特　集　この 10 年の強風災害と新しい調査・観測手法

台風による強風屋根被害の航空機調査とその結果

Aircraft Survey of Roof Damage by Typhoon and the Results

野田　稔＊1　尾田　春雄＊2　益子　渉＊3　竹内　崇＊4　友清　衣利子＊5
Minoru NODA　Haruo ODA　Wataru MASHIKO　Takashi TAKEUCHI　Eriko TOMOKIYO

１．はじめに

2018年の台風21号（Jebi, 以降T1821号と呼ぶ），2019年の台風15号（Faxi, 以降T1915号と呼ぶ）といずれも上陸前後まで「非常に強い」勢力を持った台風が通過した近畿地方あるいは千葉県では甚大な被害がもたらされた。この2つの台風では大阪あるいは東京という大都市の近くを通過し，いずれも広域にわたって建物被害が発生し，その全容を把握することには困難が伴った。総務省消防庁の報告書によれば，T1821号が大阪府にもたらした建物被害（住家＋非住家）は全壊，半壊，一部損壊を合わせて77,739棟に上り，全国の合計104,437棟の74%を占めている[1)]。また，T1915号が千葉県にもたらした建物被害は82,262棟で，全国の合計94,544棟の87%であり，住家の全壊，半壊数に限っても4,912棟と全国の合計5,263棟の92%であった[2)]。1府県にこれだけの被害が集中すると，短時間で被害の全容を把握することは容易ではない。

このような状況になると，被害状況を調査するにもまず被害の集中している場所を把握して被害調査を重点的に行う事が効率的であることは明白であるが，その手段の一つとして挙げられるのが，航空機調査である。ここでは，この2つの台風被害で実施した航空機調査について紹介し，その結果得られた成果について述べる。また，著者がこれまでに竜巻や台風の建物被害の調査において必要と感じたブルーシート下の被害状況の調査手段として検討した赤外線カメラによるドローン調査の可能性について紹介する。

２．台風による屋根被害の航空機調査

２．１　T1821号による屋根被害の航空機調査

T1821号による被害が発生したのは2018年9月4日であり，著者は発災直後に現地調査に赴いたが，あまりにも被害が多すぎて地上での調査で全貌を把握することが困難であった。その後，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」（代表者：丸山敬）が採択されて，航空機調査が実施できることになり，実際に航空機調査を実施したのは，発災から2カ月余り経過した11月13日である。この調査では被害が集中した大阪府南部と和歌山県北部のブルーシートが掛った建物を対象に小型航空機（セスナ式172R型飛行機）によって高度600mから時速180kmで後部座席の左右の窓に設置した4Kビデオカメラにより地上を撮影した。同時にアクションカメラ（GoPro HERO7）を吸盤で窓に固定してインターバル撮影を行

＊１　高知大学　教授　noda@kochi-u.ac.jp
Professor, Kochi University
＊２　高知大学大学院　大学院生
Graduate student, Graduate School, Kochi University
＊３　気象研究所
Meteorological Research Institute
＊４　神戸大学　助教
Assistant Professor, Kobe University
＊５　熊本大学　准教授
Associate Professor, Kumamoto University

い，GPS機能により撮影時刻と撮影位置の記録を行った[3,4]。図1にこの調査時の飛行経路と撮影された映像から抽出されたブルーシートの位置を示す。

２．２　ブルーシートをマーカとした調査の有効性

T1821号による建物被害の航空機調査では発災後2カ月が経過しているということもあり，ブルーシートをマーカとして抽出した建物屋根被害の情報が実際に発生した被害を反映しているのかどうかを確認する必要がある。特に，この撮影では飛行経路の真下の被害状況が記録できなかったこともあり，その影響も加味してブルーシートを介した屋根被害調査の有用性を検証することが必要であった。そこで，図2に示すような撮影範囲を包括するポリゴンを作成し，このポリゴン内で目視により抽出したブルーシート数と，GISデータより抽出されるポリゴン内に存在する建物数より，ポリゴン外の被害状況も同程度であるという前提で撮影対象となった地方自治体内のブルーシート数を推計し，各地方自治体における被害建物数と比較した[5]。図

