

1978年2月28日に東京地方を襲った竜巻について

光 田 寧・文 字 信 貴
岩 谷 祥 美・西 岡 淳 一

ANALYSIS OF TATSUMAKI IN TOKYO ON FEBRUARY 28TH, 1978

By Yasushi MITSUTA, Nobutaka MONJI,
Yoshiharu IWATANI and Junichi NISHIOKA

Synopsis

In the evening of Feb. 28th, 1978, strong wind caused severe damages in the area along the northern coast of Tokyo Bay. The damages were distributed in a straight belt area for 40 km long and 0.4 km wide. Most outstanding damages of all were that a train was turned over on the bridge, and that a prefabricated one-story school building was lifted and carried for about 20 meters. There are many meteorological observatories around damaged area, and wind speed distribution around the Tatsumaki could be composed from meteorological informations.

1. は じ め に

1978年2月28日の21時から22時の間に神奈川県川崎市から東京都大田区、江東区、江戸川区を経て千葉県市川市、鎌ヶ谷市に至る40kmほどの間で幅数百mの細長い範囲で強風による被害が発生した。被害総計についてみれば、家屋の全壊は10戸以下であり、死者も出なかったことなどから大きな災害であったとは言えないが、被害の中には走行中の電車が横転したというものや、学校校舎が全壊したものなどが含まれており、もしその発生時刻が不運な時刻に当たれば多大な人命損失につながる可能性のあったものであり、しかもほとんど予測の出来なかった現象であったことから注目に値する。今後このような現象による大災害の発生を予防するためにも、今回の災害についてよく調べておく必要が感じられた。そこで著者等はこの被害発生の翌日から調査に着手し、残された各種の記録に基づいて解析を行った。

この被害の発生した場所は高潮対策および公害対策などの目的で比較的多くの点で気象観測が行われている地域であり、現象に関連のある自己記録を比較的多く入手することが出来た。この点で過去におけるこの種の災害の場合とは著しく異っている。

今日まで日本におけるこのような Severe Local Storm の研究はその頻度が低く、被害総額が少ないこともあってほとんど組織的には行われておらず、従って防災対策は全く考えられていない。しかし、最近の社会活動の複雑化と共に原子炉や高圧ガスタンク、パイプ網あるいは超高压送電線などたとえ1ヶ所でも破壊されると大きな社会的影響を生じる構造物が作られるようになって来ており、発生確率の非常に小さい現象に対しても対策を考えねばならなくなっている。従って、今回のような機会に詳しい研究を行うことは大きな意味を持っていると思われるので、出来る限り、得られた観測資料を用いて解析を行った。

今回の現象は夜間に生じたことでもあり、現象を遠くから見た人もいないので、竜巻を特徴づける現象は確認されておらず、従来の我国で見られた竜巻の被害の跡に比して幅も広く、長い距離にわたっているために、これを竜巻と断定することに疑問を持つ人々も多かったが、本文中にも示したような多くの理由で竜巻であったと考えるのが適当であると思われる。

大規模気象現象との関連については気象庁村松氏による研究¹⁾が発表されており、建築物の被害については建設省建築研究所による調査がなされている²⁾。また、高速鉄道の事故に関する調査委員会も作られ調査がされており、他に色々な立場からの調査がなされている^{3) 4)}。著者等の研究はこれらの調査が行っていない風の記録に基づいた竜巻に伴う風の分布の解析にも重点が置かれている。

2. 1978年2月28日の気象条件

この日には低気圧が発達しながら日本海を東北東進しており、21時には日本海東部 (40°N, 137°E) にあって 988mbにまで中心気圧が下がっていた。21時の地上天気図、及び850mb 面天気図は Figs. 1, 2 に示す通りである。気象庁の解析によれば³⁾ 20時45分頃大手町の東京管区気象台の位置を温暖前線が通過し、23時すぎに寒冷前線が通過している。従って21時過ぎに東京付近は低気圧の暖域内にあった。低気圧が日本海にあった関係で東京では28日には比較的气温が高く、最高気温 15.7°C、最低気温 4.7°C、平均気温 9.5°C でいずれも平年値に比して 5.2°C、3.4°C、3.8°C 高かったし、夜間にかかわらず、暖域内にあった21時頃は約 12°C と気温が高く、最高気温は寒冷前線通過直前の22時30分に発現している。

またこの低気圧はこの年の春の低気圧としてはよく発達したものであり、西日本に近い間から各地で風が強く、新幹線が止まったり、各地で風による被害が軽微ながら出ている。従って各地で強風注意報が出されていたことは当然である。その上にこの竜巻が発生したのであるから、最初は他と同様に前線通過などによる風であると考えられたのも致し方ないことである。

気象庁気象衛星センター村松氏の解析¹⁾によると静止衛星による赤外領域での観測が、たまたま当日夕方から20時38分まで30分間毎に行なわれていたが、この低気圧の暖域内の寒冷前線の前面に squall line と呼べるような雲の列があり雲頂は-50°C、すなわち対流圏の頂部にまで達していた。そしてこれは system の動

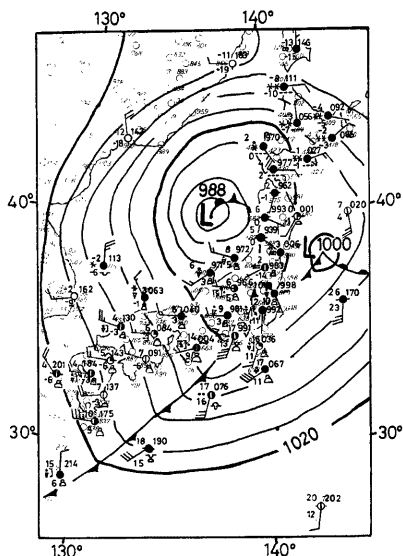


Fig. 1. Surface weather chart, 21 JST., Feb. 28, 1978.

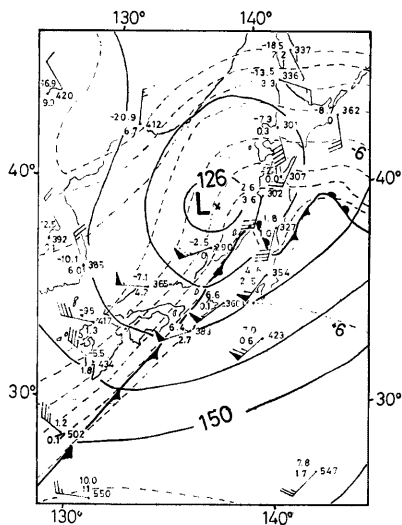


Fig. 2. Upper air (850 mb) chart, 21, JST., Feb. 28, 1978.

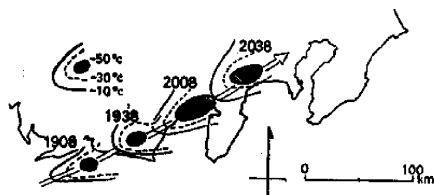


Fig. 3. Movement of one of the Cb. cells in prefrontal squall line as observed through IR channel of G. M. S. after Muramatsu¹⁾.

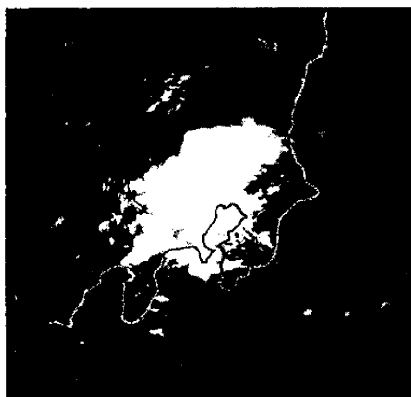


Fig. 4. PPI Radar echo as observed by Tokyo Radar at 20h39m JST, Feb. 28, 1978.

きと共に東に動いて行ったが、中でもその中に位置した一つの積乱雲群と見られるものは Fig. 3 に示すような動きを示しており、この動きを外挿すれば21時過ぎ頃には京浜地区の上に達していたものと推定出来る。

一方、東京管区気象台のレーダ写真の内、人工衛星の観測のある時刻に最も近い20時39分のを Fig. 4 に示すが、この写真で見るとまとまった雨域が箱根山付近にあり、Fig. 3 で見られる人工衛星から見た雲頂の位置と比較すると多少南西側にずれている。そのずれは20km 前後であり、ずれる方向はほぼ Fig. 2 に示した 850mb 面あるいはそれ以上の風向と一致しており、レーダが1000~2000m ぐらいのところの水滴を見ていることを考えると、積乱雲群の雲頂とその下の降雨域が風向方向に傾いていたのが知られる。この雨域は次第に北東進し21時半頃には東京管区気象台で強い雨を降らせている。その降雨強度は 50mm/hr 以上に達している。気象台付近においては周辺の地面反射のためレーダによる雨域の追跡は困難であるが、21時40分頃には雨域は北東方向に抜け出して判別可能となり Fig. 5 に示した21時50分頃には雨域は取手付近に進み、しかもその中央部に小さな雨域の穴が見られる(矢印)。この黒点は後で述べるように被害等から解析した竜巻の位置に相当し、これが竜巻中央部の下降気流域に対応するものであると判断される。この黒点は21時45分には大きくなって行き22時過ぎにははっきりしなくなる。その頃には東京の北西側から寒冷前線に対応するラインエコーが進んで来ている。なお村松氏¹⁾あるいはシカゴ大学藤田教授などは21時10分頃にフック状エコーが見られるとしているが、これを竜巻と関連づけて考えるには多くの経験が必要であろう。

