

長期的に見た東北海区の暖水塊の北上機構と漁場形成への影響

伊藤幸彦[†], 杉本隆成

Dynamics of Long-term Northward Movement of Warm-core Rings and Their Effect on Fishing Ground Formation

Sachihiko ITOH and Takashige SUGIMOTO

Numerical experiments were performed to explore topographic effects on warm-core rings in the Tohoku area, using a three-dimensional, primitive equation, numerical model. Among five experiments with a steep western boundary slope, warm-core rings which initially had a deep baroclinic flow tended to move northward along isobaths, similar to the long-term movement of rings in the Tohoku area. However, the ring did not move northward in a case with a moderate slope. It seemed that the steep slope acted like a wall and the effect equivalent to the image effect appeared. The detail movement of the model rings were compared with observational results of warm-core ring 93A. Unlike the model rings, there were a seasonal along-shore oscillation and short-term cross-shore movements for warm-core ring 93A. However, these fluctuations could be explained qualitatively by taking into account the Oyashio, the Kuroshio Extension and other warm-core rings: seasonal oscillation was due to the southward advection of the Oyashio, and most of rapid cross-shore movements were due to the interaction with the Kuroshio Extension and other warm-core rings. An analysis with warm-core ring 93A showed that the cross-shore position of rings, which is very simple and well prognosticated by our analysis, can be a good index for saury fishing ground formation.

Key words: warm-core ring, the Kuroshio-Oyashio transition region

はじめに

本州及び北海道の東方沖合には、黒潮続流から切離した直径200 kmにも及ぶ暖水塊が高気圧性の渦を形成している。これらの暖水塊は、季節的に南北回遊する浮魚類の経路や漁場形成に大きな影響を持っており (Sugimoto and Tameishi, 1992), その移動の予測は漁況予報の基礎として非常に重要である。

黒潮続流から切離した暖水塊は一部が黒潮続流に吸収されるものの、多くは日本海溝に沿って北上する (Yasuda *et al.*, 1992, Mishra *et al.*, 1999). 1993年に形成された暖水塊93Aの中心位置の変動を、稲掛 (1997) とサンマ資源会議報告書 (東北区水産研究所) の海況の実況に基づいて Fig. 1に示した。暖水塊の移動機構としては多くの可能性が考えられるが、継続的な北向きの移動を生み出すものとしては地形の影響による鏡像効果 (ゾンマーフェルト, 1967) 説が最も有力である。安田ほか (1986) は側壁の鏡像効果

により暖水塊が岸を左に見て進むことを数値実験により示している。しかし実際の三陸沖の地形を考えたとき、海底斜面により地形性 β 効果が生じれば暖水塊はむしろ南へ移動するから、実際への適用にはなお議論が必要である。そこで本研究では、現実的な海底地形が暖水塊にどのように作用するかを数値実験で調べた。

さらに、数値実験で得られた移動機構に関する知見について、漁況予報の一要因としての応用の可能性を議論した。東北海区の暖水塊の分布はしばしば海況を表す指標の一つとして用いられているが、暖水塊が親潮流路や黒潮続流からの暖水ストリーマとも密接に関係していることから、海況を代表する指標となり得る。複雑な海況を簡単な指標で記述すれば物理過程の情報を利用して変動を予測することができ、漁況予報の精度の向上に役立つ。本研究では、海況の影響が強くあらわれるサンマの南下回遊を事例として用いた。

海況とサンマ漁況の関係に関する研究は古くから精力的に行われてきた。福島 (1979) は、サンマ漁況の変動要因として海況を始め多くの要因について検討し、サンマ漁況の総合的な予報の基礎を築いた。また、特定の海況に注目する研究も行われている。Yasuda and Watanabe (1994) は親

2000年9月6日受付, 2000年1月9日受理

東京大学海洋研究所海洋生物資源部門環境動態分野
Division of Fisheries Oceanography, Ocean Research Institute, University of Tokyo, 1-15-1 Minamidai, Nakano, Tokyo 164-8639, Japan

