

和歌山県富田川河口の地形変化計測

Measurements of Morphological Changes in Tonda River Estuary

水谷英朗・馬場康之・久保輝広

Hideaki MIZUTANI, Yasuyuki BABA and Teruhiro KUBO

Synopsis

The purpose of this study is to clarify the relation between sediment transport from river and topographical changes of mouth-bar by field measurements in Tonda river, which is second grade river flowing in south of Wakayama prefecture. Upstream areas of Tonda river were damaged by slope failures due to heavy rainfall which was caused by Typhoon No. 12 in 2011, and a large amount of sediment was supplied into the river. In this study, we will conduct field observations using RTK-GNSS during the next few years in order to capture the transporting phenomena of the overabundant supplied sediment from upstream area to estuary and sea. In this paper, we reported our recent results of field measurements.

キーワード: 河口砂州, 地形変化, RTK-GNSS測量, 富田川

Keywords: mouth-bar, morphological change, RTK-GNSS Surveying, Tonda River

1. はじめに

河口域の水理現象及び地形変化は、上流の河川域や河口域から離れた海域に比べ、河川と海の両者の影響を受けるため複雑である。河川流れ、波浪、潮位変化、風、密度流と多くの外力によって河口域の地形が形成されている。そして、日本国内河川の河口域において、河川上流部のダムや堰による流量低下や冬季の風浪の影響によって、河口砂州が河口を塞ぐよう形成されているケースも少なくない。河口現象は一般論で論じることが困難な程に個々の河口に特性があると言われているが、河口砂州の多くは渇水期等の流量が少ない時期に波浪の影響による土砂輸送によって形成・発達し、出水期の洪水等によってフラッシュされ、それらが繰り返されている。そして、その河口砂州が洪水初期段階にフラッシュされない場合、砂州が障害となり上流側の水位が上昇するため氾濫の危険性が高まる。河口砂州の存在によって洪水流量ピーク以前に河口水位ピークが現れることや、砂州上に植生が繁茂した場合は流出しにくい強固な砂州となる等、防災の観点から河口砂

州の成長をモニタリングおよび管理することが重要となっている。加えて、河口閉塞による河川と海の分断は、母川回帰する魚にとっても母川溯上を阻害することになるため、河川環境・魚類生態系の保全する観点や、河口砂州地形が塩水溯上を低減する有利な面があることも河口砂州管理上忘れてはならない。

これまで水工学分野や海岸工学分野において、河口域を対象とした多くの現地調査が行われている。例えば、日本国内の17河川について現地調査し河口を4タイプに分類した宇多ら(1996)の研究、河口形状を分類した須賀(1972)の研究がある。これまで経費の面から中小河川の河口を対象とした現地計測が困難であったり、河口域の現地観測の困難性から詳細な計測を高頻度に行うことが難しく、中小河川や短期的なスケールの現象を議論することが少なく、河口域地形変化の現象を議論するには未だ十分にデータが揃っていないとも言えない。計測技術が目覚ましく発展した現在において、河口域の現地計測を年間を通して高頻度を実施し、河口域地形変化の現象について実証的に理解を深める必要があると筆者は

考えている。

本研究では、GPS計測技術の発展の恩恵に与り、河口域の地形を高頻度に計測し、河口砂州の形成・成長過程だけでなく気象擾乱や洪水イベントによる短期的な地形変化を捉え、河口周辺の土砂輸送メカニズムを明らかにすることを目的としている。本研究で対象としている和歌山県2級河川富田川（Fig. 1）は、宇多ら（1996）や須賀（1972）の分類によると、Fig. 2から確認できるように偏流型のタイプ-2に当たる。2011年台風12号による斜面崩壊で多くの土砂が富田川上流へ供給され、その過大に供給された土砂が上流域から出水期等の増水によって徐々に下流へ輸送され、河口域の地形にも影響を及ぼすことが懸念されている。近年においては、和歌山県西牟婁振興局の方で、富田川河口の砂州地形の土砂を不定期ではあるが人為的に移動させている。本研究は富田川河口域地形を計測しモニタリングする意義も含まれている。

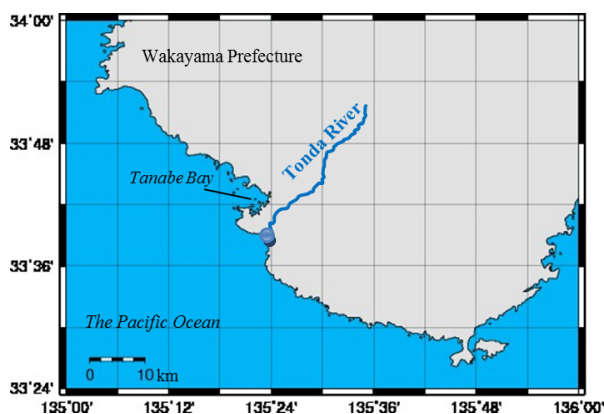


Fig. 1 Location of Tonda River and picture of the estuary.

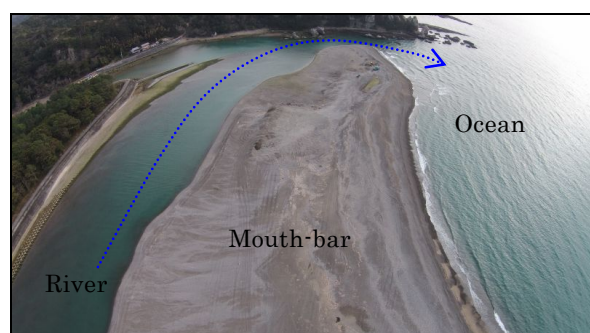


Fig. 2 Picture of Tonda River estuary.

