

風力エネルギーに関する研究

(第2報 水平軸風車の穂高岳山荘における
実用実験及び風車プロペラの設計)

鳥 居 亮 ・ 榊 原 芳 夫
今 田 英 雄* ・ 神 憲 明*

The Study on the Wind Energy
(The Second Report on the Practical Tests
of the Horizontal Axis Windmills
at Hutte Hodakadake-
Sanso and Design
of the Windmill Propellers)

Akira TORII, Yoshio SAKAKIBARA, Hideo IMADA
and Noriaki JIN

Abstract

1. The wind power condition from May to October in 1982 at Hutte Hodakadake-Sanso was investigated and it seemed difficult to us that windmills would get sufficient wind power from July to August.

2. The propellers of new style for the horizontal axis windmill were designed and manufactured. The practical tests were conducted for the performance of new design propellers. The results were as follows.

(1) The propeller section with some torsional angle showed better aerodynamic performance than that with no torsional angle.

(2) Power of our new design propellers was about 2.5 times higher than that of the original propellers.

1. ま え が き

風力エネルギーに関する研究として第1次(54年度), 第2次(55年度), 第3次(56年度)において水平軸風車プロペラの基礎研究を行った¹⁾。

第4次(57年度), 第5次(58年度)は風力エネルギー応用研究の一環として水平軸風車の実用研究を, 北アルプス穂高連峰にある穂高岳山荘(2996 m)にて行った。本報告はこの2年度にわたる実用実験研究と第5次(58年度)研究に使用した風車プロペラの設計に関するものである。

* 穂高岳山荘
昭和58年10月5日受理

2. 記号及び単位

C_L : 揚力係数	
C_D : 抗力係数	
dr : 任意の半径 r における微小部分の 半径方向の長さ	m, mm
dL : 微小部分の揚力	N
dD : 微小部分の抗力	N
dF : 微小部分の風車軸方向の抗力	N
dT : 微小部分の風車軸回りのトルク	Nm
a : 軸方向の気流速度の変化率	
a' : 回転方向の気流速度の変化率	
c : プロペラの断面弦長	m, mm

K : 揚抗比 C_L/C_D	
n : プロペラ回転数	rpm
P : 風車出力	w
R : プロペラ半径	m, mm
r : プロペラの任意半径	m, mm
V : 気流速度	m/s
V_r : 気流合成速度	m/s
b : プロペラ枚数	
i : ねじり角	deg
α : 迎角	deg
θ : 空気流入角	deg
η : 風車効率	
ρ : 空気密度	kg/m ³
ω : プロペラ回転角速度	rad/s
σ : $bc/2\pi r$	
X : 先端速度比, $\omega R/V$	
x : 任意断面の速度比, $\omega r/V$	

3. 穂高岳山荘地区の風況

北アルプス穂高連峰の白出のコル（標高 2996 m）に穂高岳山荘（収容人員 350 名）がある。山荘の南には本邦第 3 の高峰奥穂高岳（3190 m）、北には涸沢岳（3103 m）があるので、山荘は東西の風の通路になっており、飛弾の白出側から信州の涸沢側へ吹く西風が 90% をしめている。風力発電装置の設置してある山荘の西面は、V 字形の白出沢が眼下に展開し、約 30° の傾斜面に沿って上昇する風は、次第に絞られて強い西風となる。風向はほぼ一定で、風車にとっては理想的な場所である。

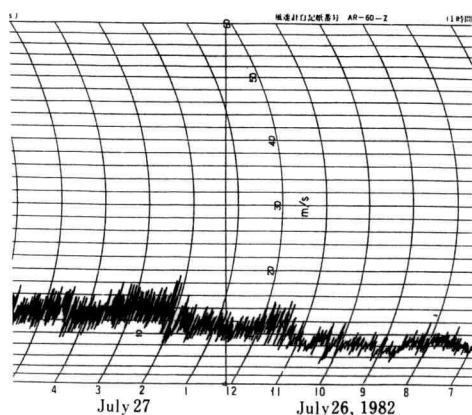


Fig. 3.1 Record of anemometer in calm

風速計の記録を図 3.1, 3.2 に示す。このように自然風は常に変化しているのが分る。(これより以後の風速は振巾の中心をとる) 図 3.1 は良い風が得られる平常の状態である。台風時には東風が強く吹くが、山荘の上を通過して風車には殆ど当たらない。台風の後には西風の強い吹き返しがあって風速は激しく変化し、図 3.2 のように昭和 57 年 8 月 2 日には瞬間風速 50 m/s に達している。図 3.3 は山荘の営業期間である 5~10 月(57 年)の平均風速を示す。5 月には結氷することもあり風も平均 8.5 m/s で強く電力は十分である。登山者の多い 8 月は無風の日があり、平均風速 6.5 m/s で電力は不足である。9 月になるとまた風が強くなり平均風速 8 m/s で電力はあまってくる。10 月も同様でやがて山小屋は閉鎖される。5 月から 10 月までの平均風速は約 7 m/s で、毎年このような状態がつづいている。

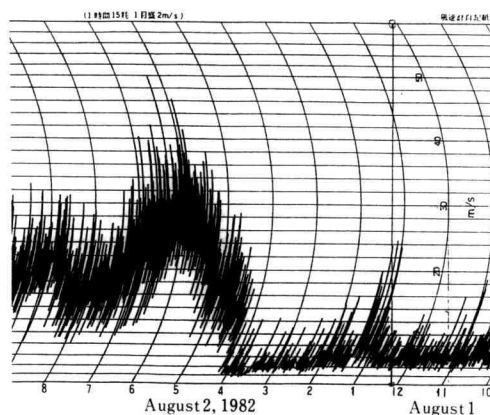


Fig. 3.2 Record of anemometer in storm

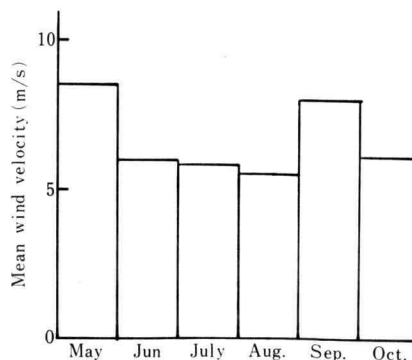


Fig. 3.3 Mean wind velocity in each month (S. 57)

