

浮体式洋上風力発電ファームにおける風車間の遮蔽影響に関する研究

正員 緒方 龍*

正員 影本 浩**

正員 木下 嗣基***

阿久津 好明**

加藤 孝義**

A study on the shielding effects among wind-power generators in a floating wind farm

by Ryu Ogata, *Member*Hiroshi Kagemoto, *Member*Tsuguki Kinoshita, *Member*

Yoshiaki Akutsu

Takayoshi Kato

Summary

As the wind power is now considered as one of the most promising renewable energy resources, the total amount of electricity produced worldwide by wind-power generators is increasing quite rapidly. In Japan, since land spaces suitable for wind-power generations are quite limited, the feasibility of wind-power generations in offshore areas is now being studied extensively. Among various possible types of offshore wind-power generations, a floating wind farm, which consists of large floating structures and an array of wind-power generators mounted on each of the floating structures is considered to be an adequate type for Japan because the water depth tends to become large steeply even in the close proximity of shores. It is known that, in such a floating offshore wind farm, the construction cost of the floating structures, on which an array of wind-power generators are to be mounted, accounts for a major part of the total construction cost. It is therefore quite vital for the reduction of the power-generation cost that the number of wind-power generators mounted on a unit area of a floating structure could be increased. On the other hand, however, a larger number of wind-power generators per unit area of a floating structure usually results in the lower amount of average power produced by each generator, because the wind speed incident to power-generating blades tends to be reduced due to the shielding effects among the congregated wind-power generators.

In the present study, the shielding effects among the generators in an offshore floating wind farm are investigated through extensive experiments and the trade-off effects on the generation cost due to the increase of the number of generators mounted on a unit area of a floating body and the increase of the shielding effects among generators are quantified. It has been found out through the experiments that the interaction effects between adjacent wind-power generators when they are placed side-by-side against wind direction are much smaller than generally conceived, and thus wind-power generators could be mounted in an offshore wind farm with significantly higher density than that of conventional wind farms.

Finally, an offshore floating wind farm free from the shielding effects among the mounted generators is proposed.

1. 緒 言

化石燃料の燃焼に伴って排出される二酸化炭素による地球温暖化などの環境問題が顕在化している中、二酸化炭素の排出を伴わないエネルギー源として再生可能エネルギーが注目されている。特にその中でも風力エネルギーは他の新エネルギーに比べ実用化が進んでおり、新たなエネルギー源として期待されている。しかし国土面積の小さい日本では風力発電に適した広い平野が少なく、大規模な開発が難しい。一方、我が国は四方を海に囲まれ、世界第6位の排他的経済水域を有する海洋領土大国であり、洋上での風力発電が有望ではないかと考えられている。しかしながら、北欧で普及しつつあるような着底式の洋上風力発電は、日本近海では遠浅の海岸が少ないことや、漁業権などを考慮すると大規模な開発は難しいとい

える。そこで、日本に適した風力発電として浮体式風力発電が考案され、現在までに様々なシステムが提案されている。一般に、風車を近接して配置すると、風車間の遮蔽影響により発電量が減少するため、陸上の風力発電ファームあるいは着底式洋上風力ファームでは、隣接する風車の中心間隔は、主要な風向と直角方向には風車直径の3倍以上、主要な風向と平行な方向には風車直径の10倍以上とすることが通例であるが、浮体式洋上風力発電ファームでは、建設コストの高い浮体を有効に使うために、浮体に搭載する風車の数をなるべく多くすることが望ましい。

このような観点から、本研究は、浮体上で近接する風車間の遮蔽影響と遮蔽影響による発電量低下を実験によって定量的に明らかにすると共に、遮蔽影響の少ない浮体式洋上風力発電システムを提案することを目的として実施した

2. 風車間の遮蔽影響実験

2.1 実験の概要

(1) 供試模型

本研究で対象としたのは、水平軸型のプロペラ型風車群を浮体上

* 新日本石油（研究当時東京大学大学院）
 ** 東京大学大学院
 *** 国立環境研究所（研究当時東京大学大学院）
 原稿受理 平成17年5月20日

に搭載する形式の浮体式洋上風力発電ファームである。プロペラ型の模型を供試する場合、模型実験において、流れの持つエネルギーを風車が吸収する率(パワー係数)を実際の風車と同程度に調整する必要があるが、模型の寸法上そのような複雑な装置を製作するのは困難であるため、Fig.1 に示すような穴を開けた円板を用い、面積率(円板の全面積に対する模型円板の面積の比)を変化させることで、風車への入射風速と風車後流における風速の比が実際の風車と模型実験とで同じになるように供試模型を設計した。供試した円板は直径 100mm、厚さ 2mm で、各穴の直径は同一で 7.7mm とした。

また、風車が回転することで風車後方の流れには旋回流が生じるが、これによる流れのエネルギー損失は小さく無視することが出来ると考えた。

(2) 実験方法

本来ならば、風洞を利用して実験を行うべきであるが、模型に働く抗力は流体の密度に比例するため、本実験で用いた模型寸法では、空気中で測定される抗力は非常に小さく、精度のよい計測が困難となることが予想された。また、本研究で対象とする模型まわりの流場はレイノルズ数によってほぼ決まると考えられるため、適切なレイノルズ数範囲で実験を行えば、流体としての媒体が空気ではなく水であっても構わないであろうと考えた。(Hoerner¹⁾のテキストに掲載されている抗力に関する実験結果も、流体が空気であるか水であるかに関わりなく、レイノルズ数が同じであればほぼ同じ結果となっていることから、本実験方式は妥当であると考えられる。)このような理由により、船舶試験用の水槽を用いて、供試模型を曳航電車により水中で曳航することによって、抗力を計測した。

実際の風車後方の流れと円板後方の流れの対応については、風車の回転面で考えれば双方とも円形の板として捕らえることが出来る。円板のようにエッジがシャープな場合、剥離点が一意に決まるので、Hoerner¹⁾によればレイノルズ数が 10^4 程度よりも大きい範囲では抗力係数はほぼ 1.17 で一定となり、レイノルズ数影響は小さい。本実験では、レイノルズ数は $4 \times 10^3 \sim 3 \times 10^4$ 程度であり、模型と実機とでレイノルズ数が異なることによる風車周りの流場に対する影響は少ないと考えたが、後述するように必ずしもそうとはいえないことがわかった。

