

トランザクション消滅のあるシステムの定常解析

正員 白井 健二 ((株)情報工房)

非会員 天野 佳則 ((株)京南エレクトクス)

正員 井上 和夫 (立命館大学)

The stationary analysis for the system with transaction lost

Kenji Shirai, Member, Yoshinori Amano, Non-Member, Kazuo Inoue, Member

The purpose of this paper is to theoretically identify that there exist stationary distributions in the system with transaction lost. In order to examine this type of system, we formulate and analyze the input/output process as the counting process based on point process. Accordingly, we make clear that this stationary distributions are the geometrical distributions as well. We, also analyze the average transit time in the stationary. We presented the simulation results in order to evaluate this system.

キーワード：トランザクション消滅，点過程，計数過程，マルチンゲール，リトルの公式

1. まえがき

トランザクション消滅とは，入力されたトランザクションが期待される出力の以前に，系外に出力されるトランザクションの事をいう。具体例としては，高速道路上，途中出入口が存在する場合，製造業での製品検査工程での“ロットアウト”，あるいはC/S型ネットワークシステムでの衝突によるフレーム消滅^{(7),(8),(9)}等が考えられる。これらのトランザクション消滅は，システム性能全体に大きな影響を与える事は良く知られている。トランザクション消滅が，システム全体にどのように影響されるかについての研究は，筆者等の知る限り数少ない。筆者等は，トランザクション消滅のあるシステムの入出力過程全体を“バーチャルキュー”(無限大キュー)という新しい考え方を導入している。システムのモデル化を計数過程^{(1),(4)}を用いる事により，本システムに与える影響について解析した。

本研究は，システム性能向上を目的としたシステム容量設計につながる基礎的研究である。筆者等は，計数過程を用いる事によりシステム上に発生する待ち行列の定常分布を明らかにした。

計数過程を用いた過去の研究には，確率過程をベースにした待ち行列システムの基本的定式化のための解析がなされている。さらに，最適制御問題に対して，その定式化とダイナミックプログラミングによる解析が成されている⁽¹⁾。製造業における在庫管理の最適化問題として，計数過程を用いて最適解を求めている⁽²⁾。トークンリング型ネットワークをジャンプ型確率微分方程式^{(1),(4),(5)}によりモデル化し，到着とサービス開始時刻が独立な確率過程として解析されている⁽³⁾。本研究の構成は，確率過程にお

ける点過程論^{(1),(4),(6)}をベースに，計数過程を活用して理論展開を試みている。本研究における点過程とは，トランザクションそのものを点列と見なし，その点列の個数を計数過程として定義する。その時，消滅したトランザクションの論理的扱いとしては，出力構造を持つ独立した計数過程モデルとして定義している。さらに，システムモデルの定式化。定常時における分布とその解析，併せてシミュレーション結果を示した。但し，定常時におけるトランザクションは，それぞれ独立した定常ポアソン過程と仮定する事により定常分布を求めている。本研究で定義した“ポテンシャルインプット”とは，システムに入るまでのトランザクション点列をいう。つまり，トランザクション消滅が全く発生していない状態であり，文献⁽²⁾での“ポテンシャルインプット”とは，意味が異なる。“アクチュアルアウトプット”とは，システム上でのトランザクション消滅が原因で，“ポテンシャルインプット”から消滅トランザクションが減算された出力トランザクション点列をいう。以上の結果より本研究では，消滅トランザクションそのものをシステム上で，出力構造を持つ独立した計数過程モデルとして定義している。

2. 対象システム及び解析モデルについて

<2-1> 入出力および，消滅トランザクションの計数過程について

ある待ち行列系において，システムに到着するトランザクションが，時刻 $\{\hat{T}_q, q=1,2,\dots\}$ をレート $\hat{\alpha}_i (>0)$ のポア

ソソ点過程, 本システム中に消滅するトランザクションが, 時刻 $\{C_r, r=1,2,\dots\}$ で消滅し, かつそのレートを $C_r^* (>0)$ のポアソン点過程, システムの出力トランザクションは, 時刻 $\{T_q, q=1,2,\dots\}$ で出力し, かつそのレートを α_q のポアソン点過程とする。システムに入力されるトランザクションは, システム内に蓄積される。この蓄積されたトランザクションを待ち行列と呼び, 時刻 $t(\geq 0)$ におけるその個数を $Q(t)$ とする。本システムの解析モデルを連続時間パラメータの確率過程としてモデル化すると以下の様に定式化できる。

