

海洋温度差発電プラントにおける 作動流体流量のデジタル制御システム

中村政俊*・大石泰彦**・上原春男***

Digital Control Systems of Working Fluid Flow Rate for the OTEC Plant

Masatoshi NAKAMURA*, Yasuhiko OISHI**, Haruo UEHARA***

The purpose of ocean thermal energy conversion (OTEC) is to extract power from temperature differences existing in the oceans. Because the thermal efficiency in OTEC plants is generally low, on the order of 3 percent, and the operating conditions, such as seawater temperatures, are constantly changing, the role of control is of great importance in operating an OTEC plant effectively. This paper describes our first attempt at digital control of the OTEC plant "Imari 2", in which the working fluid flow rate of the OTEC plant was controlled by a personal computer (SORD M223) based on modern control theory. The innovative feature of this study is the construction of a digital control system and the implementation of digital control for the real pilot OTEC plant. In the construction of the system, a provision was made for linkage between the software of control theories and the hardware of the OTEC Plant. We succeeded in implementing the control of the OTEC plant by use of this digital control system.

Key words ; Digital control, modern control theory, OTEC plant, working fluid flow rate

1. まえがき

現在我々が消費するエネルギーは急速に増加しつつあり、しかもその大部分は石油に頼っている。石油資源の枯渇が予測されて以来石油に替わる新しいエネルギーの開発研究が各方面で進められている。新しいエネルギーとしては風力、波力、太陽光、太陽熱、海洋熱などがあげられるが、これらの中でも海洋熱エネルギーは資源量が豊富でしかも安定性が良く、その利用技術の開発が期待されている。この海洋熱エネルギーの利用技術の一つとして海洋温度差発電がある。¹⁾

海洋温度差発電とは、海洋の表層の温海水(15~30°C)と深層の冷海水(1~8°C)と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発電方式である。クローズサイクル方式を用いた発電の原

理の概略はつぎの通りである。低温で沸騰する作動流体は、蒸発器において温海水により加熱され蒸気となる。この蒸気はタービンを回転させ、タービンと連結された発電機によって発電が行われる。タービンを出た作動流体の蒸気は、凝縮器において冷海水で液化され、作動流体循環ポンプで再び蒸発器に送られる。この発電の原理は従来の火力発電や原子力発電と大差ないが、発電に利用する温海水と冷海水の温度差が小さいために、熱効率が3~4%と火力発電や原子力発電の30~40%に比べるとかなり小さい点が特徴である。また温海水、冷海水の温度は季節あるいは一日を通じて変化しており、その温度差は一定でない。このことは発電出力に直接に影響する。したがって、効率よい安定な海洋温度差発電を行うにはつぎの2つの観点からの研究が重要となる。

その第1は、作動流体の適切な選定と発電プラントの機器本体の性能の向上である。海洋熱エネルギーと電気エネルギーの媒介として重要な役割りを果たす作動流体の選定は重要で、伝熱学的、熱力学的また化学

*佐賀大学理工学部電気工学教室

**佐賀大学工学研究科電気工学専攻(現在 三菱重工長崎研究所)

***佐賀大学理工学部生産機械工学教室

の性質を考慮のうえで、フロン22あるいはアンモニアが適切とされている。¹⁾発電システムを構成する蒸発器、凝縮器の熱交換器は熱通過係数の値を高めるように、またタービン、発電機は効率を充分高めるように設計されなければならない。¹⁾さらに、これら個々の機器の性能の向上のみではなく、個々の機器の関連を考慮して発電システム全体の効率を高めるための研究も必要である。²⁾

第2は、発電システムの運転技術の向上である。海洋温度差発電は、もともと熱効率の低い発電方式であるので、運転技術においてその欠点を十分に補い発電効率を最大にする最適な運転が望まれる。また温海水と冷海水の温度差の変化、すなわち発電プラントの外界の変化により発電システムの特性が変わり、発電出力を目標値にうまく一致させるのは容易ではない。そこで発電システムに要求される安定した電力の供給のためには、システムの動的な特性を考慮した運転が必要である。このような効率面と安定性の面での複雑な要求事項に対して、手動制御あるいは古典的な制御手法では対処が困難である。そこで現代制御理論に基づくデジタル制御が考えられる。デジタル制御は制御の精度が高く、最適な概念を反映させての制御が可能である。また制御目的などの要求事項の内容に応じて、計算機に組みこむプログラムの適切な選択を行うことによって対処が容易である。以上のことから海洋温度差発電プラントの運転は、デジタル制御による運転が望ましいと思われる。

本学での海洋温度差発電の研究は、佐賀大学理工学部海洋熱エネルギー変換実験施設の実験プラント「伊万里2号機」を中心に行われている。いままではさきに述べた第1の留意事項、すなわち機器性能の向上のための実験と研究が中心であった。プラントの実際の運転に関しては手動で行い、プラントの状態を見ながら人間の勘に頼る部分が多く、第2の留意事項である運転技術の研究はあまり行われていなかった。

本研究は、海洋温度差発電プラント「伊万里2号機」において、発電出力を一定に保つのにまず必要な作動流体の蒸発器出口熱量を目標値に合わせるという制御目的を、デジタル制御によって実現させるものである。すなわち作動流体の蒸発器出口熱量を求めるのに必要な情報をプラントにより信号電圧として観測しそのアナログ量をA/D変換器を通してデジタル計算機に取り入れる。計算機内ではこの熱量を計算しその値が目標値と一致するにはどれだけの作動流体の流量

が必要かをレギュレータ・オブザーバを用いた制御手法によって求め、その流量をうるのに必要な作動流体循環ポンプの信号電圧を出力する。計算機により出力された信号電圧は、D/A変換器を通してプラントの作動流体循環ポンプに送られ、流量の調節が行われる。以上の機能を有するデジタル制御システムを実際に構成し、作動流体の流量を自動的に調節し、制御目的は達成され一応良好な結果が得られた。本研究の意義は、海洋温度差発電プラントの一部の運転を、デジタル制御によって達成することに成功し、それを通して、この分野の制御に関する研究が発展することにある。

2. 海洋温度差発電プラントの概略と制御目的

佐賀大学理工学部海洋熱エネルギー変換実験施設の海洋温度差発電プラント「伊万里2号機」の概要と動作原理を示し、このプラントの制御に関する要求事項を確認したうえで、いまから考察する制御目的を明らかにする。

2.1 海洋温度差発電プラント

海洋温度差発電の実験プラント「伊万里2号機」の概略を図2.1に示す。このプラントは、プラント本体、駆動部と検出部とから構成されている。

プラント本体は、海洋熱エネルギーを電気エネルギーに変換するプラントの最も主要な部分で、作動流体と温海水の熱交換を行う蒸発器、作動流体と冷海水の熱交換を行う凝縮器、作動流体のもつ蒸気熱量を機械エネルギーへ変換するタービン、機械エネルギーを電気エネルギーに変換する発電機から構成されている。

駆動部は、温海水と冷海水を流すそれぞれのポンプとその流量を調節するバルブ、作動流体の流量を調節しながら循環させる作動流体循環ポンプからなる。プラントを実際に運転する場合、調節可能なのはこの駆動部における温海水、冷海水、作動流体の3つの流量である。

検出部は、プラントの運転状態を知るもので現在は流量検出と温度検出からなる。また作動流体蒸気の圧力検出も可能であるがいまは検出していない。温海水、冷海水、作動流体の流量は、流量の指示メータの目測値に対応する信号電圧として観測される。温度検出は検出の必要な箇所に熱電対を設置し、温度に対応した信号電圧として観測される。図2.1における G_H 、 G_C 、 G_F は、それぞれ温海水、冷海水と作動流体の流量

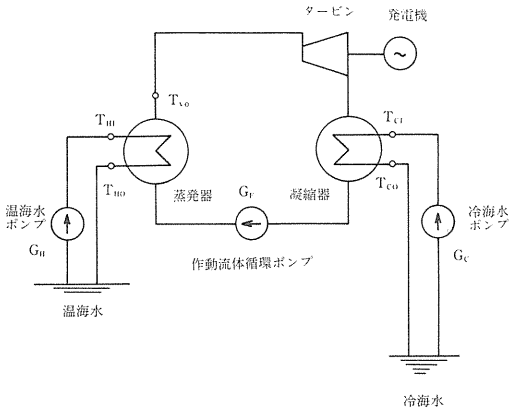


図 2.1 海洋温度差発電プラントの概略

(kg/h) を示し, T_{H1} , T_{H0} は温海水の蒸発器入口温度と出口温度 ($^{\circ}\text{C}$), T_{C1} , T_{C0} は冷海水の凝縮器入口温度と出口温度 ($^{\circ}\text{C}$) を示している.

つぎにこのプラントの発電原理と要求事項について示す. 低温で沸騰する液体の作動流体 (フロン22またはアンモニア) は蒸発器に入る温海水

$$Q_H = G_H C_H (T_{H1} - T_{H0}) \quad (\text{kcal/h}) \quad (2.1)$$

で加熱され蒸気となる. ここで C_H (kcal/ $^{\circ}\text{Ckg}$) は温海水の比熱である. 蒸気となった作動流体はタービンを回し, タービンと連結された発電機によって発電が行われる. タービンを出た作動流体の蒸気は凝縮器で冷海水の熱量

$$Q_C = G_C C_C (T_{C0} - T_{C1}) \quad (\text{kcal/h}) \quad (2.2)$$

によって熱量が奪われ, 凝縮し再び液体となる. ここで C_C (kcal/ $^{\circ}\text{Ckg}$) は冷海水の比熱である. 液体の作動流体は, 作動流体の循環ポンプによって強制的に流量 G_F で循環される.

この発電プラントにおける発電出力 P_G は

$$P_G = \eta_T \eta_g (Q_F - Q'_F) \quad (\text{kcal/h}) \quad (2.3)$$

で示される. ここで, η_T と η_g はそれぞれタービンの効率と発電機の効率, Q_F と Q'_F はそれぞれ作動流体蒸気のもつタービン入口熱量と出口熱量で

$$\begin{cases} Q_F = G_F h & (\text{kcal/h}) \\ Q'_F = G_F h' & (\text{kcal/h}) \end{cases} \quad (2.4)$$

で示される. h と h' (kcal/kg) は, タービン入口と出口における作動流体のそれぞれのエンタルピである. 安定した発電出力 P_G をうるには, (2.3)式より Q_F および Q'_F を安定した一定の値に保つ制御が必要となる.

制御に必要な操作量は本プラントにおいてははさきの駆動部の箇所でも示した3つの流量すなわち G_H , G_C および G_F である. 現在, G_H と G_C はバルブの手動開閉により, G_F は作動流体循環ポンプの電動モータに可変電圧を加えることによって調節している. 現段階での運転の自動化への移行が容易なのは作動流体の流量の調節である. このことも考慮して次節で本研究における制御目的を考える.

2.2 制御目的

前節でも示したように, 安定した一定の発電出力 P_G を得るには Q_F および Q'_F の値を一定にする必要がある. ここでは Q_F について考える. タービン入口すなわち蒸発器出口における作動流体の蒸気のもつ熱量 Q_F は, 作動流量がフロン22で飽和蒸気圧の場合は近似的に

$$\begin{cases} Q_F = G_F L \\ L \simeq 48.9 - 0.1885 T_{V0} - 0.012 T_{V0}^2 \end{cases} \quad (2.5)$$

で示される. ここで L (kcal/kg) はフロン22の潜熱である. (2.5)式からわかるように, Q_F は G_F および T_{V0} の観測によって近似的に求めることができ, そして G_F を変化させることにより Q_F を調節することが可能である.

以上より, 本研究の制御目的は, 制御量 Q_F を一定の目標値 Q_d に等しくなるように操作量 G_F を調節することである. そして, その実現をデジタル制御により自動的に行う.

3. 作動流体流量システムの同定・推定制御理論

本章では, 第2章で述べた制御目的をデジタル制御によって達成させるための理論の説明を行う. 制御を行うには, まず何を入力とし, 何を出力とするのかの制御対象を設定し, その対象の特性を把握すること, すなわち同定を行い, その結果に基づいて制御系を構成するのが一般の手順である.

