

たつ巻研究の諸断面*

内 田 英 治**

1. はじめに

1978年2月28日夜、川崎市(神奈川県)より鎌ヶ谷市(千葉県)にわたり、突風が発生した。これはあとになってたつ巻であるとわかったが、今まで首都圏中央部付近をこのような形でたつ巻が襲ったことはなく、ましてやふだんは地上の風の影響のない地下鉄の列車が、こともあろうに、荒川・中川橋梁東端で最後尾2両が転覆しようとは想像外のことであった。また、家屋、船舶、自動車その他に多くの被害が発生し、もし羽田の飛行場などで何かの事故でも起こっていたら、それこそ一大惨事となるところであった。

しかし、研究面としては、比較的細かいデータも観測でき、夜間のために目視データこそなかったが、さまざまな面から解析ができた。

従来、たつ巻(トルネードの日本名。たつ巻はふつうトルネードのうち比較的小規模のものに相当するものをさして言っている)については世界的には多くの研究がある。ただし、日本に関してはそう多いという訳ではない。そこでこの機会に日本の文献や、外国の著名な文献をいくつか調べ、その上で東京のこのたつ巻の特性を考えて見た。

この解説では、今までのたつ巻(トルネード)研究上の問題点、F、Pナンバー[たつ巻(トルネード)の規模を表す数]の意味、フックエコーとダウンバーストがたつ巻とどんな関係があるかということなど、そして東京のたつ巻の観測を紹介することにする。

その際、いわゆる突風(後述を参照のこと)とたつ巻との特性上の差についてもまず触れておく。

* Some comments and topics on tornado investigation.

** Eiji Uchida, 気象研究所予報研究部.

なお、お断りしておきたいことは、たつ巻に関する理論的実験的研究が最近では相当進んでいるが、そこまで詳しく紹介することはできないので、1~2の論文について概説するに留めておく。

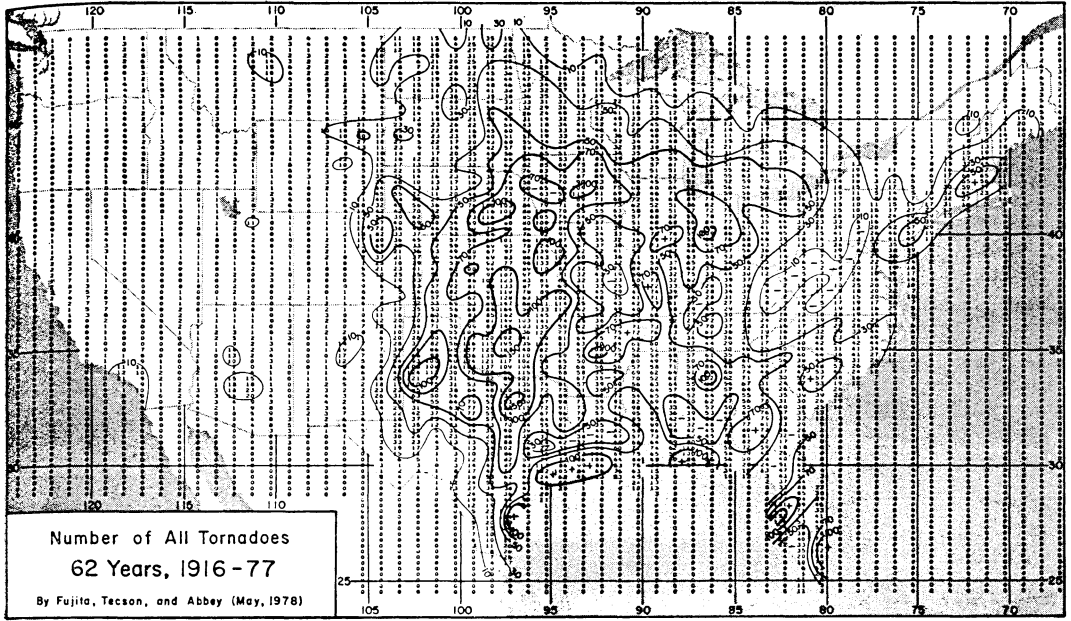
2. 突風の特性

突発的に吹いてくる強風をふつう突風と言うが、広義の意味と狭義の意味とに分けられる。広義にはメソスケール(数100km)内で強い風が急に吹きはじめ、風の息が強く存在する場合に突風と言っている¹⁾。また、たつ巻も当然突風の中に入ることになるが、狭義には強い寒冷前線に伴う強風(陣風)などのように短時間内の典型的な突風をさして言う。さらにここでは、いわゆる突風はたつ巻のような回転性の風でなく、非回転性の強風をさして狭義の意味で突風ということにしよう。

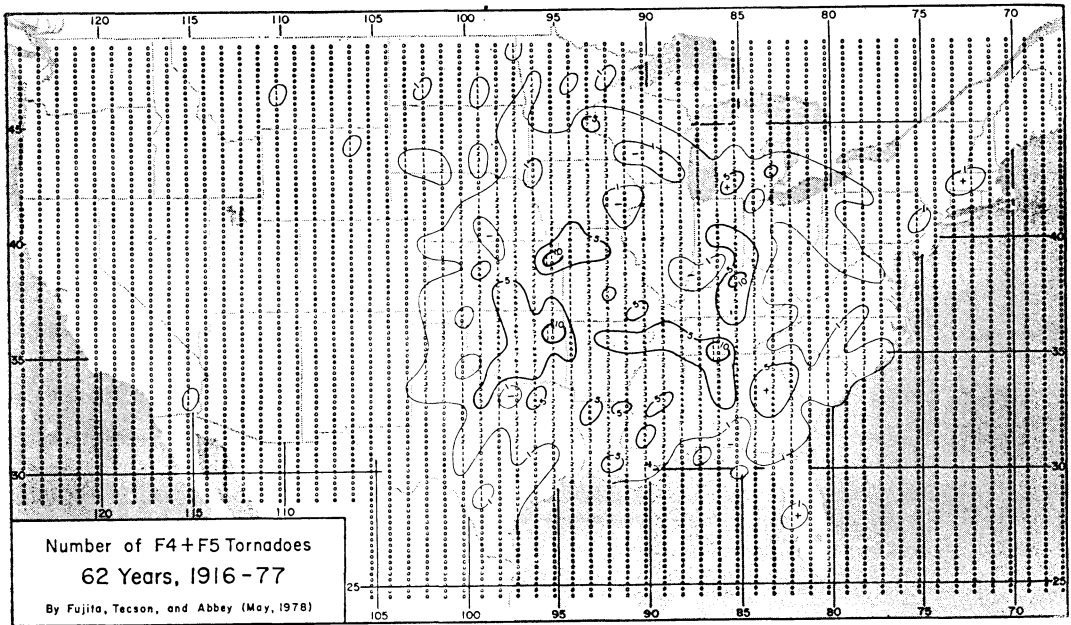
さて、狭義のこの突風は大気下層の暖気の強い移流による暖気突風と、大気中層の寒気移流による寒気突風とに分けられる。また、気流が山越えをする時などに地形の影響を強く受けた場合に起こる突風は、ふつうおろし風、だし風などと呼ばれているが²⁾、この地形性突風には今回は触れない。

平地に起こる突風についての観測報告によると^{3)~7)}、突風の特性としては次のことが挙げられる。

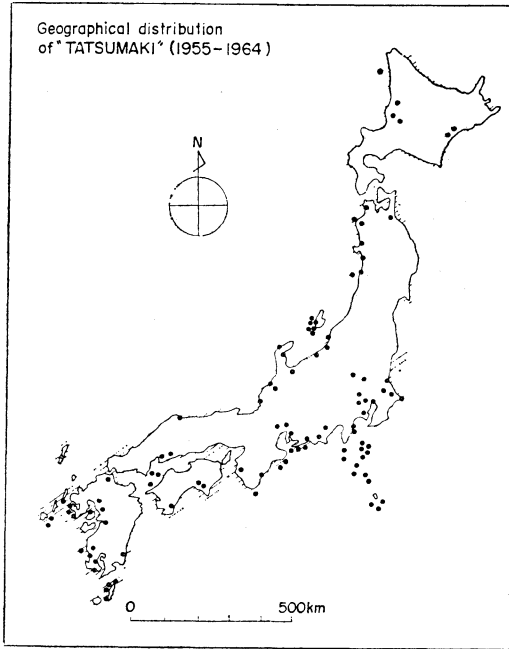
- (1) 風向: 急激な変化はあるが、時計式または反時計式と言った系統的变化は認められない。
- (2) 風速: 最大瞬間風速は突風の吹きはじめの2~4倍程度がふつうである。しかし、その絶対値は30~40 m/sec 程度の風速の記録はある⁶⁾。また、かなり長時間の風の息が認められる。単発的にまともって顕著に吹く場合は、その吹送時間は数分程度である。



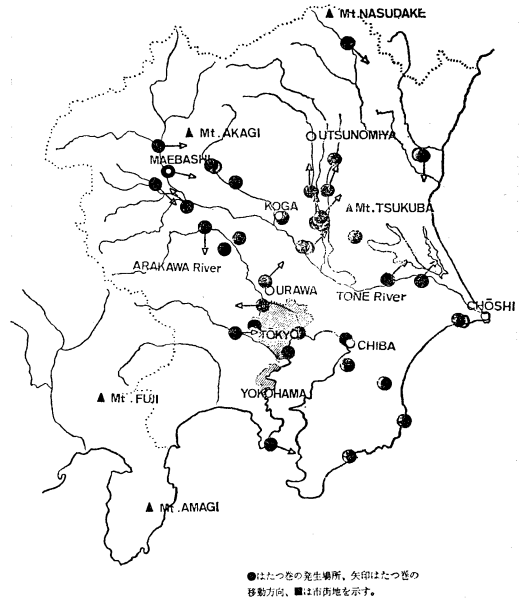
第1図 アメリカの62年間 (1916~1977) の全トルネード数¹¹⁾ (極大値 195 は中央オクラホマにある)。



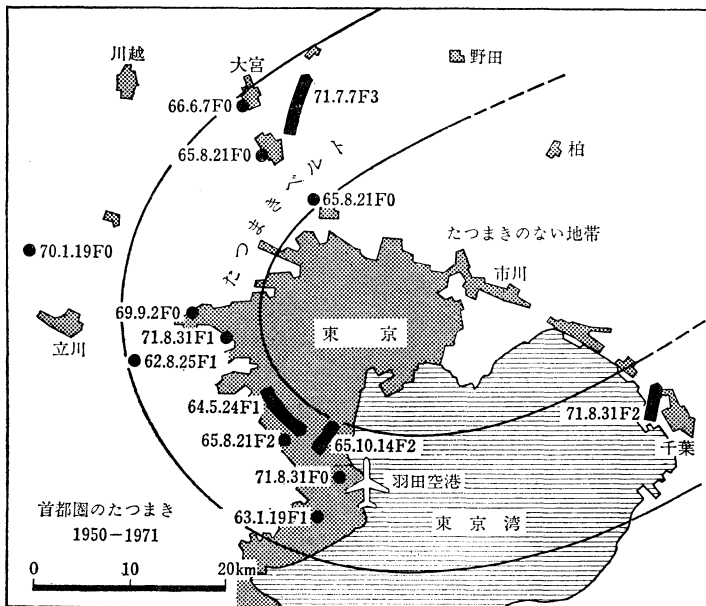
第2図 アメリカの62年間 (1916~1977) の F4+F5 のトルネード数¹¹⁾ (極大値 10~11 は、オクラホマ、カンサス、ケンタッキー、テネシーにある)。



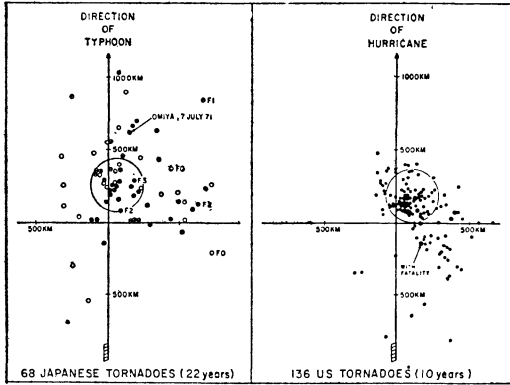
第3図 日本における10年間(1955~1964)のたつ巻発生の地域分布¹²⁾¹³⁾.



