研究論文

916. フォールアウトCs-137の水田環境内動態と米への蓄積 ファジィ・システムモデルによる評価の試み

森澤眞輔*, 野村武司**, 井上頼輝*

(1989年 6月2日 受理)

*Dynamic Behavior of Fallout Cs-137 in Paddy Field
and Its Accumulation in Rice
Evaluation by Fuzzy System Model*

By Shinsuke MORISAWA,
Takeshi NOMURA and Yoriteru INOUE

Fuzzy system model was constructed by introducing fuzzy parameters and fuzzy relations into the evaluation of dynamic behavior of fallout ^{137}Cs in paddy field and numerical simulation was practiced to discuss on the technical feasibility of the model. Cesium-137 contents in polished rice were calculated over 33 yr and were compared with the observed data to examine the usefulness of the model.

The results obtained in this study under the limited assumptions are as follows:

- (1) The observed ^{137}Cs contents in polished rice fall in the range of variation of the contents estimated by the fuzzy system model. Fuzzy system model could depict the dynamic behavior of fallout ^{137}Cs in paddy field.
- (2) Fuzzy system model was constructed by considering fuzziness in both environmental parameters and relation of ^{137}Cs transfer in the paddy field. The model becomes conventional crisp model when both type of fuzziness are neglected.
- (3) The sensitivity of each parameter which is related to the direct deposition of ^{137}Cs on rice plant is high during heavy fallout period, and that related to uptake through root is high during light fallout period.
- (4) Width of fuzziness in fuzzy parameter, which gives the same variation of ^{137}Cs contents in polished rice as estimated by the statistical parameter model, could be determined.

KEYWORDS: fallout, caesium 137, paddy field, rice, fuzzy system, fuzzy parameter, fuzzy relation, environmental parameter, mathematical model, sensitivity, soils, water, root uptake, radioactivities

I. 序 論

著者らは、すでにフォールアウトとして降下した ^{90}Sr の水田環境中での動態と米への移行、米の流通による ^{90}Sr の人為的輸送、および米の摂取に伴う ^{90}Sr の人体内移行と人骨への蓄積を、システムダイナミックスの技法を援用して解析した結果を報告した⁽¹⁾。水田環境

内でのフォールアウト放射性核種の動態を解析・評価するための数学モデルそのものは、時間、空間スケールの制約を受けずに詳細なものを構成することが可能であるが、モデルに含まれるパラメータや入力データ

* 京都大学工学部衛生工学教室 (Dept. of Environ. & Sanit. Eng., Kyoto Univ.)

** 梶野村総合研究所 (Nomura Res. Inst. Ltd.)

をモデルと同じ精度で入手することは不可能に近い。また、モデルで表現する環境構成要素間での放射性核種の移行・分配・蓄積の諸関係を、微分方程式等で厳密に規定するに十分な研究成果が蓄積されているとはいえない難いケースも多い。

環境中での放射性核種の挙動に関する研究成果を集積すると、数値や方程式で厳密に表現されるパラメータや関係に比べて、例えば、「 ^{137}Cs の水田土壌に対する吸着は ^{90}Sr よりも大きい」等と表現されるような「あいまい」な情報が少なくないことに気づく。また、数値や方程式で厳密に表現されているデータや関係のなかにも、「あいまいさ」を内包しているものが多い。

本研究では、これらのパラメータや関係の「あいまいさ」を、「あいまいさ」を残したまま定量的に処理し、水田環境中でのフォールアウト ^{137}Cs の動態と白米中への蓄積を評価するためのモデルを構成する。本研究では、前報⁽¹⁾と同じく、環境中に放出された放射性核種の数年あるいはそれ以上の時間スケールで、生態学的連鎖を経て人間に及ぶと思われる影響を評価するのに適した評価モデルを開発することを目指している。「あいまい」な情報を活用することの技術的可能性とその有用性について具体的に検討するために、フォールアウト ^{137}Cs と日本人の主食である米に注目し、白米への ^{137}Cs の移行と蓄積を評価するモデルを構成する。さらに、構成したモデルの試計算を行い、計算結果を実測値と比較することにより、構成したモデルの妥当性について検討する。

本研究で検討の対象にする「あいまいさ」は、確率・統計学で取り扱われる、いわゆるRandomness(「客観的なあいまいさ」、「事象の生起のあいまいさ」)ではなく、主としてFuzziness(「主観的なあいまいさ」、「意味、評価のあいまいさ」)と呼ばれる「あいまいさ」⁽²⁾であることから、本研究で構成するモデルを“ファジィ・モデル”と称することにする。

II. ファジィ・システムモデルの構成

1. クリスプ・システムモデル

ファジィ・モデルの構成方法として、2つの方法がある。第1の方法は、例えば因果関係をif-then文を用いてファジィ集合論を援用して表現する方法であり、エキスパートシステムの構成にしばしば採用される。第2の方法は、通常の微分方程式等により因果関係を表現し、これをファジィ化する方法である⁽³⁾。本研究では、第2の方法によってファジィ・システムモデルを構成する。このとき、通常の微分方程式群で構成さ

れるモデルを、“クリस्प・システムモデル”(「あいまいさ」のないモデル)と呼ぶことにする。

人に対する長期的な放射線影響を評価するためには、特に環境構成要素中での放射性核種の蓄積量や要素間の移行量を把握する必要があることから、基礎となるクリस्प・モデルでは、地表面に降下したフォールアウト ^{137}Cs の水田環境構成要素中での蓄積と構成要素間の移行量を直接の評価対象とする。フォールアウトとして水田に供給される ^{137}Cs が米中へ移行する過程を、コンパートメントモデルの構成手順に従ってモデル化し、支配微分方程式群を記述する。水田環境の構成要素として水田表層土壌(作土)、水田表水(灌漑水)、稲表面、稲内部および白米に注目して、マスフローダイアグラム(Fig. 1)を作成した。

