

我が国におけるネットワーク仮想化研究開発

中尾彰宏

我々は2008年よりプログラム可能な独立なりソースの集合「スライス」を用いて新世代ネットワークを構成する持続進化可能な「ネットワーク仮想化基盤」の研究を始め、SDNとNFVの融合に相当する概念やデータプレーンのプログラム性を含むDeep Programmabilityの概念を提唱し、6者の共同研究と7者の委託研究により推進してきた。その歴史と今後の発展を議論する。

1 まえがき

1960年代後期のARPANETを起源とするTCP/IPのネットワーク・プロトコルをベースとするインターネットは、当初ネットワークの相互接続(Inter-networking)を実験する目的として開発されたが、1990年の商用化に伴い、様々な新たな社会インフラとしての要求に応えるために改良され、現代では、我々の社会生活には欠かすことができない必要不可欠な重要情報社会基盤(Critical Information Social Infrastructure)となっている。

このように1974年という約40年以上前に提唱されたCerfとKahnのインターネットワーキングの原理(Internetworking Principle)が、その後現代まで受け継がれ、現在のインターネットのアーキテクチャの根幹を成していることは、ある意味驚くべきことである。しかしながら、このように長きにわたって成功し、社会インフラとして利用されるようになったインターネットは、2000年頃には「Ossified」つまり新しい機能を導入するのが難しく停滞したと認識されるようになる。このことは、2001年に出版されたU.S. National Research Council Reportの「*successful and widely adopted technologies are subject to ossification, which makes it hard to introduce new capabilities...*」という引用にもあるように、革新的に成長させることが困難となるという課題が認識されたのである。

そこで、インターネットのアーキテクチャを再度一から見直し、黒板を全てまっさらにした上で新たなアーキテクチャを描くという意味の「クリーンスレート(Clean Slate)」なネットワークとして再設計・再検討する動きが2007年頃から始まった。米国では、NSFの資金でGENI(Global Environment for Networking)プロジェクト¹⁾が始まり、新しいネットワーク・アーキテクチャを検討するためにテストベッド構築が進められることになった。その後はBBNテ

クノロジーがGENI Project Officeを務めることとなり、大規模なネットワーク仮想化研究が全米で開始された。同時期、2008年頃には、我が国でもNICTが中心となり、新世代ネットワークを実現するための研究開発が開始された。新世代ネットワークを支えるネットワーク基盤技術として、様々な新しいプロトコルを実験的に実証できる技術として、ネットワーク仮想化がその鍵を握る技術として研究開発することになった経緯がある。

我が国では、筆者が、GENIのコミュニティの一員であり、また2005年までLarry Peterson教授の下でGENIの初期の設計に重要な影響を与えたPlanetLabプロジェクト²⁾に従事した経緯があることもあり、日本で、NICTのプロジェクトリーダーとして仮想化ノード(VNode)プロジェクトを始動し、2008年から2010年までは、NICT・東大・NTT・NEC・日立・富士通の6者で、GENIよりも早いペースで仮想化ノードというアーキテクチャを構築し、GENIコミュニティから招待され基調講演やデモをしてきた。2011年からはNICTが委託研究として、この継続を先導し、東大・NTT・KDDI・NEC・日立・富士通の6者が受託して協力してオールジャパン(All Japan)でGENIに対する日本のカウンターパートとしての研究を推進してきた。

2008年から2015年にわたる共同研究と委託研究の成果として、GENIよりも先に先進的なアイデアとして提案した研究提案はいくつもあり、そのうちのいくつかはGENIコミュニティに大きな影響を与えたと考えられる。一番重要なのは、ネットワーク仮想化基盤の構成要素である、仮想化ノード(VNode)のノード・アーキテクチャ³⁾は、2008年には設計の提案を行い2010年には最初の実装が完了し、第8回のGENI Engineering Conference(GEC)にて招待基調講演として発表したが、その1年後にGENIがGENI Rackと呼ばれるVNodeによく似たアーキテクチャを提案

