

II-232 水圏生態系における食物連鎖による放射性汚染の推定と評価

京都大学工学部 正員 井上頼輝, 正員 青山 繁
東京電力 正員 吉川 進, 京都大学工学部 学升面光司

I. はじめに

原子力産業の進展とともに、放射性廃棄物量が増大し、その最終処分法の確立が緊急の課題となりつつある。この放射性廃棄物の一部は環境水系に移行し、水圏生態系を通じて、最終的には人間に還元される。本研究は、この過程を定量的に把握することを目的としている。

環境水中に導入された放射性核種が生物に移行する経路は、大別して放射性核種をえら膜や体表を通じて生体内にとり込む直接汚染と、汚染生物を水産生物が経口的に摂取することによって核種をとる間接汚染とがある。水産生物による放射性核種の濃縮パターンは、直接汚染の場合、平均的に指数関数モデルによって近似的に表現される。間接汚染、あるいは食物連鎖による影響については、まだ十分な研究成果が報告されていないが、本研究では、摂餌速度定数の概念を導入して、この場合にも指数関数モデルを適用し、実験的にモデルの妥当性の検討を行い、種々の速度定数の値について数値計算を行なった。

II. 解析法

水圏生態系における食物連鎖は、極めて複雑な様相を呈しているのがあるが、図-1のような簡単なCompartment Model について考える。すなわち、餌料生物は k_{12} (1/d) の摂取速度で環境水中から核種を取り込み、 k_{22} の速度で排泄する。また捕食生物 j は k_{ij} の速度で環境水から取り込み、 k_{jj} の速度で排泄する。この捕食生物が餌料生物を摂餌することによって取り込む物質の速度式は、

$$\frac{dx_j}{dt} = k_{ij} x_i \dots (1) \quad M_j \frac{dx_j}{dt} = \theta (M_i x_i) \dots (2)$$

ここで、 x_i : 餌料生物の放射性濃度、 x_j : 捕食生物の放射性濃度、 M_i : 餌料生物の重量

M_j : 捕食生物の重量、 θ : 同化率 [= (全摂取量 - 排泄量) / (全摂取量)]

(1), (2) 式から $k_{ij} = \theta M_i / M_j \dots (3)$ で定義される比例定数を摂餌速度定数とする。これらのことから図-1に示される水圏生態系において、放射性核種の移行速度を表わすシステム方程式は次のようになる。

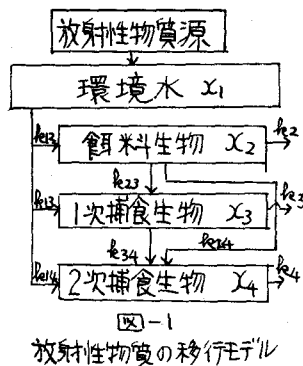
$$x_1 = x_1(t) \dots (4) \quad \frac{dx_j}{dt} = \sum_{i=1}^{j-1} k_{ij} x_i - (k_{jj} + \lambda) x_j \quad (j=2, 3, 4) \dots (5)$$

(λ は崩壊定数 1/d)

$x_1 = \text{Const}$ の場合について、初期条件 $x_2 = x_3 = x_4 = 0$ のもとでの解の一例を次に示す。

$$x_4 = k_{12} k_{23} k_{34} \left\{ \frac{1}{\alpha \beta \Gamma} - \frac{e^{-\alpha t}}{\alpha(\beta - \alpha)(\Gamma - \alpha)} - \frac{e^{-\beta t}}{\beta(\alpha - \beta)(\Gamma - \beta)} - \frac{e^{-\Gamma t}}{\Gamma(\alpha - \Gamma)(\beta - \Gamma)} \right\} + \frac{k_{14}}{\Gamma} (1 - e^{-\Gamma t}) x_1$$

$$+ k_{13} k_{34} \left\{ \frac{1}{\beta \Gamma} + \frac{e^{-\beta t}}{\beta(\beta - \Gamma)} - \frac{e^{-\Gamma t}}{\Gamma(\beta - \Gamma)} \right\} x_1 + k_{12} k_{24} \left\{ \frac{1}{\alpha \Gamma} + \frac{e^{-\alpha t}}{\alpha(\alpha - \Gamma)} - \frac{e^{-\Gamma t}}{\Gamma(\alpha - \Gamma)} \right\} x_1 \dots (6)$$



