

計算制御のための流量予測シミュレーション

A Simulation Method of Process Flow Prediction for Computing Control

山 口 楠 雄*・嶋 田 淑 男*

Kusuo YAMAGUCHI and Toshio SHIMADA

1. はじめに

連続工程と回分工程とが混在している生産工程の例は多く、このような工程では両者の間をいかに円滑に接続するかが制御上あるいは工程管理上の重要な点になることが多い。精糖工程などがこの例で、連続的な流量を供給する応答の遅い連続プロセスと、パル的な流量消費パターンをもつ回分式プロセス群とが有限容量のバッファを中継として接続されている。この場合の流量制御は、回分工程の流量消費スケジュールを優先させると、バッファ容量が極めて大きい場合を除いて、レベル検出によるフィード・バック制御は適当でなく、将来のバッファ・レベルの予測値に着目する一種の予測制御が必要となる。

そこで予測制御を行なうとどの程度の効果が得られるか、バッファ容量はどの程度のものが必要か、制御基準として何が適当かなどを知るためのシミュレーションの研究を行った。また、この手法を計算制御に応用したシステムについて考察したので合わせて報告したい。

2. シミュレーション・モデルと手法

シミュレーションはモデルの決め方に大きく左右されるので実施に当たってまずモデル化の範囲を明確にしておくことが重要である。ここでは一般性と取り扱い易さを考慮して、できるだけ単純化したモデルを採用することにする。

対象となる工程は一応精糖工程にもとづいて図1のものを考える。この工程で制御しようものは供給流量 F_s と回分工程のスケジュールとがあるが、今回は一応スケジュールを優先させ既知のものとしている。

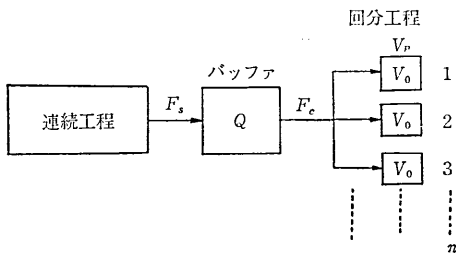


図 1 工程模型図

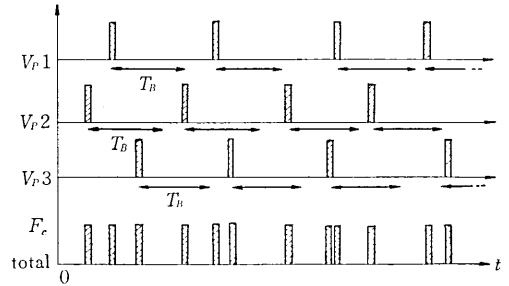


図 2 回分工程消費流量模型図

回分工程について次のように仮定する。

1) 回分工程の流量消費パターンは図2のように、各工程一回の起動につき容量 $V_0=1$ のインパルスとする。

2) 回分工程の起動方法は、全回分工程を同一操作として確率モデルをつくり、起動を確率的に決める。確率モデルとしてポアソン分布を用いる。すなわち図2の全起動を合わせた total のパターンで考え、その平均起動間隔を \bar{T} とすると、

$$p(dt \text{ 時間内に } 1 \text{ 回起動する確率}) = dt/\bar{T} \quad (1)$$

を用いる。具体的には、 dt 毎に $0.0 \sim 0.9999\dots$ の一様乱数を発生させ、乱数値 RN が $0.0 < RN \leq P$ ならば起動とする。ただし、実際の工程との適合を考慮して次の条件を加味する。すなわち、

3) ある回分工程は起動後 T_B 時間以内に次の起動に入れない。この間に生じた場合は T_B 時間過ぎるまで待たせる。

4) すべての回分工程が同時に \bar{T} 時間以上休止することはない。 \bar{T} 過ぎても生起しない場合は強制的に1回起動させ次の生起を1回見送る。

バッファ・レベル Q の予測と流量 F_s の変更の方法は次のように行う。

(i) Q の予測式として、

$$Q_t = Q_0 + \int_0^t F_s \cdot dt - \int_0^t F_c \cdot dt \quad (2)$$

を用い、まず $0 < t \leq t_{p \max}$ (最大予測時間) まで Q の予測を行う。

(ii) つぎに流量 F_s の変更量を決める。この変更基準として次の2つを考えた。

(a) $t_{p \max}$ における $Q_{t_{p \max}} = 0$ となるように(2)

