

詳細リスク評価におけるモデリング技法の役割

吉田 喜久雄（産総研・化学物質リスク管理研究センター）

1. はじめに

化学物質のヒト健康および生態へのリスクを評価する上で、曝露*の解析は必須の項目である。新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の化学物質総合評価管理プログラムが開始される少し前の2000年12月25日に資源環境技術総合研究所から発刊された「資源と環境」では、「化学物質の曝露とリスクの定量的・管理に向けて」という特集が組まれ、化学物質リスク管理センターの母体となった当時の安全工学部の研究官による以下の総説と解説が載せられている。

- ◆化学物質の曝露・リスク評価における数理モデルの役割と課題
- ◆大気環境シミュレーションモデルの現状と化学物質運命予測への適用上の課題
- ◆土壌・地下水媒体からの化学物質の曝露シナリオ
- ◆環境濃度評価から曝露・リスク評価へ：関東地方におけるNO₂とベンゼンのリスク評価
- ◆浮遊粒子状物質による健康影響の定量評価および経済評価の現状

これらの記事の中で挙げられた課題等は、ほぼそのまま、翌年度から始まったNEDOプログラムの「化学物質のリスク評価およびリスク評価手法の開発プロジェクト」における研究開発項目として、産総研・化学物質リスク管理センターで鋭意取り組んできた。特に、開発したモデル等は、化学物質の環境中濃度の空間分布のみならず、媒体間移行を伴う間接曝露やヒトの生活・行動パターンを考慮して、対象集団の化学物質への曝露の分布を評価し、曝露の道筋を明確にして有効なリスク削減対策を選択する上で必須のツールである。さらに、これらを開発・公開するだけでなく、実際の詳細リスク評価において適用事例を示してきた。

講演では、「化学物質のリスク評価およびリスク評価手法の開発プロジェクト」で開発・公開したモデルやツール等のモデリング技法が、化学物質の詳細リスク評価において果たした役割と今後の課題について総括する。

2. 曝露の分布を決定する要因

化学物質の初期リスク評価では、リスク評価対象集団の曝露濃度や摂取量の最大値を用いて、「リスクは懸念されない」、「情報収集が必要」または「詳細評価が必要」を判定するため、集団全体の曝露濃度や摂取量の分布を解析することは基本的に必要ではない。一方、詳細リスク評価では、集団全体の曝露分布を解析することがリスク評価の第一歩となる。この集団の曝露分布には、集団が吸入する屋内外空気や摂取する食物等の曝露媒体中における化学物質濃度の時空間変動が大きな影響を及ぼす（図1）。この時空間変動は、モニタリングで把握可能であるが、対象集団全体を適切かつ迅速に評価するには、環境媒体中濃度推計モデルが適する。また、曝露の分布を推定する上で、集団に属する個人の通勤・通学等による移動等の生活行動特性や食品の生産地から消費地への移動は、化学物質濃度の空間分布と密接に関係しており、さらに、個人の生理学的・生化学的特性も、集団の曝露

