

## チェックポイント濃度を使用した 最適チェックポイント策†

福本 聡†† 海生 直人††† 尾崎 俊治††††

コンピュータシステム、とりわけデータベースシステムにおけるファイル系の構成および回復技術は、システム運用の上で極めて重要な役割を持つ。ここでは、最も一般的なファイルの回復技術～ロールバック・リカバリ～に関するチェックポイント策について考察する。これは主記憶装置のファイルに障害が発生したとき、トランザクションの処理をシステムの稼働開始時点からやり直すのではなく、チェックポイントと呼ばれるある前もって定められた時点において情報を安定な二次記憶装置に記憶しておき、その時点から記憶された情報を使用して再び処理を行うという回復技術である。そのときチェックポイントをどのように決定するかが問題となる。頻りにチェックポイントを行うと記憶のための費用が多くなるし、少なく行くと障害が発生したとき回復のための費用が多くなる。ゆえに、それらのトレードオフを考えたチェックポイント時刻列を求める必要がある。本稿では、定常状態における単位時間当りの近似期待費用を最小にするチェックポイント時刻列について議論する。その結果、チェックポイント濃度の汎関数として近似期待費用を導出し、それを最小にする最適チェックポイント時刻列を求める手順が示される。また数値例として、障害発生時間の累積分布関数にワイブル分布を仮定した場合の結果を計算し、その解析結果の有用性を示す。

### 1. はじめに

コンピュータシステムにおいては、稼働中に発生する障害に対処するため、障害が発生してもシステム・ダウンとなる状態を回避する手法、あるいは回避できない場合でも速やかに正常な稼働状態に復帰できるような手法が必要とされる。そのため各種のシステムの高信頼性技術が研究されている<sup>1)</sup>。とりわけデータベースシステムにおけるファイル系の構成および回復技術の研究は、システム運用の上で極めて重要な課題である。システムに起こる何らかの障害により、多くの情報を記憶するファイルが破壊されたり誤った情報が付加されたりすると、データベースシステムの信頼性および処理性能に多大な支障をきたすことは明らかである。そこでデータベースシステムでは、データの信頼性を向上させるための誤り訂正技法や、ファイルに二重化による冗長性を持たせるデュアルファイル方式などが用いられている。また実際に、障害の発生によりファイルが破壊された場合に、ファイルを障害が発生する直前の状態まで回復させるファイル・リカバ

リの手法が多く考えられている。ここではその代表的な例であるロールバック・リカバリについて考察する<sup>2)~4)</sup>。

一般にデータベースシステムでは、処理するトランザクションの要求により主記憶装置のファイルの更新が行われるとき、そのトランザクションの処理に必要な情報をジャーナル（またはログ）と呼ばれる安定な二次記憶装置（磁気ディスク、磁気テープ）に保存する方法が用いられている。これによりファイルの更新に関するトランザクションの取り消し（undo）、やり直し（redo）が可能となる。主記憶装置のファイルが何らかの障害により破壊されたとき、あらかじめ正常な時点で主記憶装置から採取されたファイルのバックアップコピーをあらかじめ主記憶装置に導入し、その上にジャーナルから得られたトランザクションの情報の処理を重ねることにより、ファイルを障害の発生する直前の状態までリカバリすることができる。このとき、ファイルの状態を過去のバックアップコピーを採取したときの状態まで戻すことをロールバックと呼ぶ。バックアップコピーが最も古い状態であるとき、ロールバックはシステムの稼働開始時点までさかのぼり、ジャーナルによるファイル・リカバリは膨大なものになる可能性がある。そこで、システムに障害が発生するまでにあらかじめ定められた時点ごとに主記憶装置のファイルの情報を、安定な二次記憶装置に保存する。この処理をチェックポイント、処理を行う時刻をチェックポイントと呼ぶ。チェックポイント

† Optimal Checkpointing Policies Using the Checkpointing Density by SATOSHI FUKUMOTO (Graduate School of Engineering, Hiroshima University), NAOTO KAIIO (Department of Management Science, Faculty of Commercial Sciences, Hiroshima Shudo University) and SHUNJI OSAKI (Cluster II (Electrical Engineering), Faculty of Engineering, Hiroshima University).

