

琉球大学学術リポジトリ

琉球大学構内及び沖縄県各地で観測された風況の特性

メタデータ	言語: 出版者: 琉球大学工学部 公開日: 2009-08-25 キーワード (Ja): キーワード (En): Wind Energy Resource, Wind Turbine, Power Generation, Gust Factor, Typhoon 作成者: 永井, 實, 屋我, 実, 島袋, 清人 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/12107

琉球大学構内及び沖縄県各地で観測された 風況の特性

永井 實* 屋我 実* 島袋 清人**

Characteristics of Wind Data at the University of the Ryukyus
and Several Points of Okinawa Prefecture

Minoru NAGAI*, Minoru YAGA* and Kiyohito SHIMABUKURO**

ABSTRACT

In this paper, the wind data obtained at the University of the Ryukyus and other several points in Okinawa prefecture such as Ameku, Itokazu of Okinawa island, Miyako island, Izena island, Aguni island and Kume island are surveyed and analyzed. As the result it is shown that there are abundant resources of wind energy in each island of Okinawa prefecture, which cannot be recognized and assessed only by the reports of Okinawa Meteorological Observatories.

The authors also observe the data of special wind conditions at the University of the Ryukyus caused by a typhoon in detail. According to the obtained averaged gust factor of 1.42, it appears that even under such a strong wind conditions the wind turbulence is not so strong.

Key Words: Wind Energy Resource, Wind Turbine, Power Generation, Gust Factor, Typhoon

1. まえがき

東シナ海の外縁を形作る南西諸島は、ユーラシア大陸と太平洋の気圧勾配によって生じる季節風が吹く地域に位置するため、潜在的な風力のエネルギー賦存量は少なくないと考えられる¹⁾。この普遍的な風のエネルギーをディーゼル発電の単価が極めて高い離島などで有効に利用することは、新エネルギー開発と農業を始めとする産業振興の両面から重要な課題である。

本論文ではこのような観点から、琉球大学構内および沖縄県各地で得られた風況データを調査し解析した。これにより従来気象官署によって報告されているデー

タのみでは知ることのできない良風況地点が県内に多数存在することを明らかにし、本県における風力エネルギー賦存量の推定を行った。

2. 観測地点

本稿で用いた資料は、表1に示す7ヶ所の地点で得られたデータである。図1に観測地点を示す地図の概略を示す。計測点1は本工学ビル屋上の水タンク用ペントハウスの上に設置したもので、1982年より今日まで連続的に風向・風速を計測しているが、本論文では、1985年のものを解析した。計測点2, 3および4は沖

* 1989年10月31日受理

* 工学部エネルギー機械工学科

**工学研究科機械工学専攻

表1 観測地点および観測期間

番号	観測地点	北緯	東経	海拔 (m)	地上高 (m)	観測期間
1	琉球大学工学ビル 屋上 (西原町)	26°15'	127°46'	110	33	1985.1.1~ 1985.12.31
2	沖縄气象台 (那覇市天久)	26°14'	127°41'	34.9	20.6	1985.1.1~ 1985.12.31
3	糸数気象レーダー 観測所 (玉城村)	26°09'	127°46'	180	10.5	1985.1.1~ 1985.12.31
4	宮古地方气象台 (平良市)	24°47'	125°17'	40	13.6	1988.1.1~ 1988.12.31
5	伊是名島屋ノ下原	26°56'	127°54'	8	30	1988.1.1~ 1989.2.28
6	粟国島筆ん崎	26°34'	127°12'	約 80	15	1988.3.24~ 1989.3.31
7	久米島大原	26°21'	126°43'	約 10	30	1988.1.29~ 1989.3.31

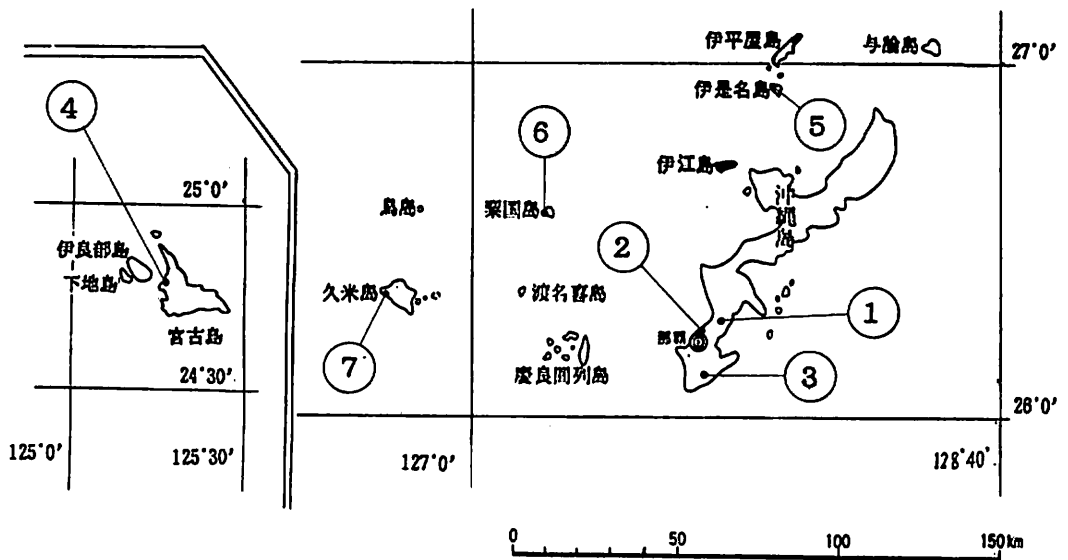


図1 観測地点の概略図

縄气象台より提供を受けたもので、2は那覇市の西海岸岸地帯で西側にゆるやかな下り勾配を有した地点、3は沖縄県南部の丘陵地帯で7計測地点の中では海拔が最も高い。4は宮古島平良市市街地の南西部に位置している。計測点5、6および7は1988年より沖縄電力㈱により、風力利用を目的として、伊是名島、粟国島および久米島の3離島において、観測が行われている地点である。また本文中で用いる春季、夏季、秋季、冬季の期間はそれぞれ3月～5月、6月～8月、9月～11月、12月～2月である。

