

プレート式蒸発器の動特性と同定

上原春男*・中岡 勉*・伊藤武人**

Dynamic Characteristic and Identification of a Shell and Plate Type Evaporator

Haruo UEHARA, Tsutomu NAKAOKA, Taketo ITO

This paper describes the identification of dynamic characteristic of a shell and plate type evaporator for OTEC plates using the least squares method. Specially, the dynamic characteristic of boiling heat transfer coefficient is described.

Key words ; OTEC, identification, Dynamic characteristic, Boiling heat transfer coefficient, Least squares method, Shell and plate type evaporator

1. 緒 言

1973年のエネルギーショック以来、石油代替エネルギーの開発と省エネルギー技術の開発は、各方面で活発に行われている。これらの中で、海水の温度差エネルギーを利用して発電する海洋温度差発電に関する技術は、急速に進展している³⁾。

著者らは、海洋温度差発電に関する数多くの研究を行ってきた。そして、熱交換器にはプレート式を、作動流体にはアンモニアかフロン22を使用すると従来のシステムより高効率で、低コストの発電システムを建設し得ることを明らかにした^{1)~4)}。

ところで、これまでの海洋温度差発電に関する研究は、各機器の静特性に関するものが主体であり、動特性に関するものは、ほとんどない。静特性に関するデータを利用して最適設計されたシステムを更に効率よくするためには、各構成機器の動特性を把握しておくこと、発電全体の動特性を把握しておく必要がある。

著者らは、海洋温度差発電用プレート式蒸発器と凝縮器の動特性を明らかにするために、これまでのデータを用いて、シミュレーション・プラントを設計し、建設した。

本報は、このシミュレーション・プラントに用いられているプレート式蒸発器の動特性を測定し、その特

性の同定を行うことによって、プレート式蒸発器の最適運転条件を決定する方法を示したものである。

2. 記 号

- A : 伝熱面積
- g : 重力加速度
- T : 温度
- G : 流量
- α : 熱伝達係数
- α' : 式(2)から算出される熱伝達係数の推定値
- λ : 熱伝導率
- δ : 伝熱板の厚み
- G(z) : 伝達関数
- U(k) : 入力
- y(k) : 出力
- V(k) : 外乱
- Ω : 式(13)で表される行列
- θ : 式(12)で表される係数行列
- $\hat{\theta}$: 式(17)で表される推定された係数行列
- (添 字)
- b : 沸騰
- I : 入口
- O : 出口
- H : 温水
- F : 作動流体
- V : 蒸気
- W : 壁面

*佐賀大学理工学部付属海洋熱エネルギー変換実験施設

**佐賀大学理工学部研究科生産機械工学専攻

N : データ数

3. 実験装置

Fig. 1に実験装置のフロー線図を示す。作動流体にはフロン22を使用した。温水は、ボイラーで定めた温度まで加熱された後、温水タンクに貯められ、そこからポンプで蒸発器へ送り込まれる。作動流体は、作動流体タンクから、インバータ付きのポンプで蒸発器へ送り込まれ、ここで作動流体は沸騰する。発生した蒸気は、凝縮器に入り、凝縮された後、作動流体タンクへ戻される。

Fig. 2に、プレート式蒸発器の略図を、Photo. 1に外観の写真を示す。高さ約0.2m、幅0.8m、厚さ0.45mで100枚のプレートが使用されている。全重量は、1.1tonである。作動流体の液は、下方の孔よりポンプで送り込まれ、温水によって、加熱されて沸騰し一部は蒸気となり、未蒸発液と共に、上方より出る。蒸気と未蒸発液は、ドレンセパレータで分離され、蒸発器は凝縮器へ送られ、未蒸発液は、タンクから送られてきた過冷却の作動流体と混合され再び蒸発器に送り込まれる。この時、送り込まれた作動流体はすべて蒸発したと見なせる。一方温水は、上方から入って作動流体と

