

## 4 処理システムをもつループコンピュータ ネットワークの信頼性†

安井一民<sup>††</sup> 中川 覃 夫<sup>†††</sup> 沢 嘉 也<sup>†††</sup>

最近、情報資源における安全性の確保、信頼性の向上、経済性の配慮などの各面から、コンピュータ・ネットワークの必要性が強調されている。システムを構成するうえで、いかに高信頼度を維持せしめるかは非常に重要な問題であり、ここでは、4つの処理システムをもつループ・コンピュータ・ネットワークにおいて、(1)単一ループシステム、(2)バイパスのある単一ループシステム、(3)双方向ループシステム、(4)バイパスのある双方向ループシステム、の4種類のモデルを考え、それぞれのモデルに対して信頼性の考察を行い、かつ、比較をする。ネットワークを構成する処理システムは、フェイル・ソフト性を考慮して、すべてマルチ・プロセッサ・システムとし、ある処理システムが故障した場合、そのシステムを、ネットワークに接続する他の処理システムがバック・アップするモデルを設定する。各々のシステムに対して、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、平均システム故障回数、システム故障までの平均時間 (MTTF) を求める。さらに、数値例として、バック・アップ可能の確率が処理システムのアベイラビリティに等しいと仮定したとき、逐次近似法によって、それぞれの信頼性の諸量を求める。

### 1. ま え が き

最近、情報資源の安全性・信頼性・経済性等に関して、コンピュータ・ネットワークの必要性が強調されている。すなわち、天災や人為的攻撃等による情報資源の安全性・信頼性を確保するため、「情報の広域分散化」の問題<sup>1)</sup>が重要視されており、同時に、コンピュータ・システムにおける、ハードウェア、ソフトウェア、データ・ベースなどの「情報資源の共有化」による経済的・有効的利用の要求も、次第に高まってきている。また、このような必要性のもとに構築されるコンピュータ・ネットワークに対して、個々のコンピュータ・システムの信頼性を向上させる問題や、ネットワーク全体を、1つの大きな仮想コンピュータと考えた場合の信頼性向上の問題<sup>2)</sup>に、関心が寄せられている。

コンピュータ・ネットワークの構成法として、集中形、分散形、分布形等の諸種の方法が考えられるが、J. R. Pierce<sup>3)</sup>によって提案され、結合伝送路数が少なく比較的容易に構成できるネットワーク形態に、ループ形がある。ループ・コンピュータ・ネットワーク<sup>4)</sup>については、すでに、その構築に対する技術的な実証

研究<sup>5)</sup>や、理論的な角度から、主にネットワーク・ステーションにおけるバッファリングを扱った研究<sup>6), 7)</sup>が多く行われているが、信頼性的研究は、まだ少ないように思われる。

この論文では、4つの処理システムをもつループ・コンピュータ・ネットワークにおいて、4種類のモデルを考え、それぞれのモデルに対して信頼性の考察を行い、かつ、比較する。すなわち、ネットワークを構成している、ある処理システムが故障した場合、そのシステムを、ネットワークに接続する他の処理システムが、バック・アップするモデルを設定する。ネットワークの形態として、次の4つのシステムを考える。

- (i) 単一ループシステム
- (ii) バイパスのある単一ループシステム
- (iii) 双方向ループシステム
- (iv) バイパスのある双方向ループシステム

それぞれのシステムに対して、マルコフ再生過程の手法<sup>8)</sup>を用いて、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 (MTTF) を求める。さらに、数値例として、バック・アップ可能の確率が処理システムのアベイラビリティに等しいと仮定したとき、逐次近似法によって、それぞれの信頼性の諸量を求める。例えば MTTF について、(i)の単一ループシステムに対し、(ii)のシステムでは約1.3倍に、(iii)のシステムでは約2倍に、それぞれ改善されること等が示される。

† Reliability of Loop Computer Networks with Four Processing Systems 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

2. ループ・コンピュータ・ネットワークのモデル

4つの処理システムから構成されるループ・コンピュータ・ネットワーク(図1(a),(b)および図2(a),(b)参照)を考える。

制御方式は、各処理システムの独立性を高めるため、分散制御形とする。ここに、図1の(a)は、単一方向伝送のループ・コンピュータ・ネットワークであり、(b)は、バイパスを挿入したシステムである。図2は双方向伝送のループ・コンピュータ・ネットワークである。いわば、図1の(a)に伝送方向の異なる主ループを追加したシステムが図2の(a)のシステムで、これにバイパスを挿入した場合が(b)のシステムである。なお、図1(b)、図2(a),(b)の伝送経路に関し、送出ステーションから宛先ステーションに至る通過ステーション数の少ない伝送経路を用いて伝送されるものとする(最短経路制御)。このネットワーク・システムは、次のような機能により稼動するものとする。