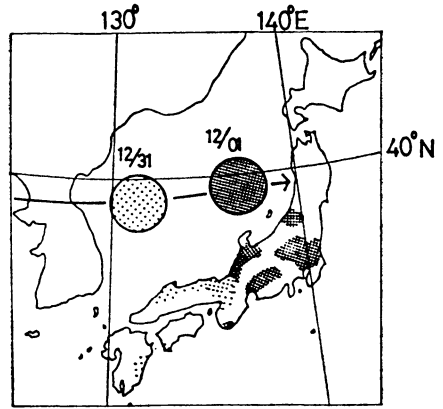
第4図 関東地方における9年間(1971~1979)のたつ巻発生の分布¹⁴⁾.



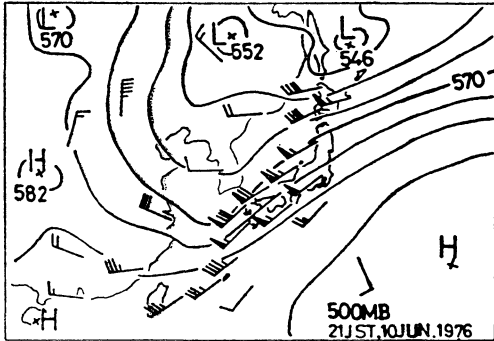
第5図 東京郊外にあるたつ巻ベルト¹⁰⁾ (22年間, 1950~1971).



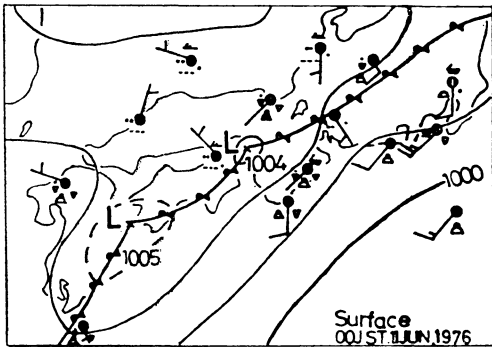
第6図 台風とハリケーンについてのトルネードの位置関係¹⁵⁾ (座標軸原点が台風の位置).



第8図 1975年5月31日と6月1日, 上層の寒冷うずの移動に伴う対流性悪天候の移動¹²⁾. [寒気たつ巻の例].



(a) 6月10日21時の500mb



(b) 6月11日00時の地上天気図

第7図 1976年6月11日の岐阜たつ巻発生当時の天気図¹²⁾ [暖気たつ巻の例].

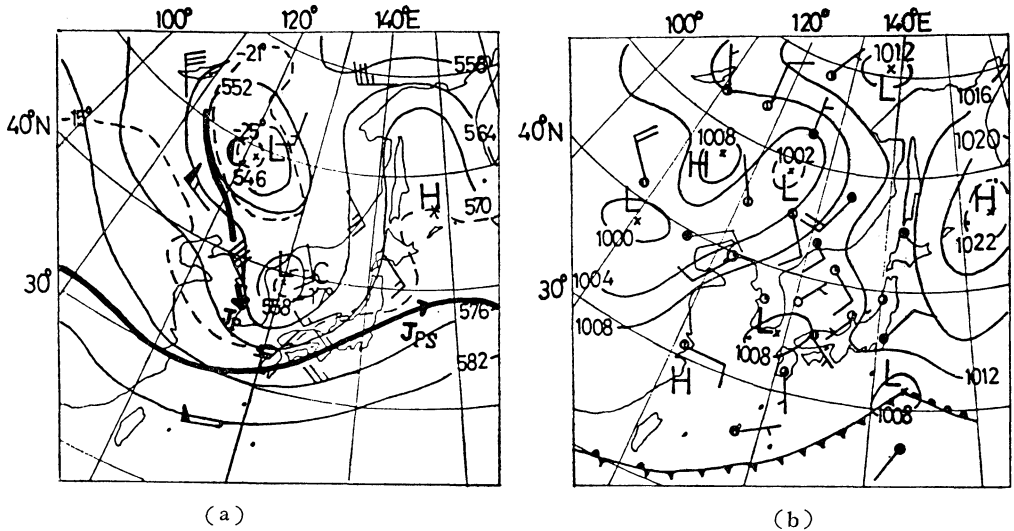
- (3) 水平規模: 最大瞬間風速の分布を見てもかなり広範囲 (たとえば県単位) に分布している¹⁾.
- (4) その他: 強い低気圧の暖域内の短時間の強風については, 寒冷前線面のスコールライン, または気圧ジャンプ (孤立重力波) に伴って起こるという研究^{3), 8), 9)}があり, 地域的には東京湾付近の東東線による突風の調査報告²⁾もある.

一方, 荒川¹⁰⁾などは地形による先述のおろし風を研究しているが, 風の記録を見ても本質的に異った吹き方はしていない. ただ, 強風の吹く地域は数 km 平方程度というようにまとまっている場合もある.

3. たつ巻 (トルネード) の特性

3.1. たつ巻のスケール分類

前にも述べたように, たつ巻はふつうトルネードのうちの小規模のものをさして言う. しかしここでは, たつ巻を広い意味に解しておく. トルネードについては, 藤田¹⁰⁾がFナンバーによる分類ということを行なった. その概略を次に示す. これは, F1をビューフォート風力階級の12と一致させ, また, F12をマッハ1すなわち大気中の音の速さになるようにしてある. だから, 万一音速に近いトルネードが世界中のどこかに現れたとしてもF8とかF10で表し得る. しかし事実上, F5までですべてのトルネードは表され, F6以上のは世界中のどこにも起こっていないと思われる.



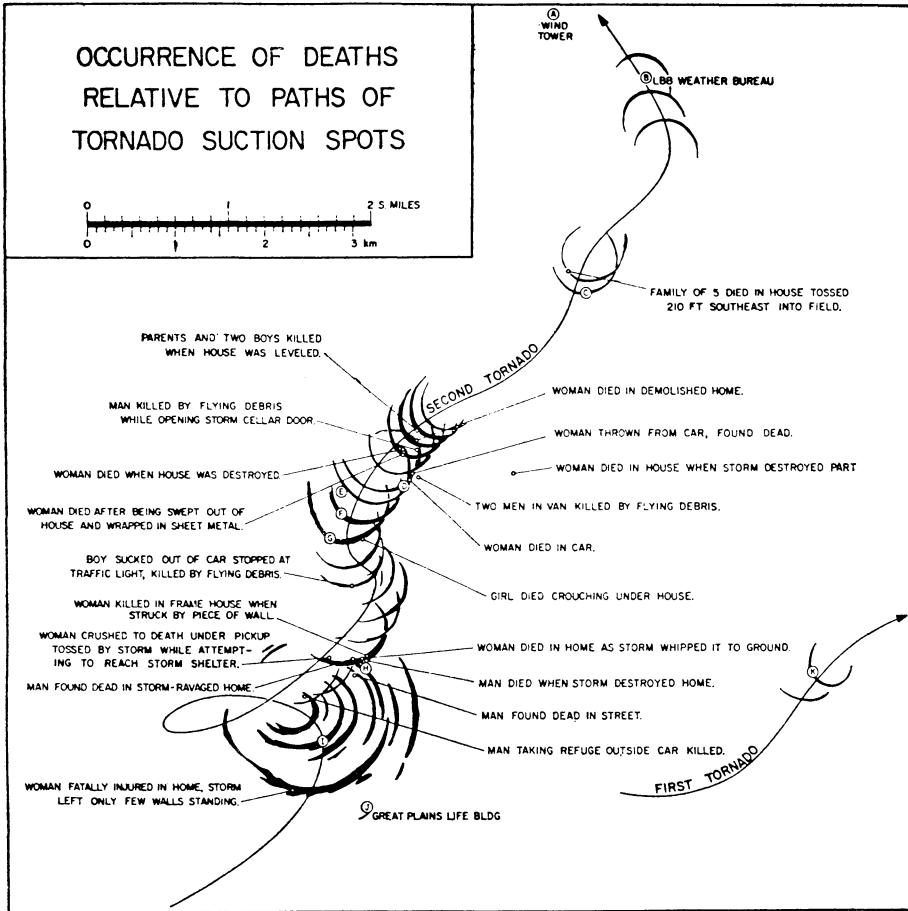
第9図 島根半島たつ巻の天気図¹²⁾ (第8図と対応).
 (a) 5月31日21時の500mb天気図(ジェット気流の位置を併せて示す).
 (b) 5月31日21時の地上天気図
 [寒気たつ巻の例].

スケール	名称	風速	被害
F 0	微弱なトルネード	17~32 m/sec (約 15 sec 間の平均)	煙突, テレビアンテナ破壊, 小枝が折れる, 根の浅い木の傾斜, 非住宅の破壊
F 1	弱いトルネード	33~49 m/sec (約 10 sec 間の平均)	屋根瓦, ガラス窓破壊, ビニールハウス被害大, 強い木の幹が折れる, 根の弱い木の倒壊, 自動車横転.
F 2	強いトルネード	50~69 m/sec (約 7 sec 間の平均)	屋根のはぎとり, 弱い非住家の倒壊, 大木の倒壊, 列車脱線.
F 3	強烈なトルネード	70~92 m/sec (約 5 sec 間の平均)	住宅倒壊, 列車転覆, 自動車が飛ばされる, 大木が引き抜かれる.

F 4	激烈なトルネード	93~116 m/sec (約 4 sec 間の平均)	住宅飛散, 非住家跡方なし, 列車吹き飛ばす, 1 t 以上の物体も飛ばす, ミステリーが起こる.
F 5	想像外のトルネード	117~142 m/sec (約 3 sec 間の平均)	住家跡方なし, 列車, 自動車遠方まで吹き飛ばす, 数 t の物体も飛ばす, ミステリーに充ちる.

この他に被害の長さでトルネードのスケールを表す方法もある。ピアソンナンバーというのがそれで、長さや幅が10の平方根すなわち3.16倍増すごとに1だけ大きくなるように作られている。したがって、10倍大きくなるとスケールは2だけ大きくなる。

スケール	長さ	被害幅
P 0	1.6 km 以下	16m 以下
P 1	1.6~5.0 km	16~50m
P 2	5.1~15 km	51~160m
P 3	16~49 km	161~499m
P 4	50~160 km	0.5~1.5km
P 5	161~508 km	1.6~4.9km



第10図 テキサス州のラボックトルネード (1970年5月11日) [第2のトルネードで死亡した26名の死亡場所(死亡場所の2名は含まれない). 死者は吸引点, すなわち吸引マーク (3.6. 参照) の狭い列の内においたことがわかる¹⁸⁾].

