社団法人　電子情報通信学会
THE INSTITUTE OF ELECTRONICS,
INFORMATION AND COMMUNICATION ENGINEERS

信学技報
TECHNICAL REPORT OF IEICE.

生物ネットワークの縮退特性を応用した データセンタの仮想マシン配置における頑強な冗長化手法

添　　亮太† 　長谷川　剛†† 　村田　正幸†††

† 大阪大学基礎工学部情報科学科 〒 560-8531 大阪府豊中市待兼山町 1-3
†† 大阪大学サイバーメディアセンター 〒 560-0043 大阪府豊中市待兼山町 1-32
††† 大阪大学情報科学研究科 〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-5
E-mail: †r-soe@ics.es.osaka-u.ac.jp, ††hasegawa@cmc.osaka-u.ac.jp, †††murata@ist.osaka-u.ac.jp

あらまし　本報告においては，生物ネットワークのトポロジに見られる特徴である縮退特性を応用した，データセンタの仮想マシン配置における頑強かつな冗長化手法を提案する．提案手法は，従来のデータセンタに見られる 1 対 1 や 1 対多の冗長化ではなく，データセンタ全体として必要な冗長資源を保持する多対多の冗長化を実現する．具体的には，縮退特性をもつ生物ネットワークに見られる，ネットワーク化バッファリングと呼ばれる性質を利用し，多対多の冗長化を少ない予備機器によって実現する．ネットワーク化バッファリングを用いることで，ロバスト性を保持しつつ，予備機器を削減できるため，提案手法はデータセンタの低消費電力化にもつながる．また，提案手法をシミュレーションによって評価し，従来の単純な手法に比べて，少ない追加資源で高い頑強性を持つことを示す．
キーワード　データセンタ，仮想マシン配置，生物ネットワーク，縮退特性，頑強性，消費電力低減

Robust virtual machine deployment method for datacenter inspired by degeneracy in biological networks

Ryota SOE†, Go HASEGAWA††, and Masayuki MURATA†††

† School of Engineering Science, Osaka University, 1-3 Machikaneyama, Toyonaka, Osaka, 560-8531, Japan
†† Cybermedia Center, Osaka University, 1-32 Machikaneyama, Toyonaka, Osaka, 560-0043, Japan
††† Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University, 1-5 Yamadaoka, Suita, Osaka, 565-0871, Japan
E-mail: †r-soe@ics.es.osaka-u.ac.jp, ††hasegawa@cmc.osaka-u.ac.jp, †††murata@ist.osaka-u.ac.jp

Abstract　In this report, we propose a virtual machine deployment method for datacenter inspired by degeneracy found in biological networks. The main idea is to exploit the concept of networked buffering observed in biological networks, , providing many-to-many redundancy with small amount of additional resources, unlike the one-to-one or one-to-many redundancy. We evaluate the fundamental characteristics of the proposed method by computer simulation, and show that the proposed virtual machine deployment method can largely improve the recovery performance from large-scale failures and reduce additional resources compared with existing methods.
Key words　datacenter, virtual machine deployment, biological network, degeneracy, robustness, energy-efficiency

1. はじめに

近年，クラウドコンピューティングやウェブアプリケーションなどの，ネットワークを介して提供されるサービスが大規模化かつ多様化し，データセンタ内で処理されるデータ量が増加の一途をたどっている [1]．データ量の増加に伴い，データセンタ内のサーバ数も急速に増加しており，大規模なデータセンタにおいては，数十万から百万台のサーバが収容されるようになってきている．サーバ数が増大することで，サーバそのものの消費電力だけでなく，ネットワーク機器，及び空調機器の消費電力も増加するため，データセンタ全体の消費電力の増大が深刻な問題となっている．従って，データセンタの低消費電力化は，早急に取り組まなければならない課題であり，様々なアプローチでデータセンタの低消費電力化を実現する研究がなされている [2,3]．

一方で，近年のクラウドサービスやウェブアプリケーションには，高いサービスの品質が求められている．つまり，データセンタは，障害や環境変動，システムの再構成などの変動に対して，高い信頼性及び頑強性を要求されている．一般的に，データセンタの信頼性や頑強性を向上させるには，予備系機器の配置が不可欠となる．このとき，予備系機器の増加は信頼性及び頑強性の向上につながるが，同時に消費電力の増大にもつ

ながる．そのため，データセンタの信頼性及び頑強性を維持しつつ，消費電力の低減を図ることが求められる．本報告においては，データセンタにおけるサーバへの仮想マシンの配置に着目し，信頼性や頑強性を損なうことなく，データセンタの低消費電力化を実現するような，主系及び予備系のサーバ群に対する仮想マシン配置問題を取り扱う．

データセンタにおける，仮想マシン配置問題についての多くの既存研究が存在し，データセンタの低消費電力化のための仮想マシン配置に関する研究も盛んに行われている [4,5]．しかし，これらの研究は，低消費電力化のみに着目しており，データセンタの頑強性については考慮されていない．また，ネットワーク負荷を考慮に入れた低消費電力化の研究も行われているが [6]，スループットなどのネットワークの指標を用いて，データセンタのサービス品質を評価しているため，データセンタに大規模な障害が発生した際に，高品質のサービスが保証されるものではない．

一般に，システムの冗長化を図るには，1 つの構成要素に対して専用の予備機器を用意する 1 対 1 の冗長化を行うことが考えられるが，実現のコストが高いため，特に大規模なデータセンタには向かない．一方，複数の構成要素が 1 つの予備機器を共有することでコストは下がるが，共有関係の構築方法によっては，信頼性が下がる可能性がある．1 つの予備機器を共有する冗長化手法を用いて，システムの構成機器の故障だけでなく，環境変動や，システムの再構成に対しても，システムの頑強性を維持しつつ，消費電力低減を達成する手法は確立されていない．

