

人間と自然のつきあいに関する生態学的一考察
——生物システムの複雑さ，柔軟さ，そして頑丈さ——

近 藤 倫 生

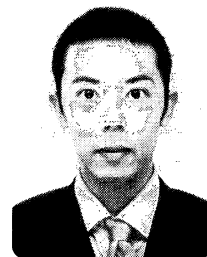
龍谷理工ジャーナル17巻1号
龍谷大学理工学会
発行日 2005年4月1日

人間と自然のつきあいに関する生態学的一考察

—生物システムの複雑さ、柔軟さ、そして頑丈さ—

近藤 倫生
Michio KONDOH

理工学部環境ソリューション工学科 講師
Lecturer, Department of Environmental Solution Technology



大学からの帰り、駅前の路地を入れて家に向かう途中、空がたいそう騒がしい。見上げると、結構な数のカラスが飛んでいる。真っ黒の大群がまるで川の流れるように形を変えながら、ビルからビルへ電線から電線へと飛びまわっている。壮観と言えば壮観、不気味と言えば不気味な光景である。しかし、付近の住人から見れば、これは腹が立って仕方が無い光景に違いない。近年、都市で人間の出すゴミを荒らすカラスが増えているのだという。そういえば、うちのマンションでも、朝外に出てみると前日から出されていた生ゴミの袋にカラスが群がっているということがよくある。カラスにしてみれば、これだけ餌を用意しておいて飛んでくるなどというのが無理な相談なのかもしれない。カラスにはカラスなりの言い分があるのだろうけれども、人間にも人間なりの事情があって、こんなふうにゴミを荒らされたりするのは迷惑なのである。

よほど「できた」ヒトどうしでも無い限り、利害対立のあるところには争いが生じる。人とカラスの場合もその例外ではない。人はゴミをカラスに荒らされないようにさまざまな工夫をする。ゴミにネットをかぶせて覆いをしてみたり、カラスを遠ざけるために爆竹を鳴らしたり。果てはカラスの死骸を吊るしておくとかラスが寄り付かないのだなどと物

騒なアイデアまで出されたりしている。こういうあの手この手は、いわゆる「撃退グッズ」として商品化されたりマスコミによって広く伝達されたりする。いったんカラス撃退のアイデアが普及すると、人間が優勢に立ったかのように見えることもある。しかし、カラスもよくできたもので、たいていはじきに慣れてしまうという話だ。先日、テレビのニュースで畑にまいた種を食い荒らすカラスの撃退についてやっていたけれども、実際、爆竹になれてしまったカラスは、目の前で爆音を鳴らされても素知らぬ顔であった。カラスが柔軟に人間の行動に対処することで、人間の意図の上をいってしまうという訳だ。

カラスに限らず、生物が人間の意図通りに反応してくれないことはよくある。農業はその最も良い例の宝庫の一つである。農業とは、人間にとって役に立つ生物（作物）を中心とした人工の生態系をつくらうとする営みである。しかし、人間にとって好ましい生物のみからなる生態系を構築するのは至難の業だ。例えば、農作物はしばしば害虫の発生によって大きな痛手を被る。害虫の発生を抑える広く利用されているひとつの方法は殺虫剤の散布である。しかし、この殺虫剤が問題をより深刻にしてしまうことがよく知られている。殺虫剤によって、一時は害

虫の個体数は減るかも知れないが、多くの場合、害虫はその個体数を回復してしまうからだ。場合によっては、じきにもともといたよりもっとたくさんの数の害虫が発生し、農作物を食い尽くしてしまうことさえある。こういった「思いもよらない」現象が起きるひとつの原因は、害虫の「進化」である。

たがいに繁殖活動をするのでできる個体の集まりを種という。「バッタやウンカが大発生して農作物に被害を与えた」などというときには、バッタあるいはウンカという同じ種に属する個体の数が増えたということを意味している。種を構成している個体はみな似た特徴を備えているが、まったく同じという訳ではない。それぞれの個体が遺伝的に異なる特徴を持っている。さらに、ある特定の遺伝子をもつグループは時とともに増えたり減ったりしている。ある種における遺伝的なバリエーションを遺伝的多様性という。遺伝的多様性が十分に高いときには、環境の変化に応じて特定の遺伝子を持った個体が別の遺伝子をもつ個体に置き換わることにより、種としての特徴が変化してしまうことがある。これは進化と呼ばれ、「思いもよらぬ」現象の原因となりうる。害虫と殺虫剤の例でいうならば、殺虫剤を使用することによって殺虫剤感受性の強いほとんどの個体は死んでしまうが、偶然に殺虫剤に耐性をもっている一部の個体は生き延びる。この耐性が遺伝する場合、耐性個体は耐性を持った子供を産むが、耐性を持たない個体は子供を残せない。その結果、次の世代ではよりたくさんの殺虫剤耐性個体が集団を占め、大発生することになるのだ (Georghiou 1990)。

