全球多媒体モデルを用いた残留性有機汚染物質の海洋水産資源への曝露予測手法の開発

○河合徹, 鈴木規之
（国立環境研究所環境リスク研究センター）

❖ 残留性有機汚染物質（POPs）の動態評価

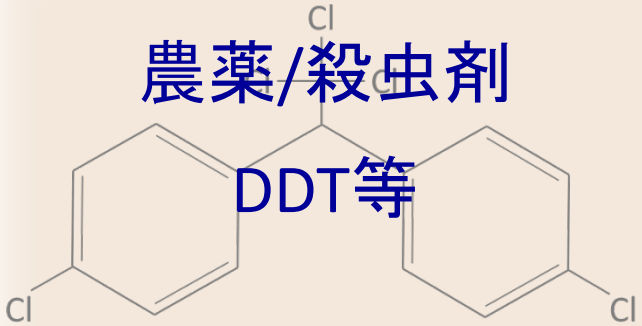
長距離移動性
難分解性
生物濃縮性
高毒性

<u>ストックホルム条約</u>

‘legacy POPs’12種（2004年）
↓
臭素系難燃剤，フッ素系化合物等を加えて24種（現在）

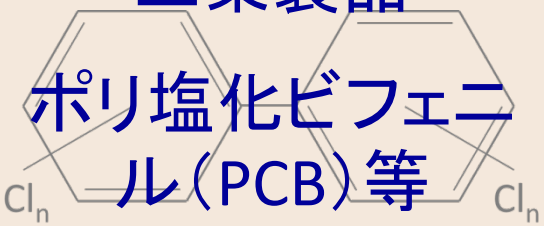
農薬/殺虫剤

DDT等



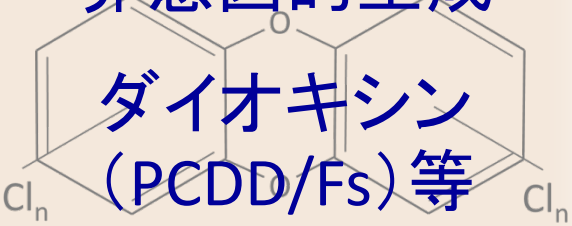
工業製品

ポリ塩化ビフェニル（PCB）等



非意図的生成

ダイオキシン（PCDD/Fs）等



❖ 残留性有機汚染物質（POPs）の動態評価

多媒体（大気-海洋-陸域-生物圏）に渡る動態評価

地球規模での動態評価（→ 領域規模）

長期間の動態評価（数十年スケール）

多数の候補物質（スクリーニング評価 → 詳細評価）

DDT等

ポリ塩化ビフェニル（PCB）等

ダイオキシン（PCDD/Fs）等

POPsの環境動態（多媒体）モデル

スクリーニング評価

適用性

詳細評価

- 定常BOXモデル

  e.g., OECD LRTP and P_{OV} Screening tool

- 低解像度区画モデル

  領域モデル：*e.g.*, CoZMo-POP2 (Wania *et al.*, 2006)

  全球モデル：*e.g.*, Globo-POP (Wania and Mackay, 1995)

- 中-高解像度区画モデル

  国環研リスクC

  領域モデル：*e.g.*, G-CIEMS (Suzuki *et al.*, 2004)

  全球モデル：*e.g.*, BETR-Global (Macleod *et al.*, 2005)

- AGCM/大気質モデルベースの高解像度モデル

  領域モデル：*e.g.*, DEHM-POP (Hansen *et al.*, 2004)

  半球モデル：MSCE-POP (Malanichev *et al.*, 2004)

  全球モデル：*e.g.*, FATE (Kawai *et al.*, 2013)

  本課題

課題：海洋における物理輸送と生物への移行

- 深海はPOPsの最終シンク場所?

