

災害調査報告

—平成30年台風第21号による強風・高潮災害について—

Research Report of Disaster

— Strong Wind and Storm Surge Disaster Caused by Typhoon Jebi in 2018 —

丸山 敬

Takashi MARUYAMA

Synopsis

Typhoon Jebi made landfall over Kinki region on September 4, 2018 bringing with it strong winds and storm surge in along Osaka Bay. This is a comprehensive study carried out on the disaster caused by the typhoon. The study examined and surveyed the characteristics of strong winds, spatial distribution of gusts, lightning strikes, rainfall and damages to various structures. It also reports the outline of the meteorological features of the typhoon.

キーワード: 台風 強風被害 高潮・高波・浸水被害 気象状況 複合災害

Keywords: typhoon, strong wind damage, coastal damage caused by Storm Surge, Storm Wave and inundation, meteorological condition, complex disaster

1. はじめに

平成 30 年 9 月 4 日に「非常に強い」勢力を保ったまま徳島県南部に上陸し、その後兵庫県神戸市付近に再上陸した台風 21 号は、四国や近畿地方に記録的な暴風をもたらした。この台風はまた記録的な高潮ももたらし、接近・上陸に伴って近畿や四国の沿岸部では急激に潮位が上昇し、大阪では 1961 年の第 2 室戸台風の時に観測した過去の最高潮位を瞬間的に上回る値を観測した。さらに、四国や近畿、北陸周辺に台風本体の活発な雨雲がかかった。これらにより、樹木の転倒、建物屋根の飛散、床上・下浸水などの住宅被害、トラックの横転、建設現場の足場やクレーン、さらには、港のガントリークレーンの倒壊など、多大な被害をもたらした。大規模な停電も発生した。大阪湾沿岸では、強風に伴う高潮被害、関西空港では浸水および漂流したタンカーの衝突による連絡橋の破損など、公共インフラ、土木構造物などにも多大な被害をもたらした。本報ではそれらの概要をまとめる。

2. 台風 21 号の気象学的特徴

2.1 台風経路

平成 30 年台風 21 号 (T1821, アジア名 Jebi) は、8 月 28 日南鳥島近海で発生し 31 日 9 時には 915hPa に達し、“猛烈な (最大風速 54m/s 以上)”勢力に発達した。21 号は伊勢湾台風と比較的似た経路で北上し、その後、やや西寄りに向かい、第 2 室戸台風に近い経路をとり、9 月 4 日 12 時に 950hPa で徳島県南部に上陸した後、紀伊水道をぬけ、淡路島を通過して 4 日 14 時には神戸市に上陸した。9 月 5 日 3 時に北海道渡島半島西部に達し、5 日 9 時に温帯低気圧に変わった (Fig.1,2)。本州上陸時に 950hPa で、非常に強い勢力のまま上陸したのは、1993 年の 13 号台風以来 25 年ぶりであった。台風 21 号は、上陸時の移動速度も早かったため、四国、近畿から北海道に至る広範囲で強風が観測され、近畿を中心として広い範囲に大きな被害をもたらした。

このように、非常に強い台風が大阪など大都市を襲ったのは稀であり、最大瞬間風速が 50m/s を超え

る強風に大都市が曝されたのも初めての経験といえる。期間最大風速および最大瞬間風速が観測記録を超えたのは概ね危険半円側の地点であり、北陸、東北、北海道日本海側でも記録更新が見られた。また、台風通過後の吹き返しによる強風も強く、高知県室戸岬では西向きに 48.2m/s、新潟県両津および石川県金沢では南西に 28.8m/s の最大風速を観測した。

2.2 最大瞬間風速の分布

Fig.3 に 9 月 4 日～5 日の間に最大瞬間風速 20m/s 以上を観測した地点を示す。図中の実線で示す台風中心経路を挟んで東側に高い最大瞬間風速を示した地点が分布している。経路近くでは 30m/s 以上を示した地点が集中しており、高い値では 50m/s を超えている。同期間に観測された最大瞬間風速の上位 6 位が 50m/s を超えており、それらの風向のほとんどは南南西から南で概ね台風最接近時に観測されている。特に近畿圏では、関空島（大阪府泉南郡）で南南西の風・最大瞬間風速 58.1m/s（最大風速 46.5m/s）、和歌山（和歌山市）で南南西の風・最大瞬間風速 57.4m/s（最大風速 39.7m/s）、室戸岬（高知県室戸市）で西の風・最大瞬間風速 55.3m/s（最大風速 48.2m/s）を記録するなど、これまでの記録を更新する強風が観測された。さらに、関東地方のように中心経路からかなり離れている地域でも 40m/s 近い最大瞬間風速を記録し、広域にわたって強風をもたらした。

2.3 突風の発生メカニズム

建物等に被害を及ぼす強風の原因となる突風は、台風に伴う循環だけでなく、その中にある積乱雲、さらには地形や都市構造物などさまざまな要因が複合して生じていると考えられる。

台風に伴う突風の発生場所をみると、Fig.4,5 に示

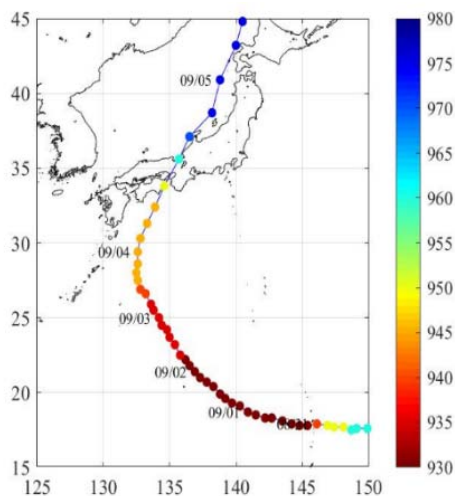


Fig.1 Time series of TC Jebi location and intensity (科研費報告書, 2019)

すように、台風中心に対して 150km 以内の北東から南東にかけての領域（危険半円）に集中していた。積乱雲の活動と突風発生に関連を対流活動の指標であるレーダーエコー強度でみると、降雨強度 48mm/h の強エコー下の突風（図中黒塗り）は台風の中心付近で発生しており、中程度のエコー（同グレー）、弱

