

冗長コンピュータシステムの修理限界問題に対する ペトリネット解析

松島 信之[†] 土肥 正^{††} 尾崎 俊治^{††}

本論文では、2種類の冗長コンピュータシステムに対する修理限界問題について考察する。システムの動的挙動を記述するために確率ペトリネットが用いられる。最終的に、シミュレーション実験においてモデルパラメータの感度分析を行い、2つのモデルに対する最適修理限界時刻を比較する。結果として、コンピュータへのジョブの到着が保全スケジュールの設定に大きく影響していることが示される。

Petri Net Analyses for Repair-limit Problems of Redundant Computer Systems

NOBUYUKI MATSUSHIMA,[†] TADASHI DOHI^{††} and SHUNJI OSAKI^{††}

In this paper, we consider the repair-limit problem for two kinds of redundant computer systems. Stochastic Petri Net is utilized to describe the dynamic behaviour of systems. Finally, throughout numerical experiments, sensitivity analyses for model parameters are carried out and the optimal repair-time limits for two models are compared. As a result, it is shown that the arrival rate of jobs to a computer influences effectively the maintenance scheduling.

1. はじめに

離散的事象の発生で特徴づけられる離散事象システムの性質やシミュレーションに関する研究は、最近ますます注目されつつある。離散事象システムの例として、通信プロトコルや銀行をはじめとする金融機関におけるオンラインでの処理等があげられる。ペトリネットは、このような並行でかつ非同期的な振舞いをするシステムのモデル化に適したグラフィックツールである^{1)~4)}。

ペトリネットを用いる利点として、(i) モデル化のための記述能力に優れているため、複雑なシステムの挙動を視覚的にとらえやすい点、(ii) 非同期的振舞いを示すシステムをネット表現できる点、等があげられる。特に、確率的挙動を示すシステムを考える場合、マルコフ解析では解析不可能なシステムの動特性をシミュレーションによって評価することができる。

そこで本論文では、確率ペトリネット（たとえば文

献5)を参照)を用いて、冗長コンピュータシステムに対する信頼性評価を行う。従来までのほとんどの研究において、冗長コンピュータシステムの挙動解析ならびに信頼性評価を行うために、マルコフ過程を用いたモデル化が行われてきた(たとえば文献6)~9)を参照)。マルコフモデルによる解析は、定常アベイラビリティ等の信頼性評価尺度を導出する際に有用であるばかりでなく、システム全体の確率論的挙動を同定するために役立つ。しかしながら、コンピュータシステムの構造や内部の処理機構が複雑になれば、マルコフモデルによる解析が不可能となったり、きわめて厳しい仮定の下でモデル化を行わなければならないという問題が生じる。

本論文では、まず2章において確率ペトリネット(以下、SPNと略す)の概要を述べた後、3章において2ユニットコンピュータシステムの修理限界問題を解析するためのペトリネットモデルを提案する。ここでは、2機のコンピュータの状態に対する時間的推移に着目する静的モデルと、コンピュータ上で処理されるトランザクションの到着を考慮した動的モデルについて、それぞれ考察を行う。さらに4章において、ペトリネットを用いたシミュレーション実験を行い、冗長コンピュータシステムの信頼性を数値的に評価する。

[†] 広島大学大学院工学研究科

Graduate School of Engineering, Hiroshima University

^{††} 広島大学工学部第2類(電気系)

Cluster II (Electrical Engineering), Faculty of Engineering, Hiroshima University

2. 確率ペトリネット

確率ペトリネット (SPN) は, 形式的記述の統合化, 正当性の証明, 性能評価ツールの開発を目的として, 応用確率モデルの分野において提案されたシミュレーションツールである. SPN の基本モデルは次のように表される.

$$SPN = (P, T, I, O, M_0, \Lambda).$$

ただし,

$P = (p_1, p_2, \dots, p_m)$: プレースの集合

$T = (t_1, t_2, \dots, t_n)$: トランジションの集合

$I \subset P \times T$: 入力アークの集合

$O \subset T \times P$: 出力アークの集合

$M_0 = (m_{01}, m_{02}, \dots, m_{0m})$: 初期マーキング

$\Lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$: トランジションに関する
発火率ベクトル.

各々のトランジションには発火遅れ (トランジションの発火前に経過しなければならない時間) が付随されており, これは負の指数確率密度をとまなう確率変数で表される. トランジション t_i ($i = 1, 2, \dots, n$) の発火遅れに関する確率密度関数のパラメータは, 発火率 λ_i (> 0) として定義される. いくつかのトランジションが同時に発火する場合には, 最も短い遅延を持つトランジションが最初に発火する. 発火遅延を表す指数確率分布は無記憶性を有することから, 有界 SPN の可達グラフは有限マルコフ連鎖と等価であることが知られている.

また本論文では, SPN の拡張版である一般化確率ペトリネット (GSPN) を扱う. GSPN は通常の SPN に次のような性質が付加されたものである.

