熊本地震後の白川河口干潟の変動と土砂量に関する基礎的研究

辻本 剛三¹・外村 隆臣²・田畑 健吾³・太田 光⁴・中條 壮大⁵・
高野 保英⁶

¹フェロー会員 熊本大学大学院先端科学部 教授 (〒860-8555 熊本市中央区黒髪2-39-1)
E-mail: tgozo@kumamoto-u.ac.jp

²正会員 熊本大学工学部技術部 (〒860-8555 熊本市中央区黒髪2-39-1)
E-mail: hokamura@tech.eng.kumamoto-u.ac.jp

³学生会員 熊本大学大学院社会環境工学専攻 (〒860-8555 熊本市中央区黒髪2-39-1)
E-mail: 173d8819@st.kumamoto-u.ac.jp

⁴正会員 (株) NIPPO (〒103-0028 東京都中央区八重洲1-2-165)
E-mail: kumamoto.u.ota@gmail.com

⁵正会員 大阪市立大学大学院工学研究科 講師 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本3-3-138)
E-mail: nakajo@eng.osaka-cu.ac.jp

⁶正会員 近畿大学理工学部社会環境工学科 准教授 (〒577-8502 大阪府東大阪市小若江3-4-1)
E-mail: takano@civileng.kindai.ac.jp

熊本地震, 集中豪雨, 阿蘇中岳の噴火の影響を受けた白川河口域の干潟の潮下帯, 潮間帯での地盤高さや深淺測量を実施した. 豪雨に流入土砂があったが元の地盤が約42cm低下したため, 平均地盤高さは過去と比べて低下したままである. 一方, 白川の水位が最高時は干潮時にほぼ一致していたこともあり滞筋上の前置層は, 約100m前進し, 約1.5mの堆積がみられた. 地形パラメータの相関は2012年の九州北部豪雨の時とは逆の相関であり, 砂質のLow Energy Beachと同じ相関であった. 地震後の地形変動量は20~30年前の約4倍程度であった.

Key Words : field observation, clinoform, tidal flat, quadratic profile, sediment transport

1. はじめに

2016昨年4月に発生した2回の震度7の熊本地震により阿蘇山麓においては大規模な斜面崩壊が起り, 亀裂を含めた崩壊・不安定土砂斜面は約5.9km²に及んでいるとされた(国土交通省). 6月18日~23日に阿蘇乙姫では総雨量で501.5mmの雨量を記録し, 総雨量では2012年の九州北部豪雨を下回ってはいるものの, この降雨により多量の土砂が白川を通じて河口域に流出し, 河口域での水産業に被害も生じた. 10月8日には阿蘇中岳の噴火により51万t程度の火山灰が放出され, 火口近くには1.5m程度の火山灰が堆積しているとの報道がなされた.

地球温暖化に伴う極端気象現象の増加は, 豪雨による土砂流入や台風の巨大化による災害リスクの増大の懸念をもたらす. 熊本地震, 阿蘇中岳噴火による土砂供給のポテンシャルの増加により, 白川河口域の脆弱性はさら

に高まったと考えられる. 地震後の地盤沈下と長期に及ぶ土砂供給による熊本県白川河口域に広がる潮間帯から潮下帯の地形の変動を明らかにすることは, 環境・災害リスクを最小化することに通じるため, 沿岸環境の保全・防災計画に極めて重要である.

本研究では, 過去の地盤高さの観測結果と比較しながら, 地震後の干潟地形の変動の特性を把握することを目的とする.

2. 白川河口干潟の研究事例

有明海には阿蘇の火山灰土等に起因する微細な底質により国内の約4割の干潟が形成されている. 特に環境・防災の観点から, 白川河口干潟では継続的な調査等が行われている. 滝川ら^{1) 2)} は水質浄化の観点から干潟の有効性に着目し, 有明海沿岸域に形成される干潟に白川・

