

# 灯標用空気式波浪発電装置の研究

(その2: ウェルズ型エアタービン)

勝原光治郎\*・北村文俊\*\*

## Studies on Air-Turbine Type Wave Energy Converter for Use of Light Beacon

Part 2 : Wells Type Air-Turbine

By

Mitsujirou KATSUHARA and Fumitoshi K ITAMURA

### Abstract

The air-turbine type wave energy converter consists of air chamber, air-turbine, generator and batteries.

It is important to develop the air-turbine which works efficiently by the going and returning air flow. That should not only exert the optimum load on air chamber, but also be subjected to the optimum load by the generator. And that should be able to rotate with the wave as small as possible.

This paper deals with the Wells type air-turbine, which is most promising for the air-turbine. The theories have been incomplete on Wells type. Therefore in the first place the mathematical model is proposed.

Using the characteristics of air-turbine in the constant wind, and assuming the pressure and inertia of air-turbine in the pulsating wind, the average torque coefficients are calculated in the period of pulsation. Then the most optimum torque characteristics of generator are obtained and the operating conditions are derived.

In the next step, the most appropriate design of Wells type air-turbine is established.

Twelve models of Wells turbine are experimented and compared with each other. The most appropriate type of Wells turbine is selected judging from the viewpoint of the best performance of start-up on operation and the better efficiency of output power.

### 目 次

1. まえがき	38	2.1.1 原理および定式化	39
2. 基本特性	39	2.1.2 負荷発電機の最適特性	40
2.1 研究方法	39	2.1.3 タービンの運転状態	40
		2.1.4 空気室の作動状態	41
		2.2 実験	41
		2.2.1 実験装置	41
		2.2.2 タービンモデル	42

\*装備部, \*\*海洋開発工学部

原稿受付: 昭和62年1月13日

2.2.3	計測および実験方法	42
2.3	実験結果および考察	42
2.3.1	定常特性	42
2.3.2	脈動特性	43
2.3.3	運転状態	44
2.3.4	負荷の最適化	45
3.	最適翼形の選定	46
3.1	研究方法	46
3.1.1	想定海域	46
3.1.2	選定方法1	46
3.1.3	選定方法2	47
3.2	実験	47
3.3	実験結果および考察	48
3.3.1	選定方法1による起動性の比較	48
3.3.2	選定方法1による出力性能の比較	49
3.3.3	選定方法2による起動性の比較	50
3.3.4	選定方法2による出力性能の比較	53
3.3.5	最適翼形の選定	53
3.3.6	選定方法1と選定方法2の比較	53
4.	結論	53
5.	参考文献	54
6.	付録	54

## 記号

$A$	流路断面積
$\alpha$	迎え角 ( $\alpha$ )
$\alpha_m$	迎え角最大値 ( $\alpha_m$ )
$C_t$	トルク係数 (定常流)
$\bar{C}_t$	平均トルク係数 (脈動流)
$D$	タービン径, または必要タービン径
$E_a$	空気エネルギー, または空気室効率
$E_i$	入力波浪エネルギー
$E_t$	タービン効率, またはタービン出力
$E_{tbar}$	平均タービン効率
$I$	慣性能率
$M$	翼板および軸の質量
$N$	回転数 (rpm)
$P$	圧力
$P_m$	圧力最大値
$P_t$	総圧
$\Psi$	圧力係数 ( $\psi$ )
$p_1$	波浪出現確認率
$p_2$	潮汐影響係数
$p_3$	不規則波係数
$Q$	流量

(240)

$Q_m$	流量最大値
$R_t$	タービン半径 ( $D/2$ )
$Re$	レイノルズ数 ( $\omega D/\nu$ ; $\nu$ は動粘性係数)
$S$	等価開口面積
$sol$	ソリディティ
$T$	トルク
$\bar{T}$	平均トルク
$T_a$	タンデム係数 (シングルするとき1, タンデムのとき2)
$T_{bar}$	平均トルク
$T_g$	発電機トルク
$U$	タービン翼周速 ( $R_t \cdot \omega = R_t \cdot 2\pi N/60$ )
$v_a$	タービン入口空気流速 ( $Q/A$ )
$w$	タービン入口相対空気流速 ( $\sqrt{v_a^2 + U^2}$ )
$w_m$	タービン入口相対空気流速最大値
$X$	空気室の負荷 (圧力最大値/流量最大値)
$x$	タービン軸方向座標
$\alpha$	迎え角
$\alpha_m$	迎え角最大値
$\zeta$	入力エネルギー修正係数
$\zeta_m$	入力エネルギー修正係数 ( $\zeta(\alpha_m)$ )
$\eta_a$	空気室効率
$\eta_g$	発電機効率
$\eta_t$	タービン効率
$\bar{\eta}_t$	平均タービン効率
$\nu$	ハブ比 (ハブ径/タービン径)
$\xi$	縮流係数 (0.71)
$\rho$	空気密度
$\tau$	波浪周期
$\psi$	圧力係数
$\psi_m$	迎え角最大値のときの圧力係数 ( $\psi(\alpha_m)$ )
$\omega$	角速度 ( $2\pi N/60$ )

## 1. まえがき

空気式波浪発電装置は, 空気室, エアータービン, 発電機およびバッテリーで構成されている。このエアータービンの特徴をあげると, 第一に, 往復空気流に効率よく動作すること, 第二に, タービンは空気室の負荷となると同時に発電機を負荷とすること, 第三に, 灯標用としては, 小波浪の入力エネルギーにも動作することである。このような条件を満たすエアータービンを開発することが, 本研究の課題の一つである。

波浪発電用のエアータービンには, ウェルズ型・衝動型・サボニウス型・反動型などが, 従来試みられて

いる。その中で前二者が最も実用の可能性が高いので、本研究では、この2種類のタービンを系統的に調べ、各々の最適の設計要目を比較し、採用するタービンを決定することにした。本報告は、そのうちのウェルズ型についての研究結果である。

現在実用化されている小型ブイ用波浪発電装置の衝動型タービンは、現場での試行錯誤によって開発されたもので、理論的裏付けがない。また、緒についたばかりのウェルズ型タービンの理論<sup>1)~4)</sup>もその特徴を記述するには不完全である。

そこで本研究は、まずモデル化によってその基本特性を明らかにして、次に最適な翼形の選定を行った。なお、このモデル化の妥当性は、後に、1/5 空気室模型を搭載して水槽実験を行い確認する計画である。

## 2. 基本特性

### 2.1 研究方法

#### 2.1.1 原理および定式化

ウェルズ型タービン(以下ウェルズタービンという)は、図-2.1のように、対称翼をもち、1977年イギリスの Wells により発明された。

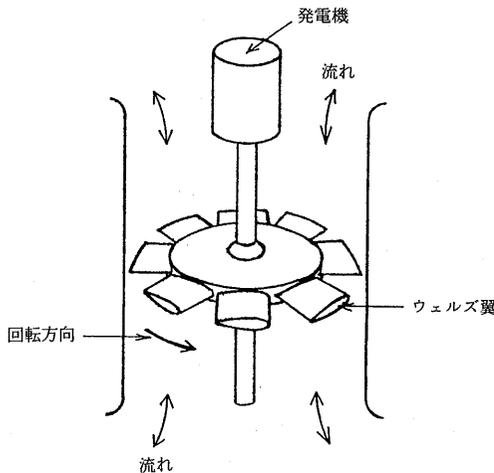


図-2.1 ウェルズタービン概念図

ウェルズタービン翼に作用する力と速度三角形を図-2.2に示す。軸方向の流速を  $v_a$ 、翼の周速を  $U$  とすると、空気は相対的に迎え角  $\alpha$ 、流速  $w$  で翼に流入し、揚力・抗力が発生する。その合力の翼前進方向成分が翼の駆動力となる。

この図から次の四つことが言える。第一に、空気流  $v_a$  の方向が  $180^\circ$  変化しても、タービン駆動力は同方

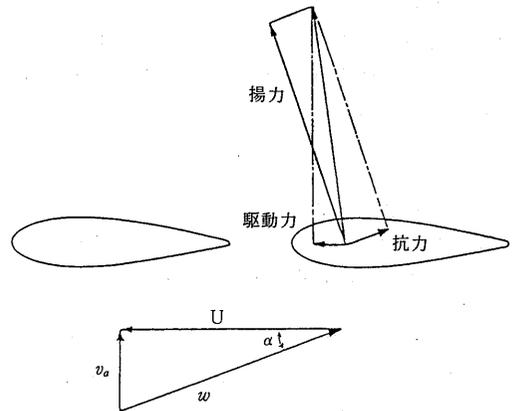


図-2.2 ウェルズタービン翼に作用する空気力と速度三角形

向である。すなわち、ウェルズタービンは往復流に対して一方に駆動力を発生させ、空気流を一方に整流する弁箱を必要としない。第二に、一般に迎え角の大きい範囲では失速域が存在する。すなわち、周速  $U$  が十分大きく、迎え角  $\alpha$  が小さい高速回転域で動作する。第三に、駆動力は揚力に比べて小さい。すなわち、タービンの出力トルクは小さい。これは第二の性質と併せ、ウェルズタービンの起動性の問題として重要である。第四に、軸方向成分の力が駆動力に比べ大きい。すなわち、ウェルズタービンは軸方向に大きな力を受け、翼板および軸を支えるベアリングに大きな負荷となる。

タービンの運動方程式は

$$I\dot{\omega} = C_t \frac{1}{2} \rho w^2 A R_t - T_g \quad (2.1)$$

$$M\ddot{x} = P - \psi \frac{1}{2} \rho w^2 \quad (2.2)$$

と書ける。定常流では

$$T_g = C_t \frac{1}{2} \rho w^2 A R_t \quad (2.3)$$

$$P = \psi \frac{1}{2} \rho w^2 \quad (2.4)$$

である。

トルク係数  $C_t$  および圧力係数  $\psi$  は、一般には、迎え角  $\alpha$  とレイノルズ数  $Re = wD/\nu$  の関数であるが、レイノルズ数の影響は小さいので、

$$C_t = C_t(\alpha), \quad \psi = \psi(\alpha) \quad (2.5)$$

$$(241)$$

として取り扱うことにする。

さて、往復空気流に対するタービンの特性（脈動特性とよぶ）を記述するために、次の三つを仮定する。

1) 波浪によって空気室から出る空気流の流量を

$$Q = Q_m \sin \omega t \quad (2.6)$$

とする。（波浪は規則波とする。）

2) タービンのイナーシアが十分大きく、脈動流によってタービンの回転数が変化しない。

3) 定常流トルク係数・圧力係数が、脈動流の瞬時に於いてそれらに近似的に等しい（準定常の仮定）。

この仮定のもとにタービン出力トルクを脈動の一周期にわたって平均化し、平均トルク係数  $\bar{C}_t$  を次のように、定義する。

$$\bar{T} = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau T dt \quad (2.7)$$

$$\bar{C}_t = \bar{T} / \frac{1}{2} \rho \omega_m^2 A R_t \quad (2.8)$$

そうすると、タービンの平均出力トルク、圧力最大値、流量最大値は次のように書ける。

$$\bar{T} = \frac{\pi^3}{240^2} \rho (1 - \nu^2) \bar{C}_t (1 + \tan \alpha_m) N^2 D^5 \quad (2.9)$$

$$P_m = \frac{\pi^2}{7200} \rho \psi_m (1 + \tan^2 \alpha_m) N^2 D^2 \quad (2.10)$$

$$Q_m = \frac{\pi^2}{240} (1 - \nu^2) \tan \alpha_m N D^3 \quad (2.11)$$

ところで、タービンを設計するためには、①負荷発電機の最適特性、②タービンの運転状態、③空気室の作動状態の三つを与えなければならない。

### 2.1.2 負荷発電機の最適特性

タービン入口の圧力、流量は、式 (2.4) を使って、

$$P = \psi \frac{1}{2} \rho U^2 (1 + \tan^2 \alpha) \quad (2.12)$$

$$Q = U A \tan \alpha \quad (2.13)$$

と書ける。タービンの入口空気エネルギー  $E_a$  は、

$$\begin{aligned} E_a &= \frac{1}{\tau} \int_0^\tau P Q dt \\ &= \frac{1}{2} \rho U^3 A \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \psi (1 + \tan^2 \alpha) \tan \alpha dt \end{aligned} \quad (2.14)$$

