

生物群集の解析手法と環境アセスメント

中村 寛志

信州大学農学部 食料生産科学科 生産環境管理学講座

要約 生物群集の構造を解析する方法は2つある。種の環境指標性を利用する定性的手法と、多様度指数や類似度指数で群集構造を解析する定量的方法である。本編ではこれらの手法を、指標生物による評価、生物群集の記載、群集の構造解析および重み付け指数による評価の形に分類し、それぞれのもつ意義をデータのもつ情報量を基準に概説する。さらにその解析手法を応用して環境評価や環境アセスメントを行う上での諸問題について述べる。またモデル群集を提示してこれらの指数の性質を比較し、重み付け指数の1つであるグループ別 RI 指数法をとりあげその環境評価への有効性について考察する。

キーワード：生物群集、指標生物、多様度指数、RI 指数、環境アセスメント

はじめに

環境アセスメント（環境影響評価 environmental impact assessment）とは、環境影響評価法によると「環境の保全について適正に配慮し、現在及び将来の国民の健康で文化的な生活の確保に資すること」（第1条）を目的として、「事業（土地の形状の変更、工作物の新設）の実施に当たりあらかじめその事業に係る環境への影響について自ら適正に調査、予測又は評価を行うこと」（第2条）としている。これは環境問題が深刻化する中で、大量生産、大量消費、大量廃棄型の社会経済システムや生活様式を見直し、環境への負荷の少ない持続的な発展を目指す必要性があることからきている¹⁾。

昆虫類を含めた生物群集の調査データをもとに、環境やその自然度を評価する試みは、さまざまな手法を使って研究されてきた^{2,3)}。地球上に存在する生物の中で昆虫類は約150万種とも言われ、最も種類が多い上に、それぞれ食性、化性などの生活様式や生息環境が異なっている。昆虫の種類構成と生息個体数は、その地域の自然環境をよく反映している。従って環境影響評価法に述べられている事業の実施に当たって、その前後に昆虫相を調査することによって、環境へのインパクトを推定し、数量的に評価することが可能である。

生物群集の構造を調査・解析する方法は、大きく分けて2つある。その1つは昆虫の環境指標性を利

用して、種名目録などの定性調査によって得られる種構成から環境を評価する方法である。もう1つは多様度指数や類似度指数など数量化によって群集構造を解析・比較する方法である。これには種数と個体数を客観的に把握する定量調査が要求される。

本編では、生物群集の構造を解析する様々な手法をデータのもつ情報量を基準に概説し、その解析手法を応用して環境評価や環境アセスメントを行う上での諸問題について解説する。なおここでは環境アセスメントの語は、前述した環境影響評価法に従い、環境評価（environmental evaluation）は、調査データから対象とする自然環境の状況や構造あるいは自然度を把握することをいうものとする。

指標生物による評価

1. レッドリスト

生物の指標性をもとに環境を評価する上での重要な問題点は、「どの種を指標種に選定するのか」である。選定基準は環境評価の目的や状況によって幾通りもの決め方がある。その中でまず第1にとりあげられるのは、環境庁が1991年に選定したレッドリスト⁴⁾を指標種とする方法である。

もともとレッドリストは、「開発による生息地の破壊や乱獲などのため、地球的規模で野生生物の種の減少が進んでおり、人為による種の絶滅の防止と保護対策の実施」のために選定されたものであるが、トキ *Nipponia nippon* (Temminck) をはじめ絶滅危惧種のワシタカ類は、自然保護・環境保全の大きな指標種になっている。

受理日 7月21日

採択日 10月8日

表1にレッドデータブックに掲載された昆虫のレッドリスト種を示した。絶滅種から希少種まで206種の昆虫類がリストされているが、その中では一般に親しみのあるトンボ目が41種(19.9%)、またチョウ類が43種(20.9%) (ガ類を含めた鱗翅目としては50種)と大きな割合を占めている。その選定基準から、高山チョウのタカネヒカゲ *Oeneis norna* (Thunberg) (北アルプス亜種と八ヶ岳亜種) などのように特定の限られた環境に生息している種と、ギフチョウ *Luehdorfia japonica* Leech やオオムラサキ *Sasakia charonda* (Hewitson) などのように

生息地の環境条件が悪化してきた種がリストされている。環境評価の観点からは、後者に属する種が指標生物として適していると考えられるが、貴重種・重要種のみを重点にした環境アセスメントは、生物群集の多様性へ与える影響を評価できないという問題点がある。

2. 緑の国勢調査の指標生物

レッドリスト種より指標性の高い昆虫リストとして、環境庁が昭和48年から実施している自然環境保全基礎調査、いわゆる緑の国勢調査において調査対象となった種がある。表2に第1回から第5回まで

表1 レッドデータブックに掲載された昆虫種

カテゴリー	種数	目	内	訳
絶滅種	2種	コウチュウ目	カドタメクラチビゴミムシ	コゾノメクラチビゴミムシ
絶滅危惧種	23種	トンボ目 鱗翅目 その他	ヒヌマイトトンボ ゴイシツバメシジミ 17種	ベッコウトンボ オオウラギンヒョウモン ミツモンケンモン ノシメコヤガ
危惧種	15種	トンボ目 鱗翅目 その他	ミヤジマトンボ ギフチョウ 10種	ルーミスシジミ ヒョウモンモドキ タカネヒカゲ
希少種	166種	トンボ目 鱗翅目 その他	38種 42種 (うちガ類5種) 86種	
地域個体群	1個体群	半翅目	宮古島のツマグロゼミ	

