

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—

光田 寧・藤井 健・川平浩二

COMPARISON OF THE WIND IN GRADIENT-WIND-BALANCE WITH THE MOVING PRESSURE FIELD AND THE OBSERVED SURFACE WIND —PREPARATION FOR DEVELOPMENT OF TECHNIQUE FOR SIMULATION OF THE SURFACE WIND DURING PASSAGE OF STANDARD PROJECT TYPHOON—

By Yasushi MITSUTA, Takeshi FUJII and Koji KAWAHIRA

Synopsis

The pressure field, fitted with the Schloemer's formula for the radial pressure profile, is moved with the moving velocity of typhoon center. Then, the wind velocity field, in gradient-wind-balance with the moving pressure field, is estimated and is termed friction-free wind (FFW). FFW is compared with the observed surface wind, with respect to the deflection angle Δdd of wind directions and the ratio V_o/V_p of wind speeds. It is shown that both Δdd and V_o/V_p have remarkable variations with direction of FFW and station to station.

1. 序

15年位前に著者の一人の光田は台風の通過にともなうて発現する異常気象環境をシミュレートするために、過去に日本本土に上陸した顕著台風の一般的特性について調べ、モデル台風を作成し¹⁾²⁾、米国の Standard Project Hurricane³⁾ に倣って標準計画台風と名づけた。しかし、この標準計画台風は、個々の台風についての詳細な解析に基づくものは上陸時の中心気圧のみであって、防災計画など実用的な方面において利用するには限界があった。そこで、われわれのグループは8年前よりこの標準計画台風をより一層統計的な裏付けをもつものに改良すべく作業をつづけてきた⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾。すなわち、1951～1970年の20年間に日本本土に上陸した顕著台風（上陸時の中心気圧 980 mb 以下）について、気圧分布を Schloemer の気圧分布式⁹⁾ で表現し、その結果を合成して、気圧分布について再現確率つきの改良された標準計画台風を作成した。しかし、この標準計画台風を防災計画などの実用的な方面において利用するためには、気圧分布だけでは不十分であって、風速分布、雨量分布を含める必要がある。そこで、次の段階として、標準計画台風の通過にともなうてどの程度の風が吹くと予測されるかについて見積る方法を開発することにした。

気象官署の各地点における年最大風速の出現確率については気象庁¹⁰⁾によって算出されているが、統計年数は38年以下であって、この期間において伊勢湾台風や第2室戸台風のような最大級の台風が最悪の経路から外れた地点も少なくなく、このような地点では風速の出現確率は小さく見積られている傾向がある。たとえば、再現期間100年の推算風速は徳島が 40.9 m/sec であるのに対して、高知では 31.3 m/sec で

ある。また、複雑な地形をもつわが国においては、地表風は周辺の局地的地形によって著しい影響を受け、ある特定の風向のときには傾度風速以上の風が吹くことさえある。そのために、気圧場についての場合のように地表風の実測値をそのままに一律に解析してモデル化することは困難である。すなわち、土地の局地性を含めない限り、任意の気圧分布をもつ標準計画台風の通過にともなう地表風を正確に見積ることはできないのである。そこで、われわれは Schloemer の式で表現した気圧場を中心の移動速度で移動させて、この移動する気圧場とバランスする風を地点ごとに求め、この風と同時に実測された地表風とを比較し、その間の統計的な関係を調べるという方法を探ることにより、その地点周辺の局地的な地形による効果を含めた風の場のモデルを作成することにした。

2. 移動する気圧場とバランスする傾度風

気圧場の解析に用いる気象官署は台風の中心より半径 50 km 以内では 1~3 地点、100 km 以内では 5~10 地点しか存在していない。中心付近の気圧傾度の大きい領域において観測資料がこのように僅少であるために富高¹¹⁾、原口¹²⁾、あるいは蔵重¹³⁾によって提出されたような数多くのパラメーターを含む複雑な気圧分布式を用いて解析を試みても、有意義な結果が得られることはほとんど期待できない。それよりも、中心気圧、周辺気圧および最大旋衡風速半径の 3 個のパラメーターのみを含む最も単純な気圧分布式を用いて、さらに等圧線が同心円状に分布していると仮定して半径方向の気圧のプロファイルを表わす方が、台風の気圧分布の一般的特性を調べるという本研究の目的には適していると思われた。そこで、われわれは 3 種類のこのような単純な気圧分布式について調査し、Schloemer の式⁹⁾

