

2021年5月1日に静岡県牧之原市で発生した竜巻の被害調査

山本晴彦¹・兼光直樹¹・坂本京子¹・岩谷潔¹

Damage Investigation of Tornado Disaster in Makinohara City of Shizuoka Prefecture on May 1, 2021

Haruhiko YAMAMOTO¹, Naoki KANEMITSU¹,
Kyoko SAKAMOTO¹ and Kiyoshi IWAYA¹

Abstract

The active thunder cloud accompanied by the cold front went ahead through the middle area of Shizuoka Prefecture towards the east at about 60 km/h at around 18:30 on May 1, 2021, and a tornado occurred in the unstable atmospheric situation in the area of Makinohara City. The tornado advanced from Sabaka, Kikugawa City eastward to Katsuta, Kiriya, Katsuma and Sakabe district through Nunobikihara district of Makinohara City. According to the field investigation, the migration length of the tornado was 7 km and the maximum damage width recorded in the Nunobikihara area was 130 m. The damage, extending to about 100 buildings such as houses, factories, and warehouses, as well as agricultural pipe housing, utility poles, and carports, was evaluated as JEF2, based on the Guidelines for the Japanese Enhanced Fujita Scale.

キーワード：2021年5月，静岡県，竜巻災害，牧之原市

Key words: May 2021, Shizuoka Prefecture, Tornado Disaster, Makinohara City

1. はじめに

2021年5月1日，日本海中部に前線を伴った発達中の低気圧があつて東北東に進んだ。これにより，静岡県の上空約5,500 mには， -18°C 以下の寒気が流入していた影響で，大気の状態が非常に不安定となり，活発な積乱雲が発生した。活発な積乱雲が通過した県中部の牧之原市付近では突風

が発生した（静岡地方気象台，2021a）。静岡地方気象台では，5月1日に静岡県牧之原市で発生した突風について，職員を気象庁機動調査班として派遣し，翌日の2日8時30分より現地調査を実施しており，「5月1日18時50分頃，静岡県牧之原市布引原で発生した突風の種類は，竜巻の可能性が高いと判断しました」とし，日本版改良藤田ス

¹ 山口大学大学院創成科学研究科
Graduate School of Sciences and Technology for Innovation,
Yamaguchi University

本報告に対する討議は2022年11月末日まで受け付ける。

ケール（気象庁，2015）で「JEF2」と発表している（静岡地方気象台，2021b）。また，気象台では18時30分頃に同市の勝田から坂部にかけて発生した家屋の損傷や電柱の倒壊などの被害（静岡地方気象台，2021c），18時40分頃に同市須々木で発生した突風についての被害（静岡地方気象台，2021d）についての調査も行っているが，これらは竜巻による被害の特定に至っておらず，前者をJEF1，後者をJEF0と推定している。

筆者らは5月1日の被災から3日後の5月4日に菊川市の沢水加（さばか）地区，牧之原市の布引原・勝田・切山・坂部地区において，現地での被害調査を実施した。ここでは，2021年5月1日に静岡県牧之原市で発生した竜巻災害について，レーダ合成雨量図，気象データ，空中写真，現地での調査結果を中心に，その概要を報告する。

2. 静岡県で過去に発生した竜巻災害の概要

気象庁は，1961年以降の竜巻やダウンバースト等の突風事例を『竜巻等の突風データベース』（気象庁，2021a）で公開している。データベースには，「突風分布図（現象別）」において「竜巻分布図（東海）（1961～2019年）」が示されており，筆者らはこの図に今回の竜巻を加筆し，図1（2021年5月1日に発生した竜巻の進路を併記）に示した。1961年から2019年までの59年間において，静岡県における竜巻の発生は28件で，県西部の浜名湖から御前崎までの海岸エリアや内陸部に多くの発生がみられ，静岡市から伊豆半島の県東部では比較的少ない傾向にある。また，1960年代が11件，1970年代が17件と計28件に上っているが，1980年代は2件，1990年代は5件，2000年代は2件に止



図1 竜巻分布図（東海）（1961～2019年）（気象庁，2021a）（筆者らが今回の竜巻を加筆）と静岡県中部の地図（左上，2021年5月1日に発生した竜巻の進路を記載）

まっており、「不明」の記載が多くを占めている。なお、2010年代は9件と増加する傾向を示している。

藤田スケールでF2に相当すると推定される竜巻による被害は、1961年11月22日の寒冷前線の通過時に旧浜北町で発生した被害(被害長さ3.0~3.5 km, 被害幅40~100 m, 負傷者14人, 住宅全4棟, 住宅半壊6棟), 1962年8月26日の台風の通過時に浜松市で発生した被害(被害長さ15.0 km, 被害幅30~60 m, 負傷者18人, 住宅全壊27棟, 住宅半壊168棟)の2件で、F1~F2に相当すると推定される被害は1962年の8月26日(前掲した同日時に旧御前崎町で発生)と同年12月30日(旧千浜村), 1974年の6月6日(浜北市)と同年7月8日(旧浜岡町)の4件で、近年はF2やF1~F2に相当する比較的規模が大きい竜巻は発生していないことがわかる。

3. 竜巻発生時の気象的特徴

図2には、牧之原市で竜巻災害が発生した直前の2021年5月1日18時の地上天気図(気象庁, 2021b)と気象衛星「ひまわり」の赤外画像(高知大学, 2021)を示した。低気圧から延びた寒冷前

線が近畿・北陸地方から東に進んでおり、発達した雨雲が中部地方を広く覆っていることがわかる。

図3には、国土交通省が運用するXバンドMPレーダ(XRAIN)合成雨量データをリアルタイムで表示するリアルタイム降雨情報サービス「AMeNOW!」(DIAS事務局, 2021)を用いて、被害が甚大であった牧之原市布引原を竜巻が通過したと推察される5月1日18時30分前後(18時25分~36分の1分毎)のレーダ合成雨量図を示した。なお、図中の矢印は筆者らの現地調査により得られた竜巻の進路、○は気象庁の菊川牧之原アメダス、△は静岡県牧之原雨量観測所の位置を示している。18時25分には、南北に延びる寒冷前線の通過によりもたらされた1時間降水量に換算して80 mm以上(紫色)と50~80 mm(赤色)で表示された強雨域の範囲が掛川市と菊川市の市境付近に位置し、5分後の18時30分には菊川牧之原アメダスと牧之原雨量観測所が南北に位置する牧之原市の布引原地区に達し、2分後の18時32分には強雨域の中心部分が布引原地区を通り過ぎ、勝田・切山地区に進んでいる。さらに強雨域は東進して、3分後の18時35分には坂部地区を通り、36分には東に隣接する吉田町に中心が達しており、わずか

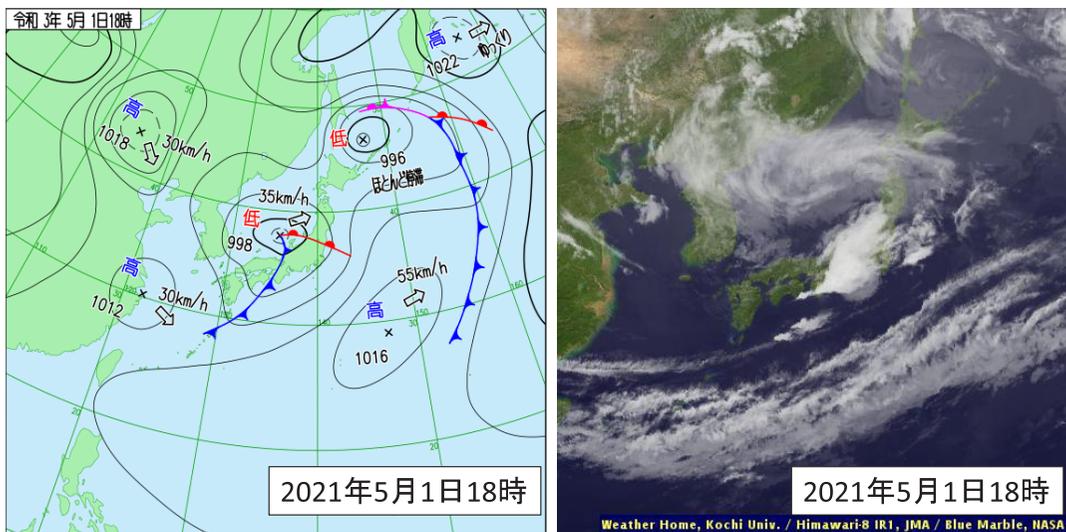


図2 2021年5月1日18時の地上天気図(気象庁, 2021b)と気象衛星「ひまわり」の赤外画像(高知大学, 2021)