†† 広島大学大学院工学研究科

††† 広島修道大学商学部管理理科学科

†††† 広島大学工学部第二類（電気系）

の決定はシステム全体の処理効率, コストなどを考慮して行われなければならない。すなわち, 頻りにチェックポイントを行うとジャーナルによるロールバック・リカバリのための時間・費用は小さくてすむが, チェックポイントに要する総合的な時間・費用が大きくなり, 逆に少なく行くとチェックポイントに関する時間・費用は小さくてすむが, 障害発生時のロールバック・リカバリのための時間・費用が大きくなるという問題がある。

チェックポイントの決定の問題に関する研究として, システムの障害がランダム故障によって発生しそれらの分布がポアソン過程を形成すると仮定して, 議論したものがある<sup>5)~8)</sup>。これらはシステムのアベイラビリティを最大にする, すなわちロールバック・リカバリとチェックポイントとに要するトータルの時間を最小にする一定の時間間隔を導くものである。また, チェックポイントをタスクに置き換えてアルゴリズムによる議論をしたものなどもある<sup>9)</sup>。

本稿では, システムが稼動を開始して, 障害発生後にロールバック・リカバ리를完了し, 再びシステムが稼動を開始するまでの一連の動作を1サイクルとするモデルを考える。さらにチェックポイントに要する費用とロールバック・リカバりに要する費用とのトレードオフを考えたチェックポイント方策について議論する。通常のコンピュータシステムの運用費用はシステムの使用時間に比例するため<sup>9)</sup>, これらの費用を評価することは上述のトータルの損失時間を評価することと本質的な差異はない。しかしながら, モデルの解析の上では本稿のように費用を考えると, チェックポイントやロールバック・リカバりに要する時間を直接的に扱わなくてもすむため, たいへん都合である。以上の理由により, 評価関数として定常状態における単位時間当りの近似期待費用を導入する。これはシステムが再び稼動開始する時点が再生点となるため, 1サイクルにおける単位時間当りの近似期待費用に置き換えることができる<sup>10)</sup>。1サイクルにおける近似期待費用は, 各チェックポイント間隔によるチェックポイント費用関数と, 最も新しいチェックポイントから障害発生までの時間間隔によるロールバック・リカバリ費用関数とによって表す。

本稿のモデルでは障害発生時間の累積時間分布に一般分布を仮定しているため, すなわち故障率が一般に時間の経過とともに変化するため, 最適なチェックポイントは間隔が時間とともに変化する時刻列として導

かれる。同様に一般分布を仮定して最適なチェックポイント時刻列を求めたモデルとして文献 11)がある。これは, それぞれのチェックポイント間隔におけるシステムの故障確率 $p$ が一定になるように時刻列を設定し, トータルの損失時間を最小にする $p$ を求めるものである。

本稿における解析ではまず, 単位時間当りのチェックポイント回数を表す関数 $\sim$ チェックポイント濃度 $\sim$ を考え, 上述の費用関数および分布を用いて定常状態における単位時間当りの近似期待費用をチェックポイント濃度の汎関数として求める。そして, それを最小にするチェックポイント濃度を導く。次にこれらの結果に具体的な費用関数を与え, それらを含めた近似期待費用, チェックポイント濃度を表す。最後に数値例として, 障害発生時間の累積分布関数にワイブル分布を仮定した場合を示す。

## 2. モデルと仮定

1. システムは時刻 0 ( $=t_0$ ) で動作を開始し, 計画期間は無限大とする。
2. システムはチェックポイント  $t_k$  ( $k=1, 2, 3, \dots$ ) で瞬時にチェックポイントされる。チェックポイントの実行時にシステム障害は発生しない。
3. システム障害は直ちに発見され, 同時にロールバック・リカバリ処理が瞬時に施される。ロールバック・リカバリ処理は完全に施されシステムは直ちに動作を開始する。以後, 同様なサイクルを繰り返す。
4. システムの動作開始 (障害/ロールバック・リカバリ) から次の動作開始までを1サイクルとする。ここで, システムの動作開始時点は再生点である。
5. 以下の諸量を導入する。
  - $F(t), \bar{F}(t), f(t), r(t), E[T]$ : コンピュータシステム障害発生時間の累積分布関数, 信頼度関数, 確率密度関数, 故障率, 平均。ここで特に,  $F(t)=1-F(t), r(t)=f(t)/\bar{F}(t)$  である。
  - $n(t)$ : 時刻  $t$  における単位時間当りのチェックポイント回数を表す滑らかな関数 $\sim$ チェックポイント濃度。
  - $t_k$ : 各サイクルにおけるコンピュータシステムの  $k$  番目のチェックポイント,  $k=1, 2, 3, \dots$ 。

