再構成を伴う汎用コンピュータ・システムの信頼性†

安井一民†† 中川覃夫††† 沢 嘉也†††

オンライン・システムに代表されるコンピュータ・システムの利用の高度化に伴い，システムに対する高信頼化の要求が急速に高まってきている．オンライン・システムにおいて，システム障害時に行わなければならない最も大切なことは，早急かつ確実にシステムを復旧させることであり，そのために動作可能なシステムを，できるだけ早く再構成することである．ここでは，マルチ・プロセッサ・システムで構成されている汎用コンピュータ・システムが，オンライン・システムの障害時のバック・アップ要求に応じて，二つの独立なパーティション・システムとしてシステムを再構成する．そのとき，一方をオンライン・システムのバック・アップ用に，他方を汎用処理用に再始動させ，オンライン・システムの回復を早期に実現するようなモデルを設定する．また，オンライン・システムからの要求を考慮して汎用コンピュータ・システムの故障を定義し，マルコフ再生過程の手法を用いて，定常アベイラビリティ，故障までの平均時間，単位時間当りの平均システム故障回数を求める．さらに，この結果を利用して，オンライン・システムからの要求を満たす確率や拒否する確率，汎用処理業務が正常に行われている確率なども求める．最後に，数値例を示し種々の議論を行う．

1. まえがき

コンピュータ・システムの利用分野が拡大されるにつれ，その利用に関する質的な高度化とともに，システムに対する高信頼化の要求が急速に高まってきている．たとえば，オンライン・システムでは，システムが動作を開始すると，使用者は，その業務を，ほぼ全面的にシステムに依存し，コンピュータ・システムの存在なしには本来の業務を正しく処理できなくなる．このような状況下において，「システムがサービスを中断しないこと」とともに，システム障害が発生した場合に「システムが早期に回復すること」への要求は，きわめて重要であるといえる．

オンライン・システムにおいて，障害発生時に行わなければならない最も大切なことは，できるだけ早急かつ確実にシステムを復旧させることである．すなわち，障害発生から復旧までに要する時間が，障害状況によって不定である状態をつくり出さないことがとくに重要である．そのために必要なことは，「障害装置の識別」ではなく，むしろ，「動作可能なシステムの再構成」である[1]．

現在のコンピュータ・システムは，多数のシステム構成要素から成立しており，必要に応じてシステムを再構成することができる．たとえば，マルチ・プロセッサ・システムは，CPU (central processor unit) を一つのエレメントと考えると，それを多重化するエレメント冗長システムであり，あるCPUに障害が発生した場合には，そのCPUを切り離して動作を継続することができる．また，平常時にCPUを分割し，別々の独立な系としてパーティション・システム (Partition System) を構成し，一方の系をオンライン処理用，他系を汎用処理用などに使用することができる．さらに，汎用処理業務の繁忙時には，再びマルチ・プロセッサ・システムを構成することもできる[2]．

コンピュータ・システムの保全に関して，すでに多くの研究[3)~6)]が行われている．この論文では，汎用コンピュータ・システムがマルチ・プロセッサ・システムとして正常に動作中のとき，他のオンライン・システムからのバック・アップ要求によって，それぞれ独立なパーティション・システムを構成し，再始動するシステムを考え，オンライン・システムからの要求をできるだけ満たすようにする．すなわち，マルチ・プロセッサ・システムで構成されている，汎用コンピュータ・システムが，他のオンライン・システムのバック・アップも兼ねており，障害時の要求に応じて，二つの独立なシングル・プロセッサ・システムとしてシステムを再構成する．そのとき，一方をオンライン・システムのバック・アップ用に，他方を汎用処理用のシステムとして再始動し，オンライン・システムの回復を可能な限り早期に実現するようなモデルを設定する．

