

瀬戸内海における水位の季節変動量の推定

駒井克昭*・日比野忠史**・清水勝義***

瀬戸内海における平年の密度, 海面気圧と水位の季節変動量の関係について考察を行い, 外海水位, 密度, 海面気圧による水位変動量を推定した. 実測の密度分布と海面気圧分布をモデル化し, 外海水位を境界条件とした平面 2 次元数値解析モデルを提案した. 数値解析によって瀬戸内海の水位の季節変動量を推定した結果, 外海水位と密度分布および海面気圧による影響により水位の季節変動量が概ね説明できることが示された.

1. はじめに

瀬戸内海は紀伊水道, 豊後水道および関門海峡を通じて外海水が流出し, 21 の一級河川が流入している. また, 各湾・灘はそれぞれ固有の地形を有し, 湾・灘間の海水交換は瀬戸・海峡などを通じて行われている. このため, 瀬戸内海の湾・灘では海域固有の水塊特性を有している. 内海水塊は気象・海象による外力を受けて湾・灘間を移動しており, 水域における栄養塩や有害化学物質の循環にとって重要な役割を果たしている. 港湾開発事業による環境への負荷をできる限り低減 (ミチゲーション) し, 自然力を有効に利用した生態系保全・創造を行うには, 季節・年変動スケールの長期的な視点, および瀬戸内海スケールの広域的な視点から環境変動を評価することが重要となる.

本論文では, 瀬戸内海全域の季節的な水位変動量に及ぼす気象・海象の外力評価を行うことを目的として, 外海水位, 海水密度および海面気圧による水位と内海流動の季節変動について検討を行った. 先ず, 瀬戸内海における水位の季節変動特性について明らかにし, 瀬戸内海総合水質測定調査データ (国土交通省中国地方整備局による) と海面気圧データを用いて, 密度・海面気圧分布の季節変動と水位変動の関係について検討を行っている. 次に, 瀬戸内海全域の密度分布および海面気圧分布の季節変動の効果をモデル化し, 紀伊水道, 豊後水道の水位を外海境界条件とした平面 2 次元数値解析を行い, 内海の密度分布と海面気圧分布が水位および流動の季節変化に与える影響について考察を行っている.

2. 瀬戸内海における水位の季節変動と密度, 海面気圧の関係

図-1 は瀬戸内海沿岸 (図-5 に示されている白浜, 大阪, 高松, 松山, 徳山, 宇和島, および足摺岬 (132.97°E, 32.78°N)) の各検潮所 (気象庁, 海上保安庁) で測定

された日平均水位 (1985~1998 年の平均値) の変動を示している. 水位は T.P.からの高さを示している. 内海の水位は 2 月に最も低く, 8 月に最も高いが, 外海境界 (白浜, 足摺岬) の水位は 9 月に最も高くなっている. 瀬戸内海境界域での水位変動は黒潮水塊の接岸・離岸と深く関係していることが知られている. さらに, 瀬戸内海西部・中央部では年較差が大きく (徳山 37 cm, 高松 38 cm), 外海側の水位の年較差は比較的小さく (宇和島 33 cm, 白浜 31 cm) なっているが, 内海奥で水位較差が大きくなっているのは内海での密度較差が大きいかことや気圧配置の影響が考えられる (日比野ら, 2000a).

図-2 は瀬戸内海沿岸 (大阪, 高松, 松山, 徳山, 宇和島) における月平均の水位と海面気圧 (気象庁による) の関係を示している. 図より, 全ての海域において海面気圧は 12 月に最も高く, 7~8 月に最も低くなっており, 約 12 hPa の年較差がある. 海域間の流れがない (motionless) と仮定したとき, 海面気圧の効果として圧力水頭に変換して約 12 cm の変動があることがわかる. 2~6 月, 9~11 月においては水位と海面気圧の相関は負であり, 海面気圧が水位を押し下げていることが予想されるが, 単純に圧力水頭換算して 1 hPa = -1 cm の対応を見出せない. 特に, 6~8 月と 11~2 月には水位と海面気圧の相関は正となり, 海面気圧以外の密度や流れによる水位変動が大きいことが示唆される. 6 月には各地点の海面気圧の差が 1 hPa 未満となり, この時期には気圧勾配が各海域間の水位差に与える影響は小さいと考えられる.

