

# HYCOM-ROMSダウンスケーリング海洋流動モデルの開発と南シナ海周辺海域への応用

内山 雄介<sup>1</sup>・千郷 直斗<sup>2</sup>・黒澤 賢太<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 神戸大学教授 大学院工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

E-mail: uchiyama@harbor.kobe-u.ac.jp

<sup>2</sup>学生会員 神戸大学 大学院工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

<sup>3</sup>正会員 (国研) 理化学研究所 計算科学研究センター (〒650-0047神戸市中央区港島南町 7-1-26)

三次元データ同化全球海洋再解析HYCOM+NCODAを初期・境界条件としたHYCOM-ROMS海洋ダウンスケーリングシステムを開発し、南シナ海の高解像度再解析を行った。衛星データ等との比較を通じてシステムの現象再現性が十分に高いことを確認したのち、南シナ海を取り囲む海峡における通過流量収支解析を行い、南シナ海の水塊形成機構を精査した。半閉鎖的である南シナ海は、全体的はルソン海峡から流入、パワラン海峡から流出する海水の収支に支配されており、前者は黒潮の直接影響、後者はセレベス海を通じたミンダナオ海流からの間接影響を受けて変動していた。両海流は北太平洋亜熱帯循環を構成する北赤道海流が分岐したものであり、南シナ海が海盆規模の影響を強く受けている可能性が示唆された。

**Key words :** HYCOM-ROMS downscaling system, South China Sea, flux bugjet analysis, Kuroshio

## 1. はじめに

海岸工学が対象とする沿岸域における流動や水塊構造を精緻に再現するためには、黒潮流路に代表される外洋影響を正確に考慮することが根幹的に重要である。例えば、福島第一原発からの放射性核種漏洩事故に際しては、東北沖における親潮系流動の発達、沿岸に捕捉された核種輸送、中規模渦・サブメソスケール渦や黒潮への連行という一連の外洋プロセスが核種の海洋分散予測・再解析の精度を強く支配していた<sup>1)</sup>。また、閉鎖性が強いと思われてきた太平洋沿岸の内湾における流動環境も黒潮流路変動の影響を強く受けている。例えば、瀬戸内海において平常時に卓越する豊後水道から紀伊水道へ向かう時計回り通過流の強度は、両水道南側海域における黒潮の北上・南下に対応して変動する<sup>2)</sup>。また、台風通過に伴う外乱によって黒潮流路が応答し、瀬戸内海通過流の流向を反転させることもある<sup>3)</sup>。沿岸流動解析に外洋影響を正確に取り込むためには、データ同化海洋再解析値から境界条件等を与え、内部を領域海洋循環モデルで解くネスティングを用いた海洋ダウンスケーリングが極めて有効である。これまで、我が国の沿岸海域においては、信頼性の高い国産のデータ同化海洋再解析値に依拠したJCOPE2-ROMS<sup>4)</sup>、MOVE-ROMS<sup>5)</sup>ダウンスケーリングシステムなどが開発され、大きな成功を収めている。

一方で、世界各地の海域における沿岸災害や汚染物質漏洩などに対応するためには、JCOPE2等がカバーし

ない海域であっても適用可能な一般性の高い高解像度モデルが必要である。外洋情報を与えるためのデータセットとしては、全球海洋循環モデルNEMOに4D-Varデータ同化を組み込んだECMWFによるORAS4再解析<sup>6)</sup>(水平格子解像度0.3-1度)、NEMOにReduced Order Kalmanフィルタデータ同化を組み込んだCMEMS/Mercator OceanによるGROLYS再解析<sup>7)</sup>(同1/4度)、全球海洋モデルHYCOMに3D-Varデータ同化を組み込んだGODAE/HYCOMコンソーシアムによるHYCOM+NCODA再解析<sup>8)</sup>(同1/12度)などが候補となる。信頼できるモデル再解析値を利用できない場合は、衛星海面高度計とArgoフロートデータを用いて静力学的に推定された3次元密度場情報(同1/4度)を用いることもオプションの1つとなる<sup>9)</sup>。

