

# 明星式風力発電装置の研究

——内蒙古を対象とした設計——

田 徳\*, 緒方正幸\*\*, 井上 實\*\*\*, 上松順二\*\*\*\*

## 1 緒言

風力発電は数多くの研究と試作がなされたが、ポンプ駆動と違い建設費が高く年間稼働率が低いために経済性が悪く、なかなか実用にならなかった。経済性を良くするためには、発電容量の大きいプラントを作り容量 (kW) 当たり単価を下げると共に、年間稼働率を上げて発電総量 (kWh) 当たり単価を下げることで両方が必要である。現在実用になっているものは三菱風車 MWT250 で、1 台の出力は 250kW だが、大出力を得るために 1 か所に数十台を建設しなければならない。私は井上賢教授の風力エネルギーを濃縮するアイデア<sup>①</sup>を実現させるためにディフューザ (diffuser) を活用した。これにより、一台あたりの出力を大きくし、更に 1 プラントに数台を積み重ねることにより、既存の例よりはるかに大きい出力が得られる風力発電装置設計が出来た。本論文は内蒙古を対象とした設計例を示す。

## 2 構造及び記号

### 2.1 構造

図 1<sup>①②</sup> に示す如く、30 枚の固定翼を持つ固定翼箱 (2) があり、固定翼箱の内側に風向 (1) に従って回転できるロータ箱 (9) を収めた。ロータ箱内に発電するための風車翼 (11)、増速機 (15, 16) 及び発電機 (17, 19) を設置している。固定翼箱空気取り入れ口 (断面 1) から風車翼部 (断面 3') までに流路面積を約 1/2.5 として風速を増した。ついでこれによる増速効果を上げるため、風車翼部 (断面 3') からロータ箱出口 (断面 4) までと、さらにロータ箱出口 (断面 4) から固定翼箱放出口 (断面 5) までの 2 断面のディフューザ (拡がり管) を設け、流路面積を約 4.5 倍として風速を減じた。

### 2.2 記号

b: 長方形断面の幅 (m);  $D_1$ : ロータ箱の直径 (m);  $D_2$ : 固定翼箱の外径 (m); d: 直径 (m); F: 面積 ( $m^2$ ); g: 重力加速度 ( $9.80665m/s^2$ );  $l$ : 軸方向の長さ (m); m: 水力平均深さ (m); P: 圧力 ( $P_e=N/m^2$ ); Re: レイノルズ数 (-); V: 速度 (m/s); W: 風車出力 (kW, MW);  $\gamma$ : 空気の比重量  $\gamma = \rho g$  ( $kgf/m^3$ );  $\eta$ : 効率 (-);  $\theta$ : 円形に換算した広がり角度 ( $^\circ$ );  $\xi$ : 係数 (-);  $\rho$ : 空気密度 ( $kg/m^3$ )

