

## 4.2 生態リスク評価 (九州大学研究グループ)

環境中の化学物質暴露がもたらす人間の健康へのリスクを管理するにあたっては、費用対効果解析の一種であるリスク/ベネフィット解析が用いられ、合理的な政策選択がはかれるようになってきた。その方法では、化学物質を規制することの経済的コスト（言い換えるとその化学物質を使うことのベネフィット）と、その規制で削減されたリスクの量との比率を政策ごとに計算し、もっとも小さな比をもつものを推奨する。しかしこのリスク/ベネフィット解析では野外の動物や植物に対する悪影響は無視されている。

人の健康リスクしか考慮しない管理法には問題があることを分かりやすく示すものは、DDT (p, p'-dichlorodiphenyltrichloroethane)であろう。DDT は殺虫剤としては大変効果的であり、急性毒性がないために人の健康リスクだけに注目すると危険性の少ない殺虫剤である。だからマラリアが問題になっている多くの国では DDT がいまでも用いられている。1990 年代でも毎年 300 万人を超える人々がマラリアにかかり、多数の死者を出し続けている。マラリアを媒介する蚊を抑えるには、DDT は有効で経済的である。

その一方、環境中の DDT の半減期は極めて長く、数百年にもわたる。生物に取り込まれた DDT とその代謝産物は体内に残留し、捕食されたときに捕食者へと移る。その結果、食物連鎖をのぼるにつれて濃縮されていく。1950 年代においては、鳥類の卵の殻が DDE によって薄くなり個体数減少を引き起こした。内分泌攪乱物質としての効果もあり、五大湖ではセグロカモメの母鳥に育雛放棄などの異常母性行動をもたらした。DDT は人の健康に対するリスクがそれほど大きくないにも関わらず、野生動物、ことに鳥に対してははっきりとした害があり、そのために先進国では禁止されているのである。

リスク/ベネフィット解析にもとづいて管理するには、人の健康リスクとは別途に生態リスクをエンドポイントとして立てて、毒性化学物質への暴露がもたらすリスクを評価することが必要である。しかしながら、いまのところ野生生物集団に対する化学物質がもたらすリスクを定量化する方法は確立していない。

これまで化学物質、より一般には人間活動の生態系に対する悪影響を見積もるには、動物・植物の絶滅だけでなく、生物の個体数、種の組成、生産性、土壌や植生、栄養塩類や水の循環、エネルギーの流れなどさまざまなものの変化を列挙して総合的に判断するとされるのが通例となってきた。しかしこれら多様な影響、複数の基準をもとに定量的なリスク管理に結び付けるには困難がある。そこで本研究では、野外の動物植物に対する悪影響（生態リスク）を定量的に評価し、それを基準にしてリスク/ベネフィット解析による化学物質を管理するための方法を追求した。エンドポイントの設定、生態リスクの算出手法、

そのような評価することが適切な化学物質の管理につながるのか、そのためにはどのようなデータが必要かを示すことが必要である。

## 1) 実施の内容

このような目的のために、(1)多種を含むシステムモデルによる生態リスク評価の研究、(2)野外の集団の増殖率低下にもとづいた化学物質のリスク評価(カワウに対するダイオキシンの影響を例にとって)、(3)実験室集団に対する個体数増加率低下および平均存続時間の短縮による評価(ミジンコおよびメダカを例にとって)、(4)集団の絶滅リスクの推定法の基礎研究、(5)野外の集団の絶滅リスクにもとづいたリスク評価(セグロカモメおよびハイタカに対する DDT の影響を例にとって)、(6)絶滅リスクのさまざまな評価実例、というサブテーマに従って研究をすすめた。以下にそれらについて説明する

### 1) - (1) 多種を含むシステムモデルによる生態リスク評価の研究

宮本および内藤は、日本の代表的な水環境である琵琶湖および諏訪湖での生息生物、水温、栄養塩類濃度、光強度を考慮した生態リスク評価モデルを構築した。このモデルは、沿岸帯、沖帯での生物の捕食・被食関係、競争関係を考慮し、生物量の経日変化をシミュレーションする。琵琶湖および諏訪湖における代表的な植物プランクトン、動物プランクトン、魚類等の生物量の実測値と、シミュレーションによる値との比較を行い良好な結果を得た。

