

環境中での物質移動解析へのファジィ情報の活用手法について

京都大学工学部 森澤真輔

京都大学工学部 井上頼輝

1. はじめに

数学モデルを構築し計算機によって数値的に解く等の方法により、環境中での物質移動を解析・評価しようとするとき、モデル及び数値解析の精度と関連パラメータ等の入手・利用可能な情報の精度とが一致しない事態に直面することが少なくない。とりわけ、解析対象の環境が広範囲に及ぶ場合や、対象物質が新たに合成された化学物質である場合、物質移動に人間の価値判断や政策決定が関与する場合等はこの傾向が顕著に現れる。環境中での物質移動を規定する情報の内には、数学モデルに直接に入力することができるように整備された情報の他に、必ずしも定量的ではないが、例えば専門家の判断や主観的な評価の結果として与えられるあいまいな情報、いわゆるファジィ情報、が多く含まれている。ここでは、ファジィ情報を利用できるモデル（枠組み）を構築し、環境中での物質移動解析にファジィ情報を活用する可能性とその有用性について検討する。

2. ファジィモデルの構成

ファジィモデルの構成方法には、あいまいな原因集合とあいまいな結果集合との関係をif - then 文を用いて記述する、ファジィエキスパートシステムの構築に多用される方法と、物理的な因果関係を微分方程式等の支配方程式群で記述し、そこに含まれるパラメータや物質移動の素関係をあいまい化する方法とに2分される。ここでは後者の方法によりファジィ情報の活用を試みた3例について報告する。

2.1 ファジィ境界条件¹⁾

数学モデルによる地下水汚染解析において評価地点の汚染物質濃度に大きな影響を及ぼす（感度が大きい）パラメータとして、汚染原因物質の土壌への収着係数、地層の透水（量）係数、汚染源（漏出）位置における物質濃度等を挙げることができる。これらのパラメータの可能な変動範囲を考慮して、パラメータ毎に堅固度解析を行うと、汚染源濃度の評価値の変動の寄与が大きいとの結果が得られる例が少なくない。ここでは、4種類の廃棄物（不燃物、スラッジ、底灰、飛灰）が埋立される処分場において、各廃棄物毎に実施される溶出試験の結果

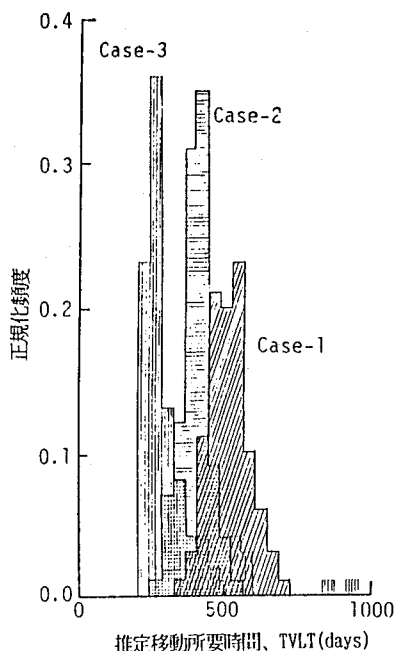


図-1 想定漏出位置から地下水の流下方向30m位置まで汚染物質が移動する時間（TVLT）の推定頻度分布

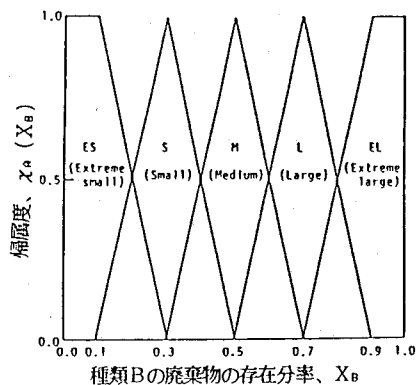


図-2 廃棄物の存在分率に関するファジィ情報の設定例

(表-1)と想定漏出位置に埋立されている廃棄物についてのファジィ情報(廃棄物の種類とその存在分率:表-2)が与えられる場合を想定し、地下水中の汚染物質濃度を推定した例を図-1に示す。ここでは、埋立されている廃棄物の存在分率に関するファジィ情報が図-2で定義される5段階で与えられ、また想定漏出位置における濃度 C_0 は次式で推定できるとしている。すなわち、

$$C_0 = \sum \sum x_a(X_B) X_B C_{B,a}$$

ここに、 $C_{B,a}$ は廃棄物の種類Bが指定されたとき表-1により推定される汚染物質の濃度、 X_B は種類Bの廃棄物の存在分率(廃棄物の存在についてのファジィ情報Aが与えられたとき、図-2から推定される)、 $x_a(X_B)$ は X_B がファジィレベルA($\in$ ES, S, M, L, EL)に属する程度を表す帰属度関数、をそれぞれ意味している。

