

4D1102 H25終了課題成果報告会発表資料

生物多様性の機能評価のための 安定同位体指標に関する研究

(FY2011–FY2013; 予算額合計(直接経費+間接経費)112,249千円)

たやす
研究課題代表者 陀安一郎
京都大学生態学研究センター・准教授



2014.03.10

研究の目的と達成目標

- ▶ 生物多様性観測データの収集と、
その解析のためのデータの標準化が必要



- ▶ 各種安定同位体比を指標とした解析手法
 - 最新の手法であるアミノ酸窒素同位体分析法を用いて、従来法で不明確だった「栄養塩循環の変化」と「食物網構造の変化」を分離する
 - 食物網構造解析として、同位体情報より「食物網複雑性指標」を作成し、理論生態学的見地から食物網の変化の影響評価を行う
- ▶ 時空間的生物多様性情報としての提案
 - 既存の標本の活用法を提案する
 - 今後の生物多様性調査に同位体情報の活用法を提案する

生物のアミノ酸同位体指標の特徴

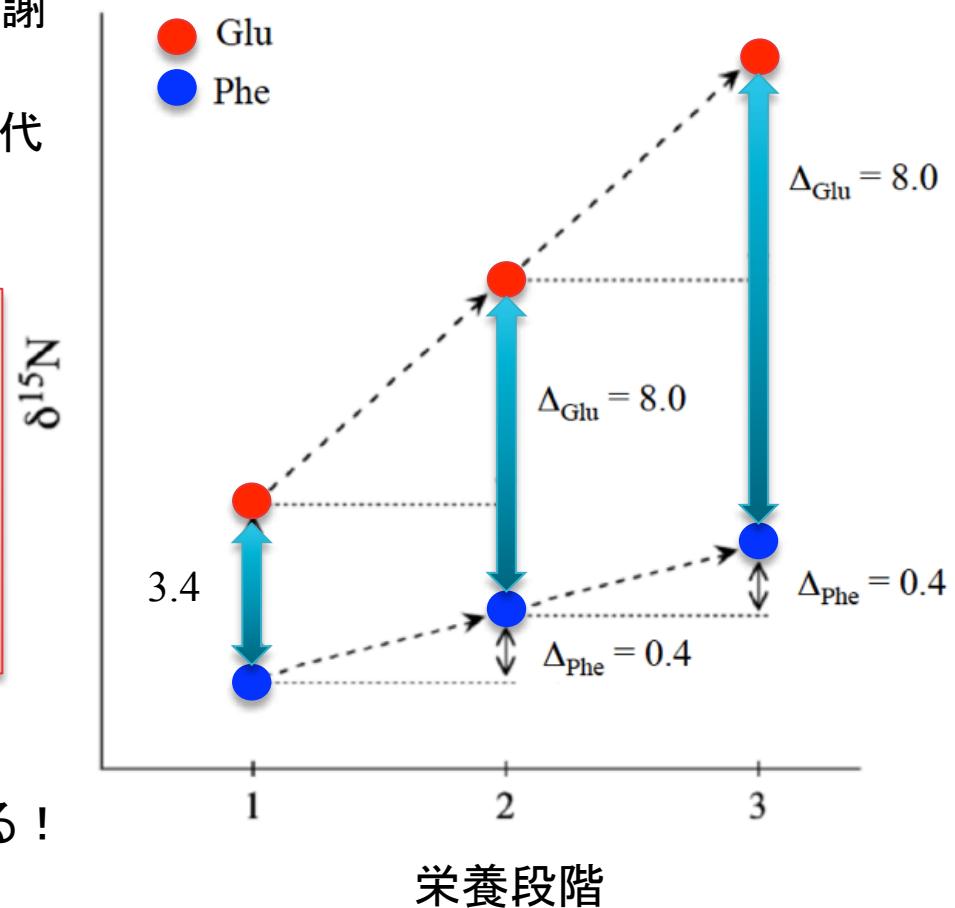
- ▶ 非必須アミノ酸である**グルタミン酸(Glu)**は代謝されるため、同位体分別(濃縮)が起る
- ▶ 必須アミノ酸である**フェニルアラニン(Phe)**は代謝されず、同位体分別がほとんど起らない

$$TP_{\text{アミノ酸}} = (\delta^{15}\text{N}_{\text{Glu}} - \delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}} + \beta) / 7.6 + 1$$

β は水域生産者で-3.4‰,
陸上C3植物で+8.4‰

食物網のどの位置にいる生物でも
「絶対栄養段階」がわかる

単体の標本からも栄養段階(TP)が推定出来る！

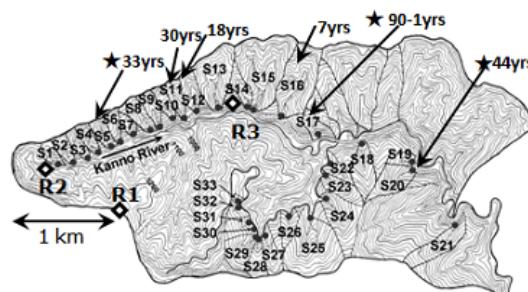


Chikaraishi et al. 2009

サブテーマの構成

サブテーマ(1)
京都大学・フィールド科学
教育研究センター
○徳地直子

「森林生態系管理が
河川生態系に及ぼす影響の研究」



研究サイト[空間軸]
京都大学・フィールド科学教育研究センター
和歌山研究林

サブテーマ(2)
東京大学・農学生命研究科
○大手信人

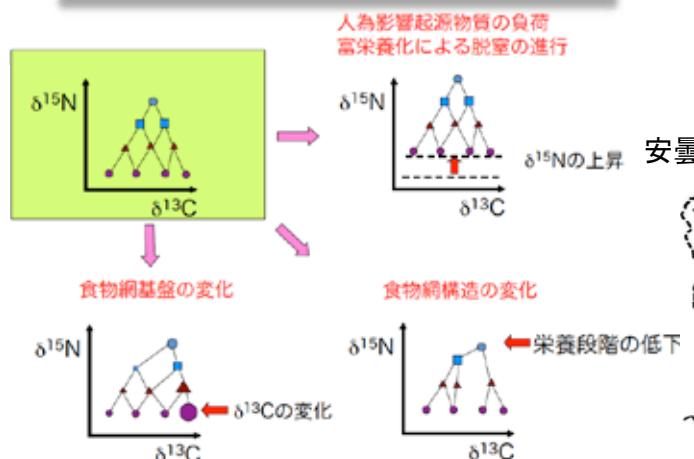
環境状態の解析
「集水域の栄養塩供給機構評価のための
安定同位体指標の開発」

安定同位体 栄養塩循環解析

サブテーマ(3)
京都大学・生態学研究センター
○陀安一郎・奥田昇

「安定同位体解析による
食物網構造解析技術の開発」

時空間的生態系多様性情報



研究サイト[時間軸]
琵琶湖集水域(生物標本)



研究サイト[空間軸]
琵琶湖集水域(野洲川・安曇川ほか)

安定同位体 食物網構造解析

サブテーマ(4)
龍谷大学・理工学部
○近藤倫生

理論生態学的解析
「安定同位体食物網情報を用いた
生態系評価」

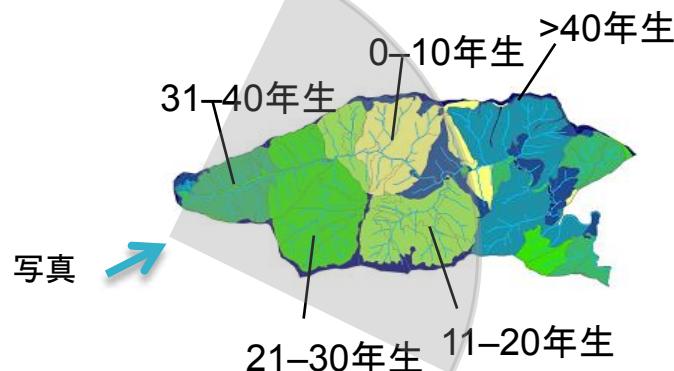
1 森林と河川の関係

(1) 森林生態系管理が河川生態系に及ぼす影響の研究[徳地直子(京都大学)]

集水域単位での施業(京大和歌山研究林)

