

共用型窓口の効果について

茨城大 工学部 佐藤 司
同 森 雅夫

1. モデルについて

J航空会社における電話予約サービス業務を考える。今、このサービスセンターには国内線、国際線の両方の客が電話して来る。そして、これらの客を処理するために国内線専用、国際線専用窓口をもうけてある。このようなやり方だと、国際線の受付が手一杯なのに国内線が手空きとなるような不都合な事も多い。だからといって全員が両方の受け付けをできるように訓練することも大変である。そこで、係の何人かを訓練して両方の受け付けをできるようにすると、混雑の整理にどれ程役立つかを調べてみたい。

ここで、次のようなモデルを考える。

- (1). 国内線専用窓口、国際線専用窓口、共用窓口が各々 S_1 , S_2 , S_3 個あり, $S_1 + S_2 + S_3 = S$ とする。
- (2). 国内線、国際線のサービスを受けようとする客の到

着間隔は各々、平均 $\frac{1}{\lambda_1}$, $\frac{1}{\lambda_2}$ の指数分布に従う。

(3). 各国内線専用窓口、各国際線専用窓口におけるサービス時間は各々、平均 $\frac{1}{\mu_1}$, $\frac{1}{\mu_2}$ の指数分布に従う。

共用窓口におけるサービスは、混惑などによる処理能力の低下を考慮して、

(4). 各共用窓口における国内線、国際線のサービス時間は各々、平均 $\frac{1}{\mu_3}$, $\frac{1}{\mu_4}$ の指数分布に従う。

とし、

(5). 国内線専用窓口、国際線専用窓口が各々ふさがっているとき、到着した双方の客は共用窓口に流れ込む。

とする。

このモデルにおいて、システムの状態として、国内線専用窓口の客の占有数 i_1 、国際線専用窓口の客の占有数 i_2 、共用窓口で国内線のサービスを受けている客の数 i_3 、共用窓口で国際線のサービスを受けている客の数 i_4 の組 (i_1, i_2, i_3, i_4) をとることによって、時間パラメータ連続のマルコフ連鎖を導くことができる。このとき、国内線専用窓口の客の占有数 i_1 によって状態を組分けすると、このマルコフ連鎖を記述する無限小生成作用素 \tilde{Q} は、次のようなブロック三重対角行列となる。

$$(1) \quad \tilde{Q} = \begin{array}{c|cccc} & \underline{0} & \underline{1} & \underline{2} & \dots & \underline{s_1} \\ \hline \underline{0} & T & \lambda_1 I_m & 0_m & \dots & 0_m \\ \underline{1} & \mu_1 I_m & T - \mu_1 I_m & \lambda_1 I_m & \dots & 0_m \\ \underline{2} & 0_m & 2\mu_1 I_m & T - 2\mu_1 I_m & \lambda_1 I_m & \dots & 0_m \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \underline{s_1} & 0_m & \dots & (s_1 - 1)\mu_1 I_m & T - (s_1 - 1)\mu_1 I_m & \lambda_1 I_m & 0_m \end{array}$$

ここで、 \underline{i} ($0 \leq i \leq s_1$) は、国内線専用窓口の客の占有数が i であるような状態の組を表わしている。 $m = (s_2 + 1)(s_3 + 1)(s_3 + 2)/2$ として、 I_m は $m \times m$ 単位行列、 0_m は $m \times m$ 零行列を表わし、 T や Δ_1 は同じ組間の推移率を表わす無限小生成作用素のなす $m \times m$ 行列である。

また、 $\underline{e}_a, \underline{e}_m$ を各々、すべての要素が 1 の $(s_1 + 1)m$ 次元列ベクトル、 m 次元列ベクトルとし、 $\underline{0}_a, \underline{0}_m$ を各々、すべての要素が 0 の $(s_1 + 1)m$ 次元列ベクトル、 m 次元列ベクトルとすると

$$(2) \quad \tilde{Q} \underline{e}_a = \underline{0}_a$$

より、

$$(3) \quad \begin{array}{l} (T + \lambda_1 I_m) \underline{e}_m = \underline{0}_m \\ (T + \Delta_1) \underline{e}_m = \underline{0}_m \end{array}$$

