

東京湾における環境汚染物質海底堆積モデルの検討

CONCENTRATION ANALYSIS OF DIOXINS IN TOKYO BAY BY SEAWATER-BOTTOM SEDIMENT INTERACTION MODEL

今野聡¹・中村倫明²・和田明³

Satoshi IMANO, Tomoaki NAKAMURA, Akira WADA,

¹日本大学大学院総合科学研究科 (〒102-8251 東京都千代田区五番町12-5)

²学生会員 日本大学大学院総合科学研究科 (〒102-8251 東京都千代田区五番町12-5)

³正会員 工博 日本大学大学院総合科学研究科 (〒102-8251 東京都千代田区五番町12-5)

Object of this study is to predict distribution of dioxins deposited on the bottom of Tokyo Bay by means of a 3-dimensional flow model (a Hybrid Box Model) linked with a diffusion model.

On the basis of the load fluxes from rivers, the distribution of concentration in seawater and mass of dioxins sedimentation to the bottom of the bay were calculated by the models.

Results were compared to the published observation data in order to examine applicability of the used models. Estimated dioxins concentrations in the sediment show good agreement with the observed data.

From the analyses, it was estimated that 50.82% of the dioxins inflow into the bay is deposited onto the bottom, and that 48.10% flow out of the bay. Dioxins sedimentation is greater in the inner and middle parts of the bay, and decreases in the direction toward the bay entrance.

Key Words : deposited dioxins, Tokyo Bay, hybrid box model, diffusion analysis

1. はじめに

ダイオキシンはゴミの焼却や、農薬製造時の副生成物として生成される物質である。また、近年では消毒薬が環境中で反応して *de novo* の状態で生成されることが知られている¹⁾。ダイオキシンは多くの異性体を有するが、その中でも毒性の最も強い 2,3,7,8-TCDD と類似した毒性機構を示す PCDD と PCDF の異性体および、工業製品として多様な用途に用いられていた PCB の異性体の中で、毒性機構が類似したコプラナーPCB をあわせてダイオキシン類として定めている。

ダイオキシン類の濃度は、2,3,7,8-TCDD の TEF (Toxic Equivalency Factor) を 1 とした時に他の異性体の毒性を相対的な値で示し、それぞれの TEF に濃度を掛け合わせその合算値を TEQ (Toxic Equivalents) として表す。ダイオキシン類には現在 29 種類の異性体が含まれている。

ダイオキシン類は、物理化学的に安定な構造を有しており、環境中でも多くは分解されずに環境中に蓄積している。また、ダイオキシン類は生物濃縮することが知られており、食物連鎖を通じて広く環境、生物に影響を与えることが懸念されている。

ダイオキシン類の東京湾への流入河川や沿岸域における現存量の調査は、周辺自治体により年数回の計測が行われている。また、海洋生物環境研究所

(以下海生研)²⁾(水産庁)²⁾、国土交通省³⁾、海上保安庁⁴⁾においては東京湾全域におけるダイオキシン類の実測調査を行っているが、東京湾全体における実態調査は充分把握されているとはいえない。

このため、湾内のダイオキシン類の濃度予測が可能な数値モデル、すなわち海水中および海底堆積層を同時に模擬できるモデルを構築できれば環境影響評価に有用な手段となり得ると考えられる。

海底堆積物を含めた濃度解析については、OECD/NEA の作業部会で構築したセディメントモデル(海底堆積層を3層に分割)による核種の要因解析の結果を参考とした。

ダイオキシン類の東京湾内での挙動を海水中および海底堆積層を同時に模擬できるモデルは現時点では見当たらない。そのため、物質のスクャベンジングにおける吸着・脱着について粒状物質に吸着しやすい²³⁰Thによる海洋観測結果を利用した⁵⁾。

2. 表層泥中のダイオキシン類の調査

河川から流入するダイオキシン類は、それ自体が疎水性の物質で浮遊物質に吸着しやすいことに加えて、東京湾内を移流・拡散する間、湾口部からの流出、海底への沈積により湾内水中の現存量が少なく、濃度は低い。

図-1 に海生研が実施した表層泥中のダイオキシ

ン類濃度を示す²⁾。

湾奥の St.1, St.2 および St.3 (多摩川河口沖), St.5 (千葉港 (市原) 沖) において濃度が高いことが示されている。理由としては多摩川河口沖に関しては京浜工業地帯からの流入が、千葉 (市原) 沖においては過去に大規模な汚染があったことが指摘されている⁶⁾⁷⁾⁸⁾。