本研究で対象とする南シナ海(図-1)には、石油(推定埋蔵量 112 億バレル)、天然ガス(同 190 兆立方フィート)に代表される海底資源や、世界の漁獲量の約 12%を占める水産資源が豊富に賦存し、世界の貨物の約 1/3 が通過するマラッカ海峡に代表される海運の大動脈を含み、政治経済的に日本と関連の深い諸国を沿岸に有するなど、アジア諸国にとって核心的に重要な海域である。したがって、南シナ海における沿岸・海洋開発や生態系保全に際して必要となる基本的な外力場を正確に求め、気候変動への応答や、災害時等の海洋物質分散やルーティングなどに応用可能な、精緻な海況再解析・予報システムの開発が強く求められている。南シナ海の流動については、ルソン海峡の西側を中心とした北部に

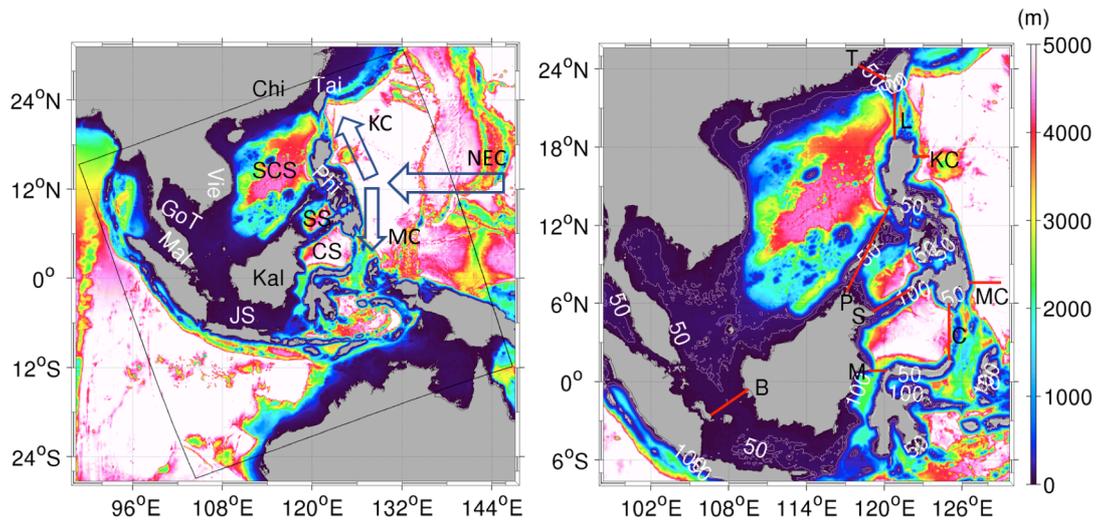


図-1 左図：南シナ海を中心とした研究対象海域および水深（カラー，m），黒枠は ROMS 計算領域，右図：南シナ海周辺のズームイン．コンターは水深 50, 100 m の等深線，矢印は主要な海流（NEC：北赤道海流，KC：黒潮，MC：ミンダナオ海流），記号は主要な海域（SCS：南シナ海，CS：セレベス海，SS：スールー海，JS：ジャワ海，GoT：タイランド湾）および南シナ海に接する・あるいは取り囲む海峡（L：ルソン海峡，C：セレベス海峡，M：マカッサル海峡，P：パラワン海峡，B：バンカ島海峡）．略号は本文で使用しているものと同じである．

において研究が進展してきた．特に，ルソン海峡海嶺地形から励起される強い内部波（内部潮汐）の発生・伝播・散逸過程や，ルソン島北部における黒潮の西向き転流に伴う流入イベントとそれに伴う切離および定在中規模渦に科学的興味が集中していた．しかしながら，南側のタイランド湾やマレー半島沿岸を含む南シナ海全体の流動構造に関する研究は立ち遅れており，海域流動の全容は必ずしも解明されていないのが現状である．本海域は多島海であり，比較的狭隘で浅い海峡で囲まれているため半閉鎖的な海域であると考えられることが多い．しかし，フィリピン東岸沖では西岸境界流である黒潮とミンダナオ海流が流れており，瀬戸内海のように海流の影響を間接的に，残差流として受けている可能性が高い．

このような背景の下に，本研究では，アジア周辺海域での使用実績が比較的多く，現時点において最も空間解像度が高い中規模渦解像のHYCOM+NCODA全球再解析データを用い，これを領域循環モデルROMSにネスティングさせたHYCOM-ROMSダウンスケーリングシステム（以下，本システムと呼称）を開発することを主たる目的とする．次いで，本システムを南シナ海およびその周辺海域（図-1）へ適用し，その再現性を確認するとともに，各海峡における断面通過体積フラックス収支解析を行い，黒潮やミンダナオ海流の消長に伴う南シナ海の応答を定量化し，本海域の基礎的な水塊形成機構を明らかにする．

