

兵庫県下を事例とした環境循環モデルによるダイオキシンのリスクアセスメント

松本大輔、近藤明、加賀昭和、井上義雄（大阪大学）

鶴川正寛（兵庫県）、董玉瑛（大阪大学）

1. 背景

近年、化学物質による環境汚染が注目されるようになってきた。これらの化学物質は発生源から環境中に排出された後、大気・水・土壌など様々な媒体中を經由して人体の健康に影響を与えている。従って、単一媒体中だけでなく多媒体（multimedia）中における化学物質の挙動を明らかにし人体への影響を正しく推測し、人体への暴露を見積もることが必要となってきた。

2. 目的

本研究では有毒化学物質の一つであるダイオキシン（PCDD/Fs）に注目し、環境中の各媒体でどのような挙動をし、どのように存在するかについてモデルを構築し、暴露による人体影響についてのリスクアセスメントを行うことを目的として研究を行った。

3. 方法

3.1 Multimedia Modelの基礎式

（各媒体中、媒体間の挙動）

3.1.1 大気に関する式

・大気中での移流、発生、消滅

$$Q_{\text{大気}} * (C_{\text{流入大気}} - C_{\text{大気}}) + G_{\text{大気+粒子}} * S_{\text{大気}} - (K_{\text{大気}} * C_{\text{大気}} + K_{\text{粒子}} * C_{\text{粒子}}) * V_{\text{大気}}$$

・大気 - 粒子間の平衡

$$C_{\text{大気}} = H_{\text{大気-粒子}} * C_{\text{粒子}}$$

・大気 - 土壌間の物質の移動

$$K_{\text{大気-土壌}} * (C_{\text{大気}} - H_{\text{大気-土壌}} * C_{\text{土壌}}) * S_{\text{土壌}}$$

・大気 - 水間の物質の移動

$$K_{\text{大気-水}} * (C_{\text{大気}} - H_{\text{大気-水}} * C_{\text{水}}) * S_{\text{水域}}$$

・沈着の式（大気粒子、SS）

$$C * V_{\text{dd}} * S$$

3.1.2 土壌に関する式

・土壌での発生と消滅

$$G_{\text{土壌}} * S_{\text{土壌}} - K_{\text{土壌}} * C_{\text{土壌}} * V_{\text{土壌}}$$

・土壌からの巻上げ

$$C_{\text{土壌}} * V_{\text{単位面積当たりの巻上量}} * S_{\text{土壌}}$$

・土壌 - 地下水間の物質の移動

$$K_{\text{土壌-地下水}} * (C_{\text{土壌}} - H_{\text{土壌-地下水}} * C_{\text{水域}}) * S_{\text{土壌}}$$

