

東シナ海における外洋起源栄養塩の輸送量と
低次生態系への影響

郭 新 宇

水環境学会誌 第34巻 第9号 (2011)

pp. 293 ~ 296 別刷

社団法人 日本水環境学会

東シナ海における外洋起源栄養塩の輸送量と低次生態系への影響*

郭 新 宇

1. はじめに

地球温暖化の進行がほぼ確実視されている現在、その影響を予測、評価することは喫緊の課題である。温暖化の海への影響については、水位上昇の臨海域への影響や水温上昇が生態系に及ぼす影響が中心的課題と見なされがちであるが、今世紀に予想される世界の人口増加による食糧問題の深刻化を考えれば、世界の海の水産資源生産力に対する温暖化の影響は水位上昇問題にも匹敵する重要課題であるといえる。

海の一次生産力（基礎生産）を支えるのは栄養塩である。温暖化にともなって鉛直成層が強くなり、外洋では深層からの栄養塩供給が減少することがほぼ確実である^{1,2)}が、沿岸域ではその影響は大きくないと考えられていた。これは、沿岸域の栄養塩が主として河川水や地下水の流入によって陸から供給されていると考えられていたためである。

しかしながら、この常識を覆すような知見が東シナ海や瀬戸内海の近年の研究で得られつつある。例えば、東シナ海では約5割の栄養塩が黒潮中層水起源であるといわれており³⁻⁵⁾、東シナ海より遙かに閉鎖的な瀬戸内海では、その閉鎖性にもかかわらず約6割もの栄養塩が外洋起源と推定されている^{6,7)}。温暖化による鉛直成層の強化を考える限り、これらの外洋起源栄養塩も温暖化により減少する可能性が高い。一方、地球シミュレータによる高解像度大気海洋結合モデルの温暖化予測によると、80年後には黒潮の流速が現在より3割大きくなることが報告されている⁸⁾。海洋力学的に考えると、黒潮の強化は東シナ海や瀬戸内海のような黒潮沿岸域への黒潮中層水の進入に有利に働き、外洋起源栄養塩の供給を増やす効果がある。このように、気候変動によって沿岸域の栄養塩環境がどのように変化するかについては、未だに定まったシナリオは存在せず、その影響過程を早急に解明する必要がある。

本研究では、東シナ海を対象とし、三次元海水流動モ

デルに海洋低次生態系モデルを導入し、栄養塩と基礎生産を代表する Chl.a の空間分布と季節変動を再現し、外洋起源栄養塩の輸送量をモデル結果から算出し、従来のボックスモデルの結果と比較する。また、基礎生産に光が必要であるため、外洋起源栄養塩が有光層へ運ばれなければ、植物プランクトンに利用されない。したがって、外洋起源栄養塩の基礎生産への影響を確認するために、本研究では黒潮流域の栄養塩濃度を人工的に変えたモデルの感度実験を行い、外洋起源栄養塩の基礎生産に対する影響を明らかにする。

2. 方法

本研究で用いた海水流動モデルは、Princeton Ocean Model をベースにして開発されたものである^{9,10)}。東シナ海を対象とするモデルと西北太平洋を対象とするモデルをネスティング手法で結合し、黒潮のような代表的な海流を東シナ海の流動モデルに導入した⁹⁾。東シナ海の流動モデルを駆動する外力は、開境界に与える月平均の流速・水温・塩分・水位、海面に与える月平均の風応力・熱フラックス・淡水フラックス、河口域に与える月平均の河川流量である。さらに、潮汐同化モデル¹¹⁾ から得られた調和定数を利用して求めた潮汐（潮位）と潮流を開境界の水位と流速に加えた。したがって、本研究で用いた流動場は潮流を含み、かつ季節的に変動するものとなっている。

本研究で用いた海洋低次生態系モデルは NORWECOM¹²⁻¹⁴⁾ をベースにして開発されたものである¹⁵⁾。このモデルでは、3種類の栄養塩（硝酸塩、リン酸塩とケイ酸塩）、2種類の植物プランクトン（珪藻類と鞭毛藻類）、2種類のデトリタスといった7つのコンパートメントが考慮されている。モデルは水中と底質を別々に取り扱っている。水中では植物プランクトンの光合成、呼吸、死亡と沈降、デトリタスの分解と沈降、懸濁粒子と植物プランクトンの光への遮蔽効果といったプロセスを、底質ではデトリタスの分解、脱窒、埋没、再懸濁といったプロセスをモデルに取り入れている。栄養塩は底質、大気、河川、開境界（台湾海峡と黒潮流域）から供給されている。

