

珪藻による河川の水質判定シミュレータSimRiverの作成[†]加藤和弘^{*1}・真山茂樹^{*2}・大森宏^{*3}・清野聡子^{*4}東京大学大学院農学生命科学研究科附属緑地植物実験所^{*1}東京学芸大学教育学部生物学教室^{*2}東京大学大学院農学生命科学研究科^{*3}東京大学大学院総合文化研究科^{*4}

本研究は、生物群集の種組成と環境条件の関係をモデル化するプログラムを利用し、生物の種組成と生育環境、あるいは人為的影響との関係を学習するための教材を開発することを目的とするものである。著者らのフィールド調査データの多変量解析により、河川産珪藻群集の種組成と環境条件を対応づけるモデルの開発を行った。並行して流域環境と水質を対応づけるモデルの開発を行い、これらを統合した環境学習のための教材“SimRiver”を提案する。教材利用者はモデル河川の環境条件を設定し、その条件下で予測される種組成に基づきコンピュータの画面に描かれる珪藻の同定および計数を行って、その結果を用いて水質評価を仮想体験する。珪藻の同定作業は実際には繁雑だが、作業画面と連動した電子珪藻図鑑を用いて行えるように工夫されている。こうした教材の適切な利用法、あるいはその利用を組み込んだカリキュラムの検討が、今後の課題となろう。

キーワード：河川、水質汚濁、付着珪藻群集、環境条件-種組成モデル、生物教育、環境教育

1. はじめに

人間活動と生物の関わりを学習するための手段として、1980年代の中頃に、生物指標が注目された（日本自然保護協会 1985）。それまでは、生物指標は中長期的・総合的な環境評価のための手段とされていたが（渡辺ほか 1984）、調査や分析を簡便化することによって専門的な知識を持っていなくとも利用できる生物指標を作成し、生物指標を用いた環境評価を実際に行うこ

とを通じて生物と環境の関係の理解を図ろうというものであった。しかし、この試みは学校教育の場においてはそれほど広がりをみせることなく今日に至っている。その理由は現時点でなお明らかにされていないが、(1)学校教育の正課の中で生物指標を取り上げることができなかったこと、(2)生物の野外での観察や調査を指導するにはある程度の専門的な知識が必要であること、さらには(3)野外での活動を行う余裕や適切なフィールドが十分でないこと、などが理由として考えられる。

平成元年度以降の学習指導要領では、中学校の理科第二分野の内容に含まれる自然と環境、および高等学校生物Ⅱに含まれる課題研究で生物指標が扱えること、また、総合的な学習の時間が学校教育のカリキュラムにおいて正式に採用され、さらに、発展的な学習が理科を含む既存の教科において可能になったことから、上述の(1)は解消されているといえる。しかし、(2)、(3)の問題点は、依然として残っている。

近年、筆者らは、生物群集の種組成と環境条件を対応づけるコンピュータ上のシミュレーションモデル（環境条件-種組成モデル）を利用することで、これら2つの問題点を解消し、生物と生育環境、あるいは人為的影響

2004年2月2日受理

[†] Kazuhiro KATOH^{*1}, Shigeki MAYAMA^{*2}, Hiroshi OHMORI^{*3} and Satoquo SEINO^{*4}: Construction of "SimRiver": a Simulation Program for River Epilithic Diatom Assemblage Composition

^{*1} Experimental Station for Landscape Plants, The University of Tokyo, Hanamigawa-ku, Chiba, 262-0018 Japan

^{*2} Department of Biology, Tokyo Gakugei University, Koganei-shi, Tokyo, 194-8501 Japan

^{*3} Department of Agricultural and Environmental Biology, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8657 Japan

^{*4} Department of General Systems Sciences, The University of Tokyo, Meguro-ku, Tokyo, 153-8902 Japan

との関係を学習するために有効な教材を作成することを試みている。本研究ではこれらの成果のうち、主にプログラムの開発と教材化についての報告を行う。

2. 材料—河川の付着珪藻群集—

河川に生育する生物は、水の汚れ（水質汚濁）の状態によってその種組成が変化する。多くの人間にとって河川でもっともなじみの深い生物は魚類、あるいは水鳥の仲間だが、これらの生物は水質汚濁以外にも流速、水深、流量、水辺の植生、近隣の河川や湖沼の生育場所としての質やそこまでの移動可能性など、多様な条件の影響を受けており（加藤 1989, 加藤・武内 1991）、環境の変化と生物相の関係が十分に把握されていない。一方付着珪藻類の生物相は、通常の河川では水質汚濁の状態に最も大きく影響される（LANGE-BERTALOT 1979, 小林・真山 1981, WATANABE *et al.* 1986, KOBAYASI and MAYAMA 1989, 真山 1998, 1999）。日本国内において主要種の水質汚濁に関する環境指標性を明らかにした先行研究（KOBAYASI and MAYAMA 1982, MAYAMA and KOBAYASI 1984, 小林ほか 1985, WATANABE *et al.* 1986, KOBAYASI and MAYAMA 1989, MAYAMA 1999, IDEI and MAYAMA 2001）は、概ね共通の結論を導き出しており、地域（言い換えれば種の供給源）を限定してやれば、水の汚れと種組成の関係がモデル化できる状態にまで研究は進んでいると考えられる。

