

# マイグレーションを利用したデータセンタの高効率運用手法の提案とオーバコミット時における VM の性能評価

児玉宏喜<sup>†1</sup> 鈴木成人<sup>†1</sup> 福田裕幸<sup>†1</sup> 吉田英司<sup>†1</sup>

**概要:** クラウドを運用するデータセンタでは、限られた収容スペースとサーバ資源にできるだけ多くの仮想サーバを構築してサービスを提供することで、ユーザーに低価格な仮想サーバを提供できる。このためには、サーバラックへのサーバ搭載数を増やし、かつ、物理サーバへ構築する仮想サーバの数を増やす必要がある。前者の手段として、サーバの実際の使用電力量に応じて搭載数を決めるオーバプロビジョニング手法が研究されており、後者を実現する手段として、サーバの物理リソースを超える CPU 数を仮想サーバに割り当てる、いわゆるオーバコミット状態での運用手法が知られているが、当然ながら過剰なオーバコミット状態は性能に悪影響を与える。我々は、マイグレーションを利用したオーバプロビジョニング手法を提案する。本論文では、CPU のオーバコミット状態で各々の VM の稼働率に注目しながら、VM の性能評価を行った。その結果、一定のコアを消費するワークロードの VM と、消費するコア数を増していく VM を共存させた場合に、一定のコアを消費している VM の性能劣化は線形ではなく、極端に下がるポイントがあることが分かった。この特性と提案するオーバプロビジョニング手法を組み合わせた VM 配置制御システムにより、性能の劣化を抑えつつ低価格のサービスを提供するシステム運用が可能である。

**キーワード:** クラウド, データセンタ, サーバラック, オーバプロビジョニング, 仮想サーバ, オーバコミット

## 1. はじめに

データセンタには、サーバやストレージやスイッチなどの ICT 機器の他に、ICT 機器を冷却するための冷却設備、電源を供給するための電源設備、不測の非常時のための非常用電源設備等が備わっている。データセンタの冷却は、冷却が必要な機器の熱量を基本に設計される。サーバは稼働状況により消費電力が異なるので、最も消費電力が大きい場合でも冷却できるように設計する。データセンタの事業形態として、電源や冷却設備を管理しながら、ICT 機器を置くスペースを用意し、ラック単位などのスペースで貸し出しをするコロケーションサービスや、サーバや仮想サーバ単位で貸し出すホスティングサービスがある。クラウドサービスを提供している事業者の中には、自社でデータセンタを所有して、様々なクラウドサービスを提供している事業者がある。データセンタを所有しながらサービスを提供する場合、サービスの価格にはデータセンタの運用費用が大きく影響する。そのため、電源の利用効率や、冷却効率など、様々な事項の効率を最大限にするように、日々改善と研究が行われている。効率を考慮すべき事項のひとつに、ラック当たりのサーバの収容台数がある。例えば、ラック当たり 8 kVA の電力が供給されているラックにサーバを何台収容できるかを考える。この場合、サーバの定格消費電力をもとにして考える。近年、サーバの消費電力をサーバの CPU の種類や、メモリ搭載枚数や、PCI カードの種類、ストレージ装置の種類・台数等の構成情報を入力し消費電力が計算できるツールがサーバベンダーから提供されている [1], [2], [3]。これらのツールを使うことで、正確にサーバの消費電力を把握することが可能になった。このツ

ールは、構成部品の最大消費電力の総和で算出するので、各々の構成部品が 100% の稼働率で動作した場合の消費電力である。このようにして算出したサーバの消費電力が、400 W だったとすると、例えば 8 kVA 供給されているラックには、最大 20 台搭載できる。サーバでは、様々なワークロードが実行される。ワークロードによっては、CPU 稼働率は常に 100% ではないので、消費電力も常に最大消費電力ではない。Google は、自社のデータセンタの 2013 年 1 月から 3 月の 3 ヶ月間、2 種類のクラスタ（サーバ台数としては 20,000 台以上）のサーバ稼働率について調べた [4]。バッチファイルなどの処理を行うクラスタは、75% 付近に中心をもつ CPU 稼働率分布なのに対し、ティピカルなクラスタは、30% 付近に中心を持つ分布だと公表している。仮に 30% のサーバ稼働率だとすれば、8 kVA の供給のうちの 30%、2.4 kW しか使えていなく、8 kVA を冷却できる冷却機としては、余力のある運用になっている。設計通りの 8 kVA に相当する熱量を冷却する運用にすることができれば冷却機の冷却効率を上げることができ、データセンタのエネルギー利用効率を向上できる。

