890. 自然界における放射性核種の大循環モデル, (I)

大西輝明*

(1987年 4月30日 受理)

Model for Large Scale Circulation of Nuclides in Nature, (I)

By Teruaki OHNISHI

A model for large scale circulation of nuclides was developed, and a computer code named COCAIN was made which simulates this circulation system-dynamically. The natural environment considered in the present paper consists of 2 atmospheres, 8 geospheres and 2 lithospheres. The biosphere is composed of 4 types of edible plants, 5 cattles and their products, 4 water biota and 16 human organs. The biosphere is assumed to be given nuclides from the natural environment mentioned above. With the use of COCAIN, two numerical case studies were carried out; the one is the study on nuclear pollution in nature by the radioactive nuclides originating from the past nuclear bomb tests, and the other is the study on the response of environment and biota to the pulse injection of nuclides into one compartment. From the former case study it was verified that this model can well explain the observation and properly simulate the large scale circulation of nuclides in nature.

KEYWORDS: *radioactive nuclides, environment, biosphere, human organs, circulation, nuclear pollution, simulation codes, system dynamics, nuclear bomb tests*

1. 緒 言

放射性核種を含む有害化学物質が環境中でいかに拡散するかに関して、現在までに数多くの議論がなされてきた。これらは産業廃棄物、排ガス、化学肥料、合成洗剤、原子力諸施設からの放射性核種の漏洩等による地域的な環境汚染、酸性雨をもたらす中域大気汚染、核実験および核保有人工天体の落下等による広域放射能汚染などであり、汚染地区の大小および汚染形態の相違に基づいて、それぞれ固有のシミュレーションモデルが構築されてきた。

モデルによる環境汚染評価では、大別して2種の異なる手法が採用されてきた。その第1は、物質の環境拡散を拡散媒体の速度場計算とそれに付随する汚染物質の濃度計算とによって一意的に算出する方法である。このためには考慮領域を多数のメッシュに分割してその各点で速度場を与えるか、または速度場方程式と物質の移流拡散方程式とを差分法または有限要素法により解く。さらに、各メッシュ点で各時刻ごとに

算出した物質濃度に基づいて、当該物質の人体に対する影響を評価する。この方法では通常、1種類の媒体内の任意の座標および時間点においての定量的議論が可能であるが、精度上昇のためにはメッシュ区分を細分化する必要がある、それに伴って長大な計算時間を要する。

一方、第2の手法はシステムダイナミクスによる。この場合、拡散媒体間での物質の巨視的な流れに注目し、個々の媒体中に滞留する物質の総量の時間変化のみを追跡する。したがって、個々の媒体内での物質分布の定量的議論は不可能となるが、複数の拡散媒体にまたがった物質の広域汚染の取扱いが可能となり、気、地、海洋の各圏、および生物圏をも含めた大規模な物質の循環を把握することも可能となる。当手法に基づく代表的な計算コードにはPATHWAY⁽¹⁾, TERRA⁽²⁾, MARINRAD⁽³⁾, INREM-II⁽⁴⁾, TIMED⁽⁵⁾, AIRDOS-EPA⁽⁶⁾, HERMES⁽⁷⁾, PABLM⁽⁸⁾, UTM-TOX⁽⁹⁾, FOOD II⁽¹⁰⁾, TOX-

* センチュリ・リサーチ・センタ(株) (Century Res. Center Corp.)

SCREEN⁽¹¹⁾等がある。これらが取扱い対象とする地球環境圏および評価対象地域はFig. 1に示す通りである。

P, A, M and W on the ordinate represent edible plants, cattles and their products, man and water biota in the biosphere, respectively. The dashed lines denoted by COCAIN show the region to which is paid attention in this paper.

Fig. 1 Regions covered by representative codes of system dynamics

これらの従来のモデルでは特定の限られた領域を評価対象域とするものが多く、また、汚染物質の移流拡散に係っては対象領域のみにおける代表的な、または固有の物理・化学現象を重視するものが多い。また、汚染物は自然界全体にわたって循環し、環境全体として1つの系となるにもかかわらず、考慮する限られた対象領域を閉じた系として取り扱うモデルが多い。さらに、循環に基づく汚染物質のフィードバック効果をコンシステントに考慮したものも少ない。

しかし、例えばチェルノブイリ事故に際して放出された核種は地域の規模ではなく地球の規模で広範囲に拡散し、環境汚染を介して遠隔地の生物圏をも汚染した事実を考慮すれば、汚染物質の地球規模での環境循環をコンシステントに取り扱い得るモデルの確立が要求され、さらにそれらを基に、大規模な環境汚染がいかに人体に影響を及ぼすかに関する評価コードも要求されよう。

本報ではシステムダイナミクスにより、Fig. 1に破線で示した領域を対象として核種の環境循環をモデル化する。汚染物質としては長寿命放射性核種を対象とするものとし、循環モデルで考慮する物理現象はほぼ

年のオーダー、またはそれ以上の時間尺度を持つ地球規模現象のみを考慮するものとする。人は植物、陸上動物、水中生物から成る生物圏内で生存するものとし、生物圏は気、地、海洋圏からなる地球環境に囲まれているとする。放射性核種は源からこれらの地球環境内へ放出され、生物圏を介して人体に影響を及ぼすものとする。

次章では、放射性核種の環境循環モデル、生物汚染モデル、人体内汚染モデルおよび被曝モデルを記述する。第Ⅲ章では、これに基づいて作成した評価コードCOCAIN(Circulation Of Chemical Agents In Nature)を用いて、大気圏内核実験をソースタームとする放射性核種の挙動、および環境中にパルス状に放射性核種が放出される場合の人および生物をも含めた環境応答状況を検討し、さらに第Ⅳ章で当該モデルに係る結論を述べる。

Ⅱ. 自然界における放射性核種の循環

1. 地域環境モデル

大気、地表または海洋中へ放出された核種が地球環境中でいかに大規模循環するかを考慮するために、Fig. 2に示すモデルを採用する。当モデルでは世界を考慮領域と外部領域とに分割し、考慮領域内の汚染源(Fig. 2中のPollutant Source コンパートメント)から放出された核種の考慮領域内での循環を検討する。

地球規模での核種の大規模な拡散媒体(□内は媒体に対応するコンパートメント番号)として、大気圏を上層大気②と下層大気③の2領域に、地圏を地殻表面層および地殻深部層の2成分に各々分解する。各々の地層部は土粒子成分および間隙水(または地下水)成分より成るとし、これらの各々を拡散媒体⑤~⑧とする。ここで、表面層間隙水(地表水)は地表面植物が持つ体内水をも含むものとする。また、陸水では湖沼および河川を考慮し、これらへの核種の流入出を検討する。湖沼および河川はさらに各々を2分し、湖沼水⑩、河川水⑪部分と各々の堆積土成分⑬、⑭から成るものとする。海洋圏では海洋水⑥と海底堆積土⑦に対する核散媒体を導入する。

以上12の拡散媒体によって考慮領域が構成されているとするが、考慮領域が全地球規模でない限り一般には閉じた系とはなり得ない。この閉塞不完全性を記述するために、さらに外部領域の上層①および下層大気④、河川⑫、地下水⑨および海洋水⑤を導入し、考慮領域内での滞留核種がこれらの外部領域媒体を通して相互作用を持つものとする。

The region considered is surrounded by a dashed curve, and the arrows indicate the flowing direction of nuclides.

Fig. 2 Compartment model of environment

Fig. 2 では媒体間での核種の流れを→に示し、→に付した s_i は源から媒体コンパートメント i への核種の流入率を表わす。コンパートメント i から j への核種移流の速度定数 $\lambda_{i,j}$ に対する物理化学的意味、およびその推算値または概算式は以下に示す通りである。

$\lambda_{1,2}$, $\lambda_{2,1}$: 地上高度 h 以上の上層大気相互間での核種の水平方向移流速度定数。ここでは対流圏界面高度を h とする。 i から j への年平均風速を $\langle v_i \rangle_{i,j}$ 、海洋部をも含んだ考慮領域の全表面積を S とすれば、

$$\lambda_{i,j} = \langle v_i \rangle_{i,j} l / S = \langle v_i \rangle_{i,j} / S^{1/2}$$

ただし、 l : 年平均風向を横切る方向の考慮領域代表長さ

$\lambda_{2,3}$, $\lambda_{3,2}$: 成層圏および対流圏間での物質循環速度定数。

$\lambda_{3,4}$, $\lambda_{4,3}$: 対流圏大気相互間での水平方向物質移流速度定数。 i から j への対流圏内の年平均風速を $\langle v_i \rangle_{i,j}$