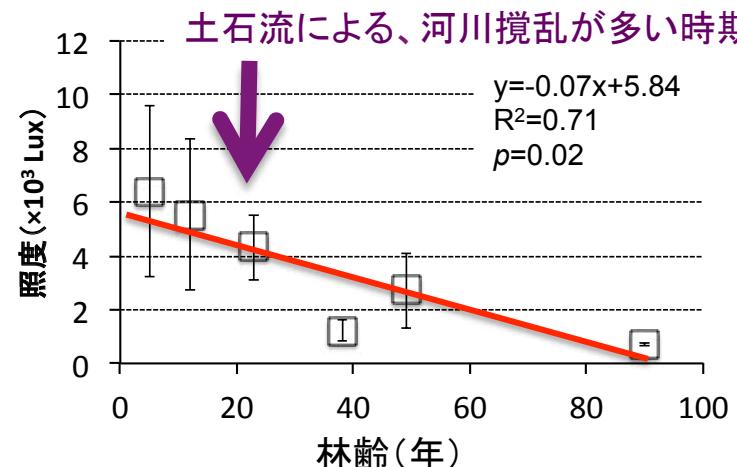
異なる人為影響レベル(スギ・ヒノキ人工林)

→攪乱からの時間軸を提供(1915年~)



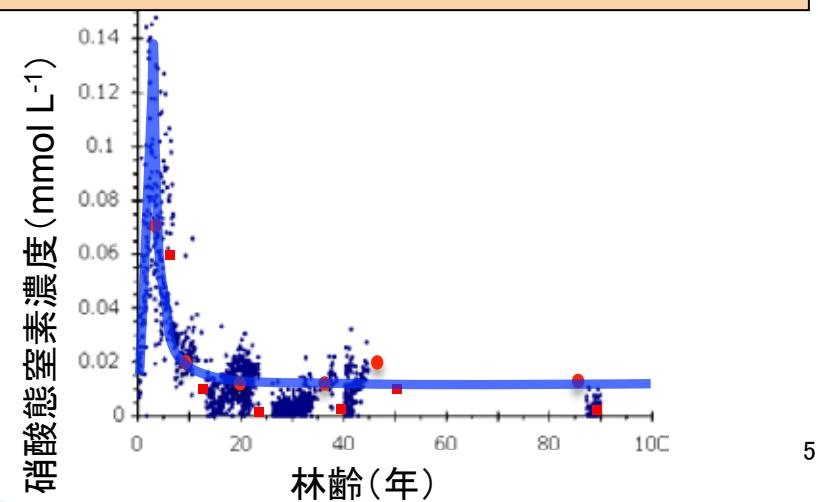
光条件

高齢林ほど平均照度は減少する



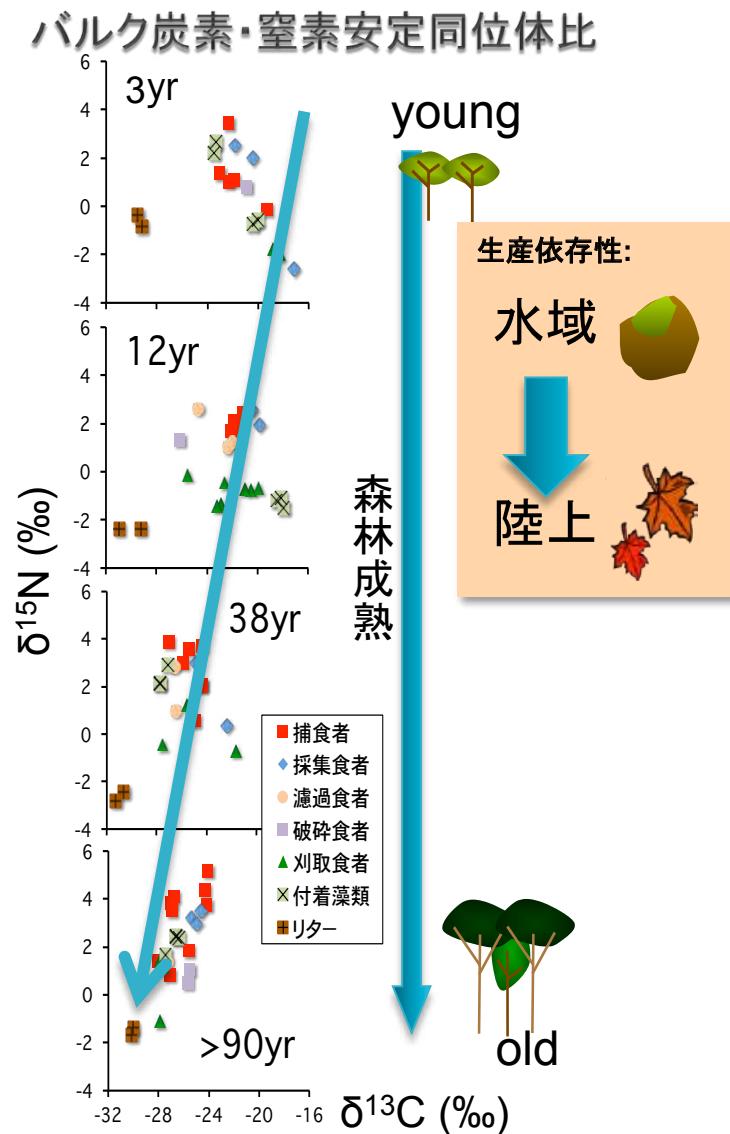
栄養塩条件

- NO_3^- 濃度は皆伐後3-4年生でピーク
- 10-15年で低下し、皆伐前の水準に

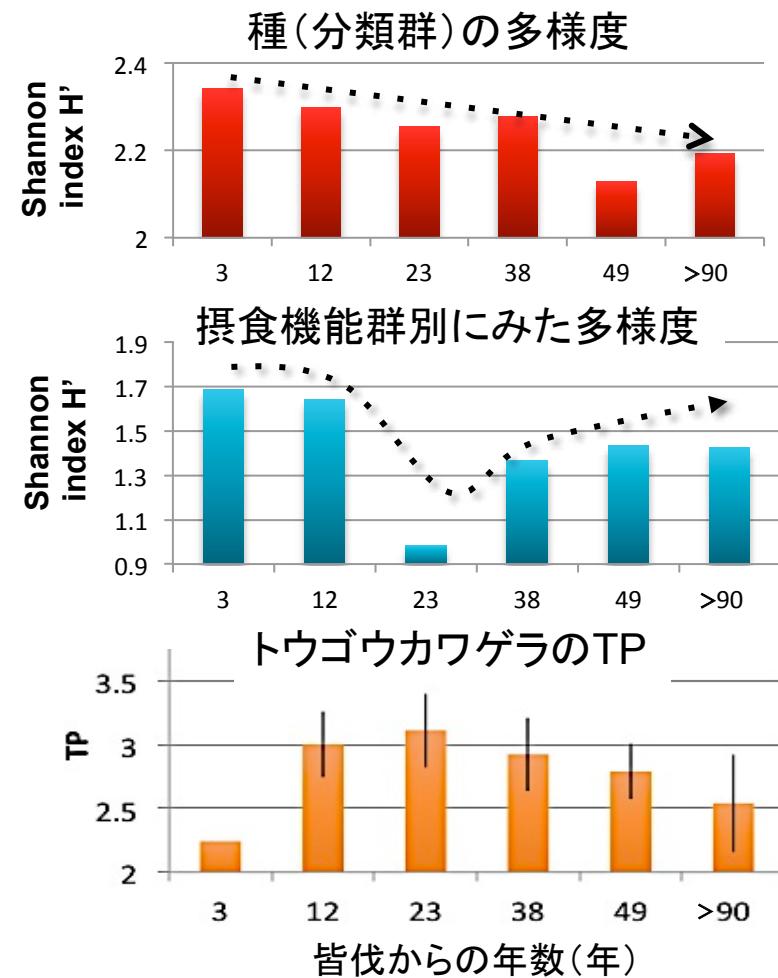


林齢の変化に伴う生物群集の変化(2011~2012, 4季節)

