

9. 弁なし波力発電方式に関する基礎研究

益 田 善 雄,^{*1} 横 溝 宏 典^{*1}

海洋科学技術センターで、昭和53年度から実海実験を行っている波力発電装置には、波の上下動による空気流の往復運動を、一定方向に整流する弁機構を備えている。

この弁機構による損失をなくし、出力および効率の向上を計ることを目的として、弁なし方式タービンの水槽実験を行った。その結果、ウェルスタービンが、有望であろうとの結論を得たので、報告する。

The Basic Study for the Valveless Air Turbine Wave Power Generator System

Yoshio Masuda,^{*2} Hiromichi Yokomizo^{*2}

The wave power generator system with air turbine — “KAIMEI” — experiences some valve losses.

Taking these valve losses off enables us to improve its power and efficiency. In this paper, we shall try to experiment on the valveless airturbines with four small models.

As the result, we obtained a conclusion that the Wells turbine and the Savonius turbine were promising as valveless systems.

1. はじめに

海洋の波のエネルギーを利用する発電方式は、数多くの考案があり、種々の実験が水槽や実海域で行われている。

海洋科学技術センターでは、波の上下動を空気の往復流に変換し、空気タービンを回転させ、発電する空気タービン方式を採用し、昭和53年度には、波力発電システム“海明”の実海域実験を行った。

このシステム構成は、下記のようになっており、記載順に波のエネルギーの変換が行われている。

- (1) 波の上下運動
- (2) “海明” 本体 (空気の往復流)
- (3) 弁機構 (一定方向の空気流)
- (4) 空気タービン (タービン回転数)
- (5) 発電機 (発電電力)

この過程の中で、弁機構というのは、空気の往復流をタービンに対して、常に一定方向の空気流に整流する役目を持つものである。この機構は、一方向性しか持たないタービンにとっては、必要不可欠なものである。

もし、タービンが空気の往復流に対して常に同方向に回転するならば、弁機構は必要でなく、構造の簡素化による保守の簡易化およびコストの低減が計れ、また弁損失の除去による効率、出力の向上などの利点がでてくる。

このような利点をわきまえ、弁なし波力発電方式として、次に述べる4種類のタービンについて水槽試験を行った結果、ウェルズタービン方式が、有望であろうという、結論が得られたので報告する。また、昭和53年度、補助発電機として、“海明”にサーボニアスタービンを搭載したので、その結果をも合わせ報告する。

^{*1} 海洋利用技術部

^{*2} Marine Utilization Technology Department.

2. 弁機構を有する空気タービン

弁機構には、1枚弁方式と図1にあげる2方式の合わせて3方式がある。“海明”では昭和53年度に2枚弁方式、昭和54年度には4枚弁方式を採用した。

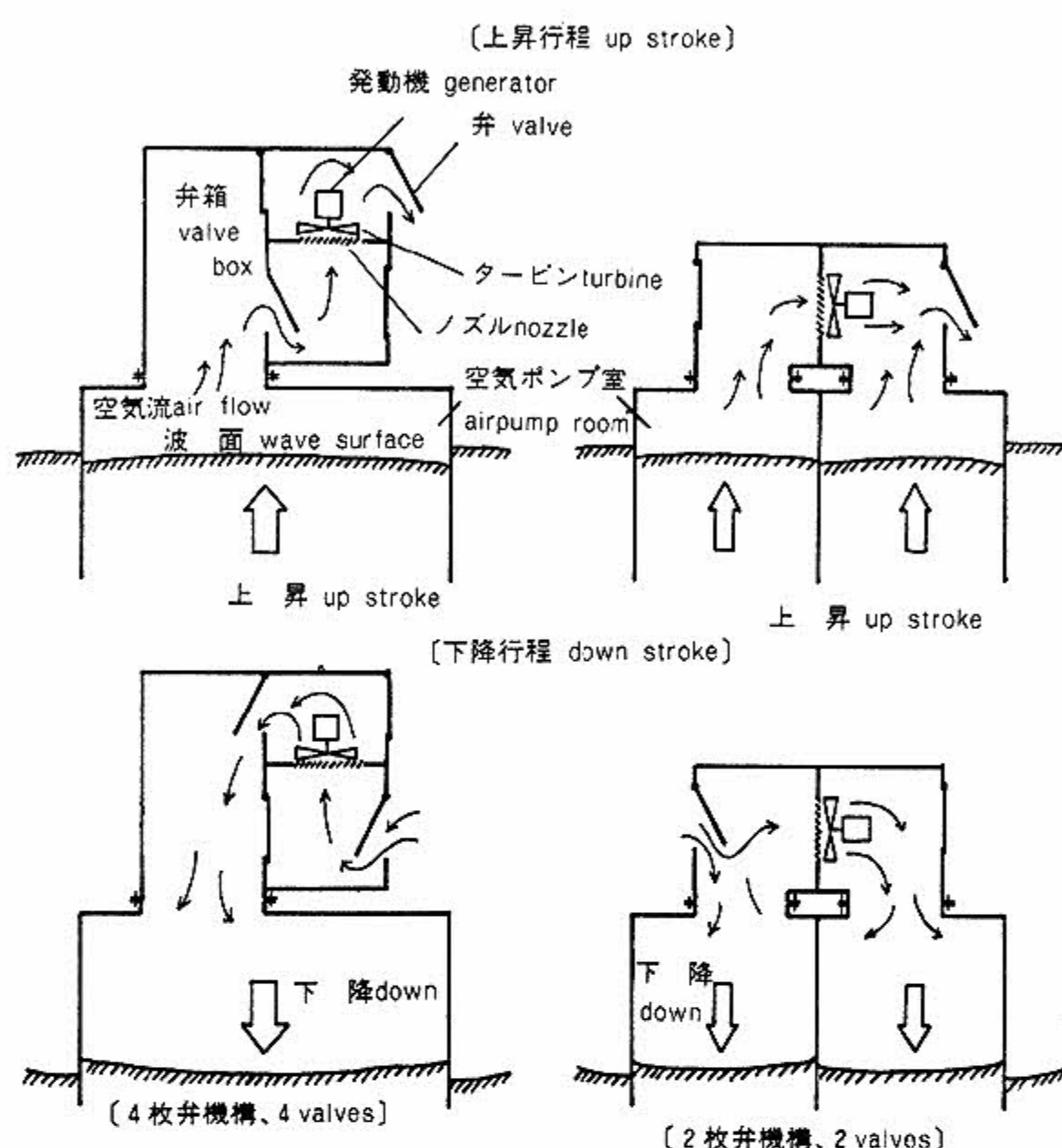


図1 弁機構を有する空気タービン

Valve mechanism

また、これに取り付ける空気タービンノズルは、図2に示す形状のものであり、これは波力発電航路標識用ブイに用いられたものを改良したもので、衝動+反動型タービンである。また、その効率は約60%である。

設計値：

ノズル外径；1350mm

ノズル枚数；50枚

ノズル面積；0.2238m²

ランナー外径；1400mm

ランナー枚数；60枚

ランナー面積；0.3896m²

材質；アルミ合金鋳物，AC 7 AF (ヒドロ合金)

