

化学物質の安全管理に関するシンポジウム（2022年12月21日）

統計的因果推論を用いた重金属の生態影響評価

国立研究開発法人 国立環境研究所
環境リスク・健康領域
横溝裕行

重金属の生態リスク評価

- 休廃止鉱山などに由来する重金属の水生生物に対する影響

Laurie RD, Jones JE. (1938)

The faunistic recovery of a lead-polluted river in North Cardiganshire, Wales.

J Anim Ecol 7:272–289.

御勢 久右衛門 (1960)

奈良県立里, 川股両鉱山及び和歌山県飯盛鉱山の廃水の河川生物に及ぼす影響

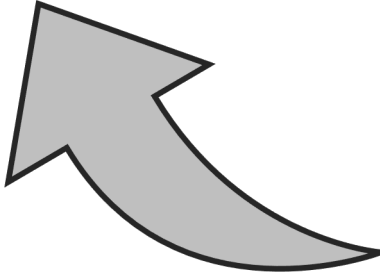
日本生態学会誌 10(1): 38–45

野外調査による群集レベルでの生物の応答の評価

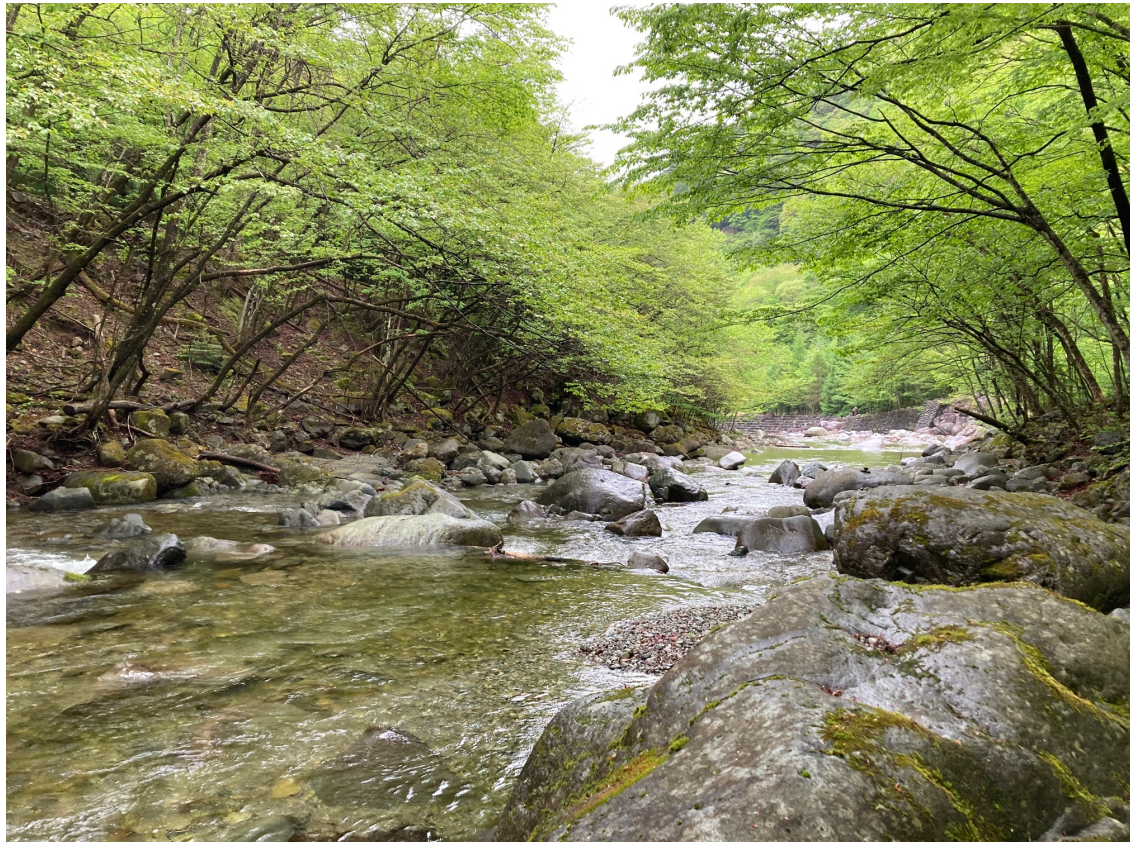
◆ 標準試験種を用いた室内毒性試験

- 再現性やコストなどの面で大きな利点
- 野外における生物群集の応答の予測につなげるのは難しい

(e.g., Cairns 1988)



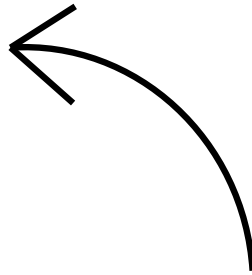
情報を
補足



野外で何をみるか？

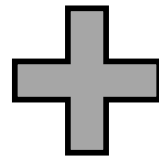
◆生物群集の特徴

- 総個体数（総重量）
- 総種数



曝露に敏感な生物の空白ニッチへの
他の(鈍感な)生物の進出を見逃す可能性

- 曝露に敏感な生物種の変化（≡希少種？）



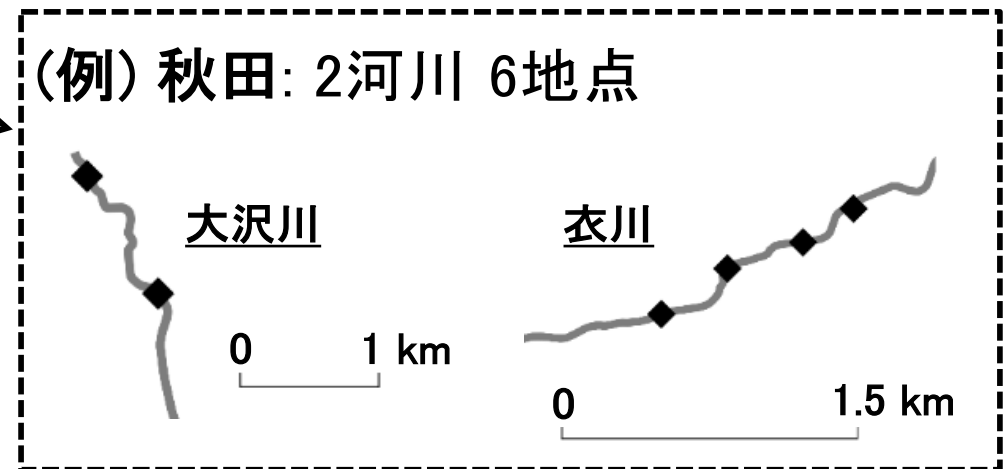
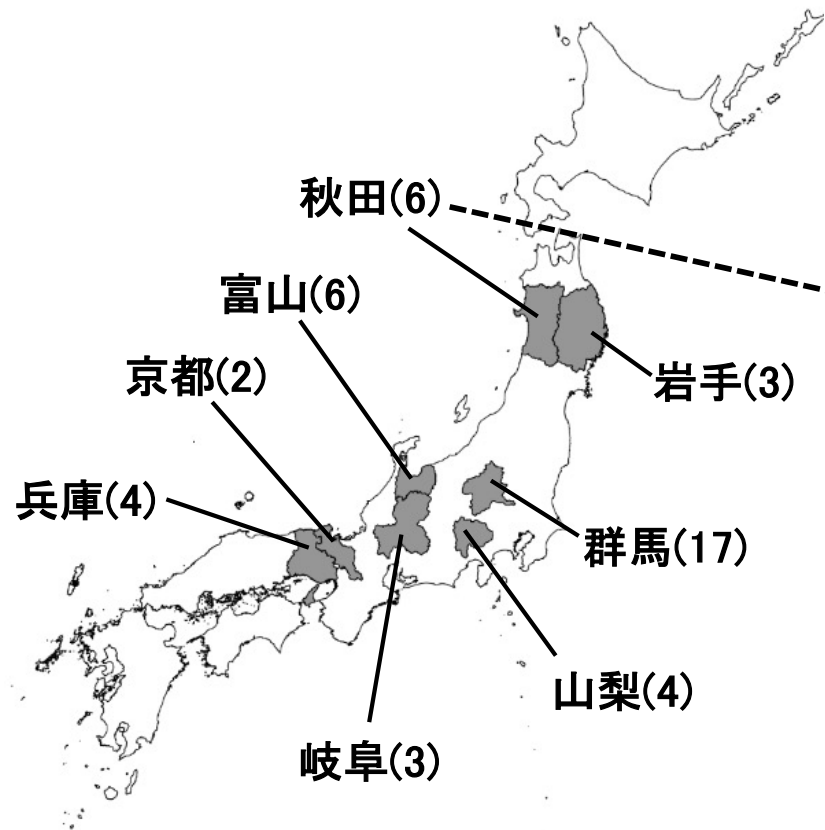
その生物群集が果たしている
生態的な機能が保たれているかどうか

解析する河川調査データセット

◆平成28年度水生生物保全環境基準等検討調査業務

- 8府県19河川の全45地点における
底生動物相および環境条件の調査

↓
(特にニッケルに着目)



解析する河川調査データセット

◆平成28年度水生生物保全環境基準等検討調査業務

8府県19河川の全45地点における

底生動物相および環境条件の調査



河川の水質(ニッケル濃度など)や
河川の物理的特性(流速など)を測定

確認された主な底生動物

カゲロウ類



カワゲラ類



トビケラ類



- 巻貝
- 二枚貝
- ミミズ類
- ヒル類
- ダニ類

- ドロムシ類
- エビ類
- ワラジムシ
- トンボ類
- ユスリカ類

統計解析-分位点回帰 (生態毒性学で用いられる手法で)

応答変数(Y): 総個体数、総種数、各摂食機能群の個体数など

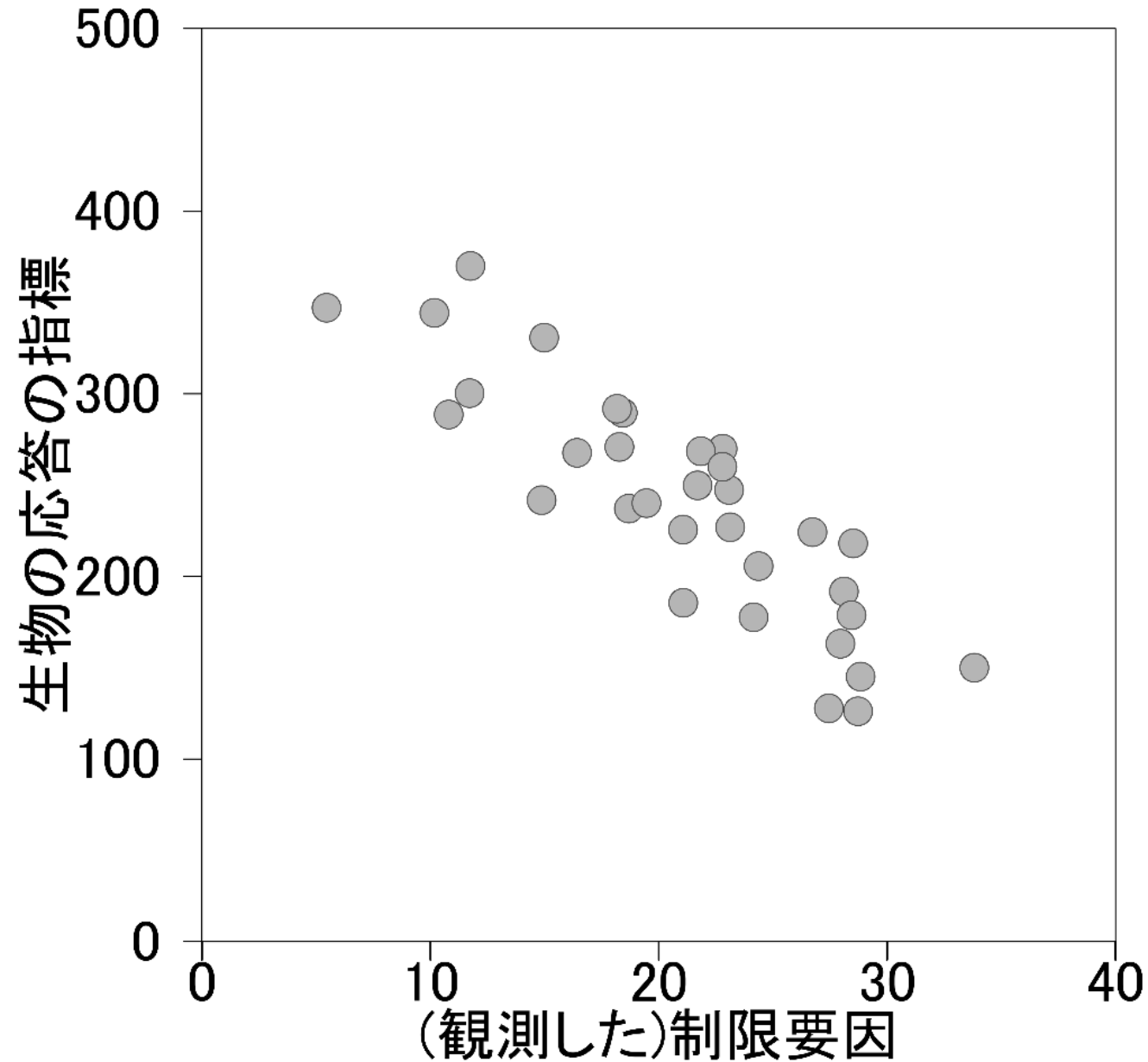
説明変数(X): ニッケルのフリー(遊離)イオン濃度

とした分位点回帰
(Koenker and Bassett 1978)

水温、pH、DOC、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^{+} 濃度などから、
ソフトウェアWHAMを用いて推定
(Tipping 1994)