\* 理工学部電気工学科元嘱託助手

\*\* 理工学部機械工学科助手 流体工学

\*\*\* 理工学部電気工学科元教授

\*\*\*\* 理工学部機械工学科教授 流体工学

添字

1~5：各断面の値を示す。

例として，12：断面1と断面2との間の値を示す。

3 設計例

図1に示すように固定翼箱外形  $D_2=4.76d$  とし，固定翼流入側角度  $48^\circ$  とする。風車直径  $d=50m$  とすれば，

$$F_1 = dD_2 \times \sin 24^\circ = 4838$$

となる。断面2は一辺を  $d$  とする正方形とし，

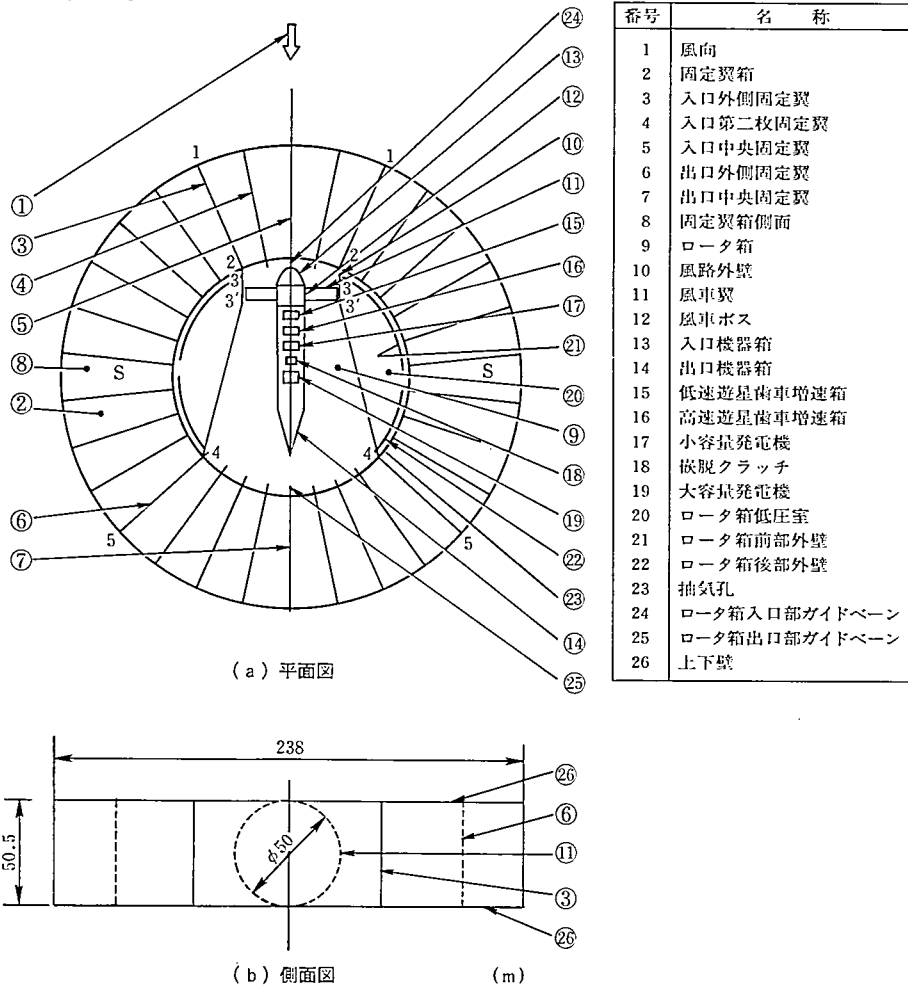
$$F_2 = d^2 = 2500$$

となる。断面3と断面3'は外形を  $d$  とし，ボス径を  $d_b=0.1d$  の環状とし，

$$F_3 = F_{3'} = (1^2 - 0.1^2) (\pi / 4) d^2 = 1944$$

となる。ロータ箱の直径  $D_1 = d / \sin 24^\circ = 2.46d$  となる。断面4は長方形ゆえ，

$$F_4 = dD_1 \times \sin 48^\circ = 4568$$



番号	名称
1	風向
2	固定翼箱
3	入口外側固定翼
4	入口第二枚固定翼
5	入口中央固定翼
6	出口外側固定翼
7	出口中央固定翼
8	固定翼箱側面
9	ロータ箱
10	風路外壁
11	風車翼
12	風車ボス
13	入口機器箱
14	出口機器箱
15	低速遊星歯車増速箱
16	高速遊星歯車増速箱
17	小容量発電機
18	嵌脱クラッチ
19	大容量発電機
20	ロータ箱低圧室
21	ロータ箱前部外壁
22	ロータ箱後部外壁
23	抽気孔
24	ロータ箱入口部ガイドベーン
25	ロータ箱出口部ガイドベーン
26	上下壁