光の減衰とともに外部資源に依存



種(分類群)の多様性と、摂食機能群の多様性、各生物のTPの異なる挙動



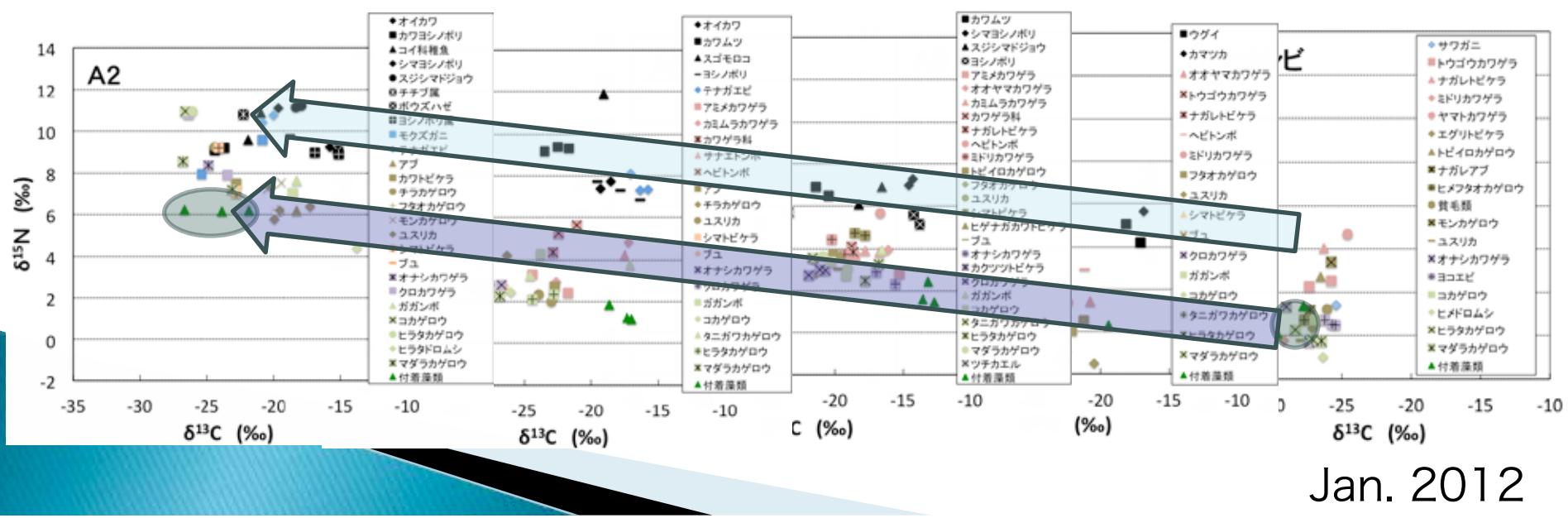
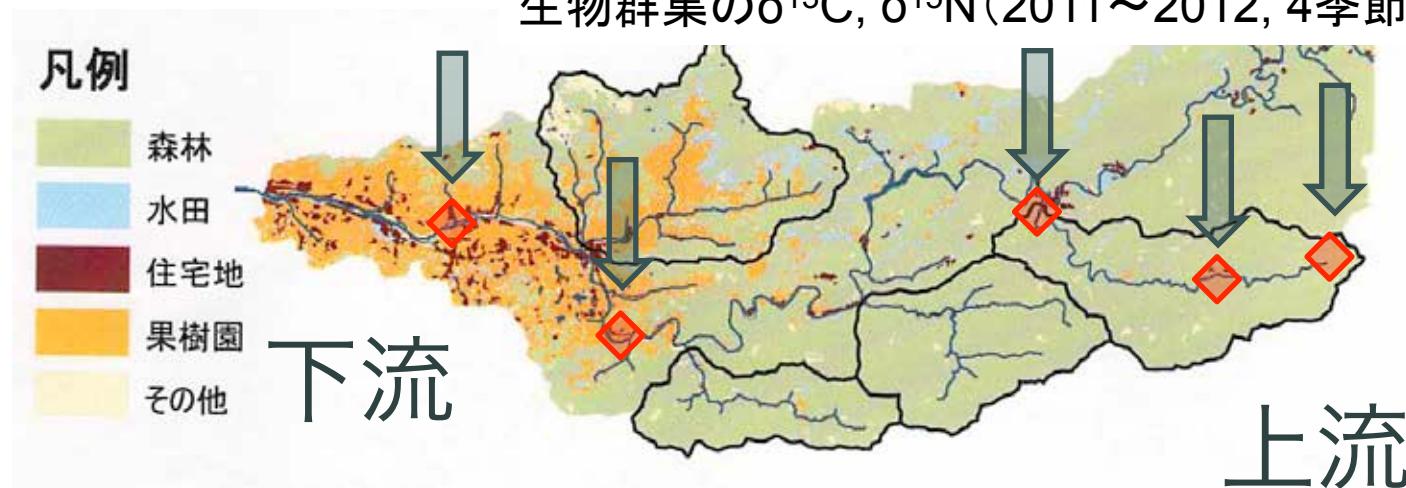
→ 生態系レベルの生物多様性情報には、種リストではわからない栄養関係情報が必要となる

2 河川流程と栄養塩

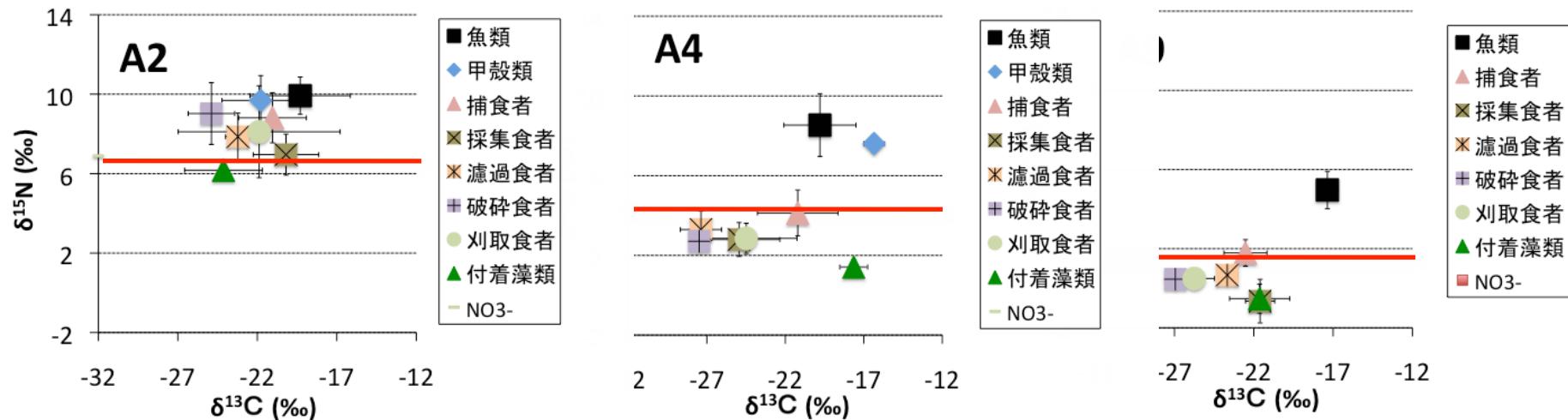
(2) 集水域の栄養塩供給機構評価のための安定同位体指標の開発

[大手信人(東京大学)]

有田川流域に沿った、
生物群集の $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ (2011~2012, 4季節)

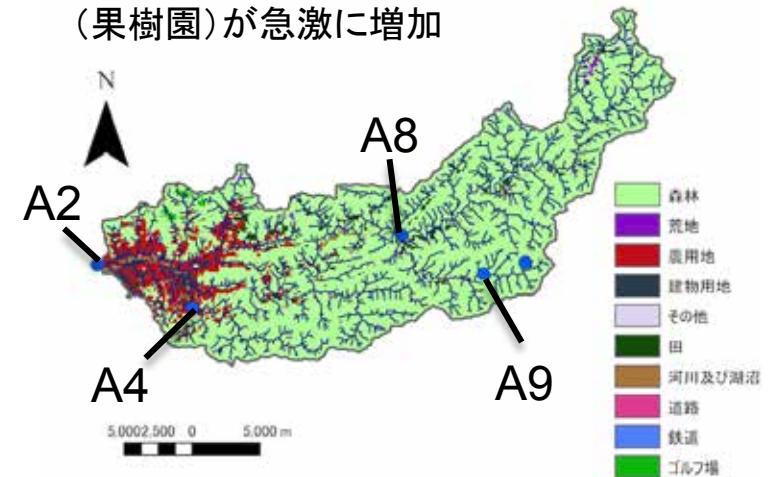
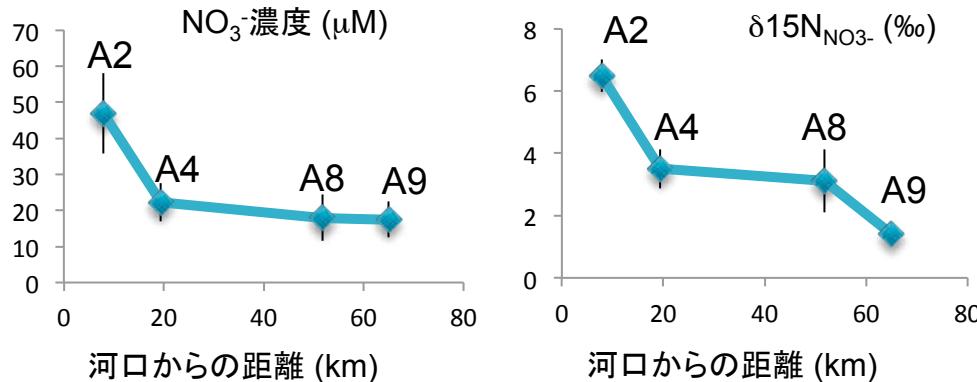