確かに、付着珪藻の種組成は、水の汚れ以外の要因によっても変化する。その主要なものとしては酸性化（RENBERG and HELLBERG 1982）、海水の混入（LOBO *et al.* 1995）、季節性（水温の変化, KATOH 1991）、流速・流量（加藤 2000）を挙げることができる。とはいえ、一般的な河川における空間的な環境変化を取り上げた場合、酸性化はそれほど問題にならず、海水の混入が問題になるのは河口付近に限られる。流速の変化は、局所的な河床勾配や流路形状などの要因によってミクロスケールで変化する。そのため、河口付近を除いて河川をある程度広域的に捉え、そこにおける付着珪藻群集種組成の空間変化を扱うのであれば、水の汚れと季節性を考慮すれば十分である場合が多い。

生物群集と環境条件の関係を分析してモデル化する場合、環境傾度が多くなればなるほどその作業は困難になる（GAUCH 1982）。従って、2つの環境傾度を取り上げれば種組成の変化の相当部分を把握できる河川の付着珪藻群集は、環境変化と群集種組成の変化の関

係を理解し、また生物の環境指標性を学習する上で、適切な教材となり得る。特に水質汚濁と種組成の関係を理解することは、人間活動が生物に与える影響を考えるよいきっかけになると考えられる。

問題は、珪藻の採集は比較的容易であるものの、採集した珪藻を観察可能な状態にするための処理にはある程度の技術を要し、さらに顕微鏡による珪藻の観察、同定には専門的な知識を必要とするという点である。すなわち、はじめにこの章で述べた第二の問題を解決しなければならない。

そこで、生物の野外調査を仮想体験させ、そこにおける調査結果を利用して生物指標による環境評価を行うことで、この問題を解決することが考えられた。上山・小林(1986)は、予め決められた水質汚濁条件において出現することが期待される珪藻の写真を、予想される構成比率に応じた数だけ図版に貼り付けたものを、仮想的なプレパラート（モデルプレパラート）として利用することを提案した。これを水質汚濁の状況が異なる3種類用意し、水質汚濁に伴う種組成の変化を体験するとともに、生物指標による水質評価も体験させようというねらいであった。こうしたモデルプレパラートは授業での利用が容易であり、そのため、珪藻が種によって水質汚濁に対する耐性が異なること、その結果、珪藻の種組成が水質汚濁の状態に応じて変化することを、学習者に容易にわからせる効果があった（真山ほか1995）。また、珪藻のような生徒になじみの薄いミクロの生物を教材にする場合、その生物の採集方法や観察方法を紹介するビデオを作成し、その映示と併せてモデルプレパラート実習を行うことで学習効果があがることも示された（MAYAMA *et al.* 1996）。

紙のモデルプレパラート教材は、反復使用に対して物理的に弱く、生徒の人数分の教材の保管場所確保が容易でなく、全国への教材の配布も困難であった。しかし、インターネットの普及により、これらの欠点を克服することが可能になった。ホームページ上で公開されたモデルプレパラートは、インターネットに接続できる環境があれば、いつ、どこにでも等質の教材を提供できるものであった（真山 2001）。この教材はパソコンのモニターに、モデルプレパラートと図鑑を並列に置いたもので、コンパクトな使い勝手をもつものであったが、常に同じ場所に同じ種類の珪藻が配置しているため、くり返し使った場合に飽きられてしまう。また、水質汚濁の条件設定も数が限られていた。もし、モニター上のモデルプレパラートを、コンピュ

ータシミュレーションによるヴァーチャルプレバラー
トに置き換えれば、教材をくり返し利用する場合の単
調さを排除し、同時に多様な条件設定を可能とす
ることができると言える。こうした内容を具体化
させた教材が、本研究において開発されたプロ
グラム "SimRiver" である。本プログラムの実行
画面の一部とおおよその使われかたについては、
既に真山(2003)に紹介したが、プログラムの
根拠となる考え方やデータ、構成、具体的な
処理手順などは未公表である。本論文では
これらの点について明らかにしていく。

3. プログラムの構成

3.1. 環境条件一種組成モデルの基本構造の決定

従来の種組成モデルの多くは、種のアバン
ダンスは環境傾度上でガウス曲線状に変化
する (GAUCH 1982, AUSTIN 1987) という
法則性を前提としていた (MINCHIN 1987)。
しかし、多数の種によって構成される現実
の群集にこれを当てはめる、すなわち、100
を超える種のそれぞれについて、ガウス
曲線のパラメータを決定するのは容易で
はない。特に少産種については、必要
なデータを集めることさえままならない
だろう。さらに、最も主要な環境傾度
に対する反応は記述できても、より低
次の環境傾度に対する反応を記述する
ためのデータを集めると、これは膨大
な量の元データが必要になってしまう。

また、自然の生物群集の種組成を調べた
場合に、データに何らかの形でノイズが
乗ることが普通である。同一の環境条
件下で複数のサンプルを得て種組成を
調べた場合に、サンプル間で全く同じ
結果になることは希である。植物群
集の場合、そのようなサンプル間の
パーセンテージ類似度は、0.7 (KORTEKAAS
et al. 1976), 0.7~0.8 (VAN DER
MAAREL *et al.* 1978), 0.5~0.9
(GAUCH 1982)などとされている。珪藻
群集の場合にはおよそ0.6~0.8である
(加藤, 未発表)。ガウス曲線モデル
をそのまま用いた場合、こうしたノ
イズはモデルに含まれないため、同
一の環境条件を設定すると、モデル
からは常に同じ種組成のサンプルが
得られることになる。

そこで SimRiver においては、水質汚濁
の幅の広い実際の河川で、四季を通
じて調査を行ったデータに基づいて
種組成変化のパターンを序列化モデル
にまとめ、利用することにした。KATO
H (1991) で報告されている、多摩
川水系浅川の珪藻群集種組成のデー
タを、主成分分析により序列化した
ところ、第1主成分は水質汚濁、