制御対象は, 入力を作動流体流量 G_F として出力を作

動流体の蒸発器出口熱量 Q_F とする作動流体流量システムと考える。このシステムをパルス伝達関数でモデル化し、その未知パラメータを G_F 、 Q_F のデータに基づいて最小 2 乗法³⁾を用いて同定する。つぎにこの同定結果に基づいてレギュレータとオブザーバ⁴⁾を用いて制御システムを構成し、制御目的を達成させる操作量 G_F の導出を行う。

なお、ここでとり上げる同定および制御の理論の説明は、本研究で採用したものの理論であるが、これらの理論はほかのものと同じく自由におき替えることが可能である。この自由なおき替えは、計算機のプログラムを変更することにより容易にでき、この置き換え可能なこと自体がデジタル制御の大きな特長の一つでもある。

3.1 最小 2 乗法を用いた作動流体流量システムの同定

入力を作動流体流量 G_F 、出力を作動流体の蒸発器出口熱量 Q_F とする作動流体流量システムを利用対象と考え、このシステムを次数が 1 次のパルス伝達関数

$$Q_F(k) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1}}{1 + a_1 z^{-1}} G_F(k) + w(k) \quad (3.1)$$

でモデル化する。ここで、 $G_F(k)$ 、 $Q_F(k)$ は k 時刻における入力および出力、 $w(k)$ は k 時刻における雑音、 z^{-1} は遅延演算子である。(3.1) 式で示すパルス伝達関数の未知パラメータ a_1 、 b_0 、 b_1 を入出力データ $G_F(k)$ 、 $Q_F(k)$ を用いて、最小 2 乗法を適用して推定する。

(3.1) 式の表現形態をかえて差分方程式表示すると

$$Q_F(k) = -a_1 Q_F(k-1) + b_0 G_F(k) + b_1 G_F(k-1) + v(k) \quad (3.2)$$

となる。ここで式誤差 $v(k)$ は

$$v(k) = w(k) + a_1 w(k-1) \quad (3.3)$$

である。入出力の観測データの数を N として、つぎのベクトルと行列

$$\begin{cases} y = [Q_F(1), Q_F(2), \dots, Q_F(N)]^T \\ \Omega = \begin{bmatrix} Q_F(0) & G_F(1) & G_F(0) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ Q_F(N-1) & G_F(N) & G_F(N-1) \end{bmatrix} \\ v = [v(1), v(2), \dots, v(N)]^T \\ \theta = [-a_1, b_0, b_1]^T \end{cases} \quad (3.4)$$

を定義する。ここで、 T は転置記号を表わす。これらのベクトルと行列を用いて(3.2)式の k を 1 から N までまとめて表現すると

$$y = \Omega \theta + v \quad (3.5)$$

となる。最小 2 乗法における評価関数

$$J = v^T v = [y - \Omega \theta]^T [y - \Omega \theta] \quad (3.6)$$

を最小とするような未知パラメータの推定値ベクトル $\hat{\theta}$ は

$$\hat{\theta} = [\Omega^T \Omega]^{-1} \Omega^T y \quad (3.7)$$

で求められる。ここで、 -1 は逆行列演算を表わす。

(3.7) 式の Ω および y は(3.4)式でわかるように、作動流体流量システムの入力 $G_F(k)$ 、出力 $Q_F(k)$ で構成され、これらの入出力データを実際に観測して、(3.7) 式を解くことによって(3.1)式のパルス伝達関数の未知パラメータは推定することができる。

この章の冒頭でも述べたように、(3.1) 式のパルス伝達関数の次数 (いまは 1 次) や、(3.7) 式の同定手法 (いまは最小 2 乗法) は暫定的に用いただけであり、これらのものはより適切なものが見つければ、その時点で計算機プログラム (いまはプログラム SA とプログラム ID) の変更によって自由におき替えることができる。

3.2 レギュレータとオブザーバを用いた作動流体流量システムの制御

制御量である Q_F を目標値 Q_d に等しくするという制御目的を達成する制御システムを、3.1 節の同定結果に基づいてレギュレータ⁴⁾とオブザーバ⁵⁾を用いて構成し、操作量 G_F の導出を行う。この導出をつぎの(1)～(5)の順で行う。

1) 作動流体流量システムの状態空間表示

(3・1) 式の1次のパルス伝達関数のパラメータ a_1, b_0, b_1 を(3・7)式で得られる推定値 $\hat{a}_1, \hat{b}_0, \hat{b}_1$ でおき替えると、作動流体流量システムは

$$Q_F(k) = \frac{\hat{b}_0 + \hat{b}_1 z^{-1}}{1 + \hat{a}_1 z^{-1}} G_F(k) \quad (3・8)$$

となる。いま状態変数 $x(k)$ を導入すると(3・8)式は

$$\begin{cases} x(k+1) = -\hat{a}_1 x(k) + (\hat{b}_1 - \hat{a}_1 \hat{b}_0) G_F(k) \\ Q_F(k) = x(k) + \hat{b}_0 G_F(k) \end{cases} \quad (3・9)$$

と書き直すことができる。そこで

$$\begin{cases} P_1 = -\hat{a}_1 \\ P_2 = \hat{b}_1 - \hat{a}_1 \hat{b}_0 \\ P_3 = 1 \\ P_4 = \hat{b}_0 \end{cases} \quad (3・10)$$

とおくと(3・9)式は

$$\begin{cases} x(k+1) = P_1 x(k) + P_2 G_F(k) \\ Q_F(k) = P_3 x(k) + P_4 G_F(k) \end{cases} \quad (3・11)$$

となる。(3・11)式が制御対象である作動流体流量システムの状態空間表示である。

2) 拡張モデルの構成

状態変数 $x(k)$ の差分 $\delta x(k)$ 、操作量 $G_F(k)$ の差分 $\delta G_F(k)$ 、制御量 $Q_F(k)$ の目標値との偏差 $e(k)$ を

$$\begin{cases} \delta x(k) = x(k) - x(k-1) \\ \delta G_F(k) = G_F(k) - G_F(k-1) \\ e(k) = Q_F(k) - Q_d \end{cases} \quad (3・12)$$

と定義する。(3・12)式を用いて(3・11)式を書き直すと

$$\begin{cases} \delta x(k+1) = P_1 \delta x(k) + P_2 \delta G_F(k) \\ e(k) - e(k-1) = P_3 \delta x(k) + P_4 \delta G_F(k) \end{cases} \quad (3・13)$$

となり、(3・13)式をまとめると

$$\begin{bmatrix} \delta x(k+1) \\ e(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1 & 0 \\ P_3 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta x(k) \\ e(k-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_2 \\ P_4 \end{bmatrix} \delta G_F(k) \quad (3・14)$$

となる。そこで、ベクトル、行列を

$$\begin{cases} X(k) = \begin{bmatrix} \delta x(k) \\ e(k-1) \end{bmatrix}, \\ A = \begin{bmatrix} P_1 & 0 \\ P_3 & 1 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} P_2 \\ P_4 \end{bmatrix}, \\ U(k) = \delta G_F(k) \end{cases} \quad (3・15)$$

と定義すると、(3・14)式は

$$X(k+1) = AX(k) + BU(k) \quad (3・16)$$

で表わされる。(3・16)式を状態空間表示(3・11)式の拡張モデルという。

新しい状態ベクトル $X(k)$ を $k \rightarrow \infty$ で

$$\begin{aligned} X(k) &= \begin{bmatrix} \delta x(k) \\ e(k-1) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} x(k) - x(k-1) \\ Q_F(k-1) - Q_d \end{bmatrix} \rightarrow \mathbf{0} \end{aligned} \quad (3・17)$$

とすることができるならば、状態変数 $x(k)$ は一定値をとり、また $Q_F(k)$ は Q_d と等しくなり、制御目的は達成される。そこで新しい状態ベクトル $X(k)$ を $\mathbf{0}$ ベクトルに収束させる新しい入力 $U(k)$ を次に求める。

3) $X(k)$ の状態フィードバック

拡張モデル(3・16)式の状態ベクトル $X(k)$ を $\mathbf{0}$ ベクトルに収束させることを、状態フィードバックによって達成する。入力 $U(k)$ を

$$U(k) = FX(k) \quad (3・18)$$

とする。ここで、 F はいまから決定すべき1行2列のフィードバック行列

$$F = [f_1, f_2] \quad (3・19)$$

である。(3・17)式に(3・18)式を代入すると

$$\begin{aligned} X(k) &= (A+BF)X(k-1) \\ &= (A+BF)^k X(0) \end{aligned} \quad (3 \cdot 20)$$

となる。

行列 $A+BF$ の 2 つの固有値すなわちレギュレータの極 λ_i ($i=1, 2$) を $|\lambda_i| < 1$ の条件で定めれば、 $X(k)$ を任意の初期値 $X(0)$ で $k \rightarrow \infty$ のとき 0 ベクトルに収束させることができる。行列 $A+BF$ の特性方程式は (3.15), (3.19) 式より

$$\begin{aligned} &|\lambda I - (A+BF)| \\ &= \begin{vmatrix} \lambda - (P_1 + P_2 f_1) & -P_2 f_2 \\ -(P_3 + P_4 f_1) & \lambda - (1 + P_4 f_2) \end{vmatrix} \\ &= \lambda^2 - (P_1 + P_2 f_1 + 1 + P_4 f_2) \lambda + (P_1 + P_2 f_1) \\ &\quad \times (1 + P_4 f_2) - P_2 f_2 (P_3 + P_4 f_1) \end{aligned} \quad (3 \cdot 21)$$

となる。ここで I は単位行列である。フィードバック行列の要素 f_1, f_2 は、(3.21) 式の根と係数の関係よりの連立方程式

$$\begin{cases} P_1 + P_2 f_1 + 1 + P_4 f_2 = \lambda_1 + \lambda_2 \\ (P_1 + P_2 f_1)(1 + P_4 f_2) - P_2 f_2 (P_3 + P_4 f_1) = \lambda_1 \lambda_2 \end{cases} \quad (3 \cdot 22)$$

の解

$$\begin{cases} f_2 = (\lambda_1 + \lambda_2 - \lambda_1 \lambda_2 - 1) / (P_4 - P_1 P_4 - P_2 P_3) \\ f_1 = (\lambda_1 + \lambda_2 - P_1 - 1 - P_4 f_2) / P_2 \end{cases} \quad (3 \cdot 23)$$

で与えられる。ただし、 λ_1, λ_2 は設計者が与えるレギュレータの極である。

4) 操作量 $G_F(k)$ の決定

拡張モデルの入力 $U(k)$ は (3.15) 式より

$$\begin{aligned} U(k) &= FX(k) \\ &= f_1 \delta x(k) + f_2 e(k-1) \end{aligned} \quad (3 \cdot 24)$$

となり、(3.12) 式より

$$\begin{aligned} &G_F(k) - G_F(k-1) \\ &= f_1 \{x(k) - x(k-1)\} + f_2 e(k-1) \\ &= f_1 x(k) + f_2 \sum_{j=0}^{k-1} e(i) - \{f_1 x(k-1) + f_2 \sum_{i=0}^{k-2} e(i)\} \end{aligned} \quad (3 \cdot 25)$$

となる。そこで $G_F(k)$ を

$$G_F(k) = f_1 x(k) + f_2 \sum_{i=0}^{k-1} \{Q_F(i) - Q_d\} \quad (3 \cdot 26)$$

とおくと、(3.25) 式は満足され (3.26) 式が操作量 $G_F(k)$ として与えられる。ところが (3.26) 式において $Q_F(i)$ は観測値として、 Q_d は目標値として得られるが、状態変数 $x(k)$ は未知であるのでこれをオブザーバを用いて推定する必要がある。

5) オブザーバによる状態変数 $x(k)$ の推定

k 時刻の状態変数 $x(k)$ の推定値 $\hat{x}(k)$ は $k-1$ 時刻の $G_F(k-1), Q_F(k-1), \hat{x}(k-1)$ を用いてオブザーバ

$$\begin{aligned} \hat{x}(k) &= P_1 \hat{x}(k-1) + P_2 G_F(k-1) \\ &\quad - K \{Q_F(k-1) - P_3 \hat{x}(k-1) \\ &\quad - P_4 G_F(k-1)\} \end{aligned} \quad (3 \cdot 27)$$

