

特集「新海洋データ同化システム (MOVE/MRI.COM) による海洋情報の高度化」

九州・沖縄海域における黒潮の流路変動*

小嶋 惇**・村上 潔**^{※1}

要 旨

九州・沖縄海域の「海洋の健康診断表」を高度化するため、北西太平洋データ同化システム (MOVE/MRI.COM-WNP, 以下 MOVE) の再解析データと現場観測データの比較検証を行った。トカラ海峡の黒潮流軸変動については、トカラ海峡を航行しているフェリーの ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler: 音響ドップラー式海流計) データとの比較を行い、MOVE が黒潮流軸変動をおおむね妥当に再現していることを確認した。MOVE では九州西岸海域における黒潮からの暖水波及が再現されており、秋季から冬季にかけて発生頻度が高いことも分かった。また、2007 年 3 月の事例において、定置水温データや沿岸潮位データと対応していることを確認した。これら結果を踏まえて、「海洋の健康診断表」の高度化を図っていく。

1. はじめに

現在、気象庁で現業運用されている北西太平洋データ同化システム (MOVE/MRI.COM-WNP, 以下 MOVE) では、それ以前の海況予測システム (COMPASS-K) に比べ、高解像度になり、さらにデータ同化手法なども改良されたため、従来より詳細な海況情報が得られるようになった。橋本・井上 (2009) は、九州・沖縄海域での MOVE における黒潮流路変動の特性を調査し、東シナ海の黒潮上流域から下流域へ黒潮流軸の変動が伝播しており、伝播速度は 13km/day であることなどを報告しているが、MOVE の黒潮流路

の変動の特徴を観測データによって検証するまでには至っていない。

また、高解像度化された MOVE では、従来再現されなかったより小さなスケールの現象・擾乱なども再現されるようになった。このため、東シナ海北部 (九州西岸海域) で起こる暖水波及のような局地的な現象についても有効な情報を出せる可能性があり、観測データとの比較から現実の場に矛盾しない妥当な表現がなされているかの検証も必要である。

本調査では MOVE を活用し、「海洋の健康診断表」において、より高度化した情報提供を目指す

* Variation of the Kuroshio Path around the Kyushu Island.

** Atsushi Kojima, Kiyoshi Murakami

Oceanographical Division, Nagasaki Marine Observatory (長崎海洋気象台海洋課)

現所属 ^{※1} 地球環境・海洋部海洋気象課

ため、MOVE の再現性を現場観測データと比較検証し、その特性を把握することを目的とする。このためトカラ海峡での黒潮の変動と九州西岸海域での暖水波及について、MOVE に同化されていない独立な観測データを用いて比較検証した。

2. トカラ海峡の黒潮変動

トカラ海峡は、黒潮が東シナ海から太平洋へ抜ける唯一の通過海域であり、また船舶が多く往来する海峡でもあることから、トカラ海峡での黒潮流路の監視は非常に重要である。また、橋本・井上 (2009) が示すように、東シナ海を伝播する黒潮擾乱 (Ichikawa and Beardsley, 1993) と日本の南岸での黒潮大蛇行のトリガーとなりうる九州東岸での黒潮小蛇行 (Solomon, 1978) を監視するという観点でも重要な意味を持つ。

本節では、MOVE に同化されていない独立な現場観測データと比較し、その再現性を検証する。

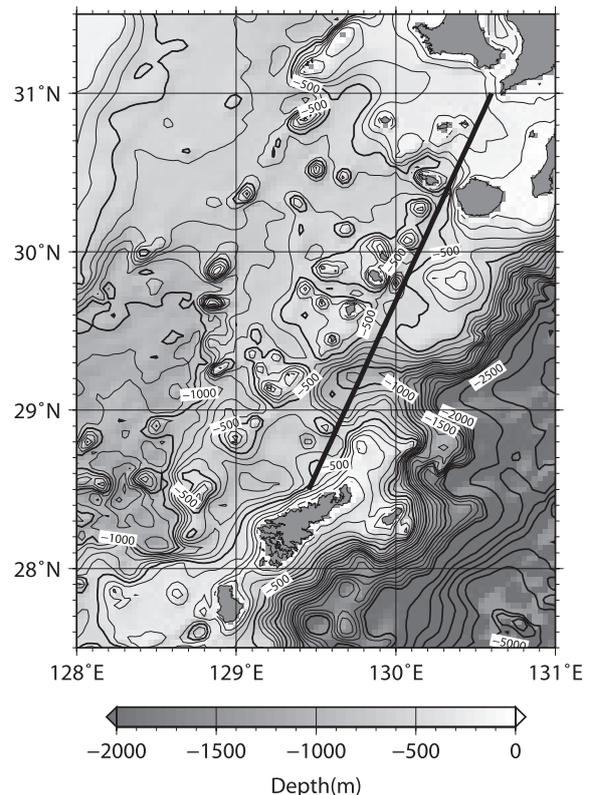
2.1 使用したデータ

MOVE の詳細については、石崎ほか (2009) の記述を参照していただき、ここでは省略するが、海流の観測データは MOVE に同化されていない独立なデータであることを指摘しておく。本調査では 5 日ごとに衛星海面水温や衛星高度計、船舶観測データなどが同化された、MOVE 再解析データを使用している。モデルの格子は日本近海で水平 0.1 度、鉛直 54 層、今回使用した再解析データは 5 日平均のデータで、期間は 1985 年から 2007 年までの 23 年間である。

