

ダウンスケーリング海洋モデルを用いた 南シナ海の海洋構造物に作用する外力評価

高浦 育¹・内山 雄介²・Nizamani ZAFARULLAH³・中山 昭彦⁴

¹ 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)
E-mail: t.naru_u117@ezweb.ne.jp

² 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

³ Universiti Tunku Abdul Rahman (Jalan Universiti, 31900 Kampar, Perak, Malaysia)

⁴ 正会員 Universiti Tunku Abdul Rahman (Jalan Universiti, 31900 Kampar, Perak, Malaysia)

HYCOM-ROMS海洋モデルと気象庁GPV-GSMによる気象再解析値を用いて、南シナ海沿岸に偏在する海洋構造物に作用する外力の予測可能性に着目した研究を行った。極値統計を用いて構造物に作用する数十年確率表面流速・風応力を求めた結果、風応力はマレー半島東沖、表面流速はボルネオ島北沖で大きくなる傾向があった。マレー半島東沖の風応力は冬季モンスーンの影響を、ボルネオ島北沖の流れはボルネオ海峡を介したスラール海への流入の影響を受けて形成されていた。通過流量収支解析の結果、ボルネオ沖流動は黒潮流量変動と連動したルソン海峡からの流入、ミンダナオ海流変動と連動したセレベス海峡からの流入の影響を間接的に、しかし強く受けていることが示された。

Key words: HYCOM-ROMS model, offshore platform, extreme value analysis, South China Sea

1. はじめに

海洋構造物の設計・維持管理のためには外力となる海流・海上風・波浪等の評価を適切に行う必要がある。通常、長期間の外力超過確率を得るためには長期間の気象観測が求められる。構造物に作用する外力は局所的に評価されるが、それらは例えば風向とフェッチに依存するなど、広域の気象海象変動の影響を強く受けるため、ピンポイントの観測データだけでは極端外力の発生機構やそれに基づく予測を十分に行うことは困難である。

外力の一つである海流に着目すると、たとえ閉鎖的な水域であっても、強い外洋影響下にあることが多い。例えば、瀬戸内海の残差流は平常時には豊後水道から紀伊水道へ向かう時計回りの通過流が卓越するが、その強度は両水道南側海域における黒潮の流路変動の影響を強く受けている¹⁾。したがって、ある海域の極端外力を評価するためには、局所的な観測に加えて外洋影響も考慮した広域的かつ長期間の広域データ蓄積が必須となる。ところが、このような総合的な気象海象観測には技術的、経済的な困難を伴うため、特に発展途上国などでは必ずしも十分に実施されずに設計がなされることも多い。

南シナ海南西部の陸棚海域（マレー半島東岸域およびボルネオ島北岸域）にはマレーシア・ペトロナス社保有の石油・天然ガス掘削プラットフォーム（以下プラット

フォーム）が多数建設運営されている（図-1右）。マレーシアは石油・天然ガスなどが豊富に賦存する世界屈指の資源輸出国である。日本は世界のLNG輸入量の34.9%を輸入しているLNG輸入大国であるが、国別ではマレーシアからの輸入量がオーストラリアの30.7%に次いで全体の17.7%を占める。すなわち、当海域のプラットフォームは我が国にとっても死活的に重要な海洋資源の供給源であると理解される。一般に、海洋資源開発に関するデータはアクセスが困難であるが、我々が入手し得た情報では、建設前後の非常に限定された期間と精度の気象観測データのみから設計外力を評価したようである。

そこで本研究では、現地データに乏しい南シナ海の海洋プラットフォームに作用する長期的な外力の予測可能性を探るべく、高解像度海洋モデルおよび全球気象モデルによる再解析値を用いて、南シナ海全域およびペトロナス社プラットフォーム展開位置での海上風および表層流速を評価することを試みる。具体的には、1. 比較的短い有限期間における気象・海洋再解析データに対して、極値統計を用いることで超過確率数十年における最大流速と最大風力を評価すること、2. プラットフォーム位置における海上風と表層流速の極大値の発生原因を考察することの2点を主たる目的とする。

