クラウド・インフラストラクチャの研究と将来の方向性

串田 高幸[1,a)]

概要：クラウドは、企業 IT で大きなトレンドになっている。クラウドは、技術革新というよりも IT システムのサービス提供モデルの変革として、さらには企業 IT システムの大きなトランスフォーメーションとして利用できることがわかってきている。一方でクラウドの研究は、クラウドがもともと技術要素の革新から出てきたものではなく、今までのサービスの提供モデルの変革であるため、従来までの研究開発とは異なったアプローチによって研究分野を見つけ出す必要がある。この論文では、はじめにクラウドが何かについて定義を述べ、クラウドのうちに主要な部分になるクラウド・インフラストラクチャの研究に関する現状と方向性について述べる。また、クラウドのライフサイクルから今後、フォーカスすべき研究分野について述べる。

1. はじめに

クラウド・コンピューティング（以下、クラウドと呼ぶ。）は、現在、企業の IT において大きなトレンドになってきている。今まで運用管理されてきている IT システムのうち、企業が使用している IT システムは、ますます複雑になってきている。さらに企業の IT システムでは、運用管理に対する技術的な変革を現在まであまり行なってこなかったことから、運用管理技術が陳腐化してきていて、IT システムの運用管理が企業にとって大きな負担になってきている。そのため、企業の IT サービスにおいて使用されているハードウェア及びソフトウェアの運用管理が、企業の外に IT アウトソーシングされている。この形態では、企業内あるいは企業外に所在するデータセンターに IT システムが設置されて、その IT システムから企業内ユーザ及び企業からサービスを受けているユーザに、高速ネットワークを使ってサービスを提供している [1]。

一般に企業の IT システムでは、新しいビジネス環境に対応するために既存の IT システムやインフラストラクチャの自動化や効率化を、以前よりもより一層進めていく必要があると考えられている [2]。そのため、企業 IT システムの自動化や効率化を行なう手法として、クラウドの利用は、企業の IT システムにおいて脚光を浴びている。そのため、クラウドを企業内外のサービスを提供する基盤として有効活用できるかが、クラウドを採用するときの一つのポイントになっている [3]。

一方でソフトウェアの設計開発及びテストをもとにしたプロダクションレベルのサービス提供は、多くの方法論やモデルがすでに提案されており、それらが、企業においても実用化されてきている。また、ハードウェアの高速化およびソフトウェアの最新化により、ソフトウェアの設計開発も常に進化してきている。しかし、企業のデータセンターにおける IT システムの運用管理は、新規技術や手法の導入よりも安定的な稼働を優先しているため、依然として従来からの手法を継続しており、それらの多くの処理が技術者よる手作業をもとにしている。さらには、ハードウェアの高機能化、ソフトウェアの複雑化によって、以前よりも一層技術者による手作業の構成が必要になってきている。一連の処理や手続きを実行するために技術者の高度な熟練を要するようになってきている。

この環境における企業の IT システムの複雑化や負担増に関する問題を解決するため、今まで様々な IT システムのモデル（例：グリッド・コンピューティング、ユーティリティ・コンピューティング）が提案されてきていた。その提案されたモデルの中で最も有力な IT システムのモデルが、クラウドである。そのため、クラウドは、従来技術の革新あるいは、新規発明によって新しく出てきた技術ではなく、コンピューティングの提供モデルとしてまとめて、総称した IT システムのモデルであり、また以前から提案されていたコンピューティング資源をユーティリティのように提供することを具体化したものである [4] [5]。つまり、今まで個別に IT サービスの提供方法を提案してきたことを定義と範囲を決めて、クラウドという用語を与えたということである。この理由から、クラウドは、技術的な側面

1 日本アイ・ビー・エム株式会社 東京基礎研究所
〒 135–8511 東京都江東区豊洲 5-6-52 NBF キャナルフロント
a) kushida@acm.org

ⓒ2014 Information Processing Society of Japan

よりもサービスモデルやビジネスモデルの側面が強調されている。

クウドが、IT システムの大きな流れとなってきており、またサービスモデルやビジネスモデルが強調されていることから、インフラストラクチャの研究者にとっても、今までとは異なった研究のアプローチが必要になると考えられる。これまでの研究では、基礎研究のフェーズにおいて新規技術を作り出し、それをもとに他の技術を組み合わせたり、利用方法に合わせりして応用研究を行ない、その後、製品として開発して実用化していくという一連のプロセスがあって、これを前提として基礎研究や応用研究が行われてきた。

一方でクラウドでは、提供モデルをまとめて、サービスとして提供するところからはじまっているために、クラウドとして提供されている現状のサービスを調査して、そこから新しい研究を行っていくという手法が必要となってくる。さらにクラウドにおいては、一般のエンド・ユーザ対してだけでなく、企業の IT システムが提供している幅広いサービスに対しての研究を行なうことが、重要になると考えられる [2]。

現在のクラウドの研究の大半が、従来までの研究分野の技術的な要素をクラウドに適用あるいは拡張するという方法をとっている（例：サーバ、ストレージ、ネットワークの要素技術の研究）。そのため、クラウドとしての独自の研究は、現在でもあまり多くはない [6]。

