

4. 黒潮変動予測実験

今脇 資郎

九州大学応用力学研究所・教授

1. 概 要

この研究では、人工衛星による海洋観測、現場での黒潮の流量測定、海洋データの同化、海洋数値モデルなどにおける最近の目覚ましい進展を受けて、日本南岸での黒潮の流軸位置や流量の変動の予測に挑戦する。そのために、黒潮および北太平洋の亜熱帯循環に関する観測データを収集し、データを同化モデルによって編集し、編集したデータを用いて将来の変動を予測できる実用予測モデルを開発することを目指す。

2. はじめに

近年の研究によって、全球的な気候の変動を正確に把握するためには、海洋の果たす役割を正しく理解しなければならないという認識が高まっている。図-1は西部北太平洋の表層（深さ1,000 m付近まで）の流れの様子を模式的に示したものである。北太平洋の亜熱帯循環を構成する、北赤道海流、亜熱帯反流、黒潮、黒潮続流などの定常的な流れのほかに、中規模渦、暖水渦、冷水渦など時間的に変動する活発な流れがある。

これまでの海洋観測データや海上気象データは主として観測船や商船などで収集されていた。ところが最近の人工衛星リモートセンシング技術を利用した海洋・気象観測の進歩には目を見張るものがあり、海面高度や海上風などのデータを全球的に繰り返し収集することができるようになった。一方、黒潮に関する現場海洋観測でも、足摺岬沖黒潮協同観測（ASUKA：1993～1995年）によって黒潮の流量とその時間変化が初めて長期にわたって得られるようになった。また、海洋の数値モデルに関しても、高解像度海洋大循環モデルが開発されたほか、海洋観測データを数値モデルに取り込み力学的に整合性のあるデータを作成するデータ同化の手法が可能になってきた。

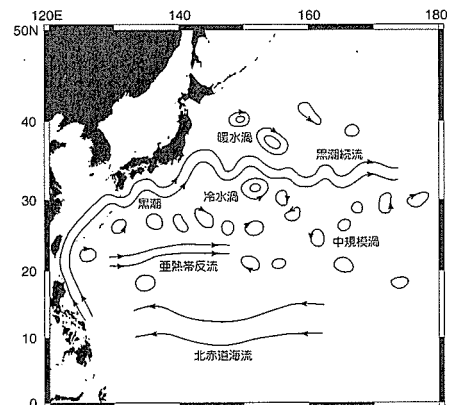


図-1 北太平洋西部の表層における流速場の模式図

そこで、これらの最近の研究の進展を受けて、これまで夢であった海洋の変動の予測、特に日本南岸での黒潮の流軸位置や流量の変動の予測に挑戦することを計画した。九大、鹿大、広大、京大、東大、北大、気象研などの研究者が協力して、黒潮変動を予測するためのシステムの開発を目指した研究チームを結成し、海洋変動の予測の可能性を明らかにする実験を開始した。この実験は、1997年度後半から2002年度前半までの5か年計画として実施されている。

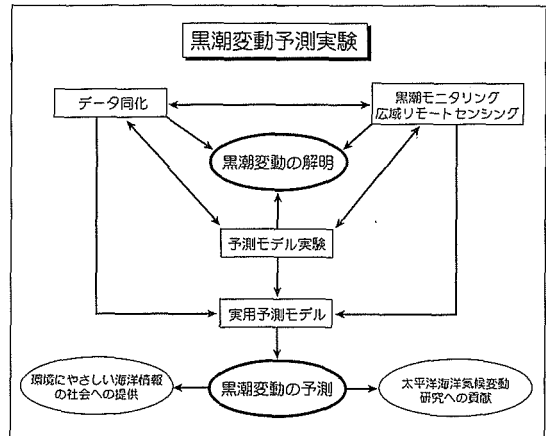


図-2 研究の流れを示すダイアグラム

実験では、まず黒潮域および北太平洋の亜熱帯循環域を中心にして、海洋と気象の変動に関する観測データを収集する。つぎに、その観測データを海洋データ同化モデルによって力学的に整合性のあるデータに編集する。これらの編集されたデータを初期値と境界条件として将来の変動を予測できる高分解能の予報モデルを開発する。さらに、これらのデータ同化モデルと予測モデルを統合し、最終的な実用予測モデルを開発する。これらの研究課題の間の連携を図-2に示す。これらのステップは、本来はシリーズ的に進められるべきであるが、限られた期間内に研究を完了するために、それらを平行して進めている。

