

論文

茂原市と豊橋市の竜巻の比較を もとにした竜巻災害に関する研 究—その1 竜巻発生直前・直 後の現象の分析—

小泉俊雄*

A Study on the Mitigation of Tornado Disasters Based on Comparisons of the two Tornadoes in Mobara and Toyohashi Cities: Analyses of Phenomena Immediately Before and After the Two Tornado Incidents (Part I)

Toshio KOIZUMI

Abstract

The Mobara tornado that occurred on December 11, 1990 in Mobara city in Chiba prefecture caused the greatest level of tornado damage in Japan's recorded history. A research group from the Chiba Institute of Technology, including myself, distributed questionnaires immediately after the 1990 Mobara tornado. The group also investigated the weather conditions at the time of the tornado as well as the evacuation measures that people employed. The Chiba Institute of Technology group also carried out another questionnaire study after the Mobara tornado victims had settled down one year after the event in order to investigate preparedness, recovery and mitigation with regard to the Mobara tornado.

A similar level of tornado damage was again recorded on September 24, 1999 in Toyohashi city, Aichi prefecture. A research group led by Dr. Tamura and Dr. Ookuma conducted a questionnaire survey to the 1999 Toyohashi tornado victims. This survey employed a similar set of questionnaire items as those in the Mobara study. In the following year, the current author also conducted a questionnaire study that incorporated the same set of items as the 1991 Mobara tornado follow-up study.

Based on the questionnaire results, the present paper compares the characteristics of the two tornadoes, the meteorological conditions, and the damage reported immediately after the tornadoes. It then discusses effective countermeasures against tornado disasters.

キーワード：竜巻災害，防災，アンケート調査，茂原市，豊橋市

Key words : tornado disaster, disaster prevention, questionnaires, Mobara City, Toyohashi City

* 千葉工業大学工学部建築都市環境学科
Department of Architecture and Civil Engineering, Chiba
Institute of Technology

本論文に対する討論は平成16年2月末日まで受け付ける。

1. 序論

1990年12月11日千葉県茂原市に竜巻が発生し、我が国観測史上最大級の被害をもたらした。また、1999年9月24日愛知県豊橋市にもほぼこれに匹敵する竜巻が発生し多くの被害が発生した。茂原については著者ら千葉工業大学の研究グループが被害直後にアンケートを実施し、竜巻発生時の現象やそれに対する避難の対応等に付いて調査を実施した^{1)~3)}。さらに、被災に対する気持ちが落ち着いた被災1年後に復旧、保険、防災、公共機関の対応に関するアンケート調査を実施した^{4)~6)}。豊橋については田村、大熊が被災直後に著者らのアンケート項目を参考に、ほぼ同一の項目でアンケート調査を実施した⁷⁾。また著者は豊橋について被災1年後に茂原とほぼ同じアンケート調査を実施した。

本論文はその1として両竜巻の特性、竜巻発生時の気象状況、竜巻の現象、被害状況を述べるとともに、被災直後の両アンケートを主な参考資料として両者を比較しながら、竜巻発生時の気象現象、被害の発生機構、襲来時の避難行動などについて分析したものである。なお、本論文の手続きは①比較すべき項目をたて、②該当項目に対する資料を既発表資料から抽出して整理し、③分析し、④総括的結論を得る、という順番である。

2. アンケート調査

ここでは被災直後のアンケート調査について、参考文献3)および7)を引用して述べる。

2.1 豊橋市⁷⁾

豊橋市消防本部防災対策室との共同で、被災後約2ヶ月の時点で行った。設問のうち、竜巻の特性や耐風工学に関連するものについては、1990年に千葉県茂原市を襲った竜巻被害でのアンケート調査²⁾を参考にして策定した。この他に、防災行政の立場から必要と思われる設問を追加して、全部で28の設問について行った。表1にアンケートの調査対象と回答数を示す。アンケートを依頼した世帯数は1000世帯で、家屋が全壊あるいは半壊した385世帯全てと、各町毎に無作為に抽出

した一部損壊世帯615世帯である。

2.2 茂原市³⁾

被災者が精神的に平静を取り戻したと考えられる被災1ヵ月後の1991年1月に実施した。調査は、竜巻の通過の時間的経過、前後の気象状況、竜巻時の対応、家屋の損壊状況と復旧費用、突発災害に遭われた方々の率直な意見を求める目的で行った。アンケートの配布は無作為に各戸を訪問し、不在の場合は郵便受けに投函して所定のアンケート用紙に記入後返送されるよう依頼した。アンケートは記名式とし、住所、電話番号の記入もお願いした。これは被害箇所の特長、詳細な調査を必要とした時のためである。表2にアンケート調査対象と回答数を示す。

3. 豊橋市、茂原市の概要(地域性の分析)

3.1 豊橋市⁸⁾

位置：愛知県の東南部(図1)。

人口：約365,000人

地形：概ね平坦で、東部の山地から台地、西部

表1 アンケート対象と回答数(豊橋)

送付世帯(総数1000)		回答数
全半壊世帯	一部破損世帯	616
385	615	

表2 アンケート対象と回答数(茂原)

配布世帯(総数818)		回答数(総数238)	
全半壊世帯	一部破損世帯	全半壊世帯	一部破損世帯
174	644	65	173

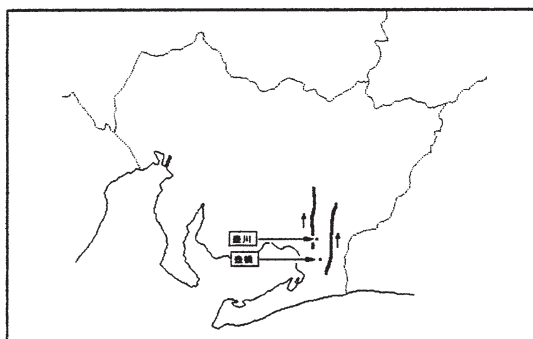


図1 豊橋市の位置と竜巻の経路

の低地へと緩やかに傾斜しているが、南部一帯は台地を形成し、太平洋側は急な崖となっている。

竜巻被害地：郊外の田園部で発生し、市の中心の人口密集市街地に大きな被害を与えながら北北東に進んだ。建物の多くは2階建木造家屋。

過去における竜巻発生状況⁸⁾：1971年から1990年までに3個発生

気候：平均気温15度前後、年平均降雨量1558mm、気候温暖、冬季に北西の季節風。

3.2 茂原市⁹⁾

位置：千葉県中部の太平洋側(図2)。

人口：約85,000人

地形：南西約10kmに標高300~350mの房総丘陵があり、そこから標高約170mほど徐々に下った所である。南と西を標高約90m程の丘陵に囲まれた平地。海まで約9km

