

一般  
投稿論文

# 信頼性モデルを用いた遠隔クラウド環境の設計手法の提案

樋渡 仁<sup>†1</sup> 吉川 美奈子<sup>†2</sup> 岩村 相哲<sup>†2</sup>

<sup>†1</sup> 東日本電信電話 (株) <sup>†2</sup> 日本電信電話 (株)

遠隔拠点にあるクラウドコンピューティング環境 (以下, 単にクラウド環境) を構築・運用していく上で, 装置の故障・障害にどのように対処するかは, 運用コストの最小化において重要である. 特に, 遠隔拠点に作業員が常駐せず定期的に現地を訪問し保守作業する前提では, 構築時に系全体に冗長性を持たせ, 装置の故障・障害が発生した場合には, 遠隔から現用系より待機系に切り替えることで, 当該装置の修理・復旧は現地での定期保守時に行う運用が典型的である. このような遠隔クラウド環境の設計では, 構築時に系全体が保持する信頼度に対し, 定期保守回数を最小化する必要がある. 本論文は, クラウド環境の信頼性モデルにより, 運用コストが最小化された設計を実現できることを示す. 特に, クラウド環境の立ち上げ時には, サーバの故障率が, 故障率曲線における初期故障期から偶発故障期へ至る過程で大きく変動するため, 本手法の適用においては, 定期保守の間隔を初期故障期と偶発故障期で使い分けることが有用であることを示す.

## 1. はじめに

近年, 大量の計算資源をネットワーク経由で利用するクラウドコンピューティング (Cloud Computing) が注目を集めている. NTTソフトウェアイノベーションセンタにおいても, クラウドコンピューティング環境 (以下, 単にクラウド環境) を社内で共用する取り組みを推進している [1], [3], [7]. 筆者は, 2008年より, クラウド環境の構築運用に従事してきたが, 2010年には, 現在の拠点より, 約50km離れた拠点A (以下, 拠点Aにあるクラウド環境を環境Aとする) でのクラウド環境の構築運用を計画した.

拠点Aのような遠隔拠点におけるクラウド環境 (以下, 遠隔クラウド環境) を運用していく上では, 装置の故障・障害にどのように対処するかが, 運用コスト最小化の課題となる. 特に, 遠隔拠点に作業員が常駐せず定期的に現地を訪問し保守作業する前提では, 構築時に系全体に冗長性をもたせ, 装置の故障・障害が発生した場合でも, 遠隔から現用系より待機系への切り替えのみで対処し, 当該装置の修理・復旧は定期保守時に行う運用が典型的である. その前提で, 遠隔クラウド環境の運用コストを最小化するには, 構築時に系全体が保持する信頼度<sup>☆1</sup>に対し, 定期保守の回数を最少化する必要がある.

この点について, 再度詳細に説明する. 遠隔クラウド

環境の設計に際し, 下記の運用手順を前提とする.

- (1) 構築時には, 現用系と待機系の装置を準備
- (2) 運用時に現用系が故障すると, 現用系から待機系へ自動もしくは手動で切り替える. その結果, 待機系の数量が減少し, 系全体の信頼度が低減する
- (3) 待機系が枯渇し, 要求性能を割り込む前に, 定期保守を実施し, 故障した装置を修理し, 待機系として利用する. その結果, 待機系の数量が構築時の水準に回復する

上記の運用手順を前提に考えると, 系全体の信頼度と定期保守の間隔は, 図1のように模式的に表現できる. 図1において, 運用コストは, 定期保守の間隔 (定期保守間隔) により増減し, 定期保守の間隔は待機系の数量により規定されることが理解できる. 遠隔クラウド環境の運用コストの最小化を実現するには, 所与の待機系の

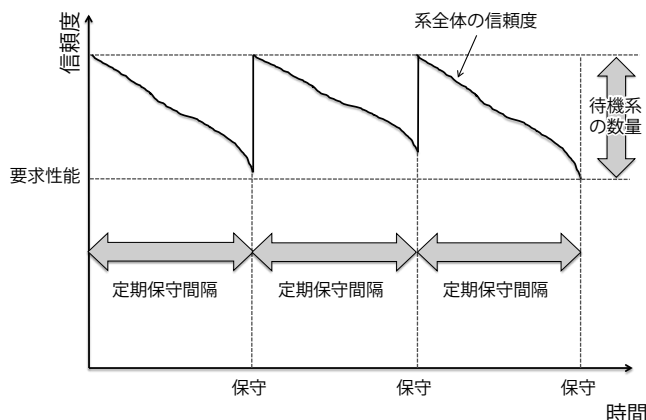


図1 系全体の信頼度と定期保守間隔の関係

<sup>☆1</sup> 文献[8]の定義を引用すると, 信頼度 (Reliability) とは, 「アイテムが与えられた条件で規定の期間中, 要求された機能を果たす確率」である. すなわち, 信頼度とは非故障確率あるいは生存確率 (probability of survival) のことである.