した。VNode のアーキテクチャの詳細は、本特集号の他章に詳述を譲るが、仮想ネットワークを構築する部分であるリダイレクタ (Redirector) と呼ばれる部分とプログラマ (Programmer) と呼ばれるネットワーク機能を実装する部分とに分離され、それらを接続するバックプレーン、という構成を取る。このアーキテクチャこそが、仮想ネットワーク実装技術と、ネットワーク機能の実装技術を独立にスケールさせる工夫があり、この思想は、2008 年の時点で筆者のプレゼンテーションスライドに原案があった。現代から振り返ると、それぞれが SDN や NFV そしてその融合がオーケストレーションとして議論されるなど、ビジネスで先行する、ネットワークをスライスし、ネットワーク機能を実行する、というアーキテクチャの原型であると言える。

また、もう 1 つ重要な、GENI に (現在でも) 先行する技術としては、データプレーンのプログラム性である。我々は当初から、新世代ネットワークの実現を要件として掲げていたため、現在のインターネットプロトコルに依存しない、言わば、非 IP (non-IP) のプロトコル、正確には、L2 以上のプロトコルがプログラムにより柔軟に処理可能なデータプレーンの構成ができる通信基盤を構築している。一方で、GENI で進んだネットワーク仮想化技術は、OpenFlow^[4] に依存した経緯もあり、TCP/IP や Ethernet のプロトコルにしか適応できないネットワーク仮想化技術に留まっている。Stanford 大学や GENI で提唱された Clean Slate という言葉は、実を言うと我が国が推進するネットワーク仮想化技術の方が、L2 以上のプロトコル改変を想定している点で、より深いプログラム性を提供するため、より Clean Slate なアプローチであるとも言える。この思想は、現代では SDN における Protocol Oblivious Forwarding (POF)^[5] が最も近い概念であるが、ネットワーク機能が限定的であることや、OpenFlow に見られるパターンマッチ・アクションというプログラムモデルという点に比べて、我々が想定するプログラム性はより深く、プログラミングも容易であることから、Deeply Programmable Networking (DPN) という概念として提唱をしている。CCN (Content Centric Networking) や ICN (Information Centric Networking) と呼ばれる従来の TCP/IP を想定しないプロトコル^[6] を処理するノードはこのような DPN におけるデータプレーンのプログラム性により真価が発揮されると考えられる。

我々がアイデアで GENI に先行し影響を与えた技術は、エッジとコアのネットワーク仮想化技術の切り分けや、無線ネットワークの仮想化、端末の仮想化、アプリケーションごとのスライスなど枚挙に暇がない。

本稿では、これらの詳細は本特集号の別の章や、あるいは、別の文献に譲ることにするが、我々が推進してきたプロジェクトが、米国のネットワーク仮想化技術のコミュニティにも大きな影響を与えてきたことは注目に値する。また、我が国のネットワーク仮想化研究が GENI コミュニティでも高い評価と注目を得たことから、筆者は GENI のアーキテクトのジャーナル論文に共著者として招待され寄稿をしている^[1]。

本稿では、このように 2008 年から NICT を中心に推進してきた我々のネットワーク仮想化技術の歴史を紹介し、また、今後の研究の方向性を議論する。

2 ネットワーク仮想化技術研究の概要

本節では、ネットワーク仮想化技術研究の一般的な概要とその進捗の経緯を紹介する。

新しいネットワーク・プロトコルを実験検証するプラットフォームとして、IP ネットワーク上に仮想化されたネットワーク実験環境が構築できるオーバーレイ・ネットワーク・システムが 2000 年初頭に出現した。その代表的な例が、プリンストン大学の PlanetLab である^[2]。PlanetLab により、オーバーレイ・ネットワークで仮想化されたネットワーク・コンピューティング・ノードリソースを動的に面的に接続するスライスを生成することが可能になった。この当時スライスは、主にサーバ上の計算量やストレージや名前空間のリソースを独立に割り当てた単位として定義されていた。2006 年には 700 以上のノードが、現在では 1,000 以上のノードが、世界規模で展開され様々なネットワーク研究が実施されている。我が国では、PlanetLab 技術をベースに更に拡張した CoreLab を開発し、東京大学と NICT により 2007 年より JGN-X ネットワーク上に展開した^[7]。

