

短寿命生物による環境化学物質の監視

Environmental monitoring of chemical pollution by short-lived wild-organisms

柴田 康行*・高澤 嘉一

Yasuyuki SHIBATA* and Yoshikatsu TAKAZAWA

独立行政法人 国立環境研究所 環境計測研究センター

Center for Environmental Measurement and Analysis, National Institute for Environmental Studies

摘 要

汚染物質の監視にかかわる生物モニタリングとは、野生生物を捕集・濃縮装置、あるいは鋭敏なセンサーとして利用しながら、環境中に存在する化学物質や重金属類等の汚染物質の濃度とその変化を監視するものである。ムラサキガイ等の二枚貝、巻貝、魚、ミミズ、ネズミ、植物の葉、さらには昆虫等の短寿命生物を使った生物モニタリングが世界のさまざまな国で実施され、化学物質適正管理のための基礎情報を提供している。本稿では、実際の例を含めて生物モニタリングの概要を紹介したあと、筆者らが試みているトンボを使った市民参加型環境モニタリング手法について紹介する。さらに化学物質の一斉分析手法や毒性研究、バイオリギング研究などの急速な進歩を背景に、生物モニタリング手法の将来展望についてもまとめる。

キーワード：一斉分析，環境化学物質，生物モニタリング，短寿命生物

Key words：comprehensive analysis, pollutants, biomonitoring, short-lived organisms

1. はじめに

化学物質や重金属は人間社会にさまざまな利便性をもたらす一方で、産業界においても日常生活においても欠かすことのできない役割を演じている。その一方で、これらの中には人や生物に対する毒性をもつものも含まれており、これらが人間活動の結果として過剰に環境中に放出されると、巡り巡って人や野生生物に蓄積し、その代謝系やホルモン、脳神経や免疫の働きを阻害したり、形態異常やがん、生殖阻害を引き起こすなど、さまざまな悪影響をもたらすことが懸念される。こうした事態を未然に防ぐために、自然界に生息する野生の生物を利用して環境の状態を監視する手法を一般に生物モニタリング (biomonitoring) と呼ぶ^{1), 2)}。なお、biomonitoring という言葉は人の化学物質等へのばく露モニタリングにも使われるが、本稿では対象を人以外の野生生物に限定して、以下議論を進めたい。

一般に生物の分野で生物モニタリングというと、水質等の環境条件とそこに生きる生物種との間に一定の関係が認められることを利用して、その場の生物、特に環境の状態に感受性の高い生物、あるいはその場の生態系を代表する生物 (指標生物と呼ぶ) の種類や数で自然環境の状態や人間活動の影響を評価する作業をさすことが多い¹⁾。一方、化学物質などによる環境汚染に関する分野では、食物網をつうじ

た生物濃縮を利用して生物試料の分析から周囲の環境中の化学物質などの存在状態を明らかにすることを生物モニタリングと呼び、その対象となる生物種を指標生物と呼んでいる²⁾。また、野生生物に対する化学物質などの毒性は生態毒性と総称され、さまざまな生態毒性試験法が開発、確立されるとともに、毒性研究の成果が野生生物における影響やばく露状態の評価にも利用されている。

汚染物質の監視にかかわる生物モニタリングは、単純化して言えば自然に生きる野生生物を捕集・濃縮装置、あるいは鋭敏なセンサーとして、環境中に存在する化学物質や重金属類等の汚染物質の濃度とその変化を監視しようとするものである。餌等をつうじて能動的に生物体内へ取り込み、濃縮していく現象を利用するもののほかに、生物の表面に沈着、付着した汚染物質を測定対象とする受動的な生物モニタリングもある。現実には場合により、これら二つの機構の寄与がさまざまに異なった割合で入り混じった状態となる。例えば、動物組織を使った化学物質の監視は前者が中心なのに対し、コケや地衣類、植物の葉等を使った重金属類の大気経路の輸送、沈降状況の監視は後者の寄与が大きいと考えられる。

一般の環境媒体 (大気・水・土壌・底質) を対象とする環境モニタリングと比較して、生物モニタリングにはいくつかのメリット、デメリットがある。食

受付：2014年5月7日，受理：2014年9月29日

* 〒305-8506 つくば市小野川16-2, e-mail: yshibata@nies.go.jp

物網をつうじた濃縮、蓄積により環境媒体より生体中の方が一般に濃度が高く、より少ない試料量で測定できるほか、残留性が高い物質では長い期間の摂取量が積分され、時間変化が平均化されて、一度の測定で代表性の高い結果が得られる。一般に動物はそれ自体が動き回る(他の生物を捕食する場合は餌も動くことが期待される)ため、分析値はある程度の広がりをもった空間の濃度の平均値として捉えることができる。さらに、毒性研究の進展、情報の蓄積にともない、例えば特定の酵素の誘導や遺伝子の発現状態の変化、あるいは形態や行動の変化(異常)等をばく露や毒性の指標(生物指標: biomarker)として利用する研究も進められている。適切に試料を採取、前処理、冷凍保存しておけば(環境スペシメンバンキング: environmental specimen banking)、過去の測定結果の検証や、新たな汚染物質あるいはばく露や影響の指標の探索、ばく露影響評価などにも利用できる可能性が広がる。現場に行きそこに生息する生物を採取して分析すればよい、という簡便性の一方で、化学物質等の取り込み、代謝、排せつには生物種差・性差・年齢差・季節変動等さまざまな変動要因が考えられ、モニタリングに当たっては対象生物の生物学的・生態学的特徴を把握したうえで、こうした変動要因をできるだけコントロールした条件でのサンプリングが求められる。本稿では、特に化学物質環境存在実態の年変化の追跡に適した寿命の短い生物を利用した環境モニタリングについて、具体的な例を交えながら現状と将来展望をまとめたい。