4. 穂高岳山荘の風車発電装置

山荘では以前より風力エネルギーに着目しており、昭和36, 37年に300Wの山田式風車発電装置を各1台ずつ設置したが、保守整備に問題があり、またヘリによる物資輸送が始まり、発電発電機の燃料が以前より容易に補給できるようになって一時中断した。

昭和52年再度風車発電装置を設置し、種々のアイデアと試行錯誤により、有効に使いこなすのに3年余りの歳月を要している。写真4.1に示すように山荘には次の4台の風車発電装置が設置されている。

(1) 12V, 200W, DC, プロペラ直径1.8m (USA, Dyna Technology inc., Wincharger) 昭和52年設置
2台

(2) 24V, 1.2KW, AC, プロペラ直径3m (Swt. Elektro GmbH Winterthur, WV-15G) 昭和54年設置
1台

(3) 12V, 300W, DC, プロペラ直径1.8m (国産中古) 昭和58年設置
1台

発電した電気は14個、最大容量2160Ahの蓄電池に貯められ、蛍光灯、ステレオ、テレビ、電動ミシン、ボイラー操作電源、掃除器、洗濯機などの電化製品に使用されている。



Phot. 4.1 The windmills of Hutte Hodakadake-Sanso

Table 5.1 Classification of the propellers for the Practical tests.

Order of the studys	Type	Number of blade	Diameter (m)	Maximum chord (mm)	Profile of section	Torsional angle
Fourth (S. 57)	A2E' *	2	3.0	150	Original	Without
	A2S **	2	3.0	150	Clark Y	Without
	A2T **	2	3.0	150	Clark Y	With
	D2T	2	3.0	150	NACA 23012	With
	W2S	2	1.8	89	Original	Without
Fifth (S. 58)	E2T	2	3.0	150	NACA 23012	With
	E2W* 230	2	2.0	110	NACA 23012	With
	E2W* 126	2	2.0	110	WORTMAN F X 126	With

* E (E of A2E') : Electro, W (W of E2W) : Wincharger

** S : straight, T : torsion

5. 研究に使用したプロペラ

第4次(57年度), 第5次(58年度)の研究に使用したプロペラを表5.1及び図5.1に示す。第4次(57年度)では直径3mが4組及び直径1.8mが1組である。

A2E'及びW2Sはオリジナルプロペラであり, 半径方向の各断面は直線的に並べてあるので, ねじり角はない。ここにA2E'とは国内メーカーにより複製されたものである。A2S¹⁾, A2T¹⁾, D2Tの3組は本学にて設計, 製作した。直径, プロペラの枚数はオリジナルと同一にし, A2Sはねじり角はなく, A2Tは翼素理論¹⁾により, D2Tは単純翼素理論¹⁾により断面のねじり角を計算した。

第5次(58年度)のE2TはElektro風車に使用す

る。E2W230とE2W126はWincharger風車に使用するが, パワーアップのためW2Sよりも形状を大きくしてある。以上8組のプロペラはすべてコーニング角は0°である。

6. プロペラの設計

風車プロペラの設計では与えられた条件のもとに最適形状を決める空力検討と, これを満たす構造強度の検討を行うが, 本研究に使用したプロペラは直径3m, 2mの小型風車用であり, 暴風雨以外の通常の使用では既に実用性の実績があるので, 今回は構造強度に関

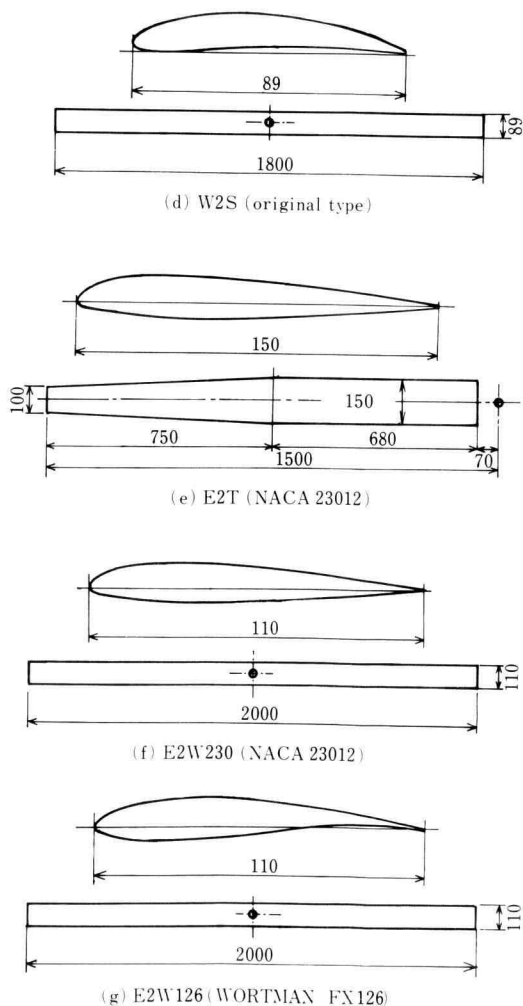
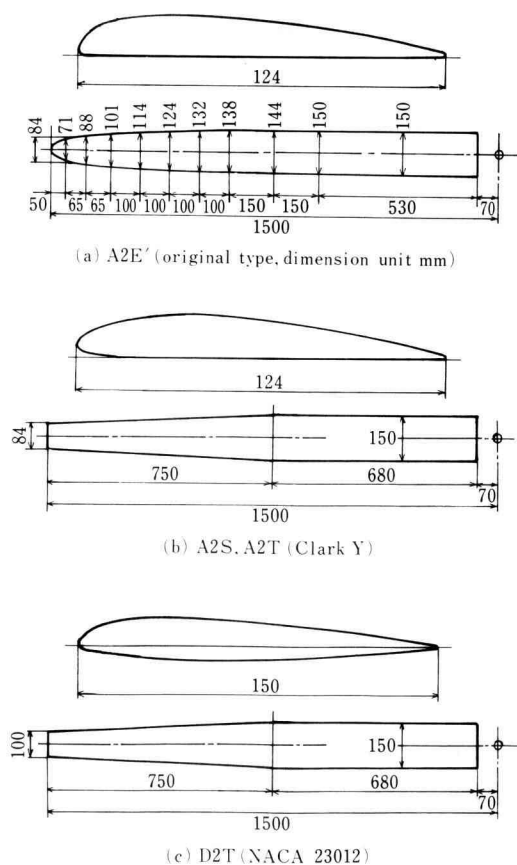


