

沖ノ鳥島における潮汐観測[†]

佐藤 敏*

TIDAL OBSERVATION AT OKI-NO-TORI SIMA[†]

Satoshi SATO*

Abstract

Oki-no-Tori Sima (20°25'N,136°05'E), the southernmost place in Japan, is a coral reef whose size is about 5 km length east to west and about 1.7km length north to south. Since 1987, Hydrographic Department has been deploying pressure gauges there to observe sea level changes.

More than 5-year tidal observation reveals the following characteristics on sea level variations at Oki-no-Tori Sima. 1) The ratio of the amplitude of diurnal tides to semidiurnal tides, $(K_1+O_1)/(M_2+S_2)$, is 0.48 and so the tidal pattern is mixed, dominantly semidiurnal. 2) The value of the annual signal at Oki-no-Tori Sima is much lower than those at other tidal stations in the low-latitude of north-west Pacific. 3) The interannual variation coincides with those in western tropical Pacific, that is, the sea level rose in La Niña phase 1988 to 1989 and fell in El Niño phase 1991 to 1992.

1. はじめに

沖ノ鳥島(20°25'N,136°05'E)は紀伊半島の南約800マイルに位置するわが国最南端の地である。Fig. 1に示すように東西約4km, 南北約2kmの珊瑚礁に囲まれた環礁となっているが、環礁の大部分は水面下にあり、わずかに北露岩、東露岩と呼ばれる2個の水上岩が存するのみである。この沖ノ鳥島において水路部では1987年から潮汐観測を実施しており、5年を超える連続データを取得している。今回の潮汐観測は沖ノ鳥島において1939~41年にかけて気象観測所並びに灯台建設工事(基礎工事のみが完了したところで戦争により中断となり、現在もその基礎であるコンクリート基台のみ残されている)が行われた際に短期間実施されて以来のものであると考えられ

る。なお、その工事の際に環礁の一部を爆破し、環礁の内と外を結ぶ水路が島の南西側に作られている。

驗潮記録は海洋の現象の理解に貴重な情報を与えるものとして様々に活用されており、また特に近年は地球温暖化に伴う水面上昇の監視という点からも驗潮記録の重要性が認識されている。沖ノ鳥島の潮汐観測はわずかに6年を経過したところであるが、地球環境の観点からもこの驗潮記録が重要な資料となることが考えられるので、以下に潮汐観測の状況と水面変動の実態について報告する。

