

省電力性と耐故障性を両立するマルチテナント用仮想ネットワーク制御

樽谷 優弥[†] 大下 裕一[†] 村田 正幸[†]

[†] 大阪大学 大学院情報科学研究科

E-mail: †{y-tarutn,y-ohsita,murata}@ist.osaka-u.ac.jp

あらまし データセンターでは、1つのデータセンターネットワーク内に、複数の企業（ユーザ）のサービスを収容し、物理資源や運用コストを低減するマルチテナント方式がとられている。テナント用ネットワークでは、故障発生時にサービスが停止してしまわないように、耐故障性を考慮した物理ネットワークへの割り当てが求められる。一方で、クラウドサービスの普及に伴う、データセンターの大規模化に伴い、データセンターにおける消費電力が問題となる。耐故障性のために多くの機器を使用してテナント用仮想ネットワークを構築すると消費電力の増加を招き、消費電力を抑えるために、少ない機器でテナント用仮想ネットワークを構築すると耐故障性が確保できない。本稿では、光ネットワークを用いたデータセンターネットワーク上で、省電力性と耐故障性の両立を行うことのできるテナント用仮想ネットワークを提供する手法について提案する。

キーワード データセンター; 消費電力; マルチテナント; 耐故障性; 仮想ネットワーク;

Virtual Network Reconfiguration with Fault-tolerance and Low Energy Consumption for Multi-Tenant Data Centers

Yuya TARUTANI[†], Yuichi OHSITA[†], and Masayuki MURATA[†]

[†] Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

E-mail: †{y-tarutn,y-ohsita,murata}@ist.osaka-u.ac.jp

Abstract In recent years, a data center accommodates multiple tenants based on the request from tenant providers. A data center has to satisfy all requirements of the all tenants in any case of failures, while the energy consumption should be minimized. In this paper, we propose a method to embed the virtual network for each tenant considering both of the energy consumption and the robustness against failures.

Key words Data center; Energy consumption; Multi-tenant; Fault-tolerance; Virtual network;

1. はじめに

データセンターでは、1つのデータセンターネットワーク内に、複数の企業（ユーザ）のサービスを収容し、物理資源や運用コストを低減するマルチテナント方式がとられている。各テナントでは、物理マシンが提供する仮想マシンを複数台使用し、仮想マシン同士が連携してデータの処理を行うことで、サービスを提供している。また、物理マシンを接続する物理ネットワーク上に、仮想化されたテナント用仮想ネットワークを構築することで、仮想マシンを論理的に接続している。仮想マシンは任意の物理マシン上に配置することができ、管理者はユーザが要求する性能に応じて、仮想マシンの配置やテナント用仮想ネットワークを構築する。

各テナントでは、冗長に用意された複数の仮想マシンが分散してデータの処理を行うことで、処理の高速化を行っている。

物理ネットワーク上の機器の故障が発生した際に、仮想マシン間の連携が行えなくなると、処理速度の低下やサービスの停止を招いてしまう。そのため、データセンターの管理者は故障発生時にもサービスの品質を低下させないように、耐故障性を考慮して仮想マシンの配置やテナント用仮想ネットワークを構築することが求められる。

一方で、クラウドサービスの普及に伴うデータセンターネットワークの大規模化に伴い、データセンターにおける消費電力が問題となっている [1]。消費電力を抑えるためには、データセンター内で使用する物理機器の数を減らすことによって、電源の投入が必要な機器の数を減らすことが求められる。そのため、管理者は物理機器の電源投入状況を考慮し、電源の投入が必要となる物理機器の数を最小限に抑えるように、仮想マシンの配置やテナント用仮想ネットワークを構築することが求められる。

ユーザからの要求に対して、仮想マシンを物理マシンへ割り

当てる方法や、テナント用仮想ネットワークの構築方法について、多くの研究 [2-6] が行われている。これらの研究では、物理ネットワーク上に多くのテナント用仮想ネットワークを収容するための仮想マシンの割り当て方法や、耐故障性を考慮してテナント用仮想ネットワークを構築することを目的としている。しかしながら、耐故障性の確保のために、複数の物理マシンへ冗長な数の仮想マシンを配置することや、仮想マシン間の仮想ネットワークを冗長に構成することは、多くの物理機器を使用してしまい、消費電力の増大を招く。一方で、省電力化のために、一部の物理マシンへ仮想マシンを集中的に配置することや、仮想マシン間の仮想ネットワークを少ない仮想リンクで構成することは、物理機器の故障発生時に処理に必要な数の仮想マシンの確保や通信に必要な帯域の確保が行えず、サービスの停止を招く。

