

S 1 - 2 7 土壤汚染対策におけるリスク評価の適用性の検討（その 4） - 日欧米のリスク評価モデルにおける暴露評価方法の比較 -

○藤長愛一郎¹・川辺能成²・福浦清¹・リスク評価適用性検討部会¹

¹ 土壤環境センター・² 産業技術総合研究所

1. はじめに

わが国では、土壤・地下水の汚染の有無を、全国一律の環境基準を用いて判断している。この環境基準は、地下水の飲用を前提として設定されており、井戸の有無など、汚染サイトごとの条件は考慮されていない。このことが原因で、汚染された工場跡地などが放置されるケースが問題となっている。このようなケースに、汚染サイトに固有の条件を考慮したリスク管理を行えば、放置されているサイトを有効に利用することが可能になる。そこで、土壤環境センターの自主事業「リスク評価適用性検討部会」では、わが国の土壤汚染対策に合ったリスク評価モデルの提案につなげることを目的として、米国、オランダ、イギリス、および日本の代表的な機関が作成したリスク評価モデルの暴露経路、暴露量の算定式、および算定結果を比較・検討した¹⁾。

リスク評価の手法は、暴露量（化学物質を摂取する量）を推定することが重要であり、使用されるのが暴露評価モデルである。暴露評価のモデルは①汚染の有無の判定用スクリーニングモデル、②サイト特有のリスクを評価するモデル、および③詳細型モデルの3つに分類される。代表的なリスク評価モデルとして ASTM（米国）、オランダ、イギリス、産業技術総合研究所で作成された4つのリスク評価モデルを取り上げ、まず、既存リスク評価モデルの概要を紹介し、暴露媒体（土、空気、水など）ごとに、各モデルの違いを整理した。また、リスク評価に使用される地下水の横方向移動に対する解析モデル（Domenico モデル）と詳細なシミュレーションが可能な有限要素法による結果と比較し、その妥当性を検討した。

2. 既存のリスク評価モデルの特徴

2.1 ASTM(米国)

ASTM(米国材料試験協会)がリスクに基づく意思決定の標準手法として開発した RBCA (Risk Based Corrective Action) は、1995年に ASTM E1739-95 (石油漏出サイトに適用されるリスクに基づく修復措置のための規格ガイド)²⁾として規格化され、その後 2000年には化学物質全般に対する ASTM E2081-00(リスクに基づく修復措置のための規格ガイド)³⁾が規格化された。

最近では、生態学的資源の保護のための RBCA (Eco-RBCA) も開発されており、2002年に Eco-RBCA の規格ガイド ASTM E2205-02 (生態学的資源の保護のためのリスクに基づく修復措置のための規格ガイド)⁴⁾が規格化されている。

RBCA のリスク評価は、階層的アプローチによって実施される。まず、初期の調査から汚染による環境リスクが許容できるかどうかを判断し、許容できない場合にはさらに詳細なリスク評価を実施して、環境リスクを評価する（図 1 参照）。

RBCA を用いたリスク評価を行なうためのプログラムソフト(ソフト名「RBCA Tool Kit⁵⁾」)が、Groundwater Services 社から開発され、販売されている。暴露シナリオや暴露モデルは、ASTM 規格ガイドの計算例をほぼ踏襲しているが、地下水から表流水を経由する暴露経路を含むなど、ASTM 規格ガイドの計算例とは異なる部分もある。また、ASTM では水平方向の輸送モデルについて詳細な記載がなされていないが、「RBCA Tool Kit」では水平方向の地下水輸送モデルと大気拡散モデルを選択できるよう設定されている。

Examination of applicability of risk assessment for soil contamination (Part IV)

- Comparison of exposure evaluation methods on risk assessment between Japan, Europe and USA -

Aiichiro FUJINAGA¹, Yoshishige KAWABE², Kiyoshi FUKUURAR¹, Risk-WG¹ (¹GEPC, ²AIST)

