

POPs — 残留性有機汚染物質

ボー ヤンセン

スウェーデン スtockホルム大学

はじめに

スライド1

皆さん、こんにちは。私の名前はボー・ヤンセンです。スウェーデンのストックホルム大学応用環境調査研究所の教授を務めています。講演にご招待いただいたことを、組織運営者の方々に感謝いたします。私は分析化学者として教育を受け、環境汚染物質に関心を持つようになり、ソレン・イェンセンと共に研究を行いました。1960年代中頃、イェンセンが環境中のサンプルからポリ塩化ビフェニール類（PCBs）を発見した頃のことです。その後も長期にわたりハロゲン化合物の研究を続けましたが、研究現場での活動からは数十年前に退いて、現在でもその弱さが指摘されることが多い化学の研究と管理業務との間の橋渡しの仕事を行っています。私の主要な任務は、化学物質に関する研究の面で欧州委員会および UNEP などの国際機関や国家機関をサポートすることです。本日は、内分泌攪乱化学物質であることが確認されている、または疑われているいくつかの残留性有機汚染物の概要についてお話します。

リスク、ハザード、および起こりうる曝露

スライド2 リスク = ハザード x 起こりうる曝露

化学物質に起こりうる曝露は、ヒトと環境の両方にリスクを及ぼす可能性があり、これらのリスクはリスクアセスメントと称されるプロセスにより推定されます。ある化学物質に関連するリスクは、このように化学物質（ハザード）の特性とそれに起こりうる曝露の関数で得られますが、残念ながらこれらの要素は何れも測定することが困難です。

影響については通常は実験用動物を用いて調査し、個体差を補うために不確定性または安全性の要素が用いられます。ごく少数の動物種について調査され、調査結果を他のすべての動物種に外挿し、不確定性/安全性要素を加えることにより種差を補います。これらの要素はかなり独断的であり、常に最悪状況を考慮しているわけではなく、また時には過剰に保護されている場合があります。我々が気付いていない影響が他にも存在する可能性もありますが、気付いていない影響については研究は行われておらず、当然、そのような影響を防ぐことが不可能なのは明らかです。内分泌攪乱が良い例です。数年前まではあまり注目されていなかった影響であり、内分泌攪乱の影響がどのような結果を生み出すかは今も正確には分かっていません。

起こりうる曝露は分析化学の手法により測定することが可能です。これらの測定の大半は、大気や食品中の化学物質濃度といった外部の曝露の測定をおこなうものであり、その測定値はサンプリングを行った場所と時間の状況を示しているに過ぎません。総合的な曝露の実体を知るためには、これらの測定を数多く実施して、長期にわたり全ての曝露の経路をカバーすることが必要です。1つの方法としては、曝露された生物や調査対象とする物質に影響を受けた臓器における濃度、すなわち体内や標的臓器における分量を測定することですが、常に可能であるというわけではありません。

もう1つの方法というか、測定を補うための方法は、起こりうる曝露を予測するためのモデルを使用することです。これらのモデルは、環境中の化学物質分布に関する以前に行われた測定と計算から得られた知識に基づいています。モデルを使用すると、かなりうまく曝露を予測することができますが、異なる状況では、試算が実際の値からかけ離れる可能性があります。従って、モデルは注意して使用する必要があり、多くの場合にはモデルと測定とを併用することが起こりうる曝露を推定する最も良い方法です。

特定の化学物質に起こりうる曝露を判断する重要な要素は、使用量、使用パターン、およびその物質の特性です。化学工場で中間物として使用されるだけの少量の化学物質よりも、広範囲に消費者が使用する大量の化学物質のほうが、ヒトに対して高い確率で曝露を生じさせることは容易に理解できるでしょう。蒸気圧や水溶性といった化学物質の特性のいくつかは、化学物質の環境中の分布を決定しています。生きた生物と相互に作用することが可能となるには、化合物が細胞内に侵入する必要があり、いくつかの場合には分子の大きさと形状が細胞内へ侵入できるかどうかを決めています。