我々は、仮想サーバのマイグレーションを使ったデータセンタの高効率運用手法を提案する。2 章では、我々の提案を説明し、3 章では、6000 台規模のサーバのデータセンタを想定した場合の適用効果を見積もった。4 章では、3 ラックシステムでのプロトタイプを構築して、性能評価を行った。5 章では、本論文の関連研究を述べる。

## 2. 高効率なデータセンタの運用手法

### (1) VM マイグレーションを利用した手法の提案

ラックあたりの給電量に対する電力使用量（以下、サー

<sup>†1</sup>(株)富士通研究所 コンピュータシステム研究所

バラックの稼働効率と呼ぶ)を上げることができれば、給電量を使い切る効率の良い運用ができる。データセンタの冷却設計は、ラック毎の最大消費電力を冷却できるように設計するので、給電量を使い切る場合が最も効率が良い。そこで、ラックへのサーバ搭載数を増やし、さらに、ホストサーバあたりの仮想サーバ数を増やす必要がある。ところが、消費電力が給電量を上回ってしまうと、当然ながら、ブレーカのトリップが起こるので絶対に避けなければならない。我々の提案する手法は、ラック当たりの実装密度を上げながら、給電量に近づいたときに、仮想サーバを別のラックのホストサーバにマイグレーションすることにより、給電量以下に制御する。図1に提案運用手法のブロックダイアグラムを示す。

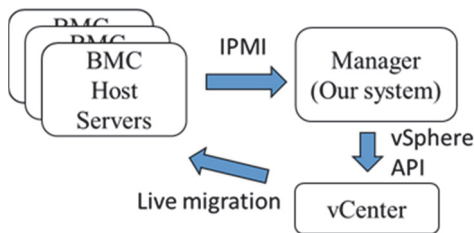


図1 ブロックダイアグラム

ホストサーバの消費電力は、Baseboard Management Controller (BMC)[5]に Intelligent Platform Management Interface (IPMI) [6]経由で Manager が取得する。Manager は、ホストサーバの消費電力をラック単位で管理し、予め定めた給電量に対する閾値に到達したら、ラック内の仮想サーバを別のラックのホストサーバへマイグレーションを行う。マイグレーションの指示は、vCenter に対し、vSphere API [7]を使い行う。マイグレーションの管理工数を簡略化するために、高稼働率のラックとマイグレーション先として用意するラックとを vSphere 上ではクラスタ[8]単位に分ける。このような物理配置と論理配置にすることで、マイグレーション先のホストを探す工数を大幅に削減することができる。

### 3. 提案手法の効果の見積もり

#### (1) 提案手法の効果の見積もり

提案手法の効果を見積もるために、サーバの稼働率に対する消費電力を測定した。図2にサーバのCPU稼働率と消費電力の関係を示す。測定したサーバは、2ソケット、1Uタイプのデータセンタで最も多く使われているタイプのサーバである。このサーバは、CPU稼働率が100%のときに、消費電力は340Wで、ベンチマークソフトウェア(Intel Power Thermal Utility)を動作させていないアイドル状態では、108W電力を消費した。アイドル状態のとき、CPUは、p-state制御[9]により動作周波数が抑えられるが、サーバの冷却用のファン、電源冷却用のファン、ネットワ

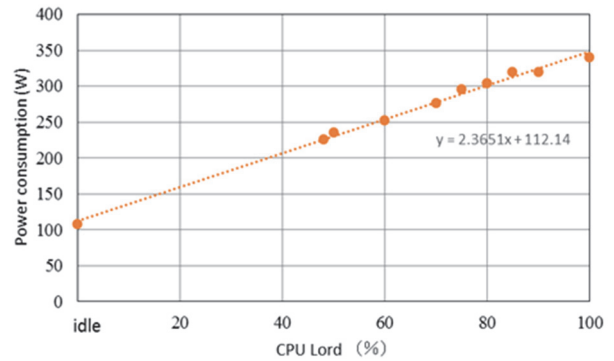


図2 サーバのCPU稼働率とサーバ消費電力の関係

ークチップ、BMCチップなどは稼働しているので、サーバのトータル消費電力はゼロにはならない。効果を見積もるにあたって、想定したデータセンタの規模は、一部屋(ここでは、ブロックと呼ぶ)当たり56ラック(14ラック×4列)あり、56ラックを4台の空調機(CRAC)で冷却する。図3に一つのブロックを上から見た見取り図を示す。一つのラックには、4.8kW給電されていて、サーバラックの稼働効率が38%の場合をスタンダードと想定した。