このモデルを用いて化学物質の影響を生物量減少リスクとして求めた。その時、実験室毒性試験データを実際の環境に適用することによる不確実性を考慮して、モンテカルロシミュレーションを行った。生物に対して異なる毒性強度を示す化学物質について調べたところ、動物プランクトンに感受性の高い DDT やクロルピリフォスのような殺虫剤は、毒性の直接影響だけでなく、間接影響(餌の減少)によって魚類の生物量減少リスクが大きくなった。さらに、アトラジンなどの除草剤では、競争相手の減少による間接影響によって、クリプト藻類の生物量が増加すると予測できた。

さらに、開発したモデルの感度解析およびモデル構造における不確実性解析を行った。感度解析の結果、捕食-被食関係と種間競争がシミュレーション結果に大きく影響することが明らかになったので、捕食-被食の定式化が異なる代替モデル及び、競争がない代替モデルの2つのモデルとオリジナルモデルとを比較した。捕食-被食の定式化が異なる代替モデルと比較した場合、リスクの絶対値は異なるがリスクの順位はほとんど変わらないかった。競争がない代替モデルと比較した場合は、リスクの順位も異なり、種間相互作用の影響がよく現れないことが明らかになった。

また、開発した方法によるシミュレーション結果と野外メソコズム毒性試験

の様々な報告例とを比較検討した。両者は、生物の毒性負荷に対する応答（減少、増加、変化無し）の点でよく一致しており、開発した方法は、化学物質の直接影響のみならず間接影響の予測・評価に有用であることが示された。

### 1) - (2) 野外の集団の増殖率にもとづいた化学物質のリスク評価

野外の集団の増殖率にもとづいた化学物質のリスク評価を進めるために、井関および村田は、カワウ集団についてダイオキシン類のリスク評価を行った。

井関は、東京湾周辺に生息するカワウの肝臓中および卵中のダイオキシン類（ポリ塩化ジベンゾ-p-ダイオキシン,ポリ塩化ジベンゾフラン,およびコプラナーポリ塩化ビフェニル）を分析し、その曝露レベルと毒性寄与について考察を行った。卵を包蔵した雌について体内の部位別に分析し、体内分布、卵への移行に関する知見を得た。また、カワウが餌とする東京湾の魚類のダイオキシン類も分析し、これと肝臓中濃度の分析値を用いてダイオキシン類のカワウの体内半減期を推定した。さらに、推定した体内半減期、卵への移行率と、姚ら(2000)による東京湾の底質コア中ダイオキシン類濃度を使って、底質 魚 カワウ 卵 という繋がりにから過去から現在までの卵中濃度の変遷を推定した。予測した卵中濃度に、Giesyら(1994)による卵中ダイオキシン類毒性等価量(TEQ)と胚致死率の回帰式を適用し、カワウ卵の胚致死率の変遷を予測した。

村田は、井関らによるカワウの汚染レベルの調査と曝露解析をもとに、ダイオキシン類の鳥類への毒性影響で最も敏感な胚の致死影響の個体群レベルの影響を推定した。その指標として、内的自然増加率の低下率と個体数の損失比を求めた。対象個体群は上野公園の不忍池のカワウ集団とし、関東地方の集団繁殖地が不忍池のみであった1971~1986年の期間を解析の対象にした。化学物質の毒性が個体群に及ぼす影響を推定するには、体内蓄積量などの曝露データ、

用量-反応関係の毒性学的データ、そして 個体数の経年変化や生存率,繁殖率などの生態学的データが必要である。 については井関らによる調査結果、

については北米の五大湖におけるカワウの近縁種ミミヒメウのデータ、 については福田(1980,1981,1997)による報告を収集し、個体群生態学の理論でこれらの情報を統合、解析し、卵中もしくは底質中のTEQと内的自然増加率の関係を求めた。また、内的自然増加率の低下率よりも直感的にわかりやすい尺度として、ダイオキシン類曝露がある時と無い時で推定される個体数の比を試算した。