3. 往復空気流用タービンの種類と原理

3.1. 二重プロペラ方式

この方式のものは、図3に示すように、空気孔をはさんで支軸の両端に、それぞれ逆ピッチのプロペラが取付けられている。

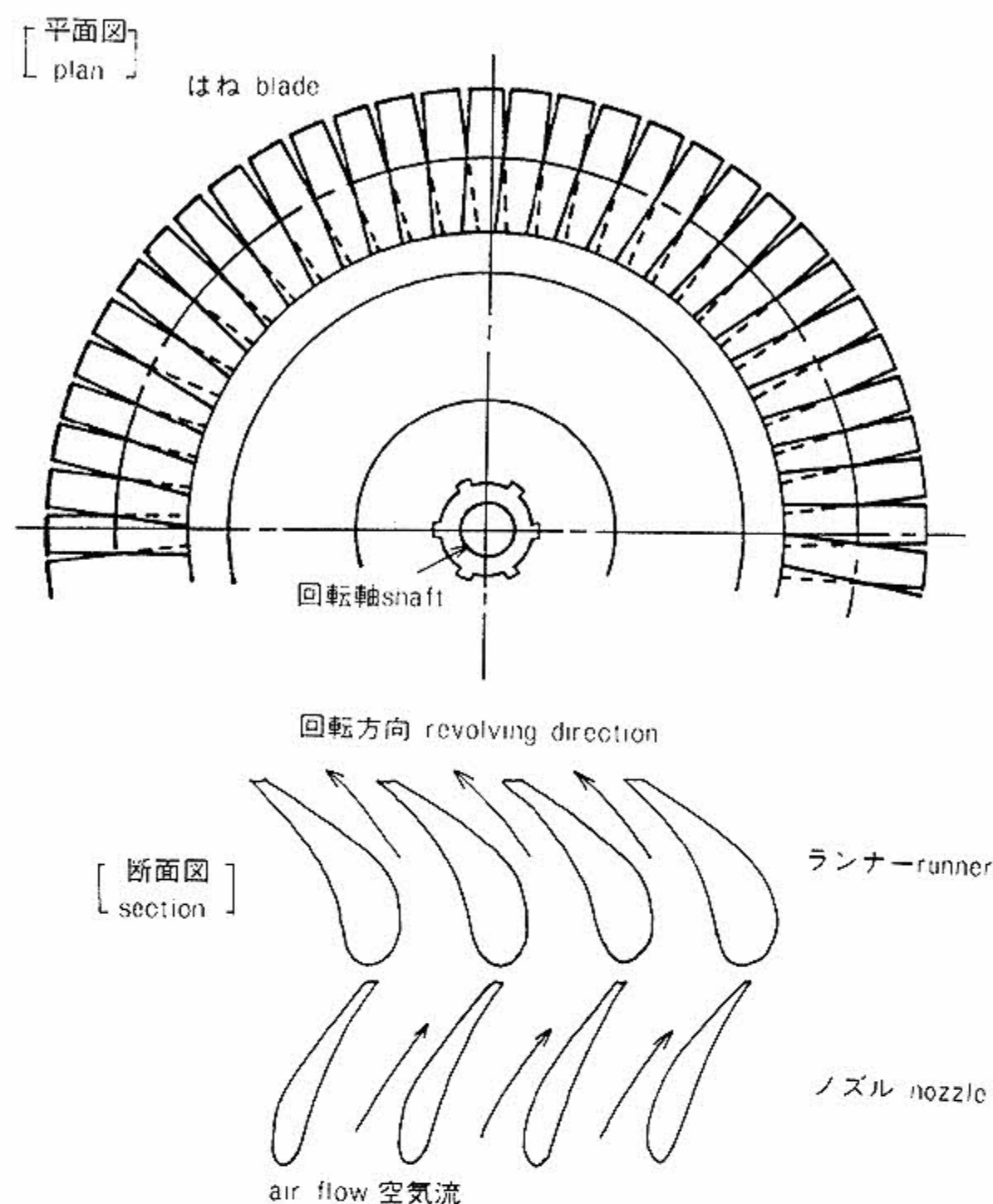


図2 “海明”の空気タービン

The air turbine on “KAIMEI”

波の上昇行程では実線、下降行程では点線のように空気流が生じ、矢印の先方のプロペラが回転する。プロペラは互いに逆ピッチであるため、往復空気流に対して常時同方向の回転が得られる。

3.2. 二重うずまき羽根方式

この方式では、図4に示すように、二重プロペラ方式のプロペラの代わりに、ねじれの異なるうずまき羽根を取付けたものである。

これもまた二重プロペラ方式と同じ要領で、常時同方向に回転する。

二重プロペラ方式と二重うずまき羽根方式とのいずれにもいえることは、上と下のプロペラ等の取り付け間隔が重要である。あまり近づけると、互いがブレーキ作用をし、遠ざけると反対に出力が得られなくなる。

