

## 東京湾の PCB 分布・堆積モデル\*

橋本 俊也\*\*・柳 哲雄\*\*\*・武岡 英隆†・高田 秀重††

### Distribution and Sedimentation Model of PCB in Tokyo Bay

Toshiya Hashimoto, Tetsuo Yanagi, Hidetaka Takeoka  
and Hideshige Takada

1995年の東京湾の海水中の懸濁態 PCB 濃度と1960~1993年の底泥中の PCB 濃度の鉛直分布を再現する数値モデルを作成し、このモデルを用いて将来の PCB 濃度予測を行った。その結果、2050年になっても東京湾の海水、底泥中の PCB 濃度は顕著には減少しないことが明らかとなった。

The concentration of particulate PCB in the sea water and its historical sedimentation pattern in Tokyo Bay are reproduced by the simple two-dimensional numerical model. Using this numerical model, the prediction of future PCB concentration in the sea water of Tokyo Bay is carried out.

キーワード：PCB, 汚染履歴, 東京湾, 将来予測

#### 1. はじめに

PCB (Poly chlorinated biphenyl, ポリ塩化ビフェニール) は日本では1950年代から絶縁材として広範に使われていたが、カネミ油症事件により人体への有害性が明らかになり、1972年には日本国内での生産が禁止された。

しかし、PCB 製造禁止の後もそれまでに使用されていた PCB が徐々に陸上から海に流出し、海底に堆積したり、外洋に流出したりしている。その結果として、環境庁の調査によれば、沿岸海域の魚類の体内から現在も PCB が検出されている。

PCB のような、その製造は中止されているが、現在も環境への負荷が続いている有害物質が沿岸海域の生態系、ひいては人間の健康に将来どのような影響を及ぼす可能性があるかを明らかにすることは科学者の重要な任務のひとつであろう。そのためにはモデルを構築して現在までの PCB の海底への堆積状況、現在の海水中の PCB 濃度を再現し、そのモデルを用いて将来の海水中の

PCB 濃度の定量的な予測を行う必要がある。

そのような目的を持った研究の第一歩として、本稿では東京湾の海水中の懸濁態 PCB 濃度、海底堆積物中の PCB の鉛直濃度分布を簡単な数値モデルにより再現することを試みる。

#### 2. 観 測

Fig. 1 に示す東京湾の湾奥からそれぞれ、約11, 16, 40 km の地点にある Stns A, B, C において1995年8月に海面下2 mの海水が採水され、海水中の懸濁態 PCB 濃度の測定が行われた。分析の結果得られた各点の海水中の懸濁態 PCB 濃度はそれぞれ94.3 pg/ℓ(10<sup>-12</sup>g/ℓ), 48.1 pg/ℓ, 12.2 pg/ℓであった(Yamashita *et al.*, 1997)<sup>1)</sup>。同じく Stn. A では1993年9月に底質の柱状採泥が行われている。得られた柱状サンプル1 cm厚毎の PCB の濃度分析の結果を Fig. 2 に示す。PCB 濃度は泥深30 cmよりやや浅い付近に最大値を持ち、それ以深で急減、それ以浅で漸減している。泥中の PCB の濃度測定と同時に柱状サンプル各層で堆積粒子の比重と含水率を測定し、積算重量深度を求めた。松本(1983)<sup>2)</sup>によれば Stn. A2 の重量堆積速度は0.3 g/cm<sup>2</sup>/yearである。積算重量深度とこの重量堆積速度から、各層の堆積年代を推定した。例えば、積算重量深度が1.2 gの深さの層は採泥時から4年前(すなわち1990年)に堆積したことになり、積算重量深度が4.2 gの深さの泥は14年前、すなわち1980