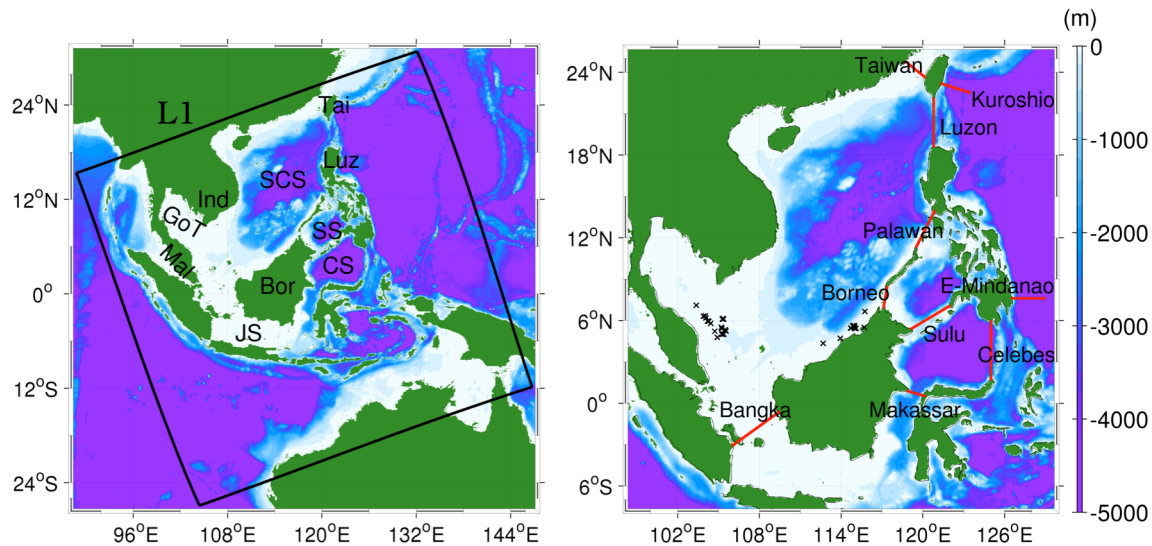


図-1 左図：南シナ海を中心とした研究対象海域。カラーは水深 (m)。黒枠：ROMS 計算領域，記号は主要な海域や地名 (SCS：南シナ海，CS：セレベス海，SS：スルー海，JS：ジャワ海，GoT：タイランド湾，Tai：台湾，Ind：インドシナ半島，Mal：マレー半島，Luz：ルソン島，Bor：ボルネオ島)。右図：南シナ海周辺の拡大図。右図の地名を付した赤線はフラックス収支解析で用いる海峡と断面の名称。X印：本研究で考慮した Petronas 社プラットフォーム 38 基の位置。

2. 研究方法

(1) 研究対象海域：南シナ海

ペトロナス社がプラットフォームを展開している南シナ海（図-1）の流動は，ルソン海峡の西側を中心とした北部海域において多くの観測・モデル研究が行われてきた（例えば Centurioni, 2004）²⁾。特に，ルソン海峡海嶺地形に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大幅に立ち遅れており，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^{3,4)}。

(2) 評価外力

運用中のプラットフォームでは，疲労や錆，生態系への影響評価などのために，海流，海上風（およびそれに伴う波浪）の長期的な評価が必要である。疲労は主に構造物に作用する波力によって発生するが，波力は波の軌道流速と海流速度を用いて評価される。ここでは最大波力を間接的に評価するために最大流速と最大風速に着目する。錆については海上での飛沫と海面下での酸化の2つの要素が支配的になるが，前者は波浪と関係するため間接的に海上風で評価され，後者は塩化物イオン交換速度が流速に比例することから（平均）流速が重要になる

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 5 km (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

と考えられる。したがって本研究では，海洋再解析値から海洋表層流速を，気象再解析値から海上風（本研究では差を際立たせるため，風速の二乗に比例する風応力を使用している）を用いて以下の解析を行うこととした。