- $\{t_1^*, t_2^*, t_3^*, \dots\}$ : 定常状態における単位時間当りの近似期待費用を最小にする最適チェックポイント列.
- $C(n(t))$ : 定常状態における単位時間当りの近似期待費用,  $n(t)$  の汎関数.
- $L_c(t_k - t_{k-1})$ : チェックポイント  $t_k$  におけるチェックポインティング費用,  $k=1, 2, 3, \dots$ .
- $L_r(t - t_N)$ : コンピュータシステム障害が時刻  $t$  で発生し, その直前のチェックポイントが時刻  $t_N$  であるときの, コンピュータシステム障害時, すなわち時刻  $t$  におけるロールバック・リカバリ処理費用.

### 3. 解 析

上記の仮定から定常状態における単位時間当りの近似期待費用を最小にする最適チェックポイント列を求める.

まず1サイクル当りの近似期待チェックポインティング費用  $S_1(n(t))$  は,

$$\begin{aligned} S_1(n(t)) &= \int_0^{\infty} \int_0^t L_c(n(\tau)^{-1}) n(\tau) d\tau dF(t) \\ &= \int_0^{\infty} L_c(n(t)^{-1}) n(t) \bar{F}(t) dt \end{aligned} \quad (1)$$

として得られる.

次に1サイクル当りの近似期待ロールバック・リカバリ処理費用  $S_2(n(t))$  を求める. いま,

$$t - t_N = \tau$$

と置くと, テーラーの定理より,  $L_r(\tau)$  は近似的に

$$\begin{aligned} L_r(\tau) &= L_r\left(\frac{\tau}{2}\right) + \frac{\tau}{2} L_r'\left(\frac{\tau}{2}\right) + \dots \\ &\approx L_r\left(\frac{\tau}{2}\right) + \frac{\tau}{2} L_r'\left(\frac{\tau}{2}\right) \end{aligned}$$

となり, 障害が時刻  $t$  で発生したときの, ロールバック・リカバリ処理費用は, 平均的に,

$$\begin{aligned} &\frac{\int_0^{n(t)^{-1}} L_r(\tau) d\tau}{n(t)^{-1}} \\ &= n(t) \int_0^{n(t)^{-1}} \left[ L_r\left(\frac{\tau}{2}\right) + \frac{\tau}{2} L_r'\left(\frac{\tau}{2}\right) \right] d\tau \\ &= n(t) \int_0^{n(t)^{-1}} L_r\left(\frac{\tau}{2}\right) d\tau + n(t) \frac{\tau}{2} \cdot 2 L_r'\left(\frac{\tau}{2}\right) \Big|_0^{n(t)^{-1}} \\ &\quad - n(t) \int_0^{n(t)^{-1}} L_r\left(\frac{\tau}{2}\right) d\tau \\ &= L_r\left(\frac{1}{2} n(t)^{-1}\right) \end{aligned}$$

となる. したがって  $S_2(n(t))$  は,

$$S_2(n(t)) = \int_0^{\infty} L_r\left(\frac{1}{2} n(t)^{-1}\right) dF(t) \quad (2)$$

となる.

定常状態における単位時間当りの近似期待費用は, 1サイクルにおける単位時間当りの近似期待費用と一致することから<sup>10)</sup>, 式(1), (2)より

$$\begin{aligned} C(n(t)) &= \frac{S_1(n(t)) + S_2(n(t))}{E[T]} \\ &= \frac{\int_0^{\infty} L_c(n(t)^{-1}) n(t) \bar{F}(t) dt + \int_0^{\infty} L_r\left(\frac{1}{2} n(t)^{-1}\right) dF(t)}{E[T]} \end{aligned} \quad (3)$$

となる.

