化学物質のリスク評価のための水系暴露解析モデル*

石川百合子¹ 東海明宏²

Watershed Model for Chemical Risk Assessment in Japan

by Yuriko ISHIKAWA^{a*} and Akihiro TOKAI^a

a. Research Center for Chemical Risk Management, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), 16-1 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8569, Japan
(*Corresponding author E-mail:y-ishikawa@aist.go.jp / FAX: 029-861-8904)

The AIST-SHANEL (AIST-Standardized Hydrology-based Assessment tool for chemical Exposure Load) software was developed to estimate detailed and accurate exposure predictions of concentrations of chemicals at watershed areas for use within chemical risk assessment and management in Japan. This software covers the area more than 50% population in Japan. The main technical focus is on the temporal and spatial fate of chemicals in surface water, together with emissions from point sources of various industry and sewage treatment plants and non-point sources of households and agricultural land. Therefore, it is necessary to account for spatial and temporal distributions in exposure concentrations of chemicals with chemical emissions and river discharge. For estimating concentrations of chemicals in surface water on the 1km scale per day or month, a given watershed area was segmented into 1km grids, including 3 compartments of surface water, sediment, surface soil. The exposure concentrations in the watershed area were predicted based on the river discharge and the emission amounts of chemicals at each grid. The discharge was estimated from precipitation amounts in the watershed area. The emission amounts of chemicals based on the PRTR in Japan were allocated to 1km grids within the watershed area using industrial manufacture data, sewerage area data and land use data. The attenuation mechanisms included advection, diffusion, sorption/desorption, settling and resuspension of suspended solids, diffusive exchange between compartments, and biodegradation. Required input parameters in this model were emission data, sewage removal rate and basic chemical-specific properties for the chemical of interest. Here this model was applied to Tama River and predicted the exposure concentrations of some representative chemicals, for example 4-nonylphenol, in terms of ecological risk and risk reduction measures. In this way, this model will enable us to conduct ecological risk assessment in aquatic systems and will be expected as chemical risk assessment tool.

KEY WORDS: Chemical Substances, Risk Assessment, Watershed Model, Exposure Concentration, Ecological Risk, Risk Management

1. はじめに

近年、産業活動や生活に伴う化学物質の使用増加に伴い、化学物質によるヒトや生態系への影響が懸念されている。問題となる化学物質が、どのような発生源から、環境中にどの程度排出され、ヒトや生態系に暴露し、影響を与えるのかを把握するため、化学物質のリスク評価が必要とされている。リスクが懸念されると判定された場合には、リスクを削減するための合理的な対策を講じなければならない。大気では、ヒトの健康影響の観点から、有害大気汚染物質の自主管理対策等が進められている。一方、河川流域などの水系においては、肥料等による窒素やリンなどの栄

養塩類による富栄養化などが深刻な問題になっていたことから、それらの調査研究が進められてきたが、産業や生活由来の化学物質については、調査報告が少ない状況にある。

水質調査に関しては、1970年に制定された水質汚濁防止法に基づき、1971年度以降公共用水域の水質測定が行われている。水質汚濁防止法で定められている水質環境基準には、26の健康項目とBOD、COD、SSなど5つの生活環境項目がある。さらに、公共用水域等における検出状況等からみて、現時点では直ちに健康項目としないが、引き続き知見の集積に努めるべきと判断されているクロロホルム等の27項目が要監視項目として掲げられており、それぞれの指針値を設定している。これらの項目については、環境省による公共用水域水質調査¹⁾が継続して行われている。また、環境省では、1978年から、化学物質の規制に関する法や対策の検討に必要な暴露データの取得のため、一般環境中における有害化学物質の残留状況等についての化学物質環境実態調査²⁾を毎年実施している。この調査では、化学物質と環境問題を巡る状況の変化や政策課題に対応するため、毎年度、調査対象物質が見直されており、各物質の継続的な測定調査は行われていない。

*2006年7月10日受付 8月19日受理

1. 独立行政法人 産業技術総合研究所 化学物質リスク管理研究センター
生態リスク解析チーム 研究員

2. 独立行政法人 産業技術総合研究所 化学物質リスク管理研究センター
水圏環境評価チーム チーム長

[著者連絡先] FAX: 029-861-8904

E-mail: y-ishikawa@aist.go.jp

キーワード: 化学物質, リスク評価, 水系暴露解析モデル, 河川流域, 生態リスク, 対策評価

最近では、内分泌攪乱化学物質による水生生物への生態影響が着目され、1998年度から環境省や国土交通省が水環境中の内分泌攪乱化学物質に関する全国的な調査³⁻¹⁵⁾を年1回から数回程度実施している。しかし、これらの調査では、水系のリスク評価の対象となる化学物質の数や調査頻度が限られており、水系の暴露濃度の代表値を求めるには、データが十分に蓄積されていないといえる。

