

## 自然環境の生物指標、特に土壤動物による指標について

藤山 静雄

信州大学理学部生物学教室

## On the Bio-indicator of Natural Environment, with Special References to the Soil Animals

Shizuo FUJIYAMA

Dept. Biol., Fac. Sci., Shinshu Univ., Matsumoto

Key words : bio-indicator ; soil animal

生物指標、土壤動物

## はじめに

生物指標を使った環境評価は、環境汚染が複雑な形で進むなか、今日その重要性を増している。特に環境汚染の総合的な影響を一般市民にわかりやすい形で提供し、社会的な関心を高め、環境浄化の機運を高めるのに大いに貢献している。

生物指標は、動、植物いろいろな分類群のもので行われているが、その進展状況はグループにより大きく違っている。私の関わってきた土壤動物では、環境指標の研究は量的に増えてきているが、まだそれほど多くのことがわかってはいない(例えば、青木<sup>1-6)</sup>、伊藤と青木<sup>7)</sup>森本と長谷川<sup>8)</sup>、吉田と星野<sup>9)</sup>等)。しかし、青木とその共同研究者らを中心とする努力により、土壤動物を指標生物として用いる形式がある程度確立されてきている<sup>6)</sup>。これらの指標による環境評価は、それなりの成果を挙げてきているが、いくつかの問題点も存在する。筆者も<sup>10,11)</sup>、これまで何度か土壤動物と環境との関連性についての調査、研究に加わってきた。しかし、それらの成果は、必ずしも十分に満足行くものではなかった。そこで、今後更にこの方面の研究に取り組むにあたって、現状を振り返って、その意義や問題点について考察してみたい。

ここでは土壤動物の話に移るまえに生物を用いた環境指標がどのようなものであるのか、を簡単に述べる。そしてその後、土壤動物を用いた環境指標の研究の現状を紹介すると共に、その意義や問題点について考察する。

## 生物指標

生物指標とは生物を用いて自然環境の現状や変化の程度、内容を評価しようとするものである。この考えは、物理、化学的測定機器では生物にとって真に重要な環境やその微妙な変化を測定することは困難であり、生物の示す反応やそこに生育、生息する種の構成や特定の種の生理生態的の反応を解析することによって、生物にとっての環境をより正確に評価することが出来るという考え方に基づいている。

生物指標の方法には、大きく分けて3つがある。第1は自然度の低い地域では生物群集の多様性が減少することから、生物群集の多様度を測定するものである。これには自然群集を直接測定する方法と調査場所に人工的に小環境(例えばスライドガラスやタイル等)を付け加え(配置)し、その群集の多様度の時間的変化を比較する方法とがある。第2は特定の生物の有無やその反応を評価する方法である。第3は特定の生物を野外に配置したり、実験室内で環境刺激にさらしたりして、呼吸量や増殖率、傷害等の生理的の反応を調べることにより、環境の良否を評価する方法である。

第1の方法は、群集生態学的手法、すなわち多様性指数と呼ばれるものを計算し、これを用いて環境の良否を論ずる。この指数には、いろいろ提案されているが、Shannon-Weaver 関数と呼ばれる次式が最も良く用いられている。

$$H = -\sum_{i=1}^s (n_i / N) \text{Log}_e(n_i / N)$$



土壌動物における生物指標

土壌動物を用いた生物指標は、前述の3つの手法のうち、これまでのところ第1、第2の方法のみで行われている。第3の手法については、土壌動物が土壌という複雑な緩衝物の中で生活しているため、生理的な反応を測定するには不適であることが挙げられる。次に研究の一部の例を紹介する。

青木<sup>1-5)</sup>は一連の研究において植生や、土壌とササラダニ群集の構造との関係を調べ、総個体数、総種数等のダニ群集全体の性質と植生は大いに関係があるが、土壌とはあまり関係がみられなかった。しかし、ダニの種類組成と土壌の間には強い関係があるとし、ツヤタマゴダニ科、ジュズダニ科、モリダニ科、リキシダニ科等が指標動物として適当であるとしている。この研究は、奥日光の自然度の高い地域のみを対象としたものであり、いろいろな環境への適用は難しいと思われる。この点に関して最近、青木<sup>17)</sup>は、土壌生息ダニ類のうち、ササラダニ類を用いて高山から市街地まで網羅する生物指標化の試みをしている。それによれば、ササラダニ類は分類体系により3つのグループ、すなわちMacropylina (Mと略称、以下同様)、Gymnوتا(G)、Poronota(P)に分けられ、それらを採集された個