とすれば、

$$\lambda_{i,j} = \langle v_i \rangle_{i,j} / S^{1/2}$$

で与えられる。

$\lambda_{3,5}$, $\lambda_{3,6}$, $\lambda_{3,10}$, $\lambda_{3,13}$, $\lambda_{3,16}$: 対流圏における核種の乾性および湿性沈着による地球面上への沈着速度定数。湿性については雨滴による洗浄効果のみを考慮に入れるものとする。 $\lambda_{3,5}$, $\lambda_{3,6}$ を除いては一般に

$$\lambda_{i,j} = (\lambda_{dry} + \lambda_{wet} f_r \zeta) S_j / S$$

ただし、 f_r : 年間の降雨時間分率

ζ : 対流圏垂直方向における降雨領域空間分率

S_j : コンパートメント j の地表面積

で与えられる。 λ_{dry} および λ_{wet} は各々乾性および湿性沈着速度定数であり、これらは $\lambda_{dry} = v_d / L$ および $\lambda_{wet} = CR^{\beta}$ とする。ここで、 v_d は乾性沈着に係るコロイド粒子の沈降速度、 L は乾性沈着に対する有効

大気高さ*, C は定数, R は降雨率であり, ベキ定数 β をここでは 1 とする。一方, $\lambda_{3,5}$, $\lambda_{3,6}$ については,

$$\lambda_{3,5} = \alpha(\lambda_{dr,y} + \lambda_{wet,f,\zeta}) S_5 / S$$

$$\lambda_{3,6} = (1 - \alpha)(\lambda_{dr,y} + \lambda_{wet,f,\zeta}) S_5 / S$$

$$\text{ただし, } \alpha \equiv (1 - \varepsilon_u) \rho_o K_d^N / \{ \varepsilon_u + (1 - \varepsilon_u) \rho_o K_d^N \}$$

ここで, ε_u : 地殻表面土層の間隙率

ρ_o : 表面層土粒子の真密度

K_d^N : 注目する核種 N の土粒子表面と
間隙水間での分配係数

とする。

上式では簡単のために, 地表面上に沈着した物質は直ちに間隙水に取り入れられて水溶し, 水溶液は各核種に対する分配係数に支配されて直ちに土粒子表面と吸着平衡に達するものとした。

$\lambda_{5,3}$: 微細土粒子の再浮遊による大気中への核種移行速度定数であり,

$$\lambda_{5,3} = m / (\rho_o l_s)$$

ただし, m : 核種を付着した微細土粒子の地表

単位面積当りの再浮遊率

l_s : 地殻表面深さ

とする。

$\lambda_{5,7}$, $\lambda_{5,8}$, $\lambda_{6,7}$, $\lambda_{6,8}$: 土粒子表面へ吸着された核種は, 間隙水と吸着解離平衡を保ちつつ間隙水の流下に従って流下し, 最終的には地殻深部層領域へ移行する。この場合, 表面層間隙水の沈降による地下水化への速度定数 A は $A = R / (\varepsilon_u S_o d)$ である。ただし, S_o は表面層中における間隙水飽和度とする。深部層においても簡単のために, 地下水化での核種は直ちに深層土表面と吸着解離平衡に達するものとする。単位時間当り, 降雨率に等しい間隙水が地下水化するとすれば,

$$\lambda_{5,7} = \lambda_{6,7} = A \alpha' (1 - \alpha)$$

$$\lambda_{5,8} = \lambda_{6,8} = A (1 - \alpha') (1 - \alpha)$$

$$\text{ここで, } \alpha' \equiv (1 - \varepsilon_L) \rho_o K_d^N / \{ \varepsilon_L + (1 - \varepsilon_L) \rho_o K_d^N \}$$

ε_L : 地殻深部層における間隙率

となる。

$\lambda_{7,9}$, $\lambda_{8,9}$, $\lambda_{9,7}$, $\lambda_{9,8}$: 深部層の土粒子表面に吸着された核種は地下水を介して外部周辺領域へ流出し, 逆に外部領域から地下水を介して考慮領域内へ流入する。地下水のこの流出および流入の速度定数⁽¹³⁾を A' および A'' とすれば, これらの機構による核種移行速度定数は,

$$\lambda_{7,9} = \lambda_{8,9} = (1 - \alpha') A'$$

$$\lambda_{9,7} = \alpha' A'', \quad \lambda_{9,8} = (1 - \alpha') A''$$

となる。

$\lambda_{6,3}$, $\lambda_{10,3}$, $\lambda_{13,3}$: 陸水蒸発に伴う共蒸留で, 核種が

大気中へ移行する速度定数。当モデルでは, “地表水の蒸発” は地殻表面層間隙水および植物層からの蒸発を指すものとする。共蒸留効果は低沸点化学種に対しては注目すべき現象である。この場合,

$$\lambda_{i,j} = f_e^N W_i / d_i$$

ただし, f_e^N : 共蒸留による元素 N の濃縮係数

W_i : コンパートメント i における単位
表面積当りの水蒸発率

d_i : i 中の水の平均深さ

$i=6$ については $d_6 = \varepsilon_u S_o d$

$\lambda_{8,10}$: 地下水流動に伴う湖沼への核種移行速度定数。湖沼滞水量が時間に依存せず一定である場合, 地下水および河川の流入と降雨による湖沼水増加率は, 河川への流出と下層大気への蒸発による湖沼水減少率に等しい。したがって,

$$\lambda_{8,10} = [S_{10} \{ (\lambda_{10,3} + \lambda_{10,13}) d_{10} - R_r \} - S_{13} d_{13} \lambda_{13,10}] / V_U$$

ここで, V_U : 考慮領域での地下水量

R_r : 単位面積当りの降水率

$\lambda_{8,13}$: 地下水流動に伴う河川への核種移行速度定数であり,

$$\lambda_{8,13} = W_{out}^{8,13} / V_U$$

ただし, $W_{out}^{8,13}$: 地下水の河川への単位時間
当り流出量

$\lambda_{8,16}$: 湖沼または河川へ流出する以外の地下水はすべて海洋へ流出する。これに伴う核種移行速度定数は, 考慮領域の海洋水量が時間に依存せず常に一定量を保つとする条件から導出する。すなわち

$$\lambda_{8,16} = [S_{16} (W_{16} + d_{16} \lambda_{16,15} - R_r) - W_{out}^{13,16} - S_{15} d_{15} \lambda_{15,16}] / V_U$$

ここで, $W_{out}^{13,16}$: 単位時間当り河川から海洋への
地下水流出量

d_{16} : 考慮領域における核種の自然
循環に係る有効海洋深さ

$\lambda_{10,11}$, $\lambda_{13,14}$, $\lambda_{16,17}$, $\lambda_{11,10}$, $\lambda_{14,13}$, $\lambda_{17,16}$: 水溶した核種の一部は水中のコロイド粒子表面へ吸着され, さらにコロイドと共沈して堆積土層へ移行する。当モデルにおける堆積土層は, 堆積土表面へ化学的に吸着された物質および堆積土間隙水中に溶存した物質の両者を含むものであるとする。堆積土表面と堆積土間隙水との間では, 物質のイオン交換反応に関して常に平衡条件が成立するものとする。さらに, 有効堆積土厚み

* 乾性沈着に係るコロイド粒子数密度の大気鉛直方向分布は均一ではない。これが平均値に等しい均一な値を持つとした場合の大気の高さを, ここで有効大気高さとして定義する。

d_i を設定し、堆積土表面から深さ d_i を超える深層部では堆積土上層水(湖沼水, 河川水, 海水)と相互作用することはないとする。上層水から堆積土層への核種移行はコロイド粒子との共沈および濃度拡散により、逆方向への移行は濃度拡散のみによる。したがって、このとき上層水層 i から堆積土層 j への移行速度定数は

$$\lambda_{i,j} = (\rho_s P_d^N v_s / d_i) + (D^N / d_i d_s)$$

逆方向の移行速度定数は

$$\lambda_{j,i} = D^N / \{(\epsilon_s + \rho_s P_d^N) d_s^2\}$$

ただし、 v_s : 堆積率

ρ_s : 堆積土バルク密度

P_d^N : 堆積土と水との間での核種 N の分配係数

ϵ_s : 堆積土間隙率

D^N : 核種 N の水中拡散係数

となる。

$\lambda_{10,13}$, $\lambda_{13,10}$, $\lambda_{13,16}$: 湖沼から河川へ、河川から湖沼へ、河川から海洋への水の流れに伴う核種移行速度定数であり、

$$\lambda_{i,j} = W_{out}^{i,j} / (d_i S_i)$$

とする。

$\lambda_{16,3}$: 海洋から大気への核種移行機構として、海水の蒸発に伴う共蒸留現象と海塩エアロゾル粒子生成に付随した移行現象を考慮する。このとき、これらの機構による核種移行速度定数は

$$\lambda_{16,3} = (f_s^N W_{16} + f_s^N M_s) / d_{16}$$

ただし、 f_s^N : 海塩粒子中での核種 N の濃縮係数

M_s : 単位面積当りの海塩粒子発生率

$\lambda_{15,16}$, $\lambda_{16,15}$: 外部領域海水の領域内海洋への流れ込み、およびこの逆方向の流れに伴う核種移行速度定数であり、以下の計算では

$$\lambda_{15,16} = 0, \lambda_{16,15} = v_0 / S_{16}^{1/2}$$

ここで、 v_0 : 海流速度

S_{16} : 考慮領域での海洋面積であり、海流幅は $(S_{16})^{1/2}$ のオーダーを持つものと仮定

とする。

以上の方法で移行速度定数 $\lambda_{i,j}$ を与える場合、コンパートメント i 中での注目核種 N の総数 X_i^N の時間変動は、以下のネットワーク方程式で記述できる。

$$\begin{aligned} dX_i^N(t)/dt = & \sum_j \lambda_{j,i} X_j^N(t) \\ & - (\sum_j \lambda_{i,j} + \lambda^N) X_i^N(t) \\ & + \lambda^P X_i^P(t) + \mathcal{S}_i^N(t) \end{aligned} \quad (1)$$