ところで，遺伝子ネットワークや神経回路ネットワークなどの生物ネットワークの解析が近年進んでいる．この分野では，遺伝子ネットワークにおいて各遺伝子が，ある環境では異なる機能や出力を行うが，異なる環境では等しい，あるいは非常に似た出力を行う，縮退特性という性質が注目されている．近年，この性質が生物ネットワークの頑強性，環境変動への耐性，環境適応性，持続的成長性などを説明するものとして説明されている [7]．

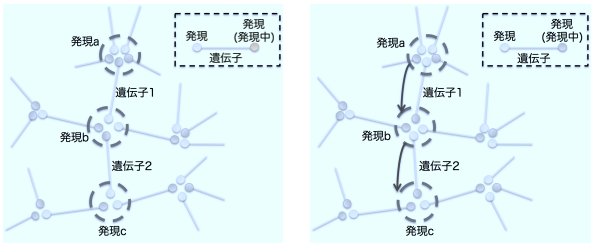
その一例として，[8] において，ネットワーク化バッファリングと呼ばれる性質が着目されている．ネットワーク化バッファリングとは，縮退性をもつ遺伝子で構成されるネットワークにおいて，ある発現パターンでは定められたタンパク質を発現できない状態が発生した際に，そのタンパク質の発現とは関係のない遺伝子の発現パターンがネットワークを介して連鎖的に変化することで，結果として求めてられていたタンパク質を発現できるという性質のことである．このような性質により，遺伝子ネットワークなどの生物ネットワークは，高い頑強性や効率のよい冗長性を保有していると考えられている．これは，ある同じ機能を果たす機器を複数台用意することにより冗長構成を行い，頑強性を高めている従来のデータセンタやその他の情報システムでは考えられていないものである．

そこで，本報告においては，上記のような，古来様々な環境変動や障害に対して耐えてきた生物の仕組みからヒントを得ることによって，データセンタにおける仮想マシン配置の問題を解決する．つまり，生物ネットワークのトポロジに見られる特徴である縮退特性を応用した，データセンタの仮想マシン配置における頑強かつ低消費電力な冗長化手法を提案する．提案手法は，従来のデータセンタに見られる 1 対 1 や 1 対多の冗長化ではなく，データセンタ全体として必要な冗長資源を保持する多対多の冗長化を実現する．具体的には，縮退特性をもつ生物ネットワークに見られる，ネットワーク化バッファリングと呼ばれる性質を利用し，多対多の冗長化を少ない予備機器によって実現する．ネットワーク化バッファリングを用いることで，ロバスト性を保持しつつ，予備機器を削減できるため，提案手法はデータセンタの低消費電力化にもつながる．また，提案手法をシミュレーションによって評価し，従来の単純な手法に比べて，少ない追加資源で高い頑強性を持つことを示す．

2. 生物ネットワークの縮退特性とデータセンタへの応用

2.1 縮 退 特 性

生物分野における縮退特性とは，システムの構成要素の提供する資源や機能が部分的に重複しており，その各構成要素が，ある環境では異なる資源や機能を提供するが，別の環境においては等しい，あるいは非常に近い資源や機能を提供する性質のことであり，生物システムの至る所でみられる性質である [9]．例えば，出芽酵母のアドヘシンにみられる特徴として，初期段階では単一の機能しか提供できないのだが，発現レベルが上がると，別の機能を提供していたアドヘシンどうしが互いの機能を提供できるようになり，ここに縮退特性が見られる [10]．その他にも，生物システムにおいて，縮退特性が観察されることが知られている．



(a) 遺伝子ネットワークモデル　(b) 発現パターンの連鎖的な変化による不足の解消

図 1　ネットワーク化バッファリングの概念図

2.2 ネットワーク化バッファリング

[8] で示されている，縮退特性がもたらす特性の一つであるネットワーク化バッファリングとは，複数の遺伝子の発現パターンが部分的に重複し，ネットワーク全体として冗長資源を保持しているということを表している．これにより，ある発現パターンによる形質発現が不足した際に，その発現に直接的に対応した遺伝子が不足していたとしても，その発現とは直接は関係のない遺伝子を含めた複数の遺伝子の発現パターンが適応的に変化することによって，結果として必要な発現パターンを確保することができる．この性質は，遺伝子ネットワークなどの生物ネットワークシステムが強い頑強性や環境変動への耐性を保有している 1 つの根拠とされている．

遺伝子とその発現パターンの関係を表したネットワークモデルを図 1(a) に示す．図においては，1 本の線分が 1 つの遺伝子を表し，両端が，その遺伝子における可能な発現パターンを表している．この例では，各遺伝子が 2 種類の発現パターンを持つものとしている．また，点線の円で囲まれた部分はある 1 つの発現パターンを表す．その中に複数の遺伝子の発現パターンが存在することは、 複数の遺伝子の発現パターンが重複していることを意味している．このネットワークの特徴として，各遺伝子の発現パターンは完全に重複しているのではなく，部分的に重複し，その重複関係がネットワークを構築していることが挙げられる．

図 1(a) において，発現 a-c がそれぞれ 2 つ以上の遺伝子によって発現されていることを求められている場合を考える．図 1(a) の状態においては，発現 c が不足している．このとき，遺伝子 2 の発現を b から c に変化させると，発現 b が不足する．このように，発現に直接関わる遺伝子の発現パターンを変化させるだけでは環境変動に対応できない場合がある．しかし，図 1(a) のような発現パターンが重複しているネットワークにおいては，ネットワークを介して適応的に発現パターンを変更することにより，不足を解消できることがある．この例においては，遺伝子 1 の発現パターンが b に変化し，遺伝子 2 の発現パターンが c に変化することで，不足が解消される．その様子を図 1(b) に示す．

