

海洋温度差発電用タービンの 最適化プログラミング (TURBOTEC)

上原 春男^{*1}, 中岡 勉^{*2},
池上 康之^{*1}, 武石 誠二^{*3}

Optimization Programming of a Single-Stage Reaction Axial Flow Turbine for OTEC(TURBOTEC)

Haruo UEHARA, Tsutomu NAKAOKA,
Yasuyuki IKEGAMI and Seiji TAKEISHI

Optimization programming of a single-stage reaction axial flow turbine for ocean thermal energy conversion(OTEC) are developed by using the method of steepest descent and the method of Hook and Jeeves. This programming is named TURBOTEC. The parameters in the objective function consist of the number of nozzle and rotor blades, specific speed, specific diameter, nozzle outlet angle and ratio of blade to diameter. The calculation method of the turbine efficiency, change of state in turbine, blade shape of the turbine, pressure loss of the turbine, specific speed and the specific diameter are present. The procedure a main program, and subroutine programs for these calculations are shown.

Key Words: OTEC, Optimization, Turbine, Programming, Pressure Loss

1. 緒言

海洋温度差発電は、海洋の表層と深層の海水の温度差による熱エネルギーを、電気エネルギーに変換するシステムである。海洋温度差発電の各構成機器については、各方面で、理論的および実験的研究が多数行われている⁽¹⁾。特に、海洋温度差発電の主要な構成機器である熱交換器については、多くの論文が発表されている⁽²⁻⁴⁾。

タービンは、海洋温度差発電システムで主要な役割を果たす構成機器の1つである。Veenemaら⁽⁵⁾は、アンモニアタービンの設計法を提案している。彼らは、周速度一定の仮定のもとに設計を行っている。さらに、タービンの種々の形状を決定するのに多くの図や表を用いている。このために、多大の時間と労力を要する割には、彼らの設計法は精度が高くはない。OTEC用の

タービンは、従来の水蒸気タービンやガスタービンと比較して、利用できる温度差が小さいために、タービンの入口と出口の熱落差が小さい。このために、OTEC用のタービンの性能は、海水の温度変化に大きく影響を受ける。このことから、海洋温度差発電用タービンの設計は精度良く行う必要がある。

そこで、著者らは、オペレーションリサーチで用いられている最急勾配法⁽⁶⁾と、HookとJeevesのパターン探索法⁽⁷⁾を併用した海洋温度差発電用タービンの最適設計法を開発した。本報は、その最適化のためのプログラミングを示す。また、その使用方法について述べる。

主な記号

- b : 軸方向長さ m
- c : 弦長 m, 式(13)
- C : 絶対速度 m/s
- C_d : 回転円板摩擦係数, 式(47)~(50)
- C_{FD} : ディフューザー効率
- D : 直径 m
- D_p : ピッチ円径 m, 式(5)

原稿受付 平成 4年11月31日

*1 佐賀大学理工学部付属海洋温度差エネルギー
実験施設

*2 水産大学校機関学科

*3 九州電力株式会社

D_a : 比直径 $m, m^3/s, m$, 式(56)
 g : 重力加速度 m/s^2
 h : 翼高さ, エンタルピー $m, kJ/kg$
 h_0 : 全エンタルピー kJ/kg
 H : 形状係数
 H_{ad} : 理論断熱熱落差 kJ/kg
 l : そり線長 m , 式(14)(15), 図4
 m_{WF} : 作動流体質量流量 kg/s
 n : 回転数 rpm
 N_s : 比速度 $r.p.m, m^3/s, m$, 式(55)
 P_G : 発電端出力 W , 式(3),
 P_0 : 全圧力 Pa
 R : 半径 m
 R_{ms} : 平均二乗半径 m , 式(4)
 $P_{r,op}$: 物性値
 Q : 作動流体体積流量 m^3/s
 Re : 翼レイノルズ数, 式(25)
 Re_d : 式(51)
 s : 頂げき
 t : ピッチ m , 式(12)
 t_b : 後縁厚さ m
 T : 温度 $^{\circ}C$
 U : 周方向速度 m/s
 W : 相対速度 m/s
 Z : ブレード数
 α : 絶対流出入角 $^{\circ}$
 β : 相対流出入角 ($\Delta\beta$: 偏向角)
 δ : 歩み
 δ^* : 運動量厚さの無次元数, 式(22)
 ζ : 損失係数
 η : 効率
 θ : 排除厚さ m , 式(26)
 θ^* : 排除厚さの無次元数, 式(23)
 λ_1 : 入口角 $^{\circ}$
 λ_2 : 出口角 $^{\circ}$
 λ_s : 食違い角 $^{\circ}$
 λ_{∞} : ベクトル平均角 $^{\circ}$
 ν : 動粘性係数 m^2/s
 ρ : 密度 kg/m^3
 x_m : タービン入口, 出口での平均乾き度
 Δ : ハブとハウジングとの隙間 m
 Δh : 損失 $kJ/kg, J/kg$

添字

1 : ノズル入口

2 : ノズル出口 (ロータ入口)
 3 : ロータ出口
 a_d : 断熱
 IN : タービン入口
 N : ノズル
 OUT : タービン出口
 R : ロータ
 s : 食違い角

2. 海洋温度差発電用タービンの特徴と基礎式

2.1 タービンの特徴

海洋温度差発電用タービンの特徴は、次のようなものがあげられる。

(1) 海洋温度差発電で利用される温海水の温度が $20\sim 30^{\circ}C$ であるため、タービンの初温は、およそ $15\sim 25^{\circ}C$ 、初圧は、 $0.6\sim 0.9MPa$ である。

(2) 海洋温度差発電で利用できる温冷海水の温度差が $15\sim 25^{\circ}C$ と限られるため、タービン入口と出口の温度差は $10\sim 15^{\circ}C$ 、圧力差は $0.3\sim 0.5MPa$ と小さく、このためタービンでの断熱熱落差は小さくなる。

(3) これらの理由により、タービンの出力を大きくするには、多量の作動流体が必要になる。

本報は、海洋温度差発電用タービンには、図1に示すような単段反動軸流タービンの最適形状について述べる。

2.2 タービン効率と設計評価

タービンの最適設計では、ノズル損失、ロータ損失、排気損失、回転円板損失、湿り損失、外部漏れ損失、機械損失などを最小にして、タービン効率を最大にするのが目的である。

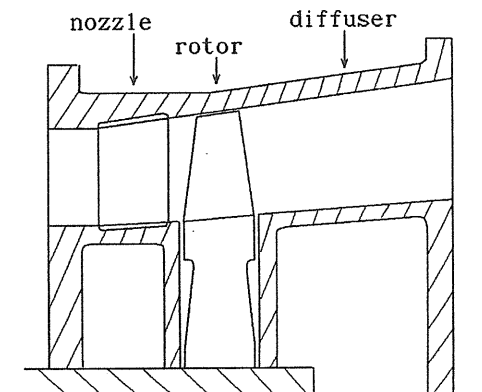


図1 単段反動軸流タービンの断面図

本報では、タービン効率 η_T を、次式のように定義する。

$$\eta_o = \{ H_{ad} - (\Delta h_N + \Delta h_R + \Delta h_{ex} + \Delta h_D + \Delta h_{wet}) \} / H_{ad} \quad (1)$$

$$\eta_T = \eta_o \cdot \eta_m \quad (2)$$

ここで、 η_o はタービン理論内部効率、 η_m はタービン機械効率、 η_T はタービン効率、 Δh_N はノズル損失、 Δh_R はロータ損失、 Δh_{ex} は排気損失、 Δh_D は回転円板損失、 Δh_{wet} は湿り損失、 H_{ad} は理論断熱熱落差である。

発電端出力 P_o は、式(2)を用いて次式で定義する。

$$P_o = m_{WF} \eta_T H_{ad} \quad (3)$$

図2に、タービン内部での状態変化と各損失を示す。

本報では、式(2)のタービン効率が、与えられた条件のもとで最大になるようにする。すなわち、式(2)の η_T を評価関数にとる。

2.3 エネルギー式

図3に直径と翼高さを示す。平均二乗半径 R_{ms} は、次式で表せる。

$$R_{ms} = \{ (R_{tip}^2 + R_{hub}^2) / 2 \}^{1/2} \quad (4)$$

ここで、 $R_{ms} = D_p / 2$ (D_p はピッチ円径)、 $R_{tip} = D_{tip} / 2$ (D_{tip} はロータ径)、 $R_{hub} = D_{hub} / 2$ (D_{hub} はハブ径) である。

ピッチ円径 D_p は、平均二乗半径 R_{ms} の2倍と定義する。ロータ出口におけるピッチ円径は、 D_3 をロータ出口径、 h_3 をロータ出口の翼高さとする式(4)は次式のようになる。

$$D_p = [D_3^2 \{ 1 - 2 (h_3 / D_3) + 2 (h_3 / D_3)^2 \}]^{1/2} \quad (5)$$

ロータ入口におけるピッチ円径も同様に計算できる。速度三角形は、定義したピッチ円上で考える。

ノズルにおけるエネルギー式は、エネルギー保存の法則より次式が導入される。

$$h_1 = h_2 + (C_2^2 - C_1^2) / 2 \quad (6)$$

同様に、ロータにおいても次式が導入される。

$$h_2 + (W_2^2 - U_2^2) / 2 = h_3 + (W_3^2 - U_3^2) / 2 \quad (7)$$

設計においては、エネルギー式(6)、(7)が保存されるように、流体の各速度、ノズルとロータの種々の形状を決定する。

2.4 ブレード形状の決定

図4に翼の形状を示す。ノズル・ロータの種々の形状は次式のBaljeの式^{(9)~(11)}を用いて決定する。

$$\lambda_\infty = \tan^{-1} \{ 2 / (\cot \lambda_1 + \cot \lambda_2) \} \quad (8)$$

$$F = 422.4465 - 7.99316 \lambda_1 + 0.0554526 \lambda_1^2 - 0.000133965 \lambda_1^3 \quad (9)$$

$$\lambda_s = \lambda_\infty \quad (\lambda_2 \leq F) \quad (10)$$

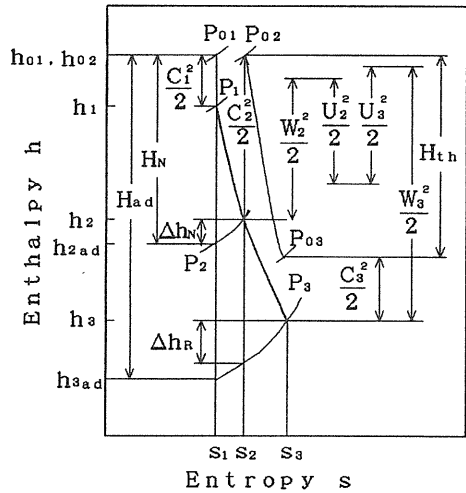


図2 タービン内部の状態変化

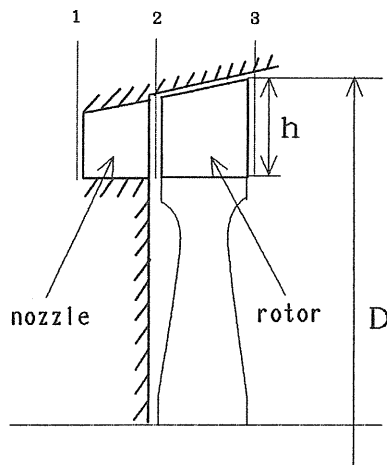


図3 直径と翼高さ

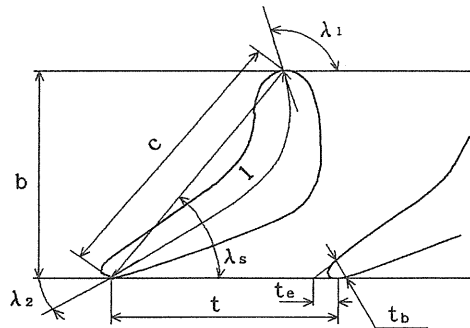


図4 翼の形状

$$\lambda_s = 15.2930 + 0.33845 \lambda_1 - 0.000669674 \lambda_1^2 \text{ -----(27)}$$

