FRA-JCOPE データに基づく東シナ海周辺海域の流動特性の解析

FRA-JCOPE data analysis for long-term variation of coastal ocean current characteristics in the East China Sea

山下隆男¹・Hendri²・永山大地³

Takao YAMASHITA, HENDRI and Daichi NAGAYAMA

Coastal ocean current fields of the surrounding waters in the East China Sea continental shelf are affected not only by the climate change and Kuroshio current, but also by the large river-oriented fresh waters, such as the Changjiang diluted water (CDW) and the Yellow Sea mixed water (YSMW), which are strongly affected by land use, land cover and human activities. In this study, the monthly variation of flow discharges of Kuroshio, CDW, YSMW and Taiwan Strait coastal waters was analyzed for the 19 years (January 1993 to September 2011) using the re-analysis data of ocean currents FRA-JCOPE to investigate the long-term variation of flow properties in the East China Sea. The analysis made clear that Kuroshio off the Taiwan coast is on the increase of 0.2453Sv/yr and 0.00239Sv/yr for Taiwan strait current.

1. 緒 言

日中韓の経済水域を含む東シナ海の大陸棚は、世界有数の漁獲生産量を誇る海域であり、水産資源やその基礎となる生態系保全は当事国のみならず国際的にも関心が高い。この大陸棚の流動場・水質は気候変動と黒潮の影響以外にも、長江起源水、黄河混合水の流量変動等、人間活動に起因する河川水の水質や拡散過程によっても大きな影響を受ける。本研究ではFRA-JCOPE (Japan Coastal Ocean Predictability Experiment) の海洋再解析データ (Miyazawa et al, 2009, 宮澤2005) を用いて1993年から2011年9月までの18年9ヶ月間の流速の3次元分布の月別変化を解析し、東シナ海海域における流動特性の長期変動特性を検討する。

2. FRA-JCOPEプロジェクトの概要

海洋変動予測実験FRA-JCOPEの北西太平洋高解像度モデル (水平1/12度, 45層) の解析結果を用いた。この解析では、プリンストン海洋モデルPOM/POMgcmを改良したプログラムコードが使用されている。衛星海面水温、衛星海面高度、船舶観測水温・塩分の重み付け多変数最適内挿法によるデータ同化が用いられている。3.5日間モデルで予測した後に、その予測値と解析値の差を7日間で緩和する強制力を7日間与えた状態で再度モデルを計算するという方法が取られている。外力としては

準リアルタイムに取得可能な現実的な風応力 (QuickSCAT NRT)、熱フラックス (NCEP/NCAR 客観解析6時間平均値) で駆動し、塩分は気候値で緩和している (Miyazawa et al, 2010)。再解析データには、水温、塩分、流速分布データがあるが、本解析では流速 (鉛直積分流量を算定) の長期変動を対象とした。

3. 東シナ海での流れの構造

図-1に対象とした東シナ海周辺海域の海底地形を示す。北から南へ大隅諸島、トカラ列島、奄美群島、沖縄諸島、宮古列島、八重山列島、尖閣諸島、大東諸島で形成される南西諸島に繋がり、沖縄トラフ上を東シナ海の大陸棚に沿って流れる黒潮が太平洋に流路転向する海域である。さらに、フィリピン海プレートがユーラシア大陸プレートに潜り込む琉球トレンチでは巨大地震とそれによる津波が懸念される海域でもある。

東シナ海には複数の水塊が存在する。それら主なものとして台湾海峡沿岸水、黒潮表層水 (黒潮)、黒潮亜表層水 (黒潮)、黄海混合水、対馬海流、および長江起源

図-1 対象海域の海底地形

1 正会員	工博	広島大学教授 大学院国際協力研究科開発科学専攻
2 正会員	工博	広島大学特任助教 大学院国際協力研究科開発科学専攻
3		九州大学大学院 総合理工学府大気海洋環境システム学専攻

