

## 日本における風のエネルギーの評価\*

光 田 寧 林 泰 一\*\*

## 1. はしがき

風のエネルギーを直接動力源として利用することは古くから農作業や軽工業において行なわれており、その歴史は古い。しかし、技術の進歩と共に容易にかつ安価に強力な動力源を入手することができるようになり、風力利用は非能率的なものとして排除されていかに見えた。ところが、最近になって化石エネルギーの逼迫と環境汚染の防止という面から、動力源としての風力の大規模な利用が再び世界的な注目を集めるようになりつつある。

全世界の大気中の風力エネルギーの総量は  $3 \times 10^{14}$  MW であり、そのうち、地上に設置した風車などで風力の利用を実行するにあたってその対象となるのは  $2 \times 10^7$  MW ぐらいであるという推定がなされている (WM O, 1954)。Van Arx (1974) は、このような推定は過大評価であり、利用可能なものは  $10^6$  MW ほどであろうとしているが、その値でも現在の水力発電の総発電量の10倍ぐらいに達する大きなものである。

風力エネルギーを産業用に利用する技術を確立するに際しては、その動力源である風のエネルギーを大量にかつ持続的に得ることのできる適地を探すという問題と、そのエネルギーを利用可能な形に変換する効率の良い装置を開発するという問題が大きな課題である。前者は気象学の問題であり、後者は機械工学の問題であるが、両者がうまく協調できなければその成功はあり得ない。

欧米諸国では、風力エネルギーの大規模な利用法についての研究がいろいろな方法によって進められており、試験的な装置の運転も始められている。わが国でも研究

が開始されつつあるが、諸外国に比して遅れていることは確かである。しかし、急いで外国において開発された装置を導入していくことは決して得策ではない。わが国の気象条件に最も適した装置を開発していくべきである。

このような目的のためには日本における風の性質が十分に理解されていなければならないが、今日までこのような目的での研究はほとんど行なわれていないのが実状である。そこで、まずここでは日本における風の環境がどのようなものであるかを調べるために、永年の気象観測の記録を容易に得られる気象庁所属の観測点での測風塔高度における風の性質を調べてみることにした。これは、このような場所から風力利用の適地を選ぼうということを目的としているのではない。適地は小地形的にも風が増強される可能性のある場所に求めねばならないが、気象官署の観測は、地域の一般的特性を求めむろ地形の影響の小さい場所が選ばれているからである。しかし、それだけにこのような地点での結果はその地域の一般的な風の性質を比較的良く示していると考えて良く、まず特殊な場所の調査に進む前の基礎資料として重要な意味を持つからである。

したがって、ここでは風力利用装置の効率などは考えずに、とにかく風のエネルギーがどのように分布しているかについて、各地の1日8回の10分間平均風速の記録を10年分ほど集めて、その頻度分布を作り、それを関数形で表現し、そしてそれから平均エネルギーがどれくらいのものであるかを求めてみることを試みた。

## 2. 風のエネルギー

大気の運動すなわち風の運動エネルギーは、風速を  $V$ 、大気密度を  $\rho$  とすると  $\frac{1}{2}\rho V^2$  で示される。力は単位

\* Wind power potential in Japan.

\*\* Y. Mitsuta and T. Hayashi, 京都大学防災研究所.

時間当たりのエネルギーの量であり、断面積  $A$  の空間を単位時間に通過する大気の体積は  $AV$  であるから、風速  $V$  の時の風力  $P$  は、

$$P = \frac{1}{2} \rho V^2 \cdot AV = \frac{1}{2} \rho AV^3 \quad (1)$$

で与えられる。

風速は時間的に変化しているから、ある時間の平均パワーはこれを平均した、

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T \left( \frac{1}{2} \rho AV^3 \right) dt \quad (2)$$

で求められることは当然である。したがって、ある地点の平均の風力を求めるには風速の立方に関する統計があれば良いことになる。

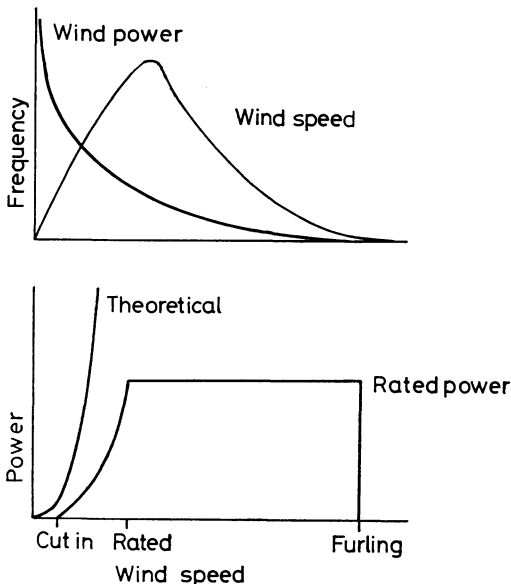
もっとも、実際にはこのように求められた風のもつエネルギーの全てを利用できるわけではなく、その一部分しか有効には取り出せない。その割合は、Betz(1920)が船のプロペラの効率の計算に応用される単純な運動量理論を応用して推算した結果によれば、 $16/27$  が可能最大値である。しかし、現実には風車を用いて取り出せるエネルギーの量はこれよりずっと少なく、たかだか40%以下であると言われている (Golding, 1955)。

実際に風力利用に用いる風車、特に風力発電装置は、風速に対して第1図に示したような出力特性を持つよう

に設計される。横軸は風速であるが、風車は弱風時風速がある値に達するまで回転を開始しないし、回転しても動力を取り出すことはできないので、風速がある値より大きくなって初めて出力を取り出すことになる。これを cut-in-speed と呼んでいる。それより大きな風速では出力は風速と共に増大していくが、定格出力に達するともうそれより風速が増しても、それ以上の出力は取り出し得なくなる。このような風速は rated speed と呼ばれている。これ以上の風速では定格の出力が多られるだけで、風のエネルギーはある程度無駄になるわけであるが、さらに風速が増大すると装置の安全のためにエネルギーの取出しを中止し、風車が風で破壊されないように対策をたてなければならぬ限界がある。これを furling speed と呼んでいる。これらの各々の点をどれぐらいの風速に選ぶかは、風速の頻度分布との関係で気象学的な知識から判断すべき問題である。また風が非常に強くなった場合、たとえば出力は得られなくなっても、装置そのものは破壊されないような強度を持っていないとほならないから、当然機械の耐用年数の間に期待すべき最大風速の予測も大きな問題である。

