

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題	2019年9月台風15号による神奈川・千葉・茨城の高波被害および東京湾の波浪追算
Title	INVESTIGATION OF HIGH WAVE DAMAGE CAUSED BY 2019 TYPHOON FAXAI IN KANTO REGION AND WAVE HINDCAST IN TOKYO BAY
著者	高木泰士, Md Rezuanul ISLAM, Le Tuan ANH, 高橋篤平, 杉生高行, 古川郁貴
Authors	Hiroshi TAKAGI, Md Rezuanul ISLAM, Le Tuan ANH, Atsuhei TAKAHASHI, Takayuki SUGIU, Fumitaka FURUKAWA
出典	土木学会論文集B3 (海洋開発), Vol. 76, No. 1, pp. 12-21
Citation	Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B3 (Ocean Engineering), Vol. 76, No. 1, pp. 12-21
発行日 / Pub. date	2020, 2
権利情報 / Copyright	本著作物の著作権は土木学会に帰属します。 (c) 2020 Japan Society of Civil Engineers.

# 2019年9月台風15号による 神奈川・千葉・茨城の高波被害および 東京湾の波浪追算

高木 泰士<sup>1</sup>・Md Rezuhanul ISLAM<sup>2</sup>・Le Tuan ANH<sup>3</sup>・  
高橋 篤平<sup>4</sup>・杉生 高行<sup>5</sup>・古川 郁貴<sup>6</sup>

<sup>1</sup>正会員 東京工業大学准教授 環境・社会理工学院 (〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1)  
E-mail: takagi@ide.titech.ac.jp

<sup>2</sup>東京工業大学 環境・社会理工学院博士課程 (〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1)  
E-mail: islam.m.ac@m.titech.ac.jp

<sup>3</sup>東京工業大学 環境・社会理工学院博士課程 (〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1)  
E-mail: letuananh.aa@m.titech.ac.jp

<sup>4</sup>東京工業大学 環境・社会理工学院修士課程 (〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1)  
E-mail: takahashi.a.as@m.titech.ac.jp

<sup>5</sup>東京工業大学 環境・社会理工学院修士課程 (〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1)  
E-mail: sugiu.t.aa@m.titech.ac.jp

<sup>6</sup>東京工業大学 環境・社会理工学院修士課程 (〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1)  
E-mail: furukawa.f.aa@m.titech.ac.jp

2019年9月9日に東京湾を直撃した台風15号の調査結果を速報する。神奈川では相模湾側で大きな高波被害は生じていなかったが、東京湾では直立護岸を乗り越える越波で被害が生じていた。千葉では九十九里浜ビーチ内の施設が被害を受けていた以外、目立った高波被害はなかった。一方、強風被害は激甚で、屋根の飛散や電柱の折損など各地で被害が生じていた。茨城でも高波被害は見かけなかったが、防波堤が堅固であることや、震災後の堤防改修が強靱化に寄与している。波浪追算の結果、ピーク波高は横浜で3.4m、東京や千葉で2.6mと推算された。湾内で急速に発達した高波が1m以下の高潮と相まって局地的な被害をもたらした。関東に上陸した過去の台風との比較では、今次台風はゆっくりと進んだ小型で強い台風と特徴づけられた。

**Key Words :** 2019 Typhoon Faxai, field survey, Kanto, Tokyo Bay, high wave impacts, wave hindcast, typhoon characteristics

## 1. はじめに

2019年9月5日に発生した台風15号 (Faxai) (以降、15号と呼称) は、9月7日に強い勢力で小笠原諸島を北進し、9月8日夜には非常に強い台風に発達して、伊豆大島に接近した。勢力を保ったまま、9月9日午前3時前には三浦半島付近を通過し、およそ時速25kmの速度で東京湾上を北北東に進んだ<sup>1)</sup>。勢力を若干弱めながらも強い台風のまま早朝5時頃に千葉市周辺に上陸した。その後、成田市や行方市周辺を進み、鹿嶋市辺りで太平洋に抜けている (図-1)。

この台風により、関東一円で約930,900戸の停電が発生し、千葉県では10日後においても約31,000戸で停電が続いている。全壊や半壊の住家被害は1,173戸に上っており<sup>2)</sup>、この件数は近年関東に影響したその他の強い台風と比較しても著しく多い<sup>3)</sup> (表-1)。一方、床上浸水の件数は相対的に少なく、今回の台風は大雨による被害より、強風による被害が甚大であったことがうかがわれる。東京湾に面した横浜市金沢区の臨海部では高波で大規模な浸水が発生し、工業団地で少なくとも399社で製造機械などに被害が生じている<sup>4)</sup>。横浜市鶴見区の大黒ふ頭や中区の本牧ふ頭など港湾区域においても高波被害が

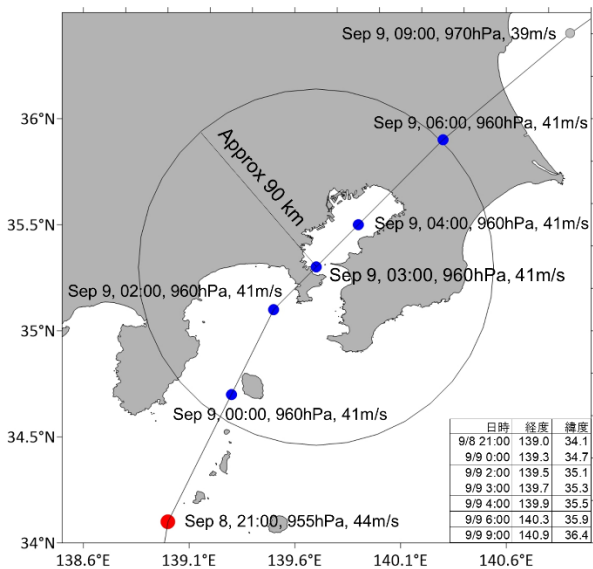


図-1 気象庁ベストトラックデータに基づく2019年台風15号の中心経路, 中心気圧, 最大風速および暴風域<sup>9)</sup>. 赤, 青, 灰色の塗潰し円は中心気圧の違いで, 各々955, 960, 970 hPaを示す.

