

土壌・地下水汚染のリスク評価技術と自主管理手法

—— リスク管理の実践に向けた構成学的研究アプローチ ——

駒井 武*、川辺 能成、原 淳子、坂本 靖英、杉田 創

土壌と地下水の汚染が人の健康に与えるリスクを評価するための手法を開発した。種々の要素研究を基盤として、評価システム全体を最適に構成した。このため、分野融合型の研究計画を立案して、要素研究の実施からリスク評価システムの開発までを行い、さらに産業や社会で利用可能な形にした。本報告では、研究開発において採用した要素技術の統合と構成のシナリオ、リスク評価の実践におけるスパイラル的な研究展開を中心に、目標達成に至るまでのプロセスについて論じる。

1 はじめに

わが国の土壌汚染対策のパラダイムは、一律に環境基準や指定基準を与える法規制から、土地用途の状況や環境条件に応じた自主的なリスク管理に大きく転換しようとしている。その基礎となったのが科学的な曝露・リスクの解析に基づいた合理的なリスク管理とガバナンス（自主的な取り組み）の考え方である。地圏環境媒体である土壌や地下水は、地表水や大気とは違い、有害化学物質の人への曝露のコントロールが比較的容易である。地表水や大気が生活に必須で、日常的に人が接するものであるのに対して、土壌や地下水は、人がそれらに接する機会（曝露機会）が比較的少ないことが主な理由である。このような地圏環境のリスク評価では、環境を経由した曝露評価に関する普遍的な要素と、地圏環境に特有な土壌物性や地下水流動のような個別な要素についての包括的な関連性を構築することがきわめて重要である。

本研究では、土壌や地下水など複雑な構成要素をもつ地圏環境に関して、それらの汚染が人の健康に与えるリスクを評価する技術を開発した。関連するそれぞれの学術分野の要素技術を個別に開発しただけでは評価システム全体の完成には至らないため、地質学と環境科学を中核とした分野融合型の研究計画を立案して、6カ年の長期間にわたって研究開発を展開した。この中で、これまでの土壌・地下水汚染の諸課題を解決するためのパラダイムを転換して、わが国独自のリスク評価手法とデータベースを構築し、リスク評価の実践においてスパイラル的な研究展開という新たな試みを行い、研究開発を成功に導いた。

本報告では、土壌・地下水汚染のリスク評価に関して、

要素技術に関する研究開発の成果、技術の融合と構成、研究成果の公開と普及、さらには管理規格など社会システムへの組み込みについて述べる。また、それぞれの学術分野における要素技術の成果とともに、第2種基礎研究^{用語1}から製品化研究^{用語2}に至るまでの構成学的なシナリオおよび研究プロセスについて論じる。

2 土壌汚染対策の現状と本研究の社会的な意義

2003年の土壌汚染対策法の施行以降、わが国の土壌・地下水汚染への対応は増加の一途をたどっている。最近の統計では、法規制の下で調査・対策が実施された件数だけで年間約1200件、企業などの自主対策を含めると数千件にものぼっている¹⁾。この背景として、環境汚染問題に対する意識の高まり、土地取引の活発化などがあげられる。また、図1に示すように最近では法規制（ガバメント）

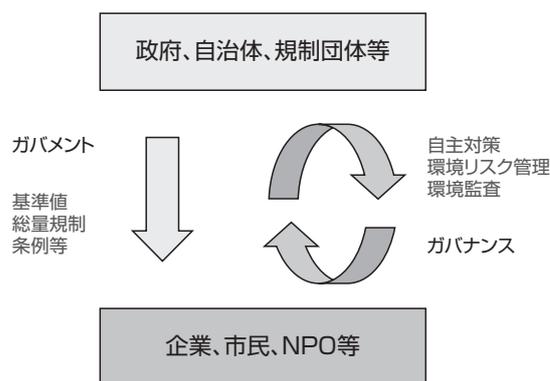


図1 ガバナンスの構造と環境改善への取り組み
環境施策の社会システムとして法規制（ガバメント）と自主統制（ガバナンス）のアプローチの違いを示しており、リスク評価・管理は主にガバナンスの方法論として適用される。

に加えて、企業や自治体における自主対策を含む重層的な取り組み（ガバナンス）の必要性が指摘され、自ら実施するリスク管理がますます重要となっている^[2]。実効性の高い環境施策を行うためには、ガバメントとガバナンスの両者を組み合わせた新たな枠組みとすることが肝要であるため、最近では自主的なリスク管理への移行を視野に入れた法改正の検討も行われている^[3]。

最近の経済産業省の調査によれば、わが国の土壌汚染対策の90%は自主的な取り組みの中で行われ、事業者や自治体自らリスク管理をして調査・対策を行うことが多い^[4]。このような現状をみると、リスク管理に基づく土壌汚染対策を重点的に推進する必要性が理解できるが、現実にはその枠組みやリスク評価の方法論に関して統一的な考え方は存在していなかった。特に、個々の土地用途ごとに異なる環境や曝露の条件に対応したリスク評価の方法が確立されておらず、現実に居住する人が受ける曝露とリスクの大きさについての科学的な情報が不足していた^[5]。

このような背景から、本研究では土壌・地下水汚染に適用可能なリスク評価の方法論を確立することを目的として、分野融合型の研究を実施した。上述のように、リスク評価手法の開発については自治体や企業などからの社会的な要請が強く、環境政策や産業環境管理などの行政的な役割への期待も大きい。この研究開発では、リスク評価手法の開発から地質調査、データ取得、数値解析、システム開発、技術の公開・普及までを一貫して実施する総合的な取り組みを行った。特筆すべき点は、これまでの研究で不足していた分野間の融合、各構成要素の統合、さらには製品化や社会システムへの組み込みまでを目指したことである。最終的な目標は、わが国の土壌汚染対策において標準的なリスク評価手法を確立することであり、その基盤となる要素技術やデータベースを開発・公開することにある。ま

た、国際的にもさまざまな土地用途の特性を考慮したリスク評価システムは研究例がなく^[6]、研究成果を広く世界に発信する意義が大きい。特に、アジア諸国の土壌・地下水汚染は深刻度を増しており、研究成果を普及して環境リスクを軽減・回避できれば国際的な貢献となる。

3 本研究の構成学的な意義と展開

本研究における構成学的な意義とその展開を図2に示す。基本的な要素技術を集積するだけでなく、要素間の関連性を重視するシナリオを採用し、リスク評価システムとしての完成を目指した。以下、さまざまな要素技術を統合するため、本研究開発で採用した基本シナリオや研究目標を達成するために導入した構成学的なプロセスについて述べる。

これまでの環境関連の法制度では、一律に基準値や指定値などを与える規制が多く行われており、ガバメントの考え方を基本としている。一方、最近の環境問題では、トップダウン型の規制では不十分であることが認識されて、企業や自治体の自主的な取り組みを基本とするガバナンスへと転換しつつある（図1）。ガバナンスの考え方は、多様な利害関係者の参加を前提としているので、近未来の環境リスク管理や持続的発展可能な産業構造を考える上できわめて有効な手段といえる^[7]。本研究では、環境施策におけるパラダイムの転換を目的に、統一的な指標による要素技術の統合化や双方向のコミュニケーションなど従来の研究とは異なるシナリオを採用した。