Fig. 5.1 Sectional profile and planform of the blades

する検討には触れなかった。

6.1 プロペラの設計目標

表 6.1 にプロペラの設計目標を示す。風速 8 m/s は穂高岳山荘に設置した自記風速計の記録より風の吹いている時の風速として決定し、また回転数は第 4 次研究の資料を基にして、さらに 6% の上昇を見込んだものである。プロペラ断面の空力特性については NACA 資料²⁾ による方法もあるが、本研究のプロペラは手作りで製作するので、本学の風洞実験で得た特性の方が近いものとしこれを用いた。

6.2 プロペラの空力設計

最近、風車が多数設立され風車効率を向上するためプロペラに関する研究が行われ、形状を決める空力設計に関する論文も多く発表されている³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾。

第 5 次（58 年度）の研究では Glauert の方法³⁾、Glauert の方法に翼素の空力特性を加えた別法及び Griffiths による翼断面抗力を考慮した方法⁴⁾の 3 方法について計算を行い、これらに第 4 次（57 年度）の実験結果を加えて検討した。次に各方法について述べる。

6.2.1 Glauert の方法³⁾

速度 V の風がプロペラ回転面を通過する時 Va だけ減速され、また角速度 ω で回転しているプロペラは近傍の後流に $\omega a'$ の角速度を与える。このようにプロペラ回転面で軸方向と回転方向の流れの変化率を考えると、プロペラの断面の流れ線図は図 6.1 のようになる。Glauert は次の式 (6.1), (6.2) のように回転面における円環部 (r と $r+dr$ にはさまれた部分, $2\pi r dr$) の風車軸方向の抗力とトルクの式を作り、これを基礎にして与えられた速度比で最大パワーを得る条件により巧に変化率 a, a' を得ている。

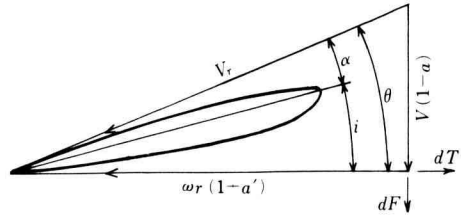


Fig. 6.1 Flow diagram of blade element (Method of Glauert)

$$dF = 4\pi r \rho V^2 (1-a) a dr \quad (6.1)$$

$$dT = 4\pi r^3 \rho V \omega (1-a) a' dr \quad (6.2)$$

直進する風のエネルギーは風車回転面でプロペラを回転し後流に回転パワーを与え、そのパワーだけ回転面の抗力として失われるので

$$(1-a)V \frac{dF}{dr} = (1+a')\omega \frac{dT}{dr} \quad (6.3)$$

ただし $x = \omega r / V$ とする。

また風車出力と効率 は式 (6.2) より次のようになる。

$$P = \int_0^R 4\pi r \rho V \omega^2 (1-a) a' r^3 dr \quad (6.4)$$

$$\eta = P / (\pi R^2 \rho V^3) = 4/X^2 \int_0^X (1-a) a' x^3 dx$$

ただし $X = \omega R / V$ とする。

与えられた速度比 X で最大出力を得るためには $(1-a)a'$ は変分法により次のようになる。

$$(1-a) \frac{da'}{da} = a'$$

式 (6.3) より

$$(1+2a')x^2 \frac{da'}{da} = 1-2a$$

$$\therefore (1+2a')a'x^2 = (1-a)(1-2a) \quad (6.5)$$

Table 6.1 Design point of the propellers at altitude 3000 m.

Order of the studys	Type	Wind velocity (m/s)	Revolution (rpm)	Power (w)	Aerodynamic property		
					C_L	C_D	α
Fifth (S. 58)	E 2 T	8	375	400	*0.8	0.0446	8.3
					**0.58		5.4
	E2W 230	8	450	210	*0.8	0.0446	8.3
					**0.58		5.4
	E2W 126	8	450	210	*0.8	0.0615	4.0
					**0.8		4.0

* Improved Glauert

** Griffiths

式 (6.5) を式 (6.3) で除すと

$$(1+2a')/(1+a')=(1-2a)/a$$

$$\therefore a'=(1-3a)/(4a-1) \quad (6.6)$$

式 (6.5), (6.6) より

$$a'x^2=(1-a)(4a-1) \quad (6.7)$$

式 (6.6), (6.7) により a, a' が求められると, 図 6.1 に示すようにプロペラ断面に対する空気流入角 θ は次のようになる。

$$\tan \theta = V(1-a)/\omega r(1+a') \quad (6.8)$$

断面翼型の空力特性 (表 6.1) より迎角 α を決めると, プロペラ製作に必要な断面ねじり角は $i=\theta-\alpha-14^\circ$ により決められる。(ここにある -14° とはプロペラを風車に取付ける座板が 14° 傾斜しているのこの角度を補正する)

