

2014 年度（第 50 回）水工学に関する夏期研修会講義集

水工学シリーズ 14-B-3

田辺中島高潮観測塔における気象海象観測

京都大学 准教授

馬場康之

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2014 年 8 月

田辺中島高潮観測塔における気象海象観測

Field Observations using the Observation Tower at the Mouth of Tanabe Bay

馬場 康之

Yasuyuki BABA

1. はじめに

白浜海象観測所は、京都大学防災研究所が持つ隔地施設の一つで、観光地として名高い白良浜のある和歌山県西牟婁郡白浜町に位置している。白浜海象観測所は白浜町堅田に観測所を構え、定点観測施設として田辺湾湾口に田辺中島高潮観測塔（写真-1）が設置されている。

白浜海象観測所が現在の場所に設置されたのは1966年であるが、観測活動は1961年から開始された。その始まりは、わが国最初の海洋観測塔として設置された旧観測塔（白浜海洋観測塔）であり、田辺湾の南、通称田尻クズレの鼻の沖合300m、水深約5mの岩礁に設置された（写真-2）。観測塔設置の背景には、船舶や浮標等による海洋観測では、測定点が不正確になることや、船舶、浮標の動揺による計測精度への影響があり、定点における精度の高い連続観測体制が必要になったことが挙げられる。

旧観測塔の設置により、気象（気圧、雨量、気温、風向・風速など）及び海象（水温、潮位、波浪、流向・流速など）に関する項目が連続的に観測できるようになった。観測塔の立地として田辺湾が選ばれた理由としては、紀伊水道を通じて外海と面し黒潮の影響を受けること、また台風の経路にも近いことなどがある。これらの現地観測データを基に、沿岸海洋における諸過程を大気や陸面との相互の関連性から捉えること、および沿岸海域における災害の抑止軽減のために台風などの暴風に伴う高波浪、高潮などの諸問題に関する観測研究が行われてきた。

本稿は、田辺湾に設置された定点観測施設である田辺中島高潮観測塔において経年的に実施されてきた現地観測活動について述べ、旧観測塔における観測成果についても合わせて示す。次の第2節では、白浜海象観測所における観測活動についてこれまでの経緯を踏まえて概説する。続く第3節では旧観測塔を含む観測活動で得られた主な成果を示し、第4節では現在運用中の田辺中島高潮観測塔で展開されている観測結果について述べる。



写真-1 田辺中島高潮観測塔

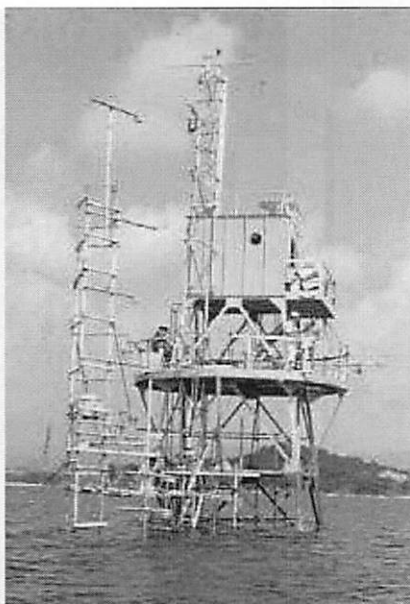


写真-2 旧観測塔（白浜海洋観測塔）

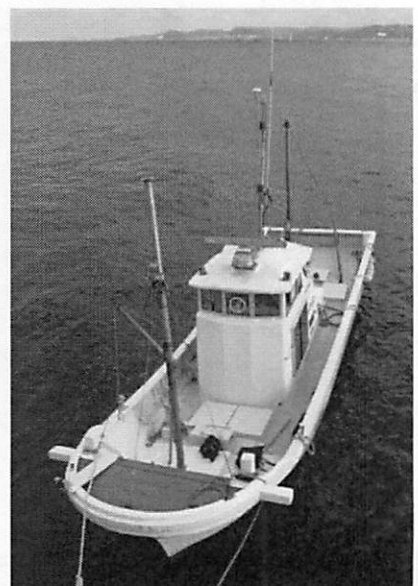


写真-3 観測船「海象」

2. 白浜海象観測所における観測活動

白浜海象観測所は、定点観測施設として田辺湾湾口に田辺中島高潮観測塔、および観測船「海象」(写真-3)を用いて、田辺湾を中心とした沿岸域における気象及び海象現象を総合的に観測しており、風向・風速計、日射計、気温・湿度・気圧計、波高計、水温計(水深5m, 10m)等の項目が常時観測されている。

図-1 は、旧観測塔および現在運用中の田辺中島高潮観測塔の位置を示したものである。先に述べたように、旧観測塔は田辺湾湾口部に近い水深5m地点に設置され、定点観測施設として気象および海象の総合的な観測が始まり、旧観測塔設置当初は、気温、風向、風速、水温、塩分、潮位および波浪の連続観測が行われた。旧観測塔が設置された1961年頃は、現地観測に必要な計測器の開発が必要な時代であった。また、計測器を動作させるための電力も十分ではなかったことから、計測器の省電力化や計測を間欠的に実施する方法などの開発が行われた。また、流速については計測器の制約のために他項目のような連続観測データを得ることができず、田辺湾の海水交流の研究も流れの実測データに基づくものではなく、水温、塩分濃度の記録などから間接的に議論されていた。

旧観測塔設置当初に実施された観測活動の一つに「海面境界過程の観測」がある(鳥羽ら, 1971)。この観測は1968年から1969年にかけて2回実施され、旧観測塔と塔の影響を避けるために設置されたポールを用いて風・波・波の崩れ・海水滴を中心に計測が行われた。この観測では、風速計には三杯風速計、波高計には容量式波高計が使用され、海水滴の計測には試薬フィルムを用いた手動インパクタを用いて、異なる高度における海水滴の採取を実施している。

観測所の設置後、観測船が配備されたことにより、定点における連続観測体制に加えて、湾内における移動観測により現象を空間的に捉えることができるようになった。観測塔における連続観測データから得られた現象の一つに、水温のJump(急変)が挙げられる。特に、数日から10数日の間隔で発生する水温のJumpが確認され、紀伊水道で見られる水温フロントとの関係が指摘された。この観測では、フェリーの海水取り込み時に水温を計測することで、大阪湾内から紀伊水道におよぶエリアでの水温が計測された。これらフェリー航路沿いの水温計測結果と田辺湾の観測結果を合わせて、紀伊水道全域の海況変動および水温フロントの変動と田辺湾における水温変動がよい対応を示すことが示されている(吉岡ら, 1977)。

流速計測については、流速計への生物付着や係留系の揺れの影響などによる問題が指摘されていたが、超音波式流速計の導入により、弱い流れも正確に捉えることができ、高速でのサンプリングが可能となったことから、流れの周期別変動成分についても求めることができるようになった。このような計測器の整備が進んだ結果、1981年