表-1 関東に影響した近年の代表的な台風<sup>2,3)</sup>

台風番号	台風名	死者/行方不明者	負傷者	住家被害 (全壊+半壊)	床上浸水
200003	Kirogi	-	8	3	425
200115	Danas	8	48	13	112
200221	Higos	4	108	76	307
201721	Lan	8	245	498	2794
201915	Faxai	1	145	1173	74

発生した。フローティングドックの橋桁への衝突や係留中の旅客船の漂流、貨物船の走錨など船舶の被害も生じている。

町中の建物や都市インフラなどと比べると、海岸は人目につきにくく、情報も少ないため、研究者が調査をまとめない限り被害の全体像が把握しにくい。そこで本稿では、15号の直後に、筆者らが神奈川、千葉、茨城の海岸線を踏査した結果にもとづき、各地の状況を速報的に報告する。また、東京湾の一部の場所で高波被害が発生したため、波浪推算モデルを使用して湾内で発生した波浪を追算した。他の台風との比較も行い、今次台風の特異性について検証を試みる。

## 2. 各地の被害状況

本節では、神奈川、千葉、茨城の各海岸を現地踏査した結果に基づき、筆者らが確認した範囲で被害の概要を示す。台風が強い勢力で接近したものの、ほぼ無被害な場所も多かったため、そのような状況も併せて報告する。各地の状況を図-2 (神奈川)、図-3 (千葉、茨城) に分

けて示し、目視で判断した被害レベルを3段階で分類した。

### (1) 神奈川県

神奈川では台風通過10~11日後に、横浜から真鶴の範囲で調査を実施した。明らかな高波被害が東京湾に面した横浜市中区や金沢区の港湾区域で確認された。本牧ふ頭 (図-2のKG-1) や横浜ベイサイドマリーナ近く (KG-2) では、越波により護岸上のフェンスが倒れていた。KG-1地点では広い範囲でフェンスが倒れていたが、KG-2では被害は護岸隅角部1か所のみであった。KG-2地点の護岸高さは、海面上2.7m (計測日時9/19 12:30) であった。横浜市金沢区で浸水が発生し始めたのは、9月9日午前2時頃と推測される<sup>9)</sup>。同時刻の横浜新港検潮所 (海上保安庁所管) の観測潮位T.P.+0.51mを基準に潮位補正を施すと、観測潮位上1.95m、すなわちT.P.+2.46mまで少なくとも波が達したと推定される。

金沢区福浦地区では、東側の護岸の一部が決壊し、越波・越流により背後の工場地区で大規模な浸水被害が発生した。このため休業状態の工場が数多く見受けられた。KG-3地点ではパラペットが倒壊し、その背後の公衆トイレで地面より約4mの高さの窓ガラスが破損していた。強風が原因の可能性も否定できないが、陸側すなわち風下側の壁部分の窓ガラスを含めて、何枚ものガラスが割れていた状況より判断すると、波による可能性が高いと考えられる。国土地理院の数値標高モデルによると周囲の標高は+3m前後であるため、越波による水塊が護岸背後でT.P.+7mくらいまで到達したと予想される。浸水発生時の潮位偏差は0.7m程度であり、極端に高かったわけではない。このため大規模な浸水の主要因は、高波やウェーブセットアップで打ち上がった海水がパラペット倒壊部より大量に流れ込んだことによるものと考えられる。

八景島寄りの福浦地区南側の護岸・パラペットには目立った被害は見られなかったが、その前面の消波ブロックの一部で破損が確認された (KG-4)。また、パラペット背後約5mの歩道沿いには、緑地を保護する法尻ブロック (0.9m×0.3m×0.15m) が多数飛散していた。越波による被害と考えられる。パラペットの天端高は計測時点 (9/19 14:00) で海面上+4.1mであった。前述と同じ方法で潮位補正を行うと、T.P.+3.83m (観測潮位上3.32m) となり、波は最低でもその高さを乗り越えたことになる。

このように、福浦地区では東側 (KG-3) でパラペットの倒壊が生じていたが、南側 (KG-4) では生じていなかった。Google Earthの衛星画像で確認すると、南側の護岸は約半分の区間で消波工が設置されているが、東側は消波工が配置されていない。波当たりの違いの他、消波工の有無がパラペットの被害や越流に関係していた可能性も否定できない。ただし、南側の消波工もパラペッ

トが露出した不完全消波であった。このような条件では護岸前面を完全に消波工で被覆した条件と比較すると、越波量や波力が大きくなることが実験により明らかになっている<sup>6)</sup>。実際に、過去にはむつ小川原港の防波堤や宇部空港の護岸が高波により大きな被害を受けたが、不完全な状態の消波マウンド上で強大な衝撃波力が作用した結果と考えられている<sup>6)</sup>。

相模湾に面する横須賀市秋谷港 (KG-5) は、2017年台風21号 (Lan, 以下2017年21号) では防波堤のパラペットの一部区間が倒壊する被害を受けていたが<sup>7)</sup>, 15号では被害は生じていなかった。ただし、港内の物揚げ場で越波が生じたためか、海面上約1mの場所に枝木が飛散していた。付近にいた漁師からも高波によるうち上がりであることを聞いた。2017年21号により甚大な越波被害を受けた江の島においても<sup>8)</sup>, 今回は目立った被害は確認されなかった (KG-6)。

茅ヶ崎漁港西隣の海岸では流木、枝木がほぼ一直線上に漂着していた (KG-7)。ハンディー光波 (TruPulse 360; Laser Technology, Inc.) で計測したところ、その位置は汀線からおおよそ37mの位置、海面上1.7mであった (計測日時9/20 9:20)。近隣の小田原地点の天文潮位より推定すると、標高 T.P.+2.05mに相当する。台風時の観測最高潮位 (気象庁小田原検潮所) は、9月9日午前1時10分の T.P.+1.74mであったため、漂流物はピーク水位に近いところに滞留したことになる。