(3) HYCOM-ROMS・GPV-GSM再解析データ

海洋再解析データとしては，南シナ海全域を対象としたHYCOM-ROMSダウンスケーリングモデル^{3),4)}を用い（表-1，図-1参照），気象再解析データとしては気象庁現業全球気象解析データGPV-GSMを用いる。HYCOM-ROMSモデルは，水平解像度1/12度の3D-Varデータ同化全球海洋再解析値HYCOM+NCODA GOFS 3.0 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（水平解像度5 km，鉛直40層）へ one-way offlineネスティングしたものである。ROMSの海上風には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，

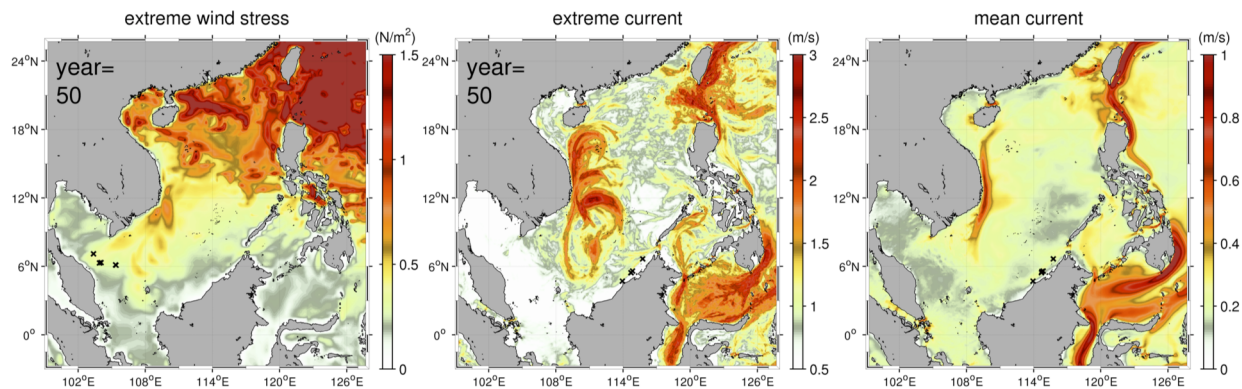


図-2 左図：50年確率の風応力分布，中央図：50年確率の表面絶対流速，右図：4年間の表面絶対流速平均値．X印はそれぞれの値の大きかった Petronas 社のプラットフォーム上位5箇所の位置を示している（表-2～4 参照）．

表-2 風応力最大値・極値 (N/m²) 上位5箇所

構造物名	4年間最大値	50年確率風応力
Laho	0.286	0.355
Bergading	0.277	0.352
Sepat	0.275	0.341
Abu	0.245	0.283
Bubu-1	0.244	0.283

表-3 表層流速最大値・極値 (m/s) 上位5箇所

構造物名	4年間最大値	50年確率流速
Tembungo	0.816	1.047
BADD-A	0.741	0.846
KN-B	0.727	0.816
KN-C	0.692	0.796
SAMARANG	0.677	0.779

表-4 表層流速平均値 (m/s) 上位5箇所

構造物名	4年間平均値
Tembungo	0.237
BADD-A	0.223
KN-B	0.208
SAMARANG	0.202
KN-C	0.199

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．その他のモデリングの詳細については既報^{3,4,5)}を参照されたい．南シナ海の流動再現においても，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^{3,4)}．本研究ではHYCOM-ROMSモデル計算期間（助走期間を除く）に対応させて，2012年～2015年の約4年間の再解析値を用いた．

(4) 極値統計解

使用したデータの期間4年間では，直接的な長期の外力評価には不十分であるため，極値統計解析を用いて数十年超過確率の流速等を求めた．本研究では試行的に最も広く用いられる Gumbel 式を確率密度関数に採用し，4年分の年最大値を用いてフィッティングさせた．

$$F(x) = \exp \left[-\exp \left\{ -\left(\frac{x-\mu}{\eta} \right) \right\} \right], \quad -\infty < x < \infty \quad (1)$$