ネットワークの消費電力を削減する方法として、光スイッチを用いたデータセンターネットワークが提案されている [7]。このデータセンターネットワーク上では、コアネットワークに光スイッチを用いることで、電気スイッチのみのネットワークよりも省電力で広帯域なネットワークを提供できる。また、このネットワーク上では、ラックスイッチ間を光パスと呼ばれる仮想リンクで結ぶことができ、光パスを張り替えることによって、柔軟にネットワークを構築することができる。文献 [8] では、このデータセンターネットワーク上で、性能要求に応じて、省電力な仮想ネットワークを構築する方法が提案されている。しかしながら、消費電力全体に占める物理マシンの消費電力は大きく、ネットワークの消費電力を削減するだけでは不十分である。

一方で、省電力化と耐故障性を両立する方法として、コールドスタンバイ状態の仮想マシンを用意する方法が考えられる。この方法では、用意されたコールドスタンバイ状態の仮想マシンに予めハードディスクのデータを複製しておく。そして、故障発生時にコールドスタンバイの仮想マシンをアクティブにし、故障の影響を受けていない仮想マシンから必要なデータを複製することによって、故障発生時にもデータの処理に必要な仮想マシンを確保することができる。また、コールドスタンバイの仮想マシンは、平常時はデータの処理を行わないため、使用する物理機器の電源を落とすことができ、消費電力の削減が期待される。しかしながら、省電力化を目的としてアクティブ状態の仮想マシンやコールドスタンバイ状態の仮想マシンを適切に配置する方法は考えられていない。

本研究では、光通信を用いたデータセンターネットワーク上で、物理機器の消費電力を考慮しつつ、単一故障発生時にもテナントがサービスの提供を維持可能なマルチテナント用仮想ネットワーク制御手法について提案する。本手法では、単一故障発生時にもデータの処理に必要な数の仮想マシンが確保できるように、アクティブな仮想マシンとコールドスタンバイ状態の仮想マシンを用いたテナントを提供する。そして、消費電力を抑えるために、電源の投入が必要な物理機器が最小となるように、各仮想マシンの配置とテナント用仮想ネットワークの構築を行う。また、物理機器の単一故障の発生の際に、電源の投入が必要な機器数が増えることで、消費電力が増加しないよ

うに、コールドスタンバイ状態の仮想マシンを配置する。

本稿の構成は以下の通りである。2章では、本稿で想定するデータセンターネットワークとテナント用仮想ネットワークについて述べる。3章では、本稿で提案するマルチテナント用仮想ネットワーク制御について述べ、4章で提案手法の有効性について議論する。最後に、5章で本稿のまとめについて述べる。

