陸水学会第 67 回大会：流域と海洋を語る ―流域からの提言・海洋からの提言―
(日本陸水学会・日本水環境学会合同シンポジウム)

シンポジウム記録 [Record]

生物蓄積性内分泌攪乱物質による地球規模の環境汚染

田辺 信介¹⁾

Global environmental contamination by bioaccumulative endocrine disrupters

Shinsuke TANABE¹⁾

Abstract

The present paper overviews the global contamination by organochlorines, a representative group of persistent organic pollutants (POPs) and endocrine disrupters, and their ecotoxicological implications on wildlife and humans from Asia. The recent pattern of contamination by organochlorine residues in the coastal environment is prominent in tropical regions due to continuous usage in the low-latitude developing countries. The major emission source of organochlorine insecticides such as DDTs and HCHs is probably located in the tropical belt and large quantities of volatilized contaminants are dispersed through the atmosphere on global terms. Reflecting this, a considerable contamination was observed in open ocean tropical waters as well as in the Arctic and nearby waters. On the other hand, PCBs are mainly released from developed nations and also deposited in open seas and oceans. The study of the mass transfer of organochlorines at the air-water interface suggests that the oceanic water bodies, particularly Arctic waters, act as a sink for persistent contaminants.

Our studies also focus on exposure and toxic effects of POPs, particularly organochlorines, in higher trophic level wildlife from Asia. Endocrine disrupting chemicals, such as organochlorine insecticides, polychlorinated biphenyls (PCBs) etc are found in tissues of a wide variety of wildlife from Asia. In general, water birds and marine mammals accumulated the dioxin-like compounds with much higher concentrations than humans, implying higher risk from exposure to these toxic contaminants in wildlife. The future issues of endocrine disrupting chemicals in humans and wildlife will have to be focused on Asian developing countries.

Key words: endocrine disrupters, organochlorines, dioxins, wildlife, marine mammals, marine pollution

摘 要

生物蓄積性内分泌攪乱物質として知られる PCBs や DDTs など有機塩素化合物による環境汚染は地球規模で拡がり、海洋はこの種の物質の最終的な到達点であり溜まり場として機能することが明らかにされている。また生物の汚染、なかでもアザラシや鯨、アホウドリなど海棲高等動物の汚染は顕在化しており、大量死など内分泌攪乱物質が原因と思われる異常も多数報告されている。海棲高等動物でみられる顕著な汚染と影響は、一部の薬物代謝酵素系の欠落など、この種の動物の特異な生理機能に原因がある。ヒトに比べ野生の高等動物は、はるかに高い濃度でダイオキシン類を蓄積しており、そのリスクはヒトよりも野生生物において深刻化する怖れがある。内分泌攪乱物質によるヒトや生態系の汚染は今後途上国で拡大する可能性があり、その現状と課題についても紹介する。

キーワード：内分泌攪乱物質、有機塩素化合物、ダイオキシン、野生動物、海棲哺乳動物、海洋汚染

はじめに

化学物質の生産と利用は近年急速な展開をみせ、世界

の年流通額は 1990 年代になって 3,000 億ドルを突破した (Anderson, 1993)。この金額がわが国の年間国家予算のおよそ半分に相当することを考えると、物質文明の急

¹⁾愛媛大学沿岸環境科学研究センター 〒790-8577 愛媛県松山市文京町 2-5. Center for Marine Environmental Studies (CMES), Ehime University, 2-5 Bunkyo, Matsuyama 790-8577, Japan (E-mail: shinsuke@agr.ehime-u.ac.jp)

Fig. 1. Persistent organochlorines.
図 1. 代表的な有機塩素化合物。

進にあらためて驚かざるをえない。無数ともいえる化学物質の安全性について、個別に対応し対策を立てることは不可能に近いが、こうした化学物質を環境汚染の観点から整理分類する作業はいくつかの研究機関によって試みられてきた。ヒトの健康を問題にしたもの、生物蓄積性に注目したもの、海洋汚染を取り上げたものなど視点は様々であるが、共通していえることは、いずれも有機塩素化合物が高い位置にランクされていることである。なかでも代表的な内分泌攪乱物質として知られる PCB (ポリ塩化ビフェニール) やダイオキシンなどは、毒性が強く、生体内に容易に侵入し、そこに長期間とどまる性質があるため最も厄介な化学物質として関心を集めてきた。また、DDT (ジクロロジフェニルトリクロロエタン)、HCH (ヘキサクロロシクロヘキサン: 商品名 BHC)、CHL (クロルデン)、HCB (ヘキサクロロベンゼン) など悪名高い農薬も有機塩素化合物の仲間である (Fig. 1)。

生態系への蓄積や影響を懸念し、ほとんどの先進諸国では有機塩素化合物の生産を禁止したが、その環境汚染は今なお続いており、学術的・社会的関心は依然として高い。とくに、この種の物質による海洋汚染の問題は、1995 年 11 月に約 100 ヶ国の政府代表が参加してワシントンで開催された「海洋汚染防止政府間会合」でもとりあげられ、汚染の拡大を防ぐ具体策の検討が行動計画に盛り込まれた。また、国連環境計画 (UNEP) は、有機塩素化合物による汚染が地球規模で広がったことに対処するため、西暦 2004 年をめどに環境汚染を防止する国際条約 (POPs 条約) の締結を提案している。有機塩素化合物は、地球規模の環境汚染が深刻化し、その防止対策の強化が国際レベルで求められている最も厄介な化学物質といつてよい。

