

# ボイラ・アキュムレータ系の最適設計

Optimal Design of Boiler Accumulator System

郭 仁 波

Jinba KAKU

## 1. はしがき

ボイラ・アキュムレータ系を一つの均流液面制御系と見なして理論的に解析し、それによって得られた系の理論式を用いて系全体の最適設計を行なう一つの方法について報告する。

## 2. 理論解析

均流液面制御系は図1に示すような系であり、プロセス工業ではよく知られている。この系の特徴はサージタンクによってこの系への供給量の外乱を平滑化することにある。図1の場合の系はつぎの線形微分方程式で記述することができる<sup>1)</sup>。

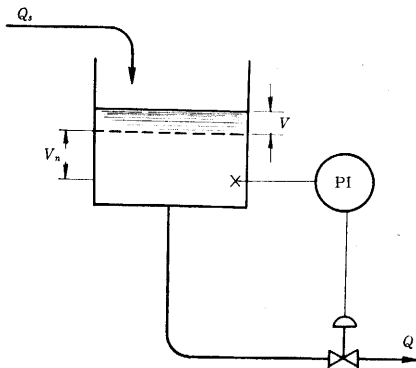


図1 均流液面制御系の例

$$AR_e(\dot{V})'' + (\dot{V})' + r(\dot{V}) = R_e Q_m (\dot{Q}_s)' / V_n \quad (1)$$

$$AR_e(\dot{Q})'' + (\dot{Q})' + r(\dot{Q}) = r(\dot{Q}_s) + (\dot{Q}_s)' \quad (2)$$

ここに  $\dot{V}$ ,  $\dot{Q}$ ,  $\dot{Q}_s$  はそれぞれ基準液面  $V_n$  からの液位  $V$  [m], 出口流量  $Q$  [m<sup>3</sup>/min], 供給流量  $Q_s$  [m<sup>3</sup>/min] の無次元化量である。すなわち基準液面を  $V_n$  [m], 平均流量を  $Q_m$  [m<sup>3</sup>/min] としたとき,  $\dot{V} = V/V_n$ ,  $\dot{Q} = (Q - Q_m)/Q_m$ ,  $\dot{Q}_s = (Q_s - Q_m)/Q_m$  になる。A はタンクの容量 [m<sup>3</sup>/m],  $R_e$  は液位  $V$  の比例幅  $b$  [m] と  $k$  (最大出口流量  $Q_{max}$  - 最小出口流量  $Q_{min}$ ) [m<sup>3</sup>/min] の比,  $r$  は調節計積分時間の逆数 [units/min],  $(X)'$  と  $(X)''$  はそれぞれ  $X$  の1階と2階の微分を表わす。

一方、ボイラ・アキュムレータ系について考えた場合、アキュムレータは均流液面制御系でのサージタンクに相当するものになる。しかし、この際アキュムレータは蒸気を蓄蔵するものであるため、サージタンクのような単純なものとは異なる。

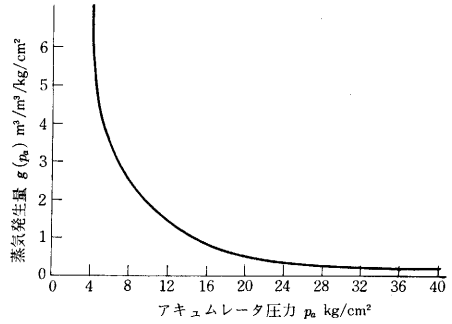


図2 アキュムレータ圧力と蒸気発生量の関係

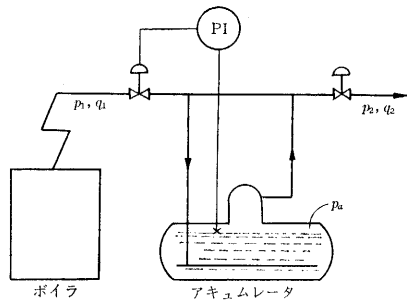


図3 ボイラ・アキュムレータ系

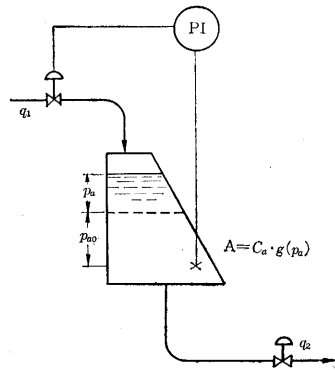


図4 非線形液面制御系

蒸気特有の性質により、単位体積の飽和水から単位圧力変化によって自己蒸発する蒸気量は圧力に対して図2のように変化する。したがって、図3に示すボイラ・アキュムレータ系と図1の均流液面制御系をアナログ的に対応させた場合、図3のボイラ・アキュムレータ系の等価均流液面制御系は図4に示すようなサージタンク(断面積が液面に対して変化する)をもつ非線形液面制御系で表わすことができ、そのときの系の理論式はつぎのように書ける。

$$AR_e(\Delta \dot{p}_a)'' + (\Delta \dot{p}_a)' + r(\Delta \dot{p}_a) = q_m R_e(\Delta \dot{q}_2)' / p_{a0} \quad (3)$$

研究速報

$$AR_e(\Delta\dot{q}_1)'' + (\Delta\dot{q}_1)' + r(\Delta\dot{q}_1) = r(\Delta\dot{q}_2) + (\Delta\dot{q}_2)' \quad (4)$$