ただし、 λ^N : N の崩壊速度定数、 P : N の親核に関する物理量

$\mathcal{S}_i^N(t)$: i におけるソースターム

2. 生物圏モデル

当モデルにおける生物は、①食物および飼料用の植物、②家畜および畜産物、③食物用水中生物の3カテゴリーとする。植物をさらに、葉菜類(P_1)、果実およびその他の野菜(P_2)、根菜類(P_3)、穀類および飼料用作物(P_4)の4サブカテゴリーに、家畜および畜産物を乳牛によるミルク(A_1)、牛肉(A_2)、豚肉(A_3)、鶏卵(A_4)、鶏肉(A_5)の5サブカテゴリーに、さらに水中生物を海草(W_1)、軟体動物(W_2)、甲殻類(W_3)、魚類(W_4)の4サブカテゴリーに各々細分類するものとする。

当モデルでは、生物体内および畜産物中における注目核種の総量は、前節で求めた環境コンパートメント中での核種量 X_i^N に比較して極めて少なく、無視し得る量であるとする。すなわち、環境の各コンパートメントの容量は十分に大きく、任意の時刻での核種量は当モデルで考慮する生物を導入した場合でも何らの変化を被ることはないが、生物および畜産物は環境中の核種濃度に依存して有意の汚染を生ずるものとする。植物、家畜と畜産物、および水中生物と地球環境との間の核種の移流モデルをFig. 3に示す。

(1) 植物

植物はその生育期間を通して間隙水中核種を吸収し続けるが、これは核種ごとに異なる濃度係数に従って直ちに植物体内へ蓄積されるものとする。地下水、湖沼水、河川水の灌水により植物表面に汚染核種が付着し、さらに上層大気からの乾性および湿性沈着によっても同様な付着現象が生ずるが、これらの植物表面上の核種は風雨等による除染効果でその一部が除去されるものとする。したがって、人によるこれらの植物の摂取時刻 t において、植物 P_i の可食単位質量当りの核種 N の濃度 p_i^N は以下の式で与えられる。

$$\begin{aligned} p_i^N(t) = & \exp(-\lambda^N \tau'') \left[B_i^N E_i \{ C_s^N(t - \tau'') \right. \\ & + C_0^N(t - \tau'') \} / \{ (1 - \epsilon_v) \rho_0 \} + (1 - F) \\ & \cdot \left[I_s T_s \sigma_s \Omega_i^N \int_{t - \tau_i' - \tau''}^{t - \tau''} \sum_j \omega_j C_j^N(t') G(t: \tau'', t') dt' \right. \\ & + (\lambda_{a,r} + \lambda_{w,at}) f_i (1 - D_i) / S \\ & \cdot \left. \int_{t - \tau_i' - \tau''}^{t - \tau''} X_3^N(t') G(t: \tau'', t') dt' \right] \cdot (E_i M_i)^{-1} \end{aligned} \quad (2)$$

ただし、 $G(t: \tau'', t') \equiv \exp \{ -\lambda^N (t - \tau'' - t') \}$

また、 τ'' : 生産物保存期間

τ_i' : 植物 P_i の生育時間

B_i^N : 植物 P_i による核種 N の生物濃縮係数

E_i : P_i の生鮮重量に対する乾燥重量比

Fig. 3 Compartment model for migration of nuclides in biosphere

$C_j^N(t)$: 時刻 t における環境コンパートメント j での核種 N の濃度

F : 洗浄等による核種の物理的除染フラクタ

I_i : P_i に対する単位面積当りの灌水率

T_i : 年間灌水を実施する時間割合
 σ_i : 単位面積当りの P_i の占有面積フラクション

Ω_i^N : 灌水中の核種が P_i の可食部へ蓄積される割合

ω_j : 環境コンパートメント j の水利用により灌水する割合

f_i : 降着エアロゾル粒子が可食部へ落下する割合

D_i : 風雨によって表面汚染が除去される割合

E_i : P_i の生鮮重量に対する可食部重量比

M_i : 単位面積当りの P_i の生育生鮮重量

物質質 f_i および D_i は, PATHWAY⁽¹⁾ による表現式で算出する。

(2) 式における濃度 $C_j^N(t)$ は, 各コンパートメントにおいて以下の通りに与えられる。

$$C_j^N(t) = X_j^N(t) / M_j$$

ただし, M_j : j での媒体質量

$$M_1 = S_{out} P_h, \quad M_2 = S \cdot P_h, \quad M_3 = S(P_1 - P_h)$$

$$M_4 = S_{out}(P_1 - P_h), \quad M_5 = S_5 \rho_o l_i (1 - \epsilon_U)$$

$$M_6 = S_5 \rho_w \epsilon_U S_{a_i}, \quad M_7 = S_5 \rho_o (l_i' - l_i) (1 - \epsilon_L)$$

$$M_8 = V_U \rho_w, \quad M_9 = S_{out}(S_5 / S) \rho_w (l_i' - l_i)$$

$$M_{10} = S_{10} \rho_w d_{10}, \quad M_{11} = S_{10} \rho_s d_i$$

$$M_{12} = S_{out}(S_{10} / S) \rho_w d_{12}$$

$$M_{13} = S_{13} \rho_w d_{13}, \quad M_{14} = S_{13} \rho_s d_i$$

$$M_{15} = S_{out}(S_{16} / S) \rho_w d_{15}$$

$$M_{16} = S_{16} \rho_w d_{16}, \quad M_{17} = S_{16} \rho_s d_{16}$$

ここで, S_{out} : 外部領域の全表面積

P_i, P_h : [単位面積当りの大気質量] を単位とする地表および対流圏界面高度における大気圧

l_i', l_i : 地殻深部層および地殻表面層深さ
 ρ_w : 水の密度

これら以外の記号については既に定義したものである。深さ l_i' は, 地下水量 V_U を用いて $l_i' = l_i + V_U / (S_5 \rho_w \epsilon_L)$ から算出する。

植物の生育期間は一般に数ヶ月のオーダーであり, 注目する核種の環境濃度変化の時間尺度が数年以上である限り, 前式における積分を区分求積法により実行しても近似的に正しい。次章では, これらの積分を以下

の表現式で近似する。

$$\int_{t-\tau_1-\tau_2}^{t-\tau_1} \sum_j \omega_j C_j^N(t') G(t; \tau'', t') dt' \\ \approx \sum_j \omega_j C_j^N \left(t - \frac{\tau'}{2} - \tau'' \right) \tau' G \left(t; \frac{\tau'}{2}, \tau'' \right) \quad (3)$$

$$\int_{t-\tau_1-\tau_2}^{t-\tau_1} X_3^N(t') G(t; \tau'', t') dt' \\ = X_3^N \left(t - \frac{\tau'}{2} - \tau'' \right) \tau' G \left(t; \frac{\tau'}{2}, \tau'' \right) \quad (4)$$