$$p = p_c + 4p_e r^{-1/x} \dots\dots\dots (1)$$

でもって気圧分布を表現することにした⁵⁾。ここで p は半径 (すなわち中心からの距離) r における気圧、 p_c は中心気圧、 $4p_e$ は中心気圧低下量 (周辺気圧-中心気圧)、 x は r/r_m であって、 r_m は最大旋衡風速半径である。

移動している台風域内においては、進行方向の右側では左側よりも一般に風が強く、気圧傾度の差だけでは説明できない左右の非対称性が存在している。この差については、Gray¹⁴⁾ が 1956~1958 年の 3 個のハリケーンについて National Hurricane Research の飛行機観測 (570~830 mb) の結果から調べている。それによると、左右両象限における最大風速の差は平均すると移動速度の 2 倍以上にもなっていた。このように左右の著しい風速差が存在するために、進行速度が 10~20 m/sec となる日本本土上陸後においては、台風移動を考慮に入れない傾度風でもって上空の風を代表させることは合理的ではない。どうしても、気圧場の移動の効果も考慮に入れる必要がある。

台風域内の風は、近似的には、台風固有の風と台風の進行速度をベクトル的に加えたものに等しいということは古くから知られている¹⁵⁾。しかしながら、この概念は最大風速半径付近では近似的には成立しても、外域では実測風よりもはるかに強い風となることが知られている。さらに、このように単純にベクトル的に加えるということは、力学的にも問題がある。また、山下¹⁶⁾は Brunt-Douglas の変圧風をモデル台風について計算し、左右の非対称性を得ているが、中心から 100 km 以内の領域における風速は妥当なものとはいえない。

これに対して、Yoshizumi¹⁷⁾ は台風の中心とともに移動していく座標系を考え、そこにおいて定常な気圧場と風の場が傾度風バランスをしている状態を想定し、最大風速半径付近では移動速度の 2 倍に近い左右の風速差があり、外域に向かってその差が次第に小さくなっていくような風速分布を得た。われわれはこの風速分布を自由大気中の風として利用することにした。Yoshizumi の方法によると、移動座標系における摩擦を無視した風の風速 V_s は

$$V_s = \frac{f}{K_s} \left[\sqrt{\frac{1}{4} + \{(1+E)V_{gr} \cos \beta - C \cos(\beta + \theta)\} \frac{K_s}{f} - \frac{1}{2}} \right] \dots\dots\dots (2)$$

と表わされ、ここで f は Coriolis' parameter, C は移動速度, ρ は空気密度, θ は台風中心の進行方向に対して直角右方向から反時計まわりに測った角であり, K_s は流線の曲率で,

$$K_s = \frac{1 + A^2 - 2A \cos \theta + A^2 B \sin \theta}{r(1 + A^2 - 2A \cos \theta)^{3/2}} \dots\dots\dots(3)$$

と表わされる。また,

$$E = \frac{V_{gr}}{fr}, \quad S = \frac{1}{f} \frac{\partial V_{gr}}{\partial r},$$

$$A = \frac{C}{(1+E)V_{gr}}, \quad B = \frac{(1+2E)(S-E)}{(1+E)E},$$

であり, β は流線が等圧線を横切る角(内向きを正)であり,

$$\beta = \tan^{-1} \left[-\frac{\frac{1}{f\rho} \frac{\partial p}{\partial r} - C \cos \theta}{C \sin \theta} \right] - 90^\circ \dots\dots\dots(4)$$

と表わされる。このようにして求めた風に移動速度をベクトル的に加えたものが、台風域内の自由大気中における風に相当し、Schloemer⁹⁾にしたがって friction-free wind (以後 FFW と略す)と呼ぶことにする。