となる。また、

$$P_m Q_m = \frac{1}{2} \rho U^3 A \psi(\alpha_m) (1 + \tan^2 \alpha_m) \tan \alpha_m \quad (2.15)$$

よって、

$$E_a = P_m Q_m \frac{\frac{1}{\tau} \int_0^\tau \psi (1 + \tan^2 \alpha) \tan \alpha dt}{\psi(\alpha_m) (1 + \tan^2 \alpha_m) \tan \alpha_m} \quad (2.16)$$

となる。ここで、右辺の積分の被積分関数は  $\alpha$  の関数であり、その  $\alpha$  の時間変化は圧力波形の式 (2.6) によって決まり、

$$\tan \alpha = \tan \alpha_m \sin \omega t \quad (2.17)$$

となる。したがって、式 (2.16) の積分は、 $\alpha_m$  のみの関数となるので、

$$\zeta(\alpha_m) = \frac{\frac{2}{\tau} \int_0^\tau \psi (1 + \tan^2 \alpha) \tan \alpha dt}{\psi(\alpha_m) (1 + \tan^2 \alpha_m) \tan \alpha_m} \quad (2.18)$$

とおくと、

$$E_a = \frac{1}{2} P_m Q_m \zeta(\alpha_m) \quad (2.19)$$

となる。 $\zeta(\alpha)$  を入力エネルギー修正係数とよぶことにする。そうすると、脈動時の平均タービン効率  $\bar{\eta}_t$  は

$$\bar{\eta}_t = \frac{\bar{T} \omega}{E_a} = \frac{2 \bar{C}_t(\alpha_m)}{\psi(\alpha_m) \zeta(\alpha_m) \tan \alpha_m} \quad (2.20)$$

と書ける。すなわち、脈動時の平均タービン効率は迎角最大値  $\alpha_m$  によって決まる。したがって、 $\bar{\eta}_t$  が最大となる  $\alpha_m$  を実現するように負荷発電機の入力トルク特性を決めると、式 (2.9) より

$$T_g = \frac{\pi^3}{240^2} \rho (1 - \nu^2) \bar{C}_t(\alpha_m) (1 + \tan^2 \alpha_m) N^2 D^5 \quad (2.21)$$

となる。式 (2.21) はタービンに固有の式であるが、厳密な意味での最適負荷特性は空気室の性質に左右される。というのは、タービン効率  $\bar{\eta}_t$  が若干下がっても、空気室効率を良くする方が、タービン出力を高くすることができる場合があるからである。したがって、 $\alpha_m$  を変化させ、入力波浪エネルギーに対するタービン出力を比較すれば、式 (2.21) であらわされる特性を補正し、最適化することができる。

### 2.1.3 タービンの運転状態

(1) 方法 1

タービンと空気室を一体の装置とみると、入力波浪に対するタービン・空気室の特性をみる事ができる。

木下ら<sup>5)</sup>は同一周期の波浪に対して、空気室効率は  $P_m/Q_m$  によって表現できることを示した。それを使えば、

$$E_i \cdot \eta_a (P_m/Q_m) = \frac{1}{2} P_m Q_m \xi(\alpha_m) \quad (2.22)$$

$$P_m = \psi(\alpha_m) \frac{1}{2} \rho U^2 (1 + \tan^2 \alpha_m) \quad (2.23)$$

$$\tan \alpha_m = \frac{Q_m}{UA} \quad (2.24)$$

$$U = \pi D \frac{N}{60} \quad (2.25)$$

とおける。\$D\$、\$E\_i\$および関数 \$\eta\_a(P\_m/Q\_m)\$、\$\xi(\alpha\_m)\$、\$\psi(\alpha\_m)\$ が既知であれば、式 (2.22) ~ (2.25) の 4 方程式の未知数は、\$P\_m\$、\$Q\_m\$、\$U\$、\$\alpha\_m\$、\$N\$ の 5 ケなので、4 ケの未知数 (\$P\_m\$、\$Q\_m\$、\$U\$、\$\alpha\_m\$) は他の 1 ケの未知数 (\$N\$) の関数として表わされる。よって、

\$P\_m = P\_m(N)\$、\$Q\_m = Q\_m(N)\$、\$\alpha\_m = \alpha\_m(N)\$、である。したがって、さらに、\$\bar{\eta}\_t = \bar{\eta}\_t(N)\$、\$\eta\_a = \eta\_a(N)\$、\$\bar{T} = \bar{T}(N)\$ と表現できる。\$\bar{T}(N)\$ は、タービンが回転数 \$N\$ で回転しているときのタービンの駆動トルクである。

タービンの運転状態は、タービンの駆動トルクと負荷発電機のトルクがつり合う時である。両トルク曲線の交点から運転状態を決めることができる。

## (2) 方法 2

平均タービントルク曲線と負荷発電機トルク曲線の交点から、圧力最大値とタービン回転数の関係を求めることができる。

発電機の入力トルク特性は、一般に、

$$T = T_g(N) \quad (2.26)$$

と書ける。式 (2.9)、(2.10)、(2.26) の 3 方程式において、未知数は \$N\$、\$\alpha\_m\$、\$T\$、\$P\_m\$ (式 (2.9) の \$\bar{T}\$ は式 (2.26) の \$T\$ と同じ意味である) の 4 ケであるから、3 ケの未知数 (\$\alpha\_m\$、\$T\$、\$N\$) は、他の 1 ケの未知数 (\$P\_m\$) の関数として求めることができる。よって、\$\alpha\_m = \alpha\_m(P\_m)\$、\$T = T(P\_m)\$、\$N = N(P\_m)\$ である。

これは、負荷発電機が決まれば、タービンの運転状態は、入力空気流の圧力最大値から求まることを示している。この関係式は、タービンの基本特性 \$C\_t(\alpha\_m)\$、\$\psi(\alpha)\$ と発電機特性から求められ、空気室の特性に依存しない。得られた関係式は、方法 1 において、入力波浪を変化させて求めた結果と同じである。

### 2.1.4 空気室の作動状態

空気室効率 \$\eta\_a\$ が \$P\_m/Q\_m\$ の関係として知られているならば、前述のタービン作動状態から空気室の諸パラメータを決めることができる。

しかし、空気室効率 \$\eta\_a\$ が、空気室に開いた丸穴ノズ

ル面積の空気室面積に対する比 (開口比) の関数として求められている場合は、次のように取り扱うことができる。

タービンを空気室の負荷としたとき、そのタービンと等価な作用をする丸穴ノズルの面積 \$S\$ をそのタービンの等価開口面積とする。面積 \$S\$ の丸穴ノズルについて、流量と圧力の関係は、

$$P = \frac{1}{2} \rho \left( \frac{Q}{\xi S} \right)^2 \quad (2.27)$$

である。ここに、\$\xi\$ は縮流係数である。式 (2.27) の \$P\$ の代わりに \$P\_m\$ を、\$Q\$ の代わりに \$Q\_m\$ を用いると、式 (2.10)、(2.11) から

$$\frac{S}{A} = \frac{\sin \alpha_m}{\xi \sqrt{\psi(\alpha_m)}} \quad (2.28)$$

となる。\$S/A\$ は \$\alpha\_m\$ の関係である。

負荷発電機がタービンに対して、\$\alpha\_m\$ 一定となるようにできていれば、等価開口面積を用いて、空気室効率をタービン効率と分離して扱うことができ便利である。

以上のように、ウェルズタービンの基本特性は、圧力係数 \$\psi(\alpha)\$ と平均トルク係数 \$\bar{C}\_t(\alpha\_m)\$ で記述できる。

## 2.2 実験

### 2.2.1 実験装置

実験装置は、図-2.3 に示すように、送風機の出口に、流量計を介して、タービンを取り付け、タービンの出力軸にトルク計を間にはさんで、DC サーボモーターを取り付けた。タービンのハブ部分にはコーンを付け、流れがタービン環状流路に滑らかにほいるようにした。ウェルズタービンの出力トルクが小さいので、トルク計はタービン軸に直結し、軸受損失を減らし、計測精度を向上させた。DC サーボモーターは 6,300 rpm まで回転数を制御できる。

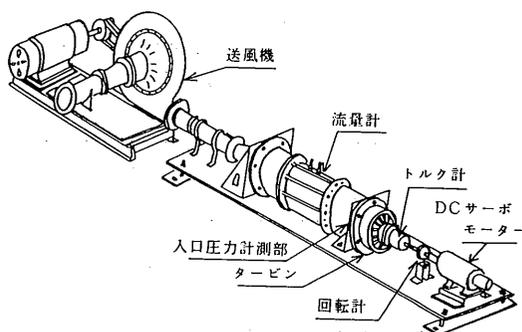


図-2.3 実験装置

2.2.2 タービンモデル

実験に用いたウェルズタービンの諸元を表-2.1に、その概要を図-2.4に示す。ブレードは木製で表面はペンキ塗装をした。

表-2.1 ウェルズタービン諸元

翼 外 径	φ200 mm
ハ ブ 径	φ140 mm
翼 形	NACA0021, 扇形
翼 厚	12 mm
翼 枚 数	8 枚
ソリディティー	0.8
ガイドベーン	なし

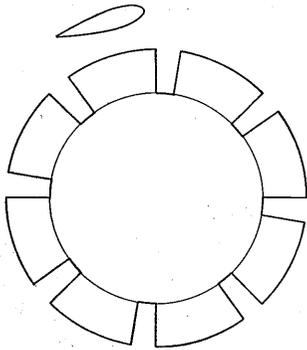


図-2.4 ウェルズタービンモデル

2.2.3 計測および実験方法

図-2.5に示すように、計測はパソコンに集中処理させた。トルク計は最大2 kg・cmで、実験範囲と一致する容量とし、計測精度をあげた。

実験は、風洞送風機の回転数を一定にし、タービン回転数を、0, 50, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 800, 1,000, 1,200, 1,400, 1,600, 1,800, 2,000,

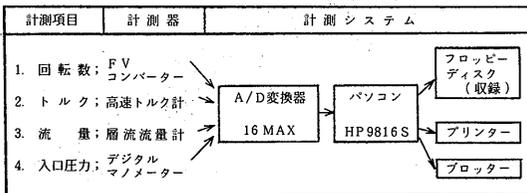


図-2.5 計測方法のブロック図

2,200, 2,500, 3,000, 4,000, 5,000, 6,000rpmの22の条件に変え、定常状態でデータを取り込んだ。データの取り方が低回転数で密なのは、迎え角αが90°~30°の範囲でも諸変数のグラフの連続性をよくするためである。

送風機回転数は8種について行った。送風機回転数が一定でも、タービン回転数が変われば、流量は一定でない。しかし、タービン回転数は精度よく制御できるので、タービン回転数を基準にした補間法により、任意の変数を求めることができるようにした。すなわち、タービン回転数の外に、トルク、流量、入口圧力のうち1ヶを任意に指定すれば、他の2ヶの値は、随意に取り出せるようにし、データ処理を容易にした。

