

流域スケールからマイクロスケールまでの 流砂現象と川の個性

岐阜大学 流域圏科学研究センター 原田守啓

1

自己紹介

➤ 原田守啓（はらだもりひろ） 博士（工学）、技術士（建設部門 河川砂防海岸海洋）

- 1976年 静岡県浜松市生まれ
- 岐阜大学流域圏科学研究センター准教授
- 兼・岐阜大学地域減災研究センター減災技術開発部門長
- 兼・岐阜大学工学部附属応用気象研究センター

➤ 専門分野：河川工学、土砂水理学、応用生態工学



30歳：



35歳：



40歳：

➤ 岐阜大学大学院では、既存の河川改修の方法に疑問を感じていたため、『河川中流域の魚類生息場評価モデルの改良』をテーマにしました。

➤ 大学院修了後、建設コンサルタントに就職。
ダム環境アセス、河川砂防関係の調査計画設計業務に従事。



以前の趣味：陶芸

➤ （独）土木研究所自然共生研究センター 専門研究員（2011.7～）
「多自然川づくり」に関する研究や、河川災害復旧の技術基準の改定に関わることができ、コンサルタント技術者時代の目標は一部達成。

➤ 岐阜大学流域圏科学研究センター准教授（2014.12～）
治水と環境保全を両立した河川管理，流域管理を目指す！

- ・治水と環境保全の両立 = 土砂水理学 + 河川生態学 + 地形地質 + α
- ・気候変動と人口減少に適応した流域圏の実現

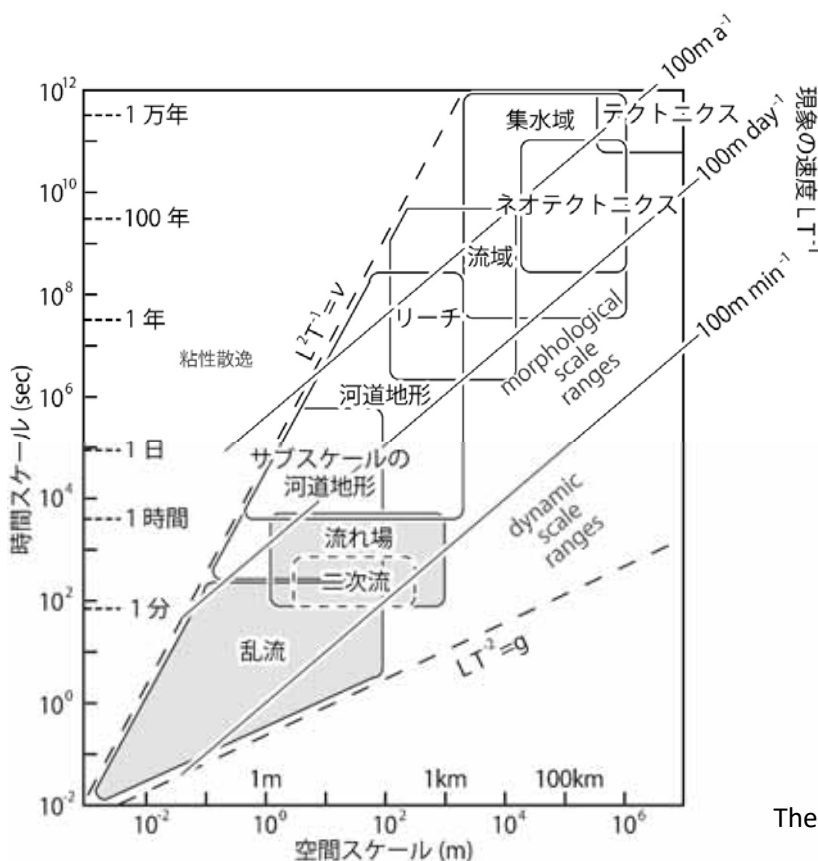


最近の趣味：卓球

今日お話ししたいこと

- 自然現象の時空間スケール
 - さまざまな時空間スケールの現象の重なり合い (河川地形、生息場、気象現象)
 - 土砂水理学がカバーしている領域は？
- 川の個性っていったい何が決めてるんでしょうね？
 - 流域特性 = 地形地質 + 気候 (+ 人間活動) ...としたときに、流砂研究は、そのどこまでカバーできているのか？
- 流域地形地質が流砂現象の境界条件を規定していると考えられるいくつかの研究事例紹介 x 3つ
- 提案したい一つのアプローチ

3



Michael Church
The University of British Columbia
Professor Emeritus

河川地形に関わる現象の時間-空間スケールの領域と現象の速度
(Church 2008をもとに作図して一部改)

4

河川の生息場の階層性

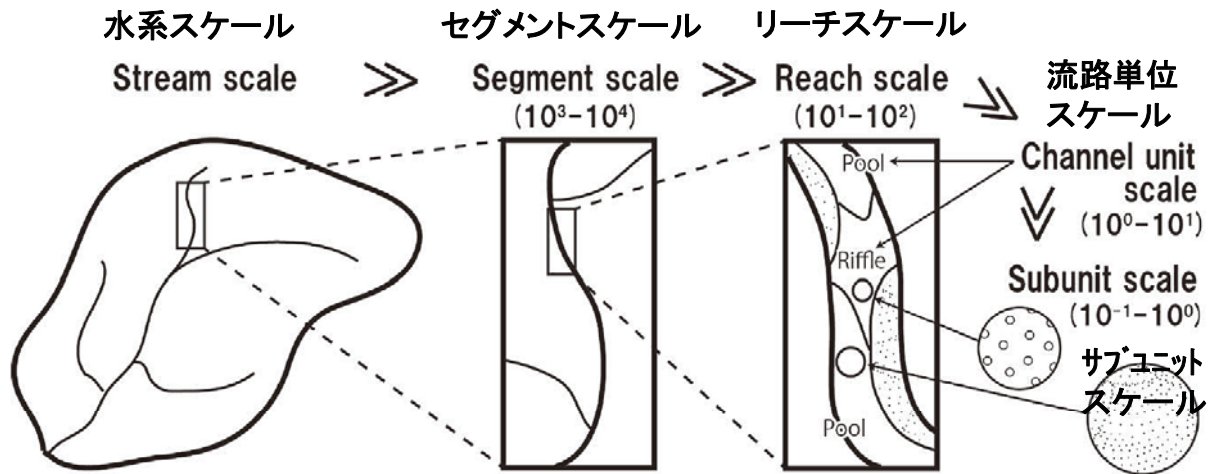


Figure 1. Hierarchical organization of spatial scales in streams and rivers. Numerical characters indicate spatial dimensions based on in situ channel width. Modified from Frissell et al. (1986) based on Grant et al. (1990) and Gregory et al. (1991).
河川における空間スケールの階層構造。数字は、対象とする場の流路幅の倍数であり、空間サイズを表す。Grant et al. (1990) と Gregory et al. (1991) に基づき、Frissell et al. (1986) を一部改変。

永山・原田・萱場 2015

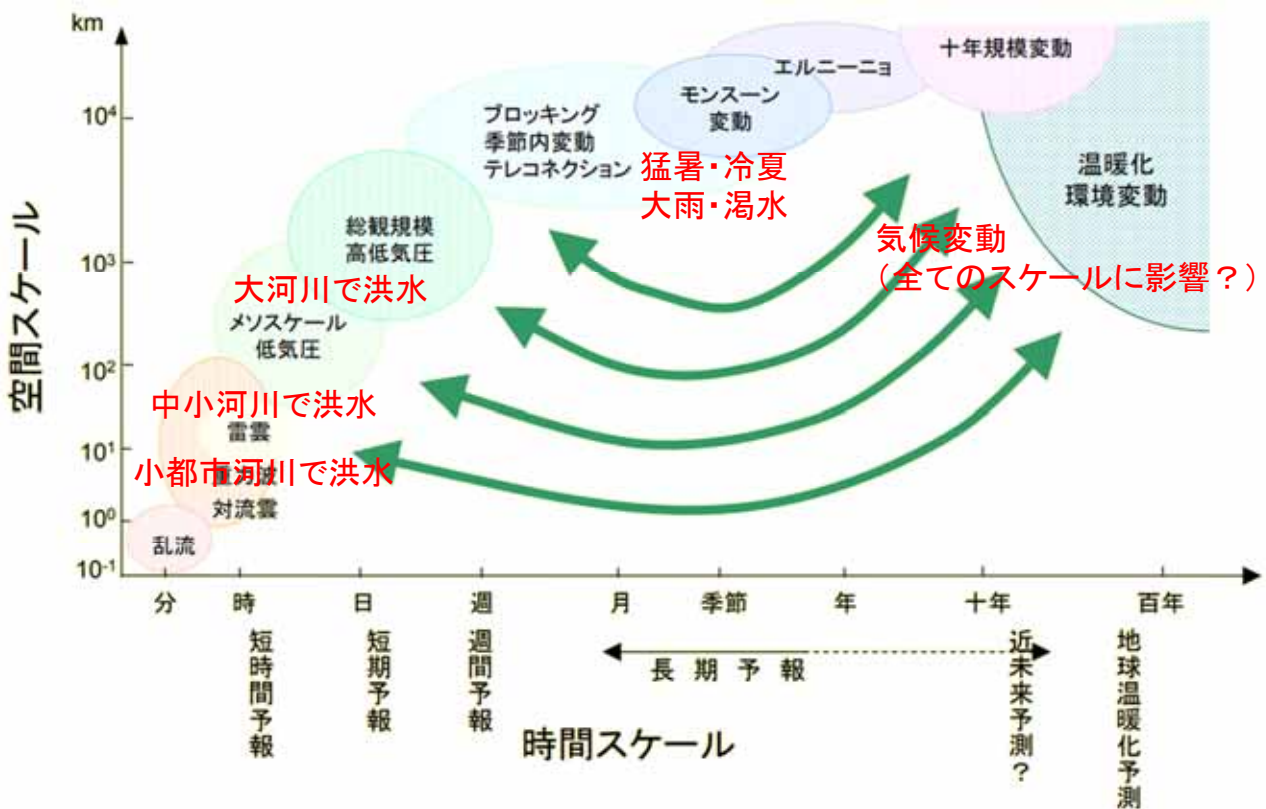
Table 1. Some events or processes controlling stream habitat on different spatiotemporal scales.

System level	Linear spatial scale ^a (m)	Evolutionary events ^b	Developmental processes ^c	Time scale of continuous potential persistence ^a (years)
Stream system	10 ³	Tectonic uplift, subsidence; catastrophic volcanism; sea level changes; glaciation, climatic shifts	Planation; denudation; drainage network development	10 ⁶ -10 ⁵
Segment system	10 ²	Minor glaciation, volcanism; earthquakes; very large landslides; alluvial or colluvial valley infilling	Migration of tributary junctions and bedrock nickpoints; channel floor downwearing; development of new first-order channels	10 ⁴ -10 ³
Reach system	10 ¹	Debris torrents; landslides; log input or washout; channel shifts, cutoffs; channelization, diversion, or damming by man	Aggradation/degradation associated with large sediment-storing structures; bank erosion; riparian vegetation succession	10 ² -10 ¹
Pool/riffle system	10 ⁰	Input or washout of wood, boulders, etc.; small bank failures; flood scour or deposition; thalweg shifts; numerous human activities	Small-scale lateral or elevational changes in bedforms; minor bedload resorting	10 ¹ -10 ⁰
Microhabitat system	10 ⁻¹	Annual sediment, organic matter transport; scour of stationary substrates; seasonal macrophyte growth and cropping	Seasonal depth, velocity changes; accumulation of fines; microbial breakdown of organics; periphyton growth	10 ⁰ -10 ⁻¹

^a Space and time scales indicated are appropriate for a second- or third-order mountain stream.

^b Evolutionary events change potential capacity, that is, extrinsic forces that create and destroy systems at that scale.

^c Developmental processes are intrinsic, progressive changes following a system's genesis in an evolutionary event.



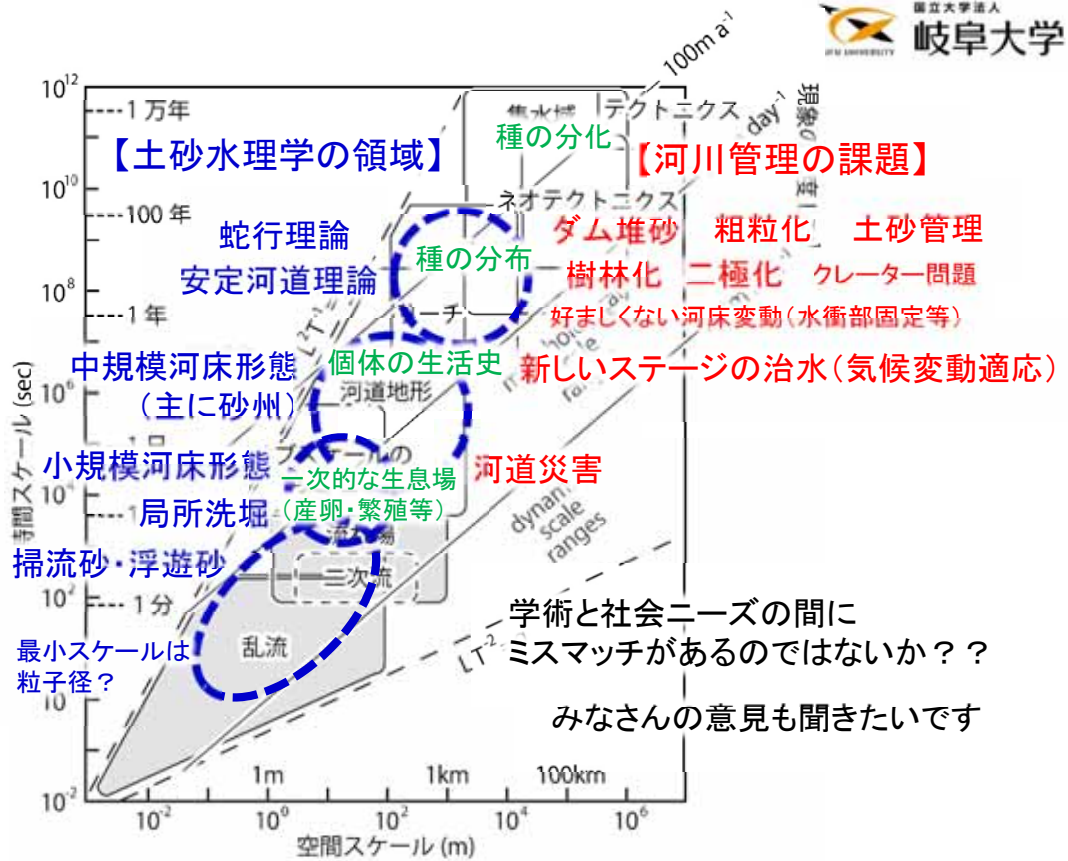
東京大学大気海洋研究所 木本昌秀さんの講演資料より拝借
<https://www.jamstec.go.jp/hpci-sp/info/sympo2012/pdf/kimoto.pdf>