Schloemer の気圧分布式により解析した気圧分布に対応する FFW の一例として、伊勢湾台風 (1959 年 9 月 26 日 21 時) の場合について、進行方向に対して直角方向の FFW の分布を Fig. 1 に示す。最大風速半径内では左右の非対称性は顕著であり、風速差は進行速度 (17.8 m/sec) の 2 倍に近い。しかし、その外側では、中心から遠ざかるにつれて移動の影響は徐々に小さくなり、傾度風速に近づいていっている。

3. FFW と地表風の比較の方法

Schloemer の式によって表現した気圧分布から、Yoshizumi の方法にしたがって FFW を求め、その風向・風速を地表風の実測値と比較することにした。その方法と結果の一部についてはすでに昨年の年報²⁾において報告してあるが、大阪管区気象台における実測値と比較した場合を例にとって示すと次のようである。1951年から1970年までの20年間に於いて上陸時の中心気圧が 980 mb 以下で、大阪から半径 200 km 以内を通過した台風の経路 (Schloemer の式による客観解析で決定した中心の位置を結んだもの)を示すと Fig. 2 のようになる。対象となる台風は13個で、大阪から半径 200 km 以内に中心の位置があり、中心気圧が 985 mb 以下である毎正時において FFW を求め、同時刻に実測した地表風との関係について調べた。FFW と地表風との間においては、中心からの距離¹⁸⁾19)20)21)、風速、象限²²⁾などによってもいくぶん変わると考えられるのであるが、それを表現する方法も確立されておらず、むしろ場所による差の方が大きいと考えられるので、ここでは FFW と地表風との間の風向の偏角と FFW に対する地表風の風速比が FFW の風向によってどの程度の差があるかについて調べることにした。その結果について Fig. 3 に示す。なお、FFW の風速が弱い場合には両者

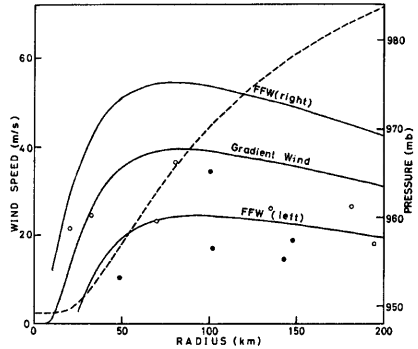


Fig. 1. An example of radial distribution of the gradient wind and the friction-free wind (FFW), in the directions perpendicular to the direction of typhoon motion. This example is for the data at 21 JST, Sept. 26th, 1959, in case of Typhoon 5915 (Isewan). A broken line represents radial pressure profile fitted with the Schloemer's formula. Open circles indicate observed surface winds in the right quadrant, and solid circles indicate those in the left quadrant.

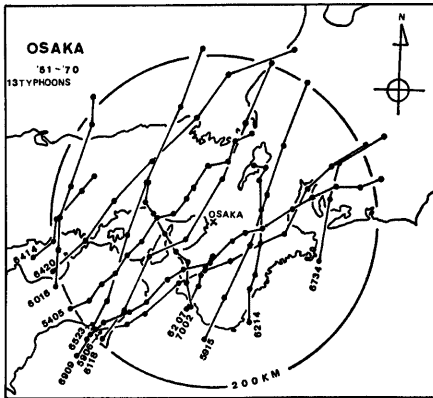


Fig. 2. The hourly positions of the centers for 13 typhoons used for the estimation of the friction-free wind at Osaka Meteorological Observatory.