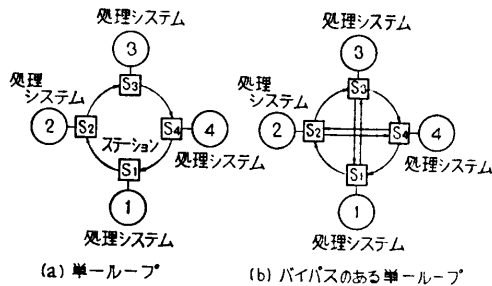


図1 4処理システムをもつループ・コンピュータ・ネットワーク

Fig. 1 Loop computer network with four processing systems.

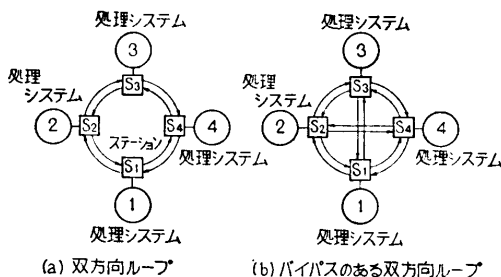


図2 4処理システムをもつ双方向ループ・コンピュータ・ネットワーク

Fig. 2 Two-way loop computer network with four processing systems.

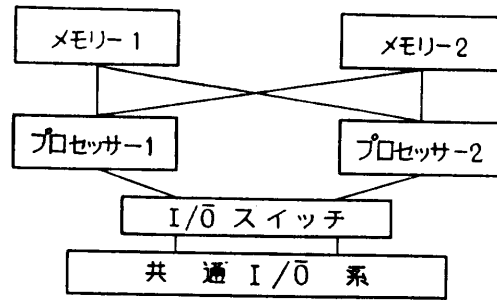


図3 マルチ・プロセッサ・システム  
Fig. 3 Multi-processor system.

(1) ネットワークを構成する処理システムは、フェイル・ソフト性<sup>9)</sup>を高めるため、すべてマルチ・プロセッサ・システム(図3参照)を構成し、互いに負荷を配分しながら処理を行う。

すなわち、常時は2つのプロセッサが稼動しており、どちらか1つのプロセッサが故障すると、直ちに主ループ(一定方向を仮定する)に隣接する処理システムに対し、バック・アップ依頼のメッセージを発信する。故障したプロセッサは自動的に処理システムから切離される。処理システムは機能を縮小しながら稼動状態を継続する。

(2) バック・アップの依頼を受けた処理システムは自己の処理システムの、システム構成要素の稼動状態、負荷状態等をチェックし、もしバック・アップ可能ならば、直ちにメッセージを依頼元へ送信し、バック・アップを開始する。もし不可能ならば、宛先名を隣接する次の処理システムに変更し、バック・アップ依頼メッセージを転送する。ここで、バック・アップを開始するとは、依頼元処理システムに関する、プログラムやファイル等の諸準備を行うとともに、依頼元処理システムを自己に対するターミナルとみなして、その処理機能を開始させることを意味するものとする。

(3) 依頼元の処理システムは、もしバック・アップ不可能のメッセージを受信した場合(すなわち、自己発信のバック・アップ依頼メッセージを受信した場合)、稼動プロセッサが、この間に故障していたならば、その修理と、もう一方の故障プロセッサの修理を、故障していなかったならば、その点検と故障プロセッサの修理を、それぞれ実施するものとする。ここで、稼動プロセッサを停止して点検を行うのは、類似の故障原因その他による以後のトラブルを防止するためである。もし、いずれかの処理システムからバック

ク・アップ可能のメッセージを受信した場合、同様に、2つの故障プロセッサの修理を、あるいは、稼働プロセッサの点検と故障プロセッサの修理を、それぞれ実施するものとする。この場合、故障プロセッサの修理完了時点で、バック・アップ処理システムに対して修理完了のメッセージを発信し、バック・アップ処理システムは、バック・アップ態勢を解き、平常に復するものとする。

(4) もしバック・アップ継続中に、バック・アップ処理システムの、システム構成要素や負荷状態などにトラブルが発生し、バック・アップが困難になると、直ちに、バック・アップ中止メッセージを依頼元処理システムのターミナル機能に対して発信し、バック・アップを中止する。