\* 1997年12月14日受領, 1998年3月20日受理

\*\* 広島大学生物生産学部

\*\*\* 九州大学応用力学研究所

† 愛媛大学工学部

†† 東京農工大学農学部

連絡先: 橋本俊也, 広島大学生物生産学部

〒739-8528 東広島市鏡山1-4-4

E-mail: thasimt@ipc.hiroshima-u.ac.jp

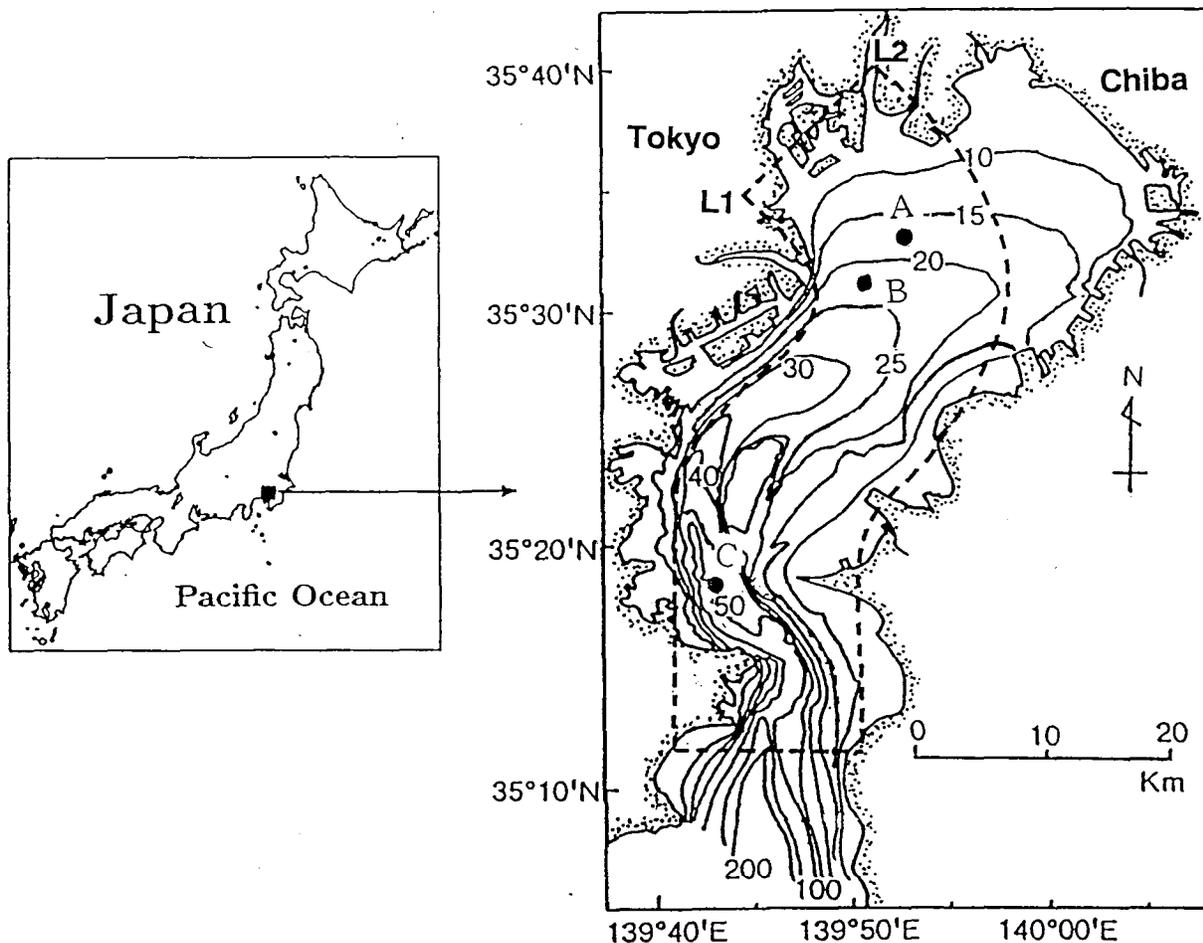


Fig. 1 Observation station (Stn. A2) in Tokyo Bay and model domain (broken line).