第2主成分は季節性を反映するもの
となった。すなわち前者は、化学的
酸素要求量 (COD) と高い相関を示
し、後者は2ヶ月間の累積水温と
相関を示した。従って、回帰分析
により COD と第1主成分、累積
水温と第2主成分を対応づける
ことが可能なのだが、これをその
まま種組成の推定に用いるのは
難しく、またノイズをうまく扱
うこともできない。

そこで、COD と季節性によって種
組成変化の多くの部分 (寄与率
から判断すれば42%) が説明でき
、残りの変動はほとんどがノイズ
に起因するものと見なして、COD
 と季節性を環境傾度とする Ecological
 space (GAUCH 1982) を想定した。
第一の環境傾度、COD を10段階、
第二の環境傾度である季節を3
段階 (春・秋、夏、冬) に分け、
Ecological space をそれぞれの組
み合わせに対応する30区画に分
割した。それぞれの区画には複
数のサンプルが含まれるので、
その平均の種組成をもって、そ
の区画において想定されるモ
デル群集の種組成とした。さら
に、実際に種組成を推定する
場合には、期待される種組成
に対応する確率で珪藻個体を
発生させるモンテカルロシミュ
レーションによって、必要な
個体数だけ珪藻の仮想サンプリ
ングを行い、仮想的な種組成を
計算することとした。こうする
ことによって、ノイズもシミュ
レートすることが可能となった。

以上のプロセスを具体的な計算
手順として表現すると、次のよう
になる。

- (1) プログラムで用いられる変数
(カウンターやダミーなどプログラ
ミングテクニック上の変数を除く)
 - ・珪藻群集構成種の相対出現頻度
: $species(i)$, $i=0\sim 99$ (教材
としての使いやすさを考慮し、全
部で100種を採用した。)
 - ・SI (汚濁指数) : si
 - ・個々の種の汚濁耐性値 : $s(i)$,
 $i=0\sim 99$
 - ・季節 : $season$ (次節で説明する
流域環境-水質モデルより値を受
け取り代入。冬なら0, 春・秋
なら1, 夏なら2の値を取る。)
 - ・COD : COD (流域環境-水質
モデルより、シミュレーション
対象地点のCOD推定値を受け
取り代入。)
 - ・COD階級値 : $CODclass$ (COD
の値に応じて、0から9までの
値を取る。)
 - ・浅川で実際に記録されたデー
タに基づき作成されたモデル群
集における相対出現頻度 (群集
の個体数に対する当該種の個
体数の比率の推定値) : $asa(i,j,k)$,
 $i=0\sim 99$, $j=0\sim 2$, $k=0\sim 9$
(k で指定されるCOD階

級値と j で指定される季節に対応するモデル群集における i 番目の種の相対出現頻度である)。

(2)定数

- $s(i)$ に、個々の種の汚濁耐性値を入力する。汚濁耐性値は、KOBAYASHI and MAYAMA(1989) および MAYAMA(1999) に、近年の知見に基づく必要な修正を施したものとする。
- モデル群集を作成し、その結果に基づき $asa(i, j, k)$ に値を入力する。

KATO(1991)が示した種組成の季節変化のパターンに基づき、集計対象となるデータを3つの季節に区分する。元のデータはいずれも奇数月に得られているので、7月と9月を夏($j=2$)、5月と11月を春・秋($j=1$)、1月と3月を冬($j=0$)とする。CODは0.7 ppm未満、0.7~1.5 ppm、1.5~2.2 ppm、2.2~3 ppm、3~4 ppm、4~5 ppm、5~6 ppm、6~8 ppm、8~10 ppm、10 ppm以上の10階級に区分する。各階級に対応する k の値は、0から1刻みで9までとする。KATO(1991)では石の上面から得たサンプルと植物枯死体から得たサンプルを分析の対象としているが、両者の間の差は小さかったこと、および、付着珪藻を環境指標生物として利用する場合には石の上面からサンプルを得るのが通例であることから(ROUND 1993, MAYAMA *et al.* 1996)、ここでは石の上面から得たサンプルのデータのみを用い、季節とCOD階級の組み合わせごとに平均する。複数の調査地点が該当する場合は、該当する調査地点全体における平均値とする。 $k=9$ の場合のデータは存在しなかったため、 $k=8$ のデータから汚濁耐性値が4(=もっとも汚濁に強い)の種のみを選択し、それらの種の構成比の合計が1(100%)となるように構成比を案分する。

(3)計算式

- if $COD < 0.7$ then $CODclass = 0$ else (if $COD < 1.5$ then $CODclass = 1$ else (.....)); COD推定値を階級値に変換
- $species(i) = asa(i, season, CODclass)$; CODの階級と季節に対応するモデル群集における種 i の構成比
- $si = \sum\{s(i) * species(i)\}$; 汚濁指数の計算

(4)処理の流れ

- $s(i)$ の値をセットする。
- $asa(i, j, k)$ の値をセットする。
- $CODclass$ の計算
- $species(i)$ の計算 (全ての種 i について、変数 $season$ の値を j に、変数 $CODclass$ の値を k に代入して得ら

れる $asa(i, j, k)$ の値を、 $species(i)$ に代入)

- si の計算
- $species(i)$ と si の値を返して終了。

計算された $species(i)$ の値を期待される相対出現頻度としてモンテカルロシミュレーションを行い、得られた種ごとの個体数に基づいてヴァーチャルプレパラートを描画する。このルーチンについての説明は省略する。