2. 富田川河口の地形計測手法

本研究の河口域地形計測において、まず陸上と水面下の両方を計測することで陸上と水面下の連続的な地形を計測し、河口域近傍の土砂移動特性を捉え

ることを考えている。地形計測において、陸上と水面下の両方を同時計測することは容易ではなく、本研究では陸上・水面下を単純に分けて異なる手法で計測を実施している。

2.1 陸上歩行GPS計測

陸上地形については、本研究では国土地理院1級GNSS測量機に登録されている高精度GPS（Nikon-Trimble R4 GPS）を用いて計測を実施している。具体的には、既知の地点から補正観測情報を携帯電話等を介して移動局に送信し、移動局の位置を測定するRTK法（リアルタイムキネマティック：Real Time Kinematic）によって本研究は計測を実施している。Nikon Trimble R4のアンテナをアルミニウム製の背負子に取り付け、GPS端末および携帯を携行し、GPSが傾かないよう気を付けながら砂州上を歩行することによって計測を実現している（Fig. 3）。長さ約300m、幅約50mの砂州上を、縦断・横断測線を描くように歩行することで砂州全貌を捉え、微地形については追加して地形コンターを描くように歩行することで詳細地形も計測している。本研究では50cmの移動間隔毎に緯度、経度、標高値を記録しており、Fig. 4に歩行GPS計測の結果例として、実際に歩行した経路とその歩行経路を基に作成した河口砂州地形コンター図を示す。対象領域は最大干満差が約2mあるため、計測の際は砂州の計測範囲を広めるために低潮位時を狙い、ウェーダーを着用することで水深の浅い水際範囲も計測し、1回の歩行計測で約3時間程度をかけて砂州全体地形を計測している。近年のGPS技術の発展のおかげで本研究の計測も精度向上および低労力化を実現でき、測定頻度も増やすことができている。



Fig. 3 Walking terrain measurement on land/extremely shallow regions using RTK-GPS survey system.

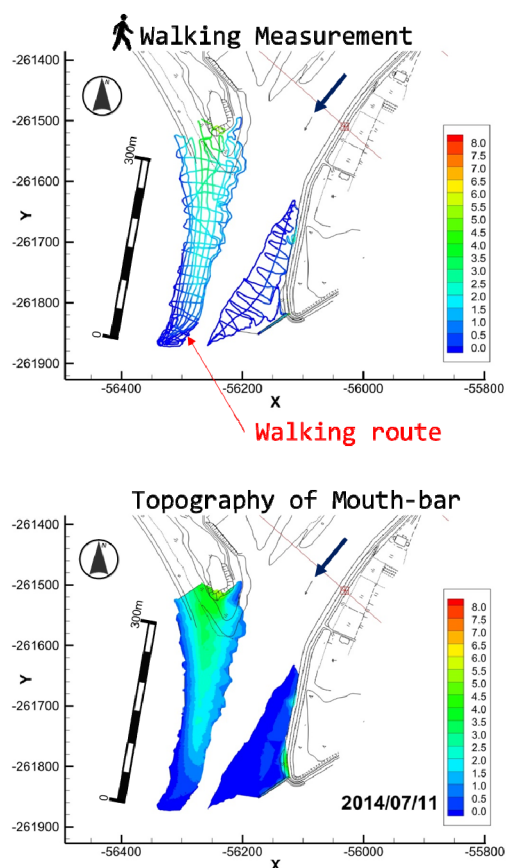


Fig. 4 Walking Measurement Using RTK-GNSS

2.2 ボート計測

水面下については、ゴムボート(Fig.5)及び白浜海象観測所所有の小型観測船「海象」(Fig. 6)を用い地形を計測している。河川の低水路域と河口部近傍の極浅海域についてはゴムボートを用い、海域の水深が大きい領域については小型観測船を用いている。測深には比較的安価なGPS機能付きの測深器(Lowrance社HDS-7, 50/200kHz標準ソナー, ストラクチャスキャンソナー)を使用した。水深0.4mから1500m程度の範囲まで計測可能で標準ソナーおよびストラクチャスキャンソナーの2つの音響測深器を併用して計測を実施した。ゴムボート計測では、船首に電動船外機、船尾のトランサムボードにはソナー送受波器、GPSおよび船外機(SUZUKI, DF2)を取り付け、低水路内を縦断及び横断測量線を描くように緯度経度情報および水深を記録し、後に計測時刻の潮位から河床高に換算している。海域の計測においても、小型観測船を用いて同じの測深器を用い船舷へ取り付け(Fig. 7)、ゴムボートと同様の方法で地形計測を実施している。計測域近傍は最大干満差が約2mあるため、ボート計測時には満潮時、陸上歩行計測時には干潮時に計測を行い、水際部分の欠測が無いよう努めている。また天候、潮位条件だけでなく、ボート計測時には波が高い状況で

は計測が難しいため、計測可能となる機会はそれほど多くなく高頻度に計測するには幸運も必要である。

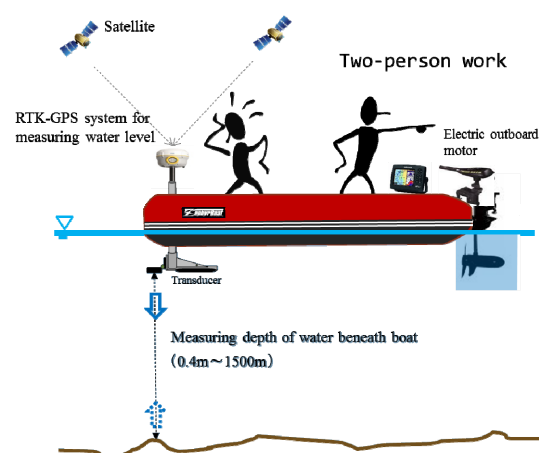


Fig. 5 Terrain measurement underwater using rubber boat



Fig. 6 Small observation boat for bathymetric survey in sea area, owned by Disaster Prevention Research Institute, Kyoto-University.



Fig. 7 Installation of Sonar to gunwale of the observation boat.

上記のように、高頻度計測によって短期的な河口地形変化を捉えるために、なるべく労力と必要人員を減らした計測体制をとっている。陸上地形は1名、ボートによる河床および海底地形は最低2名で可能

であるが、安全のためボート計測はプラス1名の3人体制で実施している。2014年4月から本研究の計測は本格的に開始し、陸上計測は1箇月程度の間隔で観測を実施し、台風や出水等の河口地形に変化をもたらすイベントが発生した際には不定期に計測を追加している。

Table 1には記録としてこれまで富田川河口の地形計測を実施した日程をまとめている。

Table 1 Date of measurements.

