



筑波大学

朝永振一郎記念

第 17 回「科学の芽」賞 応募用紙

受付番号 : SJ0846

応募部門 : 中学生部門

応募区分 : 個人応募

題名 : 茨城県のトンボの群集構造を決める水辺の環境要因 トンボの研究パート12

学校名 : 茨城県つくば市立手代木中学校

学年 : 2年生

代表者名 : 井上 善超

※ 個人情報保護のため、入力された項目から抜粋して出力しています。

茨城県のトンボの群集構造を決める水辺の環境要因

トンボの研究パート12

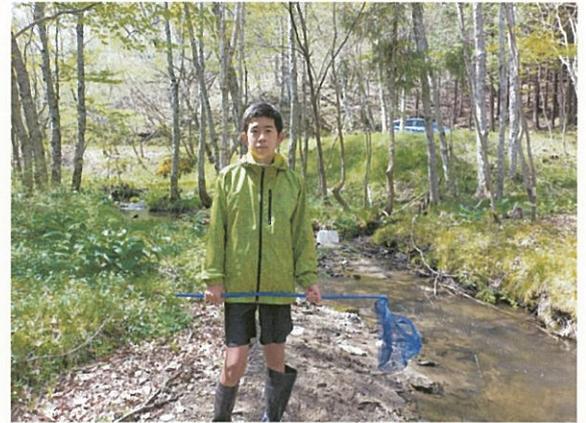
つくば市立手代木中学校 2年 井上善超

1. 動機

昨年までの研究において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の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。その結果、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。

トンボは羽化後、未熟な成虫は移動と分散を繰り返し、成熟するとまた水辺に戻ってくる。この時、必ず羽化した水域に戻るとは限らず、生息地選択を世代ごとに行い、よりよい環境を求めて移動していると考えられる。これまで9年間、トンボがいったい水辺の環境の何を具体的に認識して集まってくるのか、ずっと興味を持って採取を続けて来た。そこで、今年にはトンボが生息地を選択する環境要因について探求したいと考えた。

トンボは幼虫のヤゴが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、トンボとヤゴの採取データから水辺やその周りの環境のつながりを解析することができる。これまでの10年間のデータをすべて用いて統計的解析(多変量解析)を試み、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、潜在的な生息地の推定に活用したい。



常陸太田市里川町岡見湿原にて

2. 目的

水辺の環境要素として、周辺の土地利用形態、水域の面積、生物植生、化学成分などを調査し、多変量解析を行って、トンボとヤゴの群集構造と水辺の環境要因との関係について検討したい。

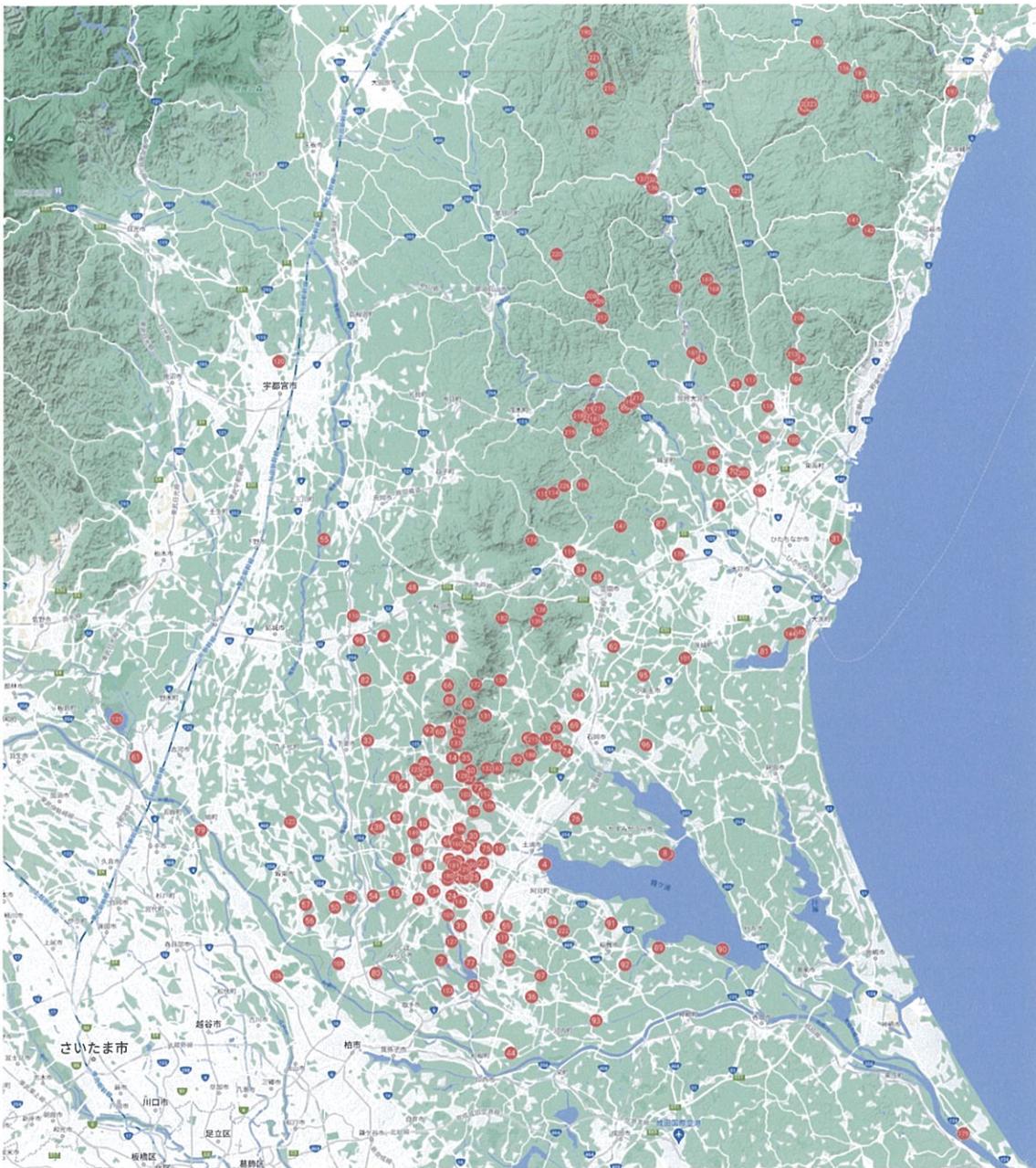
また、希少種はできるだけ発生を確認し、絶滅危惧種については引き続き観察したい。ヤゴを飼育し、羽化を観察したことのない種の羽化を観察したい。(継続調査)

3. 方法

1) トンボおよびヤゴと羽化殻の調査方法

2013年から今年2022年までの10年間、茨城県内211ヶ所においてトンボを採取した(図1)。うちヤゴと羽化殻が採取できたのは71ヶ所であった、採取には5mおよび3mの竿と60cmおよび45cm口径の捕虫網を使用した。