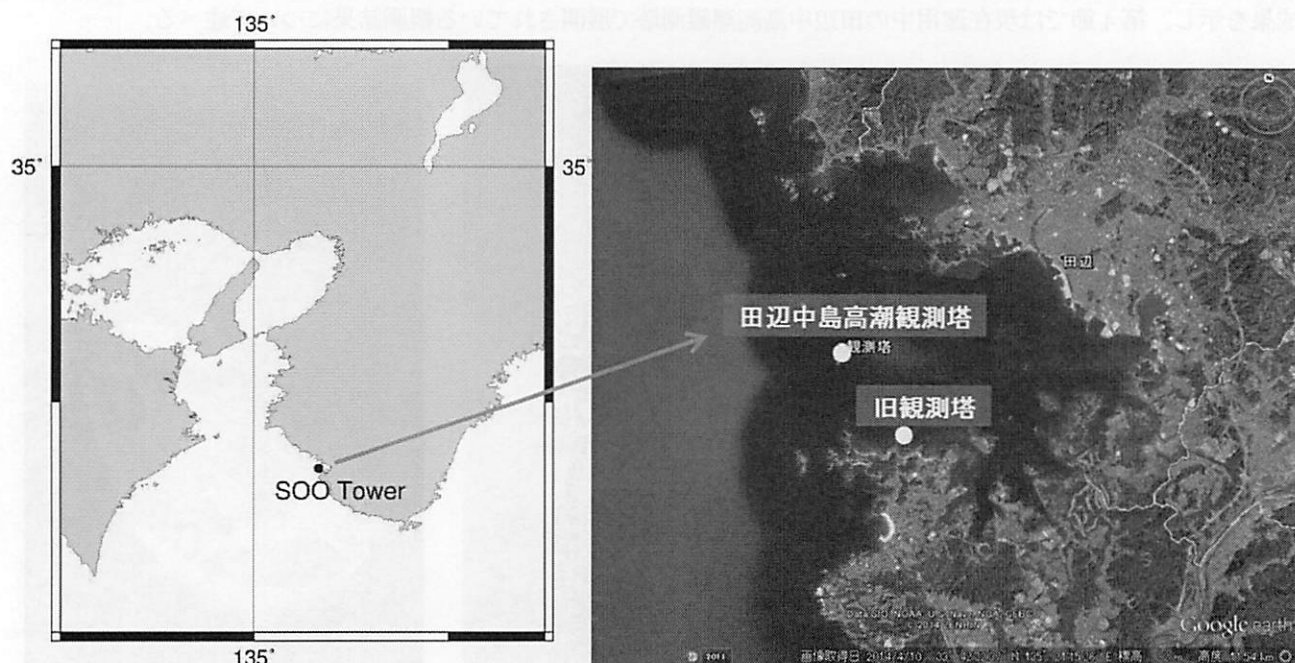


図-1 田辺中島高潮観測塔、旧観測塔の位置

から旧観測塔沖の水深 13.5m 地点での流速観測が実施され、超音波流速計による潮流および波浪流の観測が約 2 年間継続された。旧観測塔および周辺で行われた長期連続観測の結果については次節で述べる。

旧観測塔の老朽化に伴い、1993 年に現在の田辺中島高潮観測塔が、田辺湾の湾口部に設置された。また、新たな観測船が 1985 年に導入され、田辺湾内および紀伊水道における移動観測が可能となり、水温・塩分濃度の鉛直分布の計測が実施されるようになった。新しく設置された観測塔は、観測に必要な電力を太陽光パネル・バッテリーシステムから供給しており、観測塔で計測されたデータは観測塔内の収集システム内に記録されるとともに、観測所にも転送され、計測データの保存・処理の自動化が進められた。田辺中島高潮観測塔では、気象・海象に関する連続観測のための計測器が常時運用されているほか、観測プロジェクト毎に計測器が投入され、沖合固定点の利点を生かした現地観測が実施されている。その他、田辺湾の気象・海象データに、湾内の水質計測、プランクトン個体数の観測を組み合わせた海域環境に関する現地観測（吉岡ら、1998a）、碎波に伴う気泡連行の可視化（吉岡ら、1998b）などが行われるとともに、例年夏期には台風接近時の暴風時を対象に、気象・海象の観測が実施されている。

3. 現地観測による主な研究成果

3.1 海面境界過程の観測

旧観測塔を用いた「海面境界過程の観測」では、1968 年から 1969 年にかけて 2 回の集中観測が実施された。観測では、風速、気温、湿度の鉛直分布の他に、海水滴数の鉛直分布、波浪の特性や風の乱れなどが計測されている。1 回目の観測は条件に恵まれなかったが、2 回目には無風状態から風速 12m/s を越える強風が連続する好条件を得て、風波の発達過程の連続観測が実施された。観測結果から、風波が崩れる度合いと水面攪乱を示すレイノルズ数の関係が現場海域でも成立すること、海水滴の生成および海面上層における分布などが明らかにされた。ここでの観測結果は、風洞実験の結果などと合わせて“風波の $3/2$ 乗則”を示す結果としてまとめられている（Toba, 1972）。

平成に入って、新しく田辺湾湾口部に観測塔が設置されて以降には、大気・海洋間の二酸化炭素の交換に関する観測が実施されている。二酸化炭素の交換に関する観測では、観測塔上または海中に二酸化炭素濃度の計測器を設置し、超音波風速計や波高計など観測塔で計測されている気象・波浪データを用いた解析を通じて、ガス交換速度に関するモデル（宮崎ら、2012）や、大気海洋界面の運動量フラックス（摩擦速度）および CO_2 フラックスの波浪などの要因への依存性などに関する検討が行われている（杉原ら、2014）

3.2 田辺湾における水温変動

田辺湾にある観測塔では水温の Jump が間欠的に発生することが観測されており、水温の Jump は湾外からの暖水塊が進入することが関係することが示され、また水温フロントは紀伊水道を北上していることが確認されている。紀伊水道内の水温フロントの変動の観測は、1973 年～1975 年にかけてフェリーの航路沿いの水温計測が実施された。また、冬季の紀伊水道には顕著な熱塩フロントが形成されることが確認されている。この熱塩フロントは、最も発達したときには幅が 1km 程度になり、そのフロントを挟んで 5 度にもおよぶ温度差が見られる（吉岡ら、1977）。一方、夏季には水温差がほとんど無くなり、塩分濃度差によるフロントが形成されることが確認され、このようなフロントの変動には黒潮の変動が関連することが示されている。

このように、田辺湾内の海況変動が紀伊水道を通じて外洋からの影響を受けていることが明らかにされ、その後計測して行われた観測結果では、黒潮の接岸状況によって、観測塔での水温変化の傾向が大きく変わることが確認されている（仁木ら、2005）。紀伊水道における海況変化と黒潮との関係については継続的に研究が進められており、黒潮の接岸距離に応じた外洋水の流入、紀伊半島南西岸沖で見られる「振り分け潮」の影響（竹内、2004）、さらには紀伊水道を通じた大阪湾内の水質と黒潮流動との関係などの研究成果が報告されている（中谷ら、2012）。

3.3 田辺湾内における流れの長期連続観測

第 2 節で述べたように、流速観測については超音波式流速計の導入により、長期にわたって精度のよい観測が実施できるようになった。ここでは、旧観測塔沖側で行われた約 1 年以上にわたる流速に関する長期連続観測の結果

について概説する（海象（流れ）観測グループ，1983）。この観測は，時間スケール別の現象の変動とそれに及ぼす諸要因を明らかにすることを目的に，1981年6月から開始された。旧観測塔沖の13.5m地点に超音波流速計が設置され，潮位，波浪および水温が合わせて観測された。また，旧観測塔における気象・海象の通年観測も実施されており，加えて田辺湾内外の現象との関係性についても調べるために，湾内外の7地点における潮位観測が実施された。

1981年7月から1982年6月までの1年間の流速，水位，風速，水温の観測結果から湾内の流れ（25時間移動平均値）は総じて小さく，冬季の風の強い日に流速が大きくなる傾向がある。一方，水温が急変するタイミングは，風速の変化よりも水位の変化とよい対応を示すことが確認されている。また，超音波流速計で計測された1年間の結果から得られた流れのスペクトルから，田辺湾内の流動には，次に示すような特徴的な変動の存在が指摘されている。

“3～20日間の長周期変動”，“半日周潮”，“約40分周期の固有振動”，“風波とうねりに伴う流れ”

4. 田辺中島高潮観測塔での現地観測

前節までに示したように，田辺湾に観測塔が設置されて以降，現地観測活動が継続的に実施されている。本節では近年実施されている観測結果について，観測プロジェクトから得られたものと，観測塔で通年観測されているデータから得られた結果について示す。

4.1 夏期集中観測プロジェクト

白浜海象観測所では，複数の大学，研究機関との連携のもと，例年夏に集中的に計測器を投入した観測が観測塔周辺で実施されている。これまでも台風の接近に伴う暴風時を対象とした観測体制が夏期に展開されていたが，Powellら(Nature 2003)による暴風条件下において海面抵抗が風速に対して減少するという結果のように，従来の大気・海面間のモデル化と異なる成果が示されたことなどを受けて，台風接近時の暴風時の流動構造，水温変化，観測データに基づく鉛直混合に及ぼす波浪の影響などの検討を目的とした総合的な観測が，田辺中島高潮観測塔周辺で実施されている。2009年以降では，2009年18号(MELOR)，2011年12号(TALAS)，15号(ROKE)，2012年17号(JELAWAT)，2013年17号(TORAJI)，18号(MAN-YI)接近時の気象・海象データが計測された(森ら，2010；内山ら，2013；Baba et al.，2013)。以下では，日本列島に沿って西から東に移動した台風(2011年15号，2012年17号)と，特徴的な進路の台風(2011年12号，2013年18号)について，観測結果の概要を示す。

