有明海湾奥部における高潮の増幅特性について

田辺 智子¹・山城 賢²・島田 剛気³・
横田 雅紀⁴・木梨 行宏⁵・橋本 典明⁶

¹正会員 九州大学学術研究員 工学研究院 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)
E-mail: tanabe@civil.kyushu-u.ac.jp

²正会員 九州大学助教 工学研究院 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)
E-mail: yamashiro@civil.kyushu-u.ac.jp

³学生会員 九州大学大学院 工学府 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)
E-mail: 2TE13222W@s.kyushu-u.ac.jp

⁴正会員 九州大学助教 工学研究院 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)
E-mail: yokota@civil.kyushu-u.ac.jp

⁵正会員 株式会社建設技術研究所 (〒810-0041 福岡市中央区大名2-4-12)
E-mail: kinashi@ctie.co.jp

⁶フェロー 九州大学教授 工学研究院 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)
E-mail: hashimoto-n@civil.kyushu-u.ac.jp

有明海は、高潮の危険性が高い海域の一つであり、さらに将来的には温暖化による高潮リスクの増大が懸念されていることから、特に背後に低平地を有する湾奥部の沿岸では、高潮・高波に対する防災対策が重要である。本研究では有明海湾奥部の沿岸防災に資する知見を得ることを目的に、海岸堤防に沿った複数の地点で潮位観測を実施し、湾奥部の高潮の増幅特性等について検討した。加えて、非構造格子モデルFVCOMを用いて観測期間に來襲した台風1216号について高潮推算を行い、湾奥部の高潮増幅率をより詳細に検討した。台風1216号のように有明海の西側を台風が北上すると、湾奥部で高潮が大きく増幅される場合があることが、潮位観測および高潮推算結果より具体的に示された。

Key Words : storm surge, Ariake Sea, field observation, numerical simulation

1. はじめに

有明海は、高潮の危険性が高い海域の一つであり、特に背後に低平地を有する湾奥部の沿岸では、高潮・高波に対する防災対策が重要である^{1),2),3)}。将来的に温暖化による海面上昇や台風の強大化に伴い、高潮リスクの増大が懸念されていることから、沿岸防災の重要性はさらに増している⁴⁾。現在、有明海では幾つかの地点で潮位の連続観測が行われているが、海岸堤防の前面、つまり、水際において高潮を観測した例は見当たらない。そこで、著者らは有明海湾奥部の沿岸防災に資する知見を得ることを目的に、水際線における高潮の実態を把握するため、海岸堤防に沿った複数の地点で潮位観測を実施した。観測期間中には複数の台風が九州に接近し、そのうちの幾つかの台風で高潮が発生した。本研究ではそれらの観測データから有明海湾奥部の高潮の増幅特性等について検

討した。加えて、非構造格子モデルであるFVCOM⁵⁾を用いて観測した高潮の再現計算を行い、湾奥部の高潮増幅率をより詳細に検討した。

2. 潮位観測

(1) 観測内容

潮位観測は、図-1に示す有明海湾奥部の佐賀県沿岸の3地点(川副, 久保田, 浜)に自記水位計(RT510-W: CIIサイエンスシステム製)を設置し、2012年7月18日から2012年10月24日まで連続して行った。サンプリング間隔は1分である。写真-1に例として浜における水位計の設置状況を示す。護岸パラペットの上にロガーを設置し、センサーは塩ビ管で保護して消波ブロックの法先に設置した。

図-1 気象・海象観測地点

写真-1 水位計設置状況 (浜)

(2) その他のデータ

観測により取得したデータの他に、図-1に示す気象庁の近隣の観測地点における気象・海象データ及び国土交通省九州地方整備局による潮位観測データを収集し、検討に利用した。