#	Date	Measurement area	Notes
1	2011/10/31	mouth-bar	After typhoon No.12 in 2011
2	2013/10/02	mouth-bar	
3	2014/04/17	mouth-bar	
4	2014/06/17	low-water channel	After typhoon No.8
5	2014/07/11	mouth-bar	
6	2014/07/17	sea area	
7	2014/08/20	mouth-bar	After typhoon No.11
8	2014/09/03	low-water channel	
9	2014/09/29	mouth-bar	
10	2014/10/07	mouth-bar	After typhoon No.18
11	2014/10/24	mouth-bar	After typhoon No.19
12	2014/10/28	low-water channel	
13	2014/11/20	mouth-bar	
14	2014/12/19	mouth-bar	
15	2015/02/05	mouth-bar	
16	2015/03/24	mouth-bar	After artificial sediment movement
17	2015/05/08	mouth-bar	
18	2015/05/14	low-water channel	

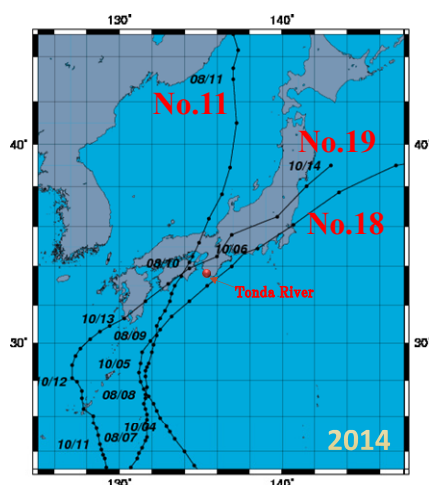


Fig. 8 Best track data issued by JMA in 2014 (<http://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/rsmc-hp-pub-eg/besttrack.html>)

3. 2014年富田川河口の地形変化

本研究では、幸運にも2014年に来襲したいくつかの台風（Fig. 8）の前後で河口域地形計測を実施し、台風がもたらす河口域地形変化をとらえることが出来た。以降には2014年のいくつか計測結果例を示し、考察を記述した。

3.1 台風11号による富田川河口の地形変化

Fig. 10 (a), (b)には、上述したGPS歩行計測およびボート計測の参考例として2014年8月に来襲した台風11号前後の河口地形計測結果を示す。そして、現象を理解するために、Fig. 12にはFig. 9に示す研究サイトから最も近い地点における台風来襲時の気象・海象に関する観測結果を示している。

Fig. 8に示されているように台風11号の中心は、高知県、そして徳島県を通過し、富田川より西側を北北東へと進む経路となった。富田川河口近傍の風は、田辺中島高潮観測塔の観測データでは、台風の影響による南東風・南風の強い風速が約1日間続いており、観測塔と遠くない富田川河口においても同様の状況と推察される。また、富田川河口から12.8km上流の市ノ瀬水位観測所の水位データから風速が強まる8/8 11:00頃（ピーク流量推定値736m³/s）と8/10 20:30頃（ピーク流量推定値1098m³/s）に2度の洪水ピークの2波形が洪水流量で確認されている。その台風11号によってもたらされた出水により閉塞されていた河口が開き、砂州先端近傍の土砂が沿岸域にフラッシュされている様子が台風来襲後の計測結果から確認できる。また、この出水ピーク時点が2度共に低潮位時と重なり、低潮位が低水路内の洗掘がより助長する効果があったと考えている。Fig. 11には台風来襲前後の河口域地形の標高差を示しているが、その図から低水路内は1m～2.0m程度の洗掘が生じていることが確認できる。また、河口砂州の海域側の水際土砂が波浪による押し込み効果により砂州上部へと土砂が運ばれ、砂州根本近傍の砂州高が上昇しており、大きいところでは2.5m程度も砂州高が上昇している。河川側の洪水流の影響による砂州土砂のフラッシュだけでなく、海の波浪による土砂の押し込みが加わり、台風来襲前後で興味深い河口の地形変化となっている。

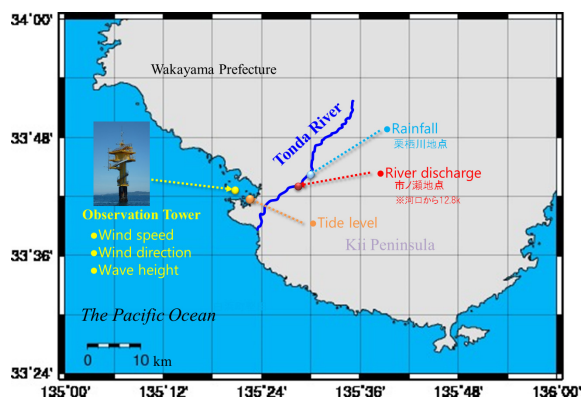


Fig. 9 Reference points of river discharge, rainfall, tide level, wind and wave observed data.

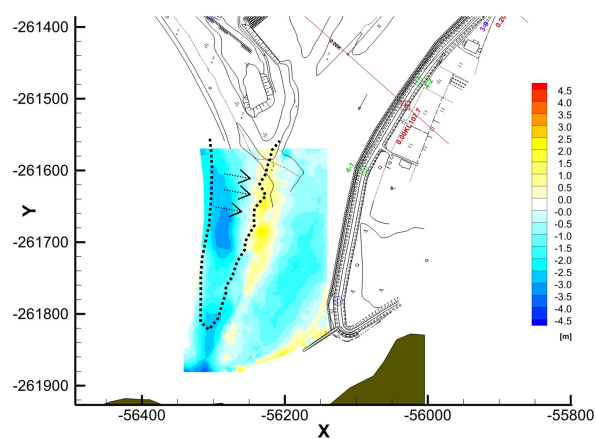
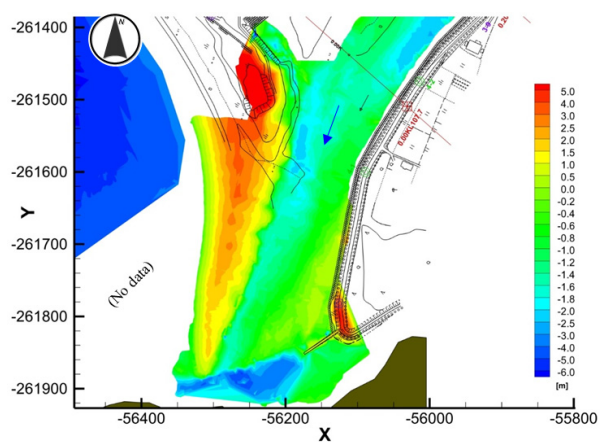
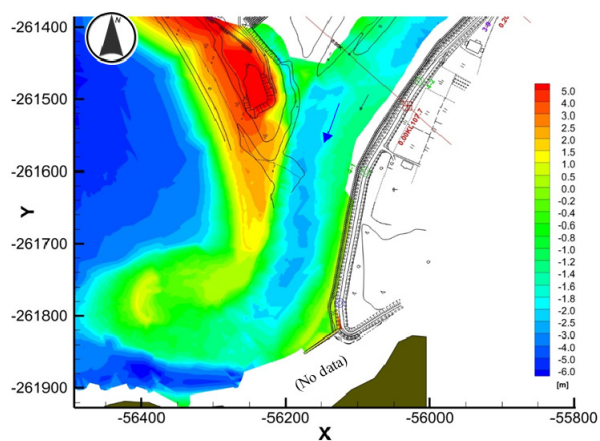


Fig. 11 Bed level difference between before and after 11th typhoon hit.