付着藻類の同位体比の上昇に従って、群集全体の同位体比が上昇



窒素負荷の情報は、
生物の体の窒素同位体比に記録されている

- A4より上流では、森林が優占
- A4より下流では水田以外の農用地（果樹園）が急激に増加



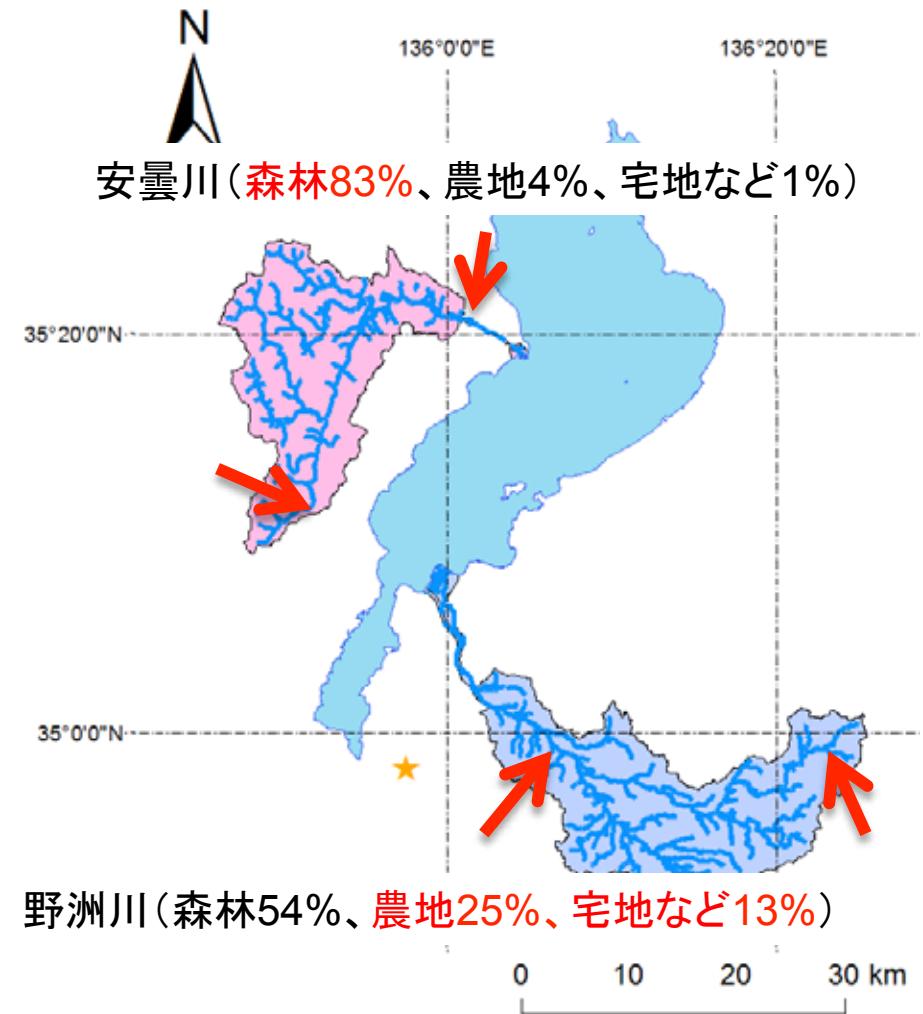
3 琵琶湖集水域(河川と琵琶湖)

(3) 安定同位体解析による食物網構造解析技術の開発

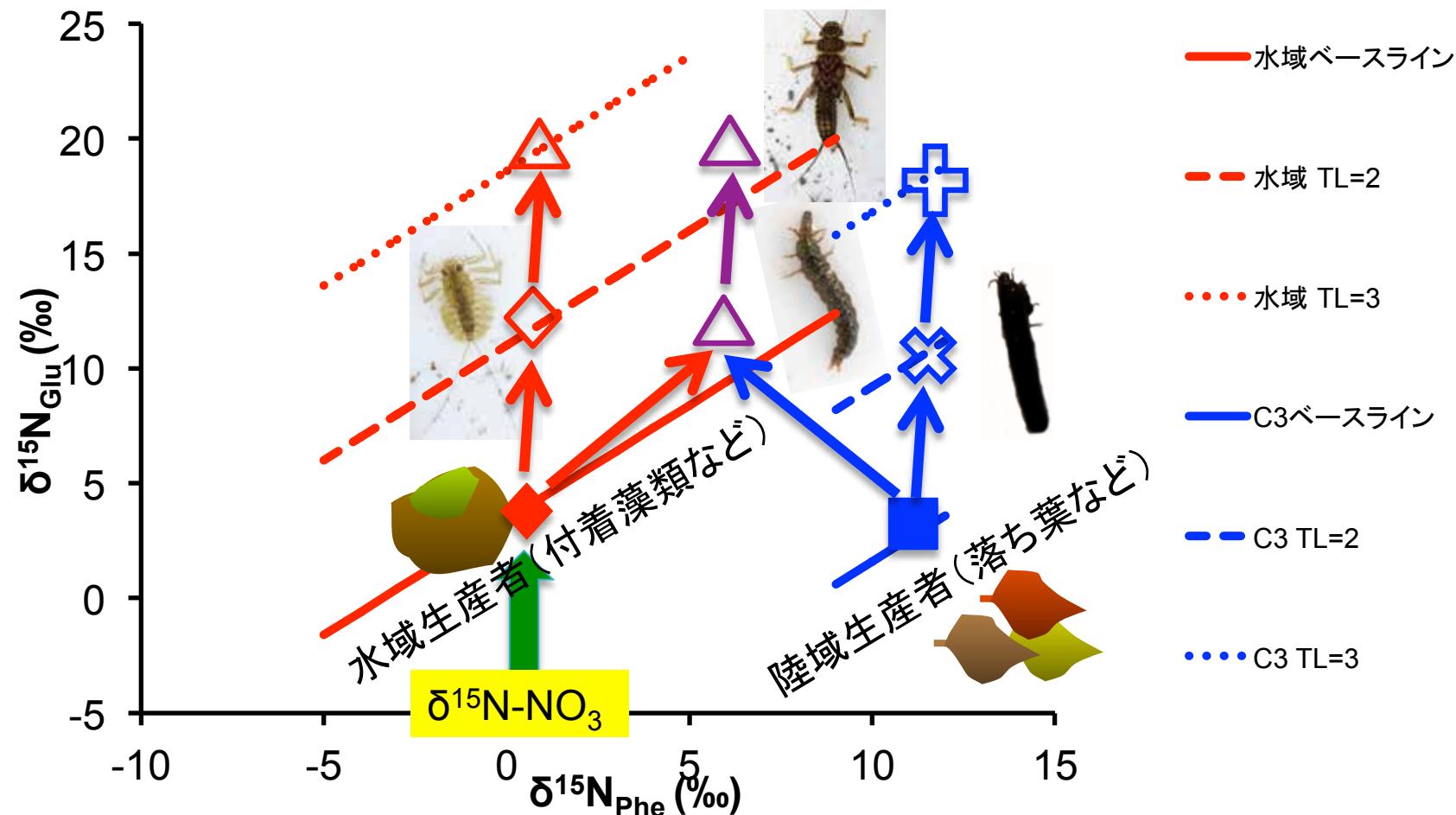
[陀安一郎・奥田 昇(京都大学)]

- ▶ 琵琶湖流入河川(野洲川・安曇川)、琵琶湖沿岸帯における比較研究
 - 野洲川流程18地点・安曇川流程11地点の調査
 - 野洲川・安曇川それぞれ上流・下流にてハビタット別集中調査

- ▶ 琵琶湖魚類相の標本分析
 - 1914年から現在までの標本試料分析による時系列解析(ここでは、特にハスの成果を発表)



本研究によって世界で初めて明らかにされた、 河川生態系食物網における $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$ - $\delta^{15}\text{N}_{\text{Glu}}$ プロットのシェマ