3.2. 流域環境—水質モデルの構築

河川の付着珪藻群集に影響を与える水の汚れは、実は多次元的に把握されるべきものである。たとえば、三浦半島の森戸川・下山川では、電気伝導度で指標される無機質な側面と、CODで指標される有機汚濁の側面とが、時に独立して変化しており、両者の総合的な効果を想定することで初めて、水の汚れの状態と付着珪藻群集の種組成の変化が対応づけられることがわかっている(KATO 1992)。とはいうものの、ほとんどの河川では、このように水の汚れを構成するいくつかの次元は相互に独立ではなく、むしろ強い相関をもって変化していることがわかっている(KATO 1991)。そこで、本プログラムでも、水の汚れの状態は一次的に表現可能なものと見なすことにした。その場合、何をもって水の汚れの状態を示す理化学的な指標とするか、という問題が生じる。複数の水質項目から計算される水質得点のようなものを利用することも考えられるが、生徒にとっての理解のしやすさという点で劣る。本プログラムでは、中学生、高校生でも多少は見聞きしたことがあるような項目で、かつ、次に述べる流域環境—水質モデルに対応しているという点を考慮して、CODを採用した。

CODの値を直接指定させ、あるいは、きれいな、少し汚れている、だいぶ汚れている、汚れている、といった感覚的な尺度の中から水の汚れの状態を指定させて、その状況下で出現し得る付着珪藻の種類を推定して示す、というプログラムも考えられたが、本プログラムでは、それにもう一段階、別のプロセスを付加した。河川の水質は、流域の土地利用や人口、下水処理施設の有無などによってある程度推定可能である。CODについては、現実的に利用可能な形でこうしたモデルが作られている(加藤 1994)。流域環境から水質を推定するモデル(流域環境—水質モデル)を本プログラムに組み込むことで、学習する生徒は、流域環境—水の汚れ—水中の生物、という人為的な環境インパクトの流れを体験的に理解できると考えられる。

流域環境—水質モデルは、実際の河川の分岐(支流

の合流)の状況にあわせて作成できるが、その場合は画面表示もプログラムも煩雑になる反面、学習にとってそうした状況が必要であるとは言い難い。そこで、本流のみのモデル河川を想定し、その流域の状況を生徒が指定すると、指定に応じてモデル河川中の何カ所かの水質(COD)が推定される、という形を採用した。

本プログラムでは、使用者は土地利用(山林、農耕地、住宅・市街地)、人口、下水処理場の有無の3項目を指定できるものとした。水辺の植生(河川の自浄作用に関係)、工場の種類や量など、加藤(1994)の流域環境-水質モデルに組み込まれている項目の一部は、煩雑さを避けるために操作の対象としなかった。流域環境-水質モデルの詳細は資料1に示した。

加藤(1994)に基づき、メッシュモデルの形式で作成した。想定されるモデル河川は、全長10kmで支流の流入が見られないものとし、2kmずつの5つの区間に分割して表現した。

メッシュモデルの作成にあたっては、1メッシュは2km四方に相当するものとし、それが5つ直列に配置されたモデルを考えた。河川水は、メッシュ列の一端からもう一端に流れるものとした。但し画面上では、学習者にとってのなじみやすさを考慮し、河川はある程度蛇行しているものとして描いた。

メッシュモデルの計算にあたり、汚濁負荷物質のメッシュ内での流達率は考えなかった。尿尿はくみ取られて域外処理されるか、または下水処理場に送られるものとした。

4. 完成した SimRiver

完成した SimRiver の環境条件設定画面を図1に示す。学習者が作業しやすいように、最近のコンピュータソフトでは一般的なラジオボタンによる選択を採用した。また、選択された条件に応じて画面の状態(土地利用や家の数、季節に応じて背景の山や樹木の様子、など)が変化し、設定された条件の一覧表とともに、学習者がどのような選択を行ったのか、確認しやすいようになっている。

設定された条件に応じて推定される種組成を反映したヴァーチャルプレパラートの一例を図2に示す。学習者の便を考え、同定を終えた珪藻にマークを付けたり、右画面に表示される電子珪藻図鑑と同定作業を連動させることができる。また、学習者が行った同定の答え合わせも可能である(真山 2003)。

SimRiver は、その概略が完成した後、実際に中学校

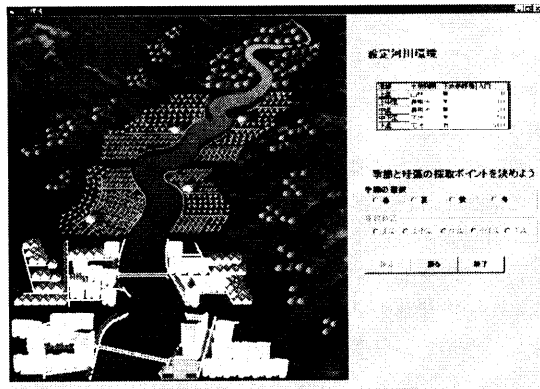


図1 環境条件入力画面. 資料1の「入力画面2」にあたり、ここでは季節と採集地点を入力する。

や高校の授業および中学高校生対象の公開講座で試用し、珪藻を用いた水質評価のシミュレーションをそれぞれの参加者に行ってもらっている。また、本来想定した使用方法ではないが、群集の種組成のシミュレーションモデルとして、生物群集の種組成の分析法に関する大学生の実習等でも使用可能であり、種多様性の指数や群集類似度、種組成データの変量解析法などの実習で試験的に利用している。これら、本教材を使用した授業の詳細な評価については、別途公表を準備中である。

5. 考 察

多変量解析を用いた生物群集種組成の分析は、1970年代より徐々に行われるようになり、1980年代には概ね今日の主要な手法が確立された(GAUCH 1982, TER