(2) 家畜および畜産物

これらの汚染は主として汚染飼料と汚染飲料水の摂取, および汚染大気吸入の2要因による。家畜飼料は外部領域から搬入した飼料, 領域内で調達した飼料と牧草, および領域内での保存飼料と干草(植物カテゴリP₄)である。さらに, 地殻表面層の汚染濃度が高い場合には, 飼料・牧草に混入した土粒子を摂取することで家畜体内が汚染される効果も無視できない。人の摂取時点で畜産物 A_i の単位質量当りに含まれる核種 N の量 a_i^N は以下で与えられる。

$$a_i^N(t) = (1-F) \exp(-\lambda^N \tau'') \\ \left[\mu_i B_{wi}^N \int_{t-\tau_1-\tau_2}^{t-\tau_1} \sum_j \xi_j C_j^N(t') G(t; \tau'', t') dt' \right. \\ + \nu_i B_{fi}^N \left\{ f_{out} C_{out}^N \tau_i + (1-f_{out}) \right. \\ \cdot \left. \left\{ y_i z_i \int_{t-\tau_1-\tau_2}^{t-\tau_1} p_i^N(t') G(t; \tau'', t') dt' \right. \right. \\ \left. \left. + (1-y_i z_i) \int_{t-\tau_1-\tau_2}^{t-\tau_1} p_i^N(t' - \tau_0) G(t; \tau'', t' - \tau_0) dt' \right\} \right\} \\ + b_i B_{ai}^N \int_{t-\tau_1-\tau_2}^{t-\tau_1} C_3^N(t') G(t; \tau'', t') dt' \\ + g_i B_{si}^N \int_{t-\tau_1-\tau_2}^{t-\tau_1} \{ C_5^N(t') + C_6^N(t') \} \\ \cdot G(t; \tau'', t') dt' \left. \right] / m_i \quad (5)$$

ただし, μ_i, ν_i : 家畜 A_i 1 頭当りの飲料水摂取率と飼料摂取率

$B_{wi}^N, B_{fi}^N, B_{ai}^N, B_{si}^N$: 摂取飲料水, 摂取飼料, 吸入大気, 表面土の各々に含まれる核種 N の, 家畜または畜産物 A_i 内への生物濃縮係数

ξ_j : 環境コンパートメント j から飲料水を導る割合

τ_i : A_i の飼育成長または生産のために必要となる時間

f_{out} : 外部領域から導入する飼料の割合

C_{out}^N : 外部領域から導入する飼料中の核種濃度

y_i : 年間放牧する時間割合

z_i : 家畜 A_i の放牧時の牧草摂取量が全飼料の摂取量に占める割合

τ_0 : 干草の保存期間

b_i : A_i 1 頭当りの呼吸による大気吸入率

g_i : A_i 1 頭当りの表面土粒子摂取率

m_i : A_i 1 頭当りの畜産物質量

$a_i^N(t)$ に対する上式積分中, τ_i の長短に基づいて $a_i^N(t)$, $a_i^N(t)$ については (3), (4) 式と同様な近似式により, その他については台形公式による数値積分によりそれぞれの値を算出するものとする。

(3) 水中生物

考慮領域を小さく限定する場合, 水中生物の一部は外部領域のそれと混存すること, および, ある種の核種や水中生物については水中での食物連鎖による核種の体内濃縮が重要となること等に注意する必要がある。しかし, 水中生物は食物連鎖ではなく, 主として環境水から直接影響を受けて体内汚染する場合も多い。ここでは簡単のために, 水中生物の体内汚染度は領域内での水中核種濃度によってのみ一意的に決定されるものとし, 核種の体内濃度は領域内での水中濃度と常に平衡状態にあるものとする。この場合, 人の摂取時刻 t における水中生物の可食部単位質量当りの核種量 w_i^N は, 以下の表現式で与えられる。

$$w_i^N(t) = \exp(-\lambda^N \tau'') (1-F) B_{oi}^N \\ \cdot \sum_j \phi_j C_j^N(t - \tau'') \quad (6)$$

ただし, τ'' : 保存加工時間

F : 水産物の加工洗浄による除染ファクタ

B_{oi}^N : 水中生物体内での核種濃縮係数

ϕ_j : 環境コンパートメント j から水中生物を捕獲する割合

(4) 代謝と人体被曝モデル

核種の摂取, 吸入による消化器官や呼吸器官の汚染過程は ICRP クリアランスモデル⁽¹⁵⁾ に従い, 体内諸器官への核種の移行過程および速度定数は ICRP-2⁽¹⁶⁾ の記載データを用いてモデル構築するものとする。人体内代謝モデルは Fig. 3 に示す通りである。

当モデルでは血液中の核種のうち, q ($=0.59$)⁽²⁵⁾ の分率は体外へ直接排出され, 残りの分率 $(1-q)$ は決定器官へ輸送されるものとする。決定器官をここでは体組織 (M_1), 筋肉/脂肪 (M_2), 骨 (M_3), 睪丸/卵巣 (M_4), 脾臓 (M_5), 腎臓 (M_6), 甲状腺 (M_7), 全身 (M_8) のいずれかとする。体内器官 M_i における核種 N の時刻 t での滞留量 $m_i^N(t)$ は, 以下の方程式を解いて得られる。

$$dm_i^N(t)/dt = \sum_j \lambda_{j,i}^N m_j^N(t) - \{\lambda_i^N + \sum_j \lambda_{i,j}^N \\ + 0.693\delta(i=M_1 \sim M_8)/t_0^N\} m_i^N(t) + \lambda^P m_i^P(t) \\ + \{0.30\delta(i=M_9) + 0.08\delta(i=M_{10}) \\ + 0.25\delta(i=M_{11})\} I_h^N(t) + \delta(i=M_{12}) I_g^N(t) \quad (7)$$

ただし, $m_i^N(t)$: 平均住民*1人当りに対する値
 $\lambda_{i,j}^N$: 体内器官 i から j への核種 N の移行速度定数
 $\delta(i=n)$: δ 関数
 t_b^N : 生物学的半減期
 m_i^P : 親核の滞留量
 I_h^N : 1人当り単位時間当りの呼吸による核種 N の吸入量
 I_p^N : 同じく食物と飲料水摂取に伴う N の摂取量

物理量 I_h^N は呼吸量と核種の大気中濃度の積で与えられ, 一方, I_p^N は食物, 飲料水, 食塩の単位時間当りの摂取量に各々における核種濃度を積算して得られる。食物は領域内で生産するものの他に, 外部領域からの調達輸入分も考慮する。また, 飲料水は地下水, 湖沼, 河川からそれぞれ有限の分率で供給されているものとする。飲食物摂取量はすべて考慮領域内の平均住民に対する値を取るものとし, 性別および年齢分布を考慮した加重平均値とする。次章の計算では男女それぞれについて, 年齢を1歳未満, 1歳~12歳未満, 12歳~19歳未満, 19歳以上に4区分するものとし, これらの区分域での各種飲食物摂取量を文献(1), (17), (20)等から採り, さらに我が国の年齢分布を用いて平均値を算出するものとする。

放射性核種による内部被曝は飲食物摂取, 汚染大気の吸入, トリチウム等に見られる皮膚経由の体内侵入の3過程による。一方, 外部からは汚染大気, 地殻表面層, 湖沼, 河川, 海面, およびこれらの沿岸での堆積土層の各々からの照射の寄与を受けて被曝する。全被曝量はこれらの和で与えられるが, 各種の線量率変換係数, 外部被曝に係る各種のシールド係数, 試算のためのパラメータ値等は文献(3), (10), (18)等から抽出して採用する。

III. COCAINによるケーススタディ

半減期1年を超える長寿命核種を対象として, 上記モデルに基づいて核種の環境循環シミュレーションコード COCAIN を作成した。本章の計算例では, 考慮領域を我が国および我が国と同一表面積を持つ周辺海洋域とし, この領域内での核種滞留量の時間変動を追跡する。我が国とその周辺海洋を除く残りの世界は外部領域として取り扱う。以下の第1節で, 第2節以下の計算例で採用するパラメータ値を与える。第2, 3節において, 従来の核実験によって解放された放射性核種 (^{90}Sr , ^{137}Cs , $^{239,240}\text{Pu}$) の環境循環, および任意のコンパートメントへパルス状に放射性核種が投入され

る場合の環境の応答状況について検討する。

1. 計算条件

ここでのパラメータ値は, ①我が国の地理学的, 気象学的なデータ, 産業, 社会, 人口データ等を基に算出また推算すべきものであるが, 我が国での値が得られない場合は, ②世界的規模での平均値, ③既存の核種循環モデルで使用された値または一般の文献値を採用するものとする。各カテゴリー①~③ごとに, 自明であるものを除いてこれらのパラメータの採用値を, ほぼ前章の記述順に出自の参考文献とともに以下に示す。参考文献のない値は推算値である。

添字 N を持つパラメータは (^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{239}Pu , ^{240}Pu) の4核種に対する値を, また, 添字 i ($i=1\sim4$ または $1\sim5$) は生物カテゴリーに対する値を与えるものとする。前章で明らかな定義をしていない記号についての, その定義を文末の[記号]欄に与えた。