2. 生物モニタリングに利用される短寿命生物

毒性を有する化学物質の中でも、環境残留性、生物蓄積性が高い物質(残留性有機汚染物質, POPs; Persistent organic pollutants)ほど人や野生生物への影響が懸念され、国内では化学物質審査規制法(化審法)の第一種特定化学物質として、また国際的には残留性有機汚染物質に関するストックホルム条約のもとで、製造・輸入・使用の禁止等の強い規制がかけられている。これらの物質の大半は水より油に溶けやすい脂溶性化合物で、餌や水等をつうじて取り込み、濃縮が起り、動物食や雑食など、比較的栄養段階が高く脂質含有量の高めの生物がモニタリングに相当と考えられる。分析対象組織としては脂肪のほか、量的に多くとりやすい筋肉、あるいは肝臓などが使われてきた。小さい生物では丸ごとの分析もよく行われる。また、生物を生かしたまま採取できる試料として、血液や海棲哺乳類の皮脂等も利用されている。一方、代謝されやすい物質や脂溶性でない物質は一般に生体内に濃縮されにくく、体内の蓄積を見る代わりに、尿など排泄物中の代謝物等を調べる研究がしばしば行われている。また、元素

についても報告例は多い。特にイオウに親和性の高い水銀やヒ素等の元素は羽根や毛、爪などに多く排泄され、野生生物を生かしたまま採取できるこれらの試料によるモニタリングも多く行われてきた。ただし、元素は生物種差などの変動要因が大きく、さらに生体内での元素間の相互作用で濃度が変動するケースも見られ、解釈には注意を要する。

生物モニタリングに適した野生生物とはどのようなものだろうか。対象となる生物種がその場に居ることが、モニタリング実施の大前提となる。例えば日本全体をカバーしようとするれば、日本全国に数多く普遍的に生息していて、採取も容易で絶滅等の危険性もなく、かつモニタリング対象物質の濃縮性も高めの生物が好ましい。化学分析を行うためにはある程度の試料量が必要である。また個体差を平均化してその地域での代表値を得るために、複数の試料をあわせて測定することが望ましい。例えば数~数十個体、あわせて数十~数百グラム程度の量が簡単に採取できる生物が適当といえる。何を食べているか、どのような場所でもどのように生活しているか、行動範囲はどのくらいかなど、生物学的・生態学的情報が多いほど、分析結果の解析も行いやすい。先述のように、種差・性差等のバイアス要因をできるだけ避けるため、できれば同性・同程度のサイズ(その場での生育期間が同程度のもの)で同一種、あるいは生物学的に近縁の種で構成された生物モニタリングのデザインが求められる。こうした観点をまとめると、小型の肉食/雑食生物として、いずれも無脊椎動物に属する環形動物(多毛類(ゴカイ)や貧毛類(ミミズ))、節足動物(甲殻類や昆虫類)、軟体動物(二枚貝, イカなど)、魚類等が浮かび上がってくる。また、ネズミ等の小型哺乳類や鳥類(あるいはその卵)等も場合により対象に含まれるであろう。いずれも比較的寿命が短いなど、年単位の環境変化を読み取るのに適した生物試料と考えられる。自然保護の観点からは、絶滅危惧種など保護対象となっている生物を避けることはもちろんのこと、少数試料の採取によりその地域の生態系に影響を及ぼさうような生物種(頂点捕食者等)はできるだけ避けることが望ましい。採取の容易さも含め、上記のように比較的小型で一か所に数多く生息しているような生物種の中から適当なものを選んでいくことが求められる。

以下、主な環境媒体ごとに、短寿命生物の利用例をまとめる。

2.1 水質, 底質

移動性が少なく、プランクトンや有機物を含む懸濁粒子をフィルターでこしとって餌とする、フィルターフィーダーと呼ばれる生物(二枚貝³⁾, フジツボ⁴⁾等)が、沿岸海洋環境や河口域の監視に数多く使われてきた。二枚貝の中でも、岩礁域に生息するムラサキイガイ(*Mytilus galloprovincialis*)等のイガイ

科,あるいはオハグロガキ(*Saccostrea mordax*)等のイタボガキ科の二枚貝の報告例が多い。これらは1,2年から数年程度と短寿命で基本的に固着性が強く,採取地点の環境を代表するものと考えられる。特にムラサキイガイの仲間は先進工業国が集中する中緯度地帯の沿岸に広く分布しており,同一種ないし非常に近い種類で世界の主な工業地帯,人口密集地の沿岸を監視可能であること,群生するため数多く採取することが容易であることなどから,これらを使った沿岸環境監視プログラム Mussel Watch が1975年に提唱されて,米国,フランス,ドイツ,日本等世界のさまざまな国で実施されている⁵⁾。そのほか多毛類(ゴカイ)の生息種と環境汚染状況との関係,あるいは特定物質へのばく露によるゴカイ中の酵素活性の変化等を指標としたモニタリングが行われている⁶⁾。一方,貝殻やサンゴなど,層状構造を作りながら年々生長する硬組織(炭酸カルシウム主体)中の微量元素や同位体比等を使って,重金属汚染などの歴史を読み取る研究も報告されている⁷⁾。

