

「期待多様性損失」指標を用いた生態系リスク評価とリスク便益分析

岡敏弘^{1,4}・松田裕之^{2,4}・角野康郎³

¹ 福井県立大学、910-1195

² 東京大学、164-8639

³ 神戸大学、657-8501

⁴ CREST、科学技術振興事業団

キーワード：絶滅確率、生物多様性、リスク便益分析、湿地、生態系リスク

要旨

新しいリスク尺度「期待多様性損失(ELB)」を用いて湿地開発の生態系リスクを評価した。ELBは、湿地に棲む生物の、湿地消失に伴う、絶滅確率の増分の重みづけ集計値である。重みは種の絶滅によって失われる系統樹の枝の長さに比例して与えられる。系統樹の枝の長さは、分類学的多様性への種の寄与と解釈できる。絶滅確率の増分は、植物レッドリストの作成に使用されたシミュレーションによって計算された。結果は、湿地保護の費用と結びつけられて、「多様性1単位あたりの費用」という指標の値を与える。

1. 生態系リスク評価と多様性尺度の必要性

人の健康に関する限り、定量的リスク評価はかなり確立された手法であり、それに基づくリスク管理が政策に導入されつつある。生態系管理を合理的な基盤の下におくためには、生態系リスクについても定量的評価が必要である。中西(1995)は、種の絶滅こそ、誰もが避けたいと思う事象であることを根拠に、種の絶滅を生態系リスク評価のエンドポイントにすることを提案した。この研究はその着想を現実化する1つの試みである。

この研究のもう1つの意義は、地域生態系保護に使える多様性指標を開発するという点にある。これまで、地域生態系の保護と、地球規模の生物多様性の保護とは、別の問題として扱われてきた。もちろん、地域生態系の保護が結局のところ地球の生物多様性の保護に貢献することは誰でも想像できるが、地域生態系を現実に保全しようとするとき、根拠となり、実際の力になったのは、地域アメニティの構成要素としての自然の価値であり、レクリエーション需要の対象地としての自然の価値であった。地域生態系の多様性が問題になるときは、例えば、ある土地に棲む種の数といった指標がとられるが、こうした指標は、その土地だけについて独立に定義されるのであり、地球の生物多様性へのその土地の寄与分を測るものではない。本研究はまさにそうした寄与分として土地の

価値を評価することを意図する。

2. 中池見湿地の開発

上記のリスク評価の手法を適用しようとする対象は、中池見湿地(福井県敦賀市)の開発である。

中池見は、「袋状埋積谷(ふくろじょうまいせきこく)」と呼ばれる地形をなす3つの「池見」の1つで、江戸時代に開発が行われ、水田となった。排水も悪く小型耕耘機の使用すら困難な所も多く、耕作に多大の労力を要する水田であったので、圃場整備も行われず、次第に休耕田が増えたが、そうした経過が、伝統的水田と、様々な遷移の段階にある休耕田と、水路や水たまりなどがモザイク状に組み合わさった、多様性に富んだ湿地生態系を作り出した。

中池見には、イトトリゲモ、デンジソウ、ミズトラノオなど、1997年に環境庁から発表された「植物レッドリスト」で「絶滅危惧種」に挙げられている植物13種、「準絶滅危惧種」2種を含む、日本で近年減少傾向の著しい湿地の植物が生育している。また、これも1999年に入って絶滅危惧種に指定されたメダカや、全国的に減少しているゲンゴロウ類、60種を超えるトンボなど、昆虫もきわめて豊富に生息している。

この中池見に開発計画が持ち上がったのは1989年である。敦賀市の総合開発計画のなかで、工業団地の誘致がうたわれたのである。この計画は実現しなかったが、大阪ガスのLNG(液化天然ガス)基地の候補地として再浮上した。1996年に、福井県の要綱に基づく環境影響評価(アセスメント)を終えたが、その結果、保護上重要な植物群落と植物種を約10ha(そのうち湿地部分は3.3ha)の「保全エリア」に移植し、水生昆虫などもそこに移入すること、そのために3年かけて移植実験を行うことを条件に事業が進められることになった。

工業団地構想の段階から、地域住民によるこの土地の自然を守るための活動が始まり、日本生態学会がこの湿地の保全を求める要望書を出す(1996年)など、生態学者などからも保全を求める声が出た。湿地を保全するためのトラスト運動も始まった。

