

黒潮の蛇行・直進による西日本南岸の水位変動量の推定

駒井克昭¹・日比野忠史²・松本英雄³

黒潮の平均流路の蛇行・直進が西日本南岸の水位変動量に及ぼす影響について、80年代以降の約20年間を期間に分けて検討した。黒潮の位置ならびに黒潮に沿った水理量の分布・変化特性を計算条件とするため、黒潮流路ならびにそれに沿った水理量を3角級数でモデル化する解析法を構築した。このモデルを用いて期間別の平均的な黒潮～西日本南方海域の流れ場の解析を行った結果、計算による水位分布ならびに各期平均の瀬戸内海開境界における水位差の変動量はTOPEX/PoseidonとJason-1による実測結果を表せており、黒潮流路の蛇行・直進が瀬戸内海への外海水流入に影響を及ぼしていることが推測された。

1. はじめに

沿岸域の防災対策や水環境保全・管理には潮汐や気象擾乱による内湾規模の流動把握に加えて、外洋の流れが沿岸域の流動に及ぼす影響を明らかにすることの重要性が認識されつつある。しかし、現状では地球規模の気候変動や外洋の海象変化に起因する沿岸の潮位変動の定量予測手法は確立されておらず、異常潮位が重なった場合を想定したときの既設海岸施設の防災効果ならびにハード・ソフト面での災害軽減対策を具体的に示すことが難しい。また、沿岸域の水環境管理においても外洋起源の現象による影響の予測が必要であり、黒潮流路の違いが沿岸域の流れや水質に及ぼす影響等の定量評価手法の構築が課題である。

本論文では、黒潮流路の蛇行・直進が西日本南岸（瀬戸内海開境界）の水位に及ぼす影響の定量評価ならびに解析法の検討を目的としている。まず、実測値から推定される黒潮と西日本南岸水位の定性的な関係について数年スケールの変動特性を概説する。次に黒潮～西日本南方海域における流れ場の境界条件として、黒潮の位置ならびに黒潮に沿った水理量（流速、水位、水温、および塩分）の約20年間の経年変動ならびに分布特性を期別に明らかにし、これらを計算条件とするための黒潮のモデル化を行う。最後に、黒潮～西日本南方海域における水位変動量を期間に分けて推定し、黒潮の平均流路の蛇行・直進が瀬戸内海開境界に及ぼす影響を検討する。

2. 瀬戸内海開境界水位と黒潮の流路変動

瀬戸内海での流れ場は開境界条件となる紀伊水道と豊後水道の水位によって左右される。串本（紀伊水道東南端、図-1）と土佐清水（豊後水道東南端、図-1）の水位

差は、80年代に比較的に小さく、90年代には逆に大きい傾向にある。黒潮流路の蛇行・直進の指標とされる串本-浦神間の水位差や瀬戸内海開口部の水温の変動等から、黒潮の流路と紀伊水道南端と豊後水道南端の水位差は関係がみられ、瀬戸内海への外海水流入時の水位勾配のみを考慮すると、80年代に豊後水道から紀伊水道、90年代には紀伊水道から豊後水道への流向が強まるということが予想される（例えば、Hibinoら(2003)）。以下では、数年スケールの黒潮流路の蛇行・直進が西日本南岸水位に及ぼす影響を検討するため、Hibinoら(2003)に従って、82～88年（期間①：蛇行期）、89～93年（期間②：遷移期）、94～99年（期間③：直進期）として考察を行う。

3. 黒潮に沿った水理量とモデル化の方針

黒潮が西日本南岸水位に及ぼす影響を力学的に整理し、黒潮に沿った水理量の経年変動ならびに分布特性について数年スケールの期間に分けて考察する。

黒潮から西日本南岸までの海域における運動量方程式を考えれば、沿岸水位は(i)黒潮位置、(ii)黒潮から沿岸までの間を通過する流量、(iii)黒潮に沿った水位、(iv)黒潮から沿岸までの密度分布、等の条件から決まる。したがって、沿岸水位の解析法としては各条件の違いを考慮できることが必要である。そこで、解析では以下のように各条件を考慮する。(i)(iii)は実測データをもとに直接に与え、(ii)は黒潮自身の(ii')流速を境界条件として流れ場を解くことで推定する。(iv)は黒潮域および沿岸域の実測水温・塩分を初期条件として移流・拡散を解くことで推定する。以下では、3期別の平均的な黒潮位置(i)とそれに対応する(ii)～(iv)の特徴を示す。

