



神戸大学深江キャンパスで観測した2018 年台風21号 (T1821, Jebi) による高潮

林, 美鶴
矢野, 吉治
根元, 和宏

(Citation)

神戸大学大学院海事科学研究科紀要, 19:[1]-[7]

(Issue Date)

2022-07

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/81013478>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/81013478>



神戸大学深江キャンパスで観測した2018年台風21号 (T1821, Jebi) による高潮 Storm Surge Disaster Caused by Typhoon Jebi, T1821, at Fukae Harbor in Japan

林美鶴^{1,2}、矢野吉治³、根元和宏⁴

Mitsuru Hayashi, Yoshiji YANO and Kazuhiro NEMOTO

¹ 神戸大学内海域環境教育研究センター、² 神戸大学大学院海事科学研究科

³ 神戸大学名誉教授、⁴ 気象庁

(2022年6月28日)

Abstract

The storm surge disaster caused by Typhoon Jebi, T1821 was happened at Fukae Harbor in Kobe University on 4 September, 2018. This paper is intended to clarify the facts of the storm surge in Fukae Harbor based on recorded in-situ data, and coastal hazards are discussed [4].

1. はじめに

2018年9月4日に台風21号 (T1821, Jebi) は、Fig.1の経路で日本を直撃した[1]。国交省近畿地方整備局は「大阪湾港湾等における高潮対策検討委員会」(以後、委員会)を設置し、被害状況をまとめた[2]。また日本土木学会も現地調査などを行い、被害状況をまとめている[3]。大阪湾奥には気象庁により複数の検潮儀が設置されており、Fig.2(a)に示す過去最高潮位が記録された。潮位はいずれも東京湾平均海面、すなわち標高を基準とする値である。神戸大学深江キャンパス内の港(以降、深江港)にも検潮儀が設置されており(委員会の議論には反映されていない)、14:16~14:18に最高潮位305cm、予測天文潮位との偏差254cmを記録した[4]。尚、Fig.2(a)の背景は神戸市による津波ハザードマップ[5]である。

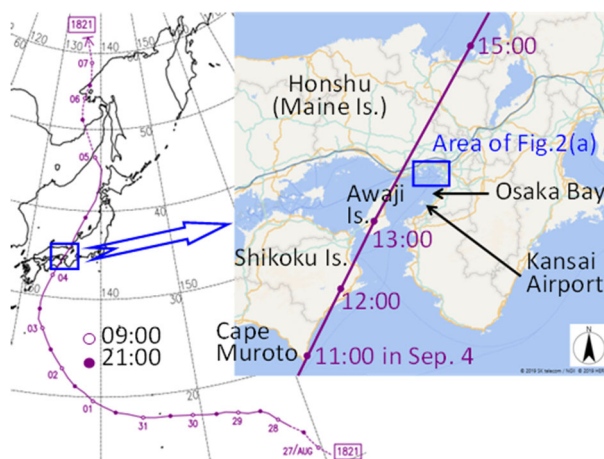
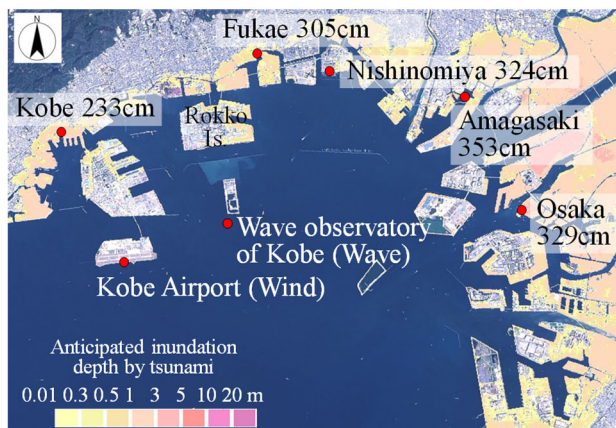


Fig.1 Track of Typhoon Jebi. The enlarged track was illustrated based on the location table [1].

