
 特集「沿岸防災関連情報の改善」

沖縄地方における簡易水位計を用いた波浪効果による 潮位上昇 (wave setup) の調査

田口 幸輝 *1・橋口 清 *2・林原 寛典 *3・永井 直樹 *1

要 旨

沖縄気象台では 2013 年度から、沖縄地方に台風が接近する前に簡易水位計を沖縄本島の各港湾に設置して、台風の接近・通過時における潮位データの測定を行ってきた。そのデータを平滑化して副振動等の短周期変動を除去した後、高潮モデル及び沿岸波浪モデルによる解析値との関係を調べた。その結果、高潮モデルでは計算されない波浪効果による潮位上昇(以下「wave setup」という。)が、港川漁港(八重瀬町)及び東漁港(東村)で顕著に測定されることが明らかとなった。この測定値を基に wave setup を定量的に求めるための実験式を算出することができたため、2015 年度から沿岸防災解説業務において当該港湾における高潮モデルの量的補正にこの実験式を使用している。

1. はじめに

台風が強い勢力を保ったまま接近しやすい沖縄地方では、これまで高潮・高波災害が度々発生してきた。特に沖縄本島の東海岸では、2007 年台風第 4 号(T0704)及び 2012 年台風第 16 号(T1216)により甚大な高潮・高波災害が発生した。T1216 の時に当時の沖縄気象台職員が水準測量した浸水痕跡高から推察すると、高潮モデルでは計算されない顕著な潮位上昇が発生した可能性が高いことが分かった。高潮モデルとは、メソ数値予報モデル(MSM: Meso-Scale Model)の風向・風速と気圧を外力として、日本沿岸 1km 格子ごとに高潮を予報する数値予報モデルである。このモデルでは、台風や低気圧等の接近に伴い気圧が低下することで潮位が上昇する「吸い上げ効果」と、沿岸に強い風が吹き続けることで潮位が上昇する「吹

き寄せ効果」を高い精度で計算することが可能である(林原, 2011)。

しかし、高潮の発生要因は吸い上げ効果と吹き寄せ効果だけではなく、海岸によっては wave setup も重要な要因の一つになりうる。wave setup とは、外洋から押し寄せた高波が浅水変形により碎波した際に働く岸向きの応力によって潮位が上昇する現象を指し、沖合の有義波高が高いほど wave setup も顕著に現れる。wave setup を予測するため、小西(1997)は東京湾に襲来した 7 個の台風に対して 5 つの検潮所で観測した潮位を用いて有義波高に対する wave setup の実験式を決定した。wave setup は一般に外洋に面した海底勾配が急な海岸で発生しやすく、リーフに囲まれた沖縄地方のいくつかの海岸でも、仲座ほか(1998)による調査等でその存在が複数報告されている。

*1 沖縄気象台(現 地球環境・海洋部海洋気象課)、*2 沖縄気象台、*3 気象庁地球環境・海洋部海洋気象課海洋気象情報室

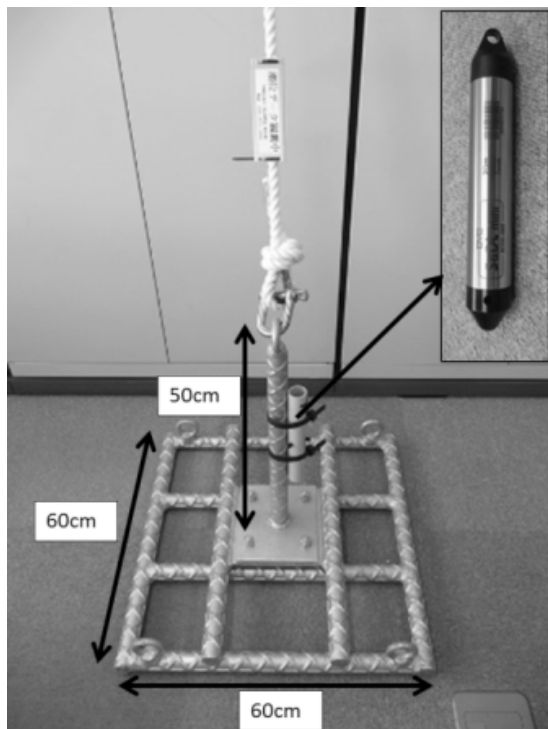
wave setup はリーフや海底勾配等といった地形の影響を大きく受けるため、東京湾に襲来した7個の台風の事例のみから求めた小西の実験式を沖縄地方に適用しても、沖縄地方で発生する wave setup を正確に予測することは困難であると考えられる。しかしながら、これまで沖縄地方に適した予測手段がなかったことから、沖縄気象台では小西の実験式を参考に沿岸防災解説業務を行ってきた。そこで、沖縄地方における wave setup の量的予測を行うことを目的として、2013年度から高潮・高波災害が発生しやすい海岸付近の港湾に簡易水位計を設置して、台風接近時から通過時にかけての潮位データの測定を行ってきた。本稿ではその解析結果について述べる。