- ① $\langle v_a \rangle_{i,j} = 5 \text{ m/s}^{(27)}$, $S = 7.4 \times 10^5 \text{ km}^2^{(27)}$
 $\langle v_a \rangle_{i,j} = 0$, $f_r = 0.1^{(27)}$, $R = 2.3 \text{ mm/h}^{(27)}$
 $S_5 = 0.494 S^{(27)}$, $S_{10} = S_{13} = 0.003 S^{(27)}$
 $S_{16} = 0.55$, $d_{10} = 2 d_{13} = 32 \text{ m}^{(27)}$
 $V_v = 2.2 \times 10^{12} \text{ m}^3^{(13)}$, $R_r = 2.6 \times 10^6 \text{ t/yr/km}^2^{(27)}$
 $W_{\text{out}}^{8,13} = 1 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{yr}^{(13)}$
 $W_{\text{out}}^{13,16} = 1.8 \times 10^{11} \text{ m}^3/\text{yr}^{(13)}$
 $W_{\text{out}}^{10,13} = 5 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{yr}^{(13)}$, $W_{\text{out}}^{13,10} = 0^{(13)}$
 $v_0 = 1.5 \text{ m/s}^{(13),(27)}$, $\tau'' = 0$, $F = 0$
 $\omega_8 = \omega_{10} = \omega_{13} = 1/3$, $f_{\text{out}} = 0.7^{(28)}$, $C_{\text{out}}^N = 0$
 $f_{\text{out}}' = 0.3^{(28)}$, $\xi_8 = \xi_{10} = \xi_{13} = 1/3$
 $\phi_{10}^i = \phi_{13}^i = (0, 0, 0, 0.005)^{(28)}$
 $\phi_{16}^i = (1, 1, 1, 0.99)^{(28)}$
- ② $h = 8,000 \text{ m}^{(27)}$, $\lambda_{2,3} = 0.5 \text{ yr}^{-1(32)}$
 $\lambda_{3,2} = 0.087 \text{ yr}^{-1(32)}$, $\zeta = 0.1^{(27)}$, $L = 8,000 \text{ m}^{(29)}$
 $\varepsilon_v = 0.5^{(2)}$, $\rho_0 = 2.5 \text{ g/cm}^3^{(14)}$
 $m = 1.5 \text{ t/yr/km}^2^{(31)}$, $I_s = 1 \text{ m}^{(13)}$, $S_a = 1.0^{(2)}$
 $\varepsilon_L = 0.1^{(13)}$, $W_6 = 0.4 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{yr}^{(13)}$
 $W_{10} = W_{13} = W_{16} = 1.2 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{yr}^{(13)}$
 $d_{15} = d_{16} = 200 \text{ m}^{(24)}$, $v_a = 2.5 \times 10^{-5} \text{ m/yr}^{(3)}$
 $d_s = 0.1 \text{ m}^{(3)}$, $\rho_s = 0.8 \text{ g/cm}^3^{(3)}$, $\varepsilon_s = 0.7^{(3)}$
 $M_s = 2.8 \text{ t/yr/km}^2^{(13)}$, $f_s^N = (1, 1, 1, 1)^{(3)}$
 $S_{\text{out}} = 7.4 \times 10^5 \text{ km}^2$
- ③ $v_a = 1 \text{ cm/s}^{(30)}$, $C = 10^{-3.5} \text{ s}^{-1}/(\text{mm/h})^{(33)}$

* ここで, 平均住民とは考慮領域に居住する住民の平均を意味し, この平均住民に対応する諸物理量はすべて, 性別をも考慮にした人口分布を重み関数として算出した平均値に等しいものと定義する。

$$\begin{aligned}
I_1 &= I_2 = I_3 = I_4 = 7.3 \times 10^2 \text{ kg/yr/m}^{200} \\
T_1 &= T_2 = T_3 = T_4 = 0.2^{20}, \tau_0 = 0.25 \text{ yr}^{(1)} \\
K_d^N &= (0.026, 0.1, 3.9, 3.9) \text{ m}^3/\text{kg}^{(2)(12)} \\
P_d^N &= (0.126, 12.6, 3.98, 3.98) \text{ m}^3/\text{kg}^{(3)} \\
D^N &= (0.0315, 0.0315, 0.0315, 0.0315) \text{ m}^2/\text{yr}^{(3)} \\
f_i^N &= (1, 1, 10^3, 10^3)^{(3)} \\
\tau_i' &= (0.27, 0.41, 0.41, 0.41) \text{ yr}^{(2)} \\
B_1^N &= (2.5, 0.08, 4.5 \times 10^{-5}, 4.5 \times 10^{-5})^{(6)} \\
B_{i+1}^N &= (0.25, 0.03, 4.5 \times 10^{-3}, 4.5 \times 10^{-5})^{(6)} \\
E_i &= (0.066, 0.428, 0.428, 0.428)^{(6)} \\
\sigma_i &= (0.6, 0.6, 0.6, 0.6)^{(14)} \\
Q_i &= (0.05, 0.05, 0.05, 0.05)^{(2)} \\
M_i &= (1.9, 0.88, 2.6, 0.28) \text{ kg/m}^{200} \\
E_i &= (1.0, 0.125, 0.5, 0.125)^{(6)} \\
\mu_i &= (29200, 18250, 2560, 110, 110) \text{ kg/yr}^{20} \\
\nu_i &= (6610, 4530, 1100, 36.5, 36.5) \text{ kg/yr}^{20} \\
B_{k1}^N &= (5.70 \times 10^{-9}, 6.04 \times 10^{-10}, 1.16 \times 10^{-12}, \\
&\quad 1.16 \times 10^{-12})^{(6)(20)} \\
B_{k1+1}^N &= (1.72 \times 10^{-10}, 1.15 \times 10^{-9}, 2.87 \times 10^{-13}, \\
&\quad 2.87 \times 10^{-13})^{(6)(20)} \\
\tau_i &= (2.74 \times 10^{-3}, 6, 1, 2.74 \times 10^{-2}, 1) \text{ yr}^{(2)} \\
y_i &= (0.4, 0.4, 0.4, 0.4, 0.4)^{(6)} \\
z_i &= (0.43, 0.43, 0.43, 0.43, 0.43)^{(6)} \\
b_i &= (1.30 \times 10^3, 3.58 \times 10^4, 1.35 \times 10^4, \\
&\quad 7.15 \times 10^2, 8.50 \times 10^2) \text{ kg/yr}^{20} \\
g_i &= (183, 183, 38, 3.7, 3.7) \text{ kg/yr}^{(2)} \\
m_i &= (250, 250, 100, 0.44, 1.5) \text{ kg}^{(2)} \\
B_{b1}^N &= B_{b2}^N = (0.01, 0.01, 1.0, 1.0)^{(3)} \\
B_{b3}^N &= (0.01, 0.03, 0.1, 0.1)^{(3)} \\
B_{b4}^N &= (0.001, 0.05, 0.01, 0.01)^{(3)}
\end{aligned}$$

前章のモデルでは、汚染核種は環境から生物圏へ移行し得るが、生物圏から環境への核種移行量は無視し得ると仮定した。農耕地帯の生物の表面密度が $1 \sim 1.5 \text{ kg/m}^2$ である⁽¹³⁾に対して、上記のパラメータ値を用いれば、下層大気、地殻表面層、地表水、深層水、深さ d_{16} までの海洋の表面密度はそれぞれ $\sim 10^4$, $\sim 10^3$, 5×10^2 , 6×10^3 , $2 \times 10^5 \text{ kg/m}^2$ となり、さらに我が国の降水率は $\sim 10^3 \text{ kg/m}^2/\text{yr}$ となる。環境の容量は充分に大きく、したがって上の仮定は妥当なものであるといえる。

COCAIN 中の連立常微分方程式はすべて指数行列 (Exponential Matrix) 法⁽³⁴⁾により解く。このためのタイムステップ Δt は、(1)式に対しては $\Delta t = \frac{1}{2} \text{ yr}$, (7)式に対しては $\Delta t = 1/2, 250 \text{ yr}$ とする。これらのタイムステップは各々の式中の $\lambda_{i,j}$ 値の大小に依存して決ま

るものであり、指数行列を Taylor 展開して第50項までの和を求めた場合に、和が収束し得る Δt のうちのほぼ最大の値に相当する。 $\frac{1}{2} \text{ yr}$ 間隔で算出した濃度 $C_j^N(t)$ を用いて、生物体内濃度についても同様に $\frac{1}{2} \text{ yr}$ ごとの値を算出する。このとき計算の簡単のために、ほぼ $\frac{1}{2} \text{ yr}$ を超えない生育期間の生物に対しては (3), (4) 式の近似を行なった。しかし、環境濃度が $\sim \frac{1}{2} \text{ yr}$ 以内の時間尺度で急速に変動する場合には、明らかにこれらの近似は良くなく、この場合には忠実に数値積分を実行する必要があるだろう。

2. 核実験による核種の環境循環

1945年以降の大気圏内核実験の爆発総量は約250 Mt に達する。ここでは1975年までの核実験データ⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾, およびその後の中華人民共和国による第26回(1980年)までの大気圏内核実験データ⁽²¹⁾を用いる。深度 50 m 以深での地下核実験は大気圏に影響を与えることはないとし、大気圏実験によって上下各層の大気中へ放出される放射性核種量を Broyles の方法⁽²²⁾を用いて推算する。 $\frac{1}{2} \text{ yr}$ を単位とした南北各半球の上層大気中への ^{90}Sr 投入率を Fig. 4 に示す。

地球の南北各半球内での成層圏大気の移動速度定数

White and black columns represent the values for the northern and southern hemispheres, respectively.

