

2019.3.11-12 流砂河床変動若手の勉強会(第4回)
於:岐阜大学サテライトキャンパス, 水辺共生体験館

石礫の形態・変態からみた 移動床現象

田代 喬

名古屋大学減災連携研究センター

ライフライン地盤防災(東邦ガス)産学協同研究部門

E-mail: ttashiro@nagoya-u.jp

自己紹介：田代 喬（たしろ たかし）

- 横浜の海岸近くの下町で育つ
～堀割川（明治期に開削された運河）。ハゼ釣。
- 名古屋大学土木工学科入学（受験時は第二希望）
～“水理研”（辻本哲郎教授）にて河川環境に関する研究に着手
- （独）土木研究所にてポスドク
～自然共生研究センター（各務原市）勤務
- 名大に“出戻り”就職
～工学・環境学研究科を経て減災連携研究センターへ



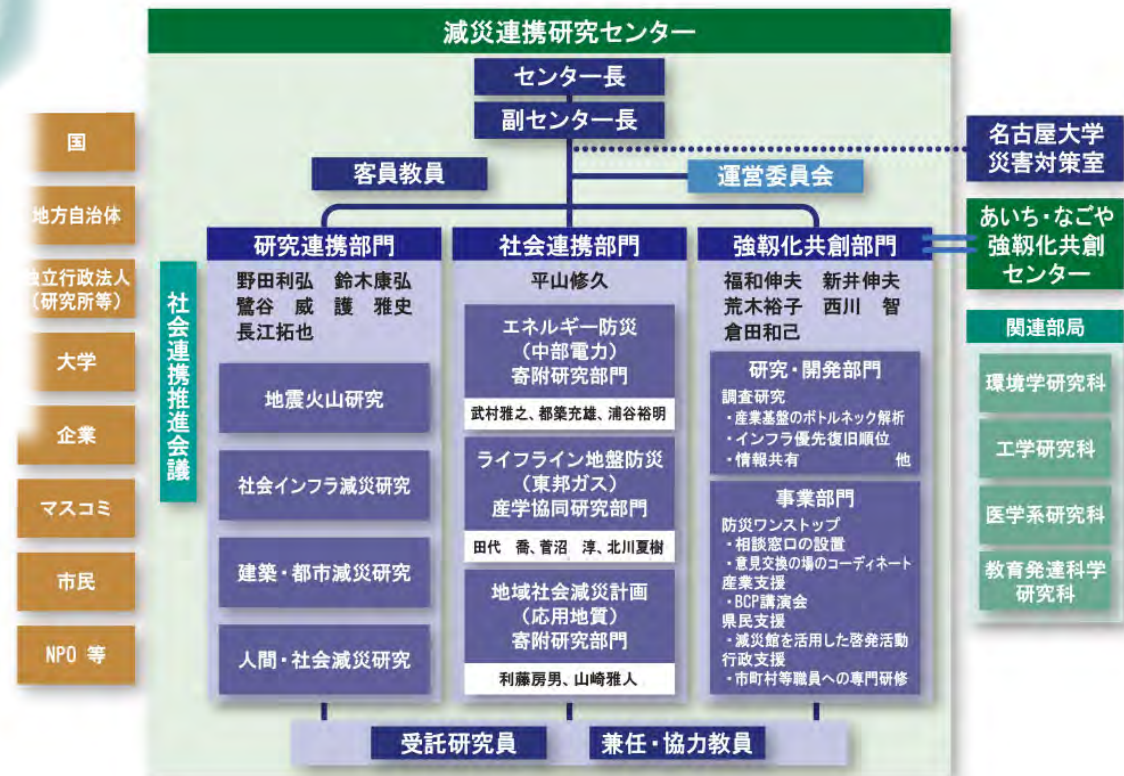
名古屋大学減災連携研究センター

<http://www.gensai.nagoya-u.ac.jp/>

- 減災のための「知」の創出
- 人材育成



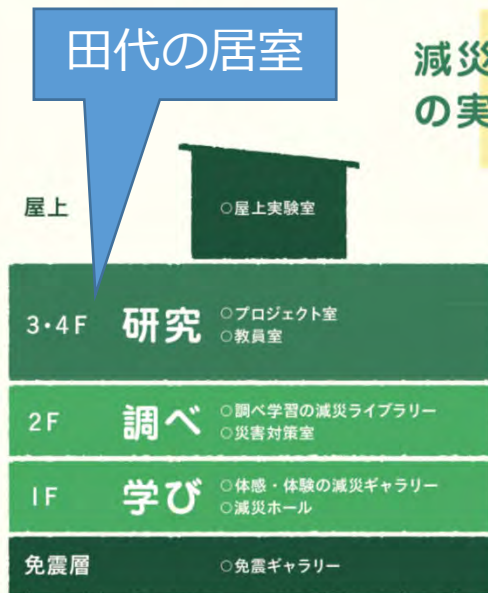
- 地域連携
- 国際連携



「減災」の最先端が、ここに集結

田代の居室

減災社会の実現



災害に対する事前の対応をしっかりと、起こり得る被害をできるだけ軽減する――。

減災館には、そのために地震や防災の研究者が集結し、全館が建築耐震技術の開発と実験の場となっています。平常時は、研究と教育、各種セミナーで市民をつなぎ、大規模災害発生時は各種機関と連携しながら、大学や地域の災害対応の拠点となります。

減災館へようこそ

セミナー・ワークショップ、体感・体験による市民に開かれた学びの場です。



1階

振動再現装置 BICURI

高層建物の中で巨大地震に遭遇した時の揺れを映像とともに振動台を使ってリアルに再現

床面空中写真

名古屋市と周辺市町村を空から見たリアルな写真を床面展示

減災ギャラリー

各種の教材で、地震被害を体感し「減災」への意識を高めていきます。「げんさいカフェ」などイベントも行われます。

減災ホール

防災アカデミーや各種講演会を実施します。

展示 【家庭防災】

① 3D地形模型

東海地域の立体地形模型にハザードマップ等デジタル情報を融合

② 木造建物耐震補強の実物展示

③ 家庭の防災

家具固定の説明や備蓄品の実物展示

屋上

大振幅長期周期の揺れを再現する実験施設

2階



地震災害に関する歴史資料、古地図、ビデオ、新聞記事、各地のハザードマップなどが充実。学習スペースで自ら調べ・学ぶことができます。

⑨ 南海トラフ海底構造立体地図

赤青メガネをかけると飛び出る大きな海底図

⑩ 愛知の災害史

愛知県の災害に関する年表・石碑写真を展示

⑪ 日本の災害史

【防災基礎】

④ ぶるるコーナー

建物や地盤の揺れ、耐震化について体感できる模型教材コーナー

⑤ キッズ工作コーナー

工作や展示で学べる子ども向けコーナー

⑥ 防災・減災の基礎

防災の科学的基礎知識を紹介(被害想定、津波、液状化、経済、情報、心理、都市計画)

⑦ ライフライン防災コーナー

電気、都市ガスの防災についてビデオ展示

【防災応用】

⑧ 防災・減災の最新技術

減災研究のさまざまな研究や技術を紹介(地殻変動、活断層、地盤・液状化)液状化の痕跡の実物を展示

地下



免震装置の実物を見てみよう。免震ギャラリー

いざという時に災害対応拠点となる減災館は、最新の免震技術で高い安全性を確保。その装置が見学できます。建築の耐震・免震・制振が学べます。

火～土曜の午後に開館。興味がある人はリーフレット差し上げます。

減災連携研究センター・減災館関係

- 災害調査（水害・土砂災害，地震噴火による二次被害など）
- 観覧者案内：ガス会社，行政機関など
- 減災館公開責任者（月1回）：ミニ講演と案内
- 減災館特別企画展の監修（年1回程度），クラウドファンディング



平成28年度キッズデー



広島土砂災害（2014年8月）の砂防堰堤損壊状況調査



第17回特別企画展「豪雨災害」



愛知県会議員・県職員案内



熊本地震（2016年4月）に伴う土砂崩壊による水力施設被災

長良川流域の地形

長良川の流系

・・・自然立地条件だけからみると、
(本川にはダムを)設置できるような
地形をもった場所が上流部までほと
んどない・・・

・・・流域を構成する地質も関係し
ているが、全体として隆起運動の緩
やかな地域にあたり、谷幅が広く、
緩やかな地形を形成しているため
に(ダム建設が)できない・・・

出典: 岐阜の地学・よもやま話

製作・著作: 小井土 由光, ページ作成: 江川 直

<http://chigaku.ed.gifu->

[u.ac.jp/chigakuhp/html/kyo/chisitsu/gifunochigaku/to](http://chigakuhp/html/kyo/chisitsu/gifunochigaku/to)

pography/nagaragawa/index.html



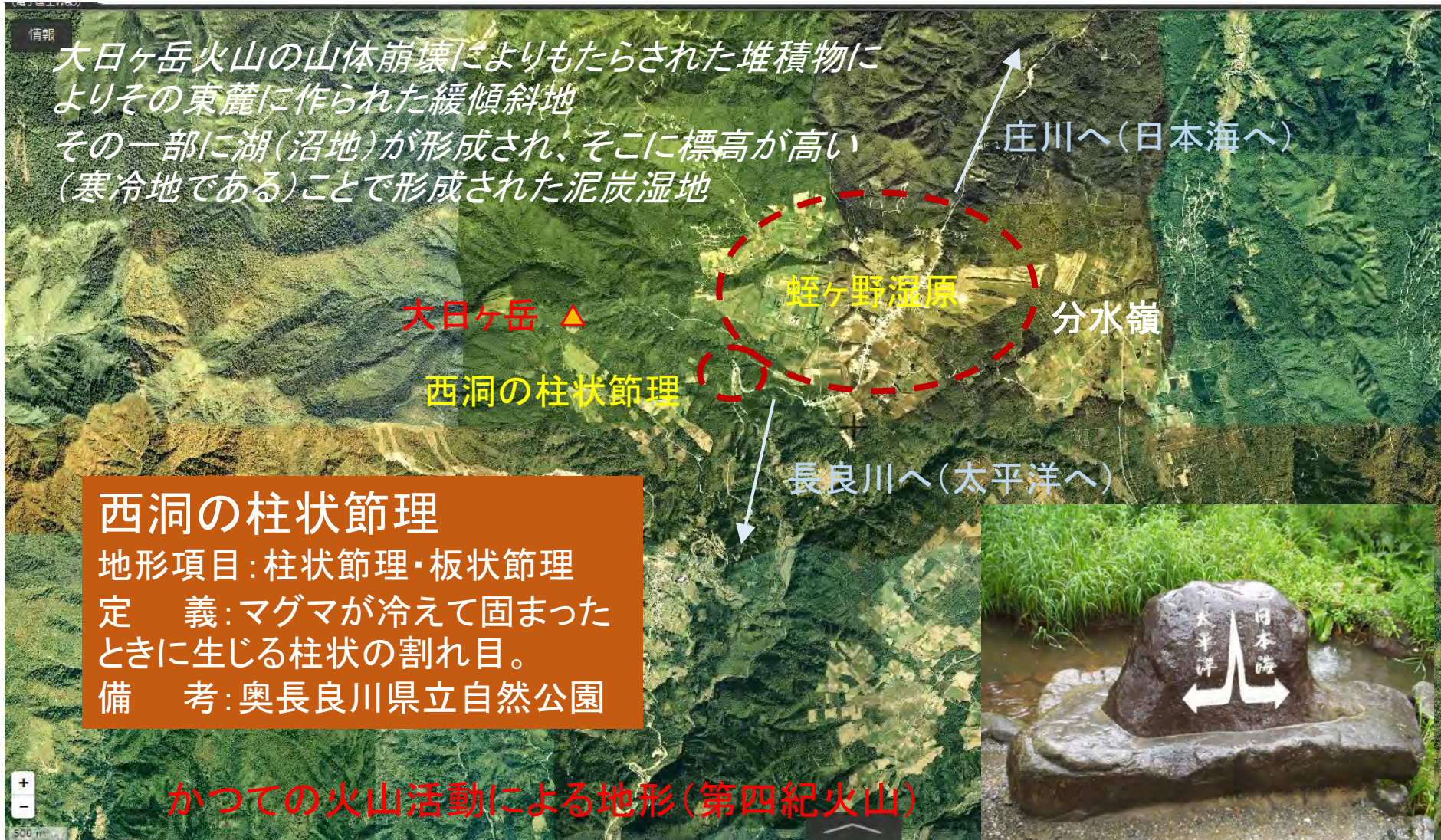
蛭ヶ野湿原

地理院地図・地質を反映した地形より

地形項目：高層湿原・池塘

定義：寒冷多湿の地域に生息するミズゴケによって形成される湿地草原。池塘(ちとう)は高位泥炭地の中にある小湖沼。

備考：白山国立公園、奥長良川県立自然公園。



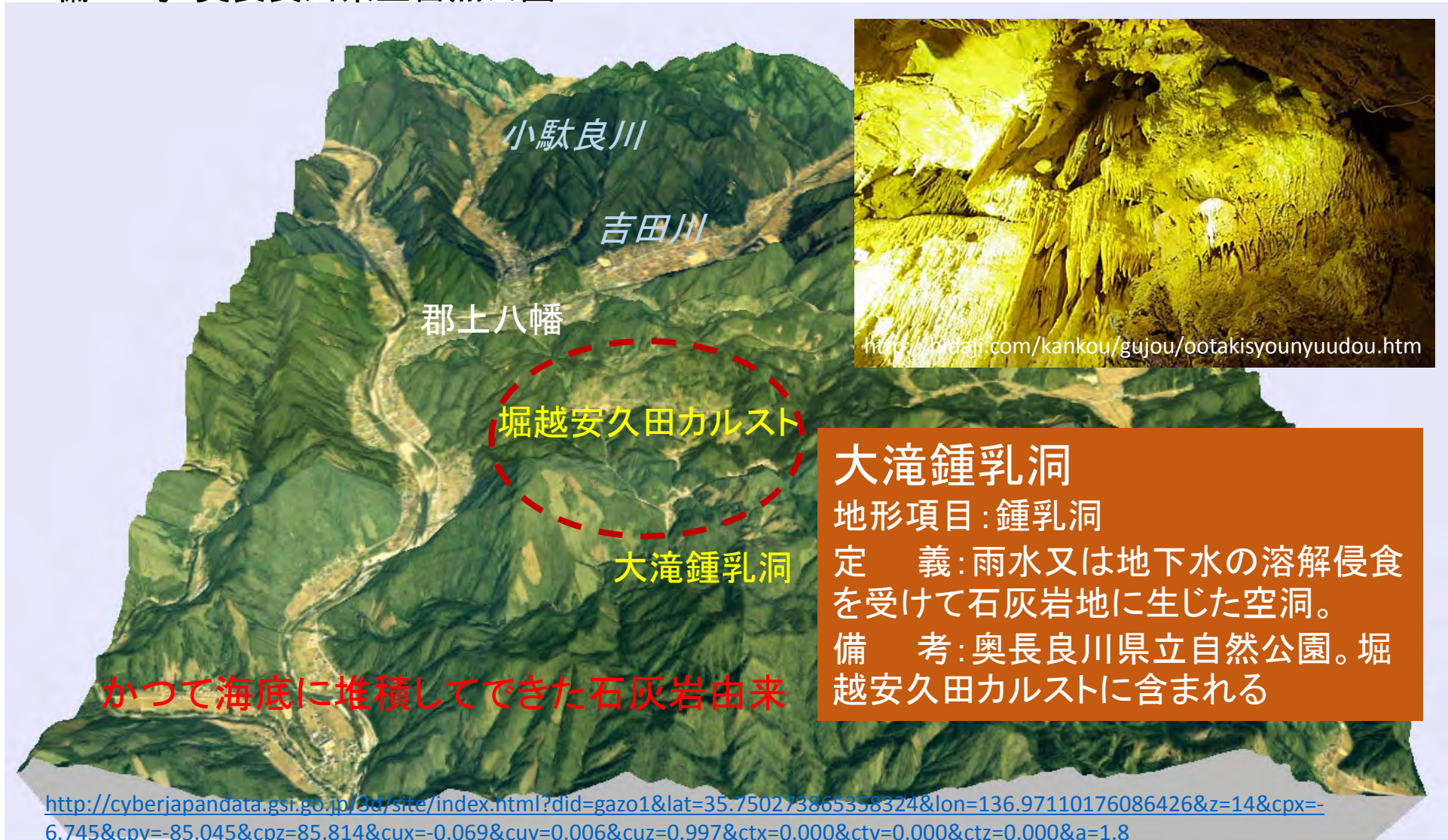
堀越安久田カルスト

地形項目:カルスト台地

定義:地表の石灰岩が侵食から免れて、台地状に残されているもの。

備考:奥長良川県立自然公園

地理院地図・地質を反映した地形より
地理院地図3Dで表示



<http://hidaji.com/kankou/gujou/ootakisyounyuudou.htm>

大滝鍾乳洞

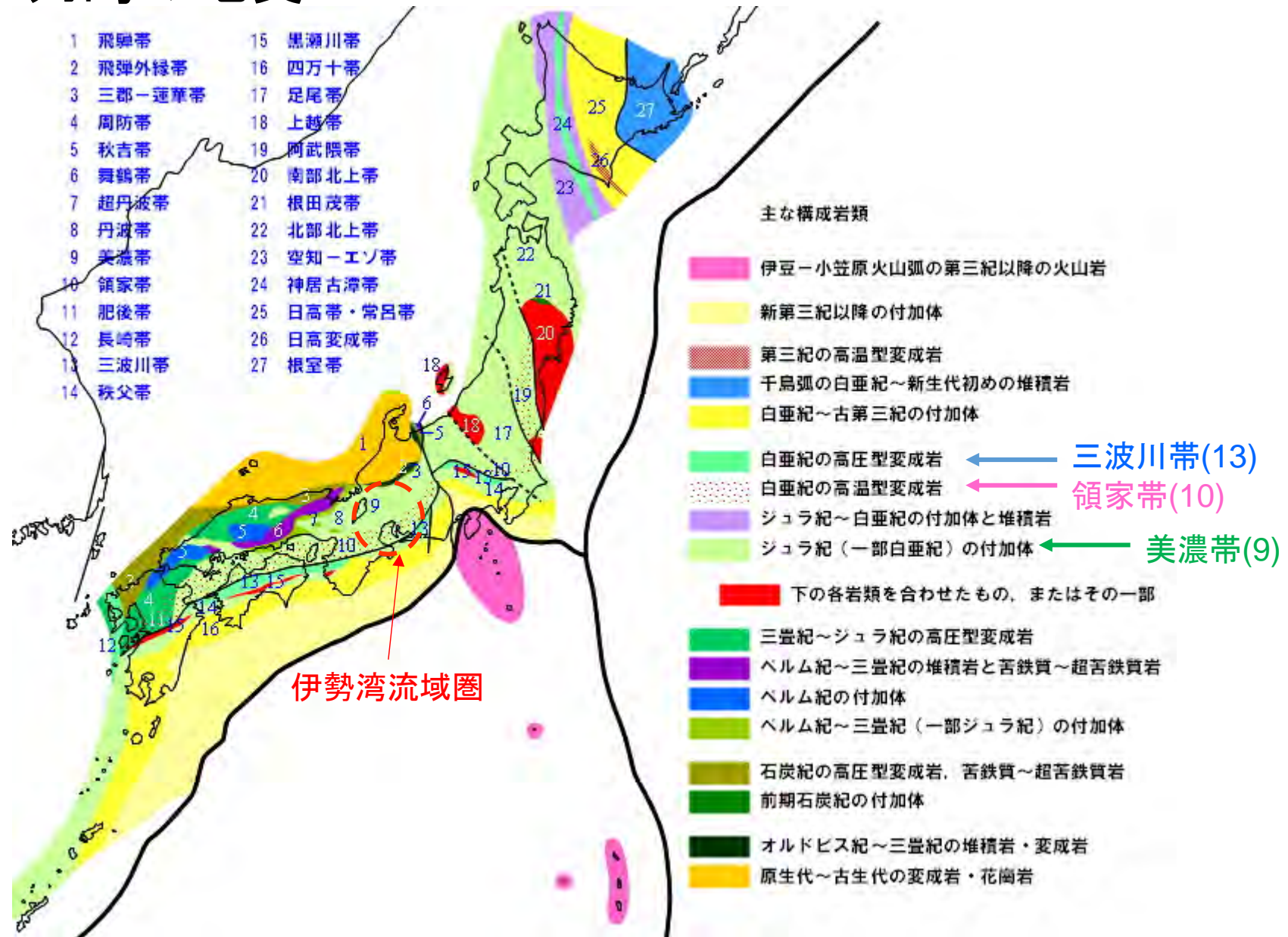
地形項目:鍾乳洞

定義:雨水又は地下水の溶解侵食を受けて石灰岩地に生じた空洞。

備考:奥長良川県立自然公園。堀越安久田カルストに含まれる

<http://cyberjapandata.gsi.go.jp/3d/site/index.html?did=gazo1&lat=35.750273865358324&lon=136.97110176086426&z=14&cpx=-6.745&cpy=-85.045&cpz=85.814&cux=-0.069&cuy=0.006&cuz=0.997&ctx=0.000&cty=0.000&ctz=0.000&a=1.8>

日本列島の地質



(産業技術総合研究所地質調査総合センター、<https://www.gsj.jp/geology/geology-japan/geology-japan/index.html>)

伊勢湾に注ぐ 河川の地質

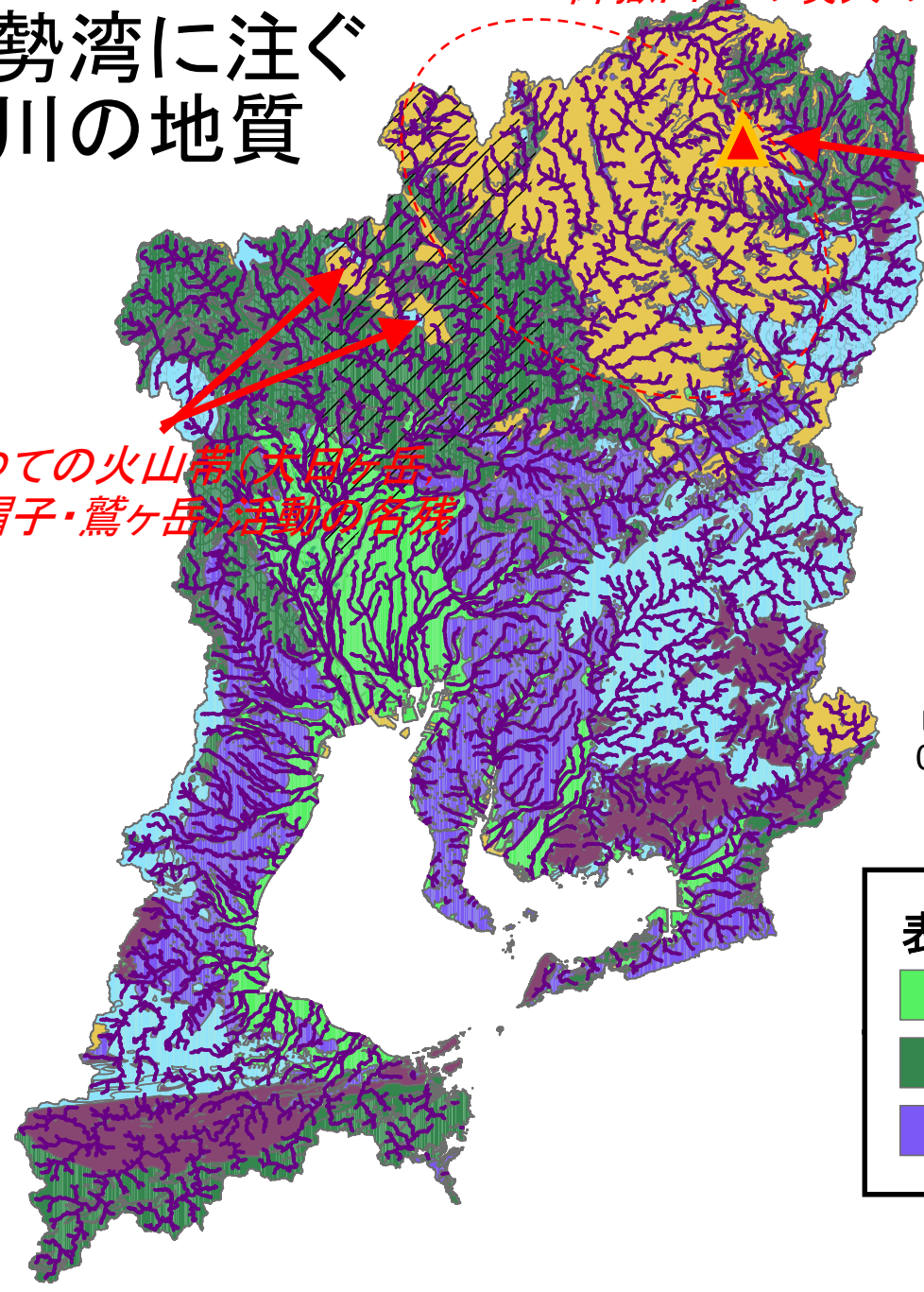
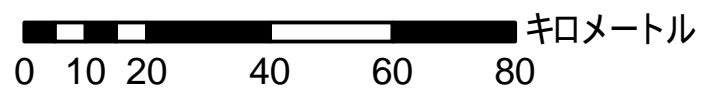
御嶽山等の噴火の影響







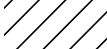
御嶽山

かつての火山帯(大日ヶ岳
烏帽子・鷲ヶ岳)活動の名残



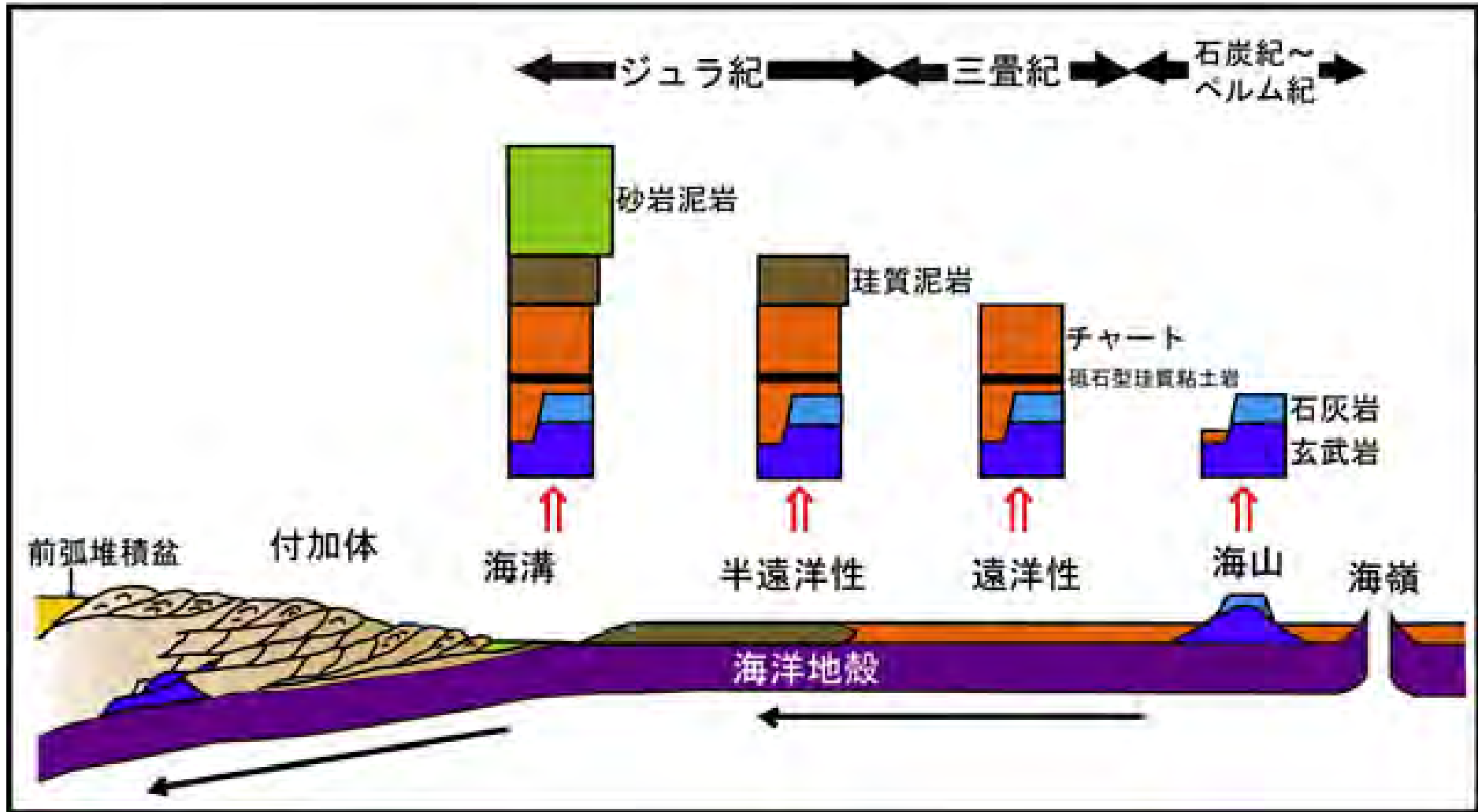
長良川・揖斐川の流域の大部分は付加体(後述, 堆積岩主体)



表層地質分布	
 その他	 変成岩類
 付加コンプレックス	 深成岩類
 堆積岩類	 火山岩類
	 長良川流域

付加体(美濃帯堆積岩類など)の形成

海洋プレートは海溝部で大陸の下へ沈み込んでいくが、堆積物はいっしょに沈み込むことができず、はぎ取られたり、大陸側から運び込まれた砂岩・泥岩などとともに大陸側へ押し付けられ、混じり合って複合体(コンプレックス)を形成・・・「付加作用」



長良川中流の河原に見られる石

出典:川原の石ころ図鑑


上流域の地質分布を反映し、堆積岩、**火山岩**が多く、深成岩(花崗岩など)は少ない

マグマが急に冷えて固まった岩

中流の石は丸いというが...




