

順圧海洋の短周期変動特性

吉田 祥子*¹, 広瀬 直毅², 市川 香², 青木 茂³

¹九州大学大学院総合理工学府

²九州大学応用力学研究所力学シミュレーション研究センター

³北海道大学低温科学研究所

Abstract

The purpose of this study is to examine high-frequency sea level variations induced by atmospheric disturbance, such as air pressure and surface wind, or tidal components. In a barotropic model, we shifted model poles from original positions to China and South America. The ocean balances itself as the IB when it is forced by the air pressure alone, because the average sea surface height is negligible. The standard deviation of the sea level forced by the air pressure is more than twice as strong as that is forced by the wind stress. The air pressure induces strong deviation around South Island of New Zealand and in the eastern equatorial region. It is found that the 12 hourly constituent of the atmospheric tide S2 is aliased in the model's forcing because the twice data interval fits in the time cycle exactly. The atmospheric S2 component gives a strong impact upon the ocean, which is found by an experiment forced only by the S2 component of the air pressure.

1. はじめに

衛星高度計や重力計などの Nyquist 周期以内 (数十日から数日) の変動が問題となっている。それらの高周波海洋変動を引き起こす原因には海面気圧と海上風が考えられており、様々な研究が行われてきた。まず Fukumori et al. [1998] が、風成順圧変動に関連した早い海面変化が、高緯度において衛星高度計観測データにエイリアシングしている可能性を指摘した。同時に、その高周波変動は空間的に一様ではなく、閉鎖的な海域でより強い変動があることも報告した。Stammer et al. [2000] は、海上風で駆動した海洋大循環モデル (OGCM) の短周期海面変動計算結果が TOPEX/POSEIDON (T/P) の観測とよく一致することを示した。一方、Ponte [1993] は現実的な大気圧変動に対する順圧海洋の応答をシミュレーションし、数日以内と大スケールにおいて、計算結果が静的な (inverted barometer, IB) 応答から大きく乖離することを示した。さらに Ponte and Gaspar [1999] や Mathers and Woodworth [2001] は、T/P データにおける IB からの偏差が大気圧の変動に対する海洋の力学的な応答であることを示した。また Matsumoto et al. [1995] により短周期変動の潮汐成分はかなり正確に計算されるようになった。本研究ではこのような数日から数十日周期の海面変動を正確に推定するため、全球順圧モデルを風応力や大気圧といった気象擾乱で駆動し、その変動特性を解析する。本研究では、下記のような海面高度の短周期変動を考える。

$$\eta_{HF} = \eta_{IB} + \eta_{prs} + \eta_{wind} + \eta_{tide} \quad (1)$$

ここで、 η は海面高度、下付きの IB、prs、wind、tide はそれぞれ inverted barometer (IB) 成分、圧力・風の変動によって引き起こされる成分、短周期の潮汐成分を意味する。また Ponte [1993] に

* E-mail: sachiko@riam.kyushu-u.ac.jp

より海面高度の IB 成分は次式より解析的に求められる。

$$\eta_{IB} = \frac{1}{\rho g}(\overline{P_a} - P_a) \quad (2)$$

ここで、 ρ は密度、 g は重力加速度、 P_a は局所的な海面圧力、 $\overline{P_a}$ は全球海洋平均海面圧力を意味している。本研究では、(1) 式左辺のモデルの出力結果 η_{HF} と (2) 式によって求められた η_{IB} を用いて IB 補正を行い、起潮力や各気象擾乱に対する各力学短周期成分 η_{prss} 、 η_{wind} 、 η_{tide} がよような特性を持つかに焦点をあてて計算を行う。

