

多重効用蒸発缶の設計計算プログラミング

宇 野 克 志*

On the Program for the Design Calculation of Multi-Effect Evaporators

Katsushi Uno

要 旨

多重効用蒸発缶の設計計算のプログラミングを試み、単一缶から何缶の場合でも計算できることを確認した。

Synopsis

A program is proposed to solve the design problem of multi-effect evaporators for forward feed type. From numerical examples, it is concluded that the program is available for designing from single-to multi-effect evaporators.

1. 緒 言

多重効用蒸発缶の設計計算において、最終的に厳密解を求めるには、答試による再計算で、何回も変則的な多元連立一次方程式を解かなければならない。この煩雑さのため、一般には、計算上影響の少ない項を省略して近似解を求めている場合が多い。

この度、これらの基礎関係式を行列式に置き換えれば、敏速に厳密解が得られることを確認したので、プログラム作製上の要点と例題による解法例を報告する。なお、基礎式と例題は、亀井三郎著：新版化学機械の理論と計算¹⁾(以後、引用書とする)より引用した。

2. 基 礎 関 係 式

図1により、4重効用缶(順流)について記すが、以下の式は次の仮定のもとにたてられた式で物質収支式

$$D_1 + D_2 + D_3 + D_4 = DS$$

熱収支式

$$D_1(L_1 - 0.52 R_1) = D_0 L_0 - FS_F \{ (t_1 + R_1) - t_F \}$$

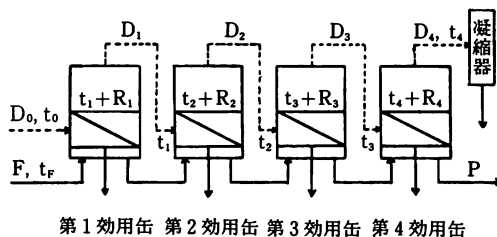


図1 四重効用缶(順流)略図

ある。

- (1) 加熱蒸気は多少過熱していても、次缶の加熱部に入るまでには熱損失により飽和温度まで冷却される。
- (2) 加熱蒸気の凝縮水はその飽和温度で缶外に抜き出す。
- (3) 稀釈熱は無視する。
- (4) 溶液の蒸発潜熱はその沸騰温度における水の蒸発潜熱に等しい。また、 $t + R$ における蒸発潜熱は t における蒸発潜熱を L とすれば $L - 0.52 R$ とする。

(1)

* 助教授 工業化学科

$$\begin{aligned}
 D_2(L_2 - 0.52 R_2) &= D_1 L_1 + (F - D_1) S_1 \{ (t_1 + R_1) - (t_2 + R_2) \} \\
 D_3(L_3 - 0.52 R_3) &= D_2 L_2 + (F - D_1 - D_2) S_2 \{ (t_2 + R_2) - (t_3 + R_3) \} \\
 D_4(L_4 - 0.52 R_4) &= D_3 L_3 + (F - D_1 - D_2 - D_3) S_3 \{ (t_3 + R_3) - (t_4 + R_4) \}
 \end{aligned} \quad (2)$$

伝熱速度式

$$\begin{aligned}
 D_0 L_0 &= U_1 A_1 (t_0 - t_1) \\
 D_1 L_1 &= U_2 A_2 (t_1 - t_2) \\
 D_2 L_2 &= U_3 A_3 (t_2 - t_3) \\
 D_3 L_3 &= U_4 A_4 (t_3 - t_4)
 \end{aligned} \quad (3)$$

式(1), (2)より, $STR_i = S_i \{ (t_i + R_i) - (t_{i+1} + R_{i+1}) \}$ として, 行列式の型に置き換える。

$$\begin{array}{cccccc}
 -L_0 D_0 + (L_1 - 0.52 R_1) D_1 & 0 & 0 & 0 & = F \cdot S_F \{ t_F - (t_1 + R_1) \} \\
 0 & +(-L_1 + STR_1) D_1 + (L_2 - 0.52 R_2) D_2 & 0 & 0 & = F \cdot STR_1 \\
 0 & +STR_2 D_1 + (-L_2 + STR_2) D_2 + (L_3 - 0.52 R_3) D_3 & 0 & & = F \cdot STR_2 \\
 0 & +STR_3 D_1 & +STR_3 D_2 + (-L_3 + STR_3) D_3 + (L_4 - 0.52 R_4) D_4 & = F \cdot STR_3 \\
 0 & +D_1 & +D_2 & +D_3 & +D_4 = DS
 \end{array} \quad (4)$$

