

# 台風構造のモデル化について (1)

光田 寧・藤井 健・川平 浩二

## MODEL OF SEVERE TYPHOON (1)

By *Yasushi* MITSUTA, *Takeshi* FUJII and *Koji* KAWAHIRA

### Synopsis

For the purpose of modeling of standard project typhoon, 38 typical typhoons during the period 1951-1970 which hit Japanese Islands are chosen for analysis. The pressure field of three typhoons have been analyzed on trial using three kinds of experimental formulae of pressure distribution proposed by V. Berknes, T. Fujita and R. W. Schloemer.

### 1. 序 文

台風災害の防止および軽減のための対策を立てるためには、被害の原因となる台風の規模としてどのようなものを考えたら良いかを明らかにしておかねばならない。そのためには、過去の特定の強烈な台風の特性をそのまま他の台風にも応用するというのではなくて、やはり多くの顕著台風の特性の統計に基づいた、確率的裏付けのある被害台風のモデルを作り上げることが必要である。このような考えに基づいて、著者は先に標準計画台風という考えを提案したが<sup>1)2)</sup>、そこで具体的に比較的統計的裏付けをもって示されたものは台風の数多くの特性のうちで、中心気圧のみであって、他の特性については十分な検討がなされていなかった。しかしながら、最近の社会活動の複雑化に伴い、台風に対する防災対策のためにより具体的な数値を示し得るモデルが要求されるようになって来た。そこで今回は、過去の台風の特性の統計的調査をやり直して、もっと明確な台風のモデルを作る試みに着手することになった。

目標は地方別に再現確率を付した被害台風のモデルを作り、その中で風速および雨量の分布を必要に応じて容易に表現出来るようにすることである。それによって、任意地点で考えておかねばならぬ台風による暴風雨規模を再現確率を付して推測出来ることになり、しかも風向、風速や雨量、気圧の時間変化まで数値的にシミュレートすることが出来、合理的な防災対策の確立が容易になる。

このような作業を完成させることは、台風の構造や移動が気象学的に十分解明された上でなければ不可能であるという考えもあるが、台風の気象学的研究の進行状況からして短時日のうちに多くのことが解明されるものと期待することは無理である。したがって、ここでは台風の構造や移動に関する詳細な研究の結果を待つことなく、まず過去の台風の特性を全く統計的に処理して、被害台風の一般的特性を前回よりもさらに詳しく表現する方策の確立に努力することにした。

さらに風や雨の分布を直接解析することは現象の複雑さから考えて必ずしも適当ではないと考えられるので、まず気圧に着目し、気圧分布の一般的特性を求め、その結果を利用して風速・風向分布、次に雨の分布を調べるという方策を考えることにした。本論文はこのような目的の一連の研究の第1報であり、気圧分布に関する調査の結果について主に述べる。

### 2. 過去の顕著台風の資料

今回の研究は過去の顕著台風の資料を出来るだけ多く集めて、各々について解析を行ってその台風の特性を求め、それらの特性を統計的に処理して、日本を襲う被害台風の一般的特性を得るという方法による。従って、

出来るだけ長期間にわたる被害台風の資料を集めることが必要であるが、日本においては、台風域内の気象要素の分布を詳しく解析することが出来るような観測資料は比較的近年になってからでないと得られない。そこで1951年から1970年までの20年間を選び、この期間に日本本土に上陸した台風のうちで、上陸時の中心気圧（気象庁の発表による）が980mb以下のものを選び出した。それらは **Table 1** に示す38個の台風である。

Table 1 The list of typhoons.