図1 明星式風力発電装置

となる。断面5は高さをd、幅をb<sub>5</sub>とする長方形ゆえ、

$$F_5 = db_5 = dD_2 \times \sin 48^\circ = 8839$$

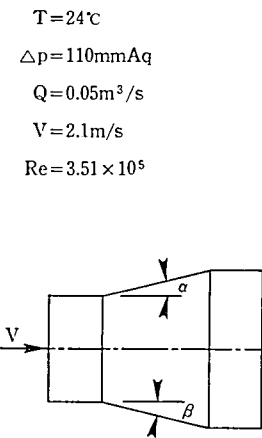
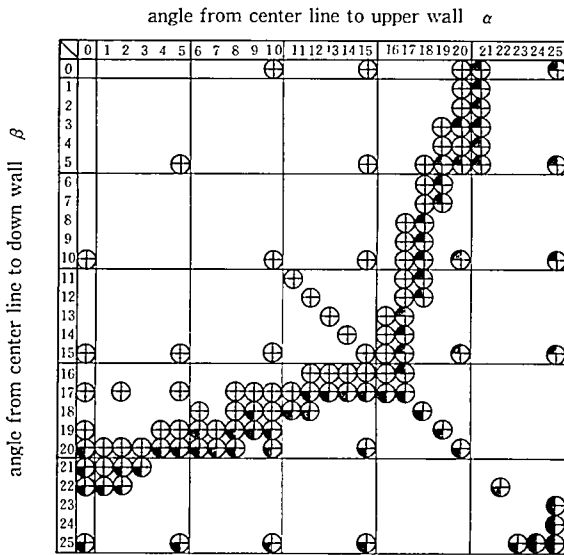
となる。

軸方向長さは

$$l_{12} \{ (D_2 - D_1) / 2 \} \times \cos 24^\circ = 52.5$$

$$l_{23} = l_{33'} = 0.207d = 10.35$$

$$l_{3'4} = (D_1 / 2) \times \cos 24^\circ - 2 l_{23} \\ + (D_1 / 2) \times \cos 48^\circ = 76.6$$



T = 24°C  
 Δp = 110 mmAq  
 Q = 0.05 m<sup>3</sup>/s  
 V = 2.1 m/s  
 Re = 3.51 × 10<sup>5</sup>

T : Temperature of Water  
 Δp : Pressure difference of Orifice meter  
 Q : Flowrate  
 Re : Reynolds number based on hydraulic diameter

- ⊕ non separation
- ⊗ separation upper wall
- ⊙ separation
- ⊖ separation down wall

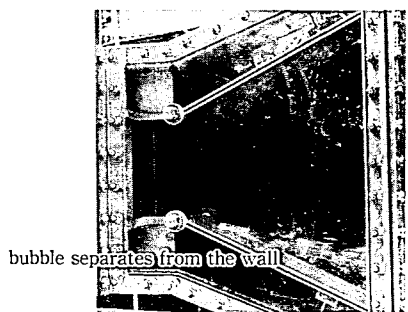
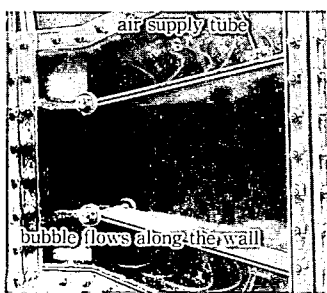


図2 ディフューザの剝離角度計測結果<sup>(4)</sup>

$$\ell_{45} = (D_2 - D_1) / 2 = 57.46$$

となる。

増速部の損失は無視できるものとし、ディフューザの損失のみを考慮してその損失は機械工学便覧<sup>(3)</sup>から取り、同一寸法で最大出力が得られる増速比並びに減速比を計算した結果は断面1から断面3までの増速比は約2.5倍、断面3'から断面5までの減速比は約1/4.5とした。尚、断面3'から断面4までの減速比を1/2.35とし、断面4から断面5までの減速比を1/1.935としたことについては後述する。尚この二つのディフューザの繋ぎ面で、ディフューザ内の減速により成長した境界層を、動力源を使わずに、固定翼箱側面に生じた低圧を利用して完全に吸い出すことにより、ディフューザ効率を高め、両者を総合して風車翼へのエネルギー濃縮を果たした。ディフューザの研究は本研究のキーポイントであるので、ディフューザについて記す。

Re数の大きい状態のディフューザの最適角度は機械工学便覧<sup>(3)</sup>に示す値より大きくなる。この実験結果は図2<sup>(4)</sup>に示す如く、Re数が $3.51 \times 10^5$ である時、剝離を発生しない広がり角度は円形に換算すれば $9.8^\circ$ 以上になる。その実験状態を写真(a)、(b)に示す。Re数が増せば、乱流度が増すので、剝離を発生しない広がり角度が大きくなる。しかも効率も良くなる。剝離の性質はRe数が大きくなることより大きい広がり角度まで発生しなくなり、発生する時は不連続に突然起こります。故意に渦を作った場合、stevensら<sup>(5)</sup>の文献によれば、ディフューザの入口側に損失があるにもかかわらず出口側の効率は良くなる。妹尾らのデータでもこの様な結果を得た。図3<sup>(6)</sup>に示す如く、故意に渦を作った場合、ディフューザの最適角度が $8^\circ$ から $15^\circ$ までは故意に渦を作らない場合の最適角度の $8^\circ$ より圧力回復率が大きい。