- (i) SPN で用いられる確率トランジションに加えて, 発火遅延を 0 とした即時トランジションを持つことが許される.
- (ii) 即時トランジションが競合状態 (複数個のトランジションが同時に発火可能である状態) にある場合, トランジションの発火列に優先順位をつけることが可能である.
- (iii) 抑止アークを許容する. ここで抑止アークとは, 入力プレースにトークンが存在しない場合に限り, トランジションが発火可能となる性質を持つアークのことをいう.

このほかに, SPN におけるトランジションが一般分布に従う遅延を持つ拡張確率ペトリネット (ESPN) が知られている^{10)~12)}.

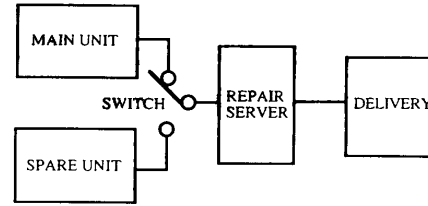


図1 2ユニット冗長コンピュータシステム

Fig. 1 Two-unit redundant computer system.

3. 2ユニット冗長コンピュータシステム

3.1 静的修理限界問題 (モデル1)

図1で示されるように, ユニットの取替えをとまなう2ユニットコンピュータシステムを考える. このシステムでは, はじめに1つのコンピュータが稼動し, もう一方のコンピュータが待機するという冗長構成が施されている. 稼動しているコンピュータが故障すれば, 待機中のコンピュータが代わって稼動を開始する. 故障ユニット (構成部品) は故障後ただちに修理サーバに移行され, 修理サーバが空きの状態であれば修理が開始される. ここで, 故障ユニットの修理時間があらかじめ定められた修理限界時刻 T (≥ 0) 以内であれば, 修理完了後待機ユニットとして使用される. 一方, 故障ユニットの修理時間が修理限界時刻 T を超えるようであれば, 修理開始 T 時間後に修理中であつたユニットは廃棄され, 新しくユニットの補充が行われる. ユニットの補充にはつねにリードタイム L (≥ 0) が必要とされ, 補充が完了すればただちに補充されたユニットは待機状態となる. このとき, コンピュータユニットが稼動していなければ, 補充されたユニットはそのまま稼動を開始する.

さらに, 解析を簡単にするために, 以下のような仮定を置く.

- (i) ユニットの切替えは瞬間的かつ完全である.
- (ii) 修理サーバで修理可能なユニット数は1つであり, もし2つのユニットが故障すれば修理は故障順に行われ, 他の故障ユニットは修理待ちの状態に入る.
- (iii) ユニットの補充は2ユニットまで可能とし, 各々のユニットの補充にかかる時間はすべて同一に L 時間かかる.

上述の保全モデルは修理限界モデルと呼ばれており, 信頼性・保全性理論において重要な役割を演じている^{13),14)}. しかしながら, 本論文で考察する2ユニットシステムの修理限界モデルは非同期的な振舞いを示すため, 状態推移確率を解析的に導出することはき

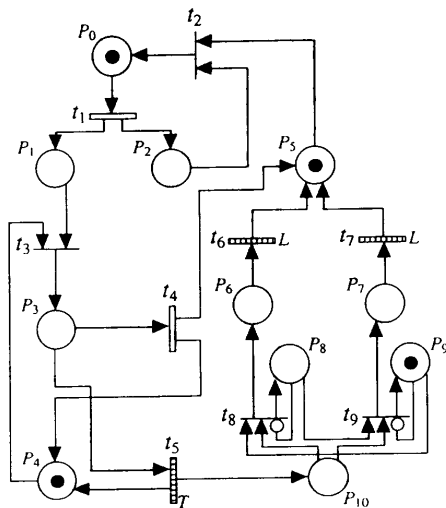


図2 一般化確率ペトリネット表現 (モデル1)
Fig. 2 GSPN representation (model 1).

わめて困難である。そこで、ペトリネットを用いて解析することによって、システム全体の挙動を把握するために見通しが良くなることはもちろん、シミュレーションによって種々の信頼性評価尺度を求めることが可能となる。

図2は修理限界スケジュールをともなう2ユニットコンピュータシステムのGSPN表現である。使用される_placesとトランジションは表1と表2において整理する。ここで、 t_2, t_3, t_8, t_9 は発火遅延時間を0とする即時トランジション、 t_5, t_6, t_7 は任意の発火遅延時間が設定された時間トランジション(ここで、 t_5 には T 時間の遅延が、 t_6, t_7 には L 時間の遅延が設定されている)。 t_1 は発火率が指数分布に従う確率トランジションである。 t_4 は、確率トランジションの遅延時間を X とすると $\min(X, T)$ の発火遅延をともなうトランジションである。

図2のネットにおいて、places P_0 に含まれているトークン数は稼働中のユニット数を表すため、 P_0 に含まれているトークン数が0であれば、システム故障が発生していることを示唆している。稼働中のユニットが故障すれば、トランジション t_1 が発火し、トークンは P_0 から P_1 に移動する。places P_1 にあるトークンは、もし修理サーバが空き状態 (places P_4 にトークンが含まれている) であれば、 P_3 に移動して修理が開始される。また、修理サーバが稼働中(このとき、places P_3 および P_4 に含まれるトークン数はそれぞれ1個と0個となる) であれば、修理サーバで修理可能なユニット数は1に制限されているため、故障ユニットは修理中であったユニットの修理完了時刻または補充開始時刻まで待ち状態となる。修理中の

表1 プレース (モデル1)

Table 1 Place (model 1).