橋本・井上 (2009) では、MOVE で求めた黒潮流軸位置を指標水温と比較してその妥当性を検証した。本調査ではさらに、トカラ海峡を航行するフェリー (船名：クリーンコーラル 8 総トン数：4,945t マリックスライン株式会社所有) に取り付けられた ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler：音響ドップラー式流速計) データと比較を行った。フェリーは鹿児島 - 奄美 - 那覇を結ぶ定期航路で運航されている。第 1 図にトカラ海峡での航路を示す。鹿児島水産技術センターは同フェリー船底に ADCP を取り付け、データを収集し、観測結果を WEB サイト (<http://kagoshima.suigi.jp/fery/feryinfobody.aspx>) で公開している。

観測頻度はおよそ 2 日に 1 回、観測深度は 5m, 10m, 30m, 50m, 100m のうち 3 層で行っている。本調査では、1999 年から 2007 年で欠測が比較的少ない 30m 深を使用し、フェリー航路上で最も流速の早い地点を黒潮流軸位置として読み取った。ただし今回の解析において、このフェリーの ADCP データは、風による吹送流や潮流成分を除いておらず、それらの影響を考慮していない。

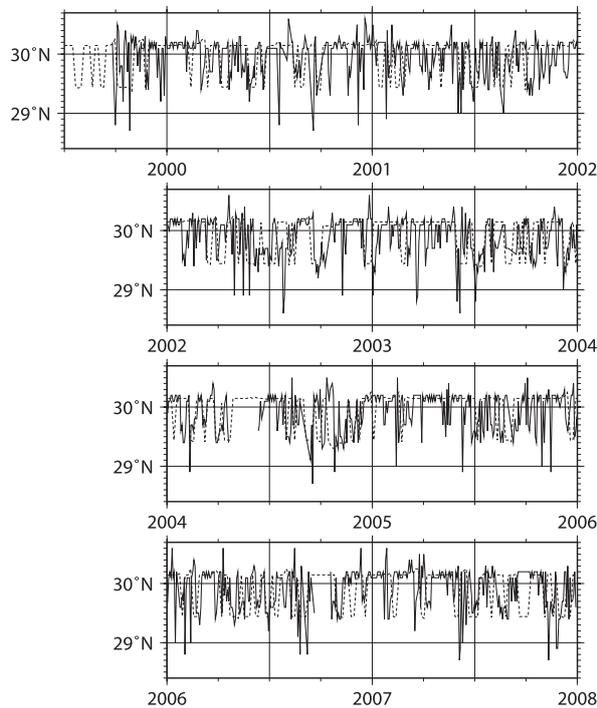
MOVE の黒潮流軸位置の決定方法は橋本・井上 (2009) と同様の手法である。フェリー航路とほぼ同じラインを設定し、そのライン上で 10km ほどの点にデータを内挿した上で、最も流速の早い点を黒潮流軸とした。MOVE の流れは橋本・井上 (2009) と同じく 50m 深のデータを採用した。



第 1 図 トカラ海峡の周辺海底地形
水深のコンター間隔は 100m。図中の太線は鹿児島 - 奄美間のフェリー航路を示す。

2.2 フェリーの ADCP データと MOVE の比較

第2図にフェリーの ADCP データと MOVE のそれぞれについて、前述の方法で決定した黒潮流軸位置（緯度）の変動時系列を示す。フェリーの ADCP データがスナップショットであるのに対して、MOVE は5日平均であり時間スケールはやや異なる。しかし、第2図を見ると変動の幅は、フェリーの ADCP データがまれに大きく南側を示すことがあるほかは、変動はおおむね同期し、よく一致しているといえる。第3図の上段にそれぞれの流軸位置の緯度別頻度分布を示す。第3図の上段を見ると、どちらの頻度分布も北緯 29.9 度を境として北側と南側の二つにピークがあり、トカラ海峡の黒潮が北側、南側の二つの流路を取ることが確認できる。また、この特徴が観測事実であるフェリーの ADCP だけでなく、MOVE で再現されていることも示された。ただし、フェリーの ADCP データでは、特に南側流路におい

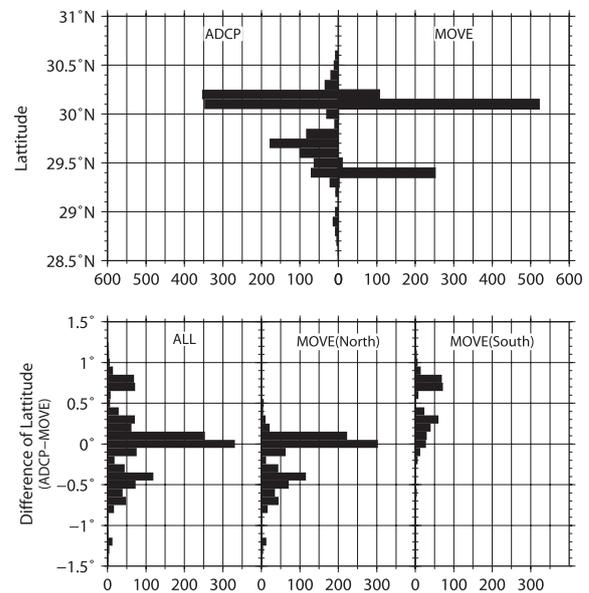


第2図 トカラ海峡における黒潮流軸位置の変動

縦軸は緯度、横軸は時間を示す。実線はフェリー ADCP データから推定した黒潮流軸位置、破線は MOVE 再解析データの 50m 深海流から決定した黒潮流軸位置を示す。