  生物ポンプによる輸送（*e.g.*, Dachs *et al.*, 2002; Wania and Daly, 2002）

  ⇕

  深層水の形成による輸送（Lohmann *et al.*, 2006）

- 中-高次消費者への曝露予測

  × 地球規模での生態系構造
  × 中-高次消費者への生物濃縮

→ 全モデル研究の課題（未知）

❖ 目的

POPsの中-高次消費者を含めた海洋生物（水産資源）への曝露量と漁業による陸域への輸送量を地球規模で推定する

H24年度課題

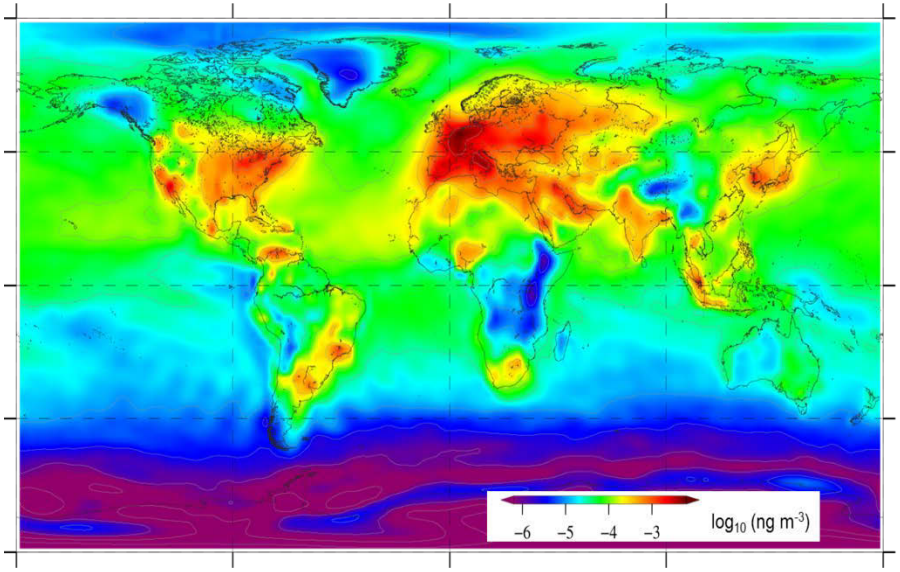
- 全球多媒体モデルFATEの開発、及び塩素・臭素系物質（Cl/Br-POPs）1411種への拡張
- S-R解析を用いたCl/Br-POPsの長距離輸送特性の評価

H25年度課題：

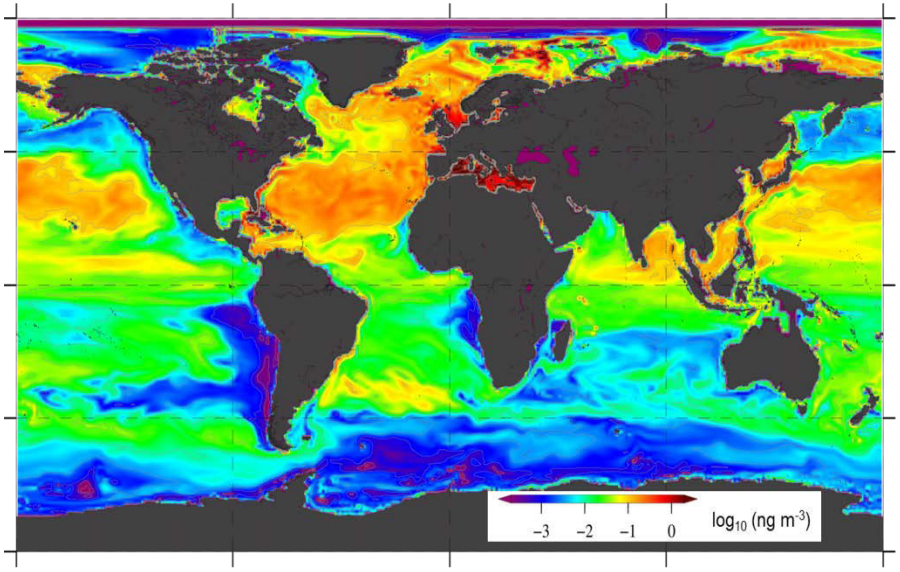
- FATE-生態系モデル-生物濃縮モデルを統合して、POPs（PCBs）の海洋水産資源への曝露量を推定
- 漁業によるPOPs（PCBs）の陸域への一次輸送量を推定

❖ 全球多媒体モデルFATEの概要

- 6媒体：大気，海洋，土壌，植生，氷圏，季節雪氷面
- 沈着，ガス交換、分解，相分配等の多媒体プロセス
- 大気-海洋結合化学輸送モデル ← 再解析データ
- 植生・海洋基礎生産者への生物移行 ← 衛星データ