記号	状態の説明
P_0	システムが稼働中
P_1	故障ユニットの修理待ち
P_2, P_8, P_9	ダメープレース
P_3	故障ユニットが修理中
P_4	修理サーバが空き
P_5	冗長ユニットが待機中
P_6, P_7	新ユニットの補充中
P_{10}	新ユニットの補充開始

表2 トランジション (モデル1)

Table 2 Transition (model 1).

記号	事象の説明
t_1	稼働中のユニットが故障
t_2	待機中のユニットが稼働開始
t_3	故障ユニットの修理開始
t_4	故障ユニットの修理もしくは ユニットの補充開始
t_5, t_8, t_9	新ユニットの補充開始
t_6, t_7	補充開始 L 時間後に補充完了

ユニット (places P_3 にトークンが1個含まれている状態) は、もし修理が T 時間以内に完了すれば、トランジション t_4 が発火し、places P_5 にトークンが入り、修理されたユニットは待機ユニットとなる。

一方、修理時間が T 時間を超えたならば、その時点でユニットの修理を諦めてそれを廃棄し、新しいユニットの補充を行う。このことは、トランジション t_5 が発火し、places P_3 のトークンがplaces P_{10} に入る動作によって表現されている。また、修理完了後もしくは補充開始後のいずれにおいてもplaces P_4 にトークンが入り、再びサーバが空きの状態となる。 P_{10} のトークンは P_6 と P_7 のいずれかに入り、新しいユニットの補充が開始される。リードタイム L 時間経過後、新しく補充されたユニットは待機ユニットとなり、places P_5 に移動したトークンがユニットの補充完了を示す。さらにplaces P_2 にトークンがあれば、トランジション t_2 が発火可能となり、トークンはplaces P_5 から P_0 に移動する。この結果、待機ユニットが稼働を開始する。

3.2 動的修理限界問題 (モデル2)

次に、コンピュータへのジョブの到着をともなう2ユニットコンピュータシステムを考える。モデル1と同様に、1つのコンピュータが稼働し、他方のコンピュータは待機中とする。コンピュータへのジョブの到着時間は指数分布に従うものとし、稼働コンピュータのサーバに空きがあればジョブの処理が行われ、サーバの処理中にジョブが到着すれば処理待ちの状態に入る。

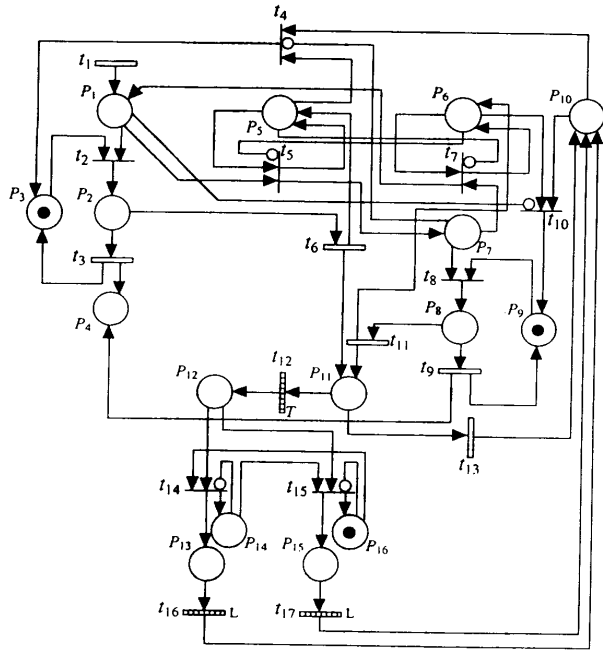


図3 一般化確率ペトリネット表現 (モデル2)
Fig. 3 GSPN representation (model 2).