緑川・坪井川からの流入を考慮した潮流・拡散解析を通じて流動を把握し、白川河口域や緑川河口で流速や水質の現地観測を実施し、底質特性から干潟の環境機能評価を試みた。柿木ら³⁾は干潟形成に対する潮位、潮流、河川水の影響を数値モデルや現地観測で検討をしたが、干潟地形の計測は行っていない。山田ら⁵⁾は2000年12月から白川河口域に測線を設置し、地盤高さの計測を開始し、地形パラメータを用いた手法により、外力との関連を明確にした。柿木ら⁶⁾は干潟地形は春から夏にかけて堆積傾向を示し、平均水面の季節変動が地形の変動に影響を与えていることを示した。Yamadaら⁷⁾は調査測線を6本に増やし、水位、流速、濁度の連続計測を行った。中道・山田ら⁸⁾は干潟の地形変動の要因として、平均流速場の非対称性（高次モーメント）に伴う底質輸送フラックスが存在することを示した。山田ら⁹⁾、Yamadaら¹⁰⁾は、潮間帯上の底質輸送プロセスを解明するために、潮流と波浪成分を分離する潮汐位相平均方法を提案し、平時の濁度変化は移流の影響を受け、高波浪時は巻き上げが卓越する事を示している。山田ら¹¹⁾は潮間帯の掃流・浮遊による輸送機構における波浪と潮流の影響度に相対波高の閾値の存在を示し、その値に応じて卓越する輸送形態とその方向を示している。山田ら¹²⁾は干潟の土砂収支を粒径別の土砂質量を用いて評価し、平時と出水時においてフラックスの方向が異なることを示した。山田ら¹³⁾は潮間帯の地盤高さと浮遊フラックスの連続観測を行い、潮流の空間スケール、出水時の河川出水ピークと潮位の位相差によってフラックスの方向が異なることを示している。Lusiaら¹⁴⁾は九州北部豪雨の影響を受けた潮間帯の変動を調査し、河口から離れた地点で泥の堆積厚が増大し、下げ潮から干潮時に最大出水量が発生したことがその要因であるとしている、またその厚みは通常の3倍以上であったことを示した。仲西ら¹⁵⁾は将来の気候変動による河口デルタの変動を潮汐・波浪モデルをリンクさせた岸沖1次元モデルを構築し、現地地形の将来予測を行った。宇野ら¹⁶⁾、末次ら¹⁷⁾、栗山ら¹⁸⁾も白川河口付近の広域観測を実施し、出水時に流入した土砂が、河道・滞筋・潮下帯に堆積し、干潟の地形変化には河川からの流出土砂量によって大きく異なることを示している。

このように白川河口干潟の研究では多くの知見が得られたが、この度の地震による地盤沈下は、100年余り先を想定していた海面上昇と見することができ、より災害リスクの懸念が高まった新たなフェーズに入ったと想定でき、従来の知見とは異なることが予想される。

3. 地震後の豪雨概要

2016年6月19日から25日にかけて本州付近に梅雨前線が停滞して、その上を低気圧が通過し、特に6月20日は

写真-1 白川の流況と土砂堆積

図-1 白川の水位と降雨量の時間変化

東シナ海からの低気圧により前線が活発化したために、日付が替わる21日の深夜にかけて大雨となった。熊本県内でも4ヶ所で観測史上1位となる時間雨量となり、熊本市でも1位となる94mmを記録した。国土交通省による暫定流量は1500m³/sであった。

写真-1は6月21日午前6時半頃の子飼橋の右岸から撮影した流況で濁水が流れており、また、多量の底泥が右岸側の高水敷に堆積した状況である。図-1に白川流域にお

図-2 観測地点（潮間帯）

図-3 現地調査範囲（潮下帯）

る6月20日12時～6月21日12時の期間の上・下流の阿蘇乙姫観測所と熊本市の熊本観測所での1時間毎の雨量、大津陣内（河口からの距離：36.05km）、代継橋（河口からの距離：12.2km）、子飼橋（河口からの距離：14.4km）での1時間毎の白川の水位の時間変化、河口付近の熊本新港における予測潮位の時間変化を示す。

上流域の阿蘇乙姫では23時から0時に降雨が集中しているが、下流域の熊本では降雨ピークが先に現れ、極めて短時間に多量の降雨であった。白川の流量は上流域のカルデラ内の降雨に影響されるが、中流域の大津陣内では0時～1時、下流域の子飼橋では1時～2時のわずか1時間で河川水位が各々4.5m、3m上昇しており、2012年の九州北部豪雨時よりも水位上昇が早かったため、代継橋においても白川氾濫危険水位（5m）近くとなる4.85mに午前3時に達していた。子飼橋での水位値のピーク時が干潮時刻（3時26分）にほぼ一致し、当日は大潮でもあり水際線が最も沖まで低下した状態で、白川からの土砂が流入したと考えられる。また、6月29日にも豪雨があり暫定流量は800m³/sであった。