大磯港 (KG-8) やそれ以西では高波の痕跡は確認されなかった。2007年台風9号 (Fitow) や2017年21号, 2019年台風21号 (Hagibis) の際に一部区間が崩壊した西湘バイパスも、15号では目立った被害は生じていない。また、伊豆半島の真鶴港や熱海 (静岡県) でも明確な高波被害は確認されなかった。

## (2) 千葉県

千葉では台風通過4日後に、銚子から南房総までの九十九里浜・外房の範囲、館山から金谷までの南房総・内房の範囲で調査を実施した。ただし、行程の都合上、千葉市など東京湾奥は調査できなかった。房総半島の南端に向かうにつれて屋根瓦の飛散や電柱の倒壊が多く見受けられるようになり、海岸に近い場所では屋根自体が吹き飛んでいた建物もあった。台風接近・通過時の強風のすさまじさを物語っており、このように千葉では広い範囲で強風による被害が特に顕著であった。

銚子漁港、片貝漁港 (図-3 CB-1)、勝浦漁港、小戸漁港、金谷港などを踏査したが、筆者らが確認した範囲では護岸や防波堤など外郭施設で目立った被害は見られなかった。房総半島の先に位置する相模湾の港内では、明らかに風による建物損壊も確認したが、この被害に高波が影響したかは不明であった (CB-3)。

目視による海岸の状況確認・被害区分

○ 高波被害なし ▲ 高波の痕跡あり・被害不明瞭 ■ 高波被害あり



図-2 神奈川県における調査地点の状況

九十九里浜や外房、南房総、内房の海岸では、流木の漂着・打ち上がりを確認したが、海岸堤防や防潮堤などインフラに大きな被害は見られなかった。今回の調査では、九十九里浜ビーチの管理施設の扉が打ち破られている状況 (CB-2) を目撃したが、これが千葉において確認できた高波被害の唯一の事例であった。ハンディー光波を用いて計測を行った結果では、この施設は汀線からおおよそ104mの位置にあり、破損した窓ガラスの中央の

高さは海面上4.1mであった(計測日時9/13 9:30)。窓ガラスより1.5mほど上の室内天井には、砂が全面に付着していた。高波が扉を打ち破り、砂を大量に巻き込んだ海水が建物内に充満したことが原因と推察された。

筆者らは関東広域で大きな被害をもたらした2017年21号の直後にも千葉・房総で調査を行っているが<sup>9)</sup>、2つの台風を比較すると、千葉の高波被害については2017年のときの方が明らかに甚大であった。例えば、2017年21号では高波により被害を受けて金谷港の護岸が大きく陥没していたが、今回は同じ場所で目立った被害は見られなかった(CB-4)。ただし、15号直後も強風による建物被害は金谷港において生じていた。また、2017年21号の際には、房総半島南端の岩礁海岸で約80m波が遡上し、標高約6mの丘陵上のレストランが高波被害を受けていたが<sup>9)</sup>、今回は同じ場所で高波被害は見られなかった。建物の外壁に損傷を被っていたが、これは強風被害と判断された。

### (3) 茨城県

茨城県では台風通過3日後に県北の日立から調査を始めて、利根川河口に位置する神栖市波崎までの範囲を踏査した。台風は千葉市に上陸した後、茨城県・鹿嶋市辺りを通過し、太平洋に抜けている。強い勢力を保ったままであったため、千葉ほど激甚な強風被害ではなかったものの、茨城でも所々で立木が倒れているような状況を見かけた。

日立港や大洗漁港(図-3 IB-1)、鹿島港(IB-3)など太平洋に面する港を確認して回ったが、港内より目視で確認できる範囲で高波や高潮による明瞭な被害は見られなかった。いずれも大きな港で、冬季波浪に耐えるため、もともと防波堤の設計波が大きく設定されており、今回の台風が引き起こした高波にも難く耐えられたものと予想される。

波崎漁港(IB-4)では、港内の岸壁に魚が打ちあがっていた。この地域は風が強いことで有名で、筆者らの踏査時も晴天であったが風は非常に強く、港内で30~50cmほどの波が立っていた。15号の通過時にはかなりの波が港内で発達していたはずで、岸壁に越波が生じていたのではないかと推測される。

大洗ビーチの砂浜海岸でも特段大きな被害は見られなかった(IB-2)。この海岸では、東日本大震災後に標高約4mの非常に緩やかな丘陵状の傾斜堤防が築かれている。前面の砂浜も非常に広く、この堤防を乗り越えるような越波が生じていたとは考えにくい。

なお、筆者らは2018年台風13号(Shanshan)の直後にも、茨城の海岸を調査しているが、このときも港や海岸で大きな被害は確認されなかった。この台風は、最終的に上陸はしなかったものの、茨城の至近をほぼ海岸線に

平行に北進した珍しい台風で、発生波浪も相当に大きかったはずである。このように直近の2つの強い台風とともに大きな被害が生じていなかった状況を考えると、茨城の海岸は神奈川県や千葉県と比べても高波への備えが進んでいるといえる。これは前述したように冬季の高波に対する防護水準が高いことのほか、震災復興で防波堤や海岸堤防の改修が進んでいるためと考えられる。

目視による海岸の状況確認・被害区分

○ 高波被害なし ▲ 高波の痕跡あり・被害不明瞭 ■ 高波被害あり

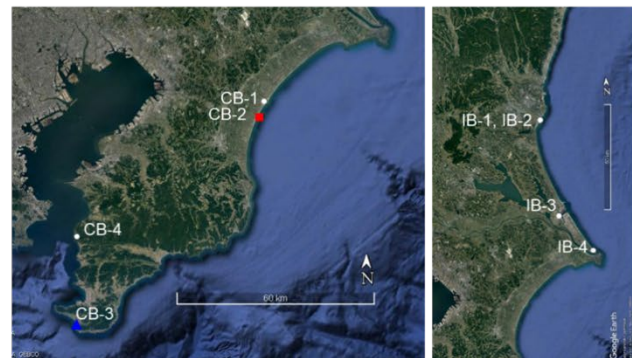


図-3 千葉県および茨城県における調査地点の状況

### 3. 東京湾の波浪追算

以上の調査より、高波被害は特に東京湾に集中していることがわかった。そこで、本節では 15 号が東京湾に接近し、湾内を縦断するタイミングに着目して、波浪追算を行う。

