

# 茨城県のトンボと水辺の環境 第6報 ヤゴの群集構造を決める環境要因

トンボの研究パート12

つくば市立手代木中学校

2年 井上善超

## 1. 動機

これまで茨城県内でトンボの調査を9年間続け、絶滅危惧種を含むトンボ75種、ヤゴと羽化殻57種を採取し、43種の羽化観察を行ってきた。昨年はトンボの体色に変化するパターンについて調査し、9年間撮りためたトンボ写真を画像解析して、その定量的評価を検討した。結果、オスだけが直線的に婚姻色の面積比率が増えていくことがわかった。

3年前に兄がそれまでの7年間のトンボの採取データを用いて、トンボが水辺の環境の何を具体的に認識して集まってくるのか、統計的解析(多変量解析)を試みた。解析の結果、池および湿地、水田、プールなどに生息する止水性のトンボは周辺の森林が、河川に生息する流水性のトンボは住宅地および工場、森林が生息地選択の主な要因となることが推定された。

トンボの成虫は水辺や陸上で生活するが、幼虫のヤゴは水中で生活しているため、陸域のみならず水域環境でも生物指標になることが可能であり、トンボとヤゴの採取データから水辺やその周辺の環境とのつながりを解析することができる。そこで、今年はヤゴの生活場所である水域の要因を調査し、その群集構造を決める環境要因について探求したいと考えた。トンボと同様にヤゴにおいても多変量解析を試み、3年前の生物指標としてのデータを補完するとともに、レッドリストに掲載されるようなトンボ種を保全するために必要な生息環境を知ることや、潜在的な生息域の推定に活用したい。

## 2. 目的

水辺の環境要因として、周辺の土地利用形態、標高、水域の面積、川幅、生物植生、化学成分を調査し、10年間の採取データを用いて多変量解析を行い、ヤゴの群集構造との関係について検討したい。また、希少種はできるだけ発生を確認し、絶滅危惧種については引き続き観察したい。ヤゴを飼育し、羽化を観察したことがない種の羽化を観察したい。(継続調査)

## 3. 方法

### 1) トンボとヤゴおよび羽化殻と生育環境の調査方法

2013年から10年間、茨城県内71ヶ所においてヤゴと羽化殻を採取し、種を図鑑で調べた。絶滅危惧種は最新の環境省レッドリスト2020、茨城県レッドリスト2016に登録されているものを参考にした。

標高は国土地理院地図を利用して、水域の面積と川幅および植物の被覆面積はGoogle Mapを用いて、採取地点の経緯度を中心とした600m×600mの航空写真から読み取った。これを25mずつメッシュで区切り、各区分の土地利用を右の基準で分類した。水辺に出現する水生植物の種類は抽水植物と浮葉植物とその他に分類し、現地において記録した。採取地点における化学成分分析用には水深5cmの環境水を採水し、0.45μmグラスファイバーでろ過後、測定まで5°Cの冷蔵庫で保管した。DOC(溶存有機炭素)を全有機炭素計、Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Cl<sup>-</sup>の濃度をイオンクロマトグラフ、Al、Si、Fe、P、Sの濃度をプラズマ質量分析装置で測定した。



- 1: 森林
- 2: 水田
- 3: 畑
- 4: コンクリート
- 5: 住宅地および工場
- 6: 草地
- 7: 湿地
- 8: ソーラーパネル
- 9: 荒地その他

←地点 1: 乙戸沼(土浦市中村西根)の600×600mの航空写真を25mメッシュで区切ったもの

### 2) 生育環境の解析方法

ヤゴの採取地点を変数軸上に序列化する方法として、群集生態学で広く利用されている除歪対応分析(Detrended Correspondence Analysis: DCA)を用いて、3年前のトンボ群集と同様に解析を行なった。まず対応分析を行い、序列化空間のDCA第1軸を均等な区画に区分した。次に各区分の第2軸、第3軸、第4軸のスコア平均が0になるように区画をスライドし、各区分内の地点プロットを伸縮した。得られた採取地点スコアと種スコアを2次元空間にプロットすることにより、採取地点における種構造パターンを視覚的に概観することができた。さらに、DCA第1軸から第4軸までの寄与率を計算し、採取地点スコアと採取地点の環境要素との相関係数(Kendallの順位相関係数:正規分布を仮定できない環境データを考察する場合に用いる)を計算した。サイトスコアと有意な相関(p<0.05)があった環境要素でお互いに高い相関がある場合、最も相関係数の高い要素を選び出した。この相関係数を用いて、採取地点の環境要素の中でヤゴの群集構造を大きく支配している環境要因が何なのかを検討することにした。

