

平成30年台風21号による 強風・高潮災害の総合研究

平成30年度科学研究費助成事業（特別研究促進費研究）

研究成果報告書（別冊）



2019年7月1日

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、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、公共インフラ設備、土木構造物などにも多大な被害をもたらした。

今回の台風被害は、都市域において強風災害、高潮災害という複合的な災害が突発的に発生したものとして、今後の防災・減災のあり方に関する多くの課題や教訓を有しており、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。さらに、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、日本において繰り返されることが予想される複合的な災害の典型であり、将来の強大な台風に伴う複合災害に備えるための資料を得るまたとない機会と考えられる。そこで、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」では、災害発生の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調査を実施したので、その成果をまとめた。

研究組織

本研究では、①台風による強風および豪雨の気象学的解明（気象グループ）、②強風災害の原因・メカニズムの解明（強風被害グループ）、③高潮・高波（浸水）災害の原因・メカニズムの解明（高潮被害グループ）、④都市部における強風リスクの空間分布の解明（リスク評価グループ）、⑤災害対応、復旧・復興体制の検証（防災・減災グループ）に焦点を絞り、図1のように各研究グループが連携して調査を行った。各調査研究グループには研究推進を担当するグループリーダーを配置し、併せて総合的な研究実施体制を強化するために、分担者の専門分野を考慮して近畿・四国地方を中心に全国の防災研究者を広く集め、文理融合の研究調査を実施した。なお、研究分担者は自然災害研究協議会と協議を重ねて決定され、同協議会のメンバーも研究分担者となり参画している。さらに、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。



図1 各グループにおける研究内容とその相関関係

研究経費

8,000 千円

研究組織

(研究代表者)

氏名	所属・職名	(専門分野)	役割分担
丸山 敬	京都大学防災研究所・教授	建築耐風工学, 風工学	全体の統括

(研究分担者)

氏名	所属・職名	(専門分野)	役割分担
石川裕彦	京都大学・防災研究所・教授	気象学	既存気象観測データに基づく強風域のマッピング
佐々浩司	高知大学・教育研究部自然科学系理工学部門・教授	気象学	台風21号のレーダーによる雨雲構造と気流構造の解析
中北英一	京都大学・防災研究所・教授	水文気象学	レーダー解析
小林文明	防衛大学校・応用科学群地球海洋学科・教授	気象学	被害調査解析
森 信人	京都大学・防災研究所・准教授	海岸工学	現地調査・数値解析
梶川義幸	神戸大学・都市安全研究センター・特命教授	気象学・気候学	高潮発生要因の解析
松井正宏	東京工芸大学・工学部・教授	風工学, 建築耐風構造	建築物等の被害実態の把握
野田 稔	高知大学・教育研究部自然科学系理工学部門・教授	風工学	被害調査, 風速推定
西嶋一欽	京都大学・防災研究所・准教授	風工学	都市型強風災害リスク分析
牧 紀男	京都大学・防災研究所・教授	防災学	災害対応・復旧復興
多々納裕一	京都大学・防災研究所・教授	災害経済学	経済影響調査, 港湾・空港の被災とその経済影響の解明
飯塚 聡	国立研究開発法人防災科学技術研究所・水・土砂防災研究部門・総括主任研究員	大気海洋相互作用	過去の台風との比較と環境場の役割の解析

また、研究分担者以外に研究に参加いただいた方を以下に挙げる。

氏名	所属機関・部局・職	氏名	所属機関・部局・職
北海道		近畿	
堤 拓哉	北海道立総合研究機構・建築研究本部 北方建築総合研究所・主査	河野祐哉	京都大学・大学院工学研究科・博士 前期課程
関東・東北		小坂田ゆかり	京都大学・大学院工学研究科・博士 後期課程
岩下久人	明星電気株式会社 気象防災事業部 技術部、主査	志村智也	京都大学・防災研究所・特定助教
大幢勝利	労働安全衛生総合研究所 研究推進・ 国際センター センター長	鈴木 覚	国立研究開発法人 森林総合研究 所・森林防災領域・室長
沖 佑典	国立研究開発法人建築研究所 建築 生産グループ 研究員	高森浩治	奥地建産(株) 耐風プロジェクト・主任
奥田泰雄	国立研究開発法人建築研究所・構造研 究グループ長	竹内 崇	神戸大学・工学研究科・助教
金井 紀江	防衛大学校・防衛大学校地球海洋学科 本科学士	竹林幹雄	神戸大学・大学院海事科学研究科・ 教授
喜々津仁密	国土技術政策総合研究所・建築研究 部・主任研究官	竹見哲也	京都大学・防災研究所・准教授
木村吉郎	東京理科大学・理工学部土木工 学科・教授	谷口徹郎	大阪市立大学・工学部・教授
金 容徹	東京工芸大学・工学部・准教授	張 馳	神戸大学・工学研究科・博士前期 課程
小山 亮	気象庁気象研究所台風研究部・主任 研究官	永松伸吾	関西大学・社会安全学部・教授
佐藤晋介	情報通信研究機構・電磁波研究所リモ ートセンシング研究室・研究マネー ジャー	野口恭平	京都大学・工学研究科・助教
嶋田宇大	気象庁気象研究所・台風研究部・研究 官	野田 博	近畿大学・建築学部建築学科・教授
清水慎吾	防災科学技術研究所・主任研究員	森山英樹	農業食品産業技術総合研究機構・ 農村工学研究部門・上級研究員
高木 みゆ き	防衛大学校・防衛大学校地球海洋学科 本科学士	八木知己	京都大学・工学研究科・教授
高橋弘樹	労働者健康安全機構安全衛生総合研 究所・建設安全研究グループ・上席研 究員	安田誠宏	関西大学・環境都市工学部・准教授
服部康男	電力中央研究所・地球工学研究所・上 席研究員	山口弘誠	京都大学・防災研究所・准教授
村井博一	気象庁・観測部計画課情報管理室・突 風災害対策情報調整官	四国・中国	
吉田昭仁	東京工芸大学・工学部・教授	長尾文明	徳島大学大学院社会産業理工学研 究部・教授
近畿		梶谷義雄	香川大学・創造工学部・教授
池内淳子	摂南大学・理工学部・教授	九州	
ガヴァンス キ江梨	大阪市立大学・工学部・准教授	友清衣利子	熊本大学・大学院先端科学研究部 (工)・准教授

次ページ以降に研究成果の概要をまとめる。

1. 台風による強風および豪雨の気象学的説明（気象グループ）

被害発生 の 気象学的要因を明らかにするために、気象庁データ、自治体、民間の気象観測データなど、多所に散らばる強風域、雲、雷雨などの各種データを集め、気象場の全体像を明らかにした。とくに、下記の1.2～1.5に示されるように、最近のレーダー技術の著しい発展により、3次元的なデータが急速に充実しつつある。結果は以下の6件にまとめた。

1.1 “台風21号による暴風の特徴”では、多くの強風害が発生した関西地方を対象に、台風接近時の市街地での突風率に着目した。堺における突風率の観測値である2.2をはじめとして、都市域の観測所では軒並み大きな突風率が観測された。LESによる高精度乱流計算により、都市のビルや構造物を考慮することで、上層の強風が街区の低層まで入り込む様子が示された。

1.2 “フェーズドアレイレーダーと空港ドップラーレーダーによる台風21号の風速評価”では、最新のフェーズドアレイ式のドップラーレーダーと空港のドップラーレーダーを用いた、地上高500mから3kmまでの風ベクトルの算出結果が示された。ここで得られた風速を、成果1.1でいうところの‘上層の強風’とし、上層風と地上風の関係に関する新たな研究の萌芽が期待された。

1.3 “台風第21号の上陸に伴う内部構造の劇的変化及びメソ渦と突風の関係”では、気象庁レーダーをはじめ気象庁の各種データを総動員して台風中心付近の構造を詳細に解析し、中心の北東側に形成されたメソ渦が強風発生に大きく寄与している様子を描写した。

1.4 “台風21号に伴う突風と落雷の空間分布”では、地上で観測された突風現象とレーダーエコーを比較し、台風の位置と突風現象発生位置の空間的關係、さらには雷活動と比較して対流の活発度との關係を示した。

1.5 “2018年台風第21号時における国土交通省XRAINを用いた雨量解析”では、国土交通省が全国展開するXRAINシステムを用いて、高精度・高分解能な雨量解析結果を示した。

1.6 “2018年の台風活動に対する環境場の影響について”では、台風21号が非常に強い勢力を維持したまま接近・上陸した要因について、大規模な環境場の観点から、本年の他の台風も含めて解析した。

2. 強風災害の原因・メカニズムの解明（強風被害グループ）

建物や構造物の強風災害の原因・メカニズムを明らかにするために、現地調査により、被害の実態および、原因となった風および周辺の地物の状況を明らかにし、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を行った。さらに個別の構造物や人への被害発生プロセスを明らかにし、それをもとに突風被害指標の適用性や被害低減策の検討を行った。それらの結果は以下の3件にまとめた。

2.1 “平成30年台風21号による強風被害調査”では、台風21号によってもたらされた被害について、強風の発生状況と対応する各種被害の様子を地域別（全国・徳島県・大阪府・和歌山県・兵庫県・北海道）にまとめた。とくに、大阪府・和歌山県の被害に関しては現地調査だけではなく、小型飛行機により上空からビデオ撮影を行うことにより、ブルーシートの分布状況から、被害家屋件数の推定を行った。

2.2 “各種構造物の被害”では、個別の構造物（鉄骨鉄筋コンクリート造建築物・鉄筋コンクリート造建築物・鉄骨造建築物・門扉・看板・フェンス）や外装材（窓ガラスや屋根葺き材、軒天井）、建築物の付属物（ベランダ、手摺、軒）、伝統的建築物（神社仏閣）、さらには、高速道路ならびに一般道路橋（道路上の車の被害、船舶の橋梁への衝突も含む）、足場、太陽光発電施設、車両、配電施設の被害調査により被害の詳細を調査し、その原因・メカニズムを明らかにした。

2.3 “観測及び工作物の被害による風速推定”では、上記で得られた種々の被害について、風速と被害程度との関係を与える“日本版改良藤田スケール”を適用し、風速の推定を行った。また、スマートフォンなどにより撮影された動画を解析し、飛散物の飛散速度の推定を行った。さらに、気象庁やその他の観測記録の解析を行い、風向風速および気圧の時系列変化を明らかにし、被害指標の適用性や被害低減策の検討を行った。

3. 高潮・高波（浸水）災害の原因・メカニズムの解明（高潮被害グループ）

高潮・高波（浸水）災害の原因・メカニズムを明らかにするために、現地調査および数値シミュレーションにより、高潮による水位変化と高波の越波による被害を把握し、埋立地、人工島などの被災メカニズムに注目して検討を行った。また、台風に伴う気圧の低下による効果と風の吹き寄せ効果に着目し、現地調査に基づく観測データおよび観測データのない地点については数値シミュレーション結果を活用することで、高潮発生要因の検討を行った。これらの結果は以下の2件にまとめた。

3.1 “沿岸災害の概要”では、陸上に残された痕跡をもとに最大水位の分布を求めた。その結果、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ぐらいの浸水高が記録された。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、場所によっては想定を上回る水位が記録され、被害の大きな要因となったと思われる。これらの高潮・波浪による災害は、ハザードとしての台風・高潮・波浪の強度および領域的な特性、被害として都市部の浸水被害、河川を遡上した海水による氾濫、堤外地などの港湾施設被害、コンテナや車などの漂流物による被害が顕著であった。沿岸部の被害は、大阪湾奥を中心として、徳島から和歌山まで広範囲でみられ、主な被害は埋立地などの堤外地に集中していた。

3.2 “高潮推定と2018年台風21号ダウンスケール実験”では、2018年9月4日の日本時間午後1時から3時にかけて大阪湾を縦断し、大阪湾内部の各都市に高潮被害をもたらした台風21号を含む大気循環場について、SCALE-RMを用いた3種類のダウンスケール実験を行い、計算領域や時空間解像度に対する影響を調べた。その結果、台風に伴う局所的な強風の再現には、適切な時間解像度の境界値（本事例の場合は1時間間隔）が必要であることが確認された。また大阪湾における35m/sを超える強風は、高時空間解像度によって再現性が高まることも示唆された。また、ダウンスケール実験結果を簡易的な潮位推定の式に適用して最高潮位を推定したところ、水平格子点間隔500mの実験で、観測値と整合するような結果が得られた。その際の吸い上げの効果と吹き寄せの効果は同程度であり、吸い上げの効果は水平格子点間隔2.5km実験と500mに有為な差は見られなかったものの、吹き寄せの効果には顕著な差が見られた。吹き寄せの効果を考慮すると、高潮の効果的な推定には高空間解像度のダウンスケール実験が必要であることが示唆された。

4. 都市部における強風リスクの空間分布の解明（リスク評価グループ）

強風リスクの空間分布を明らかにするために、衛星写真や GIS データ、現地調査により住宅が密集する街区における強風被害の空間的分布を明らかにした。さらに、調査により明らかになった空間分布を説明し得る建築的および都市計画的要因を分析するとともに、その物理的メカニズムを明らかにした。これらの結果は以下の 2 件にまとめた。

4.1 “2018 年台風 21 号襲来前後に撮影された衛星写真の比較に基づく住宅の屋根被害率推定”では、とくに被害が大きかった大阪府南部の沿岸部の一般住宅を対象に、台風襲来前後に撮影された衛星写真と GIS データを用いて、住宅屋根被害の有無を屋根にブルーシートが被覆されているかによって判断し、その結果を用いて住宅屋根の被害率を推定した。また、気象モデルを用いた再解析結果と照らし合わせることで、風速に対する被害率を推定した。その結果、今回の分析対象地域では最大風速 22m/s～28m/s 程度の強風が吹いたと推定される。ただし、一部のグリッドにおいて最大風速が 30m/s～38m/s と推定された。最大風速が 22m/s～28m/s の範囲で屋根被害率は 5.5%～7.5%であった。

4.2 “現地調査に基づく住宅被害の要因分析”では、被害が広く分布した大阪府泉佐野市の一部地域を対象に現地でのヒアリング調査を行って、住宅被害状況を確認するとともに、被害拡大に影響を及ぼす要因を検討した。その結果、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、比較的新しい住宅でも外装材被害が発生したことが分かった。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と言えた。しかし、既存住宅の多くは 2007 年以前に建てられたものであるため、いまだ強風風圧による被害を防ぎきれていないことも判った。また、飛来物による二次被害は耐風設計された新しい住宅にも及んでおり、依然として甚大な強風被害が発生していたことを説明できた。

5. 災害対応、復旧・復興体制の検証（防災・減災グループ）

災害対応、復旧・復興体制の検証を行うために、インタビュー、および、アンケート調査を実施した。これらの結果は以下の4件にまとめた。

5.1 “2018 年台風 21 号の災害対応”では、台風時のライフライン企業、鉄道事業者、行政の災害対応の状況について、ヒアリング調査により明らかにした。ライフライン企業の災害対応事例としては、強風の影響により大規模な停電被害を経験した関西電力の事例について、また、高潮による浸水被害・船舶の衝突により連絡橋が被害を受けた関西国際空港の事例についてインタビュー調査結果を行った。鉄道事業者の災害対応事例としては、台風接近にともない計画運休を行った JR 西日本の災害対応について調査を行った。さらに、行政の災害対応事例としては、大阪府について調査を行った。ヒアリングの内容は、1) 時系列での対応状況（組織の設置、運休決定、再開決定、マスコミ発表など）、2) 台風 21 号の対応で上手くいった点、3) 台風 21 号の対応で上手くいかなかった点、その後の改良点、4) 計画運休を実施するようになった経緯（ハリケーン・サンディーの教訓が反映されているのか）＜JR 西日本のみ＞、5) その他であり、事前にインタビュー内容を知らせた上でインタビュー調査を実施し、各組織の災害対応状況についての調査結果をまとめ、対応の現状と今後の課題について検討した。

5.2 “関西国際空港の経済レジリエンス定量化の試み”では、Rose の経済レジリエンス指標を用いて台風 21 号による関西国際空港の被害とレジリエンスの定量化の可能性について検討した。代替的なデータとして航空機の離発着記録を用いて分析を行った。結果を見ると、離陸便は着陸便に比べ、台風の進路や状況を見ながら、ぎりぎりまで離陸の可能性を探っていたことが伺える。しかし、そのことが空港島内の多数の孤立者を生んだ原因となったことがわかった。

5.3 “台風 21 号の被害記録を目的とした GIS 作成と大阪府南部 12 市町の調査報告”では、台風 21 号の被害写真収集と公開型 GIS へのマッピングを実施した。本 GIS は、公開を継続し今後の台風被害軽減に役立てる予定である。また、大阪府南部 12 市町職員を対象としたアンケート調査を実施した結果、災害対応しつつ通常業務が停止されなかったことで人員確保に苦慮した事が明らかとなった。

5.4 “アンケート調査に基づく経済被害の推計:調査の設計と期待される成果”では、台風 21 号によって生じた強風と高潮に着目し、これらのハザードがもたらす経済影響を評価するために必要となる産業部門へのアンケート調査に関して検討した。

まとめ

中心気圧 950hPa で徳島県南部に上陸し近畿地方を縦断した台風 21 号は、近畿地方をはじめ 100 カ所の観測点で最大瞬間風速の記録を塗り替えるほどの強風を広範囲に吹かせた。その結果、これまで長い間強風の経験がなかった地域でも強風が吹き、被害が発生したと考えられる。とくに、50m/s を超える最大瞬間風速を記録した大阪府南部や和歌山県北部などに甚大な被害が見られた。代表的な被害として、住家の倒壊、外装材の破損・脱落、電柱の折損、太陽光パネル・風車の被害、広告板・ブロック塀などの倒壊、車の転倒・火災、クレーンなどの港湾施設の被害などを紹介した。さらに、今回の台風被害は、強風だけでなく大阪湾沿岸に高潮被害が発生するなど、近年大都市が初めて経験する複合災害であった。本研究では、台風による強風および豪雨の気象学的解明、強風災害の原因・メカニズムの解明、高潮（浸水）災害の原因・メカニズムの解明、都市部における強風リスクの空間分布の解明、災害対応、復旧・復興体制の検証に焦点を絞り、近畿・四国地方を中心に全国の防災研究者を広く集め、文理融合の研究調査を実施し、その成果をまとめた。

文部科学省気候変動リスク情報創生プログラム（平成 24～28 年度）などにより、地球温暖化による将来気候のもとでは、将来、強大な台風の発生頻度の増大が示唆されている。今回、都市域に強風と高潮を伴って直撃した「非常に強い」台風 21 号による災害は、今後の日本において繰り返されることが予想される複合的な災害の典型である。本研究の成果は、将来の強大な台風に伴う複合災害に備えるための、またとない資料であり、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ることを願っている。

最後に、被害に遭われた皆様に、心よりお見舞い申し上げます。また復旧活動にあたられている皆様、ならびに、さまざまな支援活動に携わられている皆様に深く敬意を表します。

謝 辞

本研究を行うにあたり、関係諸機関・被害に遭われた方々には調査などに多大な協力いただきました。ここに記して感謝の意を表します。また、本研究の成果の一部は、平成 30 年度日本風工学会「突風性災害調査費」の補助を受けて行われました。

以下の成果を資料として添付する.

研究成果もくじ

1. 台風による強風および豪雨の気象学的解明

緒言	1-1
1.1 台風 21 号による暴風の特徴 (石川裕彦, 竹見哲也)	1-3
1.2 フェーズドアレイレーダーと空港ドップラーレーダーによる台風 21 号の風速評価 (佐々浩司, 佐藤晋介, 嶋田宇大)	1-9
1.3 台風第 21 号の上陸に伴う内部構造の劇的変化及びメソ渦と突風の関係 (嶋田宇大, 小山 亮, 清水慎吾)	1-17
1.4 台風 21 号に伴う突風と落雷の空間分布 (小林文明, 高木みゆき, 金井紀江)	1-37
1.5 2018 年台風第 21 号時における国土交通省 XRAIN を用いた雨量解析 (中北英一, 山口弘誠, 小坂田ゆかり)	1-43
1.6 2018 年の台風活動に対する環境場の影響について (飯塚 聡)	1-47

2. 強風災害の原因・メカニズムの解明

2.1 台風 21 号による強風被害調査 (野田 稔, 友清衣利子, 長尾文明, 竹内 崇, 堤 拓哉)	2-1
2.2 各種構造物の被害 (奥田泰雄, 喜々津仁密, 沖 佑典, 高森浩治, ガヴァンスキ江梨, 八木知己, 野口恭平, 木村吉郎, 高橋弘樹, 大嶋勝利, 吉田昭仁, 丸山 敬)	2-25
2.3 観測及び工作物の被害による風速推定 (金 容徹, 岩下久人, 野田 博, 野田 稔, 松井正宏)	2-87

3. 高潮・高波（浸水）災害の原因・メカニズムの解明

3.1 沿岸災害の概要 (森 信人, 志村智也, 安田誠宏)	3-1
3.2 高潮推定と 2018 年台風 21 号ダウンスケール実験 (梶川義幸)	3-9

4.	都市部における強風リスクの空間分布の解明	
4.1	2018 年台風 21 号襲来前後に撮影された衛星写真の比較に基づく住宅の屋根被害率推定	(西嶋一欽, 河野祐哉, 竹内 崇, 友清衣利子, 野田 博) 4-1
4.2	現地調査に基づく住宅被害の要因分析	(友清衣利子, 竹内 崇, 西嶋一欽, 野田 博) 4-7
5.	災害対応, 復旧・復興体制の検証	
5.1	2018 年台風 21 号の災害対応	(牧 紀男) 5-1
5.2	関西国際空港の経済レジリエンス定量化の試み	(永松伸吾) 5-9
5.3	台風 21 号の被害記録を目的とした GIS 作成と大阪府南部 12 市町の調査報告	(池内淳子) 5-11
5.4	アンケート調査に基づく経済被害の推計:調査の設計と期待される成果	(多々納裕一, 梶谷義雄, 竹林幹男) 5-17

第 1 章

気象学的側面からの研究

緒言

この章には、気象学の観点からの研究報告 6 件を記載する。第 1 節（台風 21 号による暴風の特徴）では、多くの強風害が発生した関西地方を対象に、台風接近時の市街地での突風率に着目した。堺の 2.2 をはじめとして、都市域の観測所では軒並み大きな突風率が観測された。さらにラージ・エディイー・シミュレーションによる高精度乱流計算により、都市のビルや構造物を考慮することで、上層の強風が街区の低層まで入り込む様子が示される。

第 2 節から 5 節はレーダー観測に基づく解析である。第 2 節（フェーズドアレイレーダーと空港ドップラーレーダーによる台風 21 号の風速評価）は、複数のレーダーの観測結果から算出した、地上高 500 m から 3 km までの風ベクトルが呈示されている。ここで得られた風速を前節で言うところの‘上層の強風’とすれば、上層風と地上風の関係に関する新たな研究の展開が期待される。第 3 節（台風第 21 号の上陸に伴う内部構造の劇的変化及びメソ渦と突風の関係）では、気象庁レーダーをはじめ気象庁の各種データを総動員して台風中心付近の構造を詳細に解析して、台風中心の北東側に形成されたメソ渦が強風発生に大きく寄与している様子を描出している。第 4 節では、地上で観測された突風現象とレーダー・エコーを比較して、台風の位置と突風現象発生位置の空間的關係、さらには雷活動と比較して対流の活発度との関係を示した。第 5 節では、国土交通省が全国展開する XRAIN システムを用いて、高精度・高分解能な雨量解析結果が示される。

以上、2～5 節に記述されるように、最近のレーダー技術の著しい発展により、3 次元的なデータが急速に充実しつつある。気象学的側面からの研究の大半がレーダーを用いた研究で占められている、という点において、本報告書は、次世代の台風防災、台風研究の動向を指し示す、エポックメイキングな報告となる予感がする。

最後の第 6 節は、台風 21 号が非常に強い勢力を維持したまま接近・上陸した要因について、大規模な環境場の観点から、また本年の他の台風も含めて解析した研究である。グローバルな環境変化が進行しつつある今日、本節の観点から台風活動を調査し、その経年変化を追っていくことが、これからの台風災害研究に求められている。

第 1 章 1

台風 21 号による暴風の特徴

Characteristics of Severe Winds due to Typhoon Jebi (2018)

石川裕彦^{*1} 竹見哲也^{*2}

Hirohiko ISHIKAWA, Tetsuya TAKEMI

SUMMARY

This study examined the characteristics of severe winds induced by Typhoon Jebi (2018) during its approach to and landfall over the Kinki region. Surface observation data obtained not only from Japan Meteorological Agency but also from local governments were used to show the regional characteristics of winds. Some of the damages occurred in a business district of Osaka City were demonstrated. Strong winds in an urban district of Osaka City were quantitatively estimated by merging a mesoscale meteorological and a large-eddy simulation model.

key words: severe winds, meteorological model, large-eddy simulation

1.1.1 はじめに

2018 年 9 月に近畿地方を縦断した台風 21 号により、大阪湾沿岸で高潮・高波が発生し、また近畿地方の広域で強風が吹き、建築構造物の被害、樹木の被害、電力網への被害、飛散物による被害、さらには関西空港の浸水といった様々な被害が生じた。この台風 21 号は、近畿地方においてかつて大きな被害をもたらした室戸台風や第二室戸台風と似たコースを辿り、大阪市内の気象台観測点では、室戸台風・第二室戸台風に次いで観測史上歴代 3 位となる最大瞬間風速 47.4 m/s が記録された。大阪市内でも強風による被害が各地で発生し、特に中心市街地では建築

構造物や街路樹に大きな被害が生じた。

市街地内での風は、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。したがって、台風 21 号による強風は、市街地内では局所的に極めて強かった可能性がある。

本研究では、台風 21 号に伴う暴風の特徴を地上観測データにより調べる。また、暴風による市街地での被害状況について、大阪市難波での状況気象モデルと LES モデルとを併用して台風 21 号により生じた暴風を定量的に評価する。

* 1 京都大学防災研究所 教授 ishikawa@storm.dpri.kyoto-u.ac.jp

Professor, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

* 2 京都大学防災研究所 准教授

Associate Professor, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

1.1.2 地上風の解析

アメダス、大阪市、京都市のデータによる地上風を収集した。アメダス観測点では良好にデータ取得されていたが、自治体の環境観測点の多くで、台風の最接近時に一時記録が停止したため、台風に伴う最大風速の情報は十分には得られていない。そこでアメダス観測点のデータを対象に、台風が通過した9月4日の00:10JSTから9月5日00:00JSTまでの各10分間について、10分間の平均風速－瞬間最大風速の散布図を作成し、線形回帰を求めその傾きを突風率とした。

表1.1.1には、和歌山県、兵庫県、大阪府、京都府、滋賀県の気象庁観測点の中で、日最大平均風速が 15 ms^{-1} を越える観測地点を、突風率の大きい順に並べた。堺(2.2)、枚方(2.1)、大阪(1.95)、京都(1.91)をはじめ、都市域の観測

表 1.1.1 四国・近畿地方の気象官署で2018年9月4日に観測された突風率。

Table 1.1.1 Gust factor at JMA observatories along the Typhoon track over 10 minute interval.

地点 Site	突風率 Gust Factor	日最大(Daily maximum)	
		10分平均風速 10 min wind [m/s]	瞬間最大風速 Max gust [m/s]
堺	2.20	20.3	43.6
能勢	2.13	17.3	31.6
川辺	2.11	23.4	42.2
枚方	2.10	19.3	40.2
南小松	2.10	16.3	32.2
東近江	2.01	16.5	31.7
大阪	1.95	23.7	47.4
熊取	1.93	26.6	51.2
京都	1.91	21.7	39.4
土山	1.87	18.6	33.2
米原	1.85	18.8	32.2
京田辺	1.84	18.7	34.4
長浜	1.82	19.3	33.6
彦根	1.81	23.5	46.2
三木	1.73	15.3	26.9
八尾	1.72	16.8	36.5
洲本	1.68	21.1	34.1
三田	1.68	18.7	29.4
豊中	1.66	18.3	38.1
今津	1.63	20.2	35.9
和歌山	1.60	37.6	57.4
南紀白浜	1.60	33.3	45.8
明石	1.46	25.2	31.6
神戸	1.43	23.0	41.9
友が島	1.36	42.5	51.8
関西空港	1.32	44.9	58.1
神戸空港	1.29	34.5	45.3

地点においても、大きな突風率が観測されている。表の突風率は一日のデータの線形回帰で得たものであるから、個々の10分間で見るとこの値よりも大きな突風率が実現している。これらの値は、教科書的に言われている値(1.5～2)の上限かそれを越える値であり、強風時に都市域で吹く突風に関して、改めて考察する必要があることを示唆する。

1.1.3 大阪市難波地区での被害状況

大阪市難波地区では、建物、看板、街路樹に多数の被害が見られた。南海難波駅前の周辺地区での現地被害調査時に撮影した写真を以下に示す。古い木造家屋の大破(図1.1.1)、建物の壁や看板・パネルの剥がれ(図1.1.2)、御堂筋沿いや南海難波駅前の広場の街路樹の被害(図1.1.3)など、限られた範囲ではあったものの、様々な被害が発生したことがわかる。



図 1.1.1 建物の被害

Fig. 1.1.1 A damage to an old house



図 1.1.2 壁や看板などの被害

Fig. 1.1.2 Damages to walls and panels

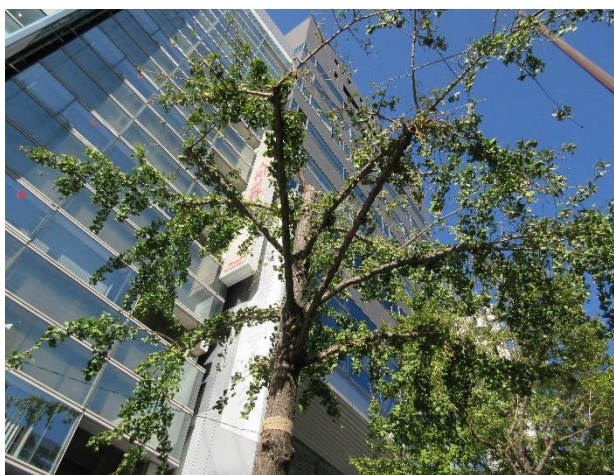
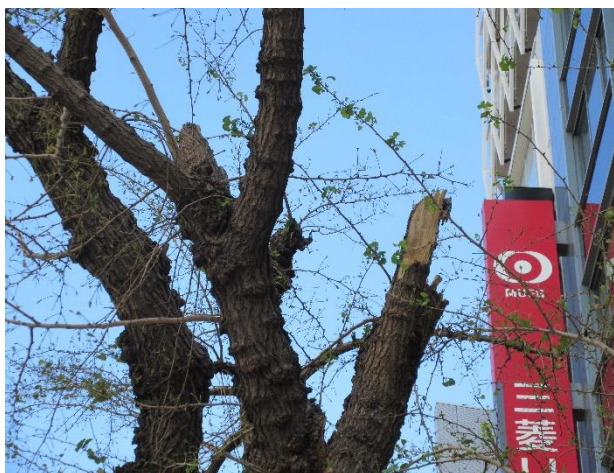
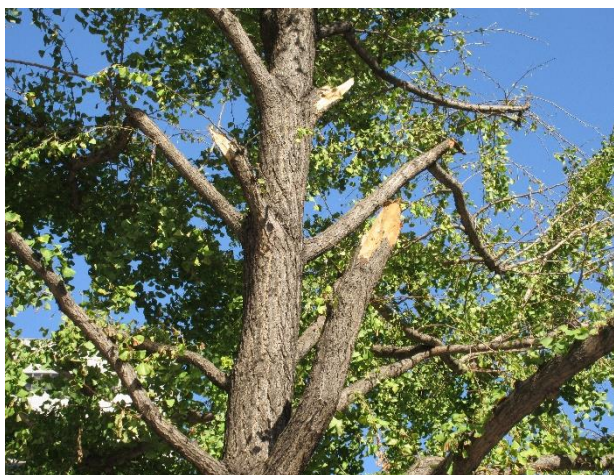


図 1.1.3 街路樹の被害
Fig. 1.1.3 Damages to street trees

ここには写真を掲載しないが、JR 難波駅周辺においても、街路樹の幹や枝が折れるといった被害が多数見られた。また、折れるまでには至ってなくとも、枝が極端に曲がった状態になった樹木もあった。これは強風が持続的に吹くことで、樹木が曲がってしまったものと思われる。

1.1.4 気象モデル・LES モデルの融合による暴風の解析

1.1.4.1 数値シミュレーションの設定

台風など気象場の再現には、領域気象モデルである Weather Research and Forecasting (WRF)モデル (Skamarock et al. 2008) を用いた。計算領域は、4.5 km 格子幅の Domain 1 を設定して日本列島および周辺の北西太平洋の 2500 km × 2700 km の範囲をカバーし、その内側に 0.9 km 格子幅の Domain 2 を設定して近畿地方を中心とした 300 km × 300 km の範囲をカバーするようにした (図 1.1.4)。モデルの鉛直上端高度は 20 hPa とし、鉛直方向の格子レベル数は 56 とした。地図投影図法は、ランベルト図法を用いた。また、モデルの地形は GTOP030 から作成し、土地利用の決定には MODIS に基づき分類された土地利用データを利用した。

モデルの初期値・境界値には、気象庁の GSM 解析値を用いた。Domain 1 にスペクトルナッジングを課すことにより、総観場の効果をモデルに取り込むようにした。これにより、台風の経路の再現性が良くなることが期待できる。また、GSM の異なる解析時刻を計算開始時刻と設定することにより、計算開始時刻の違いによる台風の再現性の不確実性を考慮したアンサンブル計算を実施した。これにより、近畿地方で実際の気象条件の下で地形の影響を受けて吹く風を量的に再現することを試みた。

次に、市街地内での風を再現するために、LES モデル (Yoshida et al. 2018) を用いた。国際航業の GIS データを用いて大阪市街地 (南北 3 km ・ 東西 2 km) の実際のビル群を 2 m メッシュで LES モデルに表現した (図 1.1.5)。本計算領域の上流部にドライバー領域を設け、乱流を生

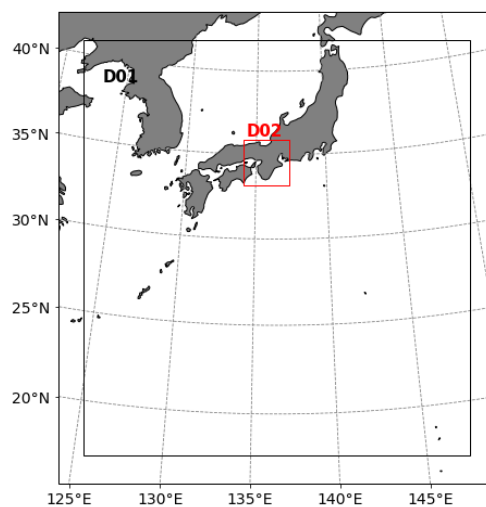


図 1.1.4 WRF モデルの計算領域
Fig. 1.1.4 The computational domains of the WRF model

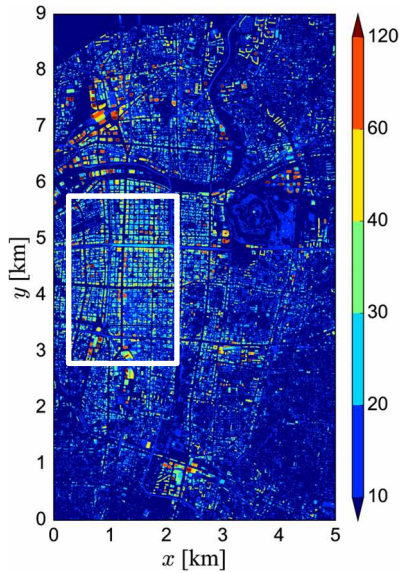


図 1.1.5 大阪市街地での建物高さの分布と LES 計算領域（白枠で囲った範囲）

Fig. 1.1.5 The building heights in Osaka City and the computational domain of the LES model (white box)

成した。南風を想定し、計算領域と流入面を設定した。LES では、5400 秒分の計算を行い、最後の 1800 秒間を解析対象とした。

LES モデルでは、モデルで形成される境界層上端高度 ($z_\infty = 326 \text{ m}$) の風速で無次元化し、都市キャノピー内での風速の時空間変動を精密に表現している。この LES 無次元風速を、WRF で計算された高度 z_∞ での風速を基準値とし、実風速に換算した。

1.1.4.2 結果

WRF モデルにより、異なる開始時刻であっても、台風 の経路や強度の再現性は大きくは変わらず、すべてのケ ースで良好であった。図 1.1.6 は、Domain 2 を中心とした 範囲における WRF により計算された台風の経路と観測 値であるベストトラックとを示す。計算結果には多少の ばらつきはあるものの、おおむね良好な再現性だと言え る。ここでは図示しないが、中心気圧や最大風速について も、WRF 計算により良好な結果が得られた。

大阪市および関西空港島でのアメダス地上観測値と比 べると、10 分間の平均風速については WRF により良く 表現できていた (図 1.1.7)。しかし、WRF では瞬間値の 再現は困難である。また、WRF では、都市のビルや構造 物は陽に表現されていないため、粗度の影響を受ける境 界層の構造も再現することができない。粗度境界層での 風の非定常かつ空間非一様な変動を量的に表現すること が LES の主眼である。図 1.1.8 は、WRF と LES による風 速の鉛直プロファイルを示す。LES では、下層 100 m で

ビル群の影響を受け、高度が下がると風速が急減するこ とが分かる。

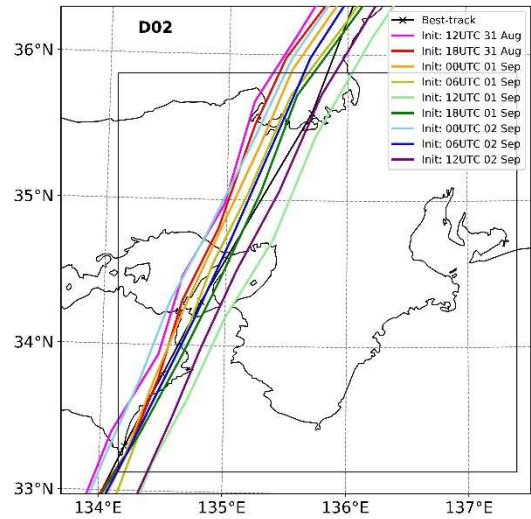


図 1.1.6 台風経路（ベストトラックおよび WRF 計算）
Fig. 1.1.6 The best track and the simulated tracks of the typhoon

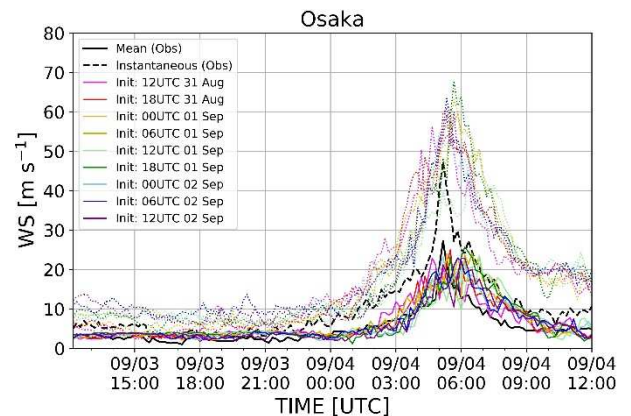


図 1.1.7 大阪市気象台での観測風速（実線：平均風 速；点線：1 分間の最大瞬間風速）と WRF 計算によ る風速（実線：10 m 高度風速；点線：326 m 高度風 速）

Fig.1.1.7 The wind speeds observed at the Osaka observation site and simulated by the WRF model. The black solid (dotted) line indicates the observed mean (instantaneous) wind, while the colored solid (dotted) lines indicate the simulated winds at the height of 10 m (326 m).

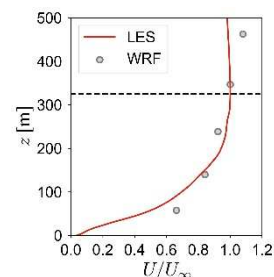


図 1.1.8 WRF と LES による風速の鉛直プロファイル
Fig.1.1.8 The vertical profile of the wind in WRF and LES

図 1.1.9 は、LES の計算時間内で見られたメッシュ毎の風速の最大値の分布を示す。数値が 1 に近いほど上空 z_{∞} の風と同じであることを意味する。図 1.1.9 から、0.8 を超える場所が多数あり、ところによっては 0.9 を超えて 1 に迫るような地区もあることが分かる。

一方、WRF モデルによるシミュレーション結果から、台風通過に伴って大阪市上空 z_{∞} の高さでは、風速が最大で 70 m/s に達していたと推定される。このことから、WRF での高度 z_{∞} の風速により、図 1.1.9 に示す LES の無次元風速を実風速に換算すると、市街地内では、場所によって、瞬間的に 60 m/s から 70 m/s にも迫る暴風が吹いていたと推定できる。

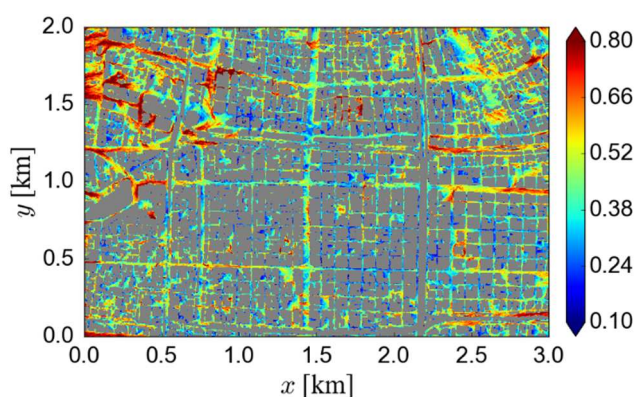


図 1.1.9 大阪市街地での地上 10 m での最大瞬間風速の分布

Fig. 1.1.9 The maximum instantaneous wind speeds at the 10-m height in a business district of Osaka City

1.1.5 まとめ

WRF と LES を組み合わせ、台風 21 号に伴う大阪市街地内での暴風を定量的に評価することができた。高層ビルが林立する大都市では、台風などの極端現象により極めて強い風が吹く可能性がある。近年の都市再開発、将来の気候変動を考慮し、大都市にひそむ暴風リスクを理解することが大切である。

謝辞

南海難波駅周辺地区での現地調査では、南新会・難波 4 丁目振興町会の山下年文氏にお世話になりました。ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, X.-Y. Huang, W. Wang, and J. G. Powers, “A description of the Advanced Research WRF version 3”, NCAR Tech. Note, NCAR/TN-47 + STR, 113 pp., (2008)
- 2) Yoshida, T., T. Takemi, and M. Horiguchi, “Large-eddy-simulation study of the effects of building height variability on turbulent flows over an actual urban area”, Bound.-Layer Meteor., Vol. 168, pp. 127-153, doi: 10.1007/s10546-018-0344-8, (2018)

第1章 2

フェーズドアレイレーダーと空港ドップラーレーダーによる台風 21 号の風速評価 Estimation of Wind Velocity by Phased Array Radar and Airport Doppler Radars

佐々浩司*¹ 佐藤晋介*² 嶋田宇大*³

Koji SASSA, Shinsuke SATOH, Udai SHIMADA

SUMMARY

Wind field around typhoon, ‘Jebi’, was evaluated by using the data obtained by Kobe phased array radar (PAWR), Itami and Kansai Doppler radars for airport weather (DRAW), and JMA Osaka radar. Wind velocity fields were obtained from echo tracking of PAWR data and dual analysis with DRAWs data and JMA radar data. The results showed that Ekman spiral was formed and conversion flow toward the typhoon eye was observed in the lower layer less than 1 km AGL. Rotational flow pattern was observed in the higher layer more than 2 km AGL. But maximum wind was found to appear in the lower layer. Maximum velocity was estimated to be more than 80 m/s at 1km AGL.

key words: phased array radar, Doppler radar for airport weather, dual analysis

1.2.1 はじめに

2018年の台風21号は9月4日14時頃、中心気圧955hPa、最大風速 45m/s の非常に強い勢力を保ったまま、神戸市に再上陸し、近畿地区をはじめとする広い範囲に強風被害をもたらした。大阪管区气象台における最大瞬間風速は14時3分に47.4m/sを記録している¹⁾。ここでは、強

風をもたらした台風21号の上空における気流がどのようなであったかを明らかにすることを目的として、NICTが設置している神戸フェーズドアレイレーダー(神戸 PAWR)、大阪空港と関西空港に設置されている空港ドップラーレーダー(DRAW)および、気象庁大阪ドップラーレーダーによりドップラー速度を中心として風速評価を試みた結果

* 1 高知大学教育研究部自然科学系理工学部門 教授 sassa@kochi-u.ac.jp

Professor, Science cluster Kochi University

* 2 情報通信研究機構 研究マネージャー

Research Manager, Research Institute of Information and Communications Technology

* 3 気象庁気象研究所台風研究部 主任研究官

Senior researcher, Typhoon Research Department, Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency



図 1.2.1 解析に用いたレーダー位置

Fig. 1.2.1 Locations of radars

について報告する。

1.2.2 解析データと解析

解析に用いた近畿地区におけるレーダー配置を図 1.2.1 に示す。国土交通省 XRAIN の X バンド MP レーダーは解析対象としていない。神戸 PAWR は X バンドのフェーズドアレイレーダーで、半径 60km の範囲内を 30 秒毎にボリュームスキャンしている。また、伊丹空港と関西空港の DRAW は C バンド MP ドップラーレーダーでビーム幅 0.7 度の高解像度をもち、半径 120km の範囲内を 0.7 度仰角の PPI 観測を 1 分毎、ボリュームスキャンを 5 分毎に行なっている。気象庁大阪レーダーは C バンドドップラーレーダーで、半径 250km の範囲内を 5 分毎にボリュームスキャンしている。ここでは、神戸 PAWR については単体でのデータ解析を行い、各高度の CAPPI データを得るとともに、スキャン 30 秒毎のエコーが対流により大きく変化することなく、水平風により移流するものと仮定してエコートラッキングにより水平風速場を求めた。エコートラッキングには反射強度が 2dBZ 毎のエコー分布を作成した上で、画像を PIV 解析ツールである Flownizer により解析を行った。一方、DRAW と大阪レーダーについては各仰角 PPI における反射強度とドップラー速度の分布を調べるとともに、2 基ずつでデュアル解析を行い、各高度断面で水平風分布を求めた。これらの解析には気象研究所開発の Draft を用いた。

1.2.3 解析結果

1.2.3.1 神戸 PAWR の解析

台風 21 号は 14 時頃神戸市に再上陸した。図 1.2.2 に神戸上陸前の 12:40JST における神戸 PAWR により観測さ

れた各高度断面の反射強度とドップラー速度分布を示す。反射強度において紫色のシェード部分は降雨減衰によりエコーが弱くなっている領域に相当しており、対応する領域のドップラー速度はカラーバーの示す -60m/s 以上ではなく、欠測を示す。この時間帯は台風が神戸上陸前であり、観測領域は台風中心から見て北東象限に相当している。このため、高度 2km 以上においては台風の旋回流に対応する南東風が卓越していた。一方、1km 以下は徐々に東寄りの風に転向しており、下層では地表面摩擦により台風中心に向けて収束する成分が支配的となるようなエクマンスパイラルが認められた。風速は上層に行くとともに増加し、高度 0.5km では最大 30m/s 程度であるのに対し、3km では 50m/s 以上も観測された。エコー強度は 40dBZ 程度で目の壁雲付近であるにも関わらず、さほど強い降水域は認められなかった。

この後は台風の目の接近に伴い、レドーム減衰によって観測領域にエコーが見られない時間帯が 14 時頃まで続いたが、ドップラー速度から判断される観測領域内の主風向は反時計まわりに回転し、14 時以降は西風成分が卓越した状況となっていた。14:20JST における様子を図 1.2.3 に示す。大気境界層におけるエクマンスパイラルは図 1.2.2 ほど顕著には認められず、下層から上層までわずかに南寄りに風向が転向するものの、全体的に西風成分が支配的であった。この時間帯においても大阪湾内に 50m/s を超えるドップラー速度が観測されているが、大阪近辺に被害をもたらしたと思われる南風成分については神戸 PAWR のドップラー速度についてもっとも感度の悪い位置関係であるため、エコーパターンのトラッキングにより、風速ベクトルの評価を試みた。高度 1km における 12:40JST と 14:20JST の解析結果を図 1.2.4 に示す。いずれも実際の降水エコーとは異なる放射状のパターンが認められるが、これは神戸 DRAW の CAPPI データ作成にあたっては空間解像度を最大限に高めるため、補間のための影響円半径を比較的小さくとしていることも影響していることが考えられる。この放射状パターンのため、エコートラッキングは観測領域の大半で適切に評価できていないが、関西空港周辺の大阪湾付近（図 1.2.4 の南東象限）では、エコーの移動に対応した南風成分（12:40JST）や南西風成分（14:20JST）が得られた。いずれの風速ベクトルもレーダー視線方向成分についてはドップラー速度と整合的であり、フェーズドアレイレーダーのエコートラッキングにより風速場を求める可能性について示すことができた。14:20JST における南西風については、最大値 69m/s を含み、 50m/s を超える領域が認められた。

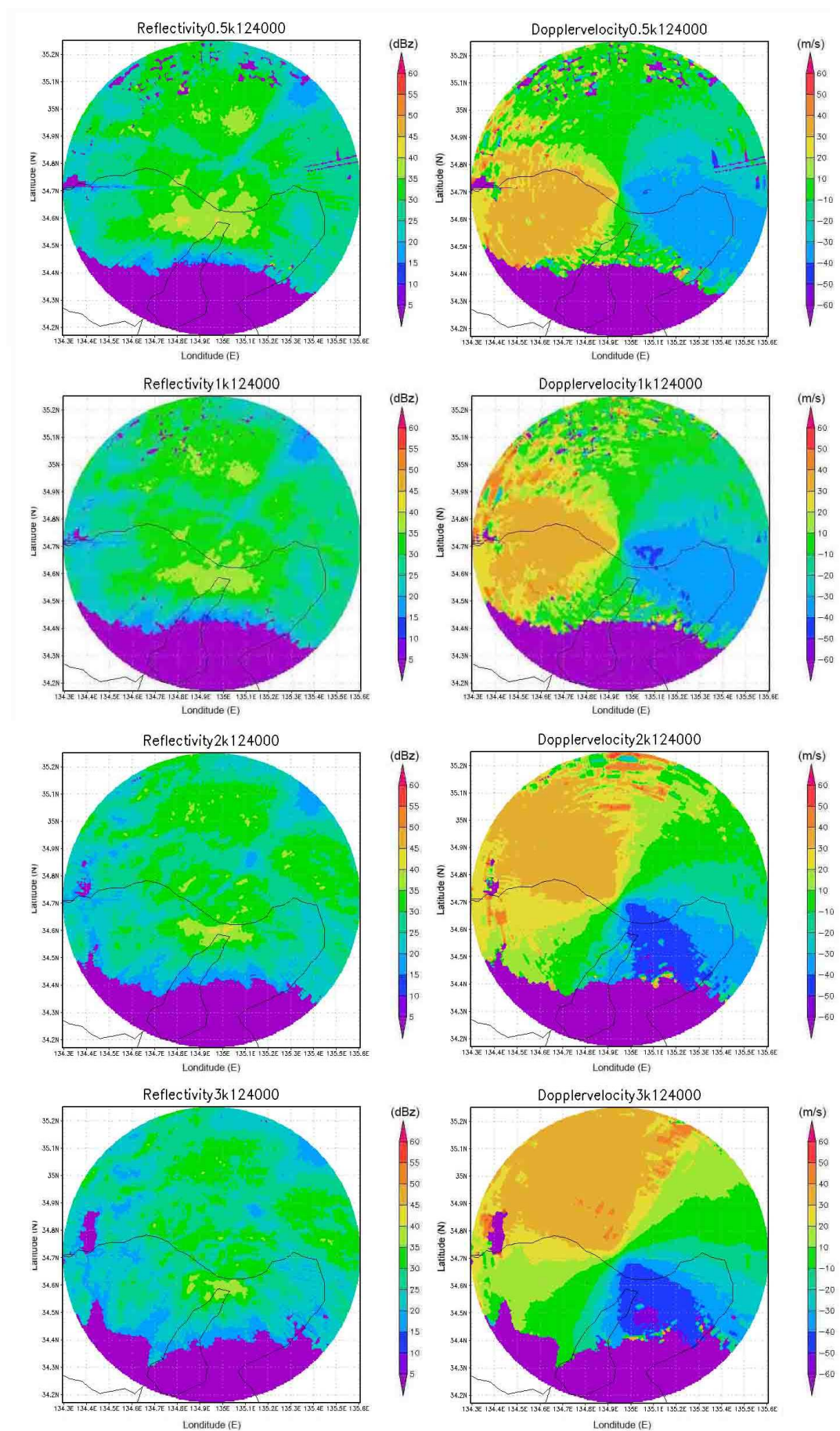


図 1.2.2 12:40JST における各高度の反射強度(左)とドップラー速度(右) 高度は上より 0.5km, 1km, 2km, 3km.

Fig.1.2.2 Reflectivity (left) and Doppler velocity (right) at 12:40JST at 0.5km, 1km, 2km, 3km AGL.

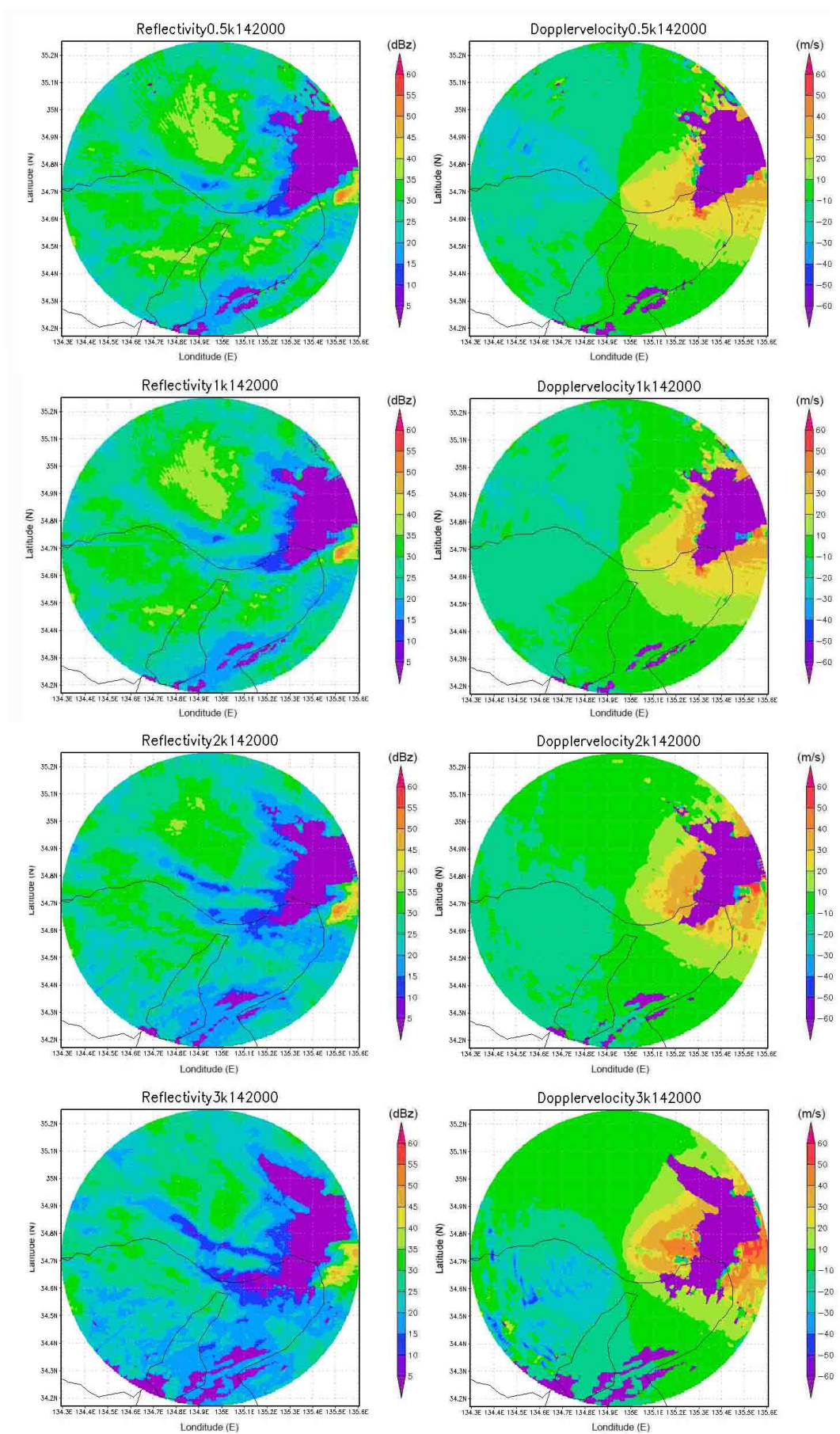


図 1.2.3 14:20JST における各高度の反射強度(左)とドップラー速度(右) 高度は上より 0.5km, 1km, 2km, 3km.

Fig.1.2.3 Reflectivity (left) and Doppler velocity (right) at 14:20JST at 0.5km, 1km, 2km, 3km AGL.

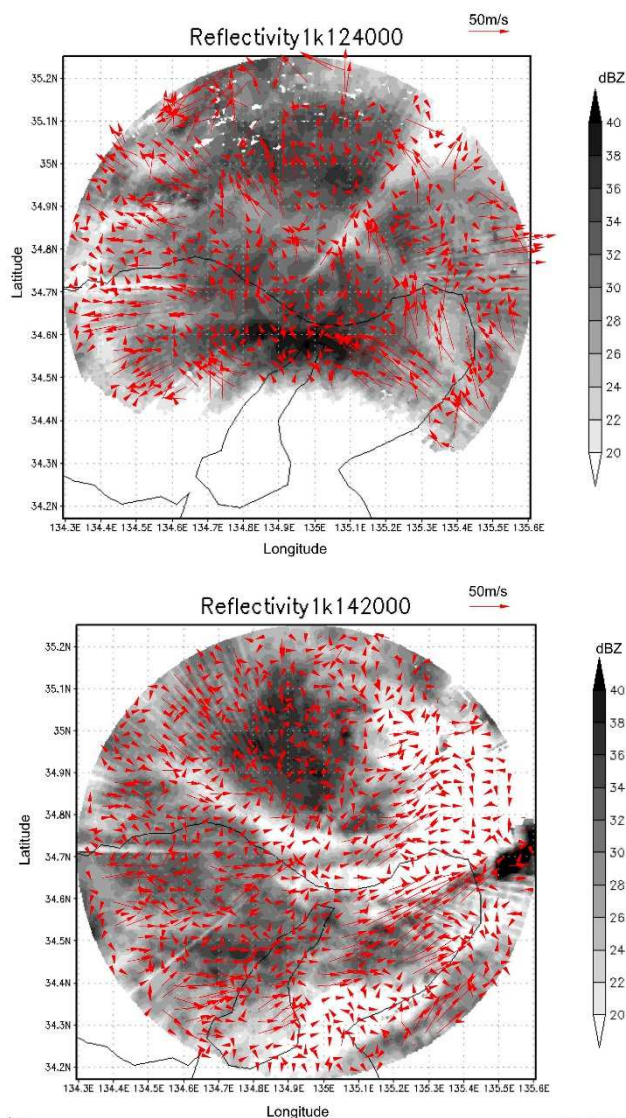


図 1.2.4 神戸 PAWR 反射強度とエコートラッキングによる風速ベクトル分布, 上: 12:40JST, 下: 14:20JST
Fig.1.2.4 Reflectivity of Kobe PAWR and wind velocity field obtained by echo tracking, upper shows 12:40JST and lower shows 14:20JST.

1.2.3.2 各レーダーの PPI 観測データ

ここでは、各地で最大瞬間風速を記録した時間に近い各レーダーの PPI 観測により、上空の風速を評価する。図 1.2.5 は 13:40JST における大阪レーダーの仰角 1.2° における PPI データを示す。これは、関西空港において最大瞬間風速 58.1m/s の南南西の風を観測した 13:38JST に最も近い。図 1.2.5 においては関西空港を含む大阪湾に台風の目に相当する欠測域が見られるものの、関西空港よりやや北東の地域では強い南西風の存在を示すドップラー速度についてナイキスト値以上の風速により折り返しエラーが生じている領域が認められる。関西空港付近における仰角 1.2° の観測が高度が約 1.2km に相当している

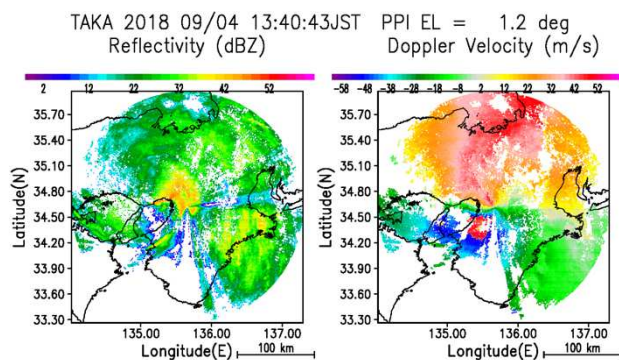


図 1.2.5 大阪レーダーにおける仰角 1.2° の PPI データ
Fig.1.2.5 PPI data at 1.2 deg. in elevation angle observed by Osaka radar

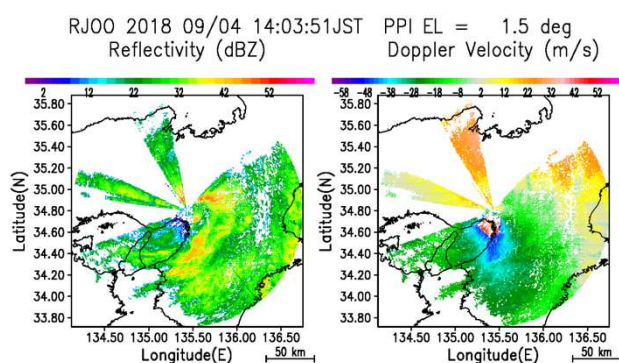


図 1.2.6 伊丹 DRAW における仰角 1.5° の PPI データ
Fig.1.2.6 PPI data at 1.5 deg. in elevation angle observed by Itami DRAW

ことから、地上付近の風が収束の影響により転向して南南西の風となっているか、レーダーが動径方向成分のドップラー速度しか捉えられないために、上空で見かけ南南西の風となっていることを考えると、地上の強風と上空 1.2km における風速はほぼ整合していると考えられる。

図 1.2.6 は 14:03JST における伊丹空港 DRAW による仰角 1.5° の PPI データを示す。大阪管区気象台では同時刻の 14:03JST に最大瞬間風速 47.4m/s の南風を観測している。図 1.2.6 においては、大阪市のエコーが弱く管区気象台上空のドップラー速度が欠測しているが周辺にやはり南風成分のドップラー速度がナイキスト値 53.3m/s を超えて折り返しエラーを起こしている領域が認められるため、上空はより強い強風であったことが推定される。

1.2.3.3 DRAW によるデュアル解析

デュアル解析は伊丹 DRAW と関空 DRAW、伊丹 DRAW と大阪レーダー、関空 DRAW と大阪レーダーの全ての組み合わせで実施した。折り返し補正は Draft のオプション

を用いて実施したが、図 1.2.5 や図 1.2.6 に見られるようにレーダー近傍で強風が観測される場合、折り返し補正が返って誤った結果をもたらす場合もある。ここでは比較的妥当な解析結果が得られている伊丹 DRAW と関空

DRAW のデュアル解析結果のみを示す。図 1.2.7, 図 1.2.8 はそれぞれ 13:12JST と 14:03JST のデュアル解析結果を示す。13:12JST は伊丹のみ、14:03JST は関空のみ折り返し補正を行なった結果により解析した。図 1.2.7 において

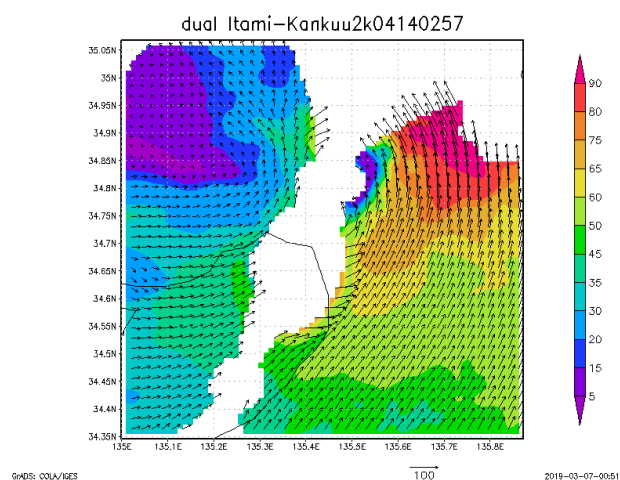
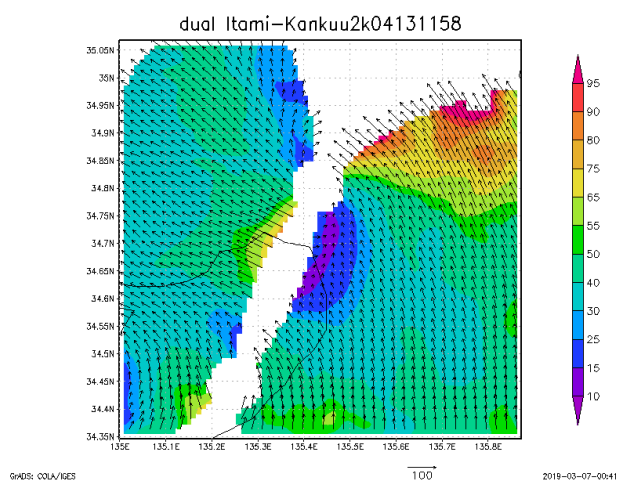
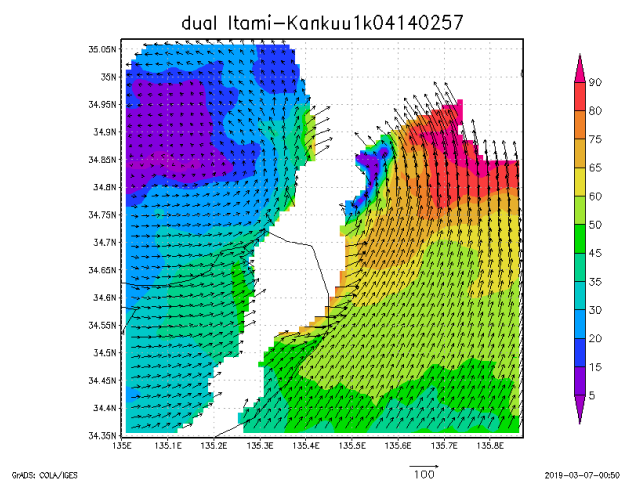
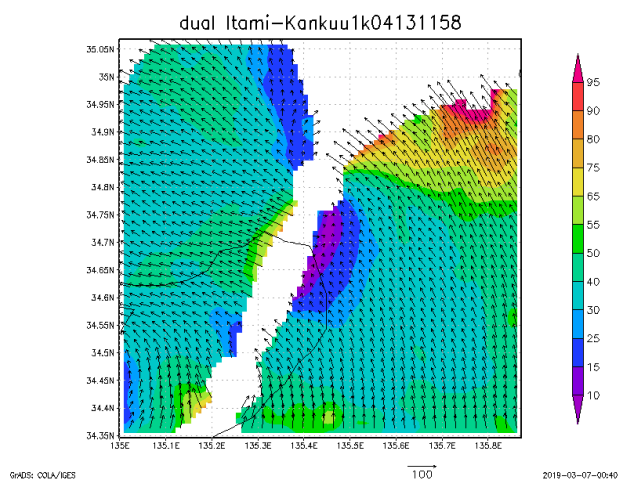
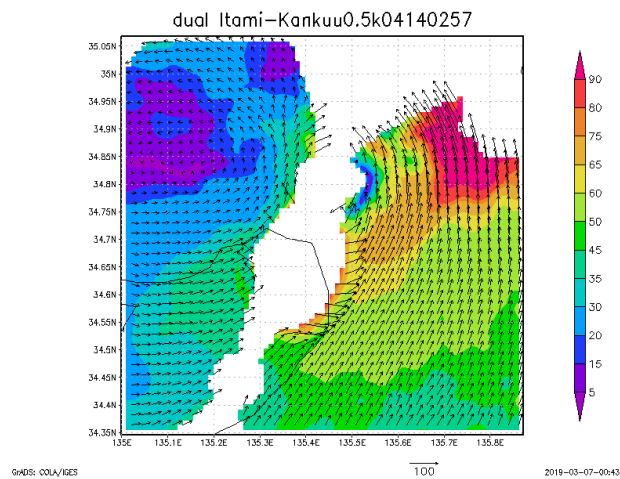
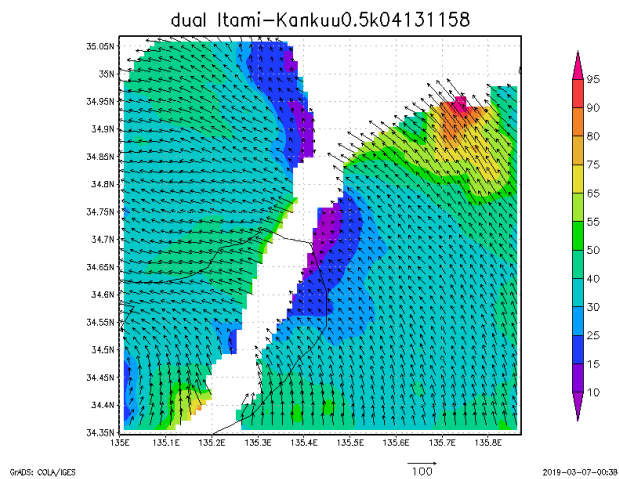


図 1.2.7 13:12JST における風速ベクトルと風速値の分布
上より高度 0.5km, 1km, 2km

Fig.1.2.7 Distribution of wind velocity at 13:13JST at
0.5kmAGL (upper), 1kmAGL (middle), 2kmAGL (bottom) .

図 1.2.8 14:03JST における風速ベクトルと風速値の分布
上より高度 0.5km, 1km, 2km

Fig.1.2.8 Distribution of wind velocity at 14:03JST at
0.5kmAGL (upper), 1kmAGL (middle), 2kmAGL (bottom) .

は台風の北東象限にあたる南東風が認められた。両レーダーを結ぶ直線上とその近傍の大阪湾周辺では正確なデュアル解析ができていないが、大阪市内はいずれの高度も 25m/s 以上の強風となっていることがわかる。また、高度が高くなると南東風から南風成が卓越する傾向にあった。伊丹空港北東部には風速が 80m/s を超える強風も認められるが、これは折り返しの過補正によるものと考えている。

図 1.2.8 は台風が神戸市に再上陸し、大阪管区气象台において瞬間最大風速を観測した時間帯の様子を示す。大阪湾と大阪市の広い範囲で 60m/s を超える強風が認められた。京都市近傍の 90m/s を超える強風については、図 1.2.6 のような各レーダーのドップラー風速データを見てもそのような強風が存在していないため、関空 DRAW データの過補正とデュアル合成のエラーによるものと考えている。

13:12JST と 14:03JST における各高度データを用いて、図 1.2.9 に示す大阪管区気象台上空の hodograph を作成した。地上風速は大阪管区气象台における 13:10JST の最大風速観測値と 14:03JST の最大瞬間風速観測値を用いた。神戸 PAWR の結果にも見られたように、13:12JST においては風向が上空から下層に向けて反時計回りに転向するエクマンスパイラルが明瞭に認められた。高度別に見ると、最も風速が大きいのは高度 3km の 40.3m/s であった。高度 1km では 25.1m/s 程度であるのに対し、より下層の 0.5km では 25.3m/s であり、下層で一部風が強くなる傾向が認められた。一方、14:03JST ではエクマンスパイラルは顕著ではなく、すべての高度南南西の強風となっていたが、やはり下層の高度 0.5km が風速が大きく 67.6m/s もの強風が認められた。

1.2.4 議論

ドップラーレーダーによる台風やハリケーンの観測例²⁾⁵⁾は多くあるものの、風速が 60m/s を超える観測事例⁴⁾は比較的少ない。本事例はかなり強い風を低高度まで観測している事例として重要である。今回の解析においてはまだ十分に折り返しエラーを補正できていないが、少なくとも大阪市周辺に台風 21 号が最接近した際には 60m/s を超える風が広範囲で生じていたことが考えられる。今回評価できたのは神戸 PAWR のパターントラッキングによって得た 69m/s とデュアル解析によって得た 67.6m/s であったが、大阪レーダーも用いて適切な折り返し補正を行うことにより、台風 21 号の目周辺で吹いていた強風の状況も的確に把握できるものと期待してい

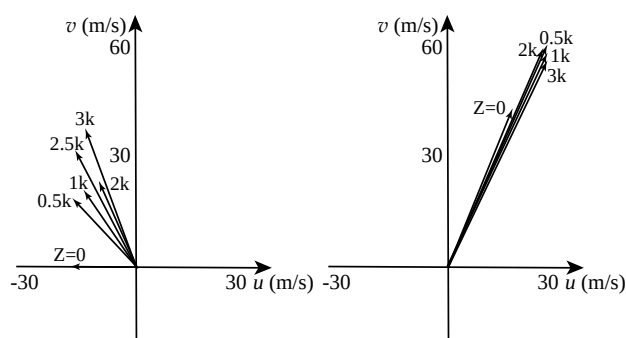


図 1.2.9 大阪管区气象台における hodograph (左 : 13:12JST, 右 : 14:03JST)

Fig.1.2.9 Hodograph at 13:12JST (left) and 14:03JST (right) at Osaka observatory

る。また、風向については特に 2km より下層で反時計まわりに転向していくエクマンスパイラルが観測されたが、下層の 0.5km 近傍で上層より風速値が大きくなる傾向が見られた。同様な傾向はハリケーン⁶⁾でも見られており、高度 1km 未満に風速のピークが存在している。

1.2.5 まとめ

本解析の結果、大阪市周辺で 67m/s 以上の高風速を観測した。2km より下層ではエクマンスパイラルが見られたが、1km 未満の下層において強風をもたらす高度が存在することがわかった。また、PAWR におけるエコートラッキングによる風速評価の可能性を示した。

参考文献

- 1) 気象庁, 台風 21 号による暴風・高潮等, https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/2018/20180911/jyun_sokuji20180903-0905.pdf (2018.12)
- 2) Bluestein, H. B, and Hazen, D. S, “Doppler-Radar Analysis of Tropical Cyclone over Land: Hurricane Alicia (1983) in Oklahoma”, Mon. Wea. Rev., Vol. 117, pp. 2594-2611, (1989)
- 3) Donaher, S.L., Albrecht B.A., Fang, M. and Brown W., “Wind Profiles in Tropical Cyclone Stratiform Rainbands over Land”, Mon. Wea. Rev., Vol.141, pp.3933-3949, (2013).
- 4) 出世ゆかり, 内藤大輔, 寺田登与徳, 坪木和久, 「台風のアイウォールのドップラー速度パターン」, 天気, 第 51 巻, 第 11 号, pp. 3-4, (2004)
- 5) Shimada, U., Sawada, M. and Yamada, H., “Doppler Radar Analysis of the Rapid Intensification of Typhoon Goni

(2015) after Eyewall Replacement”, J. Atmos. Sci., Vol. 75, pp. 143-162, (2018)

- 6) Bell, M.M., Montgomery, M.T. and Emanuel, K.A., “Air–Sea Enthalpy and Momentum Exchange at Major Hurricane Wind Speeds Observed during CBLAST”, J. Atmos. Sci. Vol.69, pp.3197-3222, (2012).
- 7) Giammanco, I.M., Schroeder, J.L., and Powell, M.D., “GPS Dropwindsonde and WSR-88D Observations of Tropical Cyclone Vertical Wind Profiles and Their Characteristics, Wea. Forecasting, Vol.28, pp.77-99, (2013)

台風第 21 号の上陸に伴う内部構造の劇的変化及びメソ渦と突風の関係

Dramatic changes in the inner-core structure of Typhoon Jebi (2018) at landfall and relationship between a mesovortex and strong wind gusts

嶋田宇大^{*1}, 小山亮^{*2}, 清水慎吾^{*3}

Udai SHIMADA, Ryo OYAMA, and Shingo SHIMIZU

SUMMARY

Typhoon Jebi (2018) caused record-breaking strong wind gusts and heavy rainfall along its track. Jebi's structure became compact after landfall, with the radius of maximum wind (RMW) at ~50 km and radar reflectivity increasing inside the RMW at altitudes from 1 to 5 km. Because of increasing forward speed and active convection inside the RMW, the maximum wind speed did not decrease significantly even after landfall. Inside the RMW, a mesovortex with a scale of 50 km formed in the downshear-left quadrant. The formation of the mesovortex was likely attributed to dynamically forced updraft associated with the storm vortex tilted by vertical wind shear and attributed to tilting of horizontal vorticity associated with the convergence of enhanced frictional inflow. The mesovortex contributed to the heavy rainfall and strong wind gusts. Also, the fast forward speed of more than 15 m s⁻¹ increased wind gusts on the right-hand side of Jebi's track.

key words: Typhoon Jebi (2018), landfalling tropical cyclones, mesovortices, wind gusts

1.3.1 はじめに

熱帯低気圧による災害を軽減するためには、熱帯低気圧の上陸時の特徴をよく理解し、その特徴に応じた効果

的な対策を講じなければならない。上陸に伴い熱帯低気圧の強度（最大風速）は急速に衰弱するものの¹⁻⁴⁾、災害の危険性は急速に減少するわけではない。特に熱帯低気

* 1 気象庁気象研究所台風研究部 主任研究官 ushimada@mri-jma.go.jp

Senior researcher, Typhoon Research Department, Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

* 2 気象庁気象研究所台風研究部 主任研究官

Senior researcher, Typhoon Research Department, Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

* 3 防災科学技術研究所 主任研究員

Senior researcher, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

圧上陸の数時間前後においては、内部構造が劇的に変化し、周辺の気象場条件次第では広範囲にわたって突風や短時間強雨などの顕著現象が発生する。熱帯低気圧の構造的特徴は高潮の発生にも影響を及ぼす。

熱帯低気圧上陸時の一般的な特徴として、最大風速の減少や眼の壁雲の収縮、非対称な降水分布の形成が挙げられる。上陸した熱帯低気圧は、潜熱フラックスの減少を主として、地表面摩擦の増加や湿潤空気の供給減が寄与して衰弱する⁵⁻⁶。台湾に上陸した台風Nari (2001)の数値シミュレーションでは、Nariは上陸前と比べて接線風速が減少した一方、二次循環がより強まり、眼の半径が収縮した⁷。上陸前後における眼の壁雲の急収縮は多くの事例で観測されている⁸。また熱帯低気圧の中心点に対し海と陸が非対称に分布する影響で、非対称な降水構造が形成される⁹⁻¹⁰。

熱帯低気圧の振る舞いや構造的特徴が地上での被害とどう結びついているか、限られた観測データから少しずつ明らかにされてきた。フロリダ半島に上陸したハリケーンAndrew (1992)では上陸時にむしろ一時的に風速が強まり大きな被害が出たと報告されている¹¹⁻¹²。Wakimoto and Black¹¹)は地表面摩擦の増加がむしろ風速の増大をもたらしたと結論付けた。最近では、Wurman and Kosiba¹³) (2018)がハリケーンHarvey (2017)の上陸時の内部構造を観測し、眼の壁雲のすぐ内側に存在するメソ渦が地上で観測される最大瞬間風速を増加させたこと、眼の壁雲の中に存在する竜巻スケールの小さな渦が地上に突風被害をもたらしたことを明らかにした。

しかしながら、上述のような熱帯低気圧の諸現象と被害を関連づける研究は面的に密な観測データを必要とするため、これまで十分に行われてきたとは言えない。熱帯低気圧が上陸に伴いどのように変化し、社会にインパクトを与える突風や短時間強雨をもたらすのかについて知見を深める必要がある。特に現在の数値予報モデルは解像度の制約から、上陸時の風速や詳細な構造を適切に表現できるわけではないため、面的に密な観測データに基づいた、上陸台風の実態調査が何よりも重要である。

2018年台風第21号(Jebi)は四国・近畿地方に上陸し足早に北上した台風だった。この台風はマリアナ諸島近海で中心気圧915 hPa、最大風速55 m s⁻¹まで発達した。台風は眼の壁雲交換を経た後に日本の南を北上し、9月4日の0300 UTC前に徳島県南部に衰弱しきることなく(中心気圧950 hPa、最大風速45 m s⁻¹)上陸した。山岳地域に加えて、台風の進路に沿った多くの観測点で1時間降水量50 mm h⁻¹以上を観測した(図1.3.1a)。さらに進路の

右側では記録的な最大瞬間風速を観測し、特に中心に近いところで40 m s⁻¹以上を観測した(図1.3.1b)。後に示す通り、この台風には中心域にメソ渦が存在していたことが特徴だった。四国・近畿地方には気象庁の地域気象観測システム(アメダス)とレーダー観測網がある。そのため、観測した記録的な突風と短時間強雨が台風第21号の上陸時の振る舞いとう関係していたのか調査することが可能である。

本研究の目的は、台風第21号が上陸前後にどのような構造変化を遂げていたのか、特にメソ渦の振る舞いに注目しながら調査すること、また地上で観測された記録的な突風と短時間強雨がどのようにしてもたらされたか明らかにすることである。本研究は気象庁の入手可能な観測データを駆使して行った。本報告書は第2節で使用データと解析手法を述べる。第3節で台風スケールの構造変化を、第4節でメソ渦を含む台風内部の詳細な構造を示す。第5節では各地で記録的な最大瞬間風速が観測されたこととメソ渦の関係を述べ、第6節でまとめる。

1.3.2 使用データと解析手法

本研究で使用したデータは、気象庁レーダー(室戸レーダー、大阪レーダー)データ、全国合成CAPPIレーダーデータ、気象庁降水強度データ、気象庁地上・地域気象観測(アメダス)データ、航空地上気象観測データ、気象庁55年長期再解析(JRA-55)データ¹⁴、雷監視システム(LIDEN)データ、大気追跡風データ(AMV)¹⁵、及び気象衛星「ひまわり」赤外(10.4μm)輝度温度データである。本研究で使用した地上気象観測要素は、最大瞬間風速・風向(1分毎)、海面気圧、気温、露点温度及び降水強度である。最大瞬間風速は3秒平均風速の1分以内の最大値である。JRA-55データは台風周辺の環境場情報を得るために使用した。特に台風が受ける環境場の鉛直シアー算出に利用した。鉛直シアーは200hPaの環境場(台風の中心から半径500km以内の平均値)の風ベクトルから850hPaの環境場の風ベクトルを引いた風ベクトルで定義される。鉛直シアーベクトルの向いている側をダウンシアー、反対側をアップシアーと呼ぶ。また以降に出てくる「ダウンシアー左」と言う用語は、鉛直シアーベクトルで象限を4つに分割した時のダウンシアー方向を見て左側の象限を指す。大気追跡風は気象衛星「ひまわり8号」の台風機動観測データから算出したものを使用した。

第3節で示す台風スケールの風速場はGBVTD解析¹⁶から得た。GBVTD解析は単一ドップラー速度データから

台風風速場を解析する手法で、得られた風速の空間解像度は接線風速で最大波数 3 までしか得られず、解析の不確か性が Dual 解析より大きい。しかし GBVTD 解析では台風周辺の風分布が広い領域で得られるため、台風の構造変化プロセスの研究で使用されてきた¹⁷⁾。本研究では室戸レーダーを GBVTD 解析に利用した。ドップラー速度データの観測密度の制約から、高度 1km から 10km までの 1km 間隔で風速場を解析した。一方第 4 節で示す台風内部の詳細な風速場は、室戸と大阪の二つのドップラー速度を利用した Dual 解析から得た。ここでの Dual 解析は単純に 2 つのレーダーのドップラー速度から算出する方法で行った。変分法は適用していない。ただし作成可能な CAPPI データの最下層が 1km だったため、鉛直流の計算は行わなかった。

本研究では 5 分毎の風速場データを扱うため、台風の中心位置は気象庁ベストトラックのものではなく、台風スケールの循環の中心点で定義した。気象庁における台風中心の定義は地上気圧の最低点として定義され、循環の中心とも整合する点とされている¹⁸⁾。そのため本研究では気象庁速報解析の 1 時間毎の中心位置を第一推定値とし、GBVTD 法を用いた循環中心点探索手法¹⁹⁻²⁰⁾を用いて、5 分毎に高度別に中心点を探索した。以上のことから、本研究で扱う台風第 21 号のように、形状が崩れた上陸台風や中心域にメソ渦を伴う事例では、循環の中心点と気圧の最低点とが一致するとは限らず、気象庁ベストトラックの位置とも若干ずれがあることに注意が必要である。

1.3.3 台風スケールの構造変化

GBVTD 解析の結果によると、台風第 21 号は、四国沖を北上していた頃（9 月 3 日 2300 UTC）には、中心から半径 80km 以遠でも高度 2km で 55 m s^{-1} 以上の風速があった（図 1.3.2a）。環境場の風速が約 15 m s^{-1} だったため、移動方向の右側と左側の風速差が 30 m s^{-1} 程度に達していた。この時の降水強度は、台風の北東側で密に、南西側で隙間がある非対称な分布になっていた（図 1.3.2b）¹⁾。

台風が四国に上陸する 1 時間ほど前になると、台風の南西側でも降水分布が現れ始め、北東側では中心により近いところで降水強度が強まり、降水がより密に分布するようになった（図略）。台風は 9 月 4 日 0000 UTC 前に

徳島県南部に上陸した後も、中心の北東側 30km 付近で強い降水域を維持した（図 1.3.2d）。一方風速場は上陸後より非対称な分布となり、台風が淡路島付近を通過中の頃（9 月 4 日 0430 UTC）には、高度 2km の大阪湾上空で 55 m s^{-1} 以上の強い風速が解析された。移動速度（台風を押し動かす環境場の風）がさらに速まっていたことが非対称性の増加に影響したと考えられる。

台風の構造を方位角平均した半径・高度分布で見ると、台風は上陸後にコンパクトな構造になった。台風が四国沖にある時は接線風速でも反射強度でもピーク半径が不明瞭な構造だったが（図 1.3.3a）、上陸後は高度 1km から 5km にかけて、半径 50km 付近に接線風速のピーク（最大風速半径、RMW）が現れ、その内側で反射強度が強まった（図 1.3.3b）。方位角平均した接線風速自体は半径 100km 以内ではどこでも減少したが、RMW 付近では接線風の減少量が他の領域よりも小さかった。GBVTD 解析された動径風は高度 1km より上層で強いアウトフローを示し、境界層インフローはレーダーの観測範囲外となっていた（図略）。しかし、RMW が 50km 付近に現れ、反射強度のピークが RMW の内側に存在するようになった配置は、発達中の台風によく見られる構造であり²¹⁻²⁵⁾、上陸後に台風の二次循環が強まったことを示唆した。このような上陸直後における二次循環の強まりは、Yang et al.⁷⁾の数値実験結果と整合的である。また二次循環の増加は RMW 付近で接線風速の減少量が小さかったことと整合的である。移動速度の増加と二次循環が強まったことで、台風第 21 号の最大風速は上陸後も高度 5km 以下で約 60 m s^{-1} を維持した（図 1.3.4）。

なお図 1.3.3b によると、高度 4km 付近に風速の極大が存在していた。この特徴は GBVTD 解析による人工的な特徴ではなく、ドップラー速度データそのものでも潮岬のゾンデ観測でも確認できた（図略）。台風は一般に境界層内の高度 500m 付近で最大値をとり、その上層では徐々に風速が減少するプロファイルをとる²⁶⁻²⁷⁾。一方で、境界層内の傾度風バランスからのずれの影響で、高度 4km から 6km 付近にもう一つの極大をとる場合があることが知られている²⁸⁻³¹⁾。台風第 21 号のように摩擦や地形が大きく効いた上陸台風でどのようにしてそのような構造が形成されたか明らかにすることは今後の課題である。

1.3.4 台風内部の構造とメソ渦

上陸後の台風内部構造を詳しく調べると、台風の北東側に存在した強い降水域が半径 40km 以内の反射強度増加に大きく寄与していた（図 1.3.5a）。この領域は鉛直シ

¹⁾ ※レーダー反射強度の減衰効果でこのような降水分布の変化が見えた可能性があるかもしれない。しかし、台風を挟んで室戸レーダーの反対側に設置された種子島レーダーでも同様の分布が観測されたこと、上陸以降北東側の強い降水域はずっと維持したことから、減衰効果によるものとは結論付けられない。

アーで象限を分けると、ダウンシアー左に対応する。一般にダウンシアー左は降水が最も強くなる領域である³²⁻³⁴⁾。9月4日0300 UTC頃の鉛直シアーベクトル(200–850hPa間)は東南東向きに約 8 m s^{-1} の大きさだった。この程度の鉛直シアーが存在すると、台風渦は鉛直シアーの影響を強く受けることになる。ダウンシアー左の降水システムは、高度6kmで反射強度が40 dBZ未満になり、対流活動としては比較的背が低かった(図1.3.5b)。このことは雷がこの降水システムで観測されなかったことと整合的である(図1.3.6)。

高度2kmと高度6kmそれぞれでDualレーダー解析を行うと、9月4日0400 UTC頃には、強い降水域から約20km内側に閉じた渦が見られた(図1.3.5a)。またこの渦の中心点は高度とともにダウンシアー左(北東方向)に傾いていた(図1.3.5b)。渦の中心付近は相対的に周りより反射強度が弱くなっていた。以上の特徴は、この渦が台風スケールの循環よりも一回り小さいスケールを持ったシステムであることを示す。以降この渦をメソ渦と呼ぶ。

地上で観測された最大瞬間風速の分布を見ると(図1.3.5a)、ダウンシアー側ではメソ渦に向かう流れがあったことがわかる。特にダウンシアー左象限では、メソ渦の外側で風向がほぼ接線方向に直角で、強いインフローが地表面付近にあったことを示す。これは高度2kmではほぼ接線方向の風があることと対照的である。台風の内部領域が全て陸上にあるわけではないが、地表面摩擦の増加の影響で地表面付近のインフローが大きくなっていると推察される。風の分布からそのインフローがメソ渦の近傍で収束していたことがわかる。

相対渦度はメソ渦の中心よりも、その外側の反射強度が強い領域でより大きくなっていた(図1.3.7a)。風速と渦度の分布から、台風の移動方向に沿ったメソ渦付近の概念図を書くとも図1.3.7bのようになる。地表面付近の風向と高度2km付近の風向がほぼ直角なため、接線風速が地面からある高度までは急速に増加するプロファイルであったと考えられる。そのため、インフローが存在する層内では水平渦度が内向きとなる。同時にそこでは図1.3.5aの地上風に示される通り収束があるため、上昇流が存在すると推察される。上昇流のピークがある位置は不明であるが、上昇流ピークの外側では渦度方程式のtilting

項 $(-\frac{\partial w}{\partial r}\frac{\partial v}{\partial z})$ が正となる領域が存在することになる。ここで w は鉛直流、 v は接線風、 r はメソ渦の中心からの距離、 z は高度である。このtilting項がメソ渦外側の相対渦

度の増加に寄与していたと考えられる。同時に上昇流に伴う渦度のストレッチングも効いていたと考えられる。

ではなぜダウンシアー左象限でメソ渦が形成したのだろうか。地上で観測された気圧分布をみると、960hPa以下のなべ底型の中心領域の中にメソ渦対応した気圧の最小域があった(図1.3.8a)。しかし温位の最大域はメソ渦付近ではなく、台風自体の中心付近(高度2km付近の台風スケールの循環中心点)にあった(図1.3.8b)。温度風バランスの点で温位の分布と循環が整合的なのは当然である。静力学平衡を仮定すると、地上の気圧と温位の分布から、メソ渦の上空には周囲よりも軽い空気(つまり暖気核)が存在すること、それゆえ台風の暖気核がダウンシアー左象限に傾いていることが示唆される。

そこで台風スケールの循環中心点を高度別にプロットすると、0300 UTCから0430 UTCにかけて、高度10kmの中心点が次第にダウンシアー右象限からダウンシアー左象限に移動していたことがわかった(図1.3.9)。地上の気圧分布から推測された暖気核の傾きと整合的である。また、鉛直シアーの影響を受けて台風渦がダウンシアー左に傾く振る舞いは、これまでの知見と整合的である^{34, 35)}。

台風の移動に相対的な大気追跡風(AMV)の分布をみると、台風中心付近の上空高度14km付近では南西風が卓越していた(図1.3.10)。この高度は気象衛星ひまわりのバンド13(10.4 μm)の輝度温度が -70°C に対応する高度から見積もった。AMVが算出された高度は高度10kmより高いが、この南西風が台風の暖気核をダウンシアー左象限に移流させていたと考えられる。

以上の特徴からメソ渦の形成メカニズムを考察することができる。台風全体の渦が傾くと、温度風バランス関係を満たすために、渦の傾いた方向では上昇流が力学的に誘起される^{33, 36-39)}。摩擦の増加で強められたインフローがその上昇流域で収束すると、図1.3.7bに示した渦度のtilting効果と上昇流に伴う渦度のストレッチング効果によって相対渦度が増加する。こうしてメソ渦が形成されたことが推察される。なお、Dual解析を行える領域の限界で、どの時点でこのメソ渦が形成され始めたかはわからなかったが、0330 UTCのDual解析でも台風中心のすぐ東側にメソ渦が解析された(図略)。

1.3.5 メソ渦と突風との関係

次に地上で観測した突風とメソ渦の関係を調べた。ここでは9月4日0430 UTCの前後30分以内に観測された最大瞬間風速を地面と台風の移動それぞれに相対的な風

ベクトルで描画し比較を行った(図 1.3.11). 50 m s^{-1} を超す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, 風速の増大には 15 m s^{-1} 以上の大きな移動速度が大きく寄与していた. 50 m s^{-1} 以上の最大瞬間風速を観測した地域が沿岸に面していること, 地表面付近の強いインフローが台風の内部領域まで入り込んでいたことで, 高度 2km の風速分布(図 1.3.2c)よりも全体的に中心により近い領域で記録的な最大瞬間風速が観測されたと考えられる.

