

Appendix

Appendix 2.1 放射性物質の分布状況変化モデルに適用可能な技術情報調査

北村 哲浩（原子力機構）

福島第一原発事故に伴う放射性物質の長期的影響を把握するためには、対象とする環境での放射性セシウムの主要な移行経路や各経路での長期の移行による放射能濃度の時間変化に関する情報を総合的に組み合わせることが重要である。これは、放射性セシウムの移行抑制方法や除染方法の決定支援を効果的に行うためにも重要となる。

地表面に沈着した放射性セシウムの表層土壌中濃度については、既に多くの研究がなされており、例えば2成分1コンパートメントモデル(地表面からある深さまでの土壌層を1つの区画とみなし、放射性物質の移行の速さが異なる2つの成分に分けて評価するもの) [1] を用いた研究では、放射性セシウムの鉛直方向分布の経時変化が評価されている[2]。

また、チェルノブイリ原子力発電所事故後の調査や解析でも報告されているように、放射性セシウムは土壌、特に粘土粒子に強く吸着する性質があり、土壌に付着した放射性セシウムが、地表表面で地表水によって侵食され河川を通じて下流側へ移動する経路が、浸透水によって下方に浸透する経路よりも、主要な移行経路となっている可能性が高い。

- 地表表面での移動：
降雨により表面にあった土砂が地表面から離脱、その土砂が地表流とともに移動、移動した土砂が堆積、という3つのプロセス。
- 河川での移動：
移動した土砂の一部が流入し浮遊土砂として移動するもの。放射性セシウムの広範囲における移動においては、この河川での移動が重要なプロセスとなる。

本調査では、福島第一原発事故に伴う放射性物質の長期的影響の評価を進めるための基盤整備として、国内外での放射性物質の分布状況の変化モデルについての文献に基づき、主に放射性セシウムの土砂に吸着した形での移動プロセスを取り扱える解析モデルについての調査・整理を行う。また、モデルは、取り扱うプロセス、詳細度、必要なデータ等によって多様なものが存在するため、評価の目的と評価の対象としている領域の大きさや地形及び水系の特徴に適したものに着目する。

各種モデルの特徴は、一般的に、経験論ベース、概念ベース、物理ベースの3つのタイプあるいはその組み合わせで論じることができる。経験論ベースのモデルは、主に観測結果を用いて定常状態を仮定して解析するもので[3]、他のタイプのモデルと比べ最も単純である。このタイプでは適用範囲が限定されるものの、より複雑なモデルと比較して必要とされるデータも少なく、情報が限定されている場合にも適用することができる。また、解析の第一ステップとして、土砂が発生する場所や化学物質の発生源を特定する場合に有効である。物理ベースのモデルは、河川流と土砂輸送、それに伴う化学物質の生成をこれらのプロセスを表す物理式を用いて解析するものである。方程式を使って様々な水文プロセスを解析するため、適用性は大きい。しかし、多数のパラメータが必要になること等不利な点もある[4]。概念ベースのモデルは、集水域での現象を大まかに扱うものであり、水の流れの特徴を一連の貯留（タンク）とみなして解析するもので[3]、経験論ベースのモデルと物理ベースのモデルの中間的なモデルとして位置づけられ[5]、どのプロセスが集水域での挙動を支配するか、また、土砂や水流がどのような挙動を示すかという評価に有効である。

侵食には、雨滴、シート、リル、ガリ、河川内侵食があり[6]、これらのプロセスを取り扱う数多

くの解析モデルを調べた結果について、上記の3種類のモデルの特徴を踏まえつつ、プロセス特化型、地表プロセス集中型、河川プロセス集中型、総合型に分類・整理した。以下では、その結果に基づき、各モデルの特徴を概観しつつ代表的なモデルの内容を記載する。

