

瀬戸内海の塩分分布に及ぼす境界水位の影響

The Effect of Boundary Sea Level Height on the Salinity Distribution in the Seto Inland Sea

金キョンヘ¹・駒井克昭²・日比野忠史³

Kyung-Hoi KIM, Katsuaki KOMAI and Tadashi HIBINO

The Seto Inland Sea, which 21 1st grade rivers are flowing into, is a semi-enclosed shelf sea connected to the Pacific Ocean through two open boundaries. It is considered that current is controlled by the difference in sea level between two boundaries accompanied by the variation of Kuroshio path. And the sea level height is varied by the distribution of salinity formed by the current characteristic. In this study, we investigated the relation of salinity distribution and boundary sea level height in the whole area of the Seto Inland Sea using field observation data and numerical calculation in order to analyze the sea level variation characteristics.

1. はじめに

黒潮内では沿岸水位よりも水位は約1m高く、水温が2～3℃高い水塊を有するため、黒潮の離着岸が日本沿岸の水位・水温分布に影響を及ぼしている (Kim et al., 2007). 四国沖では黒潮の蛇行、直進は豊後水道および紀伊水道との離岸距離に現れるために黒潮流路の変動が瀬戸内海境界での水位、水温に与える影響は大きい。特に紀伊水道沖では黒潮流路の変動に伴う離岸差が大きい (図-1), 黒潮の蛇行期と直進期では紀伊、豊後の両水道における水位関係が大きく異なる。また、瀬戸内海は狭さく部が多く、凹部に湾が形成されているため、湾・灘は閉鎖性の強い海域となっている。さらに、21の1級河川から流入する河川水 (図-1) は瀬戸内海全体の流れ方向に依存し、河川水が閉鎖性の強い湾・灘に貯留されることから、低塩分となる海域が境界水位関係によって変動している。

瀬戸内海での水位分布は密度に影響を受けることが多く、例えば、瀬戸内海水位の年変動 (約35cm) の内、密度の寄与率は1～2割程度ある (日比野ら, 2000)。水温の上昇や低塩分化する海域が流れ場に依存するために瀬戸内海の水位は一般的な上昇率になっていない。今後、瀬戸内海境界での水温や水位は確実に上昇することが予想されている。境界条件の変化が内湾環境に及ぼす影響を明らかにすることは、将来の瀬戸内海を管理していくための重要な課題である。本研究の目的は、瀬戸内海における各湾、灘での塩分分布の変動と境界水位、河川流量の関連を現地観測結果と数値計算 (流れ場) によって明らかにすることである。水温塩分の実現象は瀬戸内海総合水質調査における200地点の観測値 (宮野ら, 2000) を用

いて検討されている。

2. 瀬戸内海の小海域別の水塊特性

(1) 水温・塩分の分布特性

図-2は1982～2005年に測定された瀬戸内海の各湾灘 (図-1の破線で区分) における季節別 (2月, 5月, 8月, 10月) の上層 (水面下1m) と下層 (底面上1m) での水温～塩分関係を示している。図中の等値線は密度を表している。

密度 (塩分, 水温) の分布から、燧灘を境として西海域と東海域の水塊特性が異なることがわかる (燧灘は境界海域)。東海域 ((a)～(d)) で塩分は低くなる傾向にあり、30～34PSUの範囲で変動している。西海域 ((f)～(h)) では東海域に比較して塩分、水温の変動幅が小さく、塩分は高い状態が維持されている (伊予灘では32PSU以上)。水温の変動幅 (年較差) も10℃程度で東海

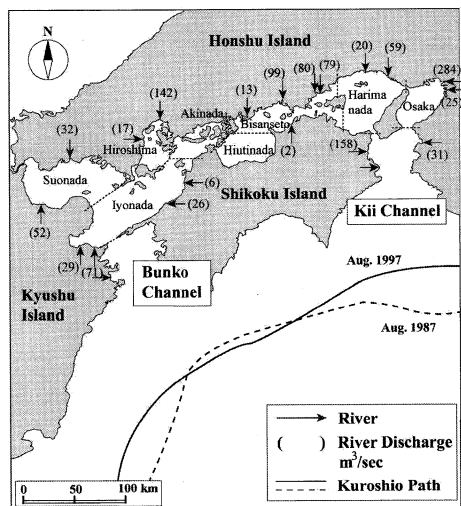


図-1 8月の河川流入量 (1987年と1997年の平均値) と蛇行期と非蛇行期の黒潮流路

1 学生会員 修(工) 広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻
2 正 会 員 博(工) 広島大学大学院助教工学研究科
3 正 会 員 博(工) 広島大学大学院准教授工学研究科