Fig. 1は、システムダイナミックスの作図記号を用いて表現されており、長方形は環境構成要素中の ^{137}Cs 蓄積量を、バルブ型は環境構成要素へ入・出する ^{137}Cs のフラックスを、雲形はシステムの境界を経ての ^{137}Cs の参入・参出を、円は補助量を、また実線の矢印は ^{137}Cs の移動を、破線の矢印は情報の流れをそれぞれ示している。Fig. 1は使用する記号の相違を除けば、前報のFig. 2⁽¹⁾と基本的に同じである。Fig. 1では、 ^{137}Cs の崩壊による各構成要素からの減少の図示を省略している。

第*i*番目の環境構成要素中の ^{137}Cs の蓄積量を M_i 、*i*以外の要素*j*から第*i*要素へ移行する ^{137}Cs フラックスを R_{ji} 、第*i*要素から第*j*要素へ移行するフラックスを R_{ij} とすると、一般に次の物質収支式

$$dM_i/dt = \sum_j R_{ji} - \sum_j R_{ij} \quad (i \neq j) \quad (1)$$

が各要素*i*について成立する。

Fig. 1の5つの要素について、それぞれ(1)式を書き下すことによって得られる数字モデルがクリस्प・システムモデルである。

2. ファジィ・システムモデル

クリस्प・システムモデルをファジィ化する方法には2通りの方法が考えられる。第1の方法は、モデルに含まれるパラメータの「あいまいさ」を考慮する方法であり、このようにして得られるモデルをここでは“ファジィ・パラメータモデル”と呼ぶことにする。第2の方法は、(1)式で記述される関係の「あいまいさ」を考慮する方法である。このようにして得られるモデルをここではファジィ関係モデルと呼び、両方の「あいまいさ」を同時に考慮するモデルを“ファジィ・システムモデル”と呼ぶことにする。

(1) ファジィ・パラメータ

Fig. 1中の破線は ^{137}Cs のフラックスを算定するための情報の流れ、主として関連パラメータ情報が利用される方向を示している。すなわち、破線の起源にはそれぞれ関連するパラメータ情報が対応する。これらの

パラメータの内には確定値に近い数値が与えられているものから、利用できる研究・調査に限りがあるためにおおまかな数値しか与えられないものまであり、情報の精度は必ずしも揃っていない。ここでは、「あいまい」なパラメータを三角型のファジィ数⁽³⁾で表現す

Fig. 1 Mass flow diagram for evaluating dynamic behavior of fallout ^{137}Cs in paddy field environment, illustrated by system dynamics technique

ることにする。

ファジィ数は、パラメータの値が「ほぼ a 」、「 a 程度」等と表現される内容を、帰属度関数を用いて表現する。例えば、「ほぼ a 」と表現されるパラメータの値を三角型のファジィ数で表現することにすれば、そのファジィ数を特性づける帰属度関数 $\mu_s(x)$ を

$$\mu_s(x) = 1.0 - |x - a|/c \quad (a - c \leq x \leq a + c) \quad (2)$$

で定義することができる。 s はパラメータの「ほぼ a 」である値 x の領域(集合)を意味し、 $\mu_s(x)$ ($0 < \mu_s(x) \leq 1$)はパラメータの値 x が「ほぼ a である」と判断される程度(x が集合 s に属する程度)を表わす。 c は「あいまいさ」の幅を表わしている。このファジィ数は、通常(a, c)と略記される。(2)式を図示したものがFig. 2である。「あいまいさ」の幅 c は、パラメータについての研究・調査の蓄積の多寡やそれらの信頼度を考慮して主観的に決定される。

(2) ファジィ関係

例えば、Fig. 1中の水田土壌から稲内部への経路における ^{137}Cs の移行関係に注目する。水田土壌中の ^{137}Cs 濃度の実測値 x に対して米中の ^{137}Cs 濃度 y をプロットし、 x と y との回帰関係式 $y=f(x)$ を得たとき、実測値の組(x, y)のすべてが回帰関係式 $y=f(x)$ 上にあることはまれである。また、この関係は別の関係式 $y=g(x)$ で表現することも可能である。これらの関係の「あいまいさ」は、その関係に関する研究・調査の蓄積が十分でない場合ほど大きくなる。

本研究では、これらの関係の「あいまいさ」を帰属

Fig. 2 Example illustration of fuzzy parameter expressed by triangular type of fuzzy number

度関数で表わす。すなわち、ある値 y がクリスプな関係 $R: y=f(x)$ に属する程度を表わす帰属度関数 μ_R ($0 \leq \mu_R \leq 1$)を

$$\mu_R = \exp[-\{(y - f(x))/f_u f(x)\}^2] \quad (3)$$

で定量的に表現することにする。ここに、 f_u はFig. 1に示す各経路における ^{137}Cs の移行関係の「あいまいさ」の相違を表現するために導入する「あいまい」度係数である。(3)式の関係をFig. 3に図示する。Fig. 3は、帰属度関数の値が同じであっても、 f_u の値が大きいほど、 y の「あいまいさ」の幅が大きくなることを示している。 f_u の値は、対応する経路における ^{137}Cs の移行関係についての研究・調査の蓄積の多寡や信頼度に応じて、主観的に決定される。

(3)式で表現される関係の「あいまいさ」をFig. 4

W_i means width of fuzziness for given value of f_u . Refer to Eq. (3) in the text.