$\sum$ はA、Bについて行う。 $\sum x_a(X_B) = 1$ 、 $\sum X_B = 1$ である。埋め立てされている廃棄物についての情報が無い場合(ケース3)には、情報がある場合(ケース1、2)に比べて、推定される汚染物質の流達時間の分布が広がる傾向があることが分かる。

2.2 ファジィパラメータモデル²⁾

フォールアウト(放射性降下物)として水田に降下する ^{137}Cs が米に蓄積される現象を図-3によりモデル化する。モデル中に含まれる種々のパラメータの内、表-3に掲げるパラメータを三角形ファジィ数で表現する。パラメータをファジィ化する前のモデルをクリスパ(あいまいさの無い)モデル、ファジィ化したモデルをファジィパラメータモデルと呼ぶことにする。ここでは、三角形ファジィ数の帰属度関数を

$$\mu_s(X) = 1 - \{|x-a|/c\}$$

で表す。ここに、 a は代表値、 c はあいまいさの幅である。両モデルにより推定した米中 ^{137}Cs 濃度の1例を、新潟県を対象に、実測米中濃度と共に図-4に示す。

2.3 ファジィ関係モデル²⁾

図-3に示される ^{137}Cs の移行経路の

表-1 廃棄物の種類毎に想定した汚染物質の浸出濃度

廃棄物の種類	浸出濃度の想定分布
不燃物	区間[0.0,0.1]に一様分布
スラッジ	正規分布(平均1.0、標準偏差0.5)
底灰	対数正規分布(平均0.3、標準偏差0.15)
飛灰	対数正規分布(平均0.7、標準偏差0.35)

表-2 埋立られた廃棄物とその存在分率についてのファジィ情報の例

検討例	情報の種類	廃棄物の種類			
		不燃物	スラッジ	底灰	飛灰
Case-1	ファジィ	Large	Small	Ext.Small	Ext.Small
Case-2	ファジィ	Medium	Medium	Medium	Medium
Case-3	無情報	想定される最大、最小濃度範囲に一様分布			

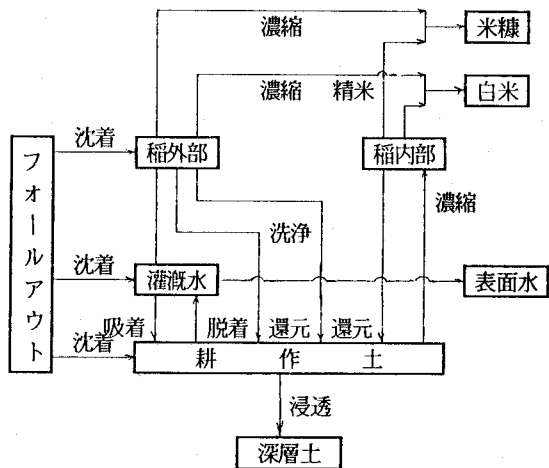


図-3 水田環境における ^{137}Cs の動態

表-3 ファジィパラメータとその値の設定例(対象地域:新潟県)

パラメータ	単位	値(代表値, 幅)
土から稲への濃縮速度係数	月 ⁻¹	(0.8, 0.16)
白米と米糠との間の分配率	-	(0.4, 0.08)
土中での環境減衰速度係数	月 ⁻¹	(0.023, 0.0046)
稲外部からの離脱速度係数	月 ⁻¹	(1.5, 0.15)
水から土への吸着速度係数	月 ⁻¹	(0.25, 0.025)
稲外部から米への移行速度係数	月 ⁻¹	(0.07, 0.035)
稲内部から米への移行速度係数	月 ⁻¹	(0.1, 0.02)

