

1978年9月16日に潮岬を襲った竜巻について

石崎 潑雄・光田 寧・林 泰一

TATSUMAKI AT SHIONOMISAKI ON 16TH SEPTEMBER, 1978

Hatsuo ISHIZAKI, Yasushi MITSUTA and Taiichi HAYASHI

Synopsis

At the midnight of September 16, 1978, a small tornado or Tatumaki hit Shionomisaki at the southern end of the Main Island of Japan and caused some damages. The damages were distributed in a narrow belt extending from SSW to NNE. The length of the damaged area was 1.6km and the width was 150m at maximum. The wind direction associated with the Tatumaki was able to be presumed from the direction of blown roof tiles, and the rotating wind system was found. The distributions of pressure fall and wind speed in the Tatumaki were estimated from the meteorological records obtained at some observatories along the path. The peak gust is evaluated to be about 42m/s from the meteorological analysis and also to be more than 40m/s from the damages. The damages caused by the Tatumaki at Tanabe near Shionomisaki in the same month are also discussed.

1. はじめに

1978年に日本付近で発生し、被害を及ぼした竜巻は16個で、そのうち陸上竜巻は13個、海上竜巻は3個であった¹⁾。特に被害が大きかった例は、2月28日夜、関東地方南部の東京湾沿岸を襲ったものであるが、この詳細については、別に報告されているとおりである²⁾。

ところで、この1978年に日本の陸上で見られた13個の竜巻のうち、約1/4にあたる3個が紀南地方で発生していることは、注目に値する。9月15日に南部町岩代、9月16日に串本町潮岬、9月29日に田辺市目良で発生している。このうち、南部町及び潮岬の竜巻は、台風の影響内に発生し、田辺のものは、低気圧に伴なう寒冷前線付近で発生したものである。南部では、屋根瓦が吹飛ばされた程度であったが、潮岬及び田辺では、全壊を含めて、十数戸に被害を引起こした。

著者は、潮岬の竜巻の際に、発生当日に被害調査を行なった。発生時刻が午前零時10分頃であり、目撃者は全く見つけることはできなかったが、竜巻の経路に沿って、潮岬灯台、京大潮岬風力実験所、潮岬測候所および同高層分室の4つの機関で気象観測を行っており、気圧や風速などの気象要素の記録が得られた。これらをもとにして、竜巻の性質について解析を行なうことができた。9月29日の田辺の竜巻についても被害調査を行なうことができたので、この調査結果についても、ここに合わせて報告する。この竜巻に関して、当地での気象観測の記録はほとんど得ることができなかったが、発生時刻が14時30分頃であったため、数人の目撃者があり、竜巻特有の漏斗状の雲が確認され、低気圧性の渦巻であったことも証言されている。

2. 潮岬の竜巻

2.1 たつまき発生当時の気象状況

この竜巻の発生当時の気象状況は、Fig. 1の天気図に示すとおりである。この天気図は、発生前日の9月15日21時のものである。台風18号が九州西部から北部を通過し、東北東に時速40kmで中国地方を横断しつつあった。竜巻が発生したのは9月16日午前零時頃であるが、この時には、台風の中心は、岡山県と兵庫県の間境付近に進んでいた。図中の、台風の中心を通る太い実線は15日午前3時から16日午前4時までの台

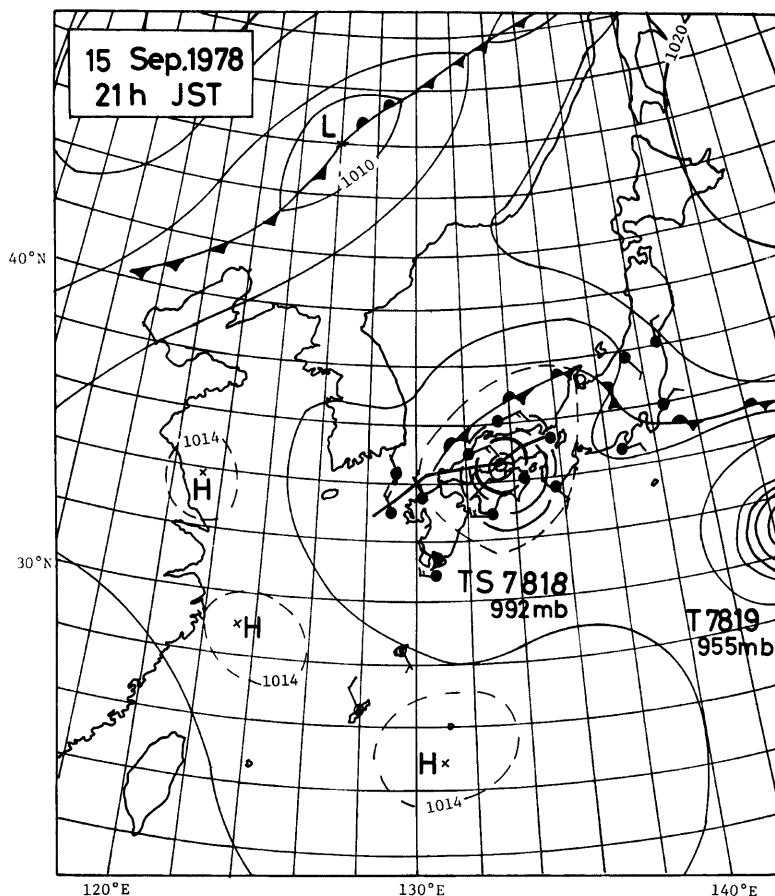


Fig. 1. Surface weather map, 2100 JST, Sept. 15th, 1978.