て、経度にして 0.5 度（幅約 50km）程度の緩やかな山なりの頻度分布をとっているのに対して、MOVE による流軸位置の頻度分布にはそれが見られず、ほとんどが北緯 29.4 度付近に限定された頻度分布となっているなど、より細かい点では違いがあることが分かった。

次に、フェリーの ADCP データとそれに最も近い日付の MOVE との流軸位置の差を求め、比較検証した（第3図下段）。その結果、全体では約 6 割が緯度差 0.1 度以内に収まっており、MOVE の再現性が良いことが分かる。しかし、



第3図 トカラ海峡における黒潮流軸位置の緯度別頻度分布（上段）と、フェリーデータと MOVE 再解析データで比較した黒潮流軸位置の差の頻度分布（下段）

上段：縦軸は緯度、横軸は 0.1 度ごとの階級の頻度を示す。フェリー ADCP はおおむね 2 日ごと、MOVE 再解析データは 5 日平均のデータである。左はフェリー ADCP データから推定した黒潮流軸位置、右は MOVE 再解析データの 50m 深海流から決定した黒潮流軸位置を示す。

下段：縦軸は緯度の差、横軸は 0.1 度ごとの階級の頻度を示す。フェリー ADCP データの日付に最も近い日付の MOVE 再解析データの黒潮流軸位置との差を取った。左は全データ、中央は MOVE 再解析データの黒潮流軸が北緯 29.8 度より北側流路を取っていた期間、右は南側流路を取っていた期間。

MOVE で南側流路が示しているときに注目すると、緯度差が 0.1 度以内に収まる割合は低くなる傾向が見られる (第 3 図下段右)。これは、フェリーの ADCP データと MOVE が示す流路が北側と南側で大きく食い違う場合に加え、同じ南側流路を示す場合でも、MOVE での制限的な南側流路に対して、フェリーの ADCP データでの幅のある南側流路との間に差が生じるためと考えられる。

3. 九州西岸海域の暖水波及

東シナ海北部では黒潮系の暖水が流入してくることが知られており (Ichikawa and Beardsley, 2002), 九州西岸海域の沿岸域では時折、薩摩半島に沿って黒潮からの暖水が北上する暖水波及が発生する。この黒潮系の暖水の波及は、沿岸域で急激な海況 (水温・海流など) の変化を引き起こす。また、東シナ海南部はマアジなどの主産卵場となっており、仔稚魚が黒潮の流れに乗って九州沿岸まで運ばれている (佐々, 2007) ことなどから、暖水波及の発生が水産資源の分布にも大きな影響を与えていると考えられる。本章では、MOVE でこの暖水波及がどのように再現されているかを述べ、観測データとの比較も含めて検証する。

3.1 MOVE で表現される暖水波及

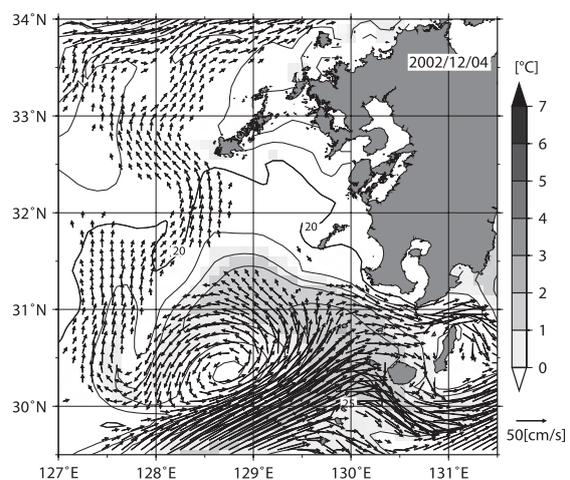
使用した MOVE のデータは第 2 章で用いたものと同じ再解析データである。期間、深度も同じく 1985 年から 2007 年までの 50m 深のデータを用いた。

一般に暖水波及は、豊後水道や紀伊水道、相模湾などで黒潮の一部が流入してくる現象として知られているが、九州西岸海域でも時折発生している。

MOVE による九州西岸海域での海流の変動を観察すると、黒潮系の水塊が流入してくるパターンとして、①黒潮から分枝した水を伴って、薩摩半島西方海域を北上するもの (例. 2002 年 12 月 4 日, 第 4 図), ②暖かい水を伴っているが、薩摩半島西方沖から東向きに流入してくる (薩摩半島に達するときには南向き流となっている) もの (例. 2002 年 4 月 28 日, 第 5 図) の二つのタイプ

