

論文

風速計高度や粗度の違いを考慮した
1991年台風19号の強風解析

桑形 恒男* 近藤 純正*

Surface Wind Field Analysis of the 9119 Typhoon Using
Roughness Correction Wind Data

By Tsuneo KUWAGATA* and Junsei KONDO*

Abstract

The horizontal wind field of the typhoon, T9119, was analyzed using the surface wind data at the meteorological stations in Japan. In this analysis, observed wind speeds were corrected according to the surface roughness of each station. The 10-min mean maximum wind speed attained to $40-50\text{ms}^{-1}$ over flat surface in western Japan and the coastal area of Sea of Japan. The calculated wind field from the empirical formula compares favorably with the observation, and also suggests that wind speeds around Japan are enhanced by fast moving velocity of the typhoon nearly 100km h^{-1} .

The wind storm of T9119 is as strong as those of the strongest typhoons which landed in Japan for recent 40 years. The gust factor in typhoon area slightly increases during recent 40 years, which result is mainly attributed to the increase of the surface roughness z_0 around each meteorological station.

キーワード：台風，最大風速，突風率，地表面粗度

Key words: typhoon, maximum wind speed, gust factor, surface roughness

1. はじめに

1991年9月16日，マーシャル諸島付近で発生した台風19号（T9119）は，9月27日から28日にかけて，日本列島のほぼ全域を暴風域に巻き込みながら時速100km 近い猛烈な速度で日本海を北上した。この台風は雨量こそ多くなかったものの，猛烈な暴風を伴っていたのが特徴で，特に西日本や東北地方の日本海側の多くの気象官署で最大風

速や最大瞬間風速の記録を更新した。この台風による風害の例を列举すると，広島県宮島では厳島神社が大被害，青森ではリンゴの大量落果，大分県日田市では「日田杉」の25年生から50年生を中心に広範囲で倒木，秋田県大館市では樹齢250年の天然秋田杉の巨木が200本倒木，岩手県二戸町では樹齢400年のケヤキの巨木数本が倒木，愛媛，広島，熊本各県などでは塩害によるミカンの大被害などがあり，農林被害は過去最高の7千億円に達した。

本報告では気象官署（約150地点）およびアメダス（約840地点）の風速データを用いて，T9119

* 東北大学理学部地球物理学教室

Geophysical Institute, Faculty of Science, Tohoku University

この論文に対する討論は平成5年4月末日まで受付ける。

号通過に伴う最大風速の分布を解析した結果について報告する。地上で観測されている風速は観測点周辺の建物などの地物や風速計地上高度、および周囲の地形の状況によって変化するため、最大風速の地域間での比較や過去のデータとの比較には注意が必要である。そこで、本研究では実測値からそれらの効果を補正した風速データを解析に使用する。

2. 風速データ

前章で述べたように、本研究では風速計高度の違いや観測点周辺の地物や地形の効果を補正した風速データを解析に使用した。その補正法には近藤ほかが開発した方法¹⁾を用いる。解析に用いた3種類の風速の意味は以下の通りである。

a. 準実測風速 U_A ：実測風を地上50mの高度に

変換した風速で、ローカルな地形効果を含んでいる（各地点の粗度 z_0 を考慮）。

b. 平坦地風速 U_P ：ローカルな地形効果を含まない平坦地上の地上高50mの風速（ $z_0 = 1\text{ m}$ とする）。

c. 地域代表風速 U_B ： U_P に日本全体の地形効果による平均的な風速の減衰係数（ $=0.67$ ）をかけたもの。

U_P は各観測点の地形による風速の減衰効果がないとした場合の陸上の風速で、風速の実測値に地点固有の係数をかけることによって求めることができる。ここで U_A は10km程度の水平スケールを代表した風速であり、地形効果を含んだローカルな強風解析に適している。また U_B と U_P は100km程度の水平スケールを代表した風速と見なせ、総観規模の立場から見た台風内の強風分布