2. マルチテナント方式のデータセンターネットワーク

2.1 光スイッチを用いたデータセンターネットワーク

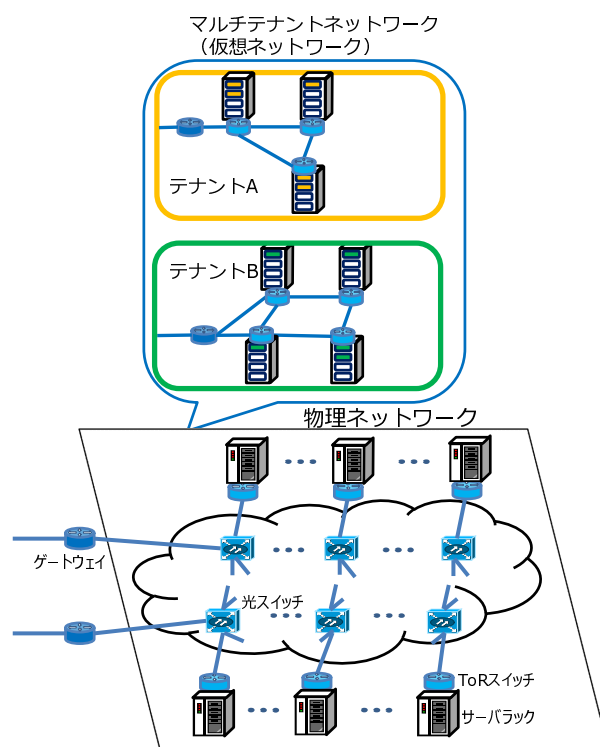


図 1 想定する物理ネットワークの構成

本稿では、図 1 のように、コアネットワークを光スイッチで構成し、コアネットワークにラック内の物理マシンと接続する電気スイッチ (ToR スイッチ)、データセンター外部のネットワークとの出入り口であるゲートウェイスイッチが接続している物理ネットワークを想定する。各ラックは複数台の物理マシンを収容しており、各物理マシンは複数台の仮想マシンを提供する。各 ToR スイッチの電気ポートには、トランシーバが接続しており、電気信号を光信号に変換して、光スイッチに送信し、光スイッチからきた光信号を電気信号に変換して、物理マシンに送信する。テナント用仮想ネットワークは、ToR スイッチ間を光パスで接続することによって物理ネットワーク上に構築する。また、ゲートウェイスイッチと ToR スイッチ間を光パスで接続することで、任意の場所にネットワークの出入口が存在するテナント用仮想ネットワークを構築することができる。光スイッチは、電気スイッチと比較して、消費電力が非常に小さく、電気スイッチのみのネットワークよりもネットワークの消費電力を抑えることができる。また、光スイッチをコアネッ

ネットワークとして用いることによって、スイッチの処理遅延による遅延の増加を抑えることができ、スイッチ数が多いラック間を使用したネットワークを構築することができる。

2.2 テナント用仮想ネットワーク

テナント用仮想ネットワークは、複数台の仮想マシンと仮想マシンを収容する物理マシン間を結び仮想リンクから構成されるネットワークからなる。各テナントでは、複数台の仮想マシンが連携してデータの処理を行っており、データの処理に必要な数の仮想マシンと仮想マシン間の通信に必要な通信帯域の確保が必要とされる。

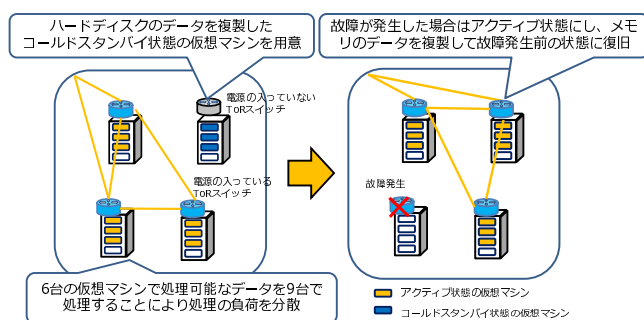


図 2 想定するテナント用仮想ネットワーク制御

本稿では、図 2 のように、複数の仮想マシンから構成されるテナントを想定する。このテナントでは、データの処理に必要な仮想マシンよりも多くの仮想マシンを用いてデータの処理を行うことで、処理の負荷分散を行っている。そのため、物理機器の故障が発生した際に、処理に最低限必要となる仮想マシンの数が確保できていれば、テナントが提供しているサービスを停止させることなく、継続してサービスを提供可能である。また、Google File System [9] のように、同じデータを複数の仮想マシンに重複して持たせることによって、物理機器の故障により一部の仮想マシンが使用できない状態が発生した際にも、新たな仮想マシンにデータを複製し、データの処理に必要な数の仮想マシンを確保することで、故障発生前の状態に戻すことができる。

しかしながら、このような構成であったとしても、ハードディスクのデータを複製するには、データの複製に時間がかかるため、瞬時にテナントの状態を故障発生前の状態に復旧することができず、残っている仮想マシンに大きな負荷をかけてしまう。そのため、平常時にデータの処理を行う仮想マシンとは別に、予備の仮想マシンを用意することが考えられている。この方式では、予備の仮想マシンにデータの複製を行っておくことによって、故障が発生した際にも使用する仮想マシンを切り替えることによって、瞬時にテナントの状態を故障発生前の状態に復旧することができる。また、コールドスタンバイ状態の仮想マシンを用いた方式では、ハードディスクのデータの複製のみを予め行っておき、メモリのデータを故障の影響を受けていない仮想マシンから複製を行うことで復旧する。この方式では、ハードディスクのデータの複製後は、ハードディスク以外のデータの複製を行わないため、平常時は物理機器の電源を落とすこと