竜巻被害地^{10),11)}：郊外の田園部で発生し、市の中心の人口密集市街地に大きな被害を与えながら北北東に進んだ。建物の多くは2階建木造家屋。

過去における竜巻発生状況¹⁰⁾：1971年から

1990年までに2個発生

気候：平均気温15度、年平均降雨量1500mm、気候温暖、四季の変化に富む

3.3 地域性の分析

参考文献1)によると、①竜巻の発生は温暖な地域で発生しやすく、これは世界共通な現象である。②日本の竜巻は、台風に伴うものと、その他の原因(低気圧や前線など)によるものとに大別でき、台風に伴う竜巻は日本では太平洋の沿岸部で主に発生し平野部が特に多い。その他の原因による竜巻は、日本各地の海岸や平野部で見られるが、この場合も太平洋沿岸部が多く、瀬戸内海や中部山岳地帯では記録に残る竜巻は少ない。③竜巻発生は海に近いなどの下層大気乾燥度が小さい事も原因として考えられる。④1971年から1990年までの統計資料によると、竜巻発生件数の多い県は沖縄県、高知県、北海道、静岡県、順であり、面積当たりでは沖縄県、東京都、千葉県、静岡県、宮崎県の順である。

そこで本論文では地理的位置や気候、地形といった自然条件、市街地や田園部といった社会的条件を含んだ地域の特性を地域性と定義し、豊橋市と茂原市の地域性と竜巻発生との関係を分析してみる。

上記①から③に関しては、位置的には両市とも太平洋岸に位置した温暖な気候の地域であり、地形的には背後を丘陵に囲まれた海に面した平野部である。後述するが豊橋の竜巻は台風に伴うものであり、茂原の竜巻はその他(低気圧の接近)の原因によるものである。④に関しては竜巻の発生件数は千葉県(茂原)は多い県である。愛知県(豊橋)は多い方ではないが、豊橋市自体では1971年から1990年までに3個発生しており、茂原市の2個とほぼ同じである。また、竜巻は郊外の田園地帯で発生し、市街地に向かい、市街地に大きな被害をもたらした事でも一致している。これらのことより上述した文献1)の事実が確認された格好である。日本の現状では竜巻の発生しやすい地域を具体的に特定する事は出来ないが、今後取り組むべき課題と考えられる。

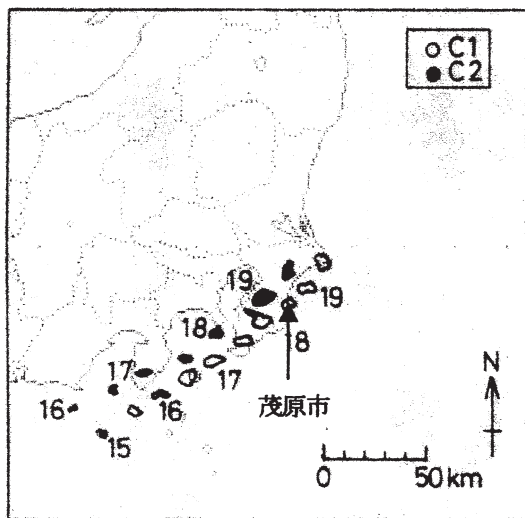


図2 茂原市の位置と雨雲のエコーの移動

4. 両竜巻の概要

4.1 両竜巻の比較

両竜巻の強さ(藤田スケール)¹²⁾、風速、気圧の低下の状況、移動速度、被害をおよぼした距離と幅などの比較を表3に示すが、両竜巻とも藤田スケールはF3であり、強烈な竜巻で木造家屋を倒壊する。被害の概要を表4に示す。

4.2 両竜巻の比較の分析

表3の竜巻の比較に示したものと関係する事項を参考文献1)より列挙すると、竜巻の特徴として①風速は局部的に80~100 m/sに達する事がある。②中心で気圧の急激な低下がある。③日本の竜巻は台風に伴うものと、その他の原因(低気圧、前線など)によるものとに大別できる。④海岸部で発生しやすい。⑤発生には季節別傾向があ

る(日本は9, 8, 10月)。⑥発生時刻は10時から17時が最も多く、13時から17時に全体の1/3が発生、深夜は非常に少ない。⑦一つの竜巻によって被害を受ける範囲は平均して幅103 m、長さ3.3 kmである。⑧平均して北東方向に進む。⑨進行速度は平均36 km/h、非常に速いものでは100 km/hにも達する。

これらのことから両竜巻を分析すると、茂原の竜巻が12月に発生し、発生月に一致しない点が見られるがその他はほぼ一致し、両竜巻が代表的な竜巻の要件を備えている事が確認された。

4.3 竜巻発生時の気象状況

(1) 気象状況

<豊橋⁸⁾>

豊橋の竜巻は台風18号に伴って発生した。豊橋

表3 竜巻の比較

項目	豊橋 ⁸⁾	茂原
発生日時	平成11年(1999年)9月24日 午前11時~午後1時	平成2年(1990年)12月11日 午後7時15分~午後7時20分
発生場所の位置	海岸線から4~5km陸上	海岸線から約10km陸上
移動距離(被害距離)	19.3km	3.5km
被害の幅	0.17km~0.55km	0.5km~1km(被害区域は大きく4ヶ所に分けられる)
藤田スケール(竜巻の強さを表す)	F3(発表時はF2、その後車が約5m持ち上げられた、電柱が多数倒れているとの事項よりF3に変更された)	F3 ⁸⁾ F2~F4 ⁹⁾ F3の上のクラス ¹²⁾
発生個数	4個(東三河内)	5個(千葉県内)
移動速度	45km/h	60km/h
移動方向	北北東	北北東
回転方向	左回り	左回り
竜巻の最大風速の推定値	51.1~72.2m/s(ガラスの破壊より) ⁸⁾	100m/s以上(気圧の変化より) ¹²⁾¹³⁾ 、 85m/s以上(10トンダンパーの横転より) ¹²⁾
発生気象要因 気圧の低下	台風の接近 約2.5hpaの低下(ただし、豊川の竜巻に伴うもの)観測点:豊川消防署 ¹⁴⁾	低気圧の接近 8.8hpaの低下(1003hpa(午後7時頃)、 994hpa(午後7時15分頃、瞬間的))観測点:長生高校 ¹⁰⁾

表4 被害の概要

項目	豊橋 ⁸⁾	茂原 ⁹⁾
被害者数	重傷15人、軽傷400人	重傷7名(12月15日1名死亡)、軽傷67人
被害家屋数	家屋 { 全壊40棟 52世帯 半壊309 333 一部破損1,980 2,150 } 公的施設被害12,861千円 保育園、幼稚園、学校関係被害 64,851千円 農業被害780,220千円 商工業被害342,837千円	家屋 { 全壊82戸 半壊161戸 一部破損1,504戸 } 公的施設被害41,386千円 文教施設25,127千円 農業被害32,439千円 商工業被害160,370千円