3.3. サーボニアスタービン方式

サーボニアスタービンの構造は、図5に示すように、わん曲した2枚の羽根を鉛直方向から2枚の円板ではさみこんだ円筒形の回転体からなる。

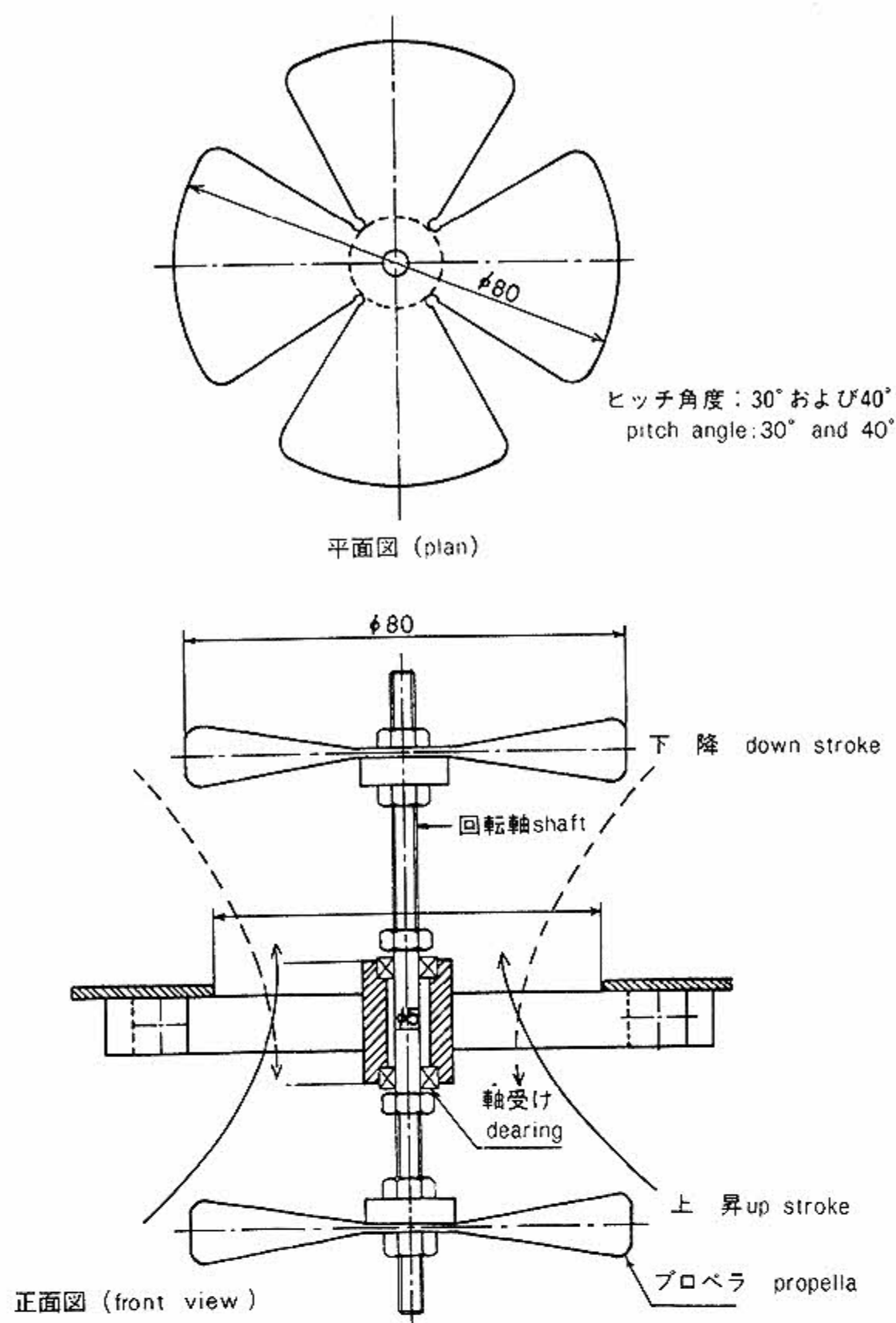


図3 二重プロペラ方式タービン
Double propella mechanism

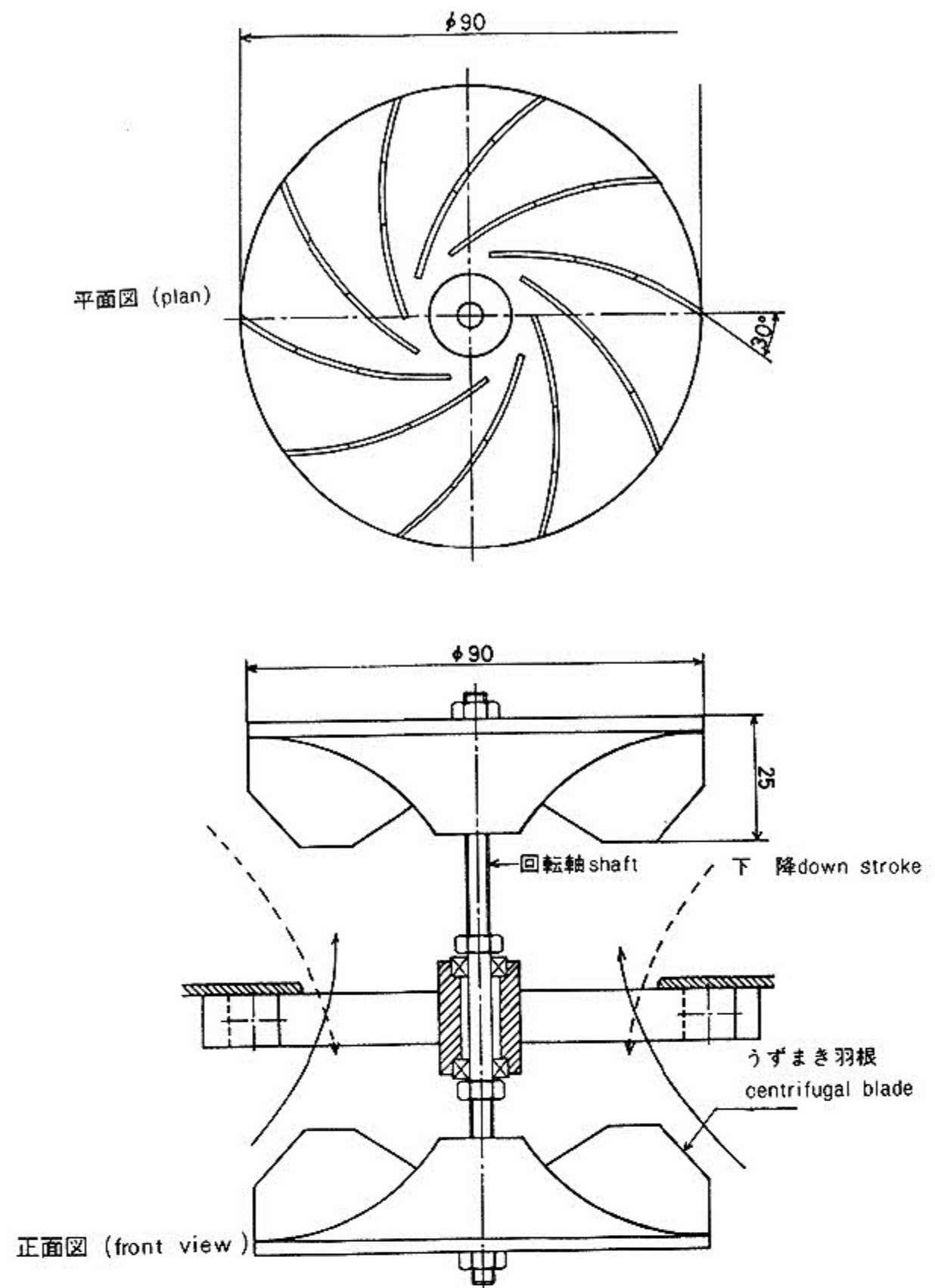


図4 二重うずまき羽根方式空気タービン
Double centrifugal blade mechanism

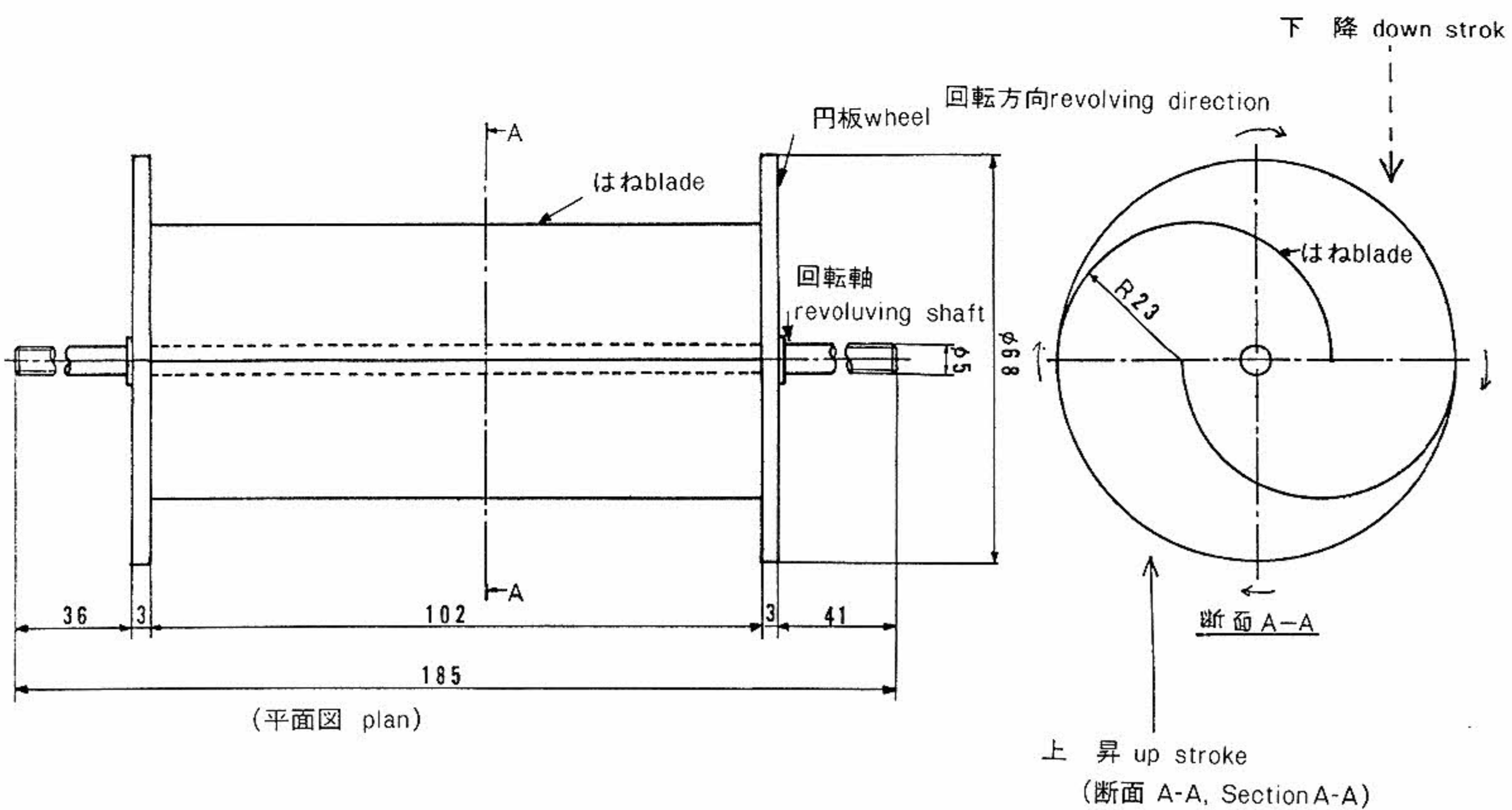


図5 サーボニアスタービン
Savonius rotor mechanism

このタービンは、回転軸に対して鉛直な空気流であれば、どのような方向からの流れでも、常に同一方向に回転する。このとき、回転に寄与する羽根と反対側の羽根、つまり流れに対して、背を向けている羽根のブレーキ作用を最小にするような設計を行う必要がある。

この形のタービンは、昭和53年度、消波発電船“海明”に補助電源発電機用タービンとして、搭載した初めての往復流用タービンである。

寸法及び定格は、つぎに示す通りである。

円板直径；440mm

円筒長さ；400mm

羽根枚数；3枚

発電機；0.8kW円誘導子型交流発電機

3.4. ウェルズタービン方式

ウェルズタービンは、英国の北アイルランドのベルファスト市クイーン大学で、アラン・アーサ・ウェルズが開発したものであり、現在、ベッドフォード大学、CEGB（英国電力中央局）、マチウッド研究所などの協力で、研究が行われている風力発電のダリウス型に似た原理のタービンである。

構造は図6に示す。

(a)の形状の水平対称翼を、(b)のように、回転軸を中心に肉厚の厚い方を同方向に向けて4枚取りつける。さらに流体抵抗を小さくするため、円錐体を取付け、横からみると(c)のようになる。