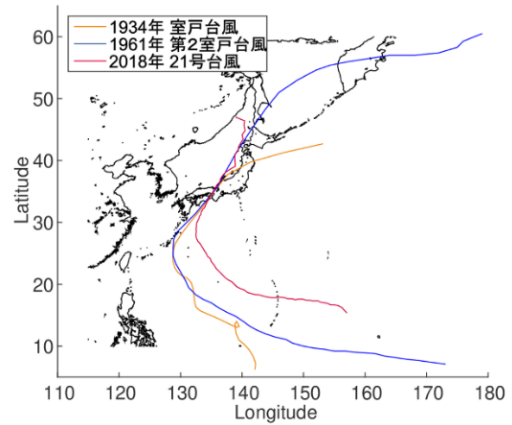


Fig.2 Tracks of historical typhoons (科研費報告書, 2019)

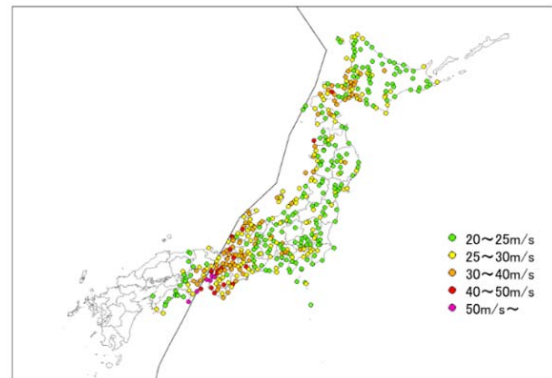


Fig.3 Points with maximum wind gust of over 20m/s on September 4 and 5 in 2018 (科研費報告書, 2019)

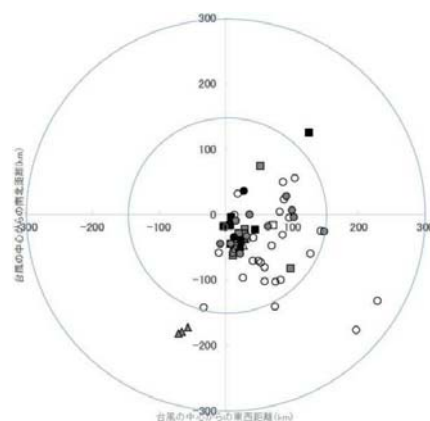


Fig.4 Positions of maximum instantaneous wind speed (more than 30 m/s) relative to the center of T1821 Same as Fig. 1.4.3, Fig.1.4.5 and Fig.1.4.6 except for rainfall rate; solid circle: more than 48 mm/h, gray circle: 12-48 mm/h, open circle: less than 12 mm/h, respectively (科研費報告書, 2019)

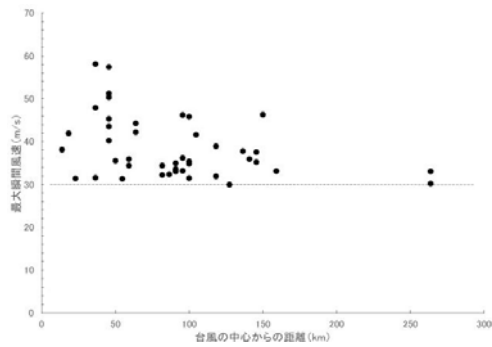


Fig.5 Relationship between maximum instantaneous wind speed and the distance from the center of T1821 (科研費報告書, 2019)

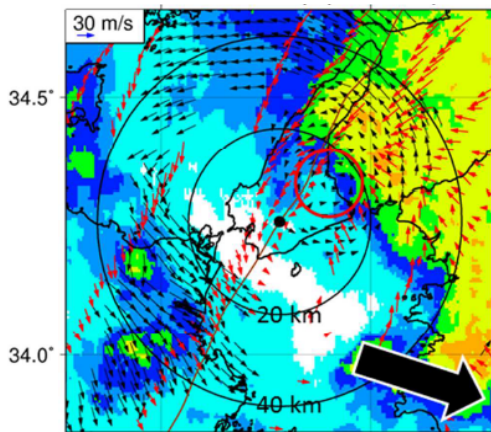


Fig.6 Distribution of storm-related winds at 2-km altitude (small black arrows), storm-related surface wind gusts (small red arrows), and composite radar reflectivity at 2-km altitude (color scale) at 0400 UTC 4 September. Storm-related winds observed at each weather station during the period from 0330 to 0430 UTC are plotted at 3-min intervals at their locations relative to the storm center position at 0400 UTC. (科研費報告書, 2019)

エコー（同白抜き）になるに従い、台風中心から離れた場所で発生していた。顕著な被害をもたらした最大瞬間風速が 50m/s を超えるような突風は、台風の中心から 50km 以内の積乱雲直下で発生していた。また、Fig.6 に示す高度 2km のレーダー反射強度とデュアル・ドップラー解析をみると、赤線で囲んだ付近の黒矢印群（台風の移動に相対的な風速ベクトル）で示されるように、台風中心の北東側に局所的に反時計回りの回転風系（メソ擾乱）が存在し、地上風（赤矢印）はここに吹き込むような風系が存在し、このメソ擾乱の北東側で強い降水が存在している。さらに台風が北進すると、大阪湾沿岸、大阪府南部において、50m/s を超す地上最大瞬間風速が台風の進行方向右側の半径20-40km以内で観測されており（Fig.7）、この風速には15m/sという台風移動速度が大きく寄与している。

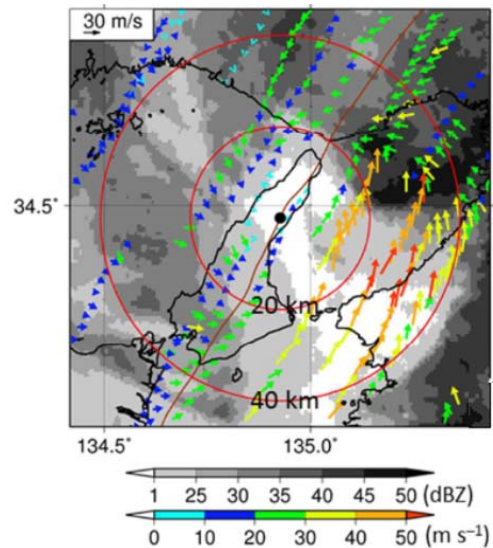


Fig.7 Distribution of surface wind gusts (small color arrows), and composite radar reflectivity at 2-km altitude (gray scale) at 0430 UTC 4 September. Surface wind gusts observed at each weather station during the period from 0400 to 0500 UTC are plotted at 3-min intervals at their locations relative to the storm center position at 0430 UTC. (科研費報告書, 2019)