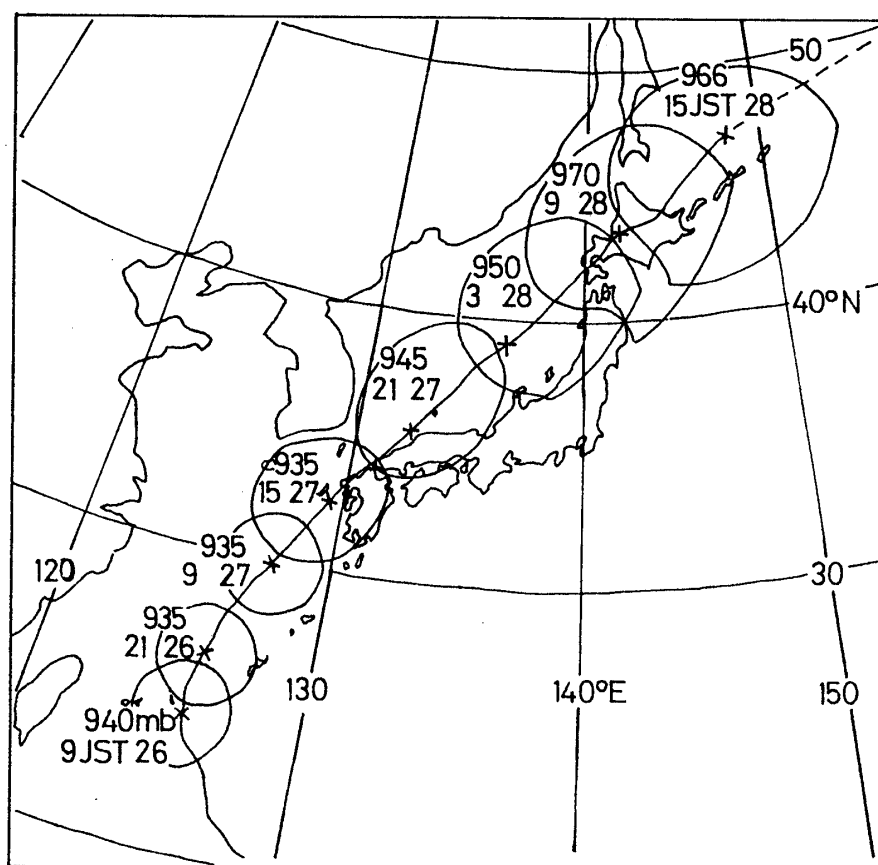


図1 台風T9119号の進路。図中の数字は各位置における日時と中心気圧を示しており、中心(×印)を取り囲む閉曲線は地上気圧990mbの等値線を表している。

解析に適している。

3. 天気概況

台風 T9119 号の進路とその時の地上天気図を図 1～2 に示す。台風 T9119 号は 9 月 16 日 9 時、マ

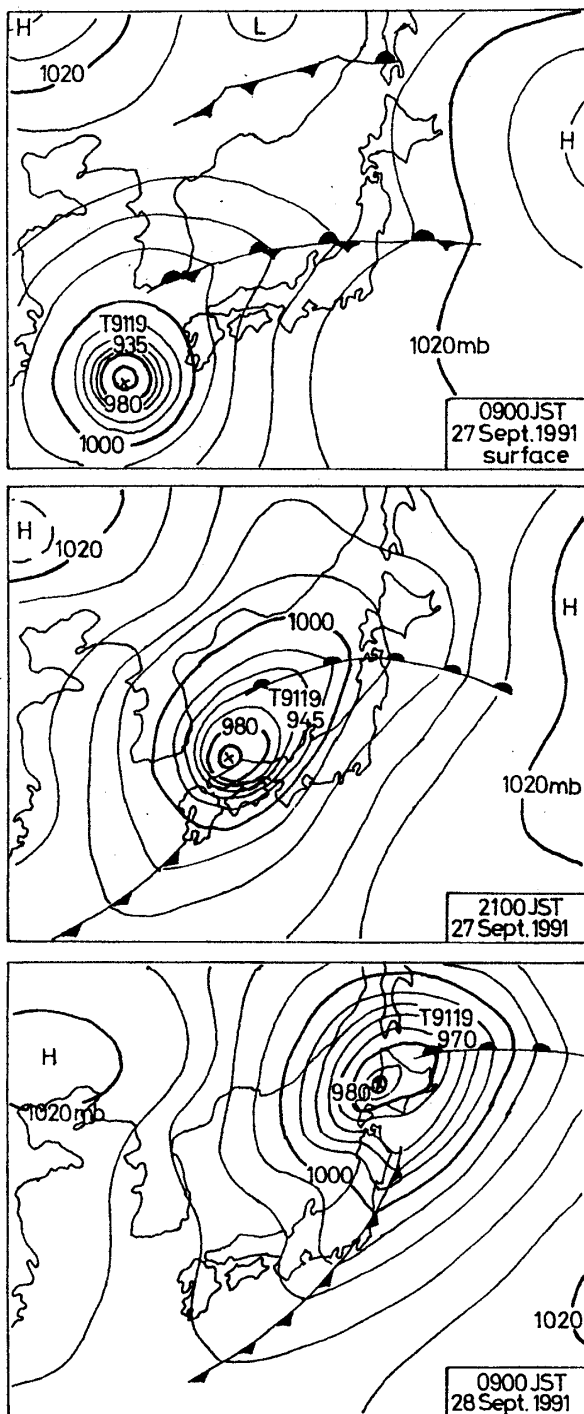


図 2 台風通過時の地上天気図 (12 時間毎)。

ーシャル諸島付近で弱い熱帯低気圧から台風に発達した。台風は西へ進みながら発達し、23日15時には中心気圧 925 mb, 中心付近の最大風速 50 ms^{-1} となった。その後、台風は北西～西北西に進み、26日から27日にかけて沖縄諸島の西寄りを通過後、北北東に進路を変え、時速 50 km で 27 日 16 時すぎに長崎県佐世保市の南に上陸した。この時中心気圧は 935 mb, 最大風速 50 ms^{-1} で上陸時の中心気圧としては観測史上 4 位のタイ記録となった (ただし沖縄や南西諸島を除く)。台風は上陸後、速度を時速 90 km にまで加速しながら中心気圧 950 mb, 最大風速 45 ms^{-1} 程度の勢力を保持して日本海を北東進し、28 日 8 時前に北海道の渡島半島に再上陸した後、28 日 15 時に千島近海で温帯低気圧になった。

4. 最大風速分布の解析

図 3 は気象官署で観測された 1991 年 9 月 27 日から 28 日にかけての 2 日間の 10 分間最大風速ベクトル (準実測風速 U_A) の分布と、最大風速と台風の中心位置との関係である。台風が日本海を進んだため、地形の影響を受けた一部の内陸観測点を除き、最大風速の風向は南寄りとなっている。地点によって多少のばらつきはあるが、最大風速は台風が最も近づいた時刻に記録している所が多い。

