

瀬戸内海における湾・灘間での海水流量の推定 およびその長期変動に関する研究

駒井克昭*・竹内健太郎**・日比野忠史***・松本英雄****

瀬戸内海総合水質調査データを用いて、最近の 20 年間を対象とし、季節的に変動する瀬戸内海での流れ場について検討した。計算モデルでは、太平洋沿岸の気圧勾配と沿岸域での密度変動の特性から定めた瀬戸内海境界での水位基準、実測された気圧・密度（圧力項）を用いている。計算精度の確認は実測水位との比較によって行われ、十分な再現性で計算が行われていることが確認された。水位・水温（黒潮流路）、河川流出量の特性から分けられた 3 つの期間の流れを比較することで内海の流れ場について検討している。豊後水道から紀伊水道に向かう流れが卓越しているが、内海への河川流出量や密度分布によって流れ方向が変化することが明らかにされた。

1. はじめに

瀬戸内海低層では豊後水道から紀伊水道に向かう流れが一般的に言われているが、全域を対象とした流れの季節変動は明らかにされていない。瀬戸内海において季節的に変化する流速場を観測によって明らかにすることは困難であることから、数値計算によって流れ場を推定することが必要となる。しかしながら、数値計算による場合においても放射による海面水温の季節変動や外海水の流入による密度変化を再現するためには豊富な観測データが必要となってくる。特に、瀬戸内海のような閉鎖性の強い海域では季節的に変動する放射の影響をどの様に取り入れるかが問題となってくる。さらに、外海での境界条件として潮汐周期以上で変化する水位を与える場合においては、基準海面の取り方で流れ方向が逆転することになり、基準海面の扱い方についても検討することが必要になる。

本研究では、グローバルな気圧場、瀬戸内海とその周辺の沿岸水位および内海の塩分・水温分布の整理、解析を行うことにより、瀬戸内海の水環境に及ぼす物理的要因に関する考察を行った。最近の 20 年間で水位・水温の変動特性から 3 つの期間に分け、各々の期間での流れの特性を把握した。さらに、瀬戸内海全域で実測されている密度分布および海面気圧分布の季節変動を取り入れた平面 2 次元モデルを用いることで、季節的に変動する流れ場を再現した。この中で、境界条件の決定方法や密度分布の利用法について検討している。流れ場の特性は、水位・水温の長期的な変動特性が異なる 3 つの期間に分け、各々の期間で再現された流れ場から湾・灘間の海水流量の比較を行うことで境界条件と流れとの関係について検討した。

2. 水塊密度・気圧場および境界水位の与え方

(1) 水塊密度と気圧場

計算で用いた水温・塩分は国交省中国整備局による瀬戸内海総合水質調査での測定値を用いている。総合水質調査は、瀬戸内海における海岸汚染の防除業務を効率的、積極的にを行うため、また将来の利用・保全計画を策定するための基礎データ収集の一環として、瀬戸内海の伊予灘以東の海域において昭和 56 年度から定期的に行われている。本調査では瀬戸内海を 8 つの海域（伊予灘～紀伊水道）に区分して 142 地点（1988 年までと 2000 年からは 200 地点）において年 4 回の水質調査を行っている（<http://www.pa.cgr.mlit.go.jp/gicyo/suishitu/index.htm>）。

ここでは、総合水質調査（周防灘、豊後水道では福岡、山口、大分、愛媛県水試による浅海定線調査）によって測定された水温と塩分を各観測点において空間的には距離の重み付け平均、時間的には直線補完により全計算メッシュに付与した後、密度に換算している。

海面気圧分布は瀬戸内海周辺 23 地点において観測された海面気圧（気象庁）から潮岬での観測値との差を距離の重み付け平均、時間的には直線補完により求めた気圧分布が各計算メッシュに付与されている。

