

論文内容の要旨

論文題目 渦解像 OGCM を用いた黒潮続流 10 年規模振動と粒子輸送に関する研究(A study on the decadal-scale Kuroshio Extension oscillation and particle transport using eddy-resolving OGCMs)

氏名 清松 啓司

計算機の性能向上に伴い海洋モデルの複雑化・高解像度化・大領域化が進んでいる。本研究で扱う OGCM(Ocean General Circulation Model)と呼ばれる海洋モデルもその例外ではなく、中規模渦を満足に表現できない渦許容モデルから、現実的な中規模渦を表現可能な渦解像モデル(渦解像 OGCM)へと発展した。

渦解像 OGCM と渦許容 OGCM で最も現象の再現性に差が現われるのが、北西太平洋では日本近海の黒潮と黒潮続流の周辺海域である。衛星海面高度計による観測データから SSH(Sea Surface Height)の平均場と分散を計算すると、黒潮と黒潮続流の周辺海域で分散が大きくなる。この大きな分散は中規模渦と黒潮・黒潮続流が相互作用することによって生じる流路変動を反映したものである。したがって、黒潮流路変動や黒潮続流 10 年規模振動といった流路変動現象は渦解像 OGCM において再現性が高いことが期待される。

OGCM で表現可能な現象の微細化が進むと、モデルで表現されている現象の時空間スケールが人間活動に関係する領域と重なってくる。渦解像 OGCM とはそのような状態にある。例えば、海の天気予報で使用されているのは渦解像 OGCM にデータ同化スキームを組み合わせた予測システムである。メキシコ湾における Deep Water Horizon の原油流出事故の際には、北西大西洋を扱う渦解像 OGCM を用いた詳細な原油流出パターン解析が行われた。最近では船舶の航行支援業務や海底資源掘削支援業務にも渦解像 OGCM の結果が使われるようになりつつある。このような応用が行われるようになったのは、黒潮のような西岸境界流の現実的な流路変動をモデル内で表現できるようになったことが大きい。

本論文にまとめた研究が目指す最終的な目標は、マイワシ資源量変動とそれに関連している海洋環境変動のメカニズムを解明することである。マイワシ資源量変動には 0 歳魚の死亡率(加入量)変動が重要であるとされているが、その 0 歳魚が産卵・輸送され分布している海域が黒潮・黒潮続流周辺海域である。したがって、渦解像 OGCM がマイワシ資源量変動やそれに関連する海洋環境変動のメカニズム解明に役立つと考えられる。

本論文第 1 章では、上記のような研究背景を説明した後、マイワシ資源量変動に関する研究、衛星観測データ及び数値モデルを使用した黒潮続流 10 年規模振動に関する研究、そして黒潮続流

周辺海域における粒子輸送に関する研究を簡単に説明する。そして、本論文で扱う具体的な研究課題として、“渦解像 OGCM の検証”、“黒潮続流 10 年規模振動と KESA2 月 SST 変動の関連性の解明”、“OGCM の検証結果に基づく卵稚仔輸送過程解析”、“力学系の理論を応用した黒潮続流周辺海域における粒子輸送過程の解析”の 4 つがあることを述べる。これらの具体的な研究課題とその背景にある最終的な目標を踏まえ、本論文の目的を“マイワシ資源量変動とそれに関連する海洋環境変動のメカニズム解明のために、上記 4 課題に取り組むこと”と定める。

第 2 章では渦解像 OGCM における黒潮流路変動、黒潮続流 10 年規模振動、KESA2 月 SST 変動の再現性を検証する。渦解像 OGCM としては JCOPE(Japan Coastal Ocean Predictability Experiment)と OFES(OGCM For the Earth Simulator)を選んだ。比較に用いたのは衛星海面高度計の観測データ(AVISO(Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic)の delayed-time absolute dynamic topography)、MIRC(Marine Information Research Center)黒潮流軸データ、JMA(Japan Meteorological Agency)の SST データである。非大蛇行接岸流路、非大蛇行離岸流路、大蛇行流路として知られる黒潮流路パターン(Kawabe et al., 1995)は JCOPE 再解析でよく再現されている。KESA2 月 SST 変動と黒潮続流 10 年規模振動に伴う黒潮続流上流部平均緯度変動は OFES データでよく再現されている。その一方で、OFES データにおける黒潮続流 10 年規模振動に伴う黒潮続流上流部の力学的状態及び黒潮流路変動の再現性は低い。黒潮・黒潮続流周辺海域におけるマイワシ卵稚仔輸送過程解析にとって重要な現象の、渦解像 OGCM における再現性は明暗分かれる結果となった。