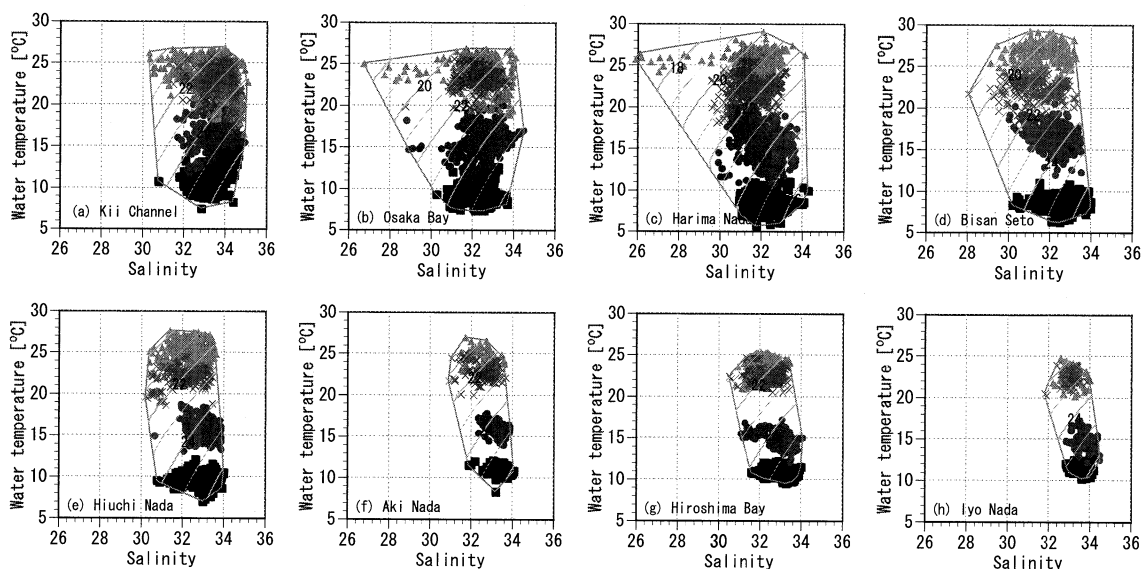


図-2 海域別の水温-塩分(上, 下層)の関係(1982~2005年)と密度(等高線)(■ 2月 ○ 5月 △ 8月 × 10月)

域よりも小さくなっていることがわかる。

大阪湾と播磨灘の両海域とも夏季に河川淡水の影響により低塩分化している海域があるのが確認できる。紀伊水道、大阪湾での塩分は黒潮系暖水塊が着岸し始める秋季に上昇し冬季に低くなる傾向にあるのに対して、その他の海域では最大塩分値は冬季に出現する傾向にある。

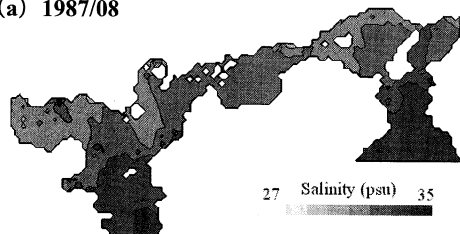
紀伊水道では一年を通じて34PSUを越える高塩分水塊が存在している。5月と8月には大阪湾にのみ34PSUをこえる水塊が存在しており、紀伊水道の高塩分水塊が出水期に大阪湾へ運ばれる流れ場が形成されていることが示唆される。

(2) 黒潮流路の変動に伴う河川淡水の滞留位置の変動

図-3は蛇行期である1987年8月と直進期である1997年8月の瀬戸内海における底層の塩分分布を示している(図-1の黒潮流路参考)。1987年蛇行期には播磨灘～備讃瀬戸が低塩分の海域になっているが、1997年直進期では備讃瀬戸～燧灘が低塩分の海域となっている。1987年と1997年の両水道の水位差と河川流入量は表-1に示されている。蛇行期と直進期の8月の水位を比較すると両水道の水位差の差は約7cmあり、この水位差の差によって瀬戸内海の塩分分布の違いが現れると考えられる。