深江港は大阪湾の奥にあり、埋め立て地の間の水路奥に位置する。また深江港は、Fig.2 (b)に示す高橋川の河口に位置し、Fig.2 (c)に示す通り防潮堤で囲まれ、2カ所の防潮扉がある。港内には練習船深江丸が停泊している。高潮により防潮堤外の建物1階は浸水して多大な被害が生じ、この状況の撮影や測地も行った。高潮は高橋川を俎上して、流域が浸水した。高潮当日、深江丸から断続的に写真と動画を撮影した。いくつかの動画はサンテレビのニュース番組で放送され、YouTubeで視聴できる[6]。深江港では、潮位をデジタルフース型検潮儀で1分毎に、気圧を1分毎に測定している。また港外の海底上50cmで、多項目水質計により水位や水質を5分毎に測定している。大阪湾奥では、気象庁のアメダスにより神戸空港などで風向や風速が測定されており、ウェブサイトから入手できる[7]。国土交通省の神戸波浪観測所では波高を測定しており(確定値の掲載には時間差がある)、高潮時の20分毎の有義波高のグラフが委員会報告書の資料[8]に掲載されている。著者らは、これら画像データと数値データを元に詳細な状況報告を行い、潜在的な高潮リスクやハザードマップとの比較も議論した[4]。

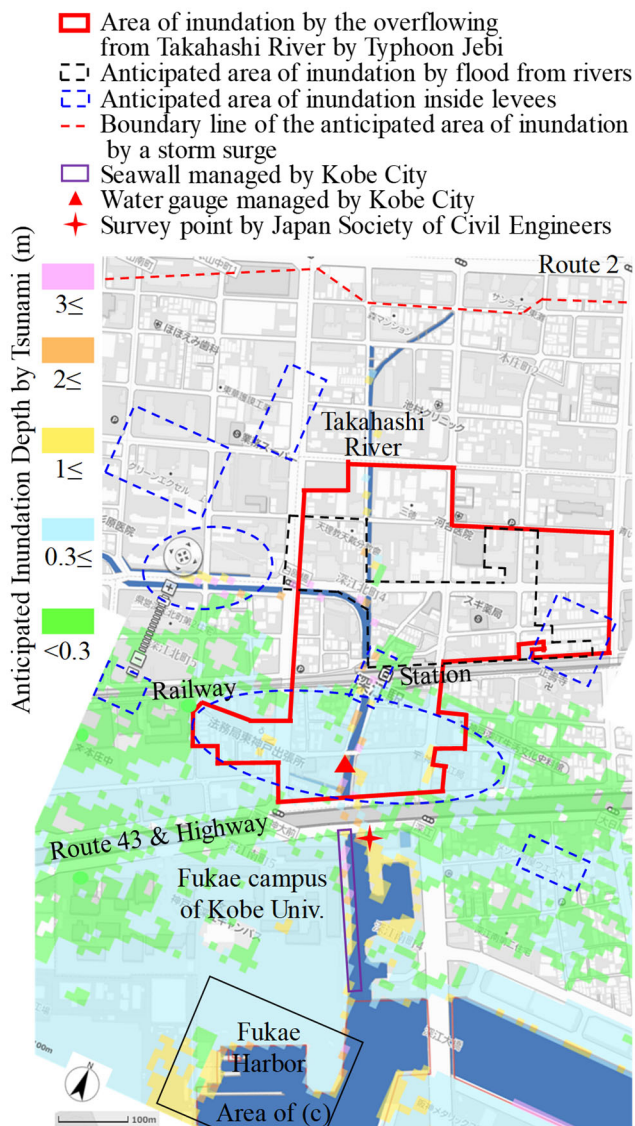
本稿は日本語版として、これを要約・加筆した。



(a) Fukae and other tide stations, and the wind and the wave observatories in the inner part of Osaka Bay. Color on the land indicates the anticipated inundation depth by the greatest tsunami^[5].