処理中に稼動ユニットが故障すれば、ただちに故障ユニットの修理が開始され、同時に待機中のコンピュータが稼動を開始する。その際、処理待ちにあったすべてのジョブは、新しく稼動開始したコンピュータの下で再び処理待ちとなる。

同様に、新しく稼動開始したユニットもサーバが故障すれば修理を開始するが、もし他方のユニットの修理が行われていれば、修理待ちの状態となり、そうでなければただちに修理が開始される。故障ユニットの修理時間が修理限界時刻 T 時間以内であれば、修理完了後、修理されたユニットは待機ユニットとなる。一方、故障ユニットの修理時間が修理限界時刻 T 時間を超えたならば、その時刻で修理を諦め、修理中であつたユニットを廃棄して新しいユニットを補充する。ユニットの補充にはつねにリードタイム L 時間が必要とされ、補充が完了すれば、ただちに補充されたユニットは待機状態に入る。また、補充の時点で稼動ユニットがなければ、新しく補充されたユニットはそのまま稼動ユニットとなる。

図3は、ジョブの到着をともなうコンピュータシステムのGSPN表現である。表3と表4において、使用するプレースおよびトランジションは以下のとおりである。 $t_2, t_4, t_5, t_7, t_8, t_{10}, t_{14}, t_{15}$ は発火遅延時間を0とする即時トランジション、 t_{12}, t_{16}, t_{17} は任意の発火遅延時間が設定された時間トランジション(ここでは、 t_{12} に T 時間の遅延が、 t_{16} と t_{17} に

表3 プレース (モデル2)

Table 3 Place (model 2).

記号	状態の説明
P_1, P_7	ジョブの修理待ち
P_2, P_8	システムが稼動中
P_3, P_9	サーバが空き
P_4	ジョブの処理終了
P_5, P_6	ユニットが故障中
P_{10}	冗長ユニットが待機中
P_{11}	故障ユニットが修理中
P_{12}	新ユニットの補充開始
P_{13}, P_{15}	新ユニットの補充中
P_{14}, P_{16}	ダミープレース

表4 トランジション (モデル2)

Table 4 Transition (model 2).

記号	事象の説明
t_1	ジョブが到着
t_2, t_8	ジョブの処理開始
t_3, t_9	ジョブの処理終了
t_4, t_{10}	待機中のユニットが稼動開始
t_5, t_7	ユニット間における処理待ちのジョブの移動
t_6, t_{11}	システムが故障
t_{12}, t_{14}, t_{15}	新ユニットの補充開始
t_{13}	故障ユニットの修理完了
t_{16}, t_{17}	補充開始 L 時間後に補充完了

は L 時間の遅延が設定されている)、 $t_1, t_3, t_6, t_9, t_{11}$ は発火率が指数分布に従う確率トランジションである。特に t_{13} は、確率トランジションの遅延時間を X とすると、 $\min(X, T)$ の発火遅延をとるトランジションである。

図3のネットにおいて、到着時間が指数分布に従うトランジション t_1 の発火は、コンピュータへのジョブの到着を示している。到着したジョブはサーバに空き(プレース P_3 内にトークンが存在)があれば処理が行われ、プレース P_2 にトークンが入る。トランジション t_3 の発火によりジョブの処理が終了し、プレース P_4 内に処理されたジョブ数のトークンが蓄積される。稼動ユニットが処理中にサーバの故障が起これば、ただちに修理が開始され、トランジション t_6 の発火後トークンはプレース P_{11} に入る。それと同時に、待機ユニットは稼動開始し、処理待ちのジョブは新しい稼動ユニットの下で再び処理待ちの状態となる (P_1 のトークン数が0より大であれば、 P_1 のトークンはプレース P_7 に移動する)。

最初の稼動ユニットと同様に、サーバに空き(プレース P_9 内にトークンが存在)があれば処理は行われるが、ユニットが故障すればトランジション t_{11} が発火し、トークンはプレース P_{11} に入る。プレース P_{11} にあるトークンは、もし故障ユニットの修理が T 時

間以内に完了すれば、トランジション t_{13} の発火を経てプレース P_{10} に入り、修理されたユニットは待機ユニットとなる。一方で、修理時間が T 時間を超えたならば、修理を中断して、修理中であったユニットを廃棄し、ユニットの補充を行う（プレース P_{11} 内のトークンがプレース P_{12} に移動する）。 P_{12} のトークンは P_{13} , P_{15} のいずれかに入り、ユニットの補充を開始する。ユニットの補充には L 時間を要し、補充されたユニットは待機ユニットとなり、プレース P_{10} のトークンがそれを表す。このとき、両方のユニットが稼働していなければ、ただちにトランジション t_4 が発火し、プレース P_3 にトークンが移動する。プレース P_3 内のトークンは、修理サーバの空き状態を表しているため、新しく補充されたユニットは再び稼働を開始する。

4. シミュレーションによる信頼性評価

ここでは3章で提案したモデル1とモデル2について、モデルパラメータを変化させたときのアベイラビリティの振舞いを比較する。ペトリネットシミュレーションでは、まずネットにおける全プレースを稼働状態と故障状態を表すプレースに分類する。次に各時刻において、稼働していれば1、システムダウンであれば0

を出力するような関数の値を各サンプルごとに求め、それらを算術平均することによってアベイラビリティを算出する。シミュレーションの打ち切り時刻を $t = 5000.0$ とし、シミュレーション回数は500回と設定した。確率トランジションの発火率は、直接法により求めた指数乱数によって生成される。