図-2 解析対象とした東シナ海の水塊流動

水等に分類される。本研究では図-2に示す水塊を対象とする。

解析対象とした水塊の特性の概要は以下のようである。
台湾海峡沿岸水：台湾海峡を通過した流れは陸棚上を北上する。台湾北東で陸棚域に進入する黒潮の一部との連続性が考えられる。黒潮より若干低塩分・低酸素の特徴を持った水塊である。この流れは夏季に長江起源水が南の方には拡がらない要因にもなっていると考えられる。また、この水塊は栄養塩を豊富に含んでいる。これは大都市香港の開発や、フィリピン、台湾沿岸の工業都市などの経済活動の影響である。さらに、台湾北部海域は黒潮の湧昇域であり、深層から供給される栄養塩の存在も重要である。中国長江流域の開発は著しく、長江への栄養塩類の負荷は莫大で、さらに増大する傾向にある。

海域へのこうした高濃度の栄養塩を含む淡水供給は長江河口域を含む東シナ海沿岸の生態系に影響を及ぼし、実際、赤潮発生頻度は1980年代から1990年代までに4倍増加するに至っている。さらに1995年以降では、東シナ海沿岸域における赤潮形成種が珪藻から渦鞭毛藻へと遷移する傾向が報告されており、長江流域の開発が海洋生態系に変化をもたらしている可能性が示唆される。

長江起源水：長江から流入した河川水は周辺の海水と混合することによって徐々に塩分が高くなり長江希釈水として陸棚域に拡がっている。長江からの水塊は流量が大きいので、その影響は東シナ海陸棚域に留まらず、対馬海峡でも明瞭な影響が見られ、大半は日本海に流入していると考えられている。冬季には北寄りの季節風の影響で長江からの河川水は中国沿岸に沿って南に流れ、中国沿岸流として台湾海峡まで達する。長江起源の豊富な栄養塩を含む淡水の流入は我が国の排他的経済水域を含む東シナ海陸棚域における藻類一次生産を基礎とする生物資源の維持、海洋環境の形成に深く関与している。

対馬海流：対馬海峡を通過した黒潮の一部が対馬海流として日本海に輸送されている。この海流は黒潮と台湾海

峡沿岸水の影響を受けている。夏季には長江起源水の拡散、冬季には季節風の影響を受けやすい台湾海峡沿岸水の影響を受ける。

黄海混合水：以下の5水塊で構成される。i) 黄河暖流水は暖かく高塩分で、済州島の西から北西に冬季にフロントを形成する。ii) 黄海底層冷水は冬季の混合によるものである。iii) 韓国沿岸水は朝鮮半島から流入する表層水と河川水が潮汐によって海水と混合したものである。iv) 中国沿岸水は渤海からの流入水を含み年間を通じて南下する。v) 長江希釈水は太平洋の縁海域で最も塩分が低い水塊である。

4. データ解析方法

FRA-JCOPEの再解析結果は、空間刻み300 arc secの日平均データである。解析の対象海域では水平格子数(206, 182)、鉛直45層の3次元流速データとなる。海流の時間スケールの長さを考慮して各月の第1日のデータをその月の代表値とし、1993年1月から2011年9月までの約19年間を解析した。図-3に σ 座標系での流速の3次元分布の一例を示す。流量は図-4の左に示すように、各層の流速と断面積を掛けて鉛直積分し、単位 Sv ($10^6 m^3/s$)で表示した。データ解析にはMathematicaを使用した。

図-3 σ 座標系での流速データの3次元場の表示例

本研究では、図-2に設定した東シナ海の流れの分類に従って、それらの流量変動を解析するため、以下の8検査断面を設定する。①黒潮流出(黒潮OUT)、②黒潮流入(黒潮IN)、③対馬海流、④台湾海峡沿岸水、⑤黄海混合水(北からの流入が正)、⑥長江起源水沖方向流River Mouth(沖方向が正)、⑦長江起源水北流North(北向きが正)、⑧長江起源水南流South(南向きが正)。表-1に検査断面両端部の緯度、経度を示す。

5. 解析結果

図-5～9に、各検査断面を通過する約19年間(18.75年)の断面流量の時間変動(上図)と線形回帰式によるトレ

図-4 σ 座標系(45層)鉛直断面の概念図と流量解析検査断面

表-1 検査断面の位置

	東経		北緯	
⑦長江起源水 N	122.583°	123.750°	31.583°	
⑥長江起源水 RM	123.750°		29.083°	31.583°
⑧長江起源水 S	122.583°	123.750°	29.083°	
④台湾海峡沿岸水	118.917°	119.917°	24.167°	25.167°
②黒潮 IN	122.167°	125.750°	24.167°	
①黒潮 OUT	130.417°		29.083°	31.250°
③対馬海流	128.500°	129.667°	33.500°	34.583°
⑤黄海混合水	119.834°	126.084°	34.583°	

