

瀬戸内海平均海面の推定

ESTIMATION OF MEAN SEA LEVEL IN SETO INLAND SEA

日比野忠史¹・駒井克昭²・浅井正³

Tadashi HIBINO, Katsuaki KOMAI and Tadashi ASAI

¹正会員 工博 広島大学助教授 工学部第4類(建設系) (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)²正会員 工修 広島大学助手 工学部第4類(建設系) (同上)³正会員 工修 運輸省第三港湾建設局課長 海域環境課 (〒650-0024 神戸市中央区海岸通29)

In this analysis, Seto Inland Sea level is defined as the standard sea level of reference datum during zero sea level gradient between North Pacific and West Pacific, and zero atmospheric pressure gradient in North West Pacific Ocean.

Based on the assumption, the difference between Seto Inland Sea level and Pacific Ocean level depends on the summation of two components of sea level fluctuation; such as, local atmospheric pressure gradient and sea water density. It seems reasonable to suppose that the mean sea level in Seto Inland Sea can be estimated by global sea level fluctuation.

It is concluded that the sea level fluctuation in Seto Inland Sea is mainly caused by variation of sea water density during winter, and by sea water exchange during summer. The mean sea level in Seto Inland Sea is lower than that of the Pacific Ocean, especially in Kii Channel and Suo Sea of Seto Inland Sea.

Key Words : Mean Sea Level, Atmospheric Pressure Distribution, Sea Water Density

1. はじめに

沿岸域での海水交換量等を推定するためには基準海面を知ることが必要であるが、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ある。瀬戸内海においても潮位データから得られる平均潮位差は大きく(気象庁の観測による大阪と和歌山では約2.5m)、これらの値が平均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が報告されており^{1),2)}、統一された水位の基準面がないのが現状である。

一方で、海面水位は水温や気圧配置の関係が深いことが報告されており、これらの関係から平均海面を推定することが考えられる。宇野木¹⁾は内湾(伊勢湾)における月平均海面について海水密度、気圧、風の影響を調

べ、内湾における月平均海面の年変化に最も影響するのは密度の年変化であり、その次に気圧の年変化であると述べている。

本論文では運輸省第三港湾建設局による瀬戸内海総合水質測定調査資料、日本海洋データセンター³⁾潮位資料および気象庁年報を用いて、先ず、グローバルな気圧配置での気圧勾配が0で、かつ、北太平洋と西太平洋の水位勾配が0になる時期を求め、この時期に基準海面が表されると仮定して瀬戸内海平均海面を求めた。次に、外海と瀬戸内海の水位差が瀬戸内海周辺の気圧勾配の変化による水位変動と内海水塊の密度変化による水位変動の和であるとして、グローバルな水位振動から求めた瀬戸内海水位の基準面の妥当性を検討した。

2. 瀬戸内海周辺での水位の年較差

図-1には瀬戸内海周辺沿岸域における気象庁および海上保安庁の各検潮所で測定された(a)月平均水位(1985~1998年の月別平均値)の年較差(8月と2月の差)および(b)西日本における月平均気圧の年較差、図-2には瀬戸内海の各海域を代表する合計142地点で1989~1999年

に観測された水温・塩分及び水深（海図）から求めた密度差から導出された2月と8月の水位差（年較差）の分布が示されている。図-1中の・は観測点を表している。図-2に示されている水位差は湾・灘における水塊移動（移流・海水交換）はなく、水位は2月に最小、8月に最大になると仮定して平均水位からの変化量が同じになるとして求められている。なお、密度は海水状態方程式を用いて圧力は1気圧で近似して求められている。

図-1(a)での瀬戸内海での水位の年較差は、室戸岬・紀伊水道で最も小さく24cm～30cm（最高水位は9～10月、最低水位は2月）、瀬戸内海の北西側で最も大きく下関では37cm（最高水位は8月、最低水位は2月）となっており、太平洋側で年較差が小さいことがわかる。これに対して図-1(b)での気圧の年較差は、太平洋側で小さく（室戸岬で8hPa）、日本海側で大きく（下関で12hPa）となっており、水位の年較差との対応がよいことがわかる。しかし、瀬戸内海周辺海域における気圧の年較差に対する水位の年較差は約3cm/hPaあり、ローカルな気圧変化のみでは水位の変化量を説明することはできない。

