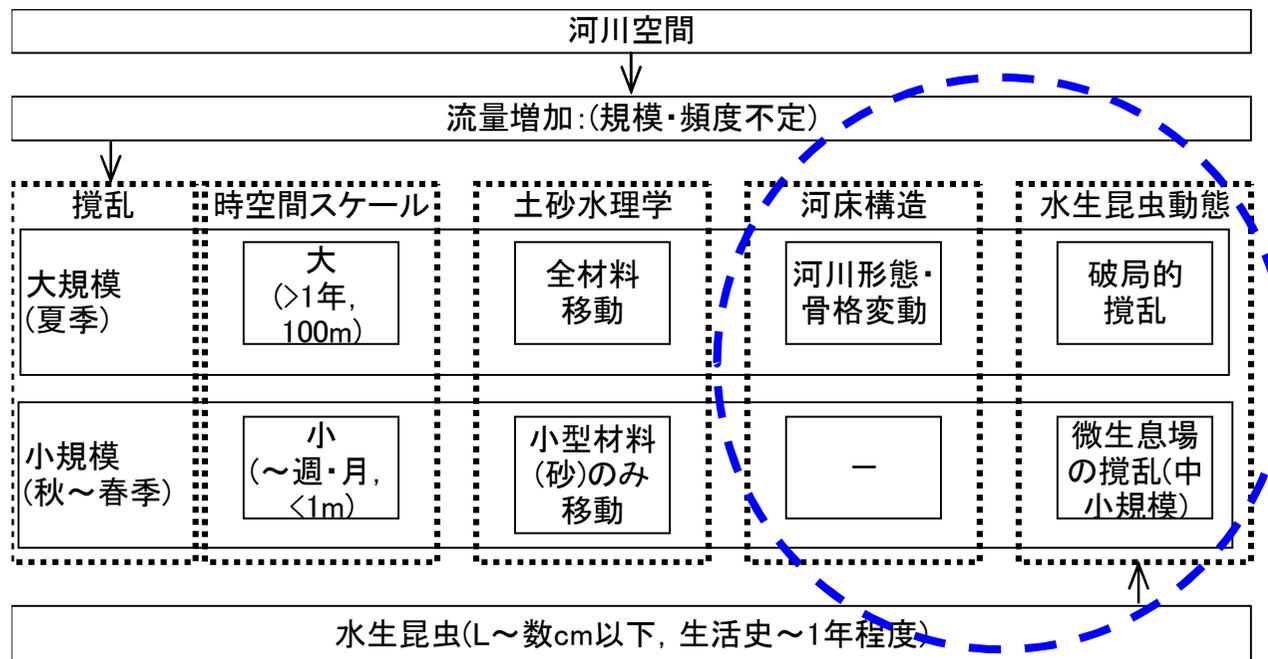
・多くのカゲロウ目、カワゲラ目、トビケラ目・・・1年に1回羽化(1化):主に早春から夏にかけて成虫になる

※チラカゲロウやヒラタカゲロウ科の一部、シマトビケラ属の一種などは年に2回羽化:2化(春と秋)

※ヒゲナガカワトビケラ:環境が良ければ2化

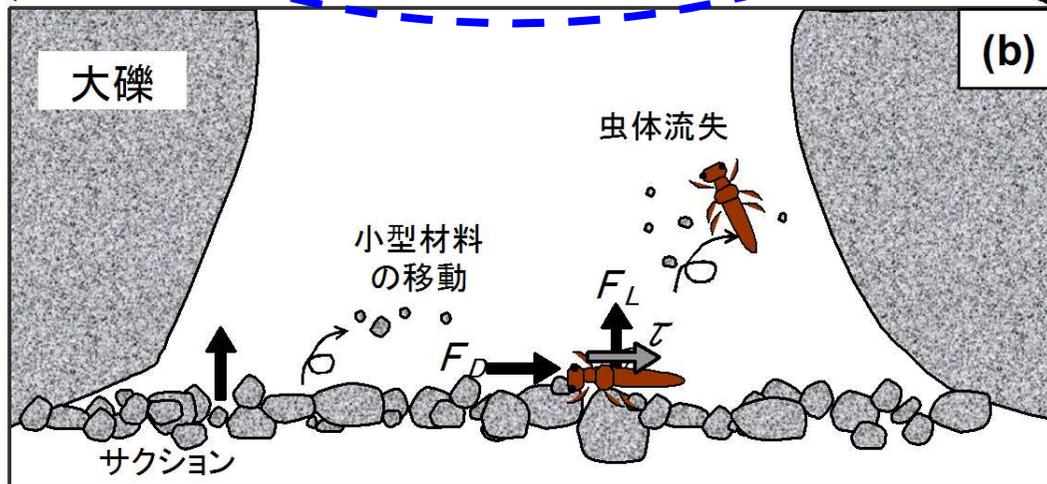
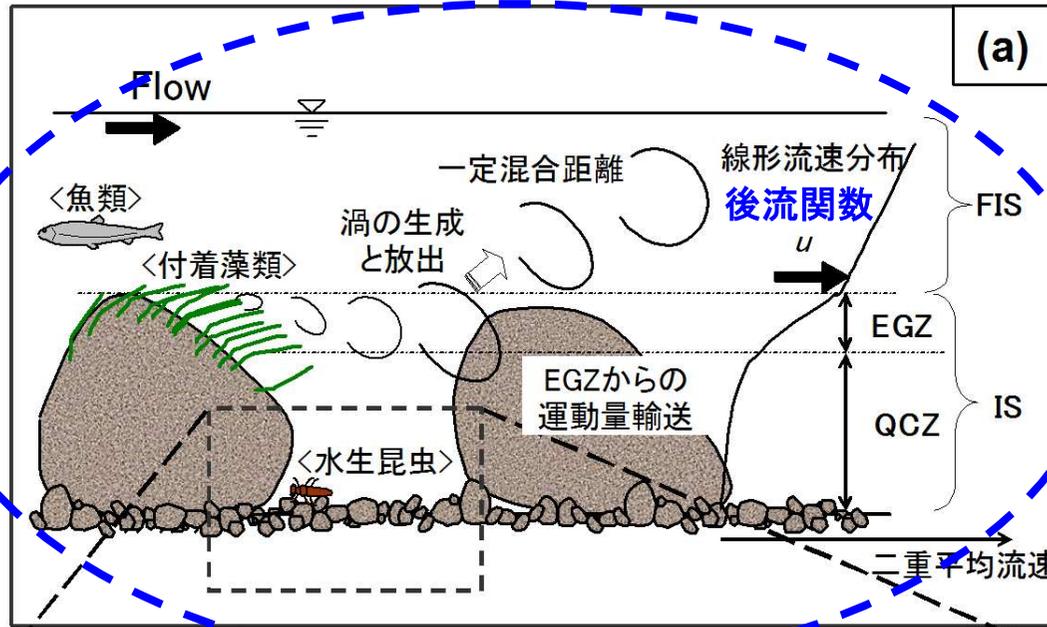
※複数年:オオヤマカワゲラなどは成虫になるのに3年

・時間的には小規模で高頻度, 短期的に生じる出水に, 空間的には虫体サイズやハビタットのスケールに応じた底面粗度層内に着目する必要がある



0 20 cm

1. はじめに (b)相対水深(水深/粗度高さ)の小さい場における流れの構造と生態系



(a)は通常時、(b)は出水時

- 粗度で生じる大規模渦構造の影響を受けた範囲の流速分布の変化(対数分布、直線分布、S字型→相対水深、淵からの距離により変化する:境界層の発達)

- 生物の動態を議論するためには、時空間的な変動が必要

- 流量が変動しない場合でも、時空間的に変動しているので、平均流で議論できるのか、乱流の平均成分(レイノルズ応力など)、渦構造(Sweep, Ejection)やその周期性まで必要なのか、未解明