またこの時刻の前後に東京の南東側で見られる孤立したレーダエコーの時間的な移動の様子を重ねて示したものが Fig. 6 である。この図の黒い部分は21時50分のエコーを示す。これらのエコーの動きから求めた向きと速さは図の中に記入したとおりである。これで見ると雲の動きは平均して北東の向きに 128km/hr となり、これが周囲の風速で流されているとすれば、SW 36m/sec ぐらいの風が吹いていたことになる。

21時の館野高層気象台における観測の結果は Fig. 7 に示す通りである。約1km, 900mb 以上の高さで風向はほぼ SW で、風速は 2km, 800mb 以上ではほぼ 35m/sec 位あり、先に求めたレーダ上の雨域の動きとはこの上層風はよく一致している。気温分布から見ると 800mb ぐらいから上ではほぼ相当温位一定になっており、800~900mb 付近ではむしろ不安定である。この様に上空風速は 30m/sec 以上に達しているにもかかわらず、関東地方南部でのこの時刻の地上風速は数 m/sec であり、この風速の比は非常に大きなものである。このようにプラネタリー境界層の wind shear は非常に大きなものであり、境界層全体として見て力学的に安定性を欠く状態にあったとも考えられる。この点はさらに検討を加える必要があるが、対流層最下層、900mb 以下で地上から数百 m の間に温度勾配が小さな安定層があったことが大きな風速比となった原因かも知れない。これは何かの原因でこの安定層が破壊されたら地上での風は急に強くなることを意味している。

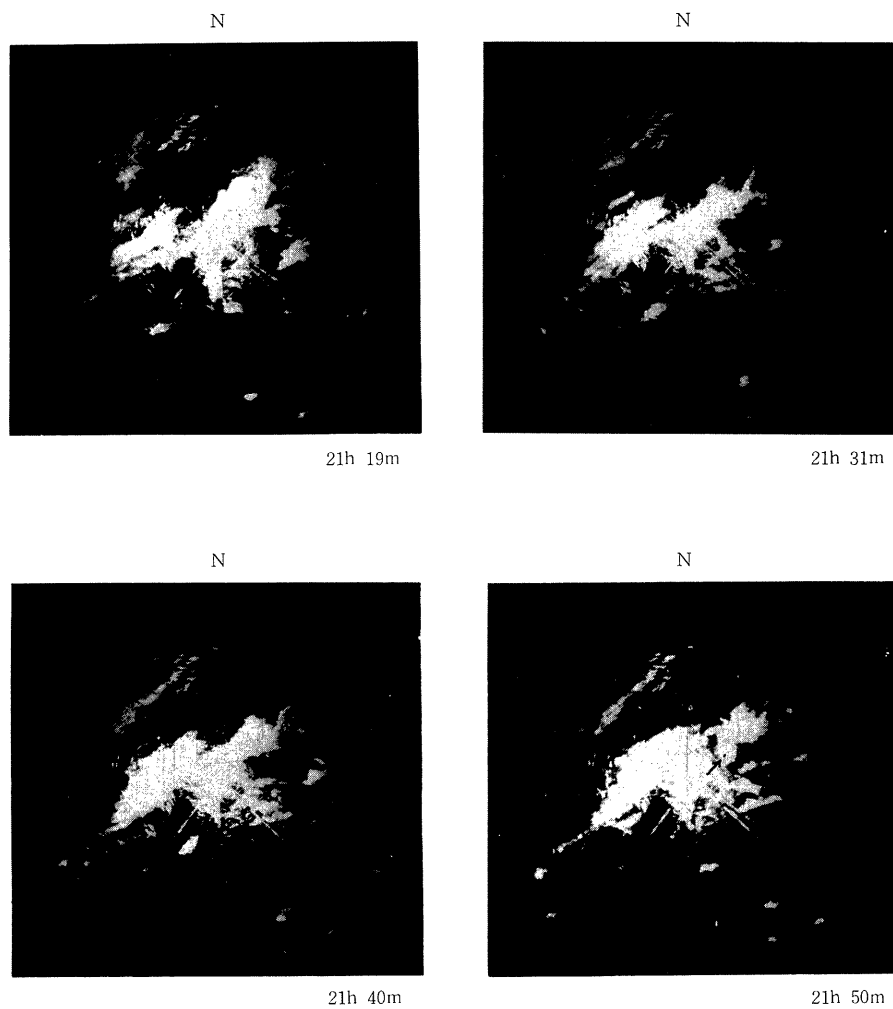


Fig. 5. PPI Radar echoes as observed by Tokyo Radar at 20h 19m, 31m, 40m and 50m JST, Feb. 28, 1978. By courtesy of Tokyo Meteorological Observatory.

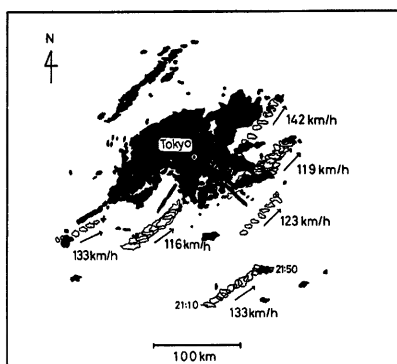


Fig. 6. Movement of echo cells on Tokyo Radar 21h 10m to 21h 50m with speeds of translation and the echo pattern of 21h 50m

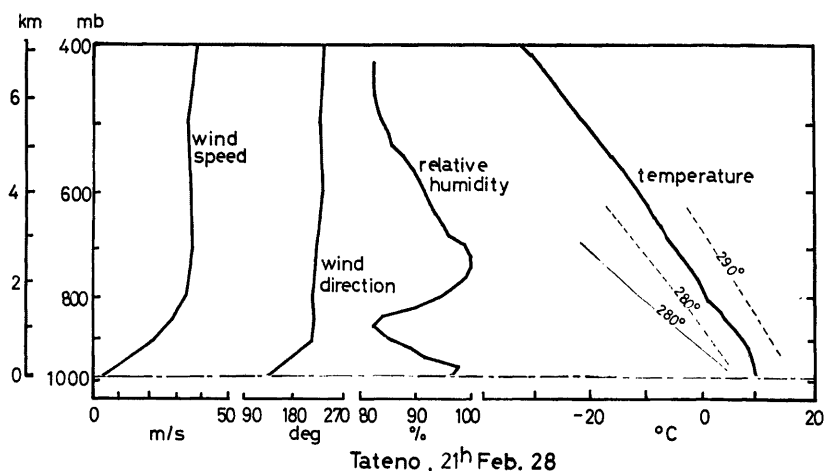


Fig. 7. Upper air soundings at Tateno for 21, JST, Feb. 28, 1978.

3. 2月28日21時頃の局地気象環境

竜巻発生に近い21時00分および21時30分の東京湾周辺の局地天気図を Fig. 8 に示す。この図からも明らかなように21時00分には海岸では風が強いが全体としてはそれほど風の分布には異常さは見られない。しかし21時30分の天気図を見ると東京隅田川河口付近に小さな低圧部の存在が見られ、雨もその北西側で強く降っている。

このような小低気圧の存在は Fig. 9 に示した東京湾周辺の観測点での気圧の自記記録の上にも見られる。すなわち横浜では21時15分頃、羽田では21時25分頃、東京ヘリポートで21時35分頃、さらに沼南では21時45分頃に気圧の下がりが見られるが、わずかに離れた調布、東京管区、千葉などの点では全くそのような変化は見られない。従ってこの変化は線状に延びたものではなく、小さな低気圧であったといえる。

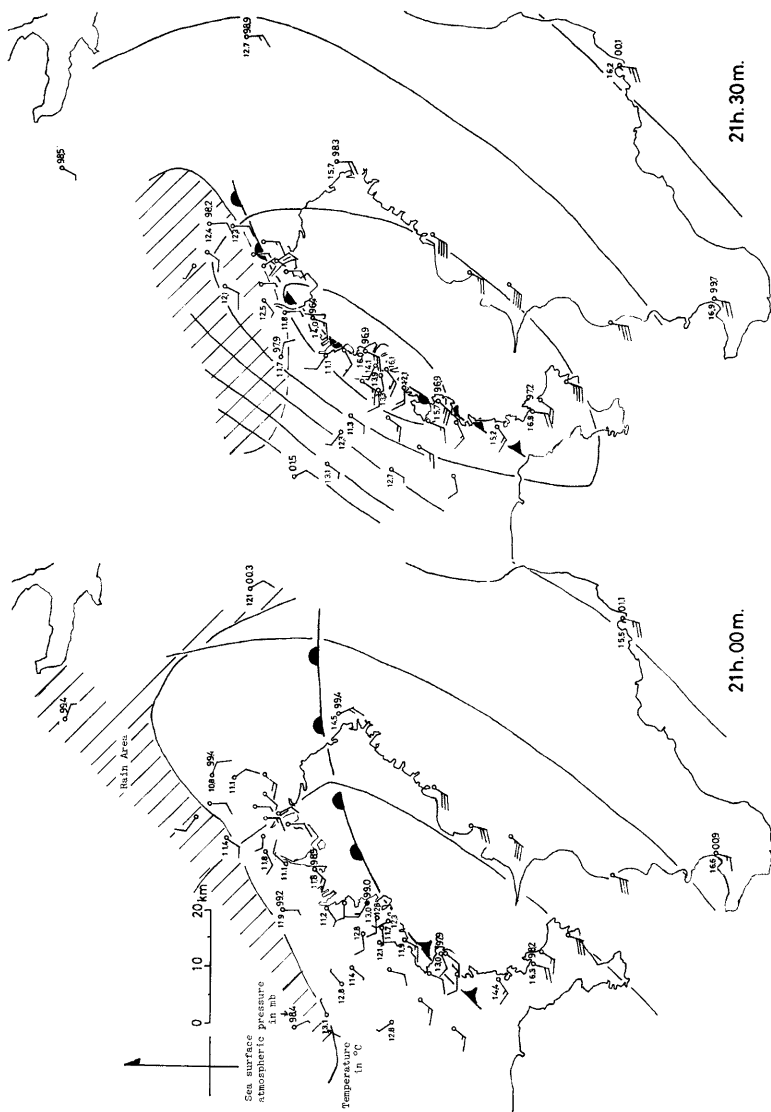


Fig. 8. Local weather charts around Tokyo for 21h 00m and 30m Feb. 28, 1978.