2.3 実験結果および考察

2.3.1 定常特性

図-2.6, 図-2.7に定常流でのタービンのトルク特性、流量特性を、圧力をパラメータにして示した。圧

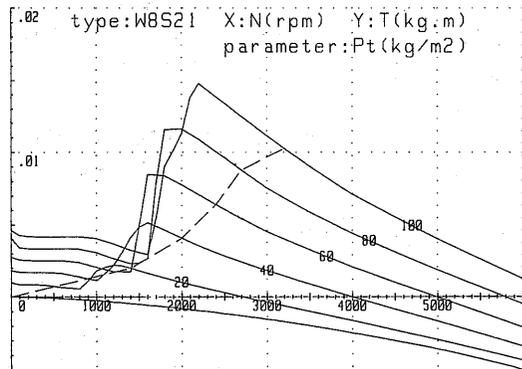


図-2.6 トルク特性 (定常流)

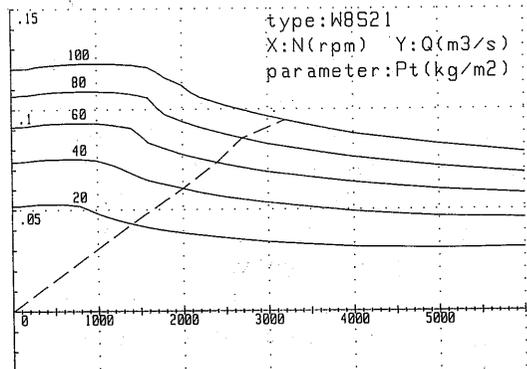


図-2.7 流量特性 (定常流)

力は、空気室の圧力と等価にするため、総圧をとったが、静圧と大差はない。この2つの図が実験から直接得られたデータで、以降の計算はすべてこれから得られるものである。

図-2.8に、図-2.6と同一スケールで等レイノルズ数の曲線を、図-2.9に等迎え角の曲線を示す。レイノルズ数は  $Re < 3 \times 10^5$  の範囲である。迎え角が小さいところでは  $w = U/\cos \alpha \approx U \sim N$  となり、等レイノルズ数曲線は等回転数曲線に近い。

図-2.10または図-2.11の点線が定常流のタービン効率である。蒸気タービンにおける衝動型および反動型と比べると、効率が最大となる周速比が1よりはるかに大きい方にずれていることがわかる。これはウェルズタービンが高速回転する特徴を示したものである。

図-2.12の点線に、定常流のトルク係数、図-2.13

に圧力係数を示す。トルク係数の曲線は、 $15^\circ < \alpha < 23^\circ$  の領域に明白な失速域を示している。図-2.14、図-2.15にトルク係数、圧力係数のレイノルズ数への依存性を示す。失速域におけるトルク係数を除いてはトルク係数および圧力係数はレイノルズ数に依存しないことがわかる。

図-2.16に等価開口面積を示す。 $\alpha_m$  の増加に伴って、等価開口面積も増加するが、 $\alpha_m \geq 20^\circ$  で飽和している。

2.3.2 脈動特性

図-2.17に、脈動時の平均トルクを示す。図-2.10および図-2.11の実線に、平均タービン効率を示す。トルクもタービン効率も、定常流のものよりも小さい。タービン効率を最大にするときの迎え角最大値は、定常流のときよりも大きくなっている。

図-2.12の実線に平均トルク係数を示す。

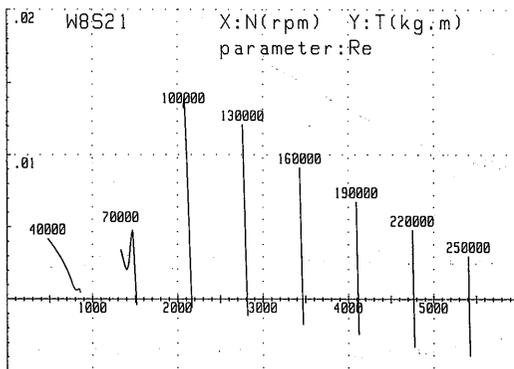


図-2.8 等レイノルズ曲線

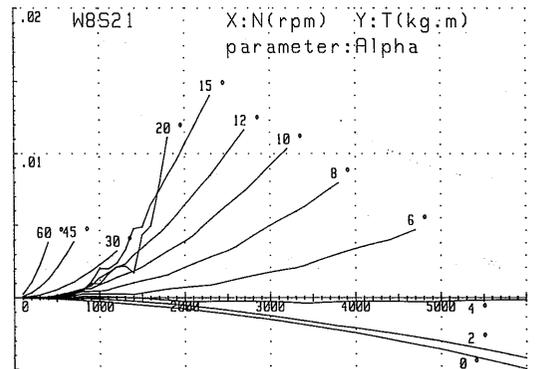


図-2.9 等迎え角曲線

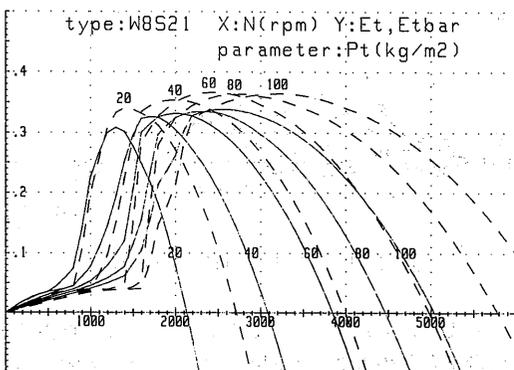


図-2.10 タービン効率と平均タービン効率

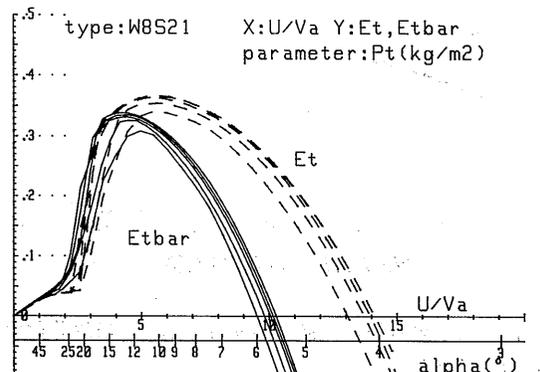


図-2.11 タービン効率と平均タービン効率 (無次元表示)

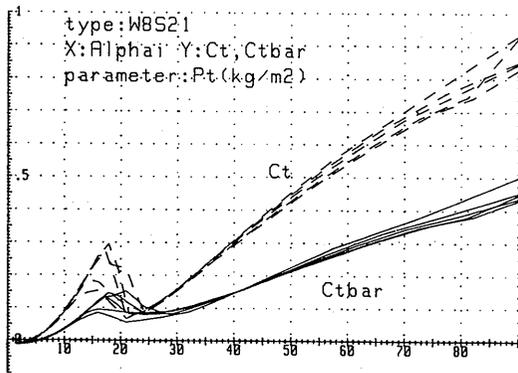


図-2.12 トルク係数と平均トルク係数

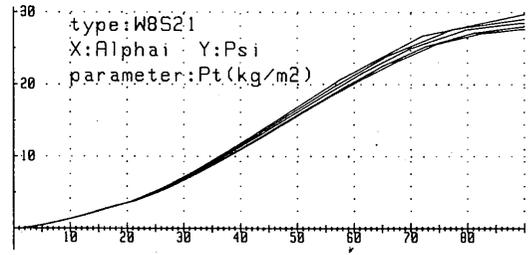


図-2.13 圧力係数

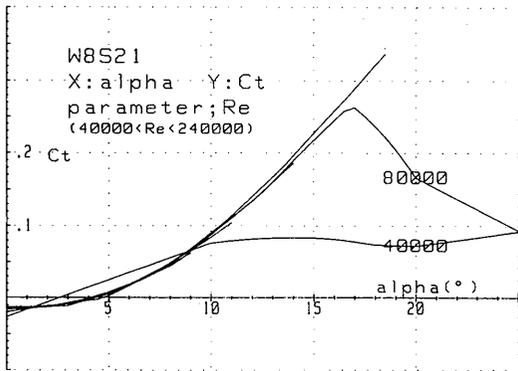


図-2.14 トルク係数へのレイノルズ数の影響

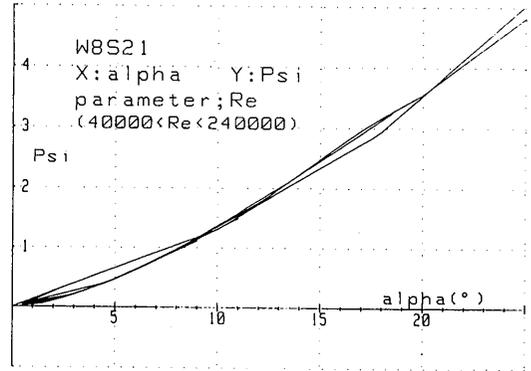


図-2.15 圧力係数へのレイノルズ数の影響

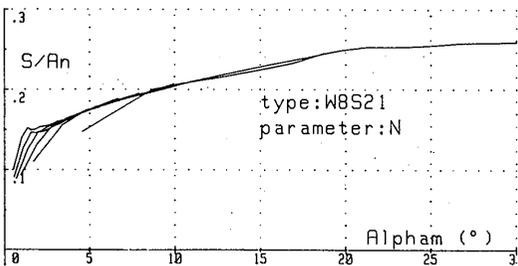


図-2.16 等価開口面積

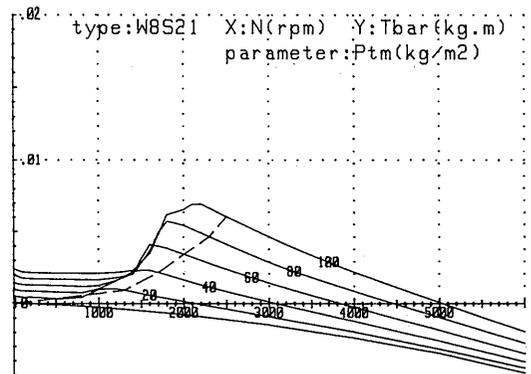


図-2.17 トルク特性 (脈動流)

図-2.17の点線は、最大効率時を示し、最適負荷の近似解である。

2.3.3 運転状態

発電機の特徴を、図-2.18の二点鎖線( $\alpha_m = 14^\circ$ )に相 (246)

当)のように仮定する。これは、図-2.17の点線で示した最適負荷の近似と低回転における発電機軸の損失を組み合わせたものである。軸損失は軸径10mmのベアリング2個の摩擦損失を実測したものである。誘導

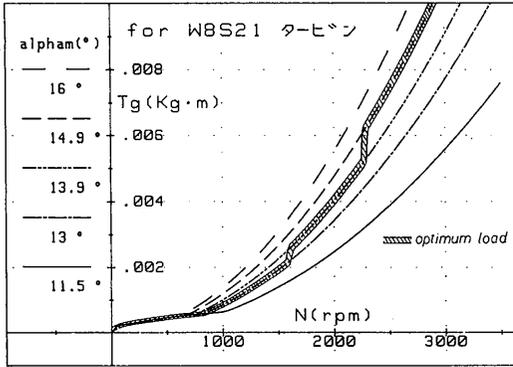


図-2.18 最適負荷を求めるための発電機特性

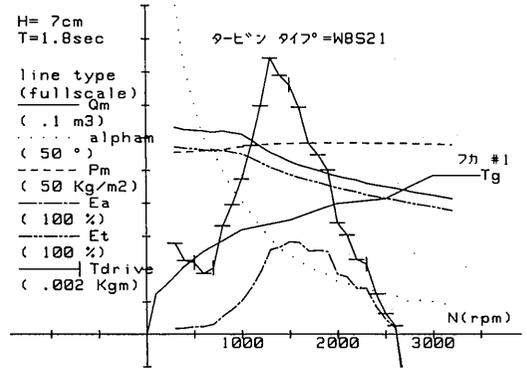


図-2.19 空気室・タービンの駆動トルクなど

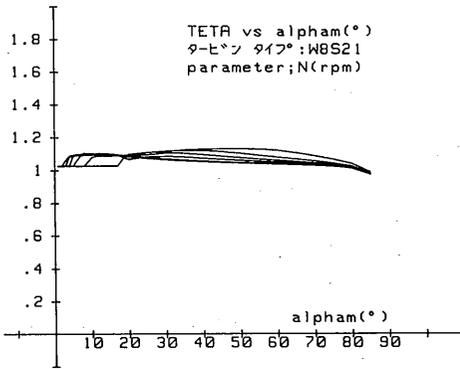


図-2.20 入力エネルギー修正係数  $\zeta$  ( $\alpha_m$ )