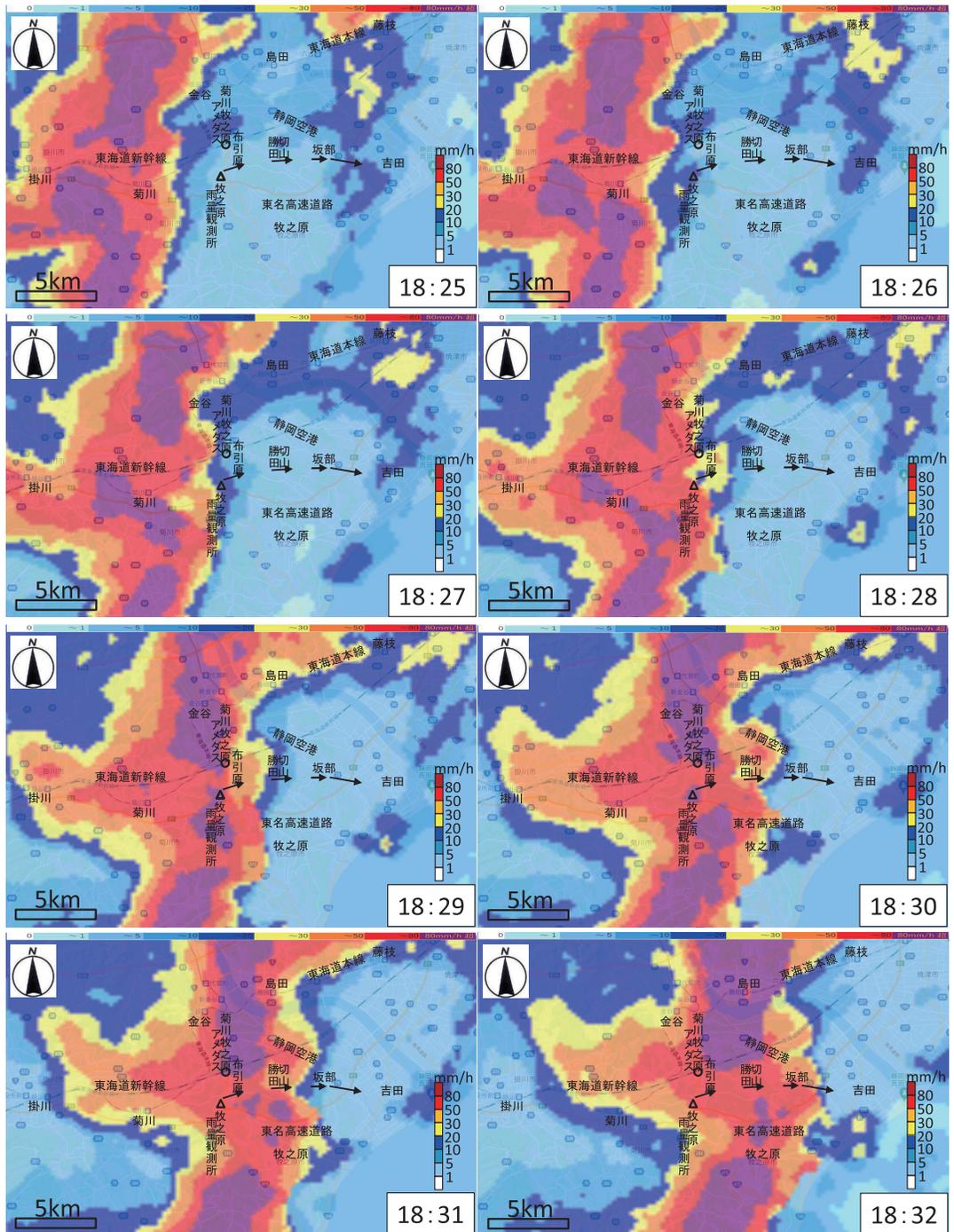


図3 AMeNOW! のレーダ合成雨量図(2021年5月1日18時25分~36分)(DIAS事務局, 2021)(○: 菊川牧之原アメダス, △: 牧之原雨量観測所, →: 竜巻の進路)

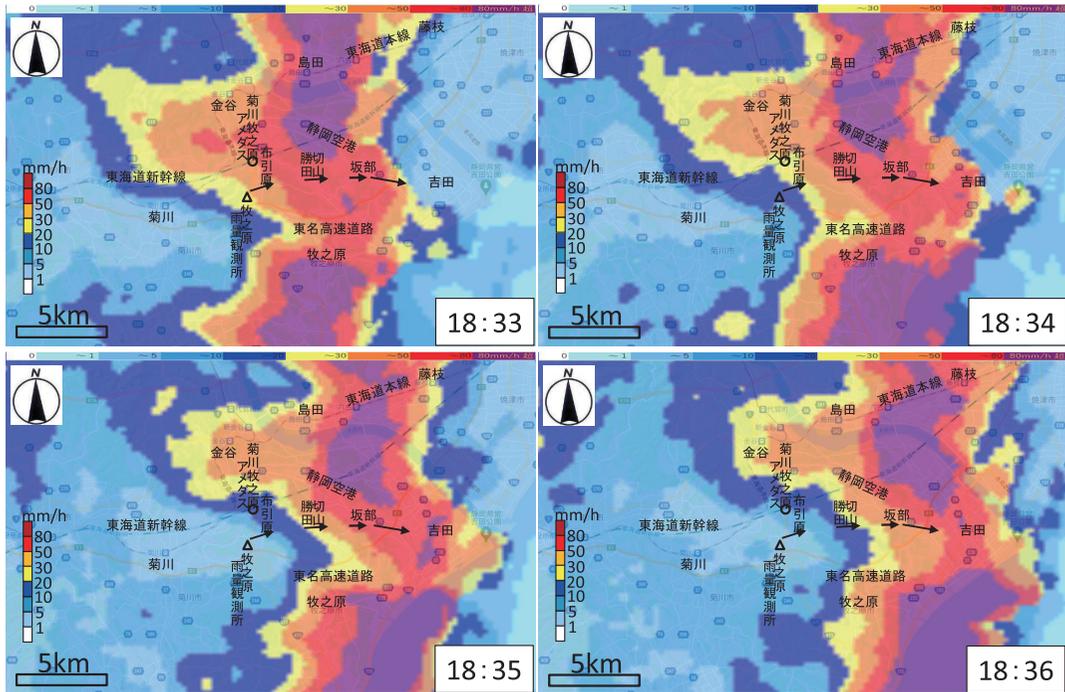


図3 続き

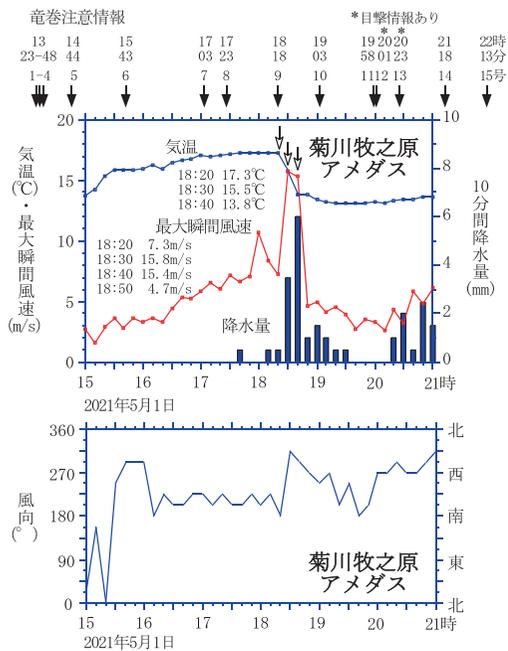


図4 菊川牧之原アメダスにおける気象要素(気温, 最大瞬間風速, 10分間降水量, 風向)と竜巻注意情報の発令時刻の推移

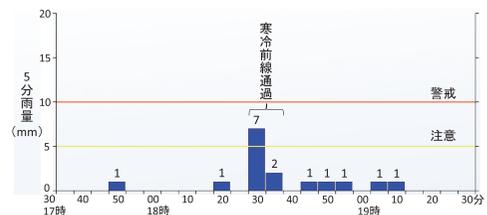


図5 牧之原雨量観測所における17時30分から19時30分までの5分間雨量の推移(静岡県交通基盤部河川砂防局土木防災課, 2021)

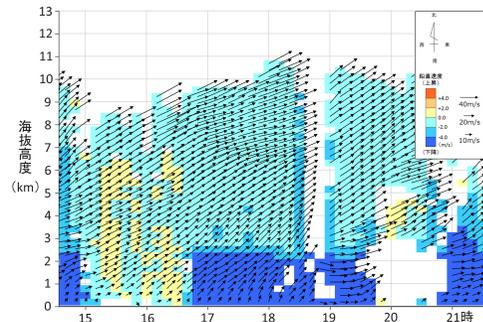


図6 静岡地方気象台に設置されたウィンドプロファイラで観測された上層風の推移(2021年5月1日15時~21時)