実験での具体的な目標として、短期変動（1か月程度）については、日本南岸での黒潮の流路（強流部分をたどった流れの筋）の位置を予測すること、経年変動（2～3年）については、海面での外力が既知であることを前提として、日本南岸での黒潮の流量を予測することを目指している。

以下の節では、流路変動、流量変動、黒潮観測、実用予測モデルという観点で、これまでに得られた主な成果を示す。

3. 流路変動

日本南岸での黒潮の流路は、様々な時間スケールで変動している。ここでは、短期変動として、九州南東からの小蛇行の東進の現象を、長期変動として、よく知られている大蛇行流路と非大蛇行流路（簡単に直進流路とも呼ばれる）の間の遷移を取り上げる。

(1) 短期変動

現実的な海岸線を持つ高分解能の改良 1.5 層有効重力プリミティブ数値モデルを用いて、1 か月後の流速場がどの程度予測できるかを調べた。初期値として、現場観測と TOPEX/POSEIDON 海面高度計データから求められた海面力学高度を、弱拘束変分法（二次元変分法）によってこの数値モデルに同化したものを用いた。例として、ほぼ直進的な流路から蛇行が発達し東進したケースを図-3 に示す。遠州灘沖の蛇行がよく再現されている。初期値を精度よく求めることが予測において極めて重要であることが分かった。ただし、蛇行流路から直進的な流路への変化は再現されなかった。海底地形の影響が重要である可能性が高い。

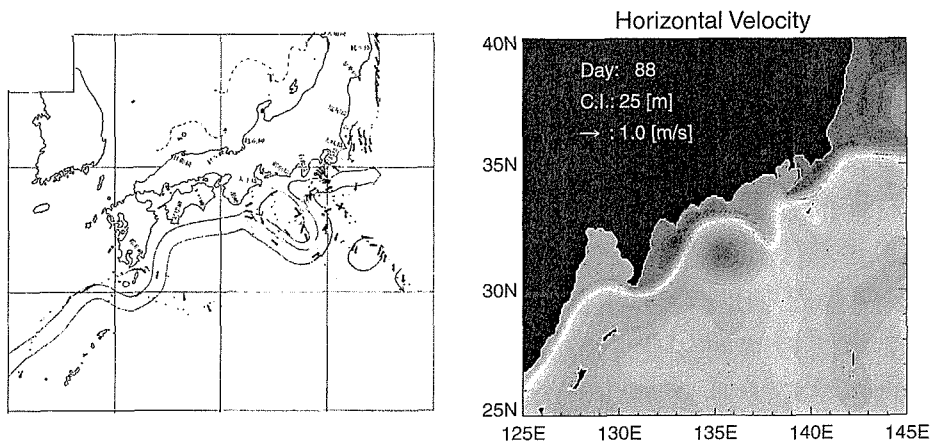


図-3 ほぼ直進的な流路を初期値（1993年3月4日）として、1か月後（4月3日）の流路を予測した例、左が水路部発行の海洋速報、右が流速場の予測結果。

(2) 定常大蛇行

日本南岸の黒潮の大蛇行流路と非大蛇行流路間の遷移のメカニズムを、比較的簡単な数値モデルによる感度実験と、海洋大循環モデルによる黒潮の再現実験によって調べた。まず、感度実験では、中規模渦と黒潮の相互作用の重要性を調べるため、台湾東方または九州南東海域に中規模渦を与え、その後の流路発展を調べた。その結果、非大蛇行流路から大蛇行流路への遷移は生じたが、大蛇行流路から非大蛇行流路への遷移は生じなかった。つぎに、現実的な海岸や海底地形をもち、黒潮域を十分細かく解像できる海洋大循環モデルを、現実的な海面での境界条件を用いて駆動し、流路変動の再現を試みた。黒潮が1985年を境に大蛇行流路から非大蛇行流路へと遷移したのは再現されたが、その後の非大蛇行流路から大蛇行流路への遷移は再現されなかった。

4. 流量変動

北太平洋亜熱帯循環の西岸境界流である黒潮の流量は、ほぼ北太平洋上の風応力に支配されている。定常状態では、その流量は、平坦な海底を仮定して線型理論で求めた、内部領域でのスベルドラップ輸送の補流（ここではこれを簡単にスベルドラップ流量と呼ぶ）として理解される。しかし、風応力には様々な時間スケールの変動があり、それらに対する海洋の応答時間が異なるので、西岸境界流の流量は、スベルドラップ流量だけでは理解できない。また、海底地形の影響が加わると、順圧および傾圧ロスビー波の間に干渉が起こり、状況はさらに複雑になる。実際の計測では、中規模渦などに伴う流量変化を分離する作業も重要である。ここでは、季節変動、2~3年周期変動、10年以上の周期の変動（decadal変動）について調べる。

