

1. まえがき

ペトリネット (Petri Net, 以下 PN と記す)^{1)~4)} は、非同期的かつ並行的あるいは並列的に動作するシステムに対し、そのなかの情報の流れを抽象化し、簡潔に表現できるモデル構築の技法として注目されている。PN の図形表現を利用することにより、システム中の事象の順序関係と状態の推移を視覚的に把握することができる。特に、順序関係の複雑な非同期並列処理システム、並列に生起進行するシステム、分散処理システムの制御などについて PN を利用すると、システムの複雑な動作が簡潔に表現することが可能となる。信頼性システムのモデル化を PN を利用することにより一つの予備ユニットを持つ修理可能な 1 ユニットシステムにおける事象である物理的な変化としての故障、修理、保全そして、取替えなどを表現する。さらに、一連の情報の流れとして、ユニットに対する修理方策や取替方策に関するシステム全体としての順序関係や条件を簡潔に表現することを可能にするものである。また 2 通りの取替方策として、予防取替および事後取替を考慮する。

PN 表現によりモデル化されたシステムは、マルコフ再生過程 (Markov renewal processes, 以下 MRP と記す)⁶⁾ を適用してシステムの挙動を確率的諸量を求めて明らかにする。最後に、数値例において、各分布に具体的な数値を導入してシステムに対して取替を施したと

きの効果を示す。

2. 信頼性システムの PN 表現によるモデル化

図 1 は、一つの予備ユニットが取替用のユニットとして待機し、他の一つのユニットが稼働しているシステムを PN 表現したものである。つまり、一つの正常に稼働しているユニットの突発的な故障を未然に防止するために、稼働しているユニットに予防取替を施し、かつ、他の一つのユニットが取替用の予備ユニットとして待機しているため、突発的な故障を起こしてもシステム全体が停止してしまうシステムダウンを、最少時間で回避することを目的としたシステムである。この種のシステムは、システムのユニット化が進むとともに、システムダウンが許されない冗長系のシステムとして、計算機システムなどにその例を多く見ることができる。

一般的に良く知られているシステムに対する保全方策としては、システムが故障したときに修理を施してシステムの機能を回復させる事後保全と故障を未然に防止すべく日常の点検・保守作業により事前に故障を回避する予防保全の 2 通りである。特に、事後保全による故障に対する事後処理を修理、予防保全による故障を事前に予防する保守作業を保全として区別しておく。ここでは、故障したユニットは予備ユニットと事後取替された後に修理を受ける。

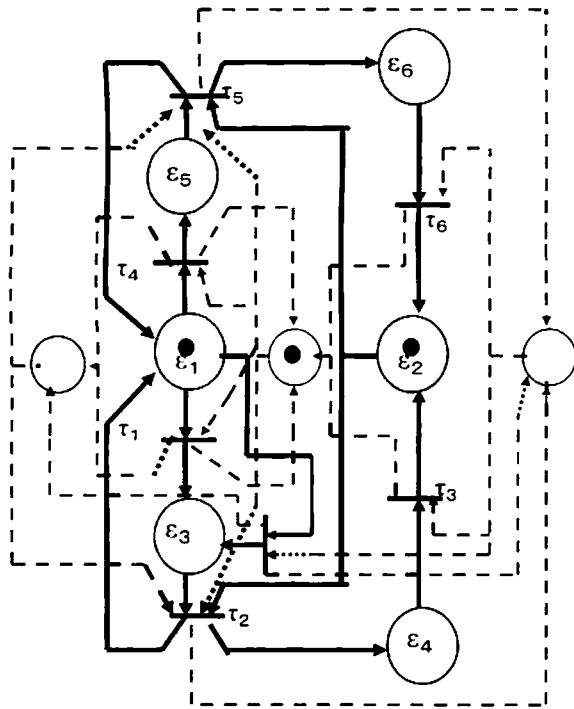


図1 PN表現

さらに、保全の中にいくつかの取替方策があり、一般的に知られているのが年齢取替⁷⁾とブロック取替⁸⁾である。それぞれの取替方策に関する研究は、数多くなされているが、本研究では、特に、年齢取替方策、つまり、ある年齢 t まで稼働ユニットが故障しなければ正常に稼働しているユニットに、保全を施すために停止して、予備ユニットと取替る場合を予防取替とする。ここで、PN表現されたシステムを理解するために必要なPNの概要を述べておく。