表 6.1 にある設計目標値により, 半径方向の断面についてねじり角を計算した結果を表 6.2, 図 6.2, 6.3 に示す。

Table 6.2-(a) Method of Glauert (E 2 T)

r/R	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
$\omega r/V$	0.74	1.47	2.21	2.95	3.68	4.42	5.15	5.89	6.63	7.36
a	0.309	0.324	0.329	0.331	0.332	0.332	0.332	0.333	0.333	0.333
a'	0.303	0.093	0.043	0.025	0.016	0.011	0.008	0.006	0.005	0.004
θ°	35.8	22.8	16.2	12.5	10.1	8.5	7.3	6.4	5.7	5.2
i°	13.5	0.5	-6.1	-9.8	-12.2	-13.8	-15.0	-15.9	-16.6	-17.1

Table 6.2-(b) Method of Improved Glauert (E 2 T)

r/R	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
$\omega r/V$	0.74	1.47	2.21	2.95	3.68	4.42	5.15	5.89	6.63	7.36
a	0.069	0.096	0.134	0.181	0.238	0.277	0.313	0.344	0.364	0.370
a'	0.107	0.039	0.023	0.017	0.013	0.010	0.008	0.006	0.005	0.004
θ°	48.8	30.7	21.0	15.3	11.6	9.2	7.5	6.3	5.5	4.9
i°	26.5	8.4	-1.3	-7.0	-10.7	-13.1	-14.8	-16.0	-16.9	-17.4

Table 6.2-(c) Method of Griffiths (E 2 T)

r/R	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
$\omega r/V$	0.74	1.47	2.21	2.95	3.68	4.42	5.15	5.89	6.63	7.36
a	0.305	0.307	0.299	0.286	0.274	0.260	0.244	0.226	0.208	0.188
a'	0.263	0.073	0.031	0.012	0.009	0.005	0.003	0.002	0.001	0.001
θ°	36.8	23.7	17.1	13.7	11.1	9.5	8.4	7.5	6.8	6.3
i°	17.4	4.3	-2.3	-5.7	-8.3	-9.9	-11.0	-11.9	-12.6	-13.1

Table 6.2-(d) Fourth Study (D 2 T)

r/R	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
$\omega r/V$		1.84	2.76	3.68	4.60	5.52	6.45	7.36	8.28	9.20
θ°		28.5	19.9	15.2	12.3	10.3	8.8	7.7	6.9	6.2
i°		6.5	-2.1	-6.8	-9.7	-11.7	-13.2	-14.3	-15.1	-15.8

Table 6.2-(e) Method of Glauert (E 2 W 230)

* Torsional angle of E 2 W 126

r/R	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
$\omega r/V$	0.59	1.18	1.77	2.366	2.95	3.53	4.12	4.71	5.30	5.89
a	0.303	0.320	0.327	0.329	0.331	0.331	0.332	0.332	0.333	0.333
a'	0.427	0.138	0.066	0.038	0.025	0.017	0.013	0.010	0.008	0.006
θ°	39.7	26.9	19.7	15.3	12.3	10.5	9.1	8.0	7.1	6.4
i°	31.4	18.6	11.4	7.0	4.0	2.2	0.8	-0.3	-1.2	-1.9
i^{**}	35.7	22.9	15.7	11.3	8.3	6.5	5.1	4.0	3.1	2.4

Table 6.2-(f) Method of Improved Glauert (E 2 W 230)

* Torsional angle of E 2 W 126

r/R	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
$\omega r/V$	0.59	1.18	1.77	2.36	2.95	3.53	4.12	4.71	5.30	5.89
a	0.052	0.065	0.086	0.110	0.134	0.168	0.202	0.241	0.288	0.348
a'	0.125	0.042	0.024	0.017	0.013	0.011	0.009	0.008	0.007	0.006
θ°	55.1	37.3	26.8	20.4	16.2	13.1	10.8	9.1	7.6	6.3
i°	46.8	29.0	18.5	12.1	7.9	4.8	2.5	0.8	-0.7	-2.0
i^{**}	51.1	33.3	22.8	16.4	12.2	9.1	6.8	5.1	3.6	2.3

Table 6.2-(g) Method of Griffiths (E 2 W 230)

* Torsional angle of E 2 W 126

r/R	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
$\omega r/V$	0.59	1.18	1.77	2.36	2.95	3.53	4.12	4.71	5.30	5.89
a	0.301	0.308	0.304	0.297	0.287	0.277	0.266	0.253	0.240	0.226
a'	0.376	0.113	0.050	0.026	0.015	0.010	0.006	0.004	0.003	0.002
θ°	40.8	27.8	20.6	16.2	13.5	11.5	10.0	9.0	8.2	7.5
i°	35.4	22.4	15.2	10.8	8.0	6.1	4.7	3.6	2.8	2.1
i^{**}	36.8	23.8	16.6	12.2	9.4	7.5	6.1	5.0	4.2	3.5

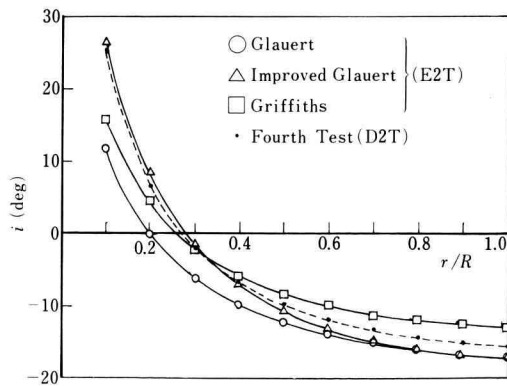


Fig. 6.2 Torsional angle at arbitrary radius (E2T, D2T)