この汎関数  $C(n(t))$  を最小にするチェックポイント濃度  $n(t)$  を求める. これは  $n(t)$  を未知関数とする変分問題であり, そのオイラー方程式は,

$$\begin{aligned} L_c(n(t)^{-1}) - n(t)^{-1} L_c'(n(t)^{-1}) \\ - \frac{1}{2} n(t)^{-2} L_r'\left(\frac{1}{2} n(t)^{-1}\right) r(t) = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

となる.

ここで, 費用関数  $L_c(x)$  および  $L_r(x)$  を具体的に与えると, 式(4)のオイラー方程式を解くことにより  $n(t)$  を求めることができる.

さらに, チェックポインティング濃度  $n(t)$  を用いて, 一般にチェックポイント列  $\{t_1, t_2, t_3, \dots\}$  は方程式

$$k = \int_0^{t_k} n(t) dt, \quad k=1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

を満足する. よって, 方程式(5)に式(4)のオイラー方程式を解くことによって得られた  $n(t)$  を代入すると最適チェックポイント列  $\{t_1^*, t_2^*, t_3^*, \dots\}$  が得られる.

以上の解析結果に基づき, 式(4)に与えるべき費用関数を具体的に導入して, チェックポインティング濃度  $n(t)$  を求める.

具体的な費用関数  $L_c(x)$  および  $L_r(x)$  を, 以下のように仮定する.

$$L_c(x) = c_c + k_c a_c \frac{\lambda_r}{\mu_s} x \quad (6)$$

$$L_r(x) = c_r + k_r \frac{\lambda_r}{\mu_s} x \quad (7)$$

ただし,

$\lambda_r$ : ロールバック・リカバリ処理のときに再処理さ

れる必要がある, すなわちファイルを変更する  
トランザクションの到着率<sup>4)</sup>.

$\mu_s$ : トランザクションの処理率 (サービス率)<sup>4)</sup>, こ  
こで  $1/\mu_s \leq 1/\lambda_r$ , すなわち  $\lambda_r/\mu_s \leq 1$  とする.

$a_c$ : チェックポイントに要する時間と, ロー  
ルバック・リカバリ処理のときに再処理される  
必要があるトランザクションの, 該当チェック  
ポイント間における総処理時間との比を表す比  
例定数.

$c_c$ : チェックポイント1回当りのチェックポ  
イント関連費用.

$k_c$ : 単位時間当りのチェックポイント費用.

$c_r$ : ロールバック・リカバリ処理1回当りのロー  
ルバック・リカバリ処理関連費用.

$k_r$ : 単位時間当りのロールバック・リカバリ処理費  
用.

である. ここで,

$$\rho = \frac{\lambda_r}{\mu_s},$$

$$K_c = k_c a_c \frac{\lambda_r}{\mu_s} = k_c a_c \rho,$$

$$K_r = k_r \frac{\lambda_r}{\mu_s} = k_r \rho,$$

とすると費用関数は, 式(6)および(7)より,

$$L_c(x) = c_c + K_c x \quad (8)$$

$$L_r(x) = c_r + K_r x \quad (9)$$

となる.

したがって, 定常状態における単位時間当りの近似  
期待費用は, 式(3)より,

$$\begin{aligned} C(n(t)) &= \int_0^\infty (c_c + K_c n(t)^{-1}) n(t) \bar{F}(t) dt \\ &+ \int_0^\infty \left( c_r + \frac{K_r}{2} n(t)^{-1} \right) dF(t) / E[T] \quad (10) \\ &= \frac{\int_0^\infty (c_c n(t) + K_c) \bar{F}(t) dt + \int_0^\infty \left( c_r + \frac{K_r}{2} n(t)^{-1} \right) f(t) dt}{E[T]} \quad (11) \end{aligned}$$

となる.

オイラー方程式は, 式(4)より,

$$c_c + K_c n(t)^{-1} - n(t)^{-1} K_c - \frac{1}{2} n(t)^{-2} K_r r(t) = 0$$

すなわち,

$$c_c - \frac{1}{2} n(t)^{-2} K_r r(t) = 0 \quad (12)$$

となる.

ゆえに,  $n(t)$  について方程式(12)を解くと,

$$n(t)^2 = \frac{K_r}{2c_c} r(t)$$

より,

$$n(t) = \sqrt{\frac{K_r}{2c_c} r(t)} \quad (13)$$

となる. さらに,

$$K_{rc} = \frac{K_r}{2c_c} = \frac{k_r}{2c_c} \rho = \frac{k_r}{2c_c} \cdot \frac{\lambda_r}{\mu_s} \quad (14)$$

とすると,

$$n(t) = \sqrt{K_{rc} r(t)} = [K_{rc} r(t)]^{1/2} \quad (15)$$

となる.