密度変化から求めた水位の年較差（図-2）は瀬戸内海奥部で年較差が小さく（8cm以下）、瀬戸内海開口部で大きく（紀伊水道入口で約20cm）なっている。これは水位の変化量には水深の寄与が大きいためであり、水深の浅い瀬戸内海奥部では水位変化量が小さく見積もられる。開口部において水位変化量が大きいのは水塊移動がないと仮定したためであるが、実際には膨張による体積増加分は水平方向に伸張すると考えられるため、開口部付近の密度変化による水位変化量は過大評価されていることになる。図-1(a)に示されているように瀬戸内海奥部と開口部で水位の年較差の差は約10cmであり、この水位差が密度変化による水位変化分（8cm以下）と内外の気圧差（約3hPa）による水位変化分（約3cm）の和として考えるとオーガ的に一致する。すなわち、グローバルな流れによって決まる外海の水位の影響に加えて瀬戸内海周辺のローカルな気圧勾配と水塊の膨張・収縮による水位変動が重畳することによって瀬戸内海内の水位分布が決まると考えられる。

本論文では先ず（3章）、瀬戸内海外海の水位変動の特性を把握し、次に（4章）、外海での水位を基準とした瀬戸内海内の平均海面の推定を行う。

3. 気圧配置にともなった日本沿岸水位の変動

図-1(a)に示されているように四国沿岸周辺では約25cmの水位の年較差がある。この年較差はローカルな気圧場（四国沿岸域で気圧の年較差約10hPa）や体積変化で決まるものではなく、グローバルな大気海洋運動に依っているものと考えられる⁴⁾。図-3には北西太平洋に沿った（石垣島；124.2° E, 24.4° N から

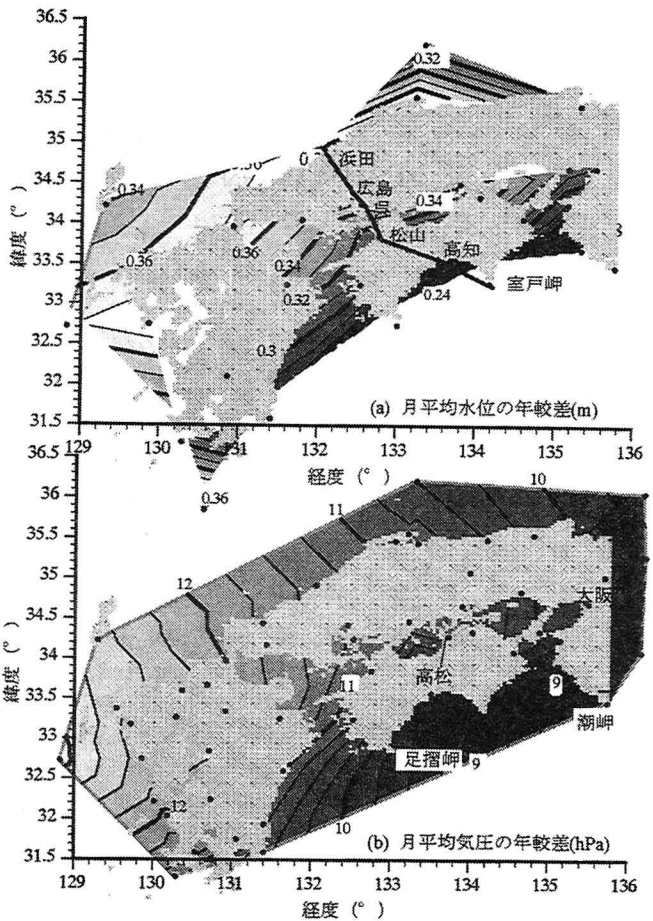


図-1 月平均水位・気圧の年較差の分布

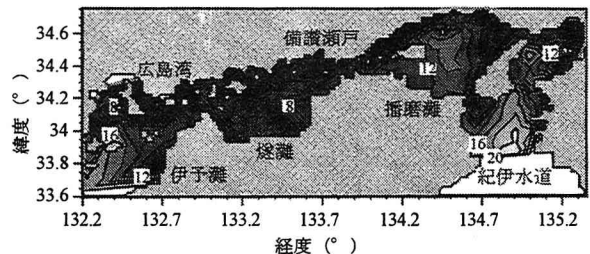
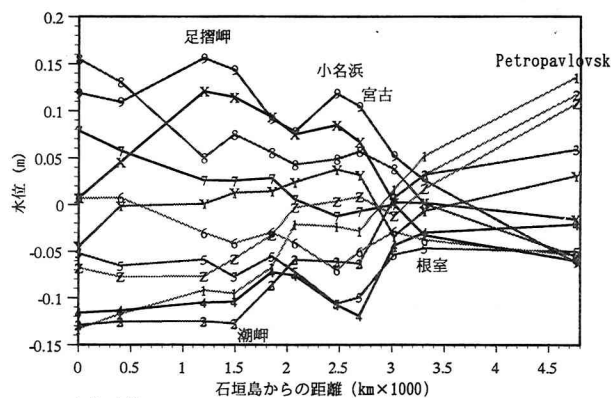