図 4 は同じく気象官署における 2 日間の最大風速の分布で、左図は準実測風速 U_A , 右図は地域代表風速 U_B である。ここでプロットの記号の大きさは風速に比例するように示してある。 U_A はローカルな地形の影響を受けた風速なので沿岸部や山岳 (伊吹山, 剣山) で特に強くなっており、地点ごとのばらつきも大きい。一方 U_B は地点ごとのばらつきが U_A ほど小さくなく、台風にとまった地上の強風地域がわかりやすくなっている。この図によると、九州および山陽・山陰地方の全域と北陸地方の日本海側で特に強い風が吹き荒れたことがわかる。

参考のために、アメダスで観測された 1991 年 9 月 27～28 日の最大風速 (準実測風速 U_A) の分布を図 5 に示した。なおこの図には最大風速 25 ms^{-1} 以上の地点のみを表示してある。アメダス観測網

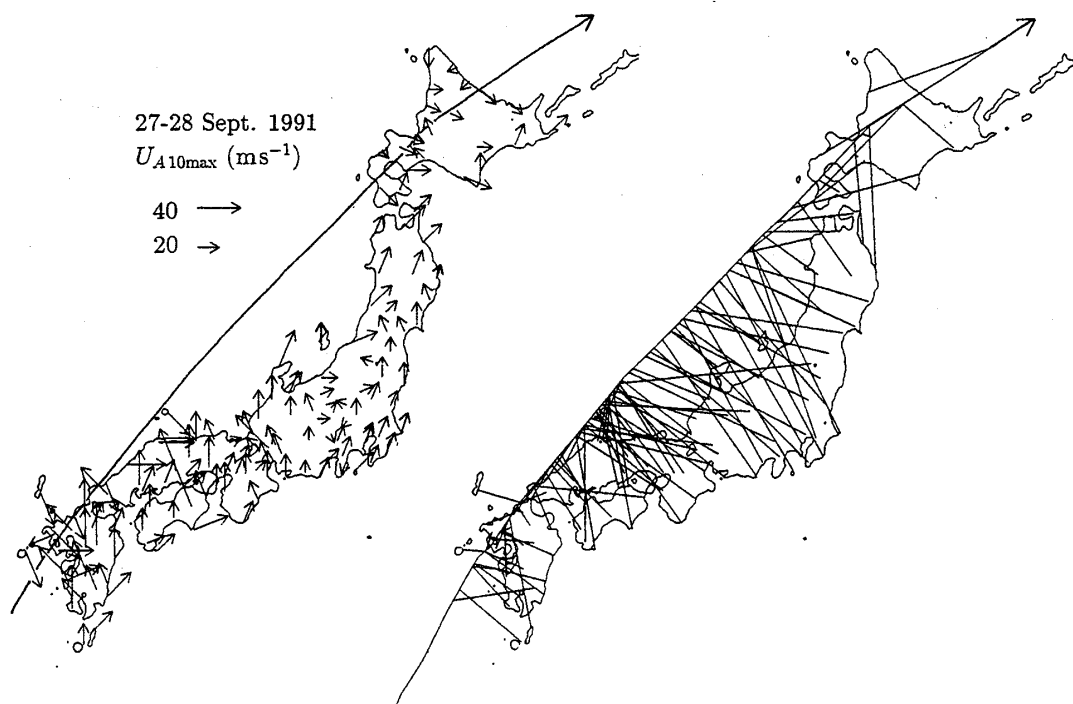


図3 気象官署で観測された1991年9月27日から28日にかけての10分間最大風速（準実測風速 U_A ）の分布（左図），および最大風速と台風の中心位置との関係（右図：最大風速を記録した時刻における台風の中心位置と各観測点を結んだもの）。台風の経路を実線で示してある。

