

瀬戸内海開境界での水位条件の決定法

A Study on the Decision of the Sea Level Condition at Open Boundaries in the Seto Inland Sea

日比野忠史¹・金キョンヘ²・越智達郎³・松永康司⁴

Tadashi HIBINO, Kyung-Hoi KIM, Tatsuro OCHI, Yasushi MATSUNAGA

In order to analyze the variation of current using numerical calculation in the Seto Inland Sea, which formed by several enclosed bay, it is very important to clarify the relation of sea level at boundaries. However, it is required that the method for using sea level at boundaries because of low reliability in T.P.. In this study, the standard datum sea level was proposed at Kii and Bunko channels to simulate the current in the Seto Inland Sea and evaluate it's validity.

1. はじめに

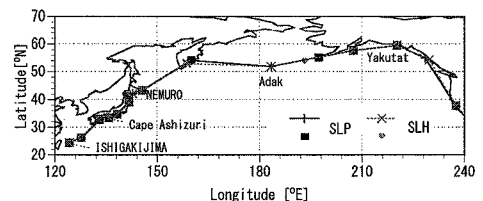
瀬戸内海では豊後水道から紀伊水道に向かう残差流が一般的に言われているが、内海全域を対象とした流れの季節変動は明らかにされていない。季節的に変化する流速場を観測のみによって明らかにすることは困難であることから、数値計算によって流れ場を推定することが必要となる。しかし、数値計算による場合においても放射収支による海面水温の季節変動や外海水、淡水（降水等）の流入による密度変化を再現するためには豊富な観測データが必要となってくる。特に、外海での境界条件として日周期以上の長周期で変化する水位を与える場合においては、境界水位の取り方で流れ方向が逆転することになり、境界間の水位関係の扱い方についても検討することが必要になる。本研究では瀬戸内海全域の流れを再現するために必要な豊後と紀伊の両水道での境界条件の設定方法を示す。この際、水質、気象、潮位（瀬戸内海総合水質調査 HP、雪と気象のデータベース、浅海定線調査、日本海洋データセンター HP）および流量年表等を用いて瀬戸内海での経年の河川流出、黒潮流路変動に伴う両境界間の水位関係から、最近の 24 年間を特性の異なる 4 つの期間に分類して（日比野ら, 2004）、瀬戸内海での水位基準の考え方を検討した。

本論文では、北太平洋周辺での気圧配置の季節変動と瀬戸内海境界での密度の季節変動を考慮した瀬戸内海開境界での基準水位を提案した。さらに、提案する基準水位の妥当性を評価するため瀬戸内海の平均海面を定義し、その変動特性を把握するとともに、数値計算結果を用いて基準水位の評価を行なった。

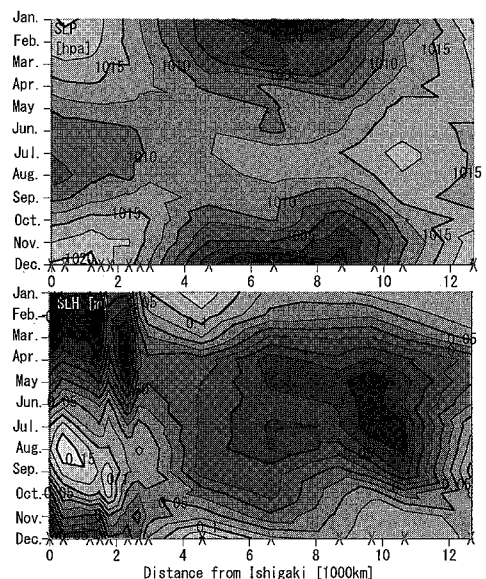
2. 瀬戸内海開境界での基準水位

(1) 日本沿岸での基準水位の設定

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。T.P. は東京湾で測定された中等海面を標高 0 m として決定されており、海面上 24.4140 m を日本水準原点としている。T.P. と水準原



(a) 北太平洋での海面気圧と水位の観測地点



(b) 1982～2005 年間で平均された海面気圧(上段)と水位(下段)の季節変動 (X は観測点)

