解　説

コンピュータシステムの信頼性評価†

尾　崎　俊　治††

1. まえがき

今日の社会においてコンピュータシステムの果す役割はますます重大になってきた．そして，銀行のオンラインシステムの故障，電子交換機の故障などにみられるように，コンピュータシステムの故障は経済的損失のみでなく社会的パニックをも引き起こすことになる．1960 年代後半に導入されたフォールトトレラントシステム[1),2)]はこのような技術的要請から生まれたものである．

コンピュータの歴史は信頼性との闘いでもあった．第一世代のコンピュータはそのアベイラビリティがあまりに低く，故障・修理（あるいは取替）の繰り返しであった．急速な電子技術の発達に伴って，信頼性の高い IC および LSI が出現した．それによって，コンピュータシステムの高信頼化技術[3)]も飛躍的に進歩した．それでもコンピュータシステムの故障は起こる．本稿においては，コンピュータシステムの信頼性および処理性の尺度を導入し，いろいろなシステムを確率モデルを用いてその信頼性および処理性を評価する．さらに，コンピュータシステムの点検モデルについても論及する．

コンピュータの高信頼化技術達成のためにはハードウェアの信頼性，環境条件，マンマシンシステムとしての人間工学的要因，ソフトウェアの信頼性などの問題がある．実際のコンピュータの故障はこれらの要因が複雑に絡んでいる場合もある．しかし，ここでは主にハードウェアのモジュール単位の破局故障（catastrophic failure）あるいは劣化故障（degradation failure）に限定する．故障の定義，分類，データについては塩見[4)]，Anderson and Randell[5)]を参照されたい．

2. 信頼性および処理性評価尺度

Avizienis[1)]はフォールトトレラントシステムを厳密に定義したが，ここでは当麻・南谷[2)]の解釈，「故障によってシステムのパフォーマンスは低下するが全面的にシステムダウンすることなく，全部もしくは一部のパフォーマンスを正しく遂行するシステム」を引用する．当然，このフォールトトレラントシステムを構成するためには，信頼性理論でよく知られた冗長構成を採用しなければならない．すなわち，各モジュール（あるいはユニット）を冗長に構成して高信頼化システムを作る．

コンピュータシステムにおける動的冗長性（dynamic redundancy）の形態はいろいろ考えられるが，Beaudry[6)]は次の 4 つに分類した．

(a)　塊状冗長システム（massive redundant system）

(b)　待機冗長システム（standby redundant system）

(c)　ハイブリッド冗長システム（hybrid redundant system）

(d)　優美劣化システム（gracefully degrading system）

上述の冗長コンピュータシステムはアーキテクチャ，処理性，信頼性にそれぞれの特徴がある．(a)の例としては TMR (Triple-Modular Redundancy)[7)]，NMR (N-Modular Redundancy)[8)]などがあり，多数決論理を用いて出力情報の信頼性を高める．最も簡単なモデルとしてはデュアルシステム（2ユニット並列冗長システム）が考えられる．(b)の最も簡単な例としてはデュプレックスシステム（2ユニット待機冗長システム）がある．(c)は，(a)，(b)両者の特長を兼ね備えるものである（例としては STAR コンピュータ[9)]）．(d)は上述の狭い意味のフォールトトレラントシステムであり，信頼性と処理性を同時に考慮している．例としてはマルチシステム(multi-system)が

† Reliability Evaluation of Computer Systems by Shunji OSAKI (Department of Industrial and Systems Engineering, Faculty of Engineering, Hiroshima University).