市で竜巻が発生した午前 11 時頃には台風を中心は北緯 35 度 30 分、東経 132 度 15 分（島根県の日本海沖）付近にあり中心気圧は 970 hPa である。ひまわりの画像によると三河湾付近には雲のあまり高くない領域があり、その東側に遠州地方を通り南北にのびる背の高い雲領域がある。豊橋市周辺はこの雲領域の西端付近に位置している。竜巻は台風中心の進行方向右前方象限約 500 km で発生した。

<茂原¹³⁾>

竜巻発生当時の 12 月 11 日 15 時の地上天気図によると、能登半島沖にある発達した 1000 hPa の低気圧が日本列島を横切って東進し、その後銚子沖に抜けた。その通過の際、この低気圧の寒冷前線の前面の温暖域で一連の竜巻や突風が発生した。この間の様子をひまわり画像より見ると、13 時から 16 時の間は千葉県中部に厚い雲は存在しないが、17 時に関東地方の全てが雲に覆われている。18 時頃の風速は 2~4 m/s、風向は南東である。気圧は徐々に降下している。

(2) 気象レーダーでの解析

<豊橋⁸⁾>

竜巻が発生した 11 時 10 分頃、竜巻発生地点付近に強いエコーが見られる。そのエコーは竜巻の移動とほぼ対応して北に移動している（詳細は参考文献 14）参照）。

<茂原^{10), 15)}>

図 2 は東京レーダーによる雨量強度 16 mm/h 以上のエコーについて移動状況を示したものである。C1 は 13 時 30 に遠州灘で発生し、だんだん発達しながら北東に進んだ。一方 C2 は 16 時頃、御前崎の南の海上で発生し、発達しながら北東方向に進んだ。進行距離と経過時間から平均移動速度を求めてみると、C1 が約 60 km/h、C2 が約 70 km/h である。C2 が C1 を追っかけていくような形で進行し、ついには 20 時 30 分頃、銚子沖で一体化してしまう。この C1、C2 の雲頂高度は房総半島上空では約 8~10 km であった¹⁰⁾。また気象研究所（所在地：茨城県つくば市）のドップラーレーダーは、18 時 40 分から観測を始め、茂原市で竜巻が発生する 30 分前からのデータを得

ることができた。これを解析した結果、竜巻の親雲の中に竜巻に関連すると思われる数 km 程度の回転性の場を見いだすことができた¹⁵⁾。

(3) 風向、風速、気圧

<豊橋⁸⁾>

公害監視ステーションなどの地上気象観測データによると

- 午前 9 時頃、11 時 10 分頃、正午頃に風向、風速とも大きく変化した（野依と大崎）。
- 竜巻が市役所を通り抜けた 11 時 18 分頃では全体的に渥美半島付近では南東の風、北側では東南東の風が吹いた。竜巻がすぐ東側を通過した豊橋市役所では、竜巻の反時計回りの回転風による 10 分間平均値で約 10 m/s の北風が吹いた（詳細は参考文献 14）参照）。

<茂原^{10), 13)}>

風向、風速の記録が得られた茂原農業高校及び東京電力茂原営業所では、竜巻の通過時に急激な風速の立ち上がりが見られ、最大瞬間風速はそれぞれ 30.7 m/s、29.6 m/s に達している。気圧の記録では、竜巻に最も近い長生高校（竜巻の経路との距離約 400 m）で 8.8 hPa の急激な低下があった。その急な低下を含んだ前後には約 30 分間緩やかな気圧の低下（約 1 hPa）があり、これは竜巻低気圧に対応するものと考えられる。京都大学防災研究所の光田らが茂原農業高校と長生高校の気圧の資料を基にして、竜巻内の気圧の分布を推定した結果、最大で 100 m/s 以上の風が吹いたと推定された。

(4) 竜巻発生時の気象状況の分析

参考文献 1) によると、竜巻発生時の気象状況として①中心で気圧の急激な低下がある。②短時間で風速が増大し、減少する。③台風に伴う竜巻は、台風の北東象限で中心から 150~300 km 離れた降雨帯に発生する事が多く、台風の目の周辺には発生していない。④その他の原因による竜巻は寒冷前線の発達に伴い積乱雲が発生し、その雲頂が成層圏に達するほど発達し、移動速度の大きい場合に竜巻の発生する事が多い。⑤竜巻発生の原因は大気不安定度が大きい。

このような事を参考に両竜巻発生時の気象状況

を分析すると、①、②に関しては、風向風速については共に急激な変化と風速の増加が確認され、気圧についても急激な低下が確認されている。③に関しては、豊橋の竜巻は台風中心の進行方向右前象限約 500 km で発生しており、距離的には離れている。④、⑤に関してはひまわりの画像やレーダーから共に厚い雲や強いエコーの存在が確認され、茂原の竜巻の親雲の中に竜巻に関係すると思われる数 km 程度の回転性の場も見出されている。竜巻の発生の予知を含めたメカニズムの解明は、気象用レーダーやドップラーレーダー、人工衛星画像の解析技術等の発達により進歩しているものの未解明の部分が多い。また、当時の気象状況下でいくつかの竜巻が発生したものの、なぜ豊橋や茂原だけに大竜巻が発生したかも不明である。著者は地形に大きな原因があるのではないかと考えているが、これらは今後の重要な課題と考える。なお、竜巻発生の気象状況をしるした本文中には細かな数字が記述されており、本論文構成上どのような役割を持つのか疑問な点も指摘されるが、日本における竜巻の予知、予報は未だ確立されておらない現状から、このような気象状況を整理し比較記述しておく事は竜巻発生の気象状況を知る上でも有効と考えられる。また、本論文を読む上でも竜巻の実態を詳しく知っておく事は理解を高めると考え記述した。

4.4 被害の状況

(1) 被害分布から見た被害の状況

〈豊橋（詳細は参考文献 8）14）参照〉

- ・被害区域は幅約 0.17 km から約 0.55 km、延長約 19.3 km のほぼ一本の帯状の区域であり、帯状に被害が分布している。
- ・被害分布の程度は一様ではなく、部分的に全壊、半壊の集中している区間が存在する。
- ・被害のあった家屋となかった家屋とが隣接している例がいくつか見られる。

〈茂原（詳細は参考文献 10）11）参照〉

- ・全体的な被害区域は幅 0.5 km から 1 km、延長約 3 km のほぼ帯状の区域であり、帯状に被害が分布している。

- ・被害区域は大きく四ヶ所に分けることができる。
- ・各被害区域において、全壊家屋が局所的に集中している部分と、全壊家屋の周囲が軽微な破損状況といった特殊性が認められる。
- ・全壊家屋と一部破損家屋あるいは被害がなかった家屋とが隣接している例がいくつか見られる。