(2) 基準海面（水位基準値）

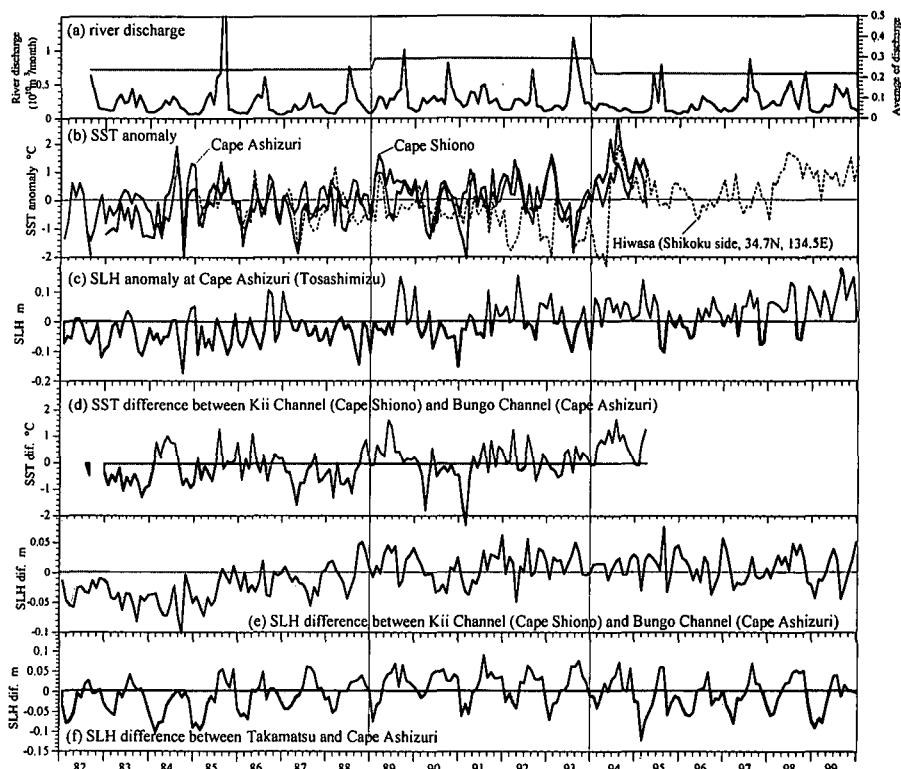
沿岸域内で観測されている水位の絶対値を知ることは非常に困難である。一般的にジオイドは全地球的な平均海面に一致するものと定義されているが、ジオイド面と日本沿岸の海面との関係は明らかではない。我が国では東京湾平均海面がジオイドと一致するものと考え、この面を高さの基準面としている。実際には日本沿岸域で共通の基準面を持つことが困難であるため、河川・港湾においては地域的な基準面が用いられることが多い。瀬戸内海においても T.P. を基準とした潮位データから得られる平均潮位差は大きく（例えば、気象庁の観測による大阪と和歌山では約 2.5 m）、これらの値が基準海面を表しているとは言い難い。平均海面の分布には様々な結果

* 正 会 員 工 修 広島大学助手大学院工学研究科社会環境システム専攻

** 学生会員 広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻

*** 正 会 員 工 博 広島大学助教授大学院工学研究科社会環境システム専攻

**** 正 会 員 工 修 国土交通省中国整備局広島港湾空港技術事務所



図一 最近 20 年間の瀬戸内海境界域での水位・水温（月平均）の変動特性と河川流出量（1982～99）

が報告されているが（例えば，Unoki・Isozaki, 1965），統一された水位の基準面がないのが現状である。

ここで用いた太平洋側開境界の水位基準値は，豊後水道，紀伊水道での 20 年間の平均水位を各々の地点で 0 として定めた。基準海面は北太平洋の気圧分布，瀬戸内海の密度分布の季節変動を考慮して決定されている。北太平洋では 5～6 月に北～西側沿岸域での海面気圧勾配が最も小さくなる。さらに，内海にある水塊密度の季節変動幅の平均値をとる時期が 5～6 月であることからこの時期の水位を基準値として用いることが適当と考えられる（日比野ら，2000 参照）。太平洋沿岸域での気圧勾配や内海での水塊密度変化の影響が 5～6 月に平均値をとることは，境界の水位基準値として年平均値を用いることができる（水位変動が気圧と水塊密度の和で表すことができる（日比野，2001））ことを示している。

（3）流れ場の再現法（計算条件）

瀬戸内海の流れ場の季節～年変動の検討は平面 2 次元モデルによって行われた。流動における圧力場として海面気圧分布と実測密度分布を与えることで実際に近い流れ場を再現していることになる（駒井ら，2002）。この手法は藤原ら（1997）の診断モデルと同様の考えから行われている。