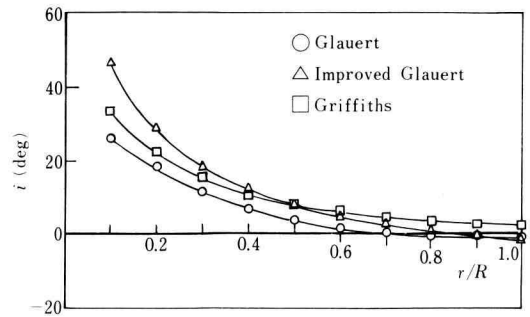


Fig. 6.3 Torsional angle at arbitrary radius (E2W 230)

6.2.2 Improved Glauert の方法 (Glauert の方法に翼素の空力特性を加えた別法)

図 6.1 の流れ線図に翼素の空力特性を加え、流れの変化率 a, a' を求める別法を試みた。この場合、翼素に働く空気力は翼素の断面抗力は無いものとし、揚力のみとすれば断面に作用する空気力は図 6.4 のようになり、次式のように揚力の分力はそれぞれ風車の回転力及び軸方向の風車抗力となる。

$$dL \sin \theta = \frac{1}{2} \rho V_r^2 C_L C \sin \theta dr \quad (6.9)$$

$$dL \cos \theta = \frac{1}{2} \rho V_r^2 C_L C \cos \theta dr \quad (6.10)$$

式 (6.9) に r とプロペラ数 b を乗算すれば、トルクとなり式 (6.2) に等しいので、次式のようになる。

$$4\pi r^3 \rho V \omega (1-a) a' = \frac{1}{2} \rho V_r^2 C_L C \sin \theta \cdot r b \quad (6.11)$$

また式 (6.10) にプロペラ数 b を乗算すると、軸方向の風車抗力となり式 (6.1) に等しいので、次式のようになる。

$$4\pi r \rho V^2 (1-a) a = \frac{1}{2} \rho V_r^2 C_L C \cos \theta \cdot b \quad (6.12)$$

また図 6.4 より

$$V_r^2 \sin \theta = V_r V (1-a) \quad (6.13)$$

$$V_r^2 \cos \theta = V_r \omega r (1+a') \quad (6.14)$$

式 (6.11) と式 (6.13) より

$$4\pi r^3 \rho V \omega (1-a) a' = \frac{1}{2} \rho C_L C r V_r V (1-a) b$$

$$\therefore a' = \frac{C_L C V_r b}{8\pi r^2 \omega} \quad (6.15)$$

また式 (6.12) と式 (6.14) より

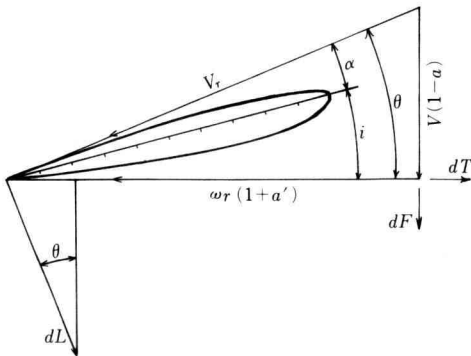


Fig. 6.4 Flow diagram of blade element (Method of Improved Glauert)

$$4\pi r \rho V^2 (1-a) a = \frac{1}{2} \rho C_L C b V_r \omega r (1+a')$$

$$(1-a) a = C_L C b V_r (1+a') / 8\pi V^2 \quad (6.16)$$

$$\therefore a^2 - a + \frac{C_L C b V_r (1+a')}{8\pi V^2} = 0 \quad (6.17)$$

表 6.1 にある設計目標値を用いて式 (6.15), 式 (6.17) により a, a' が得られ、空気流入角 θ は式 (6.8) より決められる。また $V_r = \sqrt{\omega^2 r^2 + V^2}$ とすれば差は 1% 以下で実用には差支えない。断面ねじり角 i は $i = \theta - \alpha - 14^\circ$ で計算し、その結果を表 6.2, 図 6.2, 6.3 に示す。

次に $bc/2\pi r = \sigma$ として空力特性 C_L と変化率 a, a' による平面形状 (c 分布) との関係調べる。図 6.4 より

$$V_r = \frac{\omega r (1+a')}{\cos \theta}$$

$$a' = C_L C \omega r (1+a') b / (8\pi r^2 \omega \cos \theta)$$

$$\therefore a' / (1+a') = \sigma C_L / 4 \cos \theta \quad (6.18)$$

同様式 (6.16) と $V_r = \omega r (1+a') / \cos \theta$ より

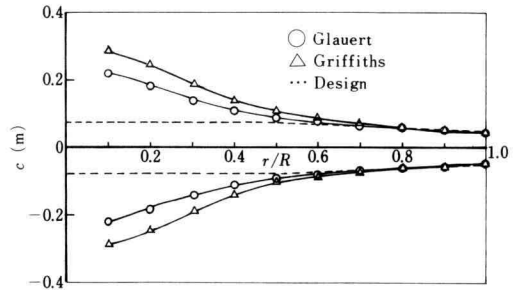


Fig. 6.5 Distribution of chord at arbitrary radius (E2T)

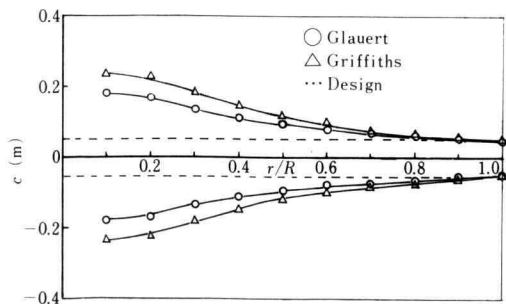


Fig. 6.6 Distribution of chord at arbitrary radius (E2W 230, E2W 126)

$$(1-a)a = \sigma C_L \omega^2 r^2 (1+a')^2 / (4V^2 \cos \theta)$$

$$a/(1-a) = (\sigma C_L / 4 \cos \theta) \cdot [\omega^2 r^2 (1+a')^2 / \{V^2 (1-a)^2\}]$$

$$\therefore a/(1-a) = \sigma C_L \cos \theta / 4 \sin^2 \theta \quad (6.19)$$

ここに最大出力を得るための条件の式 (6.6) を用いて, 式 (6.18), (6.19) より a, a' を消去すると

$$1 = (\sigma C_L \cos \theta / 4 \sin^2 \theta) (\sigma C_L / 4 \cos \theta + 2)$$

$$\therefore \sigma C_L = 4(1 - \cos \theta) \quad (6.20)$$

式 (6.20) は Glauert の方法⁴⁾ と同形になる。表 6.1 の設計目標値と式 (6.20) により半径方向の σ (c 分布) による断面弦長が計算され, これを図 6.5, 6.6 に示す。