図4は、故障率が変化した場合の経過時間に対するアベイラビリティの振舞いを示した結果である。モデル1においては、時間が経過するにつれてアベイラビリティの値が著しく低下するが、モデル2では、アベイラビリティの値の減少は穏やかであることが分かる。これは、モデル2において頻繁に起こるジョブの到着により、システム全体の稼働率が上昇し、アベイラビリティの低下を軽減させていることに起因している。

図5は、修理率が変化した場合の経過時間に対するアベイラビリティの振舞いを示している。モデル1では、修理率が変化してもアベイラビリティの値に急激な変化が見られないのに対し、モデル2はモデル1に比べてアベイラビリティの値が極端に減少している。特にモデル2において、修理率が比較的小さい場合には、アベイラビリティの値が極端に減少している様子を読みとることができる。このような状況において、

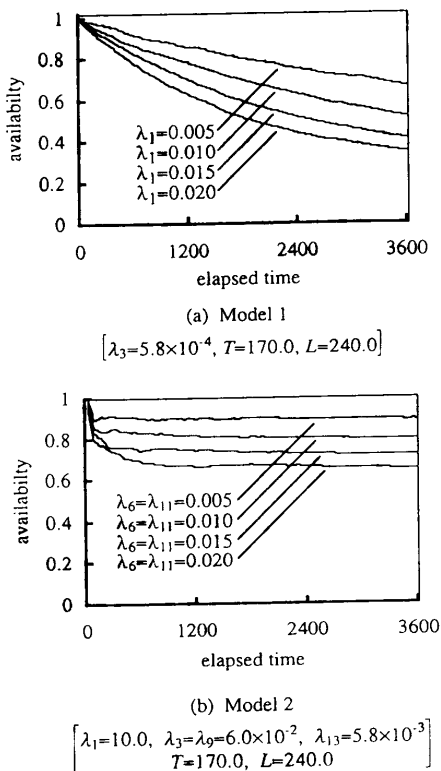


図4 アベイラビリティにおける故障率の従属性
 Fig. 4 Dependence of the failure rate in the availability.

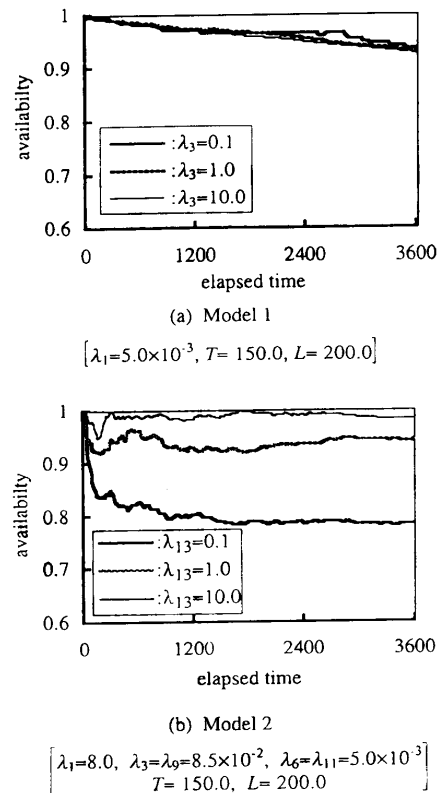


図5 アベイラビリティにおける修理率の従属性
 Fig. 5 Dependence of the repair rate in the availability.

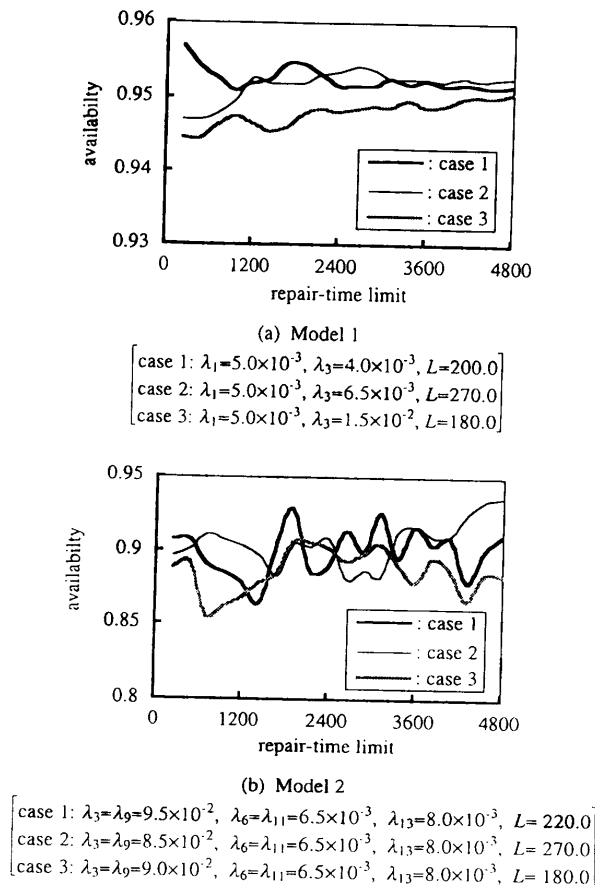


図6 時刻 t における最適修理限界時刻の振舞い
Fig. 6 Behavior of the optimal repair time limit
($t = 2400.0$).

