日本海中層における輸送時間の直接シミュレーション

高山, 勝巳
九州大学応用力学研究所力学シミュレーション研究センター

広瀬, 直毅
九州大学応用力学研究所力学シミュレーション研究センター

https://doi.org/10.15017/16740

出版情報：九州大学大学院総合理工学報告. 26 (3), pp.351-355, 2004-12. Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University
バージョン：
権利関係：

九州大学大学院総合理工学報告
第26巻 第3号 351 - 355 頁 平成16年12月

Engineering Sciences Reports, Kyushu University
(KYUSHU DAIGAKU SOGORIKOGAKU HOKOKU)
Vol. 26, No. 3 pp. 351 - 355 DEC. 2004

日本海中層における輸送時間の直接シミュレーション

高山 勝巳*1・広瀬 直毅*1

(平成16年10月28日 受理)

Direct Simulation of the Transit Time of the Intermediate Layer in the Japan Sea

Katsumi TAKAYAMA, Naoki HIROSE
†E-mail of corresponding author: *taka@riam.kyushu-u.ac.jp*

In order to represent the distribution of transit time of the seawaters accurately, the transit time tracer is introduced in an isopycnic coordinate ocean model. This passive tracer is initialized by the time of subduction from the sea surface mixed layer to the isopycnic interior layers, and is calculated by the normal advection-diffusion equation in the isopycnic layers. The residence time is directly given by the transit time tracer varying at each time and position. We apply this method in the Japan Sea, and attempt to estimate the residence time for the intermediate water characterized by the salinity-minimum layer. The simulated residence time in the intermediate layer is 0-4 years for the northern part, 6-10 years for the southwestern part, and 12-16 years for the southeastern part of the Japan Sea, respectively.

Key words: *Transit time tracer, Residence time, Isopycnic coordinate ocean model, Japan Sea, Japan Sea Intermediate Water*

1. 緒言

海洋中に溶け込んだ物質がどのように移動し，どのくらいの期間，海洋に留まっているのかを知ることは，地球環境問題について考える上で非常に重要である．しかしながら，海洋の中深層における時空間的に密な観測は難しく，物質循環のメカニズムや輸送時間に関する我々の理解は少ない．これまでの海洋の中深層における輸送時間の推定方法としては，化学トレーサーが利用される場合が多かった．例えば，溶存酸素は海面付近で飽和濃度に近い値を示すが，海洋内部に沈み込んだ後は酸素の供給が無く，生物活動やバクテリアによる有機物の分解によって酸素が使用されるため，その濃度は時間と共に減少すると考えられている．このような生物・化学的性質を利用し，数少ない観測から得られたトレーサーの値を比較することで，各海域における海水の大まかな輸送時間(あるいは滞留時間)を見積もっている．しかしながら，観測データの少ない海域の滞留時間を知ることは容易ではない．

そこで，本研究では三次元の海洋循環モデルに時間の情報を持たせたトレーサーを組み込むことで，モデル領域の各格子点における滞留時間を直接計算する方法を紹介する．さらに，この方法を日本海の中層に適用し，得られた結果について論じる．

*1 応用力学研究所 力学シミュレーション研究センター

2. 日本海の概要

日本海は日本列島，ユーラシア大陸，樺太によって囲まれた半閉鎖的海域で，その平均水深は約1350 mである(Fig. 1)．日本海中央部には大和堆と呼ばれている浅海域が存在し，北部の日本海盆と南東部の大和海盆，及び南西部の対馬海盆を隔てている．日本海と他の海域とを連絡する海峡は対馬海峡，関門海峡，津軽海峡，宗谷海峡，間宮海峡の5箇所であり，いずれの海峡も水深は200 mより浅い．このことから，日本海の中深層水は他の海域の中深層水と直接的に交換することが難しく，日本海で独自に形成されていると考えられている[1]．特に日本海の水深500 m以深の海水は水温0～1℃，塩分約34.07 psu前後でほぼ均一な特性を持ち，日本海固有水(Japan Sea Proper Water)と呼ばれている[2]．

日本海の表層と日本海固有水の間(水深約300 m付近)には塩分極小で特徴付けられる日本海中層水(Japan Sea Intermediate Water:以後JSIWと省略)が存在する[3) 4)]。このJSIWは溶存酸素極大を伴うことがあり，日本海北部において冬季の海面冷却により表層