式の F_s を変更する。(Q のレベルは0を中心にとっ

* 東京大学生産技術研究所 第3部

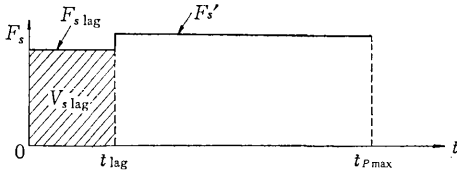


図 3 流量変更の模型図

である.)

(b) $0 < \tau \leq t_{p \max}$ におけるレベル平均を \bar{Q} として,

$$\bar{Q} = \frac{1}{t_{p \max}} \int_0^{t_{p \max}} Q_{\tau} \cdot d\tau \quad (3)$$

$\bar{Q} = 0$ となるように F_s を変更する.

(iii) 連続工程の流量変更のむだ時間を t_{lag} として, $0 < t \leq t_{lag}$ の間は F_s は変更できず前までの予測で決められた値をとるものとする.

(iv) 流量変更は図 3 のようにステップ状に必要な変更できるものとする.

以上の方法でシミュレーションを行うと F_s および Q は図 4, 5 のように変動する. この結果から制御方式の適否を判断するための評価量として次のような統計量を用いる.

- (イ) $(dQ)_{\max} = Q_{\max} - Q_{\min}$
- (ロ) $\{(dQ_{\max})_{10}\}_{\max}$ (但し, $(dQ_{\max})_{10}$ は期間 $[t, t+10]$ における Q の最大変動幅)
- (ハ) $\overline{(dQ_{\max})_{10}}$
- (ニ) $\sigma(dQ_{\max})_{10}$
- (ホ) $(dF_s)_{\max} = F_{s \max} - F_{s \min}$
- (ヘ) σdF_s (但し, $dF_s = |F_s - \bar{F}_s|$)

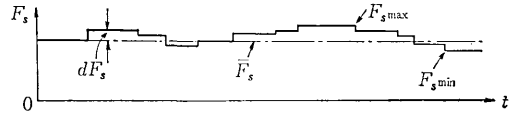


図 4 F_s の評価量説明図

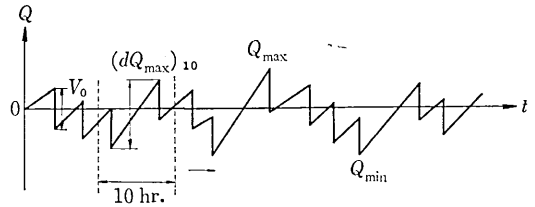


図 5 Q の評価量説明図

これらのうち重要なものは $(dQ)_{\max}$ で最低必要なバッファ容量を示す. また, 10 時間以内に別の方法でバッファ・レベルが修正できる場合には $\{(dQ_{\max})_{10}\}_{\max}$ が重要となる. 連続工程の大幅な流量変更が好ましくない場合は同時に $(dF_s)_{\max}$, σdF_s などが重要である. いづれにしてもこれらの量は小さい程よい.

3. シミュレーション結果と考察

このシミュレーションに使用したパラメータを表 1 に示す. これらの数値は一応精糖工程を参考にしての V_0, \bar{T} など扱い易い数値を用いている.

シミュレーション結果を図 6~9 に示す.