2.4 市街地内の強風

台風 21 号では大阪市内（大阪中央区）において最大瞬間風速 47.4m/s が観測され、市街地でも強風の被害が多く見られた。市街地内の風はビルの密集度合いや高層ビルの配置の影響を受け、場所によって大きく変化すると考えられ、局所的に極めて強い風が吹いた可能性がある。ここでは、数値計算によって大きく変化すると考えられ、局所的に極めて強い風が吹いた可能性がある。ここでは、数値計算により大阪市内の強風場を再現した結果を参考に、台風時の市街地内での強風特性を見る。

現在、気象モデルを用いた数値解析が気象予測などに広く用いられており、Fig.8 に示すように再現計算は実台風を精度よく再現し、10 分間平均風速の観測値は計算結果に良く対応する。さらに、変動風速場を再現することのできる LES モデルを用い、21 号台風時の南風を想定した計算を行って変動風速場を再現した結果をみると、Fig.9 に示すように、地上 10m において市街地内でも場所によっては瞬間的に 60m/s から 70m/s に迫る強風が吹いていたと推定された。このように、都市のビルや構造物によって上層の強風が街区の低層まで入り込む様子が示され、台風時の地上付近における強風発生メカニズムとして、台風循環および周辺場の風、積乱雲からのダウンドラフト（ダウンバースト）、地形や構造物による増幅という 3 つの効果が影響しあうことが明らかになった。

2.5 降雨

台風 21 号に伴う降雨は、Fig.10 に示すように近畿地方を中心に四国、中国、北陸、東海地方に広がり、特に紀伊半島南部で多大な降雨量を観測した。大阪湾沿岸の降雨量については、兵庫県淡路市や洲本に

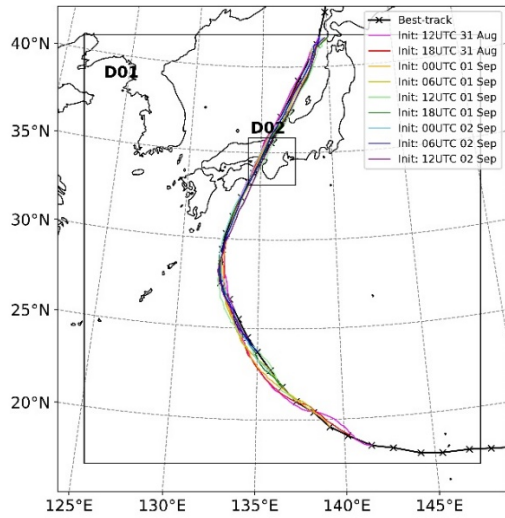


Fig.8 The best track and the simulated tracks of the typhoon (科研費報告書, 2019)

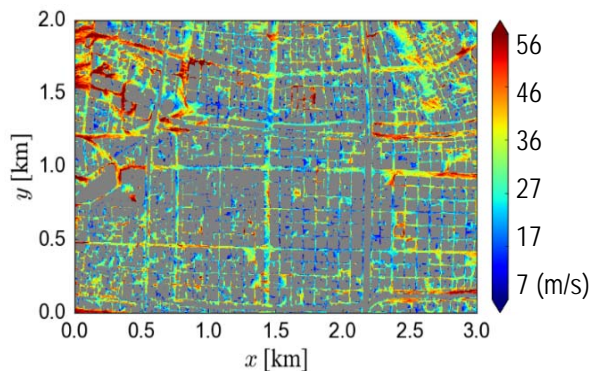


Fig.9 maximum instantaneous wind speeds at 10-m height in a business district of Osaka City (科研費報告書, 2019)

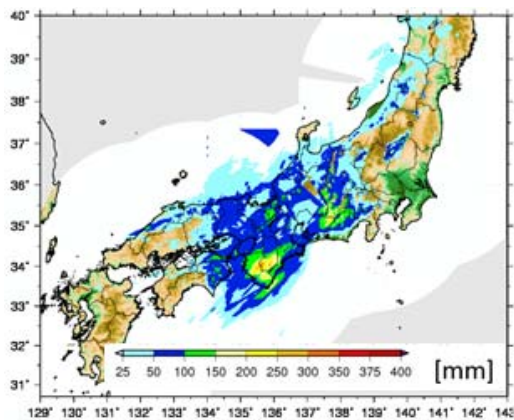


Fig.10 Accumulated rainfall for 14-hrs from 10 am (科研費報告書, 2019)

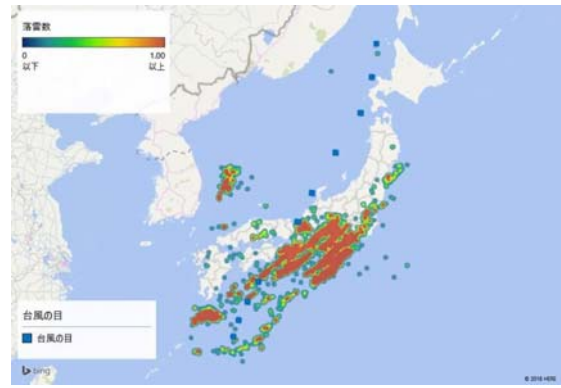


Fig.11 Frequency of CG lightning from 03JST, 4 September to 06 JST, 5 September 2018 (科研費報告書, 2019)

において 6 時間雨量でそれぞれ 139.0mm, 135.5mm. 1 時間雨量で 85.5mm, 74mm を記録した。また、大阪府能勢町では 1 時間雨量で 69.0mm, 兵庫県神戸市では 1 時間雨量で 60mm を記録しており、神戸市や淡路の沿岸では豪雨による被害も多く、短時間降雨による下流域への集水も生じていたと考えられる。

2.6 落雷活動

台風 21 号に伴う雷活動は、対地雷撃 (落雷, CG) 数が 8000 回を超え、比較的活発だったといえる。Fig.11 に示すように、9 月 4 日 3 時から 5 日 6 時までの落雷頻度は、近畿から関東の太平洋沿岸に落雷は集中しており、台風南方の OUTER レインバンドを形成する積乱雲からの落雷頻度が高かった。

