特集

# 海洋汚染の生体影響を海鳥で測る

●文･写真:綿貫豊（北海道大学水産科学研究院）

**世界には340種をこえる海鳥種がいます。その分布は北極海から南極海まで、そして沿岸域から沖合・外洋域を含み、全世界の海をカバーしています。この海鳥の特性をいかして、深刻化する海洋汚染問題を探る上で重要なモニタリングを継続するチームがあります。今号は北海道大学の綿貫豊教授に、「なぜ海鳥なのか?」の答えとともに、興味深い研究の一端をご紹介いただきます。**

コアホウドリ

## 海の人間由来物質

私たちはさまざまな物質を、家庭・工業廃水のほか市街地や畑や牧草地を通る雨水に溶かしこんで、結局は海に垂れ流しています。火力発電所などの排気として大気中に放出されたものも、結局は雨水とともに海に入ります。こうした物質のなかでも、殺虫剤などに含まれる合成化学物質、水銀などの重金属や日常的に使用しているプラスチック類の影響が特に懸念されています。さらに、商業価値のない魚の海洋投棄も問題です。海で獲れたものを海に戻すので問題はないと思われるかもしれませんが、海洋生態系になんらかの影響を与えると考えられています。

こうして垂れ流された人間由来物質は、大気や海流により陸から数千キロ離れた外洋域まで運ばれます。こうした外洋域は200カイリ経済水域の外に広がっており、重要な国際漁場でもあります。マグロ類の延縄や最近はサンマ漁などがこうした外洋域で行われます。また大規模なトロール漁も天皇海山などの外洋域においても行われています。投棄魚を含めた外洋域での人間由来物質によるインパクトは相当なものであることが考えられます。外洋域において重要な海域を定め、人間由来物質をモニタリングし、その影響を評価することが求められています。しかしながら、200カイリの外の外洋域での観察やサンプリングは思った以上に大変です。とくにリアルタイムでの影響評価や情報収集は困難です。

海鳥は魚やイカを食べることを通して海洋中の人間由来物質を体に取り込み、それらの化学成分を筋肉や脂肪、血液や羽根に保存して繁殖地に持ちかえります。繁殖地で多数の海鳥を捕獲するのはむずかしいことではありません。そこで、こうした人間由来物質の海鳥への影響についての研究が進んでいます。また、海鳥を使って人間由来物質のモニタリングができないか、という研究も進められています。ここで紹介するこれまでの研究例は比較的沿岸域に生息する海鳥についてのものが多いですが、今後、アホウドリ・ミズナギドリ類などの外洋性の海鳥を調べることで外洋での影響評価ができるでしょう。

はじめに、ここで扱う人間由来物質について紹介しましょう。まず、第1に人間が作り出した、合成化学物質の一種である残留性有機汚染物質（Persistent Organic Pollutants, POPs）があります。有機塩素系殺虫剤のDDTsや 電気の変圧器の中の絶縁材として使われたPCBsなどが含まれます。その危険性からPCBsなどは製造が禁止されましたが、これまでに環境中に放出され海底の泥などに残留しているものがあります。また、水銀、電池やメッキに使われるカドミウム、電池やガラス製造に使われる鉛などの重金属も人間由来の汚染物質です。重金属は、火山噴火などでも環境中に排出されますが、工業製品化や燃焼の過程で、排水や排気により環境中に放出されています。水銀を例にあげれば、その排出は石炭の火力発電によるところが大きく、年間2000トン以上が排出されると推定されており、排出源は欧米から南アジアに移っています。こうした汚染物質に加え、第2に海洋プラスチックの問題があります。プラスチックの総生産量は加速度的に増えています。その量は今や年間2億8000万トンに達しており、うち500～1300万トンが毎年海洋に流出しています。第3は投棄魚です。トロール漁や延縄には狙った獲物ではない、いわゆる外道がたくさんかかることがあります。これらは港に持ち帰られることはなく、海に捨てられます。世界的に見れば全漁獲の8%にあたる730万トンが毎年、海洋投棄されています。特にエビトロール漁では漁獲物のうち62%もが海に捨てられています。（写真1）

**写真1 トロール漁漁獲物**

キンキなど高級底魚をねらったトロール網にはソコダラ類など商品価値がない魚も大量にかかる。これは北大水産学部付属練習船おしょろ丸によるトロール実習の例である。漁獲物のうちかなりの割合が現時点では商品価値のない魚である