18時29分から35分までの7分間で寒冷前線に伴う強雨域が布引原、勝田・切山、勝間、坂部地区の東西約7kmを東進して通過しており、移動速度は時速60kmと推察された。

図4には菊川牧之原アメダスにおける気象要素(気温、最大瞬間風速、10分間降水量、風向)と竜巻注意情報の発令時刻の推移を示した(気象庁、2021b；静岡地方気象台、2021a)。なお、アメダスは竜巻被害の中心部の布引原地区から北約1.5kmに位置している。寒冷前線が通過した18時20分～40分の間に、気温が17.3℃から13.8℃へとわずか20分間で3.5℃も低下している。最大瞬間風速は20分7.3 m/s → 30分15.8 m/s → 40分15.4 m/s → 50分4.7 m/sと短時間で変化しており、18時30分前から十数分前後で竜巻が南側を通過して突風が吹いたものと推察され、風向は南南西から北西風が卓越している。竜巻注意情報は第1号が13時23分に発令され、竜巻が牧之原市で発生したと推定される18時30分頃の約12分前の18時18分に第9号、発生30分後の19時03分に第10号が発令されており、的確な発令であったことがわかる。

図5には牧之原雨量観測所(布引原の竜巻被害の中心部から南に約300mに位置)の5分間雨量の推移を示した(静岡県交通基盤部河川砂防局土木防災課、2021)。18時20分に1mmを観測した後、同30分には7mm、35分には2mmの強雨となり、同45分～19時10分まで1mm/5分間の雨を観測しており、牧之原雨量観測所付近では18時30分頃の時間帯に寒冷前線が通過して大気が不安定になり、強雨が降ったものと推察される。図6には、静岡地方気象台に設置されたウインドプロファイラで観測された5月1日15時～21時の上層風の推移を示した(気象庁、2021b)。寒冷前線の東進により上層では強い南西寄りの下降風を観測しており、竜巻が発生した前後の時間帯の上層の大気場が見取れる。

以上のように、レーダ合成雨量図、アメダスと雨量観測所の気象観測データ、ウインドプロファイラの観測結果を総合的に判断すると、18時30分頃から40分にかけて牧之原市の布引原から坂部地区にかけて寒冷前線が通過し、大気の状態が非常

に不安定になり、竜巻が発生する大気場にあったことが推察された。なお、中部電力パワーグリッド株式会社からは牧之原市の布引原、勝田、切山、勝間、坂部を含む島田営業所管内(島田市、川根本町、吉田町、牧之原市)で18時28分に停電が発生したとの情報を得ており、寒冷前線の通過と停電発生時間帯はほぼ一致している。

4. 竜巻による被害の実態

5月14日17時現在の牧之原市役所の調査では、竜巻による被害は全壊8棟(非住家)、半壊6棟(住家)、一部損壊126棟(住家89棟、非住家37棟)、施設等(農業用施設の損傷35棟、福祉施設の損傷2棟、保育施設フェンスの損傷1か所)、軽傷3名、車の横転5台、電柱の倒壊15本・傾斜3本となっている(牧之原市、2021)。

筆者らは、竜巻災害が発生した5月1日の3日後の5月4日に現地調査を実施した。図7には、現地調査により基づいて作成した竜巻による建物等の被害分布図(全体図、地区①～④)を示した。なお、図7(地区①～④)にはJEFスケール(日本版改良藤田スケール)で被害指標(DI)と被害度(DOD)から推定した風速代表値(m/s)を色別で、建物や電柱等の被害方向や農地の農作物などの倒伏方向を矢印で示している。また、被害が大きかった牧之原市の布引原地区の概要について、被害前の空中写真を空中写真1に示した(牧之原市新拠点整備室、2021)。なお、本報告では空中写真と現地での撮影した被害写真と混同しないよう、「空中写真1～9」と写真と区別し、空中写真と写真中に記した角度(°)は方位角を示している。

菊川市の沢水加地区で発生した竜巻は、東側に隣接する牧之原市の布引原地区を東北東に進み、勝田・切山・勝間地区、さらには坂部地区までの約7kmをやや右方向に進路を変えながら東に進んで終息している。以下に、地区毎に建物被害等の実態の概要を紹介する。

4.1 菊川市 沢水加地区

菊川市の沢水加地区は、牧之原市布引原地区の西側に隣接しており、空中写真1に示した竜巻の

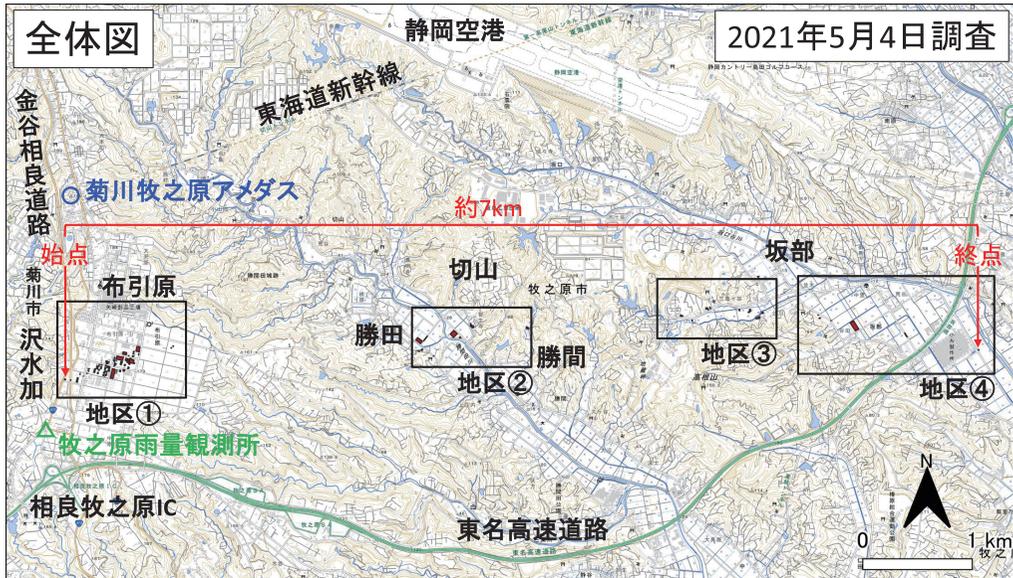


図7 (全体図) 現地調査に基づいて作成した竜巻による建物等の被害分布図 (被害箇所はすべて赤色で記載, ○: 菊川牧之原アメダス, △: 牧之原雨量観測所)

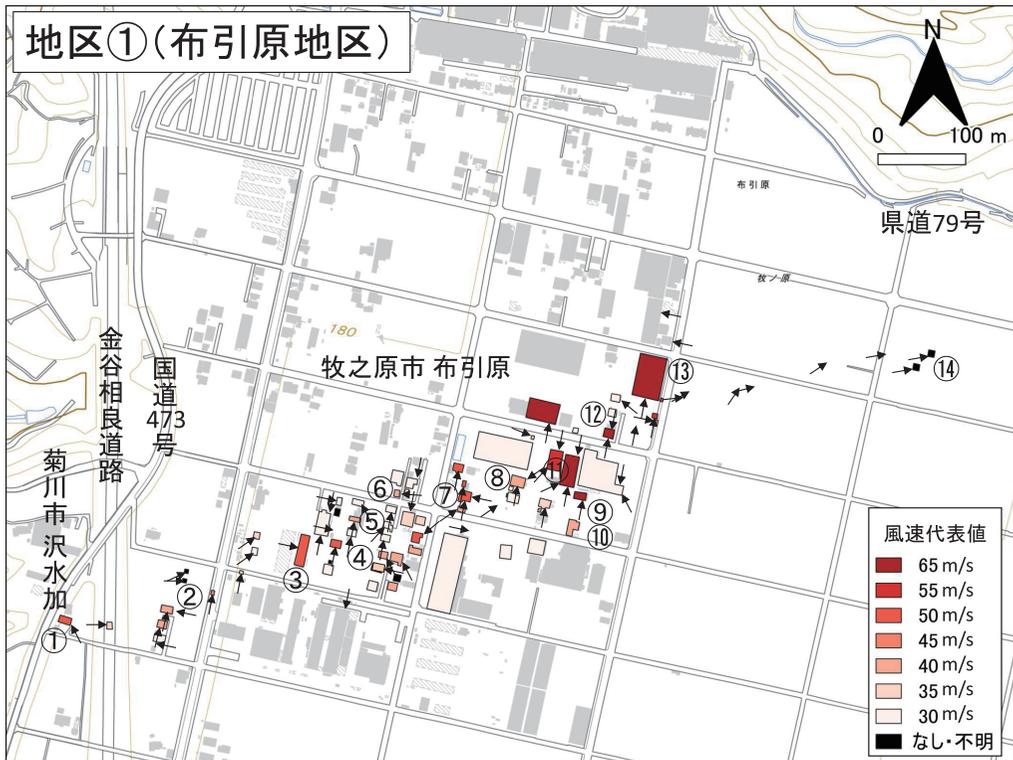


図7 (地区①) 現地調査に基づいて作成した竜巻による建物等の被害分布図 (矢印は被害から判断した風向, 数字が写真番号)