3. 計測器の仕様

工学ビル屋上(計測点1)で用いたプロベラ式風向風速計と、伊是名島、粟国島、久米島で用いた超音波風向風速計の仕様を以下にそれぞれ示す。なお計測点2、3、4の気象官署のものはいずれもプロベラ式風向風速計で、計測点1のものとはほぼ同様である。

i) プロベラ式風向風速計

風速発信部	交流発電式
風向発信部	交流シンクロ式
測定範囲	2 m/s～70 m/s (1 m/s～35 m/s, 切換え式)
測定精度	風速 10 m/s以下±0.5 m/s以内 10 m/s以上±5%以内 風向 ±5%

ii) 超音波風向風速計

測定方式	超音波方式
測定範囲	0～60 m/s, 0～360°
測定精度	風速 ±4% 風向 ±5%

4. 観測結果

4.1 工学ビル屋上, 天久, 糸数における観測結果

図2および図3にそれぞれ工学ビル屋上(計測点1)、天久(同2)、および糸数(同3)で、1985年1月～12月にかけて観測した時間別(3時間毎)、および月別平均風速を示す。図2よりいずれの時間においても糸数、工学ビル屋上、天久の順に平均風速が高い。またいずれも午前6時頃から風速が増加し始め、正午にピークに達した後、翌日午前零時にかけて減少するこ

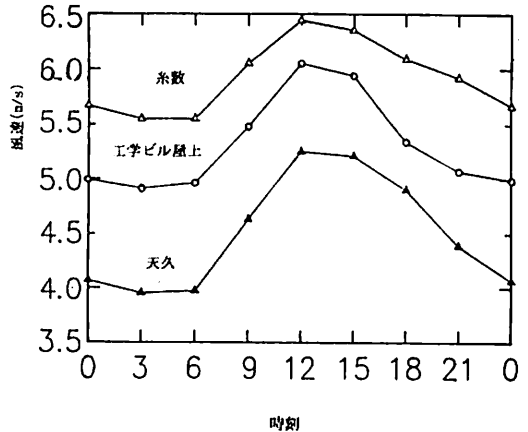


図2 工学ビル屋上, 糸数及び天久における時別平均風速 (1985年)

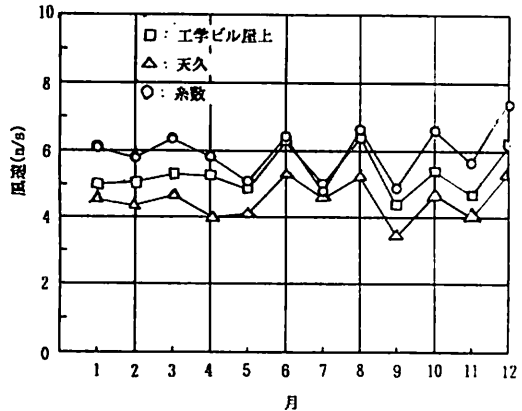


図3 工学ビル屋上, 糸数及び天久における月別平均風速 (1985年)

とが認められる。この傾向は後述のように他の島々にも見られるが、太陽熱加熱により陸地表面に発生する気流が影響するためと考えられる。

図3によると、7月の平均風速が工学ビル屋上と糸数で逆転するのを例外として、図2の場合と同様糸数、工学ビル屋上、天久の順に高い風速を示している。これは計測点海拔が糸数、工学ビル屋上に共に海岸から測定地点までの障害物が少なく、陸地形状により加速されるためと考えられる。またいずれの観測地点においても、6月、8月、10月および12月の偶数月が特に平均風速が高くなっていて興味深い。この傾向は工学ビル屋上で1984年および1986年の観測結果にも認められるが、その原因は今のところ明らかではない。