大気最下層濃度（PCB153, 2007）



海洋表層溶存態濃度（PCB153, 2007）

❖ 多媒体-生態系-生物濃縮モデルの統合

全球多媒体モデル（FATE）

海洋低次生態系モジュール

↓ 海洋低次消費者（POM）中の濃度

生物濃縮モデル

↓ 魚類（栄養段階別，個体）中の濃度

生態系モデル（中-高次消費者）

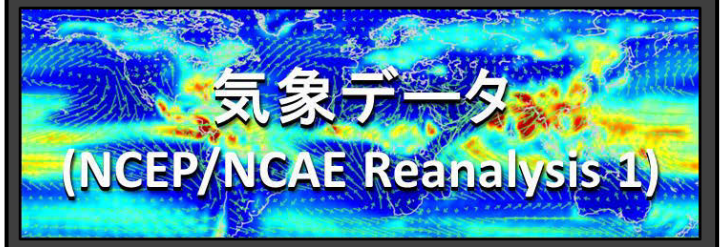
↓ 魚類（全栄養段階，個体群）中の濃度

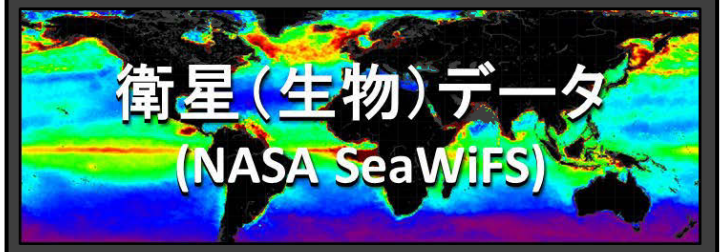
水産統計データ（FAO FishStatJ）

↓

漁業による陸域への輸送量

入力データ





❖ 多媒体-生態系-生物濃縮モデルの統合

全球多媒体モデル（FATE）

海洋低次消費者（HOM）中の濃度

低次消費者への生物移行

生物濃縮モデル

魚類（全栄養段階，個体群）中の濃度

生態系モデル（中・高次消費者）

魚類（全栄養段階，個体群）中の濃度

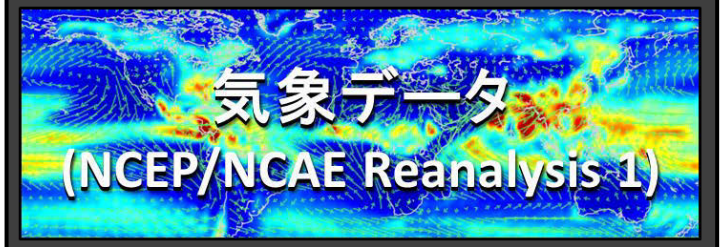
中-高次消費者への生物移行

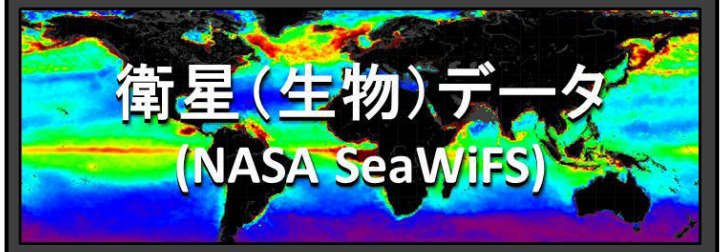
水産統計データ（FAO FishStatJ）

↓

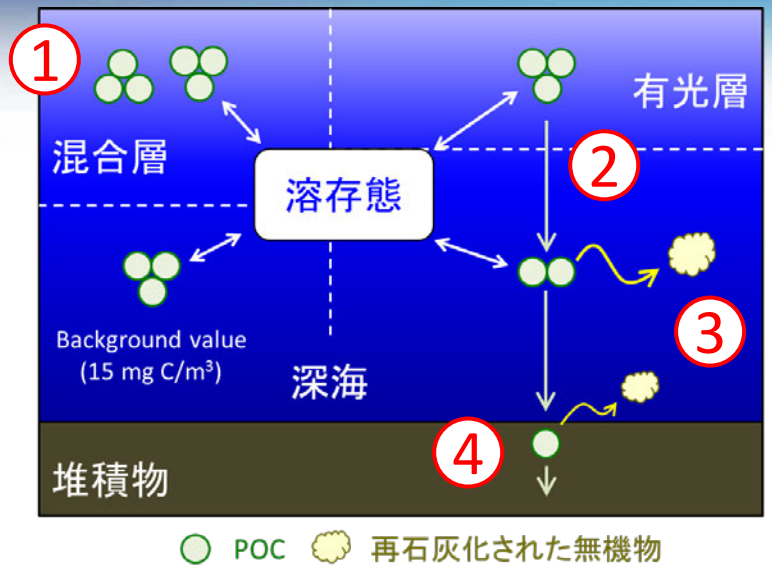
漁業による陸域への輸送量

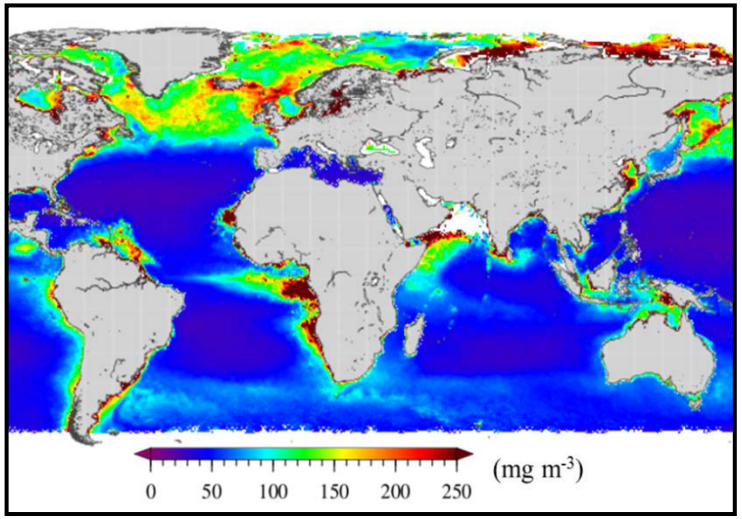