実験は、東京大学工学部運動性能水槽(長さ 45m×幅 5m×実験時水深 3m)で行った。水槽にはレール上を水槽の長さ方向に走行することが出来る曳航電車が装備されており、コンピュータ制御により 20mm/sec～1000mm/sec の速度範囲で、誤差 ± 1 mm/sec で走行させることが可能である。



Fig. 1 風車模型

2.2 予備実験

2.1 で述べたように、穴あき円板を用いた供試模型が実際の風車と同程度のパワー係数を持つように設計する必要がある。そのため、まず予備実験として、供試模型の面積率(円板の全面積に対する模型円板の面積の比)を変化させて抗力を計測し、風車単体の場合の面積率と抗力係数の関係を求めた。実験方法は、風車模型を円板面が曳航電車進行方向と正対するように曳航電車に固定し、水中を一定速度で曳航させた時の風車模型に働く抗力を検力計によって測定した。予備実験の結果を Fig.2 に示す。ここで、速度 U で曳航した時の模型風車に働く力が抗力係数 C_D を用いて $\frac{1}{2} \rho_w S C_D U^2$ で表されると仮定して抗力係数を求めた。(ρ_w は水の密度で、 S は面積率にかかわらず直径 100mm の円板の面積値を用いた。また、凡例は各曳航速度を示す。) 図中の R^2 は、抗力係数と面積率の関係を図中に示した直線で近似した時の抗力係数の値と実験結果との相関係数 R の 2 乗値であり、相関係数 R の値が 0.9469 ($=\sqrt{0.8966}$) と 1 に極めて近いことから、面積率と抗力係数はほぼ比例することがわかった。

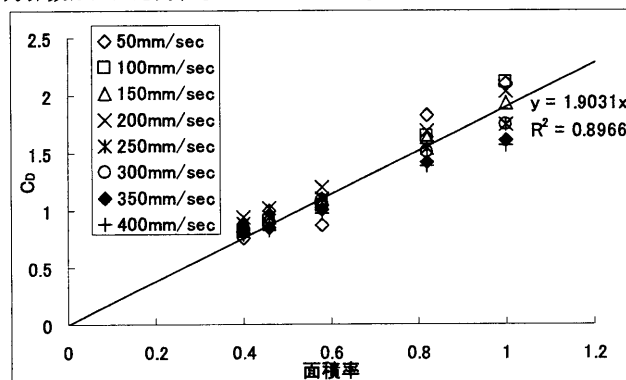


Fig. 2 面積率と抗力係数

2.3 風車模型の設計

予備実験の結果を基に、以下に示すような方法によって実験に用いるべき風車模型の面積率を決定した。

(1) 運動量の理論(実機)

実際の風車に加わる抗力 $T_{turbine}$ は、風車の前後の風速を Fig.3 のように定義すると、風が風車を吹きぬける際の質量保存と運動量の釣り合いから(1)のように書ける。なお、ウェイク風速とは風車後方における風車の影響を受けた風速のことである。また、流量一定であることから $SU = AV = S'u$ を用いた。

$$\begin{aligned} T_{turbine} &= \rho_a S U^2 - \rho_a S' u^2 \\ &= \rho_a A V (U - u) \end{aligned} \quad (1)$$

ρ_a : 空気密度

A : ロータ面積

V : ロータ面上での風速

U : 風車前方の風速

u : 風車から離れた位置でのウェイク風速

また、 $T_{turbine}$ は風車前後の圧力差とベルヌーイ式から以下のようにも書くことができる。

$$\begin{aligned} T_{turbine} &= A(p_u - p_d) \\ &= \frac{1}{2} \rho_a A (U^2 - u^2) \end{aligned} \quad (2)$$

p_u : 風車前方の圧力

p_d : 風車後方の圧力

(1)、(2)式より、 V, U, u は以下の関係を満たす。

$$V = \frac{1}{2}(U + u) \quad (3)$$

(2)、(3)より、発電量 P は(4)のように表せる。

$$P = 2\rho_a S(U - V)V^2 \quad (4)$$

ここで、風車による風速の減衰率を α とすると、下のようにおける。

$$V = \alpha U \quad (5)$$

(4)に代入すると、(6)のようになる。

$$P = 2\rho_a S(1 - \alpha)\alpha^2 U^3 \quad (6)$$

また、風車後方の風速 u は(3)より

$$u = 2V - U = (2\alpha - 1)U$$

となる。これが 0 よりも大きいことから、

$$\alpha \geq \frac{1}{2} \quad (7)$$

である。

ここで、風車のパワー係数が 0.4 程度であることを用いると、(6)より

$$P = 2\rho_a S(1 - \alpha)\alpha^2 U^3 = 0.4 \times \frac{1}{2} \rho_a S U^3$$

$$(1 - \alpha)\alpha^2 = 0.1 \quad (8)$$

(7)の範囲で(8)を解くと、 $\alpha = 0.865$ となるので、

$$V = \alpha U = 0.865U$$

$$u = (2\alpha - 1)U = 0.730U \quad (9)$$

となる。

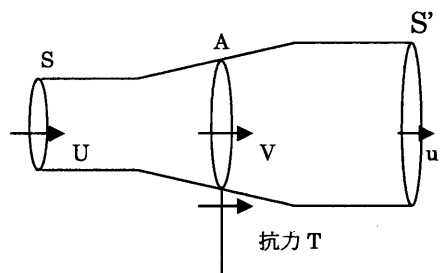


Fig. 3 運動量理論における風車ロータまわりの流れ

(2) 運動量の理論(模型)

模型周りの流れを、運動量の理論より検討する。模型の前後の風速を Fig.3 のように与える。このとき、円板前後の流量が一定であることから、 $Q = US = uS'$ となるので、

$$S' = \frac{U}{u} S \quad (10)$$

ここで抗力 T は、運動量の法則より

$$T = \rho_w \int_S U^2 dS - \rho_w \int_{S'} u^2 dS'$$

ρ_w : 水の密度

となる。 u が S' 上で一様であると仮定すると、

$$T = \rho_w U^2 S - \rho_w u^2 S'$$

ここで(10)を代入し、

$$T = \rho_w U^2 S - \rho_w u^2 \frac{U}{u} S \quad (11)$$

$$= \rho_w (U^2 - Uu) S$$

また、抗力係数 C_D を用いると、

$$T = C_D \cdot \frac{1}{2} \rho_w U^2 S \quad (12)$$

となるので、(11)、(12)より

$$u = \left(1 - \frac{1}{2} C_D\right) U \quad (13)$$

したがって、(10)、(13)より

$$S' = \frac{U}{\left(1 - \frac{1}{2} C_D\right) U} S = \frac{1}{1 - \frac{1}{2} C_D} S \quad (14)$$