しかし、オーバーレイ・モデルのネットワーク環境では、ネットワーク内の制御が不可能であるため新世代ネットワークが目指すクリーンスレートのネットワークを研究開発することが困難である。そこで、ネットワーク仮想化ノードを開発により、ピア・モデルに基づくネットワーク仮想化技術 (図 1) の研究開発が 2008 年、NICT を中心とし、東京大学、NTT その他企業の産学官連携により始められた。

我々のプロジェクトでは、スライス概念は、プログラム可能な独立なネットワーク・計算・ストレージ・名前空間などのリソースの集合として定義され、従来の仮想ネットワークが、L2 や L3 のネットワークを VLAN タグやトンネルで多重化するだけであったのに対し、プログラム可能なリソースとしてあらゆるネットワーク・プロトコル処理が実現可能であり (プ

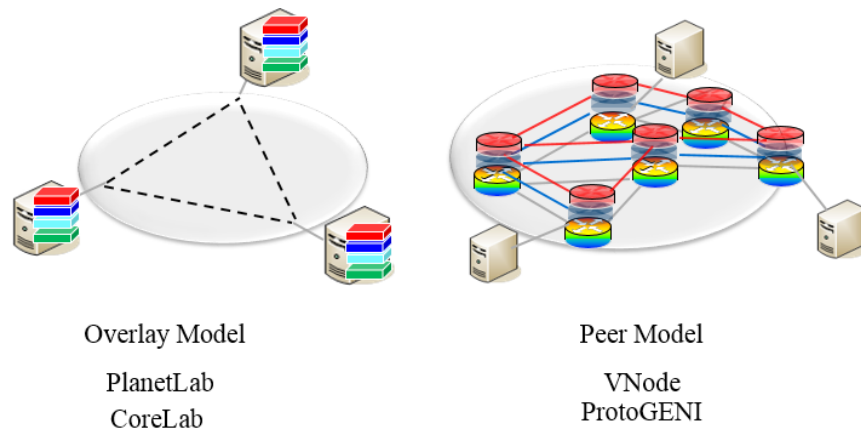


図1 オーバーレイ・モデルとピア・モデル

ログラム性)、またそのプログラムの実行環境を提供するリソースは独立に割り当てること(リソースアイソレーション)が非常に重要な要件として定義されている。

ネットワーク仮想化ノード開発に当たっては、持続的に進化可能であるノード・アーキテクチャ設計に基づき、ネットワーク・リンクの仮想化を行うリダイレクター(Redirector)と、ノード機能を仮想化するプログラマーの2つのパーツに分けた構成とした^[3](図2)。リダイレクターは、ノード間接続や帯域保証しながら仮想ネットワークを構成する機能であり、現代のSDNの技術に相当する機能である。プログラマーはパケット変換、フィルタリングや経路制御に加え、キャッシュや信号処理も包含する、今日のNFVに相当する機能あるいは新プロトコルを定義し、その変換や制御までもプログラムの対象とするという意味では、SDNやNFVを融合し拡張したとも言える機能を実現する。すなわち、2008年の共同研究フェーズの開発時点で、すでにSDN/NFVのアーキテクチャを先取りしたアーキテクチャを提案してきたことになる。さらに、物理的なリソース上にスライスを多数構築する仮想化技術により、複数のネットワーク機能を多重化する、これから更に進化することが想定される新しい技術にも対応している。