†† 広島大学工学部

考えられる．Mathur and de Souza[10]は上の4つのシステムをその特別な場合として含む一般的な NMR システムを提案している．

信頼性理論[11),12)]において，システムの信頼性を評価する尺度として，

(ⅰ) 信頼度 $R(t)$,

(ⅱ) MTFF (Mean Time to First Failure),

(ⅲ) MTBF (Mean Time Between Failures),

(ⅳ) MDT (Mean Down Time),

(ⅴ) 瞬間および極限アベイラビリティ $A(t)$, A,

などが定義されている．(ⅰ)，(ⅱ)は主に修理不可能なシステムの尺度であり，(ⅲ)，(ⅳ)，(ⅴ)は修理可能なシステムの尺度である．

コンピュータシステムを評価する場合にはハードウェアの信頼性のみでなく出力情報の信頼性あるいは処理性をも考慮しなければならない．たとえば，2ユニットの並列，待機およびマルチシステムを比較するならば，カバレッジ（自動回復成功率）[13]が1であるとすれば，待機システムの信頼性は他のシステムのそれより優れている．しかし，並列システムは出力の不一致が検出可能であるので，特殊なミッションには欠かせない機能を備えている．また，マルチシステムは他のシステムに比較して，処理性に優れていることは明らかである．

Beaudry[6]は以下の処理性を考慮した信頼性の尺度

(ⅵ) 計算信頼度 (computation reliability) $R^*(t, T)$,

(ⅶ) MCFF (Mean Computation to First Failure),

(ⅷ) 計算しきい値 (computation threshold) t_T, T_t,

(ⅸ) 計算アベイラビリティ (computation availability) $A_C(t)$, A_C,

(ⅹ) 能力しきい値 (capacity threshold) t_c,

を定義した．ここで，(ⅵ)，(ⅶ)は主に修理不可能なシステムの尺度であり，(ⅷ)，(ⅸ)，(Ⅹ)は主に修理可能なシステムの尺度である．特に，(ⅸ)は時刻 t および極限状態 ($t\to\infty$) における計算能力の期待値であり，処理性を考慮したアベイラビリティと考えればよい．たとえば，前述の2ユニットの並列，待機およびマルチシステムの比較では計算アベイラビリティを評価尺度とすればマルチシステムが他のシステムより優れている．

(ⅲ)の尺度に対応して，

(ⅹⅰ) MCBF (Mean Computation Between Failures)

を定義しよう．すなわち，引続く故障間に利用できる計算量の期待値である．

修理不可能な同一のNユニットからなる優美劣化システムについて解析する[14]．各ユニットの故障分布は平均 $1/\lambda$ の一般分布 $F(t)$ に従い，カバレッジは $c(0<c<1)$ と仮定する．単一（1ユニット）システムの計算能力を1とすると，優美劣化システムにおいて $(N-i)$ 個 ($i=0, 1, \cdots, N$) のユニットが動作しているときの計算能力を便宜上 $(N-i)\alpha$ と仮定する．ただし，$0<\alpha\leqq 1$ とする．そのとき，時刻0でNユニットが動作しているとき，時刻 t で $(N-i)$ ユニットが動作している確率 $P_{0i}(t)$ が求められる．この $P_{0i}(t)$ を用いて導かれる各評価尺度を **表-1** に示す．特に，$F(t)$ を指数分布と仮定した結果も 表-1 に示す．これらの結果は Beaudry[6]と一致する．比較のため，Nユニット待機冗長システムについても同様な諸量を表-1 に与える．

以上の結果を比較すれば，MTFF は待機冗長システムの方が大である．また，待機冗長システムの MTFF および MCFF は常に単一システムのそれより大となるが，優美劣化システムの場合には，c および α の値によっては単一システムのそれよりも小になる可能性がある．このことは信頼性についても同様である．しかし，計算アベイラビリティ $A_C(t)$ は，$N\alpha>1$ ならば，ある時刻 $t_{\max}$ までは，待機冗長システムより優美劣化システムの方が高い値を示す．

表-1 Nユニットシステムの各評価尺度

優美劣化システム	一般分布の場合 $R(t)=[cF(t)+\bar{F}(t)]^N-[cF(t)]^N$ $A_C(t)=N\alpha\bar{F}(t)[cF(t)+\bar{F}(t)]^N$ $\mathrm{MTFF}=\int_0^\infty R(t)dt$ $\mathrm{MCFF}=\int_0^\infty A_C(t)dt$ 指数分布の場合 (Beaudry[6]参照) $\mathrm{MTFF}=\frac{1}{\lambda}\sum_{i=0}^{N-1}\frac{c^i}{N-i}$ $\mathrm{MCFF}=\frac{\alpha}{\lambda}\cdot\frac{1-c^N}{1-c}$
待機冗長システム	$R(t)=A_C(t)=\sum_{i=0}^{N-1}c^i[F(t)]^{i*}*\bar{F}(t)$ $\mathrm{MTFF}=\mathrm{MCFF}=\frac{1}{\lambda}\cdot\frac{1-c^N}{1-c}$