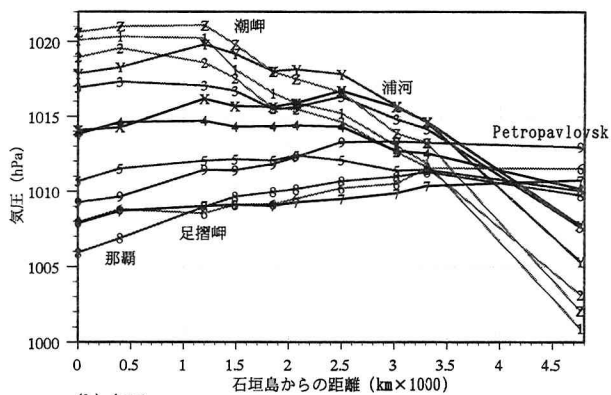
図-2 密度の年較差から求めた水位の分布

Petropavlovsk ; 158.6° E, 53° N) (a)水位勾配と(b)気圧勾配の年変化、図-4には足摺岬からPetropavlovsk間の水位差と気圧差との関係（年変化）が示されている。

図-3(a)と図-3(b)を比較するとPetropavlovskでは気圧変化と水位変化に位相差は生じていないが、日本沿岸域では約3ヶ月の位相差（水位変動の遅れ）があり、北日本と西日本で水位勾配の挙動が異なっていることがわかる。水位変動の遅れは2～4月（足摺岬、潮岬付近で約4hPaの気圧低下に対して約2cmの水位上昇）と7～9月（同じく約3hPaの気圧上昇に対して10cm以上の水位上昇）が要因となっている。黒潮の接岸する四国～紀伊半島と親潮、黒潮および津軽暖流が混合する三陸沖で水位変動が大きくなっており（図-3(a)）、北日本と西日本における水位勾配の挙動の違いは海流の動きとの関連が大きい（3～5月頃の三陸での水位低下は親潮の南下、9



(a) 水位



(b) 気圧

図-3 北太平洋沿岸の水位・気圧の年変化
(図中のシンボルは月を表す。X,Y,Zは10,11,12月)

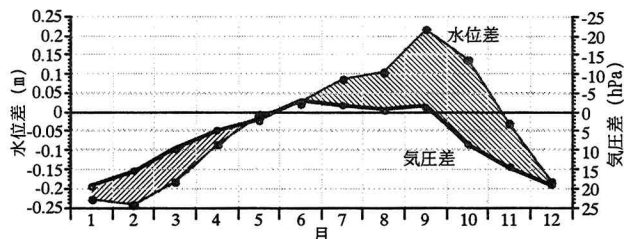
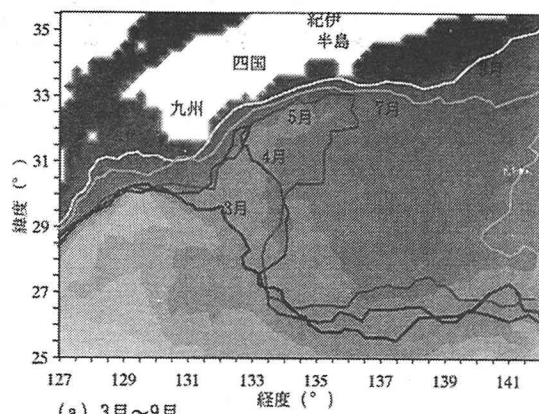