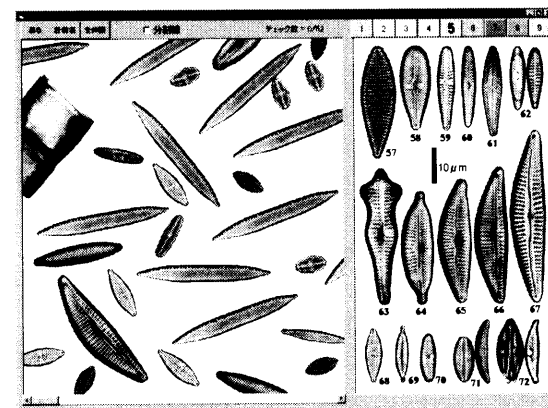


図2 ヴァーチャルプレパラート. 左側の画面がそれで、右側に表示されている電子珪藻図鑑を隠して、全画面表示にすることもできる。

BRAAK 1986, 加藤 1992). その後今日に至るまでの計算機とソフトウェアの進歩は, 多変量解析を容易に実行可能なものとし, それを用いた多くの研究論文が公表されている.

問題は, 研究の事例は多いものの, その成果が具体的に応用された事例が乏しいことである. 加藤(1996b)は, 多変量解析による生物群集分析は地域の環境計画などに応用可能であるとしているが, 実際にそうした実務で多変量解析の成果が利用されたケースは, 調査研究の色彩が強い事例(例えばドイツのドラッヘンフェルス地域における地域計画用のピオトープ地図作製のための調査, BLAB *et al.* 1989)を除けば, 我が国では管見では見あたらず, 国外でも少ない(国外での事例として, イギリスで底生無脊椎動物を指標生物として開発された全国的な河川環境評価手法の River InVertebrate Prediction And Classification System (RIVPACS), MOSS *et al.* 1987がある). 環境計画や環境管理を行う行政の現場では, 簡便な生物指数や特定の指標生物(環境指標種, 象徴種, 希少種など)の分布が, 環境の分析や評価のための主要な方法となっている. 国外でも, 特定の種の出現傾向をモデル化し, 簡便な指数として利用できるようにしたもの(例えば Habitat Suitability Index (HSI), U.S. FISH AND WILDLIFE SERVICE 1981; Index of Biotic Integrity (IBI), KARR 1981)や, それを水理モデルと組み合わせて河川環境管理に利用しようとする手法(Instream Flow Incremental Methodology (IFIM), BOVEE *et al.* 1998)が, より一般的になっている. なぜだろうか. それは, 多変量解析やその結果が, 一般には理解しがたいものであり, 従って環境計画や環境管理といった場で利用しにくいことに起因すると思われる. 実際, 上述した海外における手法においても, 指数やシステムの背景に多変量解析を利用したモデルがありながら, 現場の利用者はそれを意識しないですむように工夫がされている.

今回制作した SimRiver もまた, 多変量解析によって得られたモデルの部分をブラックボックスにしてしまうことで, 逆に, 生物群集と環境との関係が理解しやすくなったといえる. 流域の汚濁負荷をどの程度にすれば生物相はどう変化するか, 操作的に確認することができるため, 専門家が多変量解析の出力を見て結果を理解するのに比べると手間も時間もかかるとはいえ, 非専門家でも多変量解析の結果を利用することができる.

今回の研究では, この性質を環境学習の教材に利用

したが, 地域計画のためのツールに利用することも可能である. 地域計画で珪藻の生育状況が問題になることは現状では滅多にないが, この方法それ自体は, 生物相と環境条件を対応づけるモデルの構築ができさえすれば, 他の生物に対しても応用が可能である. 実際, 底生無脊椎動物や鳥類を材料にしたモデルの構築を, 現在検討中である. 底生無脊椎動物の場合には, 水質汚濁以外にマイクロハビタットの影響を強く受ける上(竹門 1999), 流速や堆積物の性状にも依存するため(加藤 2001), 付着珪藻に比べてモデルが複雑になるのが困難な点だ. 鳥類も, その種組成に影響を与える要因は少なからずあり, 比較的種組成の変化のパターンが単純な都市および近郊の緑地であっても, 樹木被覆面積, 植物種数, 下層植生の発達の程度に影響を受ける(加藤 1996a). また, 周辺の同種の生育地の分布状況にも影響されるので(一ノ瀬・加藤 1994), 河川の付着珪藻群集に比べるとモデル化はやはり困難だろう. とはいえ, 個別のモデル化の事例は, 特に鳥類については既に少なからず報告されている(SÆTERSDAL and BIRKS 1993, 加藤 1996a, ICHINOSE and KATOH 1998, 加藤ほか 2003). これらの事例を集めて共通点を探し, モデル上考慮すべき環境条件を限定してモデルの適用可能範囲を明確にしつつ, モデルを構築することができれば, SimBird in Urban Park といった具合のプログラムも実現できるだろう.

SimRiver で使用した珪藻は, 中学校理科, および高等学校生物の教科書に必ず登場する生物である. しかし, 顕微鏡を用いないと観察できないうえ, たとえ観察できたとしても, 通常よく見かける種類は $100\mu\text{m}$ 以下のサイズのため, 中学, 高校の顕微鏡では必ずしもよく見えず, また適当な図鑑がないため同定が難しく, 教材として扱うにはハンディーを負った生物であった. しかし, SimRiver では, モニターに良質な珪藻の顕微鏡写真を提示することにより, 生徒は親しみを持って実習することができる. また, モデルプレパラートの横に配置した図鑑と, 答え合わせモードを使用することにより, 専門的知識を持ち合わせなくとも実習ができる. また, 学習者自身が流域環境を自由に創造し, その一部を変化させることで, どのように種組成と水質が変化するかを知ることができるが, これは野外フィールド実習では実際に体験できないことである. これら, SimRiver が持つ特徴はコンピュータを利用することにより初めて可能となったものである.