がいえる。

さらに、無限小生成作用素 T を詳細に表わすために、状態

$\underline{0} = (0, i_2, i_3, i_4)$ から $\underline{0}$ への推移を考える。このとき、国際線専用窓口の客の占有数 i_2 によって状態をさらに組分けすると、無限小生成作用素 T は、

$$(4) \quad T = \begin{array}{c} \begin{array}{c} \underline{0}' \\ \underline{1}' \\ \underline{2}' \\ \vdots \\ \underline{s_2}' \end{array} \begin{array}{|c|} \hline \begin{array}{cccc} \underline{0}' & \underline{1}' & \underline{2}' & \vdots \\ \hline T\lambda & \lambda_2 I_n & 0_n & \dots \\ \mu_2 I_n & T\lambda - \mu_2 I_n & \lambda_2 I_n & \dots \\ 0_n & 2\mu_2 I_n & T\lambda - 2\mu_2 I_n & \lambda_2 I_n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ (s_2-1)\mu_2 I_n & T\lambda - (s_2-1)\mu_2 I_n & \lambda_2 I_n & \dots \\ 0_n & \dots & 0_n & s_2 \mu_2 I_n \end{array} \\ \hline \end{array} \end{array}$$

と表わされ、これもブロック三重対角行列となっている。ここで、 $\underline{i_2}$ ($0 \leq i_2 \leq s_2$) は国際線専用窓口の客の占有数が i_2 であるような状態の組 $(0, i_2, i_3, i_4)$ ($0 \leq i_2 \leq s_2$) を表わしており、 $n = (s_3 + 1)(s_3 + 2)/2$ として、 I_n は $n \times n$ 単位行列、 $T\lambda$ 、 Λ_2 は $n \times n$ 行列である。

一見、(1)式は、PH/M/C(N)モデルから導かれたマルコフ連鎖の無限小生成作用素 \tilde{Q} ([4], chap.3)において、 $N=C=S_1$ 、 $T\lambda = \lambda_1 I_m$ 、 $\mu = \mu_1$ として、状態 $\underline{N} = \underline{S_1}$ から $\underline{N} = \underline{S_1}$ への無限小生成作用素 $T + T\lambda - c\mu I$ を $T + \Lambda_1 - s_1 \mu_1 I_m$ と置いたものと似ている。これから上の問題を PH/M/S₁(S₁)モデルとして定式化できるかに思えるが、そうはいかない。というのは、PH/M/S₁(S₁)モデルでは $T\lambda = \lambda_1 I_m = \Lambda_1$ が成り立っているが、我々の問題で

$\lambda_1 I_m \neq A_1$ であり、さらに、 $T^0 A^0$ の意味する所から $T^0 A^0 = \lambda_1 I_m$ も成り立たない。したがって、PH/M/d(N)モデルの解析法をそのまま利用するわけにはいかない。次節では、(1)式で表わされたマルコフ連鎖の定常分布 \underline{x} を求めるアルゴリズムを紹介しよう。

2. アルゴリズム

状態の組分けに対応して定常分布 \underline{x} も小ベクトルに分割し

て、

$$(5) \quad \underline{x} = [x_0, x_1, x_2, \dots, x_{s_1}]$$

と表わす。定常分布 \underline{x} は、 $\underline{x} \tilde{Q} = \underline{0}$ を満たすから、状態方程式は、

$$x_0 T + \mu_1 x_1 = \underline{0}_m$$

$$(6) \quad \lambda_i x_{i-1} + x_i (T - i \mu_i I_m) + (i+1) \mu_i x_{i+1} = \underline{0}_m \quad (1 \leq i \leq s_1 - 1)$$

$$\lambda_1 x_{s_1-1} + x_{s_1} (T + A_1 - s_1 \mu_1 I_m) = \underline{0}_m$$

$$(7) \quad \sum_{i=0}^{s_1} x_i e_m = 1$$

となる。(6)式の両辺に右から e_m を掛けて、(3)式を使うと、

$$(8) \quad x_i e_m = \frac{1}{i!} \left(\frac{\lambda_1}{\mu_1} \right)^i x_0 e_m \quad (1 \leq i \leq s_1)$$

を得る。(8)式を(7)式に代入して、

$$\sum_{i=0}^{s_1} x_i e_m = \sum_{i=0}^{s_1} \frac{1}{i!} \left(\frac{\lambda_1}{\mu_1} \right)^i x_0 e_m = 1$$

