

「東シナ海陸棚域の循環と長江河川水の挙動」

九州大学応用力学研究所 松野 健

1. はじめに

東アジアの主要な縁辺海のひとつである東シナ海では、その豊かな生物生産の恩恵を受けて、古くから漁業活動が盛んであったが、周辺国による過剰漁獲と急激な経済発展の影響によってその生物環境が大きく変貌しつつある。私たちは東シナ海の環境と生物生産の構造がどうなっており、それがどのように維持されているか、ということに関心を持ってきた。それは主として、この海域での漁業生産が周辺諸国の関心事であったことに由来するが、最近では、日本や韓国の沿岸環境に、東シナ海陸棚域の不健全な環境が影響を及ぼしている様子が垣間見えるようになってきたことにも注目しなければならない。

東シナ海に関連して周辺国の相互理解によって解決しなければならない課題は少なくないが、その中で、生物資源も含めた海洋環境を健全に維持していくこと、すなわち、この海の「自然」を回復させ、この海が本来あるべき姿を持続させる方策を見いだすことは、周辺国に共通する大きな課題のひとつであると言える。ここでは、このような背景と研究者間での共通理解の元に、ここ数年、韓国・中国・台湾の研究者と進めてきた共同研究の成果を中心に、東シナ海陸棚域の循環構造と、同海域の環境に深く関与している長江起源水の挙動について紹介する。

2. 陸棚上の循環

2.1 台湾海峡通過流

よく知られているように、北太平洋亜熱帯循環の一部をなす黒潮は、台湾の東を北上し、その大部分が台湾と与那国島の間を通過して東シナ海に流入している。東シナ海に入った黒潮の大部分は大陸斜面に沿って流れ、九州南方でトカラ海峡を通過してまた太平洋に戻る。一方、対馬海峡を通過して日本海の表層環境を支配する対馬暖流も黒潮の影響を受けた性質を持っており、黒潮の一部が対馬暖流として日本海に輸送されていることは確かである。東シナ海がもう1カ所外と繋がっている台湾海峡からの流入もあることを考えると、対馬暖流は単に黒潮から分岐した流れではない。台湾海峡から流入する流れが東シナ海陸棚上の流れの構造に重要な役割を果たしていることは、古くから指摘されている。台湾海峡通過流と黒潮の影響を受けた東シナ海陸棚域南部の海流は台湾暖流と呼ばれ、陸棚上の循環構造に大きな役割を果たしている。

対馬海峡通過流については既に13年以上にわたって定期フェリーによるモニタリングが継続されており信頼性の高い季節変動の知見も得られている (Fukudome et al., 2010)。一方台湾海峡通過流については、Isobe(2008)が整理したように、大きな季節変動があることが過去の文献からは示唆されるが、過去の実測データはそれぞれ計測期間が短いこともあり、文献によるばらつきは大きい。そこで、台湾海峡通過流量の変動をより細かく把握するため、2009年1月から定期フェリーによるモニタリングを開始した。国立台湾大学との共同研究により、基隆と馬祖諸島を1日1回往復している台馬というフェリーにADCPを搭載した。

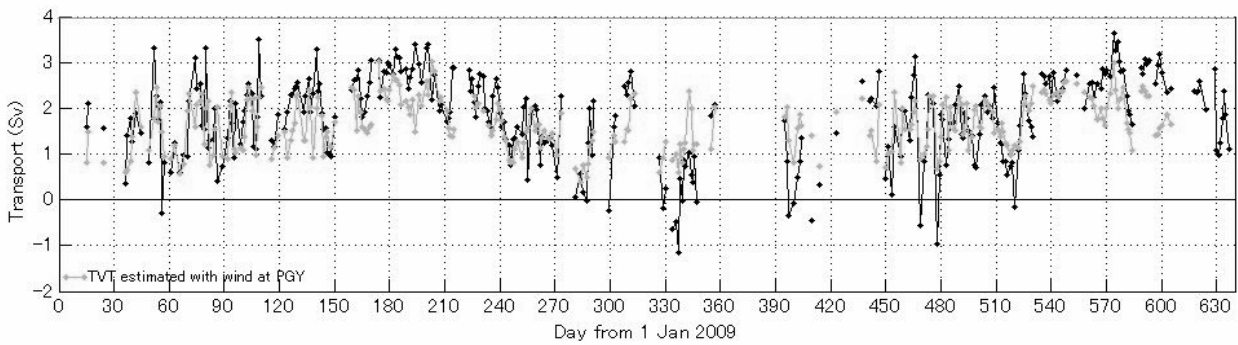


図 1 台湾海峡通過流量に対する風の影響（黒：計測値、グレー：風から見積もった流量）

2010年までに2年間の時系列が得られており、それから明瞭な季節変動がみられ、より短い時間スケールの変動を含めて、台湾海峡に沿った風との相関が高いことが明らかになってきた(図1)。風との相関が高い変動成分を除くと、台湾海峡通過流量の年変動はあまり大きくない。