教材としての SimRiver はこのような形で一応の完成

を見ることができた。しかし、教材はそれ単体では十分な意義を持たない。適切な利用法、あるいはその利用を組み込んだカリキュラムが、教材を生かしていく上で不可欠である。SimRiverについても、試験的な利用を繰り返し改良を重ねると並行して、今後そうした点について検討を進めていくことが必要だろう。

なお、本シミュレーションソフトは下記 URL にて軽量版を公開している。

<http://library.u-gakugei.ac.jp/diatom/> (ミクロの生物「珪藻」から川の環境を見つめてみよう)

6. ま と め

- ・多変量解析の手法を用いて珪藻群集の種組成データを序列化し、序列第1軸が COD 値と相関する環境条件—種組成モデルを構築した。
- ・流域環境—水質モデルをメッシュモデルとして構築した。
- ・両モデルに加えて珪藻表示プログラムおよびそれらを統括するインターフェイスを作成し、人間活動と河川水質の関係を珪藻から学ぶ IT 教材 SimRiver を作成した。
- ・今後、本教材を有効に活用するカリキュラムの開発が期待される。

謝 辞

なお、本研究の一部は財団法人松下視聴覚教育研究財団第8回研究開発助成、平成14年度文部科学省科学研究費補助金特定領域研究(課題番号14022103)、および平成15年度文部科学省科学研究費補助金特定領域研究(課題番号15020101)からの研究助成によるものである。

参 考 文 献

- AUSTIN, M. P. (1987) Models for the analysis of species' response to environmental gradients. *Vegetatio*, **69** : 33-45
- BLAB, J., TERHARDT, A. and ZSIVANOVITS, K. P. (1989) Tierwelt in der Zivilisationslandschaft. Teil 1 : Raumeinbindung und Biotopnutzung bei Säugetieren und Vögeln im Drachenfelder Ländchen. Schriftenreihe für Landschaftspflege und Naturschutz, **30** : 1-223
- BOVEE, K. D., LAMB, B. L., BARTHOLOW, J. M., STALNAKER, C. B., TAYLOR, J. and HENRIKSON, J. (1998) Stream habitat analysis using the instream flow incremental methodology. USGS, *Biological Resources Division Information and Technology Report*, **USGS/BRD-1998-0004** : 1-131
- GAUCH, H. G. (1982) Multivariate analysis in community ecology. *Cambridge University Press*, Cambridge, pp.298
- 一ノ瀬友博, 加藤和弘 (1994) 埼玉県所沢市の孤立樹林地における鳥類群集の分布に影響を及ぼす諸要因について. *造園雑誌*, **57(5)** : 235-240
- ICHINOSE, T. and KATOH, K. (1998) Factors influencing bird distribution among isolated woodlots on a heterogeneous landscape in Saitama Pref., Japan. *J. Ecol. (Bratislava)*, **17** : 298-310
- IDEI, M. and MAYAMA, S. (2001) *Pinnularia acidojaponica* M. Idei et H. Kobayasi sp. nov. and *P. valdetolerans* Mayama et H. Kobayasi sp. nov. - new diatom taxa from Japanese extreme environments. In JAHN, R., J.P. KOCIOLEK, A. WITKOWSKI and P. COMPERE (eds) *Lange-Bertalot-Festschrift*. Gantner, Ruggell, pp.265-277
- KARR, J. R. (1981) Assessment of biotic Integrity using fish communities. *Fisheries*, **6(6)** : 21-27
- 加藤和弘 (1989) 生物による水環境評価について. *環境科学会誌*, **2** : 301-310
- KATOH, K. (1991) Spatial and temporal variation of diatom assemblages composition in a partly polluted river. *Jap. J. Limnol.*, **52** : 229-239
- 加藤和弘 (1992) 多変量解析を用いた珪藻群集の生態研究. *Diatom*, **7** : 1-8
- KATOH, K. (1992) A comparative study on some ecological methods of evaluation of water pollution. *Environ. Sci.*, **5** : 91-98
- 加藤和弘 (1994) メッシュデータによる浅川水系の水質予測モデル. 武内和彦・恒川篤史(編) *環境資源と情報システム*. 古今書院, 東京, pp.179-187
- 加藤和弘 (1996a) 都市緑地内の樹林地における越冬期の鳥類と植生の構造の関係. *ランドスケープ研究*, **59(5)** : 77-80
- 加藤和弘 (1996b) 生物群集の多変量解析とその地域環境計画への応用. *ランドスケープ研究*, **60(1)** : 46-55
- 加藤和弘 (2000) 河川における付着珪藻群集の多様性と水域形状の関係. *ランドスケープ研究*, **63(5)** : 523-526

