

屋久杉の樹脂斑点幅記録より推定された超強風速の出現可能性の検討

Investigating Occurrence Possibility of Super-Strong Wind Speed Estimated Using Width Records of Resin Freckle Left along Annual Rings of 'Yakusugi'

山口正隆*・野中浩一**・畑田佳男***

Masataka YAMAGUCHI*, Hirokazu NONAKA** and Yoshio HATADA***

Yakushima, located around 60 km south of Kyushu Island is famous for their long-lived (several thousand years old) cedars known as 'Yakusugi'. Manabe(1968) suggested an occurrence of typhoon-generated super-strong wind speeds reaching 93.5 m/s at Yakushima from the analysis of resin freckles left along annual rings on a stump of the Yakusugi(Yakushima Cedar) with a tree age of more than 1,500 years. This paper gives a re-estimate of 70 m/s wind speed at a height of 10 m from the ground through reanalysis of the relationship between annual width of freckles in the recent years on the stump and annual maximum wind speed measured at Yakushima. An extreme value analysis for a sample of annual maximum wind speed consisting of measurements in recent years and data converted from around 1,500 year-long freckle records using the above-mentioned relationship indicates that the return period of wind speed may be more than 2,000 years. A simple approximation form of gradient wind model with either of two types of pressure distribution in a typhoon is applied to evaluate a limiting wind speed under the supposable severest condition of central pressure. Also, a Monte-Carlo simulation of typhoon-generated winds over a 1000-year period on the Northwestern Pacific Ocean is carried out to estimate the return wind speeds on the area. Both investigations imply that the super-strong wind speed event may occur in a period of around 5,000 years.

Key Words ; Super-strong wind speed, typhoon, stump of 'Yakusugi' (Yakushima Cedar), resin freckle, annual ring, extreme value analysis, return wind speed

1. 緒 言

2011年3月11日東日本を襲った超巨大地震とこれに伴う超巨大津波の事例にみるまでもなく、想像を越える異常事象の存在が示唆されている場合には、その生起可能性について科学的・工学的検討

*愛媛大学名誉教授

Prof. Emeritus, Ehime University

**愛媛大学工学部環境建設工学科

Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Ehime University

***愛媛大学大学院理工学研究科(工学系)生産環境工学専攻

Engineering for Production and Environment, Graduate School of Science and Engineering, Ehime University

原稿受理 平成23年10月5日

を加えておくことが今後の災害対策にとって重要になる。その1例が鹿児島県屋久島で伐採された屋久杉の樹脂斑点幅記録から真鍋・川勝^[1]と真鍋^[2]によって推定された過去約1,500年の間における超強風速95 m/sの存在である。

本研究では、屋久島を含む沖縄から九州の気象官署において観測された過去100年前後の年最大風速資料や、屋久島における74年間の観測資料を含む約1,500年間の推定年最大風速資料に対する極値統計解析に基づいて、再現期間が1,000年規模の確率風速を推定するとともに、傾度風モデルの極限形を用いて推定した限界風速や確率的台風モデルを用いたモンテカルロシミュレーションの結果に基づいて推定した確率風速との比較を通じて、数千年の時間スケールにおける超強風速の生起可能性を議論する。

2. 屋久島における風速資料の解析

2.1 風速資料

Fig. 1は屋久島、鹿児島など南西日本における5地点の気象官署の位置を示す。真鍋・川勝^[1]および真鍋^[2]は約1,500年前から伐採時点に至る屋久杉の樹脂斑点幅記録のうち、近年のものと同様に屋久島および鹿児島における年最大観測風速を用いて両者の直線回帰式を作成したのち、古い時代の樹脂斑点幅に対する当該回帰式の適用により4~39年の年数幅で(西暦)451~484年の期間(34年間)から1943~1951年の期間(9年間)に至る41ケースの推定風速値を得た。

本研究では、このうち4ケースを除く451~484年(34年間)の資料から1922~1931年(10年間)の資料に至る34ケースとこれ以降の3ケースの資料を用いる。これらは1935~1942年(8年間)、1940~1950年(11年間)、1943~1951年(9年間)における資料であり、観測風速資料との対比・相関をとるために、それぞれ1943年、1946年、1948年に年最大観測風速をもたらした台風により生じた斑点幅と考える。

屋久島では1937年から2010年までの74年間にわたる風観測資料が得られており、年最大風速・風向と年平均風速を気象100年誌やインターネット上に公開された資料などから収集することができる。周知のように、風速・風向、とくに風速の観測値は風速計の種類や高度、評価時間、周囲の状況など測風環境の変化によって経年変動を伴い、等質性を欠くのが通例である。ここでは山口ら^[3]にならって、古い時期の観測風速をごく最近の測風環境における観測風速とするために、屋久島では一方向的な経年変化をほとんど伴わない1975~2001年の27年間における年平均風速3.9 m/sと、それ以外であまり一方向的な経年変化を伴わないいくつかの区間の年平均風速が一致するように両者の比率を乗じて年最大風速の補正を行う。この結果、屋久島の海拔47 m地点における1975~2001年基準の補正年最大風速資料が1937~2010年の74年間相当分得られたとみなす。なお、屋久島の風向・風速計は2002年4月以降にそれ以前の位置より1 km移動されているため、2002年以降の年平均風速が移動以前に比べてかなり大きい。

Fig. 2は屋久島の1937~2010年74年間における年平均観測風速(○印)、補正年平均観測風速(*

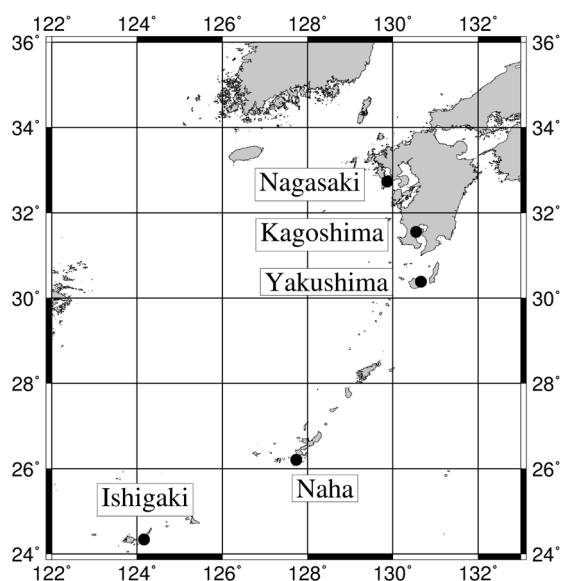


Fig. 1 Location of 5 meteorological stations in Southwestern Japan.

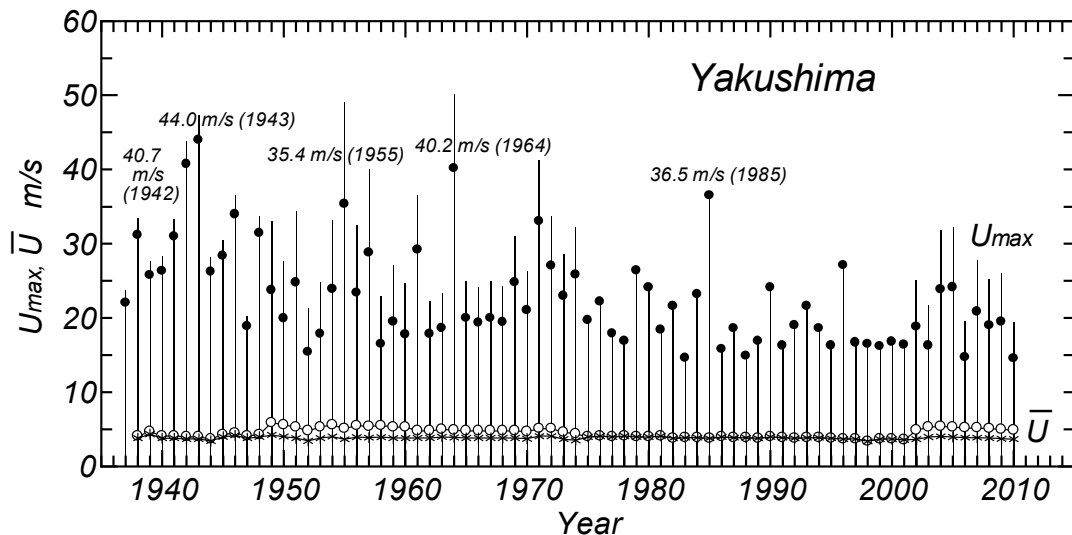


Fig. 2 Yearly variation of measurement-based annual maximum and mean wind speeds at Yakushima.