7

自然現象の時空間スケール

- 大きな現象ほど時間スケールが大きい
 - 重力加速度と動粘性係数の狭間の世界に我々は生きている!
- 小さな現象は大きな現象の支配下にある
 - 現象の境界条件は、より大きな現象により決定される
- 同じスケールでも、現象によって時間スケールが異なる
 - 地形の変化速度より、気象現象の変化速度の方が早い
 - 気象現象は、地形現象の形成要因であると同時に攪乱要因である
- じゃあ、このようなフレームワークを、土砂水理学にあてはまると、先人たちはいったい何を研究してきたといえるだろうか？

8



河川地形に関わる現象の時間-空間スケールの領域と現象の速度 (Church 2008をもとに作図して一部改)

流域スケールからマイクロスケールの現象、土砂水理学と河川生態学を一体化するために私はこう考えました。

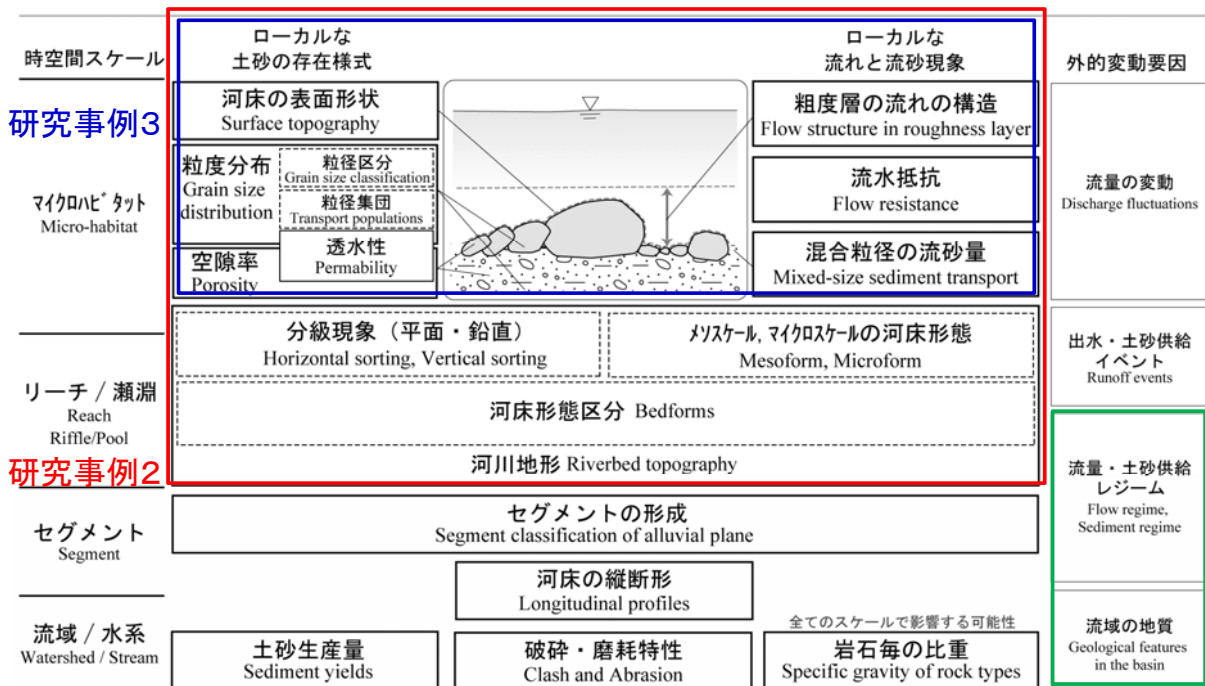


Fig.1. Physical properties of riverbed environment

図1 河床環境を構成する物理環境要素

研究事例 1 : 流域地質の違いと河道管理

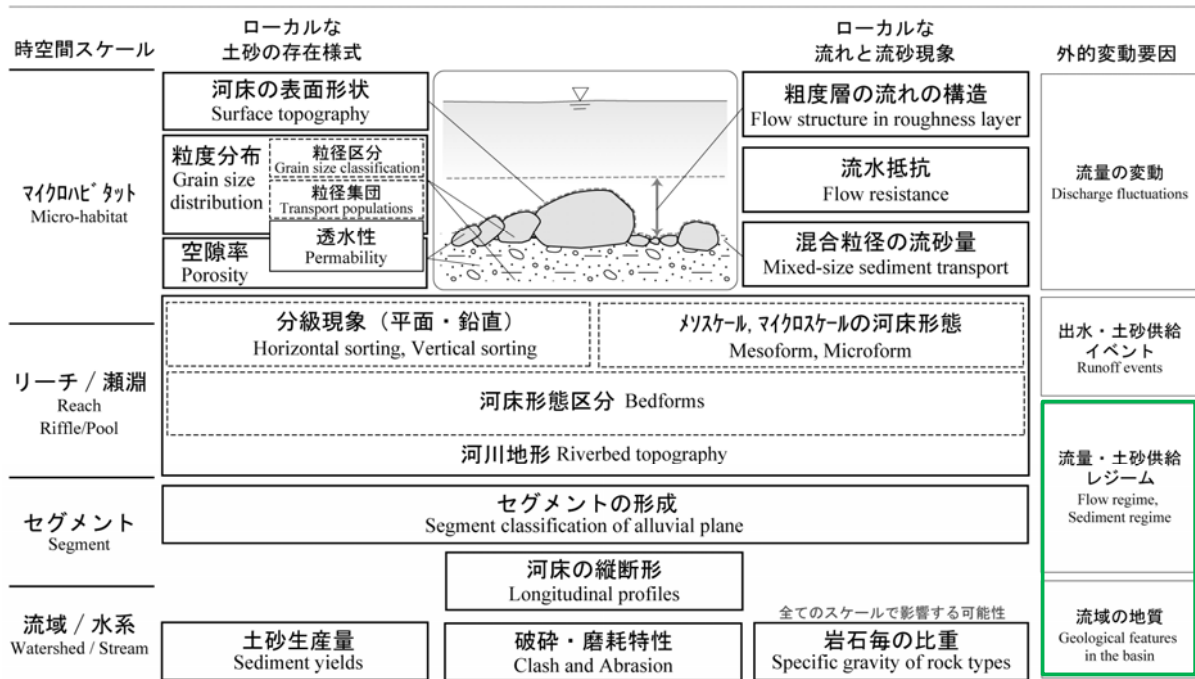


Fig.1. Physical properties of riverbed environment

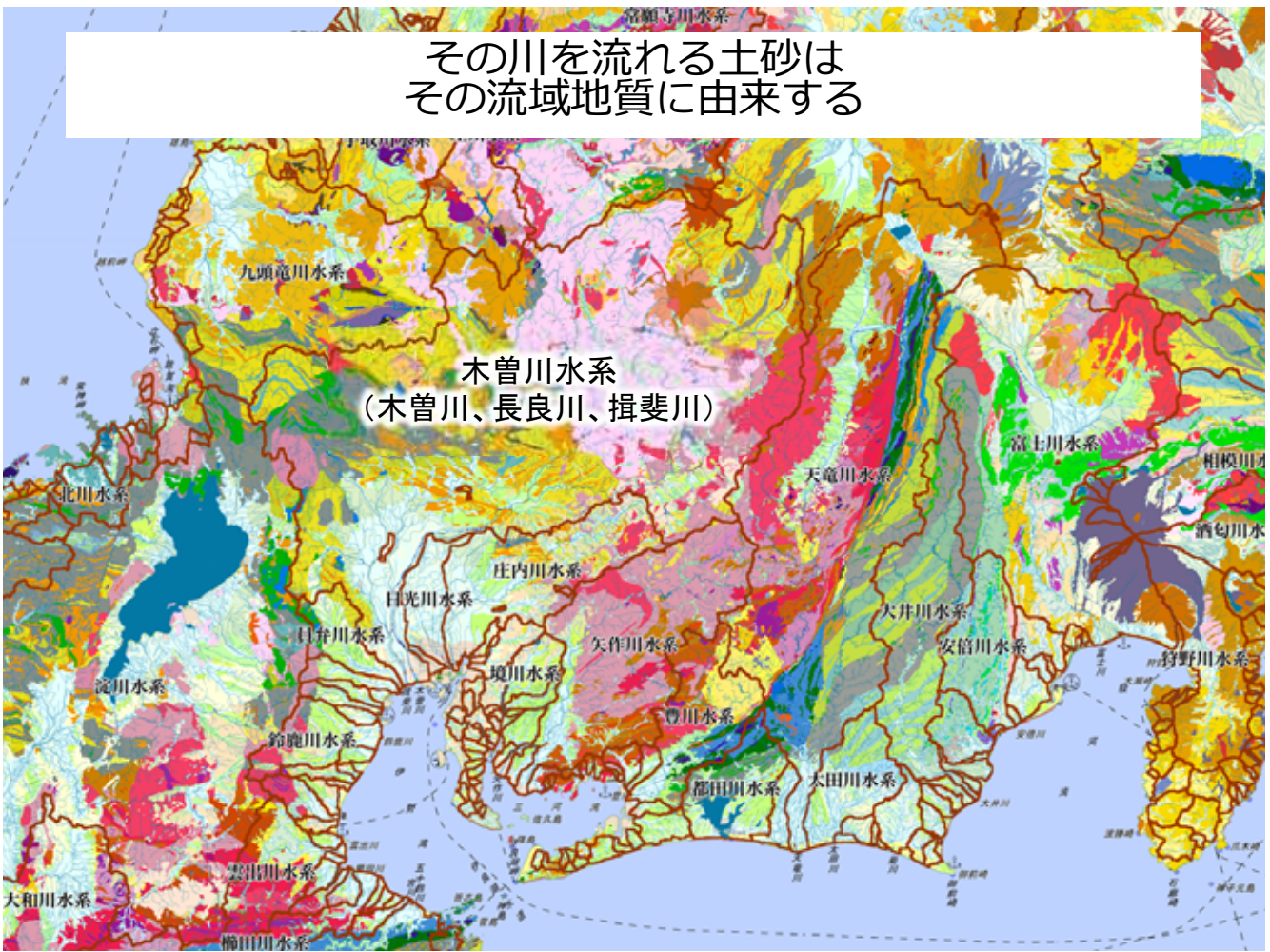
図1 河床環境を構成する物理環境要素

(原田・萱場 2015)改

11



その川を流れる土砂は
その流域地質に由来する



流域地質が山地河川地形に与える影響 国立大学法人 岐阜大学

Research Question:

1. 山間地の河川のセグメントの特性は、どのように区分できるのか？
2. 山間地の河川の姿（地形・河床材料）は地質によってどう違うのか？



赤線：流域界
青線：水域



赤色・・・火成岩
 橙色・・・変成岩
 黄緑・・・深成岩(花崗岩)
 桃色・・・堆積岩類
 水色・・・付加体コンプレックス
 赤線・・・流域界

地質によって
河床材料は変わる！
地形はどうか？



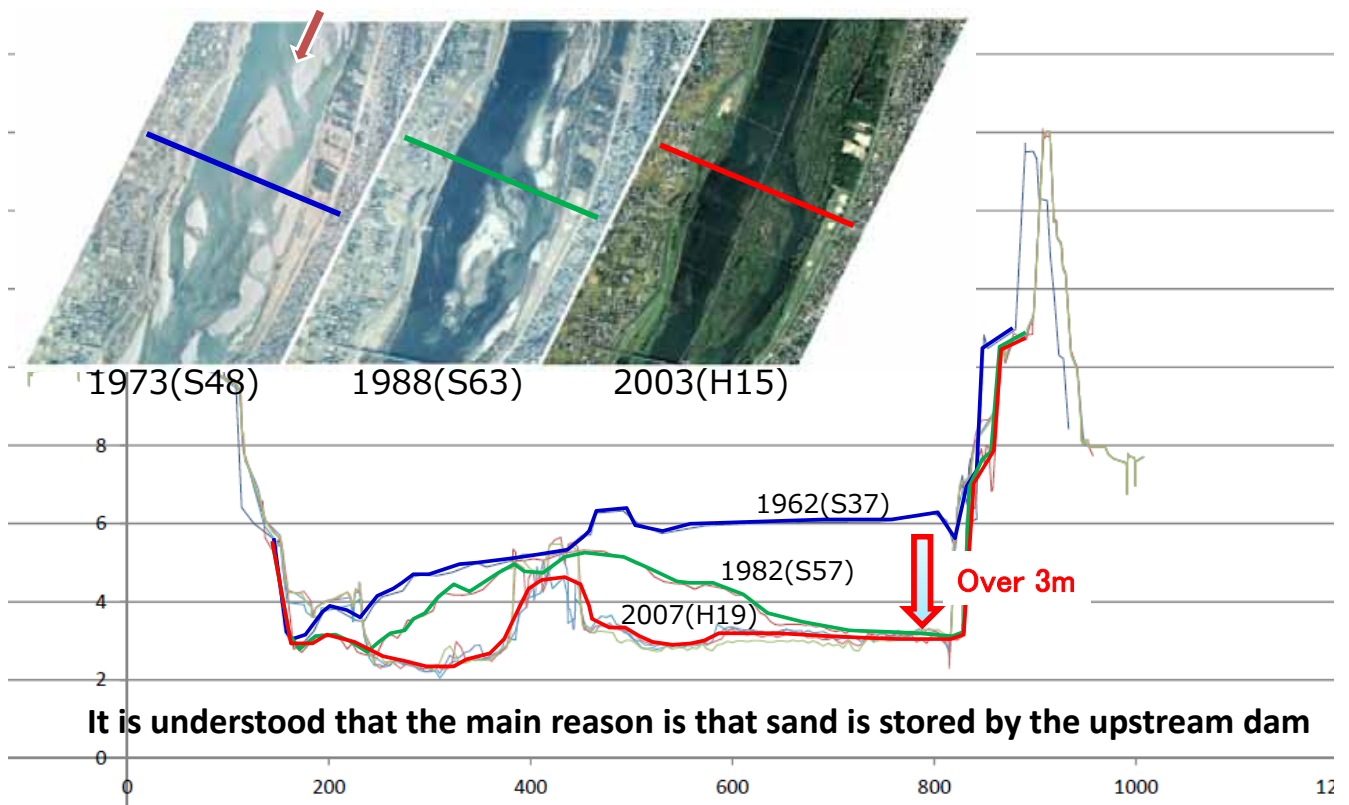
大学着任直後に学生たちと色々検討してみたが、はっきりした傾向があったのは、花崗岩地帯(領下帯)と濃飛流紋岩の河川だった。(論文化してません)

