

「情報処理学会論文誌」第29巻 第4号別刷 昭和63年4月発行

バイパスとループバック機能を持つ2重リングの信頼性

海老原 義彦 高野 智 池田 克夫

バイパスとループバック機能を持つ2重リングの信頼性†

海老原 義彦^{††} 高野 智^{†††} 池田 克夫^{††}

バイパスとループバック機能を持つ2重リングの信頼性について述べる。2重リングのモデルを設定し、障害状況に応じて2重リング構成の場合分けを行って、リングシステムの信頼性を解析している。システムの信頼性を評価するパラメータとして、平均実効端末数を採用している。平均実効端末数は接続している総端末数のうち、実際に通信できるアクティブ端末数の平均である。バイパスもループバック機能も持たない2重リング、バイパス機能のみの2重リング、ループバックのみの2重リングおよび両機能を持つ2重リングのそれぞれについて次の項目に関して明らかにした。1. 最適リング構成を取る平均実効端末数、2. 障害発生確率が2重リングに与える影響、3. バイパス効果とループバック効果。

1. はじめに

最近のLANのもつ処理機能はますます複雑化、高度化している。高度化にともない、高信頼性のLANが要求されている。リング型LANは代表的LANの一つであり、多くの研究・開発が行われている^{1),2)}。単一リングは致命的障害に対して、信頼性が比較的低いといわれる。このためシステムの信頼性を高める手段として、リングを多重化したり、障害時に障害箇所を自動的に切り離すバイパス機能を付加したり、ループバック機能を付加するなど、種々の障害対策がとられている^{3),4)}。

一般にリング型LANではフレーム同期制御をリング上の一箇所の制御局で行う集中型制御が多い。本論文ではバイパス機能とループバック機能を持つ2重リングの信頼性評価を行う。ただしここでの2重リングとは、通常両リングともフレーム同期が確立しており、送信データはいずれのリングを使っても送信できる2重リングを対象とする。従来、集中型制御のリング型LANに関しては、予備リングを用いたバイパスとUターン機能付き単一リングおよび階層型構造を持つ単一リングの信頼性評価が行われている^{5),6)}。リング型LANはデータの送受信を行う伝送系とデータを処理する処理系（計算機、端末やワークステーションなど）から構成されているが、従来の論文は前者を取り扱っている。ここでは後者も含めた信頼性評価を

行う。処理系を構成する計算機やワークステーションなどを総称して端末と呼ぶ。LANの信頼性を評価するパラメータとして平均実効端末数を用いる。平均実効端末数とはリング上の総端末数のうち、実際に通信できる端末数の期待値である。この平均実効端末数を用いて、信頼性に与えるバイパス/ループバック効果、最適リング構成や2重リングの信頼性特性について論ずる。

2. 2重リングのモデル化と仮定

2.1 2重リングのモデル化

バイパスとループバック機能をもつ2重リングシステムのモデル化を考える。フレーム同期は集中型制御方式を取り、システムは一つの制御局と $(m-1)$ 個の非制御局から構成されているものとする(図1参照)。非制御局は一つの端末、2個のリングプロセッサ、2重の伝送回線と端末・リングプロセッサ間の接続線からなる。リングプロセッサはデータの送受信と障害時のバイパスおよびループバック機能を持つ。制御局と非制御局のシステム構成は同一であるが、制御局の端末はリングのフレーム同期を監視するスーパーバイザとしての機能を有している。リングは m 個のリングプロセッサと伝送回線により一つの環線をなす。リングのフレーム同期の崩れを引き起こす障害には制御局の端末であるスーパーバイザやリングプロセッサのダウンまたは伝送回線の切断がある。その他のシステム構成要素の障害はフレーム同期障害とはならない。データはリング上を一方方向に流れ、2本のリング上をそれぞれ逆方向に伝送される。

リングプロセッサの障害には2種類ある。一つはリングプロセッサの部分障害が発生しても、その障害箇所をバイパスすることにより、フレーム同期が回復できる障害である。このような障害を非カタストロヒッ

† Reliability of Double Ring Communication System with Bypass and Loopback Facilities by YOSHIIKO EBIHARA (Institute of Information Sciences and Electronics, University of Tsukuba), SATOSI TAKANO (Master's Program in Scientific Technology, University of Tsukuba) and KATSUO IKEDA (Institute of Information Sciences and Electronics, University of Tsukuba).

†† 筑波大学電子・情報工学系

††† 筑波大学大学院理工学修士

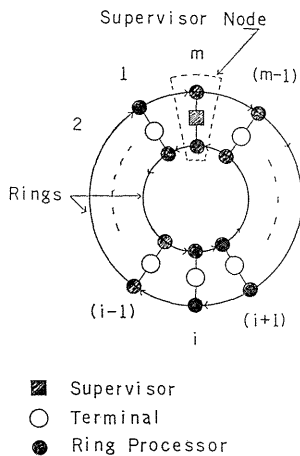


図1 2重リングのモデル
Fig. 1 Model of double ring system.