Typhoon	Central pressure at the time of landing (mb)	Period for analysis (JST)
Kate	976	1951 July 1st 22h ~ 2nd 03h
Ruth	949	1951 Oct. 14th 19h ~ 15th 09h
5313	946	1953 Sept. 25th 18h ~ 26th 06h
5405	952	1954 Aug. 18th 01h ~ 19th 09h
5413	960	1954 Sept. 7th 15h ~ 8th 03h
5412	956	1954 Sept. 13th 14h ~ 14th 02h
5415 (Toya-maru)	965	1954 Sept. 26th 02h ~ 26th 08h
5522	940	1955 Sept. 29th 19h ~ 30th 08h
5615	972	1956 Sept. 27th 12h ~ 27th 16h
7510	956	1957 Aug. 6th 18h ~ 7th 15h
5811	976	1958 July 23rd 05h ~ 23rd 12h
5821	955	1958 Sept. 18th 04h ~ 18th 10h
5822 (Kanogwa)	950	1958 Sept. 26th 21h ~ 27th 06h
5906	966	1959 Aug. 8th 03h ~ 9th 21h
5915 (Isewan)	929	1959 Sept. 26th 18h ~ 27th 00h
6011	980	1960 Aug. 11th 04h ~ 17th 18h
6016	970	1960 Aug. 29th 12h ~ 29th 20h
6118 (Daini-Muroto)	920	1961 Sept. 16th 08h ~ 16th 18h
6124	976	1961 Oct. 10th 06h ~ 10th 09h
6207	970	1962 July 27th 13h ~ 27th 20h
6213	980	1962 Aug. 21st 21h ~ 22nd 09h
6214	955	1962 Aug. 26th 04h ~ 26th 10h
6309	970	1963 Aug. 9th 16h ~ 10th 03h
6414	965	1964 Sept. 12th 12h ~ 12th 18h
6420	930	1964 Sept. 24th 15h ~ 25th 15h
6515	940	1965 Aug. 6th 04h ~ 6th 12h
6517	936	1965 Aug. 22nd 18h ~ 23rd 03h
6523	940	1965 Sept. 10th 07h ~ 10th 13h
6524	955	1965 Sept. 17th 21h ~ 18th 06h
6619	980	1966 Sept. 9th 09h ~ 9th 15h
6626	960	1966 Sept. 25th 00h ~ 25th 05h
6734	965	1967 Oct. 28th 01h ~ 28th 06h
6804	975	1968 July 28th 19h ~ 29th 00h
6816 (Daisan-Miyakojima)	955	1968 Sept. 24th 21h ~ 25th 04h
6909	960	1969 Aug. 22nd 10h ~ 23rd 09h
7002	955	1970 July 5th 15h ~ 6th 02h
7009	965	1970 Aug. 14th 23h ~ 15th 07h
7010	962	1970 Aug. 21st 07h ~ 21st 15h

これらの台風が上陸し、日本本土上を通過する間で、かつ中心気圧が 985mb 以下である時間について解析することにしたが、その時間も **Table 1** に示した。この間の気象官署の毎時気象観測記録を収集して基礎資料とすることにしたが、台風の中心近くが特に問題であるから、中心から 200km 以内の距離にあるものみに限定した。それでも資料の数は非常に多くなるので、解析を迅速かつ客観的に行うために資料はカード化し電子計算機によって処理することにした。

### 3. 台風域内の気圧分布

台風域内の気圧分布の特性を出来るだけ簡単に表現し、しかもそれと風や雨の分布との間の関係を調べることは今日までいろいろと試みられており、いくつかの実験式も提案されている。しかし、本研究では出来るだけ簡単な表現によって客観的に台風の特性を示すことを目的としているところから、台風の気圧分布は中心に対して対象であると考えて、過去に提案された実験式の適合性を調べ最適のものを選び出し、それに基づいて解析を進めるという方法によった。もっとも、台風の構造そのものに非対称性のあることが主張されているが<sup>3)</sup>、ここではまず対称であると考えて解析を進め、それを観測値と対比させて検討する過程において大きな誤差が認められたら、そこで補正項として非対称性を考えに入れるという方法をとることとするので、先にも述べたとうり台風の構造には深く立入らない。

1929年堀口由巳<sup>4)</sup> は沖縄台風 (1924年) の観測資料の解析から、台風の中心からの距離  $r$  と気圧  $p$  との間に次のような関係のあることを見出した、

$$(760-p)(r+170)=6810 \dots\dots\dots(1)$$

但し、この式では気圧  $p$  を mmHg 単位で、距離  $r$  を km 単位で示している。この式は台風内の気圧分布を示す試みとしては最初のものである。その後1939年高橋浩一郎<sup>5)</sup> はこの形を改良して一般化し、次のような形を提案した、

$$p=p_{\infty}-\frac{p_{\infty}-p_c}{1+x} \dots\dots\dots(2)$$

但し、ここで  $p_{\infty}$  は台風の周囲の気圧、 $p_c$  は台風の中心気圧、 $x=r/r_m$  であり  $r_m$  は旋衡風速が最大となる半径である。