- 加藤和弘 (2001) 河川中流域における底生無脊椎動物群集の多様性を規定する要因. ランドスケープ研究, **64**(5) : 607-610
- 加藤和弘, 一ノ瀬友博, 高橋俊守 (2003) 分類樹木を用いた生物生息場所の分類—河川水辺の鳥類群集を対象とした事例研究. 応用生態工学, **5** : 189-201
- 加藤和弘, 武内和彦 (1991) 河川環境管理のための生物群集分析に関する研究. 造園雑誌, **54**(5) : 281-286
- 小林弘, 真山茂樹 (1981) 強腐水域でのケイ藻による水質判定法の検討. 用水と排水, **23** : 1190-1198
- KOBAYASI, H. and MAYAMA, S. (1982) Most tolerant diatoms of severely polluted rivers in the vicinity of Tokyo. Jap. J. Phycol., **30** : 188-196
- KOBAYASI, H. and MAYAMA, S. (1989) Evaluation of river water quality by diatoms. Korean J. Phycol., **4** : 121-133
- 小林弘, 真山茂樹, 浅井一視, 中村真一 (1985) 東京およびその近郊の各種汚濁河川から採取したケイソウの出現様式, 特に相対出現頻度と BOD₅ との関係について. 東京学芸大学紀要 4 部門, **37** : 21-46
- KORTEKAAS, W. M., VAN DER MAAREL, E. and BEEFTINK, W. G. (1976) A numerical classification of European *Spartina* communities. Vegetatio, **33** : 51-60
- LANGE-BERTALOT, H. (1979) Pollution tolerance of diatoms as a criterion for water quality estimation. Nova Hedwigia Beih., **64** : 285-304
- LOBO, E. A., KATOH, K. and ARUGA, Y. (1995) Epilithic diatom assemblages response to water pollution in rivers located in the Tokyo Metropolitan area, Japan. Freshwater Biol., **34** : 191-204
- 真山茂樹 (1998) 河川の珪藻類. 千葉県史料研究財団 (編) 千葉県の自然誌本編4: 千葉県の植物1. 千葉県, 千葉, pp.246-249
- MAYAMA, S. (1999) Taxonomic revisions to the differentiating diatom groups for water quality evaluation and some comments for taxa with new designations. Diatom, **15** : 1-9
- 真山茂樹 (1999) 「水と生き物」珪藻を用いた河川の水質判定法. 第2回 SEF エコカレッジ. (財)科学教育研究会, 東京, pp.21-31
- 真山茂樹 (2001) 珪藻で水質環境を知るインターネット教材. 藻類, **49** : 219-220
- 真山茂樹 (2003) 付着珪藻を使った環境教育. 国立科学博物館ニュース, **406** : 11-13
- MAYAMA, S. and KOBAYASI, H. (1984) The separated distribution of the two varieties of *Achnanthes minutissima* Kuetz. according to the degree of river water pollution. Jap. J. Limnol., **45** : 304-312
- 真山茂樹, 上山敏, 真山なぎさ, 小林弘 (1995) 珪藻の採集および観察を通して種の多様性・生態的特性を理解させるビデオ教材の開発. 片山舒康(編) 生物教育の中で地球生態系の理解を深めさせるための広い視野に立った藻類の教材化. 平成5・6年度科学研究費助成金研究成果報告書. pp.29-55
- MAYAMA, S., UHEYAMA, S., MAYAMA, N. and KOBAYASI, H. (1996) A video program showing the procedure for collection and observation of diatoms used for evaluation of river water quality. In Kitano, H. et al. (eds) Biology Education to Nonbiology Majors. Proceedings of the 15th Biennial Conference of the Asian Association for Biology Education. AABE, Tokyo, pp.184-189
- MINCHIN, P. R. (1987) Simulation of multidimensional community patterns: towards a comprehensive model. Vegetatio, **71** : 145-156
- MOSS, D., FURSE, M. T., WRIGHT, J. F. and ARMITAGE, P. D. (1987) The prediction of the macro-invertebrate fauna of unpolluted running-water sites in Great Britain using environmental data. Freshwater Biol., **17** : 41-52
- 日本自然保護協会 (1985) 指標生物. 思索社, 東京, p.355
- RENBERG, I. and HELLBERG, T. (1982) The pH history of lakes in southwestern Sweden, as calculated from the subfossil diatom flora of the sediments. Ambio, **11** : 30-33
- ROUND, F. E. (1993) A review and methods for the use of epilithic diatoms for detecting and monitoring changes in river water quality. HMSO, London, p.65
- SETERSDAL, M. and BIRKS, H. J. B. (1993) Assessing the representativeness of nature reserves using multivariate analysis: vascular plants and breeding birds in deciduous forests, western Norway. Biological Conservation, **65** : 121-135
- 竹門康弘 (1999) 水生昆虫の生活と溪流環境. 太田猛彦・高橋剛一郎(編) 溪流生態砂防学. 東京大学出版会, 東京, pp.65-89

版会, 東京, pp.65-89

TER BRAAK, C. J. F. (1986) Canonical correspondence analysis: a new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis. *Ecology*, **67** : 1167-1179

上山敏, 小林弘 (1986) 高校生物のためのケイソウによる水質判定についてのドライラボ. 東京学芸大学紀要第4部門, **38** : 55-78

U.S. FISH AND WILDLIFE SERVICE (1981) Standards for the development of habitat suitability index models for use in the Habitat Evaluation Procedures. 103 ESM, U.S. Fish and Wildlife Service, Division of Ecological Services.

VAN DER MAAREL, E., JANSSEN, J.G.M. and LOUPPEN, J. M. W. (1978) TABORD, a program for structuring phytosociological tables. *Vegetatio*, **38** : 143-156

WATANABE, T., ASAI, K., HOUKI, A., TANAKA, S. and HIZUKA, T. (1986) Saprophilous and eurysaprobic diatom taxa to organic water pollution and diatom assemblage index (DAIpo). *Diatom*, **2** : 23-73

渡辺仁治, 水野寿彦, 御勢久右衛門, 桜井善雄, 盛下勇 (1984) 水生生物による水質の簡易調査法—策定の理論的根拠. 公害と対策, **20**(12): 82-86

Summary

The aim of the present study is to develop a new learning material for learning of the relationship between biota and habitat environment including anthropogenic disturbances, using numerical models representing the relationship. We made ordination of our field research data using multivariate analysis, followed by development of a simulation program for river diatom assemblage composition as well as a water quality estimation program using a mesh model. The developed programs were integrated to a learning material named "SimRiver". Users of this material set some environmental conditions for the modeled river. Diatoms are drawn on computer displays based on the species composition estimated under the environmental conditions. Users identify and count the diatoms, based on which they virtually experience water pollution evaluation using diatoms. As it is expected that identification of diatoms is not easy to most users, pictorial guide of diatom identification that is coupled with the material is prepared to help users. The

next problem will be to find proper ways to use such material and to develop appropriate curriculums using such material.