注) $\bar{F}(t)\equiv 1-F(t)$, $i*$ は i 重たたみこみ, $*$ はたたみこみ

以上の解析はいくつかの評価尺度を用いて，どのシステムが優れているかを評価した．しかし，実際のコンピュータシステムにおいては，それぞれのミッションに応じて冗長構成を考えなければならない．たとえば，無人衛星搭載用のコンピュータシステムは出力情報の高信頼化のため（a）の塊状冗長システムあるいは（c）のハイブリッド冗長システムを採用しなければならない．

一方，商業ベースのコンピュータシステムについては，故障したならば修理することによって再構成して動作させなければならない．しかし，その場合のそれぞれのミッションによっていろいろな冗長システムを考えなければならない．たとえば，国鉄の座席予約システム[15]は個人客のためのみどりの窓口（端末）用の MARS-105，電話予約用の MARS-150，団体長期予約用の MARS-202 から構成されているが，その性質上，MARS-105 は待機ユニットを備えたマルチシステム，MARS-150 は待機冗長システム，MARS-202 は単一ユニットシステムとなっている．

修理可能なシステムについて，信頼性および処理性の評価尺度を求めよう[14]．ここでは，同一の2ユニットからなる優美劣化システム（マルチシステム）および同一の2ユニットからなる待機冗長システムについて述べる．各ユニットの故障時間分布は平均 $1/\lambda$ の指数分布に従い，修理時間分布は平均 $1/\mu$ の一般分布 $G(t)$ に従うとする．各故障は互いに独立で，修理によって新品同様となり直ちに動作を始める．カバレッジは $c(0<c<1)$ と仮定する．前同様に，単一（1ユニット）システムの計算能力を1とすると，マルチシステムにおいて1ユニットのみが動作しているときの計算能力を α，2ユニットが動作しているときの計算能力を便宜上 2α とする．

2ユニットマルチシステムの各評価尺度はラプラススチルチェス変換（Laplace-Stieltjes 変換，以後 LS 変換と略す）を用いて 表-2 で与える．比較のため，2ユニット待機冗長システムについても各評価尺度を表-2 に与える．

表-2 の結果を比較すれば，計算アベイラビリティを除いてはいずれも待機冗長システムの方が優れている．計算アベイラビリティ A_C は $\alpha>\alpha_{\min}$（表-2 参照）を満たすならば，マルチシステムの方が優れている．

コンピュータシステムのいろいろなモデルの解析結果については文献[16),17)]を参照されたい．

表-2 修理可能な2ユニットシステムの各評価尺度

マルチシステム	$\mathrm{MTFF}=\dfrac{1+2c[1-g(\lambda)]}{2\lambda[1-cg(\lambda)]}$
	$\mathrm{MCFF}=\dfrac{1+c[1-g(\lambda)]}{\lambda[1-cg(\lambda)]}\alpha$
	$\mathrm{MCBF}=\dfrac{\alpha}{\lambda[1-cg(\lambda)]}$
	$A=\dfrac{[2-g(\lambda)]\mu}{2\lambda+[\mu+2\lambda(1-c)]g(\lambda)}$
	$A_C=\dfrac{2\mu\alpha}{2\lambda+[\mu+2\lambda(1-c)]g(\lambda)}$
待機冗長システム	$\mathrm{MTFF}=\mathrm{MCFF}=\dfrac{1+c[1-g(\lambda)]}{\lambda[1-cg(\lambda)]}$
	$\mathrm{MTBF}=\mathrm{MCBF}=\dfrac{1}{\lambda[1-cg(\lambda)]}$
	$A=A_C=\dfrac{\mu}{\lambda+[\mu+\lambda(1-c)]g(\lambda)}-1$
比較	$\alpha_{\min}\equiv\dfrac{2\lambda+[\mu+2\lambda(1-c)]g(\lambda)}{2\lambda+2[\mu+\lambda(1-c)]g(\lambda)}$
	$\cong\dfrac{1+(3-2\rho)\rho}{2[1+\rho(1-c)]}\ (\rho\equiv\lambda/\mu\ll 1)$