$$+ 0.4413227 \lambda_2 + 0.000266053 \lambda_2^2$$

$$+ 0.001201732 \lambda_1 \lambda_2 \quad (\lambda_2 > F) \text{ ----(11)}$$

$$t = D_p \pi / Z \text{ -----(12)}$$

$$c = 2t (\cot \lambda_2 - \cot \lambda_1) \sin^2 \lambda_2 / (0.9 \sin \lambda_s) \text{ -----(13)}$$

$$l = \{0.7221988 + 0.00504736 (\lambda_1 - \lambda_2)\} c$$

$$(\lambda_1 - \lambda_2 < 55.039) \text{ ----(14)}$$

$$l = c \quad (\lambda_1 - \lambda_2 \geq 55.039) \text{ ----(15)}$$

$$b = c \sin \lambda_s \text{ -----(16)}$$

3. 諸損失

タービンの最適設計を行うにあたって、式(1)に示した種々の損失をどのように見積もるかが必要になってくる。これについては、多くの研究者らが理論的および実験的解析を行い、タービンの損失を見積もる経験式を種々発表している^{(9)~(14)}。

本報では、Veenema⁽⁵⁾の検討結果を参照し、次の諸式を用いる。

3.1 断面損失係数 ζ_p

断面損失係数 ζ_p は、CraigとCox⁽⁹⁾の定義に従って次式を用いる。

$$\zeta_p = N_{p,t} \cdot \zeta_{p,t} + \Delta \zeta_{p,t} \text{ -----(17)}$$

$\zeta_{p,t}$ は翼の流体摩擦損失係数で、高レイノルズ数域での補正項がある次式のBaljeの式^{(9)~(11)}を用いて見積もられる。

$$\zeta_{p,t} = 1 - \left[\frac{(K_1^2 / K_2^2) \cos^2 \lambda_2 + K_1 \sin^2 \lambda_2}{1 + 2(K_2^2 - K_1) \sin^2 \lambda_2} \right] \text{ -----(18)}$$

ここで、

$$K_1 = 1 - \delta^2 - \theta^2 - t_o / t \text{ -----(19)}$$

$$K_2 = 1 - \delta^2 - t_o / t \text{ -----(20)}$$

$$t_o = t_b / \sin \lambda_2 \text{ -----(21)}$$

$$\delta^2 = 1.286 \theta^2 \text{ -----(22)}$$

$$\theta^2 = f \cdot \theta / (t \cdot \sin \lambda_2) \text{ -----(23)}$$

$$f = 1 + 71.0 / (\log_{10} Re)^{2.58}$$

$$- \tanh (1.96508 \log_{10} Re - 8.51713) \text{ ----(24)}$$

$$Re = (C_2 \text{ or } W_3) l / \nu \text{ -----(25)}$$

$$\theta = 0.00211 \left[\frac{1 - (\sin \lambda_2 / \sin \lambda_1)^{4.5}}{1 - (\sin \lambda_2 / \sin \lambda_1)} \right]^{0.8} \text{ ----(26)}$$

C_2 はノズル出口での絶対速度、 W_3 はロータ出口での相対速度である。

また、式(17)の $N_{p,t}$ は、CraigとCoxの図⁽⁹⁾より作成した次式を用いる。

$$N_{p,t} = 1 + a_1 \cdot t_b / t + a_2 (t_b / t)^2$$

ここで、

$$a_1 = -5.3772 + 2.4626 \lambda_2 - 0.18742 \lambda_2^2$$

$$+ 0.53371 \times 10^{-2} \lambda_2^3 - 0.50168 \times 10^{-4} \lambda_2^4 \text{ -----(28)}$$

$$a_2 = 0.63683 \times 10^3 - 0.10251 \times 10^3 \lambda_2 + 6.0368$$

$$\times \lambda_2^2 - 0.14954 \lambda_2^3 + 0.12953 \times 10^{-2} \lambda_2^4 \text{ -----(29)}$$

式(17)の後縁形状による損失係数 $\Delta \zeta_{p,t}$ には、CraigとCoxの文献⁽⁹⁾に示された図より作製した次の近似式を用いる。

$$\Delta \zeta_{p,t} = 0.02750 (t_b / t) - 0.7500 (t_b / t)^2$$

$$+ 18.75 (t_b / t)^3 \text{ -----(30)}$$

3.2 二次損失係数 ζ_c

二次損失係数 ζ_c はBalje⁽⁶⁾によると、翼弦と翼高さの比に比例し、転向角と流れの加速度および翼列直前における境界層厚さを用いて次式で表す。

$$\zeta_c = K_o \cdot \zeta_{c,max} \text{ -----(31)}$$

ここで、

$$\zeta_{c,max} = (c / h) E$$

$$(\sin \lambda_2 / \sin \lambda_1 \leq 1.0) \text{ -----(32)}$$

$$\zeta_{c,max} = (c / h) E (\sin \lambda_2 / \sin \lambda_1)^2$$

$$(\sin \lambda_2 / \sin \lambda_1 > 1.0) \text{ -----(33)}$$

$$E = [0.0388 \{(\sin \lambda_2 / \sin \lambda_1) + 0.08\}$$

$$\times \{1 + (\lambda_1 - \lambda_2) / 100\}]$$

$$+ 0.3377 \times 10^{-3} [10 \{(\sin \lambda_2 / \sin \lambda_1) + 0.08\}]^n \text{ -----(34)}$$

$$n = 1.5 + (\lambda_1 - \lambda_2) / 160 \text{ -----(35)}$$

Balje⁽⁶⁾は K_o の値として、次のように提案している。

$$\text{ノズル: } K_o = 0.3 \text{ -----(36)}$$

$$\text{ロータ: } K_o = 0.3 + \tanh (2.875 H \zeta_{c,n}) \text{ ----(37)}$$

H は形状係数 1.286 である。

3.3 頂げき損失係数 ζ_{c1}

頂げき損失係数 ζ_{c1} は、次のHubert⁽¹²⁾の式を用いる。

$$\zeta_{c1} = \zeta_s (c / h) \sin \lambda_\infty \cdot \delta_u \text{ -----(38)}$$

ここで、

$$\zeta_s = 0.06963 \tanh (13s / c) \text{ -----(39)}$$

$$\delta_u = \cot \lambda_2 - \cot \lambda_1 \text{ -----(40)}$$

3.4 ノズル損失 Δh_N

ノズル損失 Δh_N は、ノズル損失係数を ζ_N とすると次式で表される。

$$\Delta h_N = \zeta_N / (1 - \zeta_N) \times (C_2^2 - C_1^2) / 2 \text{ ----(41)}$$

ここで、ノズル損失係数 ζ_N は、断面損失係数 ζ_p と二次損失係数 ζ_c の和として次式で表される。

$$\zeta_N = (\zeta_p + \zeta_c)_N \text{ -----(42)}$$

3.5 ロータ損失 Δh_R

ロータ損失 Δh_R は、ロータ損失係数を ζ_R とすると次式で表される。

$$\Delta h_R = \zeta_R / (1 - \zeta_R) \times (W_3^2 - W_2^2) / 2 \quad \text{----- (43)}$$

ここで、ロータ損失係数 ζ_R は、断面損失係数 ζ_P 、二次損失係数 ζ_2 と頂げき損失係数 ζ_{01} の和として次式で表される。

$$\zeta_R = (\zeta_P + \zeta_2 + \zeta_{01})_R \quad \text{----- (44)}$$

3.6 排気損失 Δh_{EX}

排気損失 Δh_{EX} は、ディフューザによる損失と残留速度損失の和として次式で表される。

$$\Delta h_{EX} = (1 - C_{FD}) \times C_3^2 / 2 + C_3^2 / 2 \quad \text{----- (45)}$$

ここで、ディフューザには、環状円すいディフューザを用いる。また、ディフューザ効率 C_{FD} は、Sovranらのグラフ⁽¹³⁾より0.45とする。

3.7 回転円板損失 Δh_D

回転円板損失 Δh_D は、摩擦トルクである次式で表される。

$$\Delta h_D = C_d \rho \omega^3 R^5 / 2 m_{WF} \quad \text{----- (46)}$$

ここで、回転円板摩擦係数 C_d は貫流がないので、DailyとNecceの式⁽¹⁴⁾の次式を用いた。

C_d は、 C_{d1} 、 C_{d2} 、 C_{d3} および C_{d4} の値の中で、一番最大のものとする。

$$C_{d1} = 2\pi / (B \cdot Re_d) \quad \text{----- (47)}$$

$$C_{d2} = 3.7 B^{0.1} \cdot Re_d^{-1/2} \quad \text{----- (48)}$$

$$C_{d3} = 0.08 B^{-1/6} \cdot Re_d^{-1/4} \quad \text{----- (49)}$$

$$C_{d4} = 0.102 B^{0.1} \cdot Re_d^{-1/5} \quad \text{----- (50)}$$

$$Re_d = R^2 \omega / \nu \quad \text{----- (51)}$$

$$B = 2\Delta / R \quad \text{----- (52)}$$

ここで、 ω は角速度、 R はハブ径である。

3.8 湿り損失 Δh_{WET}

湿り損失 Δh_{WET} は、次式で表される。

$$\Delta h_{WET} = (1 \sim 1.15) (1 - x_m) H_{s,d} \quad \text{---- (53)}$$

ここで、 x_m は、アンモニアおよびフロン系を作動流体とする場合には、蒸気は湿り蒸気内で膨張すると考えられ、 x_m をタービン入口、出口での乾き度の平均とする。

3.9 外部漏れ損失

海洋温度差発電では作動流体の完全密封が必要であるので、ここでは考慮しない。

3.10 機械損失 η_m

機械損失係数 η_m は、作動流体を完全密封するために必要な軸シールによる損失等を考慮して、ここでは、 $\eta_m = 0.98$ とする。

本報では、3.1~3.10節以外の損失については考慮していない。

4. 最適化プログラミング

4.1 設計における仮定

(1) 流れは自由渦流れとする。すなわち、速度三角形はピッチ円上で考え、半径方向の流れは無視して設計を行うFree-Vortex-Design-technicを使う。図5にピッチ円上における速度三角形を示す。