関西国際空港(関空島)で観測された相当温位, 海面更正気圧, 最大瞬間風速及び台風中心までの距離の時系列を図 1.3.12 に示す. 関空島では台風中心に最も接近した 0440 UTC 直前に最大値 58.1 m s^{-1} と気圧の最小を観測した. 関空島ではそれより前の 0420 UTC 頃から急速に 45 m s^{-1} 以上の最大瞬間風速が観測されたことも特徴的である. 0430 UTC になると, はっきりとしたメソ渦は解析されなくなったが, 関空島での最大瞬間風速の急増はメソ渦に関連した強い降水域が通過した際に起きていた(図 1.3.12). 同様に神戸空港でもメソ渦の通過に伴い最大瞬間風速が 17 m s^{-1} から 44 m s^{-1} に急激に増加した(図 1.3.13). この直後に気圧の最小値が観測されたが, 相当温位のピークはその後に観測された. このように台風第 21 号に伴う記録的な最大瞬間風速は, 大きな移動速度(台風を押し動かす環境場の流れ)を主因としつつ, メソ渦も大きな役割を果たしていたことがわかった. 特にメソ渦は風速の急増に寄与していた.

1.3.6 結論と考察

2018 年台風第 21 号は四国上陸以降, 中心の北東側にメソ渦を形成しながら, 内部構造の劇的な変化を遂げた. 本研究では, このメソ渦を含む内部構造の変化を記録するとともに, 観測した記録的な暴風と短時間強雨がメソ渦とどう関係しているか調査した.

台風は上陸後にコンパクトな構造になった. 高度 1km から 5km にかけて, 明瞭な接線風速のピーク(最大風速半径, RMW)が半径 50km 付近に現れ, その内側でレーダー反射強度が強まり, 台風の二次循環が一時的に強まったことを示唆した. 反射強度の強まりはメソ渦がダウンシアー左象限の RMW 内側に形成されたことと関連しており, 台風の経路に沿って短時間強雨をもたらした. 記録的な最大瞬間風速は 15 m s^{-1} 以上の移動速度(台風を押し動かす環境場の流れ)が大きく寄与しており, メソ渦は各地で観測された急激な風速増加の要因となっていた.

以上のデータ解析を通じ, 台風第 21 号におけるメソ渦の形成は, (i)摩擦インフローの増加と(ii)鉛直シアーの効果によって生じたことが示唆された. メソ渦の形成メカニズムの仮説を概念図に示す(図 1.3.14). この概念図は台風の移動方向の面に投影して図示されている.

- i. ダウンシアー左象限では鉛直シアーによる台風渦の傾きに伴い, 温度風バランス関係を満たすために上昇流が力学的に誘起される.
- ii. その上昇流域に摩擦の増加で強まったインフローが収束する.
- iii. 高度 2km 風と地上風の角度が 90° 近くに達し, tilting 効果で鉛直渦度が増加する.
- iv. その結果, 台風スケールよりも小さなメソ渦が RMW 内側に形成される.

上昇流の強制と摩擦インフローの強化で対流活動が誘起されたものの, 対流の背は低く, 降水システムはダウンシアー左に傾いた構造となっていた. 暖かな海上に台風がある時と異なり, この時の海面フラックス量は活発な背の高い対流には不十分だったと考えられる. また暖気核がダウンシアー左に傾いていたため, そこでの大気の鉛直プロファイルは熱的に安定だったことも背の低い対流に寄与した可能性がある.

以上の仮説で説明されるメソ渦の形成メカニズムは, Wurman and Kosiba¹³⁾が示した複数のメソ渦が同時に存在する場合と異なると考えられる. 一般に眼の壁雲を多角形構造にするメカニズムは, 接線風速の順圧不安定で渦ロスビー波が励起されることで説明される⁴⁰⁻⁴³⁾. 海上に存在する熱帯低気圧においては, 比較的強い鉛直シアーの影響によりダウンシアー左象限で活発な対流バーストが発生し, 波数 1 のメソ渦が形成されるメカニズムがある⁴⁴⁻⁴⁶⁾. このメカニズムは活発な対流活動が重要な要素と言う点で台風第 21 号の場合と異なる.

謝辞

本研究の遂行に当たり, データの取り扱いや解析手法, 現象の理解に関して助言を下さった高知大学の佐々浩司教授, 気象庁観測部の山内洋観測技術開発推進官, 村井博一突風災害対策情報調整官に感謝申し上げます. 本調査研究は, 科学研究費助成事業(特別研究促進費)「平成 30 年台風 21 号による強風・高潮災害の総合研究」(代表丸山敬京都大学教授)の助成を得て行われた. 本研究を行うきっかけと助言をいただいた気象研究所台風研究部の青梨和正部長, 気象研究所気象衛星・観測システム研究部の鈴木修部長に感謝いたします. 高潮被害との関連

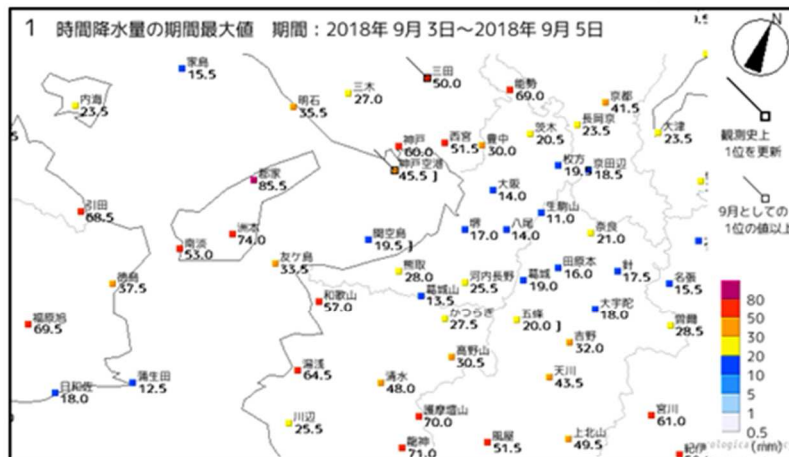
で議論を行った気象研究所海洋・地球化学研究部の高野
洋雄室長に感謝いたします。

参考文献

- 1) Kaplan, J., and M. DeMaria, 1995: A simple empirical model for predicting the decay of tropical cyclone winds after landfall. *J. Appl. Meteor.*, **34**, 2499–2512.
- 2) Kaplan, J., and M. DeMaria, 2001: On the decay of tropical cyclone winds after landfall in the New England area. *J. Appl. Meteor.*, **40**, 280–286.
- 3) DeMaria, M., J.A. Knaff, and J. Kaplan, 2006: On the decay of tropical cyclone winds crossing narrow landmasses. *J. Appl. Meteor.*, **45**, 491–499.
- 4) Wong, M.L.M., J.C.L. Chan, and W. Zhou, 2008: A simple empirical model for estimating the intensity change of tropical cyclones after landfall along the South China coast. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **47**, 326–338.
- 5) Tuleya, R. E., 1994: Tropical storm development and decay: Sensitivity to boundary layer conditions. *Mon. Wea. Rev.*, **122**, 291–304.
- 6) Tuleya, R., M. Bender, and Y. Kurihara, 1984: A simulation study of the landfall of tropical cyclones using a movable nested-mesh model. *Mon. Wea. Rev.*, **112**, 124–136.
- 7) Yang, M. J., D. L. Zhang, X. D. Tang, and Y. Zhang, 2011a: A modeling study of Typhoon Nari (2001) at landfall. Part II: Structural changes and terrain-induced asymmetries. *J. Geophys. Res.*, **116**, D09112.
- 8) Chang, P.-L., B. J.-D. Jou, and J. Zhang, 2009: An algorithm for tracking eyes of tropical cyclones. *Wea. Forecasting*, **24**, 245–261.
- 9) Knupp, K. R., J. Walters, and M. Biggerstaff, 2006: Doppler profiler and radar observations of boundary layer variability during the landfall of tropical storm Gabrielle. *J. Atmos. Sci.*, **63**, 234–251.
- 10) Kimball, S. K., 2008: Structure and evolution of rainfall in numerical simulated landfalling hurricanes. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 3822–3847.
- 11) Wakimoto, R. M., and P. G. Black, 1994: Damage survey of Hurricane Andrew and its relationship to the eyewall. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **75**, 189–200.
- 12) Willoughby, H. E., and P. G. Black, 1996: Hurricane Andrew in Florida: Dynamics of a disaster. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**, 543–549.
- 13) Wurman, J., and K. Kosiba, 2018: The role of small-scale vortices in enhancing surface winds and damage in Hurricane Harvey (2017). *Mon. Wea. Rev.*, **146**, 713–722.
- 14) Kobayashi, S., and Coauthors, 2015: The JRA-55 Reanalysis: General specifications and basic characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan.*, **93**, 5–48.
- 15) Shimoji, K., 2014: Motion tracking and cloud height assignment methods for Himawari-8 AMV. *Proc. 12th International Winds Workshop*. [Available at http://www.eumetsat.int/website/wcm/idc/idcplg?IdcService=GET_FILE&dDocName=PDF_CONF_P61_S2_06_SHIMOJI_V&RevisionSelectionMethod=LatestReleased&Rendition=Web.]
- 16) Lee, W.-C., B. J.-D. Jou, P.-L. Chang, and S.-M. Deng, 1999: Tropical cyclone kinematic structure retrieved from single-Doppler radar observations. Part I: Interpretation of Doppler velocity patterns and the GBVTD technique. *Mon. Wea. Rev.*, **127**, 2419–2439.
- 17) Shimada, U., M. Sawada, and H. Yamada, 2018a: Doppler radar analysis of the rapid intensification of Typhoon Goni (2015) after eyewall replacement. *J. Atmos. Sci.*, **45**, 143–162.
- 18) 気象庁予報部, 「台風解析の技術」, http://www.jma.go.jp/jma/kishou/minkan/koushu/taifu_kaiseki_gijutsu.pdf, (2019.1)
- 19) Bell, M. M., and W. Lee, 2012: Objective tropical cyclone center tracking using single-Doppler radar. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **51**, 878–896.
- 20) Shimada, U., M. Sawada, and H. Yamada, 2016: Evaluation of the accuracy and utility of tropical cyclone intensity estimation using single ground-based Doppler radar observations. *Mon. Wea. Rev.*, **144**, 1823–1840.
- 21) Shapiro, L., and H. E. Willoughby, 1982: The response of balanced hurricanes to local sources of heat and momentum. *J. Atmos. Sci.*, **39**, 378–394.
- 22) Nolan, D. S., Y. Moon, and D. P. Stern, 2007: Tropical cyclone intensification from asymmetric convection: Energetics and efficiency. *J. Atmos. Sci.*, **64**, 3377–3405.
- 23) Pendergrass, A. G., and H. E. Willoughby, 2009: Diabatically induced secondary flows in tropical cyclones. Part I: Quasi-steady forcing. *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 805–821.
- 24) Rogers, R. F., P. Reasor, and S. Lorsolo, 2013: Airborne

- Doppler observations of the inner-core structural differences between intensifying and steady-state tropical cyclones. *Mon. Wea. Rev.*, **141**, 2970–2991.
- 25) Smith, R.K., and M. T. Montgomery, 2016: The efficiency of diabatic heating and tropical cyclone intensification. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **142**, 2081–2086.
 - 26) Franklin, J. L., M. L. Black, and K. Valde, 2003: GPS dropwindsonde wind profiles in hurricanes and their operational implications. *Wea. Forecasting*, **18**, 32–44.
 - 27) Zhang, J. A., R. F. Rogers, D. S. Nolan, and F. D. Marks Jr., 2011: On the characteristic height scales of the hurricane boundary layer. *Mon. Wea. Rev.*, **139**, 2523–2535.
 - 28) Stern, D. P., and D. S. Nolan, 2009: Reexamining the vertical structure of tangential winds in tropical cyclones: Observations and theory. *J. Atmos. Sci.*, **66**, 3579–3600.
 - 29) Stern, D. P., and D. S. Nolan, 2011: On the vertical decay rate of the maximum tangential winds in tropical cyclones. *J. Atmos. Sci.*, **68**, 2073–2094.
 - 30) Stern, D. P., J. R. Brisbois, and D. S. Nolan, 2014: An expanded dataset of hurricane eyewall sizes and slopes. *J. Atmos. Sci.*, **71**, 2747–2762.
 - 31) Shimada, U., Kubota, H., Yamada, H., Cayan, E.O. and Hilario, F.D. 2018b: Intensity and inner-core structure of typhoon Haiyan (2013) near landfall: Doppler radar analysis. *Mon. Wea. Rev.*, **146**, 583–597.
 - 32) Chen, S., J. A. Knaff, and F. D. Marks Jr., 2006: Effects of vertical wind shear and storm motion on tropical cyclone rainfall asymmetries deduced from TRMM. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 3190–3208.
 - 33) Ueno, M., 2007: Observational analysis and numerical evaluation of the effects of vertical wind shear on the rainfall asymmetry in the typhoon inner-core region. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85**, 115–136.
 - 34) Reasor, P. D., R. Rogers, and S. Lorsolo, 2013: Environmental flow impacts on tropical cyclone structure diagnosed from airborne Doppler radar composites. *Mon. Wea. Rev.*, **141**, 2949–2969.
 - 35) Reasor, P. D., M. T. Montgomery, and L. D. Grasso, 2004: A new look at the problem of tropical cyclones in vertical shear flow: Vortex resiliency. *J. Atmos. Sci.*, **61**, 3–22.
 - 36) Jones, S. C., 1995: The evolution of vortices in vertical shear. I: Initially barotropic vortices. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **121**, 821–851.
 - 37) Wang, Y., and G. J. Holland, 1996: The beta drift of baroclinic vortices. Part I: Adiabatic vortices. *J. Atmos. Sci.*, **53**, 411–427.
 - 38) DeMaria, M., 1996: The effect of vertical shear on tropical cyclone intensity change. *J. Atmos. Sci.*, **53**, 2076–2088.
 - 39) Frank, W. M., and E. A. Ritchie, 1999: Effects of environmental flow upon tropical cyclone structure. *Mon. Wea. Rev.*, **127**, 2044–2061.
 - 40) Schubert, W. H., M. T. Montgomery, R. K. Taft, T. A. Guinn, S. R. Fulton, J. P. Kossin, and J. P. Edwards, 1999: Polygonal eyewalls, asymmetric eye contraction, and potential vorticity mixing in hurricanes. *J. Atmos. Sci.*, **56**, 1197–1223.
 - 41) Kossin, J. P., and W. H. Schubert, 2001: Mesovortices, polygonal flow patterns, and rapid pressure falls in hurricane-like vortices. *J. Atmos. Sci.*, **58**, 2196–2209.
 - 42) Hendricks, E. A., W. H. Schubert, R. K. Taft, H. Wang, and J. P. Kossin, 2009: Life cycles of hurricane-like vorticity rings. *J. Atmos. Sci.*, **66**, 705–722.
 - 43) Wu, C.-C., S.-N. Wu, H.-H. Wei, and S. F. Abarca, 2016a: The role of convective heating in tropical cyclone eyewall ring evolution. *J. Atmos. Sci.*, **73**, 319–330.
 - 44) Nguyen, L. T., and J. Molinari, 2015: Simulation of the downshear reformation of a tropical cyclone. *J. Atmos. Sci.*, **72**, 4529–4551.
 - 45) Chen, X., Y. Wang, J. Fang, and M. Xue, 2018: A numerical study on rapid intensification of Typhoon Vicente (2012) in the South China Sea. Part II: Roles of inner-core processes. *J. Atmos. Sci.*, **75**, 235–255.
 - 46) Shimada, U., and T. Horinouchi, 2018: Reintensification and Eyewall Formation in Strong Shear: A Case Study of Typhoon Noul (2015). *Mon. Wea. Rev.*, **146**, 2799–2817.

(a) 1時間降水量 > 50 mm/h



(b) 最大瞬間風速 > 40 m s⁻¹

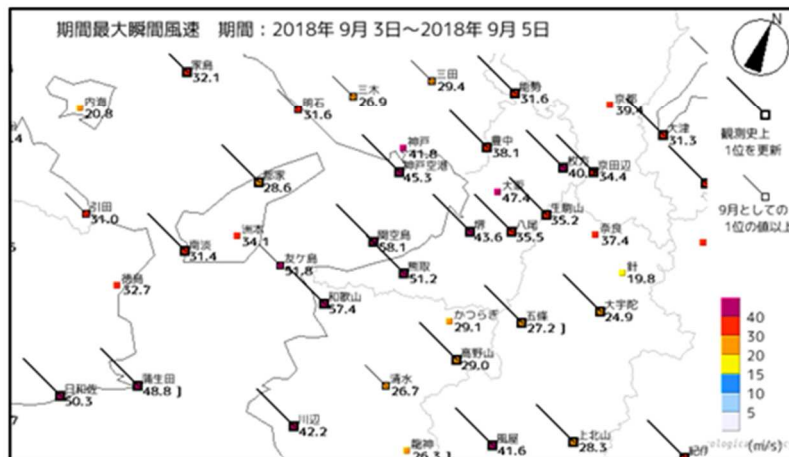


図 1.3.1 9月3日から5日に観測された、(a) 1時間降水量の期間最大値、(b) 期間最大瞬間風速。

図は気象庁 HP から引用 (<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/mdrr/periodstat/index.html>)。

Fig.1.3.1 (a) maximum hourly rainfall and (b) maximum wind gust observed during the period from 3 to 5 September. The figures are provided by Japan Meteorological Agency (<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/mdrr/periodstat/index.html>).

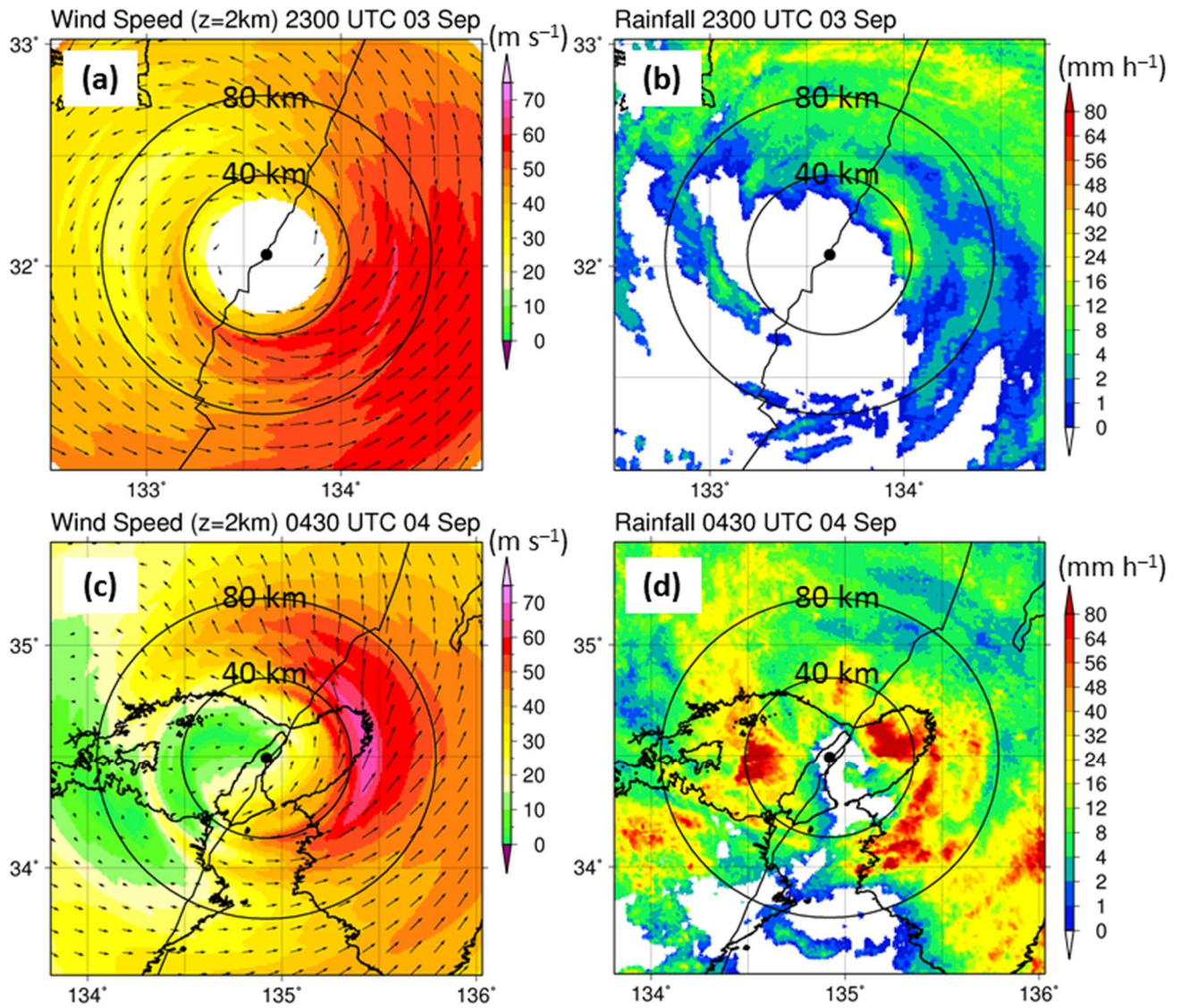


図 1.3.2 (a),(c) GBVTD 解析から得られた高度 2km の風速. (b),(d) 降水強度. 黒線は GBVTD 解析に使われた高度 2km の台風中心位置を示す.

Fig.1.3.2 (a),(c) Wind distribution at 2-km altitude retrieved from the GBVTD analysis. (b),(d) Precipitation. The black line indicates the track of Typhoon Jebi used for the GBVTD analysis at 2-km altitude.

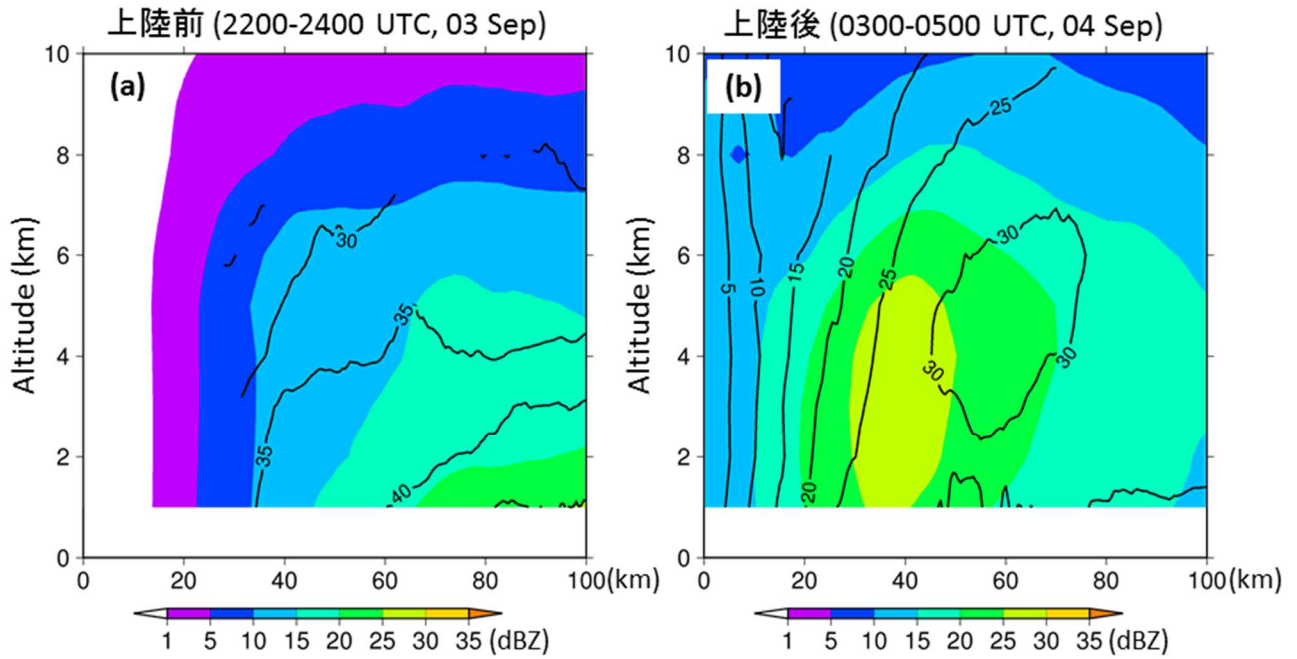


図 1.3.3 GBVTD 解析から得られた接線風速の方位角平均値（黒線）と反射強度の方位角平均値（カラー）. (a)9 月 3 日 2200 から 2400 UTC の時間平均値. (b)9 月 4 日 0300 から 0500 UTC の時間平均値. 黒線は時間平均する際に少なくとも 1 時間以上データが存在した領域のみ示す.

Fig.1.3.3 Radius–height plots of time-averaged azimuthal-mean tangential wind (black contours) and azimuthal-mean radar reflectivity (color scale). (a) During the period from 2200 to 2400 UTC 3 September and (b) during the period from 0300 to 0500 UTC 4 September. Contours were drawn only in areas where there were observations averaged over at least 1 h in total.

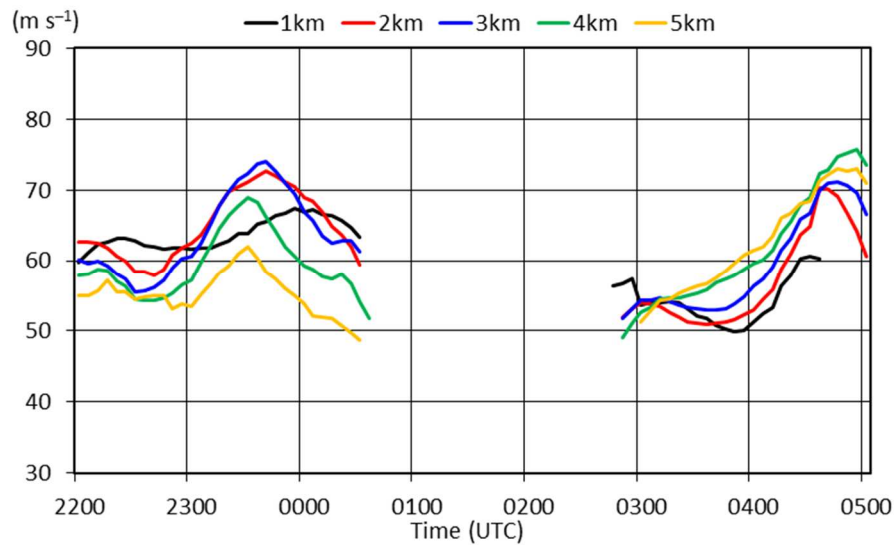


図 1.3.4 高度 1km から 5km までの、30 分移動平均した最大風速値の時系列.

Fig.1.3.4 Time evolutions of 30-min running mean maximum wind speed at altitudes from 1 km to 5 km.

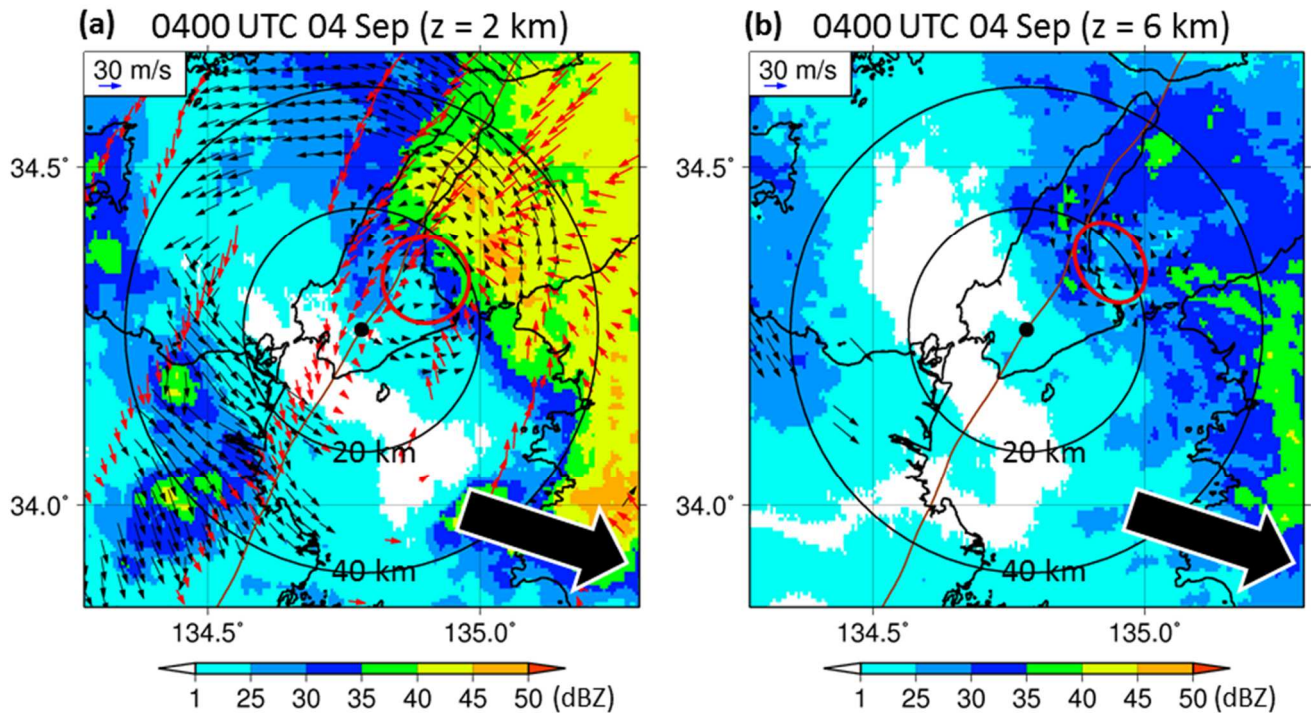


図 1.3.5 (a)9 月 4 日 0400 UTC における，高度 2km の台風の移動に相対的な風ベクトル（黒矢印），台風の移動に相対的な地上最大瞬間風（赤矢印）及び高度 2km の反射強度（カラー）の分布．地上最大瞬間風は，0330 UTC から 0430 UTC までの観測値を 0400 UTC 時点の台風中心点に相対する位置に 3 分おきに表示している．(b)9 月 4 日 0400 UTC における，高度 6km の反射強度（カラー）及び高度 6km の台風の移動に相対的な風ベクトル（黒矢印）の分布．赤丸はメソ渦の位置，茶線は台風の経路（平滑化したもの），及び大きな矢印は鉛直シアを示す．

Fig.1.3.5 (a) Distribution of storm-relative winds at 2-km altitude (small black arrows), storm-relative surface wind gusts (small red arrows), and composite radar reflectivity at 2-km altitude (color scale) at 0400 UTC 4 September. Storm-relative 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. (b) Distribution of storm-relative winds at 6-km altitude (small black arrows) and composite radar reflectivity at 6-km altitude (color scale) at 0400 UTC 4 September. The red circle indicates the location of a mesovortex. The brown line is the storm track. The bold black arrow shows the 850–200-hPa shear vector.

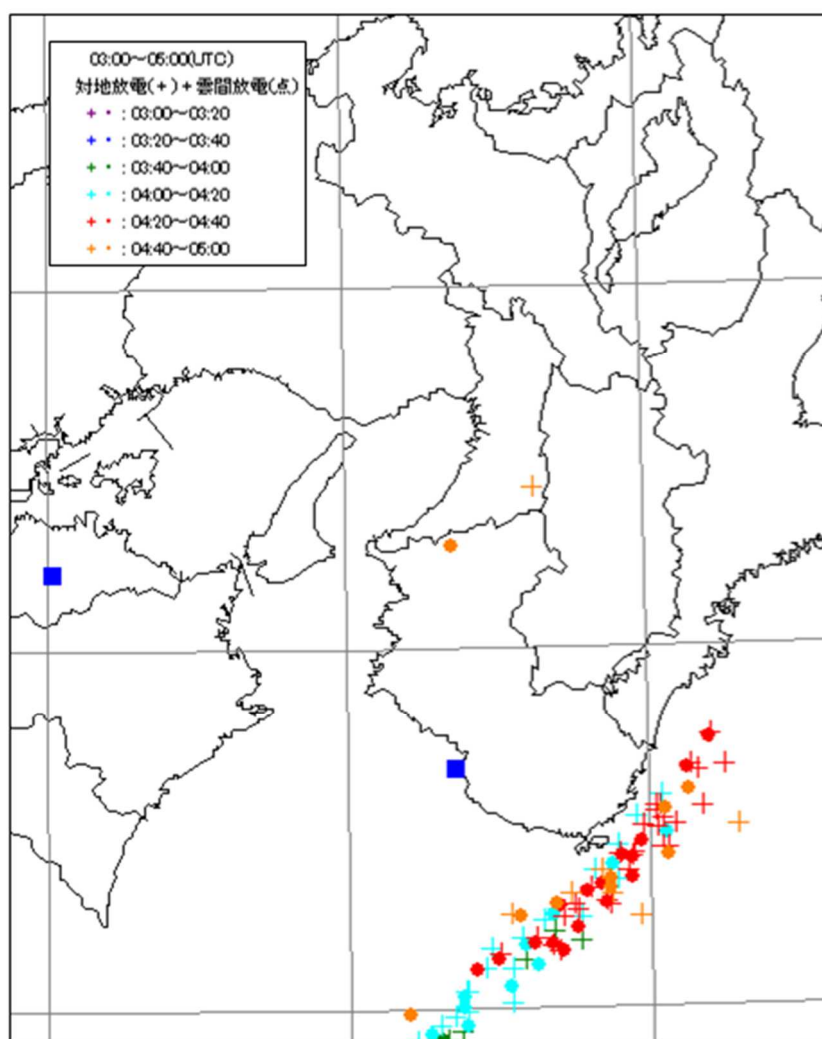


図 1.3.6 9 月 4 日 0300 UTC から 0500 UTC の間に観測された対地放電(+)及び雲間放電(·)の分布. 青の四角は観測点を示す.

Fig.1.3.6 Lightning locations of cloud-to-ground discharges (+) and cloud-to-cloud discharges (·) observed from 0300 to 0500 UTC 4 September. The blue square indicates observation sites.

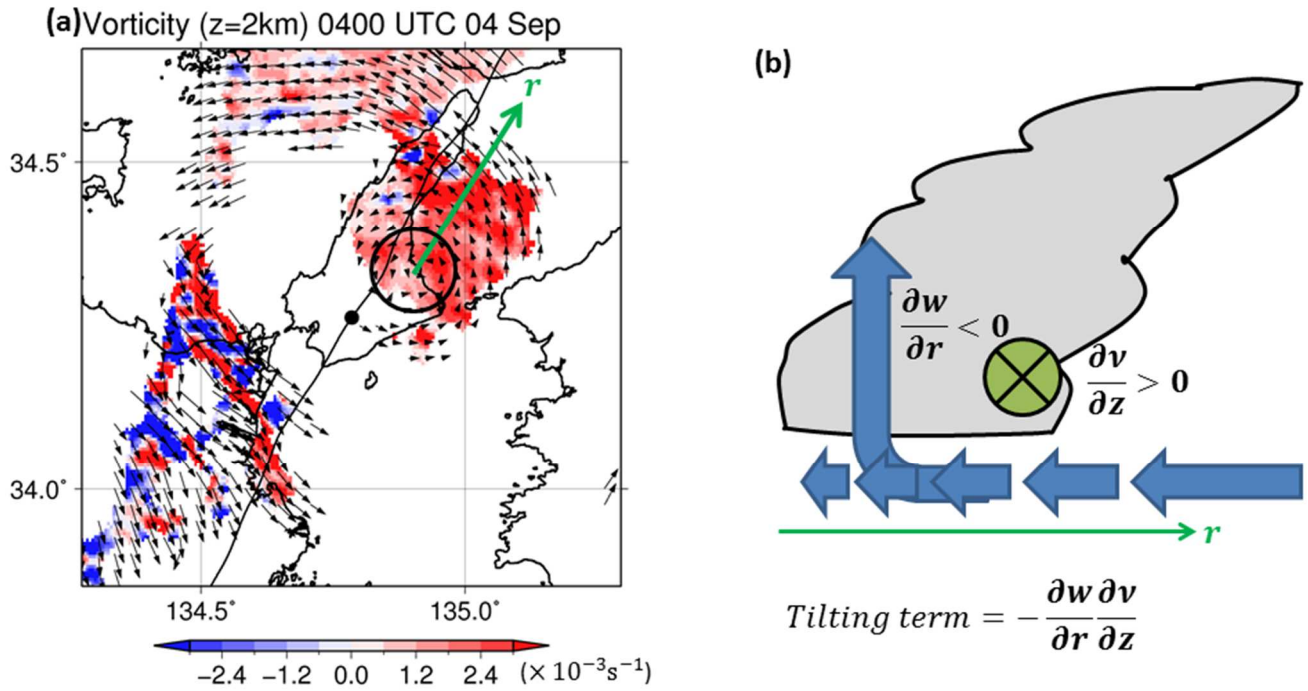


図 1.3.7 (a)高度 2km の相対渦度（カラー）と台風の移動に相対的な風（黒矢印）の分布．黒丸はメソ渦の位置，緑矢印は(b)に示す座標を表す．(b)メソ渦に伴う降水域における，渦度方程式の tilting 項を通じた渦度増加の概念図．

Fig.1.3.7 (a) Distribution of the relative vertical vorticity (color scale) and storm-relative winds (small black arrows) at 2-km altitude at 0400 UTC 4 September. The black circle indicates a mesovortex and the green arrow represent a coordinate system shown in (b). (b) Schematic diagram of an increase in vorticity through the tilting term of the vorticity budget equation in the area of the rainfall system accompanying the mesovortex. The brown line is the storm track.

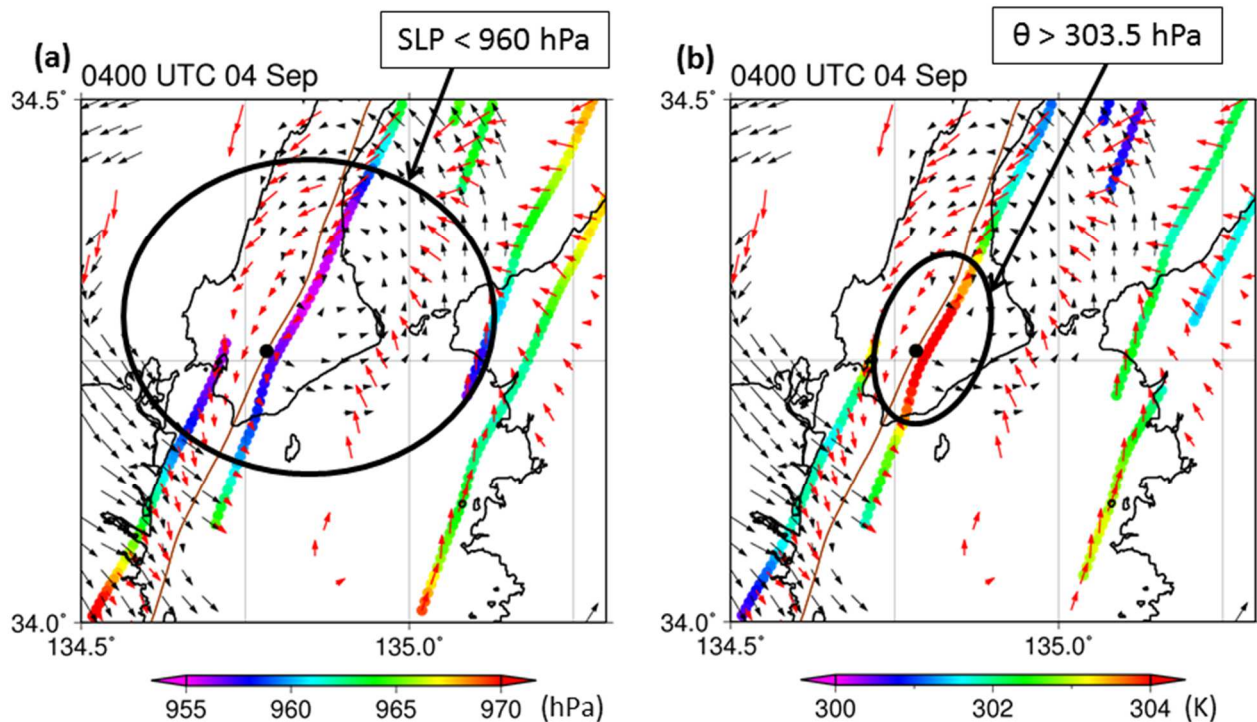


図 1.3.8 (a)9 月 4 日 0400 UTC における，高度 2km の台風の移動に相対的な風ベクトル（黒矢印），地上最大瞬間風（赤矢印），及び海面更正気圧（カラー）の分布．地上最大瞬間風（海面更正気圧）は，0330 UTC から 0430 UTC までの観測値を 0400 UTC 時点の台風中心点に相対する位置に 3 分（1 分）おきに表示している．(b) (a)と同じ，ただしカラーは地上温位の分布を示す．

Fig.1.3.8 (a) Distribution of storm-relative winds at 2-km altitude (small black arrows), storm-relative surface wind gusts (small red arrows), and sea level pressure (SLP) (color scale) at 0400 UTC 4 September. Storm-relative winds (SLP) observed at each weather station during the period from 0330 to 0430 UTC are plotted at 3-min (1-min) intervals at their locations relative to the storm center position at 0400 UTC. (b) As in (a), but for potential temperature at the surface (color scale). The brown line is the storm track.

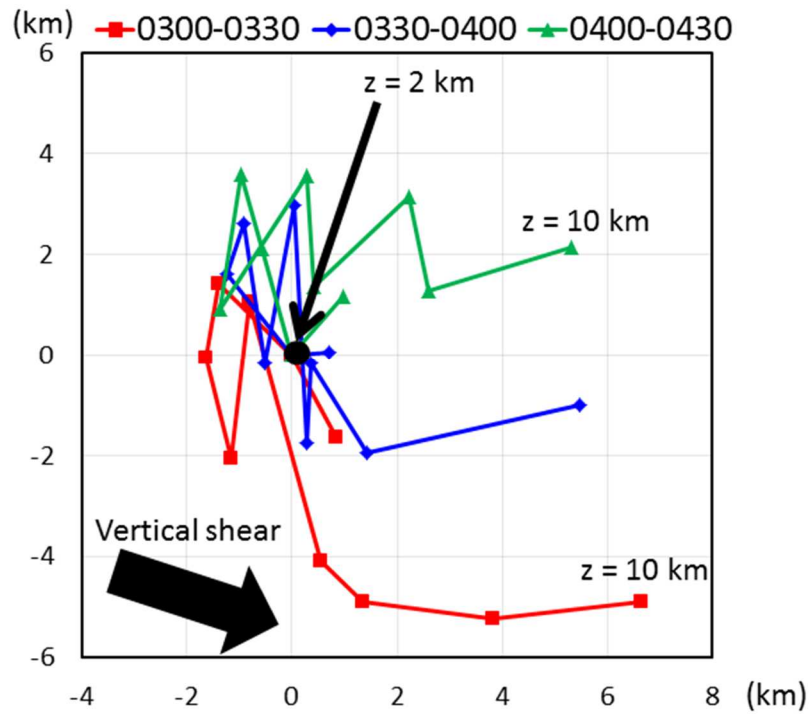


図 1.3.9 高度 1km から 10km までの各期間における台風渦の循環中心点. 各期間における平均値を示している. 黒矢印は鉛直シアーを示す.

Fig.1.3.9 Storm centers from 1 to 10 km at 1-km intervals for each time period. The origin of the plot is the storm center at 2-km altitude. The bold black arrow shows the 850–200-hPa shear vector.

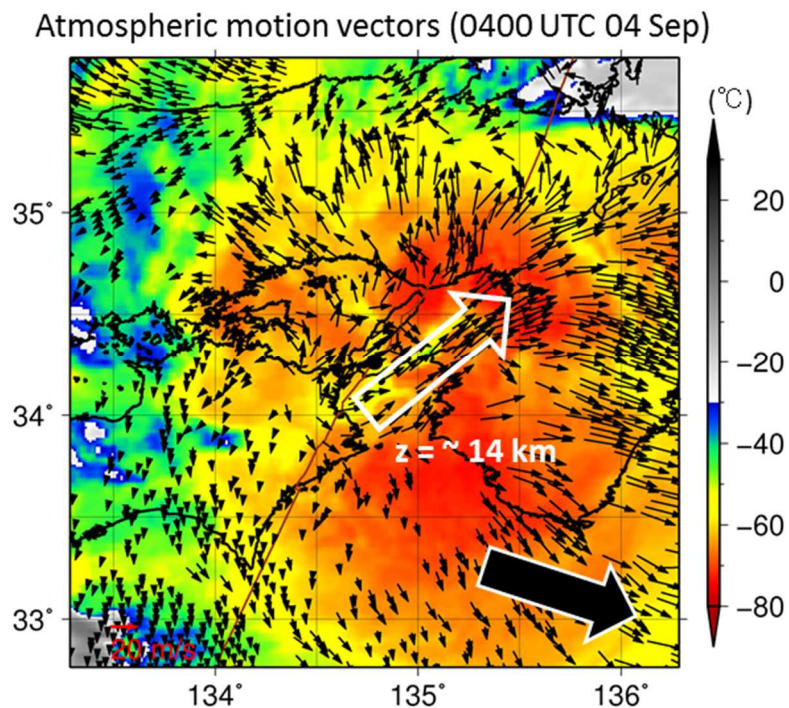
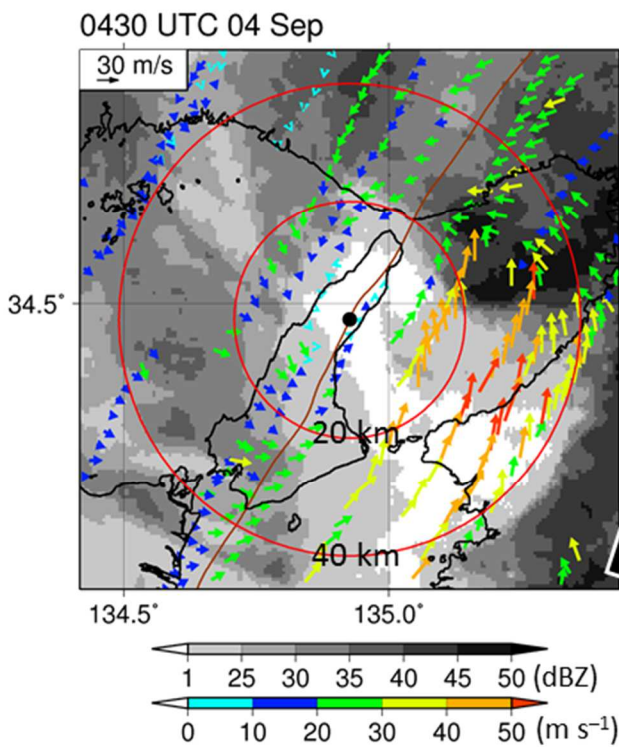


図 1.3.10 9月4日 0400 UTC における台風の移動に相対的な大気追跡風 (AMV) (矢印) と気象衛星「ひまわり 8 号」の赤外 (バンド 13, 10.4μm) 輝度温度 (カラー). 白矢印は台風渦上空の大まかな流れ, 黒矢印は鉛直シアーを示す.

Fig.1.3.10 Distribution of storm-relative atmospheric motion vectors (small arrows) and infrared brightness temperatures (at 10.4 μm) from the Himawari-8 geostationary satellite at 0400 UTC 4 September. The white arrow indicates the rough flow at ~14 km over the storm. The bold black arrow shows the 850–200-hPa shear vector. The brown line is the storm track.

(a) Gust wind speeds



(b) Storm-relative gust wind speeds

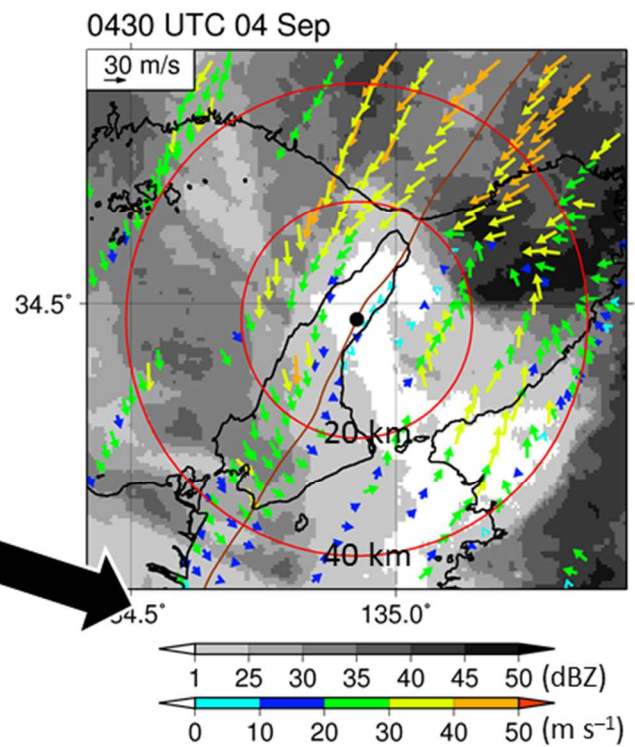


図 1.3.11 (a) 9 月 4 日 0430 UTC における，地上最大瞬間風（カラー）及び高度 2km 反射強度（白黒）の分布．地上最大瞬間風は，0400 UTC から 0500 UTC までの観測値を 0430 UTC 時点の台風中心点に相対する位置に 3 分おきに表示している．(b) (a) と同じ，ただし，台風の移動に相対的な地上最大瞬間風（カラー）を示す．黒矢印は鉛直シアを示す．

Fig.1.3.11 (a) 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. (b) As in (a), but for storm-relative surface wind gusts (small color arrows). The bold black arrow shows the 850–200-hPa shear vector.

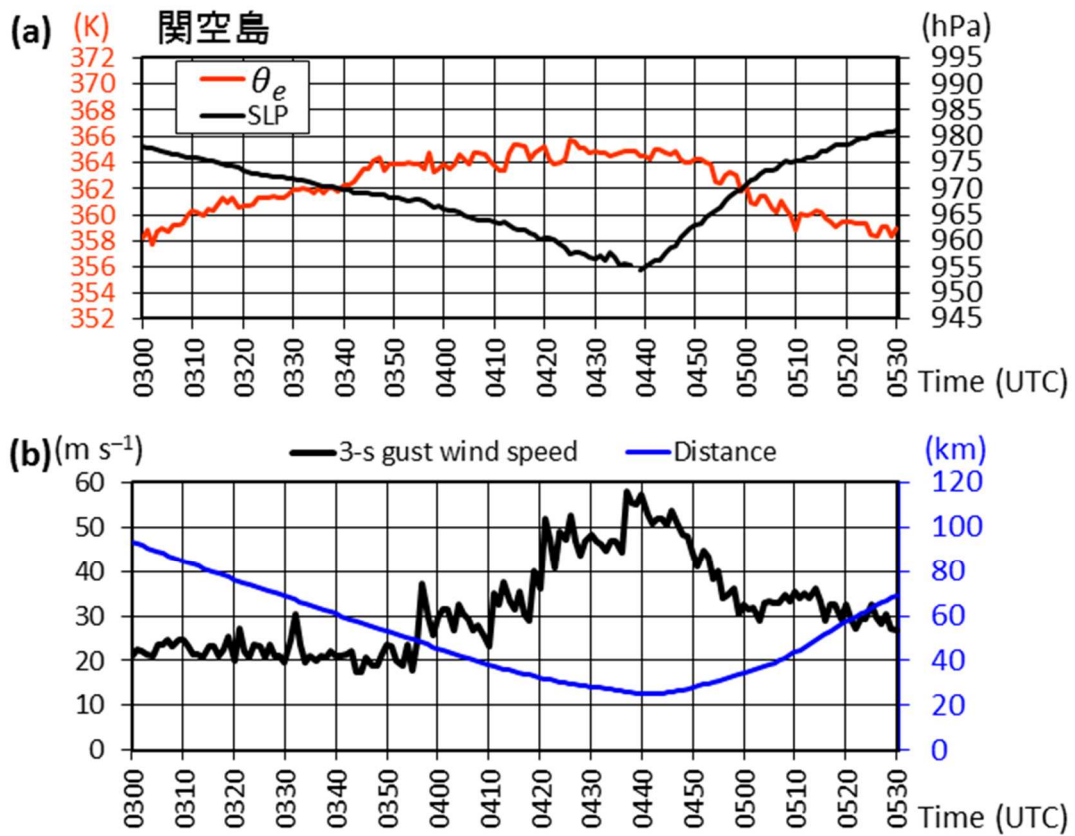


図 1.3.12 関西国際空港（関空島）で観測された，(a)相当温位及び海面更正気圧の時系列，(b)最大瞬間風速の 1 分毎の最大値及び台風中心までの距離。

Fig.1.3.12 Time evolutions of surface observations at Kansai International Airport. (a) Equivalent potential temperature (θ_e) (orange line) and SLP (black line). (b) 3-s mean maximum gust wind speed observed within each 1 minute (black line) and distance between the storm-scale center and the weather station (blue line).

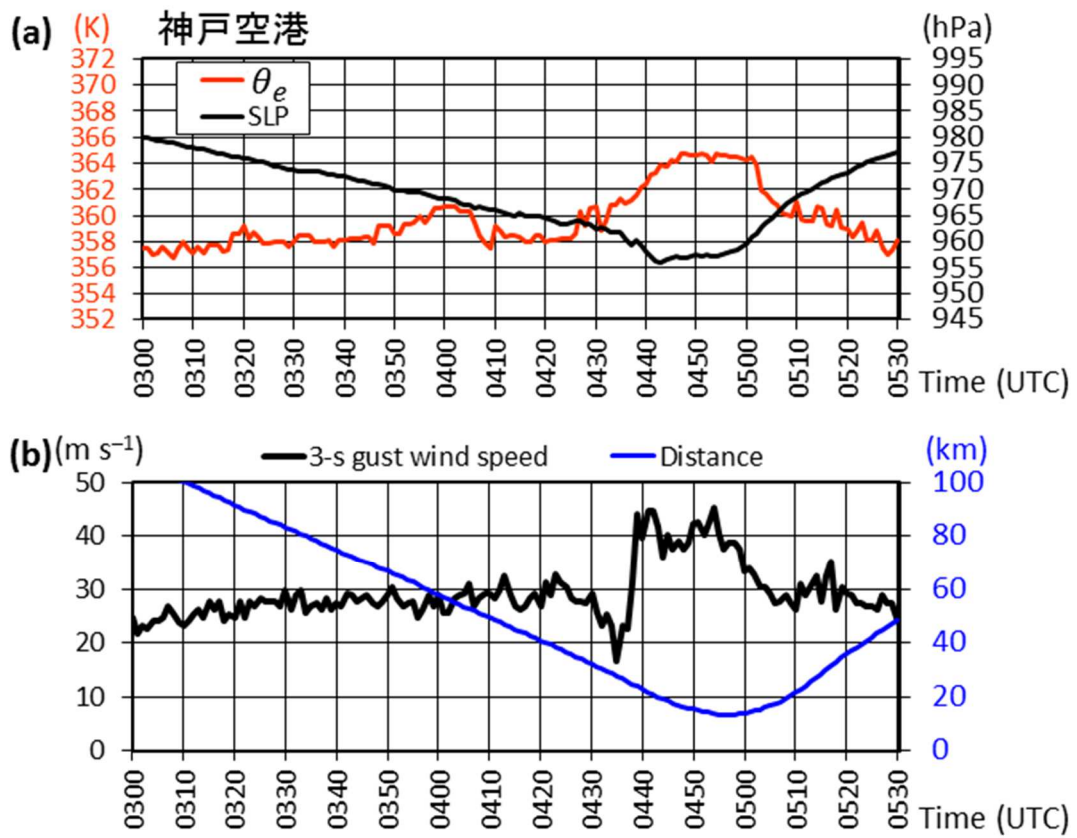


図 1.3.13 図 1.3.12 と同じ，ただし神戸空港の観測値を示す．

Fig.1.3.13 As in Fig. 1.3.12, but for Kope Airport.

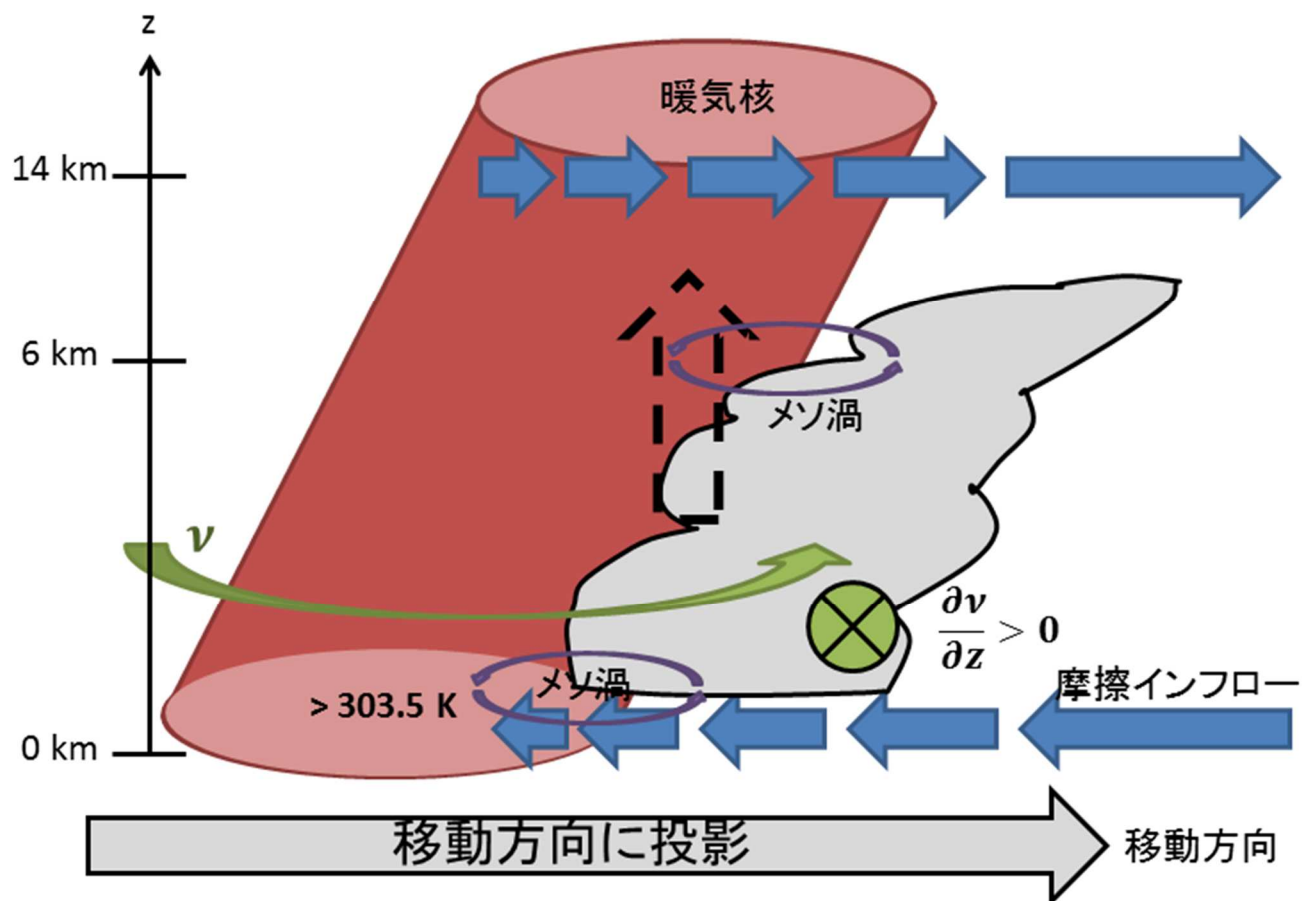


図 1.3.14 メソ渦形成仮説の概念図。図は台風の移動方向の面に投影されている。

Fig.1.3.14 Schematic diagram of a possible mechanism for the mesovortex formation. The image is projected onto the vertical plane along the forward motion direction.

第1章4

台風 21 号に伴う突風と落雷の空間分布

Spatial Distribution of Gusts and CG Lightning Associated with Typhoon 1821

小林 文明^{*1} 高木 みゆき^{*2} 金井 紀江^{*2}
Fumiaki KOBAYASHI Miyuki TAKAGI Norie KANAI

SUMMARY

Based on the detected gusts accompanied with the Typhoon T1821, the meteorological features of gusts were revealed. Almost of the gusts were accompanied with convective radar echoes. Most of the gusts occurred within 150 km from the center of the typhoon and concentrated within between NE to SE direction. These results implied that the gusts were influenced by both the force of gradient wind and the downdraft from cumulonimbus. The number of lightning strikes (CG) around T1821 exceeded 8000 times. However, no CG lightning discharge was observed within extreme wind region over the sea, CG was observed only over the land after the landing of T1821.

key words: gust, typhoon induced tornado, downburst, Cloud-to-Ground discharge

1. 4. 1 はじめに

平成30年台風21号（T1821，アジア名チービー）は8月28日南鳥島近海で発生し31日09時には915 hPaに達し，“猛烈な（最大風速54 m/s 以上）”勢力に発達した。9月4日12時に950 hPaで徳島県南部に上陸した後，紀伊水道をぬけて4日14時には神戸市に上陸した。9月5日03時に北海道渡島半島西部に達し，5日09時に温帯低気圧に変わった（図141）。

T1821に伴い四国，近畿から北海道に至る広範囲で強風が観測され，各地で住宅の屋根や工事用足場の倒壊などの被害が発生した。特に近畿圏では，関空島（大阪府泉南郡）で58.1 m/s，和歌山（和歌山市）で57.4 m/s，

室戸岬（高知県室戸市）で55.3 m/s を記録するなど，これまでの最大瞬間風速を更新する強風が観測された。

“非常に強い（最大風速44 m/s 以上54 m/s 未満）”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。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50 m/s を超える強風に大都市が曝されたのも初めて経験といえる。その結果，数10台の車の横転，1,000本を超える電柱の倒壊，40,000棟を超える住宅被害など，これまでの経験と想像を絶する被害件数が報告された。本報告では，突風現象が台風に対してどのような場所で発生したのか，あるいは積乱雲がどの程度活発であったかを明らかにする目的で，台風

* 1 防衛大学校地球海洋学科 教授 kobayasi@nda.ac.jp

Professor, Department of Geoscience, National Defense Academy

* 2 防衛大学校地球海洋学科 本科学学生

Undergraduate Student, Department of Geoscience, National Defense Academy

と突風の空間的關係、突風発生時の上空のレーダーエコー強度、落雷 (Cloud-to-Ground lightning discharge) の観点からみた積乱雲の活動度について調べた。

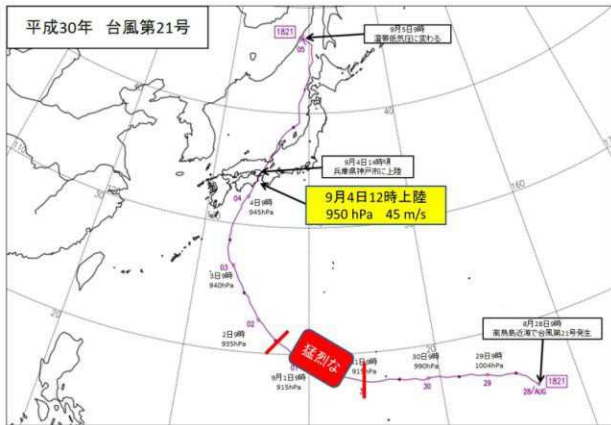


図1.4.1 台風 21 号の経路 (気象庁に加筆)

Fig.1.4.1 The path of T1821 (JMA)

1. 4. 2 突風発生と台風との時空間的な関係

本研究では、台風 21 号に伴って発生した突風が台風に対して相対的にどのような位置で生じたか、上空の積乱雲 (気象レーダーエコー) が存在したか、という観点から突風発生時の気象条件を調べた。ここで、本研究で扱う“突風”は、次の 3 つのデータから抽出した。1) 気象官署の最大瞬間風速値 (気象庁)、2) 地上の顕著な被害、3) 竜巻あるいは竜巻のような渦。1) に関しては、各気象官署 (地上高 10 m の風速計) で観測された最大瞬間風速 30 m/s 以上の風速値を用いた (データ数 45 個)。2) に関しては、地上被害の中で、F (フジタ) スケール (JEF (日本版改良フジタ) スケール) で F1 (33~49 m/s) あるいは JEF1 (39~52 m/s) 以上に相当する被害について、発生時刻の判明しているものの中でその地域 (市町) における最大値を選んだ (計 22 地点)。3) に関しては、気象庁が認定した竜巻 (三重県で 1 カ所) あるいは竜巻的な渦 (つむじ風) が画像として残された場所および竜巻によると考えられる地上被害場所を選んだ (計 5 地点)。

図1.4.2 に 13 時 40 分と 14 時 30 分における突風発生場所 (図中太矢印) の事例を示す。図には台風中心位置、レーダーエコー (気象庁)、POTIKA で観測された海面更正気圧も示されている¹⁾。台風の中心位置は気象庁発表の位置を内挿した (図中★印)。POTIKA で観測された各気圧と台風中心位置は整合的であった。

突風発生と上空の積乱雲有無との関係は、気象庁レーダーエコー (反射強度) 情報を用いて、降雨強度 48 mm/h 以上の強エコー (非常に発達した積乱雲下)、12~48 mm/h の中程度の強度エコー (積乱雲)、12 mm/h 未満の弱エコー (積乱雲あるいは層状性雲) に分けて調べた。つまり、降雨強度 48 mm/h 以上の強エコー下で発生した突風は、積乱雲からの下降気流 (ダウンドラフト、ダウンバースト) の影響を受けている可能性が高い²⁾。なお、今回抽出した突風事例はすべてエコー下で発生しており、ノーエコー領域で発生した事例はゼロであった。

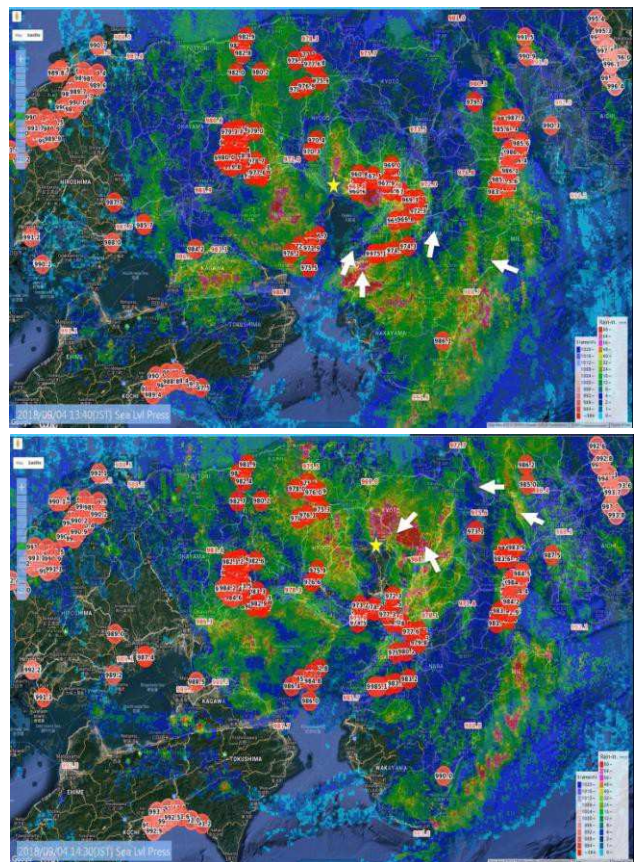


図1.4.2 突風発生場所 (矢印)、台風中心位置 (☆印)、レーダーエコー (カラー、気象庁)、POTIKA で観測された海面更正気圧 (円内数値)。上: 9 月 4 日 13 時 40 分、下: 14 時 30 分。

Fig. 1.4.2 The position of gusts (arrows), the center of T1821 (star), radar echo (color), and the value of sea surface pressure.

気象官署で観測された最大瞬間風速値 30 m/s 以上の地点をプロットすると、台風の東側、すなわち危険半円内に集中していたことがわかる (図1.4.3)。さらに、台風中心から北東~南南東方向、150 km 以内に突風は集中していた。ただ、台風中心から 250 km を超える地点でも突風は記録された。また、台風の中心近傍でも突風が観測さ

れた点が特徴的であった。この点は、最大瞬間風速値と台風からの距離の関係にも明瞭に表れており、60 m/s 近いピーク値は台風中心から 40~50 km という比較的 center に近い場所で記録されたことがわかる（図 1.4.4）。最大瞬間風速が 30 m/s を超える突風は、台風中心から 20 km~150 km までの領域で発生しており、ランキン渦的な分布になっている。上陸時の暴風域半径が 220 km であったことを考えると、ピーク風速が現れた半径 50 km が最大風速半径と仮定すると、物理的に何を意味しているかは興味深い。図 1.4.5 は、顕著な地上被害がもたらされた位置をプロットしたものであり、分布傾向は図 1.4.3 と似ているが、台風中心付近（南東~南方向 50 km 以内）に集中していた。竜巻や竜巻的な渦（つむじ風）の発生場所は、台風中心から南南西方向に直線状に分布していた（図 1.4.6）。なお、三重県で発生した竜巻は図中最も台風の中心から離れた点で示されている。

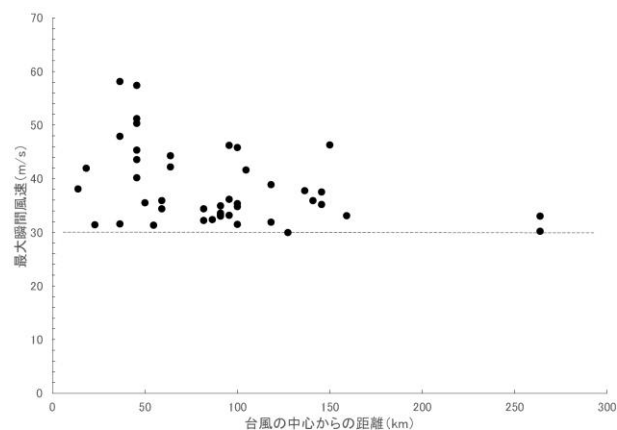


図1.4.4 最大瞬間風速（30 m/s 以上）と台風からの距離の関係。

Fig.1.4. 4 Relationship between maximum instantaneous wind speed and the distance from the center of T1821

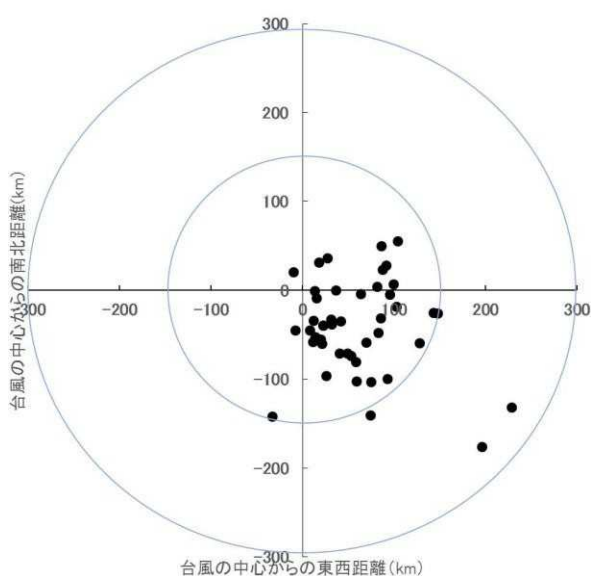


図1.4.3 突風（最大瞬間風速 30 m/s 以上）の発生場所（原点が台風の中心）。

Fig. 1.4.3 Positions of maximum instantaneous wind speed (more than 30 m/s) relative to the center of T1821

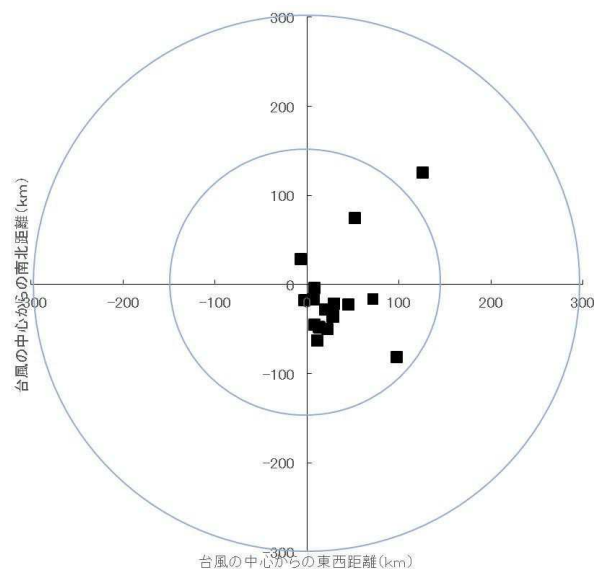


図1.4.5 顕著な地上被害が発生した場所（図1.4.3 と同様）。

Fig. 1.4.5 Same as Fig. 1.4.3 except for the positions of remarkable surface damage

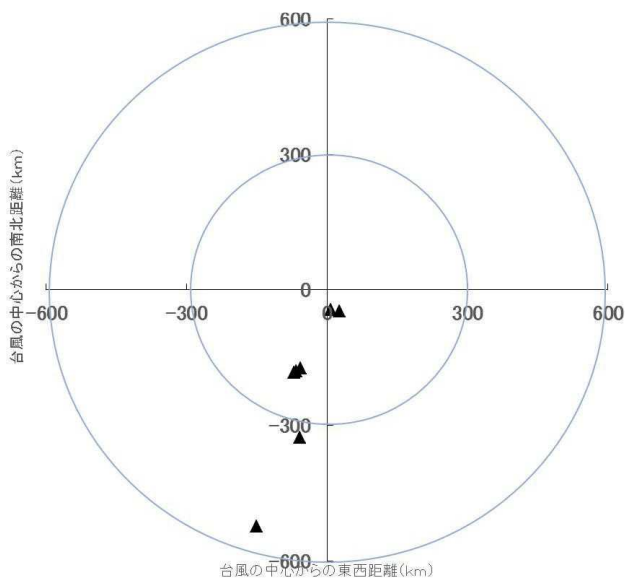


図1.4.6 竜巻やつむじ風が発生した場所 (図1.4.3 と同様).

Fig. 1.4.6 Same as Fig. 1.4.3 except for the tornado and tornado-like vortices

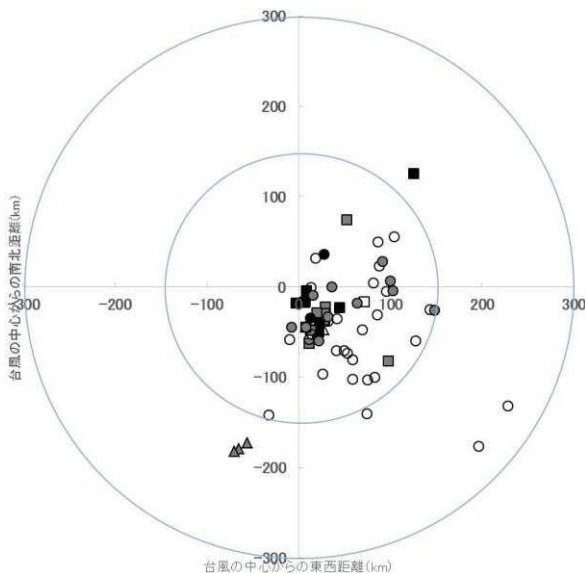


図1.4.7 上空のエコー強度別に示した突風発生場所 (図1.4.3, 図1.4.5, 図1.4.6). 黒塗り: 降雨強度 48 mm/h の強エコー, グレー: 12~48 mm/h の中程度のエコー, 白抜き: 12 mm/h 未満の弱エコー.

Fig. 1.4.7 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

図1.4.7 は上空のエコー強度別に突風発生場所を示したものであり, 降雨強度 48 mm/h の強エコー下の突風 (図中黒塗り) は台風を中心付近で発生していた. 12~48 mm/h の中程度のエコー (図中グレー), 12 mm/h 未満の弱エコー (図中白抜き) になるに従い, 台風中心から離れた場所で発生していた.

一般に, 地上で観測される突風は気象学的には, 晴天時に局地循環 (海陸風など) や山岳波 (おろし風など) に伴うもの, 低気圧, 台風, 前線などのシノプティック (総観) スケールの大気擾乱に伴い力学的に発生するものに大別される³⁾. さらに, 都市の構造 (形状) や単体の構造物 (ビル風など) により, マイクロスケール (1 km 以下) の突風も生じる. 今回は, 台風という大規模な擾乱, 台風に伴うインナーレインバンド (壁雲) とアウターレインバンドを形成する積乱雲, 大阪湾という地形や大都市の複雑な構造物の形状という要因が重なって, 台風に対してさまざまな領域で突風が発生したものと考えられる. 特に, 顕著な被害をもたらした最大瞬間風速が 50 m/s を超えるような突風は, 台風を中心付近の積乱雲直下で発生していることが明らかになった. すなわち, 台風の持つ力学的な風, 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つの効果が重なった結果と考えられる.

台風 21 号に伴う竜巻は, 気象庁の突風等データベースでは 1 件 (三重県) が認定されているが, 竜巻によると推定される痕跡や竜巻的 (つむじ風) な渦の動画が多数存在した. 2006 年の台風 13 号に伴い, 延岡市内で発生した竜巻 (延岡竜巻) に関しては, 詳細な現地調査によって, 約 10 個の竜巻が九州から四国にかけて発生していたことが報告された⁴⁾. 台風と竜巻の関係は, 台風中心付近における竜巻発生メカニズムなど未だ不明な点が多い.

T1821 の上陸時の中心気圧は 950 hPa, 最大風速は 45 m/s であり, 暴風域半径は東側に 220 km, 西側に 70 km であった. 図1.4.4 に示した最大瞬間風速が 30 m/s を超えた地点は台風中心から 150 km 以内であり, 暴風域半径内でほとんどの突風が発生したことになる. 大阪を中心に近畿圏に大きな被害をもたらした, 最大瞬間風速が 50 m/s を超える突風は, F (フジタ) スケールでいうと F2 (50~69 m/s) あるいは JEF2 (53~66 m/s) に相当する. 50 m/s を超える瞬間風速値が観測された, 台風中心から 50 km 程度の場所はインナーコア (台風の眼と壁雲の境界辺り) に対応する.

上陸時の中心気圧が 950 hPa 以下で, 最大風速が40 m/s

を超える事例は過去にも観測されている（表1.4.1）。例えば、2004年に10個上陸した台風のうち、T0416は上陸時に950 hPa、最大風速40 m/s、T0418は945 hPaで40 m/s、T0422は940 hPaで45 m/sであり、いずれも顕著な強風被害が発生した⁹⁾。

今回の台風では、数万件におよぶ構造物の被害が報告されているように、大都市であるレベルを超える強風が吹くと如何に多くの被害が生じるかを認識する結果となった。一方で、数100件の動画が残されており、構造物の破壊や飛散のプロセスを検証するための貴重な資料として活用が考えられる。これだけ甚大な被害が発生すると、停電や公共交通機関の運休、道路の通行止めなどにより迅速な現地調査が実施できなかった。また、大阪市内の調査に終始して、周辺地域の調査に手が回らなかったのも事実である。これらの点は今後の課題である。

1.4.3 台風21号に伴う雷活動

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、比較的に活発だったといえる。図1.4.8は9月4日03時から5日06時までの落雷頻度であり、近畿から関東の太平洋沿岸に落雷は集中していた。これは、台風南方の OUTER-RAINBAND を形成する積乱雲からの落雷頻度が高かったことを意味している。

台風の暴風半径内、強風半径内、その外側の3つの領域で落雷数を比較すると、暴風半径内で発生した落雷は上陸まではほとんど観測されず、上陸後の近畿、北陸で観測され、その後の日本海上では観測されないという特徴的な傾向を示した。これは、最も発達した暴風圏内の積乱雲（INNER-RAINBAND）の電荷分離は不活発（つまり水雲であったことを示唆）であったことを示している。上陸後の地形による上昇流の強化により、積乱雲が発達したことが、陸上のみで落雷が観測された原因と考えられる。竜巻と異なり、台風を形成する積乱雲の落雷活動度は事例によって活発、不活発両方が存在する⁹⁾。

1.4.4 まとめ

本研究では、台風21号に伴って発生した突風に関して、気象官署の最大瞬間風速値、地上の顕著な被害、竜巻など渦の発生場所を、台風中心からの相対的な位置関係および上空のエコー有無の関係について調べた。また、落雷分布についても調べた。解析結果は次の4点にまとめられる。

- 1) 突風の発生場所は台風中心に対して、150 km 以内の北東から南東にかけての領域に集中した。ただし、

250 km 離れた場所でも突風は発生していた。最大瞬間風速が50 m/s を超えた突風は、台風中心から50 km 程度の場所で発生し、40 m/s 以上の突風は中心から150 km 以内で観測された。

- 2) 地上の顕著な被害場所は、台風中心から100 km 以内の南東方向領域に存在した。竜巻などの渦現象は、台風中心の南方向に集中した。
- 3) 突風発生時の上空エコーの存在に関しては、すべての突風（風速値）が「エコーあり」であり、強エコー（48 mm/h 以上）下での突風は比較的台風の中心に近い領域、弱エコー（48 mm/h 未満）下での突風は離れた領域で観測された。
- 4) 台風21号に伴う雷活動は、台風の循環内（コア領域）では相対的に少なく、台風の南側のバンドエコー（アウターバンド）領域で活発であった。台風の循環内における落雷は、海上では観測されず、上陸前後に陸上のみ発生したのが特徴的であった。

表1.4.1 2004年に上陸した台風4個の上陸時のパラメータ。
Table 1.4.1 Parameters of 4 typhoons in 2004

	Pressure (hPa)	Radius of strong wind (storm wind) (km)	Maximum wind (m/s)
T0406 June	965	560 (150)	35
T0416 Aug.	950	600 (260)	40
T0418 Sep.	945	560 (310)	40
T0422 Oct.	940	410 (150)	45

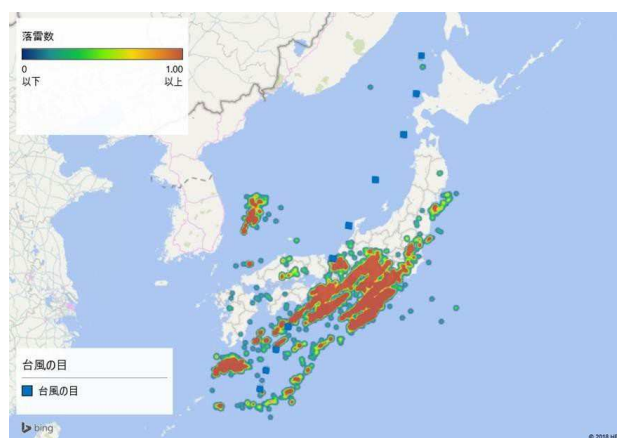


図1.4.8 2018年9月4日03時から5日06時までの落雷頻度

Fig. 1.4.8 Frequency of CG lightning from 03JST, 4

September to 06 JST, 5 September 2018

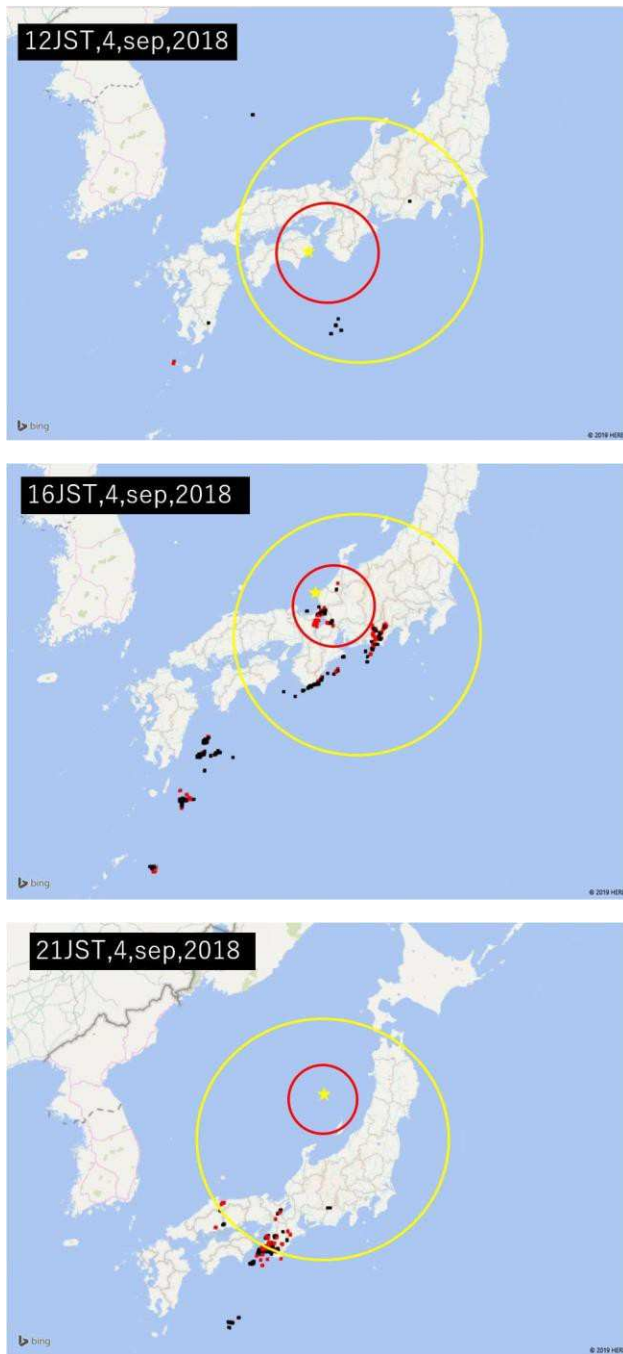


図 1.4.9 2018 年 9 月 4 日 12 時 (上), 16 時 (中), 21 時 (下)

の前 1 時間落雷分布. 赤ドット：正極性落雷, 黒ドット：負極性落雷, ★：台風中心位置, 赤色円：暴風域, 黄色円：強風域を示す.