この行列式は変則的な多元一次方程式のため簡単には解けないが, 第2行列以下は GAUSS-JORDAN 法などにより解けるので, 最後に第1行から D_0 を求めることができる。

3. プログラム作製の要点

プログラムを組むうえで, 缶数 N に応じて配列を取るため, 基礎式の添字に 1 を加えたものを配列番号とする。また, プログラムではできかぎり基礎式の記号と同一のアルファベット大文字を使用するが, それ以外のものは下記の記号を使用する。

プログラム記号:

$N1$ = 計算すべき効用缶の最小缶数, NN = 計算すべき効用缶の最大缶数, $N1 \leq NN$, CN = 製品の濃度, TS = 第1缶の加熱用蒸気温度, TN = 最終缶の操作温度, MW = 溶質の分子量, $NTRY$ = 答試における繰返し回数, ATS = 各缶伝熱面積の総和, AAV = 1缶あたりの平均伝熱面積, $AD(K) = AAV$ に対する各缶伝熱面積の差, $APS = AD(K)$ に対する収束判定用定数

計算の順序は図2流れ図によるが, ここでは以後の例題に関係してくるラウールの法則が成り立つ水溶液蒸発の場合について, 主としてこのプログラムの中心である副プログラム MATRIX と物性値の計算に必要な関数副プログラムを説明する。なお, 収束判定は各缶同一の伝熱面積とした。

(1) SUBROUTINE MATRIX

式(4)より, 缶数 N について, 行列式は一般に下

式で表現できる。(解を右辺項の配列 D_K に置き換えるので表現上 DD_K とした)

$$[AA(K, J)] [DD_K] = [D_K] \quad (5)$$

$$K = 1, N + 1$$

$$J = 1, N + 1$$

このルーチンを詳細に理解できるように, 行列配置の部分のプログラムを下記に載せた。

```

-----
SUBROUTINE MATRIX (N,F,DS,TF,L,S,T,R,D,LP)
REAL L
DIMENSION L(9),S(9),T(9),R(9),D(9),AA(9,9),STR(9)
NP=N+1
DO 100 K=1,NP
DO 100 J=1,NP
100 AA(K,J)=0.
AA(1,1)=L(1)
D(1)=F*S(1)*(TF-T(2)-R(2))
DO 200 J=2,NP
200 AA(NP,J)=1.
DO 250 K=1,N
J=K+1
250 AA(K,J)=L(J)-0.52*R(J)
IF (N.EQ.1) GO TO 400
DO 300 K=2,N
J=K
STR(K)=S(K)*(T(K)+R(K))-T(K+1)-R(K+1)
D(K)=F*STR(K)
300 AA(K,J)=L(K)+STR(K)
IF (N.LE.2) GO TO 400
DO 350 K=3,N
NM=K-1
DO 350 J=2,NM
350 AA(K,J)=STR(K)
400 D(NP)=DS
-----
省略 | 第2行列以下を GAUSS-JORDAN 法など
      | で解き, 第1行から D(1)を求める。
RETURN
END

```

(2) SUBROUTINE BPR

ラウールの法則により沸点上昇を求めるルーチンである。なお, 沸点上昇に関する関係蒸気圧, DÜHRING の関係式などがあれば, このルーチン内におくとよい。

(3) FUNCTION ATU(T)