(1) プロセス特化型

ある特定のプロセスのみに重きを置き、そのプロセスを詳しく解析をするタイプのもので、経験ベースのUSLE [7]、概念ベースのIQQM [8]、物理ベースのWEP [9] 等が挙げられる。

このうち多くの既存の流域モデル(侵食、地表流を含む)で用いられているものはUSLE (Universal Soil Loss Equation) である。このモデルで取り扱う式は単純であり、標準的なアウトプットは丘陵斜面から侵食によって流出してくる一年間あたりの土砂量である。USLEモデルは、広域を対象とした考え方なので、狭い領域(例えば1 km²)での検討への適用には問題がある可能性があり、また、大規模な侵食を最も起こしそうな降雨事象を特定して評価することはできないという制約もある。しかしながら、本モデルで必要なパラメータは比較的入手しやすく[10]、観測結果と整合的な結果も得られており全体的な評価においては有用である。

WEP (Water and Energy transfer Processes) は、複雑に土地利用がされている集水域での水文循環をシミュレーションする物理ベースモデルである。主な基礎モジュールは、降雨一流出、不圧/被圧地下水、河川水と地下水の相互作用を取り扱っており、浸透施設・調節池の効果の計算及び水田の詳細計算等の機能を備えている。また、様々な土地利用形態(市街地、水田、畑地等)が混在する集水域にも適用でき、鉛直方向の一次元の熱輸送解析も行う。この降雨一流出モデルは、集水域に分割して格子状に分布している各々のセルからの水・熱輸送量をシミュレーションし、その計算結果を地図上に出力することができる。GISソフトウェア(ArcView)を用いたデータ管理モジュールがあり、これを用いることによって流域情報の管理や解析結果の表示ができる。

(2) 地表プロセス集中型

地表での土砂生成、移動、堆積を主に扱うもので、いずれも物理ベースのモデルで、田畑の流出・侵食を扱うCREAMS [11]、PERFECT [12]、小集水域での土砂量・浸水量を扱うANSWERS [13]、TOPOG [14]、土砂濃度を計算するGUEST [15] 等がある。

CREAMS (Chemical Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems) は、表面流出や根域の下にある土壤水に存在する汚染物質が農作業へ与える相対的な影響を評価するために開発された物理ベースモデルである。本モデルは、水文学、侵食と堆積、対象としている非点源汚染物質と化学物質の3つの要素から構成されている。CREAMSで使われているアルゴリズムは、他の多くの侵食と水質のモデルでも使われている(例えば、PERFECT、WEPP [16])。本モデルは、丘陵傾斜での侵食・堆積と土砂移流、土砂の一次、二次の河川水路への流入を評価し、流量、最大流量、土壤浸透、蒸発散、土壤水分、地下水への浸透と土砂生成を結果として得る。

PERFECT (Productivity, Erosion and Runoff, Functions to Evaluate Conservation Techniques) は、CREAMSの適用性を広げるために開発され、耕作、休閒管理等の土壤管理慣行の影響を解析することができる。CREAMSモデルは、表面や耕作の仕方によって変わる作物被覆を考慮せずに、流出を降雨と土壤水分の関数として計算する。一方、PERFECTモデルでは、流出、侵食、オーストラリアの乾燥作物地帯での管理オプションに伴う作物生産量を予測することができる。本モデルはデータインプット、水収支、作物生育、作物残渣、侵食、モデル・アウトプットの6つのモジュールで構成される。これらのモジュールは、適用の範囲が拡張されたときに代替りのモジュールが使えるようなフレームワークで構成されている。

(3) 河川プロセス集中型

河川内での土砂に関するプロセス(生成、移動、堆積)を主に扱うもので、概念ベースのEMSS [17]、SWRRB [18]、LASCAM [19]、LISEM [20]、SWAT [21]、AGNPS [22]、物理ベースのTODAM [23]、RIVTOX (1次元モデル) [24]、FETRA [25]、COASTOX (2次元モデル) [26]、iRIC (2次元・3次元) [27] 等がある。さらにIHACRES-WQ [28]、SEDNET [29] は経験ベースと概念ベースの組合せである。