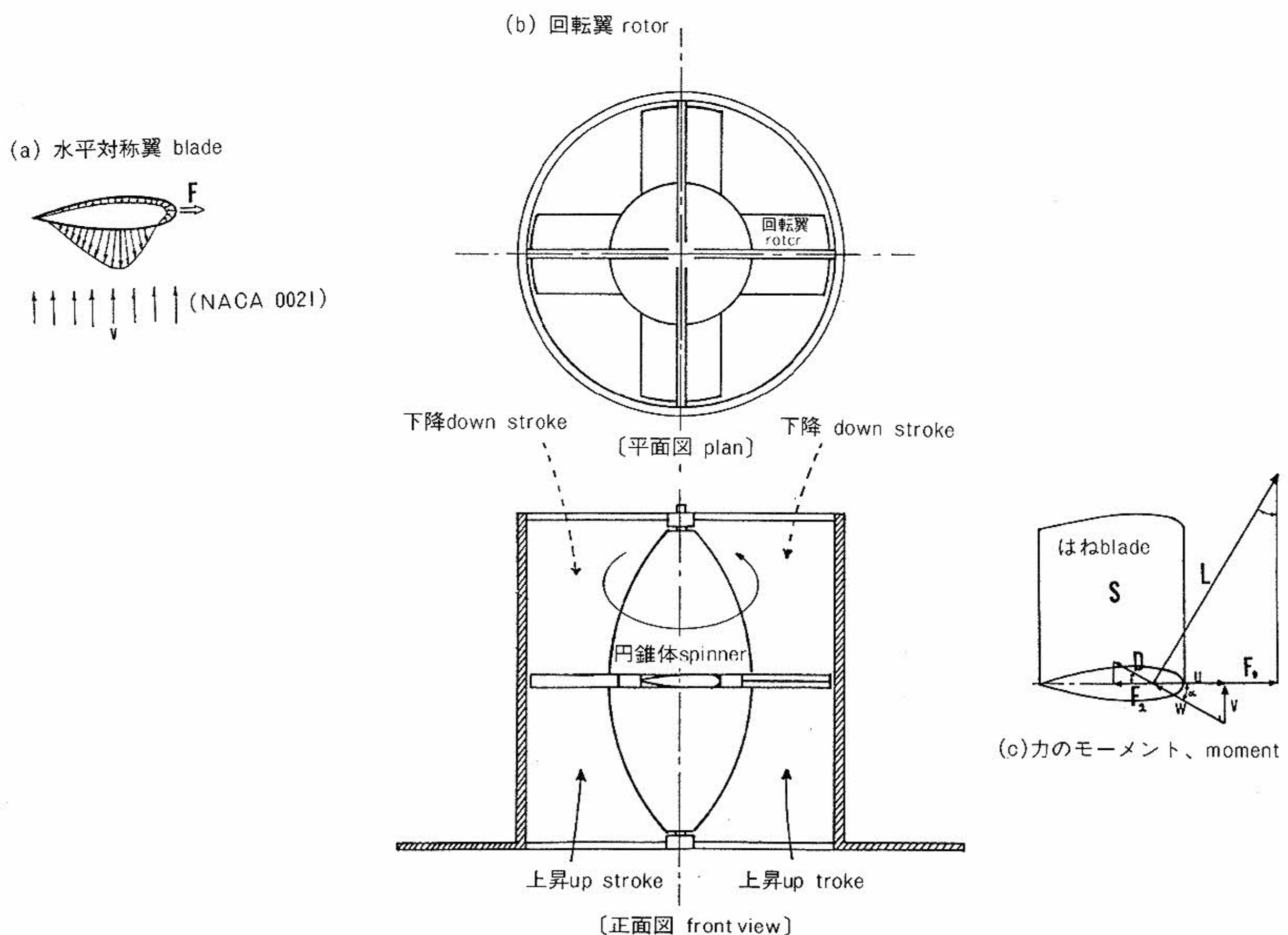


図6 ウェルズタービン方式
Wells turbine mechanism

(a) で空気流 v が水平翼に鉛直な方向から流れてくると、矢印で示す圧力分布を作り出す。この圧力は、曲率半径の大きな方が小さな方よりも小さいので、その圧力差によって回転力 F が生じ、回転し始める。回転を始めると、周速 u が働き、空気流の絶対流速 v と合成した相対流速 w が翼に作用する。その結果、図中の (d) に示すように、揚力 L および抗力 D が生じ、揚力と抗力の水平成分回転力 F_1 と F_2 となる。

この翼が回転および増速するときの必須条件は $F_1 > F_2$ である。

ここで、

u : 周速, v : 絶対流速, w : 相対流速, s : 翼の表面積, α : 相対流速迎角, L : 揚力, D : 抗力, F_1 : 回転力(前向), F_2 : 回転力(後向), C_L : 揚力係数, C_D : 抗力係数, ρ : 空気密度 とする。

以上のように、記号を決めると、(d) での揚力、抗力、回転力および推進力 F は、下記のようになる。

$$L = C_L \frac{1}{2} \rho w^2 S \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$D = C_D \frac{1}{2} \rho w^2 S \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$F_1 = C_L \frac{1}{2} \rho w^2 S \cdot \sin \alpha \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$F_2 = C_D \frac{1}{2} \rho w^2 S \cdot \cos \alpha \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$F = F_1 - F_2 \\ = \frac{1}{2} \rho w^2 S (C_L \cdot \sin \alpha - C_D \cdot \cos \alpha) \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$C_L \cdot \sin \alpha - C_D \cdot \cos \alpha \quad \dots\dots\dots(6)$$

したがって、(6)式が最大になるような迎角の場合には、効率最大となる。

4. 実験方法

4.1. 波の条件

海洋科学技術センターの波動水槽に、 $\frac{1}{40}$ 空気室モデルを固定し、正弦波の波を下記の条件で起し、試験を行った。

波周期; 1.5~2.5s

(0.25s おきに 5 点)

波 長; 3.51~9.75cm

波 高; 6.0~20.0cm

4.2. タービンの種類及び寸法

(1)二重プロペラ方式

直径; 80.0mm ϕ

ピッチ30°と40°の2種類の試験を行った。

プロペラ間距離; 55.0mm

(2)二重うずまき方式

直径; 90.0mm ϕ

羽根間距離; 35.0mm

(3)サーボニアス方式

直径; 68.0mm ϕ

筒の長さ; 108.0mm

同寸法で2枚羽根と3枚羽根の試験を行った。

(4)ウェルズタービン方式

翼型; NACA 0021

ローター直径; 125.0mm ϕ

肉厚; 7.0mm

4.3. 計測項目および出力算出式

トルク; 摩擦ブレーキとばね計

回転数; 磁気誘導型デジタル回転計

波 高; 容量式波高計

空気圧; ストレンゲージ式圧力計

空気流速; 空気圧から換算(空気室内)および熱線流速計(空気室外)

上記の器具を用いて計測を行い、出力 $P(W)$ は、トルク $T(kgm)$ 、回転数 $N(rpm)$ とすると、下式で算出できる。

$$P = 1.03 TN(W) \quad \dots\dots\dots(7)$$

5. 実験結果

5.1. 二重プロペラ方式

ピッチ角30°のプロペラの方が、40°よりも良好な成績だったので、図7にピッチ角30°のグラフを示した。この形式のタービンは、試験したタービンの中で、最も軽量で、回転数が2,000~5,000rpmの高速であった。また、トルクが小さく、空気出力の変動にきわめて敏感に対応し、変動が一番激しかった。