本稿では、有機塩素化合物による地球規模の汚染とそ

の生態系への影響、とくに哺乳類や鳥類など高等動物の汚染と影響について紹介する。

地球規模で拡大した汚染

筆者と米国地質調査所の O'Shea 博士は、これまでに報告された海の哺乳動物の化学物質汚染に関する論文を収集・整理し、検出された化学物質および動物種と個体数についてまとめた (O'Shea and Tanabe, 1999)。初めて海棲哺乳動物から有機塩素化合物を検出した論文は 1966 年に発表され、南極のアザラシに DDT とその代謝物が残留していることを報告した (Sladen et al, 1966; George and Frear, 1966)。しかし、1960 年代に海棲哺乳動物から検出された化学物質は有機塩素化合物 5 種類、元素 1 種類 (Hg) のみで、動物も 8 種類 89 検体の鯨類・鯨類類にすぎなかった。ところが、1990 年代では、265 種類の有機汚染物質と 50 種類の元素が海棲哺乳動物から検出されている。有機汚染物質の大半は有機塩素化合物で、17 種類の鯨類と 40 種類の鯨類を含む総計 5,529 検体でその汚染が確認されている。検出された有機塩素化合物の中には、強毒性の内分泌攪乱物質として関心を集めているダイオキシンやジベンゾフラン、コプラナ PCB など含まれている。また、多環芳香族化合物、放射性核種、有機スズ化合物なども 1990 年代になってその残留が報告された。海棲哺乳動物の有害物質汚染に関するこれまでの発表論文数は、18,000 編を越えている。

このように多数の有害物質が膨大な数と種類の海棲哺乳動物から検出された事実は、化学分析の技術が進歩したことに加え、この半世紀の間に化学物質の生産や利用が著しく拡大し、またその環境汚染も世界の隅々にまで広がったことが背景にある。また最近になって、地球規模の海洋汚染を引き起こしやすい場で有機塩素化合物の利用が始まったことも要因としてあげられる。工業用材料や農薬として多用された有機塩素化合物の汚染源は陸上にあり、大気や水を媒体として広域輸送される。かつてこの種の物質の生産と利用は先進工業国に集中したため、北半球中緯度域で最高汚染が認められた。ところが先進諸国における規制の強化と途上国における産業活動の拡大にともない、汚染の南北分布は最近変化した。Fig. 2 に示すように、アジアの沿岸域で二枚貝のイガイを指標生物にしてモニタリング調査を実施したところ、有機塩素系農薬 DDTs による水質汚染は、熱帯・亜熱帯海域で顕在化していることが判明した。類似の結果は、HCHs でも認められた。先進国型の化学物質として注目

Fig. 2. DDTs distribution in mussels from Asian coastal waters.
図2. アジア海域における二枚貝イガイのDDTs汚染.

を集めたPCBs (Fig. 3)やCHLsは中緯度海域の汚染が進んでいるが、その分布は低緯度域にも拡大している (Monirith et al., 2003)。地図を開いてみればわかるように、途上国の多くは熱帯・亜熱帯地域にある。南インドの水田地帯で有機塩素系殺虫剤HCHの散布試験を行なったところ、その90%以上はすみやかに大気に揮散し低緯度地域における化学物質の残留期間は短いことが判明した (Tanabe et al., 1991)。こうした大気への活発な揮散は、熱帯・亜熱帯環境の化学物質汚染を軽減する効果はあるが、そこでの無秩序な利用は地球規模の汚染に大きな負荷をもたらすことになる。海洋は地球の面積の7割を占めており、熱帯・亜熱帯から放出された化学物質の大半は世界の海に拡がることになる。つまり、汚染源の南下は、世界の海洋に分布している海棲哺乳動物にとって最も厄介な場で化学物質の利用がはじまったことを意味する。有機塩素化合物によるこの種の動物の汚染が顕在化した遠因として、地球の蒸発皿すなわち熱帯・亜熱帯地域における化学物質利用の増大があげられる。

ところで、中低緯度地域で利用された有機塩素化合物

はどのように広がり、最終的にどこに到達するのであろうか？ 残念ながらこうした疑問に応えられる研究は少ないが、その分布やゆくえを示唆した例はある。有機塩素化合物による外洋大気および表層海水の汚染を地球規模で調査した例は、農薬HCHsの残留濃度が最も高く、とくに北半球の汚染が顕在化していることを明らかにしている (Iwata et al., 1993)。興味深いことにHCHsの高濃度分布は、この殺虫剤が使用されている熱帯・亜熱帯周辺海域で認められるばかりでなく、北極周辺海域でも観察されこの傾向は大気よりも表層海水で顕著であった。対照的にDDTsの残留濃度は全体的に低く、熱帯海域周辺のみで高濃度分布がみられ、HCHsに比べれば大気により輸送されにくく汚染源周辺にとどまりやすいことが示唆されている。ところが、PCBsやCHLsは均質な濃度分布を示し、南北差も小さいことが明らかにされている。PCBsやCHLsの汚染が全世界に広がり一様な分布を示すことは、依然として中緯度先進諸国からの放出が続いていることに加え、第三世界を中心に有機塩素化合物の汚染源が今なお拡大していることを暗示している。西部

Fig. 3. PCBs distribution in mussels from Asian coastal waters.

図 3. アジア海域における二枚貝イガイの PCBs 汚染.

Fig. 4. Schematic representation of the global transport of organochlorines.

図 4. 有機塩素化合物の移動拡散過程.

北太平洋に棲息するイルカや鯨について有機塩素化合物濃度を測定した最近の研究は、物質によってその分布にちがいがあり、外洋表層海水の汚染パターンが反映されていることを明らかにしている (Prudente et al., 1997)。

外洋環境では、有機塩素化合物の汚染分布と併せて大

気・海水間での物質交換の研究も行なわれ、その地球規模でのゆくえが解析されている (Iwata et al., 1993)。大気・海水間における有機塩素化合物のフラックス (移動量) を求めた研究では、ほとんどの海域で負の値が得られており大気から海水へ活発に移行していることが明らかにされている。HCHs のような農薬の場合、汚染源に近い熱帯海域で大きなフラックスが認められることは当然であるが、北極のような汚染源から離れた海域でも大気から海水へ活発に流入している。北極域の海水が大きな負のフラックスを示す傾向は PCBs でも認められ、この事実は外洋の海水がこの種の物質の最終的な到達点として機能していることを示しており、とくに北極周辺の海水は有機塩素化合物のたまり場として重要な役割を演じていることが推察される (Fig. 4)。このような海洋の特性は海棲哺乳動物が有害物質のはきだめに生息していることを意味し、この種の動物で多様な有機塩素化合物の蓄積がみられる一要因でもある。

Fig. 5. Relative activity of drug-metabolizing enzyme systems to decompose organochlorines.