2. 土砂還元と生態系の変化 (1) 二瀬ダム事例



計画堆砂量
51,000m³/year
実績堆砂量
79,000m³/year
置き砂: 実績ベースで1割強



土砂還元の実績

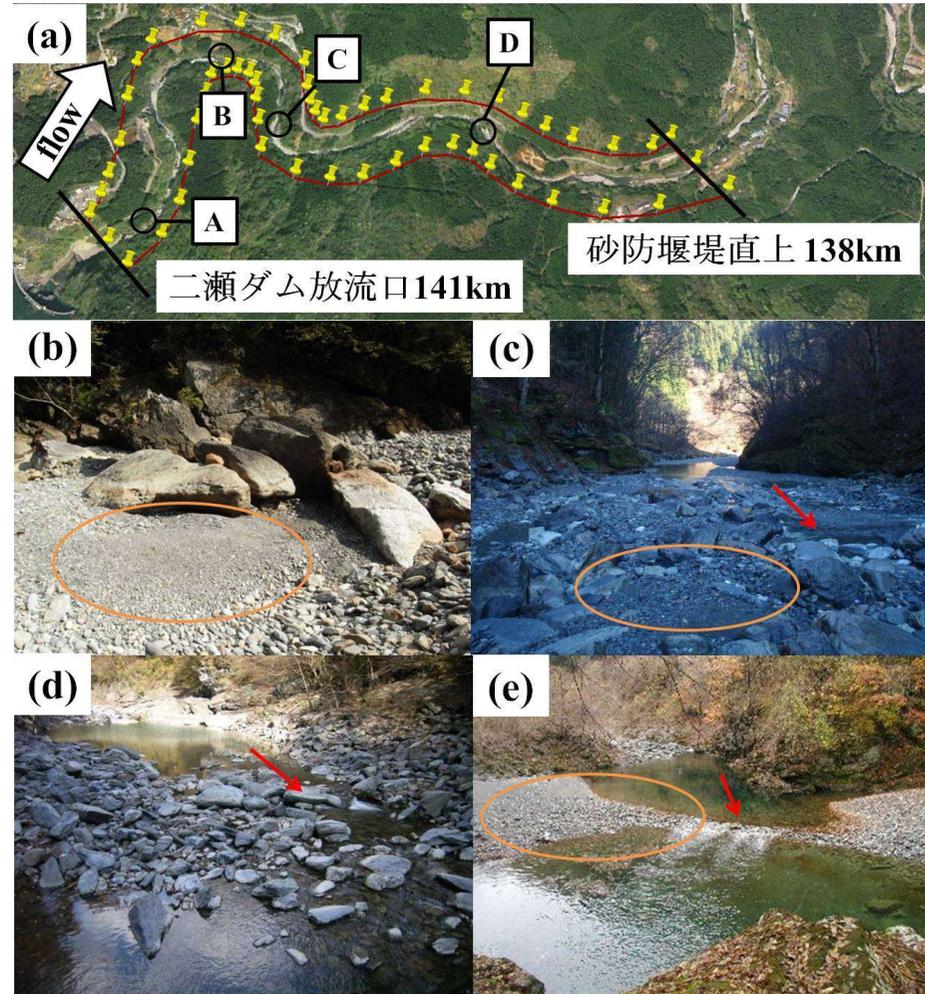
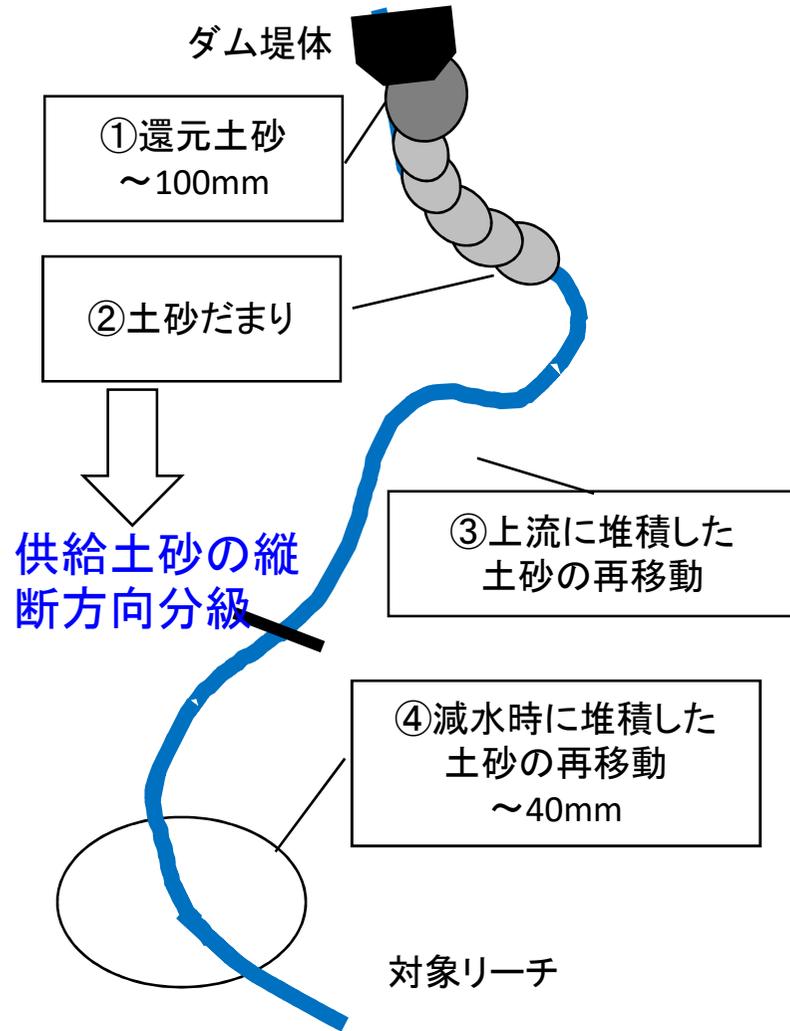
年	置き砂量 (m ³)	概算流下量 (m ³)
H15	13,000	-
H16	11,700	13,000
H17	5,400	11,700
H18	5,300	5,400
H19	11,600	5,300
H20	8,100	5,000
H21	8,800	12,300
計	63,900	52,700



土砂は貯砂ダムより搬出し、ダムの直下に投入している。

(平成22年3月現在)

2. 土砂還元と生態系の変化 (2)河床構造の変化



土砂還元の直接的な影響としては、ほぼ移動しなくなっていた粗粒分の空隙および上部に、還元された土砂が供給されるとともに、一定規模の出水で移動する移動性の高い河床状態が形成されていることが推定される。

2. 土砂還元と生態系の変化 (3)水生昆虫群集の変化

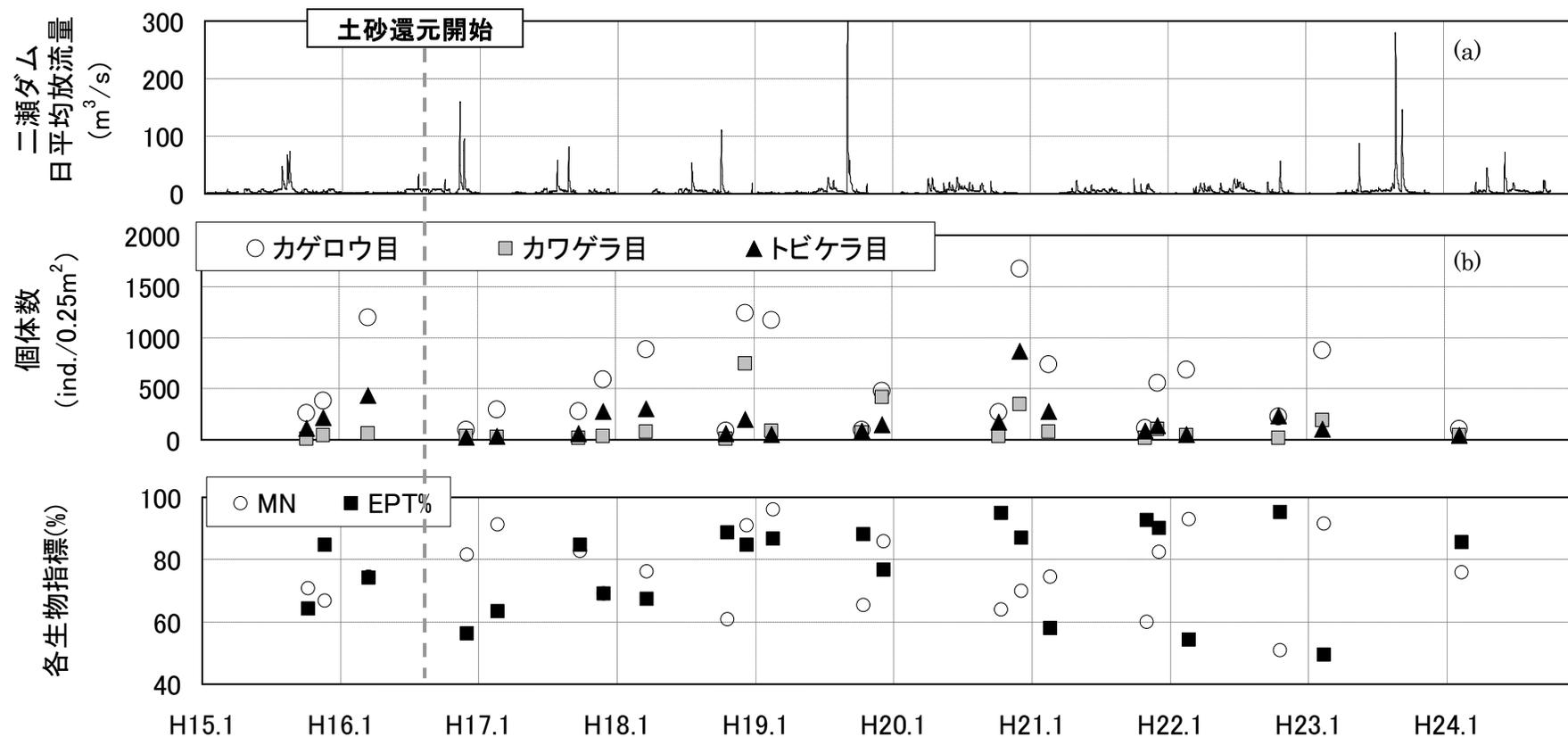
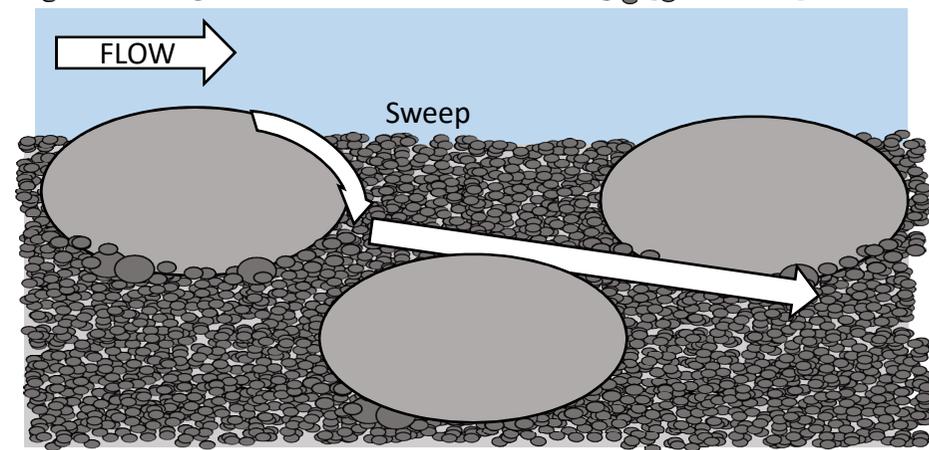
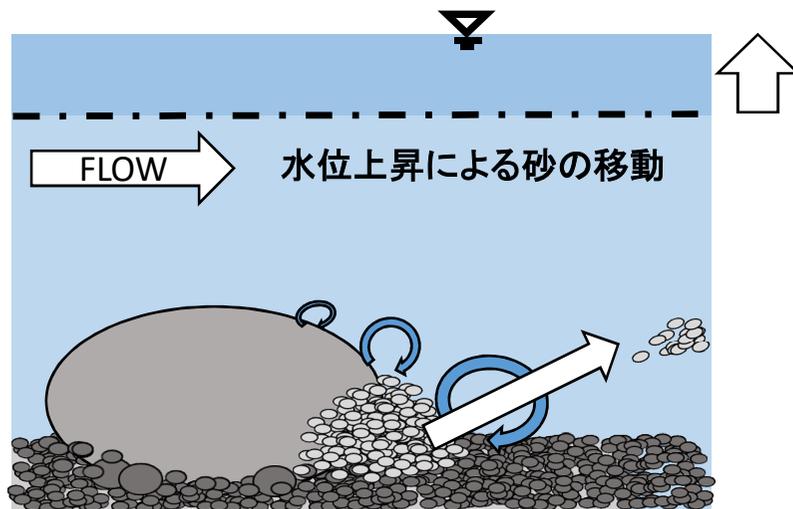
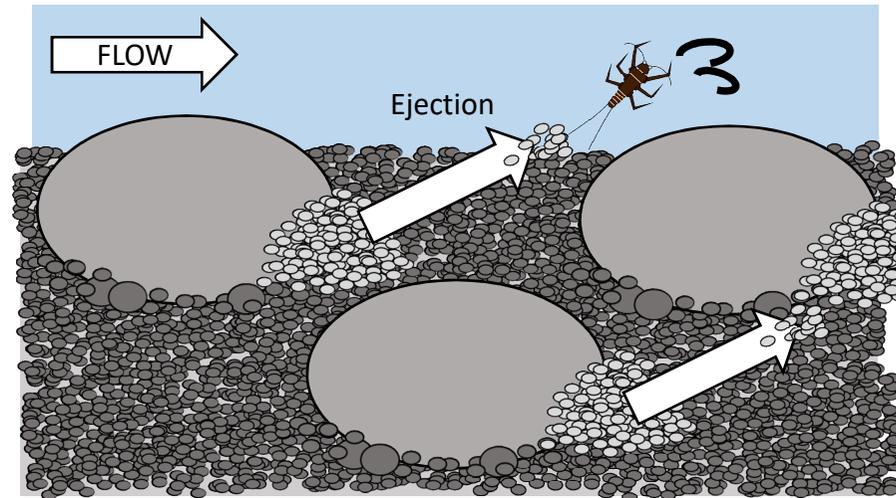
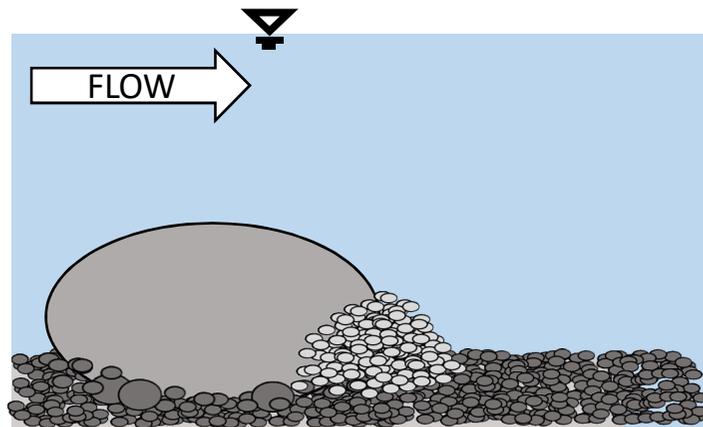