Fig.1.4. 9 Distribution of CG lightning at 12 JST (top), 16 JST (middle), 21 JST (bottom) on 4 September 2018

謝辞

本研究に当たって, 地上観測データは気象庁, 明星電気 (POTEKA), レーダーエコーは気象庁, 落雷データはフランクリンジャパンのものを使用しました.

参考文献

- 1) 小林文明, 佐藤英一, 野田稔, 友清衣利子, 佐々浩司, 岩下久人, 長尾文明, ガヴァンスキ江梨, 高森浩治, 森山英樹, 吉田昭仁, 「台風 1821 号 (JEBI) がもたらした広域強風災害について」, 日本風工学会誌, 第 44 巻, pp.44-53, (2019)
- 2) 小林文明, 白岩馨, 上野洋介, 「降雪雲に伴う突風の統計的特徴—北陸沿岸における観測—」, 天気, 第 55 巻, pp.651-660, (2008)
- 3) 小林文明, 河合克仁, 林泰一, 佐々浩司, 保野聡裕, 「冬季庄内平野における突風の発生頻度と環境特性」, 日本風工学会論文集, 第 37 巻, pp.1-10, (2012)
- 4) 日本風工学会風災害研究会編, 「2006 年台風 13 号および同年 11 月 7 日に北海道佐呂間町で発生した竜巻による強風災害に関する調査報告書」, 188pp, (2007)
- 5) 日本風工学会・風災害研究会, 「2004 年の強風災害に関する調査報告書」, 221pp, (2005)
- 6) Kobayashi, F., and M. Yamaji, "Cloud-to-Ground Lightning Features of Tornadoic Storms Occurred in Kanto, Japan, on May 6, 2012", Journal of Disaster Research, Vol.8, pp.1071-1077, (2013)

2018 年台風第 21 号時における国土交通省 XRAIN を用いた雨量解析

Rainfall of Typhoon Jebi Using XRAIN

中北英一^{*1} 山口弘誠^{*2} 小坂田ゆかり^{*3}

Eiichi NAKAKITA, Kosei YAMAGUCHI, and Yukari OSAKADA

SUMMARY

Rainfall distribution of typhoon Jebi was investigated using XRAIN. Strong rain at the eye-wall and orographic rainfall were occurred. More than 300 mm as a total amount of rainfall at 4th September was also occurred.

key words: XRAIN, Accumulated rainfall

1.5.1 まえがき

近年増加する集中豪雨や局所的な大雨による水害や土砂災害等に対して、適切な施設管理や防災活動等に役立てるために、2010 年以降 X バンド偏波ドップラーレーダーのネットワーク観測（旧 XRAIN）によるレーダー雨量情報が国土交通省から提供されている。さらに 2016 年 7 月からは配信エリアが大幅に拡大されていて、通称 XRAIN (eXtended RAdar Information Network)と呼ばれている。旧 XRAIN は非常に強い雨の際に降雨減衰が起こり、電波が消散して unknown のエリアが出てくることがあったが、X バンドレーダーに加えて、降雨減衰の少ない C バンド

レーダーを合成処理することで、豪雨事例においても電波消散領域が少なくなった。そこで、本稿ではその新しい XRAIN を用いて、2018 年台風第 21 号の降雨量を解析する。

1.5.2 XRAIN を用いた降雨解析

対象日時は台風が上陸した 2018 年 9 月 4 日の 10 時～24 時とした。実際には 10 時より少し早い時間から台風のアウターバンドの降水域が日本列島にかかっていたが、残念ながら、XRAIN のデータ管理サーバーのメンテナンスの影響で 10 時以降のデータしか収録がなかった。

* 1 京都大学防災研究所 教授 nakakita@hmd.dpri.kyoto-u.ac.jp

Professor, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

* 2 京都大学防災研究所 准教授

Associate Professor, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

* 3 京都大学大学院工学研究科 博士後期課程

Ph.D Student, Graduate School of Engineering, Kyoto University

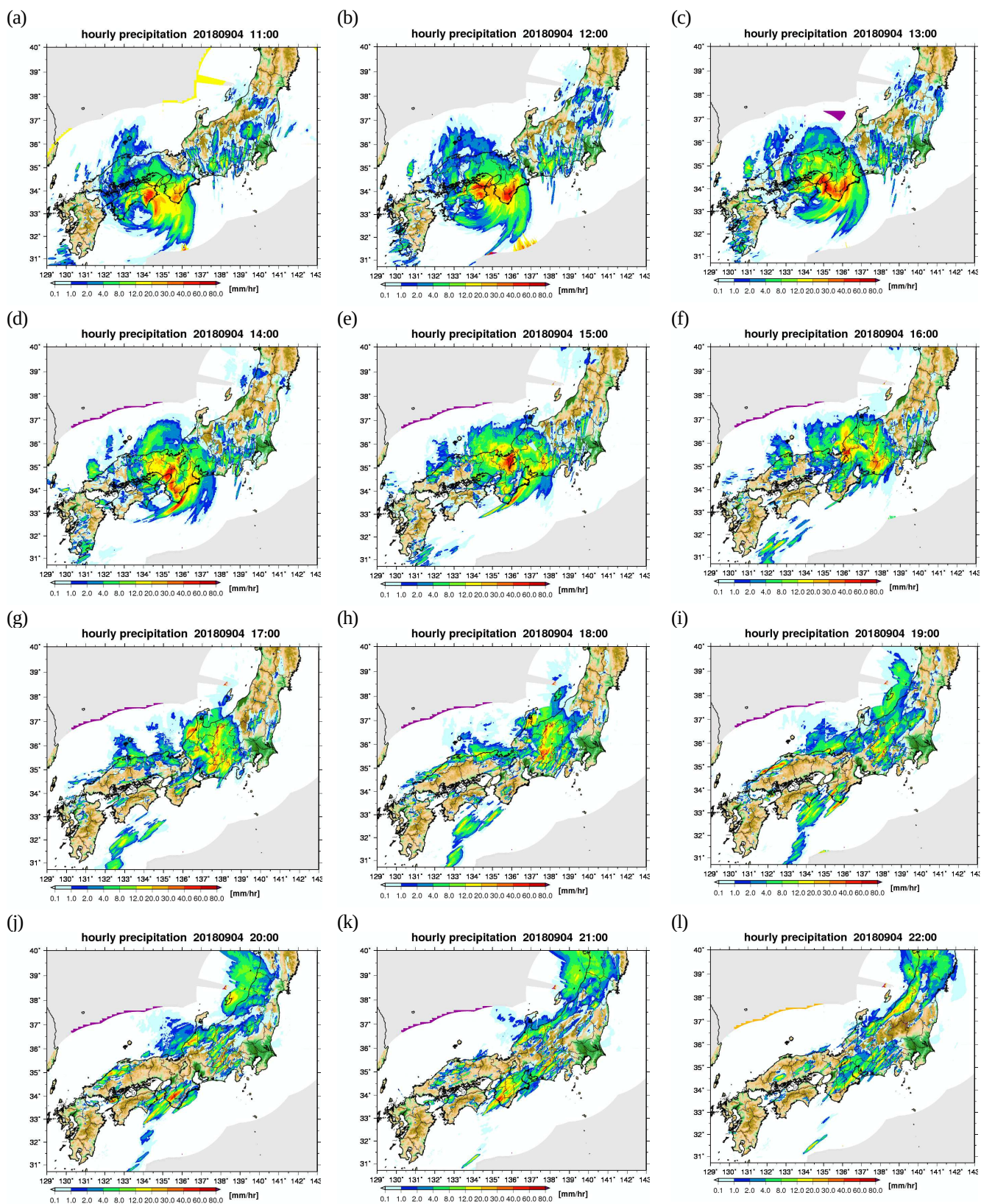


図 1.5.1 XRAIN で観測された 1 時間積算雨量の時系列図 (前 1 時間を図示)

Fig. 1.5.1 Hourly rainfall distribution using XRAIN

XRAIN は毎分データが更新されており、そのデータを用いて 1 時間積算降雨量を算出したものを図 1.5.1 に示す。図 1.5.1(a)～(d)の 11 時～14 時をみると、台風の目の構造をはっきりと確認することができる。この時間帯は徳島県や紀伊半島南部における地形性降雨が卓越していることを確認できる。また、13 時～14 時において、兵庫県南東部と大阪府北部において強雨域が存在している。図 1.5.1(d)をみると、六甲山付近から線状に降水帯が北東-南西ラインに伸びているように見える。しかし、この現象はいわゆるメソ対流系でよく見られるバックビルディング現象ではないと考えている。図 1.5.2 に 13:46 と 14:07 における降雨強度の瞬時値を示すが、台風のアイウォールの一部の強雨域が単に台風の移動に伴ったものと考えられる。同時時間帯において淀川水系の一庫ダムでは猪名川の水位上昇を抑えるためにダム貯留の防災操作を開始しており、降雨と災害対応との関連性を理解することができる。なお、このダム操作によって 0.72m ほど水位の低減効果があったと推定されており、避難判断水位未満に抑えていることが報告されている。

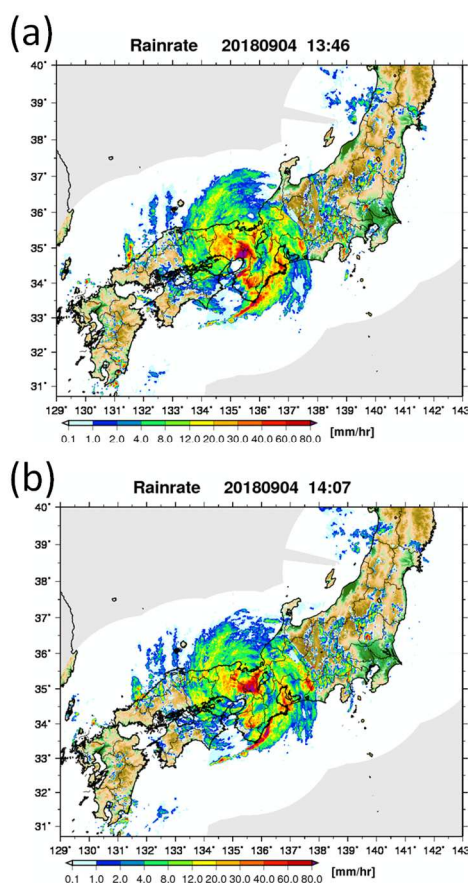


図 1.5.2 XRAIN で観測された降雨強度（瞬時値）
(a) At 13:46, (b) at 14:07.

Fig.1.5. 2 Rainrate by XRAIN.

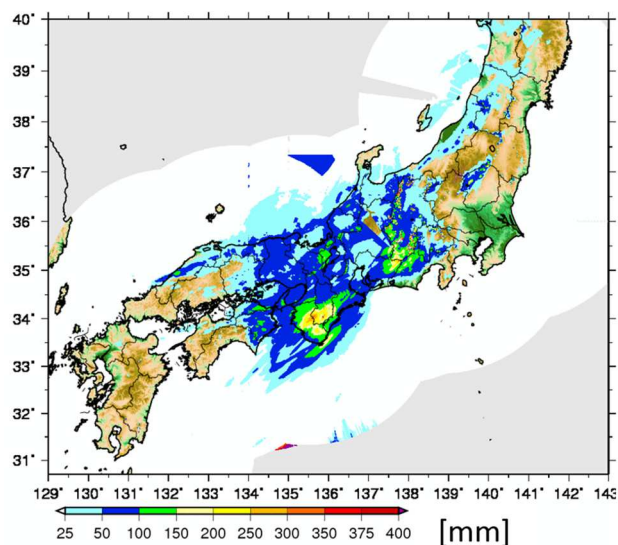


図 1.5.3 XRAIN で観測された 9 月 4 日 10～24 時の総降雨量。

Fig.1.5. 3 Accumulated rainfall for 14-hrs from 10 am.

次に XRAIN で観測された 9 月 4 日 10～24 時の総降雨量を図 1.5.3 に示す。和歌山県、奈良県南部、東海地方で大きな総降雨量があったことを確認できる。気象庁速報²⁾ではアメダスを用いた解析を行っており、それと比較しても同様のことが言える。ただし、午前 10 時からのデータしか用いていないため、徳島県の降雨量を過小推定していることに注意されたい。

台風第 21 号の移動速度は比較的に早い方であり、例えば、近畿地方に大雨をもたらした 2011 年第 12 号台風 (TALAS) と比べると、日本に上陸してから移動速度が倍以上であった。そのため、地形性降雨を除いて同じ場所に強雨域が長時間とどまることがなかったため、TALAS のときよりも総降雨量が少なかったと考えられる。それでも 300 mm を超える雨量がもたらされた地域もあることを確認できた。

参考文献

- 1) 国土交通省近畿地方整備局河川部, 出水速報「平成 30 年 9 月台風 21 号による高潮・大雨の概要第 2 報」, 2018 年 9 月 11 日.
- 2) 気象庁速報, 台風第 21 号による暴風・高潮等, 2018 年 9 月 11 日.

第 1 章 6

2018 年の台風活動に対する環境場の影響について

Environmental Factors affecting 2018 Western North Pacific Tropical Cyclone Activity

飯塚 聡

Satoshi IIZUKA

SUMMARY

Tropical cyclone (TC) activity over the western North Pacific in 2018 is documented. Among 29 TCs in 2018, the number of typhoons ranked on violent typhoon intensity with a maximum wind speed more than 105 knot were seven, which is the largest over the past 40 years since 1979. All of the violent typhoons, including Typhoon 1821 and 1824 making landfall on Japan, were generated over the southeastern quadrant of the western North Pacific, as a TC has enough time to intensify after its formation over the warm tropical ocean. The increase in TC formation frequency over the southeastern quadrant seems to be related to the eastward extension of monsoonal westerlies associated with El Niño. Additionally, the comparison among intense landfalling typhoons implies that the track of Typhoon 1821 was favorable for keeping its intensity owing to a passage over the North Pacific subtropical gyre with large ocean thermal energy.

1.6.1 はじめに

2018 年には、平年の 2.7 個のおよそ倍に当たる 5 個の台風が沖縄を除く日本の本土（九州，四国，本州，北海道）へ上陸した¹⁾（図 1.6.1）。特に、台風第 21 号は 1961 年の第 2 室戸台風時の最高潮位を上回る高潮を引き起こし²⁾、大阪湾周辺に浸水被害や関西地方を中心に強風被害をもたらした。また、その後に上陸した台風第 24 号も、各地で観測史上 1 位の最大風速を記録する他、和歌山県御坊では 218 センチもの潮位偏差を引き起こした³⁾。さらに、関東地方を中心に塩害が発生し、首都圏の交通機関に大きな影響も及ぼした。また、通常とは異なり日本の本州を東から西へと移動した台風第 12 号は、伊豆半島の東岸に高波による被害を、台風第 20 号も建物の倒壊等の被害をもたらした。

日本の本土に 1979 年以降に上陸した台風のうち、気象庁のベストトラックデータ⁴⁾において上陸時の最大風速が 80 ノット（毎秒約 40 メートル⁵⁾）を超えた台風を表 1 に列挙する。1979 年以降で上陸時の最大風速が 80 ノットを超えた台風は 14 個あったが、2018 年台風第 21 号の上陸時の最大風速 85 ノット（毎秒約 45 メートル）は 3 番目の強さであった。また、2018 年台風第 24 号も上陸時の最大風速は 80 ノットに達しており、6 番目の強さであった。

国立研究開発法人 防災科学技術研究所 総括主任研究員

National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

順位	番号	年	月	日	時	上陸時 中心気圧	上陸時 最大風速	最低気圧	最大風速	上陸地点
1	9313	1993	09	03	15	930	95	925	95	鹿児島県薩摩半島
1	9119	1991	09	27	16	940	95	925	100	長崎県佐世保市
3	9918	1999	09	24	04	940	85	930	90	熊本県天草
3	9019	1990	09	19	20	948	85	890	120	和歌山県白浜
3	1821	2018	09	04	11	950	85	915	105	徳島県南部
6	9426	1994	09	29	19	950	80	925	100	和歌山県みなべ町
6	0416	2004	08	30	09	950	80	910	110	鹿児島県串木野市
6	0422	2004	10	09	16	950	80	920	100	静岡県伊豆半島
6	0613	2006	09	17	18	950	80	919	110	長崎県佐世保市
6	1115	2011	09	21	14	950	80	940	85	静岡県浜松市
6	1721	2017	10	23	03	950	80	915	100	静岡県掛川市
6	1515	2015	08	25	06	955	80	930	100	静岡県浜松市
6	0705	2007	08	02	17	960	80	925	105	宮崎県日向市
6	1824	2018	09	30	20	960	80	915	105	和歌山県田辺市

表 1.6.1 1979 年以降で日本に上陸時の最大風速が 80 ノット以上の台風。

Table 1.6.1 List of tropical cyclones making landfall on the Japanese main islands with maximum wind speed more than 80 knot since 1979.

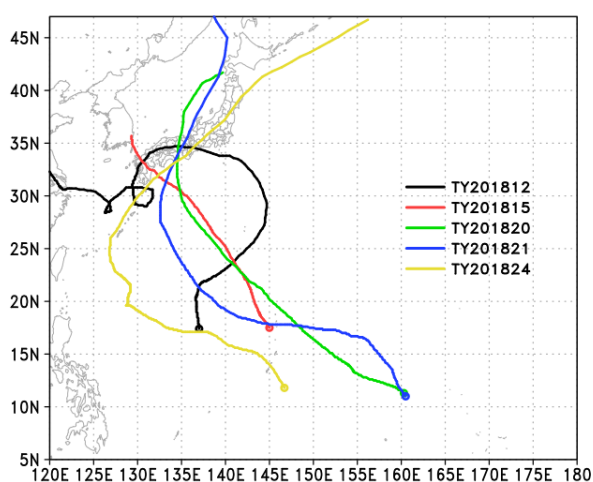


図 1.6.1 2018 年に上陸した台風の経路。

Fig.1.6.1 Tracks of five tropical cyclones making landfall on the Japanese main islands in 2018.

台風の強度は、台風内部の雲構造やそれに伴う放射の影響などによる最大風速半径の位置の変化によって変わる^{6,7)}他に、周辺の大気場や海面水温などの外的な要因によっても変わる^{8,9)}。主に熱帯海上で発生する台風は、水温の高い海面から供給される水蒸気により発達し最盛期を迎えるが、日本周辺に來ると、熱帯よりも低い海面水温により水蒸気の供給が

減少すること、偏西風による移動や鉛直シアーなどの影響で軸対称な構造が保てなくなること、地表面での摩擦効果の影響などで勢力が減衰する。従って、同程度に発達した台風であれば、上陸時の台風の強さは、最盛期から上陸までの間の鉛直シアーの強度や移動経路上の海面水温などに影響されると考えられる。一方、減衰効果が同程度の場合であれば、より強く発達した台風の方が上陸時の勢力も強いことが期待される。ここでは、台風第 21 号が 1979 年以降では 3 番目の強さで上陸した要因を検討するために、2018 年の台風強度に対する外的要因としての環境場の特徴を報告する。

1.6.2 2018 年の台風の発生と環境場

2018 年の台風の発生数は 29 個¹⁾であり、平均 26 個に比較すると多かった年と言える(図 1.6.2)。次に、発生した台風の強度について見ると、2018 年は気象庁が定義した最大風速が 105 ノットを超える「猛烈な台風」¹⁰⁾は、台風第 3, 8, 21, 22, 24, 25, 26 号の 7 個もあり、1979 年以降で最も多かったのが特筆すべき点として挙げられる。但し、基準を「非常に強い台風」や「強い台風」にまで発達した台風に変えると、その発生数は平均値とほぼ変わらない。

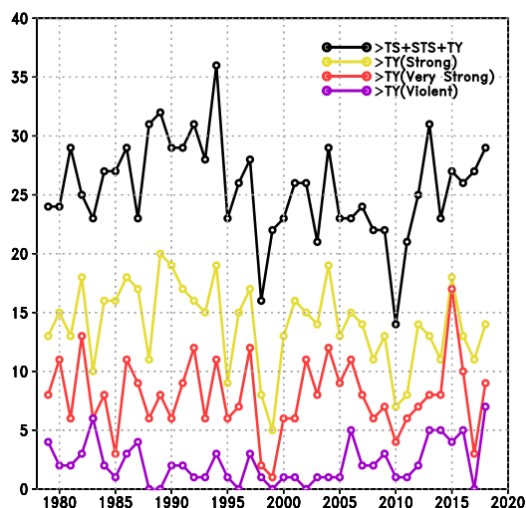


図 1.6.2 各年の西太平洋での台風（黒線）並びに、気象庁が定義した⁸⁾強い台風（64 ノット）以上（黄線）、非常に強い台風（85 ノット）以上（赤線）、猛烈な台風（105 ノット）以上（紫線）の台風の発生数。
Fig.1.6.2 Number of tropical cyclones with a peak maximum wind speed more than 34 knot (black), 64 knot (yellow), 85 knot (red), and 105 knot (purple).

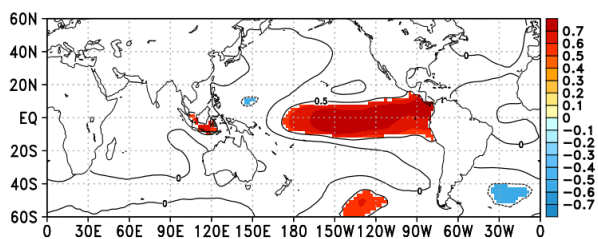


図 1.6.3 「非常に強い台風」以上の強さに達した台風の発生数と 12 月の海面水温との相関係数の分布。有意水準が 99.9%以上の値のみハッチで示す。
Fig.1.6.3 Map of correlation coefficient of sea surface temperature anomaly in December with annual tropical cyclone frequency with a peak maximum wind speed more than 85 knot. Only regions above 99.9% confidence level are shaded.

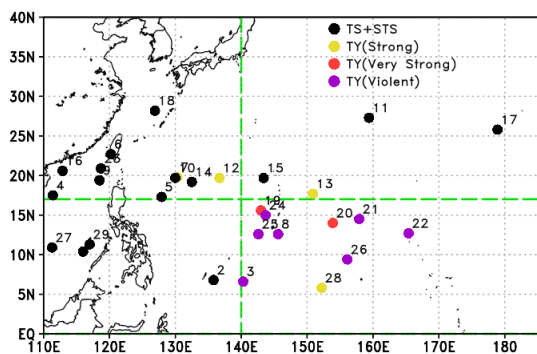


図 1.6.4 2018 年の各台風の発生位置。
Fig. 1.6.4 Tropical cyclone formation locations in 2018.

これまでの研究^{11), 12)}によれば、西太平洋で発生する台風の特徴を年々変動のスケールで見ると、1982 年、1997 年、2015 年のような強いエル・ニーニョが発生した年に、強い台風が増加する傾向があることが知られている。モンスーントラフが例年よりも東まで張り出すのに伴い、西太平洋熱帯域の南東域で発生する台風が増加し、その結果、暖かい海水温の領域を長時間移動しながら発達するためと考えられている。図 1.6.3 に「非常に強い台風」以上の強さに達した台風の発生数と海面水温との相関係数の分布を示すが、有意水準 99.9%で東部赤道上の海面水温と 0.6 以上の相関が見られる。そこで、2018 年に発生した台風の位置および発生時期の西太平洋における下層風の状況について示す。図 1.6.4 に見られるように、2018 年に「猛烈な台風」及び「非常に強い台風」の強さに達した台風はいずれも東経 140 度より東、北緯 17 度より南の海域で発生していた。西太平洋熱帯域の南東海域で発生した台風のなかで、「非常に強い台風」の強さにまで達しなかったのは、海面水温が季節的に低い 11 月下旬に発生した 28 号のみである。また、西太平洋の台風の約半数はモンスーンのシアライン上で発生することが指摘されている¹³⁾が、2018 年の「非常に強い台風」以上に発達した台風はいずれも、貿易風とモンスーン西風の境界付近で発生している（図 1.6.5）。

図 1.6.6 に 2018 年の主な強い台風が発生した 8 月中旬から 9 月下旬までの期間で平均した大気下層 850hPa での風の偏差の分布を示す。西太平洋の赤道付近では西風偏差となっている一方で、日本の南東の小笠原諸島付近を中心に高気圧性循環の偏差が見られる¹⁴⁾。その結果、西太平洋熱帯域の南東域では低気圧性の循環が平年よりも強い状態となっており、台風の発生に好都合な条件となっていたことがわかる。西太平洋の赤道付近の西風偏差は、その後東太平洋赤道上に正の水温偏差を引き起こしている（図 1.6.7）。また、小笠原諸島付近を中心とした高気圧性循環の偏差は、この期間に日本付近に台風が接近・上陸するのに好都合な環境場をもたらしていたと言える。これらから、2018 年の「非常に強い台風」や「猛烈な台風」の発生に対しては、太平洋高気圧の強化とエル・ニーニョの発生に伴う西太平洋の赤道付近での西風偏差の強化に伴い、西太平洋熱帯域の南東海域で台風の発生が促進されたことが一要因として挙げられる。

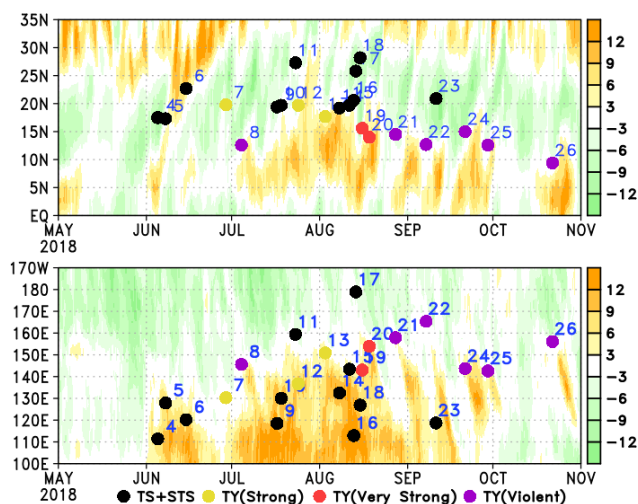


図 1.6.5 2018 年の各台風の発生時期と東経 130°から 150°で平均した 850hPa の西風(m/s) (上段) と北緯 5°から 15°で平均した西風 (下段) の時間変化。

Fig. 1.6.5 Upper panel: Time-latitude section of 850-hPa zonal winds (m/s) averaged over the longitude from 130° to 150°E. Lower Panel: Time-longitude section of 850-hPa zonal winds averaged for the latitude from 5° to 15°N. Tropical cyclone formation locations are denoted by circles.

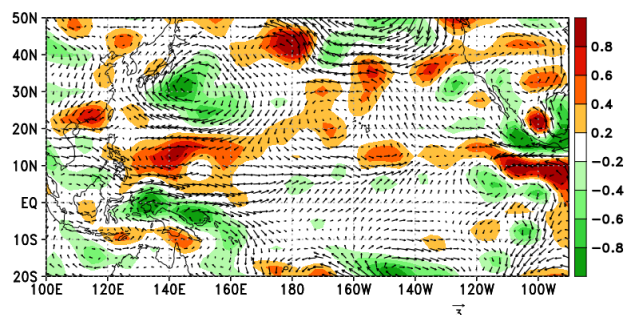


図 1.6.6 2018 年 8 月中旬から 9 月下旬までの期間で平均した 850hPa の風速(m/s)と渦度(10^{-5} s^{-1})の偏差。
Fig. 1.6.6 850-hPa anomalous wind (m/s) and vorticity (10^{-5} s^{-1}) averaged over the period from August 15 to September 30 in 2018.

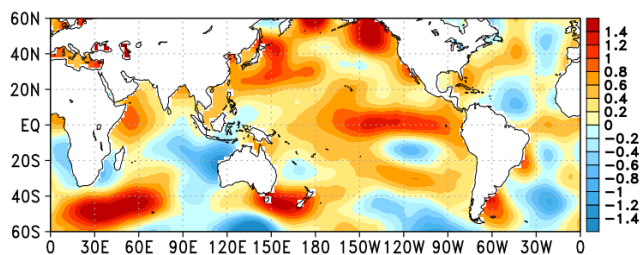


図 1.6.7 2018 年 12 月の水温偏差。
Fig. 1.6.7 Sea surface temperature anomalies in December 2018.

しかしながら、上記のような台風発生に対する環境場の違いだけでは、2018 年に 1979 年以降最多となる 7 個もの「猛烈な台風」の発生を説明することはできない。1979 年から 2018 年までの 40 年の間に発生した「猛烈な台風」は 88 個あったが、その内の 64 個が西太平洋熱帯域の南東海域で発生（台風の強さまでに発達）していた。ちなみに、北西、北東、南西海域で発生した猛烈な台風はそれぞれ 2, 4, 18 個であった。このことから、台風の発生位置の南東への偏移は、「猛烈な台風」の発生に対して好都合な条件とは言える。しかし、西太平洋熱帯域の南東海域で発生した台風が必ずしも猛烈な台風になるわけではない。実際、強いエル・ニーニョが発生した 1982 年、1997 年、2015 年は、西太平洋熱帯域の南東域で発生した「非常に強い台風」は多いが、「猛烈な台風」は多いわけではない（図 1.6.8）。西太平洋熱帯域の南東域で発生しても「強い台風」にまで達しなかった台風は、その発生時期の水温が比較的低い晩秋から春の場合で十分に発達できず、寿命が比較的に短い場合などの特徴が見られる。また、後で示すように発達期の環境場の鉛直シアアの強度の違いが、成熟期の台風の強度に影響を与えている状況も見られる。2018 年に多数の「猛烈な台風」が発生した要因については、季節内スケールの短時間の環境場による外的な要因や台風自身の内的要因等からの影響の観点も含めて今後調査すべき課題と考えられる。

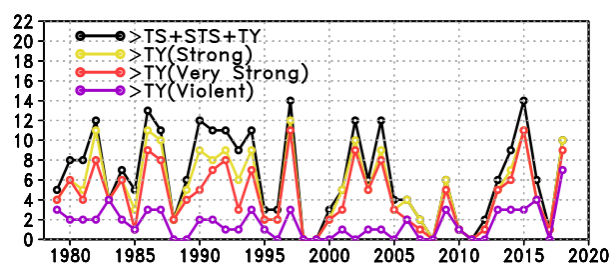


図 1.6.8 各年の西太平洋南東領域で発生した台風（黒線）並びに、気象庁が定義した⁸⁾強い台風（64 ノット）以上（黄線）、非常に強い台風（85 ノット）以上（赤線）、猛烈な台風（105 ノット）以上（紫線）の台風の数。

Fig. 1.5.8 Number of tropical cyclones with a peak maximum wind speed more than 34 knot (black), 64 knot (yellow), 85 knot (red), and 105 knot (purple) generated over the southeastern quadrant of the western North Pacific.

1.6.3 2018年の台風の日本上陸までの環境場

ここでは、台風が上陸するまでの環境場の特徴について見る。図 1.6.9 に 2018 年に日本に上陸した各台風の最大風速、直下の海面水温、移動速度、200hPa と 850hPa での風速差で定義した鉛直シアアの時間変化を上陸時の時刻を基準として示している。低い海面水温により水蒸気の供給が減少すること、偏西風による移動や鉛直シアアなどの影響で軸対称な構造が保てなくなる効果、さらに地表面での摩擦効果の影響等で台風の勢力は減衰するが、基本的には 2018 年の台風の上陸時の強度は最盛期の強度に影響されていたことがわかる。ほぼ同じ海域で台風となり日本へ上陸した 2018 年台風第 20 号と第 21 号について、

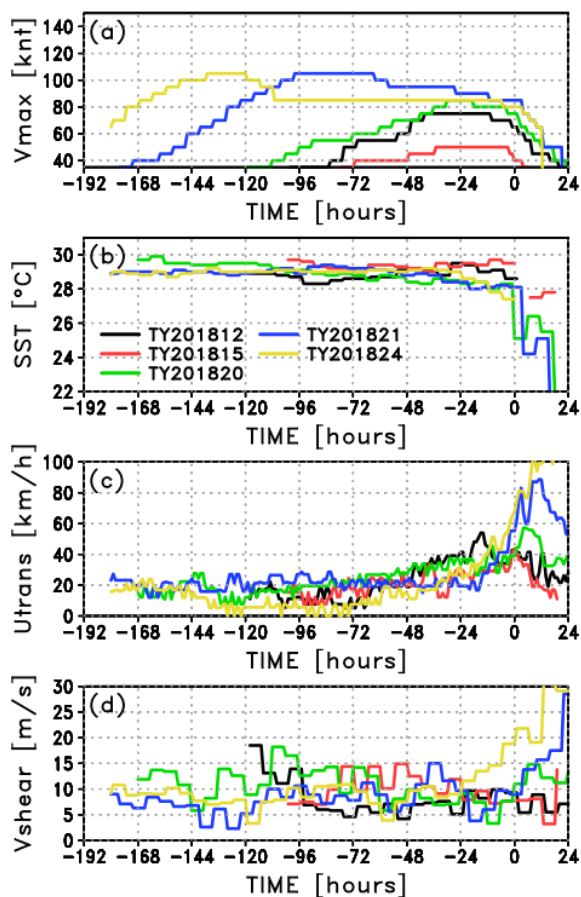


図 1.6.9 2018 年に上陸した各台風の発生から上陸 24 時間後までの (a) 最大風速、(b) 直下の海面水温、(c) 移動速度、(d) 鉛直シアアの時間変化。

Fig. 1.6.9 Time evolution of (a) maximum wind speed, (b) underlying sea surface temperature, (c) translation speed, and (d) vertical wind shear defined as the wind speed difference between 850 hPa and 200 hPa for tropical cyclones making landfall on the Japanese main islands in 2018.

て、上陸までの経路上での海面水温および環境場の鉛直シアアを比べると、どちらも 29 度前後の海面水温の領域を通過しているが、台風 20 号は相対的に強い鉛直シアアの環境下を通過していたために、発達が抑制され、上陸時の強度も相対的に弱かったと推測される。

次に、「猛烈な台風」にまで発達した後に日本に上陸した台風に絞って比較を行い、成熟期から上陸までの環境場の影響について見る。1979 年以降で上述の条件を満たす台風は 15 個（表 1.6.2 参照）あったが、その中で上陸時の強度が強かった上位 5 個の台風と弱かった下位 6 個の台風の経路および上陸までの環境場の時間変化を図 10, 11, 12, 13 に示す。両者の比較から、相対的に強い勢力で上陸した台風は、上陸 1 日前の位置での海面水温が 28 度前後であるのに対して、相対的に弱い勢力で上陸した台風は 27 度以下となっている。但し、1983 年台風第 5 号と 1998 年台風第 10 号は、上陸 1 日前の位置での海面水温が 28 度前後であるにも関わらず、相対的に弱い勢力で上陸している。後者は、フィリピンや台湾周辺を通過時に気圧の低下が顕著であることから、地形の影響

台風番号	最盛期 最大風速	上陸時 最大風速	上陸時刻		
			月	日	時
199019	120	85	09	19	20
201821	105	85	09	04	11
200416	110	80	08	30	09
200613	110	80	09	17	18
201824	105	80	09	30	20
200918	110	75	10	08	05
197920	140	70	10	19	09
201217	110	70	09	30	17
201411	105	70	08	10	06
201419	115	65	10	13	08
199028	105	65	11	30	14
198210	125	60	08	02	00
198310	110	60	09	28	10
198305	120	55	08	17	07
199810	110	50	10	17	16

表 1.6.2 1979 年以降で「猛烈な台風」にまで発達した後に日本に上陸した台風。

Table 1.6.2 List of tropical cyclones making landfall on the Japanese main islands with their maximum wind speed more than 80 knot since 1979.

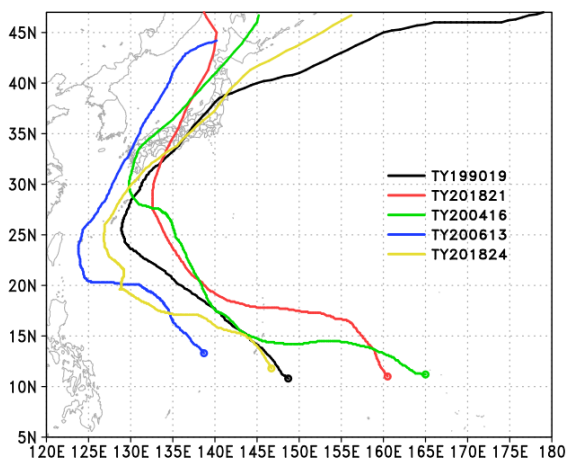


図 1.6.10 台風 9019, 1821, 0416, 0613, 1824 の経路。
Fig. 1.6.10 Tracks of Typhoon 9019, 1821, 0416, and 0613, 1824.

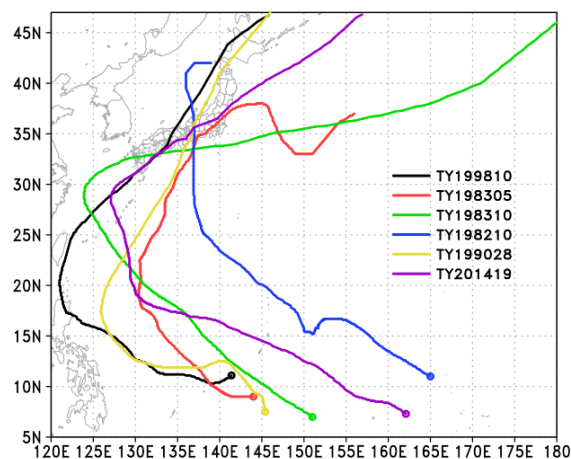


図 1.6.12 台風 9810, 8305, 8310, 8210, 9028, 1419 の経路。
Fig. 1.6.12 Tracks of Typhoon 9810, 8305, 8310, 8210, 9028, and 1419.

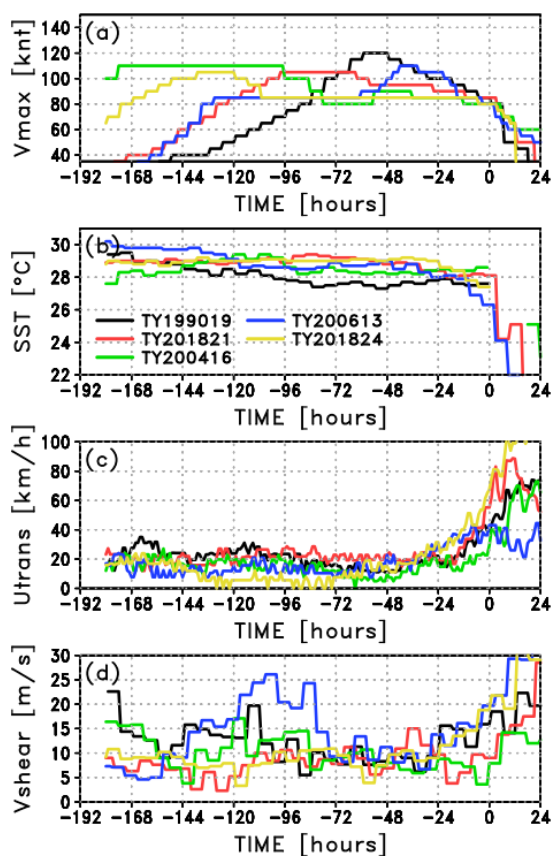


図 1.6.11 台風 9019, 1821, 0416, 0613, 1824 の発生から上陸 24 時間後までの(a)最大風速, (b)直下の海面水温, (c)移動速度, (d)鉛直シアアの時間変化。
Fig. 1.6.11 Time evolution of (a) maximum wind speed, (b) underlying sea surface temperature, (c) translation speed, and (d) vertical wind shear defined as the wind speed difference between 850 hPa and 200 hPa for Typhoon 9019, 1821, 0416, 0613, and 1824.

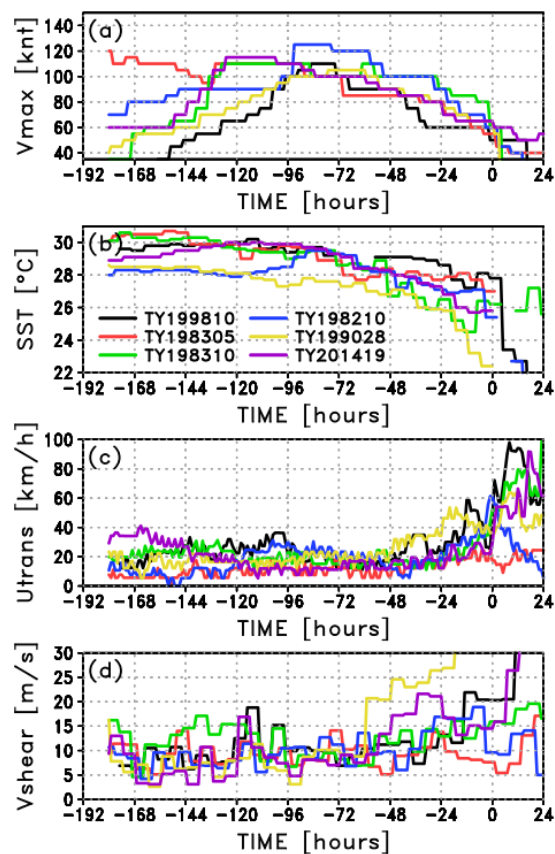


図 1.6.13 台風 9810, 8305, 8310, 8210, 9028, 1419 の発生から上陸 24 時間後までの(a)最大風速, (b)直下の海面水温, (c)移動速度, (d)鉛直シアアの時間変化。
Fig. 1.6.13 Time evolution of (a) maximum wind speed, (b) underlying sea surface temperature, (c) translation speed, and (d) vertical wind shear defined as the wind speed difference between 850 hPa and 200 hPa for Typhoon 9810, 8305, 8310, 8210, 9028, and 1419.

による効果で減衰したためと考えられる。一方、前者は周辺に位置した台風第 6 号との相互作用や比較的強い鉛直シアが減衰に影響した可能性がある。

強い台風の強化と海洋表層の構造との関係を調べた研究¹⁵⁾によれば、海洋混合層が深い黒潮や亜熱帯循環系上は、台風の発達・維持に好都合であることが報告されている。これを反映するように、黒潮の流軸よりも西側の東シナ海を通過した 1983 年台風第 10 号と 2014 年台風第 19 号は、上陸前に比較的低い海面水温上を通過したのに伴い上陸時の勢力が弱まる傾向が見られる。一方、1990 年台風第 28 号や 1982 年台風第 10 号は、黒潮の流軸よりも東の亜熱帯循環系を通過しているが、季節的に水温が低い季節に通過しているために上陸時の勢力が弱まっている。一方、上陸直前とはともかく、上陸 24 時間前までの時点では、1990 年台風第 28 号と 2014 年台風第 19 号を除くと、移動速度や鉛直シアに明確な差は見られない。上記の日本に上陸した台風の比較から、黒潮の流軸の東の亜熱帯循環系上を水温が高い季節に通過したことも、強い勢力で台風第 21 号が上陸する上で好都合な要因であったと言える。

1.6.4 まとめ

2018 年台風第 21 号が 1979 年以降では 3 番目の強さで上陸した要因について、台風強度に対する環境場の特徴に着目して調べた。2018 年には平年の 26 個よりも多い 29 個の台風が発生し、1979 年以降最多となる 7 個の台風が気象庁の定義する最大風速が 105 ノットを超える「猛烈な台風」にまで発達した。台風第 21 号と 24 号を含む「猛烈な台風」にまで発達したこれらの台風はいずれも、強い台風に発達する上で好都合な西太平洋熱帯域の南東域で発生していた。南東域での発生に対しては、エル・ニーニョに伴いモンスーンのシアラインが例年よりも東へ張り出したことと日本の南東で太平洋高気圧が強かったことが要因として考えられる。また、強い勢力のまま台風第 21 号が上陸した要因として、黒潮流軸の東の亜熱帯循環系上を海面水温が季節的に高い 8 月下旬から 9 月上旬に通過したことも挙げられる。しかしながら、2018 年に過去最多の「猛烈な台風」が発生した要因は明らかではなく、その調査は今後の課題である。季節内変動スケールでの鉛直シアの影響や大気上層の環境場との間での角運動量フラックス収束、乾燥空気の流入等の観点からの検討も必要と考えられる。

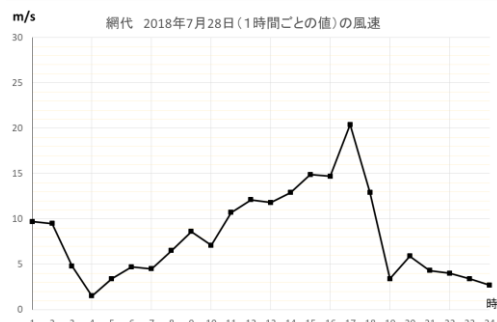


図 1.6.14 静岡県網代の気象庁アメダスで 2018 年 7 月 28 日に観測された 1 時間毎の平均風速。

Fig.1.6.14 Time series of hourly 10-minute averaged wind speed of the AMeDAS at Ajiro, Shizuoka.

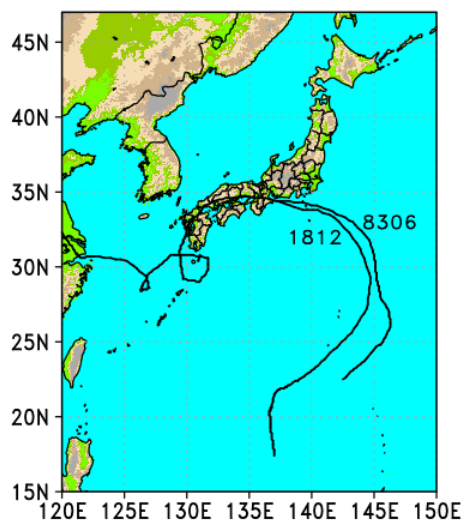


図 1.6.15 2018 年台風第 12 号と 1983 年台風第 6 号の経路。

Fig.1.6.15 Tracks of Typhoon 1812 and 8306.

一方、通常とは異なり本州を東から西へ移動した台風第 12 号により、伊豆半島東岸の神奈川県小田原市や静岡県熱海市にもたらされた高波による被害も 2018 年の台風災害として特筆しておくべきである。この高波の発生は、当該地域への台風の接近時刻と満潮（大潮）の時刻が重なったことに加え、異例な台風のコースのため北東の風が当該地域に吹き続けたことなどの条件が重なったためと考えられる（図 1.6.14）。過去に似たようなコースを通った台風は、1951 年以降では、1983 年の台風第 6 号のみであった（図 1.6.15）。しかも、台風第 12 号は太平洋高気圧の持続により周辺の海面水温が平年より高かったため、より発達していた。高波による被害が発生した地点に隣接する静岡県網代に設置されている気象庁アメダスの記録を調べると、1 時間毎の平均風速が秒速

20メートルを超えたのは1979年以降では14回のみ(図1.6.16)であることから、稀な事例であったと言える。また、通常の台風のコース(西から東)では、うねり成分(周期9秒以上の波)は、伊豆半島にブロックされるため、伊豆半島東側には入ってこないが、2018年の台風第12号では、うねりに伴う高波が入ってきており(図1.6.17, 1.6.18: 下図の黄から赤の部分)、その点でも稀な事例であったと言える。

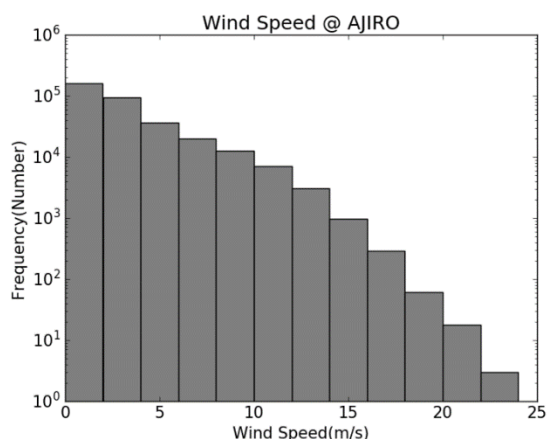


図 1.6.16 静岡県網代の気象庁アメダスにおける過去39年間(1979年1月1日から2018年7月29日)での1時間毎の平均風速の頻度分布。

Fig. 1.6.16 Histogram of hourly 10-minute averaged wind speed of the AMeDAS at Ajiro, Shizuoka, during the period from 1 January 1979 to 29 July 2018.

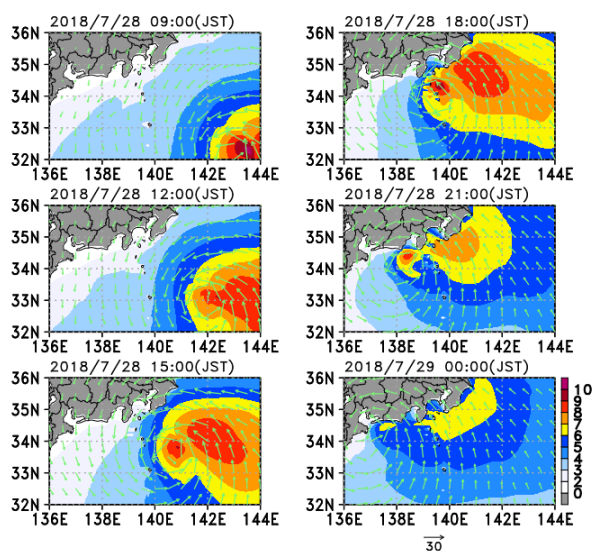


図 1.6.17 2018年7月28日から29日における有義波高(m)。緑の矢羽は10mの風(m/s)を表す。

Fig. 1.6.17 Significant wave height (m) of JMA analysis during the period from 09JST 28 July to 00JST 29 July, 2018. 10-m surface winds are shown in green vector.

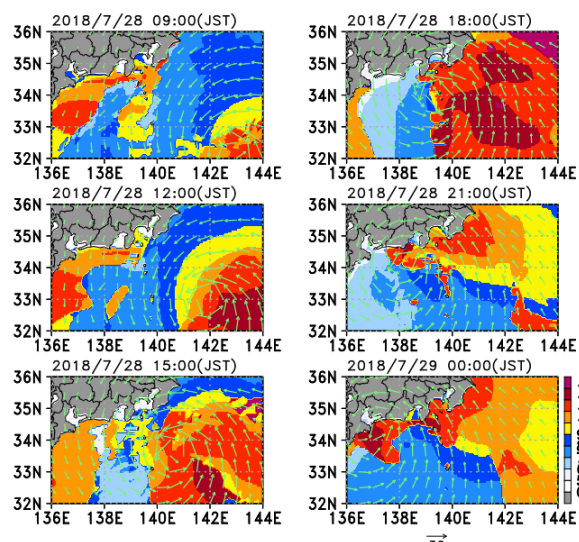


図 1.6.18 2018年7月28日から29日における有義波の周期(秒)。緑の矢羽は10mの風(m/s)を表す。

Fig. 1.6.18 Significant wave period (sec.) of JMA analysis during the period from 09JST 28 July to 00JST 29 July, 2018. 10-m surface winds are shown in green vector.

謝辞

本研究は、科学研究費特別研究促進費 18K19953「平成30年台風21号による強風・高潮災害の総合研究」(研究代表者:丸山敬)による支援を受けて実施されました。台風のベストトラックデータ、アメダスの観測データ、波の解析値は、気象庁から提供されているデータを用いました。大気の実環境場のデータには、NCEP2の再解析データを、海面水温データには気象庁が提供するMGDSSTと1981年以前についてはNCEP2の再解析データを用いました。

参考文献

- 1) 気象庁, 台風の統計資料
<https://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/typhoon/statistics/index.html>
- 2) 台風第21号による強風・高潮等
<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/2018/20180911/20180911.html>
- 3) 台風第24号による強風・高潮等
<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/2018/20181011/20181011.html>
- 4) JMA, Best Track Data
<https://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/rsmc-hp-pub-eg/besttrack.html>
- 5) 気象庁, 速度, 風速, 距離の換算表

- https://www.jma.go.jp/jma/kishou/now/yougo_hp/kansanhyo.html
- 6) Wang, Y., How do outer spiral rainbands affect tropical cyclone structure and intensity? *Journal of the Atmospheric Sciences*, 66, 1250–1273, (2009) doi.org/10.1175/2008JAS2737.1
 - 7) Fovell, R. G., Corbosiero, K. L., Kuo, H.-C., Cloud microphysics impact on Hurricane track as revealed in idealized experiments, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 66, 1764–1778, (2009) doi.org/10.1175/2008JAS2874.1
 - 8) Wang, Y., 2012: Recent research progress on tropical cyclone structure and intensity. *Tropical Cyclone Research and Review*, 1, 254–275, (2012) doi:10.6057/2012TCRR02.05.
 - 9) Wang, Y. and Wu, C.-C., Current understanding of tropical cyclone structure and intensity changes— A review. *Meteorological and Atmospheric Physics*, 87, 257–278, (2004) doi:10.1007/s00703-003-0055-6.
 - 10) 気象庁, 台風の大きさと強さ, <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/now/typhoon/1-3.html>
 - 11) Camargo, S. J. and Sobel, A. H., Western North Pacific tropical cyclone intensity and ENSO, *Journal of Climate*, 18, 2996–3006, (2005) doi:10.1175/JCLI3457.1
 - 12) Wang, B., Chan, J. C. L., How strong ENSO events affect tropical storm activity over the western North Pacific, *Journal of Climate*, 15, 1643–1658, (2002) doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<1643:HSEEAT>2.0.CO;2
 - 13) Yoshida, R., and Ishikawa, H., Environmental factors contributing to tropical cyclone genesis over the western North Pacific, *Monthly Weather Review*, 141, 451–467, (2013) doi.org/10.1175/MWR-D-11-00309.1
 - 14) 「平成 30 年 7 月豪雨」及び 7 月中旬以降の記録的な高温の特徴と要因について
<https://www.jma.go.jp/jma/press/1808/10c/h30goukouon20180810.pdf>
 - 15) Lin, I.-I., We, C.-C., and Pun, I.-F., Upper-ocean thermal structure and the western North Pacific category 5 typhoons. Part I: Ocean features and the category 5 typhoons' intensification, *Monthly Weather Review*, 136, 3288– 3306, (2008) doi.org/10.1175/2008MWR2277.

第 2 章 1

平成 30 年台風 21 号による強風被害調査

野田稔*¹ 友清衣利子*² 長尾文明*³ 竹内崇*⁴ 堤拓哉*⁵

Minoru NODA, Eriko TOMOKIYO, Fumiaki NAGAO, Takashi TAKEUCHI, Takuya TSUTSUMI

SUMMARY

T1821 landed in the southern part of Tokushima Prefecture at noon on September 4, re-landed in Kobe City at 14:00 on the same day, then went to the Sea of Japan, and reached Oshima Peninsula at the western part of Hokkaido at 03:00 on the next day. In the area of dangerous semicircular side of the typhoon, strong wind was observed over a wide range, especially 58.1 m / s at Kansai Island in Sennan City, Osaka Prefecture, and 47.4 m / s at Wakayama City. The maximum instantaneous wind speed more than 50 m / s was recorded on the Kinki area.

T1821 damaged 50,298 residential houses including completely and partially destroyed of 215 cases. This typhoon killed 14 people and injured 968 people across the country.

In Tokushima prefecture, severe wind damage was induced by strong eastern wind when the typhoon was approaching.

In Osaka Prefecture, 42,902 buildings were reported as being damaged by a large number of residents. As a result of the aviation survey, it was estimated that more than 2,000 houses were damaged in Wakayama City, where residential damage was reported as 0. Residential damage in Hyogo prefecture by strong wind was reported as 8 totally destroyed, 44 partially destroyed, and 2,631 damaged in part, and most of the strong wind damage was the damage of roof coverings.

Typhoon 1821 went northward in the west of Hokkaido, and changed temperate low pressure around Sakhalin. With the passage of Typhoon 1821, it caused damage of houses and poles around Hokkaido.

* 1 高知大学教育研究部 教授 noda@kochi-u.ac.jp

* 2 熊本大学大学院先端科学研究部 (工) 准教授 tomokiyo@arch.kumamoto-u.ac.jp

* 3 徳島大学大学院社会産業理工学研究部 教授 fumi@ce.tokushima-u.ac.jp

* 4 神戸大学工学研究科 助教 takeuchi_t@person.kobe-u.ac.jp

* 5 北海道立総合研究機構建築研究本部北方建築総合研究所 主査 tutumi@hro.or.jp

2.1 台風 21 号による被害の概要

2.1.1 全国の被害

野田 稔（高知大学）、友清衣利子（熊本大学）

（1）最大瞬間風速分布

図 2.1.1.1 に平成 30 年 9 月 4 日～5 日の間に 20m/s 以上の最大瞬間風速を観測した地点を示す。図中の実線は台風 21 号の進路であるが、進路を挟んで東側、すなわち、危険半円側に高い最大瞬間風速を示した地点が分布しており、進路近くでは 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。表 2.1.1.1 に、同期間に観測された最大瞬間風速の上位 10 地点の数値を示すが、上位 6 位が 50m/s を超えており、いずれも台風進路近傍の観測点であり、それらの風向のほとんどは南南西から南に含まれ、記録日時も日和佐を除いて概ね台風最接近時に観測されている。また、関東地方のように台風進路からかなり離れているエリアであっても 40m/s 近い最大瞬間風速を記録している地点も存在し、広域にわたって強風をもたらしていることが分かる。

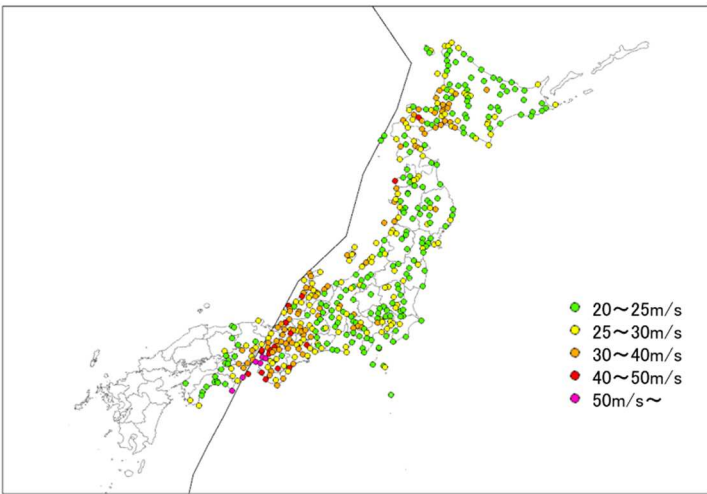


図 2.1.1.1 平成 30 年 9 月 4 日～5 日に 20m/s 以上の最大瞬間風速を記録した地点

表 2.1.1.1 平成 30 年 9 月 4 日～5 日に観測された最大瞬間風速（上位 10 地点）

No.	観測地点	最大瞬間風速	風向	観測日時
1	大阪府 泉南郡田尻町 関空島	58.1m/s	南南西	4 日 13 時 38 分
2	和歌山県 和歌山市 和歌山	57.4m/s	南南西	4 日 13 時 19 分
3	高知県 室戸市 室戸岬	55.3m/s	西	4 日 11 時 53 分
4	和歌山県 和歌山市 友ヶ島	51.8m/s	南	4 日 13 時 14 分
5	大阪府 泉南郡熊取町 熊取	51.2m/s	南	4 日 13 時 40 分
6	徳島県 海部郡美波町 日和佐	50.3m/s	東	4 日 11 時 05 分
7	福井県 敦賀市 敦賀	47.9m/s	東南東	4 日 15 時 00 分
8	大阪府 大阪市中央区 大阪	47.4m/s	南南西	4 日 14 時 03 分
9	愛知県 常滑市 セントレア	46.3m/s	南南東	4 日 14 時 17 分
10	滋賀県 彦根市 彦根	46.2m/s	南東	4 日 14 時 13 分

（2）台風 21 号による全国の被害の概要

表 2.1.1.2 に消防庁がまとめた都道府県毎の被害数を示す。ここでは、浸水に関する被害の情報は除いている。この結果から、被害は全国に広く分布しているが、特に集中的な被害を受けているのが大阪府である。図 2.1.1.2

および図 2.1.1.3 に都道府県別の死者数および負傷者数を示すが、死者は進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 493 名と突出している。

図 2.1.1.4～図 2.1.1.6 に各都道府県における台風 21 号による住家被害数を示す。図 2.1.1.4 に示した全壊家屋の分布は進路近傍に集中しており、図 2.1.1.5 に示した半壊家屋の分布、図 2.1.1.6 に示した一部損壊以上の被害家屋の分布と、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。図 2.1.1.7 に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簡易的な被害率を示す。この結果を見ても、台風進路の危険半円側近傍において住家被害が集中しており、特に大阪府の被害が突出していることが分かる。

表 2.1.1.2 都道府県毎の被害数（消防庁応急対策室まとめ：平成 31 年 2 月 12 日現在）

都道府県	人的被害件数（名）				住家被害件数（棟）				非住家（棟）	
	死者	重傷	軽傷	負傷者合計	全壊住家	半壊住家	一部損壊住家	被害住家合計	公共建物	その他
北海道		1	6	7		2	220	222	8	50
青森県				0			14	14		
岩手県				0			0	0		
宮城県			1	1			2	2		1
秋田県				0			70	70	1	7
山形県			1	1			8	8		1
福島県			1	1			21	21	2	6
栃木県			4	4			3	3		5
埼玉県			18	18			50	50		
千葉県			2	2			4	4		9
東京都			4	4			26	26		1
神奈川県			8	8			27	27	1	1
新潟県		2	5	7		1	84	85		7
富山県			6	6			23	23	1	
石川県			8	8			34	34		5
福井県		1	6	7		4	111	115	29	44
山梨県			3	3		4	15	19	1	3
長野県			5	5		1	35	36		1
岐阜県		6	41	47		15	960	975	64	99
静岡県			3	3			1	1		1
愛知県	2	3	105	108	1	8	555	564	30	89
三重県	1	2	32	34	5	10	770	785		23
滋賀県	2	8	66	74	2	17	2,151	2,170		46
京都府		3	56	59	4	32	8,955	8,991	56	124
大阪府	8	7	487	494	28	436	64,556	65,020	986	3,143
兵庫県		6	53	59	7	37	3,036	3,080	1	72
奈良県		2	7	9			19	19		
和歌山県	1	5	25	30	11	59	3,866	3,936	13	766
島根県				0				0		
岡山県			2	2				0	1	20
徳島県			8	8	1	1	98	100	1	
香川県			1	1				0		1
高知県			1	1			1	1		4
合計	14	46	965	1,011	59	627	85,715	86,401	1,195	4,529

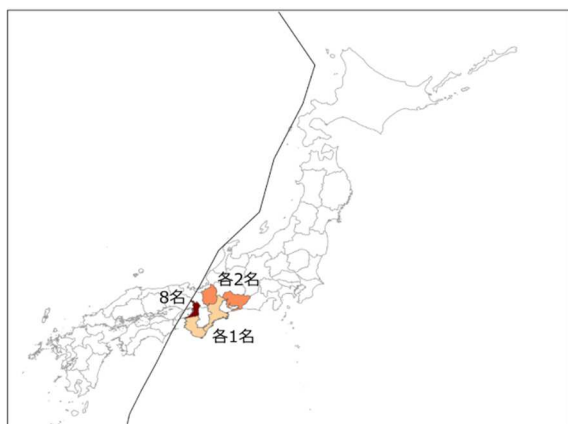


図 2.1.1.2 都道府県別の死者数

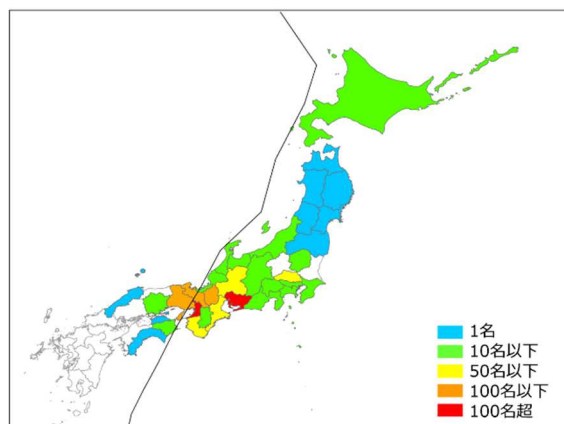


図 2.1.1.3 都道府県別の負傷者数

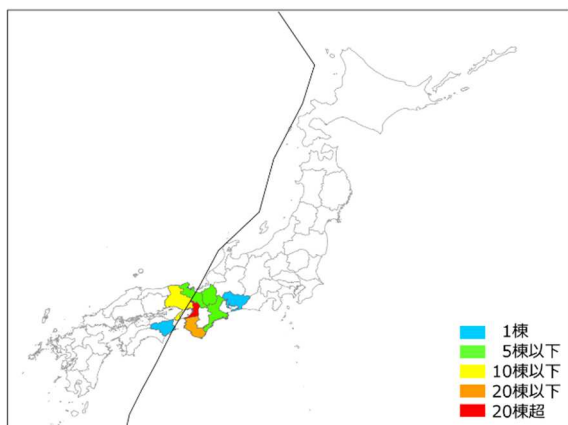


図 2.1.1.4 都道府県別の全壊住家数

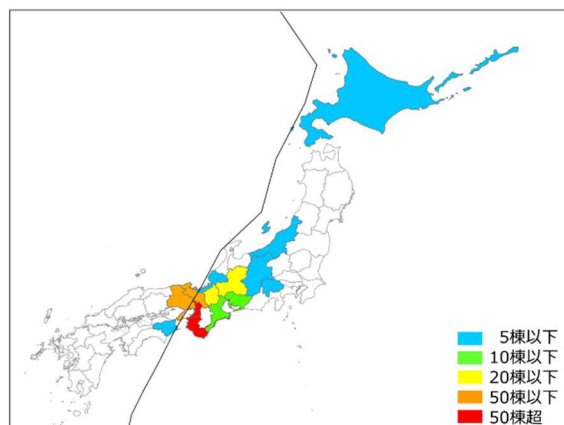


図 2.1.1.5 都道府県別の半壊住家数

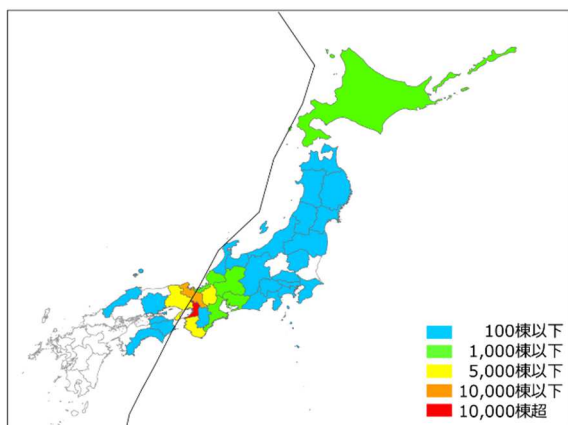


図 2.1.1.6 都道府県別の一部損壊以上被害住家数

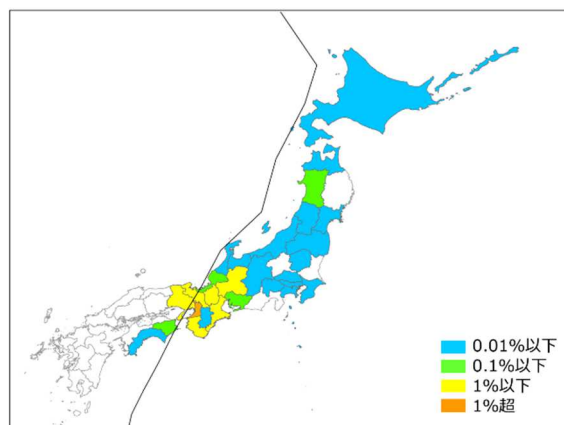


図 2.1.1.7 都道府県別の被害住家率

(3) 近畿地方付近の被害概要

ここでは、特に被害が集中している近畿地方付近について、市町村単位での被害分布を検討する。

図 2.1.1.8 および図 2.1.1.9 に近畿地方の市町村別の死者数および死傷者数の分布を示す。死者に関しては、台風進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ことが分かる。

次に、図 2.1.1.10～図 2.1.1.12 に近畿地方の市町村別の全壊住家数、半壊住家数、一部損壊以上の被害家屋総

数の分布を示す。全壊家屋の分布は大阪府の市町村を中心に台風進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進路に対して危険半円側へと拡大している。図 2.1.1.13 に各市町村別の一部損壊以上の被害住家数を世帯数で除した簡易的な被害率の分布を示すが、大阪府の各市町村で被害率が突出しており、被害率で見ると最大瞬間風速が 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。一方で、和歌山市周辺の一部自治体には被害住家がないことになっているが、公表されている被害状況に住家被害数が示されていないためであり、目視による調査が必要である。



図 2.1.1.8 近畿地方市町村別の死者数

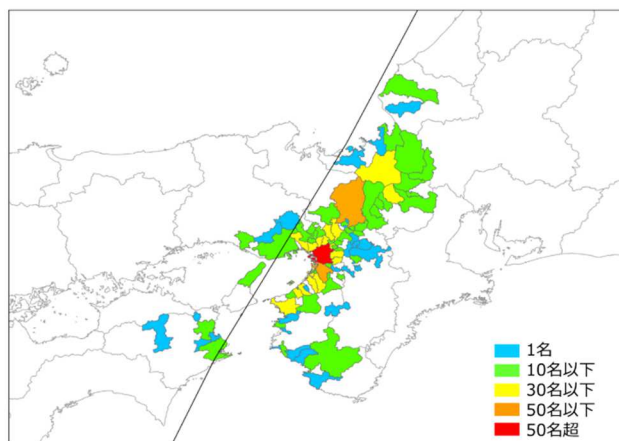


図 2.1.1.9 近畿地方市町村別の死傷者数

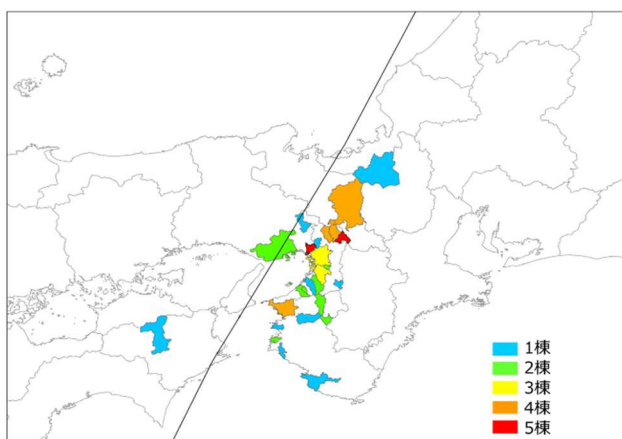


図 2.1.1.10 近畿地方市町村別の全壊住家数

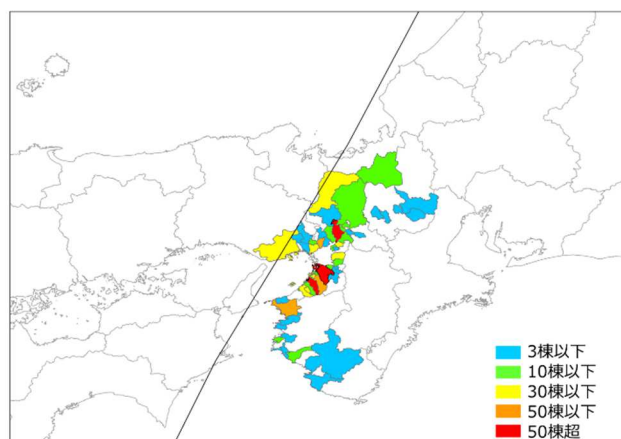


図 2.1.1.11 近畿地方市町村別の半壊住家数

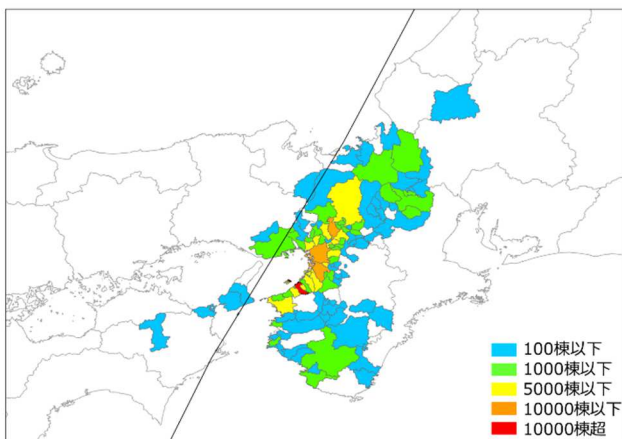


図 2.1.1.12 近畿地方市町村別の一部損壊以上被害住家数

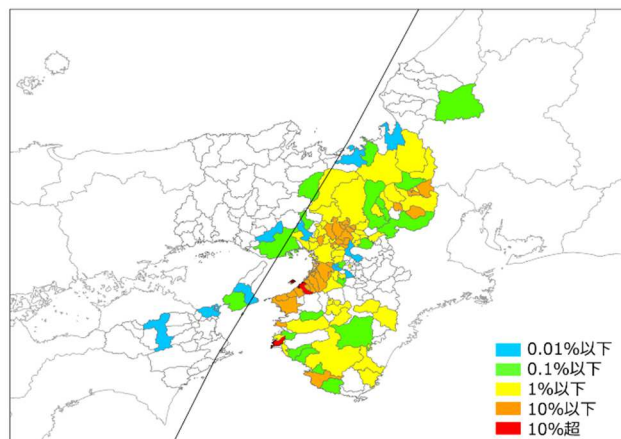


図 2.1.1.13 近畿地方市町村別の被害住家率

2.1.2 徳島県の被害

長尾 文明（徳島大学）

平成 30 年台風 21 号（T1821）は、9 月 4 日正午ごろ徳島県南部に上陸し、徳島県東部を南から北に縦断したのちに、紀伊水道を北上して、神戸市に再上陸している。

徳島県内のアメダス観測所における平均風速、最大瞬間風速、平均風向の時刻歴を図 2.1.2.1 に、また、アメダス測点と被害調査を行った地域を図 2.1.2.2 に示す。日和佐や蒲生田においては既往最大瞬間風速を更新する東からの 50m/s 程度の強風が観測されている。穴吹観測点を除くアメダス観測点は、台風の本が観測点の近傍を通過しており、南の観測所から順（海陽、日和佐、蒲生田、徳島）に、風向の急変と急激な風速低下後の吹き返しの比較的強い風が観測されている。従来の台風による徳島県における強風被害は、台風が徳島県の西側を北上するような経路において、台風進行方向の右側の危険半円に徳島県が位置した時に作用する南東や南南東の強風によって発生することが多かった^{1), 2)}が、T1821 では、台風の本が徳島県東部を通過しており、台風が南方から徳島県に接近中（上陸前や上陸直後）において作用した東風によって強風被害が発生している。

表 2.1.2.1 に徳島県における被害概要を示す。西部の三好市と東みよし町を除いた市町村で倒木や飛散物等による大規模な停電を含め強風による多大な被害が発生している。家屋等の被害は、海岸沿いのすべての市町で発生している。一例として、図 2.1.2.2 中に A と記載している蒲生田岬の付け根に位置する地域の被害の分布を図 2.1.2.3 に示す。図中の丸印で示した建物が、橋湾に沿って作用した東からの強風で被害を受けている。具体例として、撮影場所と方向を図 2.1.2.3 中に矢印で示したア～エにおける被害状況を図 2.1.2.4～2.1.2.7 に示す。屋根瓦の飛散や壁の剥落並びに図 2.1.2.7 に示す体育館の隅角部の大きな負圧の作用による窓ガラスの枠ごとの飛散等、多くの被害が発生している。

また、台風の進行方向左側の比較的風が弱いとされる地域において確認できた西端は徳島市より約 50km の美馬市の吉野川左岸地区（図 2.1.2.2 の B 地域）である。この地区における屋根の被害例を図 2.1.2.8 に示す。また、同じ町内の倒木による民家の全壊被害（図 2.1.2.2 の C 点）を、図 2.1.2.9 に示す。本地点の近隣には、吉野川の右岸に穴吹アメダス測点があるが、穴吹測点は盆地的な地形であり、強風被害発生地点は吉野川に沿って東側に開けた地形であり、穴吹よりも強い東風が正午前の台風上陸時刻頃に作用したと考えられる。また、本事例のように民家等に近接している寺社の巨木は、葉つきがよくても根腐れしている可能性があり注意が必要である。

トラックの強風による横転事故が 3 橋梁上（図 2.1.2.2 中、D, E, F）で発生している。図 2.1.2.10(c)に示す F 橋は河口に近く、水面からも高く、強風が作用する橋梁であり、台風上陸前の 10 時 40 分頃に東風によって大型トラックが横転した。一方、図 2.1.2.10(a), (b) に示す D, E 橋は河口から 5 km ほど内陸に位置し、水面からもさほど高くなく、図(b)に示す E 橋は鉛直材を有するワーレントラスであり、図(a)の D 橋は川幅 100m 程度の直接海に連ならない川に架かっており、強風時の交通規制について検討が必要であると考えられる。

また、簡易倉庫の転倒・飛散事故も複数件発生している。図 2.1.2.11 に示すような基礎の支持力不足や基礎への連結材の腐食・劣化等による強度不足、さらには、窓や扉の破損による風力の増大等が原因である。簡易倉庫の飛散による下流側民家の 2 次被害（図 2.1.2.12）も発生しており、日常の維持管理が重要である。

避難場所として使用されることもある体育館では、屋根や窓の破損も複数（図 2.1.2.13）発生しており、安心・安全な避難場所として提供できるよう十分強度を確保する必要がある。

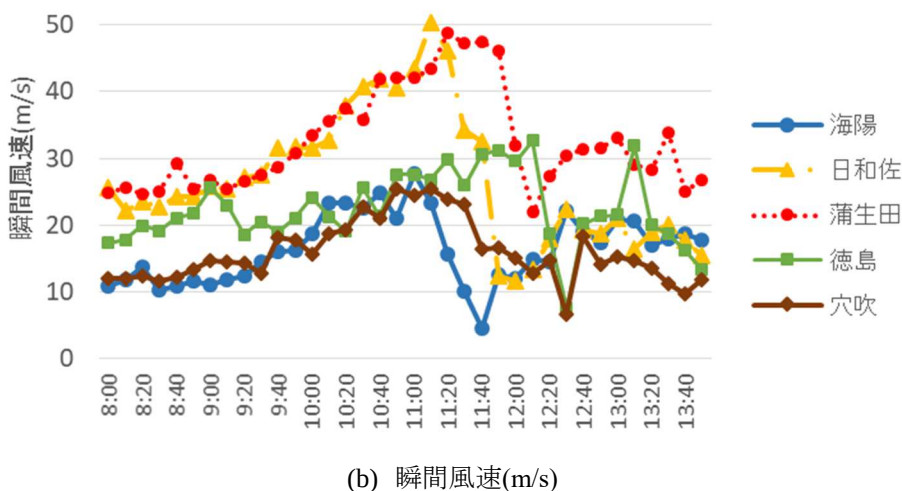
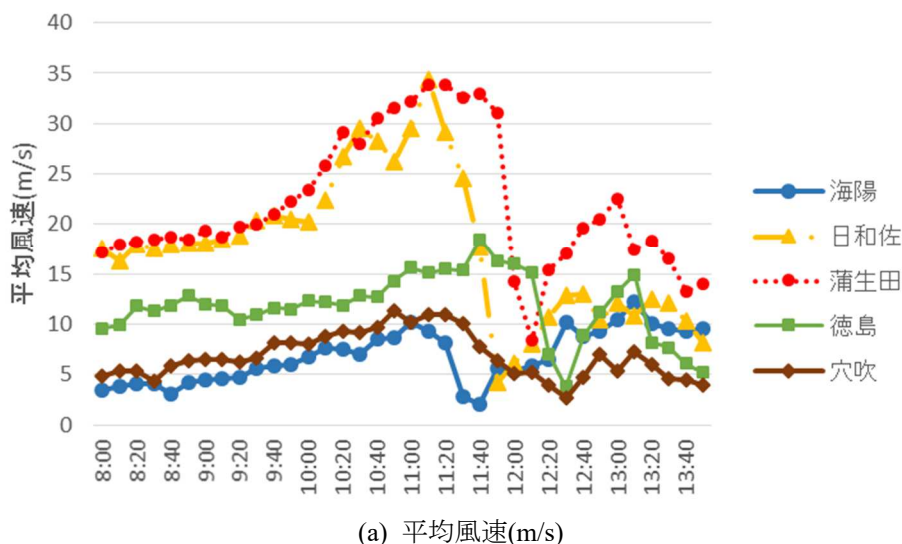
また、看板の飛散事例を図 2.1.2.14 に示す。図(b)のように飛散看板による民家の 2 次被害や停電等を誘発させている。通常南向きに設置される太陽光発電パネルにおいても、図 2.1.2.15（図 2.1.2.2 中、地点 G, H）に示すようにパネル背面からではなく、東寄り（パネル側面またはやや後方）の風においても飛散している。両被害例においては、太陽光発電装置の基礎の強度不足が共通している。

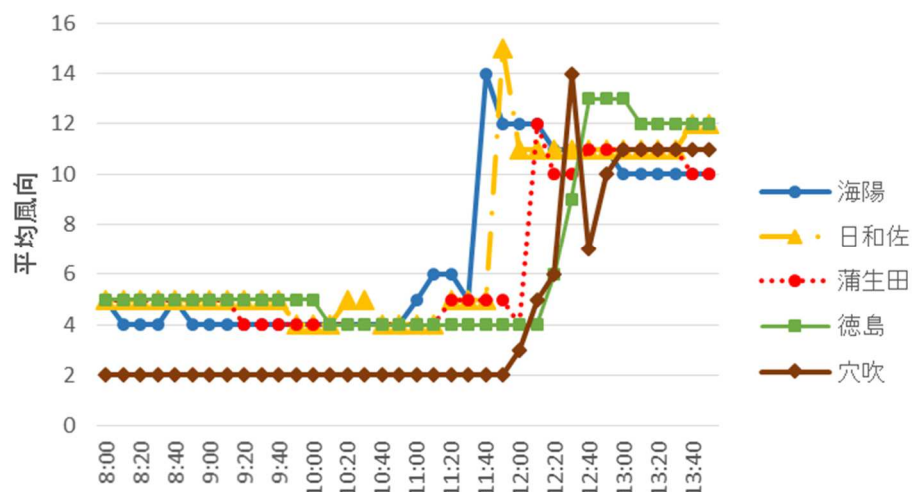
さらに、建物形状や屋根形状が若干特殊な建屋での被害をそれぞれ図 2.1.2.16 と図 2.1.2.17 に示す。図 2.1.2.16 に示した建物被害（図 2.1.2.2 中、地域 I）は、長方形と台形を連ねた平行 5 角形の平屋において、長方形部分が飛散しているが、屋根の面積が相対的に小さい台形部分は被害を受けていない。飛散物による窓やドアの破損や、基礎との接続方法等不明点も存在しているが、屋根に作用する揚力の大小が影響した可能性も考えられ

る。図 2.1.2.17 の建屋（図 2.1.2.2 中、地域 J）の屋根は、非常に複雑であり、屋根の南半分は切妻、北半分の 2/3 の部分が南側の切妻と同じ勾配の切妻で、残りの 1/3 部分が南側の切妻の傾斜角と等しい片流れとなっている。そして、北側の片流れ部分の約 3/4 が飛散しており、南北の両切妻の屋根には被害が発生しておらず、このような複雑な屋根が採用された理由は不明であるが、この複雑な屋根に作用する大きな空気力によって被害が生じたものと考えられる。

図 2.1.2.18 には、ボートレース鳴門（図 2.1.2.2 中、地点 K）のボート出艇部分の被害を示している。先述のように T1821 による徳島県下の被害は台風接近時の東からの強風によるものであり、ほぼ東西方向の小鳴門海峡に沿う非常に強い東風が出艇部のテントに作用し、浮桟橋もろとも煽られて飛散し、支持構造物にも甚大な被害が発生したものと考えられる。

局所的な地形の影響による特異な風による被害例として、図 2.1.2.2 中記号 L で示した地域の被害状況を図 2.1.2.19 に示す。図中には被害状況から推定した風の作用方向を矢印で示している。図中のアからエの被害状況を図 2.1.2.20(a)から(d)に示す。この地域においても上空の主風向は東寄りであったと考えられるが、被害からは西から東に吹き飛ばされた倉庫、屋根瓦等が存在している。これは、徳島県鳴門市の大毛島における現地観測、縮尺地形模型並びに半島状地形を単純化した模型を用いた風洞実験結果等で報告³⁾されている水平軸を持つ旋回流が地域の東側の尾根状地形の背後に発生し、建造物により強い風が作用したと考えられる。