ク障害と呼ぶ。他はフレーム同期が回復できない状態を引き起こす障害で、これをカタストロヒック障害と呼ぶ。この場合、該当リングプロセッサはダウンを意味し、そのリングプロセッサが接続しているリングは使用不可能となる。

次に各周の構成要素の障害発生確率を以下のように定める。

D_s : 制御局のスーパーバイザの障害発生確率

D_t : 非制御局の端末の障害発生確率

D_r : リングプロセッサの非カタストロヒック障害発生確率

D_c : リングプロセッサのカタストロヒック障害発生確率

なお、伝送回線の障害は受信側リングプロセッサのカタストロヒック障害に含める。受信側リングプロセッサはキャリア検出機能により、伝送回線の切断などの障害を容易に検出できる。さらに、端末・リングプロセッサ間の接続線の障害は該当端末が通信できない点から、リングプロセッサがバイパスした状況と本質的に同じであり、非カタストロヒック障害と考えられる。すなわち接続線の障害は該当リングプロセッサの非カタストロヒック障害に含める。表1に障害の種類と障害処理・対策を示す。

2.2 2重リングに関する仮定

2重リングの信頼性を解析する前に、いくつかの仮定を設定する。

1. リングプロセッサに障害が発生したとき、カタストロヒックまたは非カタストロヒック障害のいずれか一つしか生じない。すなわち同一箇所の障

表1 障害の種類と障害対策
Table 1 Failures and recoveries.

障 害	障 害 対 策
スーパーバイザダウン	システム全体のダウン
端末のダウン	該当端末をシステムから切り離して、続行運転
リングプロセッサの非カタストロヒック障害	バイパスし該当障害箇所を切り離し、フレーム同期を回復して続行運転
リングプロセッサのカタストロヒック障害	該当リングプロセッサが接続しているリングのダウン

害がカタストロヒック障害と非カタストロヒック障害の両方を起こすことがない。

2. バイパスやループバック機能を付加してもリングプロセッサの各々の障害発生確率は両機能のない場合のリングプロセッサの各々の障害発生確率と変わらない。
3. バイパスやループバックや端末の切り離しには障害が発生しない。
4. 端末はいずれか一つのフレーム同期が確立しているリングを使用して通信できる。ただし、データは途中の端末を経由することはできない。
5. ループバックとなる障害が発生した場合、ループバック機能の使用は一度だけ許される。

3. 平均実効端末数

平均実効端末数の計算方法を示す。後章では説明を簡単にするため計算の手順が異なることもあるが、本質的には変わらない。図1に示すように各端末に順に番号を付け、自分の端末を i 番目とする。 i 端末から k 個の端末（自分自身とスーパーバイザを除く）と通信できる確率 $P(k, m)$ を求める。

$$P(k, m) = (\text{あるリング構成になる確率}) \cdot (k \text{ 個の端末と通信できる確率})$$

平均実効端末数 $N(m)$ は、次式で求まる。

$$N(m) = \sum_K kP(k, m)$$

平均実効端末数を以後、実効端末数と呼ぶ。

4. バイパスもループバック機能もない2重リングとバイパス機能のみの2重リング

リングのフレーム同期を取っているのがスーパーバイザなので、スーパーバイザは常に生きていなければならない。すべての場合に言えるので、以下、特には断らない。スーパーバイザと端末 i が生きている確率は、

$$(1-D_s)(1-D_t)$$

である。\$A_1\$ と \$A_2\$ を各々のリングが使用できる状態を表す。それぞれの確率を \$P(A_1)\$ と \$P(A_2)\$ で表すと、少なくとも一つのリングを使用して通信できる確率 \$P_1\$ は、

$$P_1 = P(A_1 \cup A_2) = 1 - P(A_1^c \cap A_2^c)$$

ただし、\$A_1^c\$ と \$A_2^c\$ は、それぞれ \$A_1\$ と \$A_2\$ の補完である。\$A_1\$ と \$A_2\$ は独立である。また各リングの構成要素は均質であるので、\$P(A_1)\$ と \$P(A_2)\$ は等しい。ゆえに、

$$P_1 = 1 - \{1 - P(A_1)\}^2$$

2重リングには、自分の端末 \$i\$ とスーパーバイザを除くと \$(m-2)\$ 個の端末が存在するので、平均して \$(m-2)(1-D_t)\$ 個の相手端末と通信できる。したがって、実効端末数 \$N(m)\$ は次のとおりである。

$$N(m) = (m-2)(1-D_s)(1-D_t)^2 \cdot \{1 - \{1 - P(A_1)\}^2\} \quad (1)$$

ただし、\$m \ge 3\$。

上式は、リング型なのでリング上の自分の端末の位置 \$i\$ に依存しない。

4.1 バイパスもループバック機能もない2重リング

バイパスもループバック機能もないため、一つのリングが生きている条件は、そのリング上の \$m\$ 個のリングプロセッサが正常でなければならない。すなわち、

$$P(A_1) = (1-D_r - D_c)^m$$

である。バイパス機能のない2重リングのリングプロセッサ障害はすべてカタストロヒック障害として扱う。バイパスもループバック機能もない2重リングの実効端末数 \$N_{\text{non}}(m)\$ は式(1)より次式となる。

$$N_{\text{non}}(m) = (m-2)(1-D_s)(1-D_t)^2 \cdot \{1 - \{1 - (1-D_r - D_c)^m\}^2\} \quad (2)$$

4.2 バイパス機能のみ持つ2重リング

リングプロセッサは非カタストロヒック障害が発生した場合、その障害を切り離し、リングをバイパスすることにより、フレーム同期を回復することができる。バイパス機能がある時、一つリングを使って自分と相手の両端末が通信できるリング状態は次のとおりである。

1. 自局、相手局と制御局のリングプロセッサが正常である。
2. 上記以外の \$(m-3)\$ 個のリングプロセッサがカタストロヒック障害を起こしていない。すなわちバイパス状態または正常状態のいずれかである。