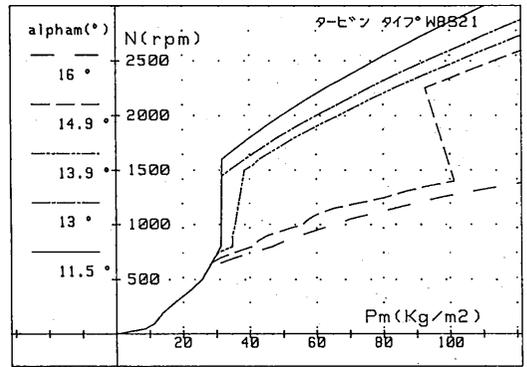


図-2.21 運転曲線

子式発電機では、この条件を満たすことができる。この特性も便宜上、以下で「最適負荷の近似解」と呼ぶことにする。

方法1によってタービンの運転状態を求めてみよう。前報(その1)<sup>7)</sup>に示した空気室の効率  $\eta_a$  は

$$\eta_a = 0.9042 - 0.000754 P_m / Q_m$$

で与えられる。ただし、 $40 \leq P_m / Q_m \leq 700$  である。波高 7 cm, 周期 1.8 sec, 波エネルギー  $E_i = 1.73 \text{ Kg/m/s}$  の規則波浪によって駆動された場合のタービン駆動トルク等を求めたのが、図-2.19である。タービン回転数が 300~3000 rpm で、 $\alpha_m$  が大きく変わる割には、 $P_m$  はたいして変化していない。したがって、図-2.17の一定  $P_i$  曲線と似ている。なお、図-2.19においてフカ#1は軸径10mmのベアリング2個の摩擦トルク(後述するフカ#2はそれに直流発電機用ブラシ1ケをつけた摩擦トルク)である。この波浪に対してはフカ#1でタービンは起動しないことがわかる。なお、図-2.13

の圧力係数の値を使って、式(2.17)および(2.18)から入力エネルギー修正係数  $\zeta_m$  を計算すると、図-2.20のようになる。 $\zeta_m$  は  $\alpha_m$  にそれほど依らないことがわかる。

方法2によって、図-2.17の平均トルク特性のグラフと図-2.18の発電機のトルク曲線の交点を求める。交点の回転数とそのパラメータである圧力最大値の関係を示したのが、図-2.21である。これがタービンの運転状態を表している。(運転曲線とよぶ)

### 2.3.4 負荷の最適化

図-2.18の二点鎖線は最適負荷の近似解であり、 $\alpha_m = 14^\circ$  に相当している。このときの空気室は、最大効率の開口比1/100よりも絞った状態である。そこで、 $\alpha_m$  を大きくして開口比を大きくし(図-2.16参照)、空気室効率を上げてみよう。タービン効率の低下を上回る空気室効率の向上がえられるかどうかは、図-2.22ないし図2.23のように、波浪エネルギーに対するタービン

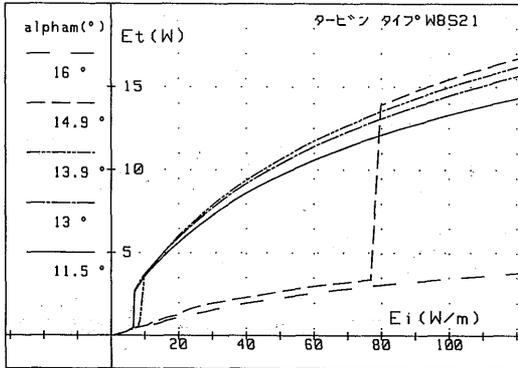


図-2.22 入力波浪エネルギーに対するタービン出力

出力ないしその比（空気室効率とタービン効率の積）をみればわかる。設計上は、 $\alpha_m=14^\circ$ の近似解を最適負荷とみなして十分であることがわかる。しかし、より良い設計をするならば、入力波浪エネルギーが大きいときは、 $\alpha_m=14.9^\circ$ で、入力波浪エネルギーが小さいときは、 $\alpha_m=13^\circ$ で、その中間では、 $\alpha_m=13.9^\circ$ でタービンが動作することが最も大きい出力をうることができる。それらの境目を与える回転数は、図-2.24から読み取ることができる。したがって、図-2.18のハッチ線のように、回転数が大きいところでは $\alpha_m=14.9^\circ$ 、小さいところでは $\alpha_m=13^\circ$ 、その中間では $\alpha_m=13.9^\circ$ の負荷が最適負荷である。

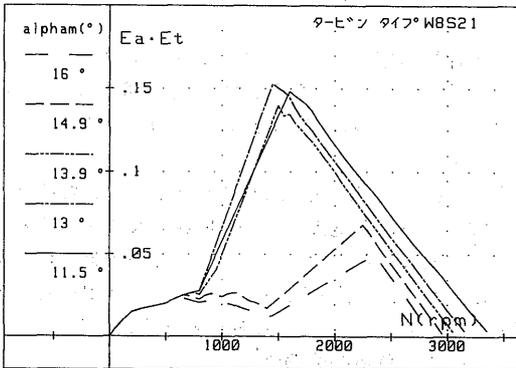


図-2.24 回転数と効率

### 3. 最適翼形の選定

#### 3.1 研究方法

##### 3.1.1 想定海域

灯標用電源に波浪エネルギーを利用する観点から、(248)

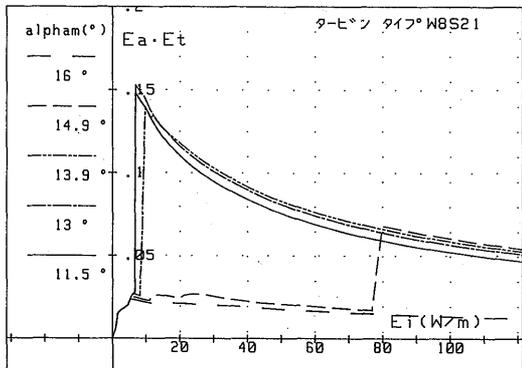


図-2.23 空気室効率とタービン効率の積

日本沿岸の波浪をみると、太平洋側と日本海側に区分できる。日本海側は、冬期には大波浪が生ずることが特徴である。それにたいして、太平洋側は、台風を除いて大波浪はないが、一年を通じて小さな波浪が存在する。

本研究では、灯標設置海域を太平洋側に想定した。したがって、波浪発電装置ないしタービンは、小さな波浪エネルギーをも取り込むものでなければならない。

##### 3.1.2 選定方法1

タービン翼の選定は、まず第一に自己起動性を有することであり、これは絶対条件である。第二に、できるだけ出力を高くとることである。

###### (1) 起動性

前章2.1.3 (1) 方法1で示した手続きで、想定海域で出現確率50%の波浪（設計波浪）に対し、各タービンの駆動トルク曲線を求める。

タービンが自己起動するためには、このタービンの失速域の最小駆動トルクよりもタービン負荷のトルクが小さくなければならない。この最小駆動トルクが発電機の製作可能限界以上であることが必要不可欠であり、またその条件下でも、できるだけ大きい値であることが望ましい。

###### (2) 出力性能

タービンの出力は、平均タービン効率と空気室効率の大きいほど良い。実用規模の空気室とタービンの大きさでは、等価開口面積  $S$  が大きいほど、空気室効率は良い。

そこで、タービン効率と空気室効率を総合的に扱うため、「必要タービン径」の概念を用いる。すなわち、設計波浪に対し、設計出力（電気出力100W）をうるために必要なタービン径  $D$  を求め、それが最も小さくな

る翼形を選ぶことにする。

$X = P_m / Q_m$  とおくと、式 (2.10), (2.11), (2.19), から

$$D^4 = \frac{C}{X} \sqrt{\frac{2E_i \eta_a(X)}{X \zeta_m}} \quad (3.1)$$

である。発電出力は、

$$E = E_i \cdot \eta_a \cdot \eta_t \cdot \eta_g \cdot p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \quad (3.2)$$

ここで、 $E_i = 6.1 \text{KW}$  (設計波浪, 波高0.35m, 波周期 4.0sec)

$$\begin{aligned} \eta_a &= 0.9042 - 0.00727X && \text{(空気室効率)} \\ \eta_g &= 0.5 && \text{(発電機効率)} \\ p_1 &= 0.5 && \text{(設計波浪出現確率)} \\ p_2 &= 0.8 && \text{(潮汐影響係数)} \\ p_3 &= 0.56 && \text{(不規則波係数)} \end{aligned}$$

とする。また、

$$C = \frac{8\rho\psi_m}{\pi^2(1-\nu^2)^2 \sin^2 \alpha_m} \cdot \frac{1}{T_a^2} \quad (3.4)$$

$$T_a = \begin{cases} 1 & \text{(シングル)} \\ 2 & \text{(タンデム)} \end{cases} \quad (3.5)$$

である。なお、ウェルズタービン翼板を一つ用いるのをシングル型、二つ用いるのをタンデム型という。タ

ンデム型では、二つの向き合った翼板に各々空気室からの、ないしは空気室への空気が作用するので、シングル型に対し式 (2.12) の流量が2倍になったものに相当する。

各翼形について、 $\alpha_m, \bar{\eta}_t, \psi_m, \zeta_m$  がえられれば、 $E = 100 \text{W}$  を出力するタービン径  $D$  が求まる。

### 3.1.3 選定方法 2

前章の図-2.18 でしめしたとおなじ方法で、発電機負荷を最適負荷の近似解と仮定し、2.1.3 方法 2 で示した手続きで、タービンの運転状態の関係 (運転曲線) を求める。これから、起動をはじめめる圧力最大値あるいは波浪エネルギーを求め、その大小を比較すれば、起動性能の優劣が判定できる。

この選定方法によれば、起動性・出力性能とも同じ運転曲線によって比較できる。すなわち、想定海域の海象データから波浪エネルギーの出現頻度を求め、波浪エネルギーに掛けて積分すれば、タービン出力の年間の平均値がえられ、この大小で、タービンを選定することもできる。

### 3.2 実験

実験装置・計測方法・実験方法は、前章 2.2 と同じである。

12種類の、実験に供したウェルズタービン翼モデルの諸元を、表-3.1 に示す。翼形状は、図-3.1, 図-3.2 に示すように、扇形と矩形の2種類である。翼

表-3.1 ウェルズタービンモデル諸元

タイプ	翼形	ソリディティ	翼形	ガイドベーン
W7 S15	扇形	0.7	NACA0015	無
W8 S15	扇形	0.8	NACA0015	無
W7 S18	扇形	0.7	NACA0018	無
W7 R18	矩形	0.7	NACA0018	無
W8 S18	扇形	0.8	NACA0018	無
W8 R18	矩形	0.8	NACA0018	無
W7 S21	扇形	0.7	NACA0021	無
W7 R21	矩形	0.7	NACA0021	無
W8 S21	扇形	0.8	NACA0021	無
W8 R21	矩形	0.8	NACA0021	無
W8 R18N	矩形	0.8	NACA0018	有
W8 R21N	矩形	0.8	NACA0021	有