瀬戸内海では黒潮流路によって決まる両水道での水位関係に依存した流れが形成される。通常、豊後水道から紀伊水道に向かう流れが卓越しているが、黒潮が非蛇行流路をとると瀬戸内海東側境界の水位が相対的に上昇し、西向きの流れが卓越してくると考えられる。この流れによって河川淡水の滞留海域が西方向に移動することが推測される。

(a) 1987/08



(b) 1997/08

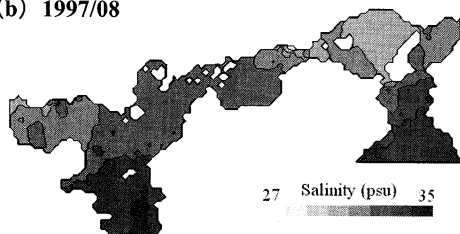


図-3 (a)1987年と(b)1997年8月の塩分分布

表-1 1987年と1997年の両水道の平均水位差と河川流入量

期間		平均水位(cm)		水位差 (cm)	平均河川流量 (m ³ /sec)
		豊後	紀伊		
1987	1年間	4.0	-4.0	8.0	739
	8月	6.3	6.8	0.5	826
1997	1年間	0.6	0.6	0	1,117
	8月	15.5	22.3	-6.8	1,625

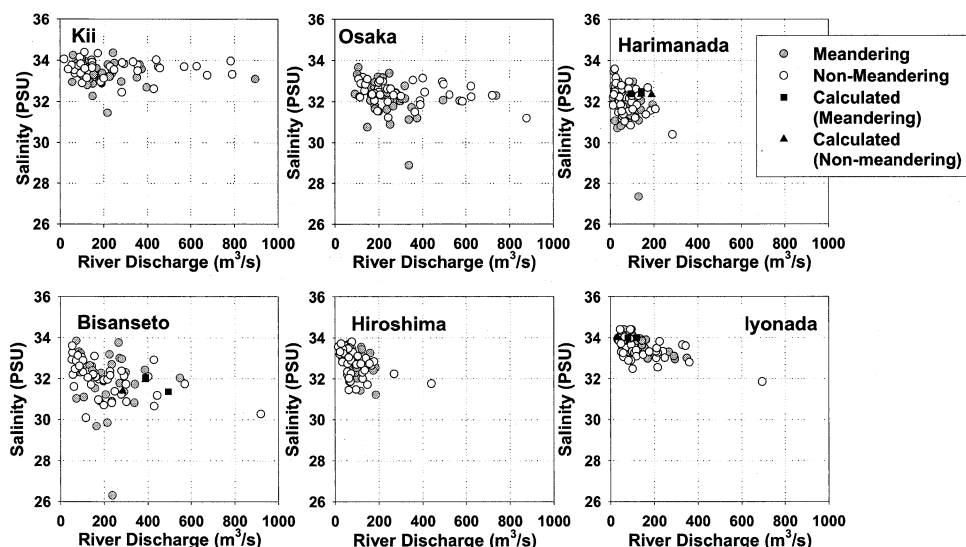


図-4 河川流量と底層での海域平均塩分の関係 (1982～2005 年)

(2, 5, 8, 10 月, 河川流量は各月とその前月との平均値)

(3) 河川流量と塩分の関係

図-4には1982～2002年の各海域に流入する河川流量と底層での海域平均塩分値の関係が示されている。河川流量は各月とその前月の平均値を用いた。紀伊水道および伊予灘では河川流量が増加してもその影響が直接塩分分布に現れておらず、32PSU以上の状態が保たれている。黒潮流路に伴う明確な特性は現れてないが紀伊水道と大阪湾では直進期に高い塩分状態になる傾向がある。備讃瀬戸では河川流出量が多く、流出に伴った塩分低下傾向がみられるが、播磨灘における流出量に伴う塩分低下量よりも小さくなる時もある。河川水の流出に伴う塩分低下量は一意的に決まらず、各海域での塩分は河川流出に直接的に依存していない。西向きの流れが卓越する場合には大阪湾に流入した河川水が備讃瀬戸まで流れることが考えられ、流入した低密度水塊は備讃瀬戸での滞留時間が長いことも考えられる。