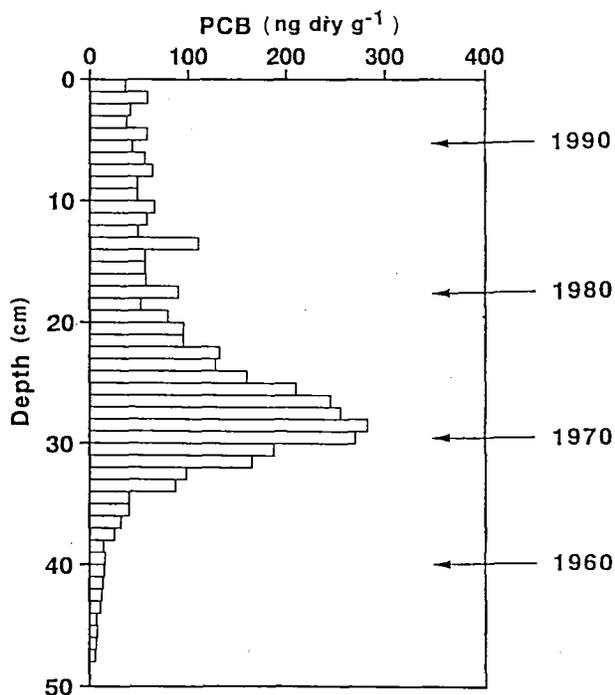


Fig. 2 Vertical distribution of PCB concentration in the bottom sediment at Stn. A2 in Tokyo Bay.

年の堆積物となる。ちなみにこのようにして得られた表層の堆積速度は 2 cm/year であった。Fig. 2 の右側には以上の方法で推定した各層の堆積年代も示した。これによると堆積物中の PCB 濃度は PCB の製造・使用が禁止された 1972 年の直前に最大濃度を記録していることがわかる。

PCB の全国生産量は 1971 年までは明らかになっている (立川, 1972)<sup>3)</sup>。全国で生産された PCB のうち、日本の総人口 (1 億 2000 万人) に対して東京湾流域の人口 (2500 万人) に比例する割合 (25/120) 分だけが東京湾流域で使用されていると仮定する。さらにそのうちの 14% が Fig. 1 に示したモデル海域の湾奥 (L1~L2) から東京湾に流入すると仮定した (この 14% という数字は後述する計算結果を観測結果にあわせるように決めた)。

また生産が禁止された 1972 年以降、PCB の全国の実環境中への排出量 ( $F$ ,  $\times 10^3$  ton/year) は、同様に後述の計算結果の絶対値が観測された実測値に合うように調整した結果、次式に示すような指数関数で減少してきていると仮定した。

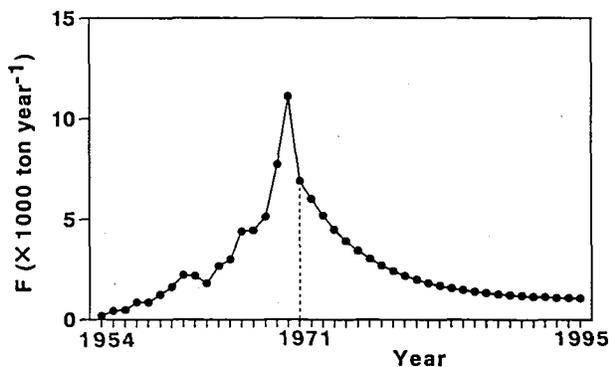


Fig. 3 Year-to-year variation in PCB load in Japan.

$$F = 1.0 + 6.0 \exp(-0.2n) \quad (1)$$

ここで、 $n$  は1971年からの経過年数を表す。1971年までの統計データ (立川, 1972)<sup>3)</sup>と(1)式をもとに描いた日本全国の PCB 生産量 (1972年以降は環境中への排出量) の経年変動を Fig. 3 に示す。

次章では Fig. 3 に示した PCB 排出量の一定の割合 (25/120×14% = 3%) が Fig. 1 に破線で示したモデル海域の湾奥から東京湾に流入したと仮定し, Stns A, B, C の海水中の懸濁態 PCB 濃度と Fig. 2 に示した Stn. A の堆積物中の PCB 濃度の経年変動を再現出来るかどうかを簡単な数値モデルを用いて検討する。

### 3. 数値モデル

Fig. 4 に示すような鉛直断面 2 次元モデルを考える。湾奥海底を座標原点として湾口に向かい  $x$  軸, 底泥の深さ方向に  $z$  軸をとり, 海底に沿って厚さ  $\delta$  の再懸濁層を想定する。PCB は湾奥 (Fig. 1 の L1~L2) から一定の割合 ( $Q$  g/sec) で海域に流入する。東京湾の水深は一定 ( $H = 25$  m), 海水中の懸濁態 PCB 濃度  $\{C(x, t)$  g/cm<sup>3</sup> は鉛直一様で, PCB は一定の沈降速度 ( $W$  cm/sec) で沈降すると仮定する。海底表面に厚さ  $\delta$  cm の再懸濁層を想定し, 層内の懸濁態 PCB 濃度  $\{C_{bs}(x, t)$  g/