(i)黒潮の平均的な流路の位置情報として海上保安庁から発表される海洋通報による流軸データを用いる。図-1は3期別の平均流軸を示している。平均流軸は紀伊半島南方で最大約0.6°N変化するが、豊後水道南方では変化は小さい。解析では紀伊半島南方で直進あるいは蛇行する黒潮の流路を計算領域の南側境界としてモデ

1 正会員 修(工) 広島大学助手 大学院工学研究科

2 正会員 博(工) 広島大学助教授 大学院工学研究科

3 正会員 中国地方整備局 広島港湾空港技術調査事務所 所長

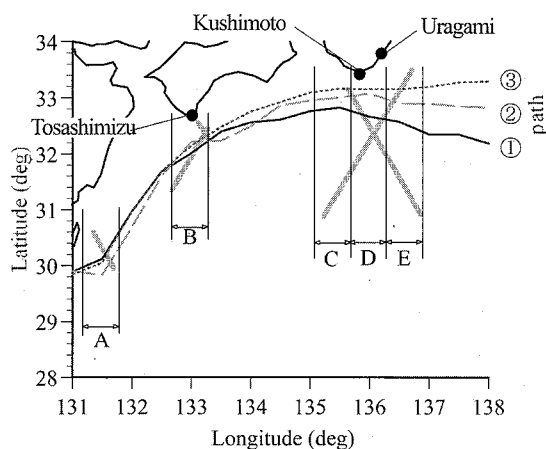


図-1 期間平均の黒潮流軸ならびに TOPEX/Poseidon・Jason-1 の水位データ測線 (太線). Zone-A ~ E: 水位抽出の区域.

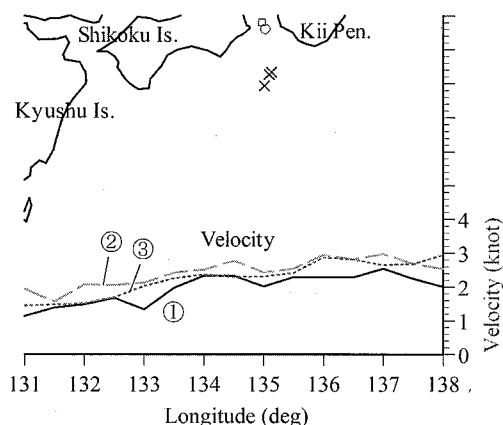


図-2 期間平均の黒潮に沿った表面流速. ○と×は図-5で示される紀伊水道および黒潮の水温・塩分データの抽出点.