Large dams in Kiso three rivers



<http://www.dammaps.jp/>

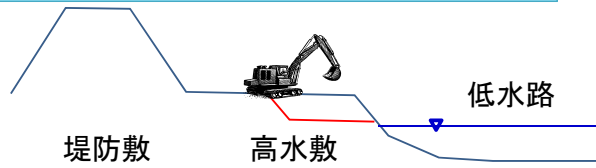
Riverbed degradation in Kiso river



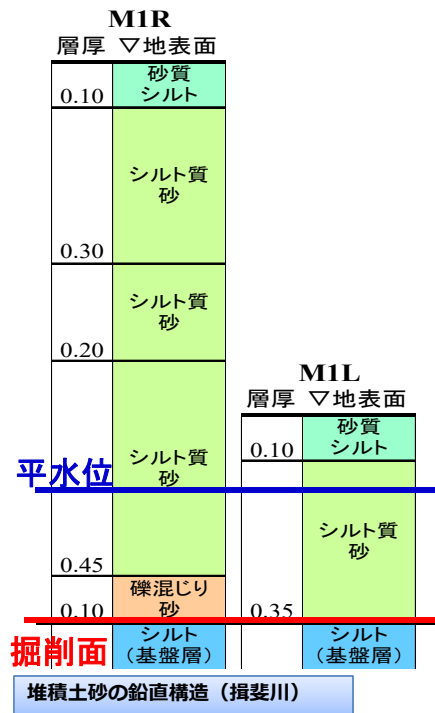
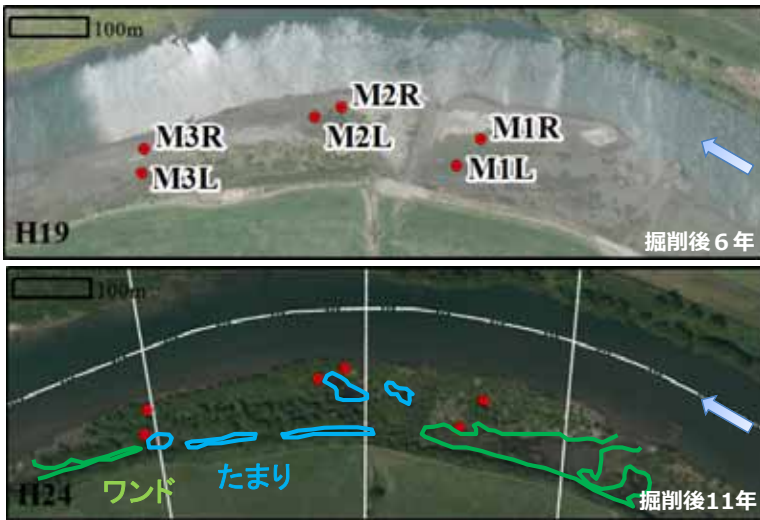
自然堤防帯河川の掘削後の土砂再堆積問題

主に国土交通省が治水安全度を確保するために行っている河道掘削

土砂が短期間に再堆積してしまう原因とメカニズムは？



掘削後の短期間（数年間）で土砂が再堆積



Excavation works in Ibi and Nagara river



揖斐川掘削地：

低く掘った箇所は赤系
高めの箇所は青系



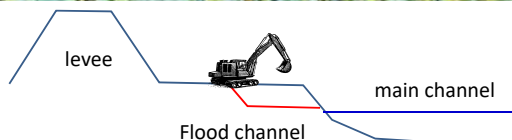
掘削地の主な堆積物：

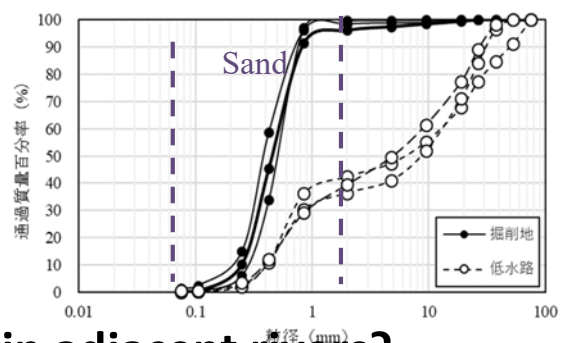
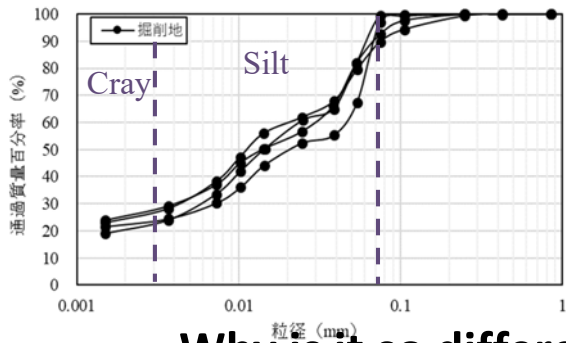
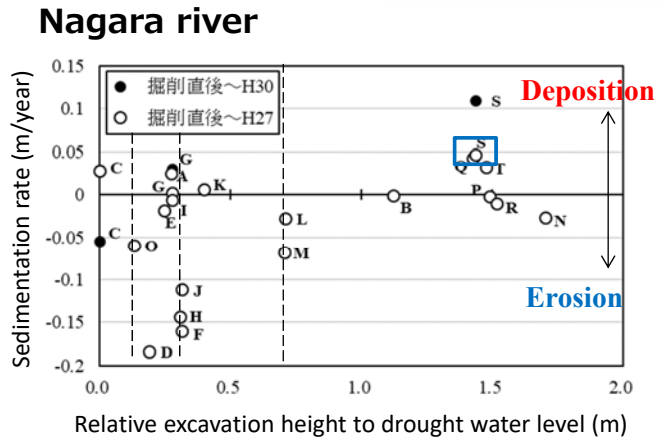
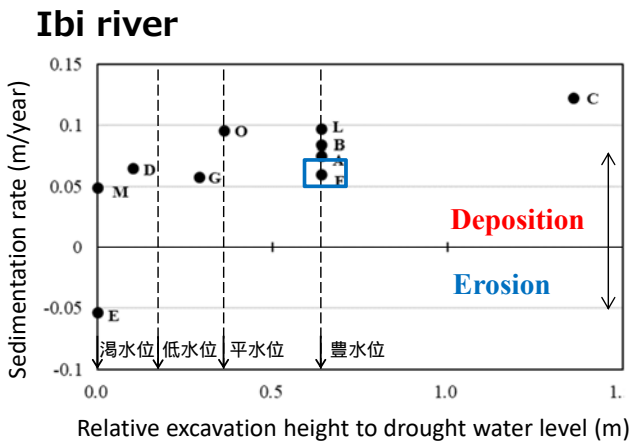
細砂やシルトを中心としたウォッシュロードが堆積 (原田ら2015)

長良川掘削地：



掘削地の主な堆積物：粗砂～細礫 (原田ら2018)





Why is it so different in adjacent rivers?

I focused on the sediment concentration during the flood

土砂生産量、浮遊砂濃度の違い

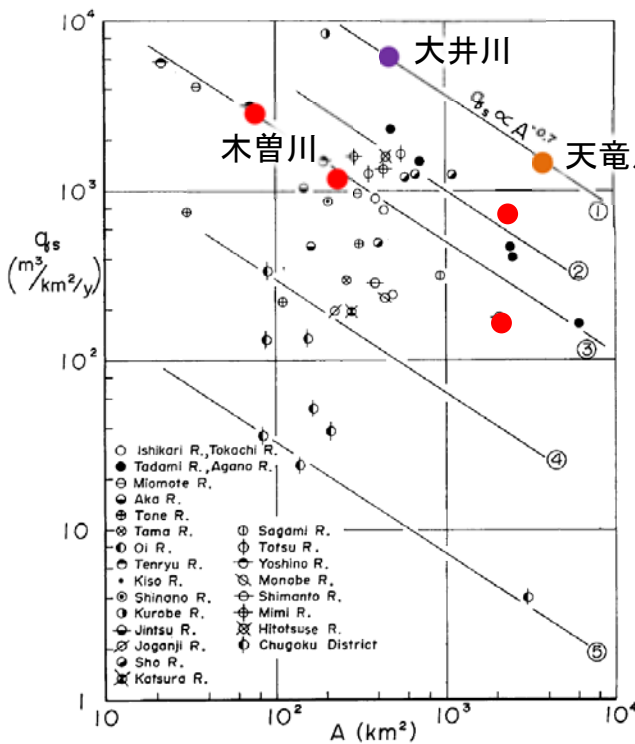
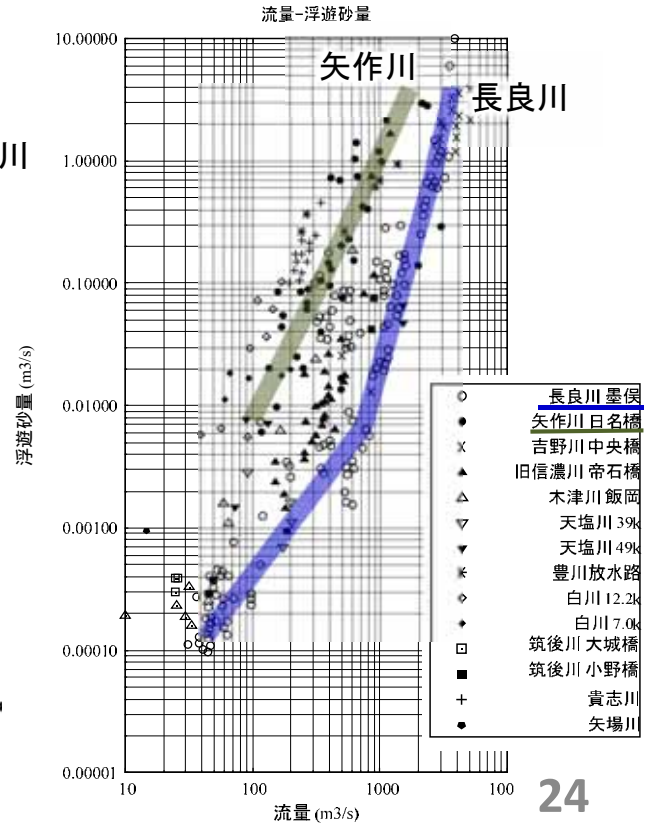
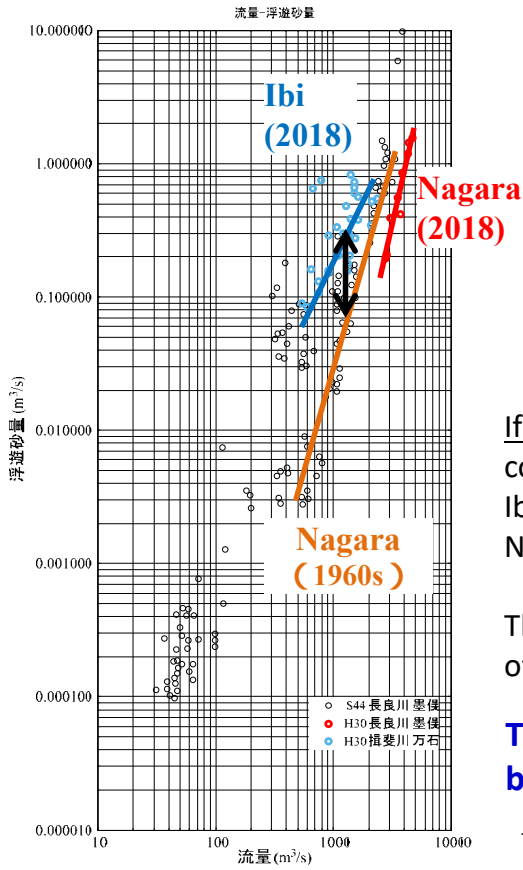


Fig. 2 Relation between specific sediment yield and catchment area in Japan.



Measurement results of fine sediment concentration in Ibi river and Nagara river (2018)

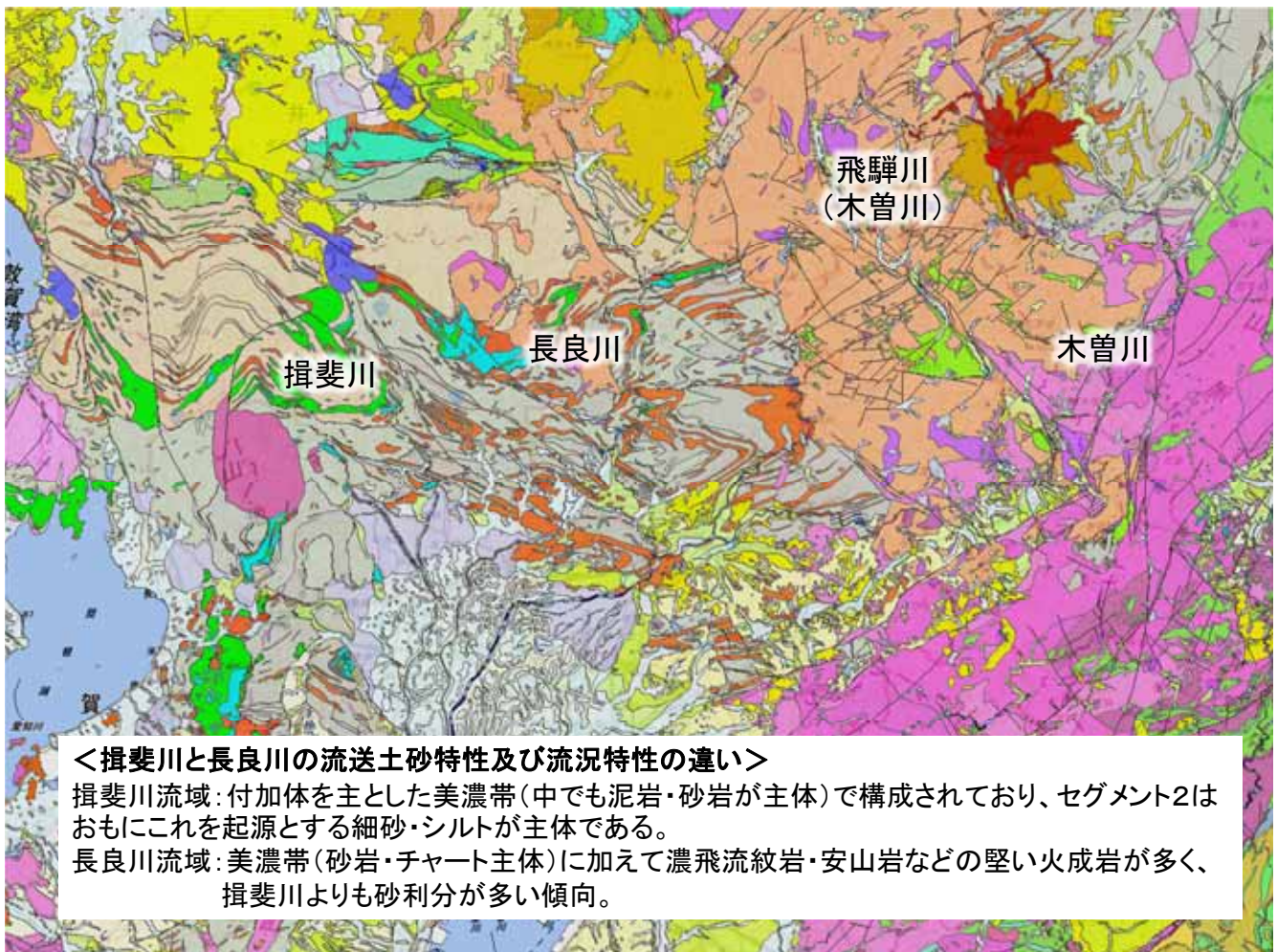


If the flow rate was about the same level, it was confirmed that the sediment concentration in the Ibigawa river was higher by about 1 order than the Nagara River.