### 1) - (3) 室内実験による化学物質の毒性影響測定と集団増殖率および絶滅時間による評価

田中は、実験個体群の研究および文献調査により、集団増殖率に対する化学物質の影響を調べた。その結果、内的自然増加率の低下に対して化学物質の影響

響はほぼ 2 乗のベキ関数で表されることが明らかになった．さらに、ミジンコおよびメダカによる測定もおこなった．また増殖率の低下だけでなく、生物集団に対する絶滅リスクによる評価を試みた（方法については以下の 1） - （ 4 ）を参照）．

### 1） - （ 4 ） 集団の絶滅リスクの推定法の基礎研究

中西(1995)は、生態系リスクの評価を自然集団の絶滅リスクに基礎をおいて行うことを提案した．生態系での個体数やバイオマスの変化が多くの場合に可逆的であるのに対して、集団や種の絶滅は非可逆の過程であり、将来の人類から潜在的な利用機会を奪うことになる．たとえそれらの種に直接的な経済価値がないとしても、種の損失は生態系への一般的な脅威とも相関しており生態リスクのよい指標になる．生物の絶滅を避けるという目標は、多くの人々の合意を得やすいという意味で、環境リスク管理のエンドポイントとして望ましい．

この考えにもとづき箱山は、集団の平均絶滅時間の短縮量によってリスクを評価する方法を開発した．方法は、田中によるものと基本的には同じであるがパラメータの選択などに違いがある．

[1] カノニカルモデルによる平均存続時間と異なるリスク要因の換算公式の導出

個体数制御があり環境変動を考慮した集団モデルとして確率微分方程式モデルを考える．それは、ロジスティック式に環境変動・人口学的確率性を組み込んだもので、増殖率  $r$ 、環境収容力  $K$ 、環境変動の大きさの 3 つのパラメータをもつ（確率変数  $X$  は個体数）．拡散過程モデルであるため絶滅平均時間を求めることができ、二重積分で表される公式となった．

$$\frac{dX}{dt} = rX \left( 1 - \frac{X}{K} \right) + \sigma_e \xi_e(t) \circ X + \xi_d(t) \bullet \sqrt{X} \quad (1)$$

この公式にもとづいて、化学物質にさらされた集団が絶滅時間を短縮する度合いと、生息地の環境収容力が低下することによる絶滅時間短縮とを比較できる．こうして同じ基準によってまったく異なるリスク要因をくらべることができるようになった．

さらには、与えられたパラメータのもとで、化学物質による毒性により集団増殖率  $r$  が だけ低下したときにそれと同じだけの集団存続時間の短縮をもたらす環境収容力の低下を計算することが可能である．これを等価生息地減少量、もしくはリスク当量とよび、そのための公式を導いた（以下の 1） - （ 5 ）で中丸が実例について計算した）．

[2] 時系列データによるモンテカルロ法に基づいた新しいパラメータ推定法

上記のモデルは、線形化などによって近似的に尤度関数を構築することがで

き、個体数の時系列データが与えられたとき、3つのパラメータを推定することができる。ところが、調べてみると推定量にはバイアスがあり、データ数が小さいときには(10年程度)、特に大きな偏りがある。