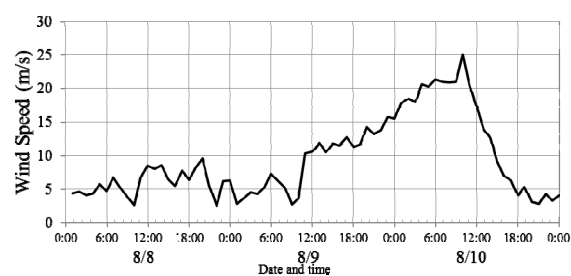


(a) 2014/06/17; before the intrush of typhoon

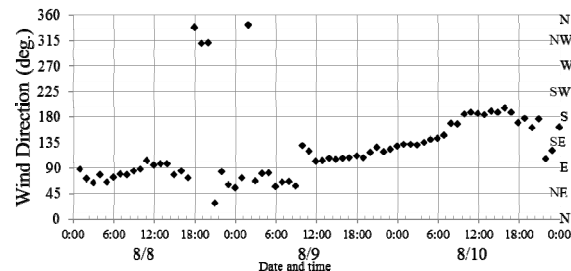


(b) 2014/09/03; after the intrush of typhoon

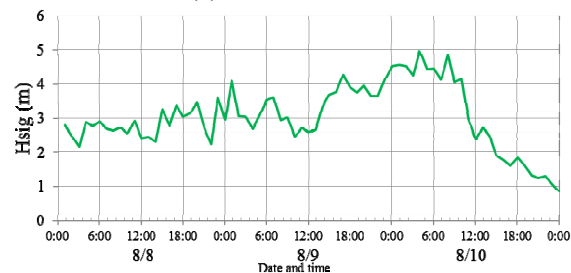
Fig. 10 Topography of river mouth measured by using boats and RTK-GPS survey systems; (a) before 11th typhoon hit, (b) after 11th typhoon hit.



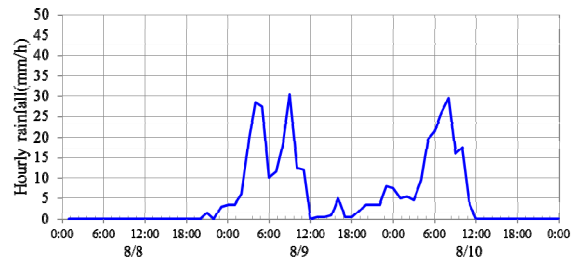
(a) Wind speed



(b) Wind direction

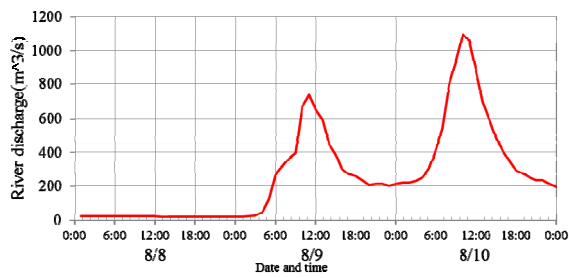


(c) Wave height

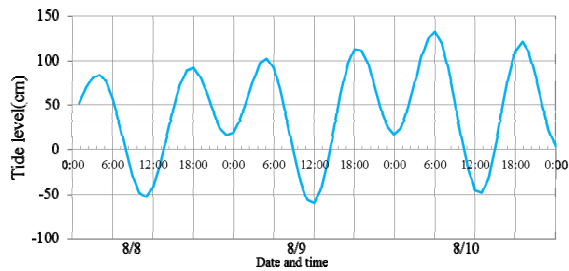


(d) Rainfall

Fig. 12 Observed data on several reference points during 11th typhoon hit.



(e) River discharge

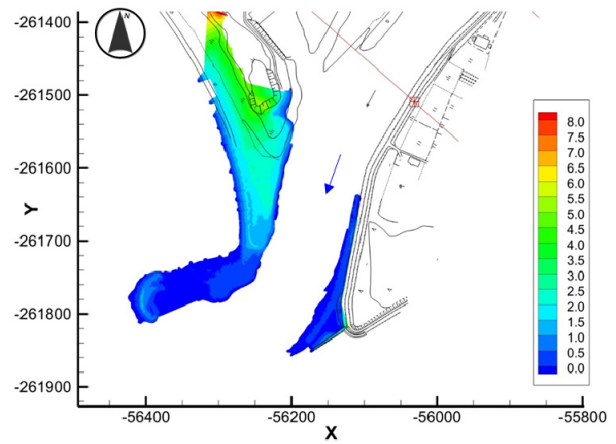


(f) Tide level

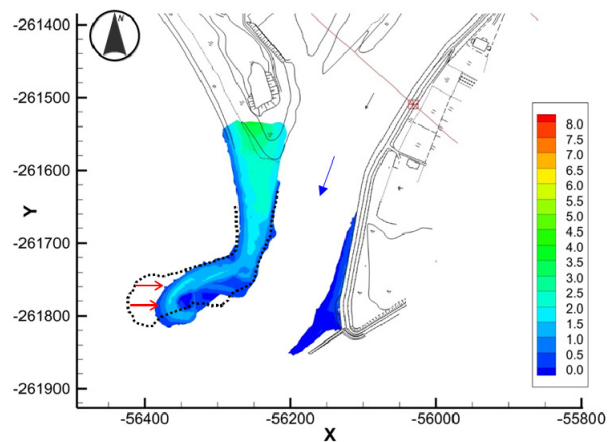
Fig. 12 (continued) Observed data on several reference points during 11th typhoon hit.