熱交換した後、下方へ流出する。

Photo. 2(a), (b)に、プレートの表面の写真を示す。Photo. 2(a)は、沸騰側で、表面に沸騰を促進するためのアルミ粉末が、溶射されている。Photo. 2(b)は、温水側の熱伝達の促進のために縦溝（フルート）と斜め溝（ドレンネッジ）が施されている。伝熱面の幅は、0.235m、有効伝熱面積長さは0.9m、伝熱板厚さは1.0mmで、有効伝熱面積（公称面積でアルミ粉末による凹凸は含まない）は、一枚当たり0.224m²で、総伝熱面積は、21.952m²である。測定に際しては、蒸発器の温水側及び、作動流体側の入口、出口の温度を測定するために、銅コンスタンタンシース熱電対を使用した。また、温水流量と作動流体流量はA/D変換器で測定した。

4. 実験方法

冷却水を凝縮器に通し、作動流体を一定流量だけ蒸発器へ送入した後、蒸発器に温水を一定流量通すと、作動流体は、蒸発器→凝縮器→タンク→ポンプ→蒸発器と循環する。これらの循環が、ほぼ定常になった後に、インバータを操作して、作動流体流量を変化させる。同時に、作動流体流量、蒸発温度、温水の入口温

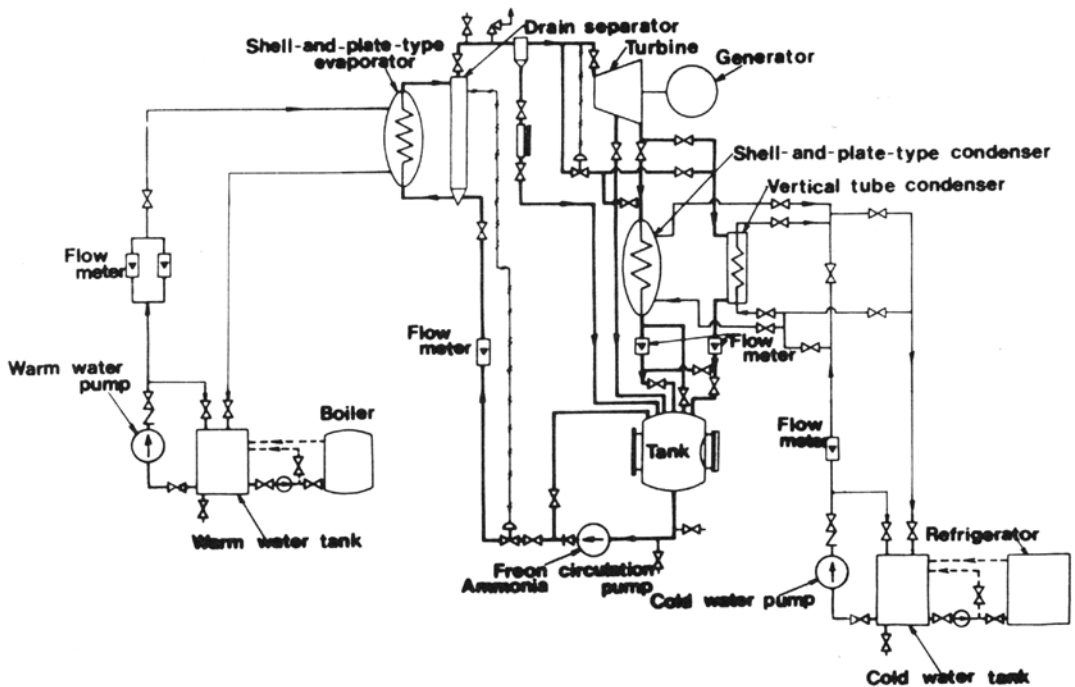


Fig. 1 Schematic flow diagram of the closed cycle OTEC power system.