2. 観測方法

潮汐観測はアーンデラー社製の圧力計を使用して実施している。圧力計をPhoto 1に示すように環礁

[†] Received 16th November 1993

* 沿岸調査課 Coastal Surveys and Cartography Division

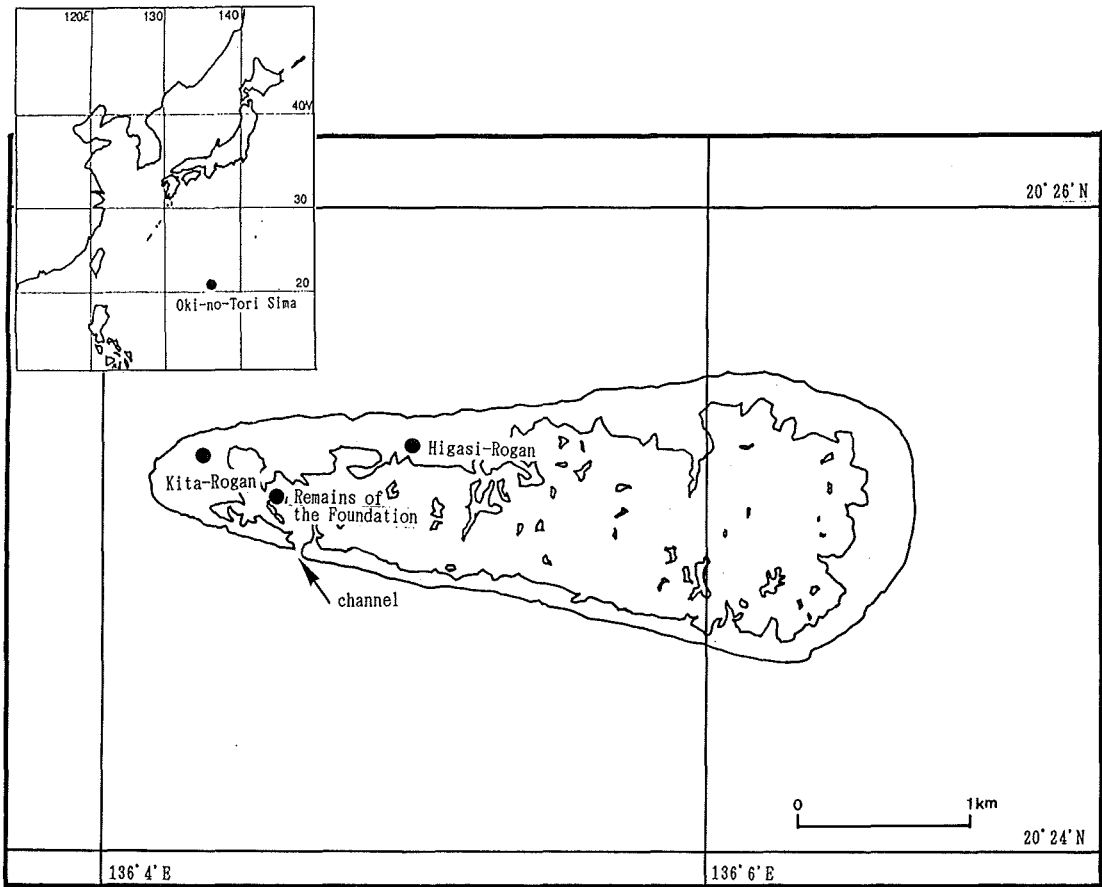


Fig. 1 Oki-no-Tori Sima.

内の海底（水深2～3m程度）に設置し、圧力及び水温のデータを機器のメモリまたは磁気テープに記録している。圧力計及び設置架台はゴムボート等により水路を通して礁内に運び込み設置している。1987年9月から1990年6月までは圧力計は基礎工事跡近くに設置していたが、1990年6月に東露岩近くに移動し1993年11月現在も同位置に設置している。設置台数については1987年9月に設置した圧力計が台風襲来により移動し、連続したデータを取得することができなかったため、1987年11月からは2台設置し、欠測を避けるための最小限の対応を図っている。幸いなことに圧力計を2台設置した1987年11月から1993年4月までは欠測無くデータを取得している。

この潮汐観測にとって一番問題となるのは沖ノ鳥島が東京から遙か南方に位置しているので訪れるこ

とが容易ではないことである。最近は年1回測量船等により沖ノ鳥島を訪れ、圧力計の交換を行っているのが現状である。したがって、観測開始当初のしばらくの期間は10分間隔のデータを記録することが可能であったが、現在は1年間のデータを記録する必要があるため、圧力計の記録容量等の関係からサンプリング間隔1時間で毎正時のデータのみを記録している。

ところで圧力計は海底において圧力を計測し記録しているものであるので、海面高を算出するためには、記録された圧力値から大気圧に相当する値を除去し、さらにその値を海水密度により除する必要がある。しかしながら、今回の場合、正確な大気圧の値を得ることができなかったため、解析にあたって大気圧に相当する値を減じることはせず、記録され

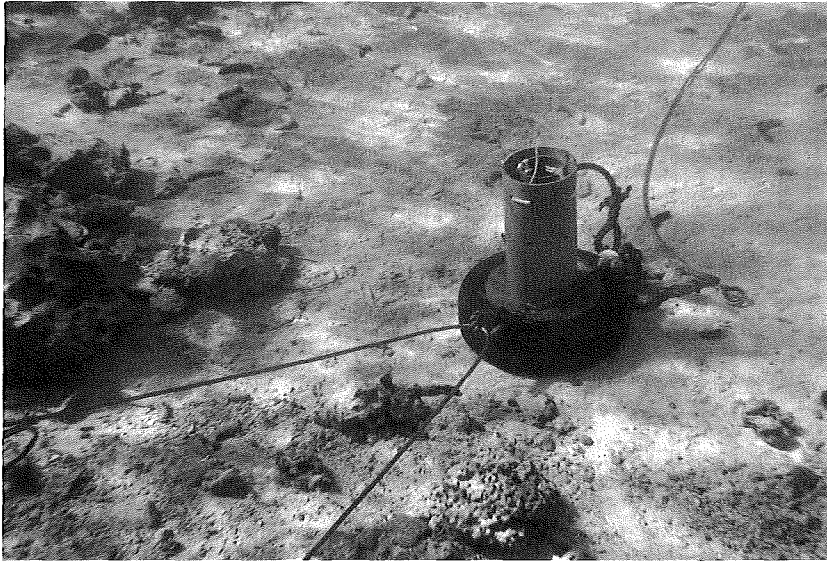


Photo 1 Pressure gauge deployed on the sea-bed.

た圧力値をそのまま海水密度を用いて水位に直している。したがって、以下に述べる水位変動の状況は、いわゆる大気圧補正を行った水位変動ということになる。

また、圧力計のドリフトあるいは圧力計の微細な移動に起因する圧力値の経時変化が現れることがあるが、これについては、当該観測期間において一定の割合で変化していると仮定し線形の補正を行っている。

以上の方針に基づいて計算した水位の日平均値(24個の毎正時データの平均値)を Table 1 に、水温の日平均値を Table 2 に示す。

3. 観測値

さて、海底に設置した圧力計はどのようなデータを記録しているのだろうか。1987年9月に設置した圧力計は台風襲来で移動したものではあるが、その水位と水温の記録には沖ノ鳥島における観測値の特徴がよく現れているので Fig. 2 に示す。図は1987年10月1日から16日までの10分間隔の水温と水位の時系列データを表しており、実線が水位、破線が水温をそれぞれ示している。