一方,移動性をもつ生物として,いろいろな種類の魚や遊泳性の軟体動物を使ったモニタリングも幅広く行われている⁸⁾。魚は種類によって生息域,生息深度,行動範囲,餌(栄養段階)などに大きな違いがあり,その生物・生態学的な特徴を利用して,さまざまに異なるモニタリングがデザインされ実施されている。その一方で,異なる環境には一般に異なる種類の魚が生息しており,地点間の相互比較は必ずしも容易ではない。同一種の比較例として,日韓の異なる地域の河川で同じ種類で同サイズの魚(ギンブナ(*Carassius auratus langsdorfii*))を採取し,その分析から汚染状況の比較を行った結果が報告されている^{9),10)}。また,世界の外洋に広く分布し食物網の比較的上位にいて1年の寿命をもつアカイカ科のイカ(*Ommastrephes bartramii*)の肝臓を使ったモニタリング(squid watch)のアイデアも注目される^{11),12)}。一方,淡水系では,自然保護の分野で河川の生物モニタリングの対象種としてしばしば使われるカワゲラ等の水生昆虫の幼虫を,化学物質や重金属等のモニタリングに利用する研究なども報告されている¹³⁾。

2.2 土壌等陸域の監視

陸域でも河川や湖沼では魚や貝を使ったモニタリングが各地で実施されているが,陸上や土壌の生物モニタリングには広く世界中で使われている手法は少ない。ミミズを使った土壌環境モニタリングがドイツなどいくつかの国で行われている¹⁴⁾。これらを餌とするアカネズミが,日本ではダイオキシン類や内分泌かく乱化学物質のモニタリングに使われた¹⁵⁾。土壌そのもののモニタリングではないが,雑食性のタヌキ,地衣類を食べるトナカイなどを使った陸域モニタリングが,限定された目的,地域で実施されている^{15),16)}。人間活動の影響の大きい都市域等の環境を総合的に評価する目的で,カラスやトビ,捕獲

された犬,猫等を使ったモニタリングの試みも行われている^{15),17)}。

2.3 大気

大気経由で運ばれた重金属類や多環芳香族炭化水素(PAHs; Polycyclic Aromatic Hydrocarbons)等が地衣類やコケ,植物の葉等の表面に沈着する現象を利用した受動的なモニタリングは長い歴史をもっている^{2),18)}。同様に,原子炉事故の際の放射性核種の大気経由の飛散状況が,地衣類,コケ,キノコ等,あるいはこれらを食べる野生動物を用いて調べられた¹⁹⁾。植物を利用した巧妙な受動的モニタリングとして,樹皮が幹の内部に取り残されて作られる入皮(bark pocket)を使った過去の大気汚染状況の調査方法があげられる²⁰⁾。一方,松葉を使ったダイオキシン類等のモニタリングは,表面への沈着に加えて脂溶性化合物の脂質への濃縮現象をとともに利用している可能性が考えられる²¹⁾。ほかに,都会の大気汚染(特に重金属類)の監視方法として,都会に住むハト等の鳥類の肺に沈着した重金属類等の分析例が報告されている²²⁾。

2.4 特異的な事例

特定の化学物質等に感受性が高い,あるいは特異的な影響を受ける生物種を選んで,その物質の汚染状況を調べた事例がいくつか報告されている。例えばトリブチルスズ等の有機スズによる海洋汚染では,イボニシ(*Thais clavigera*)等いくつかの巻貝にインボセックスと呼ばれる,オスの生殖器がメスにできる特異的な形態異常が生起することが知られ,その影響を調べるための全国調査が行われた²³⁾。爬虫類の生殖器サイズへの化学物質の影響に関連して,有機汚染物質のワニ体内濃度を調べた事例もある²⁴⁾。殺虫剤の一般環境への放出を監視する目的で,感受性の高い昆虫あるいは甲殻類が指標生物としてしばしば利用される。一方,食用となる生物(例えば魚類やイカ等)の可食部を使うモニタリングも,人への化学物質等のばく露評価のための基礎情報取得などの目的を兼ねて実施されている。さらに,自然環境保全や農業,水産業等の保護,事故(飛行場周辺でのバードストライク等)の防止などの目的で駆除の対象となる生物がいる場合に,駆除された生物を積極的に利用する環境モニタリングも行われている。年齢査定が難しい鳥類等でも,誕生後1,2年の間は羽毛の色等から識別が可能で,駆除個体の中の若鳥,あるいは間引きされた卵を対象として環境の年変化を追跡する生物モニタリングも実施されている²⁵⁾。

3. 生物モニタリングの具体例:

トンボを使った環境モニタリング

生物モニタリングについては上記のようにさまざまな報告が出されており,それぞれの例については

引用文献等を参考にされたい。ここでは一つの具体例として、著者らのトンボを使った陸域モニタリング手法確立の試みについて紹介する。

国立環境研究所では、生物モニタリングと試料の長期保存(環境スペシメンバンク)を組み合わせた環境試料タイムカプセル化事業と呼ばれる活動を行っている²⁶⁾が、沿岸など水環境の生物モニタリングと比較して、陸域環境汚染を面的に調べるために適当な生物モニタリング手法が少ないことがこの研究を行った背景にある。POPsの全球での廃絶、削減を目指すストックホルム条約に2009年に追加が決まったPFOS(Perfluorooctanesulfonate, ペルフルオロオクタンスルホン酸)は極めて安定で水も油もはじくという特異的な性質をもち、衣類や靴、じゅうたんなどの表面加工のみならず、金属メッキ溶液や電子部品製造工程における界面活性剤、航空機や石油タンク火災等につかう泡消火剤の成分、航空機用作動油の成分、さらにはハキリアリの駆除剤等、さまざまな用途に使われてきた。末端にスルホン酸をもつPFOSの類縁物質として、カルボン酸をもつPFOA(Perfluorooctanoate, ペルフルオロオクタン酸)をはじめ、さまざまな炭素数のペルフルオロ化合物が知られている。図1に代表例を示す。これらによる日本の環境汚染実態を把握するために、国立環境研究所では2003年から二枚貝を使った沿岸調査を進め、いくつかの相対濃度の高い地域を見いだしてきた²⁷⁾。これらの発生源を突き止めるには、さらに内陸部の調査が必要となる。

