II－55　　水産生物による放射性核種の濃縮過程に関する確率論的考察

京都大学工学部　正員　井上頼輝
〃　　〃　青山 勲
〃　学生員 ○山本正史

昨年の土木学会第26回年次学術講演会において，筆者らは，水産生物による放射性核種の濃縮過程の動力学的機構の一般的な把握として，確率過程の一つである出生死滅過程を適用することにより，体内濃度の分布の経時変化を予測できることを示した。今回は，昨年の考察に加えて放射性核種の間接的な摂取いわゆる食物連鎖の過程を経て水産生物の体内に濃縮される場合についての理論的考察を加えると共に，放射性核種をトレーサーとして環境水中の放射性核種の濃度が指数的に減少する場合についての実験的検討を行なった。

1. 理論的検討

確率変数を $Y(t)\{Y=0,1,2,\cdots,i,\cdots\}$ とし，微小時間 Δt の間の推移確率が図1で与えられるとし，ある時刻 t において $Y(t)=i$ である確率を $P_i(t)$ とすると，次の出生死滅過程の基礎方程式が導ける。

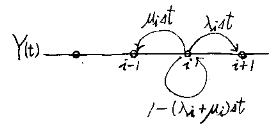

図1　推移確率

$$\frac{dP_i(t)}{dt}=\lambda_{i-1}P_{i-1}(t)-(\lambda_i+\mu_i)P_i(t)+\mu_{i+1}P_{i+1}(t) \quad \text{--------(1)}$$

これを水産生物による放射性核種の濃縮過程に適用するために，水産生物体内の放射性核種の濃度を適当な分割巾 h で区切り，順番に濃縮段階 $0,1,2,\cdots,i,\cdots$ とし，前述の確率変数 $Y(t)$ に対応させる。これを図2に示す。また，λ_i，μ_i はそれぞれ水産生物の放射性核種摂取，排泄速度を分割巾 h で割ったものに等しいと考えることができるから，環境水からの直接濃縮の場合，それぞれ次式で表わされる。

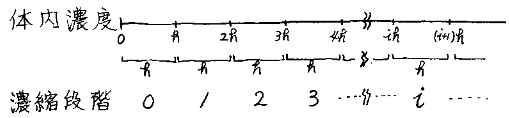

図2　濃縮段階の概念

$$\lambda_i=\frac{{}^1k_{01}x_0(t)}{h_1} \quad \text{--------(2)}$$

$$\mu_i=i({}^2k_1+\beta) \quad \text{--------(3)}$$

ここで，$x_0(t)$ は放射性核種の水中濃度，${}^1k_{01}$，${}^2k_1$ はそれぞれ放射性核種の直接摂取速度定数，排泄速度定数，β は物理的崩壊定数，h_1 は分割巾である。

λ_i，μ_i を(2)，(3)式で与え，初期条件を $P_0(0)=1$ とし，$x_0(t)=C_0$（定数）とした場合(1)式の解は，

$$P_i(t)=\frac{\{m(t)\}^i}{i!}\exp\{-m(t)\}, \quad m(t)=\frac{{}^1k_{01}C_0}{h_1({}^2k_1+\beta)}\left\{1-e^{-({}^2k_1+\beta)t}\right\} \quad \text{----------(4)}$$

次に，直接濃縮に加えてこのような体内濃度の分布を持つ生物 X_1 を捕食することによっても放射性核種を体内に濃縮する食物連鎖のより上位に位置する水産生物 X_2 について考察を加える。上記の理論がそのまま適用できて，λ_i，μ_i はそれぞれ次のようになる。

$$\lambda_i=\frac{{}^1k_{02}x_0(t)+{}^1k_{12}\sum_{i=0}^{\infty}h_1 i P_i(t)}{h_2} \quad \text{-------(5)} \qquad \mu_i=i({}^2k_2+\beta) \quad \text{-------(6)}$$

ここで，${}^1k_{02}$，${}^1k_{12}$ はそれぞれ直接摂取速度定数，間接摂取速度定数，h_1，h_2 は水産生物 X_1，X_2

の体内濃度の分割巾，${}^{2}k_2$は水産生物X_2の排泄速度定数である。分割巾h_1の間では水産生物X_1の体内放射性核種濃度は均一に分布しているとすれば(5)式は次のようになる。

$$\lambda_i = \frac{1}{h_2}\left\{ {}^{1}k_{02}\,x_0(t) + {}^{1}k_{12}\,x_1(t) \right\} \quad \text{-----------} (7)$$