PBTs、vPvBs、および POPs

スライド3 PBTs、vPvBs、および POPs

分解速度が遅い化学物質はしばしば残留性 (P) 化学物質と称されます。この用語は金属などの元素に関連するもので、たいいていの有機物質は遅かれ早かれ分解される傾向があります。しかし、残留性という用語は、環境中での分解が遅い有機物質にも使用され、残留性有機物質は、たとえ排出が控えめであっても、高濃度に蓄積する可能性があります。また、寿命の長いこれらの物質は様々な拡散機序（例えば風、水流、および生物相の移動）により広範囲に分散する可能性があり、その供給源からはるかに離れた場所にも有害作用を生じさせることがあり、従って、観察された影響をこれらの発生源と結び付けることが困難なことがあります。影響を受けた生物も多数の化学物質に曝露されており、影響を特定の物質に結び付けることも困難です。その影響に関与している複数の化学物質が、相加作用や多かれ少なかれ何らかの作用を及ぼしている可能性があるからです。

親油性物質として知られている脂溶性の高い化学物質は、平衡を維持した状態を保ち、周囲の媒体内よりも高濃度で生物の脂質中に存在します。この濃縮プロセスは、生物濃縮として知られており、生物が餌とする食物を介した間接的な曝露により増幅されることや周囲の媒体からの汚染が加わることがあります。これらの複合した濃縮は生体内蓄積性 (B) として知られており、食物網における2つのレベルの濃度差はしばしば生物学的濃縮と呼ばれます。

1つの毒性 (T) 化合物が1つ以上の有害作用を生物に及ぼしており、そのような影響が数多く報告されています。いくつかの影響には、それ以下では影響を発現しない濃度、すなわち域値があると信じられています。一方、他の影響については、非常に低濃度でも影響が発現すると考えられています。しかし、一般に影響 (リスク) はその物質の潜在力と曝露により決まります。

従って、残留性、生体内蓄積性、毒性を高い値で併せ持つ化学物質（いわゆる PBT 化学物質）には特別な注意が必要です。このことは、いくつかの殺虫剤については1960年頃に既に分かっていたことで、レイチェル・カーソンの著書「沈黙の春」等によって広く知られるようになりました。以来、いくつかのハロゲン化殺虫剤を含め、複数の化学物質が世界の多くの地域で禁止されましたが、これらの特性を併せ持つ化合物が現在も（意図的または意図せずに）生産されています。

ここ数年、非常に残留性が高く、且つ、非常に生体内蓄積性が高い化学物質（いわゆる vPvB 化学物質）に特別な関心が寄せられています。その理由としては、化合物に毒性作用が全くないとは決して言えないからです。これまで研究対象とされたことのない影響や現在分かっていない影響が存在する可能性があります。内分泌攪乱はその良い例で、これまでは安全であると考えられていた化合物の影響を内分泌攪乱として現在観察しています。ある程度の期間にわたり使用されている vPvB 化学物質に起因して新たな影響が発見されても、その化学物質は既に環境中に拡散しており、その場に長期間とどまり、環境中から回収することは恐らく不可能であるため、何もすることができません。従って、予防措置として、スウェーデンの政府は生産物への vPvB 化学物質の使用を禁止することに決定しており、欧州連合で討議されている化学物質に関する新たな方針でもこの種の物質に特別な注意を払っています。

PBT 化学物質に関連したこのような特殊な問題により、PBT 化学物質の使用と排出を減少させるための複数の国際協定が生まれています。オスロ・パリ委員会 (OSPAR) の任務は北東大西洋域を保護することであり、その枠組の中で多数の化学物質について PBT 特性の有無が調査されています。この種の物質のいくつかには高い優

先順位が割当てられており、その目標は、排出を全面的に停止し、環境中の濃度を影響の出でこない環境濃度に戻すことです。しかし、この委員会における合意には法的拘束力がなく、加盟国は、主にこの種の化学物質の生産と使用に利用できる最善の技術を用いることにより、目標に到達するための努力をしています。

POPs とは、PBTs の下位分類の 1 つである Persistent Organic Pollutants (残留性有機汚染物質) の頭文字であり、この種の化学物質に関する国連の枠組みでは、2 つのプロトコルが承認されています。何れのプロトコルも発効に必要なすべての加盟国による批准がなされていませんが、1、2 年以内に発効するものと期待されています。2 つのプロトコルとは、POPs に関する UN-ECE LRTAP プロトコルと UNEP POPs プロトコルです。次に両プロトコルについて説明いたします。