このようにして，部分的に重複するネットワークを構成することで様々な環境変動による発現の不足に対して柔軟に対応することができるようになる．この性質が，生物ネットワークの頑強性，環境変動への耐性，環境適応性，持続的成長性の 1 つの根拠として説明されている．

2.3 データセンタにおける仮想マシン配置への適用

遺伝子ネットワークにみられるネットワーク化バッファリングの性質を，データセンタの仮想マシン配置における冗長構成へ適用できると考えられる．すなわち，限られた複数の仮想マシンを実行できる物理マシンを用意し，それらの実行できる仮想マシンを部分的に重複させることによって，ネットワークを構築し，データセンタに環境変動や障害が発生した場合に，ネットワーク内の複数の物理マシンの仮想マシンの実行を適応的に切り替えることによって，仮想マシンの実行不足を解消することができる．

従来のデータセンタにおいて，これまで考えられてきた冗長化手法においては，1 つの物理サーバに対して専用の冗長資源を確保する 1 対 1 の冗長化手法や，高性能な物理サーバを導入し，必要とされるすべての仮想マシンを実行可能な冗長資源を用意するという手法が取られてきた．しかし，前者の手法では，

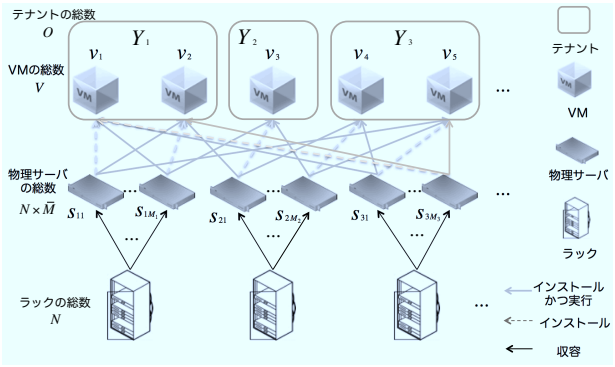


図 2　データセンタモデル

個々の冗長資源は固定的な機能を提供すればよいが，故障や環境変動をあらかじめ予測して，それに応じた冗長資源を用意しなければならないため，想定していないような故障や環境変動が発生すると，冗長資源の過不足が発生する．また，後者の手法では，高い性能を持つ物理サーバを多数必要とするため，実現のコストが大きくなる．

それに対し，ネットワーク化バッファリングに基づく冗長化手法は，各冗長資源は限られた数の仮想マシンを実行できればよく，ある仮想マシンの実行が不足した際には，ネットワークを介して各物理サーバの実行する仮想マシンを適応的に切り替えることによって，実行不足を解消できるため，従来の冗長化手法に見られる欠点を克服できると考えられる．

3. データセンタモデルと障害発生モデル

本章では，本報告における提案手法の性能評価のために用いるデータセンタモデルと，想定する障害発生に関するモデルの説明を行う．

3.1 データセンタモデル

本報告で用いるデータセンタのモデルを以下のように定義する．物理サーバはラックに収容されており，ネットワークスイッチに接続されている．一般的にデータセンタにおけるネットワークスイッチの配置方法には EoR (End of Row) と ToR (Top of Rack) の 2 種類があるが，本報告では ToR を用いる．つまり，各ラック中のすべての物理サーバはそのラックに設置された 1 台の ToR スイッチに接続されている．物理サーバはストレージを持っており，物理サーバ上で動作する仮想マシン (VM) を複数インストールできる．また，物理サーバはマルチコア CPU を持つものとし，同時に実行可能な VM の上限は物理サーバの CPU コア数に等しいとする．

データセンタを用いて VM を実行するテナント構成として，マルチテナント型データセンタを想定する．マルチテナント型データセンタとは，複数の異なるテナントが同一のデータセンタ環境を共同で利用するものである．ここでは，テナントを VM の部分集合であると定義し，テナントは，自身に含まれるそれぞれの VM について必要とする実行数だけ実行することを物理サーバに要求する．物理サーバはテナントからの要求に従って，どの VM をインストールするか，かつ，そのうちのどの VM を実行するかを決定する．そのとき，データセンタ全体で，テナントが要求している実行数を満たすように VM を実行する．マルチテナント型データセンタにおける，ラックへのサーバ収容，およびサーバの VM のインストールと実行の関係を図 2 に示す．図中において，サーバから VM への点線の矢印はサーバが VM をインストールしているが実行はしていない状態を示し，サーバから VM への実線の矢印はサーバが VM をインストールしていてかつ実行もしている状態を示している，またラックからサーバへの矢印はラックがサーバを収容している状態を示している．

データセンタモデルにおける変数定義は以下のとおりである．ラックの総数を N とし，i 番目のラックを r_i とする．ラック r_i に収容されたサーバ数を M_i とし，そのうち j 番目のサーバを s_{ij} とする．サーバの集合を $Z = \{s_{11}, s_{12}, \cdots, s_{1M_1}, s_{21}, \cdots, s_{NM_N}\}$ とする．また，VM の総数を V とし，その集合を $Y = \{v_1, v_2, \cdots, v_V\}$ とする．テナントの総数を O とし，k 番目のテナントがもつ VM の集合を $Y_k \subseteqq Y$ とする．ただし，$(\forall i, \forall j\ Y_i \cap Y_j = \phi)$ かつ $(Y_1 \cup Y_2 \cup \cdots \cup Y_O = Y)$ とする．また，物理サーバ s_{ij} の CPU コア数は C_{ij}，インストールできる VM の数を I_{ij} と定義する．

サーバ s_{ij} が VM v_k をインストールしているかどうかを表す変数を δ_{ijk} とし，以下のように定義する．

$$\delta_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{サーバ } s_{ij} \text{ が VM } v_k \text{ をインストールしている} \\ 0 & \text{サーバ } s_{ij} \text{ が VM } v_k \text{ をインストールしていない} \end{cases}$$