また, Hosomi らは³⁾, 国土交通省の観測結果を検討し市原沖で最大濃度を示し, 湾奥部で濃度が高く, 湾口に向かって低くなることを報告している。

さらに清水らは⁴⁾, 東京湾において 13 地点の海底堆積物を採取し, ダイオキシン類の分析を行った。その結果千葉港 (市原) 沖で最も高く, ダイオキシン類による汚染は千葉港沖合いに広がっていることを報告している。

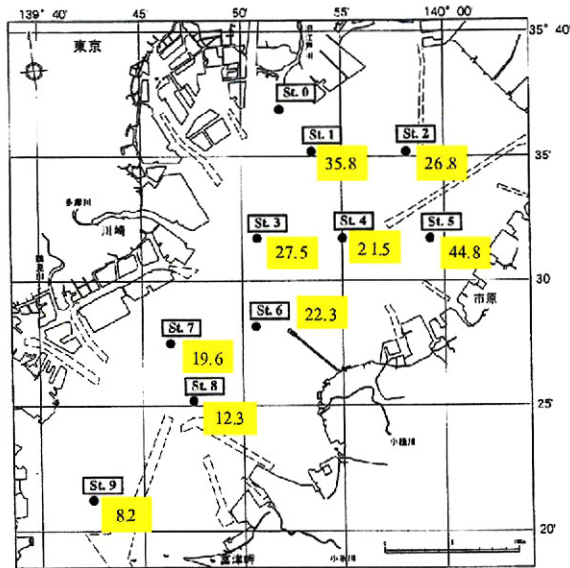


図-1 東京湾底泥中のダイオキシン類濃度³⁾
(単位: pg-TEQ/g)

3. 東京湾内水の流動解析

本研究では東京湾を緯度・経度ともに 2.5 分, 鉛直方向 8 層の格子に分割し, 地形・水深・河川流量などの現地データを組み込んだボックスモデルを用いて, 水温・塩分の年間平均値を基に交換流量の年間平均値を求めた。

水質の予測調査を行う場合, 湾内の物質収支を正確に評価する必要がある。このため, 各ボックス間の流量保存が完全に成り立っている流動場の使用が絶対条件となる。本研究で採用した Hybrid-box model による第 1 層 (0 ~ 5m) の流動解析結果を図-2 に示す。湾奥部では反時計回りの循環流が見られる。東京湾奥部の河口から大量流入により南下する流れが卓越している。第 2 層 (5 ~ 15m) の流れ (図-3) は湾奥部では第一層とは逆に時計回りの循環流が生じている。湾の西側では湾奥から湾口へ向かう流れが顕著である。第 3 層 (15 ~ 25m) 以深 (図-4) では湾口より湾奥へ向かう流れが卓越

している。この結果は, 各ボックス間の流量保存を精度よく満足するものである⁹⁾¹⁰⁾。

東京湾の平均流については, 明確な定見は無いが, 以下の知見が得られている。

- a) 秋, 冬は時計回りの還流が認められるが, 夏は明確ではない
- b) 湾内西岸沿いの表層で幅の狭い南下流が存在する。
- c) 表層は流出, 下層は流入するいわゆる密度流的循環流が見られる。

本研究の流動計算は年間平均値として平均流成分を求めたものであるが, 上記の知見を満たす結果が得られたと考えられる。得られた結果をもとに, 東京湾における長期間にわたるダイオキシン類の移行解析を行った。