この湿地の問題の特徴は、ここに存在する自然が、人手の加わらない原生的な自然ではなく、水田耕作という人の行為とともに歴史的に形成されてきた自然であり、数十年前まではどこにでもあったごくありふれたものであり、それが、近年の農業のやり方の変化や、治水や利水など人が自然を制御する仕方の変化の中で、急速に失われつつあるものであるということである。こうした特徴はこの土地の保全の問題を複雑にしている。現在この湿地がもつ生物多様性は、伝統的に営まれてきた農業が縮小していくという変化の一局面で現れているものだからである。大阪ガスの環境影響評価書でもそのことは指摘され、むしろ、そうだからこそ、この湿地の自然を守るには「放置」ではなく「管理」が必要であり、事業計画の中にある「保全エリア」こそ、積極的に保全を図るために必要な手段であると主張されている。これに対して、湿地動植物の複雑な相互依存関係や水などの環境条件がそれらの生物に及ぼす影響に未知の部分が多いことを考えると、限られた面積への移植・移入そのものが成功する保障はなく、「成功」したかどうかの判断も短期間では不可能であり、また、仮にそれによって特定の種や群落の保存に成功したとしても、そうした「ビオトープ的」発想で管理された自然の生物多様性はもとの自然と同じではなく、湿地全体を利用しながら残すべきだというのが、これに反対する生態学者の主張である(角野 1997)。

3. 期待多様性損失(ELB)

地域生態系を地球の生物多様性と結びつけ、地域生態系消失のリスクを絶滅確率で定量化しようとするわれわれの枠組みは次の3段階からなる。

1. 中池見が失われることは、そこに棲む生物種の生息地が1つ失われることを意味する。それは、その種が絶滅する確率を幾分か上昇させるだろう。
2. 種の絶滅は地球全体の種の多様性を減少させる。その減少分は、系統分類学的多様性への種の寄与分によって測られる。
3. 中池見が失われることによるさまざまな生物種の絶滅確率の増加分に、それぞれの種の多様性への寄与分をかけて足しあわせたものが、中池見という土地の、地球の生物多様性への寄与分であり、それをもって、中池見開発の自然生態系リスクの指標としてよい。この指標は「期待多様性損失(ELB: expected loss of biodiversity)」と呼んでよいだろう。

3.1 絶滅確率の増分

絶滅確率に関するわれわれの推定は日本の植物レッドリスト(1997)の作成に使われたシミュレーションに基づく。このレッドリストはIUCNの1994年のレッドリストのカテゴリーと基準とに基づき、絶滅確率の定量的評価によるランクづけを行った。5つの基準のうち、いわゆるE基準がそれであり、それは、

1. CR (critically endangered): 10年間または3世代のうち長い方の期間で50%以上の絶滅確率
2. EN (endangerd): 20年間または5世代の長い方で20%以上の絶滅確率
3. VU (vulnerable): 100年間で10%以上の絶滅確率

という範疇分けを行う。実際には、他の基準も併用され、最も厳しい範疇分けを与えた基準が効力を持った。

絶滅確率の評価は、生育地の数・生育地の個体数・過去10年間の個体数減少率の全国分布に基づくシミュレーションによって行われた。これらのデータは全国約400人の調査員から集められた情報によって作られた(Yahara et al., 1998)。シミュレーションでは、過去10年間の減少率の分布が今後も続くとして1000回の試行が行われ、そのうち何度絶滅したかということから絶滅確率が算定された。

このシミュレーションでは、絶滅までの平均時間も計算される。そして、1つの生育地がなくなった場合の平均時間もまた計算できる。通常、生育地の数が減れば絶滅までの時間は短縮されるだろう。これが中池見消失の影響評価に使えるのである。ある種の、絶滅までの平均時間が T 年であるとしよう。その逆数 $1/T$ は、各年の絶滅確率が一定で互いに独立であるならば、1年あたりの絶滅確率と解釈できる。そこで、1つの生育地の消失による $1/T$ の増加分 $\Delta(1/T)$ を、その影響の指標としよう。

中池見に生育する15種の絶滅危惧および準絶滅危惧植物の絶滅確率への、中池見消失の影響を表1に示す。この計算には、個体数区分ごと、および、個体数の減少率区分ごとの全国の生育地の数が必要である。それは、近刊の『レッドデータブック』で公表される。また、中池見の個体数が必要である。これは角野の調査による。