2. 簡易水位計と設置基台

本調査では簡易水位計として副振動の調査等で使用実績のある小型絶対圧水位計（応用地質株式会社製 S&DLmini MODEL-4800 20m）を使用した（第1図右上）。この簡易水位計は下端部に搭載されたセンサーで水位及び水温を測定し、そのデータを内部メモリに収録する。また、内蔵電池によ

り6～8年使用可能であり、一度の測定で水位及び水温のデータをそれぞれ40,000個まで収録可能である。さらに、専用のクレードルを用いてパソコンと接続し、データの保存並びに測定開始日時及び測定間隔の設定を行うことができる（第1表）。台風接近時の潮位変動を詳細に捉えるためには測定間隔をできるだけ短くすることが望ましいが、本調査では台風通過期間と簡易水位計のメモリ容量とを考慮し、これを10秒に設定した。この設定では測定開始から約4.5日分のデータを収録することが可能である。

簡易水位計の設置基台（第1図）は、高潮・高波による簡易水位計の流失や砂泥による埋没の防止、安定した測定値を得るための設置安定性及び設置回収作業の利便性を考慮して製作したものである。基台の重量は45kgで、主材料には海水の塩分による腐食を防止するために亜鉛溶融メッキを施したD35異形棒鋼を採用した。本調査では、簡易水位計を塩化ビニル管で保護したうえでこの基台の支柱に結束バンドで固定し、波の影響を受けにくい港湾内の海底に設置した（第2図）。



第1図 簡易水位計（右上）及び設置基台



第2図 簡易水位計の設置作業

第 1 表 簡易水位計の仕様

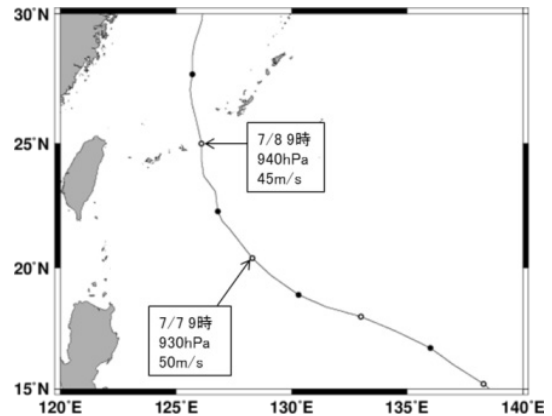
項目	仕様
電池寿命	6～8年 (測定間隔を10分にした場合)
使用可能温度範囲	-20℃～+50℃
通信方式	RS-232C / USB (S&DL miniクレードル使用)
外觀寸法	直径22 mm x 長さ158 mm (ただし突起含まず)
質量 (空中質量)	177 g
水位測定範囲	19m (他に5m～100mまでの4製品を指定可能)
測定回数 (メモリ容量)	リニア測定時 水位・水温各40,000回
測定間隔	リニア測定時連続0.5秒、1～99秒 (1秒単位)、 1～99分 (1分単位)、1～99時間 (1時間単位)
圧力センサ精度	0.1%FS (0℃～40℃)
水位分解能	2mm