ここでは、これらの問題を解決するためのモンテカルロ法(もしくはパラメトリック・ブートストラップとも言う)に基づいた新しい方法を開発した(Hakoyama and Iwasa, 2000a, 2000b)。また、データ数が少ないことに由来するバイアスだけでなく、近似最尤推定量が一致推定量ではないことのバイアスも同時に効果的に補正できることが分かっている。この方法では、大きな偏りを持った推定量に対して、非常に有効なバイアス補正推定量や漸近的な信頼区間(ブートストラップで再抽出を無限に行えば、exactな信頼区間を与えるという意味で漸近的)を計算することができる。(1)コンピュータ・シミュレーションができること、(2)なめらかな単調増加関数(未知)で対応する不偏推定量へ対応している偏りのある推定量を構築できること、の二つが可能であれば、どのようなパラメトリック・モデルに対してもこの方法は適用できる。特に、偏りを持った推定量 $(r, K, \sigma_e)$ ( $\sigma_e$ : 環境変動の大きさ)の期待値が線形関数で変換できる場合、(1)式を満たす $(r, K, \sigma_e)$ は不偏推定量となることが証明できる(Hakoyama and Iwasa, 2000a, 2000b)。

### 1) - (5) 野外の鳥集団の絶滅リスクにもとづいたリスク評価

野外の集団に対して絶滅リスクにもとづいた評価の例として中丸は、セグロカモメとハイタカをとりあげDDTのそれらに対する影響を試算した。

食物網の頂点である水鳥や猛禽類で個体数減少が顕著におこり、DDTが原因だと考えられている。今回は水鳥としてニューヨーク州ロングアイランドに生息するセグロカモメ、猛禽類としてイギリス東部に生息するハイタカを例に絶滅リスクを推定する。DDTが禁止される前のアメリカ合衆国のLong Islandにおいて報告された濃度をもちいて推定した。

#### [1] パラメータ推定方法

箱山らの開発したカノニカルモデルを基に絶滅リスク評価を行う。カノニカルモデルは4つのパラメータがある。内的自然増加率  $r$ 、環境収容量  $K$ 、環境変動の大きさそしてDDTによる生存率減少  $\sigma_e$  である。実測データからパラメータを推定した。

#### (a) 内的自然増加率 $r$ :

カノニカルモデルでは、集団中の個体密度が低いときの増加率である。一般的には集団の増加率は、メスのある年齢での繁殖率や年間生存率をレズリー行列へ代入して計算する。集団中の個体密度によって生存率や繁殖率は変わってくるが、生存率や繁殖率データを測定した時点での集団中の密度は高く、そのままでは内的自然増加率を過小評価することになる。そのため急速に増大する

低密度集団の倍加時間から、内的自然増加率を推定した。

(b) DDT による生存率低下 a :

まず、繁殖率に密度依存効果がかかると仮定する。倍加時間から求めた内的自然増加率をレズリー行列に代入して、個体密度の低いときの繁殖率を逆算した。

DDE 濃度と繁殖率の減少率の関係を示すデータを用いて、ある濃度での繁殖率を計算する。DDE によって生存率が減少しないと仮定した。これらのデータを再びレズリー行列へ代入し、DDE 濃度と内的自然増加率の関係が求め、これから DDT による生存率の減少が推定される。

(c) 環境収容量と環境変動係数 :

環境収容力は 100 (ただし、メスの繁殖個体数)。野外の鳥類の個体数変動データから個体数の変動係数 CV を 0.2 と決める。個体数変動の変動係数から環境変動の強さを計算した。

以上の 4 つのパラメータが推定されると、DDT による平均絶滅時間の変化量が計算される。また本研究では、平均絶滅時間の変化量と同じリスクを受ける生息地の減少率に換算し直した (リスク当量)。

### 1) - (6) さまざまな対象に対する絶滅リスク評価の試み

多くの野生生物が定常状態になく、人為的影響により減り続けている。すなわち、現在進んでいる大量絶滅の原因のほとんどは乱獲や生息地破壊、環境汚染などの人為的影響である。松田は、さまざまな対象に対して、絶滅リスクの評価を試みた。

まず日本植物分類学会専門委員会は絶滅の恐れのある植物を判定するため、日本産の 7000 種の維管束植物のうちから 2100 種を対象種に選び、全国で 400 名の調査員により、25000 分の 1 地図(約 10km 四方)4000 枚分の各地域に生存する種、各種のおよその個体数、過去 10 年間のおよその減少率をアンケート調査した。その結果から各種ごとに、数個体、数十個体、数百個体、数千個体いる地域数、絶滅、1/100 以下、1/10 以下、半分以下、若干の減少、現状維持の地域数を集計し、現存個体数を求めた。各地域の今後の減少率が過去 10 年間のその種の地域別減少率の頻度分布にしたがって独立に減り続けると仮定し、Monte Carlo 法により絶滅までの期待待ち時間を計算した。