(2) 個別被害から見た被害の状況

〈豊橋〉

参考文献 8) の中の山田の論文「1999 年 9 月 24 日豊橋市に発生した竜巻被害に関する考察」より多くの部分を引用する。

(a) 個別的に被害を見た場合

- ・ガラスの飛散による被害が特に多い。
- ・損壊した建築材料の衝突による被害が大きい。
- ・被害が局部的である。
- ・強い吸引力が働いた。

(b) 建築物の被害と建材の飛散

①屋根材の飛散

- ・竜巻の通過した戸建て住宅の密集地では、住宅の屋根瓦の飛散が被害の主たるものとなっている。

②ガラスの破損

- ・特に校舎のガラス破損は重大で、南から進行した竜巻に、長く並んだ南面のガラスが一度に飛散した。

③外壁の被害

- ・被害のパターンは主に強風による剥離、飛来物の衝突による破損、開口部破壊に伴う室内圧の増加による外装材の全面剥離の 3 つである。

④電柱の折損

- ・送電電柱の多くが破壊し、建物を破壊するなど 2 次災害を引き起こしたり、交通の被害や停電を招いた。電柱の折損は、風圧または飛来物衝突によるものである。

⑤負傷者について

- ・ガラスにより多くの負傷者が生じた。学校において生徒が授業中であつたということもきな原因である。負傷者は 340 人を越える。小中学校で割れた窓ガラスは強化仕様されていない旧式のガラスだったことが分かり、防災上の課題も残した¹⁶⁾。

〈茂原^{9), 11), 17)}〉

(a) 個別的に被害を見た場合

- ・損壊した建築材料の飛散による被害が多い。
- ・非常に強い吸引力と大きな水平力とねじり力とが働いたと考えて良い。
- ・被害が極めて局部的である。
- ・竜巻が市街地や居住区域で起こったにもかかわらず、重傷者が少なかったことなどの特徴がある。

(b) 建築物の被害と建材の飛散

①鉄筋コンクリート

- ・コンクリートそのものの被害はないが、タイルなどの表装部に飛来物が激突して破損した。
- ・ガラス窓が破損して室内の被害がでた。

②鉄筋造

- ・飛来物によるモルタルの破損があり、鉄骨や鉄筋が露出している。

③木造家屋

- ・二階建てに挟まれた平屋は被害が少ない。被害は平屋，2階建ての区別はない。全壊，半壊，一部破損の理由については，建物の新旧にはよらない。ただし，堅固な雨戸をしっかりと閉めてある大きな家屋は被害が軽いようだ。ガラス窓のみの場合や薄いトタン製の雨戸の場合は防災効果がない。
- ・吸引力による屋根瓦，屋根，床材，その他室内の家具などの持ち上がりがあった。
- ・二階建ての家屋で振じれがあって，戸が閉まらない箇所があった。

④屋根（瓦，スレート，トタンなど）

- ・吸引力と強風とが襲ったと思われる箇所では飛散していた。しかし瓦を剥ぎ取り空中に飛ばす力が働いたにもかかわらず，屋根の上に瓦がかたまって残っている箇所が多かった。
- ・廂は飛来物（例えば瓦，木材，トタン板など）によって破損した。

⑤外壁の被害

- ・強風による剥離，飛来物の激突などによって大きく破損した。

⑥コンクリートブロックの被害

- ・倒壊，飛来物の貫通により破損した。

⑦電柱の折損

- ・電線に飛来物が衝突するなどして多数の電柱が折れ，転倒した。交通の被害や停電などを招いた。

⑧建築中の鉄筋柱，植木林

- ・断面の大きさが 650 mm × 620 mm の柱に直径 22 mm，長さ 4.5 m の鉄筋を 12 本立て込んだ鉄筋柱が固定端から 40 cm 程度の位置で撓み角 45 度前後に曲げられた。鉄筋柱の曲がった方向は規則性がなく，互いに向き合って曲がっているものもある。このように柱状をなしたものの転倒方向に規則性を見出せなかった例は杉林や植木林にもあった。特に，植木林は 300m²程の狭い箇所でも様々な方向に倒れているものがあった。

⑨負傷者について

- ・重傷者 6 名（内 1 名は飛ばされた時の打撲が原因となり死亡），軽傷者 68 名（市役所に届けた者のみ）であった。アンケートによると屋内にいて飛来物が当たったり，飛ばされたために軽傷を負った者はより多くにのぼるとみなされた。

(3) 被害分布から見た被害の分析

参考文献 1) によると，一つの竜巻によって被害を受ける範囲は平均して幅 103 m，長さ 3.3 km 程である。両竜巻共被害は幅数 100 m，長さ数 km に渡って帯状に分布している。しかしながら被害の程度は一樣ではなく，全壊家屋が集中している部分と半壊家屋が集中している部分といった特殊性が見られたり，全壊家屋と一部破損家屋あるいは被害がなかった家屋とが隣接しているといった例が多く報告されている。この事は竜巻の被害分布には竜巻の強さが常に一定ではない事と，地形・地物などの影響があるものと考えられる。竜巻の被害分布に及ぼすこれらの影響についての研究は少なく，今後の課題と考えられる。

(4) 個別被害から見た被害の分析

個別被害を考える際，竜巻の特性として激しい渦巻き，気圧の急速な低下，強力な上昇流，サクション（吸い上げ渦），飛来物，猛烈な風（茂原では最大で 100 m/s 以上と推定）が考えられる。両竜巻においても飛来物による窓ガラスの破損や，

それに伴う室内の被害、外壁などの被害、吸引力と強風による屋根材の飛散、室内の家具の持ち上がり、車両の横転といった被害が生じている。電柱も風圧または飛来物の衝突により折損した。負傷者の多くはガラスや飛散物によるものが多い。

ここで負傷者の数に限って見て見ると、両者に大きな相違点があり、竜巻災害に有効な情報を提供していると考えられるので詳しく分析してみる。茂原の場合には大小の角材、瓦、トタン板やガラスの破片などが飛び交って、コンクリートブロックや建物の外壁を貫通した中で負傷者は豊橋に比べ極めて少ない。この原因は茂原においては竜巻が午後7時過ぎと言う夕食時であったことと、激しい雷雨・降雹といった異常気象のため外出者が極めて少なかった事によると考えられる。豊橋では午前11時から午後1時という時間に竜巻が発生し、授業中の学校を直撃し、窓ガラスにより多くの生徒が負傷した。

このことから、部屋の中にいる事、窓ガラスから離れる事が負傷を少なくする鍵である事が確認された。

5. 竜巻発生時の現象の再現と対応、対策

本章の豊橋については参考文献7)をもとにしたが、(1)、(2)の一部、(4)、(12)、(16)、(17)の項目では参考文献8)より引用した。詳細(特に図、表)については参考文献14)を参照されたい。茂原については参考文献1)2)4)11)13)17)をもとにした。

(1) 竜巻の前兆現象(竜巻30分位前の外の様子)

図3参照(択一回答、回答方式は両市同一)

