

# 風力利用の話

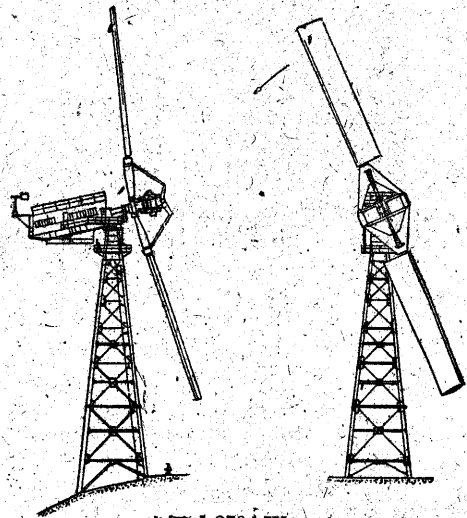
守 屋 富 次 郎

## 1. 外国の 2, 3 の例

風力利用に関しては極めて古い歴史を有し、今それをたどる意志はないが、比較的近代的东西のものについてまず若干ふれて見たいと思う。近代空気力学の香を持つにいたつたのは第1次世界戦争の末期以来のことで、まず第一に注目を引いたものはいわゆる Magnus 効果を利用したものすなわち風の中で圓筒をその軸の周りに回転するとき風に直角の方向に力を生ずることを利用したもので、Flettner, Mádaras 等の名が知られている。ことに Flettner の Baden-Baden 號がこの推進装置で 1925 に太西洋を横断したことは有名な話である。Mádaras は同じ方法を車輛に取付け推進される際に車輛につけた發電機によつて發電しようという風力發電所を提案し、1933 に Burlington (New Jersey) において直徑 28', 高さ 90' の圓筒について實驗を行つた。Magnus 効果というのは  $\rho VKl$  ( $\rho$  は空氣の密度,  $V$  は風速,  $K$  は循環,  $l$  は圓筒の長さ) なる推力を生ずることを意味するのであつて、Flettner は圓筒の回転を大きくして  $K$  を充分大きくし、帆よりも小さい装置で必要な推力を出そうとしたところがねらいのようであろうが、Mádaras の装置にいたつては誰が見ても機械的、電氣的の損失が極めて大きいことが想像されるが果して Mádaras も實驗の結果他の發電装置に打ち勝ちできないことを認めた。

これとは別個の途をたどつたものに Savonius の風車がある。見かけは若干上記のものと似ているが、これは圓筒殻を縦に二つに切つてそれぞれの中心線を平行にややずらせたもので、一種の風車である。効率の點から見ると可成り高い(約 31%) ことが實證されているが、同じ出力のものをプロペラ型風車と比較すると数十倍の重さになる。

風力を利用することに對してこれ等のものはむしろ好奇的の例であつて、やはり通常のプロペラ型風車が最も簡單で効率も最も高くできる。この型式の風車はすでに紀元前から存在していたとのことであるが航空學の發達につれて風車にも近代的の息を吹きかけたのは Joukowski, Drzewiecki, Krassvosky, Sabinin, Prandtl, Betz, Constantin, Eiffel, Ackeret 等であつて第1次世界戦争を界にして風車に大きい變革がきた。近代的風車の中で最初に注目されるのはソ聯の Yalta の近くで黒海を見



米國 1,250 kW 風車

下す斷崖の上に 1931 年 5 月竣工した 100 kW の風車であろう。直徑 100' で發電機、ピッチ變更裝置等は約 100' の塔上のゴンドルの中におさめられ、風向の變化に對しては 1.1 kW の補助電動機によつて風車の向きを變えるようになってゐる。翼は 3 枚で薄板をはつたもので、風速 11 米/秒のとき 30 回転/分を出し、このとき最大効率 24% を示す。これは設計風速を大きく見積り過ぎてゐるようで、平均一番風速の高い 3 月でも月平均 48.4 kW の出力で、風の弱い 8 月では平均 18 kW しかでない。一年間に平均 32 kW となり總出力 279,000 kWh であつたといわれる。ソ聯ではこの風車を 2 年間試験し、更に設計を改良して 1933 に 100 kW 風車 2 臺をその附近に建設した。そしてこれらの風車は第 2 次 5 ヶ年計畫の中の 5,000 kW 風車のための試験用のものであるといわれていたが、5,000 kW 風車に關する報告は筆者もまだ聞いたこともない。100 kW 風車の發電は誘導發電機により、その電力は Sevastopol にある火力發電所の送電線につながれているとのことである。7 分間の出力が +20% から -15% の間に變動すると書いてあるが、設計風速以上でのことか以下でのが明かでないが、もし設計風速以上での話であるとするときピッチ變更裝置がよくないといわねばならぬ。且つ最大効率 24% もよい方ではない。Betz の理論によれば理想風車の効率は 53.2% であるから今少し高い効率にはできるはずである。

