

トラフィック予測に基づくハイブリッドクラウドシステムの コストと性能の評価

小川祐紀雄[†] 長谷川 剛^{††} 村田 正幸^{†††}

[†] 日立製作所 IT プラットフォーム事業本部 〒 103-0027 東京都中央区日本橋 1-2-19

^{††} 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 大学院情報科学研究科 〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-5

E-mail: †yukio.ogawa.xq@hitachi.com, ††hasegawa@cmc.osaka-u.ac.jp, †††murata@ist.osaka-u.ac.jp

あらまし 本稿では、アプリケーションシステムを通常時はオンプレミス型プライベートデータセンタで稼働させ、計算リソース要求が増加した時にパブリックデータセンタへスケールアウトするという、ハイブリッドクラウドでのクラウドバースティングを対象とする。アプリケーションへのリクエストトラフィック量を予測し、応答制約を満たす最小の計算リソースを、逐次、各データセンタに配備することができれば、応答性能を保ちつつ全体コストを低減させることが可能になる。ハイブリッドクラウドの全体コストモデルを提案し、実観測データを利用して ARIMA モデルによるリクエストトラフィック予測を行い評価を行った結果、本稿の設定条件下では、プライベートデータセンタのみの処理に比較してハイブリッドクラウドでは全体コストが約 1/2 に低減できることを示す。さらに、応答制約を満たさないタイムスロットの割合と全体コストはトレードオフの関係にあることを示す。

キーワード ハイブリッドクラウド、データセンタ、トラフィック予測、全体コスト、応答性能

Cost and Performance Evaluation of Hybrid Cloud Systems Based on Traffic Prediction

Yukio OGAWA[†], Go HASEGAWA^{††}, and Masayuki MURATA^{†††}

[†] IT Platform Division Group, Hitachi, Ltd. 1-2-19, Nihonbashi, Chuo-ku, Tokyo, 103-0027 Japan

^{††} Cybermedia Center, Osaka University 1-32, Machikaneyama, Toyonaka-shi, 560-0043 Japan

^{†††} Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University 1-5, Yamadaoka, Suita-shi, 565-0871 Japan

E-mail: †yukio.ogawa.xq@hitachi.com, ††hasegawa@cmc.osaka-u.ac.jp, †††murata@ist.osaka-u.ac.jp

Abstract In this report, we focus on the cloud bursting scenario of hybrid cloud systems, in which an on-premise application system runs in a private data center and bursts into a public data center when total demand surpasses the private data center capacity due to demand spikes. In this scenario, we can reduce the total cost of an application system in the hybrid cloud environment (called a hybrid cloud system) and meet response time constraints, as long as we can successively predict the demand for the system and deploy minimum computing resources for maintaining the constraints in advance. Through numerical simulations with demand prediction using ARIMA model, we evaluated the total cost and response time of a hybrid cloud system. Under our settings, the total cost decreased by about 50% compared to the case of the application system deployed in a private data center alone. We also showed a trade-off between the ratio of time slots exceeding response time constraints and the total cost.

Key words hybrid cloud, data center, traffic prediction, total cost, response time constraint

1. はじめに

広域ネットワークの広帯域化を背景に、オンプレミス型プラ

ivateクラウドとパブリッククラウドを組み合わせるアプリケーションシステムを構成するハイブリッドクラウドが普及しつつある [1]。このシステムは、セキュリティ・コンプライア

ス問題 [2] に対しては従来型のプライベートデータセンタの利用により回避しつつ、計算リソース要求の急激な増加に対してはパブリックデータセンタを利用するといったユースケースなどで利用される。このユースケースにおいて、計算リソースを定期的にプライベートデータセンタに配備し、リソース不足時にパブリックデータセンタへスケールアウトを行う方式をクラウドバースティングと呼ぶ [3]。本報告では、このクラウドバースティングを対象し、プライベートとパブリックの各データセンタ間の負荷分散を適切に行うことで、サービスレベルを守りつつ全体コストを最小化することを目的とする。なお、以降では、ハイブリッドクラウドを用いて配備したアプリケーションシステムをハイブリッドクラウドシステムと呼ぶ。