表1: 中池見消失による絶滅確率の増分

No.	種	レッド リスト	絶滅までの 時間 (T)		$\Delta(1/T)$	
			消失前 (年)	消失後 (年)		
1	ミズニラ	Isoetes japonica	VU	89.96	89.89	8.90×10^{-6}
2	デンジソウ	Marsilea quadrifolia	VU	32.32	32.26	6.43×10^{-5}
3	サンショウモ	Salvinia natans	VU	54.57	54.56	5.71×10^{-6}
4	オオアカウキクサ	Azolla japonica	VU	52.76	52.65	4.10×10^{-5}
5	ヤナギヌカボ	Persicaria foliosa	VU	54.00	53.87	4.26×10^{-5}
6	ヒメビシ	Trapa incisa	VU	85.08	84.06	1.42×10^{-4}
7	ミズトラノオ	Eusteralis yatabeana	VU	35.99	35.54	3.56×10^{-4}
8	オオニガナ	Prenanthes tanakae	VU	119.5	118.87	5.10×10^{-5}
9	アギナシ	Sagittaria aginashi	NT	162.0	161.91	4.38×10^{-6}
10	イトトリゲモ	Najas japonica	EN	37.73	37.51	1.53×10^{-4}
11	ミズアオイ	Monochoria korsakowii	VU	56.44	56.23	6.68×10^{-5}
12	カキツバタ	Iris laevigata	VU	102.2	102.15	6.32×10^{-6}
13	ミクリ	Sparganium erectum	NT	185.1	185.08	1.90×10^{-6}
14	ナガエミクリ	Sparganium japonica	NT	202.2	201.77	1.10×10^{-5}
15	ミズトンボ	Habenaria sagittifera	VU	81.80	81.79	1.49×10^{-6}

3.2 多様性寄与

進化系統樹の情報から分類学的多様性が測れるという議論がある (Willams et al., 1991, 1994; Weitzman, 1992; Faith, 1995)。われわれの方法はそれを土地の開発に使えるように具体化するものである。

基本的な考え方は、いくつかの種からなるグループの全多様性は、それらの種の間関係を示す系統樹の枝の全長によって測られ、ある種の全多様性への寄与分は、その種と最近縁種との最も近い共通祖先からその種までの距離を示す枝の長さによって測られるというものである。その種が絶滅する場合に失われる多様性もその寄与分に等しい。

ある種が最近縁種から分かれてからの実際の時間として枝の長さを測れるのが理想的だが、そうしたデータは必ずしもない。そこで、全系統樹の「根」から注目する種までの枝分かれの数の逆数をもって、その種から最近縁種との共通祖先までの枝の長さの代用とした。

加えて、あるグループ内の種間の系統関係が完全に解かれていない場合も多い。そこで、注目する種を含むある上位グループの中に含まれる種数から、その種と全系統樹の「根」までの枝分かれの数の逆数の期待値を求める方法を採用した。

例えば、あるグループ内に4種あるとすれば、全部で15とおりの系統樹があり得るが、そのうち、ある種Aにとっての、そのグループの「根」からの枝分かれの数が1になる場合は3とおりの、2になる場合は6とおりの、3になる場合は6とおりのある。そこで、そのグループの「根」から全系統樹の「根」までの枝分かれの数が m であるならば、種Aから全系統樹の「根」までの枝分かれの数の逆数の期待値は $3/[15(m+1)]+6/[15(m+2)]+6/[15(m+3)]$ と計算されるだろう (図1)。

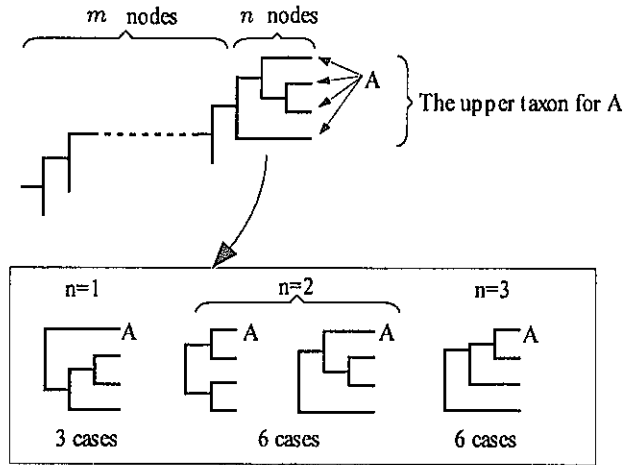


図 1: 上位グループに 4 種ある場合の枝分かれの数

一般に、ある種 A を含む上位グループ内に n 種あるとき、種 A にとっての、上位グループの根からの枝分かれの数が k である場合の数は、次の式を満たす $f_k(n)$ である。

$$\begin{cases} f_1(n) = f(n-1) \\ f_k(n) = \sum_{i=1}^{n-k} {}_{n-1}C_i f(i) f_{k-1}(n-i), \quad k = 2, 3, \dots, n-1 \end{cases}$$