同様に，サーバ s_{ij} が VM v_k を実行しているかどうかを表す変数を γ_{ijk} とし，以下のように定義する．

$$\gamma_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{サーバ } s_{ij} \text{ が VM } v_k \text{ を実行している} \\ 0 & \text{サーバ } s_{ij} \text{ が VM } v_k \text{ を実行していない} \end{cases}$$

インストールできる VM の数，及び同時に実行可能な VM 数に関する制約は以下のようになる．

$$\forall i, \forall j \quad \left(\left(\sum_{k=1}^{V} \delta_{ijk} \leqq I_{ij} \right) \wedge \left(\sum_{k=1}^{V} \gamma_{ijk} \leqq C_{ij} \right) \right)$$

ある環境において，VM v_k を実行している物理サーバの台数を T_k^P とすると，T_k^P は以下の式により求められる．

$$T_k^P = \sum_{s_{ij} \in Z} \gamma_{ijk}$$

また，VM v_k が必要とされる実行数を T_k^E とすると，VM v_k における不足数 θ_k は，

$$\theta_k = \begin{cases} 0 & T_k^P > T_k^E \\ T_k^E - T_k^P & else \end{cases}$$

となる．これより，すべての VM の実行数の不足状況を示す指標 F，及び，テナント Y_i ごとの VM の実行数の不足状況を示す指標 F_i をそれぞれ

$$F(T^P) = \sum_{v_k \in Y} \theta_k, \quad F_i(T^P) = \sum_{v_k \in Y_i} \theta_k$$

と定義する．

3.2 データセンタにおける障害発生モデル

すべての VM の実行数の不足状況を示す指標 F について，$F = 0$ のとき，データセンタ全体が健全であると定義する．また，テナント Y_i についても同様に，$F_i = 0$ のとき，そのテナントは健全であると定義する．データセンタにおける障害とは，データセンタ全体として健全な状態が保てなくなることを意味している．具体的には，データセンタで発生する障害として，サーバ障害とラック障害の 2 種類を想定する．サーバ障害とは，ディスクや CPU などのサーバの構成物の故障を想定している．一方，ラック障害とは，ToR スイッチの故障により，ラックに収容されているすべての物理サーバのネットワークへの接続が切断される障害を想定している．5. 章における性能評価においては，サーバ障害を想定する場合には，指定した台数のランダムに選択した物理サーバを停止させる．その結果，停止した物理サーバが実行している VM は停止する．一方，ラック障害を想定を想定する場合には，指定した数のランダムに選択したラックを停止させる．物理サーバが接続されているラックが停止した場合には，その物理サーバが実行している VM は停止する．VM の実行が停止した結果，必要とされている実行数を満たしていない VM があれば，その VM が所属するテナントの健全性が保てなくなってしまう．また，障害の度合いを評価する指標として，全テナント数のうち健全なテナント数の割合を F_{num}，各テナント中の VM のうち必要実行数を満たしている VM の割合の最小値を F_{min} と定義する．前者の指標は，障害の影響がなかったテナントの規模を，後者は，テナント間の公平性を表すものである．

3.3 障害からの回復

3.2 節で示した障害発生の結果，テナントが持つ VM の実

行数が不足すると，データセンタは稼働していない物理サーバや CPU コアなどの冗長資源を利用して，VM の実行不足を解消する．その際，物理サーバが事前にインストールしていない VM を起動するには，VM の物理サーバ間の移動を必要とするため，起動までの時間として，VM のデータ容量や移動元と移動先の物理サーバ間の距離などによって変動するが，数十秒から数百秒を必要とする [11]．そのため，ここでは，障害からの回復を迅速に行うため，物理サーバは事前にインストールした VM のみを実行するものとする．従って，障害に対する頑強性を高めるには，事前にどの VM をどの物理サーバへインストールするかが重要になる．本報告では，2. 章に示した，生物ネットワークの縮退特性を応用した手法を提案する．

4. 提 案 手 法

本章では，生物ネットワークの縮退特性を応用した仮想マシン配置手法，および，障害からの回復手法について説明する．

4.1 仮想マシン配置手法

ここでは，物理サーバへの VM の配置手法についての詳しい説明を行う．各手法を表す図においては，ラック数 N は 2，ラックに収容できるサーバ数 M は 4，各サーバの VM のインストール可能上限数 I_{ij} は 2 としている．

既存手法 1 (Existing Method 1)

既存の冗長化手法として，同じ種類の VM をインストールした物理サーバを複数台用意することで頑強性を高めるものがある．例えば，各 VM をそれぞれ 1 つのラックに割り当て，そのラック中の複数のサーバへインストールするという手法が考えられる．この手法を既存手法 1 とし，これを実現する具体的な手順を以下に示す．まず，VM を $v_1, v_2, \cdots, v_V$ と並べる．並べた VM をラック数である N で等分し，VM のグループ分けを行う．ラックも同様に $r_1, r_2, \cdots, r_N$ と並べ，順番に VM のグループを割り当てる．そして各 VM を，所属するグループの VM の番号が低い順に，割り当てられたラックに収容されているサーバを 1 つランダムに選択し，そのサーバへインストールしていく．グループ内のすべての VM をインストールし終えたら，グループ内の最初の番号の VM から同様にインストールしていく．これを，ラックに収容されているすべてのサーバのインストール上限数に達するまで繰り返す．こうすることで，グループ内の VM のインストール数を均一にすることができる．

既存手法 2 (Existing Method 2)