3. 調査事例と調査地点

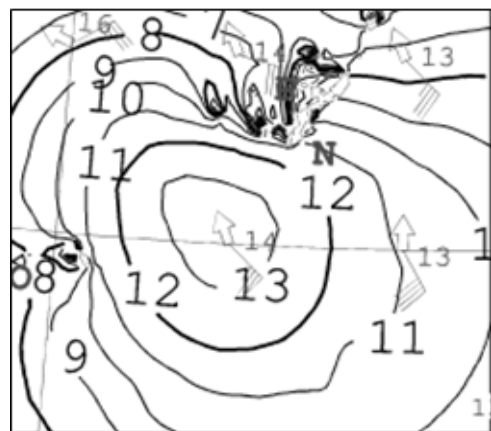
本調査では2013年10月～2015年7月にかけて沖縄本島地方に接近すると予想された台風を対象とした。このうち、以下では全国で初めての台風による特別警報が沖縄地方に発表された2014年台風第8号 (T1408) の事例について述べる。T1408は北緯22度まで北西進した後、7月8日9時には中心気圧940hPa、最大風速45m/sの大型で非常に強い勢力を維持したまま宮古島と久米島の間を北上した (第3図)。台風の本島から100km以上離れていたが、沖縄本島の東海岸には南南東から有義波高12m程度の高波が押し寄せていた (第4図)。この台風の接近に伴い高潮・高波が発生することが予想されたため、過去に高潮・高波災害が度々発生している沖縄本島南部の港川漁港 (八重瀬町)、北部の東漁港 (東村) 及び安田漁港 (国頭村) に簡易水位計を設置した (第5図)。このうち、港川漁港と東漁港において顕著な潮位上昇がみられたため、この2か所に絞って解析した。

4. データの解析

台風が通過した後、基台を引き揚げて、簡易水位計に記録された csv 形式のデータを専用のクレードルを用いてパソコンに保存し、以下に示す手順で解析した。



第 3 図 T1408 の台風経路図及び沖縄本島接近時における中心気圧と最大風速
経路上の○印は9時の位置、●印は21時の位置。



第 4 図 T1408 が沖縄本島に最接近する直前 (2014年7月8日9時) の沿岸波浪図 (確定図)

4.1 大気圧補正

簡易水位計は絶対圧式であるため、簡易水位計で測定した潮位は、水圧だけではなく大気圧の影響も含まれた見かけ上の値 h_{app} である。このため、実際の水位 h_{real}^* を算出するには、 h_{app} から大気圧補正值 h_{air} を除かなければならない（式（1））。

$$h_{real}^* = h_{app} - h_{air} \quad (1)$$

h_{real}^* ：実際の水位測定値 (m)

h_{app} ：見かけの水位測定値 (m)

h_{air} ：大気圧補正值 (m)

h_{air} は現地の海面気圧 p に応じて線形に変化するため、大気圧補正係数をあらかじめ求めておくことによって p から h_{air} を算出することができる。この大気圧補正係数を決定するために、那覇の地上気圧を観測している地上気象観測装置の気圧計の近傍に簡易水位計を設置し、地上気圧に対する簡易水位計の測定値を調べた（第6図）。こうして得られた地上気圧と簡易水位計の測定値との関係から、最小二乗法により大気圧補正係数を決定した（式（2））。

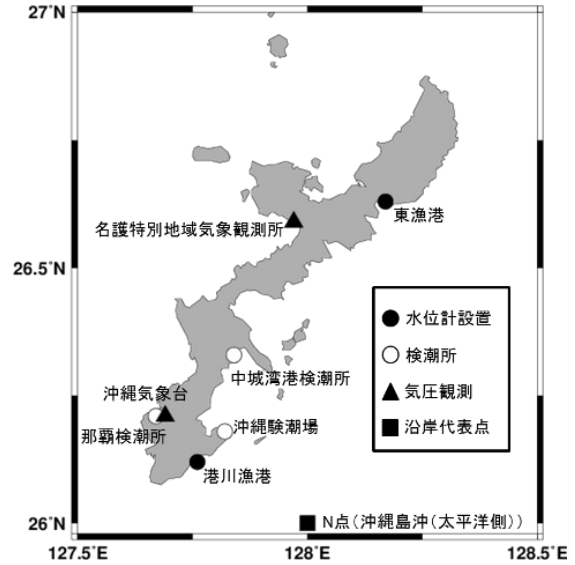
$$h_{air} = 1.017p \times 10^{-2} - 9.54 \quad (2)$$

p ：現地の海面気圧 (hPa)