計算では $\Delta x = \Delta y = 3600$ m, $\Delta t = 30$ 秒とし，豊後水道

および紀伊水道の境界水位は油津，足摺岬，小松島，白浜で実測された日平均水位（各地点での 1982～99 年の季節変動の平均値を基準値）を 2 地点間で内挿した値が用いられた。河川からの流入は各々の 1 級河川からの月毎に平均された流出量として与えられている。

計算された流れ場の再現性の確認は瀬戸内海の 8 地点での実測水位と比較することで行われている。

3. 瀬戸内海沿岸水位と内海塩分の変動特性

図一には（a）瀬戸内海に流入する 1 級河川からの総流出量（流量年表），（b）豊後水道，紀伊水道における海面水温偏差（平均季節変動値からの差），（c）潮岬での水位偏差（海面水温と同様に算出），（d）潮岬と足摺岬での海面水温差，（e）潮岬と足摺岬での水位差および（f）高松と足摺岬との水位差の経年変化を示している。図中の水位は 1982～99 年の水位の平均値を基準値として表されている。

（1）最近 20 年間での境界水位の変動特性

太平洋境界沿岸域における最近の 20 年間では水位・水温とも上昇傾向にあるが，水位・水温の上昇は潮岬側で大きいこと，潮岬と足摺岬の水位差には水位・水温の上昇とは別に 10 年程度の変動周期があることがわかる。さらに，潮岬と足摺岬の水温差は水位偏差の上昇傾向と同

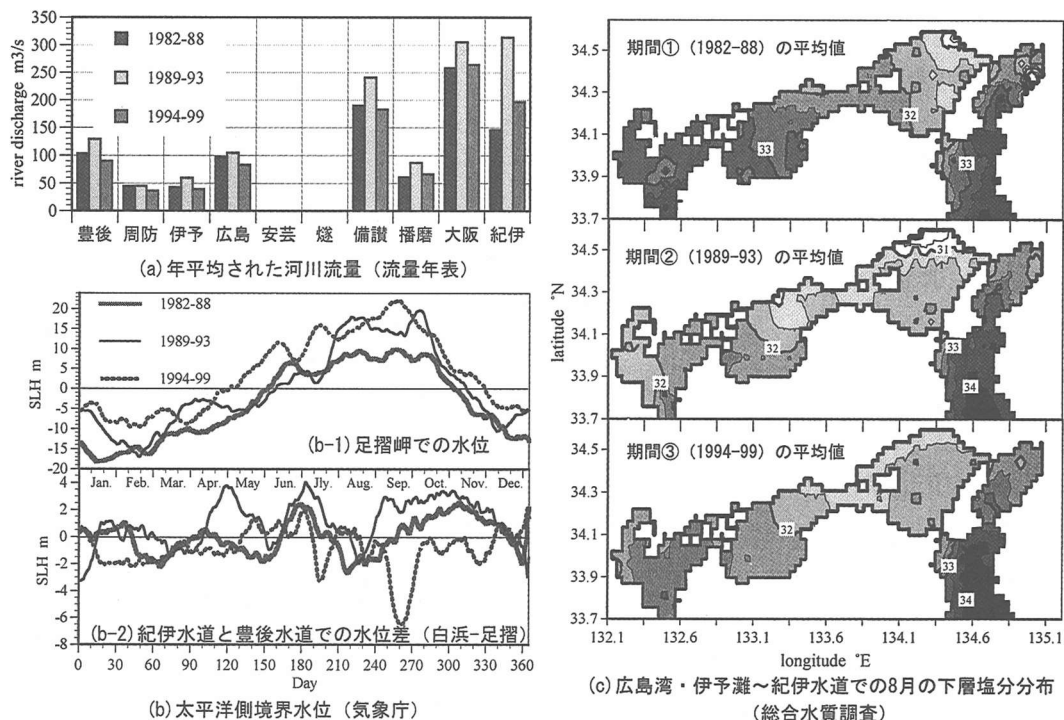


図-2 3期間で各々平均された河川流量, 境界水位および塩分分布の比較 (計算条件)

様の傾向にあることがわかる。1980年代は黒潮が蛇行流路をとることが多かったが、1990年代には黒潮は四国～紀伊水道に接岸することが多くなっている。黒潮流路の変動に紀伊水道での水温が追従しており、瀬戸内海沿岸での水温は黒潮流路の蛇行・非蛇行に伴って低下・上昇する傾向がある (Hibino・Shimizu, 2003)。