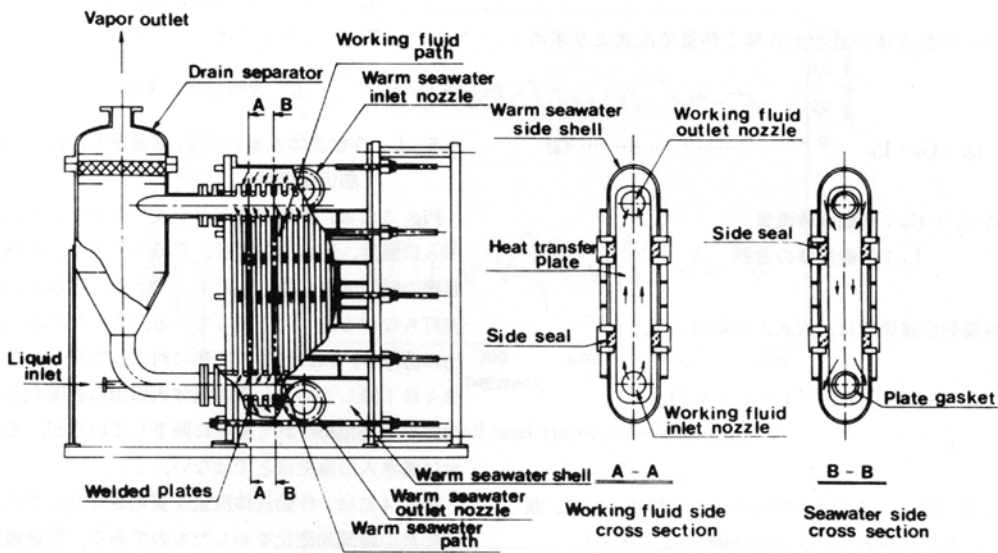


Fig. 2 Shell and plate type evaporator.

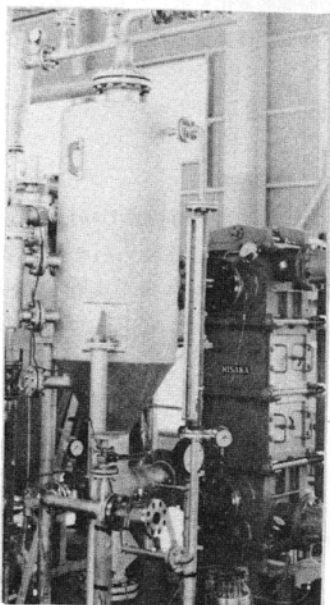


Photo. 1 Shell and plate type evaporator.

度、出口の温度等をサンプリング周期2秒で、連続300個、A/D変換器を通して、直接ミニコンに取り込む。

5. 熱通過係数と沸騰熱伝達係数

プレート式蒸発器の動特性を調べるために、本報では特に熱通過係数と沸騰熱伝達係数の時間的変化に着目した。

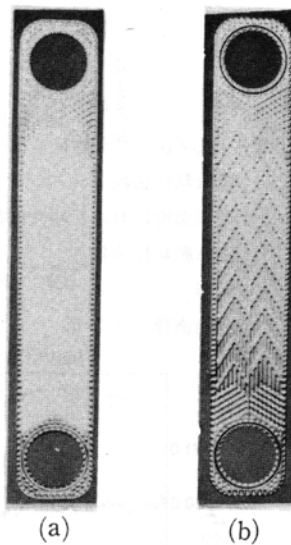


Photo. 2 Test plate.

熱通過係数は、次式で定義した。

$$U = Q_F / A \cdot \Delta T_m \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 ΔT_m は対数平均温度差で次式で定義した。

$$\Delta T_m = ((T_{H1} - T_{V0}) - (T_{H0} - T_{V1})) / \ln((T_{H1} - T_{V0}) / (T_{H0} - T_{V1})) \quad \dots\dots\dots (2)$$

Q_F は、作動流体が温水から奪う熱量で次式より求めた。

$$Q_F = G_F \cdot L_F \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 G_F : 作動流体流量
 L_F : 作動流体の潜熱

沸騰熱伝達係数は、次式より算出した。

$$1/\alpha_b = 1/U_F - (1/\alpha_H + \delta/\lambda_w) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 U_F は、式(1)より算出された実験値、 α_H は、温水側の熱伝達係数で、次式の経験式⁴⁾より求めた。

$$\alpha_H = 0.047 \cdot R_{eH}^{0.8} \cdot P_r^{1/3} \cdot (\mu_H/\mu_w)^{0.14} \quad (5)$$

