

# 明星式風力発電装置の研究

(第2報, 装置内固定翼箱の風洞実験について)

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

Studies on MEISEI-type Wind Turbine  
(2nd report, A wind tunnel test on the fixed vane  
casing of this wind turbine)

Masayuki OGATA , De TIAN , Minoru INOUE , Junji UEMATSU

## Abstract

The distinctive feature of our wind turbine is to recover the rare wind energy by condensing them with diffuser . In our former paper<sup>[1] [2] [3]</sup>, we presented the design of 5180kW at the wind velocity of 12.6m/s , by using the 50m diameter windmill.

In this paper , we added the model test data , and we succeeded to improve the diffuser efficiency , by using the injection into the boundary layer and the boundary layer suction . And when we use these data , we suggested that this wind turbine has larger possibility.

## 1. 緒言

前報<sup>[1] [2] [3]</sup>において, 新型の風力発電装置 (図1) について述べた。風力エネルギーは無尽蔵であり無公害である。しかし, 非常に希薄なエネルギーである。そのため, 設備費が高くつき, 発電原価が高くなる。それ故, 筆者らは同じ直径でより大きい出力を発生させることが出来る装置を設計した。また, この装置は同じ風速に対してより大きい直径の風車を使用出来る。そして筆者らが名づけた固定翼箱の内側にディフューザを取り付けて風の持つエネルギーを濃縮することによって低風速の下でも有効に動作するようにした。この発電装置を“明星式風力発電装置”と命名した。

この設計において用いた主な方程式は以下の通りである。

ディフューザ効率については式(1), (2)を用いる。

$$\xi = \xi_0 - \Delta\xi \cdot (\beta - F_0/F_1) \quad (1)$$

$$\eta_d = 1 - \xi \cdot (1 - F_1/F_0) / (1 + F_1/F_0) \quad (2)$$

---

本論文は1993年6月30日に横浜で開催された「The First International Conference on New Energy Systemes and Conversion」で発表したものに加筆したものである。

\*理工学部機械工学科 助手 流体工学

\*\*内蒙古農牧学院 機電工程系 講師 (本学 電気工学科大学院修了)

\*\*\*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

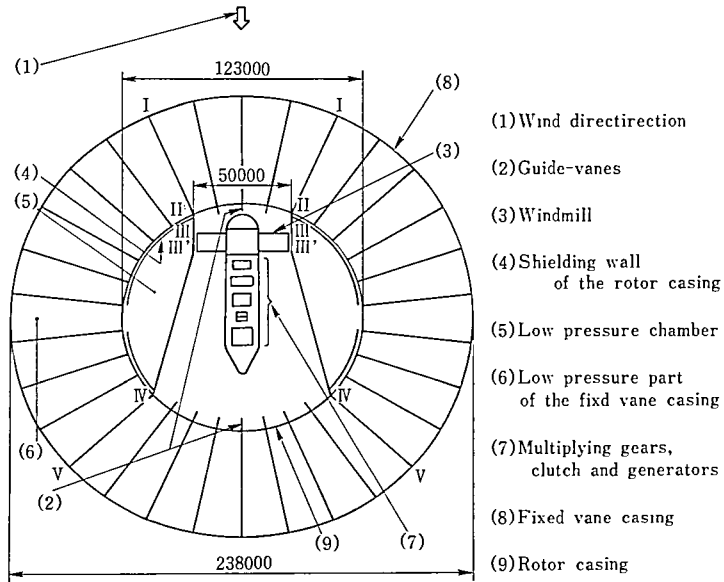


Fig. 1 The original design of the Meisei-type Wind Turbine<sup>[1] [2] [3]</sup>

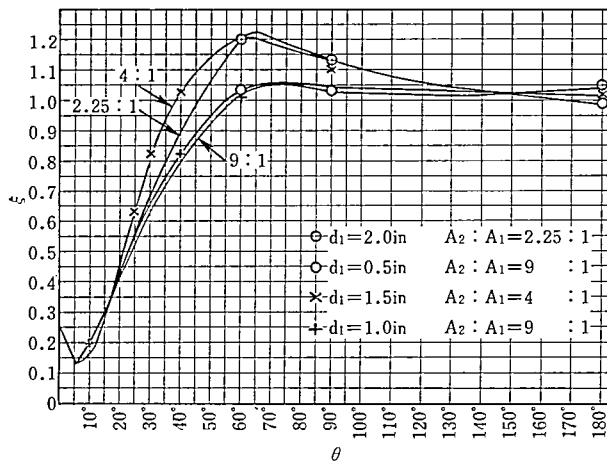
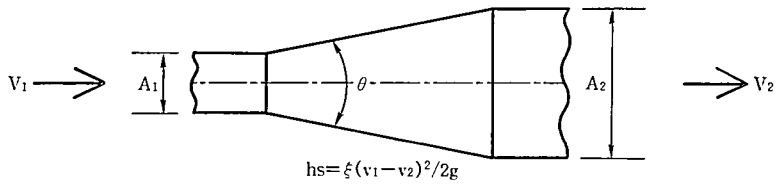