図-1 二瀬ダム下流(st.3)における水生昆虫群集の変化

- ・秋データのEPT指数が土砂還元後経年的に増加しつつあること, MN (E,P,Tに対するE,Pの割合)の秋季から冬季にかけての増加が土砂還元後に増加したことが確認できる.

2. 土砂還元と生態系の変化 (4)小規模出水による土砂移動

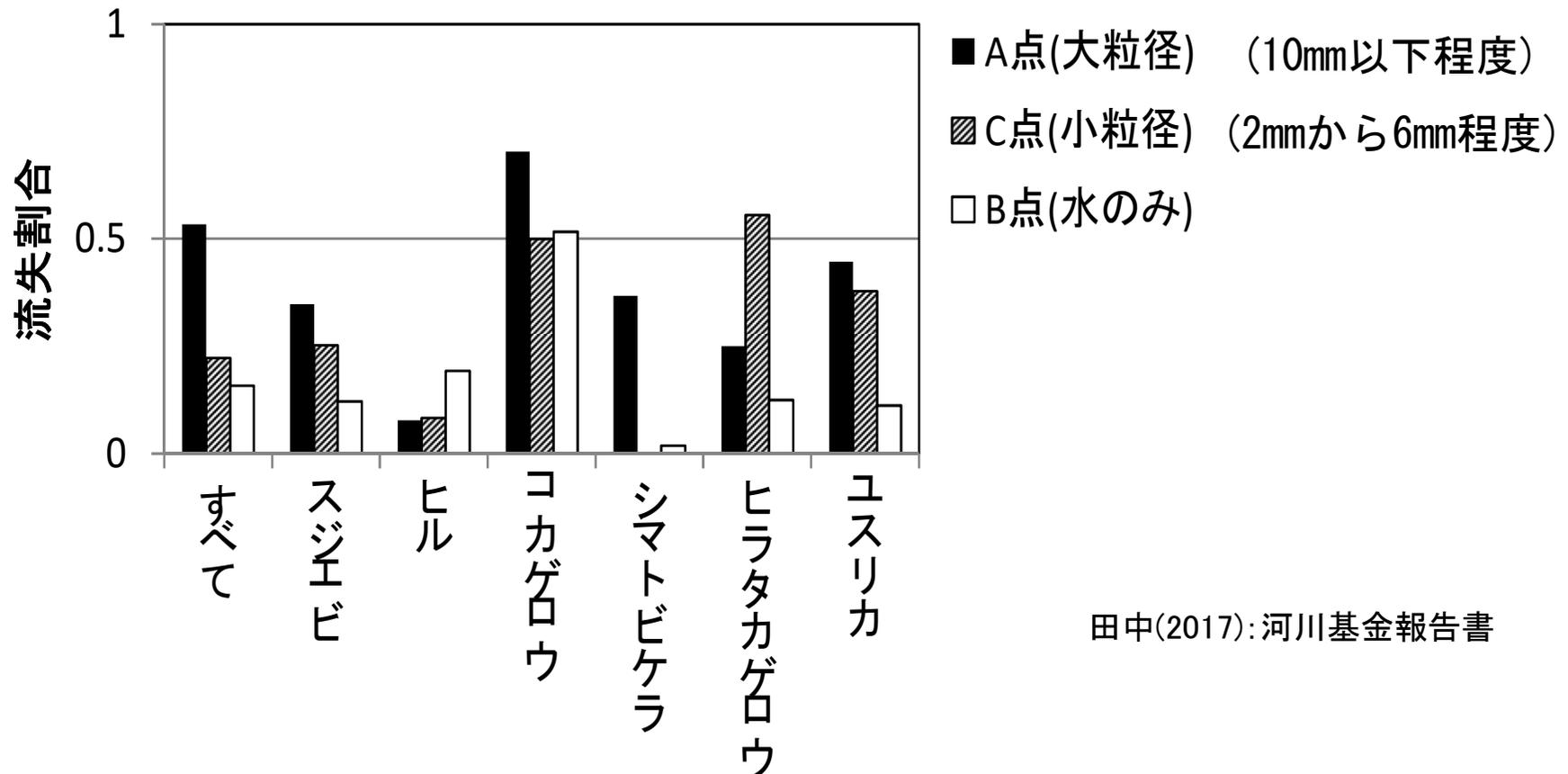
遊泳型のカゲロウは逃げて戻ってくる？ 匍匐型のカワゲラ横ばい。トビケラは減少。



小規模出水であっても遮蔽域内の土砂が不安定になり移動する

乱流現象と水生昆虫群集の変化
(受動的ドリフト)