4. 現地観測概要

観測は図-2に示す有明海中央部に位置する熊本県白川

図-4 濁度、水位、降雨

図-5 代継橋の水位変化

河口域に広がる潮間帯・潮下帯で実施した。観測方法は山田ら⁵⁾と同様である。潮間帯には複数の測線があり、2000年12月から地盤高さを主に計測している。2016年は5月～12月に6回、潮間帯で地盤高さを計測した。また、8月に図-3の2.5km×2kmの潮下帯において、船上からADPCを用いて深浅測量、底泥採取、CTDによる塩分、水温を計測した。底泥は粒径と化学元素分析を行った。図-3の破線枠（5.3km×4.4km）は国土交通省による1976年から2003年までの調査範囲であり、本研究の観測範囲はこの範囲に含まれている。また、地震直後から白川河道において約週1回の頻度で採水を行い濁度の計測を行い、現在も継続中である。2017年3月に左岸及び右岸の干潟測量の基準点となる地盤高さをGPS計測した所、左岸側で0.414m、右岸側で0.237mの沈下量があった。なお、地震直後の国土交通省の測量結果は、白川の河口付近の左岸堤防付近は場所によるが0.5m、右岸堤防は0.2m程度の沈下量であった。

5. 観測結果と考察

(1) 白川の濁度と水位変化

図-4に濁度と水位、阿蘇乙姫の降雨量の観測結果を示す。水位上昇が急激になる前から、濁度が上昇し始めており、少量の雨量でも一時的に高濃度の濁水が発生している可能性があり、連続計測を実施することで検証する必要がある。

図-5には代継橋の月平均水位を示す（マイナス表示

図-6 潮間帯の岸沖断面地形

図-7 地形パラメータの時系列変化(地震)

図-8 地形パラメータ相関 (地震)

図-9 地形パラメータ相関 (北部豪雨)

図-10 EOF解析結果

は基準面からの高さによる)。例年と異なり地震直後から水位上昇が見られ、土砂堆積と地盤沈下の影響が示唆される。

(2) 潮間帯の地形特性

地震後に地盤沈下が見られたため、それを考慮した左岸側測線の岸沖断面図を図-6に示す。地震後は0.5m程度はほぼ均一に低下しており、堤防の沈下量と同程度であった。豪雨後には0.1m程度の堆積が沖側で見られている。その後は断面形状に大きな変動はない。しかしながら、2017年4月の観測では沖側で0.3m程度の侵食が生じている。柿木ら³は春から夏にかけて堆積し、秋のピーク後に侵食し冬場に侵食量が最大となることを示しており潮位変化に対応するとしており、地震後の変動はこれらとは傾向が異なる。

地形特性を山田ら⁹⁾が提案した地形パラメータ、凹凸度： Q ($Q < 0$: 凹, $Q > 0$: 凸, $Q = 0$: 直線), 平均勾配： S (任意点の局所勾配の平均), 鉛直変位： D ($D > 0$: 堆積, $D < 0$: 侵食) で分析を行った結果を図-7に示す。分析期間は2014年2月～2017年4月のデータを用いた。鉛直変位は地震直前までは正の値を有し、地震後は地盤沈下により見かけ上の鉛直変位は負となった。洪水による出水の数カ月後から堆積傾向であったが、4月時点ではやや低下気味になっている。それに伴い平均勾配は急勾配になり、凸状であった形状が徐々に一様化している。パラメータ間の相関は極めて高く、図-8、図-9に示す。 S と D 間は0.9 (0.52), Q と D は0.9 (-0.52), Q と S は0.99 (-0.85) となった。 Q と S の相関は同じ傾向ではあるが、他のパラメータ間の相関は逆になっている。辻本ら¹⁹⁾は内湾に形成される波浪条件が比較的穏やかなlow energy beachの遡上域の岸沖断面の地形特性を地形パラメータで分析しており、パラメータ間の相関は地震後の干潟地形と同じ傾向であった。

図-10にEOFによる分析結果を示す。空間係数E1は平均地形に対応するが、沖側にかけて差異が見られる。平均地形からの変位を示す空間係数E2は、全領域におい

て変位が生じている。底質の移動に関する係数E4は沖側にかけて変動が大きくなっている。平均地形に関する時間係数C1やC2は地震直後に変動が見れるが、底質移動に関わる係数C4は他の係数とタイムラグがみられた。