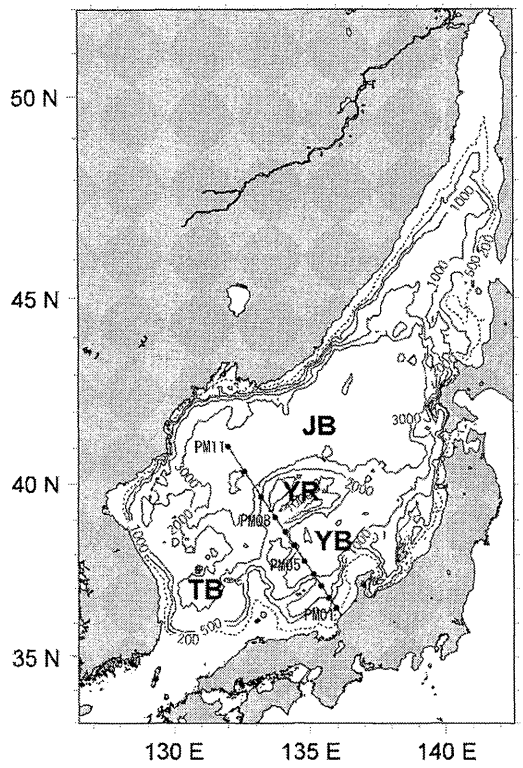

Fig.1. Bottom topography of the Japan Sea (JB: Japan Basin, YB: Yamato Basin, TB: Tsushima Basin, YR: Yamato Rise). Thin line with circles shows PM-line made for Fig. 2.

から中層へ海水が沈み込みことで形成され，日本海南部へ輸送されていると考えられている．本研究では輸送時間トレーサーを用いて，このJSIWが存在する密度層の滞留時間について計算を行う．

3. 数値モデル

3.1 MICOM

本研究では米国マイアミ大学で開発された等密度面座標モデル(Miami Isopycnic Coordinate Ocean Model: MICOM)を使用する[5)6)7)8)]。このモデルの特徴としては，海洋の鉛直密度成層した構造を一定密度層の重ね合わせとして表現し，鉛直座標に密度が用いられていることにある．各等密度層は浅水波方程式に似た力学方程式によって支配される．このような数値モデルを用いる利点としては，移流の数値的表現による偽の非等密度面混合が発生しない点にある．さらに，大規模スケールの海洋混合過程は等密度面に沿って発生すると考えられ，等密度面座標モデルはこの混合過程をより良く再現できることが期待される．そして，大気からの外力(風，熱塩)に起因する水塊形成と内部の等密度層とを関連付けるために，海洋表層のみには密度可変のバルク型混合層モデル[9)]が適用されている．

等密度面における渦粘性係数と渦拡散係数は水平方向の距離:Δxに比例する形で与えられ，本研究では渦粘性係数が$1.0\times\Delta x$ cm^2/s，渦拡散係数が$0.1\times\Delta x$ cm^2/sである。非等密度面拡散係数は浮力振動数:Nに反比例する形で与えられ，本研究では$3.0\times 10^{-4}/N$ cm^2/sを用いた．側面境界についてはno-slip条件が適用される．

モデル解像度は緯度・経度共に1/5°格子，鉛直には7層(混合層と6つの等密度層)を取り，2層目以降の密度は，26.00, 27.00, 27.30, 27.32, 27.34, 27.37 σ_θ(σ_θは海面基準のポテンシャル密度)とした．JSIWに相当する密度層は4層目である．

日本海の海底地形にはMIRC[10)]とSKKU[11)]のデータを用いてモデル用海底地形を作成した．風応力，熱フラックス，淡水フラックスに関しては，1992年11月1日から2000年10月31日までのECMWFの6時間ごとの予報値から気候学的月平均値を計算し，モデル格子点に内挿している．熱フラックスと淡水フラックスに関しては，Barnier *et al.* [12)] のフラックス・補正混合スキームを用いて，モデル混合層の水温と塩分の値をそれぞれ，海面水温と海面塩分の観測データに緩和している．海面水温データは人工衛星データ[13)]を気候学的月平均にしている．海面塩分データは，Luchin *et al.* [14)]によって作成された長期月平均値塩分データを使用している．流入条件は対馬海峡を横断する客船に取り付けられたADCPの長期観測から得られた流量の推定式[15)]を使用した．流入域における水温と塩分の値は，FRDACのデータを当てはめた．流出条件としては、津軽海峡と宗谷海峡でそれぞれ、対馬海峡における流入量の2/3と1/3を流出させ，水温と塩分に関しては放射条件とした．なお宗谷海峡と関門海峡については海峡幅が狭いために，閉じた境界として扱った．