(3) 観測期間中に来襲した台風の概略

観測期間中に九州地方に来襲した台風は、台風1210号(8月上旬)、台風1214、1215号(8月下旬)、台風1216号(9月中旬)であった。それぞれの台風経路を図-2に示す。4台風が有明海に最接近したときの中心気圧は、940~980hPa程度であり、最も有明海の近くを通過した台風1216号の中心気圧が最も低く940hPa程度であった。また、台風1216号により長崎県や沖縄県で高潮による道路・家屋への浸水被害が生じている。

図-2 台風経路図

図-3 観測結果

3. 高潮の増幅特性

(1) 潮位偏差の推定

図-3に、潮位の観測結果を示す。図中に赤枠で各台風の来襲期間を示している。潮位は東京湾中等潮位(T.P.)を基準としている。なお、センサーが干出している時間帯のデータは取得できていない。台風1216号来襲時に高潮が生じていることが見て取れる。観測した潮位から潮位偏差を推定するため、気象庁による大浦の

図-4 大浦と観測地点の潮位の相関(静穏時)

観測結果を利用した。まず、観測期間全体のうち、大浦の潮位偏差が $\pm 5\text{cm}$ 以下であった期間を静穏時とみなして抽出し、3地点の観測潮位と大浦の天文潮位の関係を調べた。図-4に大浦と各観測地点の潮位の相関を示す。図に示すように、静穏時については、大浦と他の観測地点での明確な潮位の相関関係が得られる。ただし、川副と久保田については、観測期間中に潮位観測結果にずれが生じたため、期間を分けて潮位偏差の推定に用いた。次に、この相関関係をもとに、3地点での天文潮位を荒天時も含めて推定した。最終的に、観測潮位から推定天文潮位を差し引いて観測点における潮位偏差を推定した。図-5に推定した潮位偏差を示す。なお、図中の水平に引いた2本のラインは天文潮位の推定誤差に関する標準偏差($\pm \sigma$)を示している。図より、台風1216号が来襲した9月16日から18日頃に、明確な潮位偏差が生じており、この台風による偏差は約1mと大きかったことが推定された。また、台風1215号来襲時にも50cm程度の偏差が生じていた。

(2) 有明海の高潮の増幅特性

明確に潮位偏差が生じた9月17日について、有明海湾奥部における高潮特性について検討する。図-6に9月17日における、気圧、風向、風速、そして推定潮位偏差と気象庁による大浦の潮位偏差の時系列データを示す。気圧の低下と最大偏差の起時には差があり、湾奥の

図-5 推定潮位偏差

最大偏差は、南寄りの強風による吹き寄せによって生じていることがわかる。偏差を比較すると、湾奥では最大

偏差が大浦に比べて大きく増大していた。図-7に観測を行った浜、久保田、川副に加え、大浦、熊本、八代、三角、口之津について、外海ではあるが湾口に比較的近い苓北（図-1参照）に対する最大高潮偏差の増幅率と最大偏差の起時の差を示す。横軸は、それぞれ苓北から各地点までのおよそその直線距離に対応している。最大偏差は湾奥に向かうにつれ大きくなり、湾奥の水際線での潮位偏差は苓北の約3倍、大浦の1.4倍以上に増幅していることがわかる。三角から湾奥に向かうにつれ増幅率が比例的に増大している点は興味深い。また、観測点での最大偏差の起時をみると、大浦とはほぼ同じであったが、苓北とは約50分の差があり、高潮がおおよそ湾口から湾奥へと伝搬していく様子が見て取れる。

4. 高潮推算

(1) 高潮推算の概略

2012年に九州地方に接近した台風のうち最も大きな高潮が生じた台風1216号を対象とし、高潮推算を行った。高潮推算では、まず、台風モデルにより外力（入力値）となる風場と気圧場を推算した。台風モデルはMyersの式による気圧分布と経験的な低減係数により風場を表現した経験的台風モデルであり、気象庁のベストトラックデータおよび中心気圧データをもとに、台風の気圧場および風場を1km間隔で推算した。次いで、その外力をもとにFVCOM（Finite Volume Coastal Ocean Model）⁵⁾により高潮を推算した。FVCOMとは、Massachusetts Dartmouth大学のC.ChenとH.Liuにより開発された非構造格子と三次元有限体積法を用いた海洋流動モデルである。非構造格子を採用しているため、従来の構造格子によるモデルと違い、外洋を表現する数十km規模の格子幅から複雑な地形や海岸構造物などを表現するための数十m規模の格子幅まで、大きさが異なる可変格子を設定でき、また、複雑な海岸線を詳細に表現できるという利点がある。さらに、有限体積法が適用されていることから、シンプルな離散化コードと高い計算効率も有している。