この論文では、クラウドが IT サービスを提供するシステムの基盤として認知され広まってきている現在において、クラウドの研究領域のうち、特に基盤となるクラウド・インフラストラクチャに関連する研究領域にフォーカスして、今後のどのような研究を行っていくべきかに議論する。この論文の構成として、「２．クラウド」においてクラウドの必要性、クラウドの定義について述べる。また、「３．現在のクラウドの研究について」では、クラウドに関連した関連研究について述べ、「４．クラウド・インフラストラクチャの研究の方向性」では、今後の研究の方向性について議論する。また、「終わりに」においてクラウドの研究の方向性の議論をまとめる。

2. クラウド

この章は、クラウドの必要性とクラウドの定義について述べる。

2.1 クラウドの必要性

企業の IT インフラストラクチャの場合、ハードウェアやソフトウェアを購入して、それをもとに企業のシステムを構築してきていた。しかし、この自前のハードウェアやソフトウェアへの初期投資や構築されたシステムの維持管理は、企業にとって年々大きな負担になっていた。そのため、どのようにして企業の IT インフラストラクチャをより簡単に効率よく構築して運用するかが、大きな鍵となっている。

クラウドは、サービスとしてリクエストに応じてハードウェアやソフトウェアをシステムにから提供でき、企業での IT 運用管理の負担を取り除くことができる。この背景として特殊なハードウェアやソフトウェアを必要とせずにコモディティ化したハードウェアおよびソフトウェアを使って、十分にプロダクションレベルのサービスが可能できるになったからである。この方法によってハードウェアおよびソフトウェアの初期投資を大きく下げることができる。また、企業の IT システムの管理運用には、一般的に大きな手間と負担がかかっており、IT 部門や IT アウトソーシングでは、多くの人が、主として IT システムの管理運用に携わっている。そのため、クラウドによって、提供されるサービスを使って、管理運用に関する負担を軽減できるサービスは、大企業の IT 部門にとって、IT システムに付随する業務を自動化することで効率化するため大きな役割をもっている。

2.2 クラウドの定義

クラウド以前は、ユーティリティ・コンピューティングというモデルが提案されていた。このモデルでは、電気、ガス、水道、電話と同等のユーティリティ・サービスとして、コンピューティング資源を位置づけており、いつ、どこでもコンピューティング資源をユーザに提供することを目的としている。また、その提供方法は、使っただけを課金するいう従量課金のモデルをもとにしている。クラウドは、このユーティリティ・コンピューティングの考え方をもとにして、複数のユーザが、データセンターのインフラストラクチャを共有することや、サービスの提供が定義されていて、それにもとづいて自動的に迅速に提供する要素が入ってきており、実用されることに大きく前進した [7]。

また、クラウドは、今までのインフラストラクチャからのトランスフォーメーションの大きな部分を占めているモデルである [8]。さらにクラウドは、ネットワークを介して、ネットワークに接続されたコンピューターリソースを、必要に応じて利用する方法に関するコンピューティングのモデルの総称である。そのため、このモデルに準じて適用されるリソースあるいは、それに基づいて提供されるサービスは、すべてクラウドと呼ぶことができる。しかし、顕著な例では、単純にネットワークを介したサービス全般をクラウドと呼んでいるケースもある。クラウドの一般的な特徴は、次の３つの項目である。

- コンピューティングリソースが、ユーザからの要求により、自動的にすばやく提供されること。この要求は、リソース・プロビジョニングと呼ばれる。
- 企業のユーザにとって、コンピュータ資源の利用に対

ⓒ2014 Information Processing Society of Japan

して事前予約を必要としないため、企業からみるとシステムへの投資を小さくはじめることができ、その後、必要に応じてコンピューティング資源を増加したり減少したりすることができる。

- 用途として、短期間で動的にコンピュータ資源が必要となる利用（開発・テストあるいは、デモンストレーション）を自在に行なうことができる。

クラウド・インフラストラクチャの構築と運用は、巨大なデータセンターにおいて、事実上の標準であるハードウェアとソフトウェアを使って、スケールメリットによりサービスを提供することである。データセンターでは、コンピューティング・リソースは、仮想化技術を使って、ソフトウェアの統計多重により複数のユーザを同時に利用できるので、今までの方式よりも稼働率を著しく上げることができる。また自動化を行っているため、すべてのリクエストとその処理は、ポータル経由で行なうことができる。

クラウドという用語は、研究、開発あるいはビジネスの分野において、よく使用されている。しかし、研究分野においては、ジャーナル論文や国際会議の論文においても、しばしば明確なクラウドの定義を記述していない場合がある。そのため、クラウドという単語とその使用方法は、多様になっており、研究者の間でも用語の混乱がよく生じている。

この論文では、クラウドの定義からはじめる。ここでは、NIST でのクラウドの定義をもとにして、説明する [9]。NIST では、クラウドコンピューティングを最小の管理労力かあるいは、サービスプロバイダへの依頼によって、迅速に準備される構成可能な共有のコンピューティング資源（例えば、ネットワーク、サーバー、ストレージ、アプリケーション、サービス）に、いつでも簡単にネットワークアクセス可能なモデルであると定義している。図 1 は、NIST のクラウド参照アーキテクチャである。このアーキテクチャでは、ネットワークを提供する Cloud Carrier の上に、Cloud Consumer、Cloud Auditor、Cloud Provider、Cloud Broker があり、これらのコンポーネントがアーキテクチャ（クラウド参照アーキテクチャ）を構成している。このなかで Cloud Provider は、Service Orchestration、Cloud Service Management、Security、Privacy から構成されている。さらに Cloud Orchestration がコンピューティング資源を使って、SaaS、PaaS、IaaS のいずれかのモデルで実際にクラウドのサービス提供している。