2. 順圧モデル

単層の球面座標浅水波モデル (Hirose and Yoon,1996) を用いる。通常の緯度・経度球面座標からモデル極点を中国大陸と南米大陸上に移し、北極海を含む全球海洋で計算を行う。モデル極付近の東シナ海など、日本付近をより高解像度で計算することができる。その反面、CFL 条件に基づく時間ステップは 15 秒と厳しい。モデルの水平格子間隔は、緯度・経度方向ともに 1 度であり、各変数の配置は、Arakawa C-grid を用いる。底摩擦係数について、Hirose et al. [2001] より、モデルの最適摩擦係数は 2.0cm/s と推定され、その係数は海底地形の複雑さに比例し、海域によって異なることが指摘されている。本研究ではその影響を考慮に入れ、Jayne and Laurent [2001] に基づいて摩擦項のパラメータ化を行い、海底地形の複雑さによる内部波への消散項を新たに加えた。European Centre for Medium-range Weather Forecast (ECMWF) の 1996 年 1 月～1999 年 12 月、6 時間毎の海上風・圧力データでモデルを駆動する。

3. 海底地形

海底地形は ETOPO5 の地形データを用い、モデルのグリッドに合わせて 1 度×1 度毎に平均を取って使用した。全球海洋で IB が成立するように、外洋と流入流出のない閉じた海や湖はすべて陸地とした。さらに、多くの小さな島が複雑に存在する領域 (例えば北極海など) では水が出入りするよう設定した。また 1 度の海底地形を 5 分のデータから作成する際に陸地化してしまった領域 (ジブラルタル海峡) ではその周辺の平均値を求めその場所の深さとした。50 メートルより浅い領域は 50 メートルとし、最大水深は約 6500 メートルである (図 1)。

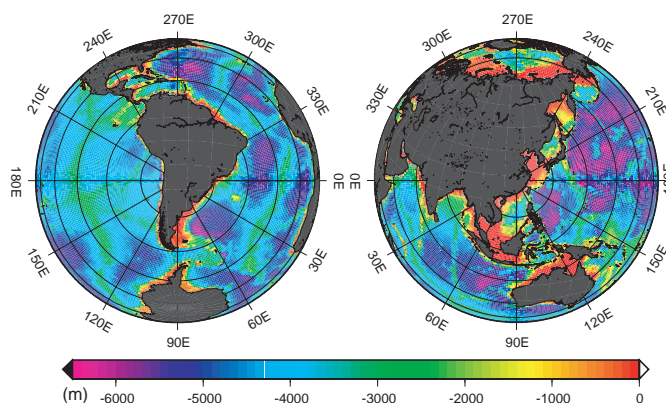


図 1: Model topography. Computational poles are shifted to the South America and China.

4. 結果

4.1. 駆動力 - ECMWF データ

図 2 に大気圧と風応力でモデルを駆動した場合の 4 年間の海面高度平均値と標準偏差を示す。気圧応答に対し、IB 補正を行っている。図 2-(a) の平均値より、風成循環によって生じた海洋大循環に対応した海面分布が得られている。また、標準偏差から太平洋の東部赤道域やニュージーランド南東部、マダガスカル島周辺で変動の大きな領域が確認できる。南北の両極周辺でも変動が 5cm を超えやや大きい。

図 3 と図 4 は、それぞれ大気圧のみ、風応力のみでモデルを駆動した場合の平均値、標準偏差である。気圧駆動の平均値として全球でほぼ IB が成り立っており、振幅が 0.1cm 以下となっている。即ち、IB 補正後の海面高度の平均値分布はほぼ風成起源によるといえる。両者の標準偏差の図を比較すると逆に、風駆動成分は気圧駆動に対して半分以下程度である。ニュージーランド南東部や太平洋東部赤道域において、海面高度の時間変動より、気圧の静的応答 (IB) から独立した局所的な短周期変動が見られた。両領域でスペクトル解析を行った結果、ほぼ半日周期の変動が卓越していた。そのためモデル駆動力となる外力の気圧データに半日周期成分が卓越していると考え、調和解析で 12 時間周期成分について解析を行った。