ゆえに、一つのリングのフレーム同期が確立されている確率 \$P(A_1)\$ は

$$P(A_1) = (1-D_c - D_r)^3 (1-D_c)^{(m-3)}$$

である。よって、バイパス機能のみを持つ2重リングの実効端末数 \$N_{\text{by}}(m)\$ は式(1)より、

$$N_{\text{by}}(m) = (m-2)(1-D_s)(1-D_t)^2 \cdot \{1 - \{1 - (1-D_r - D_c)^3 (1-D_c)^{(m-3)}\}^2\} \quad (3)$$

となる。

5. ループバック機能のみを持つ2重リング

一般に両リングに障害が発生すると、ループバックもバイパス機能もない場合、システムダウンとなる。ループバック機能があれば、障害箇所を切り離し、新たにリングを構成して運転続行できる。ただしそのリングにはスーパーバイザと自分自身の端末 \$i\$ が含まれていなければならない。また仮定5からこのリングにさらにループバックとなる障害が発生した場合はシステムダウンとする。ループバック機能のみの場合についても、2重リング稼働、1重リング縮退とループバック稼働の三つのリングの状態に分けて実効端末数を求める。1重リング縮退とは、一方のリングのフレーム同期が確立できなかったため、そのリングを放棄し、リングのフレーム同期が確立している残りのリングで稼働している状態を言う。

5.1 2重リングと1重リング縮退稼働の場合

2重リングと1重リング縮退稼働の場合は、前章で求めたバイパス機能のない結果が適応できる。すなわち、ループバック機能のみの2重リングと1重リング縮退稼働の場合の実効端末数 \$N_{\text{u1}}(m)\$ は式(2)より、次式となる。

$$N_{\text{u1}}(m) = N_{\text{non}}(m)$$

5.2 ループバック機能を使う場合

ループバックを使う場合、次の場合分けを考える。

1. 1番目の局と \$(i-1)\$ 番目の局間で、リングプロセッサの障害により両リングのフレーム同期が崩れる。
2. \$(i+1)\$ 番目の局と \$(m-1)\$ 番目の局間で、リングプロセッサの障害により両リングのフレーム同期が崩れる。

図2に1の状態を示す。

5.2.1 1と\$(i-1)\$番目局間の両フレーム同期崩れ

1番目と \$(i-1)\$ 番目の局間で両リングのフレーム同期崩れを引き起こす場合を考える。図2に示すよう

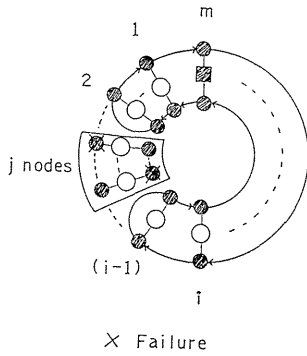


図2 ループバック運転
Fig. 2 Loopback operation.

に、その障害範囲は j 個の局数から成るものとする。ただし、 $1 \leq j \leq (i-1)$ 。2重リングはループバック機能により、残りの局 $(m-j)$ 個を使って新たなリングを構成する。

まず、 $(m-j)$ 個の局からなるリング内の端末 i が通信できる相手端末数を求める。ループバック機能のみであるので、 $(m-j)$ 個の局のリングプロセッサはすべて正常でなければならない。この確率は、

$$(1 - D_r - D_c)^{2(m-j)}$$

である。相互に通信できるには、スーパーバイザ、端末 i と相手端末が正常である必要がある。この確率は、

$$(1 - D_s)(1 - D_i)^2$$

である。よって、端末 i が通信できる確率 $P(j)$ は上記の各々の積で表される。

$$P(j) = (1 - D_s)(1 - D_i)^2(1 - D_r - D_c)^{2(m-j)}$$

このリングにはスーパーバイザと端末 i を除いて $(m-j-2)$ 個あるので、端末 i が通信できる相手端末数は次のとおりである。

$$M(j) = (m-j-2)P(j) \tag{4}$$

ただし、 $1 \leq j \leq (i-1)$, $m \geq 4$

次に両リングのフレーム同期崩れを引き起こす障害確率 P_j を求め、実効端末数を算出する。以下 P_j が j に依存するので場合分けを行う。

(1) $j=1$ の時の実効端末数

1個の局の両リングプロセッサに障害が発生した場合である。ループバック機能のみであるので、1個の局の両リングプロセッサに非カタストロヒックかカタストロヒック障害が生じた場合である。この確率は、

$$(D_r + D_c)^2$$

である。さらに、1から $(i-1)$ の区間で、このような1個の障害局は $(i-1)$ 個選択できる。よって1個の局による両リングのフレーム同期崩れを引き起こす

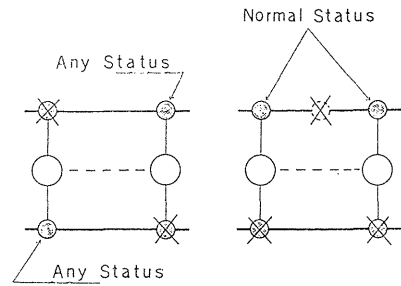


図3 ループバック障害
Fig. 3 Loopback failures.