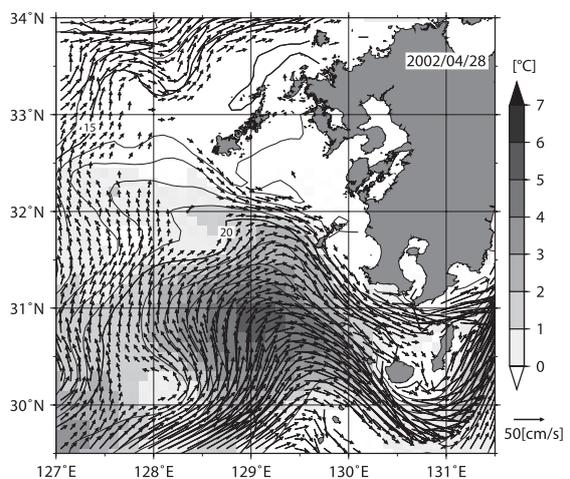
があった。②のタイプについては、①のタイプと流れの分布が異なり、振舞いも個々の事例で大きく異なることから、ここでは①のタイプのみ注目して議論する。

MOVE で北緯 31 度から北緯 32 度、東経 129 度以東の九州西岸で囲んだ海域に注目して、上記①の定義で暖水波及の発生を観察すると、本調査の解析期間 (1985 年から 2007 年まで) でおおむね 50 ~ 60 回の暖水波及が発生しており、平均では年数回発生していることが分かった。発生する



第 4 図 MOVE 再解析データ 50m 深水温偏差と海流 (2002 年 12 月 4 日)

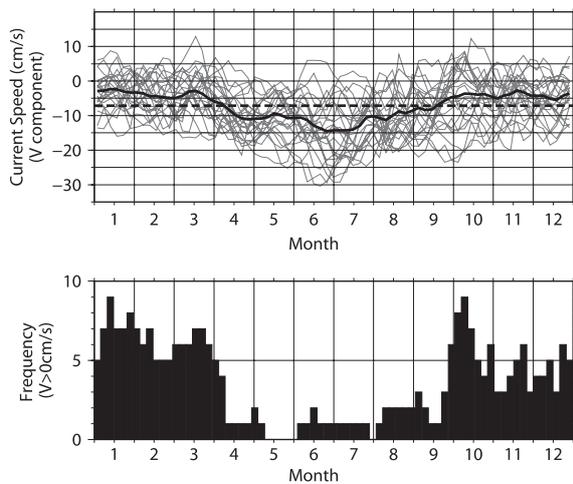
コンターは水温, コンター間隔は 1°C. 陰影は水温偏差, 水温偏差が正のみ陰影を示した. ベクトルは流速 10cm/s 以上の海流を示す.



第 5 図 第 4 図と同じ (ただし 2002 年 4 月 28 日)

季節は、秋季 (10-12 月) から冬季 (1-3 月) が多く、春季 (4-6 月) から夏季 (7-9 月) に発生する事例はほとんど見られなかった。

暖水波及の発生を客観的にとらえるための指標として、九州西岸海域での南北流に着目した。第 6 図上段に北緯 31.5 度、東経 129 度から陸までのラインで平均した MOVE の 50m 深の南北流速の時系列を示す。これを見ると、この海域での平均的な流れは南向き成分を持つことが分かり (第 6 図上の太破線)、北向き流の発現が暖水波及を示す指標として有効であることが分かる。また、6 月、7 月をピークに南向き成分が強く、逆に秋季から冬季にかけては弱まっていることが分かる (第 6 図上の太線)。第 6 図下の南北成分が北向き流 ($V > 0 \text{ cm/s}$) となる頻度を見ても、10 月から 3 月の秋季から冬季にかけて多く、それ以外の時期にはほとんど見られない。



第 6 図 北緯 31.5 度ラインにおける MOVE 再解析データ 50m 深の平均南北流速 (上図) と同ラインで北向き流 ($V > 0 \text{ cm/s}$ 以上) となる頻度分布 (下図)

上段: 縦軸は流速 (cm/s)、横軸は月を示す。灰色の線は各年 (1985 年から 2007 年) の北緯 31.5 度のライン (東経 129 度から陸地まで) で平均した南北流速の時系列を示す。太実線はそれらを平均した時系列、破線は全期間の平均値を示す。

下段: 縦軸は北緯 31.5 度ラインの平均流が北向き (上図で $V > 0 \text{ cm/s}$ 以上) となる頻度 (回数: MOVE 再解析データの 5 日平均を 1 回と数えた) を示す。横軸は月を示す。

この暖水波及の季節依存性の原因としては、東シナ海の季節的な海流場の変化が考えられる。第 7 図に MOVE の 50m 深の月平均の流れを示す。これを見ると、夏季、特に 7 月をピークに北緯 31.5 度、東経 129 度を中心とする直径 200km 程度の高気圧性循環が形成され、逆に冬季にはこの高気圧性循環は完全に消滅し、明りょうな循環場が存在していないことが分かる。つまり、夏季には、この九州西方の高気圧性循環によって、薩摩半島沿岸で南向きの流れが形成されることで黒潮系暖水の北上が抑制される、逆に冬季には黒潮からの北上流を抑制する南向きの流れが存在しないため、暖水波及が発生しやすい場となっていると考えられる。

九州西方の高気圧性循環については、種子田ら (2008) による観測の例があり、循環の位置や循環の直径が 150km 程度といった規模もよく一致している。ただし、種子田ら (2008) の観測では 1 回のスナップショットであり、またほかの研究事例も少ないため、MOVE で再現されたような高気圧性循環が定常的に存在し、また季節変動しているかについては、今後も観測などによる裏付けが必要である。