図-3 には図-2 に示された各地点における密度変化による水位の季節変動が示されている. 密度変化による水位変動 $\Delta\eta$ は, 海域間の流れがない (motionless) と仮定したときの海水の膨張・収縮による水位変動であり, 以下の式から求められる.

$$\Delta\eta = (\rho^{-1} - \bar{\rho}^{-1})D/\bar{\rho}^{-1} \dots\dots\dots (1)$$

ここに, ρ : 密度, D : 海域平均水深, $\bar{\rho}$: 年平均密度である. 密度 (σ_t) は 2 月に最大, 8 月期に最小となり, 年較差は高松で大きく (4.5 kg/m³), 松山, 宇和島で小

* 正会員 工修 広島大学助手 大学院工学研究科
** 正会員 工博 広島大学助教授 大学院工学研究科
*** 正会員 国土交通省中国地方整備局

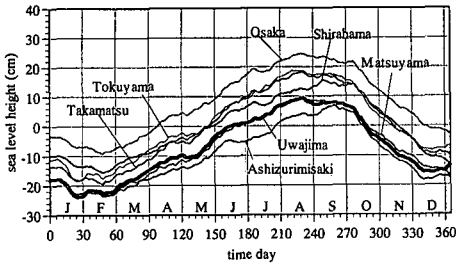


図-1 瀬戸内海における日平均水位の季節変動 (海上保安庁, 気象庁による, 1985~1998年の平均値, 潮位は T. P.上 (単位 cm))

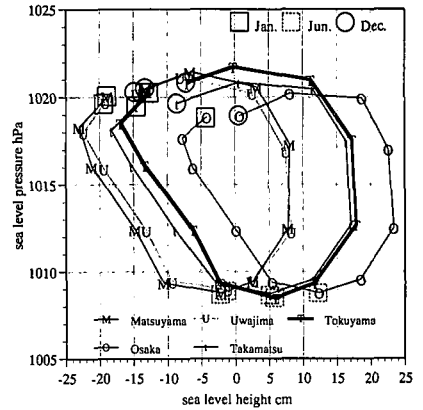


図-2 水位と海面気圧の関係 (月平均)

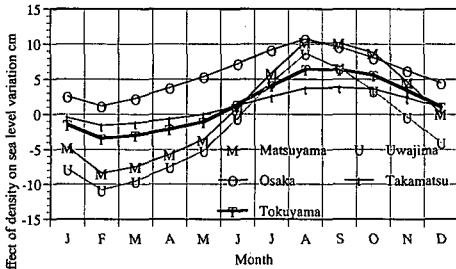


図-3 流れがないと仮定したときの密度変化による水位の季節変動

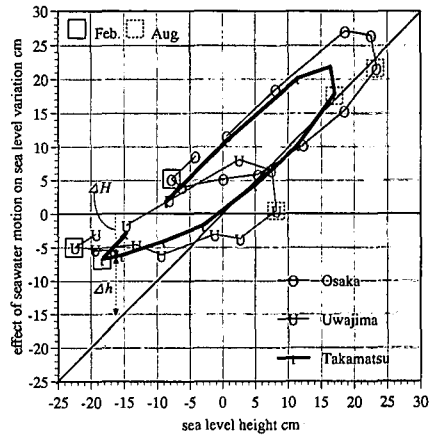


図-4 水位と流れによる水位変化の効果の関係

さい (3 kg/m^3). これを (1) 式によって水位に換算した場合, 密度変化の効果は外海に近く海域平均水深が大きい松山, 宇和島で最大 20 cm であり (水深分布は図-7 参照), 内海奥に位置する高松で最小 5 cm 程度である. 海水膨張による水位上昇量は 8 月に最も大きくなり, 内海で 8 月に水位が高くなる主な原因として考えられる.

内海水位は外海水位を境界条件とする海域間の流れによって調整されるため, 流れによる非線形的な効果も考慮しなければならないが, ここでは, 気圧補正した水位から密度変化による水位変動分を除いた水位を流れによる水位変化の効果 ΔH として扱うことにする. ただし, この効果は海域間の流れがない (motionless) と仮定した場合の海面気圧と密度の効果を実測値から差し引いたもので, 流れの非線形性は考慮されていない. 図-4 は横軸に実測水位, 縦軸に上述のようにして求められた流れによる水位変化の効果 ΔH を示している. 図中の対角線上では水位変動量は流れ成分のみで水位が変動することを表しており, 対角線からのずれ Δh は密度と気圧の効果の和になる. 8~10 月の大阪, 高松では, 海面気圧の上昇 (図-2, 約 1012~1020 hPa) に伴い, 密度変化による水位変化 (図-3, 約 3~5 cm) に加えて, 流れによる水位上昇の効果 (最大 20~25 cm) が生じている (図-1). 一方で, 外海に近い宇和島では, 夏期には流れによる水位変化の寄与は大きい, 冬期には海面気圧や密度変化

による水位変化の寄与のほうが大きくなっている. このことより, 瀬戸内海規模の季節的な気圧配置の変化や, 豊後・紀伊水道からの季節的な外海水や河川流入, 日射量の変化に起因する密度場の変化やそれに伴う流動などの影響が考えられる.