印, いずれも \bar{U} で表記), 年最大観測風速 (縦棒), 補正年最大観測風速 (●印, いずれも U_{max} で表記) の年系列を与える。等質化の手続きによって 1974 年以前および 2002 年以降の補正年平均観測風速は年に関して平準化がはかられ, 補正年最大観測風速は等質化前に比べて有意な程度に小さくなっている。

同様の手順によって, 沖縄と九州の気象官署 (石垣, 那覇, 鹿児島, 長崎) における年最大風速の補正を行う。このうち, 鹿児島の観測資料の期間は 1885~2010 年の 126 年間あるいは年平均風速が大きな落差を伴う 1897 年以前のデータを除いた 1898~2010 年の 113 年間である。また, あまり一方向的な経年変化を伴わない 1994~2010 年の年平均風速は 3.4 m/s (高度 49 m) を与える。

Fig. 3 は屋久島 (高度 47 m) と鹿児島 (高度 49 m) における補正年最大風速の関係を表す。各プロット点はかなりのばらつきを伴うけれども, 相関係数 $\rho = 0.60$, 原点を通る相関直線の勾配値 $a_0 = 1.04$ であるから, ごく粗い近似で両地点における補正年最大風速はほぼ同じとみなせよう。

つぎに, Fig. 4 は樹脂斑点幅と屋久島における補正年最大風速および鹿児島における補正年最大風速を加えた場合の両者の関係をそれぞれ示す。まず屋久島における年最大風速のみを用いる場合の斑点幅と補正年最大風速の資料値は 1935~1942 年 (該当年は 1943 年) の (6.6 mm, 44.0 m/s), 1940~1950 年 (1946 年) の (5.5 mm, 34.0 m/s), 1943~1951 年 (1948 年) の (3.1 mm, 34.4 m/s) の 3 組である。両者の関係は斑点幅を δ mm, 補正年最大風速を U_{Yaku} (m/s) として

$$U_{Yaku} = 3.19\delta + 20.30 \quad (1)$$

により近似される。また鹿児島における年最大風速に関して 1911 年の資料とみなした (6.3 mm, 37.5 m/s), 1924 年の資料とみなした (4.6 mm, 27.9 m/s) を加えた 5 組の資料に対する回帰直線のあてはめ結果は

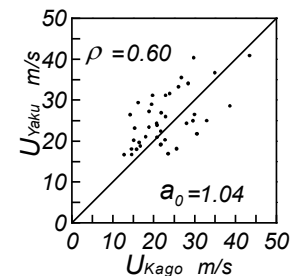


Fig. 3 Relationship between annual maximum wind speed at Yakushima and that at Kagoshima.

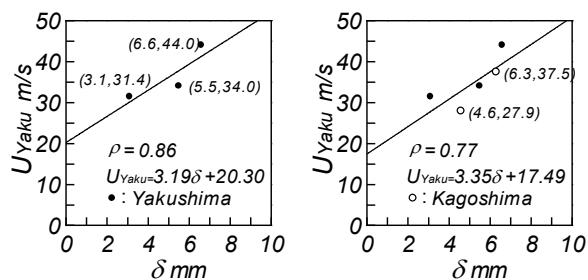


Fig. 4 Relationship between annual maximum wind speed at Yakushima and width of resin freckle on stump of 'Yakusugi'.

$$U_{Yaku}=3.35\delta+17.49 \quad (2)$$

で表される。これらの式によれば、 $\delta=20$ mm に対して U_{Yaku} はそれぞれ 84.1 m/s と 84.5 m/s、 $\delta=15$ mm に対して 68.2 m/s と 67.7 m/s、 $\delta=10$ mm に対して 52.2 m/s と 51.0 m/s、 $\delta=5$ mm に対して 36.3 m/s と 34.2 m/s であるから、高風速部ほど両者の差が小さい。ここでは、屋久島における 3 組の資料から導いた式(1)の推定式を採用する。なお、鹿児島における 1,890 年、1,899 年、1,905 年に相当する 3 ケースの資料を追加すると、適切な関係が得られないので、この場合の資料を回帰式の導出に際して採用していない。なお、真鍋・川勝^[1]および真鍋^[2]に与えられた斑点幅と推定年最大風速より逆算して得た回帰式は

$$U_{Yaku}=3.88\delta+12.53 \quad (3)$$

である。

Fig. 5 は 473~2010 年 1,538 年間における 108 個の推定・補正年最大風速の年系列を示す。全資料における 473 年 (451~484 年) ~1927 年 (1922~1931 年) の 1,455 年間 34 個の斑点幅から推定した年最大風速と、1937~2010 年の 74 年間 74 個の補正年最大観測風速の各資料よりなる。各斑点幅の生起年代は相当する期間の平均値や真鍋・川勝^[1]と真鍋^[2]に与えられた表に記載された古文書の記録などを参照して決めた。Table 1 に示すように、全年最大風速資料のうち、第 1 位値は 545 年 (537~552 年) の 87.0 m/s、補正を行っていない年最大風速資料に対する回帰式を用いた真鍋^[2]では 93.5 m/s、第 2 位値は 473 年 (451~484 年) の 75.2 m/s、真鍋^[2]では 79.0 m/s、第 3 位値は 1828 年 (1819~1830 年) の 73.9 m/s、真鍋^[2]では 77.5 m/s、第 4 位値は 1130 年 (1118~1156 年) の 70.1 m/s、真鍋^[2]では 73.0 m/s

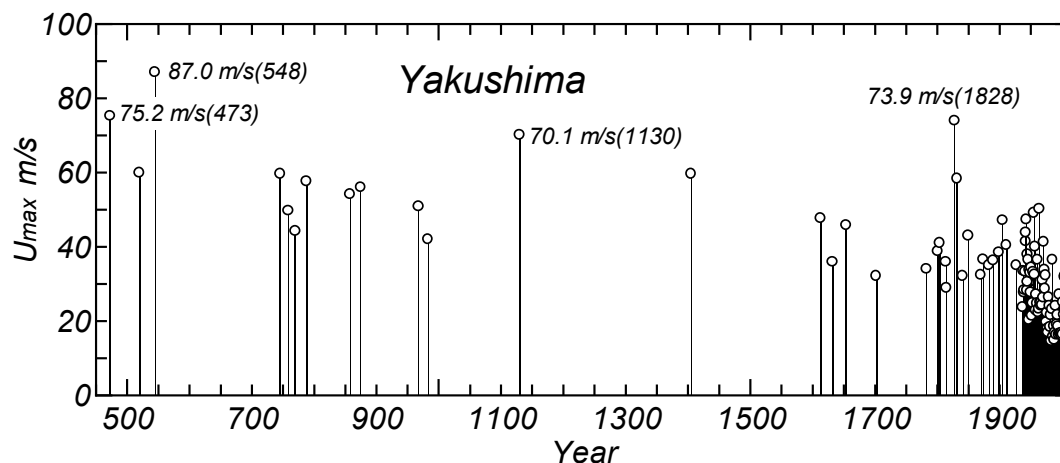


Fig. 5 Yearly variation of freckle-based and measurement-based annual maximum wind speeds over a period of more than 1,500 years at Yakushima.