(2) 計算条件

図-8に計算格子を示す。計算の対象領域は、台風1216号の経路を考慮して設定した。海岸線は国土数値情報データをもとに設定しており、計算格子における水深データは日本水路協会の海底地形データをもとに各格子点に内挿補間して与えた。計算格子は非構造格子で、格子間隔は開境界の最大格子を約17kmとし、徐々に格子間隔が狭まるように設定して、内湾の最小格子で約0.8kmとした。なお、有明海・八代海の湾内部では、基本水準面上平均海面の高さへの補正を行っている。

FVCOMにおける計算条件は有明海で高潮の再現計算

を行った木梨ら(2012)⁶⁾に従った。主な計算条件を表-1に示す。高潮推算の計算時間は2012/9/16 0:00～9/17 21:00までの45時間とした。なお、入力値（風場、気圧場）はFVCOM内で計算時間間隔に合わせて線形補間されている。

図-6 時系列データ

図-7 苓北と観測点との増幅率と最大偏差の起時の差

図-8 高潮推算の対象領域と計算格子

表-1 FVCOMの主な計算条件

水平格子間隔	0.8~17 km
鉛直方向層数	10 層
海水密度	一定 (20 °, 30 psu)
開境界条件	水位境界(潮汐無し)
気象場の推算	台風モデル (入力時間間隔 60 分)
計算時間間隔	1.0 秒

5. 湾奥部沿岸における増幅特性

図-9に高潮推算結果の一例として大浦と久保田の高潮偏差の時系列について推算結果と観測値の比較を示す。推算結果は概ね観測結果を再現できているが、最大偏差の大きさや起時に多少の差が生じている。これは台風モデルを使用していることから、風と気圧の推算精度に限度があるためと思われる。図-10に気象庁観測所3地点（三角、大浦、口之津）および著者が現地観測を行った有明海湾奥部の堤防前面3地点（川副、久保田、浜）における最大高潮偏差の比較を示す。有明海湾奥部の久保田で推算値が若干過大となったが、他の地点については最大高潮偏差の推算値は観測値とほぼ一致した。

図-11に最大高潮偏差の平面分布および大浦に対する高潮偏差の増幅率を示す。図-10に示したように有明海湾奥部における推算結果は観測結果と比較して多少過大であり、ここでは増幅率の分布形状を把握することを目的に増幅率が最大となる久保田で推算結果と観測結果の増幅率が一致するように、全体を一定の割合で減少させて補正した。補正後の増幅率の分布形状は観測結果を良く表しており、湾奥部沿岸での高潮の増幅特性を妥当に推定できているものと思われる。図より、湾奥部沿岸における高潮増幅率の分布形状は湾奥の海岸線の形状と比較的似ており、湾奥部の中でも特に入江状に入り込んだ最奥部の久保田で最も増幅率が高く、久保田から川副に至る海側に弓状にせり出した海岸沿いでは増幅率が低くなっている。

6. おわりに

有明海湾奥部の沿岸防災に資する知見を得ることを目的に、台風期に有明海湾奥部の水際において海岸堤防に沿った複数の地点で潮位観測を実施した。さらに、非構造格子モデルFVCOMを用いて台風1216号を対象に高潮の再現計算を行い、湾奥部の高潮増幅率をより詳細に検討した。主要な結論を以下に示す。