たまたまいくつかの昆虫並びに昆虫を捕食する小動物のPFOS等の濃度を測定したところ、食物網のより上位に位置する肉食系の生物(トンボ、カマキリ、ジョロウグモ、カナヘビ)に、これらのフッ素系界面活性剤がより多く蓄積されていることを見だし、

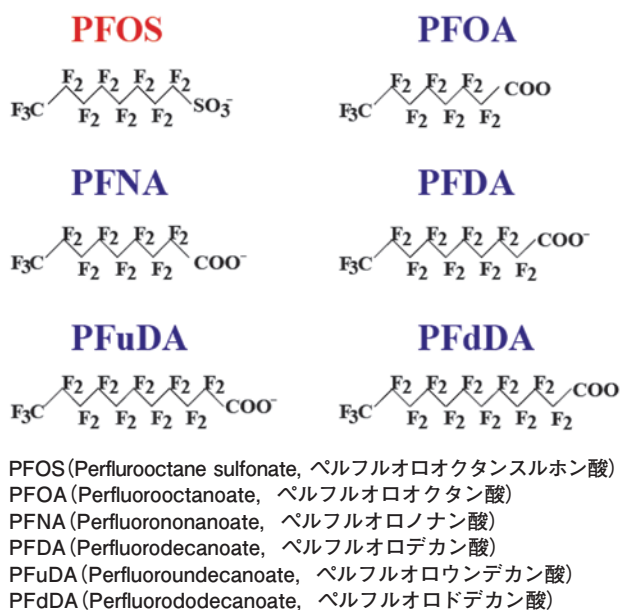


図1 主要なフッ素系界面活性剤の名称と構造。

それらの中から全国的に広く分布し、一か所で複数の試料を捕集しやすいトンボに着目し、さらに研究を進めた。同一地点(つくば市の研究所内)で異なる種類のトンボのオス・メスの比較を行った結果、サイズの近いシオカラトンボ(*Orthetrum albistylum speciosum*), ショウジョウトンボ(*Crocothemis servilia mariannae*), コシアキトンボ(*Pseudothemis zonata*), ノシメトンボ(*Sympetrum infuscatum*), ナツアカネ(*S. darwinianum*)のオス(図2)は互いによく似た濃度、組成のフッ素系界面活性剤を蓄積していることが明らかとなった。前三者のオスはいずれも所内の池になわばりをもって生活しており、長い夏の未成熟期間を所内の木陰で過ごす後二者のオスとともに生活空間を共有すると考えられる。一方、あちこちを飛び回りながら産卵適地を探す成熟メス、広い行動範囲をもつオオヤマトンボ(*Ephthalma elegans*)やギンヤンマ(*Anax parthenope*)等の大型種、さらには極めて長距離飛行性が強いとされるウスバキトンボ(*Pantala flavescens*)は上記五種のオスとは明らかに組成や濃度に違いがあり、生活空間の違いが蓄積するフッ素系化合物の違いに現れる様子が明らかとなった²⁸⁾。さらに、つくば市周辺で数km間隔で同一種(ノシメトンボ)を採取し濃度を比較した結果、一か所で他より高濃度のフッ素系界面活性剤が見つかり、すぐ脇にある工業団地の池の水の中にこれらの物質が桁違いに高い濃度で含まれていることが明らかとなった。この池から距離を変えてノシメトンボとシオカラトンボの二種類を捕まえ濃度を調べたところ、いずれも1km離れたところではほぼ1/3~1/4に減り、直径2km程度の範囲を飛び回っている様子が見えてきた。

こうした結果を踏まえ、ギンヤンマやオオヤマトンボ等の大型種並びにウスバキトンボやアキアカネ(*S. frequens*)等の移動性の高いトンボを除いて、トンボ科の普通種の成熟オスを対象にトンボを使ったフッ素系界面活性剤の全国調査を提案、採択され(環境研究総合推進費サブ課題²⁹⁾、各地の研究者、さらにはホームページ等をつうじて一般市民に呼びかけて全国調査を行った。結果は極めて興味深く、フッ素系化合物濃度が高めの地域がいくつか見つかったほか(図3)、関東と近畿で地域ごとの汚染傾向に違いがあることも見えてきた。以前の二枚貝調査で濃度の高かった地域の近くで、トンボでも高めの地点が見つかるが、貝では主として工場排水による沿岸汚染が見えたのに対し、トンボ調査では山際や田園地帯など意外な場所で高い濃度が認められた。不思議に思ってこうした地点を調べると、近くに廃棄物埋立処分場や焼却炉などが認められることが多い。製品利用や廃棄物処理をつうじた汚染の広がりが見て取れるとともに、化学物質汚染監視の呼びかけに参加してこのような場所を選んで試料採取をしてくださった一般市民の問題意識のあ

