太平洋・日本近海での長期海面変動特性と 海面上昇の将来予測

鷲田 正樹1・山下 隆男2・高橋 智幸3

¹正会員 セントラルコンサルタント株式会社 大阪支社 (〒530-6012 大阪市北区天満橋1-8-30)
E-mail:mwashida@central-con.co.jp
²正会員 セントラルコンサルタント株式会社 大阪支社 (〒530-6012 大阪市北区天満橋1-8-30)
E-mail:tyamashita@central-con.co.jp
³正会員 関西大学教授 社会安全学部 (〒569-1116 大阪府高槻市白梅町7番1号)
E-mail:tomot@kansai-u.ac.jp

IPCC, AR5では人間活動の最悪シナリオRCP8.5で,全球平均の海面上昇量は2100年で100cmに達する可能性が示されているが,実際の上昇量は海域により大きく異なる.特に,貿易風の影響を受ける赤道太平洋,黒潮の影響を受ける日本近海では全球平均とは異なる変動特性になっているため,長期変動特性を的確に考慮した海面上昇量の予測が必要である.本研究では,NASAの海面変動再構築データセット,Restructured Sea Level Version1 (RSLV1)を解析し,太平洋全域および日本近海での長期的な海面変動特性を示すとともに,RSLV1の観測結果から季節型自己回帰和分移動平均過程(SARIMA)モデルを用いて,季節性を変化させた2070年までの日本近海の海面上昇予測を行った.さらに,季節性を30年と仮定した場合の2015,2040,2060年の海面上昇量の平面分布を示した.

Key Words : Restructured Sea Level Version 1, Relative Sea Level, Pacific Ocean, ENSO, Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average Process

1. 緒 言

気候変動に関する政府間パネル(IPCC),第五次報告 書(AR5)¹⁾で示された全球平均の海面上昇量は、1901~ 2010年の観測で1.7mm/yr、1993~2013年で3.2mm/yrであ る.将来予測では、2081-2100年間の全球平均海面上 昇量は、人間活動のシナリオRCP2.6で0.26~0.55m, RCP4.5で0.32~0.63m,RCP6.0で0.33~0.63m,RCP8.5 で0.45~0.82mとなり、2100年にはRCP8.5シナリオで 0.52~0.98mの全球平均海面の上昇量が見込まれる.

実際の上昇量は海域により異なる.特に,貿易風の 影響を受ける西赤道太平洋の海面変動量は全球平均の 3倍以上になっているため,ここでの予測には,温暖 化によるトレンド以外にも,ENSOや太平洋十年規模 変動等の大気海洋相互作用の長周期振動成分を考慮す る必要がある.わが国の海面変動では,黒潮の影響を 受ける太平洋沿岸海域と,対馬海流が流入する日本海 とに分けて検討する必要がある.

本研究では、NASAにより構築された1950~2009年の 海面変動再構築データセット、Restructured Sea Level Version1 (RSLV1)を解析し、太平洋全域および日本近海 での長期海面変動特性に解析するとともに、季節変動 型自己回帰和分移動平均過程(SARIMA過程: Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average Process)モデルによる2009年以降2070年までの海面上昇量の将来予測を試みる.

2. 海面上昇の実態と予測

IPCCのAR5¹から、全球規模の海面上昇の実態と予測 を概観する.図-1(a)は物理過程に基づく数値モデルに よる全球平均の相対的海面高さの時系列変化を示す (WG1の報告書).観測値は潮位記録と衛星海面高度 計の観測値、予測値は最悪の人間活動のシナリオ RCP8.5と最善シナリオRCP2.6の場合の大気海洋結合モ デルの結果をモデル毎の変動幅(グラデーション)と 平均値(実線)が示されている.

図-1(b)は、1998年から2013年の間に衛星海面高度計 で観測された相対的海面高度の年間上昇量(mm/yr)を分 布を示している.貿易風の影響を受ける赤道太平洋西 部海域のフィリピンおよびニューギニア島の東部海域, 黒潮が蛇行を始める房総沖から黒潮蛇行海域で 10mm/yr以上の高い上昇率になっている.また、黒潮 分岐流の対馬海流が流れ込む日本海で上昇率が高く、 特に,日本海西部海域では高い上昇率が観測されてい る点が注目される.



(a) 全球平均海面高さの観測値とモデルによる予測値



(b)1998 2015 中の衛星(海面高度) 10月(加) 一クに塞り 海面の年間上昇率 (mm/yr) の分布 図-1 全球海面変動の観測データと予測 (IPCC, AR5)

3. 解析手法の概要

本研究では、NASAの海面変動再構築データセット、 RSLV1を用いた太平洋における海面変動の解析手法、 日本近海における海面変動予測に用いた、SARIMA過 程モデルの概要を示す.