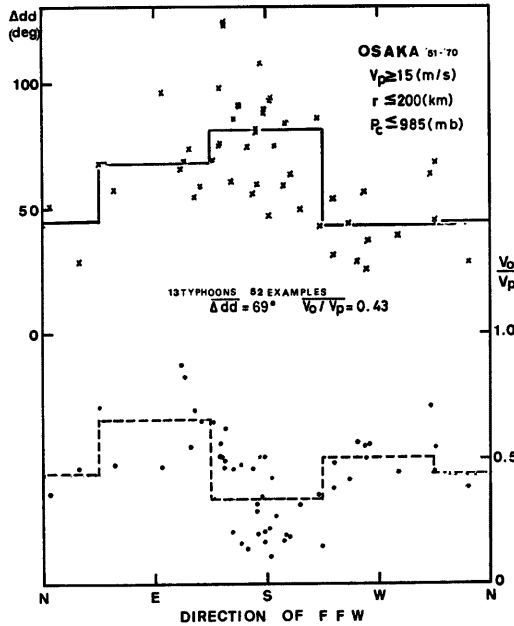


Fig. 3. The deflection angles, Δdd , marked with crosses in the upper chart, of directions of the surface wind from friction-free winds, and the ratios, V_0/V_p , marked with dots in the lower chart, of speeds of the surface wind to the friction-free winds. The solid and broken lines represent the averages of deflection angle and ratio of speed, respectively, averaged in every direction of the friction-free wind.

の間の関係ははっきりしない場合があるので、FFW の風速が 15 m/sec 以上の場合のみに限ることとした。

この図によると、風向の偏角と風速比の両方とも FFW の風向によって著しい差が存在している。この差は主として周辺の局地的な地形によるものであると考えられるが、どの程度の地形が影響を及ぼしているかについてはさらに多くの地点、多くの場合についての解析例を検討してみないと明らかではない。しかし、風向の偏角と風速比の間では FFW の風向による差が完全には対応していない、よって偏角に対する場合と風速比に対する場合とでは変化の様子が異なっているようである。FFW の風向によって 4 方位に分け、方位ごとに平均をとると、偏角については FFW が南よりの風の場合最大で、81° (標準偏差 21°) にもなる。したがって、この場合地表風はほぼ東よりの風となっていて、FFW が北よりの風の場合 (平均値 44°, 標準偏差 11°) あるいは西よりの風の場合 (平均値 43°, 標準偏差 11°) に比べて偏角の平均値はほぼ 2 倍にもなる。一方、風速比の平均値については、南よりの風の場合に最小 (平均値 0.34, 標準偏差 0.16) で、最大となる東よりの風の場合 (平均値 0.66, 標準偏差 0.14) の約 1/2 である。

4. 日本本土の台風来襲地域の代表的地点における FFW と地表風の比較

前節で大阪の場合について調べたように、日本本土の台風の通過することの多い地域の代表的地点について、風速が 15 m/sec 以上の FFW の各方位における FFW と地表風の風向の偏角および風速比の平均値を Fig. 4 (a)~(c) に図示し、平均値と標準偏差を Table 1 に示す。Fig. 4 においては外側の円の半径を 1 とした風速比の各方位における平均値を太い実線の長さで、地表風の平均風向の方向に引いてある。すなわち、太い実線と細い実線のなす角が風向の偏角を表わす。数字は解析例数であり、2 個以下の風向については図には示していない。この図、あるいは Table 1 によると、FFW の風向とともに地点間において

Table 1. The average values and the standard deviations (S.D.) of the deflection angles of the surface wind from the friction-free wind, and those of ratios of speeds of the surface wind to the friction-free wind.