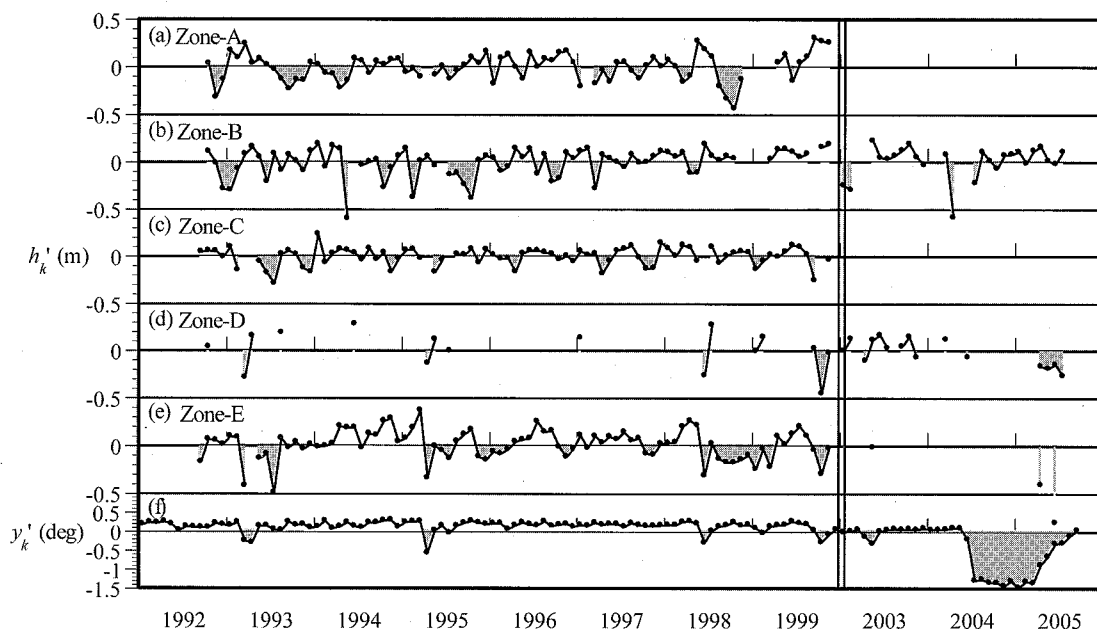


図-3 92~05年の(a)~(e)Zone-A~E上における黒潮に沿った平均水位からの偏差(h'_k),ならびに(f)Zone-D(136° E)の平均流軸緯度からの偏差(y'_k)の経年変化. (a)~(e)では水位低下時, (f)では黒潮の蛇行時の偏差を塗りつぶして示している

ル化する.

(ii) 黒潮に沿った流速は JODC (日本海洋データセンター) で提供される海流データから求める. ここでは, 各経度の黒潮位置から $\pm 0.25^\circ \text{E}$, $\pm 0.1^\circ \text{N}$ の範囲の各月表面流速データを期別平均して流速を求めた. 図-2 は 3 期別の黒潮に沿った平均流速を示している. 平均的には期間①が最も流速が小さいが, 3 期間ともに東進にしたがって紀伊半島南方で約 1 knot 加速している. 地衡流を仮定すれば, 流速の大きい紀伊半島南方では流軸

に直交する圧力勾配も大きく, 流路の蛇行・直進に伴う水位変化が大きいたことが予想される. したがって, 境界条件としては東進しながら加速する特性を表すように流速分布をモデル化する.

(iii) 黒潮に沿った水位は地球観測衛星 TOPEX/Poseidon と Jason-1 による水位データから求めた. まず, 図-1 に示す黒潮流軸と衛星による水位データ測線が重なる点から $\pm 0.25^\circ \text{E}$, $\pm 0.1^\circ \text{N}$ の範囲内の水位データを抽出し, Zone-A~E に経度ごとに領域を区分し

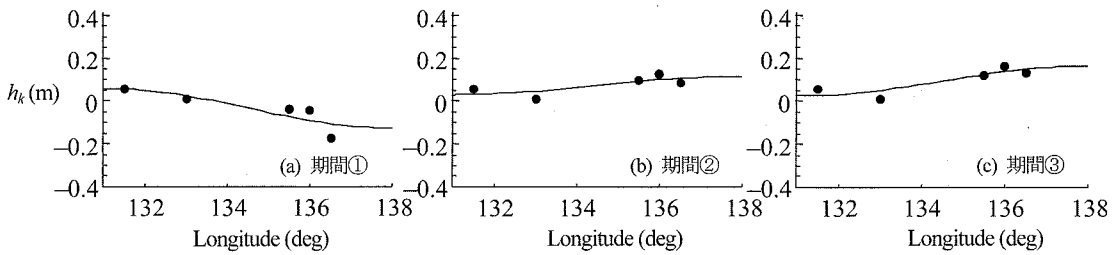
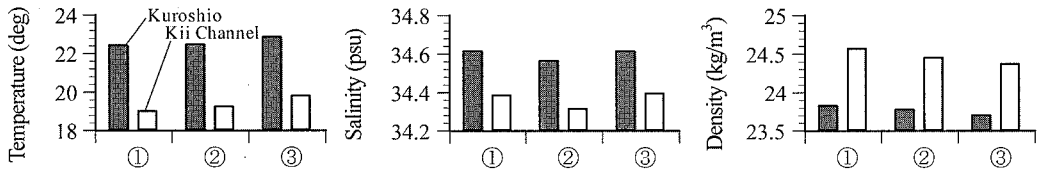