水の温度に対する蒸気圧を計算する。計算式は日本機械学会蒸気表⁴⁾より引用した。

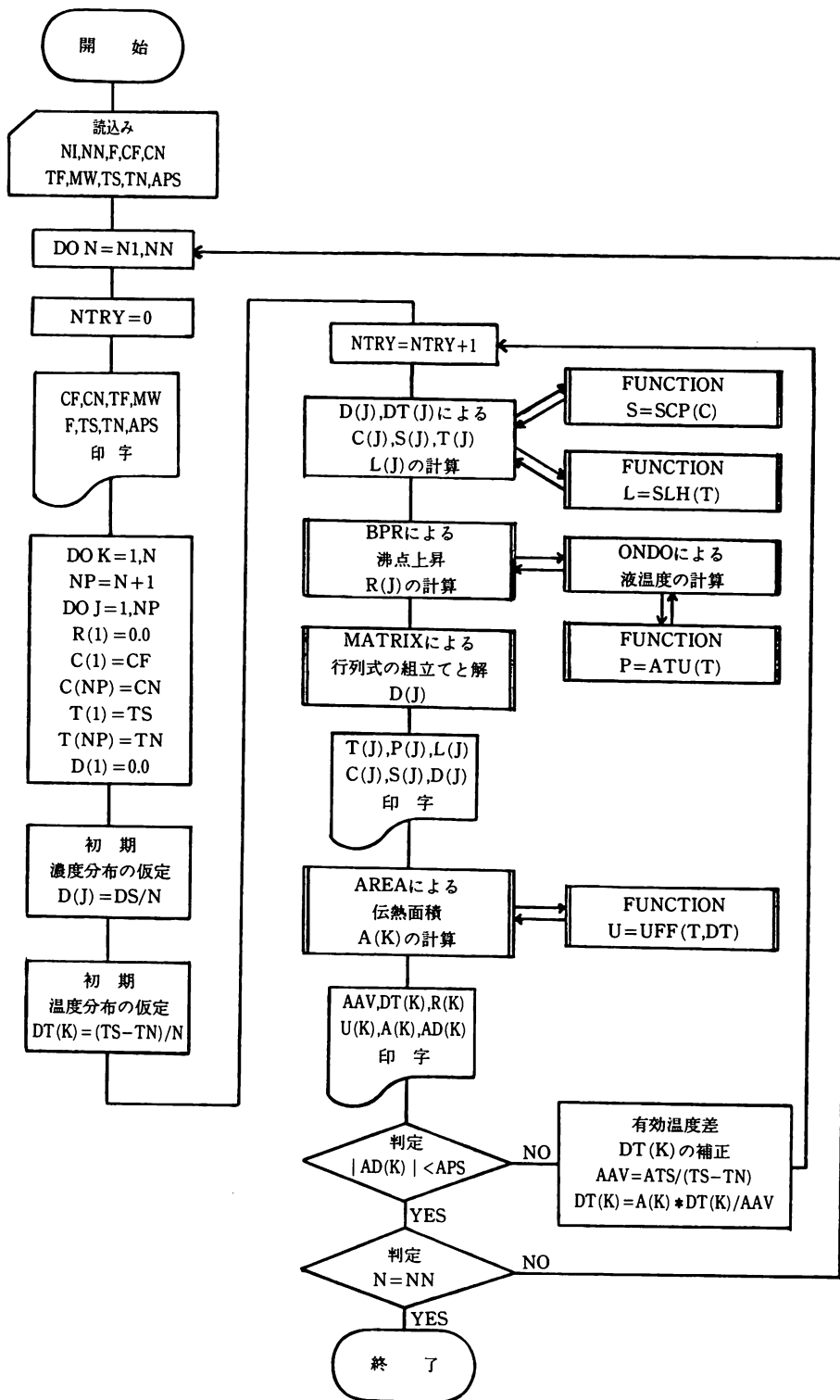


図2 流れ図

(4) SUBROUTINE ONDO

FUNCTION ATU(T)の逆関数計算のためのルーチンで、黄金分割法についてのプログラム⁶⁾を参考にした。

(5) FUNCTION SCP(C)

溶液の熱容量を計算する式をおく。

(6) FUNCTION SLH(T)

水の温度に対する蒸発潜熱を計算する。計算式は日本機械学会蒸気表⁵⁾の比エンタルピ(L)と温度(T)の関係についてシュミレーションを行い、1~140℃で誤差±0.01 kcal/kg以下の次式を開発した。

$$L = H_0 + H_1 T + H_2 T^2 + H_3 T^3 + A \log_e(B - T) \quad (6)$$

$$H_0 = -1.51042 \times 10^3, H_3 = -2.59908 \times 10^{-6}$$

$$H_1 = -3.15546 \times 10^{-2}, A = 3.28243 \times 10^2$$

$$H_2 = 5.57008 \times 10^{-4}, B = 6.151 \times 10^2$$

(7) FUNCTION UFF(T, DT)