2. 土砂還元と生態系の変化 (5)水生昆虫によって、水流や土砂移動に対する耐性が異なる

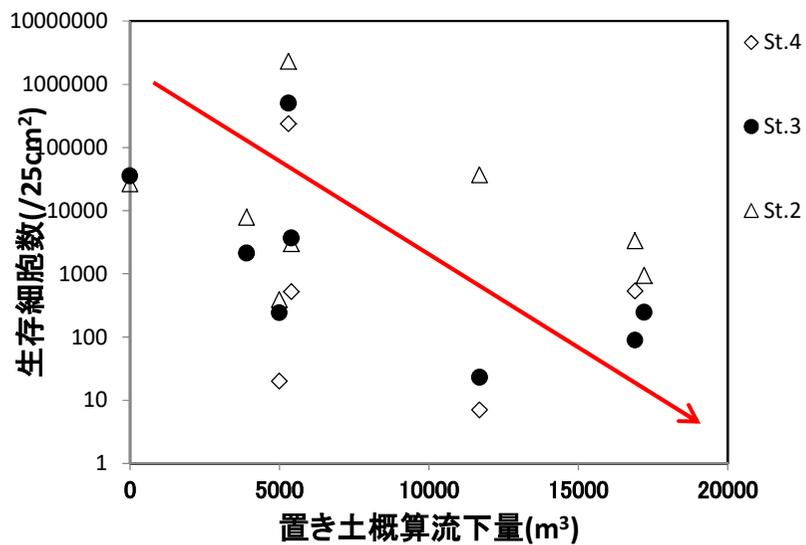
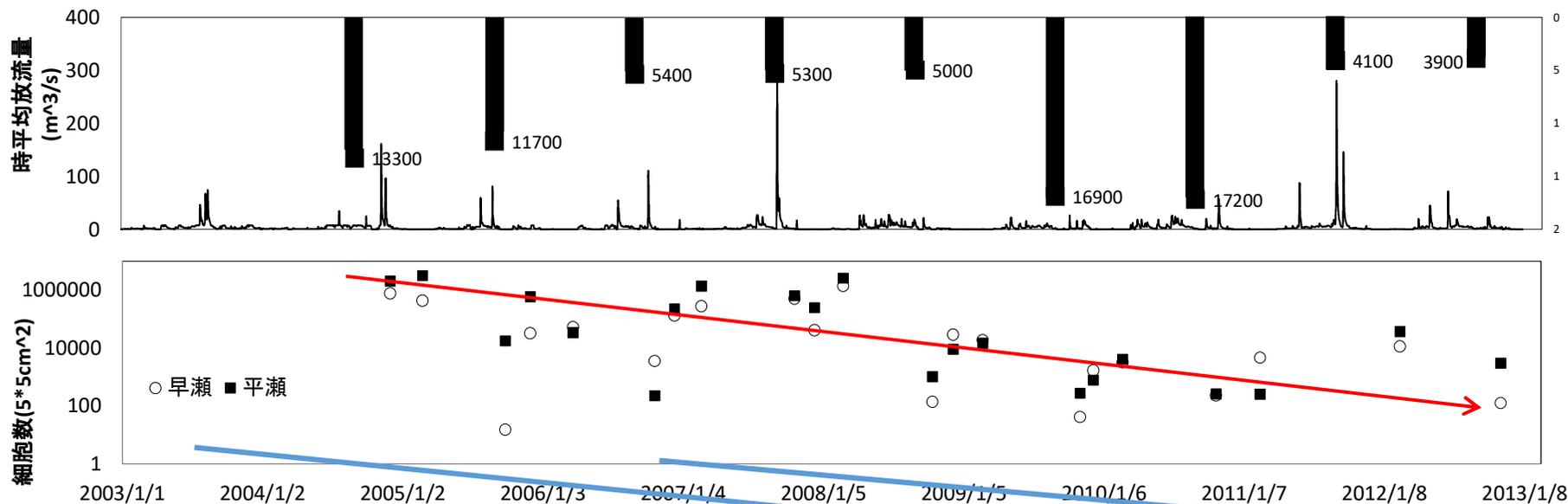


田中(2017): 河川基金報告書

・ 強制的に水流や土砂移動を発生させた条件で、ドリフトされた水生昆虫の割合：遊泳型は水流でも多く流出し、匍匐型は土砂移動を伴うと多く流出する傾向がありそうである

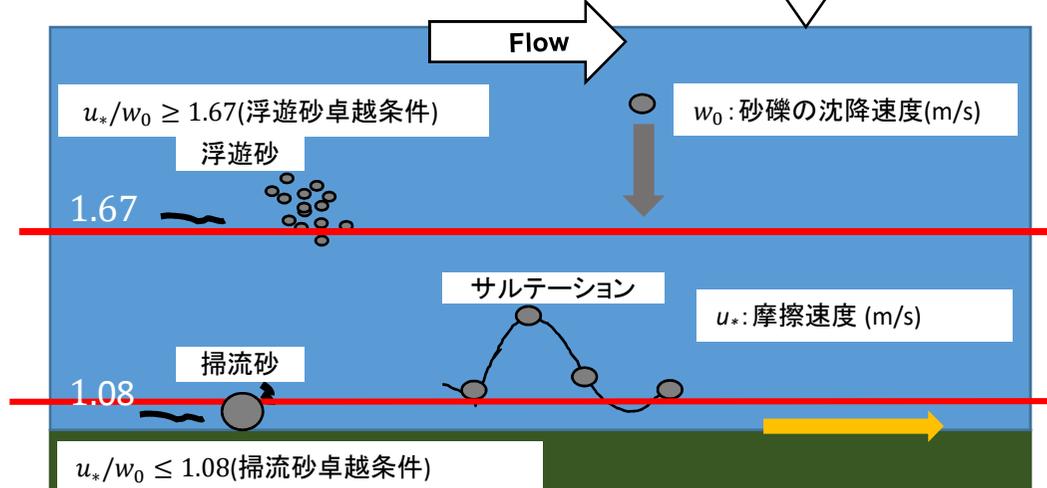
・ 攪乱と水生昆虫の動態の関係を知る必要

3. 付着藻類群集と土砂還元 : 二瀬ダムの事例



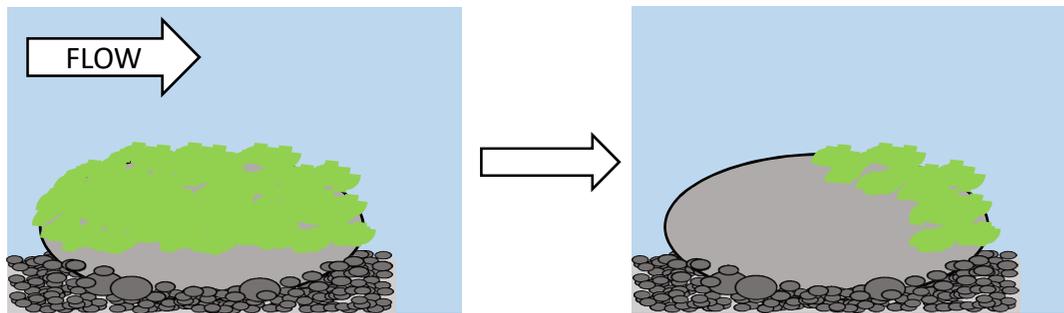
土砂還元を実施すると、
 経年的に付着藻類量が減少
 特に、土砂還元量が多い年は、
 放流ピーク後に付着藻類量が少ない

3. 付着藻類群集と土砂還元 (2) 移動土砂の量とその移動モードが クレンジングに大きな影響を与える



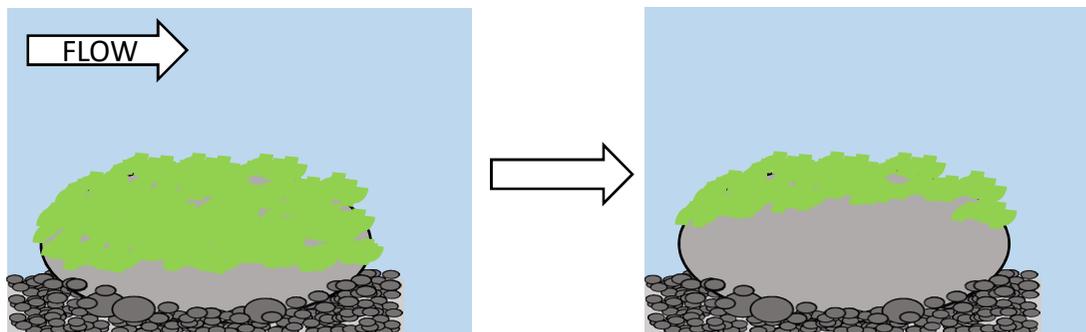
- ・粗度層における摩擦速度の評価
- ・摩擦速度の持つ意味

大規模出水(かつ、浮遊土砂が有る場合)



出水規模
土砂移動モード
移動する土砂の量
付着藻類の活性(時期)

中小規模出水(掃流砂が主体な場合)