一方、V. Bjerknes は

$$p=p_{\infty}-\frac{p_{\infty}-p_c}{1+x^2}, \dots\dots\dots(3)$$

藤田哲也<sup>6)</sup> は、

$$p=p_{\infty}-\frac{p_{\infty}-p_c}{(1+x^2)^{1/2}}, \dots\dots\dots(4)$$

さらに R. W. Schloemer<sup>7)</sup> は

$$p=p_c+(p_{\infty}-p_c)e^{-\frac{1}{x}} \dots\dots\dots(5)$$

というような実験式を台風やハリケーンの気圧分布を示すものとして提案している。(3)および(5)式では  $r_m$  は旋衡風速の最大となる半径であるが、(4)式の場合には  $\sqrt{2} r_m$  において旋衡風速は最大となる。

上に示した5つの式のうちで双曲線形の分布を示す(1)、(2)式は台風の中心付近の気圧分布を示す式としては適当でないことが知られており、現在の所台風やハリケーンの気圧分布を示す式として用いられているのは主として後3者の(3)、(4)、(5)式である。従って、ここでもこれら3つの式を各々の台風の観測値に適合させてみて、最も問題の少ないものをモデルの気圧分布の形としてまず採用することとする。

### 4. 気圧分布の解析

先に選んだ台風のうち代表的なものについて(3)、(4)、(5)式を適合させてみることをまず試みた。式からも明らかなとうり、気圧分布を決定する定数は中心気圧  $p_c$ 、周囲気圧  $p_{\infty}$ 、最大風速半径  $r_m$ 、および台風の

心位置である。各台風、各時刻毎にこれらの定数を観測値から客観的な方法によって算出し、誤差の最も少ない分布型を選択すると共に、各定数のうち台風を特色づける定数である  $r_m$  と台風の強さ ( $p_\infty - p_c$ ) との関係について統計的に調べることが差し当たっての目標である。

台風の中心位置あるいは台風の中心気圧、周囲気圧などは気象庁によって解析結果が発表されてはいるが、それらの値は台風襲来時にあわただしく主観的に決定された値であると云えるので、必ずしも信頼出来るものではない。従って、ここではこれらについても観測値から客観的な方法で算定してみることにした。もっとも、気圧の分布のみから決定する中心位置は、他の要素まで考慮に入れた気象庁の解析結果に比べてより正確であるということは断定し難いが、気圧中心を客観的に決定するという試みには解析の自動化という点からも意義がある。

結局、ここで行う作業は先に示したような台風中心から 200km 以内の毎時観測資料から、台風の周囲の気圧、 $p_\infty$ 、中心気圧、 $p_c$ 、最大風速半径、 $r_m$  および台風の中心位置 ( $\psi, \lambda$ ) を各時刻毎に決定することになる。計算は最小自乗法により各時刻毎独立に行うが、各々の資料には台風の中心からの距離に逆比例するような重みを掛けて中心付近の資料を重視するようにした。しかし、その重みは過大な値とならないように上限を次のように取った、

$$w = \begin{cases} \frac{100}{r} & (10 < r \leq 200) \\ 10 & (0 < r \leq 10) \end{cases} \dots\dots\dots(6)$$

但し  $r$  は km 単位で示す。

気圧分布の式の各定数を直接測定値 (観測点の緯度経度を含む) から最小自乗法で計算することが理想であるが、式の形からも明らかなように正規化方程式は非線型 5 元連立方程式となり解析的には解けない。この連立方程式を展開して近似し線型化して解く方法も考えられるが、解の収束の条件を考えると必ずしも得策ではない。そこで、ここでは中心位置 (緯度  $\varphi$ 、経度  $\lambda$ ) と最大風速半径  $r_m$  に、近似値を与えて  $p_c$  と  $p_\infty$  を最小自乗法で求め、最初に与えた  $\varphi, \lambda, r_m$  の近似値を少しづつずらして気圧の自乗誤差が最小となるような位置に持って行くという簡便法によることにした。各々の分布に対する正規化方程式は次のとおりである、まず (3)式については、

$$\left. \begin{aligned} p_\infty \sum_{i=1}^n \frac{x_i^2}{1+x_i^2} + p_c \sum_{i=1}^n \frac{1}{1+x_i^2} &= \sum_{i=1}^n p_i, \quad (i=1, 2, \dots, n) \\ p_\infty \sum_{i=1}^n \frac{x_i^2}{(1+x_i^2)^2} + p_c \sum_{i=1}^n \frac{1}{(1+x_i^2)^2} &= \sum_{i=1}^n \frac{p_i}{1+x_i^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(7)$$