図 5. 有機塩素化合物を分解する薬物代謝酵素系の相対活性の動物種間差.

海棲高等動物の特異な生体機能

海棲哺乳動物の化学物質汚染が顕在化しているのは、汚染源の南下や海洋が有害物質のたまり場となっていることばかりでなく、この種の動物の特異な生体機能も関与している。

その特異な機能の第一点は、海棲哺乳動物の皮下に厚い脂肪組織があり、ここが有害物質の貯蔵庫として働いていることである。この脂肪組織はブラバーと呼ばれ、海棲哺乳動物の種類によって変動するが、アザラシの乳仔では体重の 50% を越え、体内の有機塩素化合物のほとんどがここに残留している。イルカの場合、体重のおよそ 20~30% がブラバーで、有機塩素化合物の体内総負荷量の約 95% が蓄積している (Tanabe et al., 1981)。有機塩素化合物は脂溶性が高いため、一旦脂肪組織に蓄積すると簡単に出ていかない。したがって、長期間そこに残留することになる。寿命の長い海棲哺乳動物では、餌から取り込んだ有害物質が徐々にブラバーに蓄積し、ここが大きな貯蔵場所として働くため高濃度汚染に結びついている。

第二点目は、海棲哺乳動物の場合、世代を越えた有害物質の移行量がばかにならないことである。有害物質が親から子に移るルートとしては、胎盤を経由する場合と生後授乳により移行する場合がある。哺乳動物の場合、一般に胎盤経由での有機塩素化合物の移行量は少なく、

せいぜい母親体内の 5% 程度であるが、鯨類や鯨脚類の乳は脂肪含量が高いため、授乳によって多量の有機塩素化合物が母親から乳仔に移行する。スジイルカでは、体内に残留する PCB 総量のおよそ 60% が授乳により乳仔に移行している (Tanabe et al., 1994)。バイカルアザラシの成熟雌の場合、授乳によって PCB および DDT 負荷量の約 20% が排泄されている (Nakata et al., 1995)。したがって鯨類や鯨脚類の成熟個体では、有機塩素化合物の蓄積濃度に顕著な雌雄差がみられる。このような大量の有機塩素化合物の母子間移行は、たとえ環境の汚染濃度が低下しても、海棲哺乳動物体内の有害物質はそのまま世代を越えて引き継がれるため簡単に低減しないことを意味しており、高濃度蓄積や長期汚染の一要因となっている。また、乳仔の体重は母親の 10 分の 1 程度であるため、有機塩素化合物の体内濃度は授乳期間中に一気に上昇する。このことは体内蓄積量の問題だけでなく、毒性影響も深刻化することを暗示している。

第三点目は、海棲哺乳動物とくにイルカや鯨の仲間は肝ミクロソームに局在するチトクローム P-450 系の薬物代謝酵素が発達していないため、有害物質をほとんど分解できないことである。一般に有機塩素化合物を分解する薬物代謝酵素系は、フェノバルビタール (PB) 型とメチルコラントレン (MC) 型に大別されるが、鯨類は PB 型の酵素系が欠落しており、陸上の哺乳動物や鳥類に比べると格段に有害物質の分解能力が劣る (Fig. 5)

Fig. 6. PCBs concentrations in birds and mammals in Japan and nearby seas and oceans.

図 6. 日本の陸域および周辺海域に棲息する高等動物の PCBs 蓄積濃度。

(Tanabe et al., 1986)。一方アザラシなど沿岸性の鰭脚類では PB 型および MC 型両方の酵素系が機能しているが、陸上の高等動物に比べるとその分解能力は弱い。陸上、沿岸、外洋の方向で高等動物の有害物質分解能力が低下しているのは、進化の過程で陸上に比べ海洋の動物ほど、また沿岸に比べ外洋の動物ほど陸起源の天然の毒物に曝される機会が少なかったためと推察される。したがって、海棲哺乳動物とくにイルカや鯨の仲間は分解酵素の機能を発達させる必要がなかったとも考えられ、このことが多様な有害物質の蓄積をもたらしたのである。

野生生物の高濃度蓄積

有害物質の貯蔵庫としての皮下脂肪、授乳による世代を越えた移行、弱い分解能力など、前述したこれらの要因はいずれも海棲哺乳動物の高濃度汚染に関与するが、とくに注目すべき点は、薬物代謝酵素系の特異性であろう。高等動物の場合、酵素系による分解は有害物質の主要な排泄ルートであり、この機能が未発達であるということは餌から取り込んだ多様な毒物が生涯にわたり体内に残存することになる。そのことを示唆する代表的な事例として、有機スズ化合物の蓄積があげられる。有機スズ化合物の一種であるブチルスズ化合物は、有機塩素化合物に比べ安定性が乏しいため、高等動物の体内では容易に分解されると考えられていたが、最近の研究により海棲哺乳動物の肝臓に高濃度で蓄積していることが明らかにされた (Tanabe, 1999)。また、海棲哺乳動物の中でもとくに薬物代謝酵素系が発達していないイルカや鯨