図-1 日本沿岸域から北太平洋北域における海面気圧と水位の振動

- | | |
|--------------|-----------------------------|
| 1 正 会 員 博(工) | 広島大学准教授大学院工学研究科社会環境システム専攻 |
| 2 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 |
| 3 正 会 員 修(工) | 東京建設コンサルタント技師 |
| 4 正 会 員 修(工) | 国土交通省中国地方整備局広島港湾空港技術調査事務所所長 |

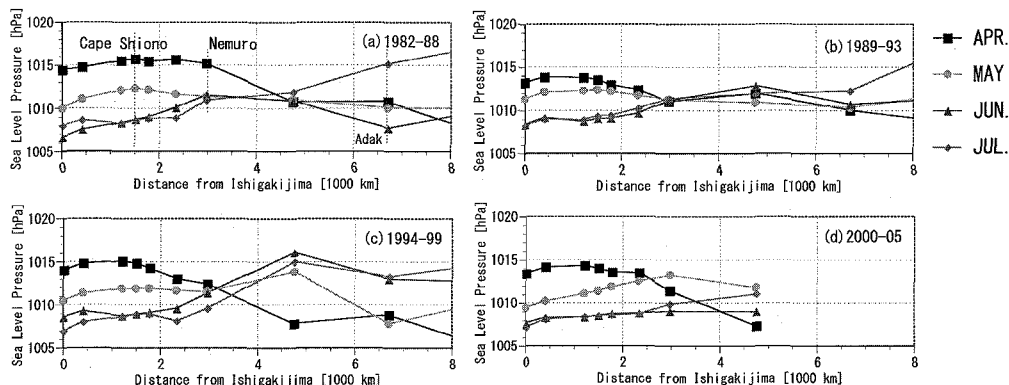


図-2 4～7月における海面気圧勾配の年代変化

点は、地盤や海面水位の変動はないものとして用いられている。実際には、T.P.と日本水準原点の関係は変化しており、日本沿岸域で共通の基準面を持つことが困難である。このため、河川・港湾においては地域的な基準面(D.L.)が用いられることが多い。瀬戸内海においてはT.P.を基準とした潮位データから得られる観測地点間の平均潮位差は大きく(例えば、大阪と和歌山におけるT.P.を基準とした年平均水位差は2mを超える)、T.P.が基準水位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が報告されている(例えば加藤、津村、1979)が、統一された水位基準がないのが現状である。

(2) 基準水位の定義と瀬戸内海平均海面の導出

北太平洋の西～北側沿岸での水位および気圧分布、瀬戸内海境界域での海水密度の季節変動を検討することで太平洋側境界(紀伊水道)での水位基準値(0m)を定める手法を提案する。北太平洋の西～北側沿岸で形成される海面水位と気圧の平均的な経月変化および境界域での密度の季節変動の特性から、海面水位に対する気圧配置および海水密度の影響が最も小さい時期を求める。

a) 気圧場

図-1に日本沿岸域から北太平洋北海域における海面気圧と水位の季節変動(1982～2005年の平均変動)の等値図を示した。縦軸に月、横軸に石垣(沖縄)からの距離(単位1000km)が示されており、1200～1400kmに瀬戸内海、3000kmに北海道(根室)、7500kmにアラスカ(Yakutat)、12500kmにサンフランシスコが位置している。北太平洋では根室付近を節とした気圧面振動に伴って水位振動があり(日比野, 2003)、気圧勾配がない時期に水位振動に対する気圧の影響が最小になることが考えられる。図-1から北太平洋の西側～北側に沿う気圧勾配は5～6月に最も小さくなっている(特に日本沿岸域)ことがわかる。

図-2には黒潮流路を基準に区分した4期間に分けて、日本沿岸域での気圧勾配が最小となる時期を含む4～7

月における海面気圧勾配の年代変化が示されている。

各期間毎に気圧の絶対値は異なっているが、5～6月の間に気圧勾配がなくなる時期が含まれていることがわかる。ただし、1994年以降は4800km地点(カムチャッカ半島)付近での気圧変動幅が大きくなっており、最近の10年程度での気圧配置の異常(板橋、日比野, 2004)が顕著に現れている。

b) 密度場

海洋観測資料、浅海定線調査および総合水質調査結果を用いて瀬戸内海開口部での密度の年周期変動から年平均値をとる時期を求めた。黒潮暖水塊の直接的な影響を受けないと考えられる紀伊水道(33°N以北)においても黒潮域と同様の季節変動が観測されており、紀伊水道沿岸域においても黒潮域での変動と同等に暖水塊の影響を受けていることがわかっている(日比野, 2003)。