入力データ





❖ 低次消費者（POM）への生物移行





（表層POC濃度, 7月）

炭素循環：衛星データベースの実験モデルを統合
生物移行：定常分配（溶存態/POC）

① バイオマス（Stramska, 2009）
→ 特定波長の反射成分と高相関

$C_{POC} = c_1[R_{rs}(\lambda)/R_{rs}(555)]^{c_2}$

② 除去率（Dunne *et al.*, 2005）

$R_{EX} = NPP[c_3T+c_4\ln(Chl)+c_5]$

③ 再石灰化フラックス（Lutz *et al.*,2002）
→ フラックスプロファイルから算出

$F_{f(z)} = R_{EX}[c_6\exp(c_7z)+c_8]$

④ 埋没効率（Dunne *et al.*, 2007）

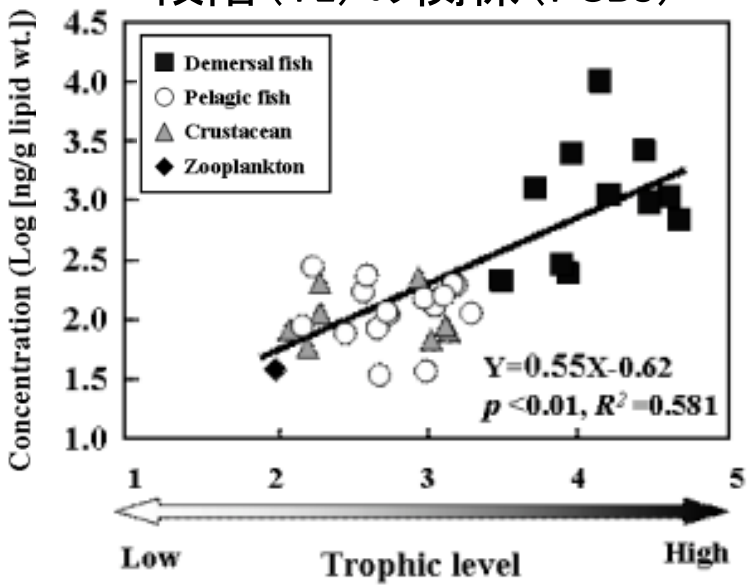
$R_{burial} = F_{f(zb)}[c_9+c_{10}F_{f(zb)}^2/(c_{11}+F_{f(zb)})^2]$

衛星データ　実験定数

❖ 中-高次消費者（魚類）への生物移行

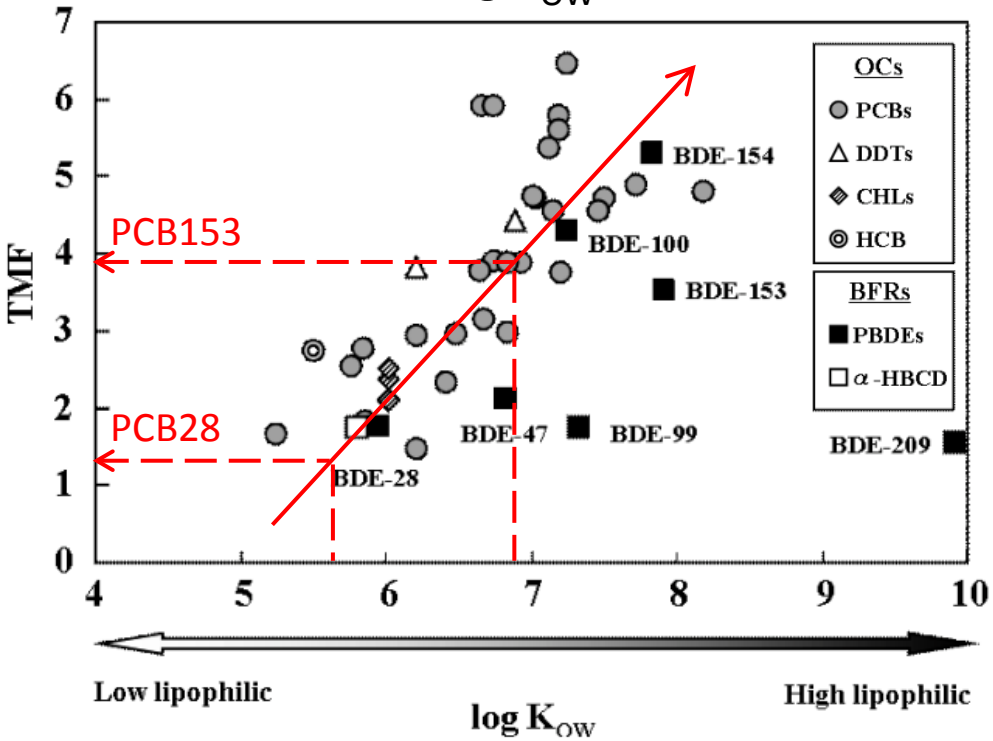
FATEより推定されたPOM中濃度とTMF（Trophic magnification factor）を用いて、各栄養段階にある魚類（個体）中濃度を計算