図-5 は瀬戸内海における 2 月期および 8 月期の月平均海面気圧の平面分布を示している. 図中の海面気圧は, 瀬戸内海沿岸の海面気圧データ (気象庁による 23 地点のデータ) の月平均値を水平距離の重み付け平均により補間して求められている. 2 月期には, シベリア高気圧の発達による西高東低の冬型気圧配置のため, 瀬戸内海東西の海面気圧差は 2 hPa に達し, 瀬戸内海東部に比べて西部において水位が約 2 cm 押し下げられる効果があることを示している. 一方, 8 月期には気圧差は 1 hPa 未満であり, 海面気圧による水位差は小さい. 図-6 は瀬戸内海における 2 月期および 8 月期の鉛直平均密度 (σ_t) の平面分布を示している. 図中の密度は瀬戸内海総合水質測定調査 (毎年 2, 5, 8, 10 月期に実施, 瀬戸内海全域

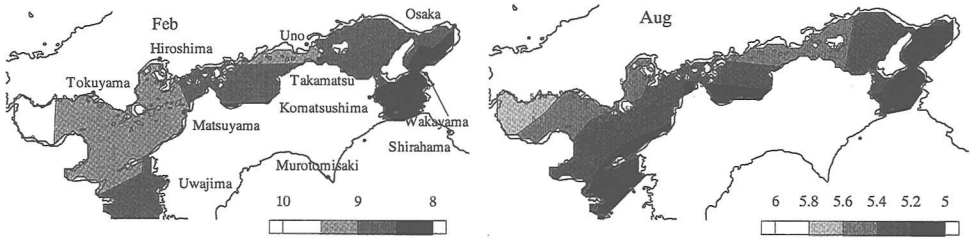


図-5 瀬戸内海における海面気圧の分布特性（2月，8月，1989～1999年の平年値，1013 hPaからの偏差，単位 hPa）

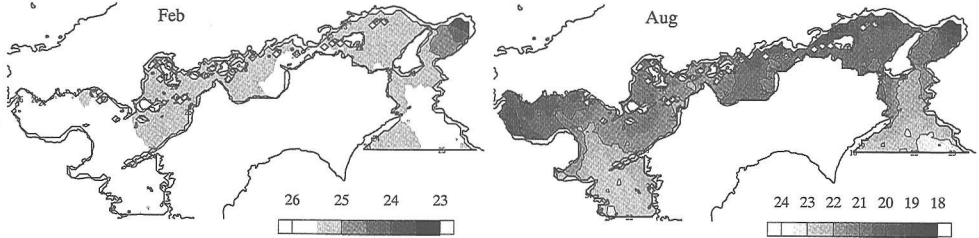


図-6 瀬戸内海における鉛直平均密度 (σ_t) の分布特性（2月，8月，1989～1999年の平年値）

で計142点)による水温，塩分データ(各測点で海面下2 m，海底上2 m，50 m以深は水深50 mの2点)の1989～1999年の各期平均値から国際海水状態方程式を用いて算出し，各測点での密度データを平均して求められている(豊後水道，周防灘では，水産庁による浅海定線調査データの1983～1993年の平均値を用いて補間されている)。2月期の内海奥の密度分布は大阪湾を除いてほぼ一様である。これに対し，8月期においては，河川水の流入や海面加熱の効果によって大阪湾・播磨灘～燧灘，周防灘で低密度となり，外海水の流入により紀伊水道，豊後水道～伊予灘において高密度となるため，内海の密度差は 5 kg/m^3 に達している。

以上の考察より，気圧，密度の時間変化は図3，4で示したように水位変動に対して線形的な関係が見出されたが，空間勾配からは冬期には気圧勾配，夏期には密度勾配の効果が現われ，水位変動に対する気圧勾配，密度勾配の効果は季節によって異なっていることがわかる。