化学物質の環境への排出量に関しては、最近まで、定量的な情報を入手できず、リスク評価を行うことは困難であった。日本では、2001年度に、「特定化学物質の環境への排出量の把握等及び管理の改善の促進に関する法律」により、PRTR (Pollutant Release and Transfer Register : 環境汚染物質排出移動登録) が施行され、この制度によって、354の化学物質の環境(大気、水域、土壌)への排出量、下水道への移動量、廃棄物への移動量のデータが一般市民でも入手できるようになった。この制度では、届出の対象となる事業所からの排出量だけでなく、対象となっていない小規模の事業所や店舗からの排出量、家庭、移動体からの排出量も推計を行っているため、対象化学物質の環境中への人為的な排出量は、おおよそ網羅されていると考えられる。ただし、PRTRには、推計方法および排出係数の精度や妥当性に関して検討課題が残っており¹⁶⁾、別途不確実性を考慮する必要がある。

水系暴露濃度を把握する方法には、実測値に基づき統計解析を行って推定する方法と、水環境中の物質の動態メカニズムを反映したモデルによって推定する方法がある。実測値の統計解析による方法では、暴露濃度の頻度分布から高暴露濃度を抽出することが目的である。しかし、前述したように、PRTRの対象となっている化学物質の観測頻度や観測地点が限られており、統計解析の母集団となるデータが不足している。水系での化学物質の観測には、多大な労力や費用がかかるため、観測調査を数多く行うことは容易ではない。また、排出源から水域へ到達するまでに、下水道が関与するため、下水道の普及状況も考慮する必要があり、実測値だけで排出源と暴露濃度の因果関係を考察することは困難である。

一方、動態解析モデルによる推定方法では、河川流量と化学物質の排出量をインプットとして、動態解析計算を行う。河川の流量は、基本的には、流域における降水量から蒸発散量を差し引いた量である。しかし、土地利用、取水(ダム、上水、工業用水、農業用水)や下水道などの人工的な水収支も考慮しなければならない。また、下水道が普及している地域では、下水処理場へ移動した物質が、完全に除去されずに河川流域へ放流されることも考慮しなければならない。このように、水系におけるリスク評価では、化学物質の暴露がその土地の特性によって大きく異なるため、流域の地理情報に基づいて、暴露濃度を推定することが重要である。しかし、これまで、日本における化学物質のリスク評価を可能とする水系暴露解析モデルはなかった。

独立行政法人産業技術総合研究所化学物質リスク管理研究センターでは、化学物質のリスク評価のための水系暴露解析モデルを開発し、産総研-水系暴露解析モデル(National Institute of Advanced Industrial Science and Technology - Standardized Hydrology-based Assessment tool for chemical Exposure Load : 通称 AIST-SHANEL)として、2004年にVer.0.8、2005年にVer.1.0を公開した。

本稿では、水系暴露解析モデルの国内外の開発状況を述べ、本

Table 1 Major watershed models of chemicals in the world.

地域	欧州	米国	米国	日本	日本
モデル	GREAT-ER ⁽⁸⁾	EXAMS ⁽⁹⁾	BASINS-QUAL2E ⁽²⁰⁾	Tamagawa River Model ⁽²²⁾	G-CIEMS ⁽²³⁾
開発機関	ECETOC	U.S.EPA	U.S.EPA	P&G	NIES
対象地域	欧州流域 (イギリス4河川、イタリア1河川、ドイツ4河川、ベルギー1河川、フランス1河川)	任意の河川	米国全流域	多摩川	日本全国
流域情報	GISによる流域情報の設定	任意の河川流域情報をユーザー設定	GISによる流域情報の設定	多摩川のデータ搭載	GISによる河道構造データベース
時間分解能	定常	定常、月単位、ユーザー設定期間	定常状態の流量を仮定	流量変動を考慮	流量変動を考慮
空間分解能	流域内の任意の地点設定可能	複数のコンパートメントに分割し、コンパートメント内は水域と底質に分割	25の対象流域について、一次元コンパートメントを20まで分割可能	多摩川を1kmごとに分割	GISによる河道ネットワーク
出力結果	モンテカルロシミュレーションを用いた暴露濃度分布に基づくPEC	水域および底質の暴露濃度	コンパートメントごとに、時間および空間的な平均濃度	多摩川における暴露濃度、負荷量	流量変動に基づく暴露濃度
排出量の設定	処理水および未処理水排出量の設定	負荷量データベースの利用	点源排出量と非点源排出量の設定	下水処理場由来負荷未処理生活雑排水	(開発中)
動態メカニズム	マルチメディア フガシティモデルの適用(大気、土壌、水系、底質に分割)	移流、分散、揮発、生分解、加水分解、光酸化、酸化、還元など	移流、分散、分解、沈着、底質の巻き上げなど	希釈、分解、下水処理除去	希釈および消長(分解、底質とSSとの平衡分配)

Fig.1 Example of outputs of the GREAT-ER model.