脂質換算濃度（C_B）と栄養段階（TL）の関係（PCBs）



$$\log C_B = \log \mathrm{TMF} \times \mathrm{TL} + b$$

TMFとlog K_{OW}の関係



（Toyoshima *et al.*, 2008, *Int. Stud. Einviron. Chem.*, **vol2**, 83-90.）

衛星データベースの中-高次生態系モデルを用いて各栄養段階にある硬骨・軟骨魚類のバイオマスを計算

衛星データ（SeaWiFS）

↓ 基礎生産モデル（CbPM; Westberry *et al.*, 2008)

基礎生産量, 海表面温度

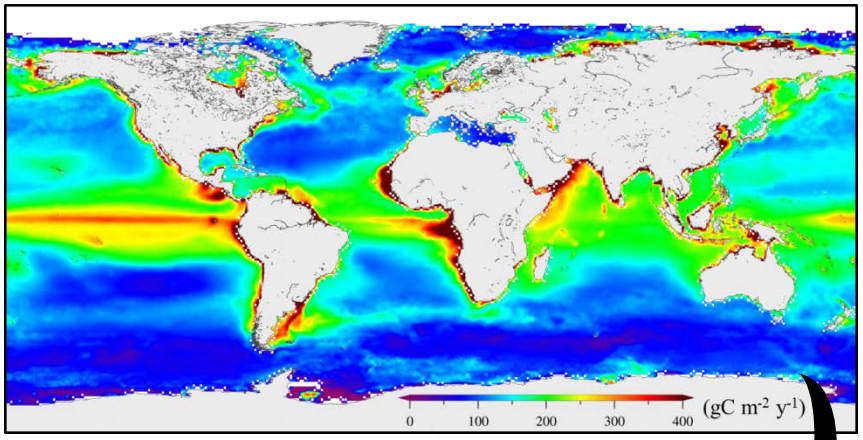