以上はstevensらと妹尾らの文献並びに上述した我々の実験データはRe数が $2 \sim 7 \times 10^5$ であるのに対し、機械工学便覧<sup>(3)</sup>のデータはRe数がやっと $10^4$ に届くぐらい小さいために生じた物である。本風車はRe数が約 $2 \times 10^7$ と大きい故更に効率も良くなり、広がり角も大きく取れる。又本案では風車の翼がディフューザに対して渦を作る効果が

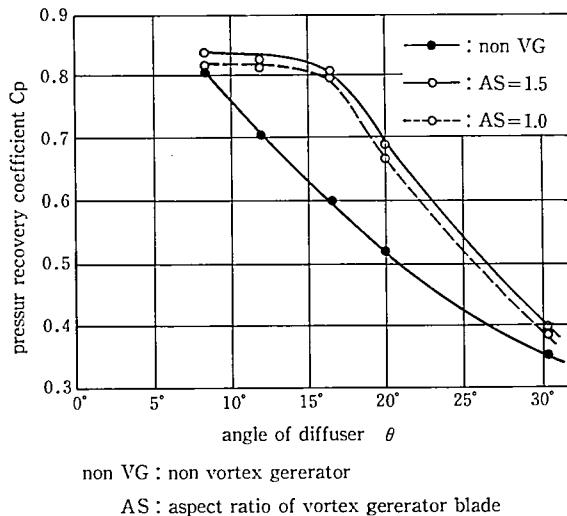


図3 ディフューザの圧力回復率に<sup>(6)</sup>及ぼす渦誘起装置の影響

あり、その上渦を作るための損失は風車効率として除いておる故効率は更に良くなる。

従って風車直後の断面3'から断面4までの減速比を1/2.35とし、広がり角を14.6°とした。一方風車から遠い断面4から断面5までの減速比を1/1.935とし、広がり角を12.6°とした。従って、本研究のディフューザの広がり角度を8°~15°の範囲に収めておけば、機械工学便覧<sup>(3)</sup>に示す8°の時の係数ξを使って未だ充分余裕がある。この数値を使って以下に計算する。

断面3'から断面4までのディフューザについて、

面積比は  $F_4/F_3=2.35$  ゆえ、機械工学便覧<sup>(3)</sup>により換算すると係数ξ<sub>3'4</sub>は

$$\xi_{3'4}=0.1296-3.807 \times 10^{-3} \times (2.25-2.35)=0.1300$$

となり、効率はη<sub>3'4</sub>は

$$\eta_{3'4}=1-\xi_{3'4}\{(1-F_3/F_4)/(1+F_3/F_4)\}=0.9476$$

となる。断面3'から断面4までの円形に換算した拡がり角度θ<sub>3'4</sub>は

$$d_3=4m_3=4F_3/(\pi d+0.1\pi d)=45$$

$$d_4=4m_4=4F_4/\{2(d+b_i)\}=64.6$$

$$\theta_{3'4}=2\tan^{-1}\{(d_4-d_3)/(2l_{3'4})\}=14.6^\circ$$

となる。

断面4から断面5までは同じく拡がり流路ゆえ上記と同じ計算をする。面積比はF<sub>5</sub>/F<sub>4</sub>=D<sub>2</sub>/D<sub>1</sub>=1.935 ゆえ、機械工学便覧<sup>(3)</sup>により換算すると係数ξ<sub>45</sub>は