で与えられる。ここで K はあとで設計パラメータより定まる定数である。(3.27) 式は (3.11) 式を用いて

$$\begin{aligned} \hat{x}(k) - x(k) &= (P_1 + KP_3) \{\hat{x}(k-1) \\ &\quad - x(k-1)\} \\ &= (P_1 + KP_3)^{k-1} \{\hat{x}(0) - x(0)\} \end{aligned} \quad (3 \cdot 28)$$

となる。オブザーバの極

$$\mu = P_1 + KP_3 \quad (3 \cdot 29)$$

の絶対値が $|\mu| < 1$ の条件を満たしていれば (3.28) 式より任意の $\hat{x}(0) - x(0)$ で $k \rightarrow \infty$ のとき $\hat{x}(k) - x(k) \rightarrow 0$ となり、推定値 $\hat{x}(k)$ は $x(k)$ と一致する。ただし、オブザーバはレギュレータより速く収束する必要があるので

$$|\mu| < |\lambda_i| < 1 \quad (i=1, 2) \quad (3 \cdot 30)$$

の条件が付加される。(3.27) 式の定数 K は、(3.30) 式の条件のもとでオブザーバの極を設定すると、(3.29) 式より

$$K = (\mu - P_1) / P_3 \quad (3 \cdot 31)$$

となる。

以上1)~5)より、 Q_F を Q_d と等しくする制御目的を達成する操作量 $G_F(k)$ はつぎのようにまとめられる。

$$\begin{cases} G_F(k) = f_1 \hat{x}(k) + f_2 \sum_{i=0}^{k-1} \{Q_F(i) - Q_d\} \\ \hat{x}(k) = P_1 \hat{x}(k-1) + P_2 G_F(k-1) \\ \quad - K \{Q_F(k-1) - P_3 \hat{x}(k-1) \\ \quad - P_4 G_F(k-1)\} \end{cases} \quad (3 \cdot 32)$$

ここで、 $G_F(k-1)$ と $Q_F(k-1)$ は観測値、 P_1, P_2, P_3, P_4 はパラメータ同定結果であり

$$\begin{cases} f_2 = (\lambda_1 + \lambda_2 - \lambda_1 \lambda_2 - 1) / (P_4 - P_1 P_4 + P_2 P_3) \\ f_1 = (\lambda_1 + \lambda_2 - P_1 - 1 - P_4 f_2) / P_2 \\ K = (\mu - P_1) / P_3 \end{cases} \quad (3 \cdot 33)$$

である。ただし、レギュレータの極 λ_i ($i=1, 2$)、オブザーバの極 μ 、目標値 Q_d は、 $|\mu| < |\lambda_i|$ の条件のもとで、設計者が与える設計パラメータである。

なお、オブザーバとレギュレータを用いた(3・32)、(3・33)式のアゴリズムも、絶対的にすぐれているか否かはここでは深く検討しない。もし、これらよりもより適切なアゴリズムが見つければ、その時点で計算機プログラム(いまはプログラムCOR)の変更によって自由におきかえればよい。

4. 作動流体流量のデジタル制御の実現

第3章では、作動流体流動システムの同定と制御の理論を示した。本章では、理論に基づいた制御方式を実際にデジタル制御によって実現する方法を示す。まず、制御システム全体の概略を述べ、つぎにその詳細部を説明する。また、デジタル制御を実行する手順を示す。

4.1 制御システムの構成の概略

作動流体流量のデジタル制御を実現する制御システムの概略を図4.1に示す。制御システムは、アナログ量の領域である海洋温度差発電プラント、デジタル量の領域であるデジタル制御部、そしてその両者を結びつけるA/DおよびD/A変換器からなる。

作動流体流量のデジタル制御を考えたとき、海洋温度差発電プラントは、作動流体循環ポンプの駆動部、

蒸発器などプラント本体からなる制御対象、作動流体流量および作動流体の蒸発器出口温度を検出する検出部からなる。デジタル制御部からD/A変換器を通して出された信号電圧は、作動流体循環ポンプに加わり作動流体の流量 G_F が変化する。その変化に伴い作動流体の蒸発器出口熱量 Q_F が変化する。この Q_F の値を知るために必要な作動流体流量 G_F 、作動流体の蒸発器出口温度 T_{v0} は流量計、熱電対で検出されその信号電圧はA/D変換器を通してデジタル制御部へ送られる。

デジタル制御部は、海洋温度差発電プラントの検出部の特性を表わした検出特性部、駆動部の特性を表わした駆動特性部、作動流体の蒸発器出口熱量を計算する熱量計算式、制御目的を達成する操作量を求める制御アゴリズムからなる。A/D変換器を通して観測された信号電圧は、検出特性部で実際の作動流体流量 G_F 、作動流体の蒸発器出口温度 T_{v0} の物理量に換算される。この G_F, T_{v0} を用いて熱量計算式で作動流体の蒸発器出口熱量 Q_F が定まる。この Q_F と目標値 Q_d とを比較して、制御アゴリズムにおいて新たにどれだけの作動流体流量 G_F を流すかが計算される。駆動特性部においてこの G_F をポンプで流すだけの信号電圧が計算され、その電圧はD/A変換され発電プラントの駆動部に送られる。

次節で、海洋温度差発電プラントおよびデジタル制御部の個々の説明を行う。

4.2 制御システムの構成の詳細

図4.1の詳細図を図4.2に示し、海洋温度差発電プラントおよびデジタル制御部の内部を説明する。図4.2の図中における記号は各内部の解説のときに説明を行うが、デジタル制御部の $Q_d, Q_F, G_F, G_{F1}, T_{v0}$ はそれぞれ物理量のデジタル量、 $V_F, v_F, V_F, \bar{V}_F, v_{v0}, \bar{V}_{v0}, V_{v0}$ は信号電圧のデジタル量であ

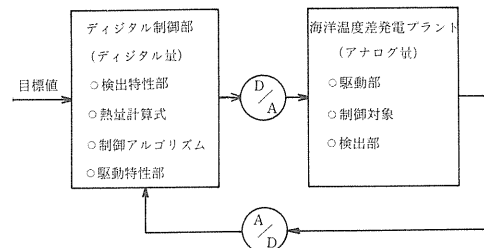


図4.1 作動流体流量のデジタル制御システムの概略

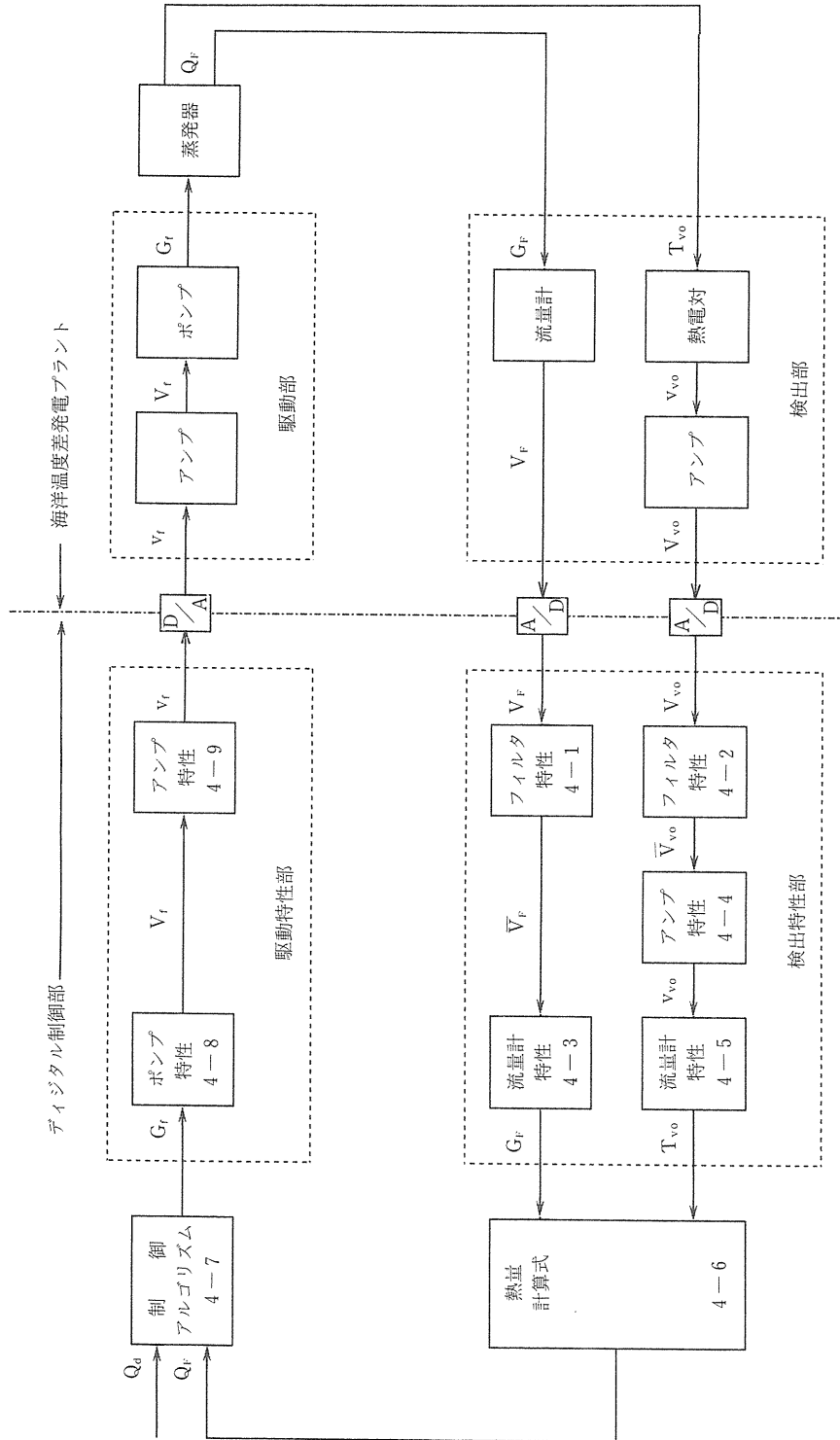


図 4.2 作動流体流量のデジタル制御システムの詳細

る。同様に海洋温度差発電プラントの G_f , G_r , T_{vo} は物理量のアナログ量, v_f , V_f , V_r , v_{vo} , V_{vo} は信号電圧のアナログ量である。なおデジタル制御部における番号は後述の式番号と一致する。

作動流体の流量は、観測される量と操作量として与える量があるが、両者の混同を避けるために本章より前者を G_f 、後者を G_r で示す。 G_f と G_r は定常状態においては一致するが、作動流体循環ポンプの特性により過渡状態においては値が異なる。

4.2.1 海洋温度差発電プラントの詳細

1) 駆動部 D/A 変換器からの信号電圧 $v_f(V)$ はアンプにより増幅され $V_f(V)$ となる。作動流体循環ポンプは電圧 V_f を変化させることによりその値に対応して流量が変化しその量は流量計指示 G_f でわかる。図 4.3 に V_f-G_f の関係を示す。アンプを必要とするのは、D/A 変換器は最大10(V)までしか出力できないのが V_f は最大15(V)まで必要だからである。アンプおよびポンプの特性はデジタル制御部の「駆動特性部」に組みこまれる。

2) 制御対象

作動流体循環ポンプで蒸発器に送られた液体の作動流体は蒸発し、熱量 Q_r の蒸気となる。この熱量はつぎの検出部で検出される G_r , T_{vo} で求められその計算式はデジタル制御部の「熱量計算式」に組みこまれる。

3) 検出部

作動流体の蒸発器出口熱量を求めるのに必要な情報 G_r , T_{vo} は検出部で検出される。流量 G_r は流量指示により観測され、流量計は G_r に対応した信号電圧 $V_r(V)$ を出力する。図 4.4 に G_r-V_r の関係を示す。温度 T_{vo} は熱電対により観測され、 T_{vo} に対応した熱電対出力電圧 $v_{vo}(mV)$ は熱電対検定表より明らかにされている。A/D 変換器の入力電圧は 1 (V)前後が適当であるが、熱電対出力は mV オーダーであるのでアンプで増幅されて A/D 変換器に入る。流量計、熱電対、アンプの特性はデジタル制御部の「検出特性部」に組みこまれる。