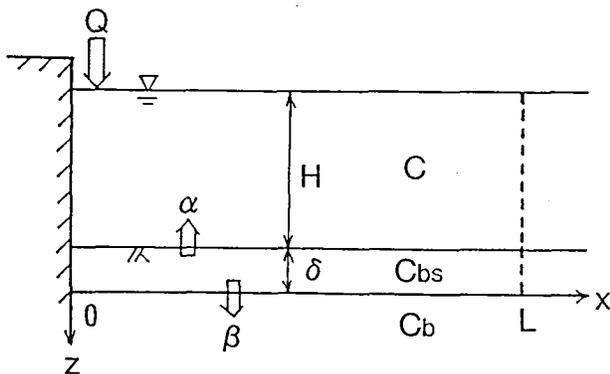


Fig. 4 Model of PCB transport in the sea water and bottom sediment in Tokyo Bay.

cm<sup>3</sup>) の一様であると仮定する (Berger and Heath, 1968)<sup>4)</sup>。

PCB の水平輸送は水平拡散のみによつたとすれば, 海水中の懸濁態 PCB 濃度の時間・空間変化は次式で表せる

$$H \frac{\partial C}{\partial t} = HK_h \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - WC + \alpha C_{bs} \quad (2)$$

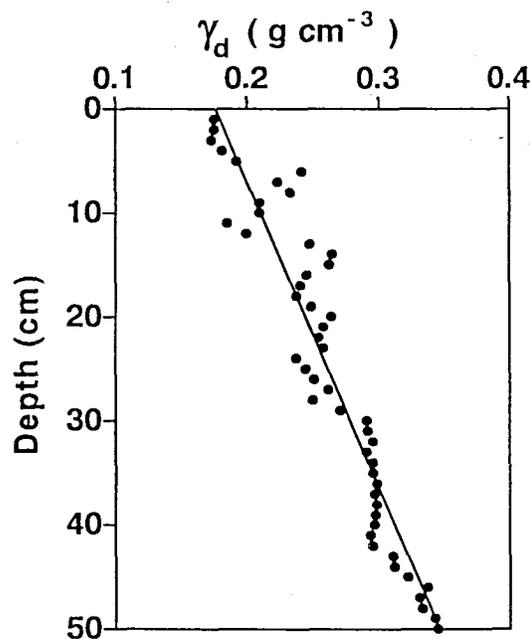
ここで  $K_h$  は水平拡散係数を表す。再懸濁速度 ( $\alpha$  cm/sec), 底質への堆積速度 ( $\beta$  cm/sec) はそれぞれ一定であると仮定する。そうすると, 再懸濁層内の懸濁態 PCB 濃度 ( $C_{bs}$  g/cm<sup>3</sup>) の時間・空間変動は次式で表せる。

$$\delta \frac{\partial C_{bs}}{\partial t} = WC - \alpha C_{bs} - \beta C_{bs} \quad (3)$$

堆積速度  $\beta$  でこの再懸濁層から海底の底質中に抜けた懸濁態 PCB はその濃度を保存するので, 底質中に PCB 濃度履歴を残す。すなわち底質中の PCB 濃度  $\{C_b(x, z)$  ng/cm<sup>3</sup> (10<sup>-9</sup> g/l)} は  $C_{bs}(x, t - z/\beta)$  と等しくなる。

計算された  $C_b$  を Fig. 2 で実測された濃度 (ng/dry-g) と比較するためには, 計算濃度を底泥の単位体積の重さ ( $\gamma_d$  dry-g/cm<sup>3</sup>) で割らなければならない。観測された  $\gamma_d$  は Fig. 5 に示すように深くなるにしたがって圧密を受けて重くなっている。そこで, この観測値を次式で近似して, 各深さの底泥の密度を求めた。

$$\gamma_d(d) = 0.003d + 0.186 \quad (4)$$



$$\gamma_d = 0.003 \times \text{Depth} + 0.186$$

Fig. 5 Observed density distribution of bottom sediment (full circle) and fitting line.