丸い!?

 **溶結凝灰岩**(火成岩)

ながらがわ
長良川という、このむらさきがかかった石ころが、まず頭にうかぶ。7000万年前の噴火で、**流紋岩**質のマグマが地表にあつて厚くたまってできたといわれる。岩石や軽石のかけらもふくむ。高鷲村から下流のどの川原でもみられる。



丸い!?

 **流紋岩**(火成岩)

はいいろ
灰色の地に、ピンク色のカリ長石の大きな結晶が目につく石。石英のつぶもわずかにふくまれている。流紋岩は、花こう岩と同じように、珪酸分が多く、白っぽい石ころ。



角張る

 **チャート**(堆積岩) ↑

白い半透明の石ころの中に、赤色、青色、黒色、茶色の模様がいっぱいチャート。どこにも砂つぶはみえない。ハンマーでたたくと火花がでる。

 **れき岩**(堆積岩)

いじょう
大きさ2mm以上のれきがあつまった岩石。れきとれきのあいだをうめているのは、粘土や石英が多い。



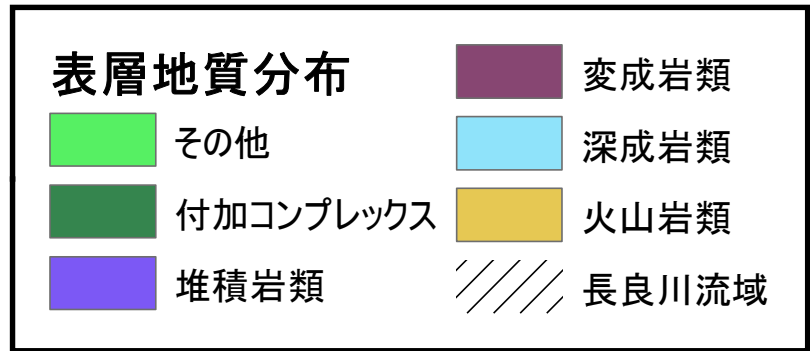
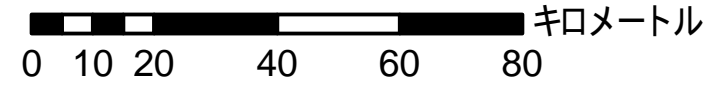
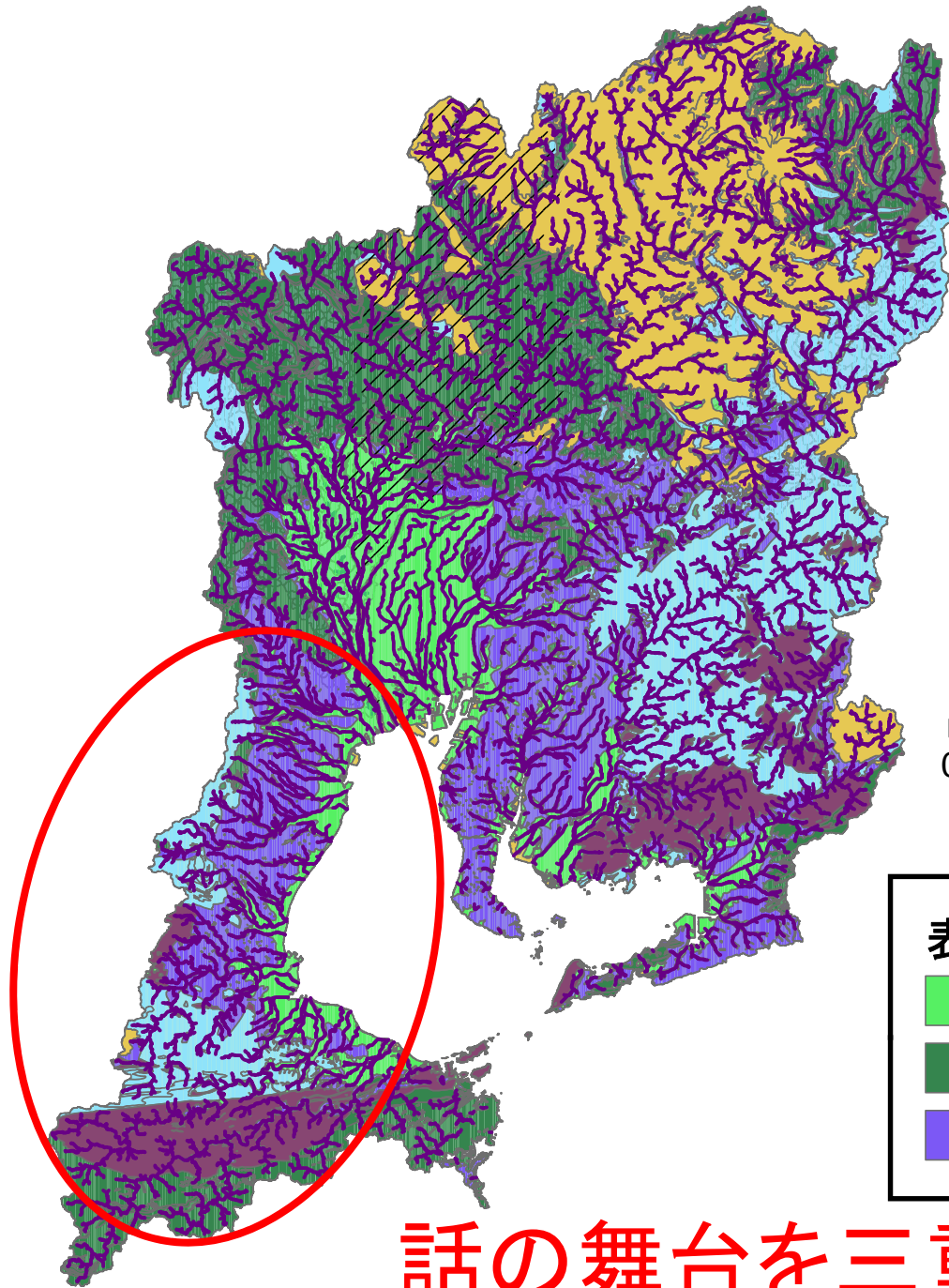
角張る



平たい

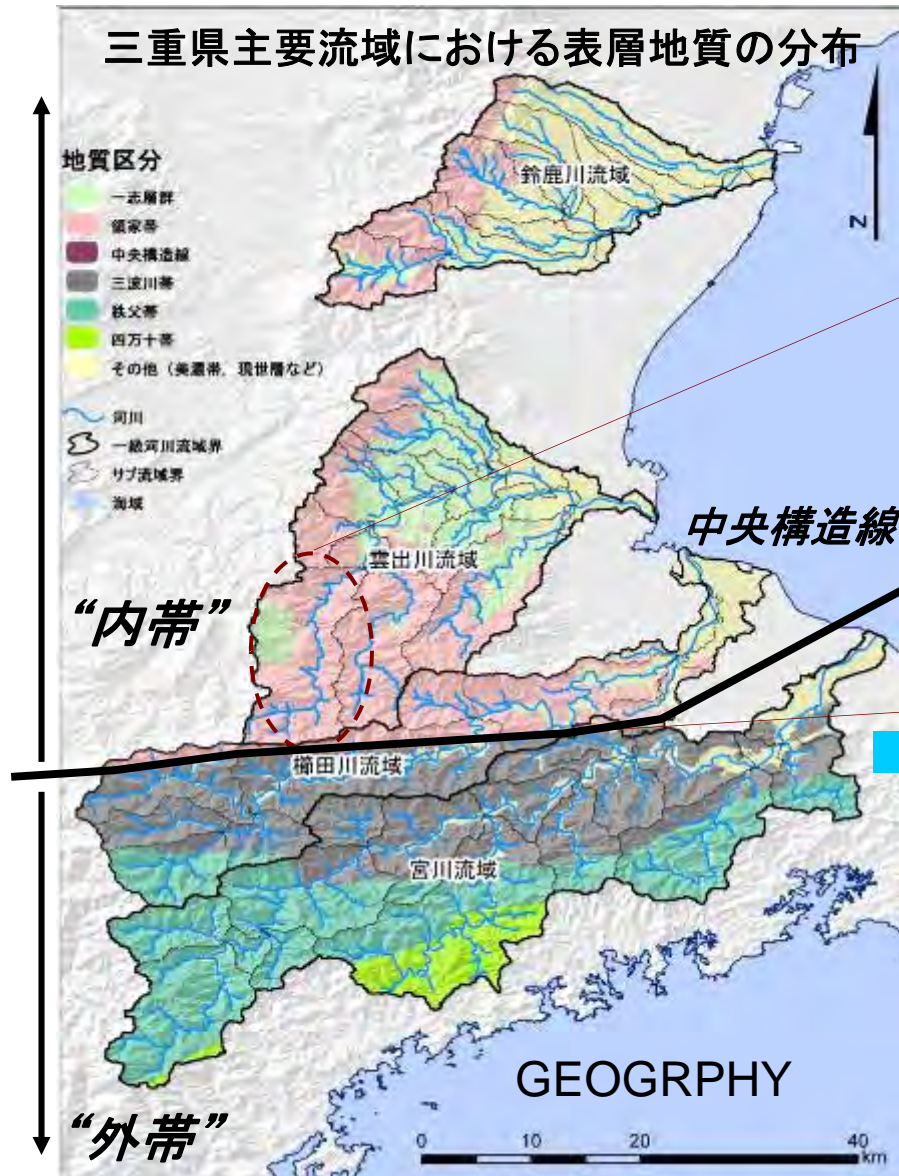
 **けつ岩**(堆積岩)

手ざわりがなめらか。四角く平べったい黒い石。角が丸くみがかれている。細いひびには石英がはいっている。

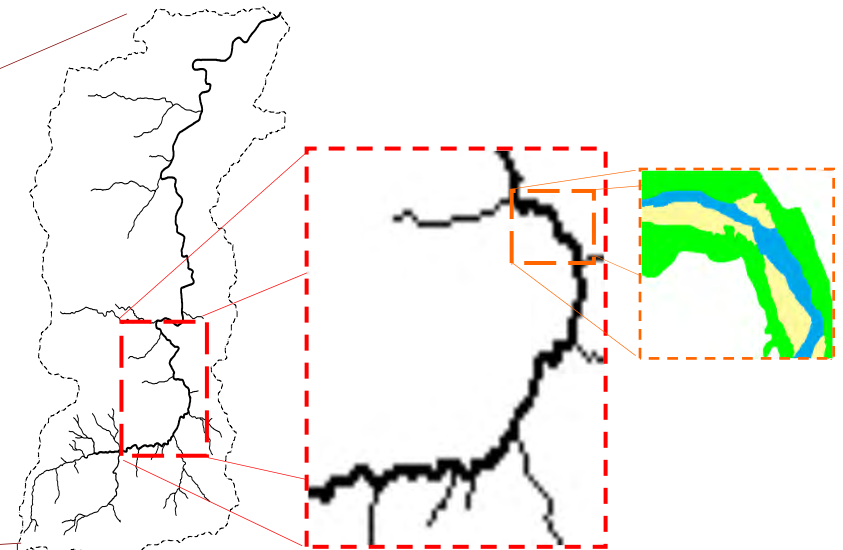


話の舞台を三重県に移します

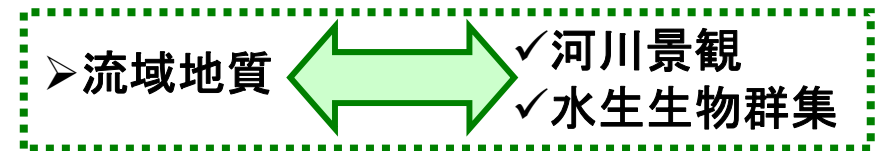
河川景観の支配要因としての表層地質



流域・河道地理特性の階層性



(SUB-)BASIN SEGMENT REACH

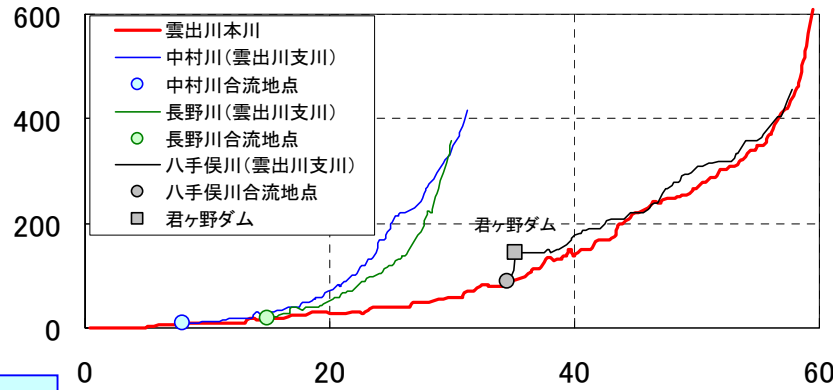


川幅, 勾配, 砂礫, 植生... ↓ 水理, 瀬・淵, 底質, 生息場

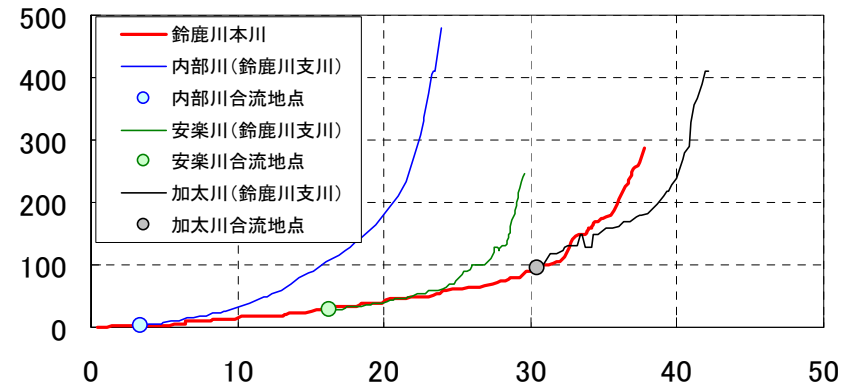
河道設計・管理技術への展開! ?

流域地質による河川縦断地形の違い

雲出川流域



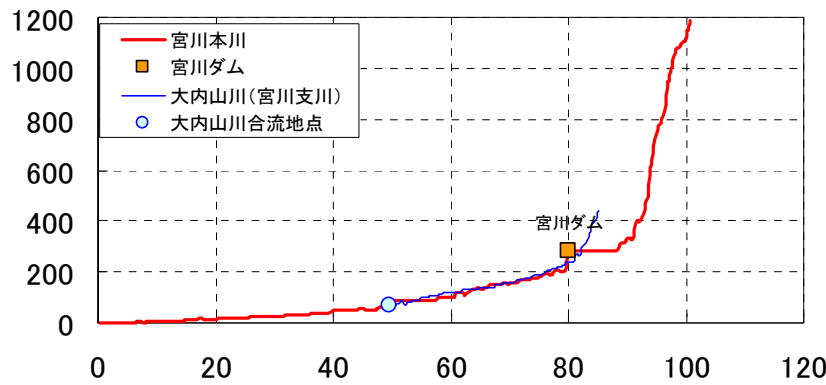
鈴鹿川流域



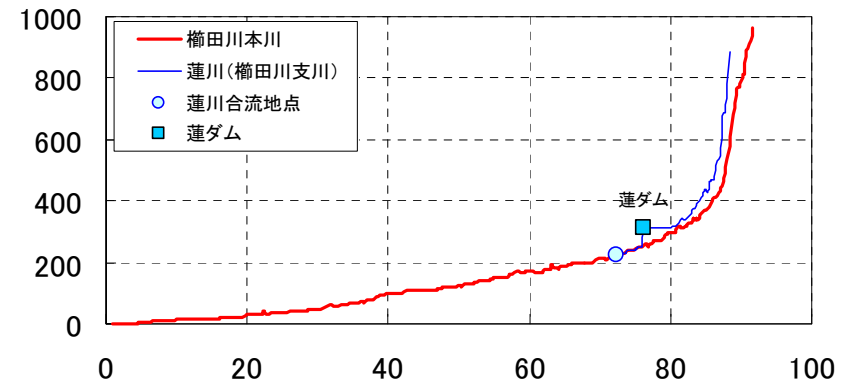
↑
内帯

↓
外帯

宮川流域



楡田川流域



・地質構造(外帯／内帯)で幹線流路の縦断地形が大きく異なっている。

流域地質と河床材料構成

➤地質構造と関連付けて河道特性を理解する

以下の条件により, 流域地質による河道特性の違いを分析

①上流域の地質が一様

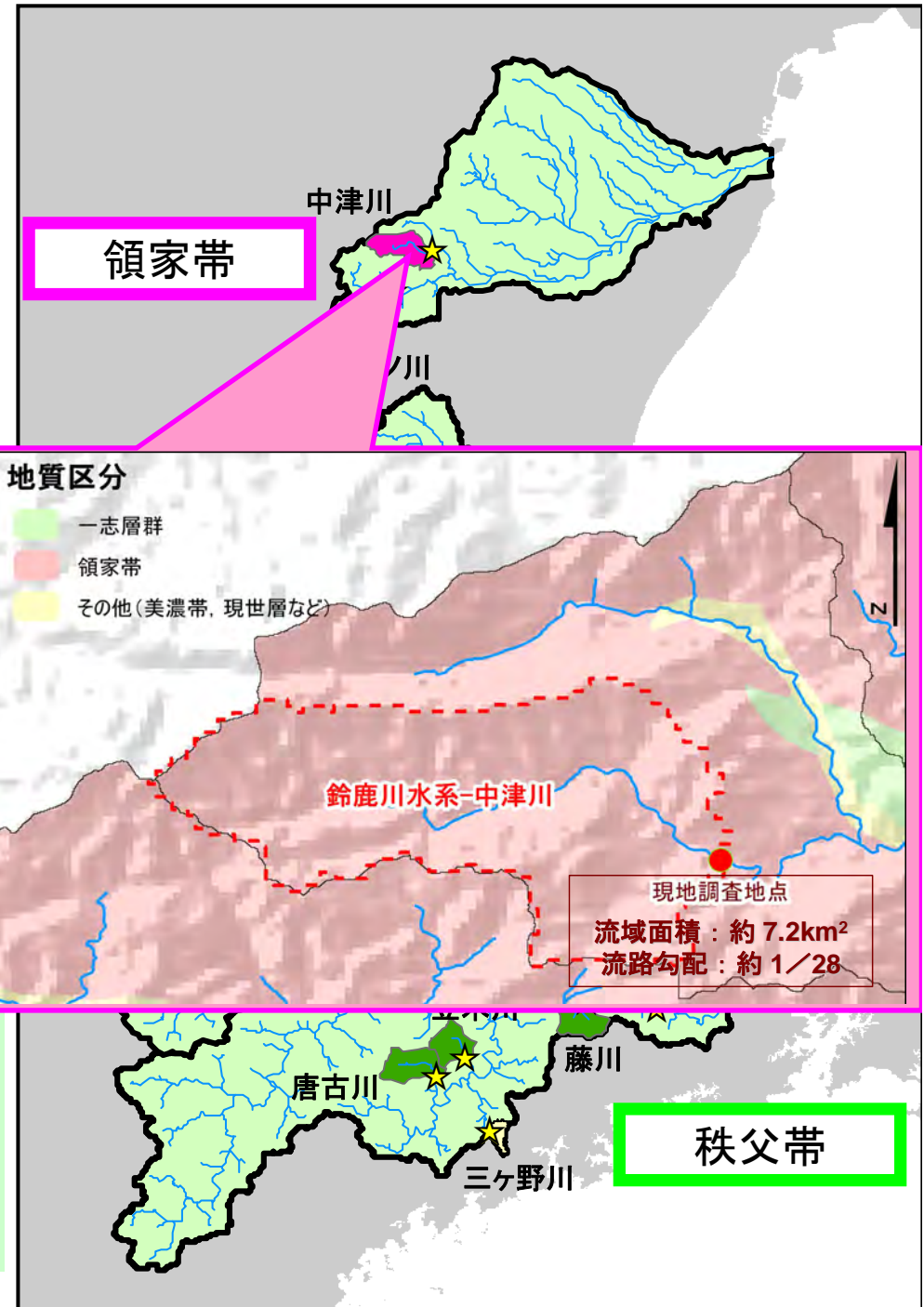
②上流域の流域面積

$$5 \text{ km}^2 \leq A_b \leq 10 \text{ km}^2$$

③流路勾配

$$1/150 \leq \tan\theta \leq 1/10$$

ダム・砂防堰堤下流, 護岸など人為の影響のある場所は回避.