[†] itohsach@ori.u-tokyo.ac.jp

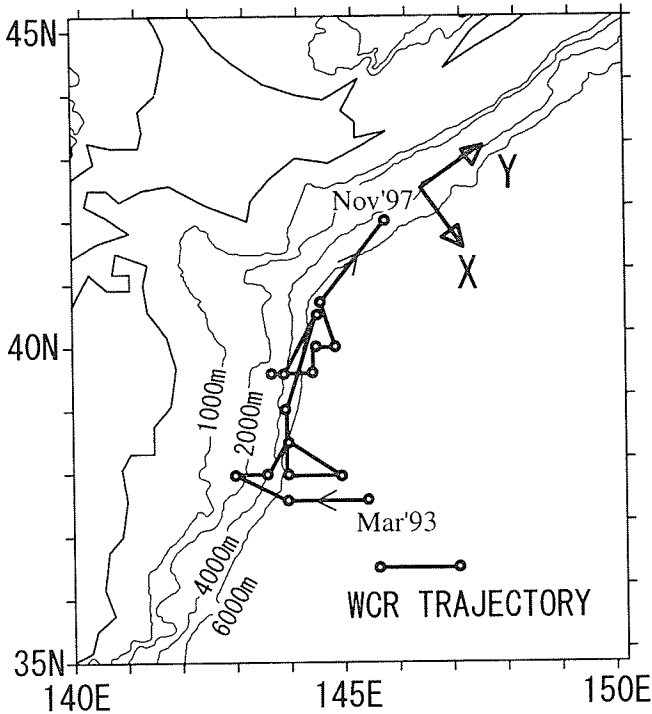


Figure 1. Observed trajectory of the warm-core ring 93A during 1993-1997 with bottom topography (adapted from Inagake (1997) and oceanic condition report by Tohoku National Fisheries Research Institute). A coordinate axes are set to analyze saury fishing grounds.

潮前線の南北偏と漁場の平均離岸距離の間に関係があることを見出した。また、岩橋・磯田 (1997) は暖水塊の空間分布をサンマ資源変動に注目して分類し、渡辺ほか (1999) は釧路沖暖水塊の存在や親潮第一分枝の勢力が道東での漁獲に大きく影響していることを示唆した。これらの研究によりサンマ漁況が多くの点で海況と対応していることが示されたが、漁況予測に必要な海況の予測をどのように行うかという議論は少なく、実際の海況予測は統計的に行われることが多い。サンマの南下回遊と暖水塊の位置の事例でも、対応関係は過去の研究で指摘されてきたものの、数値実験の結果を利用して物理的に海況を予測し、それを漁況予測に応用したのは本研究が初めてである。

方法

数値モデル

本研究では Princeton Ocean Model (POM, Mellor, 1998) を使用した。POMは σ 座標を用いたプリミティブ方程式モデルであるから、3次元的な渦構造を再現し海底地形の作用を調べるといふ本研究の狙いには適している。

計算領域は、35°N~45°N、140°E~155°Eとした。これは日本列島の釧路から常磐までを西側の境界として沖合1200kmにまで広がる海域である (Fig. 2)。海底地形は

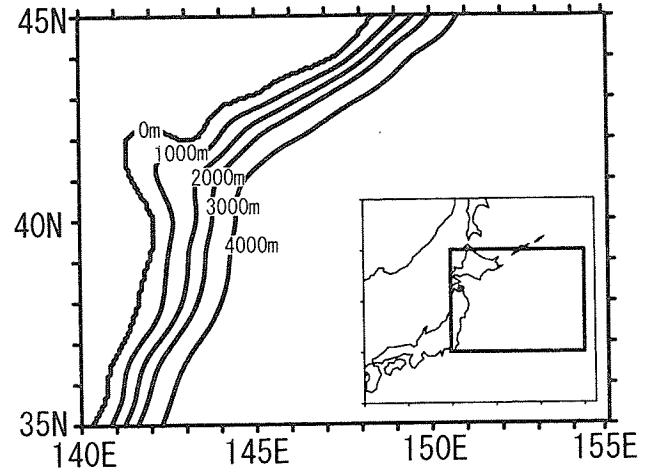


Figure 2. Model domain and its bottom topography.

Smith and Sandwell (1997) のデータを使用し、暖水塊の鉛直スケールに比べて十分深い4000m以深は暖水塊の挙動に重要ではないと考えて最大水深は4000mとした。地形を考慮しないモデルでは水深は4000mで一定にした。また水平格子間隔は東西が2'~6'、南北が2'~5' (海底が平坦な場合は東西5'、南北4') で地形データは線形補間し、鉛直格子は上層で高解像度を得るように25 (海底が平坦な場合は14) のレベルを区切った。

粘性、拡散係数は、水平は Smagorinsky 係数 (Mellor, 1998) を、鉛直は Pacanowski and Philander (Pacanowski and Philander, 1981) に従った。簡単なテストにより暖水塊の挙動は水平、鉛直の粘性、拡散係数に敏感でないことは確認した。

