

潮岬における風力エネルギーについて

石崎 潑雄・光田 寧・林 泰一

ON WIND ENERGY AT SHIONOMISAKI

By *Hatsuo* ISHIZAKI, *Yasushi* MITSUTA and *Taiichi* HAYASHI

Synopsis

Wind speed distributions at the Shionomisaki are parameterized by the Weibull distribution for the purpose of available wind power estimations. The Weibull distribution well fits to the wind distribution. The total wind power is also estimated. The available wind power at Shionomisaki is computed based on NASA 100 kw unit. The estimated annual mean output is about 35% of the rated power.

1. は じ め に

風力エネルギーは、人間にとって、きわめて身近なものであり、歴史的にもオランダの風車などにみられるように、灌漑や穀物をひくのに利用されてきた。今日、再び実用可能なエネルギー源として注目を集めつつある。現在、アメリカをはじめとして、カナダ、ソ連、ドイツ等の欧米諸国においては、風力利用とくに発電を計画し、その装置の開発と同時に、その設置場所の選定のための気象調査が実施されつつある^{(1)~(3)}。風力エネルギーの開発の可能性を探り、その有効な利用を計るためには、その目的とする場所の風の性質をあらかじめ知っておかねばならない。この場合に、風の統計的な性質を比較的簡単にかつ十分精度よく表現できるようなモデルを作成し、できるだけ少数のパラメーターによって書き表わすことができれば、設置場所の選定や、その場所に応じたエネルギー変換装置の開発の際に好都合である。ここでは、Weibull 分布⁽⁴⁾を利用して、風速の度数分布のモデルを作り、実際の風速に応用して、その適合性を調べた。Justus *et al*⁽⁵⁾の方法を用いて、潮岬を例にとって、風力エネルギーの総量及び利用可能量を評価してみた。

2. 風力エネルギー

理論的には、流れに直角な単位断面積当りの風のパワー（単位時間当りのエネルギー）は次式のように風速の3乗に比例する。

$$P = 1/2 \rho V^3 \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 ρ は空気密度、 V は風速を示す。 P の平均値は、空気の密度の時間変化が高々5%であるから、これを無視すれば、風速の3乗から計算できる。このように、風速の3乗についての統計量から、 P についての統計量も計算できるはずである。

ところで、実際には、風の総エネルギーが利用できるわけではない。Betz によれば、理想的な装置を利用して、実際に取り出しうる割合は、16/27であるという結果を得ている。現実には、その割合は、さらに悪くなり、30~40%と見積られている⁽⁶⁾。目的とする場所で、発現するすべての風速の範囲にわたって、風力発電が可能であるような装置を作成することが、理想であるが、それは、現実には、設備投資が過大になることなどから困難である。このため、一般には、Fig. 1 に示すように、風速に対して、風力発電装置の出力が、ある特性をもつように設計される。風速がある値に達すると、風車が回転しはじめ、発電を開始す

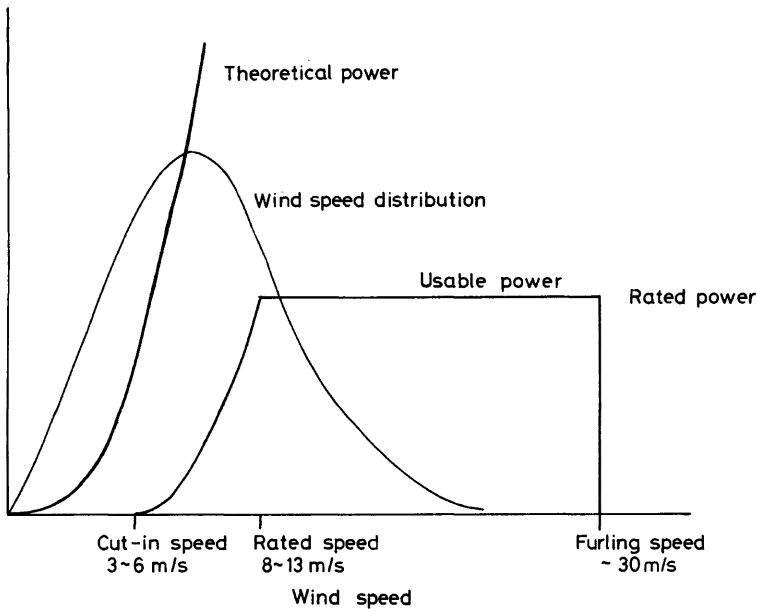


Fig. 1. The schematic power output curve.