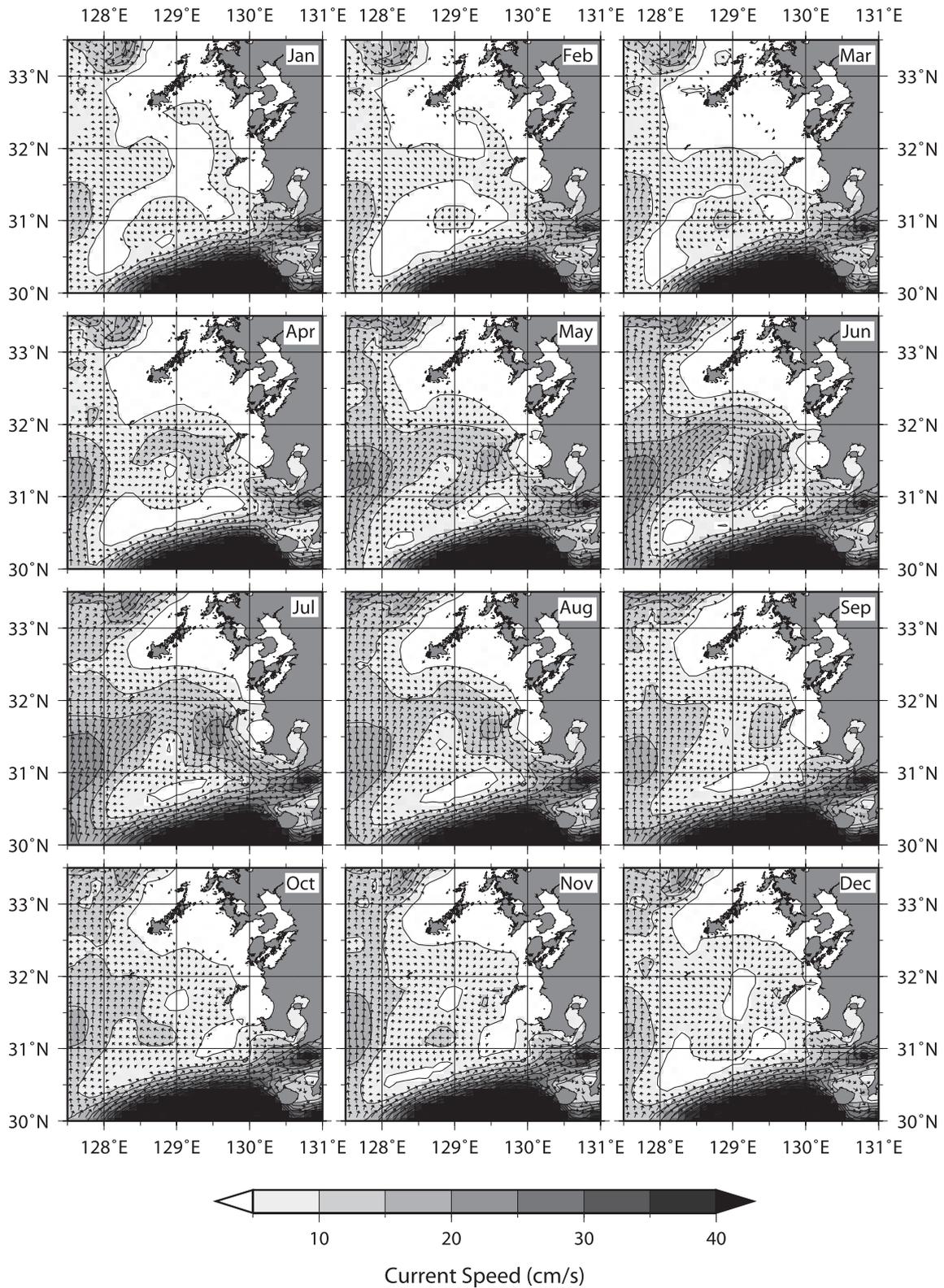
なお、ここでは、MOVE の 50m 深の結果について述べてきたが、同様の結果を表層 (0.5m)、100m 深のデータでも確認できた。

3.2 定置水温データとの比較

MOVE で表現された暖水波及が現実と合致しているかの検証は、暖水波及が 10 日程度の短期間で発生、終息となる現象であり、船舶による観測データでとらえることが難しいことから容易ではない。

西海区水産研究所では、漁港などに水温計を設置して、九州沿岸の水温をモニターしている。2007 年 3 月の暖水波及を事例に、この定置水温データとの比較を行った。

使用した定置水温データは、西海区水産研究所が熊本県の天草と長崎県の野母崎に設置した水温計によるもので、水温計の設置水深は約 10m である。調査には日平均データを使用した。また、この定置水温データは MOVE には同化されてお