クラウドは、下記の 5 つの本質的な特徴を持っている。

- **オンデマンドのサービス**　：　ユーザは、人とのやりをせずに、必要なときにサービス要求を自ら出して、そのサービスは、システムから自動的に提供される。
- **ブローバンドネットワークでのアクセス**　：ブローバンドの高速ネットワークによってコンピューティング資源にアクセスすることができる。
- **コンピューティング資源のプール**：コンピューティング資源が共有されて、プールされており、ユーザからの要求に応じて提供される。また、必要がなくなったコンピューティング資源は、ユーザーからプールに戻され、再利用される。
- **迅速性と弾力性**：コンピューティング資源は、迅速で弾力的に提供される。ユーザーから論理的にみるとコンピューティング資源は、無限に増加できるようにみえる。しかし従量課金制であるため、コンピューティング資源の追加要求をすると課金が増えることになる。
- **計測可能なサービス**：コンピューティング資源の使用を計測できることが基本である。さらに抽象度の高いサービス（例えば、ユーザ数やアプリケーション使用量）も計測できるので、クラウド・サービスプロバイダは、随時レポートを提供することができる。

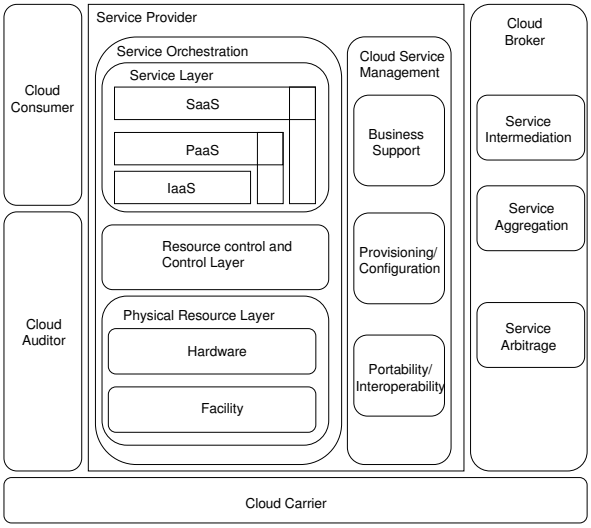

図 1　クラウド参照アーキテクチャ

クラウドでは、図 1 にある Service Orchestration のように、基本的には、下記の 3 種類のサービスのいずれかに分類される。

- SaaS (Software as a Service)：アプリケーション・ソフトウェアをサービスとして提供するモデルであって、一般的にユーザは、このサービスを申し込むだけで下位レイヤーにあるソフトウェアやコンピュータ資源の構成要素（例：CPU、メモリ、ディスク、ネットワーク）をまったくを気にすることなく、単純にアプリケーションをサービスとして、ネットワーク経由で利用することができる [10]。
- PaaS (Platform as a Service)：サービス・プロバイダが提供するプラットフォームレベルでのコンピューティング環境である。このレベルでのサービスを提供するためのモデルであって、ソフトウェアの設計、開発、テスト、実働のすべてをプラットフォーム・レベ

ⓒ2014 Information Processing Society of Japan

ルとして提供することが目的である [11]。ユーザは、インフラストラクチャ管理を必要としないが、アプリケーション制御や設定を行なう機能は持っている。

- IaaS (Infrastructure as a Service)：インフラストラクチャをサービスとして提供することができるサービスモデルで、プロセッサ、ストレージ、ネットワークあるいはその他のコンピューティング資源をユーザの要求によって提供を受ける。また、特定の種類のネットワーク機器（ロードバランサやファイヤウォール）の提供を行っており、限定的であるがそれら機器の制御を行なうことができる。また、インフラストラクチャのサービスを、OpenStack や Xen Cloud Platform のオープンソースによって実現することができる [12]。

クラウドが運用されるとき、基本的には、下記 4 種類にクラウドの設置モデルが分類される。

- プライベート・クラウド：このクラウドの設置モデルでは、特定の組織（例えば、会社）への IT サービスのために専用に提供されるクラウドであって、組織と同じ場所かあるいは別な場所にあるデータセンターから提供される。
- コミュニティ・クラウド：このクラウドの設置モデルは、複数の組織により共有される IT サービスである。これらの複数の組織は、同じコミュニティに所属か、クラウドのサービスに対して同じ要件（例えば、利用目的、セキュリティ、ポリシィ）を持っている。この設置モデルでは、加入した複数の組織のみが利用することができるクローズドなサービスであって一般に公開されていない。
- パブリック・クラウド：このクラウドの設置モデルは、不特定多数のユーザが利用できることを目的としている。通常は、クラウドサービスを提供するサービスプロバイダーによって所有されている。また、クラウド・インフラストラクチャのリソースは、ユーザ間で共有されているが、ユーザ間での分離がプロバイダによって保証されている。
- ハイブリット・クラウド：このクラウドの設置モデルは、上記にある複数のクラウド設置モデルの 2 つ以上組み合わせて IT サービスを提供する。通常、大きな組織でのクラウドの利用では、複数のクラウド設置モデルを組み合わせる要件がある。クラウドに対して、単一のユーザインターフェイスによってアクセスできるようにする必要があるが、どの配置モデルを使うかは、ユーザによって選択することができる。