は、有機塩素化合物を驚くほどの高濃度で蓄積している。たとえば西部北大平洋のスジイルカは、海水中の一万倍もの高濃度で PCB を蓄積している (Tanabe et al., 1984)。異常な蓄積はこれだけではない。一般に化学物質の濃度は、陸上の汚染源から遠ざかるにつれて低減するのが普通であるが、本来清浄なはずの外洋に棲息しているイルカや鯨は、陸上や沿岸の高等動物よりはるかに高い濃度で PCB を蓄積している (Fig. 6) (Tanabe et al., 1994)。外洋性の動物が高濃度の有機塩素化合物を蓄積している他の事例として、アホウドリがある (Jones et al., 1996; Guruge et al., 2001)。興味深いことに、北太平洋のクロアシアホウドリでは、一部の検体から約 100 ppm の PCBs が検出されており (Fig. 6)、DDTs の残留濃度もきわめて高い。イルカや鯨と同じように、外洋を主な棲息域としているアホウドリ類も、チトクローム P-450 系の薬物代謝酵素が一部欠落しているものと予想される。

イルカや鯨、アザラシなどの海棲哺乳動物は、ダイオキシン類の蓄積濃度も高い。とくに、コブラナ PCB の汚染が顕在化しており、このことは最近の環境庁の調査でも明らかにされている (田辺, 2002a)。海棲哺乳動物や魚食性の鳥類は、数千 pg TEQ/g (脂肪重当り) の濃度を示すものがかなりあり、この値はヒトから検出されたダイオキシン類の蓄積濃度をはるかに上回る (Fig. 7)。弱い薬物代謝機能をもつなど、ある種の野生生物にはヒトとは違う生理機能があり、そのことが内分泌攪乱物質の蓄積濃度や毒性影響に関与していることが考えられる。

毒性影響

有機塩素化合物による海洋汚染が注目されはじめたきっかけは、その毒性影響が高等動物にあらわれているという示唆であろう。イギリスの生態学者 Simmonds は、記録として残されている海棲哺乳動物の大量変死事件が 20 世紀になって 11 件あることを報告しているが、このうちの 9 件は 1970 年以降に集中している (Simmonds, 1991)。しかも大量変死事件のほとんどは先進工業国の沿岸域で発生しており、このことはこうした異常が物質文明の進展と無縁ではないことを匂わせている。また “Our Stolen Future (邦訳「奪われし未来」, 翔泳社)” の著者 Colborn は、海棲哺乳動物の異常 (個体数の減少、内分泌系の疾病、免疫機能の失調や腫瘍など) を総説としてまとめ、1968 年以降 65 例にのぼる報告があり、その原因として生物蓄積性の内分泌攪乱物質すなわち有機塩

Fig. 7. Comparison of TEQ concentrations of PCDDs and related compounds in higher wildlife and human.

図 7. 野生高等動物およびヒトから検出されたダイオキシン類の TEQ 濃度。

素化合物が関与していることを示唆している (Colborn and Smolen, 1996)。

環境ホルモンの毒作用機序は、ホルモンレセプターと結合し、ホルモン擬似的作用を介して内分泌系を攪乱すると説明されているが、環境汚染物質によって誘導される薬物代謝酵素系もホルモンを攪乱する。有害物質が蓄積すると、肝臓のチトクローム P-450 酸化酵素系が誘導され、この酵素系が化学物質を活性化してガンや奇形を引き起こしたり、ステロイドホルモンを代謝し生殖機能を攪乱する。また、胸腺に作用して、免疫機能の失調をもたらすこともある。したがって野生の高等動物では、化学物質の蓄積量、薬物代謝酵素の活性やホルモンの濃度、病的症状の三者の関係を明らかにし、有害な影響を検証する研究が求められている。しかし、この種の研究ははじまったばかりであり、情報は大幅に欠落しているが、有機塩素化合物の影響を匂わせる結果がないわけではない。例えば、北部北太平洋の冷水域に生息するイシイルカでは、PCB および DDE (DDT の安定代謝物) の残

Fig. 8. Relationship between PCBs/DDE concentrations in the blubber and testosterone levels in serum in adult male Dall's porpoises from northern North Pacific.

図 8. 北太平洋で捕獲されたイシイルカ成熟雄の脂皮に残留する PCBs および DDE 濃度と血清中テストステロン濃度の関係。

留濃度と雄の性ホルモン・テストステロン濃度との間に負の関係が認められ、この種の物質の濃度が高いとテストステロンの濃度は低いという傾向がみられる (Fig. 8) (Subramanian et al., 1987)。また、三陸沖のオットセイ調査では、PCB の残留濃度と薬物代謝酵素活性の間に明瞭な正の相関がみられている (Tanabe et al., 1994)。さらに飼育下のキタゾウアザラシ (Lahvis et al., 1995) や米国フロリダ沿岸の野生バンドウイルカ (Shaw, 1998) では、低濃度の有機塩素化合物でリンパ球の増殖活性が阻害されることが報告されている。因果関係を裏付ける知見の集積は今後の課題であるが、こうした結果は、現実の有機塩素化合物蓄積濃度で薬物代謝酵素系が誘導されたりホルモンレセプターとの結合や免疫機能の抑制がおこっていることを窺わせ、内分泌系や免疫系の攪乱など化学物質の長期的・慢性的な毒性影響が、野生の海棲哺乳動物で起こりうることを暗示している。

汚染と影響の将来

有機塩素化合物の長期的な影響を予測するには、汚染の消長を理解することが必要となる。この場合、保存試料を用いて過去の汚染を復元し将来を予測することが望ましいが、海棲哺乳動物や鳥類の場合、有用な試料は少ない。断片的ではあるが、三陸沖で捕獲したオットセイの保存試料では、1970 年代の中頃 PCB や DDT 汚染の極大がみられ、その後濃度は低減したが 1980 年代以降の PCB 汚染は定常状態を示し、HCH の汚染には明瞭な低減傾向が認められていない (Tanabe et al., 1994)。南氷洋で捕獲したミンククジラの調査では、最近 10 年間有機塩素化合物の濃度はほとんど変化しておらず PCB はむしろ増大傾向にあることが判明している (Fig. 9)

Fig.9. Temporal trends of persistent organochlorine concentrations in the blubber of minke whales from Antarctic Ocean.