$\{\hat{A}(t); t \geq 0\}$ をポテンシャルインプットを表す計数過程 (確率過程) とする時, $\hat{A}(t)$ の計数過程は

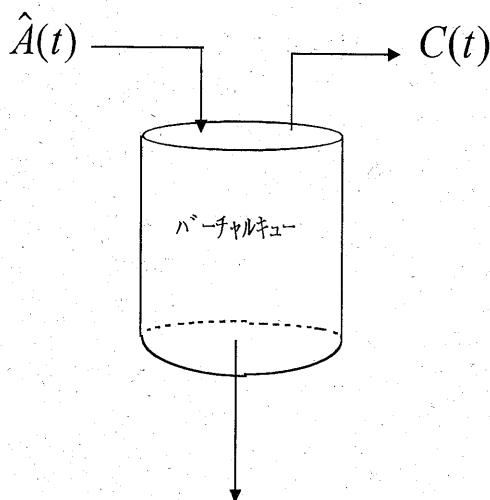


図1 システム概念図
Fig.1 System Concept

$$\hat{A}(t) = \sum_{q \geq 1} \mathbf{1}_{\{T_q \leq t\}}, \quad q = 1, 2, \dots \quad (1)$$

また, アクチュアルアウトプット $A(t)$ の計数過程は

$$A(t) = \sum_{q \geq 1} \mathbf{1}_{\{T_q \leq t\}}, \quad q = 1, 2, \dots \quad (2)$$

と表される。消滅トランザクションの計数過程は, 点過

程は

$$\{C_r\} = \{C_1, C_2, C_3, \dots\} \in C \quad (3)$$

である事から, 消滅トランザクションの計数過程は,

$$C(t) = \sum_{r \geq 1} \mathbf{1}_{\{C_r \leq t\}}, \quad r = 1, 2, \dots \quad (4)$$

と書ける。ここで, 上記指示関数 $\mathbf{1}_{\{ \cdot \}}$ は, 集合 $\{ \cdot \}$ 上で 1, それ以外では 0 の値をとる指示関数である。例えば, $\mathbf{1}_{\{T_q \leq t\}}$ は, 時刻 $0 \leq T_q \leq t$ で $\{T_q\}$ の個数をカウントしている。本システムのモデル式は,

$$Q(t) = Q(0) + \hat{A}(t) - C(t) - A(t) \quad (5)$$

である。この解析モデルは, ポテンシャルインプット, アクチュアルアウトプットおよびトランザクション消滅をそれぞれ独立した確率過程として待ち行列を表現している。連続時間下でのトランザクション消滅をより忠実に表現出来るところに, 計数過程の利点がある。ここで, 独立性の仮定については, 文献(3)で述べられている様に局へのフレーム到着とサービス開始時刻が独立した確率過程としている。トークンリング型ネットワークにおいてもトークンそのものが消失した場合, 局のフレームが滞留する事になる。この事を考え合わせても本システムにおいて, 入出力過程とトランザクション消滅過程を, それぞれ独立したポアソン過程と仮定しても本質的な差異はないと思われる。

<2・2> 入出力および消滅トランザクション F_t -強度

確率空間 (Ω, F, P) 上で一般的な考察を行う。(5)式に対し

て $F_t \subset F, t \geq 0$ を増大 σ -加法族

$$F_t = \sigma\{Q(s), \hat{A}(s), A(s), C(s); 0 \leq s \leq t\} \quad (6)$$

とする。消滅トランザクションは, システムから見た場合, 出力構造を持った計数過程として定義する。(図1参照) システム上から出力されずに, 系外へ出力される計数過程として定義する。ここで, (5)式について F_t -強度を定義す