3.2 台風来襲後 1 箇月間の砂州再生

Fig. 13 (a), (b)には台風 11 号来襲直後と 1 箇月経過した砂州地形を示している。先に示した台風 11 号がもたらした洪水によってフラッシュされた砂州地形が 1 箇月間かけて再生した地形が計測されている。富田川河口は太平洋に面しており、左岸側から突き出た海崖の遮蔽の影響もあり、主には西側からの波浪が主となる。Fig. 14に示す観測塔で観測された有義波高のヒストグラムから確認できるように、大きな波浪が長時間続くような気象擾乱は台風 11 号来襲後の 1 箇月間で発生していない。また、Fig. 15には同じく観測塔で観測された同期間の風配図を示す。この 1 箇月間では北東・東北東・東の風が卓越しており、平均すると 4.0ms から 5.0m/s の風が観測されている。この約 1 箇月間での地形変化は、砂州の水際土砂を東へと輸送し、折れ曲がった砂州先端近傍の水際土砂を集めて砂州高を上昇させている。富田川河口の砂州地形において、台風に伴う高波浪や洪水流が河口地形へ与えるインパクトは大きいですが、約 2m の潮位変化と水際土砂を輸送する弱い波浪場の継続によってフラッシュされた土砂を徐々に輸送する、洪水後の富田川河口砂州再形成プロセスが今回の計測で実証的に示されている。



(a) 2014/08/20; after the intrush of typhoon



(b) 2014/10/07; About 1 month later

Fig. 13 Topographical changes in reformation process in Tonda River estuary; (a) after 11th typhoon hit, (b) 1 month later from intrush of 11th typhoon.

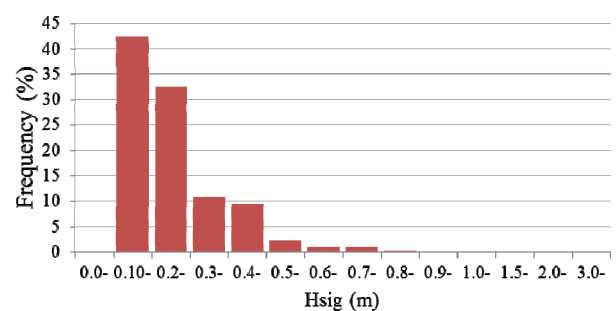
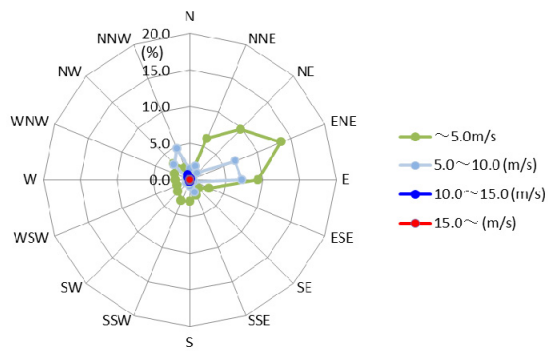
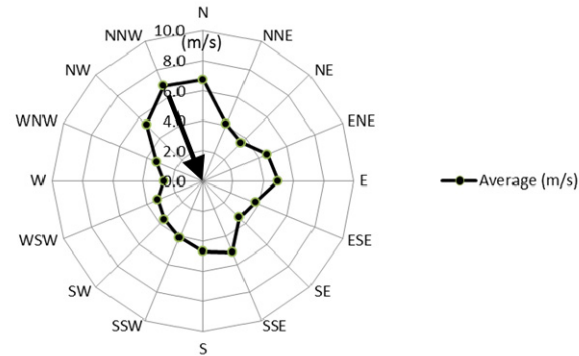


Fig. 14 Histogram of wave height observed at observation tower.



(a) Frequency of wind speed and wind directions



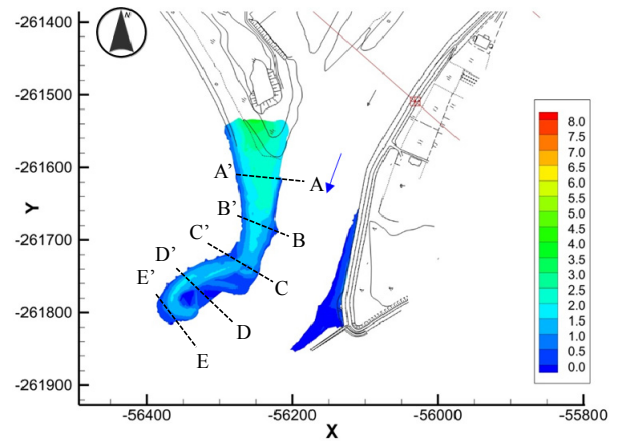
(b) Averaged wind speed on the directions

Fig. 15 Wind rose of wind observed at observation tower.

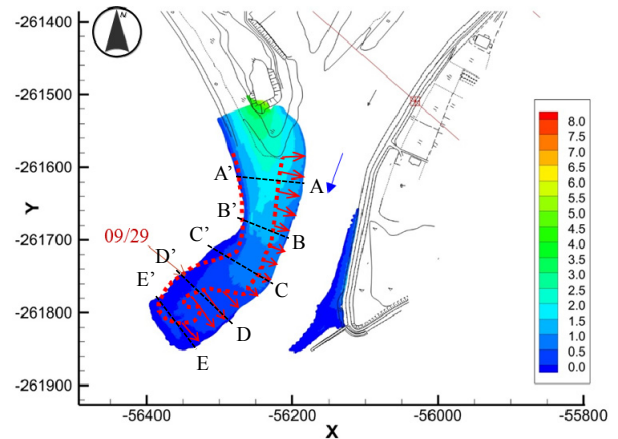
3.3 台風18号による富田川河口の地形変化

次に示すFig. 16は、2014年台風18号がもたらした河口砂州地形の変化を示している。台風18号の中心は、Fig. 8から確認できるように和歌山県南側を上陸せずに東北東へ進行し、その後静岡県に上陸しそのまま東北東へ進行した。そして、Fig. 17に先と同地点の気象・海象に関する観測結果を示す。台風が南側を通過したため、南側から台風が接近している期間は西風が卓越し、風速ピーク時になる辺りから北北西風が卓越している。そして、先の台風11号とは異なり、富田川上流域で降雨が少なく、河川流量のピークが小さく大きな出水は発生していない。そして、台風18号がもたらした現象の大きな特徴として、海域で台風による高波浪が1日以上続き、さらにその高波浪ピーク時が満潮時と重なっており、海域から河川側へと砂州上を海水が越流する状況が発生している。そのため図から確認できるように、台風11号来襲後から約1箇月間で徐々に再形成していた砂州地形が、今度は海側からの高波浪による流水の影響で河川側へと土砂が引き込まれている様子が明瞭に確認できる。その高波浪がもたらした越流水によって砂州高は全体的に低くなり、砂州の平面的な範囲が拡大していることがFig. 16と横断測量結果Fig. 18によって確認できる。

