

台風域内における地表風のシミュレーション

光田 寧・藤井 健・塚本 修

SIMULATION OF THE SURFACE WIND IN TYPHOON

By Yasushi MITSUTA, Takeshi FUJII, and Osamu TSUKAMOTO

Synopsis

The prediction equation for the surface wind in typhoon is established, through the procedure of a multiple regression analysis. The Standard Project Typhoon is moved on the tracks directed for N30°E and N30°W, and then time change of the surface wind in Osaka and Hiroshima are simulated. As a result, the following features are revealed; (1) on the track directed for N30°E the maximum wind is occurred after turning to the westerly wind in Osaka, (2) on the course passing to the east of the station wind is not necessarily low, and (3) on the track directed for N30°W higher wind is induced than that directed for N30°E.

1. 序

暴風による災害防止の目的で建造物の設計風速などの評価のさいには、一般には、問題とする場所において過去に実測された風速の最大値あるいは風速の実測値を統計処理して算出した再現期待値が使用されている。大規模な災害をひき起すような暴風は、日本海沿岸地方を除く関東地方以西において、最大級の台風にもなって発現すると考えてよい¹⁾のであるが、わが国の気象観測の歴史は浅く、そのうえに、最大級の台風の本土上陸頻度は10年に1～2個程度で極めて少ない。さらに、個々の台風の通過にともなう暴風による災害域は幅数十km程度の地域内のみであり、したがって、経路の偶然性が一地点の観測値の最大値および再現期待値に大きく影響を及ぼして、これらの値は信頼性が乏しいのである。

そこで、われわれの研究グループは、過去に日本本土に上陸した顕著台風について気圧場の解析を行い、標準計画台風というモデル台風を作成し、それを仮想的な経路にそって移動させていくことによって各地の暴風の程度を予測する方法の開発に関する研究を進めてきた^{2)～7)}。このような手法により、気象観測の歴史の浅さや最大級の台風の上陸頻度の少なさを補うとともに、統計的にも裏づけのある予測を行うことが出来るのが本研究の特徴である。

台風域内の地表風については、移動する気圧場とバランスする傾度風と比較すると、場所によって、また風向によって、その間の関係が著しく異っている⁸⁾。これは地表風に対するその場所周辺の種々のスケールの障害物の効果が、場所により、また風向により、著しく異なっていることに起因すると考えられる。このような障害物の効果については、多様な地形因子を設定し、具体的な地形の情報を使用して、地表風を推定する方法が試みられている^{9)～10)}が、しかし、それらでは気圧場との関係については全然考慮に入れられていないく、利用方面においても制限がある。

一方、われわれは、まず気圧場を設定し、それが移動したときにバランスしている傾度風を力学的に算出し、この風から地表風への換算式を場所ごとに重回帰分析により作成し、より合理的な方法で地表風を予測する方法を開発した。さらに、標準計画台風を仮想的な経路にそって移動させ、そのときの地表風の時間的変化をシミュレートしたが、本論文においては、その例として、大阪および広島の場合について報告する。

2. 地表風予測式の作成

われわれは, R. W. Schloemer の気圧分布式¹⁰⁾,

$$p = p_c + \Delta p e^{-\frac{r}{x}} \quad (1)$$

を, 等圧線の分布が同心円状であると想定して, 気圧の実測値に客観的に適合させる方法を開発した¹¹⁾。この式で, p は気圧, p_c は中心気圧, Δp は中心気圧低下量 (周辺気圧 $p_\infty - p_c$), x は最大旋衡風速半径 r_m に対する中心からの距離 r の比である。この方法を利用して, 1951~1978年の28年間に日本本土に上陸した台風のうち, 上陸時の中心気圧が 980mb 以下の38個の顕著台風について, 本土上陸後毎正時, 気圧場の客観解析を行った。その結果を合成して顕著台風の気圧分布の一般的特性を地域別に明らかにし, Δp については再現期待値を求め, 標準計画台風の気圧場を作成している⁴⁾。ここでの地表風の予測式の作成はこの顕著台風の気圧分布と実際に観測された地表風との関係を利用して行った。

この合成した気圧場を実際に観測された速度で移動させた場合にそれとバランスする傾度風, すなわち, friction-free wind (FFW と略す) を吉住の方法¹²⁾を適用して算出した。FFW は地表の障害物の影響の及ばない上空の風と考えられるが, これにその場所周辺の障害物の影響を取り入れて地表風に換算するための地

Table 1. Partial regression coefficients for a prediction of deflection angle of directions of the surface wind from the friction-free wind.