Fig. 2 Loss coefficient of the circular diffuser  $\xi$ <sup>[4]</sup>

式(1), (2)において,  $\xi$ と $\Delta\xi$ は図2<sup>[4]</sup>より, 次の値を得る。

$$\xi_0 = 0.1296, \Delta\xi = 0.00381, \beta = 2.25$$

$$P_1 - P_5 = \alpha \cdot \rho \cdot v_p^2 / 2$$

(3)

$\alpha$ に関しては、最大出力において $v_1=v_p$ であると仮定し、それゆえ  
 $\alpha=0.8$

と仮定する。

$\rho$ に関しては、内蒙古地方（平均気温 278.2K 高度 1500m）を対象として設計した前報<sup>[1][2][3]</sup>と同じ値の

$$\rho=1.0503\text{kg/m}^3$$

とする。

$$P_2-P_3'=\rho \cdot v_1^2/2 \cdot \{\alpha+1-F_1/F_3\}^2 + [(F_1/F_3)^2-(F_1/F_4)^2] \cdot \eta_{d3'} + [(F_1/F_4)^2-(F_1/F_5)^2] \cdot \eta_{d45} \tag{4}$$

$$W=F_1 \cdot v_1 \cdot (P_3-P_3') \cdot \eta_t \cdot 10^{-3} \tag{5}$$

これらの方程式により、以下の条件を用いて出力を算出すると。

$$d=50\text{m} \quad F_1=4838\text{m}^2 \quad F_1/F_3=F_1/F_3'=2.489$$

$$F_1/F_4=1.059 \quad F_1/F_5=0.5473$$

$$\eta_t=0.85$$

この場合、この設計は2.5m/s~12.6m/sまでの風速のもとで有効に仕事することができ、そして最大5180kWの出力を得る。また、固定翼箱を用いることによって1プラントに幾つかのユニットを重ね合わせる事が出来るので、筆者らはこのプラントに5ユニットの重ね合わせを試み、その結果合計で25MWより大きい出力を得る。