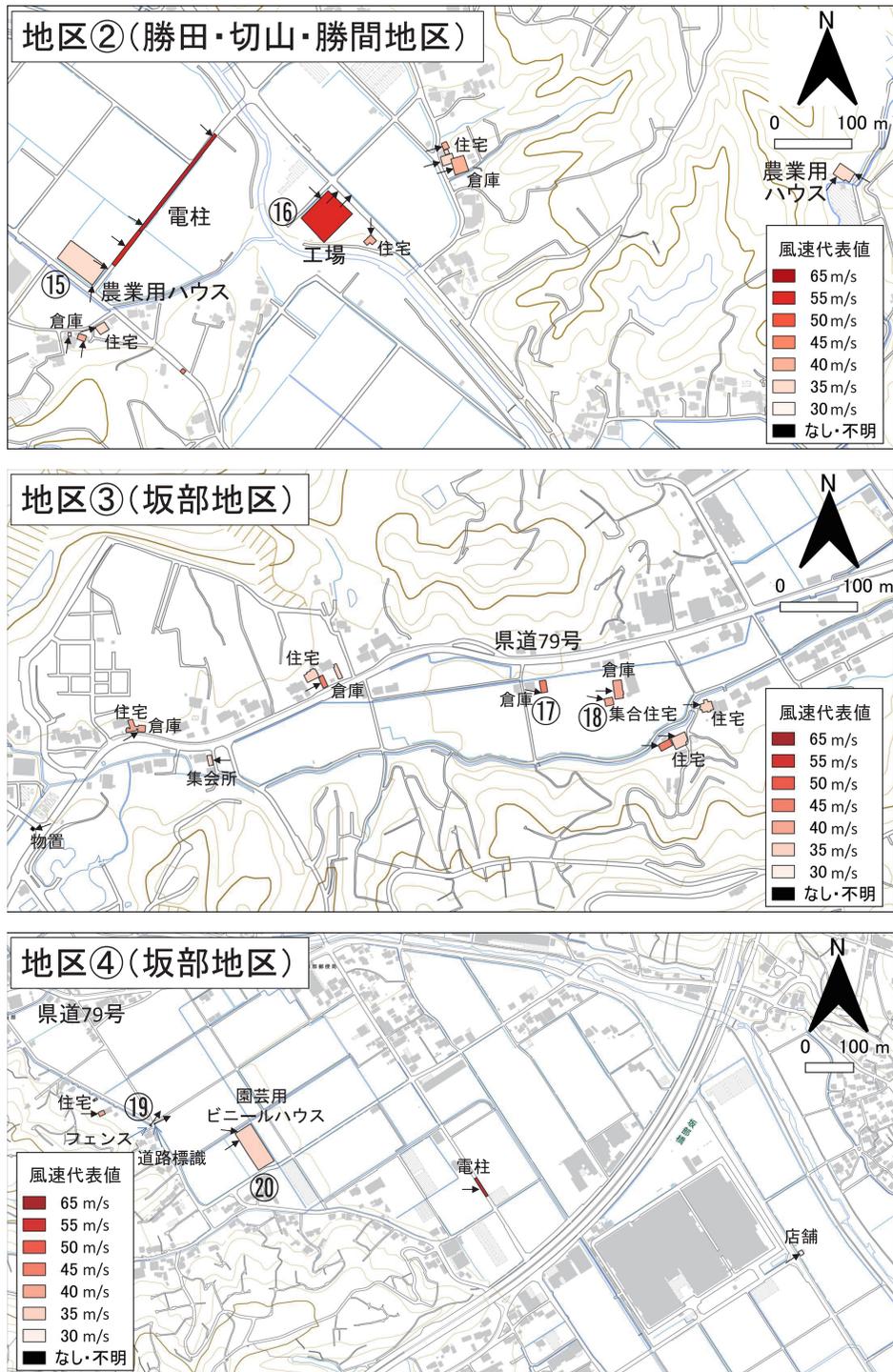
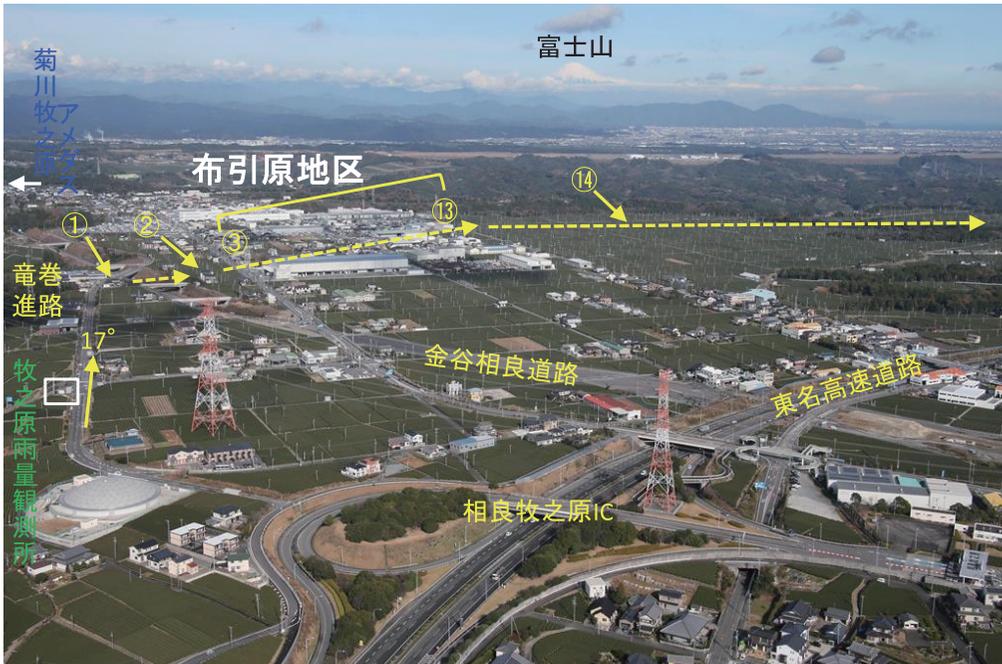


図7 (地区②～④) 現地調査に基づいて作成した竜巻による建物等の被害分布図(矢印は被害から判断した風向, 数字が写真番号)

始点と推察される①の木造住宅の被害状況を写真1に示した。住宅2階の屋根瓦が吹き飛んで、屋根の野地板が飛散しており、DI1（木造の住宅又は店舗）・DOD4（屋根の軒先又は野地板の破損又は飛散：風速代表値50 m/s）と推定される被害に見舞われている。南北に走る金谷相良道路を挟んで東側に位置する②の木造住宅（DI1）では、写

真2に示したように屋根葺き材が剥離するDOD2（比較的狭い範囲での屋根葺き材の浮き上が又は剥離（金属板葺き又は化粧スレート）：風速代表値40 m/s）の被害が生じており、雨よけのブルーシートが掛けられている。住宅の東側に隣接した茶園に設置された凍霜害対策用の防霜ファンも2基が北東と東方向（写真2）に傾倒する被害に見