2.7 高潮、高波

この台風はまた、高潮、高波をももたらし、特に大阪湾では、大阪と神戸の検潮所でそれぞれ 3.29m および 2.33m の最大水位 (大阪管区气象台) を記録し、防潮堤の内外において浸水被害が発生した。陸上に残された痕跡調査による最大水位の分布をみると Fig.12 のように、局所的には最大 3.5m 前後の高潮偏差、最大 6m を上回る高潮と波浪による遡上・越波が観測された。具体的には淡路島南、和歌山港付近で 4m を超える浸水高 (波浪の影響を含む)、大阪湾奥大阪港で 3.5~4.0m の浸水高 (多少の波浪成分を含む)、西宮~神戸で 2.0~3.0m 程度の浸水高が記録され、波浪による影響を加えると最大 5m 以上の浸水高が記録された。

3. 強風災害

ここでは台風 21 号によって引き起こされた強風被害について概観する。現地調査、自治体、公共団体などの被害統計などを用いて各種被害の様子を地

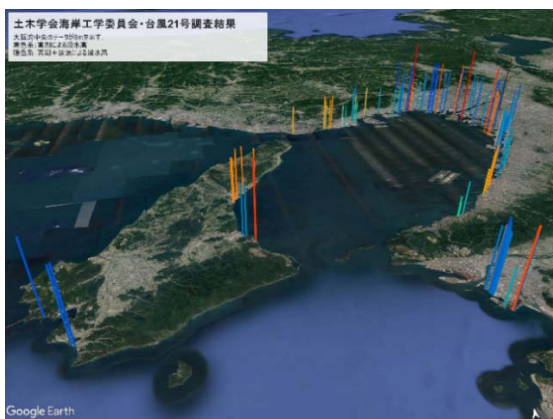


Fig.12 Spatial distribution of inundation heights along the coast based JSCE survey data (cooler color: storm surge, warmer color: storm surge+wave runup) (土木学会,2018;森ら,2018)

域別にまとめた。とくに、被害の大きかった大阪府南部および和歌山県北部の被害に関しては現地調査だけではなく小型飛行機からの映像や衛星写真を使った調査結果も紹介する。

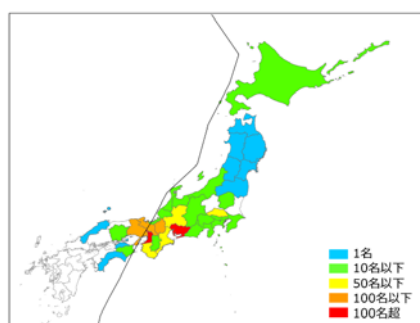
3.1 全国の被害の概要

台風 21 号による人的被害・建物被害は広く全国に分布している。Fig. 13 a,b に示す通り、死者は経路に近い危険半円側で生じている。死因は、部屋に飛び込んだ飛散物、全壊した倉庫の下敷き、屋根からの転落などが含まれている。一方、負傷者については危険半円側の広域で発生しているが、大阪府が他に比べ突出している。

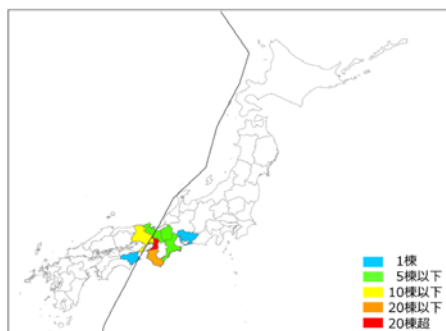
住家被害数は Fig.13 c~f に示すように、全壊家屋の



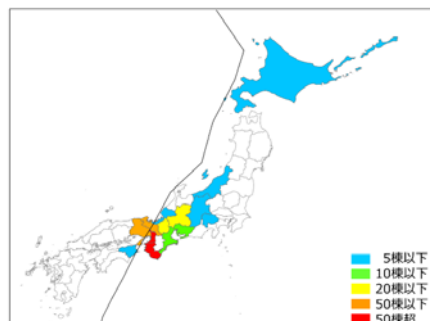
a. number of deaths by prefecture



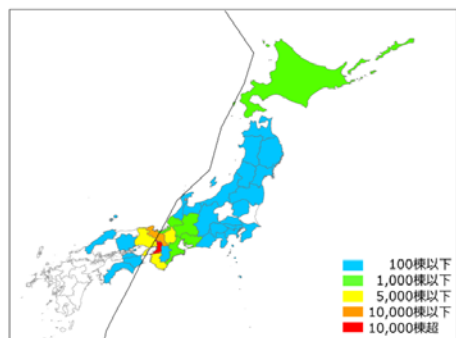
b. number of injuries by prefecture



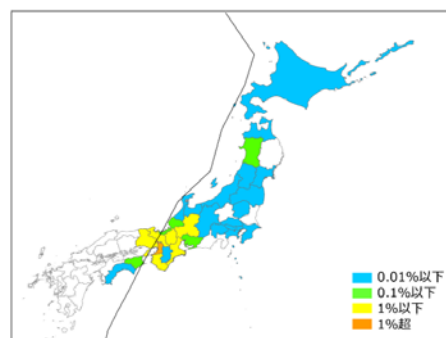
c. number of houses totally destroyed by prefecture



d. number of houses half destroyed by prefecture



e. number of houses totally and half destroyed or partially damaged by prefecture



f. houses damage ratio by prefecture

Fig.13 nationwide distribution of damages by typhoon Jebi (科研費報告書, 2019)

分布は経路近傍に集中しており、半壊、一部損壊と、被害の程度が下がるにつれて危険半円側に被害範囲が拡大していることが分かる。一部損壊以上の被害家屋数を各都道府県の世帯数で除した被害率を見ると、台風経路の危険半円側近傍において被害率が高く、大阪府の値が突出している。

3.2 近畿地方の被害概要

次に被害が集中している近畿地方についてみると、Fig.14 a,b に示す通り、死者は台風経路に対して危険半円側に分布しており、負傷者まで含めると危険半円側に広がって分布している。住家被害についてはFig.14 c~f に示すように、全壊家屋の分布は大阪府の市町村を中心に台風経路に対して危険半円側に存在しており、半壊、一部損壊以上の被害家屋総数と分布範囲は台風経路に対して危険半円側へと拡大している。被害率は大阪府の各市町村で被害率が突出し

ており、最大瞬間風速が 58.1m/s を記録した関西国際空港の対岸に位置する泉佐野市が最も高い被害率となっている。

3.3 北海道の被害概要

この台風では北海道でも強風が吹き、倶知安町で 42.4m/s、岩見沢市で 37.6m/s の最大瞬間風速を記録し、22 地点において日最大瞬間風速の観測史上 1 位を更新し、各地で被害をもたらした。Fig.15 に示す北海道内の住家被害の市町村別の分布をみると、太平洋側から道央にかけて被害棟数が多い傾向にあった。