クラウドバースティングの実現に向けて、商用などの製品では、計算リソースの CPU 利用率などの監視機能や、仮想サーバのスケールアウト機能などの基本機能が利用可能である [4]。しかし、いつ、何を基準にパブリックデータセンタの計算リソースを利用するかといった運用方針は、管理者に任されている。一方、クラウドバースティングの自動化に向けた研究は、大規模アプリケーション処理の投入量を把握しながら制御を行う反応型制御と、大量の小規模アプリケーション処理のリクエスト量を逐次に予測しながら制御を行う予測型制御に大きく分けられる。前者の例として、大規模な並列数値計算アプリケーションを対象に、数 10 分～数 10 時間のジョブ完了時間の制約を守るよう実行時間を推定しながらプライベート/パブリックデータセンタの計算リソース選択・スケジューリングを行う方式が提案されている [5], [6]。また、後者の例として、企業アプリケーションに対して負荷を予測しながら仮想サーバの移行コストを最小化するようアプリケーション配備位置を決定する方式 [7]、ビデオストリーミングを対象にリクエスト受信率を推定しデータアクセス負荷 (キャッシュ利用) やレプリケーション負荷を最小化するようデータを分散配置する方式 [8]、生産システム向けウェブサービスを対象に仮想サーバの利用率が一定以下になるように制約を設けながら全体コストを最小化する方式 [9] が提案されている。本稿では、エンドユーザが対話的に利用するウェブシステムを対象とし、上記後者の制御方式を評価する。文献 [9] と同じく全体コストを最小化するプライベートおよびパブリックデータセンタの計算リソース量を評価するが、対話型アプリケーションであることからシステム応答時間を制約とし、さらに、リクエスト変動量が大きいことを考慮し、リクエスト受信率の予測誤差が全体コストやシステム応答時間へどのように影響するかを評価する。

以下、本稿では、クラウドバースティングにおける全体コストとシステム応答性能の最適化を図る。まず、ハイブリッドクラウドシステムの概要を示し、各データセンタに配備する仮想サーバ台数を決定する運用シナリオを説明する。次に、評価モデルとして、リクエスト受信率の予測方式、リクエスト応答時間の推定方式、全体コストの算出方式について説明する。さらに、実アプリケーションシステムの観測データを用いて評価を行い、ハイブリッドクラウドシステムのコスト優位性、リクエスト受信率予測誤差に起因する応答制約を満たさない時間区間

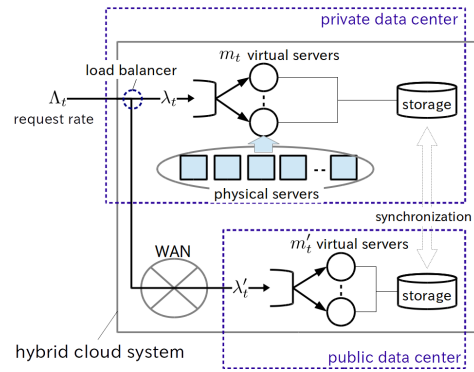


図 1 ハイブリッドクラウドシステムの構成

の比率と全体コストのトレードオフの関係を示す。

以下、2. 章ではハイブリッドクラウドシステムの構成と運用シナリオを説明する。3. 章において評価モデルを構築し、4. 章では実システムを想定した全体コストと応答性能の評価を行う。最後に 5. 章で本稿のまとめと今後の課題を述べる。

2. システム構成と運用シナリオ

ハイブリッドクラウドシステムの概要を図 1 に示し、主な変数・定数の表記を表 1 に示す。パブリックデータセンタに関連した変数は ' を付す。また、変数の推定値を表す場合は ^ を付して表す。例えば変数 Λ_t の推定値は $\hat{\Lambda}_t$ と表記する。図 1 に示すように、ハイブリッドクラウドシステムは、プライベートデータセンタにおいて物理サーバから切り出した仮想サーバ、広域ネットワーク経由で接続するパブリックデータセンタから借用した仮想サーバ、および、各データセンタにリクエストを振り分けるためのロードバランサから構成される。なお、各データセンタのデータストレージは常に同期しているとする。

本稿のハイブリッドクラウドシステムの運用では、パブリックデータセンタの計算リソース課金時間周期にあわせて仮想サーバ台数の制御時刻単位を設定する。以降では、代表的なパブリックデータセンタ [10] の課金時間周期である 1 時間にあわせ、制御時刻単位を 1 時間と設定する。なお、この制御時刻の間隔をタイムスロットと呼ぶ。

サービスレベルの指標としてシステム応答時間を用い、タイムスロット t の応答時間分布の q パーセンタイル値 $r_t^q, r'_t{}^q$ を事前に推定しながら $\hat{r}_t^q \leq R, \hat{r}'_t{}^q \leq R$ となるように、各データセンタの仮想サーバ台数を設定する。本稿では、全体コストを最小化するために、仮想サーバ台数を応答制約を守ることが可能な最小限の台数にまで削減することを基本方針とする。以下、ハイブリッドクラウドシステムの運用シナリオを説明する。

step 1: プライベートデータセンタの最大処理性能、つまり、 m_{max} 台の仮想サーバで処理可能なリクエスト受信率 λ_{max} を算出する。このリクエスト受信率 λ_{max} は、仮想サーバ台数 m_{max} のときに $\hat{r}_t^q = R$ となる値である。

step 2: タイムスロット t において、過去の観測値に基づきタイムスロット $t+1$ におけるハイブリッドクラウドシステム全体のリクエスト受信率の推定値 $\hat{\Lambda}_{t+1}$ を算出する。