(3) 風車模型の設計

風車模型の所要抗力係数の決定

模型風車後方の流れと実機風車後方の流れが相似になるためには、(9)と(13)が一致することが必要条件となる。このとき、

$$0.730 = 1 - \frac{1}{2} C_D$$

$$C_D = 0.540 \quad (15)$$

となる。この時、風車上流から流れ込む風速 U と風車下流から流れ出す風速 u との比が実機と模型実験とで一致するので、 S と S' との比も実機と模型実験も同じ値となる。従って、Fig.3 のように描いた時の風車前後の空気流の幾何学的な広がり方が実機と模型実験とではほぼ等しくなると考えられる。ただし、風車後流は実際には旋回流となっているなど、風車まわりの流れと穴あき平板まわりの流れの間には流体力学的観点から種々の違いが存在するため、風車を穴あき平板で置き換えて実験を行うといったコンセプトの妥当性に関しては、今後、風車模型を使った実験結果と穴あき平板模型を使った実験結果の比較や、風車模型周りの流れ場と穴あき平板模型周りの流れ場に関する詳細な計算結果の比較などにより更に検討すべき課題であると考えられる。

穴のあいていない円板の抗力係数は、たとえば Hoerner¹⁾ によれば、レイノルズ数が 10^4 程度より大きな範囲では 1.17 で一定である。一方、本実験で穴のあいていない円板を水中で曳航した場合の抗力から求められる抗力係数は Fig.2 に示したようにそれよりも大きな値となった。

このように本実験の結果得られた円板の抗力係数が既存の実験結果と異なる原因として 1) 自由表面影響 2) レイノルズ数影響などが考えられる。この内、自由表面影響については、曳航する円板(穴のあいていないもの)の自由表面からの深度を変えて実験したところ Fig.4 に示すような結果が得られた。この図から、曳航される風車の深度を変化させても抗力係数はほとんど変化せず、自由表面の影響は見られないことがわかる。(ちなみに Fig.2 に示した結果は風車中心の深度が 75mm の場合である。)

一方、レイノルズ数の影響については、穴のあいていない円板(中心の深度 75mm)を用いて、曳航速度を 100mm/sec から 500mm/sec まで変化させて抗力係数を求めた結果を Fig.5 に示す。また、Fig.6 には、横軸にレイノルズ数をとって Hoerner¹⁾ に示されている図(page 3-15, Figure 26)に本実験結果を重ねてプロットした図を示す。(水の動粘性係数を $1.3 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ と仮定した) Hoerner の図は既存の実験結果をまとめて示したものであるが、各実験間のばらつきは少なく、Fig.6 に示すようにほぼ 1 本の曲線上にすべて

の実験結果がのる一方で、本実験結果はこれら既存の結果より明らかに大きい値となっている。曳航速度を上げるにつれて（即ちレイノルズ数を上げるにつれて）本実験結果は Hoerner の図に近づくが、そもそも本実験におけるレイノルズ数範囲では Hoerner の図ではレイノルズ影響が見られないのに対して、本実験ではレイノルズの増加と共に抗力係数が小さくなるといった傾向が異なる。

本実験に用いた模型は Fig.2 に示したように、円板をストラットで支える構造となっているため、計測された抗力には円板に加わる抗力以外にストラットに加わる抗力が含まれているが、ストラットだけを取り出して曳航して計測を行ったところ、計測された抗力は Fig.5, Fig.6 に示した実験結果の 1 割程度で、Hoerner の図との差を説明するに至らなかった。

以上、結局のところ円板に加わる抗力に関して、本実験結果と既存の実験結果（Hoerner の図）に有意な差が見られることの原因を特定することはできなかったが、実験事実として本実験における円板まわりの流れと、Hoerner の図に引用された既存の実験における円板まわりの流れの様子は少し異なり、本実験に用いた円板まわりの流れ場の乱れが既存の実験における円板まわりの流れ場の乱れに比べて若干小さいことが示唆される。とはいえ、Hoerner の図においてレイノルズ数 10^3 以下で見られる抗力係数の大きな変化に比べて、本実験結果のレイノルズ数依存性は小さく、本実験における円板まわりの流れ場と Hoerner の図に引用されている既存実験における円板周りの流れ場とで、流れ場の違いは小さいとして、以後実験を進めることとした。