(3) 潮下帯の地形特性

白川河口から流出した底泥は、長期的には潮下帯に堆積し前置層を形成する。前置層の変化は潮間帯に影響を及ぼすため、河口干潟の地形変化を検討する上で潮下帯における前置層の動態は重要である。前置層の過去40年間の変化を図-11に示す。1976年～2003年は国土交通省、2013、2014年は九州北部豪雨後の山田らの観測結果である。国土交通省の観測線の位置が異なるために補間している。滞筋に近い測線では約40年間で600～700m程度の前置層が前進している。九州北部豪雨後の2003～2012年は約60m、熊本地震後の2014～2016年は約150mの前進が見られている。写真-2にその測線5で採取した底泥の画像を示す。図-12に底泥の粒径を ϕ 表示算出した平均粒径、分散、歪度を示す。前置層の頂点と潮間帯の境界に近いroll over point(647km付近)を境に粒径が細くなり、正の値を有する歪度も小さくなり対称形を示すようになる。また、分散は1.0 ϕ 程度で極めて均一な粒径になっている。

図-11 潮下帯の岸沖断面形状

写真-2 底泥の顕微鏡画像

図-12 底泥の物理特性

図-13 前置層の位置とその水深

図-13に各測線の前置層の位置とその水深の時系列変化を示す。滞筋付近では前進をしながら水深が浅くなっている。右岸側では後退をしながら水深が深くなり、左岸側ではほぼ平衡上であるが、水深が深くなっている。

潮下帯の観測範囲における1km²当たりの土砂変化量は、2003-2013年 (3.15万m³/yr) , 2013-2014年 (10万m³/yr) , 2014-2016年 (11万m³/yr) の堆積があり、栗山ら¹⁸⁾は1978年～1997年間の堆積期間中の地形変化量を34.16万m³/yrと見積もっており、1km²の観測領域の範囲に置き換えると約2.5万m³/yrであり、ここ数年は過去の堆積期間の4倍程度の地形変化量であった。

6. まとめ

河口干潟は元来、脆弱な環境下で形成されており、外力の変化による影響が極めて大きいため、研究の動機として地球温暖化に伴う海面上昇を想定した議論が多くなされていた。熊本地震による地盤沈下は、海底面からの視点で見ると、急激な海面上昇に相当している。また、阿蘇山麓では年間 3000mm 程度の降雨があるために、地震後の斜面崩壊や阿蘇中岳の噴火の火山灰は、河口干潟への供給土砂量の増加を長期的にもたらしている。地震直後から国土交通省と熊本県では、白川河道内に堆積した土砂を 2016 年度で 23 万 m³程度撤去し、2017 年度以

後も継続して、土砂の撤去が計画されている。

地震後の1年が経過した地盤高は、潮間帯から潮下帯近傍で低下が見られ、2016年度は白川河口域への高波浪が少なかったこともあるが、潮間帯では黒ぼく、赤ぼくと称される阿蘇を起源の底質が恒常的に存在している。これらは、従来の傾向とは異なっているため、河口干潟地形の動態は今後も注視しておく必要がある。