2.2 台湾暖流—外部陸棚水

台湾海峡を通過した流れは陸棚上を北上するいわゆる台湾暖流を形成するが、台湾北東で陸棚域に進入する黒潮の一部との相互作用が推察される。東シナ海南部陸棚域における台湾暖流の挙動や黒潮水の陸棚上への進入は数値モデルによって示されている (Guo et al., 2006, Lee and Matsuno, 2007) が、陸棚上での測流データが限られているため、台湾暖流の形成過程については実測に基づいた理解はまだ十分ではない。黒潮が陸棚斜面に接する台湾北東部の海域に関しては、台湾の研究者の精力的な研究がよく知られている (Wong et al., 2000, Tang et al., 2000)。

最近の実測と、過去のデータに基づいた水塊分析を紹介する。陸棚域では活発な漁業活動のため、係留系による流れの観測はあまり行われていない。また、外洋域でデータの蓄積が著しいARGOのデータもないため、測流データは空白域に近い。われわれは、台湾海峡から東シナ海陸棚域に至る流れ場に関する情報を得ることを目的として、台湾海峡に表層ブイを繰り返し投入している。得られた流跡の数はまだ多くないが、台湾海峡を通過した流れは、300km以上にわたって非常に安定した流路をとり、その後分散する傾向にあることがわかってきた。

一方、過去の水温・塩分および溶存酸素のデータによる水塊分析からは、外部陸棚域を中心として、黒潮より若干低塩分・低酸素の特徴を持った水塊が高頻度で存在する。これは台湾海峡通過流と黒潮から陸棚に進入した水とによって形成されたものと考えられるが、その起源は明らかになっていない。ただ、T/Sダイアグラムでは、奄美大島西方のPN線や更に下流の測線でも、黒潮より若干低塩分の顕著なモードが見られることが多く、ある特性を持った水塊が外部陸棚域に安定的に存在していることが示唆される(図2)。この傾向は夏から秋にかけて特に明瞭に見られる。上述の漂流ブイの軌跡と合わせて考えると、台湾海峡を通過した流れが主体となって陸棚上を北東方向に向かう安定な流れを形成し、北緯28度付近で流れ場は不安定になるものの、黒潮の影響を受けて陸棚上を東もしくは東北東に流れる水塊を形成していると考えられる。このような流れ、あるいは水塊分布の存在は、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。

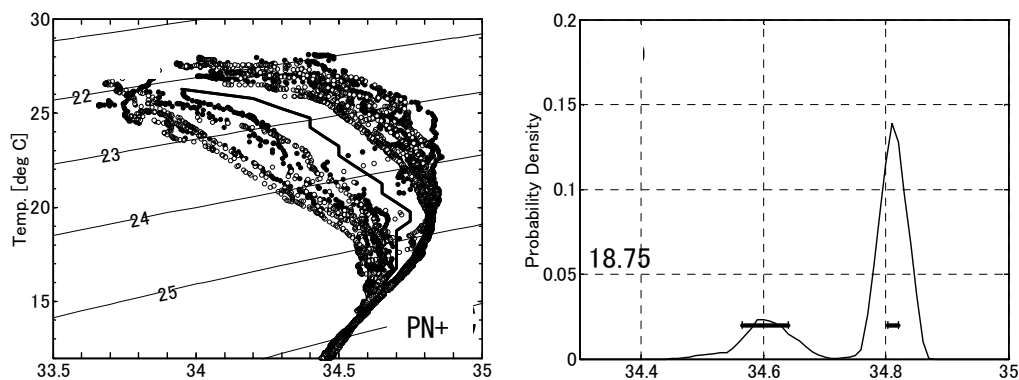


図2 (左) PN線およびその北側の測線における T/S ダイアグラムと、(右) それによる水温 18.5~19.0 の範囲における塩分の出現確率密度(Yanao 私信による)