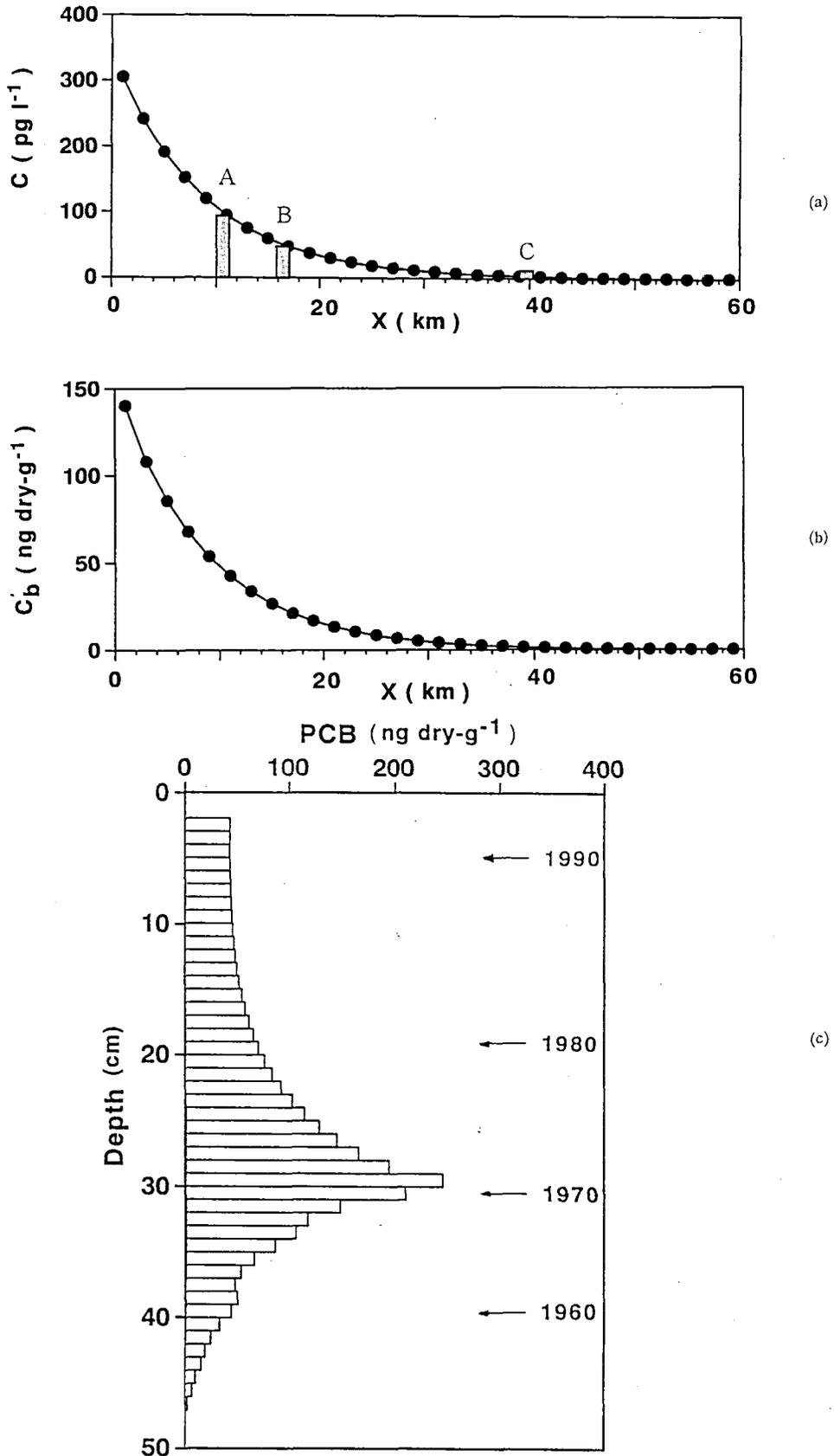


Fig. 6 Calculated vertical distribution of PCB concentration of bottom sediment 11 km from the head of the bay (a) and horizontal distributions of PCB concentration in surface sediment (Cb) and suspended PCB concentration in sea water (C) 11 km from the head of the bay (b).

