

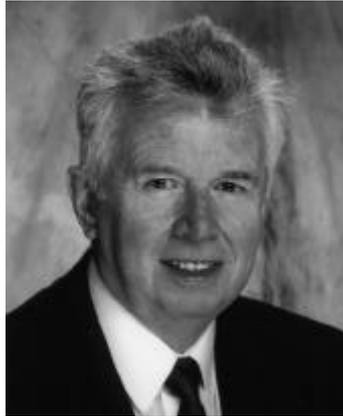
エコ・ケミストリー
環境保全と化学物質利用の調和に向けて

カナダ・トレント大学環境資源研究所教授
カナダ・トレント大学環境モデリングセンター長
ドナルド・マッケイ教授

Eco-Chemistry
Achieving Harmony Between Chemical Use
and Environmental Stewardship

Dr. Donald Mackay

Professor, Environmental and Resource Studies, Trent University Canada



略歴

- 1936年 スコットランド グラスゴーで生まれる
1958年 グラスゴー王立技術大学で理学士号取得（応用化学）およびARCST取得（化学技術）
1961年 グラスゴー王立科学技術大学で博士号取得（化学工学）
1961～64年 トロント大学化学工学・応用化学部にてカナダ学術研究会議の博士研究員として、O. トラス教授と衝撃波管を共同研究
1964～67年 英国ICI社（本社ダーラム）重有機化学部にて化学技術研究員
1967～95年 トロント大学化学工学・応用化学部教授
1995年～現在 トレント大学（所在地ピーターボロー）環境資源研究所教授
トレント大学環境モデリングセンター長。

所属団体：

- オンタリオ技術士会会員
- カナダ化学会およびカナダ化学技術協会会員・フェロー（1972年）
- アメリカ化学会会員
- 環境工学教授会会員
- 国際五大湖研究協会会員

受賞歴：（1989年以前は省略）

- 1990年 国際五大湖研究協会より The Chandler-Misener Award を受賞
1990年 ウォータルー大学科学振興財団より Francis W. Karasek Award を受賞
1990年 Founders Award SETAC を受賞
1991年 『Journal of Great Lakes Research』編集者賞を受賞
1992年 トレント大学より環境学 McLean 客員教授の称号を受ける。
1993年 カールトン大学理学部より Varian Lecturer を受賞
1998年 国際学生技術研修協会より Award in recognition of outstanding service を受賞
2000年 エルゼビア・サイエンス社と SETAC の協賛による Mellanby Review Award を受賞
2001年 オンタリオ PE 協会金賞を受賞

出版活動：

これまでに全 520 点を刊行、うち 400 点以上が公式の目録に登録された。

エコ・ケミストリー
環境保全と化学物質利用の調和に向けて

2001年11月16日

第22回本田賞授賞式記念講演

2001年本田賞受賞者

カナダ・トレント大学

トレント大学環境資源研究所教授

トレント大学環境モデリングセンター長

ドナルド・マッケイ教授

エコ・ケミストリー 化学物質利用と環境管理の調和に向けて

2001年11月16日 第22回本田賞授賞式記念講演

カナダ・トレント大学
ドナルド・マッケイ教授

謝 辞

このたび本田賞という栄えある賞をいただきましたことに深く感謝申し上げます。私としましては、マッケイ個人ではなく、40有余年に渡り、私を支えてくれた数多の研究者仲間を代表して、この榮譽にあずかりたいと思っております。この場をお借りして本田財団理事長の川島様、常務理事の井上様、事務局長の石原様をはじめとする関係者の方々に心から御礼申し上げたいと思います。

また、私はカナダ政府、とりわけNSERC（自然科学・工学研究所）から長期的、継続的な支援を受けることができ幸運でした。カナダ政府は良識ある政府です。責任ある公的補助金の配分と、必要最小限の行政手続きと指導との間で巧みにバランスをとり、研究者が自由なアイデアを試してみる機会を与えてくださいました。アイデアの多くは失敗に終わりましたが、何らかの成果をお見せできる日の来ることを願っています。

さらに、トレント大学CEMC（カナダ環境モデリングセンター）における仲間と私の研究を長くサポートしてくださっている化学系企業の皆様にも感謝いたします。専門企業の方々との交流は、財政面のみならず、化学と環境の未来を担う学生にとって得難い機会となっています。「エコ・ケミストリー」の実現を目標とするセンターの研究、とりわけ商用化学物質の環境内挙動に関する研究は、皆様のご支援なくして確たる成果を上げることは叶わなかったでしょう。

最後に、私のために労をいとわなかった在日カナダ大使館職員の方々、とりわけ金子功氏とヒックス博士（参事官）にお礼申し上げます。彼らは本田賞候補選定に当たり数々の推薦状を集めてくださいました。終わりに、推薦状の筆をとり、私をご推挙くださった推薦者の方々にも感謝いたします。

化学技術と人間性あふれる文明社会

本田財団の活動理念は「人間性あふれる文明社会の創造」という本田財団創設者の故本田宗一郎氏の提唱された概念に存します。ホンダグループは、高品質な製品により今日の成功と名声を獲得しました。「質の高さは内在的な価値」という本田技研の信念が、環境や社会のレベルに拡張されたものこ

そ、本田財団が提唱され、その実現に向けて幅広く努力されている「エコ・テクノロジー」の概念です。質の高い技術が社会全般に計り知れない恵みをもたらすという考え方に、私も心から共鳴いたします。そのような思想は、私の全研究生活を導いてきた信条に他なりません。

これからの時間、私は技術の有効利用について、特に人類の繁栄、健康と福祉に対する化学物質の利用についてお話しいたします。いわゆる「エコ・ケミストリー」です。技術の応用について語るとき、化学分野での経験は、とても興味深い側面を持っています。これまで人類は化学物質の扱いに関して多くの過ちを犯してきました。多くの過ちは、化学物質の挙動や、化学物質が生態系に共存する人間や他の生命に及ぼす影響に関する無知や不十分な知識に起因しています。残念なことに、いまでも多くの人々が化学物質や化学技術に不信を抱いています。そこにはもっともな理由もあります。彼らは農薬に懐疑的ですから、高いお金を出してでも低農薬「有機」野菜を買い求めます。化学物質を規制あるいは撤廃せよとの運動も激しくなっています。そうしたなか、国連は今年、12種類の化学物質の製造と使用を禁止する決議を採択し、地味ながら大きな意味を持つ一歩を踏み出しました。

地球上ではこれまでに約2千万種の化学物質の存在が確認されています。そのうち5万から10万の物質は商用生産されています。現在カナダでは約2万4千種の化学物質の使用が認められています。私のところでも、化学物質の評価と有害性の診断、必要な規制の適用、なるべく環境に優しい安全な物質への代替が大きな課題となっています。