空中写真1 空中写真による竜巻の進路（牧之原市新拠点整備室，2021）（筆者らが文字等を加筆，丸数字は写真番号，破線矢印は竜巻進路）



写真1 木造住宅における屋根の野地板の飛散（菊川市沢水加）



写真2 木造住宅における屋根葺き材の剥離，防霜ファンの傾倒（菊川市沢水加）

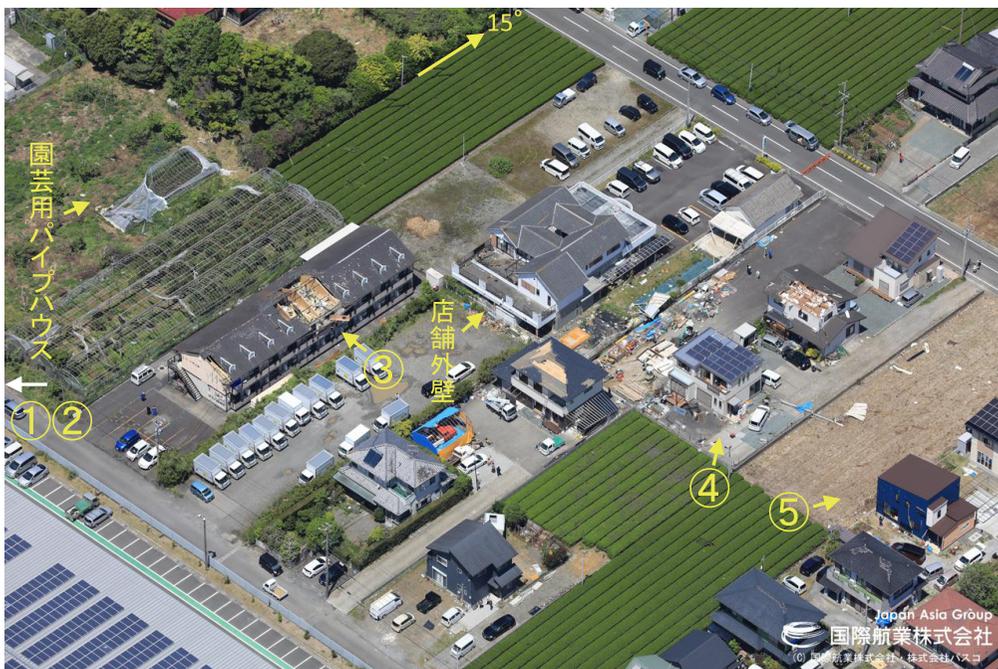
舞われている。なお、被害住宅の南側に隣接する住宅でも屋根葺き材の剥離(DI1・DOD2)やカーポートの側面パネルの破損(DI20・DOD1：風速代表値30 m/s)の被害が発生している(写真省略)。

4.2 牧之原市 布引原地区(空中写真1～6)

竜巻による被害が大きかった牧之原市の布引原地区について、被害の全容を上空から詳細に把握するため、国際航業株式会社が被災翌日の5月2日に撮影した写真を空中写真2～6に示した(国際航業株式会社, 2021)。空中写真2の左上に写った園芸用パイプハウスは倒壊(DI8・DOD2：風速代表値30 m/s)しているが、北側妻面では被害を受けておらず、竜巻は菊川市沢水加からパイプハウスの南側を東北東の方向に通過したものと推察される。園芸用パイプハウスが設置された農地の東側に隣接してほぼ南北方向に2階建ての木造集合住宅が建っており、屋根の野地板の飛散(DI1・DOD4)と修繕状況を写真3に示した。空中写真2でも明らかなように、南北に並んだ10室の中央

部の5・6室目の箇所のみ被害が発生していることから、この箇所を竜巻の中心部分が左から右に通過したものと推察される。集合住宅の北東方向には2階建ての店舗(医院で閉院)が立地し、写真は省略するが南側の駐車場から見ると建物南面の外壁材には飛来物によると思われる多数の破損(DI1・DOD1：風速代表値30 m/s)が確認できる。店舗の東側には3棟の住宅が南北に建ち並んでおり、写真4に示した南側の鉄骨系プレハブ住宅は南側の窓ガラスやシャッター等の破損(DI2・DOD1：風速代表値30 m/s)のみの被害に止まっているのに対して、奥に写った切妻式の2階建て木造住宅では屋根葺き材の剥離(DI1・DOD2)や外壁材が破損し、足場が組まれてブルーシートが掛けられて修繕工事が進められており、空中写真2でも明らかなように、この住宅付近を竜巻の中心が通過したものと推察される。

さらに農地を挟んで東側には、写真5に示した南北に3棟の新築の木造住宅が立地しており、いずれも南西方向を中心に外壁材・窓ガラス・



空中写真2 被災翌日の2021年5月2日に撮影された牧之原市布引原地区の空中写真(国際航業株式会社, 2021)(丸数字は写真番号, 黄色の矢印は写真の撮影方向)

シャッター等の破損 (DI1・DOD1) が確認できるが、新しい住宅であるため比較的軽微な被害に止まっている。写真6は、道路を隔てて北側に位置する木造車庫の倒壊 (DI7・DOD4: 風速代表値40 m/s) の状況を示している。手前に赤色、奥に白色の乗用車が駐車しており、倒壊した木材が覆いかぶさり、損傷する被害が発生している。ヒアリング調査では「『ゴォ』という音で自宅の窓を開けると、外が真っ白だった」と述べており、空中写真3の中央部に写った東西 (写真では上下) に延びる道路を竜巻が左上から右下に通過する際に生じた突風であったものと推察され、東側の茶園では多くの瓦礫が散乱している状況が確認できる。

一つ東側の街区でも、空中写真4に示したように中央部の左から右に被害が直線状に認められ、

写真7では南北に連なる木造倉庫の屋根葺き材の剥離 (DI7・DOD3: 風速代表値30 m/s) と窓ガラスの破損、木造住宅の屋根葺き材の剥離 (DI1・DOD3: 風速代表値50 m/s) などの甚大な被害が発生している。東隣の駐車場に駐車した大型自動車は損傷 (DI15・DOD1: 風速代表値30 m/s) 後に運転席がブルーシートで覆われており (写真は省略)、駐車した12台の大型自動車の内で手前の1台と最も奥の1台には被害が認められないことから、10台の自動車が駐車した中央付近を竜巻が通過したものと推察される。駐車場の東側に立地する木造住宅では、写真は省略するが屋根葺き材が剥離 (DI1・DOD2) し、敷地内のカーポートのパネルも剥離 (DI20・DOD1) する被害に見舞われている。さらに、駐車場を隔てた東側に位置す



写真3 木造集合住宅における屋根の野地板の飛散 (牧之原布引原)



写真4 鉄骨系プレハブ住宅における窓ガラス・シャッター等の破損 (牧之原布引原)



写真5 住宅における窓ガラス・シャッター、外壁材の破損 (牧之原布引原)



写真6 木造車庫の倒壊と自動車 (1: 赤色, 2: 白色) の被害 (牧之原布引原)



空中写真3 被災翌日の2021年5月2日に撮影された牧之原市布引原地区の空中写真（国際航業株式会社，2021）（丸数字は写真番号，黄色の矢印は写真の撮影方向）



空中写真4 被災翌日の2021年5月2日に撮影された牧之原市布引原地区の空中写真（国際航業株式会社，2021）（丸数字は写真番号，黄色の矢印は写真の撮影方向）

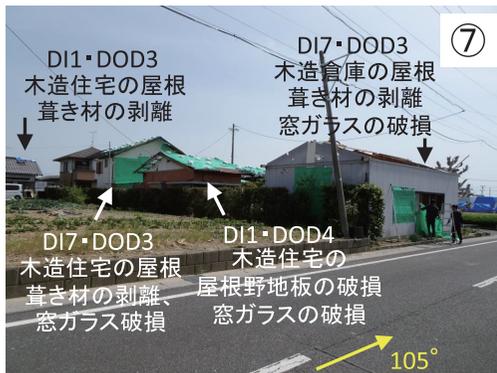


写真7 木造住宅と倉庫における屋根葺き材の剥離と窓ガラスの破損、瓦葺屋根の剥離 (牧之原布引原)



写真8 木造住宅における屋根葺き材の剥離等と木造倉庫の被害 (牧之原布引原)



写真9 木造住宅における小屋組の構造部材の飛散、軒天の破損 (牧之原布引原)



写真10 木造住宅における小屋組の構造部材の飛散 (牧之原布引原)

る写真8の切妻式の木造住宅でも屋根葺き材が剥離 (DI1・DOD2又は3)する被害が発生しており、両者とも急急の修繕工事が進められている。

写真9・10には、木造住宅における小屋組の構造部材の飛散と軒天の破損 (DI1・DOD7: 風速代表値65 m/s)を示した。写真9・10の建物の側面部分には竜巻の強風による破損が認められないことから、開口率は小さいものと判断される。泉ら (2016)は、建物模型を用いた風洞実験より、開口率が小さいほど模型内外の差圧力は大きくなることを報告している。このことから、被害を受けた建物も開口率が小さいことから建物内外の差圧力が大きくなり、住民が証言している「家の中が膨らむように感じ、2階に上がると天井や屋根が