研究所が公開した産総研-水系暴露解析モデルの概要と活用事例を紹介する。

2. 水系暴露解析モデルの国内外の研究動向

化学物質に関する河川流域を対象とした水系暴露濃度の推定モデルで公開されているものは、ほとんどが欧米で開発されたものである¹⁷⁾。そのうち、代表的なモデルとして、欧州における流域のリスク評価のために開発された GREAT-ER¹⁸⁾や、米国の EXAMS¹⁹⁾や BASINS²⁰⁾ 等がある。主な水系暴露解析モデルの概要を Table 1 に示す。

GREAT-ER は、ヨーロッパの河川流域における地理情報をベースに、流域の暴露濃度の確率分布から PEC (予測環境濃度) を算出する地域環境アセスメントツールである (Fig. 1)。現在、イギリス (4 河川)、イタリア (1 河川)、ドイツ (4 河川)、ベルギー (1 河川)、フランス (1 河川) を対象流域とした解析が可能となっている。

米国環境保護庁 (U.S.EPA) による EXAMS は、複数または単一の排出源から排出される化学物質による河川や湖沼など表層水や底質への影響を調べることを目的とした水系暴露解析モデルである。このモデルでは、計算対象の河川流域を複数の均一な性質を持つと仮定する区分 (コンパートメント) に分割し、各コンパートメントで環境条件を設定し、水域中および底質中の化学物質濃度を推定する。

U.S.EPA による BASINS は、米国の流域を対象に、行政による表層水の解析に用いるために開発されたシステムであり、GIS を利用して米国内のすべての対象流域の地理情報を取り入れることが可能となっている。BASINS のシステムの中に、一般的な水質汚濁物質や化学物質の濃度を推定するためのモデルをいくつか備えている。

これらの欧米で使用されているモデルは、欧米の河川のように勾配が緩やかなところに適したものであるといえる。一方、日本の河川は、欧米と比べて河川の勾配が急であり、距離も短く、流量の時間的な変動は相対的に大きい。また、人口密度が高く、排出源が密に立地しているところが多いため、流域全体における排出量の空間分布を把握し、排出源と暴露濃度の因果関係を考察する必要がある。したがって、日本の河川流域を対象とした水系暴露解析モデルは、時空間的に詳細な変動を解析できることが要件となる。

日本における河川の汚染物質に関するモデルは、湖沼や都市河川での水質改善がはばかしくなく、有機物による水質汚濁、窒素やリンによる富栄養化が顕在化していることから、これに関するモデルの研究事例が多い²¹⁾。しかしながら、こうしたモデルでは、化学物質のリスク評価を行うことができない。Yamamoto et al.²²⁾ は、多摩川における LAS 等の界面活性剤について、1km メッシュで年平均濃度を予測するモデルを開発した。また、最近では、化学物質による全国規模の汚染状況の空間分布を把握するため、日本国内全域の河道ネットワーク上における化学物質の動態解析を目標とした全国の河道構造データベースを作成し、GIS を利用した河川動態モデルを開発したとの研究報告もある²³⁾。将来的には、河川流域の情報を GIS で解析する方法が発展していくと思われるが、現在のところ、GIS の費用が高く、一般社会で GIS を活用するには、しばらく時間がかかると思われる。

3. 産総研－水系暴露解析モデル (AIST-SHANEL) の開発

水系における化学物質のリスク評価や管理対策の必要性が高まっていることを考慮すると、GIS を導入するための技術的な発展を待つよりも、まず、一般社会で普及しているパソコンのレベルで解析可能な水系暴露解析モデルを開発することが急務となる。本研究の産総研－水系暴露解析モデル（以下、AIST-SHANEL と呼ぶ）は、一般のパソコンを利用して、日本の河川流域における水系暴露濃度の詳細な時空間変動を推定できるものである。本モデルの仕組みや詳細な計算方法については、既報²⁴⁾に記述されているため、ここでは、本モデルの概要と、実際に計算した事例に基づいて、どのようなことに活用できるのかを述べる。

3・1 モデルの概要

AIST-SHANEL は、PRTR のデータを用いて、日本の河川流域を対象に、流域全体を 1 km メッシュおよび 1 日単位の精度をもって水系暴露濃度を推定するモデルである。各メッシュ内で、河川水、河川底泥、土壌の媒体間で、SS（懸濁物質）の沈降や巻き上げ、Koc（有機性炭素分配係数）を考慮した物質移動に基づいたモデル式を設定しており、土壌吸着性の高い物質や水溶性の高い物質の物性を反映することができる。さらに、推定した化学物質の水系暴露濃度が、水生生物に影響を与える濃度を超過するかどうかを判定する生態リスク評価も備えている。リスク管理対策の観点から、排出量の削減や下水処理除去率の向上の効果を計算することも可能である。

本モデル計算の流れを Fig. 2 に示す。まず、対象とする流域の土地利用、標高、人口、工業統計と気象データから、1km メッシュ単位での流量を推定する。次に、対象とする化学物質の PRTR デー