#### 4. 数値例

障害発生時間の累積分布関数に尺度母数  $\lambda$ , 形状母  
数  $m$  のワイブル分布,

$$F(t) = 1 - e^{-(\lambda t)^m} \quad (\lambda > 0, m > 0)$$

を仮定した場合の数値例を示す. ワイブル分布は疲労  
破壊や電子素子の故障などの記述に用いられ, パラ  
メータの値によっていろいろな故障形態に対応するこ  
とができる. 本稿のモデルのように時間による故障率  
の変化を考える場合にも十分に有効な分布である. こ  
のとき,  $\bar{F}(t) = e^{-(\lambda t)^m}$ ,  $f(t) = m\lambda^m t^{m-1} e^{-(\lambda t)^m}$ ,  $r(t) =$   
 $m\lambda^m t^{m-1}$ ,  $E[T] = (1/\lambda)\Gamma(1+1/m)$  となる.  $\Gamma(k) = \int_0^\infty$   
 $e^{-x} x^{k-1} dx$  (ガンマ関数) である.

チェックポイント濃度は式(15)より

$$n(t) = [K_{rc} m \lambda^m t^{m-1}]^{1/2} \quad (16)$$

となる. ワイブル分布の故障率の性質により,  $0 < m$   
 $< 1$  ならばチェックポイント間隔は時間とともに増加  
し, やがて一定の間隔に近づく.  $1 < m$  ならば減少し  
ていき, 同様に一定の間隔に近づく.  $m=1$  の場合  
は,  $F(t)$  は指数分布となりチェックポイント間隔は  
常に一定の値となる.

このときの定常状態における単位時間当りの近似期  
待費用は, 式(11), (16)より,

$$C(n(t)) = \frac{2c_c \int_0^\infty n(t) \bar{F}(t) dt + c_r}{E[T]} + K_c \quad (17)$$

となる.

表1に式(5), (16)より求めた最適チェックポイン  
ト列  $\{t_1^*, t_2^*, t_3^*, \dots\}$  および定周期のチェックポイン

表 1 最適チェックポイント列と定周期チェックポイント列

Table 1 Optimal checkpointing time sequence by the checkpointing density vs. the sequence by the constant time interval.

$(F(t)=1-\exp[-(\lambda t)^m], m=0.5, E[T]=500, c_c=10, c_r=10, k_c=1, k_r=1, a_c=0.1, 1/\lambda_r=5, 1/\mu_r=2)$

$k$	$t_k^*$	$F(t_k^*)$	$t_k^{**}$	$F(t_k^{**})$
1	92	0.4557	158	0.5485
2	233	0.6192	316	0.6752
3	400	0.7178	474	0.7478
4	587	0.7840	632	0.7962
5	791	0.8311	791	0.8311
6	1008	0.8658	949	0.8574
7	1238	0.8920	1107	0.8780
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

表 2 最適チェックポイント列と定周期チェックポイント列

Table 2 Optimal checkpointing time sequence by the checkpointing density vs. the sequence by the constant time interval.

$(F(t)=1-\exp[-(\lambda t)^m], m=1, E[T]=500, c_c=10, c_r=10, k_c=1, k_r=1, a_c=0.1, 1/\lambda_r=5, 1/\mu_r=2)$

$k$	$t_k^*$	$F(t_k^*)$	$t_k^{**}$	$F(t_k^{**})$
1	158	0.2711	158	0.2711
2	316	0.4687	316	0.4687
3	474	0.6127	474	0.6127
4	632	0.7177	632	0.7177
5	791	0.7943	791	0.7943
6	949	0.8500	949	0.8500
7	1107	0.8907	1107	0.8907
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

表 3 最適チェックポイント列と定周期チェックポイント列

Table 3 Optimal checkpointing time sequence by the checkpointing density vs. the sequence by the constant time interval.

