

14-NW01

多重仮想化を用いた大容量サービス環境の 遠隔地への高速転送に関する研究

関谷 勇司（東京大学）

概要 ICT サービスを構築するにあたって、クラウドやビッグデータが活用されている。IaaS クラウドや PaaS クラウドにて構築されたサービスは、基本的にそのクラウド内においてのみ有効であり、クラウド間にてサービスをそのまま移動することは想定されていない。しかし、耐障害性や冗長性という観点から、クラウド上にて稼働しているサービスを、その環境も含めそのままの形で遠隔地のクラウド上に高速転送することが求められている。そこで本研究課題では、クラウド上にて構成されるサービスを、その構成要素やネットワーク機能をより移動しやすい形にて抽象化し、サービスが利用するデータも含めた遠隔地への高速転送を可能とするアーキテクチャを構築し、技術開発を行った。本研究の成果により、災害やデータセンタ単位の障害時にも、クラウド上にて展開されるサービスを高速移動することが可能となる。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同研究を実施した拠点名

東京大学情報基盤センター

(2) 共同研究分野

- 超大規模数値計算系応用分野
- 超大規模データ処理系応用分野
- 超大容量ネットワーク技術分野
- 超大規模情報システム関連研究分野

(3) 参加研究者の役割分担

研究代表者の関谷は、研究全体の進捗管理とアーキテクチャの設計、ならびに実験と評価を担当した。課題研究者の妙中は、災害のような特殊な環境においてもサービスを継続できるための、無線環境を用いたイメージの高速転送に関する技術開発と実験、ならびに評価を担当した。共同研究者の大江は、OS のネットワークプロトコルスタックの観点から、ネットワーク高速化技術の検証を評価を担当した。同じく共同研究者の田崎は、従来の仮想化技術や多重仮想化技術を柔軟なものとし、ネットワークやシステムの構成をそのまま転送することを可能にするための、新たな多重仮想化技術の研究開発を担当した。また、申請時の名簿には入っていないが、慶應義塾大学の堀場が研究参加し、多重仮想化環境におけるサービス構築技術に関して貢献し、東京大学の中村がオーバ

レイ環境を用いたネットワークパスの形成技術の開発とオーバレイ環境での転送性能の高速化に関する評価に貢献した。

また、本研究は、JGN-X を利用した共同研究として、東京大学と倉敷芸術科学大学において行っている、IX (Internet eXchange) を利用した「緊急避難時を想定した超高速マイグレーション」の発展型共同研究となっている。そのため、JGN-X¹が提供する環境を用いて、実証実験を行った。

2. 研究の目的と意義

本節では、研究の背景と目的、ならびにその社会的な意義について述べ、本研究が対象としている技術とユースケースの範囲について明確にする。

2.1 本研究の背景

情報通信技術の成長とともに、日常生活における ICT サービスの重要度は高くなっている。このため、ICT サービスの停止は、人々の生活に大きな影響を与え、その停止時間をできる限り短くする事が求められている。また、クラウドやビッグデータ処理の台頭により、今までは手元に保有されていたデータが、遠隔地であるデータセンタに保存され、かつ大容量になる傾向にある。このデ

¹ <http://www.jgn.nict.go.jp/>

ータの増大が管理・運用上の一つの大きな問題となっており、クラウドサービスにおいても、ストレージの管理やデータの移動が大きな制約となり、サービスの自由度が制限されている。

例えば、IaaS クラウドの場合には、VM の停止や起動、ならびにメモリイメージの移動は、一般的に許容できる時間内にて完了するため、比較的自由に位置を決定することができる。その反面、VM イメージが配置されているストレージは、その物理的な配置にサービスが大きく制約される。VM のイメージは小さくとも数 G バイトの大きさがあり、コピーや移動にはそれなりの時間を要する。そのため、計算資源としての VM 移動は比較的容易に行えるものの、VM イメージ自体の移動にかなりの時間を要するため、結果として VM を起動する場所は、そのイメージがあるストレージの場所に左右される場合が多い。そのため、レプリケーションや分散ファイルシステムといった、実時間で分散して書き込む手法が存在する。これらの手法では、データの書き込み速度を犠牲にする代わりに、データ移動を容易に行なう、もしくは移動自体を必要としないような仕組みを有している。しかし、これらの実時間にて複製や分散書き込みを行なう技術の多くは、広域にまたがった複数のデータセンタを結ぶような環境においては、現実的な速度と耐障害性を持って機能することが難しい。