Station	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7
Fukuoka	81.7	-.273	38.9	-59	-0.94	.059	-.194	1.35
Kumamoto	32.9	.922	14.1	-34	-0.75	.072	-.131	6.24
Miyazaki	44.0	-.008	0.8	57	-1.09	-.017	.095	-3.77
Kagoshima	32.0	.066	13.5	-26	-0.47	.018	-.027	3.62
Hiroshima	37.1	.283	30.4	-53	1.07	-.001	-.060	0.68
Kochi	33.0	1.133	12.7	56	-0.67	-.076	-.003	-1.03
Osaka	70.6	-1.578	35.2	-44	2.43	-.024	-.002	-3.33
Shionomisaki	-25.6	.624	30.1	219	-1.83	-.202	-.003	13.89
Nagoya	35.0	.340	20.3	215	-1.12	-.029	-.040	6.82
Shizuoka	28.0	.142	12.7	119	-1.13	.404	.011	1.33
Tokyo	22.2	-.878	36.1	-87	0.21	.616	-.259	1.89

Table 2. Partial regression coefficients ($\times 0.01$) for a prediction of ratios of speeds of the surface wind to the friction-free wind.

Station	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7
Fukuoka	99.0	-1.76	14.1	75	0.45	0.025	-0.051	-5.14
Kumamoto	82.4	-1.20	7.1	235	-0.08	-0.058	-0.088	1.08
Miyazaki	91.9	-0.69	21.9	38	0.17	0.080	-0.080	-0.50
Kagoshima	72.6	-0.75	18.8	25	0.55	0.016	-0.036	3.94
Hiroshima	60.7	-0.51	10.8	27	1.01	-0.041	-0.084	-0.20
Kochi	49.1	-0.24	16.2	-75	0.35	-0.037	-0.136	6.56
Osaka	53.8	-0.46	14.4	73	0.40	0.119	-0.042	0.20
Shionomisaki	132.3	-1.82	20.3	42	1.31	-0.074	-0.163	7.20
Nagoya	75.9	-0.28	5.2	211	0.10	-0.134	-0.113	0.83
Shizuoka	43.3	-0.01	6.0	245	-0.46	-0.033	0.016	-1.20
Tokyo	37.8	-1.02	38.9	250	0.27	0.292	-0.078	-0.33

Table 3. Correlation coefficients and r.m.s. errors between the observed surface winds and the computed ones.

Station	Number of typhoons	Samples	Wind direction		Wind speed	
			r	σ (deg)	r	σ (m/s)
Fukuoka	18	73	0.99	20	0.41	3.4
Kumamoto	20	114	0.99	19	0.43	3.1
Miyazaki	19	107	0.96	14	0.73	3.8
Kagoshima	19	93	0.96	16	0.62	3.3
Hiroshima	21	63	0.99	22	0.63	3.5
Kochi	17	87	0.97	19	0.85	3.0
Osaka	17	72	0.99	16	0.75	3.4
Shionomisaki	13	61	0.91	17	0.63	4.1
Nagoya	20	46	0.93	29	0.87	3.1
Shizuoka	14	29	0.93	22	0.80	3.1
Tokyo	9	20	0.91	22	0.80	3.1

 r : correlation coefficient σ : r.m.s. error

表風予測式を次のような方法で作成した。

FFW と地表風の間の関係については、風向は偏角 (DWD と略す)、風速は比 (RWS と略す) で表わすことにし、これらに影響を及ぼすと考えられるパラメーターとして、FFW の風向 d_f と風速 V_f 、中心の移動方向 C_d と速さ C_s 、中心からの距離 r 、および式 (1) のパラメーターの一つの x を選んだ。台風がその場所から 200km 以内に存在する毎正時の観測資料を用いて、場所ごとに重回帰分析を行い、次のような形の地表風予測式を作成した。

$$\left. \begin{array}{l} \text{DWD} \\ \text{RWS} \end{array} \right\} = a_0 + a_1 V_f + a_2 \sin(d_f + a_3) + a_4 C_s + a_5 C_d + a_6 r + a_7 x \quad (2)$$