この表で、長さのうち、被害がところどころとぎれている場合は除いて連続したところを測定する。また、幅は平均値を用いる。そして F ナンバー と合わせ、FPP (ただし PP は長さとの順序) という表現でトルネードのスケールを表わす。

3.2. たつ巻の分布

アメリカのトルネードは、数においてもそのスケールにおいてもものすごいものがある¹¹⁾。

第1図によると、62年間に195 (年平均3約) のトルネードが発生したところもある。このうち、第2図では6年に1回は F4+F5 級のが襲来したという。

日本においては、第3図¹²⁾¹³⁾、第4図¹⁴⁾、第5図¹⁰⁾のようになっていて、関東地方には比較的によくのたつ巻

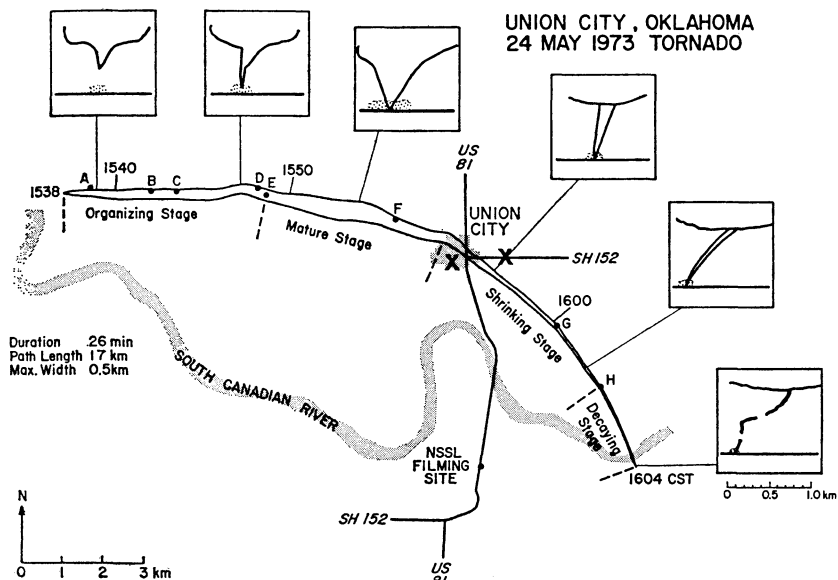
が発生している¹²⁾¹³⁾。

また、ハリケーンや台風に伴った例としてはその進行方向による分布図 (第6図)¹⁵⁾があり、東京の北方地域のたつ巻については詳しい研究がある¹⁶⁾¹⁷⁾。

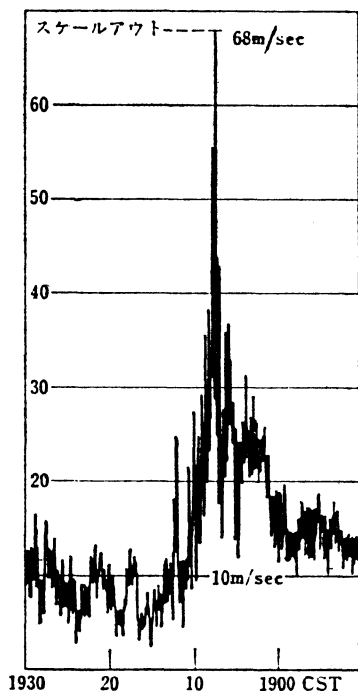
3.3. たつ巻と総観場

たつ巻 (トルネード) は、暖気たつ巻と寒気たつ巻に大別される¹²⁾。暖気たつ巻は暖気の突入により起こるが、これには、①台風、②発達した低気圧、③温暖前線に伴うたつ巻 がある。また寒気たつ巻は、①寒気の急激なあふれ出し、②上層の寒冷うず によって発生するものである。

これらの例として、暖気たつ巻の② (第7図) と寒気たつ巻の② (第8, 9図) を掲げる。第9図では、500



第11図 オクラホマ州ユニオン市のトルネード (1973年5月24日) の被害経路 [南から見たルート雲のスケッチ. A~Hは被害を受けた農場, ×は主経路の外側の被害地を示す]¹⁹⁾.



第12図 ミシガン州ツカムサで記録したたつ巻の風¹⁰⁾ [1965年4月11日, 風速計の地上高は7m].

mb の強風軸は日本海側に位置し, 日本は全般に南西の風が強かった. そして, 地上前線の位置が数日前よりこの時期としては北上し, 日本列島の内陸部に入っていた.

第8, 9図では, 500 mb の寒冷うずの移動に伴って対流性悪天候の地域も移動することを示す. これらの図では鉛直構造は示されていないが, 不安定性が広範囲に期待される.

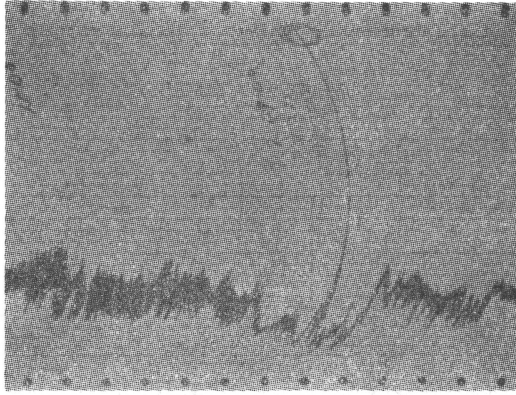
いずれにせよ, 第2章でも述べたように, 寒冷前線前面のスコールラインのような収束・不安定域内で発生することが知られる.

3.4. たつ巻の移動

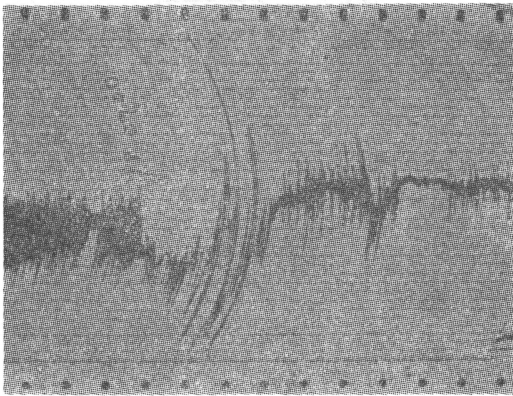
個々のたつ巻の被害域や移動状態を詳細に記録したら龍大この上もない. ここでは, アメリカの近頃の代表的な例を二つ挙げる.

一つは, 1970年5月11日のテキサス州ラボックのトルネード¹⁸⁾である. これは, 第10図に示すように彎曲した移動経路と円弧状の被害域が顕著である. これについては後でも示す.

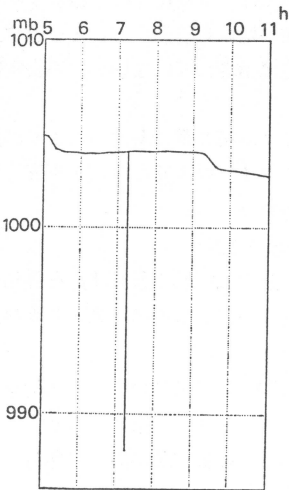
また, 1973年5月24日のオクラホマ州のユニオン市のトルネードを第11図に示す. Fスケールは1(A点)~5(H点)であった¹⁹⁾.



(a)



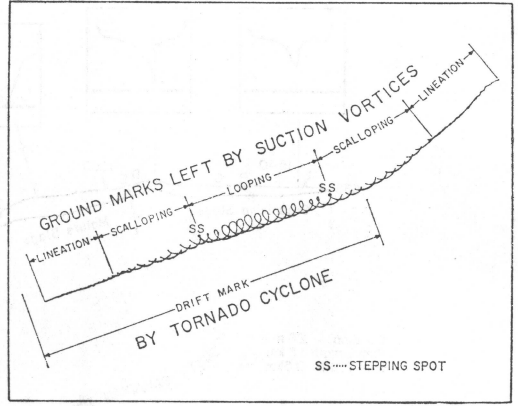
(b)



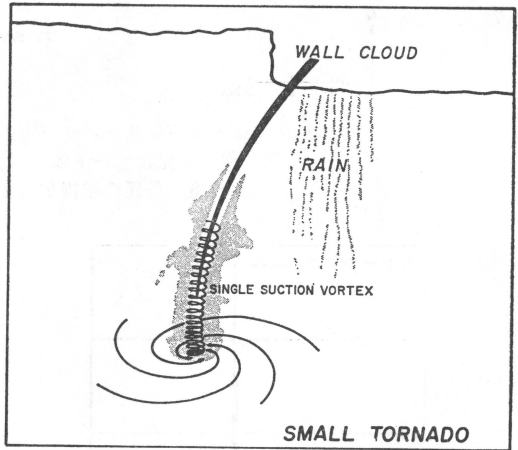
(1974.7.8 剣崎)

(c)

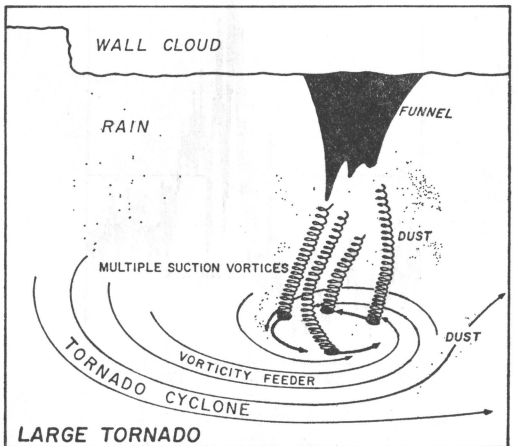
第13図 剣崎灯台のたつ巻の記録²⁰⁾ [1974年7月8日].



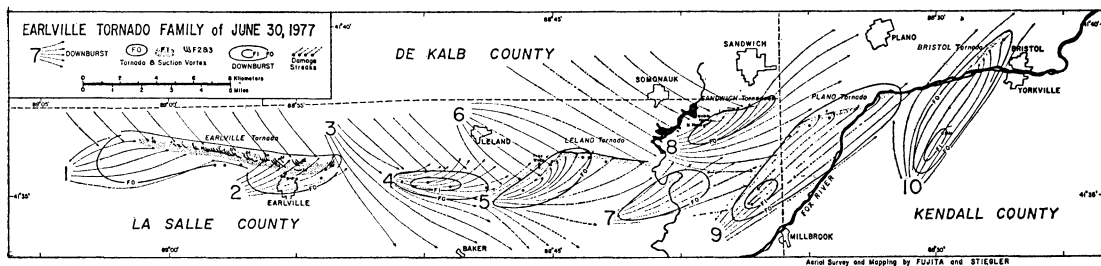
第14図 典型的な地表の被害マーク²²⁾.



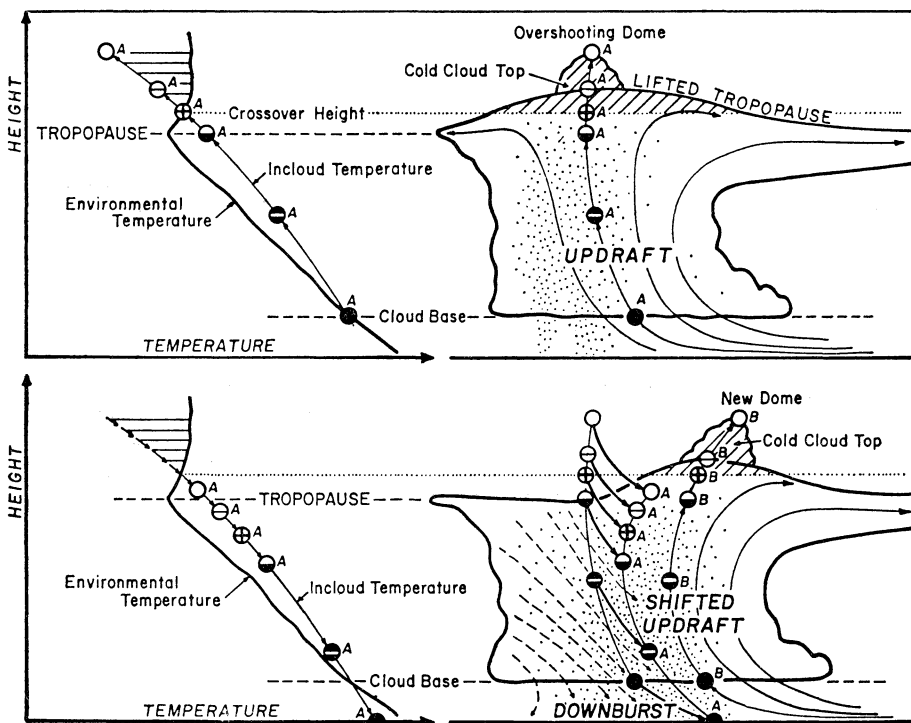
第15図 単一吸引渦をもつ、小トルネードとウォール雲¹¹⁾.