↓ 中-高次生態系モデル（Jennings *et al.*, 2008）

硬骨・軟骨魚類のバイオマス（各栄養段階）

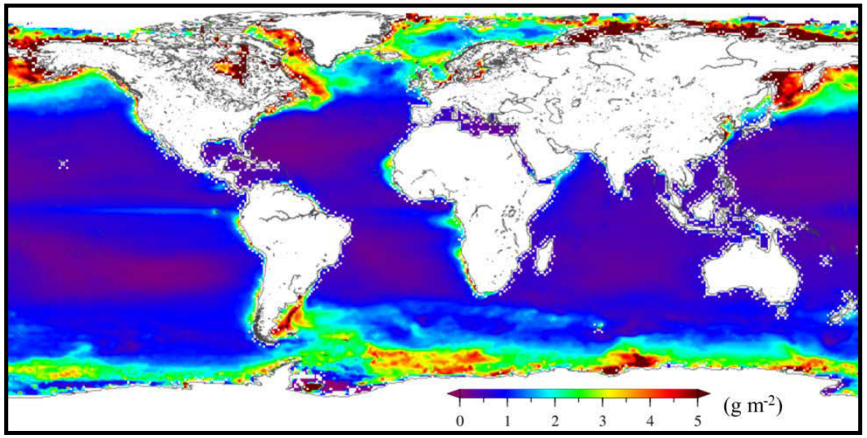
↓ 魚類固体中濃度（各栄養段階）

全硬骨・軟骨魚類中の含有量

基礎生産量（CbPM）



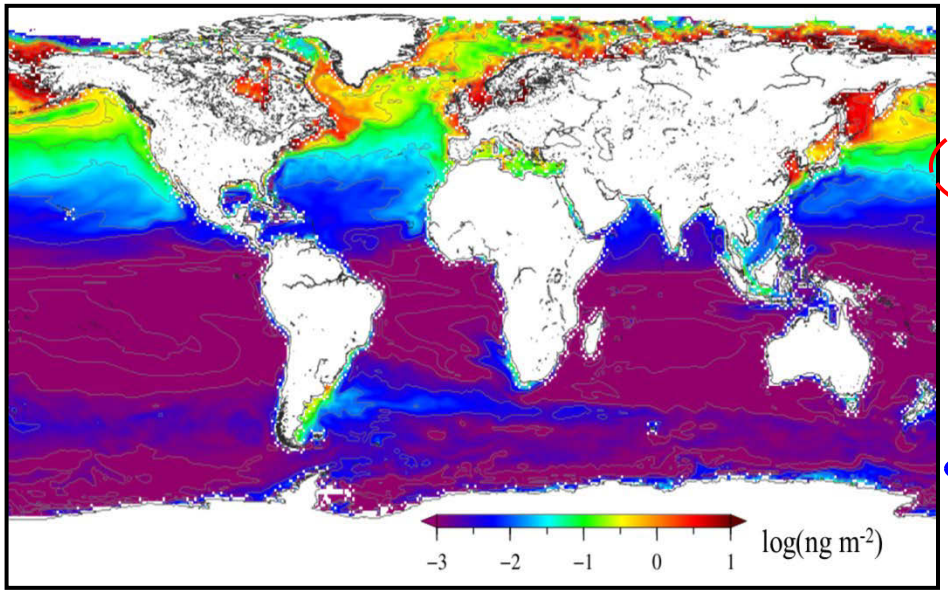
全魚類のバイオマス



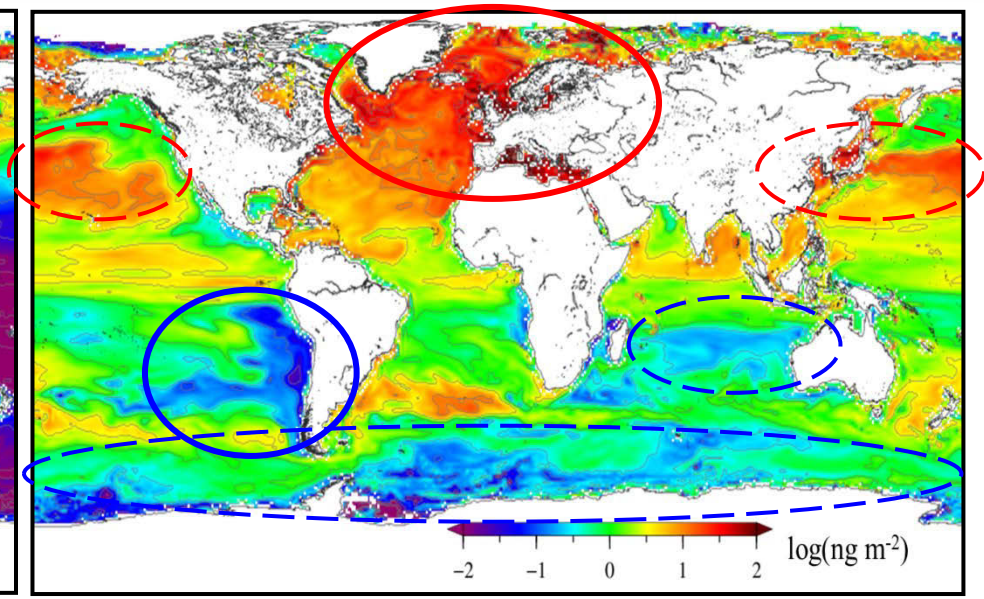
（Jennings *et al.*, 2008, *Proc. Roy. Soc. B.*, **275**, 1375-1383.）