注）$g(s)$ は $G(t)$ の LS 変換

3. 処理需要を考慮した評価尺度

前章で導入した尺度（i）～（v）は信頼性評価尺度であった．コンピュータシステムにおいては処理性にも関心があるので，Beaudry[6]は処理性を考慮した信頼性評価尺度（vi）～（x）（および（xi））を提案した．Meyer[18]は処理性と信頼性を同時に考慮したパフォーマビリティ（performability）という評価尺度を提唱している．

上述の尺度は信頼性あるいは処理性を考慮した評価尺度であるが，処理需要は全く考慮していない．しかし，たとえば，端末を持つ TSS を考えれば，処理需要が小ならば，処理能力は低下しても処理できるが，処理需要が大ならば，処理能力が低下すれば処理できないジョブが発生することになる．Gay and Ketelsen[19]はこのような処理需要を考慮したモデルを提案し，

(xii) 期待定常スループット（expected steady-state throughput），

(xiii) スループットアベイラビリティ（throughput availability），

(xiv) 損失スループット（lost throughput）

などの評価尺度を提唱した．そして，ポアソン到着/指数サービス型（M/M 型）待ち行列に従う処理需要と M/M 型の故障・修理に従う2ユニットマルチシス

テムについて，これらの評価尺度を計算した．Gay らは到着するジョブの配分方法として，

1. ランダム配分（2 プロセッサにランダムに配分），
2. 一様配分（2 プロセッサにできるだけ等しくなるように配分），
3. パック配分（1 プロセッサが一杯になるまで配分して，その後は次のプロセッサに配分）

を考え，パラメータを変化させて，各評価尺度を計算した．その結果，2 の一様配分がわずかであるが他の配分より優れていることを示した．

中村・衣笠・尾崎[20]は処理需要を考慮した 2 ユニットマルチシステムを一般的な仮定の下で解析した．そして，マルコフ再生過程を用いて厳密解と近似解を求め，それらの数値計算結果を比較して，実用的に近似解で十分であることを示した．以下にその結果を簡単に述べる．

ジョブの到着率および処理率はそれぞれ λ および μ の M/M 型待ち行列に従い，各プロセッサの故障時間は平均 $1/\lambda_0$ の指数分布に従い，その修理時間は平均 $1/\mu_0$ を持った一般分布 $G(t)$ に従うと仮定する．プロセッサの修理機能は 1 つであるとする．厳密解は待ち行列の個々の推移に注目してマルコフ再生過程によって解析される．

近似解は待ち行列の挙動と 2 ユニットマルチシステムの挙動は独立であると仮定して求める．**表-3** に各評価尺度を与える．

つぎに，状態 0 では M/M/2(N) 待ち行列を形成し，その極限確率 $P_k^2(k=0, 1, \cdots, N)$ はよく知られている[21]．状態 1 では M/M/1($N-1$) 待ち行列を形成し，

表-3 処理需要を考慮した各評価尺度

2 ユニットマルチシステム	$A=P_0+P_1$ $\mathrm{MTBF}=A\cdot D(0)/[1-g(\lambda_0)]$ $L_J=P_0\lambda_0(P_1^2+2\sum_{k=2}^{N}P_k^2)+P_1\lambda_0\sum_{k=1}^{N-1}kP_k^1$ $C_J=\lambda(P_0\cdot P_N^2+P_1\cdot P_{N-1}^1+P_2)$ ただし $P_0=[g(\lambda_0)/(2\lambda_0)]/D(0)$ $P_1=\{[1-g(\lambda_0)]/\lambda_0\}/D(0)$ $P_2=\{1/\mu_0-[1-g(\lambda_0)]/\lambda_0\}/D(0)$ $D(0)=1/\mu_0+g(\lambda_0)/(2\lambda_0)$
単一ユニットシステム	$A=\mu_0/(\lambda_0+\mu_0)$ $\mathrm{MTBF}=1/\lambda_0$ $L_J=A\lambda_0\left(\sum_{k=1}^{N}kP_k^*\right)$ $C_J=\lambda(A\cdot P_N^*+1-A)$