SWAT (Soil and Water Assessment Tool) は、流域での水と物質輸送をシミュレーションするものであり、気候、土壌、地形、土地利用及び植生、土地管理方法等のインプット情報を用いて、水や土砂の移動、農作物の生育、栄養塩や農薬の化学物質の輸送をシミュレーションするツールとして国際的に知られている。また、GISソフトウェアの拡張機能としても機能する。SWATモデルのユーザーは多く多数の論文発表がある。

TODAM (Time-dependent One-dimensional Degradation and Migration) は、有限要素法を用いた物理ベースのモデルであり、河川でのプロセスをシミュレーションすることができる。モデルは、酸化、加水分解、光分解、生物学的活動による汚染物質の分解プロセスをそれぞれ別に取り扱える。核種輸送は、総合的浮遊土砂モジュールによって取り扱われる。この土砂モジュールは、粘着性、非粘着性土砂を取り扱うことができる。ここで粘着性土砂とは、シルトや粘土の微粒子を含む土砂である。

iRIC (International River Interface Cooperative) は、USGS (アメリカ地質調査所) が開発してきた MD_SWMS と (財) 北海道河川防災研究センターで開発してきた RIC-Nays の機能を、清水康行教授 (北海道大学) と Jon Nelson 博士 (USGS) の提唱により統合した河川の2次元及び3次元流れ・河床変動解析フリーソフトである。計算格子を河川測量データやDEM (Digital Terrain Model) データの測量データから作成することができ、流砂量流出、河岸侵食の予測解析に応用される。

(4) 統合型

(1)~(3)の特徴を全て含むもので、WEPP [16]、MIKE-11 [30]、HSPF [31] 等がある。

WEPP (Watershed Erosion Prediction Project) は、物理ベースのモデルであり、丘陵斜面のみを考慮するバージョンと集水域を考慮するバージョンの二つのバージョンがある。このモデルは、傾斜で起きる侵食のモデリング手法として世界中で使われてきた[32]。このモデルは、人為的影響も含む水による侵食を支配する本質的なメカニズムを測定あるいは評価することを目的にしている。恒常ガリ (小峡谷) や恒常河川のような恒常的な流れでの侵食、輸送、堆積は考慮していない。集水域バージョンは、耕作されてこれらの表面侵食が水路網になる可能性がある間欠性ガリを含む地域を対象としている。

HSPF (Hydrologic Simulation Program, Fortran) は、集水域での水文と水質 (窒素、リン、浮遊土砂、他の有毒有機、無機汚染物質) をシミュレーションするために開発された概念ベースのモデルであり、広範囲の水質関連の化学成分を解析することができる。本モデルは、浸透性陸地、不浸透性陸地、河川・混合貯水池の3つのモジュールから構成され、集水域を水文学的に均一な土地区分に分割し水量と水質を計算することで、アウトプットして河川に流入した水、土砂、化学物質のフラックスの合計を評価する。

なお、上記の土砂移動に着目した各種モデル以外の重要な評価手法として、最初に触れた2成分1コンパートメントモデルがある。これまでに、原子炉事故時における公衆の放射線影響を解析するコードシステムの研究開発[33-34]、土壌深度別のセシウム137の外部被ばく線量係数の計算[35]、チェルノブイル原子力発電所近傍において測定されたデータに基づく本モデルの妥当性及びパラメータ値の検討[2, 36]、等の報告がある。本報告書でも2.3章において本モデルを応用した空間線量率の経時変化が求められている。現時点では1成分モデルに分類される結果が多いが、2成分モデ