step 3: $\hat{\Lambda}_{t+1} \leq \lambda_{max}$ であれば、全リクエストをプライベート

表 1 主な変数・定数の表記

$\Lambda_t, \lambda_t, \lambda'_t$	タイムスロット t における、ハイブリッドクラウドシステム全体 / プライベートデータセンタ / パブリックデータセンタでの各リクエスト受信率 (タイムスロット t での平均値) ($\Lambda_t = \lambda_t + \lambda'_t$)
λ_{max}	プライベートデータセンタで処理可能なリクエスト受信率最大値
μ	プライベートデータセンタおよびパブリックデータセンタの仮想サーバ 1 台あたりのリクエスト処理率
m_t, m'_t	プライベートデータセンタ / パブリックデータセンタにおいてタイムスロット t に稼動している各仮想サーバ台数 ($m_t \leq m_{max}$)
m_{max}	プライベートデータセンタに配備可能な仮想サーバ台数最大値
$r_t^q, r'_t{}^q$	プライベートデータセンタ / パブリックデータセンタにおけるタイムスロット t の各応答時間分布の q パーセンタイル値
R	応答時間のしきい値

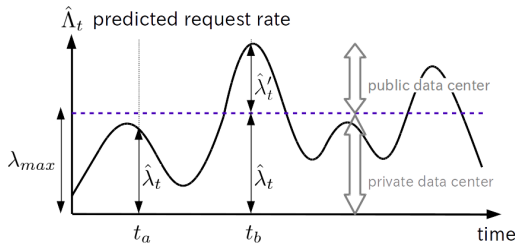


図 2 リクエスト振り分け方式の概要

データセンタで処理可能である (図 2, t_a)。各データセンタへのリクエスト受信率を $\hat{\lambda}_{t+1} = \hat{\Lambda}_{t+1}$, $\hat{\lambda}'_{t+1} = 0$ と推定する。これに従い, m_{t+1} をリクエスト受信率 $\hat{\lambda}_{t+1}$ に対して $\hat{r}_{t+1}^q = R$ となる台数に設定し, $m'_{t+1} = 0$ と設定する。

step 4: $\hat{\Lambda}_{t+1} > \lambda_{max}$ であれば, タイムスロット $t+1$ において, プライベートデータセンタの処理性能以上の負荷をパブリックデータセンタに転送する (図 2, t_b)。各データセンタへのリクエスト受信率を $\hat{\lambda}_{t+1} = \lambda_{max}$, $\hat{\lambda}'_{t+1} = \hat{\Lambda}_{t+1} - \lambda_{max}$ と推定する。これに従い, $m_{t+1} = m_{max}$ とし, m'_{t+1} はリクエスト受信率 $\hat{\lambda}'_{t+1}$ に対して $\hat{r}'_{t+1}{}^q = R$ となる台数に設定する。

step 5: タイムスロット t から $t+1$ に切り替わるときに, プライベートデータセンタにおいて $m_{t+1} - m_t$ 台の仮想サーバを起動あるいは停止する。同様に, パブリックデータセンタにおいても $m'_{t+1} - m'_t$ 台の仮想サーバの起動または停止を行う。

step 6: タイムスロット $t+1$ においては, プライベートデータセンタとパブリックデータセンタのリクエスト受信率の比率が $\hat{\lambda}_{t+1} : \hat{\lambda}'_{t+1}$ となるようにリクエストを各データセンタに振り分ける。以降, step 2 に戻り処理を繰り返す。

3. 全体コスト評価モデル

全体コスト評価モデルとして, リクエスト受信率の予測, システム応答時間分布の推定, 全体コスト算出について説明する。

3.1 リクエスト受信率の予測

タイムスロット t におけるハイブリッドクラウドのリクエ

スト受信率 Λ_t を, 季節変動 (周期性) を考慮した ARIMA (自己回帰和分移動平均) モデル $ARIMA(p, d, q) \times (P, D, Q)_s$ [11] で表し, タイムスロット $t+1$ のリクエスト受信率 $\hat{\Lambda}_{t+1}$ を予測する。 Λ_t は, $ARIMA(p, d, q) \times (P, D, Q)_s$ により, 過去のデータと誤差, および, 過去の周期におけるデータと誤差の線形和として表される。ラグ演算子 B を $B\Lambda_t = \Lambda_{t-1}$ と定義すると, 次のように表される。

$$\begin{aligned} & \left(1 - \sum_{i=1}^p \phi_i B^i\right) \left(1 - \sum_{j=1}^P \Phi_j B^{js}\right) (1-B)^d (1-B^s)^D \Lambda_t \\ & = \left(1 + \sum_{i=1}^q \theta_i B^i\right) \left(1 + \sum_{j=1}^Q \Theta_j B^{js}\right) e_t \end{aligned} \quad (1)$$