(5) バック・アップ依頼元の処理システムは、バック・アップ可能のメッセージが到着した時点から故障プロセッサの修理完了時点まで、あるいは、バック・アップ中止のメッセージ受信時点まで、バック・アップ処理システムによるターミナル機能の保障等によって、その処理システムのアベイラビリティが、完全に保障されているものとする。

(6) ネットワークを構成する通信回線は、多重化するなどして、故障しないものと仮定し、各処理システム間のコミュニケーションに関して、「システム間の差異」は大きくないものとする。また、故障システムのバック・アップに関して、「I/O ネット」は生じないものと仮定する。

### 3. システムの信頼度

各処理システムの、2つのプロセッサは同一の機能を持つものとし、故障時間分布を  $F(t)$  とする。プロセッサが故障した場合の修理時間分布および故障していない場合の点検時間分布を、それぞれ  $G_1(t)$ 、 $G_2(t)$  とし、便宜上、その時間の和の分布を  $H_1(t) \equiv G_2(t) * G_1(t)$  (平均  $1/\mu_1$ )、 $H_2(t) \equiv G_1(t) * G_1(t)$  (平均  $1/\mu_2$ ) とおく。ここに、\* は分布関数のたたみこみを意味する。また、ある処理システムから隣接する処理システムへのコミュニケーションに要する経過時間は、一定時間  $l$  とする。例えば、処理システム1からバック・アップ依頼のメッセージを発信し、ある処理システムでバック・アップが可能である場合、返信メッセージを受信するまでの経過時間は、図1の(a)では  $4l$ 、(b)では、処理システム2,3の場合は  $3l$ 、図2の(a)では、処理システム2の場合は  $2l$ 、(b)では、処理シ

ステム4の場合は  $4l$  などである。バック・アップ不可能の場合は、いずれのネットワークも  $4l$  である。

さらに、バック・アップ依頼を受けた処理システムは、確率  $p$  でバック・アップ可能とし、また、バック・アップ開始後、平均  $1/\lambda_B$  をもつ指数分布に従ってトラブルが発生し、バック・アップを中止するものとする。なお、各処理システムのプロセッサの機能は、点検または修理により、その全機能を回復するものとする。

以上の仮定のもとで、システムの挙動を表わす各状態  $i$  ( $i=0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$ ) を次のように定める。なお、処理システムにおける2つのプロセッサの状態を、ドット(・)を用いて表わすものとする(例えば、点検・修理開始とは、稼働プロセッサの点検と故障プロセッサの修理を、引続いて行うことを意味するものとする)。

状態 0: 2つのプロセッサ稼働開始。

状態 1: 1つのプロセッサ故障、バック・アップ依頼のメッセージ発信。

状態 2: 1つのプロセッサ稼働中にバック・アップ可能のメッセージ到着、バック・アップ開始、点検・修理開始。

状態 3: システム故障中にバック・アップ可能メッセージ到着、バック・アップ開始、修理・修理開始。

状態 4: 点検・修理中にバック・アップ中止メッセージ受信、システム故障。

状態 5: 修理・修理中にバック・アップ中止メッセージ受信、システム故障。

状態 6: 1つのプロセッサ稼働中にバック・アップ不可能メッセージ到着、点検・修理開始、システム故障。

状態 7: システム故障中にバック・アップ不可能メッセージ到着、修理・修理開始。

状態 8: バック・アップ依頼中に稼働中のプロセッサ故障、システム故障。

上で定義された状態は、マルコフ再生過程を形成し、状態 0, 2, 3, 6, 7 が再生点となる。しかし、状態 1 は他の1つのプロセッサが稼働中であり、状態 4, 5 は、それぞれ、点検・修理、修理・修理が継続中、また、状態 8 は、バック・アップ依頼中に故障が起るため、ともに再生点にはならない。各状態間の推移は図4のように表わすことができる。

ここに、図4における○はシステム・アップの状態

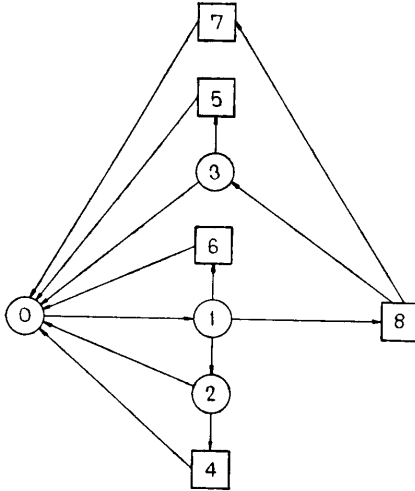


図 4 マルチ・プロセッサ・システムの状態推移図  
Fig. 4 Transition diagram between system states for a multi-processor system.