したが、 τ 、

$$(9) \text{-----} \sum_{i=0}^{s_1} x_i e_m = \frac{1}{i!} \left(\frac{\lambda_1}{\mu_1} \right)^{i_1} / \sum_{j=0}^{s_1} \frac{1}{j!} \left(\frac{\lambda_1}{\mu_1} \right)^j \quad (0 \leq i_1 \leq s_1)$$

を得る。この(9)式は、定常状態において国内線専用窓口の客の占有数が i_1 ($0 \leq i_1 \leq s_1$)である確率を表わしている。

つぎに、 $K(i_1) = T - i_1 \mu_1 I_m$ 、 $L(i_1) = i_1 \mu_1 I_m$ とおくと、(6)式は、

$$\sum_0 K(0) + \sum_1 L(1) = Q_m$$

$$(10) \text{-----} \lambda_1 \sum_{i=1} x_{i-1} + \sum_i K(i) + \sum_{i+1} L(i+1) = Q_m \quad (1 \leq i \leq s_1-1)$$

$$\lambda_1 \sum_{s_1-1} x_{s_1-1} + \sum_{s_1} (K(s_1) + \Lambda_1) = Q_m$$

と書き替えられる。これを行列表示すると、

$$(11) \text{-----} \begin{bmatrix} x_0, \text{-----}, x_{s_1} \end{bmatrix} \begin{vmatrix} K(0) & \lambda_1 I_m & 0_m & & & 0_m \\ L(1) & K(1) & \lambda_1 I_m & & & \\ 0_m & L(2) & K(2) & \lambda_1 I_m & & \\ & & & & & 0_m \\ & & & & L(s_1-1) & K(s_1-1) & \lambda_1 I_m \\ 0_m & & & 0_m & L(s_1) & K(s_1) + \Lambda_1 & \end{vmatrix} = [Q_m, \text{-----}, Q_m]$$

となる。次にこの行列を変形して、 x_i を x_{i-1} だけの関係式で表わすように工夫する。

まず、 $\{\text{第}(s_1-1)\text{列} \times (K(s_1) + \Lambda_1)\} - \{\text{第}s_1\text{列} \times L(s_1)\}$ とすると、
第 (s_1-1) 列は、

$$\left[\begin{array}{c} 0_m \\ 0_m \\ \lambda(K(S_i)+\Delta_i) \\ K(S_{i-1})(K(S_i)+\Delta_i)-\lambda L(S_i) \\ 0_m \end{array} \right] \stackrel{\text{put}}{=} \left[\begin{array}{c} 0_m \\ 0_m \\ R(S_{i-1}) \\ S(S_{i-1}) \\ 0_m \end{array} \right]$$

となり、

$$\left[\begin{array}{c} [x_0, \dots, x_{s_i}] \\ \vdots \\ 0_m \end{array} \right] \left[\begin{array}{cccc} K(0) & \lambda I_m & 0_m & 0_m \\ L(1) & K(1) & \lambda I_m & \\ 0_m & & & \\ & L(s_{i-2}) & K(s_{i-2}) & R(s_{i-1}) & 0_m \\ & & L(s_{i-1}) & S(s_{i-1}) & \lambda I_m \\ 0_m & & 0_m & 0_m & K(s_i)+\Delta_i \end{array} \right] = [0_m, \dots, 0_m]$$

を得る。以下、同様の手順をふむことにより、

$$(12) \quad \left[\begin{array}{c} [x_0, \dots, x_{s_i}] \\ \vdots \\ 0_m \end{array} \right] \left[\begin{array}{cccc} S(0) & R(1) & 0_m & \dots & 0_m \\ 0_m & S(1) & R(2) & & \\ & & & & \\ & & 0_m & S(s_{i-2}) & R(s_{i-1}) & 0_m \\ & & & 0_m & S(s_{i-1}) & \lambda I_m \\ 0_m & & & & 0_m & K(s_i)+\Delta_i \end{array} \right] = [0_m, \dots, 0_m]$$

を得る。ここで、 $S(s_i) = K(s_i) + \Delta_i$ 、 $R(s_i) = \lambda I_m$ とおくと、

$$(13) \quad \begin{aligned} S(i) &= K(i)S(i+1) - R(i+1)L(i+1) & (s_i - 1 \geq i \geq 0) \\ R(i) &= \lambda S(i+1) & (s_i - 1 \geq i \geq 0) \end{aligned}$$