地圏環境を取り扱う研究では、表1に示すような地質学や環境科学などの基礎科学の知見が不可欠である。特に、わが国に特有な土壌や地質の構造や地下水の流動特性、有害化学物質の化学形態や存在形態、曝露解析に必要な各種パラメータなどは、リスク評価を行う上で欠かせないものである。このような要素研究は相互補完的な特徴を有しているが、共通の尺度による研究分野の融合が必要である。具体的には、各研究分野で使用するデータ、パラメー

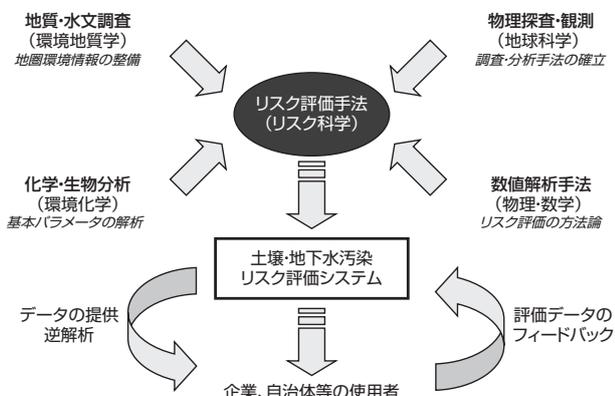


図2 本研究開発における構成学的な特徴
土壌汚染リスク評価システムの研究開発に必要な要素技術と統合化のシナリオを示しており、システム開発およびデータ構築に伴うスパイラルの構成が特徴的である。

表1 本研究に関する学術分野と要素技術

曝露・リスク解析手法	リスク科学(リスク解析、情報科学)	リスク解析 曝露解析
曝露シナリオ、曝露ファクター	安全科学(薬学、毒性学)	
地質構造データベース	地質学(地質情報、都市地質)	地質調査 地下水調査
土壌・地下水パラメータ	環境地質学(地圏情報、水文学)	
環境中物質移行パラメータ	地球科学(物質循環、物理探査)	物理探査 モニタリング
土壌-生体移行パラメータ	環境化学(土壌物理、生物地球化学)	
化学物質パラメータ	物理化学(平衡論、速度論)	化学分析 生物・生態
環境汚染に関する諸データ	環境科学(分析化学、地圏微生物)	
移流・分散解析手法	計算科学(流体工学、数値解析学)	数値解析 システム化
システム化・可視化	システム工学	

タ類などに十分な整合性をもたせることが重要であり、そのための研究調整と方法論の統一化をはかった。

一方、これらの基礎研究の成果を活用するリスク解析では、曝露・リスク評価を行うためのシナリオや数式の確立、地圏環境における汚染物質の移動を把握するための数値解析手法、地下の地質構造を3次元的に把握するための物理探査などの応用的な研究開発も重要である。これらを「環境リスク」という統一的な指標でもって構成し、それぞれの要素技術を有機的に関連づけることにした。また、リスク評価システムを「製品」として完成させるためには、使用する方法論やデータの妥当性を検証することが必要である。そのため、開発したリスク評価システムをいくつかの汚染現場に適用して、得られた評価結果をフィードバック(図2)するとともに、専門家による技術的な評価結果を反映させた。

4 リスク評価の要素技術と方法論の研究

土壌・地下水汚染のリスク評価に関わる要素技術は多岐にわたっている。この中には、表1に示したように地質調査、汚染評価、分析技術、解析技術、モニタリング、およびリスク評価などの要素技術が含まれ、土壌汚染のリスク評価技術を中心とした総合的な研究開発を立案、実施した。

4.1 曝露・リスク評価の方法論の開発

本研究では、まず土壌や地下水などの地圏環境におけるハザードを特定し、そのリスクを定量化するための基本的コンセプトを提示した¹⁸⁾。主要な曝露の経路としては、表層土壌の直接摂取(摂食など)、地下水経由の間接摂取(飲用)、揮散および飛散による大気経由の間接摂取、農作物を経由した間接摂取など、想定されるすべての経路を考慮した(図3)。リスク評価のエンドポイント^{用語3}は、化学物質

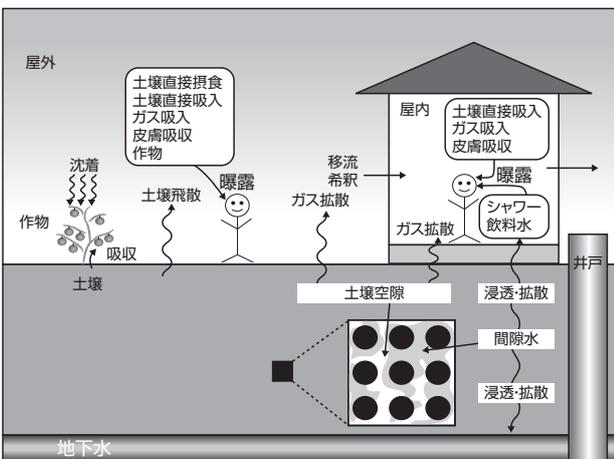


図3 リスク評価における曝露シナリオと曝露経路
土壌汚染リスク評価における曝露シナリオを概念的に示したものである。曝露経路として、直接摂取、地下水経由の経口摂取、大気経由の吸入曝露、作物経由の摂取など経路設定が必要である。

により異なるが、発ガンリスク(経口、経気道)、非発ガンリスクの両者を想定した。また、曝露のシナリオとして、曝露機会や頻度、曝露ファクター(平均体重、水摂取率、土壌摂取率など)を設定し、わが国のデフォルト値とした。これらのデータは、人の行動パターンや医学的な知見から求めた。さらに曝露評価のモデリングを行い、曝露経路およびエンドポイントごとに曝露量およびリスクの計算式を与えた。この他、環境汚染物質の移動性や反応性を予測するための2次元および3次元の数値解析プログラムを与えた。

4.2 化学物質の特性と未規制物質への対応

曝露・リスク評価では、化学物質の基本的特性、土壌との相互作用などのデータ類の集積が欠かせない。本評価システムで対象とする化学物質としては、土壌汚染対策法で規定されている重金属等、揮発性有機化合物、農薬のほか、ダイオキシン類、PCB、鉱物油および未規制化学物質(例えば、亜鉛、アンチモン、ホルムアルデヒドなど)も評価できるようにした¹⁹⁾。これまで約120物質の物性値や環境パラメータ(ヘンリー定数、水-オクタノール分配係数、土壌-水分分配係数等)に関する文献や資料を精査し、データベースを作成した。鉱物油に含有する多様な炭化水素やPAHs(多環芳香族炭化水素)については、室内実験において揮発速度、土壌吸着特性および地下水中の移動パラメータをあらたに測定した。さらに、複合的な汚染問題にも対応できるように、評価システムに改良を加えた¹⁰⁾。

4.3 土壌汚染の調査と分析手法の確立

地圏環境のリスク評価では、土壌の特性や表層から地下水に至る地層、3次元的な地質構造、さらには地下水の挙動に関する情報が重要である。表層土壌の特性を調べるため、独自に実施した地質や土質の調査結果により従来の農用地の分類法を修正し、地域ごとに表層土壌基本図を作成した。また、土壌に含まれる環境汚染物質の含有量や溶出量を定量的に得るための試験分析法を確立し、土壌の種類ごとに全含有量、含有量および溶出量のデータベースを作成した¹¹⁾。さらに、曝露評価の精度に大きな影響を与える化学物質の存在形態に関して、逐次抽出法の標準分析手法を確立し、各種の土壌や岩石に関するデータを集積した。

