文献 ID：13-12-013

1．基本情報

区分	市街地	担当者名	古米弘明、尾崎則篤、和田桂子
タイトル（英文）	A new generic sub-model for radionuclidefixation in large catchments from continuousand single-pulse fallouts, as used in a rivermodel		
タイトル（和文）	大規模集水域における放射性核種の沈着に関する新規サブモデルの提案		
キーワード	Rivers; Fixation; Model; Catchment; Runoff; Radiocesium; Radiostrontium; Predictivepower		
著者	Lars Ha°kanson		
文献	Journal of Environmental Radioactivity 77 (2004) 247–273		

（1）対象地域

ヨーロッパ。モデルの有効性を評価するために、27 のヨーロッパの河川およびその集水域の放射性核種量の実測値とモデル値の比較を行っている。

それぞれの河川のデータは Table1 に記されている。

データとして用いた河川の名称、その集水域の面積、年間降水量、標高、緯度およびチェルノブイリ原発事故または核兵器実験による降下量と堆積量のデータが示されている。表から、各データにバラつきが確認できる。以下にそのバラつきについてまとめた。

集水域面積：3360－2950760km^2

年間降水量：418－1731mm/year

標高：海抜 0-1000m

緯度：北緯 41 度(イタリア)-北緯 72 度(レナ川、ロシア)

また、西端はテムズ川(イギリス)、東端はイェニセイ川(ロシア)である

データがない部分は空欄となっている。

（2）重要な図表

新規サブモデルは河川における放射線核種濃度の予測モデル中に含まれている。この河川モデルには集水域サブモデルの他に、河川上流部における輸送、浸食、再懸濁といった事象を捉えるサブモデルが含まれている。

新規集水域サブモデルを組み込んだ河川モデルのアウトラインを Fig.7 に示した。新規サブモデルでは集水域を Outflow areas (OA)、 Inflow areas (IA)に分割している。湿潤土壌が主となる OA では対象物質が流体により水平伝播し水系に移動し、乾燥土壌が主である IA では堆積、土壌に浸透し、一部は直接水系に移動する。このように OA、IA 中での物質の沈着は異なる挙動をとるため、区別して考える必要がある。他に考慮すべき事象としては、土壌タイプ(浸透性の高い粗粒物質層や浸透性が低い有機物、粘度、シルト層など)や沈着の時間変動である。

以下には沈着に関する諸式を記した。

(1)式には時間に依存する無次元の土壌沈着量 FixF を示した。

If(TIME －TF)>1 then

$$FixF=1/(TIME-TF)^{FixS} \quad (1)$$

else　FixF=1

TIME-TF：堆積してからの時間(months)

また、FixS は土壌タイプに依存する沈着係数であり、以下の式で表される。

$$FixS=100/ST \quad (2)$$

ST：土壌タイプ(0~100)

輸送形態に依存する沈着率 RR(IA への沈着率の場合 RR_{IA}、OA の沈着率の場合 RR_{OA})は(3)式で表される。

$$RR_{IA}=(1-D_{IAOA})FixF \cdot Y_Q(0.04/12)(Prep/650)^2/ST \quad (3)$$

D：分配計数(0.5(－)がデフォルト)。D_{IAOA} は IA からの流出量に占める OA への流出割合。

Y_Q：一か月の排出量の変化を均等にするための係数

Prep：年間平均降水量(mm/year)

IA における沈着量 F_{IA} は次式で表される。

$$F_{IA}=Dep \cdot ADA(1-OA) \quad (4)$$

Dep：単位面積当たりの放射性物質降下量(Bq/m²)

ADA：集水域面積(m²)

OA：流出水エリアの割合(-)

一方、IA から河川へのフラックス F_{IARW} は以下のように表される。

$$F_{IARW}=M_{IA} \cdot RR_{IA}$$

定着計数 FixS は沈着する物質によって変化する。放射性セシウムを例とすると、(5)式のようになる。

$$\mathrm{FixS}=\frac{(1/C_{CsX})ST}{100} \quad (5)$$

C_{CsX}：セシウムを基準とした対象物質の流動定数(-)

降下する放射線核種の由来としては、チェルノブイリでの事故由来に代表される単発のもの、もしくは日常的な核兵器実験などのように継続的のものが挙げられる。単発のものについては上記の(1)～(5)式からモデル値が算出され良い精度での予測が可能となる。Fig.5、Fig.6 には集水域サブモデルとして(1)~(5)式を適用した場合の河川中放射性核種沈着予測値と実測値の相関、および誤差について示している。図からわかるように、良い相関が得られ(r^2=0.90)、誤差も小さいことがわかる。