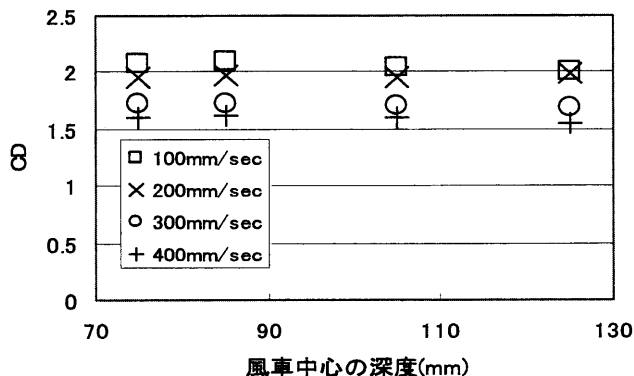


Fig.4 風車の深度と抗力係数の関係

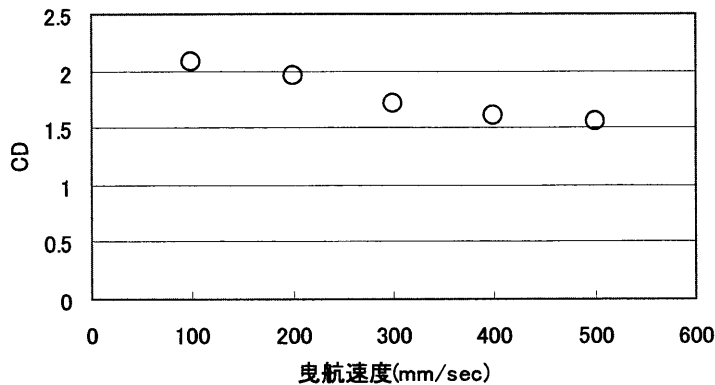


Fig.5 曳航速度と抗力係数の関係

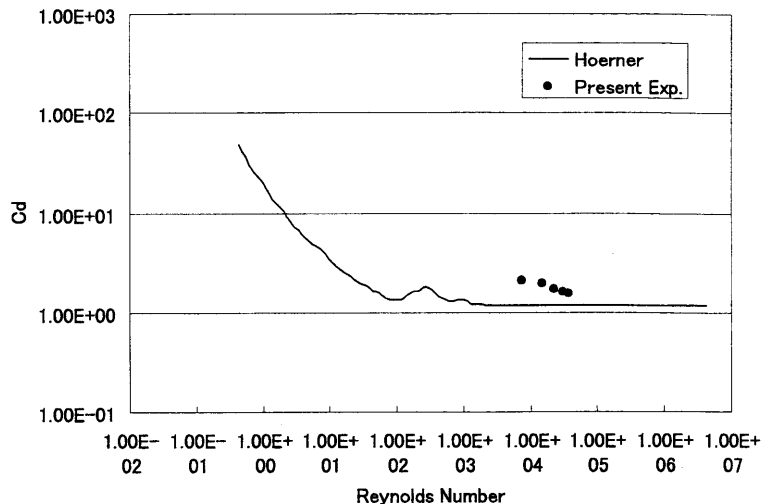


Fig.6 Hoerner の図と本実験結果の比較

風車模型の面積率の決定

Fig.2 に示したように面積率と抗力係数の関係を直線近似した結果より、面積率 1 の円板の抗力係数は約 1.90 となる。一方、上述したように、実機風車の抗力係数は約 1.17 と考えられる。

(15)式より、実験に用いるべき穴あき円板の抗力係数は 0.540 となるべきであるが、穴あきの模型風車の場合も、面積率 1 の場合の模型風車と実機風車の抗力係数の比と同じ割合で抗力係数が大きくなると仮定すると、実験に用いるべき穴あき模型風車の抗力係数 C_D' は

$$C_D' = \frac{1.90}{1.17} \times 0.540 = 0.877$$

となる。

抗力係数 0.877 に対応する面積率は、Fig.2 より

$$\frac{0.877}{1.903} = 0.461$$

となるから、実験に用いるべき円板の面積率は 0.461 と決定される。

（上に示した面積率の求め方から、結局面積率は 0.540/1.17 で求められるから、実験のレイノルズ数に拘わらず実験に用いる円板の所要面積率は同じ値になることがわかる。）

以上の結果をふまえて、本実験では Fig.7 のように風車模型を設計・製作した。製作された風車模型の面積率は 0.466 となった。

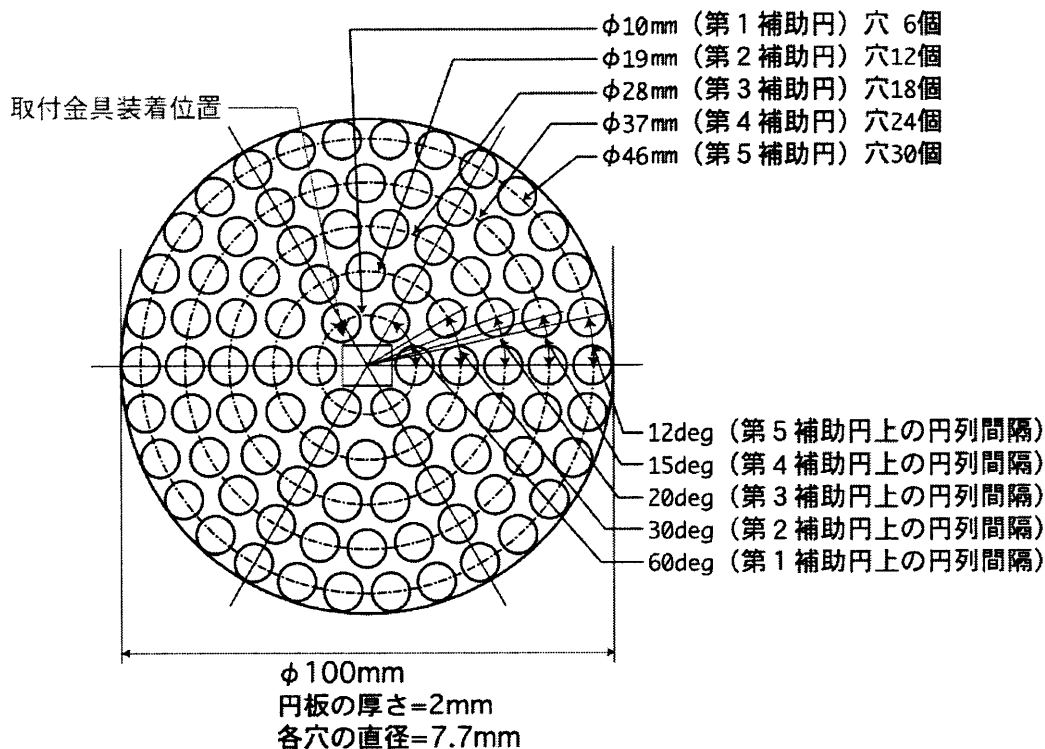


Fig. 7 風車模型の穴の配置

2.4 風車間の遮蔽影響実験

(1) 実験方法

本実験は、Fig. 1 に示した風車模型を、Fig. 8 に示すように上下逆にして曳航電車に固定し、水中を一定速度で曳航することによって各風車に加わる力を計測した。既存の風車は、風向きが変化しても風に正対する方向にヨー制御されることから、Fig. 9 に示すように、各風車模型の円板面は常に曳航電車の進行方向と正対させた。風車模型に加わる力の計測には、Fig. 1 に示したように風車を支えるストラット（実際の風車ではボールに当たるものと見なすことができる）に、歪みゲージ型の防水仕様検力計を組み込んで計測を行った。実験パラメータは、風車の搭載数を 2～7 基、風車中心間隔を 10～100cm、風向を 0～90deg、曳航速度を 50～450mm/sec とし系統的に変化させて実験を行った。なお、風車模型の直径は 10cm である。（風向 θ の定義は Fig. 9 中に示す通りである。）