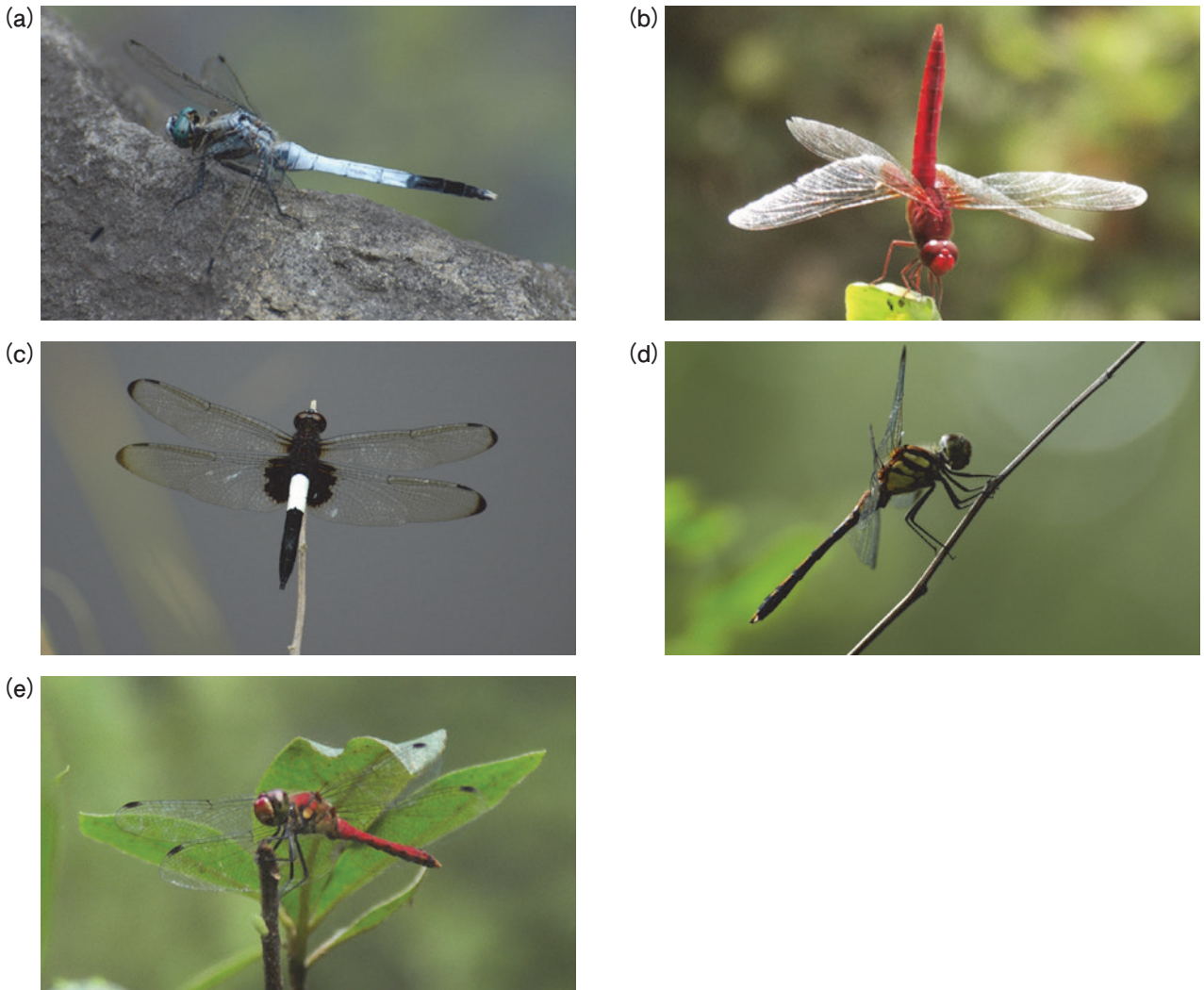


図2 陸域モニタリングの対象となるトンボ。
(a)シオカラトンボ, (b)ショウジョウトンボ, (c)コシアキトンボ, (d)ノシメトンボ, (e)ナツアカネのオス.

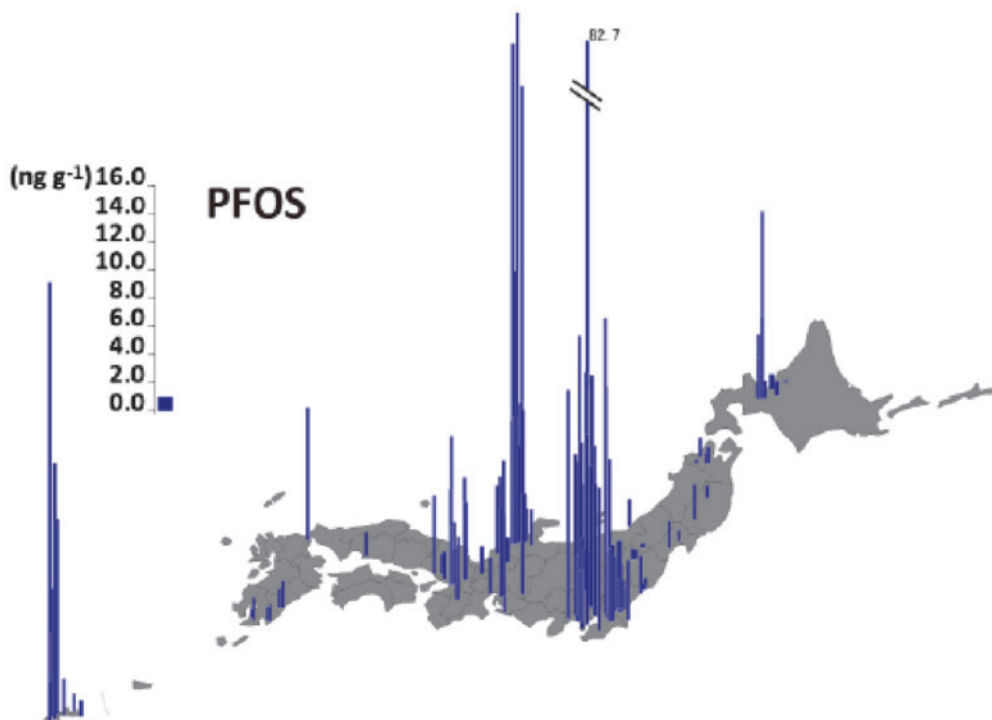


図3 トンボの中のフッ素系界面活性剤 PFOS 濃度の分布²⁹⁾.