ジョブの到着と処理の機構を含むモデル2では、修理率がシステムの稼働率に大きく影響する要因となる。

図6は、時刻 $t = 2400.0$ において、修理限界時刻を変化させたときのアベイラビリティの振舞いを示している。この図より、アベイラビリティを最大にする時刻が最適修理限界時刻となる。モデル1ではアベイラビリティの値が幅0.01前後の範囲であまり変化しないのに対し、モデル2においてはアベイラビリティの値は大きく変動する様子を読みとることができる。

図7は、モデル2における到着率を変化させたときの経過時間に対するアベイラビリティの振舞いを示したシミュレーション結果である。初期段階では、到着率が高いほどアベイラビリティの値も大きいという傾向が見られるが、だんだんと経過時間が長くなるにつれて、アベイラビリティの値が到着率に関係なくある一定値に近づくことが分かる。このことは、比較的早い段階において、システムは定常状態に移行し、ジョブの到着率の影響は緩和されることを示している。

表5と表6は、故障率と修理率に対する最適修理限

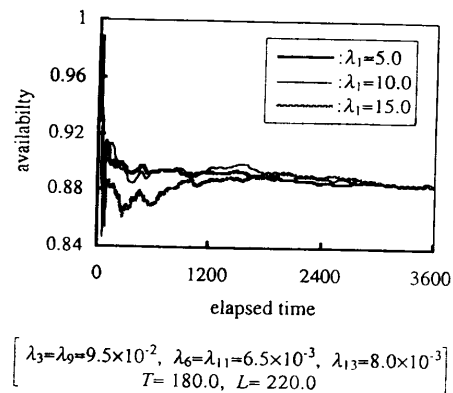


図7 アベイラビリティにおける到着率の従属性
Fig. 7 Dependence of the arrival rate in the availability.

界時刻の従属性を調べたものである。ここで、 $t \rightarrow \infty$ は十分に長い時間が経過している（シミュレーションでは $t = 5000$ ）ことを意味しており、 $A_\infty(T)$ は定常アベイラビリティの値である。いずれの結果においても、最適修理限界時刻 T^* に対する故障率ならびに修理率の単調性は観測されなかった。また、モデル1とモデル2を比較した場合、どちらか一方のアベイラビリティの値がもう一方よりも大きくなるということではなかった。表7は、モデル2におけるジョブの到着率と最適修理限界時刻の関係を調べた結果である。この場合も同様に、 λ_1 の増加はシステムの稼働率の上昇を促進するが、故障時におけるシステムダウンの影響も同時に大きくするというトレードオフ関係が成立していることが分かる。

最終的に表5~7の結果から、過渡状態における最適修理限界時刻とアベイラビリティの値は、定常状態におけるそれと比較してかなり異なることが確認される。よって、初期の稼働段階においてシステムの信頼性を正確に把握するためには、定常時における信頼性評価尺度を代替的に用いるべきではないことが分かる。このことは、本論文で考察したペトリネットシミュレーションの有効性を強調する結果となっている。

5. むすび

本論文では、確率ペトリネットを用いて2種類の冗長コンピュータシステムに対する修理限界問題について考察した。ここで扱った2ユニット修理限界モデルは、従来の文献13), 14) において議論されてきた1ユニットモデルの拡張となっており、オンライン・バンキング・システム等に見受けられる汎用的な待機系システムであることに注意すべきである。特に、シミュレーションによる信頼性評価を行うことによって、過渡状態におけるアベイラビリティを求め、種々の観点

表5 異なる故障率に対する最適修理限界時刻
Table 5 The optimal repair-time limit for varying failure rate.

(a) Model 1
[$\lambda_3 = 6.5 \times 10^{-3}$, $T = 180.0$, $L = 250.0$]

λ_1	$t = 1200.0$		$t = 2400.0$		$t = 3600.0$		$t \rightarrow \infty$	
	T^*	$A_t(T^*)$	T^*	$A_t(T^*)$	T^*	$A_t(T^*)$	T^*	$A_\infty(T^*)$
0.005	124.0	0.935596	92.0	0.945477	62.0	0.940355	55.0	0.938774
0.010	32.0	0.922006	50.0	0.915220	182.0	0.904966	154.0	0.880661
0.015	92.0	0.888445	71.0	0.875239	86.0	0.869739	160.0	0.852321
0.020	63.0	0.851439	100.0	0.840111	64.0	0.832774	104.0	0.815505
0.025	89.0	0.803727	156.0	0.792451	70.0	0.771770	156.0	0.751273