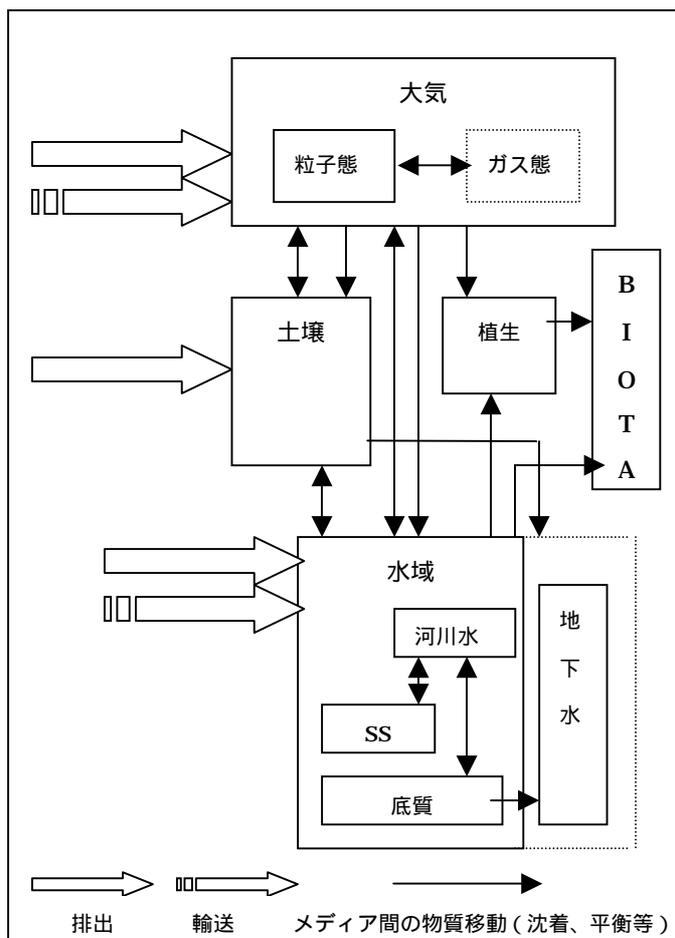


図1. モデルの構造

• Run Off

$C_{\text{土壌}} * V_{\text{土壌のRun Off}} * L_{\text{水域}}$

• 植生による吸収

$K_{\text{土壌-植生}} * C_{\text{土壌}} * V_{\text{植生}}$

• 植生での消滅

$K_{\text{植生}} * C_{\text{植生}} * V_{\text{植生}}$

3.1.3 水域に関する式

• 水域での移流、発生、消滅

$Q_{\text{水}} * (C_{\text{水流入}} - C_{\text{水}}) + G_{\text{水}} * S_{\text{水}} - K_{\text{水}} * C_{\text{水}} * V_{\text{水域}}$

• 水 - SS 間の平衡

$C_{\text{水}} = H_{\text{水}} * C_{\text{SS}}$

• 水 - 底質間の物質の移動

$K_{\text{水-底質}} * (C_{\text{水}} - H_{\text{水}} * C_{\text{底質}}) * S_{\text{水}}$

• 地下水での消滅

$K_{\text{地下水}} * C_{\text{地下水}} * V_{\text{地下水}}$

3.2 人体健康へのリスク評価

3.2.1 人体暴露

環境へ排出されたダイオキシンは媒体中を移動して様々な経路から人体に暴露される。主な人体への暴露経路は以下の三つが考えられる。

呼吸によるガス、粒子状のダイオキシン汚染物質の吸入（直接暴露）

皮膚からの吸収（直接暴露）

食品、飲料水からの摂取（間接暴露）

3.2.2 人体健康へのリスク評価

• TEQ（毒性等量）

ダイオキシンの各同族体の量に TEF（毒性等価係数）を乗じた値の総和。TEF は個々の同族体の毒性強度を、最も毒性が強いとされる 2,3,7,8 - TCDD の毒性を 1 として表した値。

• TDI（耐容一日摂取量）

TDI（耐容一日摂取量）は人が一生涯にわたり摂取しても健康に対する有害の影響は現れないと判断される一日あたりの摂取量である。ダイオキシンのように蓄積性高い物質は体内負荷量に着目して、動物での体内負荷量を試験で求め、人の場合どの程度の量を継続的に摂取すればその体内負荷量に達するかを求めることが適切である。そこでまず体内負荷量から一日摂取量を算定されている¹⁾。WHO の専門家会合で採用された人一日摂取量の計算式は

人一日摂取量 (pg TEQ/kg/日)

= 体内負荷量 (86ng TEQ/kg) * ln 2 / 半減期 (7.5 年) / 吸収率 (50%)

であり、この計算結果 (43.6 pg TEQ/kg/日) を不確実係数 10 で割り TDI = 1 ~ 4 pg TEQ/kg/日を算定する。

記号の説明

$V_{\text{大気}}, V_{\text{水域}}, V_{\text{地下水}}, V_{\text{土壌}}, V_{\text{植生}}, V_{\text{粒子}}$: 各メディアの体積 (m³)

$S_{\text{大気}}, S_{\text{粒子}}, S_{\text{土壌}}, S_{\text{水}}$: 表面積 (m²)

$Q_{\text{大気}}, Q_{\text{水}}$: 流入量 (m³/s), $L_{\text{水域}}$: 長さ (m)