<豊橋>

- ・大気は不安定な状態
- ・一部で雷が発生
- ・約70%の人が曇または雨と回答

住民の受け止めた状況は次の通りである(文献8)より抜粋)。

雨が降り、雲も黒さを増して押し寄せ、稲光に似た光が走るのが見えた。窓の外を見ると何か黒っぽいものがたくさん飛んでいるのが目に入り、一瞬カラスの大群かなと思った。雲行きが真っ暗に

なって稲妻が走り、更に「ゴォー」と大きな音が響いた。

なお、図中の%は「無回答20.8%」を除いて計算したものである。

<茂原>

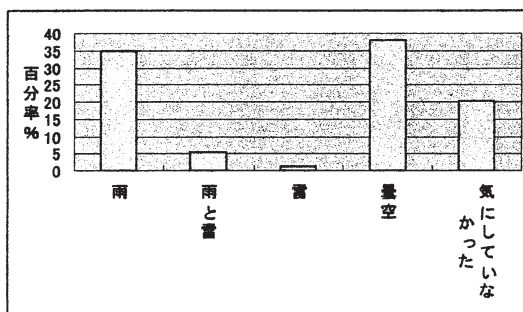
- ・竜巻直前に雷雨に混じって降雹
- ・雷雨、強い風

住民の受け止めた状況は次の通りである。

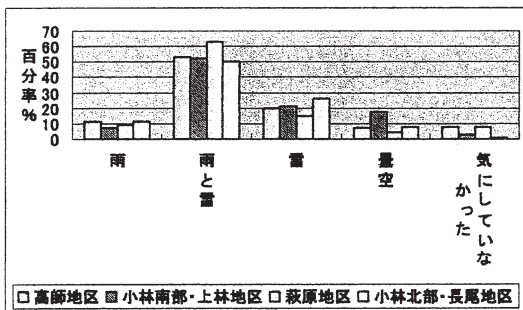
真っ黒な入道雲が押し寄せてきて大粒の雨が降りだし、気温が下がって寒いほどになり、雨が雹に変わって雷鳴が轟き、また雨・雷鳴が激しさを増した。耳の中がツーンとして痛くなると共に激風が襲った。大粒の雨が降り始めてから竜巻になるまでは1時間程の時間経過があったようだ。竜巻は瞬時に通り過ぎ、再び雨模様に戻った。

<分析>

竜巻直前から30分位前の様子について両竜巻で現象を再現してみると、にわかに空が真っ黒に



(a) 豊橋⁷⁾



(b) 茂原²⁾

図3 竜巻30分位前の外の様子

なり稲妻が走り雷が鳴り、雹や大粒の雨が降り突風が吹くという異常気象が確認される。積乱雲が発生しこのような現象が起きた場合は竜巻発生の可能性が強い事が分かる。

(2) 竜巻襲来時の異常な現象

図4参照(択一回答, 回答方式は豊橋には「曇空」, 「気にしていなかった」が入り, 茂原には「風が強かった」が入っている)

<豊橋>

- ・外が急に暗くなり, ゴーとジェット機が飛んで来るよううなりが声が響き強風と激しい雨が降り出した。
- ・耳鳴りがした。
- ・嵐の前兆が予想された。
- ・真っ黒な雲。
- ・いろいろな物体が空中を舞っていた。
- ・稲妻が光った。

<茂原>

- ・ジェット機の爆音のような異常な音がした。
- ・耳鳴りがして, 耳が痛くなった。

<分析>

図3の竜巻30分前の外の様子と図4の直前の外の様子を比べるとほぼ同じような現象になっているが, 茂原について見てみると直前の方が雹や強風の現象が多く確認されており, 異常気象が強くなって来ている事が分かる。また, ジェット機の爆音のような異常な音や気圧の急激な低下による耳鳴りや痛さが直前における共通な現象として確認されている。上記(1)に述べたような気象状況に続いてこのような現象が起こった場合は竜巻の発生と考えられる。

なお, 図中の%は「気にしなかった8.9%」, 「無回答20.1%」を除いて計算したものである。

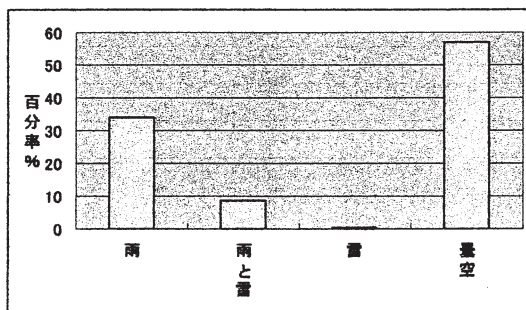
(3) 竜巻が通り過ぎるのに要した時間

<豊橋>

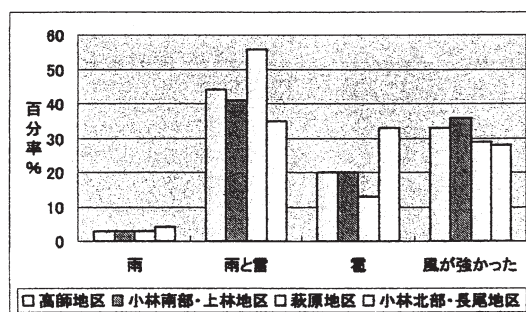
参考文献7)によると, 回答に大きなばらつきがあり, 設問の意味に若干の取り違いがあったのかもしれないとしているが30秒が最も多い。

<茂原>

6秒以上が多いが, 竜巻発生地点に近い程, 要した時間は短い。



(a) 豊橋⁷⁾



(b) 茂原²⁾

図4 直前の外の様子

<分析>

表3に示すように竜巻の移動速度は豊橋で45 km/h (13 m/s), 茂原で60 km/h (17 m/s), 被害の幅は最大で1 kmである。ほぼ1分以内で通りすぎる計算になる。参考文献1)で示される竜巻の特徴からしても竜巻が通りすぎる時間は1分以内程度の短い時間である事が分かる。

(4) 貴方は竜巻を見ましたか(竜巻の構造, 同時発生本数, 進行方向)

<豊橋>

- ・豊橋市中消防署他がビデオで撮影。
- ・複合渦構造(竜巻渦の中心付近に2つの渦がある)。
- ・進行方向は南から北。

<茂原>

- ・ビデオ撮影有。
- ・竜巻を見たという回答は19件, このうち2個同時が2名, 3個同時が1名。

- ・数個の竜巻が同時に発生。
- ・進行方向は東北東に向かった竜巻と南から北上した竜巻などが推定される。

<分析>

複合渦構造や数個の竜巻が同時に発生している事が分かる。

(5) 強風が吹き込んだ方向

<豊橋>

南を中心として東から南西の方向の回答が多い。

<茂原>

南を中心として、西あるいは東寄りの風が吹いた。

<分析>

両竜巻とも主な進行方向は北北東であり、茂原では一部東北東に向かったものも推定されている。竜巻の渦は左回りである事から南からの風が多く吹き込んだ事は納得のいく現象である。