(b) Model 2
[$\lambda_1 = 10.0$, $\lambda_3 = \lambda_9 = 8.0 \times 10^{-2}$, $\lambda_{13} = 6.5 \times 10^{-3}$, $T = 180.0$, $L = 250.0$]

$\lambda_6(\lambda_{11})$	$t = 1200.0$		$t = 2400.0$		$t = 3600.0$		$t \rightarrow \infty$	
	T^*	$A_t(T^*)$	T^*	$A_t(T^*)$	T^*	$A_t(T^*)$	T^*	$A_\infty(T^*)$
0.005	24.0	0.977219	35.0	0.975001	58.0	0.962390	39.0	0.945352
0.010	30.0	0.968251	36.0	0.963289	68.0	0.958412	45.0	0.938209
0.015	31.0	0.948032	44.0	0.941444	82.0	0.930771	65.0	0.925998
0.020	22.0	0.936736	31.0	0.928114	52.0	0.919556	42.0	0.912367
0.025	23.0	0.922805	29.0	0.913586	48.0	0.902765	40.0	0.898812

表6 異なる修理率に対する最適修理限界時刻
Table 6 The optimal repair-time limit for varying repair rate.

(a) Model 1
[$\lambda_1 = 6.0 \times 10^{-3}$, $T = 200.0$, $L = 270.0$]

λ_3	$t = 1200.0$		$t = 2400.0$		$t = 3600.0$		$t \rightarrow \infty$	
	T^*	$A_t(T^*)$	T^*	$A_t(T^*)$	T^*	$A_t(T^*)$	T^*	$A_\infty(T^*)$
0.005	∞	0.946327	216.0	0.943036	224.0	0.937290	230.0	0.929114
0.010	160.0	0.953144	184.0	0.939672	210.0	0.935915	225.0	0.926531
0.015	144.0	0.934389	176.0	0.933804	120.0	0.926489	98.0	0.922257
0.050	256.0	0.934540	168.0	0.926141	135.0	0.924269	118.0	0.920089
0.100	164.0	0.935155	140.0	0.932467	118.0	0.928671	105.0	0.923156

(b) Model 2
[$\lambda_1 = 10.0$, $\lambda_3 = \lambda_9 = 9.5 \times 10^{-2}$, $\lambda_6 = \lambda_{11} = 6.0 \times 10^{-3}$, $T = 200.0$, $L = 270.0$]

λ_{13}	$t = 1200.0$		$t = 2400.0$		$t = 3600.0$		$t \rightarrow \infty$	
	T^*	$A_t(T^*)$	T^*	$A_t(T^*)$	T^*	$A_t(T^*)$	T^*	$A_\infty(T^*)$
0.005	65.0	0.930216	47.0	0.918241	130.0	0.903870	172.0	0.875924
0.010	56.0	0.953115	66.0	0.921573	108.0	0.910012	120.0	0.895336
0.015	42.0	0.963805	43.0	0.941227	48.0	0.913095	52.0	0.906742
0.050	64.0	0.972128	45.0	0.956176	32.0	0.922174	20.0	0.919258
0.100	55.0	0.973351	30.0	0.960013	26.0	0.936667	22.0	0.925678

表7 異なる到着率に対する最適修理限界時刻 (モデル2)
Table 7 The optimal repair-time limit for varying arrival rate (model 2).
[$\lambda_3 = \lambda_9 = 9.0 \times 10^{-2}$, $\lambda_6 = \lambda_{11} = 6.5 \times 10^{-3}$, $\lambda_{13} = 7.5 \times 10^{-3}$, $T = 200.0$, $L = 220.0$]

λ_1	$t = 1200.0$		$t = 2400.0$		$t = 3600.0$		$t \rightarrow \infty$	
	T^*	$A_t(T^*)$	T^*	$A_t(T^*)$	T^*	$A_t(T^*)$	T^*	$A_\infty(T^*)$
1.0	110.0	0.935016	49.0	0.921281	48.0	0.917373	40.0	0.897276
2.0	108.0	0.925190	94.0	0.922001	78.0	0.915384	69.0	0.900893
5.0	150.0	0.928288	74.0	0.925573	62.0	0.920284	51.0	0.913693
10.0	170.0	0.939250	186.0	0.932811	200.0	0.930875	221.0	0.923543
15.0	128.0	0.942021	176.0	0.940058	189.0	0.933989	204.0	0.926319

から静的モデルと動的モデルの比較を行った。本論文で採用した確率ペトリネットによる接近法は、シミュレーションを理論的かつ正確に実行するために役立つばかりでなく、システムの稼動初期段階において信頼性を数値的に評価するために有効であることが確認された。

一般にマルコフモデルにおける過渡アベイラビリティを厳密に求めることは非常に困難であり、微分方程式の数値解法や離散型マルコフ連鎖変換法^{15),16)}等が必要とされる。一方、本論文で採用したシミュレーションによる方法は、厳密に過渡アベイラビリティを計算するためには乱数の精度に関していくつかの課題が残されるものの、モデルの比較の簡便さについては圧倒的に有利である。今後の課題として、計算アベイラビリティやMTBF等の他の信頼性評価尺度を導出し、上述のような異なる方法で冗長コンピュータシステムの修理限界問題を分析することである。