❖ 全魚類中の含有量の推定結果（2007年）

PCB28



PCB153



浅海（0-200m）における含有量の**14.5%**が魚類に蓄積

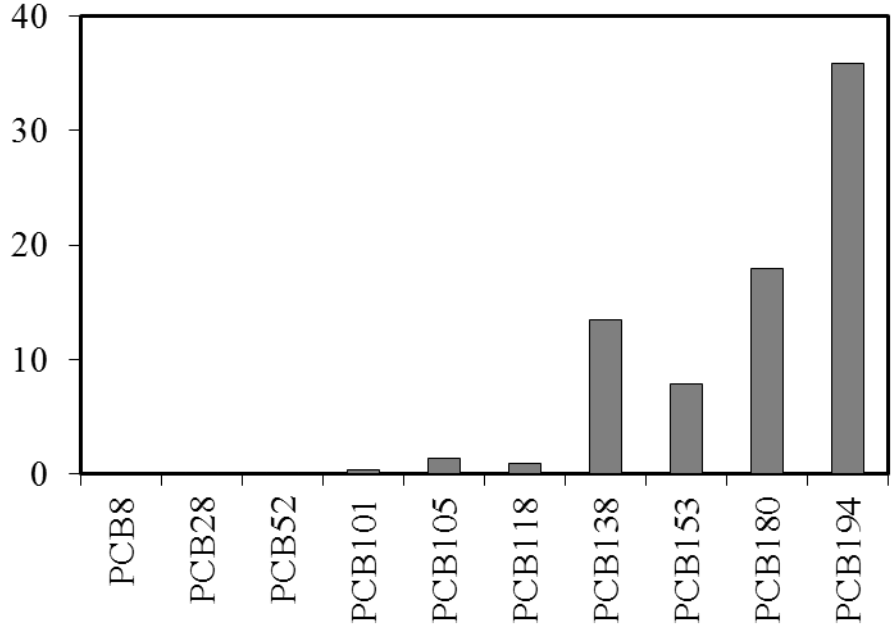
浅海（0-200m）における含有量の**28.7%**が魚類に蓄積

❖ 漁業による陸域への輸送量（2007年）

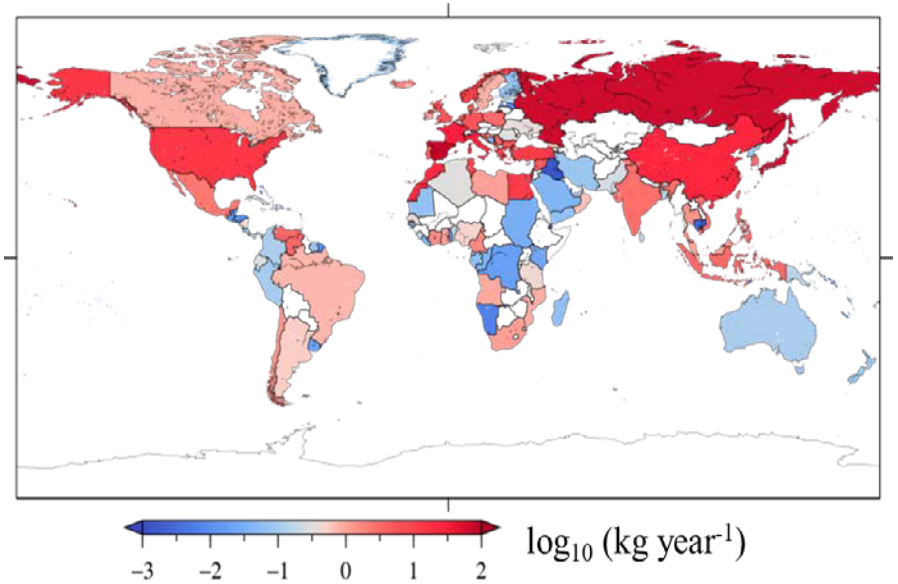
魚類（個体群）中の含有量の予測結果と水産統計データ（FAO FishStatJ）を用いて、漁業による陸域への（一次）輸送量を推定

（FishStatJ: 245カ国, 2119魚種, 19FAO主要漁業海域, 1950-2010年）

年間排出量に対する漁業による陸域への輸送量の割合（%, 全球）



漁業によるPCB153の陸域への年間輸送量（国別）



❖ まとめと展望

H24年度課題：全球多媒体モデルFATEを開発

- 分子構造より物理化学特性を推定するQSPRモデルを開発/導入して，FATEを塩素・臭素系（Cl/Br）物質1411種へ拡張
- S-R解析を用いて，Cl/Br物質の長距離輸送特性を評価

H25年度課題：FATE-生態系モデル-生物濃縮モデルを統合して海洋水産資源への曝露評価手法を開発

→ 排出から漁業による陸域への（一次）輸送に至るまでの物理・化学・生物学的プロセス、及び人為的要因によるPOPsの循環を地球規模で推定することが可能になった.