備讃瀬戸では低塩分の範囲や濃度勾配が黒潮流路によって変動することがあるが、これは東海域で流出した河川水の滞留場所が境界の水位関係によって変わる瀬戸内海内部の流れ方向に依存するために起こる現象と考えられる。

閉鎖性が強い広島湾では海域面積に対する河川流量も多いことから、河川水の流出に伴い内海塩分の低下がみられる。また、伊予灘は高塩分の状態が維持されていることから、河川からの流出よりも豊後水道からの影響が強いことが示唆される。

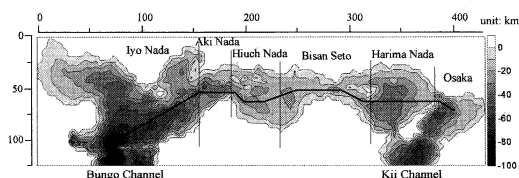


図-5 塩分と残差流の計算結果出力断面 (実線)

3. 瀬戸内海での塩分分布解析

(1) 塩分分布の再現

3次元数値解析モデル (ELCOM, Hodges et al., 2000) を用いて、瀬戸内海全域での流れ場を再現した。本章では境界水位が異なる黒潮流路の蛇行期 (1987年) と直進期 (1997年) の再現結果について議論する。境界条件は紀伊水道 (白浜～室戸) と豊後水道 (油津～土佐清水) での時間水位、海水温、塩分 (浅海定線データ; 各県水産研究所), 河川関連データ (日本河川協会) を用いた。境界水位は気象庁観測データ (JODC) を用いており、基準水位は1982年から20年間の平均水位を利用した (日比野ら, 2007)。図-5には計算に用いた地形 ($\Delta x = \Delta y = 1200\text{m}$, $\Delta t = 300\text{s}$) が示されている。

図-6～図-8の断面分布は図-5に示す断面 (実線) での塩分と東西方向の残差流の計算値が示されている。両図とも各計算年の8月16～30日の計算結果を抽出し、15日間の平均値を示している。計算の精度は塩分の観測値 (図-3) と計算値を比較することによって検証した。蛇行期、直進期とも河川水が中央海域方向に流貯留されるために播磨灘、備讃瀬戸の塩分が低下する瀬戸内海特有の塩分分布が再現されている。

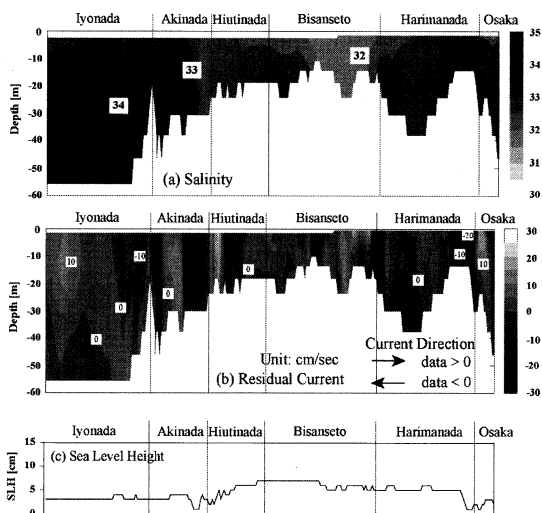


図-6 蛇行期(1987年夏)の(a)塩分分布, (b)残差流, (c)水位の計算結果(15日平均)

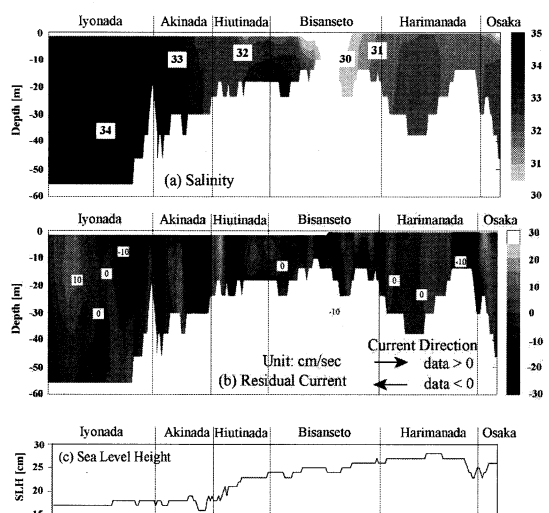


図-7 直進期(1997年夏)の(a)塩分分布, (b)残差流, (c)水位の計算結果(15日平均)