吹き飛んでいた」が生じたものを推察される。写真は省略するが、2階建て倉庫の北側に設置された自動販売機は横転 (DI12・DOD1: 風速代表値35 m/s)してあり、地面に固定されてないで置かれていたため、強風で東方向に横転したことがわかる。写真11には鉄骨造の工場における屋根葺き材の剥離と外壁材の破損状況 (DI6・DOD3: 風速代表値65 m/s)を示している。手前の簡易倉庫の屋根等も破損し、東側に隣接する倉庫の屋根葺き材や外壁材にも強風による剥離や破損の被害が認められ、空中写真5でも被害が甚大であることが見て取れる。なお、写真11では倉庫手前の農地の農作物も北東側に倒伏しており、南西の強風が吹いたことが見て取れる。



空中写真5 被災翌日の2021年5月2日に撮影された牧之原市布引原地区の空中写真（国際航業株式会社，2021）（丸数字は写真番号，黄色の矢印は写真の撮影方向）



写真11 鉄骨造の工場や倉庫における屋根葺き材の剥離と外壁材の破損（牧之原布引原）



写真12 木造住宅における小屋組の構造部材の飛散（牧之原布引原）

写真12には切妻式の木造住宅における小屋組の構造部材の飛散状況を示しており、北側の構造部材を中心に強風で吹き飛んで消失する甚大な被害（DI1・DOD7）に見舞われている。しかし、北側に隣接する陸屋根式のプレハブ住宅は窓の破損と屋根に設置された太陽光パネルの一部飛散等の被害（DI2・DOD1）に止まっており、空中写真5や

6からも被害の状況が見て取れる。写真13には、鉄骨造倉庫における屋根葺き材の剥離と外壁材の破損（DI6・DOD3（開口部なし）：風速代表値65 m/s）の状況を示しており、駐車場に面した南側の外壁には多数の飛来物による衝突痕も認められ、屋根材は剥離する被害が発生している。また、駐車場に設置された看板の変形（DI18・DOD1：



空中写真6 被災翌日の2021年5月2日に撮影された牧之原市布引原地区の空中写真（国際航業株式会社，2021）（丸数字は写真番号，黄色の矢印は写真の撮影方向）



写真13 鉄骨造倉庫における屋根葺き材の剥離と外壁材の破損，看板の変形，コンテナ詰所の破損（牧之原布引原）

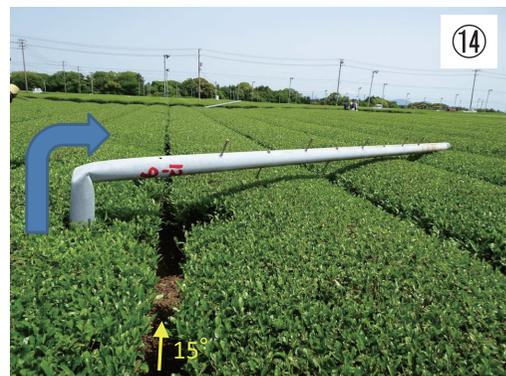


写真14 直角に折れ曲がった防霜ファンの支柱（牧之原布引原）

風速代表値45 m/s)，コンテナ詰所の破損（DI6・DOD3（開口部あり）：風速代表値55 m/s），さらには倉庫の南東脇と道路の東に隔てて建てられた2本の電柱が倒壊（DI17・DOD2：風速代表値55 m/s）する被害も発生している。なお，布引原地区における竜巻による被害の幅は，現地調査（写真3～13の範囲）や空中写真（2～6）から最大

130 m と推察された。

この鉄骨造倉庫の東側の南北道路を隔てて茶園が広がっており，空中写真6から竜巻の通過により発生した住宅や工場，倉庫等の屋根材や外壁材の一部が飛散して茶園に散乱していることがわかる。茶園では，一番茶の刈り取り前の茶葉への異物の混入を防ぐため，農家や多くのボランティア

により塵芥を取り除く作業が懸命に行われていた。また、竜巻による強風で、写真14に示したように防霜ファンの支柱が直角に折れ曲がったり傾倒したりして、先端に取り付けられたファンの撤去作業、支柱の解体作業が行われていた。

以上から、菊川市の沢水加地区で発生した竜巻は、住宅や工場・倉庫が立ち並ぶ牧之原市の布引原地区を東北東の方向に進み、東に隣接する茶園を通り過ぎたものと推察される。なお、布引原から勝田方面に向かう県道79号沿いでも、2本の防霜ファンが東方向へ傾倒する被害が確認されている。図7（地区①～④）には建物や電柱等の被害方向や農地の農作物などの倒伏方向を矢印で示しているが、西から南に面した被害が多く確認されたが、竜巻に伴う突風の方向には規則性は認められなかった。

なお、「おーちゃん @oochan0220」(2021)のSNSでは、「竜巻？直前の信号待ちで、突然信号機消えたから何事かと思ったら… #竜巻 #怖かった #嵐」と題して、18時32分03秒から33分03秒までの30秒間のドライブレコーダーによる動画が投稿されている。豪雨と伴に稲光が光っている映像が写っており、32分31秒には空中写真6に写った写真13の倉庫と東側の茶畑との間の道路を自動車で北上中に、電柱の倒壊により道路が塞がれている状況に遭遇しており、竜巻が18時30分頃に通過した直後の光景を撮影したものと推察される。

4.3 牧之原市 勝田・切山・勝間地区（空中写真7）

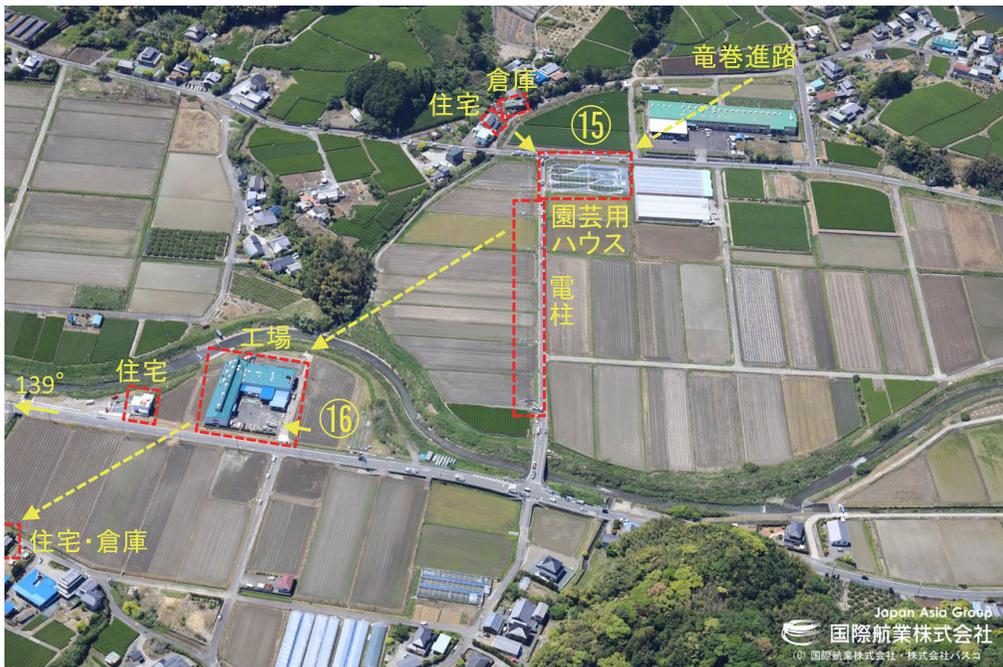
竜巻は布引原地区の茶園を東に進み、勝田・切山地区に達し、住宅・倉庫、園芸用パイプハウス、工場等に被害が発生している（空中写真7）。写真15には、勝田地区におけるイチゴの園芸用パイプハウスの倒壊（DI8・DOD2）の状況を示した。先に記したパイプハウス被害と同様に、道路側の手前の部分は倒壊し、奥の部分は被害を免れている。手前の道路に沿って北東側に設置されている電柱6本も倒壊（DI17・DOD2）しており、西側の山際に位置する木造住家や倉庫も屋根材のはく離、窓ガラスや外壁材の損傷等の被害が発生して

いる（写真省略）。電柱の倒壊現場から東方の切山地区には写真16に示した製茶工場が立地しており、屋根葺き材の剥離と外壁材の破損（DI6・DOD4（開口部あり）：風速代表値55 m/s）等、甚大な被害が発生している。なお、この工場の東側でも木造住宅（DI1）や鉄骨系プレハブ倉庫（DI2）の屋根材の剥離（DOD2）が生じており、これらの被害は西から東の方向に直線状で発生している。なお、切山地区から東方の勝間地区でも、延長上の農園において園芸用パイプハウスの被害が確認できる（写真省略）。

