

プロペラ型風車の動特性

Studies on the Dynamic Characteristics of the Horizontal Shaft Wind Turbines.

清 水 幸 丸*

Yukimaru Shimizu

1. ま え が き

風車を設置する場所は地表近くにあり、気象流体力学的な観点からは大気乱流境界層中の接地層に相当する。接地層内の乱れは大きく、場所によっては地表の凹凸や構造物の影響によって、流れは一層複雑になる。我々が風車を利用しようとする場合、このような複雑な流れの中で既存の風車が平均的に1日当たりどれぐらいの電力を発生しうるか、平均的な風車効率はどうぐらいになるか、瞬時瞬時の発生電力はどの程度変化するか、また、変動する入出力から効率はどのように決定すればよいか等数多くの事柄について知りたくなる。また、風車の強度上の関心から風車翼に作用する流体力の変動量および翼の各部分や軸に働く応力変動がどのような性質を持ち、その値はどれぐらいになるかも知りたくなる。

現在、風車に関する研究は活発化しつつあるが^{1)~3)}、上記の問題に有効に答える研究は少ない。本報告は、上記の問題点にわずかしか答えられず不十分ではあるが、著者等の研究結果を中心に述べてみたい。著者はこれまでに、3台のフィールド水平軸風車について性能を中心とする動特性について研究を行ってきた。その内、室工大風車および増毛風車については室工大奥田教授と共同研究⁴⁾を行った。上記2台の水平軸風車は市販品のため風車の動特性を検討するには不十分なので、著者は三重大1号風車を自作し、風速、回転数、発生電力および電圧の変動と風車軸に働くトルクの変動の関係および風車回転面の速度変動について検討した。これらの結果はまだまだ初歩的なものであり、整理も不十分であるが、本報告から現実の水平軸風車の運転状況がどのようなものであるか、その一端を知ることができると思う。

2. 記号および定義式

E : 風車に対する入力 ($= \frac{1}{2} \rho \pi r^2 v^3$)

I : 発生電流

r : 風車半径

S : 軸出力 ($T \times \Omega$)

T : 発生トルク

t : 時間

V : 発生電圧

v : 風速

W : 発生電力 ($= V \times I$) ρ : 空気の密度 ϕ : 周速比 ($= r \Omega / v$) Ω : 風車回転角速度Ct : トルク係数 ($= T / \frac{1}{2} \rho \pi r^3 v^2$)C_{lp} : 軸出力係数 ($= (S/E) \times 100$)C_{lw} : 発電効率 ($= (W/E) \times 100$)AR : 自己相関係数 ($= \frac{\sum_{t=1}^{n-k} (x_t - \bar{x})(x_{t+k} - \bar{x}')}{n-k}$)CR : 相互相関係数 ($= \frac{\sum_{t=1}^{n-k} (x_t - \bar{x})(y_{t+k} - \bar{y})}{n-k}$)

k : タイムラグ

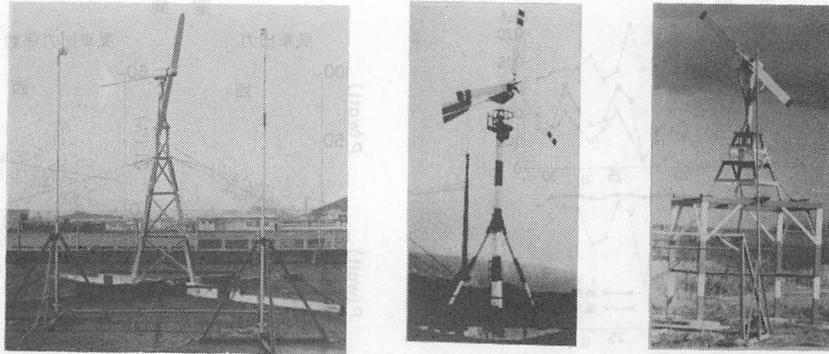
 $\bar{x} = \frac{\sum_{t=1}^{n-k} x_t}{n-k}$, $\bar{x}' = \frac{\sum_{t=1}^{n-k} x_{t+k}}{n-k}$, $\bar{y} = \frac{\sum_{t=1}^{n-k} y_t}{n-k}$

3. 研究結果

図-1(a)には室工大風車および測定装置、図-1(b)には増毛町風車、図-1(c)には三重大学1号風車および測定装置の写真を示す。室工大風車直径は2.5mφ、2枚翼で翼形クラークY、ねじり少し有り、スイス、Electro-G社製、増毛風車直径は7.4mφ、3枚翼で翼形不明、ねじり少し有り、アメリカ Millville Windmill 社、三重大学1号風車は直径2.3mφ、2枚翼で翼形はFX74-CL6-140、ねじりなし直線翼で自作風車である。室工大風車は最大出力500W、増毛風車は最大出力3KW、