る。この風速値を cut-in speed とよぶ。この風速を越えると、発電量は、風速とともに増大してゆき、定格出力 (rated power) に達する。このときの風速は rated speed である。この風速以上では、出力は風速にかかわらず一定 (定格出力) に保たれる。さらに風速が増大すると、装置に損傷が生じる恐れがあるので危険を防ぐために、制動装置によって強制的に風車の回転を止めてしまい、発電も中止する。このときの風速を furling speed という。これらの特性は、発電を実施する場所の風速の度数分布に関連して、最も能率がよいように決定されるべきものである。現在、諸外国で利用されている風力発電装置では、機種によって相違はあるが、cut-in speed が 3~6m/s, rated speed が、8~13m/s, furling speed が 25~30m/s 程度である。

3. 風速の度数分布

3.1 風速の度数分布のモデル化

風速の度数分布を定式化する場合に、現在のところ、平均風速によってパラメタライズできるような分布が利用されることが多い。たとえば、Plank 分布⁷⁾、Rayleigh 分布⁸⁾、対数正規分布⁹⁾ などである。しかし、ここでは、平均値を用いない、Weibull 分布を利用する。これは、確率変数をべき乗した場合の分布が、元の変数の分布から簡単に予測できるという点で、風のパワーの解析には有効な手段であると考えられる。Weibull 分布は、1951年に Weibull によって、最初に提案されて、破壊強度の解析に利用されたが⁴⁾、この分布は、一般化された Γ 分布の特殊な場合である。ここでは、パラメータが2つの Weibull 分布を使用する。その確率密度関数は、次のように表現できる。

$$P(V) = \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right] \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 V は風速、 k は形状パラメータ (shape parameter) c は尺度のパラメータ (scale parameter) とい

われる定数である。 $k > 1$ のときには、分布は一つの山をもつが、 $k = 1$ のときは指数分布になり、 $k < 1$ のときは山をもたず、単調減少関数をなす。そして $k = 3.5$ のときには、ほぼ正規分布に近い形を示す。一般には、確率分布のパラメータを決定するときに、最尤推定法 (Maximum likelihood estimation) が使われる。Weibull 分布についても、その具体的な方法が提案されているが⁽⁹⁾、それは複雑な繰返し計算を必要とする。このため、ここでは、次に述べるような累積度数分布を用いる簡単な方法でパラメータを決定した。Weibull 分布で、風速が V_x よりも小さいような累積確率は、(2) 式を積分して次のようになる。

$$P(V \leq V_x) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{V_x}{c} \right)^k \right] \dots \dots \dots (3)$$

(3) 式を書き変えると、

$$\ln[-\ln(1 - P(V \leq V_x))] = -k \ln c + k \ln V_x \dots \dots \dots (4)$$

となる。ここで $x = \ln V_x$, $y = \ln[-\ln(1 - P(V \leq V_x))]$ とおくと、 y は x の一次関数になる。実験的に得られた累積度数分布から回帰直線を求めることによって、 k と c は決定できる。

風速の平均値や標準偏差は、 k , c 及び Γ 関数を用いて表現できる。

$$\text{平均値} \quad \bar{V} = c \Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right) \dots \dots \dots (5)$$

$$\text{分散} \quad \sigma^2 = c^2 \left[\Gamma \left(1 + \frac{2}{k} \right) - \left\{ \Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right) \right\}^2 \right] \dots \dots \dots (6)$$

確率分布として Weibull 分布をとるような場合には、その確率変数のべき乗もまた Weibull 分布になる。すなわち、風速 V が (2) のような確率密度関数であれば、 $Z = V^n$ の確率密度関数は、

$$P(Z) = \frac{k}{n c^n} \left(\frac{Z}{c^n} \right)^{\frac{k}{n} - 1} \exp \left[- \left(\frac{Z}{c^n} \right)^{\frac{k}{n}} \right] \dots \dots \dots (7)$$