Station	Wind direction of FFW	Number of cases	Deflection of wind direction (deg.)		Ratio of wind speed	
			Mean	S.D.	Mean	S.D.
Fukuoka	N	17	20	23	.75	.23
	E	45	60	18	.58	.18
	S	—	—	—	—	—
	W	6	1	47	.45	.15
Total	68	45	33	.61	.21	
Kumamoto	N	30	35	18	.43	.13
	E	40	65	16	.31	.10
	S	4	80	28	.54	.36
	W	39	32	30	.39	.17
Total	93	49	26	.38	.16	
Niyazaki	N	—	—	—	—	—
	E	—	—	—	—	—
	S	42	39	11	.56	.17
	W	52	34	16	.54	.16
Total	94	36	14	.55	.17	
Kagoshima	N	5	20	7	.58	.09
	E	2	30	3	.97	.12
	S	7	30	32	.40	.09
	W	62	17	15	.48	.13
Total	76	39	18	.49	.13	
Hiroshima	N	9	12	20	.56	.31
	E	23	75	22	.54	.15
	S	18	67	23	.42	.15
	W	4	26	33	.48	.14
Total	54	61	32	.50	.19	
Kochi	N	11	57	21	.27	.11
	E	4	44	3	.54	.15
	S	29	49	19	.50	.17
	W	18	31	15	.39	.12
Total	62	45	20	.43	.17	
Osaka	N	4	44	11	.44	.07
	E	8	68	12	.66	.14
	S	30	81	21	.34	.16
	W	10	43	11	.51	.09
Total	52	69	24	.43	.18	
Shimonoseki	N	—	—	—	—	—
	E	—	—	—	—	—
	S	19	16	13	.76	.18
	W	24	12	16	.70	.10
Total	43	13	15	.73	.15	
Nagoya	N	4	19	23	.56	.12
	E	2	96	29	.39	.14
	S	21	33	14	.51	.13
	W	7	34	50	.52	.10
Total	34	35	32	.51	.13	
Shizuoka	N	6	41	37	.31	.16
	E	—	—	—	—	—
	S	14	29	17	.40	.09
	W	6	47	18	.40	.10
Total	26	36	25	.38	.11	
Tokyo	N	—	—	—	—	—
	E	2	19	26	.52	.05
	S	15	40	23	.46	.10
	W	2	17	35	.31	.19
Total	19	36	23	.45	.12	

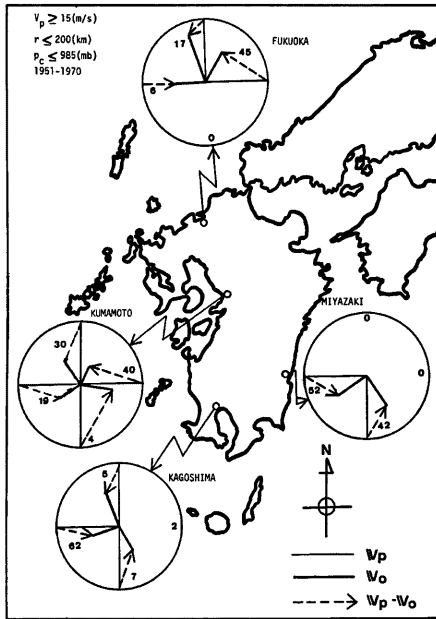


Fig. 4(a) The average deflection angles of the surface wind, V_o , from the friction-free wind, V_p , and the average ratios of speed of the surface wind to the friction-free wind, averaged in every direction of the friction-free wind, for four typical weather stations in Kyushu District. The deflection angle is shown as the angle between thick and thin solid lines, and the ratio of speed as the ratio of length of thick solid line to that of thin solid line (or the radius of circle).

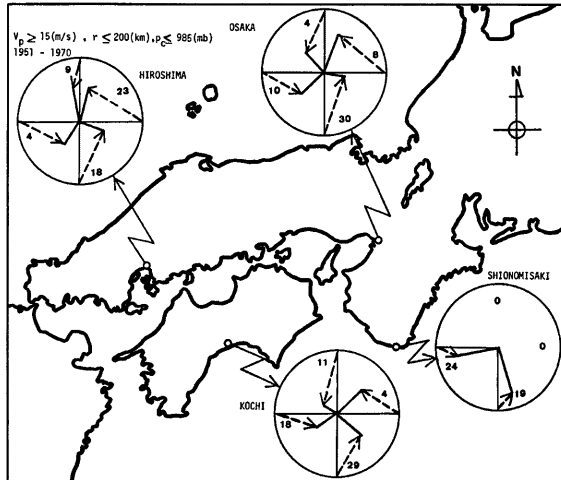


Fig. 4(b) Same as Fig. 4(a), except for four typical weather stations in Shikoku, Chugoku, and Kinki Districts.

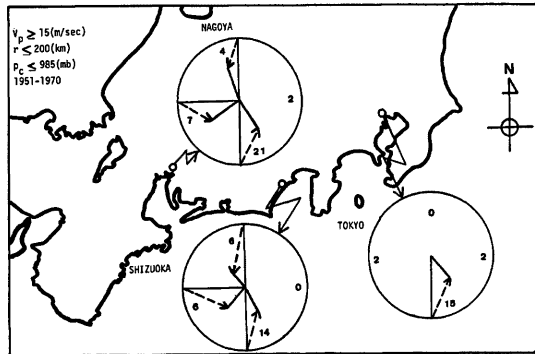


Fig. 4(c) Same as Fig. 4(a), except for three typical weather stations in Tokai, and Kanto Districts.

