

米国におけるソフトウェア・定義ド・
ネットワーク（SDN）技術分野の研究開発動向

平成 28 年 3 月

国立研究開発法人 情報通信研究機構
（北米連携センター）

目次

1	SDN/NFV 導入の背景	5
1.1	SDN の概要	5
1.2	NFV の概要	6
2	米連邦政府機関による SDN/NFV 研究開発支援	9
2.1	NITRD	9
A.	2013 年 12 月の SDN ワークショップと提案	9
B.	SDX 開発	11
2.2	DOE	12
A.	SDN 関連技術開発と提案	12
B.	ESnet	16
2.3	NSF	18
A.	SDN/NFV 開発支援	18
B.	サイバーインフラ導入支援	19
C.	SDX 開発支援	19
2.4	FCC	20
3	SDN 関連の研究・教育ネットワーク	21
3.1	Internet2	21
3.2	GENI	22
3.3	US Ignite	22
4	米国における SDN/NFV のエコシステム	23
4.1	SDN エコシステム	23
A.	Open Networking Foundation と OpenFlow	23
B.	ONRC、ON.Lab、ONOS	24
C.	OpenDaylight	25
D.	Open Compute Project	27
4.2	NFV エコシステム	27
A.	OPNFV	28
B.	ATIS NFV フォーラム	29
5	エッジ・コンピューティング	30
5.1	Cisco のフォグ・コンピューティング	32
5.2	IBM のエッジ・コンピューティング	36
6	米国の SDN/NFV、エッジ・コンピューティング研究開発プロジェクト	39
6.1	SDN/NFV	39

A.	プリンストン大学とジョージア工科大学	39
B.	ON.Lab と AT&T	41
C.	マサチューセッツ大学アマースト校	44
6.2	エッジ・コンピューティング	46
A.	シカゴ大学とアルゴンヌ国立研究所	46
B.	カーネギーメロン大学と Intel.....	49
7	その他の関連トピックについて	51
7.1	トランスポート・ネットワークのホワイトボックス化	51
A.	Open Networking Foundation と Optical Internatworking Forum の取り組み	52
B.	Vello Systems 主導の OSO の取り組み	53
7.2	ホワイトボックス・スイッチ市場動向	53
7.3	ソフトウェアスイッチ市場動向	56
7.4	ROADM のホワイトボックス化	57
7.5	関連研究開発におけるオープンソース・ソフトウェアの利用	58

図表

図表 1	Open Networking Foundation の SDN アーキテクチャ	6
図表 2	NFV ホワイトペーパー参画企業	7
図表 3	NFV を活用したビジョン	8
図表 4	NFV と SDN、オープンイノベーションの関係	9
図表 5	米連邦政府の SDX 技術開発ロードマップ	12
図表 6	DOE が開発している SDN を基盤としたインテリジェント・サービス・プレーン	14
図表 7	ESnet の 2013 年 1 月時点でのトポロジ	16
図表 8	米連邦政府が検討しているマルチドメイン SDN 機構	17
図表 9	SDX による ESnet と AARNet とのピアリング状況	18
図表 10	SDN アーキテクチャにおける OpenFlow の役割	23
図表 11	Cisco の IoT アーキテクチャ	30
図表 12	コンピューティング環境とそれぞれに期待できるパフォーマンス	32
図表 13	Cisco が標的とする IoT ソリューション	33
図表 14	Cisco の DMo とフォグ・ノード、クラウドを含むアーキテクチャ	34
図表 15	IoT ワールド・フォーラム・リファレンス・モデル	35
図表 16	MEC 動画解析の例	39
図表 17	CORD アーキテクチャ	43
図表 18	AoT ノードの技術計画と市内設置構想	47
図表 19	GigaSight アーキテクチャ	50
図表 20	トランスポートネットワークへの SDN 導入の課題	52
図表 21	イーサネット・スイッチ市場売り上げ全体に占める各ベンダのシェアランキング(2014 年)	54
図表 22	データセンタへのホワイトボックス・スイッチの導入変化予測	55
図表 23	ソフトスイッチを含む VoIP と IMS 機器の市場状況(2014 年と 2015 年の第 3 四半期比較)	57

