

台風に伴う竜巻について*

小元敬男**

要旨

日本の竜巻の約1/3は直接・間接的に台風に関連して発生する。その地域性は竜巻全体に比べかなり偏っており、ほとんどが太平洋側に起こっている。日本海沿岸も竜巻が比較的多い地域であるが、台風関連のものはほとんどない。竜巻の非常に多い宮崎平野では、80%以上が台風性である。関東・東海地方の竜巻の約半分は台風に関連している。台風に伴う竜巻の季節変化は明瞭で、約3/4が8月と9月に発生する。なお、竜巻には、数年という比較的短い期間に特定の地域に集中的に発生する傾向が見られる。

事例解析の対象とした昭和54年9月4日の名古屋竜巻は、台風7912号の中心の右前方象限、外側降雨帯内に発達した積乱雲性対流系に伴った。この対流系の強雨域の右後側面に直径約10kmの低気圧性渦が形成され、竜巻はその循環内に発生した。この竜巻を伴ったメソスケールの対流系の構造は、トルネードを伴う巨大雷雨系の構造とは若干異なった点があり、その原因について考察した。

1. はじめに

本報告では、まず、台風に伴う竜巻の気候学およびメソ気象学的な特徴について、日本の竜巻全体ならびに米国のハリケーンに伴うトルネードと比較しながら述べる。次に、台風7912号に伴った、昭和54年9月4日の名古屋竜巻に関連したメソ解析の結果を示す。

近年、米国では2台あるいは3台のドブラーレーダーによる積乱雲観測が盛んに行われ、トルネードを伴う巨大雷雨系内の三次元的気流分布がかなり分かってきた。数年前までは地上の気圧分布と風の分布、あるいは普通の気象レーダーで観測されたエコーの形状から推定されていたトルネードサイクロン(竜巻低気圧)についても、この渦が地上5~7kmにまで達している例が報告されている^{2), 26)}。しかし、これまで、詳細な観測・解析の対象となったトルネードを伴うメソスケールの擾乱(以下にメソ擾乱と書く)は、大気が非常に不安定な時に発生するスコールラインとかスーパーセルストームといった、巨大雷雨系と名付けられる積乱雲性対流系に限られている。この種の対流系は日本では滅多に発生しない。従って、日本の竜巻にはこのような巨大雷雨系に伴うも

のは極めて少ない。そして、その発生に台風が関係しているものが比較的多い。

宮沢ら¹⁹⁾は、1971~1978年の8年間に発生した153個の竜巻について発生時の総観的気象状況による分類を試みた。それによると、「台風の循環内」が20個、「台風または弱い熱低の中心から離れた前線」が23個で、何らかの形で台風に関連した竜巻は全体の28%を占めている。最近の資料***によると、1965~1980年の16年間に発生した竜巻267個のうち、総観的状況に台風と書かれているものは83個で、やはり全体の約1/3である。米国の場合、1916~1952年の42年間に発生した8,506個のトルネードのうちハリケーンに伴ったものはわずか84個で^{10), 34)}、約1%に過ぎない。なお、1950年代の終わりからハリケーンに伴うトルネード数が激増していることが注目されている。Novlan and Gray²¹⁾のデータによると、1958~1972年の15年間に発生したハリケーンに伴ったトルネードの数は323個で、その前の42年間の総数のほぼ4倍である。しかし、この中には141個ものトルネードを伴ったハリケーン Beulah (1967年9月)が含まれている。さらに、社会の関心の増大などによって1950年代の後期から全米で報告されるトルネード数自体が著しく増加してお

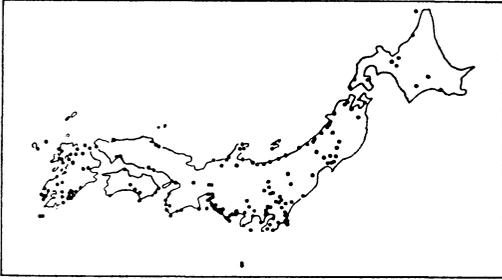
* On "Tatsumaki" (tornadoes) associated with typhoons.

** Yukio Omoto, 大阪府立大学農学部.

——1982年5月20日受領——

——1982年7月26日受理——

*** 文部省自然災害特別研究“竜巻などによる瞬発性気象災害の実態とその対策”(研究代表者 光田寧)研究資料1及び研究資料2.



第1図 日本の陸上竜巻の発生分布 (1927~1971).

り*, ハリケーンに伴うものの比率はトルネード全体の2~3%程度と見るべきであろう。このため、トルネード研究の盛んな米国においても、ハリケーンに伴うトルネードに関する報告は少なく、メソ解析的研究はなかなか見当たらない。今回、名古屋竜巻について詳細な解析を試みた理由は、これがたまたま気象観測点の密度の非常に高い地域を通過し、台風に伴う竜巻について詳しい解析を行うのに絶好の事例であったからである。なお、日本の竜巻全般についての報告・解説は幾つかあるが^{5), 19), 27), 29), 32)}, 台風に伴った例については10年前の Fujita *et al.*⁹⁾ の論文があるのみなので、本論文の前半では、やや解説的ではあるが最近の文献・資料をもとに、その一般的な特徴について論じた。

2. 竜巻—その定義

「竜巻」という言葉は、一般にかなりルーズに使われている。突風に伴うつむじ風(塵旋風的一种)も、被害次第では新聞の見出しは「竜巻が襲う」となる。砂旋風(dust devil)も砂漠の竜巻と説明されたりするし、国語辞典の「竜巻」の定義にも誤解を招きそうなものが少なくない。その様なことがあってか、島田²⁹⁾は竜巻とその類似現象の用語について詳しく吟味している。そして、竜巻という用語は、陸上で起こる tornado または land spout (筆者注: 後者はほとんど使われない)、および水上で起こる water spout の両者を指すものと考えたいと述べている。一方、tornado と water spout は性質のやや異なる現象と見る向きもある。例えば、藤田⁵⁾は、「陸上たつまきに多い雷雲性の親雲」、「水上たつまきに多い積雲性の親雲」という表現を用いている。日

本では、海上に発生、上陸して被害を与える竜巻が少なからずあり、両者を明確に区別することは難しい。そこで、本論文では発生から消滅まで海上にあったものを水上竜巻とし、他を全て陸上竜巻あるいは単に竜巻と呼ぶことにした。なお、今井・相馬¹³⁾は「竜巻は米国におけるトルネードとよく似た回転性の強烈な風の現象」と述べている。両者ははっきり区別できるものではないが、この点を考慮して、本文では日本の例を竜巻、米国の例をトルネードと書いた。

3. 日本の竜巻

3.1. 地域性

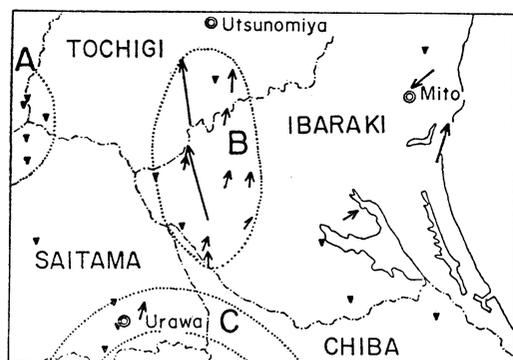
日本の竜巻発生分布に関して、関谷²⁷⁾、島田²⁹⁾、藤田⁵⁾、宮沢ら¹⁹⁾などの文献があるが、これらに示された地域性にはかなりの違いが見られる。第1図は、最も長期間の資料を用いている藤田⁵⁾の分布図である。本図で宮崎平野と東海道の静岡・愛知両県の平野部はたいへんな竜巻多発地域になっている。また、東北・北陸の日本海沿岸、仙北平野、関東平野、和歌山県沿岸、および九州の北部・西部の海岸と平野部にも、比較的頻繁に発生している。ところが、島田²⁹⁾と宮沢ら¹⁹⁾の分布図では、宮崎平野の竜巻はわずか1~2個で、竜巻の多い地域とは言えない。仙北平野は両図で空白(皆無)になっている。藤田⁵⁾が「たつまき銀座」と呼んだ東海道も、宮沢ら¹⁹⁾の図では東半分だけ残った形になっている。著者が1965~1980年期間について、改めて発生分布図を作ったところ、宮崎平野はやはり竜巻の超多発地域で、東海道もかなり多い。統計期間の違いで分布にこの様に大きな差がでてしまうのは、竜巻の絶対数が少ないことにもよるが、比較的短い期間に竜巻が特定の地域に集中的に発生する奇妙な現象が起きているためである。例えば、宮崎県では1979・1980年の2年間に13個も発生したが、その前の10年間の発生数はわずか2個である。藤田⁵⁾が研究者にとって「たつまきの宝庫」と名付けた銚子市と飯岡町では、1954~1971年の期間に11個発生したが、以後11年間は1個も発生していない。