ができ、消費電力の削減が行える。また、故障発生時には、次のコールドスタンバイの仮想マシンを用意することによって、次の故障に備えたテナントを構築することができる。

2.3 ユーザから与えられるテナントの性能要求

ユーザから与えられるテナントの性能要求は以下に示すような情報が与えられる。

- テナントがデータの処理に必要なとする仮想マシン数: N_{all}
- 故障発生時にサービスを停止させることなく、テナントを復旧可能な仮想マシン数: N_b
- 仮想マシン間の通信に確保が必要な帯域: B

本稿で想定するテナントは 2.2 節でも述べたように、冗長な数の仮想マシンを用いてデータの処理を行っており、故障発生時もテナントが最低限必要な仮想マシンの数が確保できれば、サービスを停止させることなく提供でき、それらの仮想マシンからデータの複製を行うことで、故障発生前の状態に復旧することができる。そのため、故障発生時にもサービスを停止させることなく復旧するために必要な仮想マシンの数 N_b が確保できるように、 N_{all} 台の仮想マシンを配置する物理マシンを決め、テナント用仮想ネットワークを構築する必要がある。また、複数の物理マシンに仮想マシンを分散した場合は、連携してデータを処理するために、仮想マシン間でデータのやり取りをする必要がある。そのため、物理マシン間には、通信のために帯域を確保する必要がある。データセンターの管理者は、データセンターに収容する全てのテナントの性能要求を満たすようにテナントの構築を行う必要がある。

3. 単一故障への耐性を考慮した省電力なマルチテナント用仮想ネットワーク制御

本章では、単一故障への耐性を考慮しつつ、省電力なマルチテナント用仮想ネットワークを構築する方法について提案する。提案手法では、2.1 節で述べたデータセンター上で、2.3 節で述べたテナントの性能要求が複数存在する状況を想定し、各テナントの仮想マシンの配置と仮想マシンの通信に必要なテナント用仮想ネットワークを構築する。

提案手法は以下の 2 つの手順を得て、テナントを構築する。

- 仮想マシンの物理マシンへの割り当て
- スイッチ間のテナント用仮想ネットワークの構築

仮想マシンの物理マシンへの割り当ては、物理マシンや ToR スイッチ、光スイッチといった物理機器の故障が発生した際にも、テナントがデータの処理に最低限必要な仮想マシン数 N_b を確保できるように仮想マシンを物理マシンに割り当てる。また、省電力化のために割り当てた物理マシンによって電源の投入が必要な物理機器の数が多くならないように仮想マシンを割り当てる物理マシンを選択する。スイッチ間のテナント用仮想ネットワークは、仮想マシン間の通信による帯域の制約を考慮しつつ、仮想リンクの構築に必要な物理機器数が最小となるように仮想ネットワークを構築することで、消費電力の増加を抑える。

3.1 物理マシンへの仮想マシンの配置

物理マシンへの仮想マシンの配置では、全てのテナントの

データの処理に必要な仮想マシンを割り当てる物理マシンを考えた後に、コールドスタンバイの仮想マシンを割り当てる物理マシンを考える。アクティブ状態の仮想マシンとコールドスタンバイ状態の仮想マシンの割り当てを別々に行うことによって、アクティブ状態の仮想マシンとコールドスタンバイ状態の仮想マシンが物理機器を共有する状況を避ける事ができる。

物理マシンへ仮想マシンの配置を考える際には、電源の投入が必要な物理マシンの数の最小化と耐故障性の確保を目的として、割り当てを考える。電源の投入が必要な物理マシンの数は、可能な限り新たな物理マシンの電源を投入しないようにアクティブな仮想マシンを割り当て、また故障発生時に電源の投入が必要な機器数が少なくなるようにコールドスタンバイの仮想マシンを割り当てる。