を, □はシステム故障の状態を示す。

マルコフ再生過程の各状態間の1ステップ推移確率時間分布を  $Q_{ij}(t)$  ( $i=2, 3, 6, 7; j=0, 4, 5$ ), また, システムが時刻  $t=0$  で状態  $i$  から出発し, 時刻  $t$  までに状態  $k$  を経由して次の状態  $j$  へ推移する確率時間分布を  $Q_{ij}^{(k)}(t)$  ( $i=0, 2, 3; j=0, 2, 6, 8; k=1, 4, 5$ ), さらに, システムが状態 0 から出発して, 時刻  $t$  までに状態 1, 8 を経由して次の状態  $j$  へ推移する確率時間分布を  $Q_{0j}^{(1,8)}(t)$  ( $j=3, 7$ ) とする。それぞれのラプラス・スティルチェス (LS) 変換を  $q_{ij}(s)$ ,  $q_{ij}^{(k)}(s)$ ,  $q_{0j}^{(1,8)}(s)$  とする。一般に小文字は, その関数の LS 変換を示す。例えば,  $h_i(s) \equiv \int_0^\infty e^{-st} dH_i(t)$  である。さらに,  $\bar{F}(t) \equiv 1 - F(t)$  とする。

#### (1) 単ループシステム

処理システム 1 のみに注目したとき, 図 4 における, 各状態間の推移確率時間分布の LS 変換形は, 次のように表わすことができる。

$$q_{02}^{(1)}(s) = 2[1 - (1-p)^3] \int_0^\infty e^{-s(u+4l)} \cdot \bar{F}(u+4l) dF(u). \quad (3.1)$$

$$q_{03}^{(1)}(s) = 2(1-p)^3 \int_0^\infty e^{-s(u+4l)} \cdot \bar{F}(u+4l) dF(u). \quad (3.2)$$

$$q_{04}^{(1)}(s) = 2 \int_0^\infty \int_u^{u+4l} e^{-st} dF(t) dF(u). \quad (3.3)$$

$$q_{07}^{(1,8)}(s) = 2[1 - (1-p)^3] \int_0^\infty e^{-s(u+4l)} \cdot [F(u+4l) - F(u)] dF(u). \quad (3.4)$$

$$q_{07}^{(1,8)}(s) = 2(1-p)^3 \int_0^\infty e^{-s(u+4l)} \cdot [F(u+4l) - F(u)] dF(u). \quad (3.5)$$

$$q_{i0}(s) = h_{i-1}(s + \lambda_B), \quad (i=2, 3). \quad (3.6)$$

$$q_{i0}^{(i+2)}(s) = h_{i-1}(s) - h_{i-1}(s + \lambda_B), \quad (i=2, 3). \quad (3.7)$$

$$q_{ii+2}(s) = \frac{\lambda_B}{s + \lambda_B} [1 - h_{i-1}(s + \lambda_B)], \quad (i=2, 3). \quad (3.8)$$

$$q_{i0}(s) = h_{i-s}(s), \quad (i=6, 7). \quad (3.9)$$

例えば,  $q_{02}^{(1)}(s)$  は, 区間  $(0, t]$  において, 処理システム 1 の 2 つのプロセッサのうち 1 つが故障し, 直ちに隣接する処理システムに対し, バック・アップ依頼のメッセージを発信したところ, もう一方のプロセッサの故障する前に, 処理システム 2, 3, 4 のいずれかによって, バック・アップ可能のメッセージを受信する場合の確率分布  $Q_{02}^{(1)}(t)$  の LS 変換形を示している。

さて, (3.1)~(3.9)式を用いて, 最初に定常アベイラビリティを求めよう。システムが時刻  $t=0$  で状態 0 から出発し, 時刻  $t$  で状態  $j$  ( $j=4, 5, 6, 7, 8$ ) にある確率 (システムが, 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確率) を  $P_{0j}(t)$  とすると, 次の再生方程式を得る。

$$P_{04}(t) = Q_{02}^{(1)}(t) * [Q_{24}(t) - Q_{20}^{(4)}(t)] + A(t) * P_{04}(t) \quad (3.10)$$

$$P_{05}(t) = Q_{03}^{(1,8)}(t) * [Q_{35}(t) - Q_{30}^{(5)}(t)] + A(t) * P_{05}(t). \quad (3.11)$$

$$P_{06}(t) = Q_{06}^{(1)}(t) * [1 - Q_{60}(t)] + A(t) * P_{06}(t). \quad (3.12)$$

$$P_{07}(t) = Q_{07}^{(1,8)}(t) * [1 - Q_{70}(t)] + A(t) * P_{07}(t). \quad (3.13)$$

$$P_{08}(t) = Q_{08}^{(1)}(t) - [Q_{03}^{(1,8)}(t) + Q_{07}^{(1,8)}(t)] + A(t) * P_{08}(t). \quad (3.14)$$