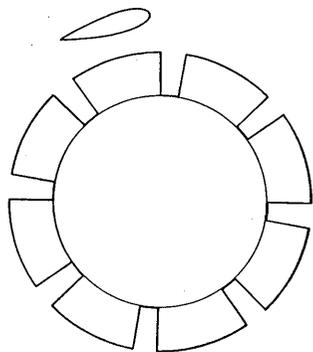


図-3.1 扇形翼

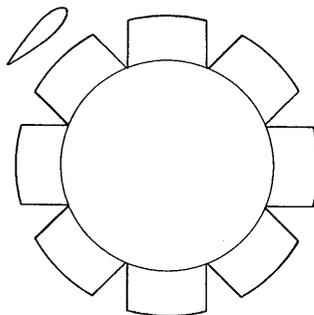


図-3.2 矩形翼

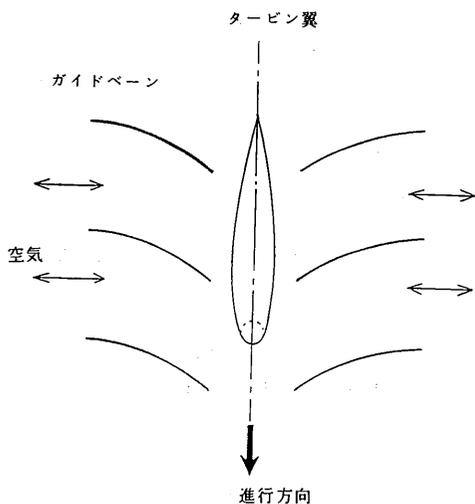


図-3.3 ガイドベーン

表-3.2 起動性 (方法1)

タービン翼形	最小駆動トルク (kg・cm)	負荷#1で起動するか
W7 S15	0.0029	×
W8 S15	0.0033	×
W7 S18	-0.0139	××
W7 R18	0.0169	×
W8 S18	0.0133	×
W8 R18	0.0357	×
W7 S21	0.0068	×
W7 R21	0.0266	×
W8 S21	0.0373	×
W8 R21	0.0613	○
W8 R18N	0.0642	○
W8 R21N	0.0984	○

○…負荷#1で起動する。×…負荷#1で起動しない。  
 ××…駆動トルクが負になる。

外形φ200mm、ハブ径φ140mm、翼枚数8枚などは共通である。翼型はNACAで0015, 0018, 0021の3種類をとった。翼厚は根元から先端まで同じである。表-3.1にはスパン中央の翼型を示してある。

起動性のあるものはソリディティーが大きいという報告<sup>6)</sup>があることから、ソリディティーを0.7と0.8にした。また、ガイドベーンを付けると起動性・タービン効率が上がるという報告<sup>6)</sup>があるので、本実験でも試みることにした。図-3.3にガイドベーンを示す。

### 3.3 実験結果と考察

#### 3.3.1 選定方法1による起動性の比較

12種類のタービン翼について、脈動流での駆動トルク曲線を求めると、図-3.4～図-3.8のようになる。低回転数領域での最小駆動トルクを読み取り、軸径10 (250)

mmの軸受け摩擦トルク(負荷#1)との大きさを比較すると、表-3.2のようになる。

これから言えることは、

- ①ソリディティー0.7で扇形翼の場合(W7S15, W7S18の順が逆)を除き、翼厚の大きいほど、起動性が良い。
- ②ソリディティーの大きいほど、起動性が良い。
- ③扇形翼よりも矩形翼の方が起動性は良い。
- ④ガイドベーンを付けた方が起動性は良い。

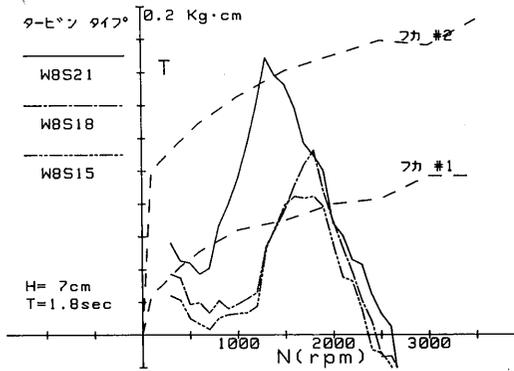


図-3.4 駆動トルク曲線 (翼厚の影響)

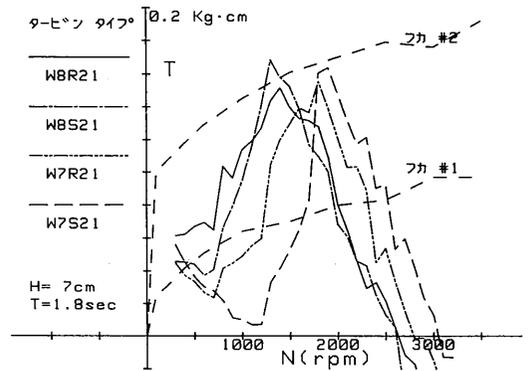


図-3.5 駆動トルク曲線 (ソリディティの影響)

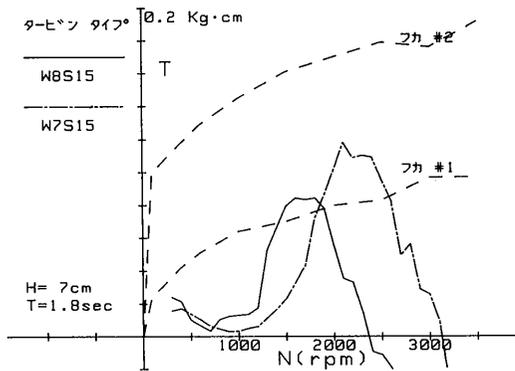


図-3.6 駆動トルク曲線 (ソリディティの影響)

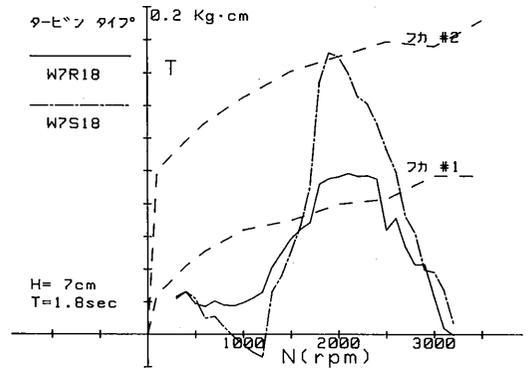


図-3.7 駆動トルク曲線 (扇形翼と矩形翼の比較)

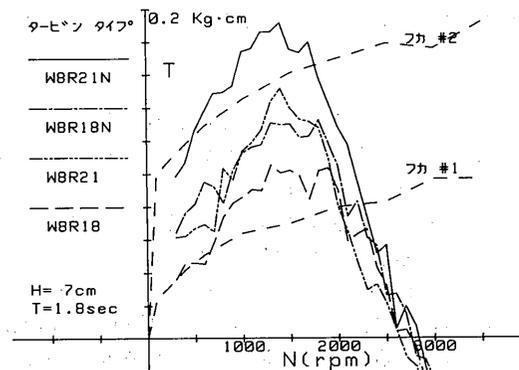


図-3.8 駆動トルク曲線 (ガイドベーンの影響)

また、負荷#1で起動するのは、W8R21N, W8R18N, W8R21の3つである。

### 3.3.2 選定方法1による出力性能の比較

表-3.3に各々のタービンについて、定常流のタービン効率の最大値およびそのときの迎え角、脈動流での平均タービン効率の最大値およびそのときの迎え角最大値、等価開口面積、そして「必要タービン径」を示す。

この結果を見ると、必要タービン径は、①翼厚が大きいほど、②ソリディティが小さいほど、③矩形翼より扇形翼の方が、④ガイドベーンが付く方が、小さくなっている。

このうち、①翼厚、④ガイドベーンについては、起動性も出力性能も共に良くなる傾向だが、②ソリディティ、③扇形翼/矩形翼については、起動性と出力性能は相反している。

なお、図-3.9に、定常流のタービン効率の大小と

表-3.3 出力性能 (方法1)

タイプ	定常流		脈動流			必要タービン径 D (m)
	$\alpha (^{\circ})$	$\eta_{tmax}$	$\alpha_m (^{\circ})$	$\bar{\eta}_{tmax}$	S/A	
W7 S15	6.8	0.40	8.8	0.33	0.24	1.10
W8 S15	6.9	0.41	7.8	0.35	0.16	1.25
W7 S18	8.8	0.45	9.9	0.41	0.25	0.88
W7 R18	6.9	0.38	9.3	0.32	0.25	1.15
W8 S18	7.2	0.41	8.1	0.35	0.17	1.23
W8 R18	6.8	0.41	8.0	0.35	0.18	1.19
W7 S21	9.2	0.44	11.3	0.38	0.27	0.91
W7 R21	10.7	0.38	13.4	0.32	0.30	1.01
W8 S21	9.8	0.37	13.0	0.33	0.22	1.16
W8 R21	9.6	0.37	11.5	0.33	0.22	1.15
W8 R18N	7.4	0.40	8.7	0.33	0.20	1.23
W8 R21N	9.8	0.40	12.6	0.38	0.23	0.97

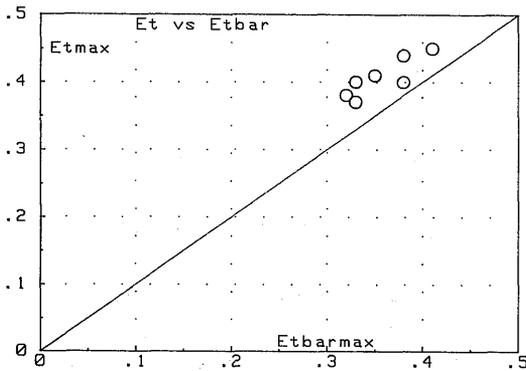


図-3.9 タービン効率と平均タービン効率の相関

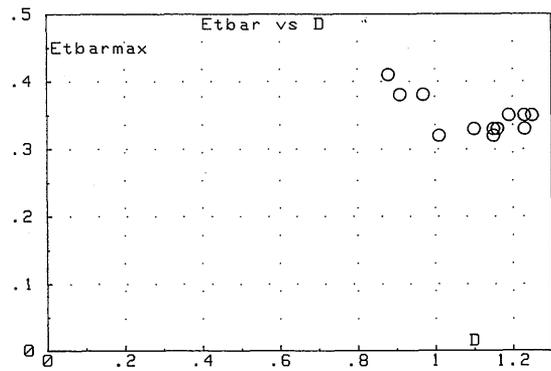


図-3.10 平均タービン効率と必要タービン径の相関

脈動流のタービン効率の大小は相関がうすいことを示した。図-3.10に、平均タービン効率と必要タービン径をプロットしたが、相関はうすいことがわかる。図-3.11に平均タービン効率と等価開口面積が互いに関係ないことを示した。これは、タービンの出力性能が、定常流のタービン効率、脈動流のタービン効率、等価開口面積で表現できないことを示している。

また、図-3.12に12種類の翼形の等価開口面積を示した。等価開口面積はソリディティーに最も依存する。おおざっぱに言えば、等価開口面積はタービン流路の

静的流路断面積に近い。

### 3.3.3 選定方法2による起動性の比較

発電機を最適負荷の近似と仮定した。それを規定するパラメータを表-3.4に示す。

図-3.13に運転曲線を示すが、迎え角最大値の変化を見れば、回転数が不連続的に大きくなるところで、タービンは高速領域にはいることがわかる。図-3.14~図-3.19に各タービンの運転曲線を示す。高速領域で運転する(起動する)のは、6種類である。起動時の圧力最大値  $P_m$  および入力波浪エネルギーを表-