4.1.1 2011年15号，2012年17号台風

2011年15号(ROKE)，2012年17号(JELAWAT)は，日本南方沖で発生・発達した後，日本の南岸を縦断する進路をとった(図-2)。紀伊半島西側にある観測塔には，西側から接近し，観測塔近くを通過して東に抜けるコースとなる。台風がこのような進路をとる場合，観測塔での海上風，波浪の観測結果は図-3のような特徴を示す。海上風は台風接近前には南寄りの風が次第に強まり，台風最接近時に風速がピークとなった後に，風向が北寄りに変わる。波浪は，台風接近前から周期が長くなり，南からうねりが入ってきていることを示唆している。波高は台風最接近時にピークを迎え，台風通過後は急速に低減する傾向を持つ。台風接近時には，強風による吹送流が卓越することが知られており，2011年15号台風の際にも，台風の通過前後の海上風の変化に対応して流向が明瞭に変化する吹送流が観測されている(図-4左)。

これらの台風通過前後の海水温の時間変化を示したものが，図-5である。共通する特徴としては，台風の接近に伴い，海水温の鉛直分布がほぼ一様になっていること，および台風通過後に表層付近の海水温が低下していることが挙げられる。台風接近に伴い海水温の鉛直分布がほぼ一様に近づく状況は，本節冒頭で示したデータの観測された台風のいずれの場合にも観測されている。これらは，台風接近に伴う強風・高波浪条件下における鉛直混合が発達したことによるものと考えられる。なお，2012年17号台風の際には，台風の接近前から海水温の鉛直分布に大きな差が無い状態となっている。これは，台風の接近が9月中旬であり，夏期に成層が発達した状態から混合層

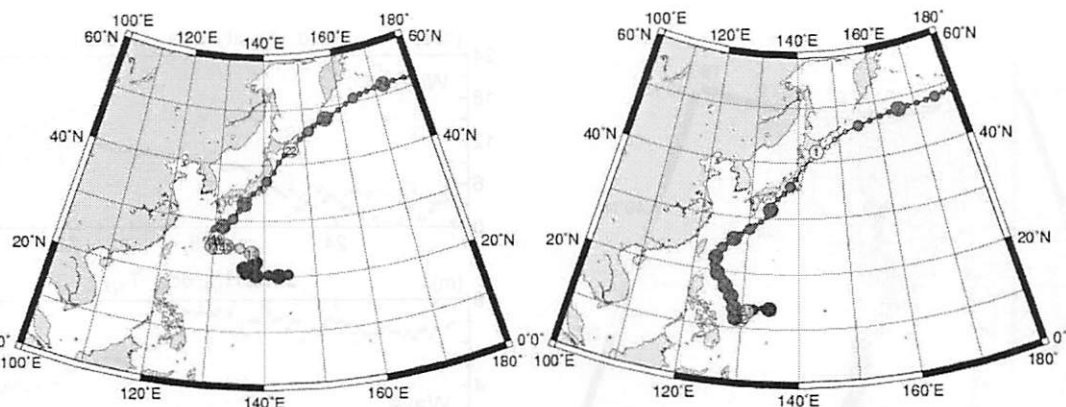


図-2 台風進路図 (左: 2011 年 15 号, 右: 2012 年 17 号, デジタル台風より)

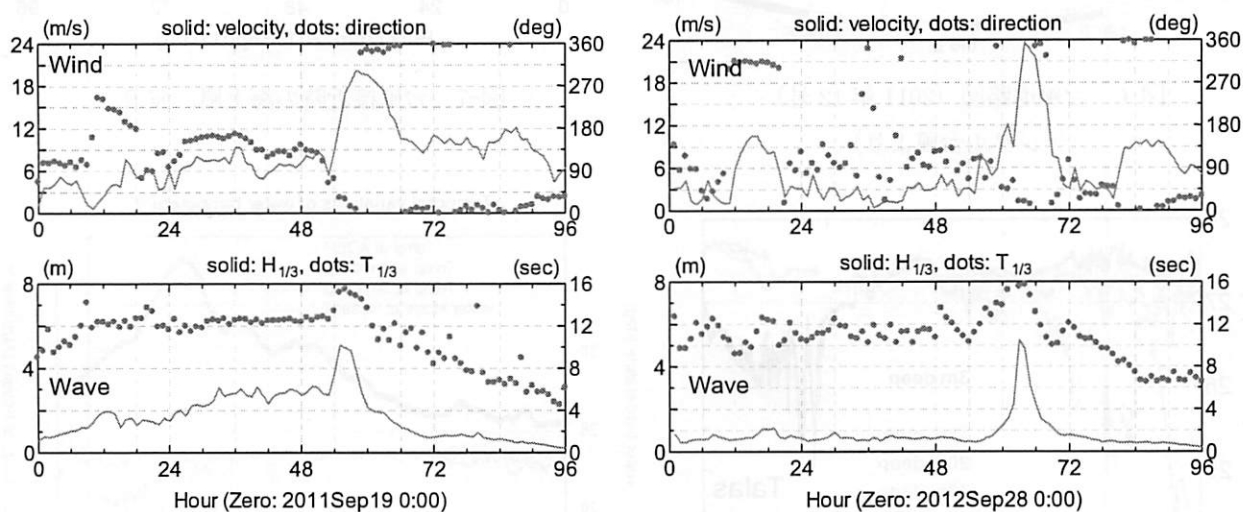


図-3 台風接近時の海上風, 波浪 (左: 2011 年 15 号, 右: 2012 年 17 号)

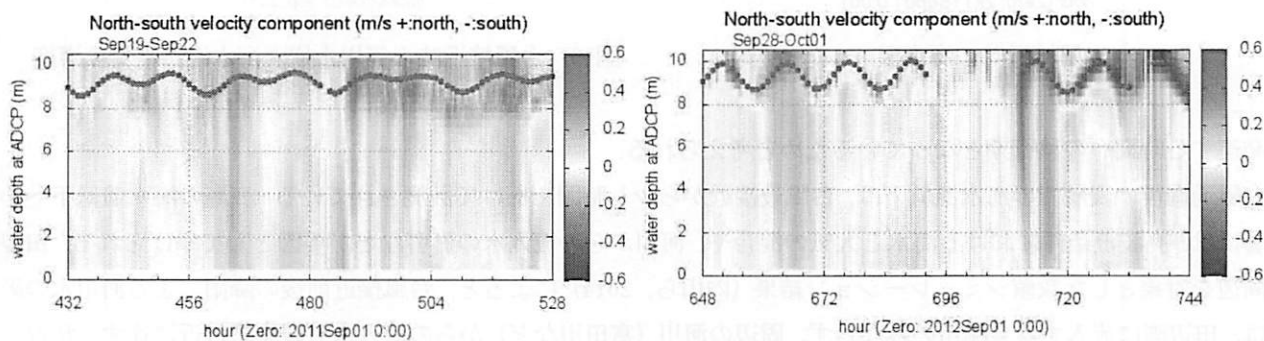


図-4 台風接近時の流速 (南北成分, 左: 2011 年 15 号, 右: 2012 年 17 号)