### 3. 風速の発現頻度分布

上に述べたように、風力利用装置の計画においてはどうしても計画地点の風速の発現頻度分布を知っておく必要がある。また、多くの候補地点を比較したりする際には、それらを何かのパラメータを用いて数量化しておくことが便利である (Baker・Hewson, 1978)。風速の頻度分布については、今日まで気象学的に多くの研究がなされて来ており、1時間あるいはそれ以下の程度の時間の風速の分布については正規分布で比較的良く近似でき、平均値と標準偏差でその性質を示すことができるということが一般的に知られている。しかし、期間が長くなると、いわゆる平均風速 (10分間ぐらいの平均) が時間的に変化するため標準偏差も時間と共に大きくなり、かつ風速零のところに風速の一つの限界がでるためその分布はどうしても歪んでくる。これを合理的に示すために、レーレー分布 (Grace, 1975) や対数正規分布 (Luna・Church, 1974)、あるいはワイブル分布 (Justus *et al.*, 1976; Hennessy, 1976)、さらにこれとは別の独自の方法 (Widger, 1977; Höngström, 1978) などが用いられているが、どれが最も適しているのかについては現在のところ決め手が無い。というのは、いずれも実験的に適合させるものであり、どれが合理的かの判断ができないか



第1図 代表的な風速と風のエネルギーの頻度分布 (上) と理論的な風力と実際に風車等で取り出すことの可能なエネルギーの関係(下)。いずれも横軸は任意な座標で書いてある。

らである。ただ、分布式をいろいろと利用する上において便利であるということで、最近ではワイブル分布を採用する人々が増しつつある。ここでも、この分布を用いて風速分布を表現してみることにする。

ワイブル分布はスウェーデンの Weibull (1951) によって提案され、破壊強度の解析に最初に利用されたものである。一般には、パラメータを三つ含む式で示されるが、風速の頻度分布に適用する時には、風速が零の発現頻度が零であるとするれば二つのパラメータによって分布を示すことができる。

ワイブル分布を風速分布の表現に用いる場合においても、風速が零の時に有限の頻度を持つとして、それを表現するためのいろいろの試みもなされているが(たとえば Talke・Brown, 1978 あるいは Stewart・Essenwanger, 1978)、著者の調査によれば(たとえば光田, 1971)、気象統計に現われる風速零あるいは静穏は風速計の微風に対する感度の不良から生じているものであり、スカラー的な平均風速については風速零の頻度は零であると考えても良いということが知られているので、そのような努力は行なわない方がむしろ正しい風速の分布に近いものが得られるものと考えられる。

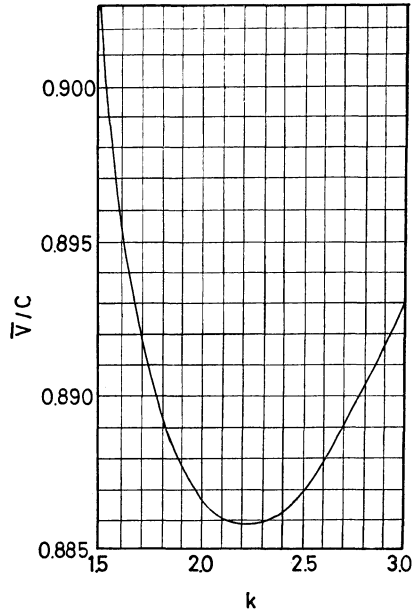
ここで用いる二つのパラメータを持つワイブル分布の確率密度分布関数は次のように書くことができる。

$$f(v)dv = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] dv \quad (3)$$

ここで、 $k$  は形状パラメータ (Shape parameter),  $c$  は尺度のパラメータ (Scale parameter) と呼ばれるパラメータである。関数の形は  $k$  の値によって変化し、 $k < 1$  の時は単調減少関数となり、 $k > 1$  の時は一つの極大をもつ山形を示す。そして、 $k$  の増大と共に山の対称性は増大し、 $k = 3$  の時正規分布に近い形を示す。また、 $k = 1$  では指数関数となる。このような点から  $k$  が形状パラメータと呼ばれるのである。また、このように示される分布の平均値  $\bar{V}$  および分散  $\sigma_v^2$  は次のようにガンマン関数を用いて示される。

$$\text{平均値 } \bar{V} = \int_0^{\infty} v f(v) dv = c \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{分散 } \sigma_v^2 &= \int_0^{\infty} v^2 f(v) dv - \bar{V}^2 \\ &= c^2 \left[ \Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \left\{ \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \right\}^2 \right] \quad (5) \end{aligned}$$



第2図 平均風速( $\bar{V}/c$ )と形状パラメータ  $k$  との関係(4)式参照)。

ここで、 $\bar{V}/c$  あるいは  $\sigma_v^2/c^2$  を考える、すなわち風速を  $c$  で測れば、分布は  $k$  のみで決定されることになるから、この  $c$  が尺度のパラメータと呼ばれるのである。普通の場合に生じる  $k$  の値に対する  $\bar{V}/c$  の値は第2図に示すとおりであり、非常に大ざっぱに言えば、 $c$  の値は平均風速の1割増ぐらいの値を取るものと見れば良い。また、累積確率分布関数は次のように示される。

$$F(v) = \int_0^v f(v) dv = 1 - \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (6)$$

この分布が工学的に用いられることの多いのは、ある確率変数がワイブル分布で近似できるときには、その変数のべき乗についてもワイブル分布で表現することができる。そのパラメータも容易に求めることができるところにある。すなわち、風速  $v$  が上のよう表現で示される分布をすれば  $z = v^n$  についても、

$$f(z) dz = \frac{k}{nc^n} \left(\frac{z}{cn}\right)^{k/n-1} \exp\left[-\left(\frac{z}{cn}\right)^{k/n}\right] dz \quad (7)$$

と書くことができる。(3)式と比較すれば、 $k' = k/n$ ,  $c' = cn$  と置き換えてみると  $z$  の分布が表現できることになる。したがって、風速の頻度分布を求めておけば風力 ( $v^2$  に比例) あるいは風エネルギー ( $v^3$  に比例) の分布が簡単に推算できることになる。