この論文においては図3に示す様なモデルを用いて得られた実験による新しいデータを追加し、出力計算を行い改善された値を得た。

初めに、固定翼箱の前部と後部との圧力差に関して、式(3)の中の $\alpha=0.8$ の代わりに上記

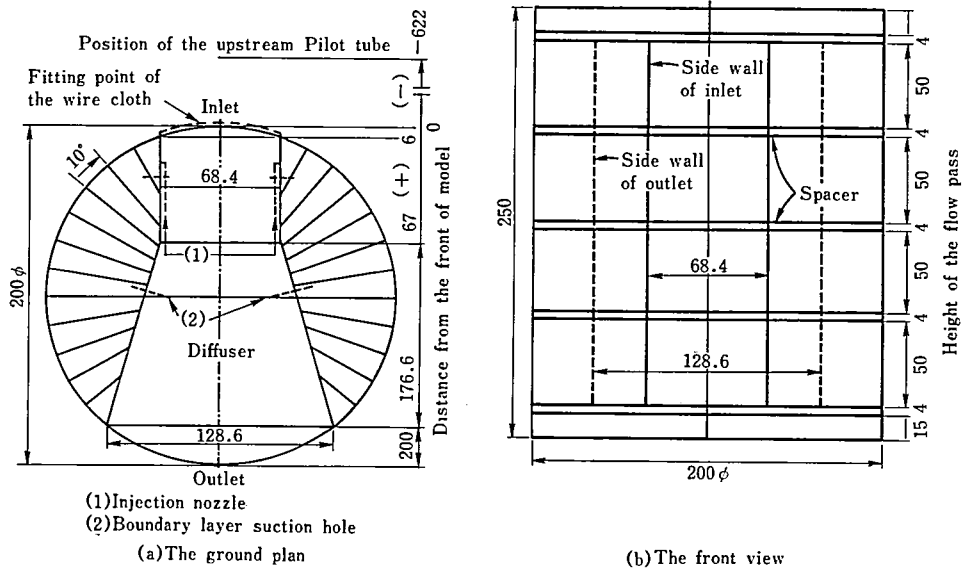


Fig. 3 The test model

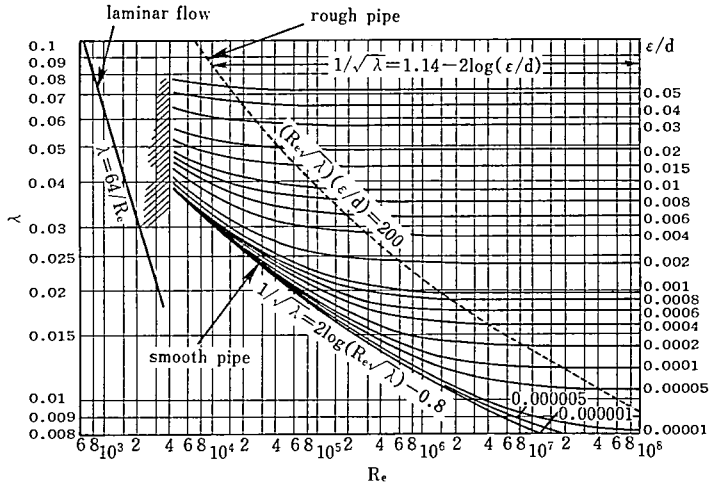


Fig. 4 Moody diagram<sup>[4]</sup>

データより  $\alpha=0.82$  という値を採用した。

この設計において、特徴の1つはディフューザを用いる事である。従ってすでに行った数種のディフューザの特性試験<sup>[5]</sup>結果より、ディフューザの主な損失は流れの剝離から起こることをしめし、そしてまた、図4<sup>[4]</sup>には壁の摩擦損失が非常に小さいことをしめている。

次に、ディフューザ効率に関して、固定翼箱の側壁において起こるところの低圧を用いる事によって、ディフューザ効率を改良するために境界層吸込みの可能性を提案する。しかし、まだディフューザ効率を求める式の中にはこの効果を導入していない。この論文においては、モデル実験のデータを用いる事によって、境界層吸込みによるディフューザ効率の大きな回復を示している。それらに加えて、筆者らは固定翼箱の空気入り口付近において起こる高圧を用いることによって境界層内に空気の注入の可能性に注目をする。そしてこの空気の注入を用いることによって、ディフューザ効率の大きな回復を得る。それ故、それら2つの方法を用いた時、ディフューザ効率に関しては100%より大きい値を得る。

ここで、ディフューザ損失を半分と仮定した時でも、5920kWの出力を得る事が出来る。そしてまた、ディフューザ効率として100%をとると、6570kWの出力を得る。

2. 記号

- $A_1$  : ディフューザ入口の面積 (図2) [m<sup>2</sup>]
- $A_2$  : ディフューザ出口の面積 (図2) [m<sup>2</sup>]
- $F_1$  : ディフューザ入口の面積 (図3) [m<sup>2</sup>]
- $F_0$  : ディフューザ出口の面積 (図3) [m<sup>2</sup>]
- $F_1$  : 図1の断面1の面積 [m<sup>2</sup>]
- $F_3$  : 図1の断面3の面積 [m<sup>2</sup>]
- $F_3$  : 図1の断面3の面積 [m<sup>2</sup>]
- $F_4$  : 図1の断面4の面積 [m<sup>2</sup>]
- $F_5$  : 図1の断面5の面積 [m<sup>2</sup>]

$P$	: 無次元圧力 $[=P/(\rho v_p^2/2)]$	$[-]$
$P_s$	: 無次元静圧	$[-]$
$P_{su}$	: モデル入口の上流における無次元静圧	$[-]$
$P_{sd}$	: モデル出口の下流における無次元静圧	$[-]$
$P_v$	: 無次元動圧	$[-]$
$P_T$	: 無次元全圧	$[-]$
$P_{Tu}$	: 入口の金網の上流における無次元全圧	$[-]$
$P_{Td}$	: 入口の金網の下流における無次元全圧	$[-]$
$V_1$	: 無次元入口流速	$[-]$
$W$	: 出力	$[kW_{or}MW]$
$W_{th}$	: 理論無次元出力	$[-]$
$d_1$	: 図2におけるディフューザ入口の直径	$[m]$
$g$	: 重力の加速度 ( $9.80665m/s^2$ )	$[m/s^2]$
$h_s$	: 図2におけるディフューザ入口の損失水頭	$[m]$
$P$	: 圧力	$[P_a]$
$P_1$	: 図1の断面1における静圧	$[P_a]$
$P_3$	: 図1の断面3における静圧	$[P_a]$
$P_{3'}$	: 図1の断面3'における静圧	$[P_a]$
$P_5$	: 図1の断面5における静圧	$[P_a]$
$P_T$	: 全圧	$[P_a]$
$P_{TP}$	: ピトー管より下流における全圧	$[P_a]$
$v_1$	: 図2におけるディフューザ入口の流速	$[m/s]$
$v_2$	: 図2におけるディフューザ出口の流速	$[m/s]$
$v$	: 図1の断面1における流速	$[m/s]$
$v_P$	: ピトー管より上流における流速	$[m/s]$
$\alpha$	: 無次元静圧差 $[=(P_1-P_s)/(\rho v_p^2/2)]$	$[-]$
$\beta$	: ディフューザ出入口の標準面積比 $[=2.25]$	$[-]$
$\eta_d$	: ディフューザ効率 (=静圧の上昇量/出入口間の動圧差)	$[%]$
$\eta_{d3'4}$	: 断面3'と4の間のディフューザ効率	$[%]$
$\eta_{d45}$	: 断面4と5の間のディフューザ効率	$[%]$
$\eta$	: 風車と発電機を含んだ全機械効率	$[%]$
$\theta$	: ディフューザの拡がり角	$[deg.]$
$\xi$	: ディフューザの損失係数	$[-]$
$\xi_0$	: 面積比が2.25の時の $\xi$ の最小値[図2より]	$[-]$
$\Delta\xi$	: 面積比9と2.25の時の $\xi$ の最小値の差	$[-]$
$\rho$	: 空気の密度	$[kg/m^3]$