ここに,

$$A(t) = Q_{02}^{(1)}(t) * [Q_{20}(t) + Q_{20}^{(4)}(t)] + Q_{03}^{(1,8)}(t) * [Q_{30}(t) + Q_{30}^{(5)}(t)] + Q_{06}^{(1)}(t) * Q_{60}(t) + Q_{07}^{(1,8)}(t) * Q_{70}(t),$$

であり, 状態 0 から初めて状態 0 に戻る再帰時間分布を示している。

システムが故障状態にある確率  $P_F$  は, 状態 4, 5, 6, 7, 8 が故障状態であることから, 次式により求めることができる。

$$P_F \equiv \lim_{t \rightarrow \infty} \left\{ \sum_{j=4}^8 P_{0j}(t) \right\}$$

$$\begin{aligned}
&= \left\{ N_i + 1/\mu_2 - [1 - (1-p)^3] \cdot [1 - h_2(\lambda_B)] / \lambda_B \right. \\
&\quad - 2 \int_0^\infty K(u) dF(u) \\
&\quad - 2 \int_0^\infty (1/\mu_2 - 1/\mu_1) \int_0^\infty K_1(u) dF(u) + (2/\lambda_B) \\
&\quad \left. \cdot [h_1(\lambda_B) - h_2(\lambda_B)] \int_0^\infty K_2(u) dF(u) \right\} / l_{00}.
\end{aligned} \tag{3.15}$$

ここで,

$$\begin{aligned}
N_i &= 4l, \\
K(u) &= \int_u^{u+4l} \bar{F}(t) dt, \\
K_1(u) &= \bar{F}(u+4l), \\
K_2(u) &= [1 - (1-p)^3] \cdot \bar{F}(u+4l), \\
l_{00} &= - \lim_{s \rightarrow 0} \left\{ \frac{d}{ds} \int_0^\infty e^{-st} dA(t) \right\} \\
&= N_i + \int_0^\infty [\bar{F}(u)]^2 du + 1/\mu_2 \\
&\quad - 2(1/\mu_2 - 1/\mu_1) \int_0^\infty K_1(u) dF(u),
\end{aligned}$$

とおく. ここに,  $1 - P_F$  は定常状態におけるアベイラビリティを表わし,  $l_{00}$  は状態 0 から初めて状態 0 に戻る平均再帰時間を表わす.

同様な考察により, システムが状態 0 から出発したとき, 単位時間あたりの平均システム故障回数:  $M_F$  および MTTF:  $l_{0F}$  も求めることができ,

$$\begin{aligned}
M_F &= \left\{ 2 \int_0^\infty \bar{K}_1(u) dF(u) - [1 - (1-p)^3] \cdot h_2(\lambda_B) \right. \\
&\quad \left. - 2[h_1(\lambda_B) - h_2(\lambda_B)] \int_0^\infty K_2(u) dF(u) \right\} / l_{00},
\end{aligned} \tag{3.16}$$

$$\begin{aligned}
l_{0F} &= \left\{ \int_0^\infty [\bar{F}(u)]^2 du + 2 \left[ \int_0^\infty K(u) dF(u) \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + (1/\lambda_B) \cdot [1 - h_1(\lambda_B)] \int_0^\infty K_2(u) dF(u) \right] \right\} / \\
&\quad \left[ 1 - 2h_1(\lambda_B) \int_0^\infty K_2(u) dF(u) \right], \tag{3.17}
\end{aligned}$$

を得る.

#### (2) バイパスのある単一ループシステム

図 1 の (a) のシステムに新たに伝送路を追加した, すなわち, バイパスを挿入したシステム (b) を考え, システム信頼度への影響を調べるため, 前項と同様な信頼度解析を行ってみよう. この場合, バイパスを挿入することによって, 処理システム 1 からバック・ア