* 三重大学工学部機械工学科助教

〒514 津市上浜町



(a) 小型 (室工大) 風車 (b) 中型 (増毛) 風車 (c) 小型 (三重大1号) 風車

図-1 研究に用いた水平軸風車

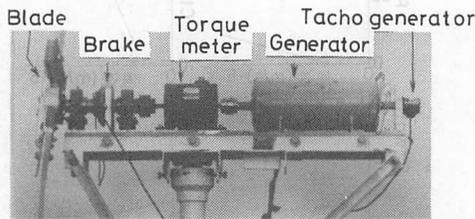
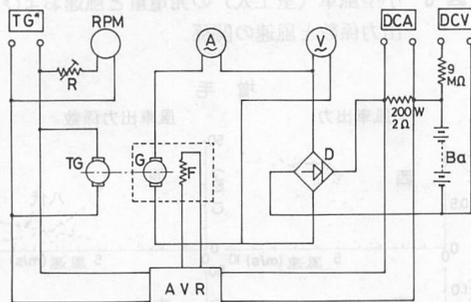


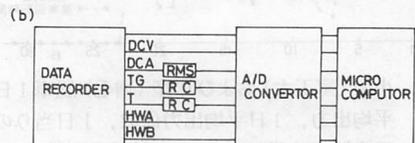
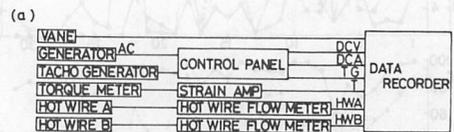
図-2 三重大1号風車の回転軸系の測定器



記号	名称	記号	名称
G	発電子	A	交流電流計
F	界磁コイル	V	交流電圧計
TG	タコジェネレータ	DCA	直流電流取出端子
D	ダイオードスタック	DCV	直流電圧取出端子
AVR	自動電圧調整器	Ba	バッテリー (60V)
RPM	回転計	R	回転計用抵抗器
TG*	タコジェネ取出端子		

図-3 三重大1号風車の発電機およびその他の測定系

三重大学1号風車は最大出力500Wである。日常的な測定は室工大では10分間平均値を打点式記録計に、増毛風車では風車出力の電流・電圧をペン書きオシロに記録した。風速・風向の測定には室工大、増毛ともに気象観測用プロペラ形風速計を用いた。三重大学1号風車は実験用に特別製作したもので、図-2に示すごと



RMS : TRUE ROOT MEAN SQUARE METER
RC : RC CIRCUIT

図-4 三重大1号風車のデータ処理系

く、左側より2枚翼、軸受け、緊急停止用ブレーキ、軸受け、トルク計および単相交流形発電機、回転計からなる。図-3には三重大風車の各種の出力系を示す。各々の測定値は図-4(a)のブロック線図に示されるように風車および熱線風速計からの各種出力が同時にデータレコーダに記録され、図-4(b)のブロック線図に示される方法でA/D変換し計算機でデータ処理を行った。

図-5には室工大および増毛風車による1日当りの発電量、1日間に吹いた風の全エネルギーに対する風車の全仕事の割合、すなわち1日当りの平均出力係数、1日間の風車が回転している時間割合および1.5m/s以上の風が吹いている時間割合が示されている。期間は室工大が1981年1月、増毛町が1980年10月の各1ヶ月間である。連続記録された測定値は30分間隔にくぎり、その間の平均値を読み取った。室工大風車の1日当りの効率率は、入力大きい場合は12%から18%の間にあり、入力小さい場合は効率率は低く、値の変動も大きい。増毛風車は風車直径も大きく、風速も大きい地域に設置されているので、風車に対する入力も室工大の20倍から100倍、大きい場合には400倍にも達す