土壌や地下水中の汚染物質の濃度や分布を明らかにするための現場調査に簡易ボーリングによる低コスト、低環境負荷の汚染調査法を採用し、日本全国の汚染サイトへの適用を容易にした。その結果、従来よりも短時間かつ安価な汚染調査法が確立され、土壌コアの効率的な現場観察や迅速なサンプリングが可能となった。また、油汚染サイトに対して電磁波や比抵抗を用いた物理探査手法を適用し、地層の3次元的な構造や地下水理特性の基礎データ

を集積した^[12]。

4.4 土壌・地下水の基本パラメータの解析

地下水の流動特性および汚染物質の移流・分散特性に関して、モデル地域のモニタリングを行い、不飽和土壌および地下水層における透水係数、分散係数などのパラメータを集積した。さらに、複数の化学物質から成る鉱物油については既存のデータが皆無であったため、カラム試験などの室内実験においてガス-油-水の3相の流動パラメータをあらたに取得した^[13]。

土壌や地下水の内部では、粘土鉱物や微生物の作用により環境汚染物質は吸着・脱着、化学反応、生物分解などの多様な変換を受けている。これらの現象は、リスク評価の結果に大きな影響を与えるため、現場調査および室内試験を通じて分解速度パラメータを収集した^[14]。土壌汚染では、国内数カ所の地域を選定して、土壌の物性、表面の吸着特性、環境汚染物質との相互作用に関する調査を行った。また、採取した土壌を化学分析し、粘土鉱物の種類や組成、吸着・脱着特性に関するデータベースを作成した。地下水汚染では、VOCs（揮発性有機化合物）の汚染サイトのモニタリングを長期間行い、主に微生物分解による環境汚染物質の自然減衰に関する各種データを集積した。

4.5 地圏環境情報の整備

リスク評価手法およびデータベースの作成と併せて、市街地や産業用地のリスク評価に適用される地圏環境情報を整備した。筆者らは、これまで特定地域の地質・土壌基本調査に基づいて、主に自然的原因による表層土壌評価基本図を作成してきた。これらの評価基本図は、曝露・リスク評価にもきわめて有効に活用されることが考えられたため、これまでの調査項目に加えて土壌中の有害化学物質の含有量や溶出量なども調査して、基本図に取り入れた。また、一般的な環境条件においてリスク評価を実施し、重金属類を対象とした曝露量の空間分布を示すリスクマップを作成した^[15]。わが国では、リスクマップの作成は初の試みであり、土壌環境リスク管理の基礎資料として十分に活用できると考えられる。さらに、日本全体の様々な地圏環境の情報をGIS上に統合する研究開発を進め、東北大学と共同で「地圏環境インフォマティクス」を開発した^[16]。この中には、土壌や地質の各種情報に加えて、全国規模の地下水汚染の状況を示すマップが含まれており、リスク管理に広く活用できる。

5 リスク評価のシステム開発

土壌・地下水汚染のリスク評価の要素技術を統合・構成して、「地圏環境リスク評価システム」GERAS（ゲラス）（Geo-environmental Risk Assessment System）を開発

した^[17]。このシステム開発では、4章で示した多様な要素技術の最適な構成に加えて、曝露モデルの作成やプログラムコーディング、数値解析手法の開発、さらには各要素の統合化および解析結果の可視化などの工学的な研究開発を実施した。

5.1 要素技術の統合とシステム開発

要素技術の統合・構成を進めるにあたり、最終的にリスク評価システムを完成させるという観点から導入した構成のプロセスは以下のとおりである。まず、個々の要素技術を適切に組み立てる上での方法論の確立や土壌を起点とした曝露シナリオの設定などに関して、リスク評価手法の開発者としてのリーダーシップが重要であった。その上で個別の研究開発では、事前検討に従ってリスク評価システムを構築するための基礎データの提供と解析作業を実施した。

次に、曝露とリスクの評価に必要なデータ類やパラメータを選択し、パラメータ間の相関や最適な組み合わせを検討した。そのため、試験方法や条件の設定を十分に検討し、目的に応じたデータベースを作成した。さらに、要素研究により取得されたデータは、実際の汚染サイトにおけるリスク評価の実施により検証され、補正や修正を加えた後にデフォルト設定とした。例えば、確実なリスク評価を実施するためには新規に取得すべきデータ類も多く、各要素

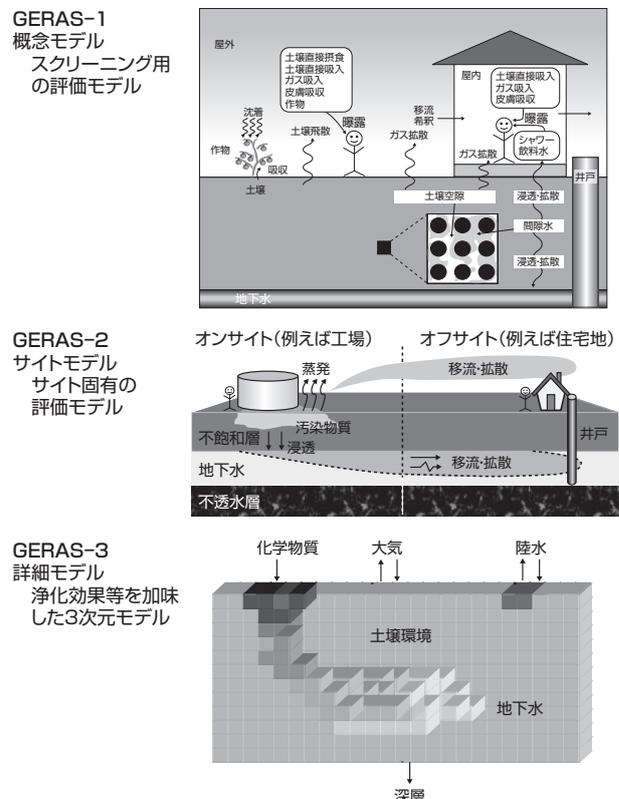


図4 地圏環境リスク評価システム（GERAS）の階層構造
 本研究の成果物である地圏環境リスク評価システム（GERAS）の3つの階層構造を示している。リスク評価のレベルと用途に応じて、スクリーニングモデル、サイトモデルおよび詳細モデルから構成されている。

研究にフィードバックするケースが多かった。それに加えて評価システムの使用者の要望に応じて、入力や出力などのシステムの改良を行い、より活用しやすいシステムへと発展させていった。以上のようなフィードバックとスパイラル構成（図2）により、信頼性の高いリスク評価システムの開発に向けての統合的な取り組みを行った。

5.2 評価システムの概要と基本機能

開発した GERAS の基本構造を図4に示す。様々な現場状況や用途に活用することを想定し、スクリーニングモデル（GERAS-1）、サイトモデル（GERAS-2）、詳細モデル（GERAS-3）の3層構造とした。システム開発では、上述の基礎的、基盤的研究の成果をベースにして、要素技術の統合および新たな構成のプロセスを導入した。ここではGERASの開発における技術的な克服やその特徴的な構成を中心に、重金属類や有機化合物を対象とした曝露・リスク評価を行った事例について述べる。