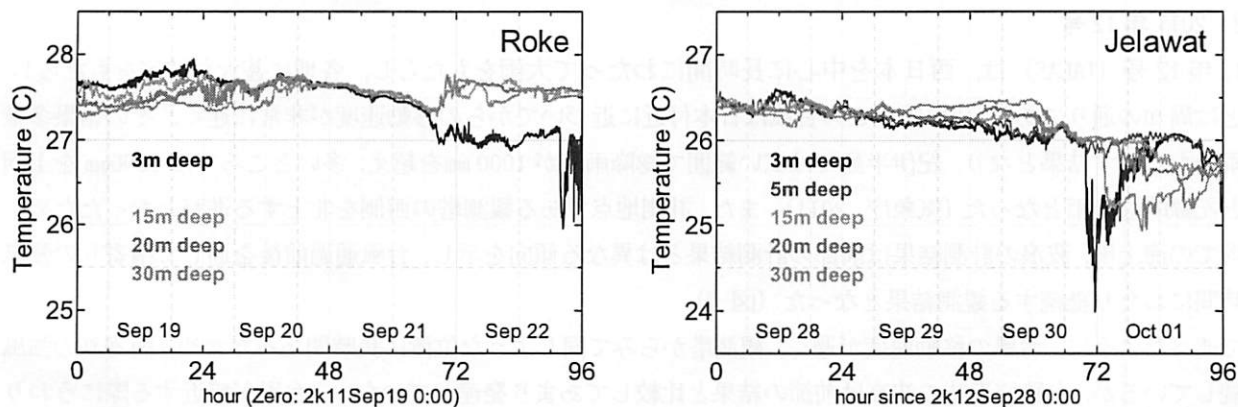


図-5 台風接近時の海水温 (左: 2011 年 15 号, 右: 2012 年 17 号)

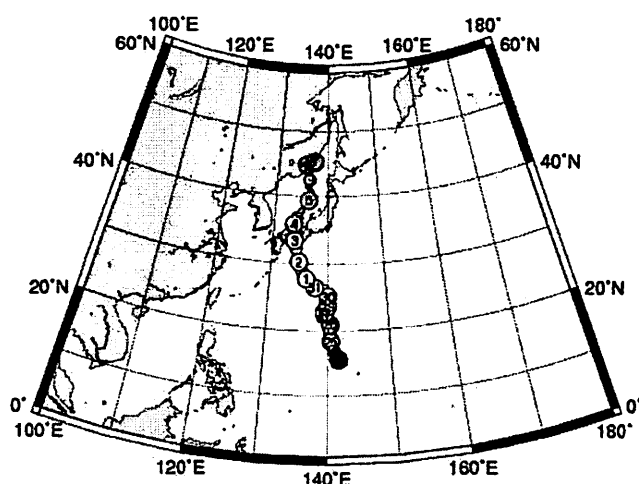


図-6 台風進路図 (2011 年 12 号)
(デジタル台風より)

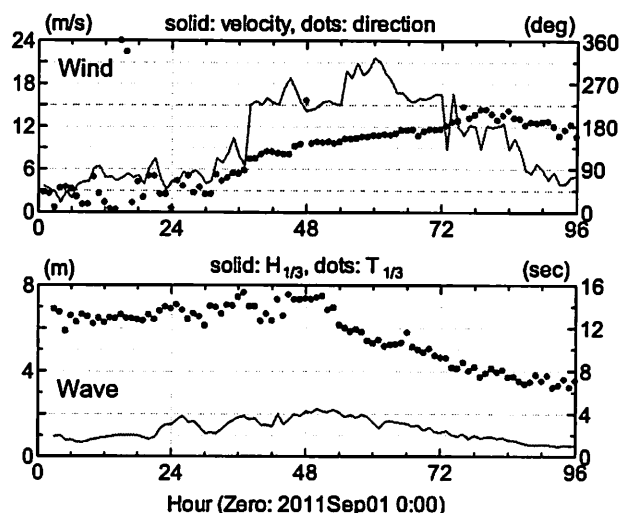


図-7 台風接近時の海上風、波浪

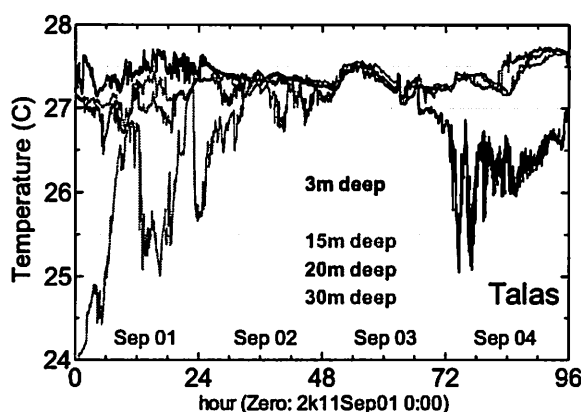


図-8 台風接近時の海水温

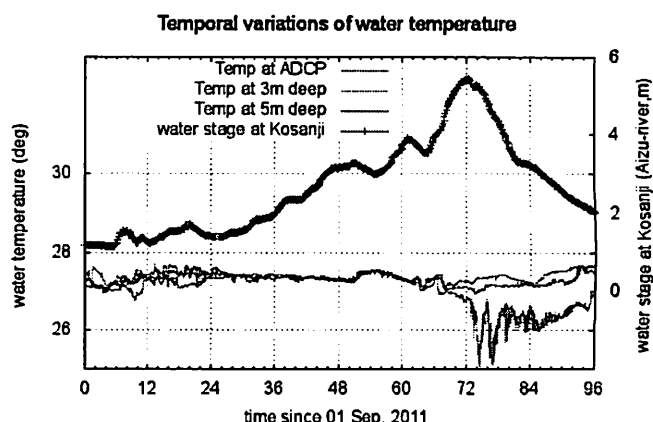


図-9 台風接近時の河川水位、海水温、電気伝導度

が発達する時期への移行期となっているためと考えられる。

台風通過後の表層での海水温低下は、台風最接近から少し時間をあけて計測されている。表層の海水温低下への影響には、高波浪条件における海水と大気の混合や、河川からの流入水の影響などが要因として挙げられる。田辺湾周辺を対象とした数値シミュレーション結果（内山ら、2014）によると、台風接近前後の降雨による河川水の影響は、田辺湾に流入する会津川のみならず、周辺の河川（富田川など）からの流入水も観測塔付近に達する状況が示されており、周辺の河川水による海水温変化への影響が少なくないことを示唆している。

4.1.2 2011 年 12 号

2011 年 12 号 (TALAS) は、西日本を中心に長時間にわたって大雨をもたらし、各地に甚大な被害をもたらしたことは周知の通りである（図-6）。この台風は日本付近に近づいてからの移動速度が非常に遅く、その結果多量の降雨をもたらす結果となり、紀伊半島では広い範囲で総降雨量が 1000 mm を超え、多いところでは 1800 mm を上回るなど記録的な大雨となった（気象庁、2011）。また、計測地点である観測塔の西側を北上する進路となったため、観測塔での海上風、波浪の計測結果は前節の計測結果とは異なる傾向を示し、台風通過前後を通じて南寄りの強風が長時間にわたり継続する観測結果となった（図-7）。

上で述べたように、台風の移動速度が遅く、観測塔からみて同じような位置に長時間あったため、南寄りの強風が連続しているが、台風接近時の波高は前節の結果と比較してあまり発達していない。台風が接近する際にうねりが南方から入ってくることによって波の周期自体は長くなっているものの、台風接近時に強風が連続したにも関わ

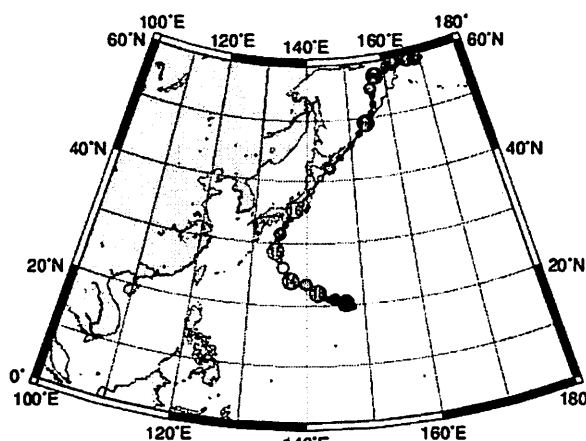


図-10 台風進路図 (2013 年 18 号)
(デジタル台風より)