今回の実験では地形の効果の解明に焦点を絞っているため、基本場は静止し密度成層は水平的に一樣とする。また大気との熱交換、運動量交換も考えない。海底での摩擦は POM の標準に従い、bulk 公式で与えた。計算は200日間分を行った。

モデルパラメータ

本研究では簡単のため、塩分は34 psu. で一定とおくことで2重拡散の効果を除く。ポテンシャル温度 (温位) の基本場は、

$$\bar{\theta} = 13 + 7 * \arctan\left(\frac{z}{150}\right), \quad (1)$$

温位は

$$\theta = \bar{\theta} + \theta' \quad (2)$$

$$\theta' = \Delta\theta_{\max} * e^{1/2} * \frac{2z}{h_0} \exp\left(-\frac{z^2}{2h_0^2} - \frac{r^2}{r_0^2}\right) \quad (3)$$

のようにおいた。分布は軸対称で h_0 , r_0 はそれぞれ特徴的深さと半径, $\Delta\theta_{\max}$ は θ' の最大値である。

流速はこの密度分布から海底で流速が零になるように傾度流速を計算した。これらの3つのパラメータは実際の暖水塊の場合は、

$$h_0 = 300 \sim 500 \text{ [m]} \quad (4)$$

$$r_0 = 40 \sim 70 \text{ [km]} \quad (5)$$

$$\Delta\theta_{\max} = 2 \sim 5 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (6)$$

となっている。 $r_0=50$, $h_0=500$, $\Delta\theta_{\max}=3$ の場合を Fig. 3(a) に示した。

1000 m より深い層は特に流速データが少なく詳細な構造はわからないが密度面の傾斜が非常に微小な 2000 m ~ 3000 m にも渦としての流速が存在している可能性が高い (川崎ほか, 1990)。しかし、上のパラメータと流速分布で

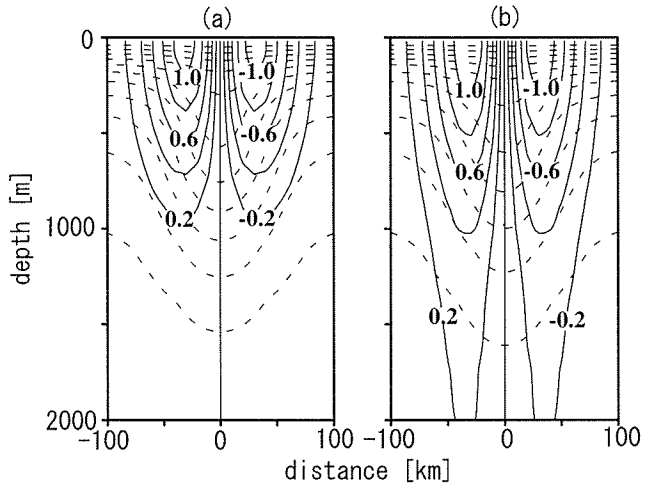


Figure 3. Initial velocity profiles of warm-core rings for the model. (a) $r_0=50$ km, $h_0=500$ m, $\Delta\theta_{\max}=3^\circ\text{C}$, (b) modified case of (a) by adding deep baroclinic structure. Solid lines are velocity contours and dashed lines are temperature contours. Each of the intervals are 0.2 m s^{-1} and 1°C .

は 2000 m 以深ではほとんど流速がなくなってしまう。この不一致は

- 実際には順圧流速が存在する
- モデルのガウス型の分布が不適切
- 実際には非地衡流成分が大きい

のいずれかが原因であると考えられるが特定は困難である。我々は h_0 , r_0 , $\Delta\theta_{\max}$ で決定される流速構造に鉛直シアアの小さい流速を足しあわせることでこの不一致を補正する。「鉛直シアアの小さい流速」の意味は以下に述べる。

順圧流速を足し合わせると、ガウス型分布で密度面の傾斜のほとんどなくなる 2000 m 以深は順圧流速が海底まで達する。これは 2 層モデルの下層の流速と同様である。しかし本研究はレベルモデルを用いているから、順圧流速ではなく鉛直シアアの小さい傾度流速を与えることもできる。これは密度分布の補正も伴うから原因の 2 番目の「ガウス型分布の補正」に相当する。この補正を、 h_0 , r_0 , $\Delta\theta_{\max}$ の 3 つのパラメータに加えて 4 番目の可変要素とする。このシアアの小さい傾度成分で Fig. 3(a) を補正したのが Fig. 3(b) である。