ここで、

- $R_{eH} = V \cdot D_{eq} / \nu_H$: 温水側レイノルズ数
- μ_H : 温水粘性係数
- μ_w : 壁面温度における粘性係数
- ν_H : 温水動粘性係数
- δ : 板厚
- D_{eq} : 相当直径 (= 2 δ)

- λ_w : チタンの熱伝達率
- V : 温水流速

6. 実験結果と考察

6.1 作動流体流量と温度、熱通過係数および沸騰熱伝達係数

Fig. 3には、作動流体流量を変化させたときの、温水入口温度、温水出口温度、蒸気入口温度、蒸気出口温度の時間的変化を示したものである。温水入口は、波打ちながら徐々に下がっている。このために、温水出口温度は、入口温度の変動に対応して変化しながら徐々に下降している。作動流体入口出口温度も温水入口温度の変化につれて徐々に降下しているが、その割合は温水入口温度ほどではない。

Fig. 4には、作動流体流量を変化させたときの熱伝達係数の時間的変化を示したものである。熱通過係数は作動流体流量に比例した変化をしている。

Fig. 5は、作動流体流量を変化させたときの沸騰熱伝達係数の時間的変化を示したものである。沸騰熱伝達係数は、作動流体流量と同様な変化をしている。

6.2 同 定

6.2.1 問題設定

時刻 k における作動流体流量 $U(k)$ を入力信号、蒸発器における沸騰熱伝達係数 $y(k)$ を出力信号と見なすとき、実験に使用したプレート式蒸発器を Fig. 6 のブロック線図にモデル化する。このブロック線図は次