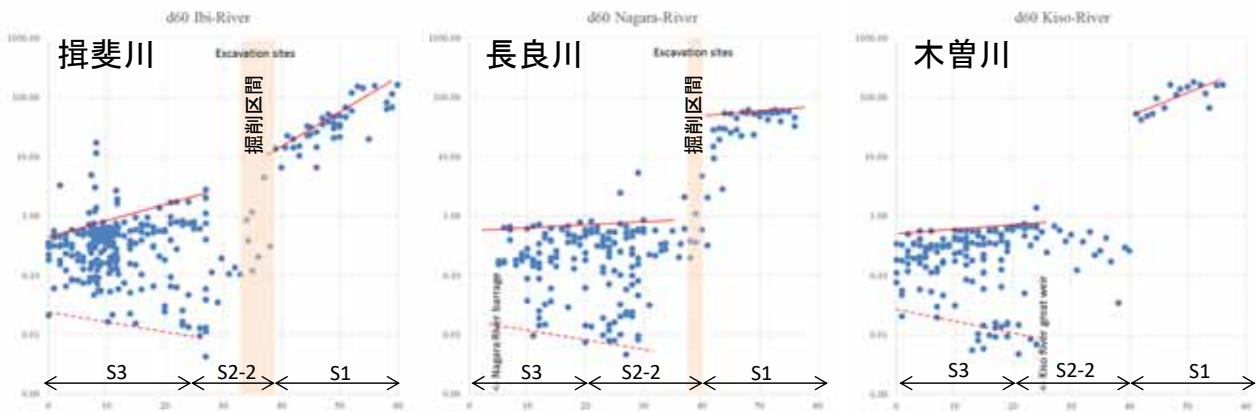
This is the cause of the accumulation of a large amount of fine grain sediment in the Ibi River.

The Kiso three Rivers are adjacent to one another, but have completely different sediment regime!

The data plots in 2018 are likely to underestimate the concentration.



木曽三川の河床材料(d_{60})縦断分布特性



粒径 (mm)									
0.005	0.075	0.250	0.85	2	4.75	19	75	300	
粘土	シルト	細砂	中砂	粗砂	細礫	中礫	粗礫	粗石	巨石
		砂			礫		石		
細粒分		粗粒分					石分		
地盤材料							岩石質材料		

自然堤防帯の土砂堆積に影響しうる流域特性 (v3.0)

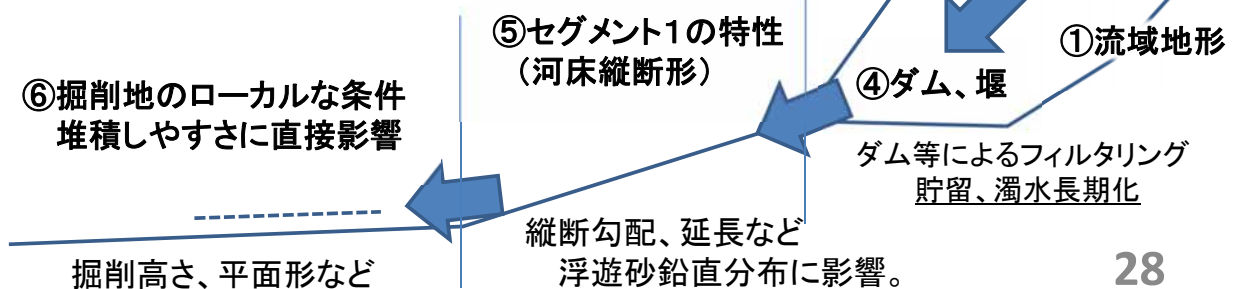
- ① 流域地形 (流域面積、流域形状等)
- ② 気候 (降水量、降水の時空間分布)
- ③ 流域地質に起因する生産土砂の特性の違い (粒度分布、磨耗・破碎特性)
- ④ ダム等、土砂の挙動に影響する工作物

ダム堆砂研究で多くの知見がある。

- ⑤ 山地 (土砂生産源) → 谷底平野・扇状地 (S1) → 自然堤防帯 (S2) の縦断形の特徴

粒度分布、生産量、破碎磨耗特性
ウォッシュロード濃度

- ⑥ 掘削地における掘削高さ等のローカルな条件
自然堤防帯の高水敷掘削地では、これらの影響が重畳した結果を観察している??



研究事例 2 : 石礫床河川のための河床変動解析モデル

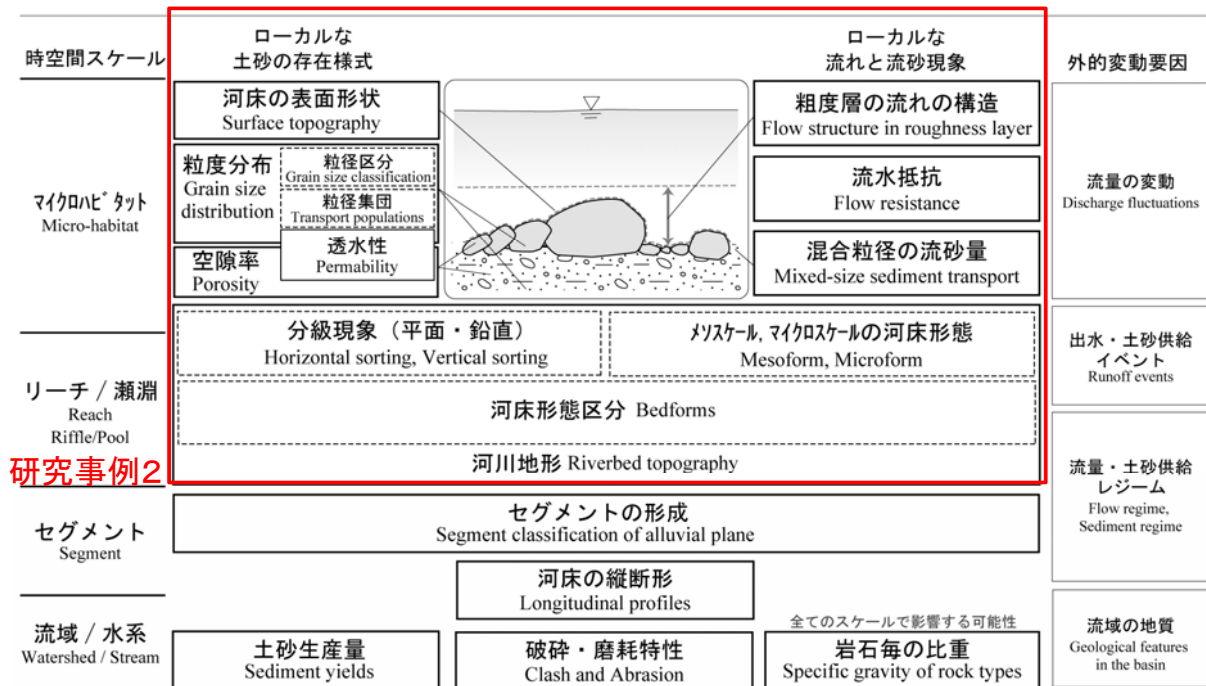


Fig.1. Physical properties of riverbed environment

図1 河床環境を構成する物理環境要素

(原田・萱場 2015)改

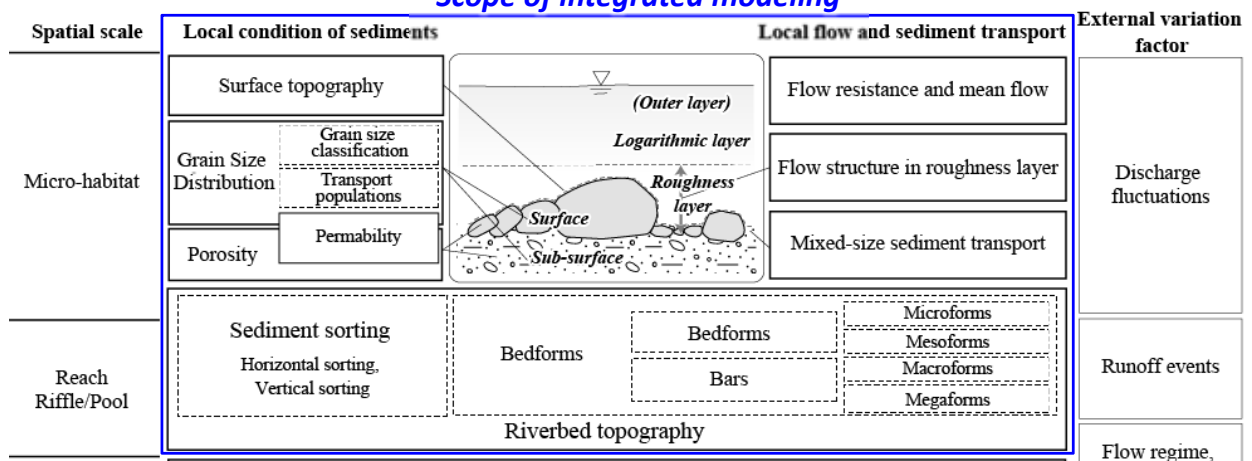
29

Concepts

Concept of riverbed environment and its modeling

Riverbed environment is dominated by spatiotemporal dynamics by larger scale habitats.

Scope of integrated modeling



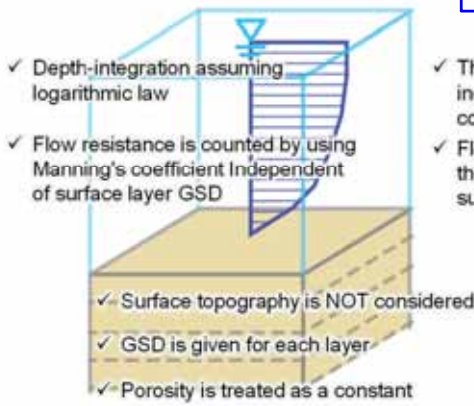
Three requirements to evaluate the riverbed environment by numerical simulation

- 1) it is possible to handle the reach scale simulation,
- 2) the local condition of sediment, local flow and sediment transport are calculated at the same time
- 3) the discharge fluctuations of a wide range can be handled with high accuracy. (usual water level to high floods)

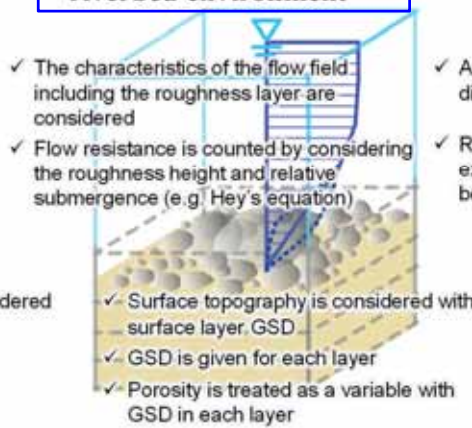
Functions required for riverbed evaluation models

Improvement and function expansion

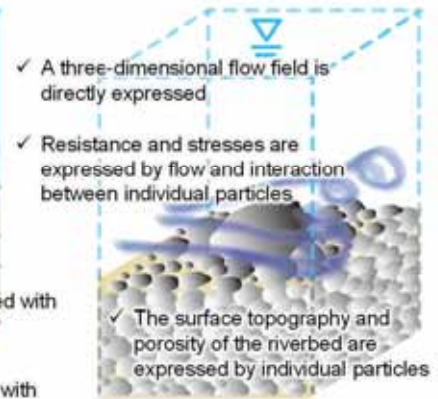
General horizontal two-dimensional models



Quasi-three dimensional model which focus on the riverbed environment



Three dimensional two-phase flow model



- Suitable for solving the riverbed variation during large flood
- Applicable from reach scale to segment scale
- **Calculation accuracy when the flow rate is low (when the relative submergence is small) is not good**
- **Physical properties on riverbed environment is hardly expressed**

- Suitable for solving flow and riverbed variation from usual water level to large flood
- Applicable from reach scale to segment scale
- **Information necessary for habitat evaluation of riverbed environment is included in the model, and habitat evaluation is possible directly from analysis results**

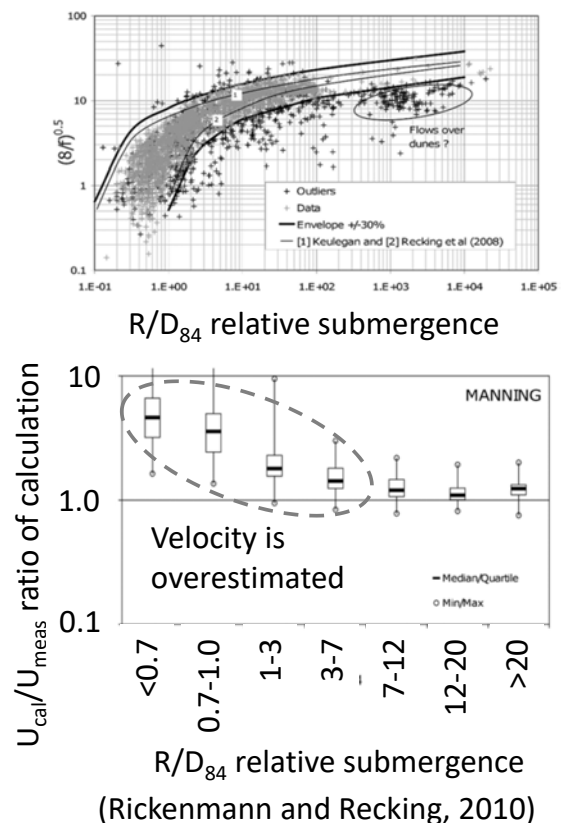
- It is expected not only to clarify the sediment transport phenomenon but also to elucidate the mechanism of habitat of aquatic life.
- **Precision, but it requires a considerable amount of computation, it will be difficult to handle space larger than the reach scale**

Conventional model's three issues to be solved

Issue 1: Flow resistance is underestimated in the shallow condition

- In the upper and middle streams, the sediment particles are larger relative to the flow depth when the flow rate is low. In such a situation **where the relative water depth is small, Manning's law is known to underestimate resistance.**
- Shallow flow (eg. riffle, shoreline part) in gravel-bed rivers is considered as 'Large to medium roughness region'.

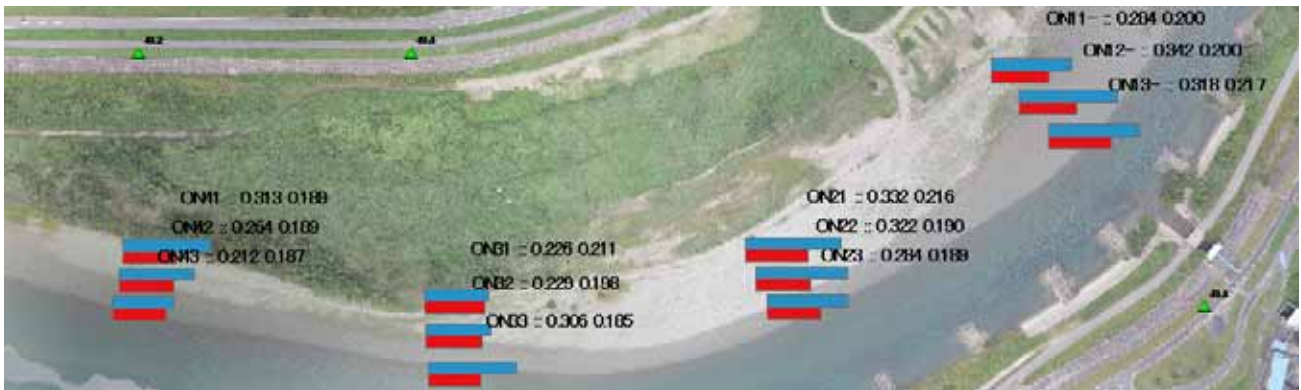
➤ **We need the flow resistance law which can express the flow resistance in large to medium roughness region**



Issue 2: Porosity rate is treated as a constant value

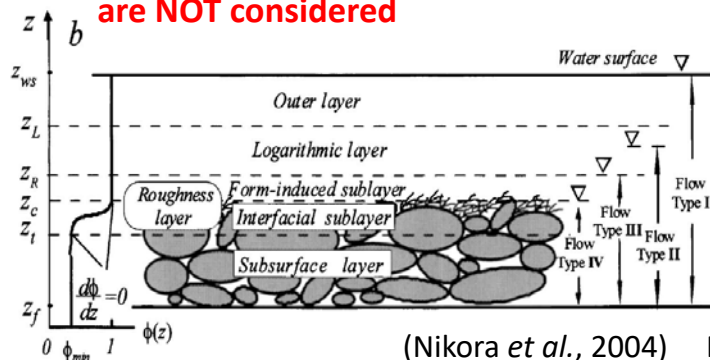
- In general 2D simulations, **porosity is often treated as a constant**. A value of about 0.4 is often used as the porosity, it is a value under uniform particle size condition.
- Actually, **the porosity has a width of about 0.2 to 0.4 varying with Grain Size Distributions**. In an actual river, the GSD has a wide width value.