第7図 九州西岸の月平均海流

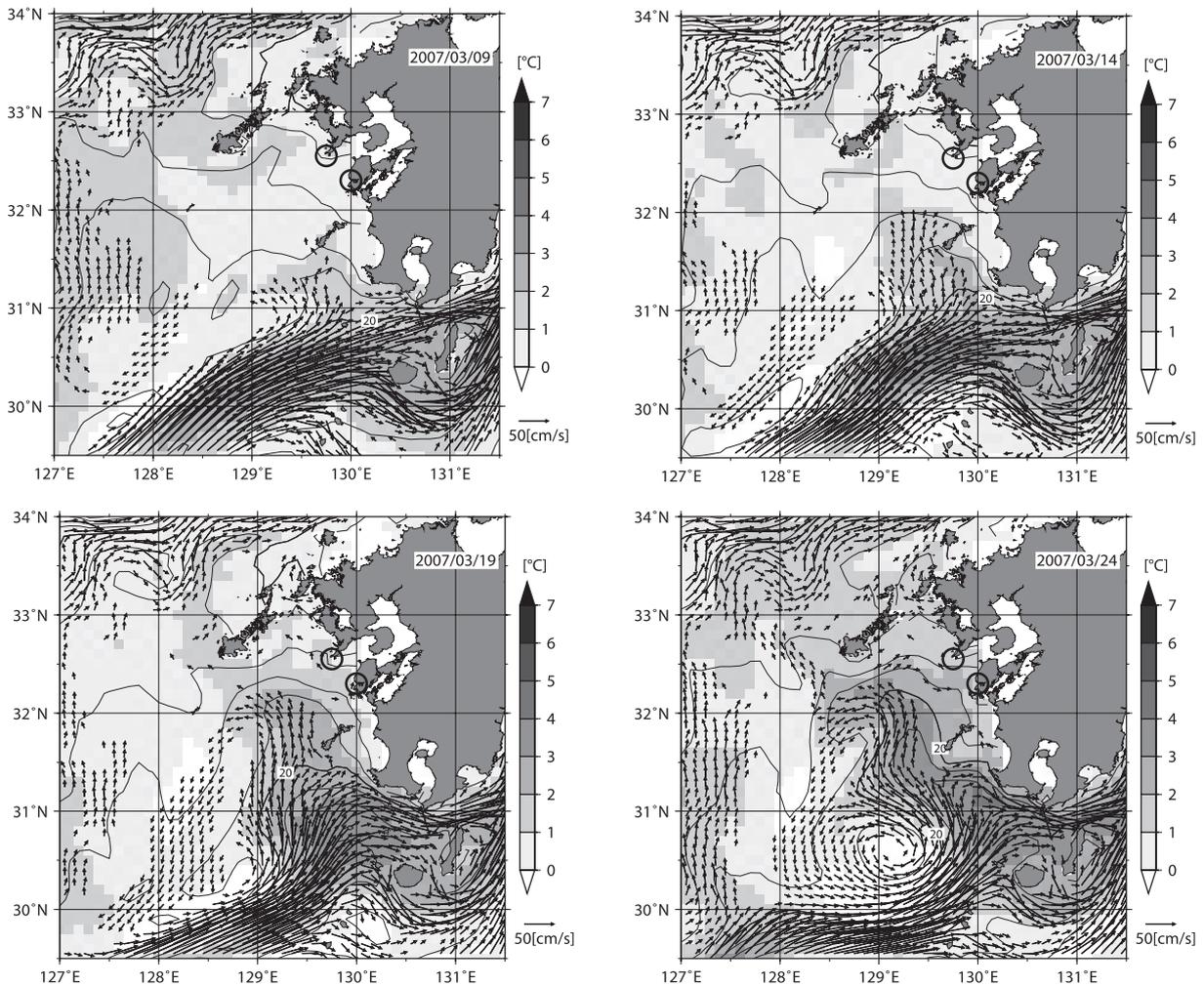
MOVE再解析データ50m深の月平均海流図。陰影、コンターは流速を示す。コンター間隔は5cm/s。ベクトルは5cm/s以上の海流を示す。

らず、MOVE と独立なデータである。

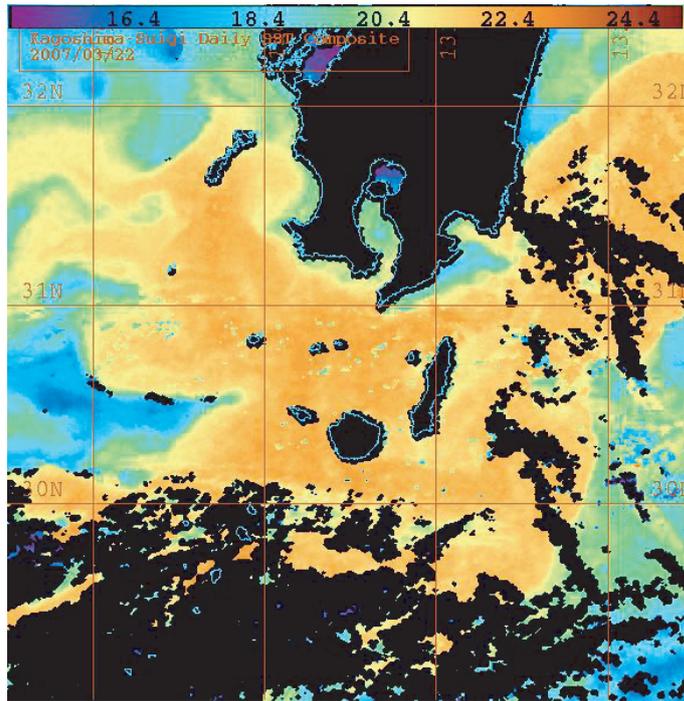
まず、MOVE で再現された暖水波及（第8図）では、2007年3月9日の海流で黒潮からの分枝の兆候として、鹿児島島の西海域で10cm/s以上の北上流が見られる。3月14日には北上流は鹿児島島の甕島に達しており、水温偏差が2℃以上の正偏差となる海域も見られるようになった。3月19日から24日ころに北上流がほぼ最盛期となり長崎県福江島付近まで達した。また、水温偏差が2℃以上の正偏差となる海域が北緯32度を越えるまで北上し、九州西岸海域一帯で1℃以上の正偏差となっていた。衛星海面水温画像では、3月23日の気象衛星NOAAによる画像（第9図）から、高水温域が甕島周辺海域まで広がっていることが