(c) Seawall, survey points and so on around Fukae harbor.



(b) Area of inundation of Takahashi River basin and Fukae Harbor, and level measurement positions^{[2][5][11]}.

Fig.2 Locations in the study area.

2. 高潮時の状況

Fig.3 に、潮位偏差 (= 実測 - 予測) が大きかった 10~18 時の実測潮位と予測潮位(a)、潮位偏差と気圧(b)、港外水位、これと検潮潮位との差 (内外差 = 港外 - 検潮)、及び有義波高 (c)、前 10 分平均風向・風速と最大瞬間風向・風速(d)を示す。高潮は、風向が ENE から WSW へ時計回りに変化する中で、最低気圧や最高風速よりも後に発生している。深江港は大阪湾に対して南側が開けていることから、南寄りの風による大阪湾への海水の吹き寄せと外洋から伝播した波浪が、風向が南寄りになると共に一気に流れ込んだものと考えられる。

神戸市は、高橋川に深江橋水位計を設置している (Fig.2(b))。ここでは 14:15 に 330cm を記録した [2]。また日本土木学会は高橋川流域で浸水高を計測し、Fig.2(b)に示す地点について 332cm を報告し

た[3]。これらと比較して、深江港内の建物内での水位の痕跡 333cm や港外最高水位 336cm は妥当な値である。この港外最高水位は、同時刻に検潮儀で測定した潮位よりも 36cm 高く（最大内外差）、港外での最大潮位偏差は 285cm となる。内外差の原因は、波浪だと考えられる。Fig.4(a)は最高潮位に達する前の 14:13 に撮影された港外の様子である。港外には波長約 50m、動画から周期数秒の波浪が南から伝播している様子が伺える。防波堤内には漂流物が散乱しており、これ以前に海水が流入していたことが分かる。内外差が波浪によると考えると、これは振幅に相当するので、最大波高は 72cm となる。港外波浪の様子から、これは十分妥当な値である。波浪が潮位データに記録されなかった理由として、検潮儀の導水管が高周波数成分のフィルターの役割を果たし、波浪による水位変動が伝播しなかった可能性が考えられる。

Fig.2(b)に示した A~E の 5 カ所で、地面からの防潮堤の天端高 (Cope Level) を測定した。Table 1 に、各場所の測地データを示す。深江港の地面の標高は 1.9~2.3 m で、変動幅がある[9]。標高は建屋から深江丸係留岸壁に向けて低くなっており、係留岸壁の標高は 200 cm で、南に向けてやや低くなる。Fig.4(a)の海水が乗り越えている防波堤 (Fig.2(c)の A 地点)の標高は 410 cm で、波浪はこれを優に超えている。すなわち、高潮に波浪が加わった港外最高水位を 1m 程度上回る波が、防波堤を越波したことを意味する。これは、防波堤に波浪が打ち上げることで生じた高波で、消波や波返しの構造がない直立した防波堤のため発生したと考えられる。Fig.4(b)は、最高潮位時の深江港内である。全てが海面で覆われているが、カッターやクルーザーがある場所は岸壁で、小型船は完全に浮いて漂流している。潮位が岸壁の標高に達したのは 13:56、完全に下回ったのは 15:03 で、約 1 時間に渡って岸壁は水没していた。

標高に換算した天端高と潮位との差から、高潮に対する防潮堤の余剰が求められる。最高潮位時の余剰は約 40~60 cm で、画像データと定性的に一致している。Fig.2(c)の D 地点における地面 (標高 2.1m) を基準とした各水位の比較を Fig.5(a)に示す。最高潮位は 95 cm で、防潮堤の余剰は 46 cm である。波浪が加わった港外最高水位は 126cm で、15 cm の余剰がある。この結果は、高潮と波浪だけでは防潮堤を越流・越波しなかったことを意味する。実際には Fig.4(b)の通り、D 地点と同じ防波堤を海水は越えており、これは打ち上げ波による越波だと考えられる。