また、IaaS のみならず、PaaS クラウドサービスも普及し始めている。PaaS クラウドサービスの場合には、VM という単位ではなく、アプリケーションもしくはアプリケーションの部品という単位でサービスが存在し、提供される。ユーザは PaaS クラウド上にてアプリケーションを開発し、サービスとして展開するため、そのサービス位置や構成単位を意識すること無くサービスを提供できる。しかし、クラウドの内部的には当然サービスを提供する物理資源が存在し、その物理資源が存在する場所によってサービスが展開される。したがって、やはり物理資源の位置や障害によってユーザのサービスは影響を受ける可能性がある。

さらに、IaaS クラウドに比べ、サービスが提供されている資源の位置をユーザが把握することが難しいため、地域規模の障害が発生した場合には、サービスを継続提供するために何を移動させればいいのか、ユーザが把握することがより困難となっている。

2. 2 本研究の意義

現在の ICT サービスは、地域レベルの災害等が発生した場合においても、ライフラインとして利用されることから、高いレベルの耐障害性が求められている。本研究ではこの要求に応えるため、仮想化技術を活用し、災害発生時においても、サービスを構成する物理資源の位置、ならびにサービス構築のための構成や資源同士の連携関係を意識することなく、サービスを遠隔地に高速に移動する手法を確立することを目指した。

この目的を実現するため、多重仮想化の手法、プロセスレベルによる仮想化手法、ならびにネットワーク機能の仮想化等の手法を用いて、拠点間での ICT サービスマイグレーションを行なうことのできる手法を設計・実装することを目指した。

これによって、東日本大震災のような、地域レベルや国レベルの震災や障害においても、サービスが停止するまでの限られた時間内においてサービスそのものをまるごと遠隔地に移動することが可能となり、クラウドやビッグデータ処理環境の信頼性と可用性の向上に貢献することができる。本研究の成果は、いわばデータセンタや地域にまたがった ICT サービスの冗長化であり、社会インフラの高信頼化に寄与するものである。

3. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

本課題は、サービスの実運用とそのシステム構成を熟知している運用側の人間と、仮想化やネットワークスタック、ならびに無線のチャンネル割り当て効率化等の個々の技術に精通している者が協力しあう事によって達成された課題である。そのため、拠点課題として運用に詳しいセンターの研究者と、仮想化技術等の個々の技術に詳しい研究者が協力することが必要であり、その観点からは

拠点公募型研究として有意義であった。しかしその一方で、参加した研究者のほとんどが東京大学となってしまったため、より複数の組織からの研究者による共同研究が望ましかった。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

研究初年度のため無し。

5. 今年度の研究成果の詳細

本研究課題では、IaaS クラウドや PaaS クラウドにて提供されているサービスを、利用している物理資源やネットワーク構成に影響されることなく、高速に遠隔地に転送し、そのままサービスを継続させることのできるマイグレーション手法を提案し、構築することを目指した。

前述の通り、IaaS クラウドの場合には VM という単位、PaaS クラウドの場合にはアプリケーションもしくはアプリケーションを構成する部品がサービスを構成する要素の最小単位となる。これらの最小構成要素がネットワークを用いて連結され、一つのサービスを構成している。つまり、サービスをそのまま遠隔地に移動させるためには、サービスを構成する要素とそれらを連結するネットワークサービス、ならびにネットワーク構成を、まとめて遠隔地に移動することが必要となる。これらの構成要素やネットワークサービスは、異なった複数の物理資源である、サーバやストレージ、ネットワーク機器を利用して構成されている。したがって、移動元と移動先に同様な物理資源が存在するのであれば、サービスをそのまま移動することが可能となる。しかし、意図して構築しない限りそのような環境は存在せず、移動元と移動先は異なった物理資源を用いて構築されるクラウドである場合が一般的である。そこで本研究では、サービスを構成する要素をそれぞれ抽象化し、異なった物理資源を持つクラウド間でも構成要素を転送し同様に組み上げることで、同一のサービスを展開できる手法を提案し、実装した。

研究提案時当初は、IaaS クラウドのみを考慮し、かつ IaaS クラウドの最小構成要素である VM

を多重仮想化し、高速転送する技術開発を目的としていた。しかし、研究を進めるにあたって、次の問題点があることがわかった。

- PaaS クラウドを利用したサービスの普及
- 多重仮想化による性能劣化
- 多重仮想化を用いたとしても転送先でのサービスの完全な再構成が困難
- ネットワークサービス (NAT やファイアウォール、ロードバランサといった機能)の不整合発生