「思いもよらない」現象は進化のみならず、種間の相互作用によっても生じうる。よく知られたひとつの例は殺虫剤の天敵への影響によるものである。限られた植物しか生えない農作地は人間が作り出した人工の生態系とみなすことができるが、この人工生態系が自然生態系に大きく依存したシステムであることは意外と知られていない。たとえば、Thies & Tschamtkke (1999) は未開墾の土地 (自然生態

系) が近くにあるとき、農業害虫が寄生虫によって駆除される可能性が高くなり、結果的に作物の収量が増加することを明らかにした。人間が自分で制御していると思いがちな農業生態系の維持には、実は自然生態系の与えてくれるサービスが不可欠なのである。このように、天敵が害虫を駆除してくれることに依存したシステムにおいて農薬を無分別に散布すると、それは農業害虫のみならず、それを攻撃してくれている天敵をも殺すことになる。その結果、天敵から晴れて自由の身になった害虫の大発生につながるかも知れない (松田 2000)。農業生態系のような「シンプル」な系においてさえ、多様な生物が互いに相互作用している。この複雑性をきちんと認識することなしに浅はかな知恵で生物システムの制御を試みれば、出てくる結果が「思いもよらない」ことになるのは当然なのかもしれない。

生態系の複雑性と「思いもよらない」ことの起こりやすさについて、Yodzis (1988) は面白い研究をおこなった。生態系はさまざまな種類の生物種が互いに食べたり食べられたり、あるいは助け合ったり (相互作用) して維持しているシステムであると捉えることができる。ここに種 A とその餌生物である種 B の二種がいるとしよう。種 A あるいは種 B の個体数を増やしたら、もう一方の種は増えるだろうか、それとも減るだろうか? もしも、システムがこれら二種からのみになっているならば、予測は比較的簡単である。餌 (種 B) を増やせばそれを食べるもの (種 A) は増えるし、食べるもの (種 A) を増やせば餌 (種 B) は減るだろう。Yodzis (1988) はこの単純な予測が互いに相互作用する多種からなるシステム (これを食物網という) においてどれほど成り立つのかを研究した。だが、現実の生態系でこれを確認するのは簡単ではない。そこで、Yodzis は現実の食物網構造を模した数理モデルを用いて理論的な解析をおこなった。その結果は驚くべきものであった。まず、捕食者を増やしたら餌生物が減少するかどうかを調べたが、結果がパラメタの微妙な値に強い影響を受けてしまうため、餌生物が増える

か減るかはっきりとは決められない場合が52%もあったのだ。それだけではない。捕食生物を増やした結果、餌生物が増えてしまう場合が11%もあったのである。同様に、餌を増やした結果、それを食べる捕食生物が増えるかどうか決められない場合が54%、逆に餌を増やしたのに捕食生物が減ってしまう場合が7%もあった。このことは、たくさんの生物が相互作用しあう複雑な生物ネットワークでは、「思いもよらない」結果がいかに簡単に生じうるかということを示している。

こうして見てきたように、生物の世界では「思いもよらない」ことは「思いもよらない」という言葉を使うのがためらわれるくらいに頻繁に起きる。生物個体はその学習能力や可塑性によって、その姿や行動を素早く変化させる。遺伝的多様性は、生物進化の原動力となり、世代を経るごとに生物の特徴を次々に変えていく。そして、生物種の多様性は、複雑な種間相互作用ネットワークをつくることによって、個体数変化の予想を難しいものにしてしまう。あたかも、予測の不確実性こそが生物システムの特徴であるかのようである。

では、私たちはこのような「やんちゃ」な自然とどのようにつきあっていったらよいのだろうか？誰でも思いつくひとつの方法は、複雑な自然生態系を単純化した人工生態系で置き換えることである。人間にとって役に立つ家畜や農作物のみを生かし、役に立たない生物種は駆逐することにより生物種の数を減らす。さらに、こうして選ばれた生物種の遺伝的多様性が残されていたのでは、「思いもよらない」進化が起こる可能性があるので、最大のサービスを提供してくれる遺伝型を持った個体のみを選択する。そうやって生物の複雑性や柔軟性を取り除いてやれば、生態系を人間のコントロール下におくことが可能かも知れない。いわば生態系の飼いならしである。しかし、生態学の研究から得られた知恵によると、この方法がうまくいく見込みは限りなくゼロに近い。なぜなら、生物システムのもつ多様性、柔軟性こそが、生態系維持の鍵だからだ。