表2 環境庁が実施している自然環境保全基礎調査(緑の国勢調査)における指標昆虫類*

調査年度	対象昆虫種	内	客
昭和48年度 (第1回)	日本特産種や希産種などの生息地	野生生物で6096件の報告	
昭和53年度 (第2回)	指標昆虫10種及び都道府県ごとに選定された昆虫種	指標昆虫 香川県選定種	ムカシトンボ, ムカシヤンマ, ハッチョウトンボ, ガロアムシ目, タガメ, ハルゼミ, ギフチョウ, ヒメギフチョウ, オオムラサキ, ゲンジボタル トンボ目シコクトゲオトンボなど10種, 直翅目3種, ゴキブリ目1種, 半翅目3種, カゲロウ目1種, 鱗翅目ヘリグロチャバネセセリなど18種, コウチュウ目ルイスハンミョウなど13種の合計50種
昭和59年度以降 (第3, 4, 5回)	全種調査 (種の多様性調査) 環境指標調査 (身近な生き物調査)	トンボ・チョウ・セミ類の全種及びガ・コウチュウ類の一部 第3回調査 第4回調査 第5回調査	ハッチョウトンボ, キリギリス, ハネナガキリギリス, タガメ, ヒグラシ, ミンミンゼミ, オオミノガ, オオムラサキ, ハンミョウ, カブトムシ, ゲンジボタル ギンヤンマ, オニヤンマ, アオスジアゲハ, オオムラサキ, カブトムシ クマゼミ, ヒグラシ, ミンミンゼミ, アオマツムシ, マツムシ ゲンジボタル, ヘイケボタル セミのぬけがら調査 (対象32種)

*: 環境庁自然保護局生物多様性センター URL (<http://www.biodic.go.jp/kiso/fnd-f.html> 1999年7月9日) による。

の調査で対象となった昆虫種および第2回に関しては香川県で選定した調査対象種⁹⁾を示した。この中で昭和53年度に実施された第2回緑の国勢調査では、タガメ *Lethocerus deyrollei* Vuilleforoy やゲンジボタル *Luciola cruciata* Motschulsky など生息環境が悪化しつつある昆虫種が10種指標昆虫として選定されている。

香川県では10種の指標昆虫類のうち7種と、さらに環境庁が示した特定昆虫類選定基準に従って50種が調査対象種となった。そのうちトンボ目(12種)と鱗翅目(19種)はやはり多くなっている。また選定基準から見ると、基準A(日本国内ではそこにしかな産しないと思われる種)はサヌキキリガ *Elwesia sugii* Yoshimoto 1種のみ、基準B(分布域が国内若干の地域に限定されている種)は13種のうち4種は他の基準と重複指定、基準C(普通種であっても、北限・南限など分布限界になるとと思われる産地に分布する種)は9種(うち4種は重複指定)、基準D(当該地域に絶滅の危機に瀕している種)は17種(うち5種は重複指定)、基準E(近年当該地域に絶滅したと考えられる種)はスジボソヤマキチョウ *Gonepteryx aspasia nipponica* Bollow, クロシジミ *Niphanda fusca* (Bremer & Grey), ルイスハンミョウ *Cicindela lewisii* Bates, コガタノゲンゴロウ *Cybister tripunctatus* Olivier の4種、基準F(業者あるいはマニアなどの乱獲により、当該地域での個体数の著しい減少が心配される種)は該当なし、基準G(環境指標として適当であると考えられる種)は11種であった。この基準Gのうち、ため池の多い香川県の環境を反映してトンボ目が6種も占めていた。

これらの指標生物種の調査をとおして環境への影響を予測し評価する手法については、哺乳類と鳥類に関しては具体的な手法が提示されていたが、昆虫類ではなかった⁶⁾。

その後第3回以降は、専門家による全種調査(第5回調査の平成6年度から「種の多様性調査」と名称変更)と全国から多くのボランティアを募って実施する環境指標調査(身近な生き物調査)の2つに内容が分かれている。すなわち生物群集の多様性と種の環境指標性を考慮した調査方針であるといえる。この中で正確な環境評価を行うには、前者ではどのような解析手法を用いればいいのか、また後者ではどのような種を指標生物として選定するのかという点が今後の課題であるといえよう。

3. 指標生物法

レッドリスト種と自然環境保全基礎調査の指標種を例としてとり上げたが、生物によって環境の状況を測定する指標生物法は、いろいろな目的にそって様々な生物種を調査対象にして実施されている⁷⁾。その典型的な例として、水生動物による水質汚染の測定法がある。

この指標生物法は、気温、湿度、窒素酸化物濃度などを測定する物理化学的方法と異って、生物によって環境を間接的に知るまわりくどい方法であり、また数量化しにくいという欠点を持っている。一方、そのメリットとして、複数要因の交互作用・相乗作用の影響や低濃度汚染の蓄積効果の測定、また環境の自然度の評価などが可能であり⁷⁾、環境アセスメントに有効な1つの手法といえる。