まず水位であるが、10月4日頃から11日頃にかけては滑らかな曲線で潮汐周期の変動を表しているのに対し、12日及び13日は短い周期の激しい変動が現れ、全般的に水位が上昇している。その上昇の後、14日には水位が逆に一挙に下がっている。14日の水位低下については台風の襲来によって圧力計が浅いところに運ばれたためであるが、その前の12日から13日の水位上昇と短い周期の変動は台風通過時に必ず見られる現象であり、水位上昇の原因は、台風により波浪、うねりが大きくなり、その波浪、うねりが環礁内に海水を運び込むことではないかと考えられる。したがって、台風等の悪天候時の環礁内の水位は環礁外に比べてかなり高い水位になっているのではないかと推測される。さらに台風通過時は気圧が低下するので水位はこの記録以上に上昇しているものと推定される。

次に水温である。水温の特徴は水位が滑らかな曲線を描く時、つまり天候の好い時に、顕著な1日周期の変化を起こすことである。この1日周期の変化は昼間の低潮時に高温になるという特徴を持っている。これは潮が引き、環礁内の海水の交換が小さくなった時に、日射により礁内の海水が暖められたも

Table 2 Daily mean water temperature (unit:0.1°C).

Table with columns for day, month, and mean water temperature. The table is organized into groups of 12 days each, with rows representing different months (e.g., 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93) and columns representing individual days (1-31). A 'mean' column is provided at the end of each group.

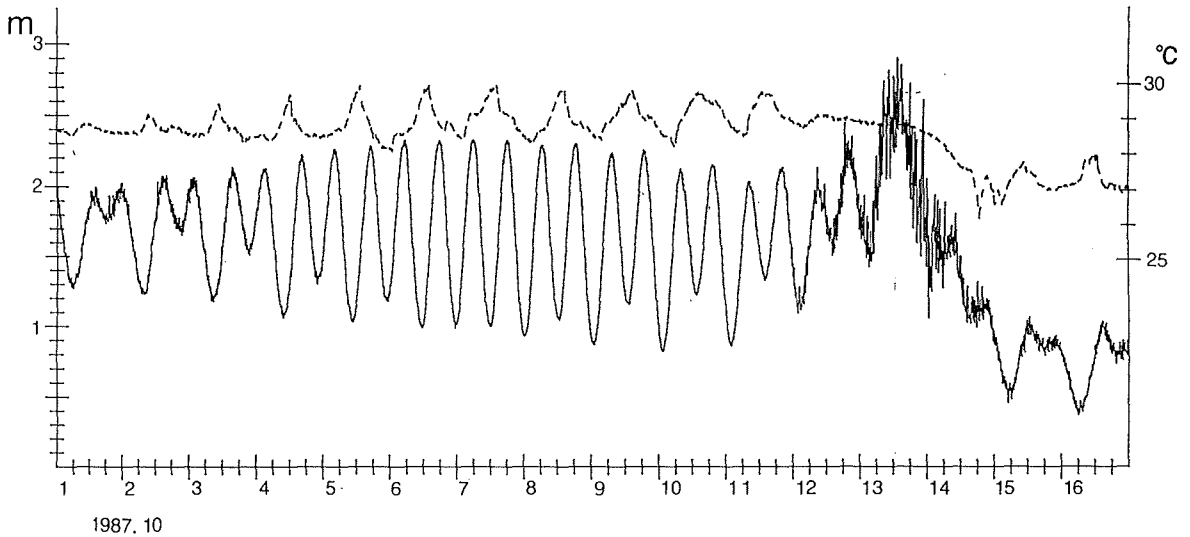


Fig. 2 Time variations of sea level and water temperature from Oct.1 to Oct. 16, 1987, observed by the pressure gauge. On Oct.14 the pressure gauge was shifted its site by a typhoon.

Solid line denotes sea level and dashed line denotes water temperature.

のと考えられる。また、逆に夜間の低潮時には海面冷却に伴うと思われる水温低下が見られることもある。もうひとつの水温に関する興味深い現象は10月14日頃の水温の変化である。台風は海の表面水温が28°C以上の時に発達すると言われているが、表面水温がその28°C以上であった海に台風がやって来て、海をかき混ぜることによって水温を28°C以下に低下させて離れて行った様子を示している。

1987年10月25日から11月1日にかけて環礁の内外を結ぶ水路 (Fig. 1参照) において潮流観測を実施した。先に悪天候時には礁内の水位が礁外に比べかなり高くなっていると述べたが、この潮流観測の結果を見ると天候の好い時にも礁内の水位は礁外よりもやや高くなっているようである。Fig. 3はその観測時における礁内の水位と水路の流れの時系列変化を表したものである。上段の曲線が水位の変動を示し、下段の曲線が水路の中央部における水路方向 (北北西-南南東方向) の流れの変動を表している。観測のほぼ全期間にわたって水路の流れは南南東方向、すなわち、環礁から水が流れ去る方向に流れている。しかも、水位と流れの時間変動の様子は酷似してお