ップ依頼のメッセージを発信したとき, バック・アップ可能処理システムが, 処理システム 2 および処理システム 3 の場合に, バック・アップ可能メッセージを受信するまでの経過時間が  $3l$  に短縮される. したがって, 前と同様な考察により, (3.15) ~ (3.17) 式において,

$$\begin{aligned}
N_i &= [4 - p(2-p)] \cdot l, \\
K(u) &= p(2-p) \int_u^{u+3l} \bar{F}(t) dt + (1-p)^2 \int_u^{u+4l} \bar{F}(t) dt, \\
K_1(u) &= p(2-p) \cdot \bar{F}(u+3l) + (1-p)^2 \cdot \bar{F}(u+4l), \\
K_2(u) &= p(2-p) \cdot \bar{F}(u+3l) + p(1-p)^2 \cdot \bar{F}(u+4l), \\
l_{00} &= N_i + \int_0^\infty [\bar{F}(u)]^2 du + 1/\mu_2 \\
&\quad - 2(1/\mu_2 - 1/\mu_1) \int_0^\infty K_1(u) dF(u),
\end{aligned}$$

と, おきかえることによって,  $P_F$ ,  $M_F$ ,  $l_{0F}$  を求めることができる.

#### (3) 双方向ループシステム

図 2 (a) のモデルは, 単一ループシステムに対し, 伝送方向の異なる主ループを追加したシステムである. バック・アップ依頼メッセージの発信を, 元の主ループ方向に対して行うものとする, バック・アップ可能処理システムが, 次の処理システムである場合に限り, バック・アップ可能メッセージを受信するまでの経過時間が  $2l$  に短縮される.  $P_F$ ,  $M_F$ ,  $l_{0F}$  は,

$$\begin{aligned}
N_i &= (4-2p) \cdot l, \\
K(u) &= p \cdot \int_u^{u+2l} \bar{F}(t) dt + (1-p) \int_u^{u+4l} \bar{F}(t) dt, \\
K_1(u) &= p \cdot \bar{F}(u+2l) + (1-p) \cdot \bar{F}(u+4l), \\
K_2(u) &= p \cdot \bar{F}(u+2l) + p(1-p)(2-p) \cdot \bar{F}(u+4l), \\
l_{00} &= N_i + \int_0^\infty [\bar{F}(u)]^2 du + 1/\mu_2 \\
&\quad - 2(1/\mu_2 - 1/\mu_1) \int_0^\infty K_1(u) dF(u),
\end{aligned}$$

を, (3.15) ~ (3.17) 式に, それぞれ代入することによって求められる.

図 2 の (b) のモデルは, (a) のモデルにバイパスを挿入した場合であり,

$$\begin{aligned}
N_i &= [4 - p(3-p)] \cdot l, \\
K(u) &= p \cdot \int_u^{u+2l} \bar{F}(t) dt + p(1-p) \int_u^{u+3l} \bar{F}(t) dt \\
&\quad + (1-p)^2 \int_u^{u+4l} \bar{F}(t) dt, \\
K_1(u) &= p \cdot \bar{F}(u+2l) + p(1-p) \cdot \bar{F}(u+3l) \\
&\quad + (1-p)^2 \cdot \bar{F}(u+4l),
\end{aligned}$$

$$K_2(u) = p \cdot \bar{F}(u+2l) + p(1-p) \cdot \bar{F}(u+3l) \\ + p(1-p)^2 \cdot \bar{F}(u+4l),$$

$$l_{00} = N_i + \int_0^{\infty} [\bar{F}(u)]^2 du + 1/\mu_2 \\ - 2(1/\mu_2 - 1/\mu_1) \int_0^{\infty} K_1(u) dF(u),$$

と、おけばよい。

ここで、 $N_i$  は、各々のシステムに対して、バック・アップ依頼のメッセージを発信してから、その結果を受信するまでの平均時間を示している。たとえば、図1の(b)では、 $p \times 3l + (1-p)p \times 3l + (1-p)^2 p \times 4l + (1-p)^3 \times 4l = [4-p(2-p)] \cdot l$  となる。

#### 4. 数値例

4つのシステムに対し、信頼性の諸量を具体的に計算してみよう。プロセッサの故障時間分布を、位相2をもつガンマ分布、

$$F(t) = 1 - (1 + \beta t) \cdot e^{-\beta t}, \quad (4.1)$$

とし、点検・修理時間分布および修理・修理時間分布を、それぞれ、

$$H_i(t) = \begin{cases} 0 & t < 1/\mu_i \\ 1 & t \geq 1/\mu_i \end{cases}, \quad (i=1, 2), \quad (4.2)$$