る。 $\hat{A}(t)$ は, F_t -強度 $\{\hat{\alpha}_t\}$, $C(t)$ は, F_t -強度 $\{C_t^*\}$ が, 存在するものとする。又, 消滅トランザクションの発生は, ポテンシャルインプットに依存している。従って, 点過程 $\{C_t; t \geq 0\}$ が与えられた時, 任意の非負の F_t -可予測過程 $\{X_t; t \geq 0\}$ に対して入力強度 $\{\hat{\alpha}_t\}$ を持ち, その時の出力強度が, $\{C_t^*\}$ である様なシステムと考える。

$$E[\int_0^\infty X_s dC_s] = E[\int_0^\infty X_s C_s^* ds] \quad (7)$$

が成り立つ確率過程 $\{C_t^*, t \geq 0\}$ が存在する時、この $\{C_t^*\}$ を点過程 $\{C_t^*, t \geq 0\}$ の F_t -強度と呼ぶ。よって

$$C_t^M = C_t - \int_0^t C_s^* ds \quad (8)$$

を定めると、 $\{C_t^M, t \geq 0\}$ は、 F_t -局所マルチンゲールである。

<定義 1>: 【独立性の仮定】

任意の確率過程 $Y(t)$ を

$$X_t(n) = \mathbf{1}_{\{Y(t)=n\}}, \quad n = 0, 1, \dots \quad (9)$$

と定義する時、 $Y(t)$ の確率分布を

$$P_t(n) = E[X_t(n)], \quad n = 1, 2, \dots \quad (10)$$

と表せば

$$\begin{aligned} E[X_t(n) \cdot C_t^*] &= E[X_t(n)] \cdot E[C_t^*] \\ &= P_t(n) \cdot E[C_t^*] \end{aligned} \quad (11)$$

が成立する時、 $\{X_t\}$ 、 $\{C_t^*\}$ は独立であるという。このような仮定は、 F_t -強度がノンランダムの場合、自明である。ここで、

$$E[C_t^*] = k_c(t), \quad t \geq 0 \quad (12)$$

となる非負の実関数 $k_c(t)$ により表す。

<2.3> システム定常分布

ここで、確率過程

$$Z_t(n) = \mathbf{1}_{\{Q(t)=n\}}, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (13)$$

を定義する。この時 $Q(t)$ の確率分布は

$$P_t(n) = E[Z_t(n)], \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (14)$$

と書ける。ここで、

$$\{Z_t(n), t \geq 0\}, n = 0, 1, 2, \dots \quad (15)$$

は、入出力のジャンプにより定まるから⁽¹⁾

$$Z_t(n) = Z_0(n) + \int_0^t f_s ds + m_t \quad (16)$$

ここで、 $Z_t(n)$ は、計数過程。 $f_t: F_t$ -更新過程、 m_t : 局所マルチンゲール。かつ、入出力過程およびトランザクション消滅過程は、マルコフ性を仮定している⁽¹⁾。よって、(5)式は、下記の様になる。⁽¹⁾

$$\begin{aligned} f_t(n) &= \{Z_t(n-1)\mathbf{1}_{(n>0)} - Z_t(n)\}(\hat{\alpha}_t - C_t^*) \\ &\quad + \{Z_t(n+1) - Z_t(n)\mathbf{1}_{(n=0)}\}\alpha_t \\ n &= 0, 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} Z_t(n) &= Z_0(n) + \int_0^t \{Z_s(n-1)\mathbf{1}_{(n>0)} - Z_s(n)\} \\ &\quad (\hat{\alpha}_s - C_s^*) ds \\ &\quad + \int_0^t \{Z_s(n+1) - Z_s(n)\mathbf{1}_{(n=0)}\} \alpha_s ds + m_t \end{aligned} \quad (18)$$

ただし、

$$m_t(n) = M_t^{\hat{A}}(n) + M_t^A(n) \quad (19)$$

$$\begin{aligned} M_t^{\hat{A}}(n) &= \int_0^t \{Z_s^-(n-1)\mathbf{1}_{(n>0)} - Z_s^-(n)\} \\ &\quad (d\hat{A}_s - (\hat{\alpha}_s - C_s^*) ds) \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} M_t^A(n) &= \int_0^t \{Z_s^-(n+1) - Z_s^-(n)\mathbf{1}_{(n=0)}\} \\ &\quad (dA_s - \alpha_s \mathbf{1}_{(A_s>0)}) ds \end{aligned} \quad (21)$$