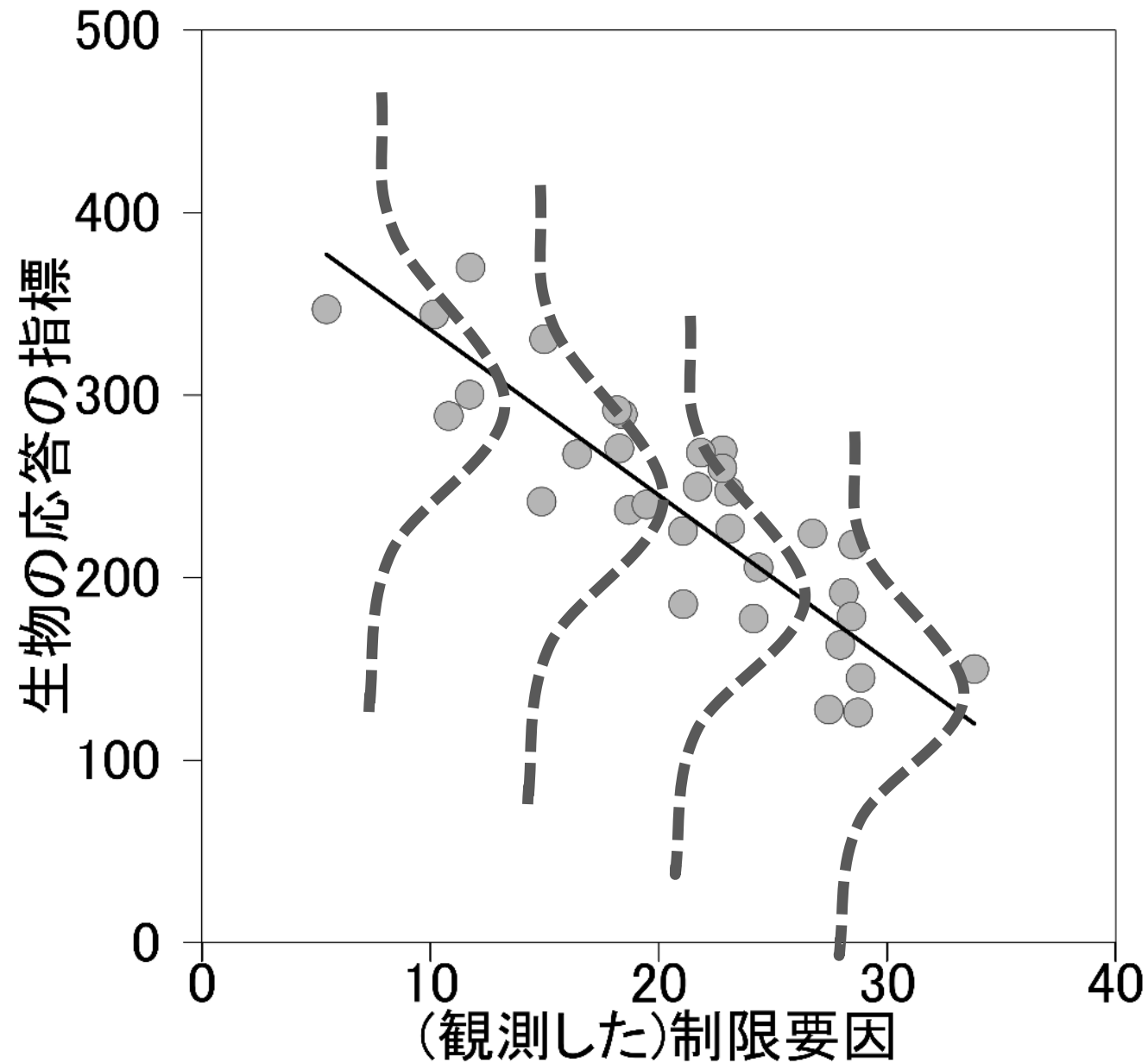
分位点回帰

- (条件付き平均を予測する)回帰分析



分位点回帰

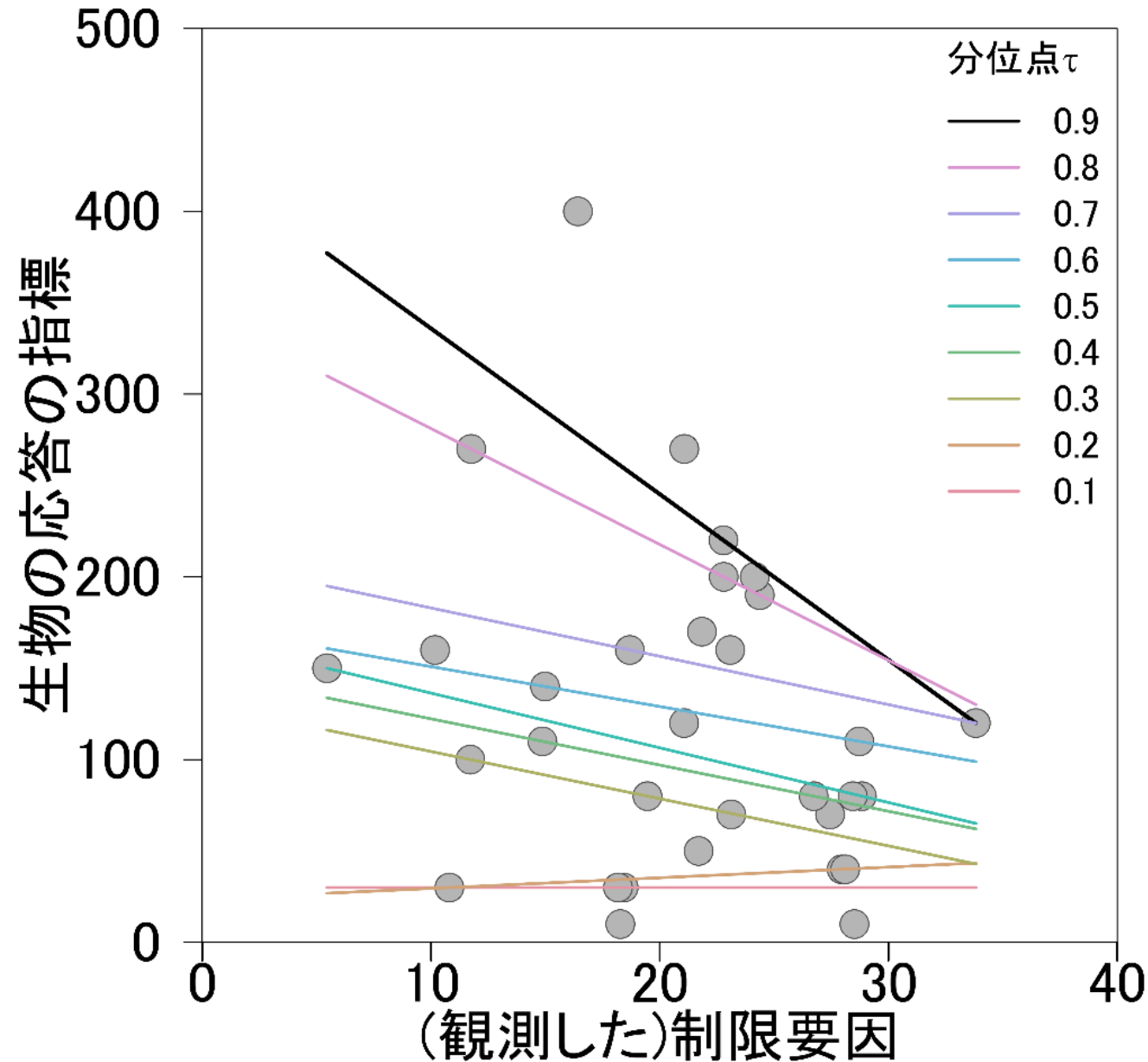
- (条件付き平均を予測する)回帰分析



分位点回帰

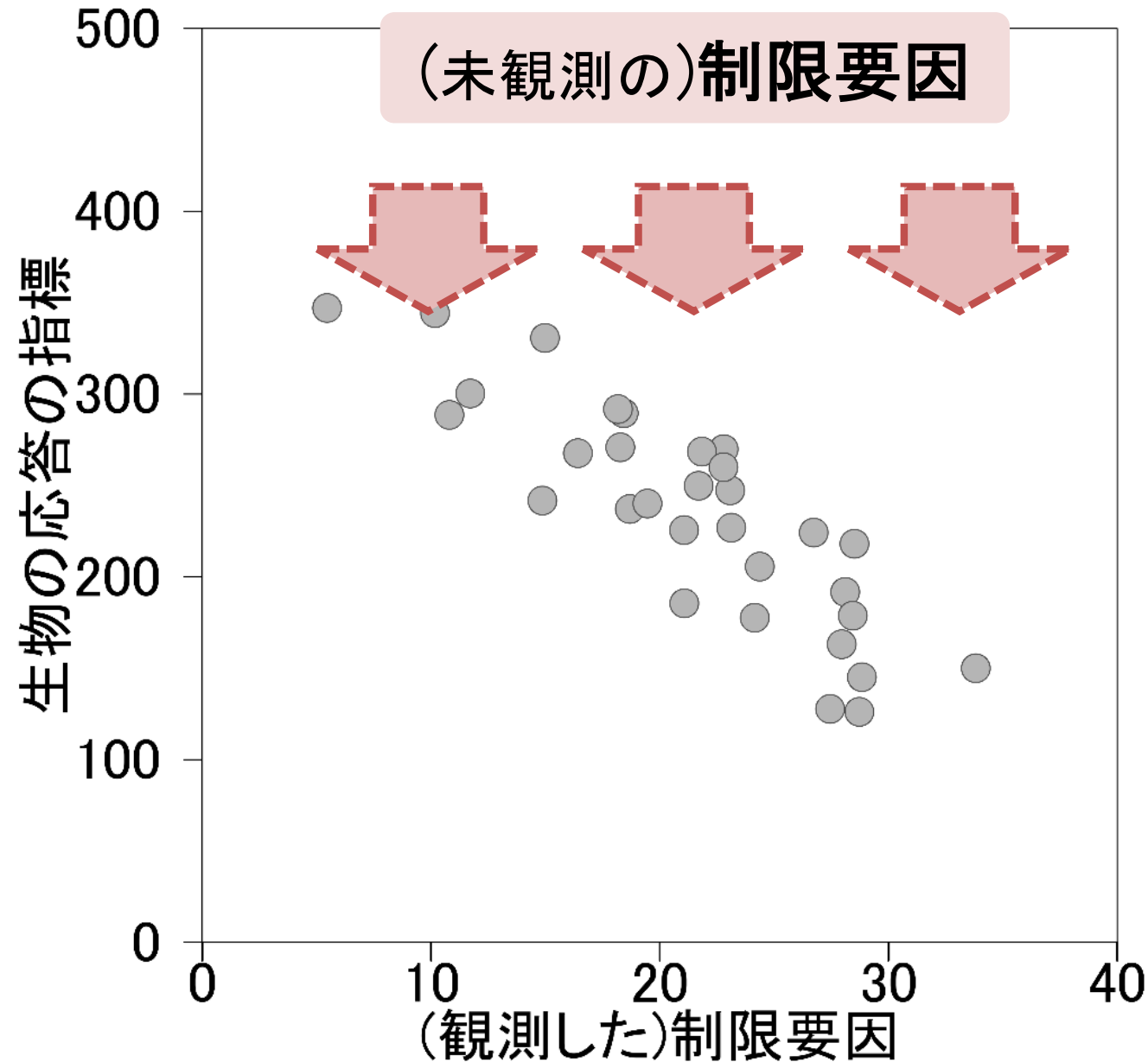
X%分位点: 観測値を小さいものから大きいものの順に並べた場合、自らよりも小さい観測値の割合がx%となる観測値