であり、後者は式(3)によるものとほぼ一致する。Table 1 List of 4 largest annual maximum wind speeds in a year period from 473 to 2010 estimated by this study and those by Manabe(1968).

等質性を担保するための補正を行った今回の結果は第 1 位値でみて真鍋^[2]によるものより 6.5 m/s 小さい。第 2 位値は熊野年代記にある大風 (473 年) に該当する可能性についての希望的観測が饒村^[4]に述べられている。第 3 位値は根本^[5]、高橋^[6]、根本^[7]に取り上げられた過去 300 年の間の超 A 級台風と目される 1828 年 9 月 17 日のシーボルト台風と考えて、発生年を特定した。

order	year period	year	U_{max}^* (m/s)	U_{max}^{**} (m/s)
1	537-552	545	87.0	93.5
2	451-484	473	75.2	79.0
3	1819-1830	1828	73.9	77.5
4	1118-1156	1130	70.1	73.0

* : this study, ** : Manabe(1968)

また、1669年以降に屋久島に隣接する種子島に影響を与えた台風が種子島家家譜を用いて吉田^[8]により調べられているが、1828年のほか、1806年、1815年を除いて、異常風速の発生年がほとんど対応しないことから、屋久島の推定年最大風速の生起年に曖昧さが残るのはやむを得ない。推定年最大風速が70 m/s以上の資料はTable 1の4例のみであり、第5位値は59.6 m/sと60 m/sを下まわる。風速が50 m/s代の資料は8ケースあり、1832年の58.3 m/sを最後とする。補正年最大観測風速の最大値は1943年の44.0 m/sであり、風速は斑点幅に基づく推定結果よりかなり低い。

要するに、Fig. 2から明らかなように、50 m/sを越える巨大風速は観測期間に生じていないし、中程度の強風速の生起も観測開始初期年代に集中している。

2.2 日本における既往最大観測風速との比較

平地にある気象官署で観測された最大瞬間風速の第1位値は宮古島（海拔50 m）における85.3 m/s（台風6618号、第2宮古台風、1966年9月5日）、第2位値は室戸岬（海拔227 m）における84.5 m/s以上（台風6118号、第2室戸台風、1961年9月16日）であり、非公式記録では鹿児島県下甕島における88 m/s（台風9119号、1991年9月27日）や同じく下甕島における83.9 m/s（台風9918号、1999年9月24日）がある。地形の影響を受ける室戸岬を除いても、最大瞬間風速は85 m/sを越える。一方、平地にある気象官署で観測された10分間平均風速の第1位値は室戸岬における69.8 m/s（台風6523号、1965年9月10日）、第2位値は室戸岬における66.7 m/s（台風6118号、第2室戸台風、1961年9月16日）、第3位値は宮古島における60.8 m/s（台風6618号、第2宮古島台風、1966年9月5日）、非公式記録では宮崎県細島灯台（海拔106 m）における74.1 m/s（台風5115号ルース台風、1951年10月14日）、ついで愛媛県佐田岬灯台（海拔40.6 m）における67.1 m/s（台風5115号、ルース台風、1951年10月14日）である。後者に関しては68.9 m/sという報告（小林^[9]）もある。第3位値は宮崎県都井岬灯台（海拔271 m）における65.0 m/s（台風5413号、1954年9月7日）である。風速計の海拔高度は佐田岬灯台で上記のように40.6 mであり、47 mを与える屋久島の風観測地点の海拔高度とそれほど差はない。局所地形の影響を強く受ける室戸岬の風観測記録を除いても、65 m/sを越える強い風速が観測されている。ただし、最近の年代における風速に補正すれば、観測値は小さくなる可能性がある。いずれにしろ、少なくとも60 m/sを越える10分間平均風速が日本の南西部でこれまでに台風時に観測されたと考えてよいであろう。こうした観測結果を考慮すると、Table 1に示した屋久島（海拔47 m）における推定風速の第1位値87.0 m/s、第2位値の75.2 m/s、第3位値の73.9 m/s、第4位値の70.1 m/sはあながち荒唐無稽な値でなく、第5位値の59.9 m/sに至っては十分生起可能な値と考えられる。

2.3 確率風速の推定

屋久島のほか鹿児島、那覇、石垣、長崎における10 m高度換算の年最大観測風速資料に対する極値統計解析をYamaguchi・Hatada^[10]のモデルによって行った。このモデルはGumbel分布、Weibull分布（形状母数 $k=0.5\sim 10$ の27種類）、FT-II型分布（形状母数 $k=2.5\sim 40$ の20種類）の48種類を候補分布とし、順序統計量の非超過確率の評価を合田^[11]のプロットング公式、尺度母数と位置母数の推定を最小2乗法、最適分布の選択を最大相関係数基準、確率風速の分散（平方根は標準偏差）の推定をjackknife法による。ここではこれをLSMモデルと称する。候補分布の増加とjackknife法の導入が合田^[11]のLSMモデルと異なる。解析における資料採択率 ν は観測資料に対して1、1,538年間の推算・観測資料に対して0.05以下である。結果をTable 2に示す。表には、風速計の高度（ z m）、資料期間と年数 K （年）、最適分布の形状母数（ W はWeibull分布、 F はFT-II型分布）、相関係数 ρ 、再現期間 $R=100$ 年、200年、1,000年に対する確率風速とその標準偏差 $\tilde{U}_R = U_R + U_{\sigma R}$ 、第1位年最大風速 U_{max}

Table 2 List of return wind speeds estimated using measurement samples at 5 stations.

location	z m	period	K yrs.	k	ρ	\tilde{U}_{100} m/s	\tilde{U}_{200} m/s	\tilde{U}_{1000} m/s	$U_{max}(\text{year})$
Yakushima	47.0	1937-2010	74	W1.3	0.9969	35.5±2.3	38.2±2.6	44.4±3.3	35.3(1943)
Kagoshima	49.0	1937-2010	74	W1.5	0.9983	33.7±2.0	36.1±2.3	41.2±2.8	34.8(1942)
		1898-2010	113	F12.5	0.9978	35.9±2.4	39.8±2.9	49.9±4.0	40.3(1899)
Naha	75.8	1911-2010	100	W2.6	0.9958	35.1±1.0	36.6±1.1	39.6±1.3	33.7(1949)
Ishigaki	35.4	1900-2010	111	W1.6	0.9960	46.1±2.1	49.3±2.3	56.2±2.8	45.8(1933)
Nagasaki	45.3	1895-2010	116	W1.6	0.9888	32.5±1.7	34.8±1.9	39.7±2.4	35.9(1914)

$$\tilde{U}_R = U_R \pm U_{or} \quad (R=100, 200, 1,000 \text{ yrs.}), \quad \text{Unit of } U_{max} : \text{ m/s}$$

との生起年（括弧内）を与える。10 m 高度風速への変換は 1/7 乗則の適用による。変換係数は屋久島で $0.80165 \approx 0.80$ ，鹿児島で $0.79689 \approx 0.80$ ，石垣で $0.83478 \approx 0.83$ ，那覇で $0.74874 \approx 0.75$ ，長崎で $0.80588 \approx 0.81$ であり，那覇の 0.75 を除く 4 地点で 0.80~0.83 とあまり異ならない。鹿児島，那覇，長崎の 3 地点では観測開始初期の年代の年平均風速と最近の年代の年平均風速の比が大きいことから，換算のために両者の比を乗じると前者の年最大風速が著しく増大するので，初期年代の資料を鹿児島で 13 年相当分，那覇で 20 年相当分，長崎で 16 年相当分削除した。この場合でも各観測資料の期間は 100 年を越える。

Fig. 6 は横軸を観測値 U_{obs} ，縦軸を計算値 U_{cal} とする Q-Q プロット図を屋久島（74 年間資料）と鹿児島（113 年間資料および 74 年間資料）について示す。この事例および各地点で得られた相関係数 ρ の値が示唆するように，最適分布の補正年最大風速資料に対する

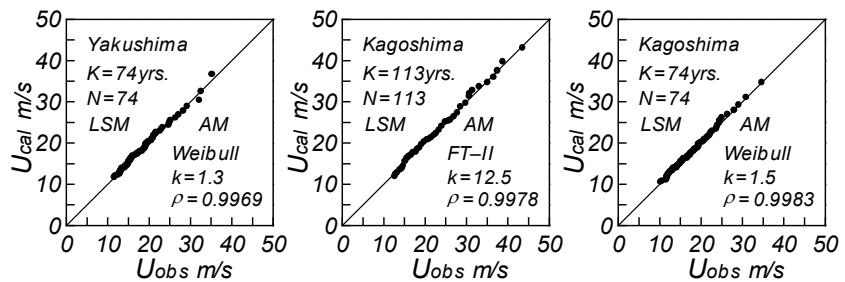


Fig. 6 Quantile-quantile plot of sample of measurement-based annual maximum wind speed at Yakushima and that at Kagoshima.