ただし、 $a_0, a_1, a_2, \dots, a_7$ は偏重回帰係数である。

関東以西の代表的11地点における地表風予測式の偏重回帰係数の値は、DWD については **Table 1**、RWS については **Table 2** のようになる。これらの表で、DWD は度、RWS は100倍の値で表わしてあり、また、 V_f は m/sec、 d_f は度 (北の風から時計まわりに測る)、 C_s は m/sec、 C_d は度 (東向きから反時計まわりに測る)、 r は km の単位にとってある。これらの係数の値には地点により著しい差がある。その差については、さらに検討する必要があるが、しかし、障害物による影響が大きいと考えられる風向のときには、DWD が大きく、RWS が小さくなる傾向があるので、主として、その地点周辺の地形などの障害物の効果によるものであると考えられる。

これらの地表風予測式を作成するために使用した資料とこれらの係数を用いて、DWD および RWS を算出し、地表風の風向・風速に換算し、そのときに実際に観測された地表風の風向・風速と比較した。計算値と実測値の相関係数および r.m.s. 誤差については **Table 3** のようになる。風向については相関係数は 0.91~0.99、r.m.s. 誤差は 14°~29° の範囲内にあり、風速については、それぞれ、0.41~0.87 および 3.0~4.1 m/sec の範囲内にある。独立した資料による検査でない点問題はあるが、防災など実用的な方面への利用には十分な地表風予測式が作成できたのである。

3. 地表風の時間的変化のシミュレーション (1) 大阪の場合

Schloemer の気圧分布式で表現したモデル台風の気圧場を仮想的な経路にそって移動させたときの地表風の時間的変化について地点ごとにシミュレーションを試みた。その例として大阪の場合については次のよう

になる。

モデル台風の中心が大阪より南 150km の東西方向の線上に到達した位置を上陸地点とし、そのときの中心気圧低下量を $(\Delta p)_0$ とし、上陸 t 時間後のそれを $(\Delta p)_t$ とする。以前の調査⁵⁾によると、上陸時の中心気圧が 960mb 以下の強い台風については、 Δp の値は上陸後数時間ほぼ指数関数的に減少することが明らかであり、それらの台風の Δp の平均的減衰率を利用して、 $(\Delta p)_t$ を次の式で求めることにした。

$$(\Delta p)_t = (\Delta p)_0 \exp(-0.0802 t) \quad (3)$$

また、 $r_m=60\text{km}$ 、 $C_s=60\text{km/h}$ とし、 C_d としては 60° ($N30^\circ E$ の方向) および 120° ($N30^\circ W$ の方向) の 2 方向について、中心が大阪から 200km 以内に中心が存在する時間帯にわたってシミュレーションを行った。

3.1 $N30^\circ E$ の方向に移動する場合

$N30^\circ E$ の方向は、以前の調査において⁵⁾、強い台風の上陸時の平均的移動方向であり、最も頻度が高い移動方向である。 $(\Delta p)_0$ の値を 80mb とする。この値は、以前の研究⁵⁾によると、四国・近畿の南岸に上陸する台風については、海岸線 100km あたりに100年に1回上陸する程度の再現確率をもつものである。上陸後の Δp の時間的变化は、式(3)によって、Fig. 1 のようになり、約3時間後に大阪を通る東西線上に達し、そのときの Δp は 63mb にまで減衰している。台風の中心の経路としては、Fig. 2 に示すように、(A)大阪の西 50km を通過する経路、(B)大阪をちょうど通過する経路、(C)大阪の東 50km を通過する経路の3通りの経路とした。各経路にそって、台風の中心が移動したときの気圧 ($p_\infty=1008\text{mb}$ として $p_\infty-p$ より換

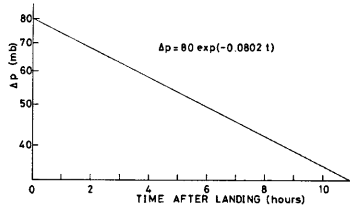


Fig. 1. Time change of central pressure depth, Δp , after landing.