体数、種数でみた場合、3群の割合は環境の異なる採集地の間で異なると言う。得られた全種数に占める各型の種数の割合 (MGP分析1と呼ぶ) により、Mの多いM型、同様にしてG型、P型、さらに3群とも20-50%を占めるO型、M群とG群が20-50%でP群が20%未満のMG型、同様にしてGP型、MP型に類型化される。そして、森林はG型、草原はO型、高山はO型またはMG型、GP型、市街地はGP型になると言う。栗城と青木<sup>18)</sup>は、同様の調査を市街地の街路樹下で行い、このようなタイプ分けは行っていないが、環境とササラダニ群集の関係を論じている。以上述べたように、ササラダニ類を用いた研究は、このグループの種が、非常に多様な環境に生息していることから幅広い指標性を期待できると考えられる。しかし、その分類に熟練を要すること、一般への知名度が低いこと、採集虫の抽出に特別の機材を要することなどの問題点が含まれている。

また、青木<sup>19)</sup>は広く一般市民に指標調査の参加を呼びかけるものとして図2に示した様に土壌動物の種類を点数化して指標化することも行っている。この様に、青木らはいろいろな方法で積極的に指標化を試みており、研究の進展が期待される。

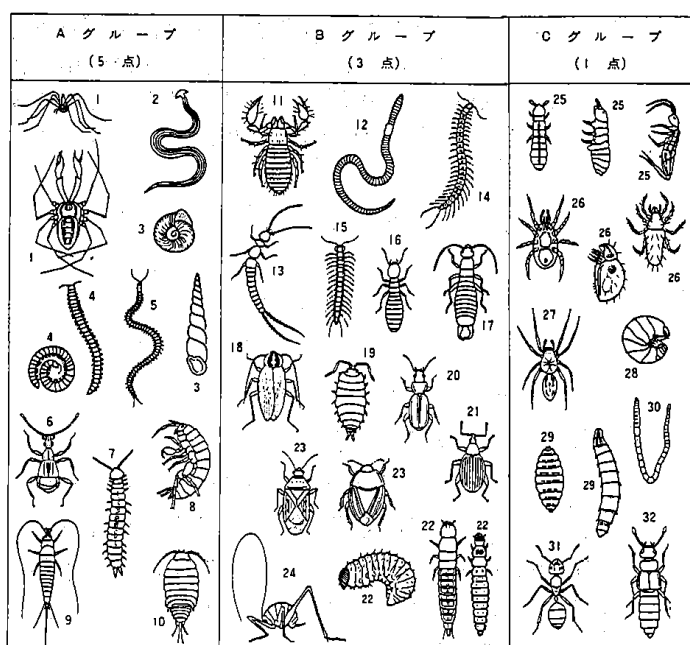


図2：自然度を判定するための土壌動物のグループ分け。

1. ザトウムシ (3~5 mm), 2. コウガイビル (5~30cm), 3. 陸貝 (2 mm ~ 3 cm), 4. ヤスデ (1~5 cm), 5. ジムカデ (3~5 cm), 6. アリヅカムシ (1~3 mm), 7. コムカデ (4~7 mm), 8. ヨコエビ (3~10mm), 9. イシノミ (1~1.5cm), 10. ヒメフナムシ (4~7 mm), 11. カニムシ (2~4 mm), 12. ミミズ (3~40cm), 13. ナガコムシ (3~4 mm), 14. オオムカデ (4~13cm), 15. イシムカデ (1.5~2.5cm), 16. シロアリ (3~8 mm), 17. ハサミムシ (1~3 cm), 18. ゴキブリ (1~4 cm), 19. ワラジムシ (3~12mm), 20. ゴミムシ (0.5~2 cm), 21. ゾウムシ (4~8 cm), 22. 甲虫 (幼虫) (3 mm~3 cm), 23. カメムシ (2~6 mm), 24. カマドウマ (1~2.5cm), 25. トビムシ (1~3