Fig. 4 Amount of ^{90}Sr injected into stratosphere as function of year of nuclear bomb tests (N.B.T.)

は、南北両半球相互間でのそれに比して大きい。また我が国の近傍では、対流圏を通しての外部領域との相互作用は成層圏を通してのそれに比して小さい。さらに、大気圏爆発で対流圏へ放出される放射性核種は浮遊塵およびエアロゾルとなり、その大部分は爆発箇所近傍へ局所的に落下する。したがってここでは、各半球の上層大気部へ投入された放射性核種は直ちに各半球の上層大気中に均一に分散するものとし、さらに我が国の近傍では、1945年中期、広島(20 kt)および長崎(20 kt)における地上核爆発に基づく下層大気層への直接の放射能投入を除いては、すべて上層大気層から降下するものとする。

以上の仮定に基づけば、我が国とその近傍の上層大気部に対するソースタームはFig. 4に示した ^{90}Sr の北半球値 $\mathcal{S}^{90}_{\text{NORTH}}$ に比例したものとなり、さらに、任意の放射性核種Nのソースターム $\mathcal{S}_1^N$ は以下に与えられるものとなる。

$$\mathcal{S}_1^N(t) = \eta(N/^{90}\text{Sr})_0 \mathcal{S}^{90}_{\text{NORTH}}(t)$$

ただし、 $(N/^{90}\text{Sr})_0$ は実験による ^{90}Sr に対する核種Nの相対生成量であり、 $(^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr})_0 \approx 10^{1/3}$ 、 $(^{239}\text{Pu}/^{90}\text{Sr}) \approx (^{240}\text{Pu}/^{90}\text{Sr}) \approx 10^{-2.3}$ 等である。また η は規格化定数であり、東京における核実験降下物の観測結果⁽²³⁾を

基に $\eta = 8 \times 10^{-3}$ とする。COCAINにおけるコンパートメント1は南半球に対応する上層大気であるとし、このコンパートメントに対する核種Nのソースターム $\mathcal{S}_1^N$ を

$$\mathcal{S}_1^N(t) = \eta(N/^{90}\text{Sr})_0 \mathcal{S}^{90}_{\text{SOUTH}}(t)$$

とする。ただし、 $\mathcal{S}^{90}_{\text{SOUTH}}$ はFig. 4に示した南半球値である。以下では、考慮領域内外の間で $\lambda_{2,1} = \lambda_{1,2} = 0.3/\text{yr}$ 、 $\lambda_{1,4} = \lambda_{2,3}$ 、 $\lambda_{15,16} = \lambda_{16,15}$ が成立するとして計算を実施する。

Fig. 5に、我が国とその周辺上空の上下層大気および外部領域の上層大気中での ^{90}Sr 量の時間推移を示す。同図には1960年以降の我が国上空の成層圏における観測値をも示す。この観測値は北半球成層圏における ^{90}Sr 存在量観測値⁽²³⁾を1963年5～8月の時点で計算値に規格化したものであるが、両者の変動の時間推移はよく一致する。さらに、同図には煩雑さを避けるために示してはいないが、コンパートメント1、すなわち南半球成層圏に対応する観測値も計算値とよく一致し、これから、南北各半球内での成層圏では、当計算で採用したタイムステップ($1/3 \text{ yr}$)よりも短い時間尺度で投入核種が均一に分散し得ること、南北両半球成層圏相互間での物質移流の真の速度定数は、当計算で

The curve denoted by 3' shows the activity in the lower atmosphere when there exists no circulation of ^{90}Sr from the geosphere to the atmosphere. Observed values are given by dashed curves. These observations are normalized to each calculations at 1963 and 1964 for the stratosphere 1 and the lower atmosphere 3' respectively.

Fig. 5 Time-evolution of ^{90}Sr activity in atmosphere

使用した 0.3/yr に近いこと等が示唆される。

当モデルでは、 ^{90}Sr 存在量の下層大気中(コンパートメント3)での時間変化は上層大気中でのそれに比して極めてゆるやかである。同図には微細土粒子に吸着されて再浮遊する ^{90}Sr が全く存在しないとした場合の下層大気中の ^{90}Sr 存在量の例も示す(3'と表示)。また、1958年以降の我が国における観測値をも示す。この観測値は、東京における ^{90}Sr の年間降下量を1964年5～8月の時点で計算値3'に規格化したものである。計算値3'は当観測値の時間推移をよく模擬しているが、再浮遊効果を含めた場合の計算値3の形状は観測値の形状と一致しない。これから、地殻表面層から放射性核種を付着して再浮遊する土粒子エアロゾル量は、少なくとも東京における場合、従来考慮された値

に比べて著しく低い値でしかないことが示唆される。

Fig. 6 に、地圏および海洋圏での ^{90}Sr 存在量の時間推移を示す。核種の投入コンパートメントから遠く離れたものであるほど、放射エネルギーの時間的分布はブロード化し、投入に対する応答は遅れる。領域内での ^{90}Sr は1987年において86.9および9.9%がおのおの海洋および深層土中で残存し、その他のコンパートメントでの存在量は極めて少ない。深層土中の ^{90}Sr は雨水の流下に伴って地表面層から移流して蓄積したものであり、当モデルでは1967年以降、地殻中では深層土による ^{90}Sr 吸着が支配的となる。1987年における海洋中の ^{90}Sr 濃度の計算値は $2.7 \times 10^{-14} \text{ Ci/kg}$ であり、中部北太平洋表面水中での近年の ^{90}Sr 濃度の観測値⁽²⁴⁾ $1 \times 10^{-14} \text{ Ci/kg}$ とはオーダーの上で一致する。

Fig. 6 Time-evolution of ^{90}Sr activity contained in each compartments of geo- and lithospheres

Fig. 7 に、生物圏での核種汚染状況の時間推移を示す。生体中での ^{90}Sr 濃度はほぼ2桁の範囲内にある。 ^{90}Sr の植物汚染は1965年初期に最高値に達し、穀類および飼料作物中で $5 \times 10^{-11} \text{ Ci/kg}$ 、根菜類で $6 \times 10^{-13} \text{ Ci/kg}$ であった。他の植物はこれらを両端値とする範囲内にある。同図には1960年以降の我が国北陸産の米粒中に含まれる ^{90}Sr の観測値⁽²⁵⁾ も合せ示す。計算値は観測値と矛盾しない。一方、畜産物の汚染は牛肉において最も著しい。これは1969年中期にその汚染度が最高となり、 ^{90}Sr 濃度に $9 \times 10^{-12} \text{ Ci/kg}$ 達した。豚肉

中の汚染度最高値は1965年中期の $1 \times 10^{-12} \text{ Ci/kg}$ であり、牛乳中のそれは1964年後期の $3 \times 10^{-13} \text{ Ci/kg}$ である。

牛肉および豚肉における最高値出現の時間遅れは、肉牛および豚の飼育成長時間をそれぞれ5 yrおよび1 yrとしたことによるものであり、生産物となった時点に含まれる放射エネルギーは、飼育成長の全期間にわたる核種の体内蓄積分の重畳として与えられるためである。同一生体であっても、核種の違いによって汚染度の時間推移がいかに異なるのか例として、牛肉中での ^{239}Pu

Dashed lines denoted by Obs. are observed concentration in the rice harvested at Hokuriku district in Japan.