† Reliability of a General Purpose Computer System with Recomposition by KAZUMI YASUI (Division of Information Systems, Chubu Electric Power Inc.), TOSHIO NAKAGAWA and YOSHIYA SAWA (Department of Mathematics, Faculty of Science and Engineering, Meijo University).
†† 中部電力(株)情報システム部
††† 名城大学理工学部数学科

このようなモデルに対して，マルコフ再生過程[7]の手法を応用して，システムの定常アベイラビリティ，平均システム故障回数，システム故障までの平均時間を求め，さらに，数値例を示して種々の議論を行う．たとえば，汎用コンピュータ・システムが，業務処理を正常に行う確率や，オンライン・システムからの要求を満たす確率が，オンライン・システムの障害復旧に要する時間に，ほとんど影響されないことなどが示される．

2. 再構成を伴うコンピュータ・システムのモデル

ある汎用コンピュータ・システムが，マルチ・プロセッサ・システムで構成されており，他のオンライン・システムの要求を次のように受け入れると仮定する．

(1) 常時は，それぞれのシステムは独立に動作しており，オンライン・システムに障害などのトラブルが発生すると，ただちにマルチ・プロセッサ・システムに対しバック・アップを依頼する．これをマルチ・プロセッサ・システムに対する「分離要求」と呼ぶ．

(2) 分離要求を受けたマルチ・プロセッサ・システムは，もし，システムが正常に動作中ならば，ただちにパーティション・システムを構成し，一つの系をオンラインのバック・アップ用に，他系を汎用処理用として再始動する．もし，システムが故障中ならば，この要求を拒否し，要求は消滅するものとする．

(3) パーティション・システムとして動作中の二つのプロセッサのうち，どちらかが故障すると，ただちに故障プロセッサの修理を開始する．もし，バック・アップ用のプロセッサが故障した場合は，ただちに汎用プロセッサをバック・アップ用に移行し，その処理を継続する．さらにバック・アップ用のプロセッサも故障した場合は，バック・アップを中止し，二つのシングル・プロセッサが修理を完了した時点で，マルチ・プロセッサ・システムとしてシステムを再構成する．その間，オンライン・システムからの要求は受け入れないものとする．

(4) オンライン・システムは，障害などのトラブルが除去された時点で，パーティション・システムに対しバック・アップ終了要求を行う．これをパーティション・システムに対する「合体要求」と呼ぶ．

(5) 合体要求を受けたパーティション・システムは，もし，どちらかのプロセッサが故障していたならば要求を拒否する．この場合，故障プロセッサの修理完了時点で，マルチ・プロセッサ・システムとしてシステムを再構成し，動作を開始する．もし，二つのプロセッサとも正常に動作していたならば，ただちにマルチ・プロセッサ・システムとしてシステムを再構成し，動作を開始する．ここで，前者の場合に合体要求を拒否するのは，次の分離要求を極力満たすためであり，同時に，マルチ・プロセッサ・システムとしての汎用処理業務の効率化をはかるためである．

(6) オンライン・システムのバック・アップに関して，オンライン処理の回復に必須の重要ファイルは，二重化されているものとする．

以上の仮定のもとで，とくにオンライン・システムからの要求が満たされるか否かに注目し，この要求充足の度合を，汎用コンピュータ・システムの信頼性の尺度に組み込むために，システム故障を次のように定義する．

(i) マルチ・プロセッサ・システムが故障中に，分離要求があったとき（分離要求拒否）．

(ii) パーティション・システムとしてバック・アップ継続中に，二つのプロセッサとも故障したとき（バック・アップ中止）．

(iii) パーティション・システムの一つのプロセッサが故障中で，他のプロセッサでバック・アップ継続中に，合体要求があったとき（合体要求拒否）．

上のようにシステム故障を定義したとき，定常状態においてシステムが故障しない確率，いわば，システム・アベイラビリティを，マルコフ再生過程の理論を応用して求めるものとする．