3. 数値解析による水位の季節変動量の推定

3.1 モデルの概要

瀬戸内海全域の流れ場の変化を通年で議論するには，河川流量や外海水の流入圧の季節変化に伴う密度分布の変化が圧力場に及ぼす影響を考慮する必要があるが，長期にわたる数値計算を行うには計算負荷の少ない平面2次元モデルが有効である。前章の結果を踏まえ，紀伊水道と豊後水道南端の水位と気圧分布を境界条件とし平面2次元数値解析を行った。ここでは，密度分布および海面気圧分布の季節変化の効果をモデル化し，密度分布お

よび海面気圧分布が平年の内海水位の季節変動に及ぼす影響を検討した。

a) 数値モデルの概要および解析条件

数値解析には鉛直積分された運動方程式と連続式を基礎方程式とする平面2次元モデルを用いた。密度と気圧の効果は運動方程式中の圧力勾配項に反映するようにモデル化されている。計算メッシュにはスタガード格子を用い，図-7に示されているように南北60メッシュ，東西120メッシュ， $\Delta x = \Delta y = 3600 \text{ m}$ とし，差分法を用いて基礎方程式を離散化している。水深分布は図-7に示されたデータを用い，閾値は最大400 m， $\Delta t = 10 \text{ s}$ とした。瀬戸内海における海面からの蒸発量は約 $1,500 \text{ mm/year}$ (石崎ら，1978)，降水量は約 $1,400 \text{ mm/year}$ (柳，1997)であることから，本モデルでは海面を通じた水収支は平衡状態にあると仮定し，海面での水収支は考えていない。

外海境界の水位変動は，紀伊水道と豊後水道における実測値(白浜，小松島，足摺岬，油津の潮位データ)を用いて，1985～1999年の毎時平均潮位の15日間移動平均が与えられている。

計算においては1年分の予備計算を行い，水位が十分に安定した後の水位について考察を行っている。

b) 海面気圧分布の効果のモデル化

季節的に変動する気圧場のスケールは瀬戸内海の空間スケールより大きく，概ね外海水位の変動に含まれると考えられるが，図-5に示されたように冬期には瀬戸内海のスケールでも圧力水頭に換算して2 cmの効果がある。本モデルでは海面気圧は $1 \text{ hPa} = 1 \text{ cm}$ の圧力水

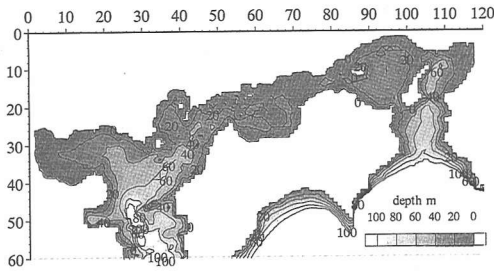


図-7 瀬戸内海の水深分布と計算メッシュ

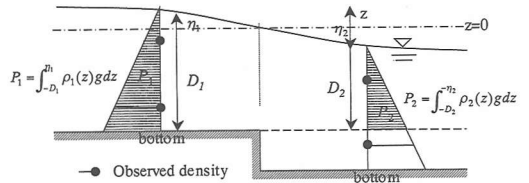


図-8 水深平均圧力の計算方法

頭として圧力項に付加されている。海面気圧は瀬戸内海周辺の23地点の日データを時間的に直線補間することで時系列データを求め、平面的な気圧分布は水平距離で重み付けして補間を行ったデータを入力されている。海面気圧の基準は、瀬戸内海全域で海面気圧差が最も小さくなる時期(6月)を基準としている(日比野ら, 2000b)。

c) 密度分布の効果のモデル化

水深平均密度は前述の実測密度データから鉛直密度分布を直線近似して求めている。求められた平均密度が概ね海域の代表値として扱えることは確認されている。ここでは、実測密度分布は圧力勾配項の計算に用いられており、実測密度分布に応じた圧力勾配力が外力として与えられていることに相当する。

本モデルの運動方程式中の圧力勾配項は、圧力を水深積分して求められているが、単純に水深積分すると水深の変化が大きい場所ではメッシュ間の積分水深の差から余分な圧力勾配が生じる。本モデルでは、メッシュ間の水深差のある場所では、圧力の基準高さを隣接するメッシュのうち水深の小さい方の海底面に定め、水面から基準高さまでの鉛直積分から圧力項が算出されている(図-8)。

密度の時系列データは、年4期(2, 5, 8, 10月)の平年値データを直線補間して求められ、密度分布は水平距離の重み付け平均による補間データが入力されている。密度の基準は1024 kg/m³としている。

3.2 計算結果の考察(密度、気圧が水位の季節変動量に及ぼす影響)