確率 P_1 は次のとおりである。

$$P_1 = (i-1)(D_r + D_c)^2 = (i-1)D^2 \tag{5}$$

ただし、 $D = D_r + D_c$ であり、以下同様である。

したがって、 $j=1$ の時のループバック機能のみの2重リングの実効端末数 $N_a(m, i)$ は次のとおりである。

$$N_a(m, i) = P_1 \cdot M(1)$$

すなわち、

$$N_a(m, i) = (i-1)(m-3)(1 - D_s) \cdot (1 - D_i)^2 D^2 (1 - D)^{2(m-1)}$$

(2) $j=2$ の時の実効端末数

二つの隣接局のリングプロセッサが両リングのフレーム同期崩れを引き起こす障害発生確率 P_2 を求める。図3に示すように対角に位置するリングプロセッサが障害を起こせば、その他のリングプロセッサの状態に関係なく、両リングのフレーム同期は乱れる。対角に位置するリングプロセッサの選び方は2通りある。その2通りの確率を加えると、四つのリングプロセッサがすべて障害を起こす場合が重複する。重複を差し引いたその確率は、

$$D^2(2 - D^2)$$

である。また1と $(i-1)$ 局間でこのような障害を起こす状態は $(i-2)$ 個選択できる。よって両リングのフレーム崩れを引き起こす確率 P_2 は、

$$P_2 = (i-2)D^2(2 - D^2) \tag{6}$$

である。ゆえに、 $j=2$ の時の実効端末数 $N_b(m, i)$ は P_2 と式(4)より次式で表される。

$$N_b(m, i) = P_2 \cdot M(2)$$

すなわち、

$$N_b(m, i) = (i-2)(m-4)(1 - D_s) \cdot (1 - D_i)^2 D^2 (2 - D^2) (1 - D)^{2(m-2)}$$

(3) $3 \leq j \leq (i-1)$ の時の実効端末数

$j=2$ の場合と同様に対角に位置するリングプロセ

ッサが障害を起こせば、その間に挟まれるリングプロセッサの状態に関わりなく、両リングのフレーム同期が崩れる。その確率は、

$$D^2(2-D)^2 \tag{7}$$

である。また図3に示すように、同一リング上の二つのリングプロセッサが障害を起こし、その二つに挟まれたもう一方のリング上に一つ以上のリングプロセッサ障害があれば、両リングのフレーム同期は崩れる。ただし、同一リング上の障害局のもう一方のリングに接続したリングプロセッサは正常である。正常でない場合の確率は式(7)に含まれる。この確率は、

$$2D^2(1-D)^2 \{1-(1-D)^{i-2}\}$$

と表される。また、1から*(i-1)*の区間で連続した*j*個を取る選び方は*(i-j)*個ある。よって、両フレームの同期崩れを引き起こす確率 P_j は上の確率から、次のとおりになる。

$$P_j = (i-j)D^2 \{ (2-D)^2 - 2(1-D)^2 \} \tag{8}$$

ゆえに、この時のループバック機能のみの2重リングの実効端末数 $N_c(m, i)$ は P_j と式(4)より次式となる。

$$N_c(m, i) = \sum_{j=3}^{(i-1)} P_j \cdot M(j)$$

$$N_c(m, i) = (1-D_s)(1-D_t)^2 D^2 \sum_{j=3}^{(i-1)} (i-j)(m-j) - 2 \{ (2-D)^2 - 2(1-D)^2 \} (1-D)^{2(m-i)}$$

$t=(i-j)$ と置き換えると、

$$N_c(m, i) = (1-D_s)(1-D_t)^2 D^2 (1-D)^{2(m-i)} \cdot \left\{ (2-D)^2 \sum_{t=1}^{(i-3)} t(t+m-i-2)(1-D)^{2t} - 2(1-D)^i \sum_{t=1}^{(i-3)} t(t+m-i-2) \cdot (1-D)^t \right\}$$

下記の級数公式を、次のような $S_1(x, i)$ と $S_2(x, i)$ で表すと、

$$S_1(x, i) = \sum_{t=1}^{(i-3)} t x^t = \frac{x(1-x^{(i-3)})}{(1-x)^2} - \frac{(i-3)x^{(i-2)}}{(1-x)}$$

$$S_2(x, i) = \sum_{t=1}^{(i-3)} t^2 x^t = \frac{x(1+x)(1-x^{(i-3)})}{(1-x)^3} - \frac{2(i-3)x^{(i-2)}}{(1-x)^2} - \frac{(i-3)^2 x^{(i-2)}}{(1-x)}$$

$N_c(m, i)$ は以下の式になる。

$$N_c(m, i) = (1-D_s)(1-D_t)^2 D^2 (1-D)^{2(m-i)} \cdot [(2-D)^2 \{ S_2((1-D)^2, i) + (m-i-2) \cdot S_1((1-D)^2, i) \} - 2(1-D)^i]$$

$$\cdot \{ S_2((1-D), i) + (m-i-2) \cdot S_1((1-D), i) \}$$

ただし、 $m \geq 6$ 。

5.2.2 *i* と $(m-1)$ 間での両フレーム同期崩れ

この場合は、障害が起こる区域が前節の反対側に位置する。前項で得られた式の i を $(m-i)$ で置き換えることにより、各々の実効端末数が求められる。

$j=1$ の時の実効端末数 $N_a(m, i)$ は、

$$N_a(m, i) = N_a(m, m-i)$$

$j=2$ の時の実効端末数 $N_b(m, i)$ は、

$$N_b(m, i) = N_b(m, m-i)$$

$3 \leq j \leq (m-i-1)$ の時の実効端末数 $N_t(m, i)$ は、

$$N_t(m, i) = N_c(m, m-i)$$

となる。

これまでの結果をまとめると、ループバックのみの2重リングの端末 i から見た実効端末数 $N_{ut}(m, i)$ は次のようになる。

$$N_{ut}(m, i) = N_{ut}(m) + N_a(m, i) + N_b(m, i) + N_c(m, i) + N_a(m, i) + N_c(m, i) + N_t(m, i)$$