3. システムの信頼度解析

マルチ・プロセッサ・システムで構成されている汎用コンピュータ・システムは，確率分布 $F_1(t)$（平均 $1/\lambda_1$）に従って故障する．オンライン・システムからの分離要求によって，ただちにシステム再構成を行い二つの独立なシングル・プロセッサ・システムとして動作を開始し，同一の指数分布 $F_2(t)\equiv 1-e^{-\lambda_2 t}$ に従って故障する．さらに，オンライン・システムからの合体要求によってシステム構成を変更し，再びマルチ・プロセッサ・システムとして汎用処理を行う．ここで，マルチ・プロセッサ・システムと，二つのシングル・プロセッサ・システムの故障時間はおのおの独立とし，システム再構成によって，そのシステムは完全に再生するものとする．システム再構成に要する時間

は，便宜上無視できるものとする．どのシステムも，故障した場合はただちに修理を開始し，マルチ・プロセッサ・システムの修理時間分布を $G_1(t)$（平均$1/\mu_1$），シングル・プロセッサ・システムの修理時間分布を $G_2(t)$（平均$1/\mu_2$）とし，各システムは，修理によってその全機能を回復する．なお，合体から分離要求するまでの時間分布を $A(t)\equiv 1-e^{-\alpha t}$，分離から合体要求するまでの時間分布を $B(t)\equiv 1-e^{-\beta t}$ とする．ここに，$A(t)$，$B(t)$ は，それぞれ，オンライン・システム自身の故障時間分布，修理時間分布に相当する．

以上の仮定のもとで，汎用コンピュータ・システムの挙動を表す各状態を，次のように定義する．

［状態 0］ マルチ・プロセッサ・システムとして動作開始．

［状態 1］ オンライン・システムからの分離要求によって，パーティション・システムに分離し二つのシングル・プロセッサ・システムが動作開始．

［状態 2］ 一つのシングル・プロセッサ・システムが故障し，修理開始．

［状態 3］ マルチ・プロセッサ・システムが故障し，修理開始．

［状態 4］ システム故障（マルチ・プロセッサ・システムの修理中に分離要求がある，あるいは，パーティション・システムの一つのプロセッサ・システムが修理中に合体要求がある，または，もう一つのプロセッサ・システムが故障する，三つの場合のいずれかが起こった場合）．

上のように定義された各状態は，マルコフ再生過程を形成し，$F_2(t)$ が指数分布であるという仮定から，状態 0，1，2，3 が再生点となる．また，おのおのの状態間の推移は，**図 1** のように表される．

マルコフ再生過程における，1 ステップ推移確率時間分布を $Q_{ij}(t)(i=0,1,2,3;\ j=0,1,2,3,4)$，状態 4 が再生点でないため，時刻 $t=0$ で状態 i から出発したとき，時刻 t までに状態 4 を経由して，次の状態 0

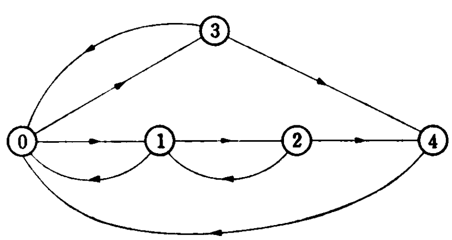

図 1　再構成を伴うコンピュータ・システムの状態推移図
Fig. 1　Transition diagram between system states for a computer system with recomposition.

へ推移する確率時間分布を $Q_{i0}{}^{(4)}(t)(i=2,3)$ とする．それぞれのラプラス・スティルチェス (LS) 変換を $q_{ij}(s)$，$q_{i0}{}^{(4)}(s)$ とおくと，

$$q_{01}(s)=\frac{\alpha}{s+\alpha}[1-f_1(s+\alpha)], \tag{1}$$

$$q_{03}(s)=f_1(s+\alpha), \tag{2}$$

$$q_{10}(s)=\frac{\beta}{s+2\lambda_2+\beta}, \tag{3}$$

$$q_{12}(s)=\frac{2\lambda_2}{s+2\lambda_2+\beta}, \tag{4}$$

$$q_{21}(s)=g_2(s+\lambda_2+\beta), \tag{5}$$

$$q_{24}(s)=\frac{\lambda_2+\beta}{s+\lambda_2+\beta}[1-g_2(s+\lambda_2+\beta)], \tag{6}$$