#### (1) 台風場

台風場の追算には、筆者らがこれまで使用してきたパラメトリック台風モデルを利用する。国内外で発生した数々の高潮・高波災害の検証に使われており、簡便でありながら推算精度が高いことを確認している<sup>9),10),11),12)</sup>。

気圧推定には以下の Myers モデルを使用している。

$$p(r) = p_0 + \Delta p \cdot \exp\left(-\frac{r_m}{r}\right) \quad (1)$$

ここに、 $p(r)$ は台風中心から $r$ の距離における気圧、 $p_0$ は台風の中心気圧、 $\Delta p$ は気圧低下量、 $r_m$ は最大風速半径である。中心気圧は気象庁ベストトラック確定値<sup>1)</sup>を引用し、2時間毎や3時間毎の数値については1時間毎に線形補完して使用した。

一方、最大風速半径については、気圧や暴風域半径と相関があるが、台風ごとにばらつきが大きいことが指摘されている<sup>13),14)</sup>。後で詳しく説明するように、15号は強風範囲が小さく、平均的な傾向を示すこれらの推定式では誤差が大きく計算される可能性がある。そこで本検討では、15号が東京湾に進入した9月9日午前3時時点の観測気圧(海面値)に着目して、観測値と推算値の一致度が全般的に高くなる最大風速半径を見つけ出して、その半径を全計算時間を通じて使用した。台風中心が東京湾の真上を通過したため、西側と東側に位置する横浜と館山の気象庁観測所データを同時に比較できる。最大風速半径を2kmごとに変えて予備計算を行った結果、図-4に示すように半径 $r_m = 28\text{km}$ で気圧最低値の一致度が特に高く計算されたため、この値を本計算で使用した。

最大風速範囲は気圧等に応じて変化するため、本来このように便宜的に半径を固定してしまう方法は好ましくない。ただし、図-1が示すように、午前0時から6時まで中心気圧は960hPaと一定であり、気圧より推定しても台風が通過する間の最大風速半径は一定と計算される。

このようにして求まる気圧分布を傾度風速の式に代入して風速場を計算する。この際、海面近くで傾度風よりも風が強まっている状態、すなわち超傾度風についても考慮する。さらに台風の移動に伴う場の風をベクトル合成することで、図-5に示す風速の空間分布が得られる。中心がはっきりとしたコンパクトな台風で、東京湾のほぼ真上を縦断したことが確認できる。

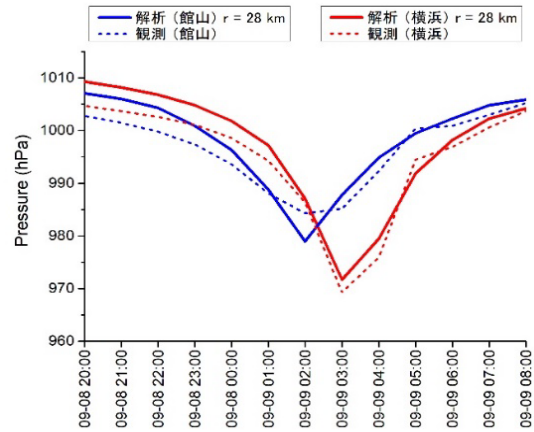


図-4 台風周辺気圧の解析値と観測値の比較 ( $r_m = 28\text{km}$ )

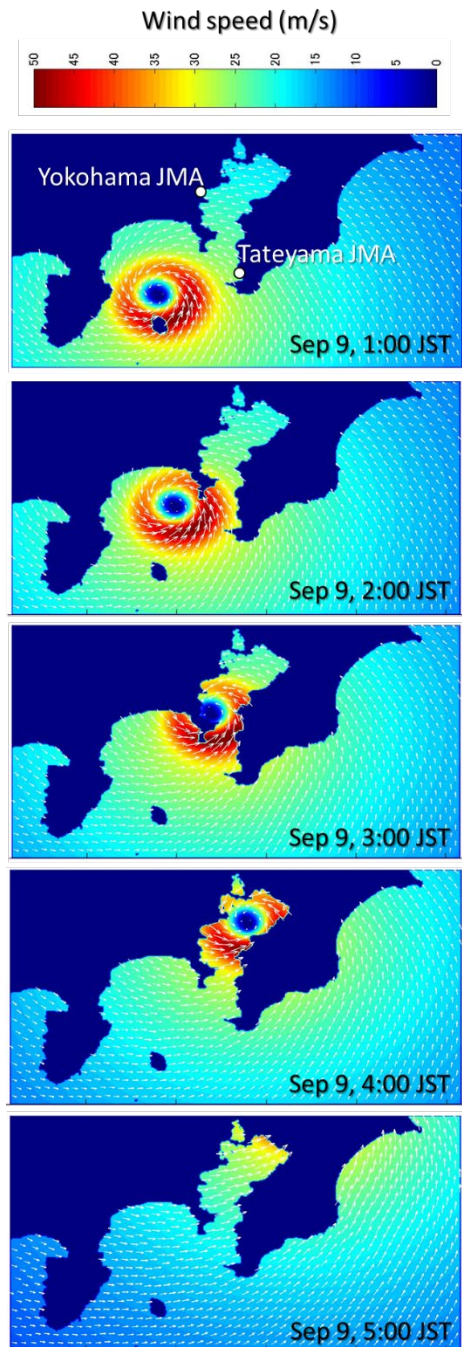


図-5 風速分布の推算結果 (矢印は風向)

(2) 波浪推算モデルの概要

上記の台風場の計算結果を使い、第3世代波浪推算モデル SWAN (Simulating WAVes Nearshore)<sup>15)</sup>により台風が東京湾を通過した際の波浪追算を行った。