### 3. 実験装置

図3に実験に使用したモデルを示す。このモデルと前報での装置との顕著な相違は大きさを約1/200に縮小したことである。この実験のレイノルズ数は $5.5 \times 10^4 \sim 10.5 \times 10^4$ とい

ような小さな値となる。それ故、本実験の領域より高いところで起こる境界層剥離の発生を懸念した。ディフューザの拡がり角度は水力平均深さを用いる事によって円錐ディフューザの8度に相当する値を換算して採った。ディフューザの入口の位置はモデルの後方67mmに設置した。また空気抵抗としては風車の抵抗に等しい金網をもちいた、金網は図3で破線で示されているようにモデルの前部の空気入り口に取付けている。使用した金網の規格は16メッシュで直径0.3mmである。抵抗値は金網の枚数によって種々変えることが出来る。モデルの回りに固定翼箱の翼と同じ翼を主流通路に除いて取付た、そして、モデルの翼に囲まれた各々チャンバーの静圧を計測した。筆者らは境界層内注入が境界吸込みより簡単であることに注目した。それ故以後それら2つについて実験した。図3にそれらの取付位置をつけ加え示した。

図5はこの実験に使用した風洞装置を示す。この風洞の境界層排除厚さは主流の幅の1.6%である。モデルは図3(b)に示されている様な一段50mmで4段の高さ250mm、直径200mmである。計測は中央部の2段を用いて行った。モデルの前部から十分な距離にピトー管をセットした。この位置では流れはすでに安定している。それ故、モデルの前部から上流622mmの位置にピトー管をセットし、このピトー管によって等価風速として $V_p$ を計測した(図3(a), 4, 6参照)。他の計測点に関してはストレートタイプのピトー管を用いて、下流から主流の中心にそってトラバースし計測した。図3(a)に示しているように、モデルの前部からの距離によってトラバース計測点を示す(下流方向を(+), 上流方向を(-)の印をつける)。

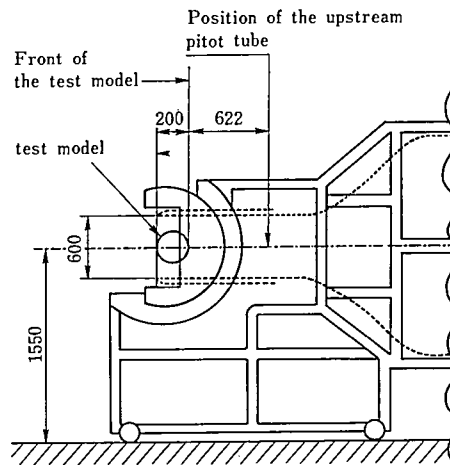


Fig. 5 The wind-tunnel apparatus

#### 4. 実験結果

図6は側壁チャンバー内で起こる静圧の値を示す。それらのデータは安定してほとんど変動しない。円柱のデータ<sup>(4)</sup>とこの値を比較してみると入口から第1チャンバー内の正の圧力は非常に高くなっている、それに代わって5, 6, 7, 8チャンバー内に発生する負の圧力は小さい値を示す。前者の現象の原因は固定翼によって生ずるよどみ効果から発生したとするものであり、後者の現象は固定翼の摩擦によってもたらせる速度減衰からなる。

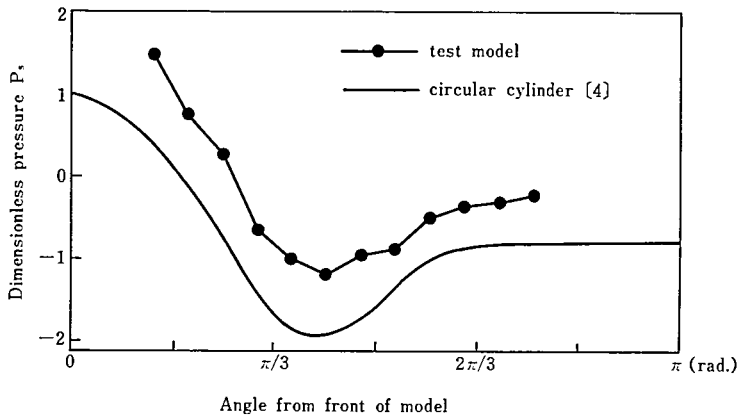


Fig. 6 Dimensionless pressure distribution surrounding the test model and the circular cylinder