- 任意の分位点を予測する回帰式を求める



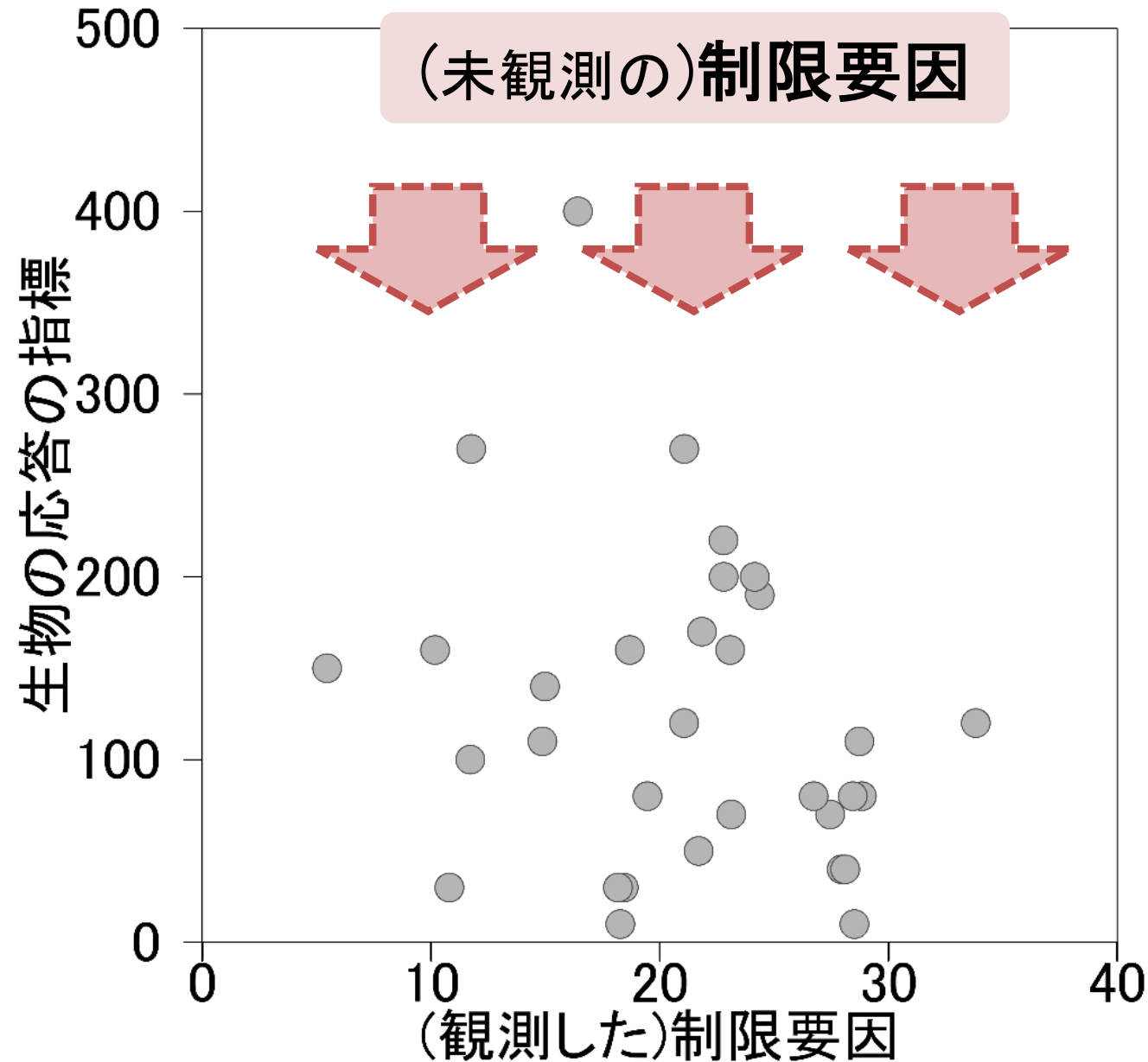
分位点回帰を行う理由

- 野外では往々にして(未観測の)制限要因が存在する



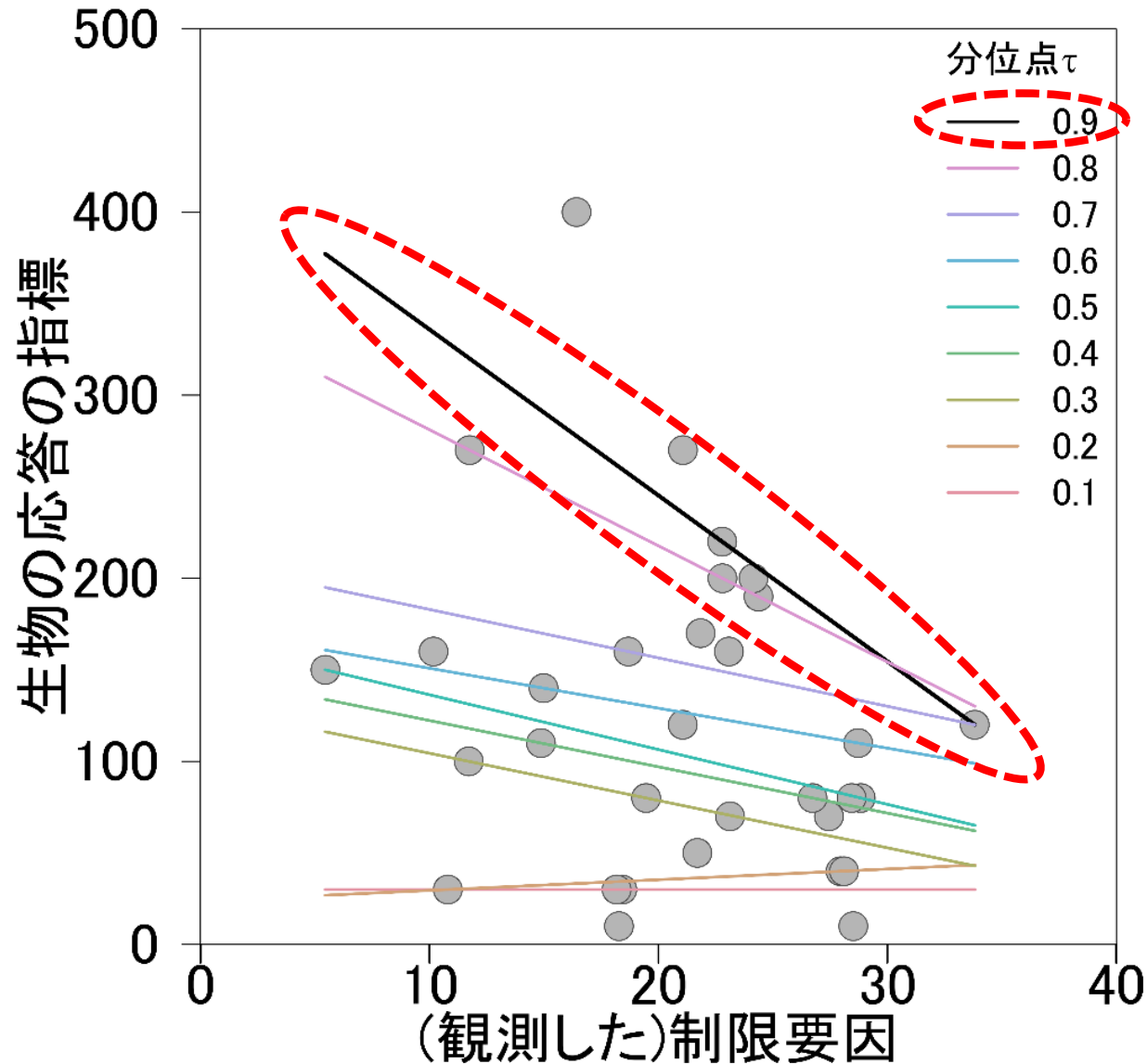
分位点回帰を行う理由

- 野外では往々にして(未観測の)制限要因が存在する

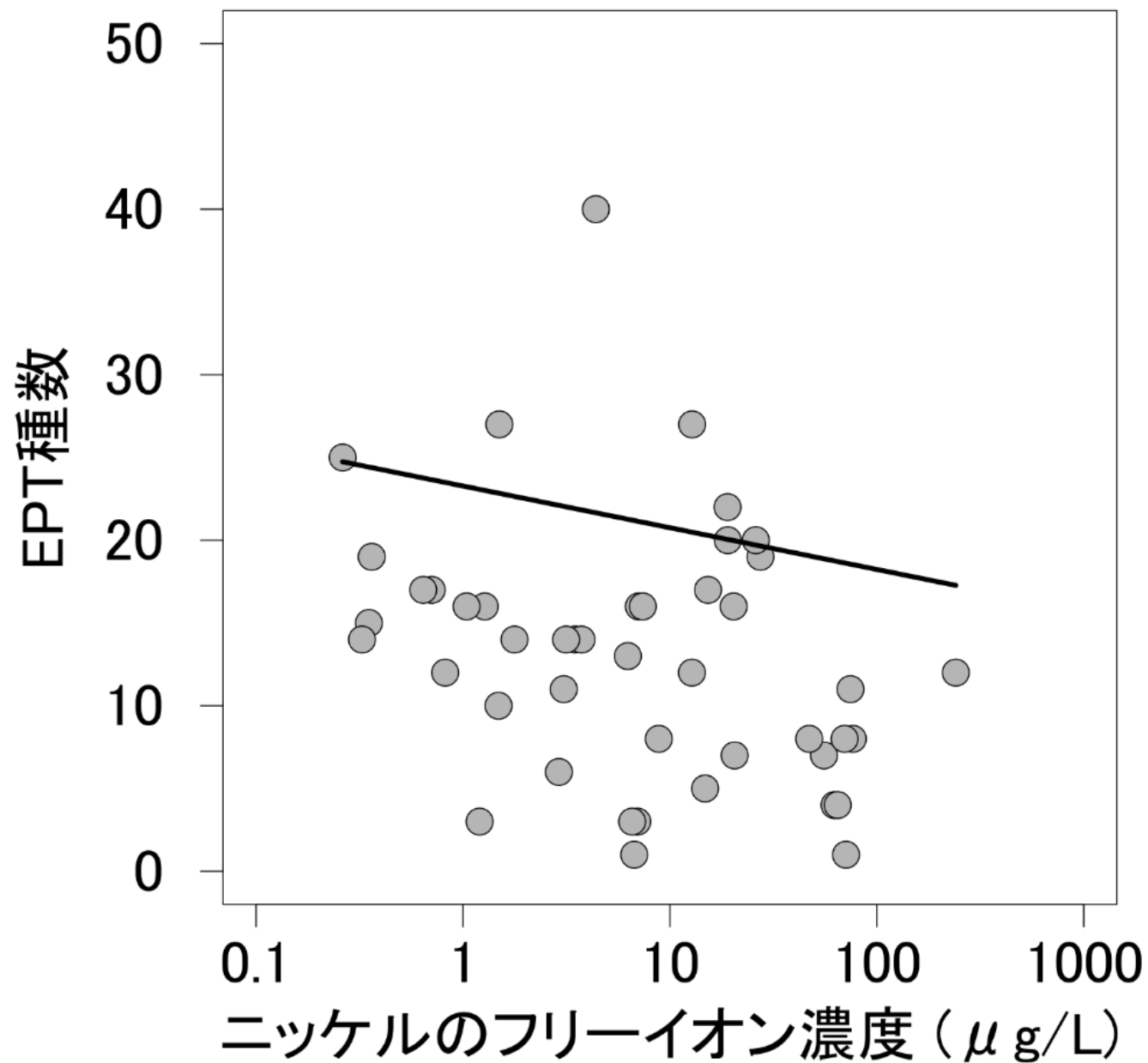


分位点回帰を行う理由

- 高分位点への回帰直線を「ニッケル以外の要因の影響が小さかった地点への回帰直線」とみなす



分位点回帰の結果　－重金属曝露に敏感らしい種－



カゲロウ目 (E)



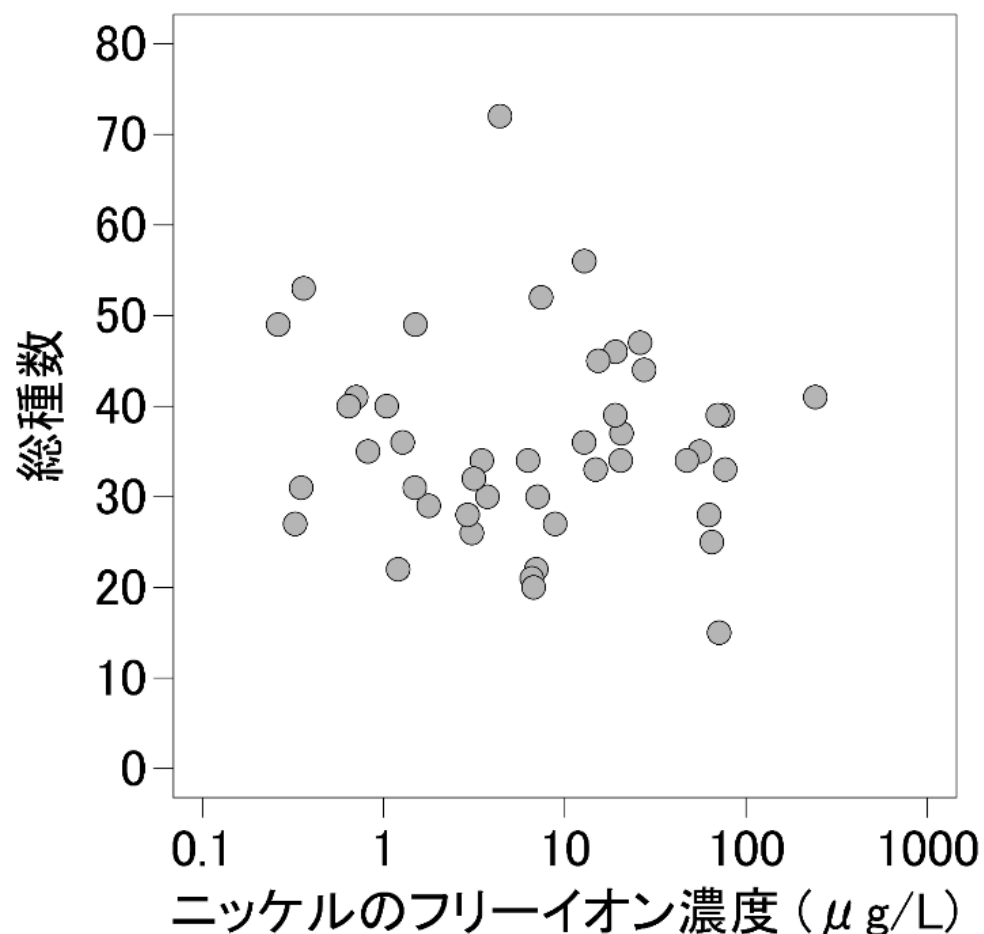
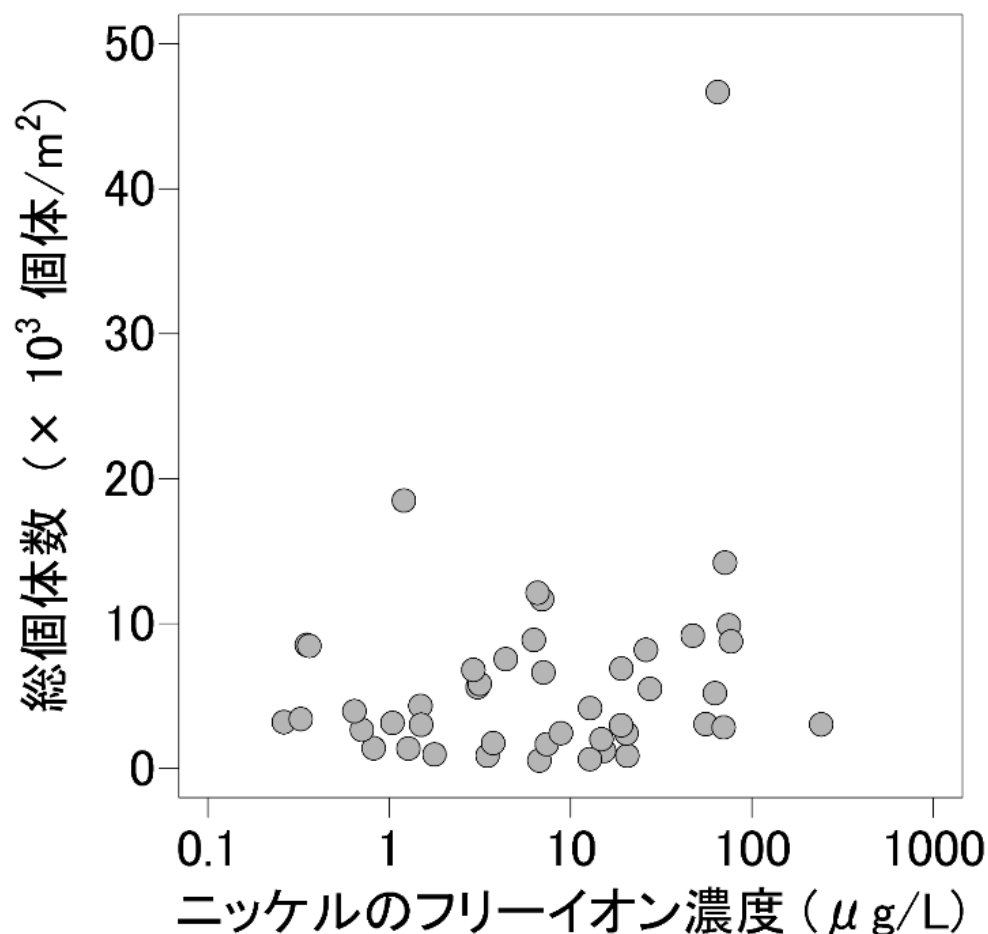
カワゲラ目 (P)