モデルの計算領域は図1に示されている。流動モデルと生態系モデルは冬の初期条件から同時に計算し始め、月平均の境界条件を用いて3年間計算し続けた。解析には3年目の結果を使用した。なお、モデル計算に使われたパラメータと観測データに関しては、別の文献¹⁵⁾ に詳しく述べられている。

3. 結果

モデル結果の検証は、夏と冬の栄養塩濃度の気候値分



Xinyu Guo

平成9年 愛媛大学大学院理工学研究科修士
同年 東京大学海洋研究所 COE 研究員
同年 海洋科学技術センター地球フロンティア研究システム研究員
11年 愛媛大学沿岸環境科学研究センター助教授
19年 同准教授
博士（工学）

* Transport Flux of Oceanic Nutrients and Its Influences on the Low Trophic Ecosystem in the East China Sea

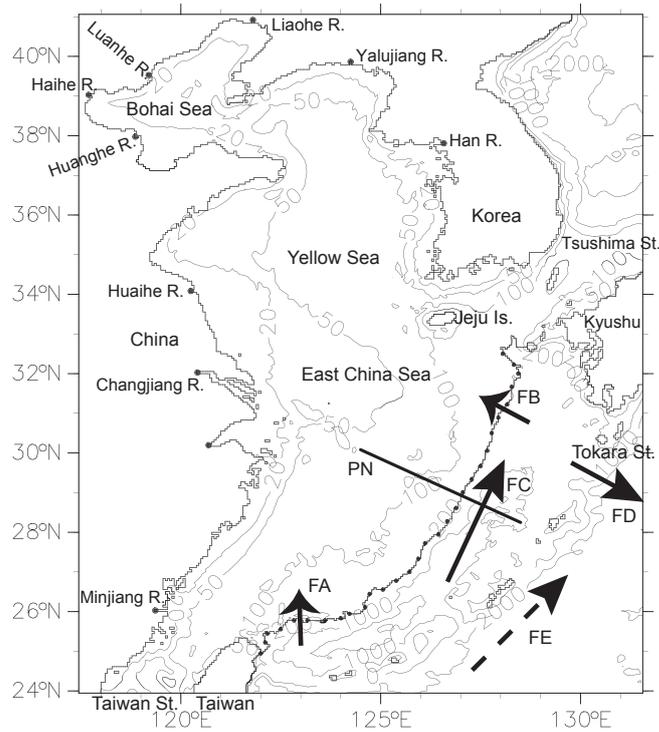


図1 モデル領域。海岸線に沿ってプロットした黒丸は河川の位置を示している。200 m等深線を陸棚縁と定義し、その上に黒丸をプロットしている。“PN”は陸棚縁に沿って流れる黒潮を横切る断面である。“FA”、“FB”、“FC”、“FD”、“FE”は本文に使われた栄養塩フラックスを示している。

布¹⁶⁾ および気象庁の観測によって東シナ海陸棚縁近傍で得られた栄養塩濃度と Chl.a 濃度を用いて、生態系モデルの結果と比較することにより行った¹⁵⁾。これらの比較から、生態系モデルは東シナ海の陸棚上における栄養塩と Chl.a の空間分布および季節変化を大まかに再現できることが分かった。さらに、水深200 mの陸棚縁に沿って求めた栄養塩濃度は観測値に近く、栄養塩輸送フラックスの計算に十分な精度を有することもわかった。

東シナ海への栄養塩供給は主に長江、台湾海峡と黒潮流域からである⁴⁾。黄海からの栄養塩供給もあるが、その量は長江、台湾海峡と黒潮流域からの供給量と比べると、無視できるほど小さい⁵⁾。長江と台湾海峡からの供給量はそれぞれに定義された場所で比較的求めやすいが、広範囲で流れる黒潮からの供給量はなかなか求めにくい。本研究では黒潮流域からの栄養塩供給量を東シナ海の陸棚縁に相当する200 mの等深線を横切るフラックスと定義し、200 mの等深線と重なるグリッドでのモデル結果(流速と栄養塩濃度)を用いて、フラックスを計算する。