但し、(20)、(21)式において s^- は、各時点 s の直前の値であり、各被積分項は s^- によって定まる F_t -可予測過程であり、しかも有界である事を意味している。即ち、各 $\{M_t^{\hat{A}}\}$ 、 $\{M_t^A\}$ は、 F_t -マルチンゲールとなる。⁽⁴⁾

ここで、(18)式の右辺第二項および第三項に対して $E(\cdot)$ 演算を実行すると、独立性の仮定⁽³⁾より

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}[P_t(n)] &= -(\alpha \mathbf{1}_{(n>0)} + \hat{\alpha} - C^*)P_t(n) + \\ &\quad (\hat{\alpha} - C^*)P_t(n-1)\mathbf{1}_{(n>0)} \\ &\quad + \alpha P_t(n+1) \\ t &\geq 0, n = 0, 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (22)$$

が得られる(付録参照)。

ここで、(22)式の Kolmogorov の方程式に対する定常分布は、

$$P(n) = \left(\frac{\hat{\alpha} - C^*}{\alpha} \right)^n P(0) \quad (23)$$

$$n = 0, 1, 2, \dots$$

となり、 $P(0)$ は、

$$\sum_{n=0}^{\infty} P(n) = 1 \quad (24)$$

となる様に定めた定数である。この時の存在条件は

$$\frac{\hat{\alpha} - C^*}{\alpha} < 1 \quad (25)$$

が得られる。すなわち、(25)式は(23)式の定常分布が唯一存在するための条件である。 $C^* = 0$ の時は、トランザクション消滅が発生しない場合である。これは、通常の $M/M/1$ の待ち行列系である。 $C^* = \hat{\alpha}$ の時は、トランザクションがすべて消滅している状態である。

$C^* < \hat{\alpha}$ の時、入力入出力およびトランザクション消滅を、それぞれ独立した確率過程とした構造が、マルコフ過程における $M/M/1$ の待ち行列の法則に従う事を示している。

<2.4> システム定常解析

筆者等は、トランザクション消滅をシステムから見た場合、"消費過程"と認識する。そこで、入出力過程を次の様に考える。バーチャルキューをトランザクション消滅が発生するまでの過程を消費過程とし、この時点で滞留するトランザクションのキューを $Q_1(t)$ 、トランザクション消滅が発生した後の過程を後過程とし、この時点で滞留するトランザクションのキューを $Q_2(t)$ の二つに分けて考える事にする。筆者等は、トランザクション消滅に要する時間が本システムにどのような影響度を持っているかについて解析を試みた。入力から出力までに要する時間をシステム滞留時間と考える。定常時での平均滞留時間をリトルの公式^{(3),(6)}を用いて求めた。

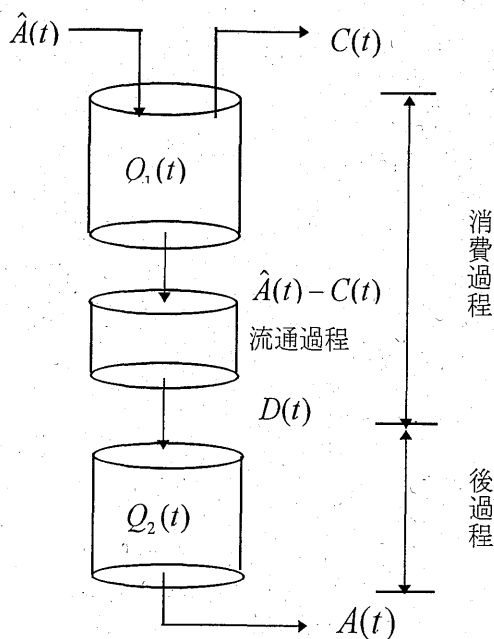


図2. 入出力過程
Fig.2 Input/Output Process

図2. より下記の関係にある。

$$\begin{aligned} Q(t) &= Q_1(t) + Q_2(t) \\ &= \hat{A}(t) - C(t) - A(t) \end{aligned} \quad (26)$$