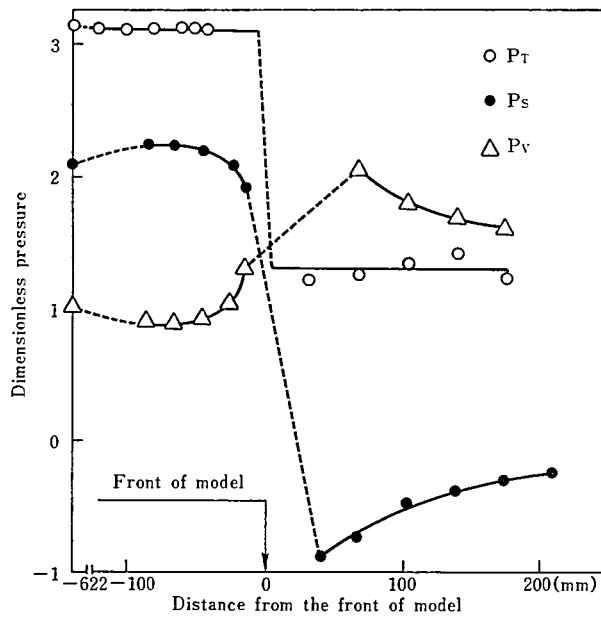
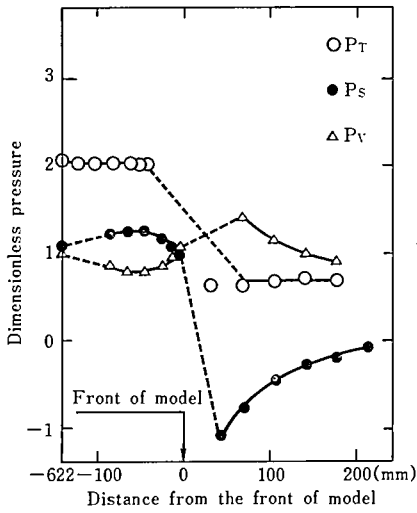
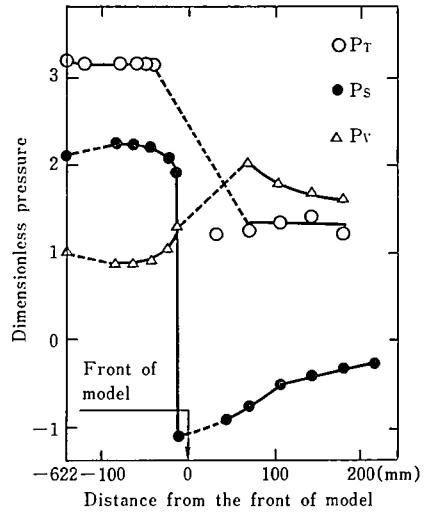


Fig. 7-1 Dimensionless pressure distribution on the axial direction  
Condition : 1 wire cloth, strong injection

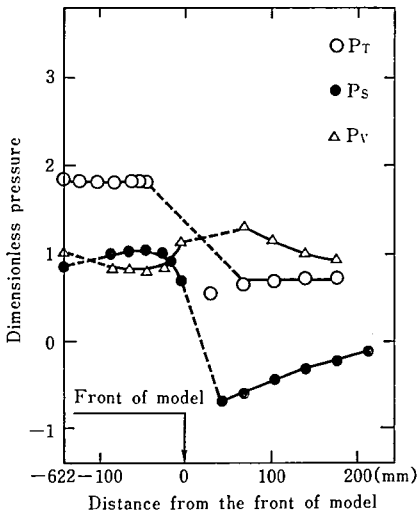
それ故、筆者らは境界層内に空気を注入することはこのモデルテストにおいて簡単であり非常に有効であることに注目する。図7-1は一枚の金網と強い注入を用いた場合のテストデータの一部を示す。この場合、ディフューザ内で境界層内の剝離は生じていない、それ故、全圧 $P_t$ はモデルの前面に付加した金網による分だけ下降する。上流の静圧 $P_s$ に関して、よどみ効果によってより高い値を得る、そして流れの加速度の影響によってモデルの前部付近で低い値を得る。また動圧 $P_v$ を用いることで入口速度 $V_1$ を求める事が出来る。それらを総合することで風力発電装置の出力を計算する事が出来る。また図7-2、7-3