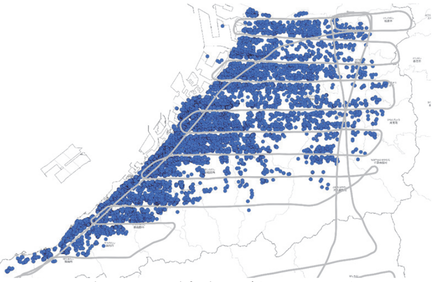


図1　T1821号の建物屋根被害の航空機調査における飛行軌跡と抽出されたブルーシート位置[3,4]

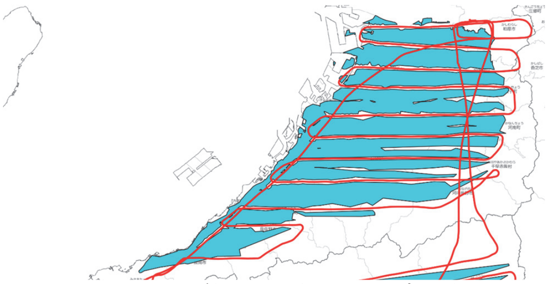


図2　T1821号の航空機調査における撮影範囲[5]

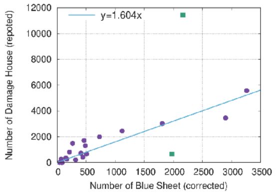


図3　T1821号におけるブルーシート数と行政に届けられた建物被害件数の関係[5]

3に推計されたブルーシート数と自治体に報告された被害件数の関係を示すが，極端に外れた2点を除いて概ね直線関係を示すことが確認できた。従って，発災から2カ月経過しているものの，ブルーシートの分布によって被害分布をある程度把握できるものと判断した。

２．３　T1915号における建物被害の航空機調査

T1915号が東京湾を通過し，千葉県を中心に被害をもたらしたのは2019年9月9日未明であり，この被害に対する航空機調査は，特に被害が甚大とされた内房地方を撮影するために飛行した読売新聞社の報道ヘリ（Eurocopter EC135P2）に同乗し，2019年9月21日に実施した。撮影はアクションカメラ（GoPro HERO7）1台を後部座席左側窓に吸盤で固定し，地上300mより1秒間隔のインターバル撮影によって地上を撮影し，同時にカメラ内蔵のGPSにより撮影の位置情報を記録した。

また，この撮影に先立つ9月19日には，自動車によって内房地方を直接見て回り，特に被害の目立つ場所ではドローン（DJI Mavic Pro Platinum）を用いて高度150mからの4K映像を撮影してあり，前述のヘリコプターからの航空写真を補足する形で利用した。この調査では，撮影できた範囲で被害を受けている建物と被害を受けていない建物の両方を目視で読み取り，位置情報をGISの点情報として記録した[6]。図4にヘリコプターの飛行軌跡と抽出された建物の位置情報を示す。

３．被害と風速の関係性

３．１　被害率と風速の関係性

被災の位置情報が定まるとすぐに思いつくのが，被害率による定量評価ではないかと思われる。そこで，図5に示すような気象解析で得られた台風通過イベント中の最大風速値分布を使って，250m間隔の直交格子メッシュによって航空機調査で視認できる各メッシュ