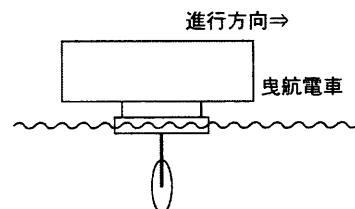


Fig. 8 実験概要側面図

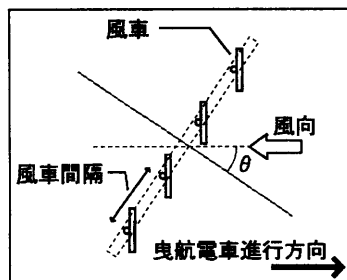


Fig. 9 実験概要平面図

(2) 実験結果

実験によって得られた各風車模型の抗力係数 C_D は、当該風車模型を単独で曳航した際の抗力係数 C_{D0} に対する比として比較した。したがって、その比が 1 に近い値であれば風車間の影響による抗力係数の変化は小さい、即ち遮蔽影響は小さいと判断される。

単独風車模型の抗力係数

Fig.10 は、Fig.7 に示した穴あき風車模型を単独で曳航した際の抗力係数と曳航速度の関係を表したグラフである。

これらの実験結果から、穴あき風車の場合、曳航速度の変化による風車模型の抗力係数の変化は小さいことが分かった。また、曳航速度が小さい範囲では計測値にばらつきがあるが、これは計測される抗力が小さく、電車の振動等による計測値の変動幅と同程度になったため、計測値から抗力を特定する際の誤差が相対的に大きくなったためと思われる。

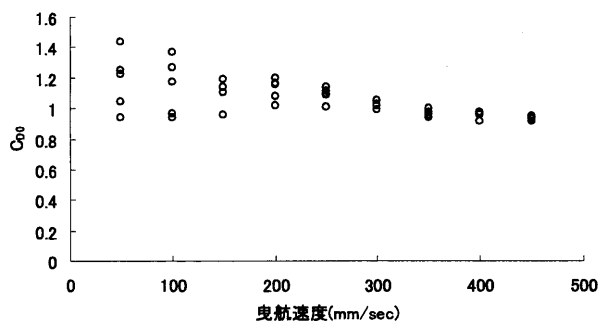


Fig. 10 抗力係数—曳航速度(単独)

風車間の遮蔽影響

次に、風車間の遮蔽影響を調べるため、風車 2 基を卓越風向に対して直角方向に配置した場合と卓越方向に平行な方向に配置した場合の抗力係数の変化を計測した。

Fig.11 は風向 0deg のとき（風向の定義については Fig.9 を参照されたい）、すなわち卓越風向に対して直角方向に風車が並んでいる際に、各風車の抗力係数が風車中心間隔に対してどのように変化するかを表したグラフである。（この場合は風車間の遮蔽影響というよりも、むしろ風車間の流体力学的相互干渉影響というべきであろう。）ここで縦軸は曳航速度 150~400mm/sec の抗力係数の平均値を表している。また、L は隣り合う風車の中心間隔を、D は風車径を表す。この結果から、隣り合う風車のブレードがほとんど接するまで ($L/D=1$ まで) 近接させても、風車間影響はほとんどないことがわかる。

従来、卓越風向に直角方向の風車中心間距離は風車径の 3 倍以上離せば風車間影響を回避できるとされているが、風向が変化しなければ風車間がほとんど接するまで近接して配置することが可能であると言える。

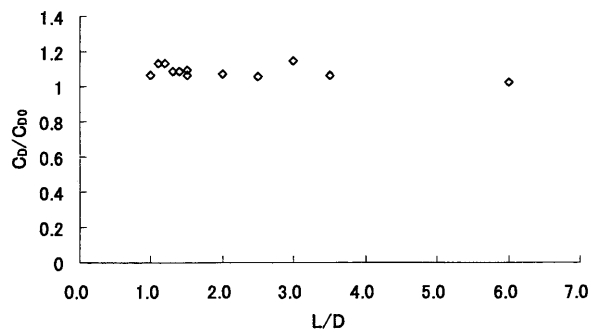


Fig. 11 抗力係数—風車間隔(風向 0deg)

Fig.12 は風向 90deg、すなわち卓越風向に対して平行な方向に風車 2 基が並んでいる際の、風下側風車の抗力係数が風車間隔に対してどのように変化するかを表したグラフである。風車径の 10 倍程度離して設置した際でも、抗力係数は風車単独の場合の 6 割程度にまでしか回復しない。抗力係数を求める際の風速としては風上風車に入射する風速を用いているので、この結果から風下風車に入射する風の速度は風上風車に入射する風速の 78% ($=\sqrt{0.6}$) 程度までしか回復せず、発電量は風車単独の場合の半分程度 ($0.78^3 = 0.47$) となってしまうことが分かる。従来、卓越風向と平行な方向には風車径の 10 倍程度離せば風上風車による風下風車への遮蔽影響は回避できるとされていたが、本実験の結果からは、卓越風向と平行な方向には風車間影響が予想以上に大きいことがわかった。

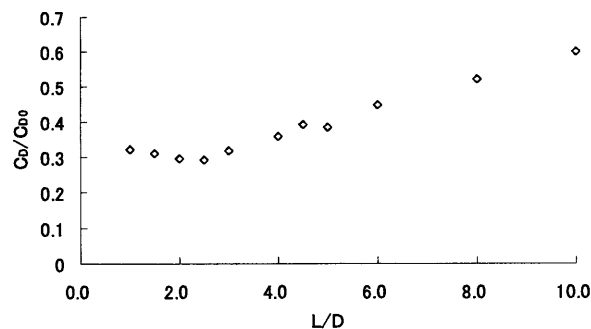


Fig. 12 抗力係数—風車間隔(風向 90deg)

Fig.13 は 2 基の風車を用いた際の風下側風車の抗力係数の風向による変化をみたグラフである。また、Fig.14 は風車を等間隔で 7 基配置した場合の 3 基目以降の風車模型の抗力係数の平均を表したグラフである。（風車を多数配置した場合の抗力係数は、風上から 3 基目以降はほぼ一定であった。）（凡例中に (CAL) で示されている結果は、後述する実験式による推定値である。）両図に示された結果より、風車中心間隔を風車径の 3 倍離した場合には、風向 70 度程度までは風上風車による遮蔽影響がほとんど見られず、風車中心間隔を風車径の 1 倍まで近接させた場合でも、風向 30 度程度までは遮蔽影響がみられないことがわかる。