モデル結果から求めた長江、台湾海峡と黒潮流域から東シナ海への流量と栄養塩フラックスの年平均値を表1に示している。黒潮流域から東シナ海陸棚上への流量は1.53 Sv ($1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)で、台湾海峡からの流量(1.15 Sv)と同程度であるが、長江流量の50倍になっている。一方、硝酸塩、リン酸塩とケイ酸塩のフラックスを比較すると、黒潮流域からの供給が最も多く、長江のそれらの9倍、40倍と6倍と、台湾海峡のそれらの6倍、2.5倍と3倍となっている。栄養塩フラックスの比が流量と異なる理由は栄養塩濃度の違いにあるが、3種類の栄養塩フラックスの比の違いは黒潮水、長江水と台湾海峡水の中に含まれた3種類の栄養塩の比の違いに由来するものである。

表1 黒潮流域、台湾海峡と長江からの流量と栄養塩フラックス。“KS”は黒潮流域から、“CJ”は長江から、“TW”は台湾海峡からのものである。フラックス以外に、本文で使われた比も示している。なお、1 Svは $10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ である。

	Water (Sv)	DIN ($\text{kmol} \cdot \text{s}^{-1}$)	DIP ($\text{kmol} \cdot \text{s}^{-1}$)	Si ($\text{kmol} \cdot \text{s}^{-1}$)	DIN/DIP
KS	1.53	9.36	0.72	18.22	13
CJ	0.03	1.06	0.018	2.98	59
TW	1.15	1.58	0.28	6.19	6
KS/CJ	50	9	40	6	
KS/TW	1.3	6	2.5	3	

表1に示された年平均値は顕著な季節変化を有する¹⁵⁾。その季節変化は主に長江流量、台湾海峡流量と黒潮の陸棚域への流入流量によるものである¹⁷⁾が、河川および海水中の栄養塩濃度の変化も寄与している¹⁵⁾。また、黒潮流域からの栄養塩フラックスに関するもう一つの重要な特徴は、表1に示された値が黒潮流域から陸棚域への流入量と陸棚域から黒潮流域への流出量の差であって、流入量と流出量は共に両者の差より10倍ほど大きいことである。

栄養塩の植物プランクトンへの利用には光条件が必要であるため、黒潮流域から東シナ海陸棚域への栄養塩輸送量があっても、基礎生産に本当に使われたかどうかを別の方法で確かめなければならない。本研究では、黒潮流域の栄養塩濃度のみを人工的に増加させ、現実の季節変化を再現した計算と同じ条件でモデルの再計算を行った。両者の差から、黒潮流域の栄養塩濃度の変化はどのように植物プランクトンの現存量に影響を与えるかを検討した。

黒潮流域の栄養塩濃度が3割増えた計算(ケース

+30%)と現状再現計算(標準ケース)で得られたPN断面における硝酸塩濃度とChl.a濃度の差をそれぞれ図2と図3に示している。硝酸塩濃度の差(図2)を見ると、黒潮起源の栄養塩の増加は主に陸棚域の底層にあることが分かる。冬は、強い鉛直混合により上下の濃度差が小さいことから、黒潮起源の栄養塩が鉛直混合により表層に運ばれていることが推察される。夏に、栄養塩の増加は主に底層に分布しているが、その一部は有光層の

深さにまで達している(届くことができる)(図2)。一方、図3に示された各月のChl.aの分布から、冬の表層での増加と夏の亜表層での増加が特徴的である。この結果、黒潮起源の栄養塩は基礎生産に利用される可能性を示唆しているとともに、黒潮起源栄養塩の影響は限定的であることも示している。また、図には示していないが、黒潮水に含まれている3種類の栄養塩の濃度比がもともと東シナ海陸棚域における海水中の3種類の栄養塩の濃