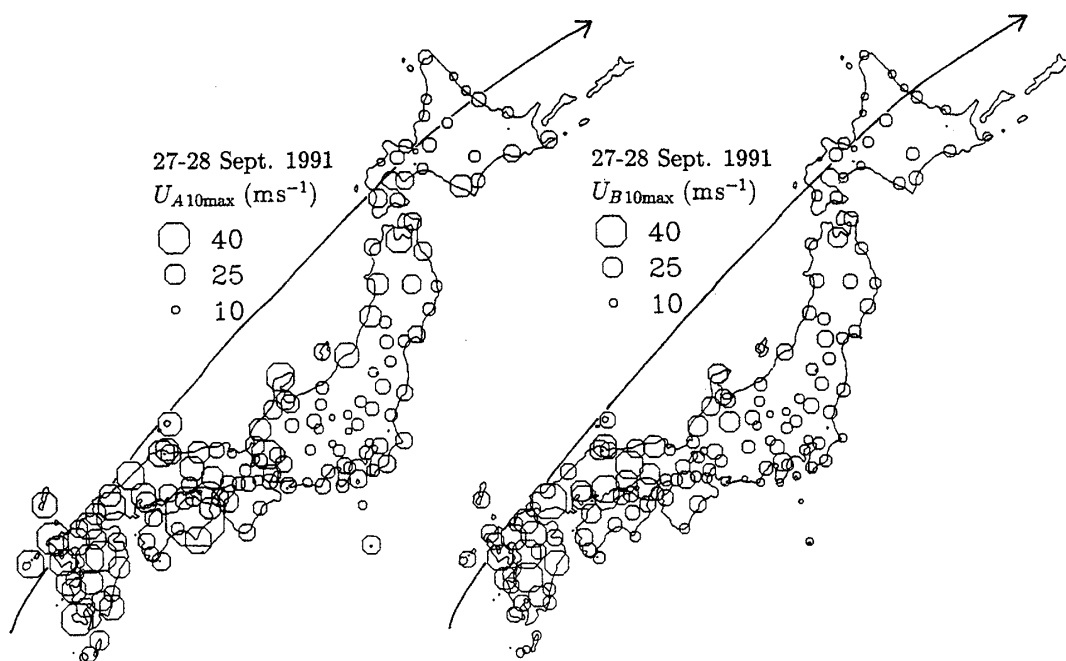


図4 気象官署における1991年9月27～28日の最大風速の分布（左図は準実測風速 U_A ，右図は地域代表風速 U_B ）。記号の大きさは風速に比例する。

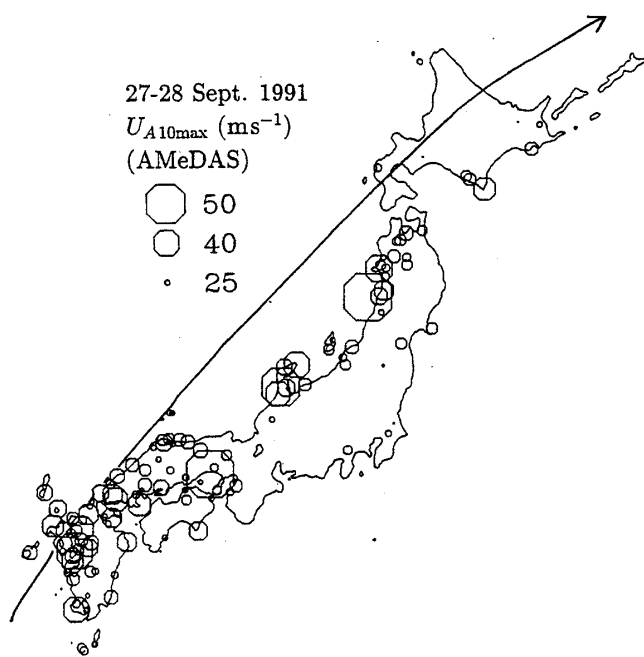


図5 アメダスで観測された1991年9月27～28日の最大風速（準実測風速 U_A ）の分布。最大風速 25ms^{-1} 以上の地点のみ表示した。

は気象官署の6倍近くの約840の観測点を持ち、台風にもなった最大風速の分布をより詳細に解析する事ができる。ただしアメダス観測点においては、地形による風速の減衰効果が定量化されていないため、準実測風速 U_A の分布のみを示した。この図から明らかなように、図4でははっきりとわからなかった東北地方の日本海側沿岸部でも、かなりの強さの強風が吹き荒れていたことがわかる。

5. 台風域内の風速分布

本章では台風域内の最大風速の水平分布を従来の実験式を用いて計算し、実測データと比較することによって、その特徴を明らかにする。ここで使用した実験式は寺田と近藤²⁾が沖縄付近を通過した台風の観測データをもとに作成したもので、次式で表される。

$$V_x = -V_s \sin(\alpha + \beta) + F_x \quad (1)$$

$$V_y = V_s \cos(\alpha + \beta) + F_y \quad (2)$$

$$F_x = C_1 C_x \exp(-0.314r/r_0) \quad (3)$$

$$F_y = C_1 C_y \exp(-0.314r/r_0) \quad (4)$$

$$V_s = V_0 (4r/r_0)(1 + r/r_0)^{-2} \quad (5)$$

ここでは (x, y) 軸をそれぞれ経度、緯度方向にとっており、 (V_x, V_y) は求めるべき台風の風速場、 $(-V_s \sin(\alpha + \beta), V_s \cos(\alpha + \beta))$ は静止台風の基本風速場、 (F_x, F_y) は台風の進行にともなう風速場への付加項をそれぞれ表している。また α は静止台風の基本風速場の風向と等圧線とがなす角、 β は各地点において台風の中心とその地点を結んだ直線と x -軸とのなす角（左回りを正）、 r は台風中心からの距離、 (C_x, C_y) は台風の進行速度、 V_0 は中心付近の最大風速をそれぞれ表し、 C_1 は一定値（ここでは0.8とおく）である。一方、 r_0 は静止台風で風速が最大となる台風中心からの距離を表し、台風の水平スケールを表すパラメータにもなっている。以上の実験式において、静止台風の風速場(5)式は沖縄周辺を通過した複数の大型台風の観測データをもとに作成したものであり²⁾ 台風の進行にともなう風速場への付加項(3)～(4)式も経験的に決められたものである。

最大風速の水平分布を計算するためには、中心付近の最大風速 V_0 と台風の進行速度 (C_x, C_y) が必要となるが、これらには気象庁予報部発表のデータ（災害気象速報）をそのまま使用した。一方、台風の水平スケールを表すパラメータ r_0 は9月27日～28日の間、実測された風速分布に合うように時間によらない一定値 $r_0 = 60\text{km}$ を与えた。