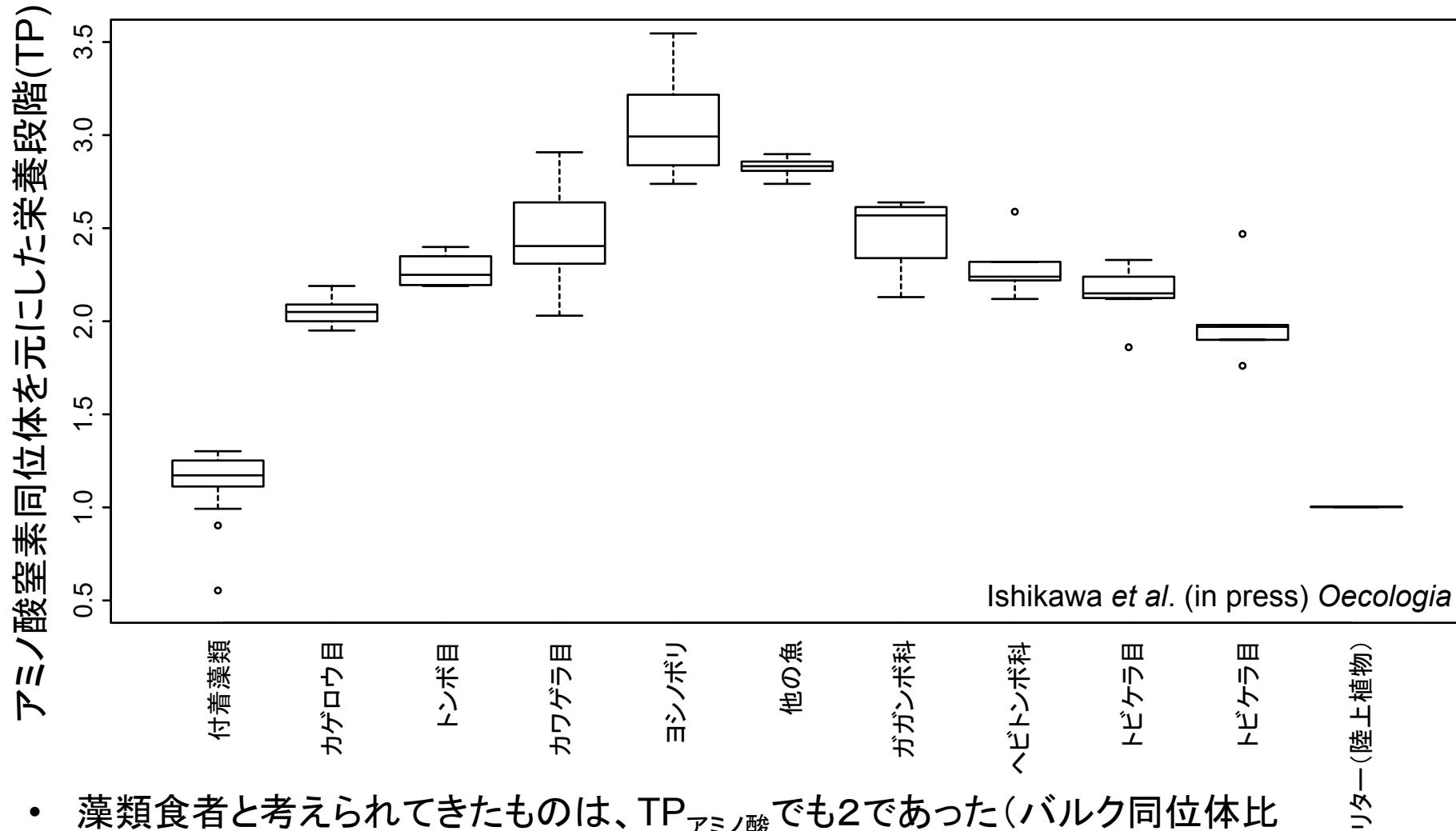


$$\text{TP}_{\text{アミノ酸}} = (\delta^{15}\text{N}_{\text{Glu}} - \delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}} + \beta) / 7.6 + 1$$

β は水域生産者で-3.4%, 陸上C3植物で+8.4%

水域・陸域の混合モデルをたてることで、各生物のアミノ酸窒素同位体比のみで食物網を描くことができる。

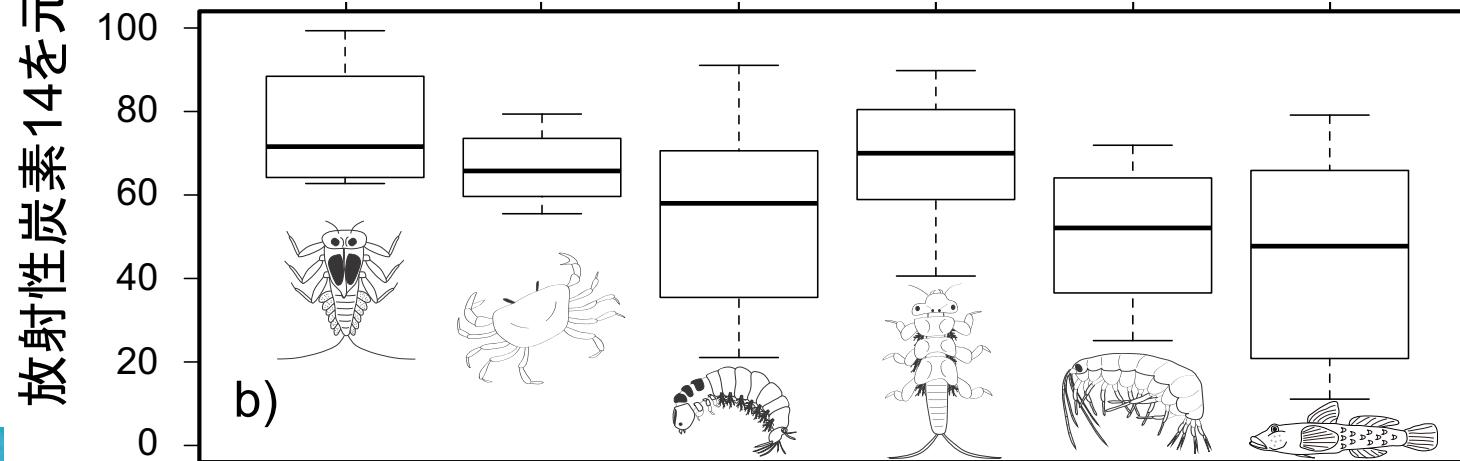
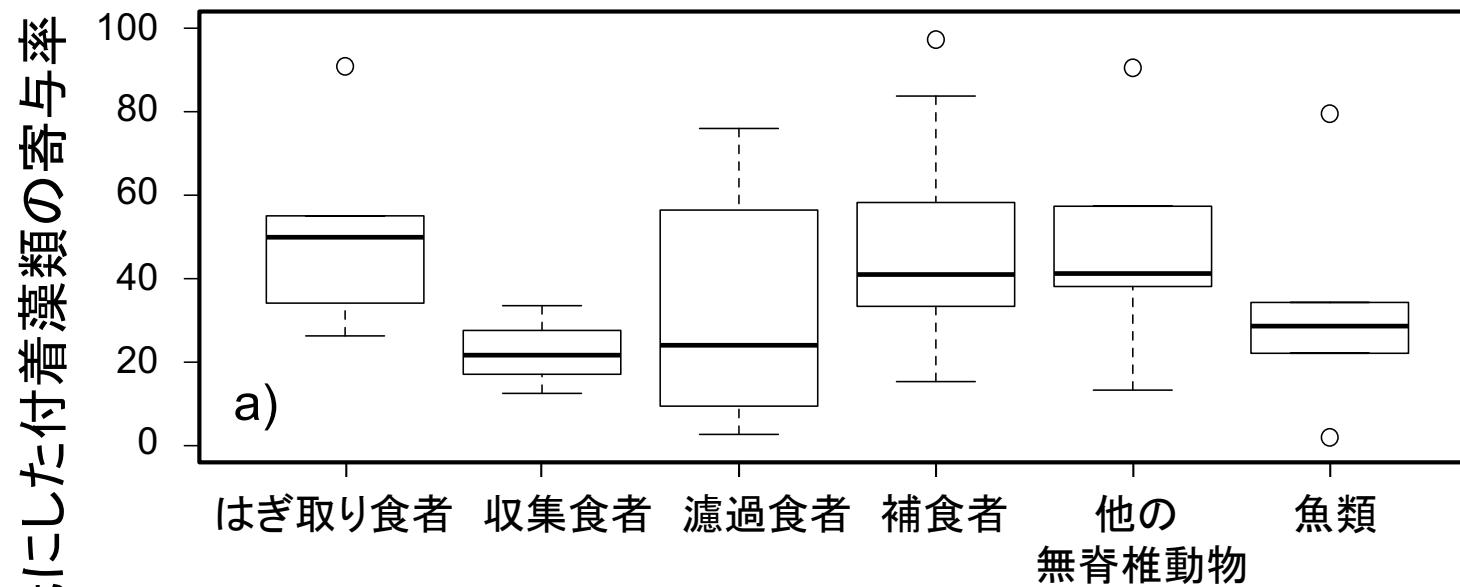
栄養段階(アミノ酸窒素同位体比による)