第16図 数個の吸引渦をもつ大きなトルネード図¹¹⁾.



第17図 5個のトルネード群 (左側はねじれのダウンバースト、若干のトルネードはダウンバーストによって生じる²⁴⁾ [1977年6月30日, アールビル].



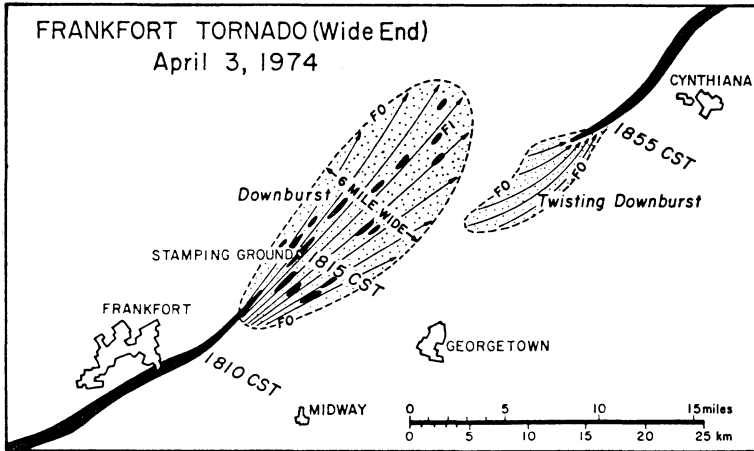
第18図 藤田のダウンバースト雷雲モデル (このモデルで、クロスオーバー高度以上に持ち上げられた寒気の位置のエネルギーは、それが下降流の運動のエネルギーに変換される時、急激に減少する仮定に基づいている。1978年6月25日のブラック・サンデー・ストームの一つは、雲の全雲層を貫いて強い下降流があったことを示す)¹¹⁾。

このほか、複合たつ巻またはたつ巻群についても多くの研究がある。

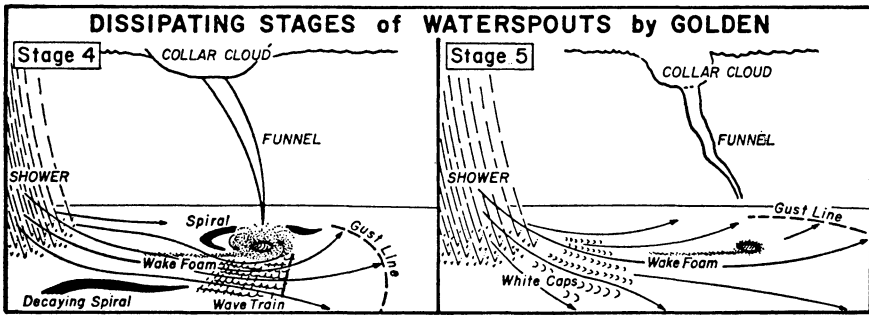
いずれにしても、たつ巻は図のようにサークロイドまたはトロコイド状に移動することがあるし、スキッピングと言って、とびとび進む例もある。

3.5. たつ巻の時の地上気象観測

たつ巻は、いわゆる突風とその越ぎを異にしているので、単発的強風が急激に吹く。たとえば、第12図に示すように、それまでの風速の数~10数倍の風が急に吹き出す。第13図の剣崎燈台²⁰⁾や豊橋²¹⁾の例では、極めて顕著



第19図 フランクフォート・トルネードの作図 (1974年4月2日, 終端幅6マイル)²⁴⁾.



第20図 たつ巻の終期と衰弱期²⁴⁾.

な風速の変化が見られた。風向にも、約20分の間には大幅な変化があった。さらに、気圧の記録にも急激な16 mbの減少があった²⁰⁾。

その他、地上気象に欠くことのできないレーダ観測については後に述べる。

3.6. 吸引渦とたつ巻低気圧

第10図にも見たとおり、藤田²²⁾はこのような被害調査より吸引渦 (suction vortex) の概念を提唱した。これは、第14図にも示されるように航空機観測によるランドマークから考えた概念である。これに対して彼は、たつ巻低気圧 (たつ巻自体とは一応区別すること) 中の単一または複合の吸引渦を考えた。そのモデル図は第15, 16図の通りである。ただし、果たしてこのような被害より類推した立体図が実在するか否か、吸引とは単な

る収束 (そして上昇) なのか、このモデルを検証すべきより詳しいデータと解析が今後要望されよう。

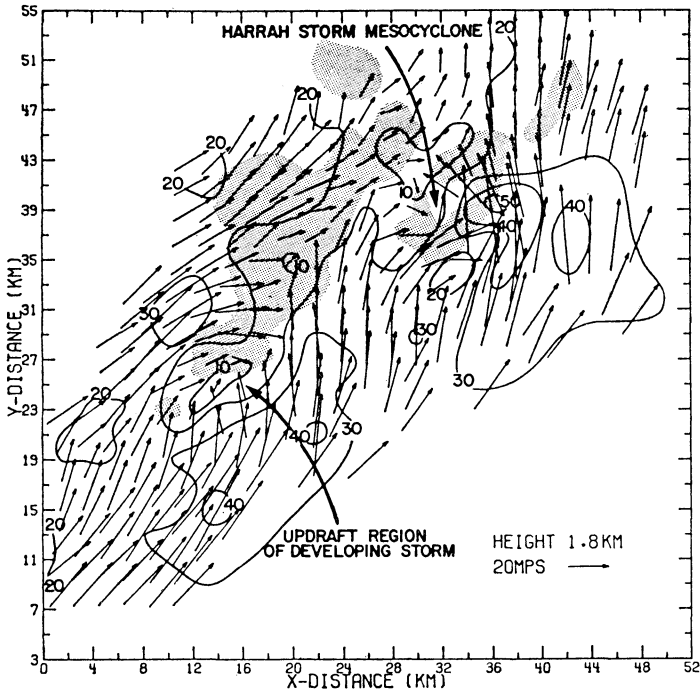
3.7. 複合たつ巻

複数の吸引渦が実際あるとすれば、複合たつ巻を意味する。これは、Agee *et al.*²³⁾等によってトルネードファミリーと呼ばれるものに相当すると思われる。藤田¹⁰⁾は、このファミリーにも左まきや右まきが共存していると言う。いずれにしても、個々のたつ巻は大きな数十 km の直径をもつたつ巻低気圧の中に存在する。

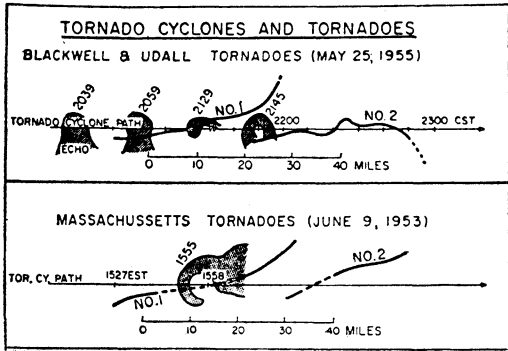
4. 最近のたつ巻構造論

4.1. ダウンバースト (下降流突風 [仮称])

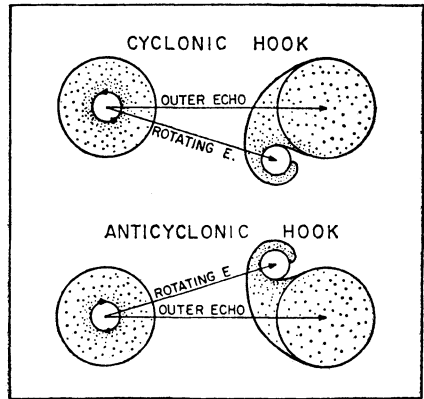
ダウンバーストとは、強い雷雲に伴う激しい下降流突風である。これは、たつ巻の発生と関係し、ダウンパー



第21図 地面に対する風の場の解析 (1.8 km 高度, 2 km グリッド, 1974年6月8日16時05分 CST. 等値線は水平風速 m/sec, ノルマンレーダ反射能 ≥ 50 dBZ が点画されている)²⁷⁾.



第22図 トルネード低気圧とトルネード家族の経路²⁹⁾. [1955年5月25日と1953年6月9日].

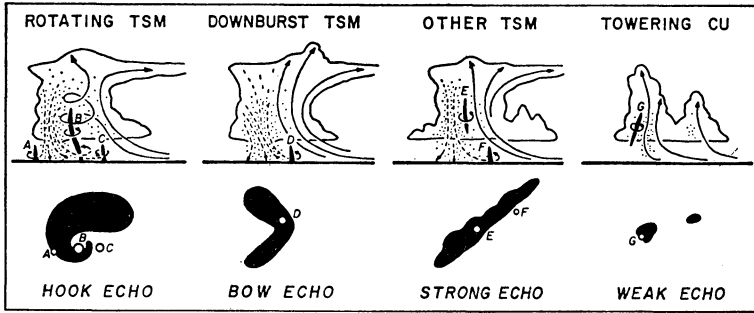


第23図 フックエコーのモデル²⁸⁾.

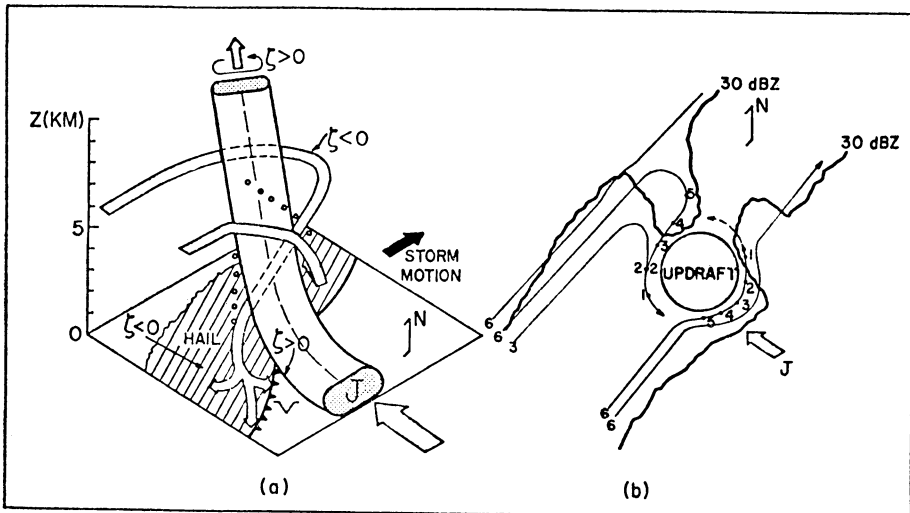
ストのあったときはたつ巻の発生する率が多い (約30%)。しかし、ダウンバーストのないときでもたつ巻は発生しているので、これが厳密な意味で必要・充分条件か否かは明確でない。