図-3の上段には潮岬での実測された水位(SLH)および海面気圧(SLP)の関係、下段には潮岬における実測水位と気圧による換算水位(1013hPaを基準として-1cm/hPaで水位換算)との差、および紀伊水道入口での実測水温・塩分(密度)プロファイルから求められた換算水位(■, ●;水深400mまでの水塊が静的に置き換わるとして水位に変換, 日比野, 2003)の関係が示されている。図中の■は33.4°N(気象庁), ●は33.3°N(徳島県水試)での観測値である。図から気圧変動を除いた水位変動成分(下段図の実線)は水塊密度から求められた換算水位(■, ●)とよく対応しており、紀伊水道沿岸での水位は、主に気圧と黒潮系水塊の流入に起因する密度変動によって変化していることがわかる。

図-4に瀬戸内海境界における①～④の期間別に推定された水塊密度(年平均値との差)の季節変動を示す。図には、北緯33.59°N、東経134.99°E(瀬戸内海総合水質調査)で観測された水深2mと50mにおける年4回(2, 5, 8, 10月)のデータの最小二乗近似値、および海面水位と海面気圧との差(SLH-SLP)から図-3と

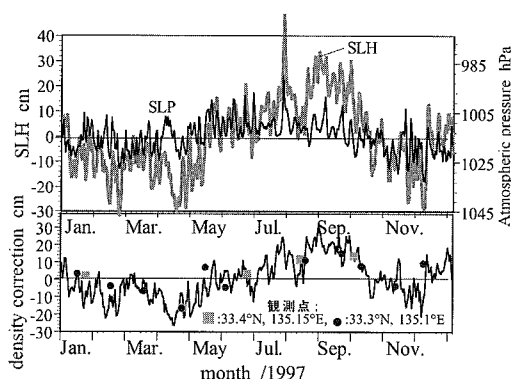


図-3 沿岸水位（潮岬：33.45°N, 135.76°E）への気圧と密度の寄与（沿岸に離着岸する水塊によって変動する水位）

同様の手法で推定された密度換算値が示してある。実測値のない11月、12月を除いて図-3と同様に水位と気圧差によって密度変化を表すことができています。境界では外海、内海へ流出入する水塊の影響を受けているが、4期とも密度の季節変動が平均値となる時期は6月に現れており、前述した北太平洋における海面気圧勾配が最小となる時期と密度が年平均値をとる時期とが一致していることがわかる。

c) 基準水位の定義

北太平洋では5～6月期には、北～西側沿岸域での海面気圧勾配が最も小さく（図-1）、さらに紀伊水道にある水塊密度の季節変動幅の平均値をとっている（図-3と図-4）。すなわち、5～6月期が気圧、密度変化の影響の最も小さい時期であることを示している。太平洋沿岸での気圧勾配の最小値と密度の平均値を考慮して、6月初旬の水位を基準水位として定義する。

北太平洋における海面気圧勾配が最小となる時期と、瀬戸内海境界における密度場が平均値をとる時期を考慮することで、最近の約20年間の瀬戸内海境界における基準水位を求めている。以下では北太平洋の北～西側沿岸域での海面気圧勾配が最も小さく、さらに瀬戸内海境界での水塊密度が年平均値をとる（153日）を基準として、平均密度になる日（±10日の範囲）の水位を基準水位として求めている。

3. 瀬戸内海平均海面の妥当性評価

定義された基準水位の妥当性は基準水位および水位の年平均値を用いて求められた瀬戸内海平均海面の経年変化、および基準水位を境界条件として用いた数値計算結果と既往の成果を比較・検討することで行われた。