PaaS クラウドの考慮は、IaaS クラウドのみではなく PaaS クラウドを利用してサービスが構築される機会が増えていることに起因する。PaaS クラウドも考慮したサービス移動を実現しなければ、今後にわたって使える技術とはならない。

また、多重仮想化による性能劣化に関しては、現在の仮想化技術は IaaS を意識したものであり、特にネットワークやローカルストレージへのアクセスに関して、それぞれハードウェアレベルの抽象化を提供しているため、多重に仮想化することで大きな性能劣化が発生する。ネットワーク入出力の場合は、通常の仮想化においても VM(ゲスト OS)での割り込みに加え、物理ハードウェアレベル(ホスト OS)での割り込みが発生するため、単純に計算しても、仮想化を持ちない場合に比べて 2 倍の割り込みが発生する。多重仮想化を用いた場合には、VM の中で実現される VM に関しても割り込みが発生するため、仮想化技術を用いない場合に比べ、3 倍の割り込みが発生する。もちろん割り込み発生処理コストだけではなく、CPU がホスト OS とゲスト OS の制御を切り替える場合にも命令時間のオーバーヘッドが発生したり、場合によっては排他制御処理等のオーバーヘッドが発生したりするため、実際にはさらに処理コストが増加する。このため、VM レベルの多重仮想化は、その環境をそのまま転送するためには適した技術であるが、その上で実レベルのサービスを展開するには不向きな技術となっている。さらに、ネットワーク構成に関して、多重仮想化を用いてネットワーク構成を一台の VM の中に隠蔽したとして

も、クラウドによって提供されるネットワーク機能の差異があり、その差異を埋められるものではないため、転送先でのサービスの再現が難しい場合が存在する。これは、IaaS クラウドや PaaS クラウドにて提供されるネットワーク機能である、NAT やファイアウォール、ロードバランサといった機能がクラウドに内包されて提供されている基礎的なネットワーク機能であり、サービス単位、もしくはユーザレベルで実現されているものではないことに起因する。これらの機能はクラウドに依存したものであり、物理資源を用いて実現されている場合も多いため、移動が困難なサービスとなっている。

これらの点から、本研究課題にて提案するアーキテクチャを見直し、既存の IaaS クラウドや PaaS クラウドにて稼働しているサービスをそのまま移動することを目指すのではなく、IaaS クラウドや PaaS クラウドの差異を吸収することで、サービス単位で転送しやすいアーキテクチャを提案し、それを実現するための要素技術の研究開発、ならびにアーキテクチャ構築を目指す。

具体的には、IaaS クラウドでも PaaS クラウドでも利用でき、かつ移動できるよう、サービス構成要素の最小単位をプロセスとしたサービス構築アーキテクチャの実現を目指した。また、それに伴い、ネットワーク構成がサービス単位ではなく、サービスの構成要素であるプロセス単位で抽象化できるよう、プロセスレベルでのネットワークプロトコルスタックの仮想化技術を研究開発した。さらに、災害時等を想定し、潤沢な専用線環境のみならず、限られた回線を有効に使うための手法の提案や、無線利用時における高速転送手法の提案を行った。最後に、高速転送を実現するにあたって必要となる、ハードウェア機能を利用したネットワーク通信オフローディング技術の検証を行い、本研究課題が提案するアーキテクチャに適している通信オフローディング技術の検証を行った。これらの研究成果を用い、サービスをそのままの形で遠隔地に高速伝送することのできるサービスアーキテクチャを提案した。

まとめると、次の点が本研究課題の本年度の成果である。

- プロセスを最小構成単位としたサービス実現のためのアーキテクチャ研究開発
- プロセスレベルでのネットワークプロトコルスタック仮想化の研究開発
- 回線やチャネルの有効利用による高速伝送技術の研究開発
- ネットワーク通信オフローディング技術の検証と適用

