

(第 6 号様式)

学位論文審査の結果の要旨

氏 名	Yang Min
審査委員	主 査 郭 新宇 副 査 日向 博文 副 査 森本 昭彦 副 査 国末 達也

論 文 名 Simulations of PCBs in the Northwestern Pacific Ocean with a Three-Dimensional High-Resolution Hydrodynamic-Ecosystem-PCB Coupled Model

審査結果の要旨

外洋における PCB (Poly Chlorinated Biphenyl、ポリ塩化ビフェニル) の主なソースは、海面における拡散フラックスだと報告されている。この拡散フラックスは大気中の PCB 濃度だけではなく、表層海水中の溶存態 PCB 濃度と水温、さらに風速にも依存する。大気中の PCB 濃度は陸上からの排出量や大気中の移流拡散などに依存し、一方、海水中の溶存態 PCB 濃度は生物粒子の付着と沈降、海流による移流、渦拡散などに影響される。大気中の PCB 濃度が高ければ、大気から海洋への拡散フラックスが生じるが、何らかの原因で海水中の PCB 濃度が直上の大気中の PCB 濃度より高ければ、海洋から大気への拡散フラックスも生じる。

日本周辺海域では、黒潮や対馬暖流が流れている。これらの海流は海岸の近くを流れるため、陸上から大気へ放出された PCB はこれらの海流に溶け込んで太平洋の中心部に運ばれる様子が想像できる。太平洋の中心部になると、大気中の PCB 濃度が低下するため、これらの海流によって運ばれてきた海水中の PCB は大気中に放出される可能性もある。このように、陸上から出される PCB は大気中の直接的な輸送ルールに加えて、海流という輸送ルートも持つ可能性がある。

一方、世界各地の深海生物から高濃度の PCB が検出されている事実から、深海に PCB が蓄積されていることが推測される。深海の PCB は千年スケールの海洋深層循環によって表層海洋に運ばれ、将来大気へ放出されることが懸念されている。このような状況において、深海にある PCB の動態を予測することは重要であるが、その前に、深海への PCB の蓄積過程を把握する必要がある。

Yang Min 氏は、本学位論文において、海洋における PCB 輸送に関わる物理過程と生物過程を把握するために、北西太平洋の 3 次元流動・低次生態系モデルに PCB 計算モジュールを導入し、流動・低次生態系・PCB の結合モデルを開発した。PCB に多数の同族体があるが、本研究では 4 つの代表的な同族体 (CB28、CB101、CB153、CB180) を選んで計算を行った。PCB モジュールの入力条件には全球 PCB モデルで得られた PCB の大気濃度を利用した。モデル結果から、大気海洋間の PCB 拡散フラックスに対する海流の調節効果を解明し、さらに PCB の日本海中深層への蓄積過程を解析した。研究成果の詳細は以下の通りである。

(1) 北西太平洋表層海水における PCB 濃度の季節変動と空間分布

モデル結果から得られた表層海水における溶存態 PCB の濃度は、亜熱帯地域から亜寒帯地域に、縁辺海から外洋域にかけて増加している。粒子態 PCB の濃度は、亜寒帯地域で高い値が見られるが、溶存態 PCB 濃度より低い。溶存態 PCB 濃度の季節変動は、基本的に冬に高く、夏に低くなるが、季節変動の幅は低緯度海域より高緯度海域の方が高い。

(2) 大気海洋間の PCB 拡散フラックスに対する海流の調節効果

モデル結果に日本南岸の黒潮流域から黒潮続流域にかけて PCB 拡散フラックスの符号は正から負になることが見られる（正のフラックスは大気から海洋へと意味する）。また、このような符号の逆転は黒潮流域に限られている。このような分布を理解するために、海流の流速をゼロに設定した計算を行い、このケースでは黒潮流域における PCB 拡散フラックスの方向逆転は生じないことが分かった。海流がなければ表層海水中の PCB 濃度は大気中の PCB 濃度とほぼ平衡状態を保ち、その水平分布は大気中の PCB 濃度に強く依存することになる。海流が存在すると、表層海水中の PCB 濃度は海流の上流側の PCB 濃度に影響され、その影響の強さは海流の方向の PCB 濃度の水平勾配と海流の速度に比例する。黒潮は西岸境界流であり、海流の中で流速が一番速い。さらに、黒潮は PCB の濃度勾配が大きくなる海岸付近を流れるため、海流の PCB 拡散フラックスに対する調節効果が最も顕著になると考えられる。

本研究の計算領域は北西太平洋に限られているが、黒潮のような海岸付近を流れる西岸境界流はほかの海にもあるために、この現象は普遍的に存在すると考えられる。そのため、本研究の成果から、海水流動を十分に考慮していない PCB の全球モデルは西岸境界流を表現できるように改善する必要があるとも言える。

(3) 日本海の中深層における CB153 の蓄積

本研究から、PCB モデルの計算を 21 年継続しても、日本海の中深層の CB153 濃度は上昇し続けることが分かった。日本海における CB153 は鉛直方向に 3 層構造を持つ。表層 (0-100m) と深層 (>600m) は濃度が低く、中層 (100-600m) の濃度が高くなっている。顕著な季節変動は表層の CB153 濃度には見られない。中層と深層の CB153 平均濃度は 0.01 と $0.013 \text{ pg L}^{-1} \text{ year}^{-1}$ の上昇速度を持つことから、日本海の中深層において未だ PCB の蓄積が続いている可能性があると考えられる。

提出された学位論文の研究成果の一部は、国際学術雑誌に 1 編の論文が公表されている。日本海における PCB153 蓄積過程に関する研究成果は投稿準備中である。

本学位論文の公聴会は令和 4 年 10 月 12 日にオンライン形式で開催し、約 50 分の英語による論文発表と 25 分の質疑応答が行われた。引き続き、学位論文審査委員会を開き、本論文の内容を厳正に審議した結果、審査委員が全員一致で、博士（理学）の学位を授与するのに値するものと判定した。