(2) 境界と中央海域での水位関係

瀬戸内海域 (高松) と境界 (足摺岬) での水位差は80年代後半から90年代前半に内海側で水位が高くなっており、この時期には河川流出量も増加している。なお、瀬戸内海内外域間の水位差には季節変動の周期が卓越しており、夏～初冬期に内海側で高く、初冬～春期に境界側で高くなる傾向にある。内海内外の水位差に年周期の変動が残るのは、放射の影響が大きい (夏期に内海で熱量が蓄えられ易い) と考えられるが、数年にわたる変動は外海水位 (流入水塊) と河川流出の影響が考えられる。

1994～99年において、内海側にある高松では、潮岬と同様の顕著な水位上昇は観測されず、逆に豊後水道側の水位が高くなる傾向が強く現れている。

4. 瀬戸内海全域での流れ場の再現

(1) 評価期間と再現状況

前章で示したように、最近の20年間では、80年代の豊後水道側で相対的に水位が高い期間と90年代の紀伊水

道側で水位が高くなる期間に大きく分けることができる。さらに、その遷移時期には内海への河川流出が増大し、内海側で水位が高くなっている。これらの期間における流れ場の特性を把握するために、水位・水温、河川流出特性の異なる①1982～88年、②1989～93年、③1994～99年の3期間における流れ場について検討する。

図-2には①～③の期間別に区分した河川流量 (21一級河川の月平均値, 流量年表), 足摺岬 (土佐清水, 気象庁) での水位, 広島湾・伊予灘～紀伊水道での下層塩分分布が示されている。河川流出量は備讃瀬戸以東の東海域で多く、東海域で約7割の流出 (備讃瀬戸では約2割) がある。期間②に全海域で流出量が大きくなっており、この期間には8～10月に水位の顕著な上昇が観測されている。

図-2(b) (境界水位) から期間③は①に比較して10 cm程度の水位上昇が観測されている (図 (b-1)) こと、期間②では紀伊水道側での水位、期間③では豊後水道側で水位が高くなる期間が多い (図 (b-2)) ことがわかる。また、図-1と比較すると、期間③における白浜での水位は潮岬での顕著な水位上昇が現れておらず、内海側での水位に近い変動となっている。

塩分分布 (図 (c)) から低塩分の海域が各期間で異なっていることがわかる。期間①では播磨灘の南東海域であったのが期間②、③では備讃瀬戸に移動している。さ

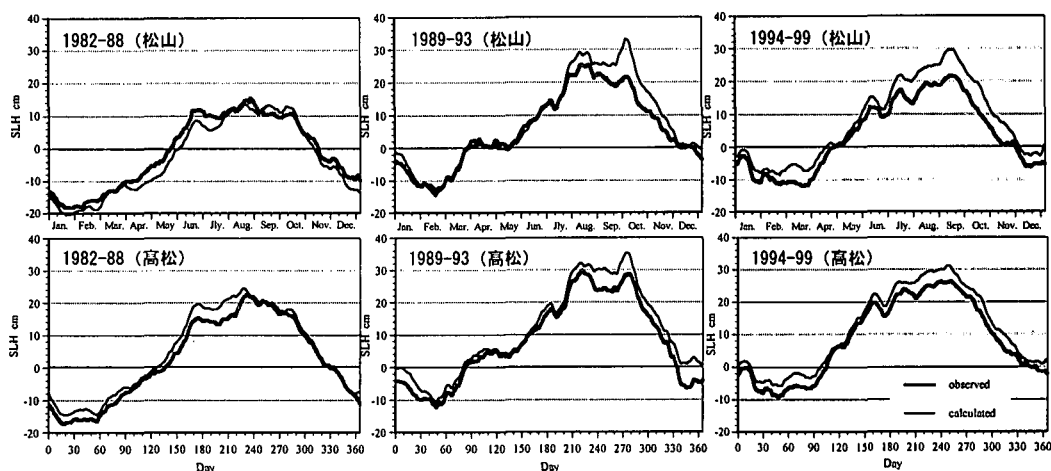


図-3 実測値と計算値の比較 (期間①～③; 松山, 高松)