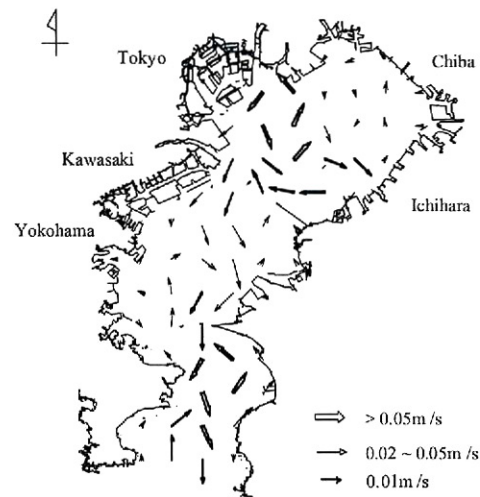


図-2 東京湾表層 (0-5m) における年間平均流量

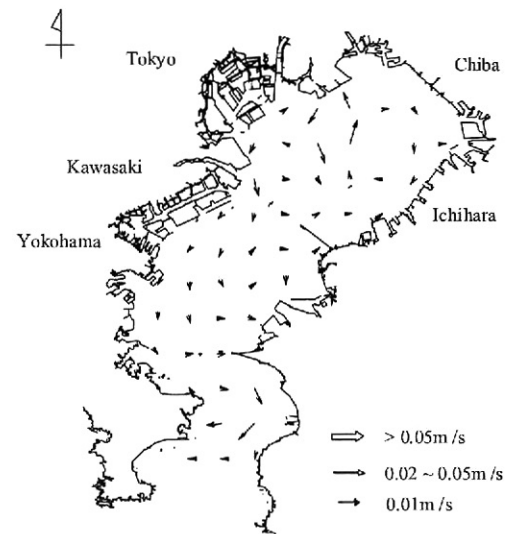


図-3 東京湾第 2 層 (5-15m) における年間平均流量

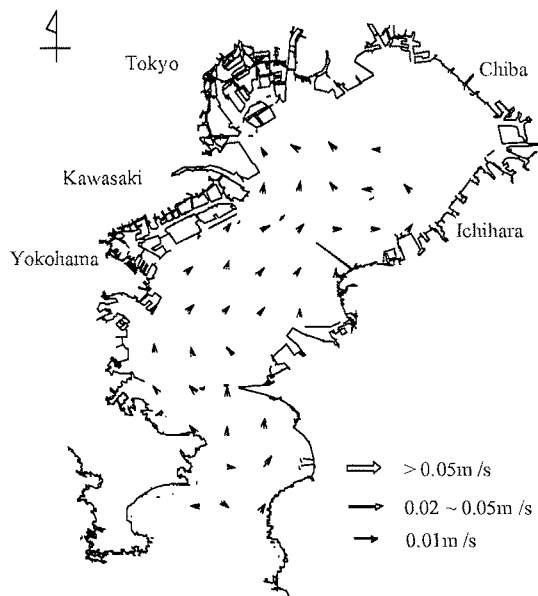


図-4 東京湾第3層（5-15m）における年間平均流量

4. ダイオキシン類濃度解析モデル

(1) 既往のモデル

N.J. Personらは¹¹⁾, Norwegian Greenland Fjordsを対象としてPDDD/Fの運命予測を行った。モデルは20個のボックスを考えたボックスモデルを採用している。ボックス間の物質収支を検討した結果Fjordの深海の海底では物質の埋没が卓越し、浅海の海底では再浮遊の現象が卓越することを見出している。

山崎・中村¹²⁾は、積物中に蓄積された化学物質の鉛直分布を求めるために、表層混合層と堆積物直上の再懸濁層を考慮した鉛直1次元モデルを構築し、宍道湖・中海水系に適用した。解析の結果、混合層および再懸濁層が物質の濃度分布を決定する上で重要な役割を果たしていることを報告した。

小林ら¹³⁾は東京湾に含まれるダイオキシン類の濃度を化学物質運命予測モデル（FATE3D）を適用して求めている。またこの論文の中で東京湾に流入する主要な6河川（江戸川、中川、荒川、隅田川、多摩川、鶴見川）について河川中のダイオキシン類の実測調査を行い、その結果から6河川から東京湾へのダイオキシン類輸送量を推定している（表-1）。今回の研究で河川からのダイオキシン類の流入量は、この報告値を用いた。シミュレーションでは粒子状物質と溶解性物質との相互関係を考慮して、海水層の濃度を潮汐作用を基にした1年間の時系列計算を実施している。シミュレーションの結果、ダイオキシン類濃度について現地観測結果との比較から妥当性を示している。なおこの論文では、海水層と海底とのダイオキシン類の交換過程は考慮されていない。

そこで東京湾に流入したダイオキシン類の底質への堆積を含めた挙動モデルの構築を試みた。

表-1 河川からのダイオキシン類輸送量

	Edo River	Naka River	Ara River	Sunada River	Tama River	Tsurumi River	Total
Coordinates	(7, 4)				(6, 6)	(4, 8)	
Small particulate (g-TEQ/year)	1.55	3.05	3.20	2.10	0.35	0.15	10.40
Dissolved (g-TEQ/year)	0.75	0.25	0.20	1.20	0.10	0.075	2.575