SWANでは様々なオプションを選択できる。最も重要な風波の発達については、台風への適用性が高いと評価されている Komen モデルを使用し<sup>16)</sup>、浅海で重要になる3波浪成分間の非線形相互作用についても考慮した。碎波モデルには Battjes and Janssen モデルを選択したが、自然海岸がほとんど残されていない東京湾で大規模に碎波が生じて波高が低減するとは考えにくい。一方、浅海においては波による振動流で減衰が現れてくるため、JONSWAP モデルと呼ばれる経験的な摩擦抵抗式を選択した。また、白波によるエネルギー散逸は Komen モデルを適用した。

解析は球面座標系で行い、約 500m メッシュで G 空間情報センター提供の水深を割り当てた。なお、ラディエーションストレスも計算されるが、このように格子が粗い場合セットアップ効果はほとんど結果に反映されない。波浪場に影響を及ぼす水位と流速については、Delft 3D FLOW により解析を行い、SWAN の計算条件を1時間ごとに更新した。Delft3DFLOW では2次元および3次元の解析を行うことができるが、今回は2次元解析とした。この場合、津波や高潮の解析で一般的に用いられる非線形長波方程式モデルと同等である<sup>17)</sup>。

(3) 波浪追算結果

解析の妥当性を検証するため、東京湾内外の3地点の観測値と比較を行った。東京湾口第二海堡のNOWPHAS 波浪観測値(オンライン版)と比較した結果を図-6a)に示す。1991年の観測開始以来、第二海堡の既往最高値は2011年台風15号(Roke)時の2.78mである<sup>18)</sup>。図-6a)は超音波式波高計と水圧式波高計による波高観測値で、欠測も多いため確定的なことはいえないが、15号でもそれに匹敵する高波が発生したことは間違いない。午前3時の推算値は3.14mで、超音波式による観測値の2.71mと水圧式波高計による4.22m(午前2時40分)の中間的な波高を示している。

一方、台風が伊豆諸島を進んでいた午前0時以前では、解析が過大評価している。計算領域が狭く、外洋を含めて台風半径を固定した影響もあり、外洋からの波浪を十分に再現できていない可能性がある。今回の推算は速報的に実施しているため、このように種々の課題は残っているが、湾内で発達した波浪に限れば、ある程度追算の信頼性は高いと考える。

図-6b)は、東京都港湾局所管の波高計による観測値と推算値の比較であるが、両者は同様な時間変化を示している。波高のピークは午前3時から4時にかけて発生し

ており、その最大値は3m弱である。一方、図-6c)は相模湾の平塚沖波高計(神奈川県・東京大学共同管理)で観測された波高との比較を示している。推算値が観測値よりもピークを過小評価しているが、外洋からのうねりの再現精度が低いことが主要因と考えられる。ただし、波高の立ち上がりや低下の傾向についてはよく似ている。特に午前2時から3時にかけて波高が急低下する特徴が解析においても再現できている。図-5より明らかなように、この時間帯では南向きの風が卓越しており、波を沖に押し戻すような作用が働いたと考えられる。

図-7は横浜、東京、千葉における推算波高の時間変化である。横浜については金沢区沖を出力地点としている。波高のピーク値は、各々3.4m、2.6m、2.6mである。東京、千葉に比べて横浜の波高が3割程度高い。また、ピーク出現時間も横浜が一番早い。東京と千葉では波高は同程度であるが、東京の方が3時間早くピークが現れている。台風中心が東京湾上を進行しているうちは、西向きの風により北西岸で波が高くなる。一方、上陸後には風向が急激に東向きに転じて、北東岸で波浪が高くなるためである。図-8は東京湾を含む広域エリアの波高分布および平均波向ベクトルを示している。浦賀水道で最大8mの高波が生じているが、富津岬の防波堤効果で東京湾内では波高が大きく低減している。それでも横須賀から横浜にかけて3m以上の波高が生じている。台風は午前3時頃東京湾内に進入しているが、このとき横浜周辺では秒速35mを超す西向きの強風が吹いており(図-5)、これに対応して西に向かう波が発生している(図-8)。

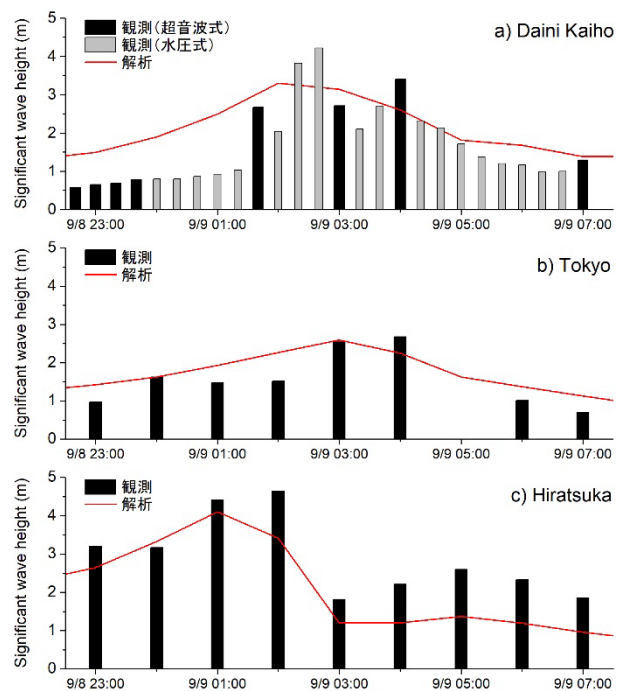


図-6 東京湾内外3地点における有義波高の解析と観測の比較 a) 第二海堡, b) 東京, c) 平塚

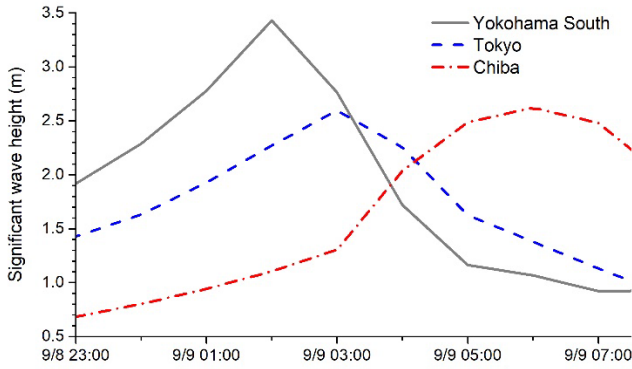


図-7 東京湾内各地点の波浪推算値の時間推移

東京では、午前2時から4時頃にかけて吹いた西向きの強風で3m近い波が発生している。千葉では横浜や東京より遅い午前6時ごろに波高のピークが現れている。これは台風中心が過ぎ去った後の吹き返しの強風で発達した波である。このように台風が東京湾の真上を通過する場合、湾の西側と東側で高波の発現時刻に数時間の差異が生じることがわかる。いずれにしても、波の主成分は外洋からのうねりではなく、強風により湾内で急速に発達した風波と考える必要がある。