ただし、 $m \geq 6$ 。

この計算結果は複雑なので省略する。

6. バイパスとループバックの両機能を持つ2重リング

両機能を持つ2重リングの信頼性解析でも、2重リング、1重リング縮退とループバックの場合分けを行う。

6.1 2重リングと1重リング縮退稼働の場合

この場合は、4章で求めた2重リングと1重リング縮退の実効端末数と同じである。この場合の実効端末数 $N_{bo(th)}(m)$ は、式(3)から次式となる。

$$N_{bo1}(m) = N_{by}(m)$$

6.2 ループバック機能を使う場合

ループバック機能のみの2重リングでは、リングのフレーム同期崩れは非カタストロヒックとカタストロヒック障害で発生した。両機能を持つ2重リングはバイパス機能をもっているため、リングのフレーム同期崩れはカタストロヒック障害だけである。次に、両機能を持つ2重リングの場合のループバック方法について述べる。図4に示すように $(i-3)$ と $(i-2)$ 局間でカタストロヒック障害が発生して両リングのフレーム同期が崩れたとする。かつ $(i-1)$ 局の両リングプロセッサはバイパスの状態にあるとき、実システムでは

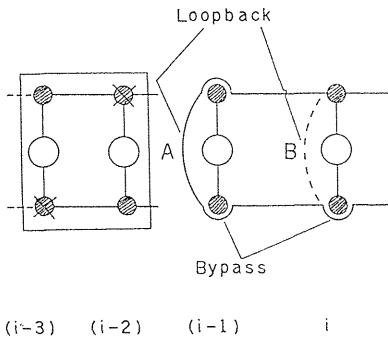


図4 バイパスとループバック
Fig. 4 Bypass and loopback.

ループバックは i 局まで後退して行う。なぜならば $(i-1)$ 局は両リングプロセッサがバイパスしているため、スーパーバイザからのループバック指令を受信できないからである。 i 局は一方のリングを介してスーパーバイザ指令を受けてループバックできる (図のBの状態)。しかし、ここではオペレータのマニュアル操作により $(i-1)$ 局でループバックできるものとする (図のA状態)。このことにより5章のループバック機能のみを持つ2重リングの解析と同様なアプローチが取れる。ただし、求める実効端末数はA状態でもB状態でも同じである。すなわちA状態で $(i-1)$ 局を再構成したリングに含めても両リングプロセッサがバイパスしているので、 $(i-1)$ 局はどこもとも通信できない。また、B状態では $(i-1)$ 局は再構成リングに含まれないので、実効端末数の計算を考慮する必要はない。ループバックによる場合は、次の場合分けを考慮する必要がある。

1. 1番目と $(i-1)$ 番目の局間で、リングプロセッサのカタストロヒック障害により両リングのフレーム同期が崩れる。
2. $(i+1)$ 番目と $(m-1)$ 番目の局間で、リングプロセッサのカタストロヒック障害により両リングのフレーム同期が崩れる。

以下、それぞれについて解析を行う。

6.2.1 1と $(i-1)$ 番目局間の両フレーム同期崩れ

5.2.1 項と同様に、 j 個の周数により両リングのフレーム同期崩れを引き起こし、残り $(m-j)$ 個の局でループバックによるリングを構成する場合を考える。このリング内にはスーパーバイザと端末 i が含まれる必要がある。

まず、このリングを使って端末 i が通信できる端末数 $M(j)$ を求める。リングであるので各局のリングプ

ロセッサがカタストロヒック障害を起こしてなく、少なくとも一つ正常なら、他の局へ到達するパスが存在する。スーパーバイザが正常で、カタストロヒック障害を起こしてなく、かつ少なくともスーパーバイザの一方のリングプロセッサが正常である確率は、

$$(1-D_s)\{(1-D_r-D_c)^2+2D_r(1-D_r-D_c)\}$$

である。端末 i が正常で、端末 i のリングプロセッサにカタストロヒック障害がなく、かつ、少なくとも一つのリングプロセッサが正常である確率は、

$$(1-D_i)\{(1-D_r-D_c)^2+2D_r(1-D_r-D_c)\}$$

である。相手端末が正常で、相手端末のリングプロセッサにカタストロヒック障害がなく、かつ、少なくとも一つのリングプロセッサが正常である確率は、

$$(1-D_i)\{(1-D_r-D_c)^2+2D_r(1-D_r-D_c)\}$$

である。さらに、スーパーバイザ、相手端末と端末 i を除いて、残りの $(m-j-3)$ 局のリングプロセッサにはカタストロヒック障害がない確率は、

$$(1-D_c)^{2(m-j-3)}$$

である。よって、端末 i が相手端末と通信できる確率 $P(j)$ は上記の各々の確率の積で表される。

$$P(j)=(1-D_s)(1-D_i)^2(1-D_r-D_c)^3(1+D_r-D_c)^2(1-D_c)^{2(m-j-3)}$$

端末 i とスーパーバイザを除いて相手端末は $(m-j-2)$ 個あるので、端末 i が通信できる端末数は次のとおりである。

$$M(j)=(m-j-2)P(j)$$

ただし、 $1 \leq j \leq (i-1)$, $m \geq 4$ 。

次に両リングのフレーム同期崩れを引き起こす障害確率 P_j を求め、実効端末数を算出する。

両機能を持つ2重リングの場合、非カタストロヒック障害はバイパス機能によりフレーム同期崩れを回避できる。ゆえに、5.2.1 項の各 P_j の $D=(D_r+D_c)$ の代わりに $D=D_c$ を代入すれば、両機能を持つ2重リングの P_j が得られる。