## 2. HYCOM-ROMSダウンスケーリングシステム

HYCOM-ROMSシステムによる南シナ海モデルの計算条件を表-1に示す．水平解像度1/12度の3D-Varデータ同化

表-1 HYCOM-ROMS南シナ海モデルの計算条件

計算期間	2011年1月16日-2015年12月31日
格子数	1024×1024×鉛直40層
水平解像度	約5km (Oblique Mercator 投影法)
時間解像度	180s (baroclinic モード)
側方境界条件	HYCOM+NCODA (1日平均値)
海上風	気象庁 GPV-GSM (6時間値)
海面フラックス	NOAA-COADS (月平均気候値)
海表面温度・塩分	HYCOM-SST, SSS (20日平均値)
河川流量	Daiら (2009) による月平均気候値
海底地形	SRTM30_Plus データ
調和定数 (潮汐)	TPXO 7.0 による主要 10 分潮

全球海洋再解析HYCOM+NCODA GOFs 3.0全球解析値GLBu 0.08, expt 90.6-91.2 (<https://hycom.org> 参照．以下，単にHYCOMと呼称) による日平均出力の3次元流速，塩分・水温，水位を時空間的に内挿して側方境界条件・初期条件とし，領域海洋循環モデルROMS（解像度5 km）へ one-way offlineネスティングした．ROMSの海上風には気象庁現業全球気象解析データ GPV-GSM（6時間毎解析値），海面での熱・放射・淡水フラックスにはNOAA-COADS月平均気候値，河川流量にはDaiら（2009）による月平均気候値を用い，潮汐には全球調和定数TPXO 7.0による主要10分潮を与えた．また，解像度不足による黒潮などの海流の再現精度を向上させるために，ROMSの3次元密度場をHYCOMによる10日平均水温・塩分場に1/20 d<sup>-1</sup>の強度で緩和させるTS-Nudging<sup>9)</sup>を導入した．さらに，COADSを用いることによる海面フラックスの不整合に伴う長期的なドリフトを補正するために，HYCOMによる20日平均海表面温度（SST）と同塩分（SSS）を用いて1/90 d<sup>-1</sup>の強度で緩和させるフラックス補正<sup>9)</sup>を導入

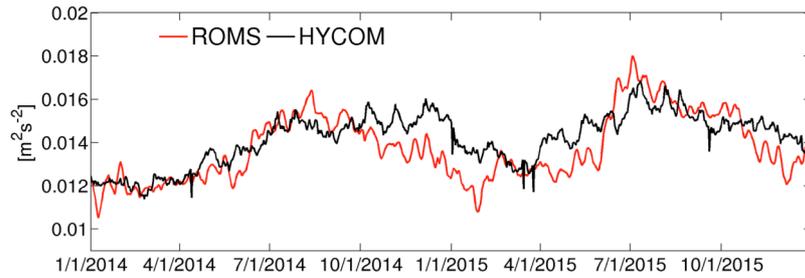


図-2：表層 400 m までの空間平均運動エネルギーの時系列. 赤：ROMS, 黒：HYCOM.

