

第2章 JPN システムについて

2.1 JPN システムの概要

JPN システムの構成は、予測モデルと解析モデルから成る。予測モデルは、水平分解能 2km の日本周辺モデル (JPN モデル) を中核とし、北太平洋モデル (NP モデル) と全球モデル (GLB モデル) と双方向ネスティングの技術により結合されている。解析モデルは、北太平洋同化・予報システムから構成され、4次元変分法北太平洋海洋データ同化システム (NPR-4DVAR) を中核とし、3次元変分法全球海洋データ同化システム (G3-3DVAR) から境界値が与えられる。解析モデルの水温・塩分の解析場を用いて予測モデルを初期値化することにより、中規模現象と沿岸現象の両者を再現することができる。

予測モデルは、気象研究所共用海洋モデル (MRI.COM) の version4 (T sujino et al., 2017) を基盤とし、自由海面の深度座標系のプリミティブ方程式を解いている。今回の再解析実験は MRI.COM の version4.5 を用いたが、現業運用は version4.6 で行われることを注記しておく。3つの予測モデルの内、JPN モデルは、東経 117 度から東経 160 度、北緯 20 度から北緯 52 度を領域とする。水平分解能は、東西 1/33 度、南北 1/50 度の約 2km である。鉛直方向は、 z^* 座標系の導入により、最小 8m の水深を採用でき、鉛直 60 層を海面 2m から海底 700m までの解像度で分解している。海氷モデルは Mellor and Kantha (1989) の海氷の生成・成長、消滅・融解を扱う熱力学要素と Hunke and Dukowicz (1997, 2002) の弾粘塑性体の力学要素から構成されており、海洋モデルと結合している。潮汐は、Sakamoto et al. (2013) により開発された主要 8 分潮 ($M_2, S_2, N_2, K_2, O_1, K_1, P_1, Q_1$) の順圧潮汐力を陽にモデルに与えている。海面気圧の大気強制力もまた与えられており、吸い上げや押し下げによる水位変化を表すことができる。移流スキームや混合スキームなど、モデルで使用されているその他の様々なスキーム、パラメタリゼーションの詳細は Sakamoto et al. (2019) を参照していただきたい。

予測モデルのダウンスケーリングには、海洋モデリングにおいて最先端の技術と言える二段階双方向ネスティングを用いている。まず、最も外側の親モデルである GLB モデルは、北極海を含む全球を tripolar 座標系によりカバーし、水平解像度は、赤道域を除き、東西 1 度、南北 0.5 度である。NP モデルの領域は東経 99 度から西経 80 度、南緯 15 度から北緯 63 度の北太平洋全域であり、水平解像度は東西 1/11 度、南北 1/10 度である。両モデルとも鉛直解像度は JPN モデルと共通である。JPN, NP, GLB の 3 モデルを二段階の双方向ネスティングによって結合し、ダウンスケーリングを行う。つまり、JPN モデルの側面境界は NP モデルから、NP モデルの側面境界は GLB モデルから、時間ステップ毎に与えられる。一方、JPN モデルと NP モデルで計算された物理量も、時間ステップ毎に NP モデルと GLB モデルのそれぞれに反映される。このように、3つのモデルが情報を双方向に通信しつつ同じ時間ステップ間隔で同期して走る。これにより、側面境界で親モデルと子モデルの場がなめらかに繋がり、適切な手法を使えば側面境界でのノイズの発生も抑制される。また、モデル全体として海水と海氷の総和の体積が保存され、気候変動に伴う長期の沿岸水位変動に関する研究等にも活用できる。

4次元変分法北太平洋海洋データ同化システム (NPR-4DVAR) は、北太平洋モデル (NPR モデル, 東経 99 度-西経 75 度、南緯 15 度-北緯 63 度の領域) 用のアジョイントコードを用いて、4DVAR を実行する。4DVAR の計算コストが多であることを考慮して、NPR モデルの水平方向に可変格子を採用した。NPR モデルの JPN 領域を包含する東経 117 度～東経 160 度、北緯 20 度～北緯 52 度の範囲は、NP モデルと同じ解像度であり、その外側はそれよりも低い解像度としている。鉛直方向の総数と分解能は予測モデル

と同じである。NPR-4DVAR は、北西太平洋版の 4 次元変分法に基づく気象研究所海洋データ同化システム (MOVE-WNP-4DVAR; Usui et al., 2015) の高度化を進めたものである。背景誤差共分散行列の設定には、従来の MOVE と同様に水温・塩分結合鉛直 EOF モード (Fujii and Kamachi, 2003) を用いている。MRI.COM の version4.0 から接線形モデルとアジョイントモデルを手動で開発した。NPR-4DVAR では、G3-3DVAR から境界条件が与えられ、予測モデルと異なり海面気圧や潮汐による強制を組み込んでいない。