$$q_{20}{}^{(4)}(s)=\frac{\lambda_2 g_2(s)+\beta}{\lambda_2+\beta}[g_2(s)-g_2(s+\lambda_2+\beta)], \tag{7}$$

$$q_{30}(s)=g_1(s+\alpha), \tag{8}$$

$$q_{34}(s)=\frac{\alpha}{s+\alpha}[1-g_1(s+\alpha)], \tag{9}$$

$$q_{30}{}^{(4)}(s)=g_1(s)-g_1(s+\alpha), \tag{10}$$

を得る．ここに，一般に $f(s)\equiv\int_0^\infty e^{-st}dF(t)$，$\bar{F}(t)\equiv 1-F(t)$ とおく．たとえば，$q_{20}{}^{(4)}(s)$ は，

$$\begin{aligned}Q_{20}{}^{(4)}(t)=&\int_0^t\int_0^u \bar{F}_2(v)dB(v)dG_2(u)\\&+\int_0^t\int_0^w\int_0^u \bar{B}(v)dF_2(v)dG_2(u)dG_2(w-u)\\=&\int_0^t\frac{\beta}{\lambda_2+\beta}[1-e^{-(\lambda_2+\beta)u}]dG_2(u)\\&+\int_0^t\int_0^w\frac{\lambda_2}{\lambda_2+\beta}[1-e^{-(\lambda_2+\beta)u}]dG_2(u)dG_2(w-u),\end{aligned}$$

の LS 変換形を示す．すなわち，これは時間間隔 (0, t] において，パーティション・システムの一つのシングル・プロセッサが修理中のとき，オンライン・システムからの合体要求によってシステム故障となった後，修理中のプロセッサの修理が完了して，マルチ・プロセッサ・システムとしてシステムを再構成する場合と，動作中のもう一方のプロセッサも故障してシステム故障となった後，二つのプロセッサの修理がともに完了し，マルチ・プロセッサ・システムとしてシステムを再構成する場合の確率分布である．

さて，(1)～(10) 式を用いて各状態における定常確率を求めよう．ここで，システムが時刻 t で状態 j にあるとは，ある時点で状態 j になった後，時刻 t までに他の状態に推移しないことを示している．システム

が時刻 $t=0$ で状態0から出発したとき，時刻 t で状態 $j(j=0,1,2,3,4)$ にある推移確率を $P_{0j}(t)$ とし，その LS 変換を $p_{0j}(s)$ とすると，

$$p_{00}(s)=[1-q_{01}(s)-q_{03}(s)]/[1-h_{00}(s)], \tag{11}$$

$$p_{01}(s)=\{q_{01}(s)[1-q_{10}(s)-q_{12}(s)] /[1-q_{12}(s)q_{21}(s)]\} /[1-h_{00}(s)], \tag{12}$$

$$p_{02}(s)=\{q_{01}(s)q_{12}(s)[1-q_{21}(s)-q_{24}(s)] /[1-q_{12}(s)q_{21}(s)]\} /[1-h_{00}(s)], \tag{13}$$

$$p_{03}(s)=q_{03}(s)[1-q_{30}(s)-q_{34}(s)] /[1-h_{00}(s)], \tag{14}$$

$$p_{04}(s)=\{q_{01}(s)q_{12}(s)[q_{24}(s)-q_{20}^{(4)}(s)] /[1-q_{12}(s)q_{21}(s)] +q_{03}(s)[q_{34}(s)-q_{30}^{(4)}(s)]\} /[1-h_{00}(s)], \tag{15}$$