植物の生態系における役割は、太陽からのエネルギーを受けとり、無機栄養塩類を土壌から吸い上げ、他の生物が栄養源として利用できる有機物を合成することである。我々人間をはじめ、すべての生命はこの植物の生産力によって支えられている。最近の研究から、この植物群落全体の生産性は、植物の種多様性が高くなるほど大きくなることが分かってきた (Tilman 1996, Hector et al. 1999)。これにはいくつかの理由があるが、もっとも重要なものは「ニッチ効果」と呼ばれるものである。種類の異なる植物は上手に利用できる資源の種類（たとえば、土壌の浅い／深いところの栄養塩）や得意な環境（暖かい／涼しい）が異なる。したがって、さまざまな種類の生物がいた方が、より多様な環境でより多くの種類の資源を利用することが可能になり、結果として全体の生産性が向上するのである。さらに、時間によって利用できる資源の種類や環境条件は変化する。多様な生物が存在すれば、それぞれのときに最も有利な植物が他の植物を抑えて増加するので、卓越する種が時とともに柔軟に移り変わることによって生産性の総量は安定化するのである。多くの生物の生命は植物の生産に依存している。多様な植物が存在することでこれらの生物の生命を支えるエネルギーを安定して供給することが可能になっているといえる。

生物進化の原動力である遺伝的多様性もまた、生物の存在には無くてはならないものである。これを示す最も面白い例の一つは、実は農業生態系におけるものである (Zhu et al. 2000)。Zhu らは中国雲南省の農家の協力を得て、水田を用いた大規模な実験をおこなった。まず、広い水田を二つのグループに分けた。一方では近代農業に習って一品種のみを栽培したのに対して、他方のグループでは遺伝的に異なるさまざまな品種の稲を混ぜて栽培し、菌類による病気のかかりやすさを比較してみた。すると、遺伝的多様性の高い混作の水田では、病気による被害が94%も抑えられ、さらに収穫量が89%も増加したのである。混作による効果は絶大で、混作農地で

は2年間の研究プログラムが終わる頃には殺菌剤の使用は不要なほどであったという。遺伝的に均質な個体の集まりは環境の変化に対して同じように反応するため、コントロールが簡単である。しかし、これは農業害虫や病原菌にとっても同じことなのだ。単一の遺伝子型の個体のみからなる水田は扱いやすい格好の餌食なのである。さまざまな遺伝子をもつ異なった特徴の個体がいることで、その集団全体は維持されやすくなっていると考えられることができる。

上で紹介した二つの研究は、種の多様性、遺伝的多様性のそれぞれが自然生態系や人工生態系の維持に役立っていることを示している好例だ。だが、遺伝的多様性、種多様性のはたらしはそれだけではない。種の多様性と遺伝的多様性は別々に働くのみならず、相互作用的に働く可能性がある。たくさんの種類の生物種が複雑に関係し合っているほど種の絶滅が起こりやすいことが、数理モデルを用いた理論研究によって予測されてきた (May 1973)。しかし、現実には、多様な生物が驚くほど複雑な種間相互作用のネットワークの中で共存しており、これは「複雑な食物網は不安定である」という理論研究の予測と矛盾するように思える。私は、最近、生物の柔軟な適応過程 (遺伝的多様性に由来する進化、可塑性、あるいは学習行動など) を考慮すると、従来の予測とはまったく逆に、複雑な食物網 (生物種間の食う食われる関係のネットワーク) ほど、種の維持が容易になることを理論的に示した (「柔軟な食物網」仮説; Kondoh 2003)。生物は関係を持つ生物種を取捨選択することが可能である。したがって、環境の変化や個体群密度の変化に応じて生物種の間には結ばれる関係は柔軟に刻々と変化している。この生物の適応的な柔軟性が生物間相互作用の複雑性と組み合わせると、環境の変動を緩衝する作用が得られるようになる。その結果、複雑な食物網では生物の絶滅はより起こりにくくなる可能性がある。