6.2.3 Griffiths の揚力, 抗力を考慮した方法⁴⁾

出発点には Glauert の方法と同じで式 (6.1), (6.2) から始まる。

次に翼素に働く空気力は揚力と抗力を考える。図 6.7 より

$$dF = dL \cos \theta + dD \sin \theta$$

$$dT = (dL \sin \theta - dD \cos \theta) r$$

b をプロペラの枚数とし揚力, 抗力を係数で表わすと

$$dF = \frac{1}{2} \rho V_r^2 b c d r (C_L \cos \theta + C_D \sin \theta) \quad (6.21)$$

$$dT = \frac{1}{2} \rho V_r^2 b c r d r (C_L \sin \theta - C_D \cos \theta) \quad (6.22)$$

速度比を $x = \omega r / V$ とすると, 空気流入角 θ は式 (6.8) と同形になる。したがって

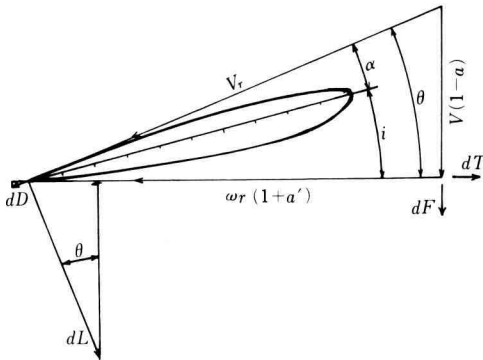


Fig. 6.7 Flow and aerodynamic force diagram of blade element (Method of Griffiths)

$$\theta = \tan^{-1} [(1-a)/x(1+a')]$$

$$V_r^2 = V^2 [(1-a)^2 + x^2 (1+a')^2]$$

次に $bc/2\pi r = \sigma$ とすると, 式 (6.1), (6.21), $\cos \theta = \omega r (1+a')/V_r$, $\sin \theta = V(1-a)/V_r$ より

$$\sigma = bc/2\pi r = 4V^2(1-a)a/V_r^2(C_L \cos \theta + C_D \sin \theta) + 4(1-a)a/[(1-a)^2 + x^2(1+a')^2]^{1/2} \cdot [C_L x(1+a') + C_D(1-a)] \quad (6.23)$$

同様に式 (6.2), (6.22) より

$$\sigma = bc/2\pi r = 4rV\omega(1-a)a'/V_r^2(C_L \sin \theta - C_D \cos \theta) + 4x(1-a)a'/[(1-a)^2 + x^2(1+a')^2]^{1/2} \cdot [C_L(1-a) - C_D x(1+a')] \quad (6.24)$$

次に式 (6.23), (6.24) より σ を除去すると

$$K = C_L/C_D = x(a+a')/[a(1-a) - a'x^2(1+a')] \quad (6.25)$$

式 (6.25) を変形すると

$$K(a-a') - ax = Kx^2(a'+a') + a'x$$

Glauert の方法と同じく

$$K(1-2a) - x = [Kx^2(1+2a') + x] \frac{da'}{da}$$

また与えられた速度比 x で最大出力を得るため,

$$\text{Glauert の方法と同様に } \frac{da'}{da} = \frac{a'}{1-a} \text{ とすると}$$

$$(1-a)[K(1-2a) - x] = a'[Kx^2(2a'+1) + x] \quad (6.26)$$

式 (6.25) と式 (6.26) を変形しこれらより

$$a' = (5aK - 4a^2K - K - 3ax + x)/\{x(Kx+1)\} \quad (6.27)$$

$$a'^2 = (3a^2K - 4aK + K + 2ax - x)/Kx^2 \quad (6.28)$$

式 (6.27) の 2 乗と式 (2.28) を組合せて a に関する 4 次方程式

$$[16a^4K^2 - a^3(40K^2 - 24Kx) + a^2(33K^2 - 38Kx + 9x^2) - a(10K^2 - 16Kx + 6x^2) + (K-x)^2] - [(Kx+1)^2/K] \cdot (3a^2K - 4aK + 2ax + K - x) = 0 \quad (6.29)$$

を作り, 繰返し計算により a を求める。

a, a' を求める式 (6.27), (6.28), (6.29) は Griffiths の論文には記述されていないので, このような方法をとった。表 6.1 の $K = C_L/C_D$ を用いて式 (6.29) より a を求め式 (6.27) より a' が得られる。式 (6.8) 及び $i = \theta - \alpha - 14^\circ$ により断面ねじり角が得られ, これを表 6.2, 図 6.2, 6.3 に示す。

また式 (6.23) あるいは式 (6.24) と表 6.1 の設計目

標値を用い、 σ (c 分布) による断面弦長が計算され、これを図 6.5, 6.6 に示す。

6.2.4 計算結果について

(1) 断面ねじり角

表 6.2 - (a), (b), (c), (d), (e), (f), (g) と 図 6.2, 6.3 に各プロペラについての理論により得られた変化率 a, a' で計算した断面ねじり角と、第 4 次研究 (57 年度) に使用したプロペラ D2T のねじり角を示した。3 方法によるねじり角の差は例えば $r/R=0.7$ では 4° である。この中から次の理由で Griffiths の方法で得たものでプロペラを製作した。