$$\xi_{45}=0.1296-3.807 \times 10^{-3} \times (2.25-1.935)=0.1284$$

となる。効率η<sub>45</sub>は

$$\eta_{45}=1-\xi_{45}\{(1-F_4/F_5)/(1+F_4/F_5)\}=0.9591$$

となる。断面4から断面5までの円形に換算した拡がり角度θ<sub>45</sub>は

$$d_4=4m_4=4\{(\pi D_1/30)d\}/\{2 \times (\pi D_1/30+d)\}=20.48$$

$$d_5=4m_5=4\{(\pi D_2/30)d\}/\{2 \times (\pi D_2/30+d)\}=33.25$$

$$\theta_{45}=2\tan^{-1}\{(d_5-d_4)/(2l_{45})\}=12.6^\circ$$

となる。8° < θ < 15° になるので前述した如く適当である。

内蒙古で高さ50mの丘の上に制御室を内蔵する10mの塔をおき、その上に1機の高さを50.5mとする本案の風車を5段積む。地上で8m/sの時、風車設置平均高さにおける風速を草原地帯の風速の高度変化による分布<sup>(7)</sup>により換算すれば、12.6m/sとなる。この風速により計算を行う。

各断面の風速は

$$V_1=V_0=12.6$$

$$V_2=(F_1/F_2)V_1=24.4$$

$$V_3=V_3=(F_2/F_3)V_2=31.4$$

$$V_4=(F_3/F_4)V_3=13.4$$

$$V_5=(F_4/F_5)V_4=6.9$$

となる。各断面の圧力は

$$P_1=85200P_a$$

(標高1500mの内蒙古の平均気圧)

$$P_2=P_1-(\gamma/2g)(V_2^2-V_1^2)$$

$$\gamma=1.0503 \text{ (kgf/m}^3\text{)}$$

(標高 1500m の内蒙古の空気比重量)

$$P_2 = 84970P_a$$

$$P_3 = P_2 - (\gamma / 2g)(V_3^2 - V_2^2) = 84765P_a$$

本案の固定翼は円柱であり、しかも  $Re$  数が大きいので図 4<sup>(6)</sup> により、

$$(P_1 - P_5) / \{(\gamma / 2g)V_1^2\} = 0.8$$

$$P_5 = P_1 - 0.8 \times (\gamma / 2g)V_1^2 = 85133P_a$$

$$P_4 = P_3 - (\gamma / 2g)(V_4^2 - V_3^2) \eta_{43} = 85066P_a$$

$$P_3 = P_4 - (\gamma / 2g)(V_3^2 - V_4^2) \eta_{34} = 84665P_a$$

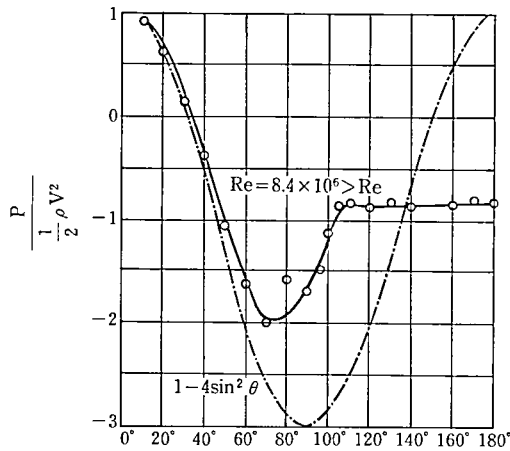
となる。

参考までに  $P_5$  の計算は図 4 (b) において

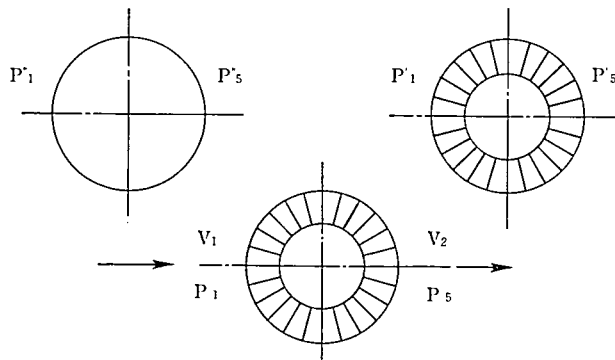
$$\{P''_1 - (\gamma / 2g)V_1^2\} - P''_5 = 0.8 \times (\gamma / 2g)V_1^2$$