$D(t)$ の F_i -強度を β_i とすると

$$\beta_i \equiv k(\hat{\alpha}_i - C_i^*) \quad (27)$$

但し、 $0 \leq k \leq 1$ である。

ここで、 $D(t)$ は、流過程という事にする。

$$Q_1(t) = Q_1(0) + (\hat{A}(t) - C(t)) - D(t) \quad (28)$$

$$Q_2(t) = Q_2(0) + D(t) - A(t) \quad (29)$$

$$Q(0) = Q_1(0) + Q_2(0) \quad (30)$$

となる。即ち、 $Q_1(t), Q_2(t)$ の定常分布は、同型の幾何分布となり、このシステムにおけるトランザクションの平均滞留時間は

$$W_R = W_{R1} + W_{R2} \quad (31)$$

と定義できる。今、リトルの公式^{(3),(6)}によれば、

$$W_{R1} = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} nP_1(n)}{\hat{\alpha}} \quad (32)$$

$$W_{R2} = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} nP_2(n)}{\beta} \quad (33)$$

但し、 β は流通過程の出力過程における F_i -強度 β_i の期待値である。又、 $P_1(n), P_2(n)$ はそれぞれ消滅過程、後過程の定常分布である。ここで $P_1(n), P_2(n)$ に関して分布そのものは、同一形態の分布を示し、かつ以下の様に仮定する。

$$P_1(n) \approx P_2(n) \quad (34)$$

よって、システム滞留時間 W_R は、

$$\begin{aligned} W_R &= \left(\frac{1}{\hat{\alpha}} + \frac{1}{\beta} \right) \sum_{n=0}^{\infty} nP_1(n) \\ &= \left(\frac{1}{\hat{\alpha}} + \frac{1}{k(\hat{\alpha} - C^*)} \right) \sum_{n=0}^{\infty} nP_1(n) \quad (35) \\ &< \left(1 + \frac{1}{k} \right) W_{R1} = L \cdot W_{R1} \end{aligned}$$

ここで、 $L(>2)$ はシステム滞留時間に対する流通係数と呼ぶ。

$$P_1(n) = \left(1 - \frac{\hat{\alpha} - C^*}{\alpha} \right) \left(\frac{\hat{\alpha} - C^*}{\alpha} \right)^n, n > 0 \quad (36)$$

と書ける。 $P_1(n)$ は、幾何分布である事から(7)(8),

$$\sum_{n=0}^{\infty} nP_1(n) = \frac{\frac{\hat{\alpha} - C^*}{\alpha}}{1 - \frac{\hat{\alpha} - C^*}{\alpha}} = \frac{\hat{\alpha} - C^*}{\alpha - (\hat{\alpha} - C^*)} \quad (37)$$

が得られる。それ故、(37)式より(38)式を用いれば、 W_{R1} は

$$W_{R1} = \frac{(\hat{\alpha} - C^*)}{\hat{\alpha} \{ \alpha - (\hat{\alpha} - C^*) \}} \quad (38)$$

となる。即ち、(36)式、(39)式によりシステム滞留時間 W_R が求められる。

3. シミュレーション結果およびその考察

(36)式で示した近似式は、本システムに与える影響は W_{R1} によるところが大きい事を示す。この近似そのものに妥当性があるかどうかの検証を示す。図3~図5はシミュレーション開始後しばらく計算値と乖離があるのは、元々、計算値ではシステム上のバーチャルキュー $Q(t)$ が存在しているためである。シミュレーションでは、消費過程の $Q_1(t)$ と後過程の $Q_2(t)$ は、シミュレーション開始時はいずれも Q_1, Q_2 の待ち行列数がいずれも存在しない状態で始めている事に起因する。言い換えれば、過渡状態である。

図3~図5はいずれもシステム滞留時間は、この W_{R1} に大きく依存していると考えられる。かつ、図6は、トランザクション消滅のレート C^* をある程度変化させても、ほぼ一定の値を示している事が分かる。つまり、(36)式での流通係数 L を用いて近似を行った事が、定常時においては、妥当性があると考えられる。