ここに， x ：流速や風応力の年最大値， $F(x)$ ：退化しない Gumbel 分布関数， μ, η ：パラメータであり， x の平均値 $\bar{x}$ および分散 S_x を用いて，積率法により $\eta = \sqrt{6}S_x/\pi$ ， $\mu = \bar{x} - 0.5772 \cdot \sqrt{6}S_x/\pi$ で評価した．

3. 極値統計解析と結果

(1) 風応力の極値とその成因

南シナ海全域における50年確率風応力の空間分布とプラットフォームの中で値の大きかった上位5箇所を図-2 左および表-2 に示す．確率年である50年は風力発電の設計基準を参考に決めた⁶⁾．50年確率風応力に加えて20年，35年確率風応力も求めたが，それらの空間分布は4年間の最大値分布と定性的には概ね一致していた（図は割愛）．風応力極値は最大で0.35 N/m²程度（風速換算で10 m/s程度）であり，上位5箇所のプラットフォームはいずれもマレー半島東沖に存在していた．なお，風応力は約10 kmの水平格子内の日平均値を用いたため，実際の瞬間最大風応力はさらに強くなる点に注意されたい（次節の流速も同様）．次に，最大風応力の成因を調べるために，上位5箇所における4年間の風応力最大値を記録した月を求め，その月（2014年12月）の月平均値分布を調べた（図-3 左）．インドシナ半島沖で南西方向への季節風が顕在化しており，その風下にあるマレー半島沖のプラットフォームに強い影響を与えていることが分かる．したがって，プラットフォームに影響する風応力はこの季節風の影響によるものであると思われる．強風域は台湾沖から南シナ海中央部を長距離にわたって南西方向に舌状に伸びており，非常に長いフェッチを有することから，このときのマレー東岸での波浪はかなり発達していたことが示唆される．

(2) 表層絶対流速の平均値・極値とその成因

同様に，表層絶対流速の極値を図-2中央および表-3に示す．風応力極値分布とは大きく異なり，プラットフォームの中で値の大きかった上位5箇所はいずれもボルネオ島北沖に偏在し，その最大流速は1 m/s程度であった．

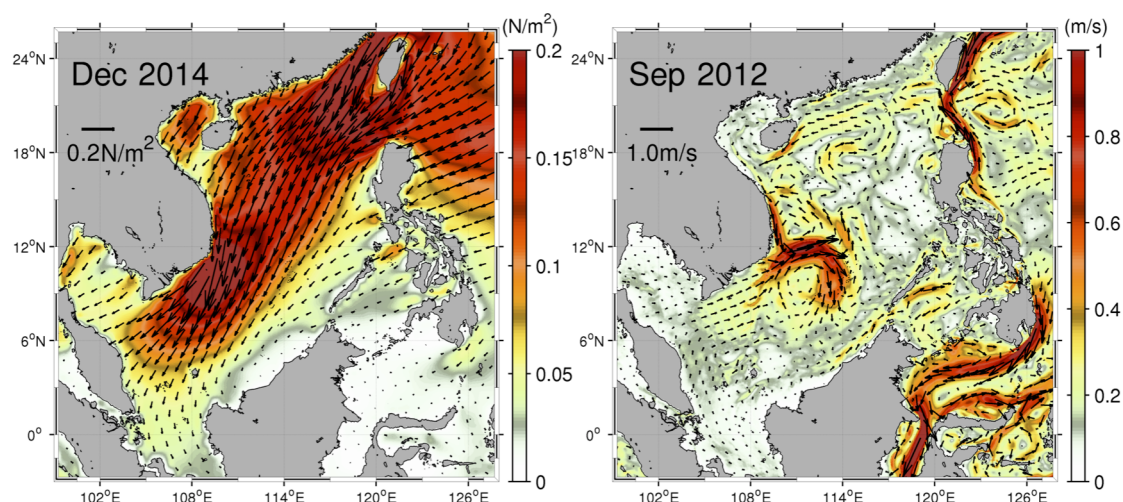


図-3 左図：月平均風応力が最大値をとった2014年12月の月平均風応力 (N/m^2)，右図：表面絶対流速が最大値をとった2012年9月の月平均流速 (m/s)．カラーはベクトルの絶対値を示している．