4.2.2 デジタル制御部の詳細

1) 検出特性部

検出特性部は、フィルタ、アンプ、流量計、熱電対のそれぞれの特性式からなる。A/D 変換器で検出されたデジタル量 V_r , V_{vo} をフーリエ変換してその周波数成分をみると特に60Hzの電源周波数が含まれてい

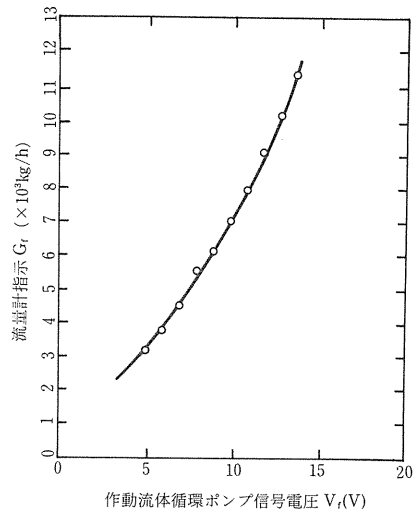


図 4.3 作動流体循環ポンプ特性

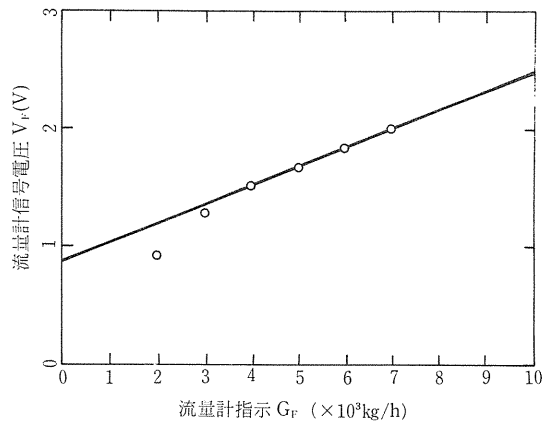


図 4.4 流量計特性

る。これは、ほぼ直流である有効信号に対して雑音とみなされ除去しなければならない。この雑音除去としてフィルタを通してている。このフィルタは60Hzの3周期分を25等分した時間でサンプリングし、その加算平均

$$\bar{V}_F = \sum_{k=1}^{25} V_F(k)/25 \quad (V) \quad (4 \cdot 1)$$

を有効信号電圧として用いる。 V_{vo} についても同様に

$$\bar{V}_{vo} = \sum_{k=1}^{25} V_{vo}(k)/25 \quad (V) \quad (4 \cdot 2)$$

を有効信号電圧として用いる。

流量計の特性は図4.4に示されている。ここでは観測された電圧 V_F がどれだけの流量 G_F に相当するかを知る必要があり、図4.4の G_F-V_F を入れかえたグラフを図4.5に示す。 G_F は図4.5の代表点2点を取り V_F の1次関数で近似した。

$$G_F = 6.25 \times (\bar{V}_F - 0.87) \times 10^3 \quad (\text{kg/h}) \quad (4.3)$$

で表わされる。

アンプは、事前にデジタルテストによって入出力電圧を測定し、その特性は、

$$v_{v0} = (\bar{V}_{v0} - 0.12) \times 1000 / 938 \quad (\text{mV}) \quad (4.4)$$

で表わされる。

熱電対の特性は、その検定表より

$$\begin{aligned} T_{v0} = & -0.67 \times 10^{-2} + 0.25 \times 10^{-2} \times v_{v0} \\ & - 0.21 \times 10^{-1} \times v_{v0}^2 - 0.45 \times v_{v0}^3 + 0.11 \\ & \times v_{v0}^4 \quad (^\circ\text{C}) \end{aligned} \quad (4.5)$$

で表わされる。

以上、検出特性部は(4.1), (4.2), (4.3), (4.

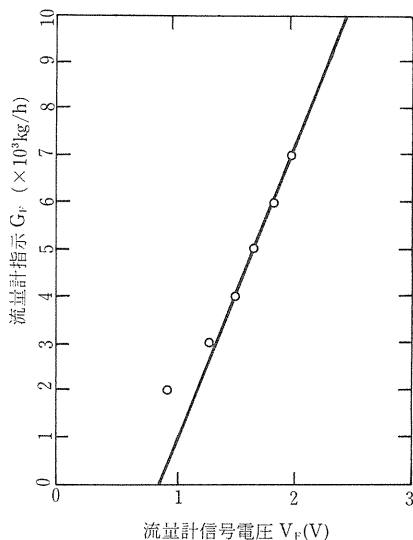


図4.5 デジタル制御部からみた流量計の特性

4), (4.5) 式より構成される。

2) 熱量計算式

作動流体の蒸発出口熱量は、作動流体がフロン22の場合は(2.6), (2.7) 式

$$\begin{cases} Q_F = G_F L & (\text{kcal/h}) \\ L \approx 48.9 - 0.1885 T_{v0} - 0.012 T_{v0}^2 \end{cases} \quad (4.6)$$

で求められ、この式が組みこまれている。

3) 制御アルゴリズム

制御量 Q_F を目標値 Q_d に一致させる操作量 G_F は第3章で導出した(3.32) 式

$$\begin{cases} G_F(k) = f_1 \hat{x}(k) + f_2 \sum_{i=0}^{k-1} \{Q_F(i) - Q_d\} \quad (\text{kg/h}) \\ \hat{x}(k) = P_1 \hat{x}(k-1) + \sum_{i=0}^{k-1} G_F(k-1) \\ \quad - K \{Q_F(k-1) - P_3 \hat{x}(k-1) \\ \quad - P_4 G_F(k-1)\} \end{cases} \quad (4.7)$$

で示され、この式が組みこまれている。(4.7) 式は初期値 $Q_F(0)$, $G_F(0)$, $\hat{x}(0)$ を必要とし、これらはすべて0としている。

4) 駆動特性部

駆動特性部は、作動流体循環ポンプ特性式とアンプ特性式からなる。

作動流体循環ポンプの特性は図4.3に示されている。ここでは、流量 G_F を得るのにどれだけの電圧 V_F が必要かを知る必要があり、図4.3の V_F-G_F を入れかえたグラフを図4.6に示す。 V_F は図4.6の観測点数点を取り G_F の2次関数で近似し、その係数を最小2乗法で求め

$$V_F = -0.0446 \times G_F^2 + 1.746 \times G_F - 0.06 \quad (\text{V}) \quad (4.8)$$

で表わされる。

アンプは、そのゲインを3/2としているので

$$v_f = V_F \times 2 / 3 \quad (4.9)$$

がアンプ特性式として組みこまれている。

4.3 デジタル制御の実行手順

作動流体流量のデジタル制御の手順を以下1)

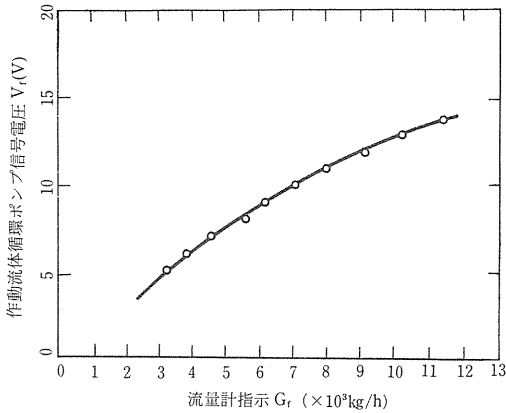


図 4.6 デジタル制御部からみた作動流体循環ポンプ特性

～5) に示す。なお、3)～5) で使用するプログラムの機能および使用手順は付録に示す。

1) 結 線

プラント検出部の熱電対、流量計、アンプ、パソコン付属の A/D 変換器の結線およびプラント検出部の D/A 変換器、アンプ、作動流体循環ポンプの結線を図 4.7 に示す。各部の番号はチャンネル番号である。この結線は 3)～5) で使用するプログラムに共通のものである。また、プログラムでは (2-1) 式で示す温水が作動流体に与える熱量

$$Q_H = G_H C_H (T_{H1} - T_{H0}) \quad (\text{kcal/h}) \quad (4 \cdot 10)$$

の観測も可能になっているので、 T_{H1} 、 T_{H0} 、 G_{H1} 、 G_{H2} 、($G_H = G_{H1} + G_{H2}$) の検出も行っている。

2) プラントの始動

プラントの冷海水、温海水をこの順に約 80×10^3 (kg/h) 流す。もし冷海水のかわりに冷凍器で冷やされた冷水を使用し、温海水のかわりにボイラで温められた温水を使用する場合は、それぞれ $T_{C1} \approx 7^\circ\text{C}$ 、 $T_{H1} \approx 25^\circ\text{C}$ に設定する。冷水と温水を流したあとに作動流体を流しはじめる。

3) 作動流体流量システムの同定のためのデータ採取

プログラム SA (付録 A) を用い、作動流体流量システムの入力 $G_F(k)$ 、出力 $Q_F(k)$ のデータを採取し、そのデータファイルを作成する。

4) 作動流体流量システムの同定

プログラム ID (付録 B) を用いて、作動流体流量システムをモデル化した 1 次のパルス伝達関数の未知パ

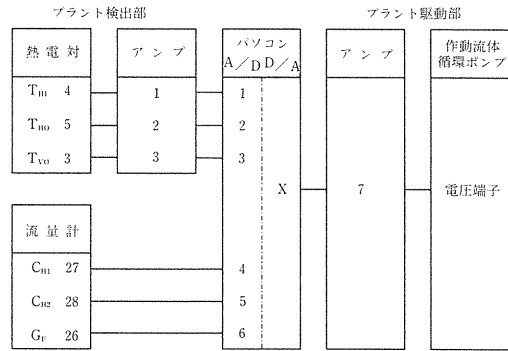


図 4.7 制御システム結果

ラメータ a_1 、 b_0 、 b_1 を 3) で作成したデータファイルをもとに推定する。

5) 作動流体流量のデジタル制御

プログラム COR (付録 C) に、4) で得られた未知パラメータの推定値、制御系の設計パラメータである Q_F の目標値 Q_d 、レギュレータの極 λ_1 、 λ_2 、オブザーバの極 μ を入力して、制御を開始する。

5. 実験結果と考察

本章では、前章で示した制御システムの構成のもとに実験を行った結果を示す。まず、最小 2 乗法を用いて作動流体流量システムの同定を行った結果を示しそのモデル化が適切であることを確認する。つぎにレギュレータ、オブザーバを用いた作動流体流量のデジタル制御の結果を示し、考察を加える。

5.1 作動流体流量システムの同定結果

作動流体流量システムをモデル化した 1 次のパルス伝達関数

$$Q_F(k) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1}}{1 + a_1 z^{-1}} G_F(k) + w(k) \quad (5 \cdot 1)$$

の未知パラメータを、(3.7) 式を用いて推定した結果を示し、その結果の検討を行う。

入力 $G_F(k)$ をランダムに変動させて、サンプル周期 2 秒の条件のもとで 150 個の入出力データ $G_F(k)$ 、 $Q_F(k)$ を採取し、そのグラフを図 5.1 に示す。これらの入出力データを用いて (3.7) 式で得られたパラメータの推定値は

$$\begin{cases} \hat{a}_1 = -0.53071 \\ \hat{\delta}_0 = 45.1778 \\ \hat{\delta}_1 = -23.9898 \end{cases} \quad (5.2)$$

である。これらの推定値が適切であるかどうかを検討するために、実際の出力 $Q_F(k)$ とモデル出力 $\hat{Q}_F(k)$

$$\hat{Q}_F(k) = -\hat{a}_1 Q_F(k-1) + \hat{\delta}_0 G_F(k) + \hat{\delta}_1 G_F(k-1) \quad (5.3)$$

の比較を行う。図 5.2 に $G_F(k)$ と $\hat{Q}_F(k)$ を示す。同一入力 $G_F(k)$ に対して図 5.1 の $Q_F(k)$ と図 5.2 の $\hat{Q}_F(k)$ を比較すると、両者は非常によく一致している。このことを定量的に調べるために $Q_F(k)$ と $\hat{Q}_F(k)$ の誤