1 SDN/NFV 導入の背景

ここでは、米国の政府機関や民間組織、大学や SDN/NFV の研究開発や普及に注力する背景となっている、SDN と NFV の概要についてそれぞれまとめる。

1.1 SDN の概要

米国において、ソフトウェア・DEFINED・ネットワーク(Software Defined Network: SDN)の普及活動をけん引しているコンソーシアムの Open Networking Foundation は、SDN を、「動的で管理が可能、かつコスト効率が高く順応性もあることから、今日の大容量かつ動的なアプリケーションにとって、理想的な新たなアーキテクチャ」と定義している。また同コンソーシアムによれば、SDN 導入によって、ネットワーク制御(通信経路を決定し、通信を司るルーティング機能を定義)とフォワーディング機能(指示された経路通りに信号を送受信する機能)とを分離し、ネットワーク制御を直接プログラミングできるようになるほか、アプリケーションやネットワーク・サービス向けの概念化も可能になる。SDN によって、ネットワークには次の機能が追加されると想定される¹。

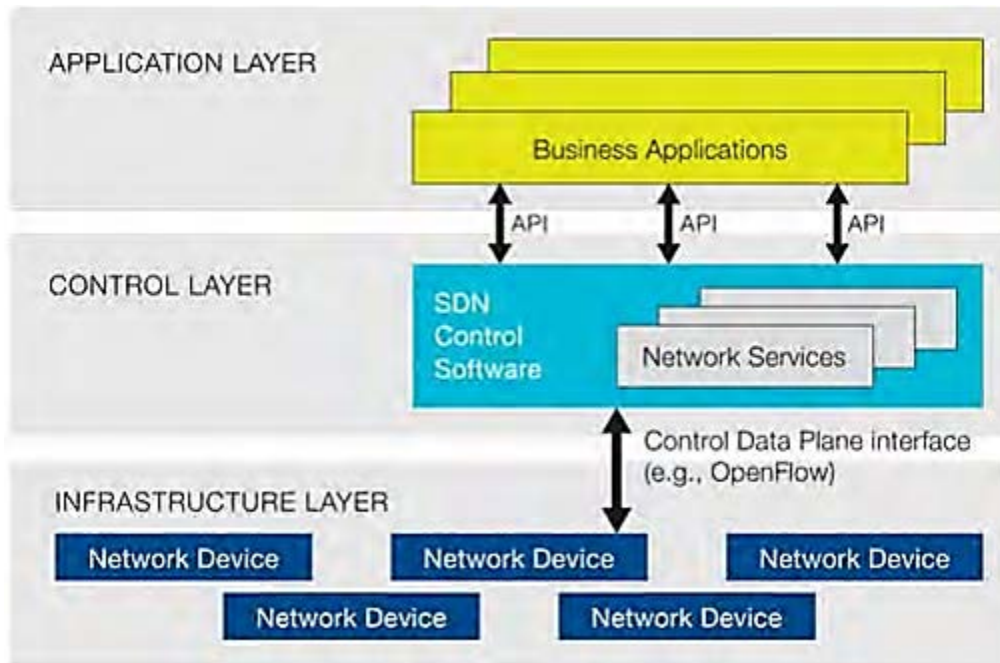
- **直接のプログラミングが可能:** ネットワーク制御とフォワーディング機能を切り離すことにより、ネットワーク制御を直接プログラミングできる。
- **敏捷性:** フォワーディング機能からネットワーク制御を切り離すことにより、管理者はニーズの変化に応じ、ネットワーク全体のトラフィック・フローを動的に調整できる。
- **中央集約管理:** SDN の導入によって、ネットワークインテリジェンス(network intelligence: 情報処理能力)は、ネットワークの全体像を把握するソフトウェア基盤の SDN コントローラ上に(理論上)集約される。SDN コントローラは、アプリケーションとポリシーエンジン(policy engine: 事前に定義されたポリシーに情報が合致するか判定する機能)において、単一の論理スイッチ(logical switch)として表示される。
- **プログラミングを通して設定可能:** 動的、且つ自動の SDN プログラムによって、ネットワーク管理者は、ネットワーク・リソースの迅速な設定と管理、保護、最適化を行える。SDN プログラムはプロプライエタリ・ソフトウェア(proprietary software: ソフトウェアの使用や改変、複製を制限するソフトウェア)に依存しないため、管理者はプログラムを自作・カスタマイズできる。
- **オープン標準とベンダ中立性:** オープン標準に基づき構築される SDN では、単一のベンダが独自に権利を擁しているような機器やプロトコルを利用せずに、SDN コントローラによって指示が出されるため、ネットワークの設計や運用が簡便化される。