Fig. 3 Variation of fuzziness in fuzzy relation of ^{137}Cs transportation, depending on membership value and fuzziness coefficient f_u

に図示する。帰属度関数 μ_R と経路ごとに関係のあいまい度係数 f_u を定めると、(3)式から、クリスプな関係 $y=f(x)$ への帰属度が μ_R である領域の上界関数

$$y = \{1 + f_u \sqrt{-\ln \mu_R}\} f(x)$$

と下界関数

$$y = \{1 - f_u \sqrt{-\ln \mu_R}\} f(x)$$

が得られる。すなわち、これら2つの関数で挟まれる領域は、稲内部中の ^{137}Cs の実測値をクリスプな関係 $y=f(x)$ を用いて計算される稲内部中 ^{137}Cs の計算値で説明できる程度が μ_R 以上である領域を表わしている。Fig. 3で見たように、 f_u が大きく、 μ_R が小さいほど、この領域は広くなる。 $\mu_R=1$ は常に $y=f(x)$ であること、すなわち関係がクリスプであることを、また $\mu_R=0$ は x と y との間に関係がないことを、それぞれ意味している。

Fig. 4 Example illustration of fuzzy relation between ^{137}Cs concentration in surface soil and that in rice plant, which is to be expressed by Eq.(3)

Ⅲ. モデルの適用と検証

1. モデル適用の条件設定

本研究は、水田環境内での ^{137}Cs の動態を、ファジィ・システムモデルを構成して評価する可能性を吟味することを目的としており、必ずしもわが国における ^{137}Cs の水田環境内動態の全体像を把握することを目的にはしていない。また、既存の研究・調査からは決定することが難しいクリスプ・モデルのパラメータの幾つかは

フィッティングにより決定する。それゆえ適応対象場として、生産米中 ^{137}Cs 濃度の実測値が20年以上の期間にわたって蓄積されている都道府県の内から、北海道、新潟県、茨城県、福岡県の4道県をモデルの構成場とし、生産米中 ^{137}Cs 濃度の実測値が若干蓄積されている秋田県と石川県をモデルの検証場として採用する。

評価対象期間を1954～86年の33年間とする。フォールアウトデータが1ヵ月単位で整理されていることから、 ^{137}Cs の水田環境内動態を評価する時間の最小単位として1ヵ月を採用する。1961年9月以降の北海道と福岡県、また1963年6月以降の茨城県と新潟県における ^{137}Cs のフォールアウトデータは、主としてRadioactive Survey Data in Japan⁽⁵⁾によった。1972年4月～74年3月の欠測は、1971～75年の同月の降水量を用いて内挿補完した。また、1954年以降、Survey Dataにデータが記載されるまでの ^{137}Cs 降水量は次のようにして補った。すなわち、Survey Dataにより東京都内 ^{137}Cs 降水量と評価対象地域内降水量との相関を把握し、この相関関係と1954年以降測定されている東京都内年間降水量⁽⁷⁾から、対象地域内年間降水量を推定し、これを当該地域における月間フォールアウトパターンによって月ごとの降水量に割り当てた。

Fig. 1で使用されている入力データおよびパラメータの種類とそれらの決定方法を整理してTable 1に示す。これらの関連情報がファジィ量であるかクリスプ量であるかは主観的に判断した。すなわち、評価モデルへの入力データである評価対象地域の水田面積ARD、フォールアウト ^{137}Cs の月間降下率FOD、単位水田面積当りの米産出量RCD、河川水(灌漑水)中の ^{137}Cs 濃度RWDはそれぞれ文献値⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾を参照し、数値に「あいまいさ」はないと見なしている。また、水田の管理や稲の生育および収穫期に関連するパラメータである水田作土深さDS、水田表水の排水期DT、水田表水の水深DW、水稻の生育期間GP、米穀の生育期間GC、灌漑期間IP、米の収穫期THの数値は、放射性核種の種類によらず正確に与えられると見なして前報⁽¹⁾と同じ数値を採用している。稲表面へのフォールアウト ^{137}Cs の沈着は、稲が水田表面を覆う程度、すなわち稲の生育速度に比例すると見なして、フォールアウト ^{137}Cs の水稻への沈着分率DEも前報⁽¹⁾と同じ数値を採用している。さらに、確定値が与えられる ^{137}Cs の半減期HL以外のパラメータを、ここではファジィ量と見なすことにする。