らず、波高が高くならなかった要因の一つとして、風向きが南東～南寄りであったことが挙げられる。観測地点である観測塔の南東側は紀伊半島の西岸であり (図-1 参照)、陸岸から観測塔までの距離は 2Km にも満たない。この方向からの風では、波浪が発達するために必要な吹送距離が十分ではなく、強風が連続したにも関わらず、波高が発達しない結果となったと考えられる。

図-8 は 2011 年 12 号台風通過前後の水温の計測結果である。台風接近に伴う海水温の鉛直方向の一様化や、台風通過後の表層の水温低下は、先の観測結果と同様に確認することができる。また、この台風は非常に大量の降雨を伴ったため、図-9 に示すように河川水位も台風接近時にかなり高くなり、河川からの多量の流入があったことがうかがえる。図-9 には表層付近の海水温、水深約 9m 地点で計測された電気伝導度、および田辺湾に流入する会津川の水位の時間変化が示されている。河川水位が時間とともに高くなり、そのピークを迎えた辺りから、表層の水温ならびに電気伝導度の低下が確認される。同じ計測点での電気伝導度の低下は、先の 2012 年 15 号台風時にも確認されているが、電気伝導度の低下および継続時間は 12 号台風における規模がかなり大きく、多量の降雨に伴い河川からの淡水流入がかなりの規模となり影響したものと思われる。

4.1.3 2013 年 18 号

2013 年 18 号 (MAN-YI) は、9 月中旬に日本付近に接近し、紀伊半島から東側の沿岸に沿って東進した (図-10)。図-11 は、台風 18 号接近時の海水温、気温 (観測塔)、SST (観測塔、放射温度計の値)、および観測塔で計測された海上風、波浪の時系列を示したものである (馬場ら、2014)。前出の 2012 年 12 号台風とは逆に、接近時に観測点からみて東寄りに位置したことから、台風の通過前後を通じて観測塔付近では北寄りの風が継続する結果となった。波高は台風が観測地点に最接近した時間帯に有義波高で 3m 程度に達しているが、北寄りの風が卓越し、吹送距離が最大でも紀伊水道の範囲内に制限されたために大きく発達することなく、台風の通過に伴い波高、周期ともに低下している様子が確認できる。

台風の最接近に伴い風速の最盛期となった 9/16 の午前中には、海水温が鉛直方向にほぼ一様になっており、強風に伴う鉛直混合が発達していることがうかがえる。風速のピークを過ぎた 9/16 の午後には、顕著な海水温の低下および塩分濃度の上昇が確認できる一方、先に示したような表層付近で見られた海水温の大きな変化はこの観測

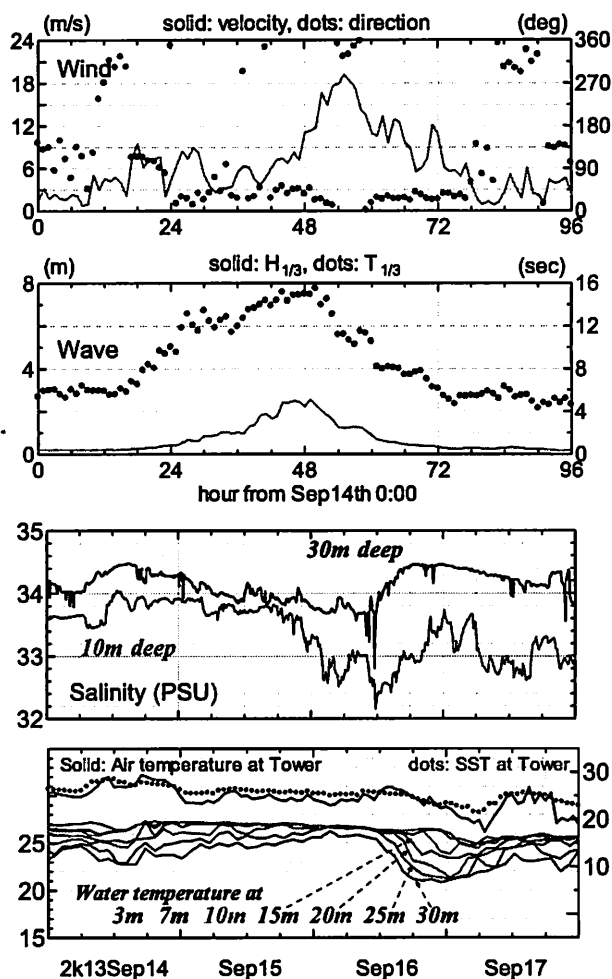


図-11 台風接近時の海上風、波浪、
塩分濃度、海水温

台風通過後に計測された海水温の低下は、水深の深い計測点（30m 地点）から始まり、続いて水深 25m, 20m, 15m の順で水温が低下している。同じタイミングで水深 30m 地点の塩分濃度が大きく上昇しており、低層から低温・高塩分の海水が進入していることを示している。北寄りの風が連続する際に、低層での水温が低下ならびに塩分濃度が上昇することはこれまでの観測でも確認されている（吉岡ら, 1998a）。岸を左手（北半球）にみて岸に沿って風が吹くときに、岸沿いに湧昇域が発生することが知られており、アメリカ西海岸での沿岸湧昇などがよく知られている。これは、岸に沿って吹く風に引き起こされたエクマン輸送が岸から沖向きに表層の海水を移動させ、下層の海水が岸方向に上昇したものと説明される。2013 年 18 号台風の際に、低層からの低温・高塩分の海水の進入が顕著に確認された背景には、台風の接近に伴い 9/15 の 18 時以降から約 1 日程度北寄りの強風が継続し、観測地点付近の慣性周期（約 21.5 時間）に匹敵する程度であったことが主な要因の一つに挙げられる。

4.2 通年観測データに基づく観測結果

2011年3月11日に、宮城県三陸沖を震源とする東北地方太平洋沖地震津波が発生した。この津波は東北地方太平洋側沿岸部を中心に甚大な被害をもたらした。日本国内のみならず北米、南米、オセアニアといった環太平洋地域で津波が観測されており、田辺湾の湾口部にある観測塔でも、同日の16時台に津波に伴う水位変動を観測した。近隣での水位変動の計測結果として、和歌山南西沖GPS波浪計（国土交通省）、田辺湾湾奥にある堅田検潮所（気象庁）の計測データがあり（図-12）、それぞれのデータの解析および比較を通じて、湾内における津波特性などについて考察が行われている（岸本ら、2012）。



図-13, 図-14, 図-15 は, 上記 3 地点で計測された津波波形である。GPS 波浪計のデータは公開されているデータをそのまま津波波形とし, 観測塔と検潮所における津波波形は観測データから長周期成分を抽出したものを使用している。GPS 波浪計では, 初動が 16 時 04 分, 最大波は初動時刻から 34 分後の 16 時 38 分に到達した第 1 波で波高は 32.6cm である。同じく観測塔では初動が 16 時 14 分, 最大波は初動時刻から 1 時間 54 分後 (18 時 08 分) に到達した第 2 波で波高は 49.4cm であり, 堅田検潮所では初動が 16 時 19 分, 最大波は初動時刻から 8 時間以上経過した 3 月 12 日 0 時 35 分に観測され, その波高は 113.27cm である。

沖合に位置する GPS 波浪計では, 周期が 1 時間を超す周期の長い波が 10 時間程度継続し, その後時間の経過とともに波形は小さくなり, 3 月 12 日の後半にはかなり減衰している様子がわかる。観測塔では, 12 日午前の 2 回 (2~4 時頃, 10~12 時頃) の時間帯を除いて, ほぼ同程度の周期を持つ波が計測されている。検潮所では第 1 波