も著しい差がみられる。前節で調べた大阪を除いて他の10地点について風向の偏角と風速比のFFWの風向による差の特徴についてまとめると次のようになる。

(1) 福岡——風向により著しい差があり、FFWが陸上を通過してくる東よりの風の場合には偏角の平均値は 60° で最大であり、風速比は0.58で比較的小さい。これに反して、海上から吹いてくる北よりの風の場合には偏角は 20° であり、風速比は0.75である。この2風向の間では地形の効果が比較的是っきり現われているようである。また、西よりの風の場合の偏角はほとんど 0° であるが解析例が少なく、標準偏差が 47° と大きく、資料はかなばらついていて($-59^\circ \sim 60^\circ$)、この平均値の信頼性は高くない。

(2) 熊本——南よりの風の場合は解析例4例のうち2例の偏角が 95° と 119° であり、そのための平均値は 80° にもなり、また東よりの風の場合にも 65° に達する。しかし、風速比の方は顕著な差はなく、全解析例についての平均値は0.38(標準偏差0.16)である。

(3) 宮崎——台風の上陸後のみ解析の対象としたので、宮崎についてはFFWが南と西よりの風の場合のみに限られている。これら2風向の間においては風向の偏角と風速比の両方とも著しい差はない。全解析例についての平均値においては、風向の偏角 36° 、風速比0.55であり、また標準偏差もそれぞれ 14° 、0.17で比較的小さく、ばらつきが少ない。

(4) 鹿児島——いずれの風向においても偏角は小さく、とくに西よりの風の場合は62例の平均値で 17° と極めて小さく、また標準偏差は 15° でばらつきも少ない。風速比については、解析例の少ない東よりの風の場合を除いて顕著な差はなく、全解析例についての平均値は0.49である。

(5) 広島——北よりの風の場合、偏角の平均値は 12° で、偏角の最大となる東よりの風の場合の約1/6である。風速比の方については顕著な差はなく、全解析例の平均値は0.50である。

(6) 高知——西よりの風の場合、偏角の平均値は最小で、 31° であり、北よりの風の場合の 57° の約1/2である。風速比については、北よりの風の場合最小となり、0.27であり、東よりの風の場合の0.54の約1/2程度である。

(7) 潮岬——FFWが海上から吹いてくる西および南よりの風の場合のみに解析が限られているが、両風向ともに偏角は小さく、全解析例の平均値が 13° である。また、風速比は両風向とも大きく、平均値は0.73である。すなわち、地表風はFFWからの偏りが小さく、減速も小さく、明らかに地形による効果が少ないことを表わしている。標準偏差は偏角・風速比ともに小さく、ばらつきが小さい。

(8) 名古屋——偏角については、北よりの風の場合に最小で 19° である。なお、西よりの風の場合は標準偏差が 50° で、ばらつきが大きく、平均値の信頼性は高くはないが、これは風向にともなう偏角の変化が激しいことによるものである。

(9) 静岡——偏角については、FFW が南よりの風の場合、すなわち太平洋上から吹いてくる場合、平均値は 29° で最小である。なお、北よりの風の場合は、標準偏差が 37° で、ばらつきが大きい。一方、風速比の方は、顕著な差はなく、全解析例についての平均値は 0.38 (標準偏差 0.11) である。

(10) 東京——19解析例中、15例が南よりの風の場合であり、風向間の差を検討するのは困難である。全解析例の平均値は、偏角 36° 、風速比 0.45 である。