藤田²⁴⁾はダウンバーストに関連し、強い雷雲の中の上下流を次のように定義している。

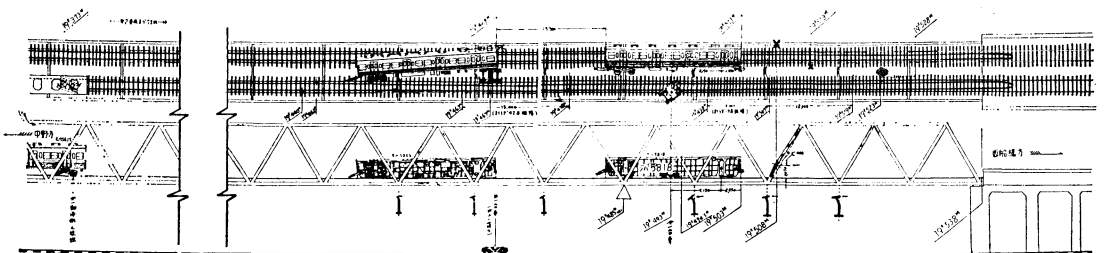
風の特性		地上の水平風速	
(中層の風)	(地上)	(40 mph 以下)	(40 mph 以上)
上昇	収れんと渦動	上昇流	トルネード
下降	発散と一般的直進	下降流	下降流突風〔仮称〕 (ダウンバースト)



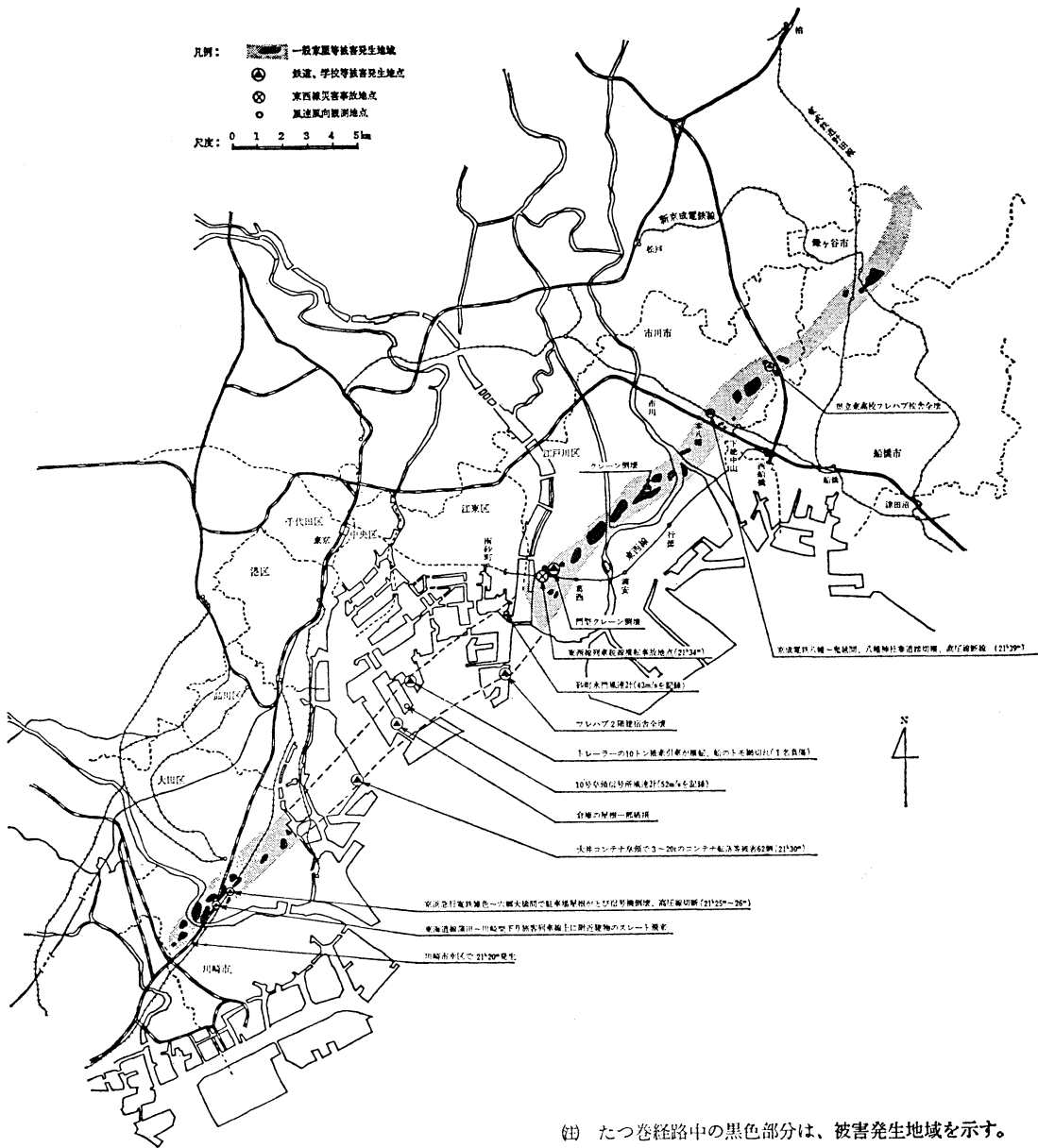
第24図 トルネードを生む親雲の四つの型¹¹⁾



第25図 ハラーストームの構造。(a)3次元気流で地表のハッチングは強い降水域, ○○○○印はひょうと降水軌跡。(b)下降する中層流の軌跡の平均図。高度は地上からの km で示す。上昇流の位置は 6.5 km, フロント面に沿う破線部では下降流が下層流と混合する³⁵⁾ [1974年6月8日]。



第26図 東西線荒川・中川橋梁上の列車災害事故現場状況図³⁷⁾ [1978年2月28日]。



(註) たつ巻経路中の黒色部分は、被害発生地域を示す。

第27図 1978年2月28日発生のだつ巻による被害状況概要図²⁷⁾。

また、藤田²⁴⁾は、たとえば第17図に示すようにダウンバーストとたつ巻群を解析し、個々の構造および分類をしている。

第18図は藤田の作った雷雲とダウンバーストのモデルであり、彼は圏界面におけるオーバーシュッピング・

ドームの変化とダウンバーストの出現を、ドツブラレーダその他の観測より図のように考えた。そして、圏界面から地表までストレートに届くモデルを画いた。しかし、佐々木²⁵⁾によれば、ダウンバーストは大気中層に侵入する乾燥空気の急激な下降²⁶⁾であると言われている。

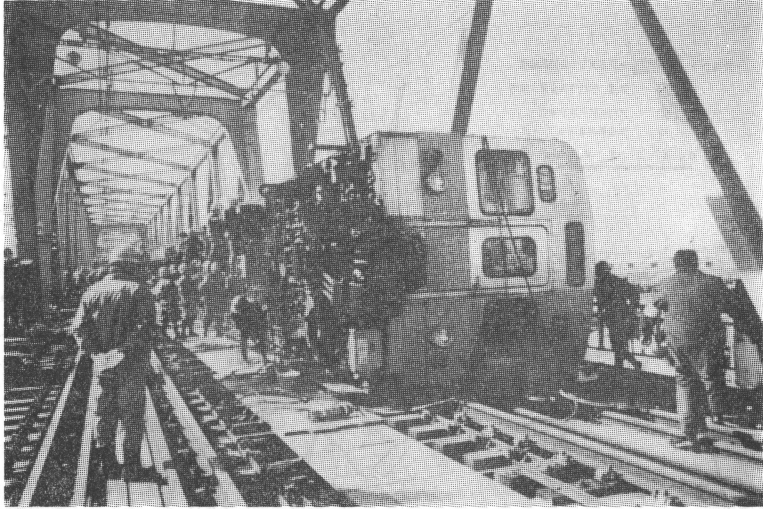
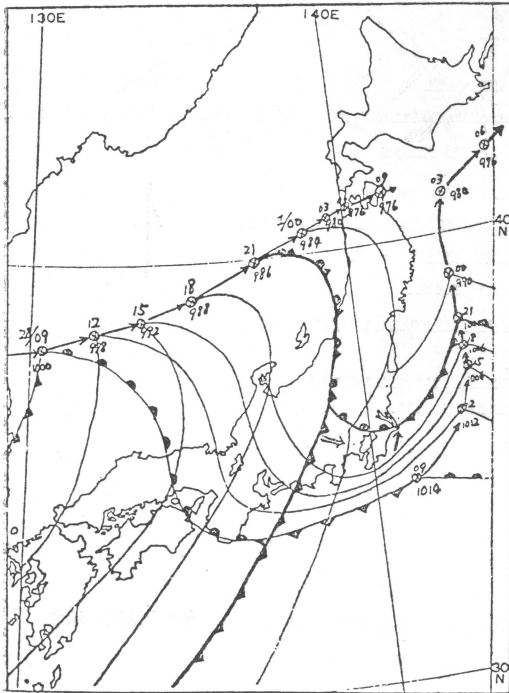
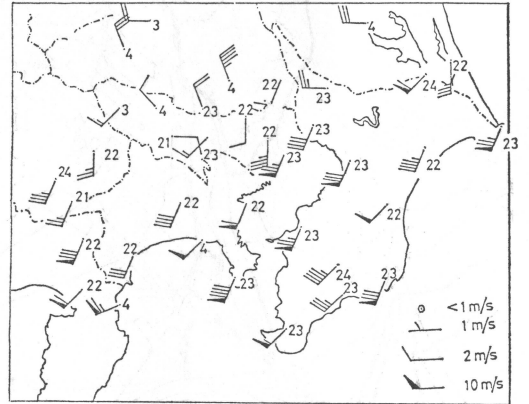


写真1 西船橋からみた災害車両と現場（第1車両）³⁷⁾.



(⊗: 低気圧の位置、数字は日時と中心気圧)
 (→: 寒冷前線の移動、←温暖前線の移動)

第28図 1978年2月28日の低気圧と前線の位置³⁷⁾.



第29図 関東地方最大風速分布図（数字は起時，
 2月28日20時～3月1日04時）³⁷⁾.

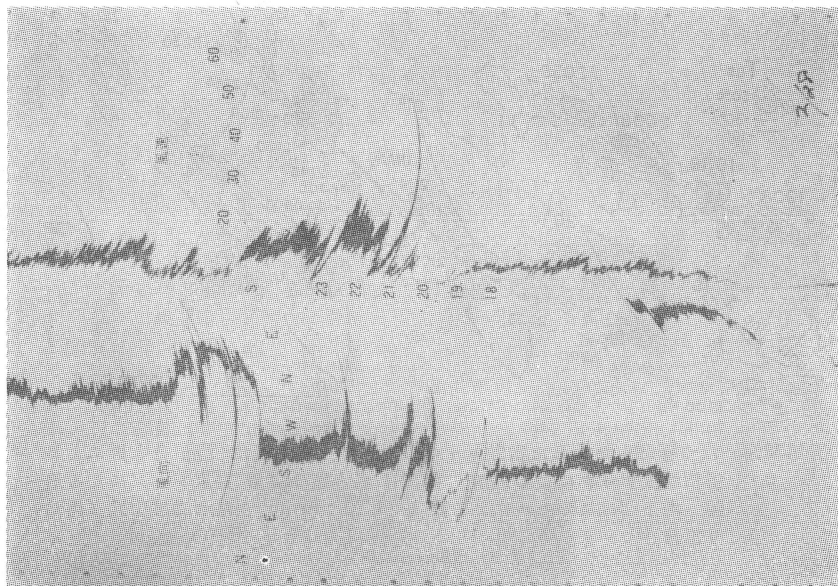
4.2. フックエコー

たつ巻の研究にレーダは欠かすことができない。とくに、2筒のドップラレーダによりじょう乱をめぐる立体解析ができる。第21図はその解析例である²⁷⁾。

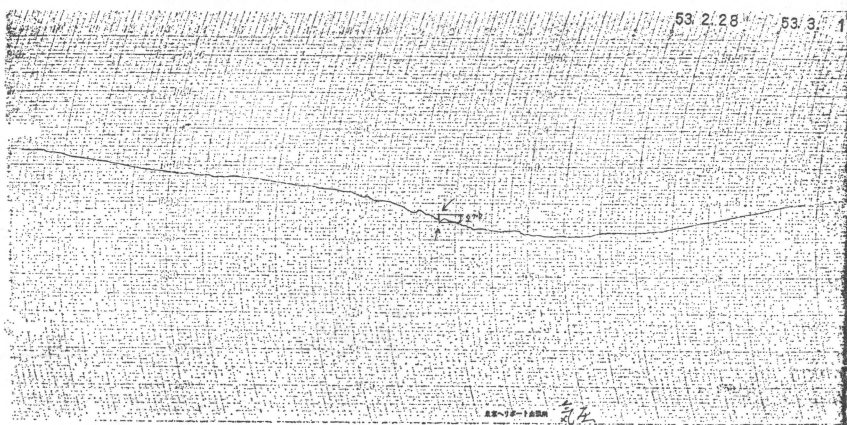
また、PPIでもエコーの中に鉤状のフック型が現われるとき、たつ巻は起こりやすい（第22、23図）²⁸⁾²⁹⁾。藤田¹¹⁾によれば、たつ巻のうち40%がフックエコー雷雲により発生しているという。