図 5-(a) に気圧データの 12 時間周期 S2 成分を示す。大気 S2 分潮周期は 12.00h のため、データ間隔のナイキスト周期と一致し、この半日周期成分がデータからエイリアジングしている。大気 S2 潮汐は主に太陽放射加熱による熱起潮力によって生じ、大気潮汐分潮の中では振幅が最も大きく、赤道域では最大 1.5mbar ほどに達する。そのためこの大気 S2 潮が、海洋に及ぼす影響は無視できない。そこでこの 12 時間周期成分を簡単な関数で近似し、データの中に含まれる 12 時間周期成分を除去した。近似には経度方向には三角関数、緯度方向には調和解析から得られた分布をもとに、ルシャンドル関数を用いた。

図 6 は補正後の標準偏差である。補正は 6 時間毎の気圧データに対して、前述の関数を用いた近似で補正を行った。補正後には、大気 S2 潮による変動は含まれてない。補正前に確認された太平洋東部赤道域における変動の大きな領域は、補正後では消滅し、気圧データのエイリアジングが原因であったことがわかる。しかしニュージーランド周辺の偏差の大きかった領域については、補正後にも変わらず存在し、原因は大気 S2 潮ではないことがわかる。

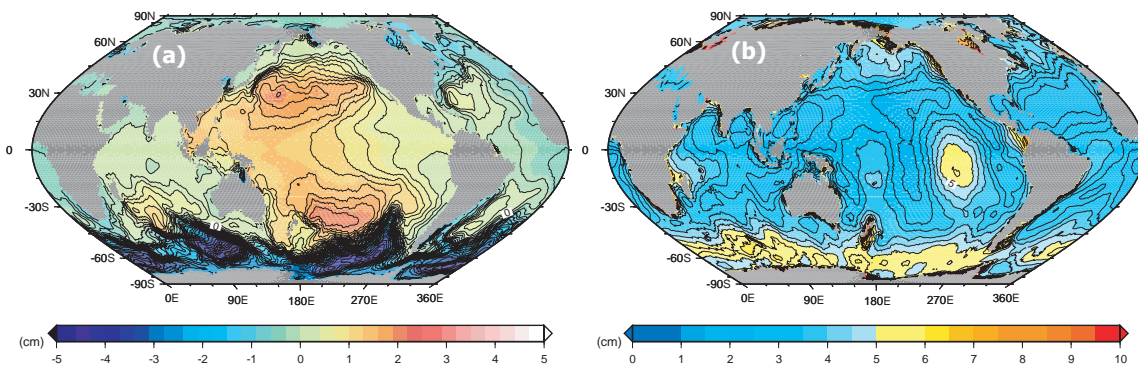


図 2: (a) Average and (b) standard deviation of sea level forced by air pressure and surface wind.

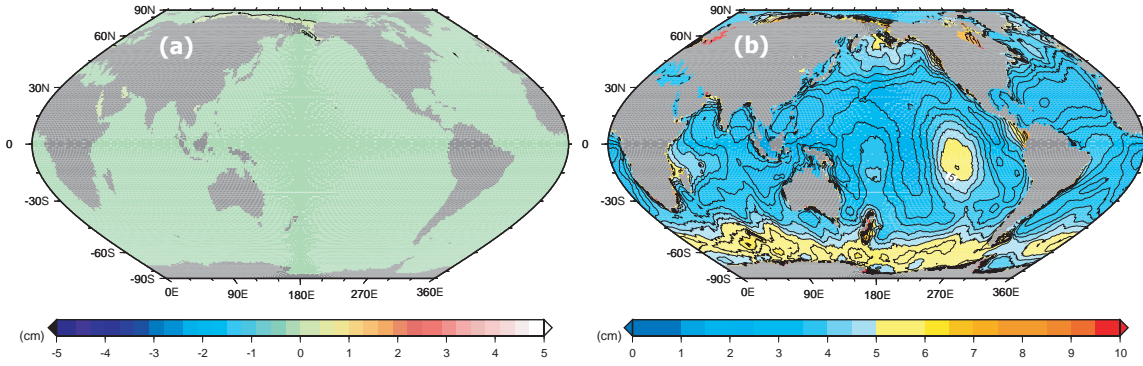


図 3: (a) Average and (b) standard deviation of sea level forced by air pressure.