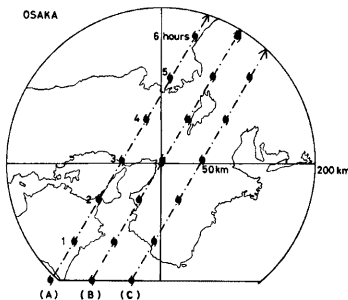


Fig. 2. The tracks and the hourly positions of typhoon center moving in the direction of $N30^\circ E$. Course (A) runs through 50km away to the west of Osaka, Course (B) just over Osaka, and Course (C) 50 km away to the east of Osaka.

算) と中心からの距離の時間的变化は Fig. 3 (a), (b) および (c) の上図にそれぞれ実線と破線で、地表風の風速と風向の時間的变化は同じ図の下図にそれぞれ実線と破線で図示してある。いずれの経路においても、中心最接近後の吹き返しの南西～北西の風のほうが風が強いが、これは FFW が最大となる中心最接近前においては RWS が 0.25 程度と非常に小さく、紀伊半島の山岳地帯の効果によるものではないかと考えられる。実際にも、大阪では、台風がこのような経路をとるとき、中心通過後の吹き返しの西よりの風が予想外に強い場合が多く、現実の台風にもなる風速変化をよく表現しているようである。

また、3 経路について比較すると、FFW の最大風速は経路(A)では 49.9m/sec、(C)では 32.9m/sec であり、(A)のほうが 20m/sec 近く大きいかかわらず、そのときの RWS が(A)で 0.33、(C)では 0.61であるために、地表風速は(A)よりも(C)のほうが少し強くなっている。この現象は一般的常識とは逆のものであり、他の地点における移動方向 $N30^\circ E$ のシミュレーションにおいても出現するところがある。この点についてさらに検討が必要である。しかしながら、大阪においては、台風の中心が東方を通過するから比較的弱いと判断して、警戒を怠ってはいけなことは言うてよいであろう。

なお、各経路ともに、台風の強さのわりには、風は弱いようであるが、これは FFW と地表風の関係が、

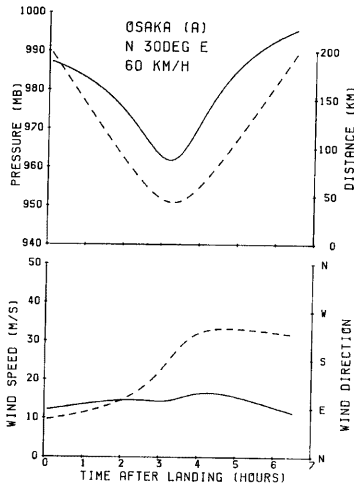


Fig. 3(a). Time change of the simulated surface wind in Osaka during the passage of the model typhoon on Course (A) in shown in Fig. 2. Solid and broken lines in the upper chart indicate pressure and distance from typhoon center, respectively. Those in the lower chart indicate speed and direction of surface wind, respectively.

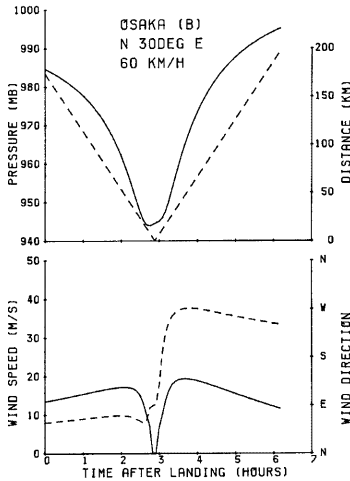


Fig. 3(b). Same as Fig. 3(a), except for the passage on Course (B).