数量（および、現用系の数量）より、系全体の信頼度を定量的に定義し、最長の定期保守間隔を求める必要がある。

本論文の構成について述べる。まず、第2章では、遠隔クラウドの運用コストを最小化する上で、解決すべき2つの課題とアプローチについて述べる。第3章では、1点目の課題へのアプローチとして、クラウド環境の信頼性モデルを構築する。第4章では、2点目の課題へのアプローチとして、サーバ装置の信頼性モデルを構築する。第5章では、環境Aの設計を事例とし、第3章、第4章で構築した信頼性モデルを用いた運用コスト最小化手法について説明する。第6章では、関連研究について概観し、第7章で本論文をまとめる。

## 2. 課題とアプローチ

### 2.1 課題

第1章の最後で述べたように、遠隔クラウドの運用コストを最小化するには、系全体の信頼度を定量的に定義する必要がある。そのためには課題が2点ある。1点目の課題は、クラウド環境の信頼度を定量的に定義する手段がないことである。すなわち、待機系の数量の増減により、系全体の信頼度がどのように変化するかを定量的に定義する手段が必要になる。2点目の課題は、クラウド環境を構成する装置の信頼度の実績値を、どのような信頼性モデルにあてはめればよいか不明であることである。仮に、クラウド環境の信頼度を定量的に定義できたとしても、運用コスト最小化を実現する定期保守間隔を算出するには、クラウド環境を構成する装置の信頼度に関し、あてはめるべき信頼性モデルが必要になる。

### 2.2 アプローチ

本論文では、上記の課題に対し、下記のアプローチで解決を試みる。1点目の課題については、関連研究[2]を参考に、独自のクラウド環境の信頼性モデルを構築することで解決を試みる。詳細は、第3章で述べる。2点目の課題については、新たに環境Aで構築するクラウド環境において、装置の故障率を計測し、装置の信頼性をモデル化することで解決を試みる。詳細は、第4章で述べる。

## 3. クラウド環境の信頼性モデル

第3章では、信頼性モデルの扱いやすさを目的とし、サーバ信頼度のみで表現されるクラウド環境の信頼性モ

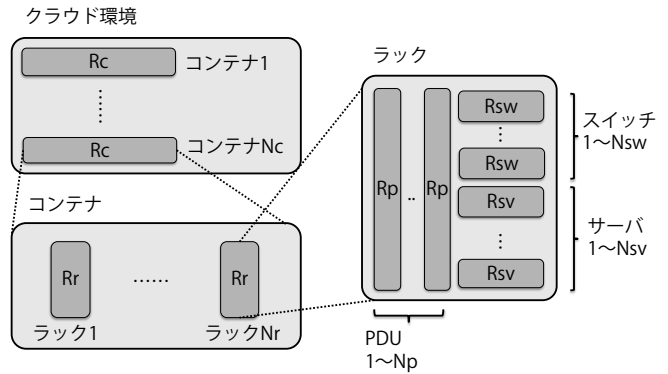


図2 クラウド環境モデル

デルを構築する。関連研究[2]において、データセンタの信頼性モデルについて議論されているが、前提となるクラウド環境の構成が異なるため、環境Aへ直接適用することは困難である。そのため、本論文では、m/n冗長系の信頼度の考え方にに基づき、独自の信頼性モデルを構築する。

環境Aは、図2のようにモデル化できる。図2において、クラウド環境は、Nc台のコンテナ（Container）から構成される。Nc台中Mc台が現用系である。コンテナは、Nr台のラック（Rack）から構成される。Nr台中Mr台が現用系である。ラックは、Nsw台のスイッチ（Switch）、Nsv台のサーバ（Server）、Np台のPDU（Power Distribution Unit）から構成される。Nsw台中Msw台、Nsv台中Msv台、Np台中Mp台が現用系である。

図2のクラウド環境モデルにおいて、クラウド環境の信頼度Reは、コンテナの信頼度Rcの関数で定義できる。コンテナがm/n冗長系<sup>☆2</sup>で構成されると仮定すると、上記の関数は式(1)で示される<sup>☆3</sup>。

$$R_e = \sum_{k=M_c}^{N_c} \binom{N_c}{k} \cdot R_c^k \cdot (1-R_c)^{N_c-k} \quad (1)$$

where

$$\binom{n}{r} = \frac{n \times (n-1) \times \dots \times (n-r+1)}{r \times (r-1) \times \dots \times 1}$$

☆2 m/n冗長系とは、「n個の構成要素中、m個が正常に動作していれば系は正常に動作するように構成してある冗長系」である。クラウド環境の機器は、現用系と待機系の2系統用意される。すなわち、現用系の台数がm台、現用系・待機系を合計した台数がn台となる。

☆3 式(1)～式(3)は、m/n冗長系の信頼度の定義より導き出せる。たとえば、現用系がサーバ20台、待機系サーバ1台の構成(20/21冗長系)の信頼度を計算するには、式(3)のサーバからの寄与Rgroup of svに対し、Msv=20、Nsv=21を代入し、下記のように求められる。

$$\begin{aligned} R_{\text{group of sv}} &= \binom{21}{20} \cdot R_{sv}^{20} \cdot (1-R_{sv})^1 + \binom{21}{21} \cdot R_{sv}^{21} \cdot (1-R_{sv})^0 \\ &= 21 \cdot R_{sv}^{20} \cdot (1-R_{sv})^1 + R_{sv}^{21} \end{aligned}$$