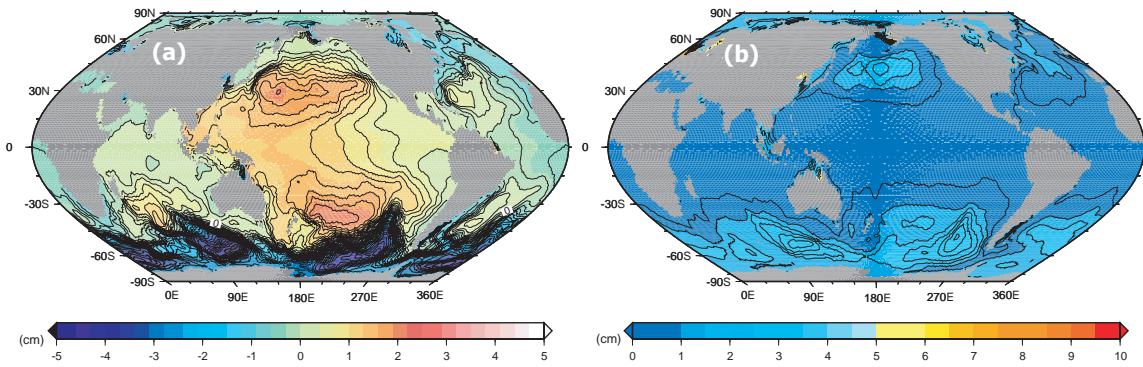


図 4: (a) Average and (b) standard deviation of sea level forced by surface wind.

4.2. 短周期潮汐成分

順圧海洋における 12 時間大気 S2 潮の影響を調べるため、モデルを潮汐のみで駆動した。海洋の潮汐 12 時間成分の中には、直接海洋の起潮力によるものと大気 S2 潮汐起源によるものがあり、そのうちの大気 S2 潮汐起源がどの程度含まれるのかに注目する。図 5-(b) に示される近似された大気 S2 潮汐でモデルを駆動し得られた大気 S2 潮汐起源の振幅を図 7-(a) に示す。さらに The Modular Ocean Model (MOM)4.0 の起潮ポテンシャルの与え方を参考に、強制振動による海洋 S2 潮汐成分を計算した (図 7-(b))。両者を比較すると、大気 S2 潮に対する海面の応答は海洋 S2 潮によって励起されるものの 20 % 程度の振幅を持つことがわかる。また特に大西洋では似たような分布を示し、インド洋では両者の違いが大きい。大気 S2 潮汐起源と起潮ポテンシャルによる海洋 S2 潮汐の位相のずれを考慮に入れて重ね合わせた結果、海洋 S2 潮汐は Cartwright and Ray(1994) に報告されるように振幅が減少し、位相がやや遅れることが確認された。しかし位相の遅れ方は、全球で場所によって異なり一様ではなかった。