図-4 3期別の流軸上での推定水位分布(●). 実線: 近似曲線

図-5 3期別の黒潮(図-2の×)と紀伊水道(図-2の○, 33.7°N, 134.9°E)の水深平均水温, 塩分および密度(σ_t)

て月平均流軸水位を求める。ここでは平均流軸緯度からの偏差を y_k' , 流軸に沿った平均水位からの偏差を h_k' とする。図-3 は 92~05 年の (a)~(e) Zone-A~E における h_k' , ならびに (f) Zone-D (136°E) における y_k' の経年変化を示している。 h_k' は (a) Zone-A~B では y_k' との対応がほとんどみられないが, (b) Zone-C~E では蛇行時に低下し, 直進時に上昇する傾向がみられる。九州沖の Zone-A~B での水位変動が紀伊半島沖の流軸変動と関係が弱いのは, 九州沖で発生する小蛇行はほぼ毎年発生し, 紀伊半島沖の大蛇行の形成に先立つ現象であるが, すべての小蛇行が大蛇行に移行していくものではない(関根, 1985) ためと考えられる。(a) Zone-A~B に比べて (b) Zone-D~E では相関係数が約 0.6 であり流路との関係があると考えられる。最小 2 乗法で求められた h_k' と y_k' の線形的な関係は以下のとおりである。

$$h_k'|_c = 0.34y_k' + 0.06 \text{ (m)} \quad (1)$$

$$h_k'|_d = 0.42y_k' + 0.09 \text{ (m)} \quad (2)$$

$$h_k'|_e = 0.63y_k' - 0.02 \text{ (m)} \quad (3)$$

これより, 紀伊半島の南西沖 (Zone-C) から南東沖 (Zone-E) にかけて黒潮の蛇行・直進に対する水位偏差の変化率が 0.34 から 0.63 m/deg に増加することがわかる。さらに, 期間①~③の y_k' (-0.31, 0.10, および 0.18°N) を用いて式 (1)~(3) で推定された黒潮に沿った水位およびその近似曲線は図-4 のとおりである。紀伊水道南方では平均的に期間①では約 0.15 m 低下し, 期間②・③では約 0.15~0.20 m 上昇している。したがって, 境界条件としては, 東進するに従って黒潮に沿った水位が変化する傾向を表すようにモデル化する。

(iv) 密度場は比較的によくのデータが得られる紀伊水道と黒潮域の水温および塩分の海洋観測結果 (JODC および水産庁浅海定線データ) を用いて推定する。図-2

には水温・塩分データの抽出地点を○(紀伊水道: 134.9°E, 33.7°N) と×(黒潮域)で示している。各地点での水深 100 m までの期別平均水温, 塩分および密度を図-5 に示す。黒潮域では水温・塩分の変化は小さく(差は約 0.5°C, 約 0.1 psu 以内), 黒潮域と紀伊水道の密度はともに期間①から③へ減少し, 密度差も期間①から③へ約 0.1 kg/m³ 減少傾向にある。解析では, 黒潮と沿岸域の各期における水温・塩分として, ここで求められた値を用いる。