UN-ECE LRTAP プロトコル、POPs プロトコル

スライド 4 UN-ECE の地図

国連欧州経済委員会 (UN-ECE) は第二次世界大戦後に設立され、ヨーロッパ、北アメリカ、および中央アジアの 55 の加盟国で構成され、カナダと旧ソ連も領域に含まれています。このスライドで示すように、その領域は北半球の大半をカバーしています。

スライド 5 LRTAP における POPs の定義

この組織には環境政策委員会が設けられており、同委員会が LRTAP の略称で知られる長距離越境大気汚染プロトコルを担当しています。このプロトコルは既に 1979 年に承認され、1983 年に発効し、その傘下でいくつかのプロトコルが承認され、そのうちの一部は批准されています。1998 年に残留性有機汚染物質 (POPs) に関するプロトコルが承認され、来年発効するものと予想されています。このプロトコルの目的は、POPs の放出、排出、および損失を管理、削減または排除することです。

この ECE プロトコルでは、「有機物質のうち、(1) 毒性を有し、(2) 残留性があり、(3) 生体内蓄積性があり、(4) 長距離にわたり国境を越えて大気により拡散して滞積する傾向があり、(5) その供給源に近い地域や離れた地域で人の健康に有害または環境に悪影響を生じさせる可能性が高いもの」を POPs と定義しています。作業部会は、主に北東大西洋に関する OSPAR やバルト海に関する HELCOM などの海洋条約から選んだ 107 種の候補となる物質に優先順位をつけました。まず、大気中における半減期が 2 日未満の化合物、高い生分解性を有する明らかな証拠がある化合物、および揮発性が高い化学物質は除外されました。この段階で 20 種の化合物が除外されました。残りの化学物質のうち、70 種は生体内蓄積性と毒性に基づいた採点法でランク付けされ、残る 17 種はデータの不足のために対処できませんでした。ランク付けされた 70 種のうち、最高得点の 17 種について、リスクアセスメントのための再検討を行い、同作業部会は最終的に 13 種の物質または物質群にプロトコルに含める際の優先性を与えました。最終リストは若干違っており、提示された化合物のうちの 1 つが消え、3 つが加えられていますが、変更の理由は分かりません。このプロトコルでは、これらの化学物質は、どんな種類の活動が同意できるかによって、3 つの異なるリストに分けられました。

スライド 6 UN-ECE、付属文書 I

最初のグループには、排除、すなわち生産と使用の禁止が予定されている物質が含まれていますが、この表に示されている通り、特に DDT と PCB については、免除規定が設けられています。他の免除規定はかなり軽微であり、主に経済が移行期にある国を対象としたものです。

スライド 7 UN-ECE、付属文書 II

この 2 つ目のリストには、使用の制限が予定されている物質が含まれており、ここにも DDT と PCB が記載されています。マラリアや脳炎のような疾患から健康を守るための適当な代替物が得られるまでは、DDT の使用が許されます。PCB の生産は、経済が移行期にある国で 2005 年まで許され、液体中における PCB の使用は、2010 年末には排除され、経済が移行期にある国では 2015 年末に排除されることとされています。欧州連合の法令では、PCB という用語にはポリ塩化テルフェニルおよび各種 Ugilec が含まれますが、他のいくつかの組織ではこれらを含めておらず、この問題については現在再考が予定されています。工業用ヘキサクロロシクロヘキサン (HCH) は、複数の異性体の混合物であり、化学物質の製造における中間生成物としてのみ許されています。一方、生物学的活性を有する異性体であるリンデンは、いくつかの特定の用途に関してのみ許可されることとなるでしょう。

スライド 8 UN-ECE、付属文書 III

3 つ目のリストでは、様々なプロセスで副産物または反応産物として生産されるために排除することが困難な 3 種の物質が指定されています。このプロトコルでは、プロトコル加盟国は、これらの物質の年間排出量を基準年における排出量から削減することを義務づけています。基準年は通常 1990 年であり、加盟国はこれらの目標に到達するための最良の方法を採用することが必要です。廃棄物焼却については、大気中への放出量に関し、遵守すべき最大値が設けられています。