図4～図6に、計測点1～3における風速階級別出現頻度の分布を棒グラフで示す。

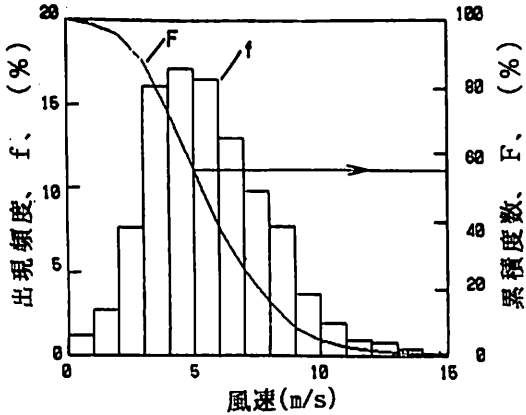


図4 風速階級別出現頻度分布（工学ビル屋上）

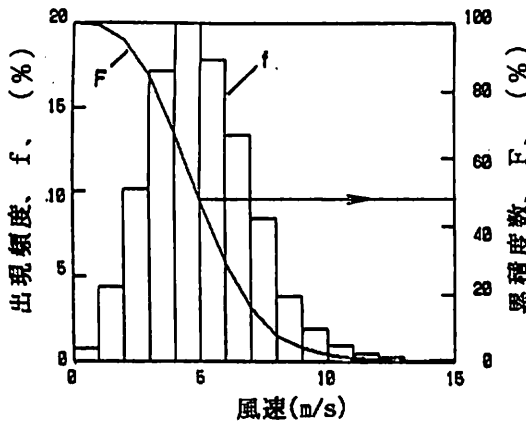


図5 風速階級別出現頻度分布（天久）

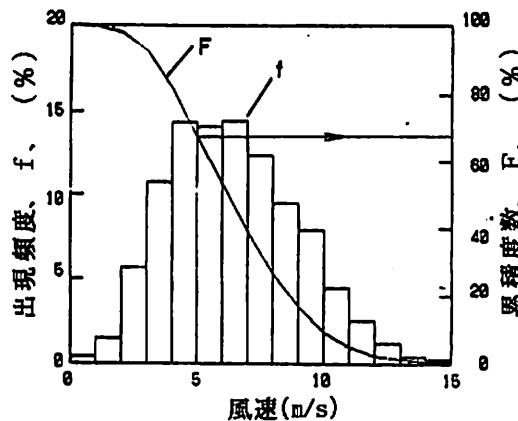


図6 風速階級別出現頻度分布（糸数）

なお図中の曲線はそれぞれその累積度数である。図4より、本学の観測点においては3 m/s級から5 m/s級の頻度が卓越しており、それぞれほぼ15%強の値を示し、高風速側へなだらかに減少する分布を示すことがわかった。一方、図5に示す天久においては4 m/s級の風速が著しく卓越し20%にまで達するため、相対的に高風速域に出現頻度が減少していることが認められる。

図6の糸数においては、図5のそれよりも1階級高い4 m/s級～6 m/s級の範囲の頻度が最も高く、しかもその頻度はそれぞれ15%弱にとどめられるため相対的に高風速側の出現頻度が大きくなるのがわかる。そのため糸数の平均風速は3観測地点中最も高くなった。このことは累積度数によればより明らかである。すなわち、工学ビル屋上、天久、および糸数における5 m/s以上の風の累積度数はそれぞれ57%、47%および68%となり、各々約10%の差で糸数、工学ビル屋上、そして天久の順に並べられる。

以上3地点の平均風速は高い順にそれぞれ6.0m/s、5.3m/sおよび4.5m/sとなるが、風力エネルギーは概略平均風速の3乗に比例するので、これらの3地点のエネルギー賦存量を比較すればおおよそ2.4:1.6:1になるといえる。

これより沖縄本島における風力利用の適地は、南部の高台および中北部の丘陵地帯、あるいは本島より東西方向へ突出した岬地帯にあるといえよう。従来のように気象台所在地（たとえば那覇市天久）の風況データのみによっては、正確なエネルギー賦存量を見積ることができないことは明らかである。

4. 2宮古における観測結果

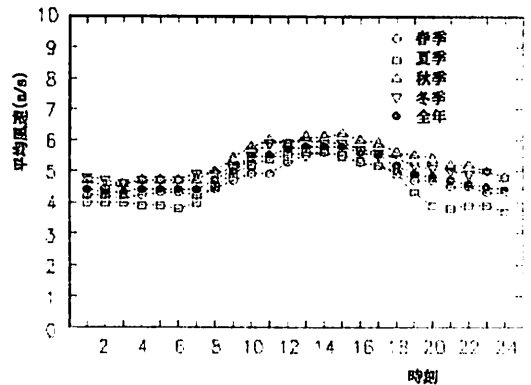


図7 時別平均風速（宮古島地方気象台、1988年）

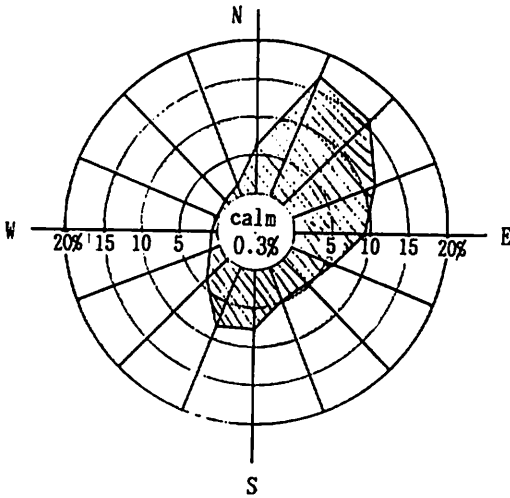


図8 風配図 (宮古島地方気象台1986~88年)

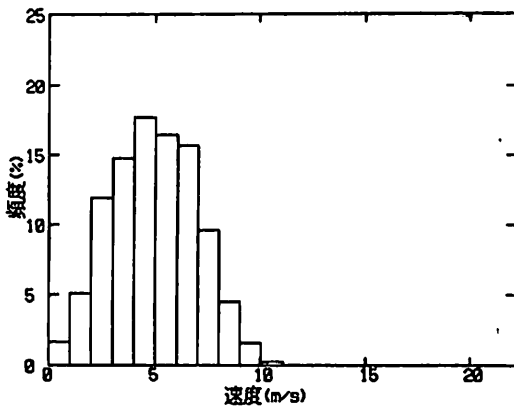


図9 速度階級別出現頻度分布 (宮古島地方気象台, 1988年)

図7~図9に宮古地方気象台より提供された1988年の風況データを分析することによって得られた季節別および全年の特別平均風速, 風配図および風速階級別出現頻度分布を示す。図7より比較的平均風速が高いのは秋季(9月~11月)であるが, 全年の平均風速はそれほど高くなく年間平均風速は4.7m/sであった。前述の沖縄本島における傾向と同様正午より昼過ぎにかけて平均風速のピークが認められる。図8の風配図によれば北東と南西の風が卓越しているが, これはそれぞれ冬季と夏季の季節風の卓越風向によるものである。さらに年間平均風速がかなり低いことから明らかかなように同地点における風況は必ずしも良好でなく, 図9の風速階級別出現頻度分布においても, 11m/s