竜巻発生分布には上記より小さなスケールでの局地性も見られる。関東平野は全体的に竜巻の多い地域であるが、(A)群馬県南東部、(B)茨城県西部・栃木県南部、(C)東京を取り巻く“都市化による竜巻ベルト”²⁵⁾、および(D)銚子市付近の4地域は特に多い。第2図は茨城県西部を中心とした関東平野における1965年以後の竜巻発生分布を示す。B地域に発生する竜巻が全て北上型であ

* 統計によると米国における平均年間トルネード発生数は、1916~1957年平均で203個(上記資料)、1950~1980年平均で673個(近着 Weatherwise: 1982, Vol. 35, No. 1, p. 32)となっている。

第1表 日本の陸上竜巻の月別発生数 (1965~1980).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	計
全 竜 巻	12	13	7	9	10	22	23	43	69	31	17	11	267
台風関連の竜巻	0	0	0	0	0	1	7	25	38	12	0	0	83



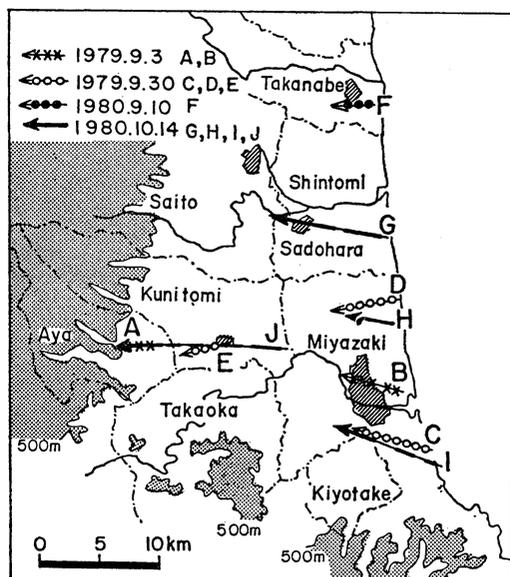
第2図 関東平野の竜巻発生分布 (1965~1980). 図中、矢印を付けた線は竜巻の経路と進行方向を示し、▼は移動距離が短く進行方向も明らかでない竜巻の発生位置を示す。

る点が注目される。なお、C地域はごく一部しか示されておらず、D地域は全く図の範囲外になっているが、藤田⁵⁾にはこれら両地域における詳細な竜巻発生分布が示されている。

局所集中性は更に小スケールでも見られる。和歌山県南部町の役場近くのある場所では、1957年5月と9月(以上未確認)。1959年9月17日、そして1969年9月2日と、4度も竜巻被害を受けた家があると言う。第3図は、1979・1980年の2年間に宮崎平野に発生した10個の竜巻の経路を示す。本図で、1979年の経路は吉岡ら³⁵⁾の資料、1980年の経路は文字ら*の現地調査に基づいている。ここで、A・E・Jの3個とC・Iの2個はそれぞれ同じ線上にあり、DとHもかなり接近しているし、BはAEJ線の延長上に位置している。これらの竜巻は全て海岸平野を内陸に向かって移動しており、経路の一致を地形と簡単に結びつけるわけにはいかない。

3.2. 日変化・年変化

竜巻の最も多い月は9月である^{19),27),29)}(第1表)。竜巻の少ない時期は春から初夏にかけてで、関谷²⁷⁾以外の

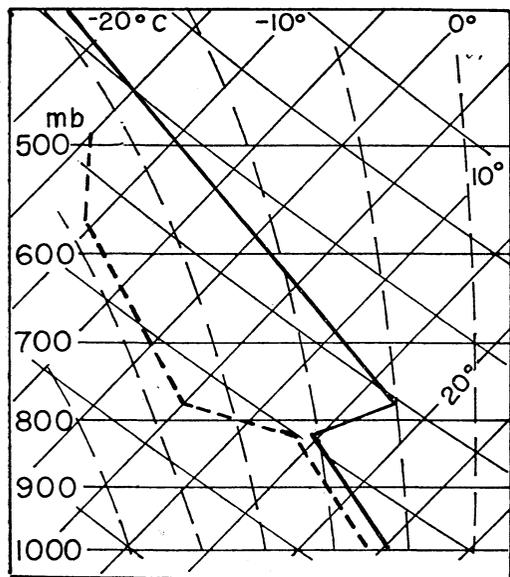


第3図 1979年及び1980年に宮崎平野に発生した竜巻の経路。

資料^{5),19),29)}では3月が最少月になっている。この竜巻発生数の年変化は、米国のトルネードの場合と全く異なっている。トルネードは春から初夏にかけて多く、4~6月の3箇月間に1年の半分以上が起こる⁴⁾。竜巻発生数の年変化には顕著な地域差があり、日本海側では春先と秋から冬にかけて多く、太平洋側は夏から秋にかけて多い。1927~1972年の期間に福井県以北の日本海沿岸に発生した42個の竜巻のうち、39個が10~3月に起こっている。台風に伴う竜巻の多い宮崎県では9月と10月に集中しており、細山田・国武¹²⁾の資料によると、1934~1980年の期間に発生した46個のうち、34個がこの2箇月のものである。関東平野の内陸部では盛夏の8月に非常に多い。

日変化は竜巻とトルネードとでかなり異なっている。トルネードには明瞭な日変化があり、全米平均で8割以上が午後のものである⁴⁾。竜巻の場合、日変化は不明瞭で、真夜中から早朝にかけて少ないという点を除いて、各報告の示す日変化は多少異なっている。1965~1980年

* 調査者、京大防災研究所：文字信貴、林 泰一、京大工学部：松本 勝、松村修一、及び筆者。



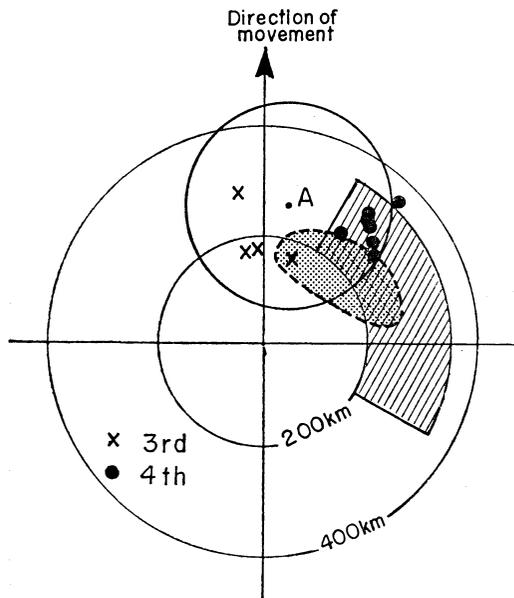
第4図 Fawbush and Miller³⁾ による mean tornado sounding, 実線は気温, 破線は露点温度。

の間に起こった竜巻のうち、発生時刻の分かった241個について調べたところ、午前が118個で午後は123個とほぼ同数となった。

3.3. 大気成層状態

米国では長い間 Fawbush and Miller³⁾ による mean tornado sounding 型の大気成層 (第4図) が、トルネード発生の危険性を示唆する状態として経験的予報に使われてきた。その特徴は、下層の湿潤大気と上層の著しい乾燥大気の境界面を成す800 mb面付近の顕著な逆転層の存在である。ここの温度差が大きいほど対流不安定と見なされる。一方、Showalter³⁰⁾ による不安定指数 (Showalter Index, SI) もよく用いられる。そして、SIが -6°C 以下になるとトルネードの危険性が極めて大きいと言われる²⁵⁾。ところが日本ではこの様に大きなSIの負の値は観測されない。1966年6月7日大宮市に発生した竜巻は、日本では珍しいスーパーセル型巨大雷雨系に伴ったが、当日午前9時の館野におけるSIは -0.6°C に過ぎなかった²²⁾。島田²⁹⁾の解析した石川県の竜巻の場合も、竜巻を伴った対流系はSR型 (典型的な巨大雷雨系) と見られたが、その地域のSIは $+2^{\circ}\text{C}$ であった。米国では、SIがこの程度ならばしゅう雨か弱い雷雨しか期待されない²⁵⁾。