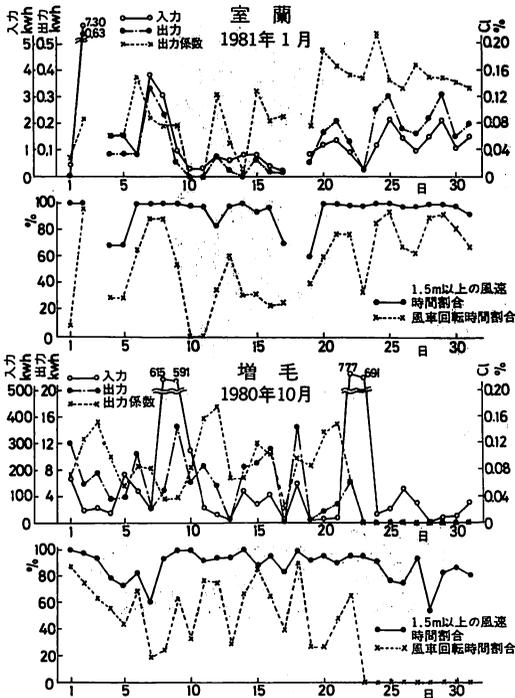


図-5 小型(室工大)および中型(増毛)風車1日平均出力、1日平均出力係数、1日当りの風車運転時間割合および1.5m/s以上の風の吹く時間割合

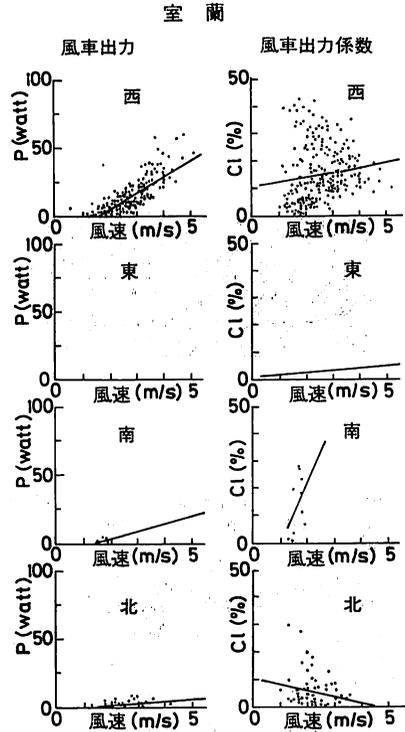


図-6 小型風車(室工大)の発電量と風速および出力係数と風速の関係

る。1日当りの平均出力係数は4%~16%の間にあり、平均的にみれば室工大風車よりやや低くなる。図-6は室工大風車10分間平均の風車発生電力および出力係数を示す。結果は東(東±45°方向)、西(西±45°方向)、南(南±45°方向)、北(北±45°方向)の4方向ごとに分類してある。1月14日から1月27日までの2週間の結果である。図中の直線は最小2乗法により求めた平均値である。出力係数と風速および風向の関係は最大44%から最小数%までバラツキがあり、一定の関係を求めることはむずかしい。図に示した測定期間においては西風が主であり、それに北、南が続き、東風はほとんどない。図-7には増毛風車の結果を示す。風車発生電力は風速が3m/sから5~6m/sまで風速とともに増大するが、約6m/s以上の風速ではほぼ1KWで一定値を示す。これは、風速に回転数制御装置が取付けられており、一定回転数以上にならない結果である。出力係数は風速5m/sまでは風速とともに増大する傾向を持つが、このような装置のため、それ以上では逆に風速増大とともに減少する。風速5m/sでは出力係数は25%から30%程度になり、比較的良好であるが、8m/s前後の最適利用風速での回転が押えられてい