(2) 全周送込翼列を考え、ノズル入口角は90°、ノズル入口における蒸気は飽和蒸気、ノズル入口における旋回はないものとする。

(3) 軸方向速度成分は一定とする。

(4) ノズル出口角 α_2 は、食違い角とソリディティの比の関係が使える範囲 $\alpha_2 \geq 15^\circ$ とする。また、(1)の方法は、ロータ径に比べて翼高が大きくなった場合使用できないので、この比 h/D は0.3以下とする。

(5) 頂げきと翼高さの比 s/h 、ハブとハウジングとのすき間とロータ出口径の比 Δ/D_3 、後縁厚さと翼高さの比 t_e/h は、製作上の限界と思われる値0.02とする。

4.2 支配変数

タービン効率、前節での諸関係を用いると次式で表すことができる。

$$\eta_T = f(T_{IN}, T_{OUT}, P_G, m_{WF}, n, D_{1,2,3}, h_{1,2,3}, \alpha_{1,2,3}, \beta_{1,2,3}, Z_N, Z_R, P_{r,op}) \quad \text{----- (54)}$$

ここで、 T_{IN} は蒸気入口温度、 T_{OUT} は蒸気出口温度、 P_G は発電端出力、 m_{WF} は作動流体質量流量、 n は回転数、 D は各直径、 h は各翼高さ、 α は各絶対流出入角、 β は各相対流出入角、 Z_N はノズルブレード数、 Z_R はロータブレード数、 $P_{r,op}$ は物性値である。

タービンの設計の際には、一般に次の比速度 N_s 、比直径 D_s が用いられる。

$$N_s = n Q_3^{1/2} / (H_{s,d} / g)^{3/4} \quad [r.p.m, m^3/s, m] \quad \text{----- (55)}$$

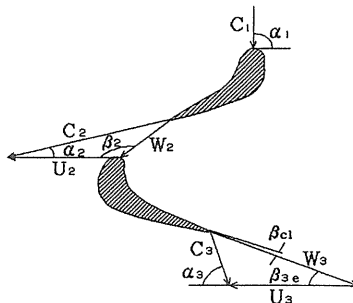


図5 速度三角形

$$D_s = D_3 (H_{s4} / g)^{1/4} / Q_3^{1/2} \quad [m, m^3/s, m] \quad \text{-----}(56)$$

ここで、 Q_3 はロータ出口での作動流体の体積流量である。

タービンの設計の場合、一般に、蒸気入口温度、蒸気出口温度、発電端出力、作動流体は与えられる。ゆえに、比速度、比直径を用いて製作上の限度を考慮すると、式(54)は次式のように整理できる。

$$\eta_T = f(N_s, D_s, \alpha_2, Z_N, Z_R, h/D) \quad \text{---}(57)$$

すなわち、式(57)の6変数、比速度、比直径、ノズル出口角、ノズルブレード数、ロータブレード数、翼高さとの比を組み合わせると、最もタービン効率が高い点を見つける。

4・3 最適化プログラミング

図6に、最適化プログラミングのフローチャートを示す。1). タービンの入口温度、出口温度、作動流体の種類および発電端出力を与える。2). ノズルブレード数 Z_N 、ロータブレード数 Z_R 、比速度 N_s 、比直径 D_s 、ノズル出口角 α_2 、翼高さとの比 h/D を仮定する。3). ノズル・ロータの各絶対速度および各相対速度の計算、ノズル・ロータブレード形状の決定、各損失等の計算を行う。4). タービン効率を求める。 Z_N 、 Z_R を決定する際には、HookとJeevesのパターン探索法を適用し、 N_s 、 D_s 、 α_2 、 h/D を決定する際に

は、最急勾配法を適用して、最大のタービン効率を求める。

(1) 最急勾配法⁽⁶⁾

固定した Z_N 、 Z_R に対して N_s 、 D_s 、 α_2 、 h/D を与えてタービン効率 η_T を計算する。次に、他の変数は固定して N_s のみを若干変化させた場合のタービン効率 $(\eta_T)_{N_s}$ を計算する。これにより N_s に対する偏微分係数 $\{(\eta_T)_{N_s} - (\eta_T)_{N_s}\} / \Delta N_s$ を求める。そして、 N_s に対する新しい値として、 $N_s' = N_s + \delta N_s \cdot [(\eta_T)_{N_s} - (\eta_T)_{N_s} / \Delta N_s]$ とする。以下同様にして D_s 、 α_2 、 h/D と変化させ、タービン効率を計算する。これらの計算を繰返してタービン効率の最大値を求めて行く。

付録1に、最急勾配法の計算のアルゴリズムを示す。

(2) HookとJeevesのパターン探索法⁽⁷⁾

図7に、HookとJeevesのパターン探索法による Z_N 、 Z_R の計算方法を示す。(図7の数字は計算順序を表す。)

仮定された Z_N 、 Z_R (基準点) を含む周りの点の中で、一番効率の高い点 (以下最大効率点) を求める。その最大効率点と基準点が一致していなければ、基準点を移動させ同様な探索を行う。このように、一定の間隔でパターン移動を繰返すことによって最大値を求めて行く。そして、基準点と最大効率点が一致したと

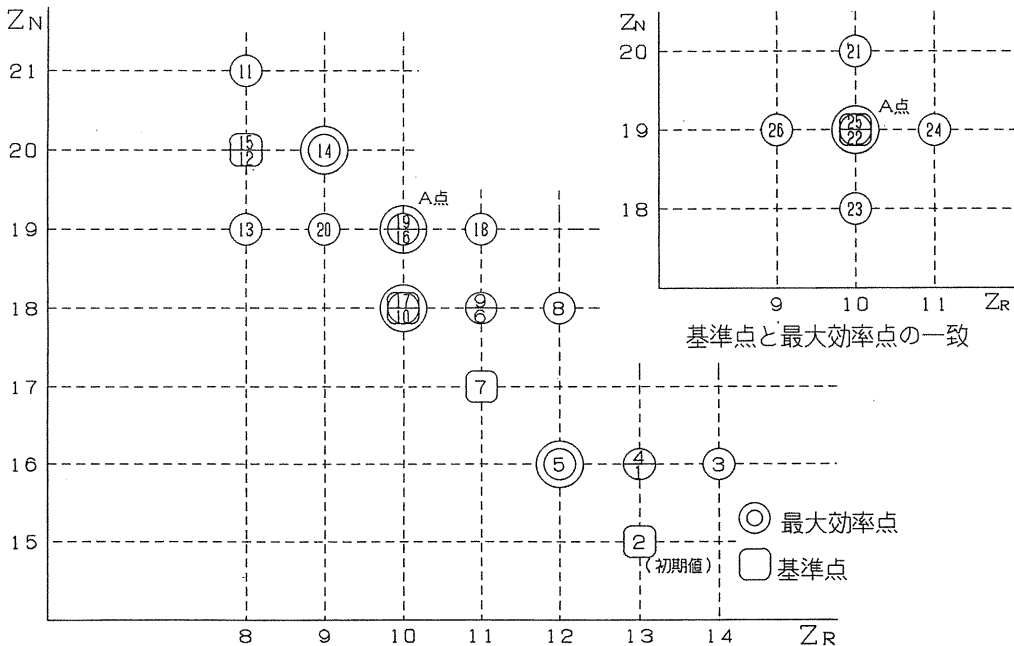


図7 Hook & Jeeves 法によるノズル・ロータブレード数の探索

きに探索は終了する。

付録1に、HookとJeevesのパターン探索法による計算のアルゴリズムを示す。

付録2に、海洋温度差発電用タービンの最適化プログラミング(TURBOTEC)のリストを示す。

付表1に、そのプログラム中の主なパラメータの説明を示す。

文献

- (1) 上原, 海洋温度差発電読本, (1983)オーム社, 1
- (2) Uehara, H.・ほか4名, Proc. 6th OTEC Conf., 8・6 (1979), 1.
- (3) Uehara, H.・ほか5名, Proc. 8th OTEC Conf., 2 (1981), 803.
- (4) Uehara, H.・ほか4名, Proc. ASME/JSME Thermal Eng. Joint Conf., 2(1983), 253.
- (5) Veenema, R. J. Jr.・ほか1名, National Technical Information Service, (1975)
- (6) 志水, システム制御と数理計画法, (1971), 48, コロナ社.
- (7) Dixon, L. C. W (松原訳), 非線形最適化計算法, (1974), 72, 培風館.
- (8) Craig, H. B. M. and Cox, H. J. A., Inst. Mech. Eng., 185-32/71(1970-71), 407.
- (9) Balje, O. E. and Binsley, R. J., Trans. ASME, J. Eng. Power, 68-GT-13(1968), 341.
- (10) Balje, O. E., Trans. ASME, J. Eng. Power, 60-WA-230(1962), 83.
- (11) Balje, O. E., Trans. ASME, J. Eng. Power, 60-WA-231(1962), 83.
- (12) Hubert, G., VDI Forschungsh., (1963), 496.
- (13) Sovran, G. and Klomp, E. D., (1967), 270, Elsevier.
- (14) Daily, J. W. and Nece, R. e., Trans. ASME, J. Basic Eng., 59-Hyg-9(1960), 217.

付録 1:

1. 最急勾配法

$f(x)=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ の最大点を求める。 $f(x)$ の最大点を直接探索する方法の1つとして、勾配法が考えられる。

$f(x)=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ の最大勾配方向とは、

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f}{\partial x_1} \\ \frac{\partial f}{\partial x_2} \\ \vdots \\ \frac{\partial f}{\partial x_n} \end{pmatrix} \quad (1)$$

なるベクトルを示すが、この方向は、 $f(x)$ を最も急に増加させる方向である。また、 $f(x)$ が一定なる等高面の正向き(f を増加させる向き)の法線方向である。

$f(x)$ が凹関数で連続な1階導関数をもつならば、任意の初期値 x^0 から出発して、

$$x_i^{v+1} = x_i^v + h \cdot \frac{\partial f}{\partial x_i}(x^v) \quad (i=1, \dots, n; h>0) \quad (2)$$

によって逐次 x^1, x^2, \dots を求めて行くと h が小さいならば $f(x)$ の最大点の近くに達する。以上の操作(2)を勾配法という。

これは、各点 x^v で $f(x)$ の最急勾配方向に h に相当する距離だけ進んで行く方法である。

h を小さくすると各ステップでの進む距離は少ないが最大点で離れた点でうろついたりする。

はじめのうちは h を大きくとり十分煮つまってきてから h を小さくするなど、 h を v によって変えてもかまわない。

以下に具体的な計算の流れを示す。

$$\begin{aligned} \eta_\tau &= f(N_a, D_a, \alpha_a, h/D) \leftarrow \\ N_a' &= N_a + \delta_1 \\ \eta_{\tau'} &= f(N_a', D_a, \alpha_a, h/D) \\ B1 &= (\eta_{\tau'} - \eta_\tau) / \delta_1 \\ D_a' &= D_a + \delta_2 \\ \eta_{\tau''} &= f(N_a, D_a', \alpha_a, h/D) \\ B2 &= (\eta_{\tau''} - \eta_\tau) / \delta_2 \\ &\vdots \\ &\vdots \\ &\vdots \\ N_a &= N_a - B1 * STEP1 \\ D_a &= D_a - B2 * STEP2 \\ &\vdots \\ &\vdots \\ &\vdots \end{aligned}$$