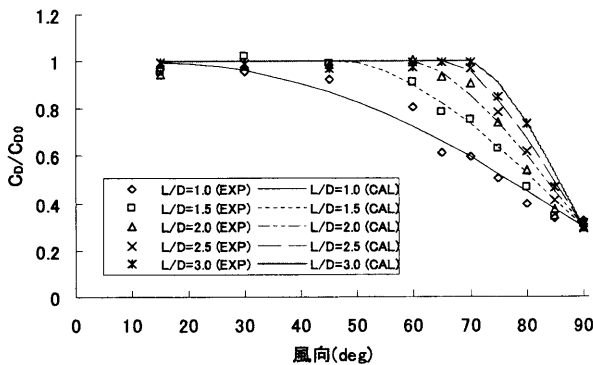


Fig. 13 抗力係数—風向(2基目)

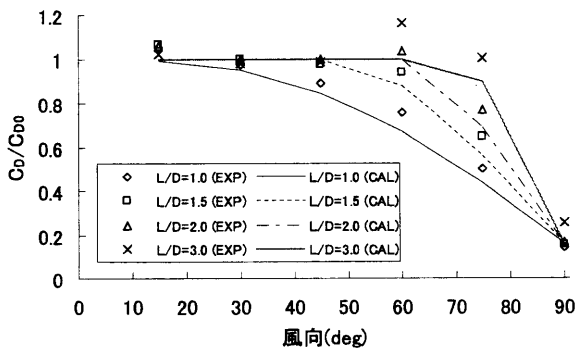


Fig. 14 抗力係数—風向(3基目以降)

これらの実験結果から風車間の遮蔽影響は、風向が大きくなって幾何学的に風上風車の風向への投影が風下風車に重なり始めるにしたがって現れ始め、逆に幾何学的に風上風車の風向への投影が風下風車に重ならない場合にはほとんど影響がないことが分かった。

また、本論文中には示していないが、他の実験結果から、風下側の風車による風上側の風車への影響は小さく無視できるということが分かった。更に、風上から3基目以降の風車では、抗力係数がほぼ一定となることが分かった。

風車間遮蔽影響の定量化

以上の結果から、風下風車が風上風車により幾何学的に遮蔽される面積の割合(遮蔽率と定義した)を用いて、風車間の遮蔽影響の定量化を行った。風車間影響のモデル化を行う際には、曳航速度150~400mm/secの抗力係数の平均値を用いることにした。また、風上側から1基目の風車の抗力係数は風車単独の場合の抗力係数と同じであるとし、さらに風上から3基目以降の風車の抗力係数は一定であるとした。(16)はこのようにして求めた風上から2基目の風車の抗力係数の計算式である。同様に、(17)は風上から3基目以降の風車の抗力係数の計算式を示す。式中の D は風車直径を表し、 ϕ, d などの定義はFig.15に示す通りである。

$$\frac{C_D}{C_{D0}} = 1 - 0.7 \times \frac{2\phi - \sin 2\phi}{\pi} \quad (16)$$

$$\frac{C_D}{C_{D0}} = 1 - 0.84 \times \frac{2\phi - \sin 2\phi}{\pi} \quad (17)$$

$$\left(\phi = \arccos \left(\frac{d}{2D} \cos \theta \right) \right)$$

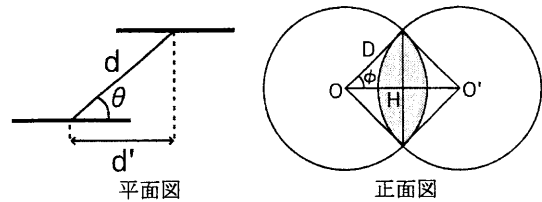


Fig. 15 遮蔽率の定義

(16),(17)式を用いて計算した結果をFig.13, Fig.14中に示すが、広い風向範囲にわたって実験結果を良く説明し得るモデル式といえる。

3. 遮蔽影響による発電量低下

3.1 年間発電量の計算法

年間発電量 \bar{W} は、当該箇所の年間平均風速が v である確率密度 $f(v)$ と風車の発電特性 $P(v)$ から次式で計算できる。

$$\bar{W} = \int_0^{\infty} P(v) f(v) dv$$

一般に風速分布は、(18)に示すWeibull分布で表されることが知られている。ここで、 c は尺度係数、 k は形状係数である。

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c} \right)^{k-1} \exp \left(- \left(\frac{v}{c} \right)^k \right) \quad (18)$$

日本周辺における風速分布では形状係数 k は0.8~2.2であり、平均風速が5m/sを超えるところでは1.5~2.2であることが知られている。 $k=2$ のときのWeibull分布を特にRayleigh分布といい、日本周辺における風速分布ではRayleigh分布を用いて評価することが多い。本論文でもRayleigh分布を用いることにする。

年間発電量を計算するにあたっては、定格5MWの風車を用いることとし、Fig.16に示すような発電特性曲線を(19)のように近似した。

$$P(v) = \begin{cases} 0 & (v < 4.0) \\ 0.05v^2 - 0.4v + 0.8 & (4.0 \leq v < 14.0) \\ 5 & (14.0 \leq v < 25.0) \\ 0 & (25.0 \leq v) \end{cases} \quad (19)$$

(v の単位はm/s)

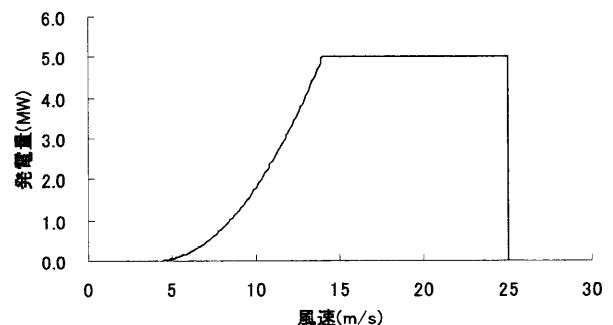


Fig. 16 発電特性曲線

3.2 遮蔽影響による発電量の低下

Fig.16に示す発電特性を持つ定格5MWの風車3基から成る風車群を対象として、遮蔽影響を(16),(17)式で推定し、風車間の遮蔽影響による設備利用率の低下が、平均風速と風向によってどのように変化するかにつき計算した結果をFig.17に示す。なお、風車中心間隔は風車径の2倍とし、各風車は風向が変化しても、常に風に正対する方向に y -制御されると仮定した。このグラフから、平均風速が小さいほど遮蔽効果による発電量低下の割合が大きいたことが分かる。(図は風向45度以上の場合を示しているが、風向が45度