連絡先：〒332-8556 埼玉県川口市仲町 5-11 前澤工業株式会社土壤環境技術部 福浦清

TEL 048-253-0910 FAX 048-254-2328 E-mail kiyoshi_fukuura@maezawa.co.jp

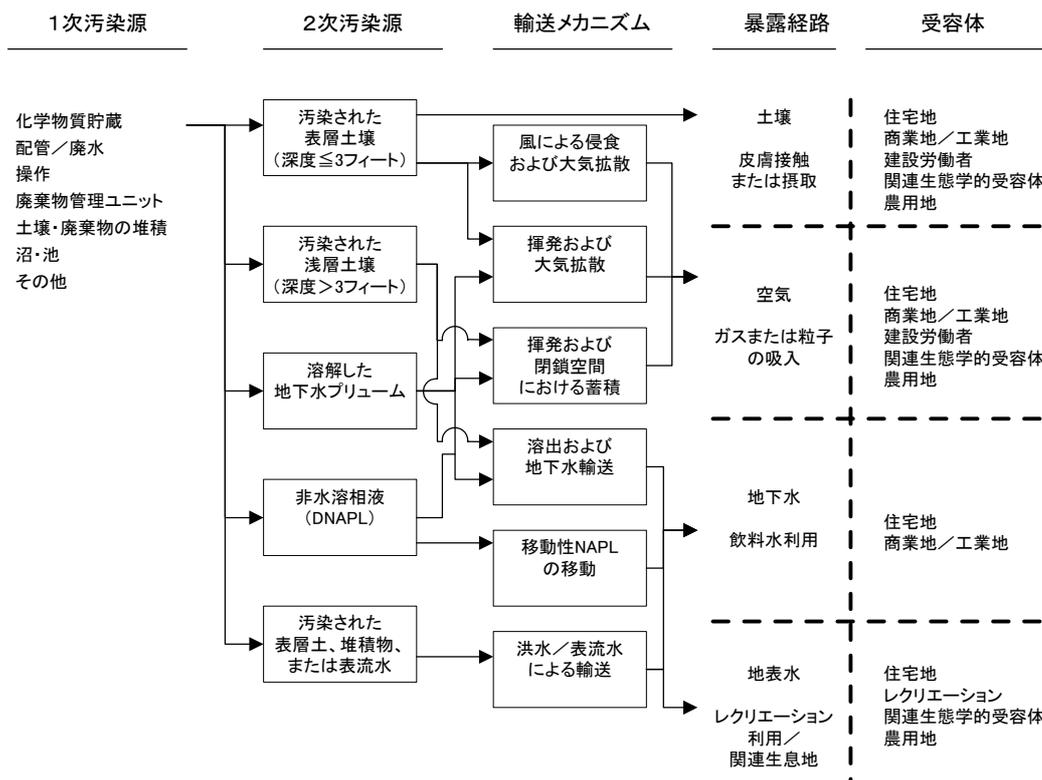


図1 暴露経路のフローチャート³⁾

2.2 RIVM(オランダ)

オランダ国立公衆衛生・環境研究所(RIVM)は、土壌汚染のリスク評価モデルとして、人の健康影響のリスク評価モデルであるCSOILをまず開発した。その後、揮発性物質の室内空気濃度推定モデルについては、VOLASOILを開発した。

(1)CSOILモデルの概要⁶⁾

CSOILモデルは、オランダの土壌環境基準の介入値(Intervention Value)を導き出すためにRIVMにより開発された暴露モデルである。また、CSOILモデルを使ったプログラムソフト(ソフト名「RISC-HUMAN」)がファン・ホール研究所(VAN HALL INSTITUUT)により開発され、1995年から利用されている。

(2)VOLASOILモデルの概要⁷⁾

VOLASOILモデルは、揮発性物質の実質的な人の健康リスクを推定するために開発されたものであり、人の健康リスクベースで浄化の優先順位が高い場合に用いられるものとされている。また、このモデルの計算はしばしば、室内や床下空気の測定とともに実施される。

当初、ビル内の室内空気濃度は、CSOILの揮発モデル式を使っていたが、CSOILの限界から暴露媒体中の濃度の測定が推奨されるに至り、CSOILによる揮発モデル式の理論的推定は、室内空気濃度のリスク評価には向いていないことが示された。このような理由からVOLASOILモデルが、土壌汚染物質が揮発する場合の現実的なリスク評価のために開発されたとされている。