2. HookとJeevesのパターン探索法

この最適化手法は、探索移動およびパターン移動と呼ばれるものを含んでいる。 n 個の直交単位ベクトルの組 $e^{(i)}$ が与えられているものとする。普通これらを座標軸に平行に選ぶ。繰り返しを始めるために、最初のステップの大きさ k と $x^{(0)}$ の推定を指定する。この方法は、各方法を順次探索する。

$$x := x^{(i)} + ke^{(i)} \quad (3)$$

最初の繰り返しでは、点 $x^{(1)}$ をはじめの推定 $x^{(0)}$ と同じにする。探索が成功であれば、すなわち、

$$f(x) < f(x^{(1)}) \quad (4)$$

であれば、この点を受けていれて、

$$x^{(i+1)} := x \quad (5)$$

とする。探索が不成功であれば、探索の方向を逆にする。

$$x := x^{(i)} - ke^{(i)} \quad (6)$$

式(4)の判定を繰り返し、もし今度は成功であれば、

$$x^{(i+1)} := x \quad (7)$$

として、そうでなければ、

$$x^{(i+1)} := x^{(i)} \quad (8)$$

とする。 n 個の方向を全部探索したときに探索移動は終わる。パターン移動は探索移動が成功であるかどうかを決めることから始まる。

探索移動が成功であるとき、すなわち、

$$f(x^{(n+1)}) < f(x^{(0)}) \quad (9)$$

の場合には、

$$x^{(1)} := x^{(n+1)} + (x^{(n+1)} - x^{(0)}) \quad (10)$$

へのパターン移動を行い、新しい基点を、

$$x^{(0)} := x^{(n+1)} \quad (11)$$

におく。もし、条件式(9)が満足されていなくても、しかも、

$$x^{(1)} \neq x^{(0)} \quad (12)$$

であれば、

$$x^{(1)} := x^{(0)} \quad (13)$$

として、探索移動を繰り返す。

しかし、式(12)が満足されていなければ、式(13)のようになると前のサイクルが繰り返されることになるから、この場合には、ステップの大きさ k を縮小する。

$$k := k/10 \quad (14)$$

繰り返しは、 k があらかじめ決めた値より小さくなったときに停止する。

付録2:
海洋温度差発電用タービンの最適化プログラミング (TURBOTEC)

```

C *****
C * Optimization Programming of a Single-Stage *
C * Reaction Axial Flow Turbine for OTEC (TURBOTEC) *
C * *
C * Method of Hook & Jeeves *
C * PRAMETER ZN,ZR *
C * *
C * Method of steepest descent *
C * PARAMETER NS,DS,HBYD,ALPHA2 *
C *****
C
COMMON IPOWER,T2,PS1,PS2,PS3,H1,H2,H3,V1,V2,V3,S1G,S2,S3,
1X1,X2,X3,ANIUS1,ANIUS2,ANIUS3,RPM,GFMASS,REACT,RED3,DP,EETATT,
2D1,D2,D3,BH1,BH2,BH3,ALPHA1,BETA2,BETA3,ALPHAS,BETAS,
3WAXILN,WAXILE,CAMBEN,CAMBER,CHORDN,CHORD,DBETAC,PITCHN,PITCHR,
4C1,C2,C3,CM2,CM3,CU2,CU3,W2,W3,WU2,WU3,UP,TLOSPN,TLOSPR,
5TLOSEN,TLOSER,TLOSCL,DHN,DHR,HDLOS,DHEX,DHSUM,HAD,IT,J,K,L,
6M,NT,IJK,IOP,T,COUNT,II,PA1,POWER,DHWET,UP2,JLD,
7CHDLOS,CBETA2,CC3,CD2,CREACT,CEETA,RH2,RH3,Q3,I1,I2
REAL NS
DIMENSION X(2,4),E(2,2),XX(2,1)
OPEN(6,FILE='CON:')
OPEN(5,FILE='PRN:')
OPEN(4,FILE='D:TURBOD1.DAT',STATUS='NEW',ACCESS='SEQUENTIAL',
1FORM='FORMATTED')
OPEN(3,FILE='D:TURBOD2.DAT',STATUS='NEW',ACCESS='SEQUENTIAL',
1FORM='FORMATTED')
FLUID=22.0
TIN=22.2
TOUT=12.7
POWER=5000.0
C *****
C * Method of Hook & Jeeves *
C * *
C * POWER=5000,25000,10000 *
C *****
5 N=2
JLD=0
X(1,1)=15.0
X(2,1)=13.0
E(1,1)=1.0
E(1,2)=0.0
E(2,1)=0.0
E(2,2)=1.0
X(1,2)=X(1,1)
X(2,2)=X(2,1)
SK=1.0
DELTA=1.0
I=1
100 XX(1,1)=X(1,I+1)+SK*E(1,I)
XX(2,1)=X(2,I+1)+SK*E(2,I)
ZN=XX(1,1)
ZR=XX(2,1)
C
CALL POWELL(FLUID,TIN,TOUT,ZN,ZR,NS,DS,HBYD,ALPHA2,EETA,HJ)
EETA1=EETA
C
ZN=X(1,I+1)
ZR=X(2,I+1)
C
CALL POWELL(FLUID,TIN,TOUT,ZN,ZR,NS,DS,HBYD,ALPHA2,EETA,HJ)
EETA2=EETA
C
IF (EETA1.GT.EETA2) THEN
X(1,I+2)=XX(1,1)
X(2,I+2)=XX(2,1)
GO TO 260
END IF
200 XX(1,1)=X(1,I+1)-SK*E(1,I)
XX(2,1)=X(2,I+1)-SK*E(2,I)
ZN=XX(1,1)
ZR=XX(2,1)
C
CALL POWELL(FLUID,TIN,TOUT,ZN,ZR,NS,DS,HBYD,ALPHA2,EETA,HJ)
EETA1=EETA
C
IF (EETA1.GT.EETA2) THEN

```

```

        X(1,I+2)=XX(1,1)
        X(2,I+2)=XX(2,1)
        GO TO 260
    END IF
250 X(1,I+2)=X(1,I+1)
    X(2,I+2)=X(2,I+1)
260 IF (I.NE.N) THEN
        I=I+1
        GO TO 100
    END IF
    ZN=X(1,N+2)
    ZR=X(2,N+2)
C
    CALL POWELL(FLUID,TIN,TOUT,ZN,ZR,NS,DS,HBYD,ALPHA2,EETA,HJ)
    EETA3=EETA
C
    ZN=X(1,1)
    ZR=X(2,1)
C
    CALL POWELL(FLUID,TIN,TOUT,ZN,ZR,NS,DS,HBYD,ALPHA2,EETA,HJ)
C
    IF (EETA3.GT.EETA) THEN
        X(1,2)=X(1,N+2)+(X(1,N+2)-X(1,1))
        X(2,2)=X(2,N+2)+(X(2,N+2)-X(2,1))
        X(1,1)=X(1,N+2)
        X(2,1)=X(2,N+2)
        I=1
        GO TO 100
    END IF
500 IF (X(1,2).EQ.X(1,1)) THEN
        IHANT1=1
    ELSE
        IHANT1=0
    END IF
    IF (X(2,2).EQ.X(2,1)) THEN
        IHANT2=1
    ELSE
        IHANT2=0
    END IF
    IHANT=IHANT1*IHANT2
    IF (IHANT.NE.1) THEN
        X(1,2)=X(1,1)
        X(2,2)=X(2,1)
        I=1
        GO TO 100
    END IF
    ZN=X(1,1)
    ZR=X(2,1)
    HJ=1
C
    CALL POWELL(FLUID,TIN,TOUT,ZN,ZR,NS,DS,HBYD,ALPHA2,EETA,HJ)
    CALL SI(PS1,PS2,PS3,H1,H2,H3,S1G,S2,S3,DHN,DHR,HDLOS,DHEX,
1          DHWET,DHSUM,HAD)
C
700 IF(FLUID.EQ.22.) WRITE(5,1001) IPOWER,TIN,TOUT
    IF(FLUID.EQ.3.) WRITE(5,1002) IPOWER,TIN,TOUT
    IF(FLUID.EQ.502.) WRITE(5,1018) IPOWER,TIN,TOUT
    WRITE(5,1003) TIN,T2,TOUT,PS1,PS2,PS3,H1,H2,H3,V1,V2,V3,S1G,S2,S3
    WRITE(5,1004) X1,X2,X3,ANIUS1,ANIUS2,ANIUS3
    WRITE(5,1005) NS,DS,RPM,GFMASS,REACT,RED3,DP,EETATT,EETA,HBYD
    WRITE(5,1006) D1,D2,D3,BH1,BH2,BH3
    WRITE(5,1007) ZN,ZR,ALPHA1,BETA2,ALPHA2,BETA3,ALPHAS,BETAS,
1PITCHN,PITCHR,WAXILN,WAXILE,CAMBEN,CAMBER,CHORDN,CHORD,DBETAC
    WRITE(5,1008) C1,C2,C3,C1,CM2,CM3
    WRITE(5,1009) CU2,CU3,W2,W3,WU2,WU3,UP2,UP
    WRITE(5,1010) TLOSPN,TLOSPR,TLOSEN,TLOSER,TLOSCL
    WRITE(5,1011) DHN,DHR,HDLOS,DHEX,DHWET
    WRITE(5,1012) DHSUM,HAD
    WRITE(5,1013) IT,J,K,L,M,NT,IJK,IOPT,II
    WRITE(5,1014) HDLOS,CHDLOS,BETA2,CBETA2,C1,CM3,C3,CC3,D2,CD2,
1REACT,CREACT,EETA,CEETA,RH2,RH3,Q3
    WRITE(5,1015) I1,I2
    WRITE(5,1016)
    WRITE(3,1017) EETATT,IPOWER,DHSUM,DHN,DHR,HDLOS,DHEX,DHWET,HAD,
1GFMASS,RPM,ZN,ZR,NS,DS,HBYD,ALPHA2,D1,D2,D3,BH1,BH2,BH3,
2PITCHN,WAXILN,CAMBEN,CHORDN,ALPHA1,ALPHA2,ALPHAS,
3PITCHR,WAXILE,CAMBER,CHORD,BETA2,BETA3,BETAS
1000 FORMAT(F8.4)
1001 FORMAT(1H ,//,18X,'OPTIMAL TURBINE DESIGN-FOR',I4,'MEGAWATTS
10TEC POWER PLANT',/,22X,24HWORKING FLUID-R22- TIN=,F5.1,1X,
24H[' C],1X,5HTOUT=,F5.1,1X,4H[' C],//,
345X,30HSTATION1 STATION2 STATION3)
1002 FORMAT(1H ,//,18X,26HOPTIMAL TURBINE DESIGN FOR,I4,'MEGAWATTS