$$P''_1 - P''_5 < P'_1 - P'_5$$

$$P_1 = P'_1 - (\gamma / 2g)V_1^2$$



(a) 表面滑らかな円柱周りの圧力分布<sup>(6)</sup>



(b) 滑らかな円柱と固定翼箱の表面圧力分布の比較

図 4 円柱周りの圧力分布

$$P_5 = P'_5 - (\gamma / 2g) V_2^2$$

$$\therefore P_1 - P_5 > \{0.8 \times (\gamma / 2g) V_1^2 + (\gamma / 2g) V_2^2\}$$

$$> 0.8 \times (\gamma / 2g) V_1^2$$

となるので、余裕を取ったものである。

$$P_3 - P_3' = 100P_5$$

となり、この圧力差が本風車が出せる単位体積当たりの仕事である。出力  $W$  は風車並びに発電機の全効率を  $\eta = 0.85$  とすれば、

$$W = \{1 / (102g)\} F_1 V_1 (P_3 - P_3') \eta = 5180 \quad (\text{kW})$$

となる。参考までに図 1 の  $s$  点の圧力  $P_s$  を図 4 から計算すると

$$P_s = P_1 - 2(\gamma / 2g) V_1^2 = 84976P_5$$

となり、この値が  $P_4$  より低いので断面 4 に於ける抽気は動力を必要とせず行い得る。従って断面 3' から断面 4 までと、断面 4 から断面 5 までの 2 段の拡がり流路が重なっても効率の低下は生じない。

本研究は風車に通った風が増速されたので回転数が上がることで直径を大きくすることができるようになった。速度 3 角形から見ても風速 2m/s の時でも 15° という大きい値が得られた。

#### 4 結論

(1) 牛山ら<sup>(9)</sup>の文献による在来型風車の同じ寸法と風速の条件で換算すると即ち、風車直径を 50m、風速を 10m/s とすれば、出力が

$$W = 28.369 \times (50 / 12)^2 = 493 \quad [\text{kW}]$$

になるが、本設計では同じ寸法で出力が 2.59MW になる。

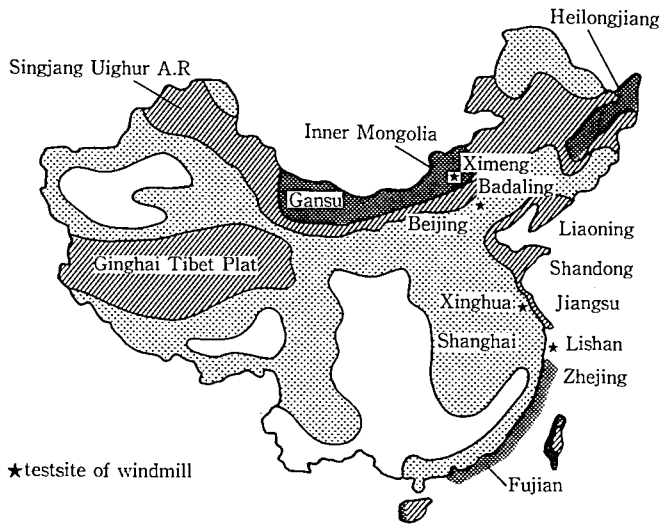
(2) 更に本研究は私の故郷である内蒙古を建設地として選んだ故、図 5<sup>(10)</sup> に示す如く、世界的に風力エネルギーの密度が高く、地上で風速 3m/s 以上の風の年間発生時間は 5000 時間以上である。しかも最大風速は台風が来ないためせいぜい平均風速の 5 倍であり、10m/s 以上の風速の発生機会は年間 1% 以下である。従って風車の稼働率が年間 90% 以上である。

(3) それに発電機を 850kW (17) と 5500kW (19) 2 台備えて、5500kW の発電機は風速が低い時、クラッチ (18) で切り離す。風速が高くなると、クラッチで繋いで発電する。従って風速の広い範囲にわたり高効率で発電できる。

尚分単位や秒単位で激しく変動する負荷変動を滑らかにするために、損失がないと言われる超伝導コイル貯蔵器を利用することと、内蒙古に流れる黄河の水量は多いし、そのすぐ北側に陰山山脈という結構高い山があるので、そしてポンプ水車を利用して余剰電力を貯蔵する事が考えられる。

An example atmospheric data for Inner Mongolia (at 1988)

