

北九州地区における風力エネルギーの特性

(昭和58年11月30日 原稿受付)

機 械 工 学 教 室	松	永	成	徳
第 二 部 機 械 工 学 科	西		道	弘
第 二 部 機 械 工 学 科	岡	本		実
北九州市立農事センター	片	山	一	敏

Characteristics of Wind Energy in Kitakyushu Area

by Shigenori MATSUNAGA
 Michihiro NISHI
 Minoru OKAMOTO
 Kazutoshi KATAYAMA

Abstract

To clarify the characteristics of wind energy in Kitakyushu area, wind behavior was studied from November 1980 to March 1982 using a propeller type anemometer with a recorder at the Municipal Agricultural Center, where a wind turbine was planned to install. According to the measurement, it was seen that values of average annual wind speed and annual wind power was 3.5m/s and 527kWh/m² respectively. Relationship between average annual wind speed and annual wind power is derived for general use to estimate wind power in Kitakyushu area.

Variations of wind speed and energy with time, wind and energy roses, and wind duration curve are also presented in this paper.

1. ま え が き

風車による風力エネルギーの利用を図る場合、設置点の風況を調査してその特性を明らかにしておくことが重要である。従来の気象データに基づいて事前調査の代りとする方式¹⁾もとられるが、我が国のような地形では風は強い局地性を有するので²⁾、公表されている観測結果をそのまま使用できないことも考えられる。

福岡県は、関門海峡を別にすれば、風の穏やかな地域であるといわれている。しかしながら、北九州地区において昭和55年11月から17ヶ月間にわたって風力調査した結果によれば年平均風速として3.5m/sが求められ、北九州地区内に風車の実用が可能とみなされる地点のあることが明らかになった。この調査は、「市立総合農事センターにおける消費エネルギーの一部を風力エネルギーによって代替する計画」に関する北九州市よりの委託を受けて、昭和55年度から昭和56年度にかけて実施されたものである。

昭和58年3月には、調査結果に基づいて選ばれた4m直径の風車が農事センター内に設置された。プロペラ式の風車は現在稼動中であり、ほぼ推測通りの性能が得られているようであるので、風力エネルギーの利用からみた、

昭和58年3月には、調査結果に基づいて選ばれた4m直径の風車が農事センター内に設置された。プロペラ式の風車は現在稼動中であり、ほぼ推測通りの性能が得られているようであるので、風力エネルギーの利用からみた、



図-1 調査地点 (北九州地区地形区分図)