を得る．ここに，

$$h_{00}(s)=q_{01}(s)[q_{10}(s)+q_{12}(s)q_{20}^{(4)}(s)] /[1-q_{12}(s)q_{21}(s)] +q_{03}(s)[q_{30}(s)+q_{30}^{(4)}(s)], \tag{16}$$

であり，状態0から初めて状態0に戻る再帰時間分布の LS 変換形を示している．

システムが，定常状態で状態 $j(j=0,1,2,3,4)$ にある確率 P_j は，

$$P_0=\left\{\frac{1}{\alpha}\cdot[1-f_1(\alpha)]\right\}\Big/l_{00}, \tag{17}$$

$$P_1=K/l_{00}, \tag{18}$$

$$P_2=\left\{K\cdot\frac{2\lambda_2}{\lambda_2+\beta}\cdot[1-g_2(\lambda_2+\beta)]\right\}\Big/l_{00}, \tag{19}$$

$$P_3=\left\{\frac{1}{\alpha}\cdot f_1(\alpha)\cdot[1-g_1(\alpha)]\right\}\Big/l_{00}, \tag{20}$$

$$P_4=\left\{\frac{1}{\alpha}\cdot f_1(\alpha)\cdot g_1(\alpha)-\left(\frac{1}{\alpha}-\frac{1}{\mu_1}\right)\cdot f_1(\alpha) +K\cdot\frac{2\lambda_2}{\mu_2}\cdot\left[1+\frac{\lambda_2-\mu_2}{\lambda_2+\beta}[1-g_2(\lambda_2+\beta)]\right]\right\}\Big/l_{00} \tag{21}$$

である．ここで，

$$K=[1-f_1(\alpha)] /\{\beta+2\lambda_2[1-g_2(\lambda_2+\beta)]\}, \tag{22}$$

$$l_{00}=\frac{1}{\alpha}-\left(\frac{1}{\alpha}-\frac{1}{\mu_1}\right)\cdot f_1(\alpha) +K\cdot\left\{1+\frac{2\lambda_2}{\mu_2}\cdot\left[1+\frac{\lambda_2}{\lambda_2+\beta}\cdot[1-g_2(\lambda_2+\beta)]\right]\right\}, \tag{23}$$

であり，l_{00} は状態 0 における平均再帰時間を示し，明らかに $\sum_{j=0}^{4} P_j=1$ である．

システム故障の定義によって，$\sum_{j=0}^{3} P_j$ はシステムの定常アベイラビリティを表し，P_4 はアン・アベイラビリティを表す．また，P_0 はシステムが状態0にある確率であるから，マルチ・プロセッサ・システムがオンライン・システムからの分離要求を満たす確率であり，同様に P_1 は，パーティション・システムがオンライン・システムからの合体要求を満たす確率である．すなわち，P_0+P_1 は，汎用コンピュータ・システムがプロセッサの故障もなく正常に動作中で，オンライン・システムからの要求を満たす確率を表す．さらに P_1+P_2 は，パーティション・システムがオンライン・システムのバック・アップをしている確率を示し，P_3 はオンライン・システムからの分離要求を拒否する確率を示す．

同様な方法によって，システムが状態0から出発したとき，初めて状態 j へ推移する平均時間 $l_{0j}(j=1,2,3,4)$ と，単位時間当りに各状態を訪問する平均回数 $M_j(j=0,1,2,3,4)$ を，次のように求めることができる．

$$l_{01}=\frac{1}{\alpha}+\frac{1}{\mu_1}\cdot\frac{f_1(\alpha)}{1-f_1(\alpha)}, \tag{24}$$

$$l_{02}=\left[\frac{1}{\alpha}+\frac{1}{\mu_1}\cdot\frac{f_1(\alpha)}{1-f_1(\alpha)}+\frac{1}{2\lambda_2+\beta}\right]\Big/\left[\frac{2\lambda_2}{2\lambda_2+\beta}\right], \tag{25}$$