3. 現在のクラウドの研究について

この章では、現在の行われているクラウドの研究について述べる。

クラウドに対する研究は、巨大データを処理する分散処理システム技術として定義され、クラウドの分類と調査が行われている [13]。また、今までのシステムを中心としたコンピューティング資源管理のアーキテクチャでは、コンピューティング資源が共有であるために、クラウドのそれぞれの顧客に対して、同じ QoS を提供することになる。しかし、もともとは、それぞれの顧客は、異なった QoS 要件があるはずである。このことから Market-Oriented Cloud の研究では、QoS のレベルごとに利用料金を変える経済的なフィードバックを顧客に対しておこなって、クラウドの利用を平準化することを提案している [7]。

一方でクラウドをコンピューティング資源の提供を市場という概念で考えをすすめていくと、サービス要素を世界中の各所から入手して、それを集約して提供するグローバルなクラウド市場を研究として考えることができる。この方向性は、今まで長年研究されてきたコンピューティング資源の交換や市場を、さらにクラウド環境において発展させていく研究になる [14]。ここで取り組むべき問題としては、このマーケットの手法自身よりも、企業がクラウドの市場からコンピューティング資源の提供を受けて、自社の基幹システムを、どのように構築できるかという課題が重要になってくる。自社においてハードウェアおよびソフトウェアを所有して運用管理し、自社のユーザに提供するプライベート・クラウドが、現在は主要な提供モデルであるため、企業において、上記の IT に対する革新的なモデルや方式は、まだ研究レベルであり、今後、実用化研究を行っていく必要がある。

一般にクラウドは、データセンターに設置された多くのサーバー群から構成されており、クラウドに関する評価実験を行なう場合、このサーバー群を実際に入手して利用することが常に大きな障害になる。そのため、クラウドのモデリングとシミュレーション環境をソフトウェアによって構築する必要がある。そのため、クラウドのモデリングとシミュレーション環境に関する研究が行われている [15]。現在は、クラウドのモデリングとシミュレーション環境に関して、標準あるいは事実上の標準のソフトウェアや方法がないため、ソフトウェアの設計開発もクラウドの研究分野になっている [15]。例えば、CloudSim は、クラウドのシミュレーション環境において、リソース・プロビジョニングやエネルギー効率化の管理の提案方式を評価するときに使用するために提案されている [16][17]。また、CloudAnalyst は、クラウドで動作するスケーラブルなアプリケーションを評価するように CloudSim を拡張して使用できる [18]。さらにクラウド・データセンターのエネルギー管理のためのシミュレーションツールとして、サーバー、スイッチ、リンクのそれぞれの資源をコンポーネントレベルでエネルギー消費をシミュレーションすることができる GreenCloud を提案している [19]。また、EMUSIM は、シミューレーションとエミュレーションを統合したク

ⓒ2014 Information Processing Society of Japan

ラウドの実験アーキテクチャであり、クラウド上のアプリケーションの検証も行なうことができる [20]。

3.1 研究分野としての分類

クラウドのモデルが提案されてから、比較的早い時期にクラウドの研究として技術的に解決すべき問題として、次の 10 項目が定義された [5]。それらは、1. ビジネスの連続性およびサービスの可用性、2. データのロックイン、3. データの守秘義務・監査能力、4. データ転送のボトルネック、5. パフォーマンス測定および見積り、6. スケールする記憶装置、7. 巨大分散システムのエラーやバグ、8. すばやくスケールすること、9. 共有に対する信頼性（技術的あるいは法律的なことも含む)、10. ソフトウェアのライセンスである。ここに列挙された解決すべき課題をもとに多くのところで研究プロジェクトが行われている。一方でクラウドの研究は、従来から行われている研究分野から派生してクラウドに対して適用する研究が多くある。そのため、クラウド独自の研究であるか、従来の研究分野をクラウドに適用しているか、あるいはクラウドを単にインフラストラクチャとして利用している研究であるかを理解する必要がある。クラウド研究分野は、下記の項目に分類することができる。

- リソース・プロビジョニング及び資源管理　：コンピューティング・リソースのプロビジョニングや資源の管理に関連すること。
- MapReduce・Hadoop 関連　：MapReduce や Hadoop そのものの性能改善することやそれらを有効利用することに関連する研究。
- セキュリティ、プライバシー　：クラウドにおいて必要となるセキュリティやプラバシーに関連する研究。
- コンピューティング資源の管理や効率化 (CPU、メモリー、ネットワーク、ストレージ)　：クラウドを構成しているコンピューティング資源をどのように管理するか、どのように効率的に使用するかに関する研究。
- クラウドブローカー、インター・クラウドあるいはクラウド間の接続 ：複数のクラウドがあった場合に、クラウド間で相互にやりとりするときのブローカー機能、インタークラウドやクラウド間の相互接続に関する研究。
- コスト最適化　：クラウドは、IT コストを最適にすることができるモデルであって、コンピューティング資源や管理運用のコストを最適化するための研究。
- スケジューリング　：クラウドの上で動作するアプリケーションのスケジューリング、あるいはクラウドへのコンピューティング資源のスケジューリングに関する研究。
- アプリケーションおよびそのデプロイメント　：クラウド上で稼働するアプリケーションやアプリケーションをデプロイするときの問題に対処する研究。
- マルチテナンシー　：クラウドに関連するソフトウェアをどのように、複数のテナント（マルチテナンシー）で同時利用できるようにするかの研究。
- データセンター管理　：クラウドが設置されているデータセンターに関する運用管理に関する研究。