予備調査項目

物理環境:

縦断測量(水位, 河床高), 流量観測

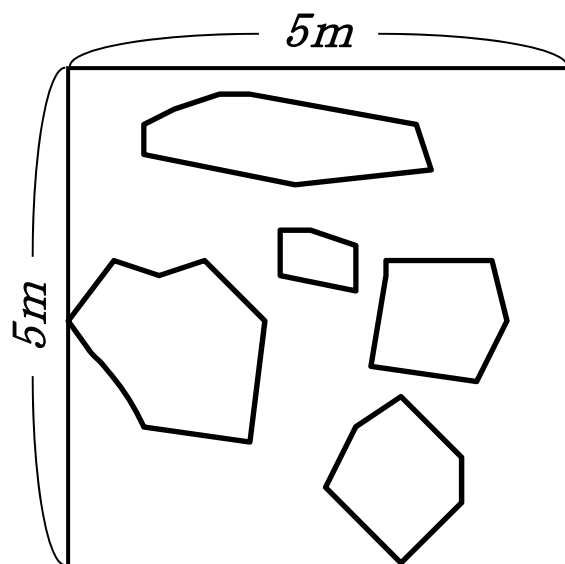
水質観測:

多項目水質計(YSIナノテック556MPS)

水温, 導電率, DO濃度, pH, 酸化還元電位



①淵尻堆積物の材料構成



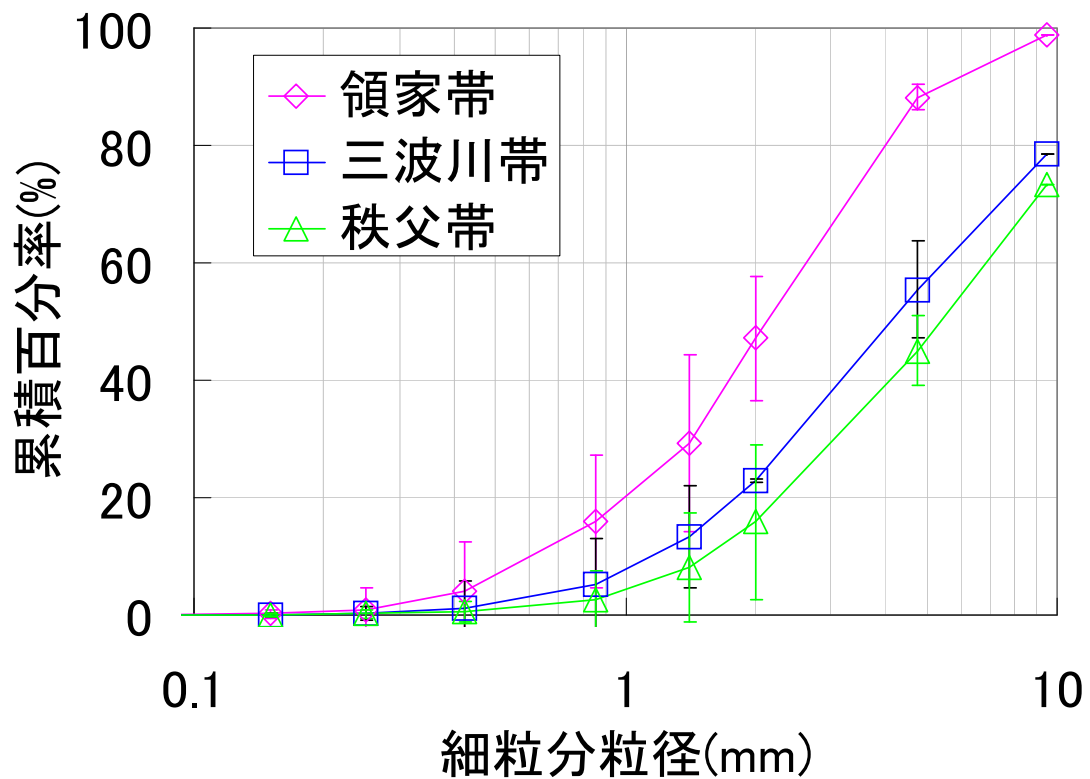
瀬の直下で5m四方で
上位5つの巨石の
短径・長径を測定



②流路内に存在する巨礫



① 淵尻堆積物の材料

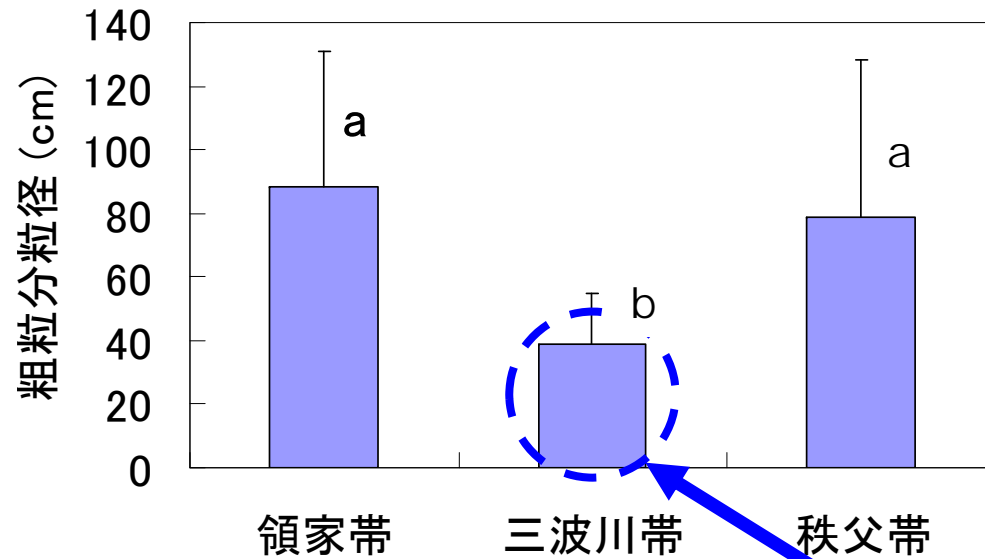


秩父帯 > 三波川帯 > 領家帯

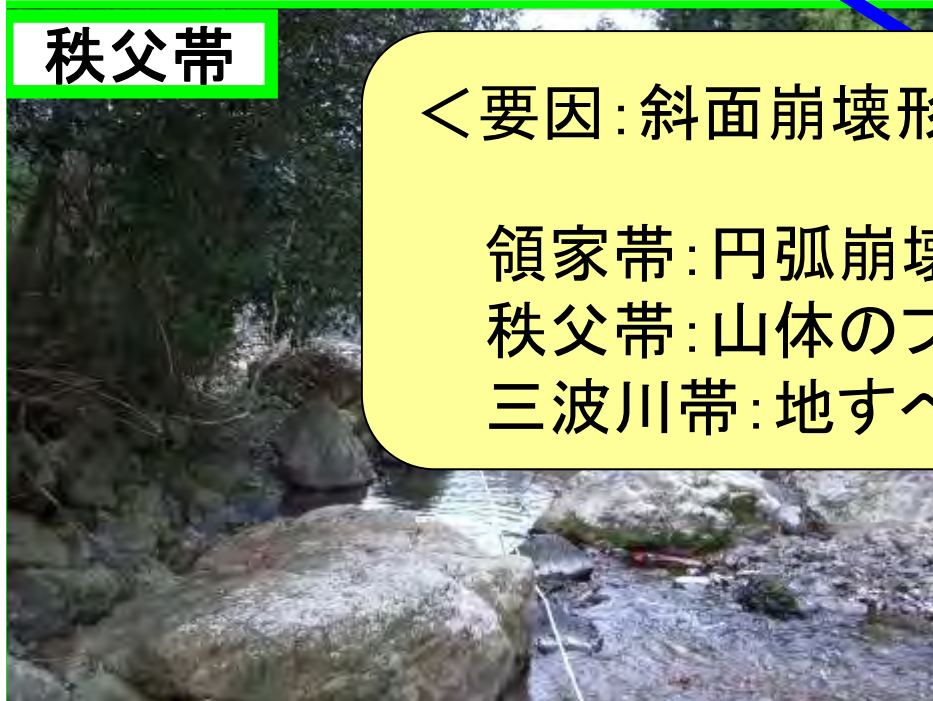
<要因>
 三波川帯変成岩: 層状剥離による破碎
 領家帯火成岩: 風化部 → マサ(真砂)



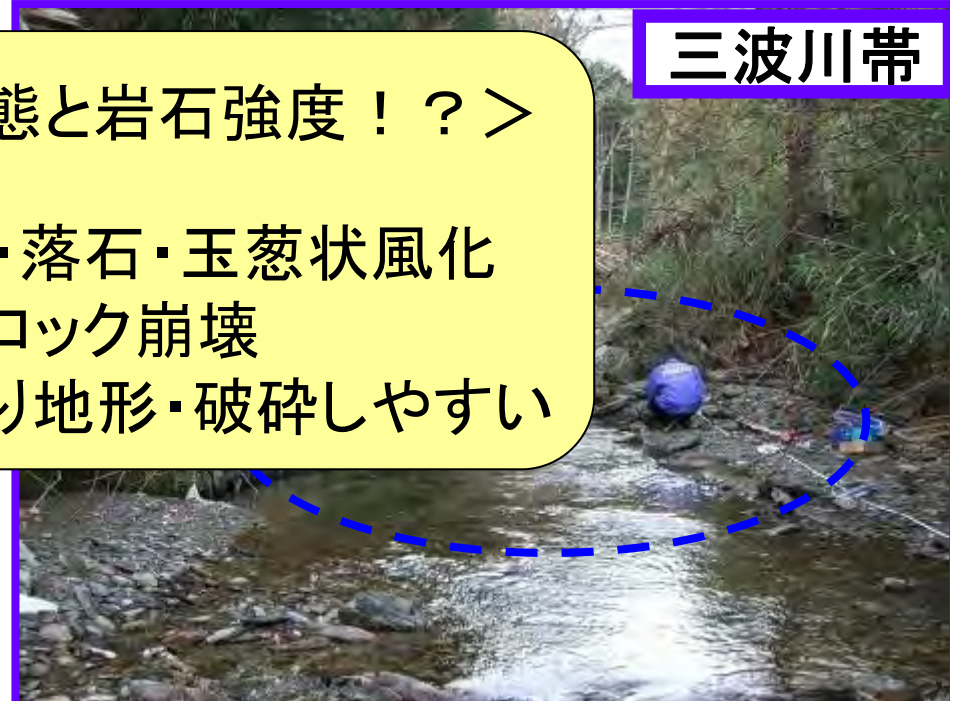
②流路内の巨礫



領家帯



秩父帯



三波川帯

< 要因：斜面崩壊形態と岩石強度！？ >

領家帯：円弧崩壊・落石・玉葱状風化

秩父帯：山体のブロック崩壊

三波川帯：地すべり地形・破碎しやすい

ここまでは地形，地質によって
産み出す石ころが違う話でした

ここからは石ころが河川地形・移動床，生物群集
を変える可能性について考察していきます

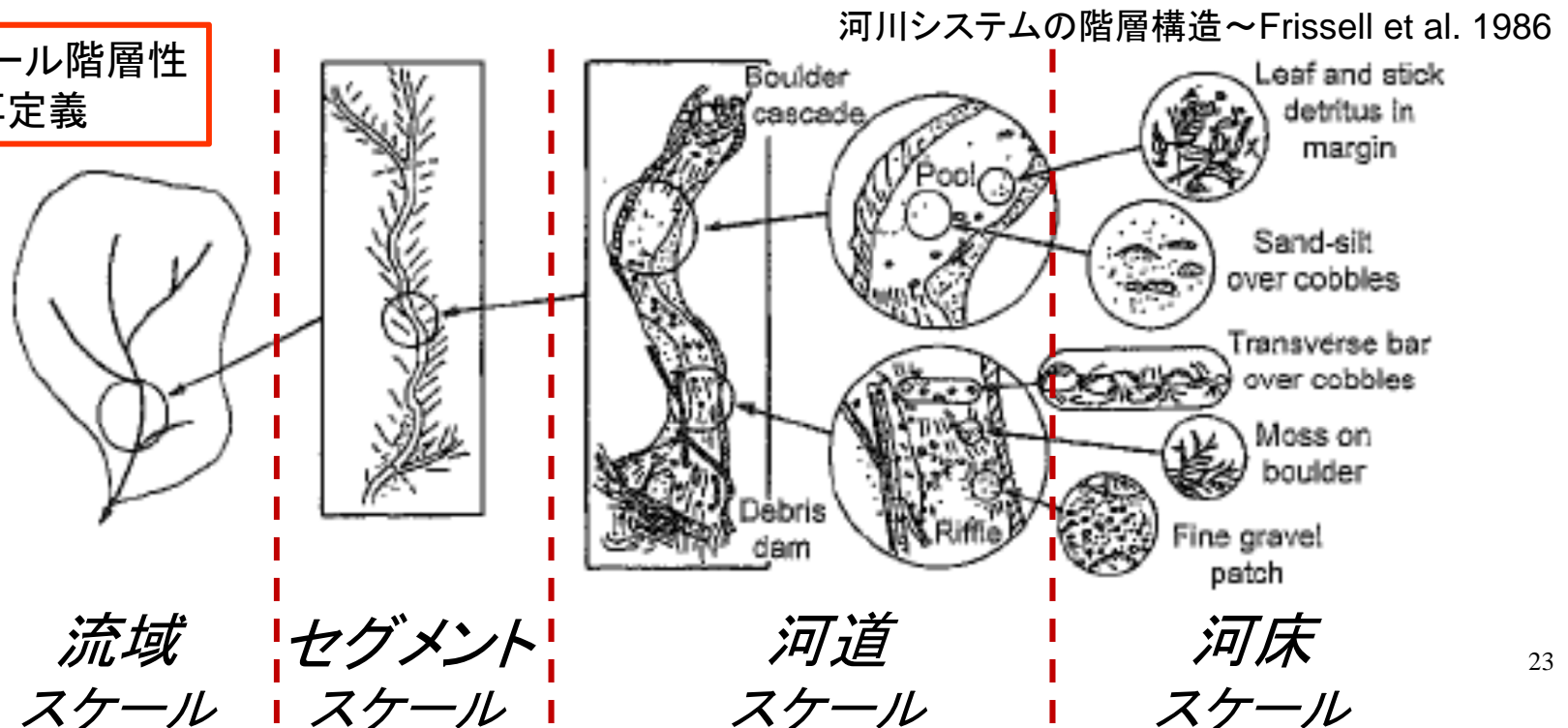
(1) 流域地質～河川景観連鎖系における支配プロセスの抽出と解明

(1-1) **空間スケールの階層性**に着目した河川景観の解析

(1-2) 流域から河道への土砂流出過程の把握

セグメント～河道内植生, 河道～河床形態, 河床～河床構造

空間スケール階層性の再定義



セグメントスケールにおける植生の消長過程に着目した分析

①教師付き(最尤法)分類

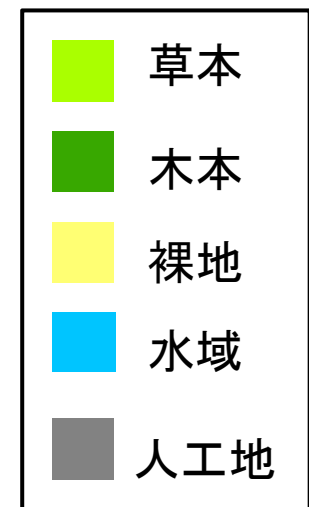
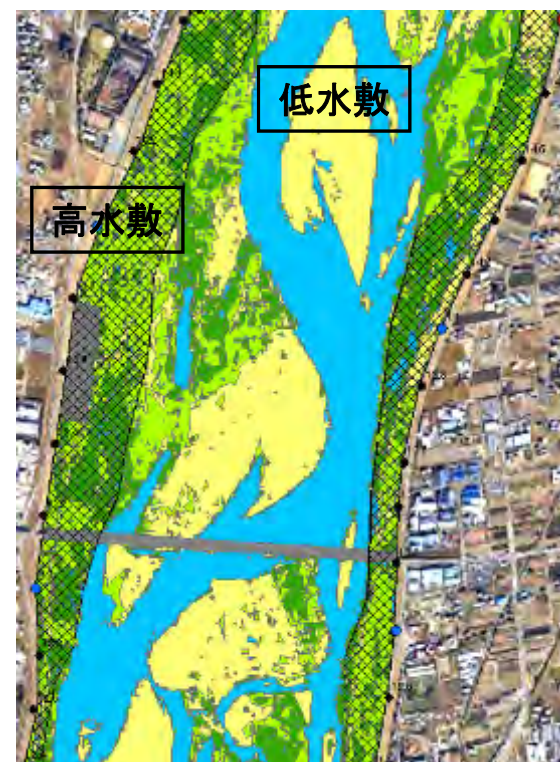
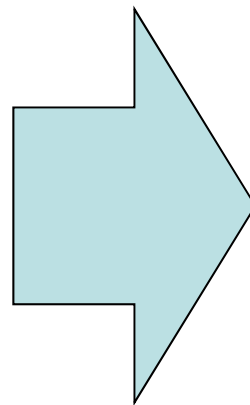
- ・分類する項目であると明確に判読できる領域をトレーニングエリアとして設定
 - ・色構成の画像情報から他の画素がどの領域に最も近いか判断し、分類される
- 草本, 木本, 裸地, 水域に分類される

②人工地(グラウンド, 耕作地等)を目視で判読

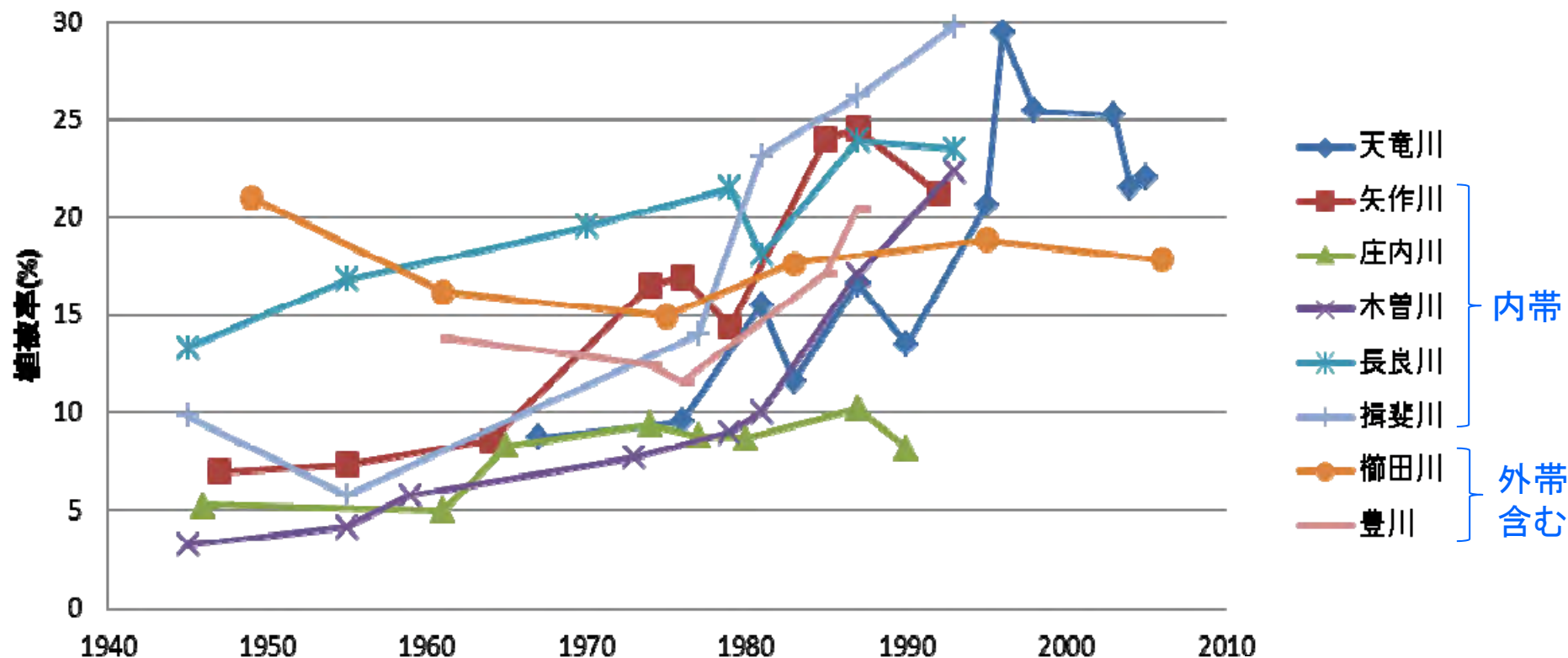
→草本, 木本, 裸地, 水域, 人工地に分類される

③高水敷と低水敷に分ける

航空写真の判読・解析



植被率の変化～中部の一級河川を対象として～

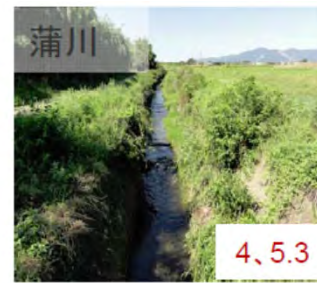


- ・変化少ない → 庄内川, 榑田川
- ・増加
 - └ 拡大と縮小を繰り返しながら増加 → 天竜川, 矢作川
 - └ 一方的な増加 → 豊川, 木曾川, 長良川, 揖斐川

流域地質が複合的で、かつ、人的改変も含む多様な影響要因があることから、築堤河道(一級河川直轄区間)の植被状況から地質影響を見出すことは困難

「河道～河床形態」

河道スケールにおける河床形態に着目した分析 川幅水深比からみた河道景観



岩盤化、根継ぎ、護床工が多く、瀬・淵がない。



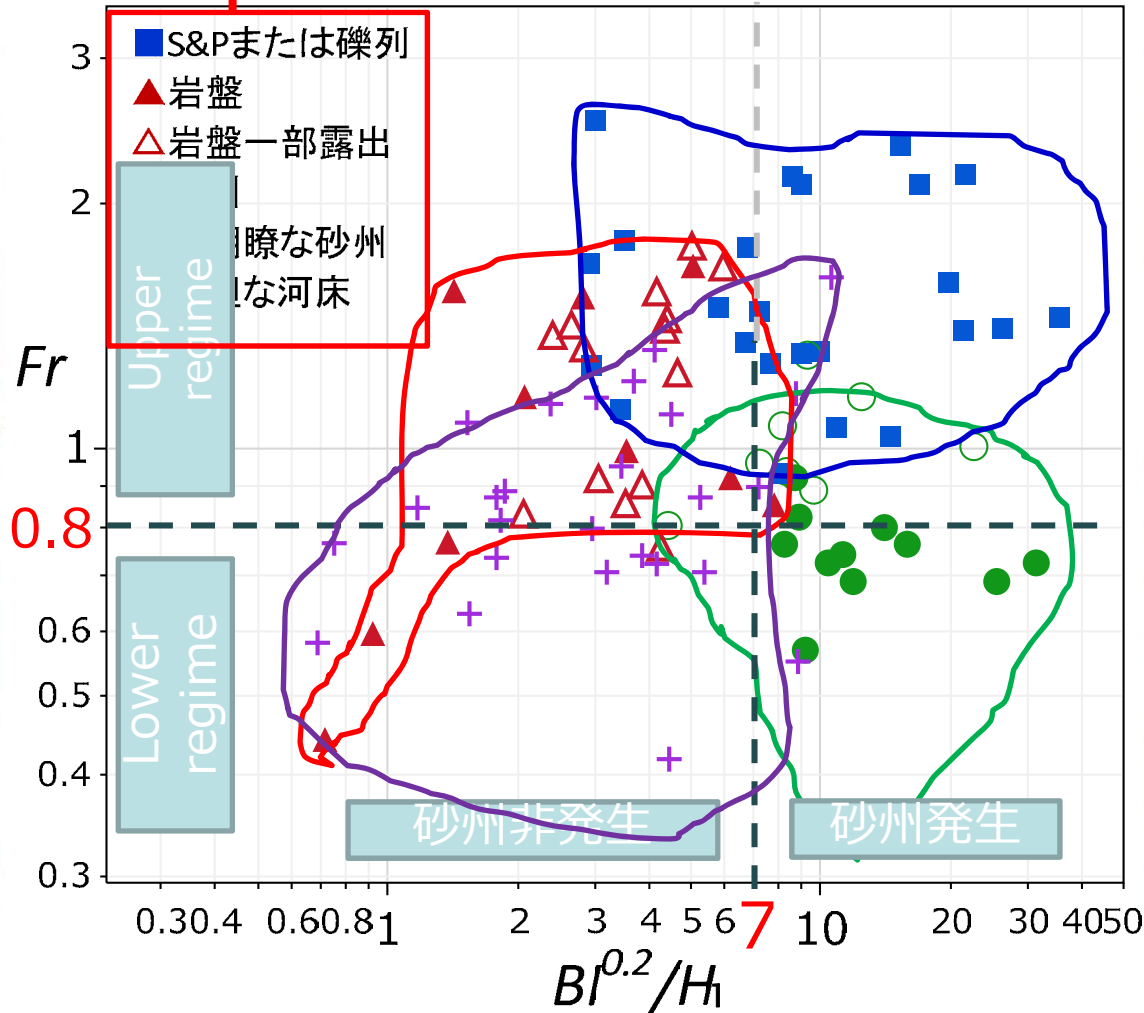
川幅 (B)、川幅水深比(B/H_1)

砂州が形成され、瀬・淵も多い。

「河道～河床形態」

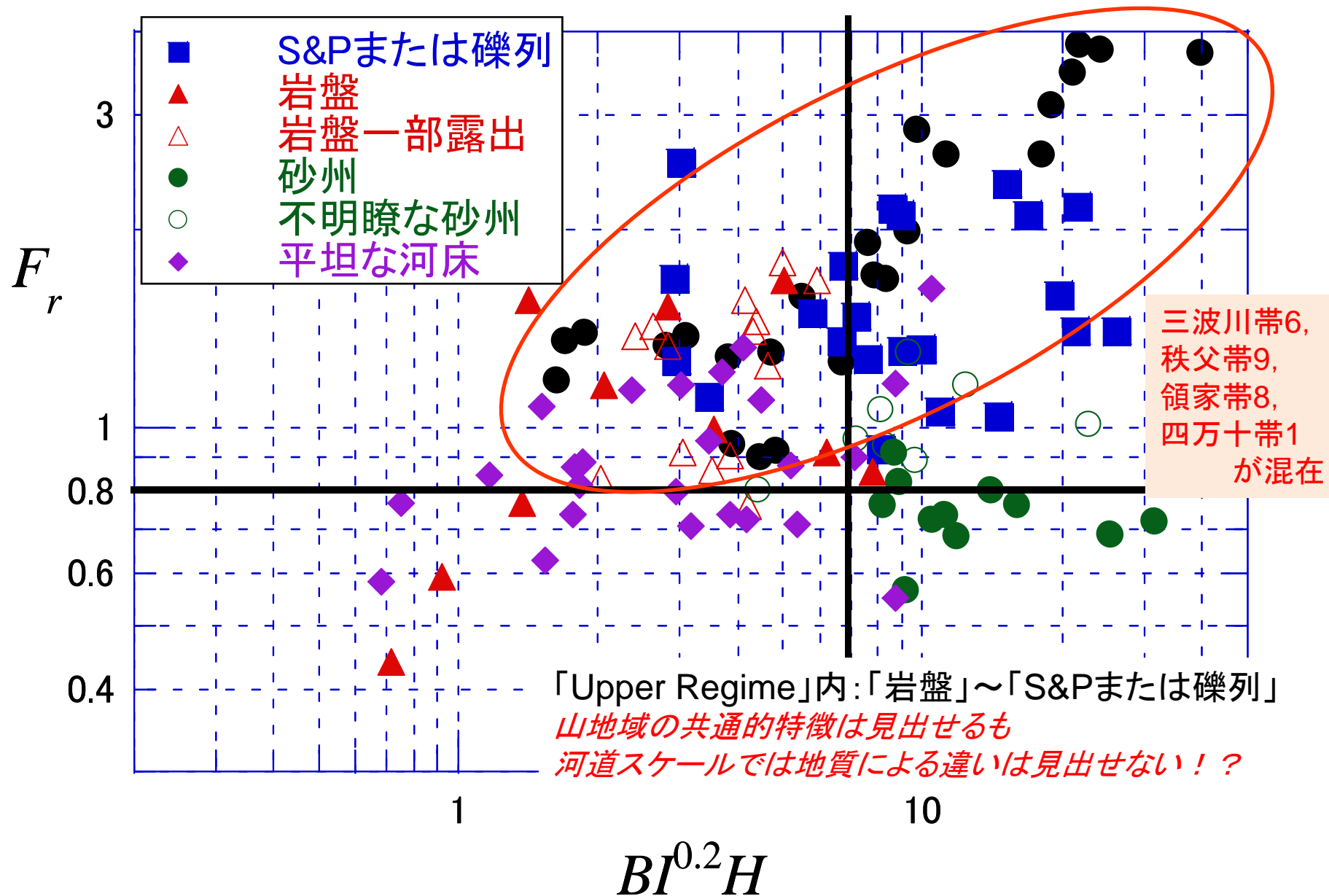
河道特性から河床形態をとらえる

河床形態や生態学的観点から、瀬・淵のとらえ方に関する既存文献を参考にしつつ6つに区分



河道特性量のみで説明し難しいのは、河道が流域特性や人的改変の影響を受けているからで、これがバラツキに現れていると考えられる。

流域地質からみた山地域の河床形態



「河床～河床構造」 河床構造に着目した分析

櫛田川流域(三重県松阪市, 多気町)

幹川流路延長87km 流域面積436km²

地質区分

- 領家帯
- 三波川帯
- 秩父帯
- その他
- 中央構造線

★ 調査地点



領家帯

火成岩(花崗岩)類
(特徴)一般的に基盤として優秀.
マサ化という特殊な風化.