一方、外房や相模湾の沿岸でも5mほどの波が生じている。十分に大きな波であるが、外洋に面した場所にあつては極端に大きな波とまでは言い切れない。

#### 4. 考察—台風の特徴や高潮・強風の影響

2017年21号の際には、相模湾から房総半島の広域で高波被害が発生している<sup>8)</sup>。これと比較すると、今回の高波被害は横浜の港湾区域に集中しており、かなり局所性が高いといえる。表-2は過去40年間に発生し、関東に強い勢力で上陸した代表的な台風<sup>3)</sup>と今回の台風の比較を示している。上陸時の風速と中心気圧を見る限り、15号は平均よりも強い台風であるが、想定外といえるほど強いわけではない。

一方、風速25m/s以上の範囲を示す暴風域半径は平均の約半分と非常にコンパクトな台風であった。これに対して2017年21号は平均サイズの2倍もの超大型台風であった。このように、2つの台風で大きさが明らかに違っていたことが、被害の集中するエリアが分かれた主因と考えられる。さらに、15号は上陸速度が平均的な台風より著しく遅く、湾の真上をゆっくりと進んだ台風であった。このため強風の吹送時間が長くなり、湾内で波浪が発達しやすい条件にあったと考えられる。

図-9は横須賀、横浜、東京の各検潮所の台風上陸前後の潮位を示している。台風が通過したのは、満潮より下げ潮に転じた時間帯であったが、高潮偏差も加わり各地点の潮位はTP.+0.8m~+1mに達し、越波を誘発する条

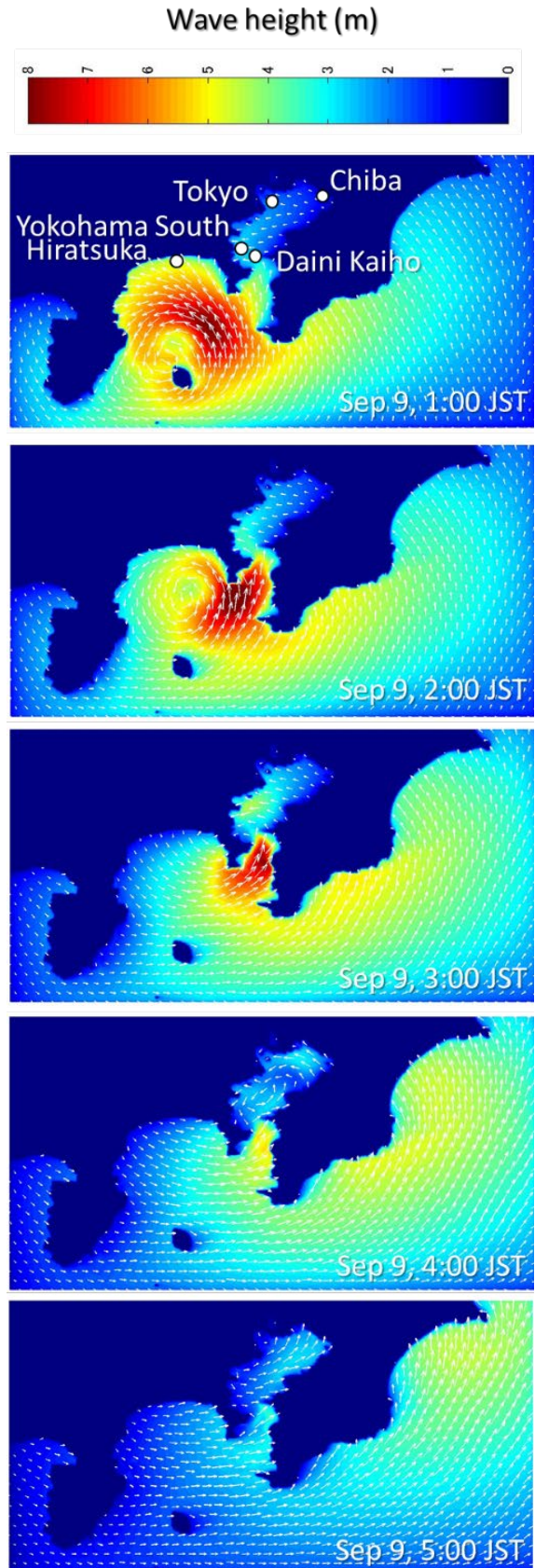


図-8 有義波高分布の推算結果 (矢印は平均波向)

件にあった。このとき先に説明した護岸パラペット(図-2KG-4)の高さは水面上+3.3m程度と推測され、波高3.4mであれば十分に越波が生じる条件である。

表-2 過去40年間に関東に上陸した強い台風の一覧<sup>1)</sup>

台風番号	台風名	上陸速度 (km/h)	上陸時風速 (kt)	上陸時中心 気圧 (hPa)	暴風域半径 (海里)
197920	Tip	75	70	965	200
198115	Thad	71	65	965	N/A
198506	Irma	69	65	968	125
199011	Winona	25	55	980	30
199707	Opal	38	55	975	90
199805	Stella	47	60	965	60
200115	Danas	24	55	970	30
200221	Higos	62	70	965	100
200511	Mawar	27	65	975	60
200709	Fitow	23	65	970	90
200918	Melor	58	70	955	120
201115	Roke	46	80	955	120
201217	Jelawat	50	70	970	120
201418	Phanfone	61	65	965	100
201609	Mindulle	20	65	975	40
201721	Lan	54	80	950	210
201915	Faxai	25	80	960	50
平均		46	67	966	97