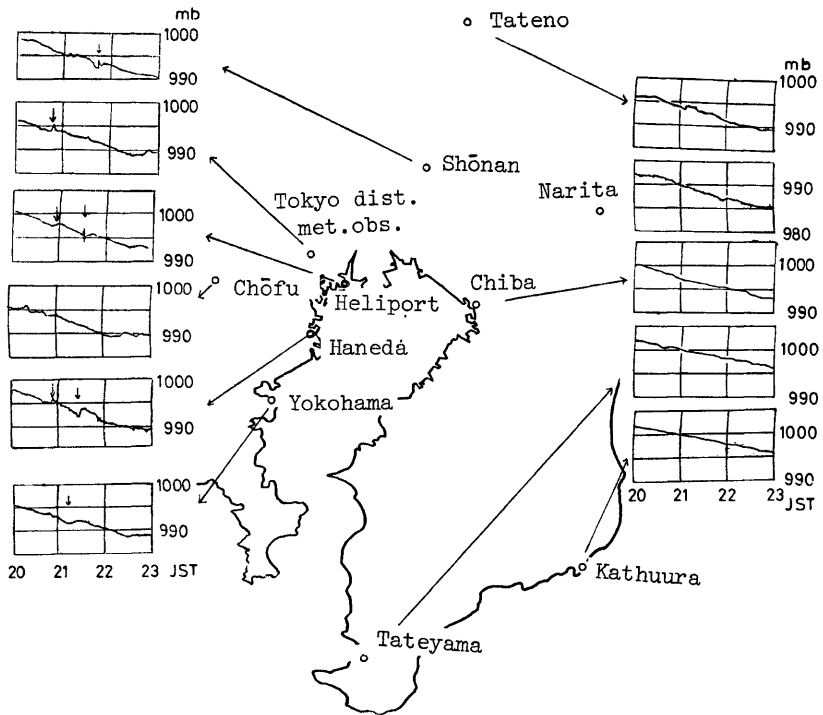


Fig. 9. Records of barometric pressure, at meteorological stations around Tokyo.

小低気圧の姿をより鮮明に示すために meso 解析においてよく用いられる各観測点における各気象要素の時間変化曲線の平滑化した値から各時刻の偏差値を作りその分布を描いて見るという手法⁹⁾によって気圧と気温の変化の様子を21時10分から50分までの間10分間毎に作って見たものが Fig. 10 である。この図で見ると低圧部は10分に横浜付近に最初に見られ、北東に進んで40分には沼南に抜けている。気圧の偏差値の最大が生じたのは横浜15分 (-0.7mb)、羽田26分 (-0.9mb)、東京ヘリポート34分 (-1.2mb)、沼南44分 (-0.8mb) である。これらのことからその移動速度は上空での風速と同じ位の北東方向に21時 10~50 分の平均で約 115km/hr であることがわかる。この移動速度と気圧の自記記録から見て低圧部の直径は約 10km ぐらいと見られる。また中心気圧の低下量は約 1.5mb ぐらいである。この低圧部はレーダーエコーの見られる領域と比較的近いところにあり一緒に動いているようであるが、低圧部では雨はそれほど激しくなく、むしろ低圧部の範囲に入らなかった東京管区気象台を含む少し西側にずれたところで雨が降っていたように見られる。またこの低圧部の後には高圧部が続いており、この低圧部は高温域、高圧部は低温域となっている。しかしこの高圧域で雨は見られない。米国におけるトルネードの解析に見られる tornado cyclone に類似している点が多い。またこの低圧域の移動を外挿した位置と先のレーダーエコーで雲の穴の見られた領域とはほぼ一致している。このような system の動きに対応するかのようになり、東京湾北西部の各地ではこの低圧部の通過の頃に強風が吹いており、先にも述べた通り各地でその記録が得られている。その分布を示したものが Fig. 11 である。これによるとこの低圧部の通過した部分では 50m/sec ほどの最大瞬間風速が見られ