## 1 残留性有機汚染物質(POPs)の影響

POPsが鳥類に深刻な影響を与えていることがわかったのは、英国の猛禽類の卵の殻の厚さに関する研究が最初です。卵殻の厚さを調べたところ、1950～1960年代の間に急に減っており、有機塩素系化合物の卵内濃度が高い地域では卵殻厚の減り方が大きい傾向がありました。同じころ北米でも、ペリカン類、シロカツオドリ、ミミウ、ウミガラス類、ミズナギドリ類などの海鳥において卵殻厚の減少が観察され、有機塩素系化合物のひとつであるDDE濃度が高いと卵殻が薄いことがわかりました。この化合物は当時農薬などとして無制限に環境中に放出されていたDDTが生物作用(代謝)を受けて変化したものです。またこの時期ミミウでは胚の発生異常も確認されました。

海鳥の大量死の原因はいろいろありますが、POPsもそのひとつです。1969年オレゴンの海岸でウミガラスが大量死しました。病理解剖の結果、溺死が直接の死亡原因であることがわかりましたが、死んだ鳥の脳のDDE濃度は健康な個体の8倍にもなっていました。その濃度は致死濃度よりは低かったため、これが直近の死亡原因であるとは考えられませんでしたが、餌不足や悪天候などのストレスがかかれば、間接的には死をもたらしうるレベルであったといわれています。

POPsは海鳥個体群にも重大な影響をもたらすことがわかってきました。1968-1976年に765羽のカッショクペリカンの若鳥がフロリダからルイジアナに移入され、1975年までは増加していましたが、1975年大量死が起こり、400個体から250個体まで減ってしまいました。また、巣立ちひな数も、個体群を維持するには足りないほど少なかったことがわかっています。その当時、通常に比べ卵殻厚が1割ほど薄かったのがその理由であろうと考えられています。同じ頃その地域で魚の大量死も観察され、魚中のエンドリン(有機塩素系殺虫剤)濃度は致死レベルに達しており、1975年でのペリカンの脳のレベルも致死濃度に達していたため、この大量死はエンドリンのせいであると断定されました。(図1)

最近、POPsは海鳥のストレスを高め免疫能力を低下させることで、菌やウイルスへの感受性を高めて、間接的に死亡率を高める可能性も指摘されています。カモ類とアホウドリ類において、血液中のPOPs濃度の高い個体は、抗酸化物質や抗酸化酵素活性が低レベルで、酸化ストレスによってダメージを受けたタンパク質が多いことがわかってきました。また化学汚染物質は、ストレスホルモンのレベルをあげたり、繁殖に関わる重要なホルモンであるプロラクチン生成を抑制したりする可能性もあるようです。血液中のPCBs濃度の高いミツユビカモメのオス個体に実験的にストレスを与えると、汚染度の低い個体よりもより多くのコルチコステロン(鳥類の代表的ストレスホルモン)を放出するという報告があります。さらに、汚染物質がどういった生化学的メカニズムでストレスをもたらすかもわかってきました。クロアシアホウドリの肝臓を調べてみると、ダイオキシン関連物質濃度が高い個体は、チトクロームP4501A(CYP1A)という酵素を過剰に生産しており、こうした過剰なCYP1Aはこれが関与する代謝系を破壊し、また活性酸素を生産することでストレスを高めているようです。

## 2 プラスチックの影響

海鳥の胃の中からはプラスチックが頻繁に見つかります。ミズナギドリ科やアホウドリ科ではなんと6～9割の個体が飲み込んでいます。北太平洋北部、南太平洋南部、北大西洋東部、南大西洋、地中海、さらには人間生活から遠く離れたカナダ北極海や亜南極海で生活する海鳥の胃のなかからもプラスチックが見つかっています。これは、全世界の海でプラスチック汚染が進んでいることを示しています。さらに気になるのはプラスチックを飲み込んでいる個体の割合(プラスチック摂取率)が年々増加していることです。(写真2・図2)

