入力シェル側, P-C 形の例
第9図 制御実験

第10図 制御応答

制御応答は第10図に示す。

(A)は第4図のaの熱交換器の応答。

特性は相当安定なことがわかる。

(B)は第4図のbの応答である。

約1分という大きなむだ時間のために相当不安定でPI動作を使ってオフセットを消すのはきわめて困難なことがうかがわれる。

以上の研究に当り絶えず熱心な御激励、御批判をいただいたカリフォルニア大学高橋安人教授に厚く御礼申し上げる。また、実験、計算に協力下さった横浜国立大学学生山之内克彦、倉島秀至両君に深謝する。なお、実験に当り種々御便宜をおはかりいただいた山武ハネウエル計器会社の加古五郎氏、小川伸一郎氏にも深くお礼申し上げる。

最後に本研究に対し、文部省科学研究費(昭和33年度の各個研究)を受けたことを附記する。

文 献

- (1) 増淵, 機械学会論文集, 24, 139(昭33-3), 209.
- (2) 増淵, 機械学会論文集, 24, 147(昭33-11), 934.
- (3) 高橋, 自動制御, 2(昭29), 117.
- (4) R. L. Johnson & J. B. Rea, *J. Aero. Sci.*, 18, 1 (1951).

また, たとえば次の解説参照。

高橋, 自動制御理論(昭29), 157, 岩波全書。

621.181.632-52 : 621.565.94-52

多 管 路 熱 交 換 器 の 自 動 制 御

(第4報, アナログ計算機による動特性の検討)*

増 淵 正 美**

Control of Multi-Pass Heat Exchangers

(Part 4, Analog Computer Test)

by Masami MASUBUCHI

In the previous papers, the multi-pass heat exchangers were treated as the distributed capacity systems and the temperatures were certain functions of time and space. The dynamic analysis for them was rather troublesome.

This paper, however, suggests a simpler method to verify the dynamic response calculations.

The author divided a heat exchanger to finite numbers of lumped elements and obtained frequency and transient responses using analog computer.

The result clearly shows the validity of the foregoing dynamic analysis.

1. は し が き

一般に熱交換器内の温度を時間と場所の関数として

取扱って得られる熱交換器の動特性を表わす理論式はきわめて複雑な形をしている。したがって理論式から過渡応答はもちろん、周波数応答を求めるにしても相当の手間は避けられない。既に純向流および純並流形熱交換器については抵抗、容量およびインダクタンス

* 昭和33年11月15日 徳島地方講演会において講演、原稿受付 昭和34年1月28日。

** 正員, 横浜国立大学工学部(横浜市区南区大岡町70)。

の組合せによる電氣的相似回路が研究されている⁽¹⁾⁽²⁾。

筆者は先に2管路⁽³⁾および3管路以上⁽⁴⁾の場合の多管路式熱交換器を分布定数系として解析し、理論的に周波数特性を求めたが、その計算にはかなり時間を要するので、その数値計算を比較的簡単に検討する一手段として以下に示すような集中定数要素の組合せによる方法を試みた。

この方法は演算器の数は多数必要であるが、係数が割に簡単なため、ふつうの相似形アナログ計算機を使って理論計算を検討したり、動特性をしらべたりするのに好都合である。

2. 分割による近似法

この方法は管路式熱交換器ならいかなる管路数の場合でも原理上適用できる(もちろん、純向流、純並流も含めて)が、管路数が多くなると演算要素の数が急速に増加してあまり実用的でない。しかし、この研究の目的は既報⁽³⁾⁽⁴⁾の動特性の理論計算を確認することであるから、多管路の中でも顕著な特性を示した2管路について行えば十分と考えられる。

記号

θ °C	= 管路流体温度
Θ °C	= シエル流体温度
t mn	= 時間
v m/mn	= 流体速度, v_1 管路側, v_2 シエル側
k kcal/m ² °C	= 熱通過率
F m ²	= 熱交換面積
q kcal/mm°C	= 流量×比熱, q_1 管路側, q_2 シエル側
C kcal/°C	= 分割された各管路流体の熱容量
C' kcal/°C	= 分割された各シエル流体の熱容量
T mn	= C/q_1
T' mn	= C'/q_2
a dl	= kF/q , $a_1 = kF/q_1$, $a_2 = kF/q_2$
τ dl	= t/T
r dl	= T'/T , ただし, dl=無次元