り、水位が低くなると水路の南南東向きの流れは強くなり、水位が高くなると水路の流れが弱くなるという特徴を示している。Fig. 4は水路の流れと水位の変動の相互相関関数であるが、タイムラグがゼロのところに相関のピークが現れており、水路の流れと礁内の水位の変化が完全に同位相で行われていることを示している。

水路の流れが環礁内から流れ去る方向に流れていることは、礁内の水位が礁外よりも高いことを示している。しかも、礁内の水位と流れの変化が同位相で起こることから、礁内と礁外の水位差が水位の高低によって変動していると見せるものである。つまり、水位が低い程、水位差が大きくなっているのである。ここで流れが礁の内と外との水位差によってのみ起こされると考え、

$$v^2 = 2gh \quad (1)$$

v : 水路の流れ g : 重力加速度

h : 礁内外の水位差

の関係を満たすと仮定すれば、流れが3knにも達する低潮時には礁内の水位は10cm程度礁外に比べて高くなっていると考えられる。この水位差も悪天候

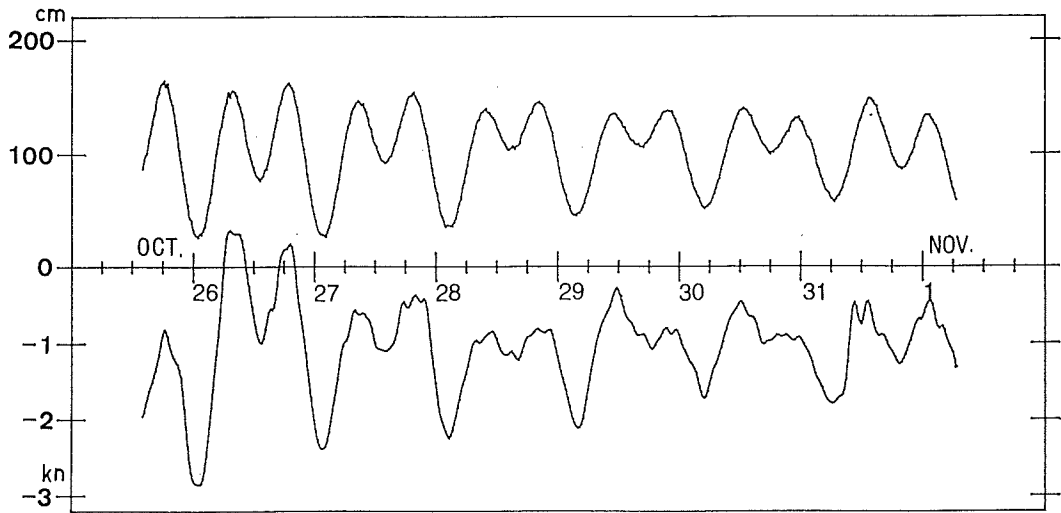


Fig. 3 Time variations of sea level (the upper curve) and the NNW component of the current (the lower curve) in the channel, from Oct. 25 to Nov.1,1987.

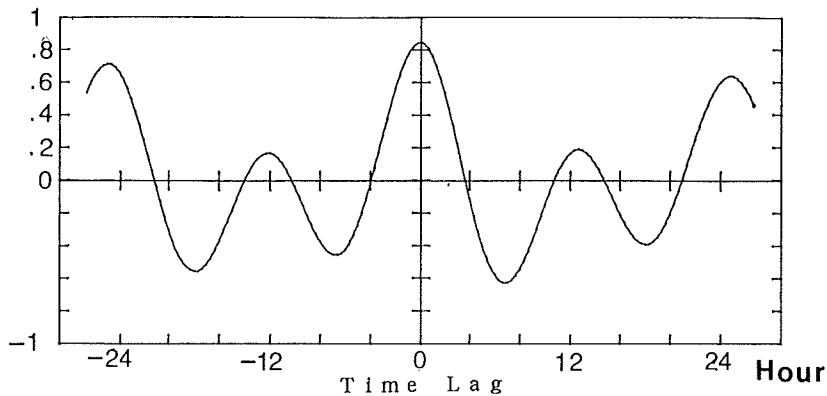


Fig. 4 The normalized cross-correlation function between sea level and the NNW component of the current in the channel.