```

```

10TEC POWER PLANT'./,22X,24HWORKING FLUID-NH3- TIN=.F5.1,1X.
24H[' C],1X,5HTOUT=.F5.1,1X,4H[' C],./,
345X,30HSTATION1 STATION2 STATION3)
1018 FORMAT(1H ,./,18X,'OPTIMAL TURBINE DESIGN-FOR',I4,'MEGAWATTS
10TEC POWER PLANT'./,22X,25HWORKING FLUID-R502- TIN=.F5.1,1X.
24H[' C],1X,5HTOUT=.F5.1,1X,4H[' C],./,
345X,30HSTATION1 STATION2 STATION3)
1003 FORMAT(1H ,14X,26HTEMPERATURE ['° C] ,3(3X,F8.3),./,
115X,26HSTATIC PRESSURE [MPa] ,3(3X,F8.3),./,
215X,26HSTATIC ENTHALPY [kJ/kg] ,3(3X,F8.3),./,
315X,26HSPECIFIC VOLUME [m3/g] ,3(3X,F8.3),./,
415X,26HENTROPY [kJ/kg·K] ,3(3X,F8.3)
1004 FORMAT(1H ,14X,26HQUALITY [-] ,3(3X,F8.3),./,
115X,26HKINETIC VISCOSITY[m2/s] ,2X,3(1X,E10.3),./,
1005 FORMAT(1H ,19X,30HSPECIFIC SPEED [r.p.m.m/s3.m] ,2X,F10.3,./,
120X,30HSPECIFIC DIAMETER [m.m3/s.m] ,2X,F10.3,./,
220X,30HROTATIONAL SPEED [r.p.m] ,2X,F10.3,./,
320X,30HMASS FLOW RATE [kg/s] ,2X,F10.3,./,
420X,30HREACTION [-] ,2X,F10.3,./,
520X,30HMACHIN RE. NUMBER [-] ,4X,E10.3,./,
620X,30HMEAN SQUARE DIAMETER [m2] ,2X,F10.3,./,
720X,30HTO-TO-T0 EFFICIENCY [-] ,2X,F10.3,./,
820X,30HTO-TO-ST EFFICIENCY [-] ,2X,F10.3,./,
920X,30HBLADE H TO DIA. RATIO [-] ,2X,F10.3,./)
1006 FORMAT(1H ,14X,22HGEOMETRY SPECIFICATION,./,35X,' STATOR INLET
1' LOTOR INLET ROTOR EXIT',./,
220X,16HDIAMETER [m],3(F8.3,5X),./,
320X,16HBLADE HEIGHT [m],3(F8.3,5X),./,
415X,11HBLADE SHAPE,23X,6HSTATOR,7X,5HROTOR)
1007 FORMAT(1H ,19X,16HNUMBER OF BLADES,7X,2(4X,F8.3),./,
120X,23HINLET ANGLE [deg],2(4X,F8.3),./,
220X,23HOUTLET ANGLE [deg],2(4X,F8.3),./,
320X,23HSTAGGER ANGLE [deg],2(4X,F8.3),./,
420X,23HBLADE PITCH [m] ,2(4X,F8.3),./,
520X,23HAXIAL WIDTH [m] ,2(4X,F8.3),./,
620X,23HCAMBER LINE LENGTH[m] ,2(4X,F8.3),./,
720X,23HCHORD LENGTH [m] ,2(4X,F8.3),./,
820X,23HUNDER TURNING [deg],8X,1H-,7X,F8.3,./)
1008 FORMAT(1H ,14X,32HVELOCITY AT MEAN SQUARE DIAMETER,./,47X.
18HSTATION1,3X,8HSTATION2,3X,8HSTATION3,./,
220X,23HABSOLUTE [m/s],3(3X,F8.3),./,
320X,23HAXIAL COMP. [m/s],3(3X,F8.3)
1009 FORMAT(1H ,19X,23HTANGENTIAL COMP. [m/s],11X,2(3X,F8.3),./,
120X,23HRELATIVE [m/s],11X,2(3X,F8.3),./,
220X,23HTANGENTIAL COMP. [m/s],11X,2(3X,F8.3),./,
320X,23HPERIPHERAL [m/s],11X,2(3X,F8.3),./)
1010 FORMAT(1H ,14X,17HLOSSES IN TURBINE,24X,6HSTATOR,6X,5HROTOR,./,
118X,33H1 PROFILE LOSS COEFFICIENT [-] ,2F12.6,./,
218X,33H2 ENDWALL LOSS COEFFICIENT [-] ,2F12.6,./,
318X,33H3 TIP CLEARANCE LOSS COEF. [-] ,7X,1H-,4X,F12.6)
1011 FORMAT(1H0,19X,32HGEOMETRY LOSS [kJ/kg],F11.6,F12.6,./,
120X,32HDISK FRICTIONLOSS [kJ/kg],F11.6,./,
220X,32HEXIT KINETIC ENERGY LOSS [kJ/kg],F11.6,./,
320X,32HWET LOSS [kJ/kg],F11.6,./)
1012 FORMAT(1H ,19X,32HSUMMATION OF LOSSES [KJ/kg],11X,F12.6,./,
120X,32HISENTROPIC HEAD [kJ/kg],11X,F12.6)
1013 FORMAT(1H ,80X,5HDLOS=,I3,7H BETA2=,I3,4H C3=,I3,4H C1=,I3,./,
181X,6HREACT=,I3,6H EETA=,I3,7H BETA3=,I3,6H IOPT=,I3,4H I1=,I4)
1014 FORMAT(1H ,5X,7H HDLOS=,F10.7,7HCHDLOS=,F10.7,7H BETA2=,F10.5,
1 7HCBETA2=,F10.5,7H C1=,F10.5,7H CM3=,F10.5,./,5X,
2 7H C3=,F10.5,7H CC3=,F10.5,7H D2=,F10.5,
3 7H CD2=,F10.5,7H REACT=,F10.5,7HCREACT=,F10.5,./,5X,
4 7H EETA=,F10.7,7H CEETA=,F10.7,7H RH2=,F10.5,
5 7H RH3=,F10.5,7H Q3=,F10.5)
1015 FORMAT(1H ,5X,'COUNTER(1)',I7,3X,'COUNTER(2)',I7)
1016 FORMAT(1H1)
1017 FORMAT(1H ,F10.4,1X,I4,./,7(F10.6,1X),./,F10.4,1X,F10.4,./,
16(F10.4,1X),./,6(F10.4,1X),./,7(F10.4,1X),./,7(F10.4,1X))

```

```

C IF(POWER.EQ.25000.) GO TO 1300
POWER=POWER+5000.
GO TO 5

```

```

C
1300 CLOSE(6)
CLOSE(5)
CLOSE(4)
CLOSE(3)
STOP
END

```

```

C*****
C* Method of steepest descent *
C*****
C

```

```

SUBROUTINE POWELL (FLUID, TIN, TOUT, FZN, FZR, NS, DS, HBYD, ALPHA2, EETA,
1      HJ)
COMMON IPOWER, T2, PS1, PS2, PS3, H1, H2, H3, V1, V2, V3, S1G, S2, S3,
1X1, X2, X3, ANIUS1, ANIUS2, ANIUS3, RPM, GFMASS, REACT, RED3, DP, EETATT,
2D1, D2, D3, BH1, BH2, BH3, ALPHA1, BETA2, BETA3, ALPHAS, BETAS,
3WAXILN, WAXILE, CAMBEN, CAMBER, CHORDN, CHORD, DBETAC, PITCHN, PITCHR,
4C1, C2, C3, CM2, CM3, CU2, CU3, W2, W3, WU2, WU3, UP, TLOSPN, TLOSPR,
5TLOSEN, TLOSER, TLOSCL, DHN, DHR, HDLOS, DHEX, DHSUM, HAD, I, J, K, L, M, N,
6IJK, IOPT, COUNT, II, PAI, POWER, DHWET, UP2, JLD,
7CHDLOS, CBETA2, CC3, CD2, CREAT, CEETA, RH2, RH3, Q3, I1, I2

DIMENSION CZN(100), CZR(100), CCEETA(100), CCNS(100), CCDS(100),
1CCHBYD(100), CCAL2(100)
REAL NS
INTEGER DOUNT
*****
*          Assume of NS, DS, h/D,  $\alpha$  2          *
*****

NS=50.0
DS=2.0
HBYD=0.20
ALPHA2=16
BETA2=30.0
BETA3=10.0
ALPHA1=90.0
C1=20.0
C3=20.0
HDLOS=0.0
DHWET=0.0
DHEX=0.0
REACT=0.5
REETA=0
RNS=0
RDS=0
RHD=0
RA2=0
IF (HJ.EQ.1) THEN
    DOUNT=0.0
    HJ=0
    GO TO 60
END IF
DO 50 I=1, DOUNT
IF ((CZN(I).EQ.FZN).AND.(CZR(I).EQ.FZR)) THEN
    EETA=CCEETA(I)
    NS=CCNS(I)
    DS=CCDS(I)
    HBYD=CCHBYD(I)
    ALPHA2=CCAL2(I)
    GO TO 600
END IF
50 CONTINUE
60 DOUNT=DOUNT+1
NN=400
CNS=NS
CDS=DS
CHD=HBYD
CA2=ALPHA2
CNS1=0.1
CDS1=4.0E-04
CHD1=1.2E-05
CA21=0.04
100 DO 500 II=1, NN
*****
*          Fix Data : ZN, ZR          *
*****
ZN=FZN
ZR=FZR
*****
*          X-Initial          *
*****
NS=CNS
DS=CDS
HBYD=CHD
ALPHA2=CA2
*****
*          X' =X+DELTA          *
*****
CNS=NS+0.01