PNは、システムにおける条件と対応づけられる位置(place)の集合、システム中の事象に対応づけられる転移(transition)の集合およびそれらの条件と事象の関係を表す有向線分(directed arc)の集合とにより構成され、位置に刻印、つまり、マーキング(marking)をあたえることにより、そのシステムのある状態を表す。PNにおけるNは、次の四つの組で定義される2部有向グラフであり

$$N = \langle E, T, A, S \rangle \quad (1)$$

で表される。ただし

$$E = \{ \varepsilon_i \mid 1 \leq i \leq |E| \} \quad (2)$$

$$T = \{ \tau_j \mid 1 \leq j \leq |T| \} \quad (3)$$

であり、Eは有限個の位置 ε_i の集合で○印で表す。Tは有限個の転位 τ_j の集合で|印で表す。Aは有限個のEとTを連絡する有向線分の集合で→印で表す。

さらに、集合Aに属する有向線分において、ある位置 ε_i から転位 τ_j へ向かう有向線分があるとき、位置 ε_i を転位 τ_j の入力位置と呼び $I(\tau_j)$ で表す。同様に、転位 τ_j からある位置 ε_i へ向かう有向線分があるとき、位置 ε_i を転位 τ_j の出力位置と呼び $O(\tau_j)$ で表す。

したがって、入力位置 $I(\tau_j)$ にあるすべての位置 ε_i に●印示される標号(token)があるときに転位が発火(fire)し、入力位置 $I(\tau_j)$ にあったすべての刻印が取りさられ出力位置 $O(\tau_j)$ のすべての位置 ε_i に新たな刻印が移動することでシステムの状態を捕らえる。Sは位置 ε_i にマーキングを与えることにより、そのシステムのある状態を表す。

図1における実験で示される有向線分は物理的な状態の変化(システムにおける故障や修理)を示すものである。点線で示される有向線分は情報の流れ(システムに対して予備ユニットが修理を終了して正常に待機している)を示すものである。

ここで、図1における各転位 $\tau_j(j=1,2,\dots,7)$ と各位置 $\varepsilon_i(i=1,2,\dots,9)$ の意味は次のとおりである。

- τ_1 : 稼働ユニットが故障する
- τ_2 : 故障ユニットと予備ユニットが取替えられる。つまりユニットに事後取替を施す
- τ_3 : 故障ユニットに修理を施す
- τ_4 : 稼働ユニットに事前取替を施すためにユニットを停止する
- τ_5 : 停止ユニットと予備ユニットが取替られる。つまりユニットに事前取替を施す
- τ_6 : 停止ユニットに保全を施す
- τ_7 : 一つのユニットが修理中または保全中に、他の一つの稼働ユニットが故障する

- ε_1 : ユニットが稼動している
- ε_2 : ユニットが待機している
- ε_3 : ユニットが故障している
- ε_4 : ユニットが修理を受けている
- ε_5 : ユニットが停止している
- ε_6 : ユニットが保全を受けている
- ε_7 : ユニットが故障しているか、または予防取替を施すために停止している
- ε_8 : ユニットが修理を受けているか、または保全を受けている
- ε_9 : ユニットが修理あるいは保全を完了し、待機している

よって、PN 表現された図 1 の E と T は

$$E=(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4, \varepsilon_5, \varepsilon_6, \varepsilon_7, \varepsilon_8, \varepsilon_9) \quad (4)$$

$$T=(\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4, \tau_5, \tau_6, \tau_7) \quad (5)$$