mm), 26. ダニ (0.3 ~ 3 mm), 27. クモ (2~10mm), 28. ダングムシ (5~13mm), 29. ハエ・アブ (幼虫) (2 mm ~ 2 cm), 30. ヒメミミズ (5~15mm), 31. アリ (2~10mm), 32. ハネカクシ (3~10mm), 各動物名のあとの ( ) 内はおよその体長を示す。青木<sup>19)</sup>より転載。

北沢<sup>20)</sup>はその共同研究者らとともに各種生態系における野生動物の現存量についての研究を総括し、土壤動物と環境との関係を物質経済的な関係からとらえる手法で研究を進めている。土壤動物では、同じ1個体でもその体長は種によって1000倍以上も異なることから、現存量といった重さでの評価を入れることは重要である。だが、種の分類自体が著しく遅れている中では、そこまで到達するにはまだ時間が掛かる。

次に土壤動物中でもその扱いが容易な地表性昆虫の例について述べる。森本と長谷川<sup>8)</sup>や森本ら<sup>21)</sup>は山岳地帯に作られた道路の周辺部とその影響のない林内とで地表性昆虫の群集解析を百分率法<sup>22)</sup>を用いて行っている。この手法は、比較する2つの対象地域で採集された種のうち、数の多く採集された主要な種について2つの地域で取れた割合を求める。そして、対象となる種が、片方の地域でのみ非常に高い割合で採集されていれば、その地域の指標種と考える。また、両地域でほぼ同じ割合で採集されていれば、共通種と考えるものである。乗鞍岳で自然区と破壊区で調査を行ったところヒメミヤマツヤヒラタゴミムシ、オサシテムシは自然区の、ミヤマチビシテムシ、サドマルゴミムシは破壊区の指標種と考えられた。また、吉田と星野<sup>9)</sup>は、同じ地域において掘り取り調査を行い、大、中型土壤動物を解析した。その結果、ヒメミズとツブグニ科が自然区で多かったと述べている。伊藤と青木<sup>7)</sup>は腐肉を使ったベイトトラップ法を用いて集まる地表生息性甲虫類について自然度の異なる4つの地域で調査を行い、種類数、個体数、優占種、科構成、種組成とその地域的類似性を検討した。それによるとオオヒラタシテムシ、コエンナムシ、オオクロツヤヒラタゴミムシの3種は、各地に共通の優占種、アオオサムシ、コクロシテムシは自然度の高い地域に生息すること、甲虫相の類似性は自然の良く残された地域間では高いが、市街地では低い傾向があることを示した。高橋ら<sup>10)</sup>や、筆者と武田<sup>11)</sup>は地表性の土壤動物について同様の手法で黒砂糖、ビールを誘引餌にして道路予定地や道路のり面と周囲の森林や、畑との比較調査を行った。その資料を元村<sup>23)</sup>の等比級数則の式に当てはめて(図3)解析するとともに、採集目数、採集個体数を合わせて評価し、道路のり面の方が、畑より群集は多様で安定しているとした(表1)。このような地表性昆虫を用いた生物指標化の研究は、これら以外にも多くなされている。それは調査が比較的簡単で時間を要しないことやこのグループの種が比較的知名度が高いことなどが挙げら