上記にあげたクラウドの研究のうち、インフラストラクチャに対する研究は、リソース・プロビジョニング、リソース管理や MapReduce・Hadoop 関連の分野を中心にして、既存のコンピューティング資源や Big Data に関連する研究が、主として行わている。また、セキュリティー・プライバシーは、クラウド以外の分野においても研究している課題であり、それらをクラウドの環境上でどのように解決するかに関する研究を進めている。個別のコンピューティングリソースである CPU、メモリー、ネットワーク、ストレージ理論や効率化は、クラウドコンピューティングが広まる前から研究分野として確立されていて、クラウドを前提あるいは、データセンターでクラウドを使った場合の問題や効率化に関する研究として行われている。

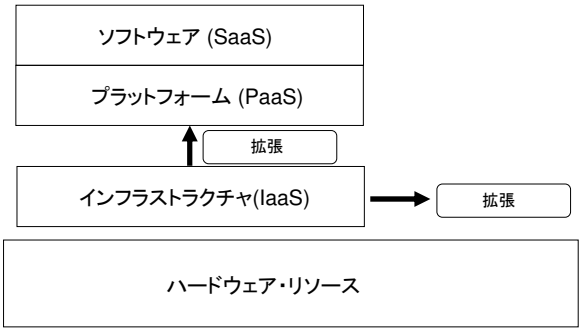

図 2　クラウドの階層構造と拡張部分

4. クラウド・インフラストラクチャ研究の方向性

この章では、クラウド・インフラストラクチャ研究に関する今後の方向性について議論する。現在のクラウドは、サービスの提供モデルをもとにしたコンピューティング提供のトランスフォーメーションであって、独自の技術をもとにした新しいインフラストラクチャではない。クラウドの研究は、前の章で説明したように今まで行われていた研究をクラウドに拡張して行われるケースが多い。その一方でクラウドのモデルが提案されて、広く使われているにもかかわらず、クラウドに独自な研究は、それほど多くはない。そのため、クラウドの研究の方向性として、今後、クラウドにおいて、より独自性を持った研究分野の新規開拓が必要であると考えている。

クラウドのインフラストラクチャの研究としては、大きくわけて、現在のインフラストラクチャ階層を、横に技術

ⓒ2014 Information Processing Society of Japan

的に拡張する方向と上に拡張する方向がある。図 2 は、クラウドの階層構造と上方向と横方向への拡張部分である。この図での IaaS の上位方向への拡張として、例えば、IaaS の API 機能を充実させることや、プラットフォームからの要件がインフラストラクチャできちんと反映させるフレームワークの研究課題がある。また、図の横方向への拡張として、例えば、リソース資源を増やしたり、データーセンター間のローカリゼーションを行なう IaaS の機能を追加する研究課題がある。

一方でクラウドのインフラストラクチャのライフサイクルからみると、クラウドの研究は、仮想化やリソース・プロビジョニングに留まらず、プロビジョニングより前のクラウド・インフラストラクチャのシステム設計やクラウドのソリューション開発が必要になってくる。つまり、クラウド自身の研究だけではなく、クラウドを利用するために必要になる周辺あるいは、時間的に前後のフェーズになる研究課題にもフォーカスをあてて、クラウド全体のライフサイクルを研究として行なうことが重要となってくる。

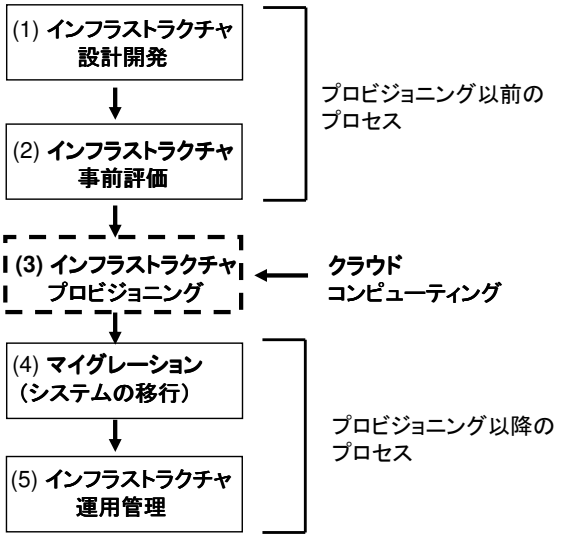

図 3　クラウドのライフサイクル

図 3 は、クラウドのライフサイクルを示している。この図において、下記の 5 つのフェーズを定義している。

(1) インフラストラクチャの設計開発
(2) インフラストラクチャの事前評価
(3) インフラストラクチャのプロビジョニング
(4) マイグレーション（システムの移行）
(5) インフラストラクチャの運用管理