これらの個々の成果に関して、詳細を述べる。

5.1 プロセスレベルによるネットワークサービス提供技術の研究開発

サービスを構築するにあたっては、OS の上でサービスを提供するソフトウェアが動作し、そのソフトウェアが単体のプロセス、もしくは複数のプロセスが連携してひとつのサービスを構築している。しかし、あるサービス、例えば Web サービスを提供するにあたって、Web サーバのみでサービスが構築できる場合もあるが、ほとんどの場合はネットワーク側にて提供されるサービスである、NAT やファイアウォール、ロードバランサといったネットワーク機能を組み合わせることで一つのサービスが構築される場合が多い。Web サービスの場合の構成例を図 1 に示す。

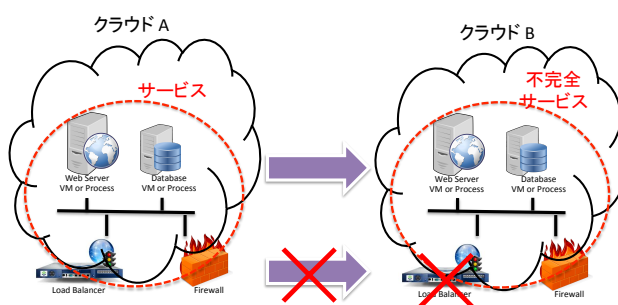


図 1：サービス構成の不一致

このようなサービス構成の場合、ネットワーク側にて提供されるネットワーク機能もプロセスと同様に移動できなければ、サービス環境を保ったままの移動は難しい。そこで本研究課題では、NAT やファイアウォールといったネットワークサービス機能をプロセスとして実現し、サービスを提供する中核プロセスと同時に移動できるアーキテク

チャを提案し、実装した。アーキテクチャの概念図を図 2 に示す。図 2 に示す通り、ネットワーク機能を Virtual Network Function (VNF) プロセスとして実現し、ユーザランド内のプロセスとして実現することで、ネットワーク機能を提供するプロセスを中核プロセスと同様に扱うことが可能となった。この成果に関しては、論文[1],[2]としてまとめた。

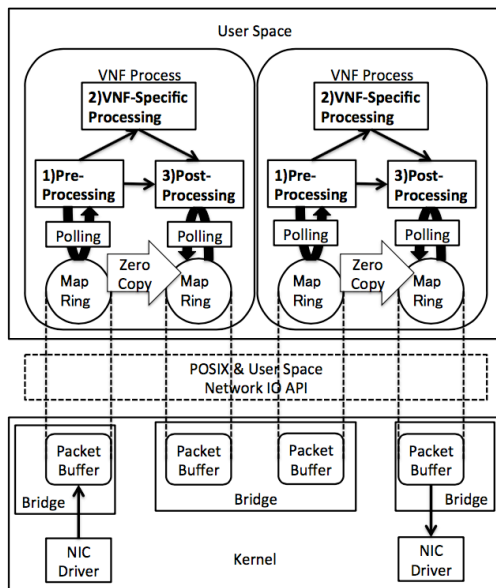


図 2 : プロセス型 VNF アーキテクチャ

5.2 プロセスレベルネットワークプロトコルスタック仮想化技術の研究開発

前述の通り、サービスの最小構成要素をプロセスとし、ネットワーク機能もプロセスとして実現することで、サービス環境をそのまま遠隔地に移動することを可能とした。しかし、クラウドの基盤となっている、ホスト OS が提供するネットワークプロトコルやネットワーク構成の差異は、依然として吸収できない。そこで本研究課題では、さらにネットワーク機能やプロトコル、構成の分離化ならびに仮想化を進めるために、ライブラリ OS という形でネットワーク機能の仮想分離化機能 (NUSE : Network Stack in Userspace) を設計ならびに実装した。この成果は、論文[5]にまとめられており、現在 Linux カーネルの標準機能として取り込んでもらうための活動を行っている。

ネットワーク機能の仮想分離化アーキテクチャを図 3 に示す。このアーキテクチャでは、本来は

カーネル内部に存在するネットワークプロトコルスタックが提供する基礎的な機能を、ライブラリとして分離することで、プロセス自身がネットワークプロトコルスタック機能を有することを可能とする。つまり、カーネルが有するネットワークプロトコルスタック機能を、プロセス側から自由に呼び出すことが可能となり、プロセス単位で専用のネットワーク環境を構築することが可能となる。