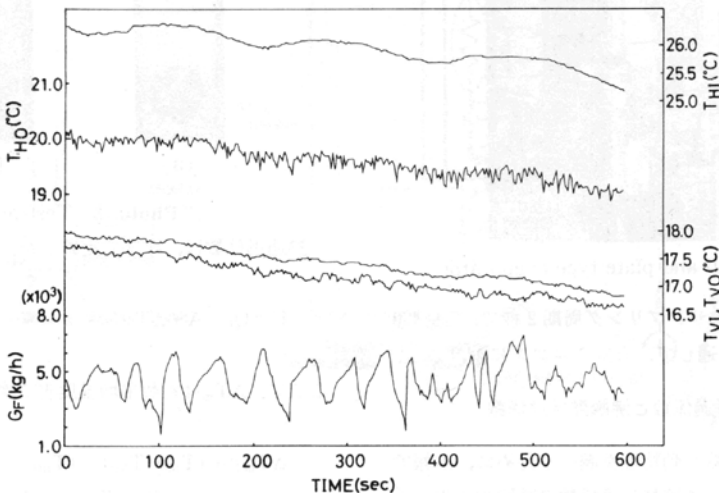


Fig. 3 Temperature of warm water and working fluid

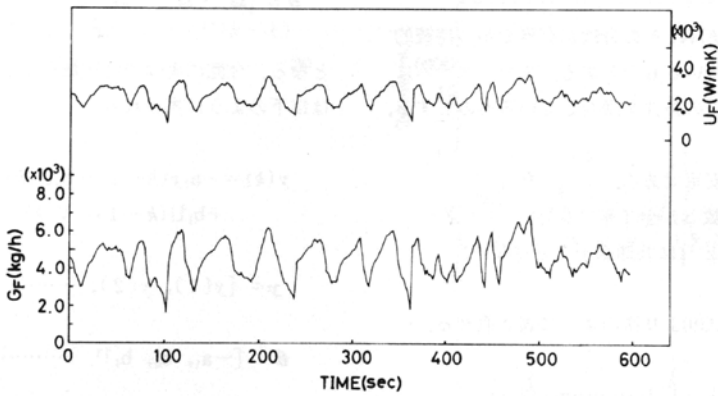


Fig. 4 Overall heat transfer coefficient

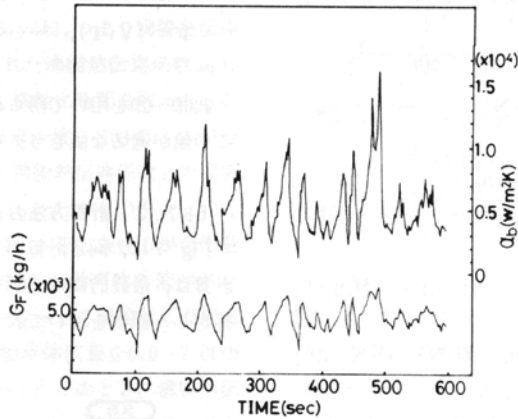


Fig. 5 Boiling heat transfer coefficient

式のようにも表せる。

$$y(k) = G(z) \cdot U(k) + V(k) \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで $y(k)$, $U(k)$ は時刻 k における出力と入力である。 $V(k)$ は平均 0, 分散 ρ^2 の白色雑音である。

式(6)の $G(z)$ は、システムの伝達関数で、このシステムモデルの次数を n 次とすると次式のように表せる。

$$G(z) = B(z^{-1}) / A(z^{-1}) \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_n z^{-n} \quad \dots\dots\dots (9)$$

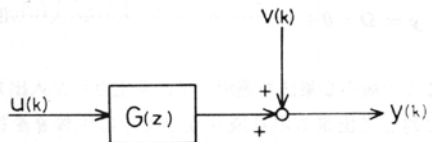


Fig. 6 Block diagram

である。

ただし、入力 $U(k)$ は、その分散が有界でかつ持続的
 励振条件を満たしているものとする。またシステムに
 ついても、次の三つの条件を満たしているものとする。

- 1) システムは安定である。
- 2) $B(z^{-1})$ の係数 b_i が全て零でない。
- 3) $A(z^{-1})$, $B(z^{-1})$ は共通因子をもたない。

式(6)は、式(7)～式(9)より次のように書き直せる。

$$y(k) = -a_1 y(k-1) - \dots - a_n y(k-n) + b_0 U(k) + \dots + b_n U(k-n) + V(k) \quad (10)$$

データ数を N とし、行列、ベクトルを次のように定
 義する。

$$y = [y(n) \quad \dots \quad y(N)]^T \quad (11)$$

$$\theta = [-a_1, -a_2, \dots, -a_n, b_1, b_2, \dots, b_n]^T \quad (12)$$

$$\Omega = \begin{bmatrix} y(n-1) & \dots & y(0) & U(n) & \dots & U(0) \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ y(N-1) & \dots & y(N-n) & U(N) & \dots & U(N-n) \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$V = [V(n), \dots, V(N)]^T \quad (14)$$

式(10)を式(11)～(14)を使って表すと次式のようなになる。

$$y = \Omega \cdot \theta + V \quad (15)$$

ここで最小 2 乗法を適用して、測定された入出力信
 号に対して出来る限り成り立つように係数 θ を推定
 する。すなわち最小 2 乗法の評価関数 J

$$J = V^T \cdot V = [y - \Omega \cdot \theta]^T \cdot [y - \Omega \cdot \theta] \quad (16)$$

を最小にするような $\hat{\theta}$ は、 $[\Omega^T \cdot \Omega]^{-1}$ が存在するならば、

$$\hat{\theta} = [\Omega^T \cdot \Omega]^{-1} \cdot \Omega^T \cdot y \quad (17)$$

となる。今回の実験では次数を 1 としたので式(10)～(14)
 は以下のように表される。

$$y(k) = -a_1 y(k-1) + b_0 U(k) + b_1 U(k-1) + V(k) \quad (18)$$

$$y = [y(1), y(2), \dots, y(N)]^T \quad (19)$$

$$\theta = [-a_1, b_0, b_1]^T \quad (20)$$

$$\Omega = \begin{bmatrix} y(0) & U(1) & U(0) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ y(N-1) & U(N) & U(N-1) \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$V = [V(1), \dots, V(N)]^T \quad (22)$$