静止状態から上述した外力を与えて100年間モデルを駆動し，その結果について解析を行う．

3.2 輸送時間トレーサー

これまで輸送時間トレーサーは海洋内部に溶け込んだフロンやトリチウムなどの人為的な化学物質を海洋循環モデルで再現する方法として開発，利用されてきた[16)17)]．このトレーサーの取り扱いに関しては Khatiwala *et al.* [18)]で詳細に述べられているが，ここでは本研究での適用例を挙げて簡単に説明する．

初期状態として各等密度層のトレーサー濃度は0とし，混合層にはモデル積分時間に相当するトレーサー濃度が常に満たされている状態を仮定する．混合層が浅くなったとき(混合層から下部の等密度層に海水が沈み込んだとき)に，その沈み込んだ(新しく水塊が形成された)領域に，沈み込んだ瞬間の濃度(経過時間)を持ったトレーサーが等密度層に加わる．このトレーサーは水温・塩分の移流拡散方程式と同じ式に従って，水塊形成域から他の領域に輸送される．等密度層に輸

送時間トレーサーが加わる手段は混合層からの加入か、上下層からの非等密度面輸送のみである。

このような条件下で、各モデル格子点での滞留時間: Rと輸送時間トレーサー濃度: Cの関係式は次のようになる。

$$R(x,y,\sigma,t)=t-C(x,y,\sigma,t) \qquad (1)$$

(1) 式は，モデル積分時間から輸送時間トレーサーの値を差し引くことで各格子点における滞留時間の瞬間値が計算できることを意味している．例えば，1年間移流も拡散もしない，物質輸送が停滞した点があると仮定すると，Cの値は一定であるが時間tが1年分増えるために、ここでの滞留時間Rは単純に1年分増加するこ