数値実験結果

現実的な海底地形で実験する前に、海底地形が平坦で壁の影響を受けない場合について実験を行った。これらの実験では暖水塊は全て南西へ移動した。移動距離 (直線距離) は平均で西に 120–400 km, 南に 170–400 km, 5 日毎の中心位置から求めた移動速度は平均で 2.6 cm s^{-1} , 最大で 11.6 cm s^{-1} であった。これは McWilliams and Flierl (1979) が行った準地衡 2 層モデルでの数値実験や Cushman-Roisin (1994) の理論解析など、惑星 β 効果の条件下での孤立渦の挙動を調べた多くの研究結果と一致している。

現実的な海底地形を考慮したモデルでは、深層に傾度的な流速を持つ実験ケース BC を基準に、暖水塊の力学構造や初期位置、及び海底斜面の勾配を変えて 6 つのケースについて実験を行った (Table 1)。BC を基準にしたのは、暖水塊が現実と矛盾しない標準的な構造を持ち、また移動傾

Table 1. Representative cases of the numerical experiments.

Experiment	r_0 [km]	h_0 [m]	$\Delta\theta_{\max}$ [$^\circ\text{C}$]	Near-bottom Structure	Initial Position [$^\circ\text{N}$, $^\circ\text{E}$]
BC: Baroclinic (near bottom)	50	500	4	Baroclinic	144.0, 39.0
BG: Big Ring	70	500	4.5	Baroclinic	144.0, 39.0
OS: Off Shore Ring	50	500	4	Baroclinic	144.5, 39.0
BT: Barotropic (near bottom)	50	500	3	Barotropic	144.0, 39.0
IS: Isostatic Ring	50	500	4	No flow	144.0, 39.0
MS: Moderate Slope	50	500	4	Baroclinic	144.0, 39.0

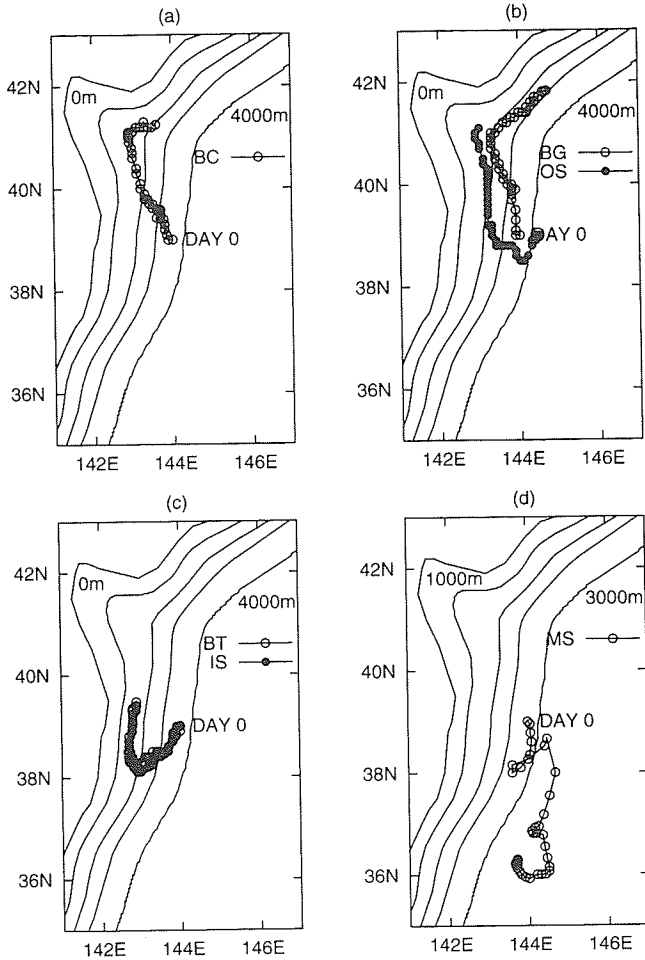


Figure 4. Trajectories of the model warm-core rings in the cases of (a) BC, (b) BG, OS, (c) BT, IS, (d) MS

向が現実と類似していたからである。暖水塊は徐々に接岸しながらも200日間で約200km北へ移動した (Fig. 4(a))。

BGでは、水平スケールが大きく暖水の温度も高い大型の暖水塊の挙動を調べた。BCの移動傾向と比較すると、接岸傾向が小さく等深線に沿っての移動距離が大きかった (Fig. 4(b))。BGではBCよりも暖水塊の半径が大きいため、縁辺部は接岸しても暖水塊全体の接岸は阻害された。またこのため、津軽海峡に相当する等深線が湾曲している海域に入り込まず、等深線に沿って定常的に移動した。BGの暖水塊の移動経路は、BCの標準的な暖水塊よりも等深線に沿う傾向が強いという点で現実に近い。初期位置を沖合に変えたOSでは、海底地形は沖合で平坦であったため、ごく初期には海底地形効果の影響を直接は受けず海底が平坦な場合と同様南西に移動したが、斜面領域に侵入した後はBCと同様の傾向であった (Fig. 4(b))。暖水塊の深層に流速がないISと順圧流速を有するBTの移動経路は極めて類似しているが、傾向はBCとは全く異なっていた (Fig. 4(c))。これらは初期には海底が平坦な場合と同様に南西へ移動