ルに分類される可能性を示唆する事例もあり、今後の長期的な評価では2成分モデルに分類される結果が多く出てくる可能性があり、継続的な検討が必要である。

参考文献：

- [1] Gale, H.L., Humphreys, D.L.O., Fisher, E.M.R., "Weathering of Caesium-137 in soil," Nature 4916, 257-261 (1964).
- [2] 高橋知之, 本間俊充, "チェルノブイル原子力発電所近傍の表層土壤中 ^{137}Cs 濃度に関するモニタリングデータを用いた外部被ばく線量評価モデルの妥当性の検証," 保健物理 34, 365-374 (1999).
- [3] Wheeler, H.S., Jakeman, A.J., Beven, K.J., "Progress and directions in rainfall-runoff modelling," In: Jakeman, A.J., Beck, M.B., McAleer, M.J., eds. Modelling change in environmental systems, Chichester, John Wiley and Sons, 101-132 (1993).
- [4] Beven, K., "Changing ideas in hydrology - the case of physically-based models," Journal of Hydrology 105, 157-172 (1989).
- [5] Beck, M., "Water-quality modeling - a review of the analysis of uncertainty," Water Resource Research 23, 1393-1442 (1987).
- [6] Loch, R.J., Silburn, D.M., "Constraints to sustainability-soil erosion," In: Clarke, L., Wylie, P.B., eds. Sustainable crop production in the sub-tropics: An Australian perspective, QDPI (1996).
- [7] Wischmeier, W.H., Smith, D.D., "Predicting Soil Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning," USDA Agricultural Handbook No. 537, 58 (1978).
- [8] Department of Land and Water Conservation, "IQQM-integrated water quality and quantity model," Catchment Processes and Modelling Branch, TS95.019 (1995).
- [9] Jia, Y., Ni, G., Kawahara, Y., Suetsugi, T., "Development of WEP model and its application to an urban watershed," Hydrological Processes 15, 2175-2194 (2001).
- [10] Loch, R., Rosewell, C., "Laboratory methods for measurement of soil erodibilities (K factors) for the universal soil loss equation," Australian Journal of Soil Research 30, 233-248 (1992).
- [11] Knisel, W.G., "CREAMS: A Field Scale Model for Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems," USDA (1980).
- [12] Littleboy, M., Silburn, M.D., Freebairn, D.M., Woodruff, D.R., Hammer, G.L., Leslie, J.K., "Impact of soil erosion on production in cropping systems. I. Development and validation of a simulation model," Australian Journal of Soil Research 30, 757-774 (1992).
- [13] Beasley, D.B., Huggins, L.F., Monke, E.J., "ANSWERS-a model for watershed planning," Transactions of the American Society of Agricultural Engineers 23, 938-944 (1980).
- [14] Gutteridge Haskins and Davey, "Integrated Quantity/Quality Modelling-Stage 3," Gutteridge Haskins and Davey, for Department of Water Resources, Sydney, 102 (1991).