である。

ここで、図 1 におけるシステムの初期状態（システム全体が正常に稼動している状態）は、位置 ε_1 の稼動ユニット、位置 ε_2 の予備ユニット、そして位置 ε_9 に標号が置かれているものとする。ここで、位置 ε_9 の標号は、システムの物理的な変化としての故障や修理などを表現するのではなく、待機ユニットが修理あるいは保全を完了して待機しているかどうかを示すものである。つまり、システムの状態、特に、待機ユニットの状態監視としての情報を示すものとして利用されている。同様に、点線で示されている有無線分および位置 ε_7 、位置 ε_8 もそれぞれのユニットの挙動を示すのではなく、システムの状態監視を示す。

ここで、稼動ユニットと予備として待機しているユニットは同機能を有するものとする。つぎにシステムの挙動 (1) から (3) を PN における標号の移動で捕らえてみる。

(1) 故障と事後取替に関する挙動： τ_1 が発火すると位置 ε_1 あった標号が位置 ε_3 に移動し、位置 ε_9 の標号は位置 ε_7 と位置 ε_9 に移動する。位置 ε_7 に標号が移動したことで稼動ユニットの故障が検出されるため、システムに故障したという確認がなされる。その結果、

転位 τ_2 に対するすべての入力位置 (ε_i : $i = 2, 3, 7, 9$) に標号があるので、 τ_2 が発火可能となり、予備として待機していたユニットが位置 ε_1 に移動することにより、直ちに稼動が再開されると同時に位置 ε_3 にあった標号が位置 ε_4 に移動し、故障したユニットが修理を受ける状態となる。この状態を位置 ε_7 にあった標号が位置 ε_8 に移動するため捕らえられる。よって事後取替が行われることになる。(2) 保全と予防取替に関する挙動： τ_4 が発火すると位置 ε_1 にあった標号が位置 ε_5 に移動し、位置 ε_9 の標号は位置 ε_7 と位置 ε_9 に移動する。位置 ε_7 に標号が移動したことで、稼動ユニットに予防取替を施すために、システムを停止したことが検出できる。その結果、転移 τ_5 に対するすべての入力位置 (ε_i : $i = 2, 5, 7, 9$) に標号があるので、 τ_5 が発火可能となり、予備として待機していたユニットが位置 ε_1 に移動することにより、直ちに稼動が再開されると同時に、位置 ε_5 にあった標号が位置 ε_6 に移動して保全を受ける状態となる。位置 ε_7 と位置 ε_9 の標号は位置 ε_8 に移動し、事前取替が行われることになる。(3) システムダウンに関する挙動：一つのユニットが位置 ε_1 で稼動状態にあり、他の一つのユニットが修理中あるいは保全中の状態である位置 ε_4 と位置 ε_8 または位置 ε_6 と位置 ε_8 にあるとき、位置 ε_1 にある稼動ユニットが転位 τ_7 の発火により、位置 ε_3 にすべての標号が移動して故障する場合である。ここで、位置に標号がないので予備ユニットが待機していない情報であることを情報として示している。次に、システムを PN でモデル化した図 1 はモデルの静的変化を示すものであるが、モデルの動的変化としてシステムの挙動を把握する方法として到達可能木による表現が知られている。到達可能木は木の開始節点に初期状態の刻印を置き、木の節点は刻印、木の枝は刻印間の直接到達可能であることを示す。図 1 の PN を到達可能木を用いて記述すると図 2 となる。