直進期(1997年)に蛇行期(1987年)に比較して備讃瀬戸中央の狭い海域に集中して塩分が低くなっているのは、直進期に相対的に西に向かう流れが強い(図-6と図-7に示した残差流図では1997年が1987年に比較して色が濃くなっている)こと、河川流出量が多いことが考えられる。備讃瀬戸では1987年に東向きの流れが強い分布が現れているが、1997年では備讃瀬戸全海域で西向きの流れが相対的に卓越している。なお、河川水流出地点(備讃瀬戸の中央部)、狭さく部(播磨灘と大阪湾の境界など)で残差流の流向が逆になっており、これらの海域では10km程度の小規模な循環流があることがわかる。

(2) 境界水位変動による塩分分布の変動特性

図-6と図-7の結果は河川流量や境界水位を含めて入力条件全てが異なることから境界水位変動による塩分の分布特性を解析するのが難しい。本節では同一な河川流入量で直進期と蛇行期の数値計算(表-2)を行って瀬戸内海での塩分分布に及ぼす境界水位の影響を考察した。

表-2 CASE1 とCASE2 の計算条件

入力条件	CASE1	CASE2
境界水位	1987年	1997年
境界水温塩分 気象(日射, 気圧…)	1987年と1997年の平均値, 河川流量は図-1に示した値 (8月)を用いている。	
河川流量		

図-8はCASE1とCASE2の塩分差と残差流(東西成分)の鉛直分布を示している。塩分差分布においてCASE1の塩分が高い海域は灰色、CASE2の塩分が高い海域はドッ

トで示した。残差流差分布はCASE2で西向きの流れの強さに合わせて濃い色で示した。

図-7(計算値)では備讃瀬戸中央の約50kmの狭い範囲が低塩分の海域になっている。直進期であるCASE2において瀬戸内海全域で西向きの流れ(残差流)が強くなるのがわかる。この流れにより備讃瀬戸で流出した河川淡水は燧灘に向かって運ばれるため、備讃瀬戸東境界でCASE2の塩分が高くなっている(図-8)。西境界でCASE2の塩分が高くなっているのは、①備讃瀬戸の西境界域は西からの流れと東からの流れがぶつかる海域であり、蛇行期の流れと直進期の流れの差が顕著に現れる海域であること、②直進期には瀬戸内海の流れの特性である東向きの流れが弱くなる(または弱い西向きの流れが形成される)ために上下層の混合が生じるためである。

備讃瀬戸中央部での計算された河川流量と塩分の結果を図-4にオーバーラップさせた。計算においても各湾灘での塩分変動は河川流出のみではなく境界水位の影響を強く受けることが示されている。

(3) 瀬戸内海に形成される水面形の特徴

瀬戸内海では低塩分化する燧灘～播磨灘で安芸灘に比較して水位が約4cm～7cm高くなる計算結果が得られた(図-6, 図-7)。この計算結果は日比野ら(2007)が示した実測値から導出された瀬戸内海の基準海面と同様の傾向を示している。

図-7に示した黒潮直進期の特性である紀伊水道での水位が高い状態(本ケースでは両水道の水位差約7cm)にも関わらず、伊予灘、安芸灘では水位上昇に対する紀伊水道水位の影響は小さくなっている。瀬戸内海では西か

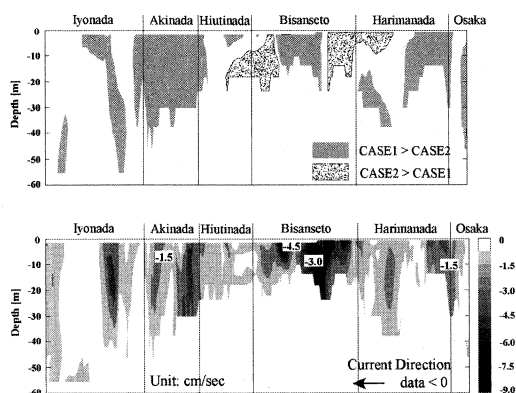


図-8 CASE1 とCASE2 計算結果の差 (1997-1987, 8月の塩分 (上) 残差流 (下) (15日平均))