3.4 大阪府南部の被害

大阪府は台風経路に最も近いエリアであり、とくに南部に被害が多かったが、4 万棟を超える住家被害の全貌を行政の統計から迅速に把握することは困

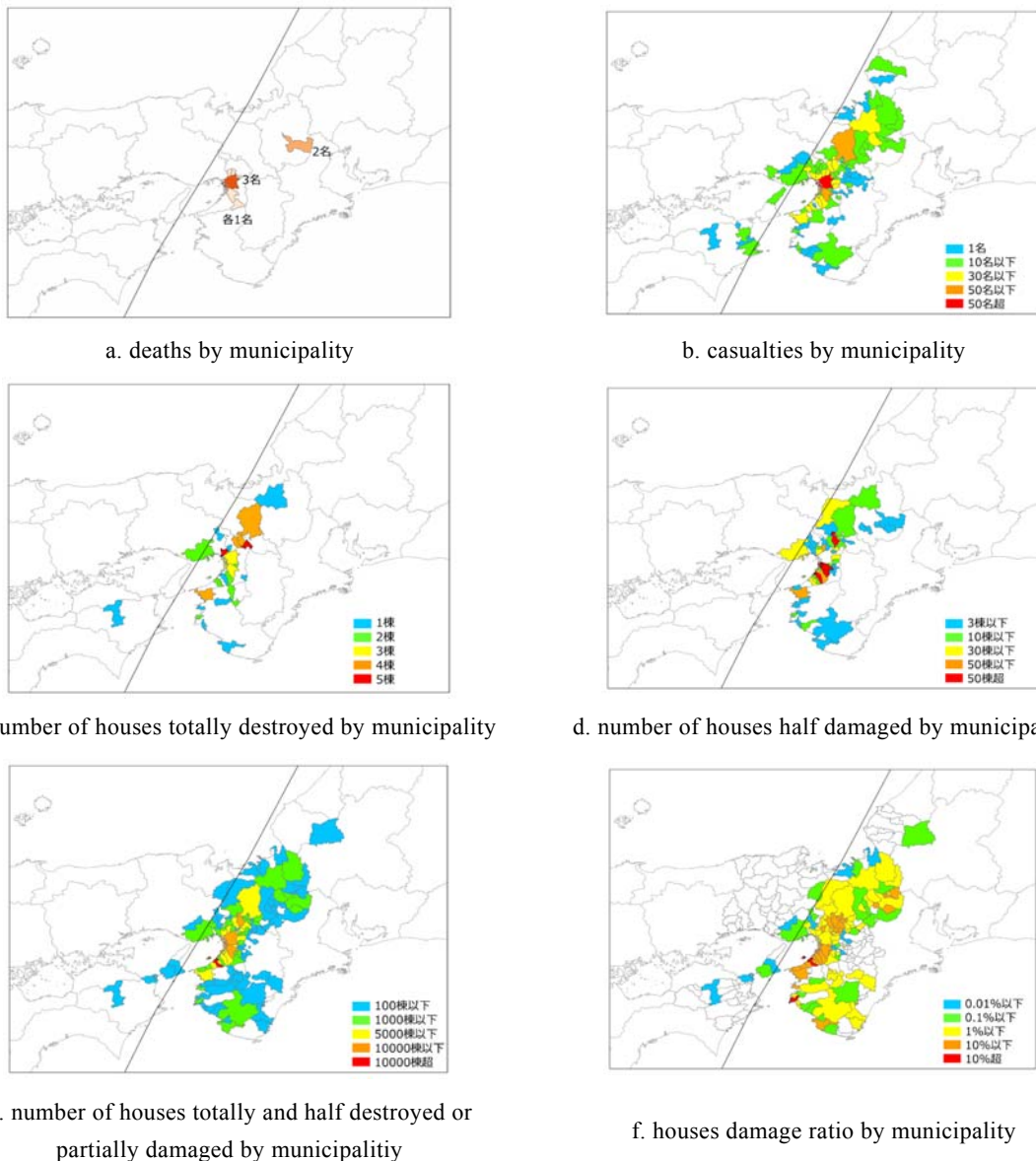


Fig. 14 Distribution of damages in the Kinki Area by Typhoon Jebi (科研費報告書, 2019)

難である.そこで,被害分布の概要を調べるために,大阪府南部と和歌山県北部の上空に小型飛行機を飛ばして上空から撮影した映像と衛星写真を用いて調査したブルーシートの分布状況により,被害分布を推定した結果を以下に示す.

(1) 飛行機からの映像による住家被害推定

飛行機からの映像による解析から, Fig.16 のようにブルーシートは大阪府南部の海岸付近で密度が高かった. 行政区別ごとの一部損壊以上の被害住家数とブルーシート数との関係は Fig.17 のように得られ,一部損壊以上の被害住家数の極端なデータ(中橙色)を除いたもの(中青色のデータ)に関しては図中の破線で示す線形関係が得られた. さらにこの関係を使って,和歌山県の一部行政区で,住家被害の調査結果が出ていない地域の住家被害率を推定



Fig.15 Housing damage status by municipality (科研費報告書, 2019)

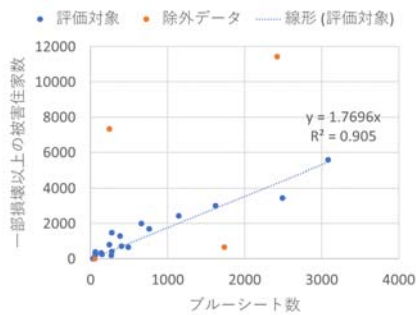


Fig.17 ratios of damaged houses covered in blue sheets and victims by municipality (科研費報告書, 2019)

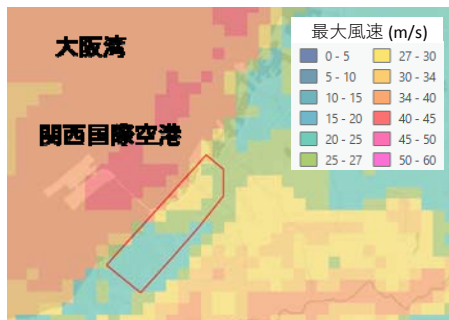


Fig.19 Maximum wind speed calculated by WRF model with calibration (Polygon in Figure: target area for this analysis) (科研費報告書, 2019)

したところ,和歌山市において後日明らかになった住家被害数と推定値はほぼ一致した. Fig.14fに推定値を追加したものを Fig.18 に示す.