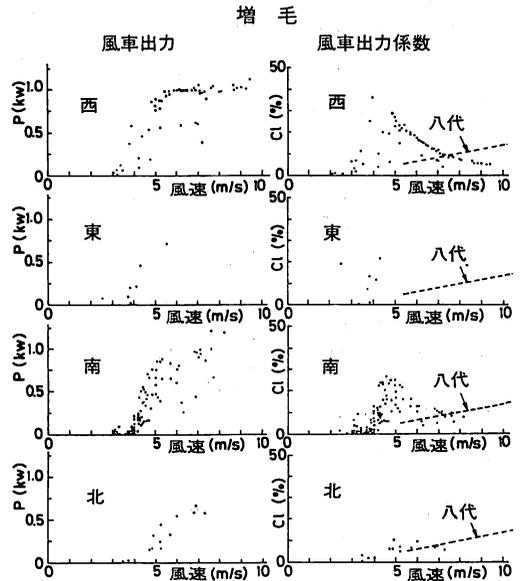


図-7 中型風車(増毛)の発電量と風速および出力係数と風速の関係

るため風車としての魅力にとぼしい。図には八代工専の水平軸風車で得られた出力係数と風速の関係が記入してある。発電方式が相当異なるにもかかわらず出力

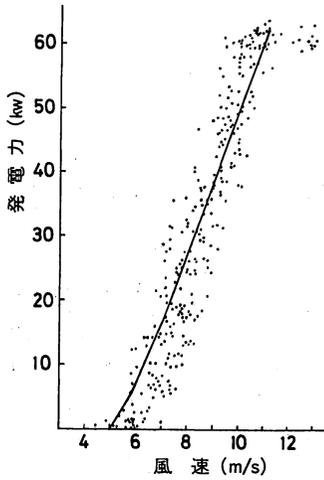


図-8 直径18mの水平軸風車の発電量と風速の関係、スウェーデンにおける一例

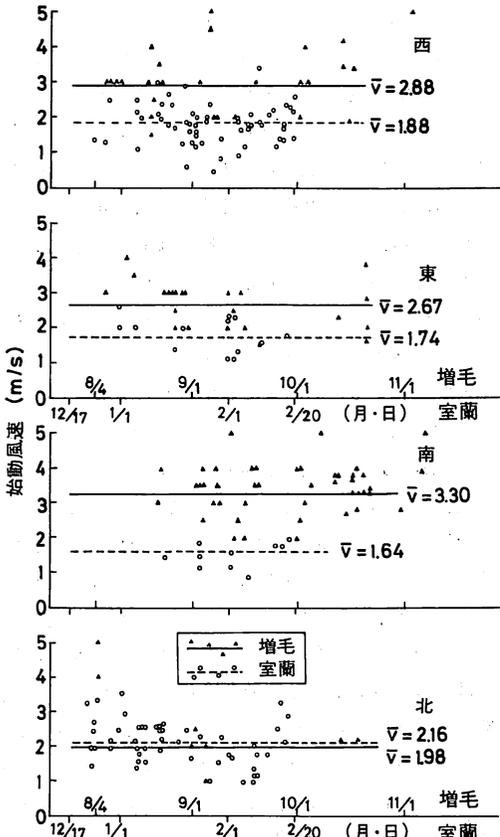


図-9 小型風車(室工大)および中型風車(増毛)の始動風速の一例

係数は15~16%を示し、本結果と類似である。図-8にはスウェーデンで作られ¹⁾た直径18m、翼形 NACA 643-618、2枚翼水平軸風車の発生電力と風速の関係を示す。直径が18m程度あれば風速約10m/sで60KW

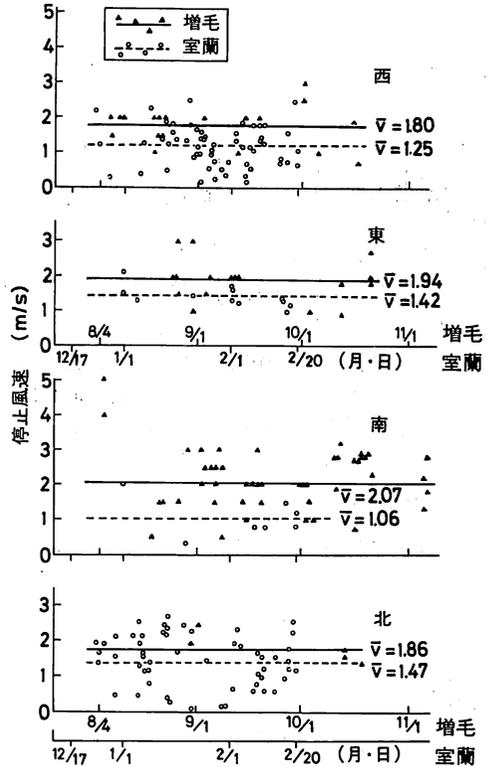


図-10 小型風車(室工大)および中型風車(増毛)の停止風速の一例

の電力が得られる。この風車の最高出力係数は約40%である。

図-9には小型(室工大)および中型(増毛)風車の始動時の風速を示す。図には各値の平均値を実線(増毛)および破線(室蘭)で記入した。小型風車の始動風速の平均値は2m/s前後であり、中型風車では3m/s前後になる。中型の始動風速は小型の場合より1m/sほど大きくなる。始動風速の大小は静止状態における翼の発生トルクと、羽根車と発電機を含めた回転系の慣性モーメントに関するが⁵⁾、一般に羽根車直径が大きくなり、発電機出力が大きくなると慣性モーメントも必然的に大きくなり、起動しにくくなる。風車設計においてはこの辺への配慮が重要になる。また、風車回転場の風の乱れ状態も始動には関係してくる。図-10には風車の停止風速を示す。始動風速に比べ停止風速は風車の慣性のため1m/sほど小さくなる。小型では約1.3m/s、中型では約2m/sで停止する。以上10分から30分間程度のおおまかな平均値を用いた場合の水平軸風車の出力特性を概観したが、自然風は10分あるいは30分間一定風速が得られることはまれであり、風速は数秒から数十秒間隔で複雑に変化するの