また、海水中の鯖に関する表面絶対流速の4年間の平均値分布を図-2右に示す．平均値の大きかった上位5箇所のプラットフォームもまた、極値同様に全てボルネオ島北沖に偏在することがわかる．

これら上位5箇所における月平均表層流速が最大値を記録した月（2012年9月）の月平均表層流速分布を見ると（図-3右），南シナ海外部やベトナム沖で強い海流が存在するものの，プラットフォームが設置されているマレー半島やボルネオ島沿岸域の表層流はかなり弱く，波力に対する表層流の寄与は相対的に小さいことが予想される．極値および平均値が大きくなったボルネオ島北沖には弱い北東方向への残差流が形成されており，ボルネオ海峡（図-1右参照）近傍で比較的複雑に流向や流速値が変化している．この残差流の形成には，南シナ海南西部の循環とホルネオ島東側のスルー海への流出入が関係している可能性が高い．そこで以下では，ボルネオ海峡を中心とした南シナ海各海峡部における流量収支について，通過フラックスを用いて検討する．

4. 南シナ海とその周辺の海水交換特性

(1) 断面通過フラックス解析

ボルネオ島北沖の残差流の形成機構を探るため，南シナ海および南西部の接続海域（スルー海，セレベス海），太平洋間の海水交換特性を評価する．本研究では各海峡通過流量（体積フラックス）に着目し，図-1右のように主要な海峡や海流の流路に検査線を設定し，断面通過流量の月平均値を求める．

任意の断面を通過する体積フラックス F (m^3/s) は

$$F(t) = \int_A u_n dA$$

で表される．ただし， A ：検査断面の断面積 (m^2)， u_n ：断面 A に直交する水平流速成分 (m/s) である．そ

れぞれの検査線を通過する月平均流量の変化とそれらの関係を調べることで，南シナ海全体と南シナ海に接続するスルー海とセレベス海の水塊形成機構，それに伴うボルネオ北沖の流れとの関係について考察する．さらに，南シナ海への外洋水の流入源であるフィリピン東の太平洋沿岸を南北に流れる黒潮，ミンダナオ海流の流量と，南シナ海水塊構造の関係について検討する．

(2) 南シナ海周辺の海峡通過流量

南シナ海を通過する流量で卓越しているのはルソン海峡からの流入とパラワン海峡からの流出である（図-4）．両者の増減には明確な負の相関があり，この2つの通過流が南シナ海の水塊構造を決定づけていると言える．一方で，台湾海峡，ボルネオ海峡，バンカ海峡での海峡通過流量の絶対値はルソン通過流の20%前後と小さい．しかしながら，いずれも若干の位相差を持ちながらもよく似た位相関係を保持しながら増減している．バンカ海峡フラックスはパラワン海峡フラックスと概ね同期した状態で変動しており，平均的には流出傾向にあるが，台湾海峡はほぼ常に流入，ボルネオ海峡では流入と流出が交互に生じている．これらの結果から，ルソン海峡からの流入フラックスは主にパラワン海峡から通過流としてそのまま流出するものの，バンカ海峡での流出も有意であり，プラットフォームが存在するボルネオ海峡周辺海域ではそれらの残差として流出入フラックス変動が形成されているものと結論付けられる．

(3) スルー海周辺の海峡通過流量

南シナ海とパラワン諸島（北東部のパラワン海峡および南西部のボルネオ海峡）を通じて接続するスルー海における流出入については，スルー海峡からの流出量とパラワン海峡からの流入量がほぼ同量であり，ほぼ同じ位相関係を保持している（図-5）．ボルネオ海峡での通過流量は両者の20%程度であるが，変動パターンは3者は概ね同じであることが分かる．したがって，スルー