KEY WORDS: RIVER, WATER POLLUTION, EPI-LITHIC DIATOM ASSEMBLAGE, SPECIES COMPOSITION MODEL, BIOLOGY EDUCATION, ENVIRONMENTAL EDUCATION

(Received February 2, 2004)

資料1 流域環境—水質モデルの詳細

(1) プログラムで用いられる変数 (プログラミングテクニック上用いられるカウンターやダミーは除く)

- 人口, 土地利用 : $popul(i)$, $landuse(i)$ ($i=1,2,3,4,5$)
- 土地利用は, 0 : 山林, 1 : 農耕地, 2 : 住宅地・市街地
- 土地利用ごとに $landuseload(j)$ ($j=0,1,2$; 定数として与える) が定まっている
- 土地利用ごとに $landuseflow(j)$ ($j=0,1,2$; 定数として与える) が定まっている
- 下水処理の有無 : $disposalment(i)$
- 0 (あり) または 1 (なし), メッシュ内で処理されサンプル点の直前で放流
- 流量 : $flow(i)$ (当該メッシュ発生分), $flowoutput(i)$ (当該メッシュ流下分=累積値)
- 負荷量 : $load(i)$ (当該メッシュ発生分), $loadoutput(i)$ (当該メッシュ流下分=累積値)
- COD : $COD(i)$
- 季節 : $season$ (冬=0, 春・秋=1, 夏=2)
- 採集地点 : $samplingpoint$ (1~5)

(2) 定数または (計算上必要な) 初期値

$landuseload(0)=4000$ (g/day), $landuseload(1)$,

$landuseload(2)=0$

$landuseflow(0)=8000$ (t/day), $landuseflow(1)=4000$,

$landuseflow(2)=1000$

$populload = 28$ (g/day)

$populflow = 0.2$ (t/day)

$treatlevel = 20$

$alfa = 0.9$

$flowoutput(0)=loadoutput(0)=0$

(3) 計算式

$load(i) = popul(i) * populload * disposalment(i)$

$+ landuseload(landuse(i))$

$+ popul(i) * populflow * treatlevel *$

$(1 - disposalment(i))$

$$flow(i) = popul(i) * populflow + lamduseflow(lamduse(i))$$

$$loadoutput(i) = load(i) + loadoutput(i-1) * alfa$$

$$flowoutput(i) = flow(i) + flowoutput(i-1)$$

$$COD(i) = loadoutput(i) / flowoutput(i)$$

(4) 変数のうちユーザ（本プログラムにより学習する生徒）により入力されるもの

- ・土地利用 $landuse(i)$: 0: 山林, 1: 農耕地, 2: 住宅地・市街地
- ・人口 $popul(i)$: 0, 5, 10, 50, 100, 500, 1000, 5000, 10000, 50000, 100000から選択. 但し, 土地利用による制約がある(山林では50まで, 農耕地では1000まで)
- ・下水処理の有無 $disposaltreatment(i)$: 有無を選択(山林, 農耕地では自動的に「無」となる)
- ・季節: 春, 夏, 秋, 冬 (変数 $season$ の値は, 順に 1,2,1,0)
- ・採集地点: 1~5 (変数 $samplingpoint$)

(5) 処理の流れ

- ・画面を, 左右に分割し, 左側にモデル河川の初期画面を表示. 土地利用なしの状態の河川が描かれている.
- ・右側に入力画面1を表示.
 - 5つのブロックのうちどこかの状況を入力するか, まず選択する.
 - モデル河川で, 選択されたブロックの輪郭が強調表示される.
 - ブロックの土地利用を決める. デフォルトは山林. 決められた土地利用に応じてモデル河川のブロックの絵柄が変化する.
 - ブロックの人口を決める. デフォルトは10人. 決められた人口に応じてブロックの絵柄が変化する.

る. 50まで, 1000まで, 5000以上の3段階.

(山林は1段階, 農耕地は2段階, 住宅地は3段階) ブロックの下水処理場の有無を選択. デフォルトはなし(値1).

有りを選択したら, モデル河川の当該ブロックの中に下水処理場の絵が現れる.

全てのブロックについて入力が済んだら, OKボタンを押させる.

全てのブロックの入力が済んでいるかどうか, 確認のメッセージとボタンを表示.

ボタンが押されたら, 入力画面1から入力画面2に切り替える.

計算を実行し, 各ブロックの下流端におけるCOD推定値を算出する.

- ・入力画面2を表示

採集の季節はいつであるか, 質問. 春, 夏, 秋, 冬で答える.

入力結果に基づき, 変数 $season$ に値0~2をセットする.

5つのブロックのうち, どこで珪藻を採集するか, 質問.

入力結果に基づき, 変数 $samplingpoint$ に値1~5をセットする.

河川の状況, 季節, 採集地点がこれでよいなら, OKボタンを押させる.

ボタンが押されたら, 流域環境—水質モデルは終了. $season$ と $COD(samplingpoint)$ の値を, 環境条件—種組成モデルの変数 $season$ および COD に引き渡す.