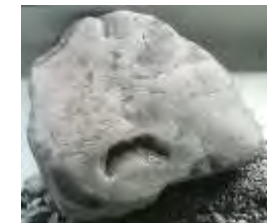
→単相地質流域: 仁柿川



三波川帯

変成岩(結晶片岩)類
(特徴)片理の存在. 層状剥離.

→単相地質流域: 相津川



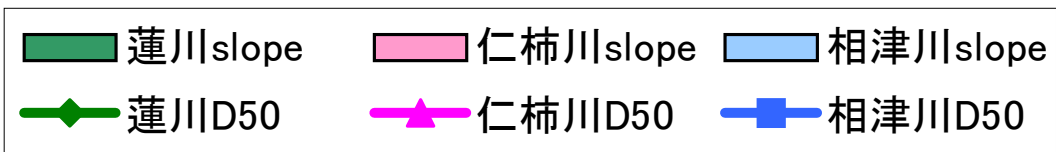
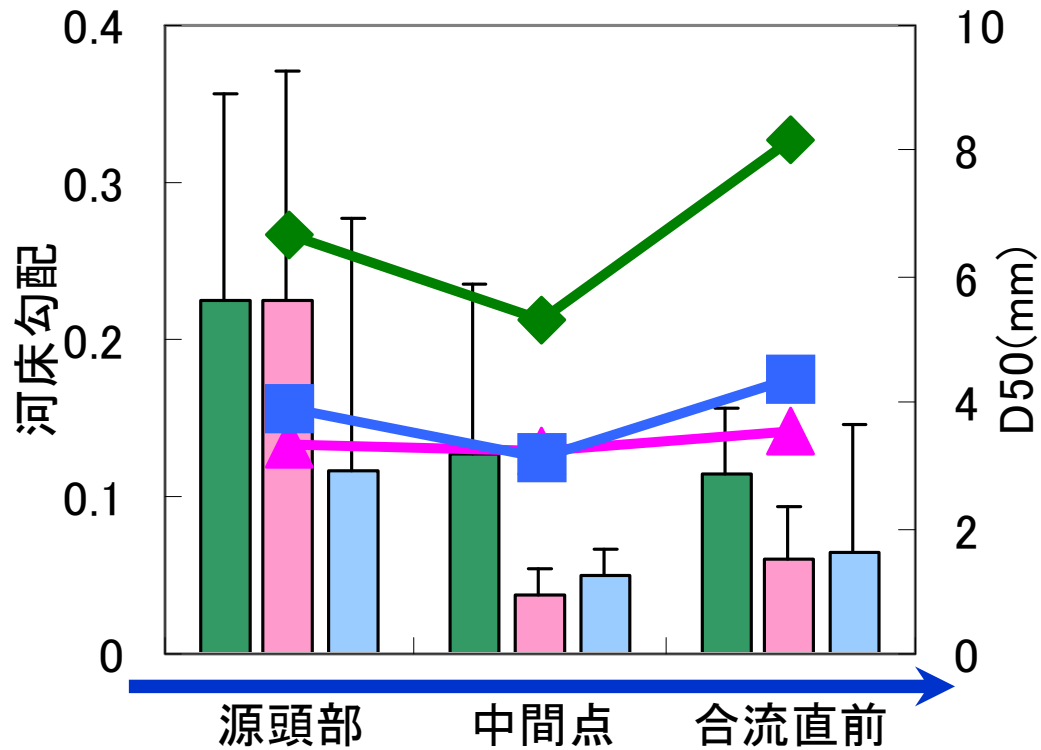
秩父帯

堆積岩類
(特徴)材質は様々. 年代によって
固結度が大きく異なる.

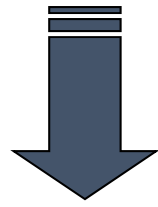
→単相地質流域: 蓮川

※各調査地点の瀬と淵で河床材料をサンプリング(N=4):
瀬で石(64~256mm)を4つ, 淵で礫分(河床表層2L:
20cm×20cm×5cm)を4セットずつ採取(田代ら, 2008).

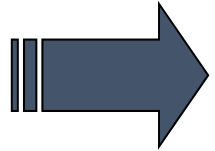
地質・河道特性による淵の砂礫サイズの流下方向変化



秩父帯と**領家帯**
 源頭部での河床勾配は同様
 ↓
 粒径には差がある



三波川帯と**領家帯**
 粒径は流下によらずほぼ同じ
 ↓
 源頭部で河床勾配に差がある

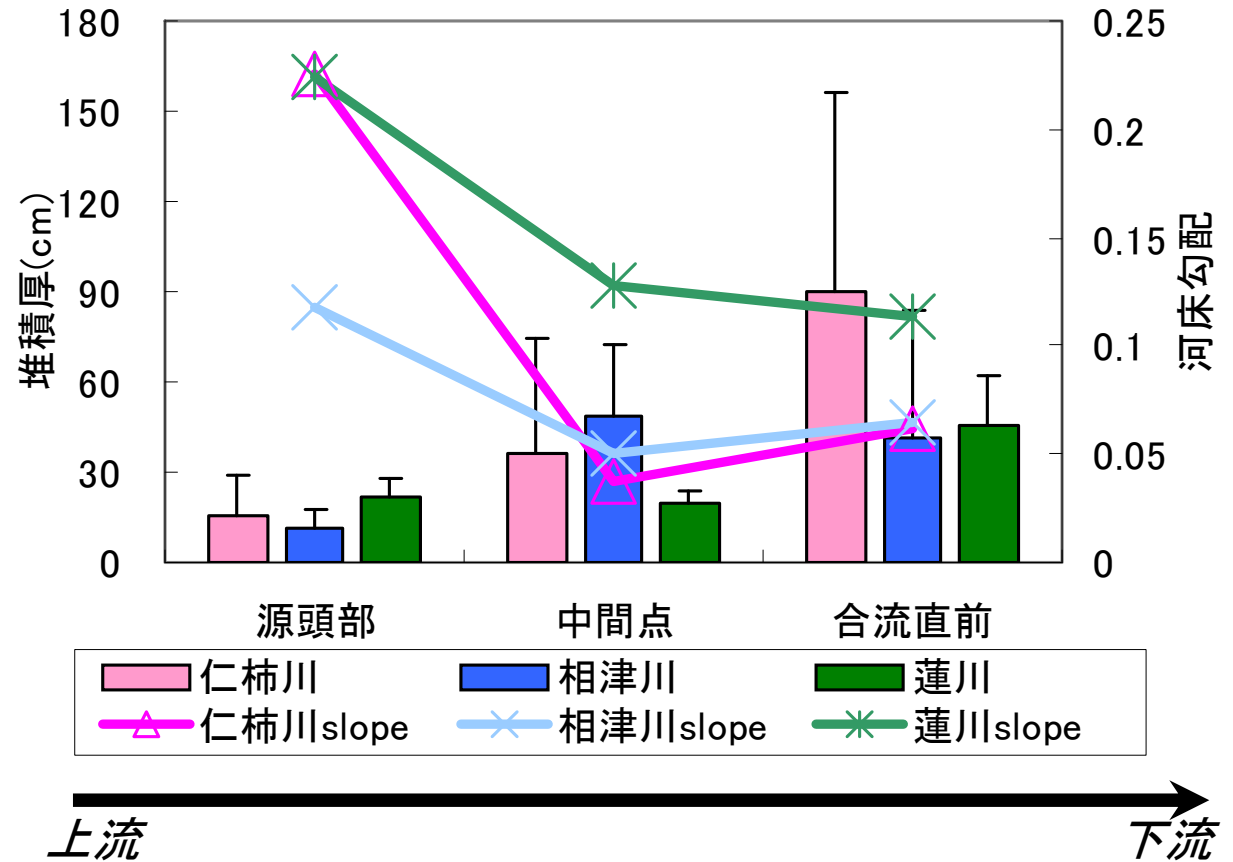


河床勾配と中央粒径には関連性が無く、河床材料特性は、河道内地形に依存しない

淵の砂礫堆積厚(交換層)の流下方向変化

河床勾配は、流下に伴っておおむね減少傾向を示す

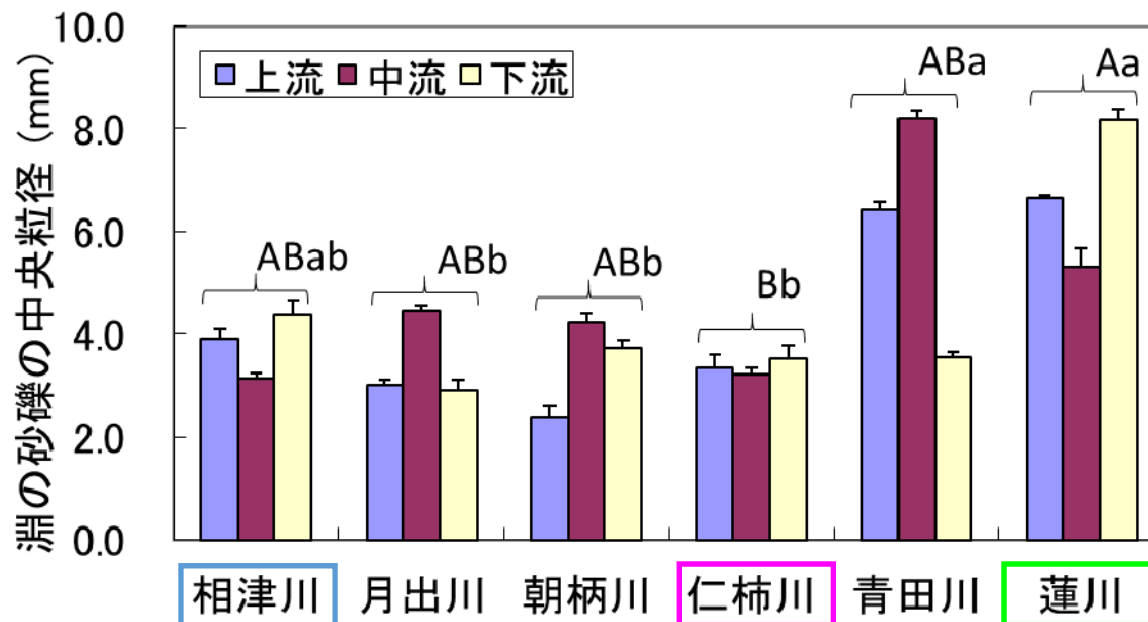
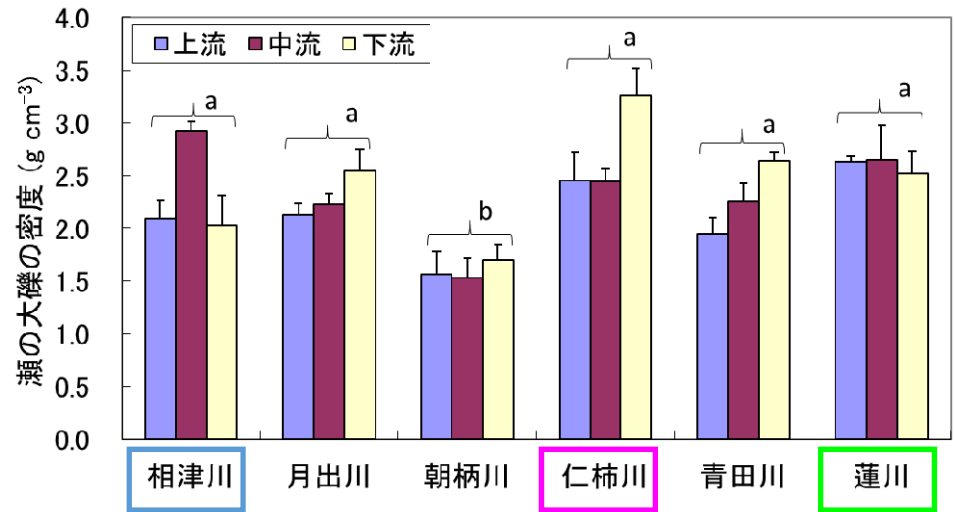
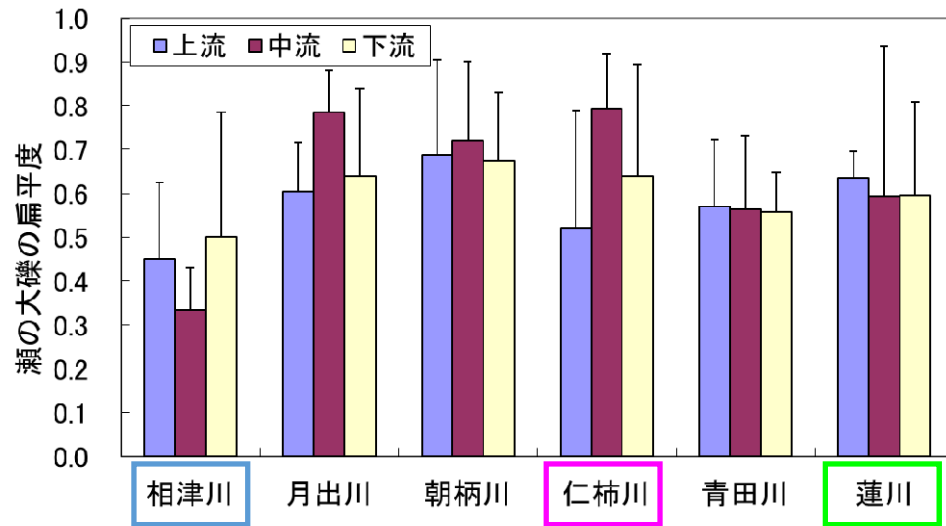
堆積厚は、源頭部で差はなく流下に伴って増加傾向を示す



特に、**領家帯**における堆積厚の増加が著しい

地質構成や河道特性によって、砂礫貯留量に差が生じた。

調査結果（上：瀬の石の形状・密度，下：淵の砂礫のサイズ）



瀬の石：

➤ 扁平度に違い

領家帯：球状／三波川帯：板状

➤ 密度に違い

未固結な堆積物（沖積平野に近い朝柄川）で小さい傾向

淵の砂礫：

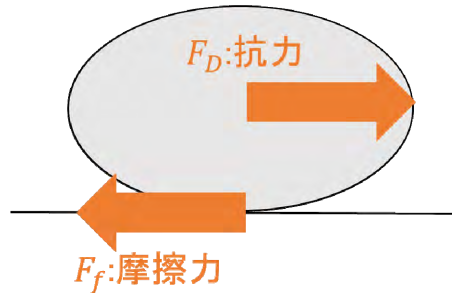
➤ 秩父帯で大きい

前述の調査結果を支持³²

余談 1 : 石礫形状は移動床過程をどのように変えるか？

● 石礫の移動限界状態に関する理論的考察

◇ 形状を考慮した石礫の無次元限界掃流力



- ・滑動(Sliding)
- ・転動(Rolling)
- ・跳躍(Saltation)

力の釣り合いより...

$$F_D = F_f$$

$$\frac{\pi}{8} \rho b c u_b^2 = \frac{\pi}{6} \mu_f (\sigma - \rho) g a b c$$

$$\frac{\pi}{8} \rho b c u_b^2 = \frac{\pi}{6} \mu_f \rho \frac{u_{*c}^2}{\tau_{*c}} a b$$

$$\tau_{*c} = \frac{4 \mu_f}{3 C_D} \left(\frac{u_{*c}}{u_b} \right)^2 \frac{a}{c}$$

$$\tau_{*c} = 0.0291 \frac{\mu_f a}{C_D c}$$

無次元限界掃流力

$$\tau_{*c} = \frac{u_{*c}^2}{(\sigma/\rho - 1) g c}$$

仮定: $d = c$

対数則分布 $\frac{u_b}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y}{d} + 8.5$

仮定: 鉛直方向に対数則が成立する場 $d = c, y = 0.5c$

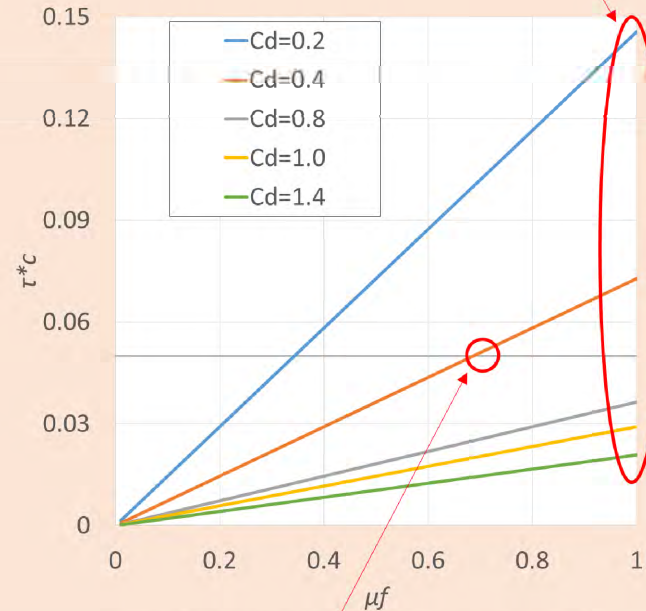
$$\frac{u_b}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{0.5c}{c} + 8.5 \cong 6.77$$

変数一覧

F_D	石礫が流れから受ける抗力	ρ	水の密度	g	重力加速度
F_f	石礫に作用する河床の摩擦力	C_D	抗力係数	σ	粒子の密度
a	石礫の流下方向長さ(長径)	y_b	石礫に作用する代表高さ	u_{*c}	限界摩擦速度
b	石礫の横断方向長さ(中径)	u_b	y_b における流速	κ	Karman定数(=0.4)
c	石礫の水深方向長さ(短径)	μ_f	静止摩擦係数	τ_{*c}	無次元限界掃流力

球形粒子($a = c$)を対象とした場合の C_D をパラメータとする μ_f と τ_{*c} の関係

C_D だけでなく、 μ_f や ϕ により τ_{*c} は大きく変動
水流に面する形状など 河床への接地状況



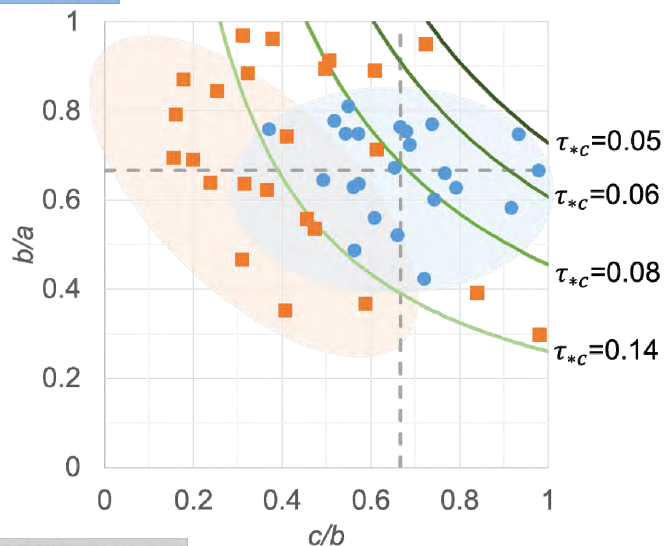
$\mu_f \cong 0.7$ (内部摩擦角 $\phi \cong 35^\circ$)との組合せで $\tau_{*c} = 0.05$ (岩垣式など)

形状の異なる石礫の掃流限界条件

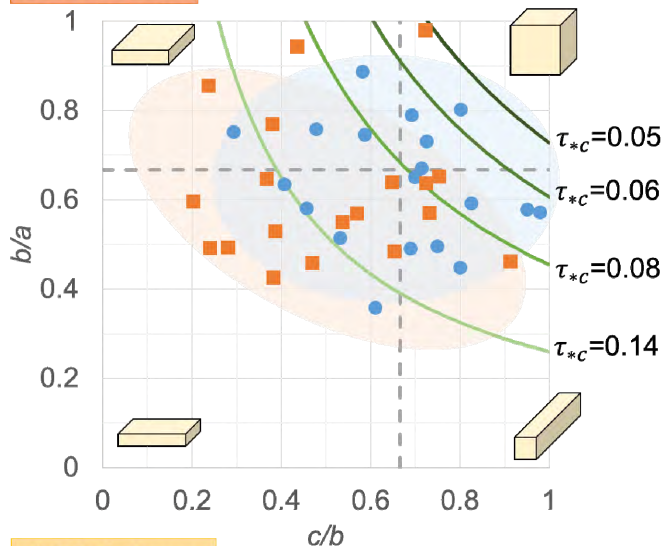
$C_D=0.4$ および $\mu_f=0.5$ として描ける τ_{*c} 一定の曲線を複数併記.