GERASは図5のようなWindows上で動作するシステムである。有機炭素含有量が多いなどのわが国特有の土壌特性や曝露ファクターを考慮し、また有機化合物については、土壌溶出値を入力することにより評価が可能である。実際の評価作業では、まず対象化学物質を選択し、基礎パラメータの設定を行う（図5のAの部分）。その後、サイト特有の土壌（図5のCの部分）、地下水（図5のDの部分）、曝露経路（図5のBの部分）ならびにレセプター（曝露対象：たとえばヒト）に関するパラメータ設定（図5のE-Gの部分）を行う。図5中のH-Iの項目は、土壌摂取量、地下水摂取量、呼吸量などの主要な曝露ファクターである。GERASにおいて考慮した曝露経路は、土壌の直接

摂取、飲用水や農作物を摂取する経口曝露（口から摂取する曝露）、土壌から大気へ揮散した化学物質や飛散した土壌粒子を呼吸する吸入曝露および土壌との接触や飲用水との接触による皮膚吸収曝露とした。

これらのパラメータの設定が完了すると計算が行われる。本評価システムでは、はじめに土壌における固体、液体（間隙水）および気体（土壌空気）を対象として化学物質のフガシティー容量（大気、水、土壌などの環境の各相における分配容量）の計算を行う。初期条件として居住地域における土壌からの有機塩素化合物の溶出値を与えることにより、土壌空気および土壌間隙水中の化学物質の濃度を算出する。この計算では土壌中の有機炭素量やpHおよび吸着などのファクターにより、それぞれの化学物質に対して異なった値が得られる。次に土壌の各相から大気や地下水への移動過程の計算を行い、各種曝露媒体（大気、作物、地下水など）中の曝露濃度が決定される。最後に曝露シナリオに基づいて、各環境媒体からヒトへの曝露量が算出される。その結果から有害化学物質の毒性によりリスクが計算される。リスクの計算には、発ガン性物質の発ガンリスク 10^{-5} あるいは 10^{-6} （10万人あるいは100万人に1人がガンになる確率）や非発ガン性物質では許容摂取量（1日当たり許容できる摂取量）に対する比率を曝露基準値とした。

5.3 評価システムの適用事例

GERASを用いて重金属類（ヒ素）および有機化合物（トリクロロエチレン：TCE）のリスク評価を行った¹⁸⁾。これらの化学物質はそれぞれ、人にとって発ガン、および肝障害といった重篤な健康被害を与える代表的な汚染物質である。

適用した事例では、それぞれの汚染物質の濃度として、現行の土壌汚染対策法による指定基準値（ヒ素：含有量150 mg/kg、TCE：溶出値0.03 mg/l）を与え、土質は関東ロームとした。曝露シナリオは住宅地とし、土壌の直接摂取、土壌の直接吸入、大気吸入（屋内・屋外）、地下水摂取、農作物摂取および皮膚吸収からの曝露を考慮した。また、曝露期間を生涯70年（小人6年、大人64年）とし、生涯の平均曝露量を算出した。世界保健機構（WHO）では、これらの化学物質の耐容1日摂取量（TDI：ヒ素=2.1 $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{day}$ 、TCE=24 $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{day}$ ）を定めているが、食品経路など従来考慮していない曝露経路からの曝露も想定されるため、耐容1日摂取量の10%（ヒ素：0.21 $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{day}$ 、TCE：2.4 $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{day}$ ）を曝露基準値とした。土壌および地下水のパラメータは、実際の汚染サイトで取得されたものを使用した。

図6および図7にヒ素およびトリクロロエチレンの曝露評価の結果を示す。ヒ素の場合では主要経路が土壌の直

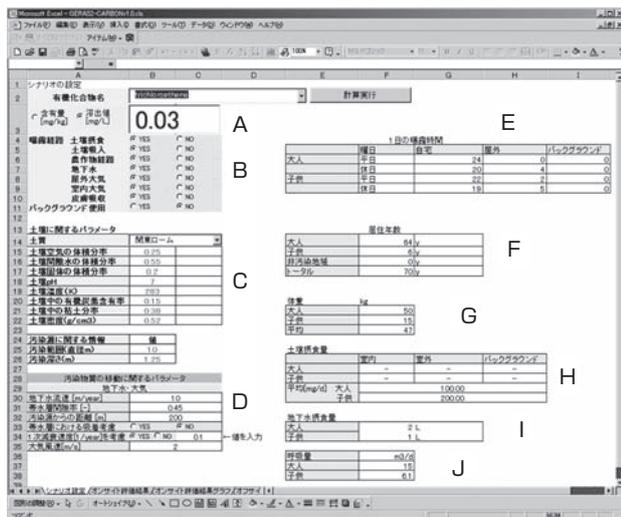


図5 GERASのシステム入力画面とパラメータ
リスク評価システムGERAS1,2のコンピュータ画面と入力パラメータである。リスク評価には、土壌と地下水のパラメータ、物質輸送に関するパラメータ、曝露経路や曝露ファクターの情報が必要である。

接摂食および地下水摂取であるのに対して、トリクロロエチレンでは、大気吸入および地下水摂取が主要経路となっていることが分かる。また、それぞれの化学物質の全曝露量はヒ素で $0.85 \mu\text{g}/\text{kg}/\text{day}$ 、トリクロロエチレンで $0.76 \mu\text{g}/\text{kg}/\text{day}$ と算出された。曝露基準値と比較するとヒ素の場合で4倍高くなっており、リスクが大きいと判断される。一方、トリクロロエチレンの場合ではリスク基準値より小さくなったことから、この程度の汚染では、リスクは許容される範囲と判断される。

本曝露評価モデルでは、各曝露経路からの曝露量やその割合およびリスクが評価できる一方で、逆に、目標リスクから浄化目標を設定することも可能である。この適用事例ではヒ素による土壌汚染のリスクがあると判断されたが、何らかの浄化手法により土壌含有量を $37 \text{mg}/\text{kg}$ 以下まで浄化できれば曝露量は基準値以下となる。また、主要経路からの曝露を遮断することにより、リスクを低減することも可能である。ヒ素の場合では主要経路が土壌の直接摂食および地下水摂取となっている。したがって、これらの曝露経路からの曝露を遮断できれば（例えば、飛散対策

や地下水飲用の指導）、リスクを大幅に軽減させることができる。

5.4 評価システムの公開と普及

GERASのうち、スクリーニングモデル GERAS-1 とサイトモデル GERAS-2 をまず開発し、専門家のレビューを受けた後、2006年2月に一般公開した。公開にあたっては、リスク評価システムおよびデータベースをCD-ROMにインストールし、シリアル番号を付けて使用者に配布している。また、汚染現場での活用を考慮して詳細マニュアルを作成し、評価システムとともに提供している。これまでに、国内では800件を越える事業所、工場、自治体、浄化企業、地質コンサルタント、大学関係者などに配布し、産業や社会で広く活用されている（図8）。その主な用途は、事業所や自治体における土壌・地下水汚染の自主管理であり、全体の60%程度を占めている。また、海外用に英語版のGERAS-Eバージョンを開発し、英国、中国、韓国、タイ、ベトナムなどに配付している^[19]。また、鉱物油（ガソリン、軽油、灯油等の石油系燃料）に特化した評価システムの開発も進めており、2009年までに公開と普及を目指している。