4.4 牧之原市 坂部地区（空中写真8～9）

竜巻は勝田・切山、勝間地区から丘陵を東に越えて坂部地区（空中写真8・9）に達し、県道79号沿いの木造住宅や倉庫で、瓦屋根や波形スレート屋根が剥離する被害が発生している。写真17に示した平屋建ての木造倉庫は、金属板屋根葺き材の剥離と飛散（DI7・DOD3）や窓ガラスの破損が発生し、飛散した屋根葺き材は東に80 mも離れた鉄骨系プレハブ集合住宅の北西側外壁に覆いかぶさり止まっており、屋根材の剥離（DI2・DOD2）も確認できる（写真18）。また、手前に駐車している自動車も破損が生じている。なお、飛散した方向が分かりやすきように、写真17を右、写真18を左に配置し、両者の間に矢印で「80 m 飛散」と記している。

茶園が連なる低い丘陵（空中写真8の奥中央部、空中写真9の手前中央部）を西から東に竜巻が進み、山裾の木造住宅に瓦葺屋根や屋根材が剥離（DI2・DOD2）する被害（写真省略）が生じ、写真19には宅地内のフェンスの傾倒（DI22・DOD1：風速代表値35 m/s）、隣接する道路の標識（カーブミラー）の傾倒（DI19・DOD1：風速代表値45 m/s）が北東方向に発生している。さらに東に向かうと、写真20に示したイチゴの園芸用パイプハウス6棟の内でも4棟が倒壊（DI8・DOD2）・損傷する被害が発生している。特に、一番手前のハウスは竜巻による西からの強風を直接受けたことにより、パイプハウスの基礎のコンクリート部分が地面から抜けて浮き上がっており、農家へのヒ



空中写真7 被災翌日の2021年5月2日に撮影された牧之原市勝田・切山地区の空中写真(国際航業株式会社, 2021)(丸数字は写真番号, 黄色の矢印は写真の撮影方向, 赤の破線内は竜巻による被害)



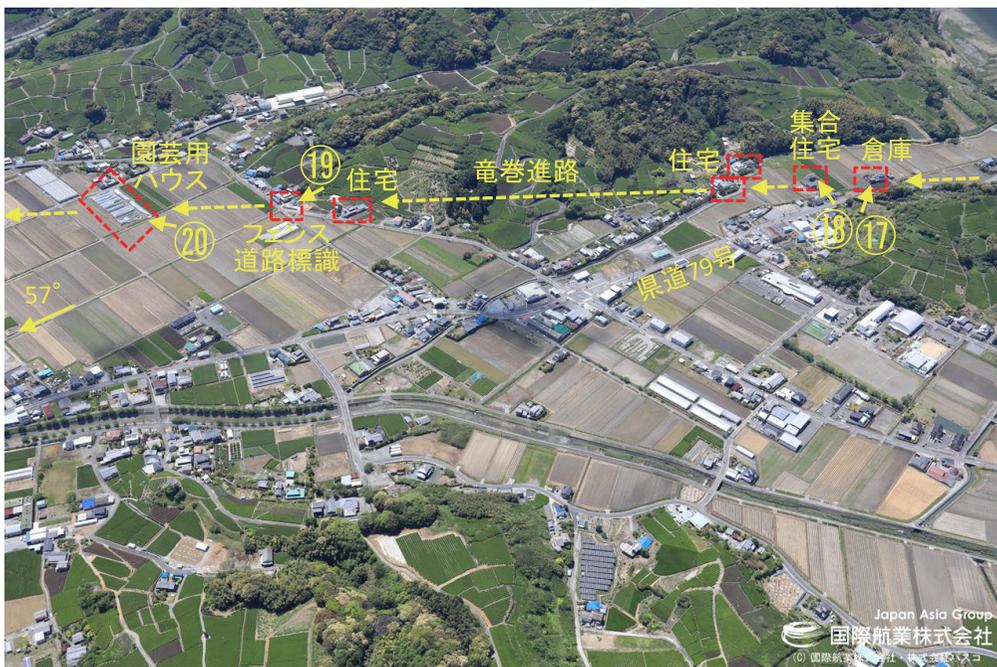
写真15 園芸用パイプハウスの倒壊(牧之原市勝田)



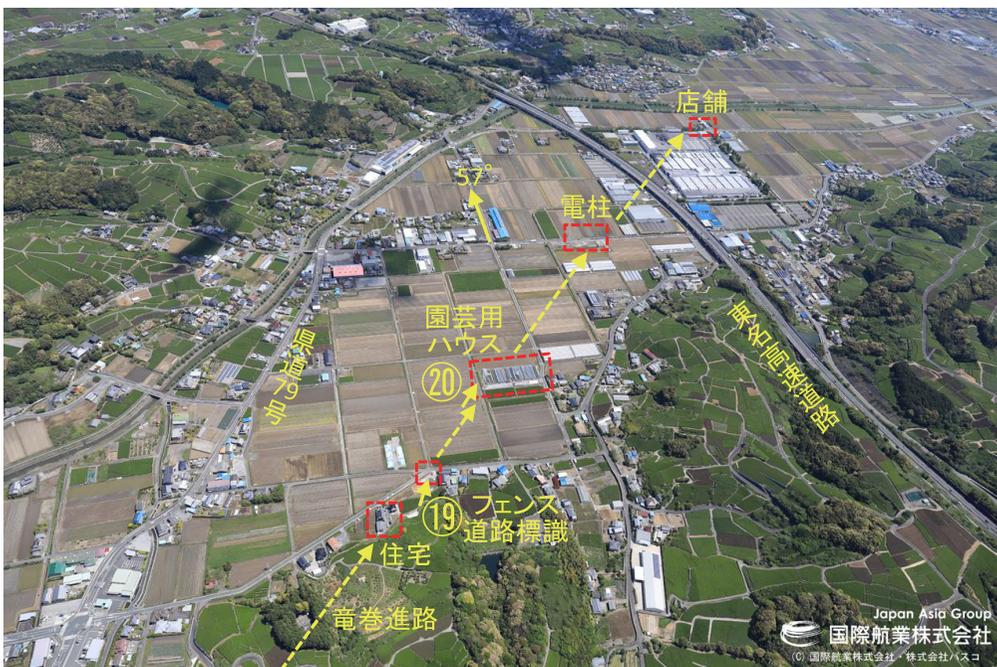
写真16 鉄骨造工場における屋根葺き材の剥離と外壁材の破損等(牧之原市切山)

アリングでは「台風でもハウスの骨組みや基礎が被害を受けたことはなかった。竜巻は海外の話だと思っていた」との落胆した想いが伺えた。なお、被害を受けた農業用ハウスの東方に位置する3本の電柱も倒壊していることから竜巻の通過時に発生した被害と推察される。この先の自動車照明部

品工場を越えて直線上に立地する店舗の屋根材にも軽微な被害が確認されているが、竜巻による被害かどうかは判定が困難であった(写真省略)。



空中写真8 被災翌日の2021年5月2日に撮影された牧之原市坂部地区の空中写真（国際航業株式会社，2021）（丸数字は写真番号，黄色の矢印は写真の撮影方向，赤の破線内は竜巻による被害）



空中写真9 被災翌日の2021年5月2日に撮影された牧之原市坂部地区の空中写真（国際航業株式会社，2021）（丸数字は写真番号，黄色の矢印は写真の撮影方向，赤の破線内は竜巻による被害）



写真18 鉄骨系プレハブ住宅への倉庫の屋根葺き材の飛散 (牧之原市坂部)



写真17 木造倉庫における金属板屋根葺き材の剥離と飛散 (牧之原市坂部)

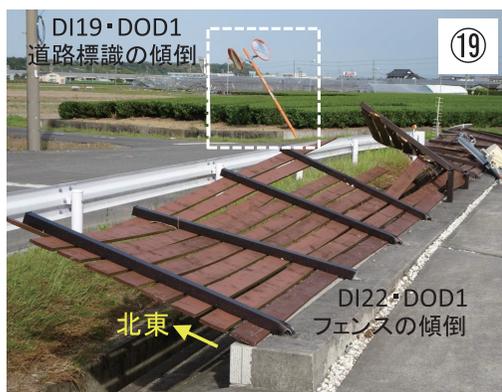


写真19 フェンスの倒壊と道路標識 (カーブミラー) の傾倒 (牧之原市坂部)



写真20 園芸用パイプハウスの倒壊 (牧之原市坂部)

5. 日本版改良藤田スケールに基づく竜巻の判定

筆者らが竜巻発生から3日後に行った現地調査に基づいて、約100件の被害指標 (DI) を対象に「日本版改良藤田スケール」により求めた被害度 (DOD) と風速の評定結果では、風速代表値の最低値は30 m/s (DI1・DOD1, DI2・DOD1, DI6・DOD1, DI20・DOD1), 最高値は65 m/s (DI1・DOD7, DI3・DOD6) であり、65 m/s が評定風速となり、「日本版改良藤田スケールにおける階級と風速の関係」から「風速55~66 m/s」の「JEF2」に相当すると評定した。