(2) 濃度解析モデル

ダイオキシン類の東京湾における沈降量の解析を行うためのモデルの概念図を図-5に示す。

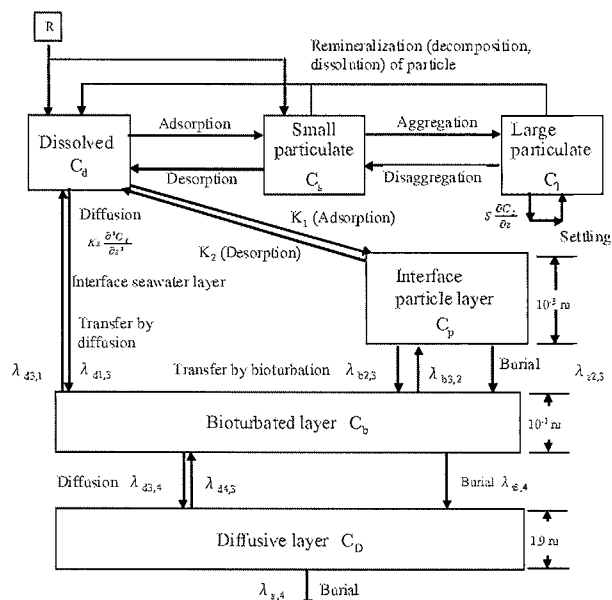


図-5 ダイオキシン類濃度解析モデル概念図

東京湾に流入したダイオキシン類はSS成分に付着しており、そのSS成分は、ほとんど沈降しない小粒子 P_s と、さらにその小粒子同士が凝集して出来る大粒子 P_l から成る。大型の粒子となると沈降するため、これにより吸着したダイオキシン類も下層へと輸送される。

定常状態ではそれぞれの粒子の増加量は各層とも0と考える。 $(dP_s/dt = 0, dP_l/dt = 0)$

また、海水中のダイオキシン類については図-5に示すように、溶存態濃度 C_d 、小粒子および大粒子吸着態濃度をそれぞれ C_s 、 C_l とした。

C_d と C_s の間は、一次近似の吸着 K_1 と脱着 K_2 によって交換が起こるものとした。

吸着速度 K_1 は、 $K_1 = K_d \times P_s \times K_{d1}$ (K_d : 分配係数)の関係から深さ10mにおける P_s と K_{d1} を用いて $K_{d1}(= 155.15)$ を求め、SSの区間分布に基づく P_s の換算値からボックスごとに設定した。

なお最下層においては、大粒子吸着態の下層への沈降は無いものとした。

海底堆積層については図-6に示すように境界層、生物かく乱層、拡散層の三層に分け、さらに境界層では海水層と海底土の表面で砂等の粒子が存在する粒子層の2つに分けたモデルを設定した。なお粒子

層以下は海底部とした。

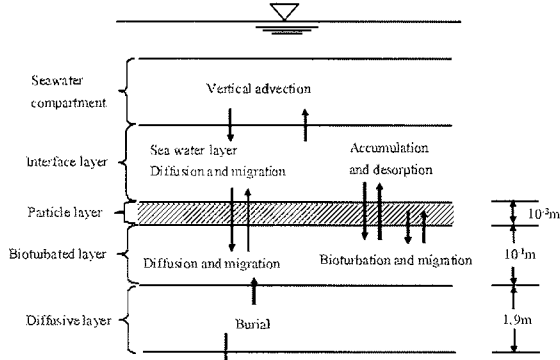


図-6 堆積層モデル

海水中ならびに堆積層のダイオキシン類濃度を求める式系は以下の通りである。

溶存態ダイオキシン類濃度 C_{di} (海水層)

$$V_i \frac{dC_{di}}{dt} = R_{cd} - \sum_{j=1}^n W_{ij} C_{di} + \sum_{j=1}^n W_{ji} C_{dj} + \sum_{j=1}^n (A_{ji} K_z \frac{C_{dj} - C_{di}}{L_{ij}}) - V_i k_1 C_{di} + V_i k_1 C_{si} + V_i \gamma (C_{di} + C_{si}) \quad (1)$$