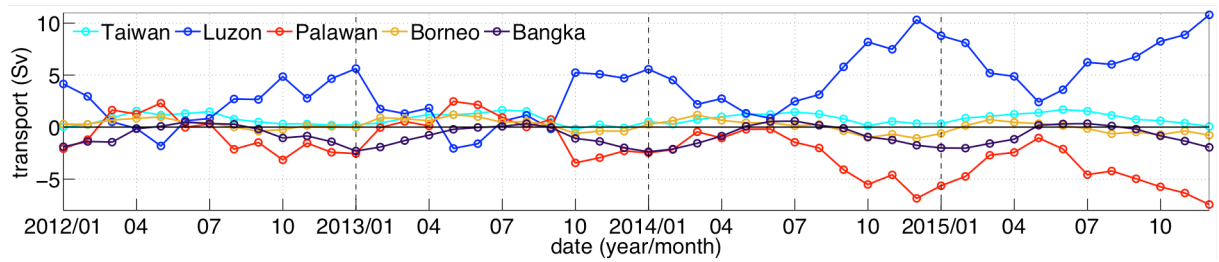


図-4 南シナ海周辺における各海峡での通過体積フラックス．南シナ海への流入を正と定義している．シアン：台湾海峡（中国-台湾間），青：ルソン海峡（台湾-ルソン島間），赤：パラワン海峡（パラワン諸島北東部），黄土色：ボルネオ海峡（パラワン諸島-ボルネオ島間），黒紫：バンカ海峡（スマトラ島-ボルネオ島間）．単位は Sv ($10^6 \text{ m}^3/\text{s}$)．

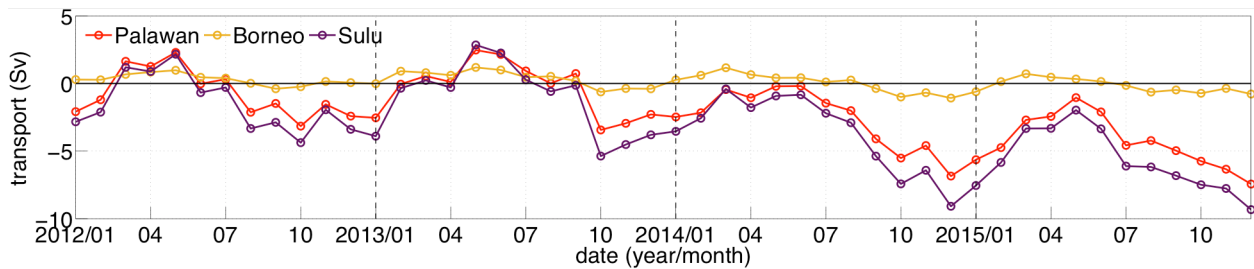


図-5 図-4 と同じ．ただしスルー海周辺における各海峡での通過体積フラックス．赤：パラワン海峡，黄土色：ボルネオ海峡，紫：スルー海峡（ミンダナオ島-ボルネオ島間）．

一海峡からの流出量とパラワン海峡からの流入量の増減に連動してボルネオ海峡からの流出が引き起こされており，プラットフォームが存在する海域に近いボルネオ島北部の流動に対しては，スルーおよびパラワン通過流が大きく影響していることが示唆される．

(4) セレベス海周辺の海峡通過流量

セレベス海ではセレベス海峡からの流入とマカッサル海峡からの流出が卓越している（図-6）．なお，3 者の合計は 0 に近づくべきであるが，流量収支には最大 30% 程度の誤差がある．この原因は，水温の変化による体積の変化，蒸発，降雨，河川の流入などである．セレベス通過流とスルー通過流は夏に増大，冬に低下するような 1 年サイクルで概ね同様の時間変動をしているのに対し，マカッサル通過流は 6 ヶ月ごとに増減を繰り返すような周期変動をしている．つまり，スルー通過流はセレベス通過流の影響を直接的に受け，マカッサル通過流はセレベス海内部において変調された時間変動を持つものの，スルー通過流とともにセレベス通過流と概ねバランスするという収支構造になっていると考察される．