上式の左辺第一括弧は p 次自己回帰過程, 左辺第二括弧は P 次季節変動自己回帰過程, 右辺第一括弧は q 次移動平均過程, 右辺第二括弧は Q 次季節変動移動平均過程をそれぞれ表し, $\phi_i, \Phi_j, \theta_i, \Theta_j$ はパラメータである。左辺第三括弧および第四括弧は, 時系列データである Λ_t を定常化させるための d 階差分演算および D 階季節差分演算を表す。 s は季節変動の期間である。また, e_t は誤差項であり, $e_t \sim N(0, \sigma^2)$ となる互いに独立な正規確率変数である。

一期先のタイムスロット $t+1$ におけるリクエスト受信率 $\hat{\Lambda}_{t+1}$ は, (1) 式において, t を $t+1$ と置き換え, 過去の観測値 $\Lambda_\tau (\tau \leq t)$, e_{t+1} の期待値 $E(e_{t+1}) = 0$ を代入することで算出する。このとき $\Lambda_{t+1} \sim N(\hat{\Lambda}_{t+1}, \sigma^2)$ となる。

3.2 システム応答時間分布の推定

本節では, プライベートデータセンタでの応答時間分布の推定について説明する。なお, パブリックデータセンタの場合も同様である。タイムスロット t におけるプライベートデータセンタからの応答時間 r_t は, 同タイムスロットでのデータセンタ内処理時間を d_t 、広域ネットワークおよびデータセンタ内の伝送時間合計を L (定数) として,

$$r_t = d_t + L \quad (2)$$

と定義する。なお, プライベートデータセンタでは広域ネットワークに関する伝送時間は 0 である。タイムスロット t におけるプライベートデータセンタからの応答時間分布の q パーセンタイル値 r_t^q も, 同様に, 同タイムスロットのデータセンタ内処理時間分布の q パーセンタイル値を d_t^q として,

$$r_t^q = d_t^q + L \quad (3)$$

と表す。プライベートデータセンタにおける処理時間の累積分布関数を F とし, タイムスロット t のデータセンタ内処理時間 d_t 、リクエスト強度 ρ_t ($\rho_t = \lambda_t / \mu$)、仮想サーバ台数 m_t の関数 $F(d_t, \rho_t, m_t)$ として表す。データセンタ内処理時間分布の q パーセンタイル値 d_t^q は,

$$F(d_t^q, \rho_t, m_t) = \frac{q}{100} \quad (4)$$

を満たす値である。 $F(d_t, \rho_t, m_t)$ は, M/M/m 待ち行列モデル [12] を用いて次のように表す。なお, ウェブアプリケーション

システムは一般に非同期処理で応答を返すことを考慮し、 $M/M/m$ 待ち行列モデル [12] における待ち時間をプライベートデータセンタの処理時間とする。

$$F(d_t, \rho_t, m_t) = 1 - \pi_t e^{-m_t \mu (1 - \rho_t) d_t} \quad (5)$$

ここで、 π_t はタイムスロット t においてリクエストが処理待ちになる確率であり、次のように定義される。

$$\pi_t = \frac{(m_t \rho_t)^{m_t}}{m_t! (1 - \rho_t)} \left[1 + \frac{(m_t \rho_t)^{m_t}}{m_t! (1 - \rho_t)} + \sum_{n=1}^{m_t-1} \frac{(m_t \rho_t)^n}{n!} \right]^{-1} \quad (6)$$

3.3 全体コストの算出

本稿では、タイムスロット t 毎にリクエスト受信率予測値に基づいて仮想サーバ数を最小限に設定し、期間 T におけるハイブリッドクラウドシステムの全体コスト TC を最小化することを目的とする。

Objective: minimize

$$TC = \sum_{t=1}^T (a C_{cap}(m_{max}, m_t) + a' C'_{cap}(m'_t, \lambda'_t) + C_{ope}(m_{max}, m'_t)) \quad (7)$$

Subject to:

$$\hat{r}_t^q \leq R, \quad (i.e., F((\hat{r}_t^q - L), \frac{\hat{\lambda}_t}{\mu}, m_t) \leq \frac{q}{100}) \quad (\forall t) \quad (8)$$

$$\hat{r}'_t^q \leq R \quad (i.e., F((\hat{r}'_t^q - L'), \frac{\hat{\lambda}'_t}{\mu}, m'_t) \leq \frac{q}{100}) \quad (\forall t) \quad (9)$$

目的関数 (7) の括弧内第一項はプライベートデータセンタでの設備・装置コスト、第二項はパブリックデータセンタから借用する装置コスト、第三項はそれらの管理コストを示す。それぞれ、プライベートデータセンタでの仮想サーバに関連したコスト $C_{cap}(m_{max}, m_t)$ 、パブリックデータセンタでの仮想サーバに関連したコスト $C'_{cap}(m'_t, \lambda'_t)$ 、およびそれらの管理コスト $C_{ope}(m_{max}, m'_t)$ をもとに算出する。 a および a' は、各データセンタにおいて仮想サーバに基づくコストからネットワークやストレージなどを含む全体コストを推定するための定数である。なお、 $C_{cap}(m_{max}, m_t)$ 、 $C'_{cap}(m'_t, \lambda'_t)$ 、 $C_{ope}(m_{max}, m'_t)$ は、タイムスロット当たりの値として考える。 $C_{cap}(m_{max}, m_t)$ も、レンタル/リース期間で割りタイムスロットあたりのコスト値とする。