(6) 竜巻襲来中の状況と被害の発生機構

<豊橋>

「身体が浮き上がった」、「家の外に飛ばされた」、「気圧により耳が痛くなった」、「ガラスの飛散」、「木片や瓦が飛んだ」、「雨戸を突き破り飛散物が床に突き刺さった」、「2階にあったものがすべて1階にとばされた」、「車が2、3回浮いた」、「家が持ち上がった」、「車が倒れた」、「電柱が折れた」、「自転車が通れないほど瓦が散乱していた」、「2階の天井が持ち上がり破損」、「4×10 mの物置が飛んだ」などの多くの事例が寄せられた。

<茂原>

「家屋が上に引き上げられた」、「床の物入れの蓋が持ち上がった」、「耳がキーとしてすごく痛かった」、「部屋の天井が浮き上がった」、「多数の足場用鉄パイプが浮き上がってから倒れた」、「畳が3 cm 持ち上がった」、「衣類や座布団が天井の孔に吸い上げられ外部へ飛んでいった」、「重量7 kgの鉄アレイが天井板を突き抜けた」、「重さ100 kgの電気温水器が空中へ吸い上げられた」などの多くの事例が寄せられた。

<分析>

4.4 節被害の状況の(4) 個別被害から見た被害の分析の項で述べたと同様の竜巻の特性に伴う

強い吸引力と強風、飛来物による被害の発生機構が確認される。

(7) 竜巻襲来時の行動

図5参照(複数回答, 回答方式は両市同一)

<豊橋>

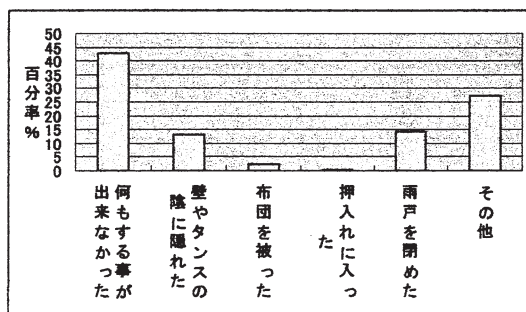
何もすることができなかつた、あるいは無回答が多い。雨戸を閉めた、壁やタンスの陰に隠れたもかなり数があった。

なお、図中の%は「無回答34.1%」を除いて計算したものである。

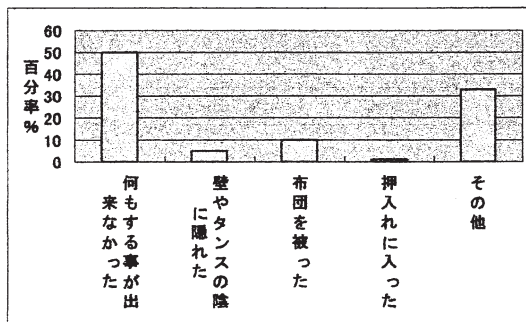
<茂原>

何をする間もなかつたが50%, 布団を被った、壁やタンスの陰に隠れたなど何らかの行動をしたが50%あった。

竜巻が最初に襲った高師地区の人達は突然のため、何事が発生したのか竜巻と知らされるまで気が付かなかつた人々が多い。しかし、高師から新茂原に至る通過地帯では凄まじい轟きの音が迫



(a) 豊橋⁷⁾



(b) 茂原¹⁾

図5 竜巻襲来時の行動

てから竜巻となった他、停電があったため懐中電灯を用意するなどのわずかな余裕があったようだ。竜巻が来たとき貴方はどうしましたかの質問に対する回答として、何をやる間もなかった人々が50%であった。

<分析>

竜巻は台風のように予報や警報が出るわけでもなく、いわゆる突然襲ってくる気象現象である。また襲来速度が速いためとっさの行動が要求される。しかしながら図5から分かるように両竜巻に対する避難行動から半数は何も出来なく、残り半数も共通と呼べるような行動は取っていない。この事は避難行動の困難さを裏付ける知見、問題点として取り上げる事が出来ると考えられる。行動した人は何らかの形で身を守るような本能が働いたようにも考えられる。4.4節被害の状況の(4)個別被害から見た被害の分析の項で述べた「部屋の中にいる事」、「窓ガラスから離れる事が負傷を少なくする鍵である」という事にも関連するが、図5にも見られる壁やタンスの影に隠れた、布団をかぶった、押入れに入った、雨戸を閉めたという行動は有効と考える。竜巻発生・襲来時の気象状況、とっさの避難移動の指針を普段から知識として与える必要性が改めて認識される。

(8) 家族の中での怪我人の有無

竜巻発生時刻が豊橋は午前11時過ぎ、茂原は午後7時すぎと時間帯が異なる。

<豊橋>

全壊、半壊の建物が385世帯もあったが人が割合は少ない。飛散したガラスにより多くの生徒が負傷した。

<茂原>

合計で9%、全壊世帯で33%、半壊世帯で21%、一部損壊世帯で7%の負傷者があった。負傷者が少なかったのは災害の発生が夕方であり、外出者が少なかったからと考えられる。負傷の原因は飛んで来たガラス40%、下に落ちていたガラス24.4%、木片、瓦などの飛来物15.6%

<分析>

竜巻の襲来時には強風とサクシオン(吸い上げ渦)および飛来物多い。従って現状の家屋の構造

(雨戸が少なく、ガラス部分が多い)からしてガラスの被害が多いと考えられる。両竜巻の場合でも怪我は飛来物によるものがほとんどであり、特にガラスによる被害が多い。学校などでは強化仕様のガラスを使用するとか、異常気象時には雨戸を閉める、窓から離れる、外出はしないなどといった心構えの必要性が再確認される。

(9) 住宅の被害の程度

図6参照(複数回答、回答方式は豊橋は全壊、半壊、一部損壊のアンケートと建物被害の部位のアンケートを別々の質問項目でとったが、茂原は同一の質問項目でとった)