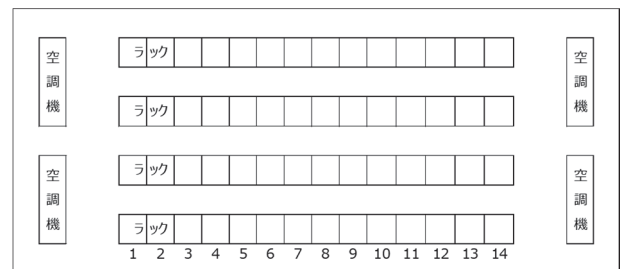


図3 一つのブロック内のレイアウト(上面図)

スタンダードブロックは、ラックに10台のホストサーバを搭載し、10ブロック規模(サーバ数:5600台[ラックあたりのサーバ台数10台×56ラック×10ブロック])を想定した。一方、提案手法は、高密度に実装したオペレーションブロック(サーバ数:5600台[ラックあたりのサーバ台数20台×56ラック×5ブロック])とオペレーションブロックからのマイグレーション先とするテンポラリブロック(サーバ数:840台[ラックあたりのサーバ台数15台×56ラック×1ブロック])とに分けて運用を行う。オペレーションブロックは5ブロック、テンポラリブロックは1ブロックである。図4(a)にスタンダード構成、図4(b)に提案構成のブロック上面図を示す。

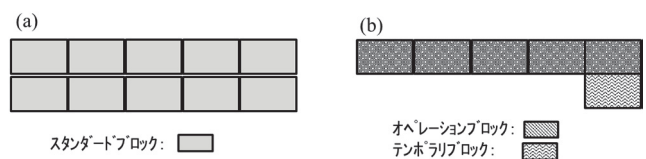


図4 スタンダード構成(a)と提案構成(b)のブロック上面図

想定した構成において、消費電力等の見積もりを行った結果を表1に示す。ラックに供給されている電力は、両構成とも、4.8kVAとし、提案構成のラックあたりの消費電力の閾値は、4.6kW (SV1)とした。ラックあたりの消費電力がSV1を超えたときに、オペレーションブロックからテンポラリブロックへマイグレーションを行って、オペレーションブロック内のラックの消費電力をSV1以下とする。サーバの定格消費電力は、480Wとした。稼働中のサーバの消費電力は、稼働率を30%として、図2の回帰直線から求めて183Wとした。一方、オペレーションブロックでもサーバの消費電力は、183Wと同じだが、ラック当たりのサーバ台数をスタンダードブロックの2倍の20台としているので、ラックあたりの消費電力は2倍の3660Wである。マイグレーション先のテンポラリブロックでは、サーバはアイドル状態でスタンバイしている想定で、サーバの消費電力は100Wとしている。空調機は、ブロック数が10から6と減数するため台数が減り、ブロックあたりで消費するサーバの電力が増えるため、空調機の稼働率も上がり、結果、空調機の効率を示す coefficient of performance (COP)も向上する。トータル(空調電力とサーバ電力)の消費電力は、フットプリントが減り空調機の電力が減る一方で、テンポラリブロックで稼働するサーバの消費電力が増加して、ほぼ、差し引きゼロである。ラックあたりのサーバ数を2倍にしていることで、従来の60%のスペースで2倍のサービスを提供できるようになる。

表1 提案構成の効果の見積もり

	リファレンス構成	提案構成	
	Standard	operation	Temporary
ラックへの給電 (VA)	4800	4800	
閾値(SV1)		4600	
ラック稼働効率 (消費電力/給電量)	38%	76%	31%
ラックあたりのサーバ台数	10	20	15
フットプリント (ブロック数)	10	5	1
ブロックあたりのラック数	56	56	
全サーバ台数	5600	5600	840
定格消費電力	480	480	
サーバの消費電力 (W)	183	183	100
ラックあたりの消費電力 (W)	1830	3660	1500
ブロックあたりのサーバ消費電力 (kW)	102.5	205.0	84.0
サーバの消費電力の合計(kW)	1025	1109	
冷却機の数	40	20	4
冷却機の稼働率(%)	27%	53%	22%
冷却機の効率 (COP)	2.75	4.03	2.35
冷却機の消費電力の合計 (kW)	373	254	36
		290	
トータルの消費電力(kW)	1397	1399	