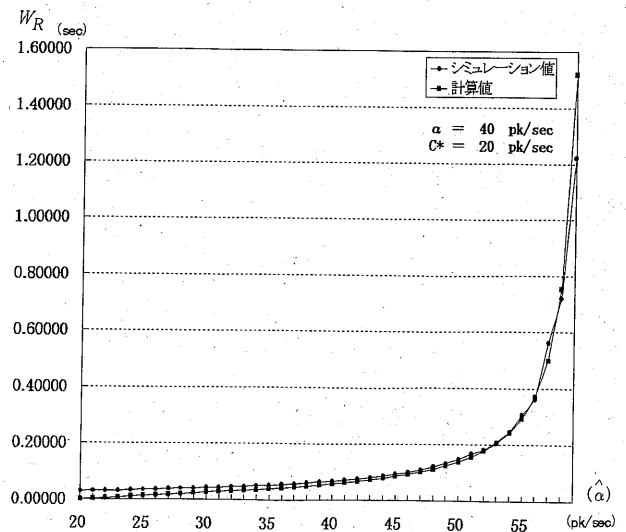


図3. 平均滞留時間に関するシミュレーション及び数値計算結果

Fig.3 The comparison between simulation and calculation for the transit time-lag in stationary

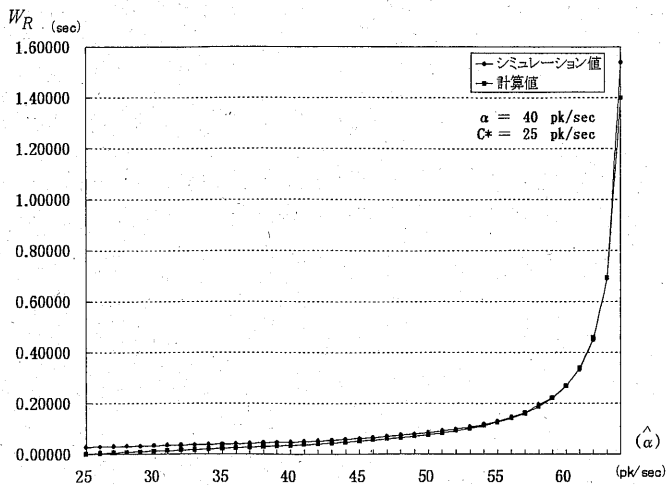


図 4. 平均滞留時間に関するシミュレーション及び数値計算結果

Fig.4 The comparison between simulation and calculation for the transit time-lag in stationary

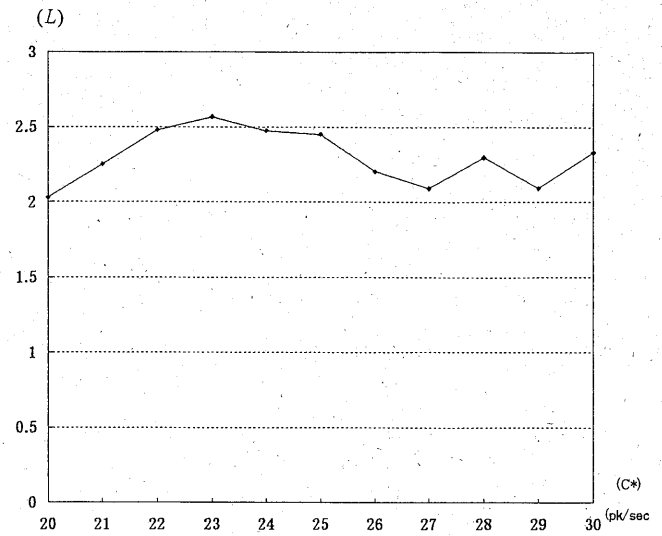


図 6. トランザクション消滅(C^*)とパラメータ(L)との関係

Fig.6 The relationship between the transaction lost(C^*) and parameter(L)