参 考 文 献

- 1) Murata, T.: Petri Nets: Properties, Analysis and Applications, *Proc. IEEE*, Vol.77, pp.541-580 (1989).
- 2) 村田忠夫: ペトリネットの解析と応用, 近代科学社, 東京 (1992).
- 3) 椎塚久雄: 実例ペトリネット, コロナ社, 東京 (1992).
- 4) 奥川峻史: ペトリネットの基礎, 共立出版, 東京 (1995).
- 5) Molloy, M.K.: Performance Analysis Using Stochastic Petri Nets, *IEEE Trans. Comput.*, Vol.C-31, pp.913-917 (1992).
- 6) Osaki, S. and Nishio, T.: *Reliability Evaluation of Some Fault-tolerant Computer Architectures*, LNCS, Vol.97, Springer-Verlag, New York (1980).
- 7) 安井一民, 中川覃夫, 沢 嘉也: 再構成を伴う汎用コンピュータ・システムの信頼性, *情報処理論文誌*, Vol.23, pp.381-386 (1982).
- 8) 安井一民, 中川覃夫, 沢 嘉也: 監視保全を伴うコンピュータ・システムの信頼性, *信学論*, Vol.J66-A, pp.1214-1219 (1983).
- 9) 安井一民, 中川覃夫, 沢 嘉也: 3つのコンピュータをもつ情報処理システムの信頼度解析, *情報処理論文誌*, Vol.28, pp.499-505 (1987).
- 10) 菅澤喜男, 村田光一, 倉林良雄: マルコフ再生過程による非再生点を含むペトリネット表現されたシステムの確率的挙動の解析, *信学論*, Vol.J67-A, pp.819-825 (1984).
- 11) Jin, Q., Kamei, M. and Sugasawa, Y.: Behavioral Analysis and Performance Evaluation of a Shift Processing System by an Extended Stochastic Petri Net, *IEICE Trans. Fundamentals*, Vol.E75-A, pp.1378-1384 (1992).
- 12) Jin, Q., Sugasawa, Y. and Seya, K.: Aggregate Approach of Markov Renewal Process and Extended Stochastic Petri Net Model and Its Applications, *IEICE Trans.*, Vol.E-74, pp.1479-1485 (1991).
- 13) Nakagawa, T. and Osaki, S.: The Optimum Repair Limit Replacement Policies, *Oper. Res. Quart.*, Vol.25, pp.311-317 (1974).
- 14) Dohi, T., Kaio, N. and Osaki, S.: Solution Procedure for a Repair Limit Problem Using the TTT Concept, *IMA J. Mathematics Applied in Business and Industry*, Vol.6, pp.101-111 (1995).
- 15) Gross, D. and Miller, D.R.: The Randomization Technique as a Modeling Tool and Solution Procedure for Transient Markov Processes, *Oper. Res.*, Vol.32, pp.342-361 (1984).
- 16) Silva, E.D.S. and Gail, H.R.: Calculating Availability and Performability Measures of Repairable Computer Systems Using Randomization, *J. ACM*, Vol.36, pp.171-193 (1989).

(平成 8 年 3 月 18 日受付)

(平成 8 年 9 月 12 日採録)

松島 信之



に従事。

平成 6 年広島大学工学部第 2 類卒業。平成 8 年同大学院工学研究科博士課程前期修了。同年松下電器産業(株)入社。在学中、主として確率ペトリネットによる性能評価の研究

土肥 正



平成元年広島大学工学部第 2 類卒業。平成 4 年同大学院工学研究科博士課程後期中途退学。同年広島大学工学部助手。平成 8 年同助教授。工学博士。平成 4 年ブリティッシュ・コロンビア大学(カナダ)客員研究員。電子情報通信学会, 日本 OR 学会, 計測自動制御学会, システム制御情報学会, Society of Economic Dynamics and Control 各会員。主として, 信頼性理論, 応用確率論, 数理システムの研究に従事。



尾崎 俊治 (正会員)

昭和 45 年京都大学大学院博士課程修了。同年広島大学工学部講師，同年同助教授，昭和 61 年教授。昭和 45～47 年南カリフォルニア大学（アメリカ）客員研究員，昭和 51～52 年マンチェスター大学（イギリス）客員研究員。工学博士。電子情報通信学会，日本 OR 学会，日本経営工学会，システム制御情報学会各会員。主として，信頼性理論，応用確率論，数理システムの研究に従事。日本 OR 学会第 4 回大西文献賞受賞。著書「応用確率論」，「OR による経営システム科学」，「品質管理・信頼性のための統計分布ハンドブック」，「確率モデル入門」，「Stochastic System Reliability Modeling」，「Applied Stochastic System Modeling」など。