## 4. 検証環境による性能測定

### 4.1 検証環境

3章で述べたように、サーバラックの稼働効率を上げるようにホストサーバを実装し、マイグレーションを利用した高効率な運用技術を適用していくためには、ホスト上の仮想サーバがマイグレーションによってどのような影響を

受けるかを定量的に把握した上でマイグレーションのトリガーになる閾値を設定する必要がある。オペレーションブロックに相当する2ラックとテンポラリブロックに相当するラックのトータル3ラックにサーバを1台ずつ設置し、検証環境を構築し、図1のブロックアイアグラムを実行するソフトウェアを作成した。表2に検証環境のサーバのスペックを示す。3台とも、1U2ソケットタイプの同スペックのサーバである。また、Hyper threadingはOFFとした。仮想環境は、VMware社のvSphere6を用いた。

表2 検証に使用したサーバの仕様

	HostA	HostB	HostC
Manufacturer	Fujitsu RX200S7	Fujitsu RX200S7	Fujitsu RX200S7
CPU	E2650, 2GHz 2socket 8core	E2650, 2GHz 2socket 8core	E2650, 2GHz 2socket 8core
Mmemory	196 GB	196 GB	196 GB
Install	Rack A	Rack B	Rack C

### 4.2 性能測定

#### 4.2.1 オーバコミットなしの性能測定 (実験1)

HostAで2台のVM (VM1, VM2)を構築した。表3にVM1とVM2のスペックを示す。HostAの物理コア16をVM1とVM2にそれぞれ、8コア(8vCPU, 2socket-4core)ずつ割り当てた。VM1とVM2のOSは、CentOS7(7.3.1611)である。最初にこのオーバコミットのない環境で、opensslの暗号化と復号化を繰り返すspeedテスト[10]を以下のコマンドで行った。

```
# openssl speed rsa4096 -multi N (1)
```

ここで、Nは実行コア数である。VM1では、N=8として、VM2では、N=1, 2, 4, 6, 8と実行コア数を変え連続して性能を測定した。測定結果を図5に示す。横軸はプロセス回数を、縦軸は復号化の単位時間あたりの処理回数(性能値: verify/sec @4096 bit)を示し、性能値が大きい方が良い結果である。VM1は、実行コア数を8として連続的に行っているため、同じ性能値を示し続ける。一方、VM2は実行コア数に比例して、性能値が増えていき、実行コア数が8のときに最大値を示す。VM1とVM2は同じスペックのため、VM2の性能値の最大は、VM1の性能値の最大と同じ値を示している。すなわち、同一ホスト上で物理コアをVMに対してオーバコミットせずに割り当てた場合、2つのVMは、互いの動作状況に干渉されることなく動作する。

表3 VM1とVM2のスペック

	vCPU数	Memory	HDD	N=
VM1	8	8 GB	50 GB	8 (固定)
VM2	8	8 GB	50 GB	1, 2, 4, 6, 8

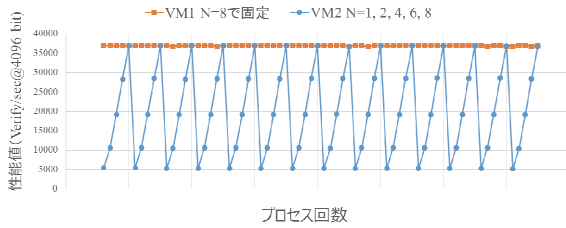


図 5 オーバコミットしていない状態の VM の動作

#### 4.2.2 オーバコミット 150%の環境での性能測定(実験 2)

次に、オーバコミット状態の性能を検証する。HostA に 2 台の VM (VM3, VM4) を 12 コア(12vCPU, 2socket-6core) ずつ割り当てた。表 4 に VM3 と VM4 のスペックを示す。