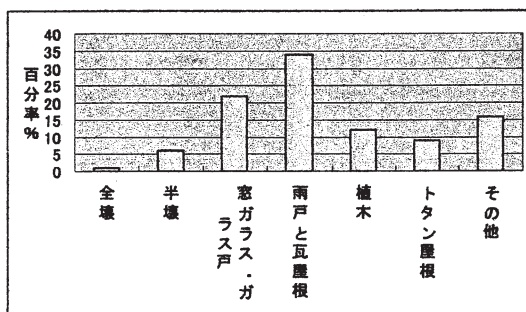
<豊橋>

窓ガラス、ガラス戸の開口部、および雨戸、瓦屋根の被害が多い。

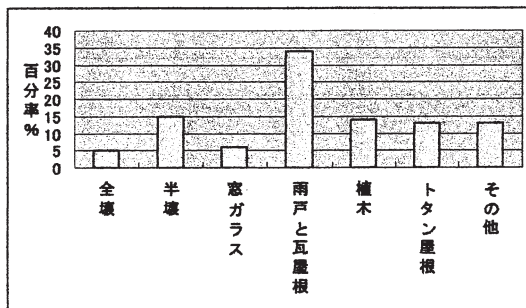
<茂原>

雨戸と瓦屋根に被害が多い。

<分析>



(a) 豊橋⁷⁾



(b) 茂原¹⁾

図6 建物の被害箇所

強風とサクション（吸い上げ渦）および飛来物による被害の特性から、住宅の開口部や瓦などの被害が考えられる。両竜巻とも屋根面や開口部に被害が集中している事が分かる。鉄筋コンクリート造の建物はガラス窓が無抵抗の状態であって、家屋の被害を招いた。木造家屋は強い吸引力と大きな風速によって、特に屋根材の被害が大きくなった。今後の防災を考えると屋根材、雨戸、壁材などが飛散物とならないように工夫すべきである。

なお豊橋、茂原とも被害の有った住宅が被害の無かった住宅に比べて構造上弱いといった差は見られなくほぼ様な住宅と考えられる。

(10) 住宅の造り

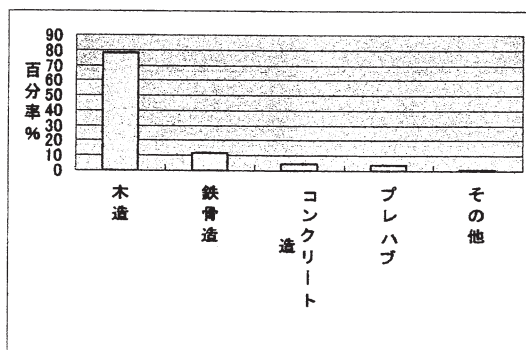
図7参照（択一回答、回答方式は両市同一）

<豊橋>

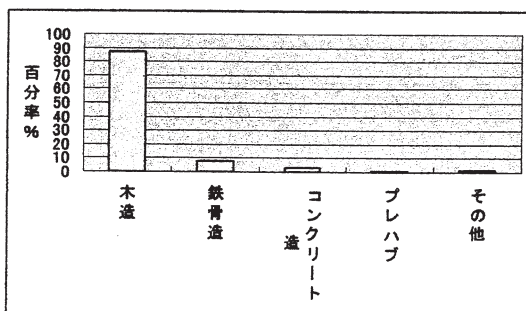
木造78%，鉄骨造12%，コンクリート造3%。全壊19世帯のうち14世帯が木造，他の5世帯はプレハブあるいは鉄骨造。

<茂原>

木造87%，鉄骨造8%，コンクリート造3%。全壊13世帯のうち10世帯が木造，他の3世帯はプレハブあるいは鉄骨造。半壊52世帯のうち42世帯が木造，8世帯が鉄骨造。



(a) 豊橋⁷⁾



(b) 茂原¹⁾

図7 被害住宅の構造形式

6. 結論および考察

本論文は豊橋と茂原の竜巻の共通点を通して竜巻発生直後の現象、被害の実態、災害への対応等について分析したものである。得られた結論は次の通りである。

(1) 地域性

豊橋と茂原は地域的に良く似ている。すなわち、両市とも位置的には太平洋岸に位置した温暖な気候の地域であり、地形的には背後を丘陵に囲まれた海に面した平野部である。竜巻は田園地帯で発生し、市街地に向かい、市街地に大きな被害をもたらした。この事は既往の文献に見る①竜巻の発生は温暖な地域で発生しやすい。②日本の竜巻は太平洋沿岸の平野部で発生が多い。③竜巻の発生しやすい県とそうでない県がある。といった地域性の存在を確認した事にもなる。現状では竜巻の発生しやすい地域を具体的に特定する事は出来な

いが、竜巻発生と地域性との関連は今後取り組むべき課題であり、このような知識を蓄積する事は今後の解析に有用な資料と考える。

(2) 竜巻の特性

豊橋の竜巻は台風に伴うものであり、茂原のものは低気圧の接近により発生したものである。両竜巻の最大風速は50 m/s～100 m/sと推定され、気圧の急激な低下も観測されている。

被害の幅は500 m～1 km，長さ3 km～20 kmである。速度は45 km/h～60 km/hで北北東に進んだ。また、大気が不安定になりやすい夏から冬にかけて、また昼頃から夕刻にかけて、下層の乾燥度が小さい海岸部で発生している。この事は既往の文献に見る①風速は局部的には80～100 m/sに達する事がある。②中心で気圧の急激な低下がある。③日本の竜巻は台風に伴うものと、その他の原因（低気圧、前線など）によるもの

大別できる。④海岸部で発生しやすい。⑤発生には季節別傾向がある（日本は9, 8, 10月）。⑥発生時刻は10時から17時が最も多く深夜は非常に少ない。⑦一つの竜巻によって被害を受ける範囲は平均して幅103m, 長さ3.3kmである。⑧平均して北東方向に進む。⑨進行速度は平均36km/h, 非常に速いものでは100km/hにも達する。といった竜巻の特性を確認した事になる。両竜巻は日本における代表的な竜巻の特性を備えたものとして理解できる。

(3) 竜巻発生時の気象状況

両竜巻発生時の気象状況を見るに、ひまわり画像やレーダーから共に厚い雲や強いエコーの存在が確認され、茂原の竜巻の親雲の中に竜巻に関係すると思われる数km程度の回転性の場も見出されている。また、風向、風速については共に急激な変化と風速の増加が観測されて、気圧についても急激な低下が観測された。豊橋の竜巻は台風の右前方象限（北東象限に入ると考えられる）約500kmで発生した。

この事は既往の文献に見る竜巻発生時の気象状況として①中心で気圧の急激な低下がある。②短時間で風速が増大し、減少する。③台風に伴う竜巻は、台風の北東象限で中心から150~300km離れた降雨帯に発生する事が多く、台風の目の周辺には発生していない。④その他の原因による竜巻は寒冷前線の発達に伴い積乱雲が発生し、その雲頂が成層圏に達するほど発達し、移動速度の大きい場合に竜巻の発生する事が多い。⑤竜巻発生の原因は大気不安定度が大きい。と言う事実をほぼ確認した事になる。しかしながら当時の気象状況下ではいくつかの竜巻が発生したものの、なぜ豊橋や茂原だけに大竜巻が発生したかは不明である。竜巻発生時の気象状況の確定と合わせて今後の課題と考える。

(4) 被害分布から見た被害

両竜巻における被害の幅は500m~1km, 長さ3km~20kmの状態に分布している。しかしながら被害の程度は一様ではなく、全壊家屋が集中している部分と半壊家屋が集中している部分があるといった実態が見られた。また全壊家屋と一