以下の図は、Open Networking Foundation が提示している SDN アーキテクチャである。ネットワークは、エンドユーザが利用するビジネス・アプリケーションで構成されるアプリケーションレイヤー(Application Layer)、ネットワークのフォワーディング機能を制御するコントロールレイヤ(control layer)、パケット交換や

¹ Open Networking Foundation – Software-Defined Networking Definition, URL: <https://www.opennetworking.org/sdn-resources/sdn-definition>

フォワーディング機能を擁する要素で構成されたインフラ・レイヤ (infrastructure layer) に分離される。SDN コントローラは、コントロールレイヤに設置され、インフラ・レイヤ上にあるネットワーク機器によって実行されるフォワーディング機能を、(理論上) 集約して制御する。SDN 採用以前のネットワークでは、フォワーディング機能を制御するソフトウェアは通常、ネットワーク機器に実装されていた。SDN コントローラは、コントローラのネットワーク要件を設定するアプリケーションとはノースバウンド・インターフェース (northbound interface: NBI) 経由で、インフラ・レイヤとはサウスバウンド・インターフェース (southbound interface: SBI) 経由で通信を実行する²。

図表 1 Open Networking Foundation の SDN アーキテクチャ



出典: Open Networking Foundation³

1.2 NFV の概要

ネットワーク仮想化 (Network Function Virtualization: NFV) とは、仮想化技術を用いてネットワーク機能を汎用サーバで実現する技術であり、SDN とも密接な関係にある。2012 年 10 月、欧州電気通信標準化機構 (European Telecommunications Standards Institute: ETSI) 内に創設された産業仕様グループ (Industry Specification Group: ISG) は、NFV のホワイトペーパーを作成し、ドイツのデュッセルドルフ

² Webtorials, "The 2015 Guide to SDN and NFV," 2015, URL: http://www.webtorials.com/main/resource/papers/webtorials/2015-Guide-to-SDN-and-NFV/2015_Guide_Chapter_1.pdf

ONE Solution Brief, "OpenFlow-enabled SDN and Network Functions Virtualization", February 17, 2014: <https://www.opennetworking.org/images/stories/downloads/sdn-resources/solution-briefs/sb-sdn-nfv-solution.pdf>

³ Webtorials, "The 2015 Guide to SDN and NFV," 2015, URL: http://www.webtorials.com/main/resource/papers/webtorials/2015-Guide-to-SDN-and-NFV/2015_Guide_Chapter_1.pdf

(Düsseldorf)で開催された「SDN & OpenFlow 世界会議(SDN & OpenFlow World Congress)」において発表した。同ホワイトペーパーは、以下の様な大手通信事業者らの共同執筆という形で発表され、NFV の定義を公に初めて提示した⁴。

図表 2 NFV ホワイトペーパー参画企業

AT&T	BT	Century Link
China Mobile	Deutsche Telekom	KDDI
NTT	Orange	Telecom Italia
Telefonica	Telstra	Verizon