表 4 VM3, VM4 のスペック

	vCPU数	Memory	HDD	N=
VM3	12	8 GB	50 GB	12 (固定)
VM4	12	8 GB	50 GB	2, 4, 6, 8, 10

HostA の物理コア数は 16, VM3 と VM4 に割り当てた vCPU 数の総和は 24 なので、150% (24/16) のオーバコミット率の環境である。VM3 と VM4 で openssl の暗号化と復号化を繰り返す speed テストを実行した。VM3 では、12 コアすべてで実行するように N=12 とし連続測定をして、VM4 では、N=2, 4, 6, 8, 10, 12 と実行コア数を変えて行った。図 6 に VM3 と VM4 の性能測定結果を示す。VM3 は、N=12 とし実行コア数を変更していないにもかかわらず、VM4 の実行コア数が増えるにつれて性能値が下がった。VM3 と VM4 の実行中のコア数の関係をわかりやすくするために、同じコア数の状態をまとめて、図 7(a), (b), (c), (d), (e), (f) に示す。同じ状態を抜き出すことで、それぞれの状態のバラツキや遷移の様子をよく表現することができる。

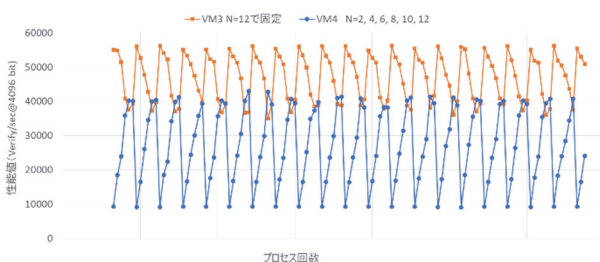


図 6 オーバコミット 150%の状態の VM の性能評価

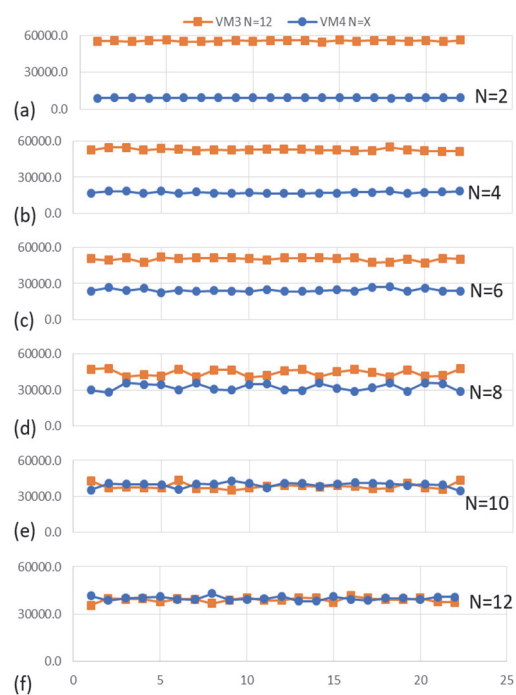


図 7 VM3 と VM4 の性能値

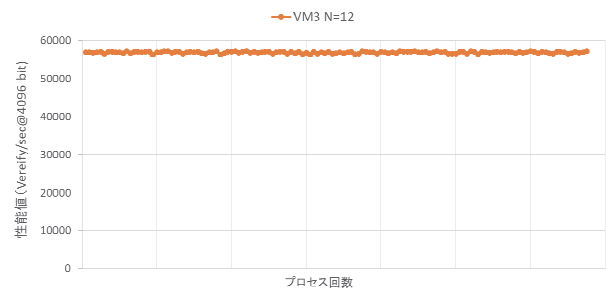


図 8 VM3 N=12, VM4 アイドル状態

図 7(d)では、VM3 は全コアの N=12 を使う命令を、VM4 は、N=8 の命令がされている。しかし、物理コア数は、16 しかないので、VM で消費するコアが不足している状態である。そのため、VM3 と VM4 の性能の推移は、VM3 の性能が下がれば VM4 の性能が上がるようにバランスされる様子が分かる。次に、VM4 はアイドル状態で、VM3 で全コアの N=12 を使う命令を実行して性能値を測定して、図 8 に示す。VM4 は、アイドル状態なので、VM3 の性能値は安定している。この性能値の平均値は、57011 verify/sec であった。一方、図 7(a)の VM3 の性能値の平均値は、55677 verify/sec であり、両者を比較すると、図 7(a)の場合のほうが、約 2.3%性能が低い。図 7(a)の状態では、VM4 の稼働率は、16.7% (2/12) と低いが、同一ホスト上の VM3 の性能値に影響を与えていることが分かる。

#### 4.2.3 オーバコミット 125%の環境での性能測定(実験 3)

4.2.2 の実験 2 の VM3 は、100%の CPU 稼働率の場合であった (12vCPU 中 12 コアで実行)。本節では、実運用を考慮してもう少し稼働率の低い状態を検討する。HostA に