時と同様にうねり等により、環礁内に水が運ばれるためではないかと考えられる。

沖ノ鳥島潮汐観測の観測値について述べてきた。述べてきたように観測値には様々な問題はあるが、これらの問題を解決するために環礁内ではなく環礁外に機器を設置して観測をすれば良いというものではないだろう。なぜならば、陸上の固定点は礁内のみ存在するので、礁外の水位を陸上の固定点と厳密に関係づけることが不可能であり、さらに水位計が深海底に設置された場合には、海洋内部の密度等の変化により海表面の変化を正確に検出することは

できないことなど礁外の観測はさらに問題があると考えられるからである。したがって、今回の潮汐観測は、問題点はあるものの水位計を設置することが可能な島嶼が近くに全く無い絶海の孤島ともいえるべき沖ノ鳥島において実施しているものであり、価値の高いものであると考えられる。

また、この観測値の問題は環礁内における水位等の観測については多かれ少なかれ共通する問題であると考えられる。したがって、例えば環礁内での潮汐観測値を用いて環礁外の水深の潮高改正を行うような場合には、潮位データを注意して取扱う必要が

あろう。今回の場合、水路の流れと水位との相関関係を用いて礁内の観測値を礁外の値に近づけるような補正方法は考えられるが、その補正が正しいか否かの検証を行うことができないので以下では主として補正を行っていないデータにより沖ノ鳥島の水位変動の状況を見ていくこととする。

5. 水位変動

(1) 長期的な水位変動の傾向

数カ月程度以上の長期的な沖ノ鳥島の水位変動の傾向を見るために、Fig. 5に水位と水温の30日移動平均値を示す。水温には明らかに年周期変動が見られるが、水位については年周期変動は明瞭ではなく、また、他の周期の変動についても、予備的な周期解析を行ったが特に卓越するような変動周期も見つからなかった。

西太平洋の赤道域では、エルニーニョ現象時には表面水温と水位の低下が起こり、ラニーニャ現象時には逆に表面水温と水位の上昇が起こることが知られているが、沖ノ鳥島でも全体的な傾向としては西太平洋の赤道域と同様に1988~89年のラニーニャ現象時に水位がやや高くなり、逆に1991~92年のエルニーニョ現象時には水位が低くなっているのが見られた。しかしながら、Qiu and Joyce (1992) は1967~88年の気象庁の137°Eの定線観測の結果から、その期間の平均では20°N付近の水位は赤道域とは逆にエルニーニョ現象時の水位は高く、ラニーニャ現象時の水位が低いことを示しており、たまたま今回の観測時に沖ノ鳥島の水位が赤道域の水位と

同じ傾向を示しただけかもしれない。

水温と水位の関係を見ると、1988年8月頃のように水温の低下と水位の低下が同時に見られる場合もあるが、全体的にみると水温と水位の相関は高くない。

(2) 潮汐周期の変動

1988年から1992年までの5年間の沖ノ鳥島における水位の記録を調和分解して算出した主要4分潮の調和定数を Table 3 に示す。K₁潮とO₁潮の振幅の和とM₂潮とS₂潮の振幅の和との比は0.48と混合潮型を示している。この(K₁+O₁) / (M₂+S₂)の値は、沖ノ鳥島のほぼ同じ経度に位置する串本で0.58であるのをはじめとして、高知0.52、御前崎0.68、南伊豆0.73など、日本列島南岸では沖ノ鳥島の値0.48よりも大きくなっている(海上保安庁水路部、1992)。これは日周潮がケルビン波的な特性を持つので、沖合いに向かって徐々に振幅が減衰し、遙か沖合いに位置する沖ノ鳥島では日本列島南岸に比べて振幅が小さくなることによって生じているものである。

Schwiderski (1979など)のモデルと今回の調和定数とを比較すると、日周潮は今回の観測結果とよく合っているが、半日周潮では違いが大きく、特にM₂潮の振幅では7cmもの差が現れた。この差の原因として潮汐観測が環礁内で行われているため、低潮時に礁外よりも水位が高くなり、そのために振幅が小さくなっているということも考えられるので、1987年10月25日~11月1日の潮流観測の結果を用いて水位と水路の流れとの関係を直線回帰で求め、その関

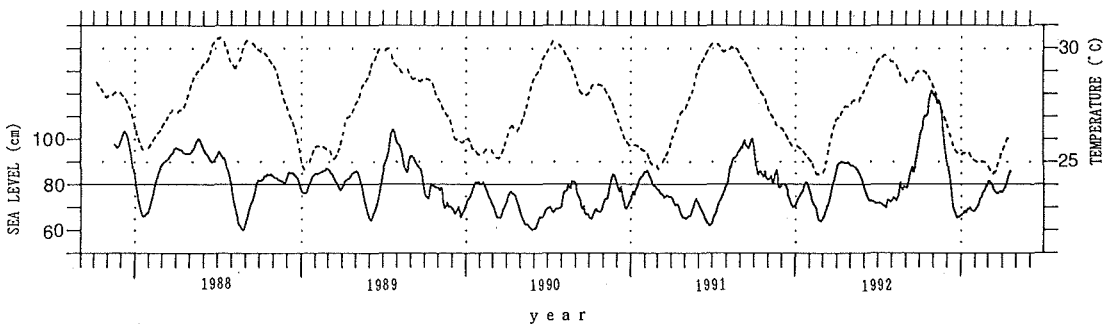


Fig. 5 30-day running mean of sea level and water temperature at Oki-no-Tori Sima.