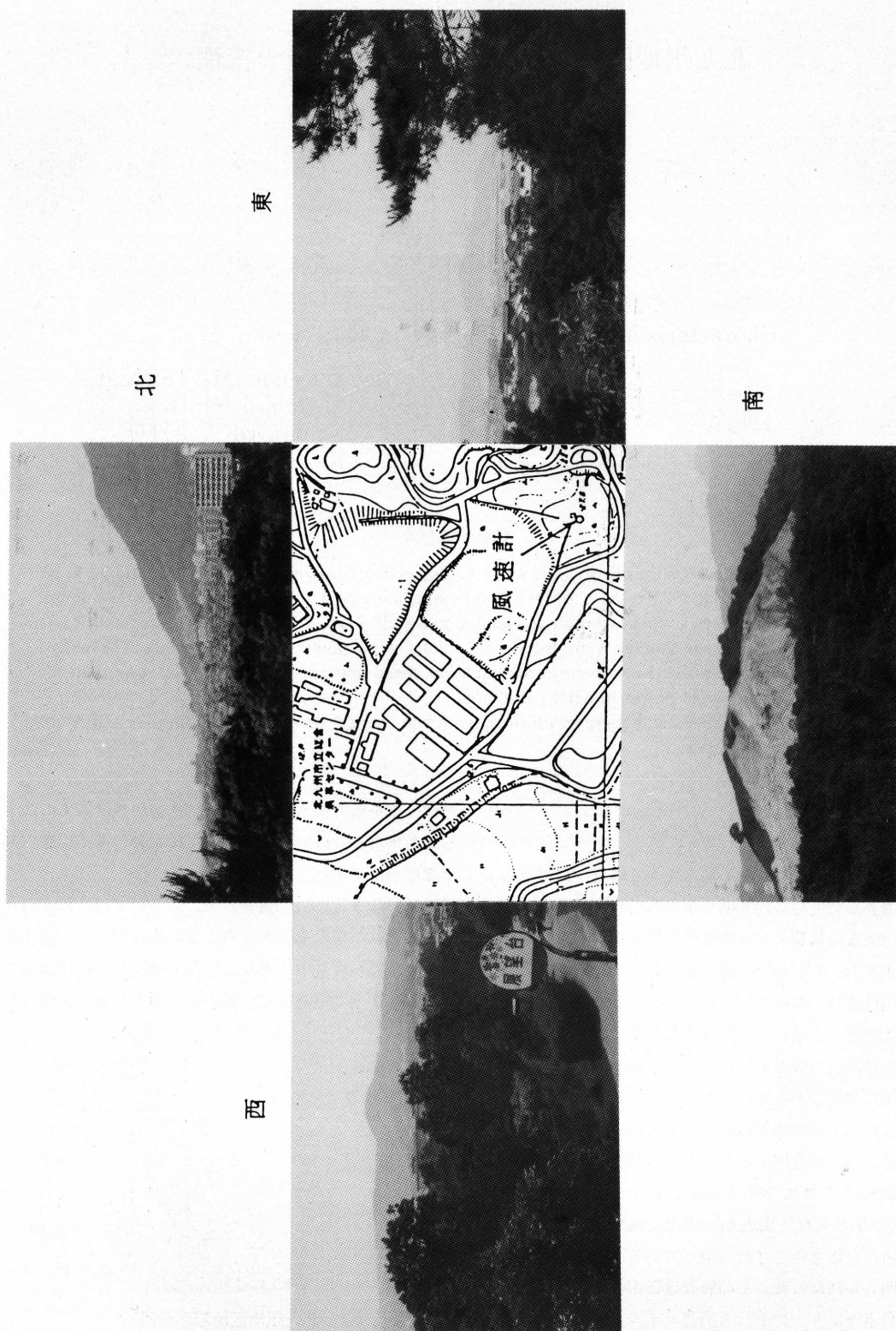


図-2 風速計設置位置と環境

北九州地区における風の特性の分析結果を以下に示す。

2. 測定場所および測定方法

風力エネルギーの調査を実施した総合農事センター（小倉南区横代東町3丁目）を図1の北九州地区地形区分図に示す。短期間の風向風速測定であるので、従来気象観測がなされている運輸省北九州空港出張所（小倉南区下曾根）および航空自衛隊芦屋基地（遠賀郡芦屋町）を、測定結果を比較する地点とした。

農事センター敷地内の風速計設置位置を図2に示す。設置点の環境は、4方位について撮影された写真および図1から判断されるように、北と南側の500m前後の山に挟まれ玄海灘（響灘を含む）から周防灘に抜ける平地の中ほどにあるとみなされる。

地上10m高さ（海拔37.8m）の位置において、風向と風速を調べた。測定に用いたプロペラ形自記風向風速計（大田計器：ダイナペン No.112）は、5秒以下の短い周期の風速変動に正しく追従できないが、風車の設置に係わるような風力エネルギー賦存量の調査等には十分であろう。この風速計の場合、検出された10分間平均相当の風速および風向のデータはアナログ信号として連続的に記録紙に出力される。回収した記録紙より、10分間隔ごとにこれらのデータを読み取った。

上記測定法は多大の労力と時間を必要とするばかりでなく、記録方式から生ずる問題点を有しているので、突風率や乱れ特性を調べる目的もあって、昭和56年度にはマイコン（富士通：FM-8）を利用したデータ集録システムを開発して一時期使用した。風向と風速のアナログ信号は10秒間隔でサンプリングされデジタル信号に変換後、10分ごとに平均値と偏差を求めるための前処理がなされる。この時系列データはマイコンに装着された補助記憶装置（バブルカセット）に出力される。今回のシステムでは、一定期間（約1ヶ月）ごとに2つのカセットを交互に交換し、大学に持ち帰って、バブルカセットから標準フロッピーディスクに媒体変換した後、データ処理に汎用計算機を利用する方式が採用された。

付録に収集データの内訳を示す。

3. 調査結果および考察

3.1 時間平均風速

時間 T に対する平均風速 \bar{V} を次式より求め、結果をとり扱う。

$$\bar{V} = \frac{1}{T} \int_0^T V dt \quad (1)$$

農事センターにおいて調査期間中に測定された月平均風速の季節変化を図3(a)に示す。各月における日平均風速の最大値および最小値を破線で表示した。17ヶ月間の平均風速は3.5m/sである。この速度は最低実用風速といわれる年平均値に相当する。同一時期に北九州空港で測定された風速データを図3(a)と直接比較できるように整理し、その結果を図3(b)に示す。図3(c)には芦屋基地における昭和56年度の平均風速を実線で、10年間の算術平均値（昭和43年～昭和53年）を一点鎖線にて表示した。冬から春にかけて強い風が吹くという、北九州地域における気象の特徴³⁾がいずれの図にも認められる。福岡県内では3m/sを越える地域はわずかであるという従来の調査報告もみられるが、ここで取り上げた北九州地域内の3地点はいずれも年平均風速が3m/s