同時期に、総計で約30の米国のトップの大学や研究機関が参加するGENIプロジェクトでも、クリーンシレート・ネットワーク研究開発に向けネットワーク仮想化技術を基盤とするテストベッド構築が進められた^[4]。欧州でもFP7のプロジェクトの下で、ネットワーク仮想化技術を基盤とするテストベッド構築が進められた。GENIの研究活動成果は、年に3回開催されるGECの会合で報告された。我が国も当初から本会合に参加し、国内でのネットワーク仮想化技術の報告を行ってきた。2008年に始まったNICTでの仮想

化ノード共同研究により、ネットワーク仮想化技術に基づくテストベッド構築に向け、2010年には、NICT白山実験施設にプロトタイプネットワーク仮想ノードであるVNodeを、GENIプロジェクトで開発したGENI Rackに先駆けて開発した(図3)。GENI RackはPlanetLabノードの進化形ともいえる単体はリソース量が少なくより多数のノードを分散するアーキテクチャのInstaGENI Rackと、単体のリソース量が多く、少数のノードを分散するアーキテクチャのExoGENI Rackの2種類がある^[5]。後者の方が、VNodeによく似たアーキテクチャとなっている。

ネットワーク仮想化技術開発の促進を図るため、2011年、NICTの委託研究に基づきNTT・KDDI・東大・NEC・富士通・日立的の6者による新世代ネットワークを支えるネットワーク仮想化基盤技術研究開発が開始された^[3]。本研究開発では、ネットワーク仮想化基盤システムを研究開発する課題アとネットワーク仮想化基盤で作成されたスライスにサービスを合成するシステムを研究開発する課題イより構成される。さらに、ネットワーク仮想化基盤上でのアプリケーションを開発する課題ウの研究も同時に進められた。2011年度から2014年度において進められた課題アは、定期的に、通算125回以上NICT白山の研究拠点において5

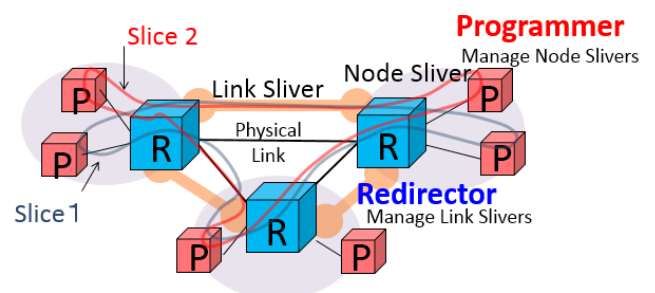


図2 ネットワーク仮想化の基本構成(2008年の筆者発表資料より抜粋)

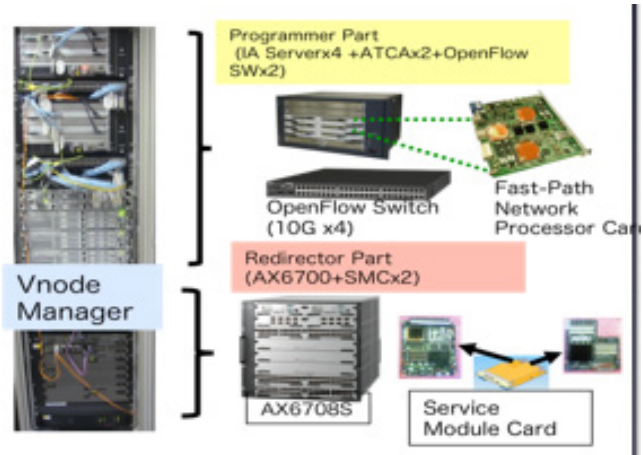


図3 ネットワーク仮想化ノードの試作(2010年)(4台の初期バージョン)

者が集まり、研究面では東大のリーダーシップ、プロジェクト統括はNTTのリーダーシップの下で、通算125回以上の打ち合わせが行われ、非常に密な議論と研究開発が行われた。