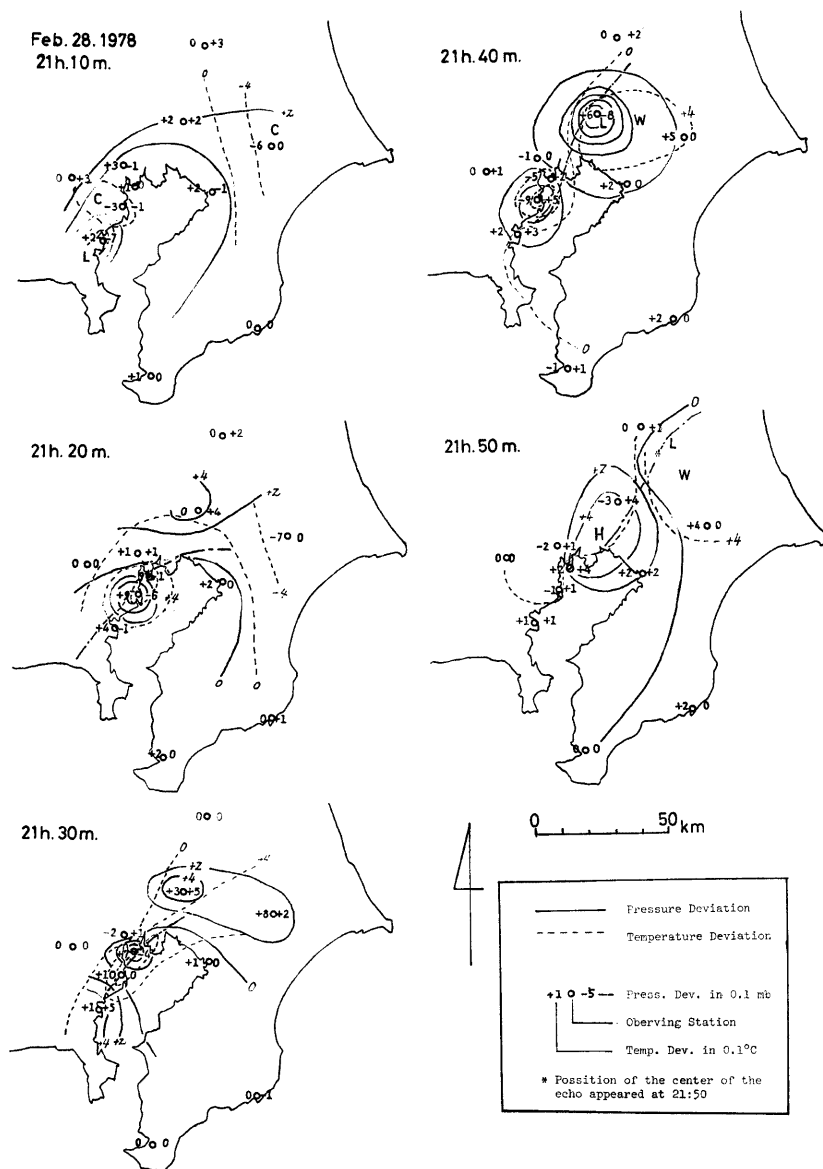


Fig. 10. Pressure and temperature excess for 21h 10m-21h 50m

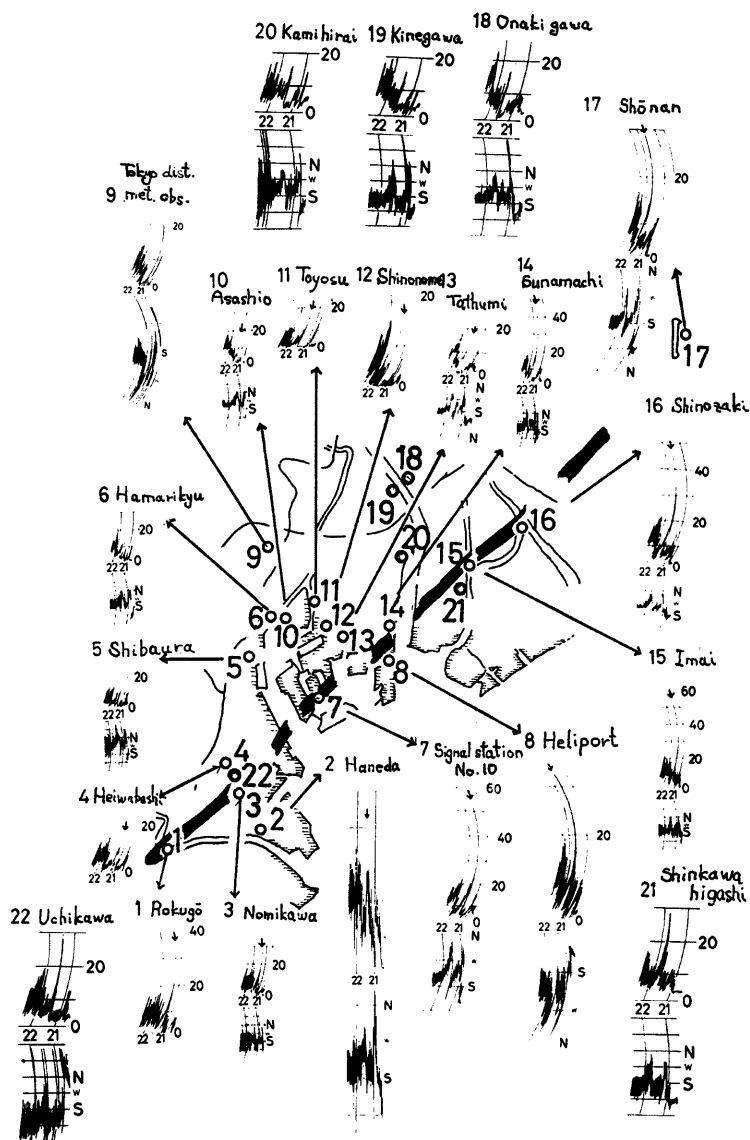


Fig. 11. Traces of anemometers of Tokyo Bay Area from 20h 30m to 22h 30m

るところがあり、短時間ではあるが強風の吹いた記録がよく見られる。このような大きな風速は先に述べた直径10km位、中心気圧降下量数mbといった程度の低圧部に直接起因しているとは考え難いし、また強風の持続時間も非常に短かくて、局地天気図で示したようなシステムの動きによって生じたものとは考え難い。これは次に述べるような被害の調査の結果をも参考として、竜巻がこの tornado cyclone の中に発生し、それに伴う強風が記録されたものと考えるべきであると判断された。レーダーエコーにおいてエコーの中に水滴の存在しない小さな領域と見られたものも竜巻の眼のような小さな現象によって生じたものとして説明出来、その位置も合理的である。

4. 竜巻による被害の状況

この嵐による風の被害はわずかながら全国的に広く分布しており、広範囲にわたっているが、その中でも

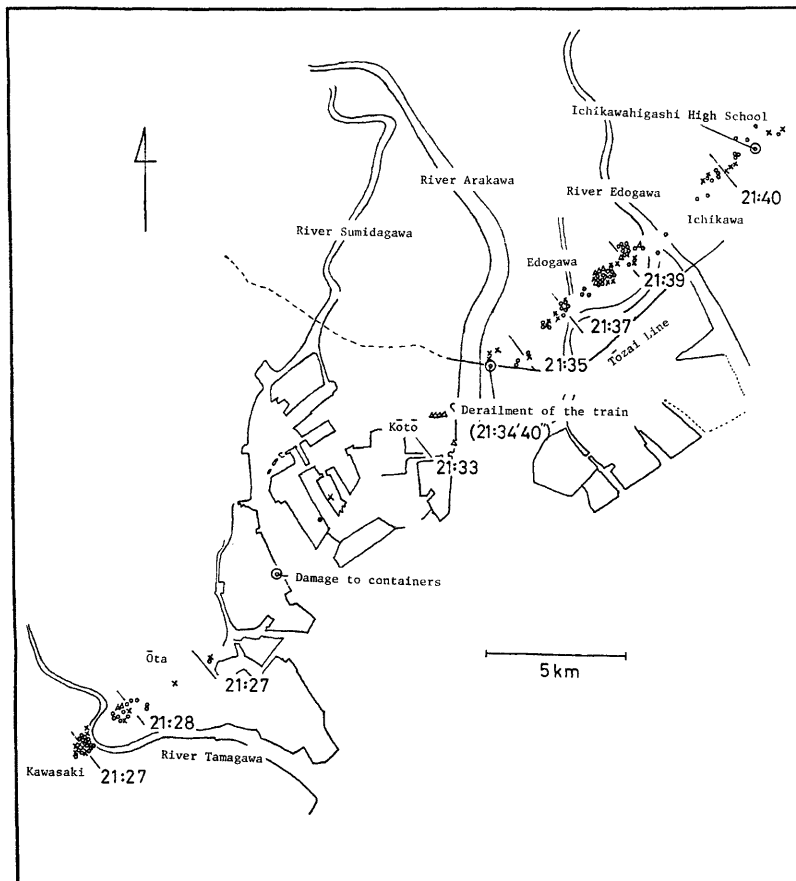


Fig. 12. The distributions of the damages to houses (○) and utility poles (△), collapses of power supply wires (×), and other outstanding damages (⊙). The numerals indicate times of power failures of small area and that of the train derailment.

著しい被害というのはやはり竜巻に伴って発生したと思われる東京南東部のものに限られる。これらは先にも述べたとおり、幅が狭く細長い範囲に分布しており、一般家屋の全半壊、配電柱の倒壊、配電線の断線および特殊な被害の分布を示したものが Fig. 12 である。被害域は川崎市幸区中幸町付近から始めて、六郷鉄橋の1kmほど北で東海道線を横切り、大井埠頭を通り、夢の島を横切って、地下鉄東西線荒川・中川鉄橋東端付近を北東に進んで、江戸川区小島町、篠崎町を経て江戸川を行徳橋のすぐ北で横切り、市川市の市川東高校付近を通過して鎌ヶ谷市付近で被害域は終わっている。各自治体、電力会社等による被害の集計結果は Table 1 に示すとおりである。全体としての被害の程度は日本における過去の竜巻の被害⁹⁾ に比して異常に大きなものとは言えない。しかし、中には走行中の地下鉄電車の横転や高校の校舎が全壊するという被害も含まれており、被害発生時刻によっては大惨事になった可能性を持っている。

この被害の発生機構については後に述べるとして、これらの被害の発生地点をさらに詳しく調べるために、被害調査の比較的良く行われていた東京都江戸川区における個々の家屋の被害の生じた位置を一つづつ地図の上に記入してみた結果は Fig. 13 のようになる。住所表示から位置を確定出来ないものも多少あるがほとんどについては位置を確定出来た。その結果、被害はさらに蛇行する幅の狭い線上に分布していることがわかる。その幅は約2~300mであり、線上においても被害の発生は一様ではなく、集中しているところとそうでないところがあり、その間隔は1000m位で交互に生じている。また詳細に見ると、被害は周囲に空地の多い、すなわち家屋の密度の低い所で多く発生していることが見られる。建設省の調査²⁾ では南側に空地のある部分の縁辺から3棟目までの範囲に限られているとされているが、そこまではっきり断定出来ないまでも、このような傾向は見られる。また同時にもう少し大きな規模で考えた場合に竜巻が障害物の無い川や平地を横切って最初に遭遇した構造物が大きな被害を受けている。これは外貿埠頭、地下鉄、学校等大きな被害はこれに当たる点注意すべきである。

被害の発生の範囲を江戸川区内で幅 400m、長さ 5.7km として、その中の推定世帯数と江戸川区のこの竜巻による家屋の被害数との比を作ってみると半壊以上で約 2.5 % となる。一方、この範囲で実際に測定さ

Table 1. Statistics of damages caused by the Tatsumaki.

Region	No. of wounded		Damage to houses			Damage to nonresident buildings	
	Serious	Slight	Completely destroyed	Partly destroyed	Slightly damaged	Public buildings	Other
Kawasaki	1	5	7	29	215	3	
Ōta				2	134	14	4
Kōtō		6	1				31
Edogawa	2	26		78	361	20	
Ichikawa			1	1	350		16
Total	3	37	9	110	1060	37	51
Region	Failure of utility poles	Inclination of utility poles	Breaking of power supply wire				
			High voltage w.	Low voltage w.	Searvice w.		
Kawasaki		3	9	23	15		
Ōta	2	2	1	1	16		
Kōtō	1	8	2	2	1		
Edogawa	6	7	77	45	127		
Ichikawa		2	7	1	20		
Total	14	21	96	72	179		



Fig. 13. Detailed distribution of damaged houses in Edogawa, Tokyo.