5. 結 語

標準計画台風の通過にともなう地表風の評価のための準備的段階として、日本本土の台風の通過することの多い地域の代表的11地点について、Schloemer の気圧分布式より表現した気圧分布をもとに、Yoshizumi の方法にしたがい、気圧場の移動を考慮に入れて、移動する気圧場に対して傾度風バランスする FFW を求め、これを地表風の実測値と比較した。その結果、FFW と地表風の間には、地点により、また風向により著しい差があり、これらの関係を統一的に求めることができないことがわかった。今後、さらに他の地点についても同じように FFW と地表風の間関係を調べるとともに、中心からの距離、風速、象限などによる差についても調べ、関係の深いすべての要素を含んだ重回帰方程式を地点ごとに作成して、FFW から地表風への換算の方式を確立する。さらに、この換算式を利用して、さきに気圧場について合成した再現確率付きの標準計画台風を仮想的な経路にそって移動させていき、地点ごとに台風の通過にともなう地表風の時間変化をシミュレートし、風速の極値や暴風の継続時間などの予測を行う予定である。

なお、本研究において Schloemer の式で表現した気圧場を移動させていき、FFW を求める計算には、京都大学防災研究所の FACOM M-140 を利用した。

参 考 文 献

- 1) 光田 寧：標準計画台風について (1)，京都大学防災研究所年報，第 8 号，1965，pp. 605-612.
- 2) 光田 寧：標準計画台風について (2)，京都大学防災研究所年報，第 9 号，1966，pp. 267-272.
- 3) Graham, H.E. and D.E. Nunn: Meteorological Considerations Pertinent to Standard Project Hurricane, Atlantic and Gulf Coast of the United States. National Hurricane Research Project Report, No. 33, 1954.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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 (3)，京都大学防災研究所年報，第 19 号 B，1976，pp. 293-302.
- 7) 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.
- 8) Mitsuta, Y., T. Fujii and K. Kawahira: Analysis of Typhoon Patterns over Japanese Islands, Journ. Natural Disaster Science, Vol. 1, 1979, (印刷中).
- 9) Schloemer, R.W.: Analysis and Synthesis of Hurricane Wind Patterns over Lake Okeechobee,

- Florida, Hydrometeorological Report, No. 31, 1954, 49 pp.
- 10) 気象庁：日本各地の年最大風速（1929—1966）、順位と出現確率，気象庁観測技術資料，第34号，1971，73 pp.
 - 11) 富高四郎：台風に関する気圧分布型について，研究時報，第13巻第8号，1961，pp. 621-624.
 - 12) 原口勘助：多くの擾乱に適合する気圧分布モデル，天気，第23巻第11号，1976，pp. 613-623.
 - 13) 藏重 清：台風の新しい気圧分布式，気象研究所研究報告，第28号，1977，pp. 83-95.
 - 14) Gray, W.M.: On the Balance of Forces and Radial Accelerations in Hurricanes, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, Vol. 88, 1962, pp. 430-458.
 - 15) Ferrel, W.: *A Popular Treatise on the Winds*, New York, Willey and Sons, 1890, 505 pp.
 - 16) 山下 洋：台風域内の変圧風分布，研究時報，第26巻，1974，pp. 151-156.
 - 17) Yoshizumi, S.: On the Asymmetry of Wind Distribution in the Lower Layer in Typhoon, *Journ. Meteor. Soc. Japan*, Vol. 46, No. 3, 1968, pp. 153-159.
 - 18) 光田 寧，文字信貴，塚本 修，浅井東洋：八重山群島を襲った台風5号（7705）の気象学的特性について，京都大学防災研究所年報，第21号 B-1，1978，pp. 405-415.
 - 19) 山元龍三郎，光田 寧，文字信貴，塚本 修，末延龍雄：沖永良部島を襲った台風9号（7709）の気象学的特性について，京都大学防災研究所年報，第21号 B-1，1978，pp. 417-425.
 - 20) 光田 寧，藤井 健，末延龍雄：北九州地方を襲った台風18号（7818）の気象学的特性について，京都大学防災研究所年報，第22号 B-1，1979，pp. 407-418.
 - 21) 光田 寧，末延龍雄：台風を中心付近の構造について，京都大学防災研究所年報，第23号 B，1980，（印刷中）
 - 22) 仲吉良功，座間味 忠：台風域内の地上風速と1時間雨量の分布について，研究時報，第31巻，1979，pp. 237-243.