式(18)～(22)を用いて得られる $\hat{\theta}$ は、推定値であるから、
 この値が適切な値を与えるかを検討する必要がある。

6.2.2 計算方法および計算結果

Fig. 7 は、同定計算のフローチャートである。この
 計算は、最終的には式(17)を求めることになっている。
 推定した係数を用いて表した式を以下に示す。

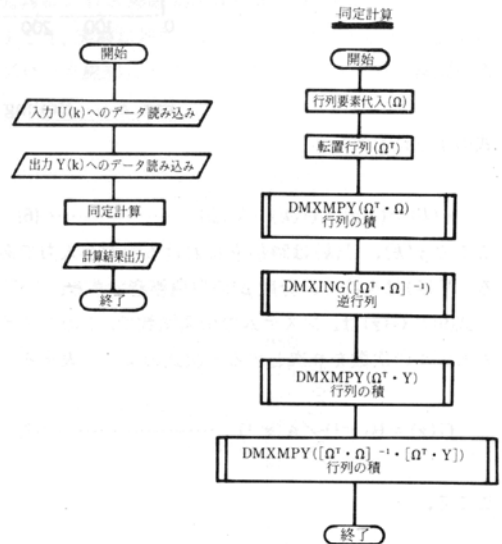


Fig. 7 Flow chart of identification

$$y(k) = -\hat{a}_1 y(k-1) + \hat{b}_0 U(k) + \hat{b}_1 U(k-1) \quad \dots\dots\dots (23)$$

ここで、

$$-\hat{a}_1 = 0.829$$

$$\hat{b}_0 = 1.919$$

$$\hat{b}_1 = -1.717$$

である。

6.2.3 計算結果の検証とシミュレーション

Fig. 8 は、推定値が適切であるか否かを検証するために縦軸に式(23)から得られる $y(k)$ 、つまり沸騰熱伝達係数 α_b' と実験値から算出された沸騰熱伝達係数 α_b および作動流体流量 G_F を取り、横軸に時間を取ったものである。図では α_b と α_b' はほぼ一致していることが分かる。次に、作動流体流量と沸騰熱伝達係数との関係を式(23)を使ってシミュレーションしたものを Fig. 9、Fig. 10 に示した。Fig. 9 では、本報の条件の場合作動流体流量が 7.0 t/h 以上になると作動流体の液がドレンセパレータよりオーバーフローして凝縮器に直接流入する恐れがあるので、作動流体流量を 6.0~7.0 t/h の範囲で変化させたものである。このとき、沸騰熱伝達係数 α_b' は、7000~9000 W/m²k となっている。この中で作動流体流量 G_F が 7.0 t/h の時に沸騰熱伝達係数

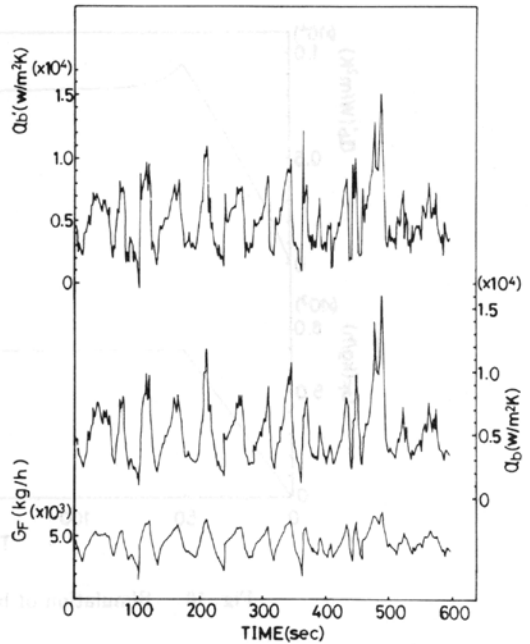


Fig. 8 Comparison of the experimental boiling heat transfer coefficient with the boiling heat transfer coefficient identified by eq. (23)

α_b' は最高となることが分かったので、次に作動流体流量 G_F を徐々に増加させていき、7.0 t/h で一定に保ったのが Fig. 10 である。この図では、沸騰熱伝達係数 α_b' が約 8600 W/m²k に保たれているのが分かる。