1.土浦市中村西根	32.かすみがうら市雪入	61.古河市鴻巣	89.稲敷市古渡	122.坂東市沓掛
2.5.6.12.20.23.26.181.	33.下妻市筑波島	62.笠間市押辺	90.稲敷市浮島	123.那珂市戸
200.つくば市松代	34.119.笠間市笠間	63.131.石岡市小幡	91.美浦村宮地	124.常総市豊岡町
3.つくば市天久保	35.つくば市山口	64.つくば市大久保	92.稲敷市江戸崎	127.つくば市下岩崎
4.土浦市大岩田	36.龍ヶ崎市中里	65.112.215.石岡市半田	93.稲敷市中山	130.石岡市小屋
7.つくばみらい市神生	37.つくば市下萱丸	66.88.桜川市真壁町羽鳥	94.阿見町吉原	132.土浦市東城寺
8.かすみがうら市坂	38.49.つくば市上郷	67.龍ヶ崎市泉町	95.小美玉市先後	133.つくば市神郡
9.筑西市桑山	39.つくば市高崎	68.つくば市花室	96.小美玉市中延	134.つくば市谷田部
10.つくば市遠東	40.42.128.つくば市小田	69.石岡市鹿の子	97.つくば市上菅間	135.大子町左貫
11.129.つくば市二の宮	41.常陸太田市岩手町	70.203.那珂市鴻巣	98.筑西市下中山	136.170.大子町池田
13.つくば市藤本	43.龍ヶ崎市佐貫町	71.水戸市下国井町	100.かすみがうら市田伏	137.大子町大子
14.つくば市北条	44.利根町中谷	72.つくば市大形	101.茨城町奥谷	138.笠間市本戸
15.つくばみらい市福岡	45.笠間市平町	73.148.牛久市結束町	102.つくば市上野	139.石岡市太田
16.つくば市小野崎	46.つくば市水守	74.かすみがうら市下志筑	103.つくば市栗原	141.高萩市中戸川
17.牛久市ひたち野西	47.筑西市宮山	75.つくば市吉瀬	104.常陸太田市里野宮町	142.高萩市秋山
18.つくば市御幸が丘	48.桜川市上野原地新田	76.土浦市菅谷町	105.常陸太田市落合町	144.大洗町神山町
19.土浦市宍塚	50.常総市坂手町	77.牛久市城中町	106.常陸太田市島町	145.大洗町大貫町
21.つくば市山木	51.つくば市和台	78.つくば市西高野	108.守谷市緑	146.つくば市白井
22.つくば市並木	52.つくば市緑ヶ原	79.五霞町山王	109.つくば市若栗	147.笠間市大橋
24.143.つくば市観音台	53.186.つくば市筑波	80.守谷市本町	110.筑西市小林	148.つくば市酒丸
25.つくば市稲荷前	54.常総市相野谷町	81.茨城町中石崎	113.桜川市真壁町原方	150.つくば市千現
27.140.つくば市小野川	56.常総市大塚戸町	82.筑西市飯田	114.115.城里町下赤沢	151.つくば市島名
28.つくば市竹園	57.坂東市神田山	83.常陸大宮市辰ノ口	116.城里町小勝	152.土浦市田宮
29.石岡市染谷	58.つくば市春日	85.かすみがうら市中志筑	117.常陸太田市芦間町	153.取手市櫛木
30.つくば市東岡	59.111.牛久市下根町	86.99.192.城里町御前山	118.常陸太田市新宿町	156.193.北茨城市関本町小川
31.ひたちなか市阿字ヶ浦町	60.つくば市沼田	87.水戸市全隈町	121.大子町高柴	157.184.北茨城市華川町花園

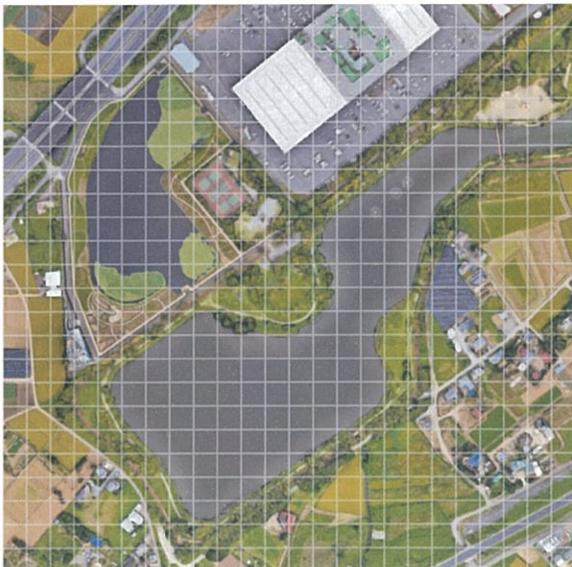


- 158.土浦市高岡
- 159.223.
- 224.常陸太田市里川町
- 160.つくば市吾妻
- 161.常陸大宮市岩崎
- 162.166.167.187.
- 191.常陸大宮市下伊勢畑
- 163.土浦市小野
- 164.石岡市半ノ木
- 165.219.城里町塩子
- 168.169.常陸大宮市諸沢
- 171.常陸大宮市盛金
- 172.石岡市上曾
- 173.つくば市下別府
- 174.笠間市片庭
- 175.城里町錫高野
- 176.城里町孫根
- 177.那珂市大内
- 178.水戸市大塚町
- 179.神栖市矢田部
- 180.つくば市上横場
- 182.桜川市木植
- 183.北茨城市関本町才丸
- 185.那珂市古蔵
- 188.かすみがうら市上佐谷
- 189.190.221.大子町上野宮
- 195.那珂市菅谷
- 196.つくば市天久保
- 197.北茨城市関本町関本上
- 201.つくば市若森
- 202.常陸大宮市長倉
- 208.220.常陸大宮市鷺子
- 209.常陸大宮市高部
- 212.常陸大宮市野口
- 213.常陸太田市町屋町
- 214.常陸太田市春友町
- 216.日立市東河内町
- 217.常陸大宮市小舟
- 218.常陸大宮市檜山
- 222.阿見町飯倉
- 225.つくば市和台
- 226.城里町徳蔵

図 1. 2013-2022 年の茨城県内におけるトンボとヤゴの採取確認地点

採取したトンボおよびヤゴと羽化殻の種を図鑑(「日本のトンボ改訂版」、「ヤゴハンドブック」尾園暁ら)で調べ、トンボは胸部がわかるように横から、ヤゴは上から写真を撮って標本を作った。ヤゴを採取する時に翅芽の長さが腹部の第4節以上にかかるものを終齢幼虫と判断し、それを持ち帰って飼育した。羽化したトンボとその羽化殻を標本にした。絶滅危惧種はともに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。

2) 環境の調査方法



標高は地理院地図(国土地理院)を利用して、採取地点の経緯度から調べた。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。

この航空写真を 25m ずつメッシュで区切り、各区分の土地利用および植生を以下の基準で分類した。これらを合計してその採取地点の土地利用および植生の面積とし、百分率で表した。

- 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 600m×600m の航空写真を 25m メッシュで区切ったもの



ヤゴ飼育の様子

水辺に出現する水生植物の種類は現地において記録した。抽水植物と浮葉植物とその他に分類し、それぞれの数と被覆面積を調べた。よく見られた種類を下に示した。



採取地点における環境水中の化学成分分析用には水深 5cm の環境水を採水した。0.45 μm 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⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻ 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。

3) 生育環境の解析方法

環境の異なる複数の採取地点の様々な環境要素(水域面積および植生、化学的要素など)を数値化したデータと採取地点のトンボとヤゴ群集(種構成や採取個体数など)を数値化したデータを比較することで、トンボとヤゴ群集に相関した連続的な環境勾配を見出すことが可能となる。トンボとヤゴの採取地点を変数軸上に序列化する方法として、群集生態学で最も広く利用されている**除歪対応分析**(Detrended Correspondence Analysis:DCA)を用いて解析を行なった。