風の中心の進路を示す。この台風は、9月16日午前4時には、若狭湾付近で弱熱帯低気圧になってしまうが、竜巻発生当時にはすでに中心気圧は995mbでかなり衰弱していたと思われる。潮岬では、この台風に吹きこむ東南の風が吹いていたが、台風が衰弱していたことと、中心からの距離が200km程度も離れていたため、平均風速は7~8m/sであった。

Fig. 2には、潮岬における9月15日21時の高層気象観測の記録をまとめて示している。この図からわかるとおり、地上から400mb程度の高さまでは、ほぼ一様に南よりの高温多湿な風が吹いている。地上の気温は25.7°Cであり、湿度は、850mb付近まで90%以上を示し、下層は高温多湿の条件付不安定状態であったと言える。このときの海面温度の記録はないが、和歌山県水産試験場による毎朝9時の串本港での測定結果によると、9月15日には25.8°C、16日には26.4°Cであった。測定方法は、バケツ採水法による。

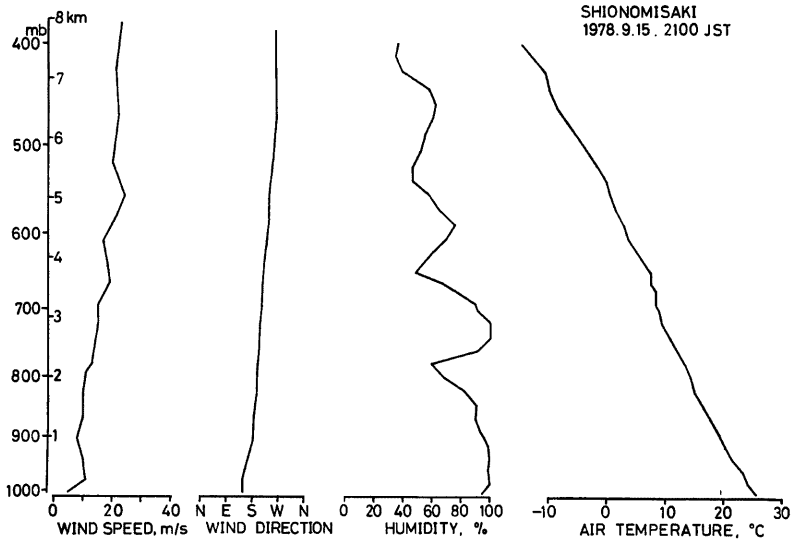


Fig. 2. Aerological data of wind speed, wind direction, humidity and air temperature at Shionomisaki, 2100 JST, Sept. 15th, 1978.

Fig. 3 には、潮岬測候所と潮岬風力実験所の自記記録を示す。測候所の記録によれば、台風の接近につれて、気圧は緩やかに低下しつつあったが、竜巻が通過したと思われる9月16日零時10分に急に2.3mb 低下し、すぐに元に戻っている。また、風力実験所の記録では、余り明瞭ではないが、同時刻頃にわずかな低下が認められる。この違いは、後で述べるように、被害分布から竜巻の経路を推定してみると、測候所の方が風力実験所より竜巻の中心に近かったことによる。

Fig. 4 には、雨量の記録を示す。シャワー性の雨が1時間毎ぐらいに継続的に降っていて、これらの降雨群の1つで竜巻が発生している。この降雨群は、前日の23時50分頃から始まり、竜巻の発生する頃まで約20

WIND EFFECT LABORATORY



SHIONOMISAKI WEATHER STATION

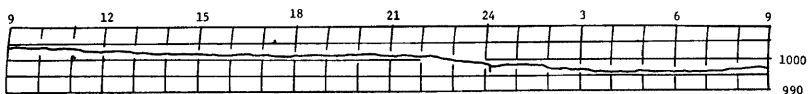


Fig. 3. Records of surface pressure at Shionomisaki Wind Effect Laboratory and Shionomisaki weather station from 0900 JST, Sept. 15th, to 0900 JST, Sept. 16th 1978.

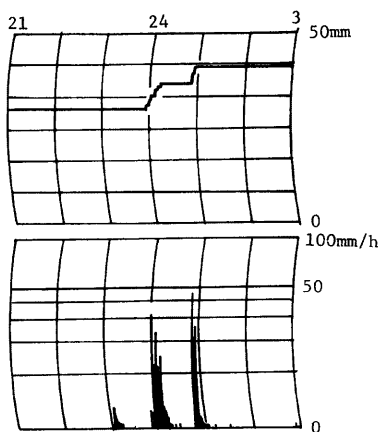


Fig. 4. Records of rainfall and its intensity at Shionomisaki weather station from 2100 JST, Sept. 15th to 0300 JST, Sept. 16th, 1978.