(6)式のパラメータは、ある程度の誤差を含んだものであり、不確定性の強いものである。このような場合、システムパラメータの変動によって、システムの状態変数などのような変動を受けるが、すなわちシステムの構造安定性を知ることは、生物の放射能汚染を評価する上に重要な問題である。これを知るために感度解析を行う。今第 m 番目のCompartment $S_m^n = \frac{\partial X_m}{\partial k_{ij}} = \frac{\partial X_m}{\partial k_{ij}} \cdot \frac{k_{ij}}{X_m} \dots (7)$ の状態変数 X_m の、パラメータ k_{ij} に対する感度は(7)式で表わされる。ここで $\frac{\partial X_m}{\partial k_{ij}}$ は感度係数 $\sigma_{k_{ij}}^m$ と呼ばれるもので、この感度係数を用いることによってパラメータ k_{ij} の変動による状態変数 X_m の時刻 t における変動量は $\Delta X_m = \sigma_{k_{ij}}^m(t) \Delta k_{ij}$ によって与えられる。 X_4 に対する感度係数の一例を次に示す。

$$\frac{\partial X_4}{\partial k_{44}} = X_4 \left(\frac{1}{r} - \frac{e^{-rt}}{r} \right) \dots (8) \quad \frac{\partial X_4}{\partial k_{34}} = k_{12} k_{23} X_1 \left\{ \frac{1}{\alpha \beta r} - \frac{e^{-\alpha t}}{\alpha(\alpha-\beta)(\alpha-r)} + \frac{e^{-\beta t}}{\beta(\alpha-\beta)(\beta-r)} - \frac{e^{-rt}}{r(\alpha-r)(\beta-r)} \right\} + k_{13} X_1 \left\{ \frac{1}{\beta r} + \frac{e^{-\beta t}}{\beta(\beta-r)} - \frac{e^{-rt}}{r(\beta-r)} \right\} \dots (9)$$

III. 実験法

はじめに述べた摂餌速度定数の意義を明らかにするために餌料生物として赤めだかを、1次捕食生物として淡水魚オセレータスを水槽内それぞれ別々に飼育した。トレーサとして ^{137}Cs 、 ^{60}Co を用いて、前者は環境水濃度を一定にして、後者は環境水濃度が指数的に減少する場合を想定して実験を行なった。捕食生物の直接汚染と食物連鎖による間接汚染とを比較するために、一オの捕食者群には直接汚染を受けた放射性的餌を、他オの群には汚染を受けない非放射性的餌を毎日定量ずつ与えた。試料生物はサンプリング後、水道水で水洗し、麻醉薬で眠らせ、その間に生体重量、放射能強度を測定した後、もとの水槽に戻した。捕食生物にはこの後、睡眠からさめるのを待って餌を与えた。

IV. 実験および数値計算結果と考察

摂餌速度定数の概念を導入することにより実験によって、食物連鎖の影響を評価できることがほぼ確認された。(6)式の計算結果の一例を図2、図3に示す。

一般に食物連鎖によって捕食生物は濃縮性が高くなる。餌料生物の濃縮性が高い場合には、その影響も著しく高くなることが予想される。(図3)。摂餌速度定数は(2)式から、同化率と一日の摂餌料によって変化するが、同一生物についての同化率は、同一機種について、ほぼ一定と考えられるので、実際に生物が生育する環境の餌料密度、餌料分布によって影響を受けると考えられる。

実験結果の詳細については講義時に述べた。