予測モデルの初期値化は、Incremental Analysis Updates (IAU, Bloom et al., 1996) 法を用いて解析モデルの水温、塩分場に拘束することで行われる。予測モデルと解析モデルの対応は、NPR-4DVAR が JPN モデル及び NP モデル、G3-3DVAR が GLB モデルを初期値化するのに用いられる。IAU を行うための修正量は、JPN モデルの場合は、JPN モデルを IAU 期間の半分まで時間積分し、その日の NPR-4DVAR の水温・塩分解析場との差分により求める。この時、NPR-4DVAR に比べて、JPN モデルは高解像度でありかつ潮汐の効果を含むことから、時空間フィルターを適用した後に差分を計算した。時間フィルターは、非再帰型の Lanczos フィルターを採用することで、2 日より短周期の成分を落とし、空間フィルターは、半径 5km の 2 次元ガウシアンフィルターを適用することでモデル間の解像度を合わせた。時空間フィルターにより得られた中規模スケール以上の修正量は、IAU 期間で等分配され、予測モデルの時間積分と共に足しこまれる。この方法により、JPN モデルで表現されている中規模以下の現象はそのまま維持される。

ナッジング手法による海水氷密接度の同化が NPR-4DVAR 及び JPN と NP モデルのそれぞれ実装されている。ナッジング手法は、従来システムにおいて実装された方法 (碓氷ら, 2010; Usui et al., 2017) と概ね同じである。モデルと観測の海水氷密接度を用いて、最小分散推定により海水氷密接度の解析値を計算し、モデルの値を解析値にナッジさせている。

2.2 実験設定

JPN システムでは、解析モデルの実行の後に予測モデルが実行される順序となる。本実験では、2008 年から 2017 年までの期間で JPN システムの実験を実行したが、計算時間の短縮のためにストリームを 4 分割 (2008-2012, 2013-2015, 2016, 2017) した。JPN モデルの初期値化を行う IAU 実験 (JPN-IAU) は、次のように行った。まずスピンアップ期間として、各ストリームの開始日 (1 月 1 日) の 1~3 か月前のフリーランの場に対して、NPR モデルに 3 次元変分法を適用した解析場を用いた IAU 実験を行う。その後、それぞれの開始日以降は、参照する解析場を NPR-4DVAR に切り替える。

NPR-4DVAR の同化ウィンドウは 10 日で、前後のウィンドウとそれぞれ 5 日間の重複期間を設定している。10 日間の同化ウィンドウの内、後半 7 日の観測を同化に用い、4DVAR により推定された初期値の修正量は初期の 3 日間の期間で IAU によって与えられる。計算の効率化のため、各解析サイクルにおいて、最初に 3DVAR を行い 3DVAR により見積もられたインクリメントを初期推定値として 4DVAR を実行した。4DVAR の最大繰り返し数は 30 回とした。JPN-IAU 実験は、間欠のない 5 日間の IAU 期間のサイクルを実行した。

大気外力データは、JRA55-do (Tsuji et al., 2018) を用いており、元の JRA55 (Kobayashi et al., 2015) を海洋-海氷モデルの駆動するために調節されたデータである。水平解像度は約 55km で、3 時間間隔のデータセットである。大気強制のデータとして、太陽放射、降水、地上気温、地上の露点温度、風、海面気圧が与えられ、Large and Yeager (2004) のバルク式を用いて、短波放射、下向き長波放射、顕熱フラックス、潜熱フラックス、風応力が計算される。河川流入データは、河川モデル CaMaFlood を JRA55 の降水を与えることで得られ、水平解像度 0.25 度の日別値の JRA55-do のサブデータセットとなっている (Suzuki et al., 2018)。

NPR-4DVAR 及び G3-3DVAR に用いた観測データは、現場観測、衛星海面水温、衛星海面高度偏差である。現場観測データは、WOD (World Ocean Database; Boyer, 2013) と GTSP (Global Temperature and Salinity Profile Programme; Hamilton, 1994) から取得した。衛星海面水温は気象庁の水平解像度が 0.25 度格子の MGDSST (栗原・他、2006) である。衛星海面高度偏差は、AVISO/CMEMS から取得した海面高度計の軌道沿いのデータである。海面高度偏差のデータは、2017 年 5 月 15 日までは遅延モードを用いているが、以降は気象庁で取得した速報モードのデータを同化に用いた。

現場観測データを用いて、MOVE の同化統計量を予め作成した。NPR モデルの領域を 39 の領域に分割し、水温と塩分の標準偏差、各領域の EOF モードや特異値などを同化統計量としている。海面高度偏差の同化に必要な平均海面力学高度は、1993 年から 2012 年の各月で現場観測データの客観解析を行い、その海面力学高度の平均場から求めている。

海氷解析値は、気象庁の現業で作成されている半旬解析値と MGDSST の海氷密接度プロダクト (K_s/Ice) を用いた。半旬解析値は各月の 5 日、10 日、15 日、20 日、25 日及び月末に作成されるため、解析日の間の日別値を線形補間から求めた。半旬解析の水平解像度は、約 0.02 度格子である。一方、 K_s/Ice は 0.25 度格子の日別値である。JPN モデルは半旬解析の海氷密接度を、NP モデルは半旬解析と K_s/Ice を組み合わせたデータセットを同化に用いた。MGDSST の海面水温は、半旬解析の海氷密接度に整合するように修正して海洋同化に用いている。海氷同化のナッジングの時定数は 1 日である。

本実験は、気象研究所で運用されている FX100 及び CX2550 を用いて 2018 年に実行された。尚、本実験は JPN システムの海洋現象の再現性の検証に合わせた設定を採用しており、そのために解析値の大気外力データを用いている。気象庁で JPN システムを現業運用する場合は、予測値の大気外力を用いた海洋予測が行われるなど、仕様が異なることを注記しておく。