```

```

CDS=DS+0.001
CHD=HBYD+0.0001
CA2=ALPHA2+0.01
C
  CALL EETAT (FLUID,TIN,TOUT,NS,DS,ZN,ZR,HBYD,ALPHA2,
1          EETA,JETA)
C
C*****
C          Specific speed    NS
C*****
300 CALL EETAT (FLUID,TIN,TOUT,CNS,DS,ZN,ZR,HBYD,ALPHA2,DEETA,JETA)
  B1=(DEETA-EETA)/0.0001
  TNS=ABS(B1*CNS1)
  IF (TNS.GT.0.5) THEN
    B1=(DEETA-EETA)/0.010
  END IF
  CNS=NS+B1*CNS1
C
C*****
C          Specific diameter  DS
C*****
  CALL EETAT (FLUID,TIN,TOUT,NS,CDS,ZN,ZR,HBYD,ALPHA2,DEETA,JETA)
  B2=(DEETA-EETA)/0.0001
  TDS=ABS(B2*CDS1)
  IF (TDS.GT.0.1) THEN
    B2=(DEETA-EETA)/0.100
  END IF
  CDS=DS+B2*CDS1
C
C*****
C          Ratio of h/D    HBYD
C*****
335 CALL EETAT (FLUID,TIN,TOUT,NS,DS,ZN,ZR,CHD,ALPHA2,DEETA,JETA)
  B5=(DEETA-EETA)/0.000001
  THD=ABS(B5*CHD1)
  IF (THD.GT.0.03) THEN
    B5=(DEETA-EETA)/0.100
  END IF
  CHD=HBYD+B5*CHD1
C
C*****
C          Nozzle outlet angle  ALPHA2
C*****
  CALL EETAT (FLUID,TIN,TOUT,NS,DS,ZN,ZR,HBYD,CA2,DEETA,JETA)
  B6=(DEETA-EETA)/0.0001
  CA2=ALPHA2+B6*CA21
350 IF (CHD.GT.0.3) THEN
  CHD=0.3
  END IF
  IF (CA2.LE.15.0) THEN
    CA2=15.0
  END IF
  QEETA=EETA
  IF ((QEETA.GT.REETA).AND.(II.GT.100)) THEN
    REETA=QEETA
    RNS=NS
    RDS=DS
    RPHN=PITCHN
    RPHR=PITCHR
    RHD=HBYD
    RA2=ALPHA2
    RII=II
  END IF
  I2=I2+1
C
  WRITE(6,*) '2:COUNTER',I2
403 WRITE(6,411) NS,DS,ZN,ZR,HBYD,ALPHA2,PITCHN,PITCHR,EETA
411 FORMAT(1H,4X,3HNS=,F8.3,4X,3HDS=,F8.4,4X,3HZN=,F8.4,4X,3HZR=,
1F8.4,4X,5HHBYD=,F8.4,8X,7HALPHA2=,F8.4,4X,7HPITCHN=,F8.5,
24X,7HPITCHR=,F8.5,4X,5HEETA=,F8.5,/)
500 CONTINUE
C
C*****
C          Optimum Data Change
C*****
  IF (JETA.EQ.1) THEN
    REETA=0.0
  END IF
  EETA=REETA
  NS=RNS
  DS=RDS
  HBYD=RHD
  ALPHA2=RA2

```

```

C      II=RII
C      *****
C      *                Optimization of turbine for OTEC                *
C      *****

      CZN (DOUNT) =FZN
      CZR (DOUNT) =FZR
      CCEETA (DOUNT) =EETA
      CCNS (DOUNT) =NS
      CCDS (DOUNT) =DS
      CCHBYD (DOUNT) =HBYD
      CCAL2 (DOUNT) =ALPHA2
600  WRITE (6,*) TIN, TOUT, EETA
605  RETURN
      END

C*****
C*                Turbine efficiency                *
C*****

      SUBROUTINE EETAT (FLUID, TIN, TOUT, NS, DS, FZN, FZR, HBYD, ALPHA2, EETA,
1      JETA)
C
      COMMON IPOWER, T2, PS1, PS2, PS3, H1, H2, H3, V1, V2, V3, S1G, S2, S3,
      1X1, X2, X3, ANIUS1, ANIUS2, ANIUS3, RPM, GFMASS, REACT, RED3, DP, EETATT,
      2D1, D2, D3, BH1, BH2, BH3, ALPHA1, BETA2, BETA3, ALPHAS, BETAS,
      3WAXILN, WAXILE, CAMBEN, CAMBER, CHORDN, CHORD, DBETAC, PITCHN, PITCHR,
      4C1, C2, C3, CM2, CM3, CU2, CU3, W2, W3, WU2, WU3, UP, TLOSPN, TLOSPR,
      5TLOSEN, TLOSER, TLOSCL, DHN, DHR, HDLOS, DHEXP, DHSUM, HAD, I, J, K, L, M, N,
      6IJK, LD, COUNT, II, PAI, POWER, DHWET, UP2, JLD,
      7CHDLOS, CBETA2, CC3, CD2, CREAT, CEETA, RH2, RH3, Q3, I1, I2
      REAL NS
      INTEGER COUNT
      I1=I1+1
      ZN=FZN
      ZR=FZR
      JETA=0
      COUNT=0
      PAI=3.1416
      RADIANT=PAI/180.
      DEGREE=180./PAI
      A=1./426.80
      G=9.80665
      SBYH=0.02
      SBYD=0.02
      EETA=0.85
      IPOWER=IFIX (POWER/1000.)

C      CALL STATES (TIN, PS1, V1L, V1G, H1L, H1G, S1L, S1G, ANIUS1, FLUID)
      V1=V1G
      H1=H1G
      X1=1.0

C      CALL STATES (TOUT, PS3, V3L, V3G, H3L, H3G, S3L, S3G, ANIUS3, FLUID)
C      *****
C      *                Theoretical adiabatic heat drop HAD                *
C      *****

      H3IS = (H3G-H3L) * (S1G-S3L) / (S3G-S3L) + H3L
5  IDCL=0
6  IJK=0
7  N=0
8  M=0
9  L=0
10 K=0
11 J=0
12 I=0
15 HAD=H1+A*C1**2/(2.0*G)-H3IS
C      *****
C      *                Mass flow rate GFMASS                *
C      *****

      GF=POWER*860./(EETA*0.98*HAD)
      GFMASS=GF/3600.

C      *****
C      *                Enthalpy (station 3) H3                *
C      *****

20 H3=H1-EETA*HAD-HDLOS+A*(C1**2-C3**2)/(2.*G)-DHWET-DHEX
      X3=(H3-H3L)/(H3G-H3L)
      V3=(V3G-V3L)*(H3-H3L)/(H3G-H3L)+V3L
      ROW3=1.0/V3
      S3=(S3G-S3L)*(H3-H3L)/(H3G-H3L)+S3L
      Q3=GF*V3/3600.
    
```

```

C *****
C * Rotational speed RPM *
C *****
25 RPM=NS*(HAD/A)**0.75/SQRT(Q3)
   D3=DS*SQRT(Q3)/(HAD/A)**0.25
   IF (JLD.EQ.0) THEN
     D2=D3*0.95
   END IF
   LD=0
C *****
C * Annular area (station 3) A3 *
C *****
30 A3=PAI*D3**2*HBYD*(1.0-HBYD)
   CM3=Q3/A3
C *****
C * Energy Eq : disk pitch DP,peripheral velocity UP *
C *****
   DP=D3*SQRT(1.0-2.0*HBYD*(1.0-HBYD))
   UP=PAI*DP*RPM/60.
C *****
C * Disk friction loss CHDLOS *
C *****
   RED3=PAI*D3*RPM*D3/(60.*ANIUS3)
   RED=RED3*(1.0-2.0*HBYD)**2/2.0
   B=SBYD*2./(1.0-2.0*HBYD)
   CD1=2.0*PAI/(B*RED)
   CD2=3.7*B**0.1/RED**0.5
   CD3=0.08/(B**(1.0/6.))*RED**0.25)
   CD4=0.102*B**0.1/RED**0.2
   CD=AMAX1(CD1,CD2,CD3,CD4)
   CONS1=(1.0-2.0*HBYD)**5
   CONS2=(UP/SQRT(1.0-2.0*HBYD*(1.0-HBYD)))**3
   CHDLOS=A*CD*D3**2*CONS1*CONS2/(G*8.0*Q3)
C
   IF (ABS(1.0-HDLOS/CHDLOS).LT.0.0001) GO TO 100
   IF (I.GT.50) GO TO 100
   I=I+1
   HDLOS=CHDLOS
   GO TO 15
C *****
C * Ratio of axial clearance & diameter (station 3) BH3 *
C *****
100 BH3=HBYD*D3
   DP2=D2*SQRT(1.0-2.0*HBYD*(1.0-HBYD))
   UP2=PAI*DP2*RPM/60.0
C *****
C * Calculate of configuration of rotor & blade *
C *****
   CALL BLADE(BETA2,BETA3,DP,HBYD,ZR,BH3,BETAZ,BETAS,PITCHR,CHORD,
1. CAMBER,TRAILE,WAXILE,DELTAU,I,JETA)
   S=SBYH*BH3
C *****
C * Calculate of underturning flow angle *
C *****
   CONST1=SIN(BETA3*RADIAN)
   CONST2=SIN(BETAZ*RADIAN)
   DBETAC=148.0*S*PITCHR*DELTAU*CONST1**2/(CHORD**2*CONST2)
C *****
C * Flow outlet angle BETA3E *
C *****
   IF (IDCL.EQ.0) DBETAC=0.0
   IF (DBETAC.GT.4.0) DBETAC=4.0
   BETA3E=BETA3+DBETAC
C *****
C * Velocity for triangle of velocities (station 3) *
C *****
   U3=UP
   W3=CM3/SIN(BETA3E*RADIAN)
   WU3=SQRT(W3**2-CM3**2)
   CU3=WU3-U3
   CC3=SQRT(U3**2+W3**2-2.0*U3*W3*COS(BETA3E*RADIAN))
C *****
C * Velocity for triangle of velocities (station 2) *
C *****

```



```

C
  U2=UP2
  CM2=1.0*CM3
  C2=CM2/SIN(ALPHA2*RADIAN)
  W2=SQRT(U2**2+C2**2-2.0*U2*C2*COS(ALPHA2*RADIAN))
  CU2=SQRT(C2**2-CM2**2)
  WU2=CU2-U2
  CONST3=(U2**2+W2**2-C2**2)/(2.0*U2*W2)
  IF(CONST3)101,102,103
101 BCONST=SQRT(1.0-CONST3**2)/(CONST3)
  CBETA2=DEGREE*ATAN(BCONST)+180.0
  GO TO 106
102 CBETA2=90.
  GO TO 106
103 CCONST=SQRT(1.0-CONST3**2)/(CONST3)
  CBETA2=DEGREE*ATAN(CCONST)
106 IF(ABS(1.0-BETA2/CBETA2).LT.0.0001) GO TO 110
  IF(J.GT.50) GO TO 110
  J=J+1
  BETA2=CBETA2
  GO TO 100
110 IF(ABS(1.0-C1/CM3).LT.0.0001) GO TO 120
  IF(K.GT.30) GO TO 120
  K=K+1
  C1=(C1+CM2)/2.0
  GO TO 11
120 IF(ABS(1.0-C3/CC3).LT.0.0001) GO TO 200
  IF(L.GT.30) GO TO 200
  L=L+1
  C3=(C3+CC3)/2.0
  GO TO 10
200 H2IS=H3IS+REACT*(H1-H3IS)
C *****
C * Calculate of nozzle outlet temperature T2 *
C *****
C CALL STATE2(H2IS,S1G,TIN,TOUT,T2,FLUID)
C *****
C * Calculate of property (station 2) *
C *****
C CALL STATES(T2,PS2,V2L,V2G,H2L,H2G,S2L,S2G,ANIUS2,FLUID)
  H2=H1+A*(C1**2-C2**2)/(2.0*G)
  X2=(H2-H2L)/(H2G-H2L)
  S2=(S2G-S2L)*X2+S2L
  V2=(V2G-V2L)*(H2-H2L)/(H2G-H2L)+V2L
C *****
C * Annular area (station 2) A2 *
C *****
  A2=GF*V2/(3600.0*CM2)
C *****
C * Diameter (station 2) D2 *
C *****
  CD2=SQRT(A2/(PA1*HBYD*(1.0-HBYD)))
  IF(ABS(1.0-D2/CD2).LT.0.001) GO TO 240
  IF(LD.GT.30) GO TO 240
  LD=LD+1
  JLD=1
  D2=(D2+CD2)/2.0
  GO TO 100
C *****
C * Ratio of axial clearance & diameter (station 2) BH2 *
C *****
240 BH2=D2*HBYD
C *****
C * Calculate of configuration of nozzle & blade *
C *****
  CALL BLADE(ALPHA1,ALPHA2,DP,HBYD,ZN,BH2,ALPHAZ,ALPHAS,PITCHN,
1 CHORDN,CAMBEN,TRALEN,WAXILN,DELTAN,0,JETA)
C *****
C * Section loss & Secondary loss Coefficient of nozzle *
C *****
  CALL ALOSS(ALPHA1,ALPHA2,C2,BH2,ANIUS2,PITCHN,CAMBEN,CHORDN,
1 TRALEN,TLOSPN,TLOSEN,0)
C *****
C * Nozzle loss DHN *
C *****