出典：ETSI⁵

ISG のホワイトペーパーは、NFV を、「多種多様なネットワーク機器を、(データセンタやネットワークノード、そしてエンドユーザ施設に設置されている)大規模なサーバ、スイッチ、ストレージに統合する、進化途上の IT 標準技術」と定義している。また同ペーパーは、NFV を導入すれば、新たな機器を追加することなく、業界標準の大規模サーバ上で稼働するソフトウェアや、必要に応じてネットワーク内のさまざまな場所に移動(もしくはインスタンス作成)が可能なソフトウェアへのネットワーク機能の実装が可能となると分析する。その後、ISG は 2013 年 1 月、ETSI の拠点があるフランスのソフィア・アンティポリスにおいて、初会合を開催した。同会合には、28 の通信事業者や、通信分野における 150 以上の技術系企業が参加した⁶。

次の図は、NFV を利用し、これまで個別のプロプライエタリ・ネットワーク機器が実行してきた機能(左部)を、汎用性がある標準的な大規模サーバとスイッチ、ストレージ機器にインストールされるネットワーキング・ソフトウェア(右部)へと置き換える様子を示している。

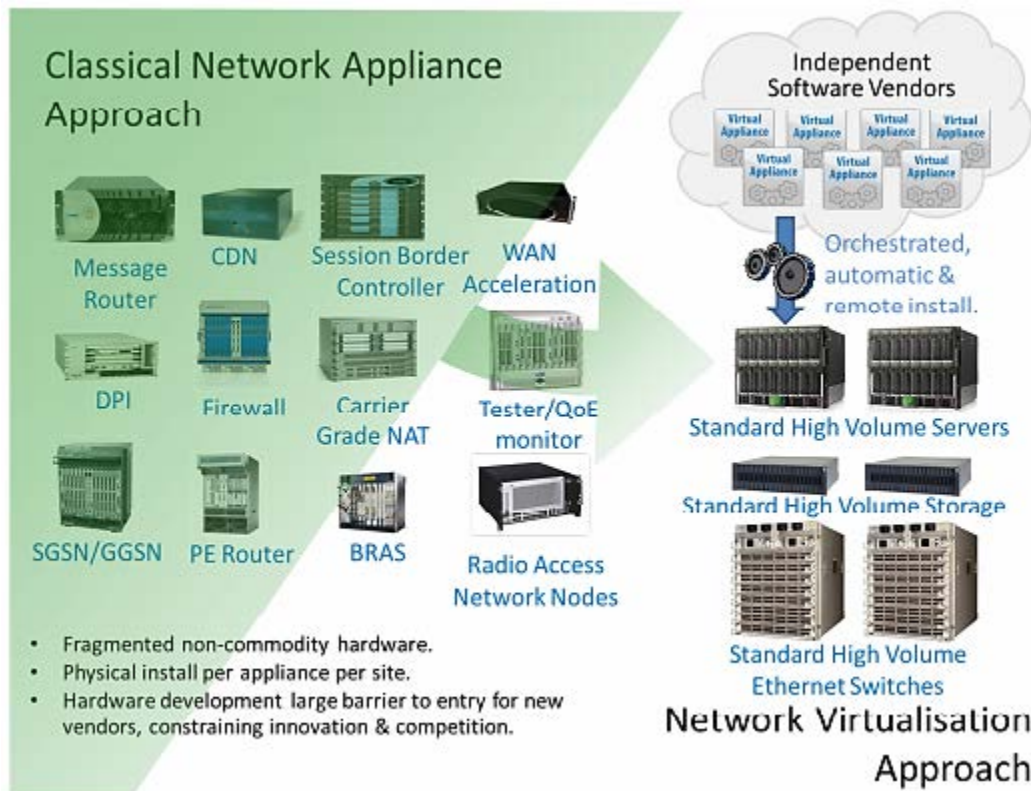
⁴ ONE Solution Brief, “OpenFlow-enabled SDN and Network Functions Virtualization”, February 17, 2014: <https://www.opennetworking.org/images/stories/downloads/sdn-resources/solution-briefs/sb-sdn-nfv-solution.pdf>

⁵ “Network Functions Virtualization: A Introduction, Benefits, Enablers, Challenge & Call for Action”, October 22-24, 2012: https://portal.etsi.org/NFV/NFV_White_Paper