LRTAP POPs プロトコルに他の化合物を含めるための討議が現在進行中で、討議中の化学物質とはペンタブロモジフェニルエーテル、リンデン、Ugilec、ポリ塩化テルフェニル、ジコホール、ペンタクロロベンゼン、およびポリ塩化ナフタレンです。また、塩素化パラフィンとペンタクロロフェノールも協議事項とされています。

UNEP-POPs、ストックホルム条約

スライド 9 UNEP

国連環境計画 (UNEP) は、ケニアのナイロビに本部を置いています。化学物質を担当する部門 (UNEP CHEMICALS) の事務局はスイスのジュネーブにあります。1995 年に UNEP の管理理事会は、複数の国際的プログラムに意見を求めて POPs の迅速なアセスメントに着手しました。まず、残留性有機汚染物質の短いリストの作成に着手し、その際、残留性有機汚染物質については UN-ECE によって協議されました。1997 年に、UNEP は、UN-ECE プロトコルに盛り込まれる化学物質の下位分類を構成する 12 種の特定の POPs から開始する国際的活動の実施に向け、国際的な法的拘束力を有する手段を取り決めるべきであることを決定しました。UN-ECE のプロトコルには含まれているが UNEP の優先順位リストには含まれていない化合物は、ヘキサクロロシクロヘキサン、クロルデコン、多環式芳香族炭化水素、ヘキサブロモビフェニルであり、これらが除外された理由は分かりません。協議の結果、本年初頭にスウェーデンのストックホルムで条約の署名が行われ、現在この条約はストックホルム条約として知られています。また、これらの物質は 3 つのグループに分割する必要がありました。そのうちの最初のグループを次のスライドでご覧頂きます。

スライド 10 スtockホルム条約、付属書 A

締結国は、付属書 A に記載された物質の生産、使用、および輸出入を禁止する、あるいは排除するために必要な法的措置および行政措置をとることとなります。エンドリンとトクサフェンを除き、締結国は、主に殺虫剤として使用するすべての化学物質について、いくつかの特別の免除を受けることが可能です。これらの免除は登録簿に記載され、国民に公開されます。製品や物品中の意図していなかった微量混入物質として生じる化学物質の分量および条約が発効する以前に生産された物品中の分量は含まれていません。これら化学物質の閉鎖系および生産現場に限定した中間生成物としての使用については、人間あるいは環境に影響を及ぼす著しい分量が予測されない場合は、本条約では扱われていません。

使用中の PCB の排除については特別な注意が払われており、「締結国は、0.05%を超える PCB を 5 リットル以上含んだ使用済みの装置を同定し、表示し、除去し」、さらに「0.005%を超える PCB を 0.05 リットル以上含んだ使用済みの装置を同定し、PCB を除去するよう努力しなければならない」とされます。締結国は、PCB 排除の進捗状況について 5 年毎に報告する必要があります。

スライド 11 ストックホルム条約、付属書 B

各締結国は付属書 B に記載された化学物質の生産と使用を制限しなければなりません。現在のところ、付属書 B には DDT だけが記載されています。DDT の使用目的として許されているのは、疾患媒介性生物の駆除に使用するジコホルの生産および中間生成物としての生産です。DDT を生産または使用している締結国は、生産または使用を通知しなければならず、国民が閲覧可能な登録簿に記録されます。DDT を使用している各締結国は、使用量に関する情報を 3 年ごとに報告し、適切な代替となる製品、方法、および戦略の導入に努めなければなりません。

スライド 12 ストックホルム条約、付属書 C

各締結国は付属書 C に記載された各化学物質の人為的発生源から生じる放出総量を削減するための複数の措置をとることとし、継続的削減および実行可能であり完全な排除を目標としています。措置には、行動計画、発生源の明細記録、代用品の普及、および利用可能な最良の技術の利用が含まれます。