ここで  $d$  は cm で表した深さを表す。

底泥が深くなるほど圧密を受けて、その厚さを減少するという事は、 $C_{bs}$  から  $C_b$  への変換の際に用いる堆積速度  $\beta_0$  cm/sec は深くなるほど薄くなることを意味している。そこで、(4)式と表層の堆積速度と泥の密度を用いて、各層の堆積速度は次式で表せるとした。

$$\beta(d) = 0.5\beta_0\{\exp(-0.1d)+1.0\} \quad (5)$$

(5)式を用いて、各層の堆積年代を推定し、その層の計算体積濃度を(4)式で割ることにより、重量濃度を求めた。ちなみに(4)、(5)式で求めた表層の重量堆積速度は  $0.372 \text{ g/cm}^2/\text{year}$  となり、松本 (1983)<sup>2)</sup>より少し大きくなる。

境界条件は  $x = 0$  で  $\partial C/\partial x = 0$ 、湾口 ( $x = L = 60 \text{ km}$ ) で  $C = 0$  (Yamashita *et al.*, 1997)<sup>1)</sup>と仮定した。日本における PCB 生産が始まった1954年を計算開始年とし、1995年の初期条件は水中、泥中の PCB 濃度をいずれも 0 とした。格子間隔  $2 \text{ km}$ 、時間間隔半日として、(2)、(3)式を解いて、解を求めた。

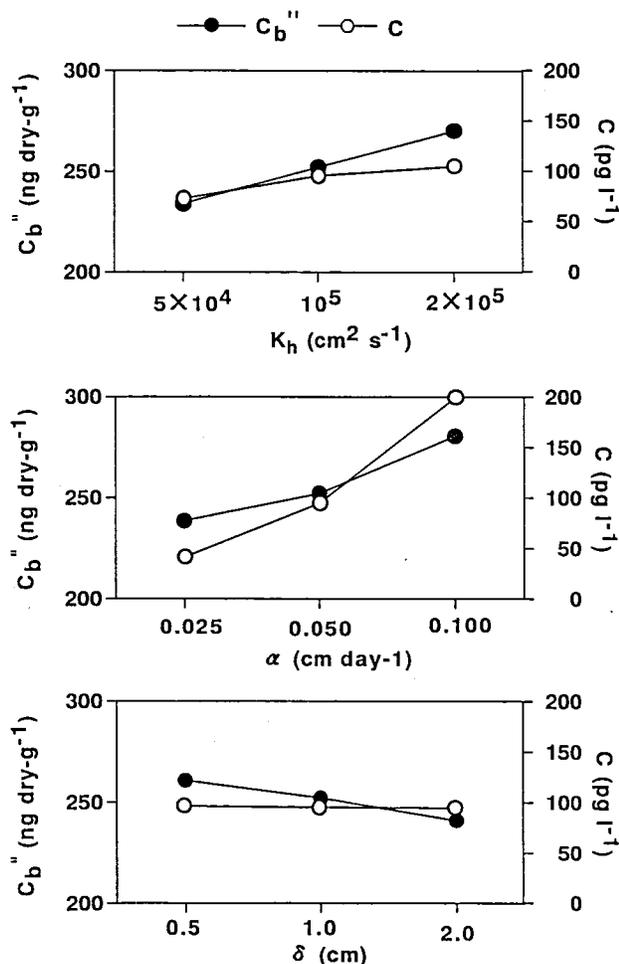


Fig. 7 Change of calculated maximum PCB concentration in bottom sediment ( $C_b'$ ) and suspended PCB concentration in sea water ( $C$ ) 11 km from the head of the bay by the change of parameters of  $K_h$ ,  $\alpha$ ,  $\delta$ .

$\alpha = 0.05 \text{ cm/day}$ ,  $W = 30 \text{ m/day}$  (谷本・星加, 1994)<sup>5)</sup>,  $\beta = 2.0 \text{ cm/year}$  (先述した今回の観測値),  $\delta = 1.0 \text{ cm}$  (Takeoka and Hashimoto, 1988)<sup>6)</sup>,  $K_h = 10^5 \text{ cm}^2/\text{sec}$  (Guo and Yanagi, 1996)<sup>7)</sup>とした場合の、1995年の海水中の懸濁態 PCB 濃度の水平分布、底質表層の PCB 濃度の水平分布 ( $C_b'$ )、濃度  $x = 11 \text{ km}$  地点の底質中の PCB 濃度の鉛直分布計算結果を Fig. 6(a), (b), (c)に示す。この計算結果は観測された Stns A, B, C の海水中の懸濁態 PCB 濃度, Fig. 2 に示した底質中の PCB 濃度鉛直分布の観測結果を定量的にほぼ再現している。Fig. 6(a), (b)によると、海水中、底泥中の PCB 濃度は湾奥で高く、湾口に向かって指数関数的に減少している。