の、レギュラ分布と仮定する。パラメータの具体的な値として、故障時間の平均を  $2/\beta = 360$  時間、また、 $1/\mu_1 = 3$  時間、 $1/\mu_2 = 6$  時間とする。さらに、バック・アップ処理システムの、平均トラブル発生時間間隔を  $1/\lambda_B = 180$  時間とし、各処理システム間のコミュニケーションに要する時間を  $l = 5 \sim 120$  分(可変)とおく。なお、バック・アップ可能確率を定常アベイラビリティに等しい、いわば、 $p \equiv 1 - P_F$  と仮定しよう。そのとき、(3.15)式の右辺に適当な初期値  $p_1$  (例えば、1つのプロセッサのアベイラビリティ  $(2/\beta)/[2/\beta + 1/\mu_1] = 360/363 \approx 0.9917$ ) を与え、アン・アベイラビリティ  $P_F(p_1)$  を求める。そこで、 $p_2 = 1 - P_F(p_1)$  とおき、逐次近似法により、順次これをくり返すことによって、定常アベイラビリティを求める。アベイラビリティは、一般に稼働率を表わしているから、この仮定は妥当であろう。

表1, 2, 3に、上述の仮定のもとでの数値例を示す。例えば、表1, 2, 3において、単一ループシステムに対し、バイパスを挿入した場合と、伝送方向の異なる主ループを追加した場合の効果についてみると、それぞれ同一信頼度のもとで、コミュニケーション時間  $l$  に関し、前者で約1.3倍、後者で約2倍まで

表1 定常アン・アベイラビリティの比較

Table 1 Comparison among the steady-state unavailability.

l (分)	$P_F$			
	単一ループ	単一ループ (バイパス)	双方向ループ	双方向ループ (バイパス)
5	$0.6849 \times 10^{-6}$	$0.3854 \times 10^{-6}$	$0.1713 \times 10^{-6}$	$0.1713 \times 10^{-6}$
10	$0.2735 \times 10^{-6}$	$0.1540 \times 10^{-6}$	$0.6849 \times 10^{-7}$	$0.6849 \times 10^{-7}$
15	$0.6146 \times 10^{-6}$	$0.3461 \times 10^{-6}$	$0.1540 \times 10^{-6}$	$0.1540 \times 10^{-6}$
20	$0.1091 \times 10^{-4}$	$0.6146 \times 10^{-6}$	$0.2735 \times 10^{-6}$	$0.2735 \times 10^{-6}$
60	$0.9704 \times 10^{-4}$	$0.5482 \times 10^{-6}$	$0.2448 \times 10^{-6}$	$0.2447 \times 10^{-6}$
120	$0.3814 \times 10^{-3}$	$0.2164 \times 10^{-6}$	$0.9706 \times 10^{-6}$	$0.9705 \times 10^{-6}$

表2 平均故障回数の比較

Table 2 Comparison among the expected number of failures.

l (分)	$M_F$ (回/分)			
	単一ループ	単一ループ (バイパス)	双方向ループ	双方向ループ (バイパス)
5	$0.6849 \times 10^{-7}$	$0.5138 \times 10^{-7}$	$0.3427 \times 10^{-7}$	$0.3427 \times 10^{-7}$
10	$0.1368 \times 10^{-6}$	$0.1027 \times 10^{-6}$	$0.6849 \times 10^{-7}$	$0.6849 \times 10^{-7}$
15	$0.2049 \times 10^{-6}$	$0.1538 \times 10^{-6}$	$0.1027 \times 10^{-6}$	$0.1027 \times 10^{-6}$
20	$0.2727 \times 10^{-6}$	$0.2049 \times 10^{-6}$	$0.1368 \times 10^{-6}$	$0.1368 \times 10^{-6}$
60	$0.8086 \times 10^{-6}$	$0.6091 \times 10^{-6}$	$0.4079 \times 10^{-6}$	$0.4079 \times 10^{-6}$
120	$0.1589 \times 10^{-5}$	$0.1202 \times 10^{-5}$	$0.8087 \times 10^{-6}$	$0.8086 \times 10^{-6}$

表3 MTTFの比較

Table 3 Comparison among MTTF's

l (分)	$l_{0F} \times 10^4$ (分)			
	単一ループ	単一ループ (バイパス)	双方向ループ	双方向ループ (バイパス)
5	1460	1946	2918	2918
10	731.2	974.2	1460	1460
15	488.2	650.2	974.2	974.2
20	366.7	488.2	731.2	731.2
60	123.7	164.2	245.2	245.2
120	62.91	83.16	123.7	123.7

許容できることを示している。すなわち、バック・アップ可能確率  $p$  が、この数値例のように比較的大きい場合には、単一ループに対する、バイパスの挿入、別の主ループの追加等によって、システムの信頼性の向上が大いに期待できることがわかる。いわば、(3.15)~(3.17)式で、それぞれのシステムに対して  $p \equiv 1$  を仮定すると、 $l$  に関して、大略、形式的に上と同様の結論が得られる。また、双方向ループと双方向ループにバイパスを挿入した場合の比較では、かなり大きな  $l$  の値においても、信頼度にはほとんど差異がみられない。このことは、同一信頼度のもとで、バイパスを挿入することによる、コミュニケーション時間  $l$  の短縮化が、あまり期待できないことを示しており、双方向