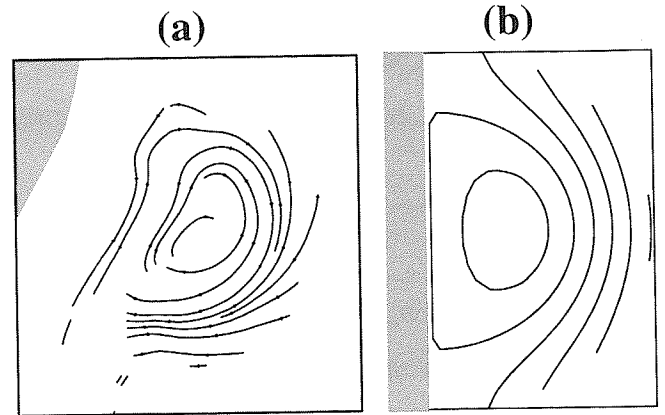


Figure 5. Stream lines profiles of warm-core rings. (a) result of the model experiment: 1700 m depth stream line of the model BC at DAY 5. (b) analytical solution: Surface stream line derived by Shi and Nof (1994).

し、水深の浅い海域に達すると沿岸の地形の影響で北向きに進路を変えた。BTでは深層に流速があるにも関わらずISとほぼ同経路で移動したが、これは直接的には順圧流速が計算開始後数日で失われたためであった (図には示していない)。急勾配の海底斜面によって地形性ロスビー波として分散したためであると思われる。海底斜面の勾配が緩やかなMSでは、暖水塊に等深線に沿う北向きの移動は見られず、複雑な経路を取りながらむしろ南へ移動した (Fig. 4(d))。このことから日本海溝の東側斜面が非常に急勾配であることが三陸沖暖水塊の北への移動に大きな役割を果たしていることがうかがえる。

BCとBG、OSでは暖水塊は岸に沿って北向きに移動する傾向があったが、鏡像効果による暖水塊の移動も北向きであることから、急勾配の斜面が暖水塊に対して側壁のように作用していたことが予想される。斜面の勾配が緩やかなMSで暖水塊が北に移動しなかったのは、緩斜面が壁としては作用していなかったと考えることができる。鏡像効果の「鏡像」は渦に対する側壁の働きが鏡像の渦の働きと等価であることによるものであり、非粘着境界の側壁により渦の流線分布が非軸対称になることが本質である。Shi and Nof (1994) が導出した鏡像効果があらわれる解析解 *wodon* と、本数値実験の暖水塊を比較すると、岸側に等深線に沿った流れが生じている点などよく対応している (Fig. 5)。よって、北向きの移動機構が鏡像効果と同等であることが示唆される。

実際の暖水塊との比較

暖水塊93Aは1993年に常磐沖で生成され、短期的には他の暖水塊等の影響を受けて大きく位置を変えたが、長期的には岸に沿うように移動して1998年には釧路沖に達した。数値実験の結果からは暖水塊の長期的な移動傾向は地形の

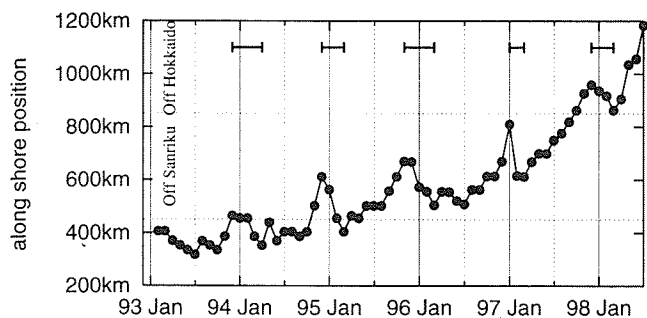


Figure 6. Time series of along shore (along 4000 m isobath) position of the warm-core ring 93A. Overlines at the upper part of the panel indicate the months the ring moved southward which seems to correspond to those of the strong southward Oyashio advection.