ただし、生息情報のきわめて少ない種があるため、全種の減少率の頻度分布を集計し、それを事前分布とし、その種の減少率の頻度分布をそれに加味して事後分布とみなす Bayes 法により絶滅確率を試算した。

その結果、1000 種以上が 100 年後の絶滅確率が 10% 以上と推定され、絶滅の恐れのある植物と認定された。秋の七草として知られているキキョウは 271 地域に分布し、約 20000 個体いると推定されているが、過去 10 年間の減少率が 66%

に達し、その間に 16 地域で消滅し、100 年後の絶滅確率が 99%、絶滅までの平均余命が 69 年と推定される。

上記のような生物の平均余命は、概ね、現存個体数と減少率に左右される。個体数が減るか、減少率が増えるような人為的影響は、平均余命を縮める。新たな人為的影響がないときの生物の平均余命を  $T_0$ 、人為的影響を加えたときの平均余命を  $T_1$  とし、前節で推定した生物の平均余命の損失を評価する。

ミナミマグロの場合、乱獲がなければ、あるいは今からでも直ちに漁獲をやめれば、半永久的に存続すると考えられる。つまり、 $(T_0, T_1) = (\infty, 90)$  である。トドの場合は詳しい資料がないが、漁業の影響のない近隣集団の生命表解析では増加率は -0.002(減少)と推定されている。この値をそのまま使うと、絶滅までの平均余命は約 2400 年と試算される。つまり、 $(T_0, T_1) = (2400, 66)$  である。ただし、2400 年という推定値の信頼性は低い。

環境ホルモンによる生殖障害が及ぼす絶滅リスクの上昇は、もしも繁殖率が 1/3 に減少する場合、生存率に影響がないとすれば絶滅までの平均待ち時間は 79 年になる。混獲による打撃に比べて小さい。環境ホルモンが生物の生存率と繁殖率にどの程度の影響を及ぼすかは定かではないが、1 種ごとへの影響を考えれば乱獲や生息地破壊に比べて大きな影響があるとは限らない。ただし、多くの生物に影響が及び環境中に残留して何世代も後まで影響が及ぶ恐れがある。

愛知万博予定地に絶滅危惧種のシデコブシが 1400 個体群生しているが、そのうち 400 個体の自生地が潰される計画だったが、この自生地を保護するように計画が変わった。この 400 個体を潰していた場合、絶滅までの平均余命は約 1 年縮まると推定される。その後の環境影響評価によって、シマジタムラソウとイトトリゲモの消失の影響は、シデコブシへの影響に劣らないことがわかった。

## 2) 得られた研究成果の状況および今後期待される効果

以下には、上記のそれぞれの研究の成果および今後期待される効果について述べる。

### 2) - (1) 多種を含むシステムモデルによる生態リスク評価の研究

化学物質の環境生物に対する毒性影響を評価する際に、野外メソコズム毒性試験は、現実的な曝露条件下で行える、直接影響だけでなく間接影響も見ることができる、生物量回復の過程も調べることができること等の理由から、欧米各国では、生態リスクが最後の段階までグレーな物質の最終評価手段として用いられている。しかし、その試験は、多大な費用と労力を要し、試験の繰り返し回数が制限されるため、データのバラツキによって、結果の解釈が困難な場合が多い。そのような物質に対して、本研究で開発したモデルでの予測評価を加えることで、より確実にリスク評価が行えると期待される。さらに、そのような事例を積み重ねることで、メソコズム毒性試験を省略して良いと判断