- 藻類食者と考えられてきたものは、 $TP_{\text{アミノ酸}}$ でも2であった(バルク同位体比では、しばしば推定が難しかった)。
- 捕食者と考えられてきたものうち、一部の種に関しては、考えられてきたよりも雑食性が高い可能性がある。

→「食物網構造」としての、構造・機能が異なる可能性がある。

放射性炭素 $14(^{14}\text{C})$ 分析を元にした、 内部生産(藻類)と外部生産(植物リター)の分離法の開発

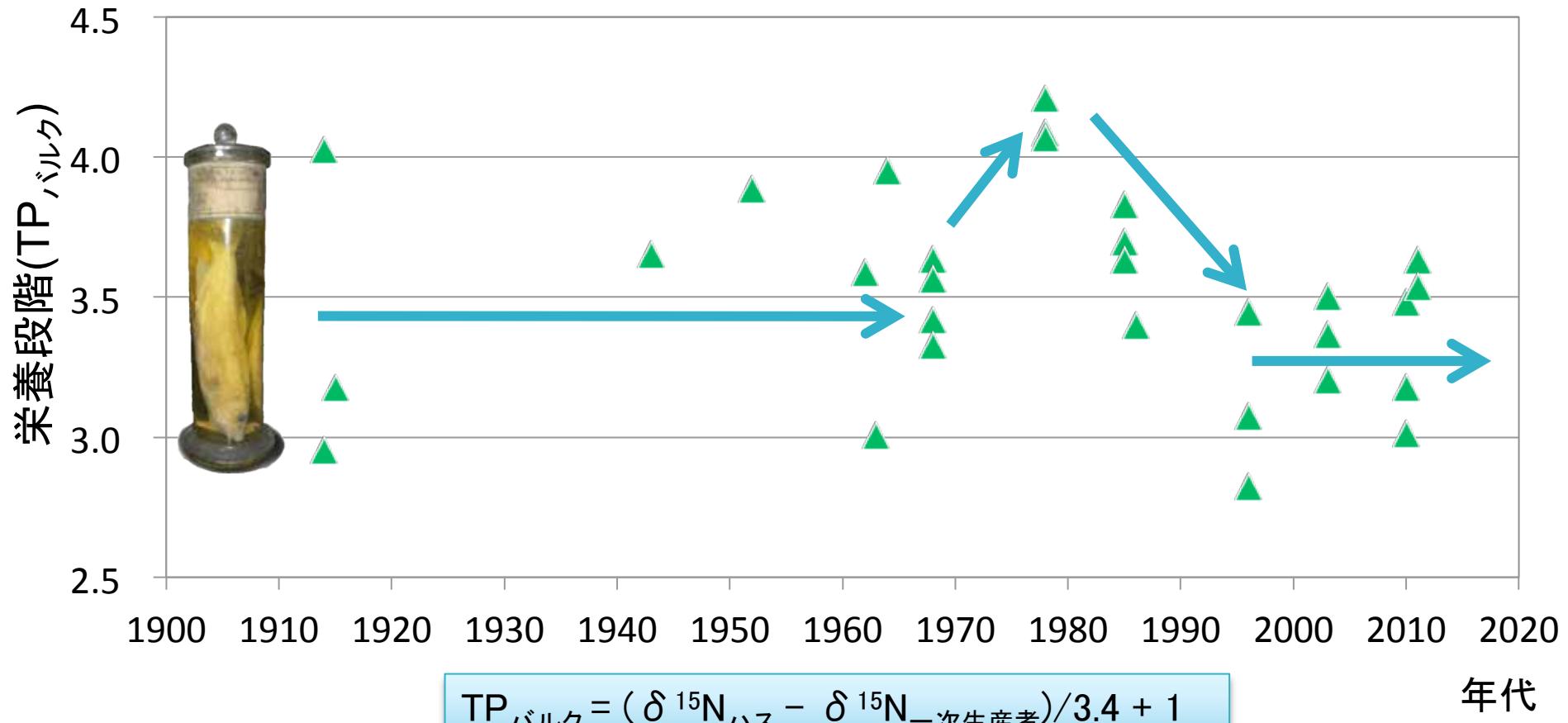


a)上流、b)下流、Ishikawa et al. (in press) *Ecology*

琵琶湖100年史:高次補食者ハスの栄養段階(TP_{バルク})

※過去の一次生産者の $\delta^{15}\text{N}$ 値を仮定することが必要。

ここでは、湖底堆積物を利用(Ogawa et al. 2001)



1910～1960年代: ほぼ横ばい(約3.0～4.0)

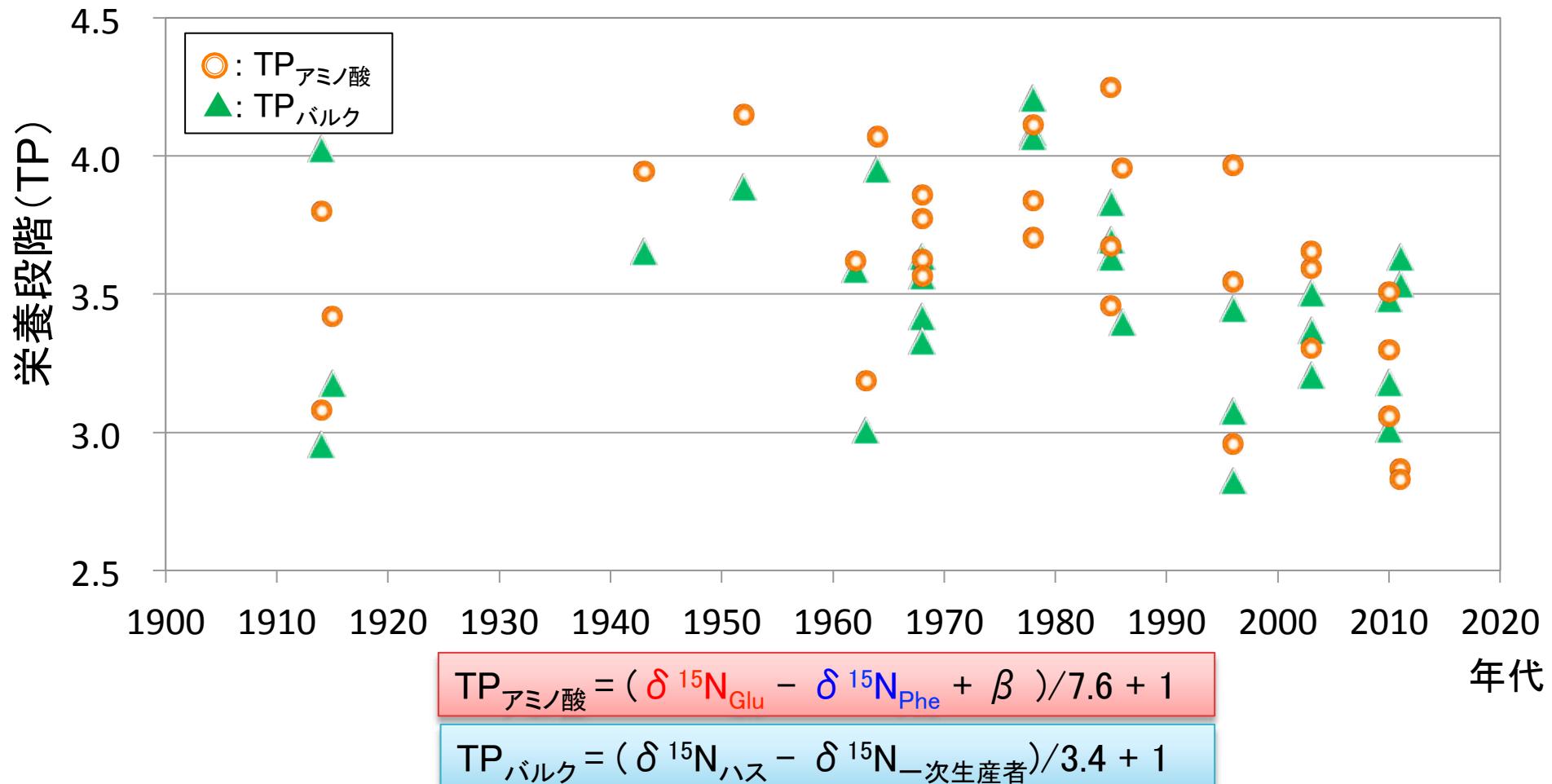
1970年代 : 上昇(<4.0)

1980～2010年代: 下降～横ばい(約3.0～3.5)