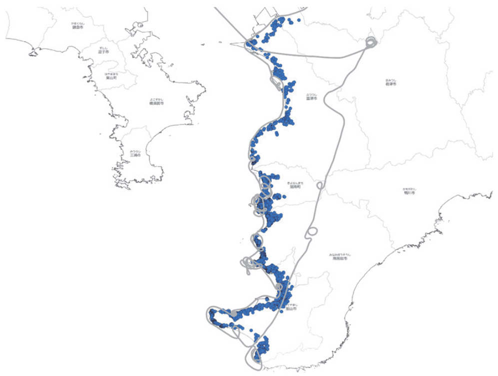
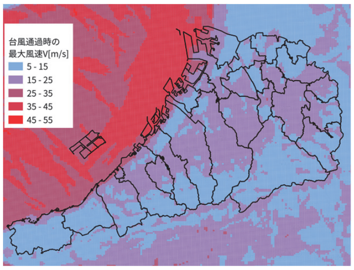
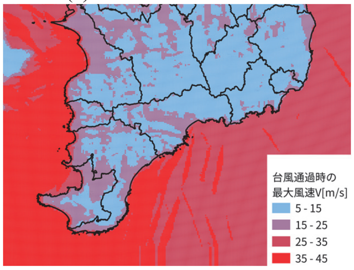


図4　T1915号の建物屋根被害の航空機調査における飛行ルートと抽出された屋根被災建物の位置[6]

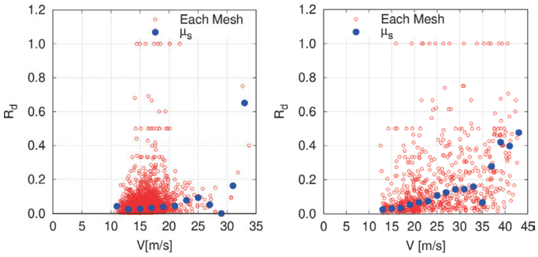


(a) T1821号大阪府南部



(b) T1915号千葉県内房[7]

図5　気象解析で得られた台風通過時の最大風速分布



(a) T1821号大阪府南部　　(b) T1915号千葉県内房

図6　最大風速と建物被害率の関係[8,9)]

内のブルーシート数を同一メッシュ内の建物数で除した被害率と，それぞれのメッシュ位置における最大風速値との関係を図6に示す。T1821号の気象解析は，引用文献7の手法を適用したものである。図中の○点は各メッシュの被害率であり，●点は，2m/s間隔の風速階級に含まれる各メッシュの建物数とブルーシート数の関係を直線近似して求めた直線式の傾きであり，平均被害率というべき量である。しかし，図を見ても明らかなように同一風速における被害率のバラツキは非常に大きく，被害率による定量評価は非常に困難であることが分かる[8,9)]。

３．２　被害確率と風速の関係性

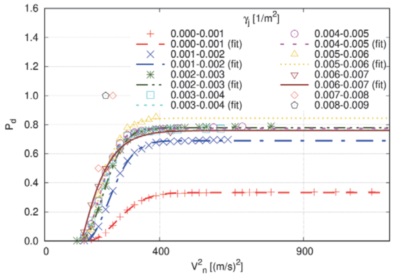
前述の通り，被害率という形で最大風速との関係を示すと被害率のバラツキが大きくて関係性を見出すことはできなかった。そこで，注目するメッシュで被害が存在するか否かのみを評価して，最大風速2乗値に対する被害メッシュの累積数を評価することを考えた[8)]。ここで，最大風速2乗値を用いたのは，風荷重が風速の2乗値に比例するからであり，累積数で評価するのは，注目する風速よりも低い風速で被害が発生したメッシュでは注目する風速でも当然被害は発生しているからである。この被害メッシュの累積数を被害なしメッシュも含めた全メッシュ数で除すことで求めた被害確率で表し，風速二乗値との関係を各メッシュの単位面積当たりの建物数で表される建物密度の階級ごとに示すと，図7のようになった。建物密度階級毎に示されている曲線は，最弱リンクモデルの破壊確率を示すWeibull分布を$X_{\min}$平行移動させて係数Aを乗じたものであり，次式で定義される。

$$F(X) = A\left[1 - \exp\left\{-\left(\frac{X - X_{\min}}{X_0}\right)^m\right\}\right] \qquad (1)$$