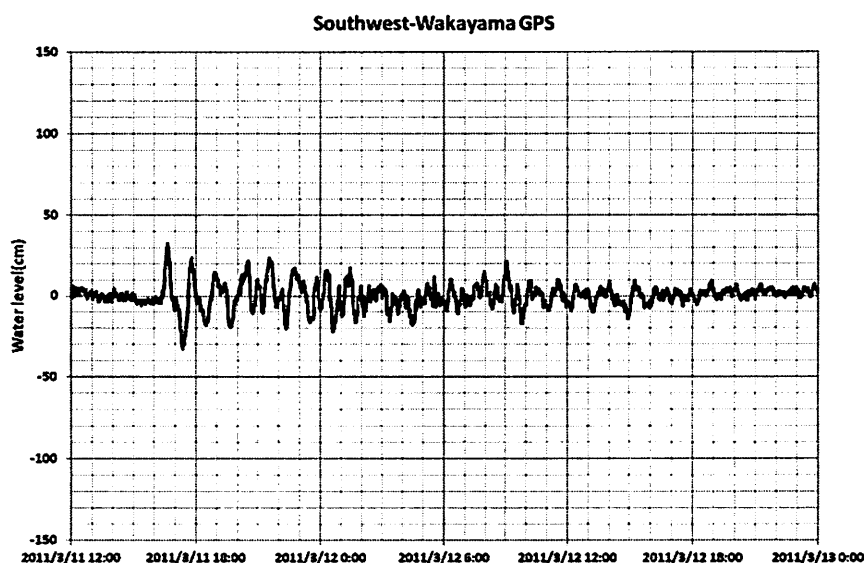


図-13 和歌山南西沖 GPS 波浪計津波波形

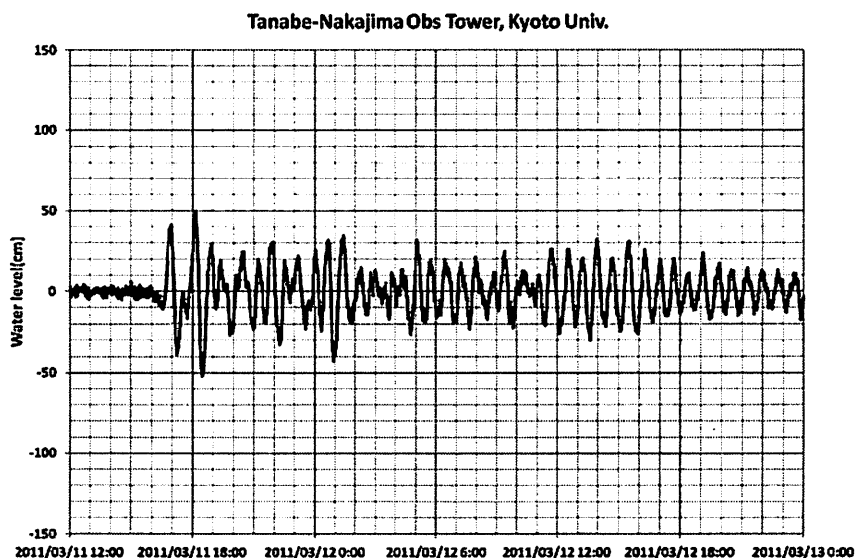


図-14 田辺中島高潮観測塔での津波波形

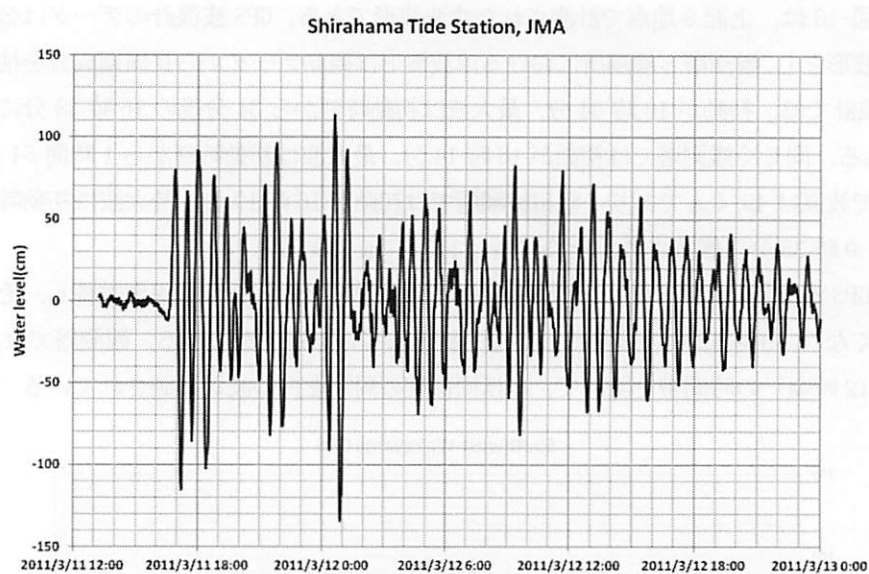


図-15 堅田検潮所での津波波形

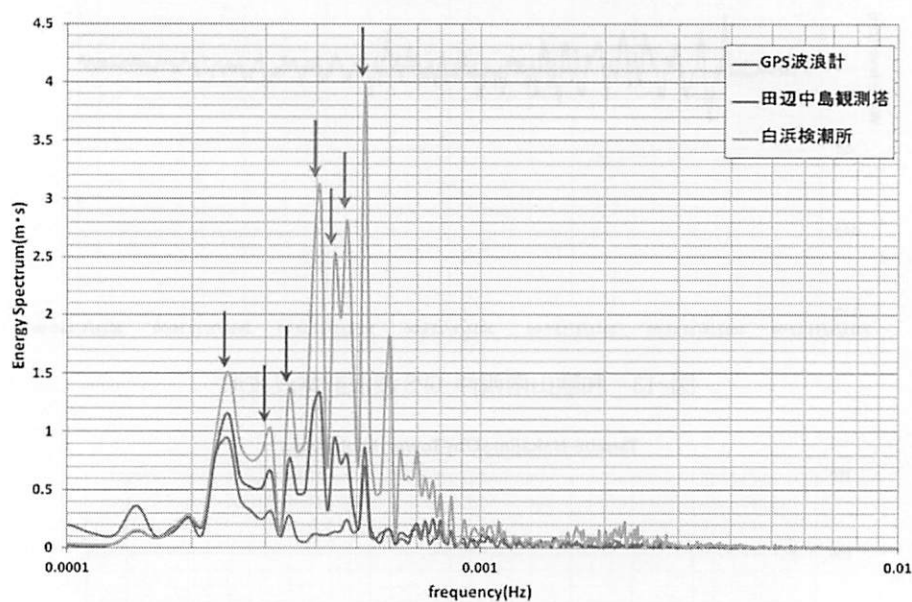


図-16 津波波形のスペクトル解析結果

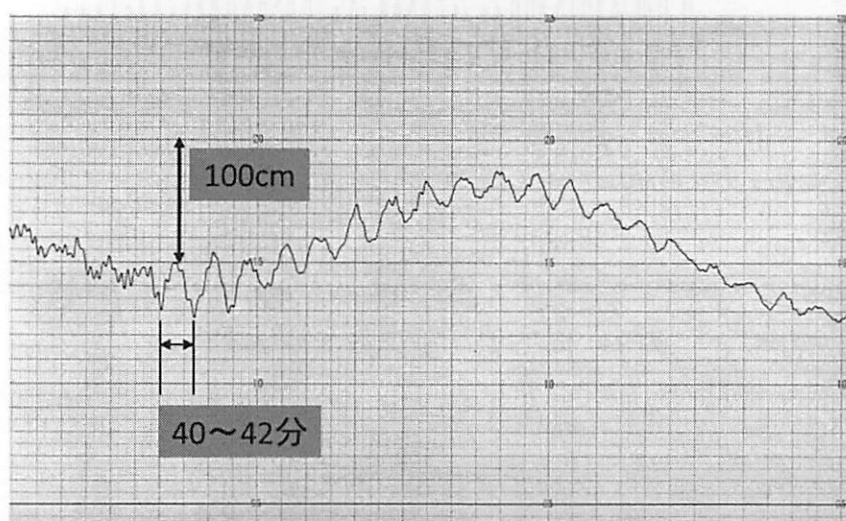


図-17 旧観測塔での観測結果（副振動）

から波高が 80cm 程度、周期が 30 分程度の波が到達後も継続して増幅、減衰を繰り返しており、最大波もその過程で観測されている。波形の計測結果より、湾内では津波の影響は長時間残り、最大波が初期波到達後時間を経過してから到達すること、沖から湾奥に進むに従って波高が増大することが確認される。波高の増大については、グリーンの公式を用いて、計測結果から得られた増幅特性が概ね表現できることが確認されている。