差の 2 乗平均の平方根 σ を調べると

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{150} \{Q_F(k) - \hat{Q}_F(k)\}^2}{150}} = 2.22 \times 10^3 \quad (\text{kcal/h}) \quad (5.4)$$

となり、この値は、 $Q_F(k)$ が $200 \sim 300 \times 10^3$ (kcal/h) という値に比べて、きわめて小さく (5.2) 式で示した推定パラメータは、十分にうまく作動流体流量システムの特性を表現していると考えられる。したがって (5.2) 式で示す推定パラメータを用いて制御系を構成する。

なお、ここでは入力として G_F を採用したが、これは $G_F = G_r$ と仮定して、循環ポンプの応答の遅れを無視したことに相当している。 G_F の代わりに G_r を用いること

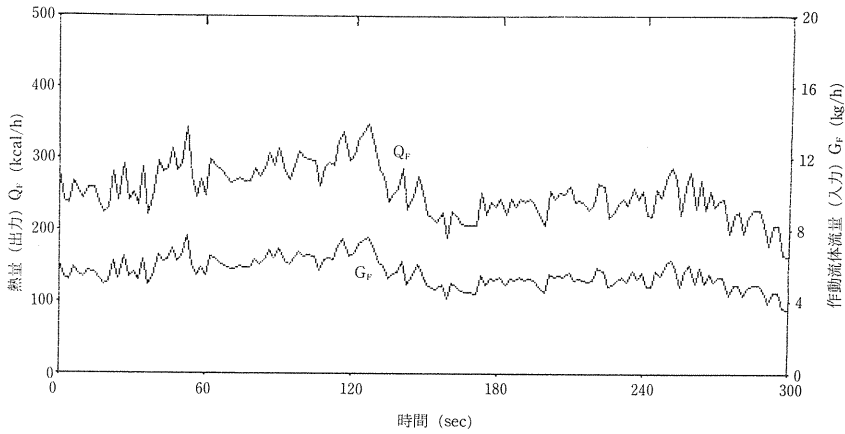


図 5.1 入出力採取データ

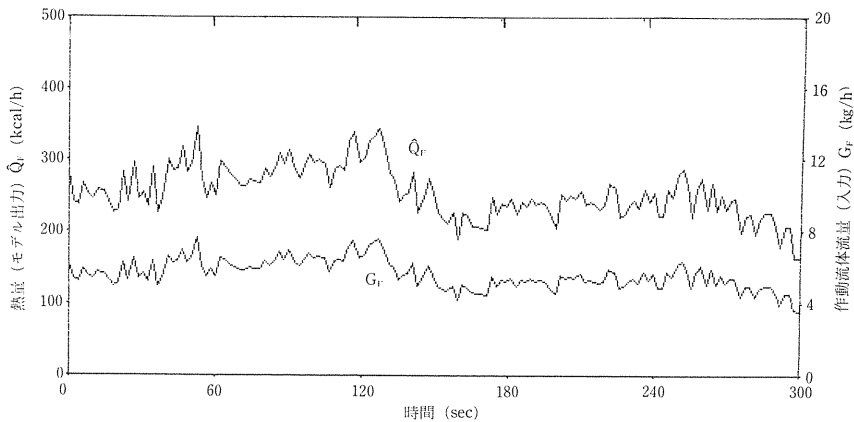


図 5.2 システムのモデル出力

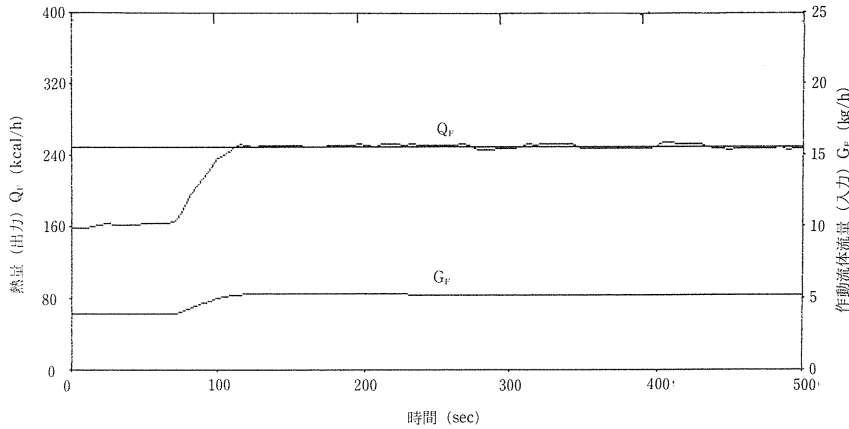


図 5.3 デジタル制御結果

により、循環ポンプと蒸発器を包含したモデルを作ることも可能である。

5. 2 作動流体流量のデジタル制御結果

作動流体流量システムの制御量 $Q_F(k)$ を、目標値 Q_d に追従させる制御を、操作量

$$\begin{cases} G_F(k) = f_1 \hat{x}(k) + f_2 \sum_{i=0}^{k-1} \{Q_i(k-1) - Q_d\} \\ \hat{x}(k) = P_1 \hat{x}(k-1) + P_2 G_F(k-1) \\ \quad - K \{Q_F(k-1) - P_3 \hat{x}(k-1) \\ \quad - P_4 G_F(k-1)\} \end{cases} \quad (5.5)$$

を用い、図 4.2 で示す制御システムのもとで行った結果を示し、考察を加える。

前節で得られた同定結果に基づき (5.5) 式の P_1, P_2, P_3, P_4 を (3.10) 式で定め、制御条件目標値 $Q_d = 250 \times 10^3$ (kcal/h)、レギュレータの極 $\lambda_1 = \lambda_2 = 0.7$ 、オブザーバの極 $\mu = 0.5$ 、サンプル間隔 2 秒、制御総時間 100 秒のもとで行ったデジタル制御結果を図 5.3 に示す。

制御量 Q_F は制御開始後約 30 秒で、目標 Q_d に近くなり、その状態が持続して、制御目的は大体達成されて、作動流体流量のデジタル制御は一応成功したとみられる。

5. 3 問題点と今後の検討事項

前節においての実験結果に示すとおり制御量 Q_F は目標値 Q_d との誤差があり制御精度の面からはまだ改善の余地がある。精度の向上や収束の速さの改善のた

めには検出部における観測値の雑音の除去、制御対象システムのより良いモデル化、最適の概念を取り入れた制御手法の利用と、問題点および改良すべき点が考えられる。

また、本研究では、作動流体流量システムという発電プラントのごく一部のみの制御であったが、最終的には発電システム全体の制御が必要である。ここではこれらの問題点と検討事項をまとめる。

1) 雑音対策

制御精度が十分高くない原因として、雑音の影響がある。検出部より観測される G_F, T_{V0} に相当するほぼ直流の信号電圧 V_F, V_{V0} には電源周波数を主とする雑音が多く含まれている。この雑音を除去するために加算平均を用いたフィルタ (4.1), (4.2) 式を用いている。このフィルタの伝達関数は

$$\begin{aligned} H(z) &= (1 + z^{-1} + \dots + z^{-24}) / 25 \\ &= (1 - z^{-24}) / \{25(1 - z^{-1})\} \end{aligned} \quad (5.6)$$

で示され、その周波数特性は

$$\begin{aligned} H(e^{j\omega T}) &= e^{-j24\omega T/2} \sin(25\omega T/2) \\ &/ 25 \sin(\omega T/2) \end{aligned} \quad (5.7)$$

で示される⁹⁾(図 5.4)。ここで ω は角周波数、 T はサンプリングタイムである。このフィルタは、データの処理は加算平均のみなので、短い計算時間で済むが、高周波部分における遮断はそれ程充分ではない。良い周波数特性を必要とするデジタルフィルタとしてパ

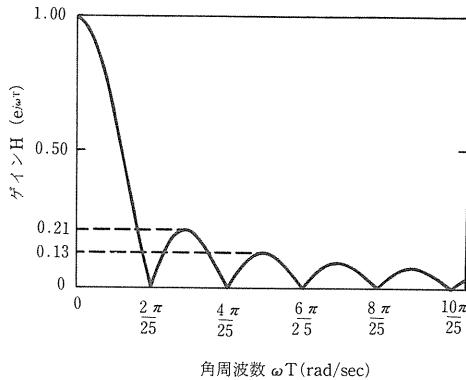


図5.4 加算平均フィルタの周波数特性

ターフスフィルタの利用が考えられるが、雑音を除き有効信号を取り出すのに多くのデータを必要とし、その処理に多くの時間を要する。したがって制御時間内に処理しきれない場合もあり、この部分の計算は機械語におきかえ計算速度を上げる必要がある。

2) 同定手法

本方法においては、制御対象である作動流体流量システムを1次のパルス伝達関数でモデル化し、その未知パラメータを最小2乗法で求めた。しかし、このモデルが最適であるとは言えない。

パルス伝達関数はここでは1次と仮定したが、たとえばAIC法などで次数を決定しなければならない。また未知パラメータの推定手法としてほかに、最小2乗法の拡張された一般化最小2乗法、補助変数法、雑音特性を利用した最尤法⁶⁾などがある。どの手法が最も適切であるか種々の手法を用いて同定し、モデルの検証を十分に行う必要がある。

3) 制御手法

本手法では、制御手法としてレギュレータおよびオブザーバを用いた。設計パラメータであるレギュレータの極およびオブザーバの極をここでは適当に定め、そこには最適の概念が含まれていない。したがって、ある目的に応じて評価関数を定めそれを最小あるいは最大とするような最適設計パラメータを与えることも考えられる。

本手法では、まず事前にシステム同定の作業を行いその結果を用いて制御系を構成し、実際の制御を行っているときは過去の同定結果をそのまま用いている。したがって制御を行っている最中に制御対象の特性が変化した場合にはその対応策はない。そこでシステムの特性を把握しながら制御を行う適応制御を採用する

ことは今後の有望な方向である。適応制御は、従来の制御手法とオンラインの同定器を組み合わせた Self Tuning Regulator (STR)⁷⁾、またあらかじめ規範モデルを定めておいて、そのモデルに追従するように制御を行う Model Reference Adaptive Control (MRAC)⁸⁾などがある。

4) 発電システム全体の制御

本研究では全システムのごく一部すなわち作動流体流量システムにおいて、作動流体の蒸発器出口熱量を目標値に合わせるという制御であった。しかし、海洋温度差発電プラントに最終的に要求されることは、安定した発電出力を供給することである。このプラントの操作量は、温海水流量、冷海水流量、作動流体流量の3つで、この3つをうまく調節して最も効率良く運転を行い発電出力を一定にする制御が必要となる。このためには、現在手動で行っている G_H , G_C の自動化が必要であり、また多入出力系の理論⁹⁾の適用が必要である。

6. あとがき

本研究では、佐賀大学海洋エネルギー変換実験施設の海洋温度差発電実験プラント「伊万里2号機」の作動流体流量制御をパーソナルコンピュータ SORD M223を用いたデジタル制御によって達成させた。

本研究の経緯を述べると、昭和57年11月からの約半年はデジタル制御に必要な機器（流量計の電気信号化、アンプ）をとりそろえる準備期間として費やし、昭和58年5月からの半年間は

- 1) アルゴリズムの選出とそのプログラミング
- 2) プラントと制御機器の結果
- 3) 駆動部と検出部の特性把握
- 4) 作動流体流量システムの把握
- 5) デジタル制御実行

の手順で、一応の成功へと導いた。

本研究を通して、今後の研究計画として次下の項目が明確になった。

- 1) 作動流体流量のデジタル制御の高精度化
 - 昭和58年度の仕事のつづき—
 - 同定・制御理論の改良
 - 雑音除去
 - ポンプ特性をも考慮した同定
- 2) 動特性（システム同定）
 - プラントの機器ごとの動特性の把握—
- 3) 温水流量制御、冷水流量制御

- 課題1の制御方式を別の制御対象へ応用—
- 4) 作動流体・温水・冷水の流量同時制御
 - 多入力多出力同定・制御理論の適用—
- 5) 発電全システムの制御
 - タービン・発電機も含めた制御—
- 6) 遠隔制御
 - 佐賀大学のSORDで伊万里のTOSBACを動かして制御—