タの全国の届出排出量の集計値、対象業種からの届出外排出量（裾切り以下）、非対象業種からの届出外排出量、家庭からの届出外排出量の推計値を入力し、工業統計や下水道普及率のデータを指標にして、流域内の各メッシュに割り振る。流量の計算に必要な流域データや気象データ、排出量推計に必要な工業統計データや人口、下水道に関するデータは、モデル内に搭載している。これらのメッシュ単位での流量と排出量を入力データとして、化学物質の動態メカニズムを考慮した計算を行い、水系暴露濃度を推定する。ユーザーが入力するデータは、対象とする化学物質の PRTR データおよび蒸気圧、分子量、水溶解度、Koc という基本的な物性である。モデルの出力結果は、1km メッシュおよび 1 日ごとの流量および河川水濃度、河川底泥濃度である。

なお、2004 年に公開した AIST-SHANEL Ver.0.8 は、多摩川（東京都・神奈川県）、日光川（愛知県）、大聖寺川（石川県）、石津川（大阪府）の排出密度の高い 4 水系について、1998－2000 年の 1 日ごとの 1km メッシュ単位の水系暴露濃度を推定できるモデルである。2005 年に公開した Ver.1.0 では、利根川・荒川、淀川、木曽川など日本の主要な広域水系を追加し、Fig. 3 に示す全国 13 水系における 1991－2003 年の月ごとの 1km メッシュ単位の流量および河川水濃度を推定することができる*。Ver.1.0 では、水系から大気への揮発や大気から水系への沈着も計算に取り入れており、広域水系における空間的な暴露評価や対策評価に有用なモデルとなっている。

3・2 計算方法

3・2・1 流域の対象環境媒体 本モデルでは、Fig. 4 に示すように、流域全体を水平方向に 1km メッシュ、鉛直方向には土壌を表層から A から D の 4 層に分割し、層の厚さをそれぞれ 0.3 m、1.0 m、2.5 m、10 m と仮定している。対象とする環境媒体は、河川水、河川底泥（液相・固相）、土壌（気相・液相・固相）、流域内水路（液相・固相）、大気である。

3・2・2 流量の推定 まず、熱収支解析によって蒸発散量を推定し、その蒸発散量と降水量から既存の流出解析モデル²⁵⁾によって、各メッシュの流量を推定する。地表面と土壌 A 層および河道に関しては kinematic wave 法、土壌 B～D 層は線形貯留法を適用している。地表面および土壌 A 層では、畑地、山林、市街地、水田、水域の土地利用別に表面流出率を設定している。蒸発量は、土壌 A 層から差し引き、不足する場合には、土壌 B 層から差し引いている。また、貯留高が飽和貯水量を超過した場合には、溢水量の上層への復帰を仮定している。

工業用水と上水道の都市用水は、定常的に取水があるものと仮定し、水利権量を設定した。農業用水は、水利権の把握が困難なことや、降水量等の気象条件によって取水量が大きく変動することから、水田における水管理方式を仮定し、これを満たす取水量を設定した。

3・2・3 排出量の推定 対象化学物質の排出量については、PRTR データの全国の「公共用水域への届出排出量」、「下水道への届出移動量」、「対象業種からの届出外排出量（裾切り以下）」、「非対象業種からの届出外排出量」と「家庭からの届出外排出量」を対象流域のメッシュへ配分することによってトップダウン的に推定する**。

PRTR の全国データに基づいた排出量推定の流れを Fig. 5 に示す。PRTR データは、点源排出量と非点源排出量に分類され、点

* Ver.1.0 では、計算時間とファイル容量の縮小化をはかるため、時間分解能を月単位とし、出力データも流量と河川水濃度のみとした。

**PRTR の個別の事業所データから、排出量をメッシュごとに積算し、ボトムアップ的に推定することも可能である。

Fig.2 Configuration of the AIST-SHANEL model.

源排出量では、産業分類の業種別の公共用水域の届出排出量、下水道への届出移動量、届出外排出量（裾切り以下）の3種類のデータが対象となる。非点源排出量では、用途別の対象業種からの届出外排出量（水道のみ）、非対象業種からの届出外排出量、家庭からの届出外排出量、下水道への移動量の4種類のデータが対象

となる*。なお、届出外排出量については、大気、土壌、水域、埋立への総排出量として推計されているため、本モデルでは、水域への排出率を設定し、総排出量にその比率を乗じたものを水域

* 下水道への移動量は、参考として報告されている。

Fig.3 Target river basins of the AIST-SHANEL model
(■: both Ver.0.8 and Ver.1.0, ■: Ver.1.0 only).

Fig.4 Mechanism of dynamics of chemicals between compartments in the model.