21世紀を迎え、私たちの化学物質に関する知識とその環境内での挙動に関する研究は大いに発展を遂げています。私がこの場で皆さんにお伝えしたいことは、過去と同じ過ちを繰り返してはならない、という点に尽きます。私たちは、化学物質の有益な性質をもっともっと解明する必要があります。しかし、それと同時に、使い方によっては環境や人類、他の生物たちに害を与える可能性があることを十分に理解しておく必要があります。これが「エコ・ケミストリー」の本質を規定する考え方です。

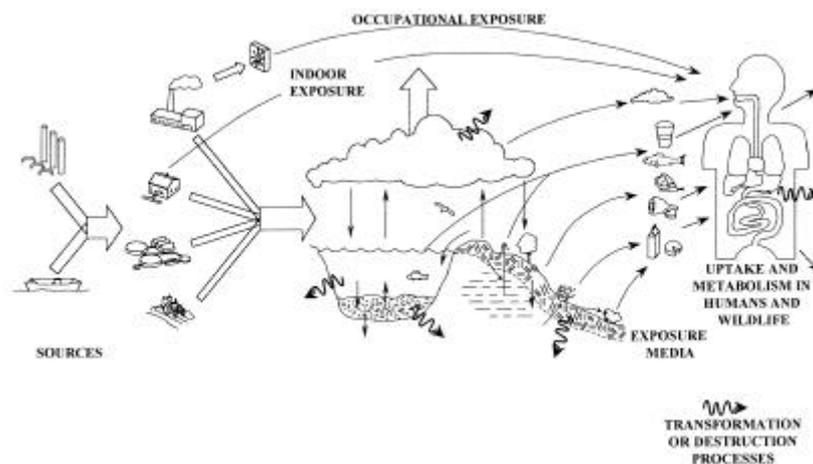


図1. 環境内における化学物質のたどる過程

図1をご覧ください。これは化学物質の辿る過程を私の観点で示したものです。ここには化学物質の取り込みと生成に始まり、環境へ放出され、最終的に空気や水、食べ物、そして私たちの体内に吸収されるまでの過程が図解されています。私たちは、この全過程を定量的に予測する必要があります。この予測を困難にしているのは、物質ごとに挙動が異なり、優先的に選ばれる過程がそれぞれに違っている事実です。

「エコ・ケミストリー」の基本的な使命は、生命が地球環境上でよりよく暮らせるよう、化学物質を賢く利用できるような新しい化学環境技術(エコ・テクノロジー)を設計することにあります。その意味で、自動車エンジンの設計と環境技術の設計には多くの共通点があります。ホンダの優秀なエンジニアが新しいエンジンを設計するとき、機能単位で部品を作るとは思いますが、全体として故障がないように、しかもなるべく小さく経済的な製品を作ろうとします。これが可能なのは、エンジン稼働時の応力が付加される状態で、各部品がどのようにふるまうかをエンジニアが十分に理解しているからです。各部品の挙動は、応力とひずみの関係、電気信号の伝播、ガソリン燃焼時の化学運動プロセスのかたちで数学的に表現することができます。エンジンを改良する場合もそうです。改良が可能なのは、全プロセスを完全かつ定量的に解析し、改良の効果が予測および検証可能で、なおかつ実現可能な場合だけです。

初期の航空機は、設計と改良の試行錯誤の結果として製造されましたが、現在ではコンピュータを使って設計することができます。飛行の科学が完全なものとなれば、空飛ぶ試作機が出現する日も近いでしょう。

環境内における化学物質の使用法を設計する際も、設計原理は同じです。化学物質の負の効果を最小化し、最大限の効果を引き出すためには、化学物質の挙動を化学物質運命のかたちで数式化し、シミュレーションを通じて挙動結果を予測します。そのためには、図1における質量、濃度、流量を数値で表現する必要があります。

20世紀、安価で高速なコンピュータ処理が普及したおかげで、化学エンジニアたちは、化学施設内に実験環境を作り、そこで化学物質の挙動シミュレーションを使って実環境での物質挙動を予測する高度な技術を開発しました。実験環境は、ホンダのエンジンと同じように特定の状態で機能するように設計された容器やパイプ、ポンプなどで構成されています。しかし、地球環境は人間が設計したものではありません。ひとくちに環境といっても、それは大気、海洋、土壌、そして常に変位を続ける有機組織体が構成する複雑な構造体です。このような複雑なシステムにおける化学物質の挙動予測は、非常に困難な仕事でしたが、過去数十年の飛躍的な進歩の結果、現在では高い精度で挙動を予測できる技術が確立されています。ですから「エコ・ケミストリー」の原理に忠実でありさえすれば、過去の失敗は繰り返さなくて済むのです。

「エコ・ケミストリー」にとって最大の課題は、化学物質の利用と管理に関する社会的コンセンサスづくりです。現代社会には、その両極に傲慢な態度が存在します。ひとつの極端な態度は、化学技術の犯した過ちを、技術の進展を抑制し、過去へ復帰することで解決しようとする、アンチ化学ともいえるべき運動です。彼らは化学物質一般、その製造に従事する者をおしなべて悪と見なします。私はそうした考え方を独善的だと思います。現在の地球人口を考えれば、過去に戻ることは不可能です。現在の人口と密度を維持するには、最低限の農薬を使わなければ十分な食料を確保することができません。健康や衛生の面で殺生剤や医薬品を使わなければ、現代人が要求する生活水準を満たすことはできません。アンチ派の対極には、目先の利益のために環境から搾取することしか頭にない傲慢な人たちがいます。彼らにとって樹木は伐採し、木材として売るための存在であり、動物や魚は人間に食べられるための存在に過ぎません。化学物質を大量かつ高濃度で使っても、人間を取り巻く環境は広大なので、いずれすべてが薄まり、何の問題も起こらないと考えているようです。過去の過ちの多くはこうした独善的な考え方に起因しています。答えは両極端の中間にしかありません。つまり、使ってよい物質と悪い物質を峻別し、環境保全に背かない方法で利用していく方法しかないのです。こうしたバランスのとれた方策こそ、「人間性あふれる文明社会を築く」という本田宗一郎さんの夢を実現に近づけるものと信じます。

このスピーチでは、化学物質運命のシミュレーションと予測方法の実例をお見せしながら、「エコ・ケミストリー」の実際をご紹介します。その上で、「エコ・ケミストリー」が「エコ・テクノロジー」に不可欠な要素技術部分として重要な役割を果たすには、どのように化学物質を利用すればいいかについて、私の考えを述べたいと思います。その前に、まず化学物質の歴史に関する私の個人的見解をお聞き願えるでしょうか。