適合度はいずれの地点でも良好である。また，屋久島の近くに位置する鹿児島では，有効とした全観測資料（113 年間）のみならず屋久島の観測資料期間（1937~2010 年の 74 年間）に合わせた資料に対する解析も行っている。屋久島および鹿児島（74 年間資料）における確率風速と標準偏差は再現期間 100 年に対してそれぞれ 35.5 ± 2.3 (m/s) と 33.7 ± 2.0 (m/s)，再現期間 1,000 年に対しても 44.4 ± 3.3 (m/s) と 41.2 ± 2.8 (m/s) であるから，両者は比較的近い確率風速値を与える。鹿児島では資料期間 74 年から 113 年への延長に伴い，100 年確率風速で 2.2 m/s，200 年確率風速で 3.7 m/s 増加しており，確率風速の推定値に及ぼす期間延長の影響は無視し得ない。ついで，対象とした 5 地点のうち 200 年確率風速は石垣における 49.3 m/s を除いて，長崎における 34.8 m/s から鹿児島における 39.8 m/s の範囲にあり，確率風速値の差が 5 m/s の範囲に納まる。

10 m 高度風速に変換した屋久島の 1937~2010 年 1,538 年間の推定・補正年最大風速資料のうち，斑点幅から推定した 1927~1947 年 1,455 年間の年最大風速資料は 25.7~69.7 m/s（47 m 高度相当で 32.1~87.0 m/s）の範囲にある。一方，1937~2010 年 74 年間の観測資料では補正年最大風速資料は 11.7~35.3 m/s（47 m 高度で 14.6~44.0 m/s）の範囲をとる。真鍋^[2]によれば，斑点幅から推定可能な最低風速は 25.5~35.0 m/s 内外（10 m 高度風速で大体 20~30 m/s 内外）と言われている。そこで，1,538 年間の推定・補正年最大風速資料に対して下限 censoring 値（限界風速） U_c を 20 m/s から 5 m/s ごとに

Table 3 List of return wind speeds estimated using sample of freckle-based and measurement-based annual maximum wind speeds at Yakushima.

U_c (m/s)	K yrs.	N	k	ρ	\tilde{U}_{200} m/s	\tilde{U}_{1000} m/s	\tilde{U}_{2000} m/s	\tilde{U}_{5000} m/s	R_{max} yrs.	R_{max2} yrs.
35*	1,538	18	W10	0.9889	46.1±2.1	62.8±5.1	69.0±6.4	76.4±7.9	2,282	817
30*	1,538	26	W10	0.9931	46.1±2.5	62.8±5.2	68.9±6.2	76.2±7.5	2,266	817
25*	1,538	41	W2.8	0.9952	45.7±2.7	62.2±5.1	68.6±6.0	76.5±7.1	2,207	769
20*	1,538	54	W3.0	0.9965	45.7±2.9	62.2±5.0	68.5±5.8	76.3±6.8	2,172	763
35**	1,538	18	F7.0	0.9961	43.8±3.2	57.6±4.9	64.6±5.7	74.9±6.9	3,191	1,316
35***	1,538	18	F7.0	0.9801	43.3±1.4	55.9±2.0	62.2±2.4	71.7±2.8	4,176	1,632

$$\tilde{U}_R = U_R \pm U_{\sigma R}, \quad U_{max}(\text{year})=69.7 \text{ m/s (545)}, \quad U_{max2}(\text{year})=60.3 \text{ m/s (473)}$$

* : LSM, ** : PPWM, *** : MLM

35 m/s まで変えて LSM モデルによる解析を行った。Table 3 は結果の一覧を示す。この中で R_{max} は第 1 位値 69.7 m/s に対する再現期間 (年数), R_{max2} は第 2 位値 60.3 m/s に対する再現期間 (年数) である。資料年数 $K=1,538$ 年に対して資料数は 18~54 と非常に少なく, したがって資料採択率も $\nu=0.012 \sim 0.035$ と小さい。この結果によると, 相関係数 ρ はかなり 1 に近く, 下限 censoring 値に伴う確率風速および標準偏差の変化も小さい。また 74 年間の観測資料に基づく 200 年確率風速の推定値 38.2 m/s と比べて, 1,538 年間の資料に基づく値 46 m/s は 20 %大きい。これはもちろん斑点幅から年最大風速を推定した観測開始以前の年代 (歴史時代)

における最大 69.7 m/s に達する超強風速の出現による。このほか, 1,538 年間の第 1 位値 69.7 m/s (47 m 高度相当で 87.0 m/s) は 2,000 年確率風速より 1 m/s 大きい程度でその再現期間は 2,200 年, 第 2 位値 60.3 m/s (47 m 高度相当で 75.2 m/s) は 1,000 年確率風速 62.2~62.8 m/s より 1.9~2.5 m/s 小さい程度で, その再現期間は 800 年前後を与える。資料期間を考慮すると, 風速の第 1 位値および第 2 位値とそれぞれの再現期間の対応関係は合理的である。

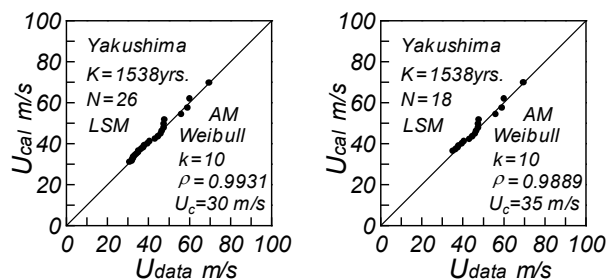


Fig. 7 Quantile-quantile plot of sample of freckle-based and measurement-based annual maximum wind speeds at Yakushima.