注） $g(s)$ は $G(t)$ の LS 変換

その極限確率 $P_k^1(k=0, 1, \cdots, N-1)$ もよく知られている[21]．これらの極限確率を用いれば，単位時間当りの故障によるジョブの期待損失個数 L_J および単位時間当りにキャンセルされる期待ジョブ数 C_J も 表-3 に与える．

単一システムの場合，アベイラビリティ $A=\mu_0/(\lambda_0+\mu_0)$，$\mathrm{MTBF}=1/\lambda_0$ となる．ジョブは M/M/1(N) 待ち行列を形成し，その極限確率 $P_k^*(k=0, 1, \cdots, N)$ はよく知られている[21]．したがって，単位時間当りの故障によるジョブの期待損失個数 L_J および単位時間当りにキャンセルされる期待ジョブ数 C_J も 表-3 に与える．

$G(t)$ を次数 2 のガンマ分布と仮定して，マルチシステム，単一システムについて A, MTBF, AC, C_J を計算したものが **表-4** である．ただし，マルチシステムについては，$\lambda=48$, $\mu=30$, $\lambda_0=0.005$, $\mu_0=0.5$, $N=30$ とし，単一システムについては $\lambda=48$, $\mu=60$, $\lambda_0=0.003, 0.005, 0.007$, $\mu_0=0.5$, $N=30$ とし，単一システムの処理率はマルチシステムの 1 ユニットのそれの 2 倍と仮定した．**図-1** は ρ を変化させて同様な数値についてジョブの期待損失個数 L_J を描いた．た

表-4 各評価尺度の比較

評価尺度	A	MTBF	A_C	C_J
マルチシステム	0.9999	10175	59.40	0.3739
単一ユニットシステム				
$\lambda_0=0.003$	0.9940	333	59.64	0.2981
$\lambda_0=0.005$	0.9901	200	59.41	0.4870
$\lambda_0=0.007$	0.9862	142	59.17	0.6745

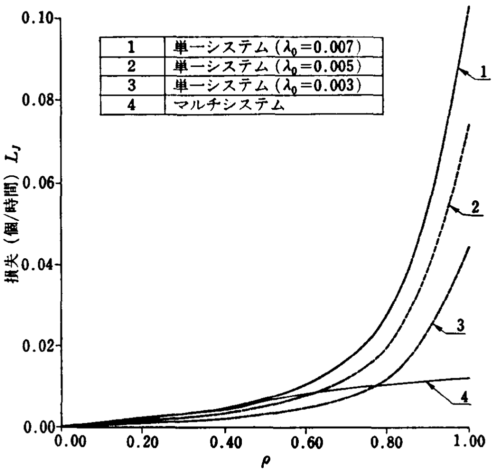

図-1 単位時間当りの故障による期待損失ジョブ数 L_J の比較

だし，マルチシステムでは $\rho=\lambda/2\mu$，単一システムでは $\rho=\lambda/\mu$ と仮定するが，前述の仮定から，いずれのシステムについても ρ の値は等しい．表-4 および 図-1 から次のことがわかる．計算アベイラビリティは各システム間の差が小さく，これらの処理能力がほぼ等しいことを示している．しかし，アベイラビリティおよび MTBF についてはマルチシステムが優れ，頻繁に処理需要のあるオンラインシステムに適している．さらに，キャンセルおよび故障による期待損失ジョブ数 C_J, L_J もマルチシステムの方が平均して小さい．図-1 から明らかなように，単一システムは ρ が 0.8 を越える辺りから損失個数が急激に大きくなり，ジョブの到着率の高いシステムには不適当であることがわかる．