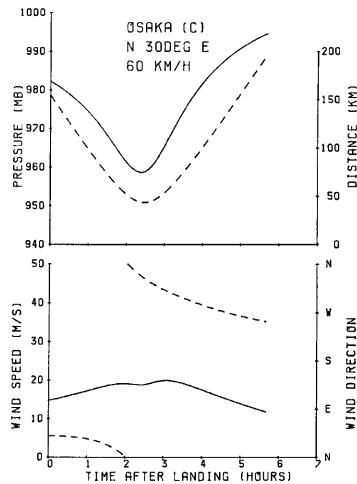


Fig. 3(c). Same as Fig. 3(a), except for the passage on Course (C).

(2) 式のような直線的回帰ではなく最大風速半径のところで RWS が最大を示すような複雑な形をしている可能性があることによると考えられ、(2) 式を用いることに再検討を必要としている。

3.2 N30°W の方向に移動する場合

この移動方向は、強い台風では極めて頻度の少ない方向であるが、N30°E の方向の場合の結果と比較することが目的でシミュレーションを行った。Fig. 4 に示すように、3 通りの経路にそって台風の中心を移動させ、他は N30°E の方向の場合と同じ条件でシミュレーションを行った。地表風の時間的変化の状況に

つては、Fig. 5 (a), (b) および (c) に図示してあるが、いずれの経路においても、中心の最接近時以前の北～北東の風のときに最大風速が出現している。中心最接近時前においては、FFW が東よりの風であり、RWS は0.45～0.65程度と $N30^{\circ}E$ の方向の場合に比べて大きいのである。経路 (A) と (C) について最大風速を比べてみるとほとんど差がなく、 $N30^{\circ}W$ の方向に移動する場合も、中心が東方を通過するから風

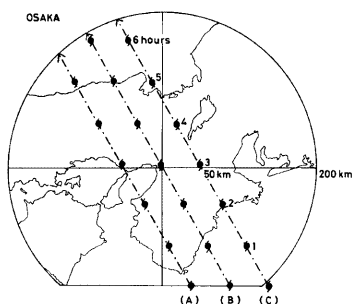


Fig. 4. Same as Fig. 2, except for the direction of $N30^{\circ}W$.

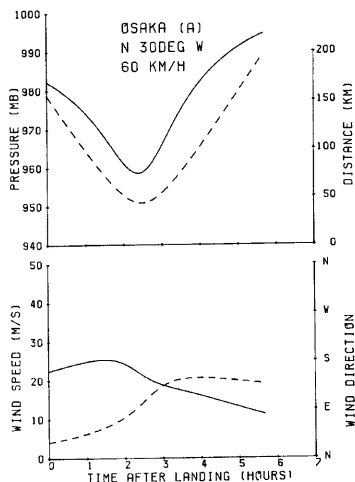


Fig. 5(a). Same as Fig. 3(a), except for the passage on Course (A) shown in Fig. 4.

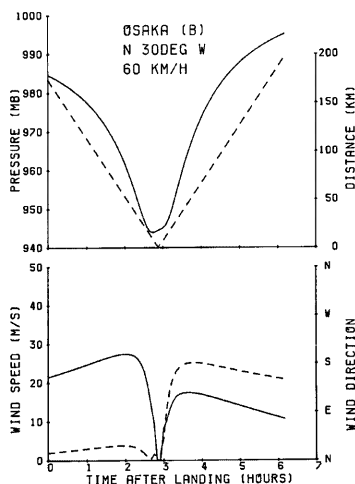


Fig. 5(b). Same as Fig. 3(a), except for the passage on Course (B) shown in Fig. 4.

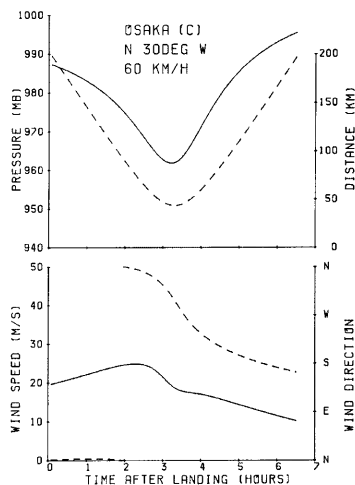


Fig. 5(c). Same as Fig. 3(a), except for the passage on Course (C) shown in Fig. 4.