Fig. 7 は下限 censoring 値を $U_c=30$ m/s および 35 m/s とした場合の Q-Q プロット図を与える。計算値 U_{cal} と資料値 U_{data} の対応はよい。同様の解析を PPWM 法モデル (宇都宮ら^[12]) および MLM モデル (山口ら^[13]) によって行ったが, 下限 censoring 値 U_c の変化に対して必ずしも安定した推定値が得られないので, $U_c=35$ m/s に対する結果のみを Table 3 の下 2 段に与える。PPWM 法モデルを用いた確率風速は各再現期間に対して LSM モデルを用いた値よりやや小さいが, MLM モデルを用いた値は一層小さい。これは最上位値付近の資料の多くが資料期間の前半年代に生起しているという当該年最大風速資料の特性に起因すると推測される。すなわち, PPWM 法モデルや MLM モデルでは前半年代 (歴史時代) と後半年代 (観測時代) のいずれに最上位値近くの値が生起するかが定式化に際して考慮されるのに対して, LSM モデルではその生起年代が問題にならないことから, 下限 censoring 値の変化に対して安定した確率風速の推定値が得られると考えられる。ここでは, LSM モデルを用いた場合の下限 censoring 値 $U_c=30$ m/s に対する結果を最適な推定値とする。

3. 傾度風モデルに基づく最大風速

3.1 Holland 式に基づく検討

屋久島で推定された 87.0 m/s (10 m 高度換算で 69.7 m/s) もの超強風速がはたして出現しうるか否かを傾度風モデル (岡田^[14]) に基づいて概略検討する。まず Holland^[15]による台風内気圧分布 p のモデルは次式で表される。

$$p = p_c + \Delta p \exp\left\{-\frac{A}{r^n}\right\} = p_c + \Delta p \exp\left\{-\left(\frac{R_w}{r}\right)^n\right\} \quad (4)$$

$$\Delta p = p_\infty - p_c, \quad R_w = A^{1/n} \quad \text{or} \quad A = R_w^n \quad (5)$$

ここに、 p_c : 中心気圧、 p_∞ : 遠方場気圧、 Δp : 気圧差、 r : 台風中心からの距離、 R_w : 最大旋衡風速半径あるいは、ほぼ最大風速半径、を表す。藤井・光田^[16]によれば、式(1)は Schloemer^[17]により提案された 10 種類の台風内気圧分布式のうちの 1 つとのことである。式(4)において $n=1$ の場合がいわゆる Schloemer 式あるいは Myers 式である。また、 n に対する経験式が Hubert et al.^[18]によってつぎのように提案されている。

$$n = 1.5 + (980 - p_c)/120 \quad (6)$$

n の範囲として 1~2.5 が Holland^[15]により推奨されている。しかし、 $n=1$ に対して $p_c=1,040$ hPa、 $n=2.5$ に対して $p_c=860$ hPa であるから、遠方場気圧 p_∞ を 1,013 hPa または 1,010 hPa とする通常の台風の場合には、それぞれ $n=1.225$ および $n=1.25$ をとり、Myers 式に相当する $n=1$ にならない。いずれにしる、中心気圧 p_c の低下とともに n は増大し、半径方向の気圧の空間分布が急になる。

式(1)に基づく傾度風速 V_g は次式で表される。

$$V_g = \left[n \left(\frac{R_w}{r} \right)^n \left(\frac{\Delta p}{\rho} \right) \exp\left\{-\left(\frac{R_w}{r}\right)^n\right\} + \left(\frac{r f}{2} \right)^2 \right]^{1/2} - \frac{r f}{2} \quad (7)$$

ここに、 ρ : 空気の密度、 $f (= 2\omega \sin\phi)$: Coriolis 項、 ω : 地球の回転角速度、 ϕ : 緯度、である。式(7)は $r = R_w$ で

$$V_{gmax} = \left\{ n \left(\frac{\Delta p}{\rho} \right) \exp(-1) + \left(\frac{R_w f}{2} \right)^2 \right\}^{1/2} - \frac{R_w f}{2} \quad (8)$$

になる。しかし、上式の $\{ \}$ 内で第 1 項 \gg 第 2 項であることから、式(8)は次式で近似できる。

$$V_{gmax} = \left\{ n \left(\frac{\Delta p}{\rho} \right) \exp(-1) \right\}^{1/2} = n^{1/2} \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho e}} \quad (9)$$

ここに、 e は自然対数の底 2.7182813 である。高橋^[19]は $n=1$ とした上式により可能最大風速の推定を行っている。

式(9)によれば、Table 4 に示すように $p_\infty=1,013$ hPa、 $\rho=1.2$ kg/m³ とし、① $p_c=860$ hPa に対して $n=2.5$ 、 $V_{gmax}=108.3$ m/s、② $p_c=880$ hPa に対して $n=2.33$ (7/3)、 $V_{gmax}=97.5$ m/s、③ $p_c=900$ hPa に対して $n=2.17$ (13/6)、 $V_{gmax}=86.6$ m/s、になる。一方、 $n=1$ とした Myers 式では $p_\infty=1,013$ hPa、 $\rho=1.2$ kg/m³ とし、① $p_c=860$ hPa に対して $V_{gmax}=68.5$ m/s、② $p_c=880$ hPa に対して $V_{gmax}=63.9$ m/s、③ $p_c=900$ hPa に対して $V_{gmax}=58.9$ m/s、である。九州沿岸を通過した最大級の超巨大台風である 1828 年のシーボルト台風の中心気圧は根本^[5]、^[7]によって 900 hPa (位置はおそらく九州西方海域) と推測されており、また台風 7709 号 (沖永良部台風) 時には沖縄本島と奄美大島の間に位置する沖永良部島で 907.3 hPa

が観測されていることから、中心気圧 900 hPa あるいはさらに中心気圧 880 hPa の台風が屋久島付近を通過する事態はあり得ないことであると推測される。

以上の V_{gmax} は静止台風に伴う最大傾度風速の第 1 次近似値である。台風内の風速には移動に伴う風の影響が加わり、台風の移動に伴う風速 v_0 は台風の移動速度を C として次式のいずれかでモデル化されることが多い。

$$v_0 = \frac{K}{1+K}C, \quad K = \frac{V_g}{rf} \quad (10)$$

$$v_0 = \frac{V_g}{V_{gmax}}C \quad (11)$$

式(10)は最大旋衡風速半径 R_w でほぼ C を、式(11)は C をとり、台風の移動速度 C が台風の移動に伴う場の風の最大風速 v_{0max} として最大傾度風速 V_{gmax} にそのまま加算される。移動速度 C を 36 km/h とすれば風速 10 m/s が、54 km/h とすれば 15 m/s が、72 km/h とすれば 20 m/s が線形的に加えられる。さらに、台風の風速は表面の摩擦の影響を受けて減少することから、10 m 高度の風速とするために減衰係数を 2/3 とする。Table 4 に示すように、 $p_c=900$ hPa の場合 Holland 式で 10 m 高度の最大風速は $V_{max}=67.7$ m/s, Myers 式で $V_{max}=49.3$ m/s, $p_c=880$ hPa の場合 Holland 式で $V_{max}=75$ m/s, Myers 式で $V_{max}=52.6$ m/s, と見積もられる。したがって、Holland 式で $p_c=900$ hPa, 移動速度 $C=54$ km/h ($v_{0max}=15$ m/s), 10 m 高度表面風速への変換係数を 2/3 とすると、最大風速は $V_{max}=67.7$ m/s であるから、屋久島における 10 m 高度推定年最大風速の第 1 位値 69.7 m/s は出現しえない値でないと推測される。

しかし、藤井・光田^[16]は台風内の気圧分布が $n=1$ に相当する Schloemer (Myers) 式でほぼ適切に表現されることを示しているので、 n を中心気圧の減少に応じて増加させる Holland 式の妥当性はあまり明確でない。一方、的場ら^[20]は n を変化させた Holland 式による台風場の風特性を検討しているが、 n の選択に関して明確な結論を得るに至っていない。

3.2 Super Gradient Wind (SGW) モデルに基づく検討

藤井・光田^[21]は表面風速 V と傾度風速 V_g の比が空間的に一定でなく、台風中心付近で 1 を越える特性を表現するために、 $x=r/r_0$ (r : 台風中心からの距離, r_0 : Myers 式による最大旋衡風速半径) とし、つぎの増幅係数 $G(x)$ を提案した。

$$G(x) = G(\infty) + \{G(x_0) - G(\infty)\} \left(\frac{x}{x_0}\right)^{k-1} \exp\left[\left(1 - \frac{1}{k}\right) \left\{1 - \left(\frac{x}{x_0}\right)^k\right\}\right] \quad (12)$$