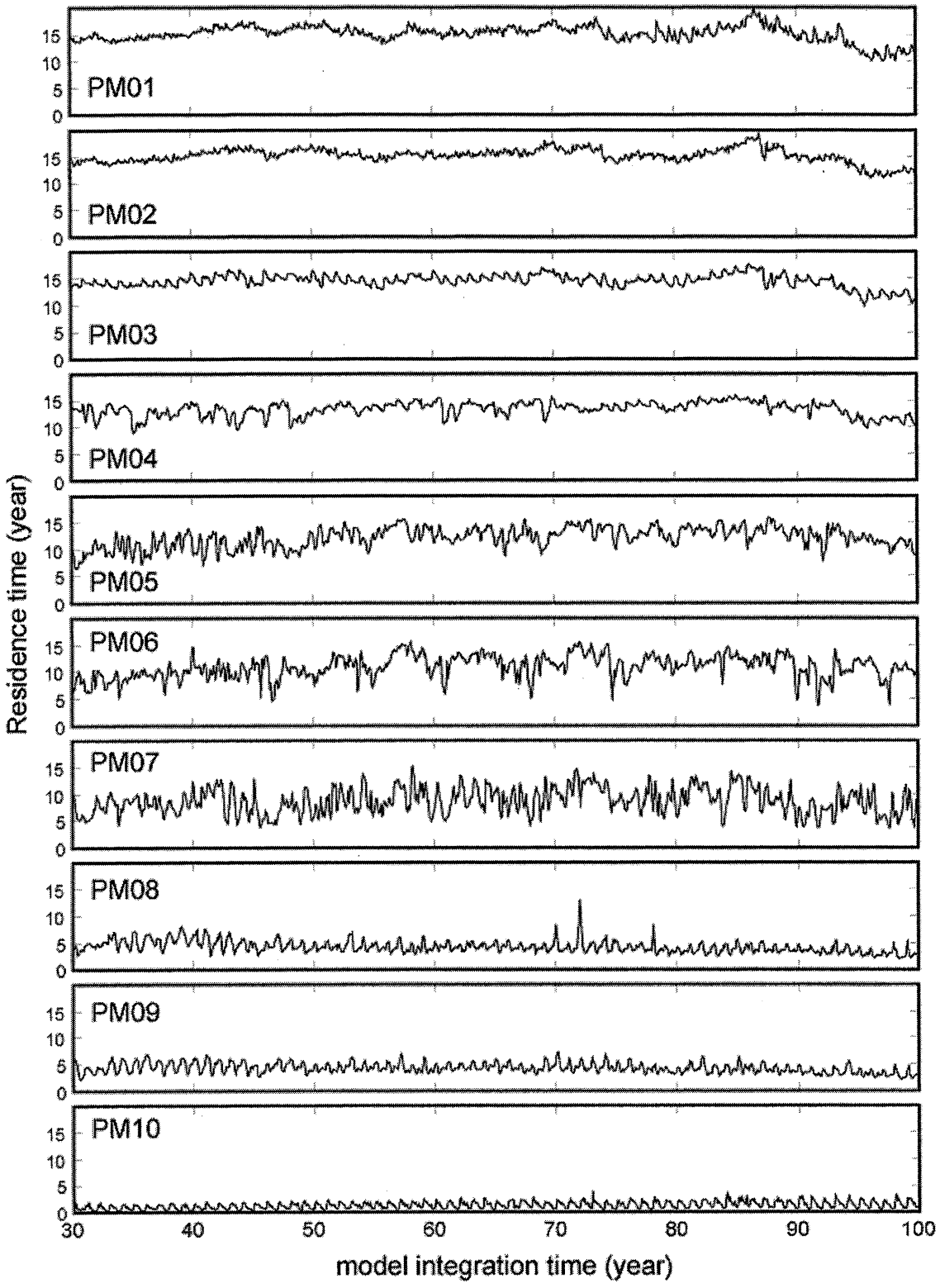

Fig.2. Time series of the residence time for each points of PM-line (Fig. 1).

とになる．逆に，滞留時間Rが変化しない点が存在するなら，混合層からの輸送時間トレーサーの供給や移流･拡散によって，1年分相当の輸送時間トレーサー濃度がこの領域に運ばれてきたことになる．このような受動トレーサーを数値モデルに組み込むことにより，各格子点での滞留時間を陽に計算することが可能となる．

4. 結果と考察

モデル積分開始後30年目から100年目のPMライン(Fig. 1参照)の各点における滞留時間の時系列をFig. 2に示す．なお、PM11に関しては冬季に4層目の層厚が0になり，輸送時間トレーサーを表現できなくなるため，検証としては使用しない。日本沿岸の若狭湾付近に位置しているPM01とPM02は、季節変動以下の短周期変動が卓越していて，またその変化幅も小さいことから，物質輸送が連続的に行われていることが示唆される．PM03では季節変動が卓越していることから，海水交換が間欠的に行われていると思われる．モデル積分開始後30年目から100年目までのPM01～03の滞留時間は10年から20年の間で変化している．次に，大和海盆に位置しているPM04～07では滞留時間の変動幅が大きいことから，新しい水と古い水が頻繁に入れ替わっている領域であるといえる．積分期間中のこれらの領域における滞留時間は5年から15年の間で変化している．最後に，大和堆西部に位置しているPM08～10では季節変動が卓越し，毎年決まった時期に新しい水が供給されていることを示唆している．これら3点における滞留時間は1年から10年の間であり，PM01～07と比べて短時間で海水が交換されていることが分かる．このように，滞留時間は各位置と時間で大きく変化していて，ある瞬間で得られた化学物質の観測データを基にした滞留時間の推定は，その平均的な姿を捉えていない可能性がある．

Figure 2から，各点での滞留時間は時々刻々と変化をしているが，長期平均的に見ると滞留時間はほぼ定常状態に達していると思われる．そこで，モデル積分90年目から100年目のPMラインにおける平均滞留時間をTable 1にまとめた．PMライン上で最も滞留時間が短かった点は，PM10で1.47年となり，逆に最も滞留時間が長かったPM02では13.23年となった．日本海北部に位置する点で滞留時間は短く，南部の点で滞留時間が長い傾向が見られる．特に，隣り合うPM07とPM08の間には平均滞留時間で約4年の差があることから，この間で物質輸送の境界があるように思える．