各パラメータの値を変えても、Fig. 6 に示した堆積パターン、水平分布自体は変化しない。 $K_h$ ,  $\alpha$ ,  $\delta$  を変化させた場合の  $x = 11 \text{ km}$  の深さ  $30 \text{ cm}$  付近の PCB 最大濃度値 ( $C_b'$ ) と 1995 年の海水中の懸濁態 PCB 濃度 ( $C$ ) の変化を Fig. 7 に示す。水平拡散係数  $K_h$  を 2 倍大きくすると、泥中の最大濃度は約 1.1 倍になる。また再懸濁率  $\alpha$  を 2 倍大きくすると、PCB は懸濁しやすくなって、泥中の最大濃度は約 1.12 倍大きくなり、水中濃度も 2 倍近く増大する。再懸濁層の厚さ  $\delta$  の変化は泥中濃度、水中濃度にほとんど影響を与えない。Fig. 6(b) と Fig. 7 の計算結果は陸岸から流入した PCB は陸岸付近 (今回の場合、湾奥から  $0 \sim 5 \text{ km}$ ) にそのほとんどが蓄えられていて、間欠的な洪水や暴風時 (この時大きな  $\alpha$  と大きな  $K_h$  が発生する) に巻き上げられ、再懸濁し、拡散されて、湾奥～湾口に移動していることを示唆している。

#### 4. 考 察

(1)式の PCB 負荷量の経年変動式を用いて、2050 年における湾奥から  $11 \text{ km}$  地点の底質表層、海水中の懸濁態 PCB 濃度を計算してみた。その結果は、それぞれ  $38.5 \text{ ng/dry-g}$ ,  $82.9 \text{ pg/l}$  となった。このことは将来にわたって東京湾の海水中、底質中の PCB 濃度は大きくは減少しないで、東京湾の底生物や魚類に影響を与え続ける可能性があることを示唆している。これは東京湾に流入する河川の底泥や東京湾奥の底質中に蓄えられている PCB が徐々に湾奥、湾口部に拡がってくるためである。

#### 5. おわりに

本研究の結果水平拡散のみを考えた簡単なモデルでも海水中の PCB 濃度や投入点からの距離に依存した PCB 堆積分布の違いが再現出来ることがわかった。

本研究で得られた結果をもとに、今後 3 次元数値実験を行い、実際の東京湾の流動・拡散場のもと、PCB がどのように拡がり、堆積するのかを計算してみたいと考え

ている。

貴重な助言を頂いた査読者の方に感謝します。なお本研究は文部省科学研究費、重点領域研究「人間地球系」の一部であることを付記する。

#### 参 考 文 献

- 1) Yamashita, N., T. Imagawa and A. Miyazaki (1997): Three dimensional distribution of polychlorinated dibenzo-p-dioxins, polychlorinated dibenzofurans and polychlorinated biphenyls in sea water using in-situ filtration/adsorption water samplers. *Organohalogen Compounds*, **32**, 204-209.
- 2) 松本英二 (1983): 東京湾の堆積環境. *地球科学*, **17**, 27-32.
- 3) 立川涼 (1972): 現状にみる PCB 汚染の問題点. *PPM*, 1-10.
- 4) Burger, W. and H. Heath (1968): Vertical mixing in pelagic sediments. *J. Marine Res.*, **26**, 134-143.
- 5) 谷本照己・星加章 (1994): 大阪湾と江田内湾における懸濁粒子の沈降速度. *海の研究*, **13**, 13-20.
- 6) Takeoka, H. and T. Hashimoto (1988): Average residence time of matter in coastal waters in a transport system including biochemical processes. *Cont. Shelf Res.*, **8**, 1247-1256.
- 7) Guo, S. and T. Yanagi (1996): Seasonal variation of residual current in Tokyo Bay, Japan-Diagnostic numerical experiments-. *J. Oceanogr.*, **52**, 597-616.