$$l_{03}=\frac{1}{\alpha}\cdot\frac{1-f_1(\alpha)}{f_1(\alpha)} +\frac{K}{f_1(\alpha)}\cdot\left\{1+\frac{2\lambda_2}{\mu_2}\cdot\left[1+\frac{\lambda_2}{\lambda_2+\beta}\cdot[1-g_2(\lambda_2+\beta)]\right]\right\}, \tag{26}$$

$$l_{04}=\left\{\frac{1}{\alpha}[1-f_1(\alpha)\cdot g_1(\alpha)] +K\cdot\left[1+\frac{2\lambda_2}{\lambda_2+\beta}\cdot[1-g_2(\lambda_2+\beta)]\right]\right\}\Big/[1-f_1(\alpha)\cdot g_1(\alpha)-K\cdot\beta], \tag{27}$$

$$M_0=\left\{1+\frac{2\lambda_2}{2\lambda_2+\beta}\cdot g_2(\lambda_2+\beta)\cdot[1-f_1(\alpha)]\right\}\Big/l_{00}, \tag{28}$$

$$M_1=\{1-f_1(\alpha)+K\cdot 2\lambda_2\cdot[1-g_2(\lambda_2+\beta)]\}/l_{00}, \tag{29}$$

$$M_2=K\cdot 2\lambda_2/l_{00}, \tag{30}$$

$$M_3=f_1(\alpha)/l_{00}, \tag{31}$$

$$M_4=\{f_1(\alpha)\cdot[1-g_1(\alpha)]+K\cdot 2\lambda_2\cdot[1-g_2(\lambda_2+\beta)]\}/l_{00}. \tag{32}$$

ここに，l_{04} はシステム故障までの平均時間，M_4 は単位時間当りの平均システム故障回数を表す．ほかに，l_{01} はマルチ・プロセッサ・システムがオンライン・システムからの分離要求によってパーティション・システムにシステム構成を変更するまでの平均時間，M_3 はマルチ・プロセッサ・システムの単位時間当りの平均故障回数を示す．また，$M_F\equiv\sum_{j=2}^{4}M_j$ とおくと，M_F はオンライン・システムからの要求を拒否する単位時間当りの平均回数を示す．

4. 数　値　例

前節で求めた定常確率 P_j，平均推移時間 l_{0j}，単位時間当りの平均訪問回数 $M_j(j=0,1,2,3,4)$ について，具体的な数値を求めてみよう．汎用マルチ・プロセッサ・システムの故障時間分布 $F_1(t)$，修理時間分布 $G_1(t)$，および，パーティション・システムの修理時間分布 $G_2(t)$ を，それぞれ，

$$F_1(t)=1-e^{-\lambda_1 t}, \tag{33}$$

$$G_n(t)=\begin{cases}0: & t<1/\mu_n\\ 1: & t\geqq 1/\mu_n\end{cases},\quad (n=1,2), \tag{34}$$

とする．また，各分布関数におけるパラメータの具体的な値として，汎用マルチ・プロセッサ・システムの平均故障時間を $1/\lambda_1=720$ 時間，平均修理時間を $1/\mu_1=1$ 時間とし，パーティション・システムの平均故障時間を $1/\lambda_2=360$ 時間，平均修理時間を $1/\mu_2=30$ 分とする．さらに，オンライン・システムが，分離要求するまでの平均時間を $1/\alpha=720$ 時間，合体要求するまでの平均時間を $1/\beta=10\sim120$ 分（可変）とおく．