通常の高層観測データから、上記程度の不安定度しか



第5図 台風7912号に伴った竜巻の台風中心との位置関係 (xは9月3日, ●は9月4日の竜巻。その他の記号については本文参照)。

得られない地域に竜巻が発生した場合、ごく局所的な不安定領域の存在が示唆されることが多い。今井・相馬¹³⁾は、1969年8月23日の茨城県猿島地区の竜巻は、寒冷気団の下層に暖気流がくさび状に突入した地域に発生したと説明している。1978年2月28日の東京竜巻も、ほぼ同様な条件下で発生したと宮沢¹⁹⁾は見ている。Fujita *et al.*⁹⁾は、1971年7月7日の大宮市の竜巻は、局所的スケールで、530 mb面における寒気移流と下層の暖気移流が合致した所に発生したと解釈している (アンダーラインの部分は筆者挿入)。この様な局所的な不安定領域の存在は、ハリケーンに伴うトルネードの研究でも指摘されている^{10), 21)}。

4. 台風に伴う竜巻

4.1. 台風循環内における発生位置

Fujita *et al.*⁹⁾は、台風に伴う竜巻は中心の前方やや右寄りの領域に発生し易いことを示した。同様な傾向はハリケーンに伴うトルネードについても知られている^{10), 24), 31)}。第5図に、本報の事例解析の対象とした台風7912号に伴った11個の竜巻の、台風中心に対する位置を示した。図中、点Aを中心とする円内が Fujita *et al.*⁹⁾による、台風に伴う竜巻が発生し易い領域である。本図



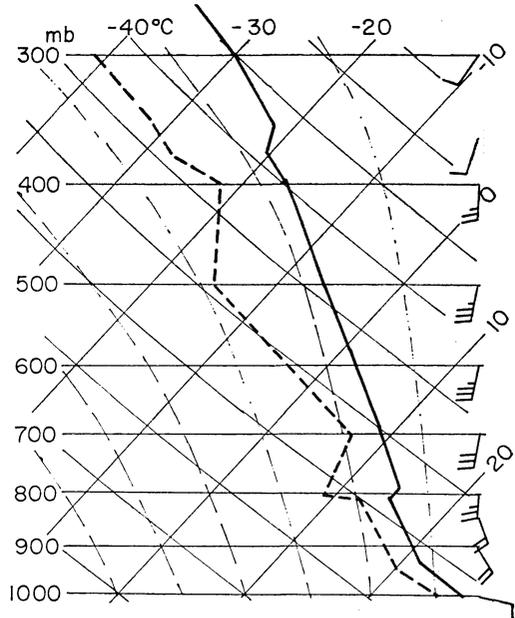
第6図 台風関連(熱低を含む)の竜巻の発生分布 (1965~1980).

には, Smith³¹⁾(扇形域)及び Pearson and Sadowski²⁴⁾(楕円域)がハリケーンに伴うトルネードの起こり易いとした領域も示してある. Fujita の円が, 台風7912号に伴った竜巻をほぼ完全に捉えている点に注目したい. なお, 西進中, あるいは迷走型ハリケーンでは, 中心に対する位置は, 進行方向よりも, 地理的方位を座標軸にとる方が良いらしい¹⁰⁾. 5日間に115個ものトルネードを発生させた1967年9月のハリケーン Beulah の場合はまさにそうであった²³⁾.

台風・ハリケーンに伴う竜巻・トルネードは外側降雨帯内に発生することが多い. 前記猿島地区の竜巻¹³⁾, 1971年の大宮市の竜巻⁹⁾, 同年8日31日千葉市の竜巻¹³⁾, さらに台風7912号と台風7916号に伴い宮崎県に発生した6個の竜巻²⁵⁾は, いずれも台風外側降雨帯内に発生したと報告されている. なお, 台風7912号に伴った11個の竜巻も全て外側降雨帯内に発生したと見られる(第5図).

4.2. 地域性

台風に伴う竜巻の地域性は, 第1図の竜巻全体のものよりかなり偏っている. 第6図は1965~1980年の16年間に発生した台風関連の竜巻分布を示す. 全体の6割強の52個が関東地方と宮崎県の2地域に起こっている. 特に宮崎平野ではほとんどが台風性で, 1965~1980年の期間に発生した15個のうち14個までが台風の循環内のものであった. また, 細山田・国武¹²⁾によると, 1934~1980年の47年間に宮崎県に発生した竜巻は46個で, そのうち台風に伴ったものは33個で約70%であるが, 平野部の3角地帯に限ると台風性33個(約88%)に対して非台風性はわずか4個に過ぎない. 関東地方や東海地方でも台風関連の竜巻は全体の約半分である. そのほか紀伊半島や高知県など, 台風性の竜巻はほとんどが太平洋側に起こっている. 一方, 竜巻発生数が比較的多いにもかかわらず, 日本海沿岸や九州北部・西部には台風関連の竜巻はほと



第7図 昭和54年9月4日9時の浜松における状態曲線(実線は気温, 破線は露点温度)および風の鉛直分布.

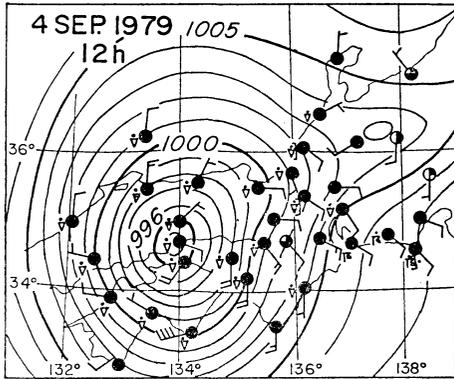
んど発生していない.

4.3. 年変化・日変化

台風に伴う竜巻の年変化は明瞭で, 台風の上陸・接近の多い8・9月に集中しており, 全体の約3/4がこの2箇月に発生している. 日変化については, Fujita *et al.*⁹⁾が調和分析によって, 台風に伴う竜巻の発生に顕著な6時間周期のあることを示している. 同じ論文でハリケーンに伴うトルネードについても同様な傾向が見られることが指摘されているが, ハリケーンに伴うトルネードについての他の幾つかの統計^{10), 23), 24)}はそれぞれやや違った時間分布を示しており, Hill *et al.*¹⁰⁾は特に発生しやすい時間帯は無いとするのが無難であると述べている.

4.4. 大気鉛直構造

ハリケーンに伴うトルネードについてまず注目された特徴の一つは, 発生域の大気成層が mean tornado sounding (第4図)と全く異なっている点であった¹⁷⁾. これについて Hill *et al.*¹⁰⁾は, ハリケーン循環内でも圏外からの乾燥空気の混入によって, 降雨帯内に, ふつうの高層気象観測網では捉えられない複雑な乾燥・湿潤空気の分布ができる可能性があるとし, 局所的な tornado sounding 型大気成層の存在を示唆した. Novlan and Gray²¹⁾もこの考えを支持している. しかし筆者は, ハ



第8図 昭和54年9月4日12時の局地天気図。

リケーンの循環内に tornado sounding 型の大気成層を無理に想定するのは考えものであると思っている。第7図に、台風7912号の循環内に起こった四日市市の竜巻発生直前の9時の浜松における状態曲線と風の鉛直分布を示す。乾燥層を伴った逆転が800 mb 面付近にあるが、大気は下層から上層まで湿っていたと見るべきであろう。なお、SIは $+1.4^{\circ}\text{C}$ で、米国の規準では弱い雷雨かしゅう雨が期待される程度の不安定度であった。なおWills³⁸⁾は、巨大雷雨系に伴いトルネードが発生する際、一般に見られる大きな風の鉛直シアは風速の増大に伴い上層ほど大きくなり圏界面高度付近で最大になるが、ハリケーン域内にトルネードが発生する際にはシアの最大値は900~800 mb という低層に起こり、それが風向の鉛直変化に起因することを指摘した。浜松の高層観測資料(第7図)もこれを裏付けている。