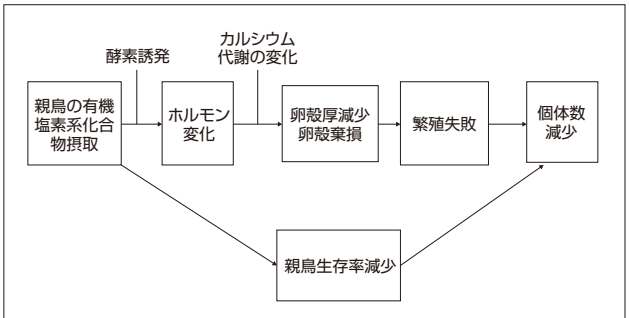


**図1 有機塩素系殺虫剤が卵殻厚減少を通じて鳥類の個体数減少を引き起こす**

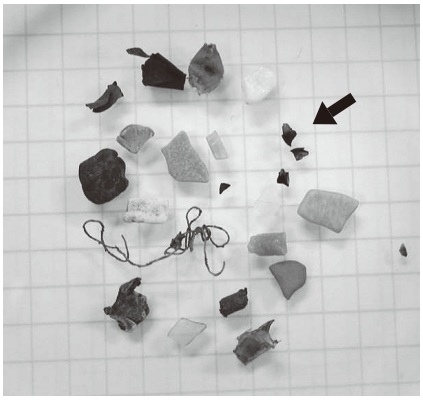

**写真2**

**ハシボソミズナギドリの後胃からみつかったプラスチック**

1ミリから5ミリ程度で、さまざまな色の食器、ゴム被覆、ビニール袋、漁網の破片など。矢印は餌であるイカの口器（いわゆるカラストンビ）

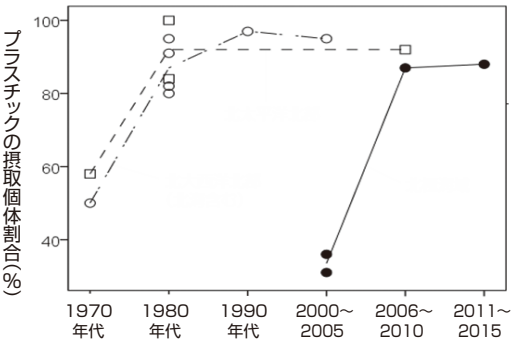


**図2 フルマカモメでのプラスチック摂取個体割合の年代変化**

北大西洋北部や北太平洋北部では、1970年代は5割程度だが、1980年代には8～9割に増加。北極海では2000年初めには4割以下だが、2008年には8割に急増した

※同じ年代に複数のデータがある場合（1980年代北太平洋北部と北大西洋北部、2000～2005年の北極海）その平均値を使って折れ線を引いている

海洋プラスチックが海鳥に与える影響として、プラスチック片などの摂取による消化障害とプラスチックにもともと含まれているか漂流中に吸着した残留性有機汚染物質を海鳥が再吸収すること、の二つが考えられています。まず、飲み込まれたプラスチックは、消化管内壁を傷つけ、潰瘍や消化管閉塞をひきおこし、時には死をもたらすことがあります。ただし、例数はそう多くはないようです。また飲み込んだ後も胃に長くとどまるプラスチックは、摂食衝動や消化率の低下をもたらし、栄養状態を悪くするかもしれません。アオミズナギドリではプラスチックを多く持っていた個体ほど栄養状態が悪いようでした。アカアシミズナギドリの研究では、プラスチックを胃にためていた巣立ち雛は軽いことが報告されています。ただし、その影響が検出されなかったオニミズナギドリの例もあり、一致した結果は出されていません。長い間海を漂ってきたプラスチックは、海水中にあった化学汚染物質（おもにPOPs）を吸着し、その濃度を高めています。プラスチックを飲み込んで1年間も消化管内にとどめておくことがミズナギドリ類では知られています。その間にプラスチックに吸着されていたPOPsが溶けだして海鳥の体内に取り込まれることが、最近わかってきました。こうしたPOPsがどの程度の影響を与えるかはこれからの研究課題です。