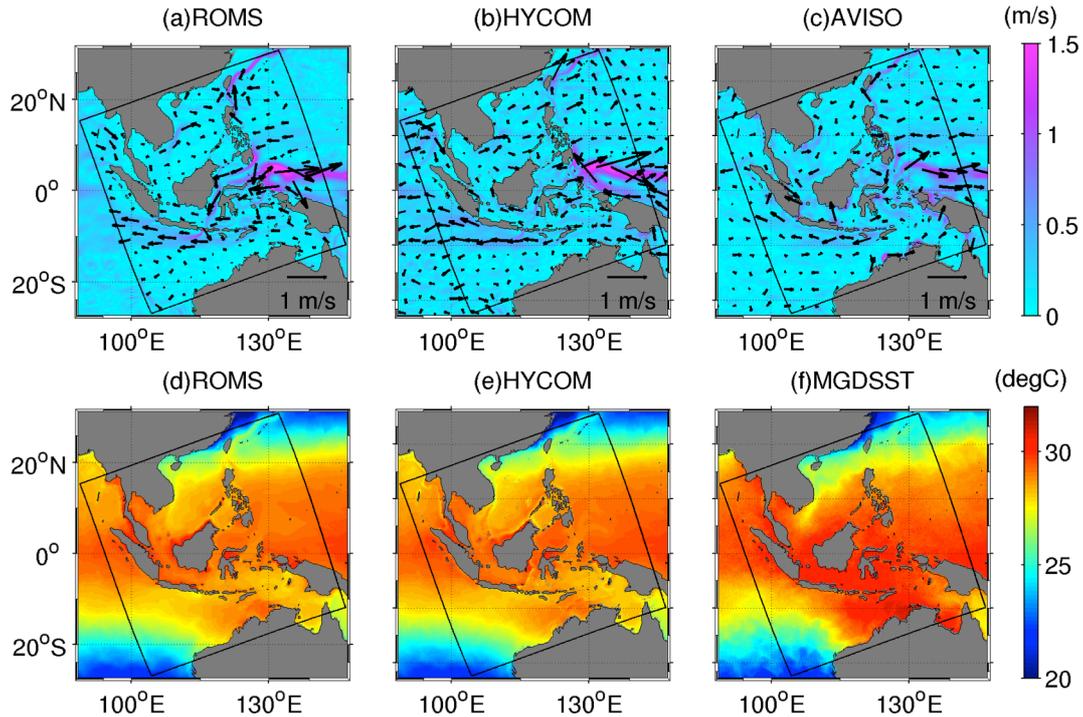


図-3 HYCOM-ROMS モデル (左), HYCOM 単独 (中央), 観測 (右, AVISO 衛星海面高度データと MGDSST 衛星海面温度 SST データ) の比較. 上段：表層流速ベクトルとその絶対値 (カラー, m/s), 下段：SST は ROMS および HYCOM はモデル第一層のポテンシャル水温, MGDSST は複数衛星のコンポジット表皮水温, 単位はいずれも℃.

した. これらの手法は著者らのグループによる JCOPE-ROMS ダウンスケリングシステム 1 段ネストモデル<sup>5)</sup> の基本設計思想を踏襲したものであり, 総観規模や中規模現象における再現精度は極めて高いことが確認されている. 本研究ではこのシステムを用いて 2011 年-2015 年の約 5 年間の再解析を行なった. 計算結果は 1 日平均値として出力し, 以下の解析に供した.

### 3. システムの再現性

HYCOM-ROMS システム南シナ海モデルの基本性能を確認するため, まず, 海洋表層における流動の時間変動特性を調べる. ここでは, データ同化された HYCOM と, forward モデルである ROMS モデルによる表層 400 m までの空間平均運動エネルギー (KE) を比較した (図-2).

ただし空間平均は ROMS の計算領域に対して行った. 計算期間後半の 2014 年~2015 年の 2 年間における KE の時間変動には明確な経年差および季節変動が見られる. 両モデルの変動傾向や振幅は概ね一致しており, 精緻なデータ同化を施していない forward モデルである ROMS が複雑な海流や内部潮汐などの高周波シグナルの subtidal 成分などの海洋変動を平均的に良好に再現していることが確認される. KE の年内変動パターンとしては, 台風などの影響を受ける夏季に増大し, 反対に北寄りの季節風が卓越する冬季で減少している様子などが表現されている.

次に, 空間的な再現性を見るために, 2014~2015 年の 2 年間について時間平均された表層流速および表面水温 SST の空間分布を求めた (図-3). ここでは HYCOM, ROMS, 実測値の三者を比較しており, 実測値は表層流速については AVISO による海面高度データから地衡流近