以上の風がほとんど吹いていないことがわかった。ただし, 同じ宮古島においても, 島の南東側に位置する東平安名岬の風況はかなりよいことが知られ, 年間平均風速7.1m/sの記録が報告されている⁽²³⁾。前述のように宮古島においても, 良風況地点についてさらに精緻な探索が必要であろう。

4. 3伊是名島における観測結果

(○—春季 □……夏季 △—秋季 X---冬季 ●—全年)

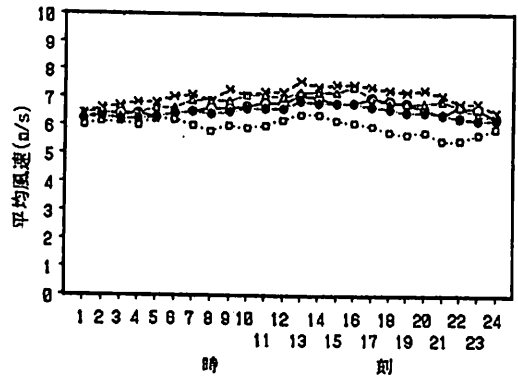


図10 特別平均風速 (伊是名島, 季節別及び全年1988年)

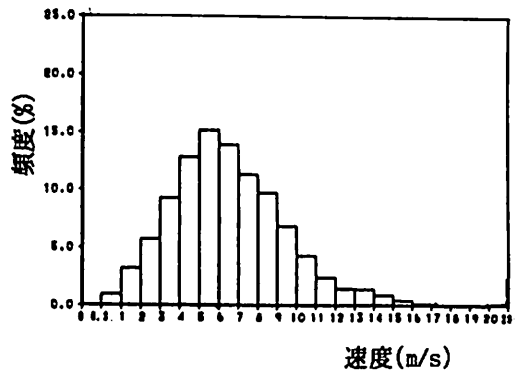


図11 風速階級別出現頻度分布 (伊是名島, 1988年)

図10と図11に伊是名島屋ノ下原の地上高30mの観測地点5で得られた季節別および全年の特別平均風速と風速階級別頻度分布をそれぞれ示す。図10より各季節とも日昼に若干風速が大きくなる傾向があり, 夏季の特別平均風速の大きさが各時刻ともに他の季節と比較して小さく, 冬季のそれが各時刻とも最大となっている。夏季の平均風速が特に低くなるのは伊是名島における観測地点が北側を海に面しているため夏季の南風

が陸地により減衰されたものと思われる。

次に図11より風速階級別出現頻度分布の形状は5 m/s級に約15%のピークを有し、高風速側へやや長い裾野を広げる分布となることがわかった。本地点における年間の平均風速は6.52m/sであった。

4. 4 粟国島における観測結果

(○—春季 □……夏季 △—秋季 ×---冬季 ●—全年)

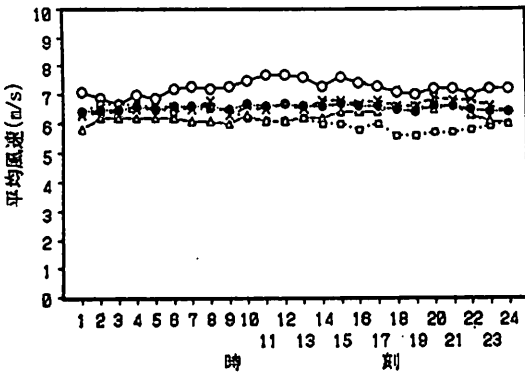


図12時別平均風速 (粟国島, 季節別及び全年, 1988年)

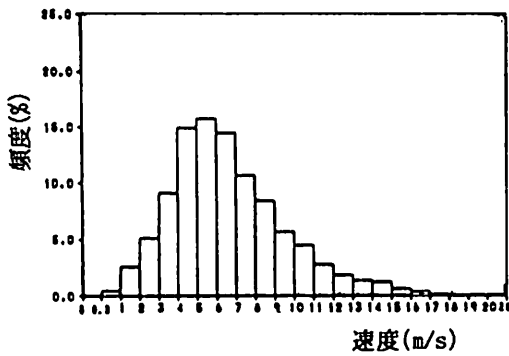


図13風速階級別出現頻度分布 (粟国島, 1988年)

図12と図13に粟国島筆ん崎の地上高15mにおける観測点6で得られた季節別および全年の時別平均風速と風速階級別出現頻度分布をそれぞれ示す。時別平均風速については、各季節ともに時間変化による風速変動の顕著な特性は認められないが、春季の計測値が他の季節と比較して極めて大きいことがわかる。春季のみの平均風速は7.2m/sに達した。これは観測点の地形の影響を受けたためと思われる。すなわち、筆ん崎が南東より北西方向へせり上がる斜面を有するため、春

季の南東卓越風を斜面により加速したためであろう。次に風速階級別出現頻度分布形状は伊是名島のそれと同様に5 m/s級をピークとして強風側に裾野を伸ばした形状となっている。年間の平均風速は6.61m/sとかなり高い値を示した。

4. 5 久米島における観測結果

(○—春季 □……夏季 △—秋季 ×---冬季 ●—全年)

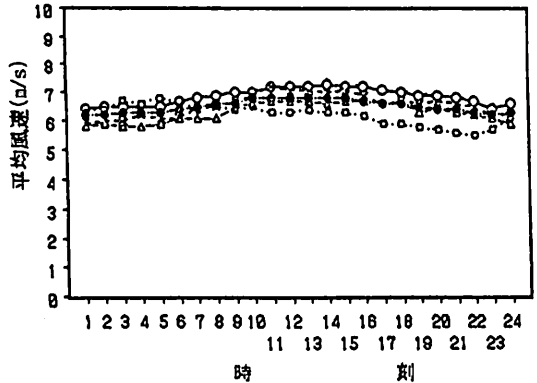


図14時別平均風速 (久米島, 季節別及び全年, 1988年)