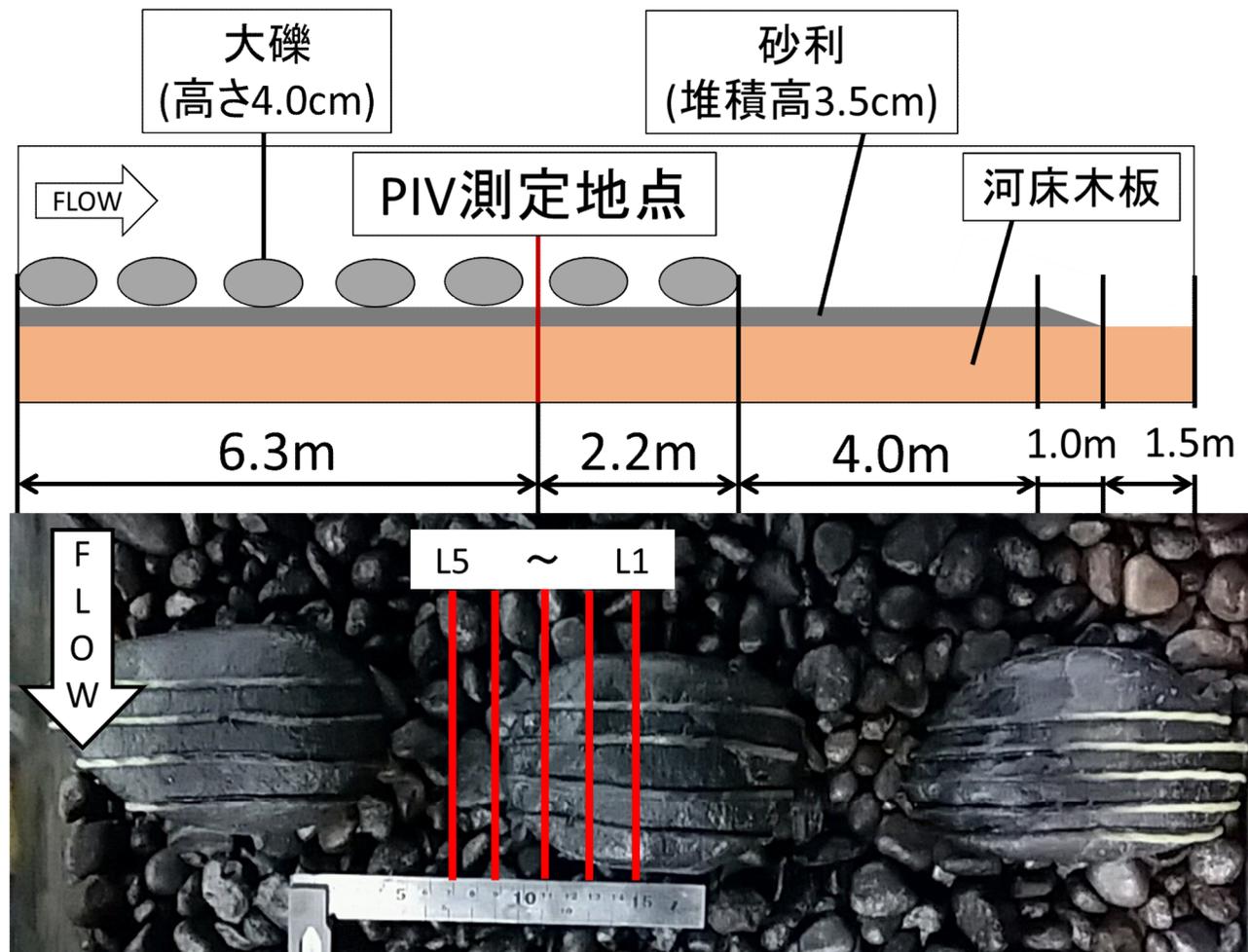


付着藻類の繁茂そのものは、粗度層近傍の乱流構造をどのように変えるか？

3. 付着藻類群集と土砂還元 (4)付着藻類の繁茂は流れの構造をどのように変えるか

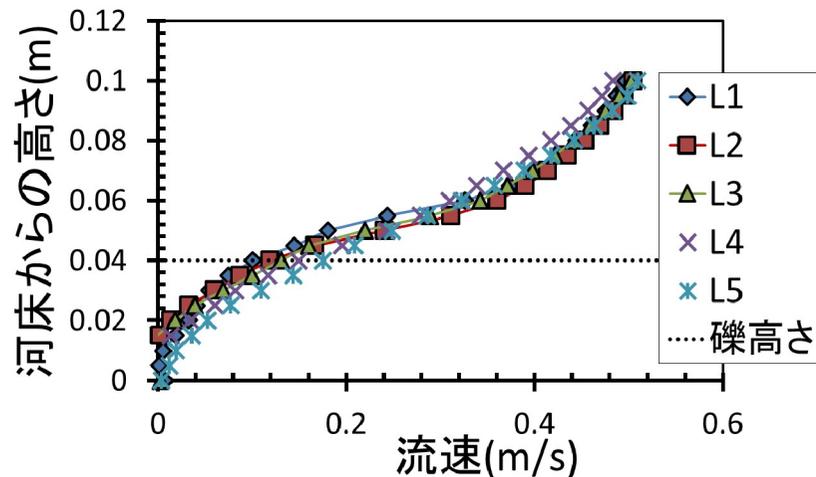
三次元乱流構造の変化: 土砂移動と相互作用系になっているはず

PIV実験: 付着藻類模型有無で、流速分布、レイノルズ応力分布を比較

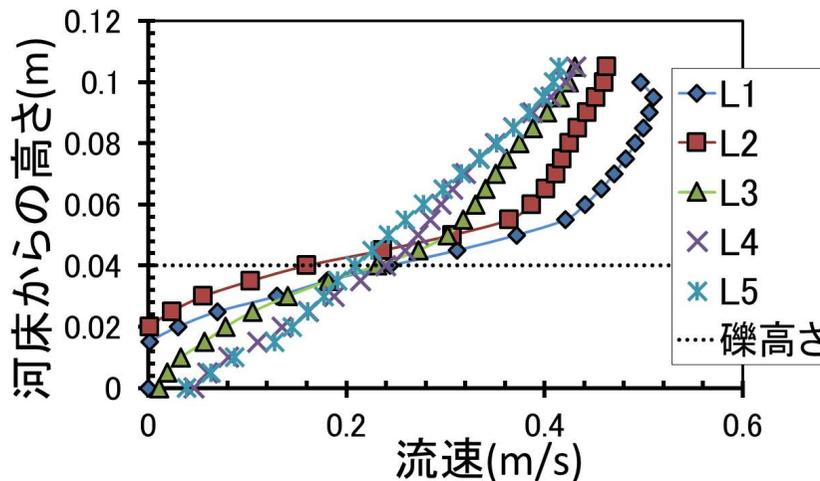


3. 付着藻類群集と土砂還元 (4)付着藻モデル有無による流速分布の相違

—(付着藻類模型あり)—



—(付着藻類模型なし)—



・底面付近, 礫高さ付近では
模型により流速は減少

・ L_1 から L_5 では上下層の
流速分布の変曲点が水面側へ

模型の存在により礫表面の
より上流側で流れが剥離

&

礫表面に付着した粗度による
剥離域の影響

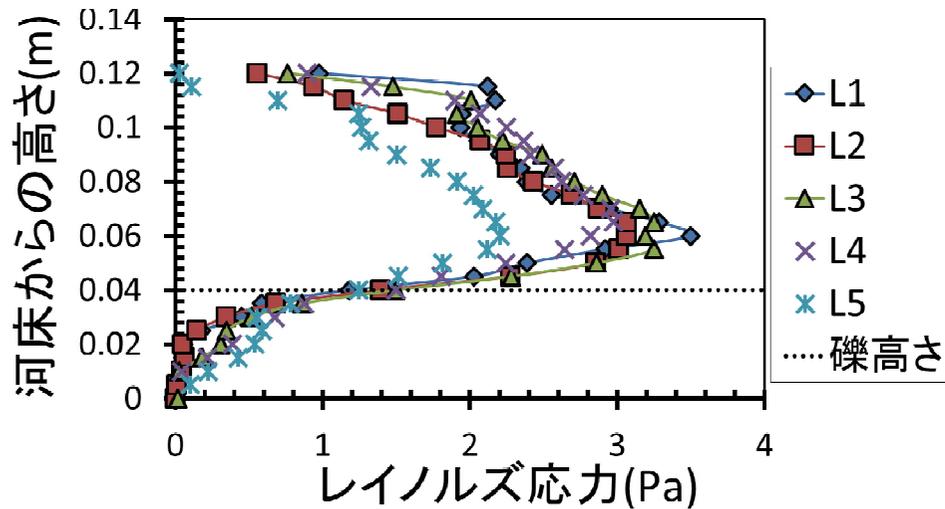


礫背後剥離域の上層部と下層部の
運動量交換が減り

礫底面付近の流速が減少した

3. 付着藻類群集と土砂還元 (5)付着藻モデル有無によるレイノルズ応力分布の相違

—本研究(付着藻類模型あり)—

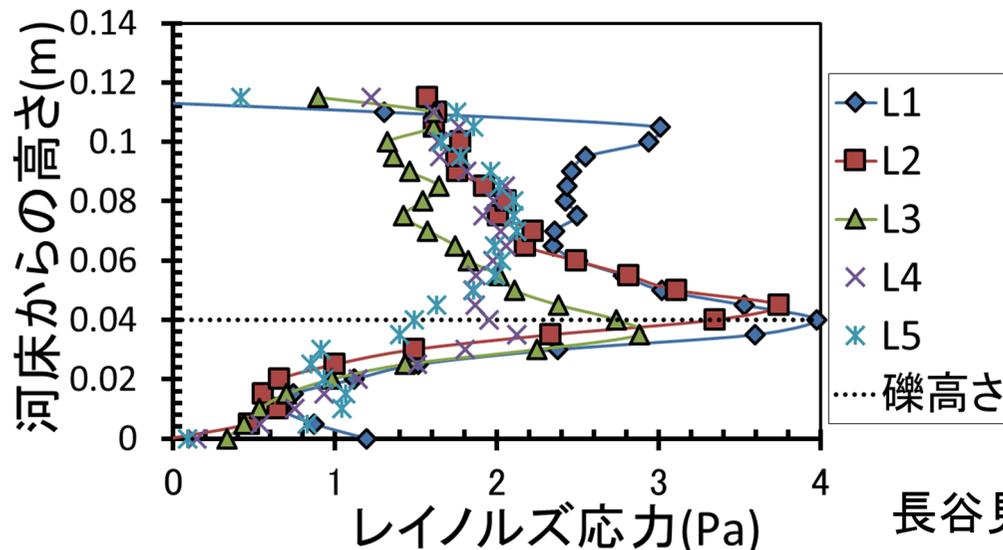


・礫高さ付近では付着藻類模型によりピーク的位置が変化
礫高さでは減少



礫背後の上下層で
運動量交換が減少している

—既往研究(付着藻類模型なし)—



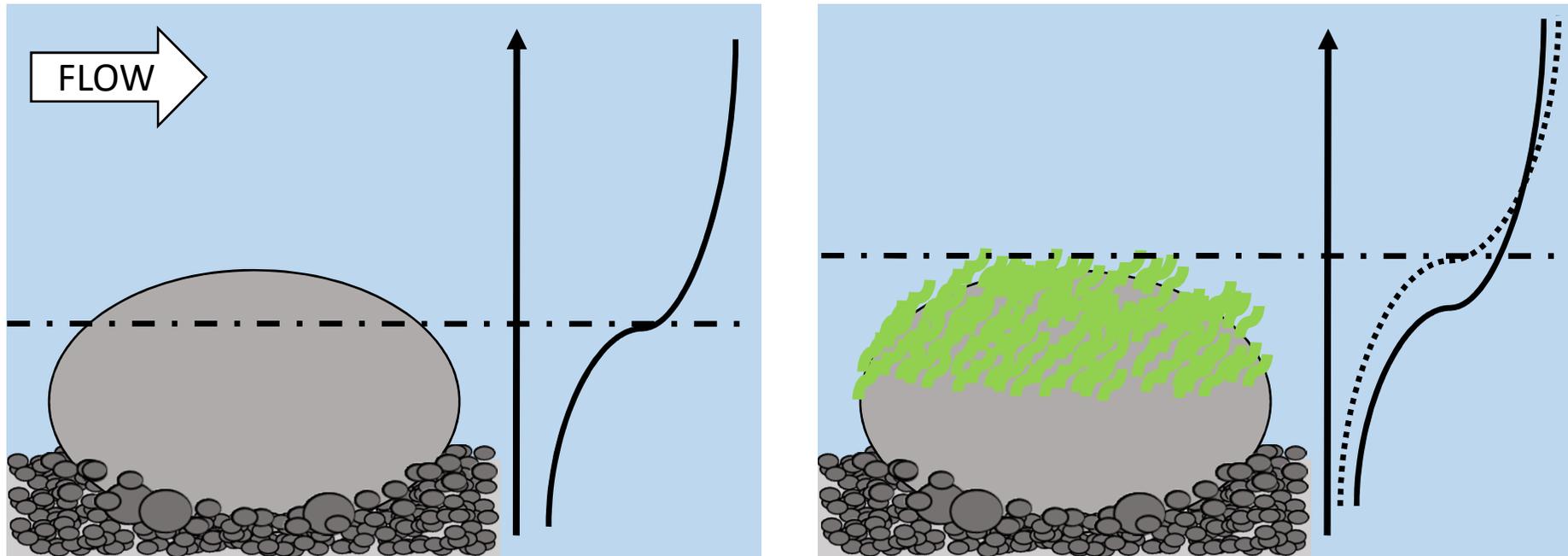