モデル積分100年目の日本海4層目における年平均滞留時間をFig. 3に示した。最も滞留時間が短い、つまり海水の新しい領域は日本海北部のロシア沿岸域から北朝鮮沿岸に大陸に沿って存在し，また，40°N, 130°E付近から南東方向に舌状に伸びている様子が伺える．そして，滞留時間が4年以下の短い領域は，40°N以北の日本海北部全体に広がっている．これらの領域は日本海北部の亜寒帯循環域にあたり，ロシア沿岸域で形成した海水が，亜寒帯循環の流れに乗って反時計回りに輸送されていることがわかる．その亜寒帯循環の内部領域(41°N, 133°E付近)では，その周囲と比べて2年以上滞留時間が長くなっている．40°N以南の日本海南部では，大和堆西部は比較的滞留時間が短く6～8年，対馬海盆で10～12年，大和海盆では12～14年，そして能登半島周辺の沿岸域で最も滞留時間が長く，約16年という結果になった．

Seung and Kim [19]では本研究と同じMICOMを用い

Table 1 Mean and standard deviation (S.D.) of the transit time for the model year 90th to 100th at the PM-line.

Station	Residence time (year)	
	Mean	S.D.
PM01	12.86	1.68
PM02	13.23	1.38
PM03	12.87	1.44
PM04	12.28	1.38
PM05	11.69	1.41
PM06	9.98	1.98
PM07	7.29	2.21
PM08	3.17	0.73
PM09	3.24	0.70
PM10	1.47	0.77

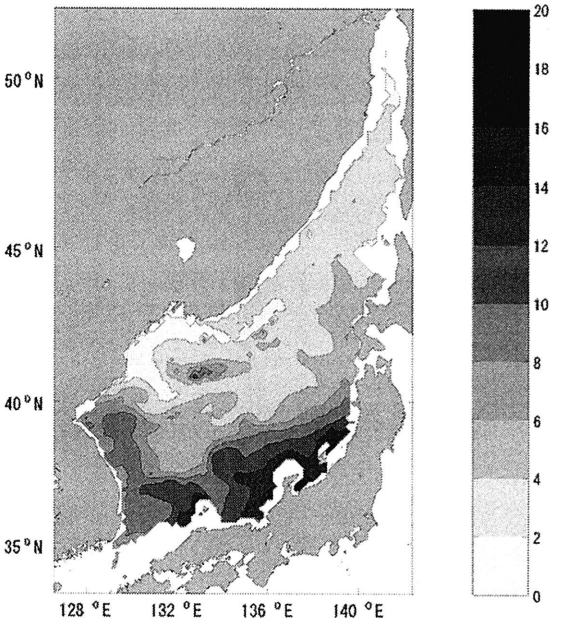

Fig.3. Residence time distribution for 4th layer.

いて，JSIWの滞留時間を推定している．しかし，彼らの推定方法は，混合層から下層(等密度層)に海水が移動したときに飽和量"1"の濃度トレーサーを加入させ，全領域のトレーサー濃度が飽和するまでの時間を調べることにより，滞留時間を推定する方法である．彼らの推定ではJSIWに相当する密度層の滞留時間は約10年となり，本研究で最も滞留時間の長かった能登半島沿岸域の約16年よりやや短い推定結果となった．この差は，モデルの解像度の違い(Seung and Kimのモデルは水平1/2°格子，鉛直4層)や外力データの違いなどによって生じたと考えられる．なお，単位濃度トレーサーで長期の時間積分を行うと，各等密度層の濃度が飽和してしまうため，輸送時間の変動を求めることはできない．

4. 結言

時間の情報を持たせたトレーサーを等密度面座標モデルに組み込むことによって，海洋の中深層に沈み込んだ海水の各格子点における輸送時間を計算する方法を採用した．輸送時間トレーサーの有効性を確認するために，等密度面座標モデルを日本海に適用し，日本海中層水の滞留時間を推定した．日本海の各海域で滞留時間は時々刻々と変化していて，時空間的に疎な化学物質の観測を基に推定した滞留時間は，平均的な姿を捉えていない可能性がある．本研究における日本海中層水の平均滞留時間は，ロシアと北朝鮮の沿岸域で0～2年，日本海北部の亜寒帯循環域で2～4年，大和堆西部で6～8年，対馬海盆で10～12年，大和海盆で12～14年，そして能登半島周辺の沿岸域で約16年となった．