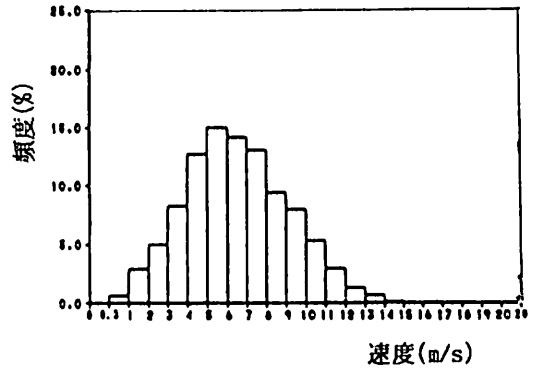


図15風速階級別出現頻度分布 (久米島, 1988年)

図14と図15に久米島大原の地上30mの計測点7において得られた季節別および全年の時別平均風速と風速階級別出現頻度分布を示す。図14より時別平均風速の大きさは伊是名島と同様に、各季節ともに日昼に若干大きくなる傾向が認められる。次に風速階級別出現頻度分布の形状は、他の2つの島と比較してあまり違いはなく、5 m/s級の風速がピークとなる形状をしており、年間の平均風速は6.57m/sであった。

上述した3つの離島の平均風速は、粟国島、久米島、

伊是名島の順に高く、いずれの島に対しても米国の California Energy Commissionによる風況評価システム⁴⁾ (地上10m の年間平均風速11~14mph(4.9~6.3m/s) のときgood, それ以上でexcellent) によれば、良 (good) あるいは優 (excellent) の評価が与えられる風況といえよう。

4. 6日昼の上昇気流による海洋風の加速について
前節までに述べた各観測点の特別平均風速においては、いずれも正午より昼過ぎにかけて風速の最大値が観測された。同様の現象は米国ハワイ州においても報告されている⁵⁾。ハワイ州の風は年間を通じて風向の安定した(東北東よりの)貿易風であるのに対し、南西諸島のそれは、前述のように夏は南~南西より、冬は北~北東よりの季節風である。ただし両者とも島嶼地帯であり、いずれも海岸風に支配された島嶼型風況ともいべき特性をもつと考えられる。そこで、日昼の平均風速の上昇を太陽熱による陸地表面加熱の効果と考えその比較を試みた。

表2に各計測点における平均風速、1年間の特別平均風速の最大値、最少値およびその差を振幅として示す。なお比較のためにハワイ州モロカイ空港における計測値を掲載した。表より、ハワイの日変化振幅は2.8m/sと極めた高いが、本県の計測値は宮古島の1.5m/sを最大として、沖縄本島の天久、工学ビル屋上、糸数、ついで伊是名、久米島の順に少なくなり、粟国島の振幅が0.3m/sと最も少なくなることがわかった。宮古および沖縄本島における日変化振幅は大きく、小離島になるほど振幅が少なくなるのは、日変化の原因を陸地表面の上昇気流によるものと考えれば、説明可能のように思われる。すなわち、計測点所在地や島の地形の影響も考えられるが、基本的には島の面積の大小によって上昇気流の量が規定され、それによる海岸風加速の程度が支配されるのではないだろうか。季節別、風向別および地形の影響の考慮、あるいはハワイ州風況とのより詳細な比較検討は今後の課題である。

5. 台風接近時の風況の特徴について

1985年8月21日より23日にかけて、台風11号(T8511, 中心気圧960mb,最大風速40m/s)が沖縄の南方海上約200kmを西進し、宮古島南方の多良間島を直撃し、そのまま大陸へ上陸した。その際、本学工学ビル屋上において記録された刻々の風速の変化を図16に示す。

番号	観測地点	最低風速 (m/s)	最高風速 (m/s)	振幅 (m/s)
1	琉球大学工学ビル屋上	4.91	6.05	1.14
2	天久	3.95	5.25	1.30
3	糸数	5.55	6.44	0.89
4	宮古島	4.3	5.8	1.5
5	伊是名島	6.2	6.9	0.7
6	粟国島	6.4	6.7	0.3
7	久米島	6.2	6.8	0.6
8	ハワイモロカイ空港	4.5	7.3	2.8