OGCM の検証中に興味深い発見があったので、それについても第 2 章で紹介している。OFES データにおける黒潮流路変動は黒潮 10 年規模振動と呼ぶべき非現実的な黒潮大蛇行の生成・発達・消滅サイクルが卓越している。本論文が明らかにしたのは、黒潮 10 年規模振動が、再現性が高いと考えられる黒潮続流上流部平均緯度変動と同期していることである。Double Wind Gyre Model を用いて定常外力下における西岸境界流の慣性ジェットの内線形振動(intrinsic variability)を調べている一連の研究の中に、黒潮と黒潮続流が一体となった 11 年周期変動の存在を報告しているものがある(Pierini, 2006; 2008, Pierini et al., 2009)。それに加えて、OFES データを解析した先行研究(Taguchi et al., 2007)によって得られた知見、そして本論文で行った OFES の intrinsic variability に関する解析結果を考慮すると、黒潮続流 10 年規模振動の frontal-scale variability が、黒潮からの渦位輸送量変動をメカニズムとする黒潮-黒潮続流一体型振動である可能性が高いと考えられる。これは、黒潮と黒潮続流の経年変動における関係を解明する上で、重要な知見である。

第 3 章では黒潮続流 10 年規模振動と KESA2 月 SST 変動の関係を論じる。まず、OFES データの SST に対する EOF 解析結果を紹介する。NPO(North Pacific Oscillation)や NPGO(North Pacific Gyre Oscillation)など黒潮続流 10 年規模振動に関係する変動は EOF モードを用いて表現されている(Ceballos et al., 2009)。北西太平洋 2 月 SST に対して EOF 解析を行ったところ、KESA2 月 SST 変動がより空間スケールの大きな SST 変動である EOF(Empirical Orthogonal Function)第 2 モード(SST-EOF2)の一部であることが示された。SST-EOF2 は黒潮続流周辺海域で大きな値を持つが、これは、後述するように、黒潮続流の南北移動の影響である。

OFES データの北西太平洋 2 月 MLD(Mixed Layer Depth)についても SST と同様の EOF 解析を行い、MLD-EOF1 が KESA2 月 SST と同期していることを示した。つまり、MLD と SST は、春期餌摂環境と水温依存の成長率特性を通じて、KESA2 月 SST 変動と同じタイミングで 0 歳マイワシ死亡率に影響を与えうるということが、渦解像 OGCM の結果からも示された。

第3章の内容で最も特徴的なのが、運動学的手法を用いた KESA2 月 SST 変動メカニズムの解明である。一般に、SST の変動要因を解析する場合、混合層内の熱量保存則、すなわちダイナミクスに基づいた解析が行われる(Qiu, 2000; Yasuda et al., 2000)。しかし、そのような手法では黒潮続流南北移動が SST 変動に及ぼす影響を議論することが難しい。そこで、KESA と黒潮続流の相対的な位置関係に基づいて、KESA2 月 SST を黒潮続流平均緯度と黒潮続流 SST、黒潮続流南側 SST によって定式化し、それを基に KESA2 月 SST の変動の原因を説明した。

運動学的手法による解析の結果は、KESA2 月 SST が黒潮続流南北移動の影響を顕著に受けていることを示している。例えば 70 年代の終わりに SST の急峻な高水温ピークがあるが、これは 80 年代の前半に黒潮続流が南下したために強調されていることがわかった。また、80 年代前半から中盤にかけての期間や 90 年代後半の KESA2 月 SST の低水温は、黒潮続流の南下なくしては説明できない。80 年代以降の SST の上昇傾向は、黒潮続流南北移動による影響ではなく、外部との熱交換の結果である。