75mm-

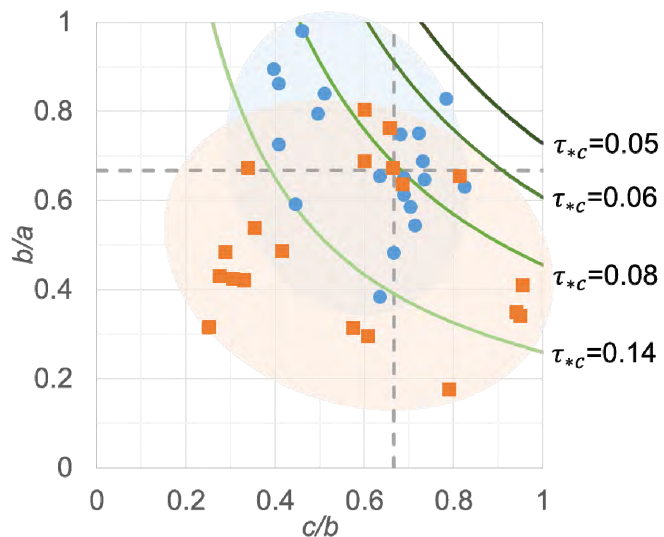
● 仁柿 ○ 相津



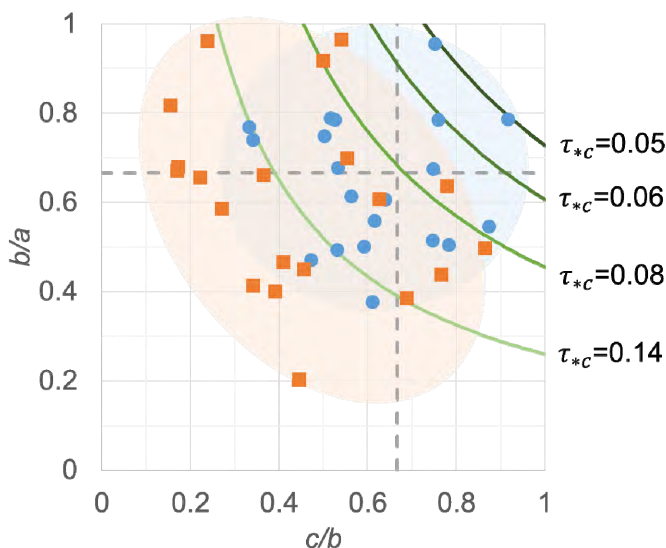
37.5-53mm



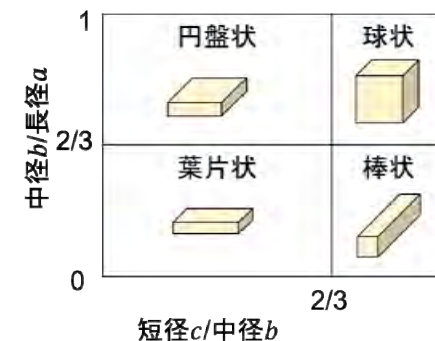
19-26.5mm



4.75-9.5mm



Zingg (1935)の形状分類



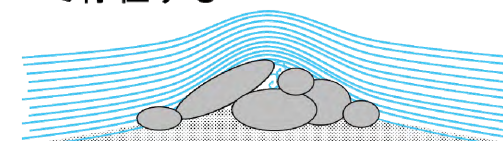
石礫の移動しやすさ

仁柿川 > 相津川
(玉石) (扁平な石)

Lane and Carlson(1954)

扁平な石礫が動きにくい原因

→石礫が河床に「瓦状」に重なって存在する



覆瓦構造 (Imbricated structure)

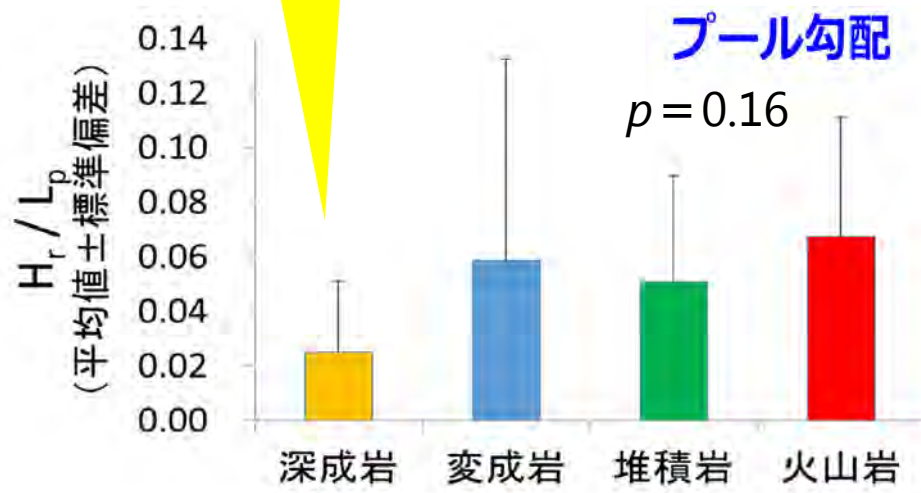
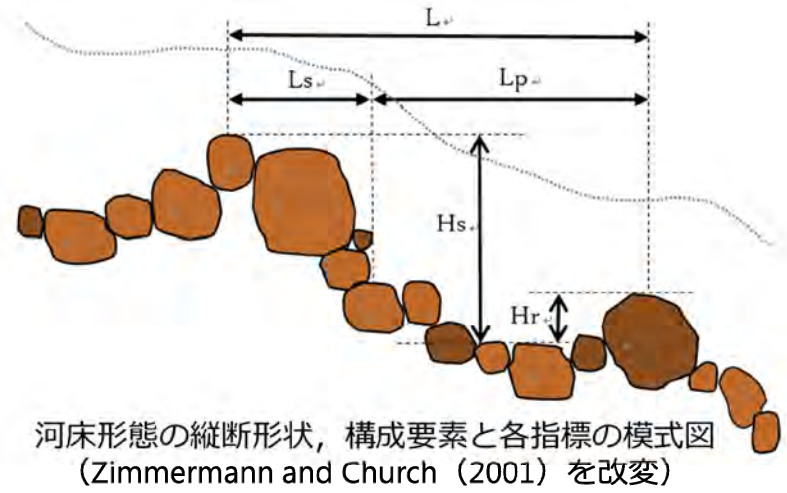
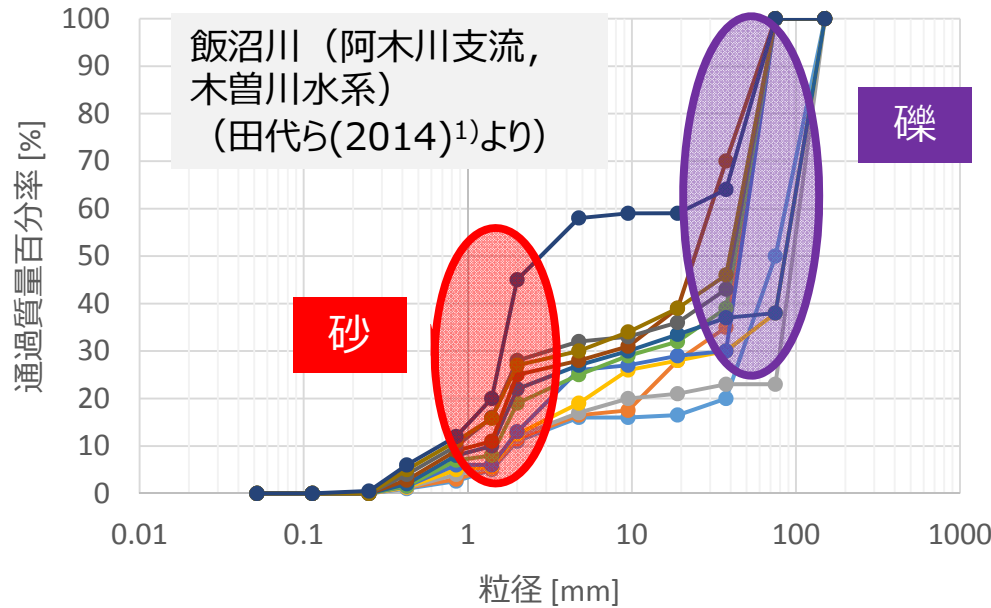


左図より...

扁平な粒子形状を有する石礫
→河床に単独で存在した場合にも動きにくくなる.

余談 2 : 歪んだ粒度は移動床過程をどう変えるか？

歪んだ粒度構成：深成岩（とくに，風化花崗岩）からなる河川水系で顕著



砂の存在により変化する石礫の移動現象

実験ケース一覧

ケース名	通水時間 [min]	供給砂量 [kg]	流量 Q [L/sec]	単位幅流量 q [L/sec/m]	平均水深 h [cm]	フルード数 Fr
A-0	10	0	16.99	56.63	6.1	1.20
A-40		40	17.44	58.13	6.2	1.20
A-60		60	16.91	56.37	6.0	1.23
A-80		80	17.56	58.53	5.9	1.31
A-100		100	17.00	56.67	5.8	1.30
A-120		120	17.28	57.60	5.9	1.28
A-140		140	17.18	57.27	5.7	1.34

初期河床

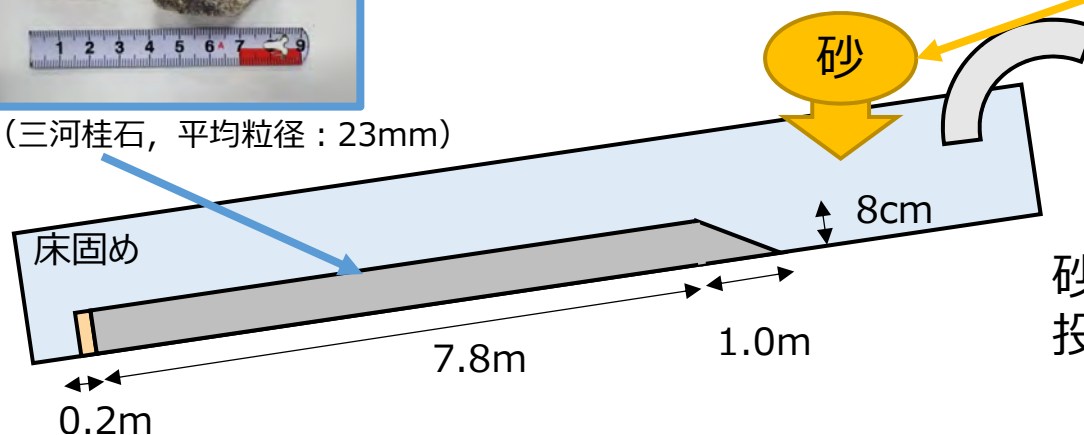


礫（三河桂石，平均粒径：23mm）

水路幅B	0.3m
水路勾配I	1/25



砂（三河桂砂V3号，平均粒径：1.3mm）

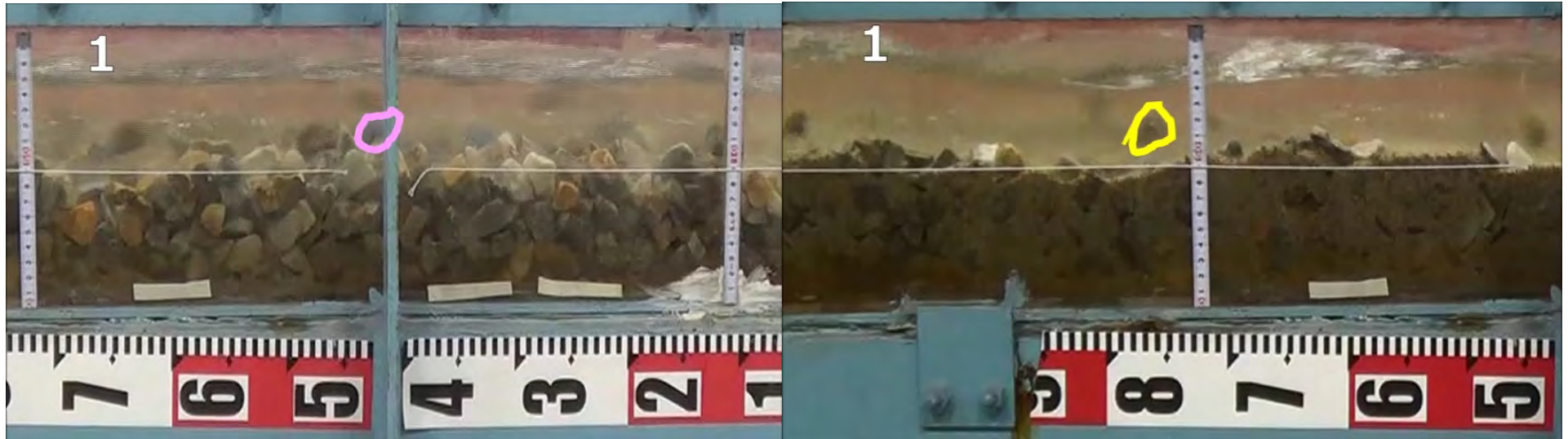


砂を1分あたり20kgのペースで投入しながら礫の移動を観察

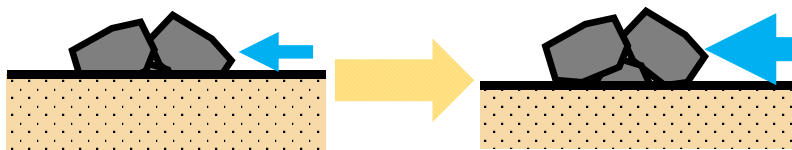
砂投入による石礫輸送の変化

砂がない場合（A-120, 2分50秒経過時点）

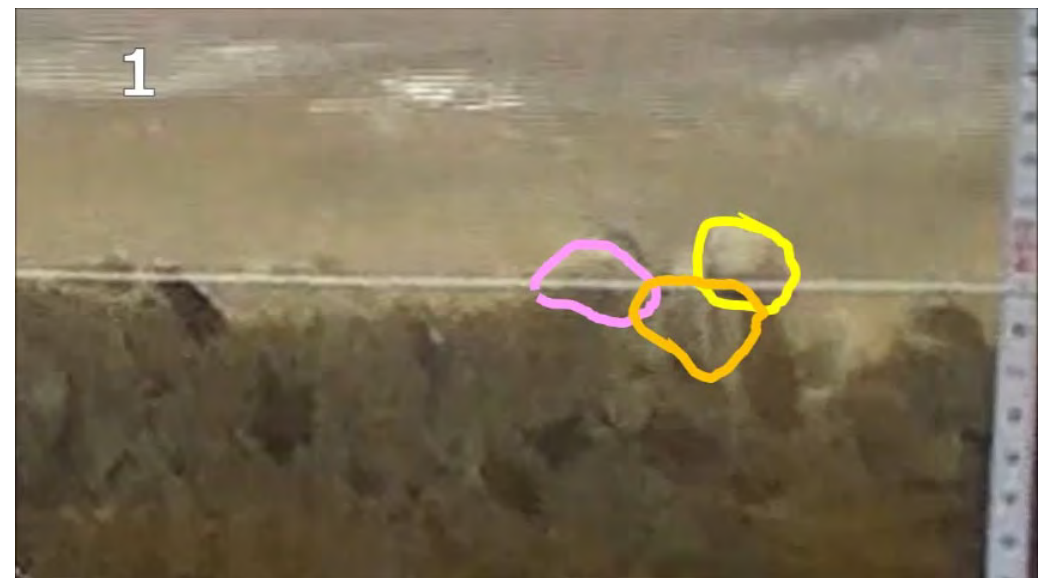
砂がある場合（A-120, 6分30秒経過時点）



Stepが破壊され、礫が移動する瞬間
（A-120, 5分25秒経過時点）

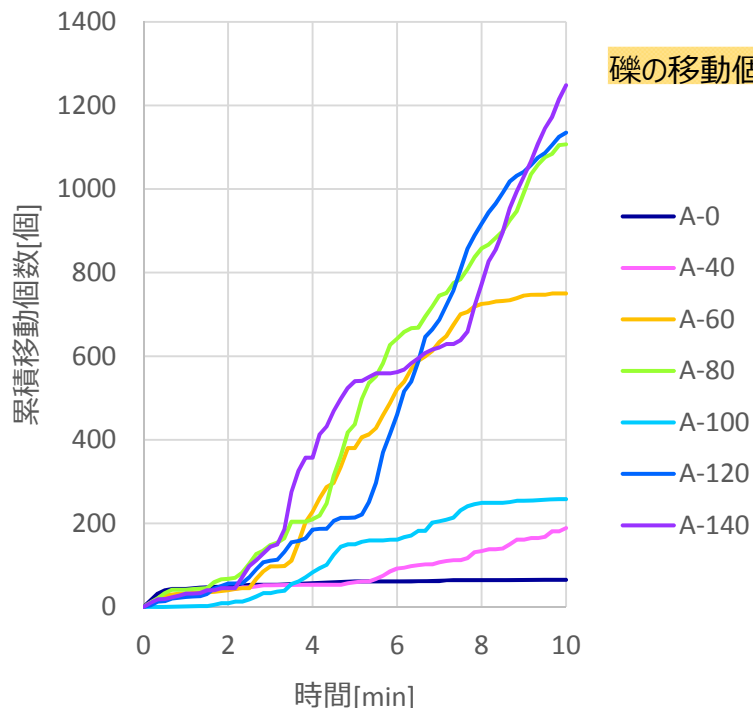


礫が河床上に突出することで
移動しやすくなった！？

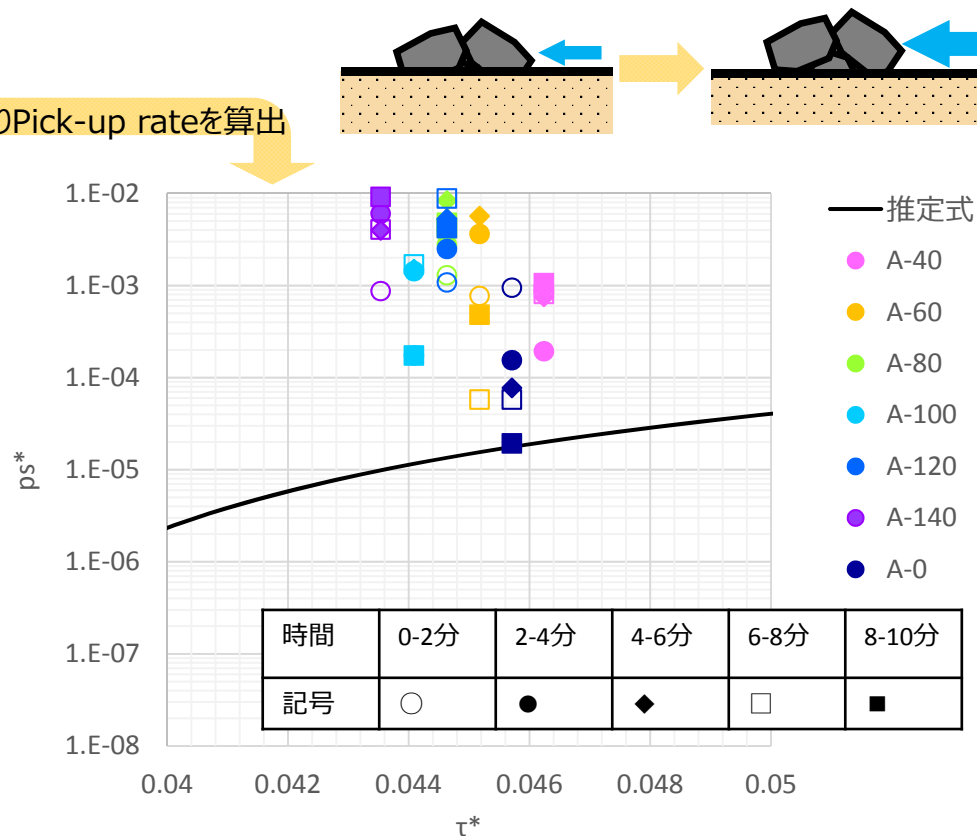


確率過程モデルを用いた考察～石礫のPick-up rate

砂の輸送によって礫が河床上に突出し，移動機会が増加！？



礫の移動個数よりPick-up rateを算出



中川・辻本 (1975) ¹⁾によるPick-up rateの推定式

$$P_{s*} = \frac{P_s}{\sqrt{d/(\rho_s/\rho_f - 1)g}} = F_0 \tau_* \left(1 - \frac{A_2 \tau_{*c}}{\tau_*} \right)^3$$

変数一覧

P_{s*}	無次元Pick-up rate
F_0	定数 (= 0.03)
A_2	面積に対する形状係数 (球の場合 $\pi/4$)

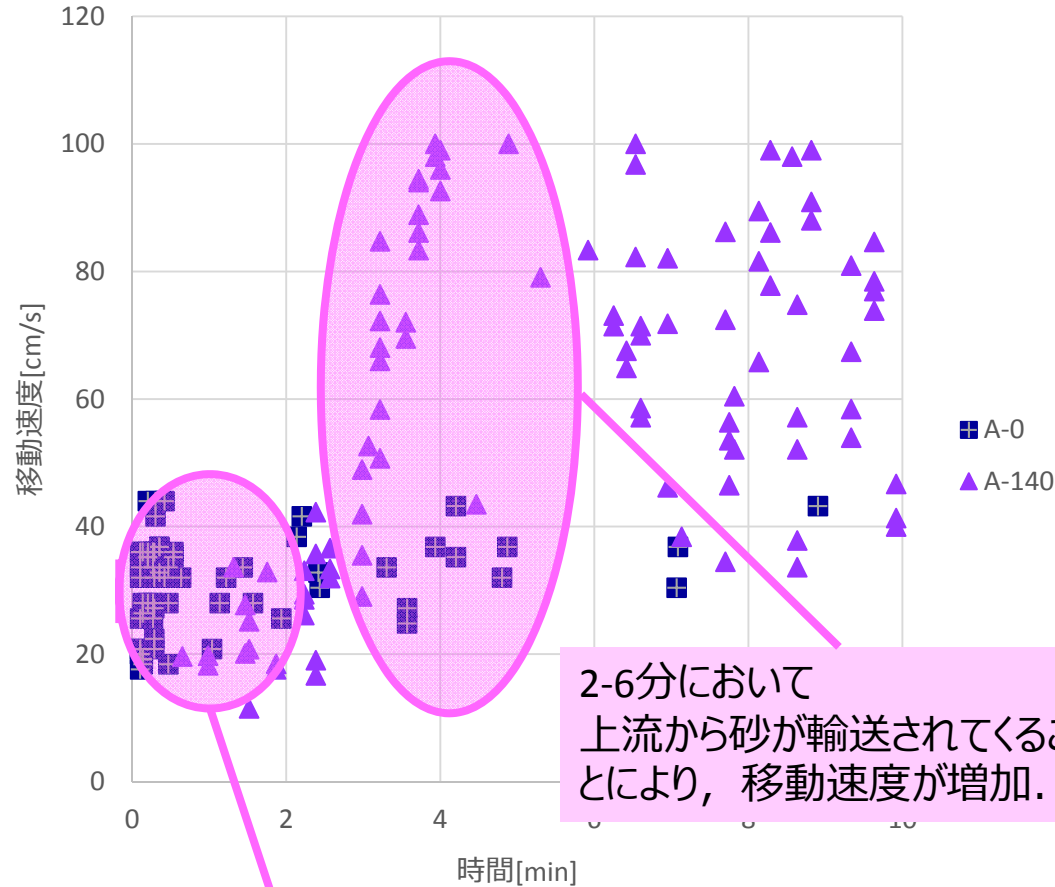
河床に砂が充てんされることにより

Pick-up rateが増加

1) 中川博次・辻本哲郎(1979)：掃流過程に対する確率モデルとその一般化，土木学会論文報告集，第291号，pp.73-83.

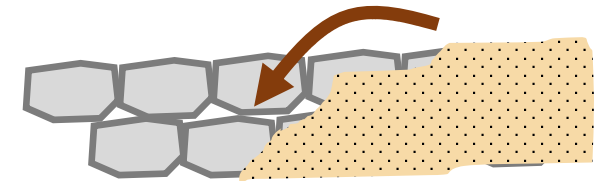
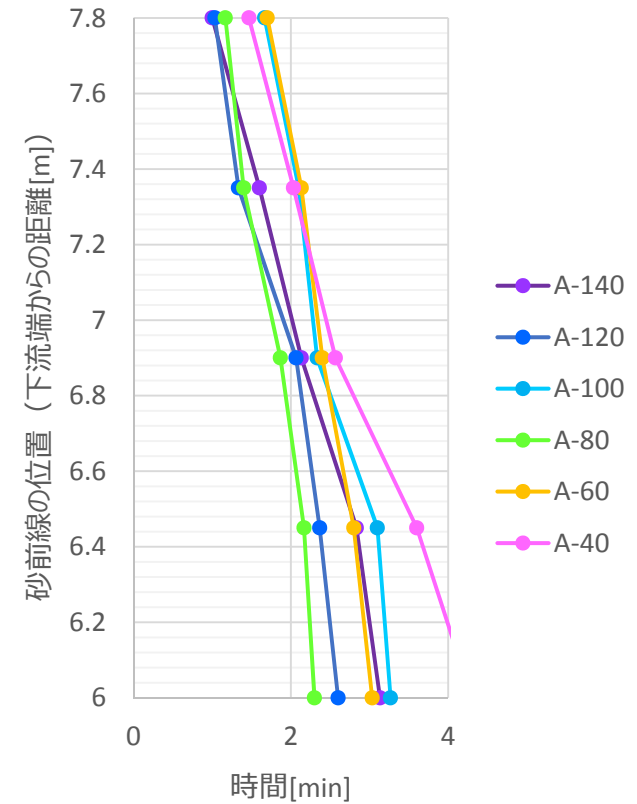
石礫のStep length

礫の移動速度



2-6分において
上流から砂が輸送されてくることにより、移動速度が増加。

0-2分まではケースによって
移動速度は変わらず。



河床に砂が充てんされることにより

Step lengthが増加



河床材料の元素組成を用いた砂礫流出比の推定

地質による元素組成の特徴を把握し、支川からの流出比推定のための基礎資料を得るため、蛍光X線分析(XRF)を実施する。分析した試料中の含有元素を質量割合(weight%)で検出可能。

分析試料・・・粒度分析の結果から得られた各試料中の最細粒分(粒径0.075～0.85mm)を使用



分析試料

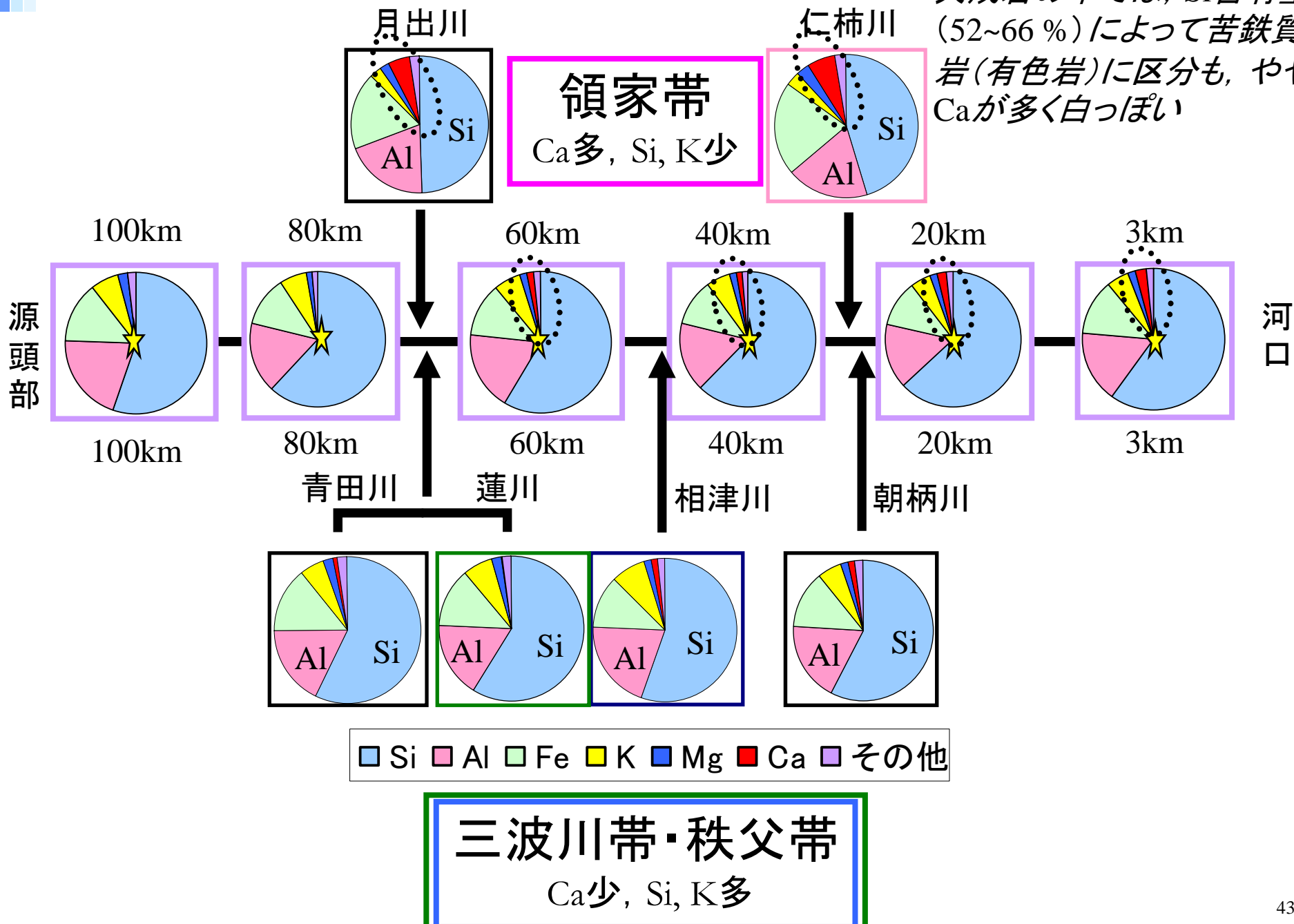


(直径2.5cm, 高さ2.2cm)



