

機関番号：82101
 研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2009～2010
 課題番号：21710033
 研究課題名（和文） 残留性有機汚染物質に対する高解像度全球多媒体モデルの構築と公開
 研究課題名（英文） Development of a high resolution global multi-compartment model for persistent organic pollutants
 研究代表者
 河合 徹（KAWAI TORU）
 独立行政法人国立環境研究所・環境リスク研究センター・NIES ポスドクフェロー
 研究者番号：30512719

研究成果の概要（和文）：研究代表者らは残留性有機汚染物質（POPs）の地球規模での生物地球化学的物質循環を詳細に解く全球多媒体モデル（FATE）の開発を行ってきた。本研究では海洋におけるPOPsの3次元輸送と基礎生産者への生物濃縮を詳細に解く高解像度海洋モデルを新たに開発し、FATEに導入した。新たに開発したモデルを用い、PCBsの海洋中における時空間動態の検討し、また、PCBsの物理・生物学的プロセスによる深海輸送量を定量化した。

研究成果の概要（英文）：A high resolution ocean compartment of the Finely-Advanced Transboundary Environmental model (FATE) was developed. FATE is a global multi-compartment model capable of predicting dynamics and biogeochemical cycles in and between the atmosphere, ocean, soil, vegetation, and cryosphere. Using improved model, we investigated the fate of polychlorinated biphenyls (PCBs) in the global oceans.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,900,000	870,000	3,770,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：環境学・環境影響評価・環境政策

キーワード：残留性有機汚染物質、全球、多媒体モデル

1. 研究開始当初の背景

近代における人間活動の変化は地球温暖化に代表される様々な環境問題を引き起こしており、有害化学物質による環境汚染もこの一として取り上げられている。重金属類を含めて有害化学物質には様々な種類があるが、とりわけ、残留性有機汚染物質 (Persistent Organic Pollutants; POPs) は高い生物濃縮性と毒性を持ち、POPsの環境汚染に対する社会的な関心は高い。過去に使用された主要な POPs に対しては、既に国際条約（ストックホルム条約、2001年5月採択、2004

年5月17日発効)において使用が規制され、環境媒体中の濃度は減少傾向をたどるであろうと予測されている。一方、近年、新規の POPs が新たに認知され始めており [臭素系難燃剤 (BFRs) や過フッ素系の化合物 (PFCs) 等]、これらの新規物質による環境汚染は今後さらに深刻化するのではないかと危惧されている。

POPs は多媒体に長期間残留する性質を持ち、大気・海洋大循環による地球規模で長距離越境輸送されることが知られており、多媒体（大気、海洋、土壌、植生等）、全球にお

たる広範囲な動態と生態系への移行（生物濃縮）を複合的に評価する必要がある。このためには、数値モデルを用いたアプローチが有効であり、また、モニタリングの難しい領域（例えば外洋や深海等）を含めた POPs の環境中における動態をシステムティックに評価しうる唯一の手段である。

多媒体モデルを中心に、POPs を対象としたモデル研究はこれまでに広く行われてきた。一方、全球モデルにおいては、大気・海洋大循環による越境輸送を評価するのに十分な解像度を持つモデルが少なく、空間輸送を解くサブモデルに改良の余地が残されている。特に海洋のモデリングが遅れており、深海までを含めて海洋大循環による POPs の空間輸送を高解像度で詳細に解く全球モデルは開発されていない。

2. 研究の目的

研究代表者らは、2008 年度より、愛媛大学、国立環境研究所との共同研究として、POPs を対象とする高解像度全球多媒体モデル（FATE; Finely-Advanced Transboundary Environmental model）の開発を行ってきた。本課題では、高解像度海洋モデルを開発して FATE に導入し、モデル検証を行うことを目的に研究を行った。さらに、新たに開発したモデルを用いて海洋における POPs の時空間動態と深海輸送に関する検討を行った。

3. 研究の方法

図 1 に FATE の概念図を示す。FATE は全球に渡って、大気、海洋、土壌、植生、雪氷圏における POPs の生物地球化学的物質循環を詳細に解く地球システムモデルである。モデルの入力・フォーシングデータには全球グリッドベースの排出量、大気・海洋大循環モデルより得られた気候データ、衛星データより見積もられた生物データ、土地利用データ等が用いられ、媒体内、媒体間における物理・化学・生物学的内部プロセスを解くことにより POPs の環境中負荷、シンク量、フラックス等の動態が予測される。大気と海洋では、それぞれ、 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ} \times 27$ 層、 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ} \times 54$ 層の空間解像度で 3 次元移流拡散計算が行われ、長距離越境輸送が詳細に計算される。これに加えて、沈着と拡散による媒体間輸送、分解や相分配等の基礎的な化学プロセス、及び、バイオマスが大きく定量的に無視できない基礎生産者（植生、海洋植物プランクトン）への生物濃縮が考慮されている。海洋基礎生産者への移行（生物濃縮）を陽的に取り扱っている点が FATE の重要な特徴の一つであるが、計算に必要な海洋植物プランクトンのバイオマスと成長率等の生物データは衛星データ (SeaWiFS) と CbPM (Carbon-based Production Model) を用いて計算した。