この実験式によって計算した風速の水平分布を台風の進行経路に沿って合成すれば、台風の通過にもなった日本各地の最大風速の大まかな分布を評価することができる。図6はこのようにして計算した1991年9月27～28日の2日間の最大風速の水平分布であり、左図は台風の進行による風速場の変形を考慮して計算した分布を表し、右図は風速場の変形を考慮せずに（静止台風を仮定したときと同等）計算した分布を表している。なお風速 30ms^{-1} 未満のコンターは省略した。ここで左図の3つの大きさの丸印は2日間の最大風速（ここでは平坦地風速 U_p に換算）がそれぞれ30, 40,

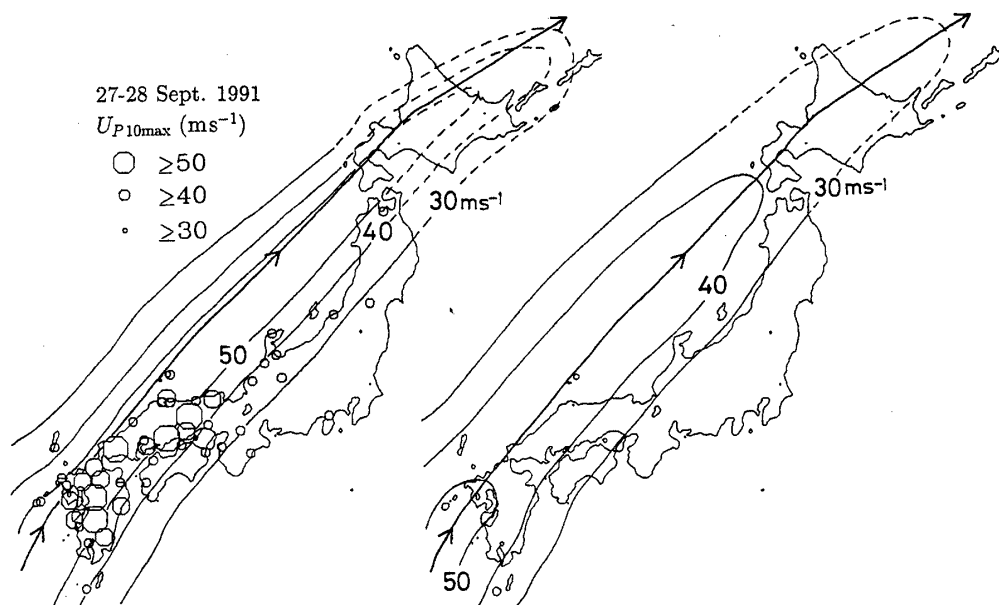


図6 中心付近の最大風速と台風の風速水平分布を表す実験式（地形効果は除外）から計算した1991年9月27～28日の最大風速の水平分布。左図は台風の進行による風速場の変形を考慮して計算した分布を表し、右図は進行による風速場の変形を考慮せずに計算した分布を表している。なお風速 30ms^{-1} 未満のコンターは省略した。左図の3つの大きさの丸印は2日間の最大風速（ここでは平坦地風速 U_P ）がそれぞれ30, 40, 50ms^{-1} 以上を記録した地点である。

50ms^{-1} 以上を記録した地点（気象官署）である。

台風の進行による風速場の変化を考慮した計算結果は、観測値と比較的よく一致していることがわかる。この図に示された気象官署のみの最大風速でははっきりしないが、図5に示されたアメダス観測点の最大風速分布から、東北地方北部の日本海沿岸でも平坦地風速 U_P で $40\sim 50\text{ms}^{-1}$ の強風が吹き荒れていたことは明らかである。一方、台風の進行による風速場の変化を考慮しない計算結果は、考慮した結果に比べて台風の東側でかなり風速が過小評価になっている。北海道付近の計算値を破線で示したのは、この付近では台風の温帯低気圧化によって実験式の適用限界を過ぎてしていると判断したためである。図1～2を見ても、北海道再上陸後は前線が形成され、 990mb の等圧線が円形からかなり崩れている。

台風の進行による風速場の変形を考慮して計算した最大風速 U_{10max}^{cal} と、進行による風速場の変形を考慮せずに計算した最大風速 $U_{10max}^{cal'}$ との比の水

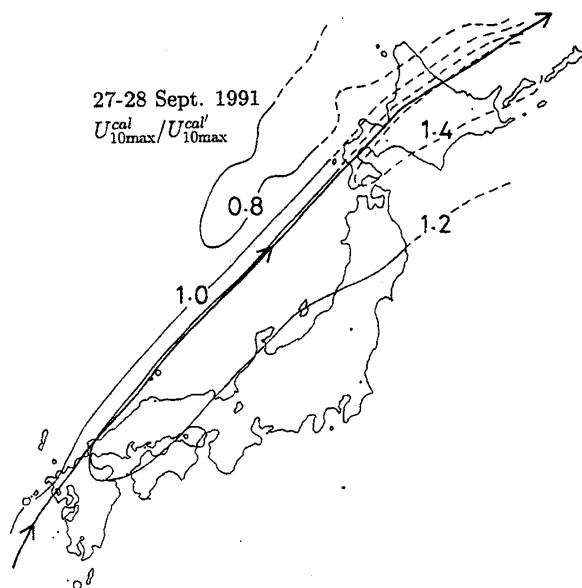


図7 台風の進行による風速場の変形を考慮して計算した最大風速 U_{10max}^{cal} と、進行による風速場の変形を考慮せずに計算した最大風速 $U_{10max}^{cal'}$ との比の水平分布。山陽・山陰地方と東北地方の日本海側で20%以上の風速増加となっている。