となり、(4)式については、

$$\left. \begin{aligned} p_\infty \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1+x_i^2}}\right) + p_c \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{1+x_i^2}} &= \sum_{i=1}^n p_i, \\ p_\infty \sum_{i=1}^n \left(\frac{\sqrt{1+x_i^2}-1}{1+x_i^2}\right) + p_c \sum_{i=1}^n \frac{1}{1+x_i^2} &= \sum_{i=1}^n \frac{p_i}{\sqrt{1+x_i^2}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(8)$$

となり、(5)式については

$$\left. \begin{aligned} p_\infty \sum_{i=1}^n e^{-\frac{1}{x_i}} + p_c \sum_{i=1}^n \left(1 - e^{-\frac{1}{x_i}}\right) &= \sum_{i=1}^n p_i, \\ p_\infty \sum_{i=1}^n e^{-\frac{2}{x_i}} + p_c \sum_{i=1}^n e^{-\frac{1}{x_i}} \left(1 - e^{-\frac{1}{x_i}}\right) &= \sum_{i=1}^n e^{-\frac{1}{x_i}} p_i, \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(9)$$

となるが、ここで  $n$  は資料数で、 $p_i, x_i$  は  $i$  番目の観測点の気圧と中心からの相対距離を示す。

この計算の実施に当って、台風中心位置の第 1 近似としては気象庁によって発表された値を用い、 $r_m$  の第 1 近似としては適当な値を最初に与えた。そして、1 回についての観測数が 10 個未満しか入らない時刻は計算

Table 2. The hourly positions of typhoon centers (Official reports of Japan Meteorological Agency and analyzed positions by the use of the experimental formulae proposed by V. Bjerknes, T. Fujita and R. W. Schloemer).

Typhoon	time (JST)	data	J.M.A.		V. Bjerknes		T. Fujita		R. W. Schloemer		
			$\psi_0(^{\circ}N)$	$\lambda_0(^{\circ}E)$	$\psi(^{\circ}N)$	$\lambda(^{\circ}E)$	$\psi(^{\circ}N)$	$\lambda(^{\circ}E)$	$\psi(^{\circ}N)$	$\lambda(^{\circ}E)$	
5522	1955 Sept. 29th 21h	10	30.6	130.4	30.68	130.48	30.60	130.46	30.58	130.46	
	22h	10	30.7	130.5	30.82	130.52	30.82	130.52	30.76	130.48	
	23h	10	30.9	130.4	31.06	130.44	31.06	130.42	31.06	130.42	
	30th 00h	12	31.3	130.4	31.38	130.38	31.38	130.36	31.36	130.36	
	01h	17	31.6	130.4	31.64	130.48	31.64	130.48	31.64	130.48	
5915	1959 Sept. 26th 18h	17	33.4	135.5	33.40	135.44	33.44	135.42	33.42	135.44	
	19h	21	33.8	135.7	33.80	135.74	33.80	135.74	33.84	135.70	
	20h	27	34.4	135.9	34.36	136.02	34.36	136.02	34.36	136.02	
	21h	27	34.9	136.3	34.92	136.28	34.92	136.28	34.92	136.26	
	22h	29	35.5	136.6	35.42	136.44	35.44	136.44	35.44	136.46	
	23h	30	36.0	136.9	36.14	136.78	36.14	136.80	36.14	136.80	
	27th 00h	21	36.6	137.5	36.84	137.48	36.86	137.46	36.82	134.46	
	6816	1968 Sept. 24th 21h	16	31.5	130.0	31.42	129.80	31.44	129.84	31.42	129.82
		22h	17	31.6	130.1	31.62	129.96	31.60	129.90	31.60	129.92
		23h	19	31.8	130.2	31.76	130.02	31.78	130.04	31.78	130.08
25th 00h		19	31.9	130.2	31.86	130.12	31.90	130.18	31.86	130.12	
01h		20	31.2	130.2	32.00	130.28	32.02	130.28	32.00	130.28	
02h		20	32.2	130.2	32.14	130.30	32.14	130.32	32.16	130.32	

Table 3 The list of the central and external pressures, the maximum cyclostrophic wind radii and the rms's of pressure deviation for three kinds of pressure formulae.