3.1.1 データの処理に必要な仮想マシンの割り当てアルゴリズム

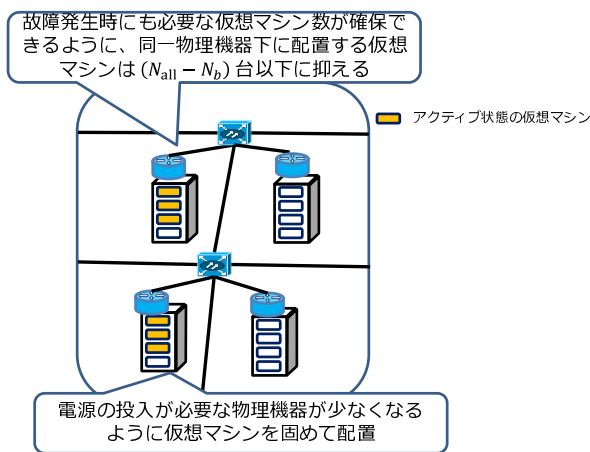


図 3 データの処理に必要な仮想マシンの割り当て

データの処理に必要な仮想マシンは、図 3 に示すように、耐故障性を確保するために同一物理機器下の仮想マシン数を $(N_{all} - N_b)$ 台以下にすることで、省電力性のために電源の投入が必要な機器数が最小となるように仮想マシンを可能な限り同一物理機器下に配置することが求められる。故障発生時に復旧のために必要な仮想マシンの数 N_b が少ないテナントから順に配置を行う。 N_b が少ないテナントほど、同一物理機器下に配置することのできる仮想マシンの数が多く、固めて配置することができる。一方、 N_b が多いテナントほど、同一物理機器下に配置する仮想マシンの数が少なくなるため、他のテナントが使用している物理マシンの空き資源を効率的に使用した割り当てができると考えられるからである。各テナントのアクティブな仮想マシンの割り当ては以下の手順で行う。

- 手順 1 仮想マシンを割り当てることができるアクティブな物理マシンを探索し、仮想マシンの配置候補とする。
- 手順 2 仮想マシンの配置候補が存在し、耐故障性の制約を満たす場合は、その物理マシンに耐故障性の制約が許す限り仮想マシンを配置し、手順 5 へ。それ以外の場合は手順 3 へ。

- 配置候補が複数存在する場合は、同一テナントの仮想マシンが割り当てられている物理マシンを優先

- 上記条件でも配置候補が複数存在する場合は、配置可能な仮想マシンの数が多い物理マシンを優先

- 上記条件でも配置候補が複数存在する場合は、ID が最も小さい物理マシンを優先

手順 3 消費電力の増加が最小かつ耐故障性の制約を満たす物理マシンの電源を投入し、耐故障性の制約を満たす限り仮想マシンを配置する。

- 電源の投入候補が複数存在する場合は、耐故障性の制約内で配置可能な仮想マシンの数が最大の物理マシンを優先

- 上記条件でも配置候補が複数存在する場合は、ID が最も小さい物理マシンを優先

手順 4 配置済みの仮想マシンのうち、新たに電源を投入した物理マシンに仮想マシンの配置を変更することで、同一テナントの仮想マシンが割り当てられている物理マシンの数を減らすことができる仮想マシンが存在するかを探索し、該当する仮想マシンがあれば配置する物理マシンを変更する。

手順 5 テナントがデータの処理に必要なとする仮想マシンの数を満たすことができているかを確認し、できている場合は手順を終了する。できていない場合は、手順 1 へ戻る。