➤ **Porosity is an essential parameter of the riverbed environment and porosity corresponding to changing GSD must be obtained**

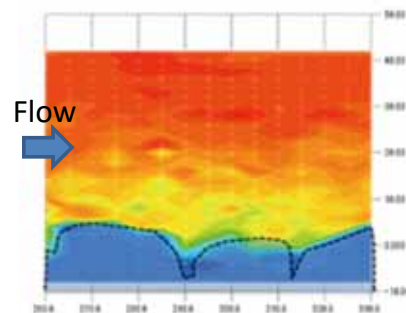


Spatial distribution of riverbed porosity of gravel-bar in Nagara river (estimated value from GSD, blue shows the surface value, red shows the sub-surface value) 33

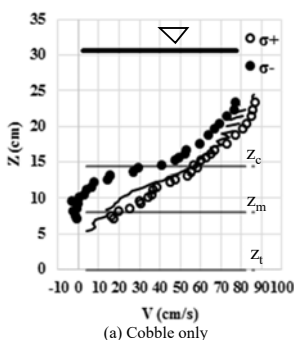
Issue 3: the characteristics of the flow field including the roughness layer are NOT considered



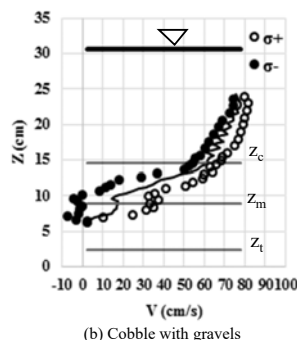
(Nikora et al., 2004)



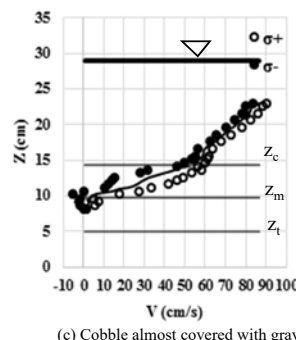
Mean velocity distribution on boulder bed. (Harada et al. 2017)



(a) Cobble only



(b) Cobble with gravels



(c) Cobble almost covered with gravels

Spatial-averaging of mean flow velocity with three bed conditions

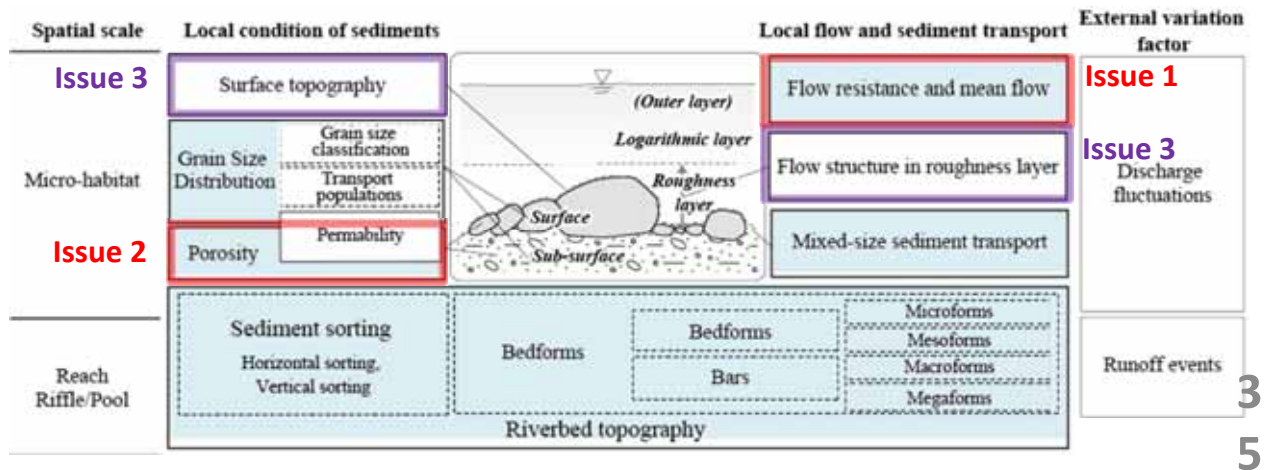
(σ_v is spatial variance of mean flow velocity).

(Rahma et al. 2016)

➤ **The roughness layer is heterogeneous and aquatic organisms use it.**

| Base Model |

- **Nays 2D solver**, general horizontal two - dimensional riverbed variation solver developed by Shimizu *et al.* (Jang & Shimizu 2005).
- The model can handle **the flow and riverbed variation in shallow channel with high accuracy**, it was widely introduced through the IRIC Project community (URL: <http://i-ric.org/en/>) and used throughout the world.
- Original Nays 2D model can express the blue-colored factors, we try to clear three more additional issues by improvement.

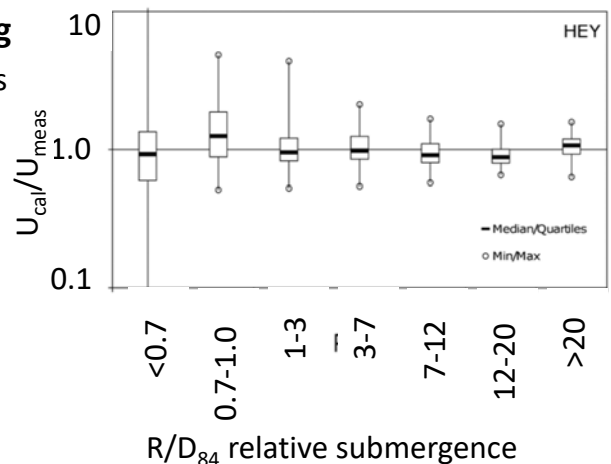


■ **Improvement 1: Flow resistance modeling**

- In Nays 2D, the Manning’s coefficient is used as a constant to evaluate flow resistance and bed shear stress.
- **Rickenmann & Recking(2010)** showed that Hey’s formula (1979) showed high accuracy in a wide range of dataset.

➤ We introduced Hey's formula into Nays 2D.

$$\text{Hey [1979]} \quad \frac{U}{u_*} = 6.25 + 5.75 \log\left(\frac{d}{3.5D_{84}}\right)$$



■ **Improvement 2: Porosity modeling**

- **Fujita *et al.* (2008)** developed the method which can evaluate the porosity in the mixed grain size condition.
- This model classify the grain size distribution into log-normal and Talbot distribution, and the functions to evaluate the porosity value are given for each typical distributions.
- **The porosity of each grid can be calculated from GSD using Fujita's model on Nays 2D.**
- **The Nays 2D solver of IRIC was improved, and the riverbed environment model coupled with the grain size distribution, flow resistance, porosity was implemented.**

Validation by experiment results on meandering flume

- In order to verify the effect of the improvement on the bed variation result under the mixed particle size condition, we use the experiment data under mixed particle size condition in meandering flume (Ashida *et al.* 1984) as a benchmark.

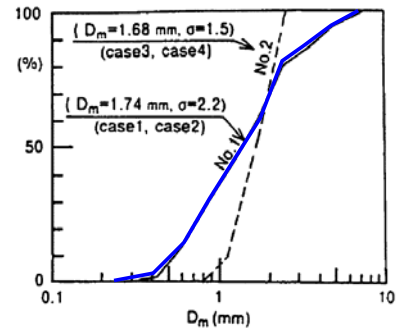
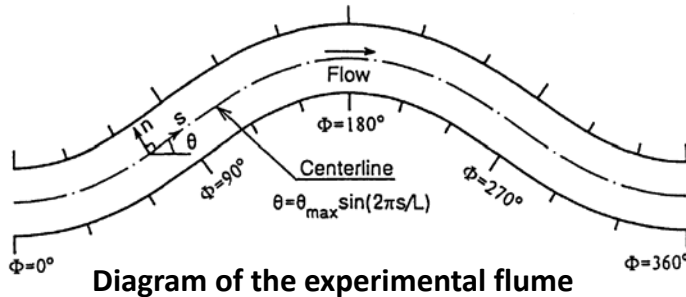


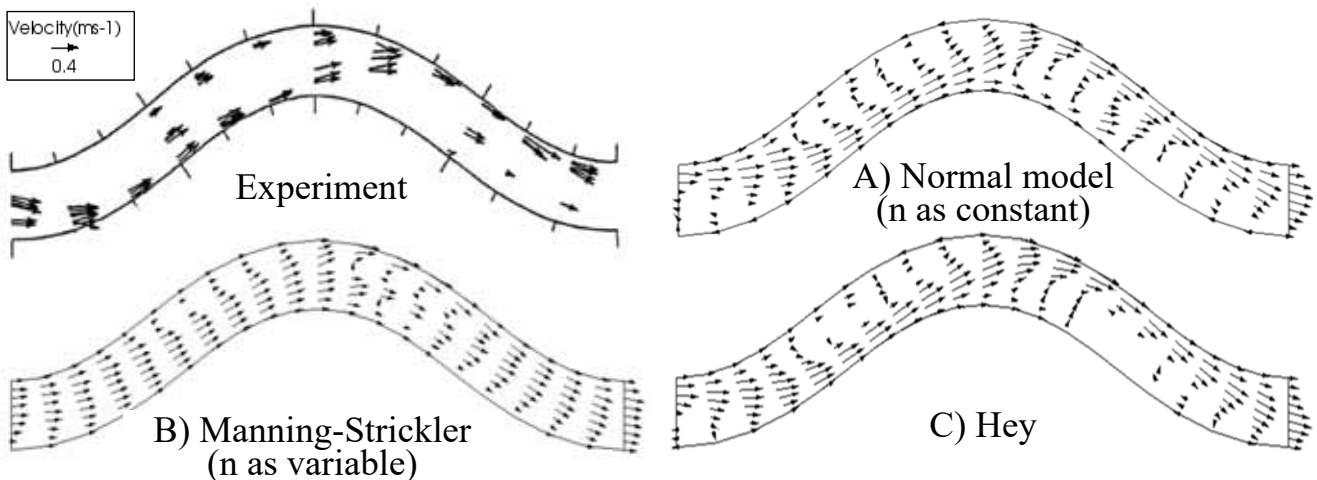
Table 1. Experimental conditions

Exp. Number	B (cm)	L (cm)	θ_{max}	i	Q (l/s)	h (cm)	Q_s (gr/s)	D_m (mm)	σ	U_c (cm/s)	$U_{c,m}$ (cm/s)	$U_{c,max}$ (cm/s)
CASE 1	20	220	35°	0.009	1.2	1.65	0	1.74	2.20	3.81	3.38	4.28
CASE 2	20	220	35°	0.009	3.6	4.26	6.67	1.74	2.20	6.13	3.38	4.28
CASE 3	20	220	35°	0.009	1.2	1.70	0.08	1.68	1.55	3.87	3.30	3.99
CASE 4	20	220	35°	0.009	3.6	4.11	5.34	1.68	1.55	6.02	3.30	3.99

<- Test case

Validation by experiment results on meandering flume

Velocity distribution and bedform

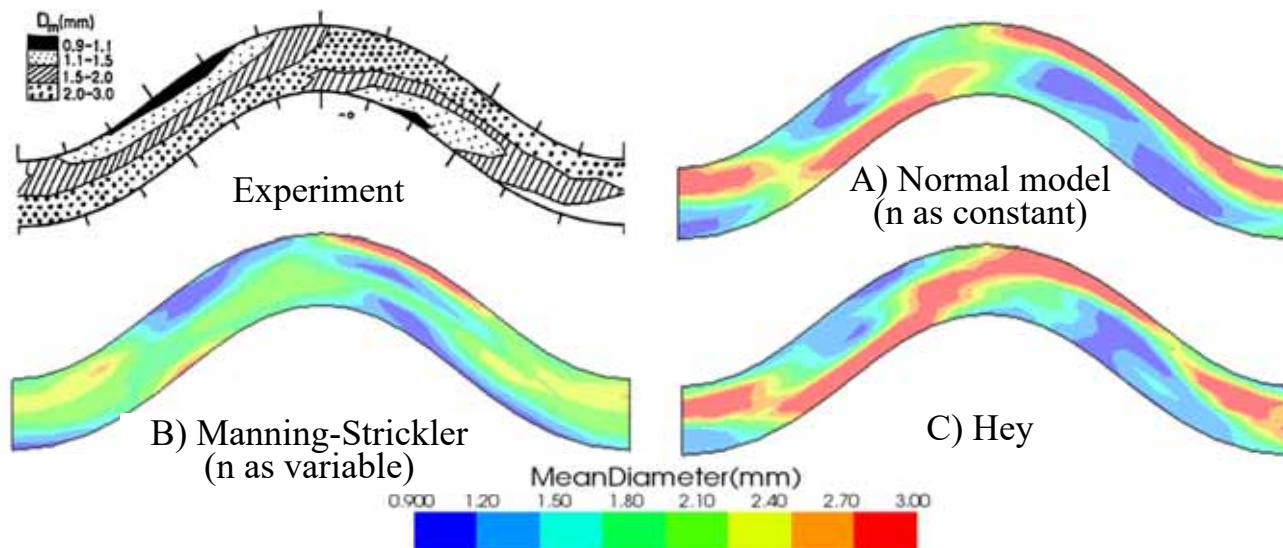


Velocity distribution of the experimental result and model simulations.

- For the improved model, it was expected to improve the calculation accuracy of the flow velocity and the water depth.
- Comparing Manning's coefficient as a constant, Manning-Strickler formula and Hey's formula, it seems that the result using Hey's formula seems to be closest to the experiment.

Validation by experiment results on meandering flume

Sediment sorting



Mean diameter distribution of the experimental result and model simulations.

- The calculation result of surface GSD was greatly improved than the flow velocity and water depth!