VM5 と VM6 を構築し、VM5 は、12 コア、VM6 は 8 コアを割り当てた。表 5 に VM5 と VM6 のスペックを示す。

表 5 VM5 と VM6 のスペック

	vCPU数	Memory	HDD	N=
VM5	12	8 GB	50 GB	8 (固定)
VM6	8	8 GB	50 GB	2, 4, 6, 8

オーバコミット率は、125% (20/16) である。VM5 では、8 コアで実行するように(1)の引数を N=8 とし、VM6 は、N=2, 4, 6, 8 とした。これらの実行コア数では、VM5 は、67%の CPU 稼働率(8vCPU/12vCPU)、VM6 は、25%、50%、75%、100%の稼働率となる。この VM5 の稼働率の 67%は、実際の運用時の高稼働率状態を想定した稼働率である。次に、VM6 を HostB へマイグレーションさせた後に、同様の稼働率でそれぞれのホストで動作させた。VM5、VM6 の性能値の遷移を図 9 に示す。マイグレーション前は、VM5、VM6 は HostA で稼働しているので、前節で得られた結果と同様に VM6 の実行コア数が増えるにしたがって、VM5 の性能値は低下していく。そして、マイグレーション後は、VM5 は同じ性能値を示し、VM6 は実行コア数に応じて、同じ割合で(コア数に比例して)性能が上昇していく。マイグレーション後は、HostA には VM5 が、HostB には VM6 が、それぞれひとつの VM だけが動作しているので、本来の性能が得られていると考えられる。

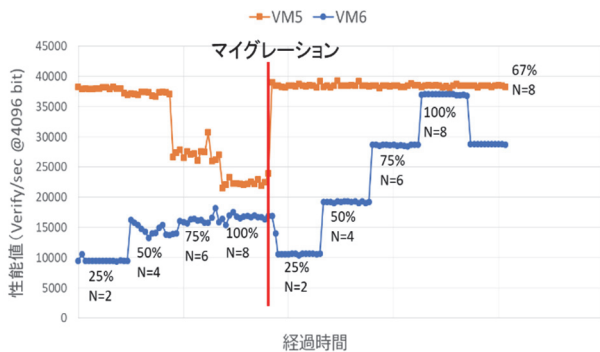


図 9 VM5、VM6 の性能値の推移

#### 4.3 閾値の検討

実験 2、実験 3 で CPU がオーバコミット状態で割り当てられた VM は、一方の VM が高稼働率状態のときに、同一ホスト上の VM の稼働率が少しでも上昇すると、高稼働率の VM の性能値は下がり始めることを確認した。実験 3 では、Host の物理コア数が 16 に対して、VM への CPU の割り当てこそ、12 vCPU、8vCPU とオーバコミット状態だが、実際の稼働は、マイグレーション前の初期状態で、VM5:8 vCPU、VM6:2vCPU、マイグレーション前最後の状態で VM5:8 vCPU、VM6: 8 vCPU と物理コアに対してはコアが不

足していないにも関わらず性能は低下した。実行コア数としては、それぞれの VM で 8 コアずつである。オーバコミットしていない実験 1 では、それぞれ 8 コアで実行した場合、互いの性能に干渉することなく動作した結果から考えても、vSphere の環境では VM への vCPU 数の割り当てが、重要であることが分かる。実験 3 でのマイグレーション後の VM5 の性能値を本来の性能としたときのそれぞれの状態の性能低下の様子を図 10 に示す。

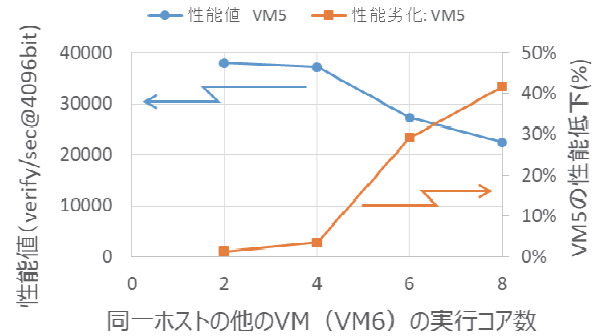


図 10 同一ホストの他の VM6 の実行コア数と VM5 の性能値の関係

VM5 の性能値は、VM6 の実行コア数が 4 を超えると急激に低下する結果が観測された。VM5 の性能を落とさないように、マイグレーションを実施するため閾値を考える場合、図 10 の例では、VM6 の稼働率が 50% (実行コア数 4) を越える場合を閾値とすることで、VM5 の利用者には、ほぼ性能を落とさずにサービスを提供できる。このように、同一ホスト上の VM の稼働率と性能低下のデータを取得して、かつ、性能低下の許容値を決めておくことで、許容値内で、マイグレーションを使った性能とサーバラックの高稼働率を両立した運用ができると考えられる。