れた風速の最大値は Fig. 11 に示した記録から見られるとおり、最大瞬間風速で 52m/sec であった。一方、過去の台風における最大瞬間風速と被害率との関係を見ると、伊勢湾台風で名古屋市において 46m/sec で 19.2%，第 2 室戸台風で奈良市において 42m/sec で 1.6%，といずれも今回よりは相対的に大きい。このような比較には問題が多いが、少なくとも被害と風速との関係においては過去の台風と異っている点について注目に値する。

これらの被害の発生時刻は、聞き込みからは正確なものはほとんど得られなかった。しかし、東京電力の変電所において配電線の系統別の停電時刻が 1 分の精度で記録されており、竜巻のように短時間に進行する現象の場合には、短絡あるいは断線などの発生時刻と竜巻の通過時刻とはほとんど一致すると考えてよい。また電車の事故についても、強風の通過時刻には 10 秒単位で推定出来る。これらから推定した被害の発生時刻が Fig. 12 の上に記入してあり竜巻のおよその位置を決定出来る。ただ、移動速度が速く 1 分間に 2km 位も進むことになるので、時刻の決定が 1 分の精度で行なわれても、必ずしも十分な精度とは言えないが、ほぼ合理的にその移動を追跡出来、Fig. 12 に示した被害地点および Fig. 17 に示した破線上を平均 130km/hr 位の速度で進んでいたと考えられる。この被害の発生から見た竜巻の位置は先に述べた小低気圧の中に位置しており、その移動速度も一致している。またそれを外挿していくと、レーダエコーに見られた眼の位置と一致する。しかし、レーダエコーの見られた 50 分頃には地上では大きな被害が発生しておらず、竜巻の回転は地上に達していなかったものと見られる。

地下鉄東西線の B-2177S 中野行普通列車 (10両編成) は 21時33分 40秒頃、荒川中川鉄橋にさしかかったところ (計画所定速度 78km/hr) で海側からの強風を受け後部 2 両 (9 両目 36ton, 10 両目 27.5ton) が反対側線路側へ横転した。しかし、幸い乗客が少なかったこともあり 21 名の重軽傷者を出しただけですんだ。この時運転手は全く前方に異常なものを確認しておらず定速で運転し、風で車体が右側に傾くのかを感じてから緩制動をかけたその後、車両分離のため自動的にブレーキがかかり停止後、後部車両が分離脱線横転しているのに気付いたという。列車最後部では列車が橋梁にさしかかった (この鉄橋の東端は中川の東側の道路を越えるところから始まっている) 時に車体が浮上がり右 (北) 側に横転したという。後の調査によればレール上には車輪が脱線時に乗り越えて行った痕跡が 2 両の脱線で 8 輪通過したはずなのに、1 ヶ所しかなかったという。従って後部の車両は浮上して脱線横転したと推定される。なお最前部車両のパンタグラフも破損していたという。従って、この電車が鉄橋にさしかかった時ある程度の強さで風が吹き架空線が風で流れていたと思はれる。

この電車の被害の様子は Fig. 14 および Photo. 1 に示すとおりであり、車体が持ち上ったものとする 600kg 重/m² 以上の上向きの力を必要とするはずである。電車は高架部分において脱線をしている

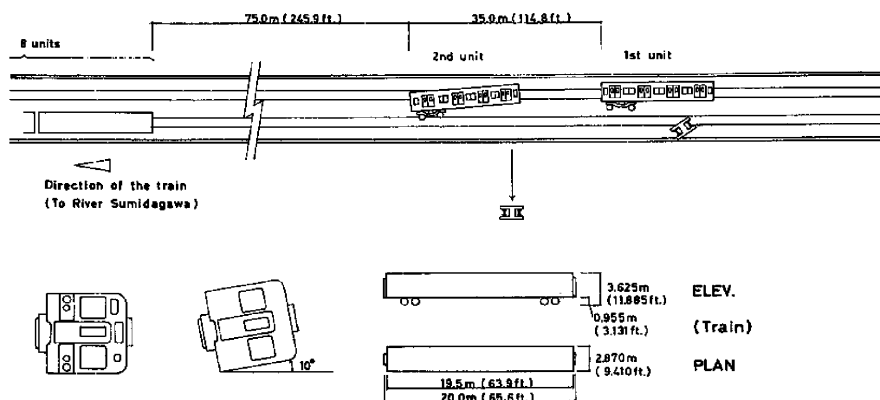


Fig. 14. Derailment of a train of a bridge over the Arakawa River.



Photo. 1. Derailment of a train shown in Fig. 14.



Photo. 2. Damage to a prefabricated school building shown in Fig. 15.

ので、軌道面の地上高は約10mと比較的高いところにあり、しかも風上側の軌道を走っていたため、この車両に当たった風は上向きの成分を持っていたことは考えられ、しかも被害の時に電車は20m/secぐらいの速度で走っていたから、相対風速としては相当大きな風速であり、しかも風が斜め前方から吹上げたことになる。

市川市北方にある市川東高校のプレハブ校舎1棟は竜巻のため持ち上げられ隣接した校舎の上を飛び越えて一つおいて隣りの建物の上に落下して破壊した。この校舎は平屋で5教室であり隣りの校舎との間隔は約19m、隣りの校舎の高さは約6mであった。その様子は Fig. 15 および Photo. 2 に示すとおりである。飛ばされた校舎の床板はそのまま残っており、教室の机は元のまま残っていた。この校舎の床面積は 535m² (59.4m×9m) であり、側壁より上の部分の重量は平均ほぼ 85kg/m² であり、側壁と木杭で止められた床とは細かいカスガイで固定されていただけであり、この校舎をこの部分で切り離して持ち上げるのは、ほとんどその重量に相当するだけの力で充分であると思われる。なお高さ約6mで19mほど離れた校舎の上を飛び越えて行くためには、少くとも20°以上の角度で飛び上らねばならない。また、この校舎の飛んだ跡を見ると、そのままの形で飛び去り回転した様子はなく、従って風向は校舎に直角にほぼ一様に風が当たったものと思われる。風上側は広い校庭がある。真上にこの校舎を6m投げ上げるためには、初速 11m/sec 以上は必要であり1secあまりで頂点に達する。水平風速がこの間に水平方向に20mほど運ぶに充分なだけ大きければよいことになるが、これはこの竜巻による他地点の風速からして不思議なことではない。ただ建物を投げ上げるだけの作用がどのようにして生じたかが問題として残る。

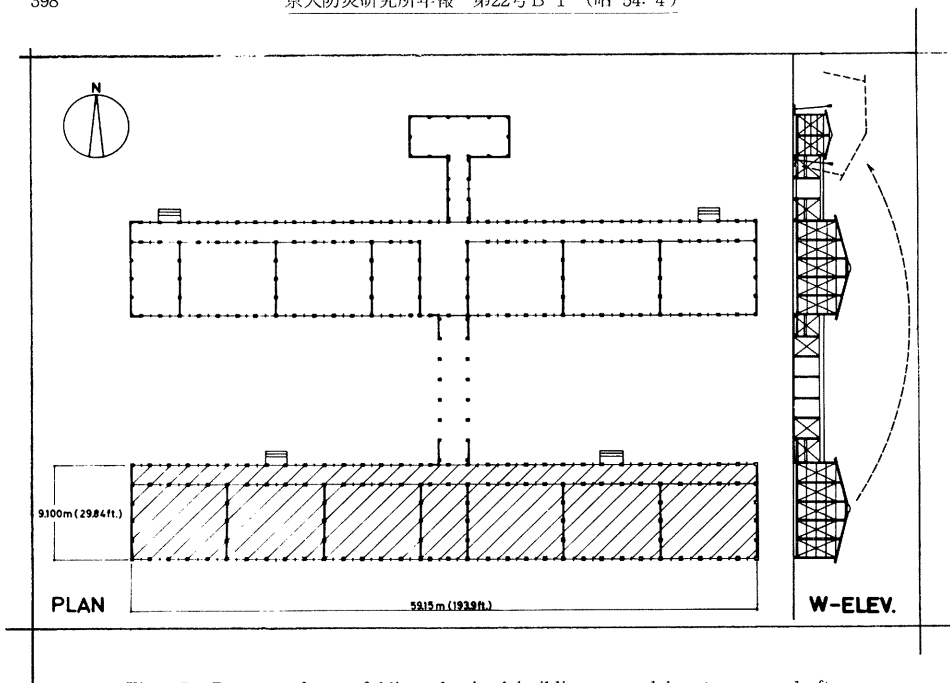


Fig. 15. Damage of a prefabricated school building caused by strong up-draft.

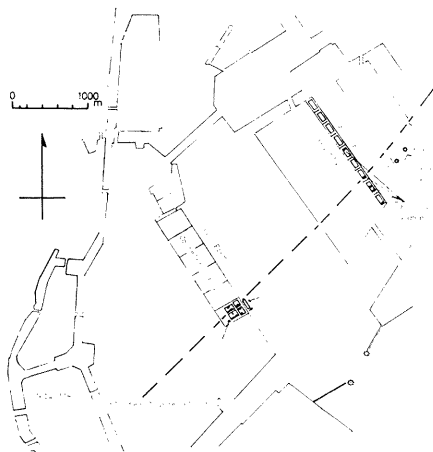


Fig. 16. The damages of harbor facilities and the positions anemometers at Signal station No. 10 ($h=38.5\text{m}$) and Ferry terminal ($h=33\text{m}$). The break line indicates the estimated track of Tatsumaki.

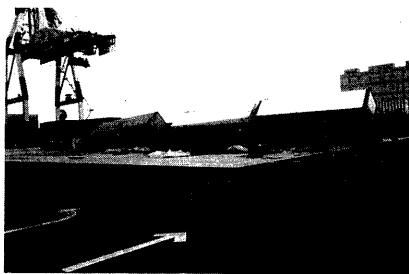


Photo 3. Damages to containers at Ooi No. 8 Pier shown in Fig. 16.