3.1.2 コールドスタンバイの仮想マシンの割り当てアルゴリズム

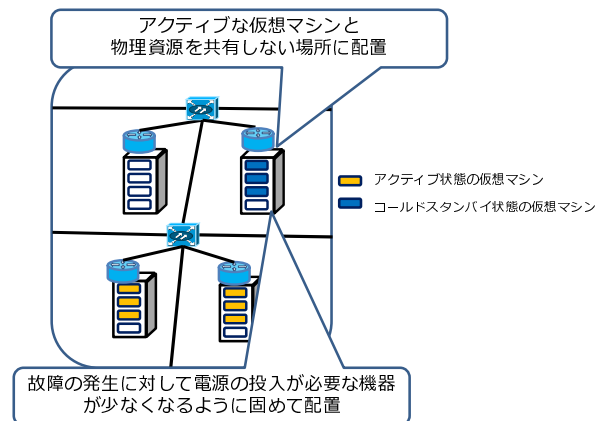


図 4 コールドスタンバイの仮想マシンの割り当て

コールドスタンバイの仮想マシンは、図 4 に示すように、耐故障性を確保するために任意の機器の故障発生時に故障の影響を受けていないデータの処理に必要な仮想マシンと合わせて N_{all} 台以上確保可能な数の仮想マシンを割り当てる。また、故障発生時に電源の投入が必要な機器数が最小となるように仮想マシンを可能な限り同一物理機器下に配置することが求められる。コールドスタンバイの仮想マシンも処理に必要な仮想マシ

ンの割り当てと同様に、故障発生時に復旧のために必要な仮想マシンの数 N_b が少ないテナントから順に配置を行う。コールドスタンバイの仮想マシンの割り当ては以下の手順で行う。

- 手順 1 仮想マシンを割り当てることができるコールドスタンバイ状態の仮想マシンが配置されている物理マシンを探索し、仮想マシンの配置候補とする。
- 手順 2 配置候補が存在する場合は、その物理マシンに配置可能な限り、仮想マシンを配置して手順 5 へ、それ以外の場合は手順 3 へ。
- 手順 3 アクティブ状態の仮想マシンと物理機器を共有せず、ある機器の故障に対して電源の投入が必要な物理機器数が最小となる物理マシンを仮想マシンの配置候補とし、配置可能な限り仮想マシンを配置する。
- 手順 4 配置済みのコールドスタンバイの仮想マシンのうち、物理マシンに仮想マシンの配置を変更することで、同一テナントの仮想マシンが割り当てられている物理マシンの数を減らすことができるか仮想マシンが存在するかを探索し、該当する仮想マシンがあれば配置する物理マシンを変更する。
- 手順 5 処理に必要な仮想マシンが割り当てられている物理マシンが使用する任意の機器の故障に対して、耐故障性が確保できているかを確認し、できている場合は終了する。できていない場合は、手順 1 へ戻る

3.2 テナント用仮想ネットワークの構築

物理マシンにアクティブな仮想マシンとコールドスタンバイの仮想マシンを割り当てた後、テナント毎に ToR スイッチ間に通信に必要な仮想ネットワークを構築する。テナント用仮想ネットワークが含む仮想リンクは、以下の 3 種類の仮想リンクに分類される。

- アクティブな仮想マシン間の仮想リンク
- アクティブな仮想マシンとコールドスタンバイの仮想マシン間の仮想リンク
- アクティブな仮想マシンとゲートウェイスイッチ間の仮想リンク

各仮想リンクを物理ネットワーク上で構築する際には、最短経路を用いるとする。ただし、光スイッチの故障発生時に全ての仮想リンクが分断しないように、同一テナント内の全ての仮想リンクが同一物理機器を使用しないという制約を設けるとする。同一 ToR スイッチ間における仮想リンクは、帯域が許容する限り共有して使用することで、トランシーバや ToR スイッチの電気ポートの電源を落とすことによる省電力化や、物理リンクの波長資源の使用を抑えることができる。

3.2.1 アクティブな仮想マシン間の仮想リンクの構築

アクティブな仮想マシン間の仮想リンクは、Generalized Flattened Butterfly (GFB) [8] を用いることによって、仮想リンクを構築する ToR スイッチ間を決定する。GFB では、性能要求から少ないリンク数で、それを満たすトポロジを計算によって求めることができる。そのため、アクティブな仮想マシ