次に注目に値する例は米國 Vermont 州の Grandpa's Knob 山の頂上に建設された 1,250 kW の Smith-Putnam 風車である。(カット参照) 妙な名前前の山だが土地の人の俗稱をそのまま用いたので地圖の上にはこんな名前はないはずである。直徑 174'9" の 2 枚翼風車で 28.7 回転/分を正規回転としている。ステンレス鋼の偉大な翼が太陽の光をまばゆく反射して回転しはじめた

のは 1941 年 8 月で、10 月 19 日にはこの電力を一般送電線につないだ。同調調整は極めて圓滑に行つたと報ぜられている。それから約一年半は無事に運轉していたが、1943 年 2 月主軸受（直径 24"）の一つが破損した。その原因は今日もなお不明とされているが、とにかくそれを取換えて再運轉をはじめたのが 1945 年 3 月 3 日であつた。しかるにその月の 26 日夜半過ぎ一枚の翼が根本に近い部分から折れて、8 ton の翼が 750' 先の地面につきささつた。この事故の原因については詳細な調査が行われたが結局それまでの 150 万回の回轉による疲労によるということであつた。設計面でもこの點に關しては若干注意が缺けていたのも事實で、折れた箇所は箱型桁の断面形が比較的急に變化しているところで、しかもそのすぐ近くに翼の隔壁が銲接でつけられていた次第で悪い條件が重なつていたわけである。この會社としてはこれ以上の財政的負擔に堪えられなくて、これで挫折したが、米國では更に大きい計畫がたてられている。

## 2. 風車建設に適當地點

太陽熱が原因となつて地球を包む大氣は大きな循環運動をする。この循環は陸地の少い部分では可成り定常的で、例えば南極を中心とした循環は一年を通じて一定方向の強い風となつてゐる。南米の南端に近い部分是一年太平洋側から大西洋側に向つて強い風が吹いてゐるから風力利用に適當な土地であらう。大きい陸地の部分ではいちじるしくその影響をうけて、この循環が亂されて局地的な風となる。日本は背後に大陸を持つてゐる關係でその影響が大きく夏と冬とは風向がほぼ逆となり、又局地的の差異がはげしい。

風力利用のためにはもちろん強い風が必要であるが、それが一年を通じてできるだけ定常的であることが望ましい。風車は一般に自動制御によつて一定回轉速度を保つようにされているので、設計風速以上の風ではその中の一定エネルギーのみを吸収して餘分のエネルギーは捨てねばならぬし、設計風速以下では設計回轉を得ることができず利用價值はいちじるしく減少する。だから一年を通じて一定の風速であることが理想的で、一年の合計エネルギーが大きいことが必ずしも適當でないことになる。日本では風速の變動が比較的大きいが岬や島ではいい状態の地點が澤山あり、又山地にも適當な地點が數多くある。

元來空氣は重力の作用をうけて高度によつて密度を異にする。このことは又大氣の運動が一樣密度の流體運動と異なることを意味するのであつて、例えば一つの山に風が當る場合、一樣密度の流體であれば山頂附近で一番風速が強いはずであるが、大氣の場合は必ずしもそうはならないで、かえつて側面の方が強いことが多い。これは大氣は上下の方向に對しては安定がよくて空氣は山を越すよりは側面を速回りして行く方が樂であるからで、山

の屏風に切れ目のある箇所が最も風の強いことは上のことから明かである。

筆者等が御前崎で實測した場合もこのことがよく見られた。御前崎の測候所は岬から約 100 米位奥へ入つた岡の頂上にたてられている。この測候所の屋上の風速と岬の先端の燈臺のある地點との同時觀測を行うと燈臺の方が 70% も強いことが認められた。佐渡の相川測候所と近くの春日崎とを比較した場合も全く同様であつた。