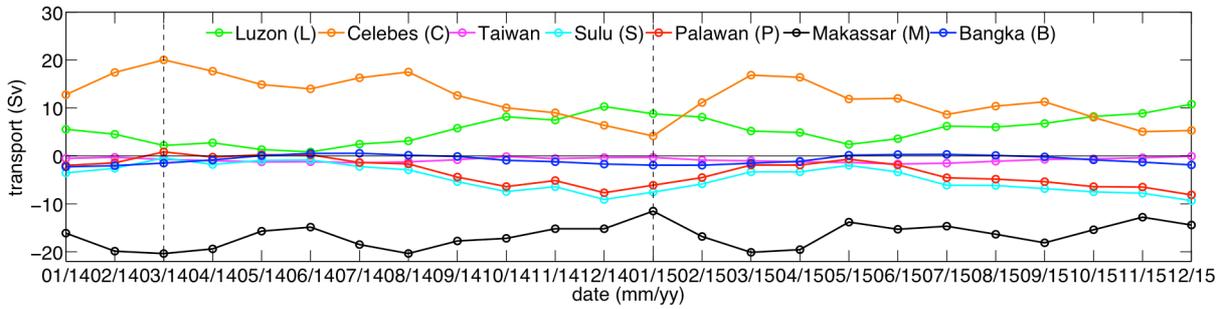


図-4 南シナ海周辺における各海峡での通過体積フラックス（流量，単位は Sv. 1 Sv = 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/s）. ただし南シナ海への流入を正と定義しており，断面の定義位置は図-1 左に示した通りである．ルソン海峡から黒潮系水塊が流入し，パラワン海峡を通じてセレベス海・ジャワ海方向へ至る流出とが概ねバランスして南シナ海の水塊が形成されている．セレベス海ではセレベス海峡からミンダナオ海流が，スルー海峡からは南シナ海系水塊が流入し，マカッサル海峡方向へと抜ける流れが卓越することが分かる．

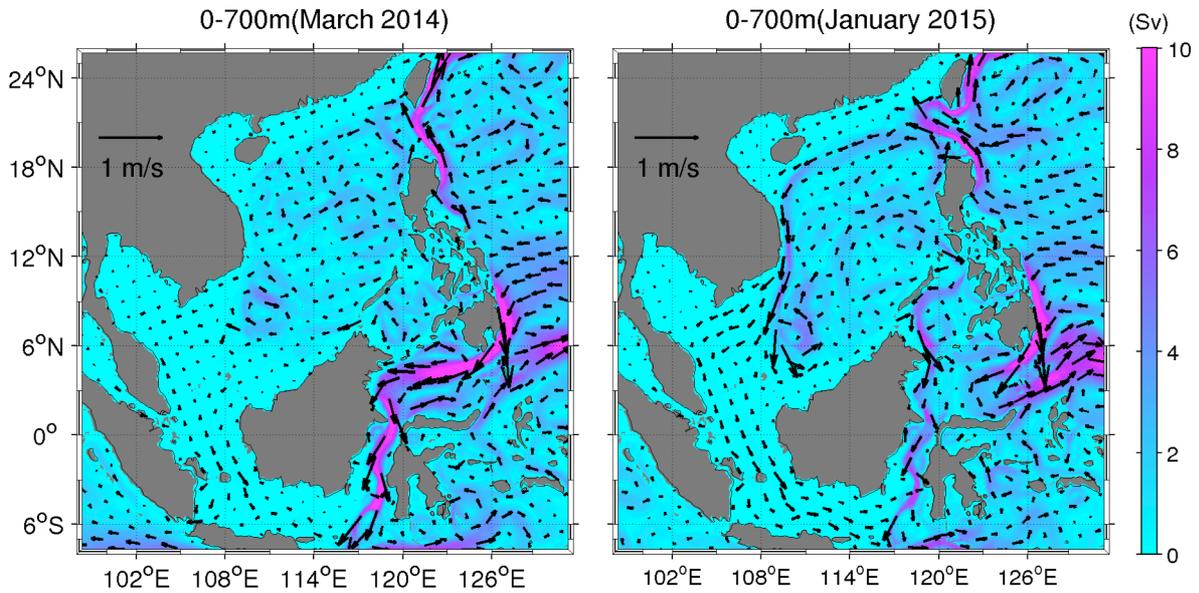


図-5 表層 700m まで鉛直積分した南シナ海周辺海域の月平均流量分布（単位：Sv）. 左：2014年3月，右：2015年1月．

似によって推算された流速，SSTについては複数の衛星データと観測値のコンポジットである気象庁による全球解析値MGDSSTを用いた．北赤道海流およびその反流が概ね10°N，6°Nの等緯度線に沿って発達し，フィリピン沖で分岐・転流して北上する黒潮と，南下するミンダナオ海流に分かれる．その一方で，南シナ海の流速は相対的にかなり弱い．SST分布は赤道を挟んで緯度の増加とともに水温低下する傾向に加え，台湾海峡，海南島周辺からベトナム沿岸にかけて南向きにジェット状に張り出した冷水舌が共通して出現している．いずれにしても，流速，SSTはいずれも三者間で良く対応しており，流速に関してはむしろROMSの方が再現性が高い様子が見取れ，開発したHYCOM-ROMSモデルは南シナ海周辺海域の表層海洋構造を精度良く再現できることが分かる．なお，紙面の都合上ここには示さないが，空間平均SSTの時間変化（RMSE 0.092度，Skill 0.984），代表的な鉛直断面内の時間平均密度分布についても衛星データやHYCOM解析値と良好に一致することを確認している．