図-4 北太平洋沿岸の水位差と気圧差の関係

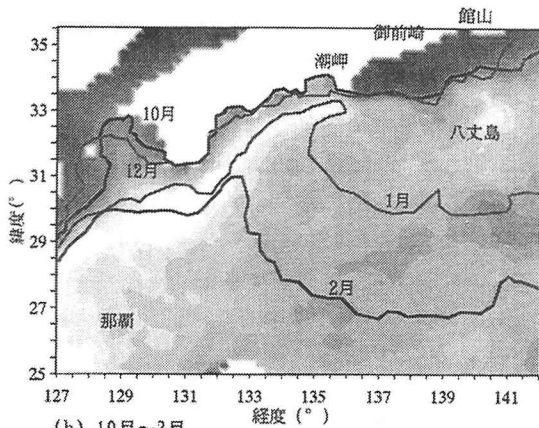
～10月頃の四国沿岸周辺での水位上昇は黒潮の接岸)と
考えられる。

図-4に示されている水位勾配と気圧勾配の関係によると12～1月と5～6月に気圧勾配に対する水位勾配の変化率が -1cm/hPa となっており、これらの期間に生じる水位勾配は気圧勾配のみに依存していると考えられる³⁾。

気圧勾配から求められる水位勾配 (-1cm/hPa の変化率として) が実際の水位勾配よりも小さくなる2～3月および水位勾配が大きくなる7～11月の水位状態は黒潮の四国～紀伊半島周辺への離着岸によって説明できる。図-5に1990～1997年までの平均水温分布 (水深100m) から求められた水温 20°C の等値線の年変動が示されている。(a)には暖水塊が四国沿岸に近づく3～9月, (b)には暖水塊が遠ざかる10～2月の等値線が示されている。なお, 等値線の背景図は(a)3月と(b)10月の水温分布を表して



(a) 3月～9月



(b) 10月～2月

図-5 黒潮の動き (四国沿岸周辺への接岸と離岸状況, 図中の実線は 20°C の等値線を表す。)

いる。 20°C を超えた水塊は9月頃に紀伊半島に着岸し, 10月頃に九州～四国～紀伊半島に接岸している。四国沿岸では3月に 16°C 以下の水塊が接岸していたのに対し, 10月には 20°C を超えた水塊が接岸しており, これらの水塊による水位の低下, 上昇が加わることで $\pm 1\text{cm/hPa}$ 以上の水位勾配が生じたと考えられる。

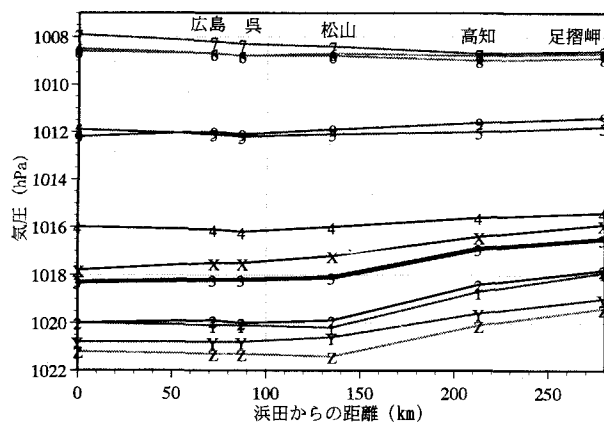
以上のことから次章の解析では水位勾配が気圧勾配のみに依存し, 気圧勾配が0となる6月初旬に瀬戸内海周辺における水位勾配も0となる基準海面を仮定する。

4. 平均海面の推定と海面の季節変動特性

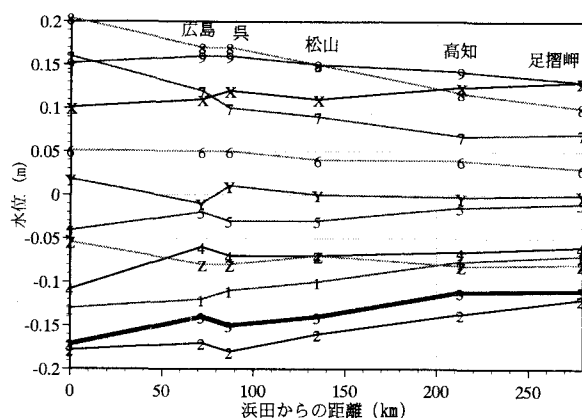
(1) 気圧勾配を用いた平均海面の推定

図-6は水位の最大勾配が生じている日本海沿岸 (浜田) から太平洋沿岸 (室戸岬) に至る地点の(a)月平均気圧および(b)月平均水位の縦断分布の季節変動を示している。なお, 水位は各観測点での5月と6月の平均水位を基準としており, 気圧軸は水位と対応させるため下向きを正にとってある。

(a) 気圧は各地で12月に最も高くなり ($1021\text{hPa} \sim 1019\text{hPa}$), 7月に最も低くなる ($1009\text{hPa} \sim 1008\text{hPa}$)。



(a) 気圧



(b) 水位

図-6 月平均気圧・水位の縦断分布の年変動

(図-1(a)中に示した実線に沿った縦断分布, 図中のシンボルは月を表す. X,Y,Zは10,11,12月.)