既存手法 1 では，ラック障害の影響を考慮してない．そのため，ラック障害の際には，そのラックに割り当てられている VM を実行できる物理サーバが他に存在せず，障害からの回復が不可能となる．そこで既存手法 2 では，ラックごとに VM を割り当てるのではなく，異なるラックに収容されたサーバでグループを構成し，そのグループに対して VM を割り当てる．具体的な手順を以下に示す．まず，VM を $v_1, v_2, \cdots, v_V$ と並べる．並べた VM を，ラックに収容できるサーバ数の最小値である M_{min} で等分し，VM のグループ分けを行う．次に，物理サーバを $s_{11}, s_{12}, \cdots, s_{1M_1}, s_{21}, \cdots, s_{NM_N}$ とならべ，s_{11} は VM の 1 番目のグループへ，s_{12} は VM の 2 番目のグループへ，というように，順に VM のグループへ割り当てていく．VM の最後のグループまで割り当てたら，最初のグループに戻り，続けて物理サーバを割り当てていく．これをすべての物理サーバに関して行う．物理サーバをグループへ割り当てたら，各 VM を，所属するグループの VM の番号が低い順に，割り当てられたサーバのグループのうち 1 つランダムに選択し，そのサーバへインストールしていく．VM のグループ内のすべての VM をインストールし終えたら，VM のグループ内の最初の番号の VM から同様にインストールしていく．これを，割り当てられたすべてのサーバのインストール上限数に達するまで繰り返す．

規則的部分重複手法 1 (Regular Degenerate Method 1)

部分的重複関係を構築する手段として，各物理サーバがインストールする VM を，規則的にずらす方法が考えられる．具体的な手順を以下に示す．まず，物理サーバを $s_{11}, s_{12}, \cdots, s_{1M_1}, s_{21}, \cdots, s_{NM_N}$ と並べ，VM を $v_1, v_2, \cdots, v_V$ と並べる．続いて，各物理サーバに対して用意した VM を物理サーバへ並べた順にインストールしていく．その際，s_{11} に関しては v_1 から並べた順に I_{11} 個，s_{12} に関しては $v_{1+I_{11}/2}$ から並べた順に I_{12} 個というように，$I_{ij}/2$ だけずらして，インストール可能上限数だけ VM を用意する．このようにして用意した VM を各物理サーバへインストールしていく．こうすることで，規則的に部分重複関係を構築することができる．

規則的部分重複手法 2 (Regular Degenerate Method 2)

規則的部分重複手法 1 では，物理サーバのラックへの収容状況を考慮していないため，1 つのラック中に収容されている各物理サーバがインストールしている VM に偏りが生じる．そのため，ラック障害が発生すると，特定の VM をインストールしている物理サーバが少なくなり，障害からの回復が行えない場合が発生する．そこで，規則的部分重複手法 2 では，重複関係を異なるラックに収容された物理サーバ間で構築する事により，上記の問題を解決する．具体的な手順を以下に示す．まず，物理サーバを $s_{11}, s_{21}, \cdots, s_{N1}, s_{12}, \cdots, s_{NM_N}$ と並べ，VM を $v_1, v_2, \cdots, v_V$ と並べる．規則的部分重複手法 1 と同様に各物理サーバに対して VM を用意し，それらの VM を物理サーバへインストールしていく．こうすることで，部分的な重複関係をラック内で構築するのではなく，他のラックと構築できるため，ラックの収容を考慮できていると考えられる．

無作為部分重複手法 1 (Random Degenerate Method 1)

部分的重複関係を構築する手段として，VM をランダムに選択したサーバへインストールする方法が考えられる．具体的な手順を以下に示す．VM を $v_1, v_2, \cdots, v_V$ の順に，物理サーバ s_{11} へインストールしていく．物理サーバ s_{11} のインストール可能数の上限に達すると，$s_{12}, \cdots, s_{1M_1}, s_{21}, \cdots, s_{NM_N}$ の順で，続けて VM をインストールしていく．v_V までインストールが終わったら，再び v_1 からインストールを再開する．これを，物理サーバ s_{NM_N} のインストール可能数の上限に達するまで繰り返す．そののち，2 つの物理サーバをランダムに選択し，それぞれの物理サーバがインストールしている VM を 1 つランダムに選択し，それらを交換する．これを十分に大きな回数だけ繰り返す．こうすることで，各 VM のインストール数が均一であり，かつ VM をランダムなサーバにインストールすることができる．

無作為部分重複手法 2 (Random Degenerate Method 2)

無作為部分重複手法 2 では，無作為部分重複手法 1 が考慮していない，物理サーバのラックへの収容状況を考慮する．すなわち，ラックに収容されている物理サーバがインストールしている VM にばらつきがでないように，かつ，ランダムに VM をインストールする．具体的な手順を以下に示す．まず，VM を $v_1, v_2, \cdots, v_V$ と並べる．そして，VM が並べた順に，ラック r_1 に収容されているサーバをランダムに 1 つ選択し，その VM を選択したサーバへインストールする．v_V までインストールしたら，v_1 にもどり，同様にしてサーバへインストールしていく．これをラック r_1 に収容されているすべてのサーバのインストール可能上限数に達するまで繰り返す．ラック r_1 へのインストールが終わると，続いて $r_2, \cdots, r_N$ の順に同様にしてインストールしていく．こうすることで，ラック内により多くの VM をインストールすることができ，かつ VM をランダムなサーバにインストールすることができる．

4.2 環境変動や障害発生後の VM 実行切り替えアルゴリズム

本節では，環境変動や障害発生によって生じる VM の実行不足を解消するための VM 実行切り替えアルゴリズムの説明を行う．このアルゴリズムにおいては，3.2 節に示した障害の規模を示す指標である F_{num}，または F_{min} を用いる．前者はより多くのテナントを復旧したい場合に，後者はテナント間での公平性を保ちたい場合に用いる．また，各指標の理想値を，前者の指標においては，全テナント数と等しい値，後者の指標においては，1 であると定義する．