藤田¹¹⁾は、ダウンバーストとレーダエコー関係を分類した（図24）。

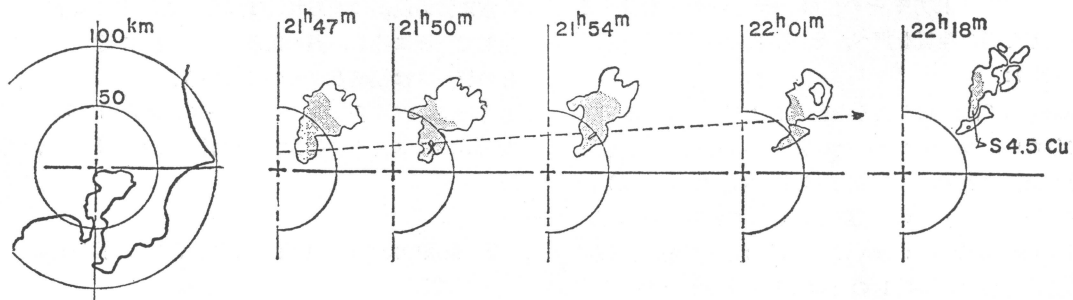
ダウンバーストに関係した藤田の研究²⁴⁾は、第19、20図にも示される。これは、被害城の綿密な調査により古いスケッチを改善したものである。



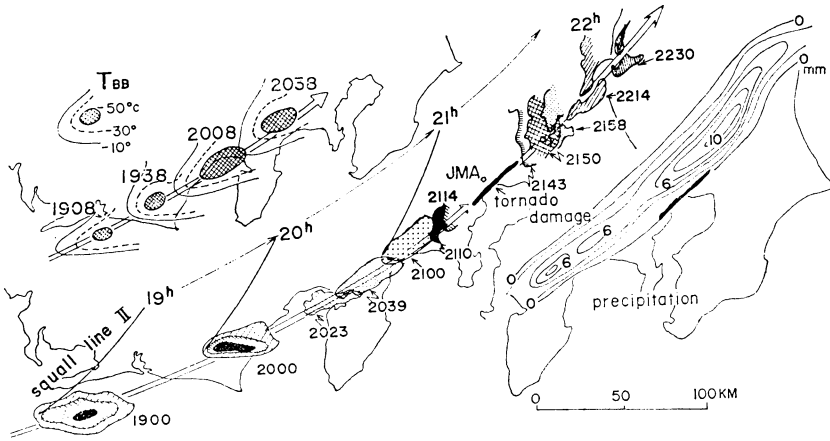
第30図 東京都東京湾管理事務所10号信号所における風向・風速の記録（風車発電式、地上高 31 m、最大風速 52 m/sec)³⁷⁾。



第31図 東京ヘリポート（被害地域内）の気圧変化³⁷⁾。



第32図 たつ巻を伴うエコーセルの移動 [21時50分 フックエコー発見]。



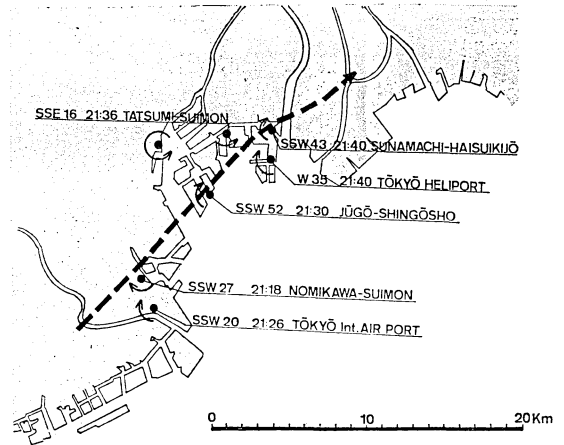
第33図 たつ巻をもたらした雷雲セルの移動追跡. 左上図は T_{BB} 分布図による雲頂温度データによる追跡. 中図は名古屋および東京レーダによる追跡. 右下図はこのセルによる降雨 (単位: mm) とたつ巻被害域 (黒塗り部分)³⁸⁾.

4.3. その他

たつ巻に関する古いモデルや研究³⁰⁾³¹⁾が日本にはあるが、この中の正野³⁰⁾によると、まず上層に強い風速の鉛直勾配をもった層 (渦度の層) ができ、この層の一部が不安定化して渦層の降下がはじまる。この際、不安定な大気中を管状となった気層が落下するので、下の方ほど速くなり、渦管はのび、半径がちぢみ、風速は増してくる。これがたつ巻であるという。

たつ巻の渦巻のこまかい構造論的解析には、たとえば Golden³²⁾ のような詳細な研究もある。また、理論的、実験的研究は最近とくに多く現われている。たとえば、Smith, et al.³³⁾ は鉛直の円柱のモデルを考え、底面は固定、側面は多孔質性、上面は鉛直方向に空気が流出するようにとった。気流は非対称性で上方には外から多孔質性の壁を通して空気が侵入して気流が回転するように考える。これは、単純な対流上昇を表現している。この外からの気流の入れ方やその他のパラメーターを変化させ、生じた渦の性質を調べ、それが底面まで達する条件を研究した。

Rotunno³⁴⁾ は、似たような仕事をよりパラメタライズして行ない、Swirl ratio なる量によって渦管の特性を計算した。これは、(回転円柱半径) × (inflow 循環) を $2 \times (\text{volume flow rate})$ で除したものである。その際、radial Reynolds number は 10^3 におさえてある。彼によると、この $\text{ratio} \ll 1$ のときはしっかりした渦が上方の隅でないとでき、1 に近づくと、隅の方に



第34図 たつ巻に伴う周辺の最大瞬間風速・風向と時刻および風の変化¹⁴⁾.

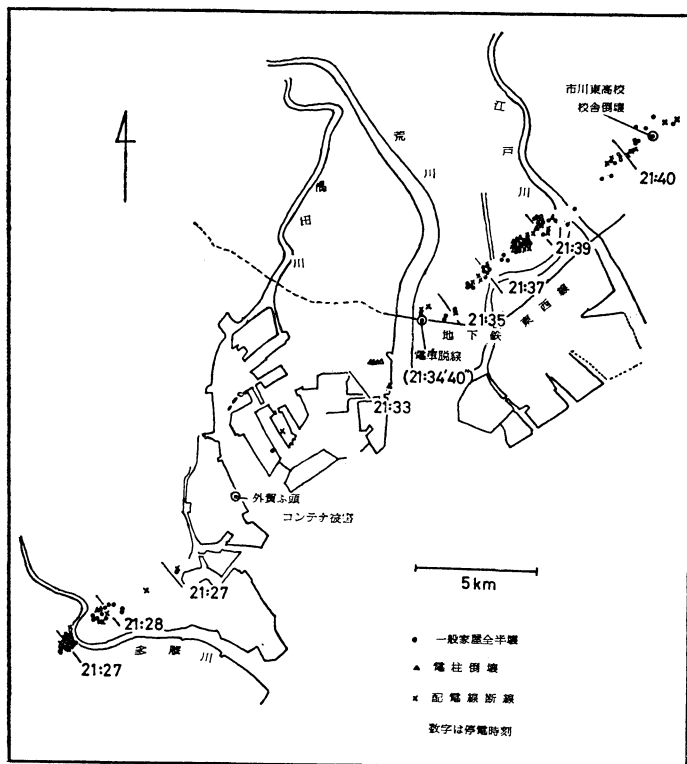
非常に強い渦がつくられ、1 になると、中央に下降流が生じて下面に達し、渦の破壊が境界層中に起こる。これらのデータは観測とよく似るといふ。

さらに、1974年のハラストームの流線図(第25図)³⁵⁾を掲げ、アメリカの巨大なたつ巻低気圧の構造を示す。³⁶⁾

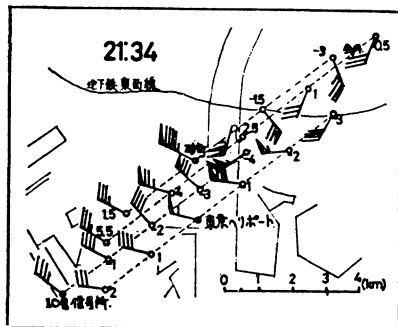
5. 東京のたつ巻 (1978年2月28日) の観測資料

5.1 被害

このたつ巻に関する詳細な報告³⁷⁾は別にあるので、こ



(a)



(b)

第35図 たつ巻の特性³⁹⁾ [被害状況と風の資料].

ここではその中より代表的なものに留める。写真1は東方より見た列車転覆の光景で、第26図³⁷⁾がその見とり図である。また、東京近郊の被害域は第27図に示され、川崎市（神奈川県）より鎌ヶ谷市（千葉県）にいたる長さ約30km、幅500~1,500mにわたっている。被害としては、家屋、自動車、船舶をはじめ多くのことが挙げられる。しかし、とくに著しいのは21時34分頃の東西線列車転覆事件である。列車は10両編成で全長200mであり、このうち最後尾2両（その自量は最後尾車27.6t、次のが36t）が転覆した。死者こそ出なかったが、乗務員と乗客合せて21名の負傷者が出た。

