

田辺中島高潮観測塔における2013年夏季観測結果

Field Measurements at Tanabe-Nakashima Observation Tower in the Summer of 2013

馬場康之・水谷英朗・久保輝広・内山雄介⁽¹⁾・森信人・
渡部靖憲⁽²⁾・山田朋人⁽²⁾・猿渡亜由未⁽²⁾・大塚淳一⁽³⁾

Yasuyuki BABA, Hideaki MIZUTANI, Teruhiro KUBO, Yusuke UCHIYAMA⁽¹⁾, Nobuhito MORI,
Yasunori WATANABE⁽²⁾, Tomohito YAMADA⁽²⁾, Ayumi SARUWATARI⁽²⁾ and Junichi OTSUKA⁽³⁾

(1) 神戸大学大学院工学研究科

(2) 北海道大学大学院工学研究院

(3) 土木研究所寒地土木研究所・寒冷沿岸域チーム

(1) Department of Civil Engineering, Kobe University

(2) Division of Field Engineering for the Environment, Hokkaido University

(3) Port and Coast Research Team, Civil Engineering Research Institute for Cold Region

Synopsis

This paper shows some results of a field observation carried out in the summer of 2013. The vertical profiles of currents and water temperature have been measured as well as wave and wind conditions, and salinity and dissolved oxygen level observations have been carried out at the observation tower of Shirahama Oceanographic Observatory.

During the observation, one typhoon (No.18, MAN-YI) approached to the Kii peninsula. When the typhoon passed around the observation site, the vertical mixing develops well, and water temperature at all measurement points show almost uniform distributions. It is also found during the typhoon passing that coastal upwelling through the Ekman transport happened clearly due to continuous southward wind.

An EOF analysis decomposes the water temperature variation during the typhoon passing into 1) the increase and decrease of water temperature and 2) the magnitude of the temperature difference in the vertical direction.

キーワード: 現地観測, 台風, 鉛直混合, 海水温変動

Keywords: Field observation, Typhoon, Vertical mixing, Water temperature variation

1. はじめに

白浜海象観測所では、毎年夏に台風接近時の気象・海象データ計測を目的とした集中観測を実施している。(森ら, 2010; 内山ら, 2013; Baba et al., 2013). 2013年の夏期集中観測は8/8~11/14の間実施され

た。観測は、和歌山県田辺湾湾口に位置する田辺中島高潮観測塔による波高, 潮位, 海水温計測に加えて, ADCPによる流速分布計測, 水深30mまで計測範囲を拡張した海水温計測(水深10mまでの表層付近には, 測器を集中的に配置)が行われた。

これらの観測は、強風時の海洋表層における物理過程、特に鉛直混合に着目して、台風接近時の海水混合の観測を、気象・海象の観測と並行して行ったものである。

白浜海象観測所・田辺中島高潮観測塔は和歌山県南部の田辺湾湾口部にあり、2013年の夏期集中観測においては以下の測器が観測塔に設置された（測点の位置は観測塔基準、鉛直上向き：正）。

- ・水温計（全20点）：-0.5~-5.5m（0.5m間隔）、-6~-10m（1m間隔）、-15~-30m（5m間隔）
- ・塩分濃度計（全7点）：-3、-4、-5、-6、-8、-10、-30m（-8m以浅は生物付着の影響により欠測）

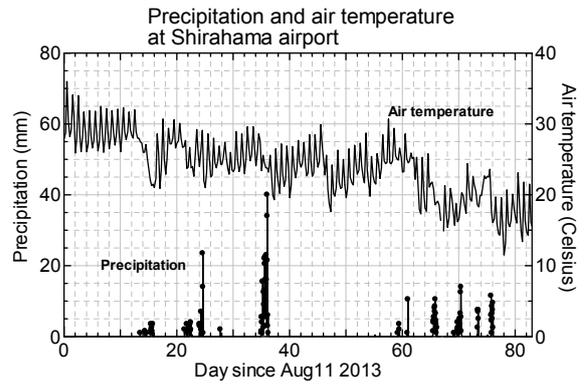


Fig.1 Temporal variations of precipitation and air temperature at Shirahama airport