流域における河床堆積物の元素組成

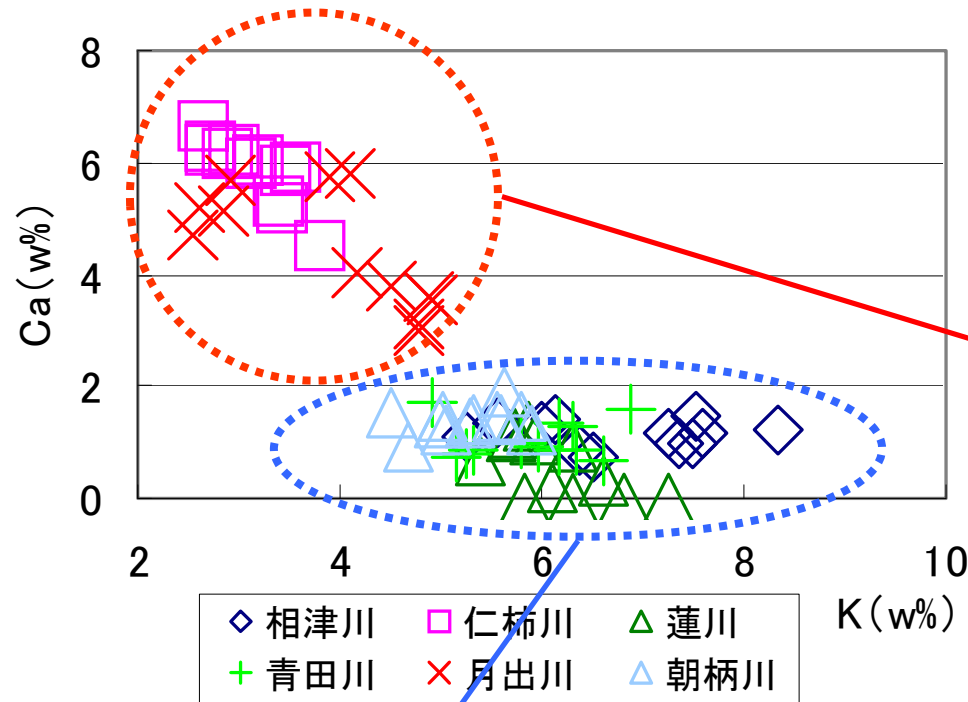
火成岩の中では、Si含有量(52~66%)によって苦鉄質岩(有色岩)に区分も、ややCaが多く白っぽい





地質による元素組成特性2 (支川河床材料)

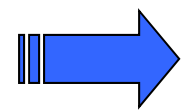
カリウムKとカルシウムCaの元素組成比率の関係



領家帯を含む河川
Ca・・・多い
K・・・少ない

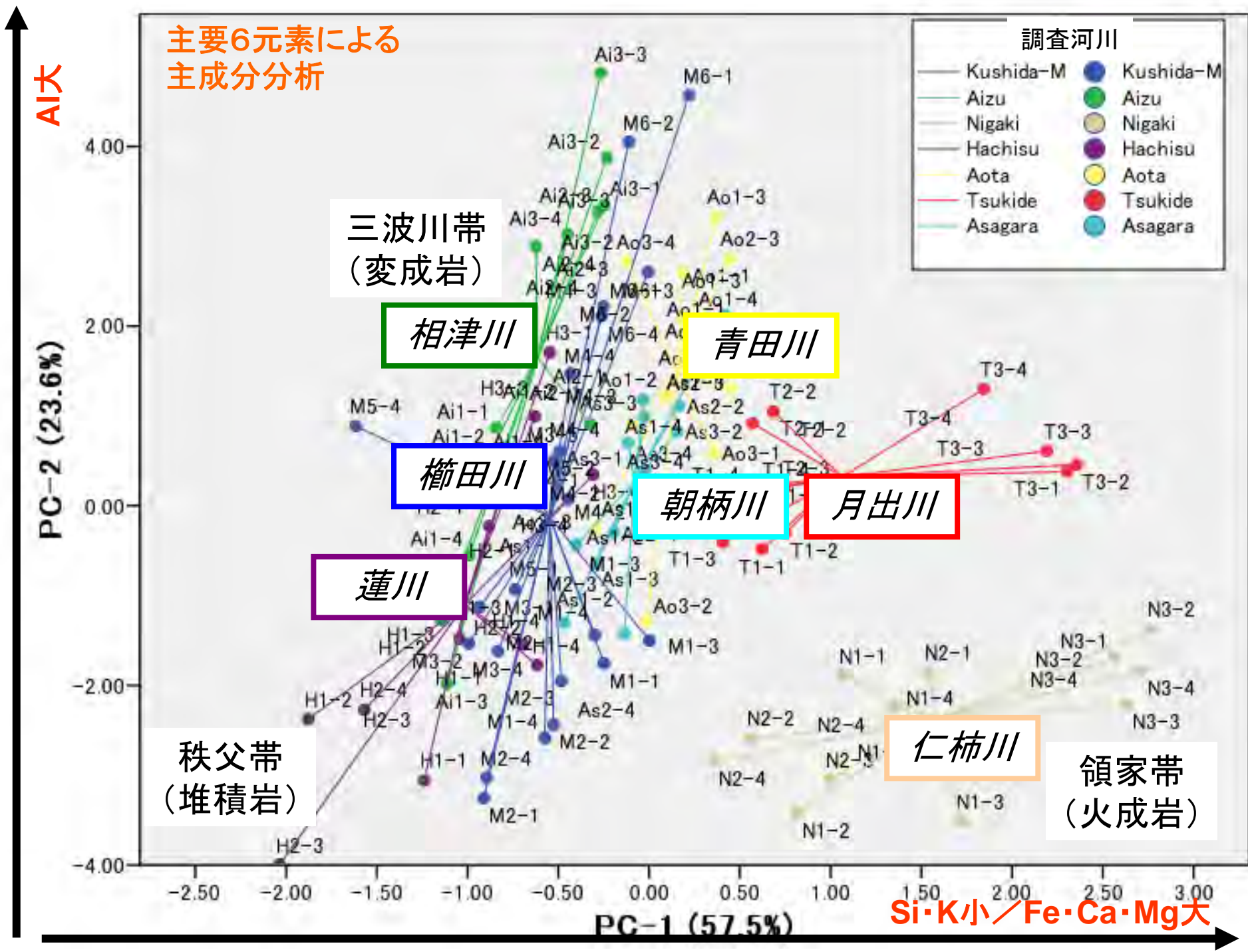


領家帯以外の河川
Ca・・・少ない
K・・・領家帯に比べ多い

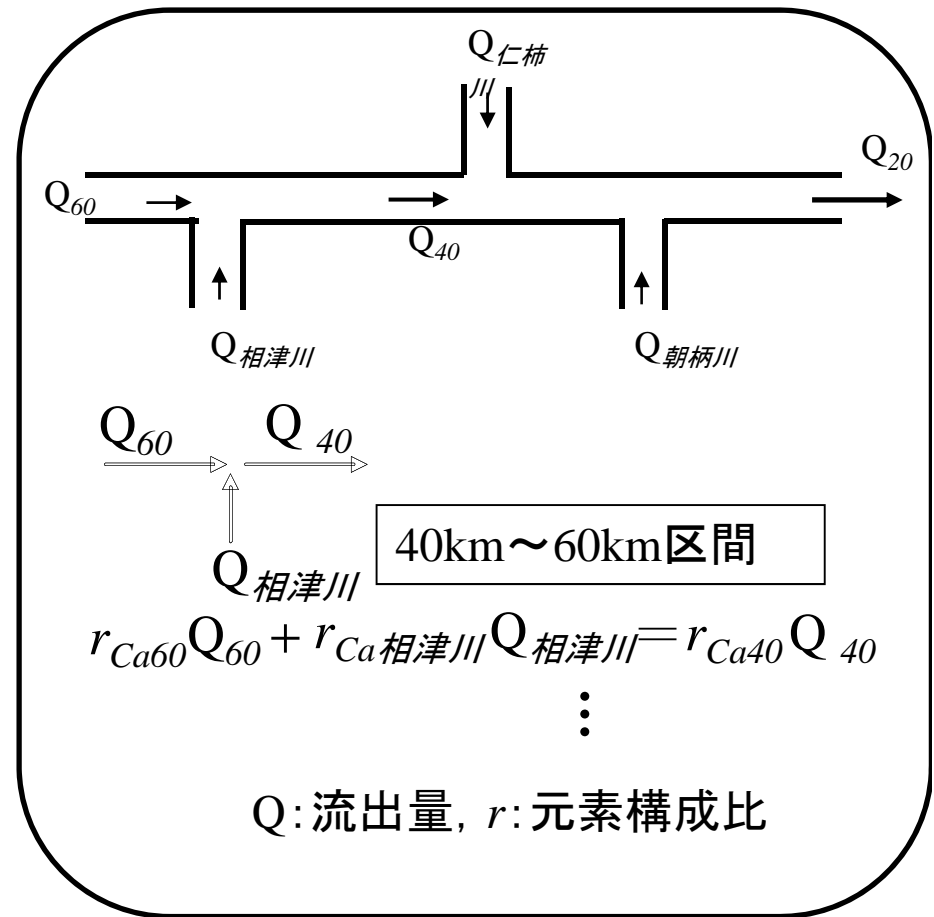


領家帯とその他の地質からなる河川で元素組成に顕著な違いがみられる。

Si ~ Al (r=-0.72, P<0.01), Si ~ Fe (r=-0.89, P<0.01), Ca ~ K (r=-0.75, P<0.01)



元素構成比を用いた砂礫流出比推定



目的: 20km地点の砂礫流出量に対する

本川, 支川の流出割合を求める.

仮定: 完全混合であり, 合流点における

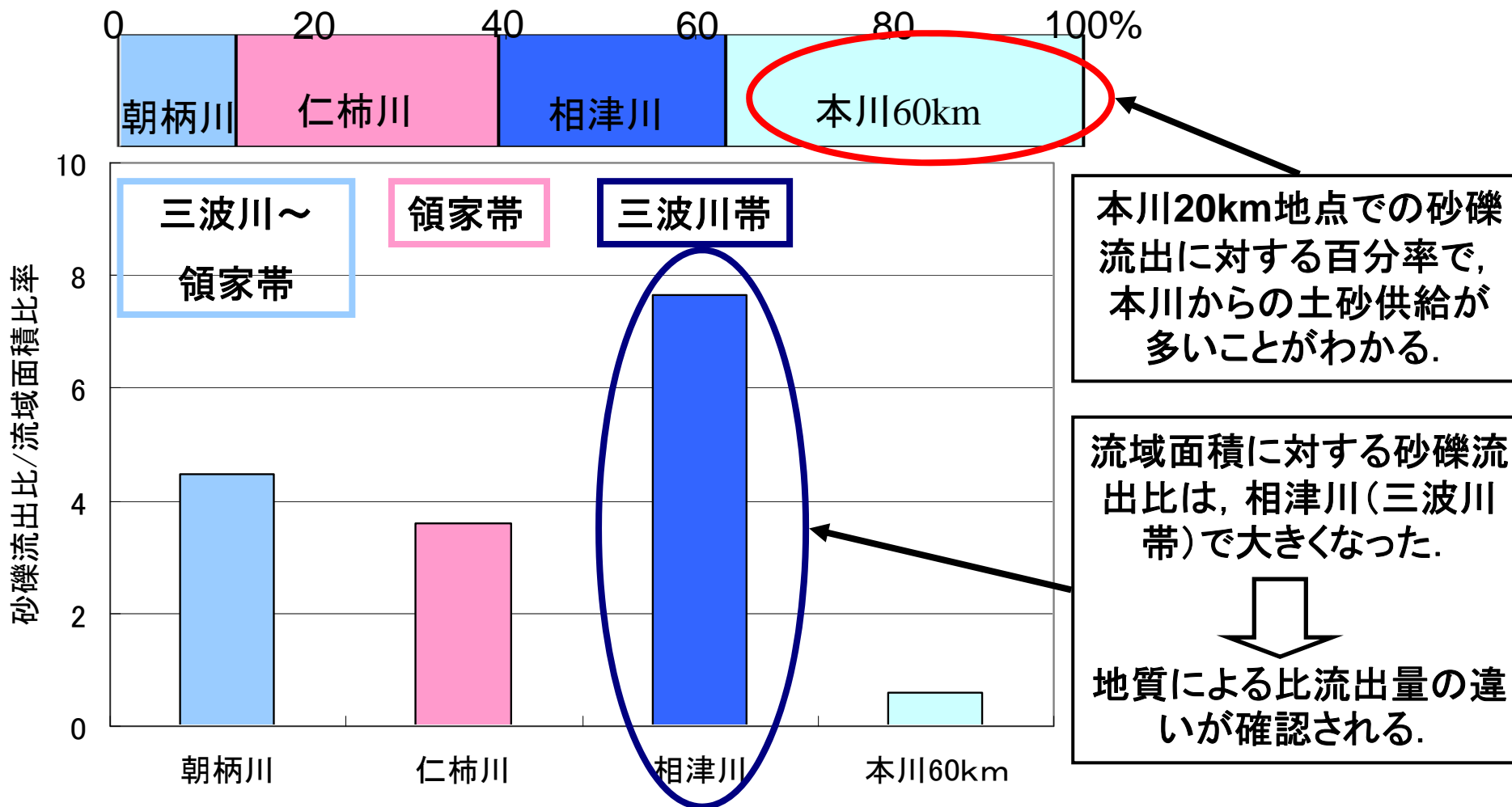
流入土砂と流出土砂は等しい.

使用元素: Si, Al, Fe, K, Ca (93~97%)

(地質に共通な主要構成元素)

上記のモデルは, 礫種構成による砂礫流出比推定(例えば, 砂田ら, 2003)を参考にしたものである.

本川20km地点における砂礫流出比とその標準化



相津川の流出比が大きくなったのは、生産時の粒度が細かいことに加え、流下による破碎磨耗により細粒化するため、生産された土砂が運ばれやすい三波川帯(変成岩)の特徴を表している！？



相津川(三波川帯)の砂礫流出強度を示す状況証拠





相津川(三波川帯)の砂礫流出強度を示す状況証拠2

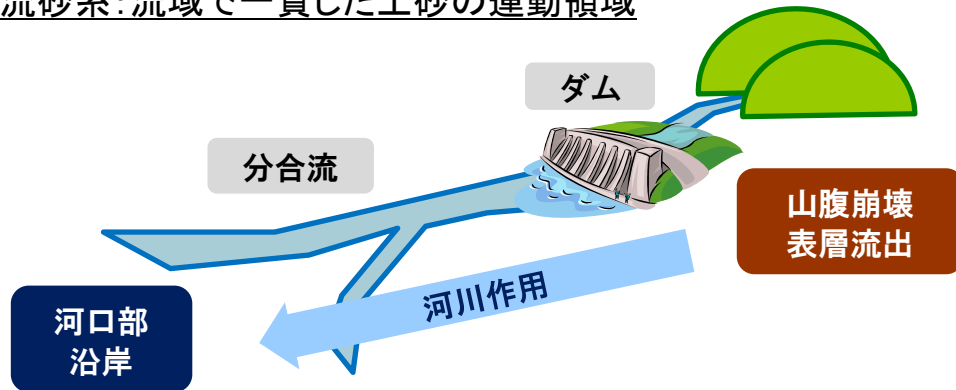


採取試料から砂礫流出比を算定した左の写真撮影当時、
相津川の砂礫流出が大きいことは眉唾であったが・・・
数年後、実際に多量の土砂が流出して現在は右の様相に



問題認識:「石ころ」の流送時における分級と破碎

流砂系:流域で一貫した土砂の運動領域



流砂・河床材料の量・質

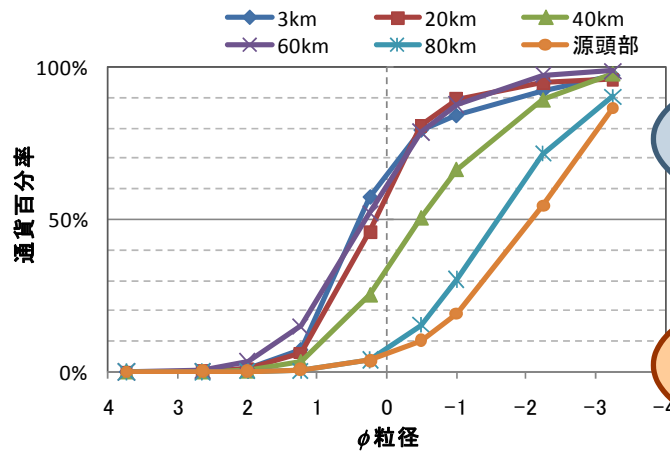
- ✓ 流域の条件
 - ✓ 河川の縦断的な変化
 - ✓ ダムなどの河道横断構造物
- などから決定

河川管理上、重要なパラメータ

質=粒度

- ✓ 河川の流れ、地形変遷において基本的な情報
- ✓ 物質循環場、生息場機能の支持要因

縦断方向の細粒化 例) 楠田川



分級作用
水理学的な影響

礫河川では大きく、砂河川では小さい。
縦断形状が凹型であるほど顕著な影響

摩耗破碎作用
材料自体の変化

山地河川など上流域では大きい
岩石の種類、形状、風化の度合いが影響

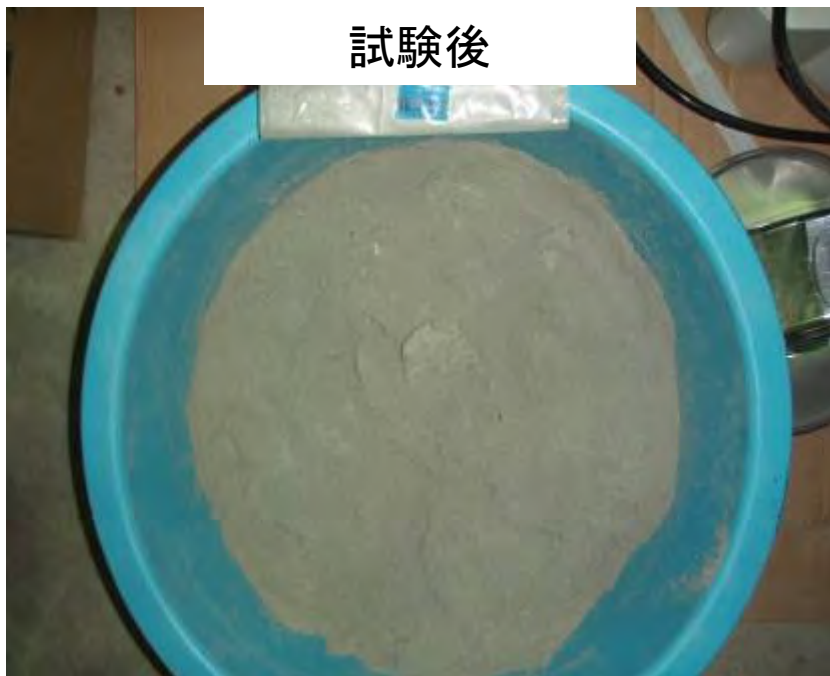
両作用の相対的な影響度は明らかでない



「石ころ」の摩耗破碎特性の定量化



各地質帯から算出される石と砂礫を混合してミキサーに投入



破碎・磨耗試験(三波川帯・相津川の例)

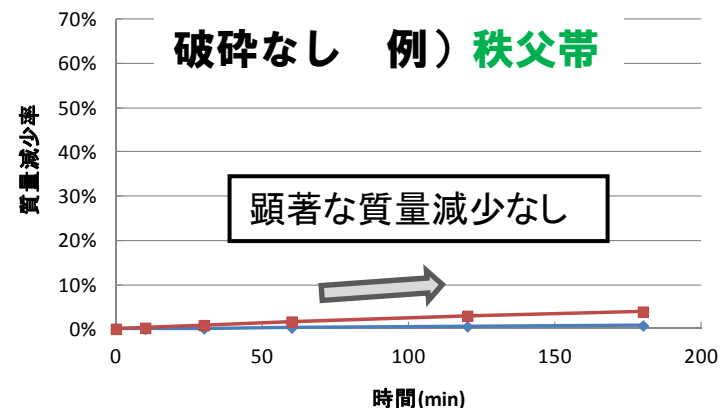
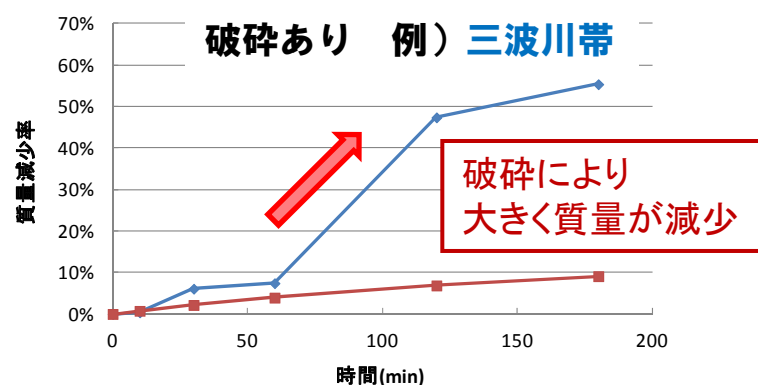


摩耗破碎試験結果の概要

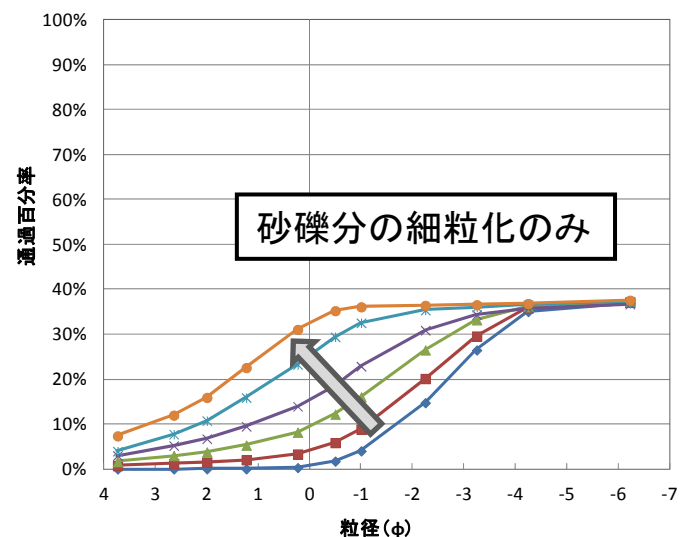
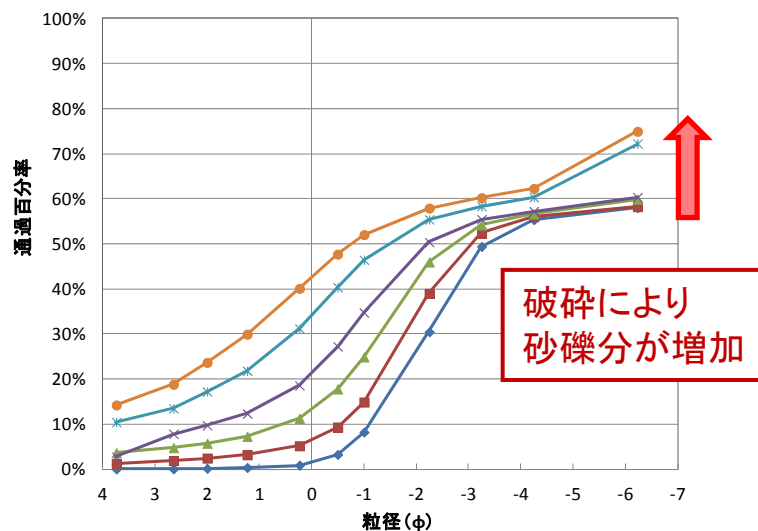
試料: 単一地質流域の3支川で採取した河床材料
各地質帯で石2サンプル+砂礫分2サンプルを2回

ふるい目盛 (mm)	75	19	9.5	4.75	2	1.41	0.85	0.425	0.25	0.16	0.075
石	粗礫	中礫	細礫	粗砂	中砂	細砂	シルト 粘土				
石分	礫			砂			細粒分				

石の質量減少



砂礫分の細粒化





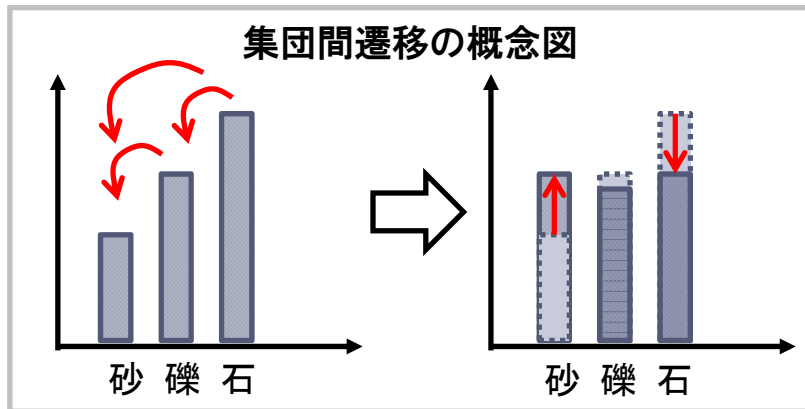
摩耗破碎作用のモデル化

□ 既往の表現

Sternbergの法則 $W = W_0 \exp(-\alpha X)$ W : 重量, X : 流下距離, α : 摩耗係数

⇒ 副産物が考慮されておらず、新しい摩耗破碎特性の定量的評価が必要

摩耗破碎作用による粒度変化を、粒径集団間の遷移としてモデル化



集団名		粒径(mm)		
石	cobble	75	—	
礫	pebble	19	—	75
粗砂利	coarse gravel	4.75	—	19
細砂利	fine gravel	2.00	—	4.75
砂	sand	0.075	—	2.00
シルト粘土	silt&clay		—	0.075