すべての統計解析はオープンソースであるR version 4.2.1(2022-06-23)を利用し、DCAはパッケージvegan 2.6-2(Oksanen 2022-04-17)を用いた。グラフ上でのヤゴと採取地点の名称はそれぞれ4文字以内になるよう省略した。

## 4. 結果

### 1) 今年採取したトンボ、ヤゴおよび羽化殻、羽化観察(継続調査)

今年初めて採取することができたトンボはモイワサナエ(茨城県:絶滅危惧Ⅱ類)、エゾイトトンボ(2015年に茨城県で初確認)、飛来種のホソミイトトンボ(2019年に茨城県で初確認)で、加えてヒスマイトトンボ(環境省:絶滅危惧ⅠB類/県:絶滅危惧ⅠA類)を肉眼で観察し、10年間でトンボ79種を確認した。また、今年初めて採取することができたヤゴおよび羽化殻はルリボシヤンマ(省/県:準絶滅危惧)、モイワサナエ、ネキト



図1. 今年採取したトンボとヤゴの様子

ンボ(県:準絶滅危惧)、モートンイトンボ(省/県:準絶滅危惧)で、10年間でヤゴと羽化殻61種を採取した(図1)。

これまでに確認していた希少種のうちコバネアオイトンボ(省:絶滅危惧ⅠB類/県:絶滅危惧ⅠA類)、オオモノサシトンボ(省/県:絶滅危惧ⅠB類)、ナゴヤサナエ(省:絶滅危惧Ⅱ類/県:準絶滅危惧)、オツネイトンボ(県:絶滅危惧Ⅱ類)は今年も存在を確認することができた。しかし、キイロヤマトンボ(省:準絶滅危惧/県:絶滅危惧Ⅱ類)、リスアカネ(県:絶滅危惧Ⅱ類)、ヒメアカネ(県:絶滅危惧Ⅱ類)は存在を確認することができなかった。

また、62匹飼育したうち、44匹が羽化した。今年初めて羽化を観察できた種はクロスジギンヤンマ、モイワサナエ、ヨソボシトンボ(県:準絶滅危惧)、オオイトンボ、モートンイトンボで、10年間で48種を確認した。

## 2) 採取地点の環境水中の化学成分

採取地点の環境水中の主要化学成分(図2)は  $Ca^{2+}$  と  $Na^+$  で、次いで  $Si$ 、 $S$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $K^+$  が多く、全地点の平均値+標準誤差は  $Ca^{2+}$  は  $10.6 \pm 1.11 \text{ mg/L}$ 、 $Na^+$  は  $7.2 \pm 0.39 \text{ mg/L}$ 、 $Si$  は  $6.4 \pm 0.40 \text{ mg/L}$ 、 $S$  は  $4.2 \pm 0.48 \text{ mg/L}$ 、 $Mg^{2+}$  は  $3.3 \pm 0.30 \text{ mg/L}$ 、 $K^+$  は  $1.6 \pm 0.15 \text{ mg/L}$  であった。 $Ca^{2+}$  は最も多い地点で  $46.4 \text{ mg/L}$ 、少ない地点で  $2.1 \text{ mg/L}$  となり、他の元素に比べてばらつきが大きく、 $S$ 、 $Fe$  とともに止水域の地点で多かった。一方で  $Si$  は流水域の地点で多かったが、 $Na^+$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $K^+$  はどここの地点でも一定量含まれており、地点によって違いが少なかった。DOC、Al、P、Cl<sup>-</sup>、Fe は  $Ca^{2+}$ 、 $Na^+$  などと比較して多く含まれていなかった。

## 3) ヤゴ種と採取地点の関係

まず対応分析を行い、ヤゴ種と採取地点の散布図(図3)を作成した。左上には河川の源流域、左下には中流域のような採取地点が、関連するヤゴ種とともに他と離れた座標に位置し、池や湿地、水田、プールなどの採取地点はすべて原点の右に集まった。このことから採取地点において河川という環境がヤゴの群集構造に大きな影響を与えていることが示唆された。