り方もうかがえて興味深い。今後さらに詳細な調査を進めるとともに、他の化学物質等に関するトンボの適用性の評価、あるいはトンボと組み合わせにより広く陸域の化学物質等の汚染実態の把握を進められる生物種の探索などの研究が重要と考えられる。

4. 生物モニタリングの将来展望

地球の表層に広がる自然環境は野生生物ばかりでなく人間の生存を支える基盤であり、その持続的な保全を図っていくために継続的・定常的な努力が必要となる。そこに生活する野生生物を利用した生物モニタリングは、持続的な社会経済活動を営みながら環境保全を図り人類の生存基盤を維持していくうえで、極めて有効なツールと考えられる。

これまでの生物モニタリングの延長上に将来像を探ると、大きく二つの面での進展が期待できるように思われる。分析手法の高感度化、多成分一斉分析の進歩にともない、より少ない試料での分析が可能になってきている。人を対象とする生物モニタリングでは、尿や血液、母乳、毛髪等を使って化学物質や重金属類へのばく露状態を把握しているが、野生生物に対しても、例えば体外への排泄物、あるいは血液採取などによって化学物質等へのばく露状態を把握する手法が今後より広く使われていくのではないかと思われる。こうした手法であれば、より食物網の上位に位置する哺乳類や鳥類等の長寿命生物、さらには絶滅危惧種等に対象を広げていくことも可能となるであろう。その一方で、分子生物学、分子毒性学の進歩にともなう毒性メカニズムの理解の推進、情報の蓄積にあわせて、組織レベル・細胞レベルの変化や、代謝や遺伝子発現状態の変化など、毒性発現の経路に沿ってより微細かつ早期の影響を捉える方法が開発されてきている。特に遺伝子発現等の状態を一斉に捉えることのできる、いわゆるオミクス研究の進展にともない、網羅的にさまざまな化学物質の影響を捉える Toxicogenomics(トキシコゲノミクス)や、毒性の分子メカニズムの理解に基づく人への毒性試験法の研究なども進められており³⁰⁾、野生生物に関する研究への拡大と生物モニタリングへの応用による研究の今後の展開が期待される。当面は、さまざまな化学物質等に関する情報が蓄積している生態毒性試験法の対象生物と同じ種、あるいは生物学的近縁種を野外で調べ、生体中化学物質レベルと毒性試験結果との比較、あるいは特定の条件下での行動等の試験項目の比較などにより、自然界でのリスクをよりの確に評価する試みが実行可能性の高い方法として注目される。化学物質や重金属類の各種生物に対する毒性情報の蓄積とともに、その結果を生かしたより鋭敏で的確な生物モニタリング手法の開発、適用が進むものと期待される。

野生生物については、生物にモニターやセンサー

をつけてその行動を探るバイオロギング研究が近年急速に進みはじめ、その生態が明らかにされてきている³¹⁾。こうした技術的進歩と生態学的情報の蓄積を背景に、さらに分析技術の進歩、捕集方法の進歩等により、野生生物に分析システムあるいは捕集システムを取り付けて、その行動監視とともに環境のモニタリングを行う手法もそう遠くない将来に実現されるのではないかと期待される。さらには生理学的な変化や血液中のバイオマーカー等を同時に監視し、環境からのストレスの程度を評価できるような時代もやがて来るかもしれない。野生生物を捕集材としてではなく観測装置の運搬手段、さらにはセンサーそのものとして用いるこうした生物モニタリングについては、長寿命で行動範囲も広い、生態系上位の哺乳類、海棲哺乳類、猛禽類や海鳥などが適当な対象生物となると考えられる。

生物の個体レベルの毒性評価が進む一方で、極めて複雑なシステムとしての生態系への影響評価は依然として困難な課題である。一般に生態学的に用いられる調査方法は、必ずしも化学物質や重金属に選択的、鋭敏な方法ではない。有機スズによるインボセックスの場合では、感受性の高い生物を用いることで影響を高感度かつ選択的に捉えられたが、いつもこうした手法が使えるわけではない。さらに、個体レベルの影響と集団レベルの影響が異なることがありうる点にも注目すべきであろう。同じくインボセックスの調査から、イボニシのメスが有機スズの影響で「完全不妊」の海域でも集団としては存続していることがわかった。これらは幼生の一定期間を浮遊性プランクトンの状態で過ごし、この期間に海流の流れに乗って移動、拡散する。そのため、汚染のひどい海域(例えばドックや港周辺)にも周囲の低汚染海域から定常的に幼生が加入し、集団としては存続しうると理解される。一方、浮遊性プランクトンの期間がないヨーロッパパチヂミボラ(*Nucella lapillus*)では、汚染のひどい海域への再加入ができずに集団が絶えてしまう³²⁾。インボセックス自体、個体の生死には影響しないレベルで生殖不能を引き起こし集団の存続を危うくする点でユニークな事例であるが、実際の環境での化学物質の生態影響はさらに複雑であることをこの事例は改めて教えてくれる。

餌のありかを探り、敵の存在をいち早く察知し、生殖活動のための情報交換を行い、さらには夫婦・集団での子育て、分業体制での社会生活の営みなど、生物は周囲の環境やそこに生活する他の生物個体とさまざまな情報交換を行って生活している。こうした物理的(視覚・聴覚・触覚)、化学的(嗅覚・味覚・そのほかの化学情報伝達)情報の授受が遮断／かく乱されると、種の存続、生態系の維持に大きな影響がでる可能性がある。実際、神経伝達やホルモン等生体内の情報伝達を遮断する従来からの農薬のほかに、フェロモンなどの生物間の情報伝達物質