ネットワーク仮想化技術の開発の進捗は、NICTが主催する新世代シンポジウムにて開発状況を一般に公開するとともに、電子情報通信学会にて発足したネットワーク仮想化時限研究会⁹⁾が主催するネットワーク仮想化シンポジウムにて、海外の研究機関の研究者を招きパネルディスカッションなどにより技術の国際協力を行った。

さらに、前述したGENIが主催するGECには、2009年より毎回参加し、GEC開催期間中最も重要なイベントの1つである、ライブネットワークデモでは開発チームによるデモ展示を行い、ライブで開発機能を実証し、我が国のネットワーク仮想化研究開発活動を海外にもアピールしてきた。展示デモに加え、2010年GEC7、2011年GEC10、2012年GEC13、2013年GEC15の3回のプレナリー・セッションで講演を行い、我が国にネットワーク仮想化の先端性を示した。2014年には、デモセッションで、後述のFLARE技術⁹⁾が最優秀デモ賞を受賞するなど、GENIコミュニティでは、我々の研究活動のビジビリティは非常に高く、また、我々が先行する技術は、彼らに大きな影響を与えてきたことがわかる。

今日のSDNを実現するOpenFlowに関して、初期の研究開発段階からGECにてライブデモが実施され、さらにハンズオン・チュートリアルにより参加技術者や学生への技術の浸透が進められてきた。この点に関しては、我が国のネットワーク仮想化技術の一般への浸透は出遅れた感があり、2013年度から電子情報通信学会、ネットワーク仮想化研究会などの場を活用して、チュートリアルやハンズオンを実施しネットワーク仮想化技術の普及活動を行っている。

3 深遠なプログラム性を提供するネットワーク仮想化技術(DPN)の開発

米国Stanford大学が提案し、もはや世界中で認知され、さらにビジネス分野で採用が先行しているOpenFlowは、従来のネットワーク機器のデータプレーンとコントロール・プレーンを分離し、コントロール・プレーンを解放し汎用言語プログラムでソフトウェア制御する画期的なアーキテクチャといえる。しかし、新世代のクリーンスレートなネットワーク・アーキテクチャを実現するのは、データプレーンがハードウェアで固定されIPパケットしか扱えない点では、不十分なアーキテクチャといえる。

我々は、データプレーンもプログラム性を持つ必要があることに当初から着目し、エニーフレーム(Any Frame)と呼ばれるL2以上フレームの処理をプログラムにより実装可能なネットワーク仮想化ノード設計を行った。すなわち、データプレーンもSDN化可能なDPN(Deep Programmable Networking)の提案を行ってきた(図4)。DPNの難しさは、データプレーンにプログラム性を持たせると、容易には高速性能が得られないところにある。そこで、VNodeのプログラマー部分では、IA(Intel Architecture)サーバを使用したSlow Pathとネットワーク・プロセッサを使用したFast Pathで構成し、高速性が必要なネットワーク処理はFast pathで行う方式とした。VNodeのFast Pathで使用したプロセッサはカーネル・モードで高速機能を実現する必要性があり、プログラミングの簡易性がやや難点である。ただし、IAサーバのプロセッサ技術の進化やパケット処理のNICオフロード技術によりVNodeのバージョンを上げることにより高速化が可能になってきた。また、仮想化ノードの研究開発は2014年度で完了したため、調査研究に留まっていたり、2015年度の共同研究や、東大やNTT