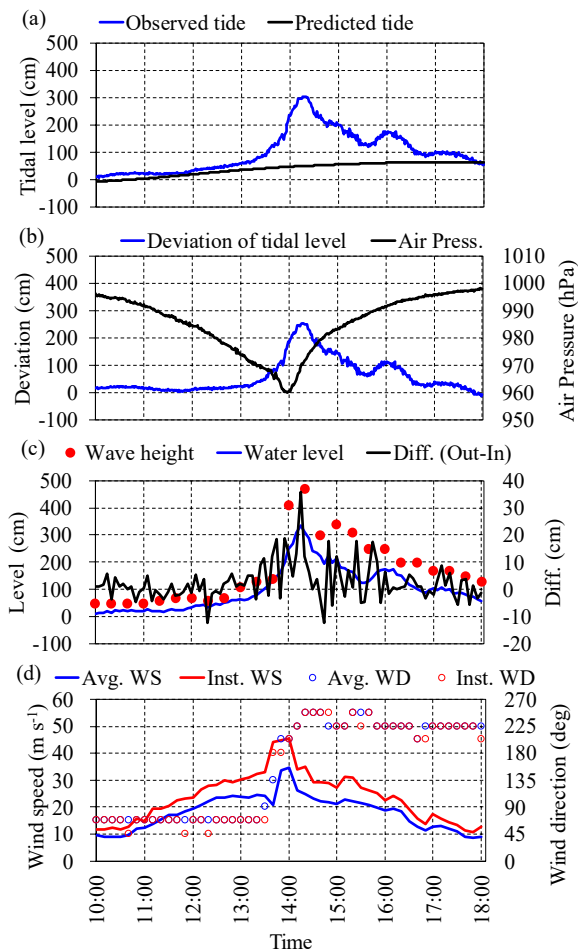


Fig.3 Time series of the observed and the predicted tidal level (a), the deviation of tidal level (observation - prediction and the atmospheric pressure (b), the outside water level, the difference between the outside and the inside (water level - tidal level), and the wave height (c), the average and the maximum instantaneous wind direction and speed (d) for 10:00-18:00 on 4 September.



(a) Mooring pier of Fukae Maru and the outside of Fukae harbor at 14:13.

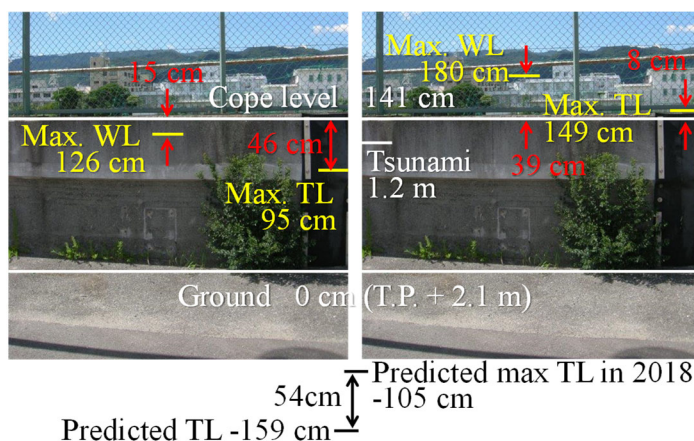
(b) Inside of Fukae harbor in maximum tidal level.

Fig.4 Storm surge in Fukae Harbor caused by Typhoon Jebi (T1821) in 4 September, 2018.