4. 黒潮のモデル化による流れ場の解析法

前述した黒潮に沿った水理量を与条件とするための流れ場の解析法を示す。計算領域は黒潮~瀬戸内海を含む西日本南方海域である。

流れ場は回転座標系の運動方程式および連続式を解くことで求める。座標軸は東向きを x , 北向きを y とする。鉛直方向には静水圧近似し, コリオリパラメータ f はベータ平面近似により緯度方向に変化させる。運動方程式の移流項は 1 次精度風上差分, 粘性項は 2 次精度中心差分, 圧力項は 2 次精度中心差分を用いて直交スタガード格子上で離散化する。海面での大気圧は一定として近似し, 水位は運動学的境界条件から求められる。渦動粘性係数は水平方向にスマゴリンスキーモデル, 鉛直方向にリチャードソン数を用いたモデルで与える。水温・塩分分布は移流・拡散方程式により計算し, 密度は海水状態方程式により求める。

黒潮の位置は期間別の平均流軸位置(図-1)から最小 2 乗法により経度に関する三角級数として近似関数を求め, 解析領域の南側境界位置とする。ここでは, 蛇行・直進の形に良く適合した式 (4) でモデル化する。

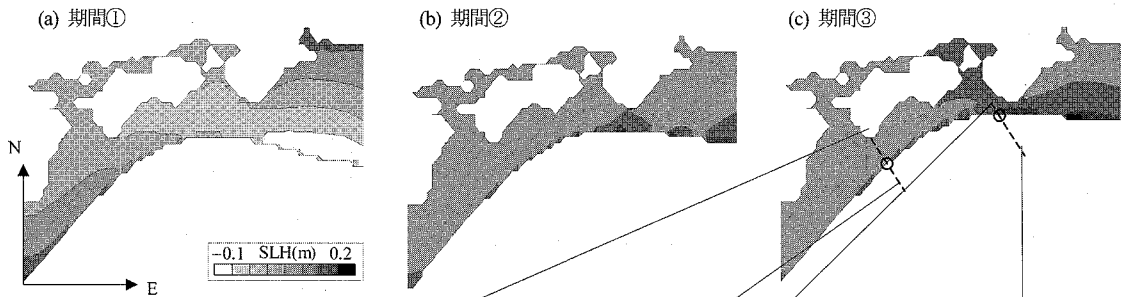


図-6 計算水位コンター. (c) 破線は図-7 で示す TOPEX/Poseidon の水位データ測線.

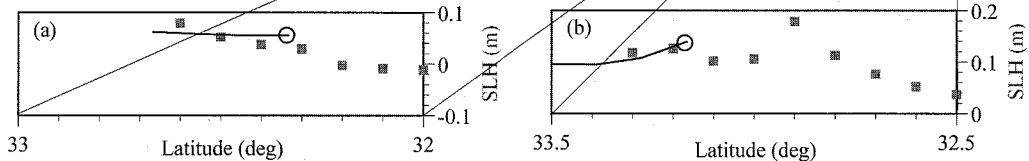


図-7 期間③における(a)土佐清水沖と(b)串本沖の衛星軌道上の実測および計算水位分布. 実線: 計算, ■: 実測, ○: 黒潮流軸位置.

$$y_k = y_0 + \sum_{n=1}^2 y_n \cos \frac{n\pi x}{L} \quad (4)$$

ここに, y_k : 黒潮流軸位置, L : 経度方向の波長 (計算領域の波長), y_0, y_n : 定数である. 解析では黒潮の流速・水位等の水理量は境界条件としてここで定められる流軸に沿って与えられる.

黒潮の流速は図-2 で示された期間別の流速分布から最小 2 乗法により経度の三角級数の形で近似関数を求め, これを流軸に沿って与える.

黒潮の水位は図-4 で求められた期間別の 5 点の推定水位から, 最小 2 乗法により経度の三角級数の形で近似関数を求め, これを流軸に沿って与える.