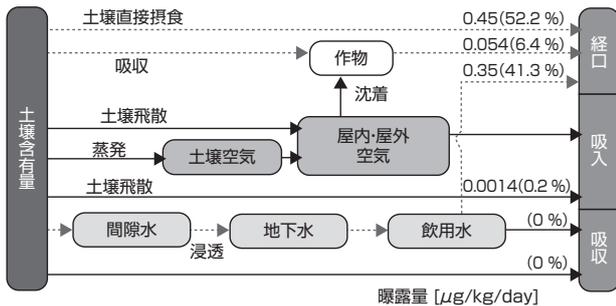


図6 汚染土壌からの曝露量と割合の推定結果（ヒ素）
リスク評価システム GERAS-1 の解析結果として、ヒ素で汚染された土壌からの曝露経路ごとの曝露量とその割合を示している。ヒ素の場合、直接摂食および地下水経由の曝露が最も多いことが分かった。

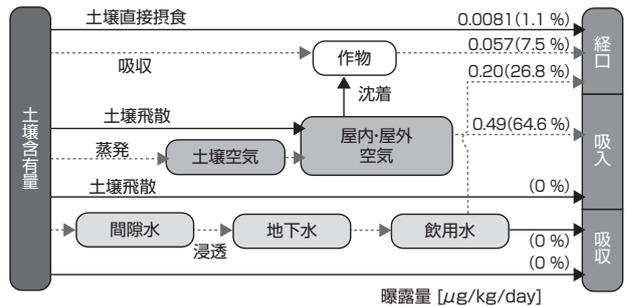


図7 汚染土壌からの曝露量と割合の推定結果（トリクロロエチレン）
リスク評価システム GERAS-1 の解析結果として、トリクロロエチレンで汚染された土壌からの曝露経路ごとの曝露量とその割合を示している。トリクロロエチレンの場合、屋内・屋外空気（大気）および地下水経由の曝露が最も多いことが分かった。

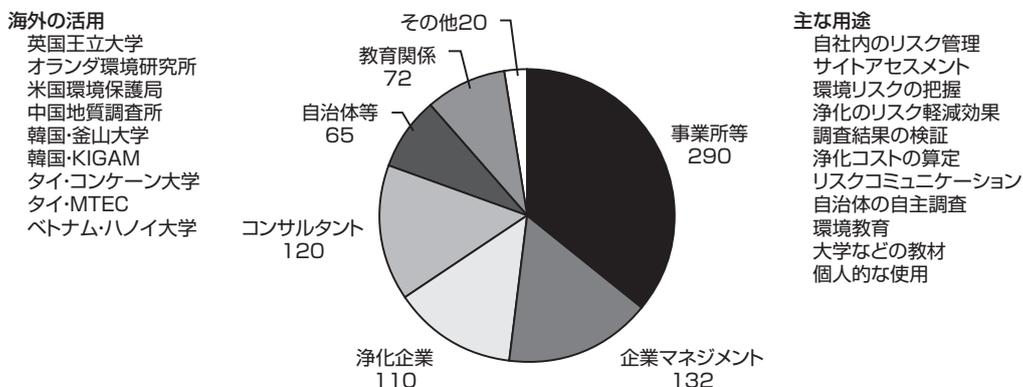


図8 GERASを配布した業種の割合と主な用途
これまでに配布・活用されているGERASの業種別の件数とその割合を示している。約800件のうち、事業所や企業におけるリスク評価の実績が多く、浄化企業やコンサルタントの実務にも多数使用されている。

今後、環境汚染物質の移流・分散解析や浄化によるリスク軽減を評価するための詳細モデル GERAS-3 の開発を行い、GERAS の全体バージョンとして仕上げていきたい。

評価システムの開発と並行して、多くの使用者から汚染サイトにおける実際の評価データを集約し、その結果をフィードバックして GERAS の改良に反映させている。土壌・地下水汚染の特性はサイトごとに多様であり、また評価結果には時間的、空間的な差異もあることから、使用者が行ったリスク評価の結果はきわめて貴重なものである。このような評価データを集積・解析することによりシステムの有効性の検証を行うとともに、システムの改良やデータベースの追加などのバージョンアップを逐次行っている。これまでに、土壌・地下水データベースの改良、対象化学物質の追加（鉱物油等、バイオ燃料（MTBE、ETBE）、PAHs、ふっ素、ほう素）、溶出値による評価手法の改善などを行い、数回のバージョンアップを行っている。

6 今後の技術的課題と社会への適用

地圏環境リスク評価システムを環境汚染問題に適用し、技術を社会に普及・定着させていくまでの課題やプロセスについて、産業や社会への貢献や社会システムへの反映を中心に述べる。

6.1 今後の技術的課題

すでに5章で述べたように、開発した GERAS には多様な要素技術やデータベースが組み込まれている。これらの

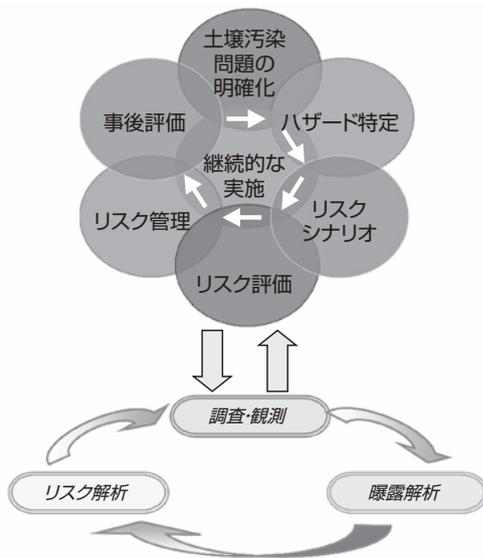


図9 環境リスク管理におけるループ構造および重層のスパイラル構成

土壌・地下水汚染に関わる環境リスク評価および管理に有効なループ構造とスパイラル構成を示している。リスク評価システム GERAS を活用した実践においても、このような重層の構成による環境改善の考え方が重要である。

最適な構成や使用するデータ類の信頼性については、これまでの研究開発でも十分に検証されているが、リスク評価技術の高度化については更なる検討が必要である。このため、リスク評価結果の不確実性や統計学的な解析に関して、基礎的な研究開発を継続する予定である。これらの研究は、環境汚染問題に対するリスク評価技術が公的に認知されるために必須であり、円滑なリスクコミュニケーションを推進する上できわめて重要な事項である。また、技術の社会的な受容性を高めるためには、評価事例を増やしてリスク評価やデータベースの信頼性を向上させることも重要であろう。すなわち、リスク評価技術の普及にあたっては、出口側の評価結果から入口側の方法論や基礎データに立ち返って、図9に図示するようなループ的な改善の継続を行うことが本研究開発の最も重要なプロセスといえる。すなわち、土壌汚染に起因するリスクを回避するためのシナリオを検討し、リスク評価の結果として許容できるレベルを超過する場合にはリスクの処理あるいは管理を実施する必要がある。また、リスク評価の実施に際しては、図9の下部に示すように適切な調査や分析による信頼性の高いデータの取得・蓄積が重要であり、このような重層のスパイラル構成に基づいてリスクの軽減とコストの低減が図られる。