DCA を行うにはまず対応分析(Correspondence Analysis:CA)を行い、序列化空間の DCA 第 1 軸を均等な区画に区分する必要がある。次に各区画の第 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、各区画内の地点プロットを伸縮する。得られた採取地点スコアと種スコアをそれぞれ 2 次元空間にプロットすることにより、双方を見比べて、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る。すなわち、図中近くにプロットされた採取地点ほど種構造パターンが似ており、遠いほど違っているということである。同様に、近くにプロットされた種は割と似たような生息環境で採取され、遠いほど違う環境で採取されるということでもある。

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様々な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)をそれぞれ計算した。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おいて、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トンボと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、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種はモイワサナエ(茨城県:絶滅危惧Ⅱ類)とエゾイトトンボ(2015年に茨城県で初確認)および飛来種であるホソミイトトンボ(2019年に茨城県で初確認)であった。加えてヒヌマイイトトンボ(環境省:絶滅危惧ⅠB類/茨城県:絶滅危惧ⅠA類)を初めて肉眼で観察し、10年間ではトンボ 79 種を採取観察した。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(環境省/茨城県:準絶滅危惧)およびモイワサナエ(茨城県:絶滅危惧Ⅱ類)、ネキトンボ(茨城県:準絶滅危惧)、モートナイトトンボ(環境省/茨城県:準絶滅危惧)で、10年間ではヤゴと羽化殻 61 種を採取した(図 2)。

これまでに確認していた希少種のうちコバネアオイトトンボ(環境省:絶滅危惧ⅠB類/茨城県:絶滅危惧ⅠA類)、オオモノサシントンボ(環境省/茨城県:絶滅危惧



図 2. 今年採取したトンボとヤゴの様子

I B類)、ナゴヤサナエ(環境省:絶滅危惧II類/茨城県:準絶滅危惧)、オツネトンボ(茨城県: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(環境省:準絶滅危惧/茨城県:絶滅危惧II類)、リスアカネ(茨城県:絶滅危惧II類)、ヒメアカネ(茨城県:絶滅危惧II類)は今年も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(茨城県:絶滅危惧II類)、ヨツボシトンボ(茨城県:準絶滅危惧)、オオイトトンボ、モートイトトンボ(環境省/茨城県:準絶滅危惧)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3)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 $10.6 \pm 1.11mg/L$ 、 Na^+ は $7.2 \pm 0.39mg/L$ 、Siは $6.4 \pm 0.40mg/L$ 、Sは $4.2 \pm 0.48mg/L$ 、 Mg^{2+} は $3.3 \pm 0.30mg/L$ 、 K^+ は $1.6 \pm 0.15mg/L$ であった。 Ca^{2+} は最も多い地点で $46.4mg/L$ 、少ない地点で $2.1mg/L$ となり、他の元素に比べてばらつきが大きく、止水域の地点の方が多い傾向があった。 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 K^+ は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。一方でSiは流水域の地点の方が高い傾向が見られたのに対し、S、Feでは止水域の地点の方が高い傾向が見られた。DOC、Al、P、 Cl^- 、Feは Ca^{2+} などの陽イオンと比較して環境水中には多く含まれていなかった。

3) トンボと採取地点の関係

まず、CA(対応分析)を行い、トンボ種と採取地点の散布図(図4)を作成したところ、上中央には河川の中流域のような採取地点が、右下には河川の源流域のような採取地点が、関連するトンボ種とともに他と離れた座標に位置し、池や湿地などの採取地点はすべて原点近くに集まった。また、ヤゴ種で同様の散布図を作成すると、