化学物質の歴史に関する私見

1970年頃、カナダ領の北極圏で石油とガスの生産計画が提案され、原油の流出による北極圏の生態系への影響が懸念され始めました。私は石油化学系の会社にいたので、石油とガスを構成している炭化水素の性質をよく知っており、すぐさま専門的な研究に着手したのですが、結果的にその後20年間、この研究に明け暮れたのです。その間、同僚と私は、石油の油層部分がどのように移動し、どれくらいの速さで蒸発、融解、分散、乳化するかを予測する方法を開発しました。また場合によっては、流出した原油を燃焼させるか、家庭用の中性洗剤に使われているのと同じ界面活性剤で水と分離させると効果的であることを証明する仕事に携わりました。この時代に開発した予測方法は、現在でも広く利用されています。1988年、今後大きな原油流出事故は起こらないこと、私の生存中に北極圏で石油の生産や輸送は行われなことを確信できたので、私はこの分野の研究をやめました。ところが、1989年3月に石油タンカー「エクソン ヴァルディーズ号」が原油流出事故を起こし、現在はアメリカのブッシュ大統領が北極圏に石油埋蔵庫の建設を計画しています。どうも私自身は将来予測が下手なようです。

研究生活の中で私は次のことを確信しました。いつ、どこで原油流出事故が発生するかは予測できないけれど、事故後の原油の挙動については予測することが可能だ、と。安くて高速なコンピュータのおかげです。同時に、私は、この予測技術を応用すれば、原油よりも有害な農薬などの化学物質の挙動予測も可能になるという確信も得ました。そして、この確信を支えに、その後、現在に至るまでの25年間、予測技術の研究に全力を注いできたのです。

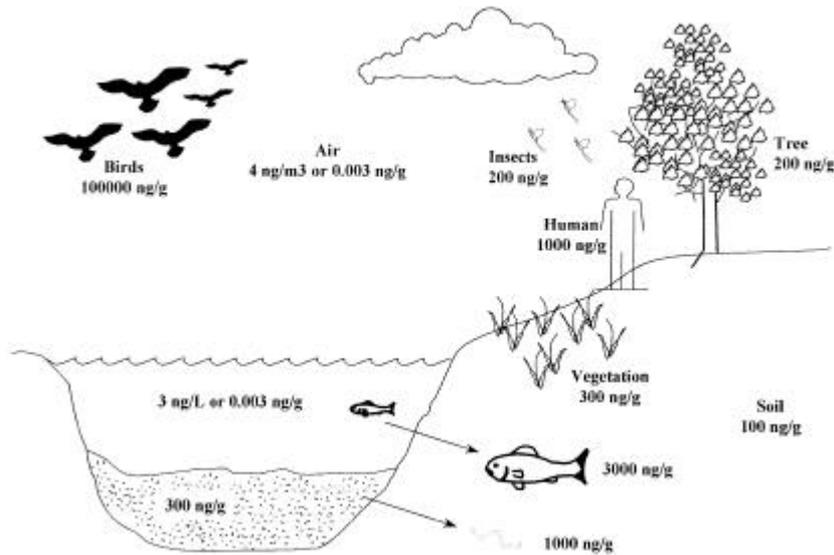


図2. 汚染された生態系における典型的なDDT濃度の分布
(1ng は10億分の1グラム)

挙動予測を説明するための図を用意しました。図2をご覧ください。これはある湖の生態系ですが、この湖は、草木の生えた土壌と空気に囲まれ、湖の底には堆積物があります。この生態系内には多くの動物が生息しています。湖には魚が、底質には虫などの底性生物が、陸には陸上動物や昆虫、鳥、人間などが棲息しています。ここで、この生態系に棲息する虫が人間に害を及ぼすと判明した場合を考えてみましょう。たとえば、蚊は人を刺し、マラリア、糸状虫症、西ナイル熱などを引き起こすウイルスを伝染させることがあります。この場合、この生態系に住む人間の生活を守り、生活の質を上げるには、蚊の棲息する湖に殺虫剤を撒くという方法が考えられます。この方法は即効性がありますが、ある程度時間が経つと蚊が戻ってきて、また殺虫剤が必要となるという欠点も容易に予想されます。

1950年代、これとよく似た状況がノース カリフォルニア州のクリア湖地帯を中心に発生しました。殺虫剤の使用が鳥などの生物を死なせ、人間にも害を及ぼすことになったのです。このとき使われた殺虫剤はDDTというもので、その成分構成は図3にある通りです。

DDTやDDTから作られる類似の殺虫剤は非常に強力な上、環境内での滞留時間が長く、比較的安価です。DDT系の殺虫剤のおかげで、アジア太平洋地域、アフリカ、中央アメリカ、南アメリカに生息する何千もの生物が救われました。しかし皮肉なことに、国連が禁止を予定している12の化学物質のひとつがこのDDTなのです。こうした問題は、1961年に出版されたレイチェル・カーソンの名著『沈黙の春』の主要な論点でもあります。この本でカーソンは化学物質の引き起こす問題を社会に警告しました。この本に啓発された人々は環境保護意識に目覚め、低有害性の化学物質を使用し、環境の運命と市場で流通する化学物質の毒性について知見を深める大きな流れを作り上げました。

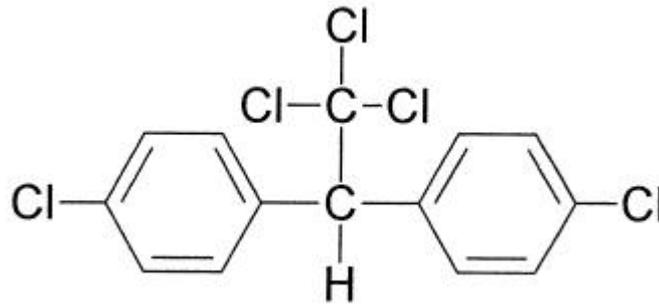


図3. DDTの化学分子構造

しかし、この問題の本当の原因はDDTそのものにはありません。問題は私たちがDDTの性質や環境内での挙動をよく知らなかったこと、生態系の有機生物に与える影響を予測できなかったことにあるのです。現在の私たちには、原始的な段階かもしれませんが、とりあえず化学物質の挙動を予測する技術があります。これを正しく使えば、過去の失敗を繰り返さなくて済むのです。

DDTの挙動予測に関して最大の困難は、DDT分子が環境のあらゆる構成要素間を移動する点にあります。DDTは移動先によって濃度もまちまちです。図2は汚染された生態系における典型的なDDT濃度分布を示しています。例えば、魚の体内に蓄積するDDTの濃度は水中における濃度のおよそ100万倍あります。

私は研究活動の後半25年間、その大半をこの予測技術の開発に費やしてきました。ここで、いくつかの成功例に基づいて、予測技術の原理について簡単に説明させてください。

多媒体環境

予測において第一に了解すべき点は、環境は非常に複雑に構成されており、時と場所によってその性格を変えるということです。ホンダのエンジン設計のような精度で、数学的に環境を説明することはほぼ不可能です。このため、図4に示すように、研究においては環境を主要な構成要素に限定してモデル化します。先ほどご紹介した生態系は、空気、土壌、水、底質の4つの媒体（コンパートメント）で構成されています。生命体（生物相）も重要な構成要素ですが（そして人間は自分自身を特に重要