図 6 は $t_{p \max}$ を変数とし, 2 種類の制御基準を用いた場合で, F_s と Q の関係, 制御基準の良否などがよく現わ

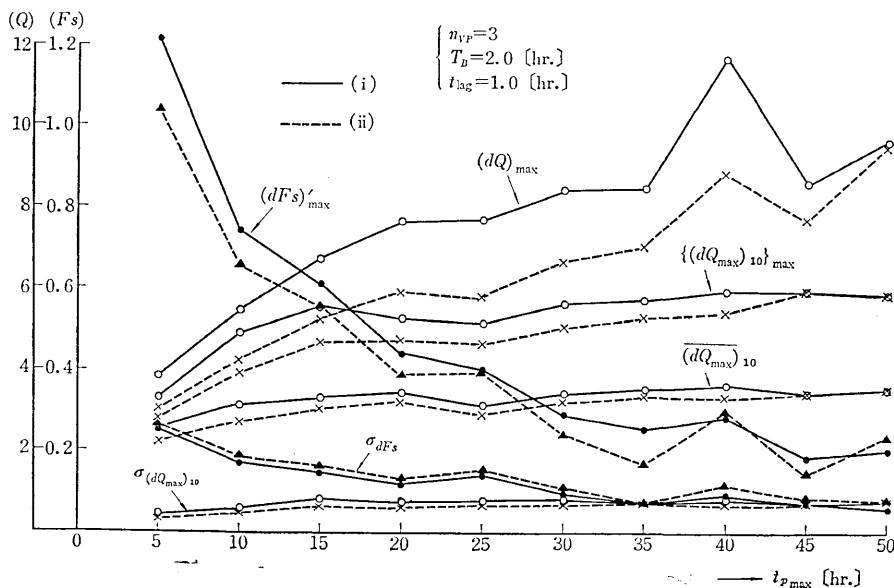


図 6 シミュレーション結果 (変数: $t_{p \max}$)

研究速報

表 1 パラメータ

パラメータ名		プログラム中の記号	数値
n_{VP}	回分工程の数	NVP	1~6
\bar{T}	平均起動間隔	ABT	1.0
Δt	シミュレーション単位時間	DT	0.1
T_s	最大シミュレーション時間	TS	100.0
V_0	回分工程の 1 回の消費量	VO	1.0
T_B	回分工程の 1 回の操作時間	TB	1.5~2.5
t_{lag}	連続工程のむだ時間	TLAG	0.5~2.0
t_{pmax}	最大予測時間	TPMAX	5.0~50.0

れている。これからわかることは $(dQ)_{max}$ と $(dF_s)'_{max}$ とは相反し、 t_{pmax} が短いと $(dQ)_{max}$ は減少するが $(dF_s)'_{max}$ は急激に増加する。 t_{pmax} を大きくすると $(dQ)_{max}$ はほぼ一定値 $8 \sim 10 V_0$ ((ii) の場合) になり、 F_s 一定として制御を行わない場合に近づく。 $\{(dQ_{max})_{10}\}_{max}$ に着目すると、 $t_{pmax} > 15$ hr. 位から一定値に近づいている。もし 10 hr 毎にタンク・レベルが修正できれば (例えばスケジュールを多少修正するなど) 予測時間は長くとした方が好ましい。図中 (i) は $Qt_{pmax} = 0$ を (ii) は $Q = 0$ を制御基準として用いた場合を示している。全般的に (ii) の方が優れているので以下のシミュレーションは (ii) を用いて行うことにした。

図 7 は t_{lag} による影響を調べたものである。予測時間を t_{lag} に較べて充分大きくとっておけば t_{lag} が増加しても $(dQ)_{max}$ はほとんど影響を受けていない。これはもともと t_{lag} を計算に入れて制御を行っているため、本来予測制御のもっている特徴の 1 つである。

図中の値のばらつきは起動を決めるために用いている乱数の初期値を変えているためと思われる。

図 8 は回分工程の稼働率を変数とした場合である。稼働率 D はその工程の平均起動間隔に対する操作時間の比であり、

$$D = T_B / n_{VP} \cdot \bar{T} \quad (4)$$

で与えられ、 $D = 1$ とは連続運転を意味する。 D が大き

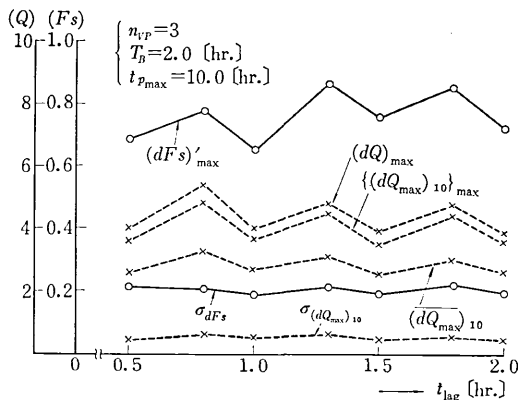


図 7 シミュレーション結果 (変数: t_{lag})