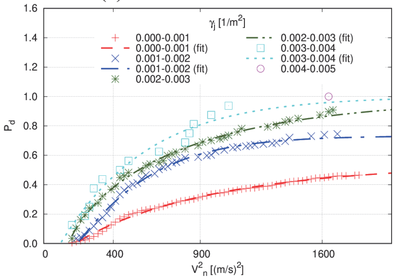
ここで, X_0, mはそれぞれWeibull分布のスケールパラメータと形状パラメータである。

最弱リンクモデルは複数の輪をつないだチェーンを引張った時の張力とチェーンの破壊確率の関係を示したものであるが，ここでは注目する評価メッシュ内の建物一つ一つがチェーンの輪に相当し，輪の内部に生じる応力値が輪の強度を上回って壊れる様子が，各建物に生じる風荷重が各建物の強度を上回って壊れる様子と等価であると考えた。また，評価メッシュに吹いたと考えられる最大風速の二乗値がチェーンの張力に相当すると考えている。

この考え方に基づくと，最大風速二乗値と被害確率の間にはWeibull分布に沿う関係性が認められた。



(a) T1821号大阪府南部



(b) T1915号千葉県内房

図7　T1821号およびT1915号における建物屋根被害発生確率と最大風速二乗値との関係[8,9)]

T1915号の被害については，大阪府南部ほどの密集地が存在しないため，建物密度の階級値の上限は大阪府南部よりも低いが，建物密度階級値毎の被害確率の値はWeibull分布に良く合うものとなっている。

ここで，式(1)の各パラメータと建物密度との関係を示すと，図8のようになった。図中の曲線は，建物密度γの関数として設定した近似関数であり，各Weibullパラメータについて以下のように定義した。

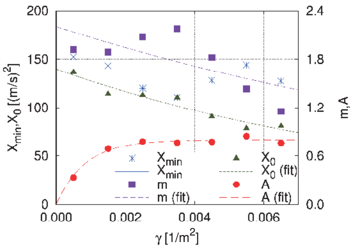
$$X_0(\gamma) = \alpha_{X_0} \exp(-\beta_{X_0} \cdot \gamma) \tag{2}$$

$$m(\gamma) = \alpha_m \exp(-\beta_m \cdot \gamma) \tag{3}$$

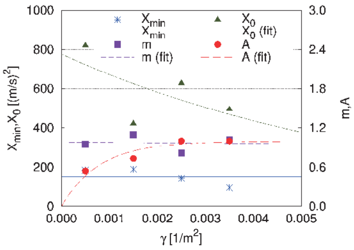
$$A(\gamma) = \alpha_A\{1 - \exp(-\beta_A \cdot \gamma)\} \tag{4}$$

T1821号による大阪府南部およびT1915号による千葉県内房におけるWeibullパラメータの近似関数の各係数は表1のようになった。被害確率の上限を決めるα_AはT1915号ではほぼ1なのに対して，T1821号では0.8程度となっているが，これは前者が発災後すぐに調査したのに対して，後者は発災後2カ月が経過しており，軽微な被害はすでに復旧され，ブルーシートで識別できる被害数が実際よりも減少したことに起因するものと考えられる。

一方，被害開始風速に関連するX_{min}は設計風速が低い大阪府南部の方が低い値となっており、大阪府南部，千葉県内房の粗度区分をそれぞれIIIおよびIIと仮定して高さ10mの設計風速を求めると，それぞれ28.6m/s, 42.0m/sとなり，被害開始風速の大小関係と設計風速の大小関係は対応しているようである。ただ，X_{min}を風速に直すと，前者が11.5m/s，後者が12.4m/sと設計風速に比べかなり低いこともあり，他の係数も含めて，どのように決まるかについて理論的な検討が別途必要である。しかし，表1に求められたWeibullパラメータを使って，最大風速2乗値と建物密度から求めた被害確率分布は，図9に示すようにいずれの台風被害においても実測の被害確率に良く合うものとなっており，実測の被害確率と，対応する最大風速2乗値および建物密度から