分間にわたって降り続けた。零時頃には、降雨強度は、30mm/hour に達し、強い降雨が竜巻に先行している。そして、竜巻発生時には、雨はほとんどやんでいたと思われる。

風向風速の記録は、京大風力実験所内で2ヶ所、潮岬灯台、潮岬測候所、同高層分室で各1ヶ所の計5地点について得られた。これらを Fig. 5 に示す。竜巻が通過した零時10分頃に、いずれの記録においても、風向の大きな変化が見られ、風速にも鋭いピークが見出される。そのときの最大瞬間風速は、灯台で20.0 m/s、風力実験所の観測室屋上で16.0m/s、同野外実験場で13.8m/s、測候所で11.8m/s、同高層分室で16.3m/s に達している。これらの風速の記録に共通していることは、風速がピークを示す直前に、一時的に、風速が小さくなり、その後急激に大きくなる現象が見られることである。とくに、風力実験所の観測室や高層分室の記録では、風速は0m/sまで低下している。これは、後述するように被害の分布から竜巻の経路を

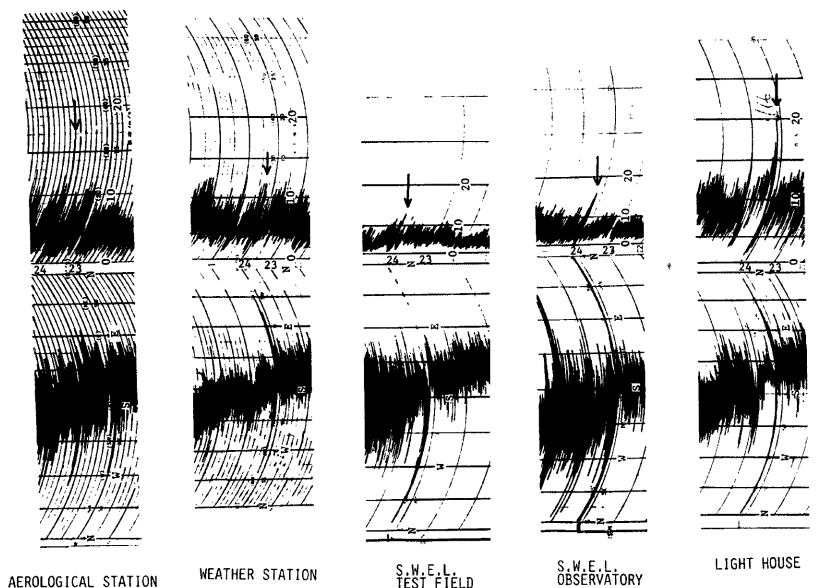


Fig. 5. Records of wind direction and speed near the damaged area. The peak gusts associated with the Tatumaki are pointed by small arrows. S. W. E. L. is the abbreviation of Shionomisaki Wind Effect Laboratory.

推定すると、これらの風の記録が得られた地点は、竜巻の進行方向に対して左側に位置しており、竜巻の低気圧性の旋風風速と移動速度が互いに反対方向になっているために生じた現象である。つまり、竜巻の接近につれて、竜巻による風と一般風が逆方向になり、両者が相殺してしまうときがあったと考えられる。さらに竜巻が接近すると、竜巻の方の風速が大きくなって、風向が逆転し、最大を示すことになったのである。

2.2 被害状況

ところで、この竜巻によって引起された被害は次のとおりである。

(1)住 家 全壊 1件

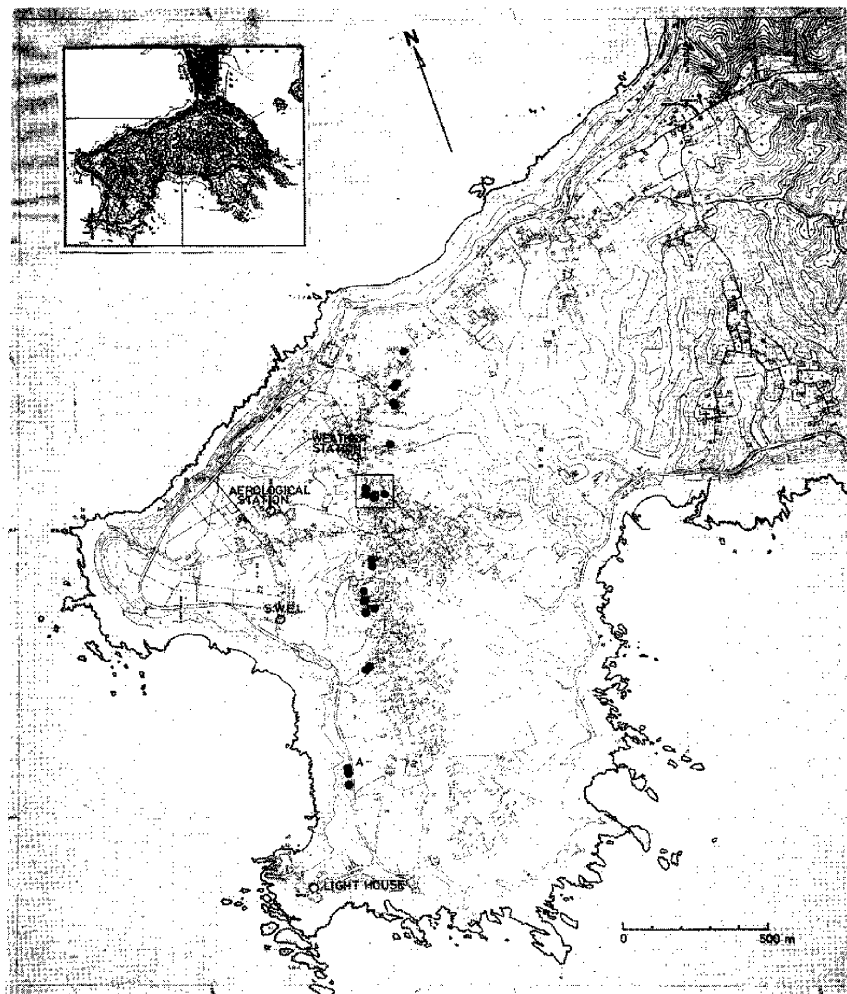


Fig. 6. Distribution of damages by the Tatsumaki. A is the position of destroyed vinyl plastic greenhouse of Photo. 1.