5.2. 二重うずまき羽根方式

図8にはその結果を示した。

この方式は、フライホイール効果が顕著に現われ、変動する空気入力に対し、回転数の変動は少なく、波周期の変動にも安定した回転数を保っていた。

しかし、回転数が小さいため、トルクが得られても、出力に換算すると低出力になってしまう。

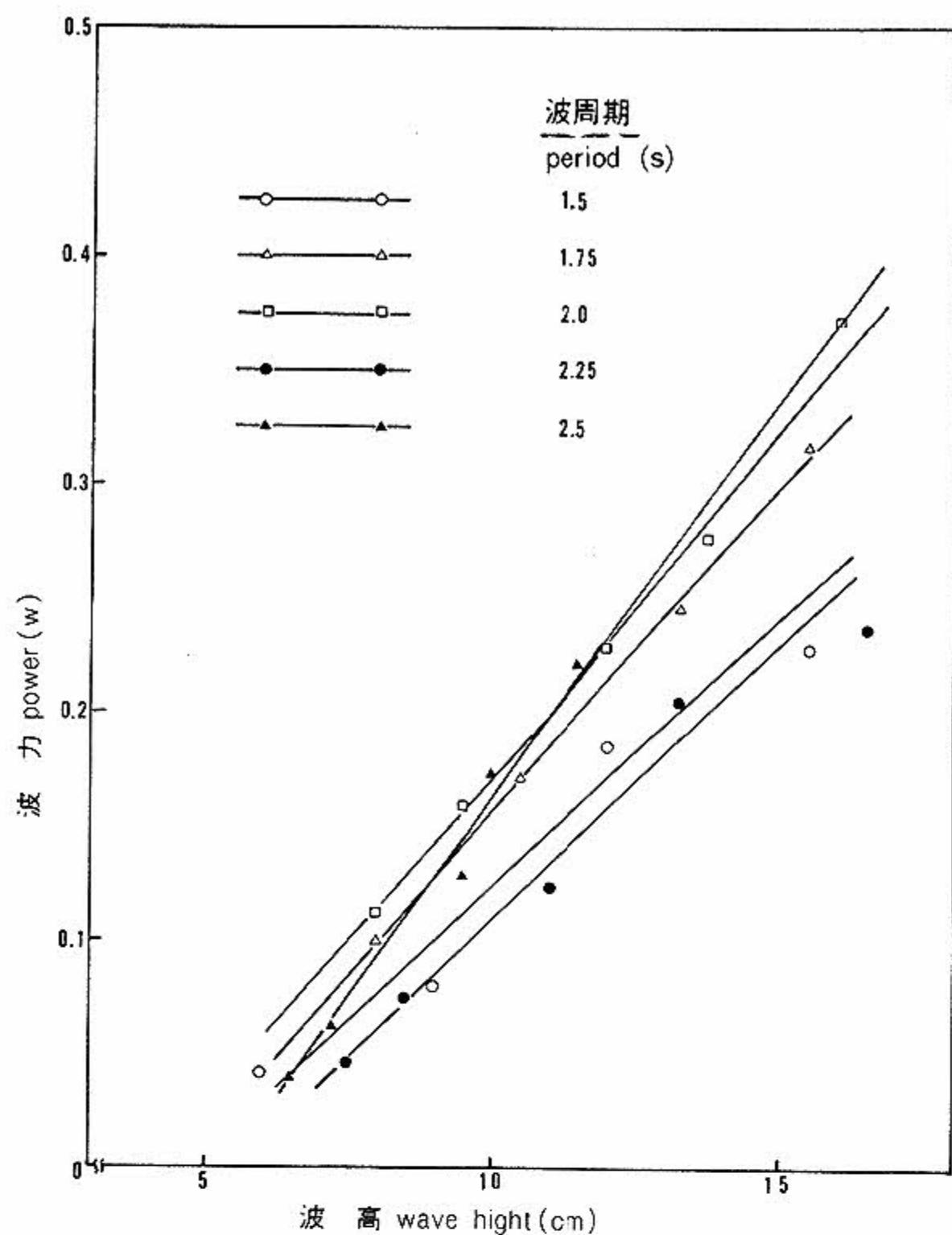


図7 ピッチ角 30° の二重プロペラ方式
空気タービン
Double propella mecanism (pitch angle: 30°)