2. ファジィ・パラメータの設定

ファジィ・パラメータのおおのに与える三角型フ

Table 1 List of input data and parameters used in this study

Input data and parameters	Symbol	Unit	Kind	Reference
Paddy field area data	: ARD	km ²	Crisp	Lit. (4)
Fallout Cs-137 data	: FOD	pCi·km ⁻² ·month ⁻¹	Crisp	Lit. (5)
Rice crop yield rate data	: RCD	kg·km ⁻²	Crisp	Lit. (4)
River water Cs-137 conc. data	: RWD	pCi·m ⁻³	Crisp	Lit. (6)
Concentration rate coef. from soil to rice plant	: CR	month ⁻¹	Fuzzy	Refer to Table 2
Deposition fraction on rice plant	: DE	-	Crisp	Relational to plant growth
Distribution fraction between polished rice and rice bran	: DF	-	Fuzzy	Refer to Table 2
Desorption rate coef. from soil to water	: DR	month ⁻¹	Fuzzy	Determined by SR/KD
Depth of surface soil	: DS	m	Crisp	Assumed to be 0.2
Drawout time of irrigation water	: DT	-	Crisp	Assumed to be Aug., Oct.
Depth of irrigated water	: DW	m	Crisp	Assumed to be 0.02
Environmental decay rate coef. of Cs-137 in soil	: ED	month ⁻¹	Fuzzy	Refer to Table 2
Environmental loss rate coef. from rice plant (ext. part)	: EL	month ⁻¹	Fuzzy	Refer to Table 2
Growth period of rice plant	: GP	-	Crisp	Assumed to be Jun.-Oct.
Growth period of rice crop	: GC	-	Crisp	Assumed to be Sep.-Oct.
Physical half life of Cs-137	: HL	month ⁻¹	Crisp	361.6 (Physical const.)
Irrigation period	: IP	-	Crisp	Assumed to be Jun., Jul., Sep.
Distribution coef. between soil and water	: KD	ml·g ⁻¹	Crisp	Assumed to be 100
Sorption rate coef. from water to soil	: SR	month ⁻¹	Fuzzy	Refer to Table 2
Time of harvest	: TH	-	Crisp	Assumed to be Oct.
Transfer rate coef. to rice crop				
from rice plant (external part)	: TRe	month ⁻¹	Fuzzy	Refer to Table 2
from rice plant (internal part)	: TRi	month ⁻¹	Fuzzy	Refer to Table 2

(Note) Each numerical value for crisp parameters in the above table is assumed to be independent on site.
Refer to Table 2 for each numerical value of fuzzy parameters.

Table 2 Fuzzy parameters and their numerical value used in this study

Parameter	Unit	Region			
		Hokkaidou	Niigata	Ibaraki	Fukuoka
CR	month ⁻¹	(2.25, 0.45)	(0.8, 0.16)	(6.6, 1.32)	(2.5, 0.50)
DF	-	(0.4, 0.08)	(0.4, 0.08)	(0.4, 0.08)	(0.4, 0.08)
ED	month ⁻¹	(0.023, 0.0046)	(0.023, 0.0046)	(0.019, 0.0038)	(0.019, 0.0038)
EL	month ⁻¹	(1.5, 0.15)	(1.5, 0.15)	(1.5, 0.15)	(1.5, 0.15)
SR	month ⁻¹	(0.25, 0.025)	(0.25, 0.025)	(0.25, 0.025)	(0.25, 0.025)
TRe	month ⁻¹	(0.1, 0.05)	(0.07, 0.035)	(0.001, 0.0005)	(0.04, 0.02)
TRi	month ⁻¹	(0.1, 0.02)	(0.1, 0.02)	(0.1, 0.02)	(0.1, 0.02)

(Note) Each parameter is expressed as triangular type of fuzzy number in (central value, width).
Refer to Fig. 2 for the detail of fuzzy number.

ファジィ数を、評価対象地域ごとに整理して Table 2 に示す。ファジィ数の中央値は以下のようにして設定した。すなわち、土壌から稲内部への¹³⁷Csの経根吸収速度係数CRおよび稲内部から米への移行速度係数TReについては、評価対象地域ごとにクリスプ・システムモデルによるシミュレーションを実行し、米中の¹³⁷Cs濃度の実測値と計算値⁽⁸⁾とが精度よく一致するように設定した。また、水田土壌からの¹³⁷Csの減少速度を表わす環境減衰速度係数EDは、同様に土壌中の¹³⁷Cs濃度の実測値⁽⁶⁾と計算値とが精度よく一致するように設定した。

その他のパラメータの中央値は地域によらない一定値を、それぞれ文献値を参照して設定した。すなわち、米穀中に蓄積した¹³⁷Csの白米成分への分配率DF

として0.4⁽⁹⁾を、灌漑水から土壌への¹³⁷Csの収着速度係数SRとして、¹³⁷Csの土壌と水との間の分配の95%が1週間以内に進行すること⁽¹⁰⁾等に基づいて推定した0.25 month⁻¹を、稲内部から米への移行速度係数TRiとして、茎、玄米等の中での¹³⁷Cs濃度の分布⁽¹¹⁾、それらの重量比⁽¹²⁾および米穀の生育期間から推定した0.1 month⁻¹を、それぞれ採用した。

また、稲に沈着した¹³⁷Csの洗浄等による稲表面からの総括的な減少速度係数ELとして、¹³¹Iの植物葉面からの洗浄による減衰実験の結果⁽¹¹⁾から推定した1.5 month⁻¹を¹³⁷Csに対しても採用した。この数値は、前報で⁹⁰Srに対して採用した数値ともほぼ一致している。

土壌から灌漑水への¹³⁷Csの脱着速度係数DRは、クリスプ量であるとした¹³⁷Csの土壌と水との間の分配係

数 $KD^{(13)}$ とファジィ量 SR とから計算($DR=SR/KD$)により推定し、間接的にファジィ量として扱った。

これらのパラメータは多くの要因によって変動し⁽¹⁴⁾、その変動幅を客観的に特定することは困難であると思われる。ここでは、ファジィ数の「あいまいさ」の幅を主観的に判断し、それぞれ TRe については中央値の0.5倍、 CR, DF, ED, TRi については0.2倍、 SR, EL については0.1倍であるとした。

3. ファジィ関係の設定

Fig. 1に示す移行経路のうち、所定の期日に集中して ^{137}Cs が輸送される経路、すなわち灌漑水の水田への導入、水田からの排出および稲藁の肥料としての水田