この結果から、ヤゴの種を河川に生息する流水性と池および湿地、水田、プールなどに生息する止水性のものに分ける必要があると考え、それぞれ DCA 法を用いて序列化を行うことにした。流水性のヤゴ種は7科26種1169匹と全体の40%ほどに相当し、止水性のヤゴ種は8科39種1612匹と全体の60%を占めた。流水性のヤゴ種は止水域では確認できなかったが、止水性のヤゴ種は流水域でも確認できた。

## 4) 池および湿地、水田、プールなどに生息する止水性のヤゴ種の群集構造を決める環境要因

DCA法で導き出された寄与率は第1軸が0.70、第2軸が0.53、第3軸が0.37、第4軸が0.34であった。これは第1軸で全変動の70%、第2軸で53%を説明できるということであった。寄与率の高かった第1軸(横軸)と第2軸(縦軸)を利用して、止水性のヤゴ種における採取地点スコアの散布図(図4)をプロットした。第1軸は公園内にあるような池で小さい値を示し、森林に囲まれた池や湿地で大きい値を示した。第2軸は水田やプールなどで大きな値を示した。

これら DCA の結果に基づき、第1軸から第2軸のサイトスコアと有意な相関( $p < 0.05$ )があった環境要素について示した(表1)。第3、4軸の採取地点スコアと環境要素には有意な相関が得られず、関係性は明らかではなかった。第1軸スコアと著しく高い有意な正の相関( $p = 0.0001$ ,  $\tau = 0.4830$ )を示したのは「周辺600m内の森林の面積」で、「森林の面積」は3年前のトンボの解析においても最も相関が高かった。続いて「湿地の面積」「環境水中のFe濃度」も高い正の相関( $p = 0.0022$ ,  $\tau = 0.3639$ ,  $p = 0.0030$ ,  $\tau = 0.3519$ )を示した。反対に「コンクリート、住宅地および工場の面積」とは有意な負の相関( $p = 0.0059$ ,  $\tau = -0.3311$ ,  $p = 0.0065$ ,  $\tau = -0.3265$ )が認められた。第2軸サイトスコアは「草地の面積」と有意な正の相関( $p = 0.0011$ ,  $\tau = 0.3881$ )があり、「標高」「抽水植物の種類数」と有意な負の相関( $p = 0.0020$ ,  $\tau = -0.3666$ ,  $p = 0.0023$ ,  $\tau = -0.3911$ )があった。

