日本周辺の平均海面水位変動*

柳 哲雄・赤木竜也†

Variation of the Mean Sea Level around Japan

Tetsuo Yanagi and Tatsuya Akaki†

Abstract

Variation of the mean sea level around the Japanese Islands is investigated using yearly mean sea level data at 6 points from 1894 to 1990. Mean sea level has risen along the eastern coast of Japan 1-2 mm/year but it has fallen along the Japan Sea coast 0-1 mm/year. The prediction of the horizontal distributions of sea level for 2030 around Japan was found to rise on the basis of IPCC (Intergovernmental Panel of Climate Change) and also this study.

1. はじめに

IPCC (Intergovernmental Panel of Climate Change) の第 1 作業部会 (気候変動の科学的評価) のまとめによると, 人類による CO₂ やメタンなど温室効果ガス排出の対策を講じない場合, 地球の平均気温は 2025 年に 1℃, 2100 年に約 3℃ 上昇する. そして, このような平均気温上昇に伴う大陸上の氷河の部分溶融や, 海水温上昇による海水の体積膨張により, 平均海面水位は 1985 年のレベルから 2030 年には 18cm (8~29cm), 2070 年には 44cm (21~71cm) 上昇すると予測されている (IPCC, 1990).

世界の平均海面水位は, 産業革命以降ここ 100 年間に約 10cm/100 年=約 1mm/year の率で上昇している (Gornitz *et al.*, 1982). この結果は観測期間 20 年以上で, 地殻変動や地盤沈下の影響が少ないと考えられる世界中の 193 カ所の検潮所のデータを地域毎に解析し, 世界 14 地域の加重平均値を求め, さらに過去 6000 年の超長期地殻変動を補正して得られたものである. また最近 50 年間では約 2mm/year とその上昇率が大きくなっているこ

とも報告されている (Barnett, 1984).

海面水位は海底の観測基準面 (陸上のベンチマークに対してその水深が決められている) に対する相対的な高さとして観測されているので, 海水の体積増加のみならず, 地盤の昇降によっても変動する. 実際過去においても, 世界で一様な平均海面水位変動が起こっているわけではなく, 北アメリカの東, 西海岸, ヨーロッパやアフリカ沿岸などでは平均海面水位は上昇傾向にあるが, アジアの東海岸, 中南米の西海岸, 南アメリカ西海岸では平均海面水位はほとんど変化していないし, 北欧では大陸氷河の融解の後のリバウンドにより地盤が隆起して, 平均海面水位は下降している (Gornitz *et al.* 1982, Barnett, 1984).

日本沿岸においてはここ 100 年間平均海面水位はほとんど変化していない (岡田, 1988) と言われている. しかし, 1953~1980 年間の岡田 (1988) と同じ海面水位観測データを用いて, Aubrey and Emery (1986) は Fig. 1 に示すように, 日本南岸では最大 20mm/year の割合で平均海面水位が上昇 (地盤が沈降) しており, 日本海側では最大 4mm/year の割合で平均海面水位が下降 (地盤が上昇) していて, 世界の平均海面水位変動率より 1 桁大きい平均海面水位変動が起こっていると報告している.

* 1993 年 3 月 24 日受領; 1993 年 9 月 20 日受理

† 愛媛大学工学部土木海洋工学教室; 〒790 松山市文京町 3

† Department of Civil and Ocean Engineering, Ehime University; 3 Bunkyo, Matsuyama, 790 Japan

Fig. 1. Ratio of mean sea level variation (mm/year). The shadow area shows that where the mean sea level has sunk down (from Aubrey and Emery, 1986).