トビケラ目 (T)



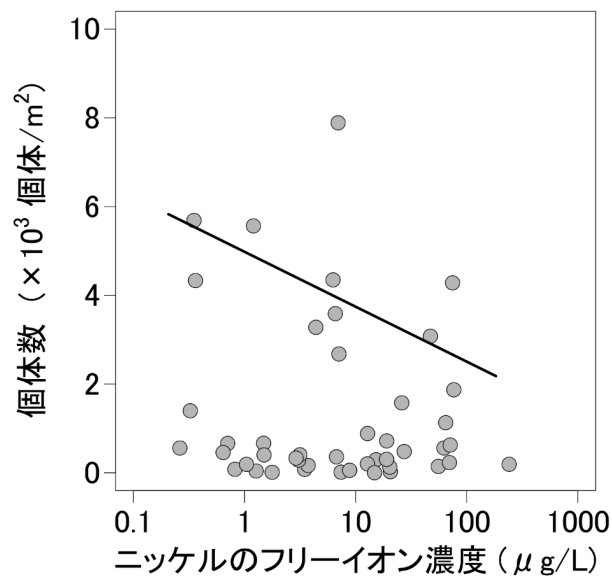
分位点回帰の結果　－総種数・総個体数－



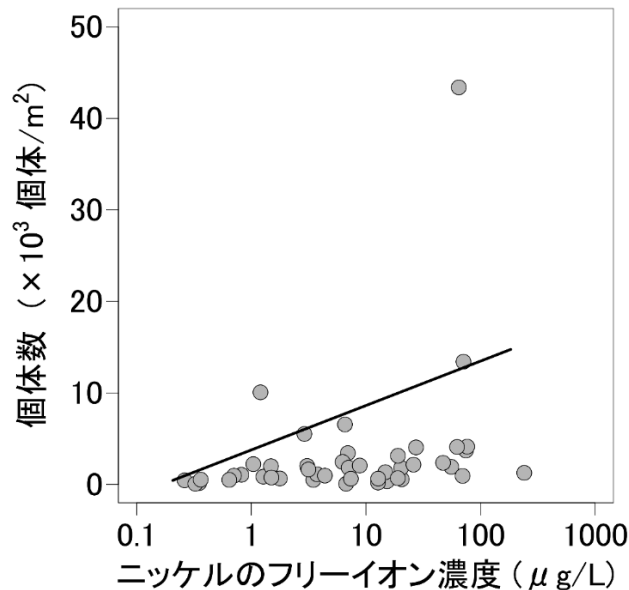
統計的な関連はみられず

分位点回帰の結果 — 摂食機能群 —

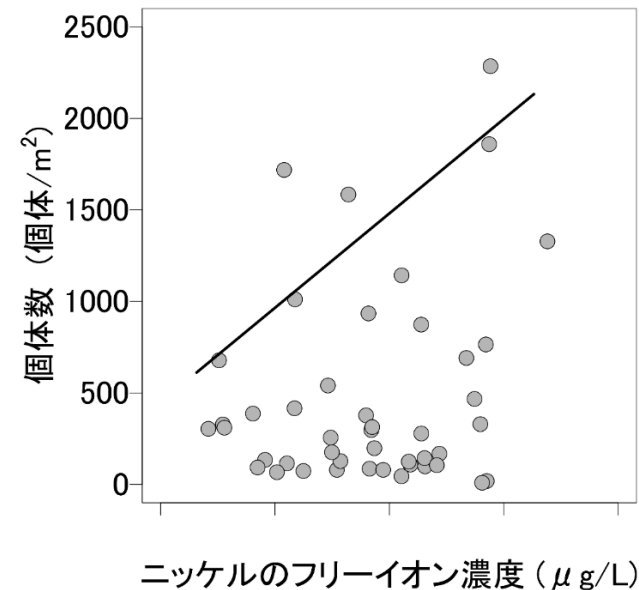
①濾過食者



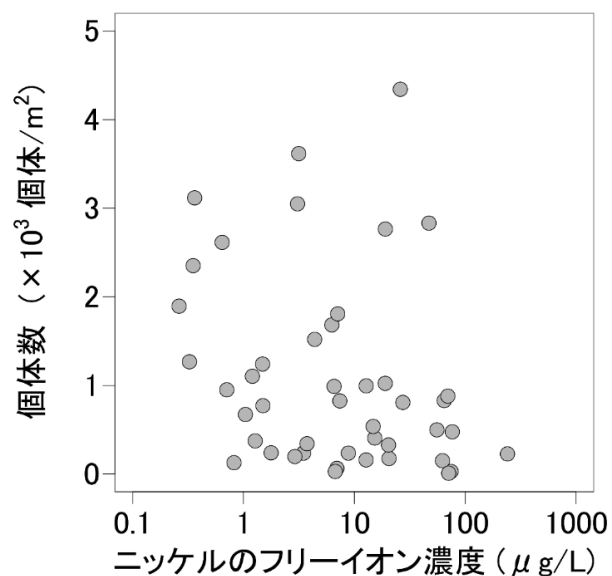
②採集食者



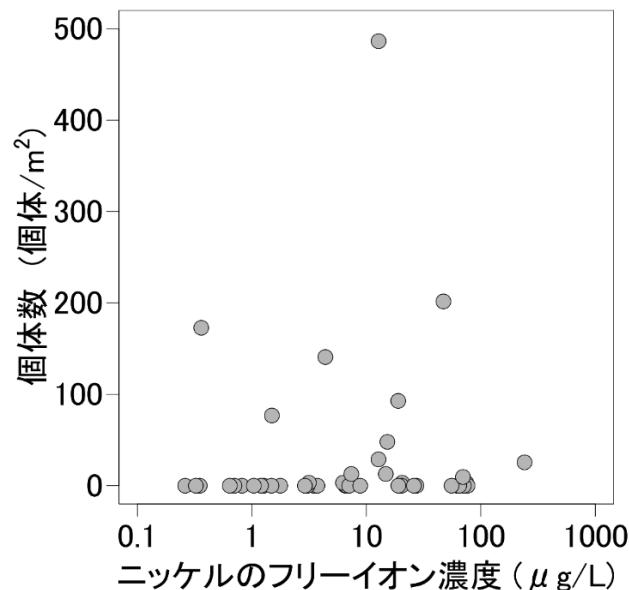
③捕食者



④刈取食者



⑤破碎食者



ニッケル濃度との関連は摂食機能群ごとに異なる。

まとめ

- ニッケルの曝露に敏感な生物の減少、及びその空白ニッチへの他の生物の進出によって、底生動物の群集構造が変化した可能性が示された
- ニッケル濃度との関連は摂食機能群ごとに異なっており、河川の生態系機能への影響が示唆された

Takeshita KM, Misaki T, Hayashi TI, Yokomizo H (2019)
Associations of community structure and functions of benthic invertebrates with nickel concentrations: Analyses from field surveys. Environmental toxicology and chemistry 38 (8), 1728-1737

まとめ

本研究で評価したのは相関関係(例: ニッケル濃度が低いときにEPT種数が多い)であって、因果的解釈(例: ニッケル濃度を下げるとEPT種数が増える)が可能かどうかは未検討であった。
その点は次の課題として取り組んだ。

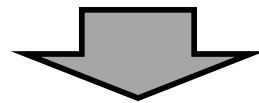
Takeshita KM, Misaki T, Hayashi TI, Yokomizo H (2019)
Associations of community structure and functions of benthic invertebrates with nickel concentrations: Analyses from field surveys.
Environmental toxicology and chemistry 38 (8), 1728-1737

介入効果を推定

Takeshita KM, Hayashi TI, Yokomizo H (2020)
The effect of intervention in nickel concentrations
on benthic macroinvertebrates: A case study of
statistical causal inference in ecotoxicology

Environmental Pollution 265, 115059

同じデータセットに対して統計的因果推論の手法を適用



EPT種数に対するニッケル濃度の介入効果を推定
(ニッケル濃度の低減に因るEPT種数の変化)

本研究における「介入効果」の定義

$X \rightarrow Y$ の介入効果



介入によって X を1単位量だけ変化させたときの Y の平均的な変化量

河川の水生昆虫(Y)に対する
重金属濃度(X)の介入効果の推定

統計的因果推論のアプローチは様々ある。

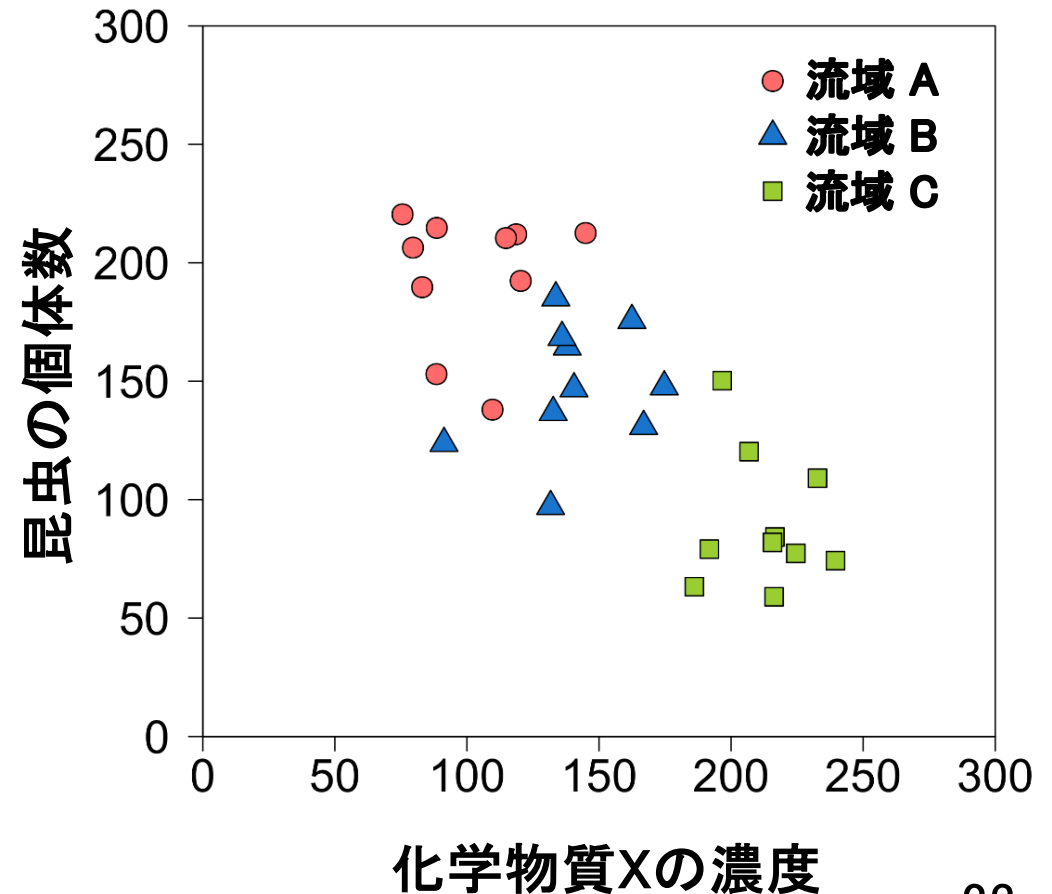
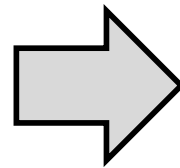
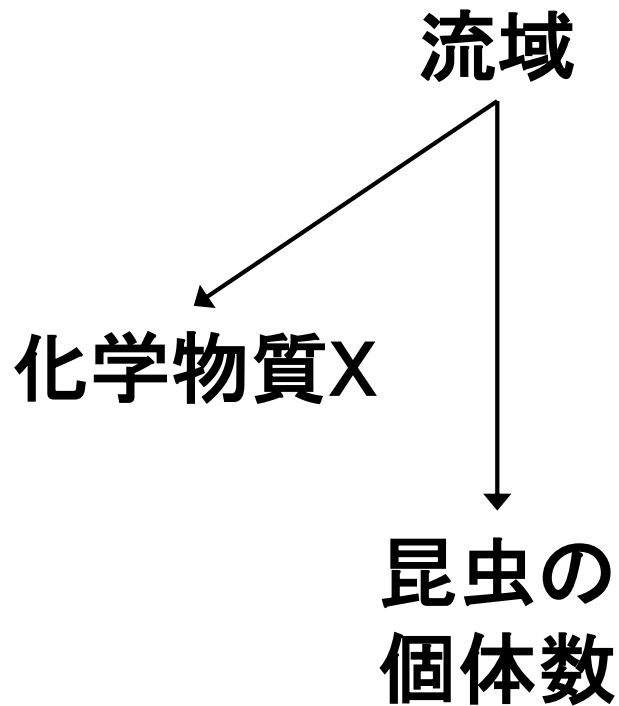
回帰分析での共変量選択を工夫して、 $X \rightarrow Y$ の
介入効果の推定値にかかるバイアス
(例: 交絡バイアス)を除いた。