図9. 南氷洋産ミンクジラの脂皮から検出された有機塩素化合物濃度の経年的推移。

(Aono et al., 1997)。こうした過去の汚染の復元は、海棲哺乳動物における有機塩素化合物の暴露と影響が、今後しばらく続くことを暗示している。とくに PCB による汚染とその毒性影響は深刻で、モニタリング調査の継続が望まれる。

途上国の POPs 問題

POPs とは、残留性有機汚染物質 (Persistent Organic Pollutants) の略称で、環境中に長期間残存する、大気や水を媒体として地球規模で越境移動する、生体内に濃縮・蓄積し健康被害をもたらす可能性がある物質と定義されている。現在のところ、意図的生成物質として PCBs, DDT, クロルデン、トキサフェン、アルドリノ、ディルドリン、エンドリン、ヘプタクロル、マイレックスの 9 種類、非意図的生成物質としてダイオキシン、ジベンゾフラン、ヘキサクロロベンゼンの 3 種類、合計 12 物質が対象となっている。これらはいずれも有機塩素化合物で、この種の物質による地球規模での環境汚染とヒトや野生生物に対する影響がきわめて深刻化し、そのことが国際社会で認知され汚染防止対策を強化する必要に迫られたため、条約締結の議論が開始された。ほとんどの先進諸国ではすでに POPs の生産を禁止しているが、一部の途上国や旧社会主義国での使用が続いているため、その環境汚染は今なお進行しており、依然として高い学術的・社会的関心を集めている。したがって、POPs 問題の本質は、先進国だけでなく第三世界にもあるといえる。

POPs 条約が締結されると、有機塩素化合物の環境汚染レベル、あるいは生態系の濃度レベルは低減することが期待される。先進国だけでなく途上国でも条約締結の効果はあらわれると考えられる。しかし、非意図的生成物質であるダイオキシン類の汚染は、今後途上国で進行する恐れがある。その一端として、途上国のゴミ問題に由来するダイオキシン類の二次生成があげられる。

ダイオキシン類は、環境残留性や生物蓄積性が高く、また強毒性のため、先進諸国を中心に、これまで多くの汚染実態調査やリスク評価が実施されてきた。その結果先進諸国では、焼却施設の改善や化学物質の流通・使用規制強化の効果があらわれ、大気、水、土壌、生物などさまざまな環境試料のダイオキシン類濃度に低減傾向がみられている。一方、近年急速な経済発展が進み、人口増加の著しいアジアの途上国では、日々多くの廃棄物が都市ゴミ集積場に投棄され、自然発火や意図的焼却により低温で燃焼している。このことから、アジア途上国のゴミ集積場では、燃焼に伴うダイオキシン類の生成が予想され、周辺環境への汚染の拡大も懸念される。加えて、これらゴミ集積場では、機器類、プラスチック、金属製品、紙類、そして生ゴミといった多様な廃棄物が分別されることなく投棄されていることから、トランスやコンデンサーに使用された PCBs、機器類や金属製品に含まれる微量元素など、多様な有害物質による汚染も考えられる。また、疫病を媒介する病害虫の発生を防止するため、殺虫剤等も散布されており、その汚染と影響も危惧される。

しかしながら、途上国のゴミ集積場では、これら有害物質の汚染調査はほとんど行われておらず、ヒトの曝露影響を評価した研究もみあたらない。ゴミ集積場周辺には多くの住民が居住しているだけでなく、大人に加え多数の子どもが waste-picker として場内で労働していることから、若い世代も有害物質の曝露を受けている。感受性の高い胎児期や乳児期における有害物質の曝露は、免疫機能や脳の発達に影響を及ぼすことが示唆されており、ゴミ集積場では疫学的な調査の実施も望まれている。そこで、アジア途上国の都市ゴミ集積場およびその他地域で採取した土壌のダイオキシン類、母乳のダイオキシン類およびその他の有機塩素化合物について、その汚染実態を調査した(田辺, 2002b)。

その結果、アジア途上国の都市ゴミ集積場内およびその周辺で採取した土壌試料すべてから、ダイオキシン類が検出された(Fig. 10)。カンボジアとインドのゴミ集積場内のダイオキシン類濃度は、周辺土壌より明らかな高値を示し、ゴミの自然発火や意図的焼却によるダイオキシン類の生成および PCB を含む廃棄物からのコプラナー PCBs の漏洩が示唆された。アジア途上国の都市ゴミ集積場内の土壌と先進諸国の焼却施設周辺、都市・工業地域、農業地域の土壌中ダイオキシン類濃度を比較したところ、ほぼ同等の高い値が認められ、途上国都市ゴミ集積場に先進諸国に匹敵するダイオキシン類汚染源のあることが判明した。とくに、カンボジアの集積場内の3地点では、日本の環境基準値 1000 pg-TEQs/g を超える高濃度のダイオキシン類が検出された。

さらにダイオキシン類はヒトの母乳試料でも検出され、途上国のゴミ集積場周辺住民は、ダイオキシン類の曝露を受けていることが明らかとなった(Fig. 11)。ゴミ集積場周辺住民の PCDD/DFs 濃度はインド>フィリピン≧ベトナム≧カンボジアの順であり、インドのゴミ集積場周辺住民は、対照地域住民と比べても明らかな高値を示した。このことは、インドのゴミ集積場にダイオキシン類の発生源が存在し、その影響が周辺住民に及んでいることを示唆している。先進諸国の場合、ヒトのダイオキシン類曝露は、魚、畜肉、卵、乳製品などの動物性食品経由が98%以上を占め、大気からはわずか1.1%と推定されている。インドのゴミ集積場内には牛などの家畜が飼育されており、周辺住民はこれら牛のミルクを飲用している。このことから、インドのゴミ集積場周辺住民は、場内で発生したダイオキシン類によって汚染された食品を通して曝露を受けた可能性がある。一方、高濃度の土壌汚染がみられたカンボジアやフィリピンのゴ

Fig. 10. Comparison of PCDDs and related compounds concentrations in soils from dumping sites of municipal wastes in Asian developing countries and those in various pollution source areas in developed nations.