表-2 19年間の流量変化の回帰式

対象地域	直線式	19年増減	年平均増減
⑦長江起源水 N	$y = 2E-05x - 0.0096$	+0.00448	+0.00023893
⑥長江起源水 RM	$y = 1E-05x - 0.1364$	+0.00224	+0.00011947
⑧長江起源水 S	$y = -0.0001x + 0.041$	-0.0224	-0.001195
④台湾海峡沿岸水	$y = 0.0002x + 0.9204$	+0.04484	+0.00238933
②黒潮 IN	$y = 0.0208x + 28.955$	+4.6592	+0.24849067
①黒潮 OUT	$y = -0.0008x + 35.814$	-0.1792	-0.00955733
③対馬海流	$y = 3E-06x + 2.231$	+0.000672	+0.00003584
⑤黄海混合水	$y = 0.0004x - 0.0613$	+0.0896	+0.0047786

ンド(図(a)の濃い破線), 季節・経年変動(下図, 図中のEはEl Nino, LはLa Nina発生時, 図-10参照)を示す。また, 表-2に線形回帰式の結果をまとめた。

(1) 黒潮の流入, 流出特性

断面②を通過する流量は台湾の東側から南西諸島の西側に流入する黒潮である(黒潮IN)。また, 断面①を通過する流量は対馬海流への分岐後, 南西諸島から流出する黒潮である(黒潮OUT)。図-5に流入流出の流量の変化と黒潮INの季節変動を示す。考察を以下にまとめる。

(1) 黒潮流入量はENSOと連動しており, El NinoからLa Nina移行期に突発的な増加(約70~80Svに至る)が見られる。長期トレンドは年々上昇傾向にあり, 約19年間で4.66Svの流量増加がある。地球温暖化と

(a) 流量の経年変化

(b) 流量の季節変化 (E: El Nino, L: La Nina 発生時)

図-5 黒潮流入, 流出の流量変動

関連していると考えられる。また, 台湾海峡沿岸水も黒潮流入量と連動しており約19年間で0.0448Sv増加している。

(2) 黒潮流出 (OUT) は季節風の影響少なく, 長期変動も小さい。流量の変動は30~40Svで流路も安定している。

(2) 長江起源水の流動特性

長江起源水の⑦北流 (North), ⑧南流 (South), ⑥沖流出流 (River Mouth) の流量変動と沖流出成分の季節・経年変動を図-6に示す。これらより以下の事がわかる。

- (1) 夏季に長江からの流出が卓越し, 冬季には弱まる。
- (2) 冬期季節風で南流成分は強化されるが, 逆流である台湾海峡沿岸水が強い場合には弱まる。南流成分は約19年間で0.0224Svが減少し, 台湾海峡沿岸水は0.0448Sv増加している。合計では台湾海峡を北流成分は増加。
- (3) 沖流出流は0.00224Sv, 北流は0.00448Sv増加しているが, 長江起源水全体としては, 0.01568Sv減少しており, これは長江流域の三峡ダム建設や流域の経済活動等, 人為的影響を受けているものと考えられる。

(a) 流量の経年変化

(b) 流量の季節変化 (E: El Niño, L: La Niña 発生時)

図-6 長江起源水の流量変動

(3) 台湾海峡沿岸水, 黄河混合水, 対馬海流の特性

図-7～9から, 台湾海峡沿岸水, 黄河混合水, 対馬海流の特性として, 以下の事が考察される。

- (1) 台湾海峡沿岸水: 夏季に流量は増加し冬季に減少するが極めて安定に流れ, 約0.95Svの平均流量で北上する。冬季に南下する長江起源水の南流成分と相互作用する。年平均約0.00239Svの増加傾向にある。
- (2) 黄海混合水: 黄河, 渤海, 朝鮮半島からの流入淡水の流動で, 季節風および降雨量の影響が顕著である。冬季には南下 (負) し, 夏季には北上 (正) する季節変動がある。流量収支はほぼゼロであるが, 年平均で0.00478Svの増加傾向にある。これは, 黄河の断流や渤海周辺の人的な活動で淡水の流出量が減っていることを意味する。
- (3) 対馬海流: 黒潮分岐流と黄河混合水の影響を受ける。流量は年間を通して安定しており平均的に2.2Sv程度で長期変化は少ない。秋に流量が増加し春先に減