Porosity predicting method (Fujita et al. 2008)

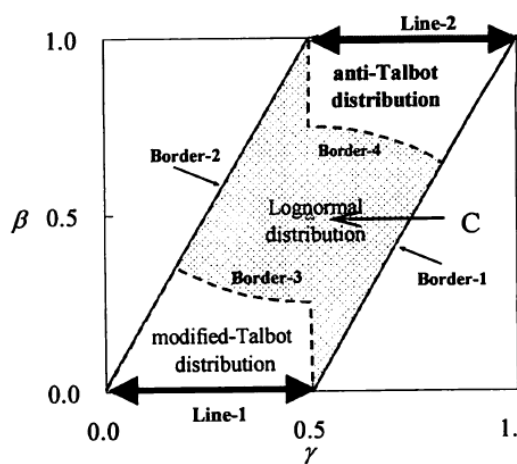


図-2 粒度分布型の領域区分

$$\beta = \frac{\log d_{\max} - \log d_{\text{peak}}}{\log d_{\max} - \log d_{\min}}$$

$$\gamma = \frac{\log d_{\max} - \log d_{50}}{\log d_{\max} - \log d_{\min}}$$

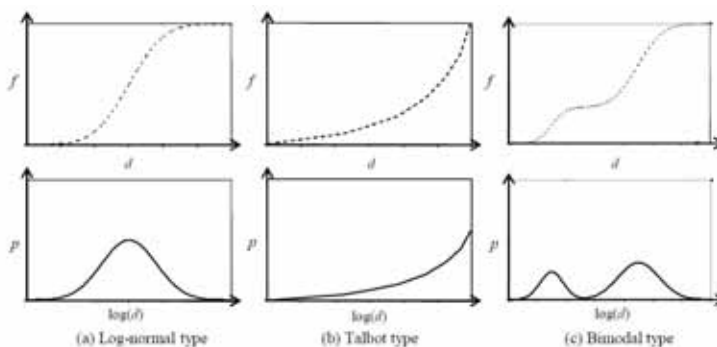


Fig.3 Typical of grain size distribution of sediment mixture and the density function of grain size

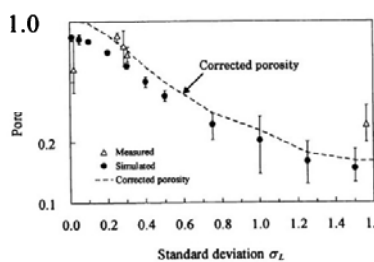


図-3 対数正規分布型の混合砂礫の空隙率

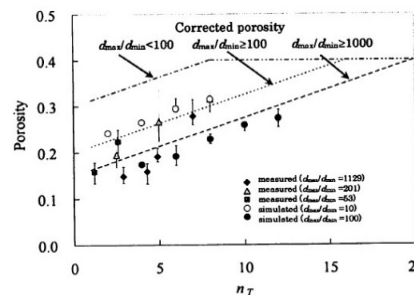
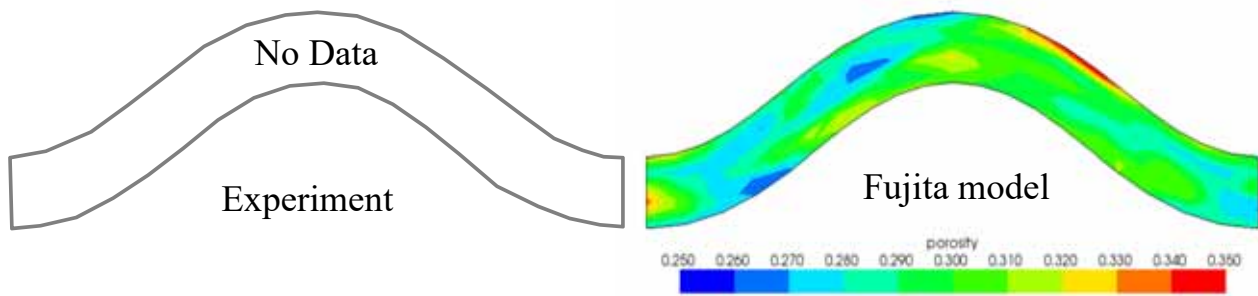


図-4 タルボット型粒度分布の空隙率

$$p(d) = \frac{1}{\log_e 10} \frac{1}{d} \left(\frac{\log(d/d_{\min})}{\log(d_{\max}/d_{\min})} \right)^{n_T}$$

Validation by experiment results on meandering flume

■ Porosity of the bed surface



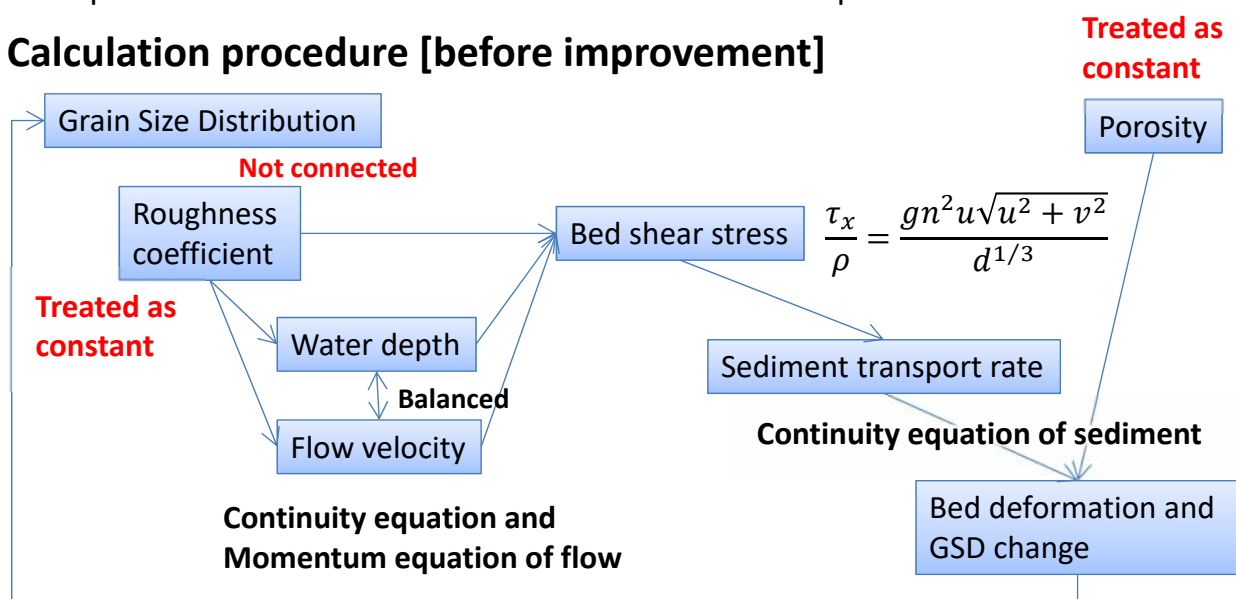
- The porosity changed in the range of 0.26 to 0.39 by introducing the Fujita model.
- Since the porosity was not measured in the experiment, it is not possible to verify the simulation result. But since the porosity has a physically close relationship with the GSD, it is considered that a more correct value is obtained by using Fujita model than handling the porosity as a constant value.

41

Why did the improved model significantly improve the accuracy of river bed variation and sorting effect?

- As a result of improvement, the riverbed environment model coupled with the GSD, flow resistance, porosity was implemented. In result, the precision of riverbed variation calculation itself improved.

Calculation procedure [before improvement]



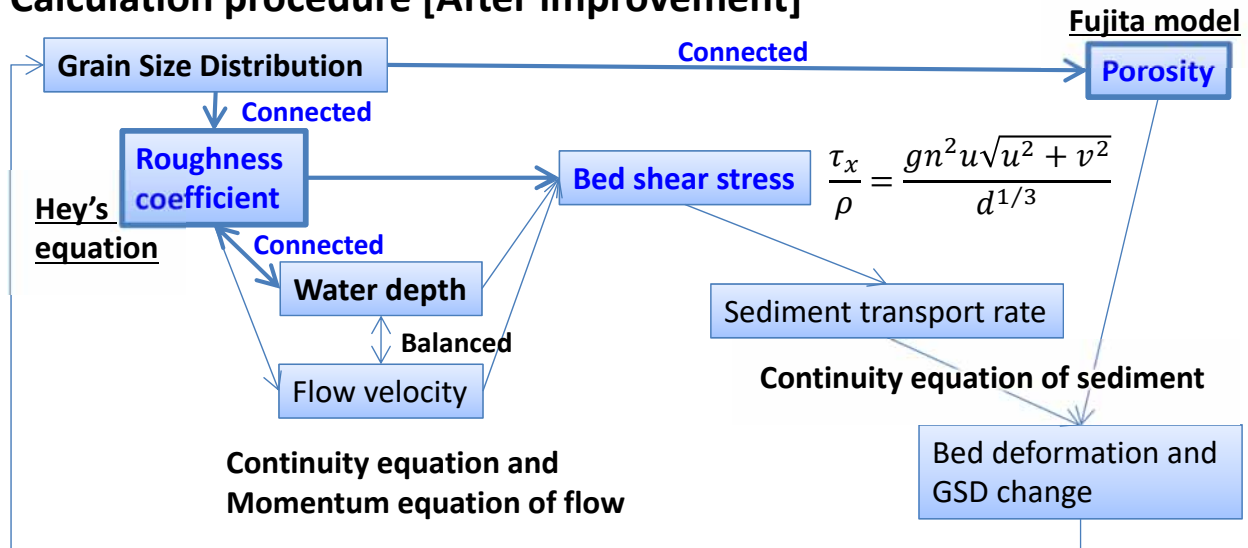
42

Discussion

Why did the improved model significantly improve the accuracy of river bed variation and sorting effect?

- As a result of improvement, the riverbed environment model coupled with the GSD, flow resistance, porosity was implemented. In result, the precision of riverbed variation calculation itself improved.

Calculation procedure [After improvement]



43

Conclusion

Summary & Conclusion



- The outline and results of numerical simulation model aiming at evaluating habitat of riverbed environment currently being developed are reported.
- The Nays 2D solver of IRIC was improved, and the riverbed environment model coupled with the grain size distribution, flow resistance, porosity was implemented.
- As a result, it became possible to obtain not merely the necessary information for habitat evaluation of the riverbed, but also the precision of riverbed variation calculation itself improved.
- Next step is estimating the flow velocity profile including the roughness layer (issue 3), we will continue to develop the simulation model which include the information necessary for habitat evaluation of riverbed environment, and habitat evaluation is possible directly from analysis results.

Thank you for your attention!



研究事例3：2粒径条件下の掃流砂量

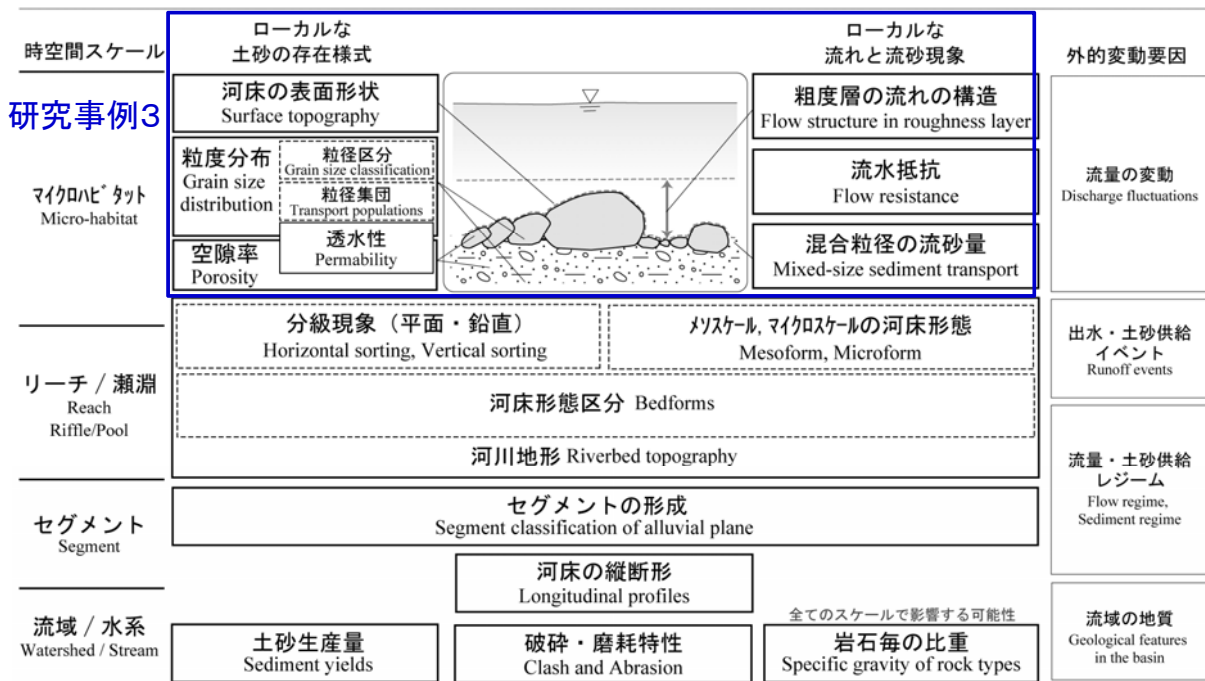


Fig.1. Physical properties of riverbed environment

図1 河床環境を構成する物理環境要素

(原田・萱場 2015)改

45

研究3：背景と目的

背景 幅広い流況において、流砂量を正確に評価することが重要
しかし、既存の流砂量式の適用が難しい状況がある：

- 河床土砂が小径と大径の2つに偏り(二峰性)、中央粒径を評価しにくい
- 小径の土砂のみが移動して大径の土砂が静止している 場合など

目的 平水時から出水時までの幅広い流況において適用できる
高精度な流砂量式の構築

本研究では

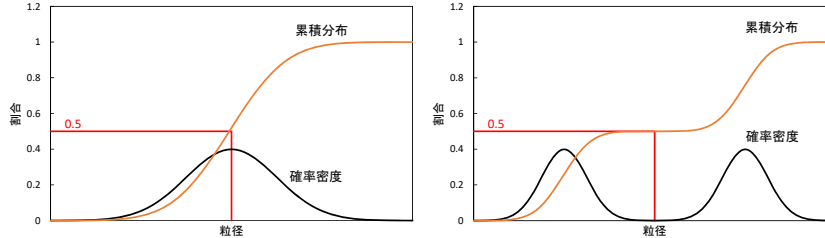
- 大径の礫と小径の砂の二峰性の粒度分布を模した水理実験で、小径の砂のみが掃流砂として移動する状態での流砂現象に着目
- **2パターンの実験により、砂の移動の解析を実施**
 - A) 大径礫をパイプに模した、横断方向に一樣な鉛直二次元的な実験
 - B) 大径礫をボールに模した、三次元的な河床形状とした三次元実験