れる。しかし、調査時期が虫の活動性の高い時に限られることやトラップへの誘引であるため偶然性に基づくデータのばらつきが大きい等の問題点がある。

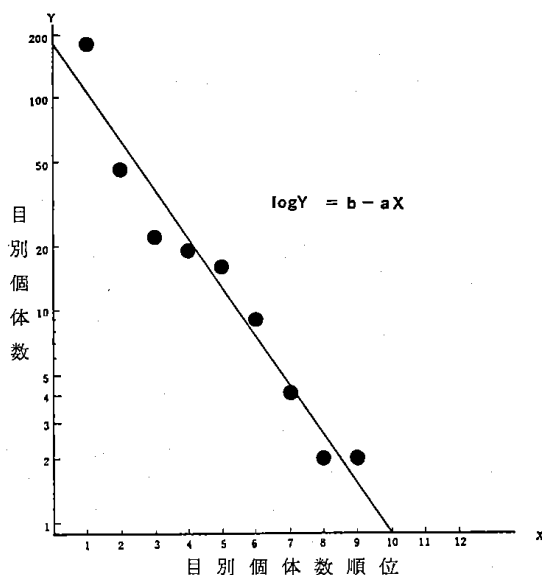


図3. ベイト・トラップ法による調査結果を目別個体数順位とその個体数との関係を元村の式にあてはめた例(浜松北バスストップのり面での調査結果)。図中の式のYは目別個体数、Xは目別個体数順位、a、bは定数を示す。藤山・武田<sup>11)</sup>より引用。

表1. ベイト・トラップで採集された地表性土壤動物の目数、個体数および元村の式の各係数の例(藤山と武田<sup>11)</sup>より引用)。調査地は静岡県金谷町および浜松市内、資料は1983年調査結果の一例である。

調査日	調査地*	a	b	目数	個体数
5月13日	牧之原(茶園内) 1	0.553	3.479	7	57
	" ( " ) 2	0.641	3.759	5	48
	" ( " ) 3	0.505	3.976	7	79
	" ( " ) 4	0.913	4.091	5	46
	" ( " ) 5	0.608	3.485	6	38
	" ( " ) 6	0.412	2.972	7	37
	牧之原サービスエリア道路のり面	0.543	5.583	12	1,203
	浜松北バスストップ道路のり面	0.525	5.159	9	298

\*牧之原(茶園) 1~6と牧之原サービスエリア道路のり面は隣接地である。

以上のように、土壤動物については、ササラダニ、地表性昆虫等を中心に群集解析による調査が行われ、資料収集が行われている。また、一般市民に解りやすい指標化の試みもなされている。しかし、その解析方法は、各種のものが並列的に行われており、まだ統一的方法が確立されるまでには至っていない。

次に土壤動物を生物指標として用いることの価値や長所と、短所や問題点について指摘しておきたい。青木<sup>6)</sup>は、価値、長所として1. 飛翔力や走力を持つ移動性の大きい地上動物と違い、環境との密着性が強い、

2. 豊かな森林から極めて貧弱な人口的環境に至るまで、少なくとも土壤の存在するところ、あらゆる環境に何らかの種が生息している、3. 地上の昆虫のように生きた植物に依存することがなく、その生息が食物としての植物種の在・不在に左右されない、を挙げている。筆者は、これに加えて次の2点を追加したい。

1. 土壤中でのみ生活する生物種である（一部の土壤動物は地上部にも出現するので例外もあるが）。その理由は土壤中は地上とは異なった環境を形成しており、その環境を評価する必要がある。この点では、植物はほとんど地下部と共に地上部をもっており、地下部と共に地上部の環境要因の影響を強く受け、土壤環境の正確な指標とは必ずしもなっていないとも考えられる。

2. 長期的な影響（蓄積効果を含む）を調べるのに良い。それは、土中は地上に比べ環境の変化が緩慢であるため、環境汚染などの影響は、大気中より遅れることが予想されるが、逆に一度環境が悪化すると環境改善に努めても地上部ほどはその効果が表れない。このことは、環境変化の蓄積的影響を知るためには土壤環境を評価することが重要であることを示している。この指標として土壤動物が使えらるであろう。但し、汚染の種類によっては土壤が持つ大きな浄化能力によって、実際の汚染が大きく緩和されてしまっていることも多いので十分注意を要する。

一方、短所としては、1. 土壤動物の調査には一般に多くの労力を要するため、精度の高い調査を行うのが難しい（一部例外はあるが、土壤を掘り起こす必要があるため調査面積が限られる）、2. 種数に比較し、知られている生物学的な資料が乏しい（調査結果に関して、生物学的因果関係を論じることが難しい）、3. 土壤層の厚さ等の微小生息環境は、場所的な異質性が高いが、地上部からは予測できないことが多い（これが精度に影響する）、等が挙げられる。これらの短所のうちには、これからの研究の発展により克服されるものも多いので、研究の進展を期待したいものである。