$(F(t)=1-\exp[-(\lambda t)^m], m=2, E[T]=500, c_c=10, c_r=10, k_c=1, k_r=1, a_c=0.1, 1/\lambda_r=5, 1/\mu_r=2)$

$k$	$t_k^*$	$F(t_k^*)$	$t_k^{**}$	$F(t_k^{**})$
1	262	0.1935	158	0.0755
2	415	0.4183	316	0.2696
3	544	0.6056	474	0.5068
4	659	0.7447	632	0.7154
5	765	0.8409	791	0.8596
6	864	0.9041	949	0.9408
7	957	0.9438	1107	0.9787
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

ティング間隔を仮定したチェックポイント列  $\{t_1^{**}, t_2^{**}, t_3^{**}, \dots\}$  を示す。ただし、 $F(t_k^*)$  は時刻  $t_k^*$  における障害発生確率であり、 $m=0.5, E[T]=500$  とし、式(6)、(7)の費用関数のための各値を、 $c_c=10, c_r=10, k_c=1, k_r=1, a_c=0.1, 1/\lambda_r=5, 1/\mu_r=2$  とした。また図1にこのときのチェックポイント列とチェックポイントニング濃度  $n(t)$  との関係を示す。同様の仮定のもとで  $m=1$  の場合の結果を表2、図2に、 $m=2$  の場合の結果を表3、図3に示す。上述のとおり  $m=0.5$  の場合、システムの稼動開始初期においてはチェックポイント間隔は小さく、時間の経過とともに大きくなり一定の間隔に近づく。また  $m=2$

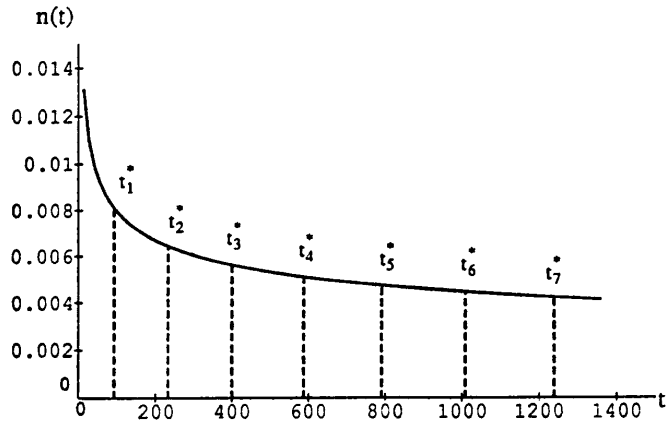


図 1 チェックポイントニング濃度とチェックポイント列  
Fig. 1 The illustration for the checkpointing density and checkpointing time sequence.  
 $(F(t)=1-\exp[-(\lambda t)^m], m=0.5, E[T]=500, c_c=10, c_r=10, k_c=1, k_r=1, a_c=0.1, 1/\lambda_r=5, 1/\mu_r=2)$

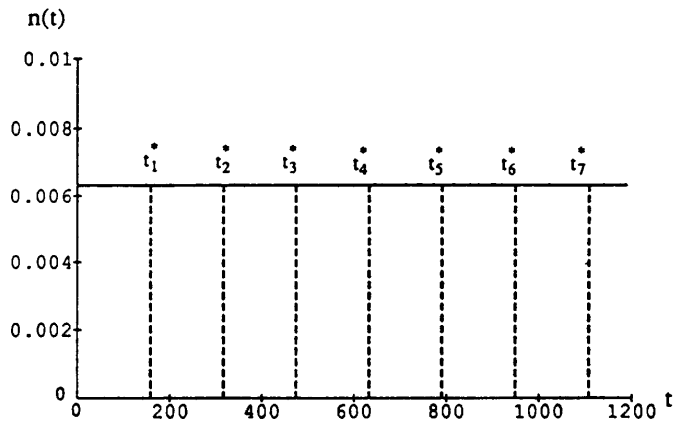


図 2 チェックポイントニング濃度とチェックポイント列  
Fig. 2 The illustration for the checkpointing density and checkpointing time sequence.  
 $(F(t)=1-\exp[-(\lambda t)^m], m=1, E[T]=500, c_c=10, c_r=10, k_c=1, k_r=1, a_c=0.1, 1/\lambda_r=5, 1/\mu_r=2)$