作土への還元、また放射性崩壊による ^{137}Cs の各環境構成要素からの減少、の各経路を除く13経路での ^{137}Cs の移動を記述する関係が「あいまい」であるとし、それぞれの関係の「あいまいさ」を(3)式によって記述する。ここではまず、各移行経路についての利用可能な知見の多寡を考慮して、その経路での ^{137}Cs の移動関係を記述するモデルの「あいまいさ」の程度を、大・中・小の3段階に主観的に評価した。ついで(3)式中の f_u の値を、任意変数 λ を用いて設定した(Table 3参照)。Table 3に設定した各関係の「あいまいさ」は、対象地域によって変化しないと仮定した。

Table 3 Fuzzy pathways, of which transportation relations of ^{137}Cs are to be treated as fuzzy, discussed in this study

	Pathways	Fuzzy rank	Fuzziness coef. ^{a)}
No. 1	Fallout on rice plant (ext. part)	Small	$\lambda/4$
No. 2	Fallout on irrigated water	Small	$\lambda/4$
No. 3	Fallout on surface soil	Small	$\lambda/4$
No. 4	Rice plant (ext. part) to rice-bran	Large	λ
No. 5	Rice plant (ext. part) to irrigated water	Large	λ
No. 6	Surface soil to irrigated water	Large	λ
No. 7	Irrigated water to surface soil	Large	λ
No. 8	Rice plant (ext. part) to surface soil	Large	λ
No. 9	Surface soil to deep soil	Large	λ
No. 10	Rice plant (ext. part) to polished rice	Large	λ
No. 11	Rice plant (int. part) to rice-bran	Large	λ
No. 12	Rice plant (int. part) to polished rice	Medium	$\lambda/2$
No. 13	Surface soil to rice plant (int. part)	Medium	$\lambda/2$

a) Fuzziness coefficient f_u defined in Eq. (3), of which numerical value is determined based on the subjective evaluation of fuzziness (fuzzy rank) for each pathway of Cs-137 in Fig. 1. These fuzziness coefficient are used for all regions listed in Table 2.

4. 数値シミュレーション

Table 1に示したクリスプ・パラメータ、Table 2に示したファジィ・パラメータおよびTable 3に示した「あいまい」度係数を用いて実行した数値シミュレーションの結果をFig. 5に示す。本研究では、クリスプな関係を記述する(1)式の連立常微分方程式群の数値解法としてルンゲクッタギル法⁽¹⁵⁾を採用している。

Fig. 5中の●印は白米中 ^{137}Cs 濃度の実測値を、実線はクリスプ・モデルによる計算値(クリスプ濃度)を、また2本の破線はそれぞれファジィ・パラメータとファジィ関係との組合せによって推定される大小2つの白米中 ^{137}Cs 濃度(アッパーレベル濃度、ロウアーレベル濃度)を表わしている。アッパーおよびロウアーレベル ^{137}Cs 濃度は、 $\mu_s(x)=0.0$ に対応する2つのファジィ・パラメータ値を用いて計算される ^{137}Cs 濃度のうち、各移行経路ごとに設定された「あいまい」度係数値と任意の

μ_R 値(Fig. 5では0.4)で表現される関係の「あいまいさ」に対応する、最大および最小の数値を算定することにより決定している。クリスプ ^{137}Cs 濃度は、上記の計算において $\mu_s(x)=1.0$ に対応するファジィ・パラメータ(ファジィ数の中央値：クリスプ・パラメータ)と $\mu_R=1.0$ に対応する関係(クリスプ関係)を用いて計算される。

5. ファジィ・システムモデルの検証

4道県について白米中 ^{137}Cs 濃度のシミュレーション結果を示した(Fig. 5参照)が、すでに述べたように、これらの地域では CR, TRe 等のファジィ・パラメータの中央値を実測値と計算値が一致するように選定している。ここでは秋田県と石川県を対象に、ファジィ・システムモデルによるシミュレーションを実行し、モデルの妥当性について検討する。計算に必要な入力データは以下のように設定した。すなわち、水田土壌

Broken line means upper and lower level estimate, and solid line does crisp estimate. Black circle stands for observed data.

Fig. 5 Comparison of ^{137}Cs concentration in rice, calculated by fuzzy system model, with observed in each four regions

からの ^{137}Cs の減少に関するEDについては、両県で実測された土壌中 ^{137}Cs 濃度の経年変化⁽⁶⁾を参照して、秋田県に対して(0.0165, 0.0034), また石川県に対して(0.023, 0.0046)の三角型ファジィ数をそれぞれ与えた。フォールアウトデータは当該県における測定値を与えたが、その他のパラメータおよび関係の「あいまいさ」等は、いずれの県に対しても隣接県である新潟県に対して設定した値(Table 2, 3参照)をそのまま用いた。シミュレーション結果をFig. 6に示す。同図は、白米中 ^{137}Cs 濃度の実測値がアッパーおよびロウアーレベル計算値の間に納まることを示している。

IV. 考 察

1. ファジィ感度解析

(1) ファジィ・パラメータの感度

Table 2に掲げる7つのファジィ・パラメータのうち6パラメータを対象に、関係の「あいまいさ」がない

場合について、当該パラメータのみをそれぞれファジィ化することによる白米中 ^{137}Cs 濃度の変化を算定した。 ^{137}Cs の白米と米糠との間の分配率DFについては、その数値が1単位変化すれば、白米中 ^{137}Cs 濃度も1単位変化する(感度が1である)ことが明らかであるため、感度解析の対象から除外した。新潟県を対象に実行した感度解析の結果のうち、有意な感度が認められた稲外部から白米への ^{137}Cs の移行速度係数TReについての感度解析の結果のみをFig. 7に示す。