で表わされる。つまり、 \tilde{Q} と等価なブロック二重対角行列を得たことになる。これを解くのは容易である。

まず、(12)式より、

$$(14) \quad x_0 S(0) = 0_m$$

を得る。また、(9)式より、

$$(15) \text{-----} \underline{x}_0 \underline{e}_m = 1 / \sum_{j=0}^{s_1} \frac{1}{j!} \left(\frac{\lambda_1}{\mu_1} \right)^j$$

である。これら(14)式、(15)式の連立 m 次元方程式の解がベクトル \underline{x} になっている。そこで $S(0)$ の第1列を \underline{e}_m に替えて、 $S(0)$ の残りの部分を S_L とすると、

$$(16) \text{-----} \underline{x}_0 [\underline{e}_m, S_L] = \left[1 / \sum_{j=0}^{s_1} \frac{1}{j!} \left(\frac{\lambda_1}{\mu_1} \right)^j, 0_m, \text{-----}, 0_m \right]$$

よって、(16)式の両辺に右から $[\underline{e}_m, S_L]^{-1}$ を掛けて、

$$(17) \text{-----} \underline{x}_0 = \left[1 / \sum_{j=0}^{s_1} \frac{1}{j!} \left(\frac{\lambda_1}{\mu_1} \right)^j, 0_m, \text{-----}, 0_m \right] [\underline{e}_m, S_L]^{-1}$$

を得る。ここで、 \underline{x}_0 が求まるので(11)式を用いて、次々に

$$(18) \text{-----} \begin{aligned} \underline{x}_1 &= -\underline{x}_0 K(0) \underline{L}(1)^{-1} = -\frac{1}{\mu_1} \underline{x}_0 T \\ \underline{x}_i &= -[\lambda_1 \underline{x}_{i-2} + \underline{x}_{i-1} K(i-1)] \underline{L}(i)^{-1} \\ &= -\frac{1}{i\mu_i} [\lambda_1 \underline{x}_{i-2} + \underline{x}_{i-1} K(i-1)] \quad (2 \leq i \leq s_1) \end{aligned}$$

が得られる。

以上により定常分布 \underline{x} が求められたが、このモデルでは次のような諸特性量が興味の対象となろう。定常状態において国内線のサービスを受けようとする客の呼損率 P_1 、国際線のサービスを受けようとする客の呼損率 P_2 とすると、それぞれ

$$(19) \text{ ----- } P_1 = P_2 \{ \text{国内線専用窓口と共用窓口が共にふさがっている} \}$$

$$= \sum_{j: i_3 + i_4 = S_3} [X_{s_1}]_j$$

$$(20) \text{ ----- } P_2 = P_2 \{ \text{国際線専用窓口と共用窓口が共にふさがっている} \}$$

$$= \sum_{i=0}^{S_1} \sum_{j: i_2 + S_2, i_3 + i_4 = S_3} [X_{i_1}]_j$$

で与えられる。また、システム全体の呼損率を評価するために、

$$(21) \text{ ----- } P_t = \frac{\lambda_1 P_1 + \lambda_2 P_2}{\lambda_1 + \lambda_2}$$

なる量を考え、これを *Total Loss Rate (T.L.R.)* と呼ぶことにする。この T.L.R. P_t はシステム全体に対する任意の客の呼損率を表わす量と考えられる。次にいくつかの数値例の結果を紹介する。