確認できる。

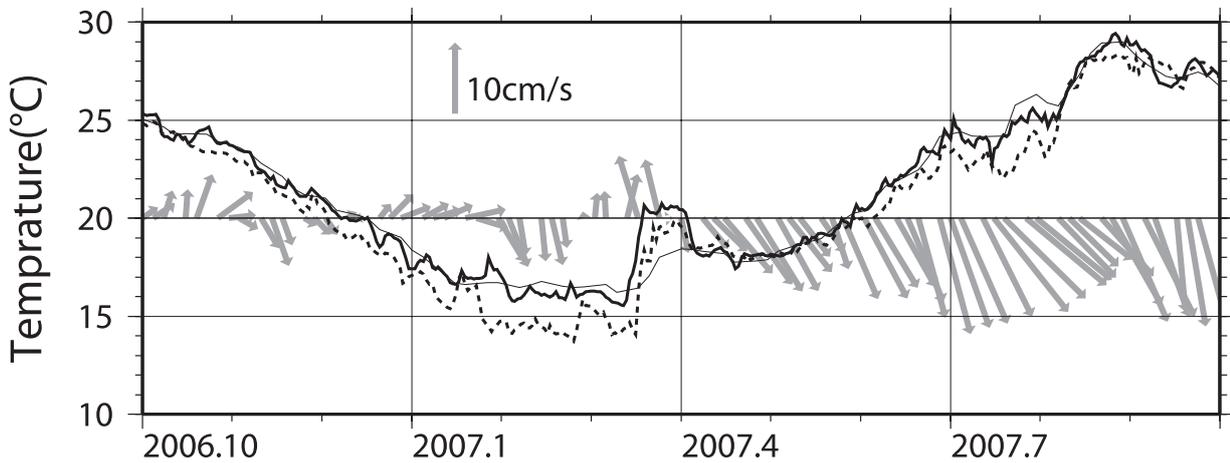
このときの定置水温データ（第10図の太実線、破線）を見ると、3月中旬に数日間で4～5℃上昇した期間があった。MOVEにおいても、この水温上昇にほぼ同期して、周辺海域（東経129.5度から130度、北緯30度から30.5度で囲まれた範囲）で2℃程度の水温上昇があり（第10図の細実線）、また北緯32度のライン（東経129度以東一陸地まで）での平均流では、3月14日から急に北上流が強くなっている（第10図のベクトル）ことが分かった。水温上昇と北上流の強化がほぼ同期しており、暖水波及の到達によって沿岸の水温上昇が生じていたことが推定される。



第8図 第4図と同じ（ただし2007年3月9日（左上）、14日（右上）、19日（左下）、24日（右下））
 図中の○は定置水温の設置地点。北は野母崎、南は天草を示す。



第 9 図 2007 年 3 月 23 日の衛星海面水温図（鹿児島水産技術
開発センターホームページより）
気象衛星 NOAA, 1 日夜間合成図.



第 10 図 沿岸定置水温と北緯 32 度ラインの MOVE 再解析データ 50m 深平均流

太実線と破線は日平均値の沿岸定置水温（太実線：天草，破線：野母崎）の時系列，細実線は MOVE0.5m 深水温（東経 129.5 度から 130 度，北緯 32 度から 32.5 度で囲まれた範囲の平均）を示す．縦軸は水温，横軸は時間（1 目盛りは 1 か月）を示す．ベクトルは MOVE 再解析データの北緯 32 度のライン（東経 129 度以東 - 陸地まで）での平均流を示す．

4. 九州・沖縄海域の「海洋の健康診断表」黒潮の診断に関する情報の高度化

本調査は九州・沖縄海域の「海洋の健康診断表」における情報の高度化を目的に行った。

暖水波及は、水温・海流などの海況を急激に変化させ、漁業水産関係者にとっては資源管理や船舶運行などに重要な情報である。また、沿岸近くまで波及し、潮位偏差への影響も考えられることから、暖水波及に関する情報を発信する意味は大きいと考えられる。

一方で、暖水波及は、MOVEのような高解像度モデルで初めて再現される現象であり、その再現性の確認には十分な注意が必要である。本調査では、沿岸水温との比較から、1例ではあるが、その再現性は現実に即していることが確認できた。今後はMOVEを用いて、定常的に九州西岸海域の暖水波及の発生を監視し、暖水波及発生時には「海洋の健康診断表」を通して、沿岸域への水温・海流情報を発信したい。また、引き続きMOVEと現場観測データとの比較検証していくことも重要である。