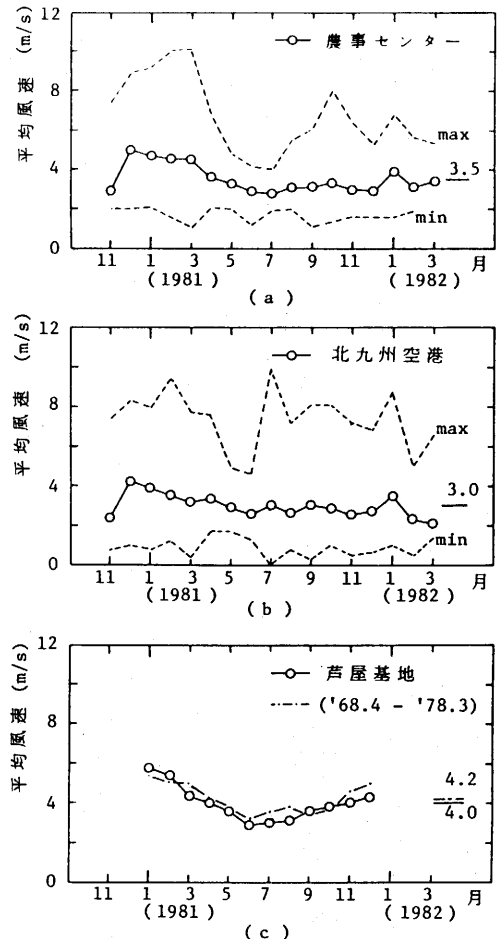


図-3 月平均風速の季節変化

以上である。

時間帯と風速との係わりを調べるため、農事センターにおける風速の日変化を図4(a)、芦屋基地の場合の結果を図4(b)に示す。実線で記した年平均風速のほか、冬(12月～2月)および夏(6月～8月)の結果をそれぞれ一点鎖線と破線で示した。両図より、日中に風が強いという、海岸近くの平地で観測される特徴が顕著に現われている。農事センターについてみれば、10時から16時の間で年平均風速が4m/sを越えている。冬の季節には気圧配置に基づき昼夜によらず吹くので、風速の日変化の振幅は冬の季節に最も小さくなる。