	半壊	一部損傷	15件
(2)非住家	全壊		1件
	半壊	一部損傷	2件
(3)ビニルハウス破損			6件
(4)停電	引込線	1ヶ所	

Fig. 6 に、被害の分布を示す。被害が発生したのは、潮岬の西部で 南々南から北々東に帯状に分布しており、その長さは 1.6km、その幅は 30~150m をもっていた。被害の南限は芝古地付近のビニルハウスの破壊である。この地点は、灯台の北々東 450m にある。ここから、竜巻の北上につれて被害が起こっているが、その分布は、図に示すように、進路に沿って、かなり不均一である。最も被害が集中して発生したのは、Fig. 6 の分布図中に実線で囲んだ部分である。この部分を拡大して図示したものを、Fig. 7 に示してある。図中の矢印は、瓦などの飛散物の方向を示している。この図から明らかなように、道路をはさんで東側と西側では、飛散方向が反対になっている。すなわち、東側では北へ飛び、西側では南へ飛んでいるこれは、この付近で竜巻の中心の経路と道路とが交差していて、道路の両側で、竜巻による風の向きが逆になっていることを示している。つまり、低気圧性の旋回風系の通過を意味している。また被害の幅は道路の東側で約 70m、西側で 40m と、東側の方が広がっている。竜巻の進行方向が北々東であるので、その進行速度の分だけ東側の方が風速が大きく被害の幅も大きくなったと説明できる。以下個々の目立った被害について述べる。Photo. 1 には、Fig. 6 の中に A で示したビニルハウスの破壊のようすを示す。アーチ型の鋼管が上から押しつぶされたような形で折れ曲がっていた。このようなビニルハウスの破壊は、全部で 6 件発生したが、いずれもビニルのおおいをかおせて使用中のものに限られていた。Photo. 2 は、倒壊したコンクリートブロック塀である。この被害は、Fig. 7 の右上の地点で発生したもので、塀の高さは 1.5m、幅 12m で、地中に埋まっている部分は 30cm であった。今回の竜巻の被害の中で最も多く発生したのは、屋根瓦が飛んだものである。Photo. 3 に、この一例を示す。この種の被害では、いずれも風下側の瓦が吹き飛ばされている。これは、風下の屋根面が負圧になり、瓦が吹き上げられて飛ばされたものである。その他、釘で打ちつけた板壁が浮上がった例があった。

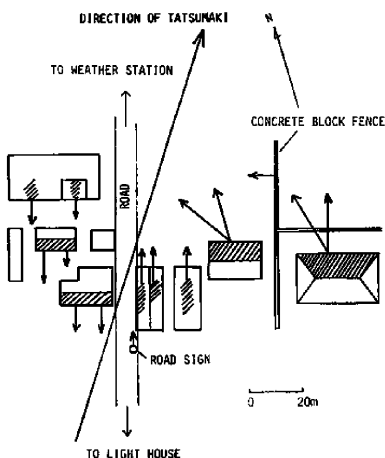


Fig. 7. Details of the area enclosed with a square in Fig. 6.

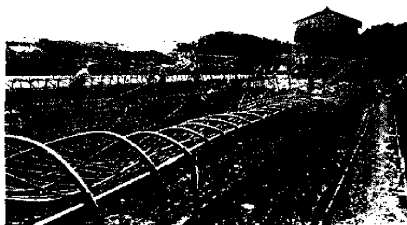


Photo. 1. Damage to a vinyl plastic greenhouse. Its position is pointed A in Fig. 6.



Photo. 2. Damage to a concrete block fence.



Photo. 3. Damage to a tiled roof.

3. 潮岬の竜巻の特徴

先きに述べたように、今回の竜巻の経路付近には潮岬灯台、京大風力実験所、潮岬測候所、高層分室の4つの、気象観測の設備をもった施設があり、気象要素の記録が、比較的豊富に得られた。これらを用いて、解析を試みたので、その結果について述べる。

3.1 竜巻内部の気圧分布

台風などの大気中の渦の気圧分布については、いろいろな式が提案されているが、ここでは、Bjerknesの複合渦を仮定して考えてみる³⁾。周辺気圧に p_m 、竜巻の中心気圧を p_c 、中心から距離 r での気圧を p 、旋衡風速が最大となる半径を r_m とすると、気圧の低下量 $\Delta p (= p_m - p)$ は、中心気圧の低下量 $\Delta p_c (= p_m - p_c)$ と、中心からの距離の関数として

$$\Delta p = \Delta p_c \cdot \frac{1}{1+x^2} \quad (1)$$

ここで

$$x = \frac{r}{r_m} \quad (2)$$

と書くことができる。

ここで、Fig. 7 の被害分布の拡大図から考えて、 $r_m = 25\text{m}$ とし、測候所の気圧の記録では、この竜巻に伴う気圧の低下量は $\Delta p = 2.3\text{mb}$ 、また測候所と竜巻の中心経路との最短距離 $r = 75\text{m}$ を用いて、(1)式から中心気圧の低下量 Δp_c を求めると、 $\Delta p_c = 23.0\text{mb}$ となる。従って、この竜巻の地表での気圧の分布は、

$$\Delta p = \frac{23.0}{1+x^2} \quad (3)$$

のように表わされる。

3.2 気圧分布から風速分布の推定

竜巻程度のスケールの渦では、コリオリ力は、遠心力に比べると無視できるから、気圧傾度力と、遠心力との釣り合いのような旋衡風近似を仮定すれば次式が成立する。

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \rho \frac{v^2}{r} \quad (4)$$