4.5. 竜巻を伴うメソスケール擾乱の構造

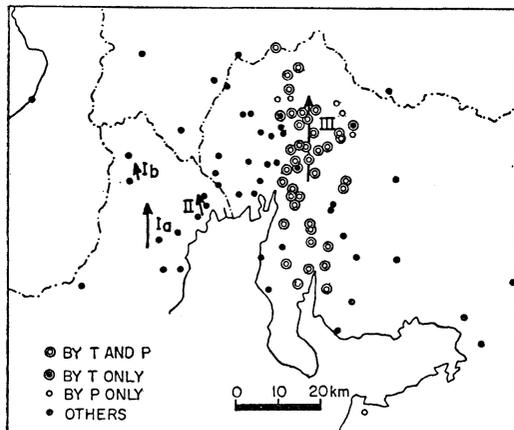
トルネード・竜巻を伴うメソ擾乱は大抵積乱雲で構成される巨大雷雨系である。レーダー観測によると、トルネードは積乱雲性エコーの進行方向に向かって後部・右側面に発生することが多い。トルネードを伴っている場合にはエコーのこの部分はよく「かぎ状」に曲がっていてhook echoと呼ばれるが、これは近年ドブラーレーダー観測で確かめられた様に、メソスケール渦の存在を示唆するものである。トルネード本体の渦の直径は肉眼で柱状に見えるものよりかなり大きい。最近、Fujita⁷⁾はトルネード本体の渦がメソスケールより1階級小さいミソスケール(水平スケール4 km~40 m)の現象であるとし、これをミソサイクロンと名付けた。名古屋竜巻の場合、もっとも接近した時で700 m 離れたいた気象台の風の記録に竜巻の影響が現われていることから見て、ミ

ソサイクロンの直径は少なくとも1 km はあったと見られる。トルネードの成因について、それが地上5 km 以上まで達するメソスケールのトルネードサイクロンの中心から延びているのか、それともトルネードサイクロンの中心軸とトルネードの軸はもともと別なのか、まだ分かっていない。Eagleman and Lin²⁾は前者と受け取れる様な図を示しているが、Fujita⁶⁾の図は、むしろ後者を示唆している。名古屋竜巻の場合、竜巻がすぐそばを通過した名古屋地方気象台の自記気圧計と自記風向計は、中心が2~3 km 離れた2つの渦が通過したと解釈される変動を記録している(6.3節)。

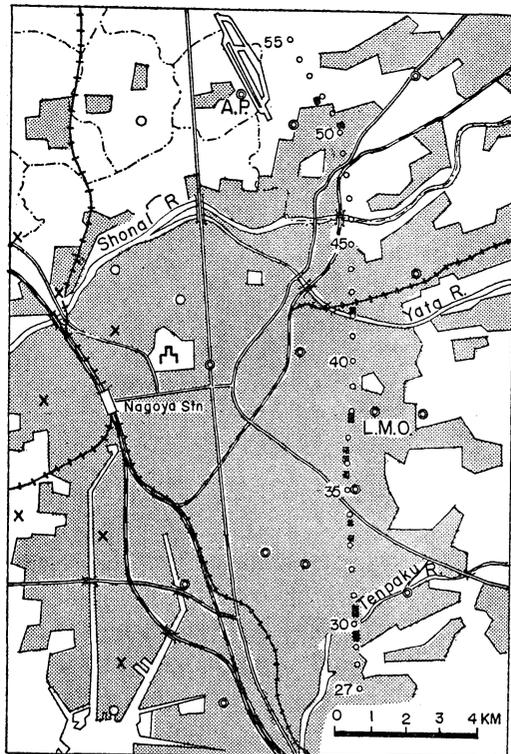
トルネードを発生する巨大雷雨系はふつう陣風線を伴い、その際気温も急に下がる。ときには、トルネードに似た被害を発生するダウンバースト⁸⁾(下降流突風³²⁾)が陣風線に沿って起こる。しかし、名古屋竜巻を伴ったメソ擾乱の通過地域では、その様な現象は起こらなかった。Fujita *et al.*⁹⁾が詳細に解析した大宮竜巻を伴ったメソ擾乱にも、陣風線は存在しなかったようである。台風外側降雨帯内に発生する竜巻を伴うメソ擾乱の構造は、大気が非常に不安定な時に発生するトルネードを伴う巨大雷雨系のものとは若干異なるように思われる。

5. 台風7912号の竜巻

1979年は竜巻が非常に多かった年で、27個発生した。そのうち15個が台風循環内に発生した。台風7912号は11個の竜巻を伴ったが、過去にこれほど多くの竜巻を伴った台風はない。この台風は8月31日硫黄島の西南西350 km の海上に発生した弱い熱帯低気圧から発達したもので、西北西進し9月2日18時に南大東島付近で台風7912号になった。その後進路を北から北東に変え、9月3日正午に屋久島の南約50 km の海上に達した。ちょうどこの頃、鹿児島県内之浦町にこの台風に伴う最初の竜巻が発生した。さらに同日16時から18時の間に、宮崎・大分両県内に計3個の竜巻が発生した。台風はいくぶん蛇行しながら北東進を続け、四国北西部を横切って4日9時頃香川県西部から瀬戸内海に入った。同日3時頃台風が延岡市付近にあった時に、第5番目の竜巻が高知県東部に発生した。さらに台風が中心が瀬戸内海を横断中の9時30分頃から11時頃にかけて、三重県北部に3個の竜巻が発生した。第8図に4日12時の局地天気図を示す。名古屋竜巻は台風の中心が岡山市北部を北北東進中に発生した。第9図に三重県北部と名古屋市を襲った竜巻の経路を示す。台風は中国地方東部を横断して日本海に入り、



第9図 昭和54年9月4日北勢地方と名古屋市に発生した4個の竜巻の経路 (Ia, Ib, II, III). 図中, ⊙は竜巻低気圧Tとその前に通過したメソ擾乱Pそれぞれに伴う風向変化の両方が観測された地点, ⊙はTによる風向変化のみが観測された地点, ⊙はPによる風向変化のみが観測された地点, ●はT, Pいずれの風向変化も観測されなかった地点.



第10図 名古屋竜巻の経路. ⊙は1分毎の推定位置, ■は被害発生地域. また, (i) ⊙, (ii) ⊙, (iii) ⊙, (iv) ×は, 風向の自記記録に竜巻低気圧による風向変化がそれぞれ, (i)明瞭である, (ii)明瞭ではないが確認できる, (iii)全く確認できない, 観測地点を表す.

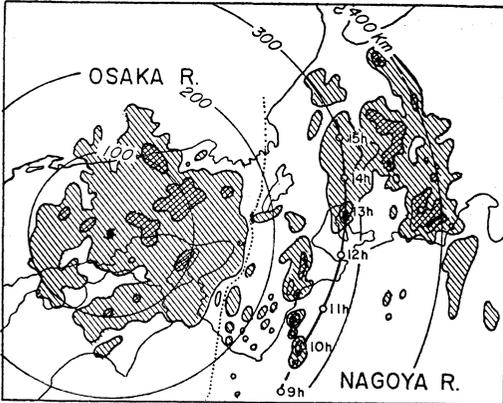
ほぼ海岸沿いに東北東進し, 5日朝秋田市の南から上陸, 東北地方を横断して三陸沖に抜けた. この台風が石川県沖を進行中, 東京を取り巻く「都市化による竜巻ベルト」内の東久留米市と松戸市に本台風の10番目と11番目の竜巻が発生した.