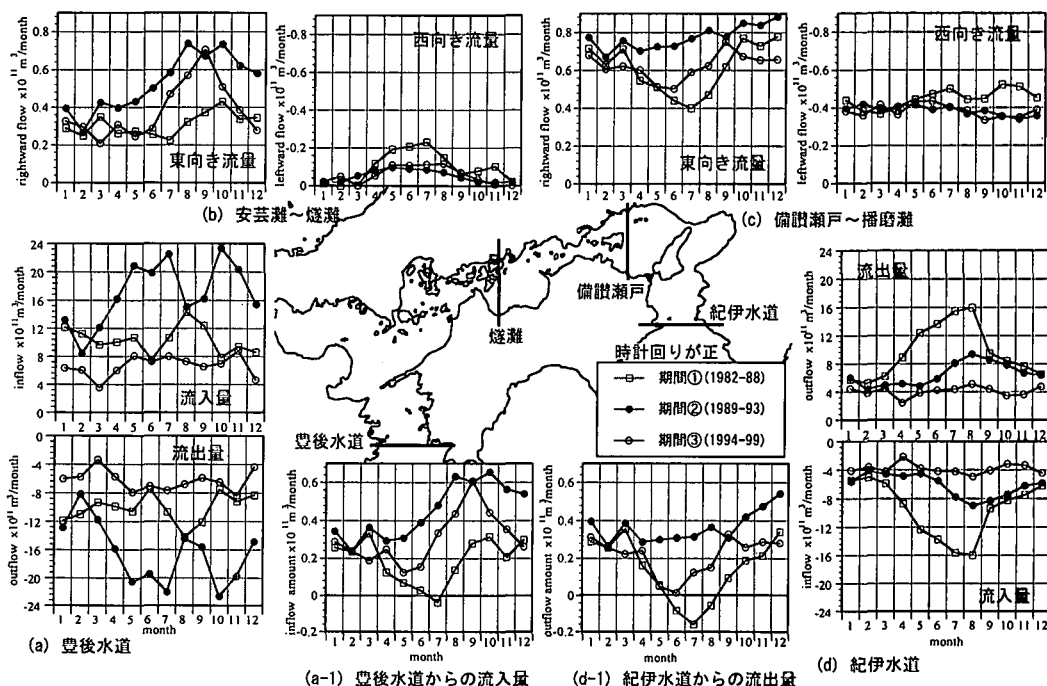


図-4 各期間の豊後水道、燧灘および紀伊水道における流入流出量 (計算結果)

らに、90年代後半に向かって高塩分水塊の紀伊水道からの流入が増大しているが、西海域での塩分が低くなっている(期間②と③)。また、期間②では紀伊水道をのぞく全域で塩分低下が顕著である。

図-3には3期間の松山と高松における実測水位(太線)と計算水位(細線)が比較されている。計算水位は概ね実測水位を再現している。特に、内海中央で水位が高くなる現象(中央海域では水位の年較差が境界での年較差より15~25%程度大きくなっている、図-2)や期間

②において夏期の計算水位が期間①、③よりも高く算出される現象がよく再現されている。これらの結果は水位上昇に対する密度変化の効果が大きい(河川の流量自体は水位を上昇させる効果は小さい)ことを示している。ちなみに、期間②の夏期に計算値が高くなるのは、低塩分の効果が過大に現れていることによる。すなわち、河川流出が多い8月の観測値が周辺数ヶ月間の代表値となっているためである。

(2) 瀬戸内海全域での流れ特性

図-4には(a)外海と豊後水道間、(b)安芸灘と燧灘間、(c)備讃瀬戸と播磨灘間、(d)紀伊水道と外海間の断面において月平均された流入量および(a-1)豊後水道からの正味の流入量(入出量差)、(d-1)紀伊水道からの正味の流出量(入出量差)が示されている。全ての座標で時計回りが正となっている。

a) 外海境界での流入量

図-4(a)と(d)から豊後水道外海側境界部での流入量は期間②、①、③の順に大きく、紀伊水道側では期間①、②、③の順に大きくなっている。さらに、期間①では、期間③よりも両水道での流入量が大きくなっているが、正味の流入量(右回りの流量)は期間③で大きくなっている。これらのことから、境界水位の上昇(黒潮の接近、流入塩分の増大、図-2(d))が境界からの流入フラックスを増大しているわけではなく(ここでは流路変動の非定常性の効果は考慮していない)、内海での塩分分布や河川流出が流れ場に影響を及ぼしていることが推測できる。