今一つこの竜巻の性質を示すものとして興味深いのは東京港の京浜外貿埠頭の被害である。ここでは南北に1 km 以上の範囲にわたって、コンテナヤードおよび倉庫が東京港 第1 航路を挟んで両側に並んでいる。これらはいずれもほぼ同じ構造のものが長く連っており、耐風性には差異は少ないと思われる。被害域はちょうどこれらの列を直角に横切っているが、被害の跡を見ると被害範囲はおよそ 200m 以下に限定されており、特に被害が大きいのはお台場側で20~30m、大井側で50~60m ぐらいしかなく、他地域の被害域と共にきれいに同一線上に並んでいる (Fig. 16 参照)。お台場側では最も風が強く風上側シャッターの破損が生じている部分の左側 500m ぐらい離れたところに逆向きの風向の風で生じたと思われる小さな被害が見られる。大井側の被害については相馬⁴⁾による調査もあるが、Photo. 3 に示すようにコンテナの倒壊、移動、コンテナ・テナーの自走、照明ボールの折損あるいは停泊中の船の係留ロープ切断などの事故が発生している。同じようなコンテナの並んでいる隣接したヤードでは被害は無い。空のコンテナは高さ 2.5m、長さ 12.2m、巾 2.5m で自重が約 3 ton ある。これに真横面から風が当り転倒する事は風速 25m/sec 程度の風で充分生じ得る。それにもかかわらず 2 km もあるコンテナ埠頭で被害が 200m ぐらいの範囲で止まっているということは、竜巻の 25m/sec 程度以上の強風域がこの程度のものであったことを示している。10号信号所はこの近くで竜巻の推定経路の右側 200m ぐらいのところにあり、高さ 38.5m の位置での風向、風速の記録が得られている。またフェリー発着場もこれに近いが、もう少し低い 33m の高さのところで風の測定値が得られている。これらの位置関係は Fig. 16 に示すとおりである。

5. 竜巻周辺の風の分布

先にも述べた通り、今回の竜巻においては過去において見られなかったほど多くの風の観測点がその通過経路の周囲に分布していた。そして Fig. 11 に示すようにこの竜巻に対応した極めて短い時間に生じた風速のパルスの増大と風向の急変が見られる観測点が被害の生じた帯状の地域に沿って見られた。この時間帯の最大風速とその風向を読み取って、被害地を中心にした地理的分布を作ったものは Fig. 17 に示す通りである。それでも竜巻の最大風速半径の中に入ったと思われる地点は全く無いので、測定値から竜巻の最大風速を決定することは出来ない。この図を見ると経路の右側では非常に強い風が吹いているが、左側ではそれほどの風速でもなく、また風向も逆の向きから吹いた様には見えない。

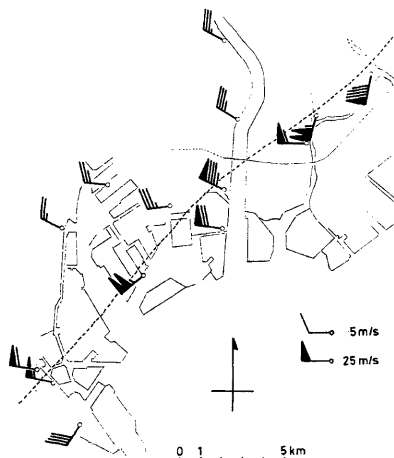


Fig. 17. The maximum gust wind speed and wind direction at every station.

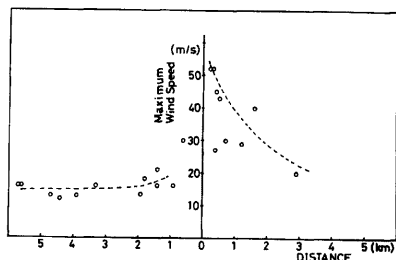


Fig. 18. The maximum wind speed as a function of the distance from the estimated track of Tatumaki center. The left side of the figure corresponds to the left of Tatumaki track and the right side to the right of the track.

また全ての観測点について、被害から決定した竜巻の経路からの距離を求めて、その距離と最大風速との関係を示したものが Fig. 18 である。被害から中心を決定する方法には竜巻の最大風速半径ぐらいの距離より短い分解能がないから、ここに示した距離はその程度の誤差は含まれているものと考えておかねばならない。この図を見ると竜巻から離れたところでの最大値は 15m/sec 程度であるが、中心の経路に近づくにつれて、特に進行方向の右側では風が強くなっている。その強風の範囲は 2km 位であると考えられる。この中から竜巻に起因した風がどのようなものであったかが問題である。

Fig. 11 に示した各観測点での風の自記録はいずれも長期記録装置によるものであり、風向と風速のペン先がそろっていなかったり、時計合せが正確でなかったり、さらに時には風向の指示がくるといって、風の同時分布を調べるのはそのままでは容易ではない。しかし、各々の記録の写しを拡大したりしてその読取りを試みた。まず時刻の修正について次のような方法によった。すなわち、この日の21時少し前に見られた気圧の急上昇(Fig. 9 参照)が東京管区気象台、東京ヘリポート、羽田航空気象台で見られ、それらが線状の構造を持った変化であり、西から東に通過した温暖前線に対応するものと考えられる。これに伴って風速の急変が見られる。これは Fig. 19 に東京管区気象台の記録の一例を示した通りで矢印の位置に出現している。

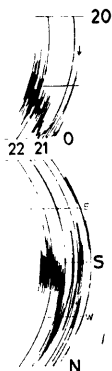


Fig. 19. The records of wind speed and direction at Tokyo District Meteorological Observatory. The arrow shows the gust caused by warm front passage.

これと同様の変化は気象庁関係以外の風の観測点においても見られるので、まず上に示した気圧の変化の方からこの現象の発現時刻を各観測点について予測しておき、これと風の変化が記録された自記録上の時刻との差がその観測点の時計の誤差であるとした。各観測点の記録を自動送り装置の付いた読み取り装置を用いて1分または1.5分毎に風向風速を読み取った。この読み取り装置の読み取り間隔は0.25mm 毎という細かいものになっているので、どうしても誤差は多いし、上に述べた時刻補正法にも精度の限界があるので、それほど高い精度とは言えない。

このようにして読み取った風向風速の値を用いて、21時24分から21時42分までの2分間毎の風向および最大風速の分布を Fig. 20 に示す。また被害の方から推定した中心の位置は図中に×印で示した通りである。30分頃から後の風の分布を見ると、大体推定した中心の位置の回りで回転している風系があり、時間と共に動いているのがわかる。この図からも明らかなおり強風は竜巻の中心から 1km 位の範囲でしか生じていない。先の局地天気図と同じような手法で求めた気圧の偏差、気温、露点をも同時に図中に記入してある。小低気圧の移動はこの図の上でも追跡出来、ほぼ竜巻と一緒に動いている。後につづく高圧部では特に風が発散しているようには見えない。海岸ではこの期間ずっと SW 10m/sec 前後の風が吹いており、内陸ではもう少し西寄りの 5m/sec 前後の風が吹いていた。この程度の差は海陸の地表粗度の差によって生じ得るものと考えられるが、このような地表風の shear と竜巻の発生、進行とにどのような因果関係があったのか、については今後さらに研究するべき問題であろう。

また東京ヘリポートでの気圧の記録 (Fig. 9 参照) を見るとこのようにして求めた竜巻の通過推定時刻21時33分頃に気圧が極めて短い時間スパイク状に約 3mb 上昇した後に数 mb 下降しているのが見られる。これは竜巻の通過時には気圧が下がるという普通に言われる事柄と相反している。この点について調べてみたが、この気圧計が置いてある部屋が鉄筋2階建の建物の2階にあり、しかも自記気圧計のある部屋と連った部屋の壁面に換気扇があり、その口がちょうど風に向いていたこと、その開口部は常に開いていることなどから、風速 37m/sec ぐらい吹いた風による建物風上側の面の動圧は約 10mb 位に達する可能性があり、それが室内に先に伝って竜巻による静圧の降下よりも大きく感ぜられたものと判断される。このような場合

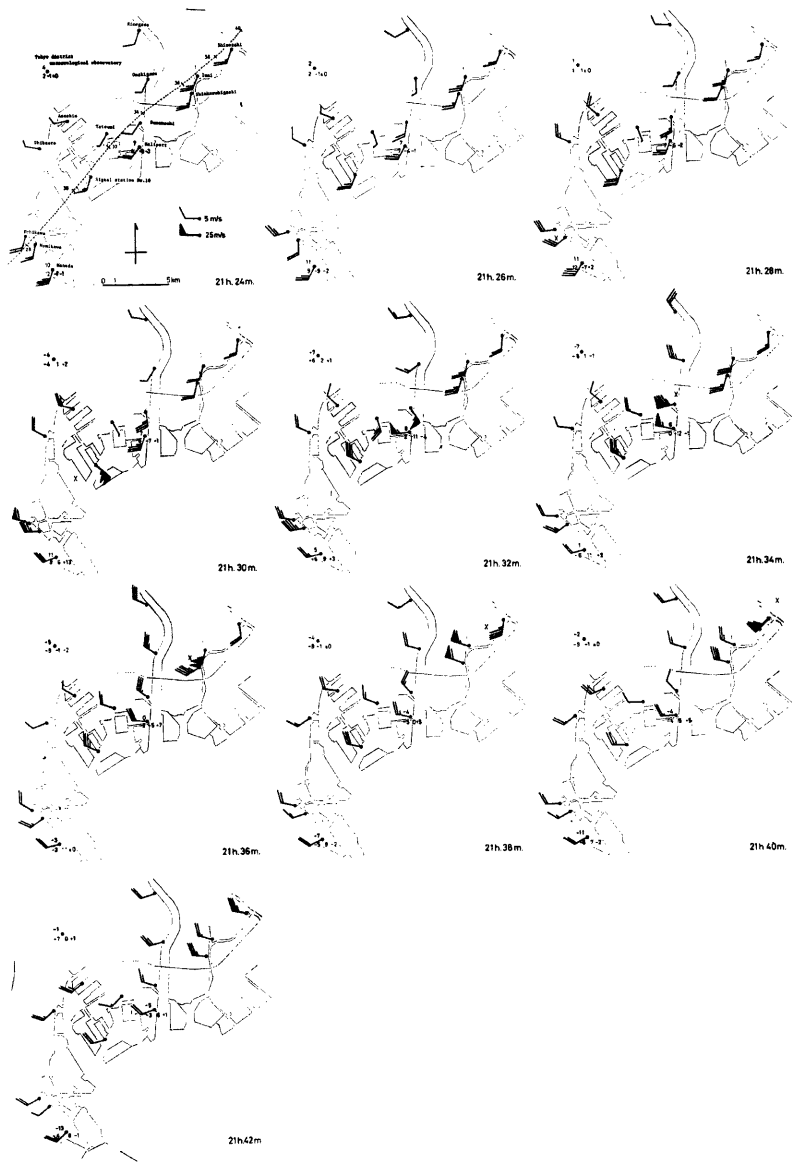


Fig. 20. The distributions of gust wind speed and direction for every 2min from 21h 24m to 21h 42m. The cross indicates the estimated position of Tatsumaki.