2.3 陸棚を横切る流れと物質輸送

黒潮水が陸棚域に進入していることは、対馬海峡通過流量と台湾海峡通過流量との差からも明らかであるが、外洋水は主として亜表層から陸棚域に進入し、表層では沿岸から陸棚端に向かう質量輸送があると考えられる。そのひとつは次節で述べる河川水の輸送であるが、それとは別に、陸棚を横切る流れの存在が議論されている。顕著な現象としては、夏季の長江起源水の分布とは別に、冬季を中心に長江河口から北側の中国沿岸域から南東方向に延びる高濁度水の分布がある。この分布について Yuan et al.(2008)は北寄りの風によって励起された黄海沿岸流が中国沿岸域で巻き上げられた懸濁物を南東方向に輸送したものと解釈している。南からの台湾暖流の影響も指摘している。しかし、上記の高濁度水の広がっている海域は、周辺より浅くなっている海域でもあり、海底堆積物の巻き上がりの寄与についても考慮する必要がある。

3. 長江起源水の希釈過程

3.1 長江希釈水の分布

上述のように長江起源水は東シナ海陸棚域の循環と海洋環境に重要な役割を果たしている。基本的には海域に流入した河川水の挙動であるが、流量が大きいと、その影響は東シナ海陸棚域に留まらず、長江河口からおよそ 800km 離れた対馬海峡でも明瞭なシグナルが見られ、長江河川水の大半は日本海に流入していると考えられている。長江の流量には明瞭な季節変動があり、冬季にはおよそ $1 \times 10^4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 、夏季は年変動が大きく $4 \sim 6 \times 10^4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 程度で、これは日本の主要河川の 100 倍程度の流量である。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 (China Coastal Current) として台湾海峡まで達しているといわれている。6 月頃から長江流量は大きくなり、風も南寄りになることから、陸棚中央部に大きく張り出す分布になる。長江起源水による低塩分水の広がり一般的な傾向を広範囲の観測データから示した報告は多くないが、数値モデルでは、長江流量や風、また台湾暖流に対応した広がりが示されている (Chang and Isobe, 2003, Guo et al., 2006)。その低塩分水の広がり、衛星からの水色分布と対応していることが多く (Kim et al., 2009)、長江起源の栄養塩が、長江希釈水域の基礎生産に重要な影響を与えていることが示唆されている。

3.2 希釈過程

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。希釈には水平および鉛直混合が関わっている。その希釈過程を調べるため、2003 年以降、水温・塩分センサー付きの表層追跡オーブコムブイを用いた観測を行ってきた。ブイは韓国の研究者との共同研究を通じて、済州島南西海域の韓国 EEZ に投入し、数日から約 2 ヶ月間の追跡を行った。主な流跡を重ねたものを図 3 に示す。これらは概ね長江希釈水域内に分布しており、東ないし北東向きに流されていることがわかる。その移動速度は 10-15 cm/s 程度で、ブイの投入海域（東経 124°）から済州島周辺まで到達するのに平均しておよそ 3 週間かかっている。