となる。つまり、 Z についての Weibull 分布の2つのパラメータを k' , c' とすると、それらは、風速 V についてのパラメータ k , c を使って、 $k' = \frac{k}{n}$, $c' = c^n$ と書ける。このことから、 k , c が風速分布について決定できれば、風速の3乗 $Y = V^3$ についても、その平均値や、標準偏差は、簡単に求められることになる。それらは、次のようにかける。

$$\text{平均値} \quad \bar{Y} = c^3 \Gamma \left(1 + \frac{3}{k} \right) \dots \dots \dots (8)$$

$$\text{分散} \quad \sigma^2_Y = c^6 \left[\Gamma \left(1 + \frac{6}{k} \right) - \left\{ \Gamma \left(1 + \frac{3}{k} \right) \right\}^2 \right] \dots \dots \dots (9)$$

風の性質は、高さとともに変化することが知られているが、2つのパラメータ k , c は高度によって変化する。実測値から直接計算すると、 c は高さのべき乗で変化し、 k は高度 69~70m に最大値をもつような分布をすることが報告されている⁽⁵⁾。

3.2 実際の風速への適用

潮岬測候所の1971年より1975年にわたる5年間の風速のデータを例にとって、試験的に解析してみた。利用した風速のデータは、1日24回の毎正時前10分間の平均風速である。各年ごと、及び5年間を通じての風速の度数分布を Fig. 2~7 に示す。各図で、上図が度数分布、下図が累積度数分布である。図中の曲線は、3.1 で述べた方法でパラメータ k , c を決定した Weibull 分布による度数分布及び累積度数分布である。累積度数分布では、Weibull 分布と風速の分布は、非常によく一致しており、両者の相違は高々5%にすぎない。度数分布では、山の位置とその高さに若干の差がみられる。これは、パラメータの決定に簡便法を用いたために生じたのかもしれない。1971年から1975年の各年ごと及び5年間を通じての k , c の値を Table 1 に示す。 k の値は、いずれの場合にも、1.9~2.0 程度であり、ほぼ一定の値である。 c の値は、4.7~5.3 程度である。このように、一年を単位として考える場合には、その風速の度数分布は、比較的安定であり、大きな変化はないようである。

風速の3乗についても、同様な度数分布を作り、その結果を Fig. 8 に示す。ここでは、1971年から1975

年の5年間を通じての場合の例だけをあげる。図に示されるように、この度数分布には、山は存在せず、風速の3乗に関して、単調減少である。これは、風速分布の k の値が2程度であり、その3乗の分布では k が2/3程度の値をとることになって1以下であることから、当然予想されることである。ここには、図を示していないが、一年ごとに解析した場合も、同様な傾向を示す。いつの場合にも、風速の3乗の値が100 (m/s)³

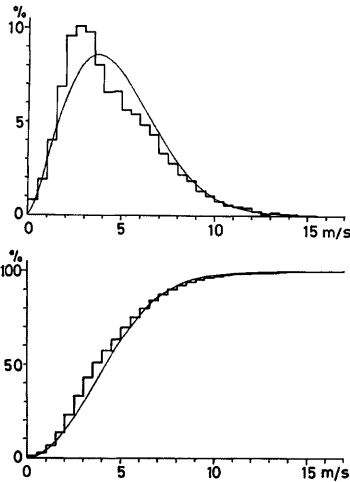


Fig. 2. The frequency distribution (up) and the cumulative frequency distribution (down) for the wind speed at Shionomisaki in 1971.

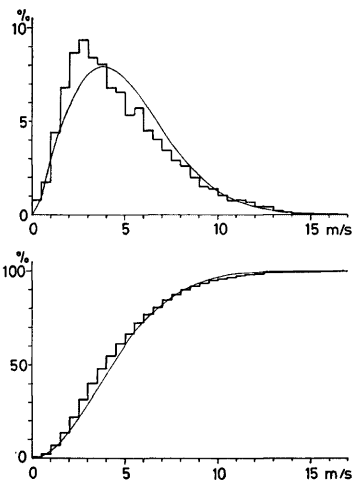


Fig. 3. Same as Fig. 2 except for 1972.

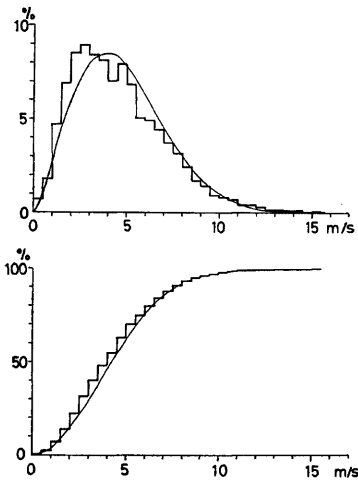


Fig. 4. Same as Fig. 2 except for 1973.