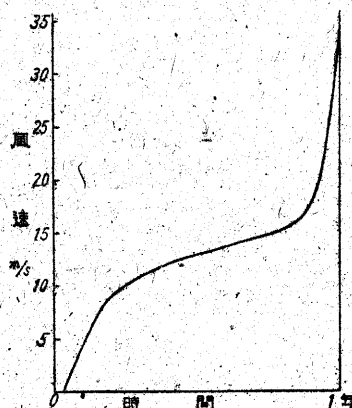
米國で前述の風車を建設する前に大規模の調査が行われたが、その中に Kármán の發案で地形模型を作つて風洞實驗によつて風速分布を求めたが、それと實測と比較するとひどく違つてゐるのでこの風洞實驗は失敗に終つたと白狀しているが、この失敗の原因は上述の理由に基くものであつて、實測の場合一樣密度の流れから推算して山頂附近の風速として山のために増速される量を豫定しかかつたが、この豫定の増速量がほとんど見られなかつたことから明かである。

このように風速は局地的に地形の影響が大きいから、風車を建設するに際しては、この點充分考慮すべきである。

次に風速について大切なことは一般に風は地表の影響をうけて、地表に近づくにしたがつて風速が減少することである。この減速された空氣層の厚さは一般に海岸に近いところは薄く、海岸から遠ざかるにしたがつて厚くなる。川口の鐵塔での觀測では地表から約 10 米附近までは風速は高さとともに比較的急に増し、それ以上の高さではゆつくり増すことが認められたに對し、銚子の海岸（舊測候所敷地内）の鐵塔では地表から 2~3 米の間に急に増速してそれから 30 米まではほとんど一樣の風速であることを實測した。

## 3. 風力利用の經濟學

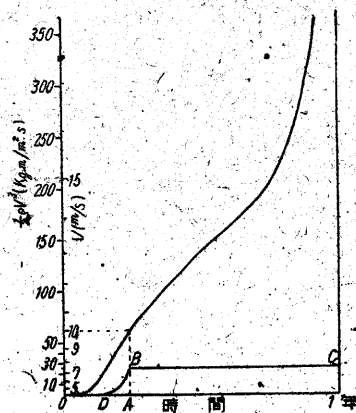
風力を利用する場合風の有するエネルギーが如何に使われるかをまず考えよう。その地點の一年間の風速の記錄を整理して各風速の風が吹いた合計時間を求め、横軸



第1圖 一年間の風況曲線

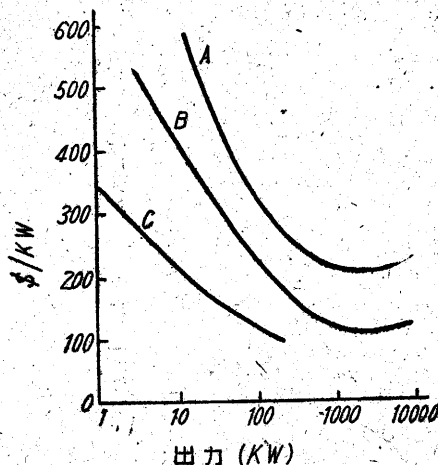
に時間を、縦軸に風速をとつて風速の大きさの順に並べると第1圖のようになる。だから横軸の合計長さは一年を表わす。更に縦座標を 3 乗して  $\rho/2$  を掛けるときすなわち  $\frac{1}{2}\rho v^3$  をつくるときは、これは單位時間に單位面積を通過する風のエネルギー

である。したがって  $\frac{1}{2}\rho V^3$  を縦座標にとつて横軸は上と同様な時間をとるときはこの曲線と横軸との間の面積は単位面積を一年間に通過する風のエネルギーである。設計風速を  $V_0$  とするとこの風速のとき利用し得るエネルギーは  $\frac{1}{2}\rho V_0^3 \eta$  ( $\eta$  は風車の効率) であつて、第2圖に於て AB で表わすとする。