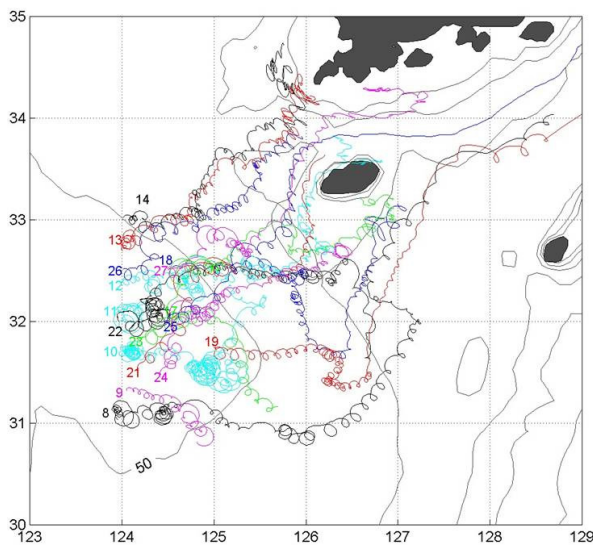


図 3 2003, 2004, 2007 年に投入した表層（海面下 5m に長さ 4m のドロッグ）ブイの流跡

この間、長江起源水は周辺水によって希釈され、塩分が上昇する。漂流ブイによって計測された塩分の時系列および複数のブイの動きから、ラグランジュ的に測定された塩分の上昇は表層水の発散に関係していることが示されている (Matsuno et al. 2006, 2010)。これは低気圧の通過などによる鉛直混合と相俟って、表層発散に伴う鉛直流が希釈に重要な役割を果たしていることを示唆している。特に熱帯性低気圧の通過によって急激に塩分が上昇し、同時に水温が低下した 2007 年の例を図 4 に示す。8 月 8 から 10 日には、ブイの位置によって大きく異なっているが 24 から 28 (psu) であった（1 例のみ長江希釈水域から少しはずれていたが）塩分が、8 月 11 日に急激に上昇し、同時に水温は低下している。これは 11 日にこの海域を通過した熱帯性低気圧の影響と考えられる。このときの 7 台の漂流ブイの動きから表層発散があったことが認められ、下層から持ち上げられた高塩分水との混合による塩分上昇と考えられる。一方、低気圧通過後、1 週間以上にわたって

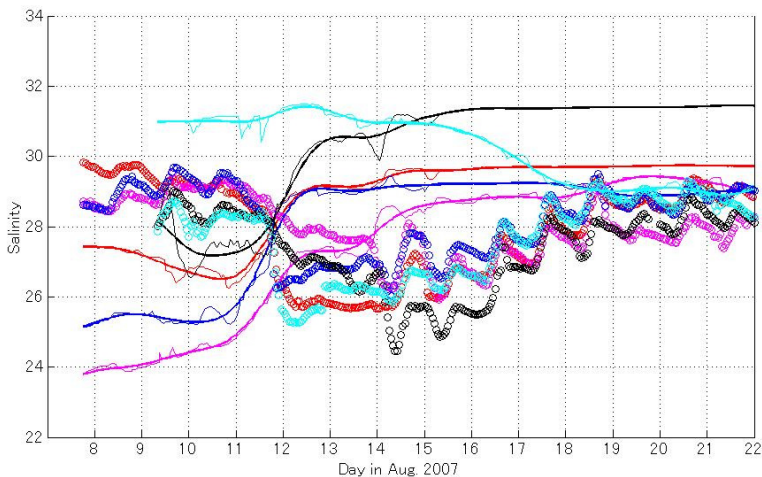


図 4 2007 年 8 月に投入した 5 台の漂流ブイによって観測された水温 (○) と塩分 (実線、太線は lowpass filter をかけたもの) の時間変化。

塩分はほぼ一様で、低気圧通過による鉛直過程を除くと、希釈はほとんど認められないということに注目する必要がある。

2008年から2010年にかけて夏季に短期の観測を行った結果でも、特に大きな低気圧の通過などが無いときには顕著な塩分の増加は見られないという結果が得られている。これらのことから、陸棚域中央部以東では長江起源水の希釈は主として低気圧の通過などによる鉛直過程によって行われていると考えられる。

4. 基礎生産を維持する栄養塩の起源

長江起源水の希釈過程には下層水との混合が重要な役割を果たしているということは、同時に長江希釈水中には下層の栄養塩が多く供給されることを示している。衛星からの水色分布からは長江希釈水域でクロロフィル濃度が高く、基礎生産が盛んであると考えられる。これは長江起源の栄養塩の寄与を示唆するものであるが、長江起源水の希釈時には下層から栄養塩が供給されている可能性が高いことを考えると、外洋起源の栄養塩の寄与も考慮する必要がある。

上述のように、衛星から観測される表層クロロフィルの分布は、長江希釈水の広がり域に対応している傾向にあることが報告されている (Kim et al., 2009) が、特に外部陸棚域では、一般に亜表層にクロロフィル極大が見られる。長江起源水中に含まれていた栄養塩は表層では基礎生産によって消費され、ほとんど枯渇しているのに対し、亜表層 (表層混合層の直下であることが多い) のクロロフィル極大は概ね栄養塩の躍層に位置しており、その基礎生産は下層に分布する栄養塩によって維持されている可能性が示唆される。亜表層で生産された植物プランクトンが表層混合層に配分され、結果的に長江希釈水と分布域が重なっている可能性も考えられる。