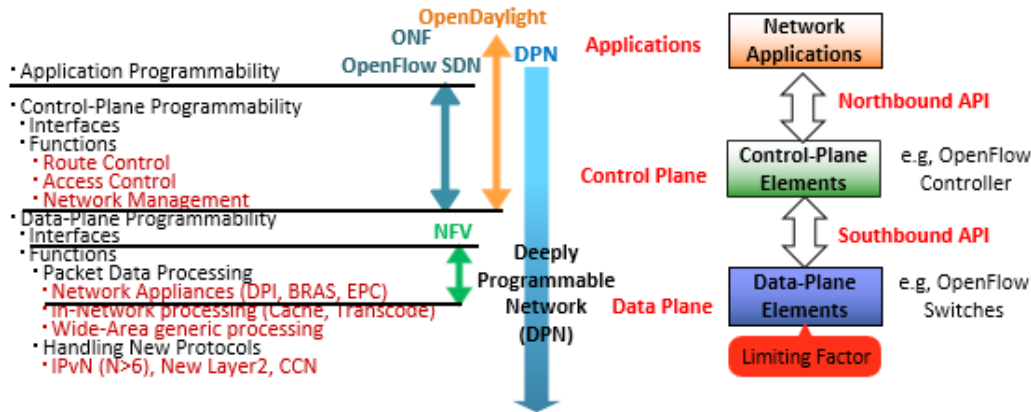


図4 SDNとDPN

の研究で独自の開発が進んでいたりするが、Intel社からオープンソースで提供される DPDK (Data Plane Development Kit)^[10] などを用いることによりある程度の処理が高速に実装可能である。しかしながら、DPDK では従来の NIC (PHY) を利用する必要があることから、フレームは従来のイーサネットフレームに限定されるなどの制限がある。

DPN を簡易に実現するアーキテクチャとして、VNode から派生しエッジネットワークのネットワーク仮想化の研究にて FLARE ノードの開発を行った^[9]。開発した FLARE ノードは、SlowPath/FastPath 構成であるが、Fast Path に使用したネットワーク・プロセッサでは、Intel DPDK でも採用されている PMD (Polling Mode Driver) をユーザ空間から利用するアーキテクチャを DPDK よりも先取りして実装し、ユーザ空間でプログラミングが可能であるため容易性が実現できる上、メニーコアプロセッサ並列処理によりスケーラブルかつ高いスループット性能が得られる (図5)。FLARE ノードにおいて、データプレーンをプログラミング可能な DPN プラットフォームを使用し、SDN のデータプレーン要素とその API (Southbound Interface) の拡張が容易に実現できるようになる。すなわち IP パケットのヘッダーに定義されたバイト列に対しての制御に加え、ユーザ指定の新規フィールドのバイト列についてソフトウェア実装により制御が実現できる。これは、現代において Huawei が推進する Protocol Oblivious Forwarding (POF)^[11] が最も近い概念であるが、ネットワーク機能が限定的であることや、OpenFlow に見られるパターンマッチ・アクションというプログラムモデルという点で制限がある。FLARE がサポートする プログラム性はより深く、プログラミングも容易であり、POF や OpenFlow を実装することも可能である。

VNode では、任意のフレーム (エニーフレーム) を処理するために、高速な GRE トンネルによる実装を行っているが、FLARE では、そもそも PHY がエニーフレームを吸い込むことができるように設計されており、トンネル技術なしで、任意のフレームに対する処理が可能である。これは、エッジネットワークにおいて、新しいプロトコルやサービスを実装するために、トンネルの構成をすることを回避することを意味しており、ネットワーク構築やパフォーマンスのオーバーヘッドを低減することができる。このような任意のフレームが処理可能な DPN 機能を利用し、新プロトコルを迅速に開発し展開を行うことが可能であることから、特に、エッジネットワークにおいて、IoT/M2M のアプリケーションに対するユースケースが多く考えられる。

FLARE は、深遠なプログラム性を備えるノード・アーキテクチャ (Deeply Programmable Node Architecture) であり、その実装は、汎用プロセッサ、メニーコアプロセッサ、そして、GPGPU などを利用して多種のプロセッサを統合する実装が可能である。現バージョンは、EZChip 社の Tile プロセッサとインテルの汎用サーバと GPGPU を組み合わせた実装と、Intel DPDK による汎用サーバのみの実装があるが、今後、多種の実装を進める予定である。