さらに, 運動方程式中の黒潮によるせん断応力, 移流もモデル化する. ここでは, 計算格子と無関係に黒潮に沿った水理量を与えるため, 隣接格子点までの距離 Δn を考慮した差分を適用することで運動方程式に考慮する. 黒潮の流れに沿うせん断応力 τ_s は, 黒潮と周囲の流速差に比例する形でモデル化する.

$$\tau_s = A_H \frac{q_k - q}{\Delta n} \quad (5)$$

ここに, q_k : 流軸流速ベクトル, q : 計算格子上の流速ベクトルである. 水平渦動粘性係数 A_H の算出にも隣接格子点までの距離を考慮した差分を適用する. 移流項についても同様に隣接格子点までの距離を考慮してモデル化する.

$$(q \cdot \nabla) q|_i = q_i \frac{q_{i+1} - q_k}{\Delta x + \Delta n} - \frac{|q|}{2} \left(\frac{q_{i+1} - q_i}{\Delta x} - \frac{q_i - q_k}{\Delta n} \right) \quad (6)$$

ここに, i : メッシュ番号である. 水温・塩分の移流・

拡散方程式においても同様である.

5. 黒潮流路の蛇行・直進による沿岸水位変動量の推定

前章で示された解析法により, 黒潮～西日本南方海域の水位分布, ならびに瀬戸内海の開境界水位である紀伊水道南端と豊後水道南端の水位差について期別平均で推定し, 黒潮の蛇行・直進の影響を検討する.

計算は静水状態から開始され, 流速を徐々に増加させながら時間積分し, 地衡流調節によって流れ場を形成する. 計算領域の初期水温および塩分は, まず黒潮域とそれ以北で実測値を一様に与え, その後に黒潮域の水温・塩分を一定に保ちながら流れ場を発達させる. ここでは海面での熱収支は考慮しない. 計算格子幅 Δx は 10,800 m, Δy は 12,700 m, Δz は 20 m としている.

なお, 比較のため Jason-1 で大蛇行が観測された 03～05 年 (期間④) の計算も加えて考察する. この期間の平均流軸偏差は -0.426°N である. なお, 期間④の黒潮の流速および水温・塩分は実測値が少ないため, 蛇行期 (期間①) のデータを仮に与えた.

(1) 黒潮～西日本南岸における水位分布特性

図-6 は黒潮～西日本南岸における期間①～③の計算水位コンターを示す. 期間①では蛇行部である紀伊半島南方沖において水位低下が強まる. また, 黒潮の蛇行・直進によって紀伊水道と豊後水道の水位の高低関係が逆転している. 期間①では豊後水道から紀伊水道, 期間③ではその逆の水位勾配が大きくなり, Hibino ら (2003) の示す実測水位の傾向と一致している.

図-7 は TOPEX/Poseidon の実測データがある期間③

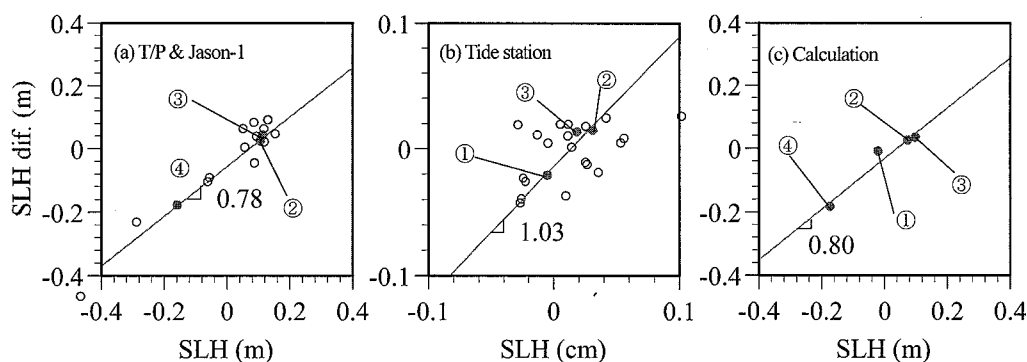


図-8 串本の水位に対する串本-土佐清水間の水位差。(a) TOPEX/Poseidon および Jason-1, (b) 検潮所, (c) 計算結果。●: 期別平均値, 実線: 期別平均値の回帰直線, ○: 各年平均値。