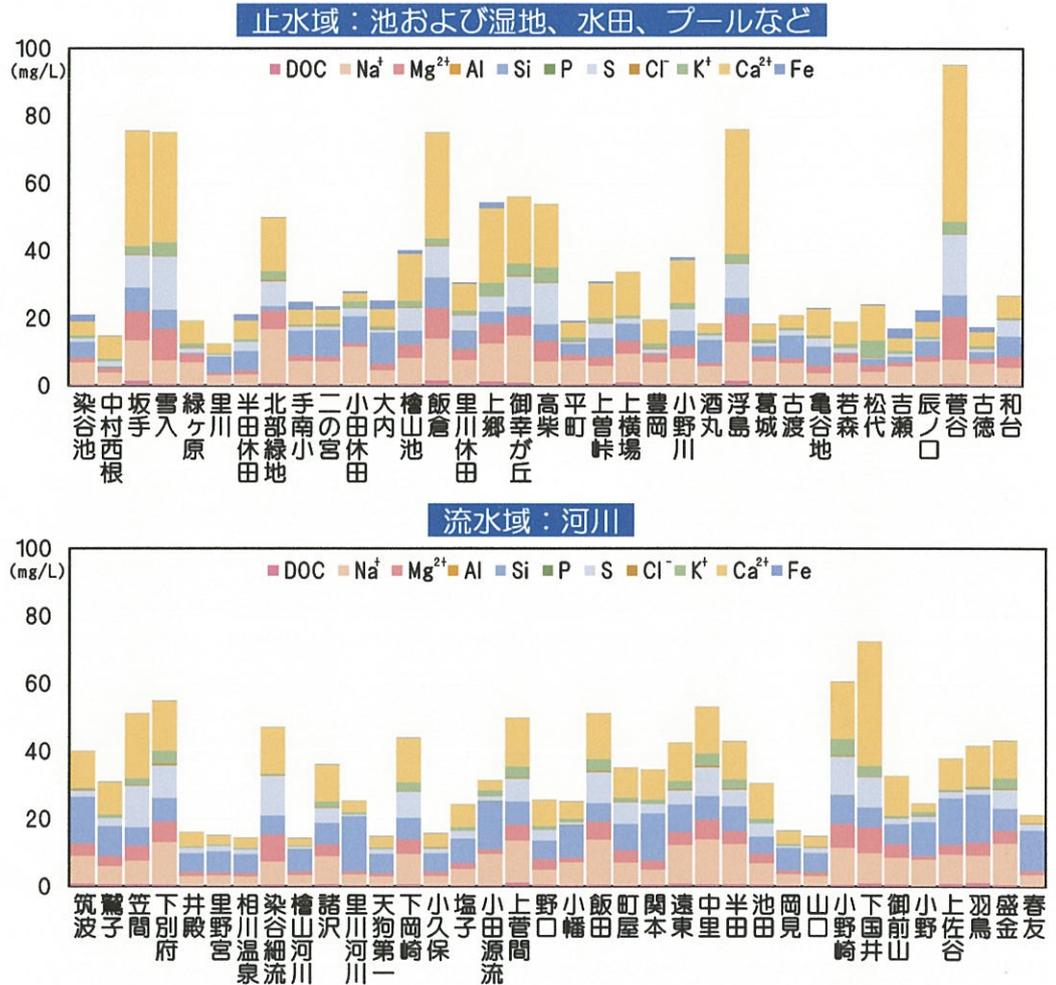


図3. 各採取地点の環境水中の化学成分

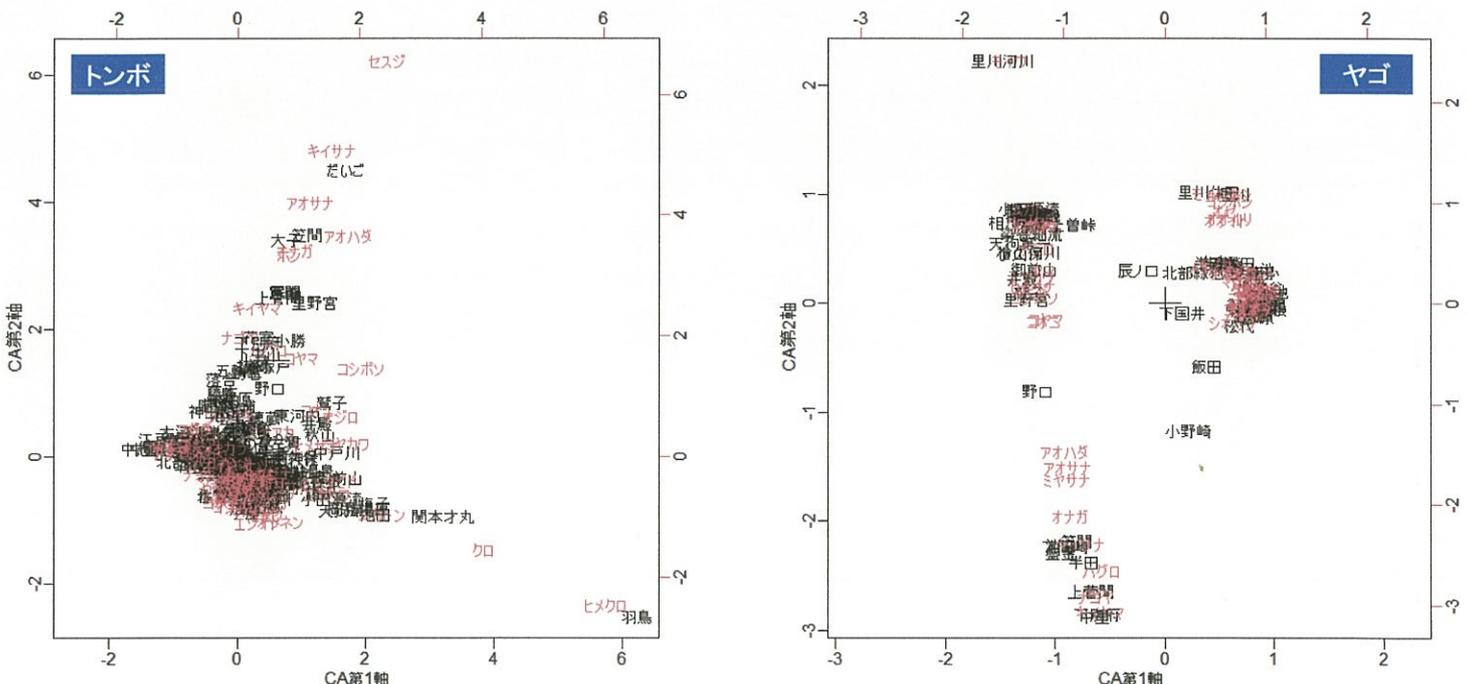


図4. 茨城県内の採取地点とトンボおよびヤゴ群集の対応分析による座標付け

左下には河川の中流域のような採取地点が、左上には河川の源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トンボと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。

次に、このCAの結果から、トンボとヤゴの種をおもに河川に生息する流水性のもと池および湿地、水田、プールなどに生息する止水性のもとに分ける必要があると考え、流水性トンボおよびヤゴ種と止水性トンボおよびヤゴ種それぞれをDCA(除歪対応分析)法を用いて序列化を行うことにした。流水性のトンボ種は26種1783匹と全体の16%ほどに相当し、止水性のトンボ種は53種9498匹と全体の84%を占めた。また、流水性のヤゴ種は26種1169匹と全体の40%ほどに相当し、止水性のヤゴ種は39種1612匹と全体の60%を占めた。流水性のトンボおよびヤゴ種は流水域では確認できなかったが、止水性のトンボおよびヤゴ種は流水域でもたびたび確認できた。

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

偶然に出現した場所による歪みを回避するため、1匹しか出現しなかった採取地点は解析対象から除き、池および湿地、水田、プールなどに生息するトンボ種においてDCAを行った。DCA法で導き出された寄与率は、DCA第1軸が0.41、第2軸が0.30、第3軸が0.22、第4軸が0.17であった。これは第1軸で全変動の41%、第2軸で30%を説明できるということであった。また、ヤゴ種においてDCAを行った結果、導き出された寄与率はDCA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。

以下の分析では寄与率の高かった第1軸(横軸)と第2軸(縦軸)のみを利用して、止水性のトンボ種における採取地点スコアの散布図(図5)をプロットした。第1軸の値は湖畔や沼などで値が小さく、森林に囲まれた池で大きかった。第2軸は水生植物が多様な池で大きな値を示した。また、止水性のヤゴ種における採取地点スコアの散布図をプロットした。第1軸の値は湖畔や沼などで値が小さく、森林に囲まれた池で大きかった。第2軸はプールや水田などで大きな値を示した。

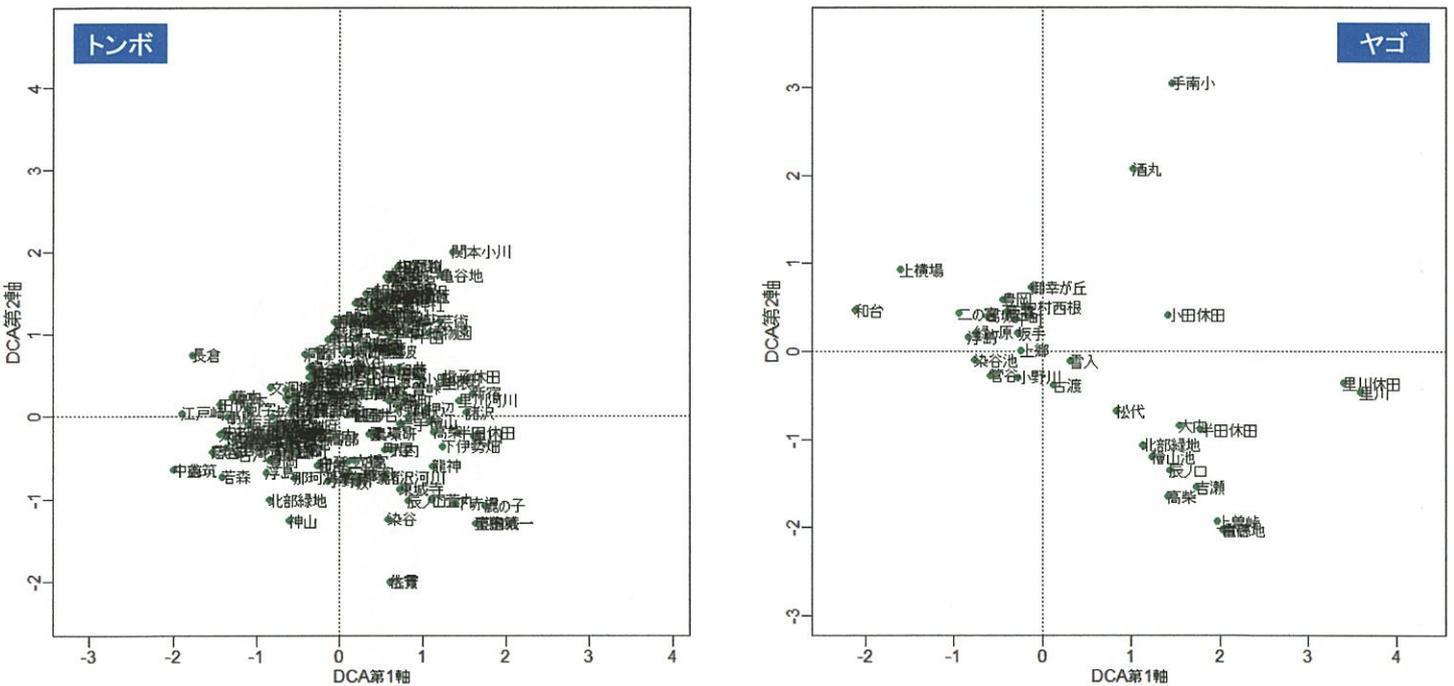


図5. 止水性のトンボおよびヤゴ種における採取地点スコアの除歪対応分析による座標付け

これらDCAの結果に基づき、第1軸から第3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)。選ばれた要素間でお互いに高い相関のある要素については、最も相関係数の高い要素を選び出した。トンボ種の第4軸、ヤゴ種の第3および4軸は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。