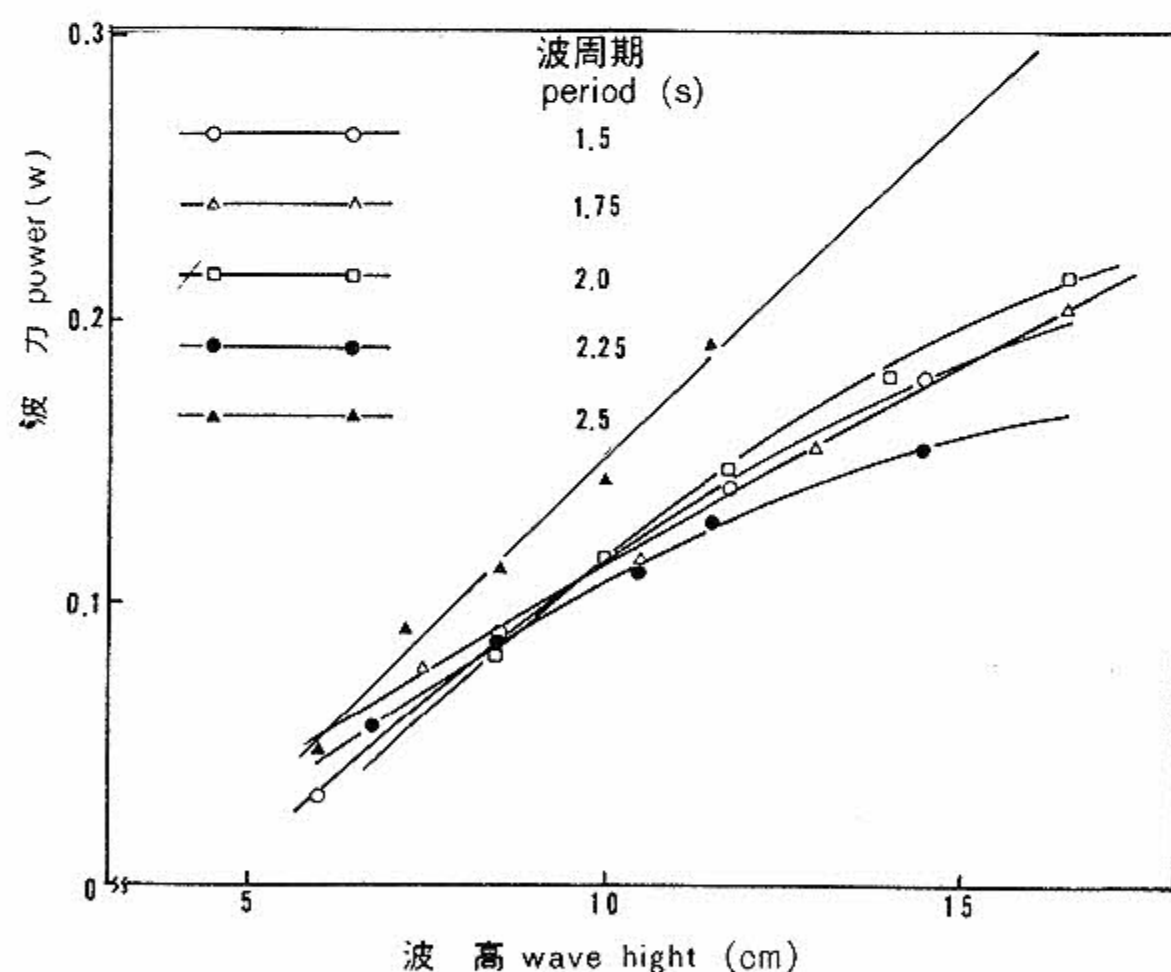


図8 二重うずまき羽根方式空気タービン
Double centrifugal blade mechanism

5.3. サーボニアスタービン方式

このタービンの試験は、2枚羽根と3枚羽根とで行った。その結果、3枚羽根の方が全般的に高

出力であった。

図9は3枚羽根の結果を示す。この方式は、プロペラやうずまき翼根よりも、トルクおよび回転数がすぐれており、出力も大きい。

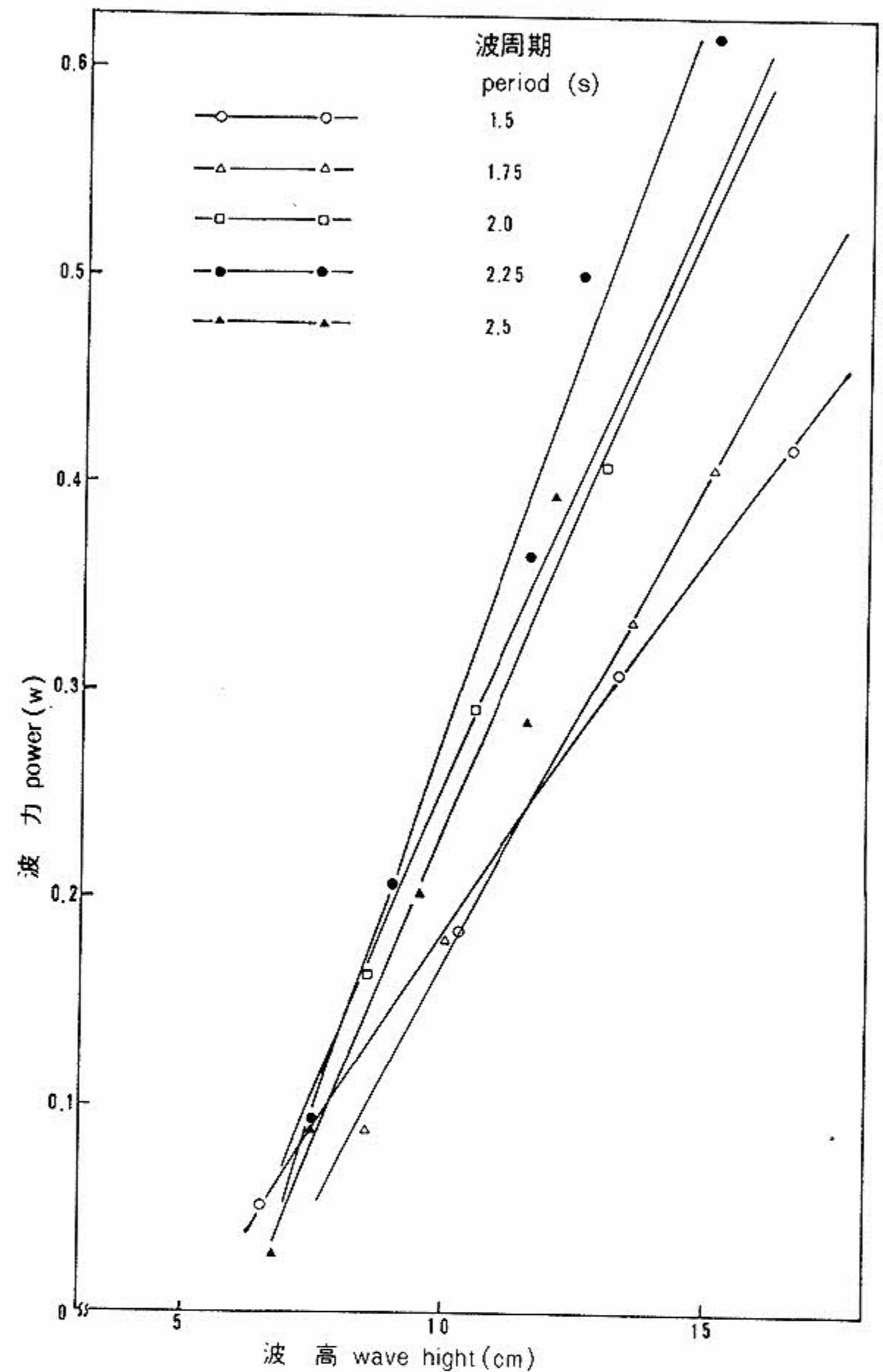


図9 サーボニアスタービン(弁なし)
Savonious rotor mechanism (valve less)

回転数は大略2,000~4,000rpmで、高速回転である。今回は、回転に寄与する羽根の方に空気流を集める空気流誘導弁なるものを付けてみた。その結果が認められず、むしろ出力低下の原因となった(図10参照)。

前述のように、昭和53年度、“海明”に0.8kWの小形モデルを搭載したので、その発電状況を述べる。

1978年11月25日~12月12日の発電量を他の一枚弁方式の小形波力発電機定格60Wおよび300Wと比較してみるため、蓄電池の充電電圧24Vでは、つぎのようであった。

60W; 399Ah

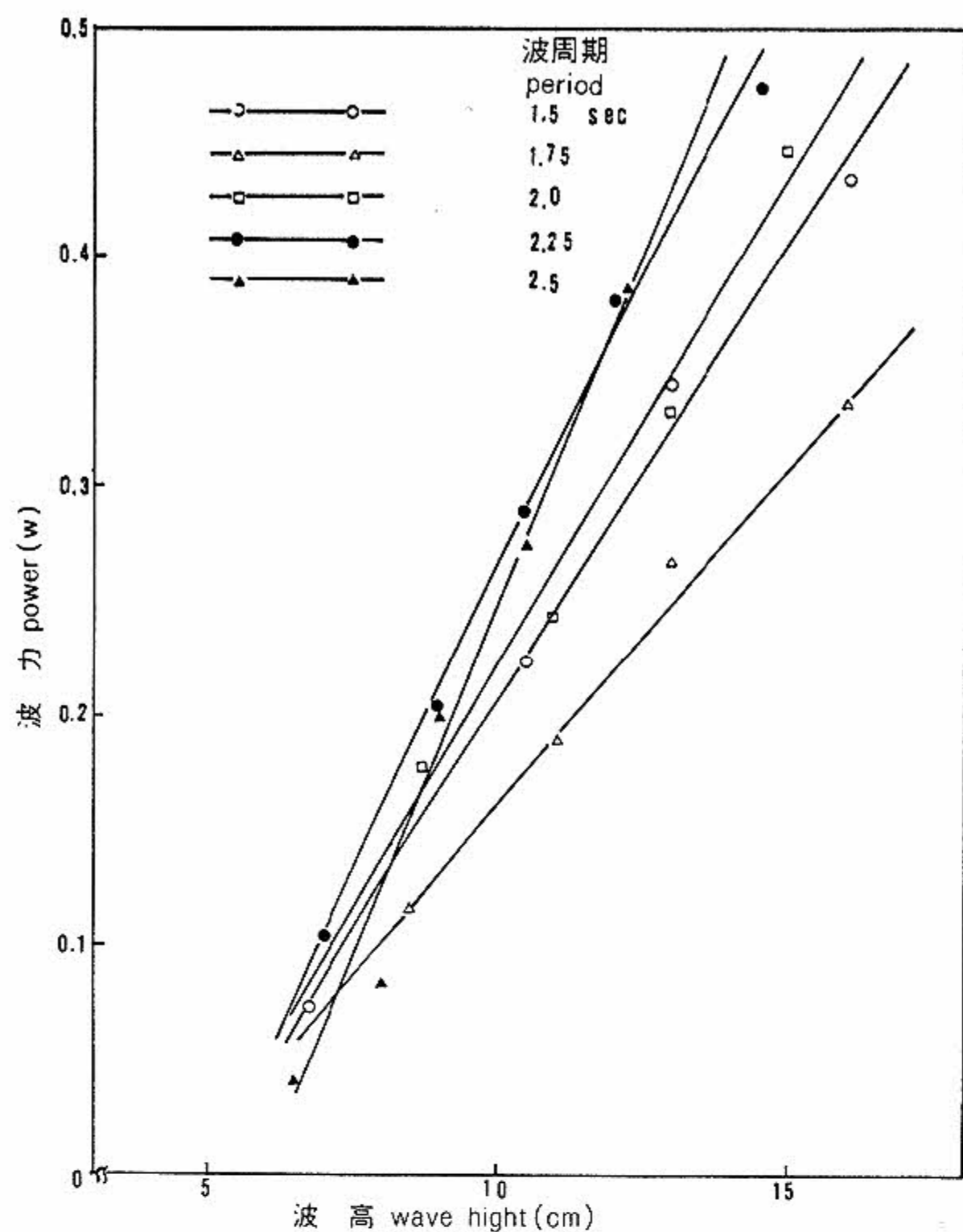


図10 サーボ=アスタービン方式空気タービン
(弁付き)

Savonius rotor mechanism(with valve)