6. 昭和54年9月4日の名古屋竜巻

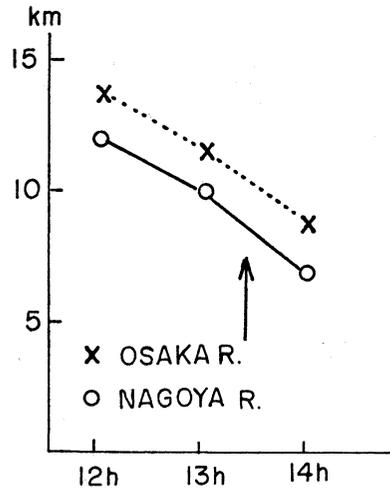
6.1. 竜巻の行動

この竜巻は, 4日13時27分名古屋市天白区野並に発生した. 竜巻による被害は死者1名, 負傷者4名, 住家半損壊456棟, 非住家半損壊2棟であった. 1965年以後この様に多くの住家が被害を受けた例はない. その発生直前に気象台から異常な雲が望見されたこともあって, この竜巻は発生の瞬間から庁舎の約700m西を通過して守山区で見えなくなるまで, 約20分間にわたって名古屋地方気象台の職員によって詳細に観測された. 第10図に竜巻の経路と被害発生地区を示す. 図中, 毎分の位置は, 写真資料などから近藤¹⁵⁾が求めたものを基に, 被害分布や名古屋航空測候所の観測記事を考慮して推定した. 竜巻が実際には見えなかった時刻についても連続性を考慮して仮想位置を記入した. 本図による竜巻の全移動距離は19kmである. しかし, 竜巻が実際に地上を

移動した距離はこれよりはるかに短く, 第10図中の断続的な被害部分をつなぎ合わせると2km弱に過ぎない. 今回は特に離れ離れであったが, 竜巻被害が飛び飛びに発生するのは良くあることで, jumpingとかskipping現象と呼ばれている^{14), 18)}. 竜巻被害が断続的になる第1の理由は, ファーゴトルネードのモデル図にある様に^{5), 6)}, それぞれ数km移動する複数の竜巻が1個の竜巻低気圧から準周期的に形成されるためである. 今回は, 1つの竜巻が雲底から垂れ下がって地面につくとすぐ消え, すぐに新しいものがその北側から垂れ下がってくるという過程が何度か繰り返されたのを気象台職員が見ている. 地面に届いていなかった部分を含めても19kmという移動距離を考慮すると, 竜巻家族の概念ではせいぜい2~3個の竜巻しか起こり得ない. 上記観測事実と被害分布から推定すると, 本図に見られるskippingは



第11図 昭和54年9月4日13時におけるレーダーエコー分布、および注目の対流セルの毎時の位置。



第12図 注目の対流セルのエコー頂高度の変化(○は名古屋レーダー、×は大阪レーダーの測定値。矢印は竜巻発生時刻。

ビルなどによる大きな地面摩擦のために竜巻の接地部分が一時的に破壊された現象の現われと考えられる。

名古屋地方気象台の竜巻観測は13時45分で終わっているが、名古屋航空測候所の日原簿には13時51分から55分にかけて竜巻目視の記事がある。これは、守山区で一旦消えた竜巻が春日井市内に再び現われたためである。事実、軽微ではあるが同市内2箇所に竜巻被害がでている。

第10図には、名古屋市内の観測所で竜巻低気圧の影響による風向変化を記録した地点が示されている。風向変化の影響範囲は、竜巻の経路の西側で3~4kmまで及んでいた。一方、大部分が本図の範囲外になっているが、竜巻経路の東側では5~6kmの所まで風向変化の影響が及んでいる(第9図参照)。

なお、昭和51年8月3日に、今回の竜巻発生地点の東約1.5kmの天白区山根町内に竜巻が発生している。この竜巻は約4km東北東に移動し、住家半損壊52棟、非住家一部破損5棟の被害がでた¹¹⁾。

6.2. 竜巻を伴ったメソスケールの擾乱

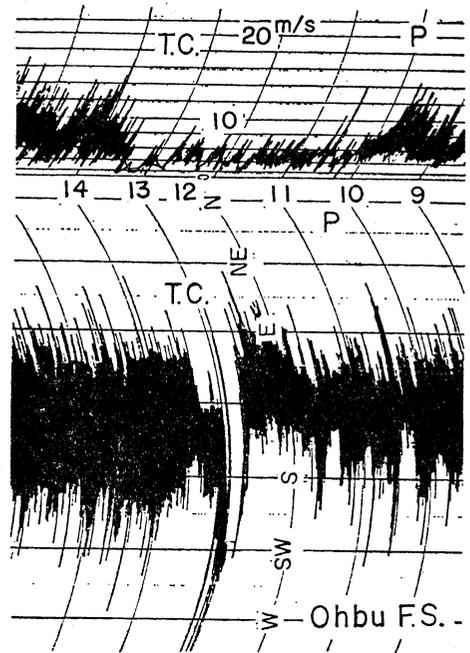
この竜巻を伴ったメソ擾乱は、台風7912号の外側降雨帯内に発達した積乱雲であったと考えられる。第11図は、大阪レーダーと名古屋レーダーの9月4日13時のエコースケッチを合成したものである。両スケッチはかなりの部分が重複するが、注目の時間帯には重複地域のエコー分布に著しい違いは見られなかった。図は、右半分が名古屋、東半分が大阪、それぞれのスケッチを写したものである。本図には、竜巻を伴ったメソ擾乱の移動状況も記入してある。第12図に名古屋・大阪両レーダース

ケッチに記入された注目のメソ擾乱のエコー頂高度の推移を示す。大阪の値が常に名古屋より高い値を与えているが、両者の変化傾向は全く同じである。本図は、竜巻がエコー頂の低下中に発生したことを示している。トルネードやダウンバーストの発生が、積乱雲頂の崩壊あるいはエコー頂低下中に起こることが最近注目されているが^{8),16)}、時間スケールを考慮すると、本図に見られる傾向とこの現象は同一視できないように思われる。

注目のメソ擾乱(レーダースケッチに見られるエコーセル)は、9月4日9時頃潮岬の南南東約50kmの海上に発生した。初め北北東進し、志摩半島を横断して12時頃伊勢湾に入り、ここで北に向きを変えて、13時には知多半島の付け根にある大府市を通過した。この少し前、大府市では短時間の強雨と、顕著な風向の変化が観測された。第13図に大府市消防署の風向・風速の記録を示す。同市市役所の風向計も、同時刻に顕著な風向変化を記録している。この変化は、メソスケール渦の通過によるものと考えられる。類似の風向変化は、大府市の南にある阿久比町や半田市にある観測所でも記録された。しかし、半田市以南の知多半島の風の自記記録は得られなかったため、問題の渦がいつどこに発生したかを確かめることはできなかった。なお、伊良湖測候所におけるどの気象自記記録にも、注目のメソ擾乱の通過を示唆する変化は認められなかった。

第14図(A)に、13時における名古屋周辺の局地天気図を示す。注目のメソ擾乱に伴う強雨域はまだ小さかったが、その南東縁にすでに発達中の竜巻低気圧が形成されていたことが、雨量と風向の自記記録の解析から推定された。しかし、名古屋レーダーの写真には、この時刻に注目の対流エコーにかぎ状構造は認められない。第14図(B)は、竜巻発生7分前の状況を示す。竜巻低気圧は明瞭となり、問題のメソ擾乱の強雨域の南東縁(進行方向に向かって右後側面)に位置している。近藤¹⁵⁾のレーダー解析によると、13時26分には注目のエコーの南端はかぎ状に曲がっていた。第14図(C)は、竜巻が名古屋地方気象台に最も接近した13時38分の天気図である。同気象台では、この前後約10分にわたって気圧と風に興味ある変化が起こった。これについては次節でやや詳しく検討するが、分析結果を先に述べると、本図の時刻には竜巻低気圧の中心はすでに気象台の北やや東寄り2~3kmの所にあり、竜巻はその中心の南南西約3kmに位置していたと推定される。竜巻低気圧に対応する渦の大部分は、この時刻には西側からこれに巻き込むような形になっていた強雨域外にあった。なお、この雨域の南東約20kmにあるもう1つの雨域は、台風7912号の同じ外側降雨帯に属する別の対流セルのもので竜巻には関係ない。第14図(D)は14時00分の局地天気図で、竜巻低気圧の残骸とみられる小さな渦が残っているが、竜巻はこの時刻にはすでに消滅していたと思われる。しかし、犬山市など本図の渦の位置よりも北にある数地点で顕著な風向変化が記録されており、渦がさらに北上したことは確かである。渦の衰弱・消滅は雨域との分離に関係していると見られる。なお、渦が完全に消滅したのは14時10分頃で、位置は木曾川を越えた岐阜県各務原市東部地区と推定される。第15図に、名古屋レーダーの13時48分のPPI(レベル4)の写真掲げた。この時刻に竜巻は目撃されていないが、竜巻低気圧の中心は図中矢印の先端あたりにあったと推定される。