GERAS は土壌や地下水の地圏環境を対象にしたリスク評価システムであるが、生態系や地球規模の環境問題に対しても拡張できる可能性がある。すでに、水生生物や地中微生物などの生態系に及ぼす有害金属元素の影響に関して基礎的な検討を進めており、多くの要素技術はそのまま適用できる。また、最近の火急の課題である二酸化炭素地中貯留や核廃棄物地層処分におけるリスク評価においても、同様の手続きや基礎データが活用できる可能性があり、具体的な検討を開始した段階である。

6.2 土壌・地下水汚染対策への貢献

本評価システムの活用によって得られる最大の効果は、科学的なリスク評価に基づく自主的な環境改善である。汚染状況や用地ごとの曝露とリスクを把握し、対策の前後でリスクの大きさを比較できることは効果的なリスク管理を行う上で意義が大きい。例えば、曝露経路ごとのリスクを知ることができるので、主要な曝露の回避や曝露経路の遮断といった具体的なリスクの低減措置に反映できる。これらの曝露やリスクの基本情報は、これまでの一律の環境基準を与える規制に比べて、対策コストの削減にも大きく寄与する。

図10は、本評価システムの導入によるリスク軽減とコスト削減の予測結果を示したものである。今後、産業界を中心としてリスクベースの取り組みが普及していくことが予想され、2025年までに50%以上のリスク軽減とコスト削減が期待される^[20]。本研究で開発したリスク評価技術の効

果として、システムの普及および法制度への適用によるコストの軽減が期待できる。また、曝露経路の遮断やコントロールによるリスクの軽減、さらには微生物活用などの新浄化手法の普及によるリスクの軽減も期待できる。すでに産業界の自主管理に本評価システムが広く活用されており、環境改善を実現すると同時に経済的な（すなわちコスト／ベネフィットを考慮した）土壌汚染対策が可能となり、環境と経済の両面からの社会貢献が大きい。

一方、リスクコミュニケーションの観点からは、本評価システムの導入により透明性の高い情報伝達と意思決定に寄与できると考えられる。実際に受ける曝露とリスクの大小、対策の前後のリスクの軽減効果、対策コストとリスク軽減の費用対効果などを明らかにすることにより、合理的かつ科学的なリスク管理が可能になる。さらに、リスク評価により未利用産業用地（ブラウンフィールド）の円滑な活用に向けての指針を得ることも大きな利点である。

6.3 社会システムの構築に向けての展望

研究レベルで開発したリスク評価技術を実社会に適用できるように確立するには、いくつかの克服すべき課題がある。その1つが、技術の信頼性および透明性であろう。本評価システムの開発では、開発者と使用者の間で双方向のコミュニケーションを行うことにより、産業や社会への円滑な適用を図った。また、環境マネジメントシステム EMS など具体的な社会システムに組み込むことも普及の重要な契機となる。環境マネジメントシステムの中には、事業所などが自主対策を行う際のサイトアセスメントの手法と手続きが示されている。これまでにわが国では統一的なリスク評価手法がなかったことから、筆者らが開発した GERAS を活用することにより汚染評価や浄化対策などの自主管理が行われている^[21]。(財)産業環境管理協会が運営している土

壌汚染評価者の認定制度「環境サイトアセッサー」において、ここで述べたリスク評価の方法論と評価システムが採用され、GERAS は産業環境管理の実務に広く活用されている^[22]。

現在、土壌汚染対策法の改正に向けた検討が行われている。2008年3月に環境省より提出された「土壌環境施策に関するあり方懇談会報告」^[23]の中で、今後の土壌汚染対策において、サイトごとの汚染状況に応じた合理的かつ適切な対策の実施、法制度と自主対策の関係のあり方に関して一定の考え方が提示された。すなわち、土地用途ごとのリスク管理の重要性が指摘され、法改正に向けて大きな転換時期となっている。これらの検討の基礎となったのが、筆者らの提案したリスク評価手法およびガバナンスの考え方である。サイトごとのリスクを適切に評価し、そのリスクを合理的に管理していくことの重要性が社会的にも認知され、リスク評価手法が社会システムに導入されようとしている。

海外では、2008年4月に開催されたドイツ・ハノーバーメッセに GERAS を出展したところ、欧州の産業界や研究者から大きな反響があった。米国で開発された RBCA システム^[24]と比較して、ユーザー指向のシステム開発、データ類のフィードバックによる逆解析の実現、土壌や地下水データの豊富さなどに優位性があり^[25]、欧米の研究機関などからも多数の問い合わせが届いている。今後、さらにシステムの改良と機能追加を行い、国内のみならず世界に向けての研究成果の発信と普及に努めていきたい。

7 結論

土壌・地下水汚染のリスク評価技術を開発するため、様々な研究分野の要素技術を統合して、統一的な方法論およびデータベースの構築に基づいてリスク評価システムとして完成させた。この研究開発では、土壌汚染対策におけるリスクベースの対応やガバナンスなどの新たな方法論を導入し、要素技術の最適な選択と統合、リスク評価の実践におけるスパイラル構成などの特徴的な研究開発を行った。その結果、わが国初の土壌・地下水汚染のリスク評価システムを開発し、数多くの事業所や自治体などに普及・導入させることができた。本評価システムは、環境マネジメントシステムや法制度への組み込みが予定されており、本格的なリスク管理施策の確立に向けての社会的な貢献は大きい。また、諸外国における同様の評価システムに対する優位性も高く、今後世界に向けての成果発信を行う予定である。さらに、評価システムの運用に必要な土壌・地質関連の地圏環境情報の整備を進め、公共財としての活用を図っていく。

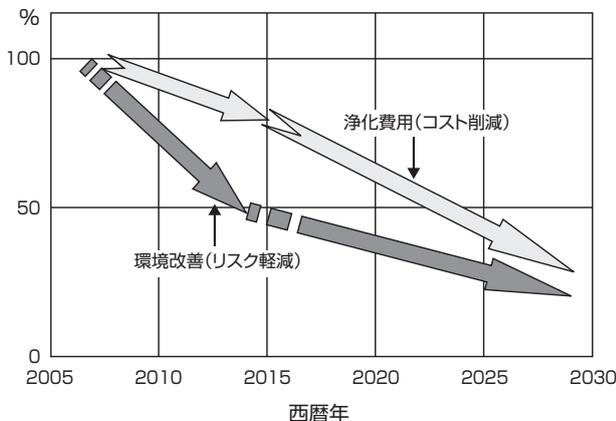


図 10 リスク管理施策によるリスク軽減とコスト削減の推算^[20]
GERAS 等を活用したリスク管理施策の導入により改善されるリスク軽減とコスト削減の年度展開を予測したものである。2025 年までに、リスク軽減とコスト削減のいずれも 50 % 以上の効果が期待できる^[20]。