の気圧の測定値には注意を要する。

ここで求めた風速分布から先に推定した竜巻の各時刻における中心の位置に相対的な竜巻の最大風速および(1分間)平均風速分布を21時34分から37分までの間について合成したものが Fig. 21 である。Fig. 21b に示した平均風速はその時の風速記録の中の最大値と最小値を平均することによって求めた平均風速を示している。これによると、竜巻の周辺での風速の分布の概様を知ることが出来る。この図において合成は方位を一致させる形で重ねてあるが、竜巻の移動方向は、この時間を通じて多少の変動はあるが、平均的に矢印で示した北東の方向である。この図からも明らかに竜巻周辺での風の流れは全体として反時計回りの回転を示しているが、前に述べたように数 m/sec の一般流が吹いていることを考えて、これを引き去ったとしても左側では逆向きの流れは大きなものではない。このことはこの竜巻がこの付近で約 110km/hr (30m/sec) という速い速度で進んでいるということと関係している。竜巻の進行方向と平行な軸の上ではその移動の影響は大きく出ないと考えられるから、Fig. 21 b の示した平均風速の分布図上で進行方向 $\pm 15^\circ$ 以内での平均風速と風向から中心に相対的な接線方向風速と動径方向風速成分に分解し、それらの値と中心からの距離との関係を図示したものが Fig. 22 である。この図には34~37分以外の値をも同時に示してある。また竜巻の前面と後面の値は区別して示してある。ここで注意せねばならないのは、竜巻の前面で外向きの成分のあることである。これは竜巻の移動の影響がここに現われていることを示すが、詳しい解析は今後の問題として残っている。

上のような解析では自記紙の送り速度の関係で時間分解能が悪いが、フェリー発着場のものだけは 30mm/hr と他のものよりも大きかったので、特にこの記録についてだけ6秒毎に読み取ってみた。ただ時計の狂るいの修正をこれだけの精度で行うことは不可能であるので、この地点のみの風の時間変化を竜巻の移動方向の距離変化に変換して図示したものが Fig. 23 である。この測点は竜巻の進路に近く、右側 200m 位のところにあったと思われるが、風速計のレンジが最大 30m/sec にしてあったので 35m/sec 以上は読み取れず、この点での最大風速は 30sec 以上にわたってスケールアウトしていたので最大風速の推定は困難である。しかし、最大風速 35m/sec 以上の範囲は移動方向の距離にして約 900m、平均風速が 25m/sec 以上が 2000m 位あったことになる。

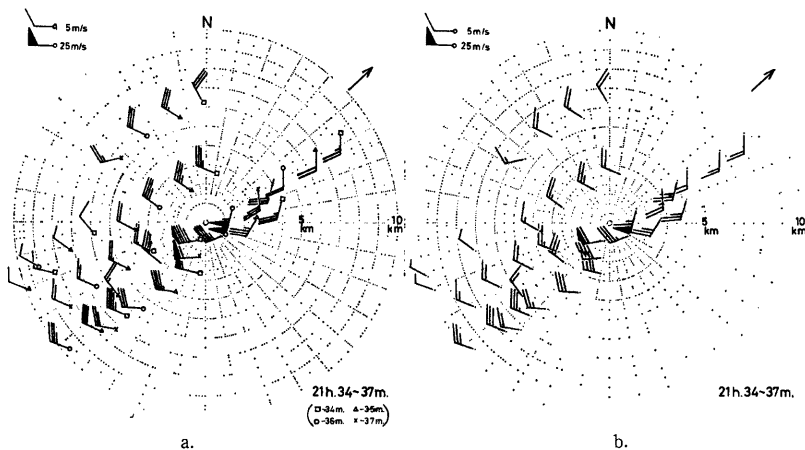


Fig. 21. (a) Peak gust and (b) mean wind speed distributions around the Tatsumaki center as composed from time changes of winds and relative positions for 21h 34m to 21h 37m. The arrow indicates mean direction of Tatsumaki motion.

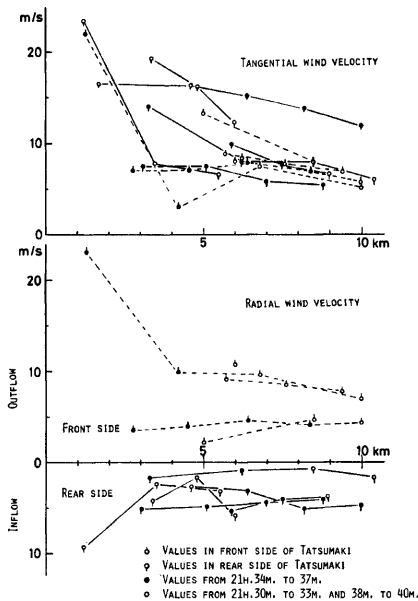


Fig. 22. The tangential and radial wind speed in front and rear side within $\pm 15^\circ$ from the track of Tatsumaki.

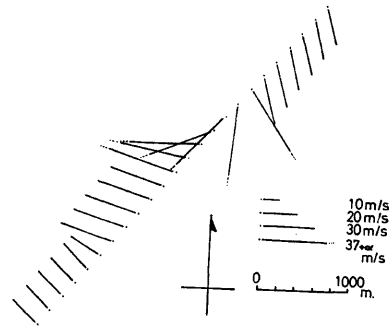


Fig. 23. Time changes of wind at Ferry Terminal ($h=33\text{m}$) in 6 second intervals converted into space distribution by the aid of translation.

以上示したように竜巻の最大風速域での風速の実測値を欠くため、実測値から最大風速を推定するのは困難である。今回の竜巻は自由大気中の風速とはほぼ等しい 35m/sec という大きな移動速度を持って進んでおり、これを無視して考えることは出来ない。移動する円形等圧線場の中での風速分布については、台風の風速分布に関連して今日までにいくつかの研究がなされているが、未だに満足なものは発表されていない。竜巻の場合はその拡がりに比して移動速度が大きいので局所的な時間変化率が大きく、竜巻の構造自身がはっきりしていないこともあってさらに問題を複雑にしている。中心より半径 1km 位離れた位置での風速はほぼ 30m/sec であるから、この位置にある空気粒子は中心の回りを一回転するのに約 200sec 要し、この間に竜巻は約 6km 進んでしまう。従って、そのような空気粒子の軌道は trochoid を描くことになり、中心の左右で曲率が大きく異なる。また竜巻の通過する領域においても現象は数分の間に完了してしまうので、接地境界層が充分な高さまでに成長する時間は無い。従って眼に近い所での境界層は極めて低いものと考えられる。この点については、さらに研究を進める必要があるが、風速計の高さでの風速についての考察においては摩擦を考えなくても大きな誤差にはならないであろう。

竜巻の構造として軸対称な円形等圧線場が進行し、竜巻の中の空気粒子はその気圧場に各時刻毎に平衡しているという仮定は比較的容易に受け入れることが出来るものである。そうすると竜巻の進行方向の軸上の運動は、先に述べたような進行による影響は受けないから、Fig. 22 に示した進行方向と平行な断面上での風速分布が竜巻の気圧分布に平衡するものであると考えられる。この図の点は非常にばらついていて、竜巻の風の分布が定常でないことを示している。ここで竜巻の風速分布が Bjerknes の提案した 3rd order の渦、すなわち

$$V = \frac{2V_{max} \left(\frac{r}{r_0} \right)}{1 + \left(\frac{r}{r_0} \right)^2} \quad (1)$$

(ここで r は中心からの距離, r_0 は最大風速 V_{max} の生じる半径) であるとする, ここに示された風速はいずれも $r > r_0$ の位置にあるような分布を示しており, r を決定するような手がかりは全くない。しかし, 地下鉄の事故の記録によると, 長さ約 200m の列車の先頭にいた運転手は視界内に竜巻を認めておらず, 強風で右側に傾くのを感じた程度であるにもかかわらず, 後部 2 両 (長さ 20m × 2) がレールに脱線する際の疵をほとんど残さず (8 輪が脱線したにもかかわらず疵は 1 ケ所しかない) 空中に浮んだような形で脱線しているのである。従って竜巻の最大風速半径が 200m 程度以下のものであったことは充分考えられるし, 2 両分の巾ぐらゐは竜巻の eye wall に相当する部分に同時に入っていたものと考えざるを得ない。また市川東高校の被害から見ても, 長さ 60m ぐらゐの剛には出来ていないプレハブ校舎を持ち上げ平行移動のような形で風向方向に運んでいることから, この範囲では風が一様に強く, また上昇気流の集中するいわゆる eye wall の領域の中のしかも進行方向直角右側で入っていたと考えざるを得ない。