(2) 衛星データを使った住家被害推定

衛星写真を使ってブルーシートで覆われた住家を抽出し,被害があった住家を推定した. また,2節で示した気象モデルによる計算値から,地上10mにおける最大風速を Fig.19 のように推定し,屋根被害率と最大風速の関係を Fig.20 のように得た. これより,建築基準法および関連法規で規定された風速(粗度区分に応じて換算した基準風速)以下でも相応の被害が広範囲で出ていること.換算基準風速を超えた地域で劇的に被害率が増加しているわけではないこと.換算基準風速前後での被害率が5.5~7.5%程度であることが明らかになった.

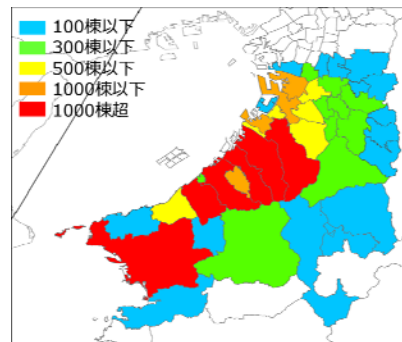


Fig.16 damaged houses covered in blue sheets in the southern Osaka municipality and Northern Wakayama Prefecture (科研費報告書, 2019)

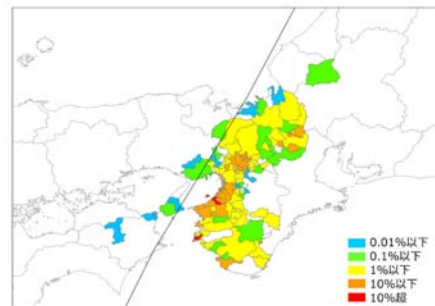


Fig.18 damaged houses in Sakai region including municipality-estimated value (科研費報告書, 2019)

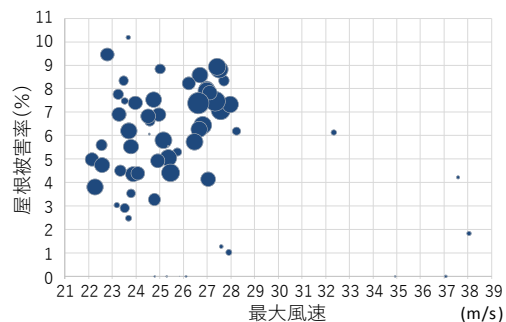


Fig.20 Maximum wind speeds and roof damage ratios at WRF calculation grids (科研費報告書, 2019)

(3) ヒアリング調査

住家被害の多かった泉佐野市の一部地域を対象に、現地での聞き取り調査を行った結果によると、古い木造和瓦葺きの住宅を中心に屋根葺材の飛散被害が発生し、その被害に伴う飛来物によって耐風設計された新しい住宅でも外装材被害が発生したこと。新しい住宅や維持管理が行われていた住宅の屋根被害はほとんど確認されず、屋根葺材の耐風設計に関する規則改正やガイドライン整備が功を奏していることがわかった。

3.5 各種建物・構造物の被害

今回の台風では近畿地方を中心として、広範囲の建物・構造物の被害が発生した。観測や解析結果に示されるとおり、大阪府南部で瞬間風速 50m/s、大阪市内で瞬間風速 45m/s こえる強風が吹いており、多種多様な被害が発生した。また、大阪湾沿岸部では高潮・高波による被害も発生した。以下ではこれら各種建物・構造物の被害について概観する。

(1) 大規模建築物の被害

市街地では高層ビルや大スパン建物の被害が見られた。これらの多くは外装材の被害 (Fig.21-15) が



Fig.21 scattered masonry rooftop cladding (科研費報告書, 2019)



Fig.22 damaged roof of gymnasium (科研費報告書, 2019)

主であるが、高層階まで飛来物が飛んできたと推定される被害 (Fig.24) も見られた。ビルの外装材が破壊されることにより、風雨の侵入による室内の被害 (Fig.25)。室内側の気圧の急激な変化により、室内や軒の天井の脱落 (Fig.26,27)、内装材・間仕切り壁の破損 (Fig.28) などが見られた。



Fig.23 scattered steel plate roof (科研費報告書, 2019)

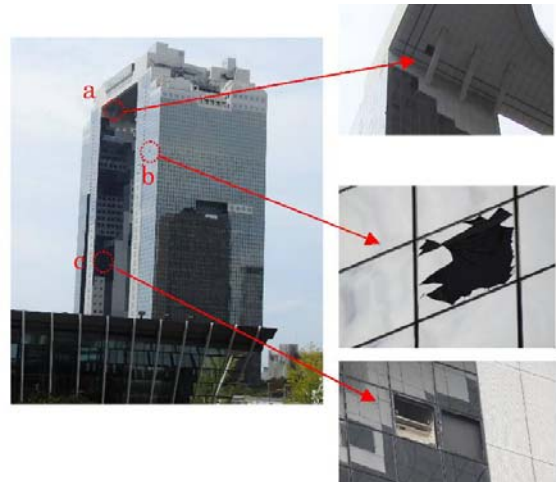


Fig.24 damage to cladding of high-rise building (b. assumed to be by airborne objects) (科研費報告書, 2019)



Fig.25 damage to interior due to damage to glass window on the 13th floor (科研費報告書, 2019)



Fig.26 damage to the ceiling (科研費報告書, 2019)



Fig.29 scattering of roof tiles (科研費報告書, 2019)



Fig.27 damage to building eaves (科研費報告書, 2019)



Fig.30 damage and blowing up of roof materials (科研費報告書, 2019)



Fig.28 damaged to a store partition wall (科研費報告書, 2019)



Fig.31 damage to room and loft (科研費報告書, 2019)

(2) 建築物およびその付属物の被害

住家の被害については、屋根ふき材や壁、窓ガラスなどの外装材の破損 (Fig.29-31) や付属物の被害 (Fig.32-34)。また、破損物の飛散による被害 (Fig.35-37)、伝統的建築物の被害 (Fig.38)、塀、門扉、欄干などの被害 (Fig.39-41) などの倒壊、転倒の例が見られた。



Fig.32 damage to railing of a housing complex (科研費報告書, 2019)



Fig.33 damage to solar panels (科研費報告書, 2019)



Fig.37 vehicle damage due to flying debris (科研費報告書, 2019)



Fig.34 toppled down vending machine (科研費報告書, 2019)