謝辞 本研究にあたり、貴重な助言と実験に御協力頂いた、佐賀大学理工学部海洋エネルギー変換実験施設の中岡勉助手と佐賀大学理工学部電気工学科の西田茂人助手、ならびに実験の手助けを頂いた生産機械工学科伝熱工学講座と電気工学科制御工学講座の大学院生および卒研学生諸君に感謝の意を表します。

さらにプログラムIDとプログラムCORの中のプログラムミスを見つけて、プログラムの一部修正をして頂いた電気工学科卒研学生（現在 多久工業高校教員）の江頭成人氏に感謝します。

参 考 文 献

- 1) 上原, 海洋温度差発電読本, オーム社 (昭57)
- 2) 上原 ほか3名, ダブルフルーテッド管形熱交換器を用いた海洋温度差発電の研究, 日本機械学会論文集 49-442, B (昭58) 1214.
- 3) 相良他, システム同定, 計測自動制御学会 (昭56)
- 4) 古田, デジタル制御と制御理論, コンピュートローラ No 2 (昭58)
- 5) 木村, デジタル信号処理と制御, 昭晃堂 (昭57)
- 6) 中溝, 線形離散時間システムの同定手法 I, II シ

- システムと制御25-8, 25-9 (昭56), 476, 551.
- 7) R. Isermann: Parameter Adaptive Control Algorithms. A Tutorial. Automatica 18-5, (1982), 513.
- 8) I. D. Landeu and 富塚, 適応制御システムの理論と実際, オーム社 (昭56)

付録: プログラムと使用説明

- A. プログラム SA (作動流体流量システムの同定のためのデータ採取)
- B. プログラム ID (作動流体流量システムの同定)
- C. プログラム COR (作動流体流量システムの制御)

付録 A プログラム SA

(A-1) プログラムの機能 海洋温度差発電プラントからの熱電対, 流量計の信号電圧を A/D 変換器を通して計算機にとりこむ。この電圧を T_{in} , T_{ho} , T_{vo} , G_H , G_F , Q_H , Q_F の物理量に換算して, データファイルを作成する。

(A-2) プログラムの使用手順

- 1) "NAME OF EXPERIMENT=" (E 1) この実験の名前 (6文字以内) を入力する。この名前でデータファイルが作成される。
- 2) "SAMPLING TOTAL TIME TO(sec)=" (300) サンプルング総時間を入力する。
- 3) "SAMPLING TIME T(sec)=" (2) サンプルング時間を入力する。TO/T がデータの個数となる。
- 4) "NUMBER OF DATA FOR REMOVE NOISE=" (25) 雑音除去のための加算平均のフィルタのデータの個数を入力する。
- 5) ピッと音がして <SAMPLING START STRIKE CONT> を表示し, CONT を押すとサンプリングが開始する。
- 6) ピッと音がして <END OF SAMPLING> を表示して, サンプリングが終わる。
- 7) あとは自動的に, T_{in} , T_{ho} , G_H , T_{vo} , G_F , Q_H , Q_F のデータファイルを作成する。

```

10 / SA
20 / SAMPLING
30 VCLEAR
40 ON ERROR GOTO 1120
50 GOTO 360
60 / A/D CONVERTOR
70 FOR I = 0 TO 5
80 LET Z(I) = 0
90 NEXT I
100 CALL #5, X, P
110 FOR I = 0 TO 5
120 FOR J = 0 TO 24
130 LET Z(I) = Z(I)+X(6*J+I)
140 NEXT J
150 LET Z(I) = 0.0025*(Z(I)/25)-5.12
160 NEXT I
170 / AMP.COEFFICIENTS
180 FOR I = 0 TO 2
190 LET Z(I) = 1000*(Z(I)-B(I))/G(I)
200 NEXT I
210 / THERMAL CAL
    
```

```

220     FOR I = 0 TO 2
230         LET Z9 = A(I,3)+Z(I)*A(I,4)
240         LET Z9 = A(I,2)+Z(I)*Z9
250         LET Z9 = A(I,1)+Z(I)*Z9
260         LET Z(I) = A(I,0)+Z(I)*Z9
270     NEXT I
280 / FLOW CAL
290     LET G1 = 24*(2*Z(3)+2*Z(4)-2)
300     LET G2 = 6.25*(2*Z(5)-0.87)
310 /
320     LET Q1 = G1*(Z(0)-Z(1))
330     LET L = 48.9-0.18855*Z(2)-0.0012*Z(2)*Z(2)
340     LET Q2 = G2*L
350     RETURN
360 / MAIN
370     INPUT "NAME OF EXPERIMENT = " , F1$
380     INPUT "SAMPLING TOTAL TIME (sec) T0= " , T0
390     INPUT "SAMPLING TIME (sec) T= " , T
400     LET N = T0/T
410     PRINT "NUMBER OF SAMPLING= " ; N
420     PRINT "N= " ; N
430     DIM Z(5) , X(149) , B(2) , G(2) , A(2,4) , P(10)
440     DIM C(8,N)
450 / AMP. CONSTANT VALUE
460 / BIAS B(0)-B(2), GAIN G(0)-G(2)
470     LET B(0) = 0.014
480     LET B(1) = 0.029
490     LET B(2) = 0.012
500     LET G(0) = 941.96
510     LET G(1) = 939.21
520     LET G(2) = 938.99
530 / THERMAL COEFFICIENTS FOR mV-°C
540 / THI
550     LET A(0,0) = -0.001629
560     LET A(0,1) = 25.24
570     LET A(0,2) = -0.3685
580     LET A(0,3) = -0.7
590     LET A(0,4) = 0.1619
600 / THO
610     LET A(1,0) = 0.0241
620     LET A(1,1) = 25.14
630     LET A(1,2) = 0.4264
640     LET A(1,3) = -0.7152
650     LET A(1,4) = 0.1634
660 / TVO
670     LET A(2,0) = -0.006699
680     LET A(2,1) = 25.39
690     LET A(2,2) = -0.02065
700     LET A(2,3) = -0.452
710     LET A(2,4) = 0.1114
720 /
730     LET P(1) = 1
740     LET P(2) = 150
750     LET P(3) = 4
760     LET P(4) = 0
770     LET P(5) = 0
780     LET P(6) = 1
790     LET P(7) = 2
800     LET P(8) = 3
810     LET P(9) = 4
820     LET P(10) = 5
830     PRINT CHR$(7)
840     PRINT "SAMPLING START STRIKE CONT"
850     STOP
860     PRINT "    TIME        THI        THO        TVO        GH        GF

```



```

QH      QF      Gf"
870    / SAMPLING
880      LET T8 = TIME
890      LET C(0,0) = 0
900      FOR K = 0 TO N-1
910        LET T1 = TIME
920        LET T1 = T1+T-1
930        GOSUB 60
940        LET C(1,K) = Z(0)
:        LET C(2,K) = Z(1)
:        LET C(3,K) = Z(2)
:        LET C(4,K) = G1
:        LET C(5,K) = G2
:        LET C(6,K) = Q1
:        LET C(7,K) = Q2
:        LET C(8,K) = 0
950      PRINT USING "#####.##  #####.##  #####.##  #####.##  #####.##
#####.##  #####.##  #####.##  #####.##" ; C(0,K) , C(1,K) , C(2,K)
) , C(3,K) , C(4,K) , C(5,K) , C(6,K) , C(7,K) , C(8,K)
960      LET T2 = TIME UNTIL T2 > T1
970      LET C(0,K+1) = TIME-T8
980    NEXT K
990  / FILE
1000   PRINT "END OF SAMPLING"
1010   PRINT CHR$(7)
1020   RECORDSIZE #1 , Y(N-1)
1030   OPEN F1$ AS FILE 1 RECORD CONTENTS 9
1040   FOR I = 0 TO 8
1050     FOR J = 0 TO N-1
1060       LET Y(J) = C(I,J)
1070     NEXT J
1080     PUT #1 RECORD I
1090   NEXT I
1100   CLOSE 1
1110   END
1120 / ERROR CHECK
1130   PRINT CHR$(7)
1140   CLOSE 1
1150   PRINT "ERR= " ; ERR , "  ERRL= " ; ERRL
1160   END

```

付録B プログラムID

(B-1)プログラムの機能 プログラムSAで採取したデータをもとに、任意の入出力データの間係をパルス伝達関数でモデル化する。パルス伝達関数の未知パラメータを最小2乗法で推定する。任意の入出力データのグラフ出力を行う。

(B-2)プログラムの使用手順

- 1) "NAME OF FILE=" (E 1) プログラムSAで採取したデータファイル名を入力する。
- 2) "NUMBER OF DATA=" (150) データ個数を入力する。
- 3) "INTERVAL=" (2) サンプリング時間(sec)を入力する。
- 4) <TIME : I = 0>
 <THI : I = 1>
 <THO : I = 2>
 <TVO : I = 3>
 <GH : I = 4>
 <GF : I = 5>
 <QH : I = 6>
 <QF : I = 7>

を表示して、この中から入力と出力を選択する。

- 5) "INPUT=", "I=" (GF), (5) 表示されたものから入力の名前(GF)とそのレコード番号(I=5)を入力する。
- 6) "OUTPUT=", "I=" (QF), (6) 表示されたものから出力の名前とそのレコード番号を入力する。
- 7) 入出力データのグラフスケールを入力する。
 "QH AND QF MAX=" (500) Q_H と Q_F の最大スケールを入力する。
 "GF MAX=" (20) G_F の最大スケールを入力する。
 "TOTAL TIME TO=" (300) 時間軸の最大スケールを入力する。
- 8) 入出力データをグラフ表示し、ハードコピーが必要なときはセンスキー1を押す。そのあとCONTを押す。
- 9) "GRAPH AGAIN? YES=1, NO=0, I=" (1 or 0) グラススケールの変更があるときはI=1で7)へ戻る。I=0で次へ進む。
- 10) "ORDER OF A(Z-1)=" (1) "ORDER

- <Gf ;I=8>
 ス伝達関数の次数を入力し、パラメータ推定の計算に入る。
- 11) 未知パラメータの推定結果を $a_1, a_2, \dots, a_m, b_0, b_1, \dots, b_m$ の順に表示する。
- 12) "STOP AT THE LINE NO 960"
 CONTによってプログラムが再開し、モデルの出力 \hat{Q}_F を算出する。
- 13) 7)~9)の手順で、GFに対するモデルの出力

```

10  /ID
20  /IDENTIFICATION 1INPUT - 1 OUTPUT
30  ON ERROR GOTO 1430
40  PRINT "ID DATA=N IDENTIFICATION SI/SO "
50  INPUT "NAME OF FILE= " , F1$
60  INPUT "NUMBER OF DATA= " , M
70  INPUT "INTERVAL= " , H
80  PRINT "TIME:I=0"
90  PRINT "THI :I=1"
100 PRINT "THO :I=2"
110 PRINT "TVO :I=3"
120 PRINT "GH :I=4"
130 PRINT "GF :I=5"
140 PRINT "QH :I=6"
150 PRINT "QF :I=7"
160 PRINT "Gf :I=8"
170 DIM U(M-1) , Y(M-1) , C(2,M-1) , Q$(40) , A(7,8) , X0(7)
180 DIM Y2(M-1) , L(7)
190 RECORDSIZE #1 , Z(M-1)
200 OPEN F1$ AS FILE 1
210 INPUT "INPUT = " ; U1$ , "I= " ; I
220 GET #1 RECORD I
230 FOR J = 0 TO M-1
240   LET U(J) = Z(J)
250 NEXT J
260 INPUT "OUTPUT= " ; Y1$ , "I= " ; I
270 GET #1 RECORD I
280 FOR J = 0 TO M-1
290   LET Y(J) = Z(J)
300 NEXT J
310 INPUT "DESIRE= " ; D1$ , "I= " ; I
320 GET #1 RECORD I
330 FOR J = 0 TO M-1
340   LET C(1,J) = Z(J)
350 NEXT J
360 CLOSE 1
370 /PLOT
380 FOR J = 0 TO M-1
390   LET C(0,J) = Y(J)
400   LET C(2,J) = U(J)
410 NEXT J
420 GOSUB 1620
430 /IDENTIFICATION
440 INPUT " ORDER OF A(Z-1)= " ; P1
450 INPUT " ORDER OF B(Z-1)= " ; Q1
460 LET E9 = 0.1E-14
470 LET N0 = P1+Q1+1
480 LET M0 = P1+Q1+2
490 FOR I = 0 TO N0
500   FOR J = 0 TO M0
510     LET A(I,J) = 0
520   NEXT J
530 NEXT I