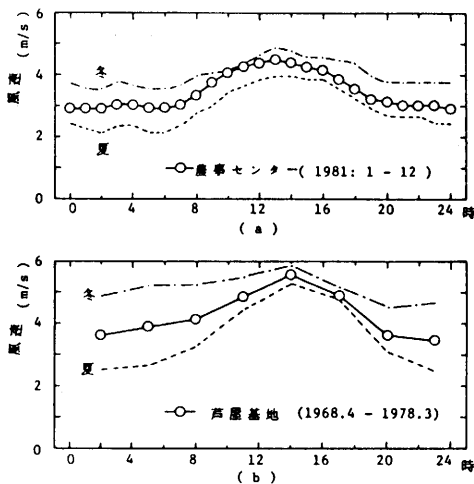


図-4 風速の日変化

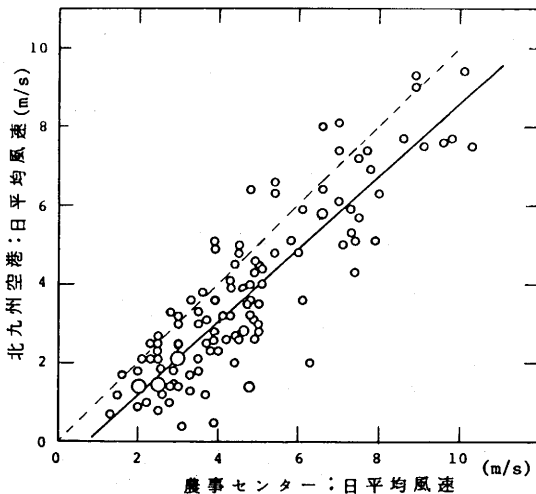


図-5 日平均風速の相関

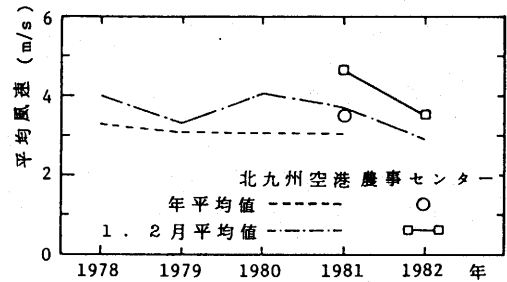


図-6 風速の年変化

今回の現地風況調査は17ヶ月の短期間でなされたため、風況の即断には注意を要する。長期にわたる観測が望まれるが、得られた結果がいわゆる平年並みとみなせるか否かについて検討する。図5は北九州空港で測定された日平均風速と農事センターの結果との相関を調べたものである。相関係数は0.9程度であり、比較的良好な対応が認められる。北九州空港における過去4年間(昭和53年～昭和56年)の年平均風速の経年変化を、図6に破線で示す。大きな変化は起きていないことが分る。同図中、1月、2月の2ヶ月平均風速値を一点鎖線で示したが、昭和57年において風速のかんりの低下が認められる。従って、四角印でプロットした農事センターの結果について考えれば、昭和57年1月～2月は平年よりも風が弱かったと推測される。

以上の結果からすれば、対象とした北九州地区の3地点はいずれも同様な風速の特性を有していると判断される。それ故、芦屋基地における平年の年平均風速(10年平均値)4.2m/sと昭和56年の値4.0m/sとの関係を利用して、農事センターおよび北九州空港の年平均風速の平年値を算定した。表1にその結果を示す。

表-1 年平均風速: \bar{V} (m/s)

	農 事 セン ター	北九州 空 港	芦屋基地
昭和56年実測値	3.5	3.0	4.0
平 年 推 定 値	3.7	3.2	4.2

3.2 風 況 曲 線

図7は昭和56年の10分間平均風速 V から求めた度数分布である。この結果は実線で示したワイブル分布により良好に近似できる。ワイブル分布は次の実験式で与えられる。

$$f = 0.427(V/3.98)^{0.7} \exp \{-(V/3.98)^{1.7}\} \quad (2)$$

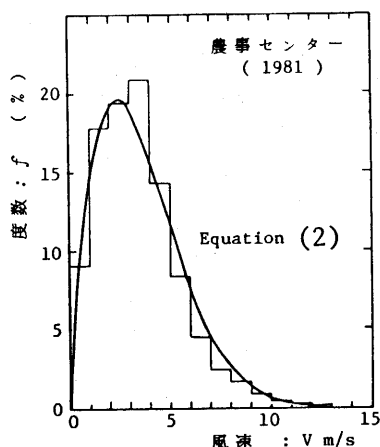


図-7 風速の度数分布 (農事センター)

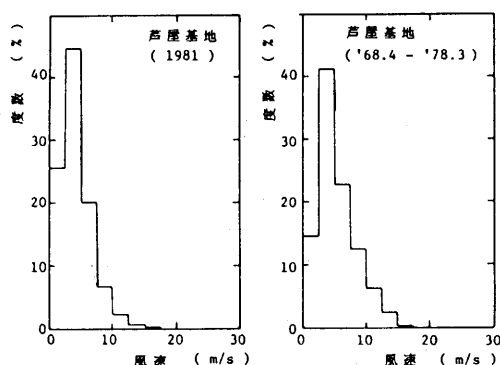


図-8 風速の度数分布 (芦屋基地)

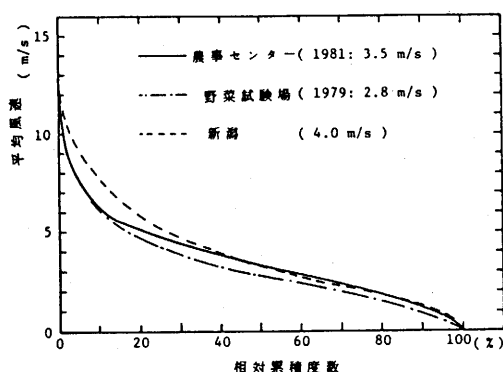


図-9 風況曲線 (カッコ内は平均風速)

比較のために芦屋基地における風の度数分布を図8に示す。

図9の実線は、図7より求めた農事センターにおける昭和56年の風況曲線である。同図には、新潟(昭和42年

～49年) および「風トピア」計画⁴⁾ が実施された野菜試験場(昭和54年)の結果も参考のために記した。図7からも分るように、農事センターでは2～5m/s間の風の出現頻度が高いという特徴がみられる。