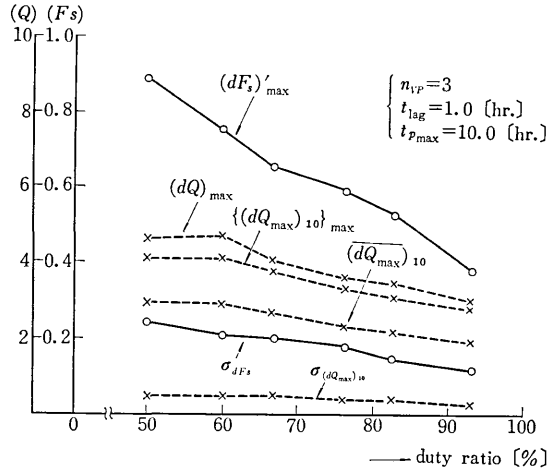


図 8 シミュレーション結果 (変数: 稼働率)

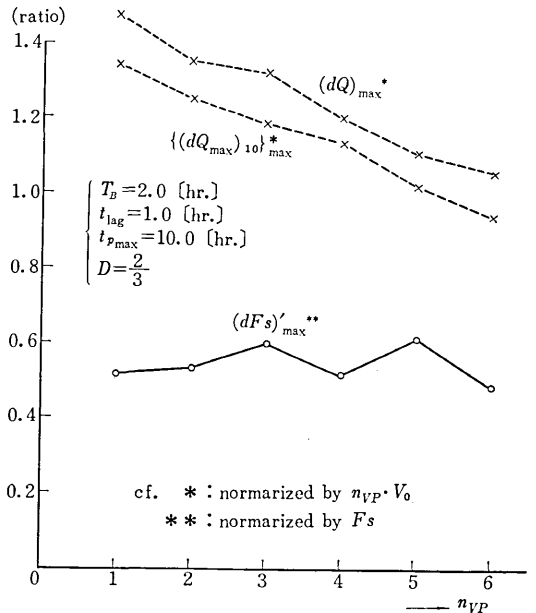


図 9 シミュレーション結果 (変数: n_{VP})

くなる程、休止時間が減り起動間隔は周期的になるので F_s 、 Q の変動は減少する。

図 9 は回分工程の数 n_{VP} を変えた場合で、評価量は \bar{F}_s および $n_{VP} \cdot V_0$ で正規化している。 n_{VP} を増せばそれだけ回分工程の生起も平均化されるので $(dQ)_{max}$ は減る。図中 $\{(dQ_{max})_{10}\}_{max}$ が 1.0 以下となる場所があるがこれは起動を決めるアルゴリズムにより 2 つ以上の工程が全く同時に起動することを避けているためである。