#### 4. 南シナ海の水塊形成機構

表層流の空間分布（図-3(a)）から，南シナ海は外洋域の海流，特に黒潮（KC. アルファベットの略号は図-1に対応．以下同様）とミンダナオ海流（MC）の影響を間接的に，しかしながら強く受けていることが示唆された．両海流の起源は北太平洋亜熱帯循環の一部を構成する北赤道海流（NEC）であり，フィリピン沖で転流して北上する黒潮と南下するミンダナオ海流に分岐する．図-1左に定義した各断面における月平均通過流量解析結果（図-4）を見ると，南シナ海の水塊形成に直接寄与しているのはルソン海峡（L）からの流入（正のフラックス）と，それと概ねバランスするパラワン海峡（P）からの流出である．この南シナ海通過流の出口となるパラワン海峡の南側にはすり鉢状の地形を有するスルー海（SS）・セレベス海（CS）が存在し，それぞれ浅い海峡で隣接海域や太平洋に接続している．パラワン海峡と

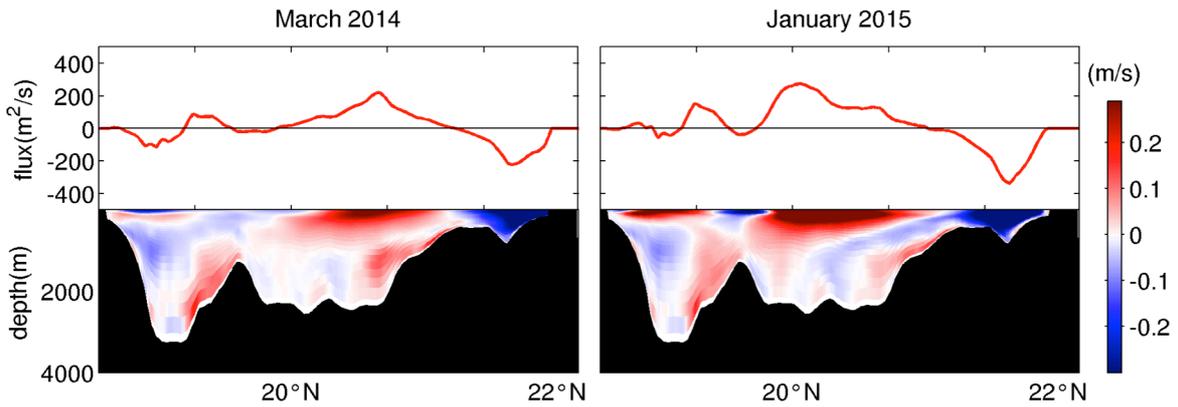


図-6 ルソン海峡 (図-1左「L」断面)における通過流. 左: 2014年3月, 右: 2015年1月. 上: 水深全体について鉛直積分された通過体積フラックス ( $\text{m}^2/\text{s}$ ), 断面内の法線方向流速分布 ( $\text{m}/\text{s}$ . 赤: 正, 青: 負).

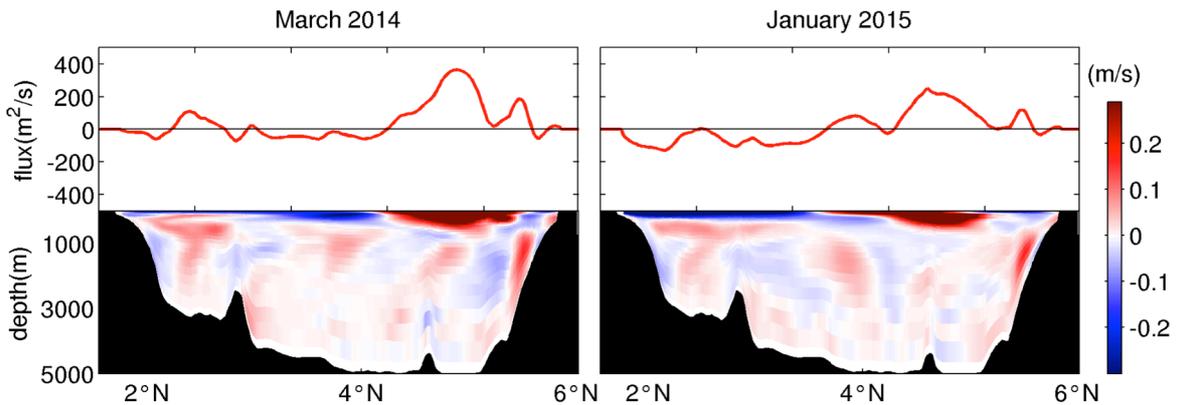


図-7 図-6と同じ. ただしセレベス海峡 (図-1左「C」断面)における値.