小粒子吸着態ダイオキシン類濃度 C_{si} (海水層および Interface layer)

$$V_i \frac{dC_{si}}{dt} = - \sum_{j=1}^n W_{ij} C_{si} + \sum_{j=1}^n W_{ji} C_{sj} + \sum_{j=1}^n (A_{ji} K_z \frac{C_{dj} - C_{si}}{L_{ij}}) + V_i k_1 C_{di} - V_i k_1 C_{si} + V_i r_1 C_{si} - V_i r_1 C_{li} + V_i \gamma C_{si} + R_{cs} \quad (2)$$

大粒子吸着態ダイオキシン類濃度 C_{li} (海水層および Interface layer)

$$V_i \frac{dC_{li}}{dt} = -V_i r_1 C_{li} + V_i r_1 C_{si} - V_i \gamma C_{li} + A_{il} V_{down} C_{lu} - A_{il} V_{down} C_{li} \quad (3)$$

溶存態ダイオキシン類濃度 C_{di} (Interface layer 海水層, 最下層)

$$V_i \frac{dC_{di}}{dt} = - \sum_{j=1}^n W_{ij} C_{di} + \sum_{j=1}^n W_{ji} C_{dj} + \sum_{j=1}^n (A_{ji} K_z \frac{C_{dj} - C_{di}}{L_{ij}}) - V_i k_1 C_{di} + V_i k_1 C_{si} + V_i \gamma (C_{di} + C_{si}) - V_i K_1 C_{di} + V_{PL} K_2 C_{PL} - V_i \lambda_{d1,3} C_{di} + V_{BL} \lambda_{d3,1} C_{BL} \quad (4)$$

P 層ダイオキシン類濃度 C_{pi} (Particle layer)

$$V_{pi} \frac{dC_{pi}}{dt} = -V_{pi} K_2 C_{pi} + V_{di} K_1 C_{di} - V_{pi} \lambda_{s2,3} C_{pi} + V_{BL} \lambda_{b2,3} C_{BL} - V_{pi} \lambda_{b2,3} C_{pi} \quad (5)$$

B 層ダイオキシン類濃度 C_{Bi} (Bioturbated Layer)

$$V_{Bi} \frac{dC_{Bi}}{dt} = V_{di} \lambda_{d1,3} C_{di} - V_{Bi} \lambda_{d3,1} C_{Bi} + V_{PL} \lambda_{s2,3} C_{PL} + V_{PL} \lambda_{b2,3} C_{PL} - V_{Bi} \lambda_{b2,3} C_{Bi} - V_{Bi} \lambda_{s3,4} C_{Bi} + V_{DL} \lambda_{d4,3} C_{DL} - V_{Bi} \lambda_{d3,4} C_{Bi} \quad (6)$$

D 層ダイオキシン類濃度 C_{Di} (Diffusive Layer)

$$V_{Di} \frac{dC_{Di}}{dt} = -V_{Di} \lambda_{s4} C_{Di} + V_{Bu} \lambda_{s3,4} C_{Bu} + V_{Bu} \lambda_{d3,4} C_{Bu} - V_{Di} \lambda_{d4,3} C_{Di} \quad (7)$$

ここで,

R_{cd} : ダイオキシン類放出量 (g-TEQ/s), C_{di} : ボックスiの溶存態ダイオキシン類濃度 (Interface海水層を含む) (g-TEQ /m³), V_i : ボックスiの体積, A_{ij} : ボックスiとjの接触面積(m²), K_z : 拡散係数, L_{ij} : ボックスiとjの平均距離(m), C_{si} : ボックスiの小粒子吸着態ダイオキシン類濃度(g-TEQ /m³), k_1 : ダイオキシン類の小粒子への吸着速度 (1/s), k_1 : ダイオキシン類の小粒子からの脱着速度 (1/s), γ : 粒子の無機化(分解)速度 (1/s), r_1 : 小粒子の凝集速度 (1/s), r_1 : 大粒子の崩壊速度 (1/s), R_{cs} : ダイオキシン類放出量 (g-TEQ /s), V_{down} : 沈降速度(m/s) K_1 : ダイオキシン類の吸着率 (1/s), K_2 : ダイオキシン類の溶出率(脱着率) (1/s), $\lambda_{d1,3}$, $\lambda_{d3,1}$: Interface海水層から生物攪乱層(逆の)への拡散移動率 (1/s) C_{Pi} : Interface粒子層ボックスiのダイオキシン類濃度 (g-TEQ /m³), $\lambda_{s2,3}$: Interface粒子層から生物攪乱層への埋没率 (1/s), $\lambda_{b2,3}$, $\lambda_{b3,2}$: Interface粒子層から生物攪乱層(逆の)へのバイオターベーション移動率 (1/s), C_{Bi} : 生物攪乱層ボックスiのダイオキシン類濃度 (g-TEQ /m³), $\lambda_{s3,4}$: Interface粒子層から生物攪乱層への埋没率 (1/s), $\lambda_{s3,4}$: 生物攪乱層から拡散層への埋没率 (1/s), $\lambda_{d3,4}$, $\lambda_{d4,3}$: 生物攪乱層から拡散層(逆の)への拡散移動率(1/s) C_{Di} : 拡散層のダイオキシン類濃度 (g-TEQ /m³), $\lambda_{s3,4}$: 生物攪乱層から拡散層へ埋没率 (1/s), λ_{s4} : 拡散層における埋没率 (1/s), $\lambda_{d3,4}$, $\lambda_{d4,3}$: 生物攪乱層から拡散層(逆の)への拡散移動率 (1/s) を表す。