以下の場合、発電量の低下はほとんど見られない。)

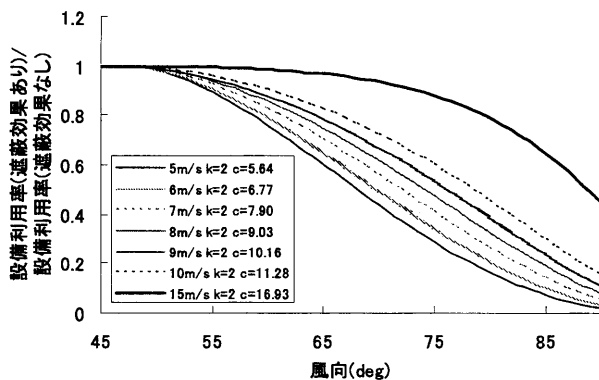


Fig. 17 遮蔽影響による平均風速ごとの設備利用率低下

3.3 風向分布と発電量の関係

Fig. 17 に示した設備利用率は、風向が変わらないとして計算しているが、実海域では風向は卓越風向の周りに変動する。そこで、風車中心間隔を風車径の 1.1 倍とし、風向変動を考慮して年間発電量の算出を行った。結果を Fig. 18 に示す。(対象としたのは、Fig. 16 のような発電特性を持つ風車を 3 基配列した場合であり、Fig. 18 の縦軸は 3 基による総年間発電量を 3 で割った値である。)

図中横軸の「卓越風向出現確率」とは、卓越風向とその両側 45 度までの風向を持つ風の出現確率のことである。(卓越風向出現確率を変化させるにあたって、卓越風向から 45 度以上離れた風向の相対的な出現確率は一定であるとした。) なお、45 度は遮蔽影響が顕著になり始める角度であり、45 度よりも小さな角度では遮蔽影響は小さい。

図より、卓越風向出現確率の変化による年間発電量の変化は大きく、当然ながら卓越風向出現確率が大きいほど年間発電量が増加する。通常、卓越風向出現確率 70% を越せば風向が安定しているといわれるが、日本近海においては珍しいことではない。Fig. 19 に示すように、特に季節風の影響を受ける地域や、陸海風の影響を受けやすい離岸距離の小さい場所では卓越風向出現確率が 80% 近くに達することも珍しくない。

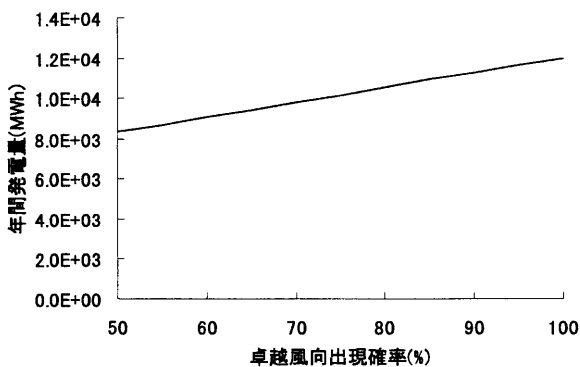


Fig. 18 卓越風向出現確率—年間発電量

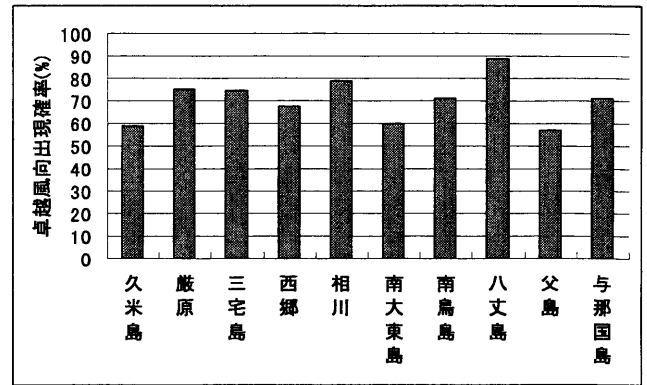


Fig. 19 日本近海の卓越風向出現確率⁵⁾

3.4 遮蔽影響による発電量低下の低減法

遮蔽影響による発電量の低下を抑えるための手法として、風車間隔を広く取る方法以外に、緒方・林・影本ら²⁾は、Fig. 20 に示すように、浮体を一点保留し、風の力を利用して浮体全体を風向に対して常に正対するように動かす浮体ヨー制御方式を提案している。このような方式にすれば、風車はそれ自体がヨー制御をすることなく常に風に正対するため、2 章で示したように、隣り合う風車のブレードがほとんど接するまで ($L/D=1$ まで) 風車間を近接させても風車間影響による発電量低下はほとんど生じないことが予想される。即ち、各風車による発電量を低下させることなく、浮体上に多数の風車を配置することが可能となり、結果的に当該風力発電ファームの発電コストの大幅な低減を図ることができる。

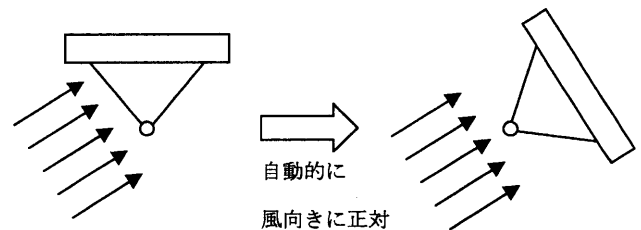


Fig. 20 浮体ヨー制御の概念図

このような浮体ヨー制御方式の効果を確認するために、浮体ヨー制御方式の風力発電ファームと、浮体ヨー制御を行わない風力発電ファームの設備利用率を比較した。(ただし、浮体ヨー制御を行わない風力発電ファームでも、既存の風力発電のように、風向の変化に伴って、各風車は風に正対するような向きに個別に回転するものと仮定した。) 浮体ヨー制御を行わない風力発電ファームとしては、2 基、5 基、10 基で構成されるものについてそれぞれ推算を行った。結果を Fig. 21 に示す。なお、推算を行うにあたっての風速・風向のデータには愛知県常滑沖の伊勢湾海上に建設予定である中部国際空港における常滑沖海上環境測定局(以後、MT 局)の 2002 年の測定値を用いた。浮体ヨー制御方式の風力発電ファームでは、風車間隔 (L/D) が 1 でも、すなわち隣り合う風車のブレードがほとんど接するまで近づけても風車間影響がほとんどないので、風車の数にかかわらず設備利用率はほぼ一定となる。横軸に風車中心間隔と風車径の比をとっているが、浮体ヨー制御方式の風力発電ファームでは、上述のように風車間隔にかかわらず風車間影響はほとんどないので、設備利用率は横軸にほぼ平行で一定となる。一方、浮体ヨー制御を行わない風力発電ファームでは、風車間隔を大きく取ったほうが遮蔽効果は低減でき、また風車台数が多いと遮蔽効果による発電量低下はより大きくなることが分かった。