用語説明

- 用語1：第2種基礎研究：本格研究における研究の1つで、複数の領域の知識を統合して社会的価値を実現する研究。本号の裏表紙にある定義を参照のこと。
- 用語2：製品化研究：本格研究における研究の1つで、第1種基礎研究、第2種基礎研究および実際の経験から得た成果と知識を利用し、新しい技術の社会での利用を具体化するための研究。本号の裏表紙にある定義を参照のこと。
- 用語3：エンドポイント：リスクを評価する場合に、評価対象の状態のこと。人の健康リスクの評価では、例えば経気道摂取による発ガン、経口摂取による腎臓疾患のような具体的な対象を意味する。

キーワード

土壌汚染、地下水汚染、リスク評価システム、リスク管理

参考文献

- [1] 環境省土壌環境課：平成17年度土壌汚染対策法の施行状況及び土壌汚染調査・対策事例等に関する調査結果(2007)。
- [2] 松下和夫：環境ガバナンス論，京都大学学術出版会，(2007)。
- [3] 中央環境審議会土壌農薬部会：サイトごとの汚染状況に応じた合理的かつ適切な対策の促進方策(2008)。
- [4] 経済産業省：事業者の土壌汚染対策等実態調査報告書(2008)。
- [5] 駒井武：土壌汚染対策の課題と環境地質学の役割，*地学雑誌*，116，853-863(2007)。
- [6] 土壌環境センター：海外アセスメントの検討 ISO-10381-5報告書，J03-06-01(2005)。
- [7] 平川秀幸：リスクガバナンス/科学技術ガバナンスと予防原則，*第7回公共哲学研究会+科学技術社会論合同研究会資料*(2003)。
- [8] 駒井武：土壌汚染対策とリスク管理手法の提案，*新政策*，19，21-30(2004)。
- [9] 川辺能成：地圏環境評価システムGERAS-1&2(重金属、有機化合物) ver.1.2，産業技術総合研究所ソフトウェア(2006)。
- [10] T. Shoji and T. Komai: Responsibility sharing and explicit and implicit indication of risks caused by interaction among pollutants, *Geoinformatica*，17，219-221(2007)。
- [11] J. Hara: The effect of solubility and mobility of harmful metals in subsurface soils on human health risk, *Proceedings of International Symposium on Aqua Science, Water Resource and Innovation Development*(2007)。
- [12] 光畑裕司，横田俊之ほか：油分土壌汚染調査における物理探査法およびダイレクトプッシュ型貫入プローブ計測の適用研究，*日本地下水学会秋季講演会予稿集*(2007)。
- [13] 坂本靖英：鉍物油に起因する土壌汚染のリスク評価を目的とした油-水混相流動挙動，*資源・素材学会春季大会講演集*(2008)。
- [14] Y. Kawabe: Natural attenuation pattern of chlorinated solvent at Yamagata site in Japan, *Proceedings of Water Resources Management*(2007)。
- [15] 原淳子：表層土壌評価基本図～宮城県地域～，E-3，産業技術総合研究所(2007)。
- [16] 狩野真吾ほか：地圏環境インフォマティクスのデータベース構築とその応用例，*資源と素材*，157，148-153(2008)。

- [17] 松永烈ほか：産業技術総合研究所における土壌汚染に関わる分野融合研究の成果，*地質ニュース*，23，6-13(2006)。
- [18] 川辺能成：地圏環境評価システムGERASの開発と土壌汚染問題への適用，*地質ニュース*，23，35-42(2006)。
- [19] 川辺能成：GERAS-英語版の出版，産業技術総合研究所ソフトウェア(2007)。
- [20] 保高徹生：土壌汚染の社会・経済影響の定量化とその解決方法に関する研究，*横浜国立大学博士論文*(2007)。
- [21] 産業環境管理協会：*サイトアセスメント実務と法規*，丸善(2003)。
- [22] 産業環境管理協会：*環境サイトアセッサー*，丸善(2007)。
- [23] 環境省：*土壌環境施策に関するあり方懇談会報告書*(2008)。
- [24] 住友海上リスク総合研究所：RBCA リスク評価に基づく修復措置のための標準ガイド，E-1739-95(2001)。
- [25] 土壌環境センター：*リスク評価適用性検討事業報告書*，リスク評価のわが国における活用に向けて，J06-06-01(2008)。

(受付日 2008.7.23, 改訂受理日 2008.10.6)

執筆者略歴

駒井 武 (こまい たけし)

1979年東北大学工学部資源工学科卒業、1997年より資源環境技術総合研究所安全工学部化学物質安全研究室長。2004年より産業技術総合研究所地圏資源環境研究部門研究グループ長、後に同部門副研究部門長。2007年より東北大学大学院環境科学研究科連携講座教授を兼任。産業保安や安全工学に関わる研究開発を実施し、1995年に資源・素材学会論文賞、2001年に日本エネルギー学会論文賞を受賞。最近では、土壌・地下水汚染のリスク評価技術や環境リスク管理の研究開発に従事している。本論文では、リスク評価手法開発の総括、土壌・地質学的な研究を担当した。

川辺 能成 (かわべ よししげ)

1997年東北大学大学院工学研究科博士前期課程修了。2000年東北大学大学院工学研究科博士後期課程修了。博士(工学)。秋田県立大学システム科学技術学部流動研究員、産業技術総合研究所特別研究員を経て、2004年より産業技術総合研究所地圏資源環境研究部門に勤務。地圏環境におけるリスク管理および汚染修復に関する研究に従事している。資源素材学会、日本水環境学会、日本生物工学会、各会員。本論文では、リスク評価システムの開発および物性データ取得の研究を担当した。

原 淳子 (はら じゅんこ)

2003年3月東北大学大学院工学研究科博士後期課程修了、2005年4月産業技術総合研究所入所。現在、地圏資源環境研究部門地圏環境評価研究グループに所属。これまで地下における水-岩石相互反応機構の評価および土壌・地下水汚染に関する研究に携わっている。本論文では、土壌パラメータ解析および地圏環境情報の整備の研究を担当した。

坂本 靖英 (さかもと やすひで)

2002年3月東北大学大学院工学研究科博士後期課程修了。産業技術総合研究所特別研究員(PD)を経て、2004年4月より地圏資源環境研究部門に勤務。2006年に資源・素材学会論文賞を受賞。これまで、汚染物質の土壌・地下水環境における移動現象を対象とした実験ならびに数値モデル化の研究開発に従事している。本論文では、数値解析手法および移動パラメータの取得の研究を担当した。

杉田 創 (すぎた はじめ)

1998年10月名古屋大学大学院工学研究科博士後期課程満了、同年10月工学博士取得。1999年1月資源環境技術総合研究所(現・

産業技術総合研究所) 科学技術特別研究員、2001年4月産業技術総合研究所入所。シリカの重合技術・析出メカニズムや土壌汚染評価等の研究に携わっている。本論文では、土壌の吸着および溶出特性の研究を担当した。

査読者との議論

議論1 本研究の第2種基礎研究、製品化研究としての意義について 質問・コメント(小野 晃)

本研究は、さまざまな要素が複合的に絡んでいる環境やリスクに関する課題を、第2種基礎研究の構成的アプローチによって解決した優れたものと思います。また社会で直接使うことができる評価システムにまで仕上げたことは、製品化研究としての意義も大きいと思います。