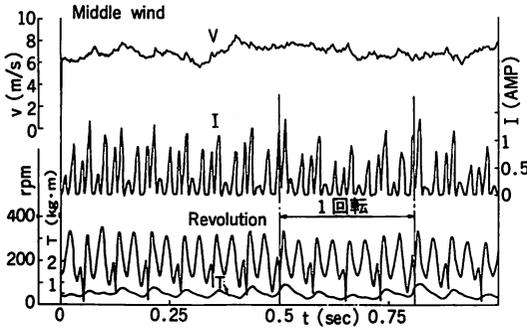


図-11 中程度の風速の場合、1/400秒間隔で1秒間サンプリングした場合の風速、発生電流、回転計からの発生パルス電圧およびトルクの変動値、三重大1号風車

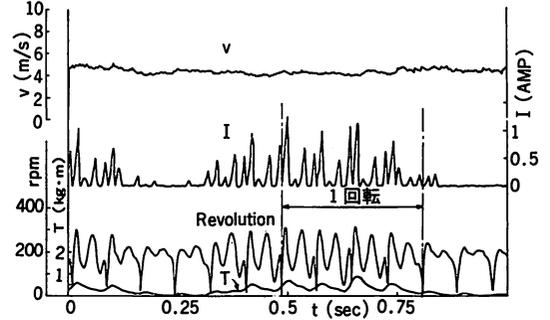


図-13 弱風の場合、1/400秒間隔で1秒間サンプリングした場合の風速、発生電流、回転計からの発生パルス電圧およびトルクの変動値、三重大1号風車

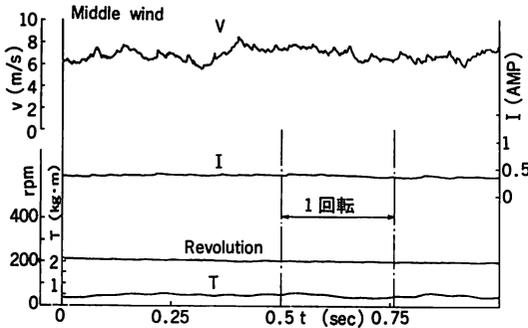


図-12 中程度の風速の場合、平均化処理を行った発生電流、回転数およびトルクの値、三重大1号風車

一般的である。つづいて、このような場合における水平軸風車の各種の出力特性を検討する。この問題の検討には精密な実験が必要になるので一般の市販風車では、装置が不十分で実験しがたい。そこで、三重大学1号風車の結果を用いることにする。図-11、図-13にはそれぞれ中程度の風速時とようやく発電ができる程度の弱風時の、風速、発生電流、回転数およびトルクの変動値を示す。サンプリングの時間間隔は1/400secで、1秒間の結果が記録されている。このように、サンプリング間隔を細かくすると各値の複雑な変動の様子がよくわかる。まず、回転数に注目する。回転数検出にはタコジェネレータを用いた。このタコジェネレータは4ポールなので4パルスで1回転ということになるが、実際のタコジェネからの出力は1パルスの形がおおよそ、3つのピークを持つ形になる。しかし、電圧が一度零になる点があるので、この点で一極の通過を判定できる。従って、4つの零点を数えて1回転と判定できる。次に電流の変動を検討する。発電機は4極の交流発電機であり、図は発電された電流を全波

整流した結果である。パルスの形は一定でないが、1極が1回転するごとに4パルス合計16パルスが発生する。発生電力はバッテリーにチャージされるため電圧はほぼ一定である。したがって、回転軸には発電によって、電流の変動と同一周期のトルク変動が生じると考えられる。次に図の一番下に示すトルク計による変動トルクを検討する。トルクも詳細にみれば複雑に変動するが、大きな変動としては1回転に4つのピークが見られる。この結果より、軸には上述の電流変動に対応する16パルスの微小変動と、それが重なって生じる1極分1パルス、4極分で4パルスのかなり値の大きいトルク変動が生じることが明らかになった。また、風速が変動するため風車に対する入力が増減し、トルク変動の山と谷の差は相当大きくなり0.5kg-mにも達する。図-13の弱風時には発電が間欠的に生じるため、電流、トルクの値は割合大きく変動する。さて、図-11、図-13では微小時間における風車軸に働く力の変動を考察したが、これらの結果から、風車には10Hzから50Hzに相当するかなり周波数の高い変動力の作用することが明らかになった。風車に働く力を検討する場合はこのような微小な変動を検討する必要があるが、風車の性能を議論する場合には、このような周波数の高い現象をそのまま扱ったのではかえって、生じる現象を考察しにくくなる。従って、これらの値をある程度平均化処理し、風車性能を検討することにする。回転数は、平滑回路を通し一定電圧値になおし、事前に別の回転計を用いて電圧と回転数の関係を求めておき、それに基づいて求める。トルクの値も平滑回路を通し平均化した値を読み取る。電流はRMS計(実効値計)により実効値を求める。図-11あるいは図-13の値に以上の平均化処理をほどこすと図-12および図-14のよう