#### 4.4 サービスの運用方法

本論文のデータセンタ運用方法は、サーバの実際の稼働状況に合わせた消費電力をもとに、ラックへのサーバ搭載台数を決定し、ラックの電力を監視しながら、閾値に到達した場合に、ホストサーバで稼働中の VM を予めマイグレーション先として決めたラックに移動させることで、ラックの消費電力を閾値内に収めることによって、高稼働率を維持する。これにより、ラックあたりの VM 数が増えることで利用者に良質なサービスを提供できるようになる。ホストの電力を下げるためのマイグレーションを実行する際には、ホスト上のすべての VM をマイグレーション対象とする方法と、いくつかの VM を選択してマイグレーションする方法が考えられる。後者の場合、どの VM を選択するかを決める必要があるが、4.3 の検討で、ホストの VM の稼働率と性能を把握することで適切な閾値を決めることができる。

## 5. 関連研究

データセンタの効率化のアプローチから関連研究を整理する。X. Fan らは[11], Google のデータセンターにおいて、データセンタレベルで電力プロビジョニングの重要性を示した。供給電力に対する使用電力を見積もる際に、サーバの定格電力値で見積もると常に 100% で稼働しない限り、供給電力と使用電力に乖離が生じる。定格電力値を使わずに、実際の使用電力で見積もることを *over provisioning* と呼んでいる。Q. Wu らは[12], データセンタの分電盤の配置・分配のレベルで監視とマネジメントを行う *Dynamo* と名付けたシステムを使った *over provisioning* を提案した。このシステムでは、供給電力を越えそうな場合、サーバの電力キャッピングの機能を使い、サーバの消費電力を下げている。電力キャッピング機能とは、サーバの消費電力を予め定めた上限値以下にする機能であり、Intel 製の CPU の場合、バンダー製サーバの多くが BMC の機能として提供していて、IPMI [6] や *Data Center Infrastructure Management (DCMI)* [13] で API が定義されている。無停電電源装置 (UPS) を使って、UPS に貯めた電力を効率よく使い稼働率を向上させる研究もある[14], [15], [16]。研究ターゲットを絞ったデータセンタのトラフィックや VM のマイグレーションコストの視点からの効率化の研究は多い[17], [18], [19]。Anton Beloglazov らは[20], ネットワークやハードウェアリソースなどの幾つかのポリシーに基づいた VM の最適化を提案している。Haikun Liu らは[21], パフォーマンスと電力の視点から VM のマイグレーションコストの見積もりを行った。

## 6. まとめ

本論文では、データセンタのラックの稼働効率 (実際に消費している電力/ラックに供給されている電力) を上げることで、スペースの削減と空調の冷却効率の向上、そして、より多くのサービスの提供ができることを約 6000 サーバ規模のデータセンタで見積もった。その結果、スペースを 40% 削減できることを示した。さらに、VM のマイグレーションにより、ラックの稼働効率を高い状態で維持するデータセンタの運用手法を提案し、オーバコミット状態であった場合でも、ホストサーバ上の複数の VM の性能変化を予め把握しておくことにより、数%の性能の低下に抑えながら運用できることを示した。特に、同一ホスト上の VM の稼働率の変化に起因する VM の性能の変化は、線形ではない特性を示した。この特性の変化を利用しながら、本提案の VM 配置制御を行うことで、性能の劣化を抑えつつ低価格のサービスを提供するデータセンタの運用が可能である。