Typhoon	time (JST)	J.M.A.					V. Bjerknes					T. Fujita					R. W. Schloemer				
		$p_c$ (mb)	$p_e$ (mb)	$p_\infty$ (mb)	$r_m$ (km)	rms error (mb)	$p_c$ (mb)	$p_\infty$ (mb)	$\sqrt{2} r_m$ (km)	rms error (mb)	$p_c$ (mb)	$p_\infty$ (mb)	$r_m$ (km)	rms error (mb)	$p_c$ (mb)	$p_\infty$ (mb)	$r_m$ (km)	rms error (mb)			
5522	1955 Sept. 29th 21h 22h 23h 30th 00h 01h	940	937.8	997.9	63	0.64	943.6	1013.6	85	0.94	945.9	1017.1	82	0.98							
		940	936.6	997.6	64	1.01	933.4	1009.4	61	1.13	951.6	1031.0	118	1.62							
		943	954.4	1016.5	129	1.48	955.1	1052.4	173	1.54	956.7	1041.5	140	1.39							
		946	953.4	996.3	81	0.61	953.3	1007.0	86	0.65	954.6	1009.2	81	0.63							
		950	947.0	994.7	63	1.42	946.7	1004.1	64	1.14	948.0	1007.0	60	1.00							
5915	1959 Sept. 26th 18h 19h 20h 21h 22h 23h 27th 00h	929	921.8	987.0	81	1.89	915.4	996.4	65	1.81	921.7	1001.9	69	1.79							
		935	941.3	994.1	121	1.55	941.5	1010.9	137	1.56	939.5	1006.4	100	1.59							
		940	945.6	993.2	111	1.50	945.4	1006.7	122	1.47	947.4	1009.2	115	1.46							
		945	947.3	990.2	92	2.26	947.6	1004.8	109	2.19	948.9	1005.4	97	2.19							
		950	954.0	989.1	95	2.09	953.6	998.0	100	2.09	955.6	1001.7	102	2.11							
		960	966.4	1010.3	231	2.14	966.8	1045.7	332	2.09	967.9	1025.8	241	2.07							
		968	967.5	996.6	167	1.64	968.0	1016.5	242	1.52	968.6	1007.8	177	1.61							
6816	1968 Sept. 24th 21h 22h 23h 25th 00h 01h 02h	955	966.2	1012.8	75	0.67	962.8	1020.2	64	0.60	963.1	1023.2	60	0.55							
		960	980.8	1013.6	94	0.91	981.1	1025.7	119	0.83	980.9	1024.7	96	0.87							
		965	984.9	1015.9	113	0.75	985.2	1025.2	126	0.67	985.9	1023.5	103	0.83							
		970	984.2	1009.1	73	1.09	985.1	1015.5	81	1.05	985.3	1017.0	76	1.00							
		973	981.9	1007.3	52	1.09	981.8	1011.8	51	0.94	982.3	1013.0	47	0.92							
		977	989.3	1009.1	79	1.28	988.1	1011.4	65	1.18	989.9	1015.7	81	1.28							

を行なわないこととした。計算に当って、緯度、経度は0.02度毎、最大風速半径は1km 毎に変えて、気圧の自乗誤差(重み付き)がより小さくなる向きに変化させて行き、極小点に達した時に計算終了とした。

## 5. 解析結果

現在のところ上述の資料の収集が完了していないので全ての場合についての計算は出来ていないが、まず試験的に行った台風5522, 伊勢湾台風(5915)および第3宮古島台風(6816)の解析結果について以下に示す。

まず台風中心の計算値は **Table 2** に示すとうりである。この表の左側にはその時刻に用いた観測点の数および、第1近似値として用いた気象庁の解析による位置が同時に示してある。