ここで、 p は竜巻内の気圧、 v は旋衡風速、 ρ は空気密度、 r は中心からの距離である。(1)式を(4)式に代入して v について解くと、

$$v = \sqrt{\frac{2\Delta p_c}{\rho} \cdot \frac{x}{1+x^2}} \quad (5)$$

となるから、3.1 で求めた、 $\Delta p_c = 23.0\text{mb}$ ($= 2.30 \times 10^3 \text{ N/m}^2$) および、このときの気象条件、気温 25.7

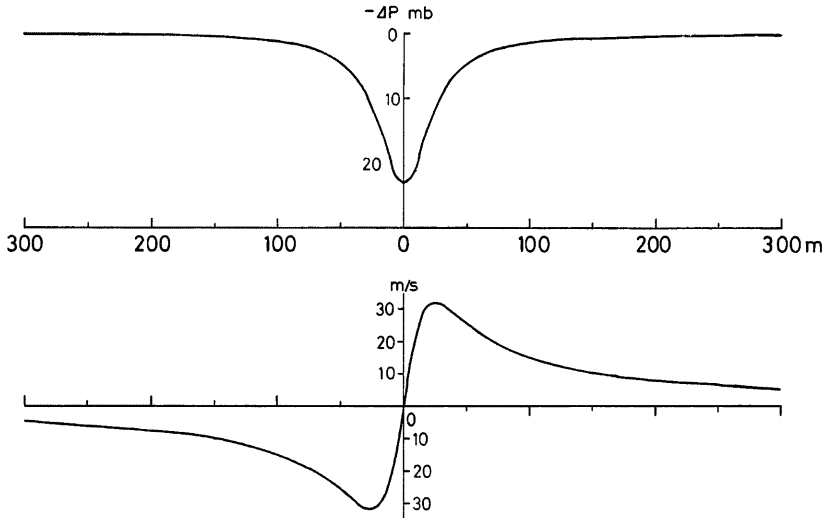


Fig. 8. Distribution of estimated pressure fall and wind speed in the Tatsumaki.

°C, 気圧 997.8mb での空気密度 $\rho=1.125\text{kg/m}^3$ を用いると, 風速分布として

$$v_{\theta}=63.94 \cdot \frac{x}{1+x^2} \quad (6)$$

を得る。 v_{θ} が最大となるのは, $r_m(x=1$ のとき) においてであり, その値は, $v_{\theta_{max}} \approx 32\text{m/s}$ となる。(3式と(6)式の関係を図示したのが, Fig. 8 である。竜巻の中心から 300m も離れると, 気圧の低下量は 0.16mb にすぎず, この程度, 竜巻から離れていたと考えられる風力実験所では, 竜巻に対応した気圧の低下が, 単に痕跡程度しか記録しなかったことうなずける。

3.2 風速の記録からの竜巻の風系の推定

地上に固定された風速計で観測される風向風速は, 竜巻の気圧場に対応する旋衡風とたつまきの移動速度と一般風の3つが合成されたものと考えられる。一般風と竜巻の移動速度がわかれば, 実際の風の記録から, ベクトルの的に引去ることによって, 竜巻の風を取出すことができる。そこで, 潮岬灯台 風力実験所の観測室, 測候所, 高層分室の4地点の風の記録をもとにして解析してみた。

4地点の風向風速を1分毎に読みとり, 各々から, 一般風と移動速度をベクトルの的に引去る作業を行ってここで用いた一般風は, 竜巻発生前後の平均風向風速で, 観測地点によって異っており, 灯台で北 135°東 8.5m/s, 風力実験所で, 北 170°東, 6.0m/s, 測候所で北 165°東, 6.5m/s, 高層分室で北 150°東, 5.5m/s である。移動方向は, Fig. 6 の被害分布図から考えて, 北 30°東で一定であるとする。移動の速さは, 不明であるが, 風力実験所と測候所の気圧の低下の時刻の差, 灯台と測候所の風の変化の発生時刻の差などから考えて, 合理的に想定される毎時 15km と仮定して計算をおこなってみた結果が Fig. 9 である。この図では, 各地点各時刻の風向風速を, 竜巻の中心に相対的な位置における値に換算して示している。竜巻の中心から右側には, (6)式から求まる風速の分布を参考のために図示した。この図から, 竜巻の風系は, 低気圧性の回転をしており, 風速についても, 気圧分布から計算した旋衡風の風速分布が, いくつかの例外を除いては作り出されており, 中心に近いところでは, 実際の風がここで考えたようにベクトル合成が可能であ

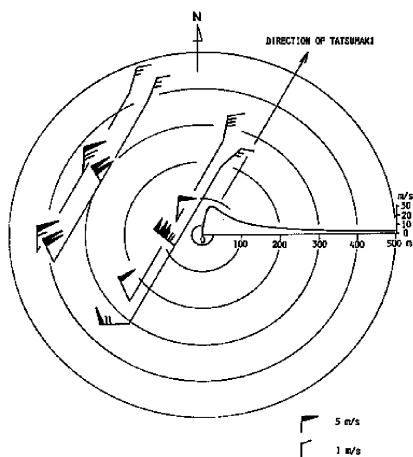


Fig. 9. Estimated cyclostrophic wind distribution in the Tatsumaki. Thick solid curve is the estimated wind speed from the pressure field in the Tatsumaki.