46

混合粒径の流砂量式の問題点

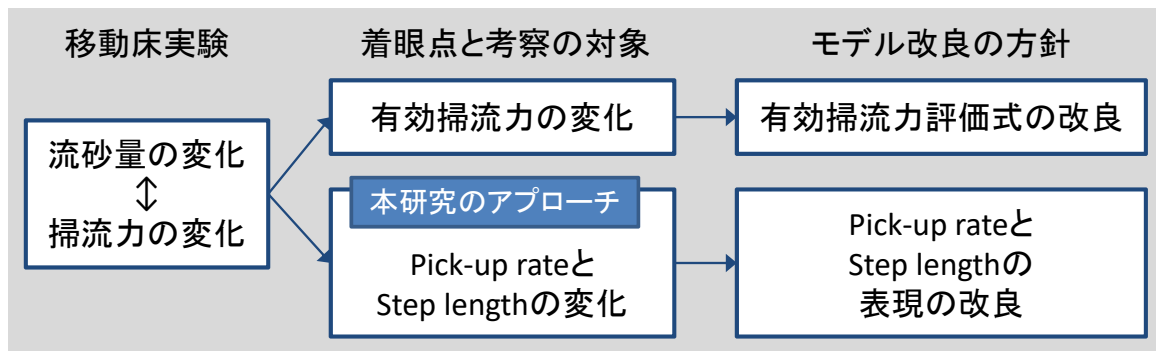
Problem of mixed-sized sediment transport formula

- 平均粒径 D_m が必要となる。 It is necessary to use mean diameter
 - 河床の土砂の粒径分布が、大きいものと小さいものの二つに偏っている場合には、平均粒径の情報が実体をもたない。
- すべての粒径の土砂が同時に移動を開始することを前提(等移動仮説)
 - 出水時はそれで良いが、平水時は小さいものだけが動くことがある。



花崗岩帯の川の中上流域はどこもこうなる！

掃流砂モデル改良へのアプローチ



Einstein型の掃流砂モデル

掃流砂量 q_B を Pick-up rate p_s と Step length Λ の積で表現

$$q_B = V_B \times p_s \times \Lambda$$

Pick-up rate p_s

単位時間あたりに、河床からある粒子が移動をはじめる確率

Step length Λ

移動をはじめた粒子が、停止するまでに移動する距離

p_s と Λ の一般的な場合との比に着目

V_B 単位面積に存在する移動可能な砂の体積

水路実験の概要

実験条件

水路幅 0.4m 水路勾配 0.005 (=1/200)

模擬河床 A) 直径48mmのパイプを敷き詰め
B) 直径49mmの球(最密充填配置)

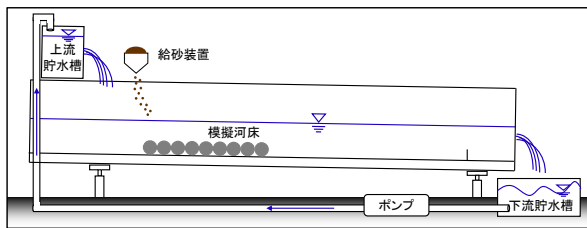
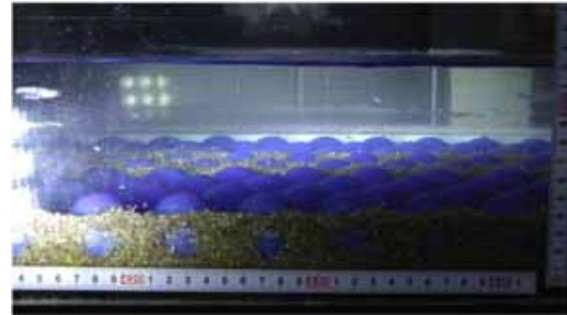
供給砂 平均粒径1.44mmの一樣砂

ケース設定 A、Bともに9ケース

流量 3段階 (9.4, 13.3, 18.8 L/s)

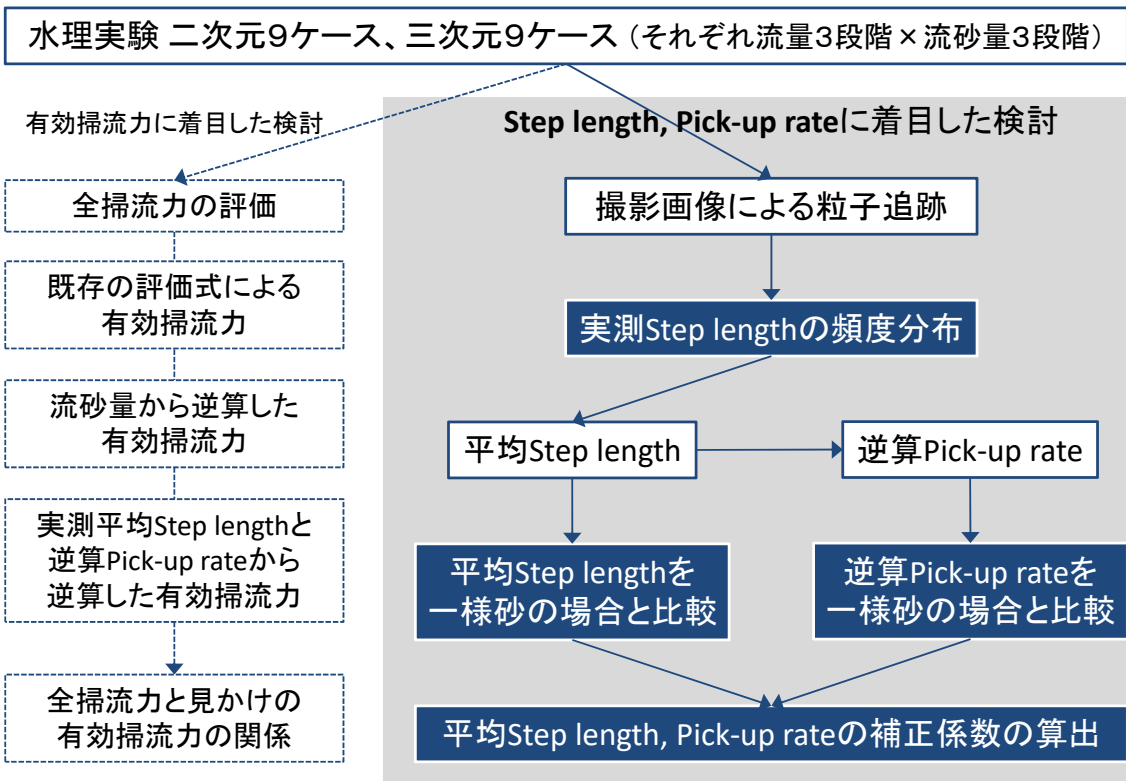
流砂量 3段階 (0.44, 0.80, 1.60 cm³/s)

方法 各ケース, 平衡状態に至ったことを確認したのち, 側面からビデオ撮影



49

解析手法



50

流砂の観察に基づく考察

空間的な偏り サンドリボン(流下方向の縦筋)が形成 パイプ実験、ボール実験ともに

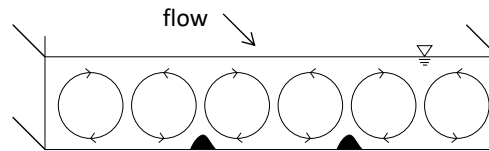
- 並列らせん流による。
- 特にパイプ実験の場合、サンドリボンの両脇で砂が盛んに揺動or巻き上げ、尾根にあたる部分で、多くの粒子が前進して流砂量に寄与している

時間的な偏り 砂の巻き上げの間欠性・周期性が明瞭にみられるもの、そうでないものの両方

- パイプ実験では、時間的な偏りが明瞭にみられるものは少ない
- ボール実験では、明瞭に現れる sweepやejectionによるものと考えられる

➤ 流砂の移動には、空間的、時間的な偏りが確認

- サンドリボン上の模擬河床に一定の領域を設定
- その領域内から運動を始める砂を追跡(全てではない)

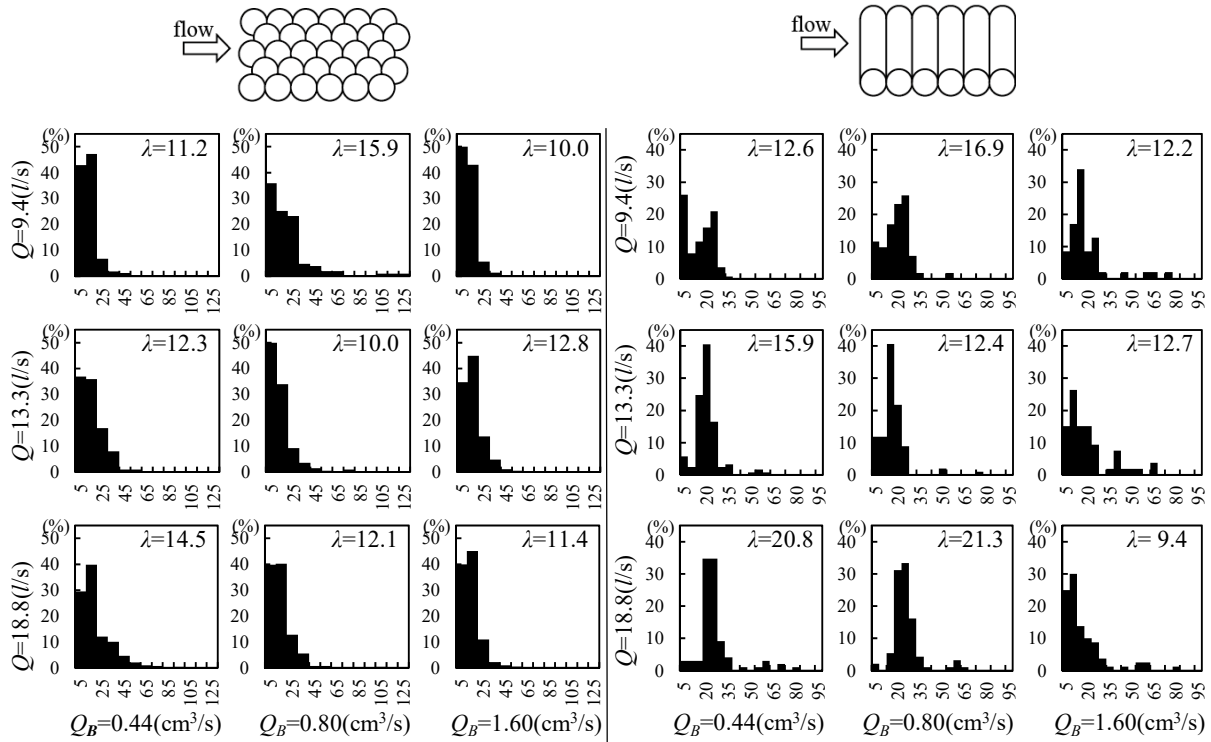


並列らせん流

実験水理量

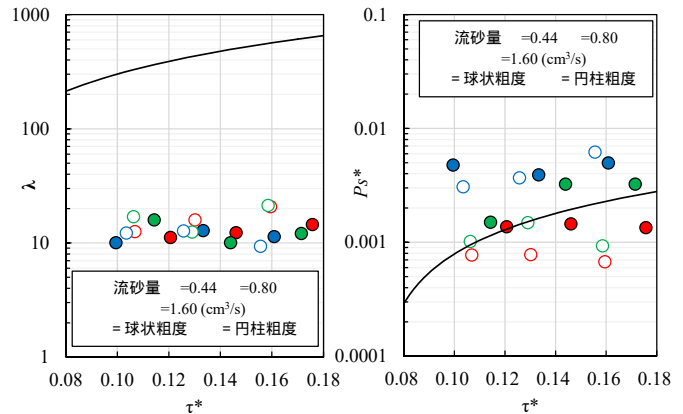
粗度	流量 Q(l/s)	給砂量 Q _B (cm ³ /s)	平均水深 H(m)	平均流速 U(m/s)	摩擦速度 U*(m/s)	U/U*	U*/w ₀	無次元掃流力 τ*	粗度頂点高 — 平均砂面高 Δz (cm)	Δz/D	砂被覆率 a _s
球状粗度	9.4	0.44	0.057	0.41	0.05	7.8	0.44	0.12	0.48	0.10	0.78
	13.3		0.069	0.48	0.06	8.3	0.49	0.15	0.66	0.13	0.61
	18.8		0.083	0.57	0.06	8.9	0.54	0.18	0.73	0.15	0.54
	9.4	0.80	0.054	0.44	0.05	8.5	0.43	0.11	0.42	0.09	0.80
	13.3		0.068	0.49	0.06	8.5	0.49	0.14	0.55	0.11	0.74
	18.8		0.081	0.58	0.06	9.2	0.53	0.17	0.64	0.13	0.69
	9.4	1.60	0.047	0.50	0.05	10.4	0.40	0.10	0.16	0.03	0.73
	13.3		0.063	0.53	0.06	9.5	0.47	0.13	0.24	0.05	0.59
	18.8		0.076	0.62	0.06	10.1	0.51	0.16	0.36	0.07	0.47
円柱粗度	9.4	0.44	0.051	0.47	0.05	9.3	0.41	0.11	0.48	0.10	0.49
	13.3		0.062	0.54	0.05	9.8	0.46	0.13	0.66	0.14	0.42
	18.8		0.075	0.62	0.06	10.3	0.51	0.16	0.73	0.15	0.39
	9.4	0.80	0.050	0.47	0.05	9.4	0.41	0.11	0.42	0.09	0.58
	13.3		0.061	0.55	0.05	10.0	0.46	0.13	0.55	0.11	0.42
	18.8		0.075	0.63	0.06	10.4	0.51	0.16	0.64	0.13	0.35
	9.4	1.60	0.049	0.48	0.05	9.8	0.41	0.10	0.16	0.03	0.57
	13.3		0.059	0.56	0.05	10.4	0.45	0.13	0.24	0.05	0.55
	18.8		0.074	0.64	0.06	10.6	0.50	0.16	0.36	0.08	0.49

無次元Step length頻度分布



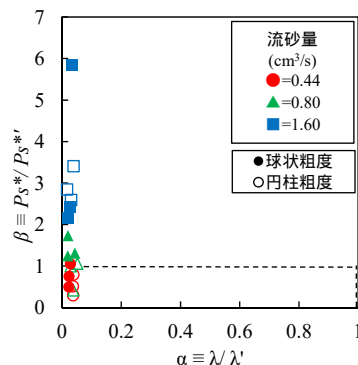
均一粒径・平坦河床との比較

粗度	流量 Q(l/s)	給砂量 Q _B (cm ³ /s)	実験値		式(2),(3)推定値		実験値/推定値	
			λ	Ps*	λ'	Ps*'	a	b
球状粗度	9.4	0.44	11.2	0.0014	393	0.0013	0.03	1.05
			13.3	0.0014	505	0.0019	0.02	0.75
			18.8	0.0013	633	0.0027	0.02	0.50
	13.3	0.80	15.9	0.0015	364	0.0011	0.04	1.31
			18.8	0.0032	496	0.0019	0.02	1.73
			18.8	0.0032	615	0.0026	0.02	1.25
	9.4	1.60	10.0	0.0048	296	0.0008	0.03	5.85
			13.3	0.0039	450	0.0016	0.03	2.43
			18.8	0.0050	570	0.0023	0.02	2.15
円柱粗度	9.4	0.44	12.6	0.0008	326	0.0010	0.04	0.79
			13.3	0.0008	430	0.0015	0.04	0.51
			18.8	0.0007	557	0.0023	0.04	0.30
	13.3	0.80	9.4	0.0010	323	0.0010	0.05	1.05
			13.3	0.0015	425	0.0015	0.03	0.99
			18.8	0.0009	553	0.0023	0.04	0.41
	9.4	1.60	12.2	0.0031	315	0.0009	0.04	3.41
			13.3	0.0037	416	0.0014	0.03	2.59
			18.8	0.0062	547	0.0022	0.02	2.84



無次元ステップレングス

ピックアップレート



- 無次元SLは、均一粒径平坦河床と比べて2オーダー小さい
- ピックアップレートは変動幅が非常に広い

$$\lambda \equiv \Lambda/d = 3.0 \times 10^3 \times \left(\frac{U_*}{w_0} \right)^{3/2} \left(1 - \frac{U_{*c}}{U_*} \right)$$

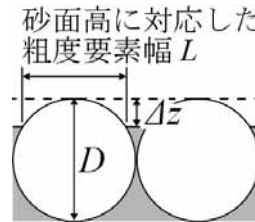
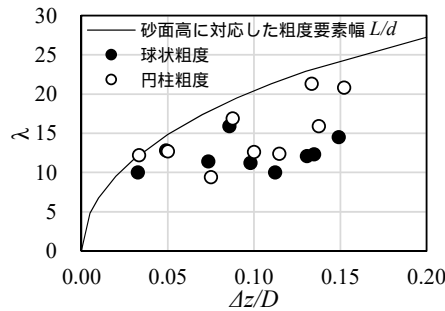
Sekine & Kikkawa 1992

$$P_s^* \equiv P_s \sqrt{d/(sg)} = 0.03 \times \tau_* \left(1 - \frac{0.035}{\tau_*} \right)^3$$

中川・辻本 1979

考察

- ステップレングスは、粗度要素の幅に制限されている
 - 流砂量が増加し、砂面高が上昇すれば、平坦河床に近づく??