制約条件 (8) は、タイムスロット t におけるプライベートデータセンタの応答時間分布の q パーセンタイル推定値 \hat{r}_t^q がしきい値 R 以下となることである。これは式 (5) が $q/100$ 以下となるよう、応答時間分布の q パーセンタイル推定値 \hat{r}_t^q とリクエスト受信率推定値 $\hat{\lambda}_t$ をもとに仮想サーバ台数 m_t を調整することに等しい。パブリックデータセンタを対象とした制約条件 (9) についても同様である。

プライベートデータセンタにおける仮想サーバに関連したコスト $C_{cap}(m_{max}, m_t)$ は次のように定める。

$$C_{cap}(m_{max}, m_t) = C_{vm}(m_{max}) + C_{pwr}(m_t) \quad (10)$$

$$C_{vm}(m_{max}) = \frac{c_{srv}}{M} m_{max} \quad (11)$$

$$C_{pwr}(m_t) = c_{eb} \left(p_{srv} (1 - E) H(m_t) + \frac{p_{srv} E}{M} m_t \right) \quad (12)$$

式 (11) は、最大 m_{max} 台の仮想サーバを配備するためのリソースプール (物理サーバ) のコストであり、 c_{srv} はタイムスロット当たりの物理サーバの装置コスト、 M は物理サーバ当たりの仮想サーバ台数である。式 (12) は、仮想サーバ台数 m_t に依存する電力コストであり、物理サーバのエネルギー比例特性 [13] を仮定して求める。 c_{eb} はタイムスロット当たりの電力量料金、 p_{srv} は物理サーバ当たりの消費電力、 E はエネルギー比例係数 [13]、 $H(m_t)$ は仮想サーバ m_t 台を稼働させるために必要な物理サーバの台数である。

次に、タイムスロット t におけるパブリックデータセンタの仮想サーバに関するコスト $C'(m'_t, \lambda'_t)$ は次のように定める。

$$C'_{cap}(m'_t, \lambda'_t) = c'_{vm} m'_t + c'_{trf} G_{trf}(\lambda'_t) \quad (13)$$

右辺第一項は、仮想サーバをオンデマンドで利用するためのコストであり、 c'_{vm} は、仮想サーバ・タイムスロット当たりの利用コストである。右辺第二項は、リクエスト推定量 λ'_t に依存するデータ転送コストである。 c'_{trf} はデータ量あたりの転送コストであり、 $G_{trf}(\lambda'_t)$ はタイムスロット当たりのデータ転送量である。なお、パブリックデータセンタに接続する広域ネットワークのコストについては、他システムと共用、かつ、定額利用料金と仮定して、ハイブリッドクラウドシステム固有のコストには算入しない。

最後に、タイムスロット t における管理コスト $C_{ope}(m_{max}, m'_t)$ を次のように定める。

$$C_{ope}(m_{max}, m'_t) = C_{ope,pvt}(m_{max}) + C_{ope,pbi}(m'_t) \quad (14)$$

$$C_{ope,pvt}(m_{max}) = c_{stf} m_{max} \quad (15)$$

$$C_{ope,pbi}(m'_t) = c_{stf} m'_t \quad (16)$$

c_{stf} は仮想サーバ・単位時間あたりの管理コスト (人件費) である。報告者の知識・経験より、プライベートデータセンタ内の小・中規模アプリケーションシステムについては、リソースプール規模 (物理サーバ台数) に依存すると定める。従って、プライベートデータセンタでの管理コスト (式 (15)) は、仮想サーバ台数最大値 m_{max} に依存させる。一方、プライベートデータセンタからパブリックデータセンタを管理するコスト (式 (16)) は、仮想サーバ稼働台数 m'_t に依存させる。

4. 評価

あるプライベートデータセンタにおける 3 万人規模ユーザが利用するウェブシステムを用い評価を行った。このシステムの 2014 年 4 月 ~ 8 月の 4 ヶ月分のアクセスログをもとに評価用リクエストトラヒックを作成して以下の解析に利用した。

4.1 評価のためのシステム条件設定

システム応答時間分布の推定において、広域ネットワークとデータセンタ内の伝送時間合は、プライベートデータセンタで $L = 0.001$ (s)、パブリックデータセンタで $L' = 0.014$ (s) とし

た。また、応答制約 (8) と (9) においては、 $q = 95$ 、 $R = 0.15(s)$ として $\hat{r}_t^{95} \leq 0.15$ 、 $\hat{r}'_t^{95} \leq 0.15$ と設定した。