ここに  $\Delta\dot{p}_a$ ,  $\Delta\dot{q}_1$ ,  $\Delta\dot{q}_2$  はそれぞれアキュムレータ圧力  $p_a$  (kg/cm<sup>2</sup>), 高压側蒸気流量  $q_1$  (m<sup>3</sup>/min), 低压側蒸気流量  $q_2$  (m<sup>3</sup>/min) の無次元化量である. すなわち, 平均アキュムレータ圧力を  $p_{a0}$  (kg/cm<sup>2</sup>), 系の平均蒸気流量を  $q_m$  (m<sup>3</sup>/min) とすると,  $\Delta\dot{p}_a = (p_a - p_{a0})/p_{a0}$ ,  $\Delta\dot{q}_1 = (q_1 - q_m)/q_m$ ,  $\Delta\dot{q}_2 = (q_2 - q_m)/q_m$  になる.  $A$  は等価アキュムレータ容量で, アキュムレータ容量  $C_a$  (m<sup>3</sup>) と蒸気発生量  $g(p_a)$  (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>/kg/cm<sup>2</sup>) の積に等しい. その単位は [m<sup>3</sup>/kg/cm<sup>2</sup>],  $R_e$  はアキュムレータ圧力  $p_a$  の比例幅  $b$  (kg/cm<sup>2</sup>) と  $k$  (最大高压側蒸気流量  $q_{1max}$  - 最小高压側蒸気流量  $q_{1min}$ ) の比,  $r$  は調節積分時間の逆数 [units/min],  $(X)'$  と  $(X)''$  はそれぞれ  $X$  の 1 階と 2 階の微分を表わす.

式 (3), (4) 中の係数  $A$  はもはや定数でなく,  $\Delta\dot{p}_a$  の関数であるため, 式 (3), (4) は非線形微分方程式になる.

3. 理論式の解

普通の均流液面制御系の微分方程式 (1), (2) の解は容易に計算できるが, ボイラ・アキュムレータ系を記述する等価均流液面制御系の微分方程式 (3), (4) は非線形であるため, その解は容易に計算することができない.

筆者はアナログ計算機で系の方程式をシミュレートし, 式 (1), (2) の解を計算した. 式 (3), (4) についても, もちろんアナログ計算機で計算することができるが, アナログ計算機による計算と併行してデジタル計算機で計算を進めている. デジタル計算機を使用した理由は Runge-Kutta-Gill 法を用いて容易にプログラムを作ることができるからである. なお, 入力データとしては通常考えられるステップとか正弦波だけでなく, 実際の工場での運転記録のデータを入力として使うことにしている. アナログ計算機で以上のことを行なうとするとカーブ・フォロワーなどが必要になってくるので, かなりめんどうになる.

4. ボイラ・アキュムレータ系の最適設計の方法

運転費 (ここででは燃料費)  $F$  と設備費  $I$  の和  $J$  を最

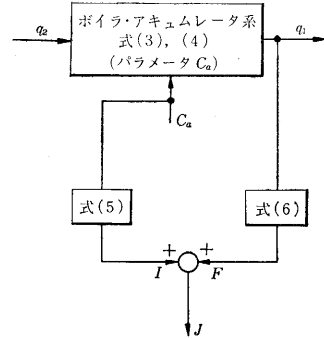


図 5 最適設計のフローチャート

適設計の評価関数とした. 設計のフローチャートを図示すると図 5 のようになる. 系のパラメータ  $C_a$  (アキュムレータの容量) を変えた場合, 設備費  $I$  はつぎのように計算される<sup>2)</sup>.

$$I = I_0(C_a/C_{a0})^{0.6} \quad (5)$$

ここに  $I$  はアキュムレータの設備費 (円),  $I_0$  は既設アキュムレータの設備費 (円),  $C_{a0}$  は既設アキュムレータの容量 (m<sup>3</sup>). なお, 運転費  $F$  はつぎのように計算される<sup>3)</sup>.

$$\left. \begin{aligned} F &= K m_f \\ m_f &= (h_1 - h_f) q_1 (\nu \eta_B Q_H) \\ \eta_B &= f(q_1) \end{aligned} \right\} (6)$$

ここに  $K$  は燃料単価 (円/m<sup>3</sup>),  $m_f$  は燃料流量 (m<sup>3</sup>/min)  $h_1$  は発生蒸気のエンタルピ (kcal/kg),  $h_f$  は供給水のエンタルピ (kcal/kg),  $q_1$  は蒸気発生量 (m<sup>3</sup>/min),  $\eta_B$  はボイラ効率,  $Q_H$  は燃料発熱量 (kcal/m<sup>3</sup>),  $\nu$  は蒸気の比容積 (m<sup>3</sup>/kg).

結果としては  $J$  が最小になったときのアキュムレータの容量  $C_a$  が決まり, ボイラ・アキュムレータ系全体としての最適設計が可能となる. (1967年6月30日受理)

文 献

- 1) Mason, C. E. and Philbrick, G. A.: Mathematics of Surge Vessels and Automatic Averaging Control, Trans. A. S. M. E., 63, (1941).
- 2) 町田: Cost Estimation と Q. C., 日本機械学会 258 回講習会教材 (化学装置の設計製作).
- 3) ボイラ型録 (川崎重工).