への排出量としている。

これらの全国規模のPRTRデータを対象流域の1kmメッシュへ割り振る。点源排出量は、産業分類の業種別の製造品出荷額のメッシュデータ、非点源排出量は、用途を考慮し、人口もしくは土地利用面積のメッシュデータで割り振る。これらの排出量は、下水道を経由しない排出量（地先からの排出量）と、下水道を経由して下水処理場で除去されない排出量（下水処理場からの排出量）の2つに分類され、推計が行われる。

3・2・4 暴露濃度の推定 暴露濃度の推定は、前述の方法で推定したメッシュごとの流量と排出量をもとに、以下の動態メカニズムを入れた計算式によって行われる。

- ① 水の流に伴う移流拡散
- ② SSへの吸着およびSSからの脱着
- ③ 河川水から河川底泥へのSSの沈降。なお、河川底泥は、懸濁物質が沈降して堆積したものと仮定する。
- ④ 河川底泥から河川水へのSSの再浮上

- ⑤ 河川水、河川底泥、土壌における微生物による生分解
 - ⑥ 河川水、河川底泥（液相・固相）、土壌（気相・液相・固相）、大気の媒体間における物質の拡散移動
 - ⑦ 大気から水系への湿性沈着および乾性沈着
 - ⑧ 水系から大気への揮発
 - ⑨ 化学物質の河川、土壌、流域内水路への排出
- 物質動態解析の基礎式を式(1)に示す。各パラメータの設定方法については、既報²⁴⁾を参照していただきたい。

$$\frac{\partial}{\partial t}(A_r C_r) + \frac{\partial}{\partial x}(A_r U_r C_r) = \frac{\partial}{\partial x}(A_r D_r \frac{\partial C_r}{\partial x}) + W \frac{A_r}{H_r} + G \frac{A_r}{R} + D - K A_r C_r + f \dots \dots \quad (1)$$

A_r : 流水断面積 (m^2), C_r : 河川水の化学物質濃度 ($mg \cdot m^{-3}$), U_r : 断面平均流速 ($m \cdot s^{-1}$), D_r : 拡散係数 ($m^2 \cdot s^{-1}$), D : 河川水-底泥間の物質移動量 ($mg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$), W : 沈降速度定数 ($mg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$), H_r : 平均水深 (m), G : 再浮上速度定数 ($mg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$), R : 径深 (m), K : 分解速度係数 (s^{-1}), f : 斜面からの横流入負荷量 ($mg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$)

本モデルでは、分解代謝物を経ずにそのまま二酸化炭素と水へ究極分解される経路と、究極分解と同時に代表的な分解代謝物を経由して究極分解に至る経路の2つから選択可能となっており、各分解経路の反応率と半減期を設定すれば、分解代謝物の濃度が推定される。

本モデルの再現性については、直鎖アルキルベンゼンスルホン酸ナトリウム (LAS) やノニルフェノールエトキシレート (NPnEO) およびその分解代謝物であるノニルフェノール (NP)、ビスフェノールA (BPA) などの計算値が実測値の ± 1 オーダーに入ることが示されている²⁴⁾。

3・3 モデルの活用事例

本節では、AIST-SHANEL Ver.1.0を適用した場合の活用事例を紹介する。ここでは、都市河川の1つであり、流域内に多様な産業や人口が多く、下水処理場も点在している多摩川流域を対象とする。対象化学物質として、最近、魚類など生物への毒性が懸念されたノニルフェノールを例として、水系暴露濃度の推定結果を示す。

3・3・1 ノニルフェノールについて ノニルフェノール (NP) は、人為的に生産され、その多くは、ノニルフェノールエトキシレート (NPnEO) という化合物に変換される。NPnEOは、界面活性剤として、多様な用途で使われる。NPnEOが河川流域へ流入する経路には、製造業の排水に含まれるNPnEOが、排水処理施設や下水処理場で除去された後、河川へ流入する排出経路と、建物の床清掃などで用いられる業務用洗剤やクリーニング剤、農薬・肥料や土木・建築などから排出され、下水道を経由するものについては、下水処理場からの排出経路がある。排出されたNPnEOは、微生物により徐々に分解されてNPとなり、最終的には、二酸化炭素と水に分解される。このNPnEOの分解生成物であるNPが、生態系に影響を与える可能性があることが知られている。したがって、NPの水系暴露濃度を推定するためには、NPnEOの排出量を推定することが必要である。

3・3・2 NPnEOの排出量 NPnEOの2001年度のPRTRデータに基づく排出量をFig.5の方法で推計した結果をFig.6に示す。NPnEOの下水処理除去率は90%²⁶⁾として計算を行った。地先からの排出量、下水処理場からの排出量ともに、多摩川の中上流で高くなっている地域が見られる。本モデルでは、点源排出量の業種別の面的分布図や非点源排出量の用途別の面的分布図を表示することができるため、それらの面的分布図と比較すると、

Fig.5 Calculation of emission amounts of chemicals from PRTR data in the model.