なお、静岡地方気象台では、前掲したように、竜巻の発生翌日に現地調査を実施し、その結果を

『令和3年5月1日に静岡県牧之原市で発生した突風について—気象庁機動調査班による現地調査の報告—』(静岡地方気象台, 2021c) として報告しており、「突風通過時に活発な積乱雲が付近を通過中」、「被害や痕跡は帯状に分布していた」、「ゴ—という音が移動したという証言が複数得られた」、「耳の詰まりや耳鳴り、体が浮き上がる感じがしたという証言が複数得られた」から、突風のもたらした現象は竜巻の可能性が高いと判断している。その強さは風速約55 m/s を推定され、「日本版改良藤田スケール」で「JEF2」に該当するとしており、筆者らの評定と一致した。

ただし、静岡地方気象台では、牧之原市の主要な被災箇所である布引原地区の被害発生を18時50

分頃、勝田・坂部地区の被害発生を18時30分頃としており、両者の現象には連続性は認められないと判断している。しかし、①筆者らのリアルタイム降雨情報「AMeNOW!」のレーダ合成雨量図による寒冷前線の移動解析では18時29分から36分に前線が通過していること、②同時時間帯に近隣の菊川牧之原アメダスや牧之原雨量観測所で強風や強雨を観測していること、③18時30分頃に布引原地区で複数の住民が突風に遭遇したと証言していること、④ドライブレコーダーにおける被害映像が18時32分過ぎであることを総合的に判断し、布引原・勝田・切山・勝間・坂部地区で発生した突風による被害は、同時時間帯に発生した連続した現象であり、西から東方向への竜巻の移動によりもたらされたものと推定するに至り、被害の長さは約7 km、被害の幅は布引原地区において最大130 mであった。

6. まとめ

今回の竜巻災害において、レーダ合成雨量図、気象観測データ、筆者らの現地調査によって得られた建物の被災状況、住民へのヒアリング調査等から、主に以下の内容が明らかになった。

①AMeNOW!のレーダ合成雨量図では、寒冷前線に伴う強雨域が2021年5月1日の18時29分から32分に牧之原市の布引原地区を通り、東進して勝田・切山、勝間地区を通過して35分には坂部地区を通り、36分には隣接する吉田町に中心が達しており、強雨域の移動速度は時速約60 kmであった。

②牧之原市の布引原地区で竜巻による被害が甚大であった箇所から北に約1.5 km離れた気象庁の菊川牧之原アメダスでは、寒冷前線が通過する18時20分～40分の間に、気温が17.3℃から13.8℃へと20分間で3.5℃も低下し、最大瞬間風速は20分7.3 m/s → 30分15.8 m/s → 40分15.4 m/s → 50分4.7 m/sと短時間で変化しており、18時30分前から40分までの10分間前後で竜巻が南側を通過して突風が吹いたものと推察された。

③竜巻は菊川市の沢水加地区から、東に隣接する牧之原市の布引原地区を通り、勝田・切山・勝

間・坂部地区に至り、被害の長さは約7 km、被害の幅は布引原地区において最大130 mであった。

④約100件の住宅、工場、倉庫等の建物、園芸用パイプハウス、電柱、カーポートの倒壊や損傷等を対象に、『日本版改良藤田スケール』に基づいて被害の評定を行った。木造住宅における小屋組の構造部材の飛散、軒天の破損(DI1・DOD7)、鉄骨系プレハブ倉庫における屋根材、外壁材の破損(開口部なし、DI6・DOD3)から風速代表値の最大値を65 m/sと推定し、この最大値から竜巻を「JEF2」と判定した。なお、建物等は西から南に面した被害が多く確認されたが、竜巻に伴う強風の方向には規則性は認められなかった。

謝辞

本調査研究では、気象庁の「竜巻等の突風データベース」、アメダスやウインドプロファイラのデータ、静岡地方気象台の現地調査の報告書、静岡県の雨量データ、データ統合・解析システム(DIAS)のリアルタイム降雨情報(AMeNOW!)のレーダ合成雨量図等を使用させて頂いた。さらに、牧之原市新拠点整備室からは牧之原 IC 北側開発の空中写真を、国際航空株式会社からは災害時に撮影された空中写真を使用させて頂き、中部電力パワーグリッド株式会社からは停電情報のご提供を頂いた。また、「おーちゃん @oochan0220」の SNS に投稿された映像を引用させて頂いた。ここに厚く感謝の意を表します。

参考文献

- DIAS 事務局(国立研究開発法人海洋研究開発機構)：リアルタイム降雨情報(AMeNOW!)，2021. <http://rain.diasjp.net/> (2021年5月15日)。
- 気象庁：日本版改良藤田スケールに関するガイドライン，121p.，2015. https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/kentoukai/kaigi/2015/1221_kentoukai/guideline.pdf (2021年5月3日)。
- 気象庁：竜巻等の突風データベース，2021a. <https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/> (2022年2月25日)。
- 気象庁：各種データ・資料，2021b. <http://www.jma.go.jp/jma/menu/menureport.html> (2021年5月

- 10日).
- 高知大学：高知大学気象情報頁（保存倉庫），2021.
<http://weather.is.kochi-u.ac.jp/>（2021年5月5日）.
- 国際航業株式会社：令和3年5月 静岡県牧之原市突風被害，2021. https://www.kkc.co.jp/service/bousai/csr/disaster/202105_shizuoka/index.html（2021年5月10日）.
- 泉知宏・高橋駿介・友清衣利子・前田潤滋：急激な気圧降下による建物内外の気圧差力に及ぼす建物密閉度の影響，第24回 風工学シンポジウム論文集，pp.205-210，2016.
- 牧之原市：突風等による市内の被害状況等について（5月14日17時現在），2021. <https://www.city.makinohara.shizuoka.jp/soshiki/4/39654.html>（2022年2月25日）.
- 牧之原市新拠点整備室：東名高速道路相良牧之原IC北側開発，2021. <https://www.city.makinohara.shizuoka.jp/soshiki/28/>（2021年5月20日）.
- おーちゃん @oochan0220：竜巻？直前の信号待ちで、突然信号機消えたから何事かと思ったら…… #竜巻 #怖かった #嵐，2021. <https://nextinfonews.com/saigai/23153/>（2021年5月20日）.
- 静岡地方気象台：5月1日の突風発生時の気象状況（令和3年5月2日12時現在），3p.，2021a. <https://www.jma-net.go.jp/shizuoka/shosai/info/pdf/0502sokuhou.pdf>（2021年5月3日）.
- 静岡地方気象台：令和3年5月1日に静岡県牧之原市で発生した突風について－気象庁機動調査班による現地調査の報告－（5月2日），2p.，2021b. https://www.jma-net.go.jp/shizuoka/shosai/info/pdf/20210501_mot_JEF2.pdf（2021年5月5日）.
- 静岡地方気象台：令和3年5月1日に静岡県牧之原市で発生した突風について（続報）－気象庁機動調査班による現地調査の報告－（5月4日），2p.，2021c. https://www.jma-net.go.jp/shizuoka/shosai/info/pdf/20210501-2_mot_JEF1.pdf（2021年5月5日）.
- 静岡地方気象台：令和3年5月1日に静岡県牧之原市で発生した突風について－気象庁機動調査班による現地調査の報告－（5月4日），2p.，2021d. https://www.jma-net.go.jp/shizuoka/shosai/info/pdf/20210501-4_mot_JEF0.pdf（2021年5月5日）.
- 静岡県交通基盤部河川砂防局土木防災課：静岡県土木総合防災情報，2021. <http://sipos.pref.shizuoka.jp/>（2021年5月10日）.
- （投稿受理：2021年6月1日
訂正稿受理：2021年10月30日）

要 旨

2021年5月1日18時30分頃、静岡県中部を寒冷前線に伴う活発な積乱雲が時速約60 kmで東進し、不安定な大気の状態牧之原市付近では竜巻が発生した。竜巻は、菊川市沢水加を始点に、牧之原市の布引原地区を通り、勝田・切山、勝間、坂部地区へと東に進んだ。現地調査から被害の長さは約7 km、被害の幅は布引原地区において最大130 mであった。約100件の住宅、工場、倉庫等の建物、園芸用パイプハウス、電柱、カーポート等の被害を対象に、「日本版改良藤田スケールに関するガイドライン」で評定した結果、竜巻はJEF2と判定した。