2.3 DEFRAおよび環境庁(イギリス)⁸⁾

DEFRA(イギリス環境・食料・農村地域省)とイギリス環境庁は、2002年3月に土地の汚染による人の健康リスク評価手法であるCLEA(Contaminated Land Exposure Assessment Model)を公表した。CLEAは、汚染土壌の長期暴露による健康被害を防止するための土の指針値(SGVs)を算出するため用いられており、住宅地、分配地(市民菜園)、商業/工業地という3つの標準の土地使用シナリオが設定されている(図2参照)。

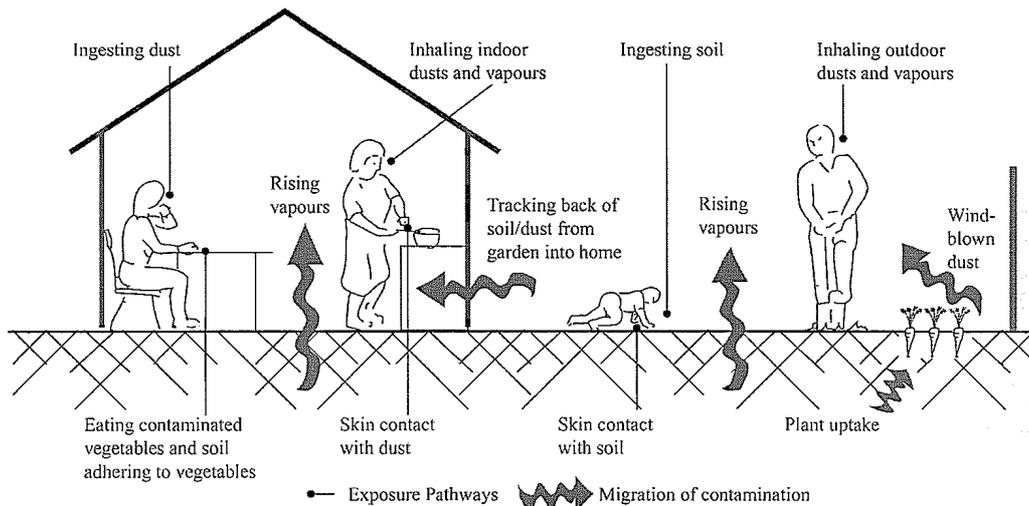


図 2 CLEA モデルで考慮されている暴露経路（文献 8 より引用）

2.4 産業技術総合研究所(日本)

独立行政法人 産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門 地圏環境評価研究グループは、土壌汚染の健康リスクを個々の現場ごとに定量化できる地圏環境リスク評価システム (Geo-Environmental Risk Assessment System, 略称「GERAS」) を開発し、2006年3月にホームページ上で一般に公開した⁹⁾。

GERAS は、一般的な暴露条件に基づいたリスク評価と浄化目標値を設定するための「スクリーニングモデル (GERAS-1)」(図 3 参照) と、汚染現場の土壌特性、汚染物質の分解特性などを考慮して個別サイトのリスクを評価する「サイトモデル (GERAS-2)」から構成されている。

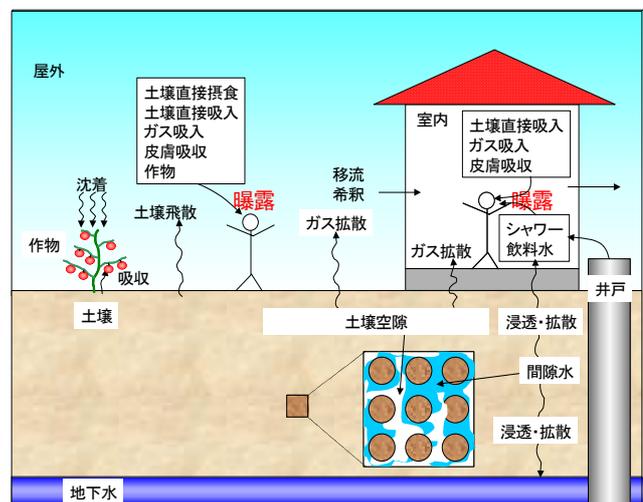


図 3 GERAS-1 の暴露経路の概念図（文献 9 より引用）

3. 暴露評価方法の比較

3.1 土壌経由の暴露

本項で検討対象とするモデルは、米国 ASTM (RBCA), オランダ (CSOIL) およびイギリス (CLEA) の3種類とした。産総研 (GERAS) は CSOIL に準拠しているため本項では省略した。