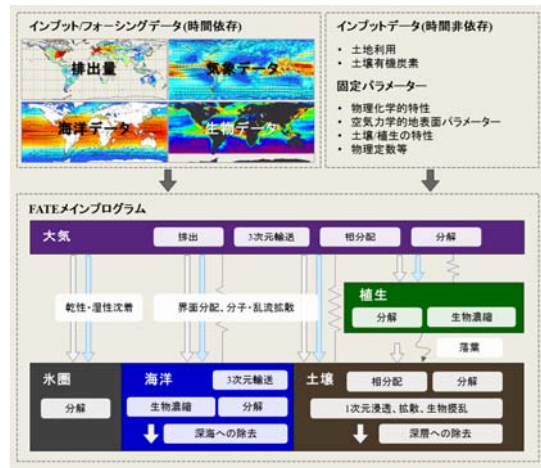


図 1 全球多媒体モデル FATE の概念図

4. 研究成果

(1) 代表的な POPs の一つである PCB (polychlorinated biphenyl) の全 11 コンジナー (PCB8、28、31、52、101、105、118、138、153、180、194) を対象としたモデル開発が完了した。今後、これを土台として、同様に地球規模での動態評価が求められる、他の POPs や BFRs や PFCs 等の新規物質、及び水銀等の重金属類への拡張が見込まれる。

(2) FATE モデルを用いて PCBs の 7 コンジナー (PCB28、52、105、118、138、153、180) に対して 1930 年から現在に至るまでの約 80 年に渡る長期シミュレーションを行った。この結果と、アジア・ヨーロッパの計 138 サイトで得られている大気濃度モニタリングの既往データを比較してモデル検証を行った (図 2)。モデルによる計算結果は、中国等の特定の国・地域のモニタリングデータを一部過小評価するが、全サイトの結果は、8 割以上が 1 オーダー以内の相違に収まった。先行研究と比較して、概ね良い検証結果が得られた。

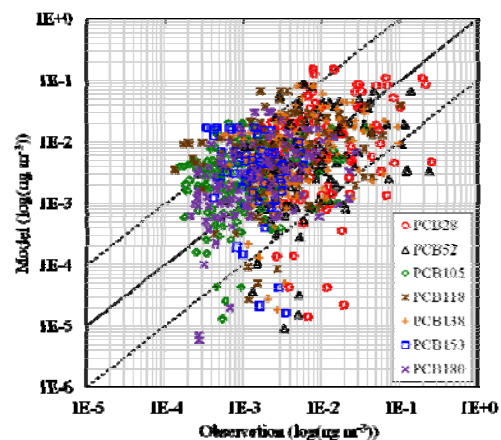


図 2 FATE で計算された PCBs の大気濃度の予測値とモニタリングデータの比較結果

(3) 地球規模での環境モニタリング、及びモデル研究の結果より、POPsは大気循環により極域へと集まりやすいということが示唆されてきた。一方、モニタリングデータが比較的少ない海洋（例えば外洋域）におけるPOPsの時空間動態を議論した研究は少なく、特に地球規模におけるこの実態把握は遅れている。本課題では、FATEを用いて過去80年に渡るシミュレーションを行い、PCBs海洋中負荷量の時空間動態を検討した。この結果、大気と海洋、水深帯（深度）、及びPCBsの同族種間において、高濃度となる収束域が大きく異なることが示された。

図3はFATEモデルより得られたPCB153の大気・海洋濃度の一例である（1990年の年平均値）。大気上層（自由大気）ではPCB153は南半球を含めた地球全体に広く輸送されており、また、極域へと緩やかに収束している。これは、これまでの知見と定性的に一致する