は強くならないと判断しては危険であることを表わしている。また、移動方向 $N30^{\circ}E$ の場合と最大風速を比較してみると、 $N30^{\circ}W$ の方向の場合のほうが $5\sim 10\text{m/s}$ 強くなっている。したがって、この方向に台風が移動してくる場合には、上陸時の中心気圧が 970mb であったが大阪では 20m/sec 近くの強風が数時間続いた7002号台風の場合のように、台風の強さのわりには強い風が吹くので十分に警戒する必要がある。

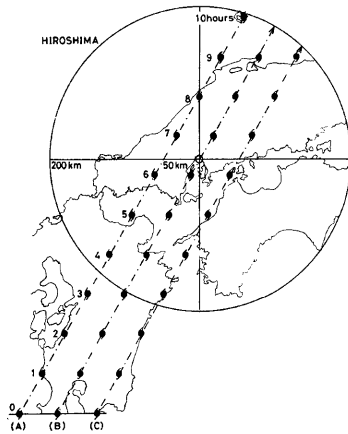


Fig. 6. Same as Fig. 2, except for Hiroshima.

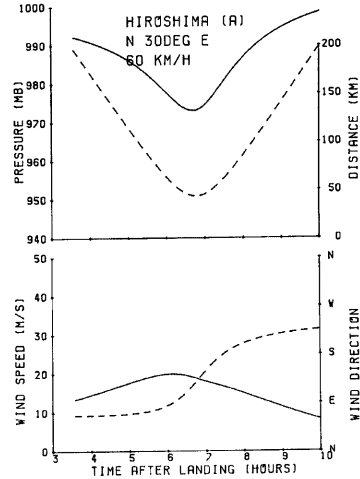


Fig. 7(a). Same as Fig. 3(a), except for Hiroshima.

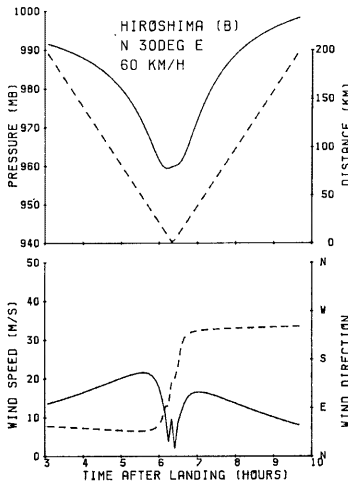


Fig. 7(b). Same as Fig. 3(b), except for Hiroshima.

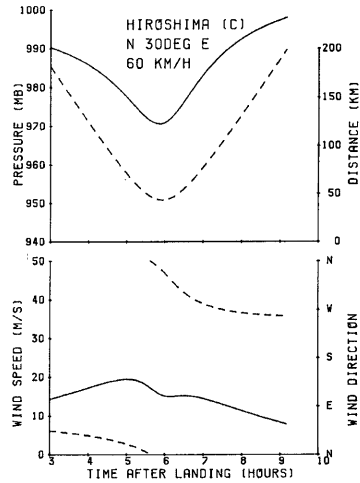


Fig. 7(c). Same as Fig. 3(c), except for Hiroshima.

4. 地表風の時間的変化のシミュレーション (2)―広島の場合

大阪の場合と同じ条件, すなわち, $(\Delta p)_0 = 80 \text{ mb}$, $r_m = 60 \text{ km}$, $C_d = 60^\circ$ ($N30^\circ E$) および 120° ($N30^\circ W$), $C_s = 60 \text{ km/h}$ として, 台風の通過にともなう広島における地表風の時間的変化 (中心が広島から 200 km 以内に存在する時間帯) のシミュレーションを行った。

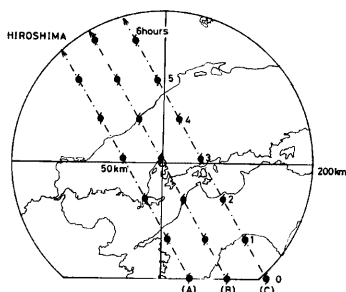


Fig. 8. Same as Fig. 4, except for Hiroshima.