(1) 季節変動

四国沖の黒潮に関する集中観測 ASUKA の現場観測データから、黒潮の流量（1000 m 以浅）と黒潮を挟む水位差の間に高い相関があることが分かった。この関係と TOPEX/POSEIDON 海面高度計データから、四国沖での黒潮流量の7年間の時間変化を推定した。この時系列データから、黒潮流量の平均的な季節変動を求めたのが、図-4である。北太平洋上の風応力データから求めたスベルドラップ流量の季節変動と比べると、観測された黒潮流量の季節変動の振幅は非常に小さいことが分かった。Svは流量の単位で $10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ 。その原因を調べるため、北太平洋を想定した矩形の海を考え、600 m 深に境界をもつ2層モデルを、年周期変化（季節変動）する風応力で駆動した。その際、伊豆・小笠原海嶺を模した南北に伸びる海嶺（最浅部が1500 m 深）を設け、それによる西岸境界流の流量変化への影響を調べた。図-5に、海嶺の西縁と東縁での流量の時系列を示す。海嶺の東縁の流量は、スベルドラップ流量に極めて近いのに対して、海嶺の西縁では、流量の季節変動幅が大きく減衰している。これから、北太平洋の内部領域を東から西に向かって伝わってきた順圧的な信号が、海嶺でほとんど遮られ、一部が上層モードの信号となって海

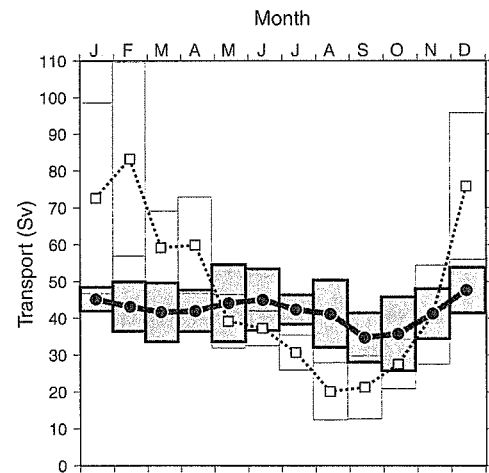


図-4 黒潮の流量の季節変化。●は観測値、□はスベルドラップ流量。

嶺の西に伝わり、黒潮流量の季節変化をもたらしていると考えられる。

(2) 2~3年周期変動

現実に近い海洋条件を与えて海洋大循環モデルによる実験を行った。モデルとしてはMOMを用い、月平均の風応力場を与えて20年間の計算を

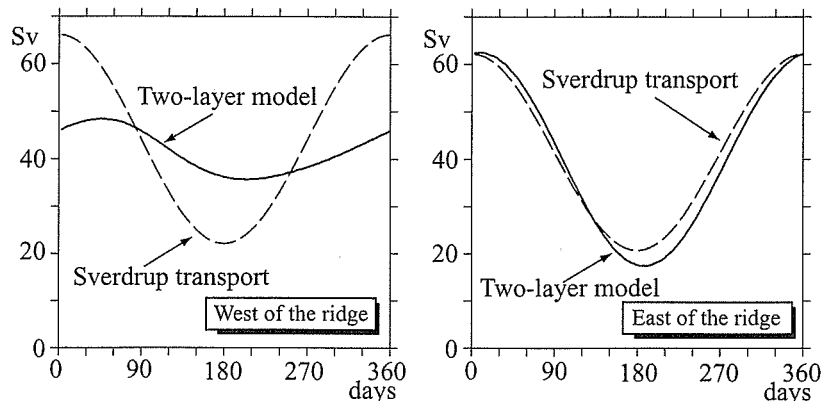


図-5 2層モデルの、海嶺の西と東での流量の季節変動

行い、続いて理想化された3年周期の風応力場を与えて10年間の計算を行った。黒潮流量の変動は、四国沖では約5 Sv、東シナ海では1 Sv以下となった。いずれもスベルドラップ流量の半分以下である。今後は実際の風応力を与え、モデルの黒潮流量を観測値と比較する。その海洋応答を詳細に検証することによって、2年先の黒潮の流量を予測する方法を探る。

(3) decadal 変動

日本南岸と東シナ海における気象庁の定線観測データから、黒潮の流量(1000 m以浅：地衡流量)の長期変化を求めた(図-6)。日本南岸の黒潮では、20年程度の周期をもつ長周期変動が明らかである。比較のために、スベルドラップ流量を同時に示す。日本南岸の黒潮流量は、北太平洋上の風応力の変動に対して、約4年遅れて応答している。しかし、その変動は東シナ海にはほとんど侵入していない。