質問・コメント富樫 茂子

全体として、構成学を意識した仕上がりになっており、アウトカムを強く意識した研究戦略のシナリオが明確に示されており、構成学としての試みの良い例を提供していると評価できます。将来への展望も記述されています。

議論2 曝露、リスク、毒性の関係について

質問・コメント(小野 晃)

本文中に「曝露」、「リスク」、「毒性」という用語が出てきますが、それぞれの意味と相互の関係はどのようなものでしょうか。

また、どのような経路で人は土壌を摂取したり吸入したりするのでしょうか。本文中に「土壌の直接摂取」と「土壌の直接吸入」が出てきますが、人が土壌を「食べる」、ないしは「吸う」という行為が実際にどのような状況と経路で起こるのでしょうか。またその量はリスクの観点から無視しえないほど大きなものになるのでしょうか。

回答(駒井 武)

本文の第3図に概念を示しました。環境を経由して人が有害化学物質を摂取することを「曝露」と呼びます。その結果、健康障害や悪い影響を与えるのですが、その確率および影響の大きさのことを「リスク」と言います。「リスク」は、「曝露」の量と「毒性」の値から算定されます。発ガン性のある化学物質の場合では、「リスク」の大きさは、「曝露」の量と「毒性」の値の積として求めることができます。

「土壌の直接摂取」とは、有害化学物質を含む土壌が手や皮膚に触れることにより取り込むことを言います。主として子供の時期に、砂遊びなどにより土壌に直接触れ、摂取する量が多いとされています。ダイオキシン類の土壌環境基準を検討した環境省のデータによると、子供の時期の平均摂取量は200 mg/日とされています。また、「土壌の直接吸入」は農作業や庭の手入れなどにおいて、粒子状の土壌を摂取することを言います。重金属の汚染土壌におけるリスク評価の算定では、汚染土壌からの全摂取量のうち、「土壌の直接摂取」は約50%、「土壌の直接吸入」は約5%であり、相当な割合を占めていることが分かります。

議論3 統一的な指標(あるいは共通の尺度)として採用したものについて

質問・コメント(小野 晃)

3章に「統一的な指標」ないしは「共通の尺度」が論じられています。異なる複数の技術領域から要素技術を抽出して、それらを統合・構成する第2種基礎研究の場合、統一的な指標あるいは共通の尺度をあらかじめ設定することが重要なポイントだと思います。

本研究で、統一的な指標(あるいは共通の尺度)は具体的にどのようなものでしょうか。またそれを設定するときの考え方や背景も合わせてご説明下さい。

回答(駒井 武)

これまでに環境施策において採用されている指標は、主として環

境基準(人の健康を守る上で維持することが望ましい値)です。しかし、土壌や地下水のような媒体では、汚染があったとしても十分に管理された状況では、必ずしも人への健康影響がないケースもあり得ます。そこで、より現実的な環境や人の状況に応じた「統一的な指標」として、本研究では「環境リスク」を採用しました。「曝露」の量や分布は、土地の状況、表層土壌や地下水の状況、人の生活形態などによって大きく変わります。また、本研究で採用した「共通の尺度」は、有害化学物質の曝露に基づく健康影響です。「曝露」の量を正しく評価する手法は、健康や環境への影響を判断する上で普遍的な尺度と考えられます。

議論4 リスク評価の信頼性について

質問・コメント(小野 晃)

6.1節で述べられていますように、本研究で開発した手法(方法論)やデータベースに基づいてリスク評価を行った場合、その評価結果がどの程度の信頼性を持っているかは、この評価システムを利用するユーザーにとって関心事だと思います。リスク評価の結果には常に不確かさがつきまとうと思いますが、不確かさの主要な要因にはどのようなものがあると考えておられますか。評価手法とデータベースのそれぞれについてお答えいただければと思います。

また、5.3節で述べられたヒ素とトリクロロエチレンの評価事例では、最終結果の不確かさは何%くらいになると見積もられますか。およびその値で結構ですのでお答え願えればと思います。

回答(駒井 武)

リスク評価における評価結果の信頼性はきわめて重要であり、これを高めるためには曝露モデルの精緻化と使用するデータベースの質・量を高めていくことが必要です。本研究では、産業技術総合研究所が独自で開発したリスク評価の方法論とデータベースをもとに、多数の専門家の検証を受けており、十分な信頼性を有する手法と考えています。また、ユーザーが評価した結果も評価システムにフィードバックして、信頼性を高める工夫もしています。リスク評価の不確かさは、データのもつ不確か性(知識の欠如に由来する)と変動性(固有の多様性)に依存します。本評価では、主に土壌と地下水のパラメータが不確か性の要因になります。地質の調査を十分に実施することにより、パラメータの不確か性を低減させることが可能です。また、本評価では変動性の要因は考慮していませんので、ヒ素およびトリクロロエチレンの評価事例では、最終評価結果の不確かさは5%未満であると推定されます。

議論5 本評価システムの生態系への拡張について

質問・コメント(小野 晃)

6.1節で述べられていますように、本評価システムは土壌と地下水の汚染以外にも適用範囲を拡張することが可能なように思えます。生物を含む生態系へこの評価システムを拡張する場合には、新たにどのような課題を解決しなければならぬと考えますか。

回答(駒井 武)

曝露・リスク評価の方法論は、土壌や地下水の汚染問題だけでなく、水質や大気質、さらには生態系のようなグローバルな環境問題にも適用可能な汎用性の高いものです。例えば、植物や水生生物への環境影響といった多様な課題にも適用範囲を拡大することを考えています。このためには、生物への有害化学物質の取り込みのメカニズム、生物の多様性に対する応答(エンドポイント)などを明らかにし、評価システムに反映させていくことが必要です。また、河川や海洋における化学物質の移動や反応などを含む曝露評価モデルの開発も重要な課題となりますので、産業技術総合研究所内で開発が進められている様々な曝露評価モデルとのリンクを考えています。

議論6 構成学的な特徴(図2)と関連する学術分野と検討項目(表1)について

質問・コメント（富樫 茂子）

図2は構成学の試みとして良い図だと思いますが、表1との関係を明確にさせていただいたほうがよいのではないのでしょうか。

回答（駒井 武）

図2に示した構成学的な特徴をより分かりやすく表現できるようにし、様々な学術分野の融合とそれぞれの役割を明記しました。また、図2と表1の関係を明確にできるように、表1のカラムを増やして学術分野と研究目的の関係を示しました。また、図2中に学術分野と研究目的の関わりを分かりやすく記載しました。

議論7 リスク管理とリスク評価との関係と全体のスパイラル構造について

質問・コメント（富樫 茂子）

リスク管理という言葉とリスク評価ということばの定義と関係が明瞭にされないまま議論がされているように思います。また、図9において、全体のスパイラル構造をうまく表現する必要があると思います。

回答（駒井 武）

リスク管理とリスク評価の言葉の関係があいまいというご指摘ですが、一部で関連が不明確なところがありましたので、修正しました。全体の構成が複雑で分かりにくいところがありましたので、図中の表現を簡素化して、本文中に構成の意味する解説を加筆しました。

図9の上部の図は継続的なリスク管理のあり方をループ構造として示したものです。また、下の図はリスク評価のプロセスとしてスパイラル構成の考え方を示したものであり、各プロセス内で多層の構成になっています。全体のスパイラル構造が分かるように図を簡素化しました。