平均海面の経年変化は前章と同様に1982～2005年を4つの期間（①黒潮蛇行期、②直進への遷移期、③直進期、④直進蛇行の繰返し期）に分けて検討した。

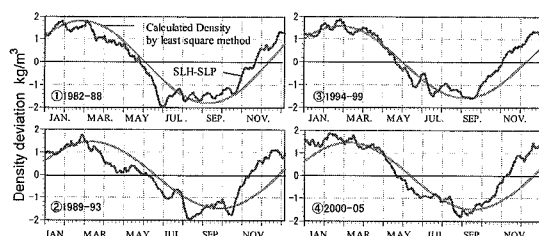


図-4 紀伊水道における期間別に推定された密度（年平均値との差）の季節変動

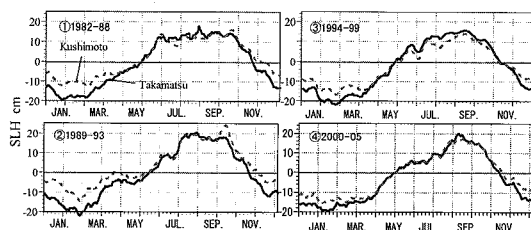


図-5 境界と内海部での水位（15日間の移動平均値）の季節変動

（1）水位の季節変動特性

図-5には紀伊水道～播磨灘における4期間の平均水位（15日間の移動平均値）の季節変動を示している。年較差は内海部（高松）で大きくなっているが、1990年後半以降その差が小さくなる傾向にある。また、期間①では夏～秋期に水位の高い時期が数ヶ月にわたって続いているが、近年その期間が短くなっている。この現象に伴って期間③以降では、冬～春期の水位変動量が小さく、4～6月頃の水位上昇量が大きくなっている。

（2）年平均水位面平均海面の分布特性

図-6に瀬戸内海における各期間の年平均水位分布の変動を示す。0値（基準点）は各々の観測点での1982～99年の年平均値とした。平均水位は瀬戸内海全域で上昇傾向にあり、特に1990年代の東海域でその傾向は強い。近年の水位の上昇傾向を除くと、平均水位は黒潮流路との関係が強く、黒潮の蛇行期にあった期間①（1982～88年）では東海域で低く、直進期（期間③、1994～99年）に遷移するにつれ、東海域で高くなっていることがわかる。

図-7に基準水位の分布（平均海面）を示す。平均海面は各観測点での基準水位を0値としたときの平均水位との水位差分布（図-7では図-6に示した年平均水位面がx軸となっている）である。負の平均海面は年平均水位面よりも基準水位が低いことを意味しており、低い平均海面は水位の上昇が6月初旬よりも早い時期に起こる場合と年平均値（経年的な水位上昇分は除かれている）が低くなる場合に現れる。