Photo. 4. Failure of a road sign.

ることを示している。

3.3 被害からの最大風速の推定

前節では、気象要素の解析から、竜巻の風速分布と気圧分布を推定した。ここでは、被害から、実際に吹いた風速の推定を行ってみた。Photo. 4 に示すような道路標識が、Fig. 7 の中央部に示すような場所で、南から北へ向かって、根元から完全に折曲がっていた。この標識が、静的な風圧力によって倒れたものであり、破壊部分で部材（鋼管）は全面降伏し、その耐力は、破壊応力度 $\sigma_B = 4.02 \times 10^3 \text{ N/m}^2$ 、降伏応力度 $\sigma_s = 2.35 \times 10^3 \text{ N/m}^2$ と推定した。Photo. 4 でわかるように、この標識には、直角に風圧をうける面が、2つの円板（直径 0.6m）と2つの長方形（0.4m×0.22m）の板の4つの標示板が付いており、これらが受ける風によるモーメントは次のように考えられる。

$$\frac{1}{2} \rho V^2 \sum_{i=1}^4 c_i A_i h_i \geq z \sigma_s s \quad (7)$$

ここで、 c_i は抗力係数 1.2、 ρ は空気密度で、先きのとおり、 1.125 kg/m^3 、 v は風速、 z は断面係数で、 $7.84 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ 、 s は降伏点モーメントと全塑性モーメントとの比で 1.27、 $A_1 = A_3 = 0.28 \text{ m}^2$ 、 $A_2 = A_4 = 0.088 \text{ m}^2$ 、 h_i は A_i の中心の地上高で、 $h_1 = 3.50 \text{ m}$ 、 $h_2 = 3.09 \text{ m}$ 、 $h_3 = 2.68 \text{ m}$ 、 $h_4 = 2.27 \text{ m}$ として、(7)式をとくと、 $V \geq 39.5 \text{ m/s}$ となる。この値は、旋回風の最大値 32m/s よりかなり大きい。実際に、標識のところで吹いていた風は、3.2 に述べたとおり、この竜巻の風と、その移動速度約 5m/s、この場所での一般風速 5m/s 程度が重り合ったものであると考えられるから、推定風速は、42m/s 程度になり、標識の破壊は十分考えられるものとなる。

ところで、潮岬候所で、最大瞬間風速 42m/s 以上となったことは、今まで、7 例もあり、それほど珍しいことではない。そのときには、今度のような被害は生じていない。たとえば、1961年の第2室戸台風のときには、潮岬候所では、最大瞬間風速は 41m/s を記録しているが、潮岬における被害率は、0.05% 以下である。このように同じ風速値に対して、竜巻の場合と台風の場合とでは、被害の発生率が異なっている⁵⁾。

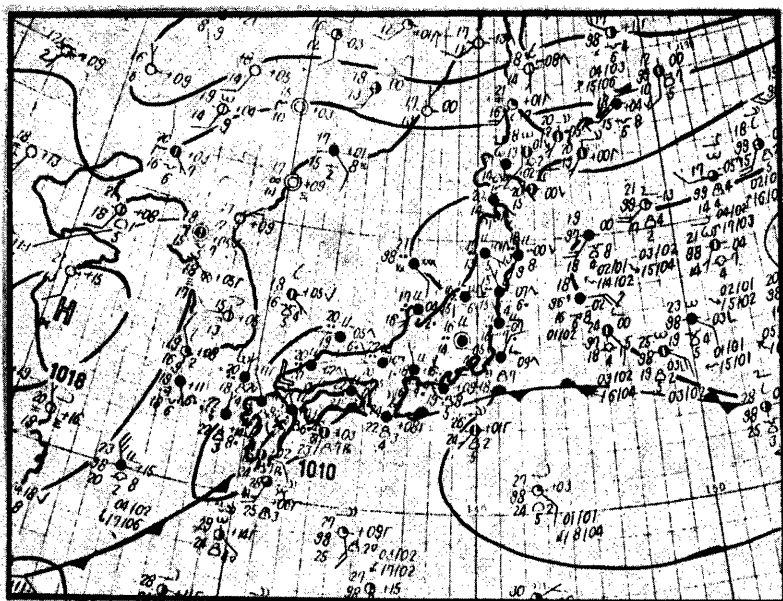


Fig. 10. Surface weather map, 0900 JST, Sept. 29th, 1978.

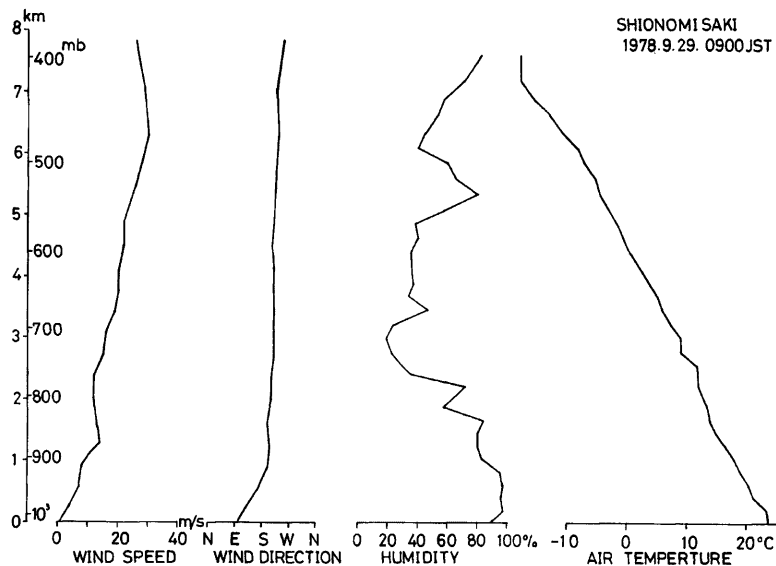


Fig. 11. Aerological data of wind speed, wind direction, humidity and air temperature at Shionomisaki, 0900 JST, Sept. 29th 1978.