な生物と勝手に思っていますが)、草木を除けば生物相の数は非常に少ないものです。私たちの考えでは、生態系に生物がいてもいなくてもDDTの挙動はあまり変わりません。また微小有機体はDDTのような化学物質を分解する上でとても重要な役割を果たしますが、こうした生物の体内にもDDTは微量にしか存在しません。

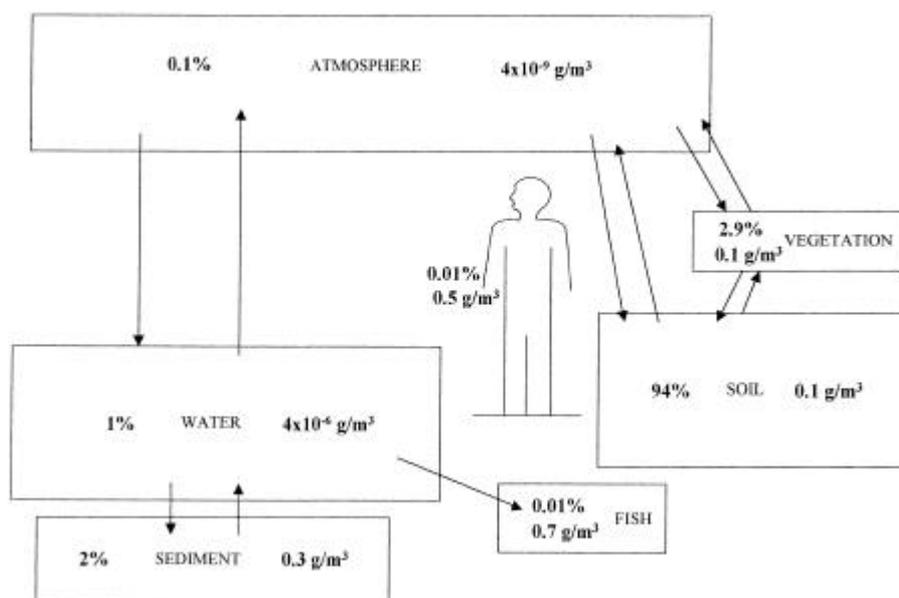


図4. 30ナノパスカルという共通の圧力（フガシティー）下における DDT の濃度分布と理論集積値

1979年、アメリカのEPA（環境保護庁）との共同研究の成果として、私たちは物質挙動の算出方式を発表しました。これは、環境を「多媒体」のシステム、相互につながった1組のコンパートメントと見なすことにより、システム内での化学物質の挙動を予測する方法であり、一般に「マッケイ・モデル」と呼ばれています。「マッケイ・モデル」を使えば、日本やカナダなどの国地域のほか、研究サンプル地域（たとえば日本の県、カナダやアメリカの州などの行政区）における化学物質の挙動をシミュレートできます。サンプル地域の利点は、それぞれの国でサンプル環境内における化学物質の挙動を解析し、研究成果を国際的に比較検証できる点にあります。その上で、実際の地域に特有の土壌、水、植生、降水量、気温、生物相を考慮しながら予測計算を行えば、結果の精度を高めることができます。

地域を単位とすれば、その地域の面積、体積、土質、水質などのデータは、インターネットの地理情報システム情報にアクセスするだけで入手でき、容易に定義できます。しかし、化学物質の各媒体における分布（何パーセントが、どの媒体に存在するか）を判定する作業は容易ではありません。化学物質の分布は、物質の特性（揮発性や蒸気圧、また水や有機水などの液体、オクタノール、脂肪・脂

質、土壌中や底質に存在する自然有機物などの固体に対する溶解性など)によって異なるからです。ただ、研究室の実験環境で計測された結果を利用すれば、実際の環境における物質の分離を予測することができます。

たとえば、水中や蒸気圧中、または沸点における化学物質の溶解性について知っていれば、物質がどのような割合で水中と空気中に分離するかを計算することができます。その上で、実験室や小さなモデル生態系内でこの分離傾向を測定すれば、予測の精度を確認することができます。

1970年代後半、私たちは分離現象に関して、「何がそれを支配する基本量なのか？」という哲学的問いに直面しました。先のDDTを例にとれば、私たちは生態系のコンパートメントごとに均衡濃度を算出することができます。つまり、DDTが環境に浸透し、最終的に各コンパートメント内に一定の濃度と量で存在する状態です。図2に見るように、DDT濃度はコンパートメントごとに大きく異なります。魚の体内は空気中に比べ、約10億倍もDDTに汚染されている計算になります。以上のことから、共通因数であるのは、物質の濃度ではなく、フガシティであることが証明されます。

フガシティ

化学プラントや石油化学プラントを設計する際、エンジニアの悩みの種は、化学物質の多媒体への分散という問題です。原油を沸騰させる際、さまざまな炭化水素がどのように原油と蒸気に分布するかを予測しなければならないからです。原油蒸留塔の設計はこの物質分布情報をもとに設計します。分布の算定に当たって利用されるのがフガシティです。フガシティは一般にはあまり知られていませんが、1901年にG.N.ルイスが発表した熱力学理論の概念です。私たちはこのフガシティの概念を環境に応用することを思いつきました。

時間が許せば、フガシティの概念について講義して差し上げたいのですが、詳しく話すと何日もかかってしまいますから、いまは要点の説明に絞らせてください。もっとも重要なポイントは、フガシティとは圧力である点です。それは環境に放出された物質がある媒体から別の媒体へ移ろうとする性質（逃散傾向）のことです。たとえば、DDTが魚の体内から水中へ、水中から大気中へ移動しようとする傾向のことです。この物質の逸散傾向を知っていれば、これと物質の濃度を関連付けることが可能となります。

図4では、DDTが30ナノパスカルという共通のフガシティ（圧力）で安定した事実から、DDTの逸散傾向（濃度分布）を算出しています。フガシティの安定とは、全コンパートメント内のフガシティが同じで、大気から水への逃散傾向と水から大気への逃散傾向に差がなく、全体としてのDDTの移動はなかったことを意味します。すべてのコンパートメント内でDDT分子が付加する圧力（逸散傾向）が30ナノパスカルです。1ナノパスカルは1パスカルの10億分の1の単位です。環境の定常圧力は、およそ

10万パスカルであることがわかっています。フガシティは多くの点で温度に似ています。熱は温度が均一になるまで熱いところから冷たいところへ移動します。化学物質はフガシティの高いところから低いところへ移動し、一定のレベルで安定します。図4の圧力（フガシティ）は非常に小さなものですが、それでも環境問題を引き起こすには十分な圧力なのです。