5.2. 気象状況

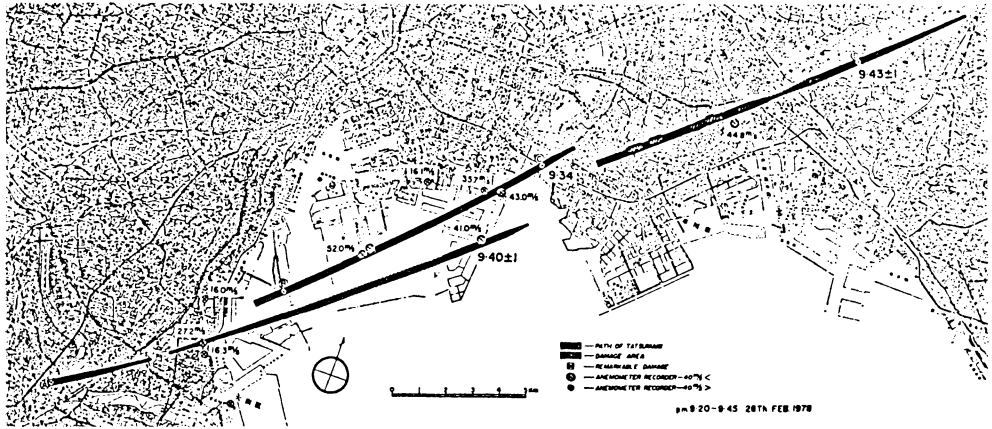
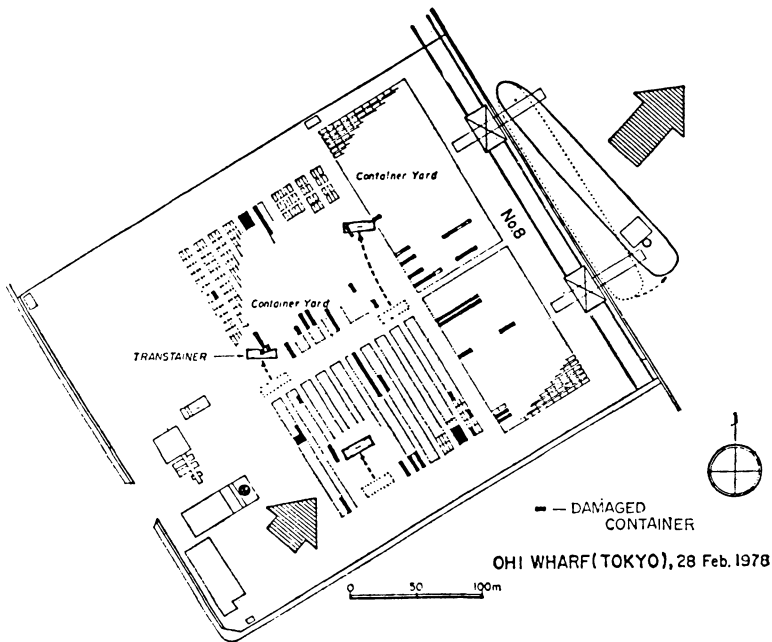
当日の天気図を見ると、発達中の低気圧が日本海を北東進し、それに伴う温暖前線が現場付近を通過し、寒冷前線前面のスコールラインの不安定・収束域においてたつ巻が起った。また、この付近に雷雨活動が活発だった（第28図）。また、アメダスデータによると、その夜、強風が上空の風で流され平均25m/sec位の速度で被害地を吹きぬけたことがわかる（第29図）。

その他、被害地域では顕著な風向・風速計の記録が2例得られた（砂町排水場と10号信号所）。そのうちの一例を第30図に示す。これによると、風速の方では21時30分頃、瞬間的突風が観測されている（砂町43m/sec、10号52m/sec）。また、風向の方では20~30分位のスケールで低気圧性の回転をしている風向変化が見られる。この風向変化のスケールは、じょう乱の進行速度が25m/secとするとその直径は約30~40kmくらいになる。これはたつ巻低気圧に相当すると考えられる。

また、被害域内の気圧計の変化は第31図に示すように2mbである。これはたつ巻低気圧内の観測値であり、もしたつ巻があったとするとその内部はおそらく数十mbの低気圧になっているであろう。

一方、当日はレーダ観測が行なわれていて、事故後であるが、第32図に示すようなフックエコーを観測している（21時50分）。

そのほか、事故現場から800m西にあった地上の風速計の記録を見ると、10分平均値であるが、事故当時、風は2m/secしか吹いていないことになるので、風の弱

第36図 群生と考えたたつ巻の通過図⁴¹⁾。第37図 大井埠頭の被害⁴¹⁾。

い状態が強い突風の近くで続いていたことになる。

この状態は事故後も約20分間続き、じょう乱の進行速度を 25 m/sec とすると、じょう乱は直径約 30 km に相当する。これは、他の観測からの推定と大体一致する。したがって、この記録をもとにたつ巻とたつ巻低気圧のモデルを考えると、たつ巻低気圧の進行方向左側半分にはかなりの風の下降域（弱風帯）と考えられる領域が広

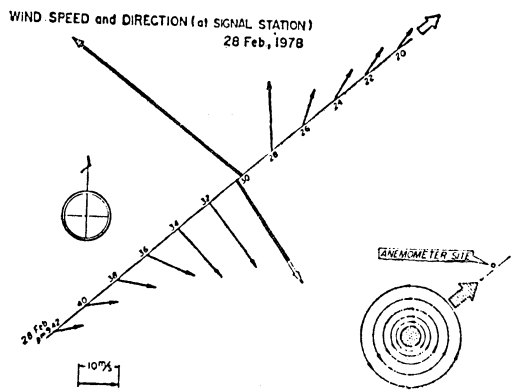
がっていたと推定される。

5.3. たつ巻の同定

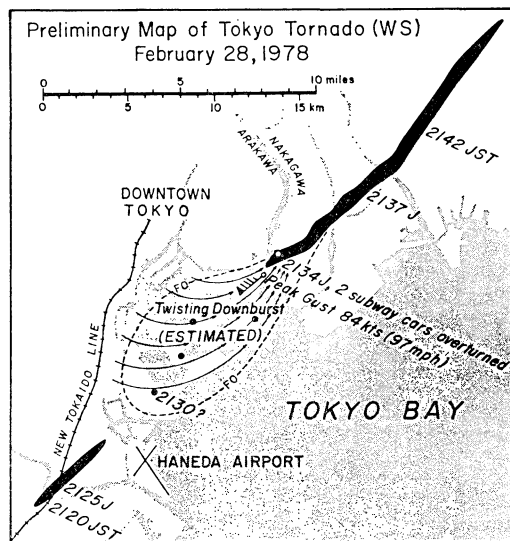
今回の突風は以上のような観測に基づき、次の理由でたつ巻と考えられた。

(1) 風向：風向はたつ巻低気圧に相当するスケール（直径約30～40 km）で反時計まわりに変化したこと。

(2) 風速：たつ巻低気圧中に極めて単発的で局地的な



第38図 風向・風速のベクトル表示⁴¹⁾



第39図 幅2～4マイルの推定旋回性ダウンバーストが先行した東京トルネードの図²⁴⁾

突風があり、過去のたつ巻の記録に類似していること。

なお、第39図のように現場の近くの風速計の変化については、数十分間、1～2 m/sec (10分間平均値)の弱い風しか吹かなかったことはたつ巻低気圧(直径約30～40 km)中の下降流による領域の通過とも推定される。

(3) 気圧：2 mb という、僅かであるが被害域およびその近くで2か所も気圧急変の記録があること。

(4) フックエコー：事故の直後、レーダがこのエコーをとらえていること。

(5) 被害状況：詳細な解析により、たつ巻の通過と思われる資料が数多く挙げられること。

以上の理由により、今回の突風は直径数十 km のたつ巻低気圧中に発生したたつ巻であることが考えられる。なお、そのモデルについては論文にて述べる。また、F ナンバーとしては F 1～2 程度であった。

5.4. 東京のたつ巻に関する諸研究

村松³⁸⁾は、静止気象衛星資料を含めた解析により、寒冷前線より進行方向 150～200 km 前方のスコールライン上に発生した雲域(直径 50～60 km で雲頂が -50°C 以下の低温域)は雨域とずれていて、その近くでたつ巻が発生したことを見出した。この雲域は、浜松のあたりより追跡しうる(第33図)。

宮沢他¹⁴⁾は、総観場等の解析を行ない、寒冷前線の前方の収束・上昇域においてたつ巻低気圧の存在を指摘した。これは、川崎より千葉県まで続いて通過したものである(第34図)。

光田他³⁹⁾は、風の記録を多く集め、被害状況の調査とから、たつ巻低気圧(直径約 20 km と推定)の存在と被害特性を調べた(第35図)。

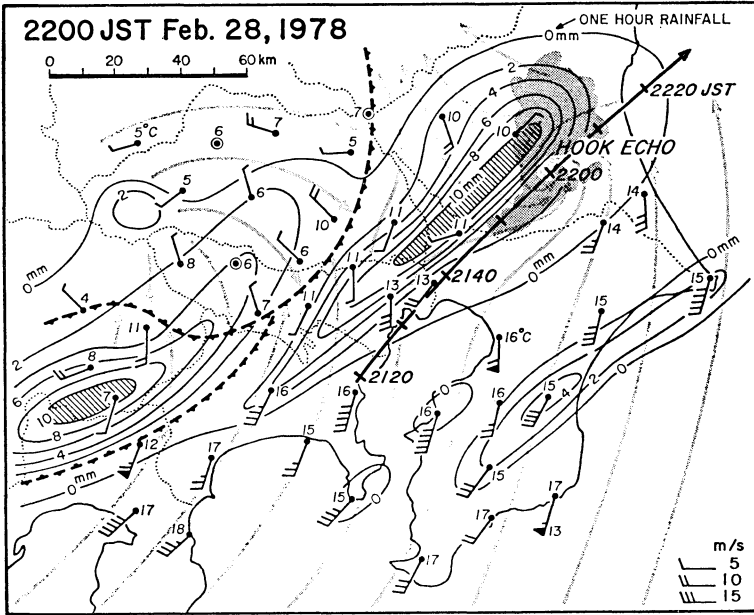
庄司他⁴⁰⁾は、当時のメソ解析を行ない、上層と下層の寒気と暖気の構造や 10 km メッシュの発散、うず度などを調べた。

相馬⁴¹⁾は、風と被害状況を綿密に調べ、たつ巻の存在を認め、さらにたつ巻の通過時刻を厳密に被害資料によりチェックし、3箇の群生たつ巻であると推定した。また、10号埋立地信号所の風の記録から風のベクトル図をつくり、一方ランキンを仮定した時の風の変化図との比較により、たつ巻中心が信号所付近を通過したと考えた(第36, 37, 38図)。第39図の風の系統的変化は22分にも及び、進行速度が 25 m/sec とすると全体の大きさは 33 km φとなる。

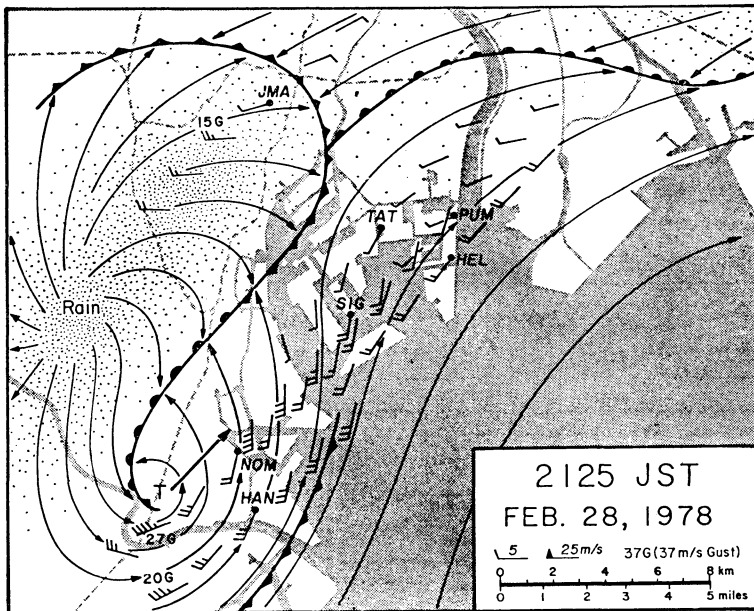
藤田²⁴⁾は、ダウンバースト論を東京のたつ巻に適用し、第39図のようなねじれのダウンバーストモデルを作った。また、地上の風、雨量、気温、被害の観測から第40～44図のようなたつ巻低気圧通過のモデルを作成した⁴²⁾。