平均海面は各期間で異なっており、それぞれの期間で異なる水位分布、期間ごとに変化する境界水位は、境界

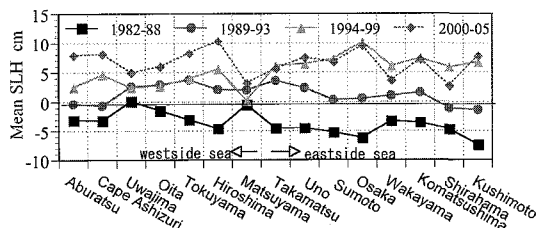


図-6 各期間の年平均水位面（年平均値と1982-99年の年平均値との差，各観測点における水位上昇量を表している）

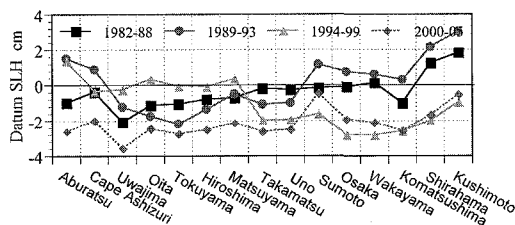


図-7 各期間の瀬戸内海平均海面（図-6の年平均水位面がx軸）

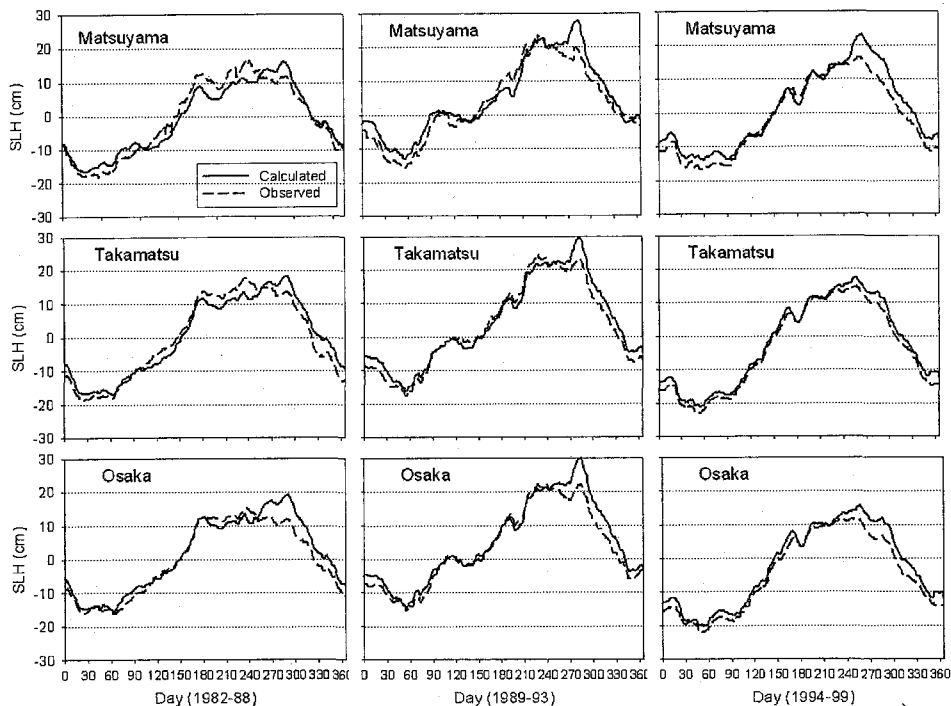


図-8 実測値と計算値の比較（期間①～③；松山，高松，大阪，点線：観測値，実線：計算値）

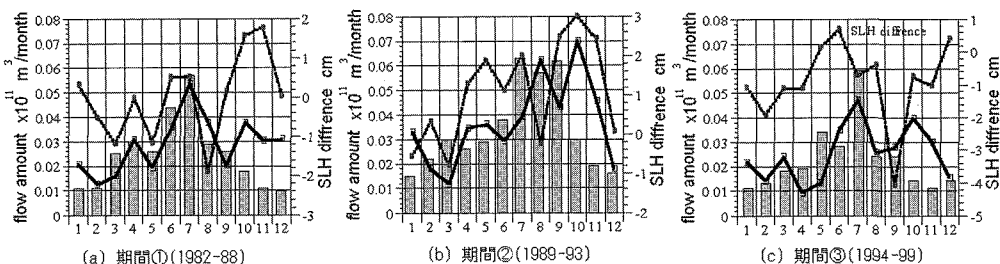


図-9 平面2次元計算によって求められた両水道からの流入流出量の差（実線，左軸），河川流出量（棒グラフ，左軸）および両水道の水位差（破線，右軸）の関係（期間別）

および瀬戸内海内部で形成される密度場や外界からの水位伝播の影響を受けている。水位の季節変動と平均海面の関係は図-5と図-7を比較することで理解できる。期間②に東海海域で平均海面が高くなっているのは、黒潮の接岸と河川流出量の増大により、他期間に比較して夏期

の水位が高くなっているためである。期間③（1994～99年）に平均海面が東海海域で低くなっているが、これは平均密度が現れる6月初旬以前に水位が高くなっているためである（松山の水位は低い，図-8）。期間④（2000～05年）になると、瀬戸内海の全域で水位の上昇時期が