### 謝辞

本論文で提案したデータセンタ運用システムのプロト

タイプの作製にご協力いただいた、富士通コンピューターテクノロジー株式会社 小島数実氏、河西隆徳氏に感謝致します。

## 参考文献

- [1] The Dell Enterprise Infrastructure Planning Tool. Available at <http://dell-eipt-landingpage.azurewebsites.net/>
- [2] HPE Power Advisor Utility. Available at [http://h50146.www5.hpe.com/products/servers/proliant/power\\_ador.html](http://h50146.www5.hpe.com/products/servers/proliant/power_ador.html)
- [3] Fujitsu Power Calculator. Available at <http://www.fujitsu.com/jp/products/computing/servers/primergy/technical/calculate/>
- [4] Luiz André Barroso, Jimmy Clidaras, and Urs Hölzle. "The Datacenter as a Computer: An Introduction to the Design of Warehouse-Scale Machines, Second Edition." Morgan & Claypool Publishers, 2013, pp.84-86.
- [5] 例えば, Fujitsu Integrated Remote Management Controller. Available at <http://manuals.ts.fujitsu.com/index.php>
- [6] Intelligent Platform Management Interface Specification 2nd Generation Available at <https://www.intel.com/content/www/us/en/servers/ipmi/ipmi-second-gen-interface-spec-v2-rev1-1.html>
- [7] VMware vSphere API Reference Documentaion. Available at <https://www.vmware.com/support/developer/vc-sdk/visdk41pubs/ApiReference/>
- [8] VMware vSphere ESXI vCenter Server 6.5 Host Management Guide. pp.123.
- [9] Intel Chapter 2: P-States: Reducing Power Consumption Without Impacting Performance. Available at [https://software.intel.com/en-us/articles/power-management-states-p-states-c-states-and-package-c-states#\\_Toc383778909](https://software.intel.com/en-us/articles/power-management-states-p-states-c-states-and-package-c-states#_Toc383778909)
- [10] Openssl command list. Available at <https://www.openssl.org/>
- [11] X. Fan, W. Weber, and L. A. Barroso. "Power provisioning for a warehouse-sized computer." In Proceedings of the 34th Annual International Symposium on Computer Architecture (ISCA '07), 2007, pp. 13-23.
- [12] Qiang Wu, Qingyuan Deng, Lakshmi Ganesh, Chang-Hong Hsu, Yun Jin, Sanjeev Kumary, Bin Li, Justin Meza, and Yee Jiun Song. "Dynamo: Facebook's Data Center-Wide Power Management System" In Proceedings of the 43rd ACM/IEEE International Symposium on Computer Architecture (ISCA2016), 2016, pp. 469-480.
- [13] Data Center Manageability Interface Specification. v1.5. Intel Corporation, 2011, pp.42-46
- [14] V. Kontorinis, L.E. Zhang, B. Aksanli, J. Sampson, H. Homayoun, E. Pettis, D.M. Tullsen, and T. Simunic Rosing. "Managing distributed ups energy for effective power capping in data centers." In Proceedings of the 39th Annual International Symposium on Computer Architecture (ISCA '12), 2012, pp.488-499.
- [15] D. Wang, C. Ren, A. Sivasubramaniam, B. Urgaonkar, and H. Fathy. "Energy Storage in Datacenters: What, Where, and How much?"; Proceedings of the 12th ACM SIGMETRICS/PERFORMANCE joint international conference on Measurement and Modeling of Computer Systems (SIGMETRICS '12), 2012, pp.187-198.
- [16] S. Govindan, D. Wang, A. Sivasubramaniam, and B. Urgaonkar. "Leveraging Stored Energy for Handling Power Emergencies in Aggressively Provisioned Datacenters." Proceedings of the seventeenth international conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems. (ASPLOS 2012), 2012, pp.75-86.

- [17] C. Ghribi, M. Hadji, and D. Zeghlache. "Energy efficient vm scheduling for cloud data centers: Exact allocation and migration algorithms". Cluster, Cloud and Grid Computing (CCGrid), 13th IEEE/ACM International Symposium on. IEEE, 2013, pp. 671-678.
- [18] VU, Hieu Trong; HWANG, Soonwook. A traffic and power-aware algorithm for virtual machine placement in cloud data center. International Journal of Grid & Distributed Computing, 2014, 7.1: 350-355.
- [19] Garg, Saurabh Kumar, et al. "SLA-based virtual machine management for heterogeneous workloads in a cloud datacenter." Journal of Network and Computer Applications 45 (2014): 108-120.
- [20] A. Beloglazov and R. Buyya. "Energy Efficient Resource Management in Virtualized Cloud Data Centers" Proceedings of the 2010 10th IEEE/ACM international conference on cluster, cloud and grid computing. IEEE Computer Society, 2010. pp. 826-831.
- [21] H. Liu, H. Jin, C. Z. Xu, and X. Liao. "Performance and energy modeling for live migration of virtual machines" Cluster computing, 201316(2), pp. 249-264.