表 4 最適チェックポイント列と定周期チェックポイント列による期待費用および利得率  
Table 4 The expected costs and gains  $((C_2 - C_1)/C_2[\%])$  by the checkpointing density vs. by the constant time interval.  
( $F(t) = 1 - \exp[-(t/\lambda)^m]$ ,  $E[T] = 500$ ,  $c_c = 10$ ,  $c_r = 10$ ,  $k_c = 1$ ,  $k_r = 1$ ,  $a_c = 0.1$ ,  $1/\lambda_r = 5$ ,  $1/\mu_r = 2$ )

	$C_1$	$C_2$	$(C_2 - C_1)/C_2[\%]$
$m = 0.5$	0.1721	0.1942	11.36
$m = 2$	0.1764	0.1867	5.513

の場合には稼動初期においてチェックポイント間隔は大きく、時間の経過とともに小さくなり一定の間隔に近づいている。

さて、 $F(t)$  にワイブル分布を仮定した場合の最適チェックポイント列による近似期待費用と、定周期のチェックポイント間隔による近似期待費用の比較をしよう。最適チェックポイント列による近似期待費用を  $C_1$  とし、定周期のチェックポイント間隔による近似期待費用を  $C_2$  とする。表 4 は上記の仮定で  $m = 0.5$  および  $m = 2$  における  $C_1$  の  $C_2$  に対する利得率  $((C_2 - C_1)/C_2) \times 100[\%]$  を計算した結果である。これによればいずれの場合も最適チェックポイント列によるチェックポイント間隔の方がより有効であることがわかる。

## 5. おわりに

本稿ではコンピュータシステムのファイル回復技術の1つであるロールバック・リカバリに関連するチェックポイント間隔について議論した。システムの障害発生時間の累積分布関数に一般分布を仮定し、故障率の時間による変化にともないチェックポイント間隔が変化することを考え、単位時間当りのチェックポイント回数を表すチェックポイント密度を導入し、評価関数としての定常状態における単位時間当りの近似期待費用を最小にするチェックポイント時刻列の導き方を示した。まずシステムが稼動を開始して、障害発生後にロールバック・リカバ리를完了し、再びシステムが稼動開始するまでの一連の動作を1サイクルとし、1サイクルにおけるチェックポイントに関する費用関数とロールバック・リカバリに関する費用関数から、定常状態における単位時間当りの近似期待費用をチェックポイント密度の汎関数として導いた。そして、それを最小にするチェックポイント密度を求めた。次に具体的な費用関数を導入して近似期待費用、最適なチェックポイント

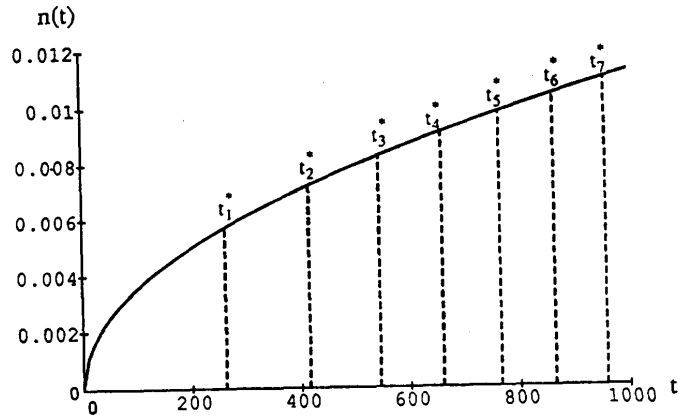


図 3 チェックポイント密度とチェックポイント列  
Fig. 3 The illustration for the checkpointing density and checkpointing time sequence.

( $F(t) = 1 - \exp[-(t/\lambda)^m]$ ,  $m = 2$ ,  $E[T] = 500$ ,  $c_c = 10$ ,  $c_r = 10$ ,  $k_c = 1$ ,  $k_r = 1$ ,  $a_c = 0.1$ ,  $1/\lambda_r = 5$ ,  $1/\mu_r = 2$ )

密度を導出した。最後に、以上の結果に対し障害発生時間の累積分布関数にワイブル分布を仮定した場合の数値例を示した。

本稿で示したチェックポイント密度による結果は解析結果である。したがって、障害発生時間の累積分布関数および諸費用を与えれば、数値計算により比較的簡単に最適チェックポイント列を求めることができる。あくまで一般分布を仮定した解析結果であるので非常に有効である。