ン間で通信に必要な帯域から、適切な GFB を求め、構築することによって、少ないリンク数でテナント用仮想ネットワークを構築することができる。

3.2.2 アクティブな仮想マシンとコールドスタンバイの仮想マシン間の仮想リンクの構築

アクティブな仮想マシンとコールドスタンバイの仮想マシン間の仮想リンクは、平常時には必要のない仮想リンクであり、故障発生時に必要に応じて仮想リンクを構築することになる。しかしながら、故障発生時に仮想リンクを構築すると、物理リンクの波長資源の不足によって、必要な仮想リンクが構築できなくなってしまう可能性がある。そのため、故障発生時に仮想リンクの構築が必要となる可能性のある全ての ToR スイッチ間に仮想リンクを構築した場合の物理資源を予め確保しておく。故障発生時には、故障箇所に応じて、必要な仮想リンクをアクティブにすることによって、故障に対応する。また、任意の機器の故障発生時に、アクティブになる仮想リンクは決まっているため、同時にアクティブにならない仮想リンクは同一の波長を共有することにより、確保が必要となる波長資源を抑える。

3.2.3 アクティブな仮想マシンとゲートウェイスイッチ間の仮想リンクの構築

アクティブな仮想マシンとゲートウェイスイッチ間の仮想リンクは、耐故障性を考慮すると 2 箇所以上必要となる。そのため、2 箇所のゲートウェイスイッチと 2 つの ToR スイッチが同一の物理機器を使用しないように仮想リンクを構築することによって、耐故障性を確保する。

4. 提案手法の性能評価

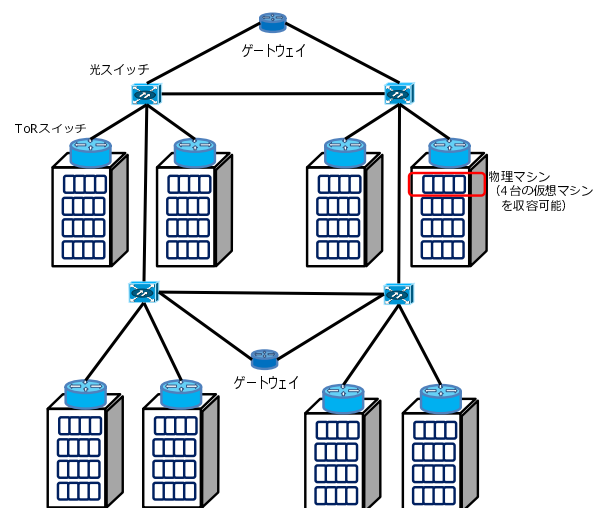


図 5 光スイッチ 4 台からなるネットワーク

提案手法の有効性を示すために、小規模なトポロジを用いて、提案手法によって割り当てを行った場合における使用機器数について評価を行う。本評価では、図 5 のように 4 台の光スイッチをリング状に接続し、各光スイッチに ToR スイッチ 2 台とゲートウェイを接続したネットワークを用いて評価を行った。各 ToR スイッチにはサーバラック内の 4 台の物理マシンが接

続いており、各物理マシンは4台の仮想マシンが収容可能であるとする。仮想ネットワークの制約は、ネットワーク規模が小さいため、リンクの帯域、波長数、各スイッチのポート数は十分な数があると仮定することで考慮しないものとし、使用する物理マシンの数と耐故障性について評価を行う。この条件において、表1のに示すテナントの性能要求が与えられている場合の物理マシンへの仮想マシンの割り当てについて考える。