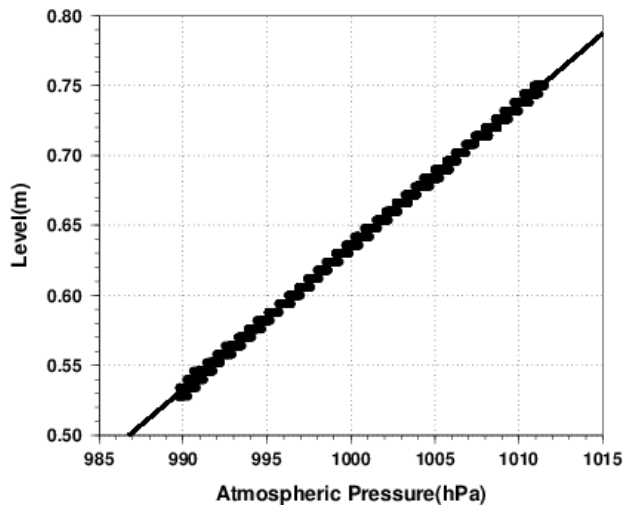
これによって台風接近時の現地の海面気圧が分かれば、大気圧補正を行うことによって実際の水位を求めることができる。しかし、港川漁港及び東漁港では海面気圧の測定を行っていないため、近傍の地上気象観測地点（那覇または名護）における海面気圧を用いた。具体的には、本島中南部に位置する港川漁港については那覇における海面気圧を用い、本島北部に位置する東漁港については名護における海面気圧を用いた。

4.2 密度補正

簡易水位計は水圧を水位に換算する際に淡水の密度（1,000kg/m³）を用いるため、潮位を算出するにはこの水位を海水の密度で補正する必要がある。海水の密度は、塩分、水温及び水圧に依存するが、このうち、水圧については本調査で取り扱



第5図 簡易水位計の設置位置並びに検潮所，気圧観測及び沿岸代表点の位置



第6図 2015年8月22日～8月30日における那覇の地上気圧に対する簡易水位計の測定値
簡易水位計の測定値は、那覇の地上気象観測装置の気圧計の近傍で大気圧を測定した時のものである。

う 10m にも満たない高潮を扱う場合には密度への影響が 0.1% 未満であるため無視できる。塩分については外洋における標準的な塩分である 35 を用いた。塩分の変動による密度への影響は 0.3% 未満であるため、一定値として問題ない。また、台風が接近する時期の沖縄地方の海面水温は 25°C ~ 30°C 程度で、この条件で算出される密度は 1,022 ~ 1,023 kg/m³ である。仮に簡易水位計で 10m の潮位を測定したとしても、誤差は簡易水位計の測定精度である ± 2cm 以下となるため、本調査では海水の密度を 1,023 kg/m³ として密度補正を行った (式 (3))。

$$h_{real} = \frac{h_{real}^*}{1,023} \quad (3)$$

h_{real} : 海水の密度で補正した水位測定値 (m)

4.3 潮位の標高への換算

沿岸防災解説業務で潮位を扱うためには、これを標高に換算する必要がある。簡易水位計を毎回同じ高さに設置することは困難であるため、本調査では近傍の検潮所の日平均潮位を基準として簡易水位計による潮位を標高に換算した。すなわち、式 (4) に示すとおり、台風通過後に潮位偏差が解消された日の日平均潮位 \bar{h}_{real} を沖縄験潮場 (国土地理院) で測定された日平均潮位 \bar{h}_{jp} に換算して、潮位 h を標高で表した。

$$h = h_{real} - \bar{h}_{real} + \bar{h}_{jp} \quad (4)$$

h : 標高に換算した簡易水位計による潮位 (m)

\bar{h}_{real} : 台風通過後の簡易水位計による日平均潮位 (m)

\bar{h}_{jp} : \bar{h}_{real} と同日の沖縄験潮場における日平均潮位 (m)

なお、本調査では、潮位偏差が解消された日として、台風通過前の日平均潮位偏差と通過後の日平均潮位偏差がほぼ同じ値 (± 5cm 以内) になる日を選んだ。

4.4 平滑化処理

簡易水位計による測定値には潮汐周期より短

い成分が混在しているため、平滑化処理によりこれらの短周期成分を除去する必要がある。この平滑化には、気象庁で潮汐観測原簿の作成に採用しているデジタルフィルターを用いた (島田ほか, 2002)。具体的には、潮汐の主要な分潮である半日周潮付近で 99.9% 以上の透過率を示すカットオフ周期 209 分のローパスフィルターを用いた。

4.5 wave setup の抽出

第 4.4 節で述べた処理によって得られた潮位 (平滑値) から天文潮位を除いた潮位偏差には、wave setup の他に気象要因による潮位変動 (吸い上げ効果及び吹き寄せ効果) 及び暖水域や冷水域の接近による海面高度の変化に伴う潮位変動が含まれている。したがって、潮位偏差から wave setup を抽出するには、潮位偏差から wave setup 以外の要因による潮位変動を除けばよい。