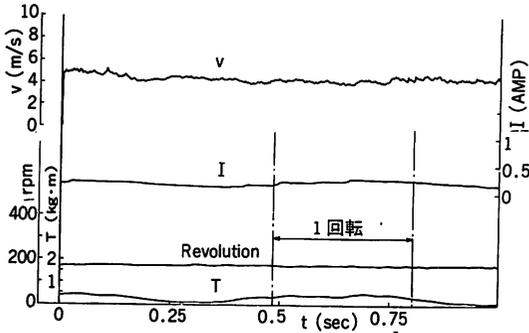


図-14 弱風の場合、平均化処理を行った発生電流、回転数およびトルク値、三重大1号風車

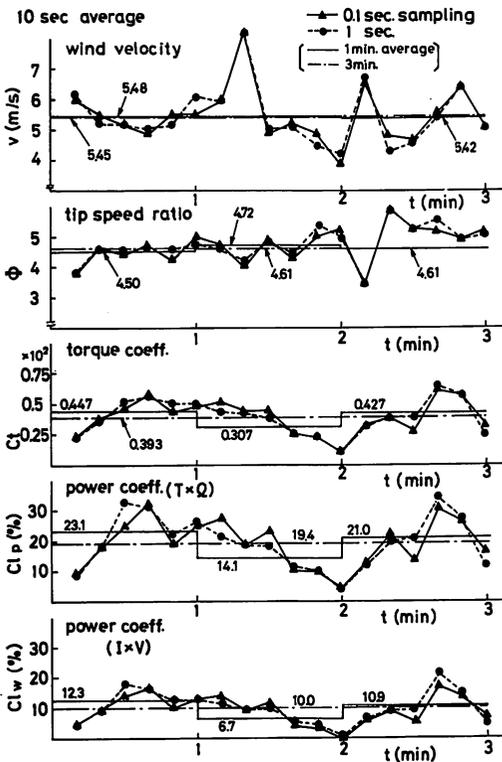


図-15 中程度の風速の場合、平均時間が10秒、1分および3分の風速、周速比、トルク係数、軸出力係数および発電効率の変化、三重大1号風車

になる。図-15、図-16には中風および弱風時について0.1秒あるいは1秒ごとにサンプリングし、その瞬時瞬時の周速比、トルク係数、軸出力係数、発電効率を示す。図には、0.1秒サンプリングの10秒間平均値を実線▲印で、1秒サンプリングの10秒間平均値を破線●印で示す。また、1分間および3分間平均値も記入してある。図-15の中風時の値に注目すると、風速の変動は1秒間隔の方が0.1秒間隔に比べやや大きくなるが、