東京港周辺では横浜港のような大きな被害は生じなかったが、これは波高が3割ほど低かったこと、台風が湾奥を通過した午前4時から6時にかけて、比較的潮位の低い時間帯であったことが幸いしたと考えられる。なお、東京の最大潮位偏差は1m程度であるため、気圧降下(約50hPa)による吸い上げが偏差の半分をもたらしており、残りは吹き寄せやウェーブセットアップによる影響と考えられる。

本稿は高波被害の状況報告が主目的であるが、最後に強風の状況についても簡単に述べておく。特に千葉においては強風が大きな被害をもたらしたことが今回の台風の特徴の一つであった。筆者らも千葉を調査した際、各地で屋根瓦の飛散や電柱の折損の状況を数多く目撃した。外房を南に進むにつれて被害の程度が大きくなっていき、建物の外壁が脱落している状況(図-3 CB-3)や家屋の屋根が完全に吹き飛んでいる状況など、激甚な被害を目の当たりにした。図-10は台風通過前後に館山において発生した強風の風速と風向きを示している。式(1)の気圧推定値より超傾度風速を求めた解析値は、おおむね気象庁・館山観測所で観測された10分間平均風速と最大瞬間風速の間に収まっており、瞬間値と平均値の中間的な値を示している。風向きについては、9月9日午前1時から4時の間に、北西から北東向きに時計回りに急変する状況が解析、観測値ともに見て取れる。特に、午前2時から3時にかけて非常に強い北向きの風が東京湾口に吹き込んでおり、これにより浦賀水道周辺で8m近い高波が発生している(図-8)。たとえ吹送時間が1, 2時間と短くても、風速と風向きによっては、このような高波浪に発達することがわかる。

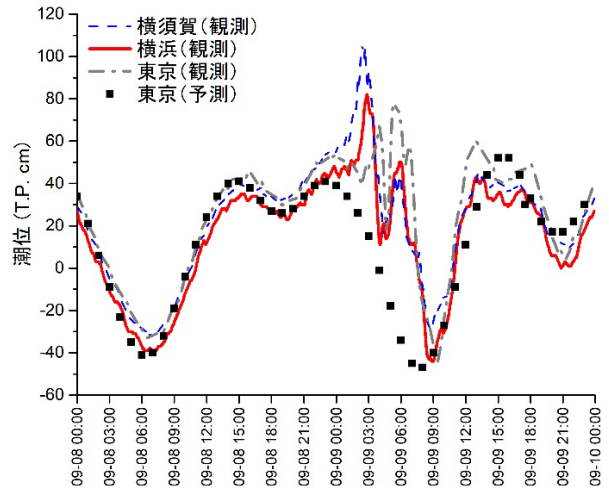


図-9 台風通過前後の東京湾内の潮位

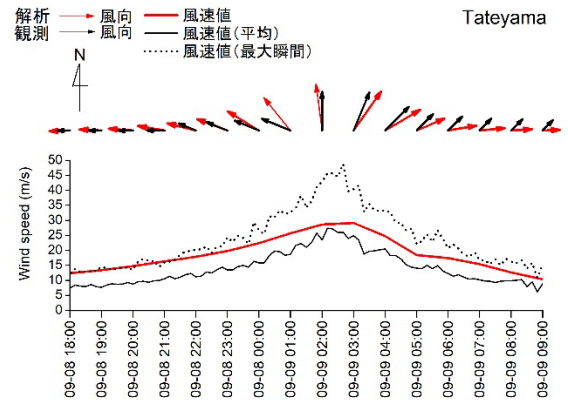


図-10 千葉・館山における風速・風向の観測値と解析値

## 5. 結語

2019年15号の直後に神奈川、千葉、茨城の海岸を調査した結果、相模湾や内房、外房、その他太平洋に面した海岸では大きな高波被害は生じていなかった。一方、東京湾に面する横浜では直立護岸を乗り越える越波やフェンスを押し倒す高波被害が生じていた。被害が確認された場所は、2017年21号の際とは明らかに対照的であった。21号が超大型台風であったのに対して、15号は小型台風という暴風域範囲の差異が左右したものと考えられる。また、15号は東京湾上をゆっくりと進んだ強い台風であり、湾内で生じた高波の主因は、外洋からのうねり性の波ではなく、強風により湾内で急速に発達した風波と考えられる。東京湾の短軸方向の距離は10~15kmである。この程度の吹送距離であっても強風時に波浪が3m以上に発達することは、理論的には説明が付くが、これが実例をもって明らかになった。

15号は非常に強い台風で東京湾に進入したが、その後若干勢力を弱めて強い台風に変わり千葉市付近に上陸している<sup>1)</sup>。万が一、非常に強い勢力を保ったまま上陸し

ていたならば、今回被害が比較的小さかった東京湾奥においても波高は3 mを優に超えていたであろう。その場合、京浜工業地帯が広がる湾奥の被害はさらに大きくなっていった可能性がある。東京湾は高潮災害への備えは着々と進んできたと思われるが、半閉鎖性海域のためか、高波災害とは無縁と考えられてきたふしがある。しかし、2018年21号では同じく閉鎖性の瀬戸内海で甚大な高波被害が発生しており<sup>9)</sup>、今次の台風において横浜で大きな高波被害が発生したことも偶然とは考えにくい。

このように、半閉鎖性海域であっても決して高波被害と無縁でないが、逆に台風が来ない限り常時は静穏であるため、臨海部の工業化の過程で高波への備えがどこか軽視されてきたように思われる。津波や高潮に比べると高波災害は人的被害こそ小さいが、護岸が決壊するような事態になると、港湾や工業地区における生産活動が突如停止し、そのことによる経済被害は計り知れない。今回の高波被害を教訓に、今一度東京湾や全国の内湾で高波対策を見直す機運が高まることに期待したい。