なお、伝達関数は一流体の入口温度に対する他流体の出口温度とする。また、直列容量、側容量はすべて省略した理想熱交換器を考えている。

3. 基礎方程式

たとえば P-C 形 2 管路熱交換器をとり上げよう。何個に分割しても全く同様に扱うことができるので、今第1図に示すように全体を四つの集中系に分割した

第1図 P-C 形 2 管路熱交換器の集中化による近似(4分割の場合)

とする。それぞれは更に2個ずつの集中要素を含むことになる。分割された各シエル要素と各管路要素との間の熱交換を考えると次の方程式が得られる。

$$\begin{aligned}
 q_1(\theta_{1i}-\theta_1)-kF(\theta_1-\Theta_1) &= C_1 \frac{d\theta_1}{dt} \\
 q_1(\theta_1-\theta_2)-kF(\theta_2-\Theta_2) &= C_2 \frac{d\theta_2}{dt} \\
 q_1(\theta_2-\theta_3)-kF(\theta_3-\Theta_3) &= C_3 \frac{d\theta_3}{dt} \\
 q_1(\theta_3-\theta_4)-kF(\theta_4-\Theta_4) &= C_4 \frac{d\theta_4}{dt} \\
 q_1(\theta_4-\theta_5)-kF(\theta_5-\Theta_4) &= C_5 \frac{d\theta_5}{dt} \\
 q_1(\theta_5-\theta_6)-kF(\theta_6-\Theta_3) &= C_6 \frac{d\theta_6}{dt} \\
 q_1(\theta_6-\theta_7)-kF(\theta_7-\Theta_2) &= C_7 \frac{d\theta_7}{dt} \\
 q_1(\theta_7-\theta_8)-kF(\theta_8-\Theta_1) &= C_8 \frac{d\theta_8}{dt} \\
 q_2(\Theta_i-\Theta_1)-kF(\Theta_1-\theta_1)-kF(\Theta_1-\theta_8) &= C'_1 \frac{d\Theta_1}{dt} \\
 q_2(\Theta_1-\Theta_2)-kF(\Theta_2-\theta_2)-kF(\Theta_2-\theta_7) &= C'_2 \frac{d\Theta_2}{dt} \\
 q_2(\Theta_2-\Theta_3)-kF(\Theta_3-\theta_3)-kF(\Theta_3-\theta_6) &= C'_3 \frac{d\Theta_3}{dt} \\
 q_2(\Theta_3-\Theta_4)-kF(\Theta_4-\theta_4)-kF(\Theta_4-\theta_5) &= C'_4 \frac{d\Theta_4}{dt} \\
 &\dots\dots\dots(1)
 \end{aligned}$$

分割は等分割である とすれば $C_1=C_2=\dots=C_8$ ($=C$), $C'_1=C'_2=C'_3=C'_4$ ($=C'$) であるから係数を無次元化して整理すると、

$$\begin{aligned}
 \frac{d\theta_1}{d\tau} + (a_1+1)\theta_1 &= \theta_{1i} + a_1\Theta_1 \\
 \frac{d\theta_2}{d\tau} + (a_1+1)\theta_2 &= \theta_1 + a_1\Theta_2 \\
 \frac{d\theta_3}{d\tau} + (a_1+1)\theta_3 &= \theta_2 + a_1\Theta_3 \\
 \frac{d\theta_4}{d\tau} + (a_1+1)\theta_4 &= \theta_3 + a_1\Theta_4 \\
 \frac{d\theta_5}{d\tau} + (a_1+1)\theta_5 &= \theta_4 + a_1\Theta_4
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{d\theta_6}{d\tau} + (a_1+1)\theta_6 &= \theta_5 + a_1\theta_3 \\
 \frac{d\theta_7}{d\tau} + (a_1+1)\theta_7 &= \theta_6 + a_1\theta_2 \\
 \frac{d\theta_8}{d\tau} + (a_1+1)\theta_8 &= \theta_7 + a_1\theta_1 \\
 r \frac{d\theta_1}{d\tau} + (2a_2+1)\theta_1 &= \theta_i + a_2(\theta_1 + \theta_8) \\
 r \frac{d\theta_2}{d\tau} + (2a_2+1)\theta_2 &= \theta_1 + a_2(\theta_2 + \theta_7) \\
 r \frac{d\theta_3}{d\tau} + (2a_2+1)\theta_3 &= \theta_2 + a_2(\theta_3 + \theta_6) \\
 r \frac{d\theta_4}{d\tau} + (2a_2+1)\theta_4 &= \theta_3 + a_2(\theta_4 + \theta_5)
 \end{aligned} \quad \dots(2)$$