具体的なアルゴリズムを以下に示す．

（1） 現在の指標 F を評価し，F_{before} とする．F_{before} が理想値と等しい時，不足はないとして，アルゴリズムを終了する．

（2） 実行数が不足している VM の集合である Y^s を求める．

$$Y^s = \left\{ v_k \mid v_k \in Y,\, \theta_k > 0 \right\}$$

$Y^s = \phi$ の場合，実行数が不足していて，かつ不足の解消ができる可能性のある VM は存在しないということになる．この時，不足の解消が不可能であり，かつ指標の値は現在の実行状況で一番良い値となると判断し，不足解消のアルゴリズムを終了する．

（3） Y^s からランダムに選んだ VM v_k をインストールしていて，かつ現在実行をしていない物理サーバの集合を Z_k^p とし，この集合を求める．

$$Z_k^p = \left\{ s_{ij} \mid s_{ij} \in Z,\, \exists v_k \in Y_s \left(\delta_{ijk} = 1 \wedge \gamma_{ijk} = 0 \right) \right\}$$

$Z_k^p = \phi$ のとき，v_k の実行数を T_k^E と等しくすることは不可能となる．よって，v_k を Y^s から除外し，2. に戻る．

（4） Z_k^p から余剰コアの最も多い物理サーバを選択する．複

表 1　パラメータ設定

想定するデータセンタの規模	小規模		中規模	
データセンタの環境	均一	不均一	均一	不均一
ラック数 (N)	8		12	
ラックに収容する物理サーバ数 (M)	8	6-10	30	20-40
テナント数 (O)	6		36	
物理サーバの CPU コア数 (C_{ij})	4	2,4,6	4	2,4,6
インストールできる VM の数 (I_{ij})	8	4,8,12	8	4,8,12
各 VM の必要稼働数 ($\forall k\, T_k^E$)	2			

数ある場合には，その中からランダムに選択する．その物理サーバ s_{ij} に余剰コアが存在する場合．つまり $\sum_{v_k \in Y} \gamma_{ijk} < C_{ij}$ のとき，6. に進む．そうでなければ，物理サーバ s_{ij} がインストールしていて，かつ現在実行している VM の集合 Y_{ij}^p を求める．

$$Y_{ij}^p = \left\{ v_k \mid v_k \in Y,\, \delta_{ijk} = 1 \wedge \gamma_{ijk} = 1 \right\}$$

（5） Y^p からランダムに選択した VM v_l の実行を中止する．

$$\gamma_{ijl} = 0$$

（6） 現在不足している VM v_k を実行する．

$$\gamma_{ijk} = 1$$

（7） この状態で指標 F を評価し，F_{after} とする．F_{after} が理想値と等しい場合，不足が解消されたということになり，アルゴリズムを終了する．F_{after} の値が，それまでの一番良い値である F_{temp} よりも大きい場合 ($F_{after} > F_{temp}$)，F_{temp} に F_{after} を代入する．また，変更前の不足状況の指標 F_{before} に F_{after} の値を代入する．

（8） 2. に戻る．また，2.-7. を繰り返し実行が一定回数 t を超えると，指標の値は現在の実行状況で一番良い値となると判断し，不足解消のアルゴリズムを終了する．

5. 性 能 評 価

本章では，4.1 節において提案した仮想マシン配置手法の性能評価を行う．具体的には，提案手法に基づいて仮想マシンの配置を行ったデータセンタに対して，3.2 節に示した障害が発生した際の，障害回復能力の評価を行う．また，データセンタ資源の冗長度がデータセンタの障害回復能力に与える影響についても評価する．ここで，本章におけるデータセンタ資源の冗長度とは，データセンタを利用するすべてのテナントの VM を健全に稼働させるために最低限必要な物理サーバ数に対する，余剰な物理サーバの割合を意味する．

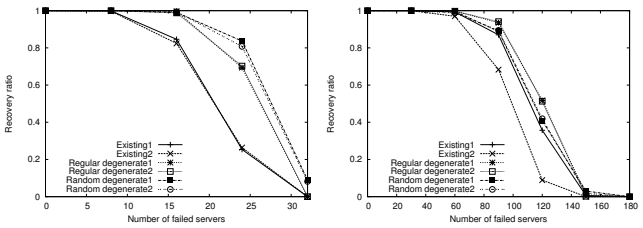
5.1 評 価 環 境

3. 章に示したデータセンタモデルを用いて，提案手法の評価を行う．物理サーバ s_{ij} には，4.1 節において提案した冗長化手法に基づき，I_{ij} 個の VM がインストールされる．そのうち，C_{ij} 個を上限に，各テナントが要求する VM の実行数を満たすように，VM を実行する．次に，3.2 節に示したようなデータセンタの障害発生を想定し，指定した台数の物理サーバ，またはラックを停止させる．ラックが停止すると，そのラックに収容されているすべての物理サーバの動作が停止する．障害発生後，データセンタ全体が健全な状態でなければ，4.2 節に示した障害への対応を行い，復旧を試みる．

以降では，各ラックに収容される物理サーバ数と，各サーバの CPU コア数がそれぞれ均一である環境と，それらがランダムに決定される不均一な環境のそれぞれに対して，2 種類のデータセンタ規模を想定して評価を行う．なお，物理サーバ s_{ij} がインストールできる VM の数 I_{ij} は，CPU コア数 C_{ij} の 2 倍であるとしている．均一，及び，不均一な環境における 2 種類のデータセンタ規模のパラメータ設定を表 1 に示す．性能評価指標には障害回復割合を用いる．これは各パラメータにおいて 1,000 回のシミュレーションを行い，4.2 節に示した VM の実行切り替えにより，データセンタ全体が健全な状態に回復した割合を示す．