早くなり、平均海面は西海域でも低くなっている。

(3) 数値計算による妥当性評価

a) 計算方法

瀬戸内海における流れ場の季節～年変動の検討は浅水波近似された平面2次元モデル(Leap-frog法による差分法)によって行われた。流動における圧力場として実測された海面気圧分布と密度分布を加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。隣接するメッシュ間に水深差(水位変動量を含む)がある場合には、圧力の基準高さを水深の浅いメッシュの海底面とし、水面から基準高さまで積分された密度差を圧力項としている。計算では $\Delta x = \Delta y = 3600\text{ m}$, $\Delta t = 30\text{ 秒}$, 年4回の約200地点での実測密度を時空間で内挿し(図-4), 圧力勾配としている。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を与えている。河川からの流入量には各々の1級河川からの月毎に平均された流出量を与えられている。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た。この際、内海の実測水位も図-7に示す境界での水位基準を用いて処理を行っている。

b) 計算結果の考察

図-8には黒潮流路が安定していた3期間の松山, 高松および大阪における実測水位(点線)と計算水位(実線)が比較されている。水位の上昇量は概ね実測水位を再現しており, 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15～30%程度大きくなっている, 図-5参照)も再現されている。ここでは示していないが, 計算された基準水位は6月初旬水位を基準として求められた瀬戸内海の全ての水位観測点での基準水位を良好に再現することができた。このことは, 本手法による水位基準値を豊後水道, 紀伊水道の水位関係に用いることの妥当性を示している。

図-9には基準水位を用いて計算された3期間に豊後水道からの流入量と紀伊水道からの流出量との差が示されている。この残差量は, 瀬戸内海に流出した河川流量とよい対応しており, 河川流出量に相当する水量が紀伊水道から流出していることがわかる。

境界間の水位差との相関は河川流出量との相関に比較して小さく, 河川水の流出による余剰水は, 常に紀伊水道側から流出する傾向にある。河川流量のピークは夏期にあるが, 河川の流出直後に太平洋に流出するのではなく, 数ヶ月遅れて流出している。すなわち, 夏期に瀬戸内海に貯留された水量分が秋期に紀伊水道から流出する傾向が計算されている。以上の結果はこれまでに観測された流れ場を妥当に平価する結果であり, ここで提案した基準水位(両水道での水位関係)を用いることで瀬戸

内海での季節的に変わる流れを再現できることが確認できた。

4. おわりに

本論文では瀬戸内海の2つの開境界(紀伊水道, 豊後水道)での水位関係を決定する方法について検討した。以下に得られた結論をまとめる。

(1) 基準水位の定義と瀬戸内海平均水面の導出

北太平洋の西～北側沿岸域での気圧勾配は5～6月に最も小さく, 境界部での密度は6月と12月頃に平均値をとることから, 6月初旬に密度が平均値をとる時を基準水位と定義した。ただし, 平均水位は最近の24年間で10 cm程度の上昇があり, 各地点で水位上昇量は異なっている。平均海面は年平均値と基準水位との差として表されており, ここで求められる平均海面は圧力的に平衡な水位面を表している。東南海域での基準水位の差は数 cm程度で, 年変動成分の数10分の1程度である。平均海面は各期間で異なった分布をしており, 密度分布が平均海面を変化させていることがわかった。例えば, 90年代の黒潮の接近によって東海域で平均海面が低くなる傾向が示されているが, これは黒潮の接岸によって低塩分水塊が内海中央まで影響を及ぼしていることを示している。

(2) 数値計算による妥当性評価

境界に基準水位を用いて計算された水位は基準水位を用いて0点調整した瀬戸内海全域での実測値(平均海面)を表すことができた。また, 豊後水道からの流入量と紀伊水道からの流出量との差は, 瀬戸内海に流出した河川流量とよい対応しており, 河川流出量に相当する水量が紀伊水道から流出していること, 夏期に瀬戸内海に貯留された水量分が秋期に紀伊水道から流出する傾向があること等, 豊後・紀伊水道の両境界で与えた水位によって妥当な内海の流れが計算されている。これらにより本手法による水位基準値を豊後水道, 紀伊水道の水位関係に用いることの妥当性を示すことができた。

参 考 文 献

- 板橋直樹・日比野忠史(2004): アリューシャン低気圧の変動と日本沿岸の海面変動について, 海岸工学論文集, 第51巻(2), pp. 1231-1235.
- 加藤照之・津村健四郎(1979): 潮位記録から推定される日本の垂直地殻変動(1951～1978), 地震研彙報, 54, pp. 559-628.
- 日比野忠史・松本英雄・明瀬一行(2004): 瀬戸内海の水環境特性—瀬戸内海総合水質調査の実施状況と調査結果の解析—, 海と空, 第80巻第2号, pp. 79-89.
- 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, pp. 13-30.