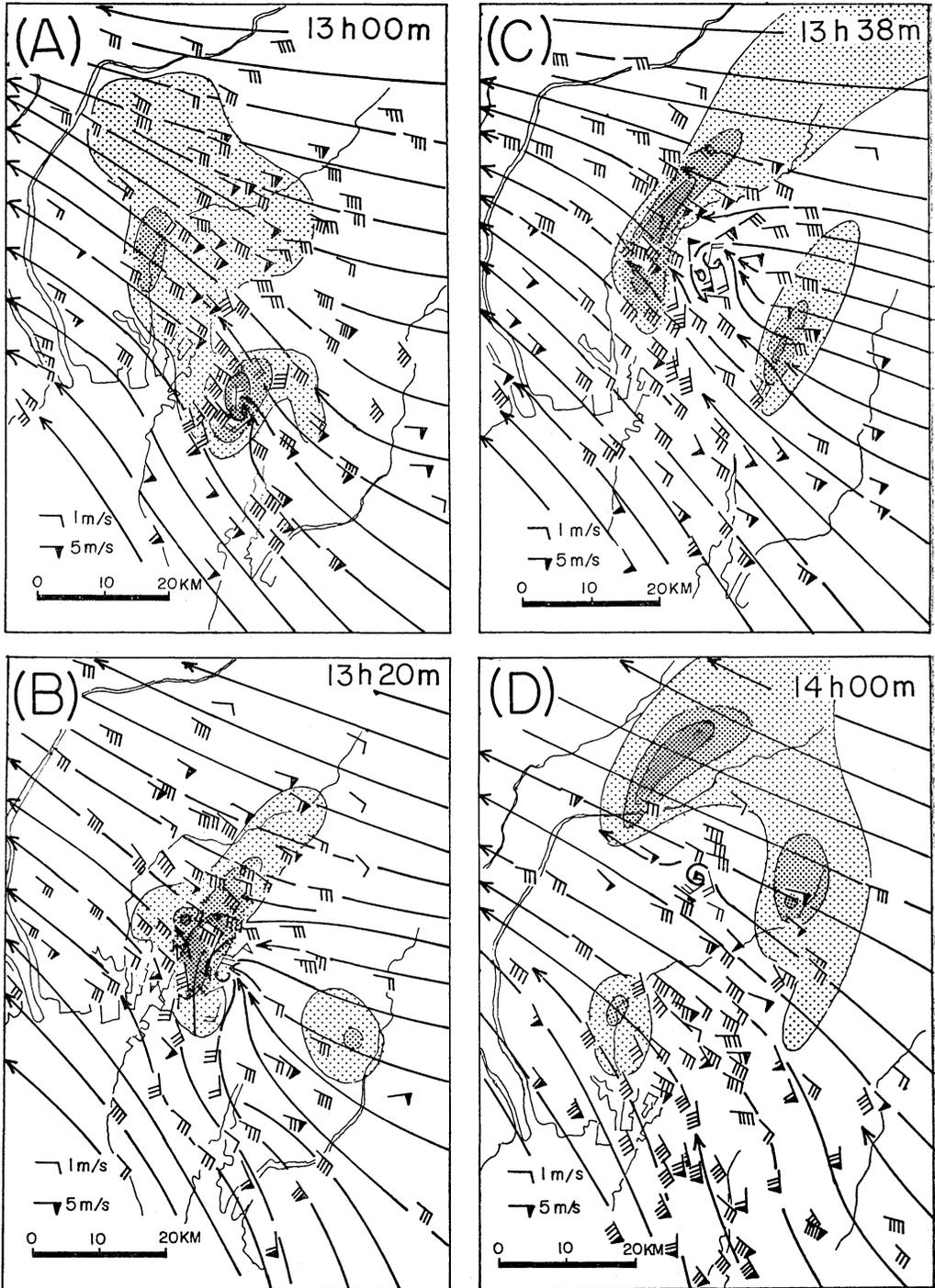
ところで、トルネードや降ひょうを伴うような巨大雷雨系は、雲層の平均流に対して右に偏って移動することが多いことが知られている。名古屋竜巻を伴った対流系は、12時以降はほぼ真北に移動した。この頃の名古屋付近の上層風の正確な資料はないが、午前9時の浜松上空の風(第7図)と台風の移動状況から推定すると、平均流はやや西寄りの南風で、この対流系は雲層の平均流とはほぼ同じ方向かやや左に偏った進路をとったと考えられる。



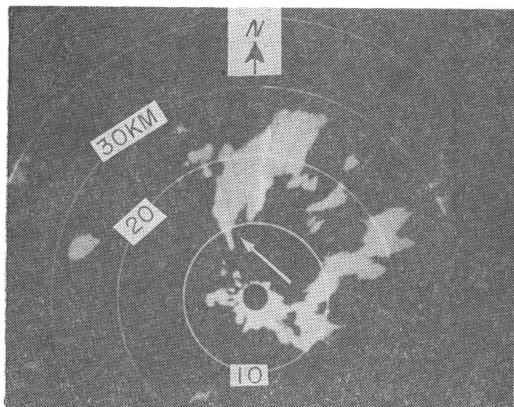
第13図 大府市消防本部における風向・風速の自記記録(9月4日9~15時頃)。

名古屋竜巻を伴ったこの積乱雲性メソ擾乱が、ふつうの巨大雷雨系と著しく異なっていた点は、通常強雨と相前後して観測される気温低下を伴う陣風が観測されなかったことである。まず気温変化について見ると(第16図)、名古屋地方気象台及び名古屋航空測候所のいずれにおいても、注目のメソ擾乱に伴う強雨(R_p)の前後に気温の降下は起こっていない。そして顕著な気温降下(P_2)はむしろその約2時間半ほど前の降雨 R_p と関連して起こっている。なお、あまり明瞭ではないが、 P_2 の起こる少し前にも別の気温降下 P_1 が記録されている。

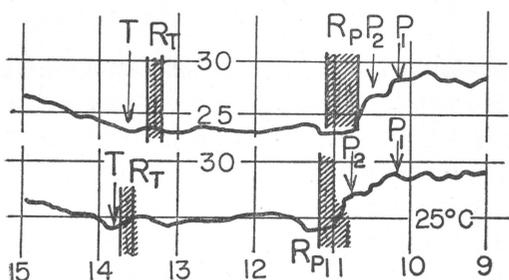
次に風の変化について見ると(第17図)、まず注目されることは、降雨 R_p のあった頃に竜巻低気圧の通過を示唆する風向の変化が、気象台・航空測候所両地点で記録されている点である。名古屋地方気象台の風向計には、後でやや詳しく述べるように、竜巻低気圧による変化T.C.と、竜巻本体の影響と見られる変化T.V.の両方が記録されている。興味深いことに、竜巻を伴ったメソ擾乱の前に強雨 R_p をもたらした別のメソ擾乱も渦の通過を示唆する風向変化を起こしている(第17図P)。さらに面白いことに、この風向変化Pは、風向変化T.C.を記録したのとほぼ同じ地域で観測されているのである。



第14図 (A~D) 名古屋市周辺の地上風および降雨強度分布の変化。降雨強度は自記雨量計の自記紙から次の3段階に分類したものである。(1) 1~5 mm/10 min, (2) 5~15 mm/10 min, (3) 15 mm/10 min 以上。



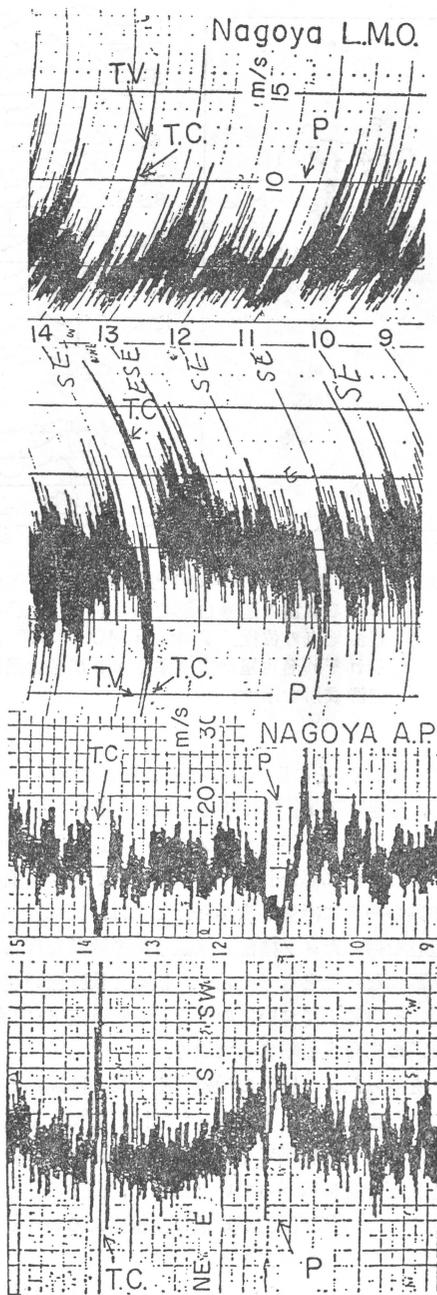
第15図 昭和54年9月4日13時48分の名古屋レーダー写真の一部(レベル4).