すなわち、(1)式で示した風のエネルギーについても、その平均値、

$$\bar{P} = c^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \tag{8}$$

また、その分散についても、

$$\sigma_p^2 = c^6 \left[ \Gamma\left(1 + \frac{6}{k}\right) - \left\{ \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \right\}^2 \right] \tag{9}$$

によって風速の分布のパラメータ  $k$  および  $c$  を用いて示すことができるし、パワーの累積頻度分布も風速の3乗の分布で計算してみるまでもなく次の式で求められる。

$$F(p) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{p}{c^3}\right)^{k/3}\right] \tag{10}$$

したがって、風の頻度分布をワイブル分布で近似し  $k$  や  $c$  を求めておくことは、風の力やエネルギーを考える上で非常に便利なわけである。

このようなワイブル分布の二つのパラメータ、 $k$  および  $c$  を決定するためにはいろいろな方法があるが、最尤法 (maximum likelihood method) を用いると最も精度を上げることができる。この方法は、複雑な計算を繰り返すことを必要とするが、Wong (1977) によって提案されている方法は次のようなものである。風速の分布が(3)式のようなワイブル分布で示される時、その尤度関数 (likelihood function)  $L$  は次のように書ける。

$$L = \prod_{i=1}^N f(v_i) \tag{11}$$

ここで、 $N$  は風速階級の分割区間の数である。 $k$  と  $c$  の最尤推定値 (maximum likelihood estimate) は  $L$  を最大とするような値であるから、次の連立方程式により求めることができる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \ln L}{\partial c} &= 0 \\ \frac{\partial \ln L}{\partial k} &= 0 \end{aligned} \right\} \tag{12}$$

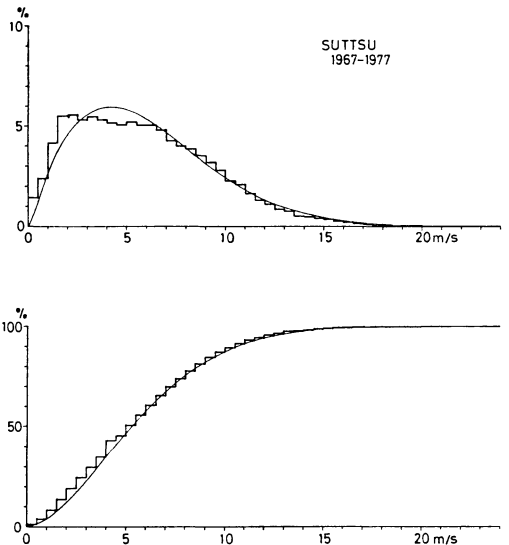
しかし、この方程式は解析的に解くことができないから、数値的に解を求めなくてはならない。それには、適当な初期値を与えて Newton-Raphson 法によって解を求めることができる。この他にも簡単な方法としては累積確率から最小自乗法で求める方法 (Justus *et al.*, 1977) あるいは Talke・Brown, 1978) や図式的に求める方法などがある。

#### 4. 日本における風速の頻度分布とそのワイブル分布での近似

日本国内の風の一般的な特性を知るための作業の一つとして、全国の157の気象官署における測風塔での風速の記録から、その度数分布を作成し、上述の最尤推定法によってワイブル分布に適合させることを試みた。利用した資料は1967年から1977年までの11年間の1日8回の気象観測結果であり、気象庁統計課の磁気記録に入っているものを利用して頂いた。また、計算は大型電子計算機を用いた。

風速の発現頻度分布を風速0.5 m/sec 毎の階級に分類して、各年・各月毎に作り、その各々について上述のパラメータを計算した。そのうちで、全統計期間を通じての値を全ての点について他の統計量と共に示したものが第1表である。この表にはワイブル分布を適合させた後に求められた  $c$  および  $k$  の値から(4)および(5)式を用いて風速の平均値と標準偏差を計算したものを示し、観測結果から直接計算したそれらの量と対比して、適合されたワイブル分布がどの程度実際の値を示しているかを調べることができるようにしてある。これから見る限り、ワイブル分布の適合は比較的うまくいっているように思われる。全体として、 $c$  は1.3 から10.4までの間に、 $k$  は1.0から2.1の間に分布している。

なお、参考のために、比較的風の強い北海道の寿都と



第3図 寿都における風速の頻度分布と累積度数分布の経験値と適合ワイブル分布。

第1表 全国の1967年から1977年までの期間の風速の頻度分布および風の平均パワー推定値.