表2 年平均日変化振幅の比較

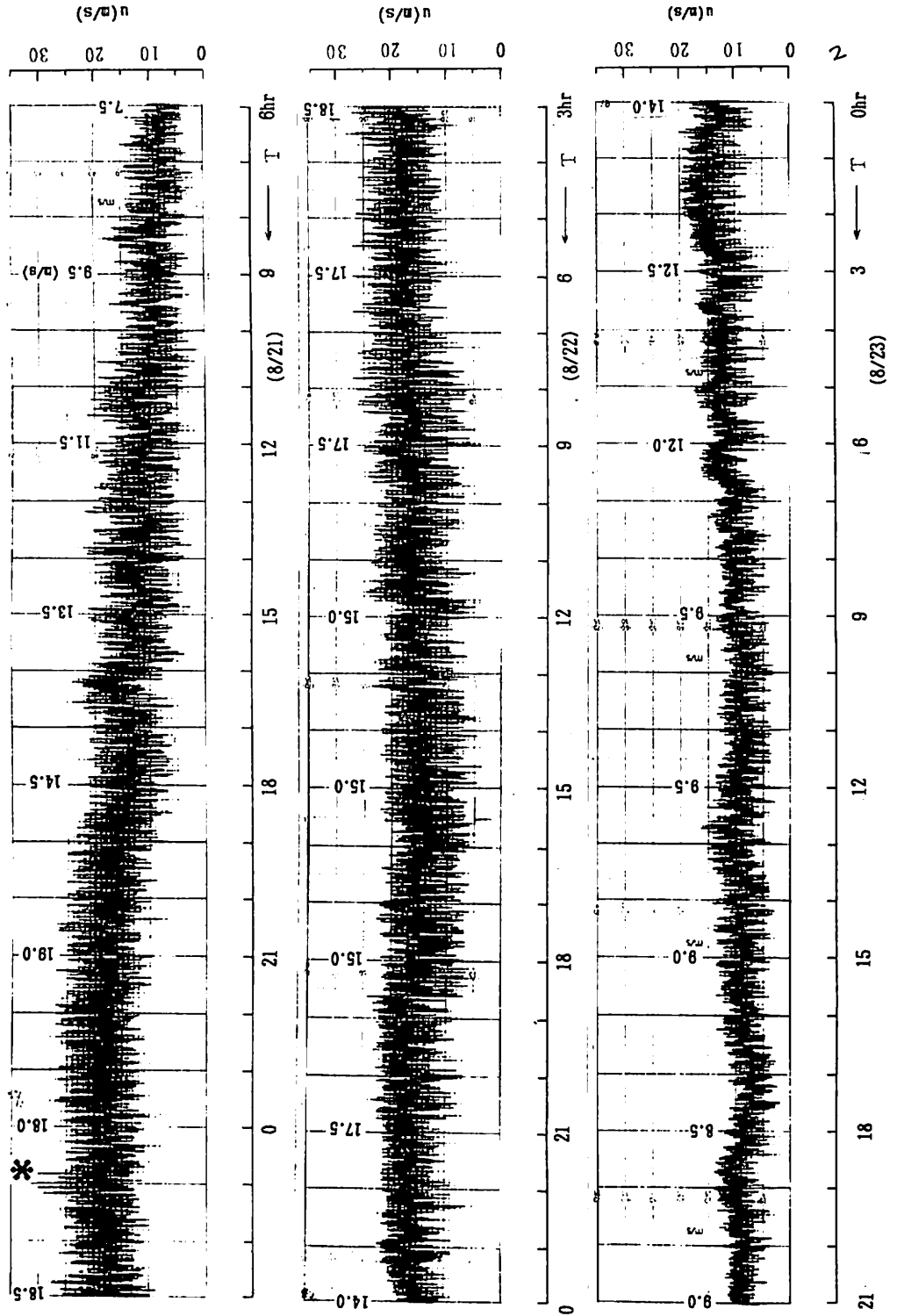


図16台風接近時における風速の変化 (T8511, 1985. 8. 21~23)

図は8月21日6時より8月23日21時までの63時間に及ぶもので、3段とも時間は右から左へと進行する。各段の縦軸に風速のスケールを示してあるが、グラフ中3時間毎の風速の測定値を記入してある。このとき、沖縄気象台によれば沖縄本島は8月21日18時から翌22日午後まで暴風圏内に入り、8月21日22時20分那覇での瞬間最大風速28.8m/sとしているが、図においても同時間帯に暴風圏に入ったことが確認され、8月22日1時頃瞬間最大風速30m/sを記録している（図中*で示す）。なお、前述のように同台風は本島南方を

ほぼ真西に直進したため同時に計測した風向は8月21日15時までは東北東を示し、その後ゆるやかに東、東南東と時計方向に変化し8月22日15時以降同日中は南東であった。また弱風時の風向は時間毎にかなり変動するのに対し、台風接近時の風向はかなり安定しており、平均風向からの変動はほぼプラスマイナス30°の範囲におさまることがわかった。次に、図17に8月22日0～24時において、10分間隔で読み取った平均風速と各正時において得られるガストファクターの変化を示す。