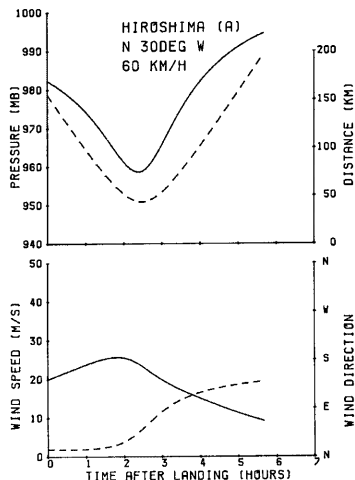


Fig. 9(a). Same as Fig. 5(a), except for Hiroshima.

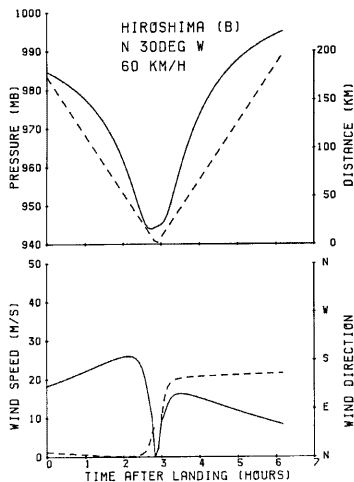


Fig. 9(b). Same as Fig. 5(b), except for Hiroshima.

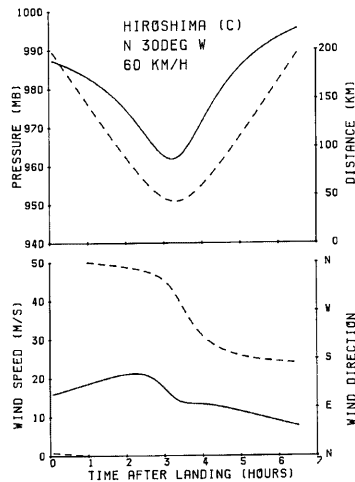


Fig. 9(c). Same as Fig. 5(c), except for Hiroshima.

4.1 N30°E の方向に移動する場合

N30°E の方向に移動し、広島付近を通過する台風の上陸地点は九州南岸に相当するので、Fig. 6 に図示するように、上陸地点を広島から南方 330km の東西方向の線上に中心が到達した位置と定める。したがって、上陸後、中心が広島を通る東西方向の線上に達するまでに約 6 時間 20 分ばかり、そのとき、 $4p$ は 48mb にまで減衰している。九州に上陸する台風については、以前の調査⁵⁾によると、 $(4p)_0=80\text{mb}$ は海岸線 100 km あたりの再現期間 50 年に相当する。大阪の場合と同じく 3 通りの経路、すなわち、(A) 広島の西 50km を通過する経路、(B) ちょうど広島を通過する経路、(C) 広島の東 50km を通過する経路についてシミュレーションを行い、その結果を Fig. 7 (a), (b) および (c) に示す。いずれの経路においても、中心が最も接近する時刻よりも前の北～東よりの風のときに最大風速が出現、最大風速は経路 (B) においては 22m/sec (A) および (C) においては 20m/sec 程度である。台風の勢力が弱まっているにもかかわらず、同じ移動方向の大阪の場合よりも風が強く、九州を通過してくるからといって決して油断できないのである。

4.2 N30°W の方向に移動する場合

上陸地点は四国南岸で、広島より南 150km の東西方向の線上とし、中心は約 3 時間後に広島を通る東西方向の線上に達する (Fig. 8)。この場合の再現期間は、大阪の場合と同じく、海岸線 100km あたり 100 年である。Fig. 9 (a), (b) および (c) に図示したシミュレーションの結果によると、(A), (B) および (C) の 3 経路ともに、中心の最接近時より前の北よりの風のときに最大風速が出現している。経路 (A) および (B) の最大風速は 26m/sec であり、(C) は 21m/sec で、中心が広島の東側を通過するときは弱くなっている。また、移動方向が N30°E の場合と比較すると、最大風速は強いが、これは上陸地点が近く、勢力が強いことにもよると考えられる。