以上の仮定のもとでの数値例を，**表 1, 2, 3** に示す．すなわち，オンライン・システムからの平均合体要求時間 $1/\beta$ の変化に対応して，表1にはシステムの各状態における定常確率を，表2にシステムが動作を開始してから各状態に初めて推移する平均時間を，表3にシステムが単位時間当りに各状態を訪問する平均回数を示す．たとえば，表1において，分離要求を満たす確率 P_0 は，$1/\beta$ が大きくなるに従って減少し，合体要求を満たす確率 P_1 は，逆に増加することが示される．しかし，オンライン・システムからの要求を常に満たす確率 P_0+P_1 の変化は微小で，およそ 99.86% の一定の値をとることがわかる．この P_0+P_1 は，汎用処理業務が正常に行われている確率であるから，オンライン・システムの平均修理時間に相当する $1/\beta$ の変化に，ほとんど影響されない状況は，汎用コンピュータ・システムにとって非常に望ましいことといえる．また，オンライン・システムからの分離要求が拒否される確率 P_3 は，非常に小さく約 0.138% であることも示される．なお，定常アベイラビリティ $1-P_4$ は，およそ 99.999% で，この値は，オンライン・システム自身の定常アベイラビリティ（$(1/\alpha)/(1/\alpha+1/\beta)$ $=43200/43260\fallingdotseq 0.99861$）に比し，かなりの改善になっていることがわかる．

表2から，システム故障までの平均時間 l_{04}(MTTF) は，$1/\beta=60$ 分のとき約 2×10^5 時間であり，l_{02} と l_{04}，l_{03} と l_{04} との関係から，システム故障に至る状態推移は，そのほとんどが状態2を経由していることが推察される．さらに，表3から，オンライン・システムからの要求を拒否する平均回数 M_F は，$1/\beta$ の影響をほとんど受けず月当り約1回であり，平均システム故障

表 1　定常確率の数値例

Table 1 Numerical values of steady-state probabilities.

$1/\beta$ (分)	P_0	P_1 $\times10^{-3}$	P_3 $\times10^{-2}$	$1-P_4$	P_0+P_1	P_1+P_2 $\times10^{-3}$
10	0.998382	0.230904	0.138568	0.9999986	0.998613	0.231107
20	0.998151	0.461443	0.138536	0.9999984	0.998612	0.462106
40	0.997690	0.921983	0.138472	0.9999983	0.998612	0.923783
60	0.997229	1.382013	0.138408	0.9999982	0.998611	1.385032
90	0.996539	2.071213	0.138312	0.9999982	0.998610	2.076102
120	0.995850	2.759434	0.138216	0.9999981	0.998609	2.766212

表 2　平均推移時間の数値例

Table 2 Numerical values of mean first-passage times.

$1/\beta$ (分)	l_{00}(分) $\times10^5$	l_{01}(分) $\times10^5$	l_{02}(分) $\times10^8$	l_{03}(分) $\times10^5$	l_{04}(分) $\times10^8$
10	0.21635	0.43260	0.46775	0.43210	0.19087
20	0.21640	0.43260	0.23414	0.43220	0.15320
40	0.21650	0.43260	0.11734	0.43240	0.12961
60	0.21660	0.43260	0.07841	0.43260	0.12122
90	0.21675	0.43260	0.05245	0.43290	0.11551
120	0.21690	0.43260	0.03947	0.43320	0.11263

表 3　単位時間当りの平均訪問回数の数値例

Table 3 Numerical values of expected numbers of visits to state per unit of time in steady-state.

$1/\beta$ (分)	M_0(回/分) $\times10^{-4}$	M_1(回/分) $\times10^{-4}$	M_2(回/分) $\times10^{-7}$	M_3(回/分) $\times10^{-4}$	M_4(回/分) $\times10^{-7}$	M_F(回/分) $\times10^{-4}$
10	0.46220	0.23131	0.21380	0.23111	0.52393	0.23184
20	0.46201	0.23139	0.42726	0.23105	0.65274	0.23213
40	0.46149	0.23140	0.85369	0.23095	0.77153	0.23257
60	0.46091	0.23134	1.27964	0.23084	0.82497	0.23294
90	0.46000	0.23123	1.91779	0.23068	0.86571	0.23346
120	0.45907	0.23109	2.55503	0.23052	0.88788	0.23396