(c) 平均風向

図 2.1.2.1 平成 30 年 9 月 4 日の徳島県のアメダス観測点における風向・風速時刻歴

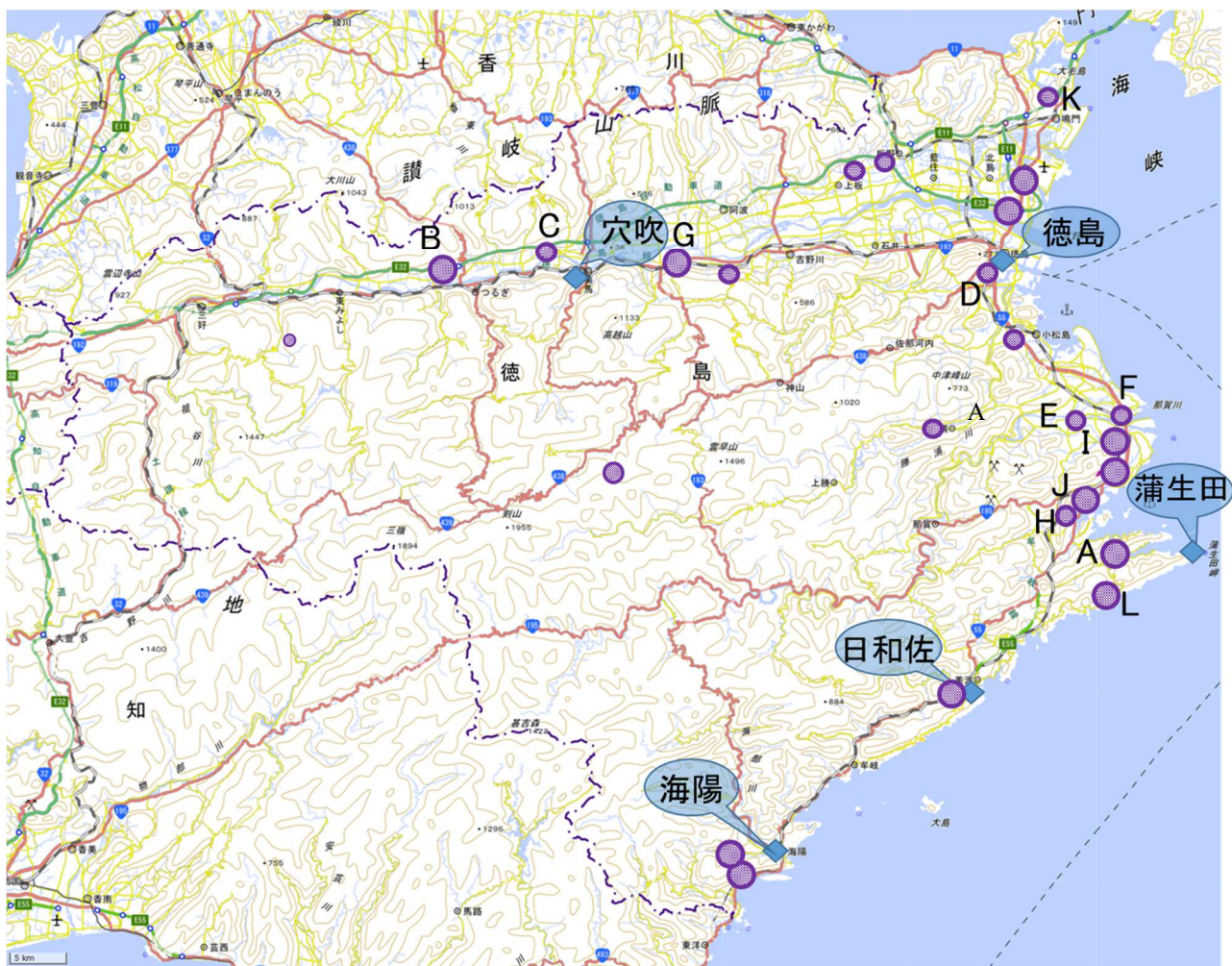


図 2.1.2.2 アメダス観測所(◇)と被害調査実施地域(●)

表 2.1.2.1 徳島県における被害概要

人的被害	軽傷 9 人（ガラス窓の破損，強風に関する事故）
建物被害	多数（把握できていない）
停電	20 市町村 29,500 戸（主に飛散物）
農作物被害	約 1 億 4 千万円（ナス，レンコン，梨，水稻等）
農業用ハウス等	約 1 億円
林業被害	約 1 億 6 千万円
防波堤	約 6 億円
河川・道路等	17 箇所，約 3 億 4 千万円

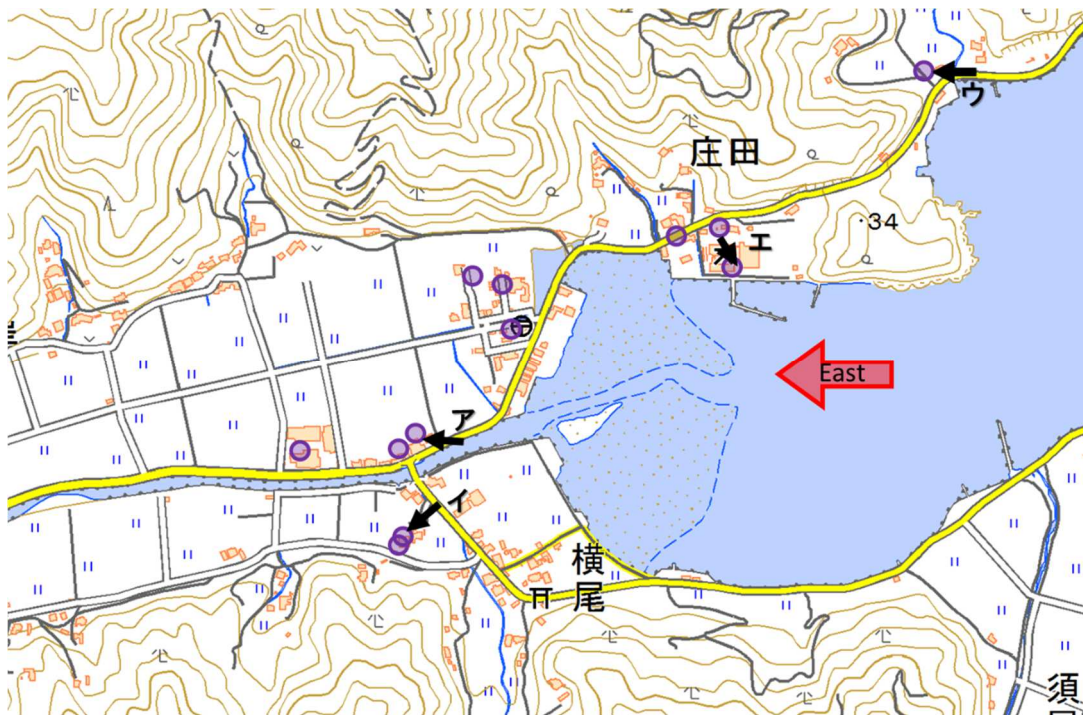


図 2.1.2.3 図 2.1.2.2 中，A 地域における東からの風による被害分布（矢印は撮影方向）



図 2.1.2.4 屋根の被害（図 2.1.2.3 中，地点ア）



図 2.1.2.5 屋根・壁の被害（図 2.1.2.3 中，地点イ）



図 2.1.2.6 屋根被害（図 2.1.2.3 中，地点ウ）



図 2.1.2.7 体育館の窓ガラスの枠ごとの脱落（図 2.1.2.3 中，地点エ）



図 2.1.2.8 屋根の被害例
（図 2.1.2.2 中，B 地域，東から西を望む）



図 2.1.2.9 根腐れして民家を直撃した巨木
（図 2.1.2.2 中，C 点）



(a) D 橋梁



(b) E 橋梁



(c) F 橋梁

図 2.1.2.10 トラックの横転（東から西向き）事故発生橋梁



図 2.1.2.11 横転・飛散した簡易倉庫



図 2.1.2.12 飛散した簡易倉庫による 2 次被害



(a) 庇の被害



(b) 屋根ふき材の剥離

図 2.1.2.13 体育館の被害例



(a) 食堂看板の飛散

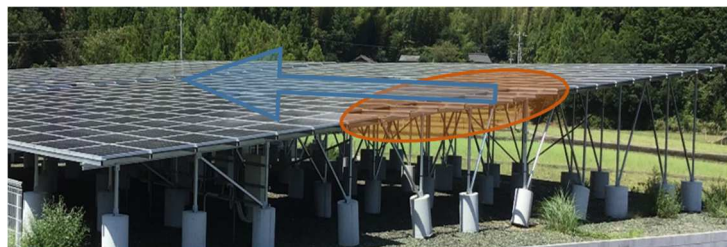


(b) 立体駐車場の看板の飛散と民家の2次被害

図 2.1.2.14 看板の飛散例



(a) パネルと支持部材の飛散
(図 2.1.2.2, 地点 G)



(b) 直交（やや斜め後方）風によるパネル飛散
(図 2.1.2.2, 地点 H)

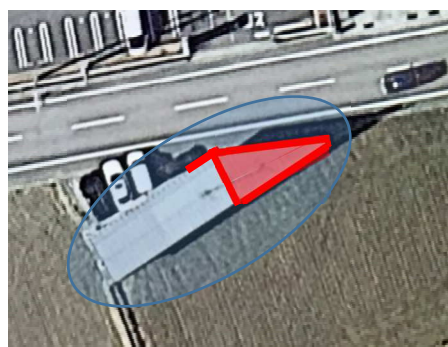
図 2.1.2.15 太陽光発電パネルの被害例



(a) 東から西を望む



(b) 西から東を望む



(c) 平面図

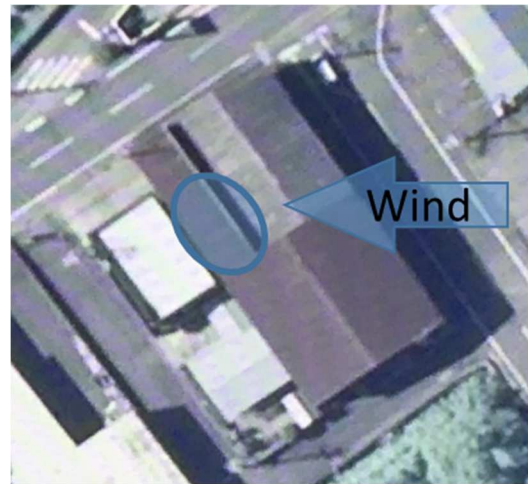
図 2.1.2.16 平行5角形状の店舗の被害（図 2.1.2.2, 地域 I）



(a) 西から東を望む



(b) 西から東を望む



(c) 平面図

図 2.1.2.17 複雑な屋根構成の建物の屋根の飛散
(北側の片流れ部分の約 3/4 が飛散楕円部分，図 2.1.2.2，地域 J)



(a) 東から西を望む



(b) 南から北を望む

図 2.1.2.18 ボートレース鳴門（図 2.1.2.2，地点 K）の被害

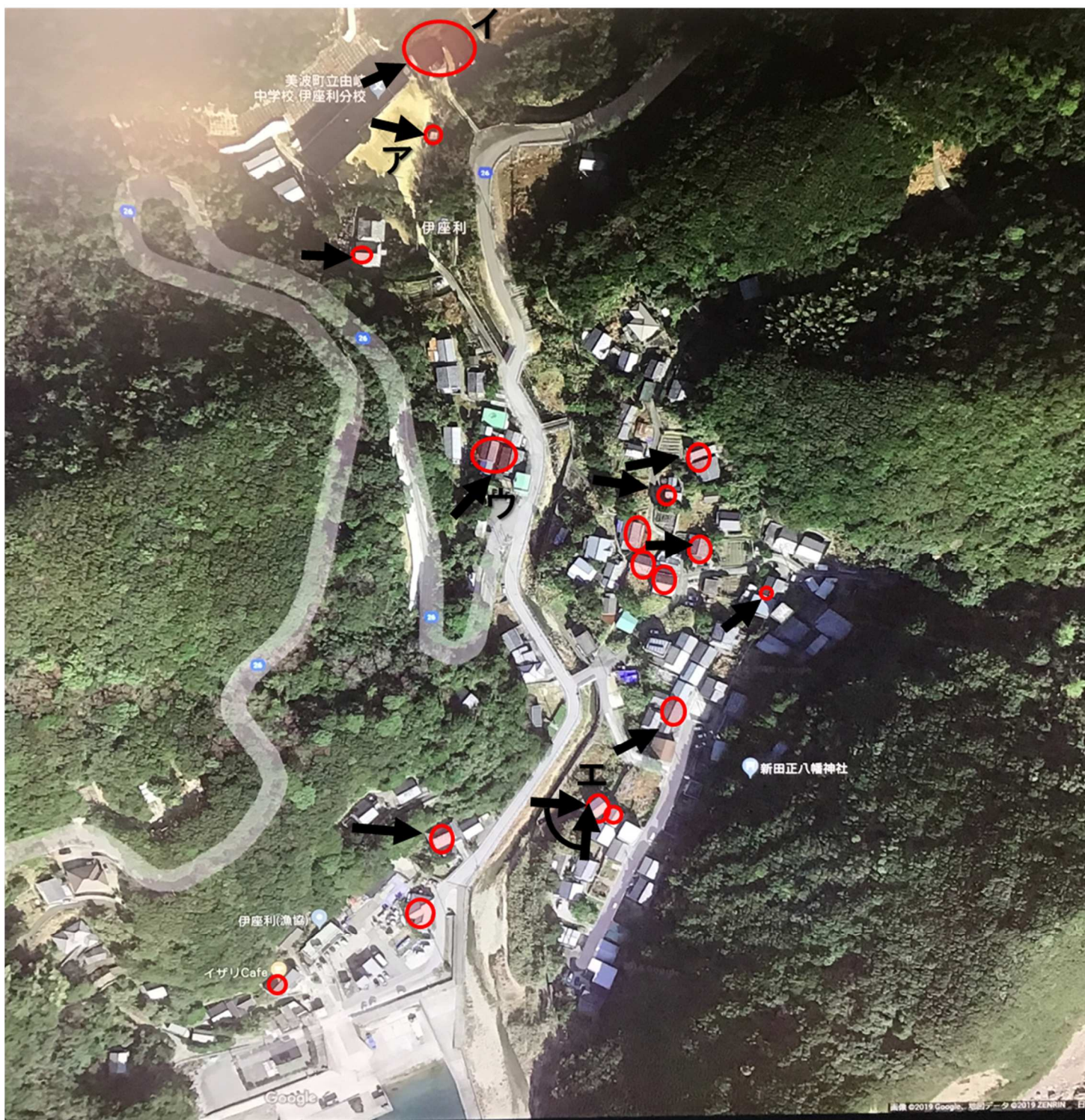


図 2.1.2.19 図 2.1.2.2 中, L 地域における被害と予想される強風の作用方向 (グーグルマップ上に記載)



(a) 物置の飛散（地点ア，西から東を望む） (b) 南西方向を望む（地点イ，撮影場所周辺に瓦の残骸あり）



(c) 南から北を望む（地点ウ，瓦は北東方向に飛散）

(d) 北西から南東を望む（地点エ，瓦は東から北の範囲に飛散）

図 2.1.2.20 図 2.1.2.2 中，L 地域の被害例（図 2.1.2.19 中，地点アから地点エ）

参考文献

- 1) 宇都宮 英彦，長尾 文明，野田 稔，「台風 9810 号による徳島県の強風災害」，日本風工学会誌，No.79，pp. 45-46，(1999)
- 2) 日本建築学会，「2004 年の強風被害とその教訓 -強風被害が残したもの-」，丸善，pp.132-134，(2006)
- 3) 宇都宮 英彦，長尾 文明，斎藤 裕二，「局所風況と地形因子に関する実験的研究」，第 10 回風工学シンポジウム論文集，pp.19-24，(1988)

2.1.3 大阪府・和歌山県の被害

野田 稔（高知大学）、友清衣利子（熊本大学）、竹内 崇（神戸大学）

大阪府と和歌山県は、台風進路に最も近いエリアであり、大阪府だけで4万棟を超える住家被害の全貌を行政の統計から把握することは困難である。そこで、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、上空からビデオカメラを使って建物屋根に掛けられているブルーシートの分布状況を調べることにした。調査は被災から2か月ほど経過した11月13日に実施しており、2か月では修理できない程度以上の屋根被害がブルーシートの分布として把握できるものと考えた。実際の調査では、大阪航空株式会社所有のセスナ式172R型飛行機を使って、図2.1.3.1に示すような大阪府八尾市以南の陸地部分を2.8km間隔に配置した東西方向の直線ルートを高度600m、時速180kmで飛行し、後部座席から左右に見下ろす形で設置した解像度2160×3840ピクセルの4Kカメラによって地上の状態を撮影した。大阪府北部については、伊丹空港の管制空域に重なっていて航空調査が自由にできず、また、平成30年6月に発生した大阪府北部地震（仮称）による屋根被害も多数分布していることもあり、台風被害との区別ができないことから今回の調査対象からは除外した。

本調査で撮影した画像の一例を図2.3.2に示す。当然、遠方ほど空間分解能は低下し、視認性が悪くなるが、確認できる範囲において目視でブルーシートの掛かっている建物を判読し、GISソフト上の地図にその場所を記録していった。なお、飛行機の真下の部分は、撮影できないため、飛行経路の真下は調査対象から外れているが、被害程度は周辺と変わらないものと予想される。

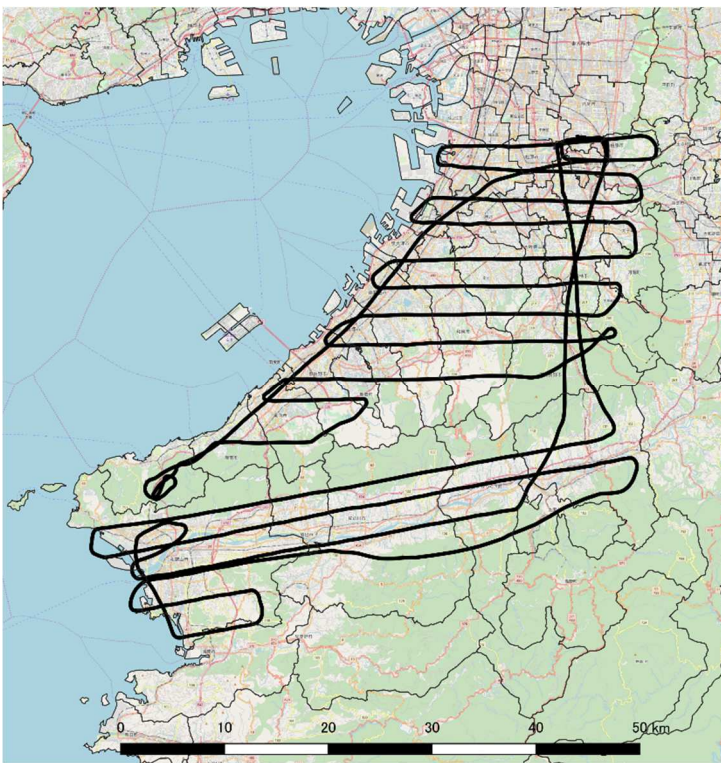


図 2.1.3.1 大阪府南部・和歌山県北部の
航空調査の飛行ルート



図 2.1.3.2 上空から撮影した
被害判読写真の一例

図2.1.3.3に今回の調査で拾いだした全ての点を示す。大阪府南部エリアで18,575点、和歌山県北部エリアで1,893点を数えた。図2.1.3.4に図2.1.3.3のブルーシート分布の密度を表すヒートマップ図を示す。この図から、大阪府と和歌山県の双方で調査した範囲にブルーシートが分布していることが読み取れるが、特に大阪府の海岸付近に集中してブルーシートが分布していることが分かる。

図2.1.3.5に示すように、行政区域別にブルーシートの数をカウントした結果、図2.1.3.6に示すような市町村ごとのブルーシート数の分布が得られた。これを各市町村の世帯数で除し、簡易的な被害率を求めた結果が図

2.1.3.7 である。この結果から、大阪府南部の海岸沿いの市町村のブルーシート率は貝塚市、熊取町、泉佐野市、泉南市付近が特に高く、山側の市町村および和歌山県北部の部分のブルーシート率が若干低い結果となった。図 2.1.3.8 に大阪府南部における市町村別のブルーシート数(x)と一部損壊以上の被害住家数(y)の関係を示す。飛行機からの調査が十分でない大阪市と極端に一部損壊以上の被害住家数の多い泉佐野市、極端に被害住家数の少ない藤井寺市と千早赤阪村を除外した両者の関係式は、 $y = 1.7696x$ ($R^2 = 0.905$)という良い線形関係を示した。ブルーシート数が発災からの時間経過によって減少する性質のものであることから、この関係式の係数も日数経過とともに変化することは明白だが、今回のブルーシート数の調査は発災からの経過日数が同じであるため、この関係を使って、和歌山県の調査範囲における各市町村のブルーシート数から一部損壊以上の被害住家数を求めると表 2.1.3.3 のようになった。航空調査からはブルーシートが実際に多数確認されていることを考えると被害住家数が 0 棟ということはある得ないため、実際の和歌山県北部での被害はこの表の様なものであったと推定される。図 2.1.3.9、図 2.1.3.10 および表 2.1.3.1 に示した推定被害住家数を入れて求めなおした一部損壊以上の被害住家数と被害住家率の分布を示す。2.1.1 節の図 2.1.1.12 および 2.1.1.13 に示していた和歌山県北部の情報の空白が埋まり、被害分布が自然な結果に近づいたと考えられる。後日、和歌山県への問い合わせで明らかになった和歌山市の一部損壊以上の住家数は 2,349 棟ということであり、推定値とほぼ一致していた。

なお、大阪府・和歌山県で発生した個別の被害例については、被害数が極端に多くて様々な被害が混在するため、次章の構造別被害を参照されたい。

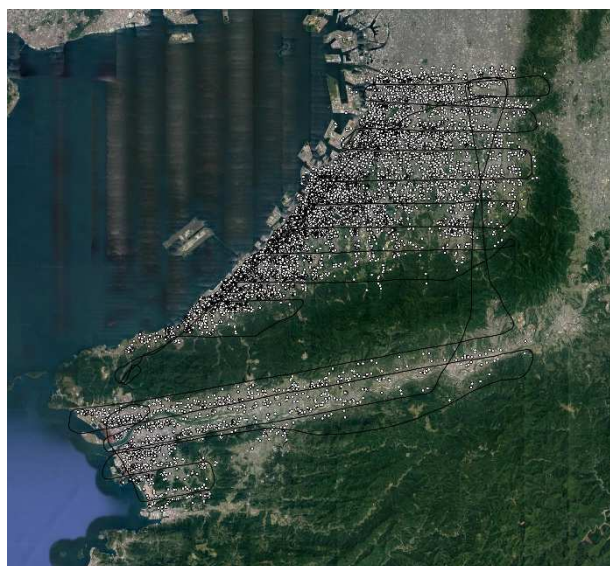


図 2.1.3.3 大阪南部・和歌山北部におけるブルーシートの分布

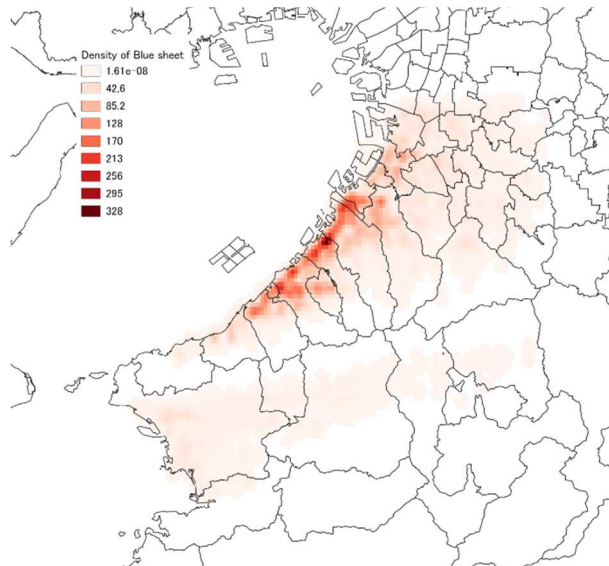


図 2.1.3.4 大阪府南部・和歌山北部におけるブルーシート分布のヒートマップ図

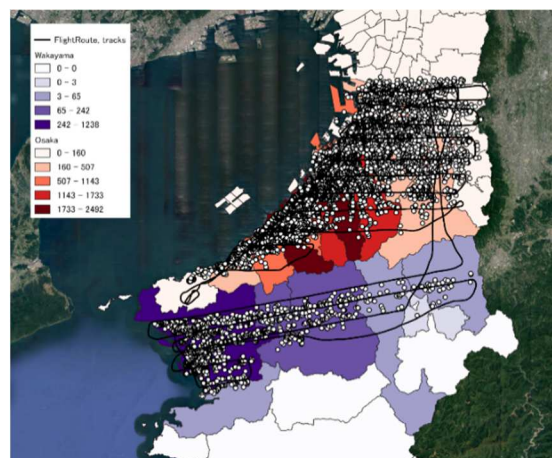


図 2.1.3.5 大阪北部・和歌山県北部の

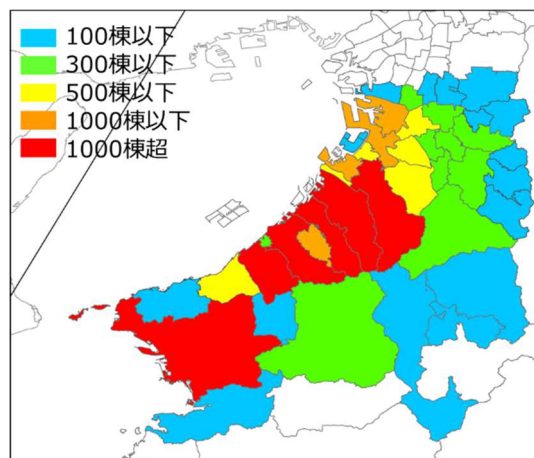


図 2.1.3.6 大阪府南部・和歌山県北部の

市町村別のブルーシート数のカウント

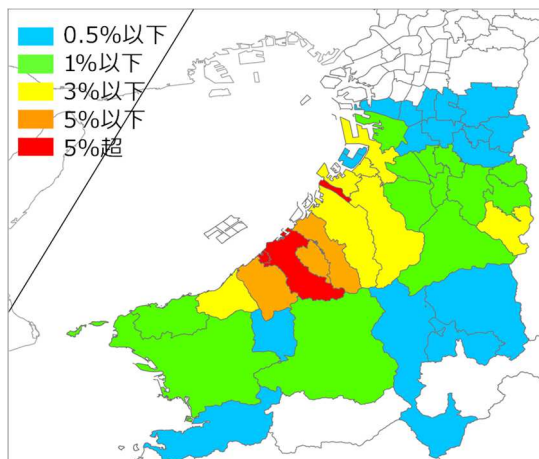


図 2.1.3.7 大阪府南部・和歌山北部の市町村別ブルーシート率

市町村別ブルーシート数

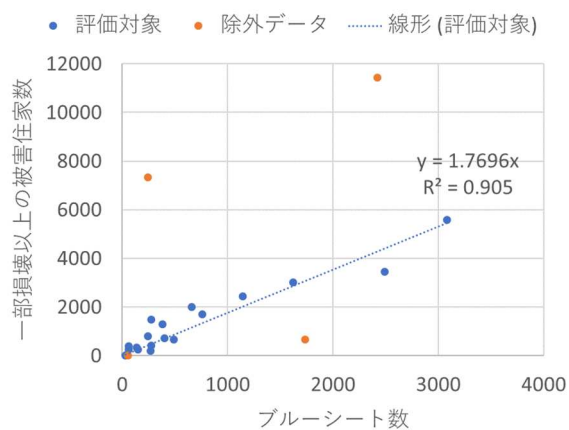


図 2.1.3.8 大阪府南部における市町村別ブルーシート数と被害住家数の関係

表 2.1.3.1 大阪府のブルーシート数と被害住家数関係から推定した和歌山県北部の推定被害住家数

市町村名	ブルーシート数 (件)	推定被害住家数 (棟)
かつらぎ町	34	60
海南市	65	115
岩出市	99	175
紀の川市	242	428
橋本市	34	60
九度山町	3	5
和歌山市	1238	2191

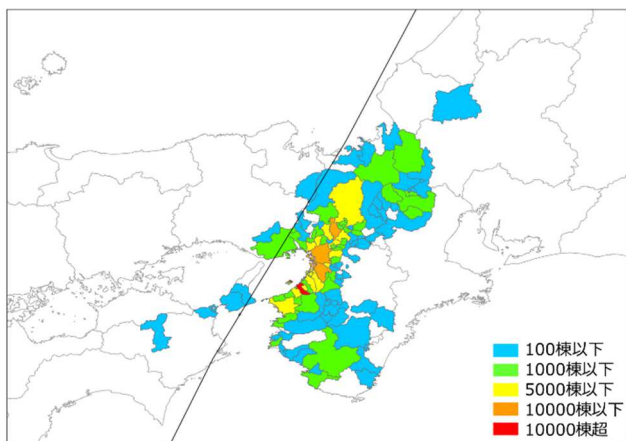


図 2.1.3.9 近畿地方市町村別の一部損壊以上の被害住家数 (含推定値)

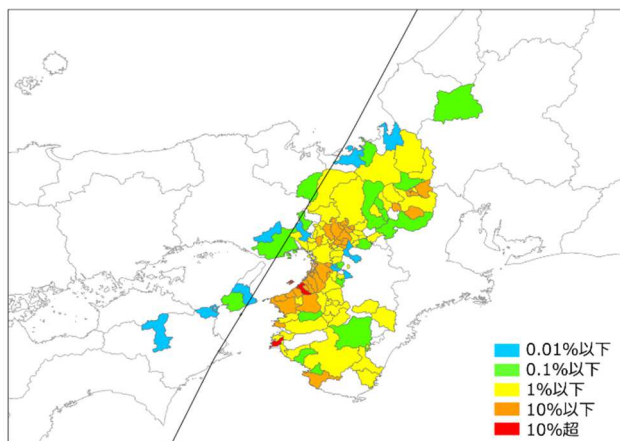


図 2.1.3.10 近畿地方市町村別の被害住家率 (含推定値)

2.1.4 兵庫県の被害

竹内 崇（神戸大学）

兵庫県においては、図 2.1.4.1 に示すように、9 月 4 日 14 時頃に神戸市付近に再上陸し、神戸地方気象台で最大瞬間風速 41.8m/s（13：41）、神戸空港にて最大瞬間風速 45.3m/s（13：55）を記録した。また西宮市のゴルフ場で 82.4m/s を観測したとの報道があったが、その詳細については確認できなかった。



図 2.1.4.1 兵庫県での台風経路

11/1 に兵庫県から発表された被害報告¹⁾においては、人的被害は重傷 7 名、軽傷 53 名、住家被害は、全壊 8 棟、半壊 44 棟、一部損壊 2,631 棟と報告されており、その内訳を表 2.1.4.1 に示す。その他にも車輛火災 233 台、停電 431,000 軒、高潮被害や、水道被害、農作物・農林水産関係施設の被害が多数報告されている。強風被害調査を行ったところ、被害は兵庫県南部の海岸沿いおよび大阪府に近い尼崎市、伊丹市、西宮市で多く見られた。以下に被害事例をまとめる。

表 2.1.4.1 兵庫県での人的被害と住家被害

市町名	負傷者		住家被害（棟）				
	重傷	軽傷	全壊	半壊	一部損壊	床上浸水	床下浸水
神戸市		5	2	16	149	125	32
尼崎市	4	12	5	19	1,316		
西宮市		22		2	601	2	
加古川市	1	2					
伊丹市	1	5					
宝塚市		2		1	1		1
川西市	1	1					
三田市		1					
三木市		1			1		
淡路市		2					
明石市							3
洲本市					1	1	6
芦屋市						28	272
伊丹市				6	555		
南あわじ市					5		
猪名川町			1		2		1
計	7	53	8	44	2,631	156	315

※兵庫県災害対策課「台風第 21 号による被害等について（第 8 報）」（2018.11）¹⁾から作成。

(1) 木造構造物

神戸市中央区の海沿いの寄棟屋根の倉庫において、屋根葺き材および野路板の飛散被害があった（写真 2.1.4.1）。伊丹市では建設中の住家の倒壊があり、尼崎市の海沿いの地域においては、写真 2.1.4.2 のように小屋組みが被害を受けた建物があつた。ただし、この小屋組みの部材はかすがいのみで固定されており、接合部の強度は高くなかったと推察される。



写真 2.1.4.1 寄棟屋根の屋根葺き材および野路板の飛散



写真 2.1.4.2 小屋組みの被害

(2) 屋根ふき材

屋根ふき材の被害は西宮市、伊丹市、尼崎市において多数発生した。伊丹市においては、伊丹空港の周辺の地域で、写真 2.1.4.3 に示すような屋根ふき材の被害が多く見られた。尼崎市の川沿いでは、写真 2.1.4.4 に示すような屋根ふき材が被害を受けた住家が複数あり、その多くは妻面が川に向いている切妻屋根建物であつた。西宮市のアーチ屋根のホテルでは、金属製の屋根葺き材が飛散した（写真 2.1.4.5）。



写真 2.1.4.3 伊丹市の住家の屋根ふき材の被害



写真 2.1.4.4 尼崎市の住家の屋根葺き材の被害



写真 2.1.4.5 アーチ屋根の金属製の屋根葺き材の飛散

(3) 軒天井

甲子園駅、阪急園田駅では、軒天井の被害が生じた（写真 2.1.4.6，写真 2.1.4.7），



写真 2.1.4.6 軒天井の被害（甲子園駅）



写真 2.1.4.7 軒天井の被害（阪急園田駅）

(4) 内装材

芦屋市のマンションの1階にある屋内駐輪場において、写真 2.1.4.8，写真 2.1.4.9 に示すような天井が押し上げられる被害があった。この駐輪場は写真 2.1.4.8 の奥にのみ出入口のある密閉空間となっており、台風接近時に門扉が使用された際に、内圧が上昇し、損傷したものと思われる。



写真 2.1.4.8 屋内駐輪場の天井の被害（芦屋市）



写真 2.1.4.9 天井吊金具の貫通

※写真 8,9 は神戸大学大学院工学研究科准教授による撮影.

2.1.5 北海道の被害

堤 拓哉（北海道立総合研究機構）

台風 21 号は北海道の西を北上し、サハリン付近で温帯低気圧に変わった。台風 21 号の通過に伴い 9 月 5 日未明から明け方にかけて、北海道の各地で暴風となり、家屋の損壊や電柱が倒れるなどの被害をもたらした。最大瞬間風速は倶知安町で 42.4m/s、岩見沢市で 37.6m/s を記録し、22 地点において日最大瞬間風速の観測史上 1 位を更新した。

北海道の集計によれば、人的被害は重軽傷者 6 名、住家非住家合わせた建物被害は 49 市町で発生し、被害総数は 747 棟に及んだ（表 2.1.5.1）。図 2.1.5.1 に住家被害（315 棟）の市町村別の被害状況を示す。最も被害棟数が多いのは苫小牧市（56 棟）、次いで恵庭市（45 棟）、札幌市（39 棟）である。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。

建物被害の内容については、金属屋根が飛散する被害が大多数で、老朽化した建物の被害が目立つ状況にあった。写真 2.1.5.1～2.1.5.4 は、恵庭市立松恵小学校の屋根被害の状況である。調査時(9/12)には、足場が設置され応急補修工事が進められていた。小学校の屋根被害が発生した地域は農村集落であるため、農業関連施設の被害が多数見られた（写真 2.1.5.5～写真 2.1.5.8）。

表 2.1.5.1 北海道の被害状況

項 目	数	内訳
人的被害	6	重症 1, 中等傷 2, 軽傷 3
住家被害	315	一部損壊 315
非住家被害	100	全壊 3, 半壊 23, 一部損壊 74
その他建物	332	一部損壊（文教施設）332

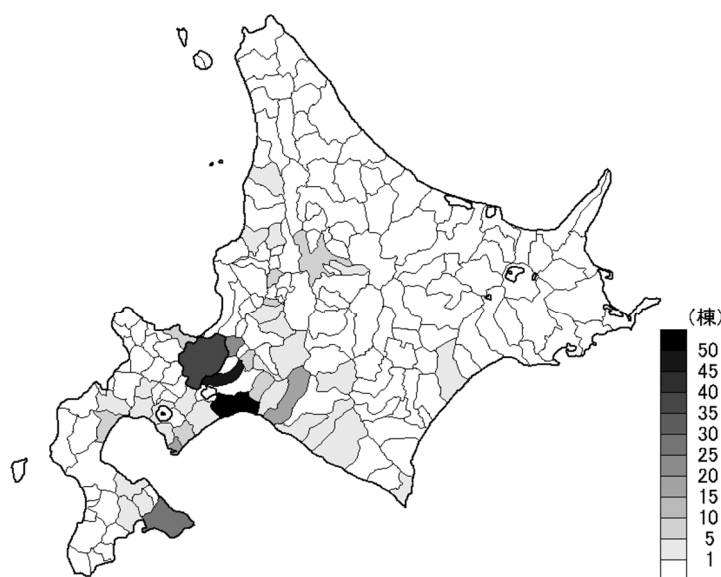


図 2.1.5.1 市町村別の住家被害の状況（道の集計資料を元に作成）



写真 2.1.5.1 小学校の屋根被害（恵庭市）



写真 2.1.5.2 小学校の屋根被害（恵庭市）



写真 2.1.5.3 屋根からはがれたトタン（恵庭市）



写真 2.1.5.4 屋根の応急修理のための足場（恵庭市）



写真 2.1.5.5 倉庫の屋根被害（長沼町）



写真 2.1.5.6 農業施設の屋根被害（恵庭市）



写真 2.1.5.7 パイプハウスの倒壊（長沼町）



写真 2.1.5.8 プラスチックハウスの倒壊（長沼町）

参考文献

北海道総務部危機対策局：平成 30 年台風第 21 号による被害状況等（第 3 報），2018.9.18

第2章2

各種構造物の被害

奥田泰雄^{*1} 喜々津仁密^{*2} 沖 佑典^{*3} 高森浩治^{*4} ガヴァンスキ江梨^{*5} 八木知己^{*6}

Yasuo OKUDA, Hitomitsu KIKITSU, Yusuke OKI, Kouji TAKAMORI, Eri GAVANSKI,
Tomomi YAGI,

野口恭平^{*7} 木村吉郎^{*8} 高橋弘樹^{*9} 大幢勝利^{*10} 吉田昭仁^{*11} 丸山敬^{*12}
Kyohei NOGUCHI, Kichiro KIMURA, Hiroki TAKAHASHI, Katsutoshi OHDO, Akihito YOSHIDA,
Takashi MARUYAMA

SUMMARY

Building Research Institute and National Institute for Land and Infrastructure Management surveyed high wind damage to some government office buildings and retail buildings in Japan immediately after Typhoon Maymay on September, 2018 based on the requirement of the Ministry of Land, Infrastructure and Transport Housing Bureau. Damage to claddings of the buildings and the damage mechanism were investigated. The continuity of government office building's function after Typhoon Maymay were also grasped.

Many metal roofing damage were observed at industrial buildings and large public buildings located along east side of Osaka bay. The various failure patterns were observed but the common ones were fastener pull-out, fastener pull-over metal roofing and rapture of metal clip for fixing metal roofing.

Typhoon 1821 Jebi caused violent wind in Kansai area and a lot of infrastructures were damaged. Especially, the damage on Kansai International Airport was devastating including the collision of tanker with a bridge linking the mainland to the airport. In this report, the other damages on expressways and road bridges in Kansai area are introduced with photos.

A ship collided with the Kansai International Airport Access Bridge due to the strong wind of Typhoon 1821, and caused a serious damage. A dragging anchor occurred and that made the ship drifting.

This paper shows the investigation about collapse of the scaffolds with soundproof panels on demolition site. From the results, the scaffolds were set correctly in the recommendation. We need examine on newly measure to wind load of the scaffolds with soundproof panels.

Many photovoltaic facilities were damaged by the strong wind of Typhoon 1821. The damage situations of the photovoltaic facilities were related to wind direction at typhoon, because photovoltaic panels are installed inclined southward.

Many vehicle were rolled over due to strong wind. It should be noted that some damages had might be occurred by the effect of high rise building.

key words: Typhoon Maymay, Government Office Building, Retail Building, Highway Bridge, Road Bridge, Ship Collision, Dragging Anchor, Scaffolds, Soundproof panel, Wall Connector, Demolition Site, Vehicle Damage

-
- * 1 国立研究開発法人建築研究所 構造研究グループ長 okuda@kenken.go.jp
Director, Department of Structural Engineering, Building Research Institute
 - * 2 国土交通省国土技術政策総合研究所建築研究部 主任研究官
Senior Research Engineer, Building Department, National Institute for Land and Infrastructure Management
 - * 3 国立研究開発法人建築研究所 建築生産グループ 研究員
Research Engineer, Department of Production Engineering, Building Research Institute
Department of Production Engineering
 - * 4 奥地建産株式会社 耐風プロジェクト ジェネラルマネージャー k_takamori@okuji.co.jp
General Manager, Wind Engineering Dept., Okuji Kensan Co., Ltd.
 - * 5 大阪市立大学大学院工学研究科 准教授
Urban Engineering, Graduate School of Engineering, Osaka City University / Associate professor
 - * 6 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 教授 yagi.tomomi.7a@kyoto-u.ac.jp
Professor, Department of Civil and Earth Resources Engineering, Kyoto University
 - * 7 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 助教
Assistant Professor, Department of Civil and Earth Resources Engineering, Kyoto University
 - * 8 東京理科大学理工学部土木工学科 教授 kichiro@rs.tus.ac.jp
Professor, Department of Civil Engineering, Tokyo University of Science
 - * 9 労働安全衛生総合研究所 建設安全研究グループ 上席研究員 takahah@s.jniosh.johas.go.jp
Senior Researcher, Construction Safety Research Group, National Institute of Occupational Safety and Health
 - * 10 労働安全衛生総合研究所 研究推進・国際センター センター長
Director, Center for Research Promotion and International Affairs, National Institute of Occupational Safety and Health
 - * 11 東京工芸大学工学部建築学科 教授 yoshida@arch.t-kougei.ac.jp
Professor, Department of Architecture, Tokyo polytechnic University
 - * 12 京都大学防災研究所 教授 maruyama.takashi.8w@kyoto-u.ac.jp
Professor, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

2.2.1 庁舎建築物と店舗建築物等の被害

奥田泰雄（建築研究所）、喜々津仁密（国土技術政策総合研究所）、沖佑典（建築研究所）

(1) まえがき

台風第21号は平成30年9月4日12時頃、非常に強い勢力で徳島県に上陸した後、速度を上げながら近畿地方を縦断した。その後、日本海を北上し、9月5日9時に間宮海峡で温帯低気圧に変わった。この台風の接近・通過に伴って、西日本から北日本にかけて非常に強い風が吹き、非常に激しい雨が降った。特に、四国や近畿地方では、猛烈な風が吹き、猛烈な雨が降ったほか、これまでの観測記録を更新する記録的な高潮となったところがある。これらの暴風や高潮の影響で、建築物の被害のほか、関西国際空港の滑走路の浸水をはじめとして、航空機や船舶の欠航、鉄道の運休等の交通障害、断水や停電、電話の不通等ライフラインへの被害も発生した。

国土交通省国土技術政策総合研究所と国立研究開発法人建築研究所は、国土交通省住宅局の要請を受け、この台風による強風被害が生じた建築物等を対象に現地調査を実施した。本調査では、台風第21号の強風により被災した非住家建築物のうち、庁舎と店舗を対象とした。庁舎では、窓ガラス等の被害状況と発災後の継続使用状況を把握した。また、最大瞬間風速58.1m/sを記録したアメダス観測点(関空島)に比較的近い範囲での低層の店舗について、風圧力に対する内外装材の被害形態を把握した。

(3)の1)に示す調査は奥田、(3)の2)に示す調査は喜々津、(4)に示す調査は喜々津と沖がそれぞれ担当した。なお、本報告は、国土技術政策総合研究所と建築研究所のウェブサイト (<http://www.nilim.go.jp/lab/bbg/saigai/h30/typhoon21.pdf>, <https://www.kenken.go.jp/japanese/contents/topics/2018/typhoon21.pdf>) に掲載した報告を再構成したものである。

(2) 台風21号の気象概要

平成30年8月28日に南鳥島近海で発生した台風第21号（最低中心気圧915hPa）は、日本の南を北西に進み、9月3日には向きを北寄りに変え、4日12時頃に非常に強い勢力で徳島県南部に上陸した。上陸時の中心気圧は950hPa、最大風速は45m/s（いずれも速報値）である（図2.2.1.1）。非常に強い勢力のまま上陸するのは、平成5年の台風13号以来25年ぶりとなる。その後、4日14時頃には兵庫県神戸市に再び上陸し、速度を上げながら近畿地方を縦断し、日本海を北上、5日9時には間宮海峡で温帯低気圧に変わった。台風の接近・通過にともなう、西日本から北日本にかけて非常に強い風^{注1)}が吹き、非常に激しい雨^{注2)}が降った。特に四国や近畿地方では、猛烈な風^{注1)}が吹き、猛烈な雨^{注2)}が降ったほか、顕著な高潮となったところがあった。

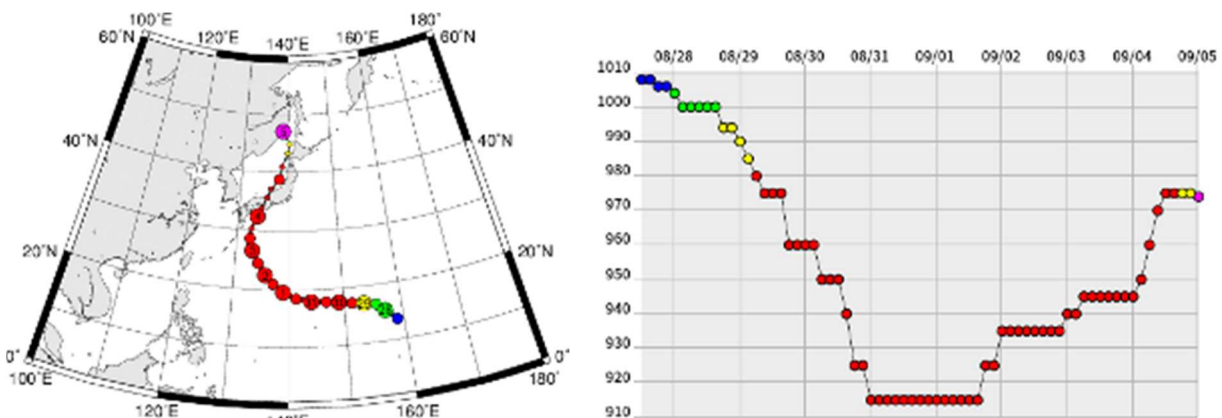


図 2.2.1.1 台風経路と中心気圧の変化³⁾

この台風の接近・通過にともない、近畿や東海地方等で記録的な暴風となり、全国約930の風の観測点のうち、最大風速（10分間平均風速の最大値）は合計53地点、最大瞬間風速（風速計の測定値(0.25秒間隔)を3秒間平均した値の最

^{注1)} 「非常に強い風」は風速が20m/s以上30m/s未満の風、「猛烈な風」は風速がおおよそ30m/s以上、または最大瞬間風速が50m/s以上の風をさす（気象庁）。

^{注2)} 「非常に激しい雨」は1時間に50mm以上80mm未満の雨、「猛烈な雨」は1時間に80mm以上の雨をさす（気象庁）。

大値) は合計 100 地点でそれぞれ観測史上 1 位を更新した。

各地のアメダス観測点で記録された主な最大風速値と最大瞬間風速値を表 2.2.1.1～表 2.2.1.2 に示す。いずれの表も内閣府資料⁴⁾を引用したものである。表 2.2.1.1 には参考として、以下の 3 つの風速もそれぞれ併記した。

- ・ 各地で記録された風速値を、建築基準法令で定める基準風速 V_0 の定義（地表面粗度区分Ⅱ，地上 10m）に従って①式で換算した風速 V_{II}
- ・ 各地の基準風速 V_0 （再現期間が概ね 50 年である暴風の 10 分間平均風速に相当）
- ・ 各地の基準風速 V_0 の 1.25 倍（再現期間が概ね 500 年である暴風の 10 分間平均風速に相当）

$$V_{II} = V_{obs} \left(\frac{Z_{G,obs}}{Z_{obs}} \right)^{\alpha_{obs}} \cdot \left(\frac{10}{Z_{G,II}} \right)^{\alpha_{II}} \quad ①$$

ここで、 V_{obs} ：各アメダス観測点で記録された最大風速値(m/s)， Z_{obs} ：各アメダス観測点での風速計高さ(m)， α_{obs} 及び $Z_{G,obs}$ ：各アメダス観測点で想定した地表面粗度区分でのべき指数及び傾度風高さ(m)， α_{II} 及び $Z_{G,II}$ ：地表面粗度区分Ⅱでのべき指数及び傾度風高さ(m)である。各アメダス観測点での風速計高さについては文献 5)を参照し、地表面粗度区分については海上に立地する「関空島」，「友ヶ島」，「神戸空港」，「セントレア」はⅠ，県庁所在地の市街にある「和歌山」と「金沢」はⅢ，左記以外の地点は全てⅡと仮定している。

表 2.2.1.1 をみると，「室戸岬」，「関空島」，「友ヶ島」，「和歌山」では基準風速 V_0 を超える換算風速 V_{II} となっている。ただし，「関空島」，「室戸岬」及び「神戸空港」の現在の風速観測箇所での観測開始年月日は，基準風速を定めた建設省告示の公布時以降とされている。また，表 2.2.1.2 をみると，「関空島」を含む近畿，四国地方の 6 カ所で 50m/s を超える最大瞬間風速を記録している。

次に，図 2.2.1.2 に主な観測値（最大風速と最大瞬間風速）と建築基準法令で想定する風速等との比較を示した。基準風速として $V_0=34\text{m/s}$ ，一般的な地表面粗度区分としてⅢを想定し，以下の②式と③式に従った風速 V_{III} と瞬間風速（相当値） V_{III}' を図示した。さらに，被災した建築物が必ずしも現行基準で設計されたものだけではないので参考に，④式に従って旧基準から換算される風速 V' も併せて示した。

$$V_{III} = V_0 \cdot E_{r(III)} \quad : \text{風速} \quad ②$$

$$V_{III}' = V_0 \cdot E_{r(III)} \cdot \sqrt{G_{f(III)}} \quad : \text{瞬間風速（相当値）} \quad ③$$

$$V' = \sqrt{\frac{q^{9.8}}{0.6}} \quad : \text{瞬間風速（旧基準）} \quad ④$$

ここで，②，③式中の $E_{r(III)}$ と $G_{f(III)}$ は，平成 12 年建設省告示第 1454 号第 1 第 2 項，第 3 項表中の地表面粗度区分Ⅲによる。また，④式中の q は次式により， h は地上からの高さ(m)である。

$$q = \begin{cases} 60\sqrt{h} & (0 \leq h < 16) \\ 120\sqrt[4]{h} & (16 \leq h) \end{cases} \quad ⑤$$

表 2.2.1.1 最大風速値 (9月3日00時～9月5日24時) 4)

都道府県	市町村	地点名	風速計 高さ(m)	最大 風速 (m/s)	風向	粗度区分Ⅱ, 高さ10mでの 風速 V_H (m/s)	V_0 (m/s)	$1.25V_0$ (m/s)
高知県	室戸市	室戸岬	21.8	48.2	西	42.9	40	50
大阪府	泉南郡田尻町	関空島	10	46.5	南南西	37.6	34	42.5
和歌山県	和歌山市	友ヶ島	9.4	42.9	南	34.9	34	42.5
和歌山県	和歌山市	和歌山	42.1	39.7	南南西	37.4	34	42.5
兵庫県	神戸市中央区	神戸空港	10.2	34.6	南南西	28.0	34	42.5
徳島県	海部郡美波町	日和佐	15.4	34.6	東南東	32.4	38	47.5
和歌山県	西牟婁郡白浜町	南紀白浜	9.7	33.4	南東	33.6	34	42.5
愛知県	常滑市	セントレア	10	31.5	南南東	25.5	34	42.5
新潟県	佐渡市	両津	18.8	28.8	南西	26.2	32	40
石川県	金沢市	金沢	48.4	28.8	南西	26.4	30	37.5

表 2.2.1.2 最大瞬間風速値 (9月3日00時～9月5日24時) 4)

都道府県	市町村	地点名	風速計 高さ(m)	最大瞬 間風速 (m/s)	風向
大阪府	泉南郡田尻町	関空島	10	58.1	南南西
和歌山県	和歌山市	和歌山	42.1	57.4	南南西
高知県	室戸市	室戸岬	21.8	55.3	西
和歌山県	和歌山市	友ヶ島	9.4	51.8	南
大阪府	泉南郡熊取町	熊取	10	51.2	南
徳島県	海部郡美波町	日和佐	15.4	50.3	東
福井県	敦賀市	敦賀	28	47.9	東南東
大阪府	大阪市中央区	大阪	24	47.4	南南西
愛知県	常滑市	セントレア	10	46.3	南南東
滋賀県	彦根市	彦根	19.7	46.2	南東

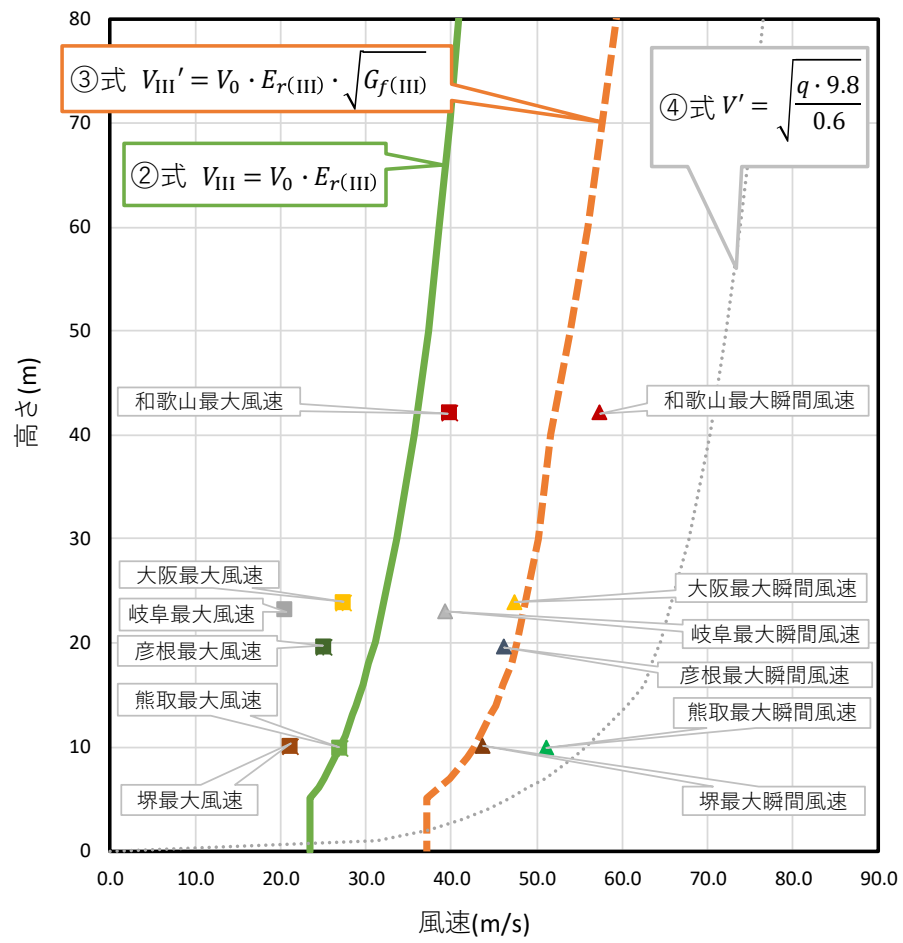


図 2.2.1.2 主な観測値⁶⁾と建築基準法令で想定する風速等との比較

(3) 庁舎建築物の被害状況

1) 大阪市内の庁舎の被害

以下では、大阪市内の庁舎の被害状況をまとめる。調査対象の庁舎Aは平成5年（1993年）に竣工した17階建ての鉄骨鉄筋コンクリート造建築物であり、大阪城の南西に位置し、南側は阪神高速13号東大阪線に面している（図2.2.1.3）。

大阪管区気象台（風速計は庁舎Aより約2.5km東に設置、地上高さ24m）では、9月4日午後2時10分ごろに最大瞬間風速47.4m/s（室戸台風、第2室戸台風に次ぐ第3位 南南西）、最大風速27.3m/sを記録している。ただし、建築基準法令（平成12年建設省告示第1454号）では大阪市の基準風速は34m/sとされており、上記の記録は瞬間値と10分間平均値ともに、建築基準法令で想定する風速値（図2.2.1.3の②、③式による結果）よりも下回っている。

図2.2.1.4に調査対象の庁舎Aの配置と被害箇所を示す。被害の概要としては、1階店舗の東面開口部のガラスの破損および室内天井の脱落、南側エントランスの軒天井の持ち上がり、1階執務室（東面窓）、2階共用会議室（東面窓）および13階執務室（南面窓）の窓ガラスの破損、12～15階執務室（南面窓）の窓枠の外れなどであった。なお、隣接する庁舎Bでの3階西面の窓ガラス破損、庁舎Cでの1階出入口の窓ガラス破損、などが報告されている。

- ・ 1階店舗の防犯ビデオによると、9月4日午後2時10分ごろに突風が室内に吹き込んで天井の一部が脱落し（写真2.2.1.1）、東面開口部のガラス2枚が室内側から外側に向かって破損、同1枚に多数のヒビが入った（写真2.2.1.2）。南風により南側エントランスの軒天井が上方に持ち上げられ（写真2.2.1.3）、外壁のすき間を通して1階店舗の天井裏に風が吹き込み、店舗の天井の一部が破損・脱落し一部が下方に垂れ下がり（写真2.2.1.4）、店舗内に風が吹き込んできたと考えられる。その結果、店舗内の内圧が上昇し、建築物側面にあたる東面では負の風圧が作用していたと考えられ、両者の合力でガラスを破損させるほどの風力が発生したと考えられる。また、1階南面の開口部のガラスは破損していなかった（写真2.2.1.3）。調査時は破損したガラス面には合板が嵌められて養生されていたが、店舗内の後片付けを行っており、被災後1週間後に店舗は営業を再開したとのことである。1階店舗で想定される内外装材の被害の進展過程を図2.2.1.5に示す。
- ・ このほか、1階店舗の北側に位置する執務室の窓ガラスも破損した（写真2.2.1.5写真～写真2.2.1.6）。また、2階東面の窓ガラスも破損し（写真2.2.1.7）、天井の一部が下方に垂れ下がっていた（写真2.2.1.8）。当時室内には人がいなかったため、破損した時刻は特定できなかった。1階東面には飛来物の衝突痕もあったので、風圧の作用と飛来物の衝突による破損が想定される。調査時は、ガラス面には合板が嵌められて養生されていた。
- ・ 13階の被災時には数10名が室内で執務中であった。南面の窓ガラス1枚が9月4日午後2時ごろに急に破損し、強風が室内に吹き込み、室内に書類が散乱した（写真2.2.1.9～写真2.2.1.10）。また、天井の一部が上方に持ち上げられていた（写真2.2.1.11）。ヒアリングによると12階で水漏れが生じたとのことである。13階は地上高さ約50mであり、南側に阪神高速が通っているため、南方向は開けており（写真2.2.1.12）、また周辺の外壁等に飛来物の衝突痕もないことから、飛来物が衝突して窓ガラスが破損した可能性は低く、正の風圧により窓ガラスが破損した可能性が高いと考えられる。窓ガラスの破損および強風の吹き込みにより3名が負傷（軽傷）した。写真2.2.1.10写真のように吹き込んだ強風により室内に書類等が散乱したが、1日で片づけを終えて翌日（9月5日）から通常業務を開始したとのことである。12、13、14、15階南面で確認された窓枠の外れも正の風圧による被害と推定される（写真2.2.1.13）。



図 2.2.1.3 大阪市内の庁舎A, B, Cの周辺地図

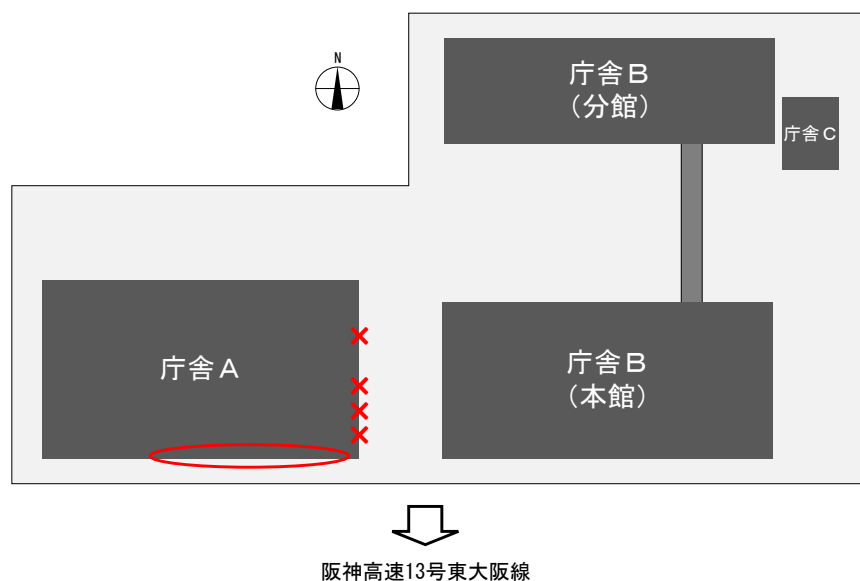


図 2.2.1.4 庁舎A, B, Cの配置と被害箇所
(庁舎Aの1階での被害について、×印は窓ガラスのおおよその破損箇所、
○印は軒天井のおおよその持ち上がり範囲を表す)



写真 2.2.1.1 1階店舗被災時の状況
(当該庁舎提供)



写真 2.2.1.2 1階東面窓ガラスの破損
(当該庁舎提供)



写真 2.2.1.3 1階の軒天井の持ちあがり



写真 2.2.1.4 1階店舗の天井の被害



写真 2.2.1.5 1階窓ガラスの破損
(当該庁舎提供)



写真 2.2.1.6 窓ガラスが破損した1階室内
(当該庁舎提供)



写真 2.2.1.7 2階窓ガラスの破損
(当該庁舎提供)



写真 2.2.1.8 窓ガラスが破損した2階室内



写真 2.2.1.9 13階の破損した窓ガラス
(当該庁舎提供)



写真 2.2.1.10 被災直後の13階室内の様子
(当該庁舎提供)



写真 2.2.1.11 被災直後の13階天井の持ち上がりの様子
(当該庁舎提供)



写真 2.2.1.12 庁舎A南側の様子

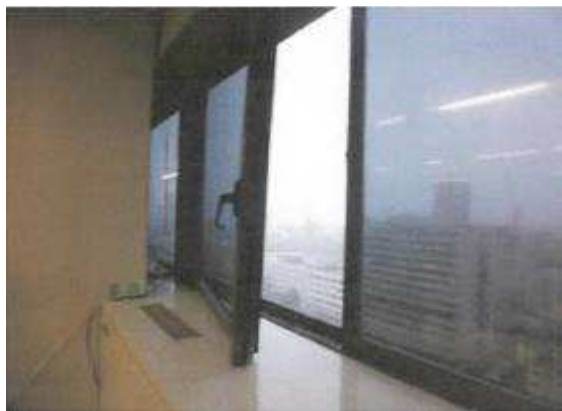


写真 2.2.1.13 15 階窓枠の外れ（当該庁舎提供）

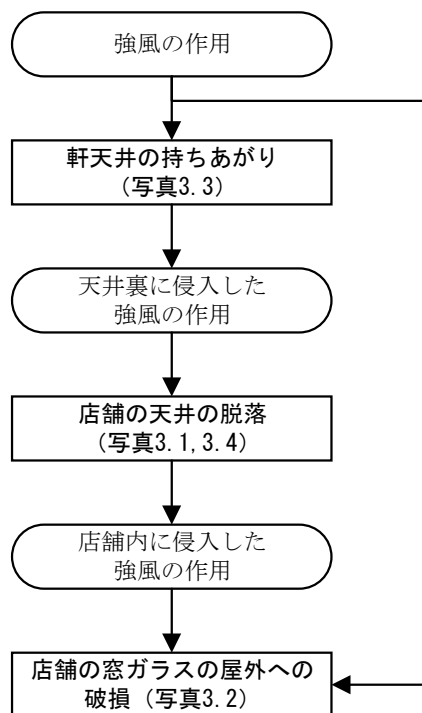


図 2.2.1.5 庁舎Aの1階店舗で想定される内外装材の被害の進展過程

2) 岐阜市内の庁舎の被害

以下では、岐阜市内の庁舎の被害状況をまとめる（図 2.2.1.6～図 2.2.1.7）。庁舎Dと庁舎Eが昭和 41 年竣工、庁舎Fが昭和 53 年竣工であり、庁舎Dが鉄骨鉄筋コンクリート造、庁舎Eと庁舎Fが鉄筋コンクリート造（一部鉄骨造）である。

これらの庁舎から直線距離で約 4km 離れた岐阜地方気象台（風速計の高さ 23m）では、9 月 4 日の 15：20 に最大風速 20.7m/s（南東）、15：40 に最大瞬間風速 39.3m/s（南南東）を記録している⁹⁾。ただし、建築基準法令（平成 12 年建設省告示第 1454 号）では岐阜市の基準風速は 34m/s とされており、上記の記録は 10 分間平均値と瞬間値ともに、建築基準法令で想定する風速値（図 2.2.1.2 の②、③式による結果）よりも下回っている。

- ・ 図 2.2.1.7 に示す庁舎D～Fで、計 3 枚の窓ガラスが破損した（写真 2.2.1.14～写真 2.2.1.16）。その内訳は、庁舎Dの 10 階執務室で 1 枚（1910mm×1140mm×6mm）、庁舎Eの 2 階倉庫で 1 枚（2220mm×1680mm×6mm）、庁舎Fの 3 階会議室で 1 枚（2220mm×1740mm×6mm）である。設計当時の図面によると、庁舎Dと庁舎Eには熱線吸収ガラスが使用されている。およその破損位置を図 2.2.1.7 に×印で示す。
- ・ いずれの窓ガラスの破損も、風圧によるものか飛来物によるものか不明であるが、室内に飛来物と思われる物体は確認されていない。調査時には、いずれの窓ガラスも復旧済みであった（写真 2.2.1.17）。写真 2.2.1.18 は、庁舎Dの 10 階で割れた窓ガラスの位置から見た外部の様子であり、周囲に高い建築物がなく比較的開けた状況である。
- ・ 庁舎Dでの窓ガラスの被害発生直後、課内の概ね全ての範囲（桁行方向約 9m×張間方向約 8.5m）で書類等が散乱していたとのことである。調査時に、廊下側のロッカーに吊るしているカレンダーが、雨水を含んでふやけていることを確認した。
- ・ 被害発生直後から全ての窓ガラスの復旧までの対応状況は、以下のとおりである。
 - 9 月 4 日(火)15 時頃
庁舎Dの 10 階執務室で窓ガラスが破損し、職員 1 名がガラスの破片を受けてけがをした（当時、写真 2.2.1.19 の A 氏は不在、執務中の B 氏がけが）。被害発生直後に、当課内にいた職員はすみやかに避難し、当課前の廊下の範囲も含めて立入禁止措置とされた。一方、庁舎Eと庁舎Fで窓ガラスが破損した部屋では、被害発生時に職員は不在であった。
 - 9 月 4 日(火)17 時すぎ（強風がほぼおさまった頃）
庁舎Dでは、ガラスの破片の回収作業を開始（写真 2.2.1.20）。厚手のビニールシートを張り付けて、割れた窓ガラスの範囲を養生した（写真 2.2.1.14）。
 - 9 月 4 日(火)19 時頃まで
庁舎Eと庁舎Fで、ガラスの破片の回収作業を実施（写真 2.2.1.20）。業者がガラス寸法の確認に来庁。
 - 9 月 5 日(水)
庁舎Dの当課内では、執務再開。常設のゴンドラを使用して、17 時頃から復旧作業を開始。2 時間程度で作業完了。
 - 9 月 7 日(金)
庁舎Eと庁舎Fの窓ガラスの復旧完了（写真 2.2.1.21～写真 2.2.1.22）。庁舎Eと庁舎Fには常設のゴンドラがないため、高所作業車の手配にやや時間を要した。なお、この週には会議室の使用予定がなかったこともあり、優先的に作業する必要もなかった。

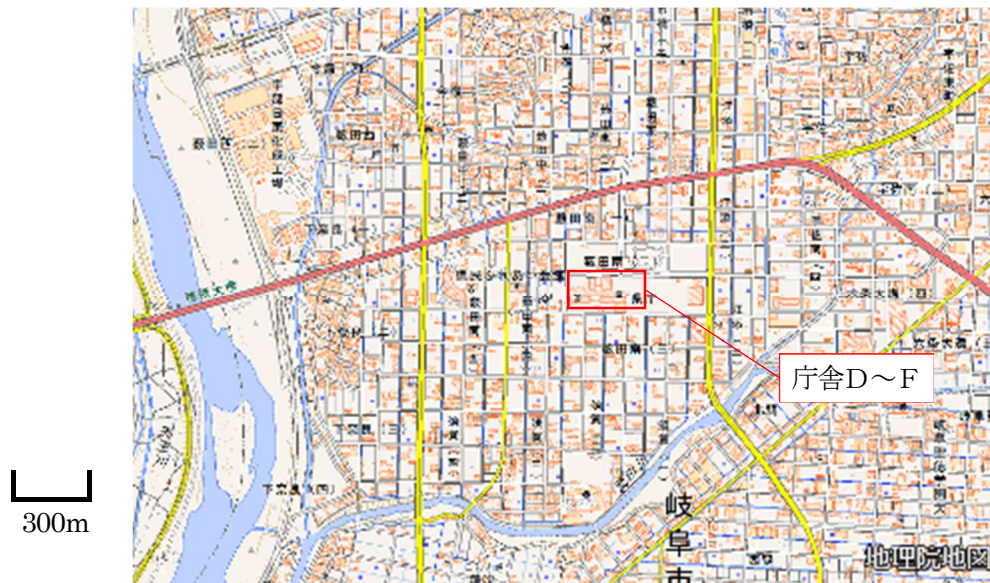


図 2.2.1.6 岐阜市内の庁舎D, E, F の周辺地図

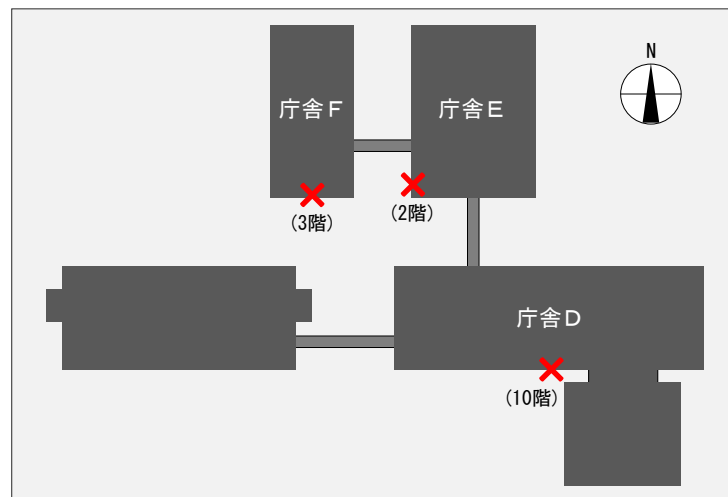


図 2.2.1.7 庁舎D, E, F の配置と被害箇所



写真 2.2.1.14 庁舎Dの10階の窓ガラスの養生の状況（当該庁舎提供）



写真 2.2.1.15 庁舎Eの2階で破損した窓ガラス（当該庁舎提供）



写真 2.2.1.16 庁舎Fの3階で破損した窓ガラス
(当該庁舎提供)



写真 2.2.1.17 庁舎Dの10階で破損した窓ガラスのサッシ (復旧済み)



写真 2.2.1.18 庁舎Dの10階から見た屋外の様子



写真 2.2.1.19 調査時の庁舎Dの10階 (復旧済み)

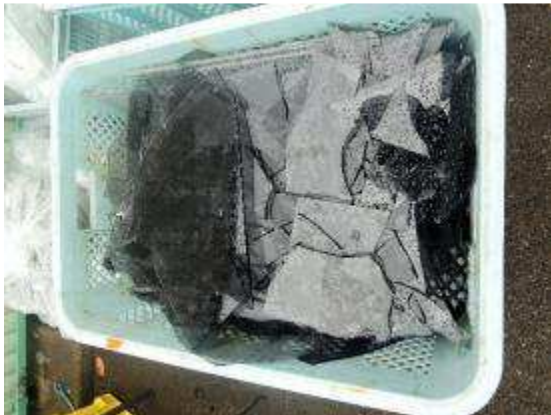


写真 2.2.1.20 廃棄処理されたガラス一式



写真 2.2.1.21 調査時の庁舎Eの2階 (復旧済み)



写真 2.2.1.22 調査時の庁舎Fの3階 (復旧済み)

(4) 店舗等の被害状況

以下では、図 2.2.1.8 に示した大阪府泉佐野市内のりんくうタウン、大阪府泉南郡田尻町で把握した低層の店舗その他の被害状況をまとめる。また、図 2.2.1.8 左上にりんくうタウンおよび田尻町の調査範囲と

における泉南郡田尻町の「関空島」、泉南郡熊取町の「熊取」の2つの観測点との位置関係を示す。りんくうタウンは、9月4日の13:40頃に瞬間風速58.1m/sの強風を記録したアメダス（関空島）から直線距離で約6km離れたエリアに位置している。なお、写真2.2.1.23はアメダス（関空島）が設置されている関西国際空港をりんくうゲートタワービルから遠望したものであり、その周囲は空港の滑走路や海面に囲まれている状況である。

以下、4. 1節で泉佐野市内のりんくうタウンに位置する店舗A～D、4. 2節で泉南郡田尻町に位置する店舗E～F、4. 3節でその他の被害について示す。なお、写真内で施設等を特定しうと思われる部分は加工処理をしている。



図 2.2.1.8 泉佐野市・田尻町での調査範囲
(左上は関西空港地方気象台・泉南郡熊取町の気象観測点との位置関係)



写真 2.2.1.23 アメダス（関空島）が設置されている関西国際空港

1) 泉佐野市内の店舗の被害

① 店舗A (図 2.2.1.9)

- ・ 図 2.2.1.9 に示す店舗Aは平成 26 年竣工、鉄骨造 1 階建てである。内外装材の損傷位置を同図に示す。
- ・ 強風的作用によって屋外（北東）に面する建具が屋内側に脱落・転倒した（写真 2.2.1.24）。調査時には、脱落した範囲をせっこうボード又は合板で塞いで仮復旧済みであった（写真 2.2.1.25, 写真 2.2.1.26）。壁を支持していた上部には軽鉄下地が残っている（写真 2.2.1.27）。
- ・ 屋内では、北（北西）側と南（南東）側の壁が屋外側に変形した損傷状況を確認した（写真 2.2.1.28）。北（北西）側において、内装材の構成部材である上部ランナーと見られる軽鉄材が脱落、垂れ下がっていた（写真 2.2.1.29）。
- ・ 調査時には修復済みであったが、西側の天井が比較的広範囲にわたって損傷していた（写真 2.2.1.30）。天井は軽鉄材で構成される在来工法天井とみられ、ボードの種類、枚数は不明である。また、損傷範囲を修復した天井付近では、壁との取り付け部分において、目視で約 2～3cm 天井面が浮き上がっている様子が確認された（写真 2.2.1.31）。
- ・ 損壊した天井の上部の鋼板製屋根材が損壊しており、脱落している状況が確認された（写真 2.2.1.32）。調査時にはブルーシートで養生されており、鋼板製屋根材の復旧作業が行われていた（写真 2.2.1.33）。
- ・ その他、店舗入り口付近の駐輪場の屋根材が飛散していた（写真 2.2.1.34）。
- ・ 9 月 6 日に範囲を限定して営業再開し（天井が損傷した範囲は立入禁止）、9 月 9 日午前天井の修復作業を完了したとのことである。
- ・ 店舗Aの損傷状況から推測される風の進入経路を図 2.2.1.9 に、想定される内外装材の被害の進展過程を図 2.1.1.10 に、それぞれ示す。

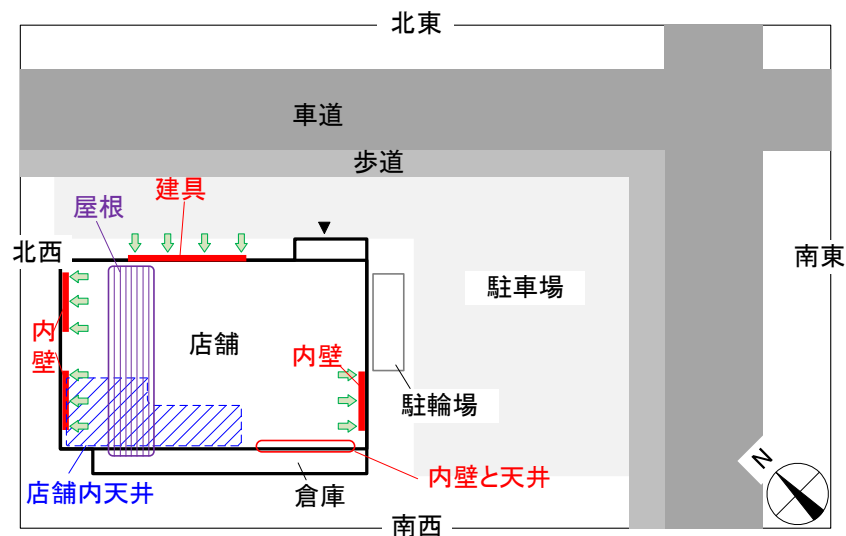


図 2.2.1.9 店舗Aの配置図

（凡例：赤は鉛直方向部材（内装材、屋外に面する建具、窓等）、青、紫は水平方向部材（天井、屋根等）の被害箇所を指す。矢印は推測される風の作用方向。図 2.2.1.11, 図 2.2.1.13, 図 2.2.1.15 も同様）



写真 2.2.1.24 屋外に面する建具の被害直後の状況
(当該店舗提供)



写真 2.2.1.25 脱落・転倒した建具の仮復旧状況
(屋外側)



写真 2.2.1.26 脱落・転倒した建具の仮復旧状況
(屋内側) 1



写真 2.2.1.27 脱落・転倒した建具の仮復旧状況
(屋内側) 2



写真 2.2.1.28 北西側の内壁の損傷 1

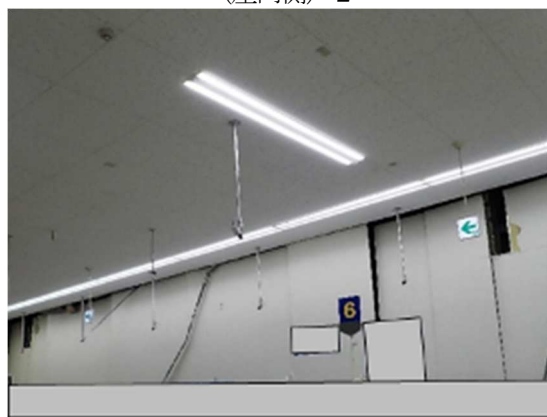


写真 2.2.1.29 北西側の内壁の損傷 2



写真 2.2.1.30 店舗内天井と屋根の損壊状況
(当該店舗提供)



写真 2.2.1.31 南西側の内壁と天井とのすき間



写真 2.2.1.32 鋼板製屋根材の脱落
(当該店舗提供)



写真 2.2.1.33 鋼板製屋根材のブルーシートによる養生



写真 2.2.1.34 駐輪場の屋根材の損傷
(店舗Aの南東側)

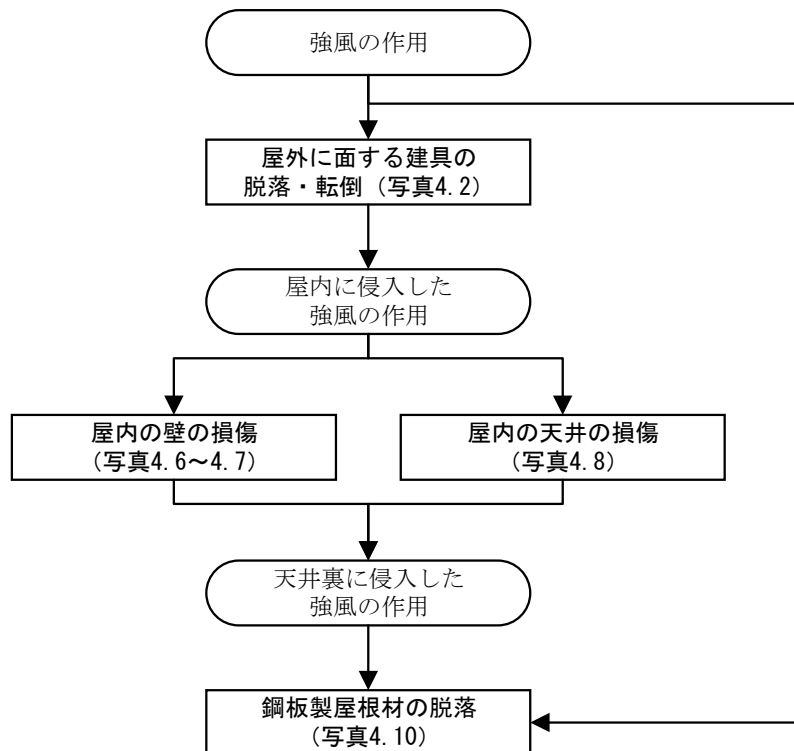


図 2.2.1.10 店舗Aで想定される内外装材の被害の進展過程

② 店舗B (図 2.2.1.11)

- ・ 図 2.2.1.11 に示す店舗Bは鉄骨造 1 階建てである。内外装材の損傷位置を同図に示す。
- ・ 南東に面している店舗入口のガラス自動ドアが風除室内に脱落・転倒し、その直上に設けられていた天井が脱落した (写真 2.2.1.35)。風除室内側の自動ドアは破損を免れており、こちらからの風が店舗内に影響を与えることはなかったと見られる。なお、調査時には修復中であったが (写真 2.2.1.36, 写真 2.2.1.37)、店舗は9月12日に営業を再開し、店舗出口を入口を兼ねた通路としていた。
- ・ 屋根の断熱材と鋼板製屋根材が広範囲にわたって飛散していた (写真 2.2.1.38)。なお、店舗の内部には天井が取り付けられていなかった。調査時点では、当該箇所を合板によって仮修復済みであった (写真 2.2.1.39)。
- ・ 店舗の南西側には、その外側にある倉庫・事務室と隔てる間仕切が設けられているが、その一部が店舗側に向かって倒壊していた (写真 2.2.1.40)。調査時点で壁は修復済みであったが、壁際の什器は使用不能となっており、覆いがかけられていた (写真 2.2.1.41)。この壁の裏側にある事務室通路部分の天井の吊り材や吊り先のハンガーが変形しており、ハンガーより下側が全面的に脱落していた (写真 2.2.1.42, 調査時点では一部修復済み)。
- ・ 店舗の入口付近左側 (南側) の底に設けられた鋼板製屋根材 (折板ぶき) が一部脱落していたほか、倉庫のシャッターが損傷している形跡が見られた (写真 2.2.1.43)。また、南西側に面するシャッターも同様に損傷していた。
- ・ その他、駐車場に設置してある看板脚部の折損 (写真 2.2.1.44) やフェンスの著しい変形が見られた。
- ・ 店舗Bの損傷状況から推測される風の進入経路を図 2.2.1.11 に、想定される内外装材の被害の進展過程を図 2.2.1.12 に、それぞれ示す。

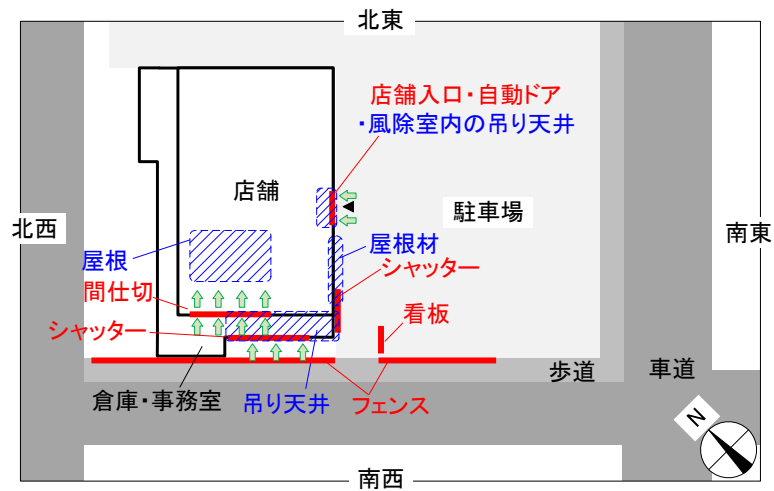


図 2.2.1.11 店舗Bの配置図

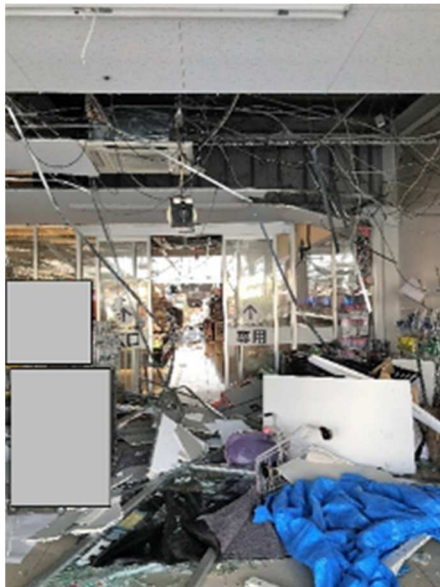


写真 2.2.1.35 店舗入口の自動ドアと天井の脱落
(当該店舗提供)



写真 2.2.1.36 店舗入口での修復中の天井と自動ドア



写真 2.2.1.37 天井の修復状況



写真 2.2.1.38 鋼板製屋根の飛散
(当該店舗提供)



写真 2.2.1.39 屋根の損傷部分での補修状況



写真 2.2.1.40 店舗南西側の間仕切
(当該店舗提供)



写真 2.2.1.41 修復済みの間仕切



写真 2.2.1.42 倉庫・事務室での天井の脱落



写真 2.2.1.43 庇の屋根材の脱落とシャッターの損傷



写真 2.2.1.44 看板脚部の折損
(当該店舗提供)

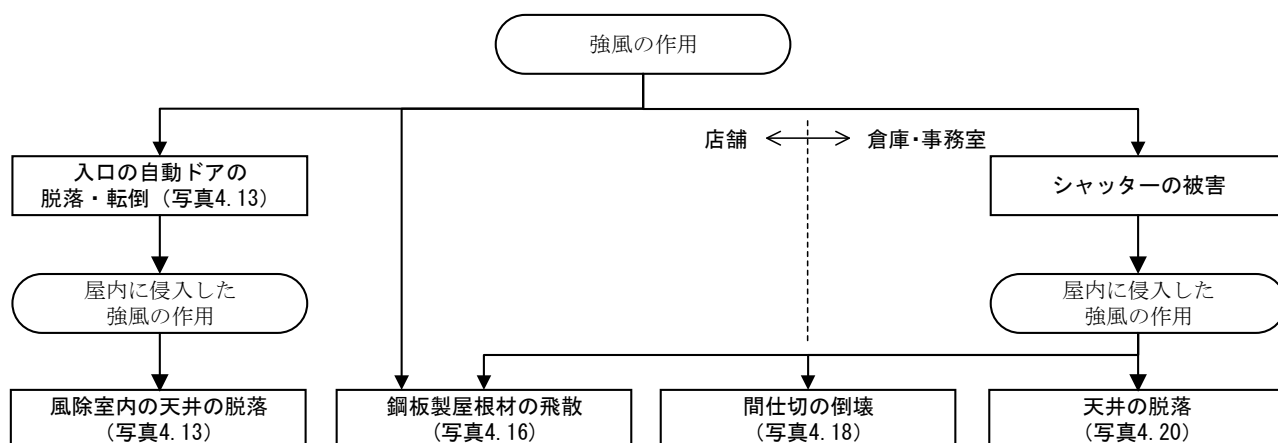


図 2.2.1.12 店舗Bで想定される内外装材の被害の進展過程

③ 店舗C (図 2.2.1.13)

- 図 2.2.1.13 に示す店舗Cは2階建てである。内外装材の損傷位置を同図に示す。
- 店舗Cの職員によると、屋外（南西）に面する開放型の建具（写真 2.2.1.45 のA）の金具が外れて屋内側に開放 → 屋内に強風が侵入 → 屋外（南東）に面する建具のガラス（写真 2.2.1.45 のB）の破損 → 屋外にガラスの破片が散乱、の過程で被害が進展したとのことである。歩道に残っていたガラスの破片は板厚約 10mm であった（写真 2.2.1.46）。
- 南西に面した入口自動ドア付近のガラスも破損していた（写真 2.2.1.47 のC）。
- 車庫の軒天井とシャッターが損傷していた（写真 2.2.1.48）。軒天井は、写真 2.2.1.48 の奥ほど損傷が大きい傾向であり、鋼製下地材の変形や外れが見られた（写真 2.2.1.49）。この箇所では以前にも強風被害を受けたことがあり、仕様を向上させたシャッター製品に更新していたが、今回また被害を受けた。この製品は特注品であったので、修復に時間を要する可能性があるとのことである。
- 屋上階段室外の軒天井が全面的に脱落していた（写真 2.2.1.50）。また、階段室内の間仕切が損傷していた（写真 2.2.1.51）。
- 軒天井は目測で吊り長さは 20cm ほどであるとみられ、吊り元は鉄骨に溶接されていた。天井は軽鉄材による下地と、板厚 6mm のボード 1 枚貼りにより構成されている。仕上げボードを留めていたビスが抜けるだけでなく、下地の接合金物であるハンガーの開きやクリップの脱落など、下地材の損傷も見られた。
- 1 階の倉庫（在庫保管用の部屋）の窓ガラスが破損し、屋内の天井が落下している状況を確認した（写真 2.2.1.52、写真 2.2.1.53）。
- 敷地の北西側にある看板に、鋼板製の飛来物が突き刺さっていた（写真 2.2.1.54）。また、北西のフェンスを構成する板材の多くが脱落していた（写真 2.2.1.55）。
- 店舗Cの損傷状況から推測される風の進入経路を図 2.2.1.13 に、想定される内外装材の被害の進展過程を図 2.2.1.14 に、それぞれ示す。