Fig. 1 は世界的によく引用されているが、このような平均海面水位変動が実際に海水を原因として起こっているとは考えにくい。また、村上・山田 (1992) は 1950～1989 年の日本周辺の 56 点の海面水位観測データを解析して、中部～北日本で平均海面水位は 1.5～1.8mm/year で上昇しているが、西日本では 1.0mm/year で下降していると報告している。

以上述べたような海洋からの視点ばかりでなく、古くから測地学者によって、地盤の隆起・沈降を調べるために、日本周辺の平均海面水位変動は解析されてきている。たとえば、加藤・津村 (1979) は 1951～1978 年の日本全国 100 カ所の検潮所のデータを用いて、三陸沿岸から北海道東岸にかけて地盤は約 10mm/year で沈降し、日本海岸では約 2mm/year で地盤が隆起していると述べている。壇原 (1977) も 1950～1969 年の検潮記録を解析してほぼ同様な結果を得ている。

これまで述べてきたように日本周辺の平均海面水位変動に関する様々な既往の研究がある中で、IPCC による 2030 年、あるいは 2070 年の世界の平均海面水位上昇予測結果を日本周辺に適用しようとする場合、どの研究を基礎において、どのような予測を行えばよいのかは明確ではない。

そこで、本稿では 1894～1990 年 (約 100 年間) の日本周辺の潮位観測データをもとに、日本周辺の平均海面水位変動の実態を明らかにし、その結果と IPCC の予測結果をもとにして、2030 年の日本周辺の平均海面水位上昇量の分布を定量的に予測を試みる。

2. 解析データ

解析に用いた海面水位観測データは建設省国土地理院海岸昇降陸地センターによりまとめられた「日本列島沿岸の年平均潮位とそのグラフ」(1991) から得たものである。

この冊子にまとめられている日本各地の 115 カ所の 1894～1990 年の年平均海面水位の観測データをもとにして、以後の解析を行った。

3. 解析結果

海面水位変動が海面気圧変動に対して一定の関係を有していることはよく知られている。用いた海面水位観測データは気圧補正が施されていないので、まず 1894～1990 年の札幌、東京、福岡の気圧変動を調べてみた。その結果を Fig. 2 に示す。用いた生データは松山地方気象台に保存されている気象庁年報より得た各点の年平均海面補正気圧であるが、1940～1950 年は気象庁年報が消失していたので、線形補間を行ってある。この変動から最小二乗法により求めた、この期間の海面補正気圧の線形トレンドは札幌で -0.0050hPa/year 、東京で -0.0056hPa/year 、福岡で $+0.0017\text{hPa/year}$ であった。+1hPa の海面気圧変動に対して -1cm の海面水位変動が対応するので、得られた平均海面気圧変動率より期待される平均海面水位変動率は $+0.056\sim-0.017\text{mm/year}$ である。この値は前述した世界的な平均海面水位変動率である約 1mm/year の 6% に満たない。そこで、以下の解析では日本周辺の平均海面水位変動に及ぼす海面気圧変動の影響は一応無視し

Fig. 2. Temporal variation in yearly-averaged sea level air pressure at Fukuoka, Tokyo and Sapporo from 1894 to 1990.

て考えることにする。

まず Fig. 1 の検証を行ってみる。Fig. 1 によれば、日本周辺の平均海面水位変動率は最大 20mm/year に達している。この値は世界の平均海面水位変動率より 1 桁大きく、このような平均海面水位変動が大陸氷河の部分溶融や海水の体積増加など、海水そのものを原因として発生している世界的な海面上昇と直接関連して発生しているとは考えにくい。そこで、Fig. 1 で局所的に大きな平均海面変動率を記録している鼠ヶ関、名古屋、大阪、神戸の生データを調べてみた。海岸昇降検知センター (1991) のグラフから選びだした生データの変動を Fig. 3 に示す。図中白丸は 2 カ月以内の欠測を含むデータから年間平均海面水位を求めた年を表している。鼠ヶ関の平均海面水位が大きく変動した 1964 年は 6 月に M7.5 の新潟地震が発生した年にあたり、この年の約 20cm の平均海面水位上昇の原因は海水そのものではなく、鼠ヶ関付近の地盤の急激な沈降にあったと考えられる。また名古屋、大阪、神戸の大きな平均海面水位変動は地下水の過剰な汲み上げによる地盤沈下の影響が最も大きいことがすでに明らかにされている (村上・山田, 1992)。