平分布を図7に示す。山陽・山陰地方と東北地方の日本海側で20%以上の風速増加となっている。すなわち今回の台風が時速100km近い速度で日本海を駆け抜けたことが各地の最大風速を強め、強風災害をもたらした要因になったといえる。

図6の解析で平坦地風速 U_p をプロットしたのは、気象庁発表の中心付近の最大風速が海上および島や平野部などの比較的平坦な地形上の風速を基準としているためである。平坦地上の地上風速は風速計地上高度と地表面粗度によって変化するが、本研究で基準としている U_p の定義は $z_0 = 1$ m, 地上高50mの風速のことであり、仮に実際の粗度が $z_0 = 10$ cm では地上高10m, $z_0 = 1$ cm では地上高3mの風速にはほぼ対応する。

最後に、各気象官署で記録した9月27～28日の最大風速（平坦地風速 U_p ）を台風中心からの距離の関数として表示したものを図8に示す。台風中心からの距離は最大風速を記録した時刻のものであり、プラス（マイナス）側には台風の進行方向に向かって東（西）側の地点のデータをプロットした。図中の2本の破線は実験式によって計算さ

れた、台風の中心を通り、かつ進行方向に直角方向の直線上における風速分布を表している（ $r_0 = 60$ km, $V_0 = 45 \text{ ms}^{-1}$, 進行速度 $C = 50, 100 \text{ kmh}^{-1}$ として計算した）。観測値と計算値の全体的な傾向はよく合っており、進行方向の東側では西側に比べて 20 ms^{-1} 以上風速が強まっていることがわかる。さらに細かくみると、中心から東側100～300 kmの範囲で計算値は観測値より過大評価になり、300 km以遠で若干過小評価になる傾向がある。はっきりとはわからないが、これは台風が中緯度にきてしかも地形などの影響が重なったために、台風が低緯度にある状態から形が崩れて来たことと関係している可能性がある。

6. 過去の大型台風との比較

この章では、過去40年間に来襲した主要な大型台風と今回の台風による強風（気象官署における10分間最大風速と最大瞬間風速）を比較する。過去40年間の大型台風としては洞爺丸、伊勢湾、第2室戸の3つがあげられ、最近のものとしては、1990年9月の台風19号がある。台風T9119号は

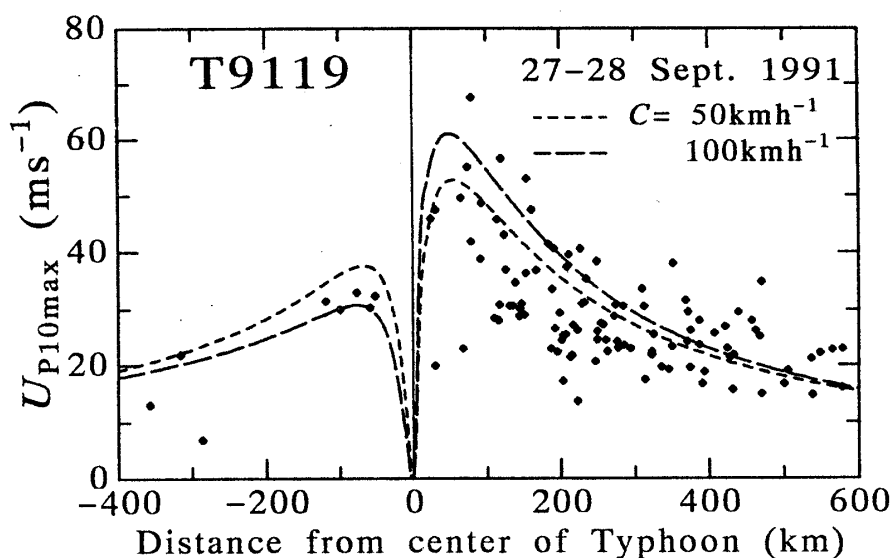


図8 気象官署における9月27～28日の最大風速（平坦地風速 U_p ）と台風中心からの距離との関係。ここで台風中心からの距離は最大風速を記録した時刻のものであり、プラス（マイナス）側は台風の進行方向に向かって東（西）側の地点のデータに対応している。図中の2本の破線は実験式によって計算された、台風の中心を通り、かつ進行方向に直角方向の直線上における風速分布を表している。

1961年9月に来襲した第2室戸台風以来、30年ぶりの大型台風であった。

風速測定のための測器はこの40年間で大きく変化しており、風速データの相互比較には測器の違いによる補正を施さなければならない。気象庁の測器課などではそれらの比較調査が実施されており^{4), 5), 6), 7)}、昔の測器で測定したデータを現在の測器のデータに変換するための係数が求められている。ここではその結果を参考にして、最大風速に関しては1961年以前の台風は0.82倍、1975年以前については0.9倍し、最大瞬間風速に関しては1961年以前の台風は1.05倍を施した。なお最大瞬間風速については1961～1965年の期間は2種類の測器が共存していた時期なので、その補正を行うにあたっては注意が必要である。