天文潮位を精度良く算出するには長期間にわたる測定値が必要であるが、簡易水位計の設置地点ではそのような測定値が蓄積されていない。そこで、2010 年度に気象庁で開発された面的天文潮位を用いた (高佐ほか, 2011)。面的天文潮位とは、これまで検潮所のある地点でしか求められていなかった天文潮位を、オレゴン州立大学の潮汐モデルに当てはめるなどして日本沿岸 1km 格子ごとに算出したもので、検潮所のある地点における天文潮位との比較によって沖縄地方を含むほとんどの地域で精度が良いことが示されている。

気象要因による潮位変動の算出には、高潮モデルのハインドキャスト (以下「ハインドキャスト」という。) を用いた。ハインドキャストとは、風と気圧の予報値ではなく予報誤差が極力除かれた過去の初期値を基に計算された解析値である。なお、ハインドキャストのうち吸い上げ効果分については、大気圧補正の際に用いた近隣の地上気象観測地点で観測された海面気圧ではなく、簡易水位計の設置地点における海面気圧の解析値を用いた。これは、両地点間で海面気圧の年間偏差にほとんど差異がみられなかったためである。

海況要因に伴う潮位変動は T1408 が接近・通過した期間にはほとんどみられなかった。このため、ハインドキャストで表現されていない潮位上

昇は wave setup のみによるものとみなして解析した。

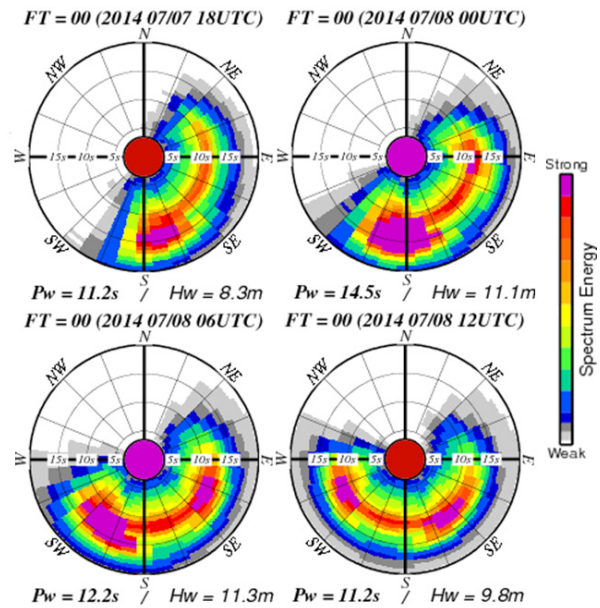
4.6 wave setup 予測の実験式算出

抽出した wave setup の測定値を気象庁沿岸波浪モデルで解析された有義波高に対してプロットし、wave setup を予測する実験式を求めた。この沿岸波浪モデルは、全球数値予報モデル (GSM: Global Spectral Model) の海上風を外力として、日本近海を 0.05 度格子に区分し、様々な波向と周期を含む波のエネルギースペクトルを計算する数値予報モデルである (峯松, 2009)。T1408 が沖縄本島に最接近した前後における沿岸代表点 N 点 (沖縄島沖 (太平洋側), 以下「N 点」という。) で解析された沿岸波浪モデルの 2 次元エネルギースペクトルを第 7 図に示す。この図から、N 点における波のエネルギー密度が最も高い方位は、台風が最接近する以前の 8 日 9 時までは南南東～南南西であったのが、台風が最接近した同日 15 時以降には東南東～南南東に加えて南南西～西南西に変わったことが確認できる。波向が南である場合は港川漁港と東漁港に高波が直接入りやすいが、波向が南西である場合はこれらの港湾に高波が直接入りにくい (第 5 図参照)。本調査では測定地点に高波が直接入りやすい場合に注目する必要があることから、wave setup がピークに達するまでの測定値のみを用いて実験式を算出した。

5. 解析結果

5.1 簡易水位計の測定結果と沿岸波浪モデルの有義波高の関係

T1408 が沖縄本島に接近した期間に港川漁港及び東漁港において測定された潮位偏差 (平滑値)、ハインドキャスト及び沖縄験潮場で観測された潮位偏差並びに沿岸波浪モデルによる有義波高をプロットした図を第 8 図に示す。台風が中心が沖縄本島から離れた位置を通過したことから、ハインドキャストで計算される吸い上げ効果と吹き寄せ効果はいずれの地点においても 0.5m 以下の潮位偏差しか解析されなかった。また、沖縄験潮場でも 0.5m 程度の潮位偏差しか観測されなかった。それにもかかわらず、港川漁港では 7 月 8