そこで、このような海水そのものに直接の原因があるとは考えにくい、局所的に急激な平均海面水位変動を示す観測点 23 点を除いた、合計 30 点の同じ期間の記録を解析して、平均海面水位変動率を求めてみた。その結果を Fig. 4 に示す。平均海面水位の上昇、下降の全体の傾向は、伊豆半島と串本で平均海面水位が下降している以外は、Fig. 1 とほぼ同様であるが、その変動率は +5.0 ~ -1.0mm/year 程度で、世界的な平均海面水位変動率と比

Fig. 3. Temporal variations in yearly-averaged mean sea level at Nezugasaki, Nagoya, Osaka and Kobe.

較して、ほぼ同程度の値となっている。したがって、1953 ~ 1980 年の日本周辺の、局地的な地盤変動を除いた、平均海面水位変動を表す図としては Fig. 1 ではなく、Fig. 4 を用いるべきであろう。

次に、より長期間の平均海面変動傾向を明らかにするために、1894 ~ 1990 年の約 100 年間を通じて、ほぼ良好な年平均海面水位データが得られている忍路、輪島、浜

Fig. 4. Ratio of mean sea level variation (mm/year) from 1953 to 1980. Black circles show the observation stations.

田 (外ノ浦), 細島, 串本, 鮎川の記録を解析して, 平均海面水位変動率を求めた。Fig. 5 に示したこれらの観測点の生データ (海岸昇降検知センター, 1991) の中の星印は, 験潮所の移設により記録が不連続となった年を示している。鮎川の年平均海面水位が大きく下降している 1930 年代は, 1933 年に M8.3 の三陸地震が発生し, 津波による死者が 3008 人を数えるという事件が起こっている。したがって, 鮎川の 1930 年代の大きな平均海面水位変動はこの三陸地震に関連したものと考えられる。ただ 1900~1920 年代の平均海面水位 (約 1.6m) と, 験潮所を移設した後の 1940 年代後半の平均海面水位 (約 1.5m) はほぼ一致させてあるので, 100 年間全体の平均海面水位変動率を求める場合に, この記録を用いることに問題はないと考えられる。最小二乗法により各点の約 100 年間の線形トレンドを求めた結果を Fig. 6 に示す。三陸・東海沿岸で平均海面水位は 1.0~2.0mm/year で上昇, 日本海北部沿岸と九州東部海岸で 0~0.5mm/year で下降して

いる。

さらに, Fig. 5 において 6 点のデータがそろって得られている 1906~1984 年の観測データを用いて行った EOF 解析の結果を Fig. 7 に示す。第 1 モードは全体の変動の 63.1% を説明するが, 鮎川と他の点の位相は逆になっていて, その時間変動は Fig. 5 に示した鮎川の平均海面水位変動とほぼ同様になっている。すなわち, 1930 年代後半に大きな変動を示し, 1950 年以降上昇傾向が顕著になっている。また第 2 モードは全点で同位相の変動傾向を示し, その時間変動には数年~十数年周期の短周期変動が顕著に現れている。

4. 考察

平均海面水位を変化させる原因としては 1) 地殻の上昇・沈降, 2) 海水の水温変化による海水の体積変化, 3) 氷河の溶融による海水の体積変化, 4) 海洋そのものの体積変化, 5) 風系や海流の変動などが考えられる。

このうち 4) に関しては, プレーートの運動に関連した海洋そのものの体積変化を定量的に見積もることは現在の所不可能なので, 今の所評価出来ない。5) の効果は主に周期数年~十数年といった短期的な平均海面水位変動に寄与していて, 今回求めた約 100 年間の平均海面水位変動に直接寄与しているとは考えられない。Fig. 7 に示した第 2 モードの短周期の時間変動が 5) の影響を表しているのかもしれない。