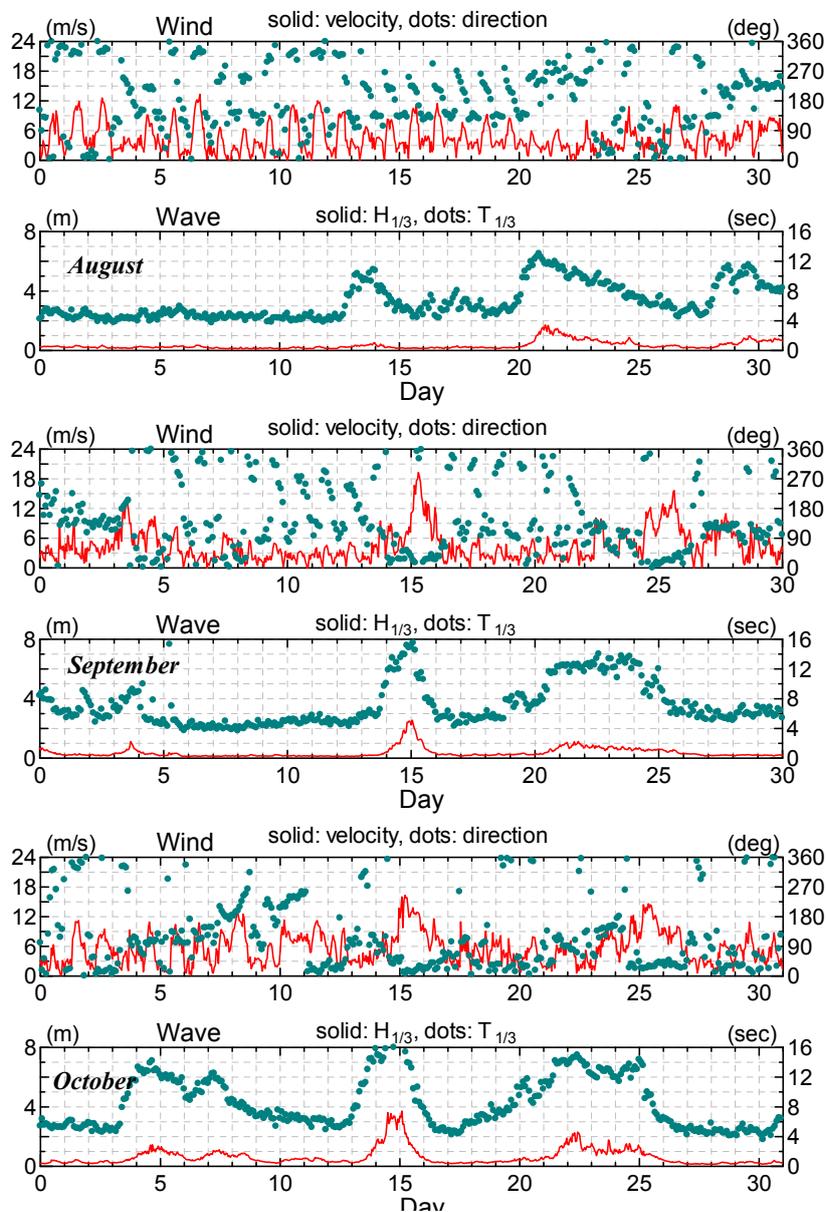


Fig.2 Temporal variations of wind and wave at the observation tower

2. 現地観測の概要

観測塔西側の水深9.5m地点にはADCP(超音波流向流速計, 1200kHz, 9/6~9/20の間欠測)が設置され, 水深方向の約20層における流向と流速が計測された. また, 観測塔上10m, 15m地点にはパーシベル, 10mにはパーティクルカウンターが設置された. これらの夏期集中観測に際して設置された測器に加えて, 観測塔既設の測器により気象・海象データが, 観測期間中連続的に計測された.