こうやって見ていくと、生物システムの一つの特徴が浮きぼりになってくるように思う。その特徴とは、「思いもよらない」現象を引き起こしているそ

の原因こそが同時に生態系に柔軟さと頑強さを与えているということである。遺伝的多様性、種多様性と複雑な生物間相互作用、そして適応的な学習行動。これらはみな、生物システムの振る舞いに柔軟性を与えるから、生物を (ちょうど鉱物かなにかのように) 固定したものとして扱おうとする人間にとっては厄介なものである。なぜなら、これらの特徴を手にしたとき、生物システムは人の期待を裏切り、自由に躍動するからである。しかし、それを生物から奪うことはできない。この自由さ、柔軟性こそが生物を非生物からわかるのもっとも重要な特徴であり、生物システムを支えている鍵だからだ。この柔軟性が失われてしまったら、自然は無機的なモノに成り下がり、そして結局は私たち人間を支えることもやめてしまうだろう。この生態系を持続的に利用するには、複雑なシステムの「有用な部分」のみに注目し、それ以外の「その他おおぜい」を無視することで、その完全な理解や制御をねらう旧来の方法はあまりに無力で危険い。事実、自然をまるで柔軟性を欠いた機械であるかのように扱うアプローチこそが、実際、現在進行中の生物多様性の崩壊と環境の荒廃の原因でもある。これからの人類には、自然システムの複雑性を残したままで同時にそのシステムの不確実性とうまくつきあっていく知恵が、そして自然の振る舞いはそもそも予測不可能であることを認めることから始まる新たな哲学が必要であろう。

天気の良い午後である。ベランダの向こうの電線に一只のカラスがとまっているのが見える。多様性、複雑性、柔軟性、そして「思いもよらぬ」躍動。そんな概念を重ね合わせようとじっと見つめるが、カラスはやはりカラスである。ときどき羽を搔くだけで、なにも難しいことを考えている様子はない。また、ああしてどこからか食べ物運ばれてくるのを待ってでもいるのだろうか。それともこの夏に別れた七羽の子供達のことでも考えているのだろうか。カラスにもカラスなりの苦勞もあるのだろうが、こうして見る限りいたって呑気なものだ。多様

性？複雑性？我関せず、という感じである。カラスも人間も同じように「生きるために生きて」きただけなのに、電線の上の彼（彼女？）と私を隔てているこの距離感は何だろう。私たちは一体どこでどう間違っこのやっかいな路に迷い込んでしまったのだろうか。やれやれとため息をつきつつお茶を飲みはじめたはずだったが、日が暮れてカラスが山に帰る頃にはもう今晚の献立を気にしている。結局、私もひとつの「柔軟」な生物システムであったという訳だ。

参考文献

- Georghiou, G. P. (1990) Overview of insecticide resistance. In: *Managing Resistance to Agrochemicals from Fundamental Research to Practical Strategies*. pp. 18–41 (eds. M. B. Green, H. M. LeBaron and W. K. Moberg) American Chemical Society, Washington.
- Hector, A., Schmid, B., Beierkuhnlein, C., Caldeira, M. C., Diemer, M., Dimitrakopoulos, P. G., Finn, J., Freitas, H., Giller, P. S., Good, J., Harris, R., Höglberg, P., Huss-Danell, K., Joshi, J., Jumpponen, A., Körner, C., Leadley, P. W., Loreau, M., Minns, A., Mulder, C. P. H., O'Donovan, G., Otway, S. J., Pereira, J. S., Prinz, A., Read, D. J., Scherer-Lorenzen, M., Schulze, E.-D., Siamantziouras, A.-S. D., Spehn, E. M., Terry, A. C., Troumbis, A. Y., Woodward, F. I., Yachi, S. & Lawton, J. H. (1999) Plant diversity and productivity experiments in European grasslands. *Science* 286 : 1123–1127.
- Kondoh, M. (2003) Foraging adaptation and the relationship between food-web complexity and stability. *Science* 299 : 1388–1391.
- 松田裕之 (2000) 環境生態学序説. 共立出版, 東京.
- May, R. M. (1973) *Stability and Complexity in Model Ecosystems*. Princeton University Press, Princeton.
- Tilman, D. (1996) Biodiversity : population versus ecosystem stability. *Ecology* 77 : 350–363.
- Thies, C. and Tschamntke, T. (1999) Landscape structure and biological control in agroecosystems. *Science* 285 : 893–895.
- Yodzis, P. (1988) The indeterminacy of ecological interactions, as perceived through perturbation experiments. *Ecology* 69 : 508–515.
- Zhu, YY, Chen, HR, Fan, JH, Wang, YY, Li, Y, Chen, JB, Fan, JX, Yang, SS, Hu, LP, Leung, H, Mew, TW, Teng, PS, Wang, ZH, Mundt, C. C. (2000) Genetic diversity and disease control in rice. *Nature* 406 : 718–722.