回数 M_4 は，年当り，およそ0.04回であることも示される．また，M_2 と M_4，M_3 と M_4 との関係から，M_F は，そのほとんどが M_3 によるものと推察される．

5. むすび

オンライン・システムなどに使用されているコンピュータ・システムの利用の高度化に伴い，システム障害時において，いかに早急にシステム回復を行うかの問題が非常に重要視されてきている．従来の一般的なシステム回復の手順は，まず障害装置の識別を行い，続いて障害個所の探索と修理を行い，修理完了を待ってシステムを復旧することとしていた．しかし，このような手順では，障害発生から復旧までの経過時間が，その障害状況に大きく依存し，オンライン・システムのようなシステム運用面では致命的な影響を受けることとなる．ここでは，オンライン・システムの障害時において，汎用処理を行っているバック・アップ・システムが，オンライン・システムからの要求に応じて自己のシステムを再構成し，オンライン・システムのバック・アップと，汎用処理を同時に行うようなシステムを設定した．すなわち，オンライン・システムの障害復旧は，汎用処理システムによるバック・アップ時間中で行うこととし，オンライン・システムの障害状況に依存することなくオンラインの運用をするとともに，極力，汎用処理もできうるモデルを設定した．

このようなモデルに対するシステム故障を，オンライン・システムからの要求を満たすか否かを考慮して定義し，定常アベイラビリティ，システム故障までの平均時間，単位時間当りの平均システム故障回数を求めた．また，オンライン・システムからの分離要求，合体要求をそれぞれ満たす確率，分離・合体要求を満たす確率，分離要求を拒否する確率，さらに，分離・合体要求を拒否する単位時間当りの平均回数などを求めた．最後に，汎用マルチ・プロセッサ・システムの故障時間を指数分布，修理時間を一定としたときの数値例を示した．この例から，オンライン・システムからの分離・合体要求を満たす確率は，オンライン・システムの平均修理時間 $1/\beta$ にほとんど影響されないことがわかり，したがって，バック・アップ・システムの汎用処理業務が正常に行われる確率も，およそ確定できることを示した．このことは，このモデルのシステム構成が，オンライン・システムおよび汎用システムの双方にとって，望ましいものであるということができよう．

コンピュータ・システムの利用動向に関して，オンライン・システムのような高度なシステム運用は，今後ますます増加するものと考えられる．この論文で述べたオンライン・システムのバック・アップの概念や，障害発生時における動作可能なシステムの再構成に対する考え方は，そのようなシステムを構築する際に有益となるであろう．とくに，システム障害発生時における回復時間が，システムの障害状況に依存しないようなシステム構成への要求は，さらに強まり，質的にも高度化するものと考えられ，この方面に対する多くの研究が期待される．

参考文献

1) 三輪　修：計算機構成論，p. 203，共立出版，東京 (1978)．
2) 猪瀬　博：コンピュータ・システムの高信頼化，p. 487，情報処理学会，東京 (1977)．
3) 塩見　弘：コンピュータ・リライアビリティ，p. 320，昭晃堂，東京 (1974)．
4) 当麻喜弘：最近のコンピュータ特集—高信頼化技術，信学誌，Vol. 62，No. 11，pp. 1260–1269 (1979)．
5) Gertsbakh, I. B.: Models of Preventive Maintenance, Studies in Mathematical and Managerial Economics, North-Holland, New York (1977).
6) 安井，本告，中川，沢：点検政策の信頼度解析とコンピュータ・システムへの応用，*J. of Oper. Res. So. of Japan*, Vol. 23, No. 3, pp. 273–285 (1980).
7) Nakagawa, T. and Osaki, S.: Stochastic Behavior of A Two-Unit Standby Redundant System, *INFOR*, Vol. 12, No. 1, pp. 66–70 (1974).

(昭和56年7月24日受付)
(昭和57年1月20日採録)