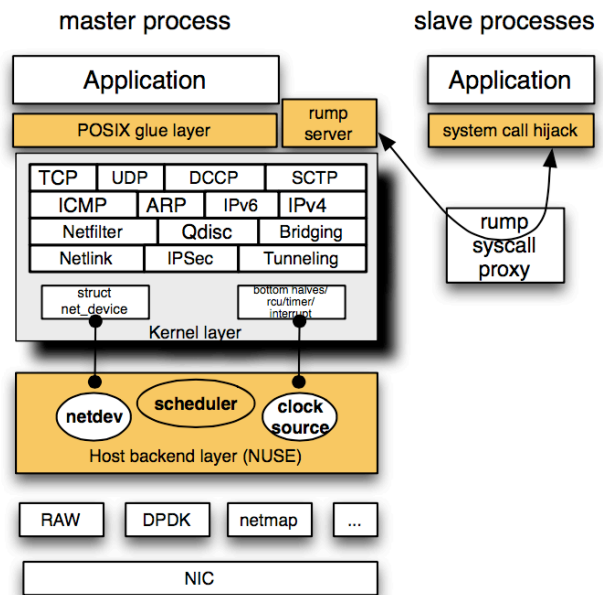


図 3 : NUSE アーキテクチャ

5.3 回線とチャネルの有効利用による高速転送技術の研究開発

前述の通り、ネットワーク機能を含めたサービスをプロセスの集合として構成することで、遠隔地への転送を可能とした。次に、プロセス自身の転送とサービスに利用されているストレージデータを遠隔地に高速に転送するための手法について検討した。その結果、Multipath TCP (MPTCP) を用いた転送が大容量データの高速転送に有効であることがわかった。しかも、これは通常の有線ネットワークのみならず、無線環境においても有効であることが確認できた。これらの成果については、論文[4],[6],[7],[8],[11],[12],[13],[14],[15]にまとめた。

有線ネットワークの場合には、通常の MPTCP が有する複数パス利用機能の他に、パスの混雑率や短時間フローのためにあらかじめ事前定義された

パスを有効利用することで、転送効率が向上する Path Switching Multipath TCP (PS-MPTCP) という手法を提案し、検証した。PS-MPTCP の概念図を、図 4 に示す。PS-MPTCP では短時間フローと長時間フローを分別し、物理パスを分割することによって、ネットワークインタフェースのキューを有効に利用することを実現している。これにより、通常の MPTCP より、高速な転送を可能とした。

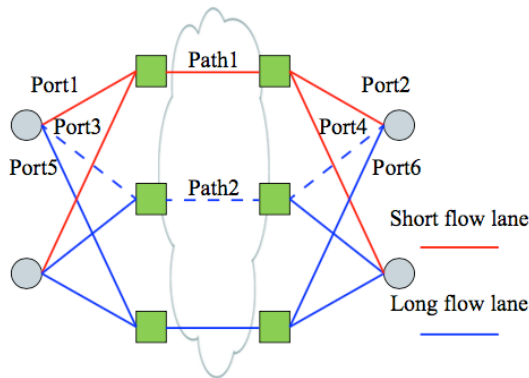


図 4 : PS-MPTCP 概念図

また、無線の場合には、マルチホップ無線環境においてチャンネル割り当てならびにトラフィック割り当てを工夫することにより、チャンネル単位でのトラフィック平滑化を行う手法を提案した。この実現には SDN 機能である OpenFlow を無線基地局でのフロー制御に導入し、あるフローをどのチャンネルに割り当てて通信するかという制御を可能とすることで、平滑化を実現した。本手法の概念図を図 5 に示す。