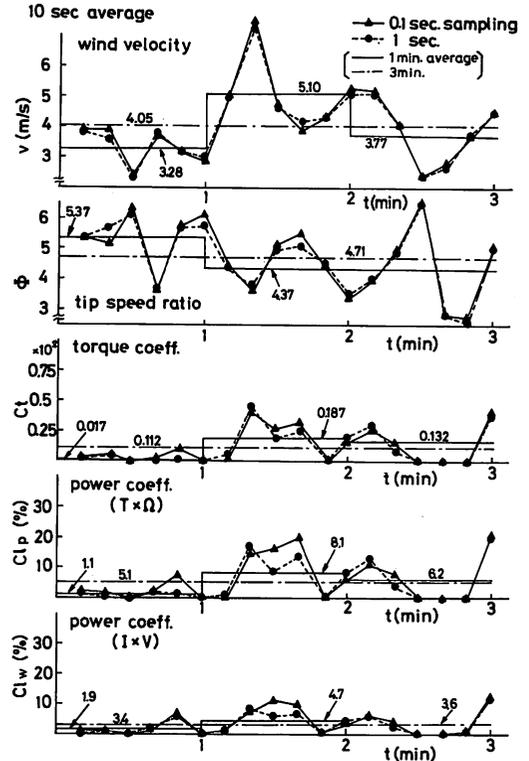


図-16 弱風の場合、平均時間が10秒、1分および3分の風速、周速比、トルク係数、軸出力係数および発電効率の変化、三重大1号風車

周速比、トルク係数を含めたその他の値では1秒間隔の値は0.1秒間隔の値を平均化した状態の値に近くなる。図の10秒平均の風速 v と軸出力 Cl_p の対応関係は悪く、1分間平均の両者の対応関係は良くなる。これは10秒平均では風車の持つ慣性力の影響が出るためである。従って、風車の性能を論ずる場合は1分間平均値の方が妥当であると考えられる。図-16の弱風の場合もほぼ同じような傾向を示す。以上の結果より、風車の羽根や回転軸にかかる力を測定する場合には10Hz~50Hzという変動力を求める必要があり、性能に関する諸量を求めるためには1秒間隔のサンプリングで1分間平均値を用いれば十分な精度が得られることが明らかになった。次に、風速の変動状態、風速変動とトルク変動の関係を検討する。図-17には熱線風速計によって測定した風速の自己相関係数を示す。各強さの風とも、サンプリング周波数が10Hz、50Hzではタイムラグが0.1秒以内で自己相関係数は0.9以上と高くなる。この結果より風速変動を考察する際でも、0.1秒程度のサンプリングタイムでよいのではないかと考えられる。図-18には風速とトルクの相互相関係数を示

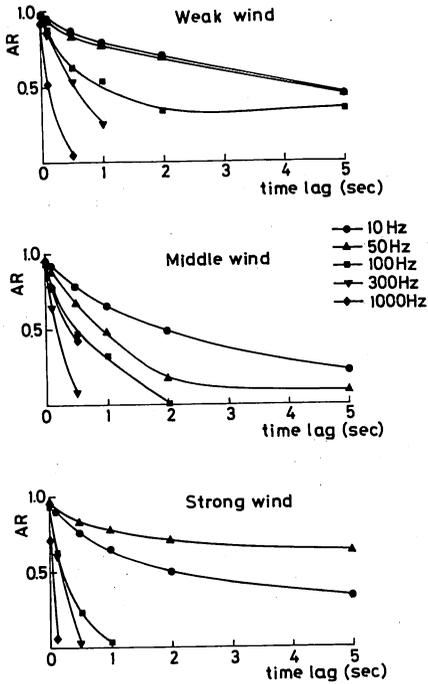


図-17 風速の自己相関係数

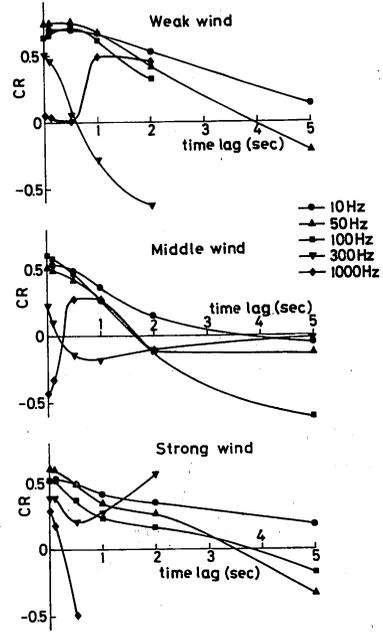


図-19 風車回転面の両端における風速の相互相関係数

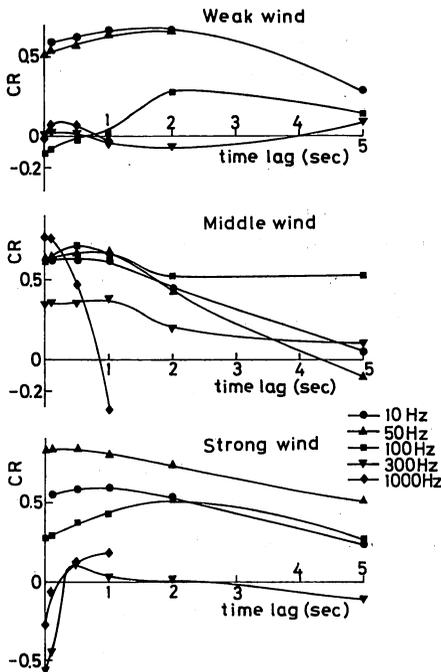


図-18 風速と風車発生トルクの相互相関係数

す。風速変動の周波数が高いのに対して、図-13、図-11から明らかなどおり、トルク変動の周波数は小さいのであまり速い周波数での相互相関係数を求めることは測定値に関係のない雑音を拾うことになりあまり意

味がない。10Hz, 50Hz では両者の変動にある程度の相関がみとめられる。相関の程度は弱風では 0.55~0.65, 強風では 0.8程度になる。定常的な発電を行う強風時のトルク変動は風速の変動に割合対応していると判断される。図-19には、風車回転面の両端からそれぞれ 1m程度ずれた位置に 2本の熱線風速計を設置し(間隔 4m), 両風速の相互相関係数を求めた。タイムラグ零, サンプリング周波数 50Hz の状態で弱風時の相互相関係数は 0.8, 中風で 0.6, 強風で 0.6 になり, 回転面の風速変動は相当大きいことがわかる。このような流れ状態では風車を構成する回転翼一枚一枚にそれぞれ異なった力が作用することになる。これらの力がどの程度になるか現在まだよく解明されておらず, 今後の研究がまたれている。