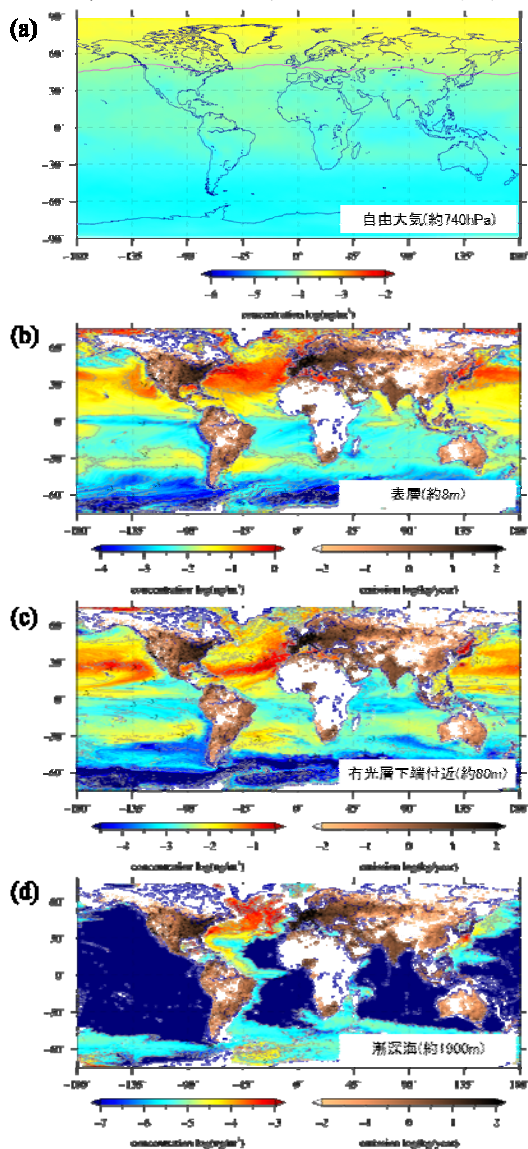


図3 FATEで予測されたPCB153の大気、海洋濃度の空間分布（1990年）

(図3(a))。一方、生物生産の行われている有光層下端付近から中深海にかけては、10年スケールの亜熱帯循環により、排出量の多い中緯度から緩やかに沈み込みながら低緯度の亜熱帯海域へと収束する。これは特に北大西洋で顕著であり、この海域における生態系への悪影響が懸念される（図3(c)）。より深い深海へは、深層水が形成される極めて限定的な海域でのみPCB153の輸送がなされている。海洋の中層・深層循環の時間スケールに比べて半減期の短い低塩素化PCBsの場合は、これらによる汚染が表層付近のみに限定され、中深海・深海への輸送がほとんどなされない結果となった。

(4) 大気より海洋へと輸送されたPCBsは深層水の形成と生物学的なプロセス（植物プランクトンへの生物濃縮と死骸の沈降）により深海へと輸送される。一度深海へと輸送されたPCBsが再び表層へもたらされるためには千年スケールの時間が必要となるため、深海はPCBs等のPOPsの最終シンク場所になっている可能性があるという議論がなされてきた。本課題では、FATEモデルを用いて、上記の物理・生物学的プロセスによるPCB153の深海輸送量の定量化を行った。図4は深層水の形成によるPCB153の深海輸送の様子[図4(a)]と生物学的プロセスによるPCB153の深海除去量の空間分布[図4(b)]を示した

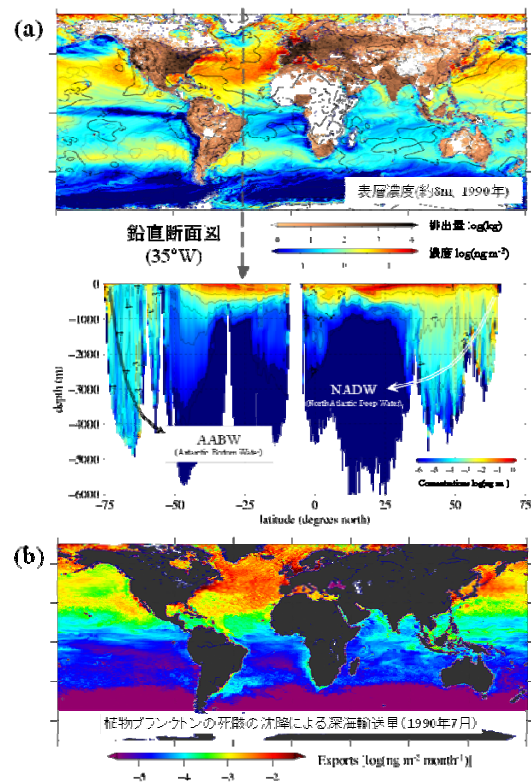


図4 FATEで予測されたPCB153の(a)海洋濃度の鉛直断面図と(b)植物プランクトンの死骸の沈降による深海輸送量の空間分布

計算結果の一例である。主要な海洋深層水である北大西洋深層水 (NADW) と南極低層水 (AABW) の形成により PCB153 が深海へと輸送されている様子が再現されている。定量的には、過去 80 年間積算した PCB153 の海洋循環による混合層以深への正味の輸送量が 7.4 トン、生物学的プロセスによる深海除去量が 1.0 トンと見積もられた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6 件)