できるクライテリアを作成できる可能性があり、化学物質の生態毒性評価において、多大な時間と費用の節約につながることを期待できる。

一方、対象地域を限定しない一般的な生態リスク評価においては、本研究で開発したモデルを用いることで、対象化学物質の影響をモニタリングする場合に注目すべき生物を適切に特定し、間接影響に起因するリスクを評価することができる。

本研究では、オークリッジ国立研究所で開発された CASM というモデルをベースとしている。生態系モデルとしては、他に米国環境保護庁が開発支援している AQUATOX、オークリッジ国立研究所で開発された IFEM 等が存在する。これら 3 つのモデルは、American Chemistry Council が出資している生態リスク推算モデルの評価プロジェクトの中で、有用なモデルとして、さらに詳細な評価とケーススタディを行うことが推奨されている。本研究の成果は、そのプロジェクトの報告書の中で引用されている。

## 2) - (2) 野外の集団の増殖率にもとづいた化学物質のリスク評価

井関らの研究により、東京湾周辺に生息する魚食性鳥類のカワウの肝臓および卵のダイオキシン類の蓄積状況が明らかになった。カワウ肝臓中ダイオキシン類濃度と他鳥種の濃度の比較から、カワウは有意に高濃度であることがわかる。また、東京湾の底質コア中ダイオキシン類濃度を使って推定したカワウ卵の致死率の変遷により、1960 年代から卵の致死率は上昇し、1970 年前後に最大となって以後減衰し、1980 年代からは横ばい傾向にあると推定された。

村田らの研究により、カワウ集団が被った個体群レベルの影響が定量的に推定された。東京湾底質中のダイオキシン類の濃度(TEQ)とカワウ個体群の内的自然増加率の関係から、1974～1986 年の底質の汚染レベルでは、集団の増殖率は汚染されていない集団に比べて 89%に低下していたと推定された。また、この期間のダイオキシン類による影響を個体数に換算して試算した。解析対象期間において、このカワウ集団はダイオキシン類の影響を受けていないときに比べて延べ個体数が約 86%になっていたと推定された。

類似研究の国内外の動向：北米の五大湖は、化学物質の汚染を最も顕著に受けた地域の 1 つであり、化学物質が生態系へ与える影響に関して多くの研究が行われてきた。五大湖に生息する魚食性鳥類には、胚の高死亡率、浮腫や奇形などが特徴である Great Lakes embryo mortality, edema, and deformities syndrome (以下、五大湖症候群)と呼ばれる繁殖障害が観察されてきた。1990 年代に入って、疫学的な手法を用いてダイオキシン類との因果関係が検証され、裏付けられた。日本では、漁業対象以外の野生生物についてのダイオキシン類の汚染状況に関する研究例はほとんどなかった。ダイオキシン類に対する社会的な関心が近年高まり、平成 10 年度から環境庁により野生生物のダイオキシン類蓄積状等調査

が実施され、魚以外の野生生物も対象に調査が行われた。平成 11 年度の調査では鳥類ではカワウとトビが選定された。カワウは長寿で完全な魚食性であることから、水系生態系における有機塩素化合物の体内蓄積や発生毒性の影響をモニタリングするのに適しており、平成 12 年度も引き続き調査対象となっている。国の野生生物モニタリング調査にカワウが選定されたことは、井関らの研究成果によるところが大きい。

また、化学物質による野生生物の個体群レベルの影響を site-specific で定量的に解析した例は、PCB のカワウの内的自然増加率への影響を検討した Hendriks and Enserink (1996)による研究、ディルドリンのハイトカの個体群増殖率への影響を検討した Sibly ら(2000)による研究などがあるが、事例は少ない。