各モデルとも土壌経由の暴露として、土壌の摂食 (経口摂取), 土壌の皮膚接触および土壌の肺吸入の3経路を考慮している (表 1 参照)。

表 1 各モデルで考慮されている暴露経路 (土壌経由)

暴露経路	米国 ASTM(RBCA)	オランダ(CSOIL)	イギリス(CLEA)
摂食	表層土壌 (GL-1m まで)	土壌	土壌 (屋外) とダスト (室内)
皮膚接触	表層土壌 (GL-1m まで)	土壌 (屋外) とダスト (室内)	土壌 (屋外) とダスト (室内)
肺吸入	ダスト (屋外・室内)	ダスト (屋外・室内)	ダスト (屋外・室内)

(1) 土壌の摂食

土壌の摂食（経口摂取）については、いずれのモデルも基本的には土壌の日摂取量（mg/d）に土壌含有量（mg/kg）を乗じて有害物質の日摂取量（mg/d）を算定している

(2) 土壌の皮膚接触

土壌の皮膚接触については、各モデルの暴露量算定式の考え方に差があり、算定結果もばらつきが大きい。基本的には露出皮膚面積に単位面積あたりの土壌付着量を乗じ、土壌の皮膚接触量が算定され、それに有害物質の土壌含有量および皮膚吸収率を乗じて暴露量が算定される。なお、オランダでは皮膚接触で考慮されている有害物質は有機物のみである。

(3) 土壌粒子の吸入

土壌粒子の吸入についても、皮膚接触同様、各モデルの暴露量算定式の考え方に違いがあり、算定結果の差は大きい。基本的には、気体中の土壌粒子濃度に呼吸量を乗じ、それに土壌含有量、吸収率(CSOILのみ)および土質に応じた濃縮係数(CLEAのみ)等を考慮し暴露量が算定される。

3.2 大気経由の暴露

(1) 検討対象としたモデル

本項では、米国 ASTM (RBCA)、オランダ (CSOIL, VOLASOIL) およびイギリス (CLEA) を検討対象とした。産総研 (GERAS) は CSOIL をベースに開発されているため、ここでは検討の対象外とした。また、オランダでは全ての暴露経路を考慮している CSOIL モデルと室内空気汚染に特化する VOLASOIL モデルを開発しているため、ここでは CSOIL と VOLASOIL を分けて比較検討する。なお、検討モデルのうち VOLASOIL は原液汚染を考慮しているが、それ以外のモデルはフリーフェーズの汚染物質は存在していないものと仮定している。

(2) 各モデルで考慮されている暴露経路

各モデルで考慮されている暴露経路を表 2 に示す。

表 2 各モデルで考慮されている暴露経路（大気経由）

暴露経路	米国 ASTM	オランダ		イギリス
	RBCA	CSOIL	VOLASOIL	CLEA
土壌→屋外空気	○	○	×	○
地下水→屋外空気	○	×	×	×
土壌→建物間隙→室内空気	○	○	○	○
地下水→建物間隙→室内空気	○	×	○	×

(3) まとめ

比較検討の結果、以下の特徴が認められた。

- VOLASOIL では原液汚染を扱えるが、それ以外のモデルでは、原液の汚染物質は存在しないものと仮定している。
- 暴露経路は、地下水から空気への移送を考慮するモデルと、しないモデルがある。
- 土壌汚染の深度は、任意に設定できるモデルと一定深度に仮定するモデルがある。
- 「室内空気」では、各モデルともに異なる計算式を用いている。これは、国により一般的な建物の構造が異なることが要因の1つと考えられる。

3.3 水経由の暴露

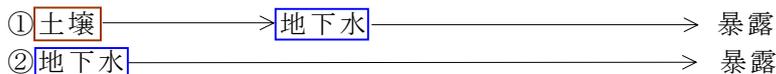
(1) 検討対象としたモデル

今回検討したリスク評価モデルの中で、水による暴露経路を考慮しているモデルは「RBCA Tool Kit」、「RISC-HUMAN」および「GERAS」の3つであった。「GERAS」は、「RISC-HUMAN」をベースに開発されているため、ここでは「RBCA Tool Kit」および「RISC-HUMAN」について検討することとした。