4. 計算制御への応用

精糖工程などは前にも述べたように、多くの回分工程

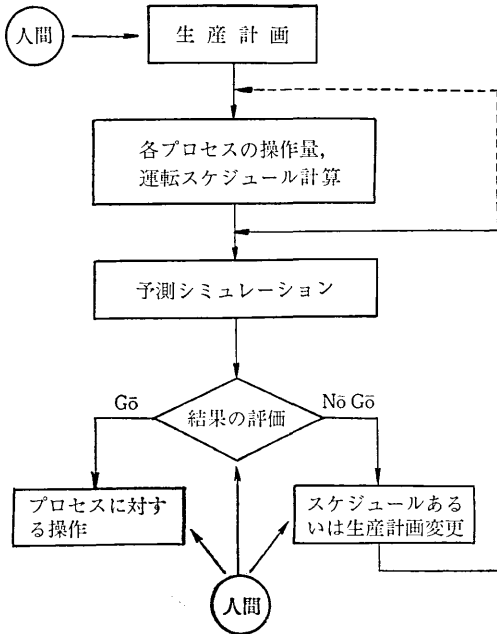


図 10 オペレータ・ガイド・システム概念図

を含み、製品、品質ともに多種の上に、同じ回分工程に違品種のものを割込ませるなど複雑な運転を行う場合が多い。我々は以前このような工程を自動制御するとき各種の処理に計算機を導入し、アルゴリズムを工夫することにより運転を自動化する方式の研究を行った^{1),2)}。しかし計算機を用いても完全自動化の不適當な場合がしばしばある。人間のもつ高度の認識力、判断力と計算機のもつ計算能力、正確さ、スピードなど各々の長所をうまく

く組み合わせることが有効な場合が多い。そこでマン・マシン・インターフェースを含んだオペレータ・ガイドのための計算制御システムを考えた。図 10 にその概念図を示す。人間が生産計画を与えると各プロセスの操作量、運転スケジュールの計算を行い、次に予測シミュレーションを実行して将来のタンク・レベルなどを表示する。人間はこの結果を評価してスケジュールの変更あるいは生産計画の変更などを行い、より有効なプロセスの運転方法を決めることができる。

5. おわりに

以上、回分工程のスケジュールを優先して予測制御を行った場合について述べた。得られたシミュレーション結果は、プラント設計時に設備容量を決めるときなどに役立っている。また、このシミュレーションは極めて単純化したモデルを用いているので、制限条件、パラメータなどの変更あるいは追加により、広く具体的なプロセスに適用できると考えている。

現在先に述べたオペレータ・ガイド方式の計算制御に適用する手法を開発中であり、これについては次の機会に報告したい。

(1973 年 1 月 23 日受理)

参考文献

- 1) 沢井, 森, 山口:「精製糖工程の総合制御システム」, 計測と制御, 6, 2, 1967.2
- 2) 同上:「同上」, 生研報告, 19, 5, 1969.10
- 3) 山口, 嶋田:「流量の予測制御シミュレーション」, 昭47 電気学会大会, 1083, 1972.4
- 4) 同上:「同上」, 第 12 回 SICE 学術講演会, 2602, 1973.8

(p. 24 よりつづく)

から得られた A_d の値であり、⊗印は El Centro 波, Taft 波等の強震記録を入力波として中型貯槽模型 ($R=0.5\text{ m}$) を振動台上で加振したときの応答計測結果から得られた A_d の値である。

図 3 より等価入力波数 n_e は 1~2 程度であることがわかるが、貯槽の設計に際しての推定値としては、地震の規模、長周期成分の周期範囲および地震継続時間等を考慮に入れて次の値を採用するのが妥当であると思われる。

$$n_e = 2 \sim 3$$

6. ま と め

地震波を入力波とした場合の液体貯槽の液面動揺の応答を求めるための方法として、正弦波の立上り入力に対する液面動揺の過渡応答を用いる手法について具体的に検討し、地震波を入力波とした場合と応答倍率の大きさ

が同程度になるような正弦波の等価入力波数 n_e を推定した。

この手法を用いると、地震波入力に対する液体貯槽の液面動揺の応答が n_e 波の正弦波入力に対する液面動揺の応答で推定できるので、液体貯槽の液面動揺の応答解析が非常に簡便に行なえる。(1973 年 1 月 25 日受理)

参考文献

- 1) 曾我部ほか, 円筒液体貯槽の液面動揺の応答 第 1 報, 生産研究, Vol. 26, No. 3, (1974.3), p. 31
- 2) Shibata, H., Observation of Damages of Industrial Firms in Nigata Earthquake, Proc. of 4 World Conference of Earthq. Eng'g., Vol. III, J-2, (1969.1)
- 3) 重田ほか, プラント応答観測実験速報(I), 生産研究, Vol. 24, No. 3, (昭47.3), p. 52
- 4) 曾我部ほか, 円筒型液体貯槽模型の自然地震応答観測実験概報, 機学会講演論文集, No. 730-14 (昭48.10), p. 157