- ピックアッププレート的大小は、粗度要素がもたらす流れ場の特徴によって説明できる

- 粗度層内での流速の空間偏差が大きく、乱れも強い 球>円柱(大本ら2007)
- レイノルズ応力の鉛直分布は、ステップレングスが小さく抑えられる(遠くまで飛ばない)ことの傍証にもなっている。次ページにスライド追加

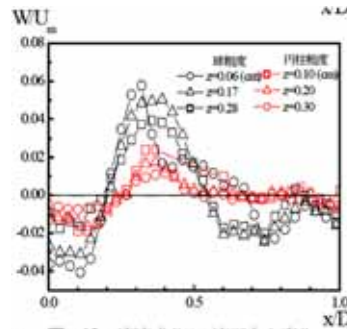
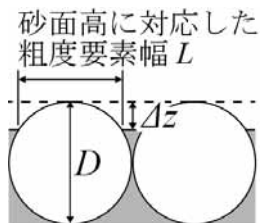
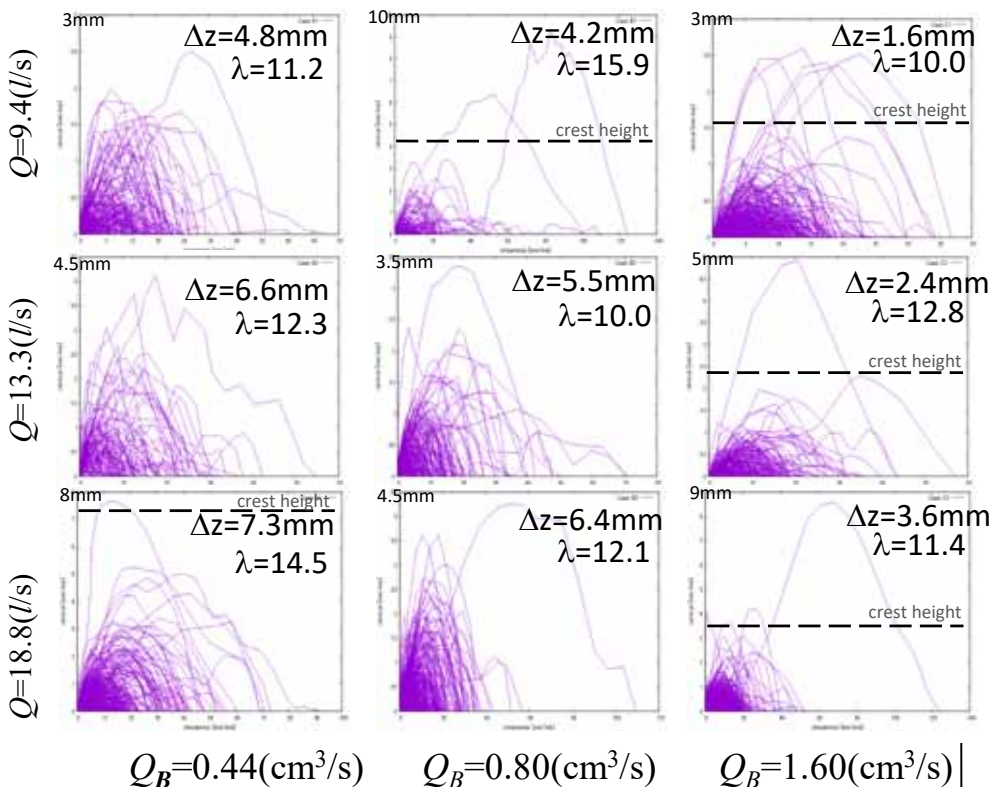
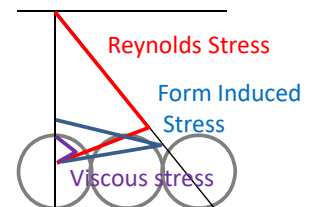


図-12 流速成分の流下方向変化

追加：粒子軌跡とサルテーション高さ (球状粗度実験のみ)

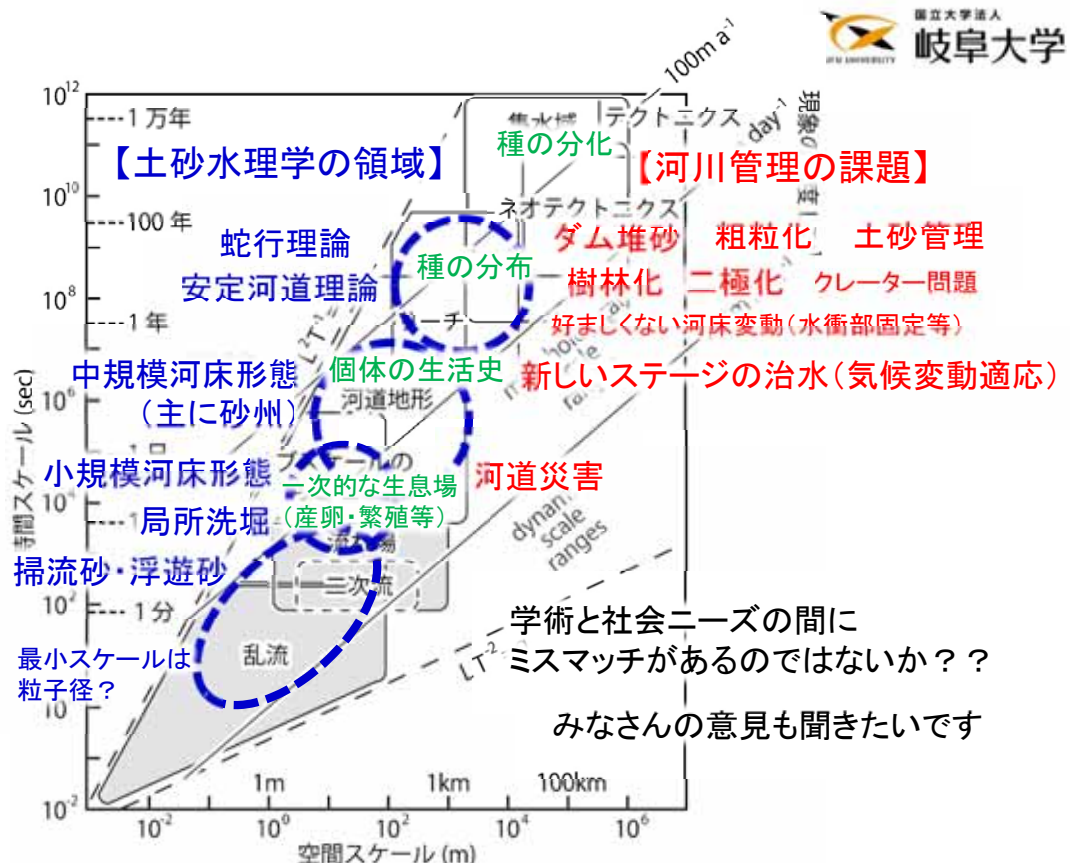


- サルテーション高さが粗度頂部を越えない
 - 乱れによる巻き上げや、平均流による加速が期待できない
 - ステップレングスが伸びない?



研究 3 まとめ

- 本研究の結論
 1. 粗度要素間を流下する砂粒子のステップレングスの頻度分布は、指数分布ではなく歪な分布形状となる。
 2. 平均ステップレングスは、球状粗度・円柱粗度とも同程度の値となり、一様粒径・平坦河床の条件下に比べて小さい。これは、粗度として振る舞う大径粒子のスケールと砂面高の影響を受けるためである。
 3. ピックアップレートは、平坦河床における値と比べて変動幅が大きく、粗度要素周りにみられる流速の鉛直成分と強い乱れに起因するものと推察される。
- 以上のことから、大径粒子が小径粒子の流砂過程にもたらす影響は、見かけ上の限界掃流力の変化だけでなく、大径粒子が作り出す境界面形状とその近傍の流れ場を介して、小径粒子のピックアップ、移動、停止のプロセス全体に及んでいると考えられる。
- ステップレングスとピックアップレートが異なる振る舞いをする。従来の流砂量式に入力する掃流力を有効掃流力に置き換えるアプローチには限界があるのでは。



河川地形に関わる現象の時間-空間スケールの領域と現象の速度 (Church 2008をもとに作図して一部改)

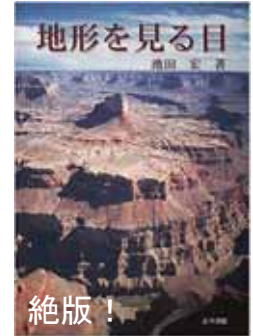
提案したいアプローチ

➤ より大きな時空間スケールの現象への着目

➤ “比較の目、時間の目” by 池田宏



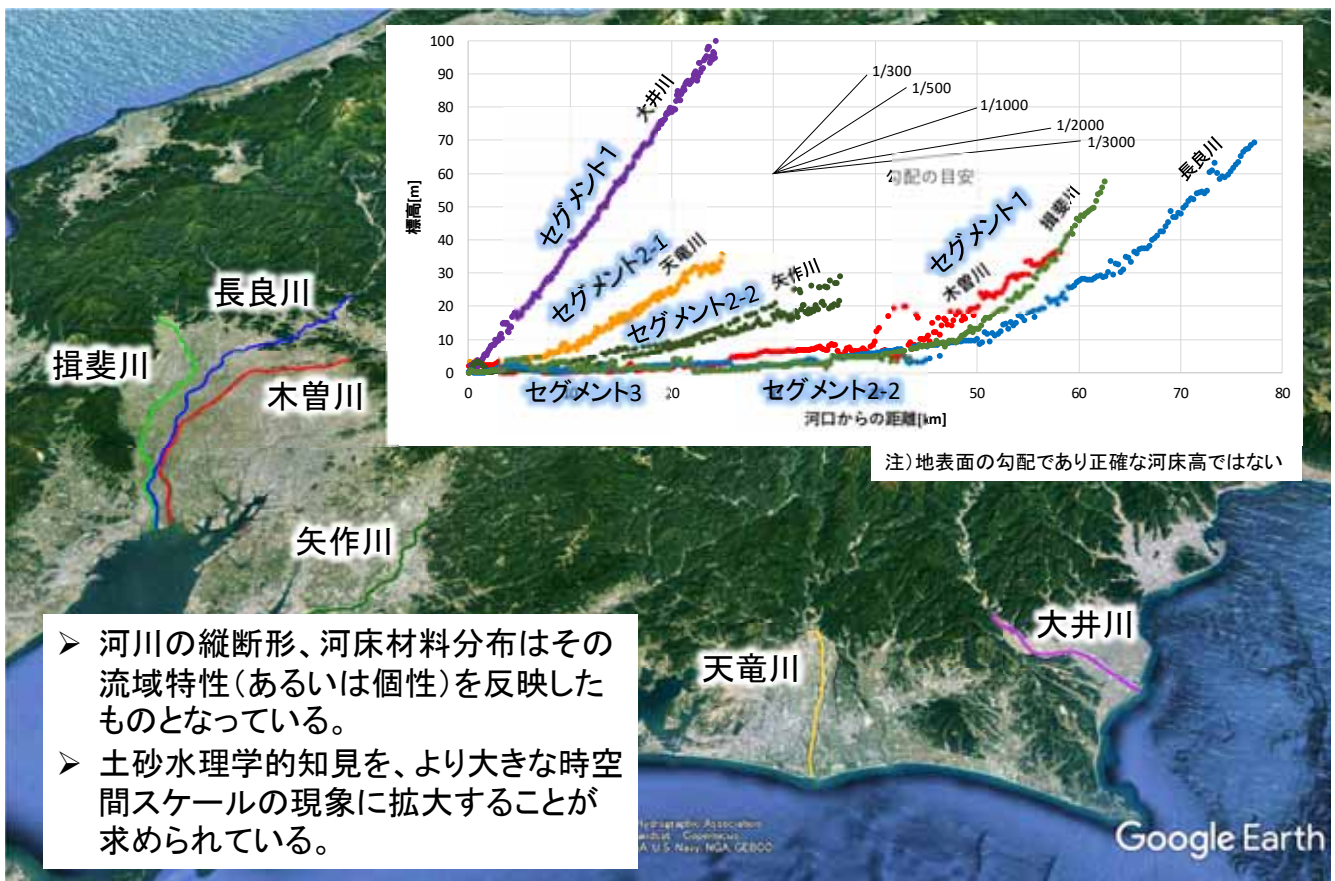
池田宏先生



➤ 流域間比較研究アプローチ

- 流域を比較することによる流域特性の形成要因の理解
- 流域に着目した学際研究の展開
- 気象-水文-河川砂防-沿岸域 水に着目した知見の統合

河川の縦断形・セグメント構成の違い



- 河川の縦断形、河床材料分布はその流域特性(あるいは個性)を反映したものとなっている。
- 土砂水理学的知見を、より大きな時空間スケールの現象に拡大することが求められている。

個人的な夢 流域圏比較研究ネットワークの形成

◆東・東南アジア流域圏研究ネットワーク形成構想



➢ 寒帯から熱帯までをカバーする
流域間比較研究ネットワークの形成

岐阜大学-富山県立大学-北見工業大学
ロシア（アムール）、インドネシア 他

➢ 協定大学・研究機関との連携

高麗大学、パイロイト大学、クラクフ工科大学等

➢ 水環境リーダー OBOGとの連携

中国	インドネシア
同済大学	Andalas University
上海交通大学	Islamic University of
蘭州交通大学	Indonesia
華北電力大学	Bandung Institute of
華南理工大學	Technology
北京師範大学他5大学	

◆伊勢湾-富山湾-琵琶湖流域 +道東地域（北見工大）



◆国際的なexperimental basins,
experimental watershedsの
ネットワークに参入?!

◆流域圏単位での気候変動適応策の
検討と社会実装、みたいなどころまで
いけないだろうか??