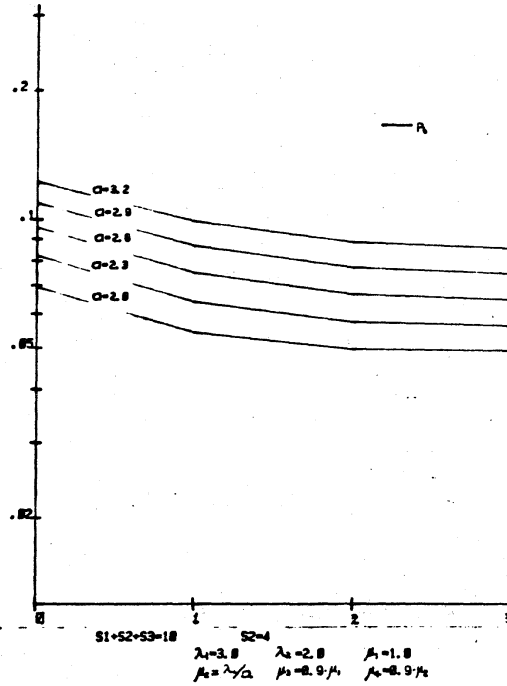
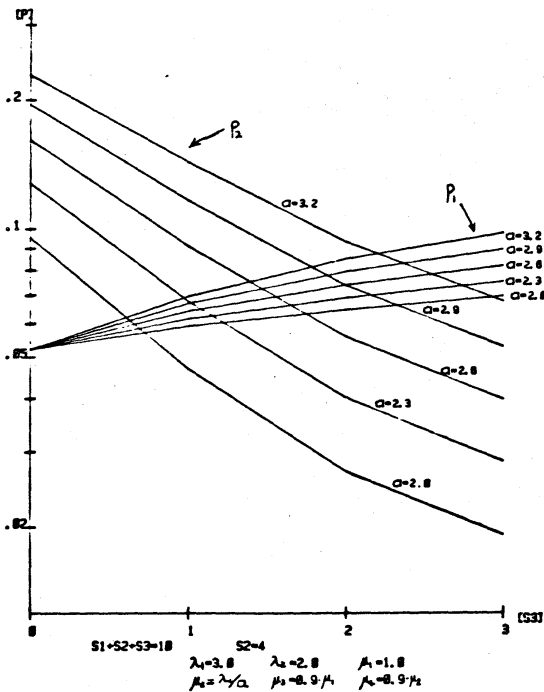
3. 数値例

ここでは、いくつかのケースに対して呼損率を計算してみよう。その一部をグラフにしたのが [4.1], [4.2] である。これらのグラフは総窓口数 $S_1 + S_2 + S_3$ 、国際線専用窓口数 S_2 を一定にし、横軸に共用窓口数 S_3 、縦軸に呼損率を取ったものである。また、 a の値を変化させていくことにより国際専用窓口における客のサービス率 μ_3 、共用窓口の国際線の客のサービス率 μ_4 を変えていき、共用窓口の効果がどのようなになるかを見ている。ただし、いずれも $\mu_3 = 0.9\mu_1$, $\mu_4 = 0.9\mu_2$ としている。グラフ [4.1], [4.2] のいずれにおいても共用窓口数 S_3 を増す

に従い、国内線の客の呼損率 P_1 が増加し、国際線の客の呼損率 P_2 が減少していく傾向が分る。そして、 P_1 の増加する割合は、 P_2 の減少する割合よりもかなり小さい。この結果、システム全体に対する任意の客の呼損率 $T.L.R. P_k$ は減少していく。([4.2] を見よ。)

また、次の [Tab.1] は、 $S_1 + S_2 + S_3 = 10$ 、 $\lambda_1 = 3$ 、 $\lambda_2 = 2$ 、 $\mu_1 = \mu_2 = 1$ 、 $\mu_3 = \mu_4 = 0.9$ として、 S_1, S_2, S_3 をいろいろ変化させたときの P_1, P_2, P_k の値を表にしたものである。この表において共用窓口がない場合 ($S_3 = 0$) には、 $S_1 = 6, S_2 = 4$ で P_k が最小になるが、共用窓口が許される場合には、 $S_1 = 4, S_2 = 2, S_3 = 4$ で P_k が最小になり、前者は後者の2倍以上になっている。このことから、この数値例においては、共用窓口を許したことによりシステムがかなり向上したことが分る。これらの計算結果をもとにして、適当なコストを導入することにより、よりよいシステムの設計が可能となろう。

以上の数値例では、いずれの場合にも $\mu_3 = \alpha \mu_1, \mu_4 = \alpha \mu_2$ としたものであったが、能率低下の係数 α の値によつては上述の結果はかならずしもあてはまらないであろう。



[G.1] 各タイプの客の呼損率

[G.2] 任意の客の呼損率(T.L.R.)