3.3 風向の特徴

季節による風向の出現度数分布を図10に示す。冬は圧倒的に西～北西の風が吹き、春から夏にかけては東南東の風が多い。西北西と東南東方向に開けている地形(図1参照)に農事センターがあることからしても、納得のいく結果である。

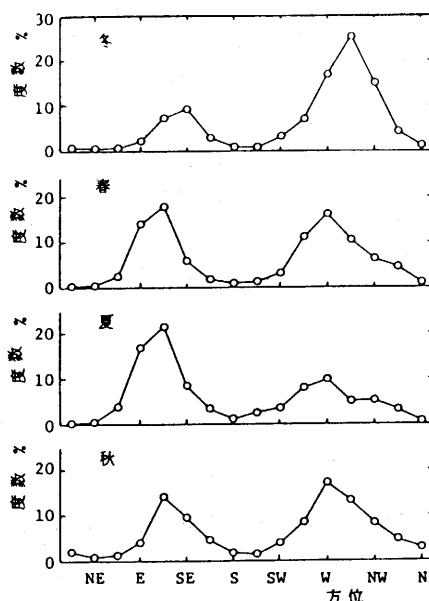


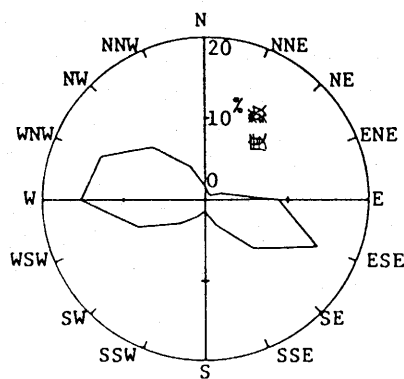
図-10 季節による風向の出現率

参考のために、年間の風の方位分布(風配図)および風エネルギー(式(6)参照)の方位分布を図11に示す。風の出現度数を表す(a)図によれば西北西と東南東から吹く風の割合は同程度であるが、風速の3乗から定まる風エネルギーは冬の季節風が最も強いために西北西方向で最大値をとることが(b)図より分る。

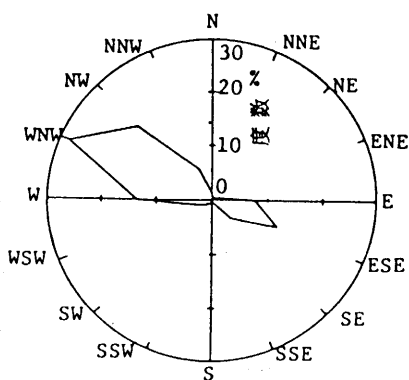
3.4 風の変動

風速は時間と共に大きく変動しているので、風車特性との関連から、風の変動特性を明らかにしておくことが望まれる。ここでは、台風時および冬の季節風時の2例についてその特徴を示す。なお、風の変動を表す量として、次式で定義される突風率 G と乱れ強さ T とを用いる。

$$G = V_{max} / \bar{V} \quad (3)$$



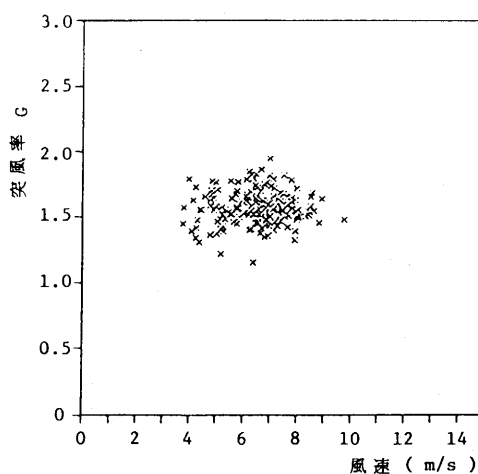
(a) 風向



(b) エネルギー



(b) 天気図



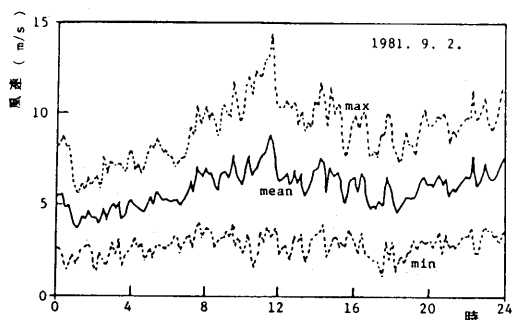
(c) 突風率

図-11 風および風エネルギーの方位分布 (昭和56年)