以下に、プライベートデータセンタの設定条件を列挙する。

- 物理サーバ (CPU コア数 12、メモリ 32GB) [14] の最大数を 4 とし、物理サーバ 1 台あたりの仮想サーバ数 $M = 2$ (仮想サーバ最大数 $m_{max} = 8$) とした。また、仮想サーバの処理性能 $\mu = 5.5$ (リクエスト/s) とした。

- 物理サーバのリース期間を 4 年とし、一台・タイムスロット当たりのコストを $c_{srv} = 436,000(\text{円/台}) / (4 \times 365 \times 24)(\text{h}) = 12.4(\text{円/台 h})$ とした。

- 物理サーバの消費電力を $p_{srv} = 550(\text{W})$ 、エネルギー比例係数 $E = 0.6$ 、電力量料金 $c_{eb} = 16(\text{円/kWh})$ [15] とした。

- データセンタの管理スタッフ数を仮想サーバ 100 台当たり 1 人 [16] とし、一人月の人件費をもとに、仮想サーバ・タイムスロット当たりの管理コストは $c_{stf} = 900,000(\text{円}) / (30 \times 24)(\text{h}) / 100(\text{台}) = 12.5(\text{円/台 h})$ とした。

- データセンタ総額に占めるサーバの割合は約 50% [16] とし、目的関数 (7) において $a = 2$ とした。

次に、パブリックデータセンタの設定条件を挙げる。

- プライベートデータセンタに対応するよう仮想サーバ (Amazon EC2, m4.xlarge インスタンス (vCPU:4、メモリ:16GiB) [10]) を選択した。仮想サーバの処理性能はプライベートデータセンタと同じく $\mu = 5.5$ (リクエスト/s) とした。

- オンデマンドでの利用料金は、仮想サーバ・タイムスロットあたり $c'_{vm} = 0.366$ (ドル/台 h) [10] とした。

- データ転送料金は、データ量あたり $c'_{trf} = 0.14$ (ドル/GB) [10] とした。なお、データ転送は、リクエストに対するレスポンス、および、ストレージの同期時に発生する。

- ストレージやネットワークなど含むパブリックデータセンタ利用料金総額に占める仮想サーバの割合は約 80% [10] とし、目的関数 (7) において $a' = 1.25$ とした。

- 円とドルの為替レートは、1 ドル=120 円とした。

4.2 リクエスト受信率の予測

予備的な解析により、リクエスト受信率の季節変動周期を 1 週間 ($24 \times 7 = 168$ 測定点) とし、 $ARIMA(p, 1, q) \times (0, 1, 0)_{168}$ を仮定した。リクエスト受信率に対し対数変換を行った上で、逐次、前 2 週間分のデータを用いて (p, q) 値を求め 1 期先のリクエスト受信率を予測した。ARIMA モデルの選択では、統計解析ソフト R [17] を利用し、 $0 \leq p \leq 5$ 、 $0 \leq q \leq 5$ の範囲から赤池情報量基準 [11] が最小となる (p, q) を選んだ。

リクエスト受信率の予測値 (点予測 ($\sigma = 0$)) と実測値の例を図 3 に示し、予測精度の評価結果を図 4 に示す。図 4 は各受信率実測値に対する予測値の誤差 (平均値、5 および 95 パーセンタイル値) を示す。本稿での適用方式 ($ARIMA(p, 1, q) \times (0, 1, 0)_{168}(\log)$) に対する比較のため、対数変換を行わない方式 ($ARIMA(p, 1, q) \times (0, 1, 0)_{168}$)、さらに季節変動を考慮しない方式 ($ARIMA(p, 1, q)$) も示している。図 4(b) より、季節変動の考慮によりリクエスト受信率の変動に追従できていること、さらに、図 4(a) より、対数変換によりリクエスト受信率が大きい場合の予測誤差を抑えられている

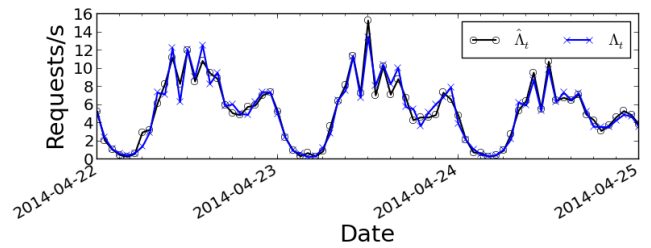
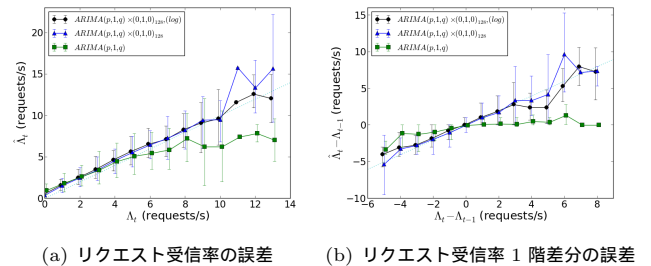