ループへのバイパスの挿入は、システムの信頼性向上の面からは、あまり得策でないといえよう。なお、具体的な数値として、 $l$ が10分以内の場合、定常アベイラビリティは、単一ループで99.9997%に対し、バイパスを挿入することによって99.9998%、別の主ループを追加することによって99.9999%以上にそれぞれ改善され、また、一年あたりの平均故障回数では、単一ループで0.072回に対し、それぞれ、0.054回、0.036回に改善されることが示されている。

## 5. む す び

コンピュータ・ネットワークの形態に関して、ループ形は、いわゆる多段中継による回線共用に特徴があり、また、ネットワーク制御機能を分散することにより、各コンピュータ・システムの独立性が高められ、拡張性を兼ね備えているなどの利点がある反面、単一ループ形では、メッセージ通過線路長が長く、かつ、回線を共用しているためのトラヒック量の増大などの欠点もある。このようなシステムに対して、ここでは信頼性的観点から、はじめに、4つの処理システムをもつ単一ループシステムにおいて、ある処理システムが故障した場合に、そのシステムを、ネットワークに接続する他の処理システムがバック・アップするモデルを設定し、その定常アベイラビリティ、平均システム故障回数、MTTFを求めた。次に、この単一ループシステムに、バイパスを挿入したモデルを、さらに伝送方向の異なる主ループを追加した、双方向ループモデルを、それぞれ設定し、同様の信頼度解析を行い、数値例により、これを比較した。数値例から、これら信頼性の諸量は、単一ループに対して、バイパスを挿入することにより約1.3倍に、別の主ループを追加することにより約2倍に、それぞれ改善されることを示した。同時に、双方向ループに、さらにバイパスを挿入することは、信頼性向上の面から、あまり得策でないことも示唆した。このことは、バイパスの挿入方法にもよるが、バック・アップ可能確率 $p$ が比較的大きい場合には、 $n$ 個の処理システムで構成される場合にも、同様の傾向が予想できよう。

ここで述べたコンピュータ・ネットワークにおける

故障システムのバック・アップという概念や、そのシステム構成方法は、ネットワークを構築する際に有益となるであろう。また、この論文では、それぞれのシステムについて、4つの処理システムで構成される場合について議論したが、この議論は、 $n$ 個の処理システムで構成されるシステムにも、同様に応用できるであろう。さらに、ネットワークを構成する個々のコンピュータ・システムの信頼性を向上させるばかりでなく、ネットワーク全体としての、システム信頼性の向上に対する要求は、今後ますます大きくなるものと考えられ、この方面に対する、多くの研究が期待されるであろう。

## 参 考 文 献

- 1) 坂井利之・コンピュータ・ネットワークと情報処理, 情報処理, Vol. 16, No. 3, pp. 170~178 (1975).
- 2) 野口正一: コンピュータ・ネットワークの最近の研究・開発動向, 情報処理, Vol. 18, No. 8, pp. 838~850 (1977).
- 3) Pierce, J. R.: Networks for Block Switching of Data, Bell Syst. Tech. J., Vol. 51, No. 6, p. 1133 (1972).
- 4) 白鳥, 野口, 大泉: ループコンピュータ・ネットワークにおける基礎特性, 信学論 (D), Vol. J 59-D, No. 12, p. 881 (1976).
- 5) Kropfel, W. J.: An Experimental Data Block Switching System, Bell Syst. Tech. J., Vol. 51, No. 6, p. 1147 (1972).
- 6) Spnagins, J. D.: Loop Transmission Systems-Mean Value Analysis, IEEE Trans., COM-20, p. 592 (1972).
- 7) 白鳥, 野口, 大泉: ループコンピュータ・ネットワークにおけるバッファリングについて, 信学論 (D), Vol. J 59-D, No. 6, p. 398 (1976).
- 8) Nakagawa, T. and Osaki, S.: Stochastic Behavior of a Two-Unit Standby Redundant System, INFOR, Vol. 12, No. 1, p. 66 (1974).
- 9) 鶴飼直哉: 大型計算機のシステム構成の動向, 情報処理, Vol. 12, No. 8, pp. 488~496 (1971).
- 10) 猪瀬博ほか: 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).

(昭和54年3月28日受付)

(昭和54年9月20日採録)