Table 3 Harmonic constants of four-main principal constituents.
 left column : results of the harmonic analysis of raw data.
 center column : results of the harmonic analysis of the corrected data.
 right column : harmonic constants from Schwiderski's model.

constituent	observed value		corrected value		Schwiderski's model	
	amplitude	phase lag	amplitude	phase lag	amplitude	phase lag
M_2	38.9 cm	202	41.1 cm	202	46 cm	209
S_2	16.5	229	17.4	229	19	233
K_1	16.0	208	16.9	208	16	209
O_1	10.4	188	11.1	188	12	191

係に(1)式を用いて環礁の内と外の水位差を算出し、その水位差分の補正を行った水位の値を調和分解したが、このような補正を行っても、 M_2 潮の振幅は2 cmあまり大きくなっただけである (Table 3 参照)。したがって、Schwiderski のモデルでは沖ノ鳥島付近の半日周潮の振幅は大きめに計算されているものと判断される。

(3) 年周期変動

太平洋の水位の年周期変動については、Wyrtki and Lesile (1980) が詳しく調べている。それによると基本的には北半球、南半球とも夏から秋にかけて頃に水位が最大になっている。しかし、沖ノ鳥島のあたりを含む西太平洋の熱帯域、亜熱帯域の島々の記録においては、例えば、1963年から1971年までの潮汐観測に基づいて算出された南鳥島(24°18'N, 153°53'E)の年周期変動が12月の終わり頃に水位が最大になっているようにかなりのばらつきが見られるので、沖ノ鳥島についても1988年~92年のデータを用いて年周期及び半年周期変動成分を算出して、北西太平洋の熱帯域、亜熱帯域のいくつかの験潮所の記録と比較することにした。その比較は Fig. 6 に示しているが、その年周期変動成分及び半年周期変動成分については大気圧補正をした水位の月平均値を用い、月平均水位が下の(2)式のように表せるとして

算出したものである。

$$H(t) = H_0 + \sum H_i \cos(\omega_i t - \alpha_i) \quad (2)$$

$$H(t): \text{月平均水位}(t=1, \dots, 12)$$

H_0 : 平均水面の高さ

$$\omega_i = 2\pi \times i / 12: \text{角振動数}(i=1, 2, \dots)$$

H_i : 振幅 (H_1 : 年周期成分)

α_i : 遅角

なお、Wake 島等のデータはハワイ大学が収集したデータを気象庁海洋気象部海洋課から頂いた。

Fig. 6にあるとおり、沖ノ鳥島の年周期変動成分の振幅は小さく、他の験潮所における値の半分以下であることが特徴的である。一方、半年周期変動成分は年周期変動よりも大きな振幅となっており、他の点の半年周期変動成分と比べても大きな振幅となっている。また、変動の位相は、ほぼ同緯度に位置する Wake 島よりも1カ月程度遅れ、10月頃に水位最大となっている。小笠原父島とは年周期成分、半年周期成分ともほとんど同位相となっていることが特徴的である。

上に述べたように小笠原父島と沖ノ鳥島は5年間のデータから算出した年周期変動及び半年周期変動は似通ったものであるが、各年の変動については全く異なった様相を見せている。Fig. 7は、季節変動を除いた水位変動、すなわち、水位の月平均値の5年