地点名	露場の海面の高さ	風速計の地上高	観測値		ワイブル分布						備考
			平均値	標準偏差	風速分布パラメータ		風速		風のパワー		
					<i>c</i>	<i>k</i>	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	
			m	m	m/sec	m/sec	m/sec		m/sec	m/sec	
稚内	2.8	23.4	5.11	3.05	5.61	1.67	5.01	3.07	180	349	
北見枝幸	6.1	10.3	3.15	2.23	3.37	1.41	3.07	2.20	53	129	
羽幌	7.9	12.3	3.62	2.35	3.94	1.56	3.54	2.31	70	148	
雄武	13.8	11.2	3.50	2.59	3.75	1.39	3.42	2.50	75	187	
留萌	22.3	12.8	4.82	2.89	5.29	1.69	4.72	2.88	148	283	
旭川	111.9	14.6	1.96	1.64	2.02	1.18	1.91	1.62	18	56	
網走	37.6	13.7	3.19	2.28	3.42	1.42	3.11	2.22	54	131	
小樽	24.3	13.2	2.62	1.79	2.81	1.46	2.54	1.78	28	66	
札幌	16.9	17.3	2.60	1.94	2.73	1.31	2.52	1.95	33	90	
岩見沢	33.2	12.2	3.04	2.04	3.26	1.47	2.95	2.04	44	101	
帯広	39.0	13.2	1.91	1.86	1.91	1.08	1.86	1.73	19	73	
釧路	31.8	12.6	3.38	2.20	3.66	1.55	3.29	2.16	56	121	
根室	25.9	11.8	4.23	2.51	4.64	1.71	4.14	2.50	98	185	
寿都	15.7	9.9	5.96	3.52	6.58	1.71	5.87	3.54	281	527	
室蘭	42.6	10.7	4.68	2.82	5.13	1.68	4.59	2.81	136	261	
苫小牧	5.9	12.1	3.65	2.46	3.96	1.53	3.57	2.38	73	160	
浦河	33.5	13.8	4.36	3.32	4.68	1.37	4.28	3.16	150	382	
江差	29.8	12.8	5.66	4.44	5.93	1.21	5.56	4.61	413	1280	
森	18.7	10.3	2.55	1.80	2.72	1.41	2.48	1.78	27	68	7年間
函館	33.3	14.4	3.07	2.21	3.28	1.38	2.99	2.20	51	128	
倶知安	174.4	10.1	2.17	1.79	2.23	1.18	2.11	1.79	23	75	
紋別	15.7	13.3	3.30	2.26	3.55	1.47	3.21	2.23	57	131	
広尾	32.4	12.6	2.79	2.05	2.98	1.41	2.72	1.95	37	89	
大船渡	36.7	11.3	2.31	1.76	2.41	1.27	2.24	1.77	24	70	
新庄	94.4	10.8	2.20	2.23	2.14	0.99	2.15	2.17	37	165	
若松	212.0	12.6	1.89	1.87	1.85	1.01	1.84	1.82	22	94	
深浦	67.7	13.3	3.89	2.61	4.19	1.46	3.80	2.65	94	219	
青森	3.6	17.0	2.89	2.17	3.16	1.34	2.90	2.19	49	128	
むつ	2.9	13.9	3.55	2.49	3.81	1.42	3.46	2.47	75	182	
八戸	27.4	12.6	3.56	2.26	3.88	1.61	3.48	2.22	63	128	
秋田	9.2	12.8	4.12	2.78	4.47	1.50	4.03	2.74	109	244	
盛岡	154.5	15.9	2.91	2.10	3.08	1.36	2.82	2.10	43	111	
宮古	42.7	12.8	2.16	1.42	2.31	1.52	2.08	1.39	15	32	
酒田	3.1	14.6	4.26	3.01	4.60	1.44	4.18	2.95	129	305	
山形	150.6	15.0	1.57	1.47	1.59	1.10	1.54	1.40	10	38	
仙台	38.4	15.8	2.37	1.65	2.53	1.46	2.29	1.60	21	48	
石巻	43.3	13.0	3.25	1.93	3.55	1.71	3.17	1.91	44	82	
福島	67.3	19.0	2.67	2.28	2.73	1.15	2.60	2.27	46	157	
白河	353.7	15.7	2.65	2.21	2.73	1.19	2.58	2.18	40	129	
小名浜	3.3	13.7	2.80	1.86	3.02	1.53	2.72	1.82	32	71	

第1表 つづき

地点名	露場の海面場の高さ m	風速計の地上高 m	観測値		ワイブル分布						備考
			平均値 m/sec	標準偏差 m/sec	風速分布パラメータ		風速		風のパワー		
					c	k	平均値 m/sec	標準偏差 m/sec	平均値 W/m <sup>2</sup>	標準偏差 W/m <sup>2</sup>	
			m	m	m/sec	m/sec	m/sec		m/sec	m/sec	
輪島	5.3	12.9	2.88	1.76	3.12	1.63	2.79	1.75	32	64	10年間
相川	34.4	13.7	4.47	3.54	4.74	1.28	4.39	3.46	182	516	
新瀉	2.0	15.8	3.73	2.61	4.03	1.45	3.65	2.56	86	201	
金沢	26.1	1.33	2.29	1.68	2.42	1.37	2.21	1.64	21	53	
伏木	12.1	14.3	2.58	1.64	2.79	1.60	2.50	1.60	24	48	
富山	8.6	13.8	2.48	1.83	2.64	1.38	2.41	1.76	27	67	
長野	418.2	18.3	2.43	2.12	2.45	1.10	2.37	2.15	37	134	
高田	13.4	15.3	2.24	1.87	2.32	1.21	2.18	1.81	25	77	
宇都宮	119.8	15.1	2.09	1.54	2.21	1.38	2.02	1.48	15	39	
福井	9.1	14.3	2.58	1.76	2.77	1.49	2.50	1.71	26	59	
高山	560.2	10.8	1.38	1.41	1.36	1.04	1.34	1.29	7	30	
松本	610.0	16.0	2.36	2.26	2.34	1.03	2.31	2.25	39	162	
諏訪	760.0	12.5	2.91	2.40	3.02	1.21	2.84	2.36	50	155	
軽井沢	999.1	11.8	2.17	1.32	2.34	1.65	2.09	1.30	12	23	
前橋	112.2	16.6	3.06	1.98	3.31	1.55	2.97	1.96	41	88	
熊谷	30.6	16.6	3.23	2.29	3.47	1.41	3.16	2.26	57	140	
筑波	868.6	15.8	5.72	3.57	6.28	1.61	3.63	3.57	241	491	
水戸	29.2	14.0	2.50	1.70	2.68	1.50	2.42	1.65	24	52	
敦賀	1.3	14.1	3.34	2.14	3.62	1.54	3.25	2.15	55	119	
岐阜	12.8	14.3	2.26	1.81	2.36	1.26	2.19	1.76	23	68	
名古屋	51.1	17.5	3.09	2.09	3.33	1.49	3.01	2.06	46	103	
飯田	481.8	12.3	1.65	1.62	1.64	1.06	1.61	1.52	12	49	
甲府	271.9	17.5	1.80	1.98	1.75	1.01	1.75	1.74	18	78	
河口湖	852.6	12.0	2.20	1.79	2.29	1.24	2.13	1.74	20	60	
秩父	218.0	11.8	1.29	1.39	1.29	1.02	1.28	1.26	7	30	
銚子	26.6	11.8	4.69	2.61	5.18	1.84	4.60	2.59	124	212	
上野	159.3	10.4	1.76	1.61	1.77	1.09	1.72	1.58	14	55	
津	1.9	15.3	3.02	2.12	3.24	1.43	2.94	2.09	46	109	
伊良湖	6.2	13.1	4.78	3.14	5.19	1.50	4.69	3.18	171	382	
浜松	31.7	13.4	3.48	2.07	3.80	1.69	3.39	2.06	55	105	
御前崎	44.7	16.1	5.46	3.20	6.04	1.75	5.38	3.17	209	382	
静岡	14.1	16.2	2.54	1.92	2.66	1.28	2.47	1.95	32	92	
三島	20.1	13.5	2.15	2.03	2.14	1.06	2.09	1.98	29	114	
東京	6.5	52.2	3.48	2.15	3.80	1.66	3.40	2.10	57	110	
尾鷲	14.4	16.2	1.83	1.61	1.87	1.16	1.77	1.53	15	49	
石廊崎	54.7	12.3	5.39	3.58	5.88	1.51	5.31	3.58	244	541	
網代	66.9	12.3	3.13	3.14	3.08	1.02	3.06	3.00	99	415	
横浜	39.2	20.1	3.85	2.22	4.22	1.76	3.76	2.20	71	128	
館山	5.8	14.6	2.86	2.18	3.00	1.29	2.78	2.17	45	127	
勝浦	11.9	12.3	3.99	2.38	4.37	1.69	3.90	2.38	84	160	