このように台風という同じの気象擾乱が発端となる河口域の地形変化ではあるが、出水の状況、波浪および潮位の状況によって異なる地形変化がもたらされ、それらは河口域地形の変化を考える上で重要なパラメータとなることが今回の計測結果からも実証的に示された。

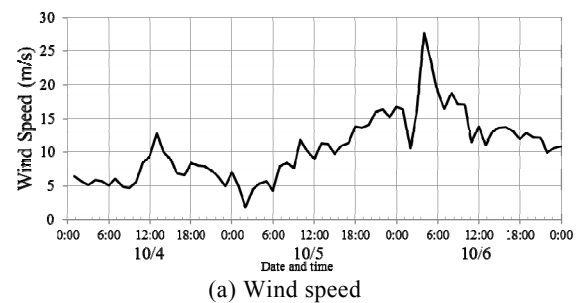


(a) 2014/09/29; before the intrush of typhoon



(b) 2014/10/07; after the intrush of typhoon

Fig. 16 Topographical changes of mouth-bar due to intrush of typhoon No.18.



(a) Wind speed

Fig. 17 Observed data on several reference points during 18th typhoon hit.

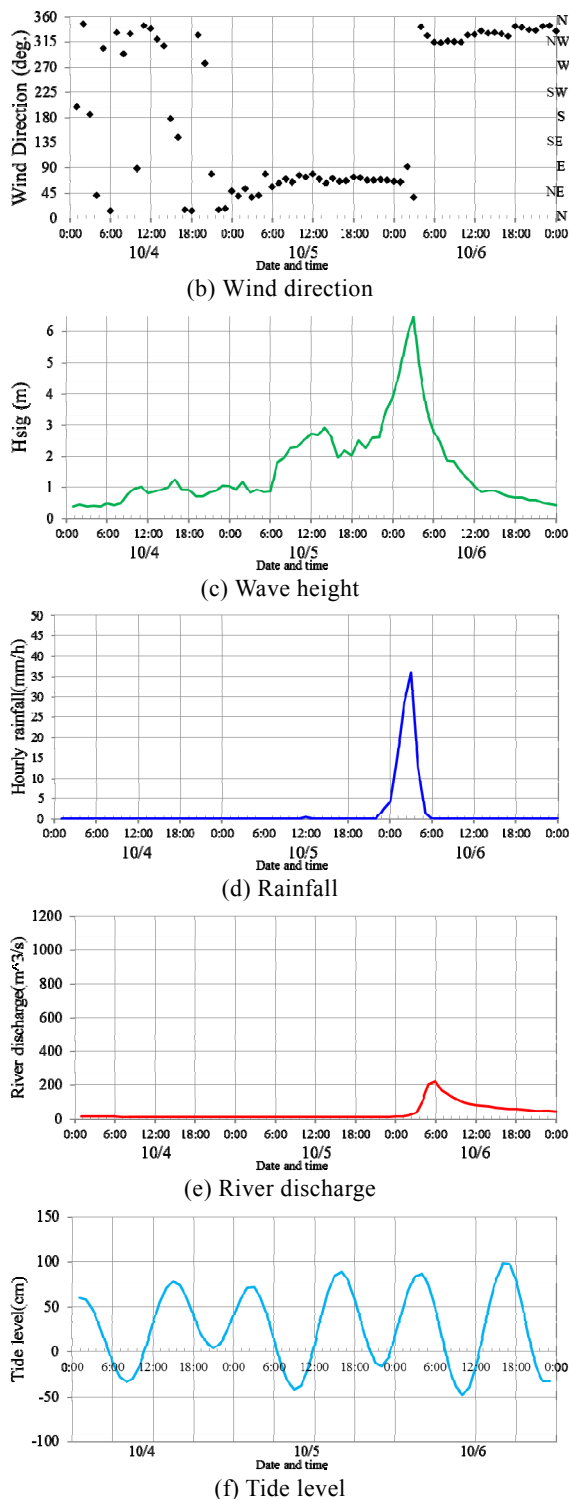


Fig. 17 (continued) Observed data on several reference points during 18th typhoon hit.

3.4 富田川河口砂州変化の記録

Fig. 19には本研究の計測が本格的に開始してから本原稿を投稿するまでの期間に計測した結果を記録のために掲載している．2014年台風18号，19号来襲後の10月7日以降は，砂州地形に変化を及ぼすような

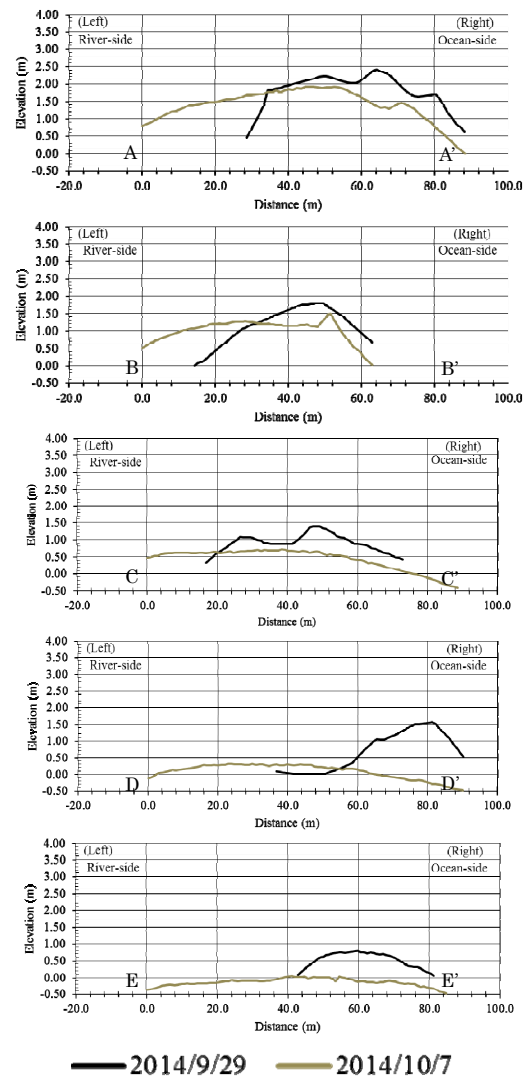


Fig. 18 Cross sections of mouth-bar of Tonda River.