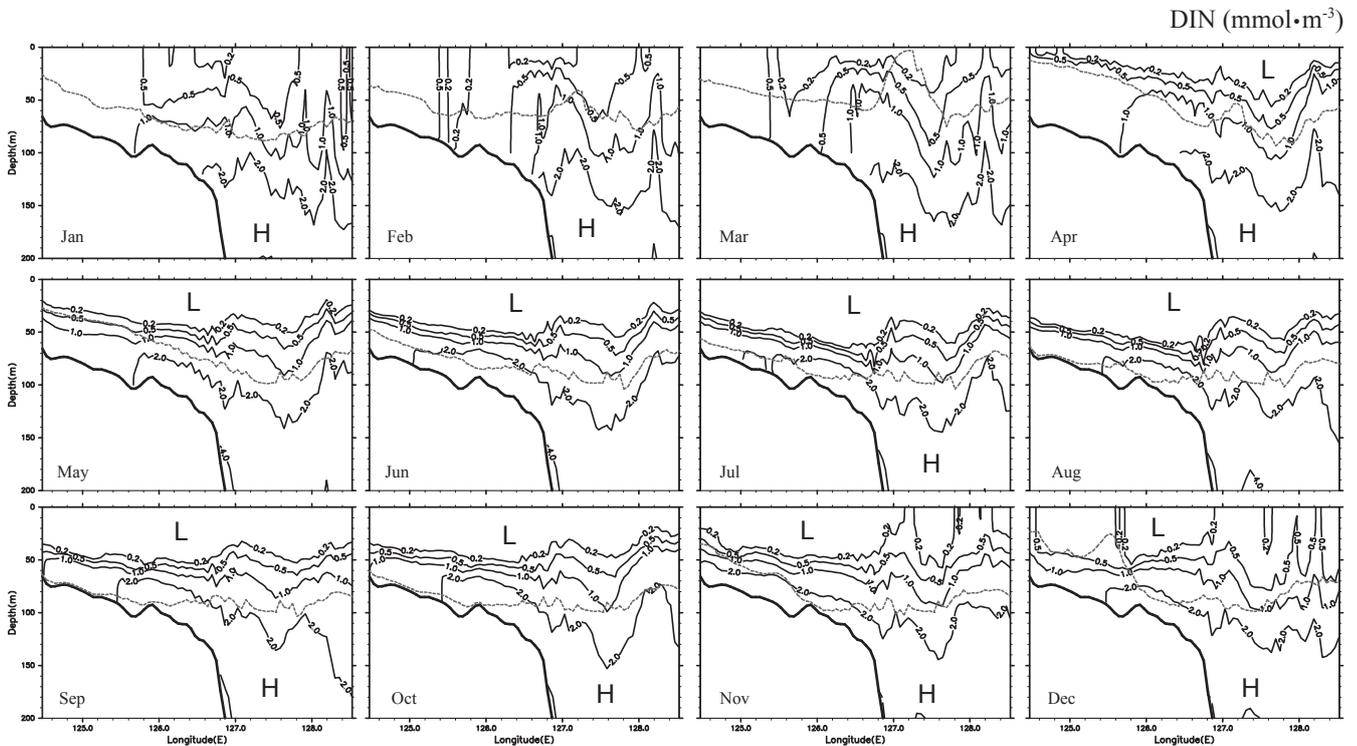


図2 PN断面におけるケース'+30%'と標準ケースの硝酸塩濃度($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-3}$)の差。Hはhigh, Lはlowの略である。破線は有光層の深さを示している。