新規サブモデルはチェルノブイリでの事故のような単発の放射性物質の降下だけではなく、継続的な降下現象も考慮にいれ作成されている。

新規サブモデルについて、前述の Fig.7 に示したアウトラインをより詳細に記述したものが Fig.8 である。

サブモデルを作成するに当たり、以下の①、②を考慮することで、より簡便な駆動変数のみでモデルを組んでいる。

①土壌タイプ

対象とする集水域にはそれぞれの環境に応じた土壌の性状がある。それに従い沈着のレベルも異なると考えられる。しかし、土壌タイプを数値で表すのは困難であり、不確実である。そのため新規モデルでは既存のモデルでは考慮されていた土壌タイプ(ST：Soil Type)というパラメータを省略することで簡略化を図っている。

②水文学的な条件

集水域は流入エリア(IA：Inflow Area)と流出エリア(OA：Outflow Area)で区別することができる。前者は水分が含まれない乾燥帯で後者は河川上流や沼地を含む湿潤地帯である。対象の集水域中の IA と OA の割合によって流出水の挙動が変化する。しかし土壌タイプと同様にこれらの割合を正確に算出することは困難であるため、新規モデルでは緯度、標高、集水域の面積を用いて、OA、IA を表している。

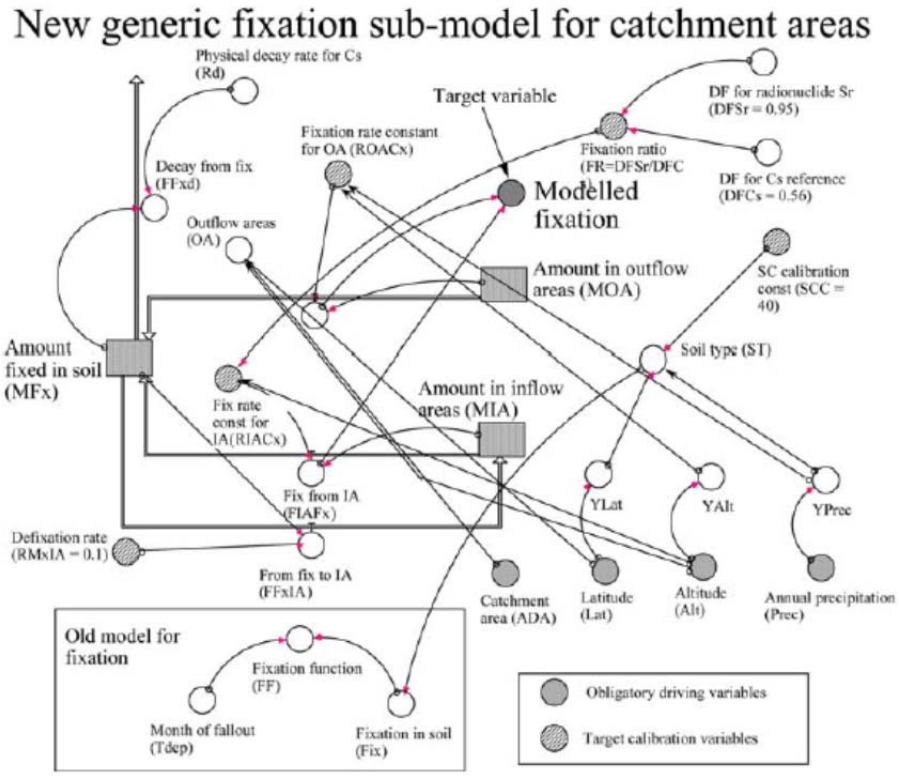

Fig. 8. Illustration of the new sub-model for fixation. All equations are compiled in Table 4. The calibrations have focussed on the rate constants regulating fixation from outflow areas (R_{OACx}) and inflow areas (R_{IACx}), the defixation rate constant (R_{FxIA}) and the soil class calibration constant (SCC). Only data on readily accessible and logical factors regulating fixation and retention of radionuclides in catchment areas (such as altitude, latitude and mean annual precipitation) are used in this model as driving variables.