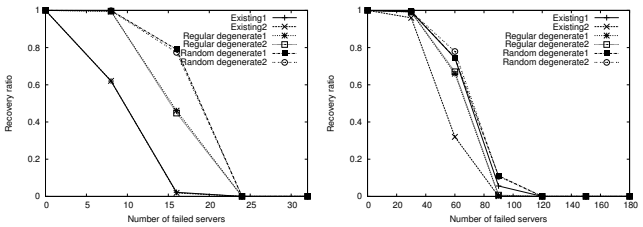
5.2 均一な環境における提案手法の評価

まず，VM 実行切り替えアルゴリズムに用いる指標が障害回復割合に与える影響を調べた．その結果，データセンタ全体の障害回復割合は，指標によってほぼ変化しないことがわかり，以降の評価においては，アルゴリズムが用いる指標として，F_{min} を用いる．



(a) 小規模データセンタを想定した環境の場合　(b) 中規模データセンタを想定した環境の場合

図 3　均一な環境における物理サーバの故障台数と障害回復割合の関係



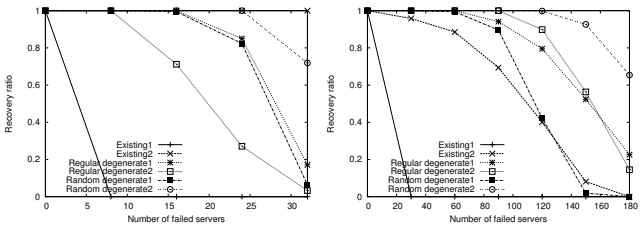
(a) 小規模データセンタを想定した環境の場合　(b) 中規模データセンタを想定した環境の場合

図 4　均一な環境における冗長度 50%とした場合のサーバ故障数と障害回復割合の関係

図 3 に，均一な小規模及び中規模データセンタを想定した環境における，サーバ障害が発生した場合の，サーバの故障台数と障害回復割合の関係を示す．ここでは，冗長度は 100%としている．図より，データセンタの規模に関わらず，既存手法に比べて，すべての部分重複手法の性能が優れていることがわかる．これは，ネットワーク化バッファリングに基づく仮想マシン配置によって，様々な障害発生パターンに対して復旧が可能になっていることを示している．一方，図 3(b) から，既存手法 1 の性能が，部分重複手法にはわずかに及ばないが，優れた性能を持つことがわかる．これは，中規模データセンタを想定した環境では，ラックが収容するサーバ数が多いため，ラック内において部分冗長化がある程度実現したためであると考えられる．また，部分重複手法と比較して，既存手法 1 の障害回復割合が若干低いのは，既存手法 1 が，グループ分けされたサーバと VM における部分的な多対多の冗長化であるのに対して，部分重複手法はネットワーク全体で多対多の冗長構成を行っているので，より多くの障害パターンに対応することができるためである．

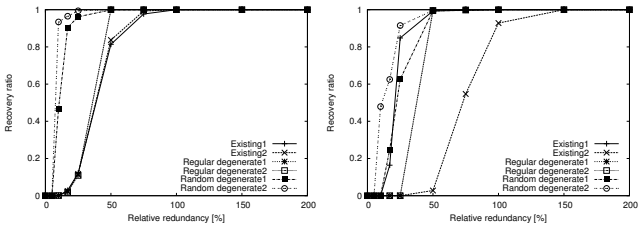
次に，データセンタ資源の冗長度が回復性能に与える影響を評価する．図 4 に，小規模及び中規模データセンタを想定した環境における，冗長度 50%とした時の，サーバの故障台数と障害回復割合の歓喜会を示す．図より，規則的部分重複手法は，冗長度が小さくなると障害回復割合が大きく低下する事がわかる．これは，冗長度が小さくなり，余剰資源量が減少することで，各 VM の物理サーバへのインストール数にばらつきが発生するためである．一方，冗長度が非常に大きい場合を除き，ほぼすべての場合において，無作為部分重複手法の性能が最も優れていることがわかる．これは，ランダムに VM を物理サーバにインストールすることで，異なる組み合わせの VM をインストールしている物理サーバが増加するためである．このことから，ネットワーク化バッファリングに基づく仮想マシン配置を行う際には，ランダムに VM を物理サーバにインストールすることが効果的であるといえる．

次に，サーバ障害とラック障害の違いが性能に与える影響を評価する．図 5 に小規模及び中規模データセンタを想定した環境における，ラック障害が発生した場合の，サーバの故障台数と障害回復割合の関係を示す．ここでは，冗長度は 100%としている．図 5(a) において，既存手法 2 の性能が障害規模にかかわらず非常に高いことがわかる．これは，小規模データセンタを想定した環境のパラメータ設定にその原因があり，非常に特殊な状況であるため，既存手法 2 の性能を適切に示したもの



(a) 小規模データセンタを想定した環境の場合　(b) 中規模データセンタを想定した環境の場合

図 5　均一な環境のラック障害における物理サーバの故障台数と障害回復割合の関係



(a) 小規模データセンタを想定した環境の場合　(b) 中規模データセンタを想定した環境の場合

図 6　均一な環境における冗長度と障害回復割合の関係

ではない．図 5 より，ラック障害を想定した場合においても，既存手法の性能は，部分重複手法に比べて，性能が劣っていることがわかる．一方，部分重複手法に関しては，図 3 に示したサーバ障害の場合は，無作為部分重複手法 1 と 2 の性能が最も優れていたが，ラック障害の場合は，ラック収容を考慮した無作為部分重複手法 2 の性能が最も優れている．これは，無作為部分重複手法 2 はラックの収容を考慮して，無作為部分重複を実現しているためである．