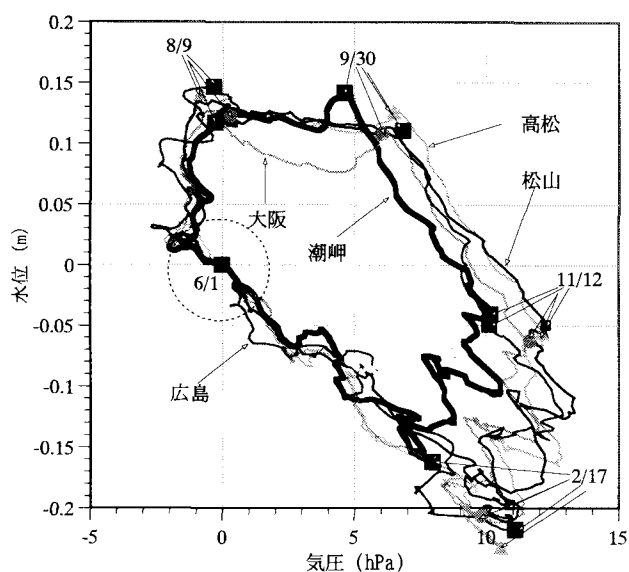


図-7 気圧～水位の関係

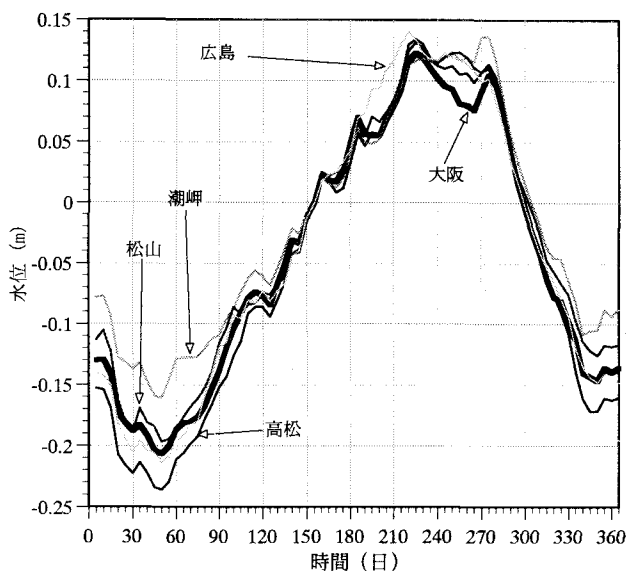


図-8 月平均水位の季節変動

10～3月には日本海～瀬戸内海で気圧が高くなり, 松山と室戸岬の気圧差は約2hPaになる(以下, 太平洋側の気圧が高い場合を正とする)。これに対して6～7月には松山と室戸岬の気圧差は約-0.5hPa(気圧勾配が逆転)となり, 冬季に比べて気圧差は約2.5hPa小さくなる。このため気圧勾配は5～6月頃と8～9月頃に逆転する。

(b)水位は日本海側では7～8月, 太平洋側では9～10月に高くなり, 2月には全海域で低くなる。このため水位勾配は5～6月と9～10月に逆転する。

以上より, 気圧勾配, 水位勾配ともに5～6月に最小となることがわかる。すなわち, 第3章で仮定された水位の基準面を用いた水位変動は気圧変動とよく対応しており, ローカルな気圧・水位関係に対しても5～6月の海面を基準海面として用いることが可能であることが示唆される。