今後の展開の見込み：日本のダイオキシン類対策を、本プロジェクトで提唱している化学物質の管理原則に照らし合わせると、一つには生態リスク評価が抜け落ちているということが挙げられる。生態リスク評価の前提として、モニタリング調査と毒性試験の結果が必要である。モニタリングに関しては、継続的な調査実施のために、捕殺せずに採血試料で体内負荷量を予測できるようにする手法が現在検討されている。ダイオキシン類の毒性評価については、種間の感受性の差が大きいことが知られているが、対象種の組織細胞を使って種の感受性も組み込んだ毒性評価方法の研究が取り組まれていく見込みである。個体群レベルの生態リスク評価に関しては、今後のモニタリング調査や毒性評価手法の進展によるデータの蓄積、精度の向上に伴ってリスク評価も更新していくとともに、本プロジェクトで道が付けられた生態リスク評価の方法を使って、他の種についてのリスク評価も実施される予定である。

## 2) - (3) 室内実験による化学物質の毒性影響測定と集団増殖率および絶滅時間による評価

毒性と個体群増殖率低下との一般的関係を導くと共に、それにもとづいて絶滅リスクの評価を行った。

## 2) - (4) 集団の絶滅リスクの推定法の基礎研究

ここに例として挙げた個体群動態モデルでは、新しいモンテカルロ法に基づく推定法は大変効果的にバイアスを取り除くことができた。このほかにも、私たちの方法は大規模な森林の格子モデルに適用され有効性が確かめられている(佐竹暁子(2000)日本生態学会誌 50, 253-254.)。このバイアス補正法はシンプルなアイデアに基づいているが、シミュレーション可能な様々なパラメトリックモデルのパラメータ推定に強力な手法を提供すると考えられる。ひとつネットワークがあるとすれば、この方法にはコンピュータ・シミュレーションの大量の繰り返しが必要なことだが、急速に発達するコンピュータが高速化するに伴って、

生物学の様々な分野でのパラメータ推定における有益性はますます大きくなるだろう。

## 2) - (5) 野外の集団の絶滅リスクにもとづいたリスク評価

2つの具体例について試算を行った。

### 2) - (5) - (1) 具体例1：ニューヨークロングアイランドのセグロカモメ集団

1960年代のロングアイランドでは海水中 DDT 濃度の 20 万倍もセグロカモメに DDT が濃縮されていた。この濃度を基準にセグロカモメ集団の絶滅リスクを求めた。

まず、内的自然増加率はニューイングランドの新しいセグロカモメコロニーの倍加時間から求めた。次に、DDT による生存率減少を求めるためにはセグロカモメのデータだけでは不十分であった。アメリカガモの卵中 DDE 濃度と繁殖率の低下分のデータを用い、セグロカモメの年間生存率と繁殖率もレズリー行列へ代入して、DDT に暴露されているときの内的自然増加率を求めた。これより、DDT による生存率減少が求まる。

1960年代のロングアイランドと同じ海水中 DDT 濃度による平均絶滅時間の変化量を等価生息地減少率に換算したところ、30.5%となった(表4-2-1)。

表4-2-1. セグロカモメとハイタカに対する DDT の影響

	セグロカモメ	ハイタカ
内的自然増加率( $r$ )	0.372	1.04
環境変動( $\sigma_e^2$ ) CV = 0.2	0.0298	0.0832
環境収容力( $K$ )	100	100
等価生息地減少量 (卵中 DDE 濃度=12ppm)	30.5%	50.0%

### 2) - (5) - (2) 具体例2：イギリス東部のハイタカ集団

基本的にはセグロカモメと同じ計算方法である。異なる点として、内的自然増加率は、有機塩素系殺虫剤の使用禁止後の個体数の回復データより求めた。ハイタカはデータがかなり揃っており、他種の鳥のデータを使う必要がなかった。結果は、生息地を 50.5%減少させるリスクとなることが分かった。カノニカルモデルは4つしかパラメータが無い簡単なモデルであるが、それでもこのパラメータ推定のために必要なデータは不十分であった。この研究は、リスク評価の際にどのようなデータが必要なのか示唆している。