(a) T1821号大阪府南部

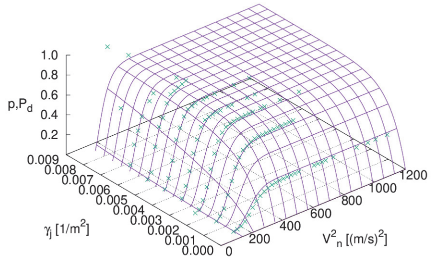


(b) T1915号千葉県内房

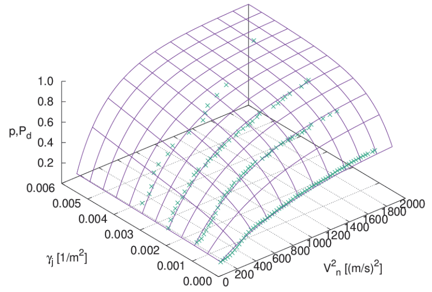
図8　T1821号における大阪府南部の建物屋根被害発生確率－最大風速二乗値のWeibullパラメータと建物密度との関係[8,9)]

表1　被害確率のWeibullパラメータの近似関数係数[8,9)]

Weibullパラメータ	係数	T1821号	T1915号
X_{min}		132	154
X_0	α_{X_0}	140	777
	β_{X_0}	91	145
m	α_m	2.2	0.98
	β_m	63	6.0
A	α_A	0.80	0.99
	β_A	1200	1276

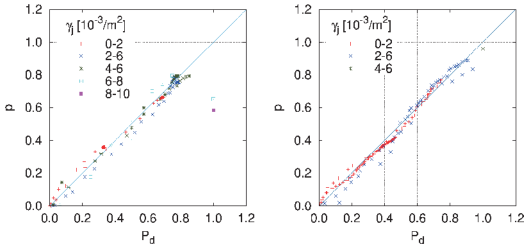


(a) T1821号大阪府南部



(b) T1915号千葉県内房

図9　T1821号およびT1915号における建物屋根被害発生確率分布pと実測値Pdとの比較[8,9)]



(a) T1821号大阪府南部　　(b) T1915号千葉県内房

図10　T1821号およびT1915号におけるWeibull分布値pと実測値Pdの相関関係[8,9)]

求めたWeibull分布から被害確率の相関関係も図10に示すように極めて良好な関係が得られている。

4．屋根被害調査における赤外線カメラ利用の可能性

台風や竜巻等による建物の突風被害に共通するのは，屋根被害を中心として，被災後に速やかに屋根にブルーシートが掛けられる点である。1棟1棟を訪れ，建物の持ち主にヒアリングすると同時に被害状況を確認させていただくことが被害調査の基本ではあるものの，一度掛けたブルーシートをめくって被害状況を確認させていただくのは被災者にとっても負担となるため，避けられるのであれば避けたいプロセスである。最近は，赤外線カメラを搭載したドローンも存在し，可視光線以外の情報も取得できるようになってきていることから，ブルーシートの赤外線の透過特性を調べ，赤外線カメラを用いてブルーシート下の状況を把握する可能性について検討した結果[10)]を紹介する。

図11に市販の0.2mm厚のブルーシート1枚の波長毎の透過率，反射率を測定した結果を示す。この結果より，遠赤外線に相当する4～1000μmにおける透過率は平均で17%を示しており，特に10μm前後の透過率は40%程度に達していることが分かる。一方で遠赤外線の反射率は0.5%程度であり，太陽光に含まれる遠赤外線は，反射せずにその40%程度がブルーシートを通過しており，ブルーシートの下の物体で反射した結果がブルーシートを再度通過して見える可能性が極めて高いことを示している。

そこで，図12に示すような南側に33°の勾配を持たせた瓦葺およびスレート葺の部分屋根模型を作製し，図13に示すように，それぞれ屋根葺き材を欠損させたり斜めに配置したりして疑似的な破損状況を再現した。その模型を，屋根葺き材から50mm程度離して1枚または2枚重ねのブルーシートで覆い，これをドローンに積載した赤外線カメラで撮影する実験を行った。