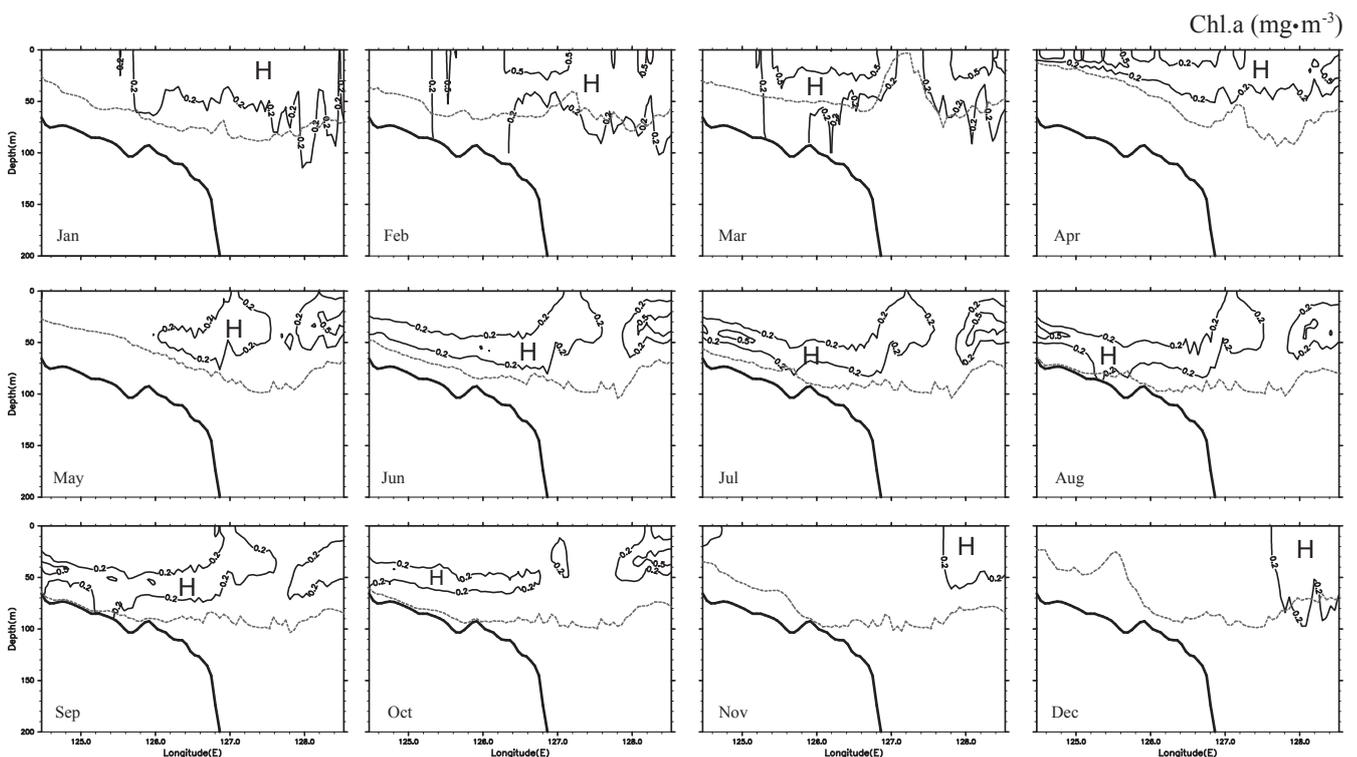


図3 PN断面におけるケース'+30%'と標準ケースのChl.a濃度($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)の差。破線は有光層の深さを示している。

度比と異なることから、黒潮起源栄養塩の供給量の変化はもともと陸棚域に存在している栄養塩の基礎生産への栄養にも影響を与えている¹⁵⁾。

4. 終わりに

本稿では、数値モデルにより見積もった黒潮流域から東シナ海陸棚域への栄養塩供給量とモデル実験で確認した黒潮流域を起源とする栄養塩の増加による基礎生産への影響を紹介した（なお、モデルから得られた結果に関連する他の内容は別の論文¹⁵⁾を参照されたい）。

黒潮は陸棚縁に沿って流れているので、陸棚域への栄養塩輸送は黒潮を横切る方向で起こっている（図1のFAとFB）。一方、黒潮に沿う方向での栄養塩フラックス（図1のFC）もあり、その量は黒潮を横切る方向での栄養塩フラックスより10倍以上大きい。このような膨大な栄養塩フラックス（図1のFDとFE）は黒潮とともに日本南方海域と黒潮統流域に輸送され、黒潮流域、とくに黒潮内側域に位置する日本南岸の内湾や内海での基礎生産に影響を与えている。今後、黒潮流域から黒潮内側域、さらに内湾や内海への栄養塩輸送の実態とそれに関連する物理過程を明らかにする必要がある。

本研究によって、東シナ海における黒潮起源の栄養塩の基礎生産に対する影響は確かめられたが、その量の評価、とくに長江起源と台湾海峡起源の栄養塩の陸棚域における基礎生産への貢献とそれらの定量的な比較はまだできていない。今後、異なる起源の栄養塩の沿岸海域における基礎生産への貢献を定量的に見積もる必要がある。