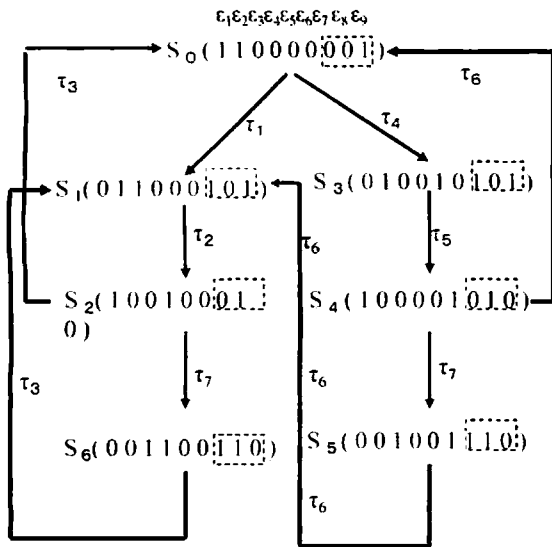


図2 図1の到達可能木

図2において S_0 は初期状態、つまり、システムの機能がすべて満足した状態にある状態であることを表す。Fig.2の $S_i(i=0,1,\dots,6)$ における位置 $\epsilon_i(i=1,2,\dots,9)$ に対して1が入っている位置はFig.1の位置に標号が入っていることを示し、0が入っている位置は位置に標号が入っていない状態である。さらに、図1で示した点線で示された有向線分で結ばれている位置 ϵ_7 、位置 ϵ_8 、位置 ϵ_9 はシステムの状態監視、つまりシステム全体の状態を表す情報であるので、Fig.2では位置 ϵ_7 、位置 ϵ_8 、位置 ϵ_9 を点線で囲み、システムの物理的変化の表現と区別した。従って、位置 ϵ_7 および位置 ϵ_8 に1が入っている S_5 および S_6 は、一つのユニットが故障中であり、他の一つのユニットが修理中かまたは保全中であるのでシステムダウンであることを、視覚的に容易に示すことが可能である。

3. 数値例

図3の横軸は、ある時間 t までシステムが故障しなかったらシステムに予防取替を施す時間間隔 t_0 を示した。さらに縦軸は極限確率 $P_i(i=0,1,2,3,4)$ を示す。図3において、予防取

替を施す時間間隔 t_0 を長くする(予防取替をユニットに施さない)と一つのユニットが稼動し、他の一つのユニットが予備として正常に待機している P_0 のアベイラビリティは大きくなる(数値例では $t_0=1000$ 時間以上)。さらに $t_0=1200$ 時間近傍においてわずかであるが P_0 が最大となる。つまりこの数値例の場合は、稼動ユニットに対する予防取替を施す時間間隔を約1200時間で行えば、システムのアベイラビリティは最大となることがわかった。

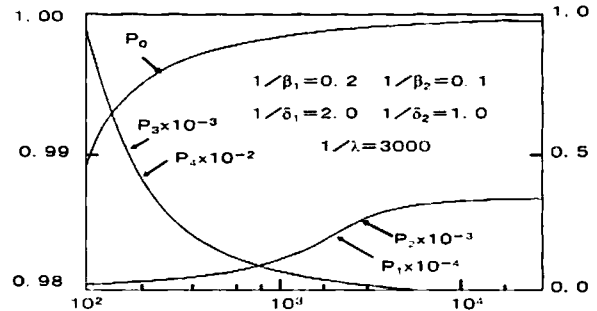


図3 数値例

4. おわりに

今回は一つのユニットが稼動し、他の一つのユニットが取替用として待機しているシステムをPN表現を利用してモデル化を行い、システムの物理的変化として事後取替、予防取替、システムダウンなどのシステムの状態を示す情報の変化を区別して記述する手法を報告した。今後も予防取替を考慮した信頼性システムを構築するためにPN表現がより有効かつ、効果的に適用できる生産システムや、搬送システムなどの信頼性システムへのペトリネット表現に積極的に利用し、PNの利用範囲の拡大を研究していきたい。

参考文献

- 1)市川惇信：ペトリネット入門、共立出版(1983)
- 2)松島俊章：ペトリネット、信学誌、66-1(1983)
- 3)T.Agerwala：Putting Petri Nets Work(1979)
- 4)J.L.Peterson：Petri Nets,Computing (1987)