地先からの排出量は主に機械・金属工業などの事業所から、下水処理場からの排出量は、業務用洗剤などの使用の多い人口密度の多い地域で高くなっていることが示唆された。

3・3・3 NPの水系暴露濃度 AIST-SHANEL Ver.1.0では、1991-2003年の流量計算が可能であるが、各流域において、降水量の平年値に最も近い年を抽出し、流量の代表年として設定している。代表年の計算値は、平均的な流量における水系暴露濃度と解釈することができる。ここでは、多摩川の流量代表年である1999年の計算結果を示す。

多摩川流域における流量の推定結果のうち、最下流地点に近い田園調布取水堰の流量の最小は12月、最大は8月であった。NPの水系暴露濃度を季節変化の観点から考察するため、12月と8月の面的分布図をFig. 7に示す。12月の水系暴露濃度の方が比較的高い様子が見られるが、これは流量が少なく、物質が希釈されずに濃度が高まったことが考えられる。また、12月は冬季で水温が低いために微生物活動が進まず、生分解が起こりにくくなり、暴露濃度が高くなったことも要因の1つと考えられる。

NPの暴露濃度が高い地域は、下流だけでなく、上流の方でも

Fig.6 Estimated emission amounts of NPnEO at Tama River basin area.
Upper: wastewater treatment system, Lower: sewerage system

Fig.7 Exposure concentrations of NP at Tama River basin.
Upper : December, 1999, Lower: August, 1999

見られる。排出源の面的分布やNPnEOの河川水濃度の面的分布から、上流にある排出源の影響が残っている可能性が示唆された。また、この地域では流量が少ないことがさらに濃度を上昇させたことも考えられる。このように、高暴露濃度の要因を考察するには、本モデルで得られる流量や排出量の時空間分布が役立つ。その結果、高濃度が比較的どこに現れやすいかを予測することができ、リスク削減対策を講じるための有用な情報を提供することができる。

3・3・4 生態リスク評価および対策評価

さらに、本モデルで推定したNPの水系暴露濃度が、水生生物に影響があらわれるレベルかどうか、影響があらわれる可能性があれば、どのような対策をとればよいかを考察することができる。

ここでは、メダカの個体群へのリスクを考え、メダカ個体群に与える影響の閾値を 2.1 mg m^{-3} ²⁶⁾とし、その濃度を超過する確率で生態リスクを評価する。超過確率が高いほど、リスクが高いことになる。今回の計算では、 2.1 mg m^{-3} を超過する地点は1つもなかった。

仮に、 0.1 mg m^{-3} で影響があらわれる水生生物がいると仮定する。この閾値を超過する確率の面的分布図をFig. 8に示す。多摩川流域の中流から下流にかけて、この超過確率は高くなっており、下水処理場を経由する排出量が影響していることが考えられる。このことは、流下負荷量で考えた場合、河川水に占める下水処理水の割合が高くなっていることを示唆している。

この超過確率を低くするための対策の検討には、排出源対策によって、どの程度リスクを削減できるかを見る必要がある。例えば、NPnEOを使用している業界が排出量を削減する自主管理対策を講じた場合にどれだけの濃度削減の効果があるのか、下水処理場において高度処理を施した場合に、除去率が向上した効果がどの程度あるのかを評価することができる。

ここでは、NPnEOを使用している業界が排出量を30%削減した場合と、下水処理場の除去率を現状の90%から99%に向上した場合の2つのケースを想定する。今回計算に用いた2001年度のPRTRデータに基づく排出量と下水処理除去率を90%とした現状のケース、この排出量を30%削減する対策ケース、下水処理除去率を99%に向上する対策ケースのそれぞれについて、最下流端に近い田園調布取水堰におけるNPの河川水濃度の経月変化をFig. 9に示す。この図から、下水処理除去率を向上させる対策が、濃度を最も低下させる効果があることが分かる。また、現状のケースでは、冬季の濃度が高く、夏季の濃度が低い傾向が見られるが、下水処理除去率の向上によって、顕著な季節変化が見られなくなることがわかる。これは、下水処理場における除去率が上がったことによって、流下負荷量ベースで河川水に占める下水処理水の割合が小さくなったことによるものと考えられる。

これらの結果は、対策に関わる費用を考慮して、合理的な対策を決定しなければならないが、多様な

Fig.8 Excess probability of NP for eco-toxicological risk as the threshold of 0.1 mg m⁻³.

Fig.9 Monthly variations of NP concentration at the lowest reach site in the Tama River in risk reduction cases.

Fig.10 Output of Turbo-SHANEL model.