(1) $j=1$ の時の実効端末数

1 個の局による両リングのフレーム同期崩れを引き起こす確率は式(5)より、次式となる。

$$P_1=(i-1)D_c^2$$

よって、 $j=1$ の時の実効端末数は次のとおりである。

$$\begin{aligned} N_a(m, i) &= P_1 \cdot M(1) \\ &= (i-1)(m-3)(1-D_s)(1-D_i)^2 D_c^2 (1-D_r-D_c)^3 (1+D_r-D_c)^3 (1-D_c)^{2(m-4)} \end{aligned}$$

ただし、 $m \geq 4$,

(2) $j=2$ の時の実効端末数

2個の隣接局による両リングのフレーム同期崩れを引き起こす確率は式(6)より、次式となる。

$$P_2 = (i-2)D_c^2(2-D_c^2)$$

よって、 $j=2$ の時の実効端末数は次のとおりである。

$$\begin{aligned} N_b(m, i) &= P_2 \cdot M(2) \\ &= (i-2)(m-4)(1-D_s)(1-D_t)^2 D_c^2 (2 \\ &\quad - D_c^2)(1-D_r - D_c)^3 (1+D_r - D_c)^3 (1 \\ &\quad - D_c)^{2(m-5)} \end{aligned}$$

ただし、 $m \geq 5$,

(3) $3 \leq j \leq (i-1)$ の時の実効端末数

この時の両リングのフレーム同期崩れを引き起こす確率は式(8)より、次式となる。

$$P_j = (i-j)D_c^2 \{(2-D_c)^2 - 2(1-D_c)^j\}$$

よって、この時の実効端末数は次のとおりである。

$$\begin{aligned} N_c(m, i) &= \sum_{j=3}^{(i-1)} P_j \cdot M(j) \\ &= (1-D_s)(1-D_t)^2 D_c^2 (1-D_r - D_c)^3 (1 \\ &\quad + D_r - D_c)^3 \sum_{j=3}^{(i-1)} (i-j)(m-j-2) \\ &\quad \cdot \{(2-D_c)^2 - 2(1-D_c)^j\} \\ &\quad \cdot (1-D_c)^{2(m-j-3)} \end{aligned}$$

$t=(i-j)$ と置くと、

$$\begin{aligned} &= (1-D_s)(1-D_t)^2 D_c^2 (1-D_r - D_c)^3 (1+D_r \\ &\quad - D_c)^3 (1-D_c)^{2(m-i-3)} \sum_{t=1}^{(i-3)} (m+t-i-2) \\ &\quad \cdot \{(2-D_c)^2 - 2(1-D_c)^{(i-t)}\} (1-D_c)^{2t} \end{aligned}$$

ただし、 $m \geq 6$ 。

下記の級数公式を次の $S_1(x, i)$ と $S_2(x, i)$ で表すと、

$$S_1(x, i) = \sum_{t=1}^{(i-3)} t x^t = \frac{x(1-x^{(i-3)})}{(1-x)^2} - \frac{(i-3)x^{(i-2)}}{(1-x)}$$

$$\begin{aligned} S_2(x, i) &= \sum_{t=1}^{(i-3)} t^2 x^t = \frac{x(1+x)(1-x^{(i-3)})}{(1-x)^3} \\ &\quad - \frac{2(i-3)x^{(i-2)}}{(1-x)^2} - \frac{(i-3)^2 x^{(i-2)}}{(1-x)} \end{aligned}$$

$N_c(m, i)$ は以下の式になる。

$$\begin{aligned} N_c(m, i) &= (1-D_s)(1-D_t)^2 D_c^2 (1-D_r - D_c)^3 \\ &\quad \cdot (1+D_r - D_c)^3 (1-D_c)^{2(m-i-3)} \\ &\quad \cdot [(2-D_c)^2 \{S_2((1-D_c)^2, i) \\ &\quad + (m-i-2)S_1((1-D_c)^2, i) \\ &\quad - 2(1-D_c) \{S_2((1-D_c), i) \\ &\quad + (m-i-2)S_1((1-D_c), i)\}] \end{aligned}$$

6.2.2 i と $(m-1)$ 間での両フレーム同期崩れ

この場合は、障害が起こる区域が前節の反対側に位置する。前項で得られた式の i を $(m-i)$ で置き換え

ることにより、各々の実効端末数が求められる。

$j=1$ の時の実効端末数 $N_a(m, i)$ は、

$$N_a(m, i) = N_s(m, m-i)$$

$j=2$ の時の実効端末数 $N_e(m, i)$ は、

$$N_e(m, i) = N_b(m, m-i)$$

$3 \leq j \leq (m-i-1)$ の時の実効端末数 $N_f(m, i)$ は、

$$N_f(m, i) = N_c(m, m-i)$$

となる。

これまでの結果をまとめると、ループバックとバイパスを持つ2重リングの端末 i から見た実効端末数 $N_{bo}(m, i)$ は次のようになる。

$$\begin{aligned} N_{bo}(m, i) &= N_{b1}(m) + N_a(m, i) + N_b(m, i) \\ &\quad + N_e(m, i) + N_f(m, i) + N_c(m, i) \\ &\quad + N_f(m, i) \end{aligned}$$