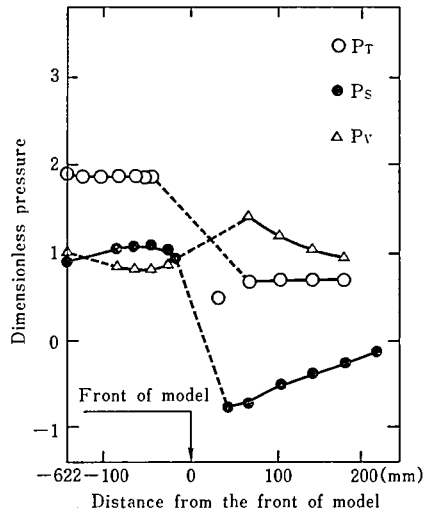
condition : 1 wire cloth  
no injection and  
no boundary layer suction



condition : 1 wire cloth  
strong injection



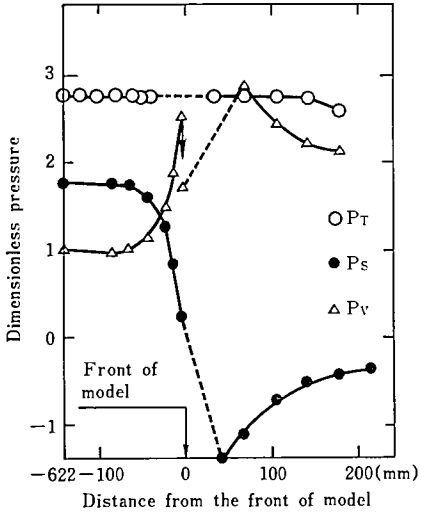
condition : 1 wire cloth  
injection



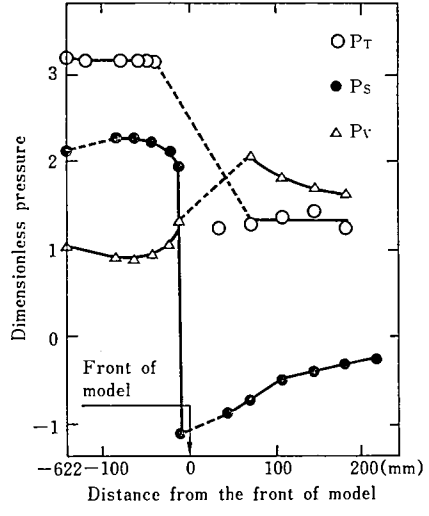
condition : 1 wire cloth  
injection plus  
boundary layer suction

Fig. 7-2 Dimensionless pressure distribution on the axial direction

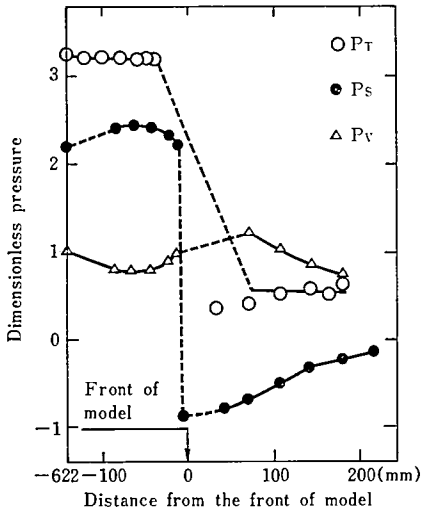




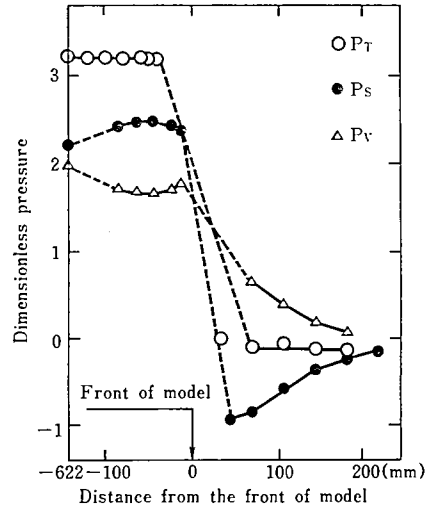
condition : non wire cloth  
strong injection