これを見ると各々のモデルによる計算結果は互いに非常に良く一致しており、その差は最大値でも10km程度であり、平均的には2km以下である。このことは、少なくとも台風の中心を決定するという点においては気圧分布の形はあまり関係しないことを示している。これらの計算値は第1近似として与えた気象庁の解析結果ともあまり変わっていない。このことは台風の中心位置の客観自動解析の可能性が大であることを示している。

この中心位置に基づいて求められた台風の中心気圧、周囲気圧、最大風速半径および気圧の計算の誤差の R. M. S. を示しているのが **Table 3** である。誤差のみからみた場合、3つの分布式のいずれについてもその誤差はほぼ同じ値を示しており優劣を判定し難い。また中心気圧についても不合理と思えるような値はいずれの場合にも生じていないし、最大風速半径の値についても分布式の違いによる差は顕著ではない。最大風速半径の時間的変化をみると時に非常に大きな変化が生じているのがみられ、この値の保存性についてはさらに検討を要する。しかし、伊勢湾台風(5915)の26日23時, 24時を除いて、この最大風速半径が平均的にどの台風についてもあまり差の無いことは注目に値する。さらに多くの例について解析した上でなければ結論は出せないが、このことは台風のモデル化を容易にする事実である。この表の左側には気象庁の解析による中心気圧が示されているが、この値は今回の計算値と20mb位も異なっていることがある。このことは天気図解析による最低気圧の推定の不正確さを示すものであって、今回の計算値の方がその時間変化の様子などをみても合理的なようである。

今回の解析結果で最も問題を含んでいるのは周囲気圧の値である。この計算においては周囲気圧の実測値は全く考慮せず、台風の中心から200km以内にある観測値から外挿して求めることになるので、これによって分布式の適合性を調べることが可能である。その結果は **Table 2** に示されるとうり、Bjerknes の式によると Fujita あるいは Schloemer の式よりも平均して10mb位周囲気圧が低く算出されること、一方 Fujita あるいは Schloemer の式では時々1040mb以上の不合理とも思える周囲気圧の計算が得られることなどこの気圧分布の型を実際に応用していく上に問題だと思われることが見られる。周囲気圧と中心気圧の差によって最大風速が決定されるから、このような差は風速の推定には問題となる。周囲気圧が異常に高くなった時刻には最大風速半径も大きくなっており、この点基礎資料の分布の状態などを調べ直すと共に、平均的な値の差からみたモデルの適否を更に多くの例について調べる必要がある。

## 6. 結 語

日本を襲う被害台風の一般的性質を求める目的で過去の被害台風の解析に着手した。出来るだけ客観的に解析出来るような手段を考えて実際に試みた結果、台風の中心位置の決定については比較的容易であることが判ったが、気圧分布の解析については標準となる気圧分布形を決定することも含めて今後の問題として残された。さらに解析例をふやしてその結果が信頼出来るものになるように努力したい。

この研究は文部省科学研究費補助金(自然災害特別研究)によって行なわれたものであり、数値計算には京都大学大型計算機センター FACOM 230/75 および京都産業大学計算センター TOSBAC 3400 を使用した。

## 参 考 文 献

- 1) 光田 寧：標準計画台風について(1)，京大防災研究所年報，第 8 号，pp. 605 -612, 1965.
- 2) 光田 寧：標準計画台風について(2)，京大防災研究所年報，第 9 号，pp. 267-272, 1966.
- 3) Namekawa, T. & S. Aoki: On the structure of the disastrous typhoon hitting Japanes Islands, Proceedings of the UNESCO symposium on typhoons, pp. 55-59, 1954.
- 4) 堀口由己：：台風の構造について，海洋気象台彙報，第20号，p. 1, 1929.
- 5) 高橋浩一郎：台風域内に於ける気圧及び風速の分布，気象集誌，第17巻，昭14，pp. 417-421.
- 6) Fujita, T.: Pressure distribution in typhoon. Rep. Met. Lab., Kyushu Inst. Tech. 2. No. 1-4, 1952.
- 7) Schloemer, R. W.: Analysis and synthesis of hurricane wind patterns over Lake Okeechobee, Florida, Hydrometeorological Report, No. 31, 1954.