排出形態を反映した対策評価を行うことができるモデルは、国内外でも唯一のものであるといえる。

4. 任意の流域を対象とした水系暴露解析モデル

AIST-SHANEL は、時空間的に詳細な計算を行うことが可能なモデルであるが、対象流域が既に設定されている。対象外の流域で、短時間で水系暴露解析を行いたいというニーズに答えるため、AIST-SHANEL Ver.0.8 では、詳細には解析できないが、任意の流域における晴天時の河川水中濃度を大まかに計算できるモデル Turbo-SHANEL を備えている。Turbo-SHANEL では、晴天時における河川水中濃度として高水流量（年間の流量日系列に対して降順 355 日目）から低水流量（年間の流量日系列に対して降順 275 日目）に相当する流域の最下流端における濃度、すなわち年間の

95 パーセンタイル*と 75 パーセンタイルに相当すると考えられる濃度を推定できる。なお、分解代謝物は考慮していない。

Turbo-SHANEL における化学物質の河川水中濃度の計算式を式 (2) に示す。河川水中濃度は、流域全体の排出量と流量、河川水中における溶存態の比率、および溶存態における生分解により定義される浄化残率で決まるものとする。

$$C = \frac{I \cdot f_w \cdot k_w}{f(Q)} \quad (2)$$

C: 河川水中濃度の確率分布 (mg m⁻³) I: 排出量 (mg s⁻¹) f_w: 溶存態比率 (-) k_w: 溶存態における生分解により定義される浄化残率 (-) f(Q): 流量の確率分布 (m³ s⁻¹)

溶存態における生分解により定義される浄化残率は、物質の分解速度に基づいて設定している。下水処理の除去率は、物質の生分解速度と相関関係があると考えられるため、物質の半減期の範囲に対応した下水処理除去率を設定している。排出量については、PRTR データの全国の公共用水域への排出量や下水道への移動量が、流域の都市的な面積に比例配分されるものと仮定して、流域に割り振る。流量の確率分布は、対数正規分布を仮定し、その母数は流域面積から決定している。流量の確率分布と化学物質の溶存態比率、溶存態における生分解により定義される浄化残率のパラメータをもとに、モンテカルロシミュレーションを適用し、河川水中濃度を確率分布として求める。

Turbo-SHANEL の計算結果の一例を Fig. 10 に示す。任意の流域を対象として、下流端における対象化学物質のおおよその濃度レベルを把握する目的には、Turbo-SHANEL が有用である。

5. AIST-SHANEL の今後の展開

AIST-SHANEL は、日本の河川の特徴や排出源の立地状況に適した化学物質のリスク評価のための水系暴露解析モデルである。このモデルが公開されたことにより、1) 日本の流域における水系暴露濃度の時空間的な分布を把握する 2) 生態系に影響があらわれる濃度と比較することによって、生態リスクを評価する 3) リスクが懸念される場合には、排出量の削減や下水処理除去率を向上させたときの濃度の低減効果を推定し、より合理的な対策を検討することが可能となり、水系におけるリスク評価の発展に寄与するであろう。また、リスク評価の必要性が高まっていることから、一般社会におけるリスク評価の普及を図ることができ、水系における化学物質のリスク評価の学習用の教材としても有用な解析ツールとなるであろう。

本モデルは、揮発性が少なく、水系に存在しやすく、また、微生物によって分解される有機化合物を対象に開発されたものである。難分解の化学物質にも適用し得ることが課題となっている。

今後は、亜鉛等金属に係る生態影響や対策効果の定量的評価の必要性が高まっていることから、金属版水系暴露解析モデルを開発することが期待されている。特に、亜鉛等の金属においては、PRTR で対象となっている排出源以外に、暴露濃度に影響を与えると考えられる鉱山などの自然起源由来の発生源や路面排水を考慮する必要があり、実態に即した詳細な排出量の推計が必要である。現在、亜鉛等を対象とした金属版水系暴露解析モデルを開発

*分位点: データを小さい方から順番に並べ、100p% (p は 0 以上、1 以下) の位置にある値を「100p パーセンタイル」という。

中であり、来年度に公開する予定である。

AIST-SHANEL に関する情報は、ホームページ²⁷⁾をご覧ください。

本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) からの受託研究「リスク評価, リスク評価手法の開発及び管理対策のリスク削減効果分析」によって得られた成果である。