第2圖 エネルギー曲線

これよりも大きい風速のときは回転数を一定にして常に AB と等しいエネルギーだけを利用するのであるから DBC によつて描かれる面積だけが一年間に利用されるエネルギーである。だからこの面積と全面積との比が一年間の効率を表わす。この効率は設計風速を大きくとることによつて或程度まで大きくすることができるが、風車ではこの効率は意味の少ないことで、大きいエネルギーを得ようとすれば大きい風車にするか幾個も風車をならべてもよいのであつて、この點は水力の場合と非常に異なる。風車で重要なことは、目的によつて幾分の相違はあるが、風車の停止時間をできるだけ少なくすることである。これには設計風速を小さくするのが対策であるが、設計風速を小さくする程同じ出力を得るための風車が大きくなつて kW 當りの建設費が大きくなり、経済的に成り立たなくなる。発電を目的にするような場合であつたら 5 米/秒以下の風速は意味のないことであろう。



第3圖 風車建設費用

- A: 一年に6基を作る場合  
B: 一年に100基を作る場合  
C: 一年に1萬基を作る場合

次に問題になるのは一個の風車をどの程度の大きさにするのが最も経済的であるかということである。第3回は 1949 に米國で計算されたもので、今日の日本と事情を異にしている點もあろうが、傾向はこれで大體推知できるであろう。設計風速のとり方で、絶対値に非常な相違を生ずるがこの圖は 7.8 m/秒で計算されたものである。これによると一基 1,500 kW 程度のものが最も経済的であることになる。こゝろみに 1,500 kW 風車の建設に要する費用の主な内澤を見ると

	\$	\$/kW	#	#/kW	\$/#
調査設計	10,500.00	7.00			
製作	210,597.50	140.40	704,459.00	465.16	0.314
(豫備費)	22,109.75	14.74			
組立	39,514.00	26.34	477,000.00	26.67	0.0447
(豫備費)	26,061.15	17.37			
合計	286,672.65	191.11	744,950.00	496.63	0.385
送電関係	18,600.00	12.40	15,000.00	10.00	0.240
(豫備費)	27,921.15	18.61			
總計	307,132.65	204.75	759,950.00	506.63	0.404

である。ここには重量をポンドで表わした値とする。重量の中の基礎工事は金屬部分の重量のみをとつてある。

#### 4. 風力利用の將來

文化の進歩とともに各人當りの動力使用量は増加することは當然であるが、その動力源として將來何に最もたより得るであろうか。

油—世界の產油國として桁外れの米國でさえ、最近輸入せねばならぬ状態だとのことである。今日世界の油の埋藏量は熱量に換算すれば地球が太陽からうける一日の熱量を少し越す位のものであるとされているが、その使用量は増加する一方であるから、いつかは枯渇するときがくるであろう。日本では大部分を輸入に仰いでいるから枯渇の前に焦眉の問題として考えねばならぬ。

石炭—日本では油程に差迫つてはいないが、世界的には油と同じ運命をたどりつつある。

水力—世界の水は太陽の照射が續くかぎりには常々一定のポテンシャルエネルギーが與えられる。世界の水力は  $5 \times 10^8$  kW 位で、この中すでに 10% は開發されている。残の未開發水力の中どれだけが経済的に採算がとれるかが問題であるが、とに角水力は今後大切な動力源である。

太陽熱—あらゆる動力源の根源であるが、直接太陽熱を利用することは熱帯の砂漠地はいざ知らず、少くも日本では極めて小規模の方法をのぞいて問題にすることはできないであろう。

地下熱—これは更に限られた量であつて、日本では比較的良好的な條件の下におかれているといつても、將來頼りになる量ではない。

原子エネルギー—原動機に利用されるようになれば恐るべき革命であるが、筆者には豫見できない。

風力—日本の風力はどの位あるかという質問を時々やるが、これは水力の場合といちじるしく異つてゐるから簡単に返事しがたい。すなわち高層の風力は利用できないが、どれだけの高さ以上が利用できないという界が明瞭でないのであつて、大規模な風車を建設すれば利用範囲が擴がることになる。このような次第で利用風力を計算することがむずかしい。大氣全體のパワーは  $3 \times 10^{17} \text{ kW}$  と見なされる。この中で利用できるのは高々  $2 \times 10^{10} \text{ kW}$  であろう。すなわち世界の全水力よりもはるかに大きいことは未利用動力源として充分着目に値するはずである。

それが意外に利用されていないのは、第一に風速に變動があつて、ことに無風又は速度の小さい時間があるこ

(25頁より續く)