交絡について

交絡としての「流域」

★ 下記のダイアグラムを基に擬似データセットを作成し

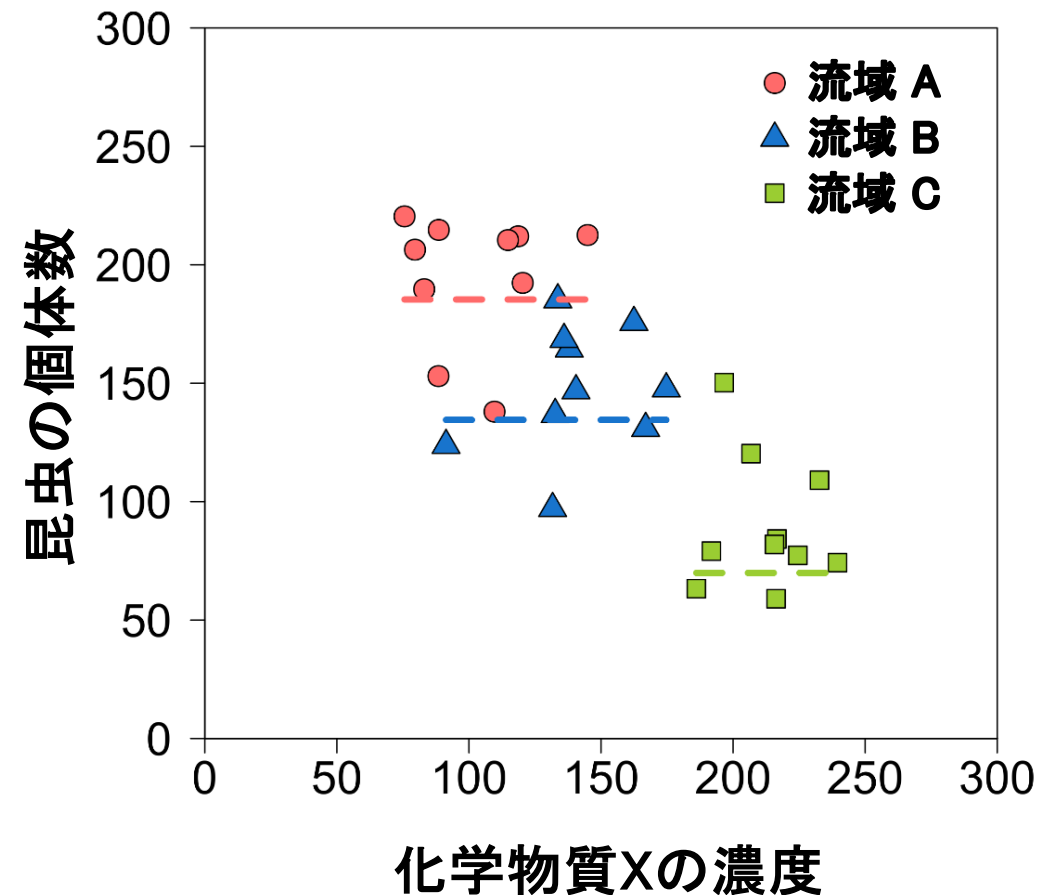
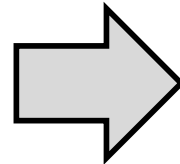
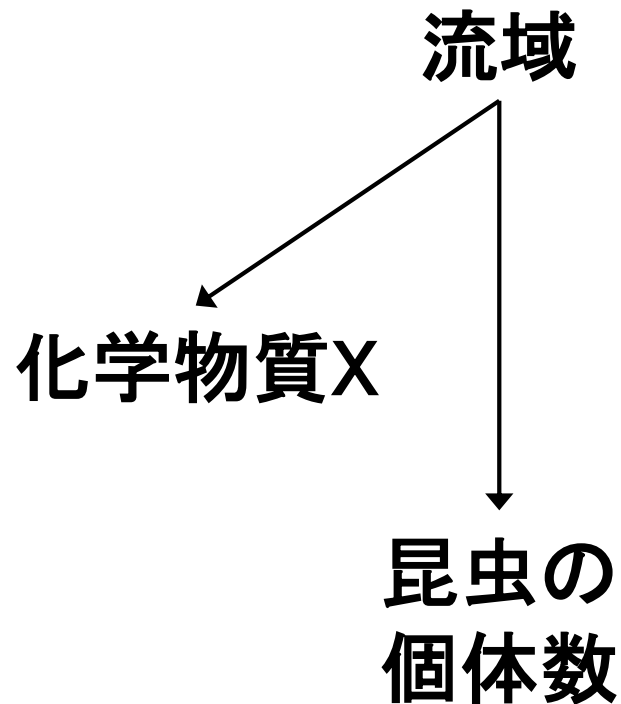
”化学物質X”で単回帰すると...



交絡としての「流域」

★ 下記のダイアグラムを基に擬似データセットを作成し

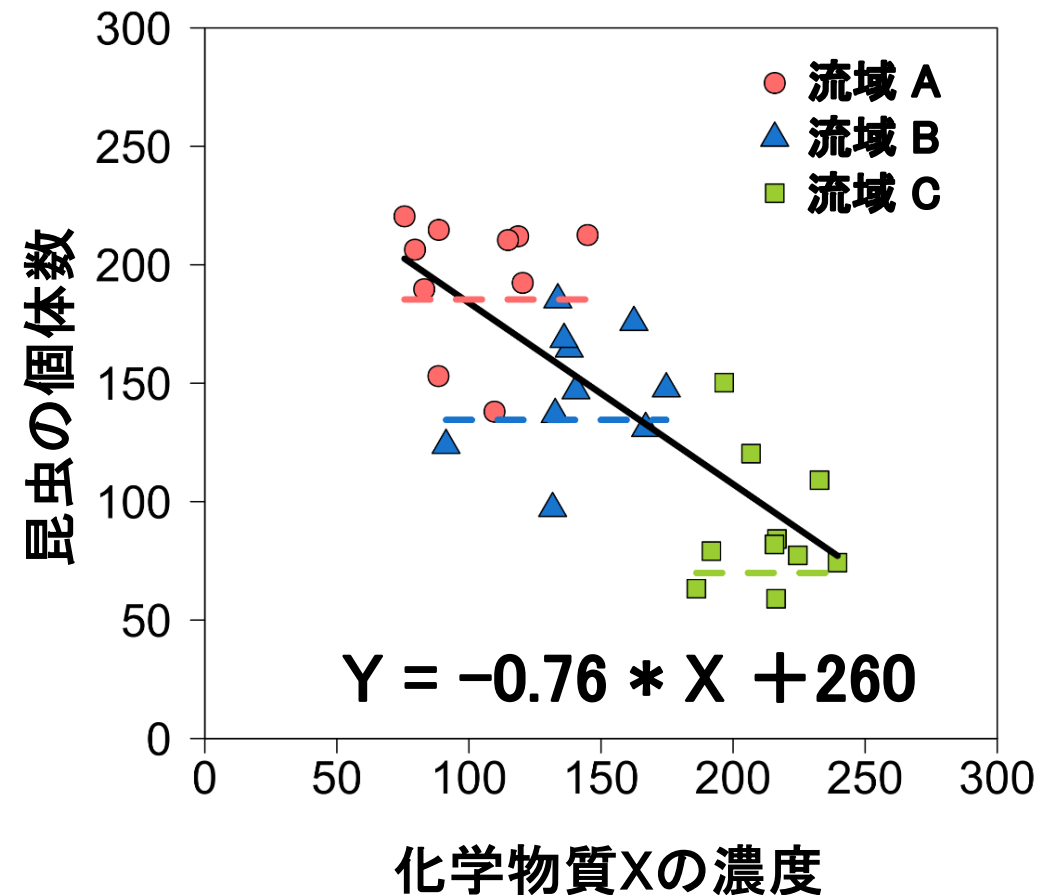
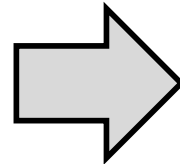
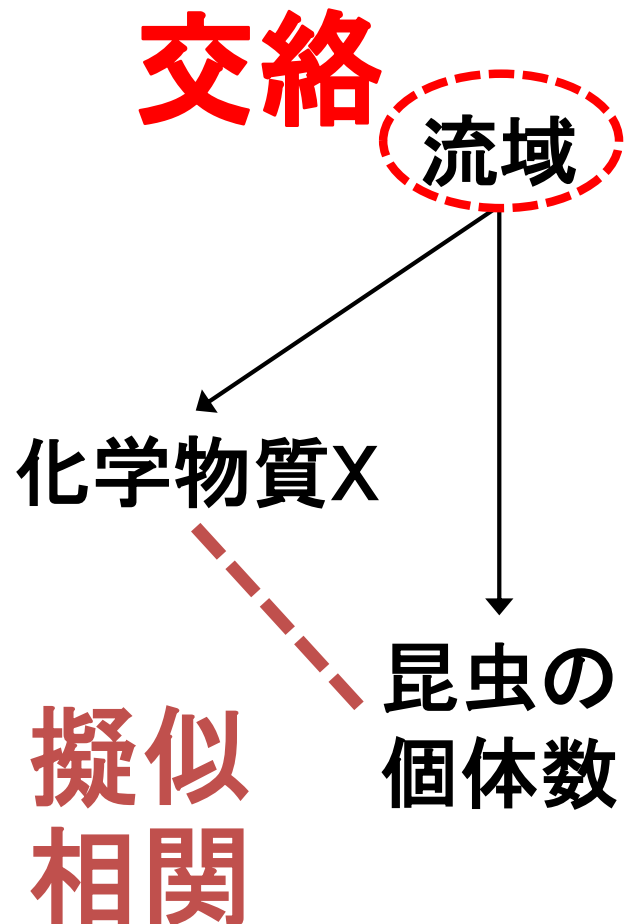
”化学物質X”で単回帰すると...



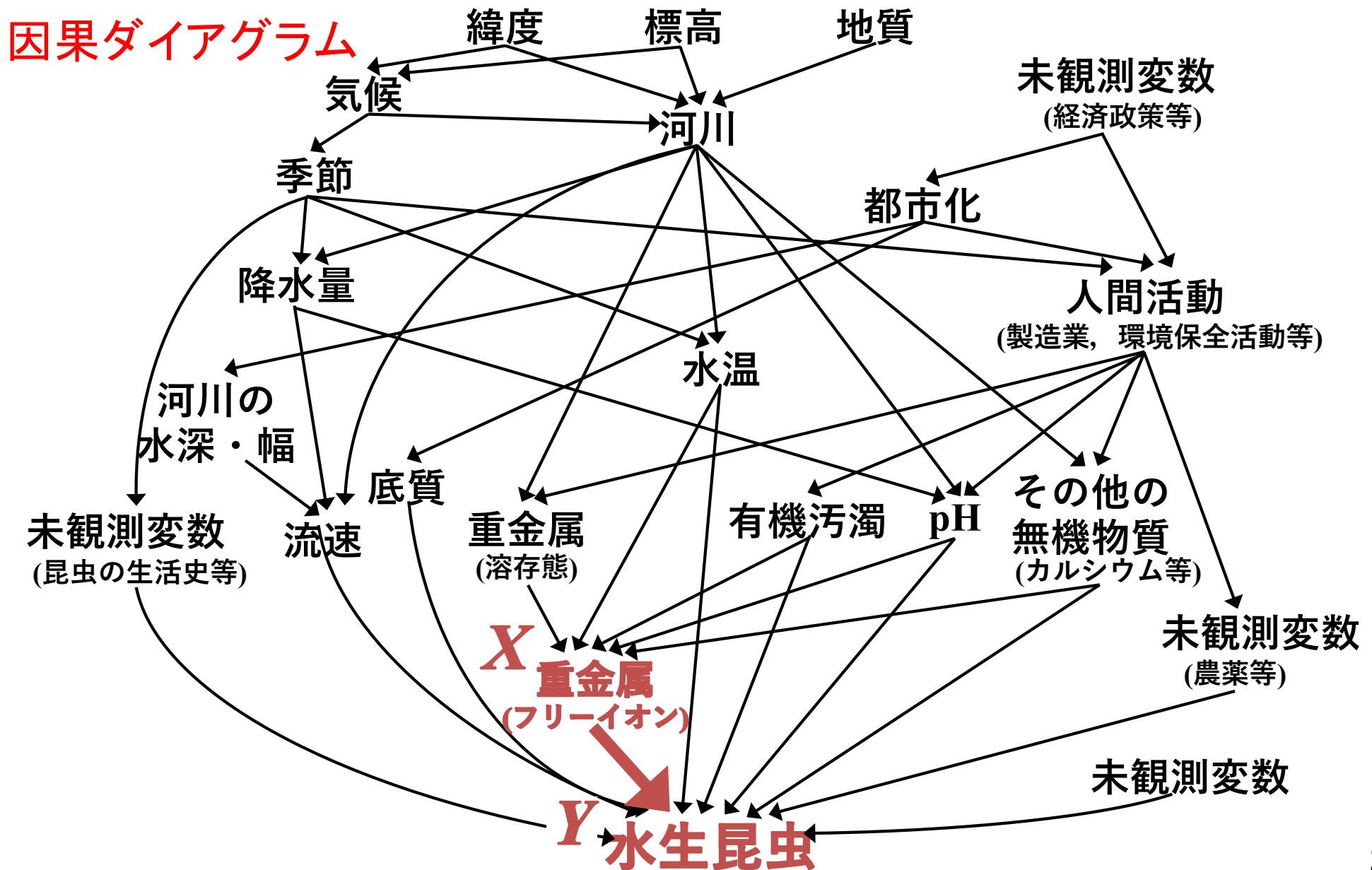
交絡としての「流域」

★ 下記のダイアグラムを基に擬似データセットを作成し

”化学物質X”で単回帰すると...