(3) モデルに含まれるパラメータ

a) 沈降速度

海水中の SS 濃度は, 大粒子濃度 P_l と小粒子濃度 P_s 濃度の和であると仮定し, Clegg ら⁵⁾ が報告している水深別存在比 (p_l/p_s) と, 鷺見¹⁴⁾ によって観測された東京湾全域における各層の SS データを使用して各層ごとに算出を行った。

OECD/NEA の報告¹⁵⁾ によると, 外洋域での大粒子と小粒子の境界域として 30-50 μ m 程度としているが沿岸域における値は示していない。今回の計算では, 東京湾という内湾であることを考慮して, 大粒子と小粒子の境界値を 50 μ m と仮定した。懸濁態粒子の体積の累積度数分布を図-7 に示す。この図から, 大粒子と小粒子との境界値を 50 μ m とすると, 大粒子が 92.1%, 小粒子が 7.9%を占めていることが分かる。

また, ストークスの式より沈降速度を 20m/day とした。

湾内の 50 年後の物質収支は, 年間の合計負荷量 12.975g-TEQ を基準として, 50 年間の連続負荷を想

定した場合、648.75g-TEQ となった。

河川より東京湾内に流出したダイオキシン類は海底に多く堆積する結果が得られたので¹⁶⁾、東京湾におけるダイオキシン類の堆積モデルの構築を試みた。

b) 埋没速度

過去の研究事例により堆積速度を 1cm/year を用いて濃度解析を実施したが、河口域から供給したダイオキシン類の殆どが海底堆積層に沈着し、実測値とはかけ離れた結果となった。したがって図-3 に示すのは OECD/NEA の値¹⁵⁾を用いた。

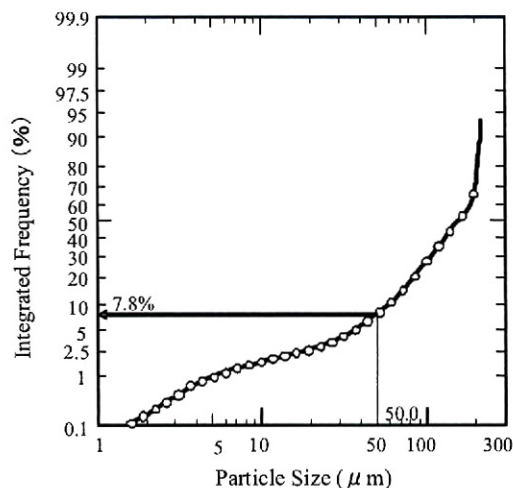


図-7 東京湾における SS 成分の累積度数分布

5. 海底層への堆積状況

本研究では、年間平均流動の結果を用いてダイオキシン類の移行解析を行った。50年後のマスバランスの結果を表-2 に示す。

表-2 に示すように、海底に堆積した内訳は粒子層 6.264%、生物かく乱層 4.878%、拡散層 39.685% であった。したがって海底層の現存量は流入負荷量に対して 50.823%であった。図-8 に海底表層部のダイオキシン類濃度の平面分布を示す。

括弧内には海生研が行なった実測結果を示した。今回行った計算結果は、実測結果と類似した結果を示した。流入河川の河口部において高い値を示し、湾奥部から湾中央部にかけて 25-30 pg-TEQ/g の値をしめしている。両者とも湾口に向かって濃度の値が減少する傾向がみられた。横浜沖から湾口西にいたる西岸域では、流れが大きいために堆積は少なくなっている。