以下に集水域における放射性核種の沈着に関する新規サブモデルについて記した。

$$M_{Fx}(t) = M_{Fx}(t - dt) + (F_{OAFx} + F_{IAFx} - F_{FxIA} - F_{Fxd})dt \quad (6)$$

M_{Fx}：対象エリアに沈着した放射線物質量(Bq)

沈着する物質量のうち、流出エリアからの沈着量 F_{OAFx}(Bq/month)は以下の式で表される。

$$F_{OAFx} = M_{OA} R_{OACx} \quad (7)$$

M_{OA}：流出エリアにおける放射線物質量(Bq)
R_{OAC_x}：流出エリアから他のエリアへの沈着速度(1/month)

反復的な試行により R_{OAC_x} は標高(Alt)と年間降水量(Prep)の関数で以下のように表されることを示した。

$$R_{OACx} = (0.075/(Y_{Alt} FR))\left(Y_{Prep}\right)^2 \quad (8)$$

0.075：固着速度のデフォルト値
FR：沈着率(流動した物質量/固着量)。放射性物質の種類によって異なる。
Y_{ALT}：標高の違いに対する調節係数

$$Y_{ALT} = 1/\left(1 + 0.0025((Alt + 1)/1 - 1)\right) \quad (9)$$

Y_{Prep}：年間降水量の変動に対する調節係数

$$Y_{Prep} = 650/Prep \quad (10)$$

650mm/year：ヨーロッパの平均年間降水量

IA からの沈着は以下の式で表される。

$$F_{IAFx} = M_{IA} \cdot R_{IACx} \quad (11)$$

また RR_{IACx} は標高 Alt を用いて以下の式で表されることが実験的に知られている。

$$R_{IACx} = 1(Alt/1000) \quad (12)$$

沈着サイトからの脱着、IA への返送については以下の式で表される。

$$F_{xIA} = M_{Fx} R_{FxIA} \quad (13)$$

物理的な減少は以下のように表される。

$$F_{Fxd} = M_{Fx} R_d \quad (14)$$

さらにモデル式の簡略化の為に、ST、OA を以下のように変更した

$$ST = SCC \cdot Y_{Lat} Y_{Prep}$$

SCC：Soil Class calibration constant.デフォルト値は 40

$$\mathrm{OA} = (Lat/60)(1/Y_{Alt})10^{\left(-0.19 log\left(\frac{ADA}{1000000}\right) - 0.7\right)}$$

以下に新規サブモデルを組み込んだ河川モデルによる予測データと実測値の相関を比較し、新規サブモデルの有効性を評価していく。Fig.10、Fig.11 にはチェルノブイリ由来の放射線物質の各河川への沈

着量のモデル値と実測値の相関、および誤差について記している。Fig.10、Fig.11 を前述の Fig.5 と Fig.6 と比較すると、新規モデルにおいても、単発の事象による放射性物質降下現象は良い精度で予測可能であると結論付けられている。

一方で、核兵器実験による継続的な現象予測について以下に述べる。

Fig.12、Fig.13 には、核兵器実験由来の放射性 ^{137}Cs の河川沈着の実測値とモデル値の相関および誤差を示している。Fig.12,13 から言えることは、まずデータ範囲が小さいという点である。このことから r^2 値は相関を確認する上で妥当ではない。ただ、多くのプロットが信頼区間内に含まれること、Fig.13 に示された中央値が誤差 0 となっていることから、良い精度で予測ができていると判断している。

また、同様の事象に対する ^{90}Sr の沈着に関するデータの相関および誤算について、Fig.14、Fig.15 にそれぞれ示した。^{90}Sr についても同様にデータ範囲が狭いものの、誤差が小さく ^{137}Cs と同じく予測が十分に可能であると判断している。

結論としては、新規集水域サブモデルを採用した河川モデルは、簡易な駆動変数のみで単発および継続的な放射線物質の降下、沈着現象を良い精度で予測することが可能であるとしている。

2. 提言につながる情報

（1）モニタリングへの活用

集水域から河川にかけての放射線物質のモニタリングにこのモデルは役に立つと考えられる。

（2）流出挙動・経路

特になし

（3）除染の際の留意点

特になし

（4）担当者のコメント

論文中に言及されていないが、考慮すべき点としては日本の地形とヨーロッパの地形の差異である。どのような地形であってもこのモデルの精度に影響がないのか、またはどのような影響があるか試験する必要がある。また日本では核兵器実験などは行われていないので、本論文で考慮した点については特に必要ないと考えられる。