コンテナの信頼度  $R_c$  は、ラックの信頼度  $R_r$  の関数で定義できる。同様に、ラックも  $m/n$  冗長系で構成されると仮定すると、上記の関数は式(2)で示される。

$$R_c = \sum_{k=M_r}^{N_r} \binom{N_r}{k} \cdot R_r^k \cdot (1-R_r)^{N_r-k} \quad (2)$$

ラックの信頼度  $R_r$  は、スイッチ、サーバ、PDUの信頼度  $R_{sw}$ ,  $R_{sv}$ ,  $R_p$  の関数で定義できる。同様に、スイッチ、サーバ、PDUも  $m/n$  冗長系で構成されると仮定すると、上記の関数は式(3)で示される。

$$R_r = R_{group\ of\ sw} \times R_{group\ of\ sv} \times R_{group\ of\ p} \quad (3)$$

where

$$R_{group\ of\ sw} = \sum_{k=M_{sw}}^{N_{sw}} \binom{N_{sw}}{k} \cdot R_{sw}^k \cdot (1-R_{sw})^{N_{sw}-k}$$

$$R_{group\ of\ sv} = \sum_{k=M_{sv}}^{N_{sv}} \binom{N_{sv}}{k} \cdot R_{sv}^k \cdot (1-R_{sv})^{N_{sv}-k}$$

$$R_{group\ of\ p} = \sum_{k=M_p}^{N_p} \binom{N_p}{k} \cdot R_p^k \cdot (1-R_p)^{N_p-k}$$

式(3)に示すように、ラックの信頼度は、スイッチから寄与  $R_{group\ of\ sw}$ 、サーバからの寄与  $R_{group\ of\ sv}$ 、PDUからの寄与  $R_{group\ of\ p}$  の積<sup>☆4</sup>で表される。ラックの信頼度に対して、スイッチ、サーバ、PDUのいずれからの寄与が支配的となるか考える。  $m/n$  冗長系において、装置の信頼度が同じで、待機系の台数を1と仮定した場合、  $m/n$  冗長系の信頼度の定義より、現用系の装置数が多いほど信頼度は低くなる。たとえば、1ラックにスイッチ2台、サーバ40台、PDU2台が搭載され、待機系が各1台という構成について考える。スイッチ、サーバ、PDU単体の信頼度を0.99とした場合、スイッチからの寄与  $R_{group\ of\ sw}$ 、サーバからの寄与  $R_{group\ of\ sv}$ 、PDUからの寄与  $R_{group\ of\ p}$  は、以下のよう求められる。

$$R_{group\ of\ sv} = \binom{40}{39} \cdot 0.99^{39} \cdot (1-0.99)^1 + \binom{40}{40} \cdot 0.99^{40} = 0.9392$$

$$R_{group\ of\ sw} = \binom{2}{1} \cdot 0.99^1 \cdot (1-0.99)^1 + \binom{2}{2} \cdot 0.99^2 = 0.9999$$

$$R_{group\ of\ p} = \binom{2}{1} \cdot 0.99^1 \cdot (1-0.99)^1 + \binom{2}{2} \cdot 0.99^2 = 0.9999$$

☆4 スイッチ・サーバ・PDUからの寄与とは、スイッチ群 (スイッチ1 ~  $N_{sw}$ ) の信頼度、サーバ群 (サーバ1 ~  $N_{sv}$ ) の信頼度、PDU群 (PDU1 ~  $N_p$ ) の信頼度を表している。

ラックに搭載されるサーバ数は、スイッチ数、PDU数に比べて多いため、ラックの信頼度は、サーバからの寄与が支配的となる。そのため、以降の議論では、ラックの信頼度を、式(3)においてサーバからの寄与で近似することとし、式(4)を用いる。

$$R_r = R_{group\ of\ sv} = \sum_{k=M_{sv}}^{N_{sv}} \binom{N_{sv}}{k} \cdot R_{sv}^k \cdot (1-R_{sv})^{N_{sv}-k} \quad (4)$$

なお、ラックの信頼度を式(4)のように近似するには、ラック内のサーバ数が、スイッチ数、PDU数と比較して、十分大きいことが条件となる。Hadoop[10]等の大規模分散処理基盤を動作させるクラウド環境は、アプリケーションの性質上、この条件を満たすことが多いと考えられる。また、クラウド環境の構成においては、サーバの高集積化 (例: 1筐体に複数のサーバノードを搭載する高集積サーバを採用する等) の傾向があり、このようなアプリケーションに適した環境は一般化しつつある。さらに、上述の条件を満たすシステム構成のクラウド環境で動作するアプリケーションであれば、同様に近似が可能である。

## 4. サーバ装置の信頼性モデル

第3章においては、クラウド環境の信頼度が、サーバ装置の信頼度により近似的に表現できることを述べた。第4章では、環境Aを構築運用した結果より、サーバ装置の信頼性モデルを提案する。