図 3 リクエスト受信率の予測値と測定値の例



(a) リクエスト受信率の誤差 (b) リクエスト受信率 1 階差分の誤差

図 4 リクエスト受信率の予測誤差

ことが示されている。

4.3 全体コストと応答性能

リクエスト受信率の点予測 ($\sigma = 0$) を用い、プライベートデータセンタでの仮想サーバの配備数上限 m_{max} をパラメータとして全体コスト (目的関数 (7)) を評価した結果を図 5(a) に示す。なお、図 5(a) の縦軸は、物理サーバの装置コスト最大値 ($m_{max} = 8$ のときの $\sum_t a C_{vm}(m_{max})$) を 1 としたときの相対値で表している。以下、図 5(a) の各項目を説明する。

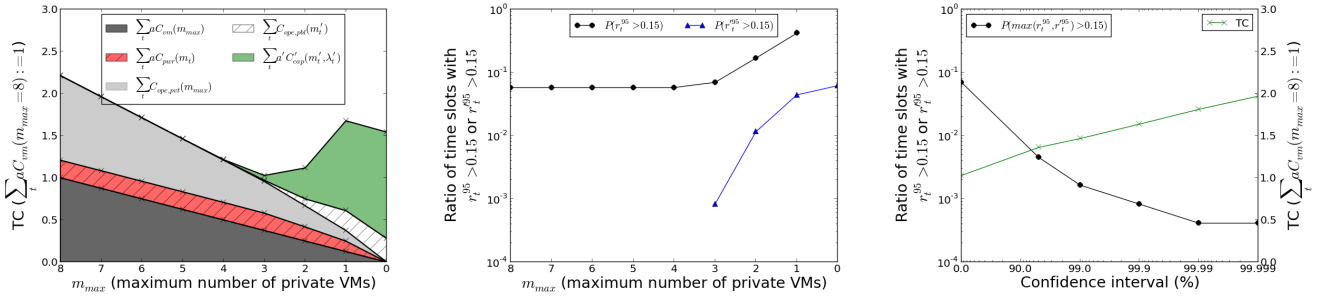
- プライベートデータセンタの装置コスト ($\sum_t a C_{vm}(m_{max})$) は m_{max} の減少に対応して単調減少する。プライベートデータセンタに関連した管理コスト ($\sum_t C_{ope,pvt}(m_{max})$) も同様の傾向である。

- プライベートデータセンタの電力コスト ($\sum_t a C_{pwr}(m_t)$) は仮想サーバ稼働台数 m_t に依存して変化する。ただし、 $m_{max} = 8$ から $m_{max} = 3$ へ変化させても、稼働率の変化が小さく電力コストの差がほとんど生じない。

- パブリックデータセンタの装置コスト ($\sum_t a' C'_{cap}(m'_t, \lambda'_t)$) は、ほぼオンデマンドでの仮想サーバ利用コスト ($\sum_t a' c'_{vm}(m'_t)$) に等しく、 $m_{max} = 3$ より小さくなると急激に増加する。パブリックデータセンタに関連した管理コスト ($\sum_t C'_{ope,pbl}(m'_t)$) も同様の傾向である。

以上の結果、本稿の条件設定では、 $m_{max} = 3$ のときに目的関数 (7) は最小となった。プライベートデータセンタのみで処理を行う場合 ($m_{max} = 8$) は装置コストと管理コストに起因して、また、パブリックデータセンタのみで処理を行う場合 ($m_{max} = 0$) は装置コストに起因して、それぞれハイブリッドクラウドシステムとして配備する場合よりコスト高となった。

次に、図 5(a) と同様のリクエスト受信率予測値に従って各データセンタに仮想サーバを配備した時に、リクエスト受信率実測値を用いて算出した応答時間が制約条件 (8) あるいは制約条件 (9) を守れなかったタイムスロットの割合を図 5(b) に示



(a) プライベート仮想サーバ最大数に対する全体コストの変化 (b) プライベート仮想サーバ最大数に対する応答性能の変化 (c) リクエスト受信率予測信頼区間に対する最適全体コストと応答性能の変化

図 5 全体コストと応答性能の評価

す。リクエスト受信率予測値の誤差がない場合は、全てのタイムスロットにおいて $r_t^{95} \leq 0.15$ 、 $r_t^{95} \leq 0.15$ を満たすが、予測誤差のために $r_t^{95} > 0.15$ 、 $r_t^{95} > 0.15$ となるタイムスロットが発生する。仮想サーバ配備数上限 $m_{max} = 1$ では、プライベートデータセンタにおいて制約条件 (8) を守れないタイムスロットの割合が 40%程度もあるが、これは予測誤差がわずかであっても、仮想サーバの処理性能が小さいために大きな遅延となって現れるためである。この割合は、全体コストが最小化される $m_{max} = 3$ では、約 7%と最小値に近い値となっている。