トンボ種において、第1軸サイトスコアと著しく高い有意な正の相関($p = 0.0001$, $\tau = 0.4691$)を示したのは「周辺600m内の森林の面積」であった。また反対に「コンクリートおよび草地の面積」と有意な負の相関($p = 0.0003$, $\tau = -0.4230$, $p = 0.0005$, $\tau = -0.4132$)が認められた。第2軸サイトスコアは「浮葉植物の種類数および被覆面積」と有意な負の相関($p = 0.0006$, $\tau = -0.2854$, $p = 0.0105$, $\tau = -0.2084$)が、第3軸サイトスコアは「池などの水域面積」「抽水植物の種類数および被覆面積」と高い有意な負の相関($p = 0.0004$, $\tau = -0.2786$, $p = 0.0005$, $\tau = -0.2807$, $p = 0.0050$, $\tau = -0.2216$)があった。以上より、DCA第1軸は「周辺600m内の森林、コンクリートおよび草地の面積」、第2軸は「浮葉植物の種類数および被覆面積」、第3軸は「池などの水域面積」「抽水植物の種類数および被覆面積」が大きな説明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軸の正の方向には山間部の森林に囲まれた池や湿地が、負の方向にはコンクリートや草地が多い開けた場所にある池が位置づけられていると説明できた。第2軸の正の方向には植生の少ない水田やプールなどが、負の方向には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。

また、ヤゴ種において、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、この「森林の面積」はトンボ種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、Al濃度」も高い正の相関($p = 0.0022$, $\tau = 0.3639$, $p = 0.0030$, $\tau = -0.3519$, $p = 0.0063$, $\tau = -0.3295$)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。また、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、池などの水域面積」と有意な負の相関($p=0.0020$, $\tau=-0.3666$, $p=0.0023$, $\tau=-0.3911$, $p=0.0026$, $\tau=-0.3572$)があった。以上より、DCA 第1軸は「周辺 600 m内の森林、湿地の面積」、第2軸は「草地の面積、標高」が大きな説明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、負の方向には周辺に住宅地が多いコンクリートで護岸されている池や湿地が位置づけられていると説明できた。また、第2軸の正の方向には平野部で周辺に草地が多く、植生の少ないプールなどの小さな池が、負の方向には山間地の植生豊かで大きな池や湿地などが位置づけられていると説明できた。

表 1. 止水性のトンボおよびヤゴ種においてDCA 第1、2、3軸と有意な相関を示した環境要素

トンボ	p-value	Kendall (τ)	ヤゴ	p-value	Kendall (τ)
DCA 第1軸			DCA 第1軸		
(1) 周辺 600m 内の森林の面積	0.0001	0.4691	(1) 周辺 600m 内の森林の面積	0.0001	0.4830
(2) 周辺 600m 内のコンクリートの面積	0.0003	-0.4230	(2) 周辺 600m 内の湿地の面積	0.0022	0.3639
(3) 周辺 600m 内の草地の面積	0.0005	-0.4132	(3) 環境水中の Fe 濃度	0.0030	0.3519
(4) 周辺 600m 内の住宅地および工場の面積	0.0010	-0.3859	(4) 周辺 600m 内のコンクリートの面積	0.0059	-0.3311
(5) 標高	0.0013	0.3390	(5) 周辺 600m 内の住宅地および工場の面積	0.0065	-0.3265
(6) 周辺 600m 内の湿地の面積	0.0039	0.2302	(6) 環境水中の Al 濃度	0.0069	0.3259
DCA 第2軸			DCA 第2軸		
(1) 浮葉植物の種類数	0.0006	-0.2854	(7) 環境水中の P 濃度	0.0073	0.3182
(2) 浮葉植物の被覆面積	0.0105	-0.2084	(8) 環境水中の Cl ⁻ 濃度	0.0093	-0.3086
DCA 第3軸			DCA 第2軸		
(1) 池などの水域面積	0.0004	-0.2786	(1) 周辺 600m 内の草地の面積	0.0011	0.3881
(2) 抽水植物の種類数	0.0005	-0.2807	(2) 標高	0.0020	-0.3666
(3) 抽水植物の被覆面積	0.0050	-0.2216	(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

次に、第1軸と第2軸を用いて、止水性トンボ種スコアの散布図(図6)をプロットした。第1軸の種スコアの値はエゾイトトンボ、オゼイトトンボ、オツネイトトンボなどが大きい値を示した。さらに、オオモノサシトンボ、ウチワヤンマ、オオヤマトンボなどは小さい値を示した。第2軸の種スコアの値はヒメアカネ、ルリボシヤンマ、エゾトンボなどが大きく、コサナエ、ムスジイトトンボ、トラフトンボ、キイトンボなどで小さかった。続いて、止水性ヤゴ種スコアの散布図をプロットすると、第1軸の種スコアの値はルリボシヤンマ、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軸の種スコアの値はコノシメトンボ、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。