condition : 1 wire cloth  
strong injection



condition : 2 wire cloth  
strong injection



condition : 3 wire cloth  
strong injection

Fig. 7-3 Dimensionless pressure distribution on the axial direction

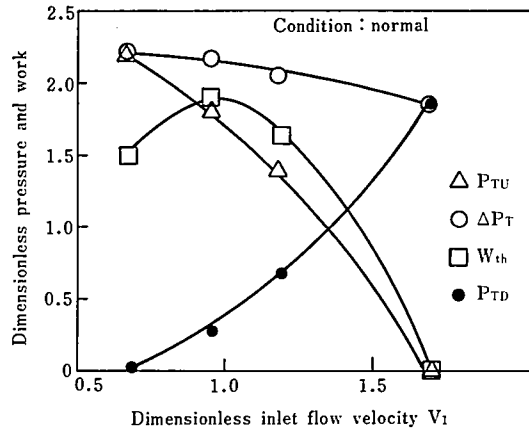


Fig. 8 The relationship of the pressure and the work to the flow velocity

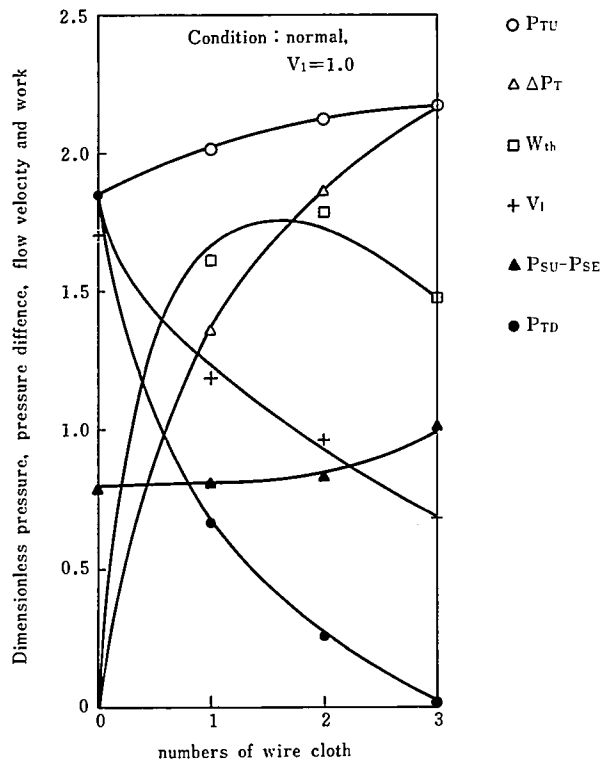


Fig. 9 The relationship of the pressure, pressure difference, flow velocity and work to the number of the wire cloth

には各実験条件 (注入と境界層吸い込み無し, 1%の注入有り, 強い注入有り, 1%の注入と境界層吸い込み有り, 金網の枚数)を変えた場合のテストデータの比較を示す。図8, 図9は一般的な, すなわち注入無し, 境界層吸い込み無しの条件の時の特性を示す。最大

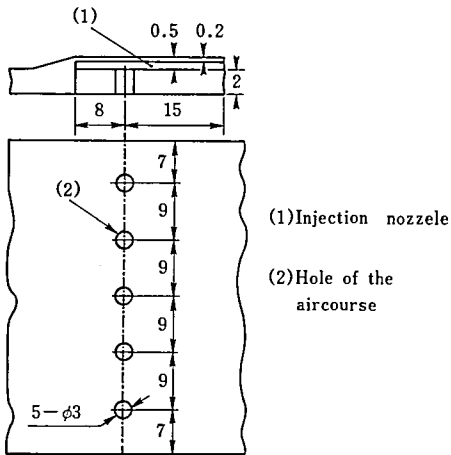


Fig. 10 Air injection apparatus

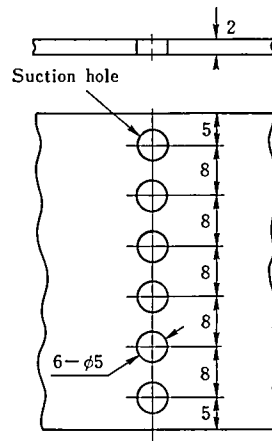
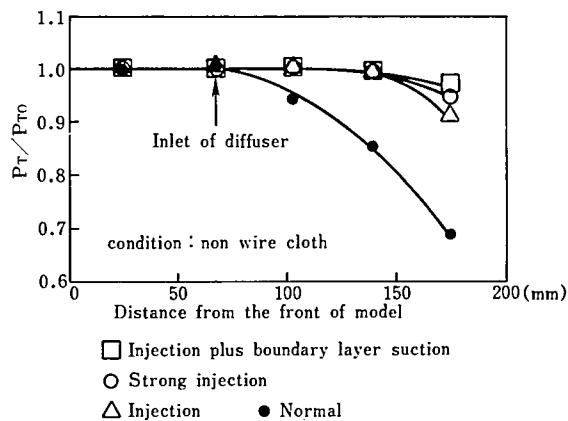


Fig. 11 Boundary layer suction apparatus

Fig. 12 The total pressure ratio  
( $P_T$  at each position per  $p_{T0}$ )

出力は入口速度 $v_1$ が風速 $v_P$ に等しい時すなわち $V_1 = v_1 / v_P = 1$ である場合に与えられる、そして、固定翼箱の前後の圧力差の値 $\alpha (= P_{SU} - P_{SD})$ は図9を参照して、前報の値の0.80に代わって、最大出力において得られる0.82をとる。図10は境界層内への空気注入の装置を示しています。一般に、注入には主流の1%を、強い注入には主流の1.6%をそれぞれ用いることにする。図11には境界層吸込みの装置を示しています。両装置とも簡単な構造で、制作しやすいものです。図12は空気の注入境界層吸込みなし、1%注入、1.6%注入、注入と境界層吸込みの場合の全圧比を示し、注入と吸込み両者を用いた場合の顕著な効果を示しています。実験は金網を1枚から3枚用いておこなったが、ここではディフューザ内の剝離を生ぜにくい金網無しの条件のもとでの境界層内注入と境界層吸込みの影響を調査した。