上記の「インフラストラクチャのプロビジョニング」がクラウドでの資源管理やプロビジョニングであり、前後の項目は、クラウドとしての研究として十分に行われておらず、ギャップや問題がある。そのため、今後、これらの分野にフォーカスした研究が必要なってくる。

図 3 において「(1) インフラストラクチャのソリューション設計開発」、「(2) インフラストラクチャのソリューション事前評価」は、プロビジョニングの前に行われる。また、「(3) マイグレーション（システムの移行)」では、既存のインフラストラクチャからクラウド環境への移行をスムーズに行なうことである。このケースでは、既存インフラストラクチャーを調査して、インフラストラクチャに必要要件を抽出して、その要件をもとにしてクラウド環境における適切な構成を作成することである。さらに「(4) インフラストラクチャの運用管理)」は、クラウドをどのように運用管理すべきかの研究課題である。提供を迅速に受けることができる。この研究では、クラウドのインフラストラクチャの恒久的な管理運用あるいは、クラウド上で稼働するシステムの管理運用に関連する問題にフォーカスした課題を行なうことになる。クラウドのライフサイクルに関して、上記の 4 つの研究課題に関する議論を行なう。

4.1　インフラストラクチャの設計開発

ソフトウェアのシステムやソリューションをクラウドで稼働させるときに、事前に行なうインフラストラクチャ・ソリューションの設計開発は、プロビジョニングする前の必要なプロセスであって、モデル化、形式化や自動化に関する研究は、あまりなされていない分野である。例えば、一つの VM インスタンスの提供をクラウドに要求する場合、CPU、メモリ、ストーレージ量あるいは OS の種類をカタログリスト（提供されているテンプレート）から選択することになる。この場合、事前にそのインスタンスで行なうアクティビティやアプリケーション・プログラムのワークロードをなるべく正確に見積もって、クラウド上での適切なサイズや種類を選択する必要がある。これらは、クラウドとは関係ないところで人手で行われている。また、複数のインスタンスを同時に提供を受ける場合やプロダクションレベルのサービスを、そのインスタンスから提供するためには、どのような構成が最適であるかのインフラストラクチャでの最適構成を作ることが重要な課題である。さらにバックアップやリストア、災害対策のための方式やサイト、また、クラウド内及びアクセスのためのネットワーク構成も研究分野に分類される。企業の IT システムにおける既存のコンピューティング環境の要件をもとにして、最適なインフラストラクチャの構成をクラウド上に構築するための設計が必要となる。これがインフラストラクチャの設計開発に関連する研究分野となる。

4.2　インフラストラクチャの事前評価

インフラストラクチャの事前評価は、実際にクラウド上でソフトウェアのソリューション利用する前に、パフォーマンスやアベイラビリティを調査して、要件に対して最適なコンピューティング資源が提供できているかどうかを評

ⓒ2014 Information Processing Society of Japan

価結果することである。クラウドインフラストラクチャが実際の業務に利用する場合に必要となり、移行する前にクラウドの実際の環境を使った評価ができないことがあるため、シミュレーターあるいは少数サブセットによる個別のサーバの事前評価を行なって、インフラストラクチャのパフォーマンスやアベイラビリティにに問題がないことを評価することを行なう。さらに構成全体についても調べて、パフォーマンスやアベイラビリティに関して、問題ないかについて事前評価を行なって検証する。この分野の検証や自動化についてのクラウド独自の研究は、まだあまりなされていない。

4.3 マイグレーション（システムの移行）

マイグレーションとは、既存の稼働システムをクラウドのコンピューティング環境に移行する一連のプロセスのことをいう。既存アプリケーションが稼働している企業においてクラウドを必要とする主な理由は、そのインフラストラチャ部分をクラウドに移行して、その後の管理運用を効率的に行なうことである。そんため、業務において重要不可欠なアプリケーションのシステム移行を短い時間で行なう必要があることや、サービス提供に対するリスクを低くなるように、システムの移行を行なう必要がある。クラウドへのマイグレーションを行った結果、十分に効果があることについては、すでに研究報告されている [21]。しかし、一方でクラウドのマイグレーションそのものの研究は、アプリケーションやハイブリットクラウドに対する研究が報告されているが、それ以外の分野は、これからである [22][23]。クラウドのマイグレーションの研究は、企業の基幹となるビジネスアプリケーションやシステムを移行することが目的であり、そのモデルやアーキテクチャおよび方式に対する検証評価を行なう研究分野を確立させることは、重要である。クラウド・マイグレーションの研究分野は、マイグレーションを大きくフェーズに分割して、マイグレーションのフレームワークとして提案されている [24]。このフェーズは４つあり、それらは、１．マイグレーション（例えばガバナンス、セキュリティ、見積、トレーニング）、２．マイグレションの計画、３．マイグレーションの実行、４．マイグレーションの評価である。

4.4 インフラストラクチャの運用管理

IT アウトソーシングは、企業の IT システムの管理運用を専門のサービスプロバイダーに委託する形態をいう。これは、企業が IT 部分に関する専門知識を企業内に維持するものと外部委託する部分とに分割することで最適化できることと IT システム関連の投資や予算を効率化することができるためである [1]。企業では、IT インフラストラクチャの部分は、企業の IT システムでは、外部委託可能な部分として捉えられる。