一方、Table 2に掲げるパラメータの値がそれぞれ同表のファジィ数で与えられる場合に、当該パラメータの「あいまいさ」のみがより大きくなる(ファジィ数の中央値は変化させず、ファジィ数の「あいまいさ」の幅のみを1.5倍とする)場合に、白米中 ^{137}Cs 濃度がどのように変化するかを調べた結果を、同じく新潟県についてFig. 8に示す。感度解析を実行した6パラメータのうち、フォールアウト ^{137}Cs の直接沈着経路(Fig. 1

Fig. 6 Comparison of ^{137}Cs concentration in rice, estimated by fuzzy system model, with observed in Akita and Ishikawa where some parameters are not available for model

Fig. 7 Sensitivity analysis in changing crisp parameter into fuzzy, for parameter TRe in Niigata

参照)に主として関与するパラメータである TRe および稲外部からの ^{137}Cs の減少速度係数 EL の感度は、フォールアウトが多い1960年代以前に高く、経根吸収経路に主として関与するパラメータである ^{137}Cs の水田土壌からの減少速度係数 ED 、水田土壌から稲内部への移行速度係数 CR 、稲内部から白米への移行速度係数 TRi の感度は、フォールアウトが少ない1970年代以降に高いといえる。この傾向は、クリスプ・システムモデルを用いて実行されたフォールアウト ^{90}Sr の白米中濃度に対するパラメータ感度解析においても確認されている¹⁰⁾。

Fig. 7 と 8 を比較すると、感度解析の設定条件下では、パラメータをファジィ化することによる白米中 ^{137}Cs の変動は、ファジィ化したパラメータの「あいま

いさ」をより大きくすることによる変動よりも小さい傾向が伺える。この傾向は他の地域でも同様である。

(2) ファジィ関係の感度

Fig. 1に示す ^{137}Cs 移行経路のうち、Table 3に掲げる13の移行経路のうちの1経路における移行関係のみをファジィ化した場合の白米中 ^{137}Cs 濃度の変化を、新潟県についてFig. 9に示す。ここでは、すべてのパラメータはクリスプであるとしている。また、移行関係をファジィ化することの効果を拡大して表示するために f_u の値を定める任意変数 λ (Table 3 参照) として0.5を用いている。Fig. 9に結果を図示していない5経路(経路-2, 4, 6, 7, 11)については、移行関係をファジィ化することの白米中 ^{137}Cs 濃度に対する感度は図示できる程度に有意には認められなかった。

Broken line means upper and lower estimate when fuzziness of each parameter is given as in Table 2, and chain line does upper and lower estimate when 1.5 times parameter fuzziness is given. Broken lines fall on chain lines in case (e).

Fig. 8 (a)~(f) Sensitivity analysis in making each parameter fuzzier in Niigata

^{137}Cs の直接沈着に主として関与する経路(経路-1, 5, 8, 10)ではフォールアウトの多い期間に感度が高く, 一方経路吸収に主として関与する経路(経路-3, 9,

12, 13)では全期間にわたってやや低い感度が認められる。この傾向は他の地域に対してもほぼ同様に認められた。

(a) Pathway of fallout on external part of rice plant

(b) Pathway of fallout on surface soil

(c) Pathway from external part of rice plant to irrigated water

(d) Pathway from external part of rice plant to surface soil

(e) Pathway from surface soil to deep soil

(f) Pathway from external part of rice plant to polished rice

(g) Pathway from internal part of rice plant to polished rice

(h) Pathway from surface soil to internal part of rice plant

Broken line means upper and lower estimate when transportation relation of ^{137}Cs in each pathway is changed from crisp into fuzzy. Solid line means crisp estimate.

Fig. 9 (a)~(h) Sensitivity analysis in changing crisp relation into fuzzy in Niigata

2. ファジィ・モデル間の関係

すでに述べたように、ファジィ・システムモデルにおいて $\mu_R=1.0$ とおけばファジィ・パラメータモデルが、ファジィ・パラメータの「あいまいさ」の幅を $C=0.0$ とおけばファジィ関係モデルが、また両操作を同時に施せばクリスプ・システムモデルが得られる。この意味で、ファジィ・システムモデルはファジィ・パラメータモデル、ファジィ関係モデル、クリスプ・システムモデルを内包しているといえる。

新潟県を対象に実行した白米中 ^{137}Cs 濃度のファジィ・パラメータモデル(パラメータの「あいまいさ」については Table 2 を参照)によるシミュレーション結果を Fig. 10 に、またファジィ関係モデル(関係の「あいまいさ」については Table 3 を参照)による同じシミュレーションの結果を Fig. 11 に示す。ファジィ・システムモデルによる同じシミュレーション結果は Fig. 5 (b) に図示されている。ファジィシステムモデルによる白米中 ^{137}Cs 濃度の計算値に含まれる「あいまいさ」に対する寄与は、設定条件下では、移行関係の「あいまいさ」による寄与よりもパラメータの「あいまいさ」による寄与の方が大きいことを示している。

Fig. 10 Comparison of ^{137}Cs concentration in rice, calculated by fuzzy parameter model, with observed in Niigata

ファジィ・システムモデルによる白米中 ^{137}Cs 濃度の計算値の「あいまいさ」に対するパラメータおよび関係の「あいまいさ」の寄与は、パラメータと移行関係との対応が単純である場合には定量的に明らかにすることができる。例えば、水田土壌から稲内部への ^{137}Cs の経根吸収速度係数 CR は、第13移行経路(水田土壌→稲内部)にのみ関係する(Fig. 1, Table 3 参照)。ファジィ・パラメータモデルにおいてパラメータ CR の「あいまいさ」(ファジィ数の「あいまいさ」の幅)を変化させ、ファジィ関係モデルにおいて第13移行経路につい

Fig. 11 Comparison of ^{137}Cs concentration in rice, calculated by fuzzy relation model, with observed in Niigata