(1) 海面変動再構築データセット: RSLV1

NASA により,衛星海面高度計データと潮位計のデ ータを組み合わせた海面変動データセット RSLV1 (Restructured Sea Level Version1)が再構築されている²⁾.衛星 高度測定の記録はグローバルカバレッジで海面の正確 な測定値を提供するが,1993 年以降の短い期間のデー タしかない(図-1(b)参照).一方,潮位計の記録は 1807 年に遡って存在し,過去 200 年間の地域の海面測 定データを提供してくれるが異常値が含まれている事 を考慮しなければならない. RSLV1 では,1950 年から 2009 年,衛星高度計からの派生周期定常経験的直交関 数(CSEOFs: Cyclostationary empirical orthogonal functions) と潮位計からの長期間の海面測定データとを組み合わ せて,両者の欠点を緩和する解析手法が用いられてい る.出力は,1週間平均の時間分解能と約0.5度の空間 分解能の全球海面変動値の再現データである.用いら れた海面高度計は, JASON-1, TOPEX/POSEIDON, OSTM/Jason-2, Jason-1 Geodetic の高度計とマイクロ波放射計である³.

(2) SARIMAProcess(季節自己回帰和分移動平均過程)

SARIMA 過程(Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average Process) は離散時間,定常状態のランダム過程で、移動平均モデルと自己回帰モデルの差分方程式であらわされる自己回帰和分移動平均過程(ARIMA Process)にトレンド,季節変動を組み込んだ非定常状態のランダム過程として、次式のように表現される⁴.

$$\Phi(B^{\mathcal{S}})\phi(B)(1-B^{\mathcal{S}})^{\mathcal{D}}(1-B)^{\mathcal{d}}\tilde{\varepsilon}_{\star} = \Theta(B^{\mathcal{S}})\theta(B)_{V_{\star}}$$
(1)

ここに、状態出力 $\tilde{\varepsilon}_t$ は、時系列データ ε_t の平均値 μ からの摂動、 $\tilde{\varepsilon}_t = \varepsilon_t - \mu$ で v_t はホワイトノイズ入力、**B**はシフト演算子で、 $B\tilde{\varepsilon}_t = \tilde{\varepsilon}_{t-1}$ で、 B^s は季節等の変動周期である.

$$\begin{cases} \phi(B) = 1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 \cdots - \phi_p B^p \\ \theta(B) = 1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 \cdots - \theta_q B^q \\ \Theta(B^s) = 1 - \Theta_1 B^s - \Theta_2 B^{2s} \cdots - \Theta_p B^{ps} \\ \Phi(B^s) = 1 - \Phi_1 B^s - \Phi_2 B^{2s} \cdots - \Phi_p B^{\alpha s} \end{cases}$$
(2)

以上には、決定すべき AR, MAパラメター、季節型次 数および和分次数, *p*,*q*,*d*,*P*,*Q*,*D* と季節性 *S* があ り、SARIMA モデルの構築にはこれらの適正値を決定 する必要がある(図-2参照).



図-2 SARIMA モデルの構成

本研究では、Wolfram, Mathematica の組み込みシンボ ル"TimeSeriesModelFit"による SARIMA 過程の時系列予 測を行った. AR パラメター(3,1,1), MA を(0,1,1)とし季 節性を変化させ、"TimeSeriesModelForcast"を用いて海面 変動の予測を行った.季節性は 10, 15, 20, 25, 30 年 で変化さた. 図-3 に天草灘(129.5E, 32N)の出力点を 例として、RSLV1の再構築データ、気象庁観測値(相 対的観測潮位)、季節性別の SARIMA モデルの予測値 を示す. 図中、赤は季節性を 30 年とした結果で、60 年 の再構築データで設定できる最長の値である. SARIMA モデルでは、使用するデータの変動特性によ って季節性ごとに予測結果は変化する(図-9参照). 気候変動の影響を受ける時系列データの分析では、 短期的な特徴とトレンド要素や周期性(季節)要素のような中長期的な特徴を表現することができる SARIMA モデルの適用が有効である. 再構築されている海面変動データの期間は 60 年程度であるので 30 年 程度の周期性までは予測できる可能性がある.



図-3 季節性を変化させた SARIMA モデルの予測結果

4. 太平洋での海面変動

(1) 短期海面変動特性

赤道太平洋では貿易風の数年周期の振動が存在する. これにより,温められた海水は東または西に移動し, 海水面の高さも変動する.高水温時には海面が上昇し, 低温時には下降する.この海面高さの振動は El Niño, La Niña の変動に対応する.赤道太平洋(10N~10S)の 海域ではこの変動が明確に確認できる.

図-4にキリバスの Tarawa (図-5に観測位置を示す) で観測された地上風の風速を一年間合計した風速値の 風向別時系列を示す.