### 4.1 環境Aの概要

環境Aの概要を図3に示す。環境Aは、1コンテナから構成され ( $N_c=M_c=1$ )、1コンテナには15架のラック

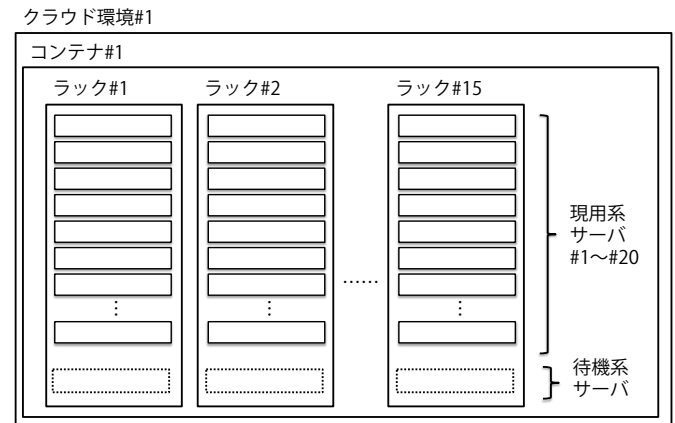


図3 環境Aの概要

を搭載する (Nr=Mr=15)。1ラックへは、現用系サーバ20台、待機系サーバ1台を搭載する (Nr=21, Mr=20)。

### 4.2 サーバ装置の故障実績

環境Aを約1年間運用した結果、相当数のサーバ故障が発生した。表1に故障実績の観測対象を示す。

次に、サーバ信頼度を求める。サーバ信頼度は、2010年12月27日(基準日)時点で使用開始したサーバ(315台)を対象として求める。そのため、表1の故障実績には、この期間に故障が発生して交換したサーバが、再度故障したサーバ(2台)は含んでいない。この補正により、環境Aは修理系だが、以下議論では非修理系として扱うことができる。

表1の故障実績から図示したサーバ信頼度を、図4に示す。

図4において、横軸は基準日からの経過日数、縦軸は、基準日に利用開始したサーバに対する信頼度である。

### 4.3 寿命分布へのあてはめ

本論文では、電子部品の寿命分布で、よく利用されるワイブル分布[8]へのあてはめを試みた。ワイブル分布は、故障率が形状母数 $\alpha$ 、尺度母数 $\beta$ により変化し、信頼度 $R(t)$ が、式(5)で表される分布である。

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha\right] \quad (\alpha > 0, \beta > 0) \quad (5)$$

表1 故障実績の観測対象

システム名	環境 A
期間	2010年12月27日～2011年12月25日
サーバ総数	315台
サーバ仕様	市販 IA サーバ

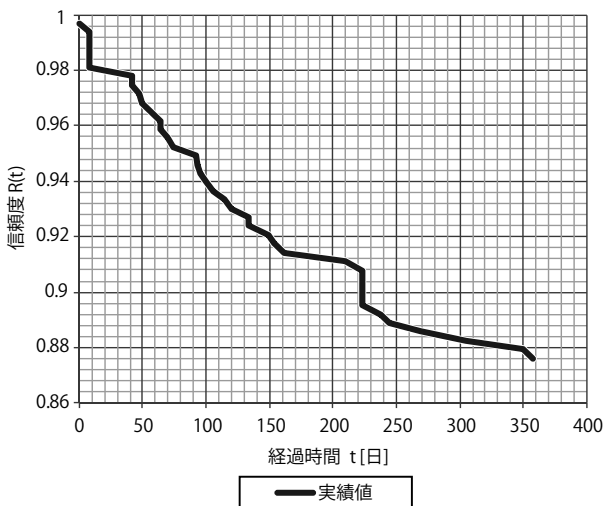


図4 実績値によるサーバ信頼度

次に、 $\alpha$ 、 $\beta$ の値を推定する。ワイブル確率紙上に、表1の故障実績をプロットし、線形回帰分析により、 $\alpha$ 、 $\beta$ の値を算出した[8]。結果は、 $\alpha = 0.6745$ 、 $\beta = 6758$ となった。また、線形回帰分析時のピアソンの積率相関係数(以下、相関係数)は、 $R = 0.9796$ となり、環境Aにおける故障実績は、ワイブル分布によくあてはまった。