日本の竜巻については全く構造が解っていないが, 米国の Tornado について Fujita 等⁷⁾が飛散物の映画画像から決定したその構造から見ると, この eye wall 域は最大風速半径の数%ぐらゐである。(1)式に示した風速分布を考えても r_0 から 20%ぐらゐ離れた所においても風速は数%ぐらゐしか減じない。従って今回の竜巻の r_0 は 100~200m という程度のものであったと考えられる。この程度は住宅の被害分布から考えても不思議ではない。Fig. 18 に示した風速分布は最大値について読み取ってあるので, 乱れによる変動分を差し引いたもので竜巻の風速分布を考えねばならない。Fig. 21 b と Fig. 22 は平均風速を示したものであるから, これを用いて, 中心からの距離の決定の精度が ± 1 km 位であることを考えに入れると, 中心から 500m で平均 30m/sec, 1000m で平均 20m/sec 位と考えても大過ない。これで最大風速半径を 150m 位と考えると最大風速は 50m/sec 位ということになる。

また竜巻の進路の右側では, 先に述べたように進行による軌跡の曲率が小さくなることにより風速はこれよりも大きくなる。吉住の研究⁹⁾によれば, その値は

$$V_r = V_{sr} + \frac{V_{sr}/fr}{1 + (V_{sr}/fr)} C \quad (2)$$

となる。ここで V_r は速度 C で進行している円形等圧線の進行方向直角方向軸上の風速, V_{sr} は中心から r の距離での傾度風速, f はコリオリ係数を示す。

ここで最大風速半径が 150m で最大風速が 50m/sec であると考えると, 移動速度は 30m/sec 位であるから, $V_{r, max} \approx 80\text{m/sec}$ となる。また風がこの風速に近い値となった時間は最大風速半径付近で 10sec 程度以下ではなかったかと思われる。前に述べた通り最大風速半径の近くで境界層は極めて低く, 風速計高度での乱れの強さは小さいものと思われるので, 最大風速域での最大風速はこの程度の値を考えるだけで充分であると考えられる。

竜巻の eye wall の領域では大きな上昇気流の存在が米国の観測などからは認められており, その上昇速度は最大水平旋回風速の $1/2 \sim 2/3$ である。このような大きな上昇速度の存在により, eye wall 域の真下の地表に置かれた物体の上面にはその速度に対応した負の圧力が生じることが考えられる。このように風速が大きく, かつ上向きの力が作用することが, 地面との固定が充分でないプレハブ校舎や地下鉄を浮かび上げた原因であると考えられ, この作用時間が短かったこともあって他の比較的地面との固定の良かったものの被害が小さかったことと関係していると考えられる。

しかし, ここに示した数値については, 非常に大胆な仮定によって作られたものであり, このような竜巻の中の風速分布, さらにそれが移動した場合の風速分布の変化については, いまだに完全に理解されているわけではない。特に竜巻の回りの風速が移動速度より小さくなるような範囲では, 上に述べたような考えは問題があることは明らかである。今後さらに研究を要する問題が多い。

6. 結 語

1978年2月28日, 日本海を東北東進した発達した低気圧 (中心気圧 988mb) の暖域内で寒冷前線から少し

離れたところを東進した line 状対流雲群が東京湾の湾奥に達した頃（21時25分頃）に竜巻が発生し、上層風に流されて動いている積乱雲と同じ速度で NNE に 35m/sec ぐらいの速い速度で川崎市から東京都、鎌ヶ谷市まで約 40km の距離を進んだ。この積乱雲群の頂部は人工衛星の観測によれば圏界面に達する高さを有しており、東海沖からその移動を追跡出来、その下、少し風上側で地上のレーダーで見た雨域が存在していた。東京付近ではレーダエコー上に竜巻と関係があると思われる雲の形および眼に相当するエコーの穴が見られ、レーダーによる追跡の可能性をうかがわせる。

竜巻の発生した位置は東京湾岸で、海上と陸上の地表摩擦の差による境界層内の wind shear の増大がこの竜巻の発生と関連している可能性を示しているが、今後の研究に待たねばならぬ点が多い。竜巻の特性を被害および風の観測記録から推定すると、最大風速半径 150m、最大風速 50m/sec ぐらいと考えられる。この竜巻が 35m/sec もの速度で進んだため、風速分布の竜巻進路の左右の非対称性は大きく、左側ではほとんど風の変化は見られず、右側では最大風速 80m/sec ぐらいに達しており、70m/sec 以上の強風が竜巻の中心経路から最大風速半径だけ離れたところでは、10sec ぐらい継続したものと思われる。竜巻の外側での地表風は普通の台風などによる強風と同程度に乱れているが、eye wall すなわち最大風速半径の近くでは前にも述べたように乱れの影響は大きく考えることはしない。移動する竜巻内の風速分布についてはまだ充分問題が解決されたとは言えないので、今後さらに研究を必要とする。竜巻の進路および被害を詳細に調べると、その地上での軌跡は直線ではなく、横巾 0.5km ぐらいの中を蛇行している。その波長は約 1km すなわち 30sec 程度である。また被害も経路上一様に生じているわけではなく、場所によって少しずつ変化している。

この風による家屋の被害は、同じ程度の最大瞬間風速の観測された台風の場合よりもその割合は小さい。それにもかかわらず走行中の電車が横転したり、プレハブ校舎が姿のまま 20m 近くも飛ばされるという事故が生じている。これらは被害発生時刻如何によっては多数の人命の損傷に連っており、大きな問題である。被害の様子を見ると周辺に広い空地が多いほど被害が大きい。このことは竜巻による地上風が地面の粗度によって大きく変化する可能性を示している。また、被害の作用時間が短いため、プレハブ校舎や電車あるいはコンテナのように地面との固定の充分でないものの被害が相対的に大きく出たことも考えられ、同時に竜巻の特色である大きな上昇気流がその eye wall 域に存在していることも普通の強風による場合とは異なった形態の被害が生じた原因と考えられる。たとえば竜巻で電車が横転しても送電用の架空線切断は見られなかったし橋梁本体の被害は見られないというように風を受ける物の性質によって応答の仕方は異っている。この点竜巻内の風の 3 次元的な分布およびそれに伴う構造物の被害の発生機構について研究すべき点は多い。

この竜巻の過去に日本を襲った竜巻の統計⁹⁾と比較してみると、最大風速半径がやや大きく、被害巾が平均の 45m に比して 200m ぐらいあること、進行速度が 130km/hr と非常に大きく従って被害の生じた範囲の長さが 40km と平均の 3km よりずっと長いことが異っている。しかし進行方向は普通のものであり、最大風速も他の大きな竜巻、たとえば 1969 年の豊橋の竜巻の最大風速推定値 90m/sec と比しても大きいとは言えない。竜巻に対する防災対策は今日日本では全く行なわれていない。日本における竜巻がある地点を通過する確率は 10^5 年に 1 回という程度で極めて低いものであり、普通の工作物についてはそれに対する対策を考える必要は無いと言えるかも知れない。しかし日本の現状では不可能な予測が将来少しでも可能となれば、避難、運転中止等を行うことによって、今回あったような事故が原因となって大惨事が生じる可能性は最小限に止められる。従ってその予測と警報についての研究に着手する必要がある。また、非常に小さな確率であっても、破壊が生じることによって大きな 2 次被害の生じる可能性のある原子炉、超高压送電線、高压ガスタンク、高速鉄道などについてはその対策を考えておく必要がある。日本では地震があるため、水平の外力に対しては充分な設計がなされているが、竜巻の場合は上向き力が働くことが考えられるので、屋根が抜けるというようなことを考えねばならない。従ってその被害の発生機構についての研究が緊急に必要である。また、適当な対策がなされないならば、少くともこれらの高重要度の構造物が狭い範囲に集中し同時に複数の被害が生じないようにする努力が必要であろう。

おわりに調査に協力して頂いた石崎教授をはじめとする耐風構造部門の方々及び多くの貴重な資料を頂いた関係各機関の方々に深く感謝の意を示したい。

参 考 文 献

- 1) 村松照男 : GMS, レーダー, アメダスシステムによるスコールラインの解析 —1978. 2. 28. 東京の竜巻に関して一, 天気, 第26巻, 1979, pp.399-411.
- 2) 建設省建築研究所第3 研究部企画部 : 1978年2月28日の突風における建築物の被害に関する調査報告書(速報), 建築研究所, 1978, 24p.
- 3) 気象庁予報部 : 昭和53年2月28日の関東地方南部の強風に関する異常気象速報, 一東京竜巻を含む一, 昭和53年防災業務実施状況報告号外, 1978, 3月, 16p.
- 4) 相馬清二 : 竜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論文集, 1978, 12月, pp. 1-8.
- 5) Fujita, T. T. : Analytical Mesometeorology ; A Review, Meteorological Monographs, Sept., 1963, Vol. 5, No. 2, pp. 61-112.
- 6) 光田寧 : 暴風災害を考える際の小規模擾乱の重要性について, 京都大学防災研究所年報, 11号 A, 1968, pp. 499-506.
- 7) Fujita, T. T. : Workbook of Tornadoes and High Winds, SMRP Research Paper No.165, Sept., 1978, 142p.
- 8) Yoshizumi, S. : On the Asymmetry of Wind Distribution in the Lower Layer in Typhoon, J. Meteor. Soc. Japan, Ser. II, Vol. 46, No. 3, 1968, pp. 153-159.