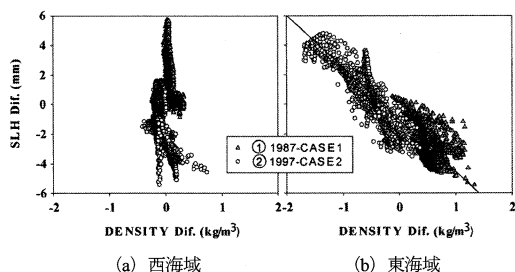


図-9 水位差と密度差の関係 (計算結果)

らの流れで東からの流れがぶつかる安芸灘～燧灘境界において紀伊水道と豊後水道間の水位差の1/2程度が生じている。

図-9は境界水位条件が各々同じである①1987年とCASE1 および②1997年とCASE2の水位差と表層と低層の平均密度差の関係を西海域と東海域に分けて示している。図では主に河川流出量が密度と水位分布に与える影響が検討される。西海域では水位変動は10mm以上であるが密度変動に依存していない。これに対し、東海域の水位は密度変化に対して線形的に変動している(密度変動にとる水位変化は $+3.5\text{mm}/-1\text{kg/m}^3$ 程度)。河川流出が起こす密度変動に伴った水位変化量は低塩分水塊の分布に従って形成される水位分布に比較して1オーダー小さくなっている。黒潮流路の変動に伴って形成される境界水位は瀬戸内海での流れ方向を決定付けるとともに、河川水の滞留位置と量によって変わる密度分布に応じた水位変動が卓越している。

4. おわりに

本論文では瀬戸内海の塩分分布に及ぼす境界水位の影響を解析するため実測データから各湾、灘の水質分布特性を検討し、数値計算による境界水位と塩分分布の関係についての数値実験を行った。以下に得られた結論をまとめる。

(1) 瀬戸内海の水塊特性 塩分は燧灘を境界として東海域で低く、西海域で高い傾向がある。蛇行期(1987年)と直進期(1997年)の塩分分布を比較すると蛇行期には播磨灘～備讃瀬戸が低塩分の海域になっているが、直進期では備讃瀬戸～燧灘が低塩分の海域となっている。これは直進期の相対的な紀伊水道で高い水位が西向きの流れを生じ中央海域へ河川淡水輸送を起こすと考えられる。各海域での塩分低下は海域に流入する河川流量に直接的に依存していないことからわかる。例えば大阪湾では河川流出量は多く、流出に伴った塩分低下傾向がみられるが、播磨灘における流出量に伴う塩分低下量よりも小さくなっている。

(2) 瀬戸内海での塩分分布解析 3次元数値解析モデル(ELCOM)を用いて、8月(出水期)の蛇行期と非蛇行期の瀬戸内海全域での流れ場と塩分分布を再現した。燧灘は西海域からの高塩分水塊と東海域からの低塩分水塊が混合する海域であり、東西を分ける海域であることが計算によっても明らかにされた。東西海域からの流れがぶつかる燧灘周辺で高い水面勾配が生じ、備讃瀬戸との境界で複雑な塩分分布を形成している。西海域での水位は主に豊後水道での水位の影響を受けているのに対して東海域では紀伊水道での水位の影響だけではなく河川流出の影響を受けている。すなわち2つの境界水位関係に依存した流れが燧灘～備讃瀬戸の低塩分の範囲を変動させていることがわかった。

参考文献

- 日比野忠史・浅井正・細川恭史(2000): 瀬戸内海における湾・灘での水質の季節変動特性, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.1036-1040.
- 日比野忠史・金キョンヘ・越智達路・水野雅光(2007): 瀬戸内海境界での水位条件の決定法, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.971-975.
- 宮野仁・日比野忠史・中山恵介・岡田知也・細川恭史・浅井正(2000): 内湾域の水環境に影響を及ぼす物理的要因に関する考察—瀬戸内海総合水質調査データによる解析—, 港湾技術研究所報告, 第39巻, 2号, pp.47-72.
- Hodges B.R., Imberger J., Saggio A., Winters K.B. (2000): Modelling basin-scale internal waves in a stratified lake, Limnology and Oceanography, Vol. 45, No.7, pp.1603-1620.
- Kyung-hoi Kim, Tadashi Hibino and Yasushi Matsunaga (2007): SEA LEVEL RELATION AT TWO OPEN SEA BOUNDARIES OF THE SETO INLAND SEA, Proceedings of the Fourth International Conference on Asian and Pacific Coasts, pp.744-757.