References

- 1) Kankyocho Mizu・Taiki Kankyokyo : Koukyouyousuiki Suisitsusokuteikekka, (1972-2005) .
- 2) Kankyocho Kankyohokenbu Kankyoanzenka : Kagakubusshitsu to Kankyo, (1975-2005) .
- 3) Kensetsusho Kasenkyoku Kasenkankyo : Heisei 10 Nendo Mizukankyo ni okeru Naibun pitsukakurankagakubusshitsu ni kansuru Jittaichousaekka ni tsuite, (1999).
- 4) Kensetsusho Kasenkyoku Kasenkankyo : Heisei 11 Nendo Mizukankyo ni okeru Naibun pitsukakurankagakubusshitsu oyobi Daiokishinrui ni kansuru Jittaichousaekka ni tsuite, (2000).
- 5) Kokudokoutsusho Kasenkyoku Kasenkankyo : Heisei 12 Nendo Mizukankyo ni okeru Naibun pitsukakurankagakubusshitsu ni kansuru Jittaichousaekka ni tsuite, (2001).
- 6) Kokudokoutsusho Kasenkyoku Kasenkankyo : Heisei 13 Nendo Mizukankyo ni okeru Naibun pitsukakurankagakubusshitsu ni kansuru Jittaichousaekka ni tsuite, (2002).
- 7) Kokudokoutsusho Kasenkyoku Kasenkankyo : Heisei 14 Nendo Mizukankyo ni okeru Naibun pitsukakurankagakubusshitsu ni kansuru Jittaichousaekka ni tsuite, (2003).
- 8) Kokudokoutsusho Kasenkyoku Kasenkankyo : Heisei 16 Nendo Zenkoku Ikkyukasen ni okeru Biryokagakubusshitsu ni kansuru Naibun pitsukakurankagakubusshitsu ni kansuru Jittaichousa no Kekka ni tsuite (Daiokishinrui, Naibun pitsukakurankagakubusshitsu) , (2005).
- 9) Kankyocho Suisitsuhozenkyoku Suisitsukanrika : Mizukankyocho no Naibun pitsukakurankagakubusshitsu (iwayuru Kankyohorumon) Jittaichousa, (1999) .
- 10) Kankyocho Suisitsuhozenkyoku Suisitsukanrika : Heisei 11 Nendo Mizukankyocho no Naibun pitsukakurankagakubusshitsu (iwayuru Kankyohorumon) Jittaichousaekka, (2000).
- 11) Kankyocho Kankyokanrikyoku Mizukankyobu Mizukankyokanrika : Heisei 12 Nendo Mizukankyocho no Naibun pitsukakurankagakubusshitsu (iwayuru Kankyohorumon) Jittaichousaekka, (2001).
- 12) Kankyocho Kankyokanrikyoku Mizukankyobu Kikakuka : Heisei 13 Nendo Mizukankyocho no Naibun pitsukakurankagakubusshitsu (iwayuru Kankyohorumon) Jittaichousaekka, (2002).
- 13) Kankyocho Kankyokanrikyoku Mizukankyobu Kikakuka : Heisei 14 Nendo Naibun pitsukakurankagakubusshitsu ni okeru Kankyo Jittaichousaekka (Mizukankyo) ni tsuite, (2003).
- 14) Kankyocho Kankyokanrikyoku Mizukankyobu Kikakuka : Heisei 15 Nendo Naibun pitsukakurankagakubusshitsu ni okeru Kankyo Jittaichousaekka (Mizukankyo) ni tsuite, (2004).
- 15) Kankyocho Mizu・Taiki Kankyokyo Mizukankyoka : Heisei 16 Nendo Naibun pitsukakurankagakubusshitsu ni okeru Kankyo Jittaichousaekka (Mizukankyo), (2005).
- 16) Keizaisangyosho Seizousangyokyo Kagakubushitsukanrika・Kankyocho Kankyohokenbu Kankyoanzenka : Heisei 15 Nendo PRTR Todokedegai Haisyutsuryo no Suikei Houhoutou no Gaiyou, (2005).
- 17) Dokuritsu Gyousei Houjin Kokuritsu Kankyo Kenkyujo : Heisei 13 Nendo Shinki Kagakubusshitsu Tsuiseki Chousa Houkokusho, (2002) .
- 18) ECETOC : GREAT-ER ver.1.0 (2003) <http://www.great-er.org/pages/home.cfm>
- 19) U.S.EPA : EXAMS ver.2.98 (2005) <http://www.epa.gov/ceampubl/swater/exams/>
- 20) U.S.EPA : BASINS ver.3.1 (2005) <http://www.epa.gov/waterscience/BASINS/>
- 21) T. Kunitatsu and K. Muraoka : *Kasen Odaku no Moderu Kaiseki*, (Gihoudou Shuppan, Tokyo, 1989) , pp.266.
- 22) A. Yamamoto, C.E. Cowan, D.C. McAvoy and E. Namkung, : *Environ. Sci.*, **10** (1997), 129-139.
- 23) N. Suzuki, K. Murasawa, K. Matsushashi, N. Nanzai, T. Sakurai, Y. Moriguchi, K. Tanabe, O. Nakasugi and M. Morita: *Kankyo Kagaku*, **15** (2005) 385-395.
- 24) Y. Ishikawa and A. Tokai: *Mizukankyo Gakkai* (Journal of Japan Society on Water Environment) (Submitted).
- 25) T. Kojiri, A. Tokai and Y. Kinai: *Kyoto Daigaku Bousai Kenkyujo Nenpu*, **41 B-2** (1998), 119-134.
- 26) Dokuritsu Gyousei Houjin Sangyou Gijutsu Sougou Kenkyujo Kagakubusshitsu Risk Kanri Kenkyu Center : *Shousai Risk Hyoukasho Nonylphenol* (2004) .
- 27) Dokuritsu Gyousei Houjin Sangyou Gijutsu Sougou Kenkyujo Kagakubusshitsu Risk Kanri Kenkyu Center : AIST-SHANEL Home page <http://www.riskcenter.jp/SHANEL/>.