本報で示した同定方法は、他の条件の場合にも自動的に電子計算機で行い、制御システムに取り入れるこ

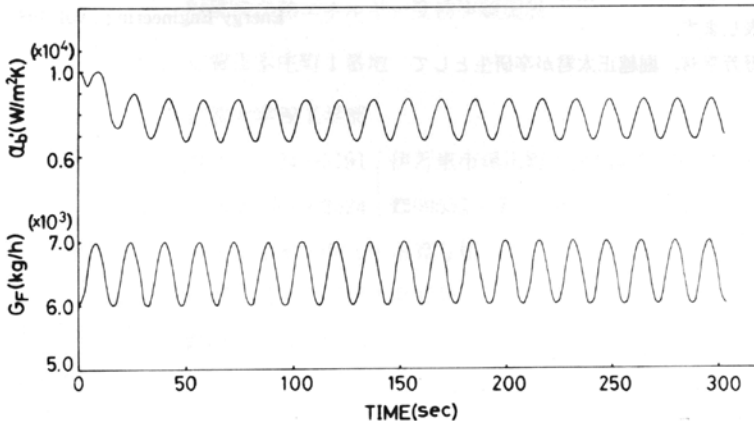


Fig. 9 Simulation of boiling heat transfer coefficient.

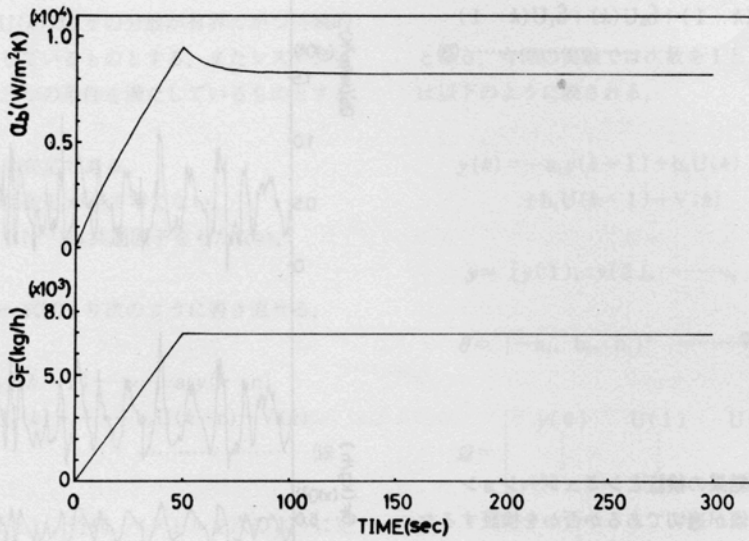


Fig. 10 Simulation of boiling heat transfer coefficient.

とが出来る。

7. 結 言

与えられた条件下で、沸騰熱伝達係数の動特性の同定に最小2乗法を用いる方法を述べた。その結果、与えられた条件で沸騰熱伝達係数が最大になるときの作動流体流量を選定することが出来た。

謝 辞

本研究を行うにあたって、同定の理論及び手法に関して、佐賀大学理工学部電気工学科、中村政俊助教授ならびに、院生の江頭成人君にご指導いただいた。ここに感謝の意を表します。

実験には、小野芳幸君、堀越正太君が卒研究生として

参加した。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 上原春男, 中岡 勉: 機論 50(453), 1325(1984)
- 2) 上原春男, 中岡 勉: 機論 50(456), 1955(1984)
- 3) 上原春男: 「海洋温度差発電読本」, オーム社, 東京 (1982)
- 4) 上原春男, 中岡 勉: 火力原子力発電, 36(7), 717(1984)
- 5) 相良節夫, 秋月影雄, 中溝高好, 片山 徹: 「システム同定」, 第2版, pp75-86, 計測自動制御学会, 東京(1983)
- 6) 中村政俊, 大石泰彦: 理工学部集, (11), 33(1983)
- 7) 中村政俊, 江頭成人, 上原春男: Journal of Solar Energy Engineering, vol. 108, 111-116, (1986)