ストックホルム条約に含まれる 12 種の化合物に、すべての残留性有機汚染物質が含まれているわけではなく、条約の協議中には特別作業部会が他の化学物質を将来条約に含めるための基準について取り組んでいました。特別作業部会の取り組みの結果は条文最終稿の付属書 D に示されており、何れの締結国も付属書 A、B、または C に記載すべき化学物質を提案しても良いと規定しています。この提案には、記載を提案する化学物質の名称、および残留性、生体内蓄積性、長い距離にわたる拡散性、有害作用に関するデータが含まれている必要があります。また、同作業部会は、条約にさらに化学物質を加える際のスクリーニング基準を決定しており、その結果をこのスライドに示しています。化学物質を条約に加える場合、化学物質が次のスクリーニング基準を満たす必要があります：

スライド 13 ストックホルム条約、残留性

残留性：半減期が水中で 2 カ月、土壌または沈殿物中で 6 カ月を超えているか、または化学物質の残留性を証明するモニタリングデータなどの他の証拠があること。且つ、

スライド 14 ストックホルム条約、生体内蓄積性

生体内蓄積性：水生種における生体内蓄積係数が 5000 を超える、または log Kow が 5 を越えること。他の生物種において高い生体内蓄積性があること、高い毒性または生態毒性があることもこの基準を満たす場合があります。且つ、

スライド 15 ストックホルム条約、長距離拡散性 (LRT)

長距離にわたる環境中拡散性：化学物質がその供給源から離れた場所で高濃度で検出されているか、大気、水、および移住性の生物種を介した長距離拡散を示すモニタリングデータがあること。また、環境中の動態特性またはモデルによる予測で、長距離拡散性が認められることを証明していること。且つ、

スライド 16 ストックホルム条約、有害作用

有害作用: ヒトの健康または環境に損害を与える可能性があることを示す証拠、または毒性、および生態毒性データがあること。

これらすべての基準が満たされる場合は、データに基づいてリスク調査を実施する必要があります。調査結果から、当該化学物質がヒトの健康や環境に著しい影響を及ぼす可能性が高いと判断される（また、判断を止めるべき科学的な確実性がない）場合は、条約締結国から社会経済学的考察に関する情報が集められます。その次の段階では、当該化学物質について、適用可能な管理措置の分析を含むリスク管理評価が行われます。最終的に条約締結国が参加する協議において、予防的な観点から、当該化学物質を付属書 A、B および/または C に記載するかどうかが決まり、関連する管理方法が指定されます。

このプロセスはかなり複雑に見えますが、基準を満たしている化合物は数多く存在すると思われます。ですから、プロトコルに新しい物質を加えることがどんなに困難であるかを調べるのはとても興味深いでしょう。

スライド 17 スtockホルム条約、調査勧告

ストックホルム条約の 11 条は、締結国は POPs に関する研究、開発、およびモニタリングを奨励または実施することとするとしています。これらの活動の分野には、条約に記載された化学物質の供給源、モニタリング、動態、影響、社会経済学的影響、削減、保有量の記録が含まれます。従って、日本政府が現在 POPs の新しいモニタリングプログラムを開始しようとしているのを伺っていますが、大変心強いことだと思います。

条約の有効性の評価は、発効後 4 年が経過してから始められ、その後は定期的実施されることとなります。締結国が参加する会議では、最初の会合で、条約に記載された化学物質の存在に関するモニタリングデータを会議に提出するための取り決めの作成に着手することとされています。比較可能なモニタリングデータの生成は容易ではありません。特に地理的および時間的傾向を明らかにするために比較を行う場合は、生成が困難です。このような比較では、小さな差が見られるデータを比較しなければならず、従って、分析精度が高くなければならないことを意味します。高い分析精度を得るための最も効果的な方法は、1 つの研究施設がすべての分析を行うことであると考えられますが、これでは世界の様々な場所に POPs 問題の認識を効率的に広めることにはならないでしょう。一部の地域では分析技術を改善するために訓練活動が必要と考えられ、分散システムを選択するにあたっては、データの比較が可能かどうかを調査するために各研究施設間の相互検定を実施する必要があります。