図4に対し、推定したパラメータを用い、ワイブル分布の予測値を図示したものを、図5に示す。

### 4.4 サーバ装置の故障率曲線

ワイブル分布の定義より、故障率 $\lambda(t)$ は、式(6)で表される。

$$\lambda(t) = \frac{\alpha t^{\alpha-1}}{\beta^\alpha} \quad (6)$$

式(6)に対し、推定したパラメータを用い、故障率の予測値を図示したものを、図6に示す。

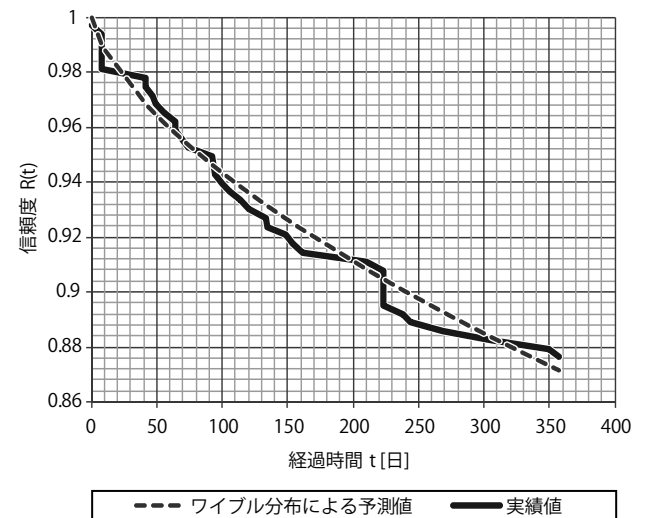


図5 ワイブル分布によるサーバ信頼度と実績値

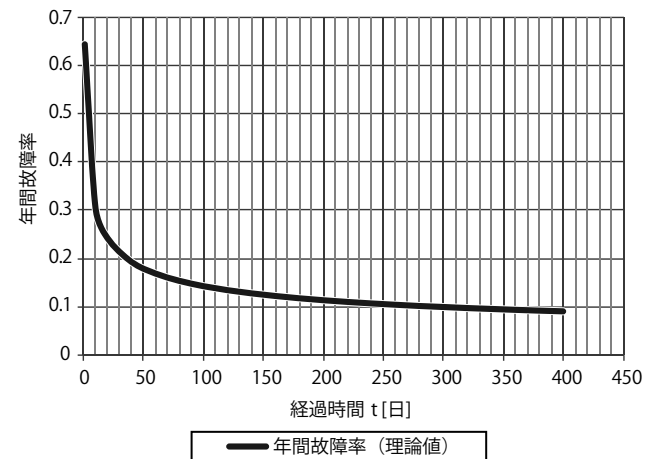


図6 ワイブル分布による故障率曲線

図6より、環境Aの立ち上げ時には、サーバの故障率が、故障率曲線（バスタブ曲線）における初期故障期より偶発故障期へ至る過程で大きく変動していることが分かる。環境A以外のクラウド環境においても、同じ傾向を示すか否かは、サーバ装置の信頼度に依存するため、一概には言えない。実務的には、サーバ装置の信頼性モデルとして、ワイブル分布を仮定した上で、ある一定期間、サーバ装置の故障実績を計測し、環境Aと同様に故障率が安定するかを確認することが必要である。

## 5. 提案手法の適用事例

第3章、第4章において、クラウド環境の信頼性モデル、サーバ装置の信頼性モデルを構築した。第5章では、これらの信頼性モデルを用いて、いかに運用コストの最小化を実現するかについて述べる。環境Aの設計においては、設備コストやラックサイズの制約から、待機系サーバは1台と決められた。そのため、系全体の信頼度は所与となり、要求される信頼度の条件下で、運用コストを最小化する定期保守間隔を決定すればよかった。

また、実際に環境Aの設計時には、以降で述べる設計手法が完全には確立していなかったため、試行錯誤で定期保守間隔を決定した。第5章では、その過程と本来どのように設計すべきであったかを述べ、その差分をプラクティスとしたい。

### 5.1 環境Aでのサーバ故障修理

その準備として、環境Aでのサーバ故障修理について説明する。環境Aは、1ラックへ現用系サーバ20台、待機系サーバ1台を搭載する構成である。すなわち、20/21冗長系である。サーバ故障発生時には、以下の手順で修理する（図7参照）。

- (1) 各ラックに搭載されている待機系サーバ1台も、事前に物理配線を実施

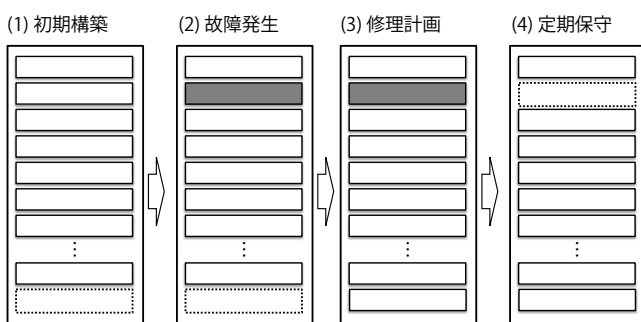


図7 故障発生時の対処策（通常時）

- (2) 現用系サーバに故障発生時には、遠隔より現用系サーバを停止。同時に、遠隔より待機系サーバを起動、各種設定を実施し、現用系サーバとして利用
  - (3) 故障した現用系サーバの修理を計画
  - (4) 次回定期保守時に、故障した現用系サーバを修理、当該サーバを待機系サーバとして利用
- 次に、多重故障について説明する。ここで、(2)故障発生から(4)定期保守までに、同じラック内で故障が発生することが、多重故障である。サーバ多重故障発生時には、以下手順で修理する（図8参照）。
- (3) 故障した現用系サーバの修理を計画
  - (5) 同じラック内で故障（多重故障）が発生時には、当該ラックでの作業停止
  - (6) 多重故障となった現用系サーバの修理を計画
  - (7) 現地へ直行し、故障した現用系サーバを修理。1台を現用系サーバとし、残りを待機系サーバとして利用。当該ラックでの作業再開

多重故障は、現地直行の運用コスト増をもたらす。そのため、運用コスト最小化の実現には、いかに多重故障を発生させないかが重要になる。

### 5.2 環境Aにおける実運用

2010年12月27日から2011年12月25日までの約1年間、環境Aを運用した結果発生したサーバ故障数、修理数、保守回数、多重故障回数の推移を図9に示す。以降では、90日ごとに4分割し、環境Aの運用を概説する。