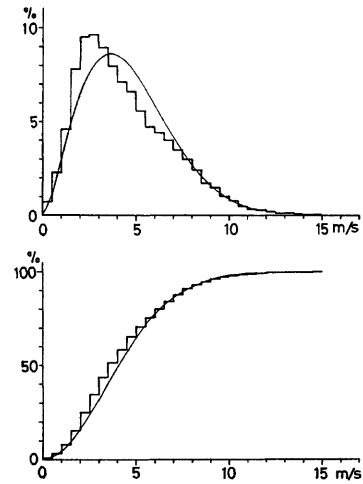


Fig. 5. Same as Fig. 2 except for 1974.

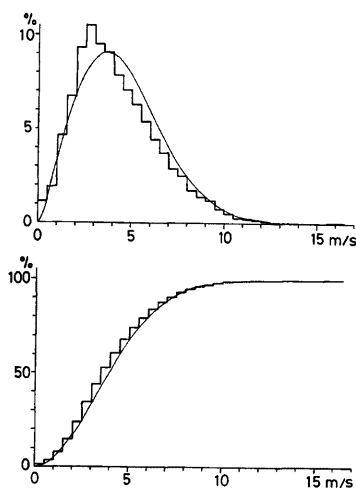


Fig. 6. Same as Fig. 2 except for 1975.

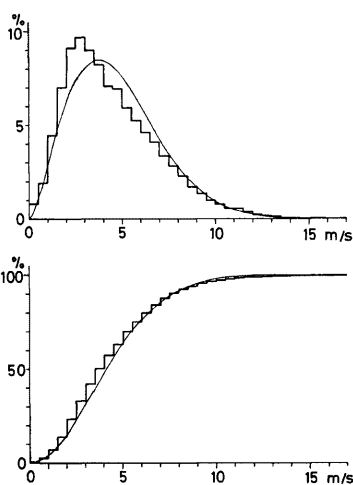


Fig. 7. Same as Fig. 2 except for 1971 to 1975.

Table 1. The shape parameter (k) and scale parameter (c) of Weibull distribution for wind speed.

Year	k	c
1971	1.984	4.996
1972	1.924	5.292
1973	2.019	5.079
1974	1.963	4.915
1975	2.014	4.763
1971~1975	1.978	5.012

以下（風速 4.64 m/s 以下）に 50% 以上が含まれる。図中の曲線は、Weibull 分布であるが、その場合の 2 つのパラメータは、先きに求めた風速の度数分布のパラメータ k, c を使って $k' = k/3, c' = c^3$ となるように決定したものである。両者の適合は十分満足しうるのであり、3 乗の分布をわざわざ計算しなくても風速の統計値から簡単に求められる。

風速の度数分布に Weibull 分布をあてはめておくと、その平均値や標準偏差も、前に示した関係から計算できる。それらを、実際の風速の度数分布から直接計算した結果とともに、Table 2 に示す。同様に風速の 3 乗についても平均値と標準偏差を求めてみた。その結果は、Table 3 に示すとおりである。風速の平均値と標準偏差については比較的良好に一致しているが、風速の 3 乗の平均値、標準偏差については、一致しているとは言えない。これは、Weibull 分布を風速の 3 乗に

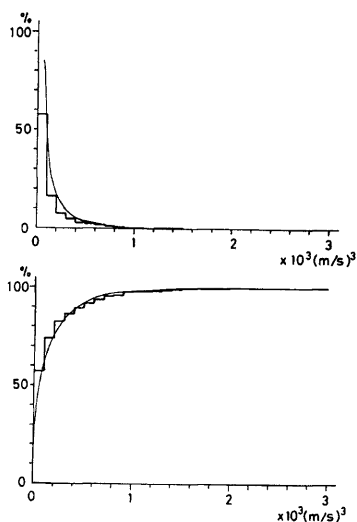


Fig. 8. Same as Fig. 2 except for the cube of wind speed from 1971 to 1975.

Table 2. The mean and RMS values of wind speed at Shionomisaki.