ての「あいまい」度係数 f_u を変化させ、新潟県における白米中 ^{137}Cs 濃度の計算値がほぼ一致するような条件を探索した。パラメータが $CR=(0.8, 0.4)$ 、移行関係が $f_u=0.5$ 、 $\mu_R=0.4$ で与えられるときに、両者の「あいまいさ」の寄与がほぼ一致することを確認した。このことは、パラメータの「あいまいさ」と移行関係の「あいまいさ」との間に定量的な関係がある可能性、言い換えると移行関係の「あいまいさ」をパラメータの「あいまいさ」で表現したり、あるいはその逆の可能性があることを示唆している。ただし、1つのパラメータが複数の移行経路に関与している場合などには、この定量的関係を把握することは容易ではない。

調査・実験データを何らかの設定モデルに適合させることによって、モデルに含まれるパラメータの数値が得られる。すなわち、パラメータの「あいまいさ」はモデルに対するデータの適合度に依存しているといえる。例えば、適合度が大きければ「あいまいさ」の幅は小さく、また小さければ大きく設定されよう。あるいは、同一パラメータについての報告値の変動が大きければ大きく、また小さければ小さく設定されよう。

一方、関係の「あいまいさ」は、調査・実験データをどのようなモデルで表現するかに依存しているといえる。現実的には、当該移行関係に対して特定のモデルが多用され、同モデルについての知見が豊富に蓄積されている場合には、その移行関係を記述するモデルの「あいまいさ」は小さいと判断され、当該移行関係についての知見が少なければ、「あいまいさ」は大きいと判断されよう。この意味で、関係の「あいまいさ」はモデル化に伴う「あいまいさ」であるといえる。ここで検討した2つの「あいまいさ」の大きさを判断するために必要な情報源は、一般的には同一ではないと考えられ

る。

3. 統計的パラメータとファジィ・パラメータ

パラメータについての情報が豊富にある場合には、その統計的な特性(例えば、分布形、平均値、分散等)を把握することができる。ここでは、パラメータが統計的に与えられるモデルを「統計的パラメータモデル」と呼び、そのファジィ・パラメータモデルとの関係について吟味する。 ^{137}Cs の水田土壌からの減少速度係数 ED を対象に、 ED がファジィ数(0.023, 0.0046)で与えられる場合と、 ED が $0.0184(=0.023-0.0046) \sim 0.0276(=0.023+0.0046)$ の範囲に統計的に一様分布する場合について、白米中 ^{137}Cs のアップーおよびロウアーレベル濃度、100および0パーセント濃度を算定した。アップーレベル濃度と100パーセント濃度は一致した。このことは、 ED のようにモデル内の1経路(第9経路；水田表層土壌→深層土壌)にのみ関連し、しかもその経路には他に変動するパラメータが含まれない場合には、パラメータの統計的変動による白米中 ^{137}Cs 濃度の変動幅とファジィ変動による変動幅とが一致することを示している。稲内部から米穀への移行速度係数 TRi のように2経路(第11, 12経路)に関与し、しかも同経路に他に TRe のような変動するパラメータが含まれている場合には、白米中 ^{137}Cs 濃度の変動幅は一致しない。

一方、Table 2に掲げる各ファジィ・パラメータの「あいまいさ」の幅の3倍(変動範囲の1.5倍に相当)の変動範囲に一様分布する統計的パラメータを用いて白米中 ^{137}Cs 濃度を算定すると、北海道と新潟県については、両モデルによる計算値が結果的にはほぼ一致した。茨城県と福岡県に対しては、この倍数は3.6倍(変動範囲の1.8倍に相当)であった。この倍数を理論的に推定することは困難である。しかしながら、対象システムを定めてパラメータを特定すれば、数値シミュレーションを介して対象地域ごとに統計的パラメータモデルとファジィ・パラメータモデルとの関係を把握できる可能性はあるといえよう。

統計的パラメータモデルによる白米中 ^{137}Cs 濃度は、乱数を用いて発生させたパラメータの実現値についてのシミュレーションを繰り返す、いわゆるモンテカルロシミュレーション(繰返し回数100回)によって算定している。一方、ファジィ・パラメータモデルではそれぞれ1回のシミュレーションによって、ロウアーレベル、クリスプレベル、アップーレベル ^{137}Cs 濃度が算定される。前者の計算に要した計算(CPU)時間は後者の

ほぼ50倍であった。計算所要時間は計算の手法や目的によって変化するから、この違いが常に成立するとは限らないが、ファジィ・パラメータモデルの計算所要時間はモンテカルロ法による統計的パラメータモデルのそれよりも短いといえよう。

4. ファジィ・システムモデルの実用性

意味の「あいまいさ」(Fuzziness)を特性づける帰属度関数は、すでに述べたように、0～1の範囲に連続な値を持ち、生起の「あいまいさ」(Randomness)を特性づける特性関数(0または1の離散値をとる)の数学的な拡張になっている。この拡張によって、例えばパラメータの値をより柔軟に設定することが可能になる。例えば、パラメータの可能な変動範囲を幾つかの領域に区分し、変動が「中程度」の領域を0.0184～0.0276の範囲に統計的に設定すれば、パラメータがこの範囲の値をとればそのパラメータ値は例外なく「中程度」と判断される。逆に、パラメータの値が「中程度」であると指定されると、その実現値は必ず上記の範囲内にある。