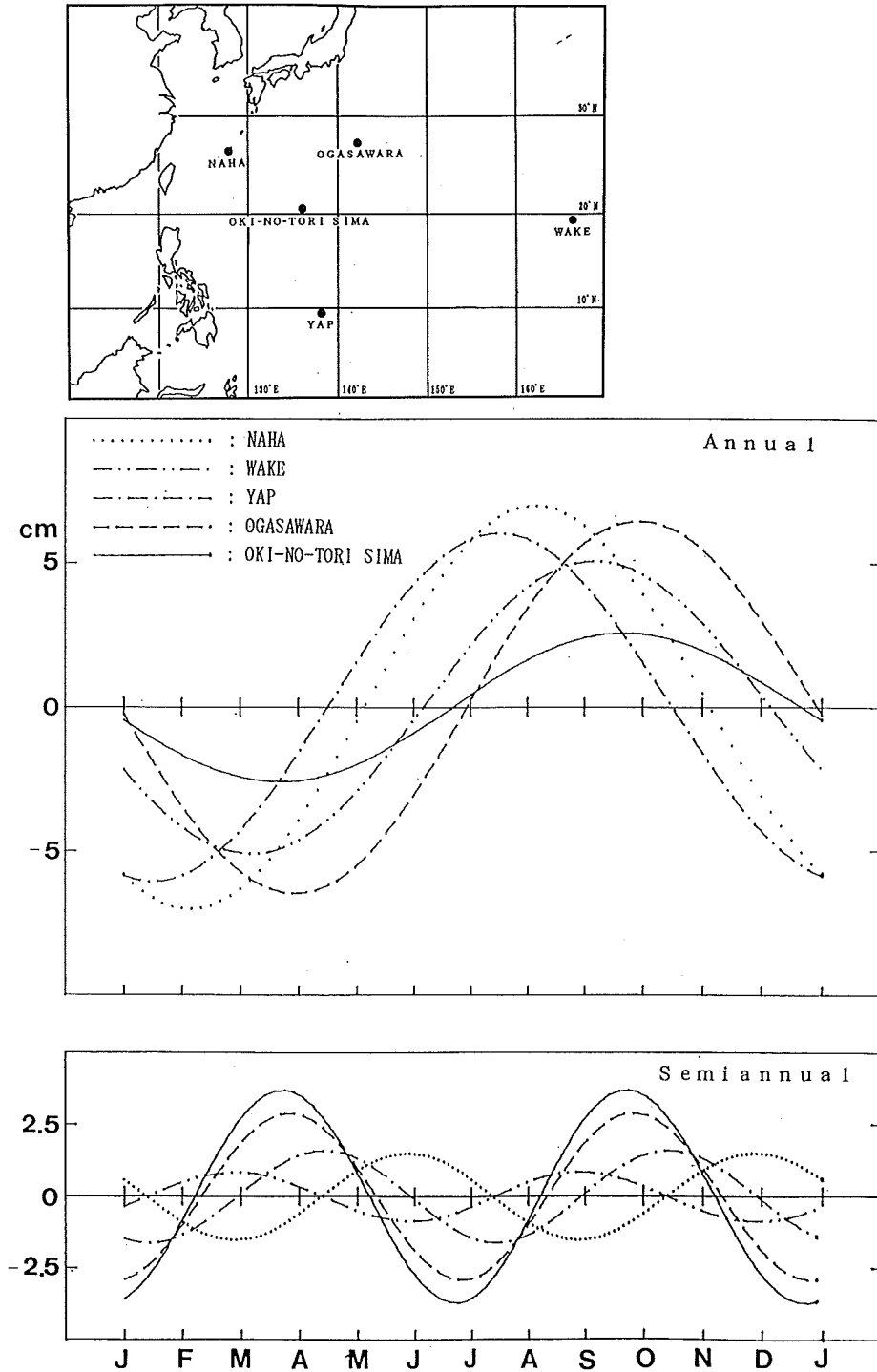


Fig. 6 Annual and semi-annual signals of sea level at the five tidal stations, Oki-no-Tori Sima ($20^{\circ}25'N, 136^{\circ}05'E$), Ogasawara Chichijima ($27^{\circ}05'N, 142^{\circ}11'E$), Yap ($9^{\circ}31'N, 138^{\circ}08'E$), Wake ($19^{\circ}17'N, 166^{\circ}37'E$) and Naha ($26^{\circ}13'N, 127^{\circ}41'E$).

Top panel : The locations of the five tidal stations

Middle panel : Annual signals

Bottom panel : Semi-annual signals

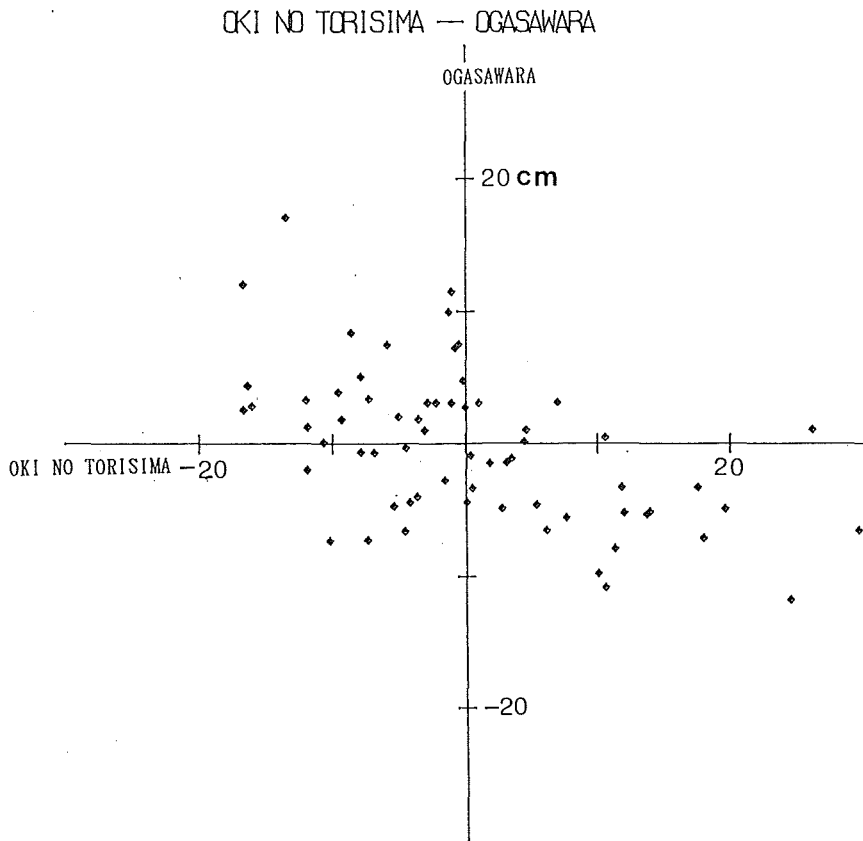
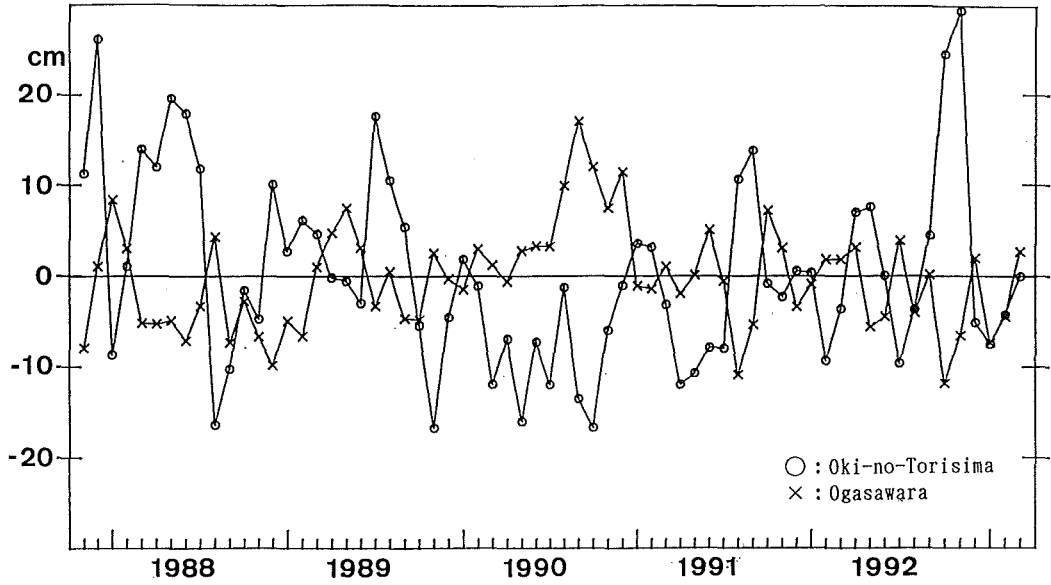