亜表層クロロフィル極大の維持に下層に分布する栄養塩がどのように寄与しているかを調べるため、鉛直拡散の大きさを見積もった。図5は長江希釈水域で観測されたクロロフィルa、栄養塩、水温・塩分、乱流エネルギー散逸率 ϵ および鉛直拡散係数の鉛直分布である。海面下10-20mの水温・塩分躍層の付近でクロロフィル極大が見られ、表層ではほとんど枯渇している栄養塩も水温・塩分躍層付近で増加している。表層混合層直下では ϵ の値は30-40m付近に比べて大きい、密度成層も強いので鉛直拡散係数は $10^{-5}(\text{m}^2\text{s}^{-1})$ 程度の値になる。これと栄養塩の鉛直勾配を用いて鉛直拡散によってどの程度の栄養塩が混合層下部に供給されるかを見積もることができる。硝酸態窒素の勾配はおおよそ $1\ \mu\text{M}\ \text{l}^{-1}\text{m}^{-1}$ なので、鉛直拡散による硝酸態窒素の増加は1日におよそ $0.1\ \mu\text{M}\ \text{l}^{-1}$ になる。これを炭素に換算すると $0.66\ \mu\text{M}\ \text{l}^{-1}\ \text{day}^{-1}$ 、すなわち $8\ \mu\text{gC}\ \text{l}^{-1}\ \text{day}^{-1}$ となる。炭素とクロロフィルaの割合は重量比で60-25くらいとされているので、クロロフィル-a では 0.1 から $0.3\ \mu\text{g}\ \text{l}^{-1}\ \text{day}^{-1}$ となる。亜表層クロロフィルaの濃度が $2\ \mu\text{g}\ \text{l}^{-1}$ くらいなので、1日に1割くらいが無くなると考えると、鉛直拡散によって下層から供給される栄養塩は、亜表層クロロフィル極大をちょうど維持できる程度ということになる。

植物プランクトンの枯死の割合を明確に見積もることは困難であり、またクロロフィル極大層を形成する植物プランクトンの一部は表層混合層に運ばれると考えられるので、クロロ

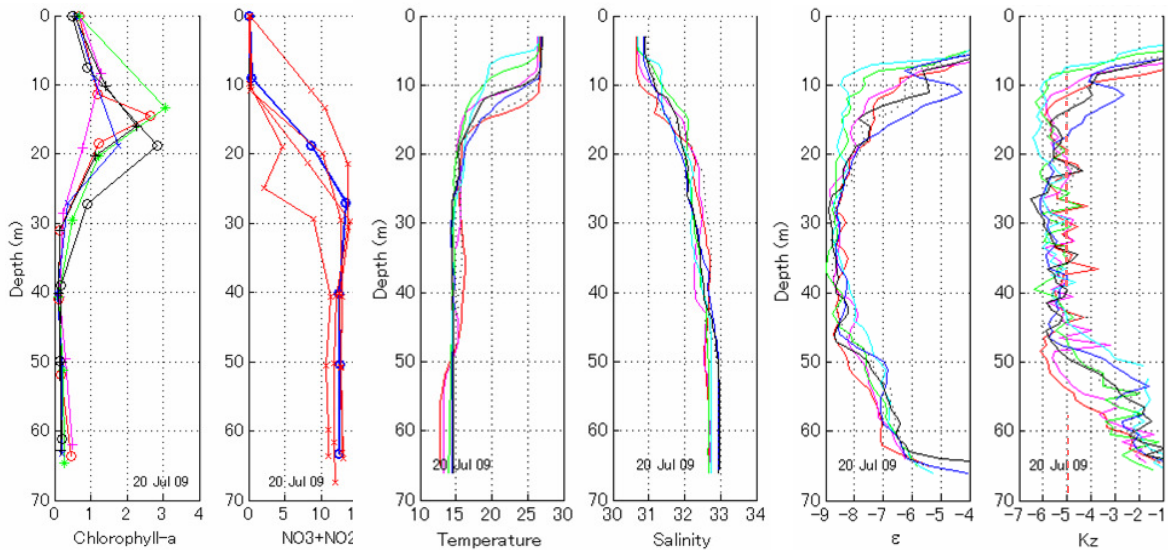


図5 2009年7月に済州島南西海域で表層ブイを追跡しながら観測された、左からクロロフィルa、硝酸および亜硝酸態窒素、水温、塩分、 ϵ および鉛直拡散係数 K_z の鉛直分布。窒素の分布は20-24日の正午前後に得られた1日毎の分布、それ以外は7月20日6:00-16:00の2時間毎の分布。 ϵ と K_z は log スケール。