## 2) - (5) - (3) 等リスク生息地減少率の代償ミチゲーションへの応用：

本研究では、絶滅リスクの指標として平均絶滅時間の変化量だけではなく、この変化量と等リスクになる生息地減少率（リスク当量）を用いた。このリスク当量の利点は、化学物質による生態系破壊と面的開発による被害という全く別の環境問題を同じリスク量で測ることが出来る。そのほか、病気の蔓延、生息地分断、遺伝的劣化などによる絶滅リスクもリスク当量で測ることによって、様々なリスクを同じ土俵で議論可能になる。最近、代償ミチゲーションという考え方が注目を浴びている。これは、あるリスクによって影響を受けた環境を代替の資源または土地に置き換えることにより影響を代償するものである。リスク当量は代償ミチゲーションの指針を与えると思われる。

リスク当量は以下のような3つの性質がある。内的自然増加率が大きいほど、環境収容力が大きいほど、環境変動が小さいほど、等価生息地減少量は大きくなる。ひとことで言えばもともと安定した集団に大しては、生息地の縮小（環境収容力低下）に比べて化学物質暴露の影響は相対的により重要性が増すということである。

## 2) - (5) - (4) 生態リスク/ベネフィット解析の進展

現在、DDTのベネフィット解析を行っている。これは、マラリア予防のために使用していたDDTを代替品に変えたときにどのくらいコストが上昇するのかを計算する。始めにピレスロイド（除虫菊）入りの蚊帳を代替品として考えた。

これらの研究が仕上がると、一通り生態リスク/ベネフィット解析方法が確立したことになる。そして蚊帳以外の代替品についても計算し、どの代替品がより良いのか検討することが最終目標となる。

しかし問題は、生態リスク/ベネフィット解析の際には様々な仮定をしている事である。生態リスク/ベネフィット解析ではそれぞれの代替品について計算して、値の大小比較を行うので、値自体は絶対的なものではない。しかし、仮定を変えると計算結果が大幅に変わることもある。DDT管理は地球規模な問題なだけに、計算結果の捉え方には慎重にならなければならない。

## 2) - (6) さまざまな対象に対する絶滅リスク評価の試み

国際自然保護連合(IUCN)や環境省の絶滅危惧生物の判定基準は、絶滅リスクに準拠しているが、予防原理に基づき、ミナミマグロなどリスクが低いとわかっている生物もリスク評価以外の基準を満たしていれば絶滅危惧種とみなすことになっている。松田は、植物学者の矢原徹一氏らと共同でミナミマグロの絶滅リスク評価を行い、IUCNの判定基準の見なおし作業に加わった。その結果、リスクが低いと考えられる生物（減少が止まり、再発の恐れがないなど）については、減少率の基準が改められた。環境省の2000年刊行の維管束植物のレッ

ドデータブックでは、絶滅リスクと個体数の将来予測を計算する手法を開発し、約 1500 種の植物を絶滅危惧種と判定した。このリスク評価を行う計算機プログラムはホームページ上で公表されている(<http://www.eic.or.jp/eanet/redlistS/List.html>)。

同じ手法で、絶滅までの平均待ち時間（種の平均余命）を評価できる。岡敏弘氏らと共同で、人為的な生息地破壊などにより、平均余命がどの程度縮まるかを評価することにより、さまざまな人為的影響を比較する手法を開発した。その結果を愛知万博会場予定地と中池見液化天然ガス備蓄基地建設予定地の環境影響評価に応用した。

生態リスク評価のエンドポイントは絶滅だけではない。生態系の管理目標を定めれば、その目標自身がエンドポイントとなる。エゾシカの個体数管理では、個体数に応じて 4 段階の捕獲圧を設定し、大発生と激減を招かず、ある適正範囲に個体数を維持することが計画された。この個体数水準は、向こう 1 世紀の間に適正範囲に維持できないリスクが十分低くなるように定められている。この評価手法を開発した。この手法と管理計画は 1998 年から実際に北海道のエゾシカ保護管理計画に採用された。さらに、1999 年の鳥獣保護法改正にともない全国の鳥獣に導入された特定計画制度の中に、個体数管理のリスク評価とフィールドバック体制の理論が取り入れられた。猛禽類への環境影響評価においても、絶滅リスク評価の思想が取り入れられ始めている。