この応答制約 (8)(9) を守れなかったタイムスロットの割合は、リクエスト受信率予測信頼区間を大きくすることで改善される。図 5(c) は、区間推定を行った場合の信頼区間を横軸にとり、全体コストを最小化する m_{max} のときの応答制約 (8)(9) の何れかを満たさないタイムスロットの割合と、全体コスト最適値をプロットしている。図 5(a) と図 5(b) の最適値 ($m_{max} = 3$ の値) は、図 5(c) において信頼区間が 0%での値に対応している。制約を満たさないタイムスロットの割合と全体コストは、トレードオフの関係にあり、本稿の設定では、応答制約を満たさないタイムスロットの割合が約 1/100 となるときに、全体コストは約 2 倍となった。

5. おわりに

本稿では、ハイブリッドクラウドシステムを対象としてクラウドパースティングにおける全体コストと性能の評価を行った。評価の結果、リクエスト受信率の予測に基づいて最小限の仮想サーバ数をプライベートデータセンタとパブリックデータセンタに分散稼働させることで全体コストを抑制できること、予測誤差のために応答制約を満たさないタイムスロットの割合と全体コストにトレードオフの関係が発生することを示した。今後の課題として、プライベートデータセンタにおける仮想サーバ配備数上限 m_{max} を動的に変化させ、適応的に最適状態へと移行する手法などの検討が挙げられる。

文献

[1] A.N. Toosi, R.N. Calheiros, and R. Buyya, "Interconnected cloud computing environments: Challenges, taxonomy, and survey," ACM Comput. Surv., vol.47, no.1, pp.7:1–7:47, May 2014.
 [2] S. Subashini and V. Kavitha, "A survey on security issues

in service delivery models of cloud computing," Journal of network and computer applications, vol.34, no.1, pp.1–11, Jan. 2011.

[3] S.K. Nair, S. Porwal, T. Dimitrakos, A.J. Ferrer, J. Tordsson, T. Sharif, C. Sheridan, M. Rajarajan, and A.U. Khan, "Towards secure cloud bursting, brokerage and aggregation," Proc. of the 2010 Eighth IEEE ECOWS, pp.189–196, Dec. 2010.
 [4] VMware, Inc., "Vmware vcloud architecture toolkit documentation center," http://download3.vmware.com/vcat/vcat31_documentation_center/, May 2015.
 [5] H.-Y. Chu and Y. Simmhan, "Cost-efficient and resilient job life-cycle management on hybrid clouds," Proc. of the 2014 IEEE 28th IPDPS, pp.327–336, May 2014.
 [6] M.R. Hoseinyfarahabady, H.R.D. Samani, L.M. Leslie, Y.C. Lee, and AY. Zomaya, "Handling uncertainty: Pareto-efficient bot scheduling on hybrid clouds," Proc. of 2013 42nd ICPP, pp.419–428, Oct. 2013.
 [7] T. Guo, U. Sharma, P. Shenoy, T. Wood, and S. Sahu, "Cost-aware cloud bursting for enterprise applications," ACM Trans. Internet Technol., vol.13, no.3, pp.10:1–10:24, May 2014.
 [8] H. Zhang, G. Jiang, K. Yoshihira, and H. Chen, "Proactive workload management in hybrid cloud computing," IEEE Transactions on Network and Service Management, vol.11, no.1, pp.90–100, March 2014.
 [9] M. Bjorkqvist, L.Y. Chen, and W. Binder, "Cost-driven service provisioning in hybrid clouds," Proc. of 2012 5th IEEE SOCA, pp.1–8, Dec. 2012.
 [10] Amazon.com, Inc., "Amazon elastic compute cloud (ec2)," <http://aws.amazon.com/ec2/>, Sept. 2014.
 [11] R.J. Hyndman and G. Athanasopoulos, "Forecasting: principles and practice," <https://www.otexts.org/book/fpp>, May 2015.
 [12] R. Jain, The Art Of Computer Systems Performance Analysis, John Wiley & Sons, April 1991.
 [13] D. Wong and M. Annavaram, "Knightshift: Scaling the energy proportionality wall through server-level heterogeneity," Proc. of 2012 45th IEEE/ACM MICRO, pp.119–130, Dec. 2012.
 [14] Dell Inc., "PowerEdge R430," <http://www.dell.com/jp/business/p/poweredge-r430/pd>, July 2015.
 [15] 東京電力 (株), <http://www.tepco.co.jp/e-rates/corporate/charge/charge07-j.html> July 2015 .
 [16] A. Greenberg, J. Hamilton, D.A. Maltz, and P. Patel, "The cost of a cloud: research problems in data center networks," SIGCOMM Computer Communication Review, vol.39, pp.68–73, Dec. 2008.
 [17] The R Project for Statistical Computing, <http://www.r-project.org/> April 2015.