フガシティの概念を利用すると、生態系内におけるDDTの挙動計算が大いに簡易化します。しかし、もっと重要なのは、フガシティを導入すれば、複雑な現象の数々を説明できることです。そして、さらに重要なのは、サンプルの化学物質に対して計算に成功し、その予測精度が証明されれば、他の物質にも計算式を応用できる点です。こうすれば、任意の化学物質の環境内における挙動を予測し、DDTの場合のような問題を引き起こす可能性の有無を一定の精度で見極めることができるようになります。住友化学やデュポン、ダウケミカルやP&Gなどの化学大手企業では、新しい化学物質の開発時にフガシティを用いた予測計算を行っています。すぐに使用禁止になるような物質を開発しても利益になりません。それよりも、長く販売し、幅広く利用されるような環境融和型の物質を開発する方がはるかに賢明です。このようにエコ・ケミストリーはビジネスメリットも大きな技術です。通常、ビジネス界では「エコ」とつく製品は収益性が悪いと考えられているようですが、それは間違いです。使いたいようではその逆です。たとえば、ホンダの4サイクルエンジンの環境に優しい「エコ」性能、それはこのエンジンの最大の魅力になっているのではないのでしょうか。

最近、3M社はスコッチガードなどのフッ素含有物質を使用した繊維コーティング剤の販売を中止しました。フッ素含有物質が環境内で有害な物質に変移し、魚や鳥、そしてヒトの体内に蓄積されてゆることがわかったためです。製品は売れなくなりました。つまり市場に出回っている化学物質の監視も大切ですが、それらが環境内で分解され、別の物質に変移したときの影響については見落としがちなのでさらに注意が必要です。DDTの場合もそうでした。DDTは環境内で分解され、子世代のDDEに変化します。DDEは親のDDTと同じくらい有毒な物質なのです。

現在、挙動予測モデルは規制当局でも化学物質の評価に利用されています。最も先進的な例はEUSES（ヨーロッパ物質評価統一システム）です。この機関ではヨーロッパで使用される化学物質の運命について多媒体モデルを使って評価を行っています。類似の評価モデルは、国連、OECD、その他の国や地域の規制当局でも利用されています。評価モデルはコンピュータプログラムであり、無料で配布されている場合もあれば、市販されているものもあります。

産業の役割

先に、化学会社との共同研究の意味について述べました。私がフガシティの概念を環境保護のために利用することを思いついたのも、化学業界でエンジニアとして働いた経験を持つからだと思います。学界や政界にいる人は、産業界の奥深い知識と経験を過小評価しがちです。化学製品の製造に携わる

研究者やエンジニアは、環境対策や生態系への影響に重大な責任を負っているため、彼らは非常に重要で課題に直面するポジションにいます。こうした職業科学者が化学物質の特性や環境への浸透について詳しい情報を持っていることは珍しくありません。

たとえば、住友化学工業の的場好英博士の研究グループは、室内環境における殺虫剤の物質運命を記述した非常に革新的なフガシティモデルを開発され、大きな成功を収められています。

「説明不能を説明可能に」—魚から学んだ知恵

魚と水が同じフガシティに達している場合、つまり長く接触していても均衡を保てる状態にある場合、魚の体内のDDT濃度は水中濃度の約100万倍であることがDDTの簡単な測定でわかります。この事実が初めて観察されたとき大きな謎でした。これには魚がDDTを食物から摂取し、体内に蓄積すると体外へ放出できないためだという説が提出されました。いわば一方通行で行き止まりの蓄積が行われると考えられたわけです。しかし、フガシティモデルを適用すればこの謎は解決します。物理化学的な理由とフガシティによって、魚の体内でのDDTの「濃縮」は不可避の現象であることがわかったからです。もはや謎の解明は困難ではなくなりました。この解明をきっかけに、現在では生物濃縮される化学物質とそうでない物質を事前に予測することができます。もし数十年前にこのような予測技術があれば、トクサフェンなどの有害物質を殺虫剤や、ポリ塩化ビフェニル (PCBs) などの有害物質を工業材料として利用せずに済んでいたと思います。また、焼却過程で発生するダイオキシンなどの人体に有害な物質の排出を抑制することもできたでしょう。水俣で発生した水銀中毒の悲劇を防ぐことだってできたかもしれません。現在の予測技術を獲得した以上、私たちは二度とこうした悲劇を繰り返してはならない使命があると思います。

有害物質への被曝

生物濃縮の過程は、魚やクジラなどの動物だけでなく、その魚を食べる私たち人間にとっても非常に深刻な問題です。図1の生態系に人間が暮らしているとすれば、毎日DDTに汚染された空気を吸い、水を飲み、魚を食べることであなたの体はDDTにさらされます。人間は一日平均20m³の空気を吸い、3リットルの水分を摂取し、20gの魚を摂食します。大気中や水中、魚の体内におけるDDT濃度を測定すると、体内にどれだけのDDTが入り込むかを計算できます。計算の結果、大気から40ナノグラム (1ナノグラム=10億分の1グラム=10⁻⁹g)、水から6ナノグラム、魚から6万ナノグラムのDDTが摂取されることがわかります。私たちは空気、水、土壌からだけでなく、毎日の食事でも有害物質に被曝しているのです。とりわけ深刻なのは汚染した魚の摂取です。有害物資の濃縮 (水から魚への生物濃縮) は人体の被曝量を拡大し、健康上の被害をもたらします。そうならないように事前に状況を予測し、被曝を防ぐ努力をしていかねばなりません。

これに関連する有毒物質の蓄積の例はクジラなどの海洋動物にも見られます。愛媛大学の田辺博士の著名な研究によって、海洋動物の中でも特にクジラ、そのなかでも雄の体内で、顕著な生物濃縮が起こることが解明され、現在ではクジラが一生のうちに摂取し排出する有毒物質量を計測するモデルも構築されています。この計測モデルにより、クジラは主に食べ物から有毒物質に被曝します。水から空気をとる魚と違ってクジラは空気呼吸し、なおかつ体内に多くの脂肪を蓄積するので、有害物質の排出が非常に困難なのです。DDTは空気よりも水に溶けやすいので、魚の場合、体内に貯まったDDTを1年から2年で排出できますが、クジラの場合、100年近くかかります。つまり一度有害物質を摂取したら生存中にすべてを排出することは不可能です。雌クジラの場合は母乳という、雄には利用できない方法で有毒物質を排出できるため少しはマシです。これも女性上位の好例なのですが、とはいえ、母乳を飲む若いクジラたちが有毒物質に汚染されてしまうという別の問題は依然として残ります。

クジラは魚よりも汚染の度合いが高いため、クジラを捕獲して食べることはやめた方が賢明です。捕鯨は中止し、その代わりに、人間による乱獲や有毒物質の垂れ流しによって数を減らしたクジラの、生息数の回復を静かに見守るべきでしょう。