図-7は潮岬および瀬戸内海沿岸各地(大阪, 高松, 松

山, 広島)における気圧と水位(6月1日の水位を基準とした)の日データを15日間で移動平均してプロットしたものである。図-8は図-7に示された水位を時系列で示したものである。図-7から気圧に対する水位の変化は時計廻りのヒステリシスを描いており, 各海域でヒステリシスの形状が異なっていること, 気圧～水位関係は季節によって変化する範囲が決まっていることがわかる。気圧～水位関係がヒステリシスを描くのは, 図-4に示したように水位が気圧勾配の他に海流の影響を受けているためである(ただし, 瀬戸内海では水塊の密度変化は無視できない)。図-7において潮岬の気圧～水位曲線を基準にすると, 瀬戸内海側では8月頃に水位が高くなっていること, 9月頃から2月頃まで気圧が高く, 水位が低くなっており, 特に1月頃に大阪, 高松で水位低下量が大きいことがわかる。

気圧変化(シベリア高気圧に伴う北西～南東方向の気

圧勾配) に対する水位変化が1cm/hPaよりも大きい瀬戸内海奥部(燧灘, 備讃瀬戸, 播磨灘)での7月頃の水位上昇や1月頃の水位低下は, 潮岬と瀬戸内海奥部で約10°Cの水温差が生じることや外海と内海で水位の伝播の遅れないことから, 瀬戸内海奥部での密度変化によるものと考えられる。

(2)瀬戸内海周辺海域での密度変化に伴う水位変動特性

図-9には図-2で用いた水温, 塩分の観測データの平均値から求めた瀬戸内海各海域の(a)水温と(b)塩分の近似曲線および, この近似曲線から求められた(c)密度, (d)密度変化による水位変動が示されている。図-9(a), (b)中の・は実測水温および塩分を示しており, 近似曲線は時間と物理量から最小2乗法によって求められている。図-9(d)は(c)による海域の平均密度変化率から平均体積変化率を求め, 各海域の平均水深を乗じることにより水位変動に換算したものである。すなわち図-9(d)に示された水位変動は水塊移動(移流・海水交換)がないと仮定して推定される変動量である。

次に, 図-9(d)で求められた水塊移動がないと仮定した密度変化による水位変動曲線を用いて瀬戸内海での密度変化による正味の水位変動量の推定を行う。図-10には(a)大阪湾, (b)播磨灘, (c)安芸灘, (d)広島湾における潮岬との水位差(細薄線), 潮岬との水位差から潮岬と水位観測点の気圧差分を差し引いた水位(太濃線)および図-9(d)で求めた密度変化による水位(太薄線)の季節変動が示されている。潮岬との水位差は, 密度変化による水位変動と潮岬と水位観測点間の気圧勾配(北西～南東方向)による水位変動の和を表している。したがって, ハッチされた部分が本仮定に基づいた密度変化による正味の水位変動の推定値であるといえる。

図-10に示されているように全海域における気圧補正した潮岬との水位差(太濃線)は, おおむね図-9(d)で求めた水塊移動がないと仮定した密度変化による水位変動(太薄線)内にある。両者の差は各海域での水塊移動(移流, 海水交換)による水位変動を表すと考えられる。したがって, 瀬戸内海では寒候期に水塊の収縮による水位低下が大きく(水塊移動が小さい), 暖候期には水塊移動による水位変動が大きいことがわかる。

以上より, 第3章で推定された水位の基準面を用いれば, 密度変化による正味の水位変動を表すことができるため, 図-6から推定された基準海面は妥当なものといえる。

図-11に第3章で推定された基準海面を用いたときの瀬戸内海の平均海面を示す。ここでは潮岬と各観測点の平均水位の差を平均海面として表している。図から瀬戸内海内の平均海面は外海(潮岬)よりも数cm程度の差でしかないが, 紀伊水道と周防灘で低いことがわかる。