ここで ${}_{n-1}C_i$ は n 個から i を選ぶ組合せの数、 $f(n)$ は n 種からなる上位グループのすべての系統樹の数、すなわち

$$f(n) = \sum_{i=1}^{n-1} f_i(n).$$

である。上位グループの根から全系統樹の根までの枝分かれの数が m であるならば、種 A にとっての、全系統樹の根からの枝分かれの数の逆数の期待値はとなる。上位グループ内種数 n が大きいときには計算量が膨大になるので、 $n > 100$ のときには、 $E_n[1/(m+k)]$ の近似として $(m+1/E_n[1/k])^{-1}$ を用いた(ただし、 $E_n[1/k] = E_{n-1}[1/k](2n-4)/(2n-3)$ である)。

$$E_n[1/(m+k)] = [1/f(n)] \sum_{k=1}^{n-1} f_k(n)/(m+k)$$

表 1 の植物にこれを適用した。上位グループとしては単系統であればどのレベルをとることも任意であるが、維管束植物の科の間の系統関係が比較的よくわかっているので、原則としては科を上位グループとしてとり、それが不可能な場合に 2~3 の科を含むグループや目などを上位グループとした。

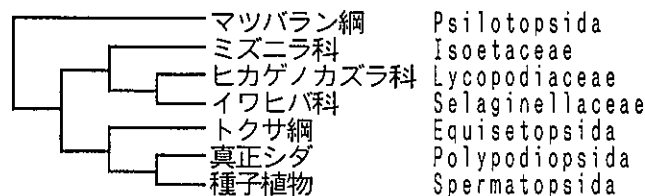


図 2: 維管束植物上位グループの系統関係

維管束植物の最上位グループ Psilotopsida, Lycopodiopsida, Equisetopsida, Polypodiopsida, Spermatopsida, の間の関係については、Bremer et al. (1987) と Bremer (1985) に従って、図 2 のとおりとした。Lycopodiopsida, 中の 3 種 Isoetaceae, Lycopodiaceae, Selaginellaceae の関係については、Manhart (1995) の分子系統解析によって図 2 のとおりとした。

シダ類については、Hasebe et al. (1995, p.146) の分子系統樹に従った。種子植物の系統樹は Chase et al. (1993) によった。

科の中の種数は、双子葉植物については Cronquist (1981)、単子葉植物については Dahlgren et al. (1985)、シダ類については Kramer and Green (1990) によった。

表 1 に掲げた種の、維管束植物全体の系統樹の根までの枝分かれの数の逆数の期待値を表 2 に示す。例えば、ミズニラにとっての上位グループであるミズニラ科 Isoetaceae の根から維管束植物全体の根までの枝分かれの数は 3 であり、ミズニラ科には 68 の種がある。そこで、上の式に従って、枝分かれの数の逆数の期待値は 0.07332 となる。

表2: 中池見の植物の多様性寄与とELB

No.	種	上位グループ	多様性寄与				
			上位グループ にとつ ての枝 分かれ の数	上位グ ループ 内種数	$E_n[1/(m+k)]$ または $(m+1/E_n[1/k])^{-1}$	Y_i (年)	ELB (年)
1	ミズニラ	Isoetaceae	3	68	0.07332	29328994	261
2	デンジソウ	Marsiliaceae	9	67	0.04879	19514737	1254
3	サンショウモ	Salvinaceae	10	10	0.07070	28278915	161
4	オオアカウキクサ	Azollaceae	10	6	0.07720	30881499	1267
5	ヤナギヌカボ	Polygonaceae	20-21	1000	0.01775	7101914	303
6	ヒメビシ	Trapaceae	25-29	15	0.03085	12341354	1755
7	ミズトラノオ	Lamiaceae+Verbenacea	29-33	580	0.00852	3406671	1214
8	オオニガナ	Asteraceae	28-29	20000	0.00531	2124976	108
9	アギナシ	Aginashi Alismatales	17-19	249	0.02771	11085960	49
10	イトトリゲモ	Najadales	17-19	205	0.02905	11618822	1782
11	ミズアオイ	Pontedariaceae	22-26	34	0.03003	12010897	802
12	カキツバタ	Iridaceae	18-18	1400	0.01574	6297533	40
13	ミクリ	Sparganiaceae	22-27	20	0.03147	12588373	24
14	ナガエミクリ	Sparganiaceae	22-27	20	0.03147	12588373	139
15	ミズトンボ	Orchids	17-21	20115	0.00557	2226034	3
計							9163