ここで留意すべき点は、指標生物のみに注目することは、人々や行政にアピールして環境の保全を図るための戦術として有効であるが、「特定の種を守ることを自然保護である」という選別主義⁸⁾に陥る危険性である。環境評価に大切なことは、指標とした特定の種を含む生物群集とその環境そのものであるとの立場から、生物群集の調査と解析を基にした環境評価の重要性が述べられている^{9,10)}。

生物群集の記載

1. 目録

昆虫の地理的分布調査の基本は、まず分布種の目録作成である。その種名リストと種の生態学的知見から調査地域の環境を概括的に評価することが可能で、中村ら(1994)¹¹⁾は香川県の環境保全地域に生息するガ類相から、その地域の環境評価を試みている。しかし、種の環境指標性を評価して客観的な環境評価に適用するには、対象種の生態学的知見と調査者の専門性が要求され、評価手法を一般化するには困難である。

次に分布目録から得られる総種数(年間の観察種数)を用いて評価する方法がある。対象地域に過去の調査データが蓄積されている場合には、ある程度その地域の多様性の経時変化を示す指標となりうる。これはチョウ類など比較的分布が研究されている種群に適している。しかし、環境を数量的に表現する上での大きな問題点として、ある地域でオオウラギンヒョウモン *Fabriciana nerippe* (C. & R. Felder) が絶滅し、かわりにナガサキアゲハ *Papilio memnon thunbergii* Siebold が分布域を拡大してきた場合でも、総種数には反映されず生態学的にみた大きな環

境変化が評価されないことがある。

2. 特定グループの存在割合

種名リストから調査環境を簡単に数量化して評価する手法として、特定のグループ(科, ある属性を持った種など)の割合を算出する方法がある。

これにはガ類の調査データをもとに山地性環境の評価を行うカラスヨトウ・シタバ(AC)指数やシヤクガ科のアオシヤク・ヒメシヤク・ナミシヤクの各亜科の種類数から算出するGSL指数などがある¹²⁾。

今井(1995)¹³⁾はチョウ相の1化性種の比率, 草原性と森林性の種の比率および地理的分布型(旧北区, 東洋区, 日華区)種群の割合を総合して, 京都西加茂地区の都市化傾向の環境変化を評価している。

3. 種の評価値

生物群集の記載に種の指標性を加味するため, 種にある基準で環境の重みを付加した評価値を与えて, 調査地点の環境を数量化する方法がある。この手法は生態的知見がよく得られているチョウ類を対象として研究されてきた。

稲泉(1975)¹⁴⁾は, チョウを生息場所で分類して1~3の評価値をあたえ, その値の和から調査地域の自然度を評価した。また豊嶋(1988)¹⁵⁾は, 香川県内における生息環境, 分布状況, 生息個体数, 過去の現状調査結果などを考慮して, 1~4の数値で環境の指標値(種自然度)を与え, その平均値を調

査地域の自然度を表現する指数とした。巢瀬(1993, 1998)^{16,17)}は, 田中(1988)¹⁸⁾の生息分布度を用いた環境指数(EI)で環境の自然度を評価することを提案している。

あらかじめ種に環境評価のウエイトをもたせる方法では, 何を基準として環境を評価するかによって評価値が異なる場合や, 希少種が過大評価される点, また種によって地理的分布が異なるため普遍性に乏しいなどの問題点がある。

群集の構造解析

1. 多様度指数

種に環境の評価値をもたせる手法に対して, どの種も等価に扱い群集内の種数と個体数による客観的な定量データから, 群集構造や種多様性(species diversity)を表現する様々な指数を使って環境評価を行う方法が近年盛んになってきた³⁾。

生物群集の種多様性は, 重要な生物群集の構造的指標で, 島津(1973)¹⁹⁾は「食物連鎖の複雑度および同時にシステムの安全度を表す指標」として位置づけている。ここでは多様性の構造的な分析から, 主な多様度指数(index of diversity)を分類して, 指数が表現している多様度の種類, その指数が導かれた理論的基盤およびその内容を表3に示した。

多様度指数は個体間距離や優占度から導かれたも

表3 生物群集の多様性を表現する様々な指数

指 数	多様度の種類	理論基盤	内 容*
Simpson(1949) ²⁰⁾ の 多様度指数(1/λ)	平均多様度	確率論	$\lambda = \sum n_i(n_i - 1) / N(N - 1)$ の逆数
森下(1967) ²²⁾ のβ指数	平均多様度	確率論	Simpsonの1/λと同じ形で定義
McIntosh(1967) ²⁸⁾ の 多様度指数	平均多様度	個体間距離	$(N - \sqrt{\sum (n_i)^2}) / (N - \sqrt{N})$
McNaughton(1967) ²⁹⁾ の 優占度指数(DI)	平均多様度	優占度	$(n_1 + n_2) / N$
元村(1932) ²³⁾ の1/a	平均多様度	種数個体数関係	等比級数則 $\log n + ax_n = b$ の傾きaの逆数
Fisher(1943) ²⁴⁾ の 多様度指数(a)	平均多様度	種数個体数関係	対数級数則 $S = a \log(1 + N/a)$ のa
Shannon-Weaver関数のH' (Margalef, 1958) ²⁶⁾	平均多様度	情報量理論	$H' = -\sum p_i \cdot \log_2 p_i$ ($p_i = n_i / N$)
Sheldon(1969) ³⁰⁾ のe ^{H'}	平均多様度	情報量理論	Shannon-Weaver関数のH'を使う
Pielou(1969) ²⁷⁾ の 均衡性指数(J')	相対多様度	情報量理論	$J' = H' / \log_2 S$
Preston(1948) ²⁵⁾ の1/σ ²	相対多様度	種数個体数関係	オクターブ法によってまとめられた対数性規則の分散σ ²
森下(1967) ²²⁾ の 繁栄指数(Nβ)	全多様度	確率論	$N \times \beta$ 指数
H'N(Pielou, 1966) ³¹⁾	全多様度	情報量理論	(Shannon-Weaver関数のH') × N