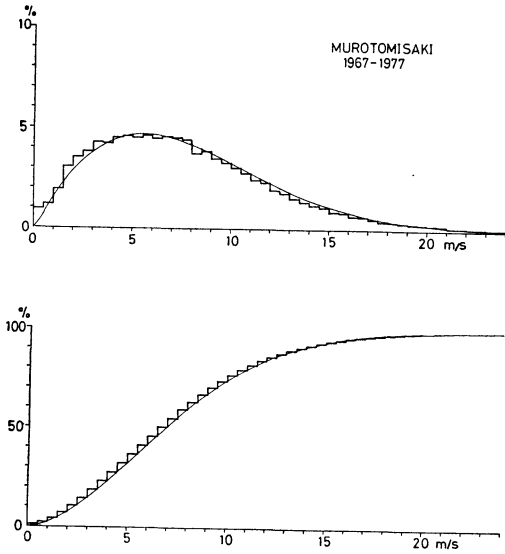
第1表つづき

地点名	露場の海面の高さ	風速計の地上高	観測値		ワイブル分布						備考
			平均値	標準偏差	風速分布パラメータ		風速		風のパワー		
					<i>c</i>	<i>k</i>	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	
			m	m	m/sec	m/sec	m/sec		m/sec	m/sec	
大島	190.2	26.6	6.86	3.73	7.59	1.85	6.74	3.78	379	645	
三宅島	36.2	12.6	6.18	3.65	6.89	1.74	6.09	3.62	314	576	
八丈島	79.7	13.6	6.04	3.48	6.68	1.75	5.95	3.51	282	514	
千葉	16.3	4.2	3.85	2.77	4.16	1.45	3.78	2.65	94	220	
四日市	47.2	11.1	3.20	2.20	3.44	1.47	3.11	2.15	52	119	
日光	1291.9	10.2	2.52	1.94	2.66	1.32	2.45	1.86	26	69	
西郷	26.6	14.7	3.43	2.31	3.69	1.47	3.34	2.31	63	146	
松江	17.1	15.7	2.60	2.30	2.64	1.10	2.54	2.31	48	176	
境	2.1	11.7	2.44	1.97	2.50	1.16	2.37	2.04	35	116	
米子	6.5	19.6	2.91	2.07	3.10	1.38	2.84	2.08	43	108	
鳥取	17.3	13.6	2.82	1.95	3.03	1.45	2.74	1.92	36	85	
豊岡	3.8	12.1	1.55	1.45	1.55	1.08	1.50	1.38	10	39	
舞鶴	29.8	12.8	2.31	2.06	2.33	1.11	2.25	2.03	32	116	
伊吹山	1375.5	11.0	9.48	5.39	10.41	1.89	9.24	5.09	829	1372	
萩	5.5	17.4	3.78	2.28	4.13	1.69	3.69	2.24	71	134	
浜田	19.8	15.1	3.92	2.68	4.27	1.51	3.85	2.59	94	208	
津山	145.4	11.7	2.21	1.83	2.29	1.23	2.14	1.76	50	151	
京都	40.9	15.3	1.82	1.43	1.89	1.25	1.76	1.41	12	36	
彦根	87.3	17.4	2.68	2.24	2.78	1.20	2.62	2.20	43	136	
下関	46.0	17.0	4.31	2.64	4.71	1.64	4.21	2.63	110	217	
広島	29.1	19.3	2.82	1.71	3.05	1.66	2.73	1.69	29	57	
呉	3.5	17.3	2.37	1.76	2.52	1.38	2.30	1.69	23	58	
福山	1.5	13.6	1.45	1.42	1.46	1.08	1.42	1.32	9	33	
岡山	3.3	12.6	1.78	1.58	1.82	1.13	1.74	1.54	15	51	
姫路	38.2	26.0	2.49	1.75	2.66	1.43	2.41	1.72	25	60	
神戸	58.1	26.8	3.56	2.34	3.86	1.53	3.48	2.32	67	146	
大阪	23.1	53.0	3.49	2.25	3.77	1.52	3.40	2.27	64	140	
洲本	109.3	15.0	3.84	2.58	4.17	1.53	3.76	2.50	85	184	
和歌山	13.9	15.9	3.19	1.88	3.49	1.74	3.11	1.85	41	75	
潮岬	73.2	14.5	4.45	2.51	4.91	1.83	4.36	2.47	106	182	
奈良	104.7	11.1	1.98	1.55	2.08	1.29	1.90	1.50	15	42	
山口	16.8	15.2	1.83	1.80	1.80	1.04	1.78	1.72	18	75	
萩原	58.2	10.5	3.09	2.28	3.26	1.30	3.01	2.33	57	157	
平戸	20.8	11.5	3.93	2.49	4.26	1.54	3.84	2.53	90	194	
福岡	2.1	19.0	3.02	2.29	3.16	1.25	2.94	2.37	57	169	
飯塚	35.9	10.9	2.30	1.90	2.36	1.18	2.23	1.90	28	90	
佐世保	16.7	12.7	2.47	1.83	2.59	1.31	2.39	1.85	28	77	
佐賀	4.2	14.9	2.25	1.68	2.36	1.34	2.17	1.64	20	53	
日田	82.9	10.4	1.43	1.40	1.42	1.04	1.39	1.33	9	36	
大分	4.4	18.3	2.70	1.76	2.92	1.55	2.62	1.73	29	61	