残留性毒性物質の地域別評価

スライド 18 RBA-PTS

条約の有効性の評価は、条約発効前の状況を基準にする必要があります。そのため、UNEP は、地球環境ファシリティーから経済的支援を受けて、「残留性毒性物質の地域評価」と称されるプロジェクトを開始しています。このプロジェクトの全体的な目的は、残留性毒性物質による損害と脅威を地域毎に比較調査し、地域レベルで化学物質関連の環境問題を評価して個々の環境問題に優先順位を付け、最も重要かつ緊急な問題に集中して対処することです。12 の地域報告には、環境中の残留性毒性物質の発生源に関するアセスメント、それらの濃度、生物相への影響、国境を越える拡散性、および問題の根源的な原因と問題に対処する能力に関するアセスメントが含まれる予定です。この地域的な分析の結果がまとめられれば、世界規模での優先順位の評価が得られるでしょう。

スライド 19 RBA-PTS 地域

RBA-PTS プロジェクトが進められている 12 の地域をこのスライドは示しています。プロジェクトの範囲は、現在ストックホルム条約によりカバーされている 12 種の POPs よりも若干広く、その理由は、これらの地域の

何れかに問題の大きい残留性化合物があるかどうかを明らかにしようと試みているためです。別の方法で対応することが予定されている北極と南極を除き、すべての地域に専門家チームがおり、これらのチームに対しては、付属書 A、B または C に現在記載されている 12 種の化学物質よりも多くの化学物質を対象とするよう奨励しています。研究は進行中で、現在はデータ収集の段階にあります。このプロジェクトは、ストックホルム条約の有効性を評価する際の優れた基礎を提供すると共に現在まだ理解が十分でない分野を明らかにするでしょう。これまでのところ、POPs に関する研究は、大半が OECD 加盟国で実施され、ある程度が北極地域で行われていますが、今後は他の地域で活発に活動することが必要となるでしょう。

また、UNEP はインターネットをもとにした複数のディスカッショングループを立ち上げており、そこでは環境中の化学物質のモニタリングが議論されています。当初は、主に POPs を中心に議論が行われますが、他の化学物質にも議論を進めていく予定です。また、UNEP は環境中の化学物質のモニタリングに関する国際会議を組織できないか検討しており、現場で活動している方たちには国際的な場で自分たちの調査結果を交換する良い機会がないため、非常に歓迎されるでしょう。

内分泌攪乱化学物質としての POPs

POPs の内分泌攪乱作用について話をするように依頼されてはいませんが、私の講演は内分泌攪乱作用に関する会議の最初の講演であるため、この視点から見た POPs に関する観察結果について短くお話して私の講演を終えたいと思います。最近、欧州委員会は、「内分泌攪乱における役割をさらに評価するための優先物質リスト」を発表しており、このリストには UNEP と UN-ECE の条約に記載されている POPs が含まれています。

スライド 20 POPs の内分泌攪乱作用 (1)

ドリン類 (アルドリン、ジエルドリン、およびエンドリン) は、環境とヒトの両方で潜在的内分泌攪乱化学物質であることが確認されています。ヘプタクロルは、野生生物の内分泌系を攪乱することは確認されていませんが、ヒトの内分泌系を攪乱する可能性があります。クロルダンとクロルデコンは、潜在的環境中内分泌攪乱化学物質であり、ヒトではホルモン作用をします。マイレックスとトクサフェンは、環境中でホルモン系と相互作用する可能性があり、ヒトでは内分泌攪乱化学物質に分類されています。

スライド 21 POPs の内分泌攪乱作用 (2)

臭素化および塩化ビフェニル類、ポリ塩化ダイオキシン類、およびポリ塩化フラン類は、ヒトのホルモン系と相互作用することが分かっていますが、環境作用については分類されていません。ヘキサクロロベンゼンは、ヒトの内分泌系と相互作用することが確認されていますが、野生生物では確認されていません。DDT は環境中の生物とヒトの両方に多数の内分泌作用を誘発します。HCH 異性体の 1 つであるリンダンは、ヒトでは内分泌攪乱化学物質として分類され、野生生物でも潜在的内分泌攪乱化学物質と分類されています。PAHs の作用は、環境またはヒトへの影響については分類されていません。

このように、POP 物質の多くも内分泌系に有害です。このことが、これらの物質の放出を可能な限り削減しなければならない理由の 1 つであり、ストックホルム条約が世界的規模で状況を改善できることが期待されません。