内、表-4に掲げる13の移行経路における ^{137}Cs の移行関係にあいまいさが避けられないとして、クリスプモデルをファジィ化し、ファジィ関係モデルを得る。ここでは、ファジィ関係を規定する帰属度関数として、

$$\mu_R = \exp[-\{(y-f(x))/f_u \cdot f(x)\}^2]$$

を採用している。ここに、 μ_R は米中の ^{137}Cs 濃度 y が関数 $f(x)$ で表わされる関係 R に帰属する程度を表し、明らかに $y=f(x)$ であれば $\mu_R=1$ となる。 f_u は関係のあいまいさの程度(グレード)を意味するパラメータである。クリスプ及びファジィ関係の両モデルによる米中 ^{137}Cs 濃度の推定結果の例を、新潟県を対象に、実測濃度と共に図-5に示す。

3. おわりに

環境中での物質移動解析に多用される数学モデル(微分方程式群で記述されるモデル)をファジィ化する手順およびファジィ化して得たモデルによるシミュレーション、モデルの検証事例を紹介した。ファジィシステムモデルを用いて物質移動を解析するためにはファジィ情報の整備方法等についてなお検討する必要があるものの、ファジィ情報を活用する枠組みは提示できたと言えよう。

参考文献

- 1) S. Morisawa and Y. Inoue:
Development of Mathematical Model for Estimating Groundwater Contamination, Preliminary Application on Groundwater Zone around an Assumed Solid Waste Land-fill Site, Proc. 17th IWSA Conf., SS-17, pp.7-9, (1988)
- 2) 森澤貞輔、井上頼輝、野村武司:
フォールアウト ^{137}Cs の水田環境内移行、ファジィシステムモデルによる評価の試み、土木学会年次学術講演会、II-383, pp.836-837, (1989)

表-4 ファジィ経路と移行関係のあいまいさの設定例

^{137}Cs の移行経路	曖昧度	ファジィ係数
稲外部への沈着	小	$\lambda/4$
灌漑水への沈着	小	$\lambda/4$
耕作土への沈着	小	$\lambda/4$
稲外部から米糠部への移行	大	λ
稲外部から灌漑水への洗浄	大	λ
耕作土から灌漑水への脱着	大	λ
灌漑水から耕作土への吸着	大	λ
稲外部から耕作土への移行	大	λ
耕作土から深層土への浸透	大	λ
稲外部から白米部への移行	大	λ
稲内部から米糠部への移行	大	λ
稲内部から白米部への移行	中	$\lambda/2$
耕作土から稲内部への移行	中	$\lambda/2$

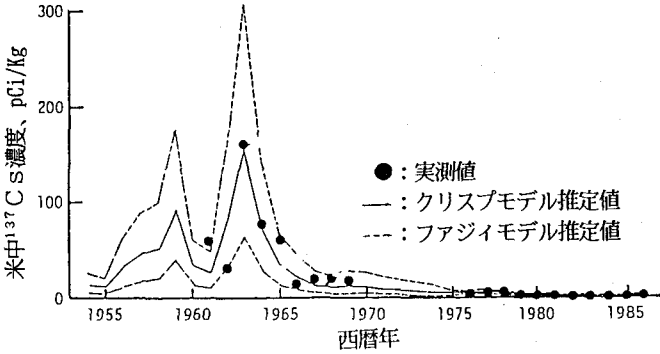


図-4 ファジィパラメータモデルによる米中 ^{137}Cs 濃度 (計算値と実測値との比較: 新潟県)

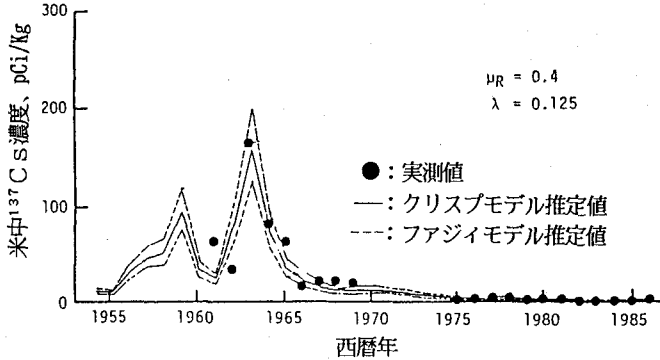


図-5 ファジィ関係モデルによる米中 ^{137}Cs 濃度 (計算値と実測値との比較: 新潟県)