・底面付近では付着藻類模型によりレイノルズ応力が小



流れの剥離が礫上流側で
発生している

3. 付着藻類群集と土砂還元 (6)付着藻類の有無が流速分布に与える影響

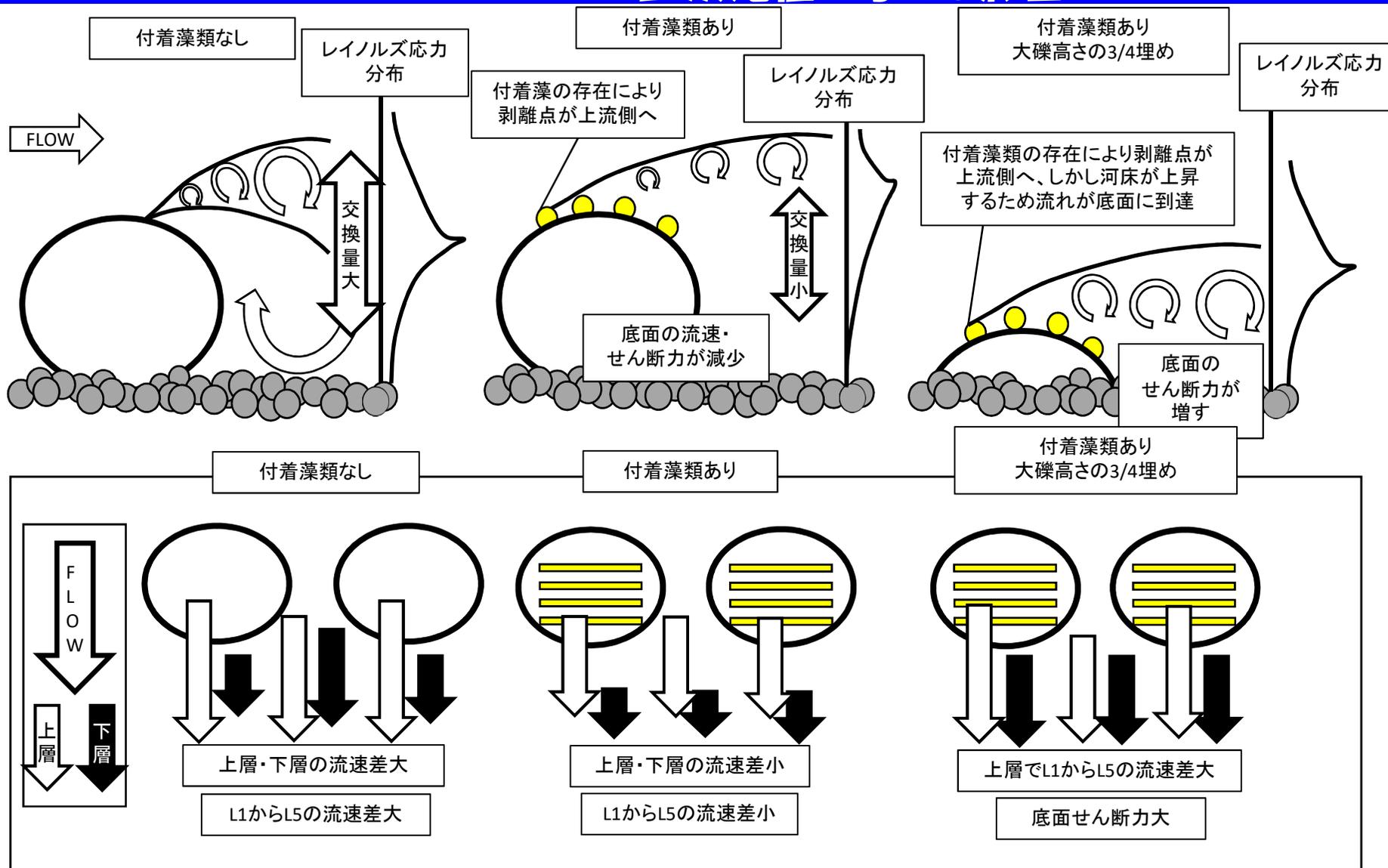
流速分布の変曲点



付着藻類模型を貼り付けた礫においては、礫表面にも付着した粗度による剥離域の影響がでるため、礫背後における上層部と下層部(礫背後剥離域)の運動量交換が減り、礫背後の底面付近流速が減少した。

特に、三次元性が減少し、上層部をすべるような流れ(Skimingフロー)を形成した

3. 付着藻類群集と土砂還元 (7) 付着藻類の有無が流れの三次元性に与える影響



底面せん断力の減少 → デトリタスの蓄積が進む

付着藻類の異常繁茂: 土砂輸送と相互作用系 + 水生昆虫の生息場にも影響

4. 礫床河川の底面せん断応力と粗面抵抗則 (1) 流れの非平衡性

(1) 摩擦速度の評価方法と物理的意味

- a) 水面形を用いる方法、b) 対数分布則を用いる方法、c) 乱れエネルギーを用いる方法、d) レイノルズ応力を用いる方法、e) 直接計測法

直接計測以外の底面せん断応力の算定法はあるスケールにおいて流れの平衡状態の仮定をする必要があり、ある断面のせん断応力が河床材料に作用する流体力や粗度層の流速を表すためには、その断面より下層では流れが平衡状態である必要がある。

(2) 流れの解析における粗面の評価方法

- f) 平面二次元解析、g) 準三次元・三次元解析

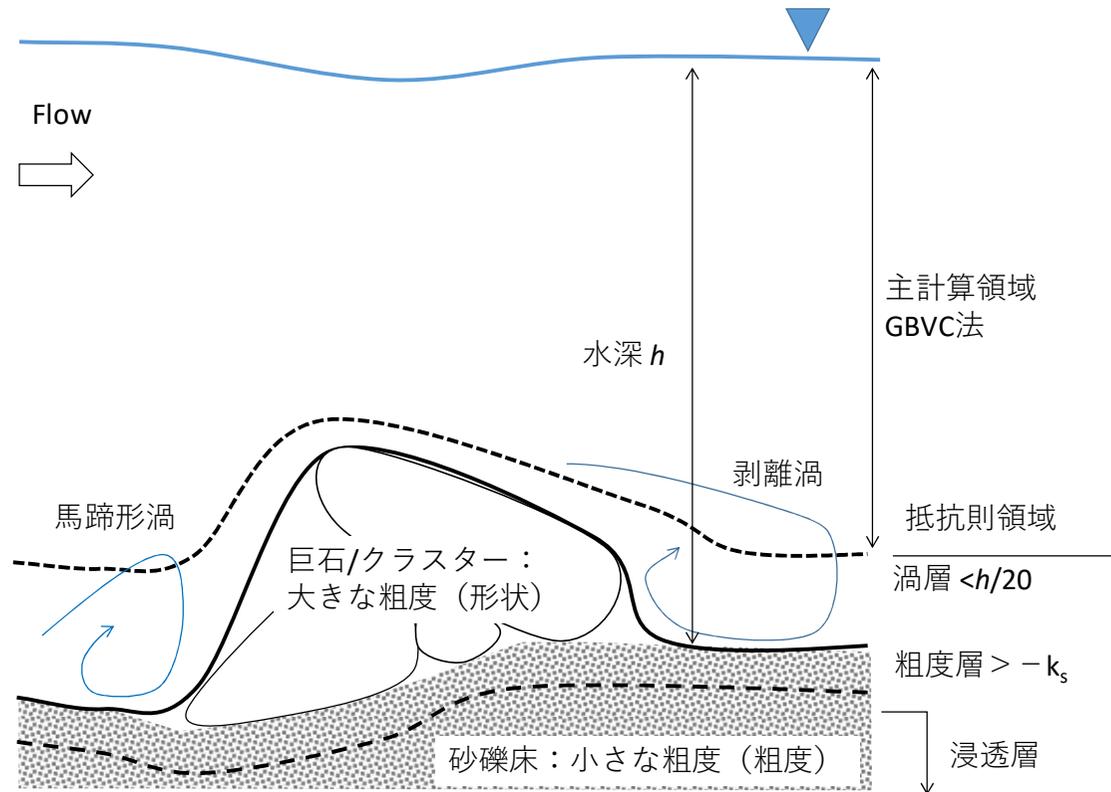
流れの解析においても、計測の場合と同様に底面せん断応力の評価には流れの平衡状態が仮定されている。