期間②の豊後水道での流入と紀伊水道での正味の流出量は他の期間と顕著な違いが現れている。期間②と③での塩分分布が類似し、期間②で河川流出が多いことから、備讃瀬戸～播磨灘の塩分分布の状態が内海中央海域での流れ場、河川流出量が豊後・紀伊水道境界での流入に寄与していることが予想できる。期間②と③を比較すると、河川流出によって両水道からの正味の流入量が25%程度増大しており、河川流出量の増加は内海での流れを活性化することが示唆される。

b) 内海域における流況

図-4(a-1)、(b)、(c)、(d-1)から瀬戸内海での年間を通じた流れは、豊後水道から紀伊水道に向かう傾向にあり(外海水は豊後水道から流入、紀伊水道側から流出)、この流れは1990年代に強調されていることがわかる。

東海域から西海域へ向かう流量は、西海域から東海域へ向かう流量の1割程度であること、安芸灘から燧灘への流れは豊後水道側から流入する正味の流量との関係が強く、備讃瀬戸から播磨灘に向かう流れは紀伊水道側からの正味の流出量との関係が強いことがわかる。これらのことは備讃瀬戸の西側と東側での流れが区別される(備讃瀬戸が西・東海域の奥部に位置している)ことを示している。瀬戸内海の西側海域では豊後水道からの正味の流入量が燧灘以西の流れを支配しており、東側海域では備讃瀬戸からの流入量および紀伊水道からの正味の流入量に依存していることが考えられる。

豊後水道への正味の流入量は期間②と③の夏～秋期に大きくなっている(図-4(a-1))が、この流れによって、夏期に内海に溜まり、冬期に流出する傾向が増長されて

いる(紀伊水道でのこの期間の流出量は豊後水道での流入量の6割程度である)。また、期間①でのみ6～8月に紀伊水道からの流入が生じており、この流れが燧灘での西向きの流れを促進することが推測できる(図-4(d-1))。

5. おわりに

本研究で得られた主な結果を以下に示す。

- 1) 最近20年間の瀬戸内海での流れ場は境界部での水位・水温および河川流出量の特徴から3つの期間に分けることができる。1980年代には低塩分海域が播磨灘周辺であったのが、1990年代には備讃瀬戸周辺に移動しており、境界の影響が内海中央での流れ場に影響を及ぼしている。89年から93年頃には河川流出量が増大し、内海水位が高くなっている。
- 2) 20年間の平均値が0となる海面を境界水位の基準とした。この基準水位の出現時期は太平洋沿岸の気圧勾配と境界域の密度変化を考慮して求めた基準水位の出現時期と一致している。
- 3) 実測の密度分布と海面気圧分布による圧力勾配場をモデル化した平面2次元数値計算を行った結果、日平均化された外海水位を境界条件とした計算水位は実測水位変動を再現できることが示された。
- 4) 瀬戸内海の流れ場は、密度分布の影響を強く受けており、密度場を考慮することで流れ場を精度よく見積もることが可能となる。
- 5) 瀬戸内海では豊後水道から紀伊水道に向かう流れが卓越しているが、境界水位と河川流出によって流れのパターンが変化している。

参 考 文 献

- 駒井克昭・日比野忠史・清水勝義(2002): 瀬戸内海における水位の季節変動量の推定, 海岸工学論文集, 第49巻(2), pp. 381-385.
- 日比野忠史・駒井克昭・浅井 正(2000): 瀬戸内海平均海面の推定, 水工学論文集, 第45巻, pp. 1073-1078.
- 日比野忠史(2003): 北太平洋北～西側海域での水位振動と日本沿岸域流入水塊密度の推定, 土木学会論文集 II-68, No. 558. (印刷中)
- 藤原正幸・大橋行三・藤原建紀(1997): 診断モデルによる8月の紀伊水道における残差流シミュレーション, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 411-415.
- Hibino T. and K. Shimizu(2003): Inter-annual Fluctuation of Water Quality in Seto Inland Sea—Relationship with Sea Levels at the Entrances of the Inland Sea—, CEJ., Vol. 45, No. 2, pp. 211-233.
- Unoki, S. and I. Isozaki(1965): Mean Sea Level in Bays, with Special Reference to the Mean Slope of Sea Surface due to the Standing Oscillation of Tide, The Oceanographical Magazine, Vol. 17, pp. 11-35.