## 3 投棄魚は海鳥を利するか?

投棄魚の問題も単純ではありません。トロールや延縄漁船から投棄された商品価値のない魚を食べようと漁船の周りに集まってくるのは、アホウドリ科、ミズナギドリ科の一部、カモメ科のうち中・大型の種、アジサシ科の一部、カツオドリ科の一部など残飯あさりする海鳥種です。餌中に占める投棄魚の割合は、北海のオオトウゾクカモメで7～8割、地中海のヨーロッパミズナギドリでは4割、アルゼンチン沖で非繁殖時期を過ごすマユグロアホウドリでは7～8割（トロールと延縄）にもなります。こうした投棄魚がどれくらいの海鳥を養えるのかについての試算があります。北海全体で1年間に投棄される魚の量はこの海域の魚資源の4%であり、これをエネルギーに換算すると3.4兆キロジュールに達します。これは、フルマカモメ、シロカツオドリ、オオトウゾクカモメ、大型カモメ類、ミツユビカモメあわせて600万個体を1年間養える量です。

これだけの量になりますから投棄魚は特定の種類の海鳥の生活に大きく影響しています。まず、採食行動や採食場所に影響します。地中海もトロール漁が盛んな海域ですが、魚資源保護のため禁漁期が設けられています。投棄魚への依存度が高いチチュウカイカモメの研究では、禁漁時期にはその海域での数が急に減ることがわかっています。また、繁殖成績にも大きく影響するようです。チチュウカイカモメでは、産卵時期にトロール漁が禁漁となると、産卵が遅れクラッチサイズ（一腹卵数）が減少し、また巣の放棄が多くなりました。キアシセグロカモメでも、育雛期に禁漁となると餌中の投棄魚の割合が減って生産性が低下しました。さらに、トロール操業は個体群にも影響することもわかってきました。カナダの大西洋側のオオカモメとセグロカモメの個体数変化を全海岸にわたり調べた研究では、底魚の水揚げが多い、すなわちトロール漁が盛んだった年には、オオカモメの繁殖数も増えていました。このように、投棄魚は一見したところ海鳥に良い効果をもたらすようです。

ところが、話はそう簡単ではありません。例えば何でも屋であるオオトウゾクカモメは投棄魚に依存して数が増えました。その後、トロールによる漁獲量が減り、また海洋汚染を減らすために投棄が禁止されると食べるものがなくなり、その結果、他の海鳥種を襲うようになったのです。オオトウゾクカモメがそれらの種の数を減らす可能性が指摘されています。

つまり、投棄魚は自然にみられる海鳥群集を直接的・間接的にゆがめているのです。また、魚の投棄がアホウドリ・ミズナギドリ類を誘引し、延縄などの漁具への混獲率を上げるとも考えられています。さらに、投棄魚は、海鳥ばかりでなく海洋生態系全体へも影響を与えることが懸念されています。船からの投棄魚は海面でまず海鳥に食べられます。食べられなかったものは水中に沈んでから他の生物の餌となります。ビスケー湾での計算によると、投棄量の4分の1を海鳥が消費し、残りの沈んでいったものが雑食性の底性生物に利用されていると考えられています。これが底性生物群集に大きな影響を及ぼしていることは間違いありません。

## 海鳥で人間由来物質を測る

では、最後に、こうした人間由来物質のモニタリングを、海鳥を使って行おうという研究について、汚染物質を例にとって紹介しましょう。大気や海水中のPOPsや重金属などの汚染物質の濃度はきわめて低く、分析するためは大量のサンプルを得て分析装置の測定限界以上まで濃縮してやる必要があります。一方、環境中の汚染物質は食物連鎖を通して生物増幅(濃縮)され、海鳥の皮下脂肪中のPCBの濃度は環境中の2500万倍にもなることがあります。脂肪サンプルは濃縮せずとも汚染物質濃度が測れます。また、海鳥は外洋の広い範囲で餌を食べるので、その皮下脂肪中の汚染物質濃度を測ることで、広い海域の平均的な汚染のモニタリングにつかえます。さらに海鳥の場合、これを殺すことなく羽根や血液などのサンプルを得ることができます。鳥類は尾羽の付け根にある尾脂腺から分泌する油脂を羽に塗ることで羽の手入れをしています。最近、東京農工大学の研究グループは、この油脂中のPOPsを分析し、環境中の汚染度を測れることを発見しました。濾(ろ)紙で尾脂腺の表面をふき取ることでこの油脂を簡単に採取できます。日本周辺の複数の場所で繁殖するオオミズナギドリが実際に利用している海域を、バイオロギング技術(GPS装置などを海鳥に取り付けて移動軌跡などを測定する技術)によって測ったうえで、その個体から採取した油脂成分を分析することで、日本周辺のPOPs汚染の現状が分かりました。(図3)