以上より、DCA第1軸は「周辺600m内の森林、湿地の面積」「環境水中

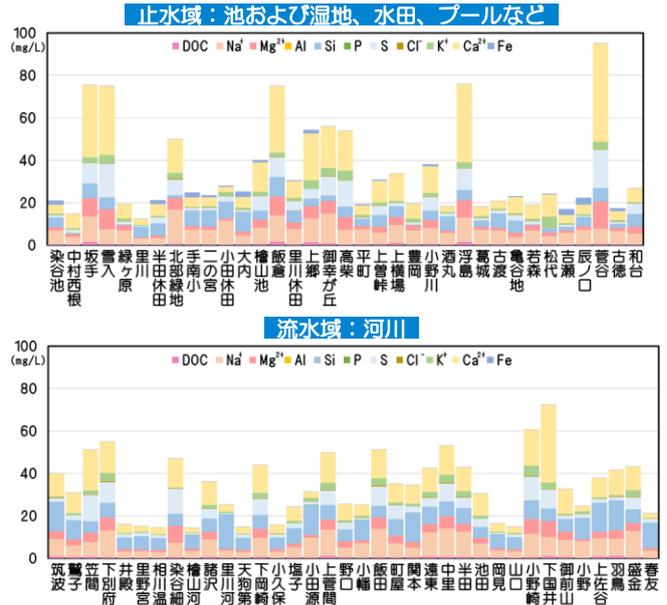


図2. 各採取地点の環境水中の化学成分

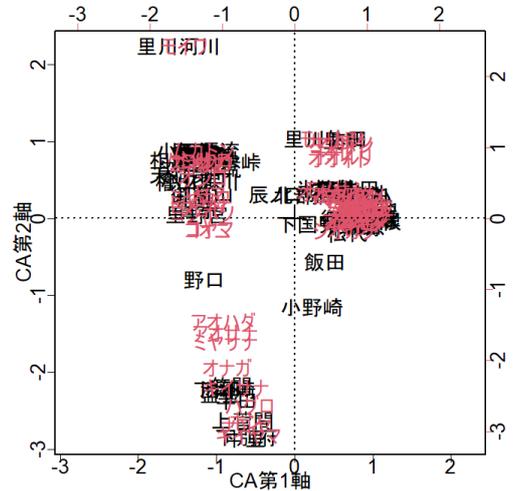


図3. 茨城県内の採取地点とヤゴ群集の対応分析による座標付け

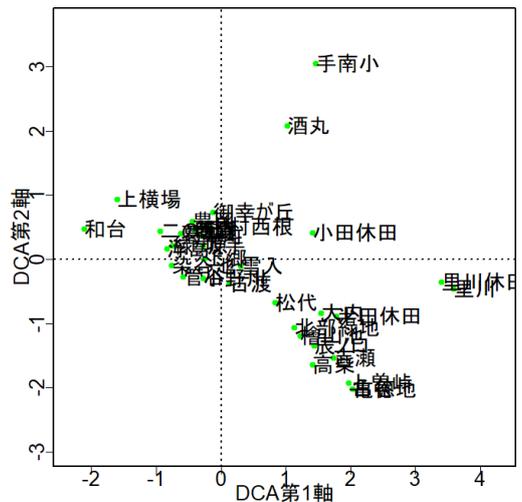


図4. 止水性のヤゴ種における採取地点スコアの除歪対応分析による座標付け

の Fe 濃度」、第 2 軸は「草地の面積」「標高」「抽水植物の種類数」が大きな要因であることが示された。したがって、採取地点スコアの散布図においては第 1 軸の正の方向には森林に囲まれた土塁の池や湿地が、負の方向には住宅地のコンクリートで護岸されている公園内にあるような池が位置づけられていると説明できた。第 2 軸の正の方向には平野部で周辺に草地が多く、植生の少ない水田やプールなどの池が、負の方向には山間地の植生豊かな池や湿地などが位置づけられていると説明できた。

次に、第 1 軸と第 2 軸を用いて、止水性ヤゴ種スコアの散布図(図 5)をプロットした。第 1 軸の種スコアはルリボシヤンマ、モートンイトトンボ、ヨツボシトンボなどが大きい値を示した。さらに、マイコアカネ、ヤブヤンマ、ハグロトンボなどは小さい値を示した。第 2 軸の種スコアはコノシメトンボ、アキアカネ、ノシメトンボ、ウチワヤンマなどが大きく、モノサシトンボ、オニヤンマ、ヤマサナエなどで小さかった。

DCA の採取地点スコア(図 4)と種スコア(図 5)をプロットした 2 つの図を重ね合わせ、ヤゴ種と水辺の環境要素との関係を解析すると、種スコア第 1 軸左側は市街地の皿池に生息するようなグループ、右側は森林の多い湿地に生息するようなグループに分けられた。また、第 2 軸下側は丘陵地の植生豊かな池の植物組織内に産卵するグループ、上側は平地の開水面が多い池や水田などの水面、泥面、空中に産卵するグループに分けられた。これらのことから、池および湿地、水田、プールなどにおける止水性のヤゴ種の生息地は周辺の森林、湿地、草地の有無から強く影響を受けていることが示唆され、他に環境水中の Fe 濃度、標高、コンクリートの有無などが影響を及ぼすと推察された。

### 5) 河川に生息する流水性のトンボ種の群集構造を決める環境要因

一方で、流水性のヤゴ種において、DCA 法で導き出された寄与率は第 1 軸が 0.90、第 2 軸が 0.61、第 3 軸が 0.40、第 4 軸が 0.11 であった。第 1 軸のみで全変動の 90%と、群集構造に関して非常に高い説明力を示した。寄与率の高かった第 1 軸と第 2 軸を利用して、採取地点スコアの散布図(図 6)をプロットした。第 1 軸は標高の低い河川で大きく、第 2 軸は水田の用水路や小川のような採取地点で大きな値を示した。