謝辞

平成16年度応用力学研究所共同利用研究「日本海における物質循環の数値シミュレーション」を通じて有益な討論を行った。また、科学振興調整費の援助を受けた。関係者・関係機関に深く感謝致します．

参考文献

1) Nitani, H. : On the deep and the bottom waters in the Japan Sea. In: *Researchs in Hydrography and Oceanography*, ed. by D. Shoji, Hydrographic Department of Japan, Maritime Safety Agency, Tokyo, 151-201, 1972.
2) 宇田道隆: 日本海及び其の隣接海区の海況．水産試験場報告, **5**, 57-190, 1934.
3) 宮崎道夫: 日本海の熱収支(海況予報の研究Ⅰ)，北海道区水産研究所報告, **4**, 1-54, 1952.
4) 宮崎道夫: 日本海の水塊について，北海道区水産研究所報告, **7**, 1-65, 1953.
5) Bleck, R. and D. B. Boudra. : Wind-driven spin-up in eddy-resolving ocean models formulated in isopycnic and isobaric coordinates. *J. Geophys. Res.*, **91**, 7611-7621, 1986.
6) Bleck, R. and L. Smith. : A wind-driven isopycnic coordinate model of the north and equatorial Atlantic Ocean. 1. Model development and supporting experiments. *J. Geophys. Res.*, **95**, 3,273-3,285, 1990.
7) Bleck, R., C. Rooth, D. Hu and L. T. Smith. : Salinity-driven thermocline transients in a wind- and thermocline-forced isopycnic coordinate model of the North Atlantic. *J. Phys. Oceanogr.*, **22**, 1486-1505, 1992.
8) Bleck, R., H. P. Hanson, D. Hu and E. B. Kraus. : Mixed layer-thermocline interaction in a three-dimensional isopycnic coordinate model. *J. Phys. Oceanogr.*, **19**, 1417-1439, 1989.
9) Kraus, E. B. and J. S. Turner. : A one-dimensional model of the seasonal thermocline. Part II: the general theory and its consequences. *Tellus*, **19**, 98-105, 1967.
10) 海洋情報研究センター: JTOPO1- 1分格子間隔の北西太平洋海底地形データ，日本水路協会. CDROM. 2003
11) Choi, B. H., K. O. Kim, ad H. M. Eum. : Digital bathymetric and topographic data for neighboring seas of Korea. *J. Korean Soc. Coastal Ocean Eng.*, **14**, 41-50. 2002. (in Korean with English abstract)
12) Barnier, B., L. Siefridt, and P. Marchesiello. : Thermal forcing for a global ocean circulation model using a three-year climatology of ECMWF. *J. Mar. Syst.*, **6**, 363-380, 1995.
13) Sakaida, F., J. Kudoh, and H. Kawamura. : A-HIGHERS- The system to produce the high spatial resolution sea surface temperature maps of the Western North Pacific using the AVHRR/NOAA. *J. Oceanogr.*, **56**, 707-716, 2000.
14) Luchin, V. A., N. A. Rykov, V. V. Plotnikov, A. N. Maniko, S. Y. Mogyagina and P. J. Tischenko. : Hydrology of water masses, In: *Hydrometeorology and Hydrochemistry of Seas, Vol. 8, Japan Sea, Issue 1: Hydrometeorological conditions, Part 4*, pp. 157 - 256. ed. by Terziev F. S., Sankt-Petersburg, Hydrometeoizdat. 2003. (in Russian)
15) Takikawa, T., J.-H. Yoon, and K.-D. Cho. : The Tsushima Warm Current through the Tsushima Straits estimated from ADCP data by ferryboat. *J. Phys. Oceanogr.*, 2004. (submitted)
16) Gray, S. L. and T. W. Haine.: Constraining a North Atlantic Ocean general circulation model with chloroflurocarbon observations. *J. Phys. Oceanogr.*, **31**, 1157-1181, 2001.
17) Waugh, D. W., T. M. Hall and T. W. N. Haine.: Relationships among tracer ages. *J. Geophys. Res.*, **108**, 3138-3154, 2003.
18) Khatiwala, S., M. Visbeck and P. Schlosser.: Age tracer in an ocean GCM. *Deep Sea Res., Part I*, **48**, 1423-1441, 2001.
19) Seung, Y. H. and K. J. Kim. : Estimation of the residence time for renewal of the East Sea Intermediate Water using MICOM. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, **32**, 17-27, 1997.