```

OF B(Z-1)=" (1) モデル化するパルのグラフを描く。

- 14) "PRINT OUT A(Z-1)A(0), B(Z-1)B(0)"
 YES=1, NO=0 "I=" (1 or 0)
 前に求めた推定結果およびAICをプリンタに出力するかどうかをきいてくる。
- 15) 終了。

```

540   FOR I = 1 TO P1
550     FOR J = 1 TO P1
560       FOR K = 3 TO M-1
570         LET A(I,J) = A(I,J)+Y(K-I)*Y(K-J)
580       NEXT K
590     NEXT J
600   NEXT I
610   FOR I = 1 TO Q1+1
620     FOR J = 1 TO Q1+1
630       FOR K = 3 TO M-1
640         LET A(P1+I,P1+J) = A(P1+I,P1+J)+U(K-I+1)*U(K-J+1)
650       NEXT K
660     NEXT J
670   NEXT I
680   FOR I = 1 TO Q1+1
690     FOR J = 1 TO P1
700       FOR K = 3 TO M-1
710         LET A(P1+I,J) = A(P1+I,J)+U(K-I+1)*Y(K-J)
720         LET A(J,P1+I) = A(J,P1+I)+Y(K-J)*U(K-I+1)
730       NEXT K
740     NEXT J
750   NEXT I
760   FOR I = 1 TO P1
770     FOR K = 3 TO M-1
780       LET A(I,M0) = A(I,M0)+Y(K)*Y(K-I)
790     NEXT K
800   NEXT I
810   FOR I = 1 TO Q1+1
820     FOR K = 3 TO M-1
830       LET A(P1+I,M0) = A(P1+I,M0)+U(K-I+1)*Y(K)
840     NEXT K
850   NEXT I
860   GOSUB 1490
870   FOR I = 1 TO P1
880     LET L(I) = -A(I,M0)
890   NEXT I
900   FOR I = 1 TO Q1+1
910     LET L(P1+I) = A(P1+I,M0)
920   NEXT I
930   FOR I = 1 TO N0
940     PRINT L(I)
950   NEXT I
960   PRINT CHR$(7)
:   STOP
970 /MODEL
980   FOR K = 0 TO 3
990     LET Y2(K) = Y(K)
1000  NEXT K
1010  FOR K = 3 TO M-1
1020    LET S1 = 0
1030    LET S2 = 0
1040    FOR I = 1 TO P1
1050      LET S1 = S1+L(I)*Y2(K-I)
1060    NEXT I
1070    FOR I = 1 TO Q1+1
1080      LET S2 = S2+L(P1+I)*U(K-I+1)
1090    NEXT I
1100    LET Y2(K) = S2-S1
1110  NEXT K
1120 /AIC
1130  LET S1 = 0
1140  FOR K = 0 TO M-1
1150    LET S0 = ABS(Y(K)-Y2(K))
1160    LET S1 = S1+S0*S0

```

```

1170     NEXT K
1180     LET A4 = M*LN(S1/M)+2*(P1+Q1)
1190 /PLOT
1200     FOR J = 0 TO M-1
1210         LET C(0,J) = Y2(J)
1220         LET C(2,J) = U(J)
1230     NEXT J
1240     GOSUB 1620
1250 /PRINT
1260     INPUT " PRINT OUT  A(Z-1)...A(0) & B(Z-1)...B(0) ?  YES=1,
NO=0  I= " ; I
1270     IF I <> 1 THEN GOTO 1400
1280     OPEN "SOUTA" AS FILE 3
1290     PRINT #3
1300     FOR I = 1 TO P1
1310         PRINT #3 , TAB(16) ; "A" ; I ; "=" ;
1320         PRINT #3 USING "##.#####^" ; L(I)
1330     NEXT I
1340     FOR I = 0 TO Q1
1350         PRINT #3 , TAB(16) ; "B" ; I ; "=" ;
1360         PRINT #3 USING "##.#####^" ; L(P1+I+1)
1370     NEXT I
1380     PRINT #3 , TAB(16) ; "AIC = " ; A4
1390     CLOSE 3
1400     CLOSE 2
1410     CLOSE 1
1420     END
1430     CALL #11 , 0 , 5
1440     CLOSE 1
1450     CLOSE 2
1460     CLOSE 3
1470     PRINT "ERR= " ; ERR , "ERRL= " ; ERRL
1480     END
1490 ////////////////////////////////////////////////////////////////////
: /      subroutine sweeps
: ////////////////////////////////////////////////////////////////////
//////////////////////////////////////////////////////////////////

//////////////////////////////////////////////////////////////////
1500     IF NO >= 2 AND M0 >= 3 AND NO < M0 AND E9 > 0 THEN
:         LET IO = 0
:         LET M1 = ABS(A(1,1))
:     ELSE
:         LET IO = 30000
:         RETURN
1510     FOR I = 1 TO NO
:         FOR J = 1 TO NO
:             IF M1 < ABS(A(I,J)) THEN
:                 LET M1 = ABS(A(I,J))
1520         NEXT J
:     NEXT I
:     FOR I = 1 TO NO
:         LET X0(I) = I
:     NEXT I
1530     FOR K = 1 TO NO
:         LET M2 = ABS(A(K,K))
:         LET R0 = K
:         LET C0 = K
:         FOR J = K TO NO
:             FOR I = K TO NO
1540                 IF M2 >= ABS(A(I,J)) THEN GOTO 1550
:                 ELSE
:                     LET M2 = ABS(A(I,J))

```

```

:           LET RO = I
:           LET CO = J
1550        NEXT I
:         NEXT J
:         IF M2 < M1*E9 THEN
:           LET IO = K
:           RETURN
1560        FOR I = 1 TO NO
:          LET M2 = A(I,K)
:          LET A(I,K) = A(I,CO)
:          LET A(I,CO) = M2
:        NEXT I
1570        FOR I = K TO MO
:          LET M2 = A(K,I)
:          LET A(K,I) = A(RO,I)
:          LET A(RO,I) = M2
:        NEXT I
1580        LET I = X0(K)
:        LET X0(K) = X0(CO)
:        LET X0(CO) = I
:        LET KO = K+1
:        LET AO = A(K,K)
:        FOR I = KO TO MO
:          LET A(K,I) = A(K,I)/AO
:        NEXT I
1590        FOR I = 1 TO NO
:          IF K = I THEN GOTO 1600
:          ELSE
:            LET A2 = A(I,K)
:            IF A2 = 0 THEN GOTO 1600
:            ELSE
:              FOR J = KO TO MO
:                LET A(I,J) = A(I,J)-A2*A(K,J)
:              NEXT J
1600        NEXT I
:        NEXT K
:        LET N1 = NO+1
:        FOR K = N1 TO MO
:          FOR I = 1 TO NO
:            LET JO = X0(I)
:            LET A(JO,NO) = A(I,J)
:          NEXT I
1610        FOR I = 1 TO NO
:          LET A(I,J) = A(I,NO)
:        NEXT I
:        NEXT K
:        RETURN
1620 /SUBROUTINE PLOT
1630 INPUT "QH AND QF MAX= " ; M8
1640 INPUT "GF MAX= " ; M9
1650 INPUT "TOTAL TIME TO= " ; TO
1660 OPEN "SOUTA" AS FILE 2
1670 CALL #11 , 0 , 0
1680 CALL #11 , 1
1690 /MIDASHI
1700 LET Q$ = "DATA;" + F1$ + " INPUT;" + U1$ + " OUTPUT;" + Y1$
1710 CALL #11 , 9 , 300 , 245 , 0 , Q$
1720 LET Q$ = "INTERVAL;" + NUM$(H) + " SEC" + " SAMPLE;" + NUM$(M)
1730 CALL #11 , 9 , 300 , 235 , 0 , Q$
1740 /JIKU
1750 /TATE
1760 CALL #11 , 6 , 20 , 20 , 230 , 1
1770 CALL #11 , 6 , 490 , 20 , 230 , 1
1780 LET S = M8/5

```

```

1790 LET S1 = 230/5
1800 FOR I = 0 TO 5
1810 LET K = I*S1+20
1820 CALL #11 , 5 , 20 , K , -2 , 1
1830 LET S9$ = NUM$(S*I)
1840 LET K = I*S1+20-3
1850 CALL #11 , 9 , 0 , K , 0 , S9$
1860 NEXT I
1870 /
1880 LET S = M9/5
1890 LET S1 = 230/5
1900 FOR I = 0 TO 5
1910 LET K = I*S1+20
1920 CALL #11 , 5 , 490 , K , 2 , 1
1930 LET S9$ = NUM$(S*I)
1940 LET K = I*S1+20-3
1950 CALL #11 , 9 , 495 , K , 0 , S9$
1960 NEXT I
1970 /YOKO
1980 CALL #11 , 5 , 20 , 20 , 470 , 1
1990 LET S = T0/5
2000 LET S1 = 470/5
2010 FOR I = 0 TO 5
2020 LET K = I*S1+20
2030 CALL #11 , 6 , K , 20 , -2 , 1
2040 LET S9$ = NUM$(S*I)
2050 LET K = I*S1+20-5
2060 CALL #11 , 9 , K , 7 , 0 , S9$
2070 NEXT I
2080 /PLOT
2090 FOR I = 0 TO 1
2100 FOR J = 0 TO M-1
2110 LET X9 = INT(470*J/(M-1)+20)
2120 LET Y9 = INT(230*C(I,J)/M8+20)
2130 IF J = 0 THEN
: CALL #11 , 4 , X9 , Y9 , 0
: ELSE
: CALL #11 , 4 , X9 , Y9 , 1
2140 NEXT J
2150 NEXT I
2160 /
2170 FOR J = 0 TO M-1
2180 LET X9 = INT(470*J/(M-1)+20)
2190 LET Y9 = INT(230*C(2,J)/M9+20)
2200 IF J = 0 THEN
: CALL #11 , 4 , X9 , Y9 , 0
: ELSE
: CALL #11 , 4 , X9 , Y9 , 1
2210 NEXT J
2220 PRINT CHR$(7)
: STOP
2230 IF INP(212) = 1 THEN
: CALL #14 , 2 , 1
2240 CALL #11 , 0 , 5
2250 CLOSE 2
2260 INPUT " GRAPH AGAIN ? YES=1, NO=0 I= " ; I
2270 IF I = 1 THEN GOTO 1620
2280 RETURN

```

付録C プログラムCOR

(C-1) プログラムの機能 作動流体の蒸発器出口熱量を目標値と一致させるように作動流体の流量を調節する。

制御時間中の入力（作動流体流量）と出力（作動流体蒸発器出口熱量）のグラフを出力する。

制御時間中の T_{H1} , T_{H0} , T_{V0} , G_H , G_F , Q_H , Q_F , G_F のデータファイルを作成する。

(C-2) プログラムの使用手順

- 1) "NAME OF EXPERIMENT=" (E 2) この実験の名前(6文字以内)を入力する。後でこの名前でデータファイルがつけられる。
- 2) "CONTROL TOTAL TIME TO (sec)=" (100) 制御総時間を入力する。
- 3) "SAMPLING TIME T (sec)=" (2) 制御間隔を入力する。TO/Tが制御段数となる。
- 4) "DESIRE QD=" (250) 作動流体の蒸発器出口熱量の目標値を入力する。
- 5) "NUMBER OF DATA TO REMOVE NOISE=" (25) 雑音除去のための加算平均のデータ個数を入力する。
- 6) "POLE OF REGULATOR R1=" (0.7) レギュレータの極を指定する。
- 7) "POLE OF REGULATOR R2=" (0.7) レギュレータのもう1つの極を指定する。
- 8) "POLE OF OBSERVER R3=" (0.5) オブザーバの極を指定する。
- 9) "U=" (0)
"Y=" (0)
"V=" (0)
"X=" (0)