しかし、人工的な粗度の場合と異なり、広い粒度分布から構成される礫床河川の底面粗度は均質ではなく、場所ごとに異なる。また、礫層間の非平衡流れを無視することが出来ず、礫床粗面を不透過の一樣粗度の河床面として取り扱う方法には限界がある。

礫床河川における巨礫群などの河床粗度の不均質性や粗度層の非平衡流れを取り扱う代表的な解析法にはレイノルズ平均と空間平均を施す二重平均法が有効である。

・二重平均法による解析を行う場合、基礎方程式の平均化に伴う種々の未知係数の評価法や従来の抵抗則との関連を明確にすることが課題となる。

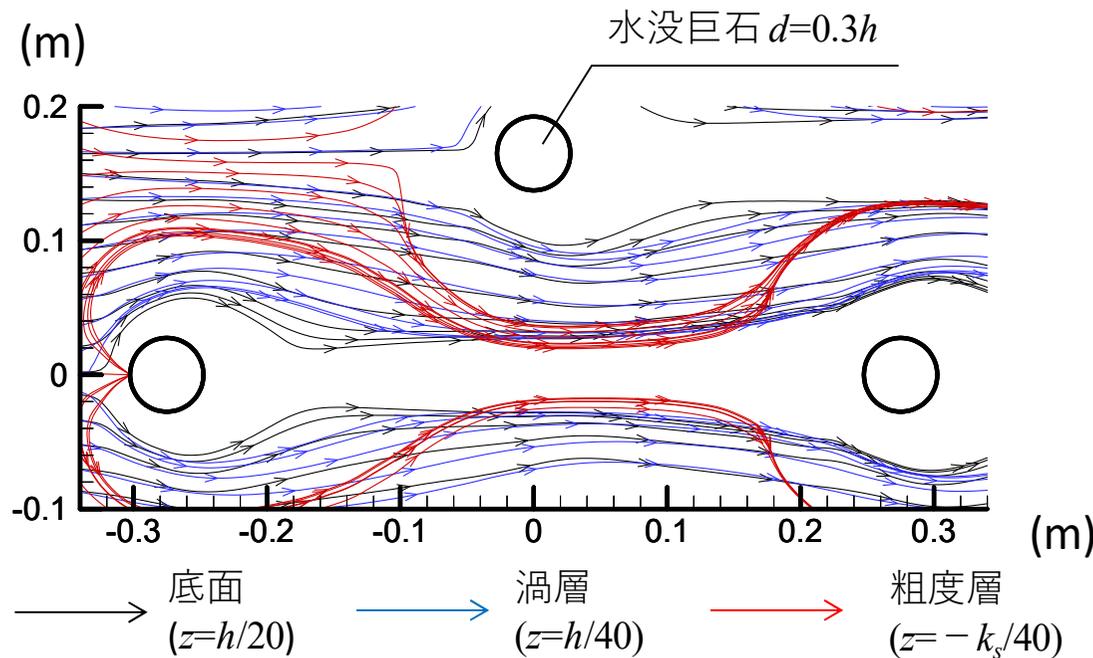
4. 礫床河川の底面せん断応力と粗面抵抗則 (2)粗度のスケール分離と非平衡粗面抵抗則



内田・福岡は河川流解析に適用できる平面二次元解析の枠組みの中で大きな粗度を形状として小さな粗度を抵抗則で与える流れの解析法を提案した。

大きな粗度が流れに与える影響を考慮するため、粗度背面の剥離が考慮できる非静水圧準三次元解析法のGBVC法が用いられている。大きな粗度の存在によって小さな粗度で構成される河床近傍の流れも乱されるために、前節のような流れの平衡状態を仮定することは適切でない。非平衡粗面抵抗則では底面近傍を粗度層、渦層に分離し、その運動方程式と連続式が解かれる。

4. 礫床河川の底面せん断応力と粗面抵抗則 (2)粗度のスケール分離と非平衡粗面抵抗則



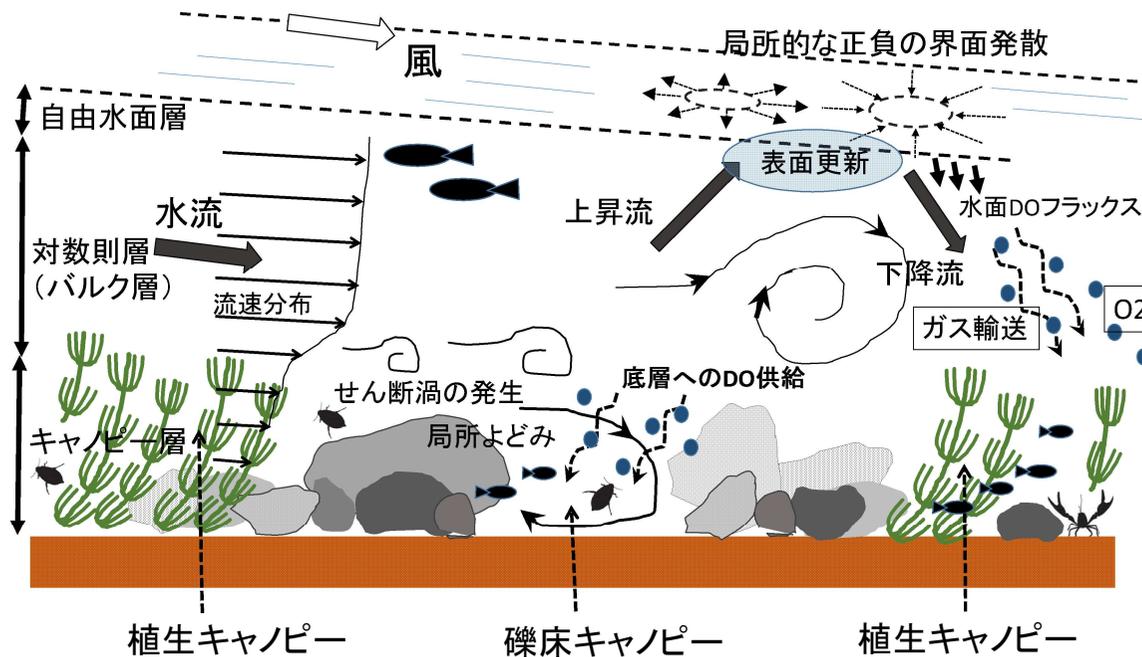
Uchida ら(2014)のGBVC4-DWL
による解析結果

- ・ 巨石前面の馬蹄形渦，背後の剥離渦によって流れは複雑に変化
- ・ 底面近傍のせん断応力を用いて粗度層の流れや粗度層の河床材料に作用する流体力を評価できない

・ 非平衡粗面抵抗則 → 礫間の生態系検討に応用するためには、**目的とする流れに応じた粗度スケール分離法を検討していく必要がある。**

・ **流れの鉛直構造と非平衡粗面抵抗則**を考慮して**実測水面形**を再現する解析を行うことにより、**全体的な底面せん断応力の精度を確保した中で、河床礫間の複雑流れと礫に作用する流体力の分布が計算できる。**

5. 粗面境界層の乱流輸送現象 (1)



- ・キャンピ層(粗度領域)の上部に平均流分布の変曲点: せん断層あるいは混合層の生成

- ・せん断不安定性から横断軸をもつ大規模な組織渦構造が誘起

- ・大規模組織渦は礫や植生の間隙とその上層(バルク層)との物質や運動量交換を担う。

田中規夫・内田龍彦・山上路生:境界層水理学が生態系保全に果たす役割, 河川技術論文集(2017)