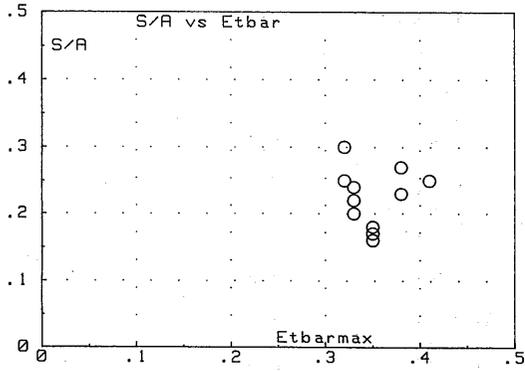


図-3.11 等価開口面積と平均タービン効率の相関

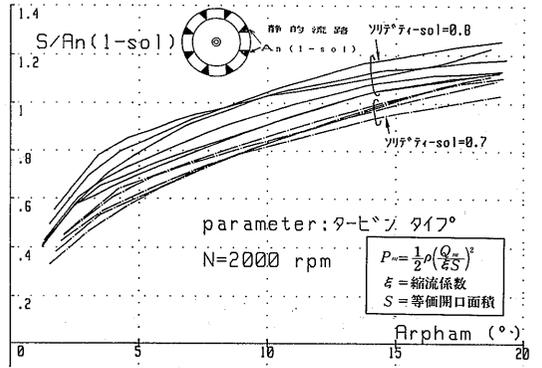


図-3.12 等価開口面積

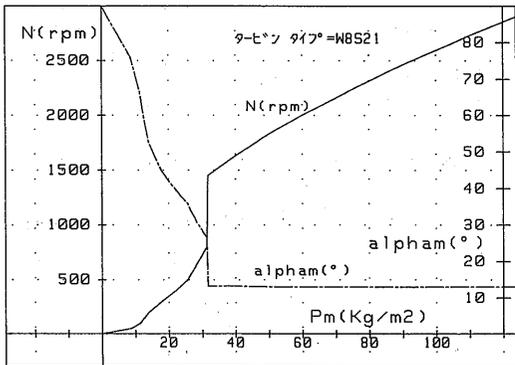


図-3.13 運転曲線 (迎え角と回転数)

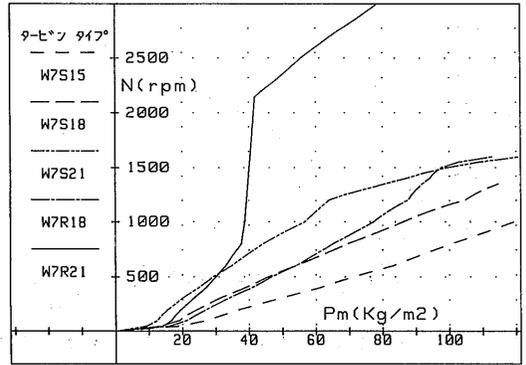


図-3.14 運転曲線 (ソリディティー0.7の場合)

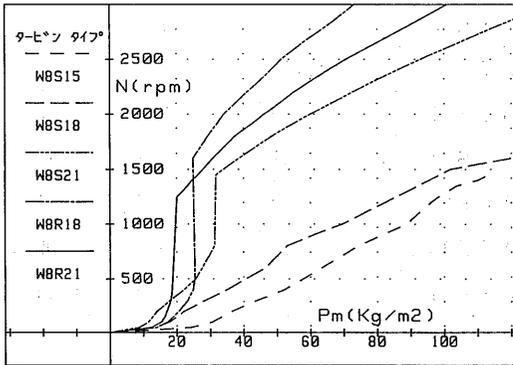


図-3.15 運転曲線 (ソリディティー0.8の場合)

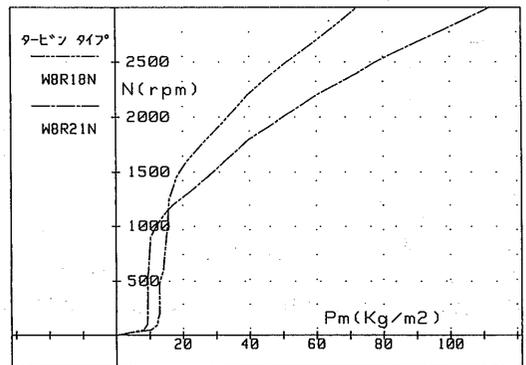


図-3.16 運転曲線 (ガイドベーンのある場合)

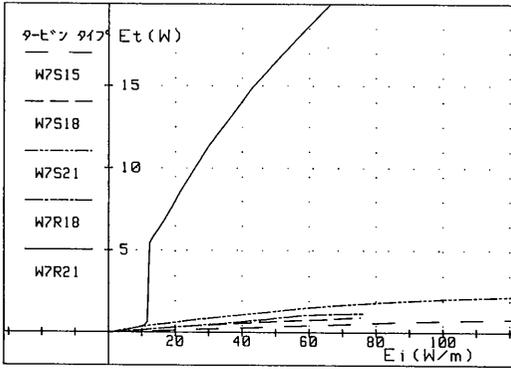


図-3.17 タービン出力 (ソリディティ0.7の場合)

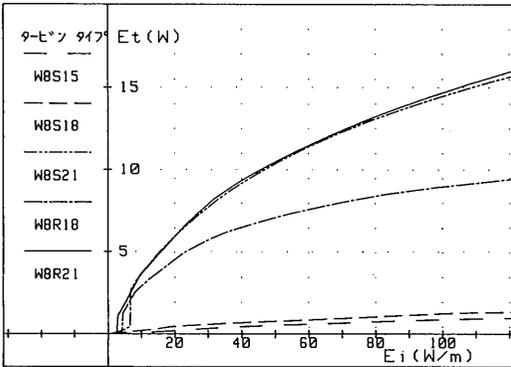


図-3.18 タービン出力 (ソリディティ0.8の場合)

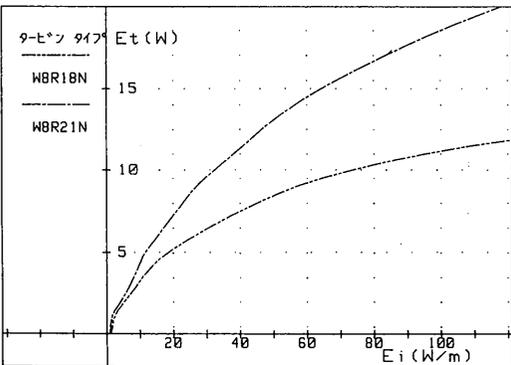


図-3.19 タービン出力 (ガイドベーンのある場合)

表-3.4 平均タービン効率最大のときの迎え角最大値および平均トルク係数

タイプ	$\alpha_m$	$\bar{C}_t$
W7S15	8.8°	0.021
W8S15	7.8°	0.033
W7S18	9.9°	0.033
W7R18	9.3°	0.022
W8S18	8.1°	0.034
W8R18	8.0°	0.028
W7S21	11.3°	0.039
W7R21	13.4°	0.046
W8S21	13.0°	0.074
W8R21	11.5°	0.051
W8R18N	8.7°	0.029
W8R21N	12.6°	0.069

表-3.5 タービン性能の比較 (方法2)

タイプ	起 動 開 始		$E_i=6\text{kgm/s}$ のときの $\eta_a \cdot \eta_t$
	圧 力 $P_m \text{ kg/m}^2$	入力波浪 エネルギー $E_i \text{ kgm/s}$	
W7S15	1,488	831	—
W8S15	113	38	—
W7S18	115	20	—
W7R18	113	20	—
W8S18	83	14	—
W8R18	25	1.1	0.08
W7S21	1,177	415	—
W7R21	39	3.0	0.15
W8S21	31	1.7	0.11
W8R21	19	0.7	0.11
W8R18N	13	0.4	0.09
W8R21N	8	0.2	0.14

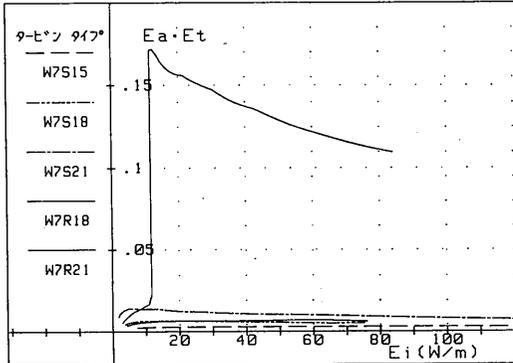


図-3.20 空気室・タービンの効率 (ソリディティー 0.7の場合)

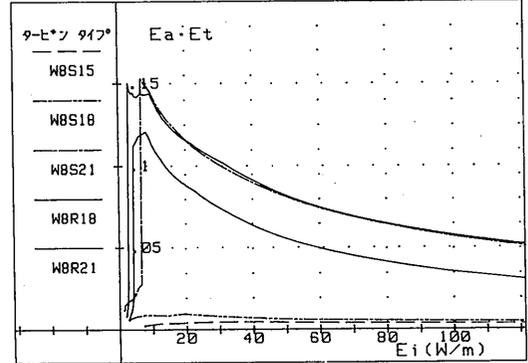


図-3.21 空気室・タービンの効率 (ソリディティー 0.8の場合)

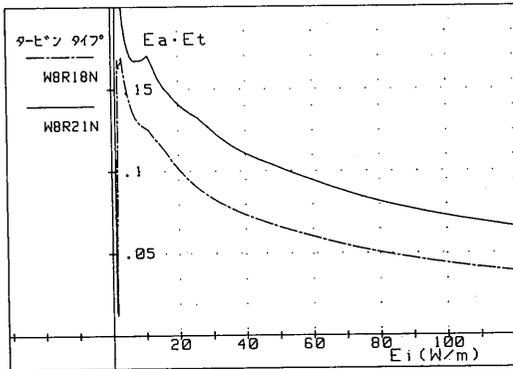


図-3.22 空気室・タービンの効率 (ガイドペーンのある場合)

表-3.6 各タービンモデルの比較 (方法1)

タービン翼	起 動 性	必要タービン径
W 8 R 21N	①0.0984kg・cm	①0.97m
W 8 R 18N	②0.0642kg・cm	③1.23m
W 8 R 21	③0.0613kg・cm	②1.15m

起動する6種類のタービンを比較すると、起動性の良いW8R21Nを選ぶか、出力性能の良いW7R21を選ぶかが問題であるが、出現確率50%の設計波浪で起動しないW7R21は落とし、W8R21Nを選定する。

3.3.6 選定方法1と選定方法2の比較

選定方法1と2は、起動性・出力性能について相反しない結果を与えた。

選定方法1によると、選定方法2で起動しない翼についても、起動性・出力性能の傾向がわかる。しかし、入力波浪の設定次第で、起動する翼を見落とすことがある。

選定方法2は、起動する翼(W7R21, W8S21)を見落とすことがなく、起動性・出力性能を総合的に評価することができる。

したがって、翼選定は方法2で十分であるが、翼の判定(改良の可能性の知見をうるなど)には両方法を併用すると良い。

4. 結 論

以上を要約すると、

- ① ウェルズタービンの起動性および運転状態を記述

3.5に示す。

起動した翼だけについてみると、選定方法1による3.3.1の①~④が、同様に成り立っている。

3.3.4 選定方法2による出力性能の比較

図-3.20~図-3.22に、縦軸を空気室効率とタービン効率の積で表した運転曲線を示す。入力エネルギー6 Kg・m/sのときの値でまとめてみると、表-3.5ようになる。起動した翼だけについてみると、選定方法1による3.3.2の①~④が、同様に成り立っている。