3. 潜在的なリスク

深江キャンパス東側の高橋川沿いの防潮堤の一部 (Fig.2(b)) は兵庫県が所有し、神戸市が管理している。それよりも南側と、Fig.2(c)に示す深江港周辺は大学の敷地である。大学が管理する防潮堤は、阪神淡路大震災の復旧工事で1996年に整備された。高さは、港外に面した南側防潮堤 (Aの面)、及び高橋川沿いは K.P.+5.1 m (Kobe Peil: 神戸港基準面)、深江港内では K.P.+4.6 m に設計された。K.P.=T.P.-0.89 m なので、標高に換算すると A は 4.21 m、B~E は 3.71 m である。Table 1 に示す通り防波堤天端高は、設計よりも 20 cm 以上低くなっている箇所がある。防潮堤は阪神淡路大震災の復旧工事で1996年に整備されたが、大学の所有地であるため、2014~2016年にかけて神戸市が行った高潮対策事業 (南海トラフ地震による津波予測値と地盤沈下を考慮) による嵩上げは行われていない。設計通りの高さが維持されていない事、高潮対策事業の対象外だった事も、越波の一因と言える。

神戸市が管理する防潮堤は、2014~2016年にかけて神戸港高潮対策事業により嵩上げされた。これには、政府が東北地方太平洋沖地震以降に見直した南海トラフ地震による津波予測値 (いわゆる新想定) が反映され、地盤沈下も考慮して、高さは K.P.+4.8 m (標高 3.91 m) に設定された。一方で、神戸港高潮対策事業による嵩上げ量の設定は、高橋川沿い南側の大学所有の防潮堤よりも 0.3 m 低く、実際に天端高には 68 cm の段差がある。段差も設計とは約 0.4 m の差があり、設計よりも北側が 0.2 m 低



(a) This case

(b) Spring tide

Fig.5 Comparison of levels based on the ground in D of Fig.2(c). (b) means that the storm surge occurred under the greatest spring tide in 2018. Tsunami means the anticipated greatest level in Higashinada caused by the Nankai Trough earthquake [15].

く、南側が 0.2 m 高い。このように、防潮堤は設計時から高さが増えるため、防災訓練などの機会に定期的な測地を行うことが望ましい。

高潮については、日本沿岸は夏～秋に平均潮位が高くなるため潜在的にリスクを持っている。9月4日は大潮ではなく、Jebi 通過時は満潮時刻ではなかった。当日の満潮は 17 時ごろで、予測潮位は高潮発生時より 14 cm 高い。よって高潮が満潮時刻に起こっていた場合、風浪が加わると防潮堤の余剰はほとんどなかったと考えられる。しかし潮位は防潮堤を越えないため越流は起こらず、被災状況は大きくは変わらなかったと思われる。

一方、2018 年の深江港の予測最高潮位は高潮発生 7 日後の 9 月 11 日で、高潮発生時の予測潮位より 54 cm 高い。これを適用した場合は Fig.5(b) となり、潮位は防潮堤を 8 cm 越えて越流する。今回と同様の時間変化を仮定すると、越流は約 8 分間継続する。深江港の岸壁上の最大浸水体積はおおよそ 11,000m³ と推定され、これが 13:56 の浸水開始から最高潮位となる 14:16 までの 20 分間に流入したので、この間の流量は約 9.2 m³/s と推定される。よって深江港に流入した海水が 8 分間越流して防波堤内へと輸送されると、その量は約 4,400 m³ との計算になる。これが深江港北側のグラウンドで留まると仮定すると浸水高は約 18 cm、浸水高 1 cm で広がると仮定すると 440,000 m² (約 660m 四方) の範囲で浸水する計算となる。

今回は風による吹き寄せが高潮発生に大きく寄与したが、水位は気圧低下による海面の吸い上げでも上昇する。気圧が 1 hPa 低下すると海面は 1 cm 引き上げられるため、今回の高潮に対する防波堤の余剰は 46 hPa の気圧低下に相当する。これを最高潮位時の気圧(970.8 hPa)から引くと約 920 hPa で、これは Jebi が太平洋上にある時の最低気圧 915 hPa 並みである。この勢力で上陸すると、海面の吸い上げだけで高潮による越流が起こる計算になる。