第1表 つづき

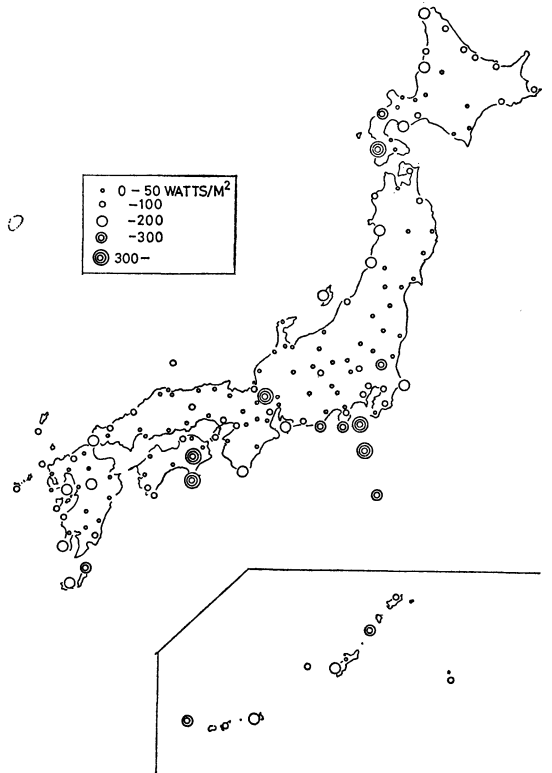
地点名	露場の海面の高さ	風速計の地上高	観測値		ワ イ ブ ル 分 布						備 考
			平均値	標準偏差	風速分布パラメータ		風 速		風のパワー		
					c	k	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	
			m	m	m/sec	m/sec	m/sec		m/sec	m/sec	
長崎	27.1	17.8	2.46	1.89	2.57	1.27	2.39	1.89	30	85	
雲仙岳	849.4	11.2	5.01	3.25	5.49	1.61	4.92	3.14	162	328	
熊本	37.7	14.8	2.09	1.59	2.20	1.34	2.02	1.53	16	43	
阿蘇山	1142.8	10.0	4.87	2.79	5.36	1.75	4.77	2.81	129	234	
延岡	19.3	12.9	1.99	1.77	2.04	1.18	1.93	1.64	18	59	
阿久根	40.3	10.9	3.71	1.92	4.08	1.96	3.61	1.92	56	89	
人吉	146.4	11.9	1.90	1.82	1.87	1.04	1.84	1.78	20	83	
鹿兒島	4.8	20.6	2.87	1.79	3.12	1.64	2.79	1.74	32	63	
都城	154.2	11.4	2.23	1.87	2.29	1.18	2.17	1.84	25	81	
宮崎	6.5	21.1	3.08	2.03	3.34	1.55	3.00	1.98	43	92	
枕崎	29.8	10.2	4.36	2.48	4.81	1.82	4.27	2.43	101	174	
油津	2.5	11.5	3.70	2.45	4.01	1.54	3.61	2.39	75	162	
屋久島	14.2	15.9	4.59	3.30	4.98	1.46	4.51	3.15	159	369	
種子島	17.0	10.5	5.38	3.49	5.88	1.55	5.29	3.48	234	500	
牛深	30.2	13.0	3.47	2.21	3.76	1.58	3.38	2.18	59	123	
福江	25.6	10.1	3.59	2.46	3.84	1.40	3.50	2.53	79	195	
松山	32.2	20.4	1.96	1.47	2.06	1.33	1.89	1.43	13	37	
多度津	3.5	12.7	2.98	2.38	3.16	1.31	2.92	2.25	51	140	
高松	8.7	15.9	2.51	1.97	2.63	1.27	2.44	1.94	32	91	
宇和島	42.6	12.6	2.39	2.31	2.40	1.10	2.32	2.12	37	132	
高知	0.5	14.5	1.87	1.34	1.98	1.44	1.80	1.27	10	24	
剣山	1944.3	7.9	7.48	4.78	8.22	1.64	7.36	4.60	461	914	
徳島	1.5	17.3	3.13	2.06	3.34	1.49	3.02	2.06	46	104	
宿毛	49.7	14.0	3.76	2.15	4.12	1.76	3.67	2.15	66	119	
足摺	29.8	14.6	3.71	2.14	4.07	1.78	3.62	2.11	63	112	
室戸岬	184.7	41.7	7.74	4.56	8.54	1.78	7.60	4.41	564	1011	
名瀬	2.8	20.2	3.25	2.12	3.52	1.55	3.17	2.09	50	108	
与那国島	30.0	12.7	6.18	3.24	6.84	1.96	6.06	3.23	265	420	
石垣島	6.0	14.0	4.62	2.32	5.10	2.06	4.51	2.30	105	157	
宮古島	39.2	11.2	5.51	2.91	6.09	1.97	5.40	2.87	186	293	
久米島	4.6	9.4	4.13	2.25	4.50	1.79	4.00	2.31	84	150	
那覇	34.8	14.9	4.95	2.70	5.47	1.89	4.86	2.67	141	234	
名護	7.1	10.6	2.66	1.95	2.80	1.35	2.57	1.92	33	87	
沖永良部	29.2	10.5	5.75	2.92	6.36	2.03	5.63	2.91	206	312	9年間
南大東島	14.6	12.7	3.74	2.19	4.06	1.67	3.63	2.23	68	132	
父島	3.7	15.4	3.22	2.17	3.46	1.48	3.13	2.16	52	119	9年間
南鳥島	8.7	12.6	5.65	2.87	6.25	2.03	5.54	2.86	196	297	8年間





第4図 室戸岬における風速の頻度分布と累積度数分布の経験値と適合ワイブル分布.

第2表 米国の主な都市の風速(高さ10 m)の頻度分布を示すワイブルパラメータ (Frost et al., 1978による).



第5図 全国の年平均の風のパワーの分布.