[総窓口数を10とし、国際線専用窓口数 S_2 を4として、
 共用窓口数 S_3 を変化させたときの呼損率の変化を表わ
 す。ここで、 $\alpha = \lambda_2 / \mu_2$

$$T.L.R. P_t = \frac{\lambda_1 P_1 + \lambda_2 P_2}{\lambda_1 + \lambda_2}$$

である。]

[Tab.1] $S_1 + S_2 + S_3 = 10$, $\lambda_1 = 3$, $\lambda_2 = 2$
 $\mu_1 = \mu_2 = 1$, $\mu_3 = \mu_4 = 0.9$

S_1	S_2	S_3	P_1	P_2	P_t
8	2	0	0.00813	0.40011	0.16492
7	2	1	0.01324	0.22371	0.09743
6	2	2	0.01878	0.11731	0.05822
5	2	3	0.02364	0.06388	0.03974
4	2	4	0.02751	0.04060	0.03275
7	3	0	0.02186	0.21038	0.09727
6	3	1	0.02870	0.10690	0.05998
5	3	2	0.03446	0.05597	0.04306
4	3	3	0.03898	0.03435	0.03713
6	4	0	0.05216	0.09528	0.06941
5	4	1	0.05925	0.04694	0.05433
4	4	2	0.06484	0.02706	0.04973
3	4	3	0.06982	0.01916	0.04956
5	5	0	0.11005	0.03672	0.08072
4	5	1	0.11698	0.01916	0.07852
3	5	2	0.12352	0.01261	0.07916

4. 今後の問題

ところで、定常分布 π は状態方程式(6), (7)を解くことによ
 って求められるが、この方程式は $(S_1+1)(S_2+1)(S_3+1)(S_3+2)/2$ 個
 の未知数(これは非常に多数)を含み、このまま数値計算を行う
 にはかなり大きい容量をもつ計算機でさえ不可能な場合があ
 る。そこで、ここではこの方程式を解くのに、 π_i を π_H だけの
 関係式で表わし、 $\pi_i \in m (0 \leq i \leq S_1)$ の情報((19)式)を使うこと
 により、方程式を $(S_1+1)(S_2+1)(S_3+1)(S_3+2)/2$ 元から $(S_2+1)(S_3+1)(S_3+2)/2$ 元
 に下げ、その $(S_2+1)(S_3+1)(S_3+2)/2$ 元連立方程式を直接解
 いた。さらに、前述のアルゴリズムで(11)式の行列を変形して
 π_i を π_H だけの関係式で表わす際に $m \times m$ 行列の積と差を重ねて

行うため数値計算においてはかなり丸め誤差がきいてきた。
このことからここで述べた計算法ではまだ十分とは言えず、
もっと生成行列の次元を低次元に落して計算ができ、計算誤
差の少ないような方法が使われることが望ましい。

そこで、現在、高橋[5]による *lumping method* を用いると
、計算の効率がどのくらい改良されるかについて検討してい
る。この場合、国内線専用窓口の客の数だけで *lump* する
と、その計算の手間は我々の方法とたいして変わらない。そこ
で、 (i_1, i_2) で *lump* すると、各ブロックの数がかなり小さく
できる。しかし、このように *lump* するとブロック三重対角の
形がくずれ、高橋[5]の一般の場合の方法を用いねばならな
い。この方法だと、確かに我々の方法より窓口数の大きい場
合の計算が可能となるが繰り返えし数が多くなるため、計算
時間が相当に長くなる。詳しくは新めて発表したい。

References

- [1] Neuts, M. F. (1978) Markov chain with application in queueing theory, which have a matrix-geometric invariant vector, *Adv. Appl. Prob.* 10, 185-212.
- [2] Neuts, M. F. (1979) Queues solvable without Rouché's theory, *Operations Research* 27, 767-781.
- [3] Neuts, M. F. (1980) The probabilistic significance of the rate matrix in matrix-geometric invariant vector, *J. Appl. Prob.* 17, 291-296.
- [4] Neuts, M. F. (1981) *Matrix-geometric solutions in stochastic models—An Algorithmic Approach*, The Johns Hopkins University Press.
- [5] Takahashi, Y. (1975) A lumping method for numerical calculations of stationary distributions of Markov chains, *Research Report on Information Sciences B-18*, Department of Information Sciences, Tokyo Institute of Technology.
- [6] 高橋幸雄 (1981) 状態方程式を解く, オペレーションズ・リサーチ 26, 190-196.
- [7] 森村英典, 大前義次 (1975) 応用待ち行列理論, 日科技連出版社.