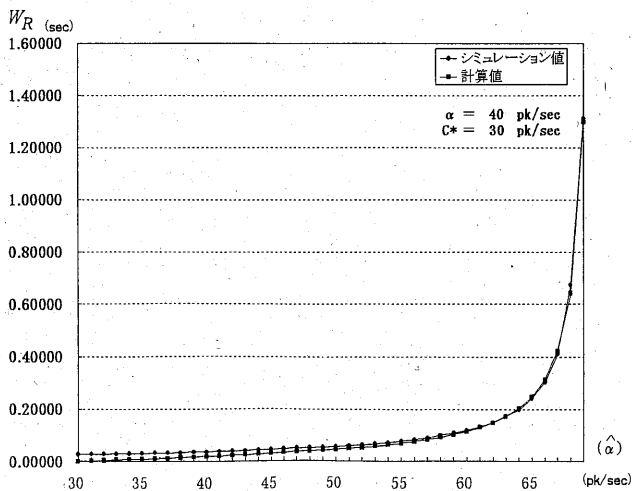


図 5. 平均滞留時間に関するシミュレーション及び数値計算結果

Fig.5 The comparison between simulation and calculation for the transit time-lag in stationary

シミュレーション条件は、下記の通りです。

- トランザクション生成
トランザクション長：100バイト(固定)
発生分布：指数分布(分布のパラメータとして平均値を与える($\hat{\alpha}$))
- トランザクションの処理時間(正常処理分)
処理時間：処理速度から算出($\alpha = 40(pk/sec)$)として一定)
- トランザクション消滅
 C^* と α の比率により算出($C^*/(C^* + \alpha)$)
- シミュレーション時間
20000秒
- 平均滞留時間
上記シミュレーション時間中に、処理対象となった各トランザクションの処理滞留時間の平均値(秒)

4. むすび

本研究は、トランザクション消滅を独立した確率過程として定義する事により、システムモデル式を点過程を応用する事により求めている。ここでは、入出力過程及びトランザクション消滅過程を各々独立したポアソン過程であると仮定した上で、システムの定常確率分布(幾何分布)を求

め、その唯一存在条件も併せて求めた。

さらに、この定常分布を利用する事により、入力されたトランザクションの定常滞留時間(システム滞留時間)をリトルの公式を応用して求めた。本システムに与える要因は、トランザクション消費に費やされる時間が最も大きく影響する事がシミュレーションで確認された。この事により、本研究は、トランザクション消滅が存在する様なシステムに対し、その容量設計のための一手法として有用であると思われる。また、本研究を進めるにあたり、貴重なご意見を頂いた東京電機大学理工学部情報科学科町原文明教授に感謝致します。尚、本シミュレーションに際しては、ネットワークシミュレーションツール“OPNET”を使用した。(株)情報工房 技術本部宇都宮課長には、シミュレーション実行で多大な協力を頂いた。ここで感謝の意を表す。

(平成 10 年 2 月 9 日受付, 平成 10 年 6 月 22 日再受付)

付録 A

$$E\left[\int_0^t \{Z_s(n-1)\mathbf{1}_{(n>0)} - Z_s(n)\}(\hat{\alpha}_s - C_s^*) ds\right] \\ = \int_0^t \{P_s(n-1)\mathbf{1}_{(n>0)} - P_s(n)\} \\ E[\hat{\alpha}_s - C_s^*] ds \quad (A1)$$

となる。次に、第 3 項は

$$E\left[\int_0^t \{Z_s(n+1) - Z_s(n)\mathbf{1}_{(n>0)}\} \alpha_s ds\right] \\ = \int_0^t \{P_s(n+1) - P_s(n)\mathbf{1}_{(n>0)}\} E[\alpha_s] ds \quad (A2)$$

となる。ゆえに、(18)式の $E(\cdot)$ を実行すると

$$P_t(n) = P_t(0) \\ + \int_0^t \{P_s(n-1)\mathbf{1}_{(n>0)} - P_s(n)\} E[\hat{\alpha}_s - C_s^*] ds \\ + \int_0^t \{P_s(n+1) - P_s(n)\mathbf{1}_{(n>0)}\} E[\alpha_s] ds \quad (A3)$$

が得られる。次に、 $\{\hat{A}(t)\}, \{A(t)\}, \{C(t)\}$ の各レート

$\{\hat{\alpha}\}, \{\alpha\}, \{C^*\}$ が、ある非負の $E[\phi_{\hat{\alpha}}] < \infty, E[\phi_{\alpha}] < \infty,$