図 10. アジア途上国のゴミ集積場内とその周辺から採取した土壌中のダイオキシン類濃度と先進諸国の汚染レベルとの比較。

ミ集積場内には家畜などの動物は飼育されておらず、周辺住民がダイオキシン類で汚染された食物を摂取している可能性は低いと考えられる。

アジア途上国の都市ゴミ集積場周辺住民から採取した母乳のダイオキシン類濃度を、他の国で報告されている一般人のデータと比較したところ(Fig. 11)、インドの都市ゴミ集積場周辺住民の母乳から検出されたダイオキシン類濃度は、世界的にみても高値であり、日本や欧米の一般人と同等、もしくはそれ以上のレベルを示した。一方、ベトナム、フィリピン、そしてカンボジア住民の濃度レベルは、先進諸国の一般人に比べると低く、他の途上国の住民と同程度であった。インドの母乳の TEQs 濃度が先進諸国に匹敵するレベルであったことは、注目すべき結果である。ベトナムの枯葉剤や台湾の油症事件を除けば、これまでダイオキシン類の汚染は先進国の問題だと言われてきた。しかしここに示した結果は、途上国にもゴミ集積場のようなダイオキシン類の大きな発生源があり、それが土壌やヒトの汚染をもたらししていること、

Fig. 11. Comparison of concentrations of PCDDs and related compounds in human breast milk from dumping sites of municipal wastes in Asian developing countries and those from other countries.

図 11. アジア途上国のゴミ集積場内から採取した母乳および他地域住民の母乳中ダイオキシン類濃度の比較。黒棒は著者らの分析結果、白棒は文献値。

つまり途上国にもダイオキシン問題は存在することを明確に示している。日本や欧米の先進国では、母乳のダイオキシン類レベルは減少傾向にある。これら先進国では、高性能焼却施設の普及・改良や化学物質の流通・使用規制強化の効果があらわれているものと考えられる。一方、アジアの途上国のように、現在まったく排出源対策がなされていない地域では今後さらにダイオキシン類による汚染が進行し、母乳の濃度レベルが上昇することもあり得る。

ところで、アジアの途上国ではダイオキシン類以外の有機塩素化合物による母乳汚染も深刻化している。Fig. 12 に示すように、インドの住民から採取した母乳は HCHs の汚染が顕著で、他の途上国住民より 1~2 桁高い値を示した。インドでは、野生生物の調査でも高濃度の HCHs が検出されており、今なおこの薬剤を使用していることが推察される。カンボジア住民の母乳は DDTs の濃度が最も高く、他の有機塩素化合物より 1 桁高い値で検出された。その DDTs 濃度は、ベトナム住民の平均値より低値であったが、他のアジア途上国および先進国の日本より高い値を示した。カンボジアでは魚類の寄生虫駆除に DDT が使用されており、魚介類の汚染実態調査でも高い DDTs 濃度が検出されている。カンボジア住民の高い DDTs 母乳レベルは、公衆衛生目的で使用された DDT の曝露に加え、魚介類からの取り込みも考えられる。ベトナム住民の母乳は DDTs 汚染が進行しており、日本や他のアジア途上国と比較すると明らかに高いレベルがみられた。ベトナムの DDTs 汚染が顕在化している

ことは、1980 年代に実施された母乳汚染調査や最近の食品汚染実態調査でも指摘されており、マラリア対策など公衆衛生を目的とした使用がその主な原因と考えられる。またベトナムでは PCBs 濃度も、日本人より低値ではあるが、他のアジア途上国に比べると高い値が認められた。汚染源は不明であるが、ベトナム戦争当時旧ソ連や欧米から持ち込まれた兵器、軍用機、戦闘車輛、電気機器などに使用された PCBs の漏出が疑われる。フィリピン住民の母乳の有機塩素化合物残留レベルは全体的に低値であったが、DDTs 濃度は相対的に高く、ついで PCBs, CHLs, HCHs, HCB の順で検出された。1970 年代以降フィリピン政府は、DDT や HCH 等有機塩素系農薬の生産、使用、輸入、販売を厳しく規制したため、母乳中の有機塩素化合物濃度は低値を示したものと考えられる。

先進国と第三世界の母乳汚染を比較すると、殺虫剤の DDTs や HCHs による汚染は明らかに途上国や旧社会主義国住民の濃度が高く、PCBs は先進諸国住民の汚染が顕在化しているが、旧社会主義国の一部で先進国に匹敵する PCBs 汚染が認められることは興味深い (Fig. 12)。アジア地域の母乳汚染パターンは、先に示した二枚貝イガイの汚染分布 (Fig. 2, Fig. 3) と類似しており、こうした知見をふまえた包括的な POPs 汚染防止対策の展開が望まれる。

母乳の有機塩素化合物濃度は、母親の年齢、出産回数、授乳期間、栄養状態など、様々な要因によって変動する。アジア途上国の住民について、母乳のダイオキシン類および有機塩素化合物濃度と母親の出産回数の関係を調べたところ、出産回数が多い母親の母乳ほど有機塩素化合物濃度は低い傾向がみられた (Fig. 13)。脂溶性が高い有機塩素化合物は、体内の脂肪組織から母乳の脂肪へ移行して体外へ排泄されるため、出産を重ねる度に母乳の濃度は減少していくものと考えられる。このことは、母乳を介した第一子への汚染物質の移行量は、第二子以降より相対的に多いことを意味しており、第一子に対する毒性上のリスクも大きいことを暗示している。