2013年に北西太平洋発生した台風は31個で, 観測期間中には台風17号(TORAJI), 18号(MAN-YI)が観測地点付近に接近し, そのうち台風18号の影響が最も大きく, 台風18号接近時には和歌山県串本町で竜巻も発生した.

Fig. 1は観測期間中の気温と雨量の時間変化を示したものである. 図中36日目付近に見られる降雨は

台風18号の接近に伴うものであり, 観測期間中最大の降雨となった. 24日目付近の降雨は台風17号によるもので, 60日目以降(10月中旬以降)の降雨は低気圧や台風26号, 27号によるものである.

8月から10月の3ヶ月間に, 観測塔で計測された海上風および波浪の時系列を示したものがFig. 2である. 2013年の観測期間中は, 台風が観測地点に上陸するほど接近することが無く, また台風接近時の風向が北寄りであったために, 台風接近時の波高は相対的に低くなっている. 風速は9月中旬の台風18号接近時に20m/s程度の風速を観測しており, その他の期間でも台風の接近時に大きな風速を観測している.

Fig. 3は, 同じく8~10月に計測された海水温, Fig. 4は塩分濃度の時系列を示している. 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

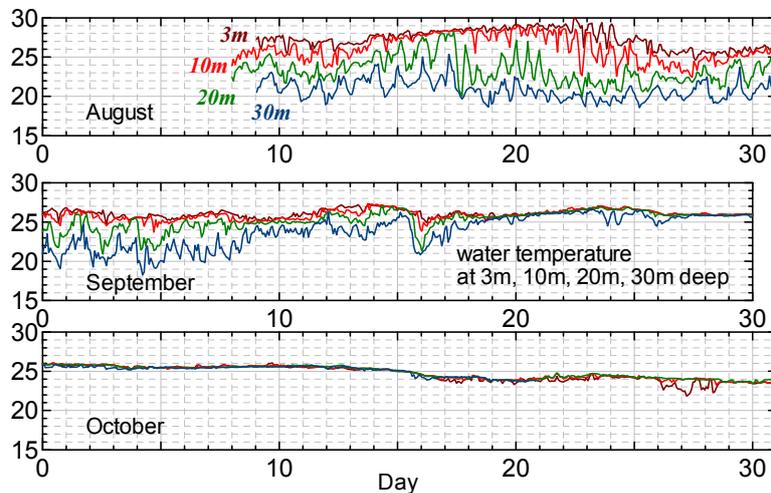


Fig.3 Temporal variations of water temperature at the observation tower

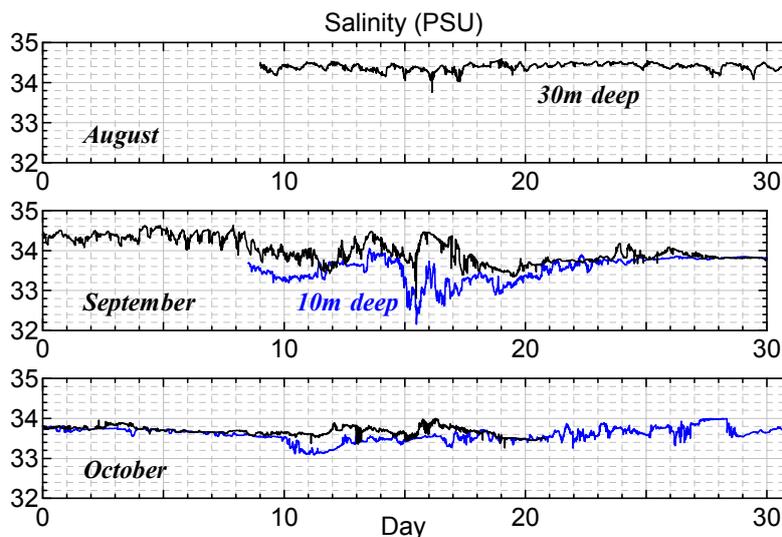


Fig.4 Temporal variations of salinity (PSU) at the observation tower

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。