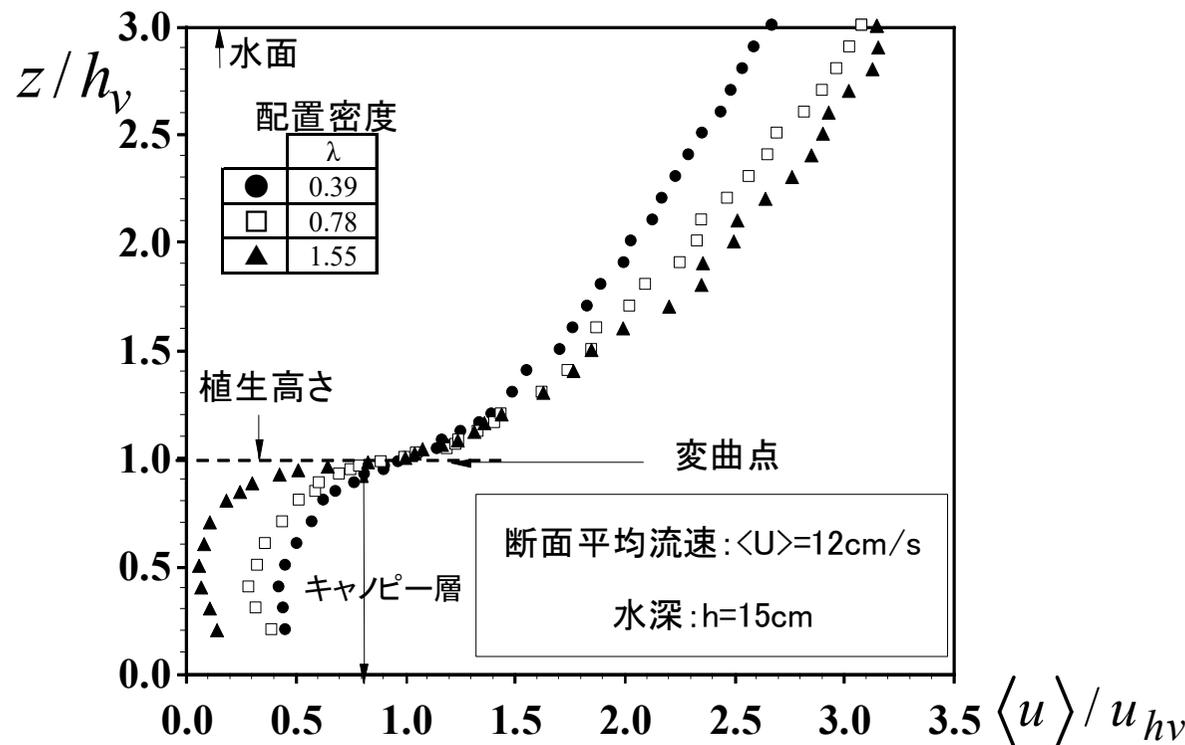
- ・底層から水面層に向けてバースティング(突発的な下降流であるsweepと上昇流であるejection)が発生

水面領域で適度な流体塊の更新(水面更新とよばれる), すなわち酸素飽和流体塊と酸欠流体塊の交換がなければ, 大気から水中への酸素供給は促進されない。

バースティングはこの水面更新にとって重要な役割をもつと期待されるが, 多くの詳細が未解明のままである。

このスライドは、山上路生准教授が論文に記載した内容

5. 粗面境界層の乱流輸送現象 (1)



- ・植生密度が大きいほど植生内部 ($z / h_v < 1$) で植生の存在が流れ場に及ぼす影響が大きくなる。

- ・植生高さ付近で変曲点が生じ、せん断不安定となる。

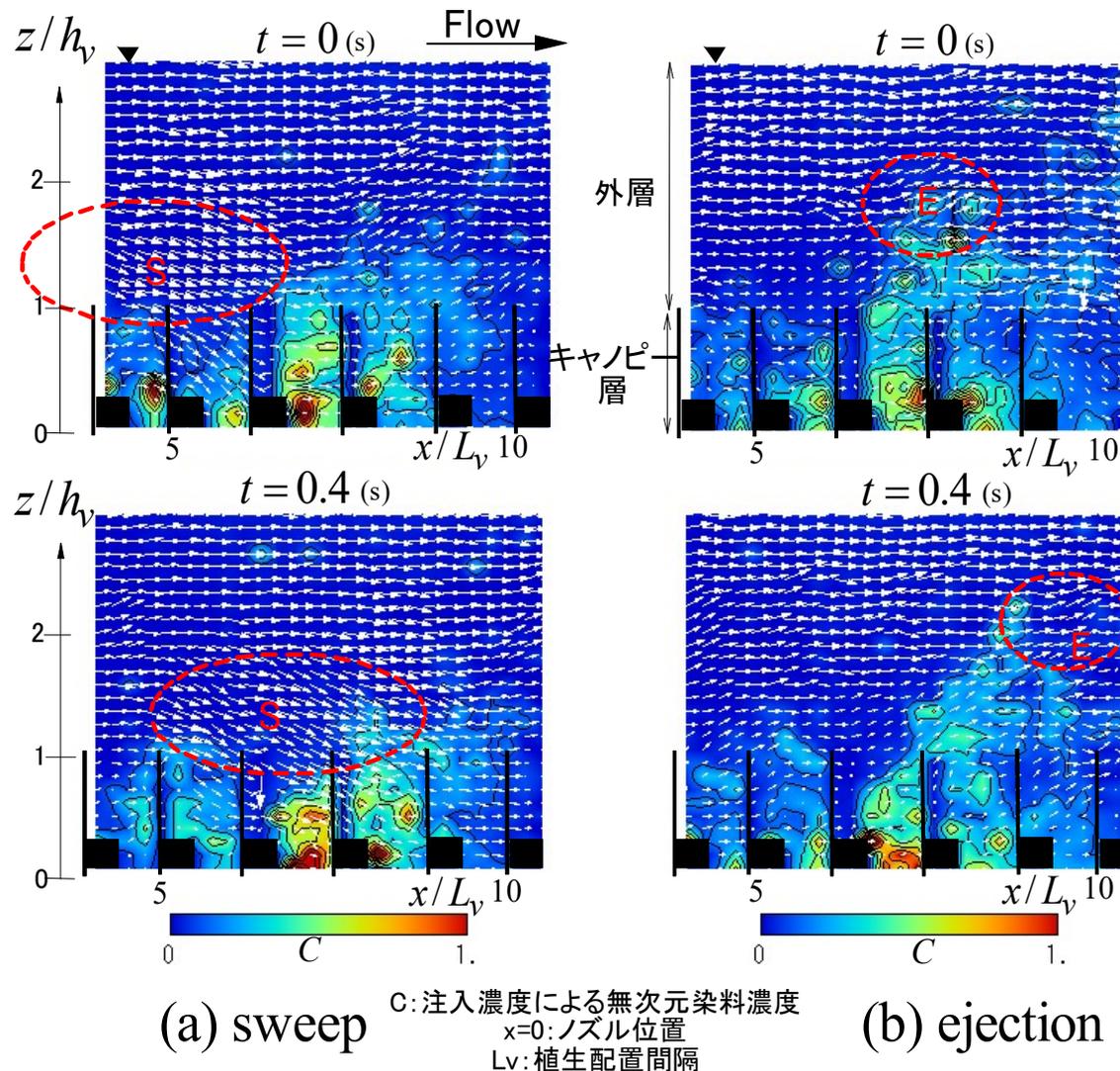
- ・礫の場合は代表直径0.1倍程度下になるという研究もある

- ・植生内部で2次ピークをもち、流速分布は負の勾配をもつことがわかる。

- ・この逆勾配流速分布は野外の植生気流、都市キャノピー、礫間の縦キャニオンでも報告されているが不明な点が多い。

- ・2次流の影響と推測され、今後詳細に検討する必要がある。

5. 粗面境界層の乱流輸送現象 (1)



組織乱流イベント
にともない植生内
外の物質交換が
促進される

図 瞬間流速と染料濃度分布の時系列

6. おわりに (1/3)

- ・粗度スケールが大きいほど**流れの3次元性**が顕著となる。粗面乱流では、粗度層内部の乱流、**二次流による輸送機構**も明らかにする必要がある。
- ・静水圧近似をしている浅水流方程式は大規模粗度群内の物質輸送問題には、本来は適用できない
- ・3次元流れの詳細を解明するためには流速計測法のさらなる高精度化とともに、**二重平均法**のようなデータ解析の高度化も求められる。
- ・粗面乱流の実験はまだまだ必要。室内実験で得られた知見を実河川場へ適用する際の**スケールギャップ**についても、将来的な研究発展にとって解決すべき課題の一つといえる
- ・**流れの鉛直構造と非平衡粗面抵抗則**を考慮して**実測水面形**を再現する解析を行うことにより、全体的な底面せん断応力の精度を確保した中で、河床礫間の複雑流れと礫に作用する流体力の分布が計算できる。

6. おわりに (2/3)

- ・底生動物の生息場や避難場は、流れの非平衡性の強い大規模粗度空間周辺にあるため、その環境改善効果の物理的メカニズムを含めた解明には、大規模粗度空間における乱流現象の解明とそれを適切に表現する指標が必要である。
- ・付着藻類繁茂と土砂輸送は相互作用系にあるので、付着藻類の有無による乱流現象の相違を解明する必要がある。
(それが水生昆虫の生息場と動態に影響を与える)
- ・最新の計測技術と組み合わせ、礫床河川の境界層水理学の理解を深めることは、流れや土砂の水理だけでなく、河川生態分野などの学際領域と併せて発展することが期待される。

6. おわりに (3/3)

科学と実務をつなぐ上での課題

- ・大規模粗度を含む粒度分布の幅の広い複雑な河床構造(時空間的に非平衡で静水圧近似できない粗度層内部)をどうモデル化するか(実験、数値解析)
- ・乱流の基礎実験で導き出すべきものは何か(時空間平均の結果として残る輸送 and/or 時空間変動を含む乱流構造)
- ・現地観測を行なう場合、どのように一般性を確保していくか(河床構造の空間的な付均質性:河床構造の捉え方)
- ・生態学としての現象理解と、水工学としての乱流現象理解は同じ解像度か(どこまで知るべきか)
- ・マクロでとらえるべきか、ミクロ現象の解明から積み上げていくべきか
ミクロの場合、実務の観測でとらえることが可能な物理量をどうとらえるか