(semiochemicals)を遮断,あるいはかく乱する化学物質を農薬として,有害虫等の制御に利用する事例も増えてきている³³⁾。これらは種特異性の高い選択的な農薬として,高いポテンシャルを有すると思われる。その一方で,ガとアジアゾウが同じ物質をフェロモンとして使うなど,異なる生物種が同一化学物質を利用している例も少なからず見つかっており³⁴⁾,対象生物(作物と駆除対象種)のみならず,それ以外の生態系を構成する生物や人等への影響も視野に入れた,十分な基礎研究が必要と考えられる。

生態系という複雑なシステムを,その構成生物種やその中で物質やエネルギーの流れのみならず,こうした情報の流れの観点も含めた形で総合的に捉え,その健全性や化学物質の影響を評価していくことは,今後に残された大きな課題であろう。生態系,さらには環境という複雑な系を機能的なシステムとして捉え,その健全性を評価するためにどのような計測手法を作り,組み合わせ,体系化していくか,それらをいかに体系的に運用していくか,そのためには環境化学,環境毒性学,生態学等の既存学問分野の垣根を越えた幅広い分野の研究者の交流と連携,共同作業が必要となるであろう。また,環境問題への取り組みに当たっては,地元を良く知る一般市民の関心,問題意識を生かす形で協力を求めていくことも重要な課題だと思われる。身近な野生生物の利用は,こうした市民連携の推進により機会を与えてくれるだろう。野生生物を利用した生物モニタリングの将来の開発,運用に当たっては,こうした観点を念頭においての推進が期待される。

謝 辞

ここで紹介した国立環境研究所の環境モニタリングの推進に当たっては,所内外の共同研究者をはじめ,一般市民を含む多くの方々に試料の採取,トンボのヤゴの提供などご協力をいただきました。この場を借りて御礼申し上げます。

引用文献

- 菅原 淳, 森田昌敏(1990)生物モニタリング-有害物質の体内蓄積を見る。読売科学選書, 29, 読売新聞社。
- Holt, E. A. and S. W. Miller (2010) Bioindicators: Using Organisms to Measure Environmental Impacts. *Nature Education Knowledge*, 3, 8.
- Goldberg, E. D., V. T. Bowen, J. W. Farrington, G. Harvey, J. H. Martin, P. L. Parker, R. W. Risebrough, W. Robertson, E. Schneider and E. Gamble (1978) The Mussel Watch, *Environmental Conservation*, 5, 101-125.
- Reis, P. A., M. A. Salgado and V. Vasconcelos (2011) Barnacles as bioindicators of metal contamination in coastal waters, *Estuarine Coastal Shelf Science*, 93, 269-278.
- 森田昌敏(1995)ムラサキイガイによる環境汚染物質監視。付着生物研究, 12, 23-33.
- Giangrande, A., M. Licciano and L. Musco (2005) Polychaetes as environmental indicators revised. *Marine Pollution Bulletin*, 50, 1153-1162.
- 井上麻夕里, 鈴木 淳, 菅 浩伸(2002)海洋汚染指標としてのサンゴ骨格中の重金属元素。日本海水学雑誌, 56, 113-117.
- 環境省環境保健部環境安全課(2014)平成25年度版化学物質と環境 詳細版(平成24年度版 化学物質環境実態調査 調査結果報告書)。226。
※関連報告は数多く,ここでは参考までに環境省が長期に渡り継続している化学物質環境実態調査の採取生物試料情報を引用する。
- Kajiwara, Y., N. Kashiwagi and K. Kadokami (2007) Nationwide study of dioxins in the freshwater fish *Carassius auratus (gibelio) langsdorfii* (crucian carp) in Japan: concentrations and estimation of source contribution ratios. *Chemosphere*, 69, 1177-1187.
- Jeong, G. H., H. J. Kim, J. Y. Moon, S. K. Jeon, C. H. Joo, K. Choi and Y. S. Chang (2009) Polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins, dibenzofurans and biphenyls in crucian carp (*Carassius auratus*) from rivers in Korea during 2000-2004. *Chemosphere*, 75, 1221-1225.
- 環境庁(1994)地球環境研究総合推進費研究報告D-2。海洋汚染物質の海洋生態系への取り込み,生物濃縮と物質循環に関する研究(4)イカ類肝臓の蓄積化学物質による全海洋環境監視計画に関する研究(平成3-6年度)。334-337。
(<http://www.env.go.jp/earth/suishinhi/wise/j/pdf/J94D0240.pdf>)
- Hashimoto, S., Y. Shibata, H. Tanaka, A. Yatsu and M. Morita (1999) PCDDs and PCDFs contamination in the Northern Pacific area reflected on squid liver tissues. *Organohalogen Compounds*, 41, 413-416.
- 村瀬秀也, 佐々木裕子, 中村朋之, 植野康成, 内藤季和, 橋本俊次, 伊藤裕康(1999)水生昆虫(ザザ虫)のダイオキシン類分析法の検討, 第8回環境化学討論会要旨集。208-209.
- Rossbach, M. and M. Stoepler (1988) Multielement fingerprinting for characterization: earthworm samples from the environmental specimen bank of the FRG. *Fresenius' Zeitschrift für analytische chemie*, 332, 636-639.
- 環境省環境保健部環境リスク評価室(2009)野生生物のダイオキシン類蓄積状況及び影響調査(1998-2007)日本の野生生物におけるダイオキシン類の蓄積量について。
- Danielsson, S., T. Odsjö, A. Bignert and M. Remberger