Fig.38 collapse of a Shinto shrine (科研費報告書, 2019)



Fig.35 damage due to scattered steel sheet roof (科研費報告書, 2019)



Fig.39 damaged to a concrete parapet wall (科研費報告書, 2019)



Fig.36 flying object hitting an advertisement (科研費報告書, 2019)

(3) その他の被害

その他の被害としては足場の被害 (Fig.42), 太陽光発電システムの被害 (Fig.43), 工作物 (Fig.44), 農業施設 (Fig.45) などがみられた。

(4) 交通・インフラの被害

交通・インフラの被害としては, 高速道路道路の被害 (Fig.46-48), 大阪港, 神戸港内の人工島では, 強風や浸水により, 港湾施設が被害を受けた (Fig.49). また, 強風により流された船舶の衝突により, 関西国際空港連絡橋が被害を受け (Fig.50) た. 船舶による橋梁への衝突はこれ以外にも阪神高速道路湾岸線, 県道芦屋鳴尾浜線でも発生した. また, 車の横転 (Fig.51,52) も各地で見られた.



Fig.40 falling of a barricade (科研費報告書, 2019)



Fig.44 damage to a water-based solar system (科研費報告書, 2019)



Fig.41 collapse of bridge railings (科研費報告書, 2019)



Fig.45 collapse of a pipe house (科研費報告書, 2019)



Fig.42 collapse of soundproof scaffolding (科研費報告書, 2019)



Fig.46 damage to highway sound insulation wall (科研費報告書, 2019)



Fig.43 damage to solar farm on a pond (科研費報告書, 2019)



Fig.47 sign-board blown out by wind (科研費報告書, 2019)



Fig.48 road closure due to uprooted tree
(科研費報告書, 2019)



Fig.52 location and direction of the vehicle overturn
(科研費報告書, 2019)



Fig.49 gantry crane collapse (科研費報告書, 2019)

(5) 電力施設の被害

電力施設の被害 (Fig.53) としては、関西電力管内 (Fig.54) において、電柱の倒壊は合計 1343 本。うち、飛来物・建物倒壊に伴う 2 次被害は 788 本 (89%) に及んでおり、風力のみによる倒壊はみられなかった。また、配電設備の被害は高圧線 4914 径間、柱上変圧器 362 台、地上機器 38 台、地中ケーブル 544m で、高圧線の断線は大阪と和歌山で多く、柱上変圧器の被害は神戸と和歌山で、地上機器の被害は神戸で多く、地中ケーブルの被害は大阪南でのみ発生した。その他、配電線の回線数では 3765 回線、停電戸数では 220 万軒におよび、回線数については阪神・淡路大震災 (649 回線) をはるかに上回る規模のものであった。

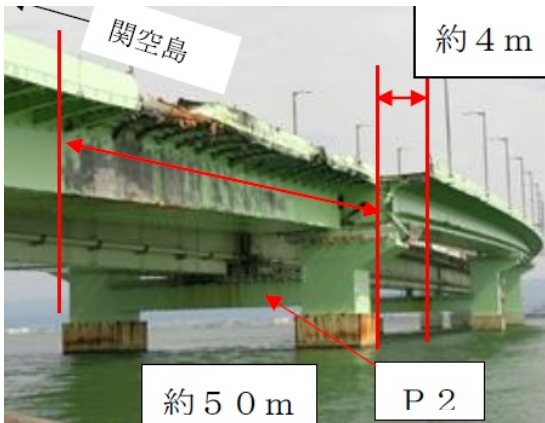


Fig.50 collision damage caused to airport connecting bridge by drifting ship (国土交通省, 2018)



Fig.53 damage to telephone pole
(科研費報告書, 2019)



Fig.51 toppled vehicles on the bridge
(科研費報告書, 2019)

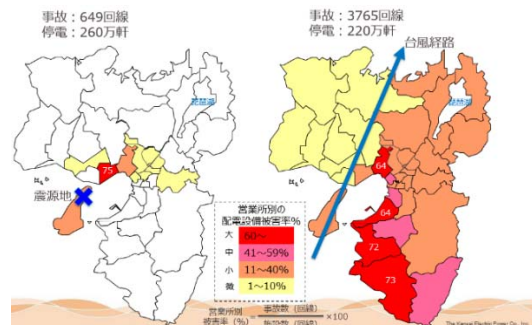


Fig.54 damage to power cut or electricity in the Kansai region (関西電力, 2019)

4. 高潮・高波（浸水）災害

台風 21 号により、都市部では高潮・高波による被害が発生した。特に、人工島や埋立地での被害が顕著であった。今回の台風による高潮は、第二室戸台風に基づいて想定された高潮水位を超えたため、堤外地には大きな浸水被害をもたらしたが、防潮対策の高さ不足による市街地への高潮の越流はほとんど確認されなかった。しかし、護岸や防潮堤に対して高波が作用し、越波による浸水被害が生じた例は多くみられた。以下では、都市部の主な被害について概説する。

4.1 都市部の高潮・高波による浸水被害

(1) 埋立地・人工島の浸水被害

南芦屋浜では潮芦屋ビーチにおいて、Fig.55 のように、約 10 基のコンテナの漂着が確認されており、さらに、階段護岸上の公園や背後の道路に漂流物が散乱していたことから、護岸を越えた越波による浸水が発生していたと考えられる。また、芦屋ペランダと呼ばれる南側護岸においても、護岸上に整備された駐車場が洗掘されていたことから、越波が起きていたことがわかった。さらに、護岸背後の涼風町の道路には、Fig.56 のように、かなりの量の砂が堆積しており、越波が激しかったことが推察された。涼風町の住宅の外壁に明瞭な浸水痕跡が確認され、床上浸水が発生していたことがわかった。

西宮市の浜甲子園でも同様に、甲子園浜背後の護岸を越波した氾濫水が、県道 340 号線を南から北に向かって浸水した。同様に今津灯台付近でも、護岸を越えた高潮が今津浜の道路を冠水させた。さらに、漂流した台船が阪神高速湾岸線側道の県道 573 号線の橋脚に衝突し、橋桁が動き、復旧に時間を有する被害が生じた。