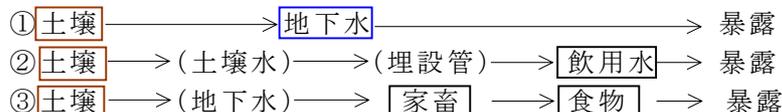
(2)各モデルで考慮されている暴露経路

検討対象とした「RBCA Tool Kit」および「RISC-HUMAN」で考慮されている暴露経路を以下に示す。

<RBCA>



<RISC-Human>



なお、「RISC-HUMAN」で考慮されている汚染サイトの家畜を食物として摂取する暴露については、対象が牧場や畜産業を営んでいるサイトなど、限定的で一般的でないと考えられるため対象外とした。

(3)各モデルの違い

「RBCA Tool Kit」が暴露シナリオのスタートを土壤・地下水いずれにも設定することが可能であることに対し、「RISC-HUMAN」は暴露シナリオのスタートが土壤だけに限定されている。

(4)まとめ

「RISC-HUMAN」が土壤汚染に起因する健康リスクの算定を目的として、全ての暴露シナリオを土壤からスタートさせていることに対し、「RBCA Tool Kit」は対象となるサイトの健康リスク低減を目的として、土地の利用方法に応じて土壤から汚染物質が地下水に溶出する場合と汚染された地下水を直接飲用する場合を想定することができる。

3.4 地下水の移流・分散モデルの検討

(1)検討内容

土壤汚染の評価において、地下水汚染の有無および経年的な拡散予測は重要である。リスク評価モデルソフト「RBCA Tool Kit」では、地下水の横方向の距離減衰ファクターを計算が容易な解析解を得る Domenico モデル¹⁰⁾を用いて算定される。Domenico モデルは、1次元の移流・分散、吸着による遅延効果、微生物分解に加え、地下水流向に対して横および鉛直方向の分散を考慮したモデルであり、米国 EPA が公開している解析ソフト「BIOCHLOR¹¹⁾」、また「GERAS」で地下水濃度変化の評価に用いられている。

本ケースでは、Domenico モデルについて、米国 Geological Survey が公開している詳細なシミュレーションが可能な有限要素法 (FEM) による数値解析プログラム「SUTRA¹²⁾」と、ほぼ同じ条件でケーススタディを実施し、計算結果を比較した。これにより、Domenico モデルと詳細なシミュレーションが可能な FEM による「SUTRA」との違いを明らかにし、敷地外への地下水濃度推定の在り方の検討を行なった。

(2)各ツールの計算結果の比較

Domenico モデルおよび「SUTRA」を用いて、汚染源から 10m～50m の地点での地下水濃度の経年変化の比較を行なった結果を図 4 に示す。各地点ともに、十分に時間が経過して定常状態に達した時点での各地下水濃度の計算値は、全く同じ値となった。このことより、移流、拡散、および吸着に関するパラメータが、均一な地盤条件で同じであれば、Domenico モデルと「SUTRA」の計算結果とよく合致することが確認できた。

ただし、分散が計算結果に与える影響が大きいため、現場の状況に適合したパラメータを採用する必要があること、および複雑な地盤状況に対しては適用が困難であることに留意する必要がある。

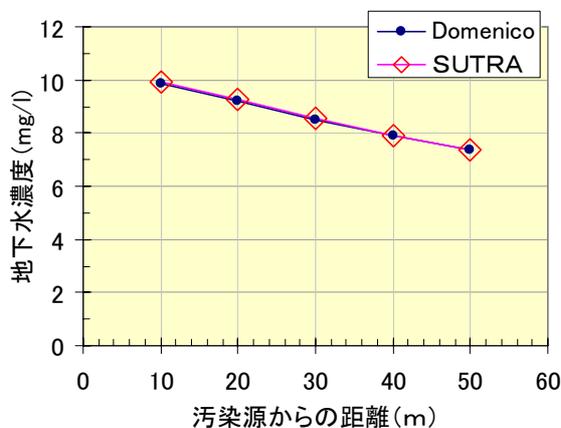


図 4 Domenico モデルと SUTRA (FEM 解析) による地下水濃度の減衰予測

4. まとめ

代表的なリスク評価モデルとして ASTM(米国)の RBCA, オランダの CSOIL と VOLASOIL, イギリスの CLEA, 産業技術総合研究所の GERAS, 以上 4 機関のリスク評価モデルを取り上げ, その暴露経路や暴露量算出式などを比較した。