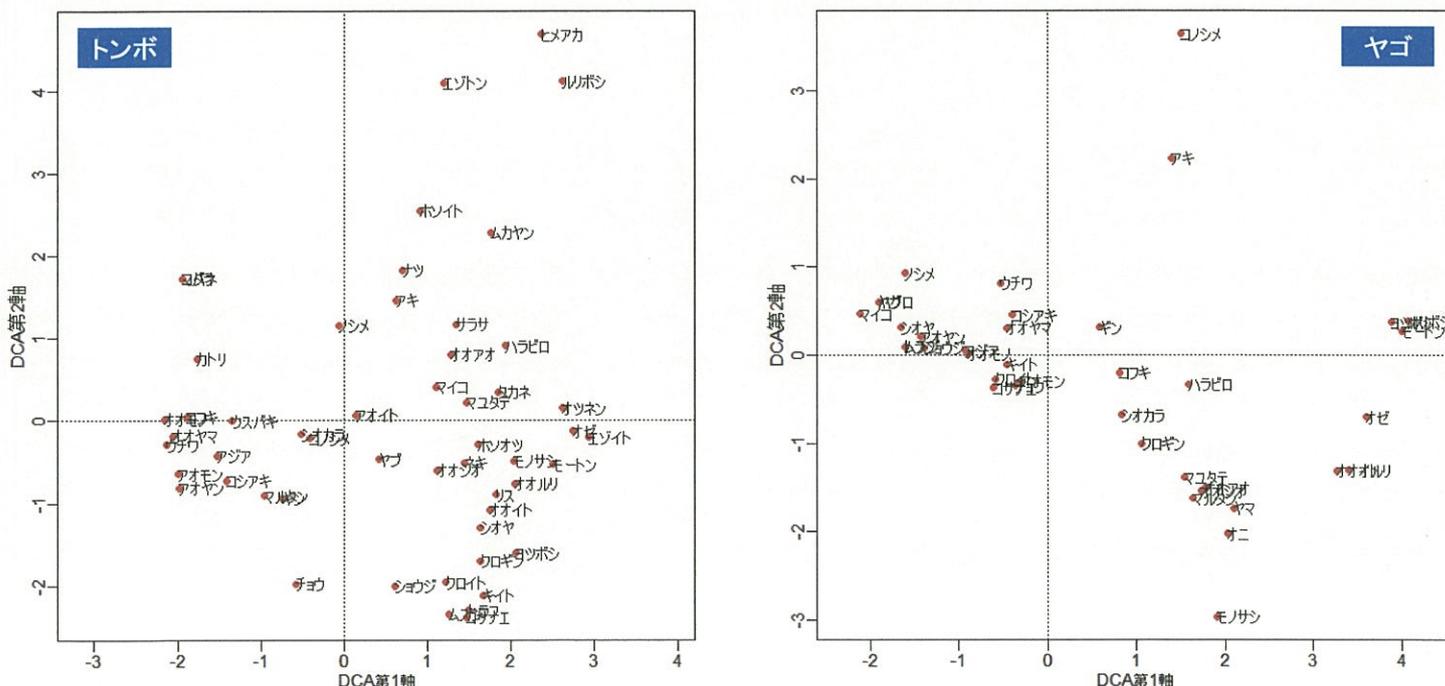


図 6. 止水性のトンボおよびヤゴにおける種スコアの除歪対応分析による座標付け

止水性のトンボおよびヤゴにおけるDCAの採取地点スコア(図5)と種スコア(図6)をプロットした2つの図を重ね合わせ、水辺の環境要素との関係を解析すると、種スコア第1軸左側は平地の市街地の皿池に生息するようなグループ、右側は森林の多い丘陵地の谷池や湿地に生息するようなグループに分けられた。第2軸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、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、プールなどに生息する止水性のトンボ種は周辺の森林の有無が生息地選択の主な

要因となることが示され、他にコンクリート、草地の有無、浮葉植物および抽水植物の種類を視覚的に選択しているものと推察された。また、止水性のヤゴ種の生息地はトンボ種同様、周辺の森林、湿地の有無から強く影響を受けていると推定され、他に環境水中のFe濃度、草地、標高、コンクリートの有無、抽水植物の種類などが影響を及ぼすと推定された。

5) 河川に生息する流水性のトンボおよびヤゴ種の群集構造を決める環境要因

一方で、河川に生息するトンボ種においてDCAを行った。止水性のトンボ種と同様、1匹しか出現しなかった採取地点は解析対象から除いた。DCA法での寄与率の計算結果は、DCA第1軸が0.77、第2軸が0.35、第3軸が0.27、第4軸が0.18であった。また、河川に生息するヤゴ種においてDCAを行ったところ、寄与率の計算結果は、DCA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軸のみでトンボ種が全変動の77%、ヤゴ種が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(横軸)と第2軸(縦軸)のみを利用して、流水性のトンボ種における採取地点スコアの散布図(図7)をプロットした。第1軸の値は河川の源流域で値が小さく、中流域で大きかった。第2軸は川幅採取地点で大きな値を示した。また、流水性のヤゴ種における採取地点スコアの散布図をプロットした。第1軸の値はトンボ種と同様、河川の源流域で値が小さく、中流域で大きかった。第2軸は川幅が広い採取地点で大きな値を示した。

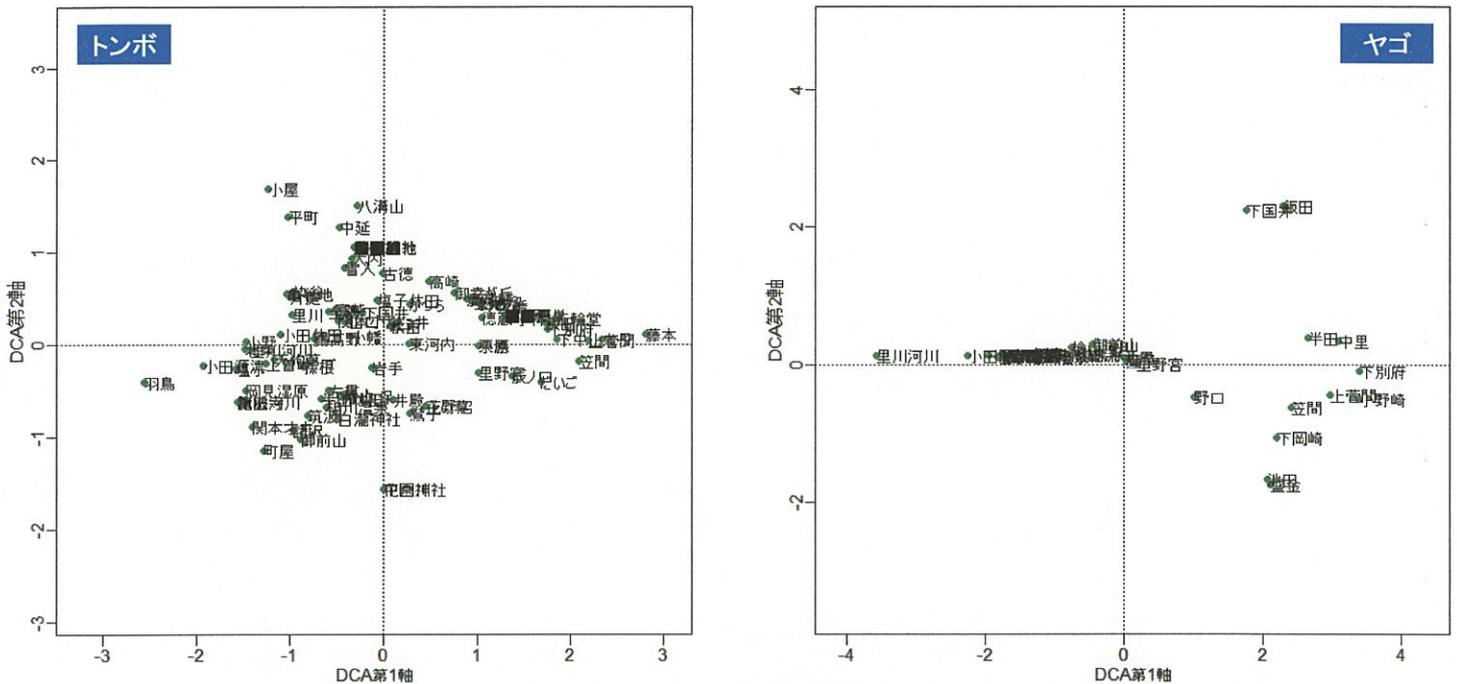


図7. 流水性のトンボおよびヤゴ種における採取地点スコアの除歪対応分析による座標付け

DCAの結果に基づき、第1軸から第3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)。止水性のトンボ種同様、選ばれた要素間にお互い相関があった場合、最も相関係数の高い要素を選び出した。第3および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ず、関係性は明らかではなかった。