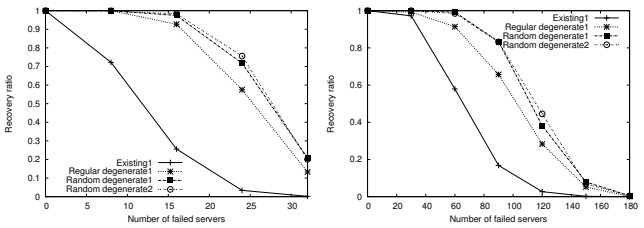
図 6 に，冗長度と障害回復割合の関係を示す．図 6(a) に小規模データセンタを，図 6(b) に中規模データセンタをそれぞれ想定した環境の，8%のサーバに障害が発生した場合の評価結果を表している．図より，無作為部分重複手法 2 が，他の仮想マシン配置手法と比べて，高い性能を示していることがわかる．また，障害回復割合を 1.0 とするために必要な冗長資源量に着目すると，小規模データセンタを想定した環境においては，無作為部分重複手法 2 を用いることで，既存手法 1 と 2 に比べて，冗長資源を 75%削減できることがわかる．

5.3　不均一な環境における提案手法の評価

図 7(a) に，不均一な小規模データセンタを想定した環境における，サーバ障害が発生した場合の，物理サーバの故障台数と障害回復割合の関係を示す．図 7(b) には，不均一な中規模データセンタを想定した環境における評価結果を示している．図より，無作為部分重複手法は，既存手法及び規則的部分重複手法に比べて，高い障害回復割合を示していることがわかる．また，既存手法 1 と規則的部分重複手法 1 は，均一な環境における評価に比べて，性能が低下している．既存手法 1 の性能が低下した理由は，ラックが収容するサーバ数が不均一であるために，各ラックの障害回復能力に差がでたためであると考えられる．また，規則的部分重複手法 1 の性能が低下した理由は，部分重複関係を構築する際に，均一な環境を仮定しているため，不均一な環境においては，VM のインストール数に偏りが生じるためであると考えられる．

6.　まとめと今後の課題

本報告では，生物ネットワークの縮退特性に着目し，データセンタの仮想マシン配置における，頑強かつ低消費電力な冗長化手法を提案した．提案手法では，縮退特性から得られるネットワーク化バッファリングの性質を利用し，高性能な物理サーバを用いることなく，限られた数の仮想マシンをインストールかつ実行することのできる物理サーバを準備し，それらの実行可能な仮想マシンの種類を部分的に重複させることによってネットワークを構築する．シミュレーション評価の結果，提案



(a) 小規模データセンタを想定した環境の場合　(b) 中規模データセンタを想定した環境の場合

図 7　不均一な環境のサーバ障害における物理サーバの故障台数と障害回復割合の関係

手法は従来の単純な冗長手法に比べて，環境変動や障害発生に対して，同じ障害復旧割合を示すために必要な冗長資源量を，最大で 75%削減できることを示した．

今後の課題として，仮想マシン配置手法において，仮想マシンがどのテナントに属するかを考慮に入れることが挙げられる．また，4.2 節において説明を行った障害回復手法は，集中制御を前提としているため，障害からの回復に時間がかかることが問題としてあげられる．そのため，各物理サーバが自律的に動作を行うような障害回復手法を検討し，障害からの回復にかかる時間の改善を図りたい．

文　献

[1] S. Sakr, A. Liu, D.M. Batista, and M. Alomari, “A survey of large scale data management approaches in cloud environments,” Communications Surveys Tutorials, IEEE, vol.13, no.3, pp.311–336, Sept. 2011.

[2] J.L. Berral, I.n. Goiri, R. Nou, F. Julià, J. Guitart, R. Gavaldà, and J. Torres, “Towards energy-aware scheduling in data centers using machine learning,” Proceedings of Energy-Efficient Computing and Networking, pp.215–224, April 2010.

[3] A. Beloglazov and R. Buyya, “Energy efficient resource management in virtualized cloud data centers,” Proceedings of Cluster, Cloud and Grid Computing, pp.826–831, May 2010.

[4] T. Benson, A. Akella, and D.A. Maltz, “Network traffic characteristics of data centers in the wild,” Proceedings of the IMC 2010, pp.267–280, Nov. 2010.

[5] M. Chen, H. Zhang, Y.-Y. Su, X. Wang, G. Jiang, and K. Yoshihira, “Effective vm sizing in virtualized data centers,” Proceedings of Integrated Network Management (IM), pp.594–601, May 2011.

[6] S.-H. Wang, P.P.-W. Huang, C.H.-P. Wen, and L.-C. Wang, “Eqvmp: Energy-efficient and qos-aware virtual machine placement for software defined datacenter networks,” Proceedings of Information Networking, pp.220–225, Feb. 2014.

[7] J. Whitacre and A. Bender, “Degeneracy: A design principle for achieving robustness and evolvability,” Journal of Theoretical Biology, vol.263, no.1, pp.143–153, Nov. 2010.

[8] J. Whitacre and A. Bender, “Networked buffering: A basic mechanism for distributed robustness in complex adaptive systems,” Theoretical Biology and Medical Modelling, vol.7, no.20, pp.1–20, March 2010.

[9] G.M. Edelman and J.A. Gally, “Degeneracy and complexity in biological systems,” Proceedings of the National Academy of Sciences, vol.98, no.24, pp.13763–13768, Nov. 2001.

[10] B. Guo, C.A. Styles, Q. Feng, and G.R. Fink, “A saccharomyces gene family involved in invasive growth, cell-cell adhesion and mating,” Proceedings of National Academy of Sciences, vol.97, no.22, pp.12158–12163, Oct. 2000.

[11] IBM Corp., “Live guest relocation”. available at `http://www.vm.ibm.com/perf/reports/zvm/html/620lgr.html`.