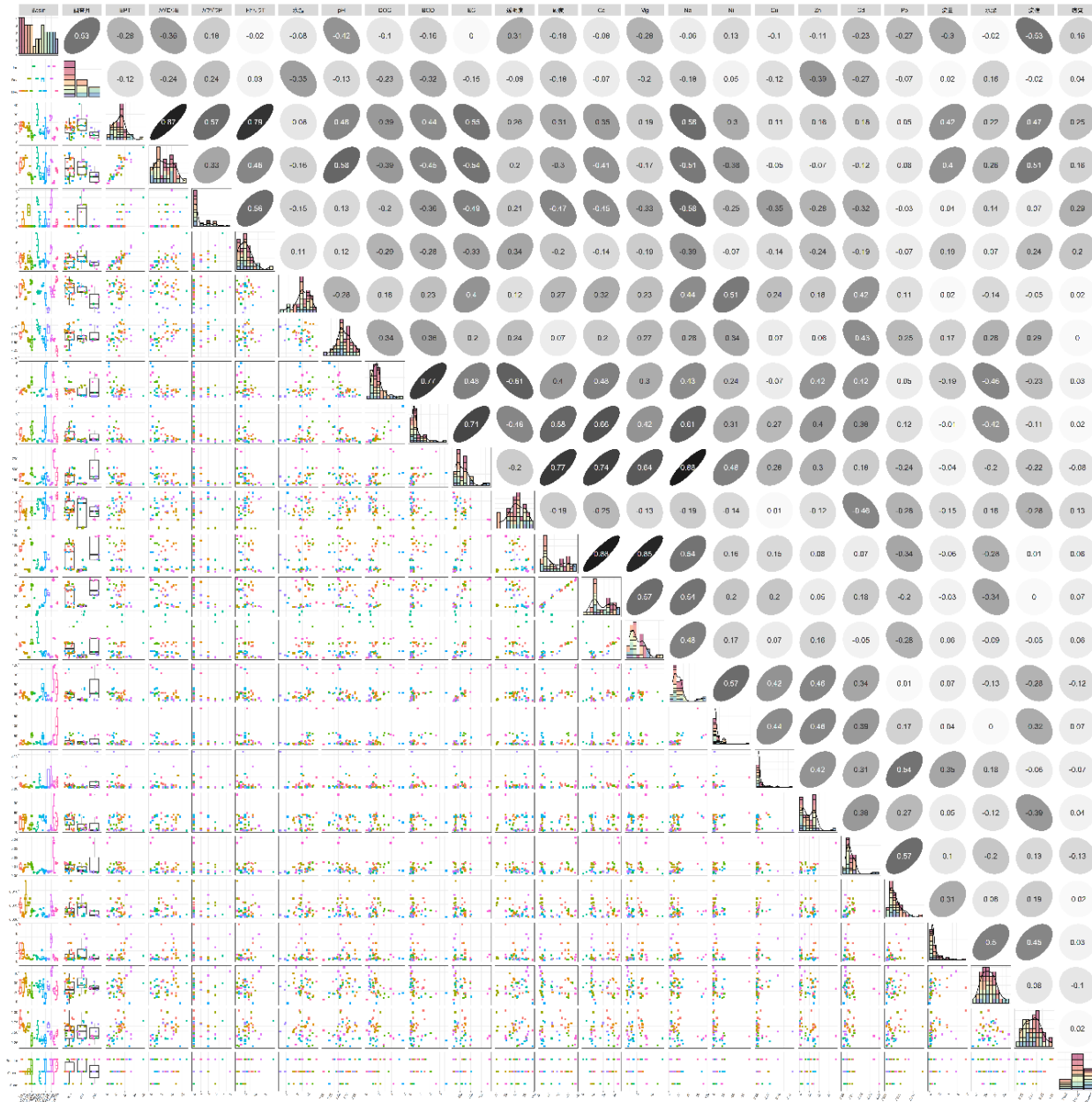


解析対象データセットの生成過程を記述した 因果ダイアグラムの構築

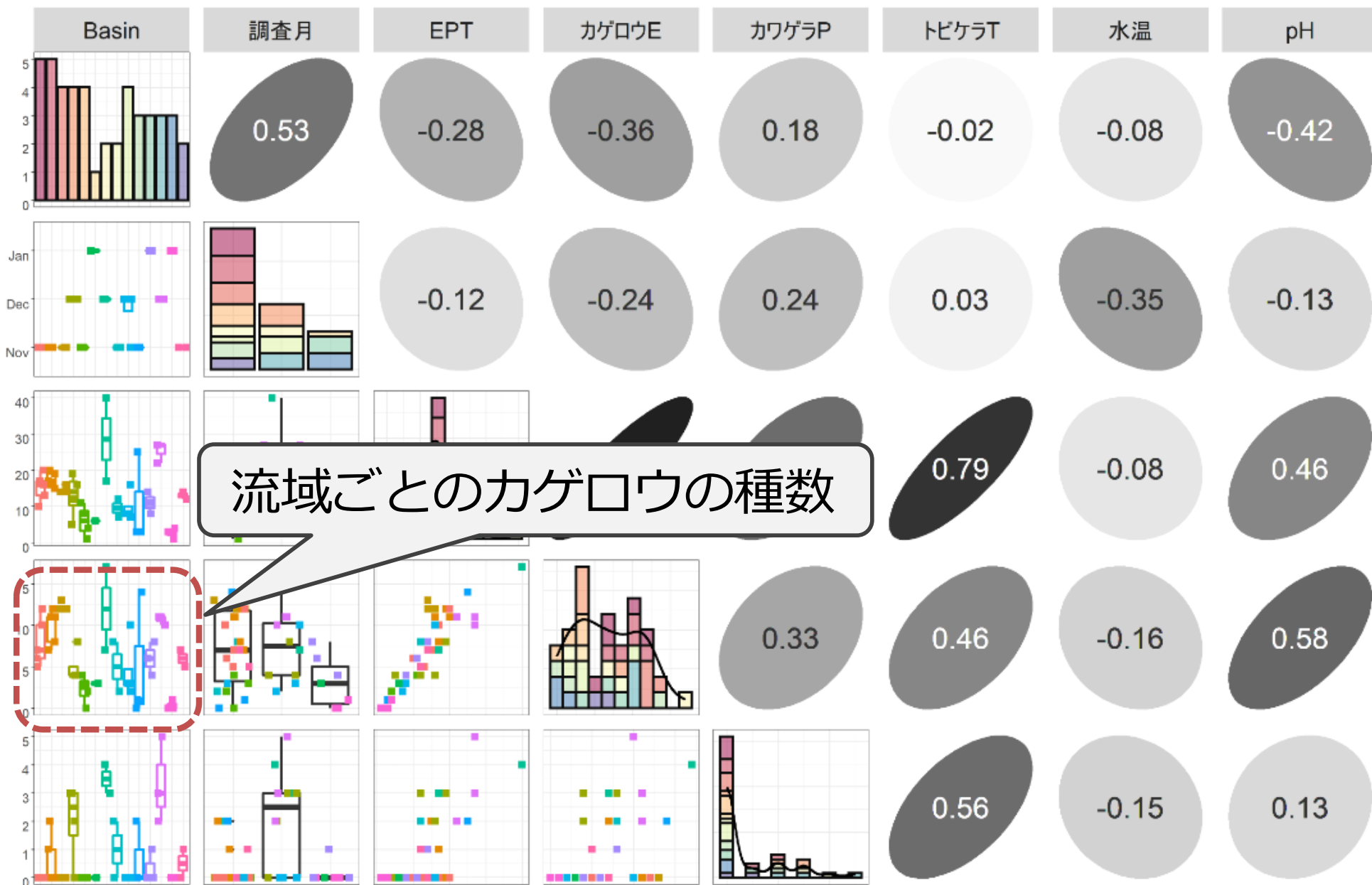


因果モデルの構築に向けて

- ペアプロットの作成



因果モデルの構築に向けて



因果モデルの構築に向けて

- 先行研究のレビューも忘れずに

御勢 久右衛門 (1960)

奈良県立里, 川股両鉱山及び和歌山県飯盛鉱山の廃水の河川生物に及ぼす影響
日本生態学会誌 10(1): 38-45

Nagell B. and Larshammar P. (1981)

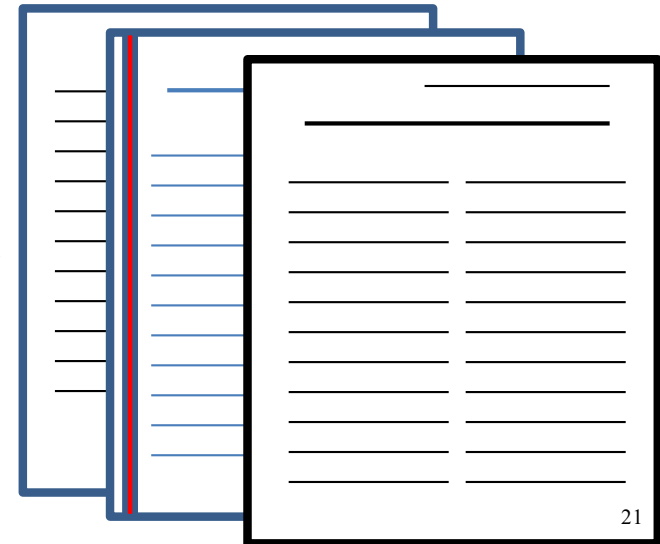
Critical Oxygen Demand in Plecoptera and Ephemeroptera Nymphs as Determined by Two Methods
Oikos 36: 75-82

Stark J.D., Banks J.E., and Vargas R. (2004)

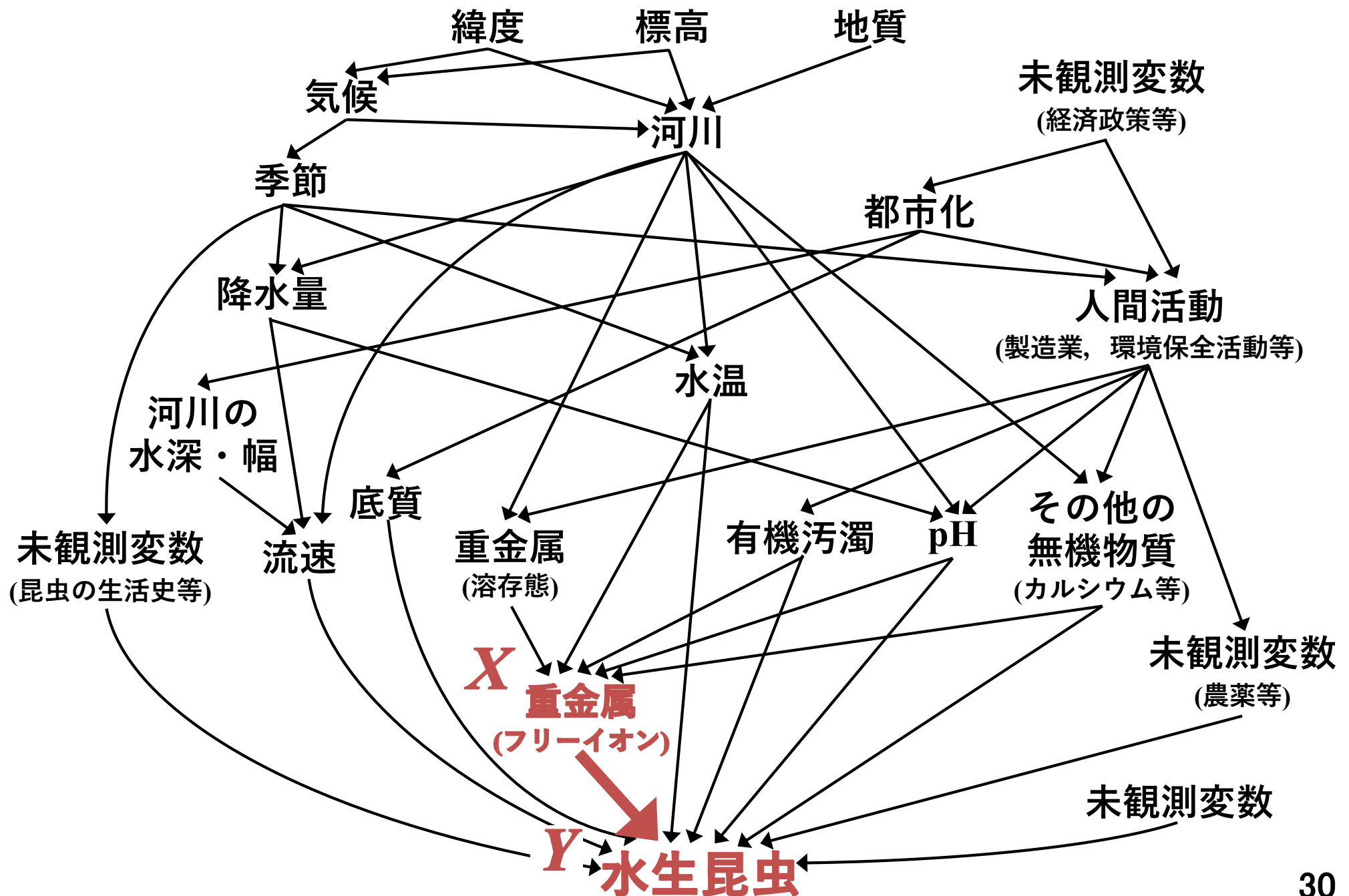
How risky is risk assessment: The role that life history strategies play in susceptibility of species to stress
The Proceedings of the National Academy of Sciences 101 732-736