6. おわりに

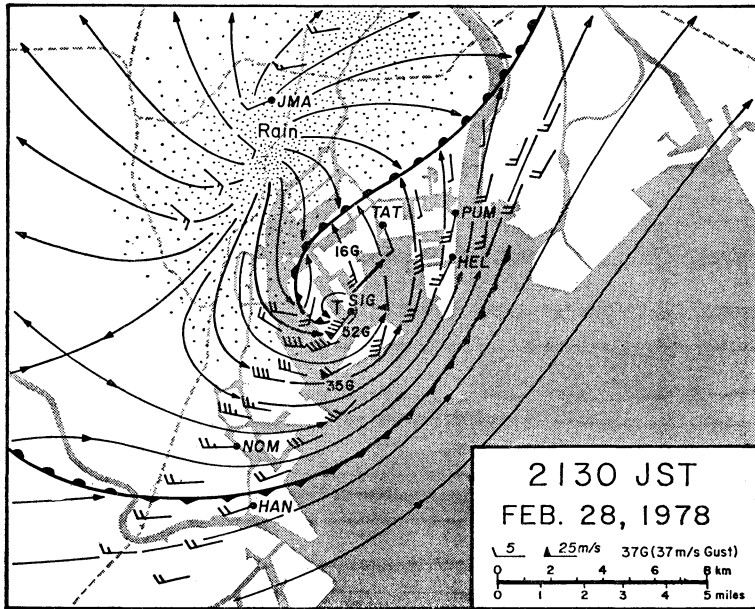
以上のように、たつ巻(トルネード)の概観と、最近の研究、および東京のたつ巻の研究を述べた。しかし、たつ巻の文献はこれ以外にたいへん数多いし、とくに理論的モデルは目下多くの研究者によって研究されつつある。



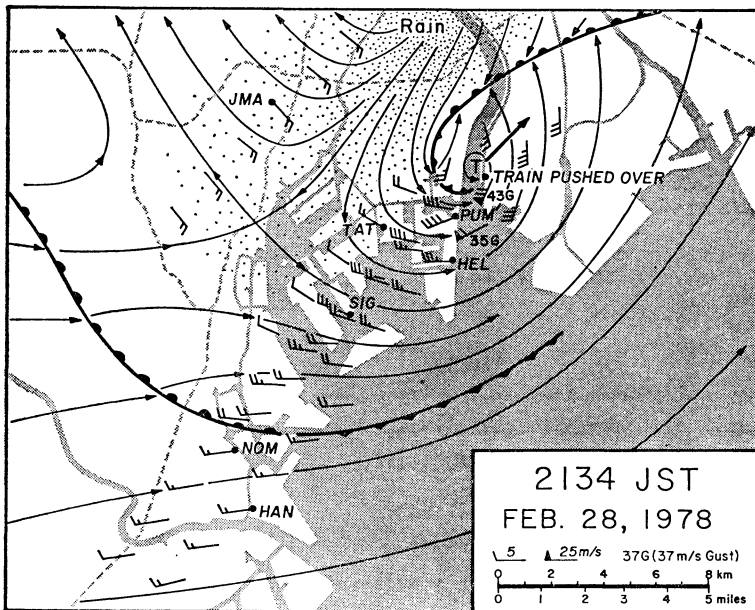
第40図 東京付近の気象状況 (その1)¹²⁾.



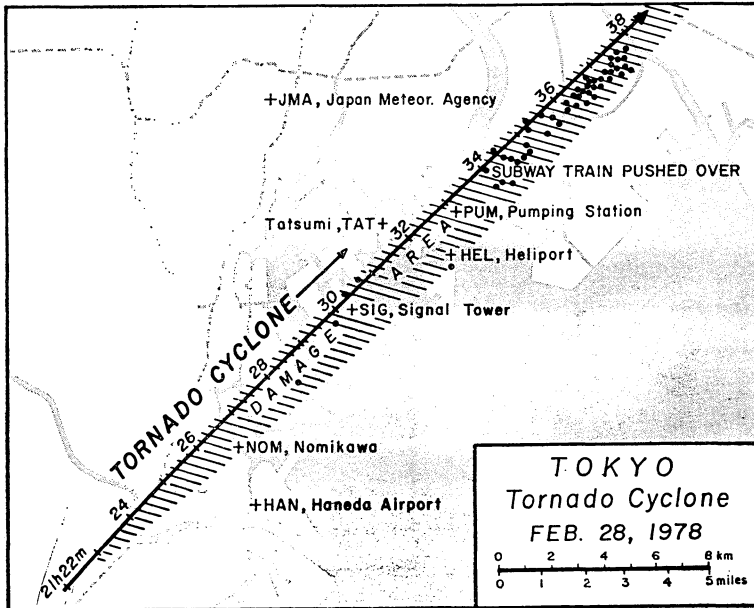
第41図 同前 (その2).



第42図 同前(その3)⁴²⁾



第43図 同前(その4)⁴²⁾

第44図 同前(その5)⁴²⁾

また、東京のたつ巻についても、まだ考えねばならぬことも多いと思う。著者は他の研究者と協力して、列車転覆に関するたつ巻の工学的モデルを別途作成した。

この解説が今後のたつ巻研究に少しの有益な助けとなれば幸いである。

謝辞

この解説と調査を行なうに当たっては、たいへん多くの方々の御世話になった。

シカゴ大学の藤田哲也教授、オクラハマ大学の佐々木嘉和教授には専門家としての貴重な御意見と、文献等の御援助をいただいた。また、国内では京都大学防災研究所の光田寧教授、相馬清二博士、気象庁予報課の宮沢清治主任予報官、衛星センターの村松照男技官などの御意見と御援助、気象大学校荒川正一助教授、甲府地方気象台島田守家台長、東京管区気象台技術部大石正二調査課長、熊谷地方気象台杉本豊台長、気象庁観測部測候課徳植弘風洞係長などの御意見や御援助をいただき感謝にたえない。ここにあつく御礼申し上げたい。

文献

- 1) 気象庁. 1962: 第2～4次突風協同観測報告, 福岡管区気象台, 長崎海洋気象台, 第7管区海

上保安本部, 気象庁技術報告. 13, 1-433.

- 2) 東京管区気象台技術部調査課, 1972: 東京湾突風調査報告書(中間報告), 1-48.
- 3) Tepper M. 1950: A proposed mechanism of squall lines: The pressure jump line, *J. Met.*, 7, Feb. 21-29.
- 4) 荒川秀俊, 堤敬一郎, 1975: 昭和43年飛騨川バス転落事故当時のスコール(突風), 日本気象学会春季大会予稿集, 114.
- 5) Arakawa, S., 1969: Climatological and dynamical studies on the local strong winds, mainly in Hokkaido, Japan, *The Geophysical Magazine*, 34: 359-425.
- 6) 石崎潑雄, 光田 寧他, 1971: 1970年彦根付近を襲った強風とそれによる被害について, 京都大学防災研究所年報, 14A, 469-480.
- 7) Ishizaki, H., Y. Mitsuta, *et al.*, 1971: Disasters caused by severe local storms in Japan, *Bull. Disaster Prevention Res. Inst. Kyoto Univ.*, 20, Mar. 227-233.
- 8) Freeman, J.C. 1952: The solution of nonlinear meteorological problems by the method of characteristics, *Compendium of Meteorology*, 421-433.
- 9) Abdullah, A.J., 1966: The spiral bands of a Hurricane: A possible dynamic explanation, *J. Atm. Sci.*, 23, 367-375.

- 10) 藤田哲也, 1973: たつまき(上), 共立出版, 科学ブックス.
- 11) Fujita, T.T., 1978: Workbook of tornadoes and high winds for engineering applications, Satellite and Mesometeorology Research Project, No., 165, 17-60.
- 12) 島田守家, 1977: 日本のたつ巻について——その概要, 測候時報, 44, 6-7号, 187-196.
- 13) 今井一郎, 相馬清二, 1972: 日本におけるたつ巻とその研究の概要, 日米天然資源開発利用会議・耐風耐震構造専門部会第4回合同部会, 22-52.
- 14) 宮沢清治他, 1978: 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), 昭和53年9月, 災害科学研究会, 気象部会, 1-36, および日本気象学会秋季大会講演, 251.
- 15) Fujita, T. *et al.* 1972: Typhoon-associated tornadoes in Japan and new evidence of suction vortices in a tornado near Tokyo. *J. Met. Soc. Japan*, 50, 430-453, および Satellite and Mesometeorology Research Project, 1-42.
- 16) 土屋 清, 島田守家他, 1971: 台風13号に伴ったトルネードの気象調査, 日本気象学会秋季大会予稿集, 68.
- 17) 渡辺和夫, 土屋 清, 1971: 台風に伴って東京地方に発生した強烈なトルネード, 同上, 69.
- 18) Fujita, T., 1970: Lubbock Tornadoes of 11 May 1970. Satellite and Mesometeorology Research Project, 88. 1-28.
- 19) Golden, J. H., *et al.*, 1978: The Union City tornadic storm. *Mon. Wea. Rev.*, 106, 3-61.
- 20) 横浜地方気象台, 1977: 1974年7月8日剣崎燈台のたつまきについて, 測候時報, 44, 197-200.
- 21) 石崎澄雄, 光田 寧他, 1971: 1969年12月7日, 豊橋市を襲った「たつまき」に関する調査報告, 京都大学防災研究所年報, 14A, 481-500.
- 22) Fujita, T.T., *et al.*, 1976: Close-up view of 20 Mar. 1976 Tornadoes: Sinking cloud tops to suction vortices, *Weatherwise*, 29, 116-131.
- 23) Agee, E.M., J.T. Snow and P.R. Clare, 1976: Multiple Vortex Features in the Tornado Cyclone and Occurrence of Tornado Families, *Mon. Wea. Rev.*, 104, 552-563.
- 24) Fujita, T.T., 1978: Manual of downburst identification for Project NIMROD. Satellite and Mesometeorology Research Project, No. 156, 68-77.
- 25) Sasaki, Y., 1979: private communication.
- 26) Zipsper, E.J., 1977: Mesoscale and convective-scale downdrafts as distinct components of squall-line structure. *Mon. Wea. Rev.*, 105, Dec. 1568-1589.
- 27) Brandes, E.A., 1977: Gust front evaluation and tornado genesis as viewed by doppler rader, *J. App. Met.* 16, 333-338.
- 28) Fujita, T.T. 1965: Formation and steering mechanism of tornado cyclone and associated hook echoes. *Mon. Wea. Rev.* 93, 67-78.
- 29) Stout G.E., and F.A. Huff 1953: Radar records Illinois tornado genesis, *B.A.M.S.*, 34, 281, 284.
- 30) 正野重方, 1958: 気象学総論, 地人書館, 279-283.
- 31) 高橋浩一郎, 1969: 総観気象学, 岩波書店, 248-253.
- 32) Golden, J.H., 1974: The life cycle of Florida Key's water-spouts, I, *J. App. Met.*, 13, 676-692.
- 33) Smith, R.K. and L.M. Leslie, 1978: Tornadoogenesis, *Q. J.R.M.S.*, 104, 189-199.
- 34) Rotunno, R., 1979: A study in tornado-like vortex dynamics, *J. App. Met.*, 36, 140-154.
- 35) Heymsfield, G.M., 1978: Kinematic and dynamic aspects of the Harrah tornadic storm analysed from dual-doppler radar data. *Mon. Wea. Rev.* 106, 233-253.
- 36) Barnes, S.L., 1978: Oklahoma thunderstorms on 29-30 April 1970. Part III: Tornado characteristics inferred from damage tracks, *Mon. Wea. Rev.* 106, 697-704.
- 37) 東西線列車災害事故対策研究報告書, 昭和54年3月, 帝都高速度交通営団東西線列車災害事故対策研究委員会.
- 38) 村松照男, 1979: GMS, レーダ, アメダスシステムによるスコールラインとたつ巻の解析——1978. 2. 28 東京のたつ巻に関して——
天気, 26, 399-411.
- 39) 光田 寧他, 1978: 1978年2月28日に東京地方を襲ったたつ巻について, 第5回構造物の耐風性に関するシンポジウム講演および日本気象学会秋季大会講演, 252.
- 40) 庄司 亮, 森 俊八, 1979: 1978. 2. 28 東京地方の強風のメソ解析, 日本気象学会, 航空気象月例会, 1979年2月23日.
- 41) 相馬清二, 1978: たつ巻ならびにその同類現象について, 第5回構造物の耐風性に関するシンポジウム.
- 42) Fujita, T.T., 1979: private communication.