ASTM の規格モデルはサイトごとのリスク評価を実施するための, 一般的なプロセスを定めた枠組みであるのに対し, オランダとイギリスのモデルは, 基準値を決定するために開発されたという大きな違いがある。

媒体別に各モデルの中味を比較した結果を下記に記述する。

- ① 土壌経由の暴露については, 経口摂取はどのモデルも同じ暴露量算定式を用い, 計算結果もほぼ同じような値となった。一方, 皮膚接触と土壌粒子の吸入については, 暴露量算定式がモデルごとに異なり, 計算結果にも大きな差が出た。
- ② 大気経由の暴露については, 暴露経路の選択肢がモデルごとに大きな違いがあることが判った。(例: 汚染源の深さや減衰, 建物の基礎および床下部分の構造とそこを通過する空気の流れをどのように考慮するかどうかの違い)
- ③ 水経由の暴露についても大気経由と同様に, 暴露経路の選択肢がモデルごとに異なることが判った。この違いにはオランダのように基準値設定のためのモデルとして土壌濃度に対するリスク評価に重点を置くか, ASTM のように汚染土壌と汚染地下水とによるサイト全体のリスク評価に重点を置くかという違いも影響しているように思われる。
- ④ 地下水の横方向移動に対する解析モデルである Domenico モデルと有限要素法モデルである「SUTRA」によるシミュレーション結果を比較した結果, 十分に時間が経過した時点での濃度は非常によく一致した。この結果より, 均一な地盤条件では Domenico モデルは「SUTRA」と同様の結果が得られることがわかり, リスク評価における地下水評価ツールとして有用であることが確認できた。

以上, 本研究で得られたリスク評価モデルの暴露評価方式の比較結果に基づいて, 日本でのリスク評価モデルの適用性について, 平成 18 年度および 19 年度の自主部会で検討を進めているところである。

参考文献

- 1) 土壌環境センター (2006): 土壌汚染対策におけるリスク評価の適用の検討 (その 2) - リスク評価のわが国における活用にむけて -, 平成 17 年度自主事業報告書
- 2) ASTM (1995): RBCA E1739 「石油漏出サイトに適用されるリスクに基づく修復措置のための標準ガイド (住友海上リスク総合研究所, 2001)」
- 3) ASTM (2000): RBCA E2081 「リスクに基づく修復措置のための規格ガイド (インターリスク総研, 2003)」
- 4) ASTM (2002): RBCA E2205 Standard guide for risk-corrective action for protection on ecological resources
- 5) Groundwater Services, Inc. (1998): RBCA Tool Kit for chemical Releases Software Guidance Manual pp.27
- 6) Rikken M.G.J. et al. (2001): Evaluation of model concepts on human exposure. RIVM report 711701022, pp.125
- 7) Waitz M.F.W., Freijer J.I., Kreule P., Swartjes F.A.(1996)The VOLASOIL risk assessment based on CSOIL for soils contaminated with volatile compounds. RIVM report 715810014, 11-13p, pp.49-83
- 8) イギリス環境庁(2002):The contaminated land exposure assessment (CLEA) model: Technical basis and algorithms
- 9) GERAS(2006):<http://unit.aist.go.jp/georesenv/topicslog2.html>
- 10) Domenico,P.A.(1987): An Analytical Model for Multidimensional Transport of Decaying Contaminant Species.J.Hydrol.91, pp49-58
- 11) U.S.EPA (2000): BIOCHLOR, Natural Attenuation Decision Support System, EPA/600/R-00/008
- 12) U.S.Geological Survey: SUTRA, IGWMC, <http://water.usgs.gov/software/sutra2D.html>