また、今日、IoT センサーやモバイルのトラフィックから高細精度の画像トラフィックまで様々なアプリケーションのトラフィックが流通している状況で、アプリケーションに特化したネットワーク機能の実行の有用性が指摘されている。

アプリケーション通常のネットワーク機器は、近年の SDN スイッチでも、パケットの DPI を行わない限り、直接にはアプリケーションレイヤーの情報が得られない。そもそも、従来のインターネットでは、アプリケーションのコンテキストは、ソケットインター

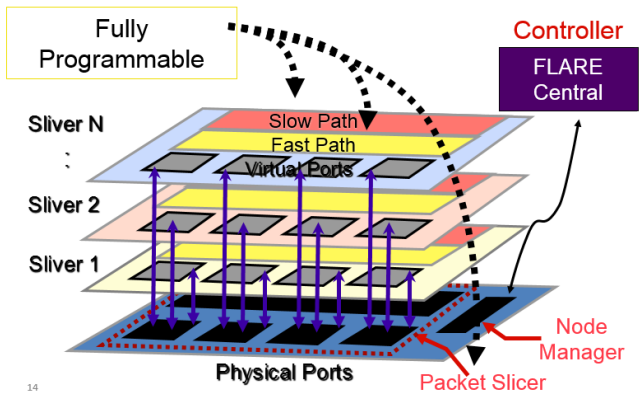


図5 メニーコアプロセッサを使用した小型ネットワーク仮想化ノード

フェースにてセッションあるいはデータグラム抽象化のために失われてしまう。このため、現状のインターネットでは、各種アプリケーションに対し画一的にトラフィック制御を行うことしかできない。

ネットワークレイヤーでもアプリケーション識別を可能とするため、アプリケーション情報を収容する新たなフィールドをパケットに定義し、ネットワーク内でアプリケーションに対応したネットワーク制御を可能とするアーキテクチャが必要になってくる。我々の提案では、既存ネットワークに対する透過性を確保するため、新たなヘッダーを定義することを回避し、パケット末尾にトレーラーバイトを定義し、トライラーバイトでアプリケーション情報をパケットに与える方式を提案している。本方式にSDNの方式でネットワーク制御することで、現状のIPプロトコルで実現できないアプリケーション識別によるパケット・トラフィック制御が可能になる。FLAREノードのDPN機能を使用すれば、新たなASIC開発なしで、SDN制御を実現することができる^[1]。

本方式の実装をモバイル・ネットワーク環境で実現しGEC20のデモ・イベント・セッションで展示を行った。その内容が高く評価されBest Demo Awardを受賞した。

4 今後の展望

2008年から新世代ネットワーク研究を支える基盤技術として開発を進めたネットワーク仮想化技術は、当初の研究開発策定時では、クリーン・スレート(Clean Slate)な実験環境を提供するテストベッドとしての位置づけが強かったが、ネットワークをスライスに分離することにより、様々なアプリケーションに応じたネットワーク構築技術そのものが次世代ネットワークに発展したといえる。また、我々が開発したネットワーク仮想化技術は、米国のネットワーク仮想化技

術に対し、先進性と独自性を確保し、米国GENIの研究開発に多大な影響を与えたと考えられる。

これからの全てのものがネットワークに接続されるIoT(Internet of Things)やIoE(Internet of Everything)の発展により、様々なトラフィック特性に対し画一的な制御では、もはやネットワークは機能しなくなるといっても過言ではない。ネットワーク仮想化技術は、トラフィックの種別を識別する技術と合わせて次世代ネットワークの根幹をなす技術と考えられる。また高速処理が容易にプログラミングできる技術は、開発期間短縮、開発コスト削減でも必須の技術であり、現状は汎用サーバで実現しているが、従来のプロセッサアーキテクチャに代わる新しいプロセッサ技術もネットワーク仮想化技術を実用化するポイントである。