スルー海峡 (S) の流量は同程度の大きさで同期しながら変動しているが, その東側のセレベス海峡ではそれらよりもかなり強い流入が卓越している. このセレベス海流量は, セレベス海南西に位置するマカッサル海峡 (M) からの流出と概ねバランスしており, その残差としてスルー海峡・パラワン海峡での平均的な流出フラックスが形成されているものと理解される.

次に, ルソン海峡流入量が小さくセレベス海流入量が大きい時期として2014年3月を, 逆位相の時期として2015年1月を取り上げ, 両月における表層700 mまでの月平均線流量空間分布を求めた (図-5). 両海峡における流入量はそれぞれ黒潮とミンダナオ海流の流路の西進成分の大小と良く一致している. したがって両海流の転流に伴う西進成分の増大がルソン海峡, セレベス海峡 (およびそれに接続するスルー海峡とパラワン海峡) での流入量増大を惹起し, 南シナ海の水塊構造に大きな影響を及ぼしているものと解釈される. また, スルー海, セレベス海では海域西岸のカリマンタン島沖を南下する海流が卓越しており, セレベス海峡からの流入が増大すると (図-5左), 流入フラックスの大部分はこの南下流に連行されてマカッサル海峡方面へ抜け, ジャワ海 (J) へと流出している. 類似した西岸南下流はルソ

ン海峡流入量が増大する期間にも強化され (図-5 右), 図-3 (d) に見られたベトナム沿岸での高緯度域からの南向き熱輸送に関与していることが容易に予想される.

2014年3月および2015年1月のルソン海峡 (図-6) とセレベス海峡 (図-7) における断面内流速法線方向成分の断面内分布とその鉛直積分値の検査線方向分布を比較すると, 両者の応答は大きく異なっている. ルソン海峡 (L) では流量変動は表層近傍で大きいものの, 水深3,000 m程度までの深海・海底近傍にも正のフラックス (流入) が生じている. これは海峡地形を越える内部潮汐に伴う残差流の影響を示すものと考えられる. 流入量 (正值) のピークは海峡中央部付近にあり, 海峡北部22°N周辺では流出 (負値) が卓越するという空間構造になっている. 流入量が増大する2015年1月にはピーク流入量と海峡南部での流入傾向が強化されるものの, 海峡北部での流出もまた強化されている. 一方で, セレベス海峡 (C) での流量変動の大部分は水深500 m程度以浅の海洋表層で生じており, 海峡北部の5°N周辺に流入 (正のフラックス) ピークがあるが, 南部は流出傾向にある. セレベス海峡流入量が増大する2014年3月では海峡全体で正のフラックスが増加し, 流入ピーク値は上昇して南部も流入傾向が強まっていることが分かる.

表-2 各断面における月平均通過体積フラックス (Sv)

transect	March 2014	January 2015
Luzon St. (L)	2.19	8.79
Celebes St. (C)	20.1	4.16
Kuroshio (KC)	14.5	22.2
Mindanao C. (MC)	78.4	57.4

## 5. おわりに

本研究では、一般性と総観規模の再現性を保持したまま精緻な海洋ダウンスケーリングを可能とするHYCOM-ROMSシステムを開発し、南シナ海へ適用した。衛星データなどとの比較を通じて性能評価を行い、南シナ海を含む広域の時空間海洋構造を高精度で再現可能であることを示した。また、システム出力の約2年分を用いて通過フラックス収支解析を行い、南シナ海の水塊構造の形成機構を考察した。得られた知見は以下の通りである。