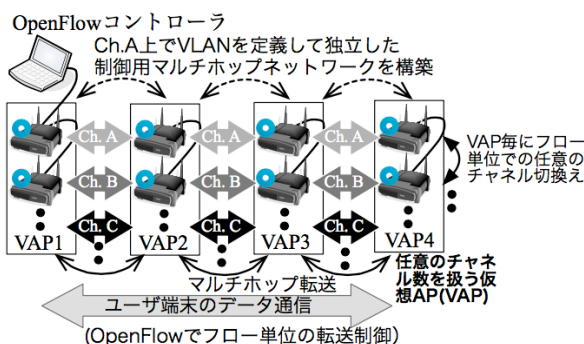


図 5 : OpenFlow を利用した無線チャンネル単位のトラフィック平滑化

図に示す通り、無線基地局間でチャンネル単位の空きスロット状況を確認し、チャンネル間での偏りが発生しないようトラフィックを平滑化することで、

チャンネルを束ねた高速伝送を可能とした。

5.4 ハードウェアオフローディングによるネットワーク高速化技術の利用

ネットワークを利用した大容量データ転送をさらに高速化するために、ハードウェアオフローディング機能の有効利用も検討した。ハードウェアオフローディング機能は、すべての IaaS クラウドや PaaS クラウドのインフラにて利用できるとは限らないが、SR-IOV²や Intel DPDK³、プロトコルオフローディング⁴ や netmap⁵といった機能は、ネットワークインタフェースカードが汎用的に提供する機能となりつつあり、商用クラウドもサポートを開始している。そのため、大容量データ転送に用いることのできる技術として検討することは、今後のサービス移動アーキテクチャにとって有用であると考え、検証を行った。この結果は、論文 [2], [9] の一部となっている。例として、Intel DPDK を用いたデータ転送と、カーネルネットワークプロトコルスタックによる、ソフトウェアデータ転送の性能比較を図 6 に示す。

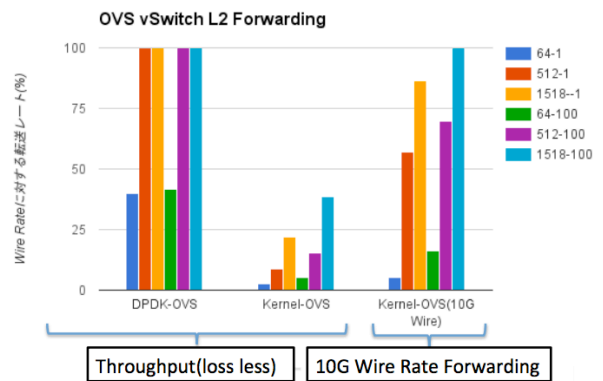


図 6 : DPDK とソフトウェア転送の比較

図に示す通り、DPDK を使った場合の転送性能 (DPDK-OVS) が、ソフトウェアのみでの転送性能 (kernel-OVS) に比べ、高い性能値を出しているこ

2

<http://www.intel.com/content/www/us/en/pci-express/pci-sig-sr-iov-primer-sr-iov-technology-paper.html>

3 <http://dpdk.org/>

4

<https://software.intel.com/en-us/blogs/2015/01/29/optimizing-the-virtual-networks-with-vxlan-overlay-offloading>

5 L. Rizzo. netmap: a novel framework for fast packet I/O. In Proceedings of the 2012 USENIX conference on Annual Technical Conference, USENIX Association, 2012.

とがわかる。現在のネットワークは広帯域化しており、サーバ自体が 10Gbps のネットワークカードを有することは珍しくない。サーバ用の 40Gbps ネットワークカードも販売され始めており、サーバ一台が有するネットワーク帯域はより増えていく傾向にある。しかしその一方で、現在の OS では、ソフトウェアによるデータ転送だけでは、10Gbps の性能を出すことも難しいことがわかる。つまり、10Gbps 以上のネットワークインタフェースカードは、カードが持つハードウェアオフローディング機能を利用したデータ転送を行うことが前提となっており、ハードウェアオフローディング機能を有効に利用しない限り、10Gbps を超える帯域にてデータ転送を行うことは難しいことがわかった。

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

今年度の本研究課題では、IaaS クラウドや PaaS クラウド上に展開されるサービスを、そのままの形で遠隔地のクラウドに高速移動するアーキテクチャならびに技術に関して、提案と研究開発を行った。具体的には、次の技術に関する研究開発や検証を行った。

- プロセスによるネットワーク機能の開発
- プロセス単位のネットワーク仮想分離化技術の開発
- 高速転送のための PS-MPTCP ならびに OpenFlow 無線技術の開発
- ハードウェアオフローディング機能を利用した高速転送の検証

これらの技術を元に、遠隔地へのサービス高速移動を可能とするアーキテクチャを構成した。

しかし、本年度では、アーキテクチャをシステムとして構築し、システム全体として実証実験を行うまでにたどり着くことができなかった。これは次年度以降の課題である。本研究にて扱っている課題は、ICT 技術や社会インフラの信頼性や冗長性を高めるために非常に重要な技術であり、次年度以降も、システムとして実用化するための実証実験を中心とした研究活動を行っていく方針で

ある。

7. 研究成果リスト

(1) 学術論文

[1] 堀場 勝広, 湧川 隆次, 関谷 勇司, 村井 純, “NFV におけるプロセス型ソフトウェアミドルボックスアーキテクチャの提案”, 電子情報通信学会, Vol. J98-B, No. 7, 2015 年 7 月 (採録通知受領済み)

[2] 関谷 勇司, 中村 遼, 岡田 和也, 堀場 勝広, “SDN と NFV による新たなネットワークサービス構造の提案”, 電子情報通信学会, Vol. J98-B, No. 4, pp. 333-344, 2015 年 4 月 (招待論文)

[3] Yuji Sekiya, Tomohiro Ishihara, and Hajime Tazaki, “DNSSEC simulator for realistic estimation of deployment impacts”, IEICE Communications Express, Vol. 3, No. 10, pp. 305-310, October 2014. DOI:10.1587/comex.3.305.