このような状況を考えれば、今後は、ネットワークとコンピューティングの融合が加速的に進むと考えられる。少なくとも、エッジネットワークにおいては、モバイルエッジコンピューティング(MEC)に代表されるように、端末とクラウドを繋ぐ土管としての位置づけではなく、端末、エッジのネットワーク機能、クラウドの3つが連携する機能付きパイプとしてのネットワークが発展するであろう。また、この延長線上には、ネットワークとコンピューティングが融合し、網内のどこでもコンピューティングが実行できる世界が到来すると考えられる。つまり、インターネット全体が巨大な分散コンピュータとして機能する。今後の研究開発は、IoT/IoEやM2M、5Gモバイル・ネットワークなどエッジからネットワークとコンピュータが融合して連携するユースケースから、それを支える基盤技術として、メニーコアネットワークプロセッサ、汎用プロセッサによる高速データプレーン処理、リコンフィギュラブルASICによる高速SDNスイッチなど、プログラム性とパフォーマンスのトレードオフとコストを考慮した適材適所の技術適用と個々の基盤技術の発展が課題となる。

商用ネットワークへの適用では、標準化と相互接続、運用・保守、セキュリティ対策、経済性、省エネルギー化など実際的な課題があるが、特に標準化と相互接続に関しては、商用化には欠かせない重要なテーマであるため国際的な標準化団体・組織へ継続して参画することが必須である。

謝辞

情報通信研究機構が推進する新世代ネットワークの研究開発において、研究開発の支援を頂いた情報通信研究機構と、共同研究、委託研究を通じて協力を頂いた

た各研究機関に深く感謝を致します。

【参考文献】

- 1 Mark Berman, Jeffrey S.Chase, Lawrence H.Landweber, Akihiro Nakao, Max Ott, Dipankar, Raychaudhuri, Robert Ricci, and Ivan Seskar, "GENI:A Federated Testbed for Innovative Network Experiments," Computer Networks 61, pp.5-23, 2014
- 2 Larry Peterson and Timothy Roscoe, "The design principles of PlanetLab," SIGOPS, Vol.40, pp.11-16, Jan. 2006.
- 3 Akihiro Nakao, "VNode: A Deeply Programmable Network Testbed through Network Virtualization," 3rd IEICE Technical Committee on Network Virtualization, March 2012.
- 4 Nick McKeon, Tom Anderson, Hari Balakrishnan, Guru Parulkar, Larry Peterson, Jennifer Rexford, Scott Shenker, and Jonathan Turner, "OpenFlow: Enabling Innovation in Campus Networks," ACM SIGCOMM, Vol.38, pp.69-74, April 2008.
- 5 Haoyu Song, "Protocol-oblivious forwarding: unleash the power of SDN through a future-proof forwarding plane," HotSDN'13, pp.127-132, Aug. 2013
- 6 Van Jacobson, Diana K. Smetters, James D. Thornton, and Michael F. Plass, "Networking Named Content," CoNEXT709, Dec. 2009.
- 7 Akihiro Nakao, Ryota Ozaki, and Yuji Nishida, "CoreLab: An Emerging Network Testbed Employing Hosted Virtual Machine Monitor," ACM ROADS 2008 (Dec.2008) .
- 8 <http://www.ieice.org/~nv/>
- 9 Akihiro Nakao, "Flare: Deeply Programmable Network Node Architecture," http://netseminar.stanford.edu/10_18_12.html.
- 10 <http://dpdk.org/>
- 11 Akihiro Nakao, Ping Du, and Takamitsu Iwai, "Application Specific Slicing for MVNO through Software Defined Data Plane Enhancing SDN," To appear in IEICE Trans. 2015



中尾彰宏 (なかお あきひろ)

東京大学大学院情報学環教授
Ph.D.
ネットワーク、コンピュータサイエンス