(5) ミンダナオ海流と黒潮の流量推移

黒潮，ミンダナオ海流の流路上の検査線（図-1 右）における各断面通過流量（北向き正）と，ルソン海峡，セレベス海峡通過流との関係を図-7 に示す．まず，ミンダナオ海流の流量増加にしたがって黒潮流量も増加している．両海流はともに，西進する北赤道海流を起源としてフィリピン沖で南北に分岐する海流であることから，流量の増減には強い相関があると考えられる．また，黒潮，ミンダナオ海流が減少する時にセレベス海峡からの流入，ルソン海峡からの流入がそれぞれ増加しているこ

とから，南シナ海および接続海域への流入・流出は外洋の海流の流量変動の影響を直接的・間接的に受けているものと理解される．

以上の結果をまとめると，南シナ海の水塊構造は大きく分けて 2 つメカニズムに支配されている．1 つは黒潮の流量増加によってルソン海峡からの流入が増加し，それに伴ってパラワン海峡，ボルネオ海峡で流出が増加する機構であり，もう 1 つはミンダナオ海流の流量増加によってセレベス海峡からの流入，マカッサル海峡から流出，スルー海峡からの流出が増加し，間接的にパラワン海峡からの流入，ボルネオ海峡からの流入が増加するという機構である．したがって，本研究で着目しているボルネオ島北沖の流れは，黒潮，ミンダナオ海流の流量変動の影響を間接的に受けて決定されていると結論づけられる．

5. おわりに

本研究では，HYCOM-ROMS 海洋モデル再解析値および GPV-GSM 全球気象再解析値を用いて，南シナ海，特にマレーシア沖海域に展開されている海洋構造物に作用する代表的な外力である波力と腐食速度の評価に向けて，平均海流速・風応力の同定，および極値統計解析による最大流速・最大風力を定量化し，それらの形成メカニズムについて考察を行った．その結果，まず，プラットフォームで生じる表層流速，風応力の 50 年超過確率極大値はそれぞれ， 1 m/s ， 0.35 N/m^2 程度と評価された．風応力はマレー半島東沖で大きく，ベトナム沖に発達する季節風（モンスーン）の勢力範囲と密接に関係していた．

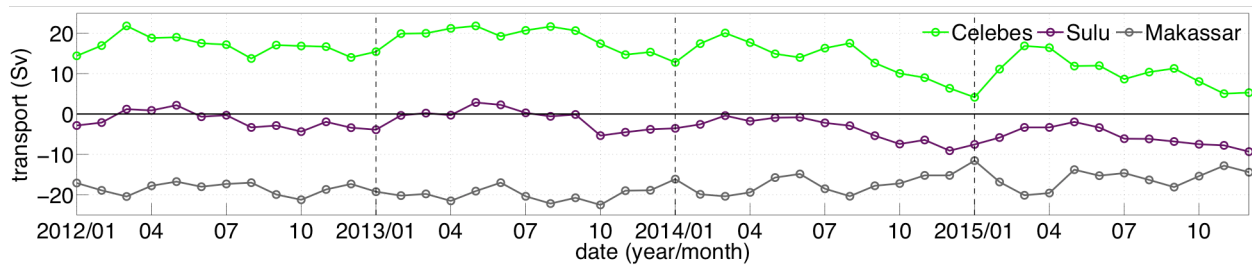


図-6 図-4 と同じ。ただしセレベス海周辺における各海峡での通過体積フラックス。黄緑：セレベス海峡（ミンダナオ島－セレベス島間），紫：スルー海峡，灰：マカッサル海峡（セレベス島－ボルネオ島間）。