ここに、 $k=2.5$, $x_0=0.5$, $G(x_0)=1.2$ である。 $G(\infty)$ は遠方場における表面風速への変換係数であり、ここでは藤井・光田^[21]による $G(\infty)=2/3$ とする。 $G(x)$ は $x=0$ での $G(\infty)=2/3$ から増大して $x=x_0$ で $G(x_0)=1.2$ の最大値をとったのち、 $x \rightarrow \infty$ で $G(\infty)=2/3$ に漸近する。表面 (10 m 高度) 風速 V' は Myers 式による傾度風速 V_g を用いて次式で得られる。

$$V' = G(x) \cdot V_g \quad (13)$$

Table 4 List of maximum gradient wind speed (V_{gmax}) and surface wind speed associated with moving typhoon (V_{max}).

p_c (hPa)	Holland			Myers			
	n	V_{gmax}	$V_{gmax}+v_{0max}$	V_{max}	V_{gmax}	$V_{gmax}+v_{0max}$	V_{max}
860	2.5	108.3	123.3	82.2	68.5	83.5	55.7
880	2.33	97.5	112.5	75.0	63.9	78.9	52.6
900	2.17	86.6	101.6	67.7	58.9	73.9	49.3

$V_{gmax}, v_{0max}, V_{max}$: m/s, $p_\infty=1013$ hPa, $\rho=1.2$ kg/m³

$C=54$ km/h ($v_{0max}=15$ m/s), $V_{max}=(2/3)(V_{gmax}+v_{0max})$

藤井・光田^[21]は Blaton の公式を通じて台風の移動速度 C を考慮した傾度風速 V_g を用いているが、ここでは台風の移動速度 C の影響を別途考慮する。また、光田・藤井^[22]は Δp に依存する $G(x_0)/G(\infty)$ の式を提案している。

$$G(x_0) = G(\infty) \left\{ 1 + 10^{(0.02314p-1.96)} \right\} \quad (14)$$

上式において $p_\infty = 1,013 \text{ hPa}$ とすると、 $G(\infty) = 2/3$ の場合 $p_c = 941 \text{ hPa}$ ($\Delta p = 72 \text{ hPa}$) で $G(x_0) = 1$ をとり、 $p_c = 941 \text{ hPa}$ 以下で SGW が実現されるが、 $p_c = 928 \text{ hPa}$ ($\Delta p = 85 \text{ hPa}$) の場合 1.34、 $p_c = 903 \text{ hPa}$ ($\Delta p = 110 \text{ hPa}$) の場合 $G(x_0) = 3.21$ となるから、増幅係数 $G(x_0)$ が異常に大きくなる。したがって、藤井・光田^[21]におけるように、 $G(x_0) = 1.2$ あるいは、せいぜい $G(x_0) = 1.4$ とすることが望ましいと考えられる。Mitsuta・Fujii^[23]の事例によれば、 $G(x_0) = 1.4$ もとりうる値である。

そこで、上記と同様に $\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$ 、 $G(x_0) = 1.2$ とし、気圧分布に Myers 式を用いれば、台風の移動の影響を含まない 10 m 高度での表面風速 V'_{max} は $p_c = 900 \text{ hPa}$ の場合 $V_{max} = 58.9 \text{ m/s}$ であるから、 $V'_{max} = 58.9 \times 1.2 = 70.7 \text{ m/s}$ と評価される。これに台風の移動の影響として、たとえば $C = 54 \text{ km/h}$ (15 m/s) に対する $15 \text{ m/s} \times 2/3 = 10 \text{ m/s}$ を加えれば、 $V_{max} = 80.7 \text{ m/s}$ となる。 $G(x_0) = 1.3$ とし、10 m 高度における移動速度の寄与を $15 \text{ m/s} \times 2/3 = 10 \text{ m/s}$ とすれば、 $p_c = 900 \text{ hPa}$ の場合 $V_{max} = 58.9 \times 1.3 = 86.6 \text{ m/s}$ と表される。屋久島における 10 m 高度推定年最大風速の第 1 位値 69.7 m/s は上記の値をかなり下まわることから、その出現可能性はないとは言えない。

4. 確率的台風モデルによるシミュレーション

4.1 Holland 式に基づく検討

ここでは野中ら^[24]の楕円型気圧分布に基づく季節別確率的台風モデルを用いて 1,000 年間の台風時風速のモンテカルロシミュレーションを実施し、極値統計解析を通じて得た確率風速の特徴を考察する。シミュレーションは Holland 式による気圧分布と楕円型気圧分布 (SGW モデルを付加) の 2 つの場合について行う。

まず、Holland 式による気圧分布の場合には $p_c = 860 \text{ hPa}$ で $R_w = 20 \text{ km}$ と仮定して $n = 2.5$ および $A = 1788.8543$ を得たのち、 $A = 1788.8543$ と固定してシミュレーションで得られる任意の台風中心気圧 p_c に対して、式(6)より n を、式(5)より最大旋衡風速半径 R_w を求める。つまり、楕円型気圧分布の長軸方向半径 a と短軸方向半径 b を等値とした円形気圧分布を対象とするシミュレーションにおいて、領域内の p_c はランダムな変動を含んだ値として求められるが、 R_w は p_c によって一意的に決定される。また、台風の移動速度 C の最大値を 100 km/h と制限し、台風の移動速度の表面風速への寄与分を式(11)によって求める。移動を含む 10 m 高度風速への変換係数は $2/3$ とする。

Fig. 8 は格子間隔 80 km の北西太平洋格子網上で得た 100 年確率風速 U_{100} と 1,000 年確率風速 U_{1000} の空間分布を示す。極値統計解析は資料採択率を $\nu = 1/2$ とした LSM モデルによる。これは以下のシミュレーション結果の解析でも同じである。100 年確率風速 U_{100} は南方境界付近で 55 m/s 、沖縄本島を通る東西方向で 50 m/s 、南九州を通る東西方向で 45 m/s 、朝鮮半島南部から日本海を経て秋田・岩手県にかけて 40 m/s である。屋久島、鹿児島、那覇、長崎における観測資料の解析に基づく 100 年確率風速は 35 m/s 前後であるから、シミュレーション資料に基づく値が那覇で 15 m/s 、他の地点で 10 m/s 大きい。また、石垣では観測資料で 46 m/s 、シミュレーション資料で 50 m/s 以上と後者が $4 \sim 5 \text{ m/s}$ 大きい。シミュレーション資料は周辺地形の影響を含まないので、両者の結果に矛盾はない。

一方、齊藤ら^[25]の中で与えられた各基準・指針における再現期間期待値 (100 年確率) 風速と比べると、 $5 \sim 10 \text{ m/s}$ 小さい。ただし、上記の算出根拠が明らかでない。また、藤井・光田^[21]によるモンテカルロシミュレーション資料から導かれた明石海峡における 100 年確率風速は 47 m/s であり、今回

の結果より 4~5 m/s 大きい。1,000 年確率風速は 100 年確率風速に比べて 5 m/s 程度大きい。しかし、屋久島付近での 1,000 年確率風速は 52 m/s 程度であって、屋久島における 10 m 高度換算の推定年最大風速の第 1 位値 69.7 m/s と比べると、15 m/s 以上小さい。再現期間を 10,000 年としてもこれに及ばない。

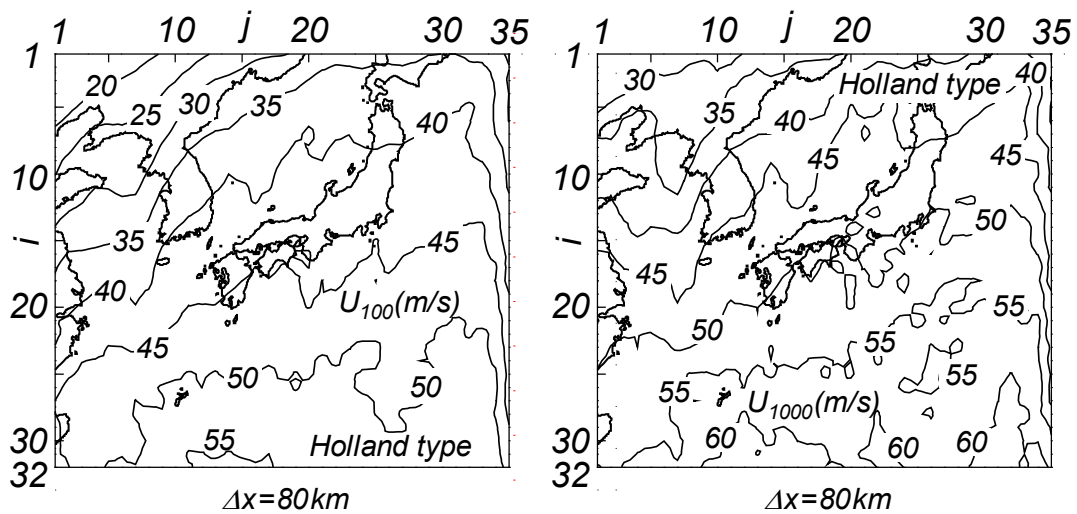


Fig. 8 Spatial distribution of return wind speed on the Northwestern Pacific Ocean estimated using Monte-Carlo simulation technique(Holland type).