グローバルビレッジ

横浜にある関東学院大学の川本克也博士は、日本の大気、水、そして土壌に存在する約68種の化学物質について研究されています。私たちは教授と共同研究をさせていただいたことがあります。まず日本の環境庁の環境汚染物質排出・移動登録システムから対象物質の排出率データを収集し、日本全土と神奈川県における汚染濃度を調査したのです。教授はヨーロッパで使用されているEUSES Simpleboxモデルを使って、私たちは自分たちがカナダで使用しているChemCANモデルを使って解析を行い、両者のデータをすり合わせて日本の環境特性を明らかにしました。今年始めに研究成果を発表しました。その興味深い内容のいくつかを図5に示しておきました。

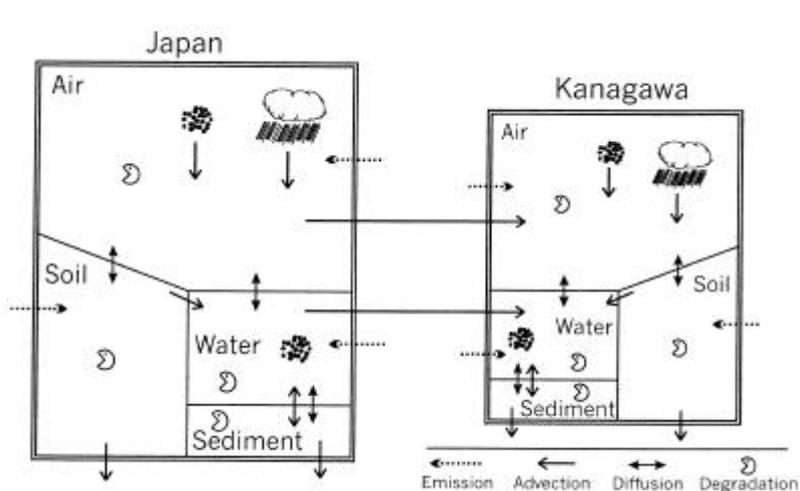


図5. 日本全土と神奈川県における調査媒体

まず私たちが使った2つのモデルはよく似た予測結果を出し、チームを勇気づけました。もちろん両方とも間違っている可能性もあるわけですが・・・

次に、川本教授が日本の排ガスデータから汚染濃度を計算されました。結果はおおむね良好でしたが、汚染の数値全般は予想をはるかに下回り、低すぎるものでした。その理由は有害物質の「輸出入」にあることは明らかでした。たとえば、日本の有毒化学物質は、その多くが西風から「輸入」されたことが明らかになっています。カナダでも同様の汚染問題があり、カナダの「輸入超過」の相手はアメリカ合衆国なのです。こうした事実が示唆するのは、日本もカナダもきれいな環境を作り出す能力には恵まれていない国土だということです。確かに日本人とカナダ人は、ある程度までは風上や上流に暮らす人間の犠牲になっています。しかし、同時に日本やカナダが大気中や水中に排出する汚染物質の被害は、私たちの風下や下流に暮らす人々が被るわけです。つまり私たちはお互いが影響しあう、汚染された地球村の住民なのだを認識する必要があります。

川本教授はこのような「輸入」汚染物質も加味したモデル解析を行い、ようやく満足のいく計算結果を得ることができました。なぜ満足がいくかと言えば、日本人の健康を考えて日本に存在する汚染物質を低減したいと考えたとき、この結果によって具体的な排出削減量を設定できるからです。つまり、川本教授の研究は、本質的には日本の環境浄化と健全化のツールを提供することを意味しているのです。

汚染物質の排出

日本や北米に対応したモデルを実行する場合、私たちが直面する重大な問題は、科学的なものではなく、正確なデータが存在しないことです。大気、水、土壌への化学物質の排出量や、廃棄物から排出される化学物質の排出量に関する正確なデータがないのです。

モデルで計算を行うには、これらの排出率データが必要です。濃縮や被曝を計算する場合、高精度で信頼できる排出量の定量データの存在は決定的な要因となります。たとえば、神奈川県における環境へのベンゼンの排出量は年間約500トンです。これから空気1m³当たり0.1マイクログラム(1マイクログラム=10⁻⁵g)の濃度でベンゼンが存在する計算になり、神奈川県の住民は1日約2マイクログラムのベンゼンを吸引していることとなります。しかし、排出量の見込み量が不正確で、実際は年間1,000トンのベンゼンが排出されているとしたら、大気中の濃度も先ほどの約2倍、空気1m³当たり0.2マイクログラム、被曝量も2倍の1日約4マイクログラムとなるわけです。このように排出量データは濃度や被曝量の算出、毒性の推定に直接影響を及ぼします。実際には近隣の県や海外からもベンゼンは「輸入」されるのです。

化学物質の使用責任を持つには、まず信頼できる排出量のデータが必要です。日本にはPRTR（環境汚染物質排出移動登録）制度があり、アメリカにはTRI（Toxics Release Inventory）制度、カナダにはNPRI（National Pollutant Release Inventory）制度があります。これらは実に良識的な制度ですが、その重要性に比べて扱いが軽いのが残念です。また制度自体が不完全で正確を欠くため、十分活用されていないのが現状です。

その理由のひとつとして、政府がこうした情報の公益性を十分に理解していないことが挙げられます。先に紹介した「多媒体マス・バランス・モデル」は、化学物質の濃度と人体被曝量を計算するために情報を利用するのです。もちろん私たち自身、サンプリングと分析によって環境内の化学物質の検出に努めていますが、化学物質の種類も、存在する地域も、そして発生原因もあまりに複雑多岐で、とても私たちだけで監視できるものではありません。化学物質の濃度と生命被曝量を予測するモデリングは、いまよりももっと安価で高速なために改良できますし、時間的にも空間的にも、適用対象をもっと広い範囲に広げ、完全性を求める余地のある技術です。そして何よりも、予測結果の正確性に確信が持てることが重要です。つまり、排出量データを収集する人、環境の状態を監視・解析する人、予測モデルを作り予測を実施する人、化学物質の管理・規制をあげる政府の人、そして化学物質の合成の担い手であり、良性の物質を発見する上で最適なポジションにいる産業界の人、これら各社の間に合目的な協力関係が欠かせません。各界の一致協力がなければ「エコ・ケミストリー」の原理原則は貫徹できないからです。

しかし、多くの関係企業は化学物質の使用方法や放出量について秘密主義を守り、データを公表しておらず、正確な排出量データを得る上で障害になっています。私は、環境倫理の観点から化学物質を公共空間に排出する者は例外なく、排出物質に関する情報公開を全うする義務があると思います。化学物質はいったん排出されれば、私たちの制御能力は物質運命の前に屈します。流出原油の処理現場では、対策は「予防、予防、予防」で予防しかないと言われていました。流出した原油の一割でも回収できれば成功なのです。「エコ・ケミストリー」の観点から見ても同じことです。化学物質の残留性、濃縮性、有害性を考えれば、一に予防、二に予防、三四が無くて五に予防、とにかく放出しないことです。環境に放出された化学物質は、まるで台風に襲われた木の葉のようにまったく制御できない状態に遷移します。そうなれば、もはや手の施しようがありません。