*: 式中の記号は, S=種数, $N = \sum n_i$ =総個体数, $n_i = i$ 番目の種の個体数, $n_1 = 1$ 位の優占種の個体数, $n_2 = 2$ 位の優占種の個体数を示す。

のもあるが、起源的には以下の3つに分類される。まず確率論から、S種の同じグループを含むN個の玉から1個を復元抽出で2回おこなった場合、それらが同じグループに属する確率として導かれたSimpson (1949)²⁰⁾の多様度指数 ($1/\lambda$) や、分布の集中度指数である I_s 指数²¹⁾から導かれた森下 (1967)²²⁾の β 指数などがある。ちなみに β 指数は Simpson の $1/\lambda$ と同じ形で定義される。次に生物群集の構造的規則性の理論である種数-個体数関係の法則から導かれた多様度指数として、元村 (1932)²³⁾の $1/a$ 、Fisher (1943)²⁴⁾の α あるいは Preston (1948)²⁵⁾の $1/\sigma^2$ などがある。第3番目として、情報理論より導かれた情報方程式から Margalef (1958)²⁶⁾が多様度指数として定義付けた Shannon-Weaver 関数の H' がある。表3の H' の公式は、対数の底が2である bit 単位として示しているが、底が10である dit 単位や底がeである nit 単位で表現されている場合もある。

これらの多様度指数が表現している具体的内容は、種多様性を的確に評価する上で重要な問題である。多様性は、種数・個体数・個体数の分布（この場合の確率変数は種）の3要素で構成されている。従って種数だけが増加しても多様性は大きくなり、またある種に個体数の分布が集中すると多様性は低下することになる。

一般的に Simpson の $1/\lambda$ など従来から多様度指数と呼ばれているものは、群集内の種数と個体数の分布（種個体数の均一的分布）を表現するものであった。そのため最近では多様度指数をその表現する内容から、全多様度、平均多様度、相対多様度に分類し、表現する内容が分析的に把握されるようになってきた。表3に示したように、種数と均一性を表現する平均多様度が最も多く指数化されているが、最近では均一性のみを的確に表現する Pielou (1969)²⁷⁾の均衡性指数 (J') のような相対多様度をあわせて用いられるようになった。また平均多様度に総個体数をかけた全多様度は森下 (1967)²²⁾の繁栄指数 ($N\beta$) に代表される。

このように多様度指数は群集構造を解析する精度の高い物差しであるが、自然環境の豊かさを示すものではない。というのは「何が豊かな自然か」という定義は、指標生物を使って環境を評価する場合にはその種を選定した時点で提示しているが、多様度指数では表現できないからである。従って多様度指数は、生息する昆虫にとっての環境の評価、複数地域の環境比較、経時的な環境変化などを表現する場

合には有効に利用できる手法である。

2. RI 指数

多様度指数のように個体数データを使って指数を計算する方法では、調査時期や方法、気候条件などを厳密に斉一化した計画や、これらのファクターを調整する変換式などが要求される。そのため調査時期や方法が異なっていたり、生息数の相対的な多少の程度は得られているが、定量的な個体数データとしては不完全な、いわゆるラフなデータを取り扱うことはできない。しかし、このようなデータも個体数の相対的多さを示す順位尺度を用いて、データの不完全さをマスクすることによって数量化が可能である。

中村 (1994)³²⁾はこの順位尺度の多様度として RI 指数を提唱した。ある地域でS種の昆虫を対象に調査を行い、種ごとにM段階 (0, 1, 2... M-1) で個体数の多少を表現するランクを与える。これを基にその調査地点の RI 指数は次の式で与えられる。

$$RI = \frac{\sum R_i}{\{S \cdot (M-1)\}}$$

ここで RI 指数は0から1までの値をとり、1に近いほど種数、個体数ともに多いことを表す。この RI 指数では、従来の多様度指数では使えなかった調査手法の異なるデータや過去の不十分なデータが利用できる。また多くの調査地点があり、厳密な調査をする余裕がない場合などにきわめて便利である。

4. 類似度指数

地域間の生物群集の構造を比較するための主な指数を表4に示した。群集の類似性を示す指数には、その地域にある種が生息しているかないかという二元データ (binary data) のみを用いる手法がある。これには古典的な Jaccard (1902)³³⁾の共通係数 CC から QS (Cs) 指数³⁴⁾や野村・Simpson 指数^{35,36)}などがある。これらの指数は生息種数がわかれば容易に算出できるため、地理的分布調査データを使って数多くの検討がなされている。