3.3.5 最適翼形の選定

(1) 方法1による選定

起動性は出力性能よりも優先するので、起動した4種類のタービンを比較すると、表-3.6のように、W8R21Nが起動性も出力性能も共に最も良い。

(2) 方法2による選定

- する方法を示した。
- ② ウェルズタービンの負荷発電機の最適特性を求める方法を示した。
  - ③ 空気室に対する、ウェルズタービンの等価開口面積を求めるなど、空気室の作動状態を記述する方法を示した。
  - ④ ウェルズタービンの基本特性は、平均トルク係数と圧力係数である。
  - ⑤ 翼形選定の方法を2つ示した。
  - ⑥ 1つは、空気室・タービン装置の駆動トルク曲線から起動性を求め、設計出力を得るに必要なタービン径から出力性能を求める方法である。
  - ⑦ 他の1つは、発電機を最適負荷の近似負荷と仮定し、その運転曲線から起動性・出力性能を求める方法である。
  - ⑧ 両方法は併用すると良い。
  - ⑨ 起動性は、翼厚の大きいほど(ソリディティ0.7の扇形翼を除く)、ソリディティの大きいほど、扇形より矩形翼の方、ガイドベーンを付けた方が良い。
  - ⑩ 出力性能は、翼厚が大きいほど、ソリディティが小さいほど、矩形翼より扇形翼の方、ガイドベーンが付いた方が良い。
  - ⑪ 定常流のタービン効率の大小と脈動流の平均タービン効率の大小は一致しない。
  - ⑫ 等価開口面積はタービン流路の静的断面積に近い。
  - ⑬ 最もすぐれた翼形として、W8R21Nを選定した。

なお、この研究の一部は株式会社緑星社の受託試験として行った。

## 5. 参 考 文 献

- 1) 鈴木正己・荒川忠一・田古里哲雄：波力発電用ウェルズタービンの基礎研究—第1報—, 日本機械学会論文集, 第50巻, 第449号(1984)
- 2) 高橋重雄・鈴木諭司・明瀬一行：波力発電ケーソンに設置されたウェルズタービンの出力計算法—波エネルギーに関する研究—第4報—, 港湾技術研究所報告, 第24巻, 第2号(1985, 6) pp205~238
- 3) 井上雅弘・金子賢二・瀬戸口俊明：ウェルズタービンに関する研究—第3報—, 日本機械学会前刷, No.84-0019A (1984)
- 4) 木下健・増田光一・宮島省吾・荒川忠一・加藤渉：固定式振動水柱型波浪発電装置のシステム・シミュレーションの実海域試験との比較, 日本造船学会論文集, 第158号(1983)
- 5) 木下健・増田光一：空気タービン式波浪発電装置の総合設計と特性解析—第1報—, 生産研究, 第35巻, 第8号(1983)
- 6) 井上雅弘・金子賢二・瀬戸口俊明：ウェルズタービンに関する研究—第1報, 第2報—, 日本機械学会論文集, 第50巻, 第459号(1984)
- 7) 岩井勝美・井上令作：灯標用空気式波浪発電装置の研究(その1, 円筒固定式空気室の波エネルギー吸収特性), 船舶技術研究所報告, 第23巻, 第5号(1986, 9)

## 6. 付 録

実験でえられた、12種類の翼形についてその基本特性等を、表-6.1~6.12に示す。表中の数値はタービン回転数  $N=2,000\text{rpm}$  のときのものである。

実験の範囲では、次のことが言える。

平均トルク係数およびトルク係数は、

- ① ソリディティの大きい方が大きい。
  - ② 扇形翼に比し、矩形翼の方が失速域の谷部がなだらかである。とくに、ソリディティ0.8のときは谷部がない。
  - ③ ガイドベーンを付けると大きくなる。
  - ④ 翼厚が大きくなると大となる。
- また、
- ⑤ 失速域は翼厚大となるにしたがって迎え角が大きい方にずれてくる。

そして、圧力係数は、

- ① ソリディティの大きい方が大きい。
- ② 扇形翼と矩形翼では変わらない。
- ③ 翼厚によっても変わらない(W8S21だけ小さい)。
- ④ ガイドベーンが付いてもあまり変わらない。

表-6.1 W7S15翼の特性

$\alpha(^{\circ})$	$C_t$	$\bar{C}_t$	$\psi$	$\eta_t$	$\bar{\eta}_t$	S/A
0	-0.0134	-0.0131	0.000	0.000	0.000	0.000
1	-0.0099	-0.0109	0.080	-7.139	-4.463	0.087
2	-0.0065	-0.0087	0.159	-1.163	-1.782	0.123
3	-0.0031	-0.0065	0.238	-0.242	-0.887	0.150
4	0.0032	-0.0031	0.333	0.137	-0.240	0.169
5	0.0119	0.0013	0.439	0.305	0.062	0.184
6	0.0205	0.0057	0.545	0.352	0.195	0.197
7	0.0288	0.0104	0.642	0.357	0.255	0.212
8	0.0368	0.0153	0.733	0.348	0.281	0.226
9	0.0447	0.0202	0.822	0.333	0.297	0.239
10	0.0504	0.0245	0.912	0.304	0.298	0.252
11	0.0370	0.0230	1.009	0.182	0.225	0.263
12	0.0237	0.0216	1.105	0.097	0.177	0.273
13	0.0104	0.0201	1.200	0.036	0.142	0.283
14	0.0070	0.0177	1.301	0.021	0.106	0.292
15	0.0038	0.0154	1.399	0.010	0.080	0.301
16	0.0008	0.0132	1.498	0.002	0.060	0.309
17	0.0000	0.0119	1.603	0.000	0.047	0.317
18	-0.0008	0.0106	1.706	-0.001	0.037	0.324
19	-0.0015	0.0094	1.807	-0.002	0.029	0.332
20	-0.0023	0.0081	1.905	-0.003	0.023	0.339
25	-0.0050	0.0042	2.622	-0.004	0.007	0.356

表-6.2 W8S15翼の特性

$\alpha(^{\circ})$	$C_t$	$\bar{C}_t$	$\psi$	$\eta_t$	$\bar{\eta}_t$	S/A
0	-0.0178	-0.0174	0.000	0.000	0.000	0.000
1	-0.0146	-0.0153	0.110	-7.553	-6.396	0.074
2	-0.0113	-0.0132	0.220	-1.465	-2.767	0.104
3	-0.0040	-0.0095	0.369	-0.207	-0.882	0.121
4	0.0068	-0.0042	0.552	0.175	-0.213	0.132
5	0.0207	0.0027	0.743	0.315	0.082	0.142
6	0.0387	0.0118	0.946	0.385	0.233	0.151
7	0.0566	0.0209	1.147	0.397	0.304	0.159
8	0.0617	0.0264	1.347	0.321	0.276	0.168
9	0.0608	0.0302	1.545	0.245	0.239	0.176
10	0.0599	0.0339	1.741	0.192	0.216	0.184
11	0.0590	0.0376	1.935	0.154	0.201	0.191
12	0.0482	0.0366	2.138	0.104	0.161	0.198
13	0.0334	0.0337	2.343	0.060	0.124	0.205
14	0.0187	0.0307	2.544	0.029	0.098	0.211
15	0.0133	0.0287	2.800	0.017	0.077	0.215
16	0.0139	0.0271	3.088	0.015	0.061	0.218
17	0.0144	0.0255	3.371	0.014	0.050	0.222
18	0.0149	0.0239	3.648	0.012	0.042	0.225
19	0.0159	0.0227	3.929	0.011	0.035	0.228
20	0.0202	0.0232	4.254	0.013	0.031	0.230

表-6.3 W7S18翼の特性

$\alpha(^{\circ})$	$C_t$	$\bar{C}_t$	$\psi$	$\eta_t$	$\bar{\eta}_t$	S/A
0	-0.0148	-0.0145	0.000	0.000	0.000	0.000
1	-0.0082	-0.0102	0.091	-5.145	-1.731	0.081
2	-0.0015	-0.0060	0.182	-0.240	-0.507	0.115
3	0.0015	-0.0018	0.272	0.355	-0.099	0.141
4	0.0117	0.0025	0.362	0.458	0.105	0.162
5	0.0184	0.0067	0.452	0.456	0.227	0.181
6	0.0249	0.0109	0.541	0.430	0.309	0.198
7	0.0315	0.0151	0.630	0.398	0.368	0.214
8	0.0429	0.0207	0.723	0.411	0.391	0.227
9	0.0559	0.0267	0.818	0.419	0.400	0.240
10	0.0654	0.0324	0.912	0.393	0.389	0.252
11	0.0717	0.0376	1.006	0.354	0.369	0.263
12	0.0780	0.0427	1.098	0.321	0.355	0.274
13	0.0659	0.0425	1.184	0.231	0.299	0.285
14	0.0413	0.0386	1.264	0.125	0.233	0.296
15	0.0168	0.0347	1.343	0.045	0.184	0.307
16	0.0056	0.0306	1.434	0.013	0.142	0.316
17	0.0021	0.0264	1.531	0.004	0.108	0.324
18	-0.0008	0.0227	1.636	-0.001	0.083	0.331
19	-0.0018	0.0204	1.767	-0.003	0.065	0.335
20	-0.0028	0.0181	1.895	-0.004	0.052	0.340

表-6.4 W7R18翼の特性

$\alpha(^{\circ})$	$C_t$	$\bar{C}_t$	$\psi$	$\eta_t$	$\bar{\eta}_t$	S/A
0	-0.0137	-0.0134	0.000	0.000	0.000	0.000
1	-0.0118	-0.0121	0.071	-9.436	-6.675	0.092
2	-0.0099	-0.0109	0.142	-1.968	-3.003	0.130
3	-0.0072	-0.0094	0.217	-0.629	-1.573	0.157
4	0.0009	-0.0056	0.319	0.038	-0.449	0.173
5	0.0090	-0.0017	0.420	0.240	-0.092	0.188
6	0.0177	0.0029	0.520	0.317	0.103	0.202
7	0.0268	0.0081	0.619	0.344	0.203	0.216
8	0.0359	0.0133	0.717	0.347	0.257	0.228
9	0.0418	0.0175	0.822	0.312	0.266	0.240
10	0.0419	0.0202	0.940	0.245	0.238	0.248
11	0.0420	0.0228	1.058	0.197	0.220	0.257
12	0.0418	0.0251	1.173	0.162	0.203	0.265
13	0.0403	0.0259	1.286	0.130	0.172	0.274
14	0.0387	0.0266	1.397	0.107	0.151	0.282
15	0.0372	0.0274	1.507	0.088	0.135	0.291
16	0.0333	0.0267	1.645	0.067	0.112	0.296
17	0.0294	0.0259	1.780	0.052	0.094	0.301
18	0.0256	0.0252	1.913	0.039	0.081	0.307
19	0.0229	0.0245	2.043	0.031	0.070	0.313
20	0.0220	0.0238	2.172	0.026	0.059	0.318

表-6.5 W8S18翼の特性

$\alpha(^{\circ})$	$C_t$	$\bar{C}_z$	$\psi$	$\eta_t$	$\bar{\eta}_t$	S/A
0	-0.0177	-0.0173	0.000	0.000	0.000	0.000
1	-0.0137	-0.0147	0.114	-6.881	-4.529	0.073
2	-0.0097	-0.0122	0.228	-1.214	-1.872	0.103
3	-0.0057	-0.0096	0.341	-0.316	-0.986	0.126
4	0.0058	-0.0039	0.514	0.160	-0.194	0.136
5	0.0196	0.0028	0.704	0.315	0.086	0.145
6	0.0334	0.0095	0.894	0.351	0.210	0.155
7	0.0549	0.0205	1.107	0.399	0.295	0.162
8	0.0769	0.0317	1.320	0.409	0.335	0.169
9	0.0988	0.0429	1.531	0.401	0.359	0.177
10	0.1035	0.0487	1.740	0.332	0.321	0.184
11	0.0832	0.0465	1.946	0.216	0.241	0.191
12	0.0630	0.0444	2.150	0.135	0.189	0.198
13	0.0429	0.0422	2.351	0.077	0.153	0.204
14	0.0230	0.0400	2.549	0.035	0.127	0.211
15	0.0138	0.0374	2.789	0.018	0.101	0.216
16	0.0137	0.0343	3.064	0.015	0.079	0.219
17	0.0136	0.0312	3.335	0.013	0.063	0.223
18	0.0157	0.0295	3.621	0.013	0.052	0.226
19	0.0203	0.0293	3.926	0.015	0.045	0.228
20	0.0249	0.0291	4.225	0.016	0.039	0.231