フィル極大と鉛直拡散による栄養塩の供給が静的にバランスしていると結論付けることはできないが、亜表層クロロフィル極大の形成に下層の栄養塩が重要な役割を果たしている可能性は高い。長江起源の栄養塩を希釈水中で短い時間に再利用する小型のプランクトンの役割と共に、外洋起源の栄養塩の役割についても定量的に評価する必要がある。

5. まとめ—海洋環境の共通理解に向けて

東シナ海陸棚域は、大流量を持つ長江の影響が大きいことから巨大なエスチュアリだと言われることがある。しかし、上でも述べたように台湾海峡を通過した流れは陸棚上の循環に大きな影響を及ぼしており、黒潮の寄与も小さくない。基礎生産を支える栄養塩の起源を考えると、長江起源と同時に外洋起源の栄養塩の寄与が少なくないことが示唆される。長江希釈水域は大陸と大洋が交わる場所と言える。ここでは、基礎生産という生態系の最下部の構造の視点から、東シナ海陸棚域が陸と外洋からの物質が相互に関わり合っている海域であることを示したが、より高次の生物生産では両者はさらに複雑に絡み合っていることが容易に推察される。

海洋環境が陸上の環境と大きく異なるのは、生態系そのものが常時動いている流れの中で維持されている点であろう。すなわち、海水の動きを正しく把握することで物質の動きが理解でき、環境の維持過程を知ることに繋がる。陸棚上における循環構造と海水の混合過程の理解が、東アジア縁辺海域の海洋環境を理解する上で、最も基本となる知見を与えるものであり、周辺諸国で研究交流を進めることによって、科学的な共通理解のレベルを高めていくことが望まれる。

引用文献

- Chang, P.-H., Isobe, A. : A numerical study on the Changjiang Diluted Water in the East and Yellow China Seas, *J. Geophys. Res.*, 108(C9), 3299, doi:10.1029/2002JC001749, 2003.
- Fukudome, K., Yoon, J.-H., Ostrovskii, A., Takikawa, T., Han, I.-S. : Seasonal volume transport variation in the Tsushima Warm Current through the Tsushima Strait from 10 year of ADCP observations, *J. Oceanogr.*, 66, 539-551, 2010.
- Guo, X., Miyazawa, Y. and Yamagata, T. : The Kuroshio onshore intrusion along the shelf break of the East China Sea: the origin of the Tsushima Warm Current, *J. Phys. Oceanogr.*, 36, 2205-2231, 2006.
- Isobe, A.: Recent advances in ocean-circulation research on the Yellow Sea and East China Sea Shelves, *J. Oceanogr.*, 64, 569-584, 2008.
- Kim, H.-C., Yamaguchi, H., Yoo, S., Zhu, J., Okamura, K., Kiyomoto, Y., Tanaka, K., Kim S.-W., Park, T., Oh I. S., Ishizaka, J. : Distribution of Changjiang Diluted Water detected by satellite chlorophyll-*a* and its interannual variation during 1998-2007, *J. Oceanogr.*, 65, 129-135, 2009.
- Lee, J.S. and Matsuno, T.: Intrusion of Kuroshio water onto the continental shelf of the East China Sea, *J. Oceanogr.*, 63, 309-325, 2007.
- Matsuno, T., Lee, J.-S., Shimizu, M., Kim S.-H. and Pang, I.-C.; Measurements of the turbulent energy dissipation rate ϵ and an evaluation of the dispersion process of the Changjiang Diluted Water in the East China Sea, *J. Geophys. Res.*, 111, C11S09, doi:10.1029/2005JC003196, 2006
- Matsuno, T., Shimizu, M., Pang, I.-C., Kim, S.-H., Han I.-S. and Fukudome, K.; Behavior of Changjiang Diluted Water in the East China Sea, *Monitoring and Prediction of Marine and Atmospheric Environmental Change in the East Asia*, ed. T. Yanagi, 21-32, 2010.
- Tang, T.Y., Tai, J.H. and Yang, Y.J.: The flow pattern north of Taiwan and the migration of the Kuroshio, *Cont. Shelf Res.*, 20, 349-371, 2000.
- Wong, G.T.F., Chao, S.Y., Li, Y.H. and Shiah, F.K.: The Kuroshio edge exchange processes (KEEP) study – an introduction to hypotheses and highlights, *Cont. Shelf Res.* 20, 335-347, 2000.
- Yuan, D., Zhu, J., Li, C., Hu, D. : Cross-shelf circulation in the Yellow and East China Seas indicated by MODIS satellite observations, *J. Mar. Sys.*, 70, 134-149, 2008.