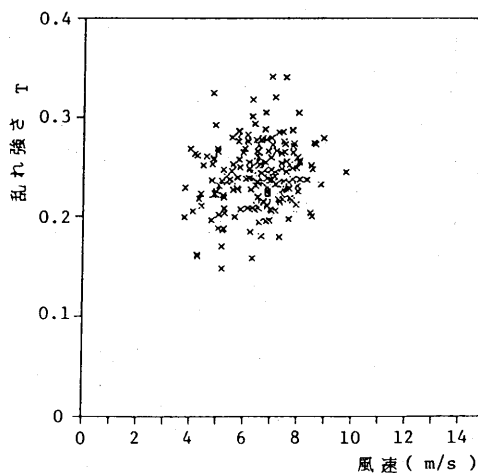
$$T = \sqrt{V'^2} / \bar{V} \quad (4)$$

ここで V_{max} : 最大風速, V' : 変動風速 である。

a) 台風時: 台風18号が九州に近づいた昭和56年9月2日, 0.1Hz 間隔で風速データを集録して, 10分間平均風速およびレンジを求めた。図12(a) がその結果である。その日の天気図を図12(b), 突風率を図12(c) および乱れ



(a) 風速変動

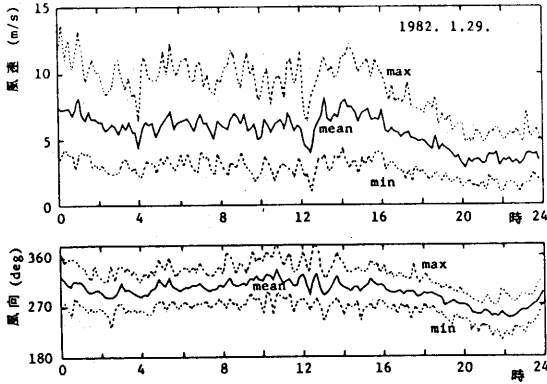


(d) 乱れ強さ

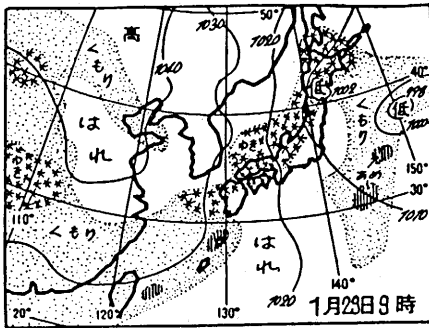
図-12 台風時の風の変動

強さを図12(d)にそれぞれ示す。

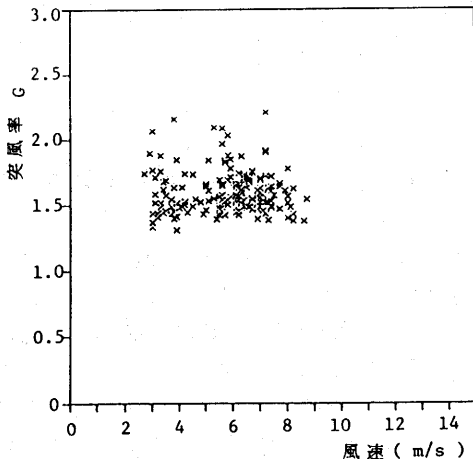
b) 冬の季節風時： 冬型気圧配置により強い風が吹いた昭和57年1月29日における，風速と風向の平均値とレンジの変動波形を図13(a)に示す。図13(b)～(d)は天気



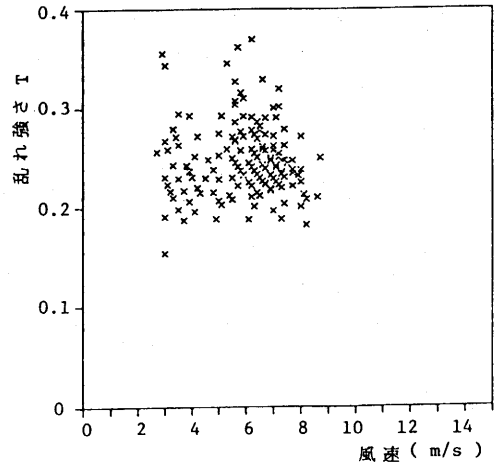
(a) 風速及び風向の変動



(b) 天気図



(c) 突風率



(d) 乱れ強さ

図-13 冬の季節風時の風の変動

図，突風率および乱れ強さの結果である。

いずれの例についても，平均突風率 G は1.6程度であり，平均乱れ強さ T は0.25程度であった。従来の結果⁵⁾と比べて， G および T ともに大き目の値が得られた。ただし，冬の季節風においては，図13(a)の例から分るように，ほぼ一定の風向と風速が長時間（0時～16時）持続している。この点は風車の利用にとって好ましいといえる。