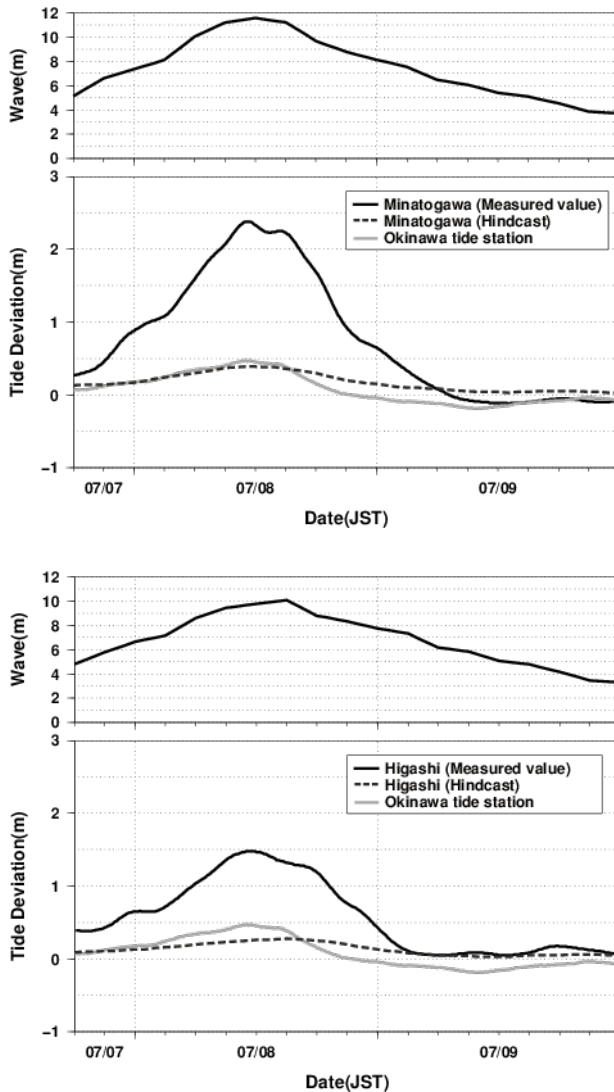


第 7 図 T1408 が沖縄本島に最接近する前後における沿岸代表点 N 点 (沖縄島沖 (太平洋側)) で解析された沿岸波浪モデルの 2 次元エネルギースペクトル

左上: 2014 年 7 月 8 日 3 時, 右上: 同日 9 時, 左下: 同日 15 時, 右下: 同日 21 時。

日 11 時頃に 2m を上回る顕著な潮位偏差が測定された。この時、沿岸波浪モデルによると港川漁港周辺では有義波高が 11m 以上であったことが推測され、有義波高と潮位偏差の対応関係が良いことが分かる。このことから、高潮の要因として wave setup が吸い上げ効果や吹き寄せ効果に比べて大きく寄与していることが推察される。また、東漁港でも有義波高 10m の時に 1.5m 程度の潮位偏差が測定されており、港川漁港と同様、有義波高との対応関係が良いことが分かる。

T1408 が接近した期間は大潮の時期ではなかったが、wave setup によって顕著な高潮が発生した港川漁港では同日 16 時頃の満潮時に高潮警報基準である標高 2.0m を大きく上回る潮位 (平滑値: 2.7m) が測定され、東漁港でも高潮警報基準に接近する潮位 (平滑値: 1.8m) が測定された。T1408 の接近に伴う被害状況について現地確認し



第8図 T1408が沖縄本島に接近する前後(2014年7月7日~7月9日)において港川漁港(上)と東漁港(下)で測定された潮位偏差(太線)とそれぞれの地点で解析されたハインドキャスト(破線)、沖縄験潮場(国土地理院)で観測された潮位偏差(細線)及び沿岸波浪モデルによる有義波高

た結果、港川漁港では台風に備えて陸揚げしていた船舶が高潮で転倒するなどの被害が生じていたことが分かった。陸揚げした船舶の位置から少なくとも標高3mの高さまで海水が押し寄せたことが推定され、このことは簡易水位計で測定された潮位と整合する。