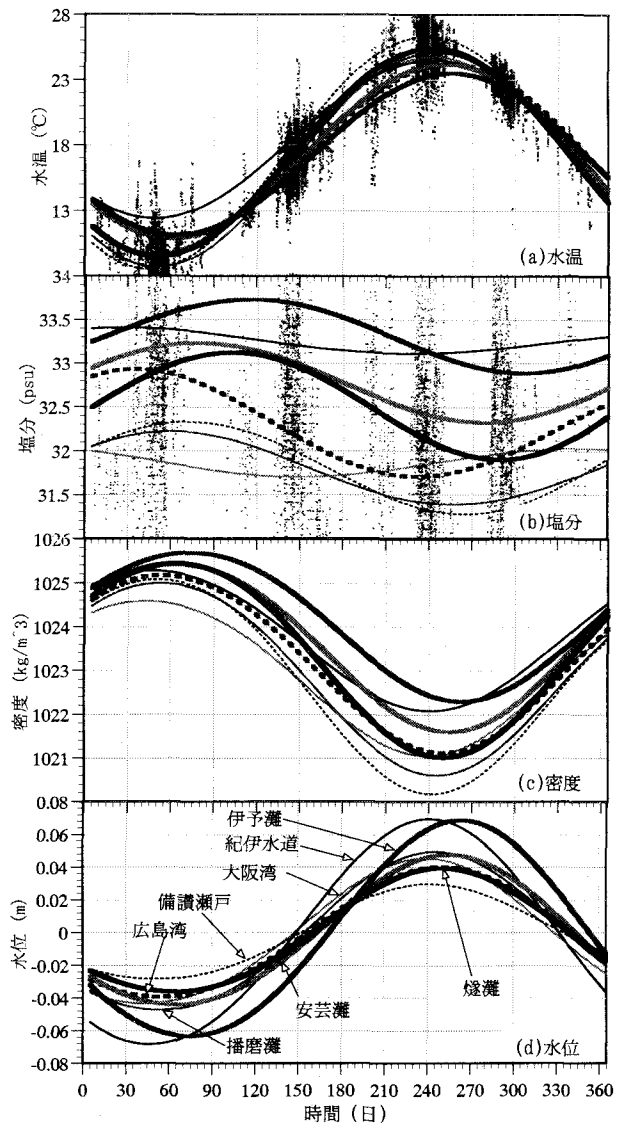


図-9 海域別の水温・塩分・密度の季節変動および密度変化による水位変動

5. おわりに

本論文では先ず, グローバルな気圧配置での気圧勾配が0で, かつ, 北太平洋と西太平洋の水位勾配が0になる時期を求め, この時期に基準海面が表されると仮定して瀬戸内海平均海面を求めた。次に, 外海と瀬戸内海の水位差が瀬戸内海周辺の気圧勾配の変化による水位変動分と内海水塊の密度変化による水位変動分の和であるとして, グローバルな水位振動から求めた瀬戸内海水位の基準面の妥当性を検討した。得られた結論は次のとおりである。

- (1)瀬戸内海での水位の年較差は24～30cmに対して, 気圧の年較差は8～12hPa(瀬戸内海周辺における気圧の年較差に対する水位の年較差は約3cm/hPa), 季節的な密度変化による水位変動は10cm程度である。し