	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May.	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	year
mean wind velocity (m/s)													
xilihot	3.7	2.9	3.4	4.2	4.0	3.7	2.7	2.5	2.3	2.8	3.4	2.8	3.2
tongliao	5.1	4.8	5.2	5.3	5.9	4.8	3.5	3.4	3.1	3.9	5.4	4.3	4.6
khailar	3.4	2.3	3.5	5.0	4.3	3.9	3.6	2.8	2.8	3.1	4.5	2.7	3.5
the days of wind velocity of over 10m/s													
xilihot	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
tongliao	0	0	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	3
khailar	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
maximum wind velocity (m/s)													
xilihot	14.3	17.7	13.3	16.7	20.0	13.0	16.0	10.0	11.3	20.0	19.0	11.7	20.0
tongliao	16.3	16.3	16.0	16.0	19.3	14.0	10.7	11.0	9.7	16.0	21.3	13.7	21.3
khailar	12.7	8.0	15.0	15.3	16.0	14.0	13.7	15.0	9.0	11.0	16.0	12.0	16.0



classification	higher wind velocity zone	middle wind velocity zone	lower wind velocity zone	windless zone
wind velocity over 3m/s (h/year)	>5000	5000~4000	4000~2000	<2000
wind velocity over 6m/s (h/year)	>2200	2200~1500	1500~500	<500
density of wind power energy (w/m <sup>2</sup> )	>200	200~150	150~50	<50

Distribution of wind power energy in China

图5 中国风力エネルギー分布



## 参考文献

- (1) Inoue, M., U.S. Patent No. 4,379,236 (Apr. 5, 1983) .
- (2) Tian, D. and Inoue, M., Wind Energy, Jan. No. 26 (1990) , p. 13.
- (3) JSME Handbook for Mechanical Engineers, (1989) JSME, PA5-77.
- (4) Ogata, M. and Uematsu, J., Reserch Bulletin of Meisei Univ., No. 21 (1985) , p. 61.
- (5) S. J. Stevens and G. J. Willams, Trans. of the ASME, Vol. 102, (1980) , p. 357.
- (6) Senoo, Y. and Nishi, M., Trans. Jan. Soc. Mech. Eng., Vol. 37, No. 303, B, (1971) , p. 2153.
- (7) JSME Handbook for Mechanical Engineers, (1989) JSME, PA5-97.
- (8) JSME Handbook for Mechanical Engineers, (1989) JSME, PB5-170.
- (9) Ushiyama, I. and Mino, M., Handbook for Small Size Windmill, 3rd edition, Power Press, (1986) , p. 50.
- (10) Ushiyama, I. and Chai, G. Z., Prepr. of Jan. 9th Symposium Wind Energy, (1987) , p. 51.

## 論文目録

## 主論文

題目 「明星式風力発電装置の研究  
——内蒙古を対象とした設計——」

## 副論文

1. 明星式風力発電装置の研究：田徳，井上實：風力エネルギー，No.26,pp.13-16 (1990.6.)
2. 三次元時間的な風速分布の解析：田徳，井上實：第12回風力エネルギー利用シンポジウム，pp.95-98 (1990.11.)
3. 可変ピッチ多段型風車の研究：田徳：平成二年度日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー協会合同研究発表会講演論文集，pp.93-96 (1990.12.6 and7)
4. 明星式風力発電装置の研究（第2報 内蒙古を対象とした設計例）：田徳，緒方正幸，井上實，上松順二：第13回風力エネルギー利用シンポジウム，pp.135-138 (1991.11)
5. 大容量風力発電設備の設計：田徳，緒方正幸，井上實，上松順二：中国科学技術協会第一回青年学術年会論文集，pp.61-69 中国科学技術出版社 (1992年・北京)

## 「風力発電装置」のオリジナリティ要約

藤井 新兵衛

風力エネルギーは無公害で無尽蔵なエネルギーであるため，その研究は古くから行われており，ポンプ駆動用としては数多くの実績を持っている。

しかし近年になって，ユーティリティとして電力が重視されるようになった為，「発電用」の研究が盛んに行われて来たが，発電の面では未だ経済的に見て既存の発電形式に比し劣っている。