```

```

TLOSSN=TLOSEN+TLOSPN
DHN=A*TLOSSN*(C2**2-C1**2)/((1.0-TLOSSN)*2.0*G)
*****
*                               Reaction REACT                               *
*****

CREACT=(H2-DHN-H3IS)/(H1-H3IS)
IF(ABS(1.0-REACT/CREACT).LT.0.0001) GO TO 210
IF(M.GT.50) GO TO 210
M=M+1
REACT=(REACT+CREACT)/2.0
GO TO 200
*****
*                               Annular area (station 1) A1                               *
*****
210 A1=A2*V1/V2
*****
*                               Diameter (station 1) D1                               *
*****
D1=SQRT(A1/(PAI*HBYD*(1.0-HBYD)))
*****
*                               Ratio of axial clearance & diameter (station 1) BH1       *
*****
BH1=D1*HBYD
*****
*                               Section loss & Secondary loss Coefficient of rotor       *
*****
CALL ALOSS(BETA2,BETA3,W3,BH3,ANIUS3,PITCHR,CAMBER,CHORD,TRAILR,
1 TLOSPR,TLOSER,10.)
*****
*                               Rotor loss DHR                                       *
*****
CT1=13.0*S/CHORD
*****
*                               Clearance loss coefficient TLOSCL                       *
*****
CT2=TANH(CT1)
CT3=CHORD*DELTAU*SIN(BETAZ*RADIAN)/BH3
TLOSCL=0.06963*CT2*CT3
TLOSSR=TLOSER+TLOSPR+TLOSCL
DHR=A*TLOSSR*(W3**2-W2**2)/((1.0-TLOSSR)*2.0*G)
*****
*                               Exit kinetic energy loss DHEX                         *
*****
DHEX=A*C3**2*(1.0-0.45)/(2.0*G)
DHEXP=DHEX+A*C3**2/(2.0*G)
X12M=(X1+X2)/2.0
*****
*                               Wet loss DHWET                                       *
*****
DHWET=1.1*(1.0-X12M)*HAD
*****
*                               Turbine efficiency EETATT                             *
*****
DHSUM=DHN+DHR+DHEX+DHWET+HDLOS+A*C3**2/(2.0*G)
*****
*                               Turbine theoretical internal efficiency CEETA           *
*****
CEETA=(HAD-DHSUM)/HAD
EETATT=CEETA*0.98
IF(ABS(1.0-EETA/CEETA).LT.0.0001) GO TO 220
IF(N.GT.30) GO TO 220
N=N+1
EETA=(EETA+CEETA)/2.0
GO TO 8
*****
*                               h - s diagram (station 2,3)                             *
*****
220 RH2=H2+A*W2**2/(2.0*G)
RH3=H3+A*W3**2/(2.0*G)
IF(ABS(1.0-RH2/RH3).LT.0.1E-03) GO TO 300
IF(IJK.GT.50) GO TO 300

```

```

IJK=IJK+1
CW3=SQRT(2.0*G*(H2-H3)/A+W2**2)
XO=CM3/CW3
DCONST=XO/SQRT(1.0-XO**2)
B3E=DEGREE*ATAN(DCONST)
BETA3=(BETA3+B3E-DBETAC)/2.0
GO TO 7
300 IF(IDCL.NE.0) GO TO 310
IDCL=100
GO TO 6
310 RETURN
END
C*****
C* Configuration of turbine *
C*****
C
SUBROUTINE BLADE(RAMDA1, RAMDA2, DP, HBYD, ZR, BH, RAMDAZ, RAMDAS, PITCH,
1 CHORD, CAMBER, TRAILE, WAXILE, DELTAU, I I, JETA)
C
PAI=3.1416
RADIAN=PAI/180.
DEGREE=180./PAI
TRAILH=0.02
IF(RAMDA1.LE.RAMDA2) RAMDA2=RAMDA1-0.5
IF(RAMDA2.LT.1.0) RAMDA2=0.5
C*****
C* Vector mean angle RAMDAZ *
C*****
C
CONST1=COS(RAMDA1*RADIAN)/SIN(RAMDA1*RADIAN)
CONST2=COS(RAMDA2*RADIAN)/SIN(RAMDA2*RADIAN)
RAMDAZ=DEGREE*ATAN(2./(CONST1+CONST2))
C1=7.99316*RAMDA1
C2=0.0554526*RAMDA1**2
C3=1.33955E-04*RAMDA1**3
F=422.4465-C1+C2-C3
C
IF(RAMDA2.GT.F) GO TO 10
RAMDAS=RAMDAZ
GO TO 20
C*****
C* Stagger angle RAMDAS *
C*****
C
10 CON1=0.33845*RAMDA1
CON2=6.69674E-04*RAMDA1**2
CON3=0.4413227*RAMDA2
CON4=2.66053E-04*RAMDA2**2
CON5=1.201732E-03*RAMDA1*RAMDA2
RAMDAS=15.293+CON1-CON2+CON3+CON4+CON5
C*****
C* Pitch PITCH *
C*****
C
20 PITCH=PAI*DP/ZR
C*****
C* Chord CHORD *
C*****
C
CO1=SIN(RAMDA2*RADIAN)
CO2=SIN(RAMDAS*RADIAN)
DELTAU=CONST2-CONST1
CHORD=2.0*PITCH*DELTAU*CO1**2/(0.9*CO2)
C
IF(ZR.LT.3.0) GO TO 30
IF((CHORD/DP).GE.0.02) GO TO 30
ZR=ZR-1.0
JETA=1
GO TO 20
C
30 IF((CHORD/DP).LT.0.35) GO TO 40
ZR=ZR+1.0
JETA=1
GO TO 20
40 IF((RAMDA1-RAMDA2).GT.55.039) GO TO 50
CAMBER=CHORD
GO TO 60
C*****
C* Camber line length CAMBER *
C*****
C
50 CAMBER=CHORD*(0.7221988+5.04736E-03*(RAMDA1-RAMDA2))
60 TRAILE=TRAILH*BH

```

```

C *****
C *                               Width  WAXILE                               *
C *****
C
  WAXILE=CHORD*SIN(RAMDAS*RADIAN)
70 RETURN
  END
C*****
C*                               Loss                                       *
C*****
C
  SUBROUTINE ALOSS(RAMDA1,RAMDA2,V,BH,ANIU,PITCH,CAMBER,CHORD,
1          TRAIL,E,TLOSSP,TLOSSE,STORRO)
C *****
C *                               Section loss coefficient  TLOSSP          *
C *****
C
  PAI=3.1416
  RADIAN=PAI/180.
  REL=V*CAMBER/ANIU
  CONST1=1.96508*ALOG10(REL)-8.51713
  CONST2=TANH(CONST1)
  FREL=1.0-CONST2+71.0/ALOG10(REL)**2.58
  IF(RAMDA2.LT.1.0) RAMDA2=0.5
  CONST3=SIN(RAMDA2*RADIAN)/SIN(RAMDA1*RADIAN)
  CONST4=0.0021*CAMBER*((1.0-CONST3**4.5)/(1.0-CONST3))**0.8
  C=FREL*CONST4/(PITCH*SIN(RAMDA2*RADIAN))
  D=1.286*C
  TRAILP=TRAIL/SIN(RAMDA2*RADIAN)
  CO1=1.0-D-C-TRAILP/PITCH
  CO2=1.0-D-TRAILP/PITCH
  CO3=CO1*COS(RAMDA2*RADIAN)/CO2
  CO4=CO1*SIN(RAMDA2*RADIAN)
  CO5=(CO2**2-CO1)*SIN(RAMDA2*RADIAN)**2
  TLOSSP=1.0-(CO3**2+CO4**2)/(1.0+2.0*CO5)
  TP=TRAIL/PITCH
  R=RAMDA2
  DXPT=-0.175E-07+2.750*TP-0.750E+02*TP**2+0.1875E+04*TP**3
  A1=1.0
  A2=-5.3772+2.4626*R-0.18742*R**2+0.53371E-02*R**3-0.50168E-04*R**4
  A3=0.63683E+03-0.10251E+03*R+6.0368*R**2-0.14954*R**3
1  +0.12953E-02*R**4
  XPT=A1+A2*TP+A3*TP**2
  TLOSSP=TLOSSP*XPT+DXPT/100.0
C *****
C *                               Secondary loss coefficient  TLOSSE          *
C *****
C
  C1=SIN(RAMDA2*RADIAN)/SIN(RAMDA1*RADIAN)
  C2=0.038806*(CONST+0.08)*(1.0+(RAMDA1-RAMDA2)/100.)
  C3=1.5+(RAMDA1+RAMDA2)/160.
  C3=0.000337*(10.0*(CONST+0.08))**C2
  E=(C1+C3)*CHORD/BH
  IF(CONST.GT.1.0) GO TO 10
  TEMAX=E
  GO TO 20
10 TEMAX=E*CONST**2
20 IF(STORRO.NE.0.0) GO TO 30
  ENR=0.3
  GO TO 40
30 X=2.857*1.286*TEMAX
  ENR=0.3+TANH(X)
40 TLOSSE=ENR*TEMAX
50 RETURN
  END
C*****
C*                               Property of working fluid                    *
C*****
C
  SUBROUTINE STATES(TR,PS,VL,VG,HL,HG,SL,SG,ANIUS,FLUID)
C
  IF(FLUID.EQ.22.) GO TO 10
  IF(FLUID.EQ.3.) GO TO 20
  IF(FLUID.EQ.502.) GO TO 30
C *****
C *                               Property of FLUOROCARBON-22                *
C *****
C
10 HL=0.99998E+02+0.27766E+00*TR+0.29284E-03*TR**2+0.36719E-05*TR**3
  HG=0.14890E+03+0.86556E-01*TR-0.48298E-03*TR**2+0.17721E-05*TR**3
1  -0.75231E-07*TR**4
  SL=0.100002E+01+0.9947941E-03*TR+0.9399766E-06*TR**2-0.4794095E-07
1  *TR**3+0.5827505E-09*TR**4