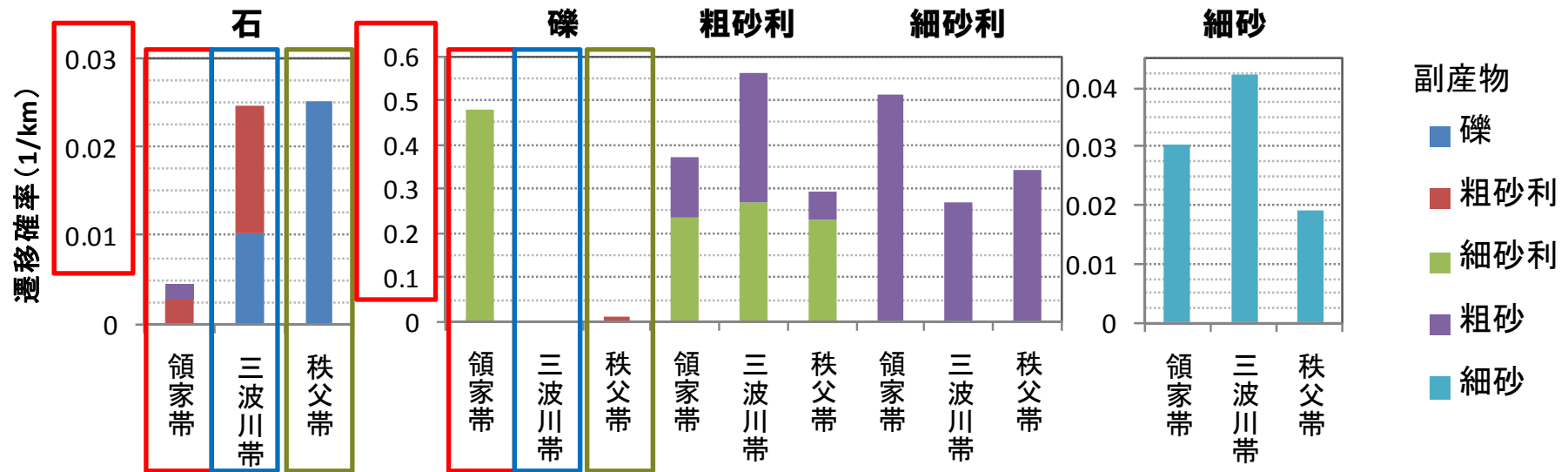
$$\Delta W_i = - \underbrace{\sum_{j=i}^n p_{ij} \Delta X \cdot W_i}_{\text{下位集団への遷移}} + \underbrace{\sum_{j=1}^{i-1} p_{ji} \Delta X \cdot W_j}_{\text{上位集団からの遷移}}$$

- 粒径の大きい集団を上位集団とする
- 上位集団 i から下位集団 j へ単位移動距離当たりに遷移する割合を遷移確率 p_{ij} として定義する。

試験時間の流下距離への換算は、従来の研究と同様に、ドラムの回転距離を移動相当距離として換算。



地質帯によって異なる「石ころ」の摩耗破碎特性



領家帯

領家帯は石が摩耗しにくい一方で、礫は摩耗しやすく細砂利を生産している。

三波川帯 秩父帯

三波川帯、秩父帯は石の質量減少率は同程度だが、秩父帯が礫を生産しているのに対し、三波川帯は礫、粗砂利と広い粒径の副産物を発生させる。三波川帯、秩父帯の礫は摩耗しにくい。

質量減少率

石集団の質量減少率は $10^{-2} \sim 10^{-3}$ のオーダーであり、小玉(1990)の結果と一致している。

礫～細砂利集団では 10^{-1} と高いオーダーになっている。

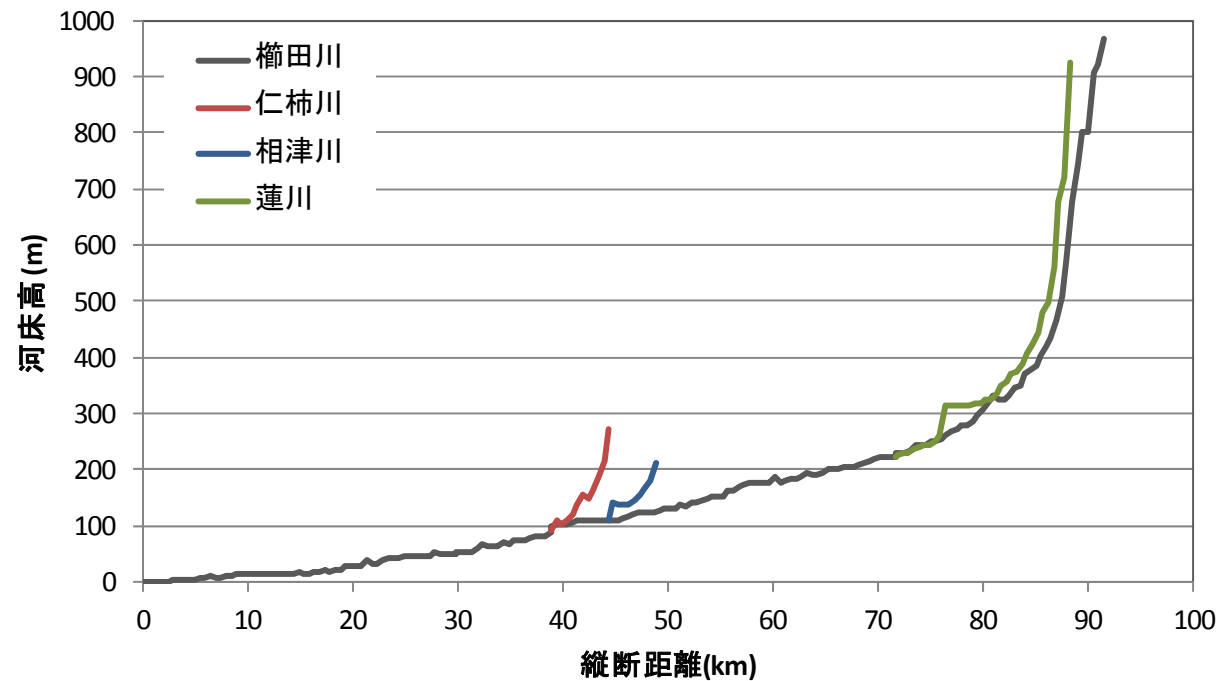
これは石により押し潰される効果が本実験条件では大きく評価されたと考えられる。



凹型傾向に関する感度分析

1. 摩耗破砕作用を考慮した掃流砂モデル
2. 解析条件
3. 凹型傾向に関する感度分析
4. 摩耗破砕作用の影響度
5. 地質特性の影響

山地河川の河床縦断形状は凹型





モデル概要

掃流砂モデル

pick-up rate, step length を用いた掃流砂モデル(中川ら, 1977)

pick-up rate: 河床からの単位時間当たりの離脱確率

step length: 再び河床に停止するまでの移動距離

※ただし、step lengthの確率分布や粒径の影響は簡略化した。

混合粒径の影響

粒径別限界掃流力

芦田・道上の式(1971)

$$\tau_{*ci} = \begin{cases} \tau_{*c0} \{ \ln(30.1\alpha) / \ln(30.1\alpha d_i/d_m) \} & d_i/d_m > 0.4 \\ 0.85 & d_i/d_m < 0.4 \end{cases}$$

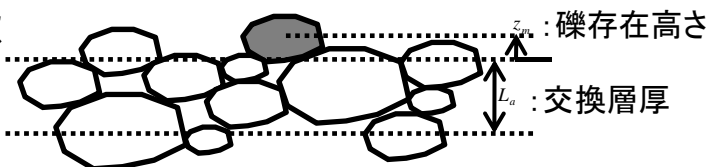
礫存在高さの影響(澤井・小久保, 1984)

pick-up rateへの河床の鉛直構造の影響を考慮

礫の存在高さ z_m は一様分布とした.

$$p_{si}(z_m) = \hat{p}_{si} \times 100^{(z_m/0.8L_a)}$$

$$-L_a + d_i/2 < z_m < d_i/2$$



河床の鉛直構造

摩耗破碎過程

掃流砂について、遷移確率に応じた摩耗破碎作用により粒度が変化

混合過程

粒度分布の更新

浮遊限界判定

浮遊限界摩擦速度 = 沈降速度とし、

浮遊砂を解析から除外

※沈降速度: Rubeyの式



解析条件

□水理条件

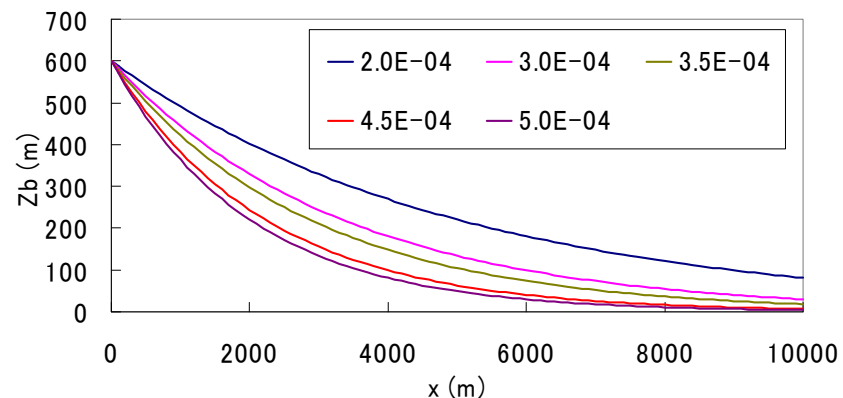
一次元不等流 単位幅流量 $1.0\text{m}^2/\text{s}$
(中小規模の洪水を想定)

□河道条件

モデル河道: $z_b = z_{b0} \exp(-cx)$

x : 最上流点からの距離, z_b : x おける河床高, z_{b0} : $x=0$ おける河床高

c によって、凹型傾向を制御
($2.0 \times 10^{-4} \sim 5.5 \times 10^{-4}$ まで 0.5×10^{-4} 刻みで変化)



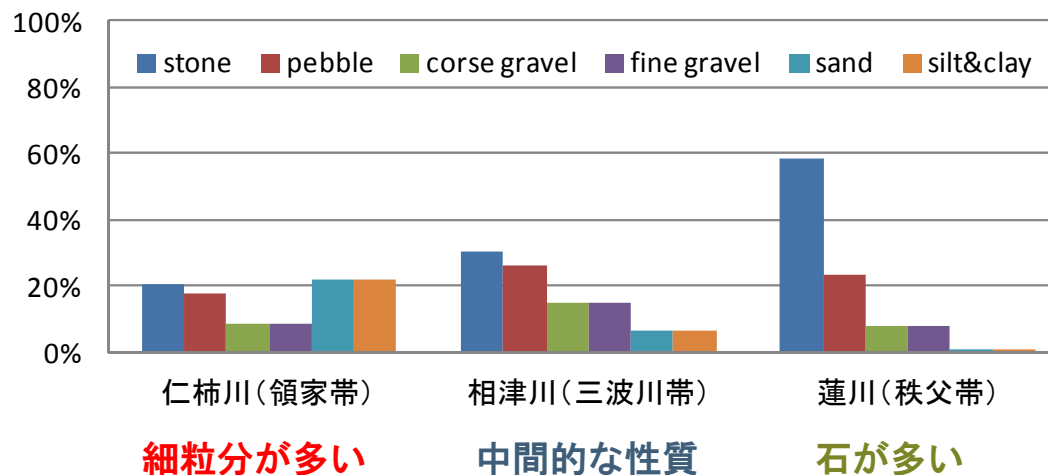
支川名	仁柿川	相津川	蓮川
c	5.49×10^{-4}	4.93×10^{-4}	3.22×10^{-4}

□土砂供給条件

上流端に一定勾配の土砂供給区間を設け、同様に解析。ただし、最上流は粒度不変。

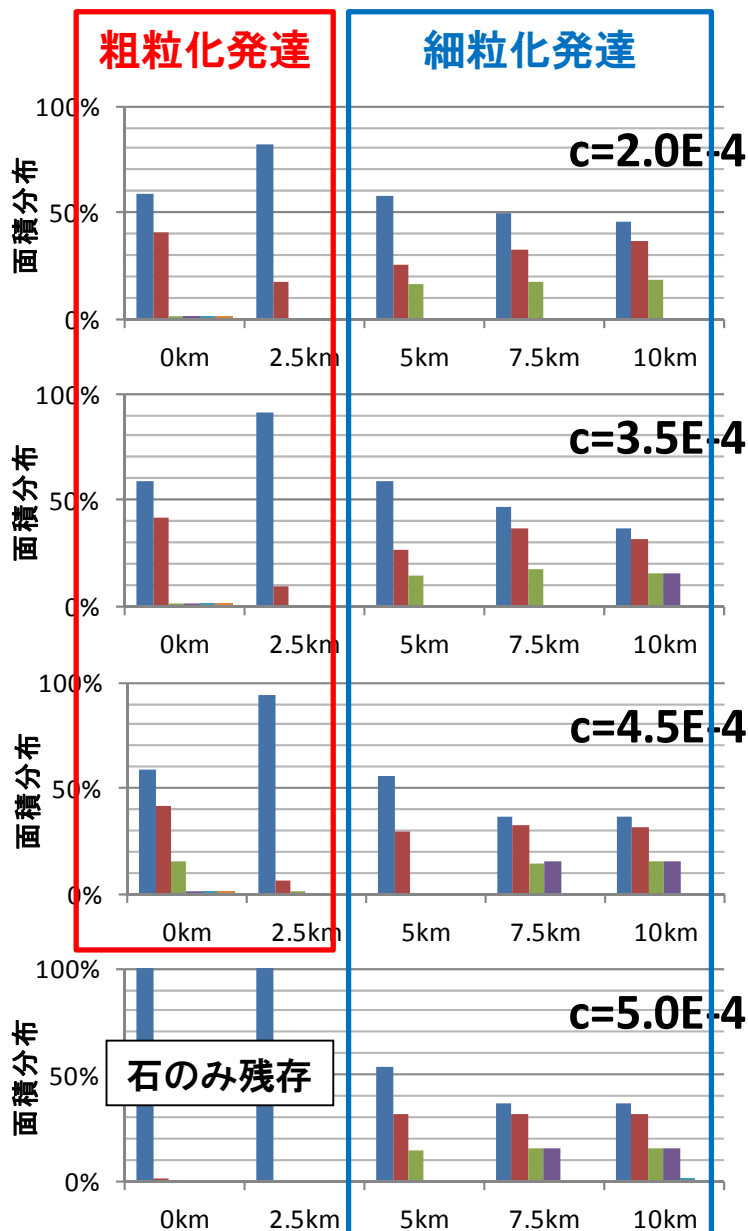
□初期河床粒度条件

表層粒度の現地調査結果から、
違いが顕著であった中流部の粒度





凹型傾向に関する感度分析



領家帯: 幅広い粒度が存在し、遷移確率が比較的大きい
計算開始6時間後の結果

細粒化発達

- ✓ 上流から運ばれてきた、粗砂利以小が堆積
- ✓ 凹型傾向が強いほど、下流の勾配は緩い
→ 顕著な細粒化

⇒分級作用による細粒化が顕著に出現

粗粒化発達

- ✓ 石が摩耗破碎しにくく、礫は摩耗破碎しやすい
- ✓ 流下に伴い、礫は摩耗破碎し、石の割合が増加

⇒摩耗破碎作用による粗粒化が顕著に出現

上流域での石の残存

- ✓ 一定以上の勾配になると、礫は流出

⇒分級作用による選択的輸送

より顕著な細粒化

局所的な勾配、勾配の縦断的变化によって
両作用の出現、影響度は変化

■ cobble ■ pebble ■ coarse_gravel ■ fine_gravel ■ sand ■ silt&clay



摩耗破碎作用の影響度

細粒化の評価式 (Knighton, 1982)

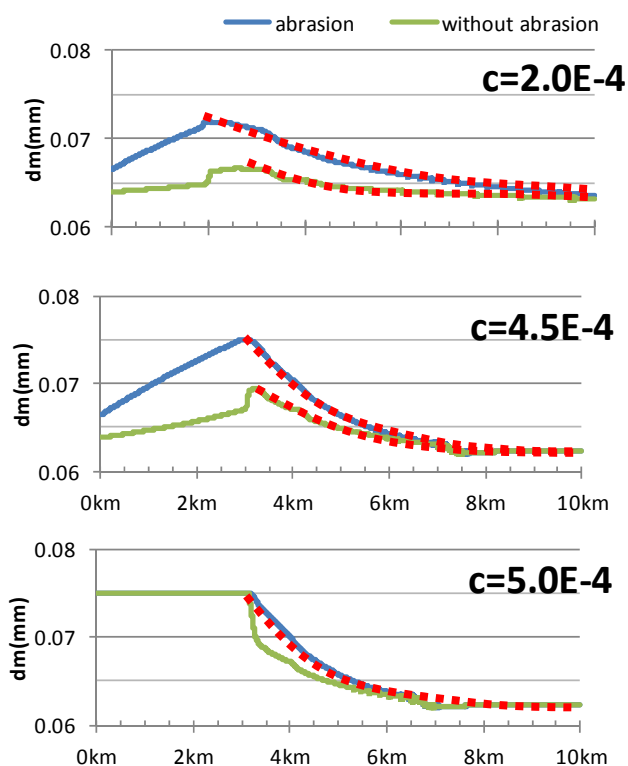
$$D = D_0 \exp\{-(K_1 + K_2)L\} \Rightarrow K_1 + K_2 = \ln(D/D_0)/(-L)$$

D : 流下方向距離 L における河床材料粒径

D_0 : $L=0$ での粒径

K_1, K_2 : 摩耗破碎作用, 分級作用による細粒化を表す係数

摩耗破碎過程がないケースとの比較 → 摩耗破碎作用の影響度を評価



- ① 平均粒径が最大値となる位置で $L=0$ とし、下流側の最小値を D として上式を適用する.
- ② 摩耗破碎過程あり → K_1+K_2
摩耗破碎過程なし → K_2
- ③ 両者の差から K_1 を定める.
- ④ 摩耗作用の影響度 $K_1 / (K_1+K_2)$

c	K_1+K_2	$K_1 / (K_1+K_2)$
2.0×10^{-4}	1.53×10^{-5}	53.4%
4.5×10^{-4}	3.73×10^{-5}	35.7%
5.0×10^{-4}	4.62×10^{-4}	2.4%

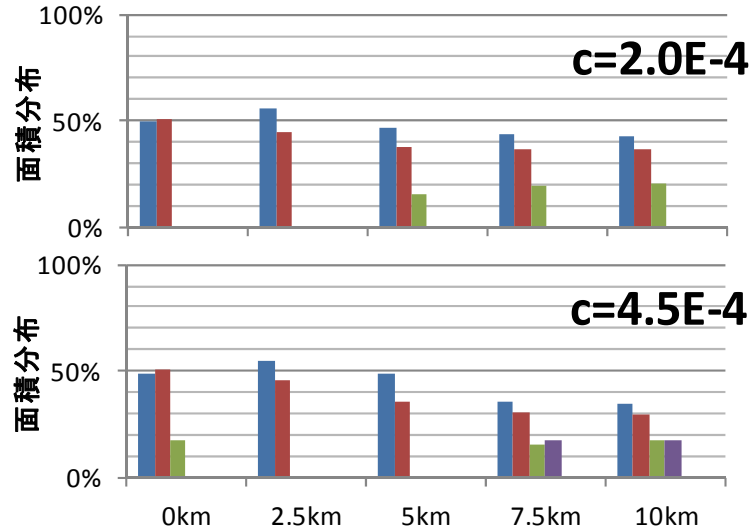
影響度大



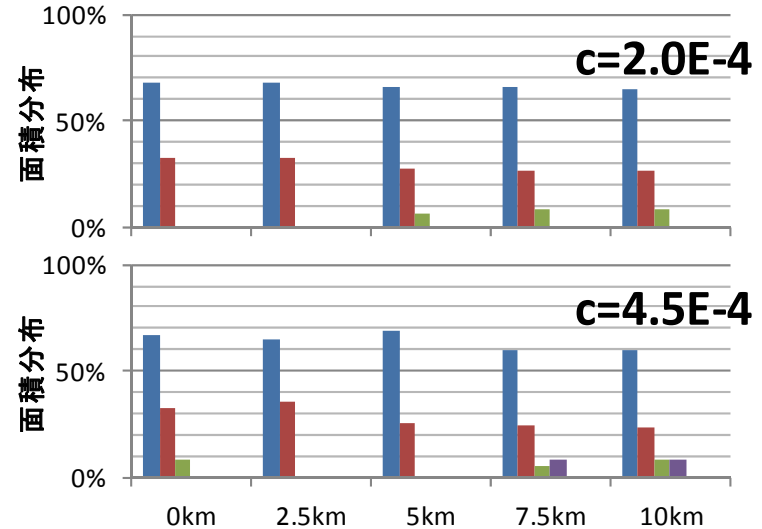


地質特性の影響

三波川帯 上流域の粗粒化: 領家帯に比べて、顕著ではない
下流域の細粒化: 領家帯と大きな違いはない



秩父帯 上流域の粗粒化: 出現せず
下流域の細粒化: 顕著でない



■ cobble ■ pebble ■ coarse_gravel ■ fine_gravel ■ sand ■ silt&clay

地質特性 = 摩耗破碎特性 + 初期粒度

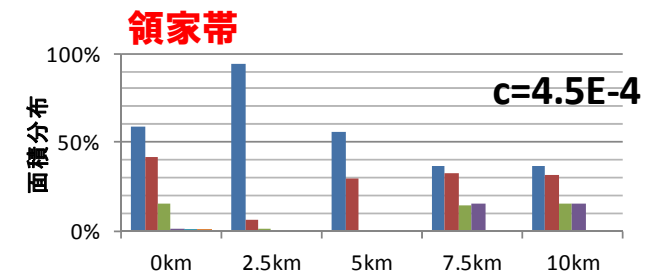
細粒化発達

初期粒度条件: 三波川帯は幅広い粒径、秩父帯は石が多い
摩耗破碎特性: 三波川帯は礫~粗砂利と広い粒径
⇒ 三波川帯では顕著に出現。

粗粒化発達

摩耗破碎特性: 石は摩耗破碎しやすく、礫は摩耗しにくい
⇒ 粗粒化が顕著でない

摩耗破碎作用の影響度も小さい



(2) 流域地質に依存する水生生物の 生息場所と群集構造に関する実態解明

- (2-1) 河川生態系における流域地質のはたらき(後述)
- (2-2) 「石ころ」が水生生物の群集構造に及ぼす影響



相津川

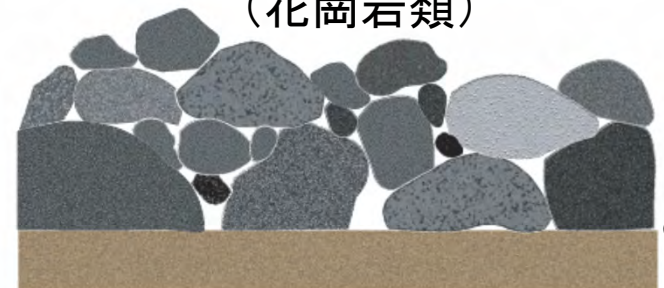
河床構造模式図

仮想: 相津川礫床
(結晶片岩類)



仁柿川

仮想: 仁柿川礫床
(花崗岩類)



底生動物群集の捉え方

□底生動物分類方法

写真：岩田撮影

本研究では、流域地質と底生動物の関係を無機的な側面に着目して評価する為、底生動物の**形態や生活方法に着目した生活型 (Life Type)** による分類を行った

生活型類型	特徴	代表的な底生動物
遊泳型 (swimming)	形態は流線形で、優れた遊泳能力を持つ底生動物群	チラカゲロウ コカゲロウ
匍匐型 (creeping)	発達した脚を持ち、石礫や落葉落枝表面を移動する底生動物群	ヒラタカゲロウ カワゲラ
固着型 (attaching)	体に吸盤のような器官を持ち、石礫表面にくっついて生活する底生動物群	ブユ、ヒラタドトムシ
携巢型 (case-bearing)	砂泥や植物片を用いて筒状の巢を形成し、その中で生活する底生動物群	ヤマトビケラ ヒゲナガトビケラ
造網型 (net-spinning)	粘着性の分泌糸で石礫表面、礫間に網を形成する底生動物群	ヒゲナガカワトビケラ シマトビケラ
掘潜型 (burrowing)	砂泥の中で生活する底生動物群	トビイロカゲロウ ユスリカ



分析方法(1)

各地点の瀬の石・淵の砂礫から底生動物(下に優占種)を採取



地点と瀬・淵という2つの要因により、
二元配置分散分析と事後検定(Scheffe's F test, 有意水準5%)を実施

淵の砂礫

オニヒメタニガワカゲロウ



Ecdyonurus bajkovae

<http://www.eonet.ne.jp/~suisaikontyu/xonihimetanigawa.htm>

フタスジモンカゲロウ



Ephemerella japonica

<http://www.eonet.ne.jp/~suisaikontyu/xonihimetanigawa.htm>

ゲマгатビケラ



Gumaga orientalis

<http://www.dcity.kaiyusa.ac.jp/~isdrv/ebf/ro/wise/madenai/mraae/s/0007/qum01-60-ikc1a-y-003044-q>

ヒメドロムシ亜科



Elminae

<http://sanaiki.sablog.jp/i/>

<http://blog.zaq.ne.jp/insect/archives/200912/1>



瀬の石礫

フタバコカゲロウ



Baetiella japonica

<http://www.zgr.mlit.go.jp/yasaka/ikimonro/sakana/futabako/futabako.htm>

アカマダラカゲロウ



Urcanthella punctisetae

<http://www.eonet.ne.jp/~suisaikontyu/akamadaraka-goro/>

ウルマーシマトビケラ



Hydropsyche orientalis

http://blogimg.goo.ne.jp/user_image/3f/3e/a3779fc637a0a9cc2bc57f1e61c6e6e.jpg

ヤマトビケラ属



Glossosoma sp.