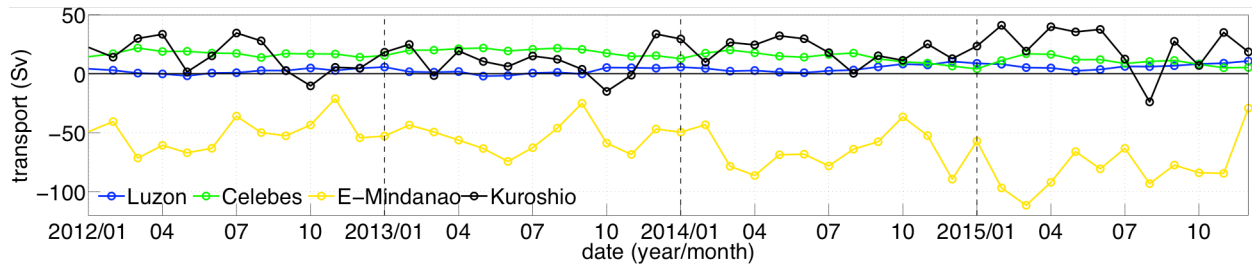


図-7 図-4 と同じ。ただし，黒：黒潮北向き流量，黄：ミンダナオ海流北向き流量，青：ルソン海峡通過流量，黄緑：セレベス海峡通過流量。

一方で，海洋表層流の最大値と平均値はボルネオ島北部沿岸域で大きな値を取っていた。通過流量収支解析の結果，この海流は黒潮，ミンダナオ海流の影響を間接的に受けた南シナ海および接続海域全体の大規模な流動に支配されている可能性が強く示唆された。

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

参考文献

- 1) 小碓大地，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. I_1273-I_1278, 2016.
- 2) Centurioni, L. R., Niiler, P. P and Lee, D.-K.: Observations of inflow of

Philippine Sea surface water into the South China Sea through the Luzon Strait, *J. Phys. Oceanogr.* Vol. 34, pp. 113-121, 2004.

- 3) 内山雄介，千郷直斗，黒澤賢太：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，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol. 74, No. 2, pp. I_625-I_630, 2018.
- 4) Uchiyama, Y., Sengo, N., Kurosawa, K. and Nakayama, A.: Development of a coupled HYCOM-ROMS downscaling ocean modeling system and its application to the South China Sea, *Proc. 13th International Conference on Hydrodynamics (ICHD2018)*, pp. 358-363, Incheon, South Korea, Sept. 2-6, 2018.
- 5) Uchiyama, Y., Kanki, R., Takano, A., Yamazaki, H. and Miyazawa, Y.: Mesoscale reproducibility in regional ocean modeling with a 3-D stratification estimate based on Aviso-Argo data, *Atmosphere-Ocean*, Vol. 56, No. 4, pp. 212-229, 2018.
- 6) 岡島伸行，勝海 務：洋上風力発電基礎の技術マニュアルについて，沿岸センター研究論文集，No.1, pp.49-52, 2001.

(2019.3.13 受付)

FORCING EVALUATION FOR OFFSHORE PLATFORMS IN THE SOUTH CHINA SEA USING A HYCOM-ROMS DOWNSCALING OCEAN MODEL

Naru TAKAURA, Yusuke UCHIYAMA, Nizamani ZAFARULLAH and Akihiko NAKAYAMA

Oceanic forcing on offshore oil platforms deployed ubiquitously in the South China Sea (SCS) was evaluated from the medium-term reanalyses based on the in-house regional HYCOM-ROMS oceanic model and the JMA's GPV-GSM global atmospheric analysis. An extreme value statistical analysis was conducted for determining the maximum surface currents and winds that may occur with multi-decadal exceedance probability. Wind stresses were most energetic off the eastern shore of the Malay Peninsula due to southwestward winter monsoons, while surface currents were intensified off the northern shore of Borneo Island. We assessed the mechanism behind the latter using a volume flux analysis at several cross-sections around the SCS. It was demonstrated that the remote forcing associated with the Kuroshio and Mindanao Currents triggered changes in the fluxes at the Luzon and Celebes Straits that are indirectly but pronouncedly influential to the coastal currents near the Borneo Strait.