現在、トレント大学はカリフォルニア大学バークレー校およびハーバード公衆衛生大学院と共同で、北アメリカ大陸（カナダ、アメリカ、メキシコ）環境における化学物質挙動の予測システムの開発に取り組んでいます。図6は、BETR（Berkeley-Trent）モデルにおける北米大陸のコンパートメント（媒体）分割を示しています。私たちはこれによって、たとえばメキシコで使用された化学物質がカナダ領の北極地方に移動するかを予測しようとしています。

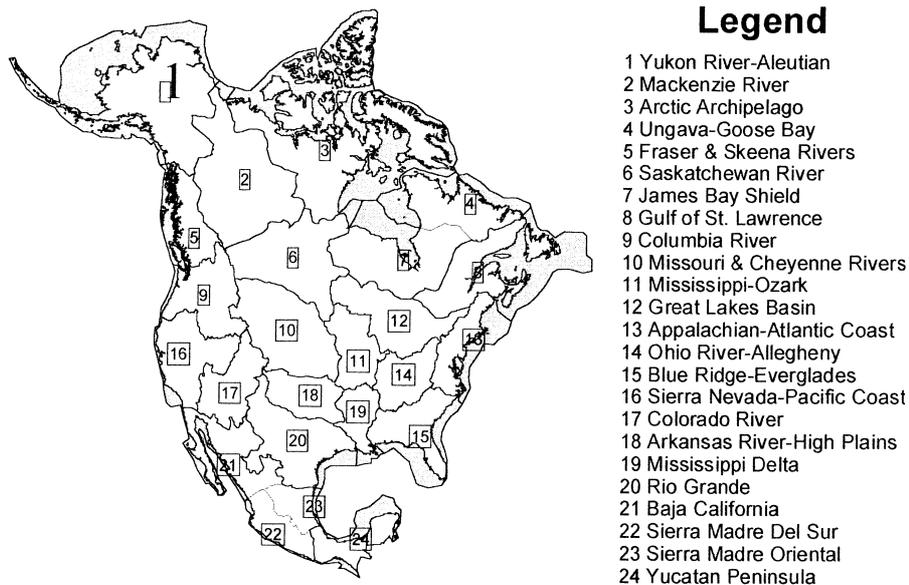


図6. BETR (Berkeley-Trent) モデルにおける北米大陸の媒体分割

実際の観測結果から驚くべきことが判りました。スペリオル湖の魚は、周辺でほとんど使用されていないトクサフェンによって深刻に汚染されていたのです。トクサフェンは、主に綿花栽培の盛んなアメリカ南部で使用されてきた物質です。これは推測ですが、トクサフェン禁止されてからの長い年月の間、アラバマ州などで土中に残留したトクサフェンが気化して北へ運ばれ、スペリオル湖の低温の水中に沈殿して魚を汚染していると考えられます。北へ向かって何百キロも移動するうちにホップ、気化、沈積の挙動を経て、その後、さらに気化と沈積を繰り返したようです。これを「グラスホッパー効果」と呼びます（ちなみにオーストラリアでは「カンガルー効果」と呼んでいます）。BETRモデルではこの挙動の発生が実際に「予測」されているのです。このモデルが1960年代に実用化されたら、以上のトクサフェン問題は避けられたかもしれません。

私たちは最終的には、北米だけでなくすべての大陸、さらに言うなら地球環境全体に適用可能な高信頼予測モデルを作れると確信しています。

図7をご覧ください。これは私の同僚フランク・ワニア教授が開発したモデルで、地球を緯度方向に9つの地域に分割したもので、各地域に空気、水、土が含まれています。季節による気温変化は地域ごとに異なります。このモデルはHCH（ヘキサクロロヘキサン）に適用され、十分な効果が確認されました。HCHは、特にアジアで広く使用されてきた農薬のリンデンに含まれ、長年問題視されてきた汚染物質です。現在では使用されていないものの、まだ海中に残留しています。西太平洋におけるHCH濃度は北上するほど高まり、北極で頂点に達します。HCHが北極で多用された歴史はありません。では、なぜHCHレベルが高いのでしょうか？答えは、北極が汚染に対して特に脆弱な地域であるせい、と考えられています。

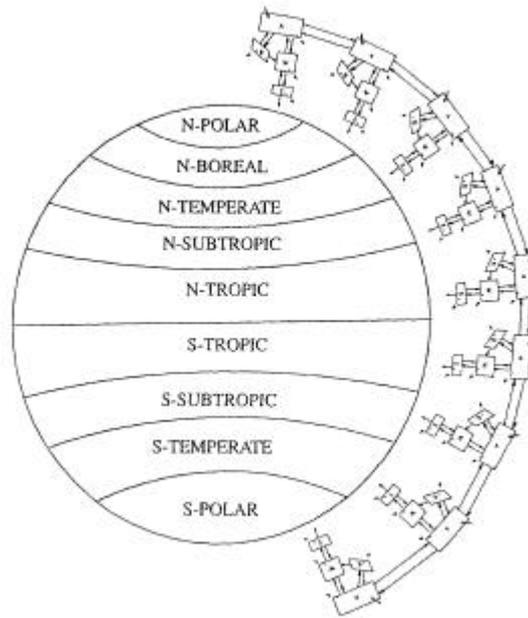


図7. 緯度方向に地域分割したモデル

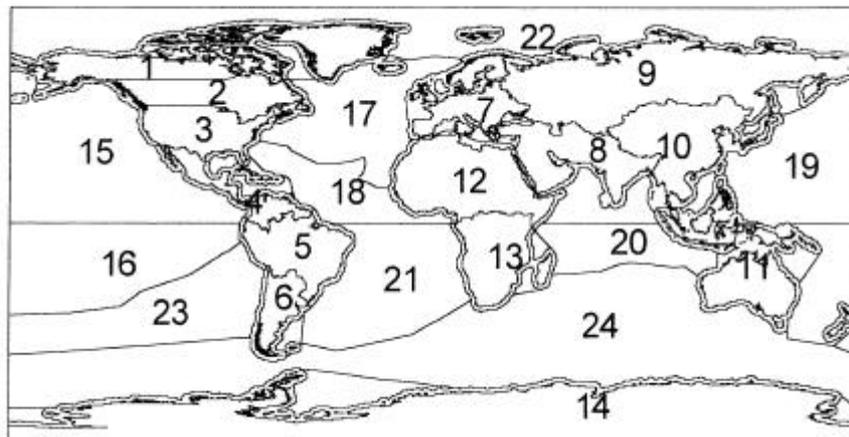


図8. 地理学的地域分割モデル

地球規模の化学物質の挙動について正確にシミュレーションや予測を行う方法はまだ確立していません。しかし諦めずに挑戦し、必ず成功させなければなりません。図8は、現在私たちが取り組んでいるモデルの構造を表しています。ここでは地球を経度で縦割りする代わりに、大陸と海洋をもとに分割しています。気象研究用の地球循環モデルをもとにしたアプローチがベストと主張する科学者もありますが、残念ながら完成に10年以上かかると見られています。どの方法がベストかわからない以上、あらゆる可能性を試み、最も効果的な方法を見極めるしかないのです。