総括境膜伝熱係数Uを計算する。引用書の脚注には“水の蒸発の実験値であり、この場合には適用できないが、単に例題のためにこれを仮定する”とあるが、他に適切な実験式がなく、図上²⁾の点を読み取り、沸騰温度(T)、有効温度差(DT)の関係についてシュミレーションを行い、次式を開発した。図3は実験値と計算値の関係を示したものである。

$$U = DT / \{ F_1 DT + F_2 (T - F_3)^{F_4} \} \quad (7)$$

$$F_1 = 2.9865 \times 10^{-4}, F_3 = 20.035$$

$$F_2 = 18.98575, F_4 = -2.130372$$

(8) SUBROUTINE AREA

式(3)により伝熱面積を計算する。

(9) 収束を早めるために

初期温度分布の仮定：

試行のたびに式(7)よりUを計算するときは、台数に応じて等分に配分するが、Uが頭初より与えられるときは、Uの逆数の比によって、有効温度差を比例配分する。

有効温度差の補正：

AD(K)の絶対値のすべてが収束判定用定数APSより小さくなければ、図2流れ図に従ってDTを補正して再計算を行う。

4. 例 題

引用書³⁾より

“分子量92の有機物の5wt%水溶液を50wt%まで濃縮するのに順流の3重効用蒸発器を用いる。

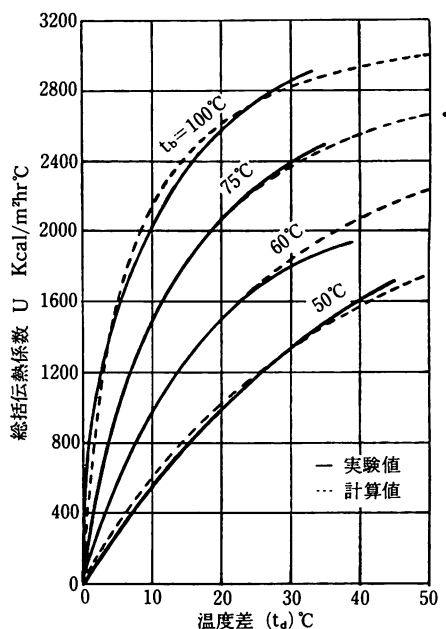


図3 総括伝熱係数の実験値の一例

原液の処理量は5,000 kg/hr、加熱用水蒸気の飽和温度105℃、原液温度60℃、最終圧の圧72 mmHgとすると、所要伝熱面積、所要加熱水蒸気量、凝縮器への熱負荷を求めよ。ただしラウールの法則が成立し、溶液の比熱は $S=1.0-0.4C$ で表わされ、熱損失は無視し、見掛けの総括伝熱係数は図3(3節(7)、式(7))により示されるものとする。”

〔解〕

APS=0.01として、プログラムにより計算した試行結果と引用書の近似計算による最終結果を表1に示す。また、プログラム確認のため、引用書の最終解の伝熱係数を用いて計算した結果を表2に示す。更に、表3はAPS=0.01として、単1台から8重効用台までの計算の台数と試行回数を示したものである。いずれの場合も確実に収束し、電卓による手計算と一致した。

5. 考 察

表1の収束経過を見ると、収束には伝熱係数が大きく影響しているように思われ、このことは引用書にも述べられている通りである。従って、伝熱係数に関して信頼性のある資料が得られない限り、厳密解の意味がなく、近似解で充分である。また、今回は計算の骨格である基礎関係式につい

