

外洋で計測されたSF₆濃度結果を拡散方程式にグリーン関数法でデータ同化して水塊移動を推定する

坪野 考樹¹

1. 背景と目的

海洋における水塊の移動を追跡する手法として、海域にトレーサを散布してその濃度を測定する手法が用いられる。ただし、実際の海域で観測する場合では、測定点が時間・空間的に疎で、豊富ではないことが多いため、水塊移動を追跡することが困難となる。

このような困難さを回避する方法として、流動を計算する数値モデルに観測した濃度結果をデータ同化(DA; Data Assimilation)させて、海域における流動や濃度を推定することが考えられる。そこで、水塊移動を追跡することを目的に、実際に観測された水塊のトレーサ濃度を、簡易なモデルにDAする手法を構築して、DAの計算を試み、その結果について検討を行った。

2. 観測データと手法の概要

(1) データ

トレーサ濃度として、植物プランクトンの増殖にとって鉄が制限因子と考えられる外洋高栄養塩海域である北太平洋亜寒帯域表層に鉄溶液を散布して、植物プランクトン等の応答を調べる実験 SEEDS II(The Subarctic Pacific Iron Experiment for Ecosystem Dynamics Study II)において水塊追跡した際に、船舶で散布・観測した六フッ化イオウ(SF₆)の濃度結果(津旨ら(2005)・西岡ら(2005))を用いた。

この水塊の観測・追跡では、SF₆の飽和海水(0.12 moles m⁻³)を4.1m³(0.49mol)作成した後、48.13 °N, 166 °Eの地点に船上からパイプを通して海表面に散布し、散布後1, 3, 4, 5, 7, 9および12日目の夜間に約8~10時間かけて、船底(水深約5m)からポンプで船上に観測間隔6分間で連続的に海水を採取して濃度測定を実施している。図1に、観測海域、SF₆の水塊形状を観測した測定点(濃度が5.0 pmol m⁻³以上の位置を●、未満の位置を+)、およびSF₆を散布する船舶の軌跡(黒線)を示す。図2に、放出後の日付に対するSF₆濃度が5.0 pmol m⁻³以上の値を示す。ここに、図中のD01の01は放出後からの日付までの観測結果を表す。本研究では、図1に示した全ての観測点の結果を用いた。ここに、散布後1, 3, 4, 5, 7, 9および12日目における観測点は、それぞれ97, 82, 85, 74, 91, 98および77点で全604

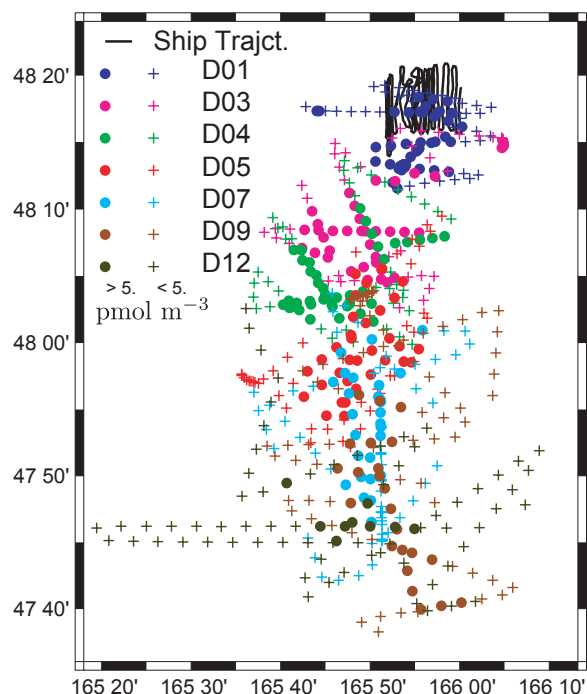


図-1 観測海域とSF₆の測定点

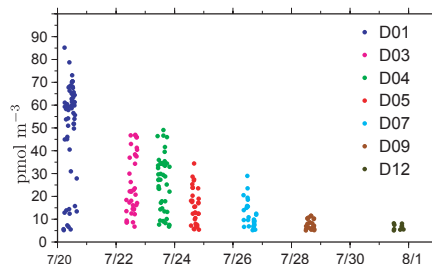


図-2 SF₆濃度

点である。

(2) モデル

一般的なモデルは、入力・数値モデル・出力で分けられる。本研究では、入力を海域流動・SF₆の初期濃度・大気とのガス交換などを表現する係数、数値モデルを水平2次元の拡散方程式を離散化した数値モデル、および出力を図1で示した測定点の濃度とした。数値モデルは、津旨ら(2005)の報告に最終的なSF₆の混合層厚が約30mであったことから層厚を30mとし、図1の範囲を計算範囲として、 x, y 方向の格子数は116, 111とした。また、境界条件は、流速が計算領域から流出する場合を放射条件とし、流速が計算領域から流入する場合を0とした。

DAでは、出力と観測値を比較して、最尤な入力値(：制御変数)を計算するが、各格子点上での流動一つ一つを推定するには、観測値が十分ではないことや計算時間が大きくなることが想定されるため、流動について簡易化を行った。実際には、流動が時間変化しないと仮定し、さらに x, y 方向についてそれぞれ3次直交多項式の線形和で表される水面形から計算される地衡流とした。そのため、DAで推定される流動に関する入力値は、多項式の係数となる。次に、その他で推定される入力値は、 SF_6 が海域に最終的に散布された濃度(初期濃度)と、海面でのガス交換や30m以深に流出することによる減衰を表す係数となる。