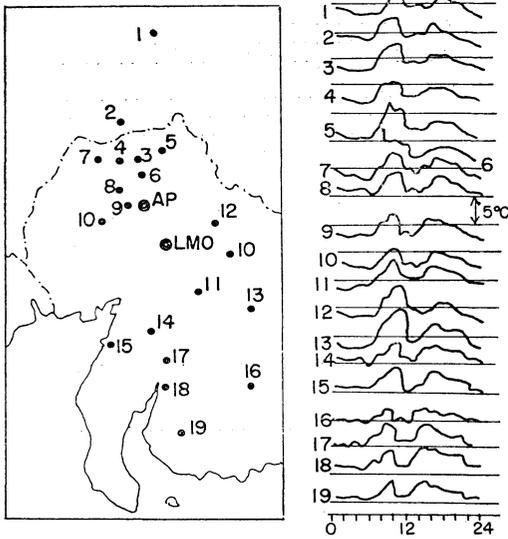
第16図 昭和54年9月4日9～15時における、名古屋地方気象台(上)、および名古屋航空測候所(下)の気温変化。Tは竜巻が最も接近した時刻、 P_1 と P_2 は竜巻を伴ったメソ擾乱とは別の擾乱による気温変化の起時。斜線を付した時間帯 R_T 及び R_P はそれぞれ竜巻を伴ったメソ擾乱と、その前に通過したメソ擾乱Pによる降雨(強度5mm/10min以上)の時間帯。

(第9図参照)。風の変化についてももう一つ注目すべきことは、竜巻を発生させたメソ擾乱が陣風または強い突風を伴わなかった点である。詳細は次節で述べるが、名古屋地方気象台の自記記録に見られる $16.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ の突風は竜巻本体の影響とみなされる。

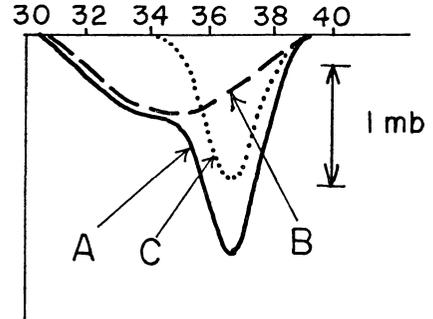
再び気温変化に戻るが、第18図に愛知県中部・東部の消防署の週巻温度計のこの日の自記記録の写しを示してある。全地点で正午を挟んで約5時間にわたって異常な気温低下が記録されている。同県西部でもほぼ同じ頃にそれほど顕著ではないがやはり気温が一時的に下がっている。前述の気温降下 P_1 、 P_2 の開始は時間的に風向変化Pとほぼ一致するが、第9図と第18図を比較すると分かるように、風向変化の観測されなかった地域でも気温



第17図 昭和54年9月4日の名古屋地方気象台および名古屋航空測候所の風向・風速の自記記録。图中、T.V.は竜巻本体、T.C.は竜巻低気圧、Pは別のメソ擾乱(第16図及び本文参照)による変化を示す。



第18図 (右) 局地スケールの気温低下発生地点における気温の週巻自記記録の写し。(左)各観測地点の位置。图中、LMOとAPはそれぞれ名古屋地方気象台および名古屋航空測候所を示す。



第19図 名古屋地方気象台における気圧変化の分析。图中、A：実際の気圧変化、B：竜巻低気圧による変化、C：竜巻本体による変化。近藤¹⁵⁾より作図。

は低下しており、その原因は今のところよく分からない。ただし、気温降下 P_2 (第16図) だけに注目すると、これは強雨と風向変化を伴ったメソ擾乱の影響、弱い冷気下降流によるように思われる。この11時頃から15時頃間に愛知県の一部に冷気が広がったことは、次に述べるように竜巻を伴ったメソ擾乱が気温下降や陣風を伴わなかった原因になったとも考えられ、極めて興味深い現象であるが、その詳細についての十分な解析は進んでおらず、紙面の都合上省略させて頂く。

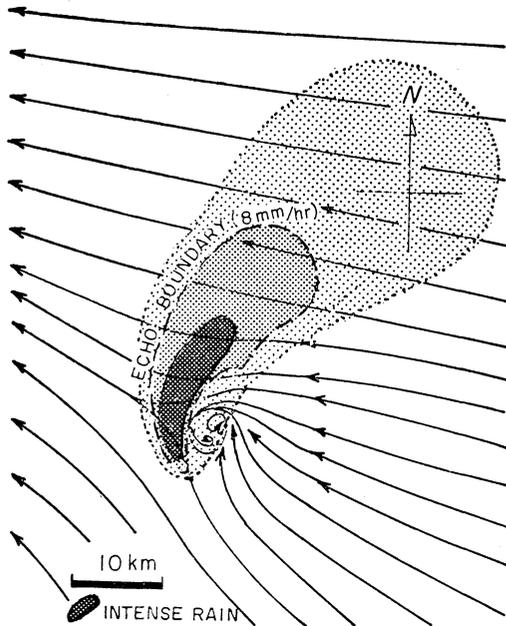
竜巻を伴ったメソ擾乱の通過に際して、陣風あるいは冷気の吹き出しが起らなかった原因として、上述の局地的な冷気塊の存在が考えられる。すなわち、この冷気塊が地表面付近に広がっていたために、問題の積乱雲内に形成された冷気下降流が地面に直接当たるのが妨げられたというわけである。スケールはやや異なるが、同様な現象が Fujita⁷⁾ によって、マイクロバーストに対するクッション作用としてモデル化されている。積乱雲からの冷気下降流は、雲中に流入する対流圏中層の、乾燥したやや冷たい上層大気が主体であるという考えがある。この気塊は雲中から雲底下まで雲粒・雨滴の蒸発によって湿潤断熱的に昇温して降下するので、周囲大気より低温となり、その温度差が大きいほど下降速度は大きく、

突風も強い。今度の場合、大気は下層からかなり上層まで湿っており、問題の温度差は小さく、下降気流も比較的弱かったと見られ、クッション作用が起り易い状態にあったと考えられる。

6.3. 竜巻低気圧

名古屋竜巻が竜巻低気圧内に発生したことは、近藤¹⁵⁾ の名古屋地方気象台の気圧変化の分析結果 (第19図) から明らかである。同氏によると、気象台の風向は13時30分頃より急速に反時計回りに変化した。13時36分に突然時計回りの変化が起こった。この風向変化は、竜巻低気圧 (メソサイクロン) の中心は気象台の東側を、竜巻 (ミソサイクロン) は西側を通過したと考えるとうまく説明できる。同気象台では竜巻が最も接近した13時38分に最大瞬間風速 $16.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ の突風を観測した (第17図上)。一方、大府市消防署 (第13図) や名古屋航空測候所 (第17図下) では、竜巻低気圧による風向変化の際に風速はむしろ減少している。実際、気象台以外で $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上の突風を記録した地点はない。このことから、気象台のみで記録された強い突風は竜巻本体の影響であると解釈できる。なお、気象台の南に竜巻経路に極めて近い所に観測点が1箇所あったが (第10図)、この風速記録は10分間平均のため最大瞬間風速は求められなかった。

第20図に名古屋竜巻を伴ったメソ擾乱のモデル図を示す。南北に細長い強雨域の南端東側に竜巻低気圧の中心が位置する点で大宮竜巻の例⁹⁾ と良く似ている。また、本図を時計回りに 90° 回転させると、レーダーエコー・雨域・竜巻低気圧の3者の関係は、一般に知られる巨大