これらは机上の計算であるが、地球温暖化により台風の強度が増す可能性が示されている[10][11]。中心気圧の低下、海面水温の上昇による勢力を維持したままの上陸、風速の増大による吹き寄せ効果の増強と波浪の発達など、高潮発生リスクは高まる方向にある。今回の高潮により神戸市の高潮対策事業は見直される可能性がある。新想定津波も考慮して、大学が管理する防潮堤の嵩上げについて検討すべきである。

4. ハザードマップとの比較

Fig.2(b)に高橋川流域の浸水区域[12]を示す。高潮が発生した時点で、神戸市の高潮ハザードマップは公開されていなかった。Fig.2(b)は津波ハザードマップ(最大クラスの津波による浸水想定区域)で、これに河川からの洪水による浸水想定区域と、排水能力を超えた内水氾濫による浸水想定区域を重ねた[5]。高潮浸水区域の南側区域(線路より南)は内水氾濫想定区域とよく一致し、津波浸水想定区域にも含まれる。高潮浸水区域の北側区域は洪水想定区域とよく一致しているが、高潮浸水区域の方が広い。北側区域では高橋川沿いの一部に津波浸水想定区域が散見されるが、周辺への広がりはない。この様に、想定される災害は異なるものの、洪水や津波のハザードマップは高橋川からの越流の広がりを概ね表現している。浸水想定区域が狭いのは、水量の想定による違いだと考えられる。住民は、水害の視点で複数のハザードマップを確認し、1 つでも被災の可能性があれば他の水害に対してもリスクがあると理解すべきである。

兵庫県は Jebi による高潮を受けて、2019 年 9 月に高潮浸水想定区域図を公開した[13]。これは最大

Table 1 Various level at A-E on the seawall.

Point	E	D	C	B	A
Location	Inside	Northern pier	Mooring pier	Mooring pier	Southern seawall
Elevation of ground (m)	2.2	2.1	2.0	2.0	2.0
CL from ground (cm)	143	141	147	163	210
Height in reserve of seawall (cm)	58	46	42	58	105
Diff. from design level (cm)	-8	-20	-24	-8	-11

規模の台風と満潮を想定しており、東灘区の予測最高潮位は 5m である。浸水想定には波浪と河川洪水も考慮して、最大規模の高潮が想定されている。その結果 Fig.2(b)に示す通り、国道 2 号線のやや南よりも海側の区域は全て浸水想定区域となっている。この想定は、防潮堤が機能する・しないに関わりなく、防潮堤等の施設では防ぐことのできない規模、とされている[14]。一方、委員会の神戸港部会は、「津波対策（嵩上げ、補強）が高潮に対しても一定の効果を発揮したことから、引き続き整備を進める」と述べている[2]。兵庫県による南海トラフ地震による東灘区で想定される最高津波水位は 3.3 m で[15]、Fig.8 に示す通り Jebi による高潮はこれを下回っていた。しかし高潮の予測最高潮位は、津波の想定値を上回った。これは、台風に伴う高潮は津波よりも深刻で、津波対策では防げない可能性を示唆している。

5. まとめ

深江港で 2018 年 9 月 4 日に発生した台風 Jebi (T1821)による高潮の実相を、画像・数値・測地データにより明らかにした。風向が南寄りになって海水が一気に流れ込んだ事により高潮が発生し、14:16～14:18 に最高潮位 305cm、予測天文潮位との偏差 254cm を記録した。約 1 時間岸壁が浸水したが、高潮による防潮堤の越流は発生しなかった。高潮に最高約 70 cm 程度の波浪が重なり、これが防潮堤に打ち上げることで防波堤内に越波した。港外に面した最も天端高が高い防潮堤では 1m を上回る打ち上げの発生が視認され、消波や波返しの構造がない直立防潮堤の問題点が明らかとなった。深江港内の防潮堤の余剰は、高潮に対しては 46 cm あったが、波浪が加わると 15 cm で、防潮堤への打ち上げによって越波した。防波堤天端高が設計よりも 20 cm 以上低くなっている箇所があり、また神戸市による高潮対策事業の対象外でもあって、これらが越波の一因でもあると言える。