**謝辞:** 本研究は、科学研究費助成事業国際共同研究加速基金(No. 16KK0121)及び特別研究促進費(19K24677)の支援を受けて行われたことを記す。

#### 参考文献

- 1) 気象庁：台風ベストトラックデータ，<https://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/rsmc-hp-pub-eg/besttrack.html>
- 2) 消防庁：令和元年台風第15号による被害及び消防機関等の対応状況（第24報），2019.
- 3) デジタル台風：<http://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon/>
- 4) 神奈川新聞：【台風15号】10メートル超に高波到達横浜・金沢区，2019年9月18日(水) オンライン版，2019.
- 5) NHK：台風被害，工場が徐々に浸水 防犯カメラに横浜 金沢区，<https://www3.nhk.or.jp/news/html/20190912/k10012079261000.html>
- 6) 高橋重雄，大木泰憲，下迫健一郎，諫山貞雄，石貫国明朗：防潮護岸の高潮時の衝撃波力による被災とその再現実験，海岸工学論文集，Vol. 47, pp. 801-805, 2000.
- 7) 塩見雅樹，山本浩，津川昭博，黒沢忠男，永松宏一：消波ブロック不連続部の波力増大による防波堤の被災とその対策に関する研究，海岸工学論文集，Vol. 41, pp. 791-795, 1994.
- 8) Islam, M. R., Takagi, H., Anh, L. T., Takahashi, A. and Ke, B.: 2017 Typhoon Lan Reconnaissance Field Survey in Coasts of Kanto Region, Japan, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B3 (Ocean Engineering), Vol. 74, No. 2, pp. 593-598, 2018.
- 9) Anh, L. T., Takagi, H., Heidarzadeh, M., Takata, Y. and Takahashi, A.: Field Surveys and Numerical Simulation of the 2018 Typhoon Jebi: Impact of High Waves and Storm Surge in Semi-enclosed Osaka Bay, Japan, *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 176, pp. 4139-4160, 2019.
- 10) Takagi, H., Xiong, Y. and Furukawa, F.: Track analysis and storm surge investigation of 2017 Typhoon Hato: were the warning signals issued in Macau and Hong Kong timed appropriately?, *Georisk*, Vol. 12, pp. 297-307, 2018.
- 11) Takagi, H., Esteban, M., Shibayama, T., Mikami, T., Matsumaru, R., Leon, M. D., Thao, N. D., Oyama, T. and Nakamura, R.: Track analysis, simulation, and field survey of the 2013 Typhoon Haiyan storm surge, *J. Flood Risk Management*, Vol. 10(1), pp. 42-52, 2017.
- 12) Takagi, H., Li, S., Leon, M. D., Esteban, M., Mikami, T., Matsumaru, R., Shibayama, T. and Nakamura, R.: Storm surge and evacuation in urban areas during the peak of a storm, *Coastal Engineering*, Vol. 108, pp. 1-9, 2016.
- 13) 高木泰士，呉文潔：日本南方海域を通過する台風の最大風速半径の推定手法，土木学会論文集 B3 (海洋開発)，Vol. 71, No. 1, pp. 1-6, 2015.
- 14) 本多和彦，鮫島和範：台風の中心気圧と最大風速半径の関係式の確率評価，国土技術政策総合研究所資料，No. 1040, 2018.
- 15) TU Delft: SWAN Cycle III version 40.11 User Manual, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, 0.00 ed., 2000.
- 16) 高木泰士，柏原英広，柴山知也：港湾構造物に及ぼす気候変動の影響とその定量的予測—防波堤を対象として，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol. 65, No. 1, pp. 891-895, 2009.
- 17) 高木泰士，富安良一，荒木健人，松原恭博，真野泰人，巖峰，鈴木正道，石原一郎，森勇造，永瀬翔平，中村友哉：浮上式防潮堤の狭小隙間部から流入する津波・高潮流量の評価手法，土木学会論文集 B3 (海洋開発)，Vol. 73, No. 1, pp. 35-42, 2017.
- 18) 川口浩二，末廣文一，藤木峻，田村仁：全国港湾海洋波浪観測年報 (NOWPHAS 2017)，港湾空港技術研究所資料，No. 1357, 2019.
- 19) 横浜地方気象台：令和元年台風第15号に関する神奈川県気象速報，2019.
- 20) 土木学会海岸工学委員会：平成30年台風21号による高潮災害調査団 調査報告書，2018.

(Received September 25, 2019)

(Accepted January 14, 2020)

## INVESTIGATION OF HIGH WAVE DAMAGE CAUSED BY 2019 TYPHOON FAXAI IN KANTO REGION AND WAVE HINDCAST IN TOKYO BAY

Hiroshi TAKAGI, Md Rezuanul ISLAM, Le Tuan ANH, Atsuei TAKAHASHI,  
Takayuki SUGIU and Fumitaka FURUKAWA

This report summarizes our reconnaissance survey after Typhoon No.15 (Faxai), which struck Tokyo Bay on September 9, 2019. In Kanagawa, there was no major damage on the Sagami Bay side, but on the Tokyo Bay side, overtopping over an upright revetment with a height of 3.3 m above the sea occurred. In Chiba, there was no conspicuous high wave damage, except a building in Kujukurihama Beach that was obviously struck by wave run-up and splash. On the other hand, wind disasters were severe, and damage occurred in various places, such as the scattering of building roofs and the collapse of power poles. Wave-damage in Ibaraki was also minor. In Ibaraki, the breakwaters should have been constructed against severe winter storms, and the embankments have been substantially upgraded after the 2011 Earthquake and Tsunami. These structural resilience may have contributed to limiting typhoon impacts. Based on our wave model verified by the observations at three stations inside/outside the bay, the peak wave height during the typhoon was estimated to be 3.4 m off the coast of Yokohama. Compared with other 16 major typhoons that landed in the Kanto region, this typhoon was characterized as a strong small typhoon that slowly moved through Tokyo Bay. The result of the wave hindcast suggests that wind waves were rapidly intensified within the bay, resulting in significant damage in particular coasts, exacerbated by a storm surge of up to 1 m.