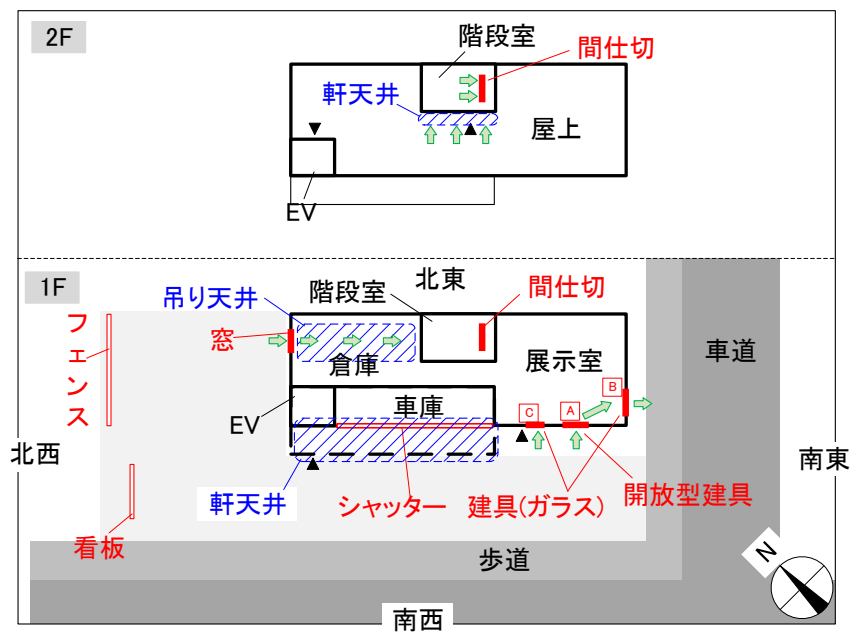


図 2.2.1.13 店舗Cの配置図

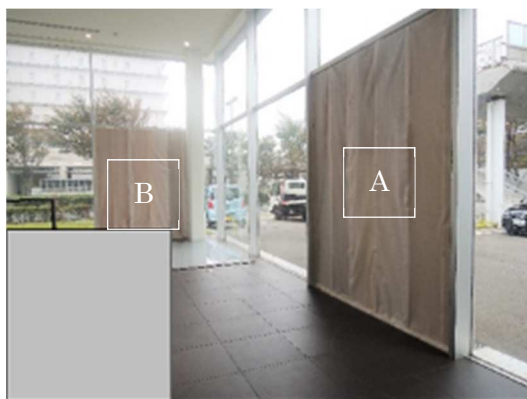


写真 2.2.1.45 屋外に面する建具に組込まれたガラスの範囲の養生



写真 2.2.1.46 歩道に残っていたガラスの破片

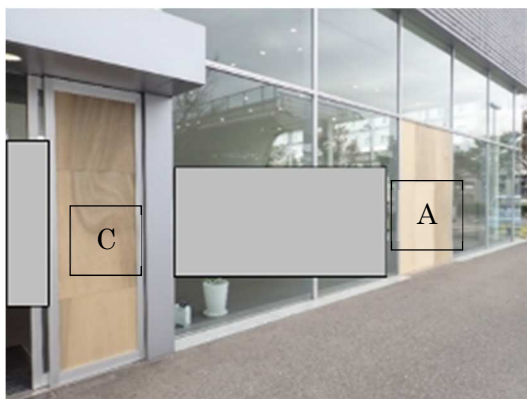


写真 2.2.1.47 南西に面した店舗入口のガラス破損



写真 2.2.1.48 軒天井の損傷 1



写真 2.2.1.49 軒天井の損傷 2



写真 2.2.1.50 屋上階段室の軒天井の脱落



写真 2.2.1.51 階段室内の間仕切の損傷



写真 2.2.1.52 1階倉庫の窓ガラスの破損（仮修復済み）
と天井の脱落 1



写真 2.2.1.53 1階倉庫の天井の脱落 2



写真 2.2.1.54 看板への飛来物の突き刺さり



写真 2.2.1.55 フェンスを構成する板材の脱落

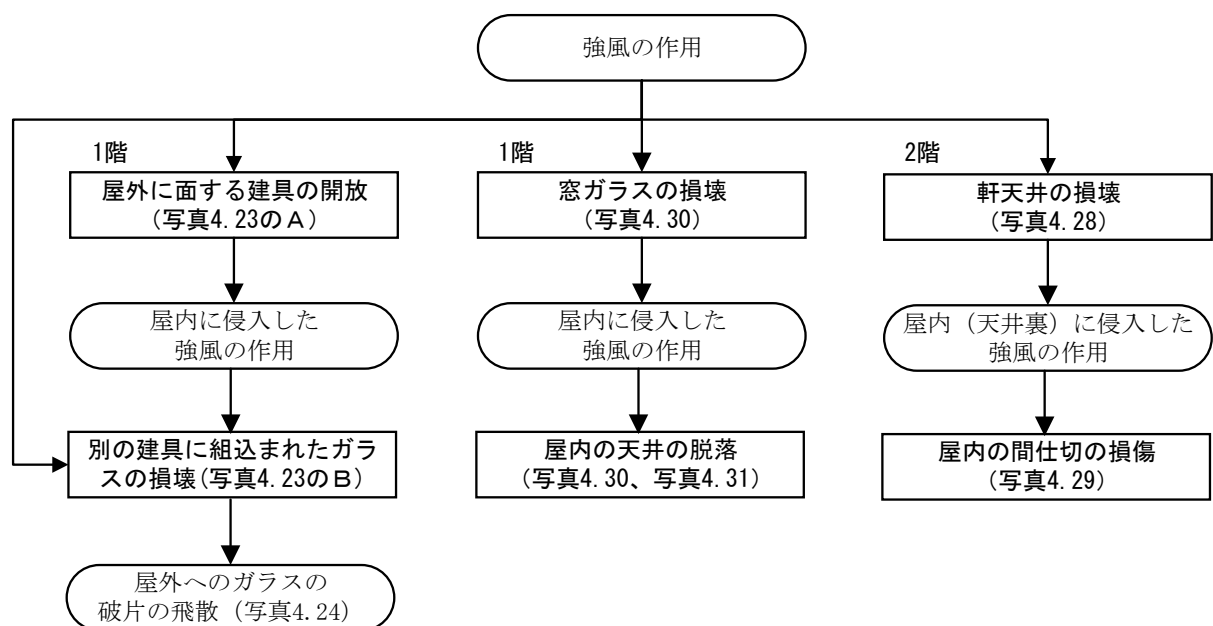


図 2.2.1.14 店舗Cで想定される内外装材の被害の進展過程

④ 店舗D

- 鉄骨造建築物の壁と屋根を構成する膜材料が、広範囲にわたって破損している状況を確認した(写真 2.2.1.56, 写真 2.2.1.57)。



写真 2.2.1.56 壁に張った膜材料の破損状況



写真 2.2.1.57 屋根に張った膜材料の破損状況

2) 泉南郡田尻町内の店舗の被害

① 店舗E (図 2.2.1.15)

- ・ 図 2.2.1.15 に示す店舗Eは1階建てで、平成 16 年 8 月に営業開始している。内外装材の損傷位置を同図に示す。
- ・ 店舗Eの職員によると、店舗は9月6日に営業を再開したとのことである。
- ・ 被害発生直後の状況では、写真 2.2.1.58 に示す屋外（南東）に面する建具が屋内側に脱落・転倒し、写真 2.2.1.59 に示す別の屋外（南西）に面する建具が屋外側に脱落・転倒していた。調査時には、それぞれ合板等で仮修復されていた（写真 2.2.1.60、写真 2.2.1.61）。
- ・ 建具が脱落・転倒した結果、その内側にあるカート等が移動していた（写真 2.2.1.62）。また、入口の内側にある間仕切用の建具も脱落・転倒していた（写真 2.2.1.63）。なお、調査時には、この建具があった付近で天井の損傷は見られたものの、店舗Aの状況と異なり、店舗部分の内壁における内圧上昇による損傷は確認できなかった。
- ・ 脱落・転倒した建具は金物によって上部を留めていたとみられる（写真 2.2.1.64）。
- ・ 南東に面した壁面上にある軒天井の面材が損傷していた。吊りボルト直下のボードが抜けていると推測され、また、隅角部でのボードが破損していた（写真 2.2.1.65、写真 2.2.1.66）。
- ・ 入口付近の損傷のほか、南西側のガラス扉が損傷しており（写真 2.2.1.67）、調査時には仮修復されていた。
- ・ 店舗Eの損傷状況から推測される風の進入経路を図 2.2.1.15 に、想定される内外装材の被害の進展過程を図 2.2.1.16 に、それぞれ示す。

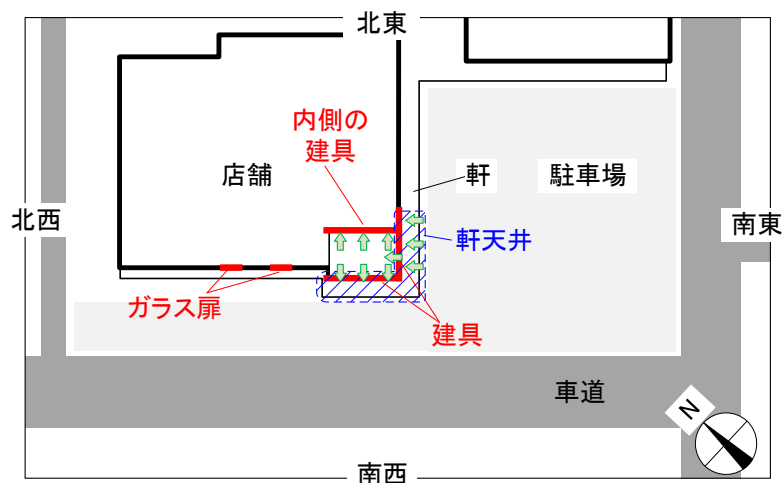


図 2.2.1.15 店舗Eの配置図



写真 2.2.1.58 南東に面する建具の脱落・
屋内への転倒(当該店舗提供)



写真 2.2.1.59 南西に面する建具の脱落・
屋外への転倒(当該店舗提供)



写真 2.2.1.60 南東面の養生の状況



写真 2.2.1.61 南西面の養生の状況



写真 2.2.1.62 建具の脱落・転倒とカート等の移動
(当該店舗提供)



写真 2.2.1.63 入口内側にある建具の脱落・転倒
(当該店舗提供)

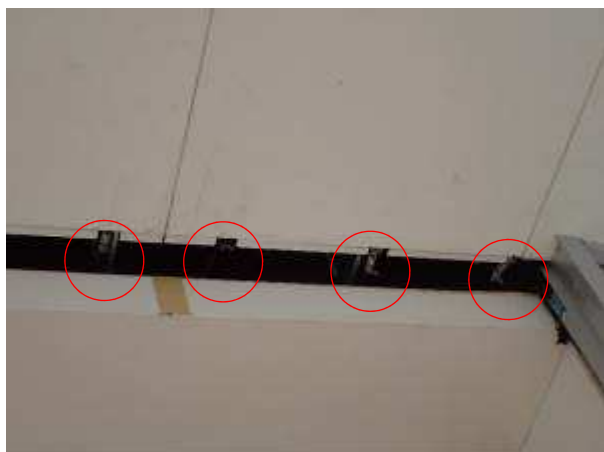


写真 2.2.1.64 脱落・転倒した入口での建具の留め付け部分



写真 2.2.1.65 軒天井の損傷

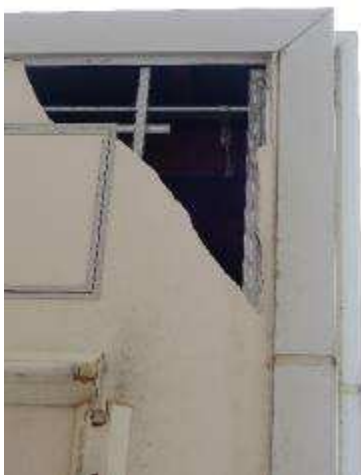


写真 2.2.1.66 軒天井の隅角部での損傷



写真 2.2.1.67 南西側のガラス扉の損傷

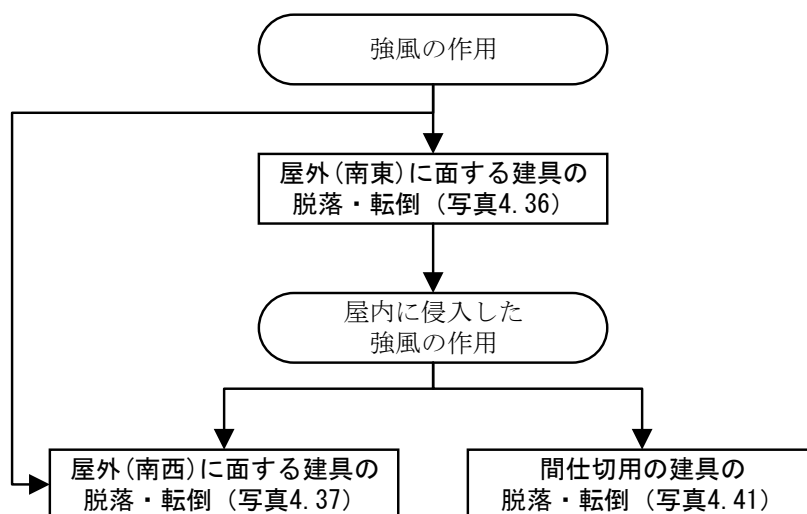


図 2.2.1.16 店舗Eで想定される内外装材の被害の進展過程

② 店舗F

- ・ 南東に面する壁面上にある軒天井のボードが広範囲にわたって脱落しており (写真 2.2.1.68), 調査時には, エントランスの真上の範囲にネットを掛けた状態で営業再開していた. エントランスのガラスが損傷していたようであり,

その範囲がブルーシートで養生されていた。

- ・ 店舗敷地内の鋼製屋根のふき材が損傷していた（写真 2.2.1.69）。また、道路に面する看板の脚部が折損し、フェンスも著しく変形していた（写真 2.2.1.70、写真 2.2.1.71）。



写真 2.2.1.68 軒天井の損傷



写真 2.2.1.69 店舗敷地内の鋼製屋根のふき材の損傷

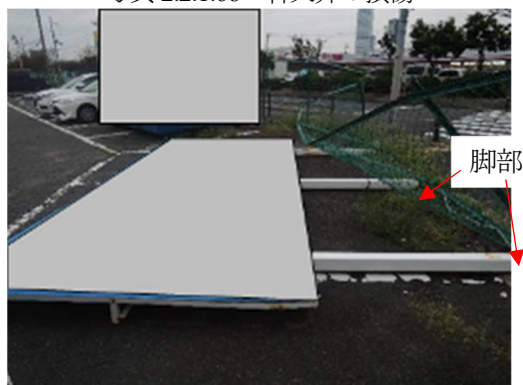


写真 2.2.1.70 看板の脚部の折損



写真 2.2.1.71 フェンスの著しい変形

3) その他の被害

- ・ 上記以外の被害として、りんくうタウンでの医療施設の窓ガラス損傷，移動式門扉の転倒，海に面した工事現場の囲いの飛散状況を確認した（写真 2.2.1.72～写真 2.2.1.74）。
- ・ 建築物・工作物以外の被害としては、りんくう公園内の樹木や街路樹に多数の根返りや折損を確認した（写真 2.2.1.75，写真 2.2.1.76）。



写真 2.2.1.72 医療施設での窓ガラスの損傷



写真 2.2.1.73 移動式門扉の転倒



写真 2.2.1.74 海に面した工事現場の囲いの飛散



写真 2.2.1.75 マツの根返り



写真 2.2.1.76 街路樹の折損（折損範囲を切断済み）

(5) まとめ

国土交通省国土技術政策総合研究所と国立研究開発法人建築研究所は、平成 30 年 9 月 4 日に台風第 21 号による強風被害を受けた建築物等を対象にして、大阪府大阪市，泉佐野市，泉南郡田尻町及び岐阜県岐阜市にて現地調査を実施した。調査対象のうち庁舎については、窓ガラス等の被害状況と発災後の継続使用状況の把握，低層の店舗については、

内外装材全般の被害形態と被害の進展過程の把握を主な目的とした。主な調査結果を以下にまとめる。

1) 大阪市内の庁舎

庁舎Aでは、南面の窓ガラスの破損や窓の開放が発生し、3名の負傷者があった。13階の室内には強風が吹き込んだため室内に書類が散乱したが、翌日には通常業務に復帰していた。一方、1階では窓ガラスの破損に加え、天井の落下、商品の散乱等があり、営業開始には1週間を要したとのことである。

2) 岐阜市内の庁舎

庁舎D～Fでは、計3枚の窓ガラスが破損し、1名の負傷者があった。庁舎Dでの10階の執務室ではガラスの破損後に風雨が吹き込み、職員は一同避難して立入禁止措置がされたが、翌日には通常業務に復帰していた。3日後の9月7日までに全ての窓ガラスの復旧が完了した。

3) 大阪府泉佐野市・泉南郡田尻町での店舗等

大阪府泉佐野市と泉南郡田尻町にある低層の店舗では、外装材や膜材料の被害として、鋼板製屋根材の広範囲のはく離、壁や屋根に設けた膜材料の広範囲のはく離、屋外に面する建具の脱落・転倒、軒天井やシャッターの損傷等を確認した。また、屋外に面する建具、軒天井、又は窓ガラスが損壊した後に強風が屋内（又は天井裏）に吹き込んだ結果、鋼製下地材で構成された天井や内壁が脱落等した被害状況を確認した。なお、調査時点で店舗によっては破損した店舗入口や外壁、天井を養生又は復旧させて営業を再開しており、店舗とは仕切られた倉庫や事務室の天井等は復旧中か被災直後の状態であった。

その他、建築物の付属設置物や工作物の被害としては、看板への飛来物の貫通、移動式門扉の転倒、駐輪場の屋根材の飛散、フェンスの著しい変形、看板脚部の折損を確認し、建築物以外の被害としては、多数の樹木の根返りや折損を確認した。

謝辞

本調査を実施するにあたり、近畿財務局総務部の前出紀央氏、近畿運輸局自動車交通部の平田克也氏、同名越正典氏ならびに、岡部順子氏ほかの皆様には、復旧作業の忙しい中、ヒアリング調査にご協力を頂き、被災時の写真や動画をご提供頂きました。また、岐阜県総務部の高木三功氏には、ヒアリング調査にご協力を頂きました。

被災された店舗A、B、C及びEの関係各位には、原状回復までの途上で大変忙しい中、被災状況等のヒアリングのご協力と被災直後の画像のご提供を頂きました。また、泉佐野市の竹内一郎氏には、現地調査同行のご協力を頂きました。

以上の皆様に対し、ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

1. 気象庁：災害をもたらした気象事例 台風第21号による暴風・高潮等，平成30年9月11日
https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/2018/20180911/jyun_sokuji201800903-00905.pdf（2018.9.20 閲覧）
2. Tenki.jp：非常に強い台風21号 徳島県南部に上陸
<https://tenki.jp/forecaster/deskpart/2018/09/04/1953.html>（2018.9.20 閲覧）
3. デジタル台風：台風201821号(JEBI)
<http://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon/summary/wnp/s/201821.html.ja>（2018.9.20 閲覧）
4. 内閣府：平成30年台風第21号に係る被害状況等について，平成30年9月14日
http://www.bousai.go.jp/updates/h30typhoon21/pdf/300914_typhoon21_01.pdf（2018.9.20 閲覧）
5. 気象庁：地域気象観測所一覧，平成30年9月19日現在
https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/amedas/ame_master.pdf（2018.9.20 閲覧）
6. 気象庁：各種データ・資料
<https://www.jma.go.jp/jma/menu/menureport.html>（2018.9.20 閲覧）

2.2.2 大規模建築物の被害

高森浩治（奥地建産株式会社）

台風は大阪や京都の都市部を直撃し、ランドマーク的な建築物も被害を受けた。ここでは、大阪市内の高層建築物および京都市内の大型駅ビルの被害の概要について報告する。

（１） 大阪市内の高層建築物の被害

図 2.2.2.1 は梅田スカイビル（大阪市）の外装材の被害の様子である。同ビルは２つのタワー（タワーイースト、タワーウェスト）を最上部の空中庭園で連結する形状となっている。台風当日は南寄りの強風が吹いており、両タワー間は南から北方向に風が通り抜けていたと考えられることから、a 部（軒天井面）の被害は、風圧（負圧）によって剥離したものと推測される。また、c 部（タワーウェスト東壁面）の被害は、強い負圧が発生すると考えられる側壁面の風上側の隅角部に近い位置で発生していたことから、風圧（負圧）に起因するものと推測されるが、飛来物の可能性もある。一方、b 部（タワーイースト南壁面）は、強風時の風上側壁面であることと、破損したガラス面の様子から飛来物による被害であったと推測される。なお、台風当日の大阪管区気象台の観測値は、最大風速 27.3m/s（SSW）、最大瞬間風速 47.4m/s（SSW）を記録している。

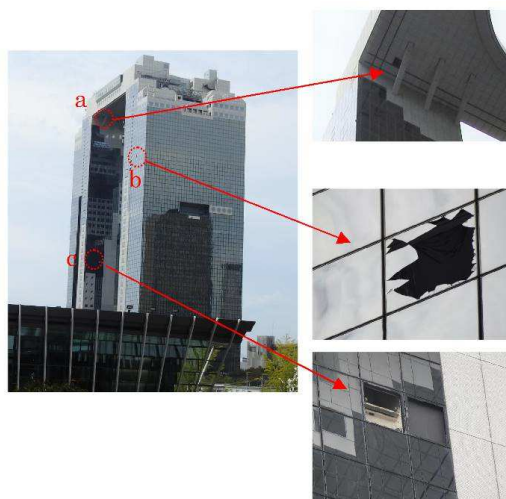


図 2.2.2.1 梅田スカイビルの外装材の被害

Figure 2.2.2.1 Cladding damages of the Umeda Sky Building

（２） 京都市内の大型駅ビルの被害

図 2.2.2.2 は JR 京都駅の駅ビルでの被害である。アトリウム屋根の硝子が割れて硝子の破片が駅のコンコースに落下し、コンコースを通行していた歩行者が頭や腕を負傷した。調査時点では、補修工事が既に行われていたため、被害当時の状況は確認できなかったが、Web 情報によればマット状の飛来物が衝突してアトリウム屋根のガラスを破損させたとのことであった。不特定多数の人が利用する駅や空港、避難所、病院等の外装材は、飛来物に対する耐衝撃性能を確保することも重要である。

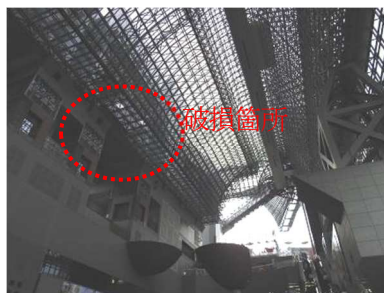


図 2.2.2.2 京都駅ビルのアトリウムの被害

Figure 2.2.2.2 Damage of the atrium in Kyoto station

2.2.3 建築物の外装材や付属物の被害

高森浩治（奥地建産株式会社）

台風 21 号による建築物の強風被害の多くは外装材や付属物の被害であった。本節では、これらの被害のうちの典型的な事例について報告する。

（1）屋根葺き材の被害

図 2.2.3.1 は集合住宅の屋根ふき材が剥離した被害事例である。屋根ふき材の剥離は、風上側となる南側半分（切妻屋根の南面のみで、北面での剥離は無かった）であり、被害原因は屋根下地と断熱材の接着部の剥がれであると推測される。また、飛散物となった屋根ふき材は北側の広い範囲に飛翔し、周辺の自動車等に危害を加えていた。強風によって建物等が破損した場合には、被害者であると同時に加害者になるリスクもはらんでいる。



図 2.2.3.1 集合住宅の屋根ふき材の被害

Figure 2.2.3.1 Damage to roofing materials on apartment building

（左：屋根面の南側半分の屋根葺き材が飛散，中央：屋根下地と断熱材との接着部の剥がれていた，右：飛散物が衝突した自動車の被害）

台風 21 号は多くの低層住宅の屋根に被害を与えた。図 2.2.3.2 は低層住宅の屋根ふき材の被害事例である。低層住宅の屋根ふき材の被害の多くは瓦屋根であり、特に築年数が古い土葺きの瓦屋根の被害が大半を占めていた。図 2.2.3.2 右は横葺きの金属屋根の被害であり、風上端部（写真の左側）から捲れるように剥離した形跡が伺える。



図 2.2.3.2 低層住宅の屋根の被害事例

Figure 2.2.3.2 Examples of damages to roofing materials on low-rise houses

（左：泉南市での瓦屋根の被害，中央：高槻市での瓦屋根の被害，右：高槻市での金属屋根の被害）

工場や倉庫の金属屋根の被害も多くみられた。図 2.2.3.3 は物流倉庫の折板屋根の被害である。剥離した折板屋根は、敷地内だけでなく、隣接する農地にも落下していた。



図 2.2.3.3 物流倉庫の折板屋根の被害（高槻市）

Figure 2.2.3.3 Damage to folded-plate roof on logistics warehouse

（左：剥離して敷地内に落下した折板，右：剥離した折板は隣接する農地にも飛散していた）

（２） 軒天井の被害

耐風設計上の盲点となっている軒天井の被害も見られた。図 2.2.3.4 は軒天井の面材が強風で剥離した被害事例である。建築物の軒天井には壁面と同等の風圧が作用するが、その構造は簡易（脆弱）なものが多く、しっかりと耐風設計されているものは比較的少ない。建築基準法などの基規準に設計用風力係数が示されていないことも被害要因のひとつであると考えられる。



図 2.2.3.4 軒天井の被害例

Figure 2.2.3.4 Examples of damages to eaves ceilings

（左：物流倉庫の軒天井の被害，中央：ホテルの軒天井の被害，右：集合住宅エントランスの軒天井の被害）

（３） 建築物の付属物の被害

建築物の付属物の被害も多く見られた。図 2.2.3.5 左は集合住宅のベランダ手すりの被害であり、手すりの支柱が風圧で外側に倒されている。ベランダ手すりはかつて格子状のものが多かったが、近年はパネル状のものが増加し、手すりの支柱に作用する風荷重は大幅に増加している。手すりの支柱は人の凭れ掛かりによる荷重が支配的であるとして設計されることが一般的であるが、パネル状の手すりの場合には風荷重に対する検討も必要である。図 2.2.3.5 中央は、駐輪場の屋根の被害であり、樹脂製の屋根パネルがフレームから外れて飛散したものと推測される。同様の被害がカーポートやバス停の屋根、低層住宅のベランダの屋根などでも見られた。図 2.2.3.5 右はメッシュフェンスの被害である。メッシュフェンスは開口率が大きいいため支柱負担する風力は比較的小さいが、飛散物がメッシュに衝突あるいは張り付くことによって支柱には想定以上の力（衝撃力や風力）が作用し、支柱が倒壊することがある。この事例では、隣接するテニスコートに敷設された人工芝が剥離し、ネットフェンスに衝突することによって倒壊したと考えられる。

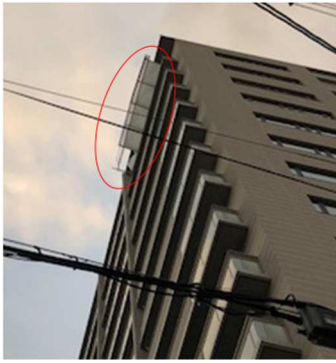


図 2.2.3.5 建築物の付属物の被害例

Figure 2.2.3.5 Examples of damages to building accessories

(左：集合住宅の手すりの被害（住民提供），中央：駐輪場の屋根の被害，右：ネットフェンスの被害)

2.2.4 金属屋根被害

ガヴァンスキ江梨（大阪市立大学）

大阪湾岸に位置する岸和田市貝塚市クリーンセンターは屋根面に大きな被害を受けた。クリーンセンターは大きく分けてごみ処理施設棟、リサイクルプラザ棟（RP 棟）、管理棟の3つに分かれており、被害はごみ処理施設棟とリサイクルプラザ棟に見受けられた。いずれの棟も金属折版屋根で覆われているが、その留め方は異なり、ごみ処理施設棟は丸馳式（図 2.2.4.1 左）、RP 棟は嵌合式（図 2.2.4.1 右）であった。



図 2.2.4.1 屋根の接合方法（左）丸馳式、（右）嵌合式

屋根面被害の概要を図 2.2.4.2、図 2.2.4.3 に示す。赤い四角で囲まれた部分が被害を受けた部分である。この図を見てわかるようにクリーンセンターは波をモチーフとした特徴的な形状の屋根を有する。建築基準法や建築物荷重指針にはこの屋根形状の風圧係数は示しておらず、管理課が所有していた設計に関する資料を見せてもらったが、風圧係数がどのように設定されていたかは不明である。



図 2.2.4.2 クリーンセンター全体模型（南西側）

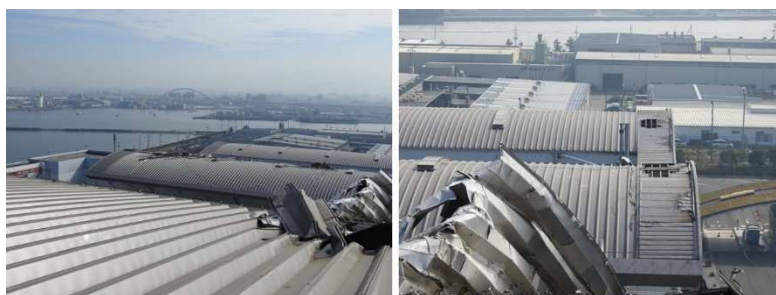


図 2.2.4.3 ごみ処理施設棟屋根から見た屋根被害

リサイクルプラザ棟に関しては建物南西側に位置するトラック搬入のための大型扉が破壊された。そしてこの扉の破壊後に屋根（図 2.2.4.2 リサイクルプラザ棟の左側の屋根山部分）が大きく破損したため、内圧上昇により屋根被害が引き起こされた可能性がある（図 2.2.4.4 左）。被害は図 2.2.4.4 右に示すように、折板が負圧で引き上げられ、吊り子のカシメが解けて、折板と共にキャップが外れて破壊していたと思われる。



図 2.2.4.4 リサイクルプラザ棟の被害（左：室内から見た被害，右：屋根嵌合部の被害）

ごみ処理施設棟においては図 2.2.4.5 左に示すように吊り子と折板のカシメが解けて折板が外れている場合や、タイトフレームにボルト固定された吊り子がボルトごと引き抜かれて折板が外れている場合（図 2.2.4.5 図 2.2.4.5 右）が見られた。



図 2.2.4.5 ごみ処理施設棟の被害

クリーンセンターの位置する大阪湾岸には産業団地があり，ここに建設された工場や倉庫などの多くも金属屋根を用いていたため多くの屋根被害が見受けられた．その一例を図 2.2.4.6，図 2.2.4.7 に示す．



図 2.2.4.6 産業団地内における金属屋根被害①



図 2.2.4.7 産業団地内における金属屋根被害②

2.2.5 害伝統的建築物の被害

京都府を縦断したこの台風は、歴史的建築物にも被害をもたらした。図 2.2.5.1 は平野神社（京都市北区）の拝殿の被害であり、南からの強風で北側に押し倒されていた。この拝殿は慶安3年（1650年）に建立されたもので、360年以上も大きな被害を受けていなかったが、今回の台風による強風によって倒壊した。拝殿の屋根は四隅の柱で支持されていたが、壁や筋交いは配置されていないため、大きい屋根に作用する水平方向の風力に対して耐えきれなかったと推測される。この他にも西本願寺（京都市下京区）において土塀の倒壊、檜皮葺き屋根の一部が損壊する被害が発生していた。



図 2.2.5.1 平野神社の拝殿の被害

Figure 2.2.5.2 Damage to the Hirano Jinja shrine

2.2.6 高速道路ならびに一般道路橋における被害事例 (Damages on Expressways and Road Bridges)

八木知己 (京都大学), 野口恭平 (京都大学)

(1) まえがき

道路橋をはじめとする土木構造物においても、台風 21 号による被害は多数発生しているものと思われる。特に関西国際空港では、滑走路や空港施設が浸水すると共に、タンカーが連絡橋に衝突し橋桁が激しく損傷した。本連絡橋の被害については別稿で報告されるため、本稿では関西地区の高速道路および道路橋で発生した他の被害事例について報告する。

(2) 西日本高速道路株式会社管内の被害事例

台風 21 号による西日本高速道路株式会社 (NEXCO 西日本) 管内の被害事例を以下に示す。

写真 2.2.6.1 に、阪和自動車の堺インターチェンジ (IC) と岸和田和泉 IC 間で発生した遮音壁の損傷事例を示す。写真 2.2.6.2 および写真 2.2.6.3 に、高速道路内の標識の損傷事例を示す。写真 2.2.6.2 は、近畿自動車道の東大阪南 IC 付近で発生したケースであり、被災前の標識は壁高欄に設置されていた。写真 2.2.6.3 は、阪和自動車道の岸和田和泉 IC 付近で発生した事例であり、門型支柱に取り付けられていた標識が落下したものである。写真 2.2.6.4 には、新名神高速道路の高槻ジャンクション (JCT) と茨木千提寺 IC 間で発生したトラックの車両横転事例を示す。また、倒木による被害も報告されており、写真 2.2.6.5 に、名神高速道路の茨木 IC と高槻 IC 間における、倒木による交通遮断の事例を示す。



写真 2.2.6.1 遮音壁の損傷

Photo2.2.6.1 Damages on noise barriers



写真 2.2.6.2 標識の落下

Photo2.2.6.2 Damage of a traffic sign



写真 2.2.6.3 標識の落下

Photo2.2.6.3 Damage of a traffic sign



写真 2.2.6.4 車両の横転
Photo2.2.6.4 Overturning of a vehicle



写真 2.2.6.5 倒木による被害
Photo2.2.6.5 Fallen trees on the road

(3) 阪神高速道路株式会社管内の被害事例

阪神高速道路株式会社管内においても台風 21 号による同様の被害があり、以下にその事例を示す。

写真 2.2.6.6 に、湾岸線岸和田大橋上での車両横転の事例を示す。写真 2.2.6.7 には、湾岸線深江浜入口における高潮浸水の事例を示す。写真 2.2.6.8 に、湾岸線甲子園浜における船舶衝突の事例を示す。写真左側の阪神高速道路湾岸線の鋼製橋脚に土運船が衝突した。また、写真右側の兵庫県が管轄する県道芦屋鳴尾浜線の鳴尾橋（西宮市内）にも衝突しており、橋桁が損傷している。この衝突事故により通行止めの措置がとられ、兵庫県による 2018 年 11 月 8 日付けの記者発表資料によれば、2018 年 12 月 10 日に東向き一方通行による暫定供用を開始し、2019 年の秋を目途に橋桁の撤去・架設を行い、通行規制を解除する予定とのことである。



写真 2.2.6.6 橋梁上での車両の横転
Photo 2.2.6.6 Overturning of vehicles on the bridge



写真 2.2.6.7 高潮による浸水
Photo 2.2.6.7 Flooding due to high tides



写真 2.2.6.8 橋梁への船舶の衝突
Photo 2.2.6.8 Collision of a ship with bridges

(4) その他の事例

写真 2.2.6.9 に示すように、京都嵐山の渡月橋（橋長 155m）では、強風により東側（下流側）の欄干が 100m 以上にわたって歩道上に倒れた。その後、歩道が使用できなくなっていたが、2018 年 10 月 25 日に修復が完了している。欄干は、歩行者が川に落ちないように橋梁内側から外向きの力には耐えることができる構造になっているが、欄干の外側からの外力には耐えられず、抜けてしまっている。その結果、欄干に損傷は少なく修復が短期間で修復が終了したものと思われる。



写真 2.2.6.9 渡月橋における欄干の損傷
Photo 2.2.6.9 Damage on handrails of Togetsukyo Bridge

謝辞

写真等をご提供頂いた西日本高速道路株式会社ならびに阪神高速道路株式会社に感謝の意を表する。

2.2.7 関西国際空港連絡橋への船舶衝突事故 (A Ship Collision Accident with the Kansai International Airport Access Bridge)

木村吉郎 (東京理科大学)

(1) まえがき

台風 21 号の強風により、関西空港の南方に停泊していた油タンカー宝運丸は、走錨 (そうびょう) を生じ、流されて、平成 30 年 9 月 4 日 13 時 40 分ごろ関西国際空港連絡橋に衝突した。なお走錨とは、強風や潮流などの大きな外力により、錨を用いて停泊中の船舶の錨が移動し続けてしまう現象を指す。ここでは、主として国土交通省運輸安全委員会より公表された経過報告¹⁾に基づき、事故の概要をまとめる。衝突により、宝運丸は右舷船首部の甲板及び居住区に圧壊等を生じ、関西国際空港連絡橋には、橋梁部に曲損、破口、擦過傷等を、鉄道桁には架線柱の倒壊、レールのゆがみ等を、ガス管等に破口等がそれぞれ生じた。死傷者はいなかった。またこの衝突事故により、関西国際空港連絡橋は全面的に通行止めとなった。翌 9 月 5 日には損傷の無かった側の橋桁を用い、緊急車両などの通行が行われるようになった。鉄道は 9 月 18 日に運行が再開された。

(2) 船舶と橋梁の概要

1) 宝運丸の概要

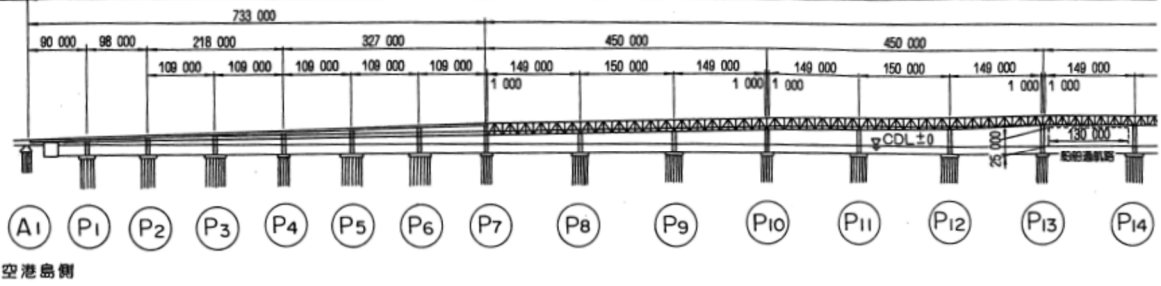
宝運丸は、日之出海運株式会社が所有し、鶴見サンマリン株式会社が運行する、総トン数 2,591 トン、長さ 89.95m、幅 15.80m、高さ 7.10m で、鋼製の油タンカーである。出力 2,059kW のディーゼル機関 1 基を備え、推進器は 4 翼固定ピッチプロペラ 1 個で、プロペラの回転数を一定にしたまま船の進む方向や船速を変化できるベクトルインラダー (舵) を搭載している。最大搭載人員は船員 11 人。また、事故当時は積荷はなく、バラスト水約 1,260t、燃料約 55t を積載していた。

2) 関西国際空港連絡橋の概要

関西国際空港連絡橋は、平成 6 年 3 月に開通した、延長 3.75km の道路・鉄道併用橋で、橋梁形式は、海上中央部が鋼連続トラス橋、取り付け部は鋼連続箱桁橋等、である。橋脚の間隔は、海上中央部では 150m であるが、取り付け部では 60~110m で、事故が生じた P1 と P2 の中心間隔は 98.0m、当該部分の桁のスパンは 96.8m、P2 と P3 の中心間隔は 109.0m、当該部分の桁のスパンは 108.4m、である。参考文献²⁾より、連絡橋全体一般図を図 2.2.7.1 と図 2.2.7.2 に、A1~P4 の一般図を図 2.2.7.3 に、事故の生じた P1~P3 と同様の断面を有すると考えられる P2~P4 の箱桁橋部の標準断面図を図 2.2.7.4 に示す。

側面図

空港島側取付部



空港島側

平面図



空港島側

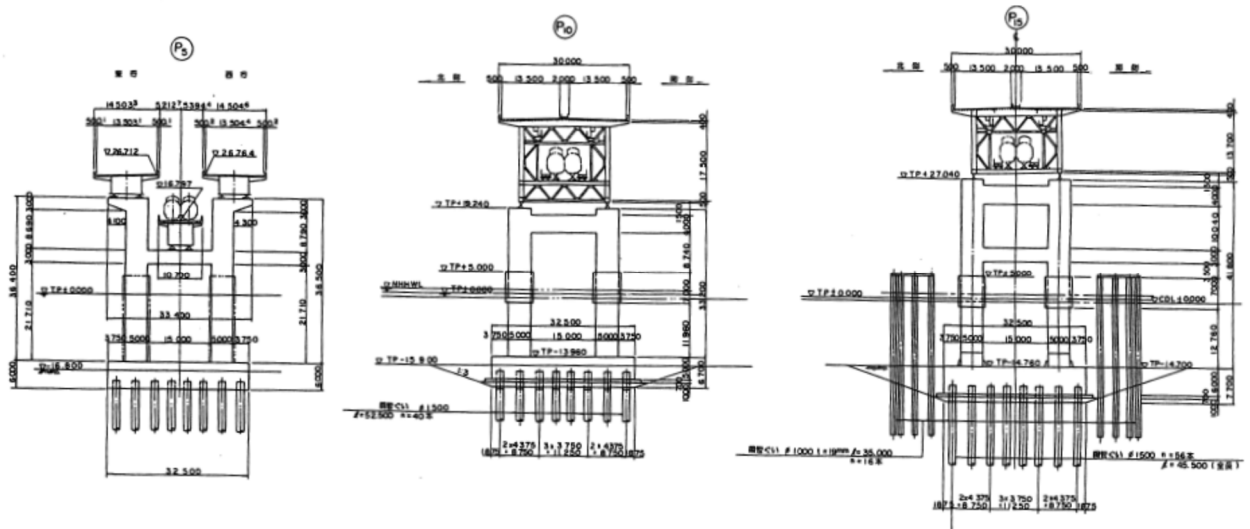


図 2.2.7.1 関西国際空港連絡橋全体一般図（空港島側）²⁾

Figure 2.2.7.1 General view of the Kansai International Airport Access Bridge

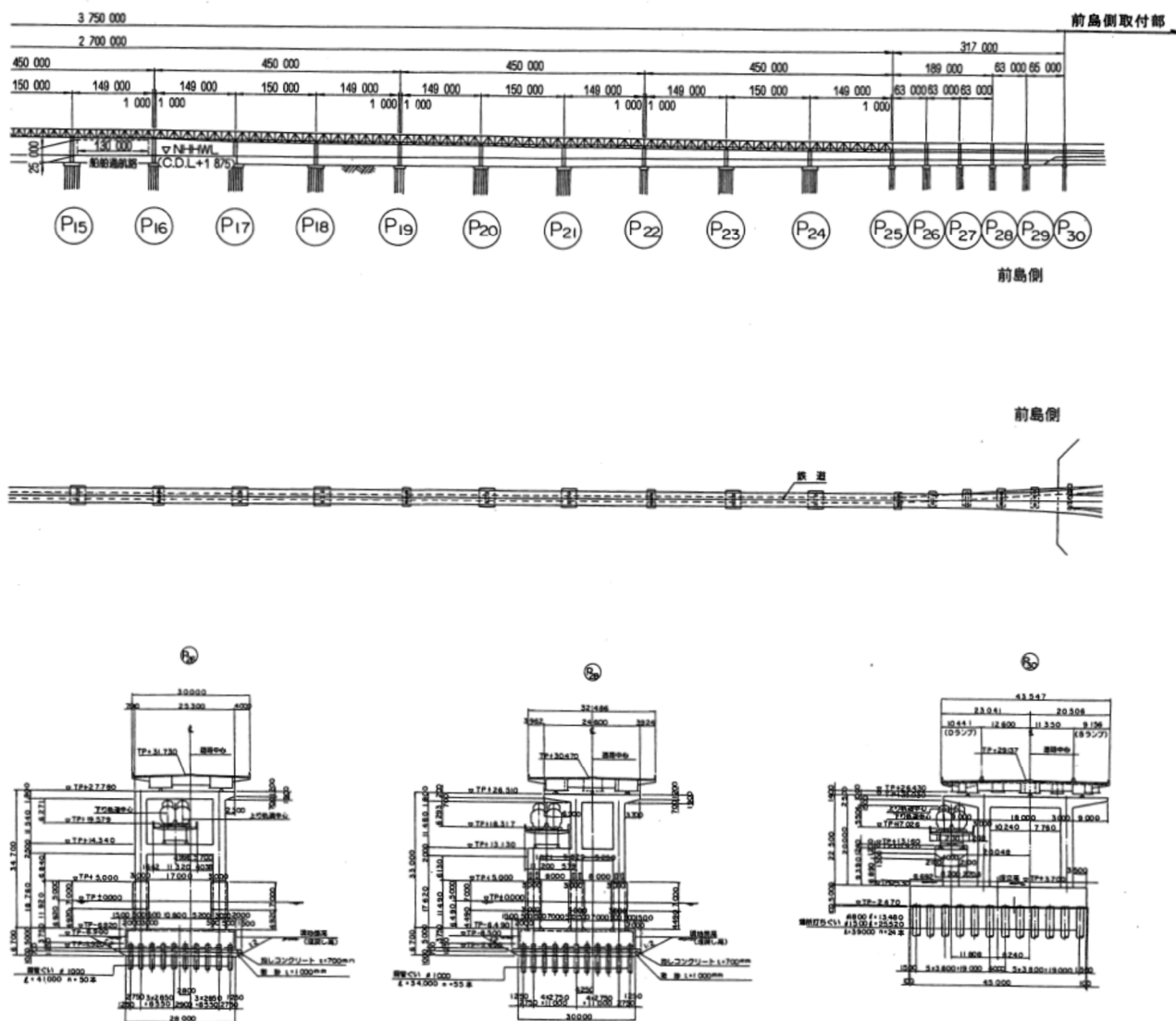
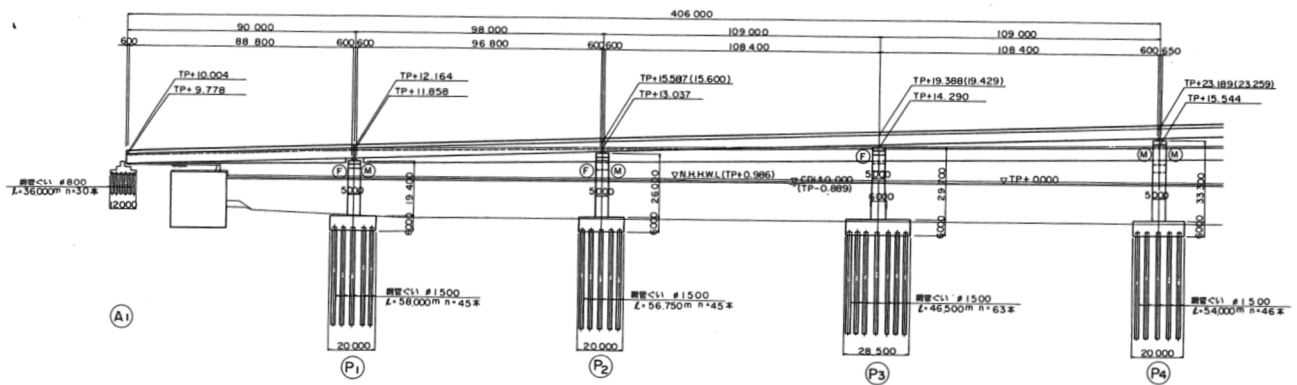


図 2.2.7.2 関西国際空港連絡橋全体一般図（続き，前島側）²⁾

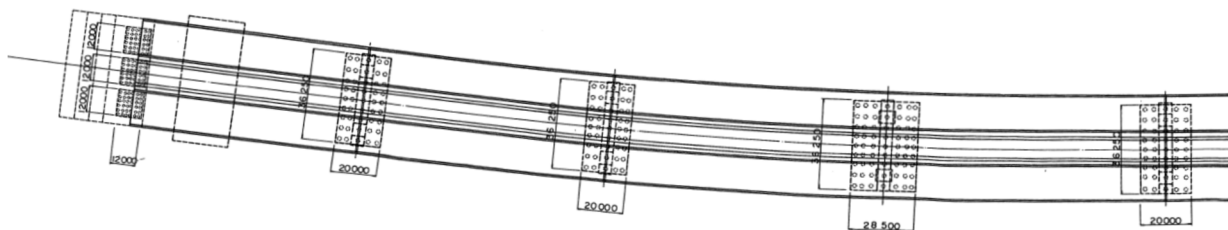
Figure General view of the Kansai International Airport Access Bridge (continued)

連絡橋 (A1~P4) 一般図

側面図



平面図



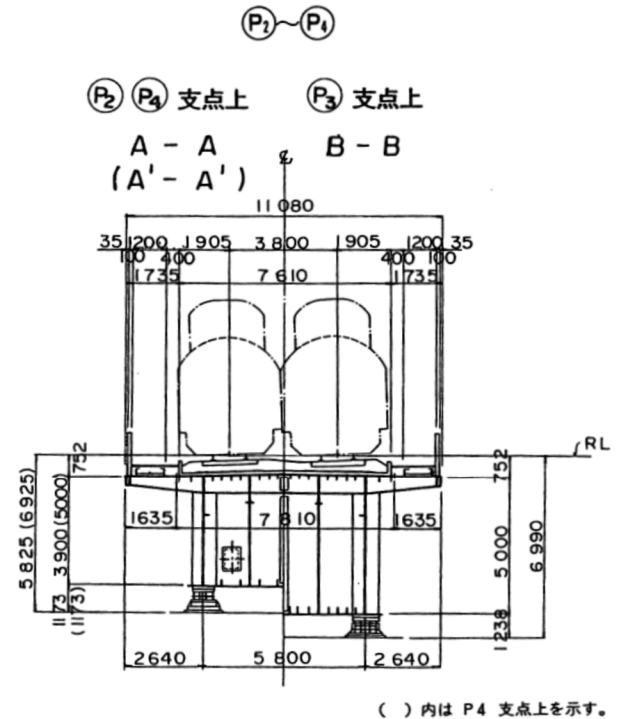
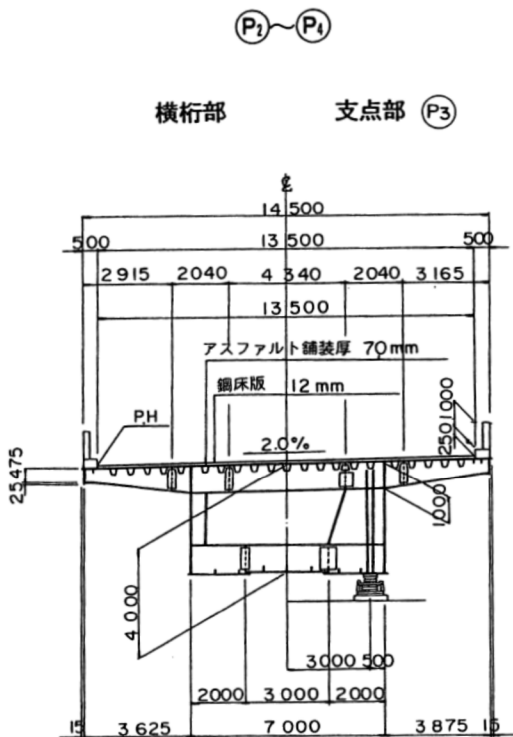
(注) () 内の数値は西行を表す。

図 2.2.7.3 関西国際空港連絡橋の A1~P4 一般図²⁾

Figure 2.2.7.3 General view of the Kansai International Airport Access Bridge (A1~P4)

箱桁橋標準断面図

鉄道橋標準断面図



() 内は P4 支点上を示す。

図 2.2.7.4 関西国際空港連絡橋の P2~P4 標準断面図²⁾

Figure 2.2.7.4 General cross-section of the Kansai International Airport Access Bridge (P2~P4)

(3) 衝突事故の経緯と状況

1) 事故発生の経過

宝運丸は、船長ほか10人の体制で泉州港の関空島のバースで揚げ荷役を終え、台風21号の接近に備え、錨泊（錨を用いて海底に係留すること）して避難するため、平成30年9月3日13時10分頃同港を出港した。同日13時30分頃、関空泉州沖連絡橋南西方灯標から230°（真方位）、1,170m付近に左舷錨を投下したのち、後進しながら錨鎖7節目終端部の連結部周辺を海面付近まで繰り出し、単錨泊（片舷だけの錨を使用した係留方法）を開始した。なお、単錨泊としたのは、2つの錨を使用すると風向が変わった際に錨等が絡み、係留力が減少する可能性があるという船長の判断に基づく。翌9月4日12時30分頃、風向が北東から東に変化し風速が約25m/s以上になったので、主機を微速力前進としベクツインラダーをホバーの位置（前後推進力のない状態）とした。同日13時00分頃、船が錨泊地から風下側の関空島に移動していることをレーダで認め、走錨していることに気づき、主機を港内全速力前進とし風上に向かうようにした。その後、レーダ画面に表示された速力が0となったので走錨が止まったものと思い、主機を半速力前進としベクツインラダーをホバーの位置に戻した。その後、風向が南から南西に変化し、風速が50m/sを超える状況下、13時30分頃船が風下側の関西国際空港連絡橋に接近していることをレーダで認め、再び風下側に流されていることを知り、主機を航海全速力前進とし、風上に向かうようベクツインラダーを操作した。しかし船は流され続け、13時40分頃関西国際空港連絡橋に衝突した。

同日18時46分頃、乗組員のうち2名が海上保安庁のヘリコプターにより救助され、残りの9名は、ガス漏れについての安全確認がされた22時10分頃、サルベージ会社タグボートにより救助された。

民間情報会社が受信した宝運丸の船舶自動識別装置による、上記の運航経過を図2.2.7.5、図2.2.7.6に示す。

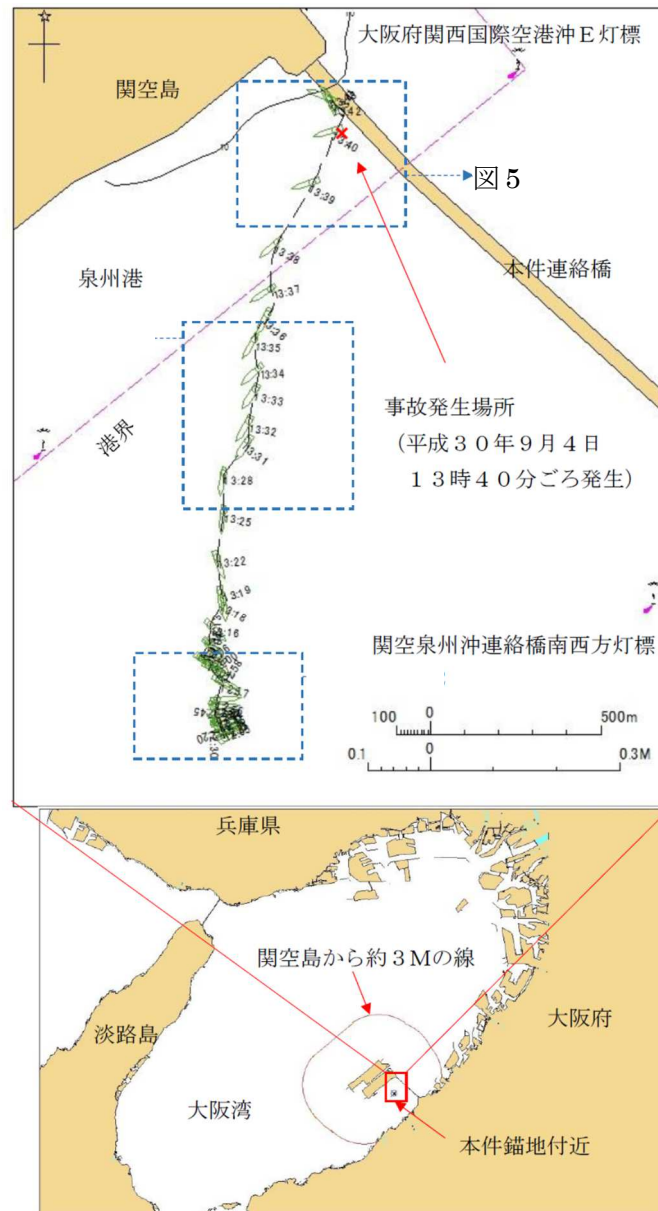


図 2.2.7.5 航行経路図（全体図）¹⁾

Figure 2.2.7.5 Location of the ship during the collision accident (overall)

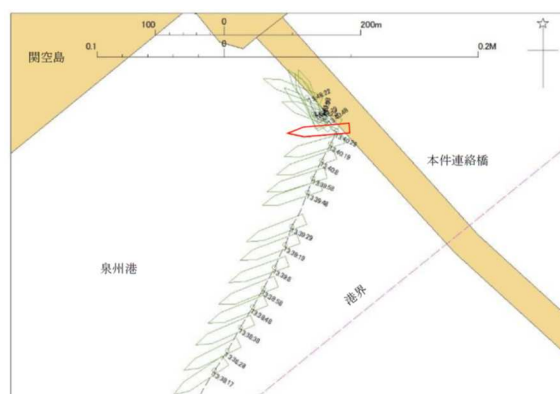


図 2.2.7.6 航行経路図（衝突時）¹⁾

Figure 2.2.7.6 Location of the ship during the collision accident (at the time around collision)

2) 人の死傷, 船舶と橋梁の損傷

この事故による死傷者はいなかった.

宝運丸は, 右舷船首部の甲板及び居住区に圧壊等を, 右舷1番貨物油タンクに破口等を, それぞれ生じた (図 2.2.7.7).



(a) 右舷船首部の損傷状況



(b) 右舷側居住区の損傷状況

図 2.2.7.7 宝運丸の損傷状況¹⁾

Figure 2.2.7.7 The damage of the Hou-un maru

関西国際空港連絡橋には, 最も関空島寄りの橋脚 (P1) を起点として関空島側約 30m, 泉佐野市側約 40m, また, P1 の泉佐野市側の隣の橋脚 (P2) を起点として関空島側約 50m にわたり, 橋梁部に曲損, 破口, 擦過傷等を生じ, また P2 上の P1 側橋桁が北東側に約 5m (参考文献¹⁾の本文の記述. 図には約 4m と記載) 移動していた (図 2.2.7.8, 図 2.2.7.9). 鉄道桁には架線柱の倒壊, レールのゆがみ等を, ガス管等に破口等をそれぞれ生じた.

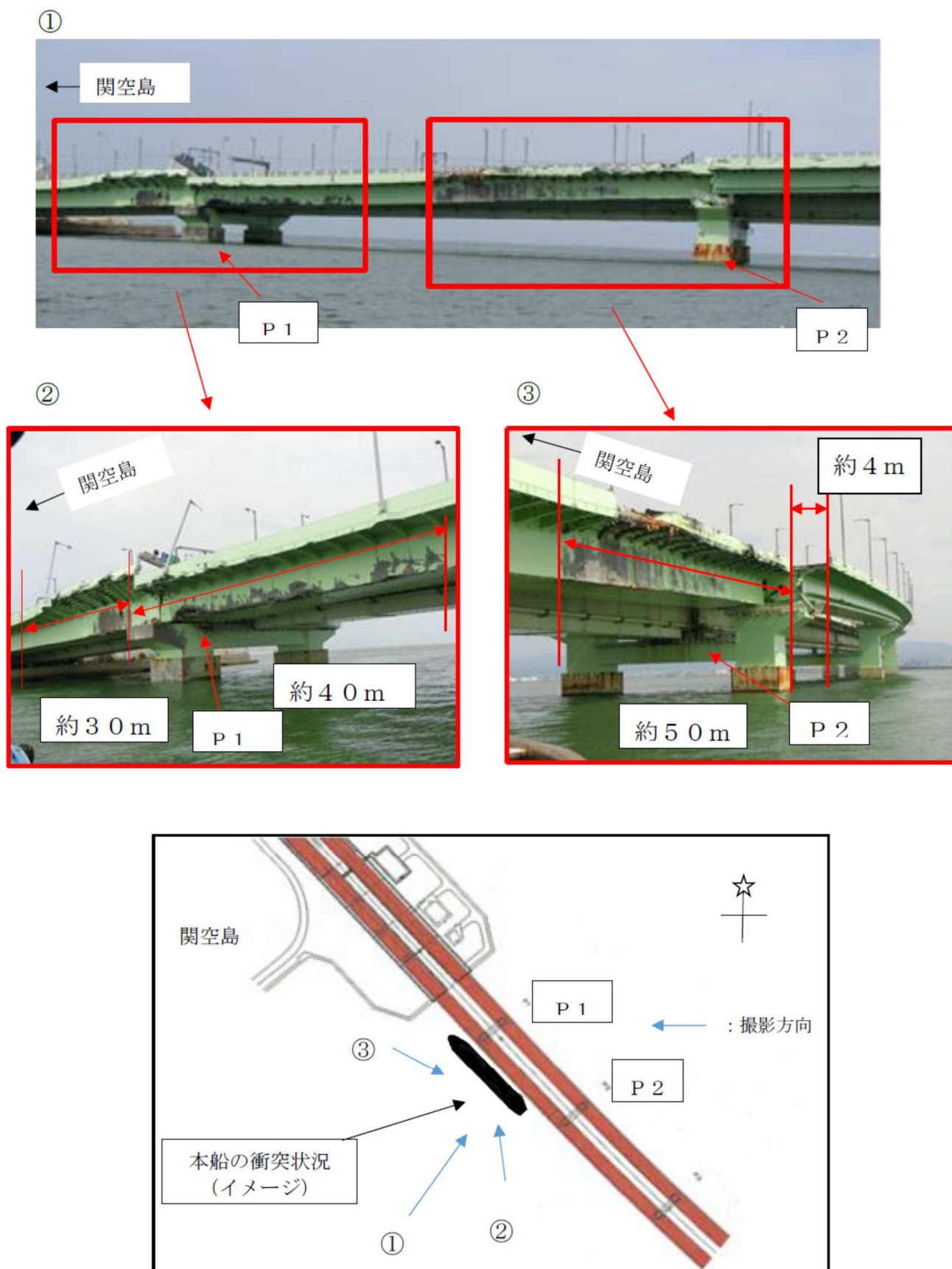


図 2.2.7.8 関西国際空港連絡橋の損傷状況 ¹⁾

Figure 2.2.7.8 The damage of the Kansai International Airport Access Bridge



図 2.2.7.9 関西国際空港連絡橋上の損傷状況¹⁾

Figure 2.2.7.9 The damage on the Kansai International Airport Access Bridge

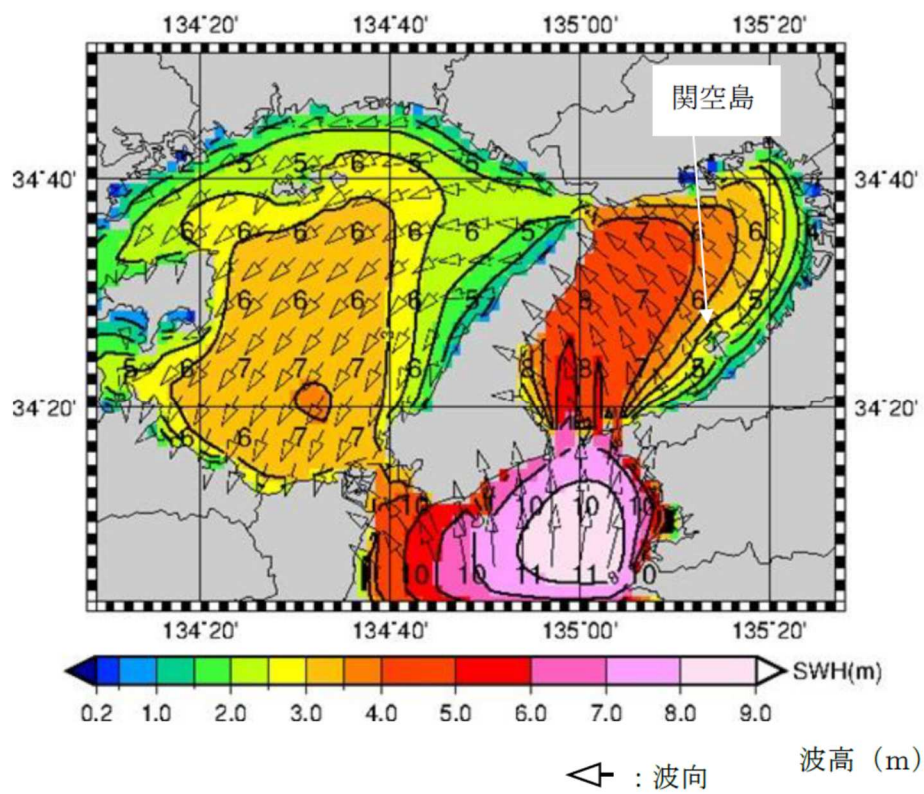
3) 事故当時の気象及び海象

事故発生場所の西方約 3.1km に位置する関空島地域気象観測所における事故当日の観測値を、参考文献¹⁾から引用して表 2.2.7.1 に示す。また、気象庁の浅海波浪モデル（水平解像度約 2km の高解像度で、湾内などのごく狭い海域のみを計算するもので、その結果は推定値）を使用して推定した 9 月 4 日 13 時 00 分及び 14 時 00 分における大阪湾周辺の波浪状況を、参考文献¹⁾から引用して図 2.2.7.10 に示す。

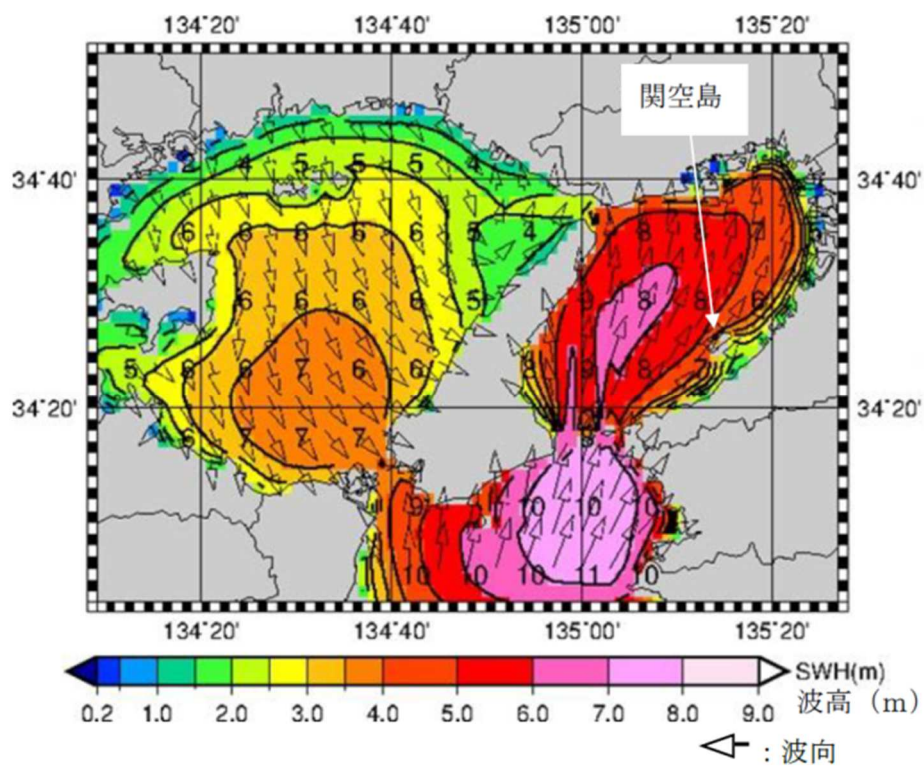
表 2.2.7.1 風向及び風速観測値¹⁾

Table 2.2.7.1 Measured wind direction and speed

時刻 (時 : 分)	最大瞬間		前 10 分間平均	
	風速 (m/s)	風向 (°)	風速 (m/s)	風向 (°)
11:00	16.5	060	13.9	060
11:30	20.1	060	17.6	060
12:00	22.1	070	19.7	060
12:30	21.1	080	18.2	070
13:00	25.7	120	19.8	110
13:04	26.7	130	22.5	120
13:09	27.8	130	24.6	130
13:10	25.2	140	24.4	130
13:13	32.4	130	24.4	130
13:16	31.4	140	25.0	140
13:18	30.3	170	25.8	150
13:22	52.0	180	28.3	160
13:25	48.9	190	30.6	170
13:28	46.8	190	35.2	180
13:31	48.4	190	39.0	190
13:32	46.8	200	39.5	190
13:33	46.3	200	39.8	190
13:34	44.8	190	40.0	190
13:35	46.8	210	40.2	190
13:36	46.8	200	40.4	190
13:37	44.2	190	39.8	190
13:38	58.1	200	40.1	190
13:39	55.6	200	41.0	200
13:40	55.0	210	41.8	200
13:41	57.1	200	42.7	200
13:42	53.0	200	43.5	200
13:43	50.9	190	44.0	200



(a) 13 時 00 分の状況



(b) 14 時 00 分の状況

図 2.2.7.10 大阪湾周辺の波浪状況 ¹⁾

Figure 2.2.7.10 Predicted wave height and direction around Osaka Bay

(4) 船舶の衝突による橋梁の被害事例と関連の研究ならびに設計における考慮

1) 被害事例

参考文献³⁾に、59件の船舶の衝突による橋梁の事故例がまとめられている。そのうち、1) 操舵装置やロープの破断による事故が7件、2) 悪天候による事故が7件、3) 船員間の誤解、軽率さ、無能力、アルコール、といった人的エラーによる事故が22件、4) 原因不明が23件、と分類されている。

今回の事故に原因が近いものとして、1946年に、米国 South Carolina 州の John Grace Memorial Bridge (橋長 3200m) において、強風により錨がスリップした船が橋に押し付けられる形となり、スパン 67m 部分を損傷させた事故がある。

2) 関連する既往の研究

今回の衝突事故に関連すると考えられる研究分野、研究例を以下に挙げる。

船が衝突した際に構造物に及ぼす影響を検討したものとして、近年、洋上風力発電のタワーや基礎を対象とした研究が多くみられる⁴⁻⁶⁾。より一般的な offshore platform を対象とした研究は、以前より行われているが、その中で比較的最近のものを参考文献として挙げておく⁷⁻⁹⁾。また、橋の橋脚を船の衝突から守ることを目的とした研究も以前よりみられる¹⁰⁻¹²⁾。

船舶の挙動に関する研究としては、船の衝突力の解析的研究¹³⁾、船の衝突や座礁時の解析や実験方法のレビュー論文¹⁴⁻¹⁵⁾、錨を用いた停泊(錨泊)時の挙動¹⁶⁾や、船に作用する風力を間接的に模擬する実験方法¹⁷⁾、等のものがみられる。

3) 関西国際空港連絡橋の航行安全対策

航行安全対策は、船舶交通の輻輳する大阪湾に橋梁が建設されることから、学識経験者や海事関係者等で構成される「関西国際空港航行安全調査委員会」が設置されて検討され、その結果を踏まえて実施された。交通予測結果より、約 130m の航路幅が必要とされ、連絡橋中央部の P13~P14 を南航用の通航路、P15~P16 を北航用の通航路、間の P14~P15 を分離帯として設定した。これらの航路を航行する船舶に対して、航行援助施設や標識を選定、配置し、また、航路付近の連絡橋の橋脚には、500tf 相当の船舶衝突を想定した緩衝工が設置された²⁾。

一方で、今回の衝突事故のような事態は、橋梁側の対策として防ぐことは難しく、事前の検討などは行われていなかったものと思われる。

(5) まとめ

台風 21 号の強風により生じた、船舶の関西国際空港連絡橋への衝突事故について、主として国土交通省運輸安全委員会より公表された経過報告¹⁾に基づいてまとめ、関連する研究などについても簡単に記述した。

参考文献

- 1) 国土交通省運輸安全委員会, 「船舶事故調査の経過報告について(平成 30 年 12 月 20 日)」, (2018.12)
- 2) 関西国際空港株式会社工務二部, 「関西国際空港連絡橋工事誌」, (1994.6)
- 3) Scheer, J., “Failed Bridges, Case studies, causes and consequence”, Wilhelm Ernst & Sohn, (2010)
- 4) Moulas, D., Shafiee, M. and Mehmanparast, A., “Damage analysis of ship collisions with offshore wind turbine foundations”, Ocean Engineering, Vol. 143, pp. 149-162, (2017)
- 5) Bela, A., Le Sourne, H., Buldgen, L. and Rigo, P., “Ship collision analysis on offshore wind turbine monopole foundations”, Marine Structures, Vol. 51, pp. 220-241, (2017)
- 6) Mo, R., Li, M. and Kang, H., “Transient behaviour of grouted connections of offshore wind turbines subject to ship impact”, Applied Ocean Research, Vol. 76, pp. 159-173, (2018)
- 7) Storheim, M. and Amdahl, J., “Design of offshore structures against accidental ship collisions”, Marine Structures, Vol. 37, pp. 135-172, (2014)
- 8) Yua, Z and Amdahl, J., “Analysis and design of offshore tubular members against ship impacts”, Marine Structures, Vol. 58, pp. 109-135, (2018)

- 9) Yua, Z. and Amdahl, J., “A review of structural responses and design of offshore tubular structures subjected to ship impacts”, *Ocean Engineering*, Vol. 154, pp. 177-203, (2018)
- 10) Gluwer, H. and Olsen, D. Eds., “Ship Collision Analysis”, *Proc. International Symposium on Advances in Ship Collision Analysis*, Copenhagen, Taylor & Francis, (1998)
- 11) Svensson, H., “Protection of bridge piers against ship collision”, *Steel Construction*, Vol. 2, No. 1, pp. 21-32, (2009)
- 12) Fan, W., Liu, Y., Liu, B. and Guo, W., “Dynamic Ship-Impact Load on Bridge Structures Emphasizing Shock Spectrum Approximation”, *J. Bridge Engineering*, ASCE, Vol. 21, No. 10, 04016057-1-15, (2016)
- 13) Pedersen, P.T. and Zhang, S., “On impact mechanics in ship collisions”, *Marine Structures*, Vol. 11, pp. 429-449, (1998)
- 14) Pedersen, P.T., “Review and application of ship collision and grounding analysis procedures”, *Marine Structures*, Vol. 23, pp. 241-262, (2010)
- 15) Liu, B., Pedersen, P.T., Zhu, L. and Zhang, S., “Review of experiments and calculation procedures for ship collision and grounding damage”, *Marine Structures*, Vol. 59, pp. 105-121, (2018)
- 16) Sasa, K. and Incecik, A., “Numerical simulation of anchored ship motions due to wave and wind forces for enhanced safety in offshore harbor refuge”, *Ocean Engineering*, Vol. 44, pp. 68-78, (2012)
- 17) Redondo, L., Méndez, R. and Pérez-Rojas, L., “An indirect method implementing effect of the wind on moored ship experimental tests”, *Ocean Engineering*, Vol. 121, pp. 341-355, (2016)

2.2.8 足場の被害

高橋弘樹（労働安全衛生総合研究所），大幡勝利（労働安全衛生総合研究所）

（１） はじめに

建設工事等で使用している足場は倒壊防止のため、足場を建築物などに連結する必要がある。この連結に使われている部材は壁つなぎと呼ばれており、台風等の強風時には、風による水平荷重を建築物等に伝えるものである。足場の耐風技術指針¹⁾には、風に対する足場の安全性を確保することを目的に、足場に作用する風荷重の計算方法や壁つなぎの適切な設置方法等が示されている。足場には資材の飛来・落下やがれきの飛散を防止するため、メッシュシート等を設置することが多い。メッシュシートを設置すると足場に作用する風荷重が大きくなるため、強風が予想される場合は、メッシュシートを巻き上げる等の対策を講じる必要がある。しかし、解体工事等で使用している防音パネルについては、取り外すことが容易でないことから、台風等の強風時にも設置されていることが多い。このため、強風時に防音パネルに過大な風荷重が作用することになり、この過大な風荷重の影響により、壁つなぎが破断等して、足場が倒壊する。そこで今回は、防音パネルが設置されていた足場の倒壊現場を対象に目視調査を行った。

（２） 調査概要

調査は大阪市内の建築解体現場２か所で行った。足場は2018年9月4日に倒壊したが、調査は倒壊8日後の2018年9月12日に行ったので、調査した時に倒壊した足場は、どちらの現場にもなかった。今回の調査では、建築物の外壁に残っていた壁つなぎ等から、倒壊した足場の状況等を推定した。

（３） 大阪市北部の足場倒壊調査

調査を行った大阪市北部の建築物解体現場を写真2.2.8.1に示す。写真2.2.8.1より建築物の周囲に足場が一部残っており、足場には防音パネルが設置されていた。足場はわく組み足場と呼ばれるもので、門型の枠材に交さ筋交いや床材等を設置して組み立てる足場である。倒壊した足場の構造については、現場に残った足場と同じように組まれていたとすれば、設計指針²⁾の要件を満たしていたと考えられる。建築物の外壁面を見ると、ガラスの一部が割れており、割れたガラスの内側には鉄骨があった。また、割れたガラスの数か所に、写真2.2.8.2に示すような単管パイプと緊結金具が残っていた。これらのことから、壁つなぎは外壁面のガラスに穴をあけ、建築物内部の鉄骨に単管パイプと緊結金具を使用して設置していたと考えられる。耐風技術指針¹⁾より、壁つなぎの設置方法については問題なく、割れたガラスの間隔で壁つなぎが設置されていたとすれば、間隔設置も問題はなかったと考ええる。



写真2.2.8.1 大阪市北部の足場倒壊現場
Photo 2.2.8.1 Scaffold's collapse site in north of Osaka

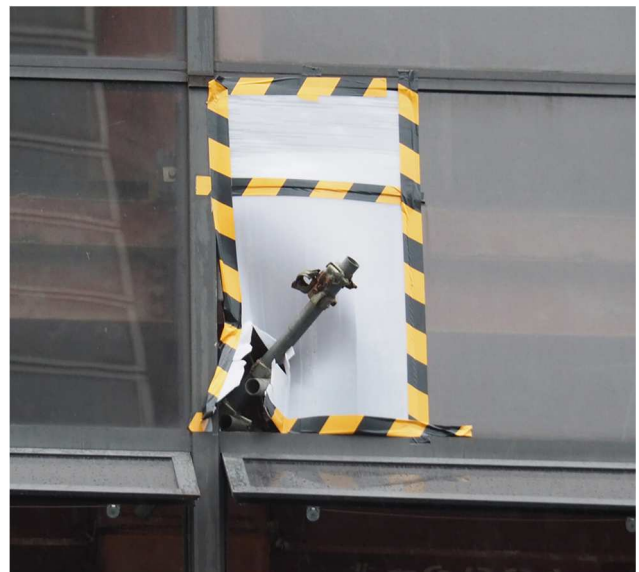


写真2.2.8.2 割れたガラスに残った単管パイプと緊結金具
Photo 2.2.8.2 Tube pipe and clamp remaining on broken glass

(4) 大阪市南部の足場倒壊調査

調査を行った大阪市南部の建築物解体現場を写真 2.2.8.3 に示す。写真 2.2.8.3 より調査時に現場では新たに足場を設置始めていたが、台風来襲時に倒壊しなかった足場が一部残っていた。足場はわく組み足場であり、防音パネルが足場に設置されていた。倒壊した足場が、現場に残った足場と同じように組まれていたとすれば、設計指針²⁾より足場の構造に問題はなかったと考えられる。建築物の外壁には穴や、写真 2.2.8.4 に示すように単管パイプと緊結金具が残っているものが確認できた。壁つなぎは外壁に穴をあけて建築物内部の構造物に設置していたか、外壁に直接設置していたと推定された。耐風技術指針¹⁾より、壁つなぎの設置方法については問題なく、穴のあいた箇所と単管パイプが残った箇所に壁つなぎが設置されていたとすれば、設置間隔も問題はなかったと考えられる。



写真 2.2.8.3 大阪市南部の足場倒壊現場
Photo 2.2.8.3 Scaffold's collapse site in south of Osaka



写真 2.2.8.4 外壁に残った単管パイプと緊結金具
Photo 2.2.8.4 Tube pipe and clamp remaining on outer wall

(5) おわりに

調査結果より、現場に設置されていた足場の構造等は、設計指針²⁾の要件を満足するものであったと推定される。ただし、現行の耐風技術指針¹⁾では、建設現場においてシートの巻き上げ等を実施することを前提として、台風接近を除外した再現期間 12 か月の風速を考慮して基準風速が設定されている。防音パネルは取り外しが容易でないため、台風等の強風時にも足場に設置されていることが多い。今後、防音パネルを設置した足場を対象とした耐風対策を検討する必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 一般社団法人仮設工業会編、「改訂 風荷重に対する足場の安全技術指針」,(2000)
- 2) 一般社団法人仮設工業会編、「足場・型枠支保工設計指針」,(2004)

2.2.9 太陽光発電システムの被害

高森浩治（奥地建産株式会社）

（１） 太陽光発電システムの被害

電気設備の技術基準の解釈第 46 条第 2 項によれば、太陽光発電システム（PVS と称する）の支持物（架台や基礎）は JIS C 8955¹⁾によって算出された設計風荷重に対する許容応力度設計が要求されている。同 JIS に規定されている風荷重算定用の基準風速は、平成 12 年建設省告示第 1454 号（建告 1454 号と称する）に準じていることから、PVS に要求される耐風性能は建築物とほぼ同等であるといえる。

関西空港地方気象台（風速観測高さ 10m）の記録によれば、台風 21 号の最大風速は 44.9m/s に達していた。関空島に位置する同気象台の地表面粗度区分を I と仮定すると、この最大風速は JIS C 8955 および建告 1454 号での設計風速（41.9m/s）をやや上回っていたことになる。前述したように PVS の支持物は設計荷重に対する許容応力度設計を要求していることから、本来、設計風荷重が作用した場合に無被害であることが前提となるので、台風 21 号の強風によって無被害ではないとしても、崩壊・飛散するような被害に至る蓋然性は低いと考えられる。しかしながら、Twitter などの Web 情報によれば、PVS が崩壊・飛散した被害は少なからず発生している。

強い台風が上陸した場合、被害エリアは広範囲に及ぶ。そのため、Web 情報が被害発生場所の特定や被害状況の把握に有益な情報源となる。台風 21 号による PVS の被害情報は Web 上に多く掲載されており、それらの情報をもとに現地調査場所を選定した。

（２） 水上設置 PVS の被害

図 2.2.9.1 は大阪狭山市の溜池に設置された水上設置型 PVS 設備の被害である。水上設置型 PVS は、造成工事が不要、PVS モジュールの冷却効果がある、藻の発生が抑制されるなどの理由から近年増加傾向にあるが、現時点ではその設計・施工に関する技術的知見は乏しい。国内における水上設置型 PVS 設備は、フロート（浮体物）にモジュールを取り付け、フロート同士を互いに連結し、外周部のフロートを水面下の地中に打ち込んだ杭、あるいは水中に沈めたコンクリートブロック等の重量物にワイヤー等で係留する工法が一般的に採用されている。この被害では、係留方法（強度）が原因で外周のフロートがめくれ上がったようであるが、めくれ上がったフロートに係留用のワイヤーが残っていないことから、フロートとワイヤーの接合部が破損したと推測される。被害発生場所から最寄りのアメダス堺の記録によれば、被害当日の最大風速は 20.3m/s（SSW）、最大瞬間風速は 43.6m/s（S）であり、フロートメーカーの保証する耐風性能を下回る風速で被害を受けていた可能性がある。



図 2.2.9.1 水上設置型 PVS 設備の被害（大阪狭山市）

Figure2.2.9.1 Damage of floating PVS

（３） 建築物上設置 PVS の被害

図 2.2.9.2 は神戸市垂水区の 5 階建ての集合住宅の屋上に設置されていた PVS 設備が架台ごと南西方向へ約 30m 飛翔し、隣接する住宅の屋根に接触した後に住宅地の法面に落下した被害事例である。PVS 設備が飛散した原因は、集合住宅の屋上面と架台との緊結に問題があったと推測される。架台は屋根の防水性能を損なわないように屋根の構造体に固定する必要があるが、既存建築物に PVS 設備を設置する場合には屋根との緊結強度を確保できないことがあり、その緊結部が破損して飛散する事例が多くみられる。また、飛散した PVS 設備でも受光すると発電するので、感電や電気火

災等の2次被害の恐れがある。そのため、専門業者によって早期に撤去されることが望ましい。



図 2.2.9.2 集合住宅の屋上に設置された PVS 設備の被害

Figure 2.2.9.2 Damage of PVS on flat-roof apartment

(左：隣地に法面に落下した PVS 設備，右：架台と屋根の緊結ボルトが抜けていた)

(4) PVS の強風被害の特徴

PVS の太陽電池モジュールは南向きに傾斜させることが一般的であることから、北寄りの風の場合には上向きの風力、南寄りの風の場合には下方向への風力が作用する。このため、PVS の強風被害は、風向によって被害状況が大きく異なることが特徴的である。紀伊水道を北北東方向に進行した台風 21 号においては、台風の進行方向に対して台風を中心より左側（西側）に位置し、北寄りの強風が吹いていた四国（高知県、徳島県、香川県）では、地上設置型 PVS が飛散する数件の事故が発生していた（Web 情報）。これらの被害は、杭基礎が引き抜け、あるいは架台の破損によるものであった。一方、南寄りの強風が吹いていた大阪府では、地上設置型 PVS が上から押さえつけられるようにして破壊していた事例も見られた（Web 情報）。

参考文献

- 1) 日本規格協会, JIS C 8955:2017 太陽光発電システム用支持物の設計用荷重算出方法, (2017)

謝辞：本調査の一部は国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託研究「太陽光発電システム効率向上・維持管理技術開発プロジェクト」の一環として実施された。

2.2.10 車両の被害

吉田昭仁（東京工芸大学）

台風 21 号の通過により、多くの車両被害が発生した。ここではインターネットを通じて、車両被害の動画や写真などの情報を収集し、被害発生風速・被害発生方向と周辺建物との位置関係などの詳細について調査を行った。なお、車両被害については、2016 年 4 月より運用が開始されている日本版改良藤田スケールにおいても DI13～15 として、軽自動車、普通自動車、大型自動車が用いられている。本スケールを定める際の基となっているのは、風洞実験により得られた風力係数から求めた風力と車両重量による抵抗力との釣り合いで算出した等価水平風速である。そのため、台風により発生した車両被害についても、本スケールで評定される風速が適用できると考え、当日の風向風速との関係についても述べる。

表 2.2.10.1 および図 2.2.10.1 はインターネットを通じて得られた車両被害状況の一覧および被害発生方向を示したものである。被害の多くは大阪・兵庫に集中しており、建物被害と同様である。被害発生方向については、四国では被害方向から午前中の東寄りの風により被害が発生しているが、大阪・兵庫、愛知では南寄りの風で被害が発生している。個別の被害発生状況について、周辺建物、地形・地物等の影響を確認してみると、最も被害が多く発生していた大阪市住之江区では普通自動車や軽自動車が 20 台以上も横転し、数十メートルも転がるなど、他の被害地点と比較しても顕著な被害が発生している。この被害発生場所は大阪咲洲庁舎としても使用されている高さ 250m のコスモタワーに隣接する駐車場であった。コスモタワーは南側に建物長辺方向が向いていることもあり、コスモタワーのビル風により被害発生地点では風速が増大していたものと考えられる。その他の被害発生地点も周辺の状況を確認してみると、隣接して比較的大規模な建築物が建っていたり、橋の上で横転被害が発生していたりするなど、周辺の状況が大きく関係していたと考えられる。

表 2.2.10.1 インターネットを通じて得られた車両被害一覧

大阪府	大阪市	阿倍野区	軽ワンボックス
		中央区	トラック
		住之江区	被害多数 (20 台以上)
		淀川区	トラック、軽ワンボックス
		浪速区	トラック
		西区	軽ワゴン
	泉佐野市	トラック 2 台横転、横滑り数台	
	摂津市	軽ワゴン	
	守口市	トラック	
	吹田市	軽ワゴン (横滑り)	
兵庫県	高槻市	トラック 7 台	
		軽トラ、軽ワゴン	
徳島県	徳島市	トラック	
徳島県	阿南市	トラック	
愛知県	豊田市	トラック	
香川県	坂出市	8 トントラック (瀬戸大橋)	
徳島県	徳島市	トラック	
徳島県	阿南市	トラック	



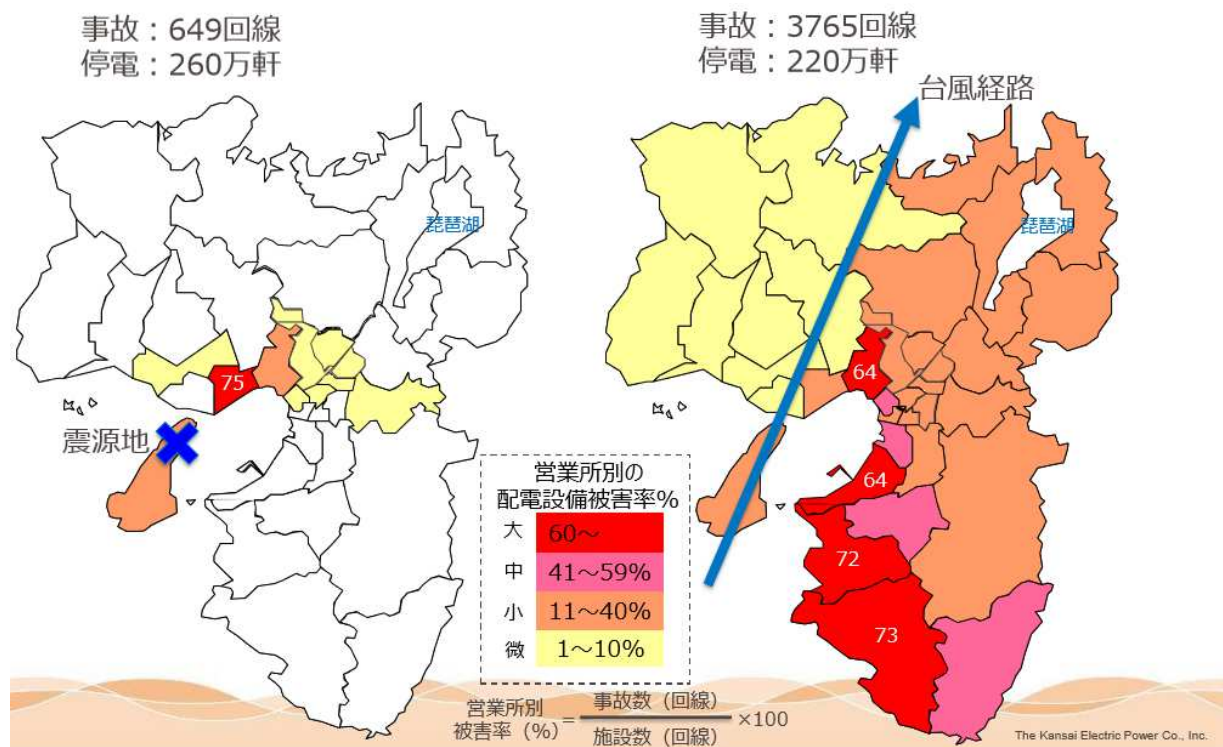
図 2.2.10.1 車両被害の発生位置および発生方向

2.2.11 配電設備の被害

丸山 敬（京都大学防災研究所）

本節では関西電力株式会社提供の資料をもとに、2018 年台風時の配電設備の被害状況について述べる。台風 21 号による関西電力の害は図 2.2.11.1 に示すように、大阪府、和歌山県、奈良県、京都府、滋賀県、兵庫県内のほぼ全ての営業所管内に及び、とくに大阪府南部の岸和田営業所および和歌山営業所管内では電柱および電線の、高槻営業所および扇町営業所では電線の被害件数が多かった。電柱の倒壊は合計で 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、配電設備の被害は表 2.2.11.1 に示すように、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る。また、大規模施設に送電を行う特高線についても 10 か所で断線の被害が発生した。なお、関西電力は最終報告書のとりまとめを行い、検討結果はインターネット上に掲載^{2.2.11.1)}されている。



平成 7 年阪神淡路大震災

平成 30 年台風 21 号

図 2.2.11.1 配電営業所別の設備被害の概要；阪神淡路大震災との比較（関西電力提供、資料 2.2.11.1）

表 2.2.11.1 設備被害の概要（関西電力提供，資料 2.2.11.1）

配電設備						送電設備
架空線			地中線			架空線
支持物【本】 （折損・倒壊等）	高圧線【径間】 （断線・混線等）	変圧器【台】 （損傷・傾斜等）	地上機器【台】 （浸水等）	地上機器【台】 （損傷・傾斜等）	ケーブル【m】 （損傷等）	特高線【条】 （断線）
1,343 ※ 1	4,914	362	38	0	544	10

※ 1 【折損・倒壊】881 {・倒木、飛来物等：788、地盤の影響（流出含む）：93}
【傾斜・沈下・ひび】462

謝辞

本報告にあたっては関西電力株式会社からの資料を提供していただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

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

観測及び工作物の被害による風速推定

Wind Speed Estimation through Damage from Various Objects and Field Measurements

金容徹*¹ 岩下久人*² 野田博*³ 野田稔*⁴ 松井正宏*⁵

Yong Chul KIM, Hisato IWASHITA, Hiroshi Noda, Minoru NODA, Masahiro MATSUI

SUMMARY

Wind speed estimations were made through the damage from various objects and field measurements. For the wind speed estimation from damage of various objects, Guidelines for the Japanese Enhanced Fujita Scale was used. The maximum estimated wind speed was 55m/s by the damage of ground-based billboard, and the minimum was 30m/s by the hollow concrete block wall. The average estimated wind speed was 40m/s.