表 1 計算結果の比較

試行回数	添字	初期の 仮定値	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	引用書の 最終解
D T	1	20.0	20.0	11.95	16.71	14.33	15.36	14.93	15.09	15.04	15.05	15.05	15.3
	2	20.0	20.0	14.05	15.53	15.52	15.32	15.49	15.39	15.44	15.42	15.43	16.1
	3	20.0	20.0	34.00	27.76	30.15	29.32	29.58	29.52	29.52	29.53	29.53	28.6
D	0	—	1692	1763	1726	1743	1736	1738	1738	1738	1738	1738	1690
	1	1500	1427	1437	1436	1435	1436	1435	1436	1437	1436	1436	1430
	2	1500	1520	1502	1508	1507	1507	1507	1507	1507	1507	1507	1520
	3	1500	1553	1561	1555	1559	1558	1558	1558	1558	1558	1558	1550
U	1	—	2330	2132	2276	2217	2245	2234	2238	2237	2237	2237	2200
	2	—	1711	1897	1783	1861	1823	1841	1833	1836	1835	1836	1800
	3	—	769	1127	980	1039	1019	1025	1023	1024	1024	1024	1100
A D	1	—	-13.109	10.556	-4.040	1.969	-0.765	0.293	-0.100	0.030	-0.007	0.000	-0.020
	2	—	-9.692	2.789	-0.007	-0.361	0.304	-0.173	0.086	-0.039	0.016	-0.006	-0.034
	3	—	22.800	-4.863	2.435	-0.750	0.242	-0.058	0.006	-0.005	-0.005	0.003	0.054
A A V		—	32.570	26.508	28.359	27.427	27.745	27.630	27.664	27.656	27.657	27.658	26.884
凝縮器の熱負荷												8.87×10 ⁵	8.85×10 ⁵
水蒸気1kgあたりの蒸発量												2.59	2.66

表 2 計算結果の比較

試行回数	添字	初期の 仮定値	1	2	3	引用書の 最終解
D T	1	14.21	14.21	15.69	15.64	15.3
	2	17.37	17.37	16.04	16.12	16.1
	3	28.42	28.42	28.27	28.24	28.6
D	0	—	1739	1732	1732	1690
	1	1500	1430	1434	1434	1430
	2	1500	1511	1509	1509	1520
	3	1500	1559	1557	1557	1550
U	1	2200	—	—	—	2200
	2	1800	—	—	—	1800
	3	1100	—	—	—	1100
A D	1	—	2.816	-0.098	0.002	-0.020
	2	—	-2.062	0.135	-0.007	-0.034
	3	—	-0.148	-0.023	0.003	0.054
A A V		—	26.986	26.977	26.978	26.884

表 3

缶 数 N	試行回数 N T R Y
1	1
2	8
3	10
4	13
5	15
6	19
7	22
8	27

て検討したが、実際には、熱損失、抽気、伝熱係数の経時変化、稀釈熱、加熱蒸気の凝縮温度など複雑な因子が多々あり、今後の検討課題としたい。それには多くの実験例が必要であり、むしろ今回のプログラムはこれらの因子を検討するためのシュミレーション用として利用すれば、有効に生かせるように思われる。

〔附記〕

計算式のシュミレーションには北海道大学大型

計算機センターを利用した。

基礎式記号

A = 伝熱面積 [m²]

C = 溶液の濃度 [kg/kg 溶液]

D = 加熱および蒸発蒸気量 [kg/hr]

DS = 総蒸発量 [kg/hr]

F = 原液量 [kg/hr]

L = その圧の下での飽和蒸気の蒸発潜熱 [kcal/kg]

R = 沸点上昇〔℃〕

S = 溶液の熱容量〔kcal/kg℃〕

t = 温度, 蒸気の場合はその圧に相当する飽和温度〔℃〕

U = 見掛けの総括伝熱係数〔kcal/m²hr℃〕
添字

1, 2, 3, 4 : 第1, 2, 3, 4 効用缶

0 : 加熱蒸気

F : 原液

参考文献

- 1) 亀井三郎, 新版化学機械の理論と計算, 産業図書(昭和48年)134頁
- 2) 同上, 123頁, 図4.8
- 3) 同上, 135~137頁
- 4) 日本機械学会蒸気表(1968)106頁, 5節 K関数(飽和線)
- 5) 同上, 6頁, 表I-1
- 6) 化学工学協会編, 化学工学プログラミング演習, 培風館(昭和51年)112頁

(昭和56年11月26日受理)