謝辞

本研究は文部科学省科学研究費補助金（課題番号：21310012）の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) Sarmiento, J. L., Slater, R., Barber, R., Bopp, L., Doney, S. C., Hirst, A. C., Kleypas, J., Matear, R., Mikolajewicz, U., Monfray, P., Soldatov, V., Spall, S. A. and Stouffer, R. (2004) Response of ocean ecosystems to climate warming. *Global Biogeochemical Cycles*, 18, GB3003, doi:10.1029/2003GB002134.
- 2) Behrenfeld, M. J., Worthington, K., Sherrell, R. M., Chavez, F. P., Strutton, P., McPhaden, M. and Shea, D. M. (2006) Controls on tropical Pacific Ocean productivity revealed through nutrient stress diagnostics. *Nature*, 442, 1025-1028.
- 3) Guo, X. and Yanagi, T. (1998) The role of the Taiwan Strait in an ecological model in the East China Sea. *Acta Oceanographica Taiwanica*, 37, 139-164.
- 4) Chen, C. T. A. and Wang, S.L. (1999) Carbon, alkalinity and nutrient budgets on the East China Sea continental shelf. *Journal of Geophysical Research*, 104, 20675-20686.
- 5) Zhang, J., Liu, S. M., Ren, J. L., Wu, Y. and Zhang, G. L. (2007) Nutrient gradients from the eutrophic Changjiang (Yangtze River) Estuary to the oligotrophic Kuroshio waters and re-evaluation of budgets for the East China Sea Shelf. *Progress in Oceanography*, 74, 449-478.
- 6) 速水祐一, 碓井澄子, 武岡英隆 (2004) 瀬戸内海における窒素・リンの存在量とその長期変動, 海と空, 80, 75-78.
- 7) 武岡英隆 (2006) 豊後水道における外洋起源栄養塩の供給機構とその生態系への影響, 沿岸海洋研究, 43, 105-111.
- 8) Sakamoto, T. T., Hasumi, H., Ishii, M., Emori, S., Suzuki, T., Nishimura, T. and Sumi, A. (2005) Responses of the Kuroshio and the Kuroshio Extension to global warming in a high resolution climate model. *Geophysical Research Letters*, 32, L14617, doi:10.1029/2005GL023384.
- 9) Guo, X., Hukuda, H., Miyazawa, Y. and Yamagata, T. (2003) A triply nested ocean model for simulating the Kuroshio -Roles of horizontal resolution on JEBAR-. *Journal of Physical Oceanography*, 33, 146-169.
- 10) Wang, Q., Guo, X. and Takeoka, H. (2008) Seasonal variations of the Yellow River plume in the Bohai Sea: A model study. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 113, C08046, doi:10.1029/2007JC004555.
- 11) Matsumoto, K., Takanezawa, T. and Ooe, M. (2000) Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimeter data into hydrodynamical model: a global model and a regional model around Japan. *Journal of Oceanography*, 56, 567-581.
- 12) Aksnes, D. L., Ulvestad, K. B., Balino, B. M., Berntsen, J., Egge, J. K. and Svendsen, E. (1995) Ecological modelling in coastal waters: Towards predictive physical-chemical-biological simulation models. *Ophelia*, 41, 5-36.
- 13) Skogen, M. D., Svendsen, E., Berntsen, J., Aksnes, D. and Ulvestad, K. B. (1995) Modeling the primary production in the North Sea using a coupled three-dimensional Physical-Chemical-Biological Ocean Model. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 41, 545-565.
- 14) Skogen M. D. and Soiland H. (1998) A user's guide to NORWECOM v2.0, a coupled 3 dimensional physical chemical biological ocean-model, In: The NORWegian Ecological Model system, Bergen, Institute of Marine Research, 42. Technical Report Fisken og Havet 18/98. (http://www.imr.no/~morten/norwecom/userguide2_0.ps.gz).
- 15) Zhao, L. and Guo, X. (2011) Influence of cross-shelf water transport on nutrients and phytoplankton in the East China Sea: a model study. *Ocean Science*, 7, 27-43, doi:10.5194/os-7-27-2011.
- 16) Chen, C. T. A. (2009) Chemical and physical fronts in the Bohai, Yellow and East China seas. *Journal of Marine Systems*, 78, 394-410.
- 17) Guo, X., Miyazawa, Y. and Yamagata, T. (2006) The Kuroshio onshore intrusion along the shelf break of the East China Sea: the origin of the Tsushima Warm Current. *Journal of Physical Oceanography*, 36, 2205-2231.