4. 点検モデル

コンピュータシステムは高信頼性を維持するためいろいろな予防保全政策がとられている．航空宇宙用のシステムでは，あるミッションを遂行するため，その間の故障ができるだけないように設計されるため動作開始後の予防保全政策はあまり考えない．しかし，商業ベースのコンピュータシステムはそのミッションに対応していろいろな予防保全政策を考慮しなければならない．フォールトトレラントシステムあるいは一般の冗長システムは一部のモジュールの機能を止めても残りのモジュールが機能を果すことができるので，その意味でも予防保全に耐えるシステムになっている．

コンピュータシステムはいろいろな機器から構成されているので，その故障形態もいろいろである．また，機械部品と電子部品では点検・修理方法も異なるのは当然である．しかし，システムとして機能を果すためにはできるだけ故障を少なくしなければならない．この章では信頼性理論でよく知られた点検政策について簡単に述べる．

一般に，機器の寿命分布を $F(t)(t\geq0)$，その密度関数を $f(t)(t\geq0)$ とすれば，その故障率は

$$r(t)=f(t)/\bar{F}(t) \quad (t\geq0) \tag{1}$$

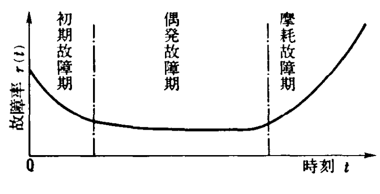

図-2 故障率の浴槽曲線

によって与えられる．一般の機器は **図-2** に示すような浴槽曲線になる場合が多い．初期故障期は品質管理技術の進歩によって短くなりつつある．偶発故障期はシステムの安定期である．そして，ある程度の時間を経て摩耗故障期に入る．しかし，電子部品の信頼性は非常に高くなり，それ以上に技術革新によってコンピュータシステムの取替が早く行われるので，最近の電子部品に限れば，偶発故障期（すなわち，指数分布に従う故障）のみ考えれば十分である．

予防保全政策[11),12)]としては年齢取替政策，ブロック取替政策，機会取替政策などの取替政策がよく知られている．これらの取替政策はいずれも故障は直ちに発見されると仮定している．しかし，コンピュータシステムでは故障は直ちに発見されず，点検のみによって故障は発見される場合が多い．このような点検モデル[22)]について述べよう．

ある機器の寿命分布 $F(t)$ は既知で，故障は点検のみによって発見される．1回当りの点検費用を c_1，故障してから発見されるまでにかかる単位時間当りの点検費用を c_2 と仮定する．頻繁の点検によって故障発見は早くなるが点検費用は高くなり，点検回数を減らせば故障発見が遅れる．故障発見までの期待費用を最小にする点検政策（点検間隔列）を求めよう．単位時間当りの点検回数を表わす点検濃度を $n(t)$ とすれば，

$$n(t)=\sqrt{\frac{c_2}{2c_1}r(t)} \tag{2}$$

となる．ただし，$r(t)$ は式(1)で定義した故障率である．したがって，

$$\int_0^{t_i} n(t)dt=i \quad (i=1,2,3,\cdots) \tag{3}$$

となるような最適点検間隔列 $\{t_1, t_2, \cdots, t_i, \cdots\}$ を求めればよい．たとえば，$F(t)$ が指数分布ならば，定周期点検政策が最適となる．摩耗故障期（$r(t)$ が増加関数）においては，点検間隔は時間とともに短くなる．

コンピュータシステムの保守・点検モデル[23),24)]についてもいろいろ議論されている．

5. むすび

本稿においては信頼性の尺度，処理性を考慮した信頼性の尺度，処理需要を考慮した尺度を導入して，いろいろなコンピュータシステムについて比較した．最近のフォールトトレラントシステムの研究の動向については文献[25)]を参照されたい．

実際の高信頼化コンピュータシステムを設計するた

めにはハードウェア，ソフトウェア，保守管理のコストが重要な要因になるが，各コンピュータによってコストはそれぞれに異なるのでここでは議論しない．コスト有効度などの評価尺度も当然考慮しなければならない．