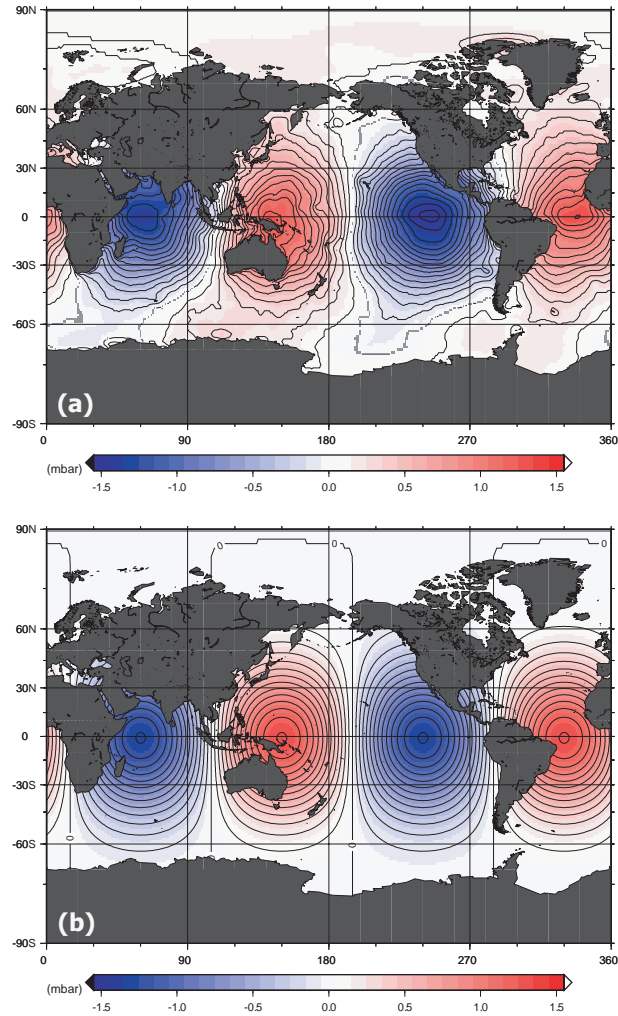


Figure 5: (a) 12 hourly constituent of the S2 in the air pressure data. (b) The ideal distribution of S2 atmospheric tidal component calculated by simple function.

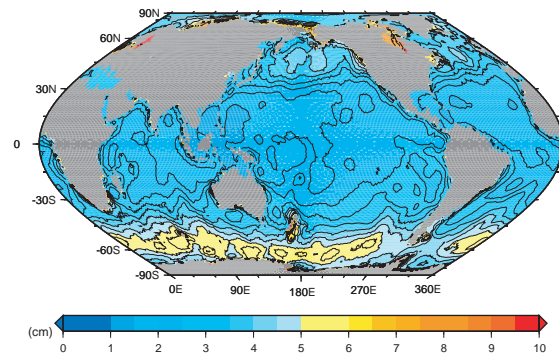


Figure 6: Standard deviation of the sea level forced by the air pressure after the dealiasing modification.