図-16 は、津波波形到達初期の 3 月 11 日 16 時から 3 月 12 日 9 時までの波形データから得られたスペクトル解析結果である。低周波側の 3 つのピーク（紫矢印）は、いずれも沖側のスペクトルが低く、湾奥でのスペクトルが高いことから、沖から入射した津波に起因するものと考えられ、その周期はそれぞれ 68 分、54 分、49 分となる。続く 3 つのピーク（赤矢印）は、GPS 波浪計の結果には見られず、湾口部および湾奥部で見られることから、田辺湾固有の振動周期と考えることができる。赤矢印で示されたピークは、それぞれ 41 分、38 分、35 分に相当する。最も周期の短い青矢印は 32 分周期に相当するピークであり、いずれの計測点においても確認できる。周期は上述の田辺湾固有の振動周期と近い値であるが、GPS 波浪計でのピークが観測塔でのピークとほぼ同等であり、その背景については引き続き検討が必要である。

ここで、田辺湾の固有振動周期として、35～41 分程度の周期が示された。田辺湾内で約 40 分周期の副振動がたびたび発生することは、旧観測塔での観測結果からも指摘されており（図-17）、沖合から津波が入射した際にも湾内の固有振動周期が卓越することが改めて確認された。また、田辺湾の北側に位置する芳養湾では、2004 年 10 月の台風 23 号接近時に約 6 分程度の周期をもつ副振動の発生が確認されるなど、局所的に卓越する固有周期などがこれまでの観測でも確認されている。

4.2.2 田辺湾湾口部における水温変動

前出の 2013 年夏期の集中観測では、観測塔の水深 3m 地点から水深 30m 地点までの 12 点での水温計測が実施された。図-18 は、水深 3m および 10m、20m、30m 地点における海水温の時系列である。海水温は、観測開始の 8 月上旬から 9 月上旬にかけて、水深方向の海水温の差が大きく、水温成層が明確に確認される。また、水深の大きな測点においては海水温が周期的に変動している様子が確認できる。9 月中旬になると、海水温の鉛直方向の差が減少し始め、9 月下旬以降は計測地点（水深 30m 程度）付近では水深方向の水温差がほぼ無い状態となり、時間を追って水温成層が弱まり、混合層が発達する様子が確認される。

図-18 において、8 月の海水温は水深方向の水温差が大きく、他の月に比べて各測点の海水温変動幅も大きい状態となっている。図-18 の計測開始時点では、すでに海水温の変動幅が大きい状態となっているので、それ以前の

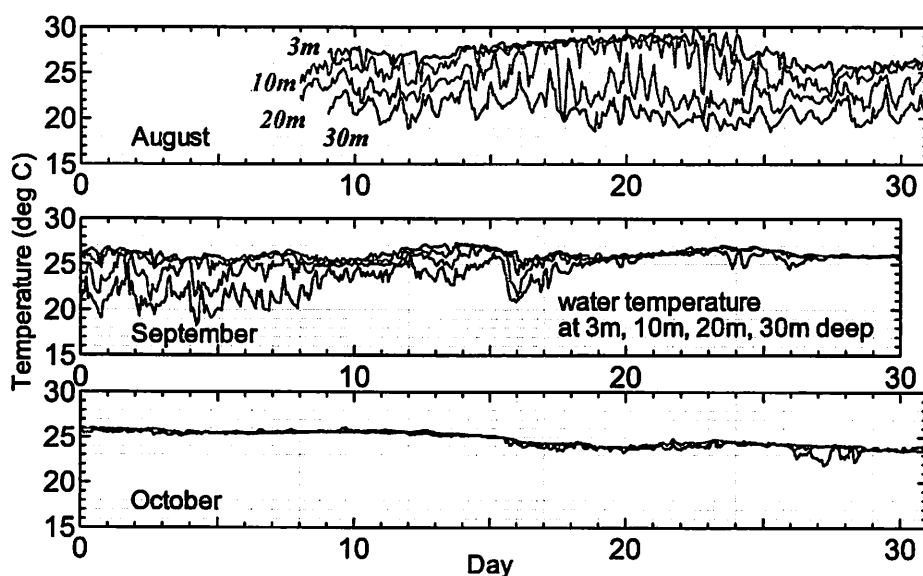


図-18 2013 年夏期の水温計測結果

水温の時間変化を確認するために、2013 年の年間の水温変化を示したものが、図-19 である。図-19 に示す海水温データは、観測塔の計測管の管内（水深 5m, 10m）で計測された海水温である。計測管内での観測であるため、擾乱に対する反応はやや鈍くなるが、計測管の外に設置された海水温とほぼ同程度の値であることが確認されている。図-19 の年間を通じた海水温の変化には、季節変化に応じた年間を通じた水温変化の他に、6 月後半から 8 月にかけての期間と、年始から 3 月を過ぎる頃までの間に、周期が長く変動幅の大きな海水温の変化が確認できる。図-19 における 230 日目前後の水温変動が、図-18 内、8 月の計測結果にも現れており、8/25 頃に水深 10m の海水温が大きく低下する状況が図-18、図-19 の両方で見られる。

これらの結果から、観測塔における海水温計測結果において、時期的に水温変動の卓越する周期が異なる状況が予想される。2013 年の年間の海水温データに対して、時間周波数解析（連続ウェーブレット解析）を行ったものが図-20 である。図-20 において、90 日目前後と 210～240 日目付近に、ウェーブレット係数の局所的に大きな領域が見られ、図-19 で周期の長い水温変化が確認された時期と対応している。90 日目前後に見られるウェーブレット係数の大きい領域に着目すると、最もウェーブレット係数の大きい時期は 720 時間程度の周期、60 日目付近では約 600 時間程度の周期、30 日目より少し早い時期にウェーブレット係数が大きくなる時期には約 360 時間程度の周期が卓越することを示している。同様の卓越周期の変化が、8 月頃（210～240 日目付近）にも確認され、2013 年に確認された周期の長い水温の変動は、15 日前後の周期を持った変動が先に起こり、その後変動の周期を長周