```

```

SG=0.11790E+01-0.28953E-03*TR-0.19367E-04*TR**2+0.25029E-05*TR**3-
1 0.14506E-06*TR**4+0.43220E-08*TR**5-0.64248E-10*TR**6
2 +0.37678E-12*TR**7
VL=0.78035E-03+0.20594E-05*TR+0.11358E-07*TR**2+0.15093E-10*TR**3
1 +0.16432E-11*TR**4
VG=0.47002E-01-0.14812E-02*TR+0.27800E-04*TR**2-0.38975E-06*TR**3
1 +0.37467E-08*TR**4-0.17788E-10*TR**5
PS=0.50769E+01+0.16556*TR+0.19951E-02*TR**2+0.1175E-04*TR**3
AMIUS=0.121001E-04+0.685682E-07*TR-0.287689E-08*TR**2
1 +0.119886E-09*TR**3-0.198864E-11*TR**4+0.125000E-13*TR**5
GO TO 50

```

* Property of NH3 *

```

20 HL=0.10000E+03+0.11012E+01*TR+0.24089E-02*TR**2-0.30866E-03*TR
1 **3+0.24435E-04*TR**4-0.93901E-06*TR**5+0.17519E-07*TR**6
2 -0.12684E-09*TR**7
HG=0.40152E+03+0.27279E+00*TR-0.38280E-02*TR**2+0.11279E-03*TR**3
1 -0.32041E-05*TR**4+0.29755E-07*TR**5
SL=0.10000E+01+0.40390E-02*TR-0.91817E-05*TR**2+0.30572E-06*TR**3
1 -0.82243E-08*TR**4+0.82217E-10*TR**5
SG=0.21041E+01-0.30853E-02*TR+0.11028E-04*TR**2-0.69905E-06*TR**3
1 +0.72046E-07*TR**4-0.32574E-08*TR**5+0.66433E-10*TR**6
2 -0.50833E-12*TR**7
VL=0.15660E-02+0.33831E-05*TR+0.33826E-08*TR**2+0.96312E-09*TR**3
1 -0.40943E-10*TR**4+0.91529E-12*TR**5-0.77117E-14*TR**6
VG=0.28970E+00-0.10144E-01*TR+0.17251E-03*TR**2+0.40629E-05*TR**3
1 -0.63069E-06*TR**4+0.33562E-07*TR**5-0.96353E-09*TR**6
2 +0.14464E-10*TR**7-0.88822E-13*TR**8
PS=0.43790E+01+0.16131E+00*TR+0.35191E-02*TR**2-0.19086E-03*TR**3
1 +0.19224E-04*TR**4-0.99006E-06*TR**5+0.28719E-07*TR**6
2 -0.43790E-09*TR**7+0.27291E-11*TR**8
AMIUS=0.935E-05-0.17083E-08*TR+0.26762E-08*TR**2-0.54592E-10*TR**3
1 +0.315E-12*TR**4
GO TO 50

```

* Property of FULOROCARBON-502 *

```

30 TR=TR+273.15
HL=-56.9623-0.154335*TR+7.46237E-03*TR**2-9.104E-06*TR**3
1 -1.50815E-08*TR**4-4.33758E-11*TR**5+1.87375E-13*TR**6
HG=353.472+0.318423*TR-5.55037E-03*TR**2+1.48342E-05*TR**3
1 +1.08578E-08*TR**4+2.60968E-11*TR**5-1.98043E-13*TR**6
SL=-1.95166+0.0147839*TR-2.39536E-06*TR**2-2.87337E-08*TR**3
1 -1.40108E-10*TR**4+2.21434E-13*TR**5+2.23291E-16*TR**6
2 +2.38102E-19*TR**7
SG=3.62134-0.0136161*TR+1.15037E-05*TR**2+3.56669E-08*TR**3
1 +9.85794E-11*TR**4-2.82378E-13*TR**5-1.53089E-16*TR**6
2 -4.75886E-20*TR**7
ROWL=1942.9-2.4015*TR+6.38642E-04*TR**2+9.65673E-06*TR**3
1 -4.23078E-09*TR**4-1.19521E-10*TR**5-1.03777E-14*TR**6
ROWG=127.266+0.0120281*TR-1.84835E-03*TR**2-7.7992E-06*TR**3
1 +1.20006E-08*TR**4+5.92447E-11*TR**5+1.02111E-13*TR**6
PS=-2.72403+0.0237695*TR-5.21761E-05*TR**2-4.68701E-08*TR**3
1 -5.12797E-11*TR**4+9.08925E-13*TR**5+1.32646E-15*TR**6
2 +4.83719E-20*TR**7
AMIUS=13.2546-0.0772148*TR+4.88755E-05*TR**2+2.33328E-07*TR**3
1 +3.48851E-10*TR**4-1.30096E-12*TR**5-6.66775E-16*TR**6
2 +1.02947E-18*TR**7

```

```

TR=TR-273.15
HL=HL/4.187
HG=HG/4.187
SL=SL/4.187
SG=SG/4.187
PS=(PS/9.80665)*100
VL=1.0/ROWL
VG=1.0/ROWG
ANIUS=ANIUS*1.0E-06
GO TO 60

```

```

50 ROWG=1./VG
ANIUS=ANIUS/ROWG
60 RETURN
END

```

C* Thermodynamic properties *

SUBROUTINE STATE2 (H2IS, S1G, TIN, TOUT, T2, FLUID)

TI=TIN

```

      TO=TOUT
      I=0
10  T2=(T1+TO)/2.
      IF(FLUID.EQ.22.) GO TO 20
      IF(FLUID.EQ.3.) GO TO 30
      IF(FLUID.EQ.502.) GO TO 40
C *****
C *
C *          Property of FLUOROCARBON-22          *
C *****
20  H2L=0.99998E+02+0.27766E+00*T2+0.29284E-03*T2**2+0.36719E-05*T2**3
      H2G=0.14890E+03+0.86556E-01*T2-0.48298E-03*T2**2+0.17721E-05*T2
1    **3-0.75231E-07*T2**4
      S2L=0.1000002E+01+0.9947941E-03*T2+0.9399766E-06*T2**2
1    -0.4794095E-07*T2**3+0.5827505E-09*T2**4
      S2G=0.11790E+01-0.28953E-03*T2-0.19367E-04*T2**2+0.25029E-05*T2
1    **3-0.14506E-06*T2**4+0.43220E-08*T2**5-0.64248E-10*T2
2    **6+0.37678E-12*T2**7
      GO TO 100
C *****
C *
C *          Property of NH3          *
C *****
30  H2L=0.10000E+03+0.11012E+01*T2+0.24089E-02*T2**2-0.30866E-03*T2
1    **3+0.24435E-04*T2**4-0.93901E-06*T2**5+0.17519E-07*T2**6
2    -0.12684E-09*T2**7
      H2G=0.40152E+03+0.27279E+00*T2-0.38280E-02*T2**2+0.11279E-03*T2
1    **3-0.32041E-05*T2**4+0.29755E-07*T2**5
      S2L=0.10000E+01+0.40390E-02*T2-0.91817E-05*T2**2+0.30572E-06*T2
1    **3-0.82243E-08*T2**4+0.82217E-10*T2**5
      S2G=0.21041E+01-0.30853E-02*T2+0.11028E-04*T2**2-0.69905E-06*T2
1    **3+0.72046E-07*T2**4-0.32574E-08*T2**5+0.66433E-10*T2**6
2    -0.50833E-12*T2**7
      GO TO 100
C *****
C *
C *          Property of FULOROCARBON-502          *
C *****
40  T2=T2+273.15
      H2L=-56.9623-0.154335*T2+7.46237E-03*T2**2-9.104E-06*T2**3
1    -1.50815E-08*T2**4-4.33758E-11*T2**5+1.87375E-13*T2**6
      H2G=353.472+0.318423*T2-5.55037E-03*T2**2+1.48342E-05*T2**3
1    +1.08578E-08*T2**4+2.60968E-11*T2**5-1.98043E-13*T2**6
      S2L=-1.95166+0.0147839*T2-2.39536E-06*T2**2-2.87337E-08*T2**3
1    -1.40108E-10*T2**4+2.21434E-13*T2**5+2.23291E-16*T2**6
2    +2.38102E-19*T2**7
      S2G=3.62134-0.0136161*T2+1.15037E-05*T2**2+3.56669E-08*T2**3
1    +9.85794E-11*T2**4-2.82378E-13*T2**5-1.53089E-16*T2**6
2    -4.75886E-20*T2**7
      T2=T2-273.15
      H2L=H2L/4.187
      H2G=H2G/4.187
      S2L=S2L/4.187
      S2G=S2G/4.187
100 X=(S1G-S2L)/(S2G-S2L)
      Y=(H2G-H2L)*X+H2L-H2LIS
      IF(ABS(Y).LT.0.5E-03) GO TO 120
      I=I+1
      IF(I.GT.200) GO TO 120
      IF(Y.GT.0.0) GO TO 110
      TO=T2
      GO TO 10
110 TI=T2
      GO TO 10
120 RETURN
      END
C *****
C *
C *          Unit conversion (Gravity unit → SI unit)          *
C *****
C
      SUBROUTINE SI(PS1,PS2,PS3,H1,H2,H3,S1G,S2,S3,DHN,DHR,HDLOS,DHEX,
1          DHWET,DHSUM,HAD)
C
      PS1=PS1*0.0980665
      PS2=PS2*0.0980665
      PS3=PS3*0.0980665
      H1=H1*4.187
      H2=H2*4.187
      H3=H3*4.187
      S1G=S1G*4.187
      S2=S2*4.187
      S3=S3*4.187
      DHN=DHN*4.187

```

```
DHR=DHR*4.187
HDLOS=HDLOS*4.187
DHEX=DHEX*4.187
DHWET=DHWET*4.187
DHSUM=DHSUM*4.187
HAD=HAD*4.187
RETURN
END
```

付表1. 主なパラメータの説明

Station

1. nozzle inlet 2. nozzle outlet 3. rotor outlet

| | | |
|--------|--------------------------|-------------|
| IPOWER | Busber power | |
| T2 | $(T_{IN} + T_{OUT}) / 2$ | |
| PS1 | saturated pressure | (station 1) |
| PS2 | " | (station 2) |
| PS3 | " | (station 3) |
| H1 | enthalpy | (station 1) |
| H2 | " | (station 2) |
| H3 | " | (station 3) |
| V1 | specific volume | (station 1) |
| V2 | " | (station 2) |
| V3 | " | (station 3) |
| S1G | entropy | (station 1) |
| S2 | " | (station 2) |
| S3 | " | (station 3) |
| X1 | dryness fraction | (station 1) |
| X2 | " | (station 2) |
| X3 | " | (station 3) |
| ANIUS1 | kinematic viscosity | (station 1) |
| ANIUS2 | " | (station 2) |
| ANIUS3 | " | (station 3) |
| RPM | rotational speed | |
| GFMASS | mass flow rate | |
| REACT | reaction | |
| RED3 | Reynolds number | (station 3) |
| DP | disk pitch | |
| EETATT | turbine efficiency | |
| D1 | diameter | (station 1) |
| D2 | " | (station 2) |
| D3 | " | (station 3) |
| BH1 | blade height / diameter | (station 1) |
| BH2 | " / " | (station 2) |
| BH3 | " / " | (station 3) |
| ALPHA1 | absolute inlet angle | |
| BETA2 | absolute outlet angle | |
| BETA3 | " | |
| ALPHAS | stagger angle (nozzle) | |