大きな出水は発生しておらず，主に海域側からの波浪と潮位の影響による土砂の押し込み現象が発生している．本研究では河口砂州の水際境界のみの座標だけでなく，RTK-GPSにより砂州微地形の標高値まで密に計測しているため，海域側からの土砂供給による砂州成長過程が詳細に計測結果から確認することができる．10月7日の平坦な砂州地形から，波浪の影響により水際に沿って小高い微地形が形成され，それが徐々に成長し砂州が沿岸線に沿って成長している．また，小高い地形が海側から不連続的に形成され押し込まれ，11月20日の計測結果には砂州先端近傍に窪地が形成されており大変興味深い地形となっている．また，3月下旬に大きく砂州先端近傍の砂州高が低下し，反対に砂州中央部の砂州高が上昇しているが，3月24日の地形計測の前に砂州先端近傍において，人為的な土砂撤去および砂州内移動が施されたためである．

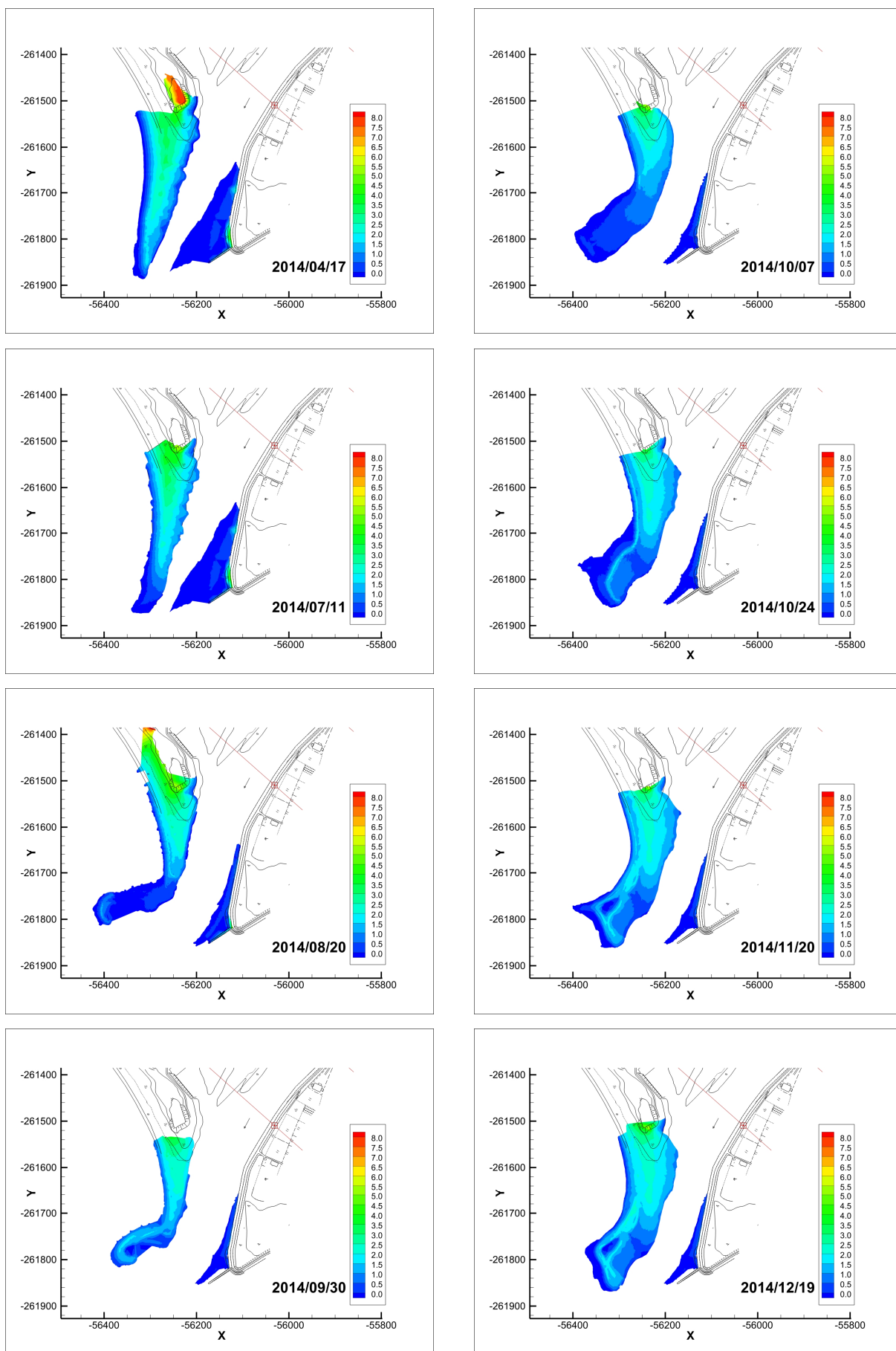


Fig. 19 Topographical changes of mouth-bar from Apr. 2014 to May 2015.