黒潮はその流量増に伴ってルソン海峡通過時に西進成分を形成し(表-2)、南シナ海への大規模な流入を引き起こす。一方、ミンダナオ海流は遠方南西のセレベス海峡での流量変動に大きな影響を及ぼす。セレベス海はスルー海を介して南シナ海に接続しているが、太平洋からセレベス海に流入した水塊は主に西岸南下流に捕捉されて南進し、マカッサル海峡を通過してジャワ海へと流出するため、南シナ海の水塊形成に及ぼす影響は量的には限定されている。しかしながら、セレベス海峡通過流量と、スルー海-南シナ海流入出力に良好な相関があることから、南シナ海はミンダナオ海流の影響を間接的に受けているといえる。これらの海流の強度は年や季節によって大きく異なるが、いずれにしても黒潮・ミンダナオ海流の発達・減衰が引き金となり(表-2)、ルソン海峡、セレベス海況通過流を変化させ、ひいては南シナ海の水塊構造を変化させる。すなわち、浅い海嶺や多くの島に囲まれた半閉鎖性海域とみなされる南シナ海

は、実は外洋からの影響を西岸境界流の変動を通じて強く受けている。したがって、HYCOM-ROMSモデルのように外洋影響を精緻に取り込むことの可能な領域スケールモデルの開発とそれを用いた解析が必要である。

謝辞：本研究は科学研究費(15H04049, 15KK0207, 18H03798)の援助を受けた。

## 参考文献

- 1) 内山雄介, 山西琢文, 津旨大輔, 宮澤泰正, 石井倫生: 福島第一原発からの放射性核種の初期分散に及ぼす沿岸ジェットとメソスケール渦の影響, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.69, No.2, 1051-1055, 2013.
- 2) 上平雄基, 川村英之, 小林卓也, 内山雄介: 福島県沖海域を対象とした海洋拡散予測システムの開発と検証, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.72, No.2, pp.1451-1456, 2016.
- 3) 小谷大地, 内山雄介, 御手洗哲司: 長期高解像度再解析に基づく瀬戸内海内部流動と幼稚仔分散過程の形成メカニズムに関する研究, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.72, No.2, pp.1273-1278, 2016.
- 4) 多田拓晃, 内山雄介: 四国・紀伊半島沖における台風通過に伴う黒潮の流動構造変化について, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.72, No.2, pp.1457-1462, 2016.
- 5) 内山雄介, 石井翔大, 宮澤泰正: JCOPE2-ROMS多段ネスティングによる黒潮続流域でのダウンスケーリング効果の検証, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.68, No.2, p.1436-1440, 2012.
- 6) 内山雄介, 神吉亮佑, 高野祥子, 山崎秀勝, 宮澤泰正: 海面高度計およびArgoデータに基づく3次元密度推定値を同化した海洋流動モデルの再現精度について, 土木学会論文集B3(海洋開発), Vol.71, No.2, pp.1365-1370, 2015.
- 7) Balmaseda M. A., K. Mogensen and A. T. Weaver: Evaluation of the ECMWF ocean reanalysis system ORAS4. Q. J. R. Meteorol. Soc., Vol. 139, pp. 1132-1161, 2013.
- 8) Ferry, N., L. Parent, G. Garric, B. Barnier, N. C. Jourdain and the Mercator Ocean team: Mercator Global Eddy Permitting Ocean Reanalysis GLORYS1V1: Description and Results, Mercator Ocean Quarterly Newsletter, #36 - January 2010, pp. 15-27, 2010.
- 9) Cummings, J. A. and O. M. Smedstad: Variational Data Assimilation for the Global Ocean. Data Assimilation for Atmospheric, Oceanic and Hydrologic Applications, Vol II, Chapter 13, pp. 303-343, 2013

(2018.3.15受付)

## DEVELOPMENT OF A HYCOM-ROMS DOWNSCALING OCEAN MODEL AND ITS APPLICATION TO THE SOUTH CHINA SEA

Yusuke UCHIYAMA, Naoto SENGO, and Kenta KUROSAWA

A downscaling ocean model for the Southern China Sea (SCS) was developed based on ROMS initialized and forced by the HYCOM+NCODA assimilative global analysis. A multi-year reanalysis was carried out by properly accounting for wind stress and heat budget at surface, freshwater influences from the atmosphere and major rivers, and tidal variability. We successfully reproduced primary dynamics of the SCS in many aspects such as the transient Kuroshio path in the south of Taiwan prominently affecting the circulation of the northern SCS through the Luzon Strait. The Kuroshio and Mindanao Currents originated from the North Equatorial Current concurrently affect the volume fluxes at the Luzon and Celebes Straits, leading to sporadic and systematic intrusion into and discharge out of the SCS. The volume flux budget analysis revealed that these fluxes promote the through flow in the SCS, and consequently influence the formation of the SCS water.