表2. 流水性のトンボおよびヤゴ種においてDCA第1、2、3軸と有意な相関を示した環境要素

トンボ			ヤゴ		
	p-value	Kendall(τ)		p-value	Kendall(τ)
DCA 第1軸			DCA 第1軸		
(1) 周辺 600m 内の住宅地および工場の面積	0.0001	0.4685	(1) 標高	0.0000	-0.5359
(2) 周辺 600m 内の森林の面積	0.0001	-0.4545	(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	0.3827	(3) 周辺 600m 内のコンクリートの面積	0.0003	0.5006
(4) 周辺 600m 内の草地の面積	0.0007	0.3517	(4) 環境水中の Ca ²⁺ 濃度	0.0003	0.4880
(5) 周辺 600m 内の湿地の面積	0.0010	-0.3452	(5) 周辺 600m 内の森林の面積	0.0008	-0.4601
(6) 周辺 600m 内の水田の面積	0.0026	0.2611	(6) 環境水中の Mg ²⁺ 濃度	0.0011	0.4530
DCA 第2軸			DCA 第2軸		
(1) 川幅	0.0001	-0.4271	(7) 環境水中の S 濃度	0.0012	0.4498
(2) 河川の水域面積	0.0003	-0.3629	(8) 周辺 600m 内の住宅地および工場の面積	0.0025	0.4358
(3) 標高	0.0005	-0.3823	(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

トンボ種において、第1軸サイトスコアは「周辺 600 m内の住宅地および工場の面積」と最も有意な正の相関(p=0.0001, τ=0.4685)があり、「コンクリートおよび草地の面積」も有意な正の相関(p=0.0003, τ=0.3827, p=0.0007, τ=0.3517)が認められた。また反対に「森林の面積」とは高い有意な負の相関(p=0.0001, τ=-0.4545)があった。第2軸サイトスコアは「川幅」および「河川の水域面積」と有意な正の相関(p=0.0001, τ=-0.4271)

1、 $p=0.0003$, $\tau=-0.3629$)が認められた。以上より、DCA 第1軸は「周辺 600 mの住宅地および工場、森林、コンクリート、草地の面積」、第2軸は「川幅」、第3軸は「湿地の面積」が大きな説明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軸の正の方向には市街化が進みコンクリートで護岸された中流域が、負の方向には森林に囲まれた源流域が位置づけられていると説明できた。第2軸の正の方向には標高の高い山中のせまい溪流が、負の方向には標高の低い平地の広い河川が位置づけられていると説明できた。

また、ヤゴ種において、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」のみと有意な正の相関($p=0.0004$, $\tau=0.4149$)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 600 m内のコンクリートの面積」、第2軸は「川幅」が大きな説明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で市街化が進みコンクリートで護岸された河川の中流域が、負の方向には山間部の森林に囲まれた谷川の源流域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いくつか集まった平野部を流れる川幅の広い河川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、流水性トンボ種スコアの散布図(図8)をプロットした。第1軸の種スコアの値はキロサナエ、アオサナエ、キロヤマトンボ、ホンサナエ、セスジイトンボ、ナゴヤサナエ、オナガサナエなどが大きい値を示した。さらに、ヒメクロサナエ、ムカシトンボ、モイワサナエ、クロサナエなどは小さい値を示した。第2軸の種スコアの値はミヤマアカネ、ミヤマサナエが大きく、ダビドサナエで小さかった。続いて、流水性ヤゴ種スコアの散布図をプロットすると、第1軸の種スコアの値はキロヤマトンボ、ナゴヤサナエ、ホンサナエ、シオカラトンボ、ハグロトンボなどが大きい値を示した。さらに、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軸の種スコアの値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、キロサナエなどで小さかった。

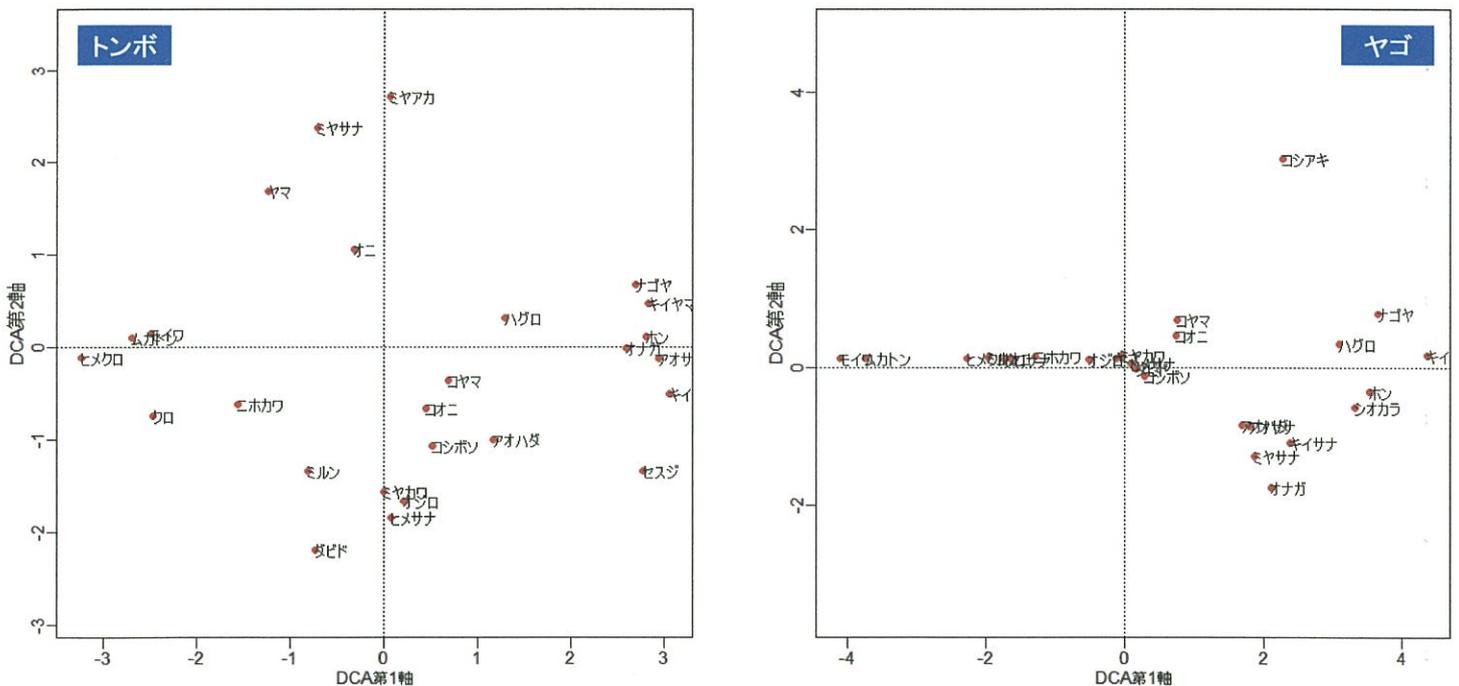


図8. 流水性のトンボおよびヤゴにおける種スコアの除歪対応分析による座標付け

止水性のトンボ種と同様、流水性のトンボ種におけるDCAの採取地点スコア(図7)と種スコア(図8)をプロットした2つの図を重ね合わせ、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の溪流に生息するような小さな体サイズのグループ、右側は市街化された平地の河川に生息するような中から大きな体サイズのグループに分けられた。第2軸下側は標高が低い川幅の広い平地の中流域に生息するようなグループ、上側は標高が高く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、河川に生息する流水性のトンボ種は周辺の住宅地および工場、森林、コンクリートの有無が生息地選択の主な要因となることが示され、他に草地、湿地の有無、川幅についても要因となることが推察された。また、流水性のヤゴ種の生息地は標高および水域面積の影響を強く受けていることが示され、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。

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トンボ、ヤゴ両群集において最も高く相関が得られた環境変数は周辺 600 m内の森林の面積で、他に湿地の面積など高い相関を示した環境変数はおおむねトンボとヤゴとで同じであった。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、普段から現地でも多くのトンボ種が森林と水域を頻繁に往復しているのを確認していた。一方で、ヤゴは森林には直接生息していない。これはヤゴ群集の