$G_{\text{大気}}, G_{\text{粒子}}, G_{\text{土壌}}, G_{\text{水}}$: 発生量 (g mol-TEQ/m²/s)

$C_{\text{大気}}, C_{\text{流入大気}}$: 物質濃度 (pg mol-TEQ/m³)

$C_{\text{粒子}}, C_{\text{植生}}, C_{\text{土壌}}, C_{\text{SS}}, C_{\text{底質}}$: 物質濃度 (g mol-TEQ/g),

$C_{\text{水}}, C_{\text{水流入}}, C_{\text{地下水}}$: 物質濃度 (g mol-TEQ/L)

V_{dd} : 沈降速度 (m/s), $V_{\text{土壌のRun Off}}$: 土壌の RunOff 割合 (m²/s)

$K_{\text{大気}}, K_{\text{粒子}}, K_{\text{土壌}}, K_{\text{植生}}, K_{\text{水}}, K_{\text{地下水}}$: 物質分解速度 (1/s)

$K_{\text{大気-粒子}}, K_{\text{大気-土壌}}, K_{\text{大気-水}}, K_{\text{土壌-植生}}, K_{\text{水-SS}}, K_{\text{水-底質}},$

$K_{\text{土壌-地下水}}$: 物質移動速度 (m/s)

$H_{\text{水-SS}}, H_{\text{水-底質}}, H_{\text{大気-粒子}}, H_{\text{ガス-土壌}}, H_{\text{ガス-水}}$

$H_{\text{土壌-地下水}}$: 分配係数 ()

・各暴露経路からの一日摂取量の算定（大人一人当たり）

経口摂取による大気、土壌中のダイオキシン汚染物質の暴露（直接暴露）

摂取量 (pg TEQ/day) = 呼吸量 (15m³/day) × 大気濃度 (pgTEQ/m³) × 吸収率 (75%)

+1日当たりの土壌摂取量(0.1g/day) × 土壌濃度(pg TEQ/g) × 吸収率(25%)

土壌粒子の皮膚接触からの暴露（直接暴露）

摂取量 (pg TEQ/day) = 皮膚面積当たりの土壌接触量(0.5mg/cm²/day) × 暴露皮膚面積(5000cm²)

× 土壌濃度 (pg TEQ/g) × ダイオキシンの吸収率 (1%) × 暴露頻度 (0.17)

食品、飲料水からの暴露（バックグラウンド汚染による暴露）

摂取量 (pg TEQ/day) = 食品・飲料水中の濃度 (pg TEQ/g) × 食品・飲料水の一摂取量 (g/day)

× 吸収率 (50%)

・リスクの算定

本研究では TDI と一日人体暴露量算定値の比を用いてリスク評価を行った。

図2．加古川流域圏の地図

4．ケーススタディ

4.1 対象地域

兵庫県加古川流域圏、58 km × 66 kmの地域（図2）

東経 134 度 46 分～135 度 24 分

北緯 34 度 42 分～35 度 18 分

4.2 対象期間

1960 年～2000 年

4.3 排出量の算定

・大気

大気への主な排出源は焼却炉である。そこで対象地域内の焼却炉を大気への発生源として各施設での排ガス中のダイオキシン濃度を元に算定した。（表1）計算式、計算結果は下に示すとおりである。

発生量 = (各施設からの排ガス中の濃度 pg TEQ/m³) × (排ガス量 m³/s) × (稼働時間 s/year)



発生源	産業廃棄物焼却炉	一般廃棄物焼却炉	その他・不明	合計
施設数	173 施設	43 施設	8 施設	224 施設
排出量 (pg TEQ/s)	319.7 × 10 ³	88.3 × 10 ³	32.2 × 10 ³	440.2 × 10 ³

表1．大気への発生源

・土壌

土壌への直接の排出源としては産廃の不法投棄と農薬からの排出が考えられる。不法投棄に関しては算定が難しいので農薬からの排出に注目した。農薬の使用量と農薬中のダイオキシン濃度を元に推定を行った。