これらの結果から、浮体ヨー制御方式を採用入れることによって、当該風力発電ファームを構成する風車数にかかわらず、遮蔽影響による発電量低下を大きく抑えることができることが確認された。

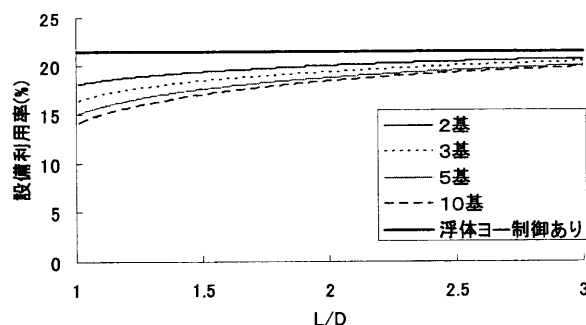


Fig. 21 遮蔽影響による設備利用率の低下

7. 結 論

本研究によって得られた主な結論は以下の通りである。

- (1) 風車後方の流れの構造は、風速が非常に低い場合以外は、風速によってあまり変化せず、風車の抗力係数は風速によらずほぼ一定である。
- (2) 風上側風車の風下側風車への影響は風上から3基目以降の風車ではほぼ一定となる。
- (3) 風車中心間隔を風車径の3倍離れた場合には、風向70度程度までは風上風車による遮蔽影響がほとんど見られず、さらに風車中心間隔を風車径の1倍まで近接させた場合でも、風向30度程度までは遮蔽影響がみられない。通常、主たる風向から $\pm 30^\circ$ に95%以上の確率で風向が収まることから、従来言われてきたように「隣り合う風車間の中心間距離を風車ブレード直径の3倍以上離すこと」は必要以上に風車間隔を大きくとりすぎており、風車間の遮蔽影響による発電量低下なしに風車群をもっと近接させて配置することが可能であることが示唆される。
- (4) 一方、卓越風向と平行な方向に風車を配置した場合、即ち風向90度の場合には、風車中心間隔を風車径の10倍程度離して設置した際でも、風速は78%位までしか回復せず、発電量は風車単独の場合の半分程度にまで低下する。
- (5) 風車間の遮蔽影響は、風向が大きくなって幾何学的に風上風車の風向への投影が風下風車に重なり始めるにしたがって現れ始め、逆に幾何学的に風上風車の風向への投影が風下風車に重ならない場合にはほとんど影響がないとして、おおよそモデル化できる。
- (6) 平均風速が小さいほど遮蔽効果による発電量低下の割合が大きい。
- (7) 卓越風向出現確率の変化による年間発電量の変化は大きく、卓越風向出現確率が大きいほど年間発電量が増加する。
- (8) 浮体ヨー制御方式を採用入れることによって、当該風力発電ファームを構成する風車数にかかわらず、遮蔽効果による発電量低下を大きく抑えることができ、実質上風車中心間距離とブレード直径の比を1.0、即ち隣り合う風車のブレードがほとんど接するまで近接させても風車間による遮蔽影響はほとんど存在しない。この結果として当該風力発電ファームの発電コストを大きく低減することが可能となる。

実際の海上での風速分布は、海面近傍に発達する境界層により、海面からの高さによらず一定ではなく、数メガワット級の大型風車を用いたとしても、風車本体はなお有意な境界層内に含まれると予想される。本研究ではこのような境界層の影響を考慮していないが、風車が境界層内にあれば、粘性影響のために風車後流の乱れが抑制

されることになるので、遮蔽影響は本実験で得られた結果よりもさらに緩和されると推察される。

また、本実験では風車群が一列に配置される場合を対象とし、もっぱら風向きに対し横方向に配列された風車間の間隔について検討を行った。これは、風車群を搭載する浮体の建設・係留のためのコストが、当該ウィンドファームのコストの大きな部分を占めるため、浮体に搭載可能な風車数を風車間の遮蔽影響が出ない範囲でできるだけ多くしたいという理由によるものであった。実際のウィンドファームでは、数行数列のマトリックス状に配置されることが予想される。従って、風向に対して直角方向に横一列に配置された風車列を、風向に並行な方向にタンデムに2行、3行と配置した場合の遮蔽影響も今後検討すべきである。

本研究では、本来風洞で行うべき実験を水槽試験によって置き換えて実施した。この第一の理由は、著者らが使用可能な風洞を有していない一方で、船舶試験用の水槽を手軽に使える状態にあったという都合によるものであるが、実際問題として風洞を有している機関は限られるので、風洞実験を水槽試験によって置き換えて行うことができれば、風車実験に関わる実用的な意義は大きいと考えられる。

8. 謝 辞

本研究には文部科学省の科研費(14350525)の助成を得た。

また、本研究において用いた気象データは中部国際空港株式会社建設事務所より提供いただきました。

参 考 文 献

- 1) Hoerner, S : Fluid Dynamic Drag, III Pressure Drag
- 2) 緒方龍、林竜也、影本浩 : Floating Wind Farm の試計画, 第16回海洋工学シンポジウム論文集, 549-556, 2001
- 3) 小杉晃 : 日本近海における沖合風力発電の実現可能性に関する研究, 東京大学新領域創成科学研究科修士論文, 2002
- 4) 緒方龍 : 日本近海における洋上風力発電の実現可能性に関する研究, 東京大学新領域創成科学研究科修士論文, 2004
- 5) (財)気象業務支援センター : アメダス 10 分値データ(CSV) 2000.1~2002.12