種数・個体数データを用いて種の重複度を表現する手法として、Morisita (1959)²¹⁾の C_i 指数、Kimoto (1967)³⁸⁾の C_π 指数また Pianka (1979)³⁹⁾の α 指数などがよく用いられる。いずれも空間的に複数の環境を比較する場合はもちろん、同一地域の時系列データを比較して環境の変化をアセスメントするのに有効な指数である。また最近3地域以上の環境を比較するため、多変量解析の一つであるクラスター分析が用いられるようになってきた。その分析過程での類似度として有効な統計量となっている。

表4 生物群集の類似性を表現する様々な指数

指 数	データの種類	内 容*
Jaccard (1902) ³³⁾ の共通係数 CC	種数	$CC = c / (a + b - c)$
Sørensen (1948) ³⁴⁾ の QS (Cs) 係数	種数	$QS = 2c / (a + b)$
野村 (1940) ³⁵⁾ ・Simpson (1960) ³⁶⁾ 指数 (NSC)	種数	$NSC = c / b (a > b)$
百分率相関法 (加藤, 1954) ³⁷⁾	種数, 個体数	2 地域の出現比率の信頼限界を図示
Morisita (1959) ²¹⁾ の C_λ 指数	種数, 個体数	$C_\lambda = 2 \sum n_{Ai} \cdot n_{Bi} / \{(\lambda_A + \lambda_B) N_A \cdot N_B\}$ $\lambda_A = \sum n_{Ai} (n_{Ai} - 1) / N_A (N_A - 1)$, $\lambda_B = \sum n_{Bi} (n_{Bi} - 1) / N_B (N_B - 1)$
Kimoto (1967) ³⁸⁾ の C_π 指数	種数, 個体数	$C_\pi = 2 \sum n_{Ai} \cdot n_{Bi} / \{(\sum \pi_A^2 + \sum \pi_B^2) N_A \cdot N_B\}$ $\pi_A^2 = \sum n_{Ai}^2 / N_A^2$, $\pi_B^2 = \sum n_{Bi}^2 / N_B^2$
Pianka (1973) ³⁹⁾ の α 指数	種数, 個体数	$\alpha = \sum p_{Ai} \cdot p_{Bi} / \sqrt{\sum p_{Ai}^2 \cdot \sum p_{Bi}^2}$ $(p_{Ai} = n_{Ai} / N_A, p_{Bi} = n_{Bi} / N_B)$

*: 式中の記号は, a =地域Aの種数, b =地域Bの種数, c =地域A, Bの共通種, $N_A = \sum n_{Ai}$ =地域Aの総個体数, n_{Ai} =地域Aの i 番目の種の個体数, $N_B = \sum n_{Bi}$ =地域Bの総個体数, n_{Bi} =地域Bの i 番目の種の個体数を示す。

上記の指数とは手法的に異なるが, 2 地域の出現比率の信頼限界を図示する百分率相関法³⁷⁾によって群集構造を記載し環境評価を行う手法がある。森本ら (1973)⁴⁰⁾はこの百分率相関法を使ってオサムシ群集を記載し, 北アルプス乗鞍岳の環境破壊の評価を行っている。

重み付け指数

多様度指数と類似度指数による解析手法の共通した方法論的特徴は, いずれの種も等価として扱うことである。そのため環境を評価する上での重要なファクターとなる種構成の識別, すなわちどのような種が生息しているかという情報は得られない。一方, 指標生物法では種の選定方法や地域的汎用性などの問題点がある。そこで2つの方法の欠点を補うため, あらかじめ種を環境の重み付けをした指標値に変換してから, 数量化の指数を適用して評価する方法が提唱されている。

この手法の代表的なものとして, チョウ類を使った田中 (1988)¹⁸⁾の環境階級存在比 (ER) がある。これはあらかじめチョウの種ごとに生息分布度と指標値を設けておき, 階級存在比として指数化し環境を判定する分析的手法である。この評価手法はチョウ類群集を基にした環境アセスメントなどに有効的に利用されている⁴¹⁾。

田下ら (1997)⁴²⁾は食性と分布から指標値の重み付けをした HI 指数を提案している。また最近では種の区別を付けられない多様度指数などに加えて, 種の環境指標性を数量化した指数をあわせて総合的に環境評価が行われている⁴³⁾。また中村ら (1995, 1999)^{44,45)}は調査対象種を, 環境が反映されたいく

つかの指標グループにあらかじめ分類してから RI 指数を用いるグループ別 RI 指数法によって, 香川県におけるチョウ類による環境評価を試みている。

モデル群集による様々な指数の比較

1. 多様度指数の比較

今まで述べてきた様々な解析手法を比較するため, 構造が異なるチョウのモデル群集 (A~F) を用意し, それらの群集構造を巢瀬の EI 指数, RI 指数, Simpson の $1/\lambda$, Shannon - Weaver 関数の H' , Pielou の均衡性指数 (J'), 森下の繁栄指数を使って表現したものを表5に示した。