4. 田辺市の竜巻

4.1 発生時の気象状況

竜巻の発生した9月29日9時の地上天気図を Fig. 10 に示す。九州に 1010mb の低気圧があり、これからのびる前線が紀伊半島の南にかかっている。この低気圧は、同日21時には、関東沖に進んでおり、14時頃には、その中心は、近畿地方通過中であった。

Fig. 11 には、潮岬での高層観測の結果を示す。これは、9月29日9時の観測によるものである。風向は、地上で東であるが、990mb 以上では、南であった。気温は、地上で、25.1℃、湿度は94%であり、下層には、高温多湿な空気が吹き込んでいた。

被害をうけた目良地区の住民の証言から、竜巻の発生当時、雷鳴や強い降雨があったことがわかっている。

付近で得られた、気象要素の記録は、田辺漁港事務所の風向風速の一例だけである。観測地点は、竜巻の経路から、約 1km も離れた地点である。この記録を Fig. 12 に示す。風速には、14時から15時にかけて、2回ピークがあり、最初のピークのあと、一度風速が 0m/s まで落ちて、小さなピークを生じ、再び小さくなった後、二度目のピークに達する。風向は、大きく変化し、複雑に動いている。単純に考えれば、竜巻の経路の右側で風を測定しているのだから、竜巻の接近につれて、風速は大きくなるはずであるが、観測地点が離れているため、直接、竜巻の風が観測されなくても不思議ではない。

4.2 被害の概要

竜巻による被害の主なものは次のとおりである。

住 家	全壊 1 件
	半壊、一部損傷 6 件
非住家	全壊 1 件
乗用車の被害	6 台
ヨット・小型船舶	2 隻
電話線の断線	1 件

被害の分布は、Fig. 13 に示す。被害は、南西から北東への細長い帯状に発生し、その長さは、約 1km、その幅は 50～15m であった。目撃者の話を総合すると、この竜巻は、元島の南の海上で発生し、水しぶきを上げながら、堤防を乗り越え 元島にある旅館「元島館」を直撃し、海上を渡って、再び上陸した。上陸直後に、乗用車数台を巻き上げたり、移動させたりした。さらに、人家数ヶ所に被害を与えたあと、直進して、ヨットハーバーで係留中のヨットや、陸揚中のモーターボートを持上げて海中へ落としている。その後 山へ上がって消滅したらしい。Fig. 13 の中の破線で、その経路を示す。

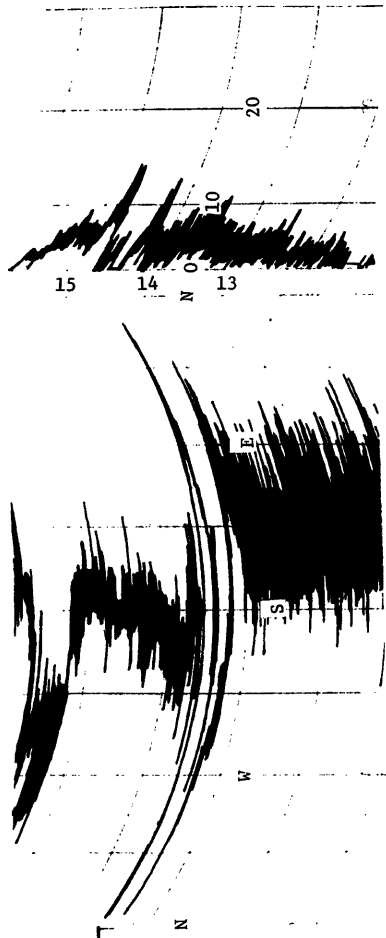


Fig. 12. Records of wind direction and speed at Tanabe Fishery Port Office.