環境Aは、2010年12月27日より運用を開始した。過去の故障実績より、定期保守間隔は4週間とした。2010年12月27日から2011年3月27日までの90日に4件の多重故障が発生した。この期間で、サーバ16台が故障し、年間故障率に換算すると20.6%となった。なお、2011年3月11日に、東日本大震災が発生し、安定的な電力供給が困難となったため、2011年3月12日より3月28日まで、すべてのサーバを停止させた。

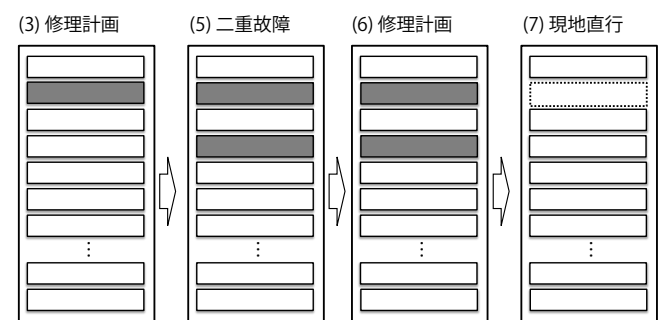


図8 故障発生時の対処策（多重故障発生時）

環境Aは、2011年3月28日より運転を再開した。多重故障が頻発したため、定期保守間隔を2週間に変更した。2011年3月28日から6月26日の90日間に、多重故障は発生しなかった。この期間で、サーバ12台が故障し、年間故障率に換算すると、15.4%となった。

また、2011年6月27日から9月25日の90日間に、多重故障が1件発生した。ただし、計画停電に向けた準備作業中に発見されたため、サーバ利用への直接の影響はなかった。この期間で、サーバ9台が故障し、年間故障率に換算すると、11.6%となった。

さらに、2011年9月26日から12月25日の90日間に、多重故障は発生しなかった。この期間で、サーバ3台が故障に、年間故障率に換算すると、3.9%となった。

### 5.3 環境Aへの提案手法の適用

環境Aにおいて、系全体の信頼度を所与として、運用コストを最小化する定期保守間隔を計算する。

まず、要求される信頼度を定める。環境Aは商用環境ではなく、検証用途の環境であることを考慮し、信頼度0.95(one nine)以上を担保する設計について考える。すなわち、時間経過とともに、環境Aの信頼度が低下していくが、0.95未満となる前に保守ができるように定期保守間隔を調整する。

次に、サーバ装置の信頼性モデルである式(6)より、その時点での年間故障率を計算する。第4章に記載したように、その時点での故障実績より、ワイブル母数 $\alpha$ 、 $\beta$ を推定する。たとえば、360日目までの故障実績より、ワイブル母数を推定すると、 $\alpha = 0.6745$ 、 $\beta = 6758$ となる。式(6)より、年間故障率を計算すると、9.462%となる。

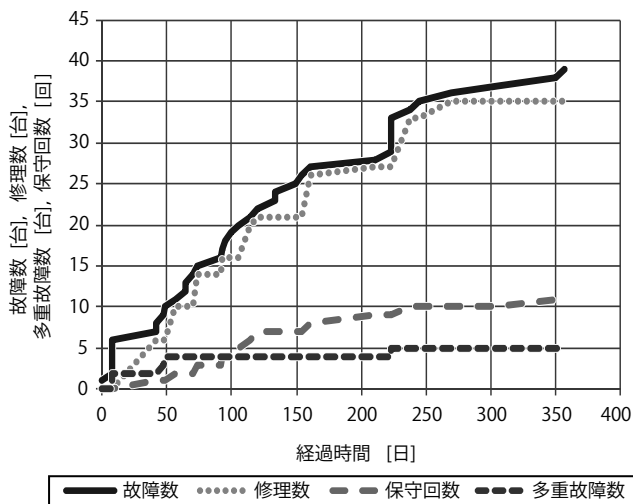


図9 環境Aを運用時のサーバ故障数、修理数、保守回数、多重故障数

運用開始から時間が経過して、故障実績がある程度収集されていれば、上述の手法が利用できる。しかし、運用開始直後では、故障実績が収集できていないため、一般には過去の運用実績を参考する。現実の環境Aの運用でも同様に過去の運用実績を参考にした。しかし、過去の運用実績は、故障率曲線上の偶発故障期の値であることが多いことには注意が必要である。図6に示したように、運用開始直後は、初期故障期にあり、故障率が高めになることを考慮し、故障率を決定する。

最後に、クラウド環境の信頼性モデルである式(1)、式(2)、式(4)を用い、その時点からの時間経過と系全体の信頼度を計算する。環境Aの場合には、ラックはm/n冗長系を構成しておらず ( $M_r=N_r=15$ )、サーバは20/21冗長系を構成している ( $M_{sv}=20$ ,  $N_{sv}=21$ )。また、サーバ信頼度である  $R_{sv}$  は、式(5)により計算し、基準日で信頼度が1となるように補正する。たとえば、360日経過時点での系全体の信頼度と経過時間の関係を図10に示す。

図10において、0.95未満となる前に、定期保守が必要となり、その値を元に定期保守間隔を決めればよい。その後も、一定期間ごとに故障実績を分析し、実態と大きな差が生じているようであれば、定期保守間隔を変更する。