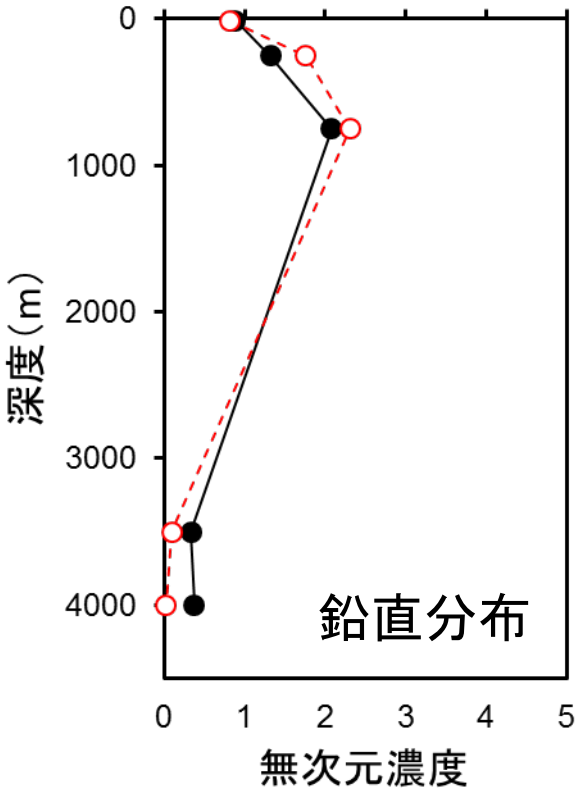
課題と展望（H26年度~?）：

- 生物濃縮モデル（TMF）の精緻化，魚類中濃度の検証
- 水銀のモデル研究への応用

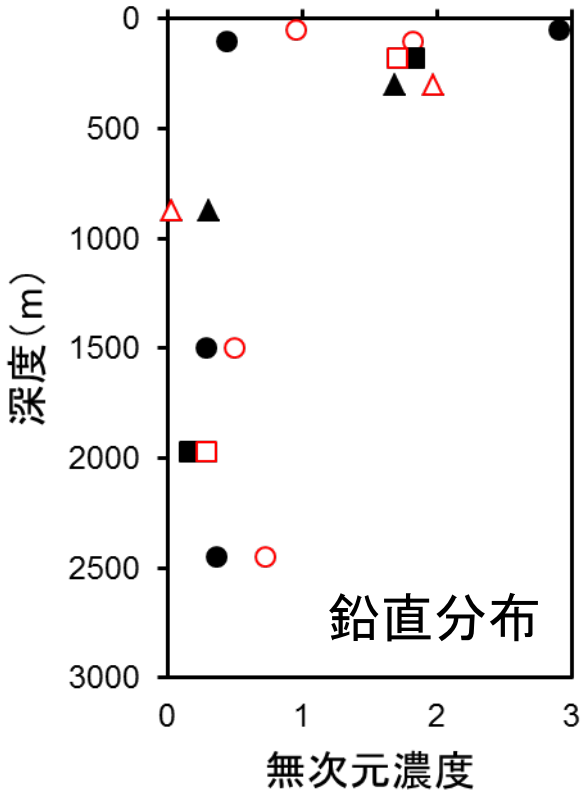
Thank you!

❖ モデル検証（北大西洋外洋, PCB153）

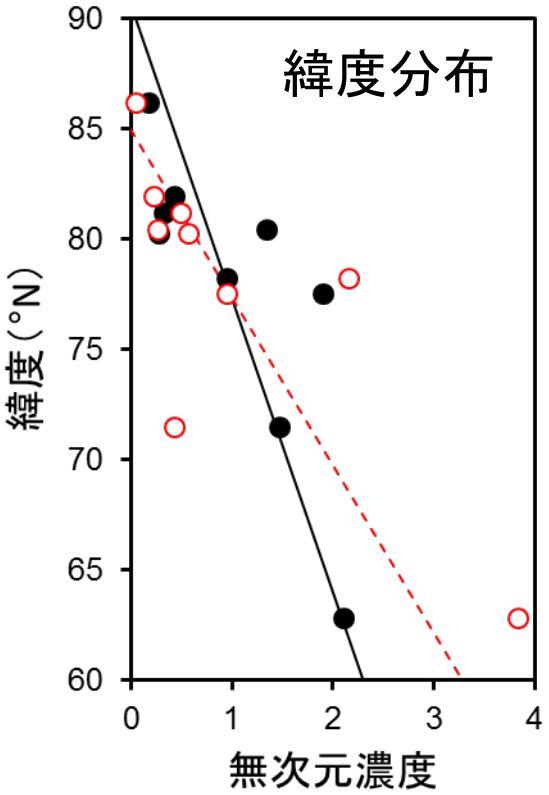
溶存態
（Schulz *et al*., 1988）



POC
（Schulz et al., 1998）



溶存態+POC
（Sobek and Gustafsson, 2004）



観測値　　予測値