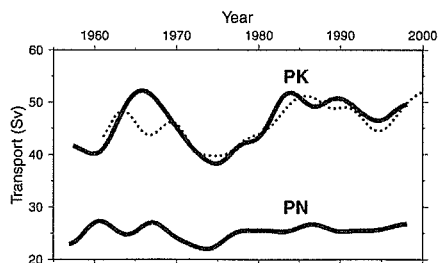


図-6 日本南岸(PK)と東シナ海(PN)における黒潮の流量の長周期変化、周期が8年以下の変動を除去したもの、点線はスベルドラップ流量の時系列を4年遅らせ、かつ4 Sv嵩上げたもの。

5. 黒潮観測

亜熱帯循環の西岸境界流としての黒潮の現況を把握するため、日本南

岸、東シナ海、琉球列島東方、西部北太平洋など、広い範囲で、黒潮や流れの変動を観測しているが、ここではそのごく一部を紹介する。

(1) 四国沖 IES 観測

倒立音響測深器 (IES) は、海底に係留し、海底から海面までの音波の往復時間を連続的に記録する測器である。この実験では、ASUKA 観測に引き続き、黒潮を挟む 2 測点で、圧力計付き IES 観測を行っている。現在までに、ASUKA 観測期間を含めて 7 年間のデータが得られた。ASUKA 観測で得られた船舶による水温と塩分の鉛直分布データを基に、音波往復時間から水温の鉛直分布を推定する手法の開発と改良を行った。IES データにこの手法を適用することで、四国沖の黒潮流量の高精度のモニターが可能となる。

(2) 琉球列島東側での境界流

1998 年 12 月に、奄美大島南東の陸棚斜面上の 3 地点で係留流速計による流速の連続観測を開始した。この観測により、これまでの資料解析や数値モデルでその存在が示唆されていた北上流の存在が初めて確認された。1999 年 12 月までの最初の 1 年間に得られた流速記録の例を図 7 に示す。500 m 深でも 40 cm/s 以上の速い流れがあり、流向が琉球列島に沿っていて、かなり安定している点が注目される。

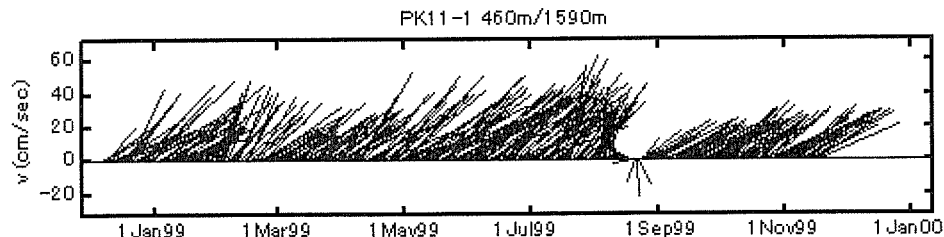


図 7 奄美大島南東約 80km の水深 1590m の地点の 460m 深での流速ベクトルの時系列、潮流成分除去後の値を 1 日毎にベクトルで示す、図の上方が北。

6. 実用予測モデル

これらの研究によって得られた黒潮変動に関する知見を随時取り入れて、黒潮の変動を実用的に予測できるシステムの開発を進めている。その際、データ同化をいかに効率よくかつ高精度に行うかが重要なポイントになる。これまでの研究によると、変分法を用いることにより同化結果がより改善されることが示されている。そのため、既存の北太平洋データ同化システムに変分法を取り入れた新たな同化システム (COMPASS-KI) の開発を行っている。このシステムは、中規模渦を解像できる海洋大循環モデルに、気象庁で解析された船舶データと衛星海面

高度計データを同化し、かつ表層のみ変分法を用いて精度のよい同化結果を算出するシステムである。

これまでに、衛星海面高度計データの解析により、現実的な誤差統計量を算出した。また、予備的な同化・予測実験で、トカラ海峡と本州南岸での黒潮の流量の季節変動、および黒潮の本州からの離岸がよく再現された。さらに、本州南岸での黒潮の表層水温場の予測可能性についても実験を開始した。

7. おわりに

この黒潮変動予測実験によって、最新の海洋数値モデルが海洋の変動をどこまで予測できるかが明らかになるほか、日本南岸での黒潮の変動機構に関する基本的な理解を深めることができるであろう。この予測モデルが実用化されれば、現在日常的に行われ実社会で活躍している天気予報と同様に、社会活動に大きく貢献するであろう。

.....MEMO.....