3.5 強風と無風

風車の耐風性を検討する場合に風速の最大値が必要となるが，今回の測定では平均風速を重視した計測法を採用したので，年間の最大風速は調べられていない。参考のために，北九州空港で過去4年間に測定された年間最大風速を図14に示す。

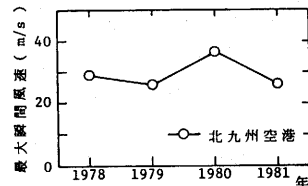


図-14 最大瞬間風速（北九州空港）

無風時間はエネルギー貯蔵のための，例えばバッテリーの容量を検討する際に必要である。17ヶ月間の調査では，10分間平均風速が2日にわたって 3 m/s 以下であることはみられなかった。

3.6 風力エネルギー賦存量

空気密度を ρ (kg/m³)、風速を V (m/s) とすると、単位時間に単位面積を通過する風の輸送エネルギー e (W/m²) は次式で与えられる。

$$e = \frac{1}{2} \rho V^3 \quad (5)$$

T 時間にわたる、単位面積当りのエネルギー賦存量 (エネルギー密度) E は

$$E = \int_0^T e dt = \int_0^T \frac{1}{2} \rho V^3 dt \quad (6)$$

密度 ρ も時間の関数であるが、一定とみなせると仮定して、式(6)を次のように変形する。

$$E = \frac{1}{2} \bar{\rho} \int_0^T V^3 dt = \frac{1}{2} \bar{\rho} \bar{V}^3 T \quad (7)$$

ここに $\bar{\rho} = 1.225$ kg/m³: 日本における年平均値、風速の3乗平均値 \bar{V}^3 の替りに平均風速 \bar{V} を用いるならば、

$$E = f_c \frac{1}{2} \rho \bar{V}^3 T \quad (8)$$

ここに $f_c = \bar{V}^3 / \bar{V}^3$ は立方係数と呼ばれる。

昭和56年に農事センターで測定された10分間平均風速データを使って、日間平均値より求めた立方係数 f_c と日平均風速との関係を図15に示す。月間について調べた結果が表2である。図によれば、風速が増すに従い、 f_c が小さくなる傾向がみられる。年間の平均風速と立方係数の関係を図中の+印で示すが、立方係数は、平均をとる期間が長くなるために日平均の場合に比較して大き目の値となる。

立方係数と日平均風速との関係を表す図中の実線と同様の線形関係が、立方係数と年平均風速の場合にも成立すると仮定して、年間のエネルギー賦存量を推定した。その結果が図16である。図中の丸印は昭和56年度に農事センターで実測された値であり、風力エネルギー賦存量が単位面積当り、年間 527 kWh であったことを示す。図16が、農事センター内だけでなく北九州地区の他の地点に対しても適用されるかどうか、今後検討する必要がある。

3.7 風力発電の検討

発電用風車を用いて風力エネルギーを電力に変換する方式は、用途に制約が少ないために最も広く採用されている⁸⁾ もの、風車の回転数、発電機の容量等から使用可能な風速範囲に限られる。国内における従来の実績調査結果によれば、風況とのマッチングを考慮して風力発電機が選定されたとはいえないために、発電効率 (= 発

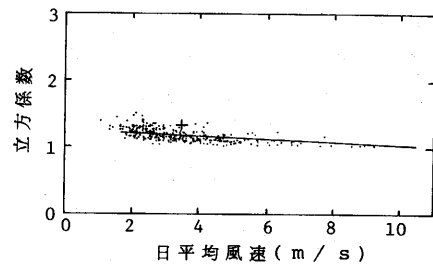


図-15 立方係数

表-2 立方係数 (昭和56年)

月	\bar{V} (m/s)	$\sqrt[3]{\bar{V}^3}$ (m/s)	f_c
1	4.67	5.90	1.26
2	4.50	5.78	1.28
3	4.46	5.82	1.30
4	3.60	4.38	1.22
5	3.30	4.02	1.22
6	2.89	3.52	1.22
7	2.77	3.31	1.19
8	3.15	3.76	1.19
9	3.14	4.05	1.29
10	3.22	4.28	1.29
11	3.00	3.97	1.32
12	2.86	3.84	1.34