4.2 Super Gradient Wind (SGW) モデルに基づく検討

楕円型気圧分布(長軸方向半径 a , 短軸方向半径 b)を用いたモンテカルロシミュレーションにおいて計算される傾度風速に式(12)を乗じて Super Gradient Wind の効果 ($G(x_0)=1.2$, $G(\infty)=2/3$) を考慮するとともに、台風の移動速度の影響を表す式(11)による v_0 に $2/3$ を乗じて台風の場の風への寄与を考慮する。シミュレーションでは円形気圧分布から楕円型気圧分布へのひずみに伴う過大な最大風速の増加を避けるため、 b/a の範囲を 0.85~1.10 と制限する。また、台風の移動速度 C の最大値を 100 km/h とする。

Fig. 9 は 100 年確率風速 U_{100} と 1,000 年確率風速 U_{1000} の空間分布を与える。100 年確率風速は南方境界付近で 60 m/s, 沖縄と九州の間で東西方向に 55 m/s, 九州, 瀬戸内海, 紀伊半島, 伊勢湾, 関東沖合の東西方向に 50 m/s, 朝鮮半島南部から日本海を経て山形県, 宮城県にかけて 45 m/s, 朝鮮半島中部から日本海を経て北海道函館付近にかけて 40 m/s となっており, Fig. 8 の Holland 式に基づく場合より 5 m/s 大きい。これらの値は斉藤ら^[25]の中で与えられた各基準・指針における 100 年確率風速と概略符合する。また, 明石海峡付近の 100 年確率風速も藤井・光田^[21]の結果より若干大きい程度で, 概略対応する。1,000 年確率風速は 100 年確率風速と比べて 5~7 m/s 大きい。屋久島付近では 1,000 年確率風速は 58 m/s 程度であるから, 屋久島における過去約 1,500 年の間の推定年最大風速の第 1 位値 69.7 m/s と比べて 10 m/s 以上小さい。10,000 年確率風速は 63 m/s であるから, 依然として第 1 位値より小さい。第 1 位値 69.7 m/s は第 2 位値 60.3 m/s, 第 3 位値 59.2 m/s と比べて約 10 m/s 大きい突出した値をとり, その再現期間は 10,000 年を優に越えることになる。一方, 第 2 位値 60.3 m/s に対する再現期間は 1,150 年であり, 約 1,500 年の資料期間を考えると, 合理的である。

ついで, Fig. 10 は $G(x_0)=1.3$ のもとに他の条件を Fig. 9 と同じにした場合の 100 年確率風速 U_{100} と 1,000 年確率風速 U_{1000} の空間分布を与える。Fig. 9 に与えた $G(x_0)=1.2$ の場合と比べて, 確率風速は 5 m/s 増加する。したがって, 斉藤ら^[25]や藤井・光田^[21]の結果を上まわることになる。一方, 1,000 年

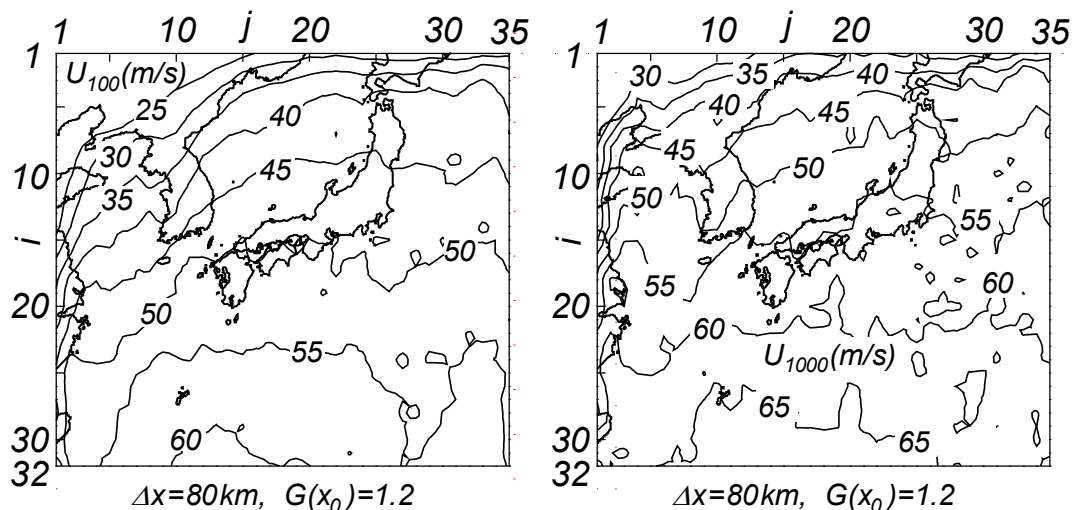


Fig. 9 Spatial distribution of return wind speed on the Northwestern Pacific Ocean estimated using Monte-Carlo simulation technique ($G(x_0)=1.2$ case).

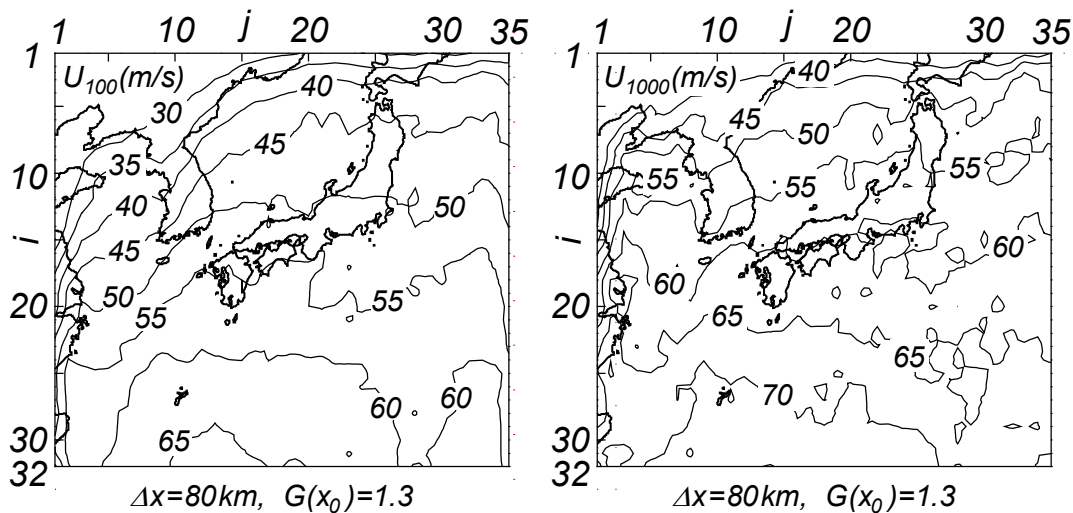


Fig. 10 Spatial distribution of return wind speed on the Northwestern Pacific Ocean estimated using Monte-Carlo simulation technique ($G(x_0)=1.3$ case).