塩分濃度は、水深方向に2点の結果であり、水深10m地点に取り付けられている塩分濃度計は、観測塔の計測管内に設置されている。そのため、擾乱に対する反応はやや鈍くなるものの、計測管の外側で塩分濃度の計測値に差が出ないことは測器設置時に確認済みである（測器設置時、計測管の外側で計測した後計測管内に設置し、前後での塩分濃度にほとんど差の無いことが確認されている）。塩分濃度は9月、10月それぞれの中旬に計測地点間で差が見られ、これらは台風の影響によるものと考えられる。ただし、夏期の成層状態から混合層が発達するにつれて、全体的な塩分濃度差が少なくなり、10月下旬にはほぼ塩分濃度の差の無い状態となっている。

3. 主な観測結果

Fig. 5は、観測期間中に紀伊半島付近を通過した台風18号 (MAN-YI) の進路図である。9月中旬に来襲した台風18号 (MAN-YI) は南海上で発達した後、日本列島に沿うように速度を速めて東進し、9/15~6/16にかけて紀伊半島の南側を東進した。台風の経路は、2012年の台風15号 (Roke), 2013年の17号 (Jerawat) と似たものとなっている。

3.1 台風接近時の海水温低下

Fig. 6は、台風18号接近時 (9/14~9/17) 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。

台風18号は9/15~9/16にかけて観測地点付近に最接近し、紀伊半島東側を南西から北東に向けて移動した。観測塔では、9/16の6時頃に最大18m/s程度の平均風速を計測している。台風18号は接近時に観測地点からみて東側を通過したため、台風接近の前後を問わず、北寄りの風が連続した (Fig. 6上、ゼロ度に近い風向が連続している)。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。

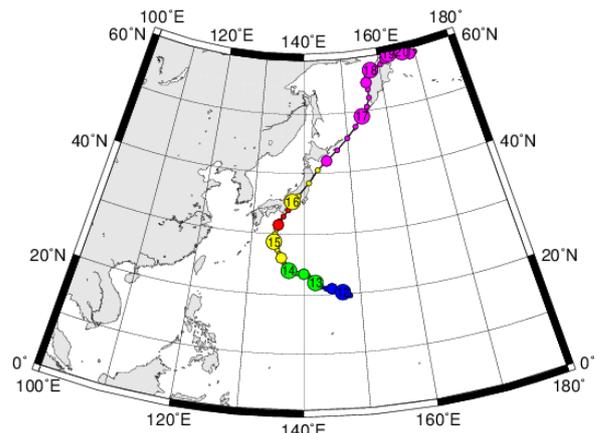


Fig. 5 Track of typhoon 201318 (MAN-YI)
(from Digital Typhoon Data)