- [15] Yu, B., Rose, C.W., Cielsiolka, C.A.A., Coughlan, K.J., Fentie, B., “Towards a framework for runoff and soil loss prediction using GUEST technology,” *Australian Journal of Soil Research* 35, 1191-1212 (1997).
- [16] Laflen, J.M., Lane, L.J., Foster, G.R., “WEPP: A new generation of erosion prediction technology,” *Journal of Soil and Water Conservation* 46, 34-38 (1991).
- [17] Vertessey, R.A., Watson, F.G.R., Rahman, J.M., Cuddy, S.D., Seaton, S.P., Chiew, F.H., Scanlon, P.J., Marston, F.M., Lymbuner, L., Jeanelle, S., Verbunt, M., “New software to aid water quality management in the catchments and waterways of the south-east Queensland region,” In: *Proceedings of the Third Australian Stream Management Conference*, August 27-29, 611-616 (2001).
- [18] USEPA, “SWRRBWQ Window’ s interface users guide,” US Environmental Protection Agency (1994).
- [19] Viney, N.R., Sivapalan, M., “A conceptual model of sediment transport: application to the Avon River Basin in Western Australia,” *Hydrological Processes* 13, 727-743 (1999).
- [20] Takken, I., Beuselinck, L., Nachtergaele, J., Govers, G., Poesen, J., Degraer, G., “Spatial evaluation of a physically-based distributed erosion model (LISEM),” *Catena* 37, 431-447 (1999).
- [21] Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S., Williams, J.R., “Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development,” *Journal of the American Water Resources Association* 34, 73-89(1998).
- [22] Young, R.A., Onstad, C.A., Bosch, D.D., Anderson, W.P., “AGNPS, agricultural nonpoint source pollution. A watershed analysis tool,” In: *Conservation Research Report 35*. US Department of Agriculture, Washington, DC (1987).
- [23] Onishi, Y., Serne, R. J., Arnold, E. M., Cowan, C. E., Thompson, F. L., “Critical Review: Radionuclide Transport, Sediment Transport and Water Quality Mathematical Modeling, and Radionuclide Sorption/Desorption Mechanisms,” NUREG/CR-1322, PNL-2901, prepared by Pacific Northwest Laboratory for the U. S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D. C., (1981).
- [24] RODOS Report, “RIVTOX - one dimensional model for the simulation of the transport of radionuclides in a network of river channels,” RODOS-WG4-TN(97)05=Revised (2003).
- [25] Onishi, Y., “Sediment-Contaminant Transport Model,” *Journal of the Hydraulics Division* 107, 1089-1107 (1981).
- [26] Zheleznyak, M.J., Demchenko, R.I., Khursin, S.L., Kuzmenko, Y.I., Tkulich, P.V., Vitiuk, N.Y., “Mathematical modeling of radionuclide dispersion in the Pripjat-Dnieper aquatic system after the Chernobyl accident,” *Science of the Total Environment* 112, 89-114 (1992).
- [27] iRIC のソフトウェア紹介ホームページ <http://i-ric.org/en/> (2013)
- [28] Jakeman, A., Littlewood, I., Whitehead, P., “Computation of the instantaneous unit hydrograph and identifiable component flows with application to two small upland catchments,” *Journal of Hydrology* 117, 275-300 (1990).

- [29] Prosser, I.P., Young, B., Rustomji, P., Hughes, A., Moran, C., “A model of river sediment budgets as an element of river health assessment,” In: Proceedings of the International Congress on Modelling and Simulation (MODSIM’ 2001), December 10-13, 861-866 (2001).
- [30] Hanley, N., Faichney, R., Munro, A., Shortle, J.S., 1998. “Economic and environmental modelling for pollution control in an estuary,” *Journal of Environmental Management* 52, 211-225 (1998).
- [31] Johanson, R.C., Imhoff, J.C., Davis, H.H., “Users Manual for the Hydrologic Simulation Program-Fortran (HSPF) version No. 5.0,” EPA-600/9-80-105. US EPA Environmental Research Laboratory, Athens, GA (1980).
- [32] Homma, T., Togawa, O., Iijima, T., “Development of accident consequence assessment code at JAERI,” EUR-13013/2 (1990).
- [33] Hairsine, P.B., Rose, C.W., “Rainfall detachment and deposition - sediment transport in the absence of flow-driven processes,” *Soil Science Society of America Journal* 55, 320-324 (1991).
- [34] Jow, H.-N., Sprung, J.L., Rollstin, J.A., Ritchie, L.T., Chanin, D.I., “Accident consequence code system (MACCS), Model description,” NUREG/CR-4691, Vol.2 (1990).
- [35] Saito, K., Jacob, P., “Gamma ray fields in the air due to sources in the ground. *Radiation Protection Dosimetry* 58, 29-45 (1995).
- [36] 高橋知之, 本間俊充, “チェルノブイル原子力発電所近傍のモニタリングデータを用いた¹³⁷Cs の外部被ばく線量評価パラメータの土質による差異に関する検討,” *保健物理* 36, 111-121 (2001).