### 5.4 待機系サーバの数量が選択できる環境への提案手法の適用

環境Aにおいては、待機系サーバの数量、すなわち、系全体の信頼度が所与であったため、運用コストの最小化を実現するには、提案手法を適用し、定期保守間隔を決定すればよかった。しかし、設計時に待機系サーバの数量を選択する必要がある場合も考えられる。その場合

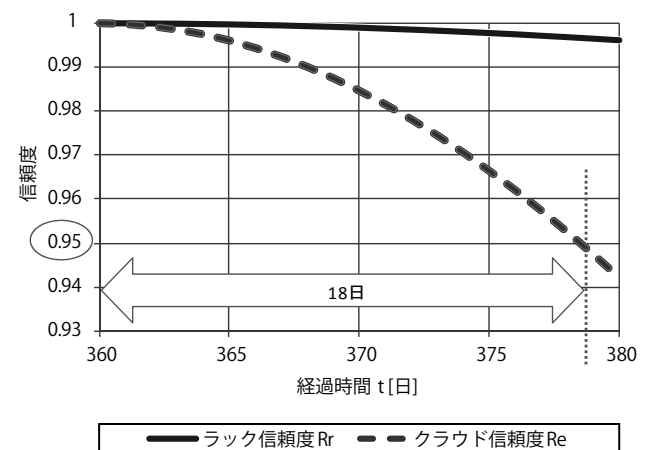


図10 系全体の信頼度と経過時間の関係

には、運用コストの最小化だけではなく、設備コストを含めた全コストを最小化する必要がある。実務的には、待機系サーバの数量の選択肢ごとに、定期保守間隔を見積もり、待機系サーバの数量の増減による設備コストの増減、および、定期保守回数の増減による運用コストの増減を算出する。その結果より、設備コストと運用コストの合計が最小となる選択肢を選定すればよい。

たとえば、環境Aを360日間運用した時点で、環境Aと同じ環境を構築する場合に、待機系サーバ数量を1台から2台に変更すべきかを検討する事例について考える。偶発故障期での定期保守間隔で比較する前提で、故障実績は360日目までの信頼度で算出することを考える。待機系サーバが1台の場合には、図10に示した通り、定期保守間隔を18日に設定することで、信頼度0.95が担保できる。一方、待機系サーバが2台の場合には、サーバ構成が20/22冗長系 ( $M_{sv}=20, N_{sv}=22$ ) となるため、系全体の信頼度と経過時間の関係は図11に示すように変化する。すなわち、待機系サーバが2台の場合には、定期保守間隔を63日に設定することで、信頼度0.95が担保できる。

仮に、新たに構築する環境（環境A'）をN年間利用するとした場合、待機系サーバを1台から2台へ変更することで増加する設備コストを $Ca'$ 円、定期保守間隔を18日から63日に変更することで減少する運用コストを $Oa'$ 円/年と表すと、 $Ca'$ が $Oa' \times N$ より大きい場合には、待機系サーバが1台の設計を採用し、 $Ca'$ が $Oa' \times N$ より小さい場合には、待機系サーバが2台の設計を採用すべきであるという結論が導かれる。

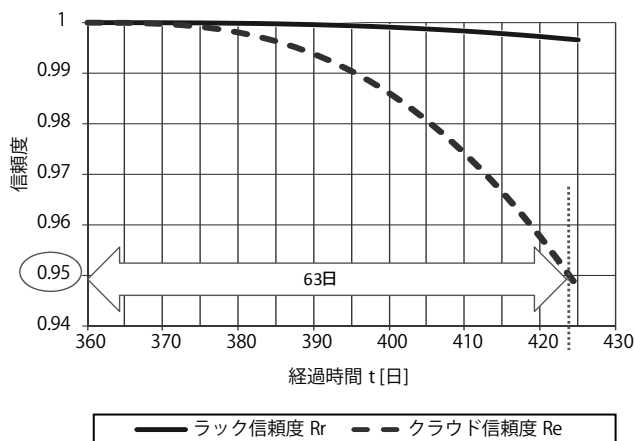


図11 系全体の信頼度と経過時間の関係（20/22冗長系）

## 6. 関連研究

本論文では、クラウド環境の信頼性を数理モデルで表現し、運用コストが最小となるように、系全体の冗長性と定期保守間隔を決定する手法について述べた。同様の手法としては、Microsoft ResearchのVishwanathら[2]があり、コンテナデータセンタの信頼性モデルを数理モデルにより構築している点が、本論文と一致している。しかし、Vishwanathら[2]が、信頼性モデルを構築したのみであるのに対し、本論文は構築した信頼性モデルを実クラウド環境へ適用しうることを示した点が、関連研究との差分である。

また、本論文では、サーバ装置の年間故障率を報告した。サーバ装置の年間故障率を報告した関連研究は発見できなかったが、サーバ故障の2大原因であるHDD (Hard Disk Drive) 故障とメモリ故障に関しては、年間故障率を報告した関連研究は存在した。

まず、HDDの年間故障率に関し、筆者ら[3]はHDDの年間故障率を12.9%と報告している。また、Pinheiroら[4]は、Google社におけるHDDの年間故障率を1.7%～8.6%と報告している。さらに、Schwarzら[5]は、Internet ArchiveプロジェクトにおけるHDDの年間故障率を2%～6%と報告している。