DCA の結果に基づき、第 1 軸から第 2 軸のサイトスコアと有意な相関( $p < 0.05$ )があった環境要素について示した(表 2)。第 3、4 軸は採取地点スコアと環境要素に有意な相関が得られなかった。第 1 軸サイトスコアは「標高」と最も有意な負の相関( $p=0.0000$ ,  $\tau=-0.5359$ )があり、次いで「河川の水域面積」「周辺 600m 内のコンクリートの面積」「環境水中の  $Ca^{2+}$  の濃度」と有意な正の相関( $p=0.0001$ ,  $\tau=0.5219$ ,  $p=0.0003$ ,  $\tau=0.5006$ ,  $p=0.0003$ ,  $\tau=0.4880$ )が認められた。さらに「森林の面積」とは高い有意な負の相関( $p=0.0008$ ,  $\tau=-0.4601$ )があった。第 2 軸サイトスコアは「川幅」のみと有意な負の相関( $p=0.0028$ ,  $\tau=-0.3660$ )が認められた。

以上より、DCA 第 1 軸は「標高」「河川の水域面積」「周辺 600m 内のコンクリートの面積」、第 2 軸は「川幅」が大きな要因であることが示された。したがって、採取地点スコアの散布図においては第 1 軸の正の方向には平野部のコンクリートで護岸された大河が、負の方向には山間地の森林に囲まれた小さな谷川が位置づけられていると説明できた。第 2 軸の正の方向には水田の用水路や親水公園の一部を流れる細流が、負の方向には支流が集まった川幅の広い河川の主流が位置づけられていると説明できた。

次に、第 1 軸と第 2 軸を用いて、流水性ヤゴ種スコアの散布図(図 7)をプロットした。第 1 軸の種スコアはキイロヤマトンボ、ナゴヤサナエ、ホンサナエ、シオカラトンボなどが大きい値を示し、モイワサナエ、ムカシトンボなどは小さい値を示した。第 2 軸の種スコアはコシアキトンボで著しく大きく、オナガサナエ、ミヤマサナエ、キイロサナエなどで小さかった。

DCA の採取地点スコア(図 6)と種スコア(図 7)をプロットした 2 つの図を重ね合わせ、ヤゴ種と水辺の環境要素との関係を解析すると、種スコア第 1 軸左側は森林に囲まれた山間地の溪流に生息するような体のサイズが小さいグループ、右側は市街化された平地の河川に生息するような体のサイズが大きいグループに分けられた。第 2 軸下側は川幅の広い平地の中流域に生息するようなグループ、上側は山中の源流域や細流に生息するようなグループに分けられた。これらのことから、河川における流水性のヤゴ種の生息地は標高および水域面積、川幅の影響を強く受けていることが示唆され、他に周辺のコンクリート、森林の有無、環境水中の  $Ca^{2+}$  濃度などが要因となると推察された。

表 1. 止水性のヤゴ種において DCA 第 1, 2 軸と有意な相関を示した環境要素

	p-value Kendall ( $\tau$ )	
DCA 第 1 軸		
(1) 周辺 600m 内の森林の面積	0.0001	0.4830
(2) 周辺 600m 内の湿地の面積	0.0022	0.3639
(3) 環境水中の Fe 濃度	0.0030	0.3519
(4) 周辺 600m 内のコンクリートの面積	0.0059	-0.3311
(5) 周辺 600m 内の住宅地および工場の面積	0.0065	-0.3265
(6) 環境水中の Al 濃度	0.0069	0.3259
(7) 環境水中の P 濃度	0.0073	0.3182
(8) 環境水中の Cl-濃度	0.0093	-0.3086
DCA 第 2 軸		
(1) 周辺 600m 内の草地の面積	0.0011	0.3881
(2) 標高	0.0020	-0.3666
(3) 抽水植物の種類数	0.0023	-0.3911
(4) 池などの水域面積	0.0026	-0.3572
(5) 周辺 600m 内の畑の面積	0.0046	0.3483
(6) 抽水植物の被覆面積	0.0047	-0.3472