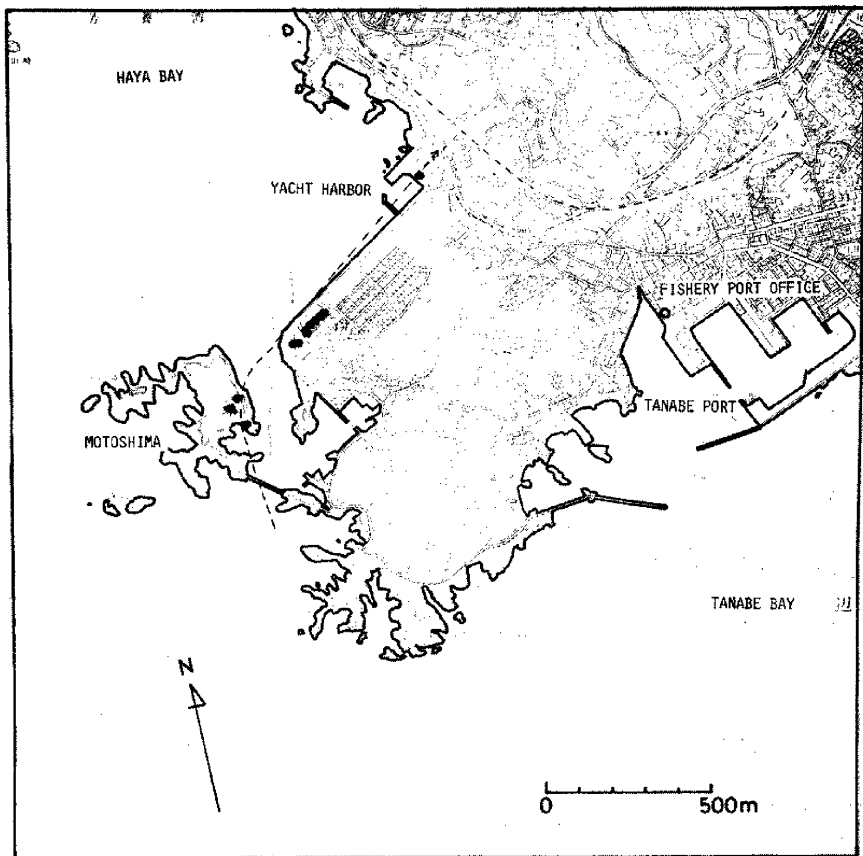


Fig. 13. Distribution of damages by the Tatsumaki. The dashed line is the path of the Tatsumaki.

Photo. 5 に最も被害の大きかった「元島館」の内部のようすを示す。屋根瓦が、ほとんど飛ばされ、天井板や窓ガラスも破られている。**Photo. 6** は、「元島館」付近の浜辺にあった作業場である。これは、コンクリートの床の上にあった木製の屋根と柱が持ち上げられて、方向を変え、約 100m 離れた海中に落下したのを引上げたものである。**Photo. 7** は、被害が数多く発生した目良地区で、トタン屋根が吹飛ばされた例である。この付近では、他に、窓ガラスが破られたり、天井板が持ち上げられた例があった。また、乗用車が持ち上げられて、一回転して落下した報告もあった。**Photo. 8** は、被害の北端のヨットハーバーで、陸揚げ中に持ち上げられて、海中に落ちたモーターボートである。長さ 7m、幅 2m、重さ約 3t であり、これが高さ約 5m 持ち上げられ、南西に約 50m 運ばれて海中へ落下した。



Photo. 5. Failure of a ceiling at inn 'Motojimakan'.



Photo. 6. Completely damaged workshop.

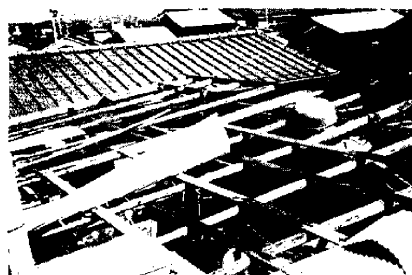


Photo. 7. Roof failure due to uplift.



Photo. 8. Damaged mortarboat at Yacht Harbor.

5. む す び

昨年の9月に潮岬と田辺で発生した竜巻について、被害調査を実施して、顕著な被害について述べた。

潮岬は、年平均の風速が約 4.5m/s で日本でも比較的風が強く、台風の襲来もたびたびあるので、昔から、防風林や石垣が普及し、屋根瓦などもシッキで固めたり、金網でおおうなどの防風対策がなされてきた。しかしながら、今回の竜巻のような現象に対して被害が発生したことは、これらの対策が、あまり有効でないことを示している。

今回、潮岬では、竜巻の経路に沿って風向風速や気圧などの気象観測の記録が得られたので、竜巻の特徴について、いくつかの解析が可能となり、竜巻の中の気圧分布や、旋衝風速の分布を求めることができた。また、被害からも風速を推定できて、最大瞬間風速は 40m/s 以上と推定された。気象要素の観測記録から求めた風速値は、 42m/s であり、両者には大差ない。このように、ある程度、竜巻の性質が表現できたことは、余り例がない。この竜巻の規模は、決して大きいものとは言えないが、竜巻に対する防災対策を作成する上において役に立つ例となると考えられる。また台風による風の被害と、竜巻によるものとの間には差異があることなど、今後、解決してゆかねばならない問題は多い。

この論文をまとめるにあたり、資料を提供していただいた、潮岬灯台、潮岬測候所、田辺漁港事務所の方々に感謝する。また、被害調査に同行していただいた、京都大学防災研究所附属潮岬風力実験所技官の尾崎寿秀、河内伸治の両氏に感謝する。被害の解析に関して議論をしていただいた、防災研究所助手、谷池義人氏に感謝する。

参 考 文 献

- 1) 市川清見 : 1978のたつまき, 気象, 第22巻, 第12号, 1978, p.10.
- 2) Ishizaki, H., Y. Mitsuta, Y. Taniike and Y. Iwatani : A Tatumaki in Tokyo on February 28th, 1978, Proc. 5th International Conference on Wind Engineering.
- 3) Bjerknes, V. : On the Dynamics of the Circular Vortex with Application to the Atmosphere and Atmospheric Vortex and Wave Motions, Geophysiske Publikationer, Vol. 2, 1921, pp. 1-81.
- 4) 日本気候表 その3 おもな気象要素についての極値と順位, 気象庁, 1972。
- 5) 石崎澄雄, 原田悦彦 桂 順治 : 第二室戸台風による家屋の風害について, 京都大学防災研究所年報, 第6号, 1963, pp. 81-94。
- 6) 山元龍三郎, 光田 寧 宮田賢二 : 第二室戸台風時の強風の分布について, 京都大学防災研究所年報, 第6号, 1963, pp. 113-127。