兵庫県が高潮後に高潮浸水想定区域図を公開したが、最大規模の高潮は、南海トラフ地震による津波よりも高く想定されており、防潮堤等の施設では防ぐことのできない規模とされている。日本沿岸は台風が発生する夏～秋に平均潮位が高くなるため、潜在的な高潮リスクを持っており、地球温暖化による台風の強化はこれを高めている。行政は津波対策で高潮対策を兼ねる方向にあるが、台風に伴う高潮は津波よりも深刻で、津波対策では防げない可能性がある。

参考文献

- [1] 気象庁、台風経路図、https://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/typhoon/route_map/ (2020.2 確認)。
- [2] 大阪湾港湾等における高潮対策検討委員会、最終とりまとめ (2019)。
- [3] N. Mori, T. Yasuda, T. Arikawa, T. Kataoka, S. Nakajo, K. Suzuki, Y. Yamanaka and A. Webb, 2018 Typhoon Jebi post-event survey of coastal damage in the Kansai region, Japan, Coastal Engineering Journal, 61(3), pp.278-294 (2019). <https://doi.org/10.1080/21664250.2019.1619253>
- [4] M. HAYASHI, Y. YANO, N. NOZAKI and K. NEMOTO, Storm Surge Disaster Caused by Typhoon Jebi, T1821, at Fukae Harbor in Japan, Transactions of Navigation, 6(1) (2021). https://doi.org/10.18949/jintransnavi.6.1_19
- [5] 神戸市、神戸市ハザードマップ、https://www.city.kobe.lg.jp/safety/prevention/map/tokubetugou_new.html (2020.2 確認)。
- [6] YouTube、サンテレビ「カメラがとらえた一部始終。台風 21 号の高潮を船上から撮影」、<https://www.youtube.com/watch?v=Glofj3RMUbs> (2020.2 確認)。
- [7] 気象庁、過去データ検索、<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php> (2020.2 確認)。
- [8] 大阪湾港湾等における高潮対策検討委員会、最終とりまとめ参考資料 (2019)。
- [9] 国土地理院、電子国土基本図 (地図情報)、https://www.gsi.go.jp/kibanjoho/mapinfo_what.html

(2020.2 確認)

- [10] K. Yoshida, M. Sugi, R. Mizuta, H. Murakami and M. Ishii, Future Changes in Tropical Cyclone Activity in High-Resolution Large-Ensemble Simulations, *Geophysical Research Letters*, 44(19), pp.9910-9917 (2017).
<https://doi.org/10.1002/2017GL075058>
- [11] Y. Yamada, M. Satoh, M. Sugi, C. Kodama, A. T. Noda, M. Nakano and T. Nasuno, Response of Tropical Cyclone Activity and Structure to Global Warming in a High-Resolution Global Nonhydrostatic Model, *Journal of Climate*, 30, pp.9703-9724 (2017). <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0068.1>
- [12] 兵庫県、大阪湾港湾等における高潮対策検討委員会尼崎西宮芦屋港部会とりまとめ、p13 (2019).
- [13] 兵庫県、高潮浸水想定区域図、<https://web.pref.hyogo.lg.jp/ks17/takashioshinso/takashioshinso.html> (2020.2 確認)。
- [14] 兵庫県、兵庫県大阪湾沿岸高潮浸水想定区域図について（尼崎市、西宮市、芦屋市、神戸市沿岸）説明資料、pp.1 (2019)。
- [15] 神戸市、兵庫県による南海トラフ巨大地震津波浸水想定に関する神戸市域の区別データ、<https://www.city.kobe.lg.jp/a46152/bosai/prevention/preparation/guide/> (2021.3 確認)。

謝辞

本研究は、九州大学応用力学研究所の共同利用研究の助成により実施しました。

本研究の実施にあたり、神戸大学大学院海事科学研究科施設担当専門職員石倉寛章氏には、深江港防潮堤に関する以下の詳細な情報を収集していただきました。心よりお礼申し上げます。