海生研が調査を行なった St.1 におけるダイオキシン類の鉛直分布を図-9 に示す。

今回の研究においては鉛直分布では表層部においては実際の濃度調査と類似した傾向を示したが、

表-2 マスバランス

	g-TEQ	Dissolved	Small particulate	Large particulate
Sea water	Inflow (g-TEQ)	128.750	522.500	
	Total load (g-TEQ)	6.625	0.307	0.020
	(%)	1.021	0.047	0.003
		Interface particulate	Bio-turbated	Diffusive
Bottom sediment	Total load (g-TEQ)	40.640	31.647	257.457
	(%)	6.264	4.878	39.685
		Runoff in dissolved	Runoff in small particulate	Total
	Total load (g-TEQ)	309.624	2.400	648.720
	(%)	47.726	0.370	99.994

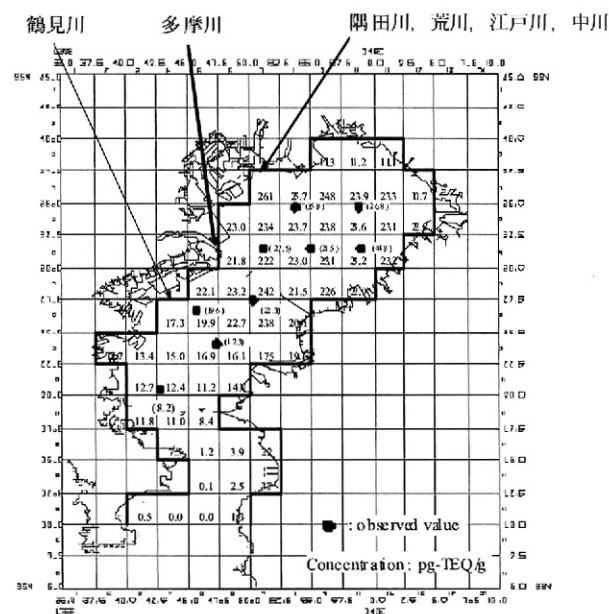


図-8 海底表層部のダイオキシン類濃度分布

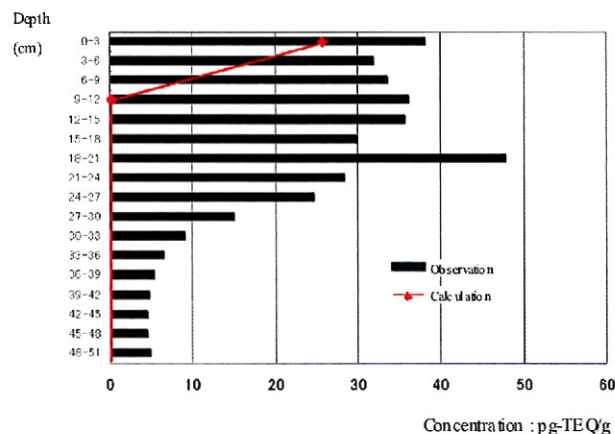


図-9 St.1 におけるダイオキシン類濃度鉛直分布

計算値では 0-3cm の層では 25pg-TEQ/g の濃度を示したものの、9-12cm の層ではゼロとなり深層部に向かうにつれ異なる結果となった。

6. まとめ

ダイオキシン類の移行過程を包括したモデルを構築し、東京湾内への物質負荷による湾内水および海底堆積物層の濃度分布を算出した。その結果、海底への堆積物量は湾奥西岸周辺で多く、川崎―富津を結ぶ線より湾奥で湾東部に至るまで堆積量が同程度存在した。湾口部に向かってその量は減っていた。

海水中の大粒子の沈降速度について SS 観測値の流経別加積曲線から小粒子、大粒子の判別を行い大粒子の沈降速度を試算し、20m/day の値を得た。

海底堆積物については、境界層（海水層と粒子層）、生物かく乱層、拡散層の 3 層に分けて、海水中と海底境界層の物質のカップリングによる解析モデルを構築した。濃度解析による海底への堆積物の平面分布は、現地観測結果と類似した結果を示した。一方で、海底への鉛直分布においては今後の課題とした。

湾内各河川から流入負荷による 50 年後の物質収支を算出した結果、溶存態 1.02%、小粒子吸着態 0.05%、および大粒子吸着態 0.01%、海底への堆積量 50.82%、湾外への流出 48.10%（溶存態で 47.73%、小粒子吸着態で 0.37%）となった。