Roofing system, including roof tiles and beams etc., and signboards on roofs were damaged by high winds. Pieces of broken materials were scattered as windborne debris. The windborne debris were observed and captured as pictures and movies with cameras built-in smartphones. These pictures and movies, reported in many websites on the Internet, were analyzed with an image processing software. Flying speeds of those materials were estimated from 17 to 50 m/s. As flying speed converges to surrounding wind speeds, maximum wind speeds were estimated more than 50 m/s.

The meteorological data observed by three kind of meteorological observation system, when Typhoon 1821 (JEBI) passed through Osaka region, are investigated in this paper. Three kind of observation results are that data obtained by compact meteorological observer (POTEKA) weather stations, Meteorological Agency observation data, and data measured by using ultrasonic anemometer installed on the roof of a high-rise building.

By using POTEKA, the extreme weather changes by Typhoon 1821 which passed through Osaka bay and landed near Kobe city, could be caught accurately. Sea level pressure dropped with the approach of typhoon intensely, and the lowest atmospheric pressure of 954.1hPa was observed at the observation points where the typhoon center seemed to have passed soon.

According to the results of the Meteorological Agency observation, most of the top ten wind speeds of the strong wind caused by Typhoon 1821 were observed at the observation stations in or near the coastal area. Strong winds close to the design wind speed were also observed in urban areas.

As for the observation results of the ultrasonic anemometer installed on the roof of the high-rise building, the characteristics of the strong wind disturbance by Typhoon 1821 was investigated in detail. The observed turbulent intensities are almost in good agreement to the value specified in Recommendations for Loads on Buildings (2015), but regarding to the scales of turbulence, these are larger than the values of them.

key words: Typhoon 1821, JEBI, POTEKA, Meteorological Agency observation, Ultrasonic Anemometer, Sea level pressure, Wind direction, Wind speed, Extreme weather change, Windborne debris

* 1 東京工芸大学 工学部建築学科, 准教授

Associate Professor, Department of Architecture, Tokyo Polytechnic University

* 2 明星電気株式会社 気象防災事業部 技術部, 主査

Assistant Manager, Engineering Department, Meteorological & Disaster Prevention Systems Division, Meisei Electric Co.,Ltd.

* 3 近畿大学 建築学部建築学科, 教授

Professor, Department of Architecture, Kinki University

* 4 高知大学 教育研究部, 教授

Professor, Research and Education Faculty, Kochi University

* 5 東京工芸大学 工学部建築学科, 教授

Professor, Department of Architecture, Tokyo Polytechnic University

2.3 工作物の被害および観測による風速推定

2.3.1 工作物に対する日本版改良藤田スケールの適用

金容徹（東京工芸大学）

(1) 日本版改良藤田スケール¹⁾

日本版改良藤田スケールは日本国内で発生する竜巻等突風の強さをよりの確に把握できるよう最新の風工学の知見を取り入れて策定しており，日本国内における竜巻等突風の強さの評定を行うにあたっての技術的指針である。日本版改良藤田スケールの評定に用いる被害状況を表2.3.1に示す。表2.3.1に示すように被害指標DI と被害度DOD に分けて設定することとした。被害指標DI は，風工学の知見に基づき30 種類の日本の建築物や工作物を選定し，それぞれの被害指標に複数の被害度DODを設定した。

表2.3.1.1 被害指標DIと被害度DOD

番号	DI	DOD 数	番号	DI	DOD 数
1	木造の住宅又は店舗	8	16	鉄道車両 (通常走行時/運転規制時)	2/2
2	鉄骨系プレハブ住宅又は店舗	7	17	電柱	2
3	鉄筋コンクリート造の集合住宅	4	18	地上広告板	2
4	仮設建築物	3	19	道路交通標識	2
5	大規模な庇・独立上家の屋根	5	20	カーポート	3
6	鉄骨造倉庫	5	21	塀	5
7	木造の非住家建築物	5	22	木製・樹脂製・アルミ製フェンス、メッシュフェンス	1
8	園芸施設	4	23	道路の防風・防雪フェンス	1
9	木造の畜産施設	5	24	ネット (野球場・ゴルフ場等)	2
10	物置	2	25	広葉樹 (通常/腐朽あり)	3/2
11	コンテナ	2	26	針葉樹 (通常/腐朽あり)	3/2
12	自動販売機	1	27	墓石 (悼石)	1
13	軽自動車	3	28	路盤	3
14	普通自動車 (コンパクトカー/ワンボックス)	3/3	29	仮設足場 (壁つなぎ材)	1
15	大型自動車	3	30	ガントリークレーン	2

表2.3.1.2 日本版改良藤田スケールの階級と評定風速との関係

階級	評定風速 (m/s, 3 秒平均)
JEF0	25-38
JEF1	39-52
JEF2	53-66
JEF3	67-80
JEF4	81-94
JEF5	95 以上

各DI・DODは風洞実験やシミュレーションを用いた研究成果や突風による建築物の被害に関する研究成果等を活用し対応する風速分布を設定したものであり，日本版改良藤田スケールを用いた竜巻等突風の強さの評定は一般的に以下

の手順で行う。

- ① 被害それぞれについて被害指標DI 及び被害度DOD を決定する。
- ② ①で決定したDI・DOD に対応する風速を求める。
- ③ ②で得られた風速のうち、最大値を評定風速とする。
- ④ 評定風速を用いて表2.3.1.2より日本版改良藤田スケールの階級を求める。

(2) 工作物の被害による風速推定

以下では被害を受けた代表的な工作物により風速推定を行う。【】内の数字は、表 2.3.1.1 の DI 番号を示す。

【18】地上広告板

地上広告板の場合、地上に設置された幅3mで高さが2m程度の2本の支柱で支持された広告板を対象としており、被害度DODと風速の関係は以下に示す。広告板が倒壊した被害例を以下に示しており、風速の代表値は55m/sである。

表 2.3.1.3 地上広告板の DOD と DI

番号	DOD	風速 (m/s)		
		代表値	下限値	上限値
1	広告板柱の傾斜や変形	45	35	55
2	広告板の倒壊	55	45	70



(a) 倒壊例 1 (大阪府貝塚市, 日本建築総合試験所前田氏撮影) (b) 倒壊例 2 (大阪府泉佐野市, 高知大学野田教授撮影)

図 2.3.1.1 広告板の被害例

【21】コンクリートブロック塀

コンクリートブロック塀の被害度DODと風速の関係を以下に示す。鉄筋がなく一部損壊または大部分倒壊とみなし風速の代表値は30m/sとする。土塀の被害もあったが、日本版改良藤田スケールの対象外のため風速判定はできない。

表 2.3.1.4 コンクリートブロック塀の DOD と DI

番号	DOD	風速 (m/s)		
		代表値	下限値	上限値
1	鉄筋なし, 一部損壊または大部分倒壊	30	25	35
2	鉄筋あり, 控壁なしまたは控壁のない側への転倒, 一部損壊	40	35	45
3	鉄筋あり, 控壁なしまたは控壁のない側への転倒, 大部分が倒壊	50	45	60
4	鉄筋あり, 控壁あり, 一部損壊	50	40	60
5	鉄筋あり, 控壁あり, 大部分損壊	60	55	75



図 2.3.1.2 コンクリートブロック塀の被害例 (兵庫県川西市, 大阪市立大学ガヴァンスキ准教授撮影)

【30】ガントリークレーン

ガントリークレーンは休止時または作業時のガントリークレーン被害度 DOD と風速の関係を以下に示す。被害のあったガントリークレーンは仮置き状態のようで、該当する DOD がいないため風速判定はできない。

表 2.3.1.5 ガントリークレーンの DOD と DI

番号	DOD	風速 (m/s)		
		代表値	下限値	上限値
1	作業時に停止している状態での逸走, 倒壊	35	30	40
2	休止時に所定の停止処置をしている状態での逸走, 倒壊	60	50	70

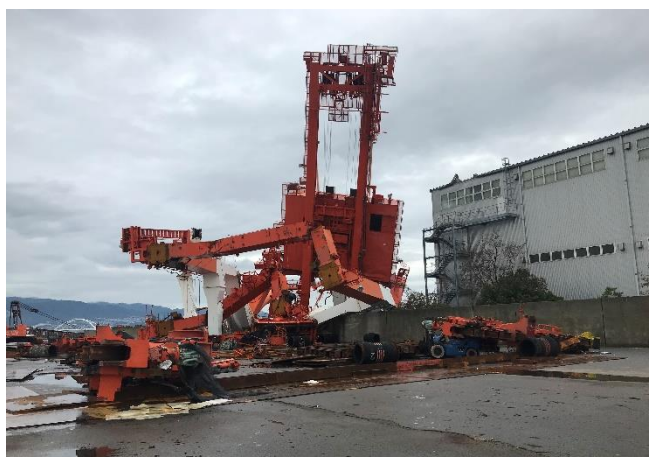


図 2.3.1.3 ガントリークレーンのクレーンの被害 (兵庫県西宮市, 高知大学野田教授撮影)

【12】自動販売機

地面に固定されていない自動販売機が横転した時の被害度 DOD と風速の関係を以下に示す。風速の代表値は 35m/s である。

表 2.3.1.6 自動販売機の DOD と DI

番号	DOD	風速 (m/s)		
		代表値	下限値	上限値
1	横転	35	30	40



図 2.3.1.4 自動販売機の横転 (大阪府泉佐野市, 奥地建産高森氏撮影)

【19】 道路交通標識

道路交通標識における被害度 DOD と風速の関係を以下に示す。道路交通標識の被害事例は見当たらなかったものの、歩道のライトの被害がみられた。支柱の傾斜とみなすと風速の代表値は 45m/s となる。

表 2.3.1.7 道路交通標識の DOD と DI

番号	DOD	風速 (m/s)		
		代表値	下限値	上限値
1	支柱の傾斜	45	35	55
2	支柱の倒壊	50	40	60



図 2.3.1.5 ライト支柱の傾斜 (大阪市なんば駅周辺, 高知大学佐々教授撮影)

【22】木製・樹脂製・アルミ製フェンス、メッシュフェンス

橋梁の欄干や学校の門扉の被害がみられた。該当する被害指標はないが、敷地境界等に設置される高さ 2m 以下程度の木製・樹脂製・アルミ製フェンス、メッシュフェンスの被害指標で判定をする。木製・樹脂製・アルミ製フェンス、メッシュフェンスにおける被害度 DOD と風速の関係を以下に示す。表によると風速の代表値は 35m/s となる。

表 2.3.1.8 木製・樹脂製・アルミ製フェンス、メッシュフェンス の DOD と DI

番号	DOD	風速 (m/s)		
		代表値	下限値	上限値
1	一部損壊または倒壊	35	30	45



図 2.3.1.6 渡月橋の欄干の倒壊 (京都大学八木教授撮影) (左) と学校門扉の転倒 (大阪府貝塚市, 日本建築総合試験所 前田氏撮影) (右)

参考文献

- 1) 国土交通省気象庁ホームページ, 日本版改良藤田スケールに関するガイドライン,
https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/kentoukai/kaigi/2015/1221_kentoukai/guideline.pdf

謝辞

被害情報をご提供いただきました, 摂南大学 池内淳子先生, 大阪市立大学 ガヴァンスキ江梨先生, 高知大学 佐々浩司先生, 奥地建産 高森浩治様, 日本建築総合試験所 前田豊様, 高知大学 野田稔先生, 京都大学 八木知己先生に謝意を表します。

2.3.2 電柱に対する日本版改良藤田スケールの適用

高知大学 野田 稔

(1) はじめに

台風 21 号によって、大阪南部を中心に電力柱の倒壊、折損被害は 1400 件を超え、約 220 万件に及ぶ大規模停電が発生し、完全に復旧するまでには多大な時間を要した。2.2.11 節で報告されている通り、台風 21 号による配電設備への被害の内、電柱の被害は 1,342 本に及んでいるものの、折損・倒壊被害を受けた 881 本は、倒木や飛来物等の影響、あるいは流出を含む地盤の影響によるものであり、純粋な風圧による折損事例はなかった。しかし、残りの 462 本の中には、ひび割れ被害が含まれており、日本版改良藤田スケールの電柱 DI を使った風速推定は可能であると考えられる。

(2) 電柱 DI の内容

電柱 DI は、日本国内で使用されているコンクリート柱の規格に対して、標準的な架線状態として、1 段あたり 3 本の電力線が 1 段または 2 段張られた上に、高さ 5.5m の高さに電話線が取り付けられている状態に対応する風荷重を作用させた場合に、電柱基部においてひび割れまたは折損が起こる風速を求めたものである。表 2.3.2.1 に電柱 DI における DOD と推定風速を示す。本表の中で AA および CC というパラメータは、コンクリート柱に埋められているタグに AA-BB-CC と示されている電柱の規格であり、AA は電柱の全長(m)、BB は末口径(cm)、CC はひび割れ試験荷重 (kN または kgf) である。

表 2.3.2.1 日本版改良藤田スケールの電柱 DI における DOD と推定風速

番号	DOD		風速 (m/s)		
			代表値	下限値	上限値
1	基部でひび割れ	AA×CC≤100 の場合	40	40	50
		100<AA×CC≤200 の場合	50	40	55
		200<AA×CC の場合	65	55	80
2	基部で折損	AA×CC≤100 の場合	55	45	70
		100<AA×CC≤200 の場合	70	60	80
		200<AA×CC の場合	95	80	110

なお、架線数が少ない場合(柱頭付近に 1 段のみ)の場合には、上限値を採用し、架線数が多い場合(3 段以上)やトランス等の付属物が設置されているような場合には、下限値を採用する。

(3) 台風 21 号による電柱被害例

台風 21 号による電柱被害の多くは、図 2.3.2.1 に示されているような同じ架線を支えている複数の電柱が同じ方向に倒れているようなものが多い。このような場合には、どれか 1 本が風圧や飛来物の衝突によって倒れると連鎖的に倒れてしまうため、基本的に風速推定には適用できない。しかし、図 2.3.2.2 のように 1 本の電柱が基部で破損し、特に飛来物などの存在も確認できない被害例も存在した。ここでは、この電柱被害に電柱 DI を適用することを考えた。

(4) 電柱 DI による風速推定

図 2.3.2.2 に示した電柱は、写真 2.3.2.3 に示すように AA-BB-CC が 15-19-500 である。この場合の CC は kgf 単位であるため、kN 単位に直すと CC=5.1 であり、AA×CC=76.5 となる。前述の通り、関西電力の報告では風圧による折損はないため、基部のひび割れである DOD=1 となる。その中で AA×CC≤100 の適用となるため、代表値は 40m/s となる。ただし、なお書きに記されているように、この電柱は 3 本の電力線が 1 段であるため、上限値の採用となるため、この被害に対する推定風速は 50m/s となる。ところで、関西電力の資料によると大阪南部の配電柱の全長の内訳は、15m 以下が全体の 89%を占めている³⁾。また、全長 15m 以下の電柱のほとんどは AA×CC ≤100 に属するため、そのほかの被害に対しても推定風速は下限値から上限値の範囲に対応すると考えられるこ

とから、電柱 DI から推定される台風 21 号の瞬間風速は 40～50m/s と考えることができる。

(5) まとめ

電柱 DI は、非常に多岐にわたる荷重条件を、前述の電力線 2 段＋通信線という条件で代表させて推定風速を導いたものだが、台風 21 号の通過の際に観測された最大瞬間風速も 40～50m/s が多く、推定風速と観測値で同程度の範囲で一致を見た。

参考文献

- 1) 気象庁、日本版改良藤田スケールに関するガイドライン、
http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/kentoukai/kaigi/2015/1221_kentoukai/guideline.pdf, 平成 27 年 12 月
- 2) 産経新聞社、「【台風 21 号】電柱倒壊、道ふさぐ 民家直撃も 大阪・泉南」,
<https://www.sankei.com/photo/story/news/180905/sty1809050012-n1.html>, 2018 年 9 月 5 日.
- 3) 関西電力、総務省光引き込み線に係る電柱添架手続きの簡素化等に関する検討会(第 3 回)資料,
http://www.soumu.go.jp/main_sosiki/joho_tsusin/policyreports/chousa/hikari_dentyu_kanso/pdf/050620_2_6.pdf, 2019 年 3 月 25 日閲覧



図 2.3.2.1 複数の電柱が倒壊した被害例²⁾
(大阪府泉南市新家 産経ニュース 2018/9/5 15:55)



図 2.3.2.2 1 本の電柱のみが基部で破損した例
(大阪府泉南市田尻町 2018/9/7 著者撮影)



図 2.3.2.3 図 2.3.2.2 の電柱のタグ

2.3.3 台風 21 号による飛散物の分析

松井正宏（東京工芸大学）

(1) 飛散物の解析の概要

台風や竜巻等の被害状況は、被害発生地点付近においてスマートフォンやドライブレコーダを始めとする電子情報機器で静止画や動画として記録されることが多くなってきた。そして、それらの情報がインターネット(ウェブサイト(Web)やソーシャルネットワーキング・サービス(SNS)) やマスメディアを介して、公開・共有されるようになってきた。特に、被害が発生する瞬間の映像、動画等は、被害メカニズムを明らかにするうえでも大変貴重な資料となる。ここでは、台風 21 号により発生した強風被害のうち、飛散物が発生した瞬間の貴重な動画を収集し、その映像から飛散物速度などを評価する方法を検討し、被害発生当時の状況を明らかにする。

(2) 動画解析に際しての問題点

スマートフォンなどによる撮影動画から、撮影時刻のわずかに異なる複数枚の画像比較から、被写体の速度を検出する。速度評価手法は、粒子画像流速測定 (PIV) とほぼ同様な考えに基づいており、計算に際しても、PIV ソフトウェアを準用する。このような飛散物に対して画像解析を適用する試みは過去に Fujita 他、野田他、佐々等⁹⁾にみられる。

スマートフォン等による動画は、カメラが固定されておらず、移動しながら撮影されることも多いため、PIV 等で暗黙に仮定されている撮影枠（フレーム）は固定されているという前提が崩れる場合も多い。また、被写体の運動も撮影面のみとも限らない。また、動画のフレームレートも、画像変換されるうちに変化してしまう等の問題もある。

(3) 動画解析方法

画面各点での位置ベクトルを $\vec{r} = (x, y)$ とし、PIV 解析により得られた速度ベクトルを $\vec{v}(x, y)$ とする。速度ベクトルは、飛散物の速度 $\vec{v}_d$ だけでなく、撮影者による撮影枠の移動、距離の変化等の影響が含まれる。この撮影枠の移動等による影響をここでは背景成分と呼ぶことにする。背景成分 $\vec{v}_b$ は並進 $\vec{v}_t$ と回転、拡大によるものの重ね合わせと考えられる。以上をベクトルの重ね合わせで表すと次式のようなになる。

$$\vec{v}(x, y) = \vec{v}_d + \vec{v}_b = \vec{v}_d + \vec{v}_t + \vec{v}_r + \vec{v}_e = \vec{v}_d + \vec{v}_t + \vec{\omega}_r \times (\vec{r} - \vec{r}_r) + \dot{e}(\vec{r} - \vec{r}_e) \quad (3.3.1)$$

ここで、 $\vec{\omega}_r$ は位置 $\vec{r}_r$ を中心とする角速度、 $\dot{e}$ は位置 $\vec{r}_e$ を中心とする単位時間当たりの拡大率を表す。角速度は画面に垂直なベクトルとして、回転中心に対する相対位置ベクトルとの外積がその位置での回転速度成分となる。

背景成分 $\vec{v}_b$ を決定するには、静止している背景を複数選択し、各位置の複数の PIV による速度と位置から、並進ベクトル、回転角速度、回転中心、単位時間当たり拡大率と拡大中心を逆解析する。回転中心には任意性がある。

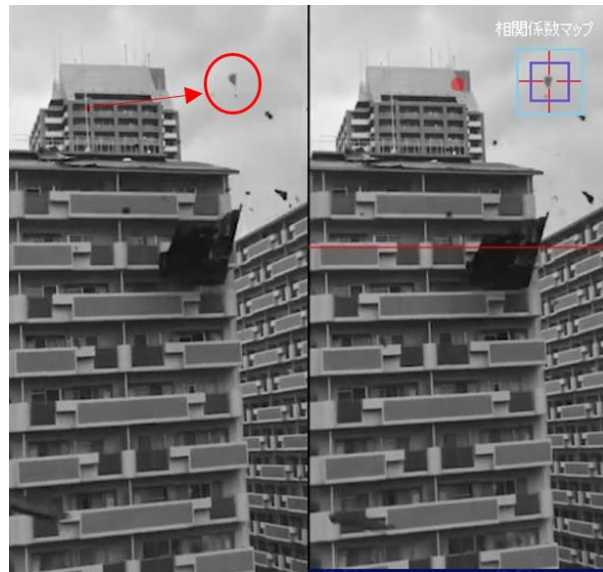
以上の分析を元に、飛散物の速度を、

$$\vec{v}_d = \vec{v}(x, y) - \vec{v}_b \quad (3.3.2)$$

として求める。

【飛散物解析例 1】

図 2.3.3.1 に集合住宅屋根被害の状況を示す。被害発生位置は大阪府大阪市、被害発生日時：9 月 4 日 14 時頃である。屋根ふき材の一部が画面左から右へと飛散している状況である。動画は ANN NEWS²⁾で報道されたものである。検査領域、探索領域を同図(b)に示す大きさに設定した。検査領域は飛散物全体を含み他の物体が入らないサイズとし、探索領域は、解析対象が含まれる複数の画像から移動範囲が含まれるサイズとした。



(a) 飛散物 (b) 検査窓, 探索窓の設定

図 2.3.3.1 集合住宅屋根ふき材の被害による飛散物
(ANN NEWS による)

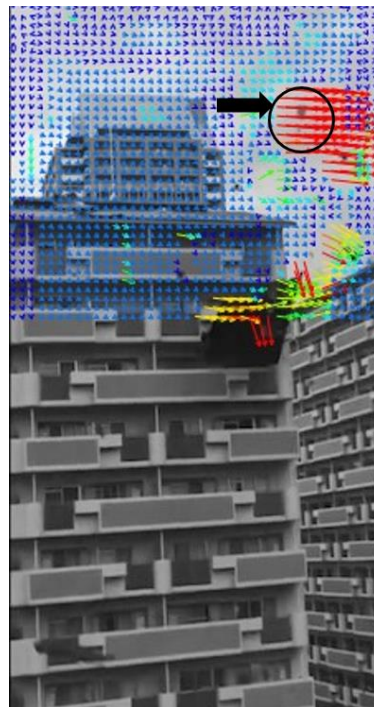


図 2.3.3.2 PIV で得られた速度ベクトル

【計算設定】計測点間隔：5pixel, 検査領域：30 pixel×30 pixel,
探索領域：上下左右+10 pixel,
対象物位置を→○で表す。

図 2.3.3.2 に PIV 解析により得られた速度ベクトルを示す。解析に際してサブピクセル解析を有効にしている。対象とした飛散物付近で同定されたベクトルは全て、ほぼ同じ飛散物の移動速度を示している。これに、飛散物発生一移動面と一致する画面上の複数の点から背景速度場(u, v)を同定し、 $u=3.6\text{m/s}$, $v=-3.5\text{m/s}$ を得た。対象物位置の同定速度 $u=20.0\text{m/s}$, $v=-1.9\text{m/s}$ から、

$$u=20.0-3.6=16.4\text{m/s},$$

$$v=-1.9-(-3.5)=5.4\text{m/s}$$

速度の絶対値は,

$$|\vec{v}| = \sqrt{16.4^2 + 5.4^2} = 17.3\text{m/s}$$

と評価された。

【飛散物解析例 2】

図 2.3.3.3 に低層建築物屋根ふき材の被害を示す。被害概要は次の通りである。

被害地点：大阪府大阪市西淀川区千舟 2 丁目付近

被害発生日時：9 月 4 日 14 時頃

映像元：NHK News7³⁾

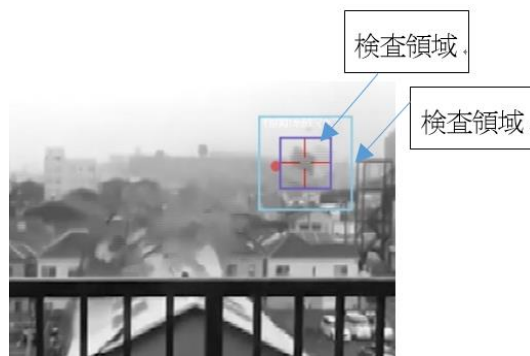


図 2.3.3.3 低層建築物屋根ふき材の被害による飛散物
(NHK News7 による)

解析例 1 と同様な解析を行い，飛散物速度 49.7m/s を得た。

【飛散物解析例 3】

図 2.3.3.4 に中層店舗建築物の屋上広告の被害例を示す。被害概要は以下のとおりである。

被害発生位置：大阪府大阪市東淀川区

被害発生日時：9 月 4 日

映像元：twitter 投稿⁴⁾,

<https://twitter.com/i/status/1036851621827731457>

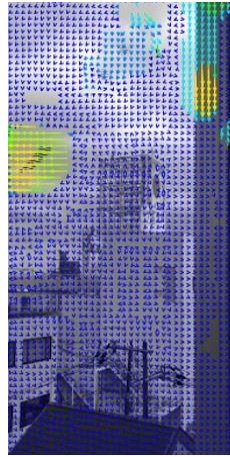


図 2.3.3.4 中層店舗建築物の屋上広告の被害と飛散物
(twitter 投稿を元にした PIV 解析結果)

飛散物となった広告板は剛性の低い膜に近いものである。飛散速度解析結果、40.1m/s を得た。

参考文献

- 1) Fujita, T.T., Pearson, A.D., Forbes, G.S., Umenhofer, T.A., Pearl, E.W. and Tecson, J.J. (1976) Photogrammetric analyses of tomatoes. Symposium on Tornadoes: Assessment of Knowledge and Implications for Man, Texas Tech University, Lubbock, TX, 22—24 June, pp. 43-88
野田稔, 長尾文明, 2007 年 8 月に徳島市で発生した竜巻における風速推定, 第 20 回 風工学シンポジウム論文集, pp.29-34, 2008, DOI <https://doi.org/10.14887/kazekosymp.20.0.29.0>
宮城 弘守, 佐々 浩司: ビデオ画像を用いた竜巻内の飛散物の飛散状況の解析, 平成 24 年 5 月 6 日に北関東で発生した竜巻の発生メカニズムと被害実態の総合調査, 科研費課題番号 24900001, 研究成果報告書, pp. 217-228, 2013
- 2) ANNnewsCH: <https://www.youtube.com/user/ANNnewsCH>
- 3) NHK News7: <http://www4.nhk.or.jp/news7/>
- 4) Twitter: <https://twitter.com/i/status/1036851621827731457>

謝辞

参考文献について, 気象研究所 鈴木修様, 高知大学 野田稔先生にご助言いただきました。情報収集と画像分析に際し, 東京工芸大学 劉美智氏, 佐野平氏, 瀬田貴章氏の協力を得ました。ここに記して謝意を表します。

2.3.4 POTEKA による風速観測記録

岩下久人（明星電気）

(1) POTEKA 観測結果概要

台風 21 号の中心が大阪湾を通過した 2018 年 9 月 4 日当時、その大阪湾周辺地域においては、およそ計 40 台（大阪南部：10 台、兵庫阪神地域：11 台、兵庫東播地域：2 台、兵庫淡路島：6 台、奈良盆地：4 台、和歌山北部：5 台）の POTEKA による気象観測が行われていた。大阪湾周辺地域の POTEKA 設置状況を図 2.3.4.1 に示す。丸印が POTEKA で、矢印は気象庁が事後解析後に発表した台風 21 号の進路である。

図 2.3.4.2 に POTEKA 観測装置の外観図を示すが、POTEKA の風向／風速計に関しては、その性能上、設置面から 1.5m の高さで観測を行っており、10m の高さでの観測を標準とする気象庁アメダスの風速値に対して、POTEKA はおよそ 1/3～1/2 程度の値に抑えられる特性を持つ。

また、当該約 40 台の POTEKA の一部には、ビジネスモデルではないが故に、長期間メンテナンスを実施していない旧型が含まれている。この旧型 POTEKA が激しい風雨環境に曝された場合、稀に極端に高い風速値が記録されることがあり、本稿においては、これが認められたものに対しては実事象でないと判断し報告は行わない。

2018 年 9 月 4 日、大阪湾周辺地域の POTEKA は、全般的に台風外縁の雨雲が掛かり始めた 9 時前後から、990hPa 程度であった海面気圧が徐々に下がり始め、平均風速も 2～3m/s であったものが徐々に上がり始めた。

台風中心が大阪湾を通過した 13～14 時頃に、海面気圧、風速共にそのピークを迎えた。海面気圧は全般的に 965hPa 程度まで低下した。風速に関しては、台風の進行方向右側の危険半円に入った大阪南部地域の一部の POTEKA では、平均風速で 15m/s 前後、最大瞬間風速で 30m/s 前後のピーク値が観測された。

その後、台風中心が北北東に離れるにつれて、海面気圧、風速共に徐々に落ち着き始め、台風外縁の雨雲が大阪湾周辺から去った 18 時頃には、海面気圧は 990hPa 程度、平均風速は 2～3m/s となり静穏を取り戻した。



図 2.3.4.1 大阪湾周辺 POTEKA 設置状況

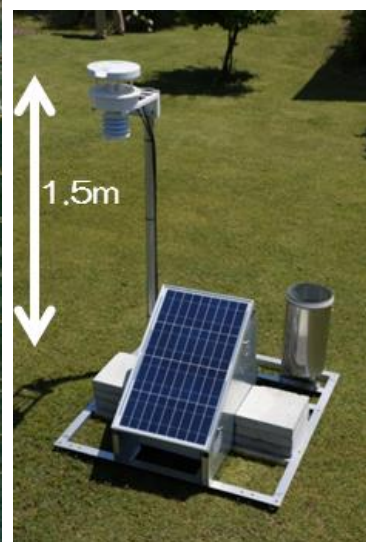


図 2.3.4.2 POTEKA 観測装置外観図

(2) 海面気圧の観測結果

図 2.3.4.3 は 13:00 時点における POTEKA の海面気圧観測値及び気象庁のレーダエコーである。①～⑤の 5 観測点は、ほぼ台風の進路上に沿って存在しており、台風中心がすぐ近くを通過したと推測される。これら 5 地点の海面気圧変化の推移を図 2.3.4.4 に示す。

台風の北北東への進行に伴い、台風中心の通過により生じたと思われる海面気圧のピーク値（極小値）が、その進路に沿って順番に出現した。最も低下した④の観測点での海面気圧の最小値は 954.1hPa であった。これは、当時、気象庁の台風情報により発表されていた 955hPa の台風中心気圧とほぼ一致している。

更に、③の観測点では台風中心の通過前にも、一時的に海面気圧の極端な低下が観測された。図 2.3.4.5 に示すように、

③の近傍の⑥の観測点においても、同様に海面気圧の極端な低下が観測されており、台風進行の前面に存在した非常に局所的な気象変化を捉えていた可能性も考えられる。

また、①と⑤との距離は約 60 km であり、海面気圧のピーク値（極小値）の出現時刻の差は 1 時間 7 分（①：12:51、⑤13:58）であったことから、台風はおおよそ時速 54 km/h で進行していたと推測できる。これは、当時、気象庁の台風情報により発表されていた約 55 km/h の進行速度とほぼ一致している。

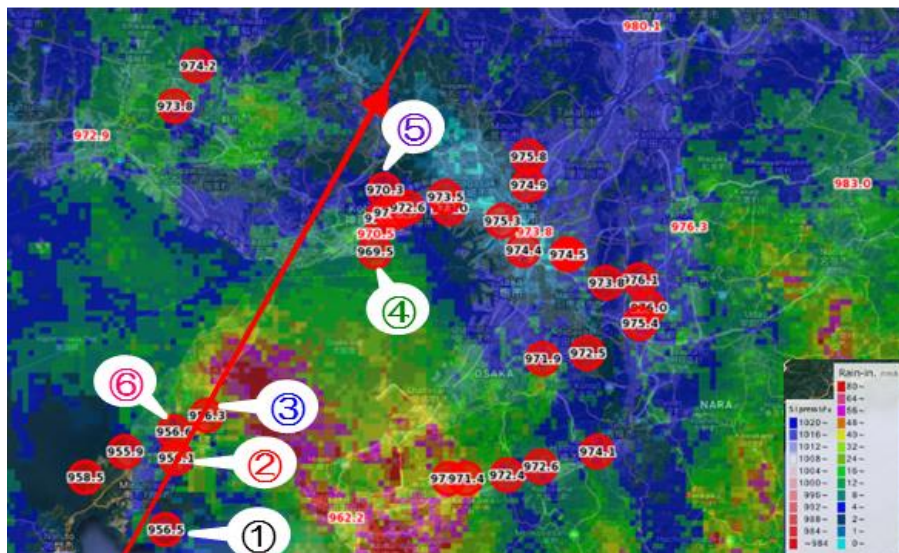


図 2.3.4.3 13:00 の海面気圧観測値

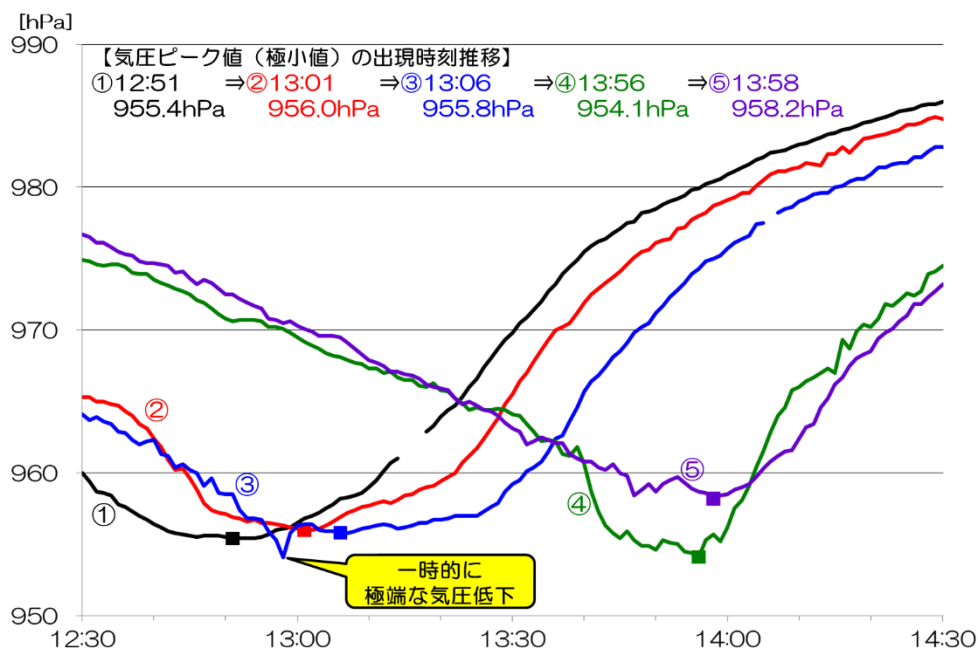


図 2.3.4.4 観測点①～⑤での海面気圧推移

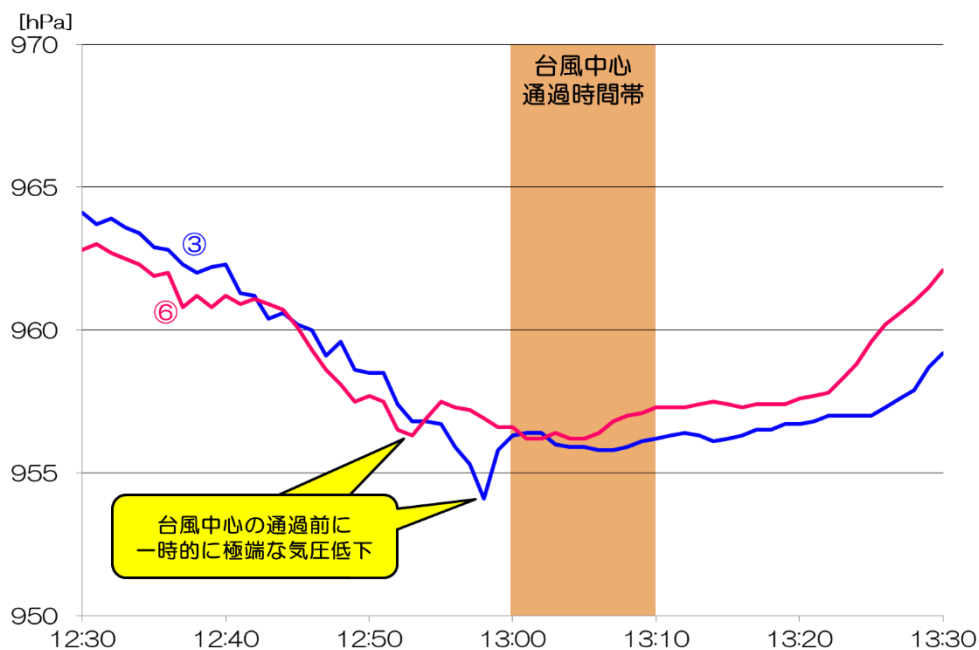


図 2.3.4.5 観測点③、⑥での海面気圧推移の詳細

(3) 風向の観測結果

図 2.3.4.6 は 14:00 時点における POTEKA の平均風速／風向観測値及び気象庁のレーダエコーである。⑤、⑦の 2 観測点は台風の進路の東側に、⑧、⑨の 2 観測点は台風の進路の西側に入ったと推測される。平均風向／風速変化の推移について、⑤、⑦を図 2.3.4.7 に、⑧、⑨を図 2.3.4.8 に示す。

台風中心の接近前は、4 観測点共に東風成分が主体であったが、台風中心の接近に伴い、⑤、⑦ではその時刻に前後はあるものの南風に転向し、一方で⑧、⑨ではほぼ同時刻に北風に転向した。その後、台風中心が北北東に去ると 4 観測点共に西風成分が主体に変化した。

この 4 観測点の地上気象観測データは、台風中心周囲の反時計回りの地上風の流れを捉えていたと考えられるため、気象庁が発表した進路の通りで、台風中心は⑤と⑧との間を通過したことは間違いないと思われる。また、⑤は六甲山の観測点であるが、その南側地域は神戸市の中心市街地域であり、台風 21 号は西側から神戸を危険半円側に巻き込み襲ったと言える。



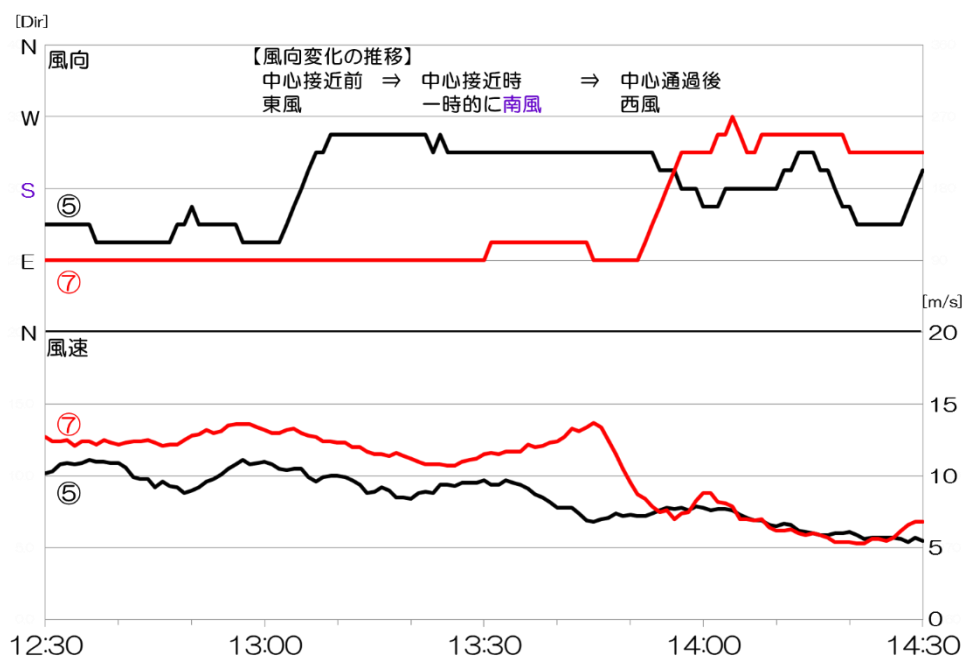


図 2.3.4.7 観測点⑤, ⑦での平均風向／風速の推移

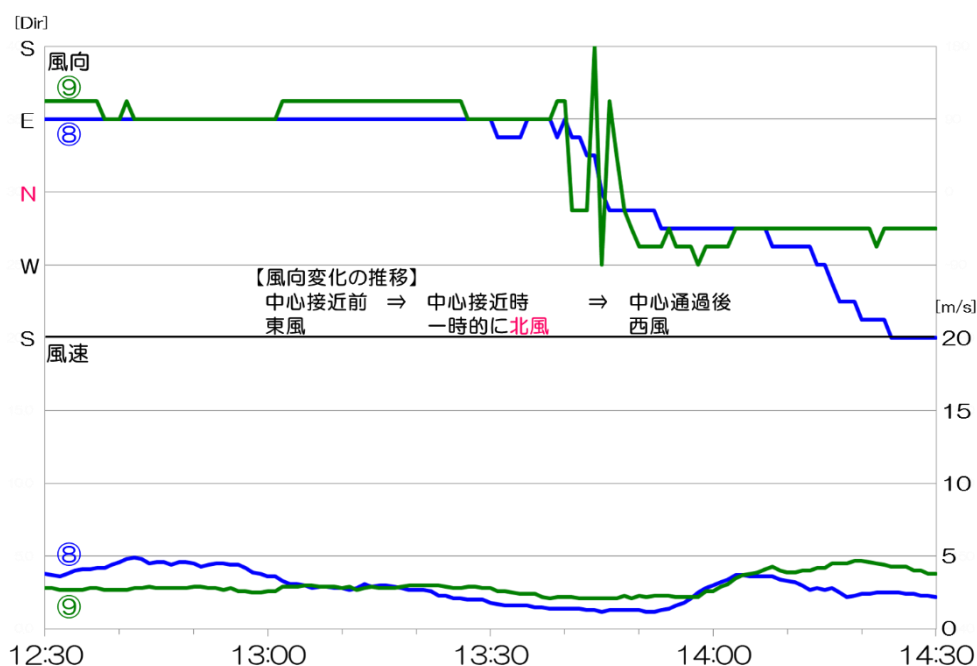


図 2.3.4.8 観測点⑧, ⑨での平均風向／風速の推移

(4) 風速の観測結果

図 2.3.4.9 は 13:30 時点における POTEKA の平均風速／風向観測値及び気象庁のレーダエコーである。また、表 2.3.4.1 には台風進路右側の危険半円側に入った 4 観測点⑩, ⑪, ⑫, ⑬の平均風速と最大瞬間風速の最大値を示す。

同じ危険半円内においても、⑩, ⑪の観測点のような台風中心により近かった阪神地域や大阪の中心市街地域よりも、⑫, ⑬の観測点のような台風中心よりやや離れた大阪南部の郊外地域の方が、平均風速も最大瞬間風速もやや高い傾向が見られた。⑪, ⑬の平均風速及び最大瞬間風速の変化の推移を図 2.3.4.10 に示す。

大都市部の市街地域では、高層の建造物等が多く存在するため、その障害物による摩擦等で風速の観測値が抑えられた可能性がある。また、平均風速のピーク値で 15m/s 級(⑫：14.6m/s が最大)、最大瞬間風速のピーク値で 30m/s 級(⑬：

32.8m/s が最大)が観測された⑫, ⑬の大阪南部の郊外地域では、仮に気象庁アメダスが標準としている高さ 10m での観測が行われていれば、平均で 30m/s や最大風速で 60m/s 以上の風速が吹いていたことも否定はできない。

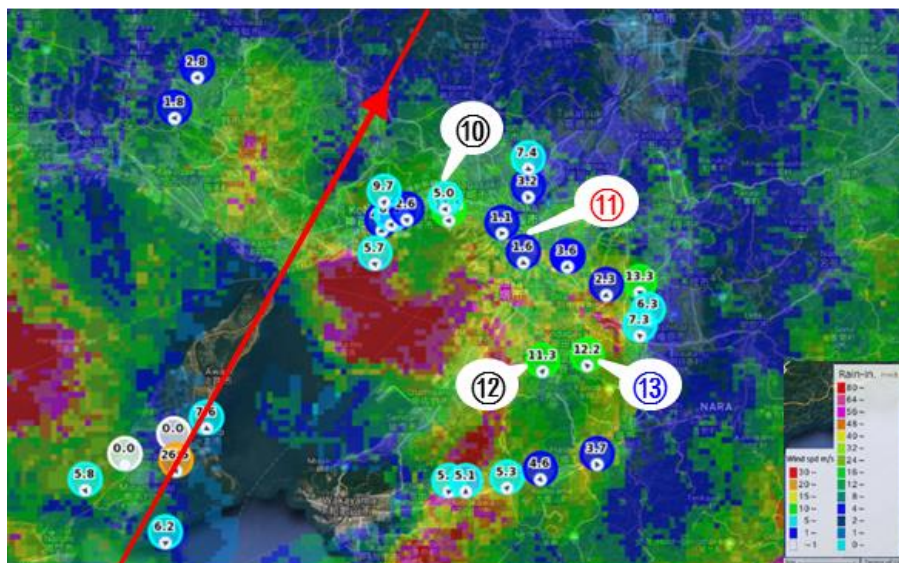


図 2.3.4.9 13:30 の平均風速／風向観測値

表 2.3.4.1 平均／最大瞬間風速の最大値

観測点	平均風速 最大値	最大瞬間風速 最大値
⑩	7.8 m/s	24.0 m/s
⑪	5.5 m/s	16.5 m/s
⑫	14.6 m/s	26.9 m/s
⑬	13.2 m/s	32.8 m/s

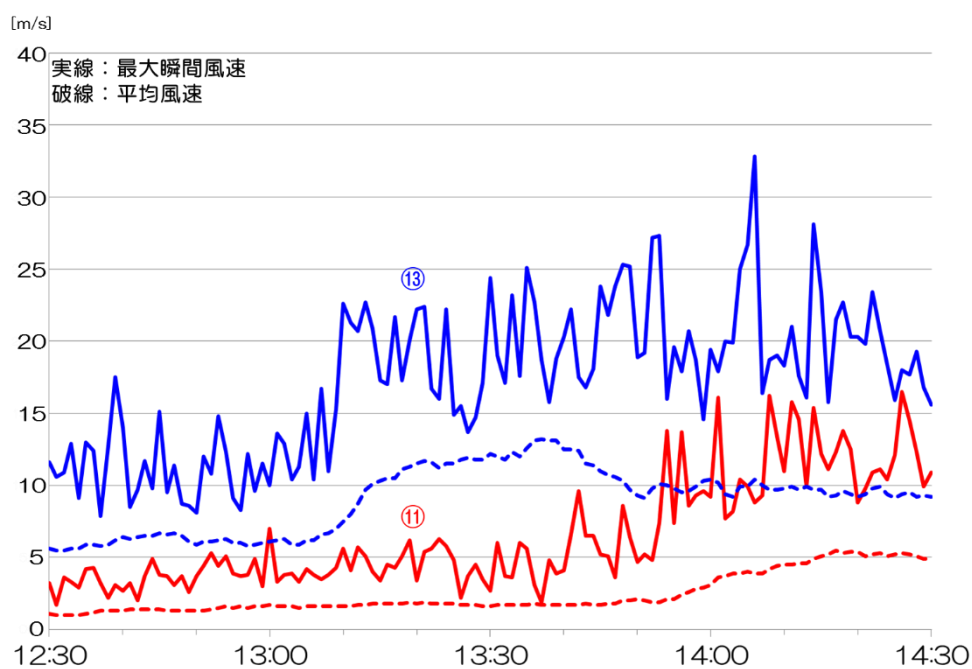


図 2.3.4.10 観測点⑪, ⑬での平均／最大瞬間風速の推移

2.3.5 気象庁観測局で観測された風向風速データ

野田博（近畿大学）

以下では、気象庁観測局²⁾で観測された特徴的な風向風速の観測データについて考察する。

(1) 最大風速上位 10 位ならびに大阪市街地における最大風速

表 2.3.5.1 に台風 21 号通過時に気象庁観測局で観測された最大風速の上位 10 位⁵⁾と大阪市内で観測された観測概要を示す。表 2.3.5.1 には各観測高さにおける日本建築学会編「建築物荷重指針・同解説(2015)」³⁾に準じて算出した風速の 100 年再現期待値と建設省告示第 1454 号⁴⁾に従い算出した設計用風速も示す。また、表 2.3.5.1 には気象庁観測局ではないが、独自に観測したデータ「近畿大学」も付記する。「近畿大学」の観測概要は後述する。

表中の「関空島」「和歌山」「友ヶ島」「日和佐」「蒲生田」「熊取」「八尾」は、これまでの観測された最大風速を上回った⁵⁾。台風 21 号による強風で最も高い風速が観測されたのは高知県の「室戸岬」で最大風速 48.2m/s であった。次いで、大阪府の「関空島」で最大風速 46.5m/s であった。「友ヶ島」「和歌山」でも最大風速が 40m/s を超えている。最も高い最大瞬間風速を観測したのは大阪府の「関空島」で瞬間風速 58.1m/s であり、「関空島」のほかに「室戸岬」「友ヶ島」「和歌山」「日和佐」でも最大瞬間風速 50m/s を超えている。これらのことより、台風 21 号通過時には広範囲に非常に強い風が吹いたことが認められる。

表 2.3.5.1 には筆者らが判断した観測局周辺の地表面粗度区分を示すが、台風 21 号通過時の上位 10 位までの強風が観測された観測局の地表面粗度区分は、「金沢」を除き、全て海岸周辺地域である地表面粗度区分Ⅰであった。海岸地域あるいはその付近ではかなり強い風が吹いたことがわかる。

表 2.3.5.1 気象庁観測局で観測された最大風速上位 10 位と大阪地方市街地で観測された最大風速

No	観測所	場所	観測高さ [m]	最大風速 発生時分	最大風速 [m/s]	風向	瞬間最大 風速 [m/s]	100年再 現期待値 [m/s]	地表面粗 度区分 ³⁾	基本風速 ³⁾ [m/s]	$E_r V_0^{(4)}$ [m/s]	地表面粗 度区分 ⁴⁾	$V_0^{(4)}$ [m/s]
1	室戸岬	高知県室戸市室戸岬町	21.8	11:53	48.2	西	55.3	58.6	I	44	44.8	II	40
2	関空島	大阪府泉南郡田尻町	10.0	13:47	46.5	南南西	58.1	49.3	I	40	33.9	II	34
3	友ヶ島	和歌山県和歌山市加太苦ヶ沖島	9.4	13:18	42.9	南	51.8	51.4	I	42	33.6	II	34
4	和歌山	和歌山県和歌山市男野芝丁	42.1	13:26	39.7	南南西	57.4	56.9	I	40	42.1	II	34
5	神戸空港	兵庫県神戸市中央区神戸空港	10.2	13:59	34.6	南南西	45.3	44.4	I	36	34.0	II	34
5	日和佐	徳島県海部郡美波町日和佐浦	15.4	11:12	34.6	東南東	50.3	54.0	I	42	40.4	II	38
7	蒲生田	徳島県阿南市椿町蒲生田	10.0	11:22	34.5	東南東	48.8	51.7	I	42	35.9	II	36
8	南紀白浜	和歌山県西牟婁郡白浜町	9.7	11:41	33.4	南東	45.8	49.1	I	40	33.8	II	34
9	セントレア	愛知県常滑市セントレア	10.0	14:22	31.5	南南東	46.3	41.9	I	34	33.9	II	34
10	岡津	新潟県佐渡市岡津	18.8	20:29	28.3	南西	39.9	49.9	I	38	35.1	II	32
10	金沢	石川県金沢市西念	48.8	18:06	28.8	南西	44.3	43.0	II	34	38.0	II	30
	大阪	大阪府大阪市東成区東中本	24.0	14:11	27.3	南南西	47.4	26.3	IV	36	32.2	III	34
	熊取	大阪府泉南郡熊取町朝代西	10.0	13:47	26.8	南	51.2	28.6	III	36	27.0	III	34
	堺	大阪府堺市堺区百舌鳥夕雲町	10.1	14:00	20.3	南南西	43.2	28.6	III	36	27.0	III	34
	八尾	八尾市空港	10.0	14:10	16.8	南	35.5	28.6	III	36	25.4	III	32
*1	近畿大学	大阪府東大阪市小若江	35	14:10	32.0	南	51.4	36.7	III	36	32.6	III	32
	*1:独自に観測した値												

観測された最大風速を 100 年再現期待値と比較するとほとんどの観測局で 100 年再現期待値以下であることがわかる。一方、上位 10 位ではないが、「大阪」で観測された最大風速は、100 年再現期待値に近い値となった。観測値は他と比較して高い値ではないが高密度市街地に吹く風としては非常に強い風であったことがわかる。また最も高い最大風速を観測した「関空島」と低層市街地域である「熊取」の最大風速も、100 年再現期待値と同じであった。

次に観測された最大風速を建設省告示 1454 号による設計風速($E_r V_0$)と比較する。観測された最大風速は上位 10 位のうち 5 観測局で設計風速($E_r V_0$)を超えている。更に一般市街地である「熊取」でも設計風速($E_r V_0$)を超えており、気象庁観測局ではないが「近畿大学」における最大風速も建設省告示による設計風速($E_r V_0$)に近い値であった。上位 10 位の観測局の周辺地域は海岸地域あるいはその付近であり、地表面粗度区分としてはⅠと判断できる。建設省告示では、地表面粗度区分Ⅰは特定行政庁が指定することになっており、現段階では地表面粗度区分Ⅰに指定された区域はない。今回非常に強い風速が観測された地域に仮に地表面粗度区分Ⅰという指定がなされていれば、建設省告示の設計風速($E_r V_0$)が観測された最大風速を上回る。このことは、海岸地域あるいはその周辺では、周辺状況に従って地表面粗度区分Ⅰを

指定する必要がある、そうすることにより、将来台風 21 号のような非常に強い台風が襲来しても、十分耐えられる建物が建設されると言える。

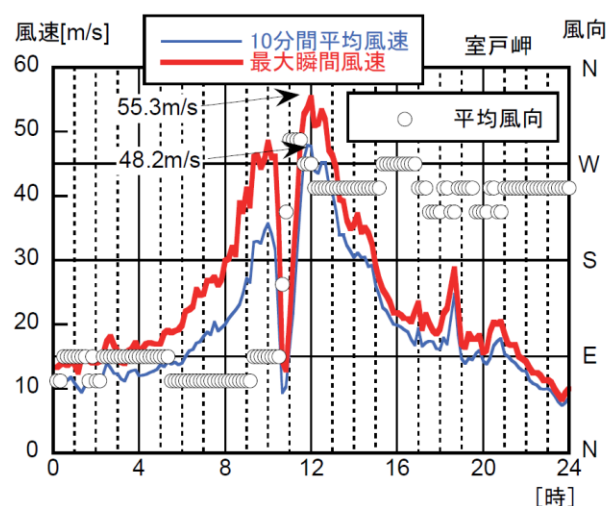
「熊取」「近畿大学」と市街地の観測局で建設省告示の設計風速と同程度の最大風速が観測されている。地表面粗度区分Ⅰの地域で観測された上位 10 位の最大風速の値と比べると低い風速ではあるが、市街地風としてはかなりの高風速であったことがわかる。これらの観測結果が示すように、台風 21 号による強風は場所によっては設計風速に近い値あるいはそれを超える風速に達していたものと思われる。

(2) 風向風速の時系列

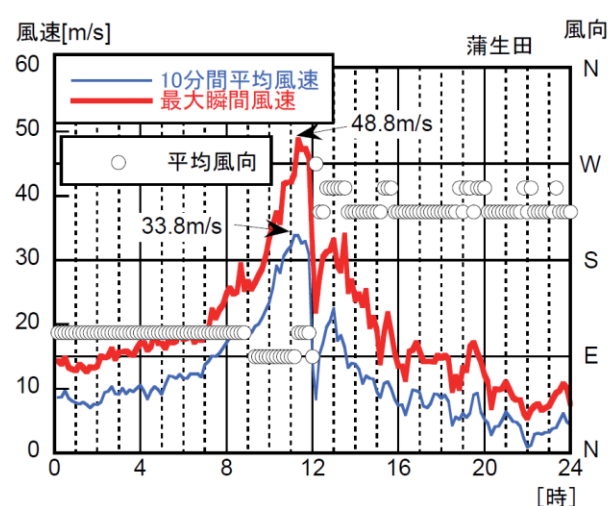
台風中心が大阪地方に接近した 9 月 4 日における気象庁観測局で観測された 10 分間平均風速、瞬間最大風速、平均風向の時系列を特徴的な観測局について考察する。

風向風速の時系列を現象別に分類する。まず、台風中心が付近を通過した観測局、台風中心の右側すなわち危険半円側の観測局、台風中心の左側すなわち可航半円側の観測局に分類し、それぞれ観測された風向風速の時系列を考察する。また、この分類とは別に市街地ではあるが高風速を観測した「大阪」「堺」についても考察する。

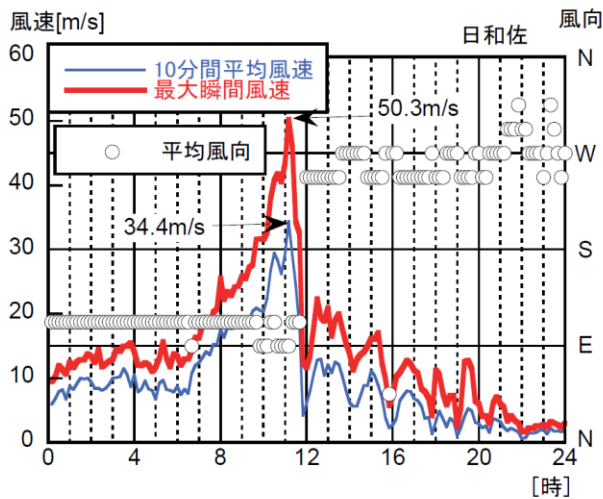
台風中心が観測局付近を通過したと思われる「室戸岬」「日和佐」「蒲生田」「洲本」における 10 分間平均風速、最大瞬間風速、平均風向の時系列を図 2.3.5.1 にそれぞれ示す。台風中心付近を観測した特徴的な性状として、まず風速が急激に上昇し、一旦短時間に強風が弱まり再度強風が発生するといった性状があるが、これら 4 つの観測局の風速の時系列を見るとその性状が捉えられている。「室戸岬」は台風 21 号による強風で最も高い最大風速を観測した地点であるが、「室戸岬」ではその特徴がはっきりと捉えられている。「室戸岬」の 10 分間平均風速を見てみると、10:00 に 35.7m/s に達し、10:40 に風速は 9.3m/s まで弱まる。そして 11:50 に最大風速 47.9m/s に達している。その後徐々に風速は低下していることがわかる。風向は、台風中心が来る前は東あるいは東北東であるが、台風中心付近が通過する際には南寄りの風となり、台風中心が通った後は西南西あるいは西となっている。台風が接近するとき、台風が去って行くとき、いずれも比較的風速が高いため風向もほぼ一定になっている。「室戸岬」では台風中心が通過後に最大風速を観測しているが、「日和佐」、「蒲生田」では台風中心が接近した直後に最大風速を観測している。「洲本」では風速の時系列から台風中心付近が通過したものと思われるが、他の観測局の風速に比べて低い風速になっている。そのため風向も安定していない。



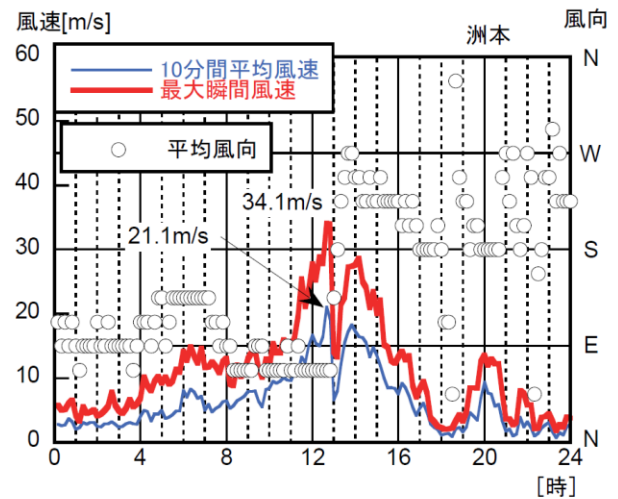
(a) 「室戸岬」 (Murotomisaki)



(c) 「蒲生田」 (Gamota)



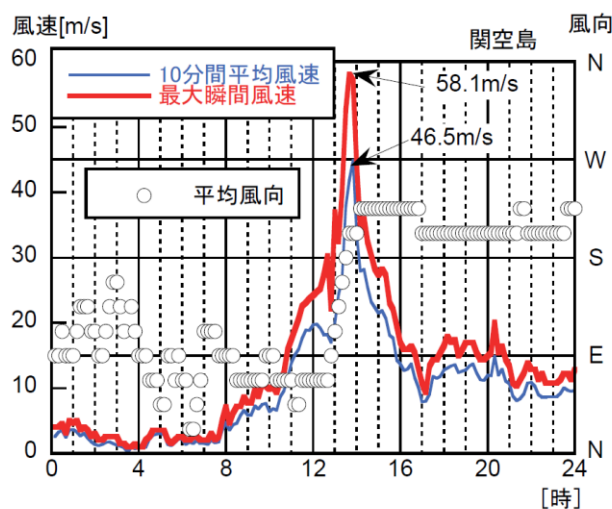
(b) 「日和佐」 (Hiwasa)



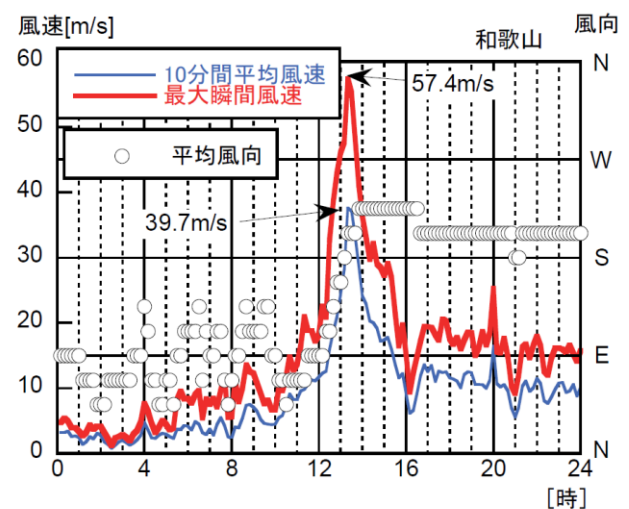
(d) 「洲本」 (Sumoto)

図 2.3.5.1 台風中心が付近を通過した観測局の風向風速の時系列(2018 年 9 月 4 日)

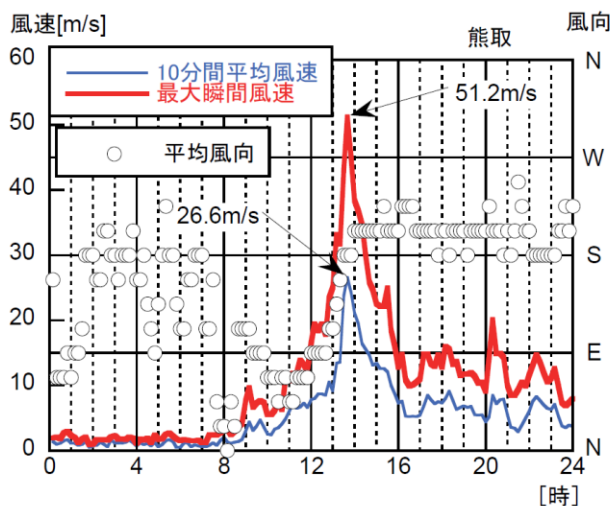
次に危険半径側の観測局の例として、「関空島」「熊取」「和歌山」「友ヶ島」の風向風速の時系列を図 2.3.5.2 に示す。ここで、「友ヶ島」では 18:10 から 19:00 の間は欠測となっている。危険半円側の観測局では、強風は一つの鋭いピーク状に発生していたことが分かる。危険半円側の観測局で最も高風速を観測したのは「関空島」であり最大風速は 46.5m/s であり、最大瞬間風速は 58.1m/s である。「和歌山」「友ヶ島」においても概ね同程度の風速が吹いていた。風向は、台風が接近するときは概ね東となっており、台風が最も接近し最大風速を観測したときは、風向は南に近づき、そして台風が遠ざかる際には南南西あるいは南西の風向となっている。これらの風向は台風の危険半円側の性状であり、この風向変化からこれら 4 観測局は台風の危険半円側であることが認められる。これら 4 つの観測局の風速変化をみると、台風が接近する際は風速が低く、風向もばらついている。台風が最接近し遠ざかる際には、台風が接近するときよりも風速が高く、その状態がしばらく続いていることが分かる。



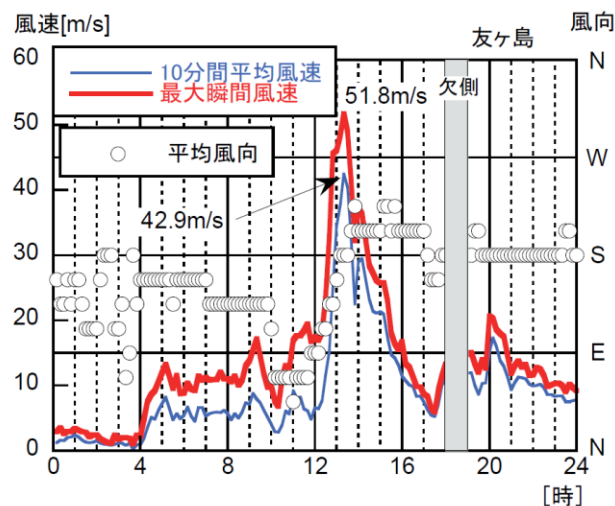
(a) 「関空島」 (Kankuujima)



(c) 「和歌山」 (Wakayama)



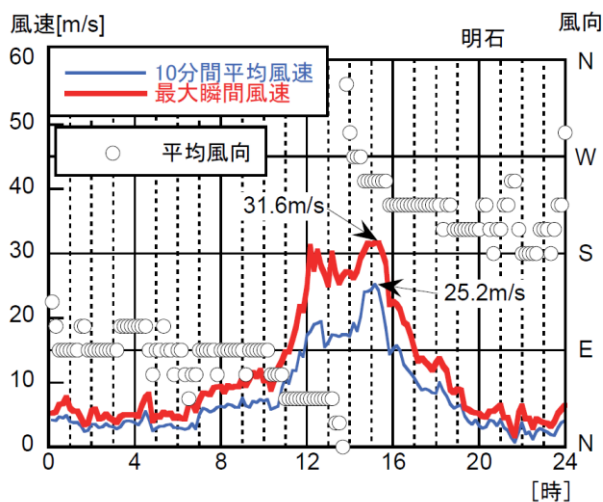
(b) 「熊取」 (Kumatori)



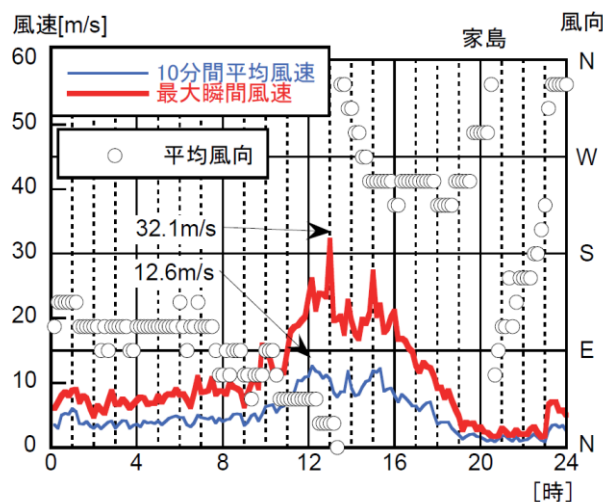
(d) 「友ヶ島」 (Tomogasaki)

図 2.3.5.2 台風中心の危険半円側が通過した観測局の風向風速の時系列(2018 年 9 月 4 日)

可航半円側の観測局として、「姫路」「家島」の風向風速の時系列を図 2.3.5.3 に示す。風速は、台風中心が付近を通過した観測局や危険半円側の観測局のそれに比べて比較的低い。風速変化も危険半円側の観測局に見られたように鋭いピーク形状となる変化ではなく、台風接近とともに比較的緩やかに風速が増加している。風向変化は、台風が接近するときは危険半円側の観測局と同様に東よりの風向であり、台風中心が遠ざかるときは西南西あるいは南南西となっている。ただし、台風中心が最接近し風速が高くなるとき、風向は、南ではなく北となっている。この風向変化の性状は可航半円側の性状そのものであり、今回の観測結果はそれをよく捉えている。



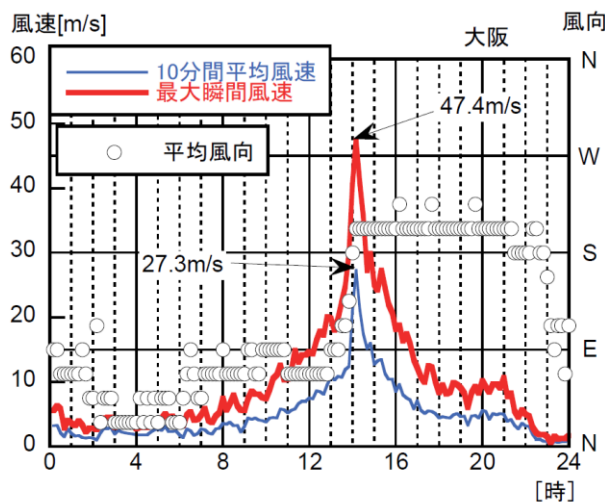
(a) 「明石」 (Akashi)



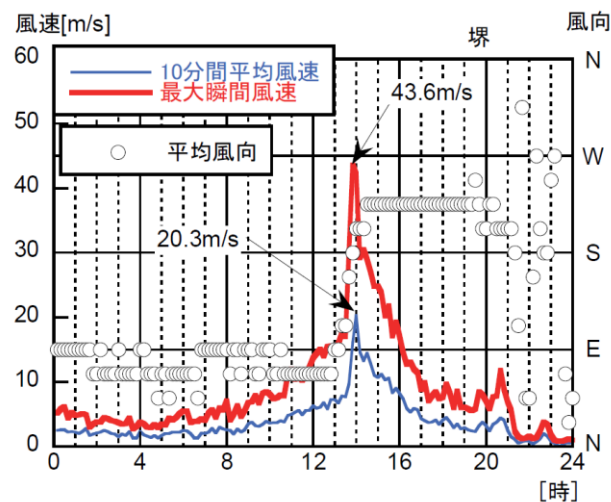
(b) 「家島」 (Ieshima)

図 2.3.5.3 台風中心の可航半円側が通過した観測局の風向風速の時系列(2018 年 9 月 4 日)

市街地の観測局で観測された風向風速の事例として、「大阪」「堺」の風向風速の時系列を図 2.3.5.4 に示す。「大阪」周辺の地表面粗度区分は IV, 「堺」の地表面粗度区分は III と判断した。これら 2 観測局は台風 21 号通過時には危険半円側に位置していた。そのため、風速変化は一つの鋭いピーク形状を有し、風向変化は東側から南を通して南西あるいは南南西に変化している。「大阪」の最大風速 27.3 m/s は、表 2.3.5.1 に示す通りこの地域(大阪市, 地表面粗度区分 IV)の 100 年再現期待値 26.3 m/s を超えている。



(a) 「大阪」 (Osaka)



(b) 「堺」 (Sakai)

図 2.3.5.4 大阪府市街地の観測局の風向風速の時系列(2018 年 9 月 4 日)

(3) 市街地における乱れの性状と観測概要

ここでは、一般市街地において超音波風向風速計で観測された結果について述べる。超音波風向風速計による測定のため、POTEKA や気象庁観測局で観測されたデータよりも時間刻み 0.25 秒の風速変動について詳細に測定・保存されているので、ここでは主に台風 21 号通過時の乱れの性状について検討する。

表 2.3.5.2 観測値点の概要と超音波風速計緒元

所在地	東大阪市若江西新町 5 丁目			
観測高さ	35m			
周辺状況	地表面粗度区分Ⅲ			
風速計緒元				
測定範囲	起動風速	応答時間	分解能	精度
0~65m/s	0.01m/s	250ms	0.01m/s	±0.2m/s
風向計緒元				
測定範囲	起動風速	応答時間	分解能	精度
0~360°	0.1m/s	250ms	1°	±2°

観測概要と超音波風速計の緒元を表 2.3.5.2 に示す。観測地点は近畿大学附属高校本校舎(地上 11 階，所在地：東大阪市若江西新家)のペントハウス(PH)に設置されており，観測高さは約 35m である。周辺は高層建物が散在しかつ低層建物が密集している。地表面粗度区分はⅢと判断できる。観測建物の近傍には特に高い建物はなく，地域を代表する風向風速の観測としては条件の良い場所と言える。本校舎を図 2.3.5.5，本校舎屋上 PH と超音波風向風速計設置状況を図 2.3.5.6 にそれぞれ示す。PH は本校舎平面の西側にあり，風向風速計はその PH の西側壁面に沿って設置されている。従って，東側の風向の場合には，本校舎の影響が及んでいると思われる。観測に用いた超音波風速計はヴァイサラ製 WMT700 である。

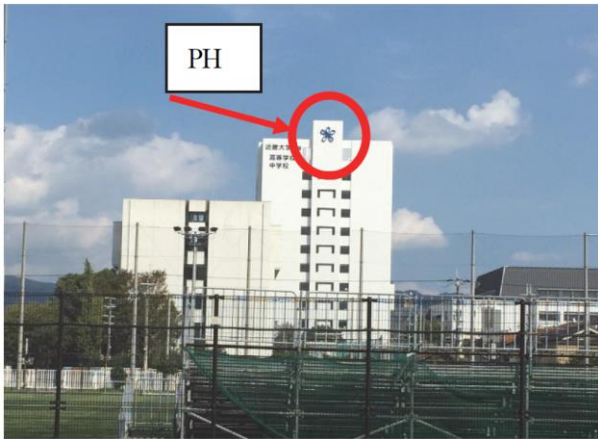


図 2.3.5.5 観測機器を設置した建物(西側壁面)



図 2.3.5.6 超音波風速計設置状況

9月4日における10分間平均風速、最大瞬間風速ならびに平均風向の時系列を図2.3.5.7に示す。最大瞬間風速は、時間刻み0.25秒で観測された時系列データに気象庁観測データの瞬間風速評価時間と同等となる様に3秒移動平均を施している。台風通過時には観測地点は危険半円側に位置しており、風向風速の時系列の性状も前章で述べた危険半円側の観測局のそれと同様な性状をしている。すなわち、台風中心が観測地点に最接近したときに一つの鋭いピーク形状的に風速が高くなっている。風向変化も台風中心が接近するときは東あるいは北東であり、台風中心が最接近したときには風向南となり、台風中心が遠ざかるときには南西になっている。14:10に最大風速32m/s、最大瞬間風速は51.4m/sを記録している。最大風速32m/sはこの地域の建設省告示1454号による設計風速と概ね一致している。

乱れの強さ、乱れのスケールならびにガストファクターの時系列を図2.3.5.8～図2.3.5.10にそれぞれ示す。乱れの強さ、乱れのスケール、ならびにガストファクターは下式により求めた。

$$I_u = \frac{\sigma_u}{\bar{U}} \times 100 \quad [\%] \quad (3.5.1)$$

$$L_u = \frac{\bar{U} \cdot S_u(0)}{2\sigma_u^2} \quad (3.5.2)$$

$$G.F. = \frac{u_{\max}}{\bar{U}} \quad (3.5.3)$$

ここで、 I_u :乱れの強さ、 σ_u :風速変動の標準偏差、 $\bar{U}$:10分間平均風速、 L_u :乱れのスケール、 $S_u(0)$:風速変動のパワースペクトル密度の周波数0Hzの成分、 $u_{\max}$:風速変動の最大値。

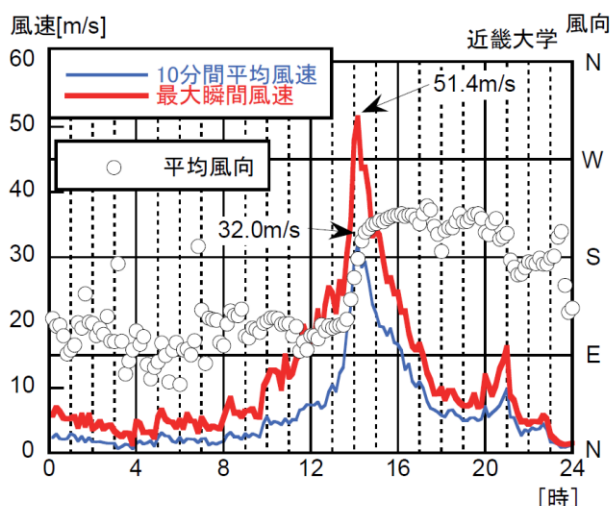


図 2.3.5.7 風向風速の時系列(2018 年 9 月 4 日)

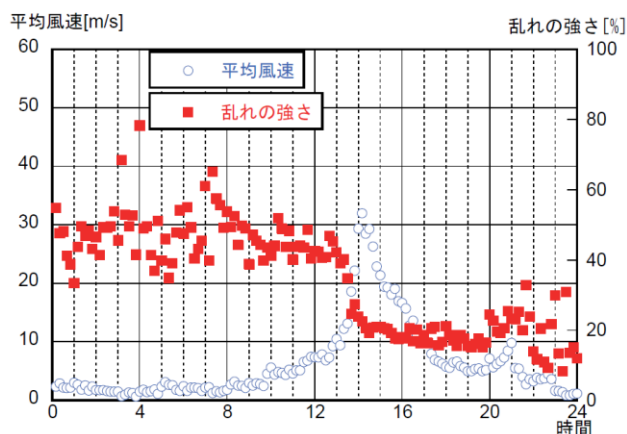


図 2.3.5.8 乱れの強さの時系列(2018 年 9 月 4 日)

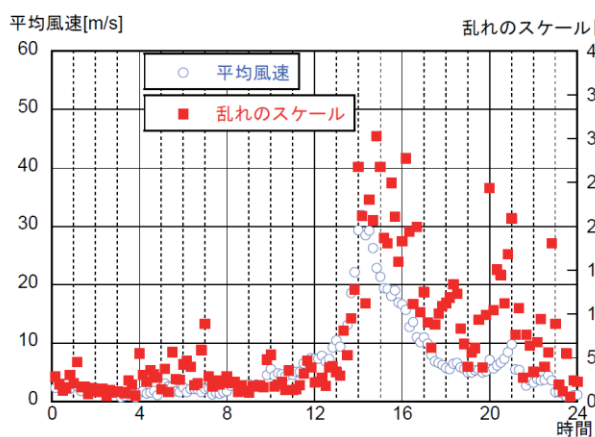


図 2.3.5.9 乱れのスケールの時系列(2018 年 9 月 4 日)

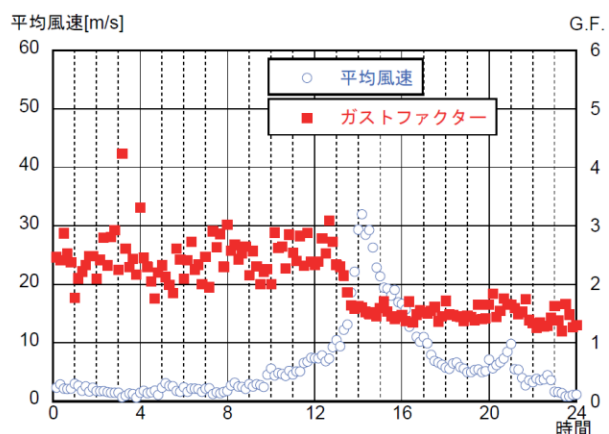


図 2.3.5.10 ガストファクターの時系列(2018 年 9 月 4 日)

風速の標準偏差や風速変動の最大値を算出する際には 3 秒移動平均を施した時刻歴データを用いた。

これら 3 つの乱れに関する量は、台風接近時と、最大風速を観測した台風最接近時ならびに台風が遠ざかるときで異なっている。観測概要で述べたとおり風向東の場合には本校舎の影響を受けることが考えられるため、これら値の変化は台風の位置による性状変化に起因するだけではないことに十分配慮する必要がある。それを踏まえて、以下に乱れの性状について述べる。乱れの強さは台風接近時には概ね 40% となっているが、台風が最接近しさらに遠ざかるときには概ね 20% になっている。ガストファクターは台風接近時には 2 から 3 の間の値であるが、最接近時以降は概ね 1.5 程度の値になっている。乱れのスケールは台風中心が最接近し高風速の場合には概ね 200 から 300m の値となり、台風中心が遠ざかり風速が弱ると 50 から 250m とかなり幅を持った値となっている。建築物荷重指針・同解説(2015)では、地表粗度区分 III、高さ 35m では、乱れの強さは 19%、乱れのスケールは 108m となる。また、既往の観測結果をまとめた文献⁹⁾によれば、地表粗度区分 III、地上約 30m で乱れの強さは 20% 前後、乱れのスケールは 100m 前後である。これらの値と観測値を比較すると、乱れのスケールは建築物荷重指針・同解説(2015)で示された値や既往の観測記録と概ね等しいが、乱れのスケールは既往の観測結果に比べ大きめの値となっている。乱れのスケールが既往の観測結果に比べて大きい値となる原因が台風による強風にものであるかは、今後詳細な検討を要すると思われる。

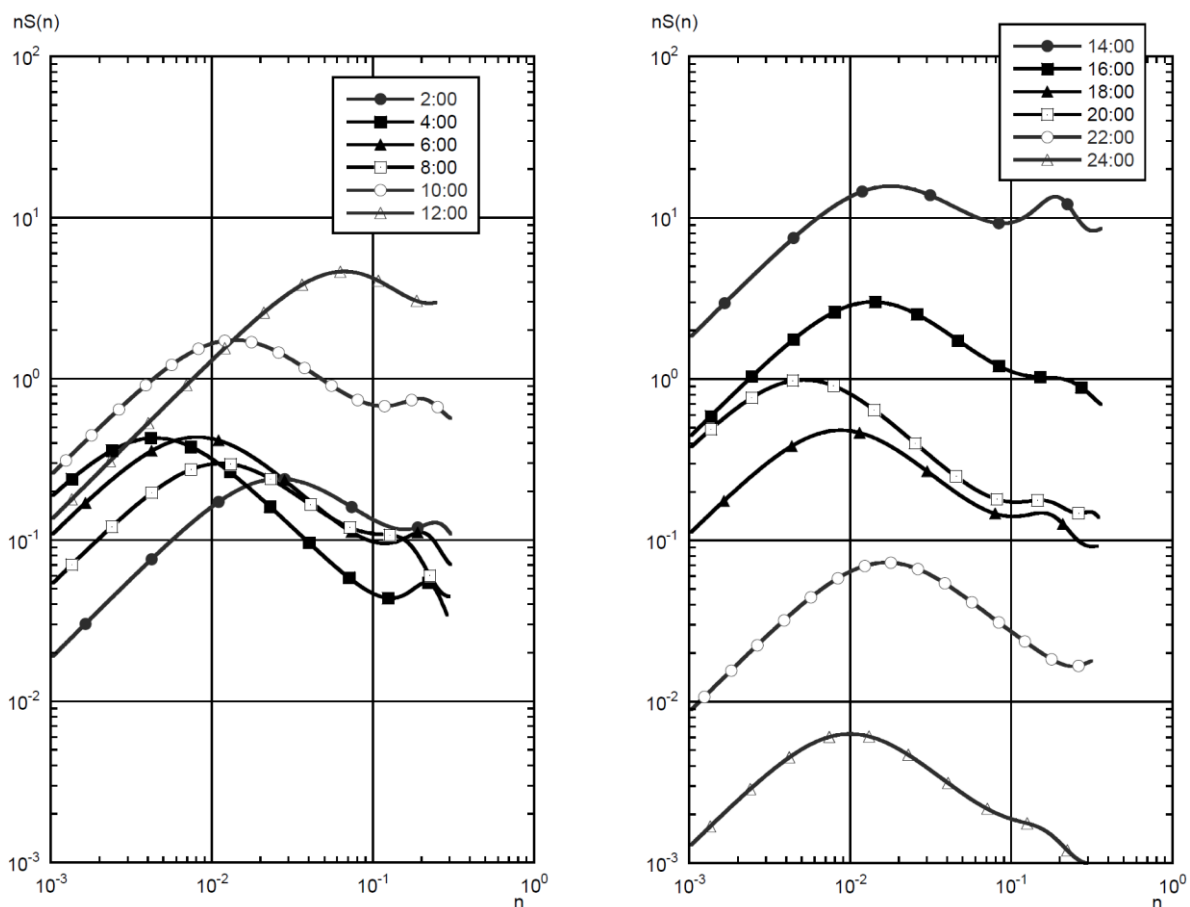


図 2.3.5.11 風速変動のパワースペクトル密度

9月4日における2時間毎の風速変動のパワースペクトル密度を図2.3.5.11に示す。乱れの強さの変化(縦軸変化)と乱れのスケールの変化(横軸変化)も同時に考察できるように、縦軸のパワースペクトル密度と横軸の周波数は無次元化していない。風速変動のパワースペクトル密度の形状は、いずれの時間においても概ねカルマン型パワースペクトルの形状をしている。台風中心がまだ接近していない午前8:00まではスペクトルピークは比較的程振動数側にあり、台風中心が最接近している14:00以降ではスペクトルピークは高周波数側に移動しており、乱れのスケールが大きくなる性状を反映している。台風中心が接近し風向が東側で観測建物の影響を受けている場合(2:00~12:00)においても、パワースペクトル形状がカルマン型を維持していることは興味深い。

参考文献

- 1) 岩下, 呉, 現在の気象, 将来の気象 -高精度・高分解能計測を目指して- 地上の天気を測る, 計測と制御, 第56巻, 第5号, 325-330, 2017.5
- 2) 国土交通省気象庁ホームページ 過去の気象データ検索 (<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>)
- 3) 日本建築学会編, 建築物荷重指針・同解説 (2015)
- 4) 建設省告示第1454号
- 5) 気象庁, 台風第21号による暴風・高潮等 平成30年(2018年)9月3日~9月5日, 災害をもたらした気象事例, 平成30年9月11日
- 6) 佐々木, 大竹他, 風の観測結果に基づく乱れの強さと乱れのスケールの鉛直分布, 日本建築学会技術報告集, 第21巻, 第48号, 477-480, 2016.6

2.3.5 まとめ

被害のあった工作物を対象に日本版改良藤田スケールを用いて風速推定を行った。日本版改良藤田スケールに当てはまる代表風速の最大値は地上広告板による 55m/s で、最小値はコンクリートブロック塀による 30m/s であり、推定された風速の平均値は 40m/s である。

台風 21 号により数多くの飛散物が発生しており、その一部はスマートフォン等による動画として記録されている。強風時には、まず安全を確保することが重要であり、被害発生状況の記録などは記録者がまず自身の安全を確保した上で実施することが強く望まれる。また、このような画像の分析結果が、被害実態や被害メカニズム、被害リスクなどの解明につながるものと考えられる。

大阪府を中心とする動画の分析から、飛散物の速度を解析した結果、飛散物速度が 17~50m/s の範囲で評価された。飛散物速度は、飛散開始後周囲の風速に漸近することを考えれば、当時の風速は局所的には 50m/s のレベルに達していたことが推察される。

台風 21 号が大阪地方を通過する際に 3 通りの気象観測機器、①小型気象計(POTEKA)で構成された超高密度地上気象観システム、②気象庁観測データ、③高層建物屋上に設置された超音波風速計、で観測された気象データについて検討した。

大阪湾周辺で気象観測を行っていた POTEKA では、大阪湾を通過し神戸市付近に上陸した台風 21 号による激しい気象変化を詳らかに捉えていた。海面気圧は、台風接近に伴い大きく低下し台風中心がすぐ近くを通過したと思われる観測点の 1 つでは 954.1hPa もの最低気圧が観測された。風向については、台風中心の周囲を取り巻く反時計回りの風が的確に観測されていた。風速は、台風進路右側の危険半円側に入りかつ大都市部に比べ地表の障害物が少ないと思われる大阪南部の郊外地域において、地表から高さ 1.5m での観測にも拘らず平均風速で最大 14.6m/s、最大瞬間風速では最大 32.8m/s を記録した観測点が存在した。

気象庁観測データでは、これまでの気象庁で長期間観測した結果を上回る風速が記録されていた。観測局によっては、設計風速を超える、あるいはそれに近い値が観測された。台風 21 号による強風の最大風速の上位 10 位のほとんどは海岸地域かその付近の観測局で観測されており、改めて海岸付近では強風に注意を要することを認識させられた。また、風速の値は海岸地域の観測局に比べて低いが、大阪地方の市街地においても設計風速に近い強風が観測された。

高層建物屋上に設置された超音波風速計による観測結果から、台風 21 号による強風の乱れの状況について詳細に検討した。観測された乱れの強さは、建築物荷重指針・同解説(2015)で規定された値と概ね等しい。乱れのスケールについては、建築物荷重指針・同解説(2015)の値よりも大きい値となった。風速変動のパワースペクトル密度は、低風速から高風速までカルマン型パワースペクトル形状を維持していた。

第3章 1

沿岸災害の概要 Overview of Coastal Damages

森 信人^{*1} 志村智也^{*2} 安田誠宏^{*3}

Nobuhito MORI, Tomoya SHIMURA, Tomohiro YASUDA

SUMMARY

Typhoon Jebi in 2018 caused severe damage along areas of Osaka Bay, Japan. After the storm, a Japan Society of Civil Engineers (JSCE) coastal survey group surveyed the coastal impacts and recorded watermarks inside Osaka Bay and along the Pacific. The maximum storm surge recorded by a tide gauge was 3.29 m at the Osaka Tide Station, which is a historical high for Osaka Bay. Coastal flooding consisted of both storm surge and wave run-up in almost all locations, with flooding exceeding 5 m and 12 m in elevation from mean sea level in the inner parts of Osaka Bay and along the Pacific coast, respectively. Coastal damage was severe in areas located outside of coastal barriers, such as ports and harbors, while residential areas were mainly well protected and spared due to coastal protection systems. In addition, some inland flooding occurred in the Kobe-Ashiya regions due to storm surge propagating up several small rivers. This survey report summarizes the findings of the post-event survey and analyzes the relation between maximum water level and resulting damage.