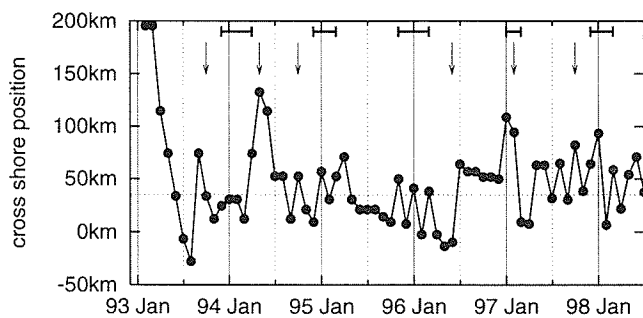


Figure 7. Time series of the cross-shore (from 4000 m isobath) position of the warm-core ring 93A. The reference value for analyzing the relationship between saury fishing ground is 35 km and shown by a dotted line. Overlines are same as Figure 6, while arrows indicate the months when the core temperature of the ring rose rapidly.

効果であることが示唆されたことから、暖水塊93Aの位置を岸に沿う成分と直角成分に分け (Fig. 1), 力学的な要因を整理した。岸に沿う方向の軸としては、日本海溝から千島カムチャツカ海溝へ伸びる4000m等深線を用いた。海岸線ではなくて4000m等深線を用いるのは、海岸線が入り組んでいるのに対して4000m等深線が比較的なだからで、また暖水塊の移動経路にほぼ並行しているという2つの理由からである。等深線は直線ではないが曲率は小さいので、座標変換は一意に行うことができる。

観測データを座標変換をして得た沿岸方向の位置の時系列を Fig. 6 に示した。暖水塊93Aは季節的に変動しながら5年半で約800km北方へ移動している。これに対し数値実験での岸に沿った方向の移動は、200日間で200km以上と見積もられ、単純に比較しても2倍から3倍の速度の違いがある。この違いは、数値実験で考慮しなかった親潮の移流の影響であると思われる。親潮の南下流量は冬期に多いため (石川・神谷, 2000)、移流の影響は冬季に顕著であると思われるが、実際に暖水塊93Aは冬季に南下している。年間の平均北上距離は約150kmであるのに対し、冬季の南下距離は100km~200kmあるから、単純に冬季を除いて考えると平均移動速度は倍増し、数値実験の結果に近いオーダーになる。

沿岸方向に比べると、岸沖方向の位置の変動は相対的に小さくかつ不規則である (Fig. 7)。しかし詳細に見ると、急速な沖合化のいくつかは急激な水温の上昇を伴っており (Mishra, 1999)、黒潮統流及び他の暖水塊との相互作用によるものであることが示唆される。これらは1993年9月 (昇温は10月)、1994年10月、1994年5月、1996年7月 (昇温は6月)、1997年1月 (昇温は2月)、1997年10月である。これらを除くと、小規模に振動しながら徐々に接岸する傾向があり、これは数値実験の結果 (Fig. 4) と整合している。また、絶対的な位置としても沖合に達した1994年5月や1997年の1月の直後には再び沿岸化した。これも地形

から離れた暖水塊が南西へ移動して接岸するという結果に一致している。沿岸方向の位置の変動は親潮の強い影響を受けていたが (Fig. 6)、岸沖方向の位置には明確な影響は見られなかった (Fig. 7)。

これらのことから、暖水塊93Aの移動は、徐々に接岸しながら北上するという数値実験の結果と同様の移動傾向が背景にあって、これに親潮や黒潮統流、他の暖水塊が影響していると考えられる。

サンマ漁場と暖水塊

秋季のサンマの東北海区への南下回遊は親潮系水に沿って起こるため、高温高塩分の黒潮系暖水塊の存在は回遊の障壁となる。ところが親潮は千島沖から東北沖へ陸棚斜面ないし海溝に沿って流れており、半径100km以上の暖水塊が日本海溝に沿って北上すれば親潮と必然的に遭遇する。川合 (1989) は、暖水塊の岸沖方向の位置が親潮の流路に大きく影響している可能性を指摘していることから、暖水塊の岸沖方向の位置を監視することにより親潮の流路分布も把握できることが示唆される。前節の解析では、親潮が暖水塊の岸沖方向に与える影響は小さく、数値実験の結果を基礎に他の暖水塊等の影響を考慮することで、岸沖方向の位置の予測は十分可能であると考えられる。漁況予報のために海況の予測は非常に重要であるが、岸沖方向の位置という1次元の数値がどこまで海況を代表し、漁況にどの程度影響しているかは分からない。そこで、暖水塊の岸沖方向の位置 [km] を改めて離岸指数とし、暖水塊93Aの例を用いてサンマ漁況への影響を検証する。