上記の結果は、少子化の問題と関連づけて考える必要がある。たとえば、先進国では女性の出産率が低下し、わが国の場合現在平均 1.33 人でしかも高齢出産の傾向にある。中国では 1 人っ子政策が推進されているが、これが近年中に法制化される。そうすると先進国や中国では第 1 子が増えることになり、環境ホルモンによる乳児の汚染とそのリスクは相対的に高くなると予想される。このことは乳幼児の健康や知能の発達に影響を及ぼす

Fig. 12. Comparison of DDTs, HCHs and PCBs concentrations in human breast milk from dumping sites of municipal wastes in Asian developing countries and those from other countries.

図 12. アジア途上国住民と他の途上国および先進諸国住民の母乳中有機塩素化合物濃度の比較。黒棒は著者らの分析結果、白棒は文献値。

けでなく、国民全体の厚生や知的水準の推移等にも係わる可能性があり、こうした観点の対策も今後検討する必要がある。

ところで、体重 5 kg の乳児は毎日約 700 ml の母乳を授乳する。この数値と母乳から検出された有機塩素化合物の濃度をもとに、途上国の乳幼児が母乳を通して摂取する 1 日当たりの有機塩素化合物量を見積もり、WHO (世界保健機構) や Health Canada (カナダ保健省) が定める安全基準値 (TDI) と比較した (Fig. 14)。その結果、最も高いダイオキシン類摂取量が得られたのはインド住民の母乳で、カンボジア、ベトナム、フィリピンを含むほとんどの母乳において、WHO が定める TDI の 4 pg TEQs/kg/日を超えた。また、HCHs と DDTs の摂取量は一部住民の母乳のみ TDI を越えたが、インド住民の母乳中 HCH に関しては、TDI を上回る試料が多数存在した。以上の結果から、途上国住民の母乳に含まれる有機塩素化合物は、乳児に対する健康影響が懸念されるレベルにあると考えられた。

乳児の健康を考えた場合、有機塩素化合物で汚染されていない人工乳を利用することは、そのリスクを軽減す

インド住民 (ダイオキシン類)

ベトナム住民 (DDTs)

カンボジア住民 (DDTs)

Fig. 13. Relationship between concentrations of DDTs, PCDDs and related compounds in human breast milk from Asian developing countries and the parturitional history of mother.

図 13. 母乳中のダイオキシン類および DDTs 濃度と母親の出産回数の関係。

る 1 つの方法である。しかし、母乳には栄養だけでなく、乳児の免疫システムを支える IgA 抗体や糖タンパクであるミルクムチン、バクテリアやウイルスの活性を抑制するオリゴ糖、ラクトフェリン、リソチームなど乳

Fig. 14. Comparison of daily intake of persistent organochlorines through lactation in infant of Asian developing countries and those tolerable daily intake (TDI) for human health.

図 14. アジア途上国乳児が授乳により摂取する有機塩素化合物量と安全基準値 (TDI) の比較.

分の量的・複合的効能は十分解明されていないが、母乳量の不足は乳児の健全な生育に何らかの影響を及ぼす可能性がある。さらに、先進国の人工乳は栄養成分が豊富で安全性の高いものが供給されているが、途上国の場合は栄養成分の不足や安全性に問題があるだけでなく、使用する水も乳児に悪影響を及ぼすことがある。これらのことを併せて考えると、途上国では乳児に母乳を与えることが不可欠と思われ、そのためには母乳中の有機塩素化合物濃度を低減する努力が必要である。しかし、母乳中の有機塩素化合物濃度は、食事よりも母親の脂肪組織からの流動の方が寄与率が高いため、低濃度の食品を選択するなど短期間の努力では濃度の低減は期待できない。母乳中の有機塩素化合物濃度を安全なレベルまで下げるには、早い時期から母親体内の曝露量を減らすことが肝要なため、アジアの途上国では早急に汚染対策を検討する必要がある。

おわりに

以上のべたように、野生の高等動物には、ヒトではみられない特異な汚染や生理機能があり、このことはヒト中心の環境観では生態系は守れないことを教えている。鯨や鳥の化学物質汚染がヒトとは無縁であるとする考え方は、もはや地球環境時代に馴染まない。「野生生物でみられる化学物質の汚染と影響は、ヒトへの警鐘である」、すなわち化学物質のリスクから生態系を守ることがヒトに対する安全性の確保にも繋がるという基本理念を育て、生態系本位の環境観を社会に定着させることが今後の大きな課題であろう。将来人間の健康に影響を及ぼす可能性がある問題として、野生生物の汚染や異常を考える必要がある。

また、先進国だけでなく途上国でも環境ホルモン汚染は顕在化しており、今後さらに深刻化することが予想されるため、地球環境問題の重要課題と位置づけ POPs 条約の締結等国際対応をすすめる必要がある。途上国の環境ホルモン問題を解決するには、先進国の国際協力や支援が不可欠であり、アジア地域においてわが国の国際貢献が問われることはいうまでもない。

文 献

- Anderson, E. (1993): Developing nation's chemical exports surge. Chemical and Engineering News, Aug. 2: 14-15.
- Aono, S., S. Tanabe, Y. Fujise, H. Kato and R. Tatsukawa (1997): Persistent organochlorines in minke whale

児の発育や成長に必要な成分が含まれている。また、母乳に含まれる長鎖不飽和脂肪酸は脳の発達に不可欠であり、母乳で生育した子どもは、人工乳を与えられた子供より知能が高いことを示唆したデータもある。これら成