海鳥は外洋域での生活者でありながら、子育てのためには繁殖地である島に戻らないといけないという特性があります。そのため、繁殖地に戻ったところを捕獲するのはとても簡単で、そこから容易に、体組織を採取することができます。人間由来物質を取り込んだ海域をバイオロギング技術で測れる点、人間由来物質の影響も同時に測定できる点で、海鳥が、外洋域における人間由来物質のインジケーターとして役に立つことはまちがいありません。

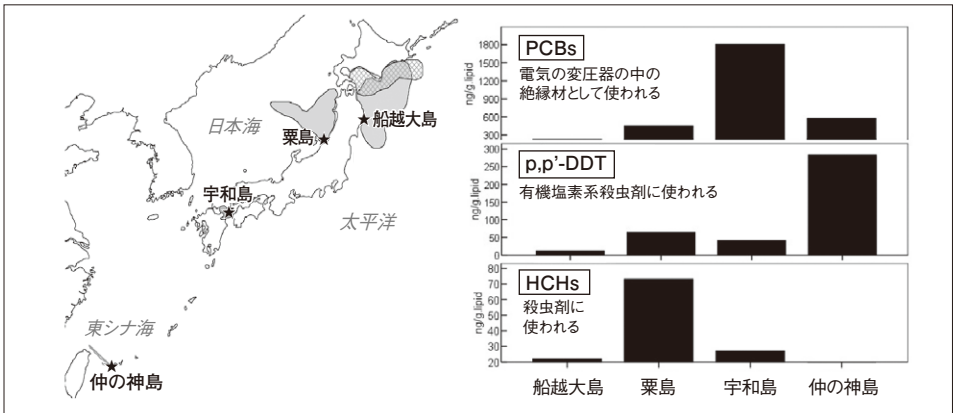


**図3 オオミズナギドリの尾脂腺油脂中のPOPs(残留性有機汚染物質)**

左の図は調査した4箇所の繁殖地(★)とそれぞれの場所で繁殖する個体の採食場所を示す。網掛け部分は粟島で繁殖する個体が時々採食する北海道沿岸域を示す。日本海北部の粟島繁殖個体では総HCHsの濃度が比較的高く、瀬戸内海の宇和島では総PCBsの濃度が、東シナ海の仲の神島個体ではp,p'-DDTの濃度が高く、日本北部の太平洋外洋域で採食する船越大島個体ではすべての濃度が低かった。それぞれの海域における、汚染物質の現在までの排出、汚染源からの距離、および汚染物質の分解性などを反映している


### 謝辞

汚染物質関連について東京農工大学の山下麗博士にコメントをいただきました。


### ●引用文献


図1 Ratcliffe　1970による

図2 Avery-Gomm et al.(2012) ; Blight and Burger (1997) ; Day (1980);
Robards et al. (1995); Mallory et al. (2006); Mallory (2008);
Provencher et al. (2009); Moser and Lee (1992); van Franeker et al. (2011).;Trevail et al. 2015による

図3 Ito et al. 2013より

**綿貫　豊**

わたぬき・ゆたか

1959年長野生まれ。1987年北海道大学農学博士。1988年より1993年まで国立極地研究所助手。昭和基地でアデリーペンギンの調査を行う。1994年北海道大学農学研究科助手、助教授をへて、2014年より同大学大学院水産科学研究院教授。北海道天売島で海鳥モニタリングを継続するほか、北極海の海洋生態系変動、風力発電のリスク評価などのプロジェクトを実施している。その中で、バイオロギング技術なども使って、気候変動と人間の海洋生態系への影響を海鳥の目を通して探ろうとしている。現場での観察から自分で問題を発見することを楽しみとしている。専門:動物の行動生態、海洋生態、保全生物。受賞歴:2009年太平洋海鳥グループ特別功労賞、2009年日本生態学会大島賞。主な著書「海鳥の行動と生態:その海洋生活への適応」生物研究社(2010)「ペンギンはなぜ飛ばないのか？:海を選んだ鳥たちの姿」恒星社厚生閣(2013)