* 本稿では、「曝露」、「暴露」、「ばく露」という用語は全て「曝露」で統一する。

の分布大きな影響を及ぼす。

このような集団の曝露分布の解析により、高曝露の原因となる排出源を明確にでき、有効なリスク削減対策を考えることが可能となる。

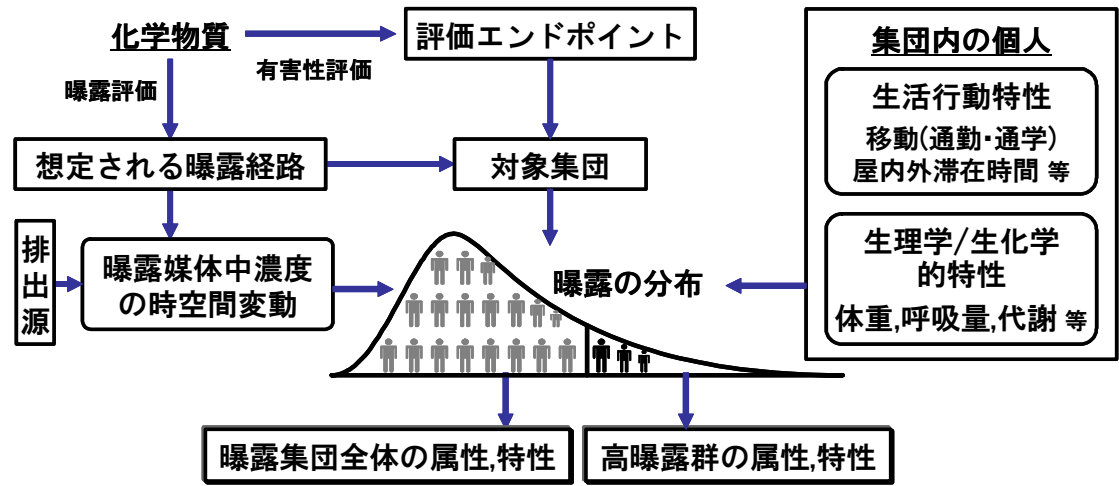


図 1 集団の曝露分布を決定する要因

3. リスク評価のために開発したモデル等

産総研、化学物質リスク管理研究センターでは、図 2 に示すように、対象集団の曝露濃度や摂取量の分布を決定するため、環境媒体中の濃度の空間分布を推計モデルに加え、曝露濃度や摂取量およびリスクを評価するツール、さらには、生活行動特性と生理学的・生化学的特性に関する情報をまとめたハンドブックを開発し、公開してきた。以下に開発したモデルやツール等の概要を示す。

			2001年	2002年	2003年	2004年	2005年	2006年
環境中濃度推計	大気系	広域 ADMER	Ver 0.8		Ver 1.0	Ver 1.5		Ver 2.0
		近傍 METI-LIS	Ver 1.0	Ver 2.0		Ver 2.0.2		
	水系	河川 SHANEL	Ver 0.8				Ver 1.0	
		海域 RAM	東京湾				伊勢湾	瀬戸内海
曝露解析およびリスク評価			Risk Learning				曝露係数 ハンドブック	RiskCat- LLE

図 2 リスク評価のためのモデルやツール等の開発年表

注：METI-LIS の開発は「化学物質のリスク評価およびリスク評価
手法の開発プロジェクト」で開発されたモデルではない

3. 1. 環境媒体中濃度推計モデル

大気および水圏環境媒体中濃度推計モデルを開発し、公開した。

①AIST-ADMER (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology - Atmospheric Dispersion Model for Exposure and Risk assessment)：日本全国の大気中化学物質濃度を 5km×5km の空間解像度で、月平均値として推計するモデルである。大気中濃度と沈着量の推計に加えて、排出量作成機能、気象データ加工・解析機能、曝露

人口分布等の推定機能を含み、任意の地点の濃度抽出も可能である。

- ②AIST-SHANEL (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology - Standardized Hydrology-based Assessment tool for chemical Exposure Load) : 広域水系 (利根川・荒川、淀川、多摩川、石狩川、阿武隈川、信濃川、木曽川、太田川、吉野川、筑後川、日光川、大聖寺川、石津川) での流量と河川水中濃度を 1 km× 1 km の空間解像度で月平均値として推計するモデルである。流量と河川水中濃度に加えて、排出量推計や指定された生物に対する閾値濃度を超過する確率を推計でき、指定地点での月別の河川水中濃度の時系列変化も推計可能である。
- ③沿岸生態リスク評価モデル (AIST-RAMTB、AIST-RAMIB および AIST-RAMSIS) : 東京湾、伊勢湾および瀬戸内海を対象とし、内湾での流動、生態系構成要素量、懸濁物質の拡散および化学物質の動態を考慮し、化学物質の海水中と底泥中濃度の推計と生物へのリスクを評価するモデルである。化学物質濃度に加えて、化学物質負荷量データと懸濁態有機物濃度分布、海水中化学物質濃度および沈着量も推計可能である。

また、NEDO 化学物質総合評価管理プログラムでの開発ではないが、事業場等から大気に排出される化学物質の近傍大気曝露評価に適用可能な低煙源工場拡散モデル METI-LIS (Ministry of Economy, Trade and Industry-Low rise Industrial Source dispersion Model) を開発し、公開している。このモデルの特徴は、排出源近傍の建物等が拡散に及ぼすダウンドラフト効果を表現できる点にあり、線源にも基本的なプルーム・パフ積分式で対応しており、重力沈降性の粒子状汚染物質にも適用できる。