ただし、 $m \geq 6$ 。

計算結果は複雑なので省略する。

7. 考 察

解析結果の数値計算より、バイパスとループバック機能を持つ2重リングの信頼性について述べる。

(1) 最適リング構成

一般に、バイパスやループバック機能の有無にかかわらず2重リングの信頼性を最も高める最適端末数が存在する。最適端末数が存在する理由は次のとおりである。総端末数が増加すると、実効端末数も増える。一方、総端末数が増えたとリングプロセッサも増加する。リングプロセッサの増加は障害発生確率の加算を意味し、システムダウンの確率が高くなる。これらのトレードオフには信頼性を最も高める最大値が存在する。一例として、バイパスとループバック機能を持つ2重リングの総端末数と実効端末数との関係を図5に示す。図で使用したパラメータは $D_s=10^{-5}$, $D_t=10^{-4}$, $D_r=10^{-3}$ と $i=m/2$ である。 m が偶数の時の場合である。 i の位置関係は次項で述べる。図はシステムの信頼性が低い場合、障害発生確率を考慮して端末増設を行わないと、端末増設による実効端末数は改善されないことを示している。

(2) 端末の位置関係

ループバック機能が働くときは、実効端末数は端末の位置 i に強く依存する。図6に端末の位置 i と実効端末数の関係を示す。図で使用したパラメータは $D_s=10^{-5}$, $D_t=10^{-4}$, $D_r=10^{-3}$ と $m=400$ である。 $D_c=0$ 以外はすべての実効端末数に最小値が存在する。最小値を取る i は m が偶数の時 $m/2$ であり、

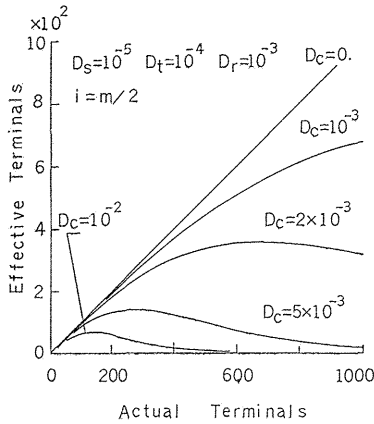


図5 バイパスとループバック機能を持つ2重リングの総端末数と実効端末数
 Fig. 5 Actual terminals and effective terminals of double ring system with bypass and loopback facilities.

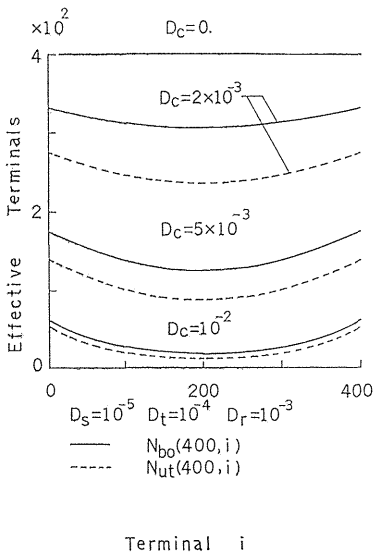


図6 端末 i と実効端末数
 Fig. 6 Effective terminals and location of terminal i .

奇数の時 $(m \pm 1)/2$ である。すなわち 端末 i がスーパーバイザから離れば離れるほど実効端末数は小さくなる。この理由は次のとおりである。端末 i がスーパーバイザから離れると、端末 i とスーパーバイザ間に存在する局数が多くなる。このため端末 i とスーパーバイザの間でリングのフレーム同期を崩す障害が起りやすくなり、端末 i がループバック機能によりシステムから切り離される確率が大きくなる。このことから次の

ことが言える。ネットワーク管理システムやファイルサーバなど、LAN を運営管理する重要な端末はスーパーバイザの近くに設置すべきである。

(3) 信頼性に与える障害発生確率の影響

一般に、バイパスやループバック機能の有無にかかわらず障害発生確率が大きくなると、システムの信頼性が劇的に悪化する。この特性はシステムがリング・トポロジーであることによる。図7は信頼性に与える非カタストロヒック障害の影響を示す。 $D_s=10^{-5}$, $D_t=10^{-4}$, $D_r=0.025$ と $i=m/2$ である。図に示すように非カタストロヒック障害が多くない限り、バイパス機能が働いているため、信頼性に与える非カタストロヒック障害の影響はほとんどない。ある程度、非カタストロヒック障害が発生すると、急激に悪化しシステムとして機能しなくなる。図8は信頼性に与えるカタストロヒック障害の影響を示す。 $D_s=10^{-5}$, $D_t=10^{-4}$, $D_r=0.025$ と $i=m/2$ である。非カタストロヒックの場合と同様な結果を得る。しかしカタストロヒック障害の信頼性に与える影響度はより大であり、信頼性が悪化し始めると変化は急激である。

(4) バイパス効果とループバック効果

両機能を持たない裸の2重リングに比べて、ループバック機能を付加した場合と両機能を付加した場合、2重リングの信頼性がどの程度改善されるかを示す。図9は $m=400$, $D_s=10^{-5}$, $D_t=10^{-4}$ と $D_r=10^{-3}$ の場合の時の $N_{ut}(400, i=1)/N_{non}(400)$ および $N_{bo}(400, i=1)/N_{non}(400)$ の比率を示している。 $i=1$ は

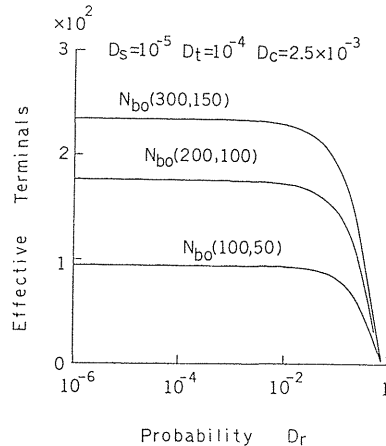


図7 両機能を持つ2重リングの非カタストロヒック障害発生確率と実効端末数
 Fig. 7 Effective terminals v.s. probability D_r in case of double ring system with bypass and loopback facilities.