部破損家屋あるいは被害が無かった家屋とが隣接しているといった実態も多く報告された。被害が帯状に分布する事は改めて記述する事ではないが、分布の特殊性と被害の有る無しの家屋が隣接する原因については今後の課題と考える。

(5) 個別被害から見た被害

激しい渦巻き、気圧の急速な低下、強力な上昇流、サクション（吸い上げ渦）、飛来物、猛烈な風により、窓ガラスの破損やそれに伴う室内の被害、外壁などの被害、屋根材の飛散、室内の家具の持ち上がり、車両の横転といった被害が生じる。負傷者の多くはガラスや飛散物によるものが多い。特に負傷者はガラスによるものが多い。部屋の中にいる事、窓ガラスから離れる事が負傷を少なくする鍵である事が実態として確認された。

(6) 竜巻の前兆現象

既往の文献および両竜巻からも積乱雲が発生し積乱雲特有の現象が確認される。すなわち急に空が暗くなり、雷鳴、豪雨、突風、降雹などの現象が起こる。積乱雲の通過時に必ずしも竜巻となる事は無いが、積乱雲とともにこのような現象が起きたら警戒が必要である。

(7) 竜巻襲来中の状況と被害の発生機構

竜巻襲来時にはジェット機の爆音のような異常な音がし、気圧の急激な低下による耳鳴りや痛み、体の浮き上がりを感じる。破壊の機構に当たっては上記(5)と同様な現象が発生する。

(8) 竜巻襲来時の行動

竜巻はいわゆる突然襲ってくる気象現象でありとっさの行動が要求されが、両竜巻に対する避難行動から半数は何も出来なく、残り半数も共通と呼べるような行動は取っていなかった。この事は竜巻災害の避難行動の困難さを裏付ける知見、問題点として取り上げる事が出来ると考えられる。しかしながら壁やタンスの影に隠れた、布団をかぶった、押入れに入った、雨戸を閉めたという行動も報告されており、これらの方法は有効である。これらの有効な行動は普段からの防災知識から生まれる部分も多いと考えられるので、竜巻発生・襲来時の気象状況や現象を広く一般に知らしめ、普段からの緊急時に対する避難行動の訓練の必要

性が改めて認識される。

(9) 怪我

怪我は飛来物によるものがほとんどであり、特にガラスによる被害が多い。学校などでは強化仕様のガラスを使用するとか、異常気象時には雨戸を閉める、窓から離れる、外出はしないなどといった心構えの必要性が再確認される。

(10) 住宅の被害

強風とサクション(吸い上げ渦)および飛来物による被害の特性から、屋根面や開口部に被害が集中する。住宅を風により被害から守るために雨戸の必要性は以前から指摘されているが、雨戸の設置と共に、屋根材、雨戸、壁材などが飛散物とならないように工夫すべきである。

本論文は「その1」として竜巻発生直前・直後の現象に論点を絞り分析して来た。次稿は「その2」として被災1年後のアンケート調査を中心に復旧、保険、防災、公共機関の対応といった社会的反応について分析し竜巻災害の全容について論じる予定である。

参 考 文 献

- 1) 足立一郎, 羽倉弘人, 小泉俊雄, 多田弘一: 茂原市竜巻被害者へのアンケート調査, 千葉工業大学研究報告, 理工編, No39, 1992年3月, pp.139-151
- 2) 羽倉弘人, 足立一郎, 小泉俊雄, 多田弘一: 1990年12月11日茂原市で発生した竜巻の被害者へのアンケート調査について, 日本風工学会誌, No 51, 1992年5月, pp.27-34
- 3) 鳥山知樹, 足立一郎, 小泉俊雄, 多田弘一: 1990年12月11日千葉県茂原市に発生した竜巻について—その1: 被災1ヵ月後の被災者へのアンケート調査—, 第20回土木学会関東支部学術講演会, 1993年3月, pp.10-11
- 4) 小泉俊雄, 足立一郎, 羽倉弘人, 鳥山知樹: 1990年12月11日千葉県茂原市に発生した竜巻について被災1年後の被災者へのアンケート調査, 千葉工業大学研究報告, 理工編, No41, 1994年3月, pp.221-241
- 5) 鳥山知樹, 小泉俊雄, 足立一郎, 多田弘一: 1990年12月11日千葉県茂原市に発生した竜巻について—被災1年後の被災者へのアンケート調査—, 土木学第48回年次学術講演会, 1993年9月, pp.888-889
- 6) 井口一典, 小泉俊雄, 足立一郎, 多田弘一: 1990年12月11日千葉県茂原市に発生した竜巻について—その2: 被災1年後の被災者へのアンケート調査—第20回土木学会関東支部学術講演会, 1993年3月, pp.12-13
- 7) 田村幸雄, 石原 競, 大熊武司, 下村祥一: 1999年9月24日に豊橋市を襲った竜巻の被害に関するアンケート調査(研究代表者桂 順治: 台風9918号に伴う高潮と竜巻の発生・発達と被害発生メカニズムに関する調査研究, 平成11年度科学研究費補助金(特別研究促進費)研究成果報告書), 2000年6月, pp.257-267
- 8) 豊橋市: 竜巻の記録, 1999.9.24 豊橋市を襲った黒い渦, 平成12年3月, pp.1-168
- 9) 茂原市: 平成2年12月11日, 千葉県茂原市を襲った竜巻災害の記録, 平成4年8月, pp.1-280
- 10) 桂 順治: 1990年12月11日千葉県に発生した竜巻による暴風災害の調査研究, 文部省科学研究費突発災害調査研究成果, 平成3年3月, pp.1-131
- 11) 足立一郎, 羽倉弘人, 小泉俊雄, 多田弘一: 1990年12月11日千葉県に発生した竜巻による被害調査報告—特に茂原市における被害を中心に—, 千葉工業大学研究報告, 理工編, No38, 1991年3月, pp.1-199
- 12) 藤田哲也: たつまき(上), 共立出版, 昭和50年10月, p.54
- 13) 林 泰一, 光田 寧, 岩谷祥美: 1990年12月11日房総半島で発生した竜巻について, 日本風工学会誌, 第51号, 平成4年5月, pp.1-14
- 14) 桂 順治(研究代表者): 台風9918号に伴う高潮と竜巻の発生・発達と被害発生メカニズムに関する調査研究, 平成11年度科学研究費補助金(特別研究促進費)研究成果報告書, 2000年6月, pp.165-185, pp.233-237
- 15) 鈴木 修, 大野久雄: 1990年12月11日茂原市竜巻周辺の気流構造について, 1991年春期大会講演予稿集, 日本気象学会, 1991年5月, p.21
- 16) 中日新聞: 1999年9月25日付記事
- 17) 小泉俊雄, 足立一郎, 羽倉弘人, 鳥山知樹: 竜巻災害に対する防災に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第472号, 1995年6月, pp.27-37

(投 稿 受 理: 平成13年11月5日)

訂正稿受理: 平成15年4月30日)