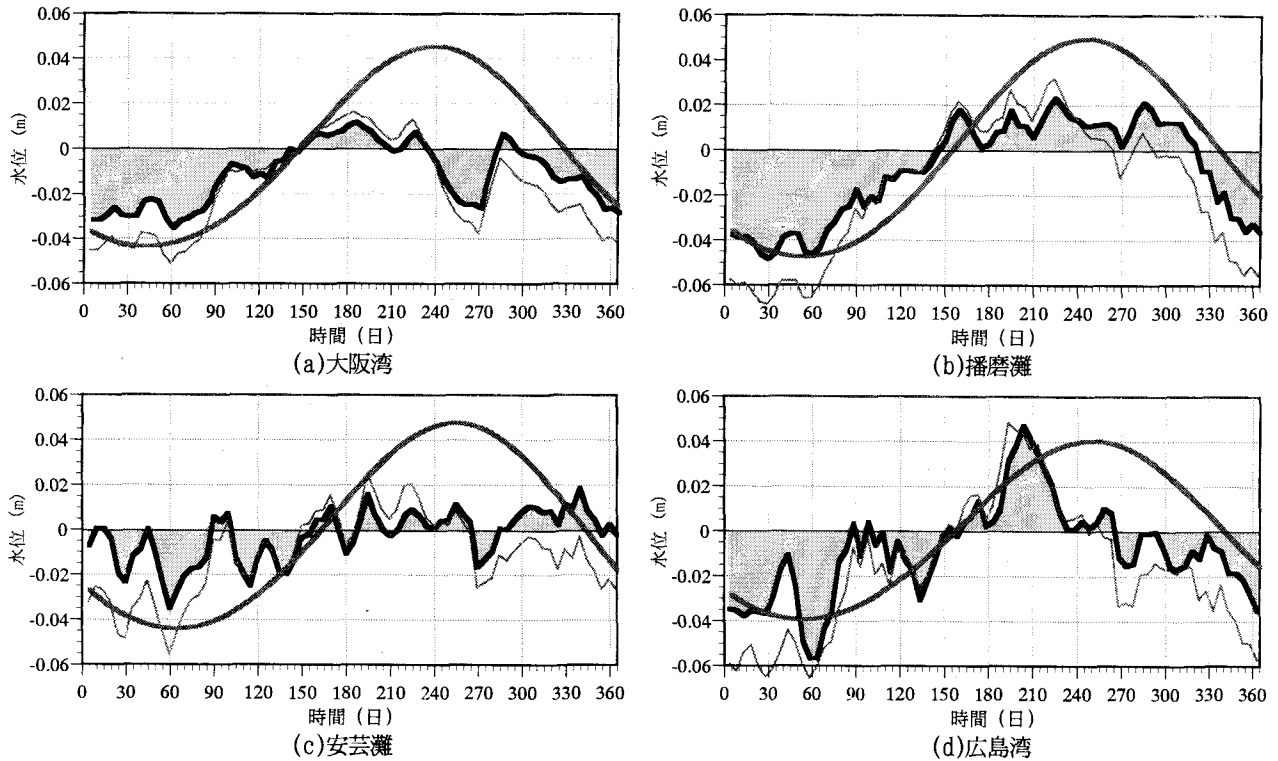


図-10 潮岬との水位差の季節変動と密度変化による水位の比較

(細薄線は潮岬との水位差，太濃線は気圧補正後の水位，太薄線は図-9で求めた密度変化による水位を表している)

たがって，ローカルな気圧変化と密度変化のみでは水位変動量を説明できない。

(2)北西太平洋沿岸(足摺岬からPetropavlovskまで)のグローバルな気圧勾配～水位勾配の季節変動から，水位勾配が気圧勾配のみに依存している時期(気圧勾配と水位勾配の変化率が 1cm/hPa)に瀬戸内海周辺の水位勾配が0になる基準海面を仮定すると，瀬戸内海周辺における6月初旬の海面が基準海面と考えられる。

(3)(2)で仮定された基準海面を用いた水位変動にローカルな気圧勾配による補正を行うことで密度変化による正味の水位変動を推定した結果，観測値から求まる密度変化による水位変動によく対応したことから，(2)の仮定に基づく基準海面の推定は妥当であるといえる。

(4)瀬戸内海では寒候期に水塊の収縮による水位低下が大きく(水塊移動が小さい)，暖候期には水塊移動による水位変化が大きい。

(5)瀬戸内海の平均海面は外海に比べて数cm低く，特に紀伊水道と周防灘で低くなっている。

謝辞：日本沿岸の潮位データは日本海洋データセンター³⁾のホームページ，瀬戸内海周辺の気圧データは地上気象観測原簿過去データCD-ROM(気象庁)および気象年報CD-ROM(気象庁)，北西太平洋の気圧データは世界気象資料(気象庁)から入手している。

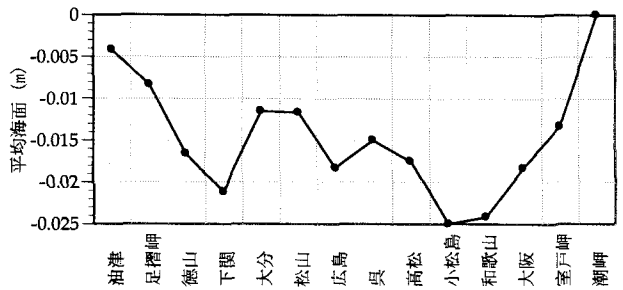


図-11 瀬戸内海の平均海面

参考文献

- Unoki, S. and Isozaki, I.: 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, 1965.
- 村上和男, 山田邦明: 我国沿岸の海面水位の長期変動の特性とその要因, 海岸工学論文集, No.39, Vol.2, pp.1026-1030, 1992.
- 日本海洋データセンター, 海洋データオンライン提供サービス(JDOSS), http://www.jodc.jhd.go.jp/online_hydro_j.html
- Hibino, T. and Furukawa, K.: Preliminary Use of Global Meteorological Information as an Indicator for Long Term Water Exchange in an Estuary – Development of Aleutian Low and Ocean Current -, *27th International Conference on Coastal Engineering*, No.211, 2000. (in printing)
- 宇野木早苗: 沿岸の海洋物理学, 東海大学出版会, 1993.

(2000.10.2受付)