(3) データ同化法(DA; Data Assimilation)

本研究では、目的関数を $J = \frac{1}{2}(\mathbf{M}(\mathbf{x}) - \mathbf{y})' \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{M}(\mathbf{x}) - \mathbf{y})$ (ここに、 y, x はそれぞれ観測・計算した濃度で、 R は重みを表す)として、グリーン関数法(GFM: Green's Function Method)を用いて、停留するまで逐次的に制御変数である入力値を推定した。

3. 結果

初期濃度の与え方を変えて、2つのモデル(Model 1; 海域に $8.5\text{km} \times 8.5\text{km}$ の正方形の範囲に初期濃度を与えるモデル, Model 2; SF_6 の放出した際の航路上のメッシュに初期濃度を与えるモデル)について、DAの計算を実施した。

まず目的関数の重みについて検討するために、 R^{-1} の対角項を時間 t の関数 t^r とおき、 $r = 0.1, 0.5, 1.0, 2.0$ で計算を行った。図-3に、 r を変化させてGFMで計算された濃度と観測結果とのRMS(：二乗平均)を示す。ここに、赤丸がModel 1, 黒四角がModel 2の結果である。 r を小さくすると、RMSが小さくなる傾向にあるが、 r が小さくなると、反復回数に対する目的関数の減少が遅くなる傾向が見られた。そこで、計算時間短縮と、 $r = 0.5$ と $r = 0.1$ のRMSが、同程度となったことを考慮して、 $r = 0.5$ を採用した。

$r = 0.5$ とした各モデルのRMSを比較すると、Model 1, 2では、それぞれ 9.5 pmol m^{-3} , 8.2 pmol m^{-3} となり、Model 2がModel 1と比較して、よい結果を示した。特にModel 2の結果では、 SF_6 放出後直近のD01の結果について、Model 1よりも再現性が向上しており、その結果を反映して、各モデルで推定した初期濃度と水塊体積から得られた初期水塊の SF_6 全量も、Model 2の結果がModel 1よりも現実的な値を示した。

図-4にModel 2で推定した SF_6 濃度の半値(太黒線), 5 pmol m^{-3} (細黒線)の分布および SF_6 濃度の 5 pmol m^{-3} 以上の観測点を示す。ここに、図中の黒線で示した分布は、放出終了後、1, 3, 5, 7, 9, 12日目の結果を示し、船の移動で時間変化する観測点と比較時刻が異なる。そのため、半値の分布は観測点と同様に南進しているが、観測点よりも南側に位置する傾向がある。また、半値の分布は、放出直

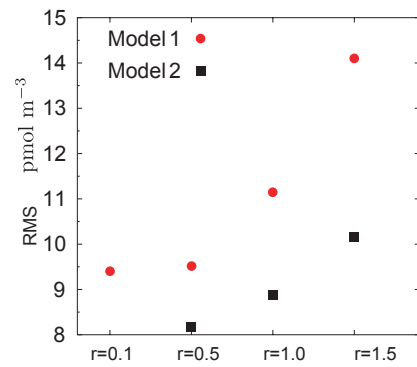


図-3 目的関数 $J = \frac{1}{2}(\mathbf{M}(\mathbf{x}) - \mathbf{y})' \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{M}(\mathbf{x}) - \mathbf{y})$ の重み $R^{-1} = t^r$ における r とRMSの関係

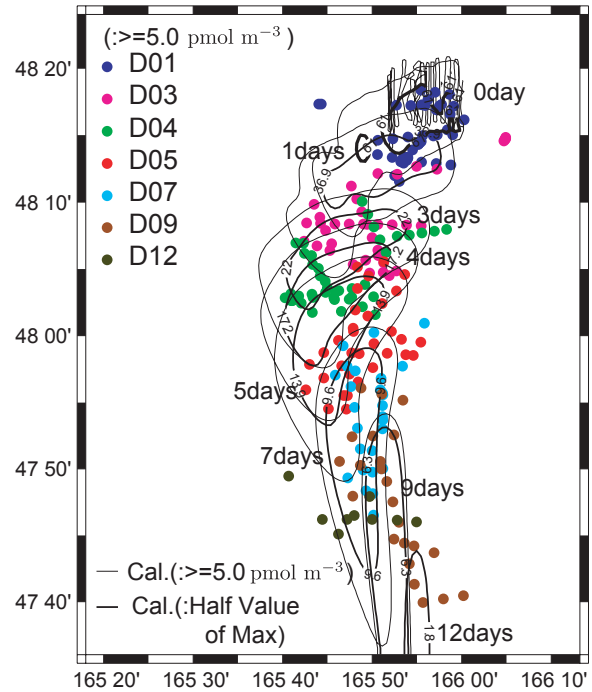


図-4 推定した SF_6 濃度の半値と 5 pmol m^{-3} の分布

後が四角に近い形状であるのにたいし、南進とともに分布が南北に伸びる結果となり、その囲まれた領域は 5 pmol m^{-3} 以上の値となる観測点の時間に伴う移動をほぼ追跡できる結果となっている。

4. 今後の課題

今後の課題として、非定常を取り扱うなどのモデルの高性能化が考えられる。さらに、実際の観測にこの手法を適用することを考えると、測定開始後何日間までのデータが揃うと、以降のトレーサを何日間追跡する出来るかとした水塊の追跡性能評価が考えられ、これらの課題について実施する予定である。