北 極

カナダは地球の北に位置するため、カナダ人は北極の環境問題にひととき高い関心を持っています。カナダ人のほとんどが北極を訪れないにしても、北極やその生態系、イヌイットの人々はカナダ人のアイデンティティの重要な一部を形成しています。

しかし、驚くと同時に悲しむべき事実ですが、北極は先ほどのHCHだけでなく、PCBやトクサフェンなどの特定の農薬によっても汚染が進行しています。これらの汚染物質は北極で直接使用されたことはありませんが、風や海水によって運ばれてくるのです。イヌイットの体内のPCBレベルはカナダ南部の住民と比べると極めて高くなっています。これには3つの理由があると考えられます。第一に、イヌイットは極寒の地を生き抜くために高脂肪の食事をとります。彼らの重要な栄養源はアザラシや鯨などの海洋哺乳類の肉です。汚染源はこの肉と見られます。第二に、北極の寒さは巨大な冷蔵庫に例えられるほどですが、食べ物だけでなく汚染物質までもが良好な状態で保存されてしまうのです。汚染物質は長期「保存」され、次第に濃縮されていきます。第三に、世界規模で汚染物質の凝縮・蒸留が進んでおり、その影響で化学物質がどんどん北極圏へ移動していることもわかっています。火星では炭酸ガスが極へ移動し、固体炭酸として凝縮します。よく冷えた瓶ビールの表面には水蒸気が結露して付着します。これらと似た現象が、地球上の一部の化学物質にも起こっていると考えられます。汚染化学物質の特性を考えれば、必然的な現象といえます。汚染物質は北極までたどり着くに十分な残存力(化学的な安定性と持続性)を持つ上、蒸発して北極に向かう風に乗れるだけの揮発性を持ち、溶解性に優れているので海水に溶け込み、主に太平洋から北極海への潮流に乗ることもできるのです。

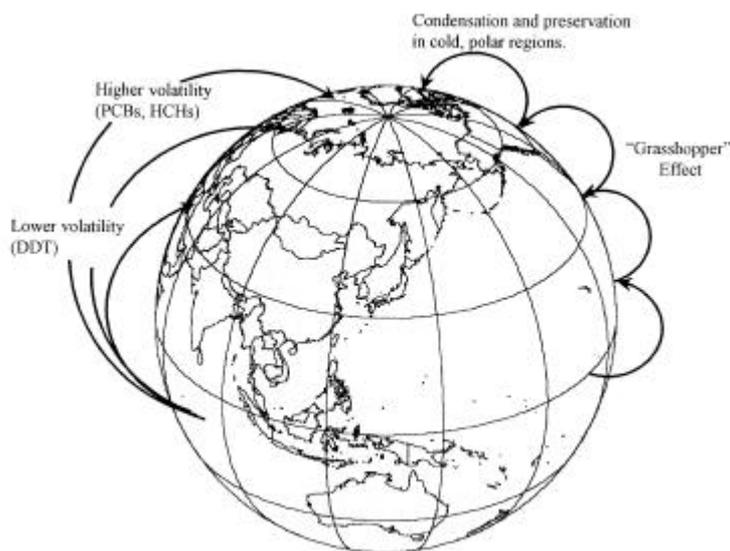


図9. 世界規模ですすむ化学物質の移動

つい最近になって、国連環境プログラムのもと国際社会が協力して汚染化学物質の規制に取り組み始めました。2001年5月22日、残留性有機汚染物質に関するストックホルム条約が127カ国の合意によって採択されました。この条約は、特定の農薬や産業化学物質(現在指定されているのは12種類)の削

減と廃絶を誓うものです。これは人類の社会にとって歴史的な瞬間といえます。私たちは指定の化学物質を地球上から追放し、永久に製造しないことに合意したのですから。残された課題は、100種類超ある「要注意」化学物質の再評価とアセスメントですが、最終的には、商用利用されている数千数万種の化学物質も調査対象に含めなければならないでしょう。一連のアセスメント作業において化学物質運命の多媒体モデルに中心的な役割を果たさせる必要を私は確信しています。ほとんどの物質は無害だと思いますが、それでも調査が終わるまで予断は禁物で、市場に意外な報告がなされる可能性があります。たとえば、臭素を含む化学物質のうち、衣類やプラスチックの難燃剤として用いられる物質の一部が、環境汚染源となる可能性を指摘されています。

結 び

私は、社会を「人間性あふれる文明」へと発展させていくために、化学物質の「エコ・テクノロジー」、つまり「エコ・ケミストリー」が重要な役割を担うと確信しています。私たちは、かつて技術的失敗を犯し、多くの人々や生態系を苦しめました。しかし、その原因は知識の欠如によるもので、悪意によるものではありません。ただ、被害を受けた人々に対しては率直に技術的誤ちを認め、二度とそれを繰り返さないために最新の研究成果を利用していく義務があるだけです。

環境科学の進展、計算処理の高速化、情報技術の高度化などのおかげで、私たちは環境内における化学物質の挙動を定性的に解明する方向へ歩み始めています。化学物質運命の正確なシミュレーションや予測が可能になれば、正確な情報を使って低害物質を選び、過去の問題の多くを解決して、過誤の反復を回避することができます。

こうした理想を実現する上では、学界、財界、行政、一般家庭など、さまざまな場で抵抗や障害に会うと思います。でも、その見返りの大きさを考えてください。化学物質を十把一絡げに有害か無害か決めつけるような独善的な態度は捨てなければなりません。事実、有害なのは一部の物質だけであり、有害物質は厳重に管理するか、この地球上から消滅させればいいのです。一部の化学物質は使い方によっては有害です。こうした場合は、劇薬の取扱と同じように、慎重に利用する技術を確立すればいいと思います。これら以外の化学物質はほとんど無害であり、環境を害さない程度を明確にして管理すれば済みます。化学物質の正しい使い分けが公共の利益を守ります。そうして初めて、私たち人間は、ありうべき危険を十分認識し、全生命が生存の拠り所とする地球環境を十全に護っていると胸を張ることができるのです。

最後になりましたが、栄えある本賞を授与して下さった本田財団の皆様、ありがとうございました。また私たちの研究をご支援下さった関係各位、特に「エコ・ケミストリー」の理想を求めてやまない学生諸君とスタッフ諸君に、いま一度心からお礼を申し上げて私のスピーチの結びとさせていただきます。ご静聴ありがとうございました。