

水田環境における放射性核種の移行評価モデル

日本土壌肥料学会
土壌・農作物等への原発事故影響WG

1. はじめに

これまで放射性セシウム (Cs) や放射性ストロンチウム (Sr) について、土壌-作物系での挙動を理解するために基礎的な知見を紹介してきた。特に、水稲における放射性核種の移行を例に挙げて示してきた。その4では、水田環境における放射性核種の移行を評価するための移行モデルの考え方と解析事例について紹介する。

2. 移行モデルの概要

原子力施設に起因する公衆の被ばくを合理的に評価するためには、日本人の主食である白米の摂取に起因する内部被ばく線量を精度良く求めることが重要となる。このためには、水田環境にもたらされた放射性核種の白米への蓄積を評価するモデルと、そのモデルに用いるパラメータが必要となる。

2. 1 移行係数モデルの概要

土壌中の放射性核種濃度が既知の場合に、白米中の放射性核種濃度を推定する手法として最もシンプルなモデルは、白米中の放射性核種濃度が土壌中の放射性核種濃度に比例すると仮定するモデル (以下「移行係数モデル」という) である。その1「放射性核種 (セシウム) の土壌-作物 (特に水稲) 系での動きに関する基礎的知見」で紹介した、「土壌から白米への移行係数 (乾燥白米 1 kg 当たりの放射能濃度 / 乾燥土壌 1 kg 当たりの放射能濃度の比)」はその比例係数であり、移行係数モデルに用いられるパラメータである。移行係数モデルは、土壌中の放射性核種濃度が分かれば、移行係数を乗じることによって簡便に農作物の可食部 (水稲の場合は白米) 中の放射性核種濃度を推定することが可能であることから、計算が容易であり、内部被ばく線量評価で一般に用いられている。

2. 2 動的コンパートメントモデルの概要と解析例 (土壌から白米への移行評価モデル)

移行係数モデルは、収穫時における白米中濃度を推定するという目的では有効であるが、水田環境中の放射性核種の移行挙動を模擬したモデルではない。このため、例えば水稲の生育期間内における放射性核種の蓄積状況の把握や、ファイトレメディエーションによる放射性核種の除去効果の確認等、経時変化を評価する必要がある場合には不向きである。このような、環境中における放射性核種の移行挙動をモデル化し、その経時変化を把握するためには、動的コンパートメントモデルが多く用いられる (高橋 2002 ; Amano ら, 2003)。動的コンパートメントモデルは、評価対象系を、評価対象物質の蓄積部 (コンパートメント) の集合体としてモデル化し、これらのコンパートメント間の物質移行や、評価対象系外との物質移行を、時間の逆数の単位をもつ係数 (このパラメータも一般に「移行係数」と表記されるが、ここでは前述の土壌から白米への移行係数と区別するため、TC (Transfer Coefficient) と記述する) で表す。動的コンパートメントモデルでは、各コンパートメント内の評価対象物質の経時変化が常微分方程式として記述され、この連立常微分方程式を、初期値を与えて解くことにより、コンパートメント内の評価対象物質の経時変化を求めることができる。

評価対象系をコンパートメントに分割する際の分割方法は、評価を行う目的や、解析に用いるパラメータの入手状況等によって判断することとなる。ここでは、水田圃場系における動的コンパートメントモデルを構築した例を示す。

土壌に蓄積した放射性Csの水稲への移行について検討するために構築したモデルを図1に示す (Takahashi ら, 2003)。水稲は穂部と茎葉部の二つのコンパートメントに分割しており、穂部のコ

ンパートメントは出穂期以降に存在することとなる。穂部への Cs の移行経路は、茎葉部に一度吸収されて蓄積し、再度穂部へ転流する経路と、土壌から直接穂部に移行する経路（経根吸収）の 2 つの経路が考慮されている。これらの移行経路の TC は、水稻の生長曲線や、安定 Cs あるいは放射性 Cs 等の水稻への移行に関する参考文献を用いて設定される。一度地表面に沈着した放射性 Cs が、水稻の収穫や土壌からの流出・浸透によって系外に移行することで減少する効果を確認するためには、このようなモデルが有効である。

水稻地上部及び穂部中安定 Cs 濃度について、生育期間内における経時変化を評価した解析例を図 2 に示す。この解析例では、Cs の土壌から水稻地上部への吸収量は生育期間内で一定と仮定している。生長曲線としてシグモイド曲線を用いていることから、生育初期では Cs 濃度が比較的高いが、生長が顕著になると濃度は急激に減少する傾向がモデルによって模擬されている。