(a) 第 4 次研究 (57 年度) で D2T のプロペラ取付角を 2° プラスしたとき、非常に良い結果であった。図 6.2 の D2T のねじり角分布を 2° プラス方向にすると、プロペラとして有効な 50% より先端部では Griffiths の方法に合っている。

(b) Glauert の方法はプロペラ断面の空力性能を考慮していない。また Improved Glauert の方法は断面の揚力のみ考慮し抗力を無視している。

(c) Griffiths の方法は本学の風洞実験で得た空力係数 $C_L/C_D=13$ を用い、さらに抗力を考慮している。

(d) ねじり角の分布は他の方法に比べて穏やかであるので、プロペラ工作は有利である。

(2) 平面形

図 6.5, 6.6 に各プロペラの計算による断面弦長分布を示す。いずれもプロペラの有効な先端部分では設計の平面形と合っている。理論では根元部分は大きな弦長になるが、実際はこのようなものは製作できない。

6.2.5 出力の推定

第 5 次研究 (58 年度) につき、表 6.1 に示す設計目標の数値を基にして、式 (6.4) により図式積分した出力を表 6.3 に示す。

高度 3000 m は空気密度が高度 0 m の約 71% になるので、それだけ出力も低下している。Glauert の方法は $C_L/C_D=\infty$ で、Griffiths の方法は $C_L/C_D=13$ とし

ているので、出力は差があり約 1/2 程度になる。

7. プロペラの製作

プロペラ断面形 NACA 23012 は表示式²⁾ に基き、コンピュータグラフィックによる原図を作り、これを鋼板に移し断面ゲージを精密製作し、これを用いてねじり角、平面形等のマークした積層木材 (姫小松) を手仕上にて切削し自作した。形状完成後に強度増大のため FRP (ガラス繊維) 加工を行い、平滑後塗装仕上げをした。回転による振動が発生しないように左右のプロペラ重量は等しく、組立後のバランスも先端部に鉛を埋め調整した。

8. 穂高岳山荘における実用実験

8.1 実験について

発電機の負荷は容量 2160 Ah の蓄電池の充電で行った。蓄電池電力の円滑な使用のため負荷状態は良好と思われる。出力は電流、電圧の計器指示値を用いその積により求めるので、発電機の内部損失を含んでいる。風速は自記風速計 (風杯型)、回転数は交流では発電機の発生パルスにより、また直流では光電式検出器を用いデジタル回転計に表示させた。自然風の実験で測定点は非常に多いので、測定値の平均線で性能を表示した。

8.2 57 年度の実験

実験は 9 月 6, 7, 8 日に行った。直径 3 m の各プロペラの出力を図 8.1 に示す。V=10 m/s では D2T は 410W, A2E' は 190W で D2T はオリジナルの A2E' に対して 2 倍以上の出力を得ている。これはプロペラ断面翼形の空力性能に差があること及び断面のねじり角の有無によるのである。次に翼形断面が Clark Y の A2S は 210W, A2T は 260W では断面にねじり角のあ

Table 6.3 Estimate of windmill power

Order of the studys	Type	Power at V=8 m/s (w)			
		0 m, $\rho=1.226 \text{ kg/m}^3$		3000 m, $\rho=0.876 \text{ kg/m}^3$	
		Glauert	Griffiths	Glauert	Griffiths
Fifth (S. 58)	E2T	1310	560	930	400
	E2W 230	580	280	410	210
	E2W 126	580	280	410	210

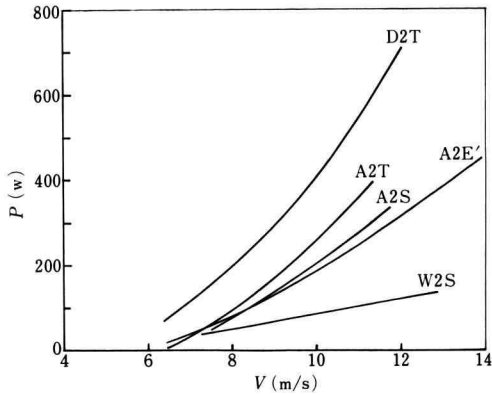


Fig. 8.1 Power versus wind velocity (Fourth study, S.57)

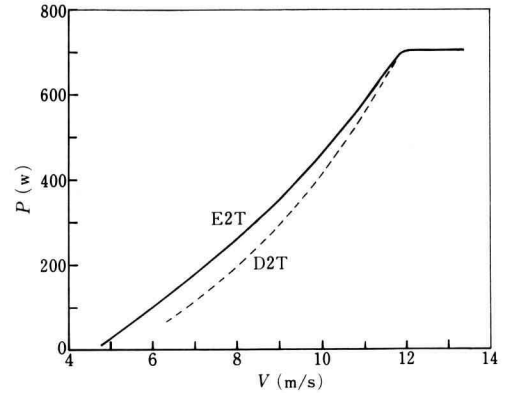


Fig. 8.3 Power versus wind velocity (E2T) (Fifth study, S.58)

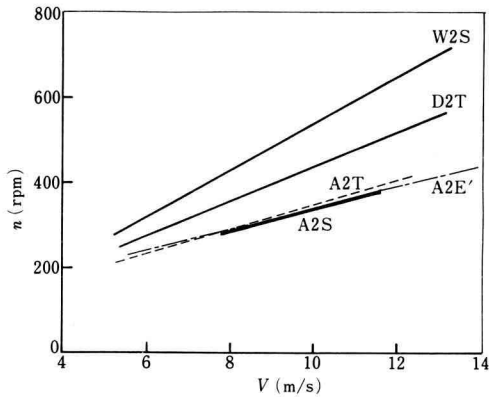


Fig. 8.2 Propeller revolution versus wind velocity (Fourth study, S.57)