## 5. 結論

今日の風力発電装置に関して最も重要な課題の1つに設備費の低減がある。この課題に関して、一つの解決方法として単位容量（単機当たりの出力）を大きくすることが考えられる。我々はこれをディフューザ装置を利用することによって希薄な風力エネルギーを濃縮する方法を用いた。この論文ではモデルテストの結果を用いた新しいデータを付加し出力を算出すると、ディフューザ損失を半分と仮定した時でも、5920kWの出力を得る事が出来る。そしてまた、ディフューザ効率として100%をとると、6570kWの出力を得る。

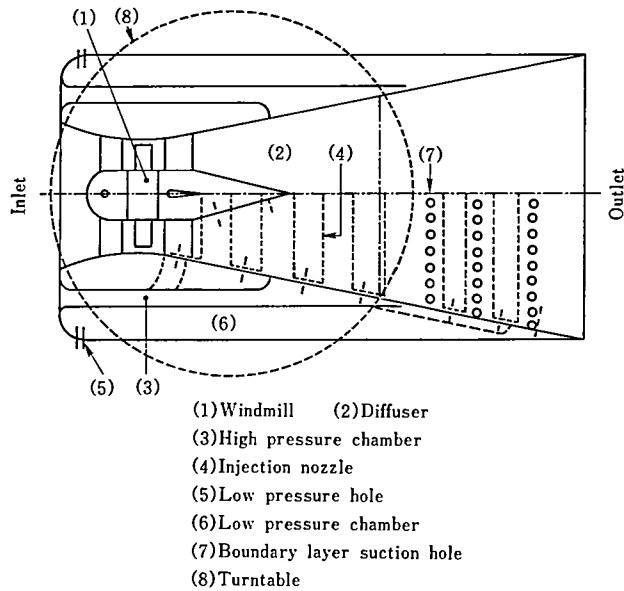


Fig. 13 New design

また、新しいデータを付加し図13に示す様な風力発電装置の新しいプランを提案した。結果を要約すると、次のようになる。

- (1) 風力発電装置の出入口間の圧力差が出力を大きくするのに多大な効果をもたらす。とりわけ風力発電装置の入口付近の圧力上昇が非常に重要である。この効果を拡大するため、図13に示すように風力発電装置の入口部をフラットヘッドにすることを提案した。
- (2) 境界層内に空気を注入（わずかなエネルギーの付加）することによって、ディフューザの損失を軽減するのに非常に有効である。例えば、主流の1%の空気の注入でも損失を減らすのに充分効果がある。特に、この空気の注入と境界層吸込とを組み合わせればさらに効果が大きくなる。この目的に関して、最も重要な事柄は高圧チャンパー内の圧力を上昇させることである。それ故、我々は図13に示すように風力発電装置の入口を空気の注入に対して高圧が取れるようにフラットヘッドにすることに提案した。
- (3) 境界層吸込みはディフューザの損失を軽減するために非常に有効である。特にこの境界層吸込みと空気の注入とが組み合わせられた時、効果は一層拡大される。この装置は図11に示す様に非常に簡単である。低圧チャンパー内の圧力を減少させる事はこの目的に対

して適している。それ故我々は図13に示す様な風速を加速するのにふさわしい緩やかな曲部に低圧孔を設けることを提案した。

- (4) 両者を同時に設置した時、図1と図13に見られるようにローターケーシングと固定翼箱との間を分ける必要はない。1つのケーシングの中に両者を組み合わせる事は大変よく、そしてケーシングの幅はディフューザの出口幅と同じ幅で充分である。
- (5) 本実験で使用したモデルは非常に小さいものであから空気の注入と吸込みを各1ヶ所だけ設置した。それにも関わらず、約6.4%の出力回復を得た。

今後、図13のモデルを制作し境界層吸込みと空気の注入効果を確認し、実現に近づけたい。

## 6. 参考文献

- [1] 田徳，緒方正幸，井上實，上松順二「明星式風力発電装置の研究(内蒙古を対象とした設計)」明星大学研究紀要(理工学部) No.29 P109~119 1993.3
- [2] 田徳，緒方正幸，井上實，上松順二「明星式風力発電装置の研究(第二報 内蒙古を対象とした設計例)」風力エネルギー vol.12 No.2 P43~46 1992
- [3] 田徳，緒方正幸，井上實，上松順二「大容量風力発電設備の設計」第一回青年学術年会論文集 中国科学技術協会 P61~69 1992 北京
- [4] 日本機械学会編 機械工学便覧 新版 A5-75, A5-78, A5-97 1981
- [5] 緒方正幸，上松順二「流体の方向転換を伴う諸問題(第4報 ディフューザの流体力学的特性)」明星大学研究紀要(理工学部) No.21 P61~70 1985.3