2. 3 動的コンパートメントモデルの概要と解析例（水田環境を総合的に模擬したモデル）

放射性核種の大気からの沈着及び灌漑水からの流入の 2 つの経路を考慮して構築したモデルを図 3 に示す（Takahashi ら, 2006）。穂部は籾殻、糠、白米の 3 種類に、茎葉部は茎葉表面、茎葉内部、茎葉通過の 3 種類に区分している。「茎葉通過コンパートメント」は、ヨウ素のように揮散しやすい放射性核種を解析する場合に用いるが、Cs や Sr の場合は使用しない。この場合、土壌から茎葉通過コンパートメントへの TC は 0 となる。水田土壌の放射性 Sr 及び放射性 Cs は、移行が速い成分と遅い成分の 2 種類に区別し（高橋ら, 2000、高橋ら, 2001）、経根吸収は両方の成分からイネに移行すると仮定している。

大気からの沈着経路を評価するためには、沈着時に湛水しているか否かが、圃場への放射性核種の残留量に影響を与えると考えられるため、田面水コンパートメントも必要となる。田面水コンパートメントは、湛水している時のみ存在すると仮定し、落水時に田面水コンパートメントに存在する放射性核種は系外に移行することとなる。水田土壌中に存在する放射性核種は、経根吸収によって茎葉内部に移行する。籾、糠、白米へは、葉茎内部に蓄積した放射性核種の転流、あるいは水田土壌から直接経根吸収により移行すると仮定する。これらの移行量は、水稻の生育段階によって変化する。また、大気中に存在する放射性核種は、水稻の生育期間に応じて区分したイネの 5 種類の部分に直接沈着すると仮定する。大気からの乾性あるいは湿性沈着速度などは、生長曲線や参考文献を用いて設定される。

今回の事故において、放射性物質が大量に放出された時期は、水田に関しては休耕期であったため、このような直接沈着を評価するモデルは必ずしも適用する必要はない。しかし、水稻の生育期に放射性物質の沈着が生じるような場合には、このようなモデルを用いて、収穫期における白米中濃度を評価することが必要とされる。

水稻の生育初期（田植えから 20 日間）に、放射性 Sr が大気から短期的に水田環境にもたらされた場合の、水田土壌、田面水及び水稻各部への蓄積量の経時変化を評価した解析例を図 4 に示す。放射性 Sr は茎葉部表面及び田面水に沈着する。茎葉部表面の放射性 Sr はウェザリング（風雨による除去）によって減少する。田面水に沈着した放射性 Sr の一部は水田土壌に吸着し、落水時に田面水に存在する放射性 Sr は落水によって系外に移行する。また、再度圃場に供給された田面水には、水田土壌から放射性 Sr が脱離する。この解析では、茎葉表面から茎葉内部への吸収は生じない（すなわち TC=0）と仮定しており、茎葉内部、籾殻、糠及び白米への Sr の蓄積は全て水田土壌からの経根吸収に起因している。この解析では田植えから 20 日後における沈着を想定しているが、出穂期以降に放射性物質の沈着が生じた場合は、大気からの直接沈着経路も、籾殻、糠及び白米への蓄積に寄与することとなる。

引用文献

- Amano ら (2003) Journal of Nuclear Science and Technology 40, 975-979.
 高橋ら (2000) 保健物理 35, 359-364.
 高橋ら (2001) 保健物理 36, 111-121.

高橋 (2002) シミュレーション 21, 15-19.

Takahashi ら (2003) Proceedings of the International Symposium on Radioecology and Environmental Dosimetry, Rokkasho, Aomori, Japan, 480-483.

Takahashi ら (2006) Proceedings of the International Symposium on Environmental Modeling and Radioecology, Rokkasho, Aomori, Japan, 189-195.

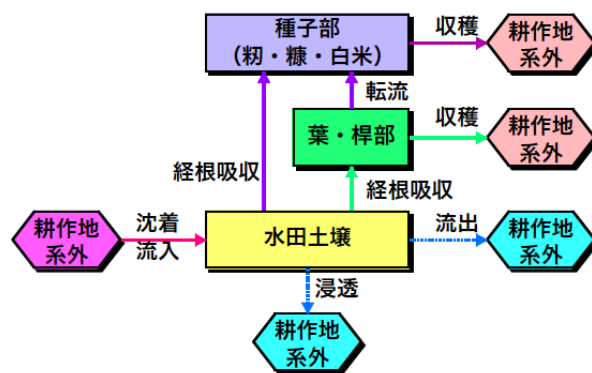


図1 水田系における放射性核種移行挙動評価のためのコンパートメントモデル例
(土壌から水稻への移行モデル)