に示すような要目を持つ発電設備が三菱長崎造船所で作られ昭和 25 年夏発電所の建設が完了した模様である。

第 1 表 白龍温泉地熱発電所要目

# 1. 原動機

型 式	2 段減速衝動タービン
出 力	30 kW
汽 壓	2 kg/cm <sup>2</sup> abs (飽和)
蒸気消費量	31.8 kg/kWh
毎分回転數	タービン 9690, 發電機 750

# 2. 復水器

型 式	堅型對向流噴射型
真 空 度	600 mmHg
冷却水量	14~16 ton/h

# 3. 発電所出力

復水ポンプ及び封水型回轉眞空ポンプ驅動に要する動力約 6 kW はタービン出力 30 kW の中から供給されるから發電所正味出力は 24 kW となる。

この試験発電所の全景、噴汽孔の噴汽状況、發電室内部の状況は口繪に示す通りである。噴汽孔は昨年改修工事を行い、現在 120°C の蒸気が噴出している。密閉すれば汽壓は 3.6 kg/cm<sup>2</sup>g, 汽温は 140°C まで上昇する。發電關係の設備が豫定通りの成績を示したという報告はまだ聞いていないが、おそらく進行中のことと思う。

工業技術廳におけるこの研究とは別に株式會社利根ボーリング社長鹽田岩治氏は終戦後間もなく伊豆半島湯之澤と宮城縣鳴子温泉附近中山平において主としてボーリング作業の研究を行つていたが、昭和 23 年 12 月湯之澤において、深さ 380 m の第 4 號 A 井の噴汽を利用してタービン發電を開始した。出力は 3~8 kW, この電力を利用して深さ 600 m を目標に第 4 號 B 井の掘鑿を行つてゐる。この發電所内部の状況は、口繪の寫眞に示してある。

一方中山平における鑿井はすでに昭和 24 年に大約 50

とによる。しかしこの缺點は水力等と併用することによつてのぞくことができる。利用の目的によつては風車の停止する時間があつても差支えない場合もある。

第二は水に比して空氣の密度が小さいため水力タービンと比較すると風車が非常に膨大なものとなるからしたがつて建設費も大きくなることが想像される。しかし第 3 圖に見るように或程度大規模のものにすれば他の發電方法にくらべて決して高いものではない。

水力の場合には大ダムを建設することによつてとかくいろいろの問題を起すが風力の場合には他の産業に影響をおよぼすことはほとんどないであろう。

日本においては多期の温水期に最も風が豊富であることは將來兩者併用に妙味をだすことができるであろう。

本文に引用した資料の中 P. C. Putnam: Power from the Wind に負うものが多いことを追記しておく。

本に達し、蒸汽のみを噴出するものも相當數成功している模様であることは同じく口繪の寫眞によつて知ることができる。この實驗場にも、自家發電の計畫がたてられていることは豫て聞いていたが、最近 20 kW の交流發電が開始されるというが、伊豆實驗場の増設であるか、中山平のものであるか私はまだ確かめていない。

昨年九州配電株式會社が、大分縣下に 3,000 kW 程度の地熱發電を計畫中と聞いているが、おそらくまだ調査進行中という段階であろうと思う。

イタリアでは 50 年の歴史を持つてゐるが、後半の 25 年間に着實な生長を示して、現在では有力な地熱發電所を持つに至つたことはすでに述べた通りである。これに反してわが國では、最初の試験以來 25 年、ほとんど足踏の状態である。當時 Conti 公爵の絶大な期待があつたにもかかわらず、現状はこの期待におよばないこと遠い。これは何故か。わが國にはまだ毎時數噸という程度の噴汽井しかつられていない。これでは大規模な發電はとてもできないが、イタリアでははじめ礫酸製造という本業があり、その副業として噴汽井の開発を行うことができた。また石炭石油等の地下燃料資源が皆無に近く地熱開發の緊要度ではるかにわが國以上であつたろう。わが國では地熱地點が温泉事業と競合することが多く、そのおそれのないところは、地理的にも不便であり、豫期通りの噴汽が得られないときは全然損失となるため、計畫に危険性が多い。わが國の地熱發電が企業となるまでにはまだ相當の年數を要するであろうが、最近の試験が漸く軌道に乗つてきたことを考えるならば、いつかその苦心が實を結ぶ時がくることは間違いない。

終りに、報告を引用させて頂きつた後藤清太郎、山田太三郎、西脇一郎の 3 氏、ならびに口繪寫を貸與して下さつた工業技術廳、株式會社利根ボーリングに厚く謝意を表する。