3.1.1 はじめに

2018年8月28日に発生した台風21号(Jebi)は、8月30日には915hPaまで発達し、54m/s以上の猛烈な勢力を持つ台風に成長した。台風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、その後淡路島、神戸を通過した(図3.1.1)。本州上陸時に950hPaである台風の上陸は、1993年以来25年ぶりである。台風21号は、上陸時の移動速度も早かったため、近年にない強風、高潮、高波をも

* 1 京都大学防災研究所 教授 mori@oceanwave.jp

Professor, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

* 2 京都大学防災研究所 特定助教

Professor, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

* 3 関西大学都市システム工学科 准教授

Associate Professor, Faculty of Environmental and Urban Engineering, Kansai University.

たらし、近畿を中心として広い範囲に大きな被害をもたらした。特に大阪湾では、大阪と神戸の検潮所で3.29mおよび2.33mの最大水位を記録し（大阪管区气象台）、防潮堤の内外において浸水被害が発生した。

「土木学会海岸工学委員会 2018 年台風 21 号 Jebi による沿岸被害調査団」の調査¹²⁾では、陸上に残された痕跡をもとに、平均海面からの水位が測量されており、痕跡調査による最大水位の分布は図3.1.2のようにまとめられている。調査結果では、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ぐらいの浸水高が記録されている。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ている。場所によっては、想定を上回る水位が記録され、被害の大きな要因となったと思われる。

台風21号による高潮・波浪による災害は、ハザードとしての台風・高潮・波浪の強度および領域的な特性、被害として都市部の浸水被害、河川を遡上した海水による氾濫、堤外地等の港湾施設被害、コンテナや車等の漂流物による被害が顕著であった。沿岸部の被害は、大阪湾奥を中心として、徳島から和歌山まで広範囲でみられた。主な被害は、埋立地等の堤外地に集中しており、ハザードの外力との関係については今後精査する必要がある。

以下では、これらの項目について、災害調査で得られた特徴的な被害についてまとめる。

3.1.2 台風特性について

台風21号は、図3.1.3に示すように発達時こそ異なる経路を示したものの、1934年室戸台風、1961年第2室戸台風と非常によく似た経路で徳島から大阪湾に上陸したという特徴がある。これら3つの台風は発生場所こそ異なるものの、北緯30度から40度にかけての経路は非常によく似ている。特に第2室戸台風と21号台風の中心はいずれも洲本市付近から神戸市垂水区へと通過しており、この時間帯の経路はほぼ一致している。ただし、その進行方向にはやや違いがあり、第2室戸台風の経路を淡路市付近を中心として時計回りに約15度回転させると今回の21号台風とほぼ一致する。ちなみにこれら3つの台風はいずれも9月に日本に上陸した台風である。

中心気圧については、図3.1.4に室戸台風、伊勢湾台風、第2室戸台風および今回の2018年21号台風の緯度毎の比較を示す。ただし室戸台風については室戸岬上陸時の

観測値を参考として示している。図3.1.4に示すように発達時こそ伊勢湾台風とよく似た発達をしたものの、北緯20度以北では過去の3台風と比較すると早い段階で勢力を弱め始めている。北緯33度における各台風の中心気圧を比較すると、室戸台風が911hPa、伊勢湾台風が927hPa、第2室戸台風が924hPa、台風21号が947hPaである。このように歴史的な台風と中心気圧で比較すると、今回の台風21号は既往の大災害をもたらした台風よりやや弱い。しかし、大阪湾を通過した際の中心気圧は947hPaであり、1951年以後は同程度以上の勢力を有した台風は2個しか該当しない。このため、被害想定に近く非常に強いハザードであった。

気象庁のベストトラックデータ（1951年～2018年台風11号まで）を対象に、東経134度、北緯33度（高知県室戸岬付近）を中心とする直径100kmの領域を通過した台風を抽出した結果、29個の台風が得られる。ここから、約2年に1回はこの範囲を通過してきた。しかし、中心気圧でみると、21号台風と同程度の強さを持つ台風が1951年以後にこの範囲を通過した例は、2個しか該当しない（うち1つは第2室戸台風）。台風21号は想定台風に近い、かつ過去に大阪湾に來襲した台風と比べると最大クラスであることがわかる。

最後に台風21号による強風および降雨の特性について、気象庁により公表されている報告に基づき、重要と考えられる点をまとめると以下の通りである。

- 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。
- 大阪府内の関空島では最大風速が46.5 m/s、大阪市中央区では27.3 m/s、和歌山県和歌山市では39.7 m/s、兵庫県の神戸空港では34.6 m/sとなった。風向きはいずれも南南西である。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48.2 m/s、新潟県両津および石川県金沢では南西に28.8 m/sの最大風速を観測している。
- 大阪湾沿岸の降雨量は、兵庫県淡路市や洲本は6時間雨量でそれぞれ139.0 mm、135.5 mm、1時間雨量で85.5 mm、74 mmを記録している。また大阪府能勢町では1時間雨量で69.0 mm、兵庫県神戸市では1時間雨量で60 mmを記録している。

以上の観測結果を踏まえると、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、大阪や兵庫、和歌山の沿岸では強風にとまなう被害が顕著に生じたと推測できる。

3.1.3 都市部の浸水被害

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 2 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。しかしながら、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。

3.1.3.1 埋立地・人工島の浸水被害

(1) 埋立地：南芦屋浜・甲子園浜

住宅地の床上浸水が発生した南芦屋浜について、詳しく述べる。南芦屋浜地区は平成 9 年 1 月に竣工し、住宅地の分譲や各種施設の開設が進められ、現在では 4 つの町に約 2,000 世帯、約 5,200 人が暮らしている。尼崎西宮芦屋港における既往最大潮位は、第 2 室戸台風時の T.P.2.64m (D.L.3.54m) であった。芦屋市・西宮市の防護水準は、設計高潮位 T.P.3.6m、換算沖波波高 $H_0=4.0\text{m}$ 、 $T=7.2\text{s}$ (大阪湾海岸保全基本計画, 2018) であり、南芦屋浜の護岸高は T.P.4.2m (O.P.5.5m) で整備されていたため、兵庫県による高潮浸水予測でも浸水は想定されていなかった。

調査結果によると、潮芦屋ビーチにおいて、図 3.1.5 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思われる。また、芦屋ベ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、図 3.1.6 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、その浸水深は 0.5m 以上であり、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。

(2) 人工島：六甲アイランド

六甲アイランドでは、高潮による浸水が顕著であった。このため、神戸市は 9 月 4 日の 15:00 に六甲アイランド全域の約 8,000 世帯、約 2 万人に避難指示を出し、屋内での垂直避難を呼び掛けた。図 3.1.7 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、図 3.1.8 のように、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ていた。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化し、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ていた。

3.1.3.2 防潮ライン外側の浸水被害

ウォーターフロント開発に伴い、防潮ラインの外側、いわゆる堤外地に商業施設が設けられることがある。今回被害が生じた代表的な例として、神戸ハーバーランド (神戸市中央区東川崎町) とサンシャインワープ神戸 (神戸市東灘区青木) の浸水被害について紹介する。

(1) 神戸ハーバーランド

神戸ハーバーランドは、旧国鉄の湊川貨物駅や川崎製鉄、川崎重工業といった工場の跡地が再開発され、1992 年にオープンしたウォーターフロント施設である。神戸港や明石海峡大橋を周遊する船舶が接岸する高浜岸壁が整備されているため、地盤高は高くない。海沿いにボードウォークも整備され、煉瓦倉庫を再利用したレストラン施設がある。高浜岸壁は高潮で浸水し、図 3.1.9 に示した煉瓦倉庫レストラン街の浸水深は 0.55m であった。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、図 3.1.10 のように浸水が発生した。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。防潮ゲートの海側の浸水深は約 0.7m であった。これまでも海面水位や河川水位が上がって内水の排水が間に合わない状況が幾度か起こっている。

(2) サンシャインワープ神戸

サンシャインワープ神戸は、2000 年に東神戸フェリーセンターの跡地に建てられたウォーターフロントショッピング施設である。フェリー岸壁がそのまま残され、エプロンが広場や駐車場として活用されており、施設の地盤高の嵩上げはされていない。このため、腰から胸の高さまで浸水した中、避難する人がおり、大変危険であった。一方、ショッピング施設の背後の道路と住宅地との間に防

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。

3.1.4 河川の氾濫被害

3.1.2 節で紹介したように、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。加えて、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い。

淀川にかかる淀川大橋では高潮の影響により 21cm 堤防高を超過したが、防潮扉を閉めて都市部への浸水を防止した。六甲山系に属する河川では、津門川が氾濫危険水位を超過し、宮川（兵庫県芦屋市）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。

台風 21 号により発生した高潮の河川遡上状況で顕著だったのは淀川である。最も河口に近い福島観測所では、14:40 に T.P. +3.95 m に達した。淀川大橋左岸での痕跡水位は T.P. +4.60m であった。淀川大橋と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。

兵庫県宮川及び高橋川では、いずれも 14:00 過ぎに河川水位が護岸を溢水して市街地に浸水被害をもたらした。図 3.1.11 に示す宮川では、河口から 1.3 km 上流に至るまで痕跡高が T.P. +3.3m ~ +3.9m であり、河口部が 0.6m ほど高い。西宮における潮位は T.P. +3.24m であり、これらの河川の反乱では高潮の影響を大きく受けていることがわかった。

3.1.5 港湾・船舶の被害

六甲アイランド東側では、浸水深約 2m にも及ぶ高潮と波浪により、甚大な被害が発生した。コンテナターミナルでは、多数のコンテナが漂流したほか、電源設備が浸水したことにより、ガントリークレーン等が使用できなくなった。図 3.1.12 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、高潮で流されたほか、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、浸水深は約 1~1.5m ほどあり、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。

さらに、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ことが、台風 21 号における象徴的な被害の一つであった。大型船舶による被害は、関西国際空港連絡橋への衝突等、大規模な被害の要因として見られた。全体的な被害は湾奥にあり、高潮による流れと強風により大型船舶・コンテナが動かされたと考えられる。

3.1.6 まとめ

2018 年台風 21 号は、1961 年の第 2 室戸台風以来の我が国の 3 大湾において起こった大きな高潮イベントであった。大阪湾の高潮対策は、1959 年伊勢湾台風および第 2 室戸台風を想定されて検討されている。台風 21 号による高潮は第 2 室戸台風級であり、事前想定と事前対策および被災の特徴について分析することが重要である。

本原稿では被害額については触れなかったが、人的被害に比べて資産被害が大きかったのも本災害の特徴である。台風 21 号に関連する地震・風水災に係る各種損害保険の支払件数・支払保険金は 7478 億円⁴⁾であり、これは平成 23 年東北地方太平洋沖地震について 2 位、風水害だけでは史上最高額である。ハザードの規模としては L1 想定前後であったのに対し、被害額としては非常に大きいという特徴がある。これまでの人的・資産被害がリンクする災害形態に比べて、台風 21 号の災害形態は大きく異なり、都市型災害として今後その特徴について精査する必要がある。

謝辞

本原稿を作成するに当たり、土木学会海岸工学委員会・関西支部 2018 年台風 21 号 Jebi による沿岸被害調査団の皆さん、特に大阪市立大学中條壮大講師、東京理科大学片岡智哉助教、港湾空港技術研究所鈴木高二朗リーダーの協力を得た。ここに感謝の意を評す。

最後に、本災害で被災された方々へお見舞いを申し上げますとともに、犠牲者・被災者の方々に深い哀悼の意を表します。

参考文献

- 1) 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.

- 2) 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.
- 3) 大阪管区气象台 (2018) 平成 30 年 9 月 4 日に発生した台風第 21 号による大阪湾の高潮に関する現地調査報告, 2018 年 9 月 14 日.
- 4) 日本損害保険協会 (2018) 2018 年 6 月から 9 月に発生した地震・風水災に係る各種損害保険の支払件数・支払保険金等について, No.18-038, http://www.sonpo.or.jp/news/release/2018/1812_06.html

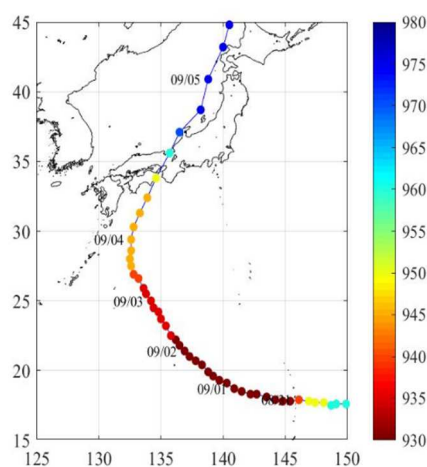


図 3.1.1 台風 21 号の経路と中心気圧の推移
Fig.3.1.1 Time series of TC Jebi location and intensity

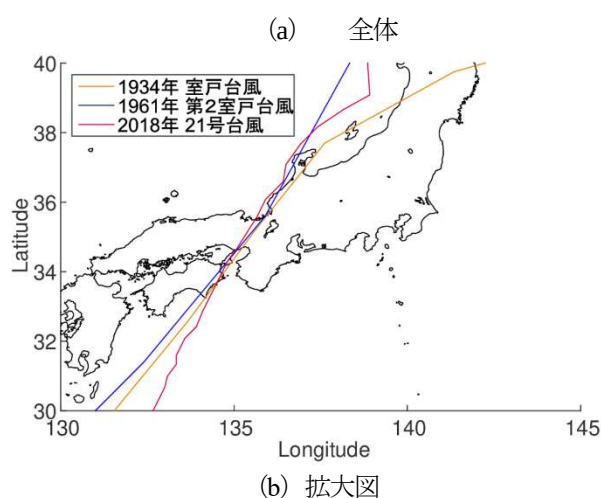
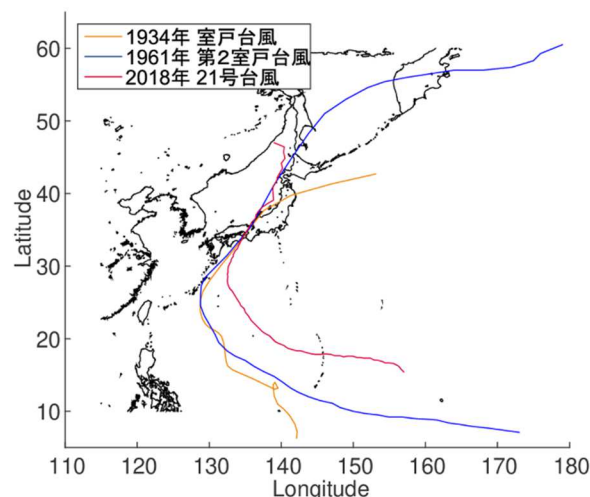


図 3.1.3 過去台風の経路比較
Fig. 3.1.3 Tracks of historical typhoons

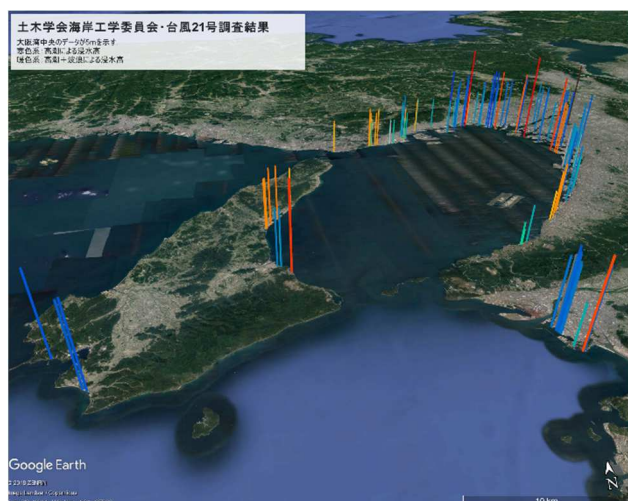


図 3.1.2 土木学会の調査結果にもとづく浸水高の空間分布

(寒色系: 高潮偏差, 暖色系: 高潮偏差+波浪影響)

Fig. 3.1.2 Spatial distribution of inundation heights along the coast based JSCE survey data (cooler color: storm surge, warmer color: storm surge+wave runup)

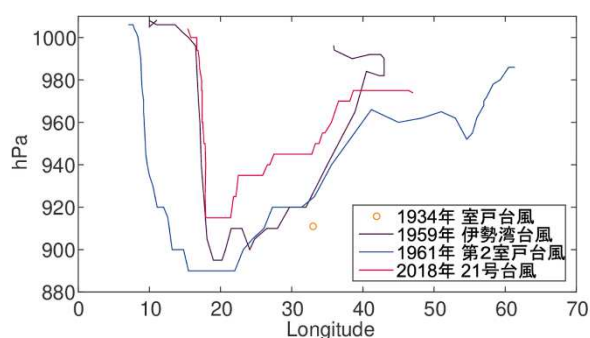


図 3.1.4 台風の中心気圧比較
Fig. 3.1.4 Comparison of central pressure to historical major typhoons



図 3.1.5 潮芦屋ビーチへのコンテナ漂着
Fig. 3.1.5 Drifted container on Shio-Ashiya beach



図 3.1.6 芦屋市涼風町における越波浸水
Fig. 3.1.6 Trapped sands by wave overtopping at Ryofu-cho in Ashiya



図 3.1.7 六甲アイランドでの浸水被害状況
(Twitter より 9/4(火) 14:23 配信)
Fig. 3.1.7 Inundation at Rokko Island (Twitter 9/4 14:23)



図 3.1.8 六甲大橋入口の浸水状況
(Twitter より 9/4(火) 14:23 配信)
Fig. 3.1.8 Inundation at Rokko bridge (Twitter 9/4 14:23)



図 3.1.9 煉瓦倉庫レストラン街の浸水状況
(Twitter より 9/4(火) 14:26 配信)
Fig. 3.1.9 Inundation at Harbor Land in Kobe (Twitter 9/4 14:26)



図 3.1.10 湊小学校交差点の浸水状況
(Twitter より 9/4(火) 14:43 配信)
Fig. 3.1.10 Inundation at Minato Elementary School in Kobe (Twitter 9/4 14:43)



図 3.1.11 宮川の氾濫状況と溢水箇所の例：呉川町交差点
付近の氾濫状況（Twitter より，9/4 14:44 配信）

Fig.3.1. 11 Inundation at Gokawa-cho along Miya river in
Ashiya
(Twitter, 9/4 14:44)



図 3.1.12 コンテナの散乱（六甲アイランド東）

Fig.3.1. 12 Drifted container at Rokko Island

高潮推定と2018年台風21号ダウンスケール実験 Dynamical Downscaling of Typhoon Jebi for the storm surge

梶川 義幸^{*1}
Yoshiyuki KAJIKAWA

SUMMARY

Dynamical downscaling experiments of Typhoon Jebi for the storm surge in September 4th 2018 was conducted by using SCALE-RM with different computational domain and spatio-temporal resolution. The results show that hourly boundary condition would be necessary to reproduce the reasonable wind circulation change accompanied by the passing of Jebi. It is suggested the model reproducibility of strong wind over Osaka Bay depends on the spatio-temporal resolution of the used model.

Maximum tidal level in each downscale experiment was also estimated based on the simplified estimate equation. The 500m resolution experiment shows the most reasonable tidal level with several observation and estimation by JMA. The atmospheric pressure effect and the direct wind effect contribute the tidal level change comparably in 500m resolution experiment. Of great interest is that the pressure effect is comparable in 2.5 km and 500 m resolution experiments, however, the direct wind effect has significant difference between two experiments. High spatio-temporal resolution would be necessary for the reasonable estimation of tidal level in terms of direct wind effect; forecasting the storm surge.

key words: downscaling experiment, storm surge, pressure effect, wind effect

3.2.1 はじめに

台風第21号(TC201821, Jebi)は、「非常に強い」勢力で2018年9月4日から5日にかけて近畿地方を縦断し、日本各地で記録的な暴風をもたらした。大阪湾では暴風雨に加え顕著な高潮が発生し、特に、大阪(大阪府)、神

戸(兵庫県)、御坊、白浜、串本(和歌山県)では、過去の最高潮位を上回る潮位を観測したり、この高潮により大阪湾において浸水被害などが発生した。これらの災害についての報告は、森らによる報告「3.1 沿岸災害の概要」を参考にされたい。

台風襲来時における高潮の発生メカニズムは、主に台

*1 神戸大学都市安全研究センター 特命教授 ykaji@dolphin.kobe-u.ac.jp

Professor, Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University

風に伴う(1)気圧の低下による吸い上げ効果と(2)強い風による吹き寄せ効果が考えられ、気象庁による台風21号に関する報道発表においても同様の指摘がされている¹⁾。一方で、本事例における大阪湾の高潮発生に対し、両効果の寄与については言及されていない。本研究では、領域気象モデルを用い、大阪湾を含む広領域で高解像度ダウンスケール実験を行うことで、高潮の発生要因を初期解析として分析・検討した。また、領域気象モデルを用いたシミュレーションにおける境界条件や水平格子点間隔(解像度)の差異によって生じる潜在的な高潮発生要因の差に着目し解析を行った。以下、2節に本研究で利用した数値モデルとダウンスケール実験設定を紹介し、3節に大気循環場のダウンスケール実験結果を述べる。また4節では、簡易的な予測式を用いることで高潮発生要因の考察を行う。尚、本報告書において、ダウンスケール実験は力学的ダウンスケール実験を示す。

3.2.2 使用モデルと実験設定

本研究のダウンスケール実験には、理化学研究所計算科学研究センターで開発公開されている領域気象モデルSCALE-RM²⁾ (<http://r-ccs-climate.riken.jp/scale/ja/index.html>)を用いた。主な力学過程、物理過程は日本におけるこれまでのダウンスケール実験³⁾と同じである。雲微物理には1モーメントバルク法を用いている。本研究では、図3.2.1に示す3種類計算領域で異なる水平格子点間隔のダウンスケール実験を行った。

- ・ 実験 A: 初期値境界値: MSM, 水平格子点間隔 2.5 km, 計算領域は日本広領域 (図 3.2.1a)。
- ・ 実験 B: 実験 A の結果を境界値にした水平格子点間隔 500 m の高解像度ダウンスケール実験, 計算領域は四国を含む西日本領域 (図 3.2.1b)。
- ・ 実験 C: 初期値境界値: MSM, 水平格子点間隔 1.0 km, 計算領域は大阪湾を中心とする関西地域に限定された領域 (図 3.2.1c)。

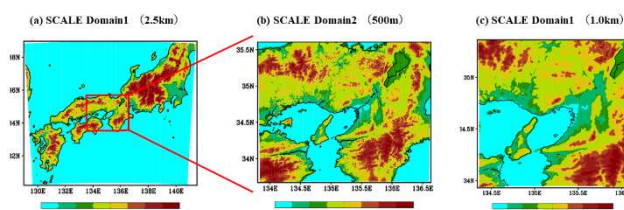


図 3.2.1 各ダウンスケール実験の計算領域

Fig. 3.2.1 Computational domain of each Downscaling experiment.

初期値および境界値には、気象庁メソ数値予報モデル(MSM)の解析値を用いた。全ての実験における初期値は2018年9月3日00Z(午前9時)である。尚、初期値境界値のMSMは3時間間隔、SCALE-RMの出力値は、実験Aでは1時間間隔、実験Bおよび実験Cでは10分間隔である。本研究では、表面風として高度10mの風を用いる。

3.2.3 ダウンスケール実験における大気循環場

図3.2.2および図3.2.3に、2018年9月4日05Z(日本時間14時)におけるダウンスケール実験結果を示す。MSMは3時間間隔であるため、図3.2.2a、図3.2.3aは06Z(午後3時)の状態を示すが、MSMを初期値境界値とした広領域のSCALE-RM実験Aでは台風21号が午後2時頃に兵庫県に再上陸したことを再現できている(図3.2.2b、図3.2.3b)。台風の南東側では非常に強い風が見られ、大阪湾や紀伊水道、熊野灘(三重県の南東沖)では風速が30m/sを超えている。これらの風は3時間間隔のMSMの値に比べ5-10 m/s程度大きい。水平格子点間隔500mの高解像度ダウンスケール実験Bの結果からは、親領域である実験Aに比べて更に風速が強く、05Zの再現実験結果では風速30m/s以上の強風域が大阪湾の北側、兵庫県付近にまで達していることがわかる。

一方、MSMから計算領域を関西地域に限定したダウンスケール実験Cでは、水平格子点間隔が1.0kmであつても領域内に台風を適切に再現することが難しく、結果的にMSMと同程度の風速が06Z(午後3時)に見られた。また05Zの実験結果では台風に伴う南西風が見られず、他の実験と比べ相対的に弱い南風が生じている。

図3.2.4は2018年9月4日00z(午前9時)から12Z(午後9時)における、関西地方での最大風速をそれぞれ示したものである。MSMは3時間間隔であるため、9月4日03Z(正午)における紀伊水道での最大風速35m/sが顕著であり、大阪湾における最大風速は相対的に低い値を示す。計算領域を関西地域に限定したダウンスケール実験Cの結果も、初期値境界値であるMSMの影響を強く受け、出力結果が水平格子点間隔1km、時間間隔10分であつても、紀伊水道に最大風速の極大値がみられる。

MSMから水平格子点間隔2.5kmでダウンスケールした実験Aでは、計算領域を広くとったことにより、03Z(正午)から06Z(午後3時)にかけて大阪湾を北上する台風を適切に再現できることが可能となり、結果として紀伊水道だけでなく大阪湾でも強い風を再現することが可能となった。水平格子点間隔を500mにしたダウンス

ケール実験 C の結果では、紀伊水道や大阪湾における最大風速が 30 m/s から 35 m/s まで増加した。この傾向は大阪湾の中央から北側にかけて顕著であり、神戸市や大阪市における高潮被害発生の一因と考えられる強い風が数値モデルの高空間解像度化によって再現される可能性が高まったと推測される。

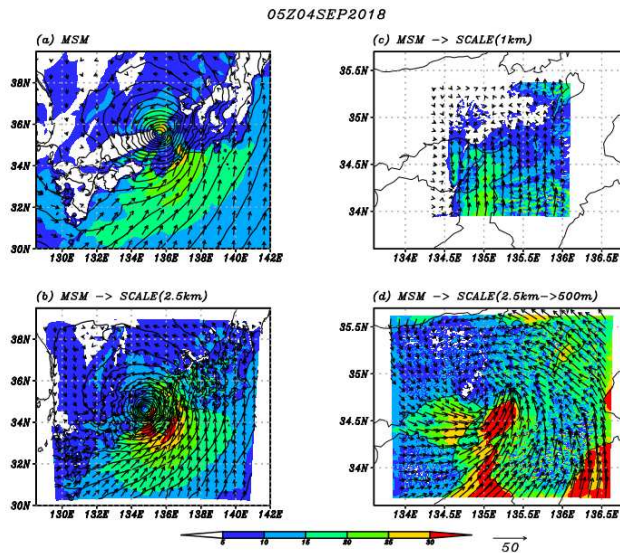


図 3.2.2 2018 年 9 月 4 日午後 2 時 (05Z) における表面気圧 (コンター, hPa), 表面風 (矢羽, m/s), 表面風速 (陰影, m/s). (a) MSM, (b) 実験 A, (c) 実験 B, (d) 実験 C

Fig. 3.2.2 Simulated Mean sea level Pressure (Contour), 10m wind (vector), 10m wind speed (shading) at 05Z, September 4th 2018 in (a) MSM, (b) Exp. A, (c) Exp. B, (d) Exp. C.

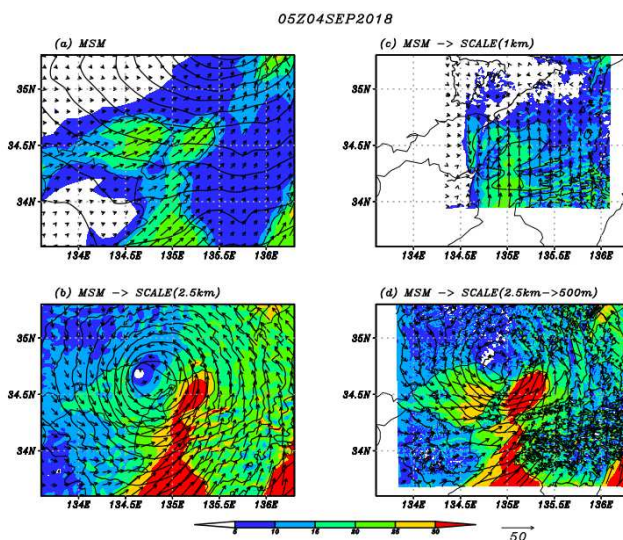


図 3.2.3 図 3.2.2 と同じ, ただし近畿地方のみ

Fig. 3.2.3 Same as Fig.3.2.2 but for covering Kinki Area.

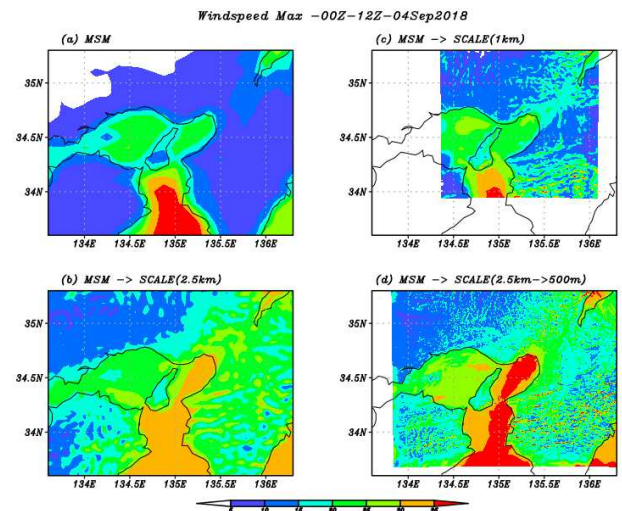


図 3.2.4 2018 年 9 月 4 日午前 9 時から午後 9 時の間における最大表面風速 (m/s)

Fig. 3.2.4 Maximum wind speed (m/s) during 00Z-12Z September 4th 2018.

上記の結果は神戸市から西宮市の沖 (北緯 34 度 37 分から北緯 34 度 40 分, 東経 135 度 16 分から東経 135 度 21 分) で領域平均した風向風速の時系列からも示される (図 3.2.5 および図 3.2.6). 風向は 03Z (正午) から 06Z (午後 3 時) までの間に東風から南西風に変化している. 水平格子点間隔が狭い 1km および 500m の実験 B と実験 C は出力値が 10 分間隔であり, 風向の変化がより短時間で起こっている. 神戸付近の風速は実験 A では 06Z (午後 3 時) にピークを迎えるものの, 500m 解像度の実験 B では午後 2 時 10 分から午後 2 時 20 分にかけて 35 m/s 以上の強風を示している.

以上の台風 21 号のダウンスケール実験の結果より, 台風に伴う局所的な強風の再現には, 適切な時間解像度の境界値が必要であることが確認された. 本事例では, 台風が 03Z (日本時間正午) から 06Z (午後 3 時) の間に四国から関西地方を縦断しているため, 境界条件として最低でも 1 時間の時間分解能が必要であったと推測される. また大阪湾における強風の再現性は水平格子点間隔 2.5 km の実験 A より 500m の実験 B の方が 5 m/s ほど強く, 高い空間解像度と 10 分間隔と言う出力値の必要性も示唆された. 尚, 本研究のダウンスケール実験のでは実験 A について 10 分値の出力をしてない為, 空間解像度と時間解像度の寄与についてはこれ以上の議論は困難であり, 今後の研究課題である.

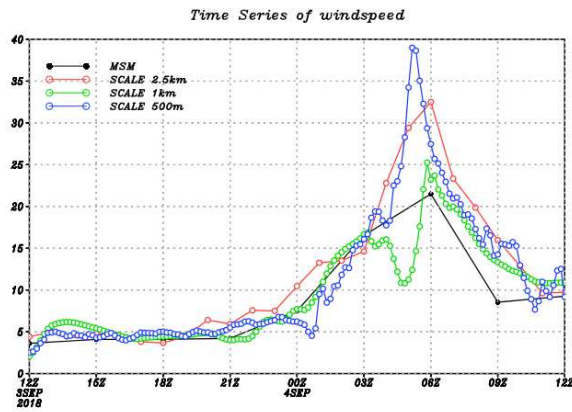


図 3.2.5 神戸沖における表面風速の時系列

Fig. 3.2.5 Time series of wind speed averaging over Sea off the Kobe area.

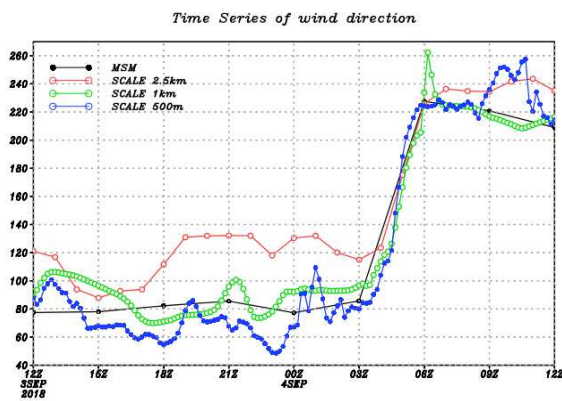


図 3.2.6 図 3.2.5 と同じ、ただし風向 (度)

Fig. 3.2.6 Same as Fig.3.2.5 but for wind direction

3.2.4 神戸における高潮の発生要因

本節では、ダウンスケール実験の結果を用いて神戸沖（領域平均は 3 節参照）における高潮の発生要因について考察する。高潮は主に台風に伴う（1）気圧の低下による吸い上げ効果と（2）強い風による吹き寄せ効果によって生じることから、ここでは以下に示す気象庁による簡易高潮予測式

$$h = a(1010 - P) + bW1U_{10}^2 \cos \theta \quad (1)$$

を用いる。ここで h は最大潮位偏差 (cm), p は最低気圧 (hPa), U_{10} は高度 10m における最大風速, θ は最大風速と湾の開口方向との角度である。また a, b は定数であり、ここでは経験的に得られた値として $a=3.370, b=0.087$ を使用した。

図 3.2.7 は、MSM および各ダウンスケール実験結果を式 (1) に適用した、神戸市から西宮市の沖（領域は前節

と同様) の最大潮位偏差の時系列である。MSM や計算領域の狭い実験 C の結果では最大潮位は 06Z (日本時間午後 3 時) に現れ、100-130cm 程度であった。一方、広領域で水平格子点間隔 2.5 km の実験 A では、午後 2 時に最大潮位偏差が現れ、さらに水平格子点間隔 500 m にダウンスケールした結果では午後 2 時 10 分に最大潮位が見られた。この結果は神戸にて 14 時 09 分に最大潮位を観測した気象庁の報道資料⁴⁾と整合的であると言える。また最大潮位は実験 A では 207cm であったが実験 B では 258cm であった。観測された神戸の最高潮位は 233cm¹⁾、一方、測定の結果から推定された甲子園浜海浜公園における高潮は約 370cm⁴⁾ではあるが、経験式に基づく簡易推定をおよそ 20 km x 10 km の領域に適用した結果としては、両地点の観測・推定値の間に収まり、比較的良好一致を見たと言える。

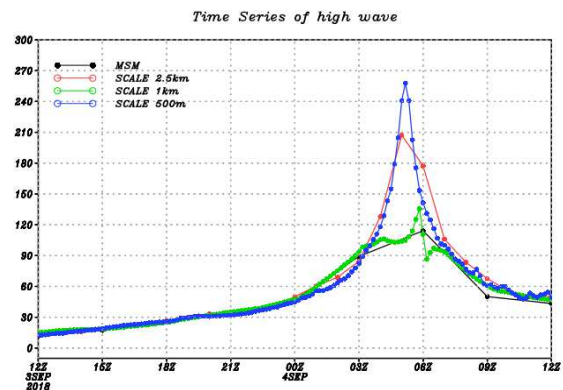


図 3.2.7 神戸市沖における最大潮位偏差 (cm) の時系列

Fig. 3.2.7 Time series of tidal level averaging over Sea off the Kobe area. It is estimated by equation (1) in the main text.

図 3.2.8 は最大潮位偏差を求める (1) 式の右辺第一項と第二項の時系列をダウンスケール実験毎に示したものである。第一項である低気圧によって海面が持ち上がる吸い上げの効果は、03Z (日本時間正午) までは、MSM を含め実験間においてほとんど差はなく、比較的大規模場で表現できることが示唆される。03Z (正午) から 06Z (午後 3 時) においては、MSM と計算領域の狭い実験 C では、台風の強化が表現できておらず、持ち上げによる潮位偏差が 100 cm 未満となっている。一方、ダウンスケール実験 A と B ではそれぞれ最大で 130 cm 程度の潮位偏差を示した。興味深い点は 水平格子点間隔が 2.5 km でも 500 m でも、本事例においては吸い寄せ効果による潮位偏差には有意な差がみられなかった点である。

一方、第二項の吹き寄せ効果による潮位偏差は水平格

子点間隔 2.5 km の実験 A では最大で 75 cm 程度であるのに対して、500 m の実験 B では最大で 120 cm を上回り大きく異なる結果となった。また、500m 解像度の実験 B における、最大潮位を観測した 14 時 10 分-20 分においてはじめて吹き寄せ効果と吸い上げ効果が同等となった時刻以外は、おおむね気圧の低下による吸い上げ効果の寄与が大きいことも特徴の 1 つである。本事例では、水平格子点間隔 500 m の実験 B の最大潮位偏差が実測に近いことから、台風 21 号による高潮の発生には吹き寄せと吸い上げの効果が同程度（それでも吸い上げ効果の方が大きい）であると考えられ、最大風速に起因する吹き寄せの効果を妥当な範囲で見積もることが、最大潮位の推定にも大きな影響を与えられ、今後の台風発生時における高潮発生予測においても、これを考慮する必要があると考えられる。

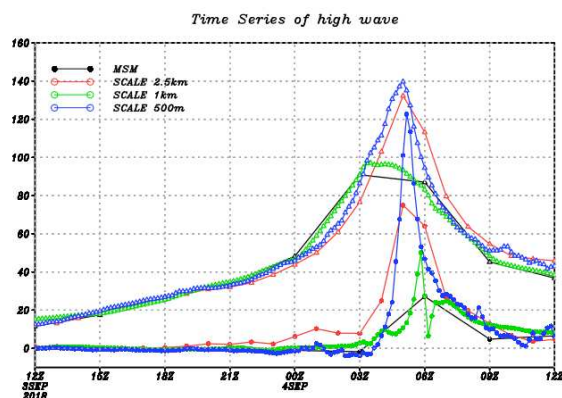


図 3.2.8 最大潮位偏差を求める簡易推定式 (1) における右辺第一項 (吸い上げ効果, 三角) と右辺第二項 (吹き寄せ効果, 丸) の時系列

Fig.3.2. 8 Same as Fig.3.2. 7 but for the first term (triangle) and the second term (closed circle) in (1) respectively.

3.2.5 まとめ

本研究では、2018 年 9 月 4 日の日本時間午後 1 時から 3 時にかけて大阪湾を縦断し、大阪湾内部の各都市に高潮被害をもたらした台風 21 号を含む大気循環場について、SCALE-RM を用いた 3 種類のダウンスケール実験を行い、計算領域や時空間解像度に対する影響を調べた。その結果、台風に伴う局所的な強風の再現には、適切な時間解像度の境界値 (本事例の場合は 1 時間間隔) が必要であることが確認された。また大阪湾における 35 m/s を超える強風は、高時空間解像度によって再現性が高まることも示唆された。

ダウンスケール実験結果を簡易的な潮位推定の式に適

応して最高潮位を推定したところ、水平格子点間隔 500 m の実験 B で、観測値と整合するような結果が得られた。また、その際の吸い上げの効果と吹き寄せの効果は同程度であり、吸い上げの効果は水平格子点間隔 2.5 km 実験と 500 m に有為な差は見られなかったものの、吹き寄せの効果には顕著な差が見られた。吹き寄せの効果を考慮すると、高潮の効果的な推定には高空間解像度のダウンスケール実験が必要であることが示唆された。

謝辞

数値シミュレーション結果の実行ならびに本原稿を作成するに当たり、神戸大学都市安全研究センター山浦剛特命助教、理化学研究所計算科学研究センターの SCALE 開発チームの多大なる協力を頂きました。神戸大学都市安全研究センター大石哲教授には、課題参加時から助言を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 気象庁報道発表, “平成 30 年台風第 21 号による高潮”, <https://www.jma.go.jp/jma/press/1809/05b/T1821cho ui.pdf>, 平成 30 年 9 月 5 日.
- 2) Nishizawa, S., H. Yashiro, Y. Sato, Y. Miyamoto, and H. Tomita, “Influence of grid aspect ratio on planetary boundary layer turbulence in large-eddy simulations”, *Geosci. Model Dev.*, 8, 3393-3419, doi:10.5194/gmd-8-3393-2015, 2015.
- 3) Adachi, S. A., S. Nishizawa, R. Yoshida, T. Yamaura, K. Ando, H. Yashiro, Y. Kajikawa, and H. Tomita, “Contributions of changes in climatology and perturbation and the resulting nonlinearity to regional climate change”, *Nat. Commun.*, 8, 2224, doi: 10.1038/s41467-017-02360-z, 2017
- 4) 大阪管区気象台報道発表, “平成 30 年 9 月 4 日に発生した、台風第 21 号による大阪湾の高潮に関する現地調査報告”, <https://www.jma-net.go.jp/osaka/topics/H30/20180914takashio.pdf>, 平成 30 年 9 月 14 日.

参考資料:

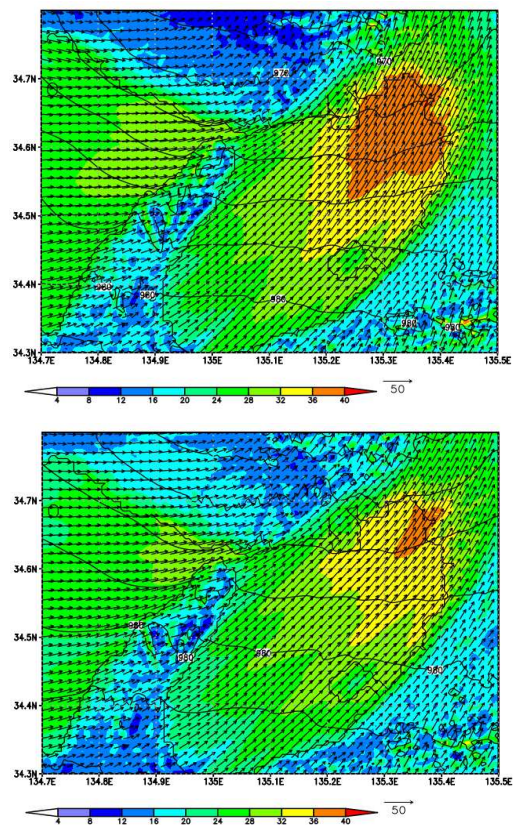
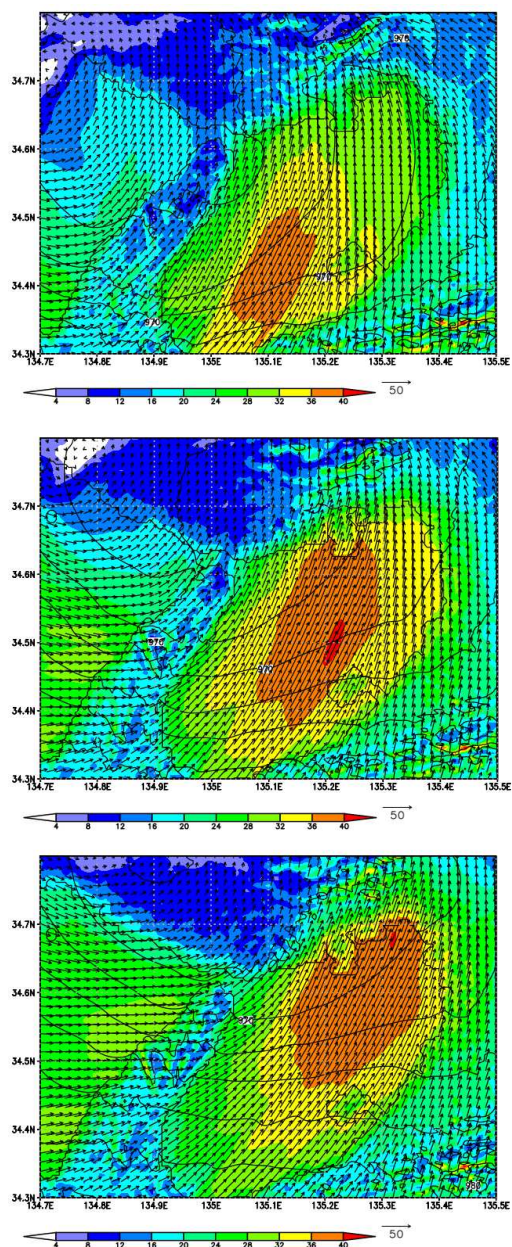


図 3.2.9 大阪湾における 2018 年 9 月 4 日 13 時 50 分から 14 時 30 分の（10 分間隔）水平格子点間隔 500 m 実験 B 結果: 表面気圧, 表面風, 表面風速. 陰影などは図 3.2.2 と同じ.

Fig.3.2. 9 Simulation results of 500 m grid spacing downscale experiment from 04:50Z to 05:30Z in September 4th 2018. Colors and contours are same manner as Fig.3.2.2.

第4章1

2018 年台風 21 号襲来前後に撮影された衛星写真の比較に基づく

住宅の屋根被害率推定

Roof Damage ratio estimation on residential houses based on satellite images taken before and after Typhoon Jebi (TY201821)

西嶋一欽^{*1} 河野祐哉^{*2} 竹内崇^{*3} 友清衣利子^{*4} 野田博^{*5}

Kazuyoshi NISHIJIMA, Yuya KONO, Takashi TAKEUCHI, Eriko TOMOKIYO, Hiroshi NODA

SUMMARY

This study estimates the roof damage ratios of residential houses affected by Typhoon Jebi as a function of maximum wind speed. The procedure for the estimation is as follows: Firstly, damages to roofs are identified by comparing satellite images (geo-tiff data) taken before and after the typhoon, where blue sheets covered on roofs are adopted as proxy to roof damage. Secondly, polygon data on residential houses are extracted from a GIS data set of buildings according to given criteria. Thirdly, the locations of the identified roof damages are superposed over the extracted polygon data on residential houses. By doing so, the residential houses with roof damages are identified. Lastly, the number of residential houses with roof damages and the total number of residential houses in individual grids, at which maximum wind speeds during the typhoon are calculated using the Weather Research Forecast model, are counted to estimate the roof damage ratios. The results show that roof damage ratios are approximately 5.5%-7.5% for the range of the maximum wind speed between 22 m/s and 28 m/s.

key words: satellite image, blue sheet, wind vulnerability, wind field reanalysis

4.1.1 はじめに

2018 年台風 21 号によって、近畿地方を中心に甚大な被害が生じ、大阪府では 66,000 棟以上の住宅が被災した¹⁾。著者らは、特に被害が大きかった大阪府南部の沿岸部の一般住宅を対象に、台風襲来前後に撮影された衛星写真

を用いて、住宅屋根被害をブルーシートの被覆の有無によって判断し、その結果を用いて住宅屋根の被害率を推定した。また、気象モデルを用いた再解析結果²⁾と照らし合わせることで、風速に対する被害率を推定した。本稿ではその手順及び結果を報告する。

* 1 京都大学防災研究所准教授, Associate Professor, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, nishijima.kazuyoshi.5x@kyoto-u.ac.jp

* 2 京都大学 Kyoto University,

* 3 神戸大学 Kobe University,

* 4 熊本大学 Kumamoto University,

* 5 近畿大学 Kindai University

4.1.2 分析対象地域と屋根被害判別方法

4.1.2.1 分析対象地域と用いた衛星写真

住宅屋根の被害の分析対象地域は、図 4.1.1 に示した貝塚市から泉佐野市、熊取町、田尻町、泉南市にかけての沿岸部（面積 38.4km²）である。分析には当該箇所に対して台風襲来後に撮影された写真であって被雲率が低い写真が入手可能であった Digital Globe 社の高分解能衛星画像（オルソパンシャープン、8bit GeoTIFF 画像、地上分解能 0.3m）を用いた。撮影日は 2018 年 11 月 7 日である。また、比較対象として用いた衛星写真の撮影日は 2018 年 8 月 4 日である。



図 4.1.1 分析対象地域

Figure 4.1.1 Target area

4.1.2.2 分析手順

住宅の屋根被害をブルーシートの被覆によって判別することとする。従って、屋根に被害があったとしても撮影時にブルーシートで屋根が覆われていない住宅は被害なしと判別される。

分析は ESRI 社の ArcGIS Pro を用いて行った。分析手順は以下の通りである。

- ① 台風前後に撮影された衛星写真を色補正したのち、同じ位置での RGB 値それぞれの成分の差をとり、B 成分が大きくなっているピクセルを特定する（図 4.1.2 (a)）。ただし、「青」以外の色同士の差異を取ると B 値が大きくなる場合がある¹ので、台風後の衛星写真で青成分が大きいピクセル（図 4.1.2 (b)）と上の手順で特定されたピクセルとの積集合によって、ブルーシートに覆われている屋根を判別する（図 4.1.2 (c)）。

なお、青色を抽出する際の基準とした RGB 値の範囲をやや広めに設定したためにブルーシート部分ではない部分もわずかに抽出されている。そこで、抽

出されたブルーシート部分が住宅の屋根面積の 5% に満たないものはノイズとして除去する。

- ② ZENRIN 住宅地図データセット（Zmap TOWN II (2016 年度 Shape 版) 大阪府 データセット）から、以下の条件に合う建物を住宅として抽出する。

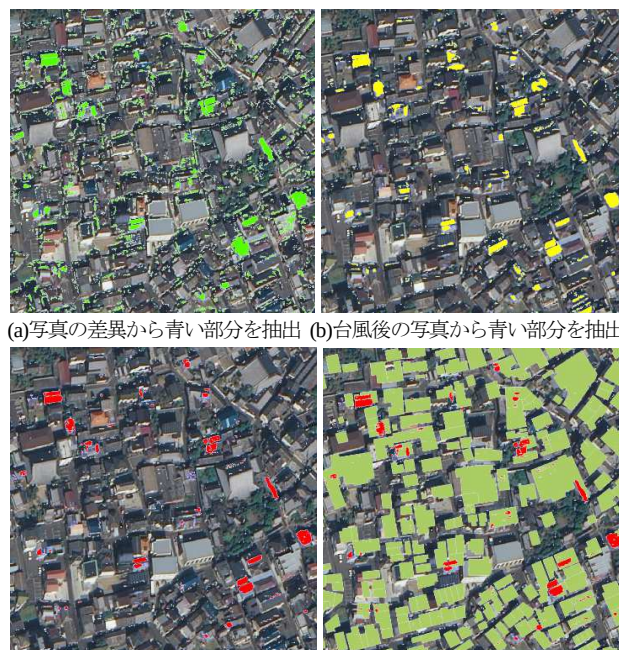
- ・ 2 階建て以下の建物
- ・ 1 階床面積が 20m² 以上 200m² 以下の建物

そのうえで、抽出された住宅の輪郭を表すポリゴンをそれぞれの住宅ごとに外側に 600mm 膨らませたものを屋根の輪郭を表すポリゴンとして以下の分析に用いる。

- ③ ②で抽出された屋根の輪郭を表すポリゴン内部に①で求めた集合の要素が含まれるかを判定し、含まれていればその建物は屋根被害を受けたものと判断する。含まれていなければ、屋根被害を受けていないと判断する（図 4.1.2 (d)）。

ただし、①でのブルーシート判定方法では一部の青色屋根の住宅を誤ってブルーシートと判定してしまう場合があるので、本研究調査での屋根被害率の推定では、青色屋根住宅以外の住宅を対象とした。衛星写真の範囲内にある 53036 棟中 49853 棟が対象となる。

この手順に従い、屋根被害を特定した例を図 4.1.3 に示す。左図の赤線で囲った部分が目視で確認できるブルーシート、右図の赤い部分が上記手順で抽出されたブルーシートである。目視で判別可能なブルーシートはほぼすべて抽出できており、実用上十分な精度と考えられる。

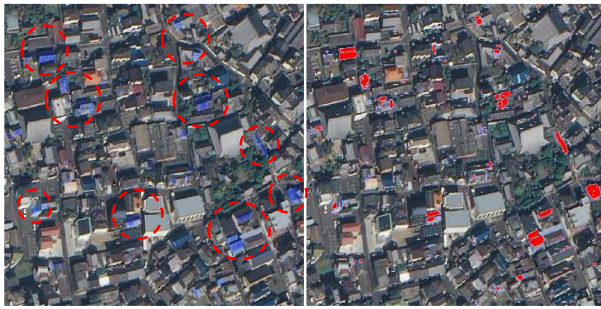


(a)写真の差異から青い部分を抽出 (b)台風後の写真から青い部分を抽出
(c)ブルーシートで覆われていると (d)住宅ポリゴンとの重ね合わせ
判断されたピクセル

図 4.1.2 屋根被害判別の手順

Figure 4.1.2 Procedure for roof damage identification

¹ 例えば台風前の衛星写真において RGB(255,255,0)であったピクセルが台風後で RGB(255,255,255)となった場合は、RGB 値の差異を取ると青色成分が上昇したこととなる。しかし、実際には RGB(255,255,0)は鮮やかな黄色、RGB(255,255,255)は白色であり、ブルーシートによる色の変化ではない。



元画像 抽出されたブルーシート

図 4.1.3 抽出結果の精度
Figure 4.1.3 Accuracy of identification

4.1.3 再解析された風速場との重ね合わせ

台風 21 号通過時の風速推定には、WRF (Weather Research Forecast)モデルを用いた再解析 (Takemi et al, 2019²⁾の 2.1 節参照) によって得られた高さ 10m での風速値を用いた。WRF を用いた計算は 2 段階の計算グリッドで行われており、2 段階目の計算グリッドは 0.9km×0.9km である。

WRF モデルを用いた再解析によって得られた風速と実際の風速との対応を見るために、大阪府下にあるアメダス風速計の観測値を用い、台風の影響を受けている期間の最大風速と比較した。同じ条件で比較するため、当該期間における 10 分間平均風速の最大値を、必要に応じて日本建築学会『建築物荷重指針・同解説 (2015)』³⁾の地表面粗度区分に応じた風速の鉛直プロファイルを用いて、高さ 10m での風速に変換した。表 4.1.1 に変換後のアメダス観測値と WRF による計算値の対応を示す。表 1 からアメダスの観測値 (変換後) と WRF 計算値はよく対応していることがわかる。ただし、図 4.1.4 に示す通り標高の高い観測地点 (能勢、生駒山) では WRF 計算値がアメダスの観測値 (変換後) よりも大きめの値となっている。今回の分析では比較的平坦な地域を対象にしている。そこで、これらの 2 地点を除いた平野部の観測地点でのアメダスの観測値 (変換後) と WRF 計算値を比較したところ、平均的には WRF 計算値に補正係数 0.98 を乗じたものがアメダスの観測値 (変換後) と対応することから、以降の分析では WRF 計算値にこの補正係数を乗じたものを実際の風速の推定値として分析に用いた。

このようにして得られた最大風速の空間分布 (図 4.1.5) と 4.1.2 項で作成した青色屋根の住宅を除く住宅データおよび屋根被害データとを重ね合わせることで、WRF の計算グリッドごとの住宅数および屋根被害を受けた住宅数を推定することができる。図 4.1.6 に 4 つの WRF 計算グリッドの一部を切り出したマップを例示する。

表 4.1.1 アメダス観測値 (変換後) と WRF 計算値
Table 4.1.1 AMeDAS observation (Converted) vs WRF estimate

観測所	標高(m)	風速計の 地表面高さ(m)	地表面 粗度区分	AMeDAS(m/s) (変換後)	WRF(m/s)
関空島	5	10	I	46.5	39.4
熊取	68	10	III	26.8	30.8
大阪 堺	1	24	III	22.9	22.3
枚方	20	10.1	III	21.1	23.7
豊中	26	10	III	19.3	24.3
八尾	12	10	III	18.5	20.4
生駒山	10	10	III	17.7	20
能勢	626	9.3	III	16.4	29.2
能勢	235	10	III	18.4	26

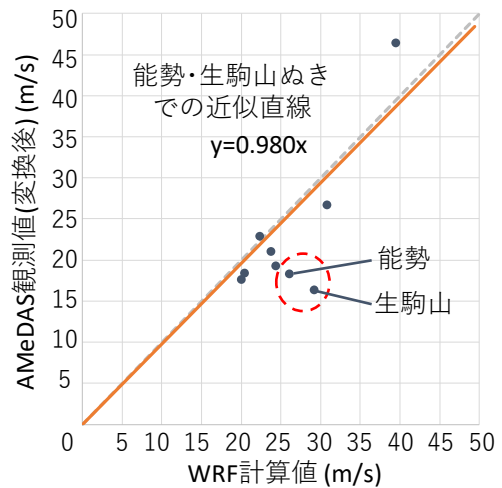


図 4.1.4 AMeDAS 観測値 (変換後) と WRF 計算値の比較
Figure 4.1.4 AMeDAS observation (Converted) vs WRF estimate

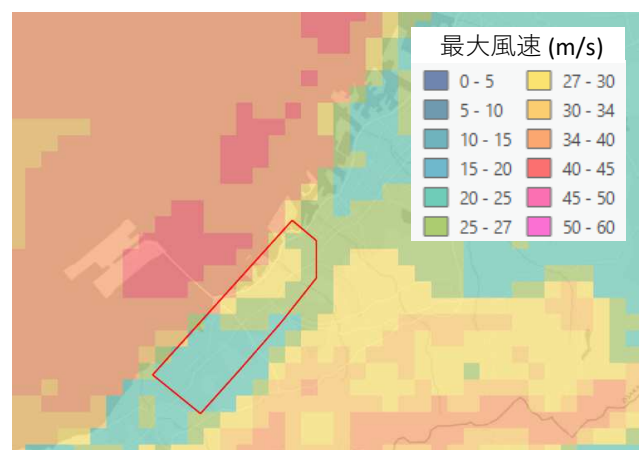


図 4.1.5 WRF 計算値に補正係数を乗じて得られた最大風速 (図中の枠が今回の屋根被害分析対象地域)
Figure 4.1.5 Maximum wind speed calculated by WRF model with calibration (Polygon in Figure: target area for this analysis)

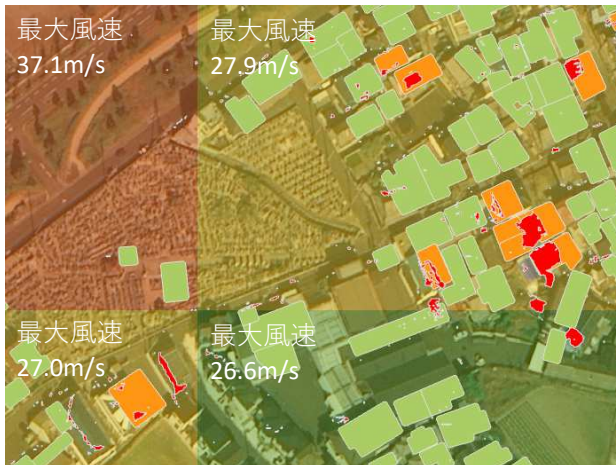


図 4.1.6 最大風速（半透明色）、住宅（緑）および屋根被害を受けた住宅（橙）

Figure 4.1.6 Maximum wind speed (transparent colors), houses (green) and houses with roof damage (orange)

4.1.4 推定された風速と被害率の関係

各グリッドにおける屋根被害住宅率（以下、被害率）を、そのグリッドに存在する住宅棟数（ただし青色屋根の住宅は除く）に対する屋根被害を受けた住宅棟数の比で定義する。グリッドごとの風速と被害率の関係を図 4.1.7 に示す。図中の○印の面積は当該グリッド内の住宅数に比例する。また、風速（1m/s 切り捨て）ごとに被害率を算出したものを図 4.1.8 と表 4.1.2 に示す。3 章での解析結果によると今回の分析対象地域では最大風速 22m/s～28m/s 程度の強風が吹いたと推定される。ただし、一部のグリッドにおいて最大風速が 30m/s～38m/s と推定されたグリッドがあるが、これらはすべて沿岸地域であり、存在している住宅の数は小さい。

図 4.1.8 を見る限り、最大風速 22m/s～28m/s の範囲で屋根被害率は 5.5%～7.5% の範囲であり、風速とともに緩やかに増加している。また、当該地域における、地表面粗度区分を考慮した換算基準風速は 26.9m/s（地表面粗度区分 II・高さ 10m での基準風速 $V_0=34\text{m/s}$ に、地表面粗度区分 III・高さ 10m に対する係数 $Er=0.79$ をかけた値、以下単に換算基準風速と呼ぶ）であり、この風速以下でも相当な被害が出ていることが知れる。

また、図 4.1.7 からわかるように、同程度の風速においても異なるグリッドにおける被害率のばらつきは非常に大きい。この原因を分析するためにまず、各計算グリッドにおける最大風速と被害率の空間分布を図 4.1.9 示す。全体的な傾向として南より北そして内陸より沿岸部に向かうほど風速が強くなっており、被害率もおおむねそれに応じた分布になっている。しかしながら、いくつかのグリッドにおいてはこのような全般的な傾向から逸脱している。例えば、グリッド 26 番と 29 番はともに風速

が 27m/s 程度であるが、グリッド 29 番の被害率は 26 番と比較して格段に低い。図 4.1.10 (a) にグリッド 29 番と 26 番の衛星写真および屋根被害を受けた住宅（赤枠で囲まれた住宅）の分布状況を示す。グリッド 29 番において多くの住宅は中央部から北東部にかけて存在しているが、これらの住宅群の南部には鉄道の高架があり、また西部には高層建築物群が存在している。これらの局所的な要因が風速を低減させ、低い被害率の一因となった可能性がある。また、北東部には高密度に密集した住宅群があり、互いに近く隣接することで全体的に屋根被害を低減させた可能性もある。次に、比較的低風速 (22m/s～23m/s) のグリッドで高被害率のグリッド 57 番と低被害率のグリッド 63 番の衛星写真および屋根被害を受けた住宅（赤枠で囲まれた住宅）の分布状況を同図 (b) に示す。被害率が高いグリッド 57 番は北側から北西側に開けた土地が広がっており、吹き返しの際に被害を受けた可能性は否定できない。一方、屋根の耐風性能の違いが被害率の違いに表れている可能性もある。

4.1.5 まとめ

ブルーシートに着目し、台風前後に撮影された衛星画像を用いて住宅の屋根被害判定を行い、屋根被害率を推定した。以下の点が明らかになった。

1. 地表面粗度区分に応じた基準風速以下の風速でも相当の被害が出ている。風速 22m/s～28m/s の範囲で住宅屋根の被害率は 5.5%～7.5% 程度である。
2. 局所的に小さな被害率になっている地区があり、地上の大きな構造物やあるいは建物の密集度の高さがその要因であった可能性がある。

本調査で取りまとめた屋根被害住宅の空間分布データを用いてさらなる分析を進める予定である。

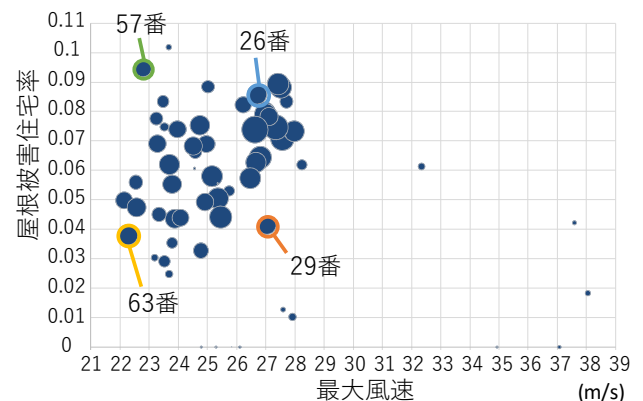


図 4.1.7 計算グリッドごとの最大風速と屋根被害率
Figure 4.1.7 Maximum wind speeds and roof damage ratios at WRF calculation grids

表 4.1.2 風速ごとの住宅数（青色屋根住宅除く）と屋根被害住宅数および屋根被害住宅率

Table 4.1.2 Numbers of houses and houses with roof damage, and calculated roof damage ratios at each maximum wind speed

最大風速(m/s)	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
住宅数(棟)	4977	9627	6574	5312	11386	11245	323				163		19		0	118	109	0
屋根被害住宅数(棟)	272	558	386	288	822	828	20				10		0		0	3	2	0
屋根被害住宅率	0.0547	0.0580	0.0587	0.0542	0.0722	0.0736	0.0619				0.0613		0			0.0254	0.0183	

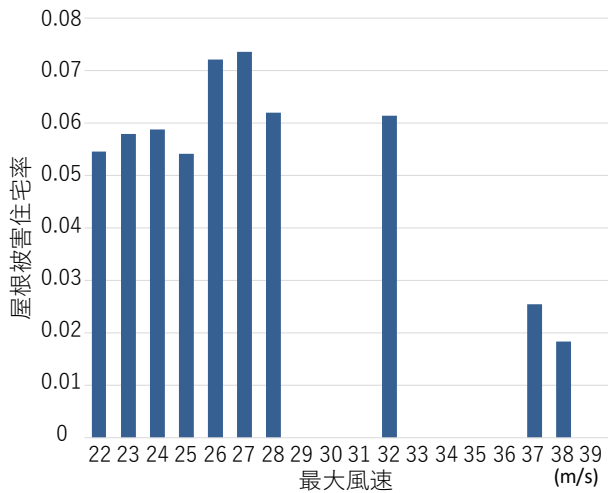


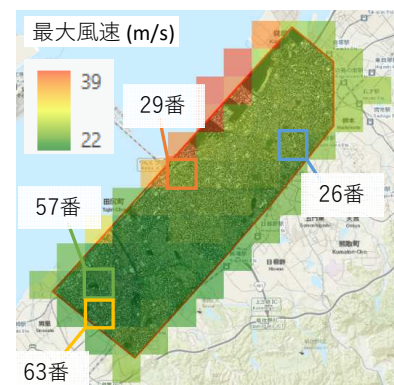
図 4.1.8 最大風速と屋根被害率の関係

Figure 4.1.8 Roof damage ratio as function of wind speed

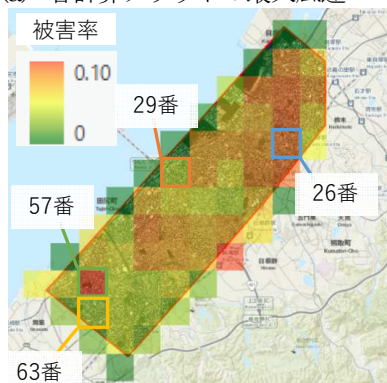
本研究のうち ZENRIN 住宅地図データ利用にかかる部分は、東京大学空間情報科学研究センターとの共同研究「強風による建物被害リスク評価の高精度化のための耐風性能因子分析」である。

参考文献

- 1) 大阪府危機管理室, 台風 21 号にかかる被害状況等について (第 30 報), 2018.12.25.
- 2) Takemi, T., T. Yoshida, S. Yamasaki, K. Hase, 2019: Quantitative estimation of strong winds in an urban district during Typhoon Jebi (2018) by merging mesoscale meteorological and large-eddy simulations. SOLA, Vol. 15, pp. 22-27, doi:10.2151/sola.2019-005.
- 3) 日本建築学会, 2015: 建築物荷重指針・同解説 (2015) .



(a) 各計算グリッドの最大風速



(b) 各計算グリッドの被害率

図 4.1.9 各計算グリッドの最大風速と被害率

Figure 4.1.9 Maximum wind speeds and damage ratios at grids



(a) 風速が高い（約 27m/s）グリッドの屋根被害住宅の分布（赤く囲まれている建物が屋根被害を受けた住宅、(b)も同じ）



(b) 風速が低い（約 22～23m/s）グリッドの屋根被害住宅の分布

図 4.1.10 風速が高いグリッドと低いグリッドでの屋根被害を受けた住宅の分布
Figure 4.1.10 Distributions of houses with damaged roofs at several grids.

第 4 章 2

現地調査に基づく住宅被害の要因分析

Analysis of Effects on Residential Damage based on Field Survey

友清衣利子^{*1} 竹内崇^{*2} 西嶋一欽^{*3} 野田博^{*4}

Eriko TOMOKIYO, Takashi TAKEUCHI, Kazuyoshi NISHIJIMA, Hiroshi NODA

SUMMARY

The authors investigated factors of damage to houses based on a field survey targeting a certain area of Izumisano City, Osaka Prefecture, which experienced severe damage caused by Typhoon Jebi (T1821). It was found that significant number of old wooden houses, especially, houses constructed before 1959, covered with Japanese style roof tiles suffered from damage to their roofs, as opposed to new houses constructed after 2000. New houses constructed after 2010 had no damage to their roof. It could be said that the revision of the enforcement regulation in 2007 and the recent development of guidelines on the wind-resistant design roofing have been successful. However, the majority of the housing stock in the surveyed area in particular and areas affected by Typhoon Jebi in general consists of houses built before the revision, which largely accounts for the significant damage to houses. Damaged roof tiles scattered around as debris, causing damage to neighboring houses, independent of their construction years. It is suggested that more efforts should be directed to upgrade and/or maintain the roofing of existing houses in order to reduce wind-induced damage to the whole building portfolio in the near future.

key words: Field survey, House, Material, Roof, Wind debris

4.2.1 はじめに

2018 年台風 21 号によって、近畿地方を中心に甚大な被

害が生じ、大阪府では 66,000 棟以上の住宅が被災した¹⁾。

特に大阪府南部での被害が大きく、泉佐野市での被害住宅

*1 熊本大学大学院先端科学研究部 准教授 tomokiyo@arch.kumamoto-u.ac.jp

Associate Professor, Faculty of Advanced Science and Technology, Kumamoto University

*2 神戸大学大学院工学研究科 助教

Assistant Professor, Faculty of Engineering, Kobe University

*3 京都大学防災研究所 准教授

Associate Professor, DPRI, Kyoto University

*4 近畿大学建築学部 教授

Professor, Faculty of Architecture, Kindai University

数は11,423棟に上った。

強風被害の拡大には、風速の値のみならず個々の建物の構造や屋根形状等の構造物の特性が関連することが示されている²⁾。また、台風のような広域に及ぶ強風下では、隣接する建物との間隔や接道条件等の建物周辺状況が被害拡大に影響を及ぼすと考えられる^{3,4)}。本報では、台風21号による被害が広く分布した大阪府泉佐野市の一部地域を対象に現地でのヒアリング調査を行って、住宅被害状況を確認するとともに、被害拡大に影響を及ぼす要因を検討した。

4.2.2 現地調査の概要

2019年1月13日と14日に、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。図4.2.1に調査対象地域の概要を示す。約500m四方の領域にある384棟の建物に対し、目視調査と住民へのヒアリング調査を行った。目視

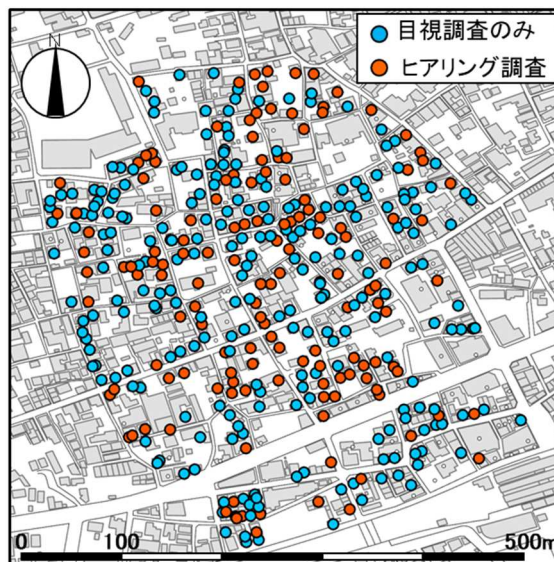


図 4.2.1 調査対象住宅の分布
Fig. 4.2.1 Distribution of target houses

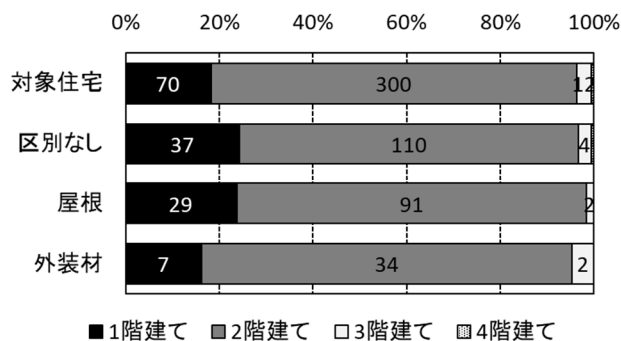
表 4.2.1 現地被害調査項目

Table 4.2.1 Item for field survey

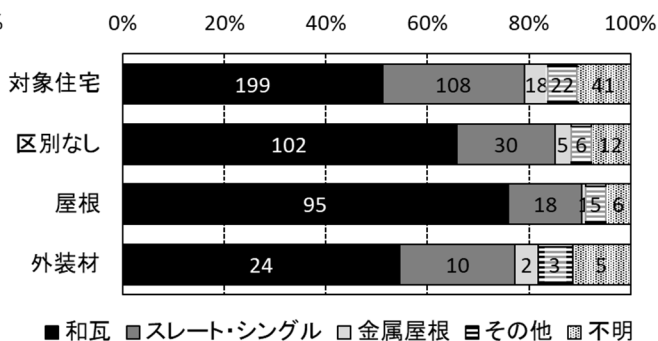
		調査項目		選択肢						
①		ヒアリング調査の有無	はい	いいえ (目視調査)						
②		ヒアリング対象者	家主	家主の配偶者	家主の子供	家主の両親	その他親類	隣人	不明	
③	1	建物の階数	1階建て	2階建て	3階建て	4階建て	5階以上			
	2	住居形態	戸建て住宅	共同住宅	併用住宅(店舗等との併設)					
	A	持ち家か借家か	持ち家	借家	不明					
	3	建物の構造	木造	鉄筋コンクリート造	鉄骨造	組積造	非木造	木造と非木造の混合	不明	
	4	屋根形状	切妻	寄棟	入母屋	陸屋根	片流れ	のこぎり屋根	不明	
	5	屋根葺材	和瓦	洋瓦	金属屋根	スレート	シングル	コンクリート	不明	
	6	壁面材料(複数回答可)	金属系サイディング	窯業系サイディング	コンクリート	木質系板張	土壁	セメント・モルタル・タイル	石・レンガ	
	7	雨戸の有無	ある	ない						
	8	建築年	1960年以前	1960年から1969年	1970年から1979年	1980年から1989年	1990年から1999年	2000年から2009年	2010年以降	不明
	9	建物被害の有無	はい	いいえ	不明					
	A	被害程度	全壊	半壊	一部損壊	不明				
	B	主な被害原因(複数回答可)	風を受けた	物が飛んできた	物が倒れてきた	建物破損による水漏れ	浸水	不明		
	C	主な被害方向(複数回答可)	北	東	南	西				
	D	屋根被害の有無	はい	いいえ						
	i	屋根の被害箇所(複数回答可)	軒先	棟	隅角部	中央	不明			
	ii	屋根の被害率	10%	25%	50%	75%	100%			
	E	外装材被害の有無	はい	いいえ						
	1 i	外壁の被害率	10%	25%	50%	75%	100%	なし		
	ii	外壁被害の方角(複数回答可)	北	東	南	西				
	2 i	被災窓の枚数	0	1	2	3	4	5	6	それ以上
	ii	被災窓の方角(複数回答可)	北	東	南	西				
	3 i	被災ドアの枚数	0	1	2	3	4	5	6	それ以上
	ii	被災ドアの方角(複数回答可)	北	東	南	西				
	4 i	被災雨戸・シャッターの枚数	0	1	2	3	4	5	6	それ以上
	ii	被災雨戸・シャッターの方角(複数回答可)	北	東	南	西				
	F	その他の被害(複数回答可)	室内	家財	車庫	アンテナ	エアコンの室外機	物置	看板	その他

調査のみの住宅は 239 棟, ヒアリング調査を行った住宅は 145 棟である。目視調査およびヒアリングの項目は, 表 4.2.1 に示す通りである。

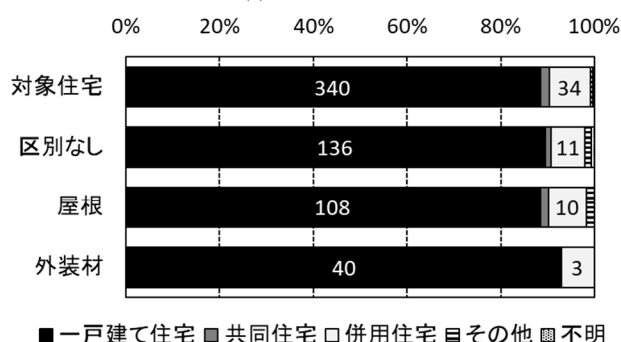
調査対象建物の特徴を図 4.2.2(a)～(h)に示す。図 4.2.2 には後述する被害住宅の特徴もあわせて示している。各図の最上段のグラフが, 調査対象住宅の特徴を示す。図



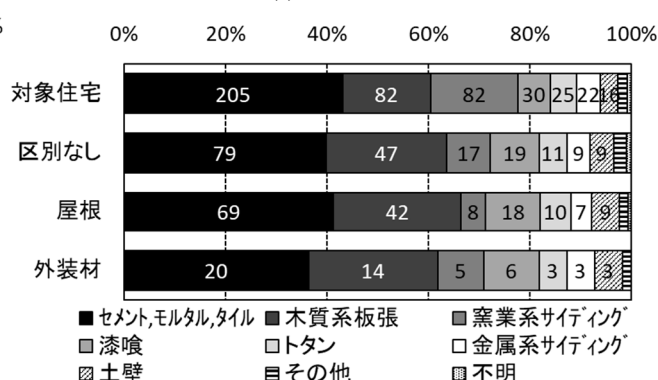
(a) 階数
(a) Number of stories



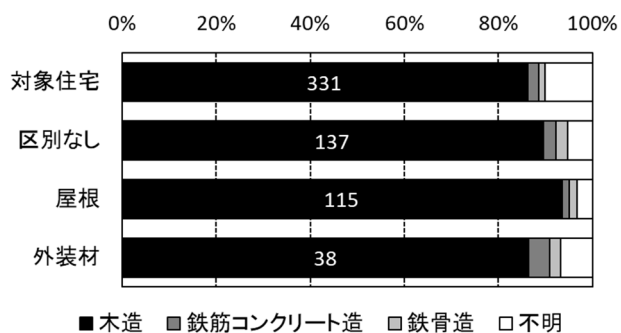
(e) 屋根葺材
(e) Material of roof



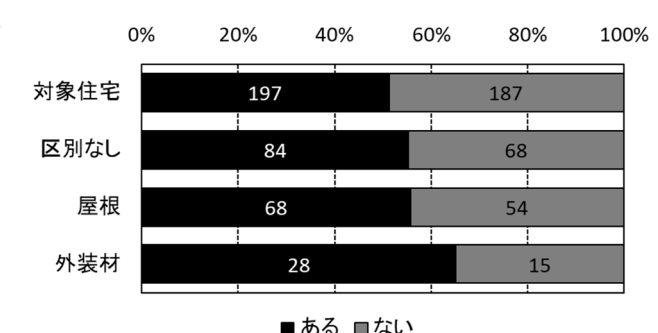
(b) 住居形態
(b) Living arrangement



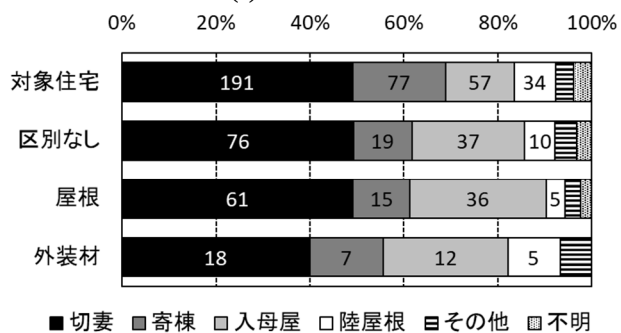
(f) 壁面材料
(f) Material of wall



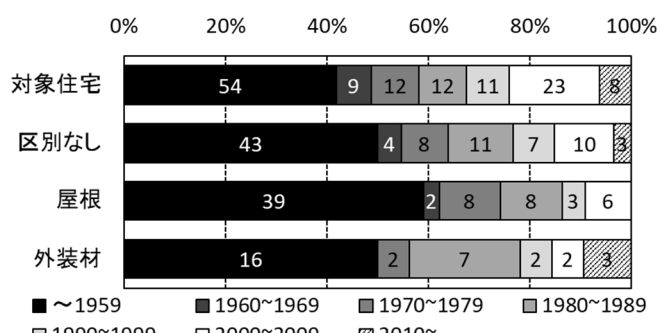
(c) 構造材料
(c) Structural material



(g) 雨戸の有無
(g) Shelter



(d) 屋根形状
(d) Roof shape



(h) 建築年代
(h) Year of construction

図 4.2.2 調査対象住宅の特徴
Fig. 4.2.2 Features of target houses

4.2.2(a)~(g)は調査対象住宅 384 棟を 100%としてそれぞれの特徴ごとに割合を示し、グラフ中にその棟数を示した。ただし、建築年代が不明である住宅は 255 棟と非常に多かったため、図 4.2.2(h)のみ「不明」を除いた割合を示した。図 4.2.2(a)より、調査対象住宅は2階建が最も多く300棟であった。図 4.2.2(b)より、一戸建の住宅が大半を占めていた。図 4.2.2(c)より、約 85%が木造であり、一部鉄筋コンクリート造と鉄骨造住宅があった。図 4.2.2(d)より、屋根形状は切妻型が約半数を占め、次いで寄棟、入母屋型が多い。図 4.2.2(e)より、和瓦葺が約半数で、次いでスレート・シングル葺の屋根が多かった。図 4.2.2(f)より、壁材はモルタル塗りが最も多く、次いでサイディング、木質系板張の割合が高かった。図 4.2.2(g)より、約半数にあたる197棟の住宅では、開口部に雨戸が設置されていない。図 4.2.2(h)より、54 棟が1959 年以前に建てられた住宅で、比較的古い住宅が多く残る地域であった。ただし、目視調査のみの住宅も多く、255 棟の住宅の建築年は「不明」であったため、図 4.2.2(h)には示していない。