分布が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を示唆している。

ところが、流水性のヤゴ種においては選ばれた環境変数が河川の水域面積や川幅などとなり、トンボ群集とは必ずしも適合しない変数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ので、異なる環境変数が選ばれたと考えられる。河川は周辺の森林に加え、トンボ群集は住宅地および工場の面積、ヤゴ群集はコンクリートの面積と強い相関があり、すでに現状のトンボ群集が都市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、止水性のヤゴ種では Fe、Al、P など、流水性のヤゴ種では Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、S などの濃度が相関の有意な環境変数として選ばれ、止水性と流水性で選ばれた変数が一致しなかった。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増加する傾向がある。そのため、標高や川幅とも相関がみられ、流水性のヤゴ種で Ca^{2+} 濃度が環境変数として選ばれたのだろう。また、止水性のヤゴ種で Fe 濃度が環境変数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。

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、流水性トンボおよびヤゴ種だけでなく止水性トンボおよびヤゴ種でも高い相関があったことから、重要な要因であることがうかがえた。

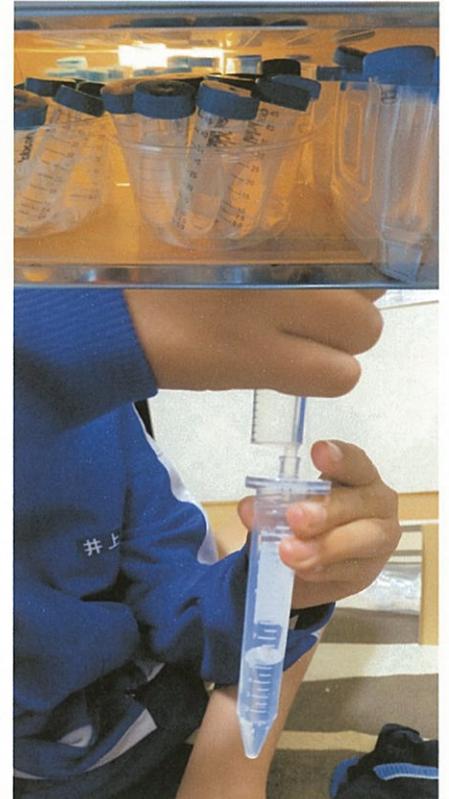
トンボの特性に基づいて現在の池および湿地、水田、プールなどとその周辺地域の生物多様性を保全するには、池の周り 600m くらいの空間スケールで森林が豊富にあり、近場に湿地や草地が存在するような環境が必要である。さらに、水生植物は産卵場所だけでなく、止まり木、体温調節のための日陰、交配場所を提供すると考えられるので、池の中には多様な植物相の水生植物が広がっているような環境も重要である。また、河川とその周辺地域の生物多様性を保全するには、トンボのために市街化を、ヤゴのためにコンクリート化を減らすとともに、ある程度の川幅を確保しつつ、やはり森林が豊富にあるような環境が必要である。

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 2022 年 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融資に取り込もう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。

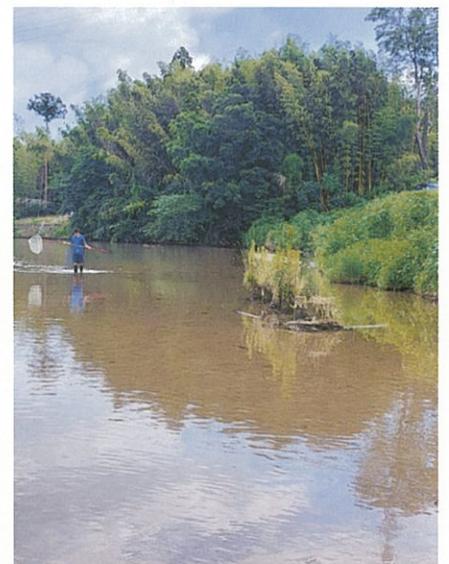
6. 感想

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、ホソミイトトンボを採取、ヒヌマイ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。茨城県では全部で 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、ホソミイトトンボを含む 5 種は飛来種とされているので (県ミュージアムパーク報告による: 二橋亮ら)、コンプリートまであと 4 種となった。うち 3 種 (ネアカヨシヤンマ、タカネトンボ、ハッチョウトンボ) と生息地不明の 3 種 (ベニイトトンボ、オオセスジイトトンボ、キトンボ) については他県に行った際に確認できてはいるが、これらと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。



環境水サンプルの保存ところ過



石岡市半田恋瀬川にて



今年作成した標本

茨城県内で
採取した
トンボ79種

- エゾイトトンボ
- ホソミイトトンボ
- ヒヌマイトトンボ

					
ムカシトンボ 2022.04.08	サラサヤンマ 2022.06.25	コシボソヤンマ 2021.08.11	ミルンヤンマ 2022.08.29	アオヤンマ 2022.07.02	カトリヤンマ 2021.09.24
					
マルタンヤンマ 2017.09.24	ヤブヤンマ 2020.08.09	マダラヤンマ 2019.09.23	オオルリボシヤンマ 2022.08.20	ルリボシヤンマ 2021.09.23	ギンヤンマ 2022.08.14
					
ウチワヤンマ 2022.06.12	コオニヤンマ 2022.07.02	オナガサナエ 2022.07.24	アオサナエ 2022.05.22	クロサナエ 2022.05.05	ダビドサナエ 2022.05.05
					
ヒメクロサナエ 2022.04.08	ヒメサナエ 2022.07.10	オジロサナエ 2022.06.28	コサナエ 2022.06.18	ミヤマサナエ 2022.07.31	ナゴヤサナエ 2022.07.23
					
キイロサナエ 2022.05.12	ヤマサナエ 2022.05.07	ムカシヤンマ 2022.06.05	オニヤンマ 2022.07.31	トラフトンボ 2022.05.07	エソトンボ 2022.07.24
					
キイロヤマトンボ 2018.06.09	コヤマトンボ 2022.05.18	チョウトンボ 2022.07.02	ナツアカネ 2021.09.21	リリアカネ 2021.08.19	ノシメトンボ 2021.09.05
					
コノシメトンボ 2022.08.06	ヒメアカネ 2017.09.09	マユタテアカネ 2022.09.05	マイコアカネ 2021.09.12	ミヤマアカネ 2022.08.07	ネキトンボ 2022.07.31
					
コフキトンボ 2022.06.17	ショウジョウトンボ 2021.09.13	ウスバキトンボ 2022.08.08	ハラビロトンボ 2022.07.10	シオカラトンボ 2022.05.24	シオヤトンボ 2022.05.07
					
ヨツボシトンボ 2022.05.28	ニホンカワトンボ 2022.06.05	アオハダトンボ 2022.06.25	ミヤマカワトンボ 2022.08.12	ハグロトンボ 2022.07.24	オツネトンボ 2022.05.28
					
アオイトトンボ 2021.09.13	オオアオイトトンボ 2022.08.06	コバナアオイトトンボ 2021.09.23	モノサシトンボ 2022.08.12	オオモノサシトンボ 2022.06.11	キイトトンボ 2022.08.20
					
クロイトイトトンボ 2021.09.05	セスジイトトンボ 2017.07.09	オオイトトンボ 2022.08.12	ムスジイトトンボ 2022.07.23	モートンイトトンボ 2022.06.18	アオモンイトトンボ 2022.06.12
					
アジイトトンボ 2022.05.29					