(Okuda et al. 2012)

アミノ酸窒素同位体比を用いたハスの栄養段階(TP_{アミノ酸})

※魚類標本試料のみによる推定

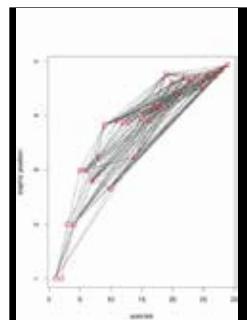


$\delta^{15}\text{N}_{\text{アミノ酸}}$ に基づく栄養段階(TP_{アミノ酸})の変遷は、 $\delta^{15}\text{N}_{\text{バルク}}$ に基づくTP_{バルク}とほぼ一致

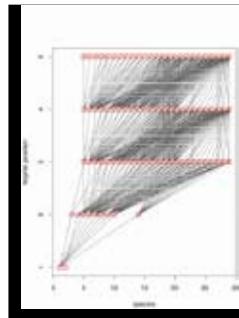
→ $\delta^{15}\text{N}_{\text{アミノ酸}}$ 測定により、高次消費者のみを用いて、栄養段階の変遷を捉える事が可能

4 理論的検討：「食物網複雑性指標」の提案

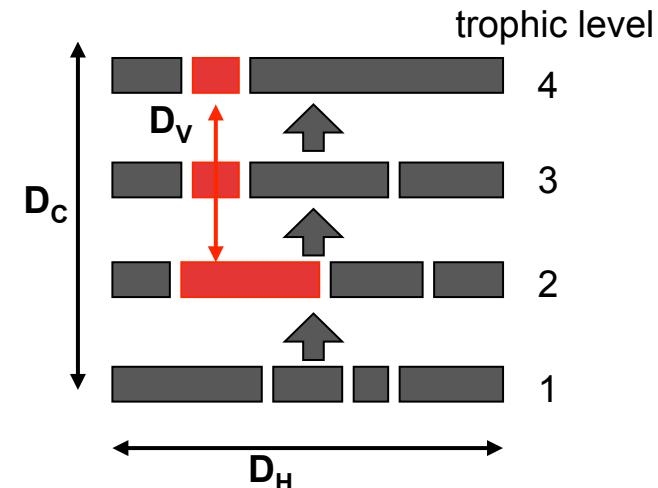
(4) 安定同位体食物網情報を用いた生態系評価



アンフォールディング



[近藤倫生(龍谷大学)]



- 物質フローネットワークから、生物種*i*のバイオマスのうちどれだけの部分がどの栄養段階に属するかを知ることができる
- 複雑な食物網のネットワークを「栄養ピラミッド」に変換できる
- 各栄養段階の総バイオマス [$B^{(x)}$] は、栄養段階 x に属する様々な生物種のバイオマス($B_i^{(x)}$)の総計

Trophic network unfolding(Higashi et al. 1989)を発展

$$H' = - \sum_{i=1}^S \left(\frac{B_i}{B_T} \log \frac{B_i}{B_T} \right)$$

Shannon の多様性指数

$$D_V = \sum_{i=1}^S \frac{B_i}{B_T} \left(- \sum_{k=1}^{\infty} \frac{B_i^{(k)}}{B_i} \log \frac{B_i^{(k)}}{B_i} \right)$$

1種が所属する栄養段階の多様性

$$H' = D_H + (D_C - D_V)$$

B_i : 種*i*のバイオマス

$B_i^{(x)}$: 栄養段階 x に属する種*i*のバイオマス

$B^{(x)}$: 栄養段階 x に属する総バイオマス

$$D_H = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{B^{(k)}}{B_T} \left(- \sum_{i=1}^S \frac{B_i^{(k)}}{B^{(k)}} \log \frac{B_i^{(k)}}{B^{(k)}} \right)$$

栄養段階あたりの種の多様性

$$D_C = - \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{B^{(k)}}{B_T} \log \frac{B^{(k)}}{B_T} \right)$$

栄養段階の数の多様性

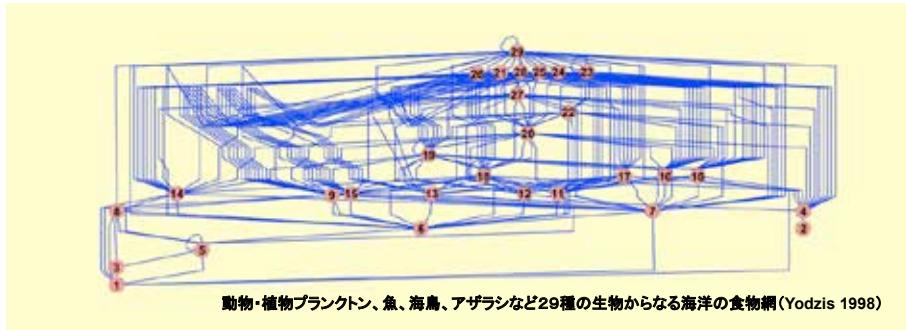
B_T : 生態系全体の総バイオマス

Shannonの多様性指数は3つの要素に分解できる

食物網複雑性指標の生態学的意味付け

アンフォールドのアイデアを動的モデルへと拡張→定常状態における複雑性-生態系機能関係を調べる

$$\frac{dB_i^{(x)}}{dt} = -B_i^{(x)} \left\{ t_i^{const} + s_0 B_i S_i \right\} + B_i Q B_i \frac{\sum_k \alpha_{ik} (B_k^{(x-1)} B_k^{n-1})}{H_i + \sum_k \alpha_{ik} B_k^n + \alpha_{iE} B_{E(i)}^n} + B_i Q B_i \frac{\alpha_{iE} (B_{E(i)}^{(x-1)} B_{E(i)}^{n-1})}{H_i + \sum_k \alpha_{ik} B_k^n + \alpha_{iE} B_{E(i)}^n} - \sum_k B_k \frac{(1+\delta) Q B_k \alpha_{ki} (B_i^{(x)} B_i^{n-1})}{H_k + \sum_j \alpha_{kj} B_j^n + \alpha_{kE} B_{E(k)}^n}$$



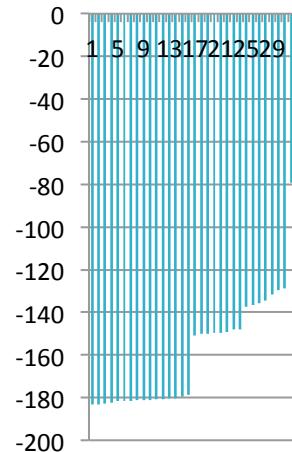
一般化線形モデルによるAICを利用したモデル選択

$$L_f = [\text{種数}] + [\text{リンク数}] + [\text{シャノン多様性指数 } H']$$

$$L_f = [\text{種数}] + [\text{リンク数}] + [D_V] + [D_H] + [D_C]$$

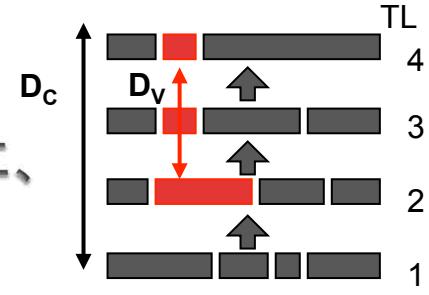
AIC

- 種数・リンク数・ H' ・複雑性指標によって栄養転換効率を予測するモデルの選択
- Yodzis (1998)によるベンゲラ湾食物網よりランダムに作成した多数の群集モデルを利用
- 最もよいモデル ($AIC = -183.3$) は $L_f = 3.10 D_V - 0.28 D_H - 0.25 D_C$
- D_V の正の効果のみ有意
- 40モデル中トップ16はすべて有意な D_V の正効果, D_H ・ D_C は常に負
- Shannonの多様性指数によるモデルは成績が悪い ($AIC = -138.7$)



ベンゲラ湾食物網モデル解析より→高い D_V は栄養転換効率を高める

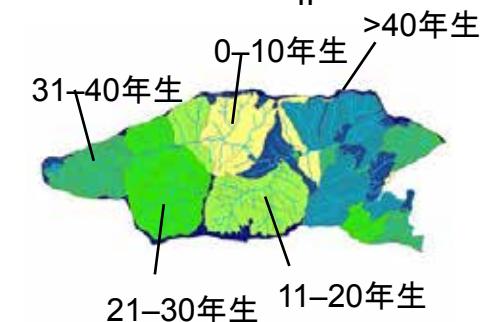
5「食物網複雑性指標」の実際の食物網への適用
全サブテーマが連携して、得られた安定同位体比のデータを元に、「食物網複雑性指標」に基づく食物網構造の評価を行った。