- ① Kawai, T., M. Kanda, Urban Energy Balance Obtained from the Comprehensive Outdoor Scale Model Experiment. Part I: Basic Features of the Surface Energy Balance, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 査読有, 49, 2010, 1341-1359.
- ② Kawai, T., M. Kanda, Urban Energy Balance Obtained from the Comprehensive Outdoor Scale Model Experiment. Part II: Comparison with Field Data Using an Improved Energy Partition, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 査読有, 49, 2010, 1360-1376.
- ③ Kawai, T., I.C. Handoh, Fate of the Polychlorinated Biphenyls in the Global Oceans Predicted by the Finely-Advanced Transboundary Environmental model (FATE), *Organohalogen compounds*, 査読有, 72, 2010, 247-250.
- ④ Handoh I.C., T. Kawai, Uncertainty Analysis of the Global Dynamics of Polychlorinated Biphenyls Using a Bayesian Emulator of the Finely-Advanced Transboundary Environmental model (FATE), *Organohalogen compounds*, 査読有, 2010, 72, 112-115.
- ⑤ Kawai T., M.K. Ridwan, M. Kanda, Evaluation of the Simple Urban Energy Balance Model Using Selected Data from 1-yr Flux Observations at Two Cities, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 査読有, 2009, 48, 693-715.
- ⑥ Kawai T., I.C. Handoh, S. Takahashi, The Rise of the Finely-Advanced Transboundary Environmental model (FATE): a State-of-the-Art model Prediction of the Global Sink of Persistent Organic Pollutants, *Organohalogen Compounds*, 査読有, 2009, 71, 1610-1615.

[学会発表] (計 8 件)

- ① Kawai, T., Quantifying the Contributions of Ocean Circulation and Marine Phytoplankton to the Global Fate of Polychlorinated Biphenyls., 2nd Korea-Japan Symposium on Environmental Chemistry, 4 November 2010, Sookmyung Women's University Centennial Hall.
- ② Kawai, T., The roles of marine phytoplankton and ocean circulation in determining the global fate of polychlorinated biphenyls., International Symposium on Modeling and Analysis of Marine Environmental Problems (MAMEP 2010), 23 September 2010, Ehime University.
- ③ Kawai, T., Fate of the polychlorinated biphenyls in the global oceans predicted by the finely-advanced transboundary environmental model (FATE)., 30th International Symposium on Halogenated Persistent Organic Pollutants (POPs), 16 September 2010, Marriott Rivercenter.
- ④ 河合徹, 全球多媒体モデル FATE を用いた PCBs の時空間変動予測、第 19 回環境化学討論会、2010 年 6 月 23 日、中部大学
- ⑤ Kawai, T., The rise of the Finely-Advanced Transboundary Environmental model (FATE): A state-of-the-art model prediction of the global sink of persistent organic pollutants., 29th International Symposium on Halogenated Persistent Organic Pollutants (POPs), 27 August 2009, Beijing International Convention Center.
- ⑥ Kawai, T., Improvements and evaluations of a Simple Urban energy balance Model for Mesoscale simulation (SUMM) by using selected data obtained from one-year flux observations in two cities., The 7th International Conference on Urban Climate (ICUC7), 1 July 2009., Pacifico Yokohama.
- ⑦ 河合徹, 全球多媒体モデル FATE を用いた残留性有機汚染物質の長期動態予測、第 18 回環境化学討論会、2009 年 6 月 9 日、つくば国際会議場
- ⑧ 河合徹, 残留性有機汚染物質の動態を予測する全球多媒体モデルの構築と検証、日本海洋学会春季大会、2009 年 4 月 8 日、東京大学

[図書] (計 2 件)

- ① Kawai, T., I.C. Handoh, N. Suzuki, *TERRAPUB, Interdisciplinary Studies on Environmental Chemistry* vol. 5, 2011, 169-178.

- ② Handoh, I.C., T. Kawai, TERRAPUB, Interdisciplinary Studies on Environmental Chemistry vol. 5, 2011, 179-187.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

河合 徹 (KAWAI TORU)

独立行政法人国立環境研究所・

環境リスク研究センター・NIES ホストクフェロー

研究者番号：30512719

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

該当なし