$E[\phi_C] < \infty$ を満たす確率変数 $\phi_{\hat{\alpha}}, \phi_{\alpha}, \phi_C$ によって、

$\hat{\alpha} \leq \phi_{\hat{\alpha}}, \alpha \leq \phi_{\alpha}, C^* \leq \phi_C$ 、但し、 $t \geq 0$ を満たすなら

定常性から余り離れないと仮定する。よって、(A3)式に微分演算を実行すると

$$\frac{d}{dt}[P_t(n)] = \frac{d}{dt}[P_0(n)]$$

$$+ \frac{d}{dt} \int_0^t \{P_s(n-1)\mathbf{1}_{(n>0)} - P_s(n)\} E[\hat{\alpha}_s - C_s^*] ds \\ + \frac{d}{dt} \int_0^t \{P_s(n+1) - P_s(n)\mathbf{1}_{(n>0)}\} E[\alpha_s] ds \quad (A4)$$

となる。ここで、(11)式に関して

$$E[C_s^*] = k_c(t) \equiv C^* (\text{const.}) \quad (A5)$$

とおく。(A5)式を用いると(A4)式は

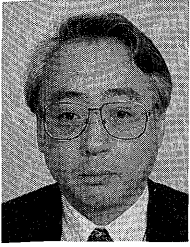
$$\frac{d}{dt}[P_t(n)] = \{P_t(n-1)\mathbf{1}_{(n>0)} - P_t(n)\}(\hat{\alpha} - C^*) \\ + \{P_t(n+1) - P_t(n)\}\alpha \quad (A6)$$

が得られる。

文 献

- (1)Bremaud P."Point Process and Queues Martingale Dynamics"p27,pp85-pp87,p117,pp123-p127 Springer-Verlag New York Inc.(1981).
- (2)LODE LI "A Stochastic Theory of The Firm" Mathematics of operations research,Vol13, No3, August 1988.
- (3)箕輪弘之:「トークンリング型ネットワークのジャンプタイプ確率微分方程式を用いたモデル化」電子情報通信学会論文誌, B-1, Vol.J78-B-1, No.7 pp272-PP278, 1995 年 7 月
- (4)宮沢政清:「確率と確率課程」p90, 近代科学者(1993)
- (5)A.SEGALL and T.KAILATH "The Modeling of Randomly B. Modulated Jump Process",IEEE Trans. Inform. Theory, vol.IT-21, NO.2, pp.135-143, MARCH 1975
- (6)川島幸之助・町原文明・高橋敬隆・斎藤 洋:「通信トラフィック理論の基礎とマルチメディア通信網」p70-p97, 電子情報通信学会, 1995 年 11 月
- (7)白井・天野・井上:「衝突を考慮した C/S 型ネットワークのジャンプ型確率微分方程式を用いたモデル化」96 年 11 月電気関係学会関西支部連合大会
- (8)K.SHIRAI,Y.AMANO and K.INOUE "Stochastic modeling and stationary distributions for the C/S type network with collision by using Jump Process", Memoirs of Institute of Science and Engineering, Ritsumeikan University, Shiga, Japan. No.55, 1996
- (9)白井・天野・井上:「フレーム衝突を含む一般化 C/S 型ネットワークのモデル化および定常分布」97 年 3 月, 信学春季全大

白井 健二 (正員)



昭 50 年立命館大学大学院修士課程了。確率モデルおよび最適制御に関する研究に従事。現在、(株)情報工房代表取締役社長。計測自動制御学会，電子情報通信学会，日本航空宇宙学会各会員。

天野 佳則 (非会員)



昭 52 年立命館大学大学院博士課程了。分布定数系の最適制御に関する研究に従事。現在、(株)京南エレクトクス専務取締役。計測自動制御学会会員。工学博士。

井上 和夫 (正員)



昭 41 年大阪大学大学院博士課程了。適応制御，ヒューマンインターフェースに関する研究に従事。現在，立命館大学理工学部情報学科教授。システム制御情報学会，電子情報通信学会，IEEE 各会員。工学博士。