調査対象地域に最も近い気象官署の観測点はアメダス熊取で、東南東に約 4.5km 離れている。台風 21 号が接近した 2018 年 9 月 4 日 13 時 47 分に最大風速 26.8m/s の南風、13 時 40 分に最大瞬間風速 51.2m/s の南風を観測した。西に約 8km 離れた関空島での風速は、13 時 47 分に最大風速 46.5m/s の南南西の風、13 時 38 分に最大瞬間風速 58.1m/s の南南西の風であった。調査対象地域の詳細な風速は明らかではないが、周辺での観測記録および再解析結果⁵⁾より、最大風速は約 27m/s、最大瞬間風速は約 50m/s の南寄りの風が想定される。

4.2.3 住宅被害の特徴

4.2.3.1 被害住家の分布

前節で述べた調査対象住宅の被害の有無を図 4.2.3 に示す。155 棟の住宅は被害の有無が不明であるが、152 棟は被害あり、77 棟は被害なしとの回答が得られた。被害の有無が判別できた住宅のうち、66%に被害があったことになる。図 4.2.3 に示すように、被災住宅は調査対象地域全体に広く分布していた。

以降では、被害ありと回答された 152 棟の住宅を対象に被害程度や被害箇所を整理する。

4.2.3.2 被害程度別および被災要因別の被災住宅分布

図 4.2.4 には被害程度別の住宅の分布を示す。被害程度は 21 棟が「不明」であったが、全壊 4 棟、半壊 3 棟、一部損壊 124 棟であった。図 4.2.4 より、被害の大きい住宅

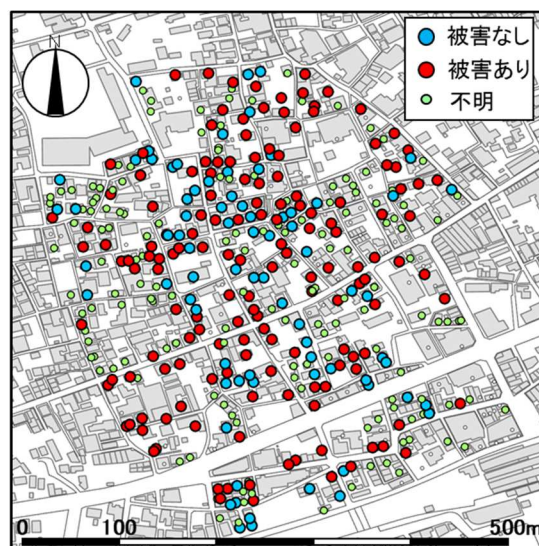


図 4.2.3 被災住宅の分布

Fig. 4.2.3 Distribution of damaged houses

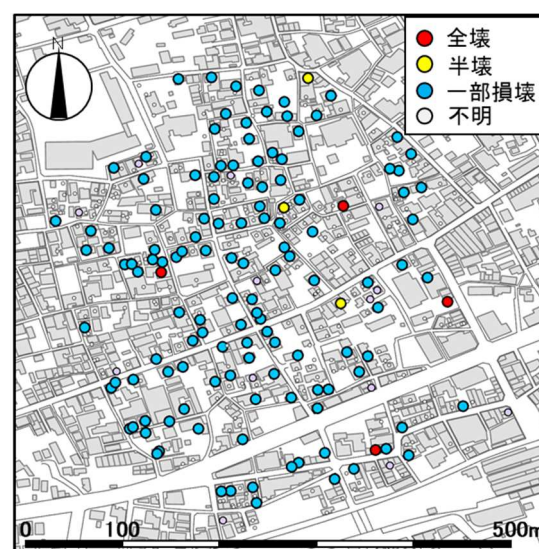


図 4.2.4 被害程度別の被災住宅の分布

Fig.4.2. 4 Distribution of houses with each damage rank

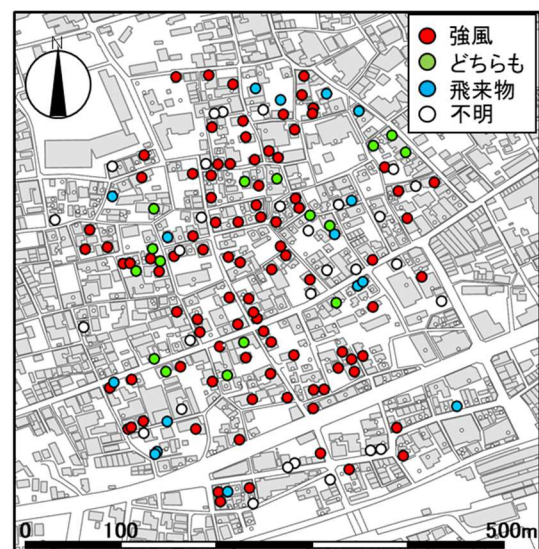


図 4.2.5 主な被災要因別の被災住宅の分布

Fig. 4.2.5 Distribution of houses with each cause of damage

の分布はばらついていて、ここでの被害程度は、内閣府の災害にかかる住家の被害認定基準による⁶⁾。

図 4.2.5 には主な被災要因別の被害分布を示す。「風を受けた(強風)」との回答は 109 件、「物が飛んできた(飛来物)」との回答は 33 件、「不明」が 30 件であった。図 4.2.5 から分布状況に明らかな偏りはみられなかった。

4.2.3.3 被災部位別の被害住宅の特徴

図 4.2.6 に被災部位別の被災住宅の分布を示す。屋根に被害を受けた住宅は 122 棟、外装材に被害を受けた住宅は 43 棟であった。どちらの部位にも被害が生じた住宅は 29 棟である。

上述した図 4.2.2(a)～(h)には、被害住宅の特徴を合わせて示した。被災部位を区別せず被害が発生した住宅(152 棟)、屋根被害が生じた住宅(122 棟)、外装材被害が生じた住宅(43 棟)に 3 分類して、上から順に示している。グラフ中の数字は対象住宅の棟数である。

(1) 被災住宅全体の特徴

図 4.2.2(a)より、被災住宅は全調査対象住宅と比べ、1 階建の割合がやや増加した。図 4.2.2(b)より住居形態には関連が見られない。図 4.2.2(c)より、被災住宅は木造住宅の割合が少し増えた。図 4.2.2(d)より、被災住宅は寄棟型の割合が減り、入母屋型の割合がやや増えた。図 4.2.2(e)より、屋根葺材別にみると、被災住宅は和瓦の割合が 6 割を超えた。一方で、スレート・シングルの割合は低下した。図 4.2.2(f)の壁面材料に着目すると、被災住宅は木質系板張と漆喰の割合が増えて、窯業系サイディングの割合がやや減少した。ここでは住宅の屋根被害も含めた被害の有無に着目したため、図 4.2.2(g)の雨戸の有無はほとんど影響がなかった。図 4.2.2(h)より、建築年別にみると、被災住宅は 1959 年以前の住宅の割合が増え、2000 年以降に建てられた住宅の割合が減った。

図 4.2.7(a)～(c)に建築年代別に調査対象住宅の屋根形状および屋根葺材ごとの住宅の割合を示す。1959 年以前に建築された住宅では入母屋屋根が 4 割を占め、和瓦葺が 8 割を超えていた。また、セメント・モルタル・タイルおよび木質系板張の壁が多く、サイディングの住宅はほとんどない。つまり、前述した屋根形状、屋根葺材および壁面材料による被災住宅数の違いは、建築年に関連しており、古い住宅に被害が集中したことを結論付ける。

図 4.2.8(a)～(c)に被災住宅の被害程度、被災要因および主な被災方向を示す。図 4.2.8(a)より、調査対象住宅のほとんどは一部損壊被害である。図 4.2.8(b)より、強風による被害が 7 割、飛来物による被害が 2 割程度であった。図 4.2.8(c)

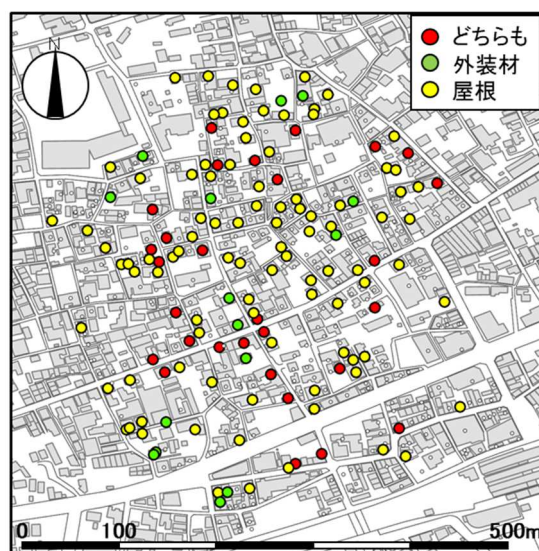
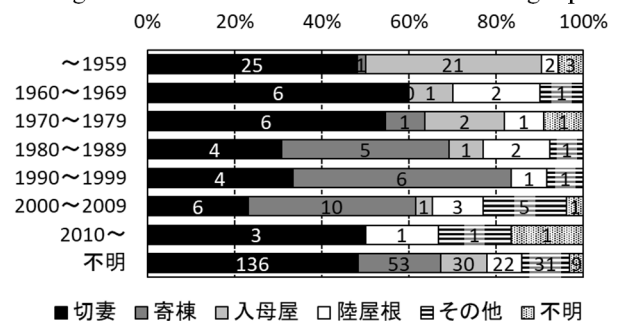


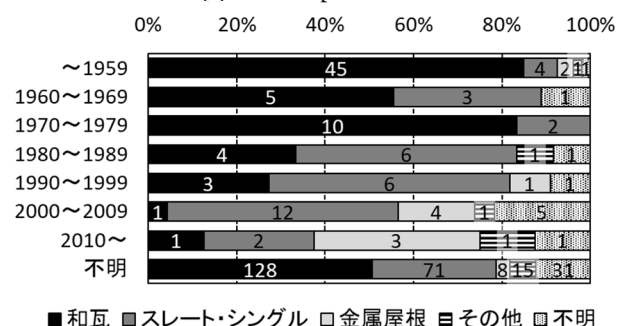
図 4.2.6 被災部位ごとの被災住宅の分布

Fig. 4.2.6 Distribution of houses with each damaged part



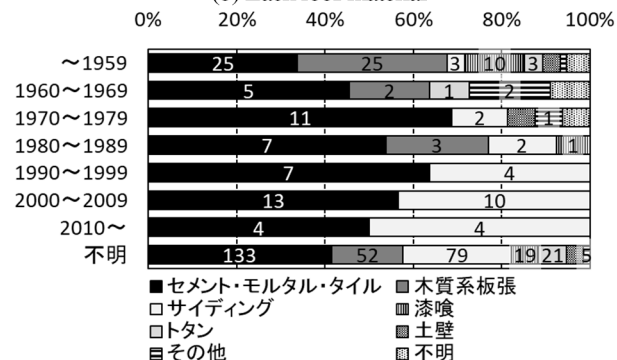
(a) 屋根形状ごとの割合

(a) Each shape of roof



(b) 屋根葺き材ごとの割合

(b) Each roof material



(c) 壁面材料ごとの割合

(c) Each wall material

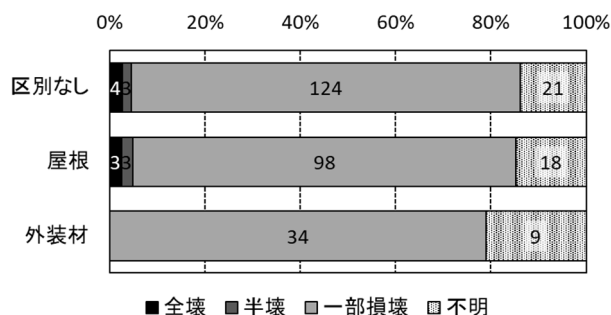
図 4.2.7 建築年別の住宅屋根の特徴

Fig. 4.2.7 Features of roof of target houses built in each

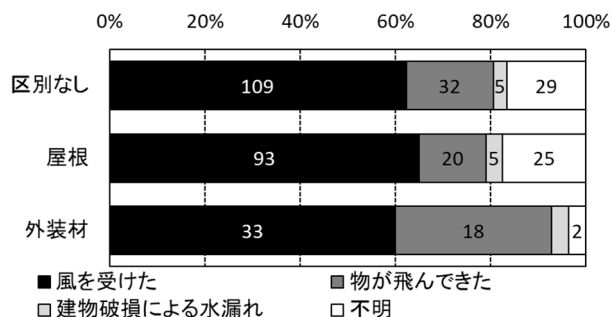
より、主な被害面は、強風の風向に面した南側が最も多いが、東側や西側との回答も少なくはなく、北側との回答も 1 割程度あった。

(2) 屋根被害住宅の特徴

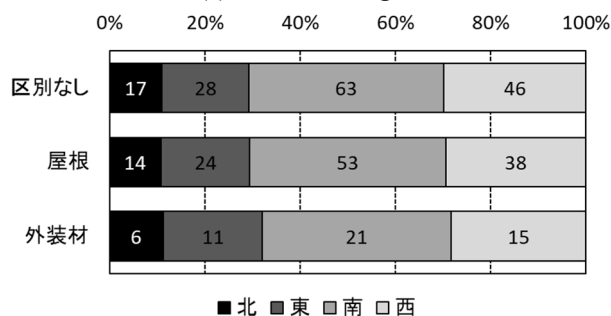
図 4.2.2 の 3 段目に示す屋根に被害が生じた住宅の特徴に着目する。階数や住居形態に特徴は見られないが、図 4.2.2(c)より、屋根に被害を受けた住宅は木造の割合がやや大きい。また図 4.2.2(d)より寄棟屋根の割合が減少し、入母屋根の割合が増加している。図 4.2.2(e)より屋根被害を受けた住宅の約 75%が和瓦で、その割合は非常に大きい。図 4.2.2(f)より、外壁材料は木質系板張と漆喰の割合がやや大きかった。図 4.2.2(g)より建築年を比較すると、被害住宅全体に比べて、屋根被害を受けた住宅は 1959 年以前に建てられたものの割合が大きい。また、同図より 2010 年以降に建てられた 8 棟では屋根被害が発生しておらず、2007 年の建



(a) 被災程度
(a) Damage rank



(b) 被災要因
(b) Cause of damage



(c) 被災方向
(c) Direction of damage area

図 4.2.8 住宅の被災状況
Fig. 4.2.8 Damage situation

築基準法施行規則や鋼板製屋根構法標準の改正⁷⁻¹⁰⁾が、屋根被害低減に貢献している可能性がある。屋根に被害を受けた住宅は、前述のように寄棟屋根の和瓦葺で漆喰や木質系板張の壁を有する比較的古いものに集中していた。現地調査のヒアリングで、屋根葺材の緊結に劣化が生じていたものが被害を受けた、建築後に改修を行ったので被害が生じなかった等の証言が得られていることから、古い住宅であっても建築後に屋根葺材の維持管理が行われていたものは被害が生じにくかったと思われる。

図 4.2.8 を見ると、屋根被害が生じた住宅の被災程度、被災要因および主な被害方向は、被災部位の区別をしなかった被災住宅とほぼ同じ傾向を示した。図 4.2.9 に屋根の被災部位を、図 4.2.10 に屋根の被害率を示すが、被災部位は「棟」の回答が最も多かった。棟部は緊結されていない場合が多かったため、被害が生じたと考えられる。屋根のみの被害率は 10%以下が最も多かった。

(3) 外装材被害住宅の特徴

次に図 4.2.2 の最下段に示す外装材被害を受けた住宅に着目する。図 4.2.2(a)～(c)および(e)に示すように、外装材に被害が生じた住宅の階数、住居形態、構造種別および屋根葺材ごとの割合は、グラフの最上段に示す全調査対象住宅とほぼ同じであり、これらの項目は外装材被害の発生に関連がないと考えられる。図 4.2.2(d)より、屋根被害を受けた住宅に比べ、外装材被害が生じた住宅は寄棟屋根の割合が相対的に増えた。図 4.2.7(a)に示したように屋根形状は建築年代と関連があり、1980 年以降に寄棟屋根の住宅が増えること

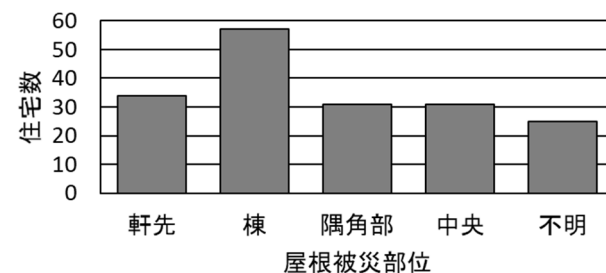


図 4.2.9 屋根被災部位別の住宅数
Fig. 4.2.9 Number of houses with each damaged part

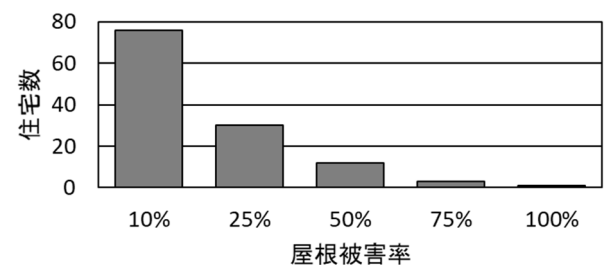


図 4.2.10 屋根被害率別の住宅数
Fig. 4.2.10 Number of houses with each damage rate of roof

から、特定の屋根形状が外装材被害に関連しているのではなく、建築年代が比較的新しい建物にも被害が生じたと考えられる。また、図 4.2.2(f)より壁面材料は木質系板張の割合がやや大きかった。図 4.2.2(g)より、外装材に被害が見られた住宅は、雨戸を設置した住宅がやや多かった。図 4.2.2(h)より、外装材被害が生じた住宅は比較的新しいものの割合が高く、住宅の形状や材料、建築年代に関わらず、外装材には被害が生じたといえる。

図 4.2.8(a)より、外装材被害が生じた住宅に全壊のものはなかった。図 4.2.8(b)より、被災要因は、「風を受けた」に比べて「物が飛んできた」との回答が非常に多かった。主な被害方向は南が最も多いが、東および西との回答も多い。

外装材被害は、外壁の被害と窓、ドア、シャッターなどの開口部被害に分けられる。外装材被害が生じたとの回答は 20 件あり、外壁の損傷が 8 件、窓の破損が 10 件、ドアの破損が 6 件、雨戸の破損は 7 件であった。被害が重複した住宅も多い。図 4.2.11 に外壁の被害方向を、図 4.2.12 に開口部の被害方向を示す。外壁の被害は西側にも多く発生しているが、開口部の被害は主に南側に集中していた。

4.2.3.4 住宅被害発生要因の分析

被害の有無に関する情報の得られた 229 棟に対し、被災部位に注目して建築年代別の住宅数を図 13 に示す。前述のように本調査対象地区では、注目する 229 棟のうち、152 棟(66%)に被害が発生しており、その被害率は大阪府の住宅被害率(約 1%)や泉佐野市の被害率(約 25%)と比較¹¹⁾して、非常に大きかった。1959 年以前に建てられた住宅に着目すると、53 棟中 43 棟(被害率 81%)に被害が生じており、被害が顕著である。被災部位に着目すると、39 棟は屋根被害が生じており、古い住宅では屋根の損傷が多い。一方で、2000 年以降に建てられた住宅 8 棟のうち、被害が生じたのは 3 棟(被害率 37%)であった。3 棟のうち 1 棟は外壁のみの損傷で「強風を受けた」との回答で、2 棟は窓ガラスの損傷で「物が飛んできた」との回答であった。ただし、うち 1 棟は外壁も損傷していた。これらはすべて外装材被害で、屋根の損傷はなかった。

ところで、台風 21 号接近通過時に調査対象地区近隣の熊取観測点で観測された最大風速は 27m/s であった。第 4 章 1 節に示すように、泉佐野市を含む大阪府南部の設計基準風速 34m/s に地表面粗度区分 III として地表面の影響を考慮した場合の換算風速は 26.9m/s であり、観測風速にほぼ等しい。一部地域で設計基準風速を超えていた可能性はあるものの、調査地区周辺で甚大な被害が発生した

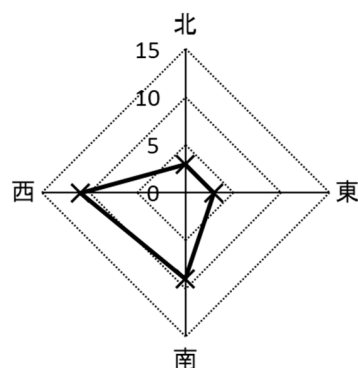


図 4.2.11 壁面の被害方向別住宅数
Fig. 4.2.11 Number of houses with each direction of damaged wall

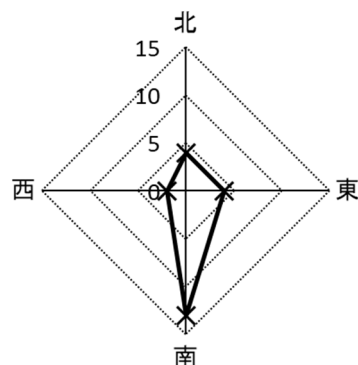


図 4.2.12 開口部の被害方向別住宅数
Fig. 4.2.12 Number of houses with each direction of damaged openings

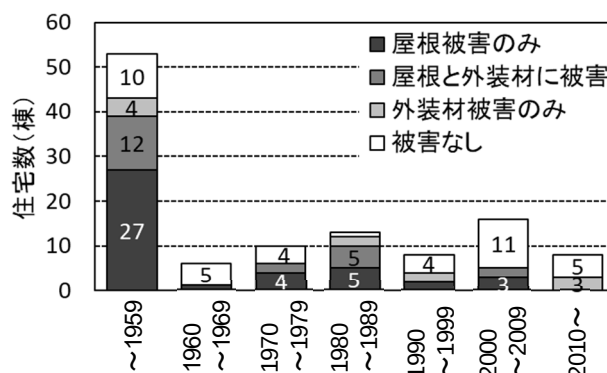


図 4.2.13 被災部位と建築年代別の住宅数
Fig. 4.2.13 Number of houses with each damaged part in each decade

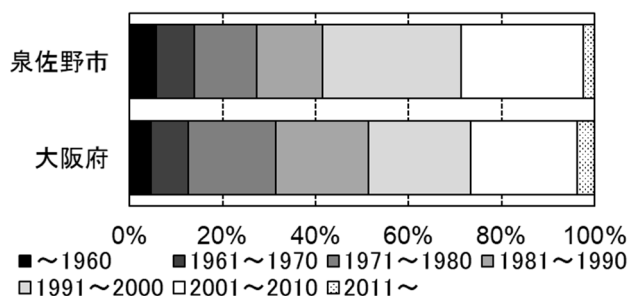


図 4.2.14 大阪府と泉佐野市の建築年代別の住宅数の割合
Fig. 4.2.14 Ratio of number of houses in each decade in Osaka Prefecture and Izumisano City

要因は、想定以上の強風ではなく、主に建築年に起因する住宅の状態であると思われる。実際に、調査対象地域において、比較的新しい住宅の被害は限定的であり、適切な耐風設計と十分な維持管理が行われた建物であれば、強風の風圧そのものによる大きな被害が生じなかった可能性が高い。

図 4.2.14 に平成 25 年の住宅・土地統計調査¹²⁾に基づく、大阪府および泉佐野市の建築年代別の住宅割合を示す。本調査において大きな被害率となった、1960 年以前に建築された建物に着目すると、大阪府と泉佐野市でのその割合は約 5% である。図 4.2.2(h) に示したように調査対象地域での 1959 年以前の建物の割合は約 40% であり、大阪府、または泉佐野市の中でも特に 1959 年以前に建てられた住宅が多い地域であった。そのことが調査地域の高い被害率につながったと考えられる。

4.2.4 まとめ

本報告では、2018 年台風 21 号によって特に大きな被害が発生した大阪府泉佐野区の一部地域を対象とした現地調査をもとに住宅の被害要因を検討した。

調査地域では、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、比較的新しい住宅でも外装材被害が発生したことが分かった。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と言える。しかしながら、既存住宅の多くは 2007 年以前に建てられたものであるため、いまだ強風風圧による被害を防ぎきれていない。また、飛来物による二次被害は耐風設計された新しい住宅にも及んでおり、依然として甚大な強風被害が発生していることを説明できる。

謝辞 東京大学 CSIS 共同研究 No.608 の成果の一部である (Zmap TOWN II (2016 年度 Shape 版)大阪府 データセット¹⁾提供)

参考文献

- 1) 大阪府危機管理室, 台風 21 号にかかる被害状況等について (第 30 報), 2018.12.25.
- 2) 友清衣利子, 前田潤滋, 強風による住家建物被害の拡大に及ぼす影響因子の抽出法に関する試みー強風被害発生要因の分析への構造物特性指標の利用例ー, 日本建築学会構造系論文集, 74 巻 642 号, p. 1423-1431, 2009.

- 3) E. Tomokiyo, J. Maeda, Effects of surrounding buildings on structural damage caused by strong winds during a typhoon, International Workshop on Wind-Related Disasters and Mitigation (WRDM), 2018.3.
- 4) 美並浩成, 建築群の風圧データベース構築による都市の強風被害リスク評価の高精度化, 京都大学修士論文, 2016.
- 5) Takemi, T., T. Yoshida, S. Yamasaki, K. Hase, 2019: Quantitative estimation of strong winds in an urban district during Typhoon Jebi (2018) by merging mesoscale meteorological and large-eddy simulations. SOLA, Vol. 15, pp. 22-27, doi:10.2151/sola.2019-005.
- 6) 内閣府, 災害に係る住家の被害認定基準運用指針, 2013.
- 7) NPO 法人住宅外装テクニカルセンター, 屋根耐風性能設計施工ガイドライン, 2002.
- 8) 日本金属屋根協会, 鋼板製屋根構法標準, 2007.
- 9) 全日本瓦工事業連盟, 瓦屋根標準設計・施工ガイドライン, 2012
- 10) 奥田泰雄, 建築基準法の風荷重関係規定について, 日本金属屋根協会テクニカルレポート, No.32, pp.2-7, <http://www.kinzoku-yane.or.jp/technical/pdf/261sp.pdf>
- 11) 小林文明他, 平成 30 年台風 21 号による強風被害調査, 日本風工学会誌, Vol.44, No.1, pp.44-53, 2019.
- 12) 総務省統計局, 平成 25 年住宅・土地統計調査, <https://www.stat.go.jp/data/jyutaku/2013/tyousake.html> , (2019-02-09 参照)

第5章1

2018 年台風 21 号の災害対応 Disaster Response to the 2018 Typhoon 21

牧 紀男^{*1}
Norio MAKI

SUMMARY

This report summarizes disaster response of electric company, Kansai International Airport, Train company and a local government to 2018 Typhoon 21. One to two hours interview and document collection on the internet is used as a dataset for the report. Damage level to electric supplying system almost reach to the level of the 1995 Kobe earthquake. Airport recovery was earlier than expected because of the effort of talented engineers. Establishment of common operational picture was the issue in the operation at the Kansai International Airport response. JR west train company's train stop operation recognized as a common operation at the time of typhoon responding operation.

key words: Disaster Response, Kansai International Airport, Electricity, Train Operation

5.1.1 はじめに

本報告では 2018 年台風時の行政、ライフライン企業、鉄道事業者の災害対応の状況についてヒアリング調査により明らかにすることを目的とする。調査対象組織、ヒアリングの概要については表 5.1.1 に示す通りである。

ヒアリングの内容は、1) 時系列での対応状況（組織の設置、運休決定、再開決定、マスコミ発表等）、2) 台風 21 号の対応で上手くいった点、3) 台風 21 号の対応で上手くいかなかった点、その後の改良点、4) 計画運休を実施するようになった経緯（ハリケーン・サンディーの教訓が反映されているのか）＜JR 西日本のみ＞、5) その他であり、事前にインタビュー内容を知らせた上でインタビュー調査を実施した。以下、各組織の災害対応状況についての調査結果をまとめる。

* 1 京都大学防災研究所 教授 maki.norio.8v@kyoto-u.ac.jp
Professor, Disaster Prevention Research Institute Kyoto University

表 5.1.1 調査対象組織とヒアリングの概要

	組織名称	日時	対応者
ライフライン	関西電力	2018年11月1日午後5時～6時30分	総務部門担当者、送配電部門担当者
鉄道	JR西日本	2019年1月17日午前10時～11時30分	安全推進部門担当者、施設部門担当者
空港	関西エアポート株式会社	2019年1月8日午前10時～11時30分	技術部門担当者
行政	大阪府	2019年1月9日午前10時～10時30分	危機管理室担当者

5.1.2 ライフライン企業の災害対応

ライフライン企業の災害対応事例として強風の影響により大規模な停電被害を経験した関西電力の事例について調査を行った。

5.1.2.1 被害の規模

台風 21 号による関西電力の被害は配電線の回線数では 3765 回線、停電戸数では 220 万軒におよぶ。停電軒数は阪神・淡路大震災 260 万軒であり、阪神・淡路大震災の方が大きい。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る。また被害地域は広域にわたっており、阪神・淡路大震災の被害は阪神間の地域に限られていたのに対し、和歌山・大阪・兵庫・京都・滋賀・奈良と関西電力の電力供給地域全体で配電設備に被害が発生した。また病院、工場等の大規模施設に送電を行う特高線についても 10 か所で断線の被害が発生した。

多くの回線が被害を受けたことにより、停電情報共有システムがダウンするという問題も発生した。台風 21 号による電力被害は阪神・淡路大震災と同じ規模の被害であったと考える必要がある。ただし、復旧作業の際に大きな課題となる電柱の被害という観点からみると阪神・淡路大震災では約 1 万本の電柱の復旧が必要であったのに対し、台風 21 号では 1343 本であり、電柱工事の絶対量という観点からすると阪神・淡路大震災の方が大きい。

5.1.2.2 災害対応

災害対応については台風到達の 1 日前の 9 月 3 日 14 時 30 分に警戒本部を設置、同日 15 時には社長をトップとする非常災害対策総本部を設置し、台風が上陸する直前の 9 月 4 日の 10 時に第 1 回非常災害対策総本部会議を開催し、台風の到来に備えている。関西電力では本社に災害対応のためのオペレーションセンターが設置されている。

しかし、先述のように阪神・淡路大震災クラスの大変大きな被害が発生したこと、復旧に長時間を要し、最終的に復旧作業が完了するのは 9 月 20 日 17 時 51 分であり、2 週間程度の時間を要している。9 月 20 日に停電の復旧が完了したことから、9 月 21 日 17 時に非常災害対策総本部は閉鎖された。

台風 21 号による停電の復旧曲線を図 5.1.1 に示す。復旧曲線を見ると発生からほぼ 1 日で 81% が回復しており、その後、発生から 5 日後にかけて徐々に復旧が進み（99%）、その後は復旧率がほとんど変化せず、発生から 16 日後に完全復旧している。この復旧曲線から、直後対応により容易に復旧可能であった箇所、さらに人員機材の確保、道路アクセスの復旧にあわせて順次復旧が可能であった箇所、さらに現場へのアクセスが難しく復旧に長期間必要となった箇所が存在したことが推測される。阪神・淡路大震災の電力復旧では地震発生から 6 日後の 1 月 23 日 15 時 04 分に応急送電を完了している⁴。阪神・淡路大震災の場合は火災焼失地域等、送電を行うことができない地域もあり、完全復旧はさらに先のこととなるが、21 号台風の 99% 復旧の 5 日後を応急送電完了と考え、1 日早い復旧となっていると考えられる。

復旧工事にあたっては関西電力のエリア間、さらには他電力からの応援も行われた。他電力とは大規模災害時の電力復旧に関する相互応援に関する計画が存在し応援チームの受入拠点を事前に決めていたことが復旧についての応援を受け入れる上で有効に機能した事例もあった。

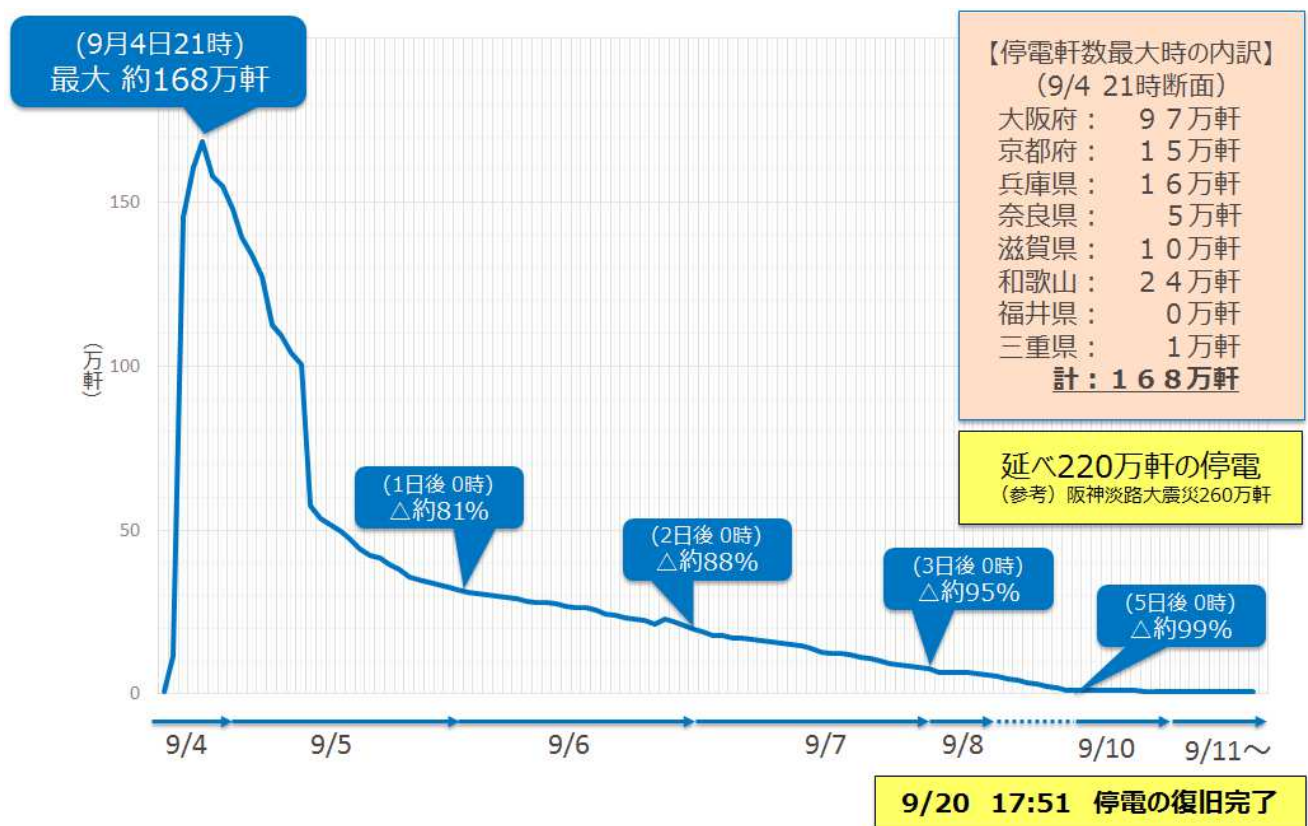


図 5.1.1 台風 21 号にともなう停電の復旧曲線（出展：関西電力資料¹⁹）

復旧工事に加えて、停電にともなうユーザー対応が大きな課題となった。先述のように停電情報システムが、停電箇所が多いためダウンしたことにより停電箇所の把握を行うことができなくなった。インターネット等を通じて停電地域や停電軒数の発信ができないこと・さらには被害の全容の把握ができなかったことにより復旧見通しの提示が遅れたことから、問合せが殺到し、関西電力のコールセンターの電話がつながりにくい状況が発生し、ユーザーが行政機関に停電状況・復旧見通しの問い合わせるという問題が発生した。

5.1.2.3 対応検証の取り組み

関西電力では上記のような課題を踏まえ社長とトップとする 1) 停電復旧検証部会、2) お客さま対応検証部会、3) 長期停電お客さま対応検証部会、4) 自治体連携検証部会の 4 部会からなる「台風 21 号対応検証委員会」を設置し、検証を行い、12 月 13 日に最終報告書のとりまとめを行い、検討結果はインターネット上 (https://www.kepcoco.jp/souhaiden/pr/2018/pdf/1213_1j_02.pdf, 2019 年 1 月 31 日閲覧) に掲載されている。内容の詳細については上記、関西電力の資料を参照されたい。

5.1.3 関西国際空港の災害対応

高潮による浸水被害・船舶の衝突により連絡橋が被害を受けた関西国際空港の事例について調査を行った。以下にインタビュー調査結果をまとめる。

5.1.3.1 災害対応の仕組み

関西国際空港を運営する関西エアポート株式会社では、災害対応のレベルとしてブロンズ、シルバー、ゴールドという 3 段階のレベルを設定している。ブロンズでは 24 時間体制で空港の運営をおこなっているオペレーション (Kix Operation Center, KOC) の責任者、シルバーでは執行役員クラスのクライシス・マネージャー、ゴールドでは CEO が指揮者となるような仕組みが構築されている。ブロンズ、シルバー、ゴールドというレベル設定は英国等の危機対応の仕組みで採用されている仕組みであり、関西国際空港の運営が 2016 年からオリックス株式会社と VINCI Airports を中核

とするコンソーシアムである関西エアポート株式会社となって以降導入された。海外の会社と共同で運営されることから国際的な危機対応の仕組みが利用されるようになっていっていると考えられる。

5.1.3.2 災害対応と情報共有

台風 21 号の対応については 9 月 4 日の 8 時に通常の台風時のオペレーションとしてシルバーの体制に移行し、10 時には鉄道の運行が停止され、11 時 10 分に最終の飛行機が出発を行った。12 時には警報が発令されたことから滑走路が閉鎖され、13 時半ごろに台風が最接近し、浸水被害がはじまり、15 時には空港を閉鎖するという措置がとられた。

またその後、体制はゴールドに移行された。ゴールドの体制は航空機事故・テロ・巨大災害といった事態を想定したもので、関西エアポートでゴールドが立ち上げられたのは今回が初めてである。ゴールド体制は 9 月 21 日まで継続され、1 日 2 回本部会議が実施された。朝の本部会議では現状の共有と当日の活動目標が設定され、夕方の会議では活動目標の達成状況を確認するという目標管理型での対応が行われた。しかし、本部会議に参加したのは関西エアポートの関係者のみで、航空会社・鉄道会社等の関連する組織は参加していなかった。

災害後設置された「危機対応（管理）体制タスクフォース」での検証でも「関空全体の情報連携強化：CDM(Collaborative Decision Making)―情報共有・相互作用による一体的な空港運営の実現^{iv)}」ということが提言され、そのため情報共有が課題となったことが分かる。台風 21 号の後に、再度、日本に上陸した台風 24 号の対応ではすでに警察、海上保安庁、消防、鉄道会社といった関係機関も本部会議に参加するように改良されている。

記者対応は、広報担当者が随時問い合わせに対応して行われていた。広報資料についてはインターネット上で確認できる情報をとりまとめたものであるが、当日の 2018 年 9 月 4 日 17 時に「関西 3 空港への台風 21 号の影響について」、21 時に「関西 3 空港への台風 21 号の影響について（その 2）」という情報提供が行われ、9 月 5 日は 2 つの資料、9 月 6 日に CEO と Co-CEO のメッセージとともに「関西国際空港が空港を部分的に再開―台風 2 号発生後 3 日目に初の国内旅客便運航―」という資料、9 月 7 日は国際線の一部再開に関する資料、9 月 8 日には CEO と Co-CEO が 15 時記者会見を行い記者会見の要旨が、その後、復旧状況についての情報が 9 月 22 日まで毎日提供され、その後はほぼ 3 日に 1 回の割合で提供されていく。



図 5.1.2 広報資料の状況 (<http://www.kansai-airports.co.jp/news/2018/>, 2019 年 1 月 31 日確認)

5.1.3.3. 復旧

復旧については台風 21 号の被害発生から 17 日後の 9 月 21 日に全面再開^{v)}が行われており、被害の規模から考えると非常に迅速な復旧が行われている。インタビューでは当初は 3―6 カ月必要だと想定されたということであるが、1 カ月かからずに復旧できている。迅速に復旧が可能であった理由として、長く勤めている技術者が残っていること、協力会社が優先的に資機材・人員を投入してくれたこと、被害が関西国際空港に集中していたこと等が挙げられる。

5.1.3.4 今後の課題

関西エアポート株式会社では護岸タスクフォース、地下施設タスクフォース、危機対応（管理）タスクフォースを立ち上げ検討を行っているが、ここでは危機対応（管理）タスクフォースのとりまとめ結果^{vi)}について報告する。

課題として、1) マルチハザード、予防・準備／緊急対応／早期復旧のすべてのフェースに対応する新 BCP の必要性、2) 関係事業者との情報共有・連携、3) 空港従業員の教育・訓練、4) 3 空港（大阪、関西、神戸）の補完体制、5) 非常時の関係機関との連携及び KAP 意思決定の一元化・迅速化、6) 利用者への情報提供の強化、機能喪失ごとの緊急対応プラン／早期復旧プラン、7) 地域（地元自治体等）との連携といったことが挙げられており、それぞれの課題についての対策の検討が行われている。

5.1.4 JR 西日本の災害対応

台風 21 号接近にともない計画運休を行った JR 西日本の災害対応について調査を行った。以下、インタビュー調査の結果をまとめる。

5.1.4.1 計画運休の実施

鉄道事業者は雨量・風速等について事前に定めた閾値にもとづき運行取り止めを行っている。台風等の接近時に運行を継続すると駅間で乗客がいる状態での運行取り止め等の事態の発生が予想されるため、乗客の安全確保という観点から事前の運行停止を実施している。2014 年以前も部分的には実施されていた。2014 年台風 19 号では近畿圏全域で、事前に通知した上で「全面運休」が実施されたことから、マスメディアはそのことを称して「計画運休」と呼び、「計画運休」という言葉が一般的に使われるようになった。現在は JR においても「計画運休」という用語が使われている。

2012 年のハリケーン・サンディー時にニューヨーク地下鉄が事前に運行を停止し、その結果、車両の被害を免れた事例が知られることとなったことは「計画運休」をする直接的なきっかけとなったわけではないが、社会的に「計画運休」が認識されるきっかけとなったと考えている。計画運休予定のアナウンスは 24 時間前をめどとして実施することとしているが、土日を含む場合には可能な限り週末に情報提供を実施することもある。

5.1.4.2 災害対応の仕組み

JR の台風に対応した列車運休等の災害対応は、新幹線鉄道事業本部・金沢支社・近畿総括本部・和歌山支社・福知山支社・岡山支社・米子支社・広島支社の各支社等の事業所単位で意思決定が行われる。本社は各支社等のサポートの役割を担う。災害対応時は、各支社等の災害対応スペースと本社の災害対応スペースを、テレビ会議システムを利用して緊ぎ情報の共有を行う。またマスコミへの情報提供についても各支社等の事業所単位で行う。

台風接近時は、進路について様々な情報にもとづき分析を行い、接近が想定される場合には各支社長等の判断で支社長等とトップとする対策本部を設置する。気象情報から得られる台風の接近状況に応じたタイミングで、台風の通過時間・通過後の点検作業の時間等を検討し、いつからいつまで運休するのかについての「大方針」の決定を行う。災害対応は、予報の分析・運休計画・アナウンスという事前の取り組み（Step1）と点検・ダイヤ運行計画策定という事後の取り組み（Step2）から構成される。計画運休については 2014 年から実施してきていることから実施のノウハウの蓄積が行われるようになってきており、マニュアルとなる計画運休のガイドラインの整備に向けた検討を行っている。

台風 21 号の対応においては各支社等において対策本部が設置され、本社には鉄道本部長（副社長）をトップと対策本部が設置され、9 月 3 日 10 時 45 分に計画運休のアナウンスが行われた。

5.1.4.3 課題

予想された進路で台風が接近した場合は適切な対応が取られたという評価になるが、進路がずれた場合には、「なぜ計画運行を行ったのか」といった印象を一般の人は持つ場合もある。また、当初の計画とは進路が変化してきた場合も、鉄道運行は大規模システムであり、人員・鉄道車両の配置を行う必要があり、急には計画を変更できないという問題も存在する。さらに計画運休は当然のことながら減収につながる。図 5.1.2 に災害対応フェーズと各フェースにおける課題を示す。

災害に適切に対応する、安全の確保という観点から考えると、空振りを恐れずに計画運行を行うということは非常に重要であり、社会がそのことが通常の対応として受け入れる必要があると考える。

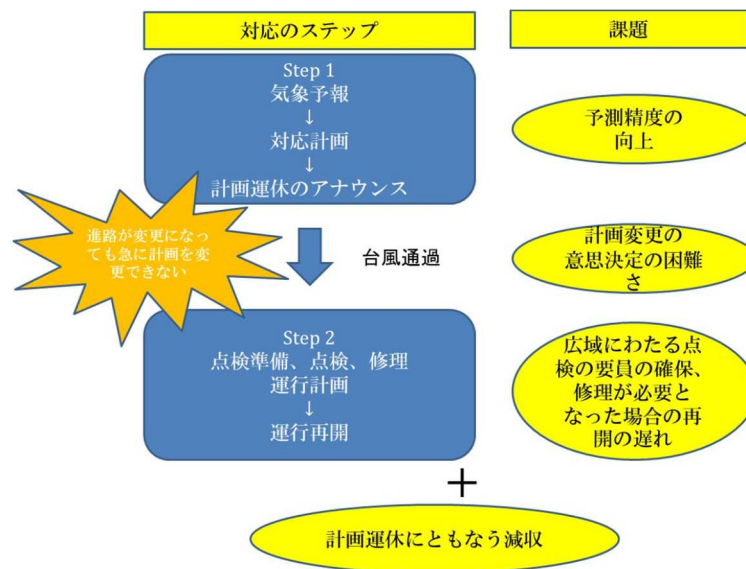


図 5.1.2 計画運行実施の手順と課題

5.1.5 大阪府の災害対応

5.1.5.1 災害対応

大阪府の災害対応は大阪府の「応急災害対策実施要領」に定められた手順によって実施されている。2018 年 9 月 4 日 4 時 56 分に暴風警報が発令されたことから警戒班（班長：危機管理室補佐）が設置され、14 時 40 分に体制が危機管理監をトップとする防災・危機管理指令部に格上げされる。

情報のとりまとめについては、同日 18 時 55 分に「平成 30 年 9 月 4 日からの台風 21 号にかかる防災・危機管理指令部会議について」という資料がとりまとめられ、その後 23 時に「台風 21 号に係る被害状況等について（第 2 報）22 時現在」が公表され、その後、9 月 5 日 3 回、9 月 6 日 1 回、9 月 7 日 2 回、その後も継続的に情報が更新され、12 月 25 日「台風 21 号に係る被害状況等について（第 30 報）」まで情報のとりまとめが行われている。とりまとめ報は 9 月 28 日までは大阪府防災・危機管理 指令部名で、10 月 1 日からは大阪府危機管理室名で公表されていることから 9 月末日で司令部体制は解除されたものと考えられる。

5.1.5.2 課題

大阪府では台風 21 号をふまえて「応急災害対策実施要領」の改訂を行っており、災害対応時に課題が発生したと考えられる。9 月 19 日に危機管理室により「今後の台風接近に係る指令部の運用について」という文書がとりまとめられている。「大阪府への最接近予測時刻の 3 時間前をめどに「大阪府防災・危機管理指令部」の活動を開始し、指令部会議を開催する、（中略）台風が通過したとみられる時刻から 2 時間以内に会議を開催して、応急対策の必要性及び体制について協議する。（中略）台風の際の災害対策本部（防災・危機管理警戒本部）の設置については、（中略）改めて運用基準や配備体制について整理できないか検討する。」^{vi)}とあり、司令部体制への移行（今回は台風上陸後）、司令部会議の実施（午後 18 時ごろ）をより迅速に実施する必要があることが示唆される。

謝辞

本研究の実施にあたっては災害対応にあたられた関西電力株式会社、西日本旅客鉄道株式会社、関西エアポート株式会社、大阪府危機管理室の方々の協力を得た。ここに記して謝意を表したい。

参考文献

- 1) 吉野 正敏, 「風と人びと」, 東京大学出版会, (1999)
- 2) Yamada, T., Sato, Y. and Kohno, F., “The 7 Stories of Nature”, Science, Vol. 25, No. 1, pp. 450-460, (2002)

i 関西電力株式会社，台風 21 号対応検証委員会報告
2018 年 12 月 13 日

ii 関西電力株式会社，阪神・淡路大震災復旧記録，
https://www.kepc.co.jp/corporate/report/k_bousai/pdf/k_bousai_p10_p11.pdf，2019 年 1 月 31 日閲覧

iii 関西電力株式会社，台風 21 号対応検証委員会報告，p6，2018 年 12 月 13 日

iv 関西空港，災害対策について—2 部—，2018.12.13

v Kansai Airport，台風 21 号から 1 カ月を経て，

2018.10.03，http://www.kansai-airports.co.jp/news/2018/2636/J_181003_pressconference_hp.pdf，2018 年 1 月 31 日閲覧

vi 関西空港，災害対策について—2 部—，pp.19-33，
2018.12.13

vii 危機管理室，今後の台風接近に係る指令部の運用
について，平成 30 年 9 月 19 日，

http://www.pref.osaka.lg.jp/attach/34503/00302243/091917_sireibuunnyou.pdf，2019 年 2 月 5 日閲覧

関西国際空港の経済レジリエンス定量化の試み

A trial for quantification of economic resilience of Kansai International Airport.

永松 伸吾^{*1}

Shingo NAGAMATSU

SUMMARY

To know the level of economic resilience of Kansai International Airport (KIX), this study tried to develop a quantification method by using international flight data.

key words: economic resilience, airport, business interruption

5.2.1 まえがき

自然災害がもたらす経済的影響とは、災害により破壊された構造物やインフラの物的被害額を指すのではない。むしろその被害によって生じる経済活動の停滞のほうがより重要である。

経済レジリエンス(economic resilience)概念については欧米においてすでに多くの研究が行われている。代表的なものとしてRoseの経済レジリエンス指標を取り上げる。Roseはレジリエンスをショックによる最大産出水準変化量に対して、軽減することのできた算出変化量の比と定義したり。このことを単純化して示そう。図5.2.1は、ある企業の算出水準と時間の関係を示していると考えてほしい。いま、 t 時点でこの企業に何らかのショックが発生し、結果経済活動水準が大きく落ち込むとする。特別な対応を何もしなかった場合、この企業の回復は遅れ、その結

果生じる生産の減少の合計は図5.2.1のA+Bの領域になる。

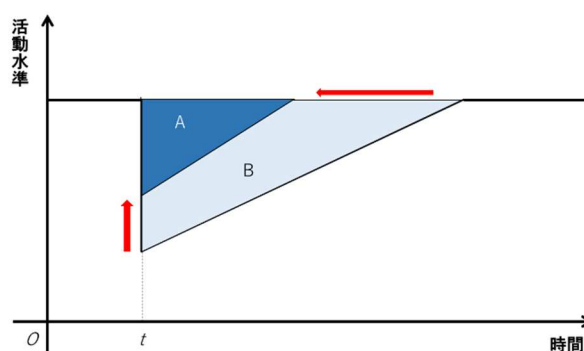


図 5.2.1 経済レジリエンス概念

Fig.5.2.1 Conceptual figure of economic resilience

これに対して、実際この事業者は様々な対応によってより被害を小さくする、あるいは生産水準の回復を早めることが

*1 関西大学社会安全学部 教授

可能になったとする。その場合のこの企業の生産減少額の合計は A に収まることとなり、この企業は B の損失を回避できたことになる。

すなわち、この企業のレジリエンスを定量化すれば、

$$\text{経済レジリエンス} = B / (A + B)$$

となる。

5.2.2 関西国際空港の飛行記録

本研究では、このフレームワークを利用して、台風 21 号による関西国際空港の被害とレジリエンスの定量化の可能性について検討した。

空港が生産しているサービスとはまぎれもなく航空機の離発着の機会の提供である。もちろん飲食店など旅行者に対する付随するサービスもあるが、本質的には航空機の発着に伴う旅行者および貨物の移動こそが空港のサービスとみるべきだろう。

しかしながら、実際に何人の旅行者が空港を利用したのかをリアルタイムに把握することは困難である。空港ごとの乗降客数の統計はあるが、時間別、あるいは二値別のデータは一般に公開されていないからである。また、乗降客数のデータでは、実際にどれだけの乗客が本来到着するはずだったのかという、反事実 (counter fact) について知ることはできない。

そこで、代替的なデータとして航空機の離発着記録を用いる。航空機のフライトデータは全世界で一元的に管理されており、有料ではあるが誰でもアクセスすることができる。ここでは FlightGrobal 社が提供する離発着記録のうち、台風が最も接近した 2018 年 9 月 4 日の関西国際空港の離発着記録のデータを試験的に購入し分析を行った。図 5.2.2 は到着便の状況を毎時間でグラフ化したものである。当日は 240 便の到着が予定されており、うち実際に到着したのは 20 便、キャンセルが 190 便であった。なお、最終到着記録は 10:22 となっているが、この図の時刻は予定時刻で集計している。

図 5.2.3 は出発便の記録を見たものである。240 便の離陸が予定されていたものの、実際の離陸は 52 便、キャンセルは 158 便となっている。着陸便に比べて、離陸便についてはより遅い時間まで運航している。離陸便は着陸便に比べ、台風の進路や状況を見ながら、ぎりぎりまで離陸の可能性を探っていたことが伺える。しかしながら、そのことが空港島内の多数の孤立者を生んだ原因となった。

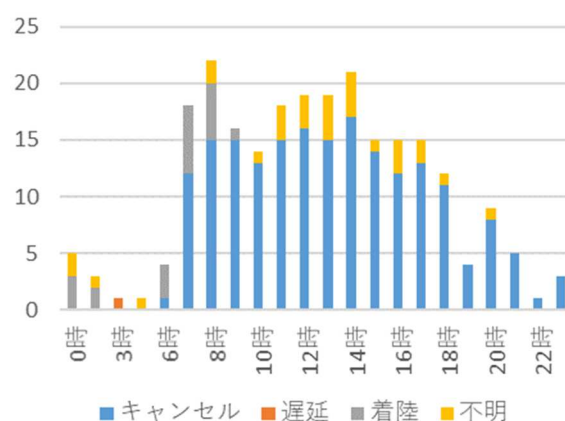


図 5.2.2 9月4日の関西国際空港到着便の内訳

Fig. 5.2.2 Arrival flights status on Sep. 4 at KIX

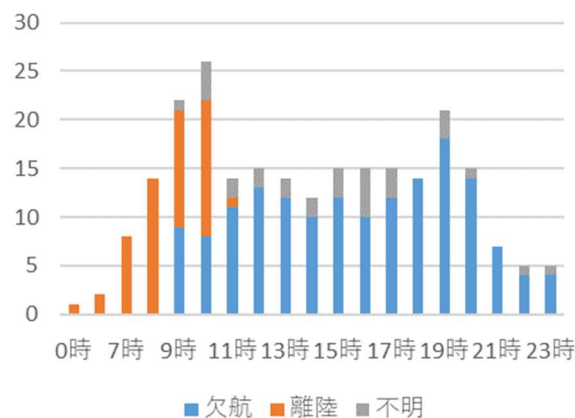


図 5.2.3 9月4日の関西国際空港出発便の内訳

Fig. 5.2.3 Departure flights status on Sep. 4 at KIX

このデータを関西国際空港が完全復旧した 9 月 21 日まで入手すれば、かなりの程度正確なレジリエンスの測定が可能となりそうなことがわかった。この方法は関西国際空港だけでなく、世界のあらゆる空港で誰でも適用可能であり、かつ世界同一の基準で算定できることも大きなメリットである。

参考文献

- 1) A. Rose, "Economic resilience to natural and man-made disasters: Multidisciplinary origins and contextual dimensions," *Environmental Hazards*, vol. 7, no. 4, pp. 383-398 (2007).

第5章3

台風21号の被害記録を目的としたGIS作成と大阪府南部12市町の調査報告

The Mapping Project using GIS for Damage Records about Typhoon No.21 and the Damage Reports of 12 Cities of the South Osaka Area

池内 淳子*¹
Junko IKEUCHI

SUMMARY

In this study, damage records of typhoon No.21 in 2018 were mapped using GIS. This Web GIS were developed for the purpose of making use for the next typhoon damage reduction. In addition, a damage investigation for 12 cities of South Osaka area was carried out. As a result, it was revealed that most of damage was house buildings. It is necessary to increase the staffs in the local government after a disaster.

key words: mapping GIS, typhoon No.21 in 2018, reports of damage, Osaka

5.3.1 まえがき

2018年9月4日、徳島県南部に上陸した台風21号は日本海へ抜ける間、関西地方を縦断した。この台風21号は、上陸前から「大型」であることが繰り返し報道されており、大阪北部地震（6月18日）発生後に列車の一斉運行中止による混乱を経験した大阪では、学校の休校はもちろんのこと、多くの企業も社員に「自宅待機」を指示していた。この台風は多くの建物被害の他、道路標識や樹木の倒壊、大規模停電等も発生させたが、昼間の近畿地方縦断であったこと、また、自宅待機者が多かったことから、台風通過時からSNSを通じて写真や映像が発信されていた。一方で、台風被害は撤去も早く、被害全貌は記録されにくい。そこで本研究では、今後の台風被害軽減に役立てることを目的とし、台風21号の貴重な被害写真を収集し、公開型GISでマッピングする取り組みを実施する。また、大阪府泉州地域3保健所が主催する合同

健康危機管理研修の機会を活用し、参加者である大阪府南部地域12市町職員を対象としたアンケート調査を実施し、結果をまとめる。なお、この12市町に関しては現地被害調査を実施する。

5.3.2 研究方法

台風21号の概要についてまとめる。公開型GISに掲載する台風被害記録は主に位置情報付写真とし、摂南大学関係者より収集する。収集した写真は被害のカテゴリ分類を行った後、公開・非公開を判断し、GISにマッピングする。また、大阪府南部地域12市町については、現地調査を実施し、主に建物被害や工作物の被害についてまとめる。さらに、大阪府和泉保健所、岸和田保健所および泉佐野保健所が主催する合同健康危機管理研修の機会を活用し、保健所管轄地域12市町の自治体職員（保健師及び危機感経理系職員）を対象としたアンケート調査を実施し、結果をまとめる。

5.3.3 公開型 GIS マッピング実施結果

図 5.3.1 に台風 21 号の進路と災害週刊風速を示す¹⁾より改。台風は12時26分に徳島県南部に上陸した。また、大阪府内 8 観測所の内、5 観測所で観測史上最大の最大瞬間風速を記録した。図 5.3.1 によると記録された最大瞬間風速は神戸上陸後の 13 時 38 分から 14 時 24 分の約 1 時間に集中していた。このように、非常に強い勢力の台風 21 号が大阪府を通過した。

表 5.3.1 に収集した写真枚数を示す¹⁾より改。被害写真の収集期間は9月4日から9月13日の10日間であり、撮影場所は大阪府、兵庫県および京都府等であった。情報提供者は摂南大学関係者など延べ 129 名（9 月 14 日現在）であり、合計 2033 枚の被害写真を得ることができた。収集被害写真は「住宅建物」、「住宅外建物」、「樹木」、「工作物（道路上）」、「飛散物」、および「その他」の 6 つのカテゴリーに分けた。「住宅建物」とは、主に、木造等の戸建て住宅建物や集合住宅とし、工場や公共建築物などを「住宅外建物」とした。また「工作物」とは、信号、標識、道路上の看板、道路上の塀やフェンスとし、「飛散物」とは、道路などに落ちている飛来元不明な物とした。さらに、「その他」には、建物上の看板やビニールハウス被害、災害ゴミの集積場等を含んでいる。これらの被害写真は公開型 GIS²⁾で整理（摂南大学理工学部住環境デザイン学科空間情報デザイン研究室：榊愛准教授）した。一方、住宅については写真非公開とシマッピングのみとした。大阪府内には、現在（2019 年 2 月）でも屋根上のブルーシートなど、数多くの台風の被害の爪痕が残っている。当該 GIS については、今後も公開できる写真を増やし、次の台風被害軽減に役立てる予定である。

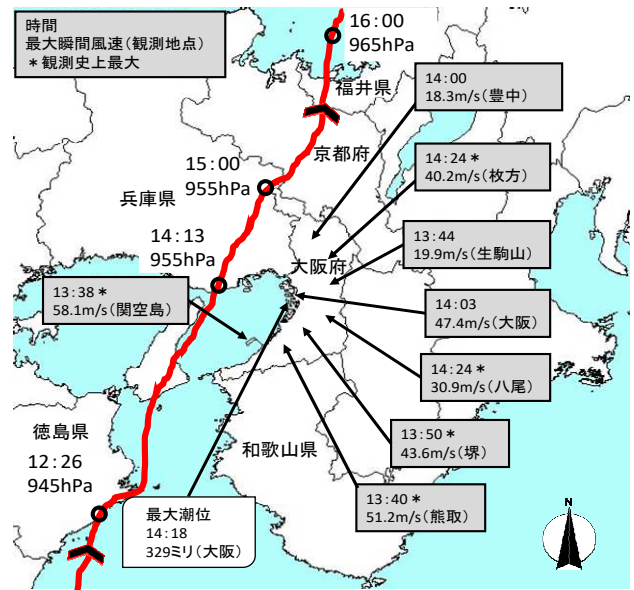


図 5.3.1 台風 21 号の進路と最大瞬間風速¹⁾より改

表 5.3.1 収集した記録写真と枚数¹⁾より改

収集期間	9月4日～9月13日(10日間)
調査場所	大阪府、兵庫県、京都府
情報提供者	摂南大学生、摂南大学職員、摂南大学OB、学外関係者
提供人数	90人(延べ129人) 9月14日現在
総写真枚数	2033枚 9月14日現在

表 5.3.2 大阪府内の被害

被害の種類	詳細
人的被害 ³⁾	死亡:8名 重傷者:6名 軽傷者:487名
住家被害 ³⁾	全壊:約30件 半壊:約445件 一部破損:約65,932件
非住家被害 ³⁾	約2,446件
避難所開設 ⁴⁾	避難所数:最大882箇所、自主避難者:最大4,015名
停電 ⁴⁾	472,000軒

5.3.4 大阪府泉州地域 12 市町を対象とした調査結果

5.3.4.1 現地被害調査結果

表 5.3.2 に台風 21 号による大阪府内の被害状況を示す。大阪府防災・危機管理指令部³⁾によると、住家被害では一部損壊が 6 万件を超えるなど甚大な被害が出ており、避難所も府内 882 箇所で開催された⁴⁾。また 9 月 4 日には、約 47 万軒で停電が発生した⁴⁾。このように、台風 21 号は大阪全域で建物およびライフラインを中心に多大な被害をもたらしたことが分かる。

図 5.3.2⁵⁾より改に大阪府 13 市町村における調査概要を示す。大阪府南部地域 12 市町に堺市を加えた。一次調査(9/8)は本調査範囲決定のために実施し、本調査(9/10)は、堺市、岬町および阪南市を除いた 10 市町

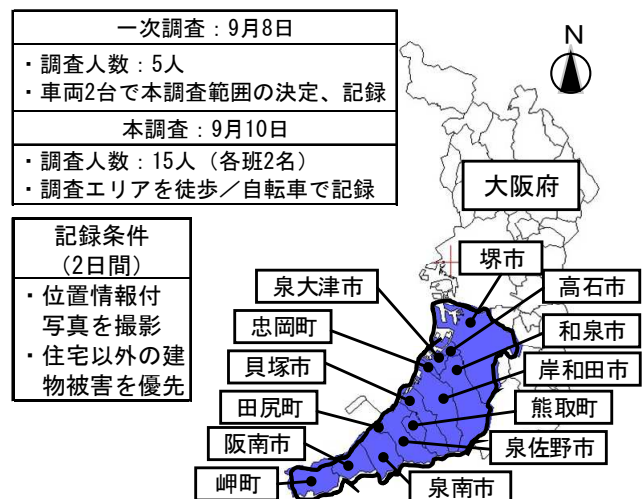


図 5.3.2 大阪府南部地域の被害調査概要⁵⁾より改

に対し、特に被害の多かった沿岸部を中心に調査した。本調査では徒歩または自転車による移動と限定した。今回の台風では、住宅被害の発生数が多すぎたことから(表 5.3.2 参照)、住宅以外の建物被害撮影を優先した。

図 5.3.3 に住宅の被害事例を示す。図 5.3.3 内、住宅①では、木造 2 階部分の外壁が剥がれ、壁内部の木材が露出している。また、住宅②では、鉄骨造 2 階から 3 階の外壁ALC板が剥がれており、鉄骨骨組みが露出している。屋根瓦のみが剥がれおちている被害(住宅③)は、いたるところに認められたが、木造の屋根小屋組まで飛ばされている被害(住宅④)は非常に稀であった。

図 5.3.4 に住宅外建物の被害事例を示す。ガソリンスタンドの軒天が剥がれた被害(住宅外①)や、体育館の鉄骨造の金属屋根が剥がれてめくり上がっている被害(住宅外②)もあった。住宅外③は、建物入口に付随する車

止めの屋根(鉄骨造)の被害である。イラスト通り、屋根は事務所建物側にめくれ上がっていた。このように、鉄骨造屋根の剥離被害も多く認められた。

図 5.3.5 に工作物の被害事例を示す。工作物①は太陽光パネルが散乱している様子であり、この太陽光パネルを支える構造形式が軽微な仕様であることがわかる。また、電柱が複数本にわたり倒れ(工作物②)、道路通行不可の原因となっていた。

図 5.3.6 にその他の被害を示す。これらは大阪府南部地域以外の被害写真である。その他①では、付近の住宅の金属屋根が電線に垂れ下がっている。また、その他②では、樹木が根元から抜け倒壊している様子を示した。このような樹木倒壊は府内に多く認められた。これら飛散物や樹木倒壊は、車道や歩道を寸断する他、電線や電柱に絡まり、停電の原因ともなった。



住宅①木造壁のはく落



住宅②ALC 壁のはく落



工作物①太陽光パネルの散乱

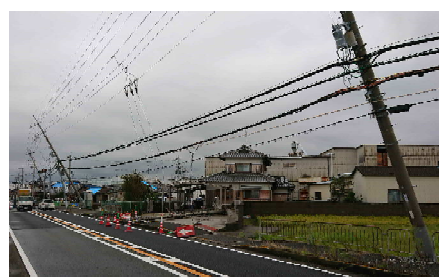


住宅③屋根瓦の剥離



住宅④小屋組の崩壊

図 5.3.3 住宅の被害写真



工作物②電柱の倒れ

図 5.3.5 工作物の被害写真



住宅外①軒天のはく落



住宅外②金属パネルの剥離



住宅外③車止め大屋根のめくれた様子(右イラスト)

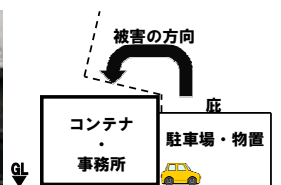


図 5.3.4 住宅外建物の被害写真



その他①
屋根材飛散

その他②
樹木倒壊

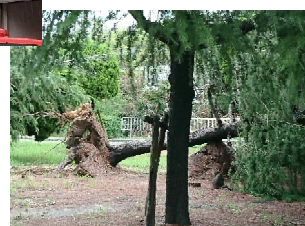


図 5.3.6 その他の被害写真

5.3.4.2 12 市町職員を対象としたアンケート調査結果

表 5.3.3 に大阪府 3 保健所管内の合同健康危機管理研修におけるアンケート概要を示す。当該研修は 9 月上旬実施予定であったが、台風の影響で 12 月に延期された。そこで、12 月の健康危機管理研修の機会を活用し、3 保健所管轄地域 12 市町の自治体職員 37 名（保健師及び危機感経理系職員）を対象に台風 21 号に関するアンケート調査を実施した。アンケート項目は勤務先や職種の他、台風被害に関する認識度、自部署における災害対応業務について（A4、1 枚）とした。

図 5.3.7 に台風被害に関する認識度の回答結果を示す。台風 21 号による 10 個の実被害事例から「見たり聞いたりしたことがある被害」についてチェック（複数回答可）してもらったところ、住宅屋根被害および信号機停止は 100% の認識度であった。一方、「体育館の金属屋根が剥がれた」、「ソーラーパネルの飛散」については回答率が低かった。これは回答した自治体職員が技術職ではなかったためであると考えられる。

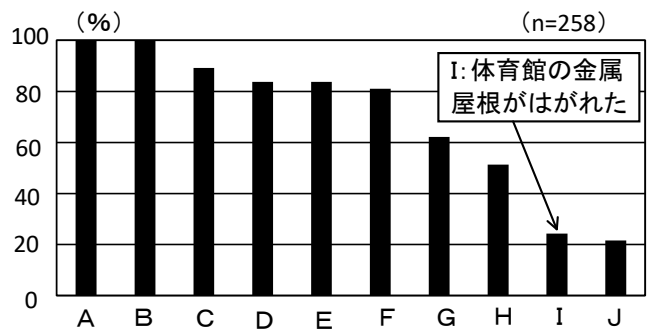
図 5.3.8(a) に自部署における避難所対応業務の有無についての回答結果を示す。これは所属部署としての回答とした。約 70% が「対応した」と回答した。また、「対応した」と回答した 26 名に、「その後、あなたの部署で災害対応業務が加わりましたか」と尋ねたところ（図 5.3.8(b)）、約 70% が「加わった」と回答した。表 5.3.2 でも府内に多数の避難所が開設されたことが示されており、避難所対応は台風通過後も継続されたことを示している。職員からは、「通常業務が継続されたまま台風対応業務が増え、人員確保に苦慮した」との意見も得られた。通常業務が停止されない規模の災害対応業務のあり方についてはこれまでも課題とされてきたが、台風 21 号においても同様の課題が示されたと考えられる。

5.3.5 結論

本研究では、台風 21 号に関する貴重な被害写真を収集し、公開型 GIS でマッピングする取り組みを実施した。この GIS は、今後も公開し次の台風被害軽減に役立てる予定である。また、大阪府南部地域 3 保健所が主催する合同健康危機管理研修の機会を活用し、保健所管轄内 12 市町職員を対象としたアンケート調査を実施した。その結果、参加者所属部署の約 70% が避難所対応業務を行ったことに加えて、対応した部署の約 70% がその後も災害対応業務を継続したことが明らかとなった。また、通常業務が継続されたまま災害対応を継続することで人員確

表 5.3.3 合同危機管理研修におけるアンケート概要

研修名	3 保健所合同健康危機管理研修
日時	2019 年 12 月 3 日（月）13:30～16:30
場所	波切ホール（大阪府岸和田市）
回答者 37 名	和泉市、泉大津市、高石市、忠岡町（和泉保健所管内）、岸和田市、貝塚市（岸和田保健所管内）、泉佐野市、泉南市、阪南市、熊取町、田尻町、岬町（和泉佐野保健所管内）職員：主に保健師・危機管理系部署の職員
アンケート 内容	職種、被害についての認識度、自部署が避難所対応したか？、自部署に災害対応業務が加わったか？他



A: 住宅屋根がはがれた、B: 信号機が停止した、C: 飛散物が電線に絡まった、D: 災害ゴミが住宅街にあふれた、E: タンカーが関空連絡橋に衝突、F: 交通渋滞が発生した、G: 建物の軒天がはがれた、H: 病院が停電した、J: ソーラーパネルが飛散した

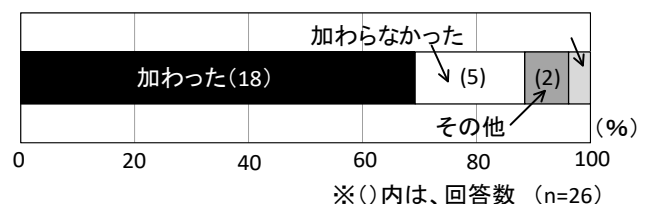
Q. 「これら被害を見たり聞いたりしたことはありますか？」

図 5.3.7 台風被害に関する認識度（複数選択可）



Q. 「あなたの部署で避難所対応をしましたか？」

(a) 自部署における避難所対応業務の有無（選択）



Q 「あなたの部署で災害対応業務が加わりましたか？」

※(a)において「避難所対応した」と回答した人のみ

(b) 自部署における災害対応業務の有無（選択）

図 5.3.8 自部署における台風関連の業務

保に問題が発生した事が分かった。通常業務が停止されない規模の災害対応業務のあり方についてはこれまでも課題とされてきたが、台風 21 号においても同様の課題が示されたと考えられる。

謝辞

公開型 GIS の取り組みは、摂南大学理工学部熊谷樹一郎教授（都市環境工学科）、榊愛准教授（住環境デザイン学科）と実施いたしました。また、台風の記録写真提供や調査協力には、摂南大学関係者にご協力頂きました。さらに、宮園寝屋川保健所長、森脇和泉保健所長、大阪府南部12市町の自治体職員の皆様および大阪府職員の皆様には合同健康危機管理研修におけるアンケート調査にご協力頂きました。ここに謝意を表します。最後に、被災された皆様に心よりお見舞い申し上げます。

参考文献

- 1) 辻野真也, 池内淳子, 2018 年台風 21 号の暴風による被害分布（速報：その 1）—アーカイブマップの作成を通じて—, 地域安全学会梗概集, No.43, pp55-56, 2018.11
- 2) 2018 年台風 21 号被害マッピングプロジェクト—945ヘクトパスカルの脅威—, http://www.setsunan.ac.jp/~ikeuchi/lab/taifu21_2018map.html
- 3) 大阪府危機管理室, 台風 21 号による被害状況について（第 30 報）, 2018 年 12 月 25 日 11:00, <http://www.pref.osaka.lg.jp/attach/34503/00302243/30.pdf>（取得日：2019 年 1 月 31 日）
- 4) 大阪府危機管理室, 台風 21 号による被害状況について（第 3 報）, 2018 年 9 月 5 日 10:00, http://www.pref.osaka.lg.jp/attach/34503/00302243/090511_3.pdf（取得日：2019 年 1 月 31 日）
- 5) 宇賀光太郎, 池内淳子, 2018 年台風 21 号の暴風による被害分布（速報：その 2）—被害分類とこれまでの台風被害との比較—, 地域安全学会梗概集, No.43, pp57-60, 2018.11

第5章4

アンケート調査に基づく経済被害の推計: 調査の設計と期待される成果

Economic Impact Analysis Based on a Questionnaire Survey: Survey Design and Expected Results

多々納裕一^{*1} 梶谷義雄^{*2} 竹林幹男^{*3}

Hirokazu TATANO, Yoshio KAJITANI, Mikio TAKEBAYASHI

SUMMARY

This article summarizes a series of questionnaire surveys to capture economic impact to the industry caused by the Typhoon Jebi hit Japan especially at Osaka bay. Typhoon Jebi causes very strong wind in the wider areas in not only Kinki areas but also other part of Japan. Strong wind caused power shutdown in a wide areas and its effect spreads in Kinki and other areas. The typhoon also brought about storm surge and caused inundation although most of areas were outside of the seawalls. More ten thousand firms are listed as a candidate of the survey based on the survey of the distribution of strong winds and storm surge inundation. The survey was conducted in February 2019 and now we are intensively making a database from the answers. Contents of the survey are explained to provide a better idea for readers to understand what can be obtained after this research.

key words: Questionnaire survey, economic impact, Typhoon Jebi

害に対する企業のレジリエンスの計量化に資する成果を得ることを目的とする。

5.4.1 はじめに

本研究では、2018年9月の台風21号がもたらした強風、高潮が企業の操業度や売り上げに及ぼした影響をアンケート調査を通じて明らかにし、今後の被害予測や台風災

多々納らは2004年新潟中越地震以来同種のアンケート調査を継続的に実施してきている。災害外力に対応して生じる建物や施設、労働力の減少等が生産能力や操業能

* 1 京都大学防災研究所 教授 tatano.hirokazu.7s@kyoto-u.ac.jp

Professor, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

* 2 香川大学創造工学部 教授

Professor, Faculty of Engineering, Kagawa University

* 3 神戸大学海事科学部 教授

Professor, Faculty of Maritime Science, Kobe University

力にどのように影響し、回復していくのか？ライフライン等の機能停止が及ぼす影響はどうか？下流側の企業の被災や需要の変化の影響はどのように表れているのか？などの論点を中心に調査を進めてきた。

特に複数の地震を比較した結果、地震動の大きさや業種特性に依存して、生産・操業能力の低下の程度が異なるが、その傾向は概ね変わらないことが確認されている。

水害に関しては、国土交通省が2000年の東海豪雨時にこの種の視点を織り込んだ調査を実施してきて以来、データの蓄積が進みつつあるものの、台風や津波といった塩水による被害に関わるデータは、東日本大震災時に国土交通省が実施したものを除けば、ほとんどない。

今回の台風は、主として強風と高潮の被害をもたらした。これらのハザードが企業にもたらした影響の計量化を目指して、アンケート調査を実施し、物的被害の状況や企業の操業能力に及ぼした影響を分析することとした。

5.4.2 アンケート調査の設計

(1) 調査の目的

台風21号がもたらした強風と高潮による被害の実態及び復興状況とその規定要因を把握することを目的とする。

(2) 調査対象の設定

調査対象は、高潮や強風の被害に見舞われた企業を対象とした。アンケート調査配布件数は表5.4.1に示したとおりである。

表 5.4.1 調査対象事業所数（アンケート配布先）

施設被害の原因	なし	あり	製造業	非製造業	計
① 浸水	①	② 最大浸水深（敷地の高さから） 土砂堆積物 ① なし ② あり			
② 強風	①	②			
③ その他（具体的に：_____）	①	②			
高潮			250	250	500
強風			-	-	4000
強風+地震			4000	3000	7000

高潮に関しては、国土交通省近畿地方整備局、神戸市、兵庫県の協力を得て浸水区域を特定化し、その内部に含まれる事業所を電子電話帳データベースを用いて抽出し、製造業、非製造業、それぞれに250件配布した。

強風に関しては、図5.4.1に示す関西電力の営業所被害率の高かった和歌山県、大阪府を中心に4000の企業を抽出した。ただし、

営業所被害率(%)=被害（回線）／施設数（回線）(%)である。

また、大阪府北部に関しては、製造業4000、非製造業3000を抽出し強風の影響に加えて2019年6月に発生した大阪府北部地震の影響も併せて調査した。

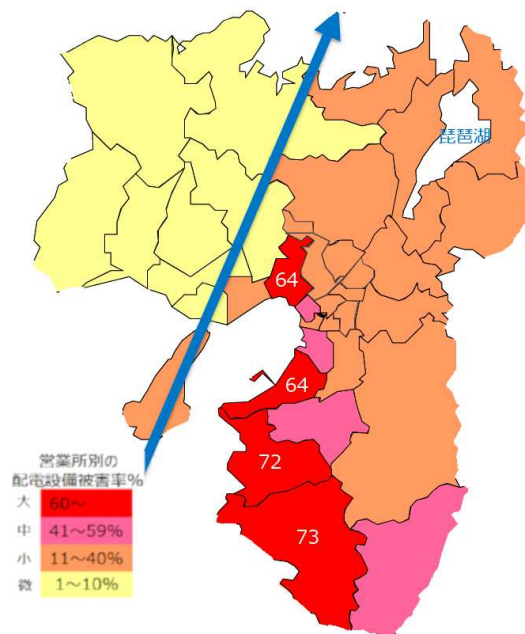


図 5.4.1 関西電力の営業所被災率

(3) 調査対象項目

高潮・強風に共通して、以下のような項目の調査を行った。

①企業、事業所の基礎情報

株式上場、非上場の別、資本金額、業種（主要製品・サービスを含む）、本支店の別、従業員数（会社全体、当該事業所）、売り上げ、郵便番号、連絡先（担当、住所）

②施設被害の状況

- 1) 建物（本社、工場、店舗等）
- 2) 設備（生産ライン、備品等）
- 3) 商品、在庫等、その他

③ 施設被害の原因

- 1) 浸水（なし、あり（最大浸水深（敷地上(m)、土砂堆積物の有無））
- 2) 強風（なし、あり）
- 3) その他（自由記述）

表 5.4.2 出荷額（販売額）回復状況に関する質問内容

問 7 台風による被害が生じてから、貴事業所の出荷額（または販売額）がどのように変化したかお尋ねします。予想見込みの販売水準を 100%として、以下の各水準に到達するのに要した日数をお答えください。

出荷額・ 販売額的水準	販売開始初日までの 日数（見込） 補足①	25%	50%	75%	100%	現在の水準 補足③ （ ） %
復旧までの 経過日数 補足②	____日	____日	____日	____日	____日	

補足①：出荷・販売額に影響がない場合は、「0 日」と、お答えください。右の各水準欄以降の記入は不要です。

補足②：例えば、ある一定の日に 100%復旧させたような場合、「100%」の欄にのみ経過日数をご記入ください。

補足③：現在の水準については、調査時点（1 月）の出荷・販売額についてご記入ください。

出荷・販売が全く再開できていない場合は、「0%」と、ご記入ください。

表 5.4.3 被害額及び復旧費用に関する質問内容

問 8 現在までに判明した被害額や復旧に投じた費用についてお尋ねします。

（以下の項目それぞれについて、お分かりの範囲でお答えください）

被害の内容	補足	概算
① 復旧費用（これまで）	建物・設備等の再構築、修理費用	____百万円
② 〃 （今後の見込み）	（同上）	____百万円
③ 除却費用	建物・設備等の内、復旧しないもの	____百万円
④ 在庫被害額	商品・製品・原材料・仕掛品在庫等の被害額	____百万円
⑤ 売上減少額		____百万円
⑥ 災害ごみの処分費用		____百万円
⑦ 物流コストの上昇	輸送ルートの変更等に伴う支出額増加分	____百万円
⑧ 運搬中の貨物の浸水被害	港湾などで浸水した積荷の被害	____百万円
⑨ その他の臨時費用	応援人件費、超過勤務手当、お見舞金等	____百万円

※復旧費用は市場調達価格で、除却費用は簿価などを参考にご記入ください。

- ④ 具体的な施設の被害状況（自由記述）
- ⑤ 施設以外の操業能力低下要因（有無＋期間）
- 1) 停電（時間）
 - 2) 上水道の停止（日数）
 - 3) ガスの停止（日数）
 - 4) 鉄道・道路の機能低下（日数）
 - 5) 関西空港の被害（日数、代替空港）
 - 6) 港湾機能の低下（日数）
- ⑥ 操業停止期間： 操業停止日および再開日

- ⑦ 販売額（出荷額）の推移

表 5.4.1 に設問を示す。出荷額（または、販売額の）回復状況を、予想見込み額に対する回復率に達した日を回答するようにしている。

- ⑧ 被害額（復旧費用）

被害額・復旧費用に関しては、表-3 に示すように除却費用、在庫被害、売り上げ減少額、ごみ処分費、その他臨時費用を含めて回答することを依頼している。

- ⑨ 年間売り上げに占める被害額の割合

- ⑩ 資金調達手段

資金調達手段に関しては、手元資金、損害保険（建物・設備、事業中断）、民間金融機関からの融資、政府系機関からの融資、災害デリバティブ、グループ会社や取引先からの支援等を含めて幅広く回答を求めている。

⑪ 政府等の支援メニューに関する事前の知識

グループ補助金等をはじめ、具体的なメニューを提示し、災害は発生前から知っていたものを列挙していただく。

⑫ 災害前からの備えの有無とその効果

企業のBCP導入状況とその効果を把握するために以下のような項目に関する準備状況とその有効性に関する災害後の評価をお願いした。

- 1) 建物の浸水対策
- 2) 建物の耐震化や設備の固定
- 3) 従業員等の安否確認
- 4) サプライチェーン（仕入先）の確保
- 5) 自社製品や販売物の委託・振替生産
- 6) 非常用発電機による備え

⑬ 被災経験の有無

⑭ 災害後の超過労働

挽回生産（操業）のための災害後の超過労働の有無と、その開始日、期間、売り上げに対する挽回額の割合を訪ねた。

⑮ 今回の災害からの教訓、復旧等への障害、国・自治体、金融機関等への意見（自由記述）

本研究では、特に高潮浸水域、大阪北部地震被災域の企業に対しては、災害後の復旧状況を把握することを目的として、復旧状況を以下の3種類に分類し、回答を求めている。

復旧状況①：事業所の施設がどのように復旧したか（ライフライン、従業員、仕入先被害などの他の影響はないものとする）

復旧状況②：①の状況（施設の復旧のみ考慮）に加え、ライフラインの影響も含めた事業所の操業能力（生産、

販売遂行能力等）がどのように復旧したか

復旧状況③：最終的に貴事業所の出荷額・販売額等がどのように回復したか（すべての影響を考慮）

例えば、以下のようなシナリオを想定した場合、図5.4.2のように3種類の復旧曲線が得られる。

①：工場が浸水し、5日目まで片づけを行っていた。片付け後、10台の工作機械のうち、3台のみが使用可能なため操業能力は30%。10日目にすべての機械の修理が完了し、操業能力は100%。

②：1日目に停電が回復。7日目に上水道が回復。8日目に操業再開。15日目に道路が完全に復旧。

③：操業再開直後から徐々に出荷額が回復。30日目に需要がほぼ平常通りとなった。

※①≥②≥③の関係になることを想定

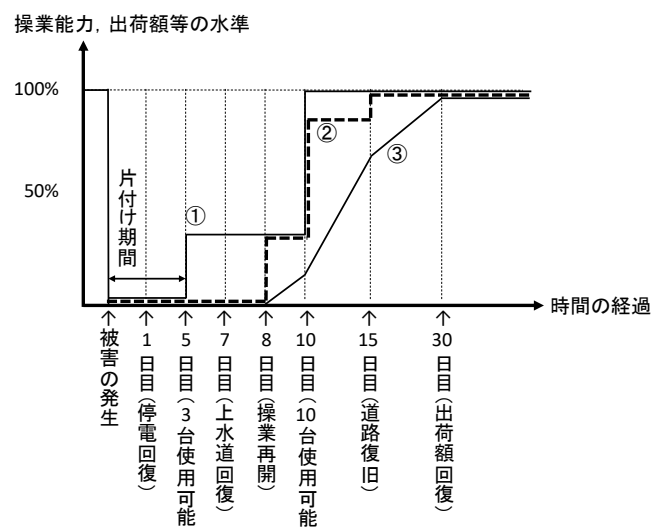


図 5.4.2 復旧状況のイメージ

(4) 調査スケジュールと回収率

調査票配布 2月1日、回収締め切り 2月25日のスケジュールとし、現在、データ入力を進めている。回収率は、全体でおおむね15%程度であり、同種の調査と比較すると、ほぼ満足のいく水準である。

5.4.3 今後のスケジュールと期待される成果

アンケート対象企業の抽出に時間を要し、全体のスケジュールは遅れ気味であるが、3月中には少なくとも単純集計結果を得、その後、個別要因と被災度や復旧・復興状況との関係に関して分析を進めていく予定である。

謝辞

本研究を推進するに際して多くの皆様のご協力を得た。

近畿地方整備局・港湾空港部，神戸市みなと総局，兵庫県県土整備部，関西電力の皆様には被災地域の特定に必要な貴重なデータのご提供いただいた．ここに記し感謝の意を表明するものである．

参考文献

- 1) 大阪湾港湾等における高潮対策検討委員会：中間とりまとめ，および， 中間とりまとめ参考資料，(2018)
<http://www.pa.kkr.mlit.go.jp/pdf/takasiotaisaku/20190222cyukan/1.pdf> ,
<http://www.pa.kkr.mlit.go.jp/pdf/takasiotaisaku/20190222c>

yukan/2.pdf

- 2) 関西電力株式会社, 台風 21 号にかかる対応について, (2018), 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 電力・ガス基本政策小委員会/産業構造審議会 保安・消費生活用製品安全分科会 電力安全小委員会 合同 電力レジリエンスワーキンググループ(第3回) 資料 13,
http://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/resilience_wg/pdf/003_13_00.pdf

発行
研究代表者

2019年7月1日
〒611-0011 宇治市五ヶ庄
京都大学防災研究所 丸山 敬
E-mail:maruyama.takashi.8w@kyoto-u.ac.jp