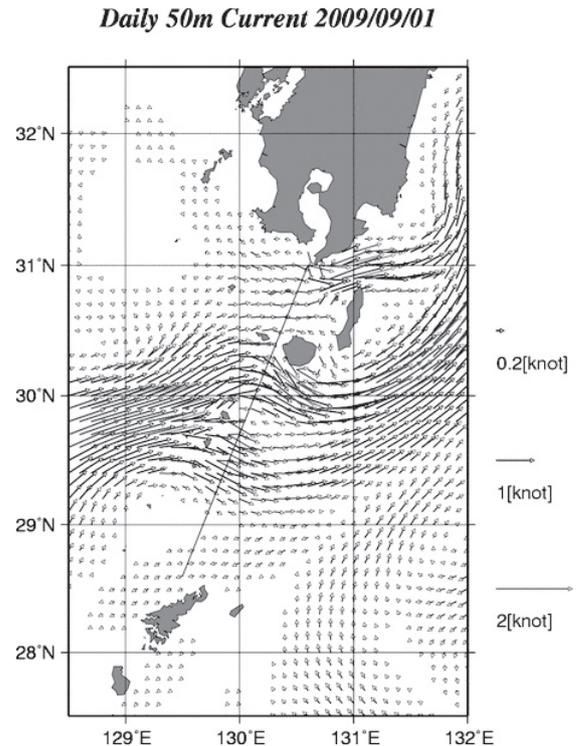
また、黒潮の流路変動に関しては、MOVEの海流から本調査の手法で黒潮流軸を求め、情報発表していく。これにより、従来、旬ごとに発表していた黒潮の位置が5日ごとに発表することが可能になる。九州・沖縄海域では、本調査のトカラ海峡のほかに、沖縄の北西と都井岬の南東での流軸位置を情報として発表する。さらに神戸海洋気象台担当海域の日本の南岸の各地点からの流軸位置についても発表していく。

なお、トカラ海峡の流軸位置については、現実の流軸変動幅よりも限定的になってしまうことなどから、「海洋の健康診断表」九州・沖縄海域の海況監視にあたっては拡大平面図（第11図）を併用し、海流の分布傾向にも注意していく必要がある。

5. まとめ

本調査ではMOVEを用いた「海洋の健康診断表」の高度化のため、MOVEと独立な現場観測データとの比較検証を行った。

トカラ海峡の黒潮流軸位置については、フェリ



第 11 図 トカラ海峡海流監視図

MOVE再解析データ50m深海流図。図中の実線は「海洋の健康診断表」でトカラ海峡での黒潮流軸位置を発表する基準線を示す。ベクトルは0.2knot以上の海流を示す。実際は、流速を3段階で色分けしている。

一のADCPデータと比較を行い、MOVEでの黒潮流軸の変動がおおむね再現されていることが把握できた。トカラ海峡の南側流路では、MOVEの黒潮流軸がフェリーの結果と比べて、位置が制限されている特性があり、注意が必要である。

九州西岸海域の暖水波及は、高解像度化されたMOVEで初めて再現された現象である。平均で年数回程度発生しており、また、九州西岸海域の高気圧性循環の季節変化に支配され、秋季から冬季にかけて多く発生していることが分かった。九州西岸海域の高気圧性循環については、暖水が沿岸まで波及してくる事例もあり、その形成や動態について更なる調査が必要である。2007年3月の暖水波及の事例では、暖水波及が天草、野母崎にまで達し、定置水温データや潮位観測データでも水温の急激な上昇や潮位偏差の拡大が観測され

ており、MOVE で現実と対応した再現がなされていることが検証された。

これら調査の結果を受けて、九州・沖縄海域の「海洋の健康診断表」では暖水波及の発生を監視し、情報発信していく。また、「海洋の健康診断表」の海洋のデータバンクではトカラ海峡を含めた日本沿岸の各地点で、黒潮流軸までの距離を発表していく。また、MOVE の再現性検証は、今後も現業運用と並行して行っていき、MOVE の特性理解とより正確な情報の発信につなげていく必要がある。

謝辞

本調査にあたって、西海区水産研究所並びに鹿児島水産技術センターによる観測資料を利用させていただきました。この場を借りて御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 橋本晋・井上博敬 (2009) : 南西諸島周辺における黒潮の流路変動と海況変動. 測候時報, 76, 特別号, S55-S81.
- Ichikawa, H. and R.C.Beardsley (1993) : Temporal and Spatial Variability of Volume Transport of the Kuroshio in the East China Sea. Deep Sea Research Part I, 40 (3), 583-605.
- Ichikawa, H. and R.C.Beardsley (2002) : The Current System in the Yellow and East China Seas. Journal of Oceanography, 58, 77-92.
- 石崎士郎・曾我太三・碓氷典久・藤井陽介・辻野博之・石川一郎・吉岡典哉・倉賀野連・蒲地政文 (2009) : MOVE/MRI.COM の概要と現業システムの構築. 測候時報, 76, 特別号, S1-S15.
- 佐々千由紀 (2007) : 東シナ海におけるマアジ仔稚魚の分布 - 産卵場, 輸送及び初期生残の推定 -, 月刊海洋, 446 号, 500-505.
- Solomon, H. (1978) : Occurrence of Small "Trigger" Meanders in the Kuroshio off Southern Kyushu. Journal of Oceanography, 34, 81-84.
- 種子田雄・森永健司・中川倫寿 (2008) : 九州西方海域の流速・密度構造とその短期変動の解明. 西海区水産研究所主要研究成果集, 第 12 号, 29.