■
■
■

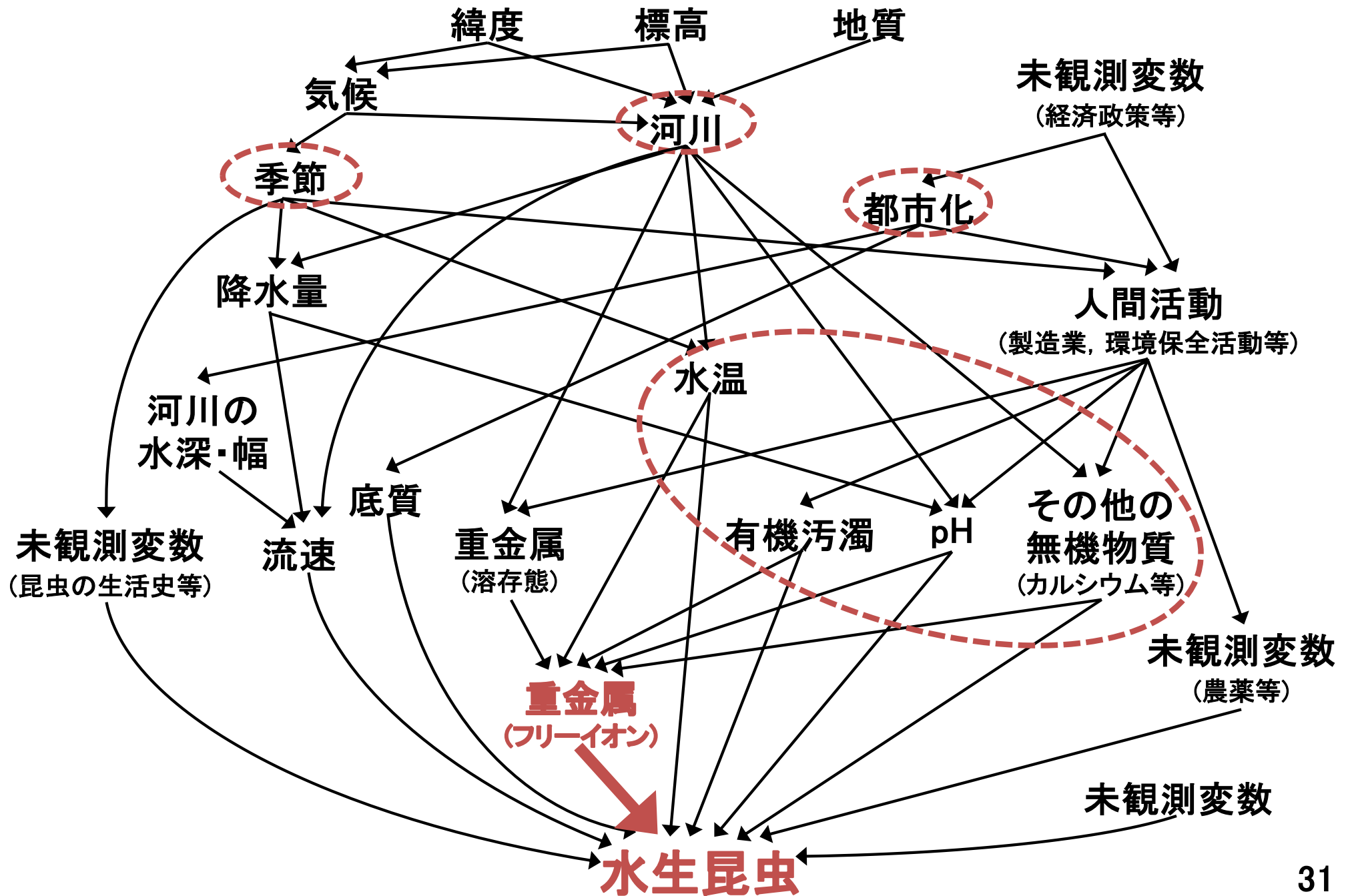
◆
◆
◆



因果ダイアグラム



主な交絡

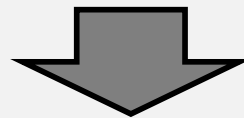


因果効果を推定するための共変量選択基準 (バイアスのない介入効果推定)

《バックドア基準》

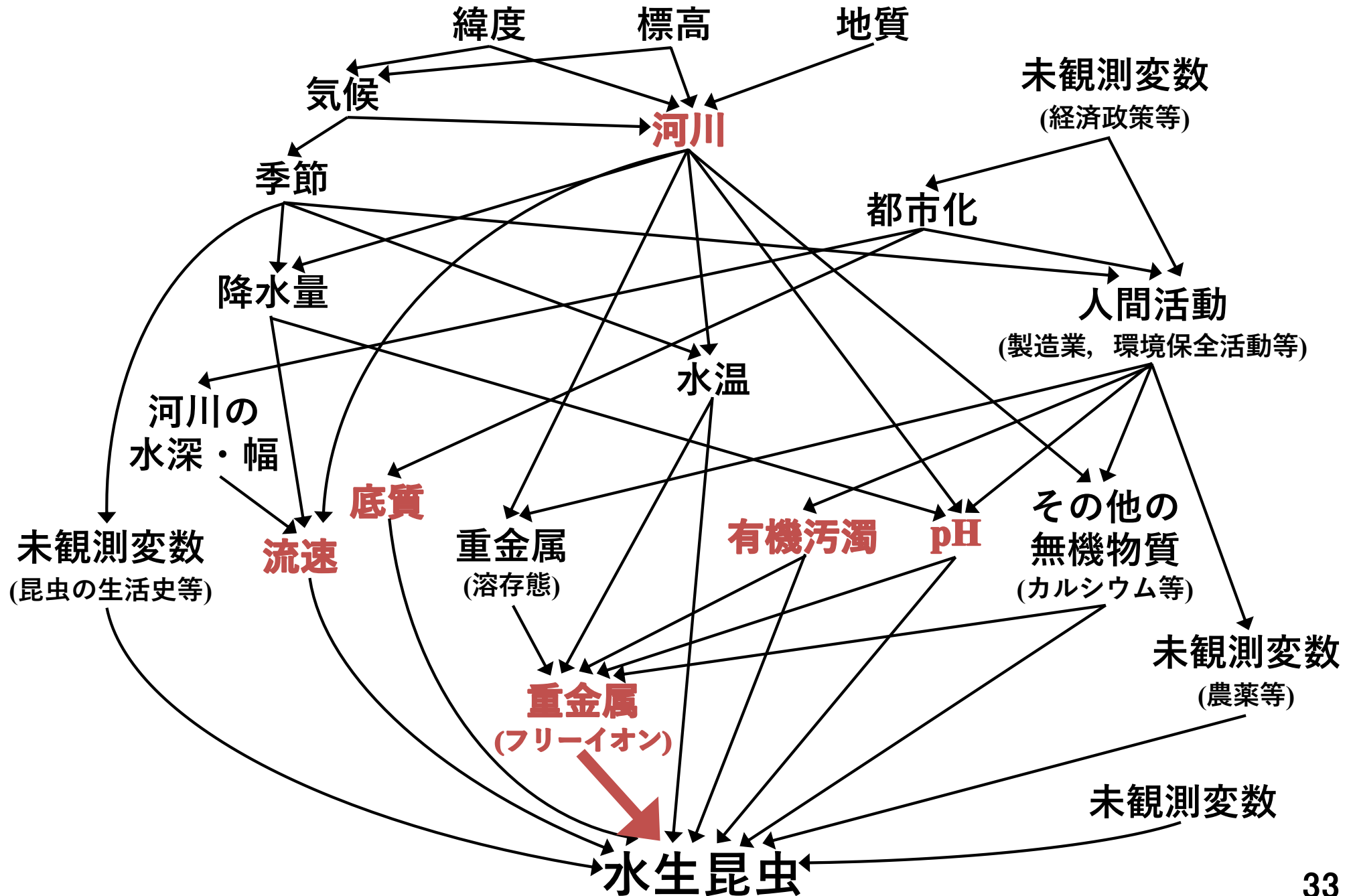
(Pearl 1993)

“Given an ordered pair of variables (X, Y) in a directed acyclic graph G , a set of variables Z satisfies the backdoor criterion relative to (X, Y) if no node in Z is a descendant of X , and Z blocks every path between X and Y that contains an arrow into X ”