	Mean (m/s)						RMS (m/s)					
	1971	1972	1973	1974	1975	1971 ~ 1975	1971	1972	1973	1974	1975	1971 ~ 1975
Observed	4.53	4.89	4.61	4.52	4.28	4.55	2.49	2.82	2.44	2.46	2.29	2.50
Weibull	4.42	4.69	4.50	4.36	4.22	4.44	2.34	2.40	2.33	2.31	2.19	2.34

Table 3. Same as Table 2 except for cube of wind speed.

	Mean (m/s) ³						RMS (m/s) ³					
	1971	1972	1973	1974	1975	1971 ~ 1975	1971	1972	1973	1974	1975	1971 ~ 1975
Observed	202	265	212	198	166	207	335	694	302	315	275	415
Weibull	166	206	172	161	143	169	261	333	264	255	219	278

対してあてはめたわけではなく, (8), (9) 式を用いて, 間接的に求めたことにも, その原因があるのかもしれない。

4. 利用可能な風力エネルギーの試算

2. で述べたように風のもっているエネルギーを全部とり出すことは不可能であり, 利用可能なパワーは発電機の特性に大きく依存する。ここでは, NASA で開発されて, Ohio 州の Plumbrook で実験中の発電装置を例としてとりあげ, 潮岬における利用可能な風力エネルギーを算定してみた。NASA Plumbrook は Fig. 9 のように 2 枚羽根の風車をもつ発電装置であり, その直径は, 約 40m で, 高さ 40m のタワー上に設置される。定格出力は 100kw であり, 出力形式は 460V, 3 相, 60Hz である。風速に対する出力特性は, cut-in speed が 3.6m/s, rated speed が 8.0m/s, furling speed が 26.7m/s である。風速が cut-in speed と

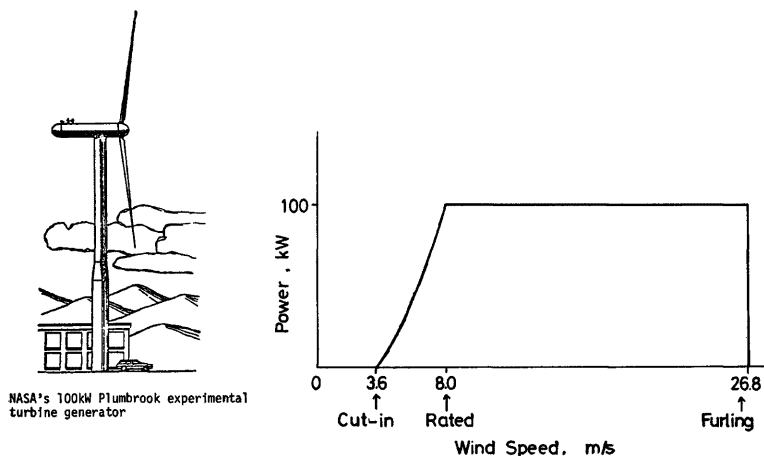


Fig. 9. The sketch of the NASA 100 kw unit (left) and its output curve (right).

rated speed の間にあるときの出力は、風速の二次関数で近似できる。

潮岬測候所の風速は、高さ 14m のところで測定されたものであるので、風速は高度の 1/7 乗に比例して増大するとして、高さ 40m での風速に換算した。風の性質が高さ 14m と 40m で、高度による変化以外には、大差ないとするならば、風速を単純に変換するだけで、前に求めた Weibull 分布を利用できる。こうして求めた風速分布を用いて、上に述べた発電装置を用いた時の平均発電量を計算してみた。また、比較のために、実測の風速に高度補正を施したものの度数分布から直接、平均発電量をも計算した。その結果を Table 4 に示す。この表には、年間の発電可能量を、定格で連続作動させたときの発電量との百分比で示し

Table 4. Available wind power at Shionomisaki.

	'71	'72	'73	'74	'75	'71~'75
Observed	34.1	37.2	35.6	33.5	30.8	34.2
Weibull	37.9	34.8	38.8	36.6	34.5	38.9

てある。発電可能量は、年間平均でほぼ 35% 前後、すなわち、100kw の発電機でも、平均的には、35kw 程度の電力しか得られないことになる。この発電可能量の推定値は Weibull 分布を用いた方が、直接実測値の分布より求めたものより多少、過大である。この程度の誤差が、実用上問題となるのであれば、風速分布にもっと適合するような、複雑なものにしなければならない。しかし、余り問題とならなければ、風速の統計量の推定が、容易である点で、この Weibull 分布の利点は大きい。