<http://museinfo.hitohaku.jp/kawamushi/zukan/tobikera/yama.html>

ウスバガガンボ属



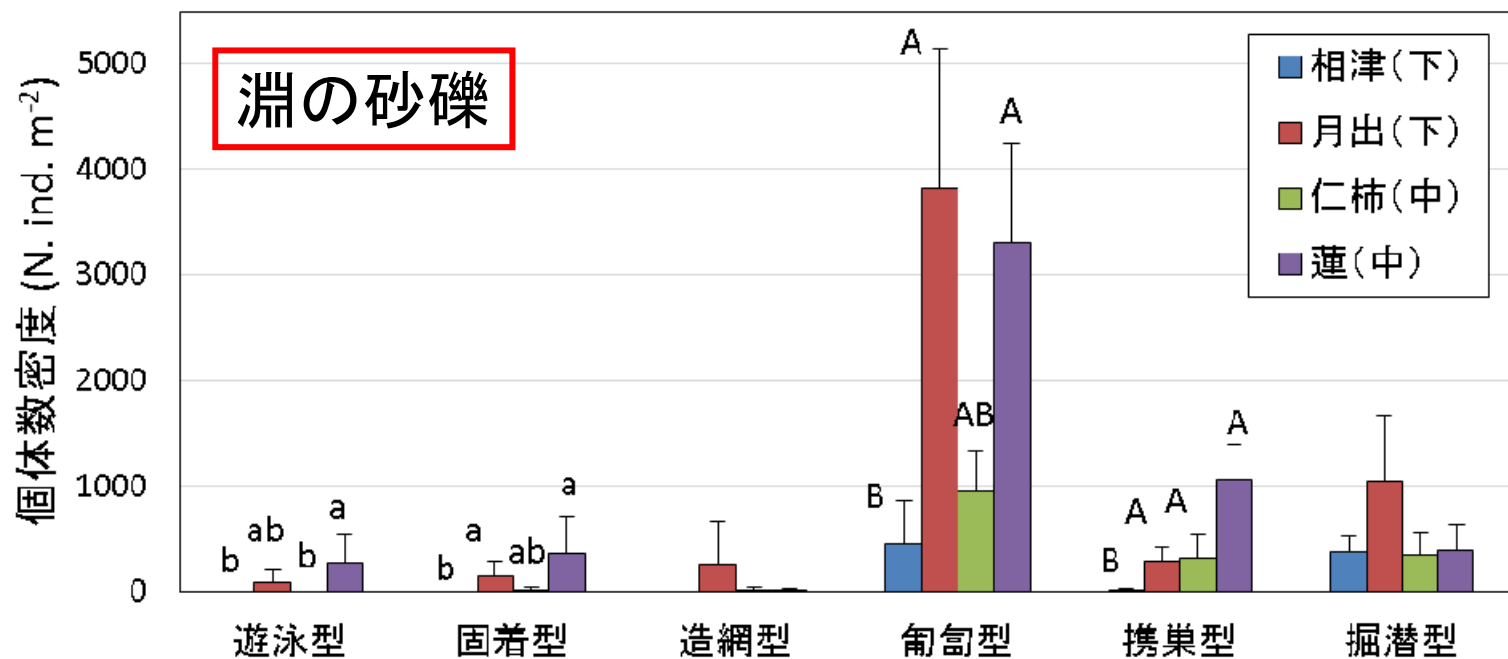
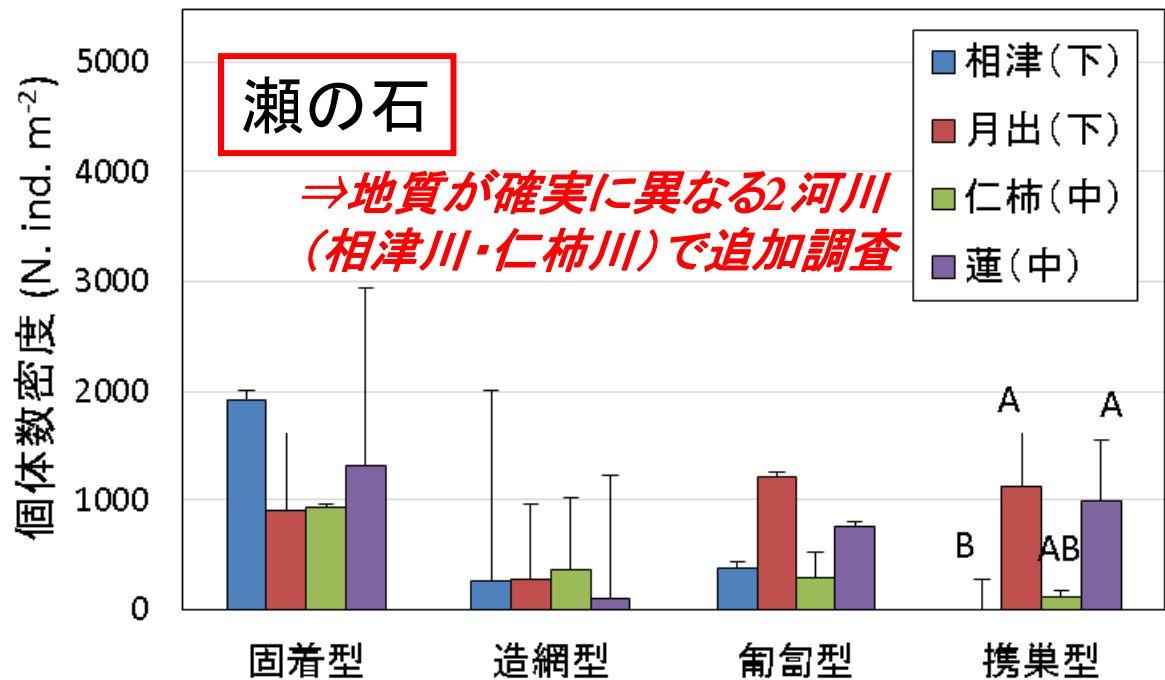
Antocha sp.



分析結果

瀬では携巢型，淵では多くの生活型において河川間で有意な差が見られた。

⇒流域地質は河床材料特性を介して生態系にも影響を及ぼす！？



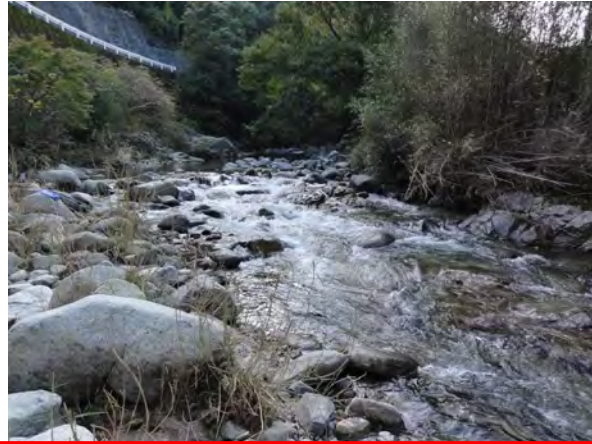
仁柿川

相津川

瀬



早瀬



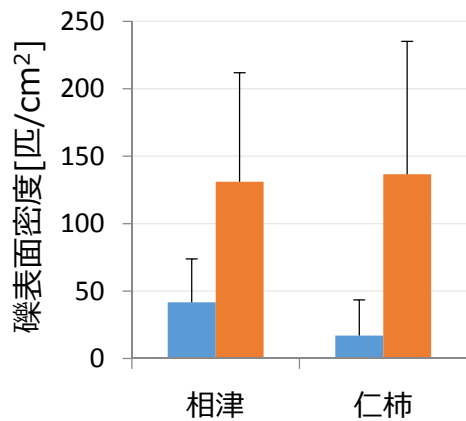
淵



調査を実施

底生動物の個体数密度

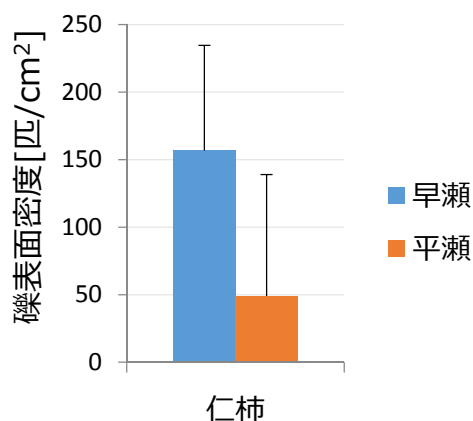
携巣型 (平均&標準誤差)



対数変換した後、
繰り返しのある
二元配置分散解析

シマトビケラ科 (造網型)

(平均&標準誤差)



対数変換した後、仁柿川について
Studentのt検定により解析

要因	P値 (携巣型)	P値 (シマトビケラ科)
相津川-仁柿川	0.131	
早瀬-平瀬	3.62×10^{-4} **	0.0668

- 携巣型…いずれの河川において平瀬の生息密度が有意に大きい。
→平瀬の細粒分を携帯巣に利用
- シマトビケラ科…特に仁柿川に限って早瀬の生息密度が有意に大きい。
→早瀬の速い流れと球状で広い礫面を利用

携巣型



ニンギョウトビケラ

砂泥や植物片を用いて筒状の巣を形成し、その中で生活する底生動物群

シマトビケラ科 (造網型)

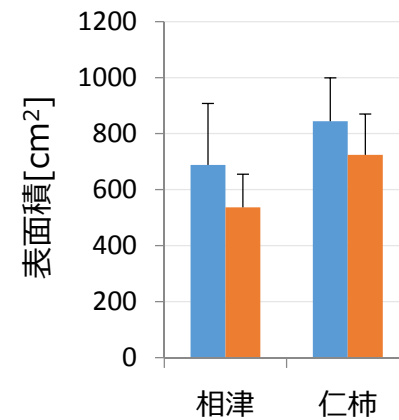
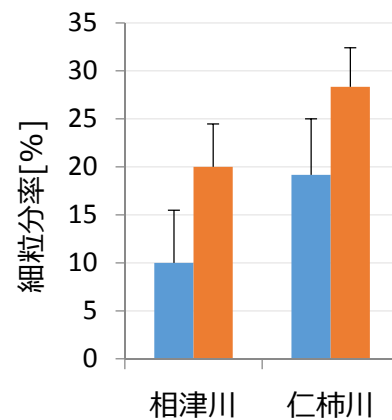


ウルマーシマトビケラ

粘着性の分泌糸で石礫表面・礫間に網を形成する底生動物群

ウルマーシマトビケラ写真：
<http://www.eonet.ne.jp/~suisaikontyu/tobikera.html>

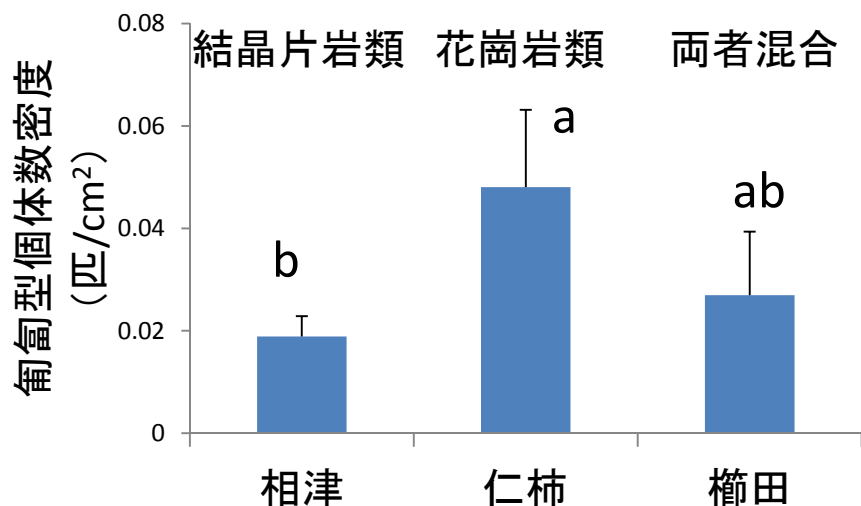
細粒分率 (平均&標準誤差) 表面積 (平均&標準誤差)



流域地質の異なる河川における底生動物生息状況 —平瀬におけるゴドラート単位調査— 匍匐型昆虫の生息密度

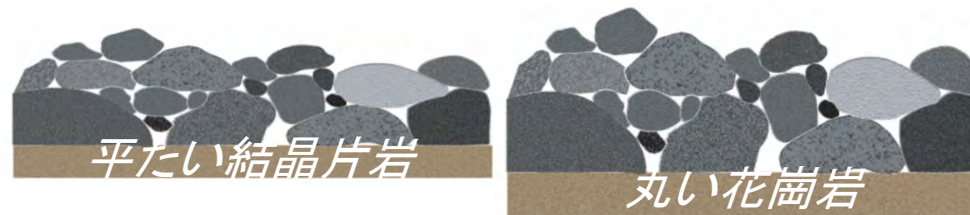
櫛田川水系の隣接する支川の比較から

2014年10月調査

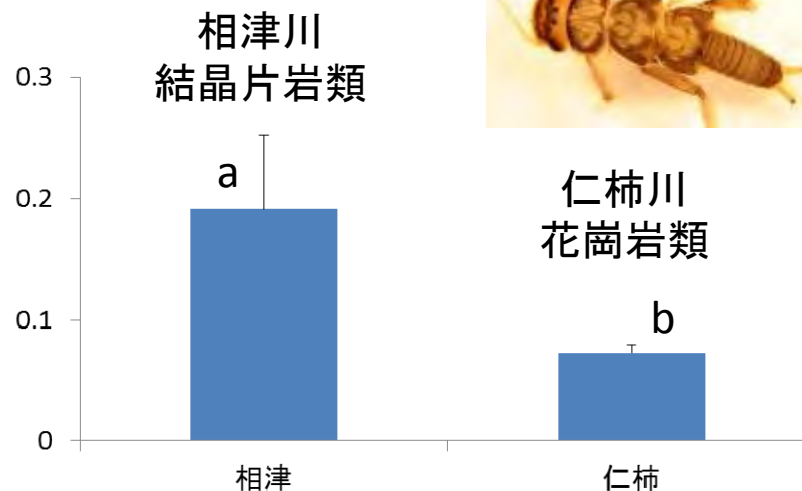


調査河川を要因とする一元配置分散分析により有意差検出 ($P < 0.05$)
事後検定の結果から匍匐型昆虫に関して仁柿川で相津川よりも有意に大きくなった ($P = 0.016$)

仁柿川を構成する厚みのある球状の花崗岩が適度な礫間隙空間を創出し、匍匐型昆虫の個体数密度が大きくなったと考えられる。



2014年12月調査



スチューデントのt検定により相津川で仁柿川よりも有意に大きくなった ($P = 0.014$)

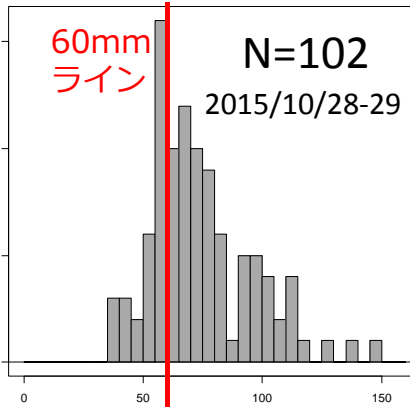
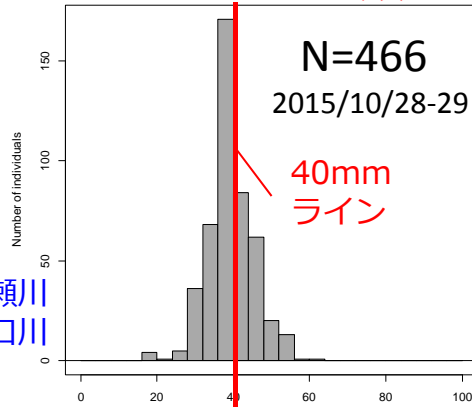
相津川では、ヒラタカゲロウ科やマダラカゲロウ科などに属する体サイズの小さな個体が多かった。相津川の扁平な石礫により小さな個体に適した環境が生じたと考えられる。

魚類調査の結果～河床構造の影響

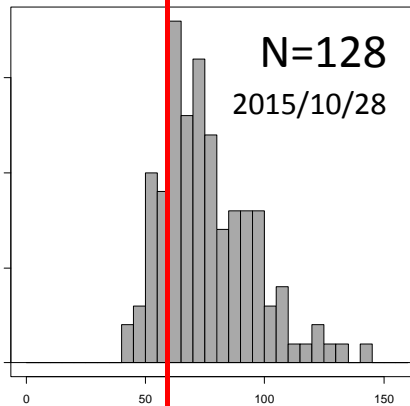
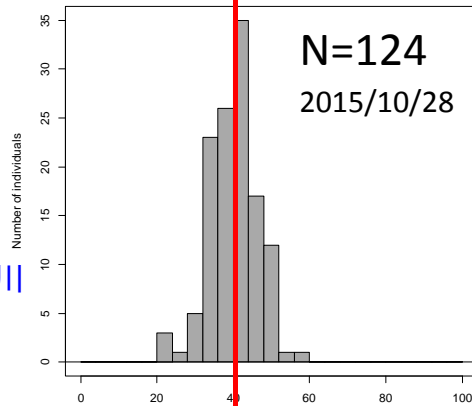
ヨシノボリ類

カワムツ

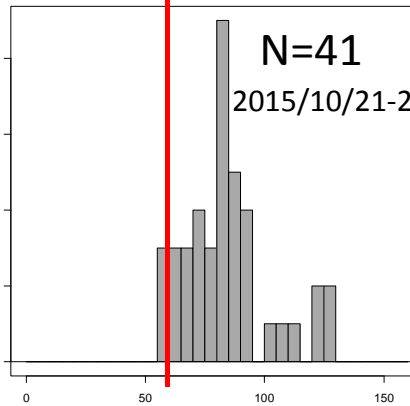
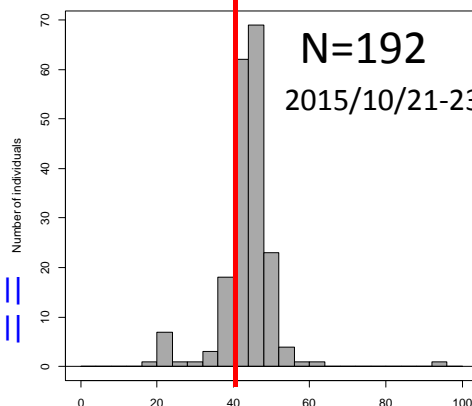
結晶片岩
一之瀬川
野々口川



花崗岩
横谷川



堆積岩
柿野川
津保川



標準体長 (mm)

標準体長 (mm)

地質別の魚類体長分布

・体長頻度分布のピークは、**花崗岩と堆積岩の河川よりも、結晶片岩の河川で両種ともにやや小さい。**

①ハビタットサイズの違いの可能性
(地質の直接的な作用)

→河床間隙のサイズの違い?

→淵の空間サイズの違い?

②密度効果? (ヨシノボリ類)

(地質の間接的な作用)

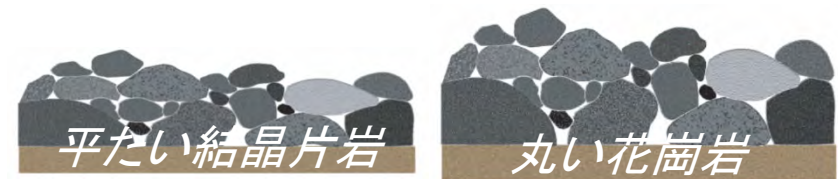
→細かな間隙が多いことで生息密度が高まり、1個体あたりの獲得エネルギーが小さい可能性?

③水温条件など?

(地質と関係が薄い作用)

→水温による孵化時期の違い?

※より多くの河川のサンプルが必要



■ まとめ

▶ 空間スケールの階層性に着目した河川景観の解析

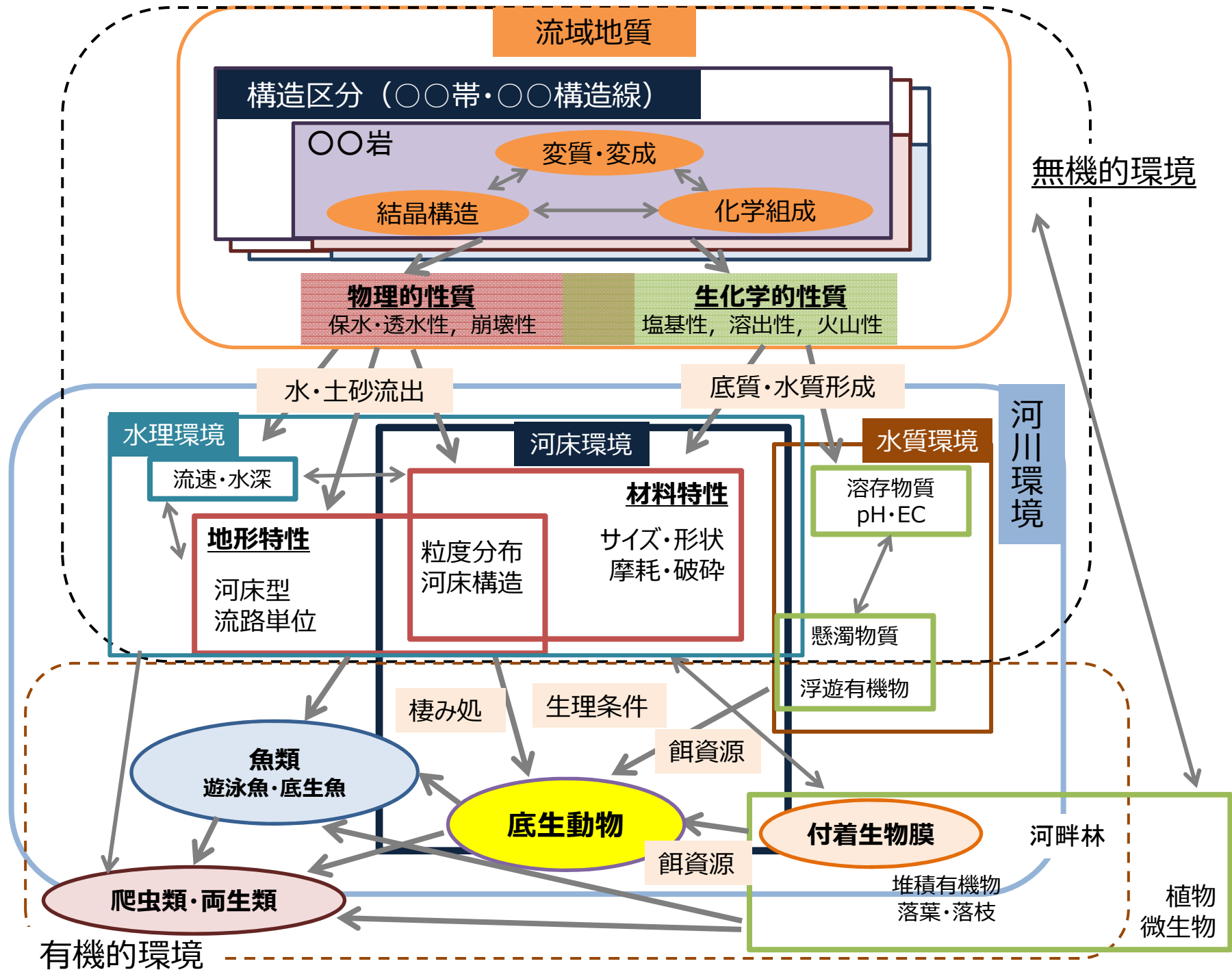
- ①流域地質が複合的で、かつ、人的改変も含む多様な影響要因があることから、築堤河道（河川中下流）の植被状況について地質影響は見られなかった。
- ②上流山地域における流域地質の影響については、河道スケールでは見出せなかったが、石ころ（河床材料構成）には顕著な違いとなって表れた。

▶ 流域から河道への土砂流出過程の把握

- ①流域地質は粒度だけでなく、「石ころ」の元素組成に大きな影響を及ぼすことが明らかになった。組成元素を用いた解析により、砂礫流出比が推定され、破碎帯である三波川帯からの比流出量が多いことが確認された。
- ②「石ころ」の摩耗・破碎試験により、地質によって摩耗・破碎過程が異なり、三波川変成岩から派生する多くの砂礫が流出に寄与することが分かった。

▶ 「石ころ」が水生生物の群集構造に及ぼす影響

- ①底生動物について、瀬では携巢型、淵では多くの生活型の生息個体数密度において有意な差が確認された。造網型（シマトビケラ科）は早瀬の速い流れと球状で広い礫面を利用していた可能性が示唆される。
- ②魚類群集では種組成に差は無いものの、体長組成に差が確認された。礫間隙空間の大きさが影響している可能性が示唆される。





本日の話題提供に関する主な発表論文

➤ 流域地質が流出土砂に及ぼす影響

- 田代 喬, 佐藤圭輔, 中村直斗, 登立公平, 辻本哲郎 (2007): 流域の地質構造・地形特性に着目した河川景観の階層性の分析, 河川技術論文集, Vol. 13, pp.279-284.
- 田代 喬, 登立公平, 辻本哲郎 (2008): 流域地質構造が河床材料特性の流下方向変化に及ぼす影響, 河川技術論文集, Vol.14, pp.121-126.

➤ 石礫の変態・形態特性が移動床に及ぼす影響

- 五島暢太, 田代 喬, 辻本哲郎(2012): 流域地質の異なる河川における石礫の磨耗・破碎現象のモデル化に基づく河床材料の縦断変化に関する研究, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.68, No.4, I_907-I_912.
- 田代 喬, 畔柳諒輔, 岩田裕輝, 辻本哲郎(2015): 石礫の輪郭形状に着目した河床間隙の評価と移動床現象に関する考察, 河川技術論文集, Vol.21, pp.149-152.

➤ 河床材料構成が底生動物群集に及ぼす影響

- TASHIRO, Takashi (2014): Landscape Sequence and Fluvial Ecosystem of the Kushida River with Particular Reference to Its Basin Geologic Heterogeneity. In H. Shimizu and A. Murayama (eds.), Basic and Clinical Environmental Approaches in Landscape Planning, Urban and Landscape Perspectives 17, pp.99-111, Springer Japan.
- 田代 喬, 辻本哲郎(2015): 流域地質の異質性からみた山地河川の河床材料構成と底生動物の関係: 櫛田川流域における現地観測, 応用生態工学, Vol.18, No.1, pp.35-45.
- 田代 喬, 岩田裕輝, 辻本哲郎(2016): 流域地質に起因する礫床環境の異質性とそれが底生動物群集に及ぼす影響, 河川技術論文集, Vol.22, pp.445-450.

など