3.2. 曝露およびリスク評価用ツールとハンドブック

化学物質による曝露とリスクを評価するツールとハンドブックを開発し、公開した。

- ①Risk Learning : 化学物質 (PRTR 対象 90 物質)、汚染媒体 (屋内外空気、表層水等 11 媒体)、曝露シナリオ (33 の曝露の道筋)、曝露対象者 (平均的日本人男性/女性) を選択し、汚染媒体中の化学物質濃度を設定することにより、汚染媒体と曝露の道筋の多様な組合せの中から、化学物質の曝露濃度や摂取量およびヒト健康リスクを容易に評価できることを目指したツールである。化学物質の物性と有害性情報はデータベース化されている。
- ②RiskCaT-LLE (Risk Calculation Tool for the LLE-based Risk Estimation) : 化学物質への曝露に起因するヒト健康リスクを損失余命として計算するツールで、化学物質への曝露と健康影響への感受性の個人差の違いを統計的に扱い、集団における健康影響の発症率を計算し、リスクを損失余命の大きさとして算出する。これにより、物質毎に異なる様々な健康リスクを損失余命という統一尺度で比較することを可能にする。
- ③曝露係数ハンドブック : Risk Learning 等で化学物質の曝露濃度や摂取量を推計する際に用いる食物、飲料水等の曝露媒体の摂取量、生活時間、自給率等の様々な係数や原単位 (曝露係数) をまとめたものである。日本での曝露状況を適切に評価するには、わが国独自の値を使用する必要がある、このハンドブックを用いることで、値の取得に要する労力を低減できる。また、RiskCaT-LLE 用の曝露の個人差に関する情報も整理されている。

3.3 詳細リスク評価への適用

現在、図 3 の 10 物質に短鎖塩素化パラフィンを加えた 11 物質について詳細リスク評価書を作成し、公開している。いずれの物質についても PRTR 調査または PRTR 調査に独自調

査を追加して、環境排出量を推計し、開発した上記のモデルやツールを用いて、化学物質のヒト健康リスクと生態リスクを詳細に評価した。特に、ヒト健康リスク評価の対象物質が主に大気に排出されるため、AIST-ADMER と METI-LIS の適用が多い。また、疎水性物質の DEHP の評価では、Risk Leaning に採用された媒体間移行モデルを用いて、排出源からヒトに至る曝露の道筋における化学物質の移行を定量的に評価している。

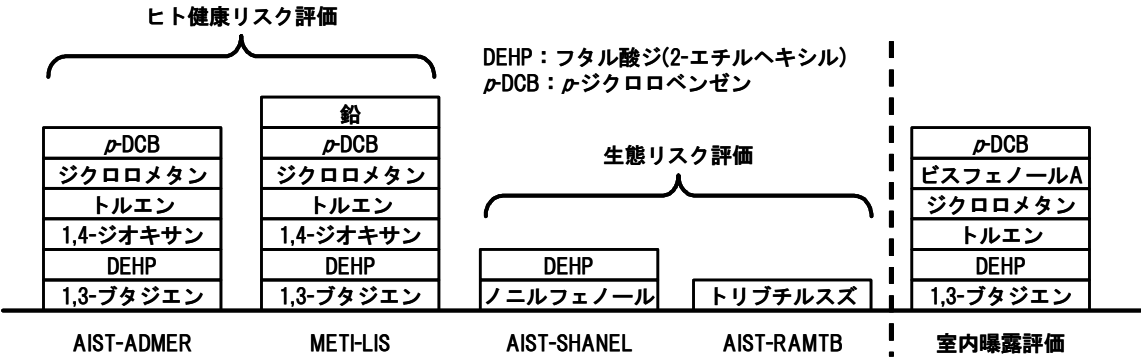


図3 モデル等を用いた詳細リスク評価対象物質

注：室内曝露は、モデル等を用いて評価されたのではなく、モニタリングデータの解析により評価された

4. 今後の課題

現在、詳細評価が必要か否かを判定する初期リスク評価は、「化学物質のリスク評価およびリスク評価手法の開発プロジェクト」と環境省の環境リスク初期評価で実施されている。判定結果が異なる物質も若干あるが、PRTR 法の第1種指定化学物質に限れば、計 92 物質のうちの 20 物質が「詳細評価が必要」と判定されている（表1）。