5つの台風に対する10分間最大風速 u_{10max} と最大瞬間風速 u_{max} の実測値の比較を表1に示す。ここで表中の数値は全観測点（気象官署）の平均値を意味し、 u_{10max} と u_{max} のカッコ内は最大値、突風率（ $\equiv u_{max}/u_{10max}$ ）のカッコ内は標準偏差を示している。なお本研究では台風が通過した期間中（2日間）における u_{10max} と u_{max} の比を突風率と定義した。一般に風工学の分野では、突風率は10分間平均風速とその10分内の最大瞬間風速

との比として定義される。ただし本解析の多くの地点では u_{10max} と u_{max} はほぼ同時刻に出現しており、今回定義した突風率は数値的には風工学で定義されている突風率とほぼ同一視してよい。

40年の間に各観測点における風速計地上高度や地表面粗度が増加しているため風速の強さを正確に比較することはできないが、今回の台風 T9119号では30年以上前に来襲した洞爺丸、伊勢湾、第2室戸の各台風匹敵するほどの強風が吹き荒れていたことがわかる。

次に突風率に着目すると、最近2年間の台風の方が過去の大型台風に比べてわずかに大きくなっており、これは統計的に見ても有為な増加である。大気境界層の理論によると、地上における突風率は地表面粗度 z_0 の増加にともなって増大することが知られている。図9は全国気象官署における突風率と z_0 との関係を今回の台風 T9119号と T9019号について示したものである。ここで z_A は風速計地上高度を表し、 z_0 は国土数値情報の土地利用データより求めた地表面粗度である^{1), 8), 9)}。図中の破線は理論的に予想される突風率の大まかな範囲（付録Aを参照）を示しているが、観測値は理論曲線に従って z_0 と共に増大し、 z_0 の小さな観測点では1.5程度であるが、 z_0 の大きな地点では

表1 過去に来襲した大型台風との比較。バーは全観測点の平均値を意味し、カッコ内は最大値（風速値）または標準偏差（突風率）を表す。各台風の風速データには測器の違いによる補正を施してある（本文参照）。

台風名	上陸後の 最低気圧 (mb)	観測地点数	$\overline{u_{10max}}$ (ms^{-1})	$\overline{u_{max}}$	$\overline{u_{max}/u_{10max}}$
T5415 (洞爺丸)	956	148	18.4 (47.3)	32.6 (>60.7)	1.84 (0.26)
T5915 (伊勢湾)	930	140	17.1 (44.1)	30.9 (58.3)	1.85 (0.25)
T6118 (第2室戸)	925	150	19.6 (60.0)	33.9 (>88.7)	1.84 (0.26)
T9019	945	154	15.1 (50.3)	27.9 (63.5)	1.95 (0.34)
T9119	935	154	17.8 (43.4)	34.5 (60.9)	2.01 (0.35)

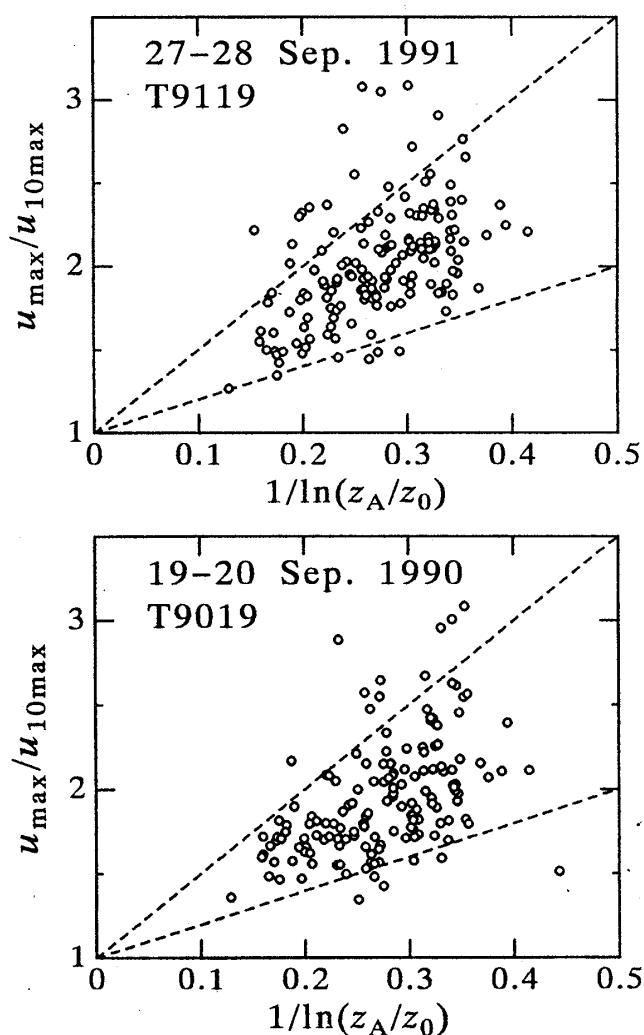


図9 全国気象官署における突風率（＝最大瞬間風速／最大風速）と地表面粗度 z_0 との関係（上図：今回1991年9月の台風T9119号，下図：1990年9月の台風T9019号）。 z_A は風速計地上高度を表し，図中の破線は突風率の理論値の大まかな範囲を表す。粗度が大きな地点ほど突風率が大きく，2以上になっていることがわかる。