図-4 Tarawa で観測されたを一年間合計風速と MEIの関係

図中の MEI (Multivariate ENSO Index)は、プラス(赤) が El Niño、マイナス(青)が La Niña の強さを示す.こ の図から、貿易風(NE-E, E-SE)の強い年には La Niña が発生し、弱い年には El Niño となっている事がわかる. また、風速の変化は極端で、数年周期の振動特性があ る.1977年までは貿易風が強く、1977年から1999年頃 までは貿易風が弱くなり El Niño が卓越的に発生し, 1999年以降,再び貿易風が強まり, La Niña 卓越期に移 行している. 1982-1983年と 1997-1998年は貿易風が極 度に弱い時期で,強い El Niño が発生している.

図−5 に風速の観測点タラワ(Tarawa),海面変動の 出力点,ライン諸島(203E,1.5N),パラオ(135E,7N) およびソロモン(164E,9S)の位置と,海面変動の時系 列を示した.図中,下段の赤・青塗りつぶしの振動は ENSO(El Niño/Southern Oscillation)指標 MEI である.こ の図からは以下のことがわかる.

・赤道太平洋の西部海域の北半球にあるパラオ,南半 球のソロモンでは、El Niño 発生時には海面が下降し、 El Niño が解消すると海面が上昇する.パラオでは週平 均海面の上昇量,下降量は共に約 30cm.ソロモンでは 上昇量は約 30cm,下降量は 40cm 以上(1999 年の La Niña 転向期)に達する場合がある.

・日付変更線より東のライン諸島では、パラオ、ソロ モンとは逆に、El Niño 発生時に海水面が急激に上昇し、 解消後に海面が急降下する.週平均海面の上昇量、下 降量は共に約25cmである.

(2) 長期海面変動特性

図-5から、太平洋の長期海面変動特性として、赤道 直下で東経 170度以西のライン諸島では海面上昇は認 められないが、西太平洋では北半球のパラオや南半球 のソロモンのように海面の上昇が認められる.さらに 1980年頃を境に、年間の海面上昇率(mm/yr)は顕著 に増加している.このような傾向を空間的に調べるた め、解析領域の各格子点上で、海面上昇率を線形関数 で解析した.期間を1950年~1979年と1980年~2009年 に分けて、平均海面の年間上昇率を求めた.この解析 結果を示した図-6より、以下のことが解読できる.

・東経 170度~270度(西経 90度)かつ北緯 10度~南 緯 10度の海域では、海面は下降しているが、その他の 海域では上昇している。

・1980年を境に、海面の変化率が明確に増加している. ・黒潮に影響される日本の太平洋側の海域では、黒潮 の外側で下降域が、流路海域では顕著な上昇域が存在 する.また、黒潮が蛇行を始める房総沖で海面上昇率 の大きな海域が存在し、蛇行海域では海面上昇率の増 加、減少海域がパッチ状に交互に発生している.

・図-1(a)に示す衛星の海面高度計の観測データ(1998 年以降)と類似した海面上昇率の分布となっている. 上昇率が高いのは赤道太平洋の西部海域のフィリピン 東部海域,ニューギニア島の東部海域で,年間の上昇 量が6~7(mm/yr)となっている.

・南北太平洋海流の分岐,蛇行する北緯30度,南緯30 度の海域での海面上昇率も高くなっている.



5. 日本近海での海面変動と海面上昇の予測

気象庁の潮位観測記録「歴史的潮位資料+近年の潮 位資料」⁹を解析する.この観測データから年平均の 相対的な海面変動量を求め,黒潮の影響を受ける太平 洋側と対馬海流の流れ込む日本海とに分けて海面上昇 特性を概観する.





(a) 1980-2009 年間の年平均海面上昇率



(b)北西太平洋の年平均海面上昇率



(c)1950-1979年間の年平均海面上昇率 図-6 太平洋における年平均海面上昇率

(1) 黒潮影響域

黒潮周辺の海面高さには黒潮流路の外側では 1m程 度の盛り上り,内側の冷水塊域では数十センチに及ぶ 下降がある.黒潮域のこの高低差が,黒潮の流路変動 で海面高さに大きな空間分布の変化を発生させる.図 -7 は黒潮の影響を受ける海域の 5 地点の年平均海面高 さの経年変化を示す.振幅 20-30cm の数年から十年規 模の長期変動の存在が確認できる.

(2) 日本海沿岸

一方,図-6で示したように,対馬海流の流れ込む日本海での再構築データからは,年平均海面上昇率が 8(mm/yr)に達する海域もあり,西部海域と北部・東部 日本海でその上昇率に差異が見られる.図-7にこの海 域での潮位計の観測結果を, 2海域に分けて示した.

日本海中部の富山で1985~2016年間で約13cmの平均 海面の上昇(4.3mm/yr)が確認でき,西部海域では約 17cm(5.7mm/yr)の上昇率を示している.