最後に，本稿では全く触れなかったソフトウェア信頼性[26]は今後ますます重要で急務な問題になるであろう．

参考文献

1) Avizienis, A.: Fault-tolerant systems, IEEE Trans. Comput., Vol. C-25, No. 12, pp. 1304-1312 (1976).
2) 当麻，南谷：フォールトトレラントシステム，信学誌，Vol. 63, No. 10, pp. 1031-1041 (1980).
3) 猪瀬博編著：コンピュータ・システムの高信頼化，オーム社 (1977).
4) 塩見　弘：コンピュータ・リライアビリティ，昭晃堂 (1974).
5) Anderson, T. and Randell, B. (eds.): Computing Systems Reliability, Cambridge Univ. Press, Cambridge (1979).
6) Beaudry, M. D.: Performance-related reliability measures for computing systems, IEEE Trans. Comput., Vol. C-27, No. 6, pp. 540-547 (1978).
7) von Neumann, J.: Probabilistic logics and the synthesis of reliable organizations from unreliable components, in Automata Studies, pp. 43-98, Shannon, C. E. and McCarthy, J. (eds.), Princeton Univ. Press, Princeton (1956).
8) Mathur, F. P. and Avizienis, A.: Reliability analysis and architecture of a highly redundant digital system, in Proc. 1970 SJCC, AFIPS Conf., Vol. 36, pp. 375-387 (1970).
9) Avizienis, A. et al.: The STAR (Self-Testing And Repairing) computer: An investigation of the theory and practice of fault-tolerant computer design, IEEE Trans. Comput., Vol. C-20, No. 11, pp. 1312-1321 (1971).
10) Mathur, F. P. and de Souza, P. T.: Reliability modeling and analysis of general modular redundant systems, IEEE Trans. Reliab., Vol. R-24, pp. 296-299 (1975).
11) Barlow, R. E. and Proschan, F.: Mathematical Theory of Reliability, Wiley, New York (1965).
12) Barlow, R. E. and Proschan, F.: Statistical Theory of Reliability and Life Testing: Probability Models, Holt, Rinehart and Winston, New York (1975).
13) Arnold, T. F.: The concept of coverage and its effect on the reliability model of a repairable system, IEEE Trans. Comput., Vol. C-22, No. 2, pp. 251-254 (1973).
14) 梶山，尾崎：処理性を考慮した高信頼化計算機システムの解析，信学論，Vol. 62-D, No. 11, pp. 742-749 (1979).
15) 佐川，槻木：ユーザの立場から見たコンピュータシステムの信頼性，電学誌，Vol. 100, No. 8, pp. 715-718 (1980).
16) 藤木：信頼性及び保全性，前掲書[3]，第2章.
17) Osaki, S. and Nishio, T.: Reliability Evaluation of Some Fault-Tolerant Computer Architectures, Springer-Verlag, Heidelberg (1980).
18) Meyer. J. F.: On evaluating the performability of degradable computing systems, IEEE Trans. Comput., Vol. C-29, No. 8, pp. 720-731 (1980).
19) Gay, F. A. and Ketelsen, M. L.: Performance evaluation for gracefully degrading systems, in Proc. 1979 Int. Symp. Fault-Tolerant Computing, pp. 51-58 (1979).
20) 中村，衣笠，尾崎：処理需要を考慮に入れた優美劣化システムの信頼性評価，日本 OR 学会春季研究発表会アブストラクト集，pp. 129-130 (1981).
21) Kleinrock, L.: Queueing Systems, Vol. I: Theory, Wiley, New York (1975).
22) 尾崎：最適点検手順に関する一考察，信学論，Vol. 60-D, No. 8, pp. 764-765 (1977).
23) 当麻：コンピュータシステムの保守，信学誌，Vol. 62, No. 8, pp. 894-899 (1979).
24) 小田，当麻，古屋：定期保守を行う自己修復系計算機システムの信頼性・性能評価，信学論，Vol. 64-D, No. 6, pp. 534-540 (1981).
25) 渡辺，古賀：第11回超高信頼システム技術シンポジュウム (FTCS-11) の報告，信学技報，R81-37 (1981-10).
26) Musa, J. D.: The measurement and management of software reliability, Proc. IEEE, Vol. 68, No. 9, pp. 1131-1143 (1980).

(昭和56年11月27日受付)