- (*Balaenoptera acutrostrata*) and their prey species from the Antarctic and the North Pacific. *Environmental Pollution*, 98: 81-89.
- Colborn, T. and M. J. Smolen (1996): Epidemiological analysis of persistent organochlorine contaminants in cetaceans. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 146: 91-172.
- George, J. L. and D. E. H. Frear (1966): Pesticides in the Antarctic. In *Pesticides in the Environment and their Effects on Wildlife*, N. W. Moore (ed.): 155-167, *Journal of Applied Ecology* (supplement).
- Guruge, K.S., M. Watanabe, H. Tanaka and S. Tanabe (2001): Accumulation status of persistent organochlorines in albatrosses from the North Pacific and the Southern Ocean. *Environmental Pollution*, 114: 389-398.
- Iwata, H., S. Tanabe, N. Sakai and R. Tatsukawa (1993): Distribution of persistent Organochlorines in the oceanic air and surface seawater and role of the ocean on their global transport and fate. *Environmental Science and Technology*, 27: 1080-1098.
- Jones, P. D., D. J. Hannah, S. J. Buckland, P. J. Day, S. V. Leathem, L. J. Porter, H. J. Auman, J. T. Sanderson, C. Summer, J. P. Ludwig, T. L. Colborn and J. P. Giesy (1996): Persistent synthetic chlorinated hydrocarbons in albatross tissue samples from Midway Atoll. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 15: 1793-1800.
- Lahvis, G. P., R. S. Wells, D. W. Kuehl, J. L. Stewart, H. L. Rhinehart and C. S. Via (1995): Decrease lymphocyte responses in free-ranging bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*) are associated with increased concentration of PCBs and DDT in peripheral blood. *Environmental Health Perspectives*, 103: 67-72.
- Monirith, I. D. Ueno, S. Takahashi, H. Nakata, A. Sudaryanto, A. Subramanian, S. Karuppiyah, A. Ismail, M. Muchtar, J. Zheng, B. J. Richardson, M. Prudente, N. D. Hue, A. V. Tkalin and S. Tanabe (2003): Asia-Pacific mussel watch: monitoring contamination of persistent organochlorine compounds in coastal waters of Asian countries, *Marine Pollution Bulletin*, 46: 281-300.
- Nakata, H., S. Tanabe, R. Tatsukawa, M. Amano, N. Miyazaki and E. A. Petrov (1995): Persistent organochlorine residues and their accumulation kinetics in Baikal seal (*Phoca sibirica*) from Lake Baikal, Russia. *Environmental Science and Technology*, 29: 2877-2885.
- O'Shea, T. J. and S. Tanabe (1999): Persistent ocean contaminants and marine mammals: a retrospective overview. In *Proceedings of the Marine Mammal Commission Workshop Marine Mammals and Persistent Ocean Contaminants*, T. J. O'Shea, R. R. Reeves and A.K. Long (eds.): 87-92.
- Prudente, M., S. Tanabe, M. Watanabe, A. Subramanian, N. Miyazaki, P. Suarez and R. Tatsukawa (1997): Organochlorine contamination in some odontoceti species from the North Pacific and Indian Ocean. *Marine Environmental Research*, 44: 415-427.
- Shaw, S. D. (1998): Organochlorines and biomarkers of immune and endocrine effects in Pacific harbour seal and Northern elephant seal pups. Ph.D Thesis of Colombia University School of Public Health.
- Simmonds, M. (1991): Marine mammal epizootics worldwide. In *Proceedings of the Mediterranean Striped Dolphins Mortality International Workshop*, X. Poster and M. Simmonds (ed.): 9-19, Greenpeace International Mediterranean Sea Project, Madrid, Spain.
- Sladen, W. J. L., C. M. Menzie and W. L. Reichel (1966): DDT residues in Adelie penguins and a crabeater seal from Antarctica. *Nature*, 210: 670-673.
- Subramanian, An, S. Tanabe, R. Tatsukawa, S. Saito and N. Miyazaki (1987): Reduction in the testosterone levels by PCBs and DDE in Dall's porpoise of northwestern North Pacific. *Marine Pollution Bulletin*, 18: 643-649.
- Tanabe, S. (1999): Butyltin contamination in marine mammals -a review. *Marine Pollution Bulletin*, 39: 393-398.
- 田辺信介 (2002a): 環境省全国一斉調査の結果. *かんきょう*, 27: 9-11.
- 田辺信介 (2002 b): POPs によるアジア途上国の母乳汚染. *生活衛生*, 46: 229-235.
- Tanabe, S., H. Iwata and R. Tatsukawa (1994): Global contamination by persistent organochlorines and their ecotoxicological impact on marine mammals. *The Science of the Total Environment*, 154, 163-177.
- Tanabe, S., A. Ramesh, D. Sakashita, H. Iwata and R. Tatsukawa (1991): Fate of HCH (BHC) in tropical paddy field: application test in South India. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 45: 45-53.
- Tanabe, S., J. Sung, D. Choi, N. Baba, M. Kyota, K. Yoshida and R. Tatsukawa (1994): Persistent organochlorine residues in northern fur seal from the Pacific coast of Japan since 1971. *Environmental Pollution*, 85: 305-314.
- Tanabe, S., H. Tanaka and R. Tatsukawa (1984): Polychlorinated biphenyls, DDT, and hexachlorocyclohexane isomers in the western North Pacific ecosystem. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 13: 731-738.
- Tanabe, S., R. Tatsukawa, H. Tanaka, K. Maruyama, N. Miyazaki and T. Fujiyama (1981): Distribution and total burdens of chlorinated hydrocarbons in bodies of striped dolphins (*Stenella coeruleoalba*). *Agricultural and Biological Chemistry*, 45: 2569-2578.
- Tanabe, S., S. Watanabe, H. Kan and R. Tatsukawa (1986): Capacity and mode of PCB metabolism in small cetaceans. *Marine Mammal Science*, 4:103-124.