### 生物指標の問題点とそのあり方

これまで生物指標について、土壤動物における研究例を中心に述べてきた。だが、この手法による環境評価には、初めに述べた理念にもかかわらず、現実にはいろいろな問題点が含まれている。それは大きく、3つに分けられる。

(1)は調査精度の問題である。一般に生物を用いての測定が、物理化学的測定機器を用いての測定ほど精度の高い値を持つものではないということである。

その理由は、大きく分けて2つのことに由来する。

1として、生物それ自身に基づくもので、環境の働きかけに対する生物の応答には個体変異がある点である。正確には環境変異と遺伝的変異からなっているが、後者は世代を通じて伝わるので特別の系統や地理的系統を生ずる。また、小集団に隔離されている場合には、遺伝子浮動により独特の形質がその集団に固定していることもある。従って、環境の悪化したところに生育、生息している個体群は、そうでないところの個体群とは遺伝的に違っていることがある。この様な種内変異に基づく問題は自然に生息する生物を扱う場合、避けで通ることは出来ない。このことに注意しておかなければならない。2として、生物の分布を規定する要因が、指標とすべき環境の問題だけによって決定されている訳ではないことである。例えば、ある昆虫の分布は、その場所の物理環境の良さだけでなく、そこにその昆虫が移入する機会があったか否か、適当な餌が十分に存在したか否か、重要な病気や天敵、競争者がいたか否か、といった要因によっても決定されている。この様なことの表れとして、結果のバラつきが大きくなる。

(2)は結果の解析が難しい点である。生物による指標では、生物に表れた反応は、環境のいろいろな要因が合わさったものであり、何が主要因であるのかは明らかでない場合が多い。それで、環境要因と結果との因果関係を解析するのにかなり専門的知識と解析技術とを必要とする。また生物の生理的、あるいは形態的反応で見られるように、その反応が質的なものであることも多い。そのため、得られた資料を数量化するのに手間が掛かったり、数量化が困難であることも多い。さらに、性質の異なった生物を同時に対象とすることも多いため、これらを含めて客観性をもった解析をすることが困難であることも多い。

(3)は調査、解析に多くの時間と労力がかかることである。生物指標が発達した背景には、高価な環境測定機器に比べ、労働力が安価であった点も挙げられる。ところが、時代が大きく変化した今日では、逆にこのことがこの学問分野の進展のネックになっている。

それでは、このような問題に対して具体的にどのような対策を考えるべきであろうか。最初に結論的に言うと、残念ながら問題を解決する方法は現在のところ、見つかっていない。しかし、その対応方法として2、3提言しておきたい。その1) 調査の目的、対象別に調査方法を整理し、その目的を絞った調査が出来るようにする。こうした手法は、日本生態学会が編集

## おわりに

した“環境と生物指標”<sup>24)</sup>において、主要環境別、分類群別にまとめられ、試みられている。筆者は、この中の項目に更に、気候帯別指標を加えるべきであると考えている。この手法は土壤動物の分野ではあまり確立されていないので、この方向に向けた研究が求められている。その2)1)の類型化に合わせた解析手法のマニュアル化、必要な解析手法の開発を行う。これにより、研究のまとめの能率化がはかれるであろう。3)ある種を単一に取り出すことを避け複数種を用いて数量的な取り扱いをする。(1)で述べた問題点を直接除くことは出来ないが、複数種を組み合わせて量的な扱いをすることによって、単一要因のみでみた場合の偶然性に基づく影響を排除することが出来るからである。

遺伝的差異に基づく要因は、この方法では除去できないが、その実態はほとんど解っていないので、さしあたり生態遺伝学的調査による資料収集が必要である。

生物指標の研究は、今日自然の豊かな地域へのリゾート開発が盛んになってきている中で、その重要性は益々高まっている。しかし、既に述べたように具体的な調査法についてはいろいろな問題点が存在する。これらの問題点を少しでも克服できる手法の開発が望まれている。