六甲アイランドでは、高潮による浸水が顕著であった。Fig.57 に六甲アイランドで撮影された浸水状況を示す。大規模な浸水により自動車やコンテナが流され、道路上に散乱した。また、六甲アイランドと対岸を結ぶ六甲大橋の出入口付近の道路が冠水し、島は約 3 時間にわたり孤立状態になった。阪神淡路大震災の際に、ポートアイランドに架かる神戸大橋がずれて島が孤立し、その後、代替アクセスとして神戸港島トンネルが整備された。しかしながら、沈埋トンネルは風水害の浸水に対して脆弱で、今回も翌 9 月 5 日まで通行止めが続いた。

(2) 防潮ライン外側の浸水被害

防潮ラインの外側、いわゆる堤外地の浸水被害の



Fig.55 Drifted container on Shio-Ashiya beach (科研費報告書, 2019)



Fig.56 Trapped sands by wave overtopping at Ryofu-cho in Ashiya (科研費報告書, 2019)



Fig.57 Inundation at Rokko Island (Twitter 9/4 14:23) (Twitter より 9/4(火) 14:23 配信)

例として、神戸ハーバーランドにおける高浜岸壁が Fig.58 のように高潮で浸水し、煉瓦倉庫レストラン街が水に浸かった被害が挙げられる。また、ハーバーランドの西側に位置する東川崎町の湊小学校周辺でも、浸水が発生した。防潮ゲートが閉められたために、住宅地への高潮の浸水は防がれたが、その一方で、排水が追いつかず、内水氾濫による床上浸水が起こった。



Fig.58 Inundation at Harbor Land in Kobe ((Twitter 9/4 14:26)

サンシャインワフ神戸では、腰から胸の高さまで浸水し、避難する人にとって大変危険であった。一方、サンシャインワフ神戸のショッピング施設の背後の道路と住宅地との間には防潮堤が整備されており、住宅地では浸水被害は発生しなかった。

4.2 小河川の氾濫被害

台風 21 号による高潮は、河川水位の有意な上昇をもたらした。高潮の河川遡上で顕著だったのは淀川であった。淀川にかかる淀川大橋では高潮の影響により堤防高を 21cm 超過したが、その下流の阪神なんば川淀川橋梁、伝法大橋では、防潮鉄扉（陸閘）が閉鎖されて浸水が回避された。

台風通過に伴い、13:00-14:00 の間に時間雨量 50mm 以上の雨が、大阪府から兵庫県東部にかけて降った。この短時間強雨が、河川水位の上昇に寄与したと考えられる。特に六甲山系の中小河川は河床勾配が急なため、流出時間が短く、短時間強雨による影響が大きく、津門川が氾濫危険水位を超過し、宮川（兵庫県芦屋市, Fig.59）と高橋川（兵庫県神戸市東灘区）で小規模な氾濫が発生した。

4.3 港湾・船舶の被害

六甲アイランド東側では高潮と波浪により、甚大な被害が発生した。Fig.60 はコンテナの漂流状況であり、高潮による流れでコンテナが漂流し、コンテナターミナル外周のフェンスまで流されて集積したものと推定される。自動車の被害は、高潮で流されただけでなく、波によって持ち上げられて積み重なり、被害が拡大した。六甲アイランド東側は地盤が全体に低く被害が大きい。一方、六甲アイランド西側は、東側と比較すると浸水深が小さかったものの、コンテナターミナルでは電源施設が高潮によって浸水し、ガントリークレーン等の設備が稼働できない状態となった。

西宮地区では横引きゲート式の陸閘が変形し、堤内地への海水の侵入が認められたが、前浜地区では

海岸堤防が防護機能を発揮し、堤内の住宅地の浸水を防いだことが確認された。

全体として被害は湾奥にあり、高潮による流れと強風により大型船舶、コンテナ、自動車等が漂流し、関西国際空港の連絡橋への衝突や湾奥での様々な被害を増幅した。



Fig.59 Inundation at Gokawa-cho along Miya river in Ashiya (Twitter, 9/4 14:44)



Fig.60 Drifted container at Rokko Island (科研費報告書, 2019)

5. おわりに

本報では、平成 30 年台風 21 号の強風・高潮災害に対して行われた調査をもとに、・強風および豪雨など、被害発生の気象学的要因、・街区における強風被害の空間的分布の解明、・現地調査により被害の実態および、自治体、公共団体などの被害統計や強風の観測記録の収集による構造物や人への被害、・高潮による水位変化と高波の越波による被害を概観した。

地球温暖化による将来気候のもとで強大な台風の発生頻度の増大が示唆されている今日、今回の台風被害は都市域において繰り返されることが予想される複合災害の典型である。災害後、気象学的立場からの強風・高潮の発生メカニズム、都市部を含む広

域で発生した建築物・構造物の被害発生メカニズム、都市沿岸部を含む沿岸部および人工島で発生した高潮被害のメカニズム、などの解明に資する数多くのデータが得られ、今後の防災・減災技術、災害対応、復旧・復興体制の検証などを進める上で極めて重要な情報が得られた。これは、学術的成果のみならず、わが国の防災・減災のあり方に及ぼすインパクトが極めて大きいと評価できる。これらが将来の災害の低減ならびに安全・安心な社会の達成のための一助になれば幸甚である。

参考文献

土木学会海岸工学委員会 (2018) 2018 年台風 21 号 Jebi による沿岸災害, <http://www.coastal.jp/ja>, 2018 年 9 月 22 日.

森ら (2018) 2018 年台風 21 号 Jebi による沿岸災害調査報告, 土木学会誌 12 月号, 4p.

平成 30 年度科学研究費助成事業 - 科研費 - 特別研究促進費研究 (代表: 丸山 敬): 「平成 30 年台風 21 号による強風・高潮災害の総合研究」成果報告書.

国土交通省運輸安全委員会, (2018. 12) 「船舶事故調査の経過報告について (平成 30 年 12 月 20 日)」

関西電力 (2019): https://www.kepco.co.jp/souhaiden/pr/2018/pdf/1213_1j_02.pdf, 2019 年 2 月 23 日閲覧

謝 辞

本稿は、平成30年度日本風工学会突発災害調査費および平成30年度科学研究費助成事業－科研費－特別研究促進費研究「平成30年台風21号による強風・高潮災害の総合研究」の助成を受け、災害発生メカニズムの解明や人的・物的被害の実態解析のための総合研究調査を実施した結果（丸山 敬：研究代表者，2019）をもとにまとめたものである。調査に際しては、日本風工学会、日本建築学会、土木学会、日本気象学会、日本鋼構造協会などに所属する風工学、建築学、土木工学、気象学、構造工学などの研究者の協力も得て実施された。ここに記して謝意を表す。

(論文受理日：2019年6月17日)