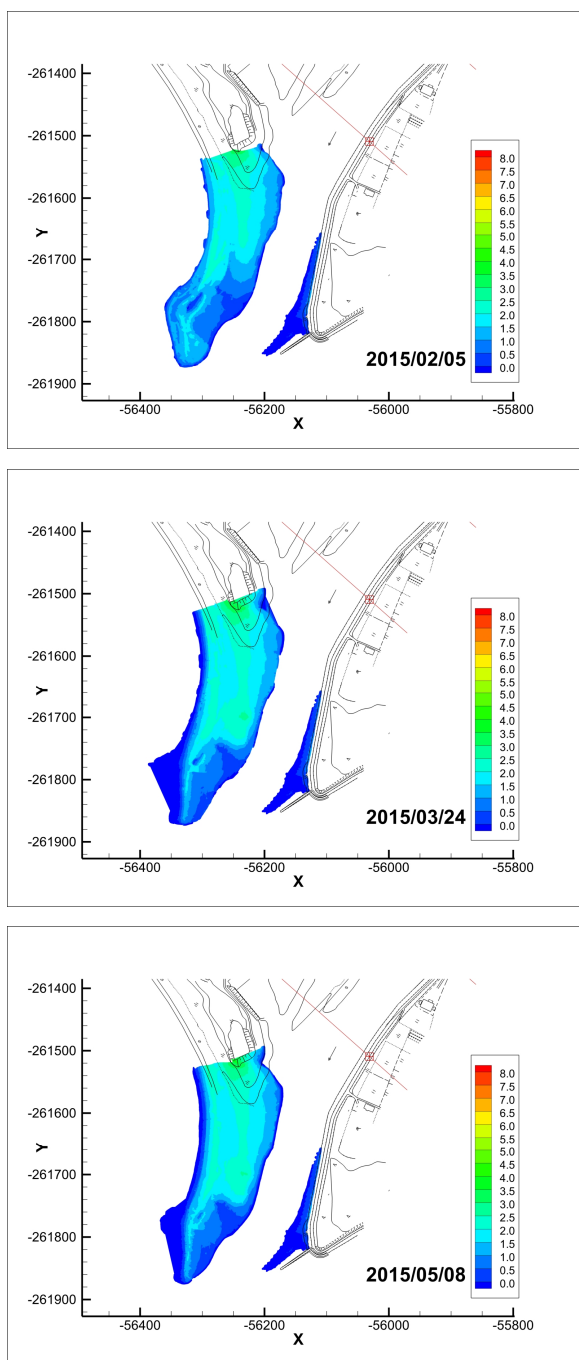


Fig. 19(continued) Topographical changes of mouth-bar from Apr. 2014 to May 2015.

Fig. 20には右岸側から延びる河口砂州の土砂量（基準高さ0.0T.P.mより上の土砂量）及び平均砂州高さの1年間の時間変化を示している。計測開始の4月頃から夏季に向けて砂州土砂量が減少し、特に台風による出水で大きく砂州の土砂量が減少、すなわち砂州を形成していた土砂が海域へと輸送されている。平均砂州高さについても同様に台風の影響により低下し、特に先述した台風18号の高波浪の影響で砂州高さの低下が著しい。そして、台風が過ぎ去った10月頃から徐々に砂州土砂量が増加し、2014年4月時点

の土砂量を12月頃に越え、1年間で約20%程度河口砂州としての土砂量が増加している。一旦海域へと輸送された土砂が、波浪と潮位変化の影響により徐々に元の場所へと輸送され、また、出水時に河川上流から海域へと輸送された土砂量も合わさったため2014年4月時点より砂州土砂量が増加した結果となったと推察される。河口砂州の面積はFig. 19の平面分布図から容易に確認できるように、2014年4月から1年を経て拡大傾向にあり、砂州高さについては平均値と比較すると1年間経過で大きな変化はなく、広範囲に土砂が広がった影響で全体として土砂量は増加しているが、砂州高さとしては全体平均で約15cm程度低下する結果を示している。平均砂州高さとしては少し低下しているが、河口を塞ぐ土砂量は増加しているため、洪水時の障害となり得ることが予想されるため今後の動向も注視しなければならない。

富田川河口砂州の土砂量は2014年4月から1年経過して、台風がもたらした出水等の影響により約20%の増加であることが示されたが、今後も南白浜海岸沿岸の浅海域から土砂が河口域へと輸送されてくると考えられるため、河口砂州地形の長期的な管理という観点では、南白浜海岸全体の土砂量の経年変化についても把握しておく必要があると考える。

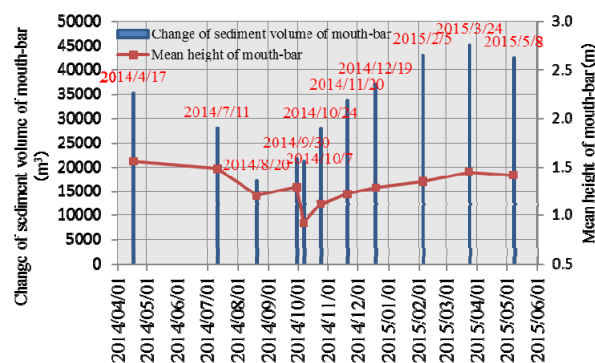


Fig. 20 Changes of the sediment volume of Tonda River-mouth bar.

4. 結論

本研究では、和歌山県2級河川富田川を対象に、河口域のGPS歩行計測およびボートによる地形計測を実施した。河口域地形を高頻度に計測することにより、河口域の短期的な地形変化と土砂輸送特性を調査した。

本研究で得られた結果をまとめると以下のようなになる。

[1] 2014年に来襲した台風の前後で地形計測を実施し、台風がもたらす河口地形への影響を現地計測

から追究した。

- [2] 台風がもたらす出水によって砂州のフラッシュ、低水路内の洗掘、そして高波浪によって土砂の河道域内への押し込み現象が確認され、河川と海側のパワーバランスによって地形が変化することが富田川の現地計測結果から実証的に示された。
- [3] フラッシュ後の砂州地形の再生過程において、沿岸線に沿って小高い微地形が不連続的に形成・統合され、砂州地形が徐々に再生される現象が計測結果から確認された。
- [4] 高潮位と台風による高波浪ピークが重なり、河口砂州の土砂を低水路内へと押し込む現象が本研究で計測され、大きな出水が無い場合においても、台風通過による河口地形変化は注視しなければならない。
- [5] 台風がもたらす砂州地形へのインパクトは大きく大きな地形変化をもたらすが、冬季の風浪による地形変化も徐々に地形を変化させるため、富田川河口砂州を管理およびモニタリングするためには、台風等の気象擾乱前後だけでなく、冬季も定期的に注視する必要がある。

謝 辞

本稿は、文部科学省 科学研究費補助金 若手研究(B) (課題番号26820202, 代表: 水谷英朗) の助成を受けたものである。現地計測については京都大学防災研究所技術室および山本善万氏に多大なるご協力を賜りました。また、和歌山県2級河川富田川の貴重な水位・流量データは和歌山県 県土整備部 河川・下水道局 河川課よりご提供頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 宇多高明・松田英明・山形宙 (1996) : 全国17河川のデータによる河口砂州形状のタイプ分類, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 596-600.
- 須賀堯三 (1972) : 河口問題と現地調査, 水工学に関する夏期研修会講義集, A-6, pp. 1-18.

(論文受理日: 2015年6月11日)