表-6.6 W8R18翼の特性

$\alpha(^{\circ})$	$C_t$	$\bar{C}_z$	$\psi$	$\eta_t$	$\bar{\eta}_t$	S/A
0	-0.0140	-0.0137	0.000	0.000	0.000	0.000
1	-0.0109	-0.0117	0.107	-5.815	-4.044	0.075
2	-0.0077	-0.0097	0.213	-1.031	-1.676	0.106
3	-0.0046	-0.0077	0.320	-0.271	-0.886	0.130
4	0.0050	-0.0034	0.475	0.150	-0.203	0.142
5	0.0174	0.0027	0.642	0.307	0.091	0.152
6	0.0322	0.0105	0.817	0.370	0.223	0.162
7	0.0468	0.0182	0.992	0.379	0.284	0.171
8	0.0614	0.0259	1.165	0.369	0.319	0.180
9	0.0708	0.0327	1.354	0.324	0.308	0.188
10	0.0773	0.0390	1.551	0.277	0.288	0.195
11	0.0838	0.0452	1.746	0.242	0.275	0.201
12	0.0887	0.0499	1.959	0.208	0.242	0.207
13	0.0934	0.0543	2.172	0.182	0.219	0.213
14	0.0981	0.0588	2.382	0.161	0.203	0.218
15	0.1045	0.0632	2.632	0.144	0.185	0.222
16	0.1120	0.0676	2.905	0.131	0.169	0.225
17	0.1196	0.0720	3.188	0.120	0.155	0.228
18	0.1287	0.0771	3.535	0.109	0.139	0.228
19	0.1376	0.0820	3.875	0.100	0.127	0.230
20	0.1463	0.0868	4.208	0.093	0.118	0.232

表-6.7 W7S21翼の特性

$\alpha(^{\circ})$	$C_t$	$\bar{C}_t$	$\psi$	$\eta_t$	$\bar{\eta}_t$	S/A
0	-0.0162	-0.0158	0.000	0.000	0.000	0.000
1	-0.0138	-0.0143	0.067	-11.683	-6.996	0.095
2	-0.0114	-0.0127	0.135	-2.401	-3.123	0.133
3	-0.0090	-0.0112	0.202	-0.838	-1.831	0.163
4	-0.0032	-0.0083	0.280	-0.161	-0.765	0.184
5	0.0049	-0.0044	0.367	0.150	-0.253	0.201
6	0.0130	-0.0005	0.453	0.266	-0.021	0.216
7	0.0257	0.0059	0.560	0.365	0.164	0.226
8	0.0390	0.0126	0.669	0.403	0.258	0.236
9	0.0522	0.0192	0.777	0.411	0.312	0.246
10	0.0646	0.0262	0.886	0.400	0.336	0.256
11	0.0764	0.0334	0.996	0.381	0.341	0.265
12	0.0881	0.0406	1.104	0.361	0.345	0.273
13	0.0886	0.0442	1.202	0.306	0.316	0.283
14	0.0705	0.0418	1.283	0.211	0.252	0.294
15	0.0526	0.0393	1.363	0.137	0.205	0.305
16	0.0347	0.0369	1.441	0.080	0.170	0.315
17	0.0170	0.0345	1.517	0.035	0.142	0.325
18	0.0088	0.0316	1.614	0.016	0.116	0.333
19	0.0068	0.0285	1.723	0.011	0.092	0.339
20	0.0048	0.0254	1.830	0.007	0.074	0.345

表-6.8 W7R21翼の特性

$\alpha(^{\circ})$	$C_t$	$\bar{C}_t$	$\psi$	$\eta_t$	$\bar{\eta}_t$	S/A
0	-0.0167	-0.0163	0.000	0.000	0.000	0.000
1	-0.0146	-0.0150	0.067	-12.520	-5.909	0.095
2	-0.0125	-0.0136	0.133	-2.666	-2.690	0.134
3	-0.0104	-0.0123	0.199	-0.980	-1.616	0.164
4	-0.0083	-0.0109	0.265	-0.437	-1.079	0.189
5	-0.0015	-0.0077	0.356	-0.047	-0.450	0.204
6	0.0070	-0.0038	0.454	0.142	-0.147	0.216
7	0.0154	0.0001	0.552	0.221	0.003	0.228
8	0.0269	0.0057	0.651	0.286	0.123	0.239
9	0.0404	0.0124	0.750	0.329	0.201	0.250
10	0.0537	0.0190	0.849	0.347	0.249	0.261
11	0.0670	0.0256	0.947	0.350	0.280	0.271
12	0.0793	0.0330	1.045	0.343	0.291	0.281
13	0.0914	0.0403	1.141	0.332	0.298	0.290
14	0.1034	0.0476	1.236	0.320	0.303	0.300
15	0.1098	0.0532	1.331	0.293	0.293	0.308
16	0.1065	0.0562	1.427	0.247	0.265	0.317
17	0.1032	0.0591	1.522	0.210	0.245	0.325
18	0.0999	0.0619	1.615	0.180	0.229	0.333
19	0.0933	0.0629	1.719	0.148	0.208	0.339
20	0.0813	0.0611	1.842	0.114	0.178	0.344

表-6.9 W8S21翼の特性

$\alpha(^{\circ})$	$C_t$	$\bar{C}_t$	$\psi$	$\eta_t$	$\bar{\eta}_t$	S/A
0	-0.0182	-0.0178	0.000	0.000	0.000	0.000
1	-0.0152	-0.0158	0.082	-10.540	-5.365	0.086
2	-0.0122	-0.0139	0.164	-2.103	-2.357	0.121
3	-0.0091	-0.0120	0.246	-0.700	-1.354	0.148
4	-0.0061	-0.0100	0.328	-0.262	-0.852	0.170
5	0.0050	-0.0048	0.478	0.119	-0.210	0.176
6	0.0165	0.0006	0.630	0.245	0.016	0.184
7	0.0279	0.0059	0.782	0.286	0.129	0.192
8	0.0470	0.0151	0.969	0.339	0.223	0.197
9	0.0667	0.0246	1.158	0.356	0.272	0.203
10	0.0862	0.0340	1.345	0.356	0.301	0.209
11	0.1114	0.0463	1.562	0.359	0.317	0.213
12	0.1400	0.0603	1.797	0.358	0.326	0.216
13	0.1682	0.0741	2.029	0.350	0.332	0.220
14	0.1963	0.0880	2.258	0.340	0.335	0.224
15	0.2266	0.1044	2.492	0.330	0.328	0.228
16	0.2565	0.1205	2.722	0.320	0.323	0.232
17	0.2859	0.1364	2.949	0.308	0.319	0.236
18	0.2531	0.1364	3.124	0.242	0.279	0.243
19	0.1969	0.1305	3.278	0.169	0.235	0.249
20	0.1412	0.1245	3.427	0.109	0.201	0.256

表-6.10 W8R21翼の特性

$\alpha(^{\circ})$	$C_t$	$\bar{C}_t$	$\psi$	$\eta_t$	$\bar{\eta}_t$	S/A
0	-0.0166	-0.0162	0.000	0.000	0.000	0.000
1	-0.0136	-0.0143	0.092	-8.380	-4.472	0.081
2	-0.0105	-0.0123	0.185	-1.616	-1.930	0.114
3	-0.0074	-0.0103	0.277	-0.507	-1.082	0.139
4	-0.0035	-0.0080	0.375	-0.132	-0.589	0.159
5	0.0080	-0.0026	0.524	0.171	-0.101	0.168
6	0.0194	0.0029	0.673	0.270	0.077	0.178
7	0.0308	0.0083	0.820	0.300	0.169	0.188
8	0.0486	0.0171	0.982	0.346	0.245	0.196
9	0.0673	0.0264	1.145	0.363	0.287	0.204
10	0.0858	0.0356	1.306	0.364	0.313	0.212
11	0.1031	0.0450	1.474	0.351	0.319	0.219
12	0.1187	0.0548	1.653	0.329	0.313	0.225
13	0.1341	0.0645	1.829	0.309	0.309	0.231
14	0.1494	0.0740	2.003	0.291	0.306	0.237
15	0.1530	0.0802	2.229	0.249	0.273	0.241
16	0.1566	0.0864	2.451	0.216	0.251	0.244
17	0.1600	0.0924	2.670	0.190	0.234	0.248
18	0.1638	0.0981	2.892	0.169	0.219	0.252
19	0.1697	0.1028	3.145	0.152	0.198	0.254
20	0.1756	0.1074	3.393	0.137	0.182	0.257

表-6.11 W8R18N 翼の特性

$\alpha(^{\circ})$	$C_t$	$\bar{C}_z$	$\psi$	$\eta_t$	$\bar{\eta}_t$	S/A
0	-0.0163	-0.0159	0.000	0.000	0.000	0.000
1	-0.0116	-0.0129	0.112	-5.908	-3.193	0.073
2	-0.0068	-0.0099	0.224	-0.872	-1.224	0.104
3	-0.0021	-0.0069	0.335	-0.120	-0.568	0.127
4	0.0026	-0.0038	0.446	0.082	-0.239	0.146
5	0.0146	0.0021	0.580	0.283	0.075	0.160
6	0.0271	0.0082	0.715	0.355	0.206	0.173
7	0.0396	0.0143	0.849	0.373	0.276	0.185
8	0.0529	0.0219	1.015	0.364	0.297	0.193
9	0.0661	0.0295	1.181	0.346	0.307	0.201
10	0.0792	0.0371	1.345	0.327	0.314	0.209
11	0.0919	0.0447	1.532	0.301	0.303	0.215
12	0.1040	0.0524	1.750	0.273	0.280	0.219
13	0.1160	0.0600	1.965	0.249	0.266	0.223
14	0.1278	0.0675	2.178	0.229	0.256	0.228
15	0.1385	0.0746	2.410	0.209	0.241	0.232
16	0.1465	0.0810	2.695	0.184	0.218	0.233
17	0.1544	0.0872	2.976	0.165	0.201	0.235
18	0.1620	0.0933	3.253	0.149	0.188	0.238
19	0.1736	0.1000	3.556	0.138	0.175	0.240
20	0.1879	0.1070	3.879	0.129	0.162	0.241

表-6.12 W8R21N 翼の特性

$\alpha(^{\circ})$	$C_t$	$\bar{C}_z$	$\psi$	$\eta_t$	$\bar{\eta}_t$	S/A
0	-0.0166	-0.0162	0.000	0.000	0.000	0.000
1	-0.0105	-0.0123	0.111	-5.413	-2.084	0.074
2	-0.0044	-0.0085	0.223	-0.569	-0.715	0.104
3	0.0016	-0.0046	0.333	0.093	-0.258	0.127
4	0.0077	-0.0007	0.444	0.246	-0.029	0.147
5	0.0138	0.0032	0.554	0.281	0.108	0.164
6	0.0201	0.0072	0.664	0.283	0.201	0.179
7	0.0386	0.0163	0.818	0.377	0.289	0.188
8	0.0569	0.0253	0.971	0.409	0.329	0.197
9	0.0752	0.0343	1.123	0.414	0.353	0.206
10	0.0932	0.0433	1.273	0.406	0.368	0.214
11	0.1111	0.0521	1.421	0.392	0.378	0.223
12	0.1319	0.0631	1.596	0.379	0.373	0.229
13	0.1533	0.0746	1.776	0.364	0.366	0.234
14	0.1745	0.0860	1.954	0.348	0.361	0.240
15	0.1937	0.0975	2.184	0.321	0.343	0.243
16	0.2120	0.1089	2.430	0.295	0.326	0.245
17	0.2302	0.1202	2.673	0.273	0.313	0.248
18	0.2498	0.1316	2.942	0.253	0.294	0.250
19	0.2681	0.1428	3.211	0.235	0.278	0.252
20	0.2836	0.1537	3.489	0.216	0.261	0.254