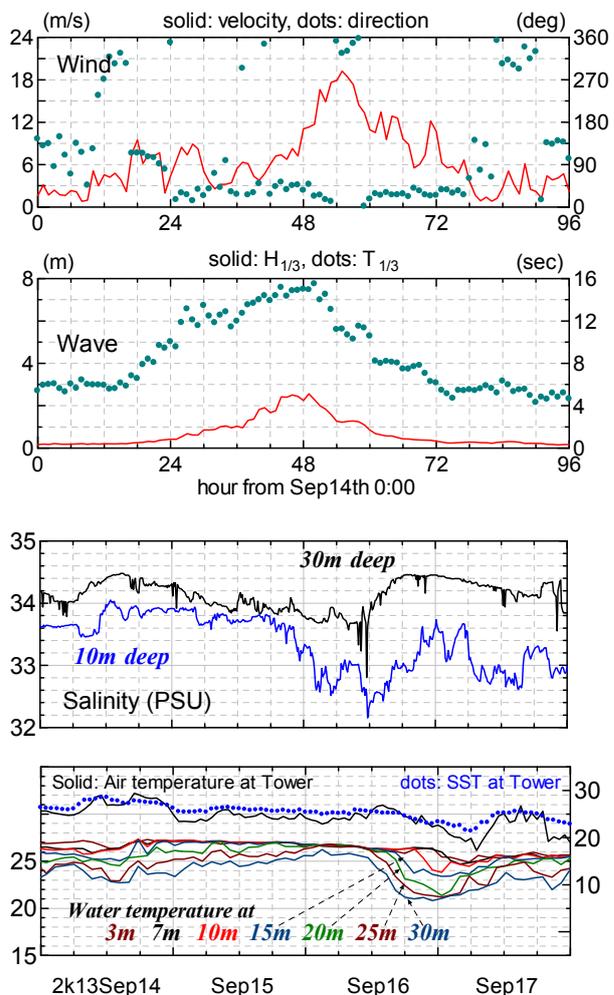


Fig.6 Temporal variations of wind, wave, salinity and water temperature (Typhoon 201318)

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。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おり（吉岡ら, 1998）、北寄りの風の連続に伴う表層のエクマン輸送が表層で西向き（田辺湾では沖向き）となることで発生すると説明できる。

2013年の観測において、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。

3.2 海水温分布のEOF解析

観測塔に取り付けられた水温計による計測結果（全12点、水深3~30m、9/14~9/17）に対してEOF解析を行い、第1、第2の主成分ならびに主成分得点を求めた（Fig. 7, Table 1）。Table 1から、抽出された二つの主成分で、鉛直方向の水温分布の変動が93%程度表現されていることがわかる。第1主成分と第2主成分に関する解釈は以下の通りであり、台風18号通過時の水温変動は大きく次のように特徴づけることができる。

第1主成分は対象とした全計測点で係数が負の値となり、係数の絶対値は水深の大きな計測点の方が大きい傾向がある。Fig. 7において、第1主成分が大きく変化しているのは9/16午後であり、Fig. 6の水温変化において低層から海水温が低下した時間帯に相当する。海水温が低下した時間帯に第1主成分は負から正に移動しており、その係数値が水深の深い測点ほど大きいことから、第1主成分は水温の全体的な変化（水温の低下）を意味していると解釈できる。

第2主成分は、水深15mにおける係数の絶対値が小さく、水深15m以浅では係数が負、水深15m以深では係数が正となっている。Fig. 7において、第2主成分は台風通過後の水温低下時（9/16午後）には正から負に変わっている。また、台風接近前の9/14午後~9/16午前には、時間をかけて負から正に変化している。この時間帯は、Fig. 6において水深方向に存在した水温差が台風の接近に伴いほぼ一樣になる期間である。言い換えると、水深方向の水温差が少なくなる期間であり、その期間に第2主成分が負から正に変わることは水深15m以浅では水温が低下、水深15m以

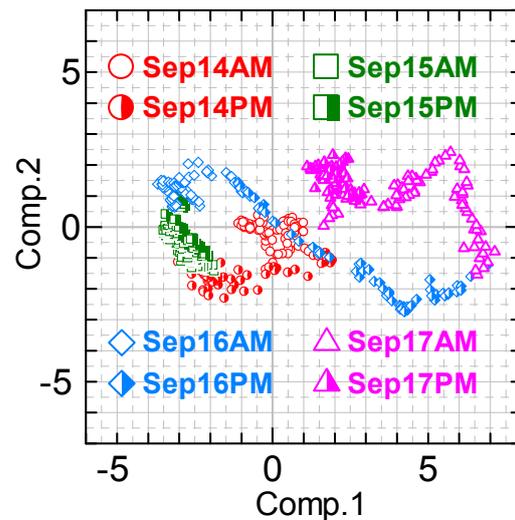


Fig.7 Scores of 1st and 2nd components by EOF analysis

Table 1 Standard deviations, proportions and coefficients of 1st and 2nd components by EOF analysis