撮影に用いた赤外線カメラはFLIR製ドローン用赤外線カメラ（Zenmuse XT2，測定波長7.5～13.5mm）であり，大型ドローン（DJI Matrice200）に搭載して撮影高度や撮影角度を変え，ブルーシートで覆われた屋根部分模型の可視光画像と赤外線画像を同時に撮影した。

図14に瓦葺部分模型の撮影結果を示す。可視光画像では平面的なブルーシートが映っているのみであるが，赤外線画像で見ると，その下に存在する瓦葺屋根模型がはっきりと映っている。2枚重ねの部分（写真右下の範囲）では1枚重ねの部分に比べて鮮明さに欠ける部分はあるものの瓦の配列などはしっかりと把握できる画像であることが分かる。また，図15にスレート葺屋根部分模型を撮影した画像を示すが，こちらも可視光画像では全く分からないブルーシート下の様子が，赤外線画像でははっきりと確認できる画像が得られている。

今回用意した条件下では，ブルーシートに遮られて可視光では見えない屋根部分が，遠赤外線領域を撮影可能な赤外線カメラによって撮影可能であり，ブルー

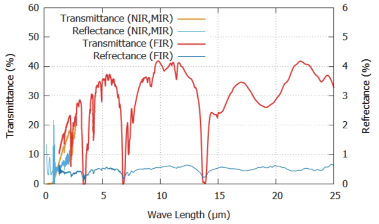
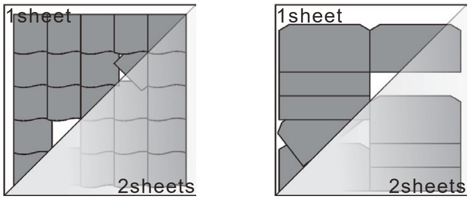
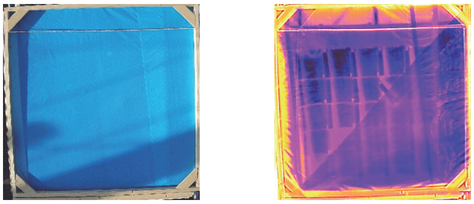


図11　市販ブルーシート(0.2mm厚)の透過率特性
（徳島大学ポストLEDフォトニクス研究所測定）[10)]

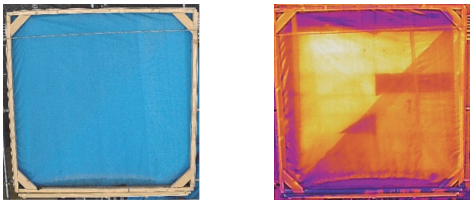
(a) 瓦葺　　(b) スレート葺
図12　屋根部分模型[10)]



(a) 瓦葺　　(b) スレート葺
図13　屋根部分模型の模擬破損とシート配置の概略[10)]



(a) 可視光画像　　(b) 赤外線画像
図14　瓦葺部分模型の撮影結果[10)]



(a) 可視光画像　　(b) 赤外線画像
図15　スレート葺屋根部分模型の撮影結果[10)]

シートで覆われたままの状態で屋根の破損状況が把握できる可能性があることが明らかになった。このことは，被災者に撮影許可のみ頂ければ，被災者の手を煩わせることなく建物被害の状況を詳細に把握できるようになる可能性を示唆している。さらに，被災調査を目的とするドローンの飛行許可について，有人航空機と同様に地権者の飛行許可を受ける必要がなくなれば，ドローンによる容易な被害調査が一般化し，可視光画像以外の撮影による情報の詳細な抽出も可能となる。

今後は，赤外線画像に対するブルーシートの種類や厚さなどの影響や屋根葺き材の種類などによる写り方の違いなどについて詳細に検討することで，赤外線画像による調査方法の実用化を目指したい。