Fig. 7 Sea level anomalies of Oki-no-Tori Sima and Ogasawara Chichijima obtained from the 1988 to 1992 monthly mean sea level adjusted for atmospheric pressure.

The upper panel shows time series of anomalies, and the lower panel is scatter diagram between anomalies of the two stations.

(1988~92年) 平均値からの偏差を表したものである。一見して明らかのように、負の相関の変動となっており、その相関係数は-0.59とかなり高いものとなっている。この沖ノ鳥島と小笠原父島の水位の逆相関の変動は1988~92年の5年間にたまたま現れたものかも知れないが、沖ノ鳥島の潮汐観測は今後も継続されることになっているので、注意深く見守っていくことにしたい。

6. おわりに

沖ノ鳥島における5年間の潮汐観測の成果をとりまとめ、周辺島嶼の水位変動との比較を行った。その結果、1) 平均水面は1988~89年のラニーニャ現象時には高く、91年春~92年夏のエルニーニョ現象時に低くなっていたこと、2) 年周期変動については、小笠原父島と同位相の変動を示すが、振幅については周辺の記録に比べ小さいこと、3) 潮汐については半日周潮が卓越するが、 K_1+O_1 と M_2+S_2 の振幅の比は0.48であり、混合潮型となっていることなどがわかった。

しかしながら、今回の結果は5年間の短い期間の観測の結果であり、潮汐周期の変動以外はこの5年間だけの特異な状態であった可能性もある。沖ノ鳥島における潮汐観測は今後も継続されることとなっているので、もっと長期的な変動を含めて、その水

位の変動状況については検討していく必要がある。

最後に、小笠原父島の験潮記録をはじめとする貴重な資料を提供して頂いた気象庁海洋気象部海洋課と通算6度沖ノ鳥島に赴かれた下平保直氏をはじめ、桑木野文章氏、福島繁樹氏、伊藤清寿氏、久保一昭氏、田賀傑氏、宗田幸次氏、西田浩志氏、益本利行氏など沖ノ鳥島潮汐観測に関係された方々に心からお礼を申し上げます。

参 考 文 献

- Qiu, B. and T. M. Joyce : Interannual Variability in the Mid- and Low-Latitude Western North Pacific, *J. Phys. Oceanogr.*, **22**, 1062-1079, (1992)
- 海上保安庁水路部 : 日本沿岸潮汐調和定数表 (1992)
- Schwiderski, E. W. : Global Ocean Tides, part II : The Semidiurnal Principal Lunar Tide 8 (M₂), *Atlas of Tidal Charts and Maps*, Tech. Rept., Naval Surface Weapons Center, (1979)
- Wyrtki, K. and W. G. Leslie : The Mean Annual Variation of Sea Level in the Pacific Ocean, Rept. HIG-80-5, Hawaii Institute of Geophysics, (1980)