4. むすび

以上、3台の実物水平軸風車のフィールドテストの結果より、1.1日平均出力係数、2.風車の発生する変動力の実態、3.複雑に高周波数で変化する風車の各出力の変動値とその平均化処理方法、4.平均化処理した値より求めた瞬間出力係数値の求め方および10秒、1分間、3分間の平均値の違い、5.風車回転面の風速変動の状況、6.風車の始動風速および停止風速、等を具体的な数値を上げ説明してみた。これらの風車はエネ

ルギーをすべて発電という形で取り出しているが、発電される電力の質、その変動状況等も上記の結果より御理解いただけることと思う。

参 考 文 献

- 1) BHRA, 2nd International Symposium on Wind Energy Systems, (1978)
- 2) BHRA, 3rd International Symposium on Wind Energy

Systems, (1980)

- 3) 奥田教海；小型風車に関する実験的研究，第3報，機講論，No.790-10 (1979)，181～183
- 4) 清水幸丸，ほか4名；水平軸風車の出力特性に関する研究（風速，風向の変動と効率の関係），第11回ターボ機械講演論文集，(1982)，55～60
- 5) 清水幸丸，片山薫；水平軸風車の動特性に関する理論的考察（風速，風向が周期的に変動する場合），機講論，No.820-10 (1982)，125～127

話の泉

バイオマスの夢

—クローズドサイクルシステム—

自然界の動植物の食糧資源、エネルギー源としての利用は、これまで一通り実施されているが、それらをさらに手を換え、品を変えてより幅広くより高度に利用することによって開発する余裕がないとはいえない。否むしろ見方によれば大幅に放任されているものもあるといえる部門も多いだろう。

食糧資源としては魚介類を中心とした海産物、農場における農産物、畜産業がそれらの中心となっている。これらの状況をさらに掘下げてみれば海洋牧場、農産工場としてのイメージが浮んで来る。すなわち海洋に現在生存する魚介類以外に、積極的に余分の人工を加えることによって大量の飼育、養殖の可能性（例えば鯨の養殖）、または農地における従来の動植物以外の生物（例えば牛、豚のプロイラ式養殖の場として見方をかえれば別のアイデアも浮んで来るのではあるまいか。廃水中の問題となっている富栄養分をプランクトンを媒介として積極的に魚介類の飼料に利用できないだろうか。

戦前の支那においては、黄河或は揚子江では奥地からの材木を筏を組んで下流に輸送するには数ヶ月の期間がかかるが、運搬人は家族とともに生活を筏の上で送って行くので、その間の生活用品は殆ど自給が原則となっており、小屋は勿論のこと便所、菜園から豚、鶏など最も効果的に循環しつつ利用している。数ヶ月の主食を積込んで置けば、人糞はそのまま豚の飼料に、豚の糞は鶏の餌に、鶏の糞は畑の肥料に、魚は筏から毎日の副食に、鶏の卵はそのまま食糧に、卵を産まなくなれば直接肉として食用に供せられる。豚も生長後はそのまま食用となる。日用品その他のものは途中の河岸の町で購入し、或は

生長した鶏、豚などを売付け或は他の食品と交換することもできる。

終戦後外蒙古に抑留中（便所が無い）野糞の後始末は豚、鶏が待機しており、そのまま処分してくれたことを今でも思い出している。人間の腸の通過物を再び豚、鶏の腸の中で再処理することになり、有効に完全処理されることになる。

最近の文明社会においては、これらの生活環境がそれぞれ独立分離しており、クローズドサイクルから大幅に逸脱し、それぞれの時点でその解決のための公共処理に困っている現状である。生活様式、生活環境の考えを少し変えることによって或は文化生活からの逆行とみられるかも知れないが、案外有効に利用される部門が開かれるのではあるまいか。厨芥物利用による自家菜園、プランター栽培など趣味の範囲から実用化への時期が来ているのではあるまいか。我が家ではすでに十数年大型ゴミ、不燃ゴミ以外は排出した記憶はない程長期間実施している。

最近の情報によれば牧草、干草など家畜用飼料の代用として製材所の鋸屑、パルプ工場の木皮、さらにリグニン、ペントザンなど最少限の加工処理によって飼料化されているらしい。

当座の問題として特に強調したいことは大量の上水を使用する都市部の浄化装置で、何等かの方法によって上水を使用しない浄化法（例えばコンポスト（堆肥）化）も技術的には光合成バクテリアその他のバクテリアの作用によって殆ど完成に近付いているらしい。

(F)