第4章では渦解像 OGCM の検証結果に基づくマイワシ卵稚仔輸送過程解析の結果、及び、日本南岸沖から黒潮続流に至る粒子輸送の様子について論じている。

まず、卵稚仔輸送過程解析に関連して、OGCM の検証結果は JCOPE の黒潮流路変動と OFES の KESA2 月 SST 変動の信頼性が比較的高いことを示していた。そこで、黒潮流路変動と KESA2 月 SST 変動(SST-EOF2)が、輸送海域と経験水温で決まる生存率(輸送成功率, Transport Success Rate, TSR)にどのように影響を与えるか調べた。

結果としては、黒潮大蛇行と KESA2 月 SST の低水温が、TSR を高めていた。黒潮大蛇行時に TSR が高くなるのは蛇行により黒潮内側域が拡大するためであり、KESA2 月 SST の低水温時に TSR が高くなるのは、黒潮の水温低下に原因がある。また、TSR に対する影響は、影響の空間分布に違いはあるものの、黒潮流路変動の方が KESA2 月 SST 変動より大きい。実際の資源量変動とここで求めた TSR の関係の解明は、今後の課題として残された。

日本南岸沖を対象とした粒子追跡シミュレーションでは、小規模な黒潮流路変動に伴う黒潮内側域の渦の変動が、黒潮続流域への粒子輸送の成否とタイミングを決めることが示された。つまり、日本南岸沖における粒子輸送過程を表現するには、非大蛇行接岸流路、非大蛇行離岸流路、大蛇行流路といった黒潮流路パターンの再現性を確保した上で、さらに規模の小さな流路変動も再現することが重要である。

第5章では、力学系の理論を応用した黒潮続流周辺海域における粒子輸送過程解析手法について論じる。具体的には、カオスの輸送を表現する hyperbolic point と stable/unstable manifolds の時間発展を解析する特異点解析システムを作成し、黒潮域に投入した粒子によって作られる黒潮続流周辺海域の流れの幾何学模様が hyperbolic point と stable/unstable manifolds によって表現されていることを確認した。解析に使用したのは JCOPE2 再解析・予測データセットである。流れの幾何学模様が hyperbolic point と stable/unstable manifolds によって表現されるということは、黒潮続流周辺海域における粒子輸送には渦の存在が重要であることを意味している。

流れの幾何学模様を hyperbolic point と manifold で表現した際に、いくつかの問題点も明らかになった。例えば、同化データを解析した際に、逐次同化により生成されたノイズの影響で本来捉えたい hyperbolic point と manifold を抽出できなかったことが挙げられる。また、manifold を構成する粒子の数が足りず、manifold の時間発展を精度良く計算できなかったケース、stable manifold と unstable manifold が交差しないケースもあった。これらの問題点を修正していくことが、今後の課題である。

第6章は論文のまとめである。第2章から第5章にかけて、渦解像 OGCM における黒潮・黒潮続流周辺海域における現象の再現性の検証、現象間のつながり及びメカニズムの解明、卵稚仔輸送過程解析、そして力学系の理論を用いた粒子輸送に関する解析と、幅広い内容を本論文では扱っている。それらの内容を第6章として簡潔にまとめた。

本論文では、KESA2月 SST 変動(SST-EOF2)より、黒潮流路変動(大蛇行と非大蛇行)の方が、輸送海域と経験水温で決まる生存率(TSR)に与える影響が大きいこと示した(第4章)。すなわち、TSR がマイワシ資源量変動を説明できるならば、KESA2月 SST と黒潮流路変動の間に何らかの関連性があるはずである。

OFES データの中にはそのような関連性が存在している。具体的には黒潮 10 年規模振動と黒潮続流 10 年規模振動は同期しており、しかも両者の間に因果関係がある可能性が高い(第2章)。そして、黒潮続流 10 年規模振動は、KESA2月 SST 変動を決める重要な要素である(第3章)。すなわち、黒潮 10 年規模振動と KESA2月 SST 変動は、黒潮続流 10 年規模振動によってつながっている。

この、黒潮 10 年規模振動、黒潮続流 10 年規模振動、そして KESA2月 SST 変動のつながりを明らかにしたことが、本論文で最も強調すべき成果であると考えられる。今後の課題は、現実の海洋においてそのようなつながりが存在するのか、存在しないとしたらその理由はなぜなのか、明らかにすることである。