これをみるとそれぞれの多様度指数の特徴がよく表現されている。まず群集AとEの指数を比較すると, H' は種数と均一性を表現する平均多様度なので2群集とも同じ値の2.485で, また J' は均一性のみを示す指数なのでいずれも1.00であった。それに対して森下の繁栄指数は群集Aでは4457, 群集Eでは630となり総個体数の違いを表現していた。 $1/\lambda$ は H' と同じ平均多様度指数であるが, 総個体数が減少すると指数が大きくなる性質があることがわかる。これは群集CとFの $1/\lambda$ を比較してもいえる。RI 指数は順位変数を用いながら群集AとE, また群集CとFの区別を数値として表現していることがわかる。

ここで問題となるのは, 巢瀬の EI 指数以外は群集CとDの区別をつけられないことである。これは今まで述べてきた種の環境指標性を評価に加えていないためである。

2. 類似度指数の比較

表6に6つのモデル群集間の類似性を QS (Cs)

表5 構造の異なったモデルのチョウ群集による多様度指数の比較

対 象 種	巢瀬の指数	モ デ ル 群 集					
		A	B	C	D	E	F
アゲハ	1	30	100	180	0	3	18
モンシロチョウ	1	30	80	100	0	3	10
ベニシジミ	1	30	60	30	0	3	3
イチモンジセセリ	1	30	40	20	0	3	2
イチモンジチョウ	2	30	30	10	0	3	1
ミズイロオナガシジミ	2	30	20	10	10	3	1
ミドリヒョウモン	2	30	10	10	10	3	1
オオムラサキ	2	30	10	0	10	3	0
イシガケチョウ	2	30	5	0	20	3	0
ムラサキツバメ	2	30	5	0	30	3	0
ミカドアゲハ	2	30	0	0	100	3	0
クロコノマチョウ	3	30	0	0	180	3	0
総 個 体 数		360	360	360	360	36	36
種 数		12	10	7	7	12	7
巢瀬の EI 指数		21	16	10	15	21	10
RI 指数		1.000	0.639	0.472	0.472	0.333	0.250
Simpson の多様度指数(1/λ)		12.379	5.671	2.962	2.962	17.500	3.119
Shannon-Weaver 関数の H'(単位ニット)		2.485	1.918	1.369	1.369	2.485	1.369
Pielou の均衡性指数(J')		1.000	0.772	0.551	0.551	1.000	0.551
森下の繁栄指数		4457	2042	1066	1066	630	112

表6 構造の異なったモデルのチョウ群集による類似度指数の比較

モデル群集* の組合せ	QS 係数	CC 係数	NSC	森下のC _s	Pianka の α
A-B	0.909	0.833	1.000	0.648	0.683
A-C	0.737	0.583	1.000	0.398	0.495
A-D	0.737	0.583	1.000	0.398	0.495
A-E	1.000	1.000	1.000	1.208	1.000
A-F	0.737	0.583	1.000	0.415	0.495
B-C	0.824	0.700	1.000	0.877	0.915
B-D	0.588	0.417	0.714	0.020	0.020
B-E	0.909	0.833	1.000	0.714	0.683
B-F	0.824	0.700	1.000	0.907	0.915
C-D	0.286	0.167	0.286	0.005	0.005
C-E	0.737	0.583	1.000	0.422	0.495
C-F	1.000	1.000	1.000	1.031	1.000
D-E	0.737	0.583	1.000	0.422	0.495
D-F	0.286	0.167	0.286	0.005	0.005
E-F	0.737	0.583	1.000	0.441	0.495

*：A～Fは表5に示したモデル群集名である。

係数, CC 係数, NSC 指数, 森下のC_s, Pianka の α で評価したものを示した。いずれの指数もその値が小さくなると、2つの群集の構造が異なっている個体数を示すものである。

それぞれの類似度指数の特徴が表現されているが、種数・個体数データを使う森下のC_sや Pianka の α

のほうが群集構造の相違を的確に表現しているといえる。類似度指数の特徴として、群集AとEや群集CとFの相違を区別できないが、一方、群集CとDは異なる構造として表現している点である。従って、多様度指数と組み合わせることにより、それぞれの指数の不十分な点を補って群集構造の的確な把握が

可能となるであろう。

3. グループ別 RI 指数法

群集CとDの区別をグループ別 RI 指数法を用いて指数的に表現し、その結果を図1に示した。この手法では、まず調査対象種をある選定基準に従っていくつかのグループに分類する。すなわちグループ分けされた種群に環境の指標性を持たせるわけである。ここでは、対象12種のチョウをグループI（都市型種：アゲハ *Papilio xuthus* Linnaeus, モンシロチョウ *Pieris rapae crucivora* (Boisduval), ベニシジミ *Lycaena phlaeas daimio* (Matsumura), イチモンジセセリ *Parnara guttata guttata* (Bremer et Grey)), グループII（里山型種：イチモンジチョウ *Ladoga camilla japonica* (Ménétrières), ミズイロオナガシジミ *Antigius attilia attilia* (Bremer), ミドリヒョウモン *Argynnis paphia tsushimana* Fruhstorfer, オオムラサキ), グループIII（照葉樹型種：イシガケチョウ *Cyrestis thyodamas mabella* Fruhstorfer, ムラサキツバメ *Narathura bazalus turbata* (Butler), ミカドアゲハ *Graphium doson* (C. & R. Felder), クロコノマチョウ *Melanitis phedima oitensis* Matsumura) の3つの指標グループに分類した。次いでそれぞれグループごとに求めた RI 指数 (RI (I), RI (II), RI (III)) をレーダーチャートで表現した。