[4] Shogo Fujii, Hajime Tazaki, and Yuji Sekiya, “Improving the short flows in datacenter with Path Switching Multipath TCP (PS-MPTCP)”, IEICE Transactions of Communication, EB (投稿中)

(2) 国際会議プロシーディングス

[5] Hajime Tazaki, Ryo Nakamura, and Yuji Sekiya, “Library operating system with mainline Linux kernel”, In Proceedings of The Technical Conference on Linux Networking (netdev 0.1), Ottawa, Canada, February 2015

[6] Yuzo Taenaka, Masaki Tagawa, and Kazuya Tsukamoto, “Experimental Deployment of a Multi-channel Wireless Backbone Network Based on an Efficient Traffic Management Framework”, In Proceeding of the 9th International Conference on P2P, Parallel, Grid, Cloud and Internet Computing (3PGCIC2014),

November 2014

[7] Yuzo Taenaka and Kazuya Tsukamoto,

"An adaptive channel utilization method with traffic balancing for multi-hop multi-channel wireless backbone network," In proceedings of International Conference on Software-Defined and Virtualized Future Wireless Networks (SDWN), October 2014

[8] Masaki Tagawa, Yutaro Wada, Yuzo Taenaka, and Kazuya Tsukamoto,

"Network capacity expansion methods based on efficient channel utilization for multi-channel wireless backbone network", In Proceeding of the 2014 International Workshop on Smart Complex Engineered Networks (SCENE2014), August 2014

[9] Ryo Nakamura, Kouji Okada, Yuji Sekiya, and Hiroshi Esaki, "ovstack : A Protocol Stack of Common Data Plane for Overlay

Networks", In Proceedings of Network Operations and Management Symposium (NOMS) 2014, pp. 1-8, DOI :

10.1109/NOMS.2014.6838420, May 2014

(3) 国際会議発表

[10] Yuji Sekiya : "PIX-IE : Programmable Internet eXchange in Edo", Asia-Pacific Information Infrastructure (APII) Workshop 2014, Osaka Japan, October 2014

(4) 国内会議発表

[11] 水山一輝, 和田祐太郎, 田川真樹, 妙中雄三, 塚本和也, "OpenFlow を用いたマルチホップ無線ネットワークにおける制御トラフィック削減手法の検討", 電気情報通信学会 ネットワークシステム研究会, 信学技報, Vol. 114, No. 477, NS2014-221, pp. 257-262, 沖縄コンベンションセンター, 2015 年 3 月

[12] 妙中雄三, 塚本和也, "キャパシティオンデマンド無線メッシュネットワーク実現に向けた SDN に基づくチャンネル利用制御手法", 電気情報通信学会 ネットワークシステム研究会, 信

学技報, Vol. 114, No. 371, NS2014-151, pp.

25-30, 伊勢市観光文化会館, 2014 年 12 月

[13] 藤居 翔吾, 田崎 創, 関谷 勇司, "データセンター環境におけるショートフロー通信改善手法の一提案", インターネットコンファレンス 2014 論文集, pp. 33-42, 広島, 2014 年 11 月

[14] 山本 成一, 中村 遼, 上野 幸杜, 堀場 勝広, 関谷 勇司, "GINEW 革新的なネットワーク運用管理アーキテクチャの一提案", ソフトウェア科学会 第 15 回インターネットテクノロジーワークショップ (WIT2014), 青森, 2014 年 6 月

[15] 妙中雄三, 塚本和也, "無線バックボーンネットワークの多チャンネル有効利用技術", 電気情報通信学会 スマート無線研究会, 信学技報, Vol. 114, No. 44, SR2014-1, pp. 1-8, 東芝研修センター (横浜市港北区), 2014 年 5 月

(5) その他 (特許, プレス発表, 著書等)