図-9には実測と計算による瀬戸内海沿岸における(a)日平均水位の年較差および(b)2章で考察した気圧・密度による水位の年較差と数値解析により流れを考慮した気圧・密度による水位変動成分の年較差が示されている。ここでは、海面気圧の水平スケールは瀬戸内海より大きく、その効果は外海水位(境界条件)に含まれるため、内海規模での気圧分布による水位差が示されている。計算結果における密度の効果はCal. 1(気圧・密度あり)とCal. 2(気圧あり、密度なし)の差、気圧の効果はCal. 2とCal. 3(気圧、密度なし)の差によって表している。

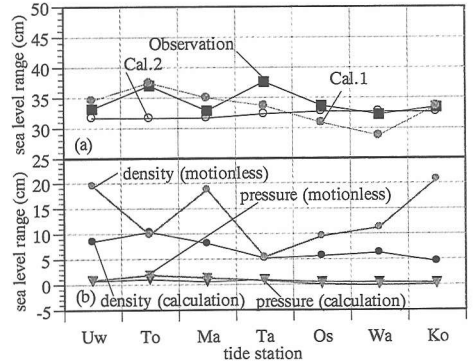


図-9 (a)日平均水位の年較差および(b)気圧・密度による水位の年較差(Cal. 1:気圧・密度あり, Cal. 2:気圧あり・密度なし, Uw:宇和島, To:徳山, Ma:松山, Ta:高松, Os:大阪, Wa:和歌山, Ko:小松島)

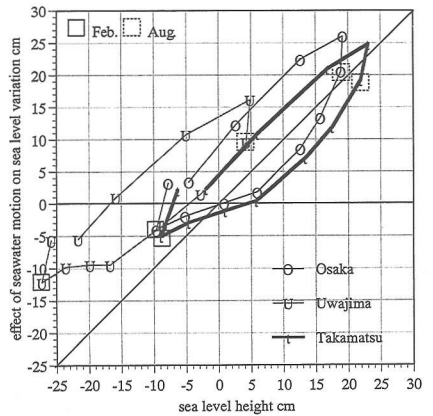


図-10 水位と流れによる水位変化の効果の関係

図-9(a)より、密度分布の季節変動を考慮することで、外海側で年較差が小さく内海側で年較差が大きい特性が再現されていることがわかる。一方、図-9(b)に示した計算結果では、内海水位の季節変動の年較差は、外海境界水位の年較差と密度効果による約5~10cmの和で概ね説明できる(気圧勾配の効果は1cm程度)。水塊が流れないとして実測値から求められた密度効果は計算値と比較すると開境界側で小さくなる傾向にあることから、流れによる影響が大きいことが考えられる。

図-10は計算により推定された水位(密度と海面気圧を考慮した計算結果)と流れによる水位変化の効果(密度と海面気圧を除いた計算結果)の関係を図-4と同様の手法で整理したものである。図-4と比較すると、計算で求められた密度効果は流れがないと仮定した密度の効果と異なっており、密度分布による流れ成分が現われていることがわかる。特に夏期の宇和島(豊後水道)において流れの効果による水位上昇量が大きくなっていることから、図-6に示されている豊後水道の高密度水塊は外海水から流入するため、水位上昇が生じていることが考えられる。

4. おわりに

本論文の結論をまとめると、以下のようになる。

- 1) 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外海水位を境界条件とした平面2次元数値解析手法を提案し、これにより水位の季節変動が概ね良く表せることを示した。

- 2) 海面気圧の効果は年に約12 cmあるが、この効果は実測された境界に含まれており、内海での流れに及ぼす気圧効果は気圧分布による数 cm程度である。
- 3) 密度効果は地形によっているため、海域毎に効果の現われ方が異なっている(10~20 cm程度)。夏期には海域間の密度差が大きくなり、この効果によって非線形性が增大することがわかった。

参 考 文 献

- 石崎 廣・斎藤 実(1978): 瀬戸内海における蒸発量について、沿岸海洋研究ノート, 第16巻, 第1号, pp. 11-20.
- 日比野忠史・浅井 正・細川恭史(2000a): 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, Vol. 47, pp. 1036-1040.
- 日比野忠史・駒井克昭・浅井 正(2000b): 瀬戸内海平均海面の推定, 水工学論文集, 第45巻, pp. 1073-1078.
- 柳 哲雄: 瀬戸内海の淡水・窒素・リン収支(1997), 海の研究, Vol. 6, No. 3, pp. 157-161.
- Unoki, S. (1983): Annual Variation of the Mean Sea Level and Its Inclination in a Bay, Coastal Engineering in Japan, Vol. 26, pp. 219-234.