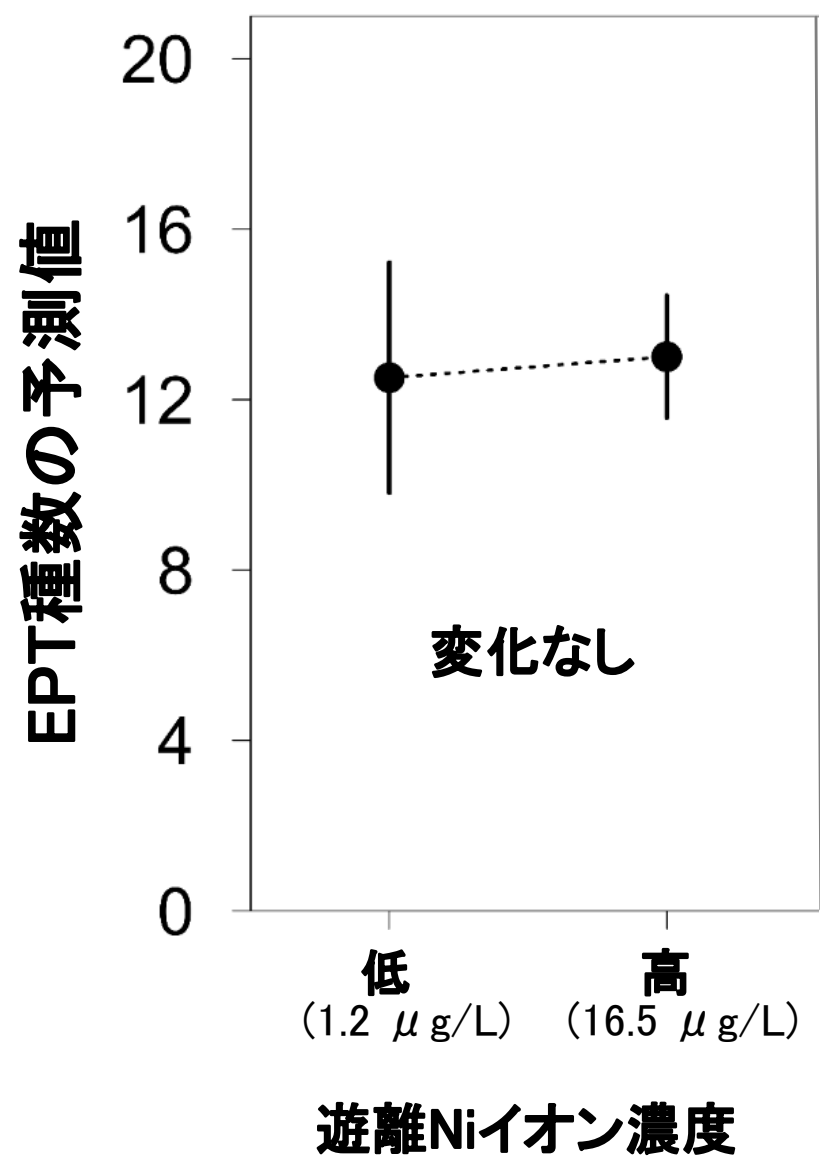


- (1) 処置 X と 結果 Y の共通の原因を入れる
- (2) 処置 X の中間変数はいれない

介入効果の推定値を得るための共変量セット

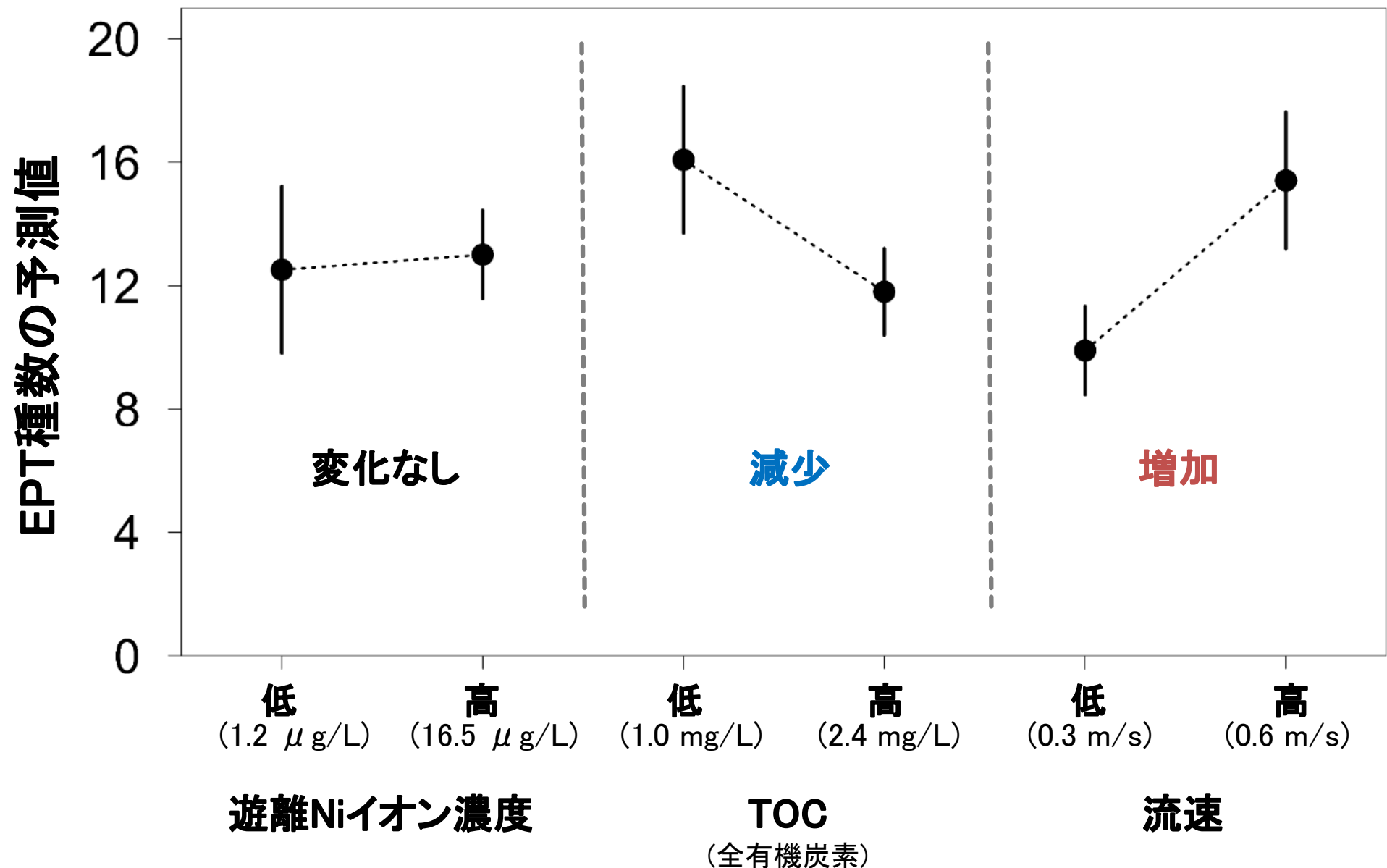


統計的因果推論によるEPT種数の予測値



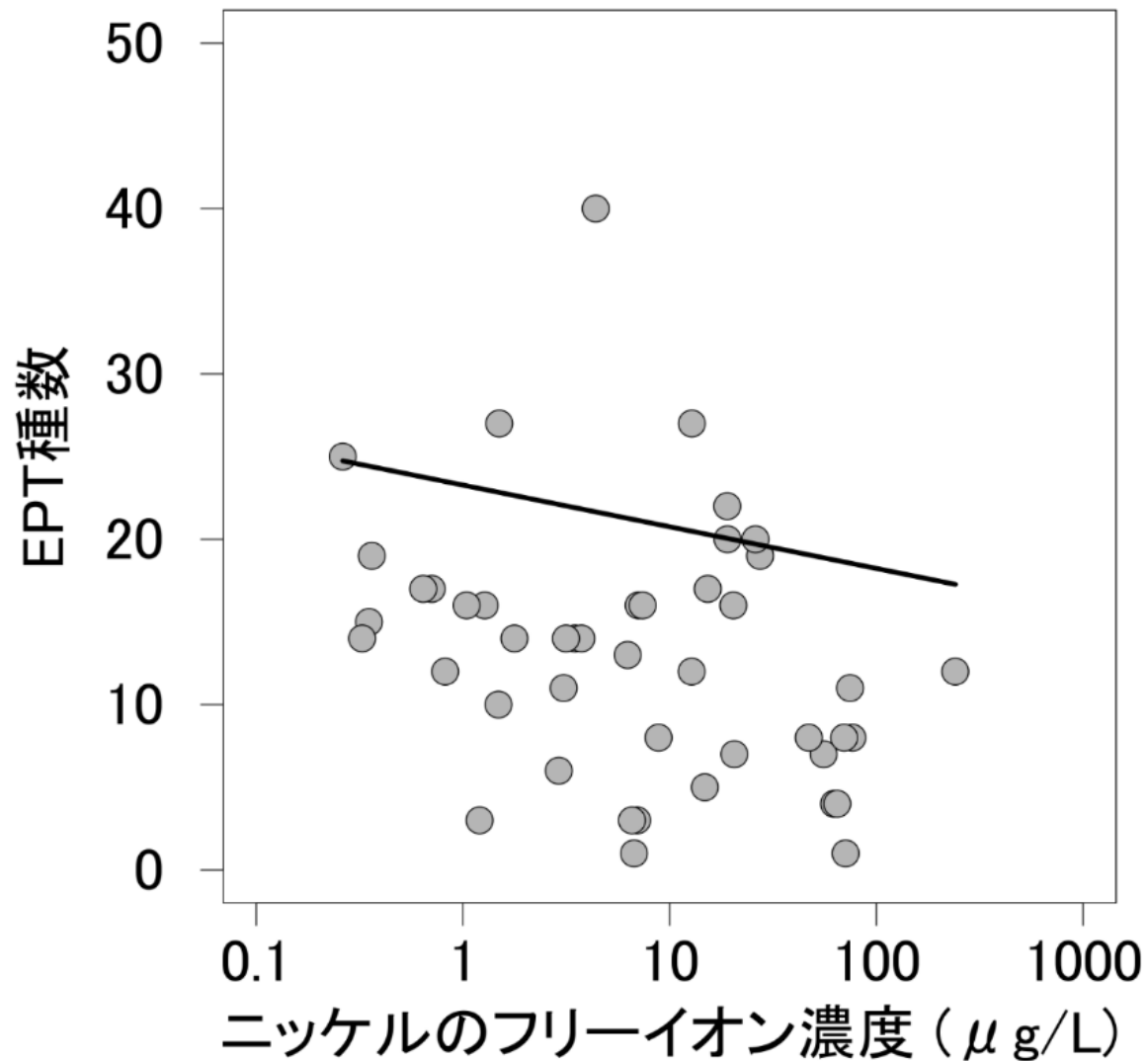
※「低」「高」にはそれぞれ、観測値の第一、第三四分位数を用いた

統計的因果推論によるEPT種数の予測値



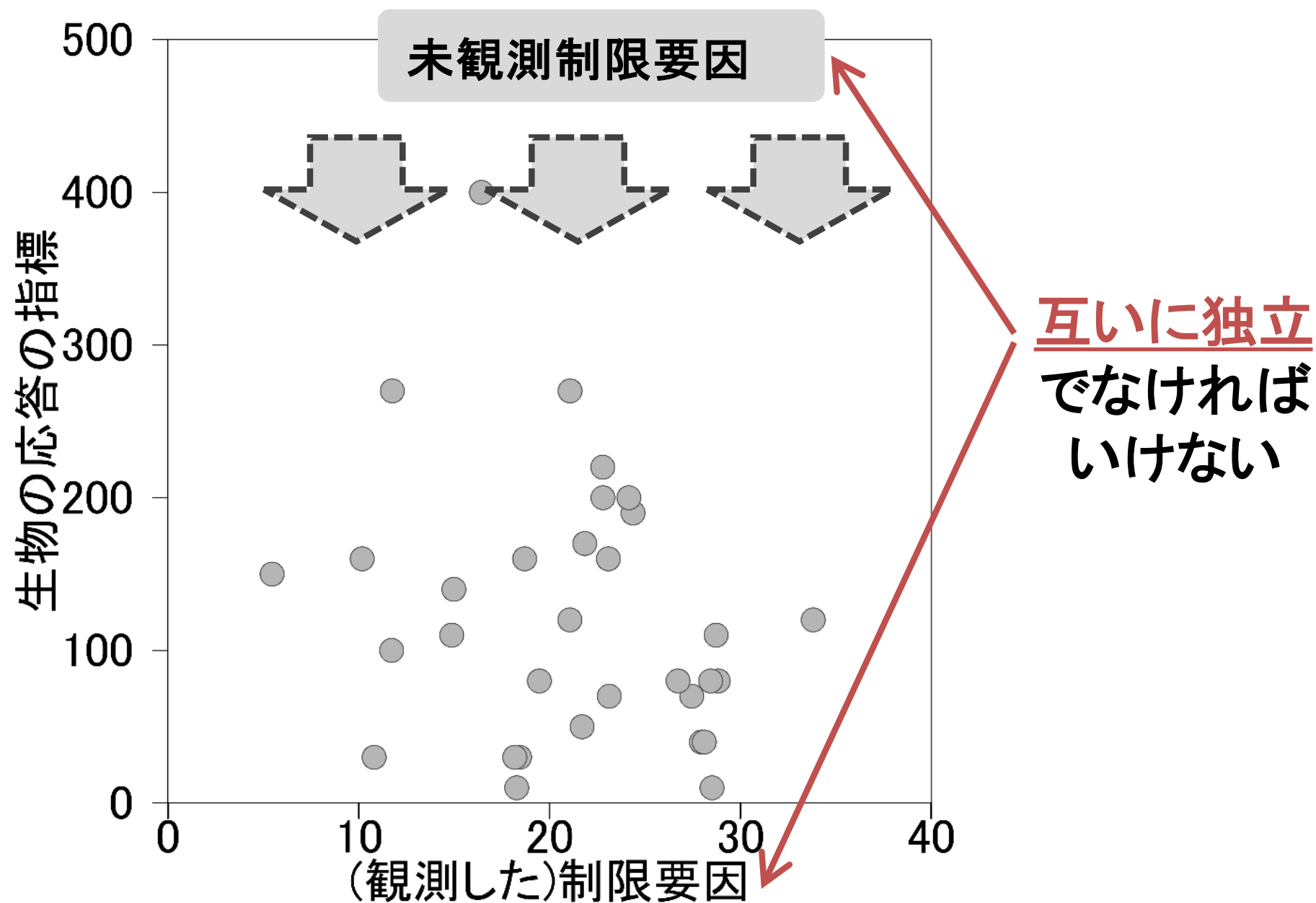
※「低」「高」にはそれぞれ、観測値の第一、第三四分位数を用いた

分位点回帰の結果



ニッケル濃度とEPT種数の間に
負の関連(相関)があるという結論は変わらない

分位点回帰が仮定していること



まとめ: 2つの研究から言えること言えないこと

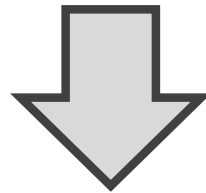
- 分位点回帰と統計的因果推論の結果が一致しなかったのは、
ニッケル濃度がTOCや流速と相関していたから

➡ 8府県レベルの広域空間スケールだったので、

「ニッケル濃度が高いところではTOCも高い(人間活動が活発)」

「ニッケル濃度が低いところでは川の流速が速い(上流部)」

が成り立ってしまった



ニッケル濃度とEPT種数の間に擬似相関が生じていた

2つの研究から言えること言えないこと

- 分位点回帰と統計的因果推論の結果が一致しなかったのは、ニッケル濃度がTOCや流速と相関していたから

➡ 8府県レベルの広域空間スケールだったので、

「ニッケル濃度が高いところではTOCも高い(人間活動が活発)」

「ニッケル濃度が低いところでは川の流速が速い(上流部)」

が成り立ってしまった

- ニッケルの生態影響を否定する結果ではない

➡ 野外において、ニッケルの効果量がTOCや流速の効果量と比較して小さいことが示されただけ

(しかもこれはEPTにおいてのみ。他の生物種については全くの未検討)

➡ 「ニッケル濃度を低減してもEPT種数は回復しない」ではなく、「回復するかどうか、このデータセットからは評価が困難」

今後の展開

- 他の生物種や、各摂食機能群の個体数に対する重金属濃度の介入効果の推定
- 野外における、複数の環境要因(種々の化学物質を含む)の効果量の相対的な比較
- 上記の研究に基づいた、野外での化学物質の生態影響評価に適切な生物指標の検討



より広域で収集された河川調査データセットの解析

➡ 8府県は日本をどれだけ代表してるか？

ご清聴ありがとうございました

本研究の河川調査は、環境省請負業務「平成28年度水生生物への影響が懸念される有害物質情報収集等調査業務」において、国立環境研究所 リスク評価科学事業連携オフィスと共同で実施いたしましたが、本発表内容は**環境省の公式見解ではありません**。

本発表の一部は、環境省環境研究総合推進費(5-2205)の助成を受けた研究に基づくものです。

Email: hiroyuki.yokomizo@nies.go.jp