一般に上の管路温度 θ に関する式は (分割数) $\times$ 2
 下のシエル温度に関する式は (分割数) $\times$ 1
 だけの数になる。

4. アナログ回路

以上の基礎方程式は一次方程式であるから一つの方程式について積分器1個, 演算器2個, およびポテンシオメータが入用である。この組合せを行うと第2図に示すような結線図になる。

また, 熱交換条件は既報の数値計算例と同等にする関係上

$$r = 1, a_1 = a_2 = 1/4 = 0.25$$

第2図 アナログ計算機結線図

とした。

図中に記入してある矢印のうち

実線は シエル入力の場合 θ_8/θ_{1i}

点線は 管路入力の場合 θ_4/θ_{1i}

を示す。

このアナログ計算機は低速度形 (東芝 TOSAC-II) であり, 正弦波信号には超低周波発信器を使用した。

5. 実験結果

分布系の周波数特性を論じた場合では問題は位相曲線にピークの現われる場合であったから, ここでもおもにそのような条件の場合を検討した。第3図に2分割した場合と, 4分割した場合の集中系置換の周波数特性と, 分布系として理論的解析から求めた周波数特性とをあわせて示してある。

2分割した a という特性線図にはほとんど特色は認められない。

しかし, b の4分割の場合にはゲイン線図がやや振動的になり, 位相線図に顕著なピークができていことがわかる。

したがって分割数を増せば次第に分布系の特色を現わすようになると考えてよいから, 以上の結果から

(i) 分割数を増すと位相曲線のピークが顕著になって次第に分布系の理論曲線の形に漸近する。

(ii) 分割数を増すとゲイン曲線が次第に振動的になり, かつ定常ゲインもわずかながら上昇してくる。

と推論することができる。

このことは第1図の熱交換器でシエル流体から管路流体への熱伝達を考えると, 各シエル要素から各管

第3図 周波数特性の比較
 (P-C 形のシエル入力の場合)

第 4 図 シェル側入力に対する応答

路要素への熱の移動が

- (i) ごく低い周波数範囲では各要素でほぼ同等に行われた結果が管路出口に現われる。静特性に近い特性を示す。
- (ii) 周波数がある程度高くなると、シェルから最短経路を経て管路へ現われる応答と各管路要素へ伝わった分が管路を流れて出口へ現われて、それらの間に相互干渉がある等の理由によるのである。

このことはまた、第 2 図の電気信号の伝達経路を考えてもある程度推察がつくものと考えられる。

以上の結果から分布系の理論特性計算の正しいことが推論できたと思う。

次に第 4 図に各管路内および各シェル内の過渡温度応答を示す。θ₁ と θ₅ の立ち上りの速度が全く一致していることに注意すべきである。θ₂, θ₃, θ₄ および θ₁, θ₂, θ₃, θ₄ と右方へ行くに従っておくれ(流体の移動のおくれに相当する)が増していることがわかる。

結 言

この方法は普通のアナログ計算機を使って割に簡単に熱交換器の特性をしらべることができるので、複雑な熱交換器の理論計算結果を検討したり、動特性を検討したりするには便利であると思う。

以上の研究にあたり、東芝鶴見研究所の御好意によって低速相似形電子計算機、TOSAC-II を利用させていただいた。鶴見研究所の青木所長および実際の運用に当って種々御便宜をはかって下さった原子力研究課の鈴木頼二氏に深謝する。

文 献

- (1) R. L. Ford, *Proc. IEE Paper*, No. 1934, 103, 7(1956), 65.
- (2) G. Kourium, *Regelungstechnik*, 5 (1957), 163.
- (3) 増淵, 機械学会論文集, 24, 139(昭 33-3), 209.
- (4) 増淵, 機械学会論文集, 24, 147(昭 33-11), 934.

多管路熱交換器の自動制御 (第 1, 2 報) 正誤表

	ペ ー ジ	誤	正
第一報 一三九号	209 ページの英文 2 行目	Chracteristics	Characteristics
	211 ページ (5) 式の分母の第 3 項の α の添字	$(\alpha_2 - \beta_3)(\beta_2 - \beta_1)e^{\beta_3}$	$(\alpha_3 - \beta_3)(\beta_2 - \beta_1)e^{\beta_3}$
	〃 5. の表題	P-C 型	C-P 型
	212 ページ (15) 式 α の分母	$-p+s+\frac{b_1+s}{s+b_1+b_2}$	$-p+s+\frac{b_1+s}{s+b_1+b_2}a_1'$
	〃 β の分母	$p+s+\frac{b_1+s}{s+b_1+b_2}$	$p+s+\frac{b_1+s}{s+b_1+b_2}a_1'$
第一四七報号	940 ページ右欄 11 行目	特 定	特 性