Fig. 7 Status of ^{90}Sr pollution in biosphere with time

汚染度も示した。米国における摂取食物中での ^{90}Sr 平均濃度⁽²⁶⁾は1964年に 1.3×10^{-11} Ci/kgの最高値となった。1980年前後には $2 \sim 3 \times 10^{-12}$ Ci/kgに、食肉中での濃度は $\sim 1 \times 10^{-12}$ Ci/kgに低下した。計算値はこれらの観測値と矛盾しない。

Fig. 8に、平均住民1人当り、3核種の年間摂取量および骨への蓄積量の時間推移を示す。 ^{90}Sr および ^{239}Pu の摂取量最大時点は1965, 1966年の各中期であり、 ^{137}Cs は1969年初期である。牛肉中での ^{137}Cs 濃度は他の食物中でのそれに比して相対的に高い。例えば、1965年での牛肉中の ^{137}Cs 濃度は 8.0×10^{-10} Ci/kgと計算され、これは穀類中の 5.1×10^{-11} Ci/kgよりもはるかに高い。

上述の核種摂取量最大時点の違いは、前2核種が主として汚染された穀類を介して摂取されるのに対し、 ^{137}Cs は主として食肉を介して人体内に摂取されることによるものである。Fig. 8は、米国成人男子の年間摂取最高値が1964年に現れて ^{137}Cs は 3×10^{-8} Ci/yr、 ^{90}Sr では 1×10^{-8} Ci/yrであったこと⁽²⁶⁾と比較できよう。

さらに同図では ^{137}Cs および ^{239}Pu の骨への蓄積状況も合せて示し、また我が国成人男子1人当りの骨中における ^{90}Sr 量の測定値⁽²⁵⁾も示した。人骨中の放射エネルギーの計算値は、1945年以来生存し続ける平均住民1人当

りの体内へ蓄積されてきた量であるのに対し、測定値は測定時点における成人1人当りが持つ放射エネルギーであり、これは1945年以降の蓄積量を必ずしも与えるものではない。しかし両者は良好に一致し、当モデルが自然界における核種循環の概略的なモデルであるにもかかわらず、定性的傾向のみではなく、少なくともオーダーの範囲で定量的議論に耐え得るものであることが判明した。

2. バルス状ソースタームに対する応答

ここでは $\lambda_{2,1}$ として第II章で記述した表現式を用い、さらに $\lambda_{1,2} = \lambda_{1,4} = \lambda_{15,16} = 0$ として計算を行う。放射性核種が(a)大気下層部、(b)地殻表面層、(c)河川、(d)海洋の各コンパートメントへ、3 Ci/yrの均一の割合で1/yr間だけ放出される場合、経過時間と共に核種が環境や生物圏でいかに分散、蓄積するかを調べた。

Fig. 9(a)~(d)に各場合の環境中への ^{90}Sr の分散状況を示す。いずれの場合でも、 ^{90}Sr については地殻に保持される分率は極めて大きく、放出後約10yrまでは主として地表面下1 m以内の、それ以降では1 mより深い深層土に吸着されて存在すること、この状況は核種が河川や海洋へ解放される場合でも変わらず、これから、いかなるコンパートメントへ投入される場合でも、自然環境のすべてにわたって核種は分散、蓄積さ

^{90}Sr activity observed in human bones is also shown by dots with error bars.

Fig. 8 Annual intake of radioactive nuclides (dashed lines) and activity retained in human bones (solid lines) both per person as function of time

れて環境汚染をもたらすことが示唆され、自然環境内での核種の大規模循環をコンシステントなモデルで記述することの重要性が認識されよう。

さらに同図で注意すべきは、核種投入後約5 yr以内は主として投入コンパートメントに係る核種移流の時間尺度で核種の分散、蓄積が起こるが、一たび核種が全コンパートメントに行きわたった5 yr以降では、自然界全体としてのゆるやかな時間尺度に従って準平衡状態を保ちつつ、時間とともにゆるやかに核種の存在量が変動することである。

同図(a)での破線は大気層からの核種の降下はあるが、地圏および海洋圏からは大気層へ核種の流れはないとした場合の大気層と海洋での濃度変動である。核種投入後はほぼ2 yr以降では、大気下層部の核種は主として地表面からの核種の再浮遊によって供給されるものであり、さらに上層大気部と下層大気部では平衡条件が成立し、下層大気部を通して地表面核種が上層大気部へ輸送される。一方、核種投入後2 yr以降での海洋部は、下層大気部を通して地殻部の核種が供給されるために汚染されることもこの図から示唆される。

核種の環境循環に関する以上の傾向は他核種の場合についても成立する。しかし、 ^{137}Cs は ^{90}Sr に比して土粒子表面への吸着の度合いは強く、 ^{239}Pu はさらに

^{137}Cs よりも強い。大気下層部へこれらが1 Ciだけパルス状に投入される場合、投入後30 yrにおいて残存する核種のうち、(地殻表面層、地殻深部層、その他)の各コンパートメントに滞留する分率は、 ^{90}Sr で各々(0.149, 0.846, 0.005)、 ^{137}Cs で(0.613, 0.382, 0.005)、 ^{239}Pu では(0.986, 0.012, 0.002)となり、その吸着の強さがうかがわれる。

Fig.10に、大気下層部へ単位放射能量を投入する場合の生物圏への蓄積の様相を示す。投入後はほぼ3 yr以降では、生物体内での核種濃度は環境中でのその時間推移に支配されて変化する。さらに ^{90}Sr の場合、陸上生物中での濃度はほぼ2桁の幅の範囲内に収まり、当モデルでは最高濃度が牛肉に、最低濃度が牛乳に現れる。同図には比較のために牛肉中での ^{137}Cs と $^{239,240}\text{Pu}$ との濃度の時間推移をも示した。Puの場合、呼吸器官を介した体内への取り込み量の摂取量に対する比の値は、他の核種に比して極めて大きい。

またPuの生物学的半減期は 6.5×10^4 yrと長く⁽¹⁸⁾、一たび体内へ蓄積されたPuが体外へ排出される可能性は小さい。核種が大気下層部へ投入された直後の大気層中のPu濃度は高く、この時期の大気を吸入した肉牛はその体内に高濃度のPuが蓄積された状態のまままで生存する。したがって、最初の5 yr(肉牛の飼育

The dashed curves shown in (a) are the values when there exists no recirculation of ^{90}Sr from the geo- and lithospheres to the atmosphere.

Fig. 9 Time-evolution of ^{90}Sr activity retained in each environmental compartments when unit amount (1 Ci) of nuclide is injected into the compartments of (a) lower atmosphere, (b) surface soil, (c) rivers and (d) surrounding ocean, respectively

Fig.10 Status of nuclear pollution in biosphere in case of pulse injection of nuclides by 1 Ci into lower atmosphere

Fig.11 Status of nuclear pollution of human organs with time when 1 Ci of activity is injected into lower atmosphere

成長時間)に得られる牛肉中でのPu濃度は高く、以後のそれは大気中濃度の減衰形状に依存して減衰する。

Fig. 11 に、大気下層部へ1 Ci が投入される場合、任意の時刻において平均住民1人当りの体内に滞留する放射エネルギーを示す。消化器官と肺を除く呼吸器官での核種滞留量は、摂取食物および吸入大気それぞれに含まれる放射エネルギーによって決まる。しかし、当モデルでは核種はすべて水に難溶性の化学形態を持っており、肺やリンパでの核種の生物学的半減期は上述の器官での滞留時間に比して極めて長い。このため、これらの器官での核種滞留量の時間推移は上述の器官のそれとは異なる。

骨に対する生物学的半減期は ^{90}Sr 、 ^{137}Cs 、 ^{240}Pu でそれぞれ 1.8×10^4 、70および 7.3×10^4 yr であり⁽¹⁶⁾、物理的、生物学的半減期の違いが骨中への蓄積量推移形状に違いをもたらす。

Fig. 12 に、 ^{137}Cs 、 ^{240}Pu の場合は(a)へ、 ^{90}Sr の場合は(a)~(d)へ単位投入される場合、平均住民1人当りの全被曝線量率の時間変動を示す。環境から受ける外部被曝はごく初期を除いては極めて小さく、これらの被曝は実質的には内部被曝によるものである。したがっ

て、 ^{90}Sr 、 ^{137}Cs では主として食物摂取を通して、 ^{240}Pu では主として吸気を通しての体内被曝に基づくものである。同一核種の場合でも、例えば ^{90}Sr に見る通り、投入コンパートメントの違いにより食物汚染の時間推移は異なり、この結果、被曝線量率の時間変動は著しく異なった形状を持つ。

一般に、汚染源から核種が複数のコンパートメントへ向けて任意の量だけ解放される場合、上述の単位投入条件の結果を組み合わせる用いることにより、環境や生物圏に対する核種放出の影響を評価することができる。

IV. 結 論

第II章で示したシステムダイナミクスモデルによれば、自然界における物質の大規模循環から考慮領域内に居住する住民の体内諸器官の汚染状況に至るまでの諸過程を矛盾なく記述し、放射性核種の挙動を把握することができる。考慮領域内での物質の概略的な流動状況と媒体内での物質滞留量の時間変動を記述するためには、この種のモデルは簡単かつ適切なものであるといえる。また、媒体内での物質移動速度定数を適

Fig.12 Time-evolution of total dose rate per person when activity is injected into environmental compartments 3, 5, 13 or 16 by amount of 1 Ci