(a) 流量の経年変化

(b) 流量の季節変化 (E: El Niño, L: La Niña 発生時)
図-7 台湾海峡沿岸水の流量変動

(a) 流量の経年変化

(b) 流量の季節変化 (E: El Niño, L: La Niña 発生時)
図-8 黄河混合水の流量変動

少する。

- (4) La Niñaの冬季に黄海混合水の流入 (南下) が強まる。

(4) 海流の長期変動と太平洋海洋振動

黒潮流入量はENSOと連動しており, El Niño ⇄ La Niña移行期に突発的な増加が見られる。図-10 (a) にMEI (Multivariate ENSO Index, Wolter & Timlin, 1998) と黒潮流入量との関係を示す。(b) にはMEIの季節・経年変動を示す。

(a) 流量の経年変化

(b) 流量の季節変化 (E: El Niño, L: La Niña 発生時)

図-9 対馬海流の流量変動

(a) MEI 指数の経年変化

(b) MEI 指数の季節変化

図-10 海流の長期変動と太平洋海洋振動

El Niño時 (MEIが正) に文字E, La Niña発生時 (MEIが負) に文字Lを付した破線を入れている。

文字E, LはENSOと流動特性との関係を調べるため、図-5～9の下図(b)にも入れている。解析した水塊流動でENSOとの相関がみられたのは、台湾東岸の黒潮流入量がEl Niño⇔La Niña移行期に突発的な増加があること、La Niñaの冬季に黄海混合水の流入強化 (河川からの

流出増加に起因) する現象であった。これら以外には、流量変動とENSOの間には顕著な関係は見いだせなかった。

6. 結 語

FRA-JCOPEの海洋再解析データを用いて東シナ海海域における設定水塊の通過断面流量の長期変動特性を検討した結果、以下のよう成果を得た。

- 1) 黒潮流入量はENSOと連動しており、El NiñoからLa Niña移行期に突発的な増加が見られる。約19年間で4.66Sv (0.2453Sv/yr) の流量増加がある。地球温暖化と関連していると考えられる。
- 2) 黒潮流出 (OUT) : 季節風の影響が少なく、長期変動も小さい。流路および流量は極めて安定している。
- 3) 夏季に長江からの流出が卓越し、冬季には弱まる。冬の季節風で南流成分は強化されるが、逆流である台湾海峡沿岸水が強い場合は弱まる。沖流出流は0.00224Sv, 北流は0.00448Sv増加しているが、長江起源水全体としては、0.01568Sv減少しており、これは長江流域の三峡ダム建設や流域の経済活動等、人為的影響を受けているものと考えられる。
- 4) 台湾海峡沿岸水 : 夏季に流量は増加し冬季に減少する。約0.95Svの平均流量で北上する安定な流れ。冬季に南下する長江起源水の南流成分と相互作用する。年平均で約0.00239Svの増加傾向にある。
- 5) 対馬海流 : 年間を通して安定し、平均的に2.2Sv程度で長期変化は少ない。秋に流量が増加し春先に減少する。
- 6) 黄海混合水 : 年平均で0.00478Svの増加傾向にある。これは、黄河の断流や渤海周辺の人的な活動で淡水の流出量が減っていることを意味する。

参 考 文 献

- Miyazawa, Y., R. Zhang, X. Guo, H. Tamura, D. Ambe, J.-S. Lee, A. Okuno, H. Yoshinari, T. Setou, and K. Komatsu (2009) : Water mass variability in the western North Pacific detected in a 15-year eddy resolving ocean reanalysis, J. Oceanogr. 65, pp.737-756.
- Miyazawa, Y., X. Guo, R. Zhang, S. M. Varlamov, T. Watanabe, T. Setou, and D. Ambe (2010) : Roles of the in-situ observations in the detection of the Kuroshio frontal variability south of Japan, 2010 Ocean Sciences Meeting P035M-10.
- Wolter, K., and M. S. Timlin, (1998) : Measuring the strength of ENSO events - how does 1997/98 rank?, Weather, 53, pp.315-324.
- 宮澤泰正 (2005) : JCOPE海洋変動予測システム使用の手引き 107p.