次に、メモリの年間故障率に関し、Schroederら[6]は、Google社において、約2.5年間、5クラスタ（同一のサーバ群）で16種類のDIMMの訂正不可能なエラーの年間発生率を計測した結果として、0.03%～1.09%と報告している。また、筆者が独自に、約1年間、3クラスタで3種類のDIMMの年間故障率を計測したところ、結果は1.583%、0.572%、0.348%であった。

HDD故障とメモリ故障は、サーバ故障の主要な原因であることが知られている。たとえば、文献[9]には、「メモリとディスクの障害は、2007年にGoogle社内のハードウェア修理部門へ送付されたサーバにおいて、2つの最も共通的な原因であったため、我々はこれらに注目する（筆者訳）」との記載がある。筆者のクラウド環境においても、この傾向は同様である。また、HDD故障とメモリ故障は、独立事象であるため、サーバ故障率はHDD故障率とメモリ故障率の和で概ね近似できると考えられる。筆者が報告した実績値以外のHDD故障率とメモリ故障率の最小値と最大値を加えると、1.73%～9.69%となる。この値は、環境Aにおける360日目のサーバ年間故障率である9.462%に整合する。

## 7. まとめ

本論文では、遠隔クラウド環境を構築・運用する際に、機器の故障・障害に対処しつつ、いかに運用コストの最小化を実現するかという課題に取り組んだ。その課題を解決するために、m/n冗長系の信頼性モデルを応用し、クラウド環境の信頼性モデルを構築した。また、環境Aでのサーバ故障実績を分析し、ワイブル分布へのあてはめにより、サーバ装置の故障率が一般的な故障率曲線（バスタブ曲線）を示すことを明らかにした。その結果から、ワイブル分布の故障率を応用し、サーバ装置の信頼性モデルを構築した。さらに、両信頼性モデルを組み合わせ、環境Aへの適用事例を通じ、運用コストの最小化を実現する設計手法を説明した。その過程で、クラウド環境の立ち上げ時には、サーバ装置の故障率が大きく変動することから、本手法の適用においては、定期保守間隔を初期故障期と偶発故障期で使い分けることが有用であることを述べた。

### 参考文献

- Hiwatashi, J. and Iwamura, S.: Method of Handling Hard Disk Drive Failures in Cloud Computing Environment, NTT Technical Review, Vol.10, No.9 (Sep. 2012).
- Vishwanath, K. V., Greenberg, A. and Reed, D. A.: Modular Data Centers: How to Design Them?, LSAP '09 (June 10, 2009).
- 樋渡 仁, 岩村相哲, 新井克也: クラウドコンピューティング環境における HDD 故障率モデルの提案, デジタルプラクティス, 2(3), pp.227-234 (July 2011).
- Pinheiro, E., Weber, W. -D., and Barroso, L. A.: Failure Trends in a Large Disk Drive Population, FAST' 07 (2007).
- Schwarz, T., Baker, M., Bassi, S., Baumgart, B., Flagg, W., van Ingen, C., Joste, K., Manasse, M. and Shah, M. : Disk Failure Investigations at the Internet Archive. In Work-in-Progress Session, NASA/IEEE Conference on Mass Storage Systems and Technologies (MSST2006) (2006).
- Schroeder, B., Pinheiro, E. and Weber, W. -D. : DRAM Errors in the Wild: A Large-Scale Field Study, SIGMETRICS/Performance' 09 (June 15-19, 2009).
- 吉川美奈子, 浜田雅樹, 岩村相哲: クラウドデータセンタの電力モデル化と節電運用, デジタルプラクティス, 4(4), pp.378-385 (Oct. 2013).
- 市川昌弘: 信頼性工学 (機械工学選書), 裳華房, ISBN4-7853-6506-6 (1990).
- Barroso, L. A. and Hölzle, U.: The Datacenter as a Computer: An Introduction to the Design of Warehouse-Scale Machines, SYNTHESIS LECTURES ON COMPUTER ARCHITECTURE # 6, Morgan & Claypool publishers (2009).
- The Apache Software Foundation: Welcome to Apache™ Hadoop®, <http://hadoop.apache.org/> (2014-01-07).

樋渡 仁 (正会員) [j.hiwatashi@east.ntt.co.jp](mailto:j.hiwatashi@east.ntt.co.jp)

東日本電信電話 (株) ビジネス開発本部第三部門担当課長. ホームゲートウェイ, クラウドコンピューティングの研究開発に従事.

吉川美奈子 (正会員) [yoshikawa.minako@lab.ntt.co.jp](mailto:yoshikawa.minako@lab.ntt.co.jp)

日本電信電話 (株) ソフトウェアイノベーションセンタ第一推進プロジェクト研究主任. クラウドオペレーションの研究開発に従事.

岩村相哲 (正会員) [iwamura.sotetsu@lab.ntt.co.jp](mailto:iwamura.sotetsu@lab.ntt.co.jp)

日本電信電話 (株) ソフトウェアイノベーションセンタ分散処理基盤技術プロジェクト主幹研究員. ビッグデータ分析処理基盤の研究に従事.

投稿受付: 2013年10月15日

採録決定: 2014年7月12日

編集担当: 後藤厚宏 (情報セキュリティ大学院大学)