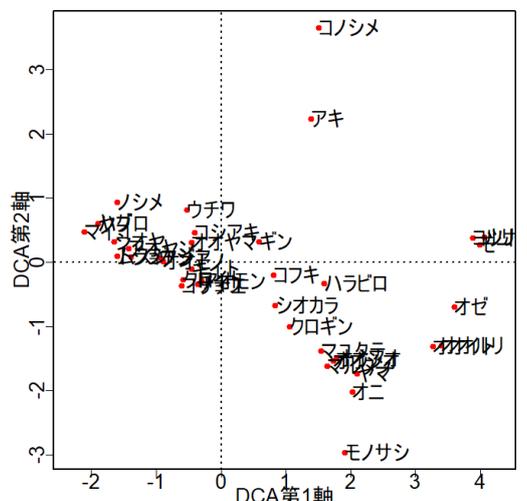


図 5. 止水性のヤゴにおける種スコアの除歪対応分析による座標付け

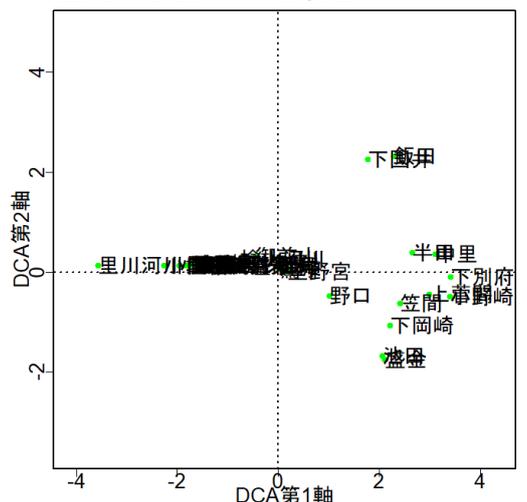


図 6. 流水性のヤゴ種における採取地点スコアの除歪対応分析による座標付け

## 5. 考察

池および湿地、水田、プールなどに生息する止水性のヤゴ群集において最も高く相関が得られた環境要因は周辺 600m内の森林の面積で、他に草地やコンクリートの面積など、高い相関を示した要因は 3 年前のトンボの解析で選ばれた要因とおおむね同じであった。トンボにとって水域に隣接する森林はえさ場、ねぐら、強風や鳥からの避難場所を提供していると考えられ、普段から多くのトンボが森林と水域を頻繁に往復しているのを確認していた。ヤゴは森林には直接生息していないので、ヤゴ群集の分布は成虫のトンボ群集の分布の影響を大きく受けていることが示唆された。

河川に生息する流水性のヤゴ群集においては選ばれた環境要因が標高や河川の水域面積などとなり、3 年前のトンボの解析とは必ずしも適合しない要因が高い相関を示した。河川に生息するヤゴは流下によってトンボとは異なる場所で採取されることも多かったため、トンボ群集と異なる要因が選ばれたと考えられる。標高は水域周辺の勾配を左右しており、気温や日射量の違いなどの影響が考えられ、とても重要な要因であることがうかがえた。また、ヤゴ群集はコンクリートの面積と、3 年前の解析からトンボ群集は住宅地および工場の面積と強い相関があり、河川においてはすでに市街化の影響を強く受けていることが示唆された。住宅地および工場がすぐそばに近接し、コンクリートで護岸されたような河川は現在多く存在し、トンボとヤゴの分布にも大きな影響を及ぼしているものと思われる。

環境水中の化学成分において、止水性のヤゴ群集では Fe、Al、P などの濃度が、流水性のヤゴ群集では  $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、S などの濃度が相関の有意な環境要因として選ばれ、止水性と流水性で一致しなかった。Fe や  $Ca^{2+}$  など金属イオンは岩石、土壌から溶脱されて河川水に流れ込むので、その水源から採取地点までの地質の様子をよく表している。茨城県で多く産出する花崗岩は  $Ca^{2+}$  濃度が他の岩石に比べて低く、下流への流れに伴って集積し増加する傾向がある。そのため、標高や川幅と相関がみられ、流水性のヤゴ群集で  $Ca^{2+}$  濃度が要因として選ばれたのだろう。また、止水性のヤゴ群集で Fe 濃度が要因に選ばれたのは池や湿地、水田では底質土壌が還元状態であるため、Fe が第一鉄イオン ( $Fe^{2+}$ ) になりやすく水への溶解度が高いからと考えられる。Fe は森林から供給される有機腐植物質と錯形成して下流域に到達するので、森林や池、湿地が Fe の環境水への供給に担う役割は大きい。環境水中の Fe 濃度は土地利用形態とヤゴの生息地分布とのつながりを考える際により多角的、網羅的な視点となる。