2～3にもなっている。気象官署周辺の環境はここ40年間で大きく変化しており，近年の都市化にともなう z_0 の増加が突風率増加の原因の大きな1つになっている可能性を示唆している。しかしその一方で測器変更にもなう器差補正などの問題もあり，表1に示された最近の突風率の増加の傾向を確かめるためには，さらにくわしい調査が必要であろう。

7. まとめ

気象官署およびアメダスの風速データを用いて，台風T9119号通過に伴う最大風速の分布を解析した。地上で観測されている風速は観測点周辺の地物や風速計地上高度，および周囲の地形の状況によって変化するため，本研究では実測値からそれらの効果を補正した風速データを解析に使用した。

解析の結果，九州および山陽・山陰地方の全域と中部から東北地方にかけての日本海の沿岸では，10分間最大風速（平坦地上の粗度 $z_0 = 1\text{ m}$ ，地上高度50mに換算した風速）で $40\sim 50\text{ ms}^{-1}$ 以上の強風が吹き荒れていたことがわかった。気象庁が発表した中心付近の最大風速と台風の風速水平分布を表す実験式から日本各地の最大風速分布を計算したところ，この観測値とほぼ一致した結果が得られた。台風は時速100km近い速度で日本海を駆け抜けたが，これが各地の最大風速を20～30%増加させる原因になったことが計算によって示された。

最後に，過去40年間に来襲した主要な大型台風（洞爺丸，伊勢湾，第2室戸の各台風）と今回の台風による強風を比較した結果，今回の台風の強風はこれら大型台風にはほぼ匹敵するほどのものであったことがわかった。またこれらの比較により，台風にともなった突風率が近年わずかに増加していることも示された。このことについては今後さらにくわしい調査が必要であるが，今回の台風の突風率は地表面粗度 z_0 が大きい地点ほど大きな値をとっていることから，都市化にともなう z_0 の増加が突風率増加の大きな原因の1つになっている可能性が示唆された。

謝 辞

資料の収集にあたって東北大学理学部の木村富士男助教授と仙台管区気象台調査課の高橋章氏の協力を得た。また作図に際しては東北大学工学部の枝松圭一氏が作成した2次元グラフプロットツール（GP）を使わせていただいた。ここに謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 近藤純正・桑形恒男・中園 信：地域代表風速の推定法，自然災害科学，Vol. 10, No. 3, pp. 171-185, 1991.
- 2) Terada, K. and J. Kondo : Trajectory of air parcel and energy supply from the ocean in Typhoon area, 海と空, Vol. 48, No. 1, pp. 1-14, 1972.
- 3) 気象庁海洋気象部・第三港湾建設局：瀬戸内海中部高潮の総合調査報告，気象庁技術報告，No. 36, 1964.
- 4) 気象庁観測部統計課：日最大瞬間風速と日最大風速の比からみた測器変更の影響について，測候時報，Vol. 34, pp. 95-100, 1967.
- 5) 気象庁観測部統計課：風の測器変更に伴う統計の接続問題について，測候時報，Vol. 46, pp. 139-142, 1979.
- 6) 和田徳弘・大谷芳一：測器変更に伴う風速観測値の検討，研究時報，Vol. 34, No. 1, pp. 49-53, 1982.
- 7) 藤谷徳之助：構造工学における風観測資料の利用について—気象庁観測資料を中心に—，日本風学会誌，No. 44, pp. 85-97, 1990.
- 8) 桑形恒男・近藤純正：東・東南部から中部地方までのアメダス地点における地表面粗度の推定，天気，Vol. 37, pp. 197-201, 1990.
- 9) 桑形恒男・近藤純正：西日本アメダス地点における地表面粗度の推定，天気，Vol. 38, pp. 491-494, 1991.

(原稿受理 平成4年4月24日
訂正受理 平成4年8月13日)

付録A 突風率の理論的な関係式

ここでは中立な接地境界層を仮定して，理論的に予想される突風率の大まかな範囲を評価する。

中立な接地境界層内では，次式で示される風速の対数分布が成り立つ。

$$u = \frac{u_*}{k} \ln \left(\frac{z_A}{z_0} \right) \quad (\text{A } 1)$$

ここで u_* は摩擦速度， $k (= 0.4)$ はカルマン定数， z_0 は地表面粗度， u は地上高度 z_A における風速をそれぞれ表している。一方，主風向方向の風速の乱れの標準偏差 σ_u と摩擦速度のあいだには次のような関係が成り立っている。

$$\sigma_u / u_* = f \quad (\text{A } 2)$$

ここで f は大気安定度の関数であり，中立な条件下では 2.5～3 程度の値をとる。

最大瞬間風速 u_{max} は風速の乱れによって生じるので，次のように表すことができる。

$$u_{max} = u + \gamma \sigma_u \quad (\text{A } 3)$$

γ は風速計の追従性などに依存する定数である。

(A1)～(A3) 式から σ_u と u_* を消去して整理すると，

$$u_{max} / u = 1 + kf\gamma / \ln \left(\frac{z_A}{z_0} \right) \quad (\text{A } 4)$$

となる。本解析においては平均風速 u を10分間最大風速 u_{10max} と解釈することができるので，(A4) 式は突風率の理論的な関係式と見なすことができる。ここで γ の値として 2～4 の範囲を仮定すると，右辺第2項の係数は $kf\gamma \approx 2 \sim 5$ となり，図9に示した実際の観測値のバラツキを説明することができる（理論的關係は破線で示した）。