表1 初期ヒト健康リスク評価で「詳細評価が必要」と判定された 20 物質

アクリロニトリル , アクロレイン , アセトアルデヒド , イソプレン , エチレンオキシド , キシレン , <u>p-クロロアニリン</u> , <u>塩ビモノマー</u> , <u>酢ビモノマー</u> , <u>1,2-ジクロロエタン</u> , <u>3,3'-ジクロロ-4,4'-ジアミノジフェニルメタン</u> , <u>p-ジクロロベンゼン</u> , <u>ジクロロメタン</u> , <u>ジニトロトルエン</u> , <u>ヒドラジン</u> , <u>ピリジン</u> , <u>ブタジエン</u> , <u>フタル酸ジ(2-エチルヘキシル)</u> , <u>ホルムアルデヒド</u> , <u>ジクロロボス</u>
--

注：ゴシック体の物質は、詳細リスク評価対象物質である。下線を付した物質は発がん影響が懸念された物質である

化学物質リスク管理研究センターでも、2007 年度末までに 30 物質の詳細リスク評価書を作成するが、詳細リスク評価が必要とされる物質全てに対応できていない。

さらに、健康被害や環境汚染を引き起こす可能性がある化学物質の製造や輸入等を規制する「化学物質の審査及び製造等の規制に関する法律」の既存化学物質点検と新規化学物質届出の状況を見ると、19,000 を越える既存化学物質では、点検済の物質は 1,485 物質に留まっている。さらに、製造、使用等の状況から相当広範な地域の環境で相当程度残留、または近くその状況に至ることが確実と見込まれ、ヒトの健康に係る被害等を生ずる恐れがある物質（第二種監視化学物質）として、900 近い化学物質が指定されているが、49 の既存化学物質について初期リスクが評価されているにすぎない。また、化学物質の初期リ

スク評価の加速化に伴い、詳細リスク評価が必要な物質も、今後さらに増大すると考えられる。

しかし、今後評価される物質については、現在評価が行われている物質のように、リスク評価に必要な情報が存在するとは考えられず、曝露を把握するためのモニタリングの実施も現実的でない。このため、限られた情報を基に、集団の曝露分布を推計するとともに、各種環境排出源からヒトや環境生物に至る主要な曝露の道筋を確認できる評価法の構築が必要となる。これを構築するためには、以下の項目について、今後、注力が必要である。

- ◆環境排出量：現状は、PRTR 調査結果に基づく環境媒体別の排出量に独自に物質のライフサイクルを考慮して推計した排出量を追加しているケースが多い。しかし、排出量の推計は、今後増大が予想される PRTR 対象外の物質では容易ではない。多種類の化学物質の環境排出量を、物質の用途や物性から推計可能な手法の開発が、モデルを用いる曝露解析に必須である。
- ◆室内曝露：現状は、室内空气中濃度モニタリング結果を独自に解析して、室内曝露を評価している。室内曝露は、ヒト健康リスクに大きな寄与をするが、今後増大が予想される PRTR 対象外の多数物質の詳細リスク評価において、物質毎に室内用途の有無を確認し、その濃度を把握することは不可能である。このため、室内に持込まれる化学物質量とそれらの室内での放散量を推計し、さらに、室内での化学物質の動態を推計するモデルの開発が必要である。
- ◆人口流動と物流：環境動態モデルの空間解像度を向上させることは、集団の曝露分布に伴う不確実性を低減する上で有効であるが、人口分布や人口流動、農・畜・水産物の物流を考慮しないと、高解像度化は逆に、不確実性を増大させる。AIST-ADMER には、曝露人口分布を推計する機能があるが、行動特性は考慮されていない。しかし、全国都市パーソントリップ調査によれば、1 トリップ毎の平均移動距離は AIST-ADMER の空間解像度の 5 km を超えており（図 4）、トリップ数も三大都市圏と地方都市圏で異なり、年齢階層でも異なるため、人口流動を考慮して、吸入経路の曝露を評価することが推計の不確実性を低減する上で重要である。図 5 の模式図の場合、人口流動を考慮することは、人口分布を考慮することで低減される不確実性と同程度の情報エントロピーで、さらに、不確実性を低減できることを示している。