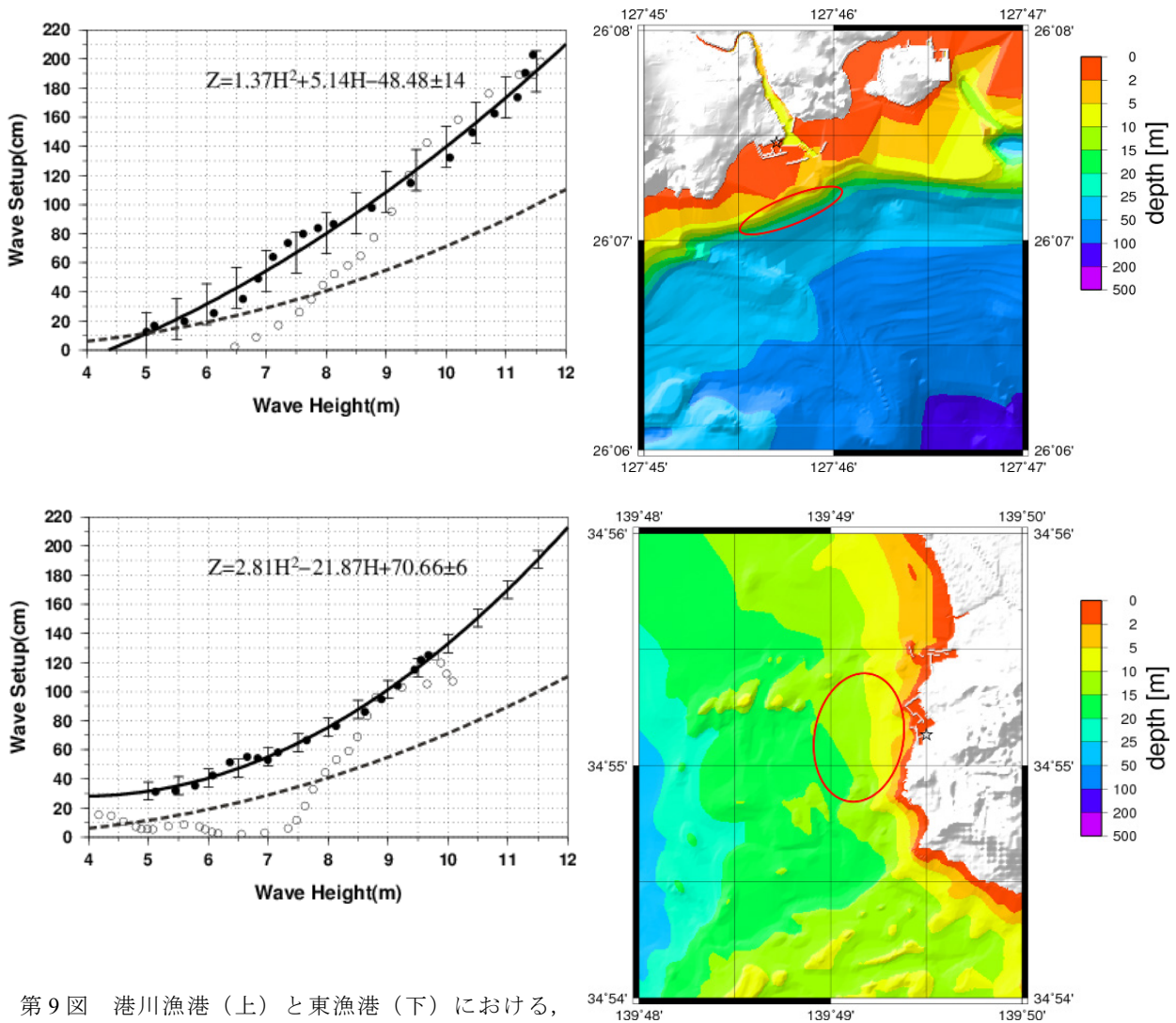
5.2 wave setupの測定値と実験式

wave setupを定量した結果、港川漁港で2.0m、東漁港で1.3mもの顕著な値が算出された。それぞれの地点において、沿岸波浪モデルで解析された有義波高に対してwave setupをプロットした図を第9図に示す。wave setupがピークに達する8日11時までの値(黒丸)では、いずれの地点でも有義波高5m以上で高い相関があった。なお、同図の白丸はwave setupがピークに達した8日12時以降の値を示す。