制御プログラムを駆動するための入力U, 出力Y,

目標値と出力の誤差V, 状態変数Xの初期値を入力する。

- 10) ビツと音がして <CONTROL START STRIKE CONT> を表示し, CONT を押すと制御が始まる。
- 11) ビツと音がして <END OF CONTROL> を表示し, 制御が終わる。(500)
- 12) "QH AND QF MAX=" (500) Q_H と Q_F の最大スケールを入力する。
- 13) "GF MAX=" (20) G_F の最大スケールを入力する。
- 14) 制御結果のグラフを表示し, ハードコピーが必要ときはセンスキー1を押す。
- 15) "GRAPH AGAIN? YES=1, NO=0 I=" (1 or 0) グラフスケールの変更があるときはI=1で12)へ戻る。I=0で次へ進む。
- 16) "PUT FILE? YES=1, NO=0, I=" (1 or 0) データファイルを残すならI=1を入力し, 残さないならI=0で次へ進む。
- 17) "PRINT OUT? YES=1, NO=0, I=" (1 or 0) データをプリント出力させるならI=1, 出力しないならI=0で終了する。

```

100 / COR
110 / OTEC CONTROL
120 VTCLEAR
130 VCLEAR
140 ON ERROR GOTO 2020
150 / MAIN
160 INPUT "NAME OF EXPERIMENT=" ; F9$
170 INPUT "CONTROL TOTAL TIME (sec) TO=" , TO
180 INPUT "SAMPLING TIME (sec) T=" , T
190 INPUT "DESIRE QD=" , Q9
200 INPUT "NUMBER OF DATA FOR REMOVE NOISE=" ; N9
210 LET N = TO/T
220 PRINT "NUMBER OF RECURSIVE=" ; N
230 LET N8 = 6*N9-1
240 DIM Z(5) , X9(N8) , B(2) , G(2) , A(2,4) , P(10) , Q$(40)
250 DIM C(8,N)
260 / SYSTEM
270 LET A1 = -0.790682
280 LET B0 = 44.7158
290 LET B1 = -35.2835
300 LET P1 = -A1
310 LET P2 = B1-A1*B0
320 LET P3 = 1
330 LET P4 = B0
340 PRINT "A1=" ; A1 ; " B0=" ; B0 ; " B1=" ; B1
350 / REGULATOR AND OBSERVER
360 INPUT " POLE OF REGULATOR R1=" ; R1
370 INPUT " POLE OF REGULATOR R2=" ; R2
380 INPUT " POLE OF OBSERVER R3=" ; R3
390 / FEED BACK AND OBSERVER PARAMETER
400 LET F2 = (R1+R2-R1*R2-1)/(P4-(P1*P4-P2*P3))
410 LET F1 = ((R1+R2-P1-1)-P4*F2)/P2
420 LET F3 = (R3-P1)/P3
430 / AMP. CONSTANT VALUE
440 / BIAS B(0)-B(2), GAIN G(0)-G(2)
450 LET B(0) = 0.014
    
```

```

460     LET B(1) = 0.029
470     LET B(2) = 0.012
480     LET G(0) = 941.96
490     LET G(1) = 939.21
500     LET G(2) = 938.99
510   / THERMAL COEFFICIENTS FOR mV-°C
520   / THI
530     LET A(0,0) = -0.001629
540     LET A(0,1) = 25.24
550     LET A(0,2) = -0.3685
560     LET A(0,3) = -0.7
570     LET A(0,4) = 0.1619
580   / THO
590     LET A(1,0) = 0.0241
600     LET A(1,1) = 25.14
610     LET A(1,2) = 0.4264
620     LET A(1,3) = -0.7152
630     LET A(1,4) = 0.1634
640   / TVO
650     LET A(2,0) = -0.006699
660     LET A(2,1) = 25.39
670     LET A(2,2) = -0.02065
680     LET A(2,3) = -0.452
690     LET A(2,4) = 0.1114
700   /
710     LET P(1) = 1
720     LET P(2) = N9*6
730     LET P(3) = 4
740     LET P(4) = 0
750     LET P(5) = 0
760     LET P(6) = 1
770     LET P(7) = 2
780     LET P(8) = 3
790     LET P(9) = 4
800     LET P(10) = 5
810     INPUT "U= " , U
820     INPUT "Y= " , Y
830     INPUT "V= " , V
840     INPUT "X= " , X
850     PRINT CHR$(7)
860     PRINT "CONTROL START STRIKE CONT"
870     STOP
880     PRINT "   TIME      THI      THO      TVO      GH      GF
QH      QF      Gf"
890   / CONTROL
900     LET T8 = TIME
910     LET C(0,0) = 0
:     LET D9 = 168
920     FOR K = 0 TO N-1
930       LET T1 = TIME+T-1
940       OUT 17 , D9
950       FOR I = 0 TO 5
:         LET Z(I) = 0
:       NEXT I
:       CALL #5 , X9 , P
:       FOR I = 0 TO 5
:         FOR J = 0 TO N9-1
:           LET Z(I) = Z(I)+X9(6*J+I)
:         NEXT J
:       LET Z(I) = 0.0025*(Z(I)/N9)-5.12
:     NEXT I
:     FOR I = 0 TO 2
:       LET Z(I) = 1000*(Z(I)-B(I))/G(I)
:     NEXT I

```



```

:     FOR I = 0 TO 2
:         LET Z9 = A(I,3)+Z(I)*A(I,4)
:         LET Z9 = A(I,2)+Z(I)*Z9
:         LET Z9 = A(I,1)+Z(I)*Z9
:         LET Z(I) = A(I,0)+Z(I)*Z9
:     NEXT I
:     LET G1 = 24*(2*Z(3)+2*Z(4)-2)
:     LET G2 = 6.25*(2*Z(5)-0.87)
:     LET Q1 = G1*(Z(0)-Z(1))
:     LET L = 48.9-0.18855*Z(2)-0.0012*Z(2)*Z(2)
960   LET Q2 = G2*L
:     LET V1 = V
:     LET X1 = X
:     LET U1 = G2
:     LET Y1 = Q2
:     LET E = Y1-Q9
:     LET V = V1+F2*E
:     LET X = P1*X1+P2*U1-F3*(Y1-P3*X1-P4*U1)
:     LET U = V+F1*X
970   IF U < 3 THEN
:       LET U = 3
:     ELSE
:       IF U > 8 THEN
980         LET U = 8
:       LET V9 = -0.0446*U*U+1.746*U-0.06
:       LET V9 = (2*V9)/3
:       LET D9 = (V9+10.24)*12.5
:       OUT 17 , D9
990   LET C(1,K) = Z(0)
:     LET C(2,K) = Z(1)
:     LET C(3,K) = Z(2)
:     LET C(4,K) = G1
:     LET C(5,K) = G2
:     LET C(6,K) = Q1
:     LET C(7,K) = Q2
:     LET C(8,K) = U
1000  PRINT USING "####.##  ####.##  ####.##  ####.##  ####.##
####.##  ####.##  ####.##  ####.##" ; C(0,K) , C(1,K) , C(2,K)
) , C(3,K) , C(4,K) , C(5,K) , C(6,K) , C(7,K) , C(8,K)
1010  LET T2 = TIME UNTIL T2 > T1
1020  LET C(0,K+1) = TIME-T8
1030  NEXT K
1040  PRINT "END OF CONTROL"
1050  PRINT CHR$(7)
1060  STOP
1070  /
1080  /GRAPH
1090  PRINT "GRAPH"
1100  INPUT "QH AND QF MAX= " , M8
1110  INPUT "GF MAX= " , M9
1120  OPEN "SOUTA" AS FILE 2
1130  CALL #11 , 0 , 0
1140  CALL #11 , 1
1150  /MIDASHI
1160  LET Q$ = "DATA;" + F9$ + " INPUT;GF OUTPUT;QF"
1170  CALL #11 , 9 , 300 , 245 , 0 , Q$
1180  LET Q$ = "INTERVAL;" + NUM$(T) + " SEC" + " SAMPLE;" + NUM$(N)
1190  CALL #11 , 9 , 300 , 235 , 0 , Q$
1200  /JIKU
1210  /TATE
1220  CALL #11 , 6 , 20 , 20 , 230 , 1
1230  CALL #11 , 6 , 490 , 20 , 230 , 1
1240  LET S = M8/5

```

```

1250 LET S1 = 230/5
1260 FOR I = 0 TO 5
1270 LET K = I*S1+20
1280 CALL #11 , 5 , 20 , K , -2 , 1
1290 LET S2$ = NUM$(S*I)
1300 LET K = I*S1+20-3
1310 CALL #11 , 9 , 0 , K , 0 , S2$
1320 NEXT I
1330 LET S = M9/5
1340 LET S1 = 230/5
1350 FOR I = 0 TO 5
1360 LET K = I*S1+20
1370 CALL #11 , 5 , 490 , K , 2 , 1
1380 LET S2$ = NUM$(S*I)
1390 LET K = I*S1+20-3
1400 CALL #11 , 9 , 495 , K , 0 , S2$
1410 NEXT I
1420 /YOKO
1430 CALL #11 , 5 , 20 , 20 , 470 , 1
1440 LET S = T0/5
1450 LET S1 = 470/5
1460 FOR I = 0 TO 5
1470 LET K = I*S1+20
1480 CALL #11 , 6 , K , 20 , -2 , 1
1490 LET S2$ = NUM$(S*I)
1500 LET K = I*S1+20-5
1510 CALL #11 , 9 , K , 7 , 0 , S2$
1520 NEXT I
1530 /PLOT
1540 FOR I = 6 TO 7
1550 FOR J = 0 TO N-1
1560 LET X9 = INT(470*J/(N-1)+20)
1570 LET Y9 = INT(230*C(I,J)/M8+20)
1580 IF J = 0 THEN
: CALL #11 , 4 , X9 , Y9 , 0
: ELSE
: CALL #11 , 4 , X9 , Y9 , 1
1590 NEXT J
1600 NEXT I
1610 /
1620 FOR J = 0 TO N-1
1630 LET X9 = INT(470*J/(N-1)+20)
1640 LET Y9 = INT(230*C(8,J)/M9+20)
1650 IF J = 0 THEN
: CALL #11 , 4 , X9 , Y9 , 0
: ELSE
: CALL #11 , 4 , X9 , Y9 , 1
1660 NEXT J
1670 PRINT CHR$(7)
1680 STOP
1690 IF INP(212) = 1 THEN
: CALL #14 , 2 , 1
1700 CALL #11 , 0 , 5
1710 CLOSE 2
1720 INPUT "GRAPH AGAIN ? YES=1,NO=0 I=" ; I
1730 IF I = 1 THEN GOTO 1080
1740 /
1750 /FILE
1760 INPUT "PUT FILE ? YES=1, NO=0 I=" ; I
1770 IF I = 0 THEN GOTO 1870
1780 RECORDSIZE #1 , A9(N-1)
1790 OPEN F9$ AS FILE 1 RECORD CONTENTS 9
1800 FOR I = 0 TO 8
1810 FOR J = 0 TO N-1

```

```

1820         LET A9(J) = C(I,J)
1830         NEXT J
1840         PUT #1 RECORD I
1850     NEXT I
1860     CLOSE 1
1870 /PRINT OUT
1880     INPUT "DATA PRINT OUT ? YES=1, NO=0 I=" ; I
1890     IF I = 0 THEN GOTO 1970
1900     OPEN "SOUTA" AS FILE 2
1910     PRINT #2 , "DATA NAME =" + F9$
1920     PRINT #2 , "    TIME      THI      THO      TVO      GH
GF      QH      QF      Gf"
1930     FOR I = 0 TO N-1
1940         PRINT #2 USING "####.##  ####.##  ####.##  ####.##  ####.##
####.##  ####.##  ####.##  ####.##" ; C(0,I) , C(1,I) , C(2
,I) , C(3,I) , C(4,I) , C(5,I) , C(6,I) , C(7,I) , C(8,I)
1950     NEXT I
1960     CLOSE 2
1970 /
1980     CALL #11 , 0 , 5
1990     CLOSE 1
2000     CLOSE 2
2010     END
2020 / ERROR CHECK
2030     PRINT CHR$(7)
2040     PRINT "ERR= " ; ERR , "ERRL= " ; ERRL
2050     END

```