今日、環境アセスメントが開発を合理化するための隠れみものとして行われているとの強い批判もある。また、日本が経済大国になるに従って生物による環境指標は人手を多く要する点で、かつてのように安価な評価法でなくなってきた。優秀な科学計測機器に優る評価が出来るのでなければ、その価値は逆に小さくなって行くかもしれない。この様な現状の中で優れた生物指標の開発が求められている。これらの要請にかなった生物指標を開発し、それを実施していくことは、容易なことではないが、それに向かって地道な研究を続けて行きたいと考えている。

## 参考文献

- 1) 青木淳一：奥日光のササラダニ群集構造と植生および土壌との関連、1、植生、土壌およびササラダニ種の記載、日生態誌、12：169-180, 1962
- 2) ……………：同、2、ササラダニ群集の構造分析（水平的比較）、同誌、12：203-216, 1962
- 3) ……………：同、3、ササラダニ群集の構造分析（垂直的比較）、同誌、13 96-104, 1963
- 4) ……………：同、4、植生とササラダニ群集構造、同誌、13：139-151, 1963
- 5) ……………：同、5、土壌とササラダニ群集構造、同誌、13：96-104, 1964
- 6) ……………：土壌中の小動物による環境評価、松中昭一編、図説環境汚染と指標生物、朝倉書店、152-159, 1979
- 7) 伊藤正宏、青木淳一：土壤動物群集による横浜市都市環境の解析、1、ベイト・トラップに集まる甲虫類。横浜国大環境研紀要、9：183-196, 1983
- 8) 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、文部省特定研究報告書、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、1：45-52, 1973
- 9) 吉田利男、星野輝一：土壤動物は環境破壊の指標となり得るか、同上報告書、1：52-56, 1973
- 10) 高橋史樹、桜谷保之、藤山静雄：昆虫相調査。日本道路公団東京第一建設局、道路緑化保全協会共編、日光宇都宮道路国立公園地域内生物相調査研究報告書、323-416, 1978
- 11) 藤山静雄、武田亨：東名高速道路における昆虫相、日本道路公団東京第一管理局、日本道路公団仙台管理局、道路緑化保全協会共編、林地昆虫が沿道農作物等へ及ぼす影響に関する調査研究報告書、76-96, 1984
- 12) 安野正之：生物指標、佐々学監修、環境科学大辞典、講談社、367-368, 1980
- 13) 桜井信夫：東京における腐肉に集まる昆虫と森林植生の量との関係、沼田真編“文部省特定研究報告書、都市生態系の特性に関する基礎研究”、47-56, 1974
- 14) 埴田宏：環境汚染と指標植物、共立出版、170 pp. 1974
- 15) 松中昭一：指標生物、環境汚染を啓示する、講談社、182 pp. 1975
- 16) 森島郁子：指標生物学生物、モニタリングの考え方、山海堂、218 pp. 1985
- 17) 青木淳一：3つの分類群の種数および個体の割合によるササラダニ群集の比較（MGP分析）、横浜国大環境紀

要、10 : 171-177, 1983

- 18) 栗城源一、青木淳一：仙台市における街路樹下の土壌小型節足動物群集、とくにササラダニ類について、動物学雑誌、91 : 165-177, 1982
- 19) 青木淳一：土壌動物、日本自然保護協会編指標生物－自然をみるものさし、252-257, 思索社、1985
- 20) 北沢祐三編、各種生態系における野生動物の現存量に関する研究報告書、立教大学、241 pp. 1978
- 21) 森本尚武、吉田利男、長谷川政興：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（続報）、文部省特定研究報告書、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、2 : 39-42, 1974
- 22) 加藤陸奥雄：動物生態学実験法、堀川芳雄外監修、生物実験法講座、第9巻、1-77、中山書店、1954
- 23) 元村勲：群集の調査面積と出現する種数の関係、生態学研究、1 : 195-199, 1935
- 24) 日本生態学会環境問題専門委員会編：環境と生物指標 1、陸上編、共立出版、291 pp. 1975