有義波高とwave setupの相関係数を求めた結果、港川漁港で0.989、東漁港で0.982とともに高い値であった。最小二乗法により有義波高の2次関数で近似したwave setupの実験式をそれぞれ求めた結果、第9図(上、下)の図中に示す2つの式が得られた。これらを東京湾の事例で求められた小西の実験式(破線)と比較すると、港川漁港及び東漁港におけるwave setupはかなり大きな値を示すことが分かる。これは、東京湾と南西諸島の海底地形の差異が主な原因であると推測される。小西の実験式に適用された地点の一つである布良(千葉県館山市)と港川漁港周辺の海底地形図を比較すると、赤丸で囲んだ碎波帯の海底勾配は布良では約0.02と緩やかであるのに対し、港川漁港では約0.1と急である(第10図)。一般に海底勾配が急であるほどwave setupが顕著に現れることから、港川漁港周辺の海底地形から推察すると、海底勾配が急なリーフ先端で高波が碎波する際に生じるラディエーション応力によって顕著なwave setupが発生すると考えられる。

6. まとめ

高潮モデルにはwave setupの効果が組み込まれていないため、沖縄地方においてwave setupを算出する手段がこれまでなかったが、簡易水位計を



第9図 港川漁港（上）と東漁港（下）における、T1408 が沖縄本島に接近した期間に沿岸波浪モデルで解析された沖合の有義波高と wave setup の測定値の関係

黒丸は wave setup の測定値がピークに達するまでの値、白丸はピークに達した後の値。実線は黒丸のみによる近似曲線（図中の式は実験式）。エラーバーは wave setup の測定値と実験式の差の標準偏差の2倍。破線は東京湾の wave setup の測定値から求められた小西の実験式。

第10図 港川漁港（上）と布良（下）周辺の海底地形図

カラースケールは水深（m）。☆印は港川漁港または布良の位置。赤丸は推定される砕波帯。

「内閣府 南海トラフの巨大地震モデル検討会」から提供を受けた地形データを基に作成。

用いて求めた wave setup の実験式を高潮ガイダンスの予想に加えることで、港川漁港と東漁港においては定量的に高潮を予測することが可能となった。このため、2015年度から台風接近時におけるより適切な高潮に関する防災気象情報の発表に資するため、本調査で算出した wave setup の実験式を使用している。

しかし、沿岸波浪モデルによる有義波高は複数の波向の合成波高であり、必ずしも wave setup を発生させる波向の波高を表しているとは限らない。このことは T1408 の接近前後で沿岸波浪モデルの2次元エネルギースペクトルの波向に明瞭な差がみられたことから推察される(第7図参照)。また、2014年台風第19号(T1419)や2015年台風第9号(T1509)においても T1408 の事例と同程度である10m以上の有義波高が沿岸波浪モデルで解析されたが、港川漁港や東漁港では台風の接近以前から wave setup が発生しやすい波向ではなかったため、T1408 の事例ほど顕著な wave setup は測定されなかった。

このような問題を改善するためには、沿岸波浪モデルにおいて港湾に入りやすい波向のみを用いて算出した有義波高を用いる必要がある。それにより、台風の経路によらず本調査で決定した実験式を適用し、より精度の高い wave setup の予測が実現すると考えられる。

謝辞

本調査を行うに当たって、簡易水位計による潮位測定を実施した港湾の漁業協同組合には、岸壁の使用についてご協力いただきました。また簡易水位計の設置及び回収にご協力いただいた方々並びに本調査にご助言いただいた方々に深く感謝します。

参考文献

- 林原寛典 (2011) : 気象庁の高潮数値予測モデル . 天気, **58**, 235-240.
- 小西達男 (1997) : 外洋に面した港湾で発生する高潮の成因について - Wave setup の効果 - .

海と空, **73**, 35-44.

- 峯松宏明 (2009) : 気象庁で現業運用している波浪モデル . 天気, **56**, 669-674.
- 仲座栄三・津嘉山正光・川上和宏・渡慶次健忠・鹿田正一・駒口友章 (1998) : リーフ海岸における平均水位上昇量に関する研究 . 海岸工学論文集, **45**, 276-280.
- 島田俊昭・野崎太 (2002) : 検潮 (潮汐観測, 津波観測) システムの概要と潮汐データの利用 . 測候時報, **69**, 特別号, S97-S115.
- 高佐重夫・近澤昌寿・森裕之 (2011) : 面的天文潮位の予測手法とその精度 . 測候時報, **78**, 特別号, S33-S42.