	Comp.1	Comp.2
Standard deviation	3.019	1.233
proportion	0.801	0.135
coef (3m)	-0.158	-0.28
coef (4m)	-0.152	-0.292
coef (5m)	-0.157	-0.313
coef (6m)	-0.167	-0.322
coef (7m)	-0.181	-0.317
coef (8m)	-0.206	-0.3
coef (9m)	-0.231	-0.26
coef (10m)	-0.257	-0.209
coef (15m)	-0.36	-0.024
coef (20m)	-0.419	0.254
coef (25m)	-0.455	0.389
coef (30m)	-0.438	0.342

深では水温が上昇することに相当し、水温差が少なくなる傾向と符合する。同様に、台風通過時の海水温低下時に第2主成分が正から負に変わるとは、水深15m以浅では水温が上昇、水深15m以深では水温が低下することを示すことから、第2主成分は鉛直方向の水温差の大きさを意味していると解釈される。

3.3 海水温の長周期変動

Fig. 3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。

Fig. 8は、観測塔の計測管（水深5m, 10m）の管内で計測された2013年全体の海水温時系列データである。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であることが確認されている。

年間を通じた海水温の変化には、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。Fig. 8における230日目前後の水温変動が、Fig. 3・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Fig. 3, Fig. 8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、時期的に水温の卓越する変動周期が異なる状況が予想されるので、2013年の年間の海水温データに対して、時間周波数解析を行った。

Fig. 9は、水深10mで計測された水温データの時間周波数解析結果である（連続ウェーブレット解析、基本ウェーブレット：complex gauss wavelet）。Fig. 9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る。縦軸の256は約428時間周期に相当する。局所的にウェーブレット係数の大きな領域では、まず400時間程度の周期を持つ水温変動が強くなり、その後400時間を越えるさらに長い周期を持つ水温変動が卓越していることになる。Fig. 8の海水温時系列と比較すると、Fig. 9のウェーブレット係数の大きな領域とFig. 8で