チェックポイント方式によるロールバック・リカバリはデータベースシステムなどのファイル回復技術として非常に広く用いられている。実際の様々なシステムで発生するファイルの障害を考えると、稼動初期などの過渡的な時刻まで考慮すれば、必ずしも故障率が一定のもので障害が発生するとは言えない。このような場合、本稿の示した結果は有効なチェックポイント間隔を与える。なぜならば、数値例に示されたとおり定周期によるチェックポイント間隔よりも最適チェックポイント列によるチェックポイント間隔のほうが明らかに優れているためである。

## 参考文献

- 1) 当麻喜弘監修, 向殿政男編: コンピュータシステムの高信頼化技術入門, 日本規格協会 (1988).
- 2) Jasper, D. P.: A Discussion of Checkpoint/Restart, *Software Age*, pp. 9-14 (1969).
- 3) Haerder, T. and Reuter, A.: Principles of Transaction-Oriented Database Recovery, *Comput. Surv.*, Vol. 15, No. 4, pp. 287-317 (1983).

- 4) Chandy, K. M. and Ramamoorthy, C. V.: Roll-back and Recovery Strategies for Computer Programs, *IEEE Trans. Comput.*, Vol. C-21, pp. 546-556 (1972).
- 5) Young, J. W.: A First Order Approximation to the Optimum Checkpoint Interval, *Comm. ACM*, Vol. 17, No. 9, pp. 530-531 (1974).
- 6) Chandy, K. M., Browne, J. C., Dissly, C. W. and Uhrig, W. R.: Analytic Models for Roll-back and Recovery Strategies in Data Base Systems, *IEEE Trans. Softw. Eng.*, Vol. SE-1, No. 1, pp. 100-110 (1975).
- 7) Chandy, K. M.: A Survey of Analytic Models of Roll-back and Recovery Strategies, *Computer*, Vol. 8, pp. 40-47 (1975).
- 8) Gelenbe, E.: On the Optimum Checkpoint Interval, *J. ACM*, Vol. 26, No. 2, pp. 259-270 (1979).
- 9) Toueg, S. and Babaoğlu, Ö: On the Optimum Checkpoint Selection Problem, *SIAM J. Comput.*, Vol. 13, pp. 630-649 (1983).
- 10) Ross, S. M.: *Applied Probability Models with Optimization Applications*, Holden-Day, San Francisco (1970).
- 11) Kaio, N. and Osaki, S.: A Note on Optimum Checkpointing Policies, *Microelectron. Reliab.*, Vol. 25, No. 3, pp. 451-453 (1985).

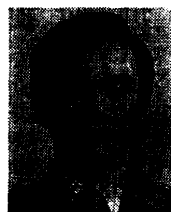
(平成元年6月22日受付)

(平成2年4月17日採録)



福本 聡 (正会員)

昭和 62 年広島大学工学部第二類卒業。平成元年同大学院博士課程前期修了。現在、同大学院博士課程後期在学中。コンピュータシステムの信頼性評価ならびに保全方策に関する研究に従事。電子情報通信学会会員。



海生 直人 (正会員)

昭和 51 年広島大学工学部経営工学卒業。昭和 56 年同大学院工学研究科博士課程後期単位取得満期退学。同年広島修道大学商学部講師。昭和 58 年同助教授。工学博士。主として、信頼性理論、生体システム工学の研究に従事。昭和 61~62 年ロチェスター大学 (アメリカ) 客員研究員。著書「単一ユニットシステムの予防保全問題に関する解析的研究」、「OR による経営システム科学」(共著) 等。日本 OR 学会、日本経営工学会、電子情報通信学会、日本脳波・筋電図学会各会員。



尾崎 俊治 (正会員)

昭和 17 年生。昭和 45 年京都大学大学院工学研究科博士課程修了。工学博士。昭和 45 年広島大学講師、同年助教授。昭和 61 年同教授。昭和 45~47 年南カリフォルニア大学研究員。昭和 51~52 年マンチェスター大学研究員。システム信頼性理論、コンピュータシステムの信頼性評価およびソフトウェアの信頼性モデルに興味をもつ。電子情報通信学会、システム情報学会、経営工学会各会員。日本 OR 学会フェロー。