この IT アウトソーシングの運用管理形態が、クラウドが加わることによって変化してきている。例えば、今まで企業内の IT システムにおいてすべてを行っていた業務が、一部をプライベート・クラウドに移行すると、既存の IT システムとプライベート・クラウドとの間で連携をとる必要がでてくる。また、このシステムにアクセスするためのポータルも一つにする必要がある。別な例では、パブリック・クラウドを利用することによって、企業内の IT システムとパブリック・クラウドに設置されたシステムとの間の連携を行なう必要があり、VPN で企業内のネットワークをパブリック・クラウドのシステムまで延長する必要がある。この例に留まらず、一般的に IT アウトソーシングへのクラウドの適用には、クラウドの管理運用の研究における課題がある。

さらに IT インフラストラクチャの管理サービスを付加して企業向けユーザに提供する Managed Services が、今まで盛んに行われてきている。この Managed Services は、IT インフラストラクチャに対するサービスとして、可用性 (Availability) やパフォーマンス (Performance) を担保し、さらにバックアップ、ソフトウェアパッチ、セキュリティー・コンプライアンス、障害管理、モニタリングの付加サービスを必要に応じて選択できる。この Managed Service の IT インフラストラクチャとしてクラウドを利用すると Managed Cloud Services として提供される [25][26]。この Managed Cloud Services において、クラウドサービスを提供するときの研究課題は、まだ十分におこなわれていない。

5. 終わりに

この論文では、クラウドのうち特にインフラストラクチャの研究にフォーカスして、どのような研究分野が主として行われているか、また実用化に向けた研究分野の議論を行った。また、今後重要となる研究として、4 つの分野を議論した。クラウドは、IT 産業において大きな潮流となってきており、多くの企業がクラウドを積極的に取り入れている。そのため、実用に大きく貢献できる研究分野として、今後ますます重要となってくる。

参考文献

[1] Yang, Z.: Disrupt the Disruptor: A Theoretical Approach of Cloud Computing on IT Outsourcing Industry Disruption, *Dependable, Autonomic and Secure Computing (DASC), 2011 IEEE Ninth International Conference on*, pp. 526–531 (online), DOI: 10.1109/DASC.2011.99 (2011).

[2] Breitgand, D. and Glikson, A.: Global enterprise cloud transformation: Centralize, distribute or federate?, *Integrated Network Management (IM 2013), 2013 IFIP/IEEE International Symposium on*, pp. 892–895 (2013).

ⓒ2014 Information Processing Society of Japan

[3] Hsu, C.-Y. and Wang, H.-I.: A research of critical factors in the the enterprise adoption of cloud service, *Awareness Science and Technology and Ubi-Media Computing (iCAST-UMEDIA), 2013 International Joint Conference on*, pp. 465–469 (online), DOI: 10.1109/ICAwST.2013.6765485 (2013).

[4] Armbrust, M., Fox, A., Griffith, R., Joseph, A. D., Katz, R., Konwinski, A., Lee, G., Patterson, D., Rabkin, A., Stoica, I. and Zaharia, M.: A view of cloud computing, *Commun. ACM*, Vol. 53, No. 4, pp. 50–58 (online), DOI: 10.1145/1721654.1721672 (2010).

[5] Armbrust, M., Fox, A., Griffith, R., Joseph, A. D., Katz, R. H., Konwinski, A., Lee, G., Patterson, D. A., Rabkin, A., Stoica, I. and Zaharia, M.: Above the Clouds: A Berkeley View of Cloud Computing, Technical Report UCB/EECS-2009-28, EECS Department, University of California, Berkeley (2009).

[6] Zhang, Q., Cheng, L. and Boutaba, R.: Cloud computing: state-of-the-art and research challenges, *Journal of internet services and applications*, Vol. 1, No. 1, pp. 7–18 (2010).

[7] Buyya, R., Yeo, C. S. and Venugopal, S.: Market-Oriented Cloud Computing: Vision, Hype, and Reality for Delivering IT Services as Computing Utilities, *High Performance Computing and Communications, 2008. HPCC '08. 10th IEEE International Conference on*, pp. 5–13 (online), DOI: 10.1109/HPCC.2008.172 (2008).

[8] Armbrust, M., Fox, A., Griffith, R., Joseph, A. D., Katz, R., Konwinski, A., Lee, G., Patterson, D., Rabkin, A., Stoica, I. and Zaharia, M.: A View of Cloud Computing, *Commun. ACM*, Vol. 53, No. 4, pp. 50–58 (online), DOI: 10.1145/1721654.1721672 (2010).

[9] Mell, P. and Grance, T.: The NIST definition of cloud computing, *NIST special publication*, Vol. 800, No. 145, p. 7 (online), available from ⟨http://csrc.nist.gov/publications/nistpubs/800-145/SP800-145.pdf⟩ (2011).

[10] Kang, S., Kang, S. and Hur, S.: A Design of the Conceptual Architecture for a Multitenant SaaS Application Platform, *Computers, Networks, Systems and Industrial Engineering (CNSI), 2011 First ACIS/JNU International Conference on*, pp. 462–467 (online), DOI: 10.1109/CNSI.2011.56 (2011).