結果は各 RI 指数の数値を提示するまでもなく、群集CとDは環境的（群集Cは RI (I) が高く都市型種が豊富な環境で、群集Dは RI (III) が高く照葉樹型種が豊富な環境である）にも構造的（RI 指数が同じく種類構成が異なっているだけで、種数と均一性は同じ）にも区別されている。同様に群集AとEや群集CとFも容易に評価することができる。このように環境による重み付けを施した多様性指数は今後の環境評価での重要な解析手法となるといえる。

おわりに

環境アセスメントの対象項目となる環境要素の1つに、「生物の多様性の確保及び自然環境の体系的保全」がうたわれている。その内容は①「植物」「動物」として、注目すべき生息地に対する影響の程度を把握、②「生態系」として、注目される生物種に対する影響の程度を把握するとなっている。この基本的な姿勢は、選定された特定保護地域に計画がどれだけ影響を及ぼすか、そして選定された生物

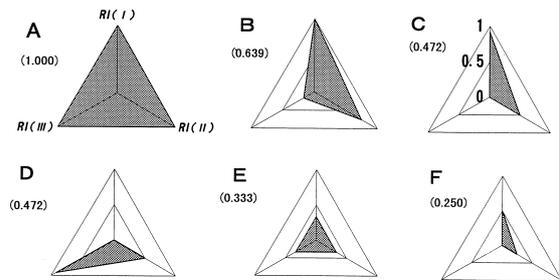


図1 指標グループごとに求めた RI 指数のレーダーチャート

A~Fは表5に示した構造を持つモデル群集名、その下の括弧内の数値は表5の RI 指数である。RI (I)~RI (III)は表5に示したチョウ12種を3つの指標グループに分類して、それぞれグループごとに求めた RI 指数である。各グループのチョウの種名は本文参照。

種にどれだけ影響が出るかを調査することで、まだ指標生物法による環境アセスメントが主であるといえる。

このように学術的研究における環境評価では活用されている群集構造の解析手法は、実際の環境アセスメントにおいて十分に活用されている例は少ない。それには調査手法の統一化や妥当性をもった統計的解析手法の開発など手法の確立が今後の研究課題となるであろう。

引用文献

- 1) 環境庁編：環境研究・環境技術ビジョン—持続可能な未来のために—, 大蔵省印刷局, 1997.
- 2) 巢瀬司：環境指標としての蝶, 昆虫と自然, 25(12), 16-19, 1990.
- 3) 石井実・山田恵・広渡俊哉・保田淑郎：大阪市内の都市公園におけるチョウ類群集の多様性, 環動昆, 3, 183-195, 1991.
- 4) 環境庁自然保護局野生生物課編：日本の絶滅のおそれのある野生生物—レッドデータブック—（無脊椎動物編）, 自然環境研究センター, 1991.
- 5) 環境庁編：日本の重要な昆虫類（四国版）, 大蔵省印刷局, 1980.
- 6) 香川県環境保健部編：香川県環境影響評価技術マニュアル, 香川県, 1990.
- 7) 日本自然保護協会編：指標生物 自然をみるものさし, 平凡社, 1994.
- 8) 鈴木邦雄：「生物多様性」の保護—「多様性尊重主義」と「選別主義」再考—, チョウ類の保護セミナー委員会編「第2回チョウ類の保護セミナー資料集」, pp1-18, 日本鱗翅学会, 1991.
- 9) 森本尚武：生物群集による自然環境の評価, 環境科学年報—信州大学—11, 1-4, 1989.