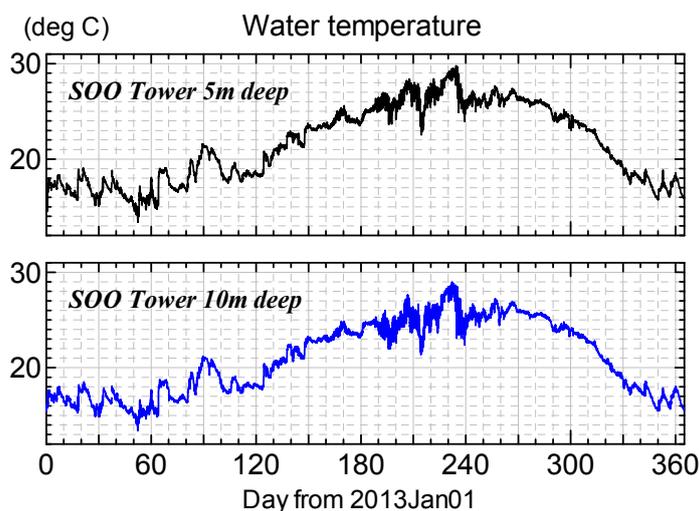


Fig.8 Temporal variations of water temperature at the observation tower in 2013

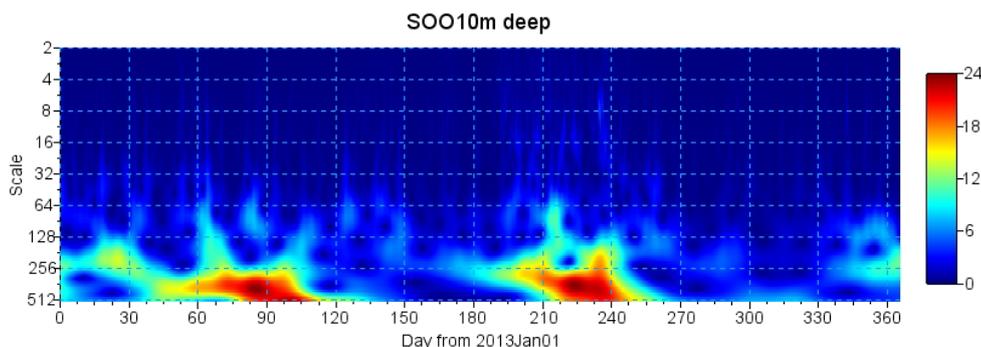


Fig.9 Time-frequency analysis of water temperature at 10m deep of the observation tower in 2013

大きな水温変動が観測されている時期はよく対応しており、変動幅の大きな水温変化は周期の長い現象と関係していることがうかがえる。400時間を越える周期を持つ流動としては、密度流が指摘されている(柳, 1982)。ここで示されている密度流には、海況変動に伴う沿岸の流れの変化などによる流れも含まれており、これらの流動は内湾と陸棚、陸棚と外洋との間の海水交換にとって、重要な意味を持つとされている。観測塔のある田辺湾付近は、黒潮の派流の影響を受けることが知られており、ここで示された周期の長い海水温の変動については、黒潮との関係性についても検討する必要がある。

4. おわりに

本報告は、2013年夏期に白浜海象観測所・田辺中島高潮観測塔周辺で実施された現地観測の結果について、その概要ならびに主な観測結果について示したものである。

2013年の観測では、台風18号が紀伊半島付近を東進する際のデータを収集することができた。台風18号が紀伊半島に接近した際、強風による鉛直混合の発達はいくつかの台風接近時と同様に観測されたが、表層の急激な海水温低下は確認されず、北寄りの風が連続したことによる低層水の進入に伴う水温の低下、塩分濃度の上昇が確認された。特に、台風18号接近前後を通じて北寄りの強風が観測地点付近の慣性周期(約21.5時間)に匹敵する程度継続したため、低層からの低温・高塩分の水塊の流入が明瞭に捉えられている。

強風に伴う鉛直混合の発達後、低層からの流入の影響を受けて、台風接近前後の海水温変化は水深の大きな計測点での変動幅が大きくなった。台風接近時の水温分布に対してEOF解析を行った結果、水深の大きな計測点での変動が大きいことと、鉛直方向の水温差の大小という2つの要因によって台風接近前後の海水温変化が特徴づけられることが示された。

集中観測初期の8月に観測された海水温変動において、他の月に比べて各測点の海水温変動幅が大きい状態が確認されたことを受けて、2013年全体の海

水温変動に対して、時間周波数解析を実施した。その結果、2013年の海水温変動においては、年始から3月を過ぎる頃までの期間と6月後半から8月にかけての期間の2つの期間で、400時間を越える周期の水温変動が卓越していることが確認された。田辺湾湾口部に位置する観測地点は、紀伊水道を通じて太平洋からの影響を受けることが知られており、観測地点周辺の流動、海水構造に影響を与えるとされている黒潮との関係性についても、検討する必要がある。

謝 辞

現地観測の実施にあたり、電力中央研究所の今村正裕氏、木原直人氏から水温計、放射温度計などのご提供を受けた。本研究は、京都大学防災研究所一般共同研究(24G-05, 25G-10)の援助を受けた。ここに記して謝意を表する。

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.1-481-I-485.
デジタル台風: <http://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon/>.
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.
柳 哲雄(1982) : 瀬戸内海の内湾海況変動特性, 沿岸海洋研究ノート, 第20巻, 第1号, pp.12-18.
吉岡 洋・芹沢重厚・高山知司・田中祐志(1998) : 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.
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).

(論文受理日: 2014年6月11日)