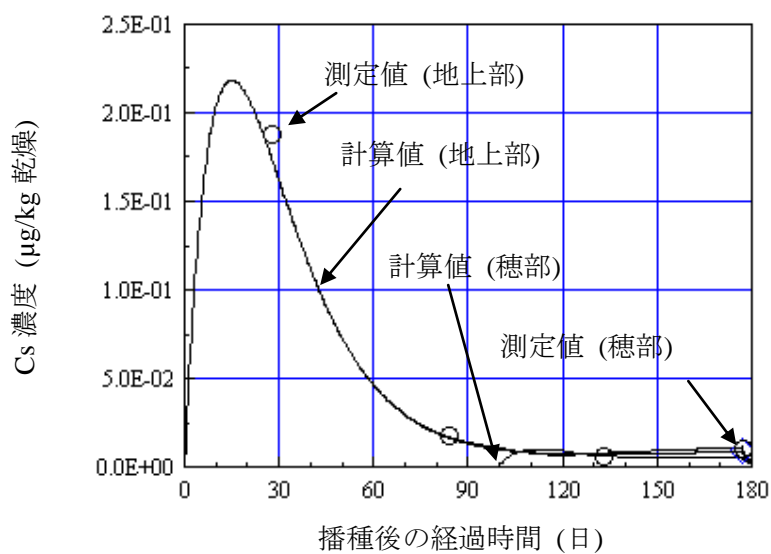


図2 水稻地上部及び穂部中安定 Cs 濃度の経時変化の評価例

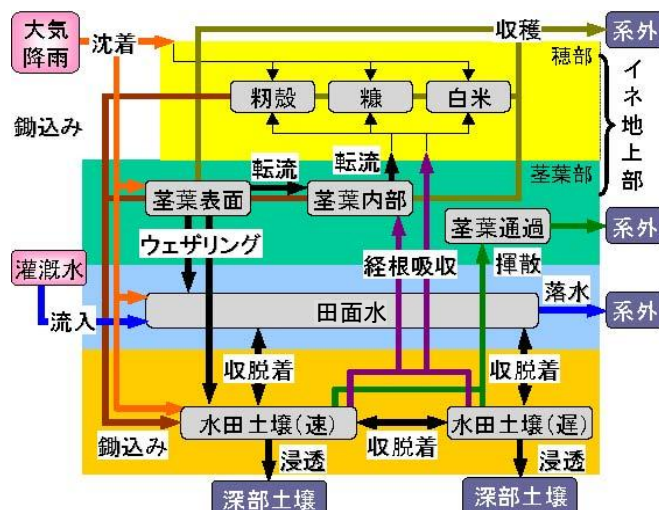


図3 水田系における放射性核種移行挙動評価のためのコンパートメントモデル例 (水田環境を総合的に模擬したモデル)

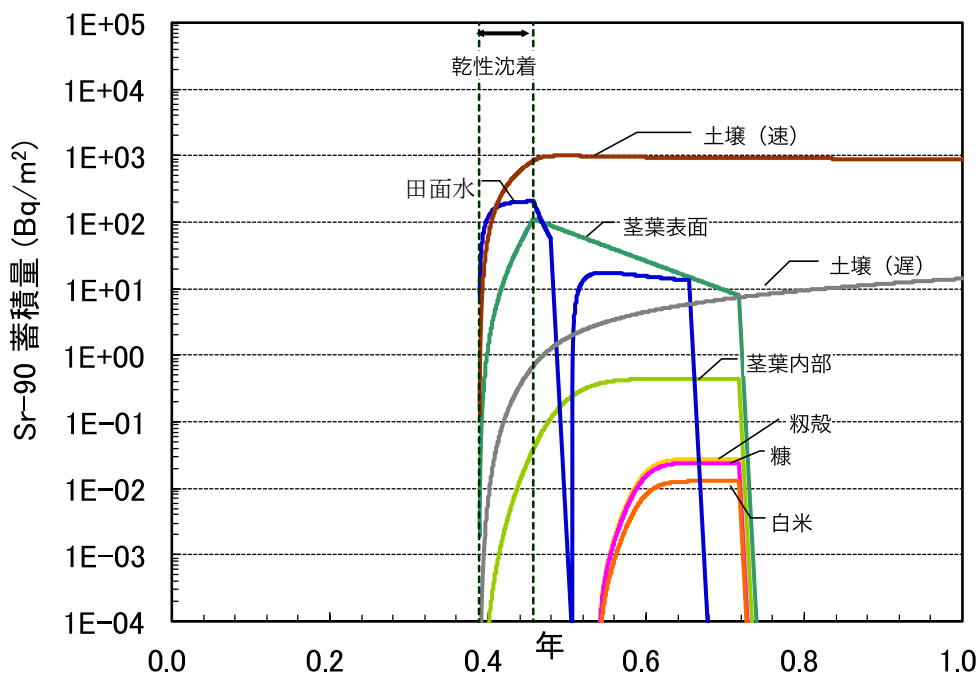


図4 短期的な放射性Srの沈着による水稲各部への蓄積量の評価例