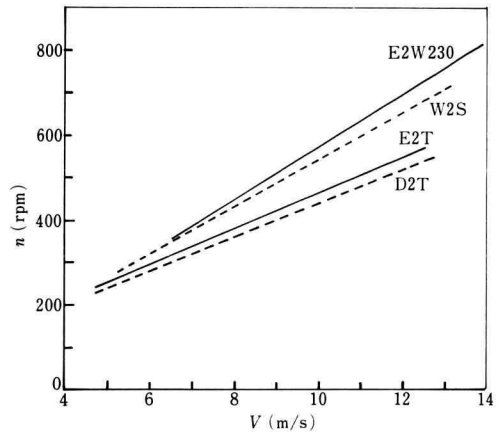


Fig. 8.4 Propeller revolution versus wind velocity (Fifth study, S.58)

る A2T が勝っている。また図 8.1 で直径 2 m のオリジナルの W2S の出力は $V=10$ m/s で 100W であり、発電機特性 (200W) から推察して妥当である。

図 8.2 に回転数を示す。 $V=10$ m/s で直径 3 m の D2T は 440 rpm, A2E', A2S, A2T は約 350 rpm で、プロペラ翼形断面の空力性能の勝る D2T が良い。直径 2 m の W2S の 540 rpm は発電後の特性としてさらに増加が望ましい。

8.3 58 年度の実験

実験は 8 月 22 日から 30 日の間に行った。直径 3 m の E2T の出力を図 8.3 に示す。 $V=10$ m/s では E2T は 470W となり、57 年度の D2T の 410W に比べてさらに出力は増加した。 $V=12$ m/s で E2T の出力が

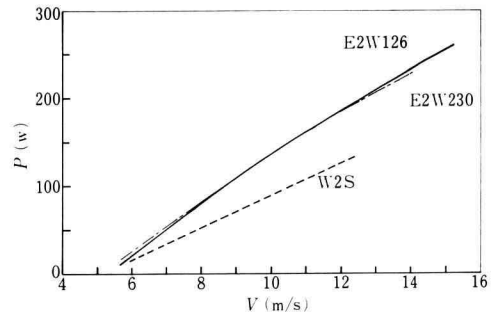


Fig. 8.5 Power versus wind velocity (E2W 230, E2W 126) (Fifth study, S.58)

D2T の出力に近づいているのは、風車安全装置として
いる風圧板の作用で、風車軸が横向きになるためである。
この風圧板は 57 年度に比べて大きくなっているの
で、 $V=8\text{ m/s}$ あたりから効き始め $V=12\text{ m/s}$ で出
力が制限される。 $V=8\text{ m/s}$ の出力は 250 W で計算に
よる目標値 400 W に達しない。これは山岳の斜面に
そって上昇する風が風車回転面に直角にあたらないこ
と、自然風の風速、風向が激しく変化するため十分に
エネルギーを吸収できないこともある。

図 8.4 に回転数を示す。E2T は $V=10\text{ m/s}$ で 465
rpm となり 57 年度の D2T に比べて約 6% 増加した。
E2T の回転数の設計目標は $V=8\text{ m/s}$ で 375 rpm と
したが、本実験では 380 rpm となり、プロペラの設計
計算の基本条件である回転数の推定は正しかった。

図 8.5 に直径 2 m の各プロペラの出力を示す。 $V=$
 10 m/s では E2W230, E2W126 は共に 140 W となり
同一の出力であるが、オリジナルの W2S の 100 W に
比べると増加している。

9. あとがき

(1) 実験結果について

57 年度研究の D2T はオリジナルの A2E' に比べて
2 倍をこす出力を得た。

58 年度研究の E2T は 57 年度の D2T に比べ、 $V=8$
 m/s のとき 34%, $V=10\text{ m/s}$ のとき 12% の出力が
増加した。これはプロペラの設計が緻密になったため
である。

結局 E2T は A2E' に比べて $V=8\sim 10\text{ m/s}$ のとき
2.5 倍をこす出力を得たことになる。

(2) 山岳実用実験について

風洞実験から飛躍して高度 3000 m の山岳における
実用実験を行ったが、殆どの学生が登山に未経験であ

るための配慮、限られた日数内における天候状況、器
材の搬入、計測用電源等の問題が多かった。特に 58 年
度は 8 月 25 日 PM 6:00 の NHK 総合テレビの生放
送に紹介される等山荘は多忙を極め、山荘滞在日数も
ふえたが、山荘側の援助により多大の成果を得た。

なお本研究は 57 年度は山田政道、川井政明、大原基、
小宮芳之、58 年度は筒井宣之、福森政之、佐藤嘉高、福
岡億の協力を得たこと、高橋正雄講師、狩野芳郎助手、
井上喜一、井柳克美、藤本明の援助を得たことを付記
する。

この実験を推進していただいた日本山岳会前副会長
折井健一氏は、昭和 58 年 9 月 29 日急逝されました。
謹んで哀悼の意を表します。

文 献

- 1) 鳥居 亮・榊原芳夫・根本光正・大矢 征; 風力
エネルギーに関する研究 (第 1 報 水平軸風車),
幾徳工大研究報告 1982, B-7 (昭 58-3), 129
- 2) IRA H. ABBOTT and ALBERT E. VON DOE-
NHOFF; Theory of wing section, Dover publi-
cations inc., 1958
- 3) H. Glauert, Windmill and Fans; Aerodynamic
Theory by William Frederick Durand, Vol. IV,
1976, 324
- 4) R.T. Griffiths; The effect of aerofoil character-
istics on windmill performance, Aeronautical
Journal July 1977, 322
- 5) H.J. Stewart; Dual optimum aerodynamic
design for conventional windmill, AIAA Jour-
nal Vol. 14, No. 11, November 1976
- 6) 山根隆志・筒井康賢・折田豊樹; 水平軸風力ター
ビンの空力設計について, 日本航空宇宙学会誌
30-345, 1982-10, 566