表1 与えられるテナントの性能要求

テナント名	N_{all}	N_b
テナント1	13	8
テナント2	11	7
テナント3	10	6
テナント4	8	5
テナント5	7	4
テナント6	5	3

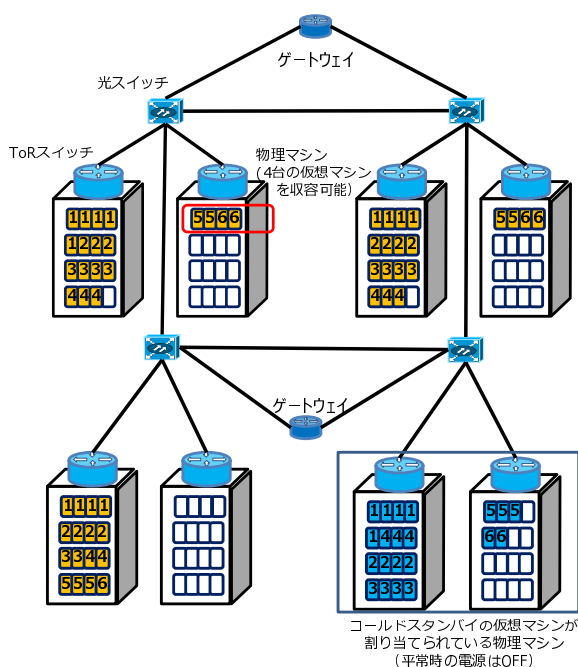


図6 表1のテナントを割り当てた場合の仮想マシンの配置

図6で、提案手法によって仮想マシンを割り当てた場合における各テナントの仮想マシンの配置を示す。テナントを割り当てた際に必要な物理マシンの最小値は各テナントの必要仮想マシン数 N_{all} の合計を物理マシンに割り当てることができる仮想マシン数で割った値を切り上げた値である。本評価における必要な物理マシンの最小値は14台であり、図6より提案手法によって電源の投入が必要な物理マシンの数は14台であり、提案手法によって使用している物理マシンの数が最小数であることが示されている。また、各物理機器下における仮想マシンの数を $(N_{all} - N_b)$ 台以下に抑えて配置しており、任意の機器の故障に対しても各テナントは N_b 台の仮想マシンを確保することができる。また、故障に応じて、コールドスタンバイの仮想マシンをアクティブにすることによって、故障前と同等以上の

仮想マシンを有することができることが図から明らかである。

5. おわりに

本稿では、光ネットワークを用いたデータセンターネットワーク上で、単一故障にたいして耐性をもつ、省電力なテナントの構築方法について提案を行った。規模の小さなトポロジにおいて、提案手法によるテナントの割り当てを行った結果、単一故障に対して耐性を持ちつつ、省電力なテナントが構築できていることを明らかにした。

今後は、規模の大きなトポロジにおいても提案手法が有効であることを示すために、シミュレーションによる評価を行う。また、故障発生時に次の故障に備えて適切にテナントが構築できているかをシミュレーションによる評価によって明らかにする。

謝 辞

本研究の一部は、情報通信研究機構 (NICT) の委託研究「高機能光電子融合型パケットルータ基盤技術の研究開発」の成果による。ここに記して謝意を表す。

文 献

- [1] D. Abts, M. Marty, P. Wells, P. Klausler, and H. Liu, "Energy proportional datacenter networks," *ACM SIGARCH Computer Architecture News*, vol. 38, pp. 338–347, June 2010.
- [2] P. Bodík, I. Menache, M. Chowdhury, P. Mani, D. A. Maltz, and I. Stoica, "Surviving failures in bandwidth-constrained datacenters," in *Proceedings of the ACM SIGCOMM*, pp. 431–442, Aug. 2012.
- [3] J. Mudigonda, P. Yalagandula, J. Mogul, B. Stiekes, and Y. Pouffary, "Netlord: a scalable multi-tenant network architecture for virtualized datacenters," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 41, pp. 62–73, Aug. 2011.
- [4] X. Cheng, S. Su, Z. Zhang, H. Wang, F. Yang, Y. Luo, and J. Wang, "Virtual network embedding through topology-aware node ranking," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 41, pp. 38–47, Apr. 2011.
- [5] J. F. Botero, X. Hesselbach, M. Duelli, D. Schlosser, A. Fischer, and H. De Meer, "Energy efficient virtual network embedding," *IEEE Communications Letters*, vol. 16, pp. 756–759, May 2012.
- [6] A. Fischer, J. Botero, M. Beck, H. De Meer, and X. Hesselbach, "Virtual network embedding: A survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*.
- [7] A. Singla, A. Singh, K. Ramachandran, L. Xu, and Y. Zhang, "Proteus: a topology malleable data center network," in *Proceedings of ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics in Networks*, pp. 8–13, Oct. 2010.
- [8] Y. Tarutani, Y. Ohsita, and M. Murata, "A virtual network to achieve low energy consumption in optical large-scale datacenter," in *Proceedings of IEEE International Conference on Communication Systems (ICCS)*, pp. 45–49, Nov. 2012.
- [9] S. Ghemawat, H. Gobioff, and S. Leung, "The google file system," in *Proceeding of ACM SIGOPS Operating Systems Review*, vol. 37, pp. 29–43, ACM, 2003.