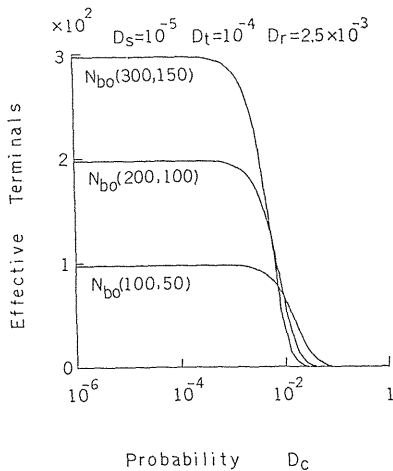


図8 両機能を持つ2重リングのカタストロヒック障害発生確率と実効端末数
Fig. 8 Effective terminals v. s. probability D_c in case of double ring system with bypass and loopback facilities.

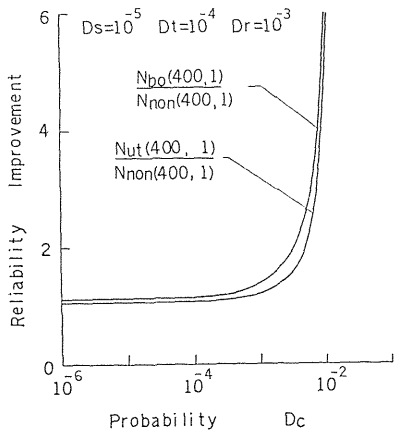


図9 バイパスとループバック効果
Fig. 9 Bypass and loopback effectiveness.

端末 i がスーパーバイザに隣接していることを意味する。障害発生確率が比較的小さいときは、信頼性の改善度も小さい。しかし障害発生確率が大いときは、信頼性が著しく改善される。一例として図9に示すようにカタストロヒック障害発生確率が $10^{-3} < D_c < 10^{-2}$ の範囲ではバイパスやループバックの効果が顕著であるのがわかる。

8. あとがき

最適リング構成、障害発生確率が信頼性に与える影響やバイパスとループバック効果に関して、2重リン

グのシステム信頼性評価を行った。

今後の課題としてメディアアクセス制御手順も含めたシステム信頼性評価が残されている。例えば、トークンリング制御の場合、リングプロセッサの同一箇所の障害でも、メディアアクセス権を持っている時と持っていない時では、カタストロヒック障害になったり、非カタストロヒック障害になったりする。このようにシステム信頼性評価モデルは採用したメディアアクセス制御手順にも依存する。

謝辞 最後に、本研究について様々の御示唆を頂いた本学・中村奉夫講師および池田研究室の諸氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) Penny, B.K. and Baghdadi, A. A.: Survey of Computer Communications Loop Networks, *Comput. Comm.*, Vol. 2, No. 4, pp. 165-180 (1979).
- 2) 矢田ほか: リング型ローカルエリアネットワーク, 情報処理, Vol. 23, No. 12, pp. 1146-1153 (1982).
- 3) Ebihara, Y. et al.: Fault Diagnosis and Automatic Reconfiguration for a Ring Subsystem, *Computer Networks and ISDN Systems*, Vol. 10, No. 2, pp. 97-109 (1985).
- 4) Saltzer, J.H. and Pogran, K.T.: A Star-Shaped Ring Network with High Maintainability, *Proc. of the LACN Symposium*, pp. 179-189 (1979).
- 5) Zafropulo, P.: Reliability Optimization in Multiloop Communication Networks, *IEEE Trans. on Comm.*, Vol. COM-21, No. 8, pp. 898-907 (1973).
- 6) Zafropulo, P.: Performance Evaluation of Reliability Improvement Techniques for Single-Loop Communications Systems, *IEEE Trans. on Comm.*, Vol. COM-22, No. 6, pp. 742-751 (1974).

(昭和62年8月21日受付)
(昭和63年2月10日採録)



海老原義彦 (正会員)

昭和22年生。昭和45年東北大学工学部電子工学科卒業。昭和50年同大学院工学研究科博士課程修了。工学博士。現在、筑波大学電子・情報工学系助教授。主たる研究分野は、計算機ネットワーク・アーキテクチャ、デジタル通信システムおよびシステム性能評価など。



高野 智 (学生会員)

昭和 39 年富山県黒部市に生まれる。昭和 62 年筑波大学第三学群情報学類卒業。同年筑波大学大学院修士課程理工学研究科に入学。現在に至る。計算機ネットワークの性能評価および知的コミュニケーションに興味を持つ。

備および知的コミュニケーションに興味を持つ。



池田 克夫 (正会員)

昭和 12 年生。昭和 35 年京都大学工学部電子工学科卒業。昭和 37 年同大学大学院修士課程修了。昭和 40 年同博士課程学修退学。同年京都大学助手。昭和 46 年同助教授。昭和 46 年 9 月より 1 年間文部省在外研究員として、米国ユタ大学および MIT に留学。昭和 53 年筑波大学教授、電子・情報工学系。コンピュータ組織法、LAN、画像処理に興味を持つ。著書に「オペレーティングシステム論」(電子情報通信学会) などがある。工学博士。電子情報通信学会、IEEE、ACM 各会員。