- 10) 宮武頼夫：昆虫相調査の手法と調査結果の検討について，環動昆，**4**，91-99，1992.
- 11) 中村寛志・増井武彦：七宝山の鱗翅目，瀬戸内短期大学紀要，**24**，171-182，1994.
- 12) 牧林功：雑木林の小さな仲間たち 狭山丘陵昆虫記，埼玉新聞社，1985.
- 13) 今井長兵衛：京都西賀茂における都市化チョウ相の変化，環動昆，**7**，119-133，1995.
- 14) 稲泉三丸：蝶類による自然度の判定．栃木県の蝶編纂委員会編「栃木の蝶」，pp148-160，昆虫愛好会，1975.
- 15) 豊嶋弘：チョウ類の分布をもとにした香川県の自然度，香川県自然環境保全指標策定調査研究報告書（自然度評価の総括），87-108，1988.
- 16) 巢瀬司：蝶類群集研究の一方法，日本鱗翅学会編，「日本産蝶類の衰亡と保護」第2集，pp83-90，日本鱗翅学会・日本自然保護協会，1993.
- 17) 巢瀬司：調査結果の解析法 環境指標性を利用した解析，日本環境動物昆虫学会編・今井長兵衛・石井実監修「チョウの調べ方」，pp59-69，文教出版，1998.
- 18) 田中蕃：蝶による環境評価の一方法，「蝶類学の最近の進歩」日本鱗翅学会特別報告，**6**，527-566，1988.
- 19) 島津康男：システム生態学，共立出版，1973.
- 20) Simpson, E.H. : Measurement of diversity, *Nature*, **163**, 688, 1949.
- 21) Morisita, M. : Measuring of interspecific association and similarity between communities, *Mem. Fac. Sci. Kyushu Univ. Ser. E. (Biol.)*, **3**, 65-80, 1959.
- 22) 森下正明：京都近郊における蝶の季節分布，森下正明・吉良竜夫編「自然－生態学的研究」，pp95-132，中央公論社，1967.
- 23) 元村勲：群聚の統計的取扱いについて，動物学雑誌，**44**，379-383，1932.
- 24) Fisher, R.A., Corbet, A.S. and C.B. Williams : The relation between the number of species and the number of individuals in a random sample of an animal population, *J. Anim. Ecol.*, **12**, 42-58, 1943.
- 25) Preston, F.W. : The commonness and rarity of species, *Ecology*, **29**, 254-283, 1948.
- 26) Margalef, D.R. : Information theory in ecology, *Gen. Syst.*, **3**, 36-71, 1958.
- 27) Pielou, E.C. : An introduction to mathematical ecology, John Wiley & Sons, Inc., 1969.
- 28) McIntosh, R.P. : An index of diversity and relation of certain concepts to diversity, *Ecology*, **48**, 392-404, 1967.
- 29) McNaughton, S.J. : Relationship among functional properties of California Grassland, *Nature*, **216**, 168-169, 1967.
- 30) Sheldon, A.L. : Equitability indices : Dependence on the species count, *Ecology*, **50**, 466-467, 1969.
- 31) Pielou, E.C. : The measurement of diversity in different types of biological collection, *J. Theoret. Biol.*, **13**, 131-144, 1966.
- 32) 中村寛志：RI 指数による環境評価(1) RI 指数の性質と分布，瀬戸内短期大学紀要，**24**，37-41，1994.
- 33) Jaccard, P. : Geetze der Pflanzenvertheilung in der alpinen Region, *Flora*, **90**, 349-377, 1902, (Hagmeier, Stultus, 1954 より).
- 34) Sørensen, T. : A method of establishing group of equal amplitude in plant sociology based on similarity of species content and its application to analyses of the vegetation on Danish commons, *Biol. Skar. (K. danske vidensk. Selsk. N.S.)*, **5**, 1-34, 1948, (Southwood, 1966 より).
- 35) 野村健一：昆虫相比較の方法，特に相関法の提唱について，九州帝国大学農学部学芸雑誌，**9**，235-262，1940.
- 36) Simpson, G. G. : Notes on the measurement of faunal resemblance, *Am. J. Sci.*, **258A**, 300-311, 1960.
- 37) 加藤陸奥雄：動物生態学実験法 生物学実験法講座第9巻，中山書店，1954.
- 38) Kimoto, S. : Some quantitative analysis on the Chrysomelid fauna of the Ryukyu Archipelago, *Esakia*, **6**, 27-54, 1967.
- 39) Pianka, E.R. : The structure of lizard community, *Ann. Rev. Ecol. Syst.*, **4**, 53-74, 1973.
- 40) 森本尚武・長谷川政興：北アルプス乗鞍岳における林道の影響による土壌層甲虫群集の差異，文部省科研費（特定研究）「中部山岳地帯における生物環境の破壊とその復元に関する基礎的研究」第1号，45-52，1973.
- 41) 桜谷保之・藤山静雄：道路建設とチョウ類群集，環動昆，**3**，15-23，1991.
- 42) 田下昌志・市村敏文：標高の変化とチョウ群種による環境評価，環動昆，**8**，73-88，1997.
- 43) 吉田宗弘：チョウ類群集による大阪市近郊住宅地の環境評価，環動昆，**8**，198-207，1997.
- 44) 中村寛志・豊嶋弘：チョウの分布からみた環境評価—RI 指数を利用した香川県の例について—，環動昆，**7**，1-12，1995.
- 45) 中村寛志・豊嶋弘：チョウ類の指標グループと RI 指数を利用した環境評価の一方法，環動昆，**10**，143-159，1999.

Methods of the Analysis of the Biotic Community and the Environmental Assessment

Hiroshi NAKAMURA

Division of Environmental Science for Food Production
Department of Food Production Science
Faculty of Agriculture, Shinshu University

Summary

There are two ways to analyze the structure of the biotic community. One is a qualitative method which uses the environmental index for the species, and another is a quantitative method which analyzes the structure of the community by employing the index of diversity or similarity.

In this review, various methods used for the analysis of biotic community such as the evaluation by bio-indicators, the description on the biotic communities and the analyses by the use of the index of species diversity and of some weighted indices and their properties are described, and, in addition, the problems in the application of these methods to the execution of the environmental evaluation or the environmental assessment are explained. Further, the utility of such indices for the assessment are compared by applying them to the analysis of butterfly communities as models. Availability of the group R1 index, which is one of the weighted indices, for the environmental evaluation is discussed.

Key word : biotic community, bioindicator, index of diversity, RI index, environmental assessment