における(a)土佐清水南東沖と(b)串本南東沖の衛星軌道に沿った実測および計算水位分布を示している。実測では(a)土佐清水南東沖の水位勾配は沿岸に向かって上昇傾向で、(b)串本南東沖では水位勾配は沿岸に向かって低下傾向であり、計算でもそれに近い傾向が表されている。

(2) 黒潮の蛇行・直進が瀬戸内海開境界に及ぼす影響

瀬戸内海の流れ場の開境界となる豊後水道南端(土佐清水)と紀伊水道南端(串本)の水位差の変動特性について考察する。図-8は串本の水位に対する串本-土佐清水間の水位差の関係をj示している。(a)はTOPEX/PoseidonとJason-1による沿岸(検潮所)に最も近い実測値、(b)は検潮所の実測値、(c)は計算値である。(a)(c)では地球楕円体、(b)では気圧補正した20年間平均値が水位の基準である。

黒潮が紀伊水道に近づくと串本の水位が上昇する。一方、豊後水道南方沖の流路変化に伴う水位変化は小さく、直進期には串本と土佐清水の水位差は増大する。串本の年別平均の水位変動幅は(a)では ± 0.1 m超、(b)では ± 0.1 m未満である。串本と土佐清水の水位差の変化率は(a)0.78、(b)1.03であり、(c)計算結果は(a)に近い値を示している。(a)衛星データと(c)計算では水位差は最大約0.2 mと推定され、数年スケールの黒潮平均流路の蛇行・直進が瀬戸内海開境界における外海水流入に影響を及ぼすことが推測される。

6. おわりに

本論文で得られた主な結論は以下のとおりである。

(1) 黒潮に沿った水理量の特性

日本南岸水位に影響を及ぼす力学的条件として、黒潮に沿った水理量の分布・経年変動特性を明らかにした。西日本南方海域において、黒潮に沿った流速は期間①で最も小さいが、各期間とも東進にしたがって紀伊半島南

方沖で約1 knot 加速している。一方、黒潮に沿った水位は紀伊半島南方沖で期間①に約0.15 m 低下、期間②と③で約0.15~0.20 m 上昇している。期間①~③における黒潮域と沿岸域の密度差は黒潮の直進によって約 0.1 kg/m^3 減少している。

(2) 黒潮の蛇行・直進による沿岸水位の変動量の推定

黒潮に沿った水理量を境界条件として設定できる流れ場の解析法を構築し、数年スケールの平均的な黒潮流路の違いを条件として黒潮~西日本南方海域における水位変動量を推定できることを示した。計算ではTOPEX/Poseidonによる期間③での水位分布の傾向が表された。また、衛星データと計算結果から瀬戸内海開境界の水位差は最大約0.2 mと推定され、数年スケールの黒潮平均流路の蛇行・直進が瀬戸内海への外海水流入に影響を及ぼすことが推測された。

謝辞：黒潮流軸緯度は海上保安庁、日本沿岸の検潮所の水位および黒潮域の流速、水温・塩分データは日本海洋データセンター、外洋の海面高度データはPO.DAACから提供されている。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 関根義彦(1985)：黒潮大蛇行の形成過程，月刊海洋，Vol. 17, No. 5, pp. 274-282.
- 関根義彦(2004)：黒潮変動による沿岸海域への影響とその予知，月刊海洋，Vol. 36, No. 7, pp. 516-521.
- 津村健四朗(1963)：日本沿岸の平均海面およびその変動の研究。一潮位変化の地域分布一，測地学会誌，9, pp. 49-90.
- Hibino, T. and Shimizu, K. (2003)：Inter-annual fluctuation of water quality in Seto Inland Sea: Relationship with sea levels at the entrances of the Inland Sea, Coastal Engineering Journal, Vol. 45, No. 2, pp. 211-233.
- Taft, B. (1972)：Characteristics of the flow field of the Kuroshio south of Japan, Kuroshio-Its physical aspects, pp. 165-216, University of Tokyo Press.