地点名	ワイブルパラメータ	
	$c$ (m/sec)	$k$
Los Angeles	4.41	2.00
Denver	3.80	1.54
Miami	3.78	1.70
Atlanta	3.82	1.69
Chicago	5.59	2.05
Indianapolis	4.39	1.82
Wichita	6.81	2.20
New Orleans	3.93	1.66
Baltimore	3.29	1.50
Boston	6.71	2.38
Detroit	4.00	1.81
St. Louis	3.45	1.68
New York City	6.05	2.06
Cincinnati	3.88	1.78
Oklahoma City	4.62	1.80
Portland	3.95	1.55
Pittsburg	4.90	1.89
Austin	4.81	2.04
Salt Lake City	3.67	1.31
Seattle	3.81	1.67

四国の室戸岬を例にとり、風速の頻度分布と累積度数分布を適合させたワイブル分布とを対比して示したものが第3図および第4図である。第3図は寿都で  $c=6.58$   $k=1.71$ 、また第4図は室戸岬で  $c=8.54$   $k=1.78$ である。この図から見て、そのピークの位置、大きさなどはワイブル分布によって比較的良く表現できているようであり、累積度数分布上で両者の差は最大でも寿都で1.8%、室戸岬で0.5%程度である。Kolmogorov-Smilov 検定によってもこれらの分布がワイブル分布で表現できるという仮説を利用して良いことが示される。

米国 NASA の Frost et al., (1978) は米国各地における同様な値を計算しているが、その代表的な値は第2表に示すとおりである。これによると、米国の都市の方が風の強い所が多いようであり、また  $k$  の値は日本の方が少し小さい。すなわち、日本の方が風速分布の歪みが大きいような傾向を持っているようである。

### 5. 風のパワーの全国的な分布

先にも述べたとおり、風速の度数分布をワイブル分布

で表現することができれば、風速の3乗についてもその統計量を簡単に求めることができる。ここでは、(2)、(8)、(9)式を用いて、空気密度と風速の変化には相関がなく、また空気密度の季節変化は小さいとして、海拔高度のみで決定されるものと考え、それを国際標準大気(ICAN 大気)を用いて代表することによって全国の気象官署の測風塔の位置での風の平均のパワーおよびその標準偏差を計算してみた。その結果は第1表の右側に示したとおりである。

このようにして求めた平均の風のパワーの全国的な分布を図に示したものが、第5図である。この図に示した結果は測風塔の高さの不統一に対する補正を全くしていないので、測風塔が40~50mもある室戸岬や東京、大阪などと他の地点とを同様に比較すべきではないが、およその分布は想像することができる。これらの表および図からも明らかなように、風速のパワーの大きいのは大島、三宅島、与那国島などの島、御前崎や石廊崎、室戸岬のような岬、あるいは伊吹山や剣山、筑波山のような山岳地であり、 $300 \text{ W/m}^2$ 以上の値を示している。これは、やはり周囲の地形が大きく影響していることを示しているものと言わねばならない。平地において大きなパワーが見られるのは、江差、寿都といった北海道南西部の日本海沿岸で $250 \text{ W/m}^2$ 以上の大きなパワーを観測することができる。その他、比較的大きいのは東北の日本海沿岸、関東以西の太平洋沿岸の突出部、南西諸島などで、 $100 \text{ W/m}^2$ 以上のパワーが見られる。また、高山や日田、山形のような盆地では非常にその値は小さい。同じ海岸でも、仙台、金沢、宮古、尾鷲、三島、福山、岡山、松山、高知などのような内海や湾奥に位置するところでは、いずれも $20\sim 30 \text{ W/m}^2$ 以下で非常に小さい。

このように、風速のパワーにすると場所による差が非常に大きく出て来る。すなわち、富山では平均 $7 \text{ W/m}^2$ で伊吹山の $829 \text{ W/m}^2$ とは百倍もの差がある。もっとも、平均 $100 \text{ W/m}^2$ の風のパワーがあるからといって $1 \text{ m}^2$ の受風面積を用いたら $100 \text{ W}$ の電球が平均的に点灯できるかと言えばそうではなく、気象学的に見た風のエネルギーがそのような値であるということであって、風車を用いて発電するというようなことをすると実際に利用できるエネルギーはずっと小さくなってしまふことは最初に述べたとおりである。しかし、これらによっておよその利用の見通しは得られるであろうし、また、これをうまく利用できるように変換装置を作らなくてはならないのである。

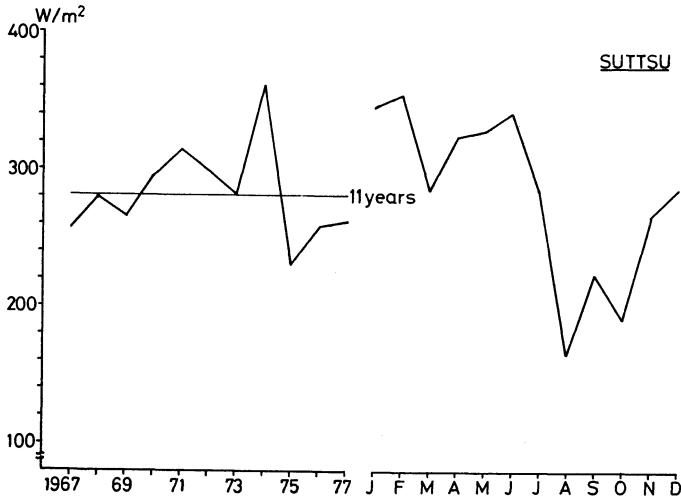
また、ここで示した風速の値は測風高度が不規則であるので、これを同じ高さでの値に換算してやるのが望ましい。しかし、現在のところこの高度補正の方法としては風速の平均分布を用いて拡大するという簡便法以上のものとしては、Justus *et al.* (1976)が風速のべき乗則に基づいた半経験則を出しているだけであり、まだ確立した手法というものは完成していない。この点、風力利用装置はふつう測風塔よりもさらに高い所に置かれるから、これを測風塔高度の風から推測する方法を早急に確立しなければならない。特に、地形の複雑な場所でのこの問題にはまだまだ研究の余地が多い。

このような気象学的に得られる風のエネルギーの値を求めた例としては、Rayment (1976)による英国における風のエネルギーの分布図がある。その計算方法はここに示したものと全く異なった手法によっているが、その結果によると、英国北西の大西洋岸では年平均 $300 \text{ W/m}^2$ 以上に達する部分が存在し、ドーバー海峡の沿岸でもその2/3ぐらいの量である。先の米国の例などから見ても、日本における風のエネルギーが比較的少ないものであることは理解できるであろう。