- (1) 台風1216号の来襲時、湾奥部の水際における高潮（潮位偏差）は、外海である苓北の約3倍、湾奥部付近の大浦の1.4倍以上に増大した。
- (2) 有明海の西側を北上する台風により、高潮が湾口

図-9 高潮偏差の時系列変化（大浦，久保田）

図-10 最大高潮偏差（観測値・推算値）の比較

図-11 有明海湾奥部における沿岸部の最大高潮偏差

から湾奥へ伝搬していくことが確認された。

(3)高潮推算の結果、湾奥部の沿岸に沿った詳細な高潮の増幅率の分布を得た。

以上、潮位の観測結果より、有明海の西側を北上する台風によって、湾奥部で高潮（潮位偏差）が大きく増幅される場合があることを具体的に示した。ただし、今回の検討結果は台風1216号に限られたものであるため、例えば、有明海付近を東進する台風など経路が異なる台風による湾奥の増幅率についてさらなる検討が必要である。

謝辞：国土交通省九州地方整備局より潮位観測データの提供を受けました。また、本研究は環境省環境研究総合推進費（S-8-2(2)亜熱帯化先進地九州における水・土砂災害適応策の研究）および科学研究費補助金の助成を受けて行われたものです。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 牧野稔・松村和雄：東京湾、有明海、八代海および鹿児島湾の高潮について、日本建築学会構造系論文報告集，第432号，pp.91-95，1992.
- 2) 藤本昌宣：有明海における波高と潮位偏差について，佐賀大農彙，77，pp.65-73，1994.
- 3) Ariestides Kadinge Torry Dundu : A STORM SURGE ANALYSIS IN THE ARIAKE SEA FOR THE COASTAL HAZARD MANAGEMENT IN SAGA LOWLAND, 2012.
- 4) 木梨行宏・山城賢・姫野慎太郎・横田雅紀・橋本典明：MRI - AGCM3.2S により得られた将来気候データに基づく有明海での将来の高潮に関する検討，海岸工学論文集，pp.201-205，2012.
- 5) Chen, C. et al. : An unstructured, finite-volume, three dimensional, primitive equation ocean model : application to coastal ocean and estuaries. J. Atm.&Oceanic Tec., 20, pp.159-186, 2003.
- 6) 木梨行宏・山城 賢・姫野慎太郎・中野俊夫・横田雅紀・橋本典明：高潮推算における非構造格子モデルの適用性に関する基礎的検討，土木学会論文集 B3（海洋開発），Vol. 68, pp.858-863, 2012.

CHARACTERISTICS OF STORM SURGES ALONG THE COAST OF INNERMOST AREA IN THE ARIAKE SEA

Tomoko TANABE, Masaru YAMASHIRO, Goki SHIMADA,
Masaki YOKOTA, Yukihiro KINASHI, Noriaki HASHIMOTO

Storm surge disasters have frequently occurred at the Ariake Sea coasts in the past. Besides, the innermost area of the Ariake Sea has also large lowlands behind the coastlines. Therefore, once severe storm surge occurs at the innermost area of the Ariake Sea, its damage might be very serious.

In this study, to understand the characteristics of storm surges along the coast of innermost area, the tidal changes in front of seawalls along 3 different areas were measured for about three months in the summer of 2012. Several typhoons passed through the west sea area of the Kyushu Island during the observation and one of the typhoons caused a relatively large storm surge in the Ariake Sea.

In addition, to investigate the amplification of storm surge in detail, a storm surge caused by typhoon 1216 was reproduced by a numerical simulation using FVCOM(Finite Volume Coastal Ocean Model). FVCOM was developed by Chen et al. (2003) with unstructured grid system so as to compute tidal currents in complicated inner bays with high accuracy.

Main findings obtained from observational results and numerical results are as follows:

- (1) In the case of T1216, the maximum storm surge at the coast around innermost area increased up to 3times of the maximum storm surge near the mouth of the bay.
- (2) The detailed spatial distribution of the amplification factor of storm surge along the coastline in innermost area was clarified.