300W; 847Ah

サーボニアス; 425Ah

このときの平均波高の日数は下記のとおりである。

平均波高(m)	日 数(日)
0 ~ 1	7
1 ~ 2	7
2 ~ 3	3
3 ~ 4	0
4 ~ 5	1

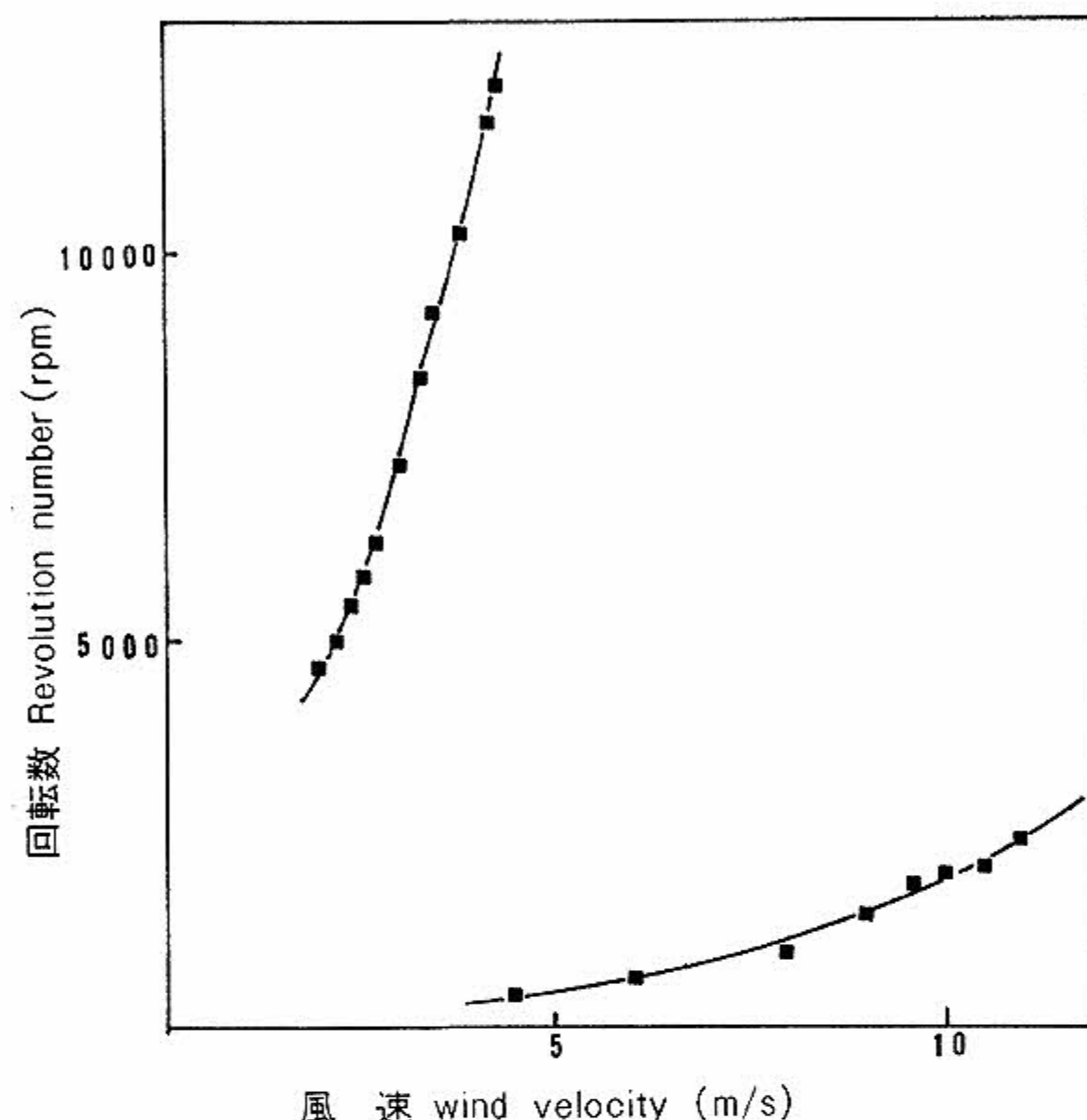
この0.8kWサーボニアスタービン小形モデルの出力が、予想を下回った原因には、安全性を考慮し、空気孔よりもタービンを離しすぎたことがあげられる。そのため、往復空気流の上昇行程のエネルギーしか得られず、下降行程の利用できず、その結果、発電機とタービンとのマッチングがとれず、出力低下となった。

その対策として、空気孔のにダクトを設け、タービン中に入れ、往復空気流が利用できるように

すれば、概略、現在の2倍の出力を得ることができらるだろう。

5.4. ウェルズタービン方式

図11は風洞で行った一定空気流に対するウェルズタービンの無負荷特性試験結果である。

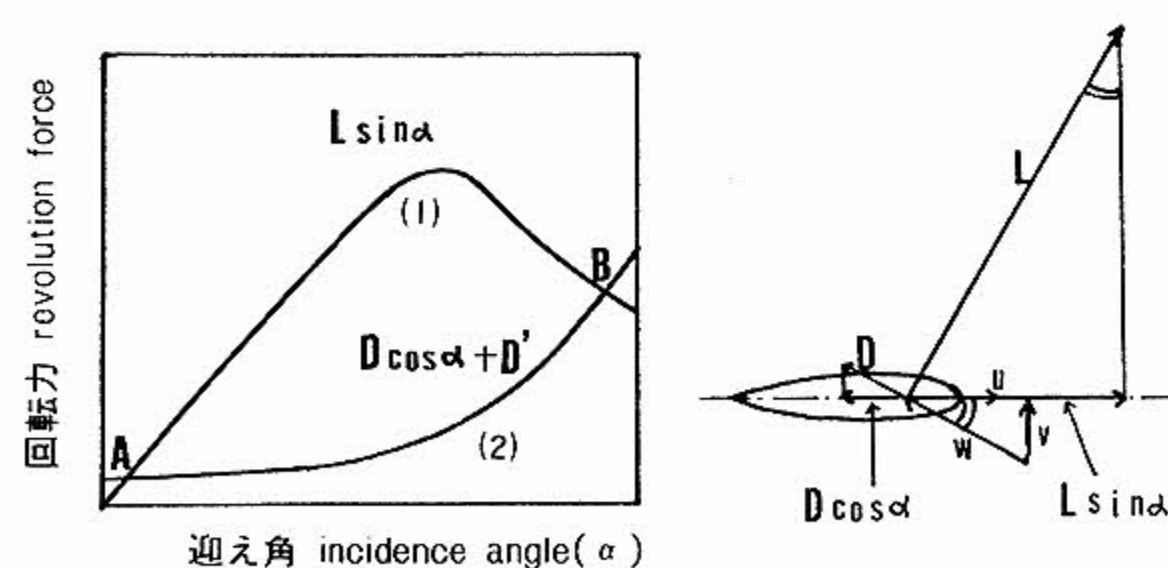


(1) 高速回転領域 high revolution area.
(2) 低速回転領域 low revolution area.

図11 一定風向によるウェルズタービンの
高速、低速回転領域

High and low revolution area of Wells turbine
in the constant direction wind

この図によれば、タービンが絶対風速 v に対して高速回転と低速回転の2領域のあることがわかる。これは水平翼の特性からくるものと思われる。



L:揚力 lift force, D:抗力 drag force, U:周速 circum velocity,
V:絶対風速 absolute wind velocity, W:相対風速 relative wind velocity,
D:機械損失 machine loss

図12 ウェルズタービンの迎え角と回転力

Wells turbin incidence angle vs revolution force

図12に示すように、翼には相対風速の迎え角 α の関数である揚力の水平成分 $L \sin \alpha$ と抗力の水平成分 $D \cos \alpha + D'$ (D' : 機械損失) が働く。この2成分がつり合う点が、A および B 点である。A が高速回転領域 (α が小), B が低速回転領域 (α が大) の安定点である。

静止状態からこれらの領域への移行は、低速回転の移行は自力で行われるが、高速回転への移行には、外部からモーター等である回転数まで回転させ、迎え角 α を一度小さくしなければならない。しかし一度高速にすると、タービンは自動的に安定状態を維持しようとする。

たとえば、高速回転の安定点Aで回転しているタービンにブレーキをかけたとすると、迎え角が大きくなり、揚力も大きくなる。したがって、ブレーキをふりきる方向へと力が働く。この作用は、 $L \sin \alpha$ のカーブの頂点の迎え角の値を越えない限り続く。この性質は、安定した回転数を得るのに有益である。またこのタービンは回転数がきわめて大きいので、発電機の小形化にも役にたつ。