A. 三興・和歌山研究林(林齢に沿った群集変化)

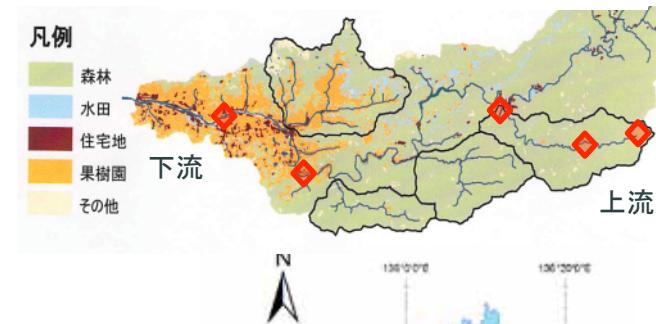
地滑り等の搅乱が生じやすい林齢(23年生):

- ・(捕食者)/(植食者)のバイオマス比が上昇 → 生産構造の変化
- ・ D_H 、 D_V の低下



B. 有田川(土地利用の流程変化に伴う群集変化)

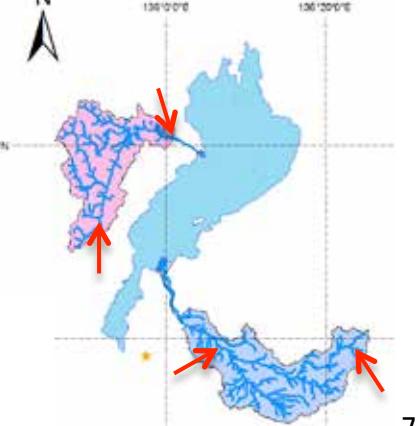
- ・サイトや季節によって摂食機能群の相対頻度は変動
- ・サイトや季節によって複雑性指標はほとんど変化しない
- ・ H' と D_H 、 D_V と D_C は似た挙動を示す



C. 野洲川・安曇川(サイト間・季節間での群集変化)

- ・ H' と D_H 、 D_V と D_C は似た挙動を示す
- ・ D_V と D_C の極端な増加 → 捕食者のバイオマス比の急増を反映

→「食物網複雑性指標」により、従来の指標(Shannonの多様性指数 H' 、摂食機能群の組成比等)では捉えられなかった構造を指標可能



研究成果の発信

原著論文など29編

- ▶ Ecology, Oecologia, Science, Ecology Letters, Ecological Researchなど査読あり17編
- ▶ その他12編

学会発表など65件

- ▶ ASLO (Association for the Sciences of Limnology and Oceanography), 2012年7月11日, Otsu, SS42 “New Frontiers of Isotope Tools for Biogeochemistry, Ecology and Environmental Sciences” (Organized by Tayasu, Ohkouchi, Schubert, and McCarthy) セッション提案:世界から32演題の発表
- ▶ 日本生態学会広島大会シンポジウム, 2014年3月15日, 広島, S10 “Use of various isotope tools in watershed ecology” (Organized by Tayasu) 4D-1102研究成果を発表するとともに、世界的な研究者であるProf. M.E. Power(UC Berkley)とDr. J.C. Finlay(Univ. Minnesota)を呼んで議論を深める

一般公開、マスコミ報道など15件

- ▶ 2011年8月、2013年8月 滋賀県立彦根東高校(SSH)
- ▶ 2012年3月 日本生態学会公開講演会、参加者325名
 - 陀安一郎:企画・司会、奥田昇:発表「水でつながる人の暮らしと琵琶湖の生物多様性」
- ▶ 2013年11月 京都大學生態学研究センター一般公開、参加者61名
 - 奥田昇「びわ湖がつなぐ生き物と文化の多様性」

主な成果(科学的・技術的意義)

- ▶ 安定同位体比を用いた生態系レベルの**生物多様性観測**
データ収集手法の確立
 - 炭素・窒素安定同位体比($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$)に加え、放射性炭素 $14(^{14}\text{C})$ やアミノ酸窒素同位体比情報($\delta^{15}\text{N}$, アミノ酸栄養段階TP_{アミノ酸})を加えた精密解析: **特に河川生態系で初の適用**
- ▶ 安定同位体比から得られる情報を用いた、**生物多様性情報解析手法**の確立
 - 「**食物網複雑性指標**」: 同位体情報を用いたTrophic network unfolding 解析を発展させた指標: Shannonの多様性指数を要素に分解

$$H' = D_H + (D_C - D_V)$$



主な成果(社会・行政的意義)

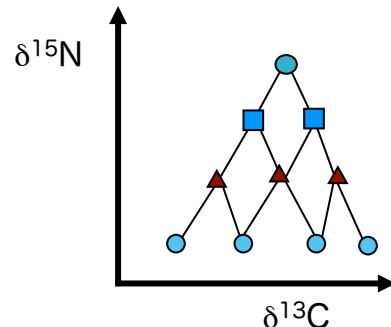
- ▶ 既存の生物多様性情報(種多様性、遺伝子多様性情報)に加え、**安定同位体指標を生態系の多様性情報として用いるための実証的・理論的基盤**を提出し、今後の生態系レベルの生物多様性情報の収集方法として提案することができた。
- ▶ 行政のモニタリング事業や博物館の標本試料(**多くの場合富栄養化と食物網構造の変化の両方が起きている**)を用いて、過去から現在に至る食物網構造の変化を評価する手法として提案することができた。



4D-1102

生物多様性の機能評価のための 安定同位体指標に関する研究

時空間的生態系多様性情報



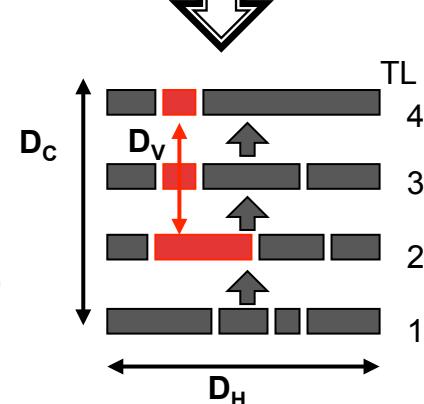
- 生物リスト
- 生物標本
- バイオマス

安定同位体
食物網構造解析

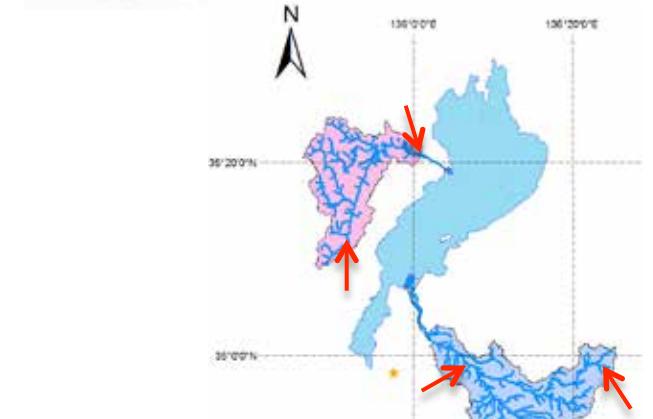
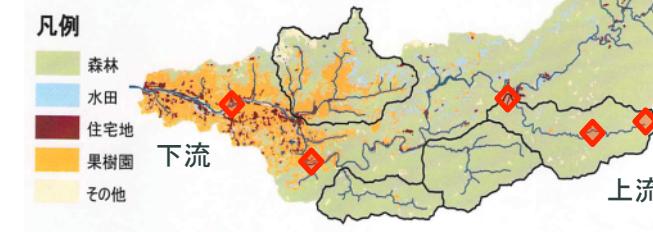
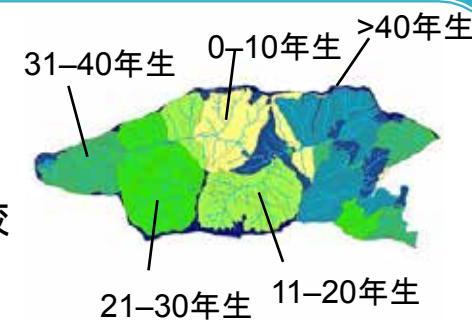
安定同位体
栄養塩循環解析

- 食物網リスト($\delta^{13}\text{C}, \delta^{15}\text{N}$)
- 栄養状態リスト($\delta^{15}\text{N}, \delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3$)
- 食物連鎖長(FCL)
- 炭素循環との関係(^{14}C)
- アミノ酸栄養段階(TP)
- Shannonの多様性指数(H')
- 食物網複雑性指標(D_H, D_C, D_V)

$$H' = D_H + (D_C - D_V)$$



多様な
サイトでの
空間軸比較



標本試料を用いた
時間軸比較