切に選択すれば定量的議論が可能となる。

前章では汚染物質として放射性核種を考慮した。しかし、一般にこの種のモデルはデータの変更により任意の化学物質についての環境循環と生体汚染を取り扱うことが可能であり、これにより、例えば大気中に放出される塩化物や硫化物等の有害気体の広域環境拡散、有機物や重金属による環境汚染、およびこれに伴う人体汚染等の諸問題の解明にも有用となろう。環境汚染の決定論的評価以外に、当モデルにより、化学物質の人体汚染に関して、環境圏、生物圏のいかなる素過程が各々いかなる程度の影響を及ぼし得るのか推計学的取扱いも可能であり、これにより注目する化学物質の移行に関するクリティカルパスも決定し得よう。

当モデルは大気層を2層、海洋を1層で近似して記述した。しかし、大気圏、海洋圏ともに媒体の流動状況が鉛直方向の推移とともに大きく変化する事実を考慮すれば、本報におけるこれらの媒体の分割は極めて粗く、モデルから導出した大気圏、海洋圏における汚染物質濃度が実際の観測値を代表するものではない可能性は大きい。したがって、この種のモデルでは今後、対流圏、海洋圏を鉛直方向に複数個のコンパート

メントに分割することが必要となろう。同様に、大気および海洋が水平方向にも不均一な速度で運動する事実や、地理学的な不均一性にも注意すれば、全世界を考慮領域とそれ以外の領域に2分するモデルの近似度は良くなく、予測精度向上のためには水平方向にも多領域化することが必要となる。採用したいくつかの仮定の任意性をも合わせて考慮すれば、当モデルは“粗い分解能”を持ったシミュレーションモデルであるといえる。

【記号】

C : 湿性沈着に係る定数係数	[1/L]
d_a : 有効堆積土深さ	[L]
h : 対流圏界面高度	[L]
L : 乾性沈着に対する有効大気高さ	[L]
R : 降雨率	[L/T]
S_a : 表面土中での間隙水飽和度	
S : 考慮領域表面積	[L ²]
v_d : 乾性沈着コロイドの沈降速度	[L/T]
$\langle v_i \rangle_{i,j}$: 成層圏での i から j への年平均風速	[L/T]
$\langle v_i \rangle_{i,j}$: 対流圏での i から j への年平均風速	[L/T]

—参考文献—

- (1) OTIS, M.D.: DOE/NV/10057-4, (1983); WHICKER, F.W., KIRCHNER, T.B.: DOE/NV/10057-1, (1986).
- (2) BAES, C.F. II, *et al.*: ORNL-5785; 5786, (1984).
- (3) KOPLIK, C.M., *et al.*: SAND-83-7104, (1984).
- (4) KILLOUGH, G. G., DUNNING, D. E., Jr., PLEASANT, J.C.: NUREG/CR-0114, (1978).
- (5) WATSON, S.B., SNYDER, W.S., FORD, M.R.: ORNL/CSD/TM-17, (1976).
- (6) MOORE, R.E., *et al.*: ORNL-5532, (1979).
- (7) FLETCHER, J.F., DOTSON, W.L.: HEDL-TME-71-168, (1971).
- (8) NAPIER, B.A., KENNEDY, W.E., Jr., SOLDAT, J.K.: PNL-3209, (1980).
- (9) PATTERSON, M.R.: CONF-860139-1, (1986).
- (10) ZACH, R.: AECL-6305, (1978); LAURENS, J.M.: AECL-8645, (1985).
- (11) McDOWELL-BOYER, L.M., HETRICK, D.M.: ORNL/TM-8334, (1982).
- (12) 加藤正平, 藪田 肇: 原子力誌, 28(4), 344 (1986).
- (13) 竹内 均, 長谷川洋作: “地球生態学”, (1984), 講談社学術文庫.
- (14) ZACH, R.: AECL-6828, (1982).
- (15) ICRP Task Group on Lung Dynamics: *Health Phys.*, 12, 173 (1966); ICRP Publ. 30, Suppl. to Pt. 1, *Ann. ICRP.*, 3, 555 (1979).
- (16) ICRP Publ. 2, (1960), Pergamon Press, Oxford.
- (17) RUPP, E.M.: *Health Phys.*, 39, 151 (1980).
- (18) DUNNING, D. E., KILLOUGH, G. G.: *Radiat. Prot. Dos.*, 1, 3(1981); KOCHER, D.C.: *Health Phys.*, 45, 665 (1983).

- ⑩ PETERSON, K.R.: *Health Phys.*, **18**, 357 (1970).
 ⑪ CARTER, M.W., MOGHISSI, A.A.: *ibid.*, **33**, 55 (1977).
 ⑫ 佐伯誠道(編): "環境放射能", (1984), ソフトサイエンス社.
 ⑬ BROYLES, A.A.: *Am. J. Phys.*, **54**, 151 (1986).
 ⑭ KATSURAGI, Y., AOYAMA, M.: *Pap. Meteor. Geophys.*, **37**, 15 (1986);
 葛城幸雄: 放射線科学, **29**, 2 (1986).
 ⑮ NAGAYA, Y., NAKAMURA, K.: *J. Oceanogr. Soc. Jpn.*, **40**, 416 (1984).
 ⑯ 森澤眞輔, 他: 原子力誌, **27**(7), 643 (1985).
 ⑰ SIMPSON, R.E., et al.: *Health Phys.*, **40**, 529 (1981).
 STROUBE, W.B., Jr., JELINER, C.F., BARATTA, E.J.: *ibid.*, **49**, 731 (1985).
 ⑱ 東京天文台(編): "理科年表(昭61)", (1985), 丸善.
 ⑲ "第34回日本統計年鑑", (1984), 総務庁統計局.
 ⑳ COHEN, B.L.: *Health Phys.*, **47**, 281 (1984).
 ㉑ SEHMEI, G.A.: *Atom. Environ.*, **14**, 983 (1980).
 ㉒ 高橋幹二: "応用エアロゾル工学", (1984), 養賢堂.
 ㉓ MACHTA, L.: "The Changing Chemistry of the Ocean, Nobel Symp.", (DYRESSEN, D., et al. ed.), p. 121 (1972), Almqvist and Wicksell.
 ㉔ HICKMAN, J.W.: *NUREG/CR-2300-V 2*, (1983).
 ㉕ 例えば, BELL, M.J.: *ORNL-4626*, Sec. 2, (1973).

投 稿 歓 迎!

(1987.1.一部改正)

本会「和文誌」投稿欄の種別は、次のとおりです。(* 欧文は「欧文誌」に掲載)

◆掲載料は1編5ページ以内は1ページにつき5,000円; 6~10ページは1ページにつき10,000円;
 11ページ以上は1ページにつき15,000円でありますので、ご了承願います。◆

- ① 研究論文* 研究の対象・方法あるいは結果に独創性・創造性があり、かつ明確で価値ある結論や事実を含み、他の学術的刊行物に公表(投稿準備中のものを含む)されていないもの。
 - ② 技術報告* 材料の製作・施設・設備・装置等の設計・試験・運転などの新しい経験やその結果をまとめた実用価値のある技術的報告で、他の学術的刊行物に公表(投稿準備中のものを含む)されていないもの。(「本誌」, **24**(1), 86(1982)を参照)
 - ③ 資料* 研究・技術に関する参考資料または調査集計報告など。
 - ④ ショート・ノート*(3頁以内) 研究・技術上の独創的かつ重要な発見または結論を含む論文の速報。
 - ⑤ レター*(1~2頁) 掲載論文に対する質疑応答または意見。
 - ⑥ 私のノートから*(2頁以内) 各専門分野の研究または技術上の経験、斬新なアイディア、珍しい実験結果など。(掲載料不要)
- ⑤⑥は「欧文誌」では Letter to the Editor
- ⑦ 談話室(2頁以内) トピックスの紹介・随想・時評・論説・海外滞在記など。(同上)
 - ⑧ 国際会議の窓(〃) 内外の会議・学会の報告・見聞・印象、および開催案内。(同上)
 - ⑨ 会員のこえ(約0.5頁) 本会または「本誌」に対する希望・意見などの自由投書。
(用紙自由、誌上匿名可)。(同上)
 - ⑩ 新刊紹介(約0.5頁) 会員の役に立ち、興味のあると思われる内外の出版物の書評および紹介。(同上)

巻頭言、特別寄稿、解説、講演、特集、総説、総合報告、等は編集委員会で立案・企画する。

ご投稿には、「投稿規程」・「投稿の手引」に従って、所定の原稿用紙(30枚綴り1冊200円, 千240円; 欧文は市販タイプ用紙(ワープロ可)), 「投稿票」(付チェックリスト)に記入して事務局宛ご送付下さい。

なお、「投稿規程」および「投稿票」中の専門分野の「分類項目」は'87年3月に一部改定されましたので、ご留意願います。