なお、年間の稼動状態を詳しくみれば、定格どおり発電しているような時、すなわち、風速が rated speed 以上 furling speed 以下である時間は、全期間の約 1/7 にすぎない。一方、全く発電が不可能な弱風時、すなわち、風速が、cut-in speed 以下の割合は 1/3 に達する。また、furling speed を越えるような場合は、1971年から1975年の5年間には、1972年9月に3時間あるのみであった。

5. む す び

風力利用の可能性を調査する際に用いる手段として、Weibull 分布を風速の度数分布に応用し、その適合性について調べてみた。この Weibull 分布は、パラメータが2つであり、風速の度数分布が Weibull 分布で表現できれば、そのべき乗も、Weibull 分布を示すことになる。そのパラメータは、風速の分布のパラメータから簡単に求めることができる。潮岬を例にして、実際の風速の度数分布、累積度数分布に適用してみると、その分布のようすを、かなり正確に表現することができた。

潮岬の風の資料を利用し、風力発電装置として、NASA 100kw Plumbrook unit を使うものとして、利用可能なエネルギーを推定してみると、年間の平均出力は、定格の約 35% であり、定格出力どおりに発電するのは、一年のうち 1/7 にすぎない。一方、全く発電できない場合は 1/3 に達する。この NASA 100kw Plumbrook の cut-in speed は 3.6m/s であるが、潮岬の風速の度数分布では、風速を高さ 40m に換算しても、その山は、この cut-in speed よりも低風速側にある。従って、この発電機では、全期間の 1/3 の間は、全く発電できない結果になってしまうのである。この場所で風力発電を考えるならば、やはり、この場所の風の実状に適した特性をもつように rated speed が風速分布の山に近いところにあり、cut-in speed 以下の発電確率をもっと低くなるような装置の開発が必要であろう。さらに日本において考えねばならぬことは、強風の可能性があることである、ここできちんとあげた装置の furling speed の 26.7m/s を越えるような場合は、今回の解析でも、3時間含まれている。さらに、50年を再現期間として考えれば、潮岬の最大風速は高度 40m で、40m/s に達する。これらのことから、この程度の高風速でも十分耐えられ、破壊しない強度が要求される。それとともに、もっと長時間にわたって強風が持続するような場所を選定しなければならないが、その選定のための方策を早急に確立し、全国的に適地を調査する努力をしなければならないであろう。

謝 辞

この論文を書くにあたり、風速の資料を提供していただいた潮岬測候所に感謝する。また、資料解析にあたり協力していただいた、京都大学防災研究所付属潮岬風力実験所の技官、尾崎寿秀、河内伸治の両氏に感謝する。

参 考 文 献

- 1) Hewson, E. W.: Generation of power from the wind. Bull. Amer. Meteor. Soc., Vol. 56, 1975, pp. 660-675.
- 2) Base, T. E., A. G. Davenport and C. J. Baynes: Meteorological aspects in the selection of sites and the prediction of performance and fluctuating air loads on airscrew windmills. Proc. 2nd U.S. National Conference on Wind Engineering Research., 1975, V-23-1~2.
- 3) Reed, J. W.: Wind power climatology. Weatherwise, Vol. 27, 1974, pp. 236-242.
- 4) Weibull, W.: A statistical distribution function of wide applicability. J. Appl. Mech., Vol. 18, 1951, pp. 293-297.
- 5) Justus, C. G., W. R. Hargraves and Ali Yalcin: Nationwide assessment of potential output from wind powered generators. J. Appl. Meteor., Vol. 15, 1976, pp. 673-678.
- 6) Golding, E. W.: The generation of electricity by wind power. Philosophical Library, 1955, p. 332.
- 7) Wentink, Jr. Tunis: Wind power potential of Alaska. Part I. Sci. Rep. NSF/RANN, Grant GI-43098, Geophysical Inst. Univ. Alaska. 1974.
- 8) Grace, D. J.: A study of wind energy conversion for OAHU. Center for Engineering Research, Univ. Hawaii.
- 9) Luna, R. E. and H. W. Church: Estimation of long term concentrations using a 'universal' wind speed distribution. J. Appl. Meteor., Vol. 13, 1974, pp. 910-916.
- 10) Wong, R. K. W.: Weibull distribution, iterative likelihood techniques and hydrometeorological data. J. Appl. Meteor., Vol. 16, 1977, pp. 1360-1364.