図13は水槽で行った往復空気流による負荷試験

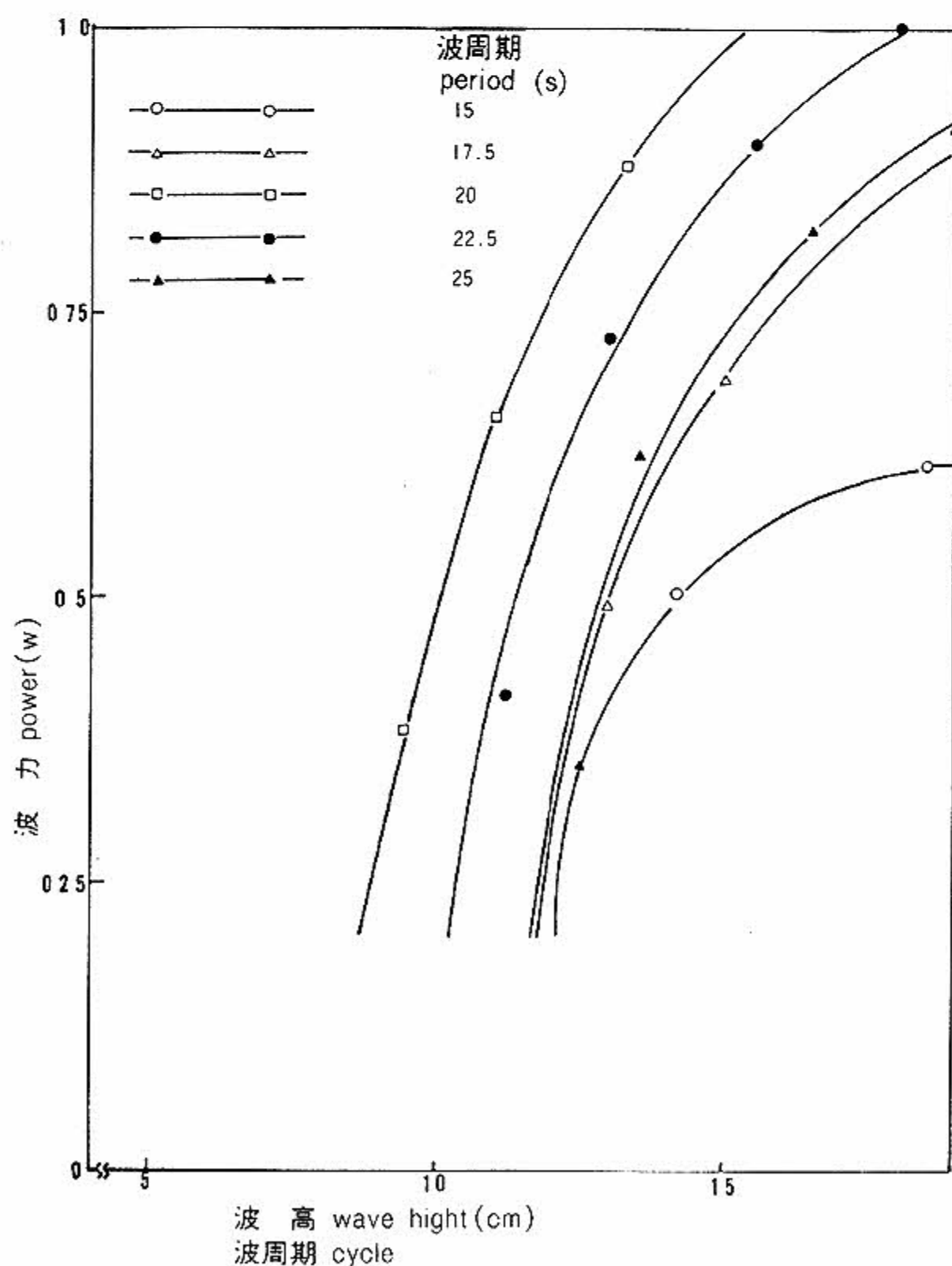


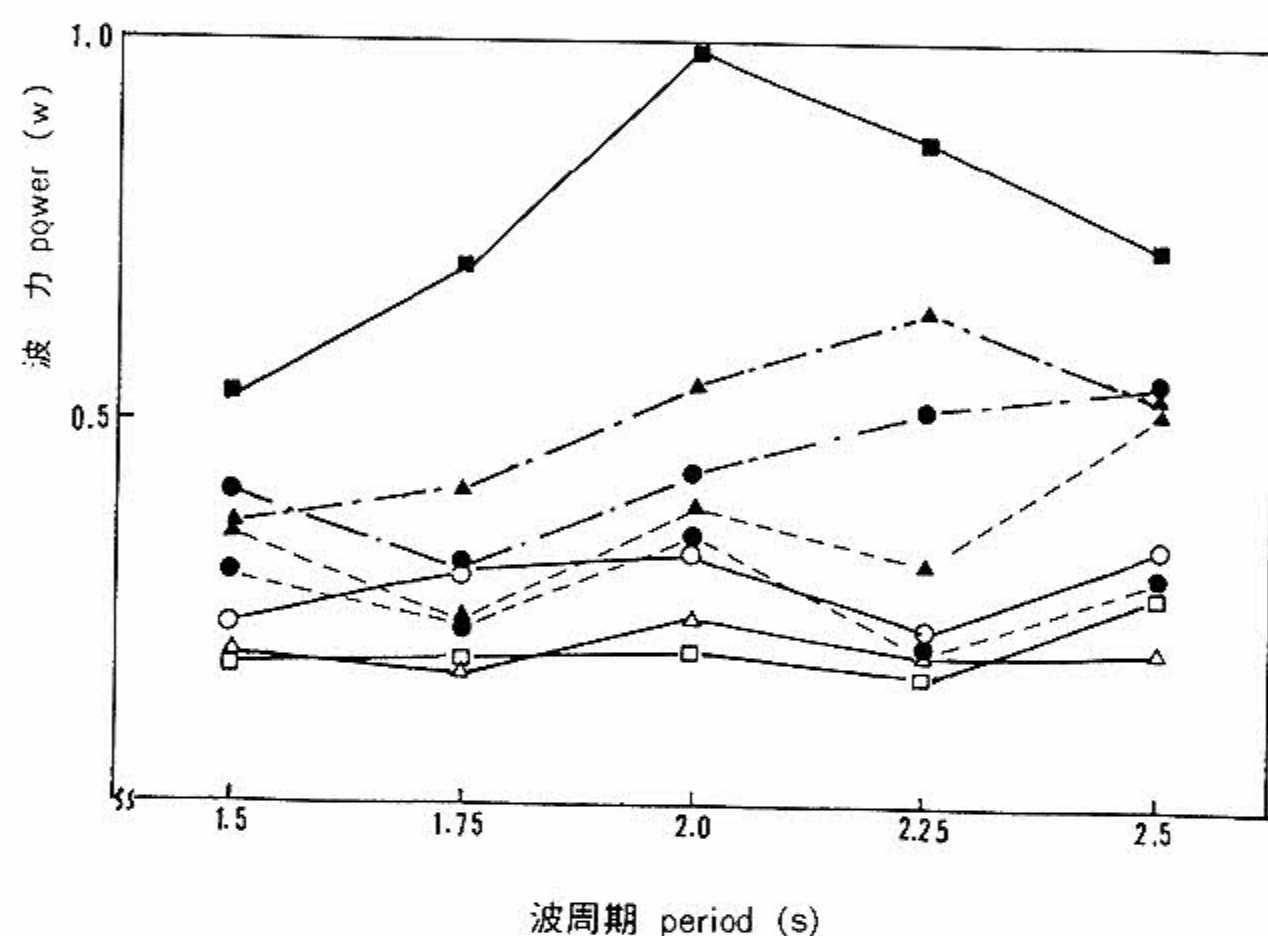
図13 ウェルズタービン
Wells turbine mechanism

結果を示す。高速回転および高トルクについてのモデルを抜いて今回の試験では、最高出力が得られた方式である。

今後の課題としては、翼の形状、たとえば厚さなどを変え、図12のAおよびB点が迎え角 α の広範囲にわたるようになれば、外部からの助力なしで高速回転に移れるようになるなどを、実験を通じて見出すことなどがあげられる。

6. 結 論

図14には各種タービンの往復空気流に対する出力と波周期 (波高15cm) のグラフの比較である。



- (1) 二重プロペラ方式のピッチ角度、pitch angle on Double propella mechanism : $\circ$ $\triangle$ 30° 40°
 (2) 二重うずまき羽根方式、double centrifugal blade mechanism:
 (3) サーボニアスタービン、Savonius rotor mechanism:
 --- $\bullet$ --- $\bullet$ --- 2枚羽根弁あり、2 blades with valve.
 --- $\blacktriangle$ --- $\blacktriangle$ --- 2枚羽根弁なし、2 blades valveless.
 --- $\bullet$ --- $\bullet$ --- 3枚羽根弁あり、3 blades with valve.
 --- $\blacktriangle$ --- $\blacktriangle$ --- 3枚羽根弁なし、3 blades valveless.
 (4) ウェルズタービン Wells turbine mechanism.
 --- $\square$ --- $\square$ ---

図14 各種タービンの性能比較

Comparison of wave power of various turbines
(wave height: 15cm)

この試験に使用した空気室のモデルは、“海明”の $\frac{1}{10}$ であるから波高を10倍、周期を $\sqrt{3}$ 倍にしてみれば、“海明”の実海域での条件になる。

実海域で多い6s以上の周期 (小形モデルでは2s) においてもウェルズタービン方式、サーボニアス方式の順に大きな出力が得られ、特にウェ

ルスタービンが弁なし方式として、有望であろうと思われる。なお、最良モデル設計では、さらに詳細なモデル実験を行う必要がある。

また、実海域の不規則波で、これら弁なし方式の運転状況は、“海明”上でのサーボニアス方式の結果を通じ、ある程度の成果を得た。が、さらにウェルズタービン方式でも、小形モデルを海明に搭載し、その特性をみることが、必要と思われる。