第20図 名古屋竜巻のメソスケールモデル図。

雷雨系の構造^{1), 6)}とほぼ一致する。しかし、雷雨高気圧に対応する流線の発散（大宮竜巻の例では明瞭に示されている⁶⁾）、冷気下降流の前面に形成される陣風線が欠けている点など、ふつう知られている雷雨系の構造とは若干異なっている。竜巻低気圧を取巻く流線の収束にも注目される。この渦の急速な衰弱が強雨域との分離とはほぼ一致することを考えると（第14図（D））地上の収束分布の変化を求めたいところであるが、観測所によって風速計の高さが異なり、市街地では近くのビルの影響も考えられるので、風速の信頼性の点から今回は収束の計算は行わなかった。

7. あとがき

以上、台風に伴う竜巻について、まず気候学的ならびにメソ気象学的特徴を述べ、次に事例解析の結果を示した。前半は総合報告的な面もあり、ここで改めて議論するまでもないと思う。事例解析の対象とした昭和54年9月4日の名古屋竜巻は、台風7912号が伴った11個の竜巻の1つであるが、台風域内で竜巻の最も発生し易いと思われる場所にできた。これを伴ったメソ擾乱は積乱雲性対流系で、ふつうトルネードを伴う巨大雷雨系と構造上類似した点もあったが、冷気下降流を伴わなかった点が著しく異なっていた。この原因として、この擾乱が来る

前に局地的に冷気塊を地上に滞留させる現象が起こり、積乱雲内に形成された冷気下降流が直接地面に当たるのが妨げられたものと説明した。なお、最後のモデル図がどの程度、台風・ハリケーンに伴う竜巻・トルネードの発生状態を表わすものとして一般化できるかは、今後の理論的・解析的研究の成果を待たねばならない。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、気象庁（統計課、大阪管区気象台、名古屋地方気象台）、建設省（中部地方建設局及び近畿地方建設局の各河川工事事務所）、水資源開発公団中部支社、愛知県（環境部、土木部）、三重県（生活環境部、土木部）、岐阜県（土木部）、滋賀県（土木部）、名古屋市（公害対策局、市民局、土木局）、上記各県内の多数の消防署、市町村役場などから、それぞれが管理する観測所の気象関係の自記記録のコピーを提供して頂いた。直接依頼した部・課・署・出張所の数は100箇所を超えるので、紙面の都合上、個々の名称を割愛させていただきますが、御協力下さった関係者各位に厚く御礼申し上げます。

この報告は、文部省自然災害科学特別研究「竜巻などによる瞬発性気象災害の実態とその対策」（課題番号00502017）の一環として行った研究の一部をまとめたものである。本研究を進めるに当たって、色々お世話頂いた京都大学防災研究所 光田 寧 教授ならびに同研究所関係者各位に深謝致します。

文 献

- 1) Browning, K.A., 1964: Airflow and precipitation trajectories within severe local storms which travel to the right of the wind, J. Atmos. Sci., 21, 634-639.
- 2) Eagleman, J.R. and W.C. Lin, 1977: Severe thunderstorm internal structure from dual-doppler radar measurements, J. Appl. Met., 16, 1036-1048.
- 3) Fawbush, W.J. and R.C. Miller, 1952: A mean sounding representative of the tornadic airmass environment, Bull. Amer. Met. Soc., 33, 303-307.
- 5) 藤田哲也, 1973: たつまき(上), 共立出版, 東京, p. 228.
- 6) Fujita, T., 1963: Analytical mesometeorology: A review, Met. Monogr., 5, No. 27, 77-125.
- 7) Fujita, T.T., 1981: Tornadoes and downbursts in the context of generalized planetary scales,

- J. Atmos. Sci., 38, 1511-1534.
- 8) ———, and H.R. Byers, 1977: Spearhead echo and downbursts in the crash of an airliner, *Mon. Wea. Rev.*, 105, 129-146.
 - 9) ———, K. Watanabe, K. Tsuchiya, and M. Shimada, 1972: Typhoon associated tornadoes in Japan and new evidence of suction vortices in a tornado near Tokyo, *J. Met. Soc. Japan*, 50, 431-453.
 - 10) Hill, E.L., Malkin, W., and W.A. Schultz, Jr., 1966: Tornadoes associated with cyclones of tropical origin—practical feature, *J. Appl. Met.*, 5, 745-763.
 - 11) 堀内孝英, 1976: 昭和51年8月3日名古屋市天白区に発生した竜巻による被害調査報告, 名古屋市防災会議, p.26.
 - 12) 細山田健三, 国武昌人, 1981: 宮崎県における竜巻災害, 自然災害資料解析, 8, 20-27.
 - 13) 今井一郎, 相馬清二, 1972: 日本における竜巻とその研究の概要, 日米天然会議, 耐風耐震構造専門部会, 第4回合同部会, 資料, 22-52.
 - 14) 石崎潑雄, 光田 寧, 川村純夫, 室田達郎, 林英爾, 田平 誠, 1971: 昭和44年12月7日豊橋市を襲った“たつまき”, 京大防災研年報, 14A, 481-500.
 - 15) 近藤五郎, 1980: 9月4日の“たつまき”について(名古屋地方気象台における講演原稿のコピー, 4p).
 - 16) Lemon, L.R., W. Burgess and R.A. Brown, 1978: Tornadic storm airflow and morphology derived from single doppler radar measurements, *Mon. Wea. Rev.*, 106, 48-61.
 - 17) Malkin, W. and J.G. Galway, 1953: Tornadoes associated with hurricanes, *Mon. Wea. Rev.*, 81, 299-303.
 - 18) 光田 寧, 文字信貴, 岩谷祥美, 西岡淳一, 1979: 1978年2月28日に東京を襲った竜巻について, 京大防災研年報, 22B-1, 385-406.
 - 19) 宮沢清治, 市川清見, 中鉢幸悦, 1980: 近年, 日本付近に発生した「たつ巻」について(付昭和53年2月28日夜, 東京湾沿いに発生した「たつ巻」), 研究時報, 32, 1-14.
 - 20) Newton, C.W. and J.C. Fankhauser, 1964: On the movements of convective storms, with emphasis on size discrimination in relation to water-budget requirements, *J. Appl. Met.*, 3, 651-688.
 - 21) Novlan, D.J. and W.M. Gray, 1974: Hurricane-spawned tornadoes, *Mon. Wea. Rev.*, 102, 476-488.
 - 22) 小元敬男, 1970: 関東甲信地方の降ひょうについて(2), 農業気象, 26, 91-100.
 - 23) Orton, R., 1970: Tornado associated with hurricane Beulah on September 19-25, 1967, *Mon. Wea. Rev.*, 98, 541-547.
 - 24) Pearson, A.D. and A.F. Sadowski, 1965: Hurricane-induced tornadoes and their distribution, *Mon. Wea. Rev.*, 93, 461-464.
 - 25) Pettersen, S., 1956: Weather analysis and forecasting, Vol. II, McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, 168-171.
 - 26) Ray, P.S., R.J. Doviak, G.B. Walter, D. Sirmans, J. Carter, and B. Bumgarner, 1975: Dual-doppler observation of a tornadic storm, *J. Appl. Met.*, 14, 1521-1528.
 - 27) 関谷 溥, 1949: 日本付近における竜巻発生の研究, 気象集誌, 27, 88-98.
 - 28) 瀬下慶長, 安斎緑郎, 笠村幸男, 1980: 台風7912と7916によって発生した宮崎市周辺のたつ巻, 天気, 27, 405-413.
 - 29) 島田守家, 1967: 1955-1964年における日本のたつ巻, 研究時報, 19, 1-22.
 - 30) Showalter, A.K., 1953: A stability index for thunderstorm forecasting, *Bull. Amer. Met. Soc.*, 34, 250-252.
 - 31) Smith, J.S., 1965: The hurricane-tornado, *Mon. Wea. Rev.*, 93, 453-459.
 - 32) 内田英治, 1979: たつ巻研究の諸断面, 天気, 26, 659-681.
 - 33) Wills, T.G., 1969: Characteristics of the tornado environment as deduced from proximity sounding, *Sci. Paper, No. 140, Dept. Atmos. Sci. Colo. State Univ.*, 55pp.
 - 34) Wolford, L.V., 1960: Tornado occurrences in the United States, U.S. Weather Bureau, Tech. Paper Publ. No. 20, 71pp.
 - 35) 吉岡幸雄, 細山田健三, 国武昌人, 1980: 台風16号に伴う竜巻災害の調査, 台風16号による風水害の総合的調査研究, 文部省科学研究費自然災害突発研究成果, No. B-54-1, 25-36.