5. 結 語

friction-free wind、中心の移動速度、中心からの距離をパラメーターとした地表風予測式を重回帰分析により作成し、上陸時の中心気圧低下量 80mb の最大級の標準計画台風を徐々に減衰させながら仮想的な経路にそって移動させ、大阪と広島について地表風の時間的変化のシミュレーションを行った。その結果、大阪の場合には、移動方向が N30°E のときには、中心の最接近時以後の吹き返しの南西～北西の風が強いこと、および中心が東方を通過する経路でも一般的常識のように風が弱いことが明らかになった。また、N30°W のときには中心の最接近時以前の北～北東の風が強いことがわかった。一方、広島の場合には、N30°E および N30°W のいずれの移動方向においても、中心の最接近時以前の北～東の風が強いこと、また、九州南岸に上陸して N30°E の方向に進んでくる経路においても、勢力が弱っているにもかかわらず、比較的に強い風が吹くことがわかった。このようにシミュレーションによって明らかになった事実は、最大風速についてさらに検討する余地が残されているが、しかし、台風災害の軽減のうえでは、利用価値はかなり高いものと考えられる。

現在、他の地点においても同様なシミュレーションを試みているが、今後、その結果をまとめて、地表風に対する周辺の障害物の効果についても解明していく予定である。さらに、中心気圧低下量、移動方向・速度などの統計にもとづき、標準計画台風を確率的に発生させて移動させ、各地点の地表風の時間的変化のシミュレーションを行い、地点ごとに風速の再現期待値を調べることを計画している。

なお、本研究は昭和 55～56 年度文部省科学研究費補助金（自然災害特別研究 1(5)202031 および 56020031）の援助を受けて行われた。

参 考 文 献

- 1) 宮田利雄, 吉津洋一: 風速の成因別再現期待値に関する一評価, 第 6 回風工学シンポジウム論文集, 1980, pp. 373-379.

- 2) 光田 寧, 藤井 健, 川平浩二: 台風の構造のモデル化について(1), 京都大学防災研究所年報, 第17号 B, 1974, pp. 227-234.
- 3) 光田 寧, 藤井 健, 川平浩二: 被害台風の構造のモデル化について(2), 京都大学防災研究所年報, 第18号 B, 1975, pp. 227-243.
- 4) 光田 寧, 藤井 健, 文字信貴, 川平浩二, 塚本 修: 改良された標準計画台風, 京都大学防災研究所年報, 第21号 B-1, 1978, pp. 393-404.
- 5) Mitsuta, Y., T. Fujii and K. Kawahira: Analysis of Typhoon Patterns over Japanese Islands, Journ. Natural Disaster Science, Vol. 1 No. 1, 1979, p. 3-19.
- 6) 光田 寧, 藤井 健, 川平浩二: 移動する台風の気圧場から求めた傾度風と実測風との比較——標準計画台風の通過にともなう地表風のシミュレーションの方法の開発の準備——, 京都大学防災研究所年報, 第23号 B-1, 1980, pp. 271-279.
- 7) 藤井 健: 台風域内における地表風の予測のための重回帰分析, 京都産業大学論集, 第10巻第2号, 1981, pp. 16-31.
- 8) 斎藤練一, 井上恵一, 壇上得爾: 暴風値の図式相関解析——日本の強風の研究IV——, 研究時報, 第11巻9号, 1959, pp. 775-780.
- 9) 小峯裕己, 他: メッシュデータを用いた地形因子解析法による任意の平均風速の推定方法に関する研究, 天気, 第27巻第12号, 1980, pp. 849-861.
- 10) Schloemer, R. W.: Analysis and Synthesis of Hurricane Wind Patterns over Lake Okeechobee, Florida. Hydrometeorological Report, No. 31, 1954, 49 pp.
- 11) 藤井 健: 台風域内の気圧場の客観解析法, 京都産業大学論集, 第4巻第1号, 1974, pp. 77-90.
- 12) Yoshizumi, S.: On the Asymmetry of Wind Distribution in the Lower Layer in Typhoon, Journ. Meteor. Soc. Japan, Vol. 46, No. 3, 1968, pp. 405-415.