8. 検討課題

本モデルを東京湾へ適用した結果、海底面でのダイオキシン類堆積物の平面分布は現地観測値と類似した傾向が見られた。しかしながら鉛直分布においては類似の傾向は見られなかった。この原因として以下のことが考えられる。①ダイオキシン類の負荷量が少ない。②海水層から海底堆積物層への沈降量が少ない。③海底堆積物層内の移行が小さい。これらの改善策として、①においては千葉県側の負荷を検討する必要があると考えられる。②においては粒子間の相互作用や SS 分布の再検討を行なう必要があると考えられる。さらに③に対して海底に沈降した粒子の埋没速度の詳細な検討を行なう必要があると考えられる。

謝辞

本研究に当たり、本学大学院総合科学研究科よりプロジェクト特別研究Ⅱの助成を受けた。

参考文献

- 1) Yamamoto, T., Abe, T., Higashino, K., Sasaki, Y.: Formation of dioxin underconcentrated chlorination to the environmental sediment, 27th International symposium on halogenated persistent organic pollutants, 2007.
- 2) 海洋生物環境研究所：平成 12 年度ダイオキシン類等漁業影響調査 魚介類のコプラナー PCB 削減方策検討・解明事業報告書、（水産庁委託），2001.
- 3) Hosomi, M., Matsuo, T., Dobashi, S., Katou, S., Abe, H.: Survey of dioxins in Tokyo bay bottom sediment, Marine Pollution bulletin 47, pp68-73, 2003.
- 4) 清水潤子, 山尾理, 野坂琢磨, 野口賢一, 峯正之, 松本敬三, 大市一芳, 堤一尚, 宮本哲司, 池田善郎：東京湾海底堆積物中における POPs（残留有機汚染物質）濃度分布の特徴について（平成 14 年東京湾 POPs 調査結果より），海洋情報部研究報告, 41, pp35-49, 2005.
- 5) Clegg, S. L. and M. Whitfield: A generalized model for the scavenging of trace metals in the open sea, II Torium scavenging, Deep Sea Research, 37, No.5, pp806-832, 1991.
- 6) 吉澤正：市原港を汚染したダイオキシン類発生源の東京湾へ与えた影響, 千葉県環境研究センター年報, 第 4 号, pp190-195, 2006.
- 7) 吉澤正：東京湾底質中のダイオキシン類分布 2 期限, 水環境学会誌, 29, pp463-468, 2006.
- 8) Uchiyama, M., Arai, M., Masunaga S., Fingerprinting Localized Dioxin Concentration Ichihara Anchorage Case, Environ. Sci. Technol., 41 pp3864-3870, 2007.
- 9) Wada, A.: Flow analysis of the Arctic Ocean with a complicated density field. Journal of Hydraulic Research, 40, pp303-319, 2002.
- 10) Wada, A., Ochiai, M., Takano, T., :Marine contamination in the Arctic Ocean, Journal of Hydraulic Research, 42, pp115-130, 2004.
- 11) Persson, N. J., Cousins, I. T., Molvær, J., Broman, D., Næs, K., Modeling the long-term fate of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and furans (PCDD/Fs) in the Grenland Fjords, Norway. Science of the Total Environment pp188-202, 2006.
- 12) 山崎智弘, 中村由行：表層混合層と再懸濁層を考慮した化学物質の堆積物中鉛直分布モデル, 海岸工学論文集, 51, pp976-980, 2004.
- 13) Kobayashi, M., Eriguchi, T., Nakata, K., Masunaga, S., Horiguchi, F., Nakanishi, J.: Application of a 3-D chemical fate prediction model (FATE3D) to predict dioxin concentrations in the Tokyo Bay, Estuarine, Coastal and Shelf Science 70, pp621-632, 2006.
- 14) 鷲見栄一：懸濁粒子の粒径分布と現地測定（1）非生物粒子と生物態粒子の測定, 海洋と生物, 173, pp627-635, 2007.
- 15) OECD/NEA: Review of the continued suitability of the dumping site for radioactive waste in the North-East Atlantic, 1985.
- 16) 今野聡, 和田明, 落合実：東京湾内の河川からのダイオキシン類負荷による海底への堆積分布の予測, 海洋調査技術学会誌, 印刷中.