確率風速は屋久島で 64 m/s であるし、屋久島における第 1 位値 69.7 m/s に対する再現期間は約 7,000 年と評価される。 $G(x_0)=1.35$ とすれば、再現期間は 2,000 年と見積もられる。したがって、屋久島における約 1,500 年の間の 10 m 高度換算年最大風速の第 1 位値 69.7 m/s の出現は、5,000 年程度のタイムスケールで見れば、あり得ない事象でないと推測される。

5. 結 語

本研究では、屋久杉の樹脂斑点幅記録から推測された過去約 1,500 年の間における 80 m/s 以上の超強風速（高度 47 m）が統計的にみて実現するか否かの可能性を検討した。得られた知見の概要はつぎのようである。

①屋久杉の樹脂斑点幅記録から推測された過去約 1,500 年の間の第 1 位風速は 1975～2000 年時点の基

準風速でみれば、高度を 47 m として 87.0 m/s と評価される。これは真鍋^[2]による推定値 93.5 m/s よりやや小さい。

②屋久島における第 1 位風速 87.0 m/s は、風速計高度の影響を無視すれば、わが国で観測された最大瞬間風速の最大値と同程度であるが、10 分間平均風速の最大値より 15 m/s 程度大きい。

③屋久島、鹿児島、那覇、長崎における 100 年前後の観測資料に基づく 10 m 高度換算の 100 年確率風速は 33~36 m/s、200 年確率風速は 35~40 m/s、石垣で 46 m/s および 49 m/s と評価される。

④屋久島における観測資料を含む 1,538 年間の 10 m 高度換算（換算係数 0.8）推定年最大風速資料に基づく 200 年確率風速は 46 m/s、1,000 年確率風速は 63 m/s、2,000 年確率風速は 69 m/s と評価される。再現期間を 200 年でみれば、観測資料のみに基づく確率風速より 8 m/s 大きい。10 m 高度換算の第 1 位風速 69.7 m/s の再現期間は約 2,200 年に相当する。

⑤Holland による気圧分布式に基づく、台風の移動速度（ $C=54$ km/h）を考慮した 10 m 高度風速の最大値は台風を中心気圧を 900 hPa と想定すれば 67.7 m/s であり、屋久島での 10 m 高度換算の第 1 位値 69.7 m/s に近い値を与える。

⑥Myers による気圧分布式に基づく傾度風速に対して Super Gradient Wind（SGW）としての風速増強を行えば、台風の移動（ $C=54$ km/h）を考慮した 10 m 高度風速の最大値は 900 hPa の台風中心気圧に対して 80.7 m/s であり、屋久島での 10 m 高度換算第 1 位値 69.7 m/s より 11 m/s 大きい。

⑦確率的台風モデルによる 1,000 年間のシミュレーション結果によれば、Holland による気圧分布式を用いる場合、再現期間を 10,000 年としても確率風速は屋久島での第 1 位値より 10 m/s 以上小さい。一方、Myers による気圧分布式を一般化した楕円型気圧分布式を用い、かつ Super Gradient Wind の影響を加味する場合には 5,000 年確率風速は屋久島における第 1 位風速値と同程度の値を与える。もちろん、この結果は想定する増幅係数の最大値に依存するのは言うまでもない。

⑧要するに、対象期間を概略 5,000 年とすれば、屋久島における推定年最大風速の第 1 位値 87.0 m/s（10 m 高度で 69.7 m/s）に相当する超強風速の出現はありえない事象でない。

参 考 文 献

- [1] 真鍋大覚・川勝紀美子：屋久杉の年輪から解析された古代気象の永年変化と大風の変遷，九州大学農学部附属演習林集報，第 22 号，pp.127-169，1968.
- [2] 真鍋 大覚：台風と屋久杉，天気，Vol.15，No.3，pp.11-17，1968.
- [3] 山口正隆・大福 学・野中浩一・畑田佳男・日野幹雄：SDP 風資料を用いた内湾・内海における 45 年間の海上風分布データセットの作成，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.B2-65，No.1，pp.186-190，2009.
- [4] 饒村 曜：台風物語 記録の側面から，（財）日本気象協会，250p.，1986.
- [5] 根本 順吉：シーボルト台風，自然，Vol.16，No.10，p.47，1961.
- [6] 高橋 浩一郎：過去 300 年間の A 級暴風雨，天気，Vol.9，No.9，pp.1-5，1962.
- [7] 根本 順吉：過去 300 年間の A 級暴風雨 付記 シーボルト台風について，天気，Vol.9，No.9，pp.6-7，1962.
- [8] 吉田 一男：種子島家，家譜による台風，天気，Vol.10，No.5，pp.21-23，1963.
- [9] 小林清一：ルース台風報告，附録 佐田岬の風速 69m/s の実地調査報告，中央気象台彙報，第 37 冊，第 3-4 号，pp.468-470，1952.
- [10] Yamaguchi, M. and Y. Hatada : An extremal analysis system and its application to the estimation of extremes of meteorological and oceanographic elements around the coasts of Japan, Proc. WAVES97, Vol.2, pp. 932-946, 1997.

- [11] 合田良實：港湾構造物の耐波設計—波浪工学への序説—，鹿島出版会，333p.，1990.
- [12] 宇都宮好博・山口正隆・野中浩一・真鍋 晶・畑田佳男：歴史資料を含む年最大値資料に対する極値統計解析における PPWM 法の適用性，海岸工学論文集，第 52 巻，pp.156-160，2005.
- [13] 山口正隆・野中浩一・宇都宮好博：歴史情報を含む年最大値資料に対する極値統計解析における最尤法モデルの適用性，水工学論文集，第 51 巻，pp.307-312，2007.
- [14] 岡田弘三：高潮を起こす気象の場とそのモデル化，月刊海洋，Vol.32，No.11，pp.735-742，2000.
- [15] Holland, G. J. : An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes, *Moth. Weather Rev.*, Vol.108, pp.1212-1218, 1980.
- [16] 藤井 健・光田 寧：台風の気圧分布形について，京大防災研年報，第 38 巻 B-1，pp.101-116，1995.
- [17] Schloemer, R.W. : Analysis and synthesis of hurricane wind patterns over Lake Okeechobee, Florida, *Hydrometeorological Rept.*, USWB, No.31, pp.49, 1954.
- [18] Hubert, G.D., G.J. Holland, L.M. Leslie and M.J. Manton : A real-time system for forecasting tropical cyclone storm surges, *Weather Forecast*, Vol.6, pp.86-97, 1991.
- [19] 高橋浩一郎：災害に関するオペレーションズ・リサーチ（II）—とくに日本の風害と関連して—，研究時報，13 巻 7 号，pp.499-525，1961.
- [20] 的場萌実・村上和男・柴木秀之：Super Gradient Wind (SGW) を考慮した台風の風の推算と高潮数値計算，海岸工学論文集，第 53 巻，pp.206-210，2006.
- [21] 藤井 健・光田 寧：台風の確率モデルによる強風のシミュレーション，日本風工学会誌，第 28 号，pp.1-12，1986.
- [22] 光田 寧・藤井 健：台風時における気圧場から計算した風速と実測された風速との関係，京大防災研年報，第 40 号 B-1，pp.165-172，1997.
- [23] Mitsuta, Y. and T. Fujii : An analytical synthesis of typhoon wind over Japan, *Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.*, Vol.37, Part 4, No.329, pp.169-185, 1987.
- [24] 野中浩一・山口正隆・畑田佳男・伊藤吉孝：拡張型確率的台風モデルを用いた波高の極値推定システム，海岸工学論文集，第 47 巻，pp. 271-275，2000.
- [25] 斉藤康高・納富周平・西條 修・岡本強一：日本沿岸域における風向別再現期待値風速，第 16 回風工学シンポジウム論文集，pp.77-82，2000.