離岸指数の基準とするために、暖水塊93Aの存在が東北及び道東沖に観測された1993年から1997年の、平均的な東北海区のサンマ漁場の位置 (全国サンマ研究チーム, 1994-1998) を参照した。サンマ漁場の位置は、4000m等深線から岸側に約65km (-65) の線を中心に標準偏差

Table 2. Chronological table of the cross-shore position (CSR) of warm-core ring 93A and its “straitening effect” on saury fishing grounds; the width of the possible southward migration path is narrowed as warm-core rings approach the shore, and this often causes “straitening effect” such as fishing grounds concentration and blocking of the southward migration. Bars indicates the months when CSR is less than 35.

Year	Month	CSP	Straitening effect
1993	Aug	-27.8	
	Sep	74.2	
	Oct	33.8	
	Nov	12.4	appeared
	Dec	24.7	
1994	Aug	52.5	
	Sep	12.4	
	Oct	52.5	
	Nov	21.2	clearly appeared
	Dec	9.4	
1995	Aug	21.2	
	Sep	14.6	appeared
	Oct	9.4	clearly appeared
	Nov	50.0	
	Dec	7.7	
1996	Aug	57.1	
	Sep	57.1	
	Oct	52.0	
	Nov	52.0	
	Dec	50.0	
1997	Aug	64.8	
	Sep	30.4	appeared
	Oct	82.4	
	Nov	38.7	
	Dec	64.3	

70 km で分布しており、暖水塊 93A の半径は約 100 km であるから、離岸指数の基準として沖側 35 km (+35) と設定した。1993 年の離岸指数は、前半は変動が激しかったが、10 月以降は比較的 low 水準である (Fig. 7)。また、黒潮統流による急速な変動が落ち着いた 1994 年の 7 月から、他の暖水塊との相互作用により暖水塊が沖合化した 1996 年 7 月までは低い水準にあり、96 年 7 月以降は比較的高い水準で推移している (Fig. 7)。離岸指数と漁場の対応は、Table 2 に簡単にまとめた。Table 2 では、暖水塊の接岸 (離岸指数低) によって漁場が沿岸に集約したり南下が妨げられる効果を「Straitening effect」と表現して、この効果の出現状況を記述した。離岸指数が low 水準であった 1994 年と 1995 年は、それぞれ常磐沖と三陸沖での漁場形成が大きく遅れたことが知られている。特に 1995 年は 10 月に三陸沖に漁場が形成されないという、極めて異例の事態だった。また、離岸指数が高水準であった 1996 年には漁場が分散し、漁況は全般的に低調だった (サンマ資源研究会議報告, 1997)。

1993 年と 1997 年は年としては離岸指数の影響は明瞭ではなかったが、詳細に見ると暖水塊に起因した現象が現れていた。1993 年は、暖水塊がサンマ漁場と遭遇した 11 月に、離岸指数が 12.4 で low 水準であった。これに対応して、魚群が常磐沖の暖水塊にブロックされて三陸沖で停滞していた (漁業情報サービスセンター, 1993)。また 1997 年は、暖水塊がサンマ漁場と遭遇した 9 月には離岸指数が 30.4 とやや low 水準であったが、襟裳岬沖の暖水塊の北東部がよい漁場になっており、暖水塊の接岸の影響が現れていた (漁業情報サービスセンター, 1997)。

このように、離岸指数は親潮、暖水塊の分布のよい指標となっており、サンマ漁場形成とも対応関係があった。対応が最も顕著に現れたのは、1995 年秋期の暖水塊 93A の接岸 (Fig. 7) による三陸沖での漁場形成の遅れであったが、この接岸は数値実験の結果を用いれば予測可能であったと思われる。しかし、1995 年秋期に数値実験の結果を直接応用できたのは他の暖水塊等の影響が小さかったためであり、離岸指数を実際にサンマ漁況予報の利用するためには、これらの影響の定量的な見積もりが必要である。

まとめ

本研究では、現実的な海底地形と暖水塊の構造を再現して高解像度の数値モデルを用いた数値実験を行い、長期的な移動の素過程として地形の効果が重要であることを示し、さらにこの効果が鏡像効果と同等のものであることを示唆した。数値実験の暖水塊は、徐々に接岸しながら北上していたから、実際の暖水塊の移動を岸に沿う方向の移動と離接岸に分けて解析したところ、親潮や黒潮統流、他の暖水塊の顕著な影響と共に数値実験と同様の移動傾向が見出された。