一方、変動が「中程度」の領域を0.0184～0.0276の範囲にファジィ的に設定する場合には、パラメータがこの範囲の値をとる場合であっても、その値が他の領域、例えば「大きい」に属することも許される。ただし、「中程度」に属する程度(帰属度)の方が、「大きい」に属する程度(帰属度)よりも大きいのが普通である。逆に、パラメータの値が「中程度」であると指定されると、その実現値は必ずこの範囲内にあるが、その実現値が「中程度」に属する程度(帰属度)は0～1の範囲に変動する。ファジィ理論を援用すればこのように、例えばパラメータの数値の「あいまいさ」を残したままモデルを構築することが可能になる。

ファジィ・システムモデルを効果的に実用するためには、ファジィ・パラメータやファジィ関係を数値的に表現する手順を準備する必要がある。すなわち、あるパラメータを、例えば5段階に区分しそのおのおのを「大きい」、「中程度」等の言語変数で表現するとき、それらにどのようなファジィ数を対応させるかを、既存の調査・研究成果の蓄積や専門家の判断を参照してあらかじめ定めておくか、定めるための手続きを準備しておくことが望ましい。このエキスパートシステムもまた、ファジィ理論を援用することによって構築することが可能である。このようなエキスパートシステムが準備されない段階では、評価者が「あいまいさ」の幅を含めて「あいまいさ」を主観的に判断することになる。

V. 結 論

本研究によって得られた結論を要約すると、以下のようになる。

- (1) ファジィ・システムモデルを構成し、同モデルの数値シミュレーションを実行することにより、白米中 ^{137}Cs 濃度の実測値が計算値の範囲に納まることを確認した。ファジィ・システムモデルを用いて ^{137}Cs の水田環境内動態を評価することは可能であるといえる。
- (2) ファジィ・システムモデルは、ファジィ・パラメータモデル、ファジィ関係モデル、クリスプモデルをその簡略化モデルとして内包している。
- (3) パラメータをファジィ化する、あるいはパラメータの「あいまいさ」の幅を大きくすることが白米中 ^{137}Cs 濃度の計算値に及ぼす効果(パラメータの感度)の経時変化は、クリスプモデルにおいて得られるパラメータ感度の変化傾向と一致している。すなわち、直接沈着に関与するパラメータの感度はフォールアウトが多い期間に高く、経根吸収に関与するパラメータの感度はフォールアウトが少ない期間に高い傾向がある。
- (4) ^{137}Cs の移行関係をファジィ化することが白米中 ^{137}Cs 濃度の計算値に及ぼす効果(ファジィ関係の感度)は、 ^{137}Cs の移行経路により異なる特色を呈した。主として直接沈着に関与する経路(経路-1, 5, 8, 10)ではフォールアウトが多い期間に感度が高く、主として経根吸収に関与する経路(経路-3, 9, 12, 13)では全期間にわたり感度は相対的に低く、その他の経路の感度は無視できる程度に低かった。
- (5) ^{137}Cs の移行経路とパラメータとの関係が単純である場合には、パラメータをファジィ化する効果と関係をファジィ化する効果との関係を定量的に把握できる可能性がある。
- (6) 白米中 ^{137}Cs 濃度の変動範囲を同じにする統計的パラメータの変動範囲と、ファジィ・パラメータ

タの「あいまいさ」の幅との関係を定量的に把握できる可能性がある。

- (7) ファジィ・システムモデルをより有効に活用するためにはパラメータや関係の「あいまいさ」を定量的に定めることを支援するシステムを準備することが望ましい。

本研究の計算には、京都大学大型計算機センターのFACOM M-400を使用した。また、数値シミュレーションの実行に際しては、高橋知之氏(京都大学工学研究科修士課程大学院生)の助力を得た。記して感謝いたします。

— 参 考 文 献 —

- (1) 森澤真輔, 他: フォールアウト ^{90}Sr の米の生産・流通・消費過程における動態と人骨中への蓄積との関連, システムダイナミックスによる予備的検討, 原子力誌, 27(7), 643~657 (1985).
- (2) 浅井喜代治, NEGOITA, C. V. 共編: “ファジィシステム理論入門”, p. 1~5 (1978), オーム社.
- (3) 寺野孝郎, 他共編: “ファジィシステム入門”, (1987), オーム社.
- (4) 農林統計研究会: “都道府県農業基礎統計”, (1983), 農林統計協会.
- (5) MIYAKE, Y., et al.: Meteorological data, *Radioactive Survey Data in Japan*, No. 1 (1961)~No. 81 (1988), NIRS.
- (6) SAIKI, M., et al.: Geographical data, water data, 文献(5), No. 4 (1964)~No. 81 (1988).
- (7) 三宅泰雄: 大気中の放射性塵とその降下, “放射線影響の研究”, (檜山義夫編), p. 29~58 (1971), 東大出版会.
- (8) KODAIRA, K., et al.: Dietary data, 文献(5).
- (9) 川瀬金次郎, 他: “環境と放射能”, p. 212 (1971), 東海大出版会.
- (10) 井上頼輝, 小池哲夫: 環境中における自然放射能の動態に関する研究, *KURRI-TR-155*, p. 60~67 (1977).
- (11) 吉田博之: 陸上の食物連鎖, “環境被曝線量評価”, p. 136~144 (1975), 原子力学会.
- (12) 食糧庁: “食糧管理統計年報(昭和60年版)”, p. 407(1985).
- (13) 井上頼輝, 森澤真輔: 放射性核種の土壌と水との間の分配係数値, 原子力誌, 18(8), 524~534 (1976).
- (14) 原子力環境整備センター: 土壌から農作物への放射性物質の移行係数, *RWMC-88-P-11*, (1988).
- (15) FACOM FORTRAN SSL II 使用手引書, p. 465~466 (1980), 富士通.