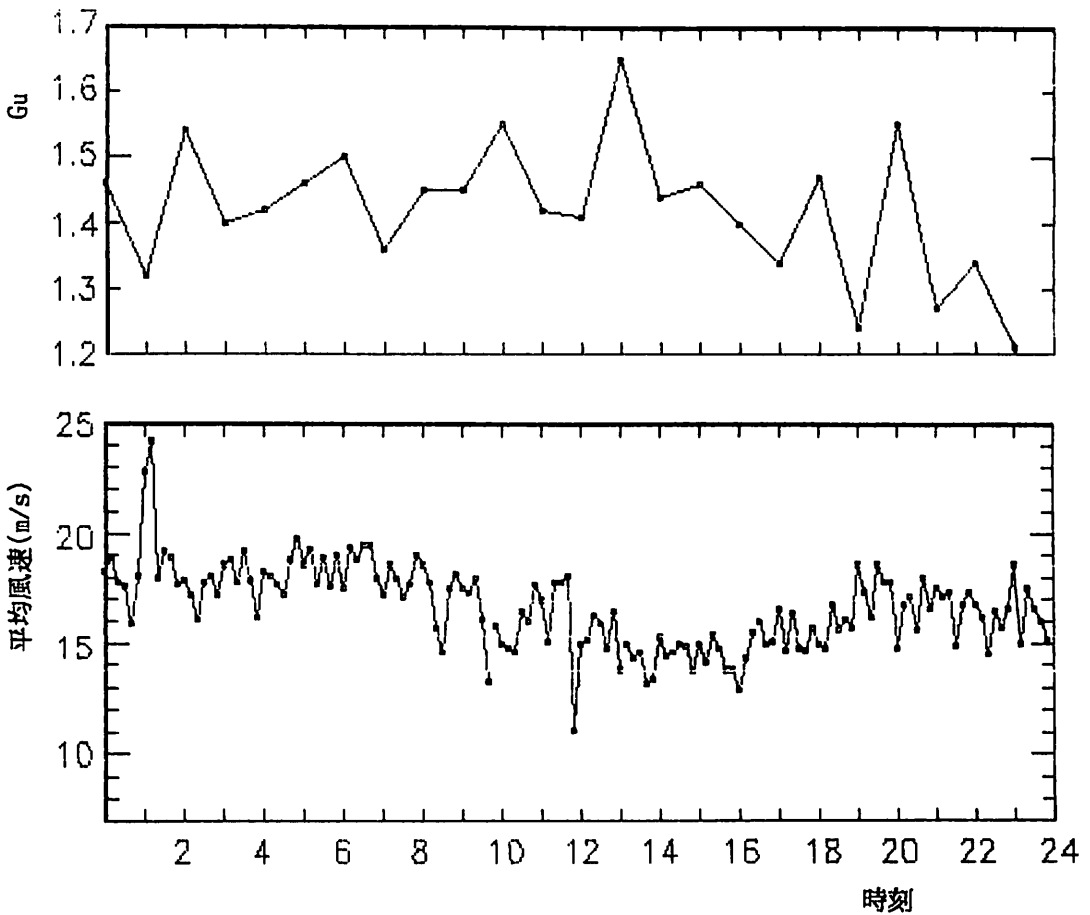


図17工学ビル屋上における台風接近時の平均風速とガストファクター (1985. 8. 22)

ガストファクターは風の乱れ度を表し、最大瞬間風速と10分間平均風速の比として次式で表される。

$$G_u = u_{max} / \bar{u} \quad (1)$$

一般にガストファクターと平均風速には負の相関が存在するといわれるが、図によってもほぼその傾向が認められる。同日のガストファクターは1.21と1.65の間にあり平均値は1.42であった。全国149ヶ所の気象官署におけるガストファクターの平均値が1.45~1.60の範囲であること¹⁾を考慮すると、台風接近時においても極端な風の乱れ度の増加はないといえる。

6. エネルギー賦存量の推定

風車によって風の運動エネルギーを回転エネルギーに変換するには、風の動圧を利用しなければならない。そこで、伊是名島、粟国島および久米島の場合について、風速階級別出現頻度分布より次式によって計算した風速階級別エネルギー賦存量分布を図18にそれぞれ示す。

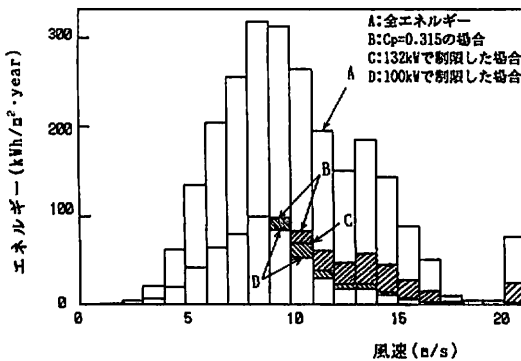


図18伊是名島におけるエネルギー賦存量 (1988年)

$$l_0 = (8.76 \times \rho u^3 \times f) / 2 \quad (2)$$

ただし ρ は空気密度で 1.225 kg/m^3 とした。 f は各風速階級の出現頻度である。

風車によって取り出されるエネルギーは風速の3乗に比例するため、風速階級別出現頻度分布のピークとなる風速で必ずしもエネルギーの頻度分布がピークになるとは限らず、図より明らかなようにいずれも高風速側にピークを有する分布となる。したがって、例えば粟国島の場合最も頻度の高い風速は 5 m/s 級であるが、図19より風力エネルギー賦存量のピークは $8 \sim 10 \text{ m/s}$ にあるので風車の設計風速もこの範囲におくことが望ましいといえる。

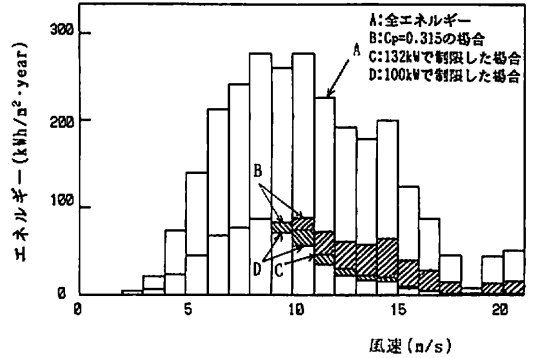


図19粟国島におけるエネルギー賦存量 (1988年)

同図に示された風力エネルギーの全賦存量は $2,660 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{year}$ になることがわかった。次に風車によって取り出すことのできる風のエネルギーの最大値は、その全エネルギーの0.593倍 (Betzの係数) であることが知られており、さらに変速機や発電機などの効率を考慮すると最終的な風車効率 C_p は $0.3 \sim 0.4$ となる。そこで $C_p = 0.315$ とし、風の全エネルギー (棒グラフ A) に 0.315 を乗じた有効エネルギー量の分布を棒グラフ B で示した。さらに、3計測地点に直径 30 m 、定格風速 9 m/s 、 $C_p = 0.315$ 、発電機の定格出力と最

観測地点	伊是名島	粟国島	久米島
風の全エネルギー [kWh/year]	17.6×10^5	18.8×10^5	16.7×10^5
$C_p = 0.315$ の場合 [kWh/year]	5.55×10^5	5.92×10^5	5.25×10^5
$4.0 \leq u < 20 \text{ m/s}$ で運転する場合 [kWh/year]	5.32×10^5	5.75×10^5	5.18×10^5
出力を 132 kW に 制限する場合 [kWh/year]	4.16×10^5	4.17×10^5	4.32×10^5
出力を 100 kW に 制限する場合 [kWh/year]	3.74×10^5	3.72×10^5	3.90×10^5
年間平均出力 (132 kW 制限の とき) [kW]	47.4	47.6	49.3