解析結果に基づいて現在の池や湿地、水田、プールなどの周辺地域の生物多様性を保全するには、600m くらいの空間スケールで森林が豊富にあり、近場に湿地や草地が存在するような環境が必要である。さらに、水生植物は産卵場所だけでなく、止まり木、体温調節のための日陰、交配場所を提供すると考えられるので、池の中には多様な植物相の水生植物が広がっているような環境も重要である。また、河川とその周辺地域の生物多様性を保全するには、市街化やコンクリート護岸を減らすとともに、河岸に森林が豊富にあるような環境が必要である。

世界経済フォーラム (WEF) によって世界全体の GDP の半分以上が生物多様性に依存しており、過去に人類が経験したことのない生物多様性の喪失がこれらの経済価値をリスクにさらしているとの指摘があった。こうした危機感の高まりを受けて、今年の 3 月に自然関連財務開示タスクフォース (TNFD) が策定され、先進的な企業や金融機関では生物多様性の問題を経営や投資に取り込むとする動きが急速に加速している。現在、さまざまな政策レベルで自然環境の再生と保全が社会・経済に関わる様々な問題解決に必須と捉えられつつあり、生物多様性の観測・評価・予測の必要性が一層高まっている。

## 6. 感想

環境水のサンプリングや測定前の調整など、初めて化学分析にチャレンジしたことがとても新鮮で楽しかった。また、湖沼や河川流域といった大きな空間スケールで環境水を分析して得られたデータが、観察と採取だけでは得られなかったトンボとヤゴの隠れた情報を担うことがわかって嬉しかった。生態系を対象とした解析にはたくさんのデータを必要としたので、家の冷蔵庫がトンボの標本とサンプリングしてきた水を入れた試験管でいっぱいになってしまった。

今年は新しくモイワサナエとエゾイトトンボ、飛来種のホソミイトトンボを採取、ヒヌマイトトンボを確認することができ、茨城県で採取できたトンボは 10 年間を通して 79 種となった。県内では 93 種のトンボが確認されており、3 種は絶滅、3 種は生息地不明、5 種は飛来種とされている (県ミュージアムパーク報告による)。コンクリートまであと 4 種となつたうち、3 種 (ネアカコシヤンマ、タカネトンボ、ハッチョウトンボ) と生息地不明 3 種 (ベニイトトンボ、オオセズイトトンボ、キトンボ) は他県に行った際に採取できているので、未だ採取したことのないハネビロエゾトンボを茨城県内で採取したい。

表 2. 流水性のヤゴ種において DCA 第 1, 2 軸と有意な相関を示した環境要素

	p-value Kendall ( $\tau$ )	
DCA 第 1 軸		
(1) 標高	0.0000	-0.5359
(2) 河川の水域面積	0.0001	0.5219
(3) 周辺 600m 内のコンクリートの面積	0.0003	0.5006
(4) 環境水中の $Ca^{2+}$ 濃度	0.0003	0.4880
(5) 周辺 600m 内の森林の面積	0.0008	-0.4601
(6) 環境水中の $Mg^{2+}$ 濃度	0.0011	0.4530
(7) 環境水中の S 濃度	0.0012	0.4498
(8) 周辺 600m 内の住宅地および工場の面積	0.0025	0.4358
(9) 周辺 600m 内の草地の面積	0.0125	0.3918
(10) 環境水中の K+濃度	0.0130	0.3764
(11) 環境水中の Si 濃度	0.0420	-0.3349
DCA 第 2 軸		
(1) 川幅	0.0028	-0.3660

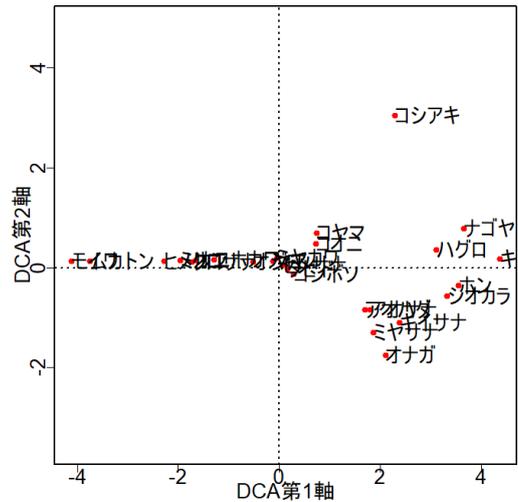


図 7. 流水性のヤゴにおける種スコアの除歪対応分析による座標付け



環境水サンプルのろ過



今年作成した標本