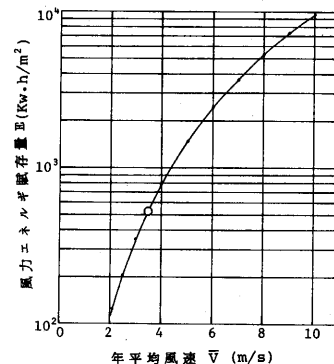


図-16 年平均風速とエネルギー賦存量の関係

電力量/風力エネルギー) は高々 17% 程度⁷⁾ である。従来の風車設置地点⁴⁾ の風況と比較して、北九州地区 (農事センター) の風況 (図9) は風力発電に向けたものと考えられる。この点を調べるために、在来のプロペラ風車 (直径: 4m) を例にとり、図17の出力曲線と昭和56年度の風況調査結果を基にして、10分ごとの発電電力量を計算し年間の発電量を求めた。その結果、1288 kWh

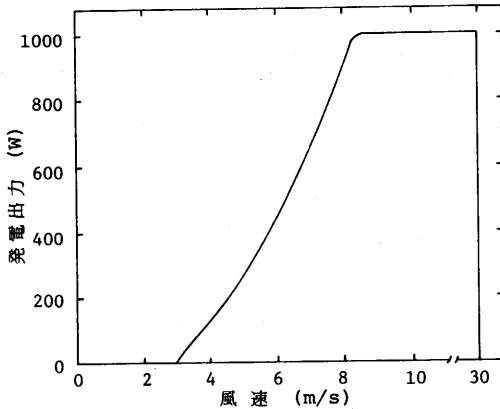


図-17 出力曲線

が推定されたので、発電効率は19.5%と見積られる。推定通りの性能が得られるかどうか、発電用風車による現地試験を実施して、実績を調査することが望まれる。

4. まとめ

昭和56年から17ヶ月間にわたり北九州市立総合農事センターで風力調査した結果の主なものは次のようにまとめられる。

- 1) 農事センターは、玄海灘から周防灘へ風が抜ける地形であるために、3.5 m/s を越える年平均風速が期待できる。
- 2) 月平均風速によれば、西高東低の冬型気圧配置と春先の温帯低気圧の影響を受け、冬から春にかけて風が強いという特徴がみられる。
- 3) 年間を通して、日中に風が強いという一日周期の変化が顕著である。
- 4) 年平均風速と年内のエネルギー賦存量との関係が求められた。
- 5) 計算によれば、在来のプロペラ風車を用いて20%に近い発電効率が期待される。

終りに、本研究を遂行するにあたり御協力いただいた北九州市役所、運輸省北九州空港出張所、航空自衛隊芦屋基地の関係各位に深く感謝する。併せて、現地調査に参加された当時の卒研究生、坂本春雄、野平文雄および高倉実の諸君に謝意を表す。

参考文献

- 1) U.S.D.O.E., Home Wind Power, Garden Way Pub.
- 2) 関, 風力エネルギー, 6巻2号(昭58), p. 29.
- 3) 福岡管区気象台要報, 23号, p. 187.
- 4) 科学技術庁計画局, 風エネルギーの有効利用技術に関する調査報告, 資源総合利用方策調査報告書35号(昭55-11).
- 5) 本間, 風力エネルギー読本, オーム社, p. 154.
- 6) 科学技術庁計画局資料課, 我が国の風力利用, (昭56-10).
- 7) 真鍋・ほか3名, 宇部工専研究報告, 29号(昭58), p. 5.

付録 収集データの内訳

今回の調査において、風の特性に係わる収集データは次の通りである。

- (1) 農事センター
 - a. 平均風速および風向(10分平均相当)
昭和55年11月～昭和57年3月(延べ日数: 約460日)。測定日数不足分は、落雷の影響による機器の修理期間及び記録計不備による。
 - b. 瞬間風速および風向
昭和57年2月～3月。
- (2) 下曽根飛行場
 - a. 日最大瞬間風速と風向, 日平均風速
昭和53年1月～昭和57年3月。
風速計は建物屋上の鉄柱に取付けられている。
- (3) 芦屋基地
 - a. 平均風速の日変化と月変化
昭和43年4月～昭和53年3月。
 - b. 風速と風向の出現頻度
昭和56年1月～12月。
風速計は地上5mの鉄塔に設置されている。