此の原因の第一は，発電機のエネルギー回収能力がポンプに比し劣って居る為である。すなわちポンプは可変速であり，速度のほぼ3乗に比例した負荷を吸収出来るため，大変広いエネルギー範囲を持っている風力エネルギーを効率良く回収出来る。一方発電機は効率良くエネルギー回収が出来る負荷範囲が狭い為稼働率を下げ経済性を悪く

し、さらに実用電源である交流を発生する交流発電機では、回転数を一定とする必要がある為、広い風速範囲に対して風車を可変ピッチとする必要があり、特に小型では大きい価格上昇を来して一層経済性を悪くする。

原因の第二は、風力エネルギーは日により又時間により大きく変動する上、分単位や秒単位でも激しい変動（フラクチュエーション）をする。この事は貯蔵が容易な水を扱うポンプでは全く支障にならないが、需要量に応じて電力量を供給する必要があり、又貯蔵の利かない電気を発生する発電装置にとっては、コストの掛かる対策が必要となり、これも又経済性を悪くする。

本論文では経済性向上の対策として、稀薄な風力エネルギーを濃縮して利用し、一台当たりの出力を大きくする方法を採用している。この論文の中に含まれているオリジナリティを列挙すると以下の通りである。

オリジナリティ 1； 稀薄な風力エネルギー濃縮の手段として用いたディフューザに就いて、実験データにもとづき構造決定に必要な拡がり角度の限界値と、濃縮度算出に必要な効率計算式の作成を行った事である。

オリジナリティ 2； 円柱の周囲に生じる圧力分布を利用して、中央に風の通路を持つ円柱に就いて、風力エネルギー濃縮に利用出来る風圧を推定すると共に、二段ディフューザを可能とする抽気ソースを示した。

即ちディフューザ効率と円柱前後の圧力差について、夫々実験データから見て十分確保できる安全側の数値を取り、これらの数値を採用した場合の最高のエネルギー濃縮点として、増速比 2.5 を選んだ場合、風車直径 50m、風速 10m/s という同一条件下で、文献から取った在来型の出力は 493kW であるのに対し、本案では安全側に見て 2540kW を出し得る。その上風速（軸流速度）が増したため風車寸法を大きく出来るゆえ、現在唯一の実用機である三菱重工業製の風車 MWT250 が、風車直径 25m で、風速 12.5m/s から 24m/s までの間で 250kW を得て居るのに対し、本案では風車直径 50m で、風速 12.66m/s 時に、安全側に見ても尚 5261kW を得た。更に風力エネルギーの濃縮に必要な固定翼箱を利用して数台を積重ねる事により、1 プラントでこの数倍（本論文では 5 倍の例を示す）の出力が得られる設計を完成した。

以上により未だ類例のない形式の明星式風力発電設備の、風力エネルギーを濃縮して利用すると言う思想を、ディフューザを利用する技術を究明する事により生かして実現可能な物とし、具体的な寸法並びに出力を持たせた試設計に成功した。

尚以上により一機当りの発電容量を大きく出来たゆえ、発電機を大容量と小容量の二台の組合わせとし、常時は後者を利用し、風力増大時に前者を追加する事とした。これにより発電機を負荷 10% から 100% の間で運転出来る事となり、広い風力範囲にわたって高い発電率を得て、経済性向上に必要な稼働率向上を可能とした。

オリジナリティ 3； 分単位や秒単位で激しく変動する負荷変動を滑らかにするために、損失が無いと言われる超伝導コイルを利用した。尚これに必要な液体窒素は、風力が大きくなり、需要から見て余剰電力が発生したときの電力を利用することにより、実用上のロス無しで行い得る事を示した。

オリジナリティ 4； 著者の故郷でもある設置場所「内蒙古」は、平均風速が世界的に最も高い所であるにも関わらず、内陸のため台風が無く、大出力確保と稼働率向上の上で最も良い場所であり、資源が豊富に存在するにも関わらず電力が不足しているため、

風力発電装置を実現する上で最も有望な所が初めて建設対象地として選ばれた。

尚本論文では、内蒙古は雨量は少ないが水量豊かな黄河が流れており、又全般的には平坦地であるが、黄河の北側に接して陰山山脈があり、ポンプ水車による電力貯蔵が容易なため、風力発電を主発電装置として利用する上での適地である事にも言及しており、風力発電設備を電力的に未開発の土地に適用する場合に就いて幅広い検討を行っている。