一方、暖水塊の離接岸が物理過程の考慮により予測可能であることが示唆されたので、これを指標化し漁況予報の基礎として役立てることを考えた。暖水塊の岸沖方向の位置で定義した離岸指数には、サンマ漁場形成への対応があり、漁況予報の一つの要因として重要であることが分かった。離岸指数はサンマだけでなく、サケ等の漁況予報にも利用できると思われる。離岸指数を用いた漁況予報精度向上のための将来的な課題としては、複数の暖水塊を指標化すること、また離接岸の定量的な予報のために黒潮統流及び他の暖水塊との相互作用の影響を見積もることが挙げられる。暖水塊同士の相互作用の研究は行われているから (Yasuda and Flierl, 1997)、この知見を応用できれば効率的である。

謝辞

POM を公開、運営している Princeton 大学の George Mellor 博士や関係諸氏に深く感謝する

引用文献

- Cushman-Roisin, B. (1994) *An Introduction to Geophysical Fluid Dynamics*, Prentice Hall, 320 pp.
- 福島信一 (1979) 北西太平洋系サンマの回遊機構の総観的解析, 東北水研研報, **41**, 1-70.
- 漁業情報サービスセンター (1993-1998) 太平洋漁海況速報, 1357-1562.
- 稲掛伝三 (1997) 暖水塊の移動特性 —1981年, 1996年7月の観測結果から—, 東北水研研報, **59**, 149-162.
- 石川孝一・神谷ひとみ (2000) 親潮南下1980年代以降の動態, 水産海洋研究, **64**, 173-196.
- 岩橋雅行・磯田豊 (1998) サンマ資源量変動と東北・北海道沖の暖水渦分布, サンマ資源研究会議報告, 第47回, 260-262.
- 川合英夫 (1989) 日本東岸近海の黒潮主流軸北限と親潮水南限の長期変動, 水産海洋研究, **53**, 353-363.
- 川崎康寛・河野時廣・杉本隆成 (1990) 親潮の流速変動, 月刊海洋, **22**, 199-210.
- McWilliams, J. and G.R. Flierl (1979) On the evolution of isolated, nonlinear vortices, *J. Phys. Oceanogr.*, **9**, 1155-1182.
- Mellor, G. (1998) User's guide for a three-dimensional, primitive equation, numerical ocean model., Princeton University Rep., 41 pp.
- Mishra, P., S. Sainz-Trapaga and T. Sugimoto (1999) Evolution of Kuroshio warm-core ring 93A from hydrographical observation, in *Ecosystem Dynamics of the Kuroshio-Oyashio Transition Region*, Proceedings of the International Marine Science Symposium held on 25-28 August 1998 at Mutsu City and Hakodate, Japan, 74-85.
- Pacanowski, R. and S. Philander (1981) Parametrization of vertical mixing in numerical models of tropical oceans, *J. Phys. Oceanogr.*, **11**, 1443-1451.
- Shi, C. and D. Nof (1994) The destruction of lenses and generation of vortices, *J. Phys. Oceanogr.*, **24**, 1120-1136.
- Smith, W. and D. Sandwell (1997) Global sea floor topography from satellite altimetry and ship depth soundings., *Science*, **277**, 1956-1962.
- Sommerfeld, A. (1967) *変形体の力学*, 第5版, 講談社, 442 pp.
- Sugimoto, T. and H. Tameishi (1992) Warm-core rings, streamers and their role on the fishing ground formation around Japan, *Deep-Sea Res.*, **39**(Suppl), S183-S201.
- Yasuda, I. and G. Flierl (1997) Two-dimensional asymmetric vortex merger: contour dynamics experiment, *Dyn. Atmos. Oceans*, **26**, 159-181.
- 渡辺一功・清水勇吾・高橋祐一郎・小坂淳 (1999) 数理化理論1類による海況条件を取り込んだサンマ来遊群の予測, サンマ資源研究会議報告, 第48回, 222-226.
- Yasuda, I., K. Okuda and M. Hirai (1992) Evolution of a Kuroshio warm-core ring—variability of the hydrographic structure, *Deep-sea Res.*, **39**(Suppl), S131-S161.
- 安田一郎・奥田邦明・水野恵介 (1986) 境界付近の渦についての数値実験—東北地区の暖水塊についての考察—, 東北水研研報, **48**, 67-86.
- Yasuda, I. and Y. Watanabe (1994) On the relationship between the Oyashio front and saury fishing grounds, *Fish. Oceanogr.*, **3**, 172-182.
- 全国サンマ研究チーム (1994-1998) サンマ漁況の経過, サンマ資源研究会議報告, 第43回-47回.