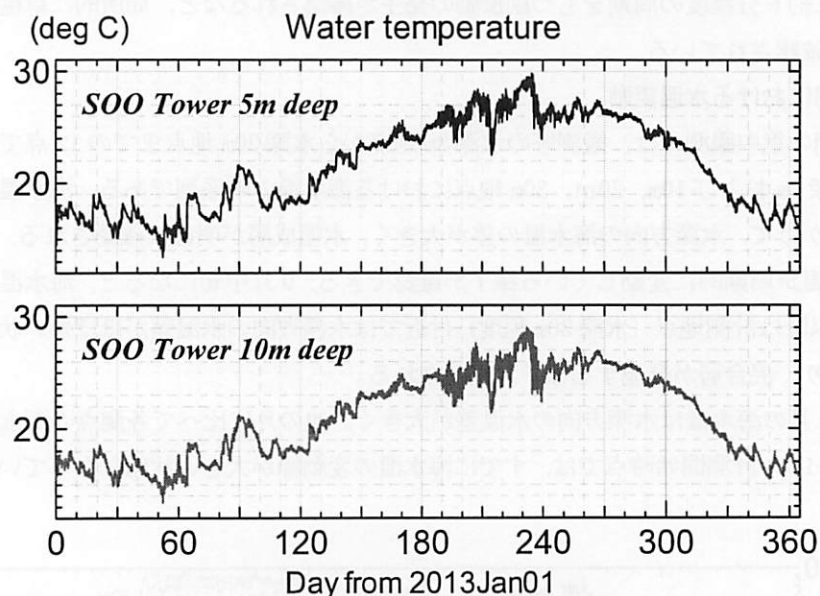


図-19 2013 年の水温計測結果

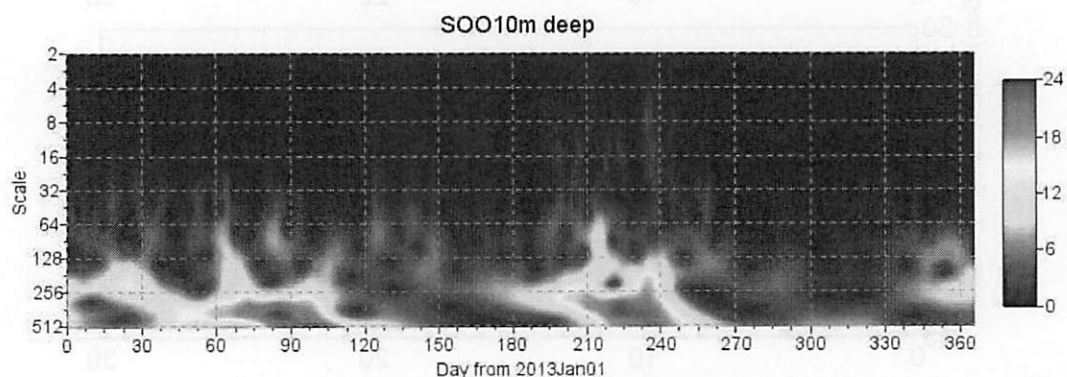


図-20 海水温（水深 10m）の時間周波数解析結果

期側に移しながら、30 日程度の水温変動でピークを迎えた後、長周期の変動を終えるという一連のサイクルが見られる。

先に示した紀伊水道の水温フロントが約 15 日前後の周期を持つことが示されており、ここで示された結果でも、田辺湾湾口部の水温変動には約 15 日周期、およびそれよりも長い周期での変動が存在することを示唆している。観測地点のある田辺湾を含めた紀伊水道沿岸は、黒潮の影響を強く受けることが知られており、旧観測塔を含めた観測塔での観測結果においても外洋の海況変動の影響が指摘されている。ここで示された周期の長い海水温の変動については、黒潮流路の違いや、それに伴う中規模の現象などとの関係性から検討する必要がある。

5. おわりに

本稿では、和歌山県田辺湾に設置された田辺中島高潮観測塔における気象・海象の現地観測結果について、1961 年の旧観測塔設置以降の流れを振り返りながら、主な観測成果および近年の観測結果について述べた。観測塔の位置する田辺湾は、紀伊水道から外洋に面する位置にあり、外洋－紀伊水道－大阪湾と連なる外洋～沿岸域の相互作用の影響を強く受けている。対象とする現象の中には、黒潮の影響をはじめとする外洋を含めた数多くの要因が複雑に関係しており、現象の実態ならびにその変動特性の理解には、経年的な観測データの蓄積および観測データの解析が欠かせない。

現地観測では、測線や測点の間隔を十分密な状況にすることが容易ではなく、長期的な変動を伴う現象を経年的に捉えるためには現地での計測を継続的に行う必要がある。現在運用中の田辺中島高潮観測塔は、固定点であるが故に測線や測点の制約の解決には適さないが、沖合固定観測点上での精度の高い観測を長期間にわたって展開することが可能である。また、対象とする現象に応じた計測器を追加することで多項目の観測を並行して実施することも可能で、多くの要因の関係する沿岸域の現象を多面的に捉えるための総合的な観測データの計測に適している。このような沖合固定観測点としての利点を生かして、多項目かつ精度のよい連続的な現地観測を田辺中島高潮観測塔において継続して実施し、外洋、紀伊水道との相互作用を含めた沿岸における現象の理解および数値シミュレーションの基盤にも資する現地データの計測・蓄積を目指す。

白浜海象観測所・web ページ : <http://rcfcd.dpri.kyoto-u.ac.jp/frs/S00.htm>

(毎時観測データ) <http://rcfcd.dpri.kyoto-u.ac.jp/frs/shirahama/data.php>

謝辞

ここに示した観測成果は、旧観測塔設置当初からの観測活動を通じて得られたものであり、現地観測に従事された関係各位、ならびに共同研究にご参加いただいた皆さまに記して謝意を表します。

参考文献

- 内山雄介・西井達也・森 信人・馬場康之 (2013) : 紀伊半島沿岸域における台風通過に伴う海水温低下と海洋構造変化について, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 69, No. 2, pp. I_481-I_485.
- 内山雄介・松川大祐・神吉亮佑・馬場康之・森 信人・水谷英明・渡部靖憲・大塚淳一・山田朋人・猿渡亜由未・二宮順一 (2014) : 紀伊半島田辺湾湾口部における海水交換特性に関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 70 (投稿中).
- 海象 (流れ) 観測グループ (1983) : 田辺湾における流れの長期連続観測, 京都大学防災研究所年報, 第 26 号, B-2, pp. 637-672.
- 岸本 治・馬場康之・久保輝広・東 良慶・平石哲也 (2012) : 2011 年東北地方太平洋沖地震津波の観測による田辺湾の共振現象, 自然災害科学, Vol. 31, No. 2, pp. 127-144.

- 気象庁 (2011): 災害時気象速報 平成 23 年台風 12 号による 8 月 30 日から 9 月 5 日にかけての大雨と暴風
- 杉原裕司・森塚 陽・田中雅一・宮崎大輔・平石哲也・馬場康之・久保輝広 (2014): 大気海洋界面の運動量・CO₂ 輸送の変動要因, 土木学会論文集 B1 (水工学), 第 70 巻, No. 4, pp. I_1183-I_1188.
- 竹本淳一 (2004): 紀伊半島周辺の海洋構造と変動および漁業への影響, 東京水産大学博士学位論文.
- デジタル台風: <http://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon/>.
- 鳥羽良明・國司秀明・西 勝也・河合三四郎・島田良恵・柴田中夫 (1971): 白浜海洋観測塔による海面境界過程の研究, 京都大学防災研究所年報, 第 14 号 B, pp. 519-531.
- 中谷祐介・西田修三 (2012): 大阪湾及び周辺海域の物質動態に及ぼす黒潮離接岸, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 68, No. 2, pp. I_976-I_980.
- 仁木将人・山下隆男・芹澤重厚・山口弘誠・福神和興 (2004): 田辺湾における夏季成層時の海水交換過程, 海岸工学論文集, 第 51 巻, pp. 896-900.
- 仁木将人・山下隆男・芹澤重厚・福神和興 (2005): 内部潮汐卓越型の湾内海水交換過程に及ぼす外洋水の影響, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp. 866-870.
- 馬場康之・水谷英朗・久保輝広・内山雄介・森 信人・渡部靖憲・大塚淳一・山田朋人・猿渡亜由未・二宮順一 (2014): 台風通過に伴う田辺湾湾口部における海水温変化について, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 70 (投稿中).
- 宮崎大輔・杉原裕司・平石哲也・馬場康之・久保輝広 (2012): 風波界面におけるガス交換速度のモデル化に関する研究, 土木学会論文集 B1 (水工学), 第 68 巻, No. 4, pp. 1699-1704.
- 森 信人・鈴木崇之・木原直人 (2010): 海洋表層鉛直混合におよぼす風応力と波浪の影響, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 66, No. 1, pp. 311-315.
- 吉岡 洋・中島暢太郎・国司秀明 (1977): 紀伊水道の OCEANICFRONT の変動, 京都大学防災研究所年報, 第 20 号, B-2, pp. 513-527.
- 吉岡 洋・芹沢重厚・高山知司・田中祐志 (1998a): 夏季田辺湾における内部急潮による海水交換, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 456-460.
- 吉岡 洋・芹沢重厚・高山知司 (1998b): 超音波による海面境界層の観測 (風波碎波による気泡の取り込み), 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 71-75.
- Baba, Y., Kubo, T., Uchiyama, Y., Kihara, N., Mori, N., Muto, Y., and Suzuki, T. (2013): Field observations at an offshore observation tower during the typhoon seasons, Proc. of the 35th IAHR, Chengdu, China (CD-ROM).
- Powell, M. D., P. J. Vickery, and T. A. Reinhold (2003): Reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones, Nature, 422, 279-283.
- Toba, Y. (1972): Local balance in the air-sea boundary processes - I. on the growth process of wind waves, Journal of Oceanography, vol. 28, no. 3, pp. 109-120.