3.3 期待多様性損失

ある種から維管束植物全体の根までのすべての枝の長さの合計を 1 とするときの種 i の多様性寄与を B_i と書くと、 B_i の値は種 i についての $E_n[1/(m+k)]$ または $(m+1/E_n[1/k])^{-1}$ によって与えられる。維管束植物の最初の分化が 4 億年前に起こったとして、種 i の多様性寄与を $Y_i = B_i \cdot 4 \times 10^8$ としてもよいだろう。結果を表 2 に掲げる。

種 i の絶滅確率の増分 $\Delta(1/T)$ を ΔP_i とすると、ELB は $\sum_i \Delta P_i Y_i$ によって計算される。結果を表 2 に示す。ELB は 9200 年となった。中池見が保持している種分化の歴史遺産が 9200 年であることを、これは示している。

4. リスク便益分析

「保全エリア」の評価によって、リスク便益分析は2つのシナリオをもつ。

1つのシナリオは、3.3haの保全エリアによって中池見の多様性が守られるとするものであり、それによると、9200年の期待多様性を守るために保全エリアにかけている費用が、リスク削減によって失われる便益と見なされる。保全エリアには初期投資で10億円、年々の維持管理費として6000万円の費用がかけられており、3%の割引率と25年の償却期間の下で、それらの年価値は1億2000万円となる。よって、便益・リスク比(B/R ratio)は13,000円/年-ELBとなる。

2つめのシナリオは保全エリアによって自然は守られず、開発によって中池見の多様性はすべて失われるとするものであり、この場合には、9200年の期待多様性を犠牲にしてLNG基地開発の便益が享受されると見なされる。中池見以外の土地に立地する場合の建設費増分をもって敦賀LNG基地の便益と見なせば、それは、着工時点の現在価値で270億円～1000億円となる。3%の割引率と50年の償却期間の下でその年価値は10億円～39億円である。よって、B/R比は、11万～420,000万円/年-ELBとなる。

5. 謝辞

この研究は科学技術振興事業団CRESTの支援を受けている。

6. 文献

- Bremer, K., Humphries, C. J., Mishler, B. D. and Churchill, S. P.: *Taxon*, **36**, 339-349 (1987).
- Chase, M. W. et al.: *Annals of the Missouri Botanical Garden*, **80**, 528-580 (1995).
- Cronquist, A.: *An Integrated System of Classification of Flowering Plants*, Columbia U.Pr.(1981).
- Dahlgren, R. M. T., Clifford, H. T. and Yeo, P. F.: *The Families of the Monocotyledons: Structure, Evolution, and Taxonomy*, Springer-Verlag (1985).
- Faith, D. P.: *Biodiversity: Measurement and Estimation*, ed. by Hawksworth, 45-58 (1995).
- Hasebe, M. et al.: *American Fern Journal*, **85**, 134-181 (1995).
- 角野康郎：関西自然保護機構会報, **19**, 103-108 (1997).
- Kramer, K. U. and Green, P. S. eds.: *The Families and Genera of Vascular Plants: Volume I Pteridophytes and Gymnosperms*, Springer-Verlag (1990).
- Manhart, J. R.: *American Fern Journal*, **85**, 182-192 (1995).
- 中西準子：環境リスク論, 岩波書店(1995).
- Weitzman, M. L.: *Quarterly Journal of Economics*, **107**, 363-406 (1992).
- Williams, P. H., Humphries, C. J. and Vane-Wright, R. I.: *Aust. Syst. Bot.*, **4**, 665-679 (1991).
- Williams, P. H., Gaston, K. J. and Humphries, C. J.: *Biodiversity Letters.*, **2**, 67-78 (1994).
- Yahara, T., Kato, T., Inoue, K., Yokota, M., Kadono, Y., Serizawa, S., Takahashi, H., Kawakubo, N., Nagamasu, H., Suzuki, K., Ueda, K., and Kadota, Y.: *Proceedings of Japanese Society of Plant Taxonomists*, **13**, 89-96 (1998).