謝辞：本研究の一部は、公益財団法人河川財団の河川基金の助成によるものであり、粒度分析には熊本大学先端科学部伊藤紘晃助教に御協力頂き、調査に関しては、(株)シー・バス・プランニング、沖新漁業協同組合、小島漁業協同組合に御配慮頂いた。深浅測量データは国土交通省九州整備局熊本河川国道事務所、熊本港湾事務所、熊本県農林水産部水産局漁港漁場整備課より頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 滝川清, 山田文彦, 原田浩幸, 北園芳人, 中島和弘: 有明海沿岸域における干潟の浄化機能と環境特性に関する研究, 海岸工学論文集, 第45巻, pp.329-342, 1998.
- 2) 滝川清, 鈴木敦巳, 古川憲治, 大本照憲, 山田文彦: 有明海の白川・緑川河口域における干潟環境特性とその評価に関する研究, 海岸工学論文集, 第46巻, pp.691-690, 1999.
- 3) 柿木哲哉, 滝川清, 山田文彦: 白川・緑川河口域の干潟形成に及ぼす潮位・潮流と河川流入の影響, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.636-640, 2000.
- 4) 柿木哲哉, 滝川清, 山田文彦, 西山大輔: 熊本県沿岸海域における潮流場・拡散場への河川流入の影響, 海岸工学論文集, 第48巻, pp.636-640, 2001.
- 5) 山田文彦, 小林信久, 柿木哲哉: 地形パラメータを用いた干潟断面の季節変動の要因分析, 海岸工学論文集, 第50巻, pp.551-555, 2003.
- 6) 柿木哲哉, 木下栄一郎, 滝川清, 山田文彦, 外村隆臣: 平均水面の季節変動が干潟地形に及ぼす影響, 海岸工学論文集, 第50巻, pp.471-475, 2003.
- 7) Yamada, F. and Kobayashi, N.: Annual tide level and mud flat profile, *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 130, pp.247-267, 2004.
- 8) 中道誠, 山田文彦, 外村隆臣, 玉置昭夫, 小林信久: 季節的な平均潮位の昇降に伴う干潟岸沖断面の堆積・侵食メカニズム, 海岸工学論文集, 第52巻, pp.526-530, 2005.
- 9) 山田文彦, 坂西由弘, 山口龍太, 蒲原さやか: 潮汐位相平均を用いた潮間帯上の底質輸送フラックスの時空間変動特性, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.626-630, 2007.
- 10) Yamada, F., Kobayashi, N., Sakanishi, Y. and Tamaki, A.: Phase averaged suspended sediment fluxes on internal mudflat adjacent to river mouth, *Journal of Coastal Research*, 25, pp.350-358, 2009.
- 11) 山田文彦, 坂西由弘, 白川雄一郎, 穴井広和, 外村隆臣, 小林信久: 干潟上の岸沖方向の底質輸送特性とその輸送概念モデル, 海岸工学論文集, 第55巻, pp.461-465, 2008.
- 12) 山田文彦, 白川雄一郎, 穴井広和, 草合良友, 坂西由弘, 山本浩一, 小林信久: シルト・粘土の質量に基づく土砂収支法の提案と河口潮間帯干潟への適用, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.65, pp.476-480, 2009.
- 13) 山田文彦, 白川雄一郎, 船越義隆, 田川一彦, 外村隆臣, 坂西由弘, 小林信久, 玉置昭夫, 多田彰秀: 河口潮間帯干潟の土砂動態に及ぼす潮汐と河川出水の相対的重要性度, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.66, No.1, pp.531-535, 2010.
- 14) Lusia Manu, 白石紘基, 伊藤政和, 外村隆臣, 中條壮大, 小林信久, 黒岩正光, 山田文彦: 平成24年7月九州北部豪雨の異常出水に伴う潮間帯河口干潟の応答特性, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.69, No.2, pp.631-635, 2013.
- 15) 仲西耕平, 中條壮大, 外村隆臣: 将来の外力変動を考慮可能な河口デルタ地形長期予測モデルの基礎的検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.71, No.2, pp.505-510, 2015.
- 16) 宇野誠高, 横山勝英, 森下和志, 高島創太郎, 大角武志: 熊本県白川河口域における土砂動態, 海岸工学論文集, 第49巻, pp.561-565, 2002.
- 17) 末次忠司, 藤田光一, 諏訪義雄, 横山勝英: 沖積河川の河口域における土砂動態と地形・底質変化に関する研究, 国土総合技術研究所資料, No.236, 111p. 2002.
- 18) 栗山善昭, 橋本孝治: 熊本県白川河口干潟における土砂収支, 港湾空港技術研究所資料, No.1074, 16p. 2004.
- 19) 辻本剛三, 山田文彦, 酒井大樹, 甲斐田秀樹, 柿木哲哉: フィルター層を有する人工海浜の岸沖断面地形の季節変動に関する研究, 海洋開発論文集, Vol.26, pp.1209-1214, 2010.

(2017.3.15 受付)

MORPHOLOGICAL CHANGES AND SEDIMENT DISCHARGE AT THE MOUTH OF SHIRAKAWA RIVER AFTER KUMAMOTO EARTHQUAKE

Gozo TSUJIMOTO, Takaomi HOKAMURA, Kengo TABATA, Hikaru OHTA, Sota NAKAJYO and Yasuhide TAKANO

The geomorphological changes of tidal flats adjacent to Shirakawa River mouth due to flush flood after earthquakes on April 14 and 16, 2016 were examined through field observation data. There was about 0.41m ground subsidence around field observation site. Therefore, the cross-shore bottom profiles could not return to the averaged profiles. The measured profiles were analyzed by the three parameters and the correlation among them was so high. The clinoform along the water-route propagated to off-shore approximately 150m during 2014 to 2016 after the earthquake. The estimated sediment discharge was $1.1 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{yr}/\text{km}^2$, which correspond to four times during 1978 to 1997.