(3) 日本近海の海面上昇予測

前節では太平洋における海面上昇率を線形関数で求 めた.実際の海面の上昇率は時間的に増加しており, 上昇量は幾何級数的に増加している.さらに,海面変 動には海流の強弱に起因する数年から十年規模の周期 性が存在する.ここでは,季節変動を考慮した自己回 帰和分移動平均過程(SARIMA 過程)に基づく予測モ デルを用いて,1950年~2009年の60年間の相対的平均 海面変動の再構築データ(RSLV1)から,2070年まで の次の60年間の海面上昇の予測を試みた.

日本近海の 0.5 度間隔の各格子点上で SARIMA モデ ルの解析を行い,各点毎の海面上昇曲線を求める.前 述したように,季節性を示す期間の設定により,予測 結果が異なるため,ここでは 10,15,20,25,30 年の 季節性について予測結果を図-9に示した.この中で 30 年の季節性を仮定した場合について,2015,2040, 2060 年の海面高さの空間分布を求め,日本近海の海域 の将来の海面上昇量として,図-10 に示した.この予 測では,季節性(周期)の設定が主要な要因になるが, 30 年間(赤線)を設定した予測では,1975 年~2070 年 の上昇量は,日本海西部で約 80cm,東部で約 60cm に なった.東京湾沖の相模灘で 100cm,伊勢湾沖の遠州 灘で 150cm であった.図中に,気象庁の潮位観測結果 (相対的年平均海面)を青丸で示した.

6. 結 語

海面上昇による影響は、日本全域において将来にわたって継続的に自然環境・社会経済等に影響を与える問題である。海面変動特性を把握し将来予測を行うことは、海岸環境や海岸防災を考える上で極めて重要である。本研究では、NASAの海面変動再構築データセット、RSLV1を解析し、太平洋全域および日本近海での長期海面変動特性に解析するとともに、日本近海において、季節型自己回帰和分移動平均過程のSARIMAモデルによる2009年から2070年までの海面上昇量の将来予測を行い、以下の主な結果を得た。

(1)太平洋の海面上昇率は,1980年頃を境にして明確 な増加傾向が認められる.赤道太平洋ではENSOの影 響を強く受けている.(2) SARIMAモデルによる将来予 測では,2070年までに日本海で約60-80cm,太平洋側 では.100-150cmの海面上昇量となった.

参考文献

- Climate Change 2013: The Physical Science Basis, of Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 1535p., 2013.
- 2) NASA, Jet Propulsion Laboratory: Restructured Sea Level Version_1 (オンライン) http://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/ RECON_SEA_LEVEL_OST_L4_V1
- Hamlington, B.D., R.R. Leben, R.S. Nerem, W. Han, K.-Y. Kim. (2011), Reconstruction sea level using cyclostationary empirical orthogonal functions. *J.Geophys. Res.*, 116:C12015.
- J.F. San-Juan, M. San-Martin, I. Perez: An Economic Hybrid J2 Analytical Orbit Propagator Program Based on SARIMA Models, *Mathematical Ploblems in Engineering*, Hindawi Publishing Corporation, 15p., 2012.
- 5) 気象庁:各種データ・資料/潮位観測資料(オンライン)http://www.data.jma.go.jp/kaiyou/db/tide/sea_lev_var/index.php

(2018.3.15 受付)



図-7 黒潮影響領域での相対的海面上昇量の観測結果



図-8 日本海西部,東部での相対的海面上昇量の観測結果





図-10 季節性を 30 年とした場合の海面上昇量の予測結果(SARIMA モデルによる)

LONG-TERM SEA LEVEL CHANGES IN THE PACIFIC/JAPAN'S WATER AND THEIR FUTURE PREDICTION

Masaki WASHIDA, Takao YAMASHITA and Tomoyuki TAKAHASHI

In the worst scenario RCP 8.5 of IPCC, AR 5, it shows that the global mean sea level rise may reach 100 cm at the end of 2100. The actual rise amount greatly varies depending on the local ocean. Especially, in the equatorial Pacific affected by the trade wind, and in the Japan's water affected by the Kuroshio, the sea level change characteristic differ from those of global average. It is necessary to accurately consider the long-term fluctuation characteristics in predicting the sea level changes. In this study, we analyzed the Restructured Sea Level Version 1 (RSLV1) which was the global sea level data set constructed by NASA to make clear the annual sea level change rate across the Pacific Ocean. Using the Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average (SARIMA) process model, the future prediction of sea level rise from 2009 through 2070 was conducted to show the variation range of sea level rise depending on the seasonality both in Japan Sea and Pacific Ocean. The sea level rise distribution map of Japan's water in 2015, 2040 and 2060 were proposed under the assumption of 30year seasonality.