## 6. 風のパワーの季節変化

これまで述べてのは11年間を通じての平均の風のパワーであるが、先にも注意したとおり、この調査においては各年・各月毎のパワーについても計算を行なっている。風によるエネルギーが年毎にあるいは季節毎にどれぐらい安定しているものかどうかを示すための例として、前と同じ寿都および室戸岬を例に取って示したものが、第6図および第7図である。これらの図の左半分は1年毎の平均値の年毎の変化の様子を示すものであり、右半分は月毎の平均値の年変化を示すものである。寿都では1974年には約 $460 \text{ W/m}^2$ と11年間の平均 $281 \text{ W/m}^2$ の約1.6倍の値を示すが、その翌年は $230 \text{ W/m}^2$ と前年のほぼ半分になってしまう。また、室戸岬においても年毎の変化は大きく1967年の $680 \text{ W/m}^2$ から1974年の $480 \text{ W/m}^2$ まで平均値 $564 \text{ W/m}^2$ のまわりで大きく変動している。また、二つの地点での変化の傾向には共通性は少ない。

季節変化もまた大きい。寿都では、1月から7月にかけては $300 \text{ W/m}^2$ 前後あるいはそれ以上の値を示すが、8月から10月には風のパワーは小さく $200 \text{ W/m}^2$ を割ってしまい、その振幅は年平均の6割を越している。室戸岬でも、6月から9月の夏季に小さく10月から2月の寒



第6図 寿都における風の平均パワーの経年変化および季節変化.



第7図 室戸岬における風の平均パワーの経年変化および季節変化.

候期に大きい。最大は1月の685 W/m<sup>2</sup>であり最小は7月の440 W/m<sup>2</sup>とその変動幅は大きい。

このように、風のパワーに変動が多いことは利用する上でエネルギーの安定した供給源となり難いことを示しているものであり、他のエネルギー源（たとえば太陽熱）と併用しなければならないことを示している。このような立場からの研究がさらに必要である。

### 7. むすび

風力エネルギーの利用が最近問題にされつつあるが、

1979年10月

気象学の立場からは開発可能エネルギーの調査や立地適地の調査法の確立などといった面で研究すべき問題が多い。日本での風力エネルギーの開発に関する研究を見ていると、風車その他のエネルギーの変換装置などのハードウェアの研究が先行しているように思われる。先にも述べたとおり、日本の風の性質を良く調べた上で、その風環境の最適で効率が良く、かつ安全な装置を開発する努力をするべきである。

日本におけるエネルギーという立場から見て風がどのような性質を持っているかを調べるための作業の一環と

して、日本の各気象官署における11年間の風速の頻度分布を作り、ワイブル分布を適合させることを試みた。この分布によって、風力やエネルギーの分布を簡単に推定することができる。全般的に見て、日本の一般的な風の環境は、平均風速が他の風のエネルギーの開発に関して先行している国々に比して小さい割に、大きな風速の発現頻度が小さいながら存在し、分布の山の歪みが大きいということである。全国的に、平地では $100 \text{ W/m}^2$ 以上の平均エネルギーの得られるところは数少ない。しかし、一方では江差のように $400 \text{ W/m}^2$ 以上の平均パワーの所もあり、適当な立地条件の場所を探せば風力利用の適地は見出し得る可能性はある。気象官署のように、周囲地形の影響のできるだけ少ない場所選ばれた観測点ではなく、地形によって風が局地時に増強されるような場所での記録の解析をさらに進めて、実際的な風力エネルギーの利用の可能性を調べるため、努力を進めていくことが望まれる。それによって初めて日本の開発可能風力エネルギーの推定も可能となる。

#### 文 献

- Baker, R.W. and E.W. Hewson, 1978: Wind power potential in the Pacific North west, *J. Appl. Met.*, 17, 1814-1826.
- Betz, A., 1920: Das Maximum der theroretisch moglichen Ausnutzung der Windes durch Windmotoren, *Zeitschrift für das gesamte Turbinenwesen*, V. 17.
- Frost, W., B.H. Long and R.E. Turner, 1978: Engineering handbook on the atmospheric environmental guidelines for use in wind turbine generator development, NASA Tech. Paper, 1359.
- Golding, E.W., 1955: The generation of electricity by the wind power, *Philosophical Library*.
- Grace, D.J., 1975: A study of wind energy conversion for OAHU, Center for Engineering Research, Univ. of Hawaii.
- Hennessy, J.P. Jr., 1976: Some aspects of wind power statics, *J. Appl. Met.*, 16, 119-128.
- Högström, A.S. and U. Högström, 1978: A practical method for determining wind frequency distributions for the lowest 200 m from routine meteorological data, *J. Appl. Met.*, 17, 942-954.
- Justus, C.G., W.R. Hargraves and A. Yalcin, 1976: Nationwide assessment of potential output from wind powered generators, *J. Appl. Met.*, 15, 673-678.
- Justus, C.G., W.R. Hargraves, A. Mikhail and D. Graber, 1978: Methods for estimating wind speed frequency distributions, *J. Appl. Met.*, 17, 350-353.
- Luna, R.E. and H.W. Church, 1974: Estimation of long term concentrations using a 'universal' wind speed distribution, *J. Appl. Met.*, 13, 910-916.
- 光田 寧, 1971: 超音波風速温度計とその接地気層研究への応用, *天気*, 18, 377-385.
- Rayment, R., 1976: Wind energy in the UK, *Building Services Engineer*, 44, No. 3, 63-69.
- Stewart, D.A. and M. Essenwanger, 1978: Frequency distribution of wind speed near the surface, *J. Appl. Met.*, 17, 1633-1652.
- Talke, E.S. and J.M. Brown, 1978: Note on the use of Weibull statics to characterize wind-speed data, *J. Appl. Met.*, 17, 556-559.
- Von Arx, W.S., 1974: Energy: natural limits and abundances, *EOS, Trans, Amer. Geophy. Union*, 55, 828-832.
- Weibull, W., 1951: A statistical distribution function of wide applicability, *J. Appl. Mech.*, 18, 293-297.
- Widger, K.W. Jr., 1977: Estimations of wind speed frequency distributions using only the monthly avarage and fastest mile data, *J. Appl. Met.*, 16, 244-247.
- W.M.O., 1954: Energy from the wind, Tech. Note No. 4, WMO-No. 32, TP-10, W.M.O., Geneva.
- Wong, R.K.W., 1977: Weibull distribution, interactive likelihood techniques and hydrometeorological data, *J. Appl. Met.*, 16, 1360-1364.