・水域

水域への直接の排出は焼却炉等の施設からの汚水の排出が考えられる。施設種類別の大気と水域へのダイオキシン排出量全国値の比を用いて各施設からの大気への排出に乗じて算定した。

・排出量の経年値

1960年～2000年までの大気、土壌へのダイオキシンの排出量を推定した。(図3, 4)



図3. ダイオキシンの大気への排出

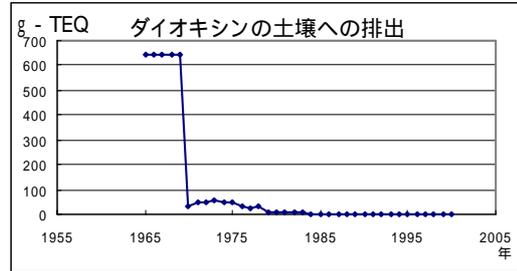


図4. ダイオキシンの土壌への排出

5. 結果

5.1 経年のシミュレーション結果について(図5, 6)

経年シミュレーションの結果を図5, 6に示した。1960年～2000年の変動は各メディアのうち、ガス、土壌、水、SSにおいては1960年の値を100%とした場合0～200%の間にあったが、粒子、地下水、底質、Biotaにおいては0～2000%と大変大きく変化した。

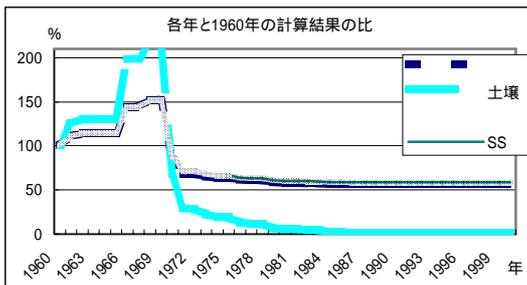


図5. 経年のシミュレーション結果

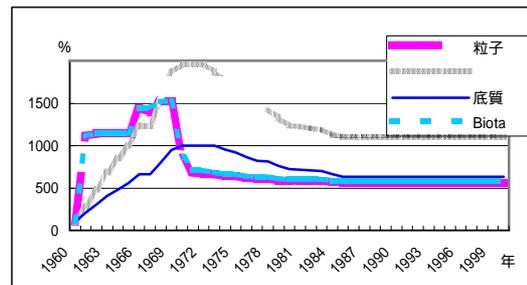


図6. 経年のシミュレーション結果

5.2 一日摂取量の算定結果

環境濃度をもとに一日摂取量を算定した。(図7) 食品からの摂取については食品中のダイオキシン濃度の経年データが見つからなかったため平成10年トータルダイエツトスタディの平均値を使用した。結果は環境省の定めたTDI(1～4 pg-TEQ/kg/day)より一桁程度小さい値となった。

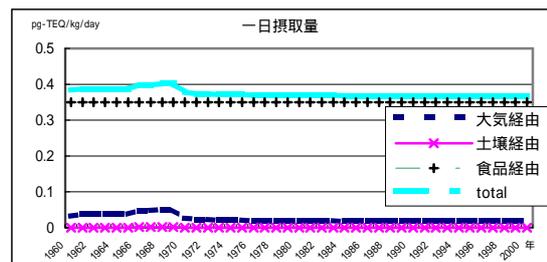


図7. 一日摂取量

6. まとめ

モデルの構築はほぼ完成したがまだ細かいパラメーターの設定などについては改善点がある。また今回は単一コンパートメントとしてシミュレーションを行ったが、今後は細かいメッシュに分割してより精密なシミュレーションを行う必要がある。

7. 参考文献

- 1) 中央環境審議会環境保健部会：ダイオキシンの耐容一日摂取量(TDI)について(平成11年6月)
- 2) 中央環境審議会大気部会：大気の汚染に係わるダイオキシン類環境基準専門委員会報告(平成11年10月)
- 3) 公害防止の技術と法規編集委員会：公害防止の技術と法規〔ダイオキシン編〕, 丸善,(平成12年8月10日)