ここで，$x_1(t)$は水産生物X_1の体内核種濃度の平均値である。

μ_i，λ_iを(6),(7)式で与え，$x_0(t)=C_0$，$P_0(0)=1$の場合について(1)式を解いた結果は次式となる。

$$\left.\begin{aligned} P_i(t) &= \frac{\{m(t)\}^i}{i!}\exp\{-m(t)\} \\ m(t) &= \frac{{}^{1}k_{01}\,{}^{1}k_{12}\,C_0\,e^{-\beta t}}{h_2({}^{2}k_1+\beta)({}^{2}k_2+\beta)}\left\{ e^{\beta t} + \frac{({}^{2}k_2+\beta)e^{-{}^{2}k_1 t} - ({}^{2}k_1+\beta)e^{-{}^{2}k_2 t}}{{}^{2}k_1 - {}^{2}k_2} \right\} + \frac{{}^{1}k_{02}\,C_0}{h_2({}^{2}k_2+\beta)}\left\{ 1 - e^{-({}^{2}k_2+\beta)t} \right\} \end{aligned}\right] \text{-------} (8)$$

(4)，(8)のいずれの場合も体内濃度の分布は$m(t)$を母数とするポアッソン分布となり，$m(t)$は，水産生物による放射性核種の濃縮過程にコンパートメントモデル(指数関数モデル)を適用して得られた解析解を分割巾h_1, h_2で割ったものと等しい。この関係は，環境水濃度$x_0(t)$が$x_0(t)=at$と直線的増加を示す場合，$x_0(t)=C_0e^{-(\lambda+\beta)t}$と指数的に減少する場合にも成立する。なお，よく知られているようにポアッソン分布の平均と分散は共にその母数に等しい。従って，これらの関係を利用すれば，コンパートメントモデルのパラメータと，適当な分割巾を与えれば，水産生物の体内濃度の分布の経日変化を予測できることになる。

2. 実験的検討

上述の理論の妥当性を検討するために，試料生物として赤めだかを，トレーサー核種として^{137}Cs, ^{60}Coを用いて，核種の直接濃縮の場合について，環境水中の核種濃度が指数的に減少する場合について実験を行なった。有効容積約48 lの透明アクリル製水槽に水道水を満たし，ついで放射性核種および赤めだかを投入し，実験開始と同時に放射性核種を含まない水道水を一定の流入率で流入させ，流入量と等しい量をオーバーフローさせることにより水中濃度を指数的に減少させた。ある期間ごとにサンプリングを行ない，1回のサンプリングで100匹の赤めだかをとり，各個体ごとに体重，放射能強度を測定しその体内濃度を求めた。なお，トレーサー核種はいずれも塩化物を用いたが^{60}Coの1部はラジオコロイドを形成していたと思われる。また，実験期間中を通じて餌の投与は行なわなかった。

3. 実験結果および考察

表1に実験から得た濃縮段階の平均値および分散と，理論計算から得たポアッソン分布の母数の経日変化を示す。体内濃度の分割巾h_1は，放射崩壊の統計的な変動を考慮して，その影響を無視し得るに十分なだけの値にした。実験値と理論値は大むね一致しており，上述の確率論的モデルは，水産生物による放射性核種の濃縮過程一般の理論的モデルとして有効であると考えられる。

^{137}Cs ; h_1 = 800 cpm/g				^{60}Co ; h_1 = 100 cpm/g			
日	平均	分散	理論値	日	平均	分散	理論値
5	2.4	3.6	2.2	2	1.1	1.5	1.6
10	2.7	2.2	3.1	5	2.3	2.6	2.6
15	3.3	4.0	3.8	10	3.2	5.2	3.1
20	3.9	4.8	4.1	15	3.4	7.4	3.3
25	3.9	4.6	4.2	20	3.4	4.5	3.5
35	3.9	3.7	4.2	25	3.9	7.4	3.7
45	3.8	4.4	4.0				
60	3.3	2.2	3.6				

表1　理論値と実験値の比較

参考文献 : 魚返 正「確率論」 朝倉書店 (1968)