- (2008) Organic Contaminants in Moose (*Alces alces*) and Reindeer (*Rangifer tarandus*) in Sweden from the past twenty years. Comments Concerning the National Swedish Contaminant Monitoring Programme in Terrestrial Biota. 7, Swedish Museum of Natural History, Department of Contamination Research.
- 17) Kunisue, T., S. Nakanishi, M. Watanabe, T. Abe, S. Nakatsu, S. Kawauchi, A. Sano, A. Horii, Y. Kano and S. Tanabe (2005) Contamination status and accumulation features of persistent organochlorines in pet dogs and cats from Japan. *Environmental Pollution*, 136, 465-476.
- 18) Conti, M. E. and G. Cechetti (2001) Biological monitoring: lichens as bioindicators of air pollution assessment – a review. *Environmental Pollution*, 114, 471-492.
- 19) UN Chernobyl Forum Expert Group “Environment”, (2006) Environmental Consequences of the Chernobyl Accidents and their Remediation: Twenty Years of Experience, *Radiological Assessment Reports*, 8, International Atomic Energy Agency.
- 20) Satake, K., A. Tanaka and K. Kimura (1996) Accumulation of lead in tree trunk bark pockets as pollution time capsules. *Science of The Total Environment*, 181, 25-30.
- 21) Ikeda, K., T. Aoyama, A. Takatori, H. Miyata and P. Pond (2001) Correlation of dioxin analogues concentrations between ambient air and pine needle in Japan 1, *Organohalogen Compounds*, 51, 84-87.
- 22) 大井 玄, 福田雅夫, 関比呂伸, 前田ヒロ子, 湯目邦雄, 秋山和幸, 野牛 弘(1971)ハト, 鉛汚染の指標. 東京都立衛生研究所年報, 295-298.
- 23) Horiguchi, T. (2006) Masculinization of female gastropod mollusks induced by organotin compounds, focusing on mechanism of actions of tributyltin and triphenyltin for development of imposex. *Environmental Sciences*, 13, 77-87.
- 24) Yoshikane, M., W. R. Kay, Y. Shibata, M. Inoue, T. Yanai, R. Kamata, J. S. Edmonds and M. Morita (2006) Very high concentrations of DDE and toxaphene residues in crocodiles from the Ord River, Western Australia: an investigation into possible endocrine disruption. *Journal of Environmental Monitoring*, 8, 649-661.
- 25) 環境省環境安全課, 化学物質環境実態調査. ※ 2013 年度から有害鳥獣駆除対象種であるカワウの幼鳥ならびに卵の分析が開始された.
- 26) 独立行政法人国立環境研究所(2013)環境スペシメンバンキング：環境の今を封じ込め未来に伝えるボタンリレー, 環境儀, 48. <<http://www.nies.go.jp/kanko/kankyogi/48/48.pdf>>
- 27) 独立行政法人国立環境研究所(2006)有機フッ素化合物等 POPs 様汚染物質の発生源評価・対策並びに汚染実態解明のための基盤技術開発に関する研究(特別研究), 国立環境研究所特別研究報告, 67, 52.
- 28) Yoshikane, M., S. Komori, M. Kobayashi, M. Yanai, T. Ueda and Y. Shibata (2009) Investigation of PFOS pollution in the terrestrial environment of Japan using dragonfly as bioindicator organism. *Organohalogen Compounds*, 71, 1946-1951.
- 29) 柴田康行(2012)B-1002 有機フッ素化合物の環境負荷メカニズムの解明とその排出抑制に関する技術開発(7)昆虫を利用した市民参加型広域的陸域監視手法の確立. 国立環境研究所. <http://www.env.go.jp/policy/kenkyu/suishin/kadai/syuryo_report/pdf/B-1002.pdf>
- 30) Committee on Toxicity Testing and Assessment of Environmental Agents, National Research Council (2007) *Toxicity Testing in the 21st Century: A Vision and a Strategy*. The National Academies Press, Washington, D.C.
- 31) Rutz, C. and G. C. Hays (2009) New frontiers in biologging science, *Biology Letters*, 5, 289-292.
- 32) Spence, S. K., S. J. Hawkins and R. S. Santos (1990) The Mollusc *Thais haemastoma* – An Exhibitor of ‘Imposex’ and Potential Biological Indicator of Tributyltin Pollution. *Marine Ecology*, 11, 147-156.
- 33) Heuskin, S., F. J. Verheggen, E. Haubruge, J. P. Wathélet and G. Lognay (2011) The use of semiochemical slow-release devices in integrated pest management strategies. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environment*, 15, 459-470.
- 34) Kelly, D. R. (1996) When is a butterfly like an elephant? *Chemistry & Biology*, 3, 595-602.



柴田 康行

Yasuyuki SHIBATA

国立環境研究所環境計測研究センター上級主席研究員。2015年4月より同フェロー、並びに先導研究プログラム総括。もともと生化学の出身で、環境中における元素の化学形態変化やその環境動態への影響、生体中での元素の役割と生物進化との関連、化学物質の毒性発現機構や体内動態、環境動態などに関心をもちつつ、環境分析手法の開発を中心に研究を行ってきた。また、モニタリングを進めつつ、集めた試料の一部を将来に残す環境スペシメンバンキング事業(環境タイムカプセル化事業)にも長くかかわっている。現在、アジア太平洋地域委員並びに全球調整委員として、ストックホルム条約の有効性評価のための環境モニタリングデータの集約作業にあたっている。



高澤 嘉一

Yoshikatsu TAKAZAWA

国立環境研究所環境計測研究センター主任研究員。現在、大気・水質を中心に環境媒体に含まれるPOPs等化学物質の網羅的検索手法の開発・体系化に加えて、災害時における汚染物質の探索的・迅速分析手法の構築、地方環境研究所との共同研究(国内における化審法関連物質の排出源及び動態の解明)などに携わる。