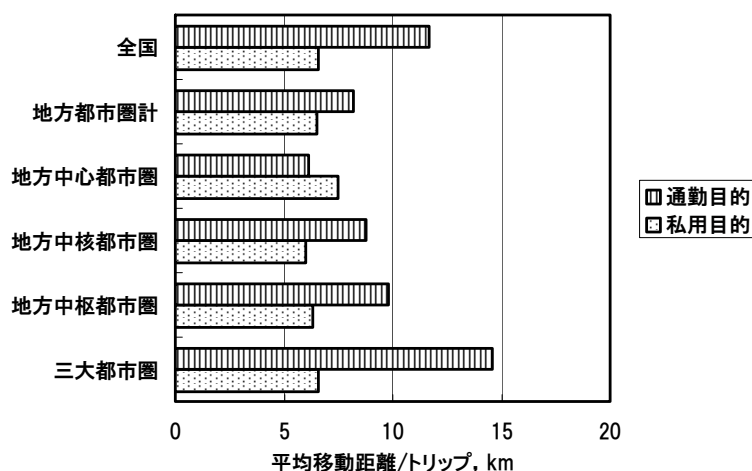


図 4 都市圏規模別の目的別 1 トリップ当りの平均移動距離（平成 11 年度，平日）

環境媒体間を移行して、農・畜・水産物に最終的に到達する DEHP のような多くの疎水性物質の経口摂取量を解析する場合、生産地と消費地が通常、遠く離れているため、食品の流通を考慮することは、人口流動以上に曝露解析に重要と考えられる。農産物の生産地は個々の作物毎に異なり、畜産物の産地も全国に遍在している。さらには、生産地から消費地への流通経路は産物毎、消費地毎に異なっている。DEHP の詳細リスク評価では、主要な農・畜産物について京浜地区への流通が考慮されているが、全ての農・畜産物等について流通経路が把握されているわけではない。

今後、人口流動や食品の物流を考慮して、化学物質の曝露濃度や摂取量をより適切に推計するために、空間的相互作用モデルのような空間統計解析手法の導入が必要と考えられる。

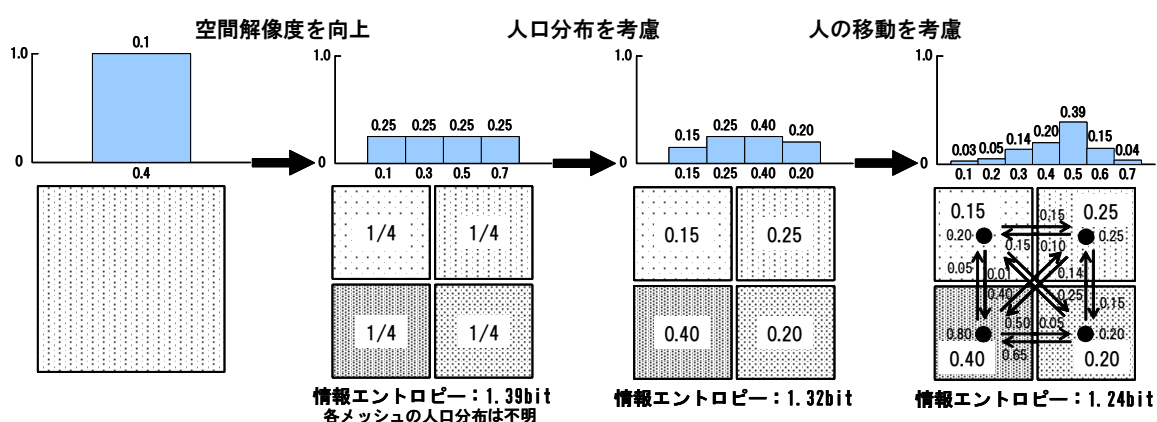


図5 空間解像度の向上と不確実性の低減（模式図）

5. おわりに

「化学物質のリスク評価およびリスク評価手法の開発プロジェクト」で、種々のモデリング技法をベースとする曝露解析手法を開発し、詳細リスク評価に適用することにより、モニタリングをベースとするでは困難であった集団の暴露分布の評価と排出源からヒトや環境生物に至る曝露の道筋における化学物質の移行の定量的評価が可能なることを示した。室内曝露モデルのように、今後、実用に耐えるモデルの構築が必要な部分も残っているが、今後は、より少ない情報量で「詳細評価が必要」と初期リスク評価で判定される化学物質を対象とした詳細な曝露解析が可能となるよう、モデリング技法の活用について検討が必要である。