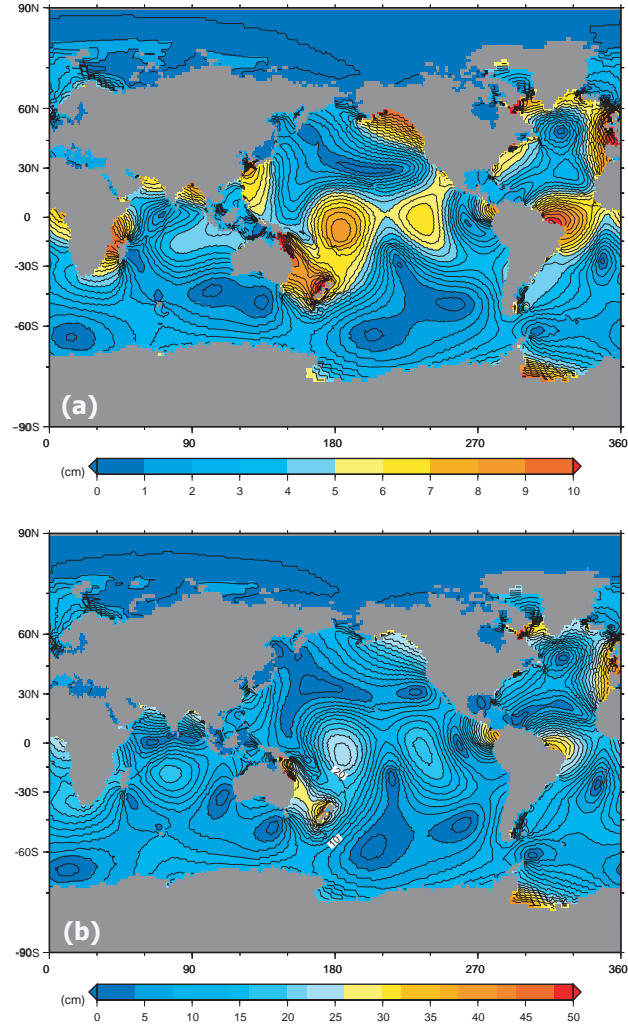


図 7: (a) The amplitude of sea level forced by S2 atmospheric tidal component. (b) The amplitude of S2 ocean tidal component.

5. まとめ

気象擾乱に対する全球海洋の短周期応答特性を調べるために、モデル極を中国・南米に移動した浅水波モデルで計算を行った。風駆動によって励起される海面高度の短周期変動は、海面気圧駆動成分と比較すると半分以下と弱い応答であった。気圧に対する局所的な海面高度の短周期変動が、太平洋東部赤道域やマダガスカル島周辺に確認され、低緯度域の変動の多くが外力データのエイリアジングによって引き起こされたものであることがわかった。ニュージーランド諸島周辺の短周期変動については、潮汐とは無関係の原因だと考えられる。

大気 S2 潮汐によって励起された海洋 S2 潮汐成分は、起潮ポテンシャルより計算される海洋 S2 潮汐の 20 %ほどの振幅を持っていたが、両者を重ね合わせると海洋 S2 潮汐は Cartwright and Ray(1994) に報告されるように、振幅が減少し位相がやや遅れる同様の結果が得られた。しかしこ

の位相の遅れについては全球一様ではなく、その分布についてこれから解析する余地がある。

References

- [1] Cartwright, D. E, and Ray, R. D, On the radiational anomaly in the global ocean tide with reference to satellite altimetry. *OCEANOLOGICA ACTA*, 17, 453-459, 1994
- [2] Fukumori, I., R. Raghunath, and L.-L. Fu, Nature of global large-scale sea level variability in relation to atmospheric forcing: A modeling study. *J. Geophys. Res.*, 100, 25027-25039, 1995
- [3] Hirose, N., and J.-H. Yoon, Barotropic Response to the Wind in the Japan Sea. *Proc. 4th CREAMS Workshop*, 39-43, 1996.
- [4] Hirose, N., I. Fukumori., V. Zlotnicki, and R. M. Ponte, Modeling the high-frequency barotropic response of the ocean to atmospheric disturbances: Sensitivity to forcing, topography, and friction. *J. Geophys. Res.*, 106, 30987-30995, 2001
- [5] Hirose, N., I. Fukumori, and R. M. Ponte, A non-isostatic global sea level response to barometric pressure near 5 days, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 2441-2444, 2001
- [6] Jayne, S. R., and Laurent, L.C.S, Parameterizing Tidal Dissipation over Rough Topography. *Geophys. Res. Lett.*, 28, 811-814, 2001
- [7] Matsumoto, K., M. Ooe, T. Sato, and J. Segawa, Ocean tide model obtained from TOPEX/POSEIDON altimetry data, *J. Geophys. Res.*, 100, 25319-25330, 1995
- [8] Ponte, R. M. and P. Gaspar, Regional analysis of the inverted barometer effect over the global ocean using TOPEX/POSEIDON data and model results, *J. Geophys. Res.*, 104, 15587-15601, 1999
- [9] Stammer, D., C. Wunsch, and R. M. Ponte, De-aliasing of global high frequency barotropic motions in altimeter observations, *Geophys. Res. Lett.*, 27, 1175-1178, 2000
- [10] Tierney, C., J. Wahr, F. Bryan, and V. Zlotnicki, Short-period oceanic circulation: implications for satellite altimetry, *Geophys. Res. Lett.*, 27, 1255-1258, 2000