Gornitz *et al.* (1982) は過去 100 年間の世界の平均海面水位変動率 1mm/year のうち, その半分は 2) で, 残りの半分は 3) で説明可能であると述べている。ただ 2) に関しては, 日本周辺の暖水塊や冷水塊の配置の変化で局所的な海面水位変動を起こす可能性がある。友定 (1991) は日本近海の 1963~1985 年の 0, 50, 100, 200m 層の水温観測結果を整理して, 最小二乗法により 23 年間の水温変動傾向を見積もった。100m 層の結果は Fig. 8 に示すようであって (他の層もほぼ同様な結果となっている), 東海道沖の約 0.01 °C/year の水温上昇を除けば, 日本近海では平均水温は 0.01 °C/year で下降している。このことは水温だけの影響を考えた場合には東海道沖でのみ平均海面水位は上昇し, 他の地点では平均海面水位は下降することになる。しかし, Figs. 4, 6 にはそのような傾向は伺えない。したがって, 日本周辺の平均水温変動が日

Fig. 5. Temporal variations in yearly-averaged mean sea level at Oshoro, Wajima, Hamada, Hosojima, Kushi-moto and Ayukawa.

本周辺の平均海面水位変動に直接影響を与えているとは考えにくい。定量的には平均水温 10°C 、平均塩分 34psu の 200m の水柱の水温が 1°C 上昇すると、体積膨張により、海面水位は約 3cm 上昇する (岡田, 1988)。したがって $0.01^{\circ}\text{C}/\text{year}$ の平均水温変動は約 $0.3\text{mm}/\text{year}$ の平均海面水位変動しか生じない。

いずれにしても, Gornitz *et al.* (1982) や Barnett (1984) が示したような 2) や 3) による平均海面水位上昇は世界全域で同様に生じているはずであり, Fig. 6 に示したように, 日本周辺において平均海面水位が上昇, 下降のパターンを示すことは 2) や 3) による約 $1\sim 2\text{mm}/\text{year}$ の世界全体の平均海面水位上昇に加えて, 日本周辺の平

均海面水位を変動させる別の原因があることを示唆している。

平均海面水位を変動させる 1)~5) の原因に対する消去法から考えれば, Fig. 7 に示した EOF の第 1 モードは 1) の日本周辺の地殻変動による平均海面水位変動を表していると考えられる。すなわち, フィリピン海プレートと太平洋プレートがユーラシアプレートと北米プレートの下部にそれぞれ潜り込んでいる日本南岸と日本東岸では地殻が沈降して平均海面水位は上昇し, 反対に日本海岸ではその反動として地殻は上昇し, 平均海面水位は下降しているのだろう。第 1 モードの時系列によれば, このような変動は 1950 年以降大きくなっている。実際, 1953

Fig. 6. Ratio of mean sea level variation (mm/year) from 1894 to 1990. Black circles show the observation stations.

～1980 年の観測データを用いた解析結果を示す Fig. 4 では三陸沿岸の平均海面水位変動率は約+5mm/year となっていて、100 年間の観測データを用いた Fig. 6 の約 2 倍となっている。

Gornitz *et al.* (1982) による 1mm/year の世界全域の平均海面水位上昇が日本周辺でも最近 100 年間起こっていたとすれば、Fig. 6 の結果から全域で 1mm/year を差し引いたものが、日本周辺の地殻変動率を表していることになる。すなわち、日本東岸や南岸の地盤は 0～1.0mm/year で沈降し、日本海岸の地盤は 1.0mm/year で隆起していることになる。また Barnett (1984) による 2mm/year の世界全域の平均海面水位上昇が日本周辺でも最近 50 年間起こっていたとすれば、Fig. 4 の結果から、日本東岸や南岸の地盤は 1.0～4.0mm/year で沈降し、日本海岸の地盤は 1.0mm/year で隆起していることになる。

Fig. 7. Results of EOF analysis on the data of mean sea level around the Japanese Islands from 1906 to 1984.