[11] Sellami, M., Yangui, S., Mohamed, M. and Tata, S.: PaaS-Independent Provisioning and Management of Applications in the Cloud, *Cloud Computing (CLOUD), 2013 IEEE Sixth International Conference on*, pp. 693–700 (online), DOI: 10.1109/CLOUD.2013.105 (2013).

[12] Bist, M., Wariya, M. and Agarwal, A.: Comparing delta, open stack and Xen Cloud Platforms: A survey on open source IaaS, *Advance Computing Conference (IACC), 2013 IEEE 3rd International*, pp. 96–100 (online), DOI: 10.1109/IAdCC.2013.6514201 (2013).

[13] Rimal, B., Choi, E. and Lumb, I.: A Taxonomy and Survey of Cloud Computing Systems, *INC, IMS and IDC, 2009. NCM '09. Fifth International Joint Conference on*, pp. 44–51 (online), DOI: 10.1109/NCM.2009.218 (2009).

[14] Lai, K., Rasmusson, L., Adar, E., Zhang, L. and Huberman, B. A.: Tycoon: An implementation of a distributed, market-based resource allocation system, *Journal of Multiagent and Grid Systems*, Vol. 1, No. 3, pp. 169–182 (2005).

[15] Zhao, W., Peng, Y., Xie, F. and Dai, Z.: Modeling and simulation of cloud computing: A review, *Cloud Computing Congress (APCloudCC), 2012 IEEE Asia Pacific*, pp. 20–24 (online), DOI: 10.1109/APCloudCC.2012.6486505 (2012).

[16] Calheiros, R. N., Ranjan, R., Beloglazov, A., De Rose, C. A. F. and Buyya, R.: CloudSim: a toolkit for modeling and simulation of cloud computing environments and evaluation of resource provisioning algorithms, *Software: Practice and Experience*, Vol. 41, No. 1, pp. 23–50 (online), DOI: 10.1002/spe.995 (2011).

[17] Buyya, R., Ranjan, R. and Calheiros, R.: Modeling and simulation of scalable Cloud computing environments and the CloudSim toolkit: Challenges and opportunities, *High Performance Computing Simulation, 2009. HPCS '09. International Conference on*, pp. 1–11 (online), DOI: 10.1109/HPCSIM.2009.5192685 (2009).

[18] Wickremasinghe, B., Calheiros, R. and Buyya, R.: CloudAnalyst: A CloudSim-Based Visual Modeller for Analysing Cloud Computing Environments and Applications, *Advanced Information Networking and Applications (AINA), 2010 24th IEEE International Conference on*, pp. 446–452 (online), DOI: 10.1109/AINA.2010.32 (2010).

[19] Kliazovich, D., Bouvry, P. and Khan, S.: GreenCloud: a packet-level simulator of energy-aware cloud computing data centers, *The Journal of Supercomputing*, Vol. 62, No. 3, pp. 1263–1283 (online), DOI: 10.1007/s11227-010-0504-1 (2012).

[20] Calheiros, R. N., Netto, M. A., De Rose, C. A. and Buyya, R.: EMUSIM: an integrated emulation and simulation environment for modeling, evaluation, and validation of performance of Cloud computing applications, *Software: Practice and Experience*, Vol. 43, No. 5, pp. 595–612 (online), DOI: 10.1002/spe.2124 (2013).

[21] Khajeh-Hosseini, A., Greenwood, D. and Sommerville, I.: Cloud Migration: A Case Study of Migrating an Enterprise IT System to IaaS, *Cloud Computing (CLOUD), 2010 IEEE 3rd International Conference on*, pp. 450–457 (online), DOI: 10.1109/CLOUD.2010.37 (2010).

[22] Meng, X., Shi, J., Liu, X., Liu, H. and Wang, L.: Legacy Application Migration to Cloud, *Cloud Computing (CLOUD), 2011 IEEE International Conference on*, pp. 750–751 (online), DOI: 10.1109/CLOUD.2011.56 (2011).

[23] Hajjat, M., Sun, X., Sung, Y.-W. E., Maltz, D., Rao, S., Sripanidkulchai, K. and Tawarmalani, M.: Cloudward Bound: Planning for Beneficial Migration of Enterprise Applications to the Cloud, *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, Vol. 40, No. 4, pp. 243–254 (online), DOI: 10.1145/1851275.1851212 (2010).

[24] Jamshidi, P., Ahmad, A. and Pahl, C.: Cloud Migration Research: A Systematic Review, *Cloud Computing, IEEE Transactions on*, Vol. 1, No. 2, pp. 142–157 (online), DOI: 10.1109/TCC.2013.10 (2013).

[25] Chieu, T., Singh, M., Tang, C., Viswanathan, M. and Gupta, A.: Automation System for Validation of Configuration and Security Compliance in Managed Cloud Services, *e-Business Engineering (ICEBE), 2012 IEEE Ninth International Conference on*, pp. 285–291 (online), DOI: 10.1109/ICEBE.2012.53 (2012).

[26] Thatmann, D., Slawig, M., Zickau, S. and Kupper, A.: Deriving a Distributed Cloud Proxy Architecture for Managed Cloud Service Consumption, *Cloud Computing (CLOUD), 2013 IEEE Sixth International Conference on*, pp. 614–620 (online), DOI: 10.1109/CLOUD.2013.56 (2013).

ⓒ2014 Information Processing Society of Japan