５．まとめ

台風による強風被害の発生は，一般的に広域にわたって膨大な建物が一斉に被害を受けることが多く，その被害状況を迅速に集約するためには，航空機調査により被害調査を行う事は極めて重要である。また，T1821号，T1915号で実施した航空機調査の結果からは，気象解析で得られる台風通過時の最大風速の情報と被害確率との間にWeibull分布に沿う関係性が認められることが示され，これらの関係性を用いれば，個別の建物の被害の有無は判断できないものの，最大風速とその場所の建物密度によって場所場所の被害発生確率を求められる可能性が示唆された。これは，現在，情報提供されている台風通過時の大まかな最大風速と暴風圏，強風圏に含まれる範囲に加えて，台風通過地域に対する強風ハザードの程度を一般市民に分かりやすく伝える手段ともなり得る。そのためにも，気象解析の風速情報と被害発生確率との関係性について一般性を持たせることが急がれる。

一方，台風被害に限らず建物被害，特に屋根被害を受けた建物はブルーシートによって被害部分が覆われてしまうため, 被災状況の把握に時間を要しているが，赤外線カメラとドローンの組み合わせによって，ブルーシート下の建物破損状況を容易に把握できる可能性があり，赤外線画像による被害調査の手法を確立するためにも今後さらに詳細な検討が必要である。

謝辞

ここで紹介した成果は, 特別研究促進費(18K19953), 日本風工学会突発災害調査費，高知大学防災推進センタープロジェクト研究経費の支援を受け得られた。建物のGISデータについては，東京大学CSIS共同研究No.608（Zmap TOWN II(2016年度Shape版)「大阪府および和歌山県データセット」提供）の助成を受けた。T1915号の航空機調査では読売新聞東京本社，赤外線撮影では㈱エレパに協力いただいた。ブルーシートの光学特性測定は徳島大学ポストLEDフォトニクス研究所の協力を受けた。ここに記し，謝意を表す。

参考文献

1) 総務省消防庁応急対策室, 「平成30年度台風21号による被害及び消防機関等の対応状況(第10報)」, (2019)
2) 総務省消防庁応急対策室, 「令和元年房総半島台風による被害及び消防機関等の対応状況(第41報)」, (2020)
3) 野田　稔, 友清　衣利子, 竹内　崇, 「大阪府南部・和歌山県北部におけるT1821号による強風被害の航空調査」, 日本風工学会2019年度年次研究発表会概要集, pp.105-106, (2019)
4) 野田　稔, 友清　衣利子, 竹内　崇, 「航空調査で明らかになったT1821号による大阪南部の住宅被害分布」, 2019年日本建築学会大会梗概集, pp.155-156, (2019)
5) 尾田春雄, 野田　稔, 「強風被害を対象とした航空調査におけるブルーシート観測の有用性」, 2021年度土木学会四国支部第27回技術研究発表会概要集, 2pages, (2021)
6) 友清　衣利子, 野田　稔, 岩下　久人, 「2019年台風第15号の強風被害分布」, 令和元年度科学研究費助成事業特別研究促進費・令和元年台風15号による停電の長期化に伴う影響と風水害に関する総合調査研究成果報告書, pp.3-1-12, (2020)
7) 益子　渉, 「令和元年房総半島台風に伴う強風の特徴」, 202年度日本気象学会秋季大会講演予稿集, (2020)
8) 尾田　春雄, 益子　渉, 友清　衣利子, 野田　稔, 「平成30年台風21号における強風被害発生確率モデルの提案」, 日本風工学会2021年度年次研究発表会概要集, pp.139-140, (2021)
9) 尾田　春雄, 野田　稔, 「最弱リンクモデルに基づく強風被害発生確率モデルの適用」, 2021年度日本建築学会大会（東海）学術講演会梗概集, 構造I, pp.77-78, (2021)
10) 野田　稔, 尾田　春雄, 「赤外線カメラを用いたブルーシート下の屋根被害評価の試行」, 2021年度日本建築学会大会（東海）学術講演会梗概集, 構造I, pp.73-74, (2021)