Fig. 8. Ratio of mean water temperature at 100 m depth around Japan. Black circles show the stations where mean water temperature has risen and open circles mean water temperature has fallen (Tomosada, 1991).

5. おわりに

平均海面水位が上昇すれば、主に沿岸地域に集中している人類の生命や財産を保護するために、海岸堤防を高

Fig. 9. Predicted distribution of mean sea level rise for 2030 referred to that of 1985 on the basis of the trend of 1894-1990 (a) and that on the trend of 1953-1980 (b).

くしたり、内水排除機能を強化したり、地下水の塩水化を防止したり、など様々な海面上昇対応策を講じる必要が生じてくる。このような多額の費用を必要とする社会的な諸対策を講じようとするれば、対策工事の優先順位を決定するために、各地で精度の良い海面上昇予測が必要とされることは言うまでもない。すなわち諸々の対策工事は平均海面水位上昇率の大きい所から行われるべきである。

IPCC の予測結果である、1985 年に対する 2030 年の平均海面水位上昇量 18cm は、主に海水の膨張と大陸氷河の融解に伴うもので、世界で一様に起こると考えられる。これに対して日本周辺では Fig. 6 や Fig. 4 に示すように日本南岸や日本東岸の地盤は 0~4.0mm/year で沈降し、日本海岸の地盤は約 1.0mm/year で隆起しているので、実際の日本周辺の平均海面水位上昇は世界全体の平均海面水位上昇にこのような地盤の沈降・隆起の影響を加えた形で現れることになる。したがって Fig. 6, Fig. 4 と IPCC の予測結果をもとにした、1985 年の平均

海面水位に対する 2030 年の平均海面水位の上昇予測分布は、Fig. 9 のようになるだろう。

今後さらに研究を進めて、日本近海の地殻と平均海面水位のより正確な変動傾向を定量的に明らかにして、平均海面水位変動の精度の良い将来予測を行えるようにしていきたいと考えている。

本研究を進めるにあたり、貴重な議論をして頂いた愛媛大学工学部武岡英隆助教授、データ整理に協力して頂いた同、磯田 豊助手、貴重なコメントを頂いた査読者の方に感謝の意を表する。なお、本研究は文部省科学研究費による総合研究 A「東アジア沿岸域における地球温暖化の実態・影響・対応策に関する総合的研究」(04302042, 研究代表者、渡邊 晃東京大学工学部教授)の一部であることを付記する。

References

- Aubrey, D. G. and K. O. Emery (1986): Relative sea levels of Japan from tide-gauge records, Geol. Soc. Am. Bull.,

97, 194-205.

Barnett, T. P. (1984): The estimation of global sea level change: a problem of uniqueness. *J. Geophys. Res.*, **89**(C5), 7980-7988.

壇原 毅 (1977): 大地を測る. 出光科学叢書 11, 出光書店, 東京, 241p.

Gornitz, V., L. Lebedeff and J. Hansen (1982): Global sea level trend in the past century. *Science*, **215**, 1611-1614.

IPCC (1990): *Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, 365p.

海岸昇降検知センター (1991): 日本列島沿岸の年平均潮位とそのグラフ. 83p.

加藤照之・津村建四郎 (1979): 潮位記録から推定される日本の垂直地殻変動 (1951~1978). *地震研究所彙報*, **54**, 559-628.

岡田正実 (1988): 平均潮位の長期変動. 気象問題懇談会レポート, 気象庁, 72p.

友定 彰 (1991): 海洋環境の変動. 木村記念会誌「潮」, 第3号, 7-21.

村上和男・山田邦明 (1992): 我国沿岸の海面水位の長期変動の特性とその要因. 海岸工学講演会論文集, **39**, 1026-1030.