表3 Y社製30m風車によって採取可能な風力エネルギー

大出力がそれぞれ100kWと132kWのY社製プロペラ型風車を設置して風力発電を行うことを想定し、出力の推定を行った。この場合風速が定格風速以上、あるいは発電機出力が最大出力以上になると出力制限されるので高風速域の賦存エネルギーはかなり放棄される。

図18～図20に示す棒グラフおよびDは発電機出力を132kWおよび100kWにそれぞれ制限した場合の出力量の分布を示す。

表3に、同風車のカットイン風速とカットアウト風速をそれぞれ4 m/sと20m/sに設定した場合の採取可能な風力エネルギー量を三地点について表示した。表よりいずれの地点においても風車により放棄されるエネルギー量はカットイン、カットアウトによるものよりも上述の出力制限によるものが大きいことがわかる。例えば図18～図19より風速20m/s級の風力エネルギーはこの年の台風によるものであるが、このエネルギー量よりも風速9 m/s以上20m/s未満の範囲において出力制限により放棄されるエネルギー量のほうが大きい。デンマーク型風車において、定格出力の異なる2基の発電機を設置し、低風速域と高風速域の両方で高効率の発電を目指す風車があるにはこのためであろう。表より、これら3離島における30m風車による年間風力発電量は、出力を132kWに制限した場合それぞれ伊是名島416,000kWh、粟国島417,000kWhおよび久米島432,000kWhに達することがわかった。久米島の発電量が他の2島より大きくなるのは、図20

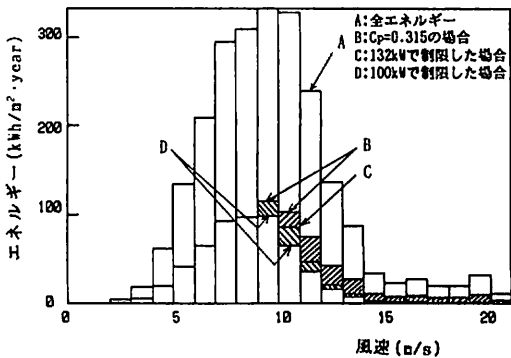


図20久米島におけるエネルギー賦存量 (1988年)

より明らかなように同島においては設計風速近傍の風速階級別出現頻度が高く、相対的に高風速域のエネルギー賦存量が低いためであると説明される。

カリフォルニア州基準⁴⁾によれば一世帯当たりの年間電力需要は約6,000kWhとされているので、上記3地点の30m風車1基はいずれも約70世帯分の電力需要を賄うと推定される。ただし、沖縄電力⁵⁾によれば沖縄における一世帯当たりの電力使用量は高ターケ月300kWh(年間3600kWh)といわれているので、これに従えば約120世帯分ということになる。

7. まとめ

琉球大学工学ビル屋上、糸数、天久、宮古、伊是名島、粟国島及び久米島における風況および台風接近時の特別風況を調査し、風車によって捉えることのできる風のエネルギー等について推定し、比較検討した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 本島内における観測地点すなわち本学工学ビル屋上、糸数、天久の1985年から1月から12月までの年間平均風速はそれぞれ5.3m/s、6.0m/s、4.5m/sで糸数が最も高く、同地点の風力エネルギー賦存量は天久の約2.4倍に達するかなり良好な風況地点であることがわかった。またいずれの観測地点においても年間を通じて6月、8月、10月および12月の平均風速が他の月に比べて特に大きくなった。
- 2) 上記7ヶ所の観測地点の中で最も年間平均風速が高いのは粟国島筆ん崎における6.61m/sで、1年の中で平均風速が最も高いのは春季(3月～5月)である。この時期は南東から吹く風が卓越しており、地形の影響もあって春期だけの平均風速は7.2m/sを記録した。
- 3) 1985年8月22日に本島の南方海上を通過した台風11号の影響を受けた風況データの詳細な分析より、ガストファクターGuを求めたところ、Guは1.21から1.65の間にあり、台風時においても極端な風の乱れ度の上昇はないことがわかった。
- 4) 風車直径30m、風車効果0.315、発電機の最大出力132kWの風力発電機を伊是名島、粟国島および久米島の3計測地点に設置して、風速4 m/s～20 m/sの範囲で運転した場合、いずれの島においても風車1基当たり約42万kWh/yearの風力発電が可能であり、約120世帯の需要を賄えることがわかった。

謝 辞

本稿は本学工学ビル屋上で得られた風況データに加え、沖縄電力株式会社および沖縄気象台より提供を受けた資料にもとづいたものである。資料提供に快く応じてくださった沖縄電力株式会社および沖縄気象台に厚く感謝申し上げる。

本学データの収集、整理には大学院卒業生（現沖縄電力）上原真二氏、1985年度卒業生稲福悟、中井竜二の両氏および1989年度卒業研究生眞喜志治、屋宜誠の両氏らにご協力頂いた。記して感謝申し上げる。

参考文献

- 1) 永井寛, 南西諸島における風力利用の可能性, 第11回風力エネルギー利用シンポジウム論文集, (1989-11)
- 2) 沖縄総合事務局農林水産部, ソフトエネルギー利用基礎調査報告書(1984-3)
- 3) 永井寛, 沖縄県における風力利用の可能性, 風力エネルギー, 10巻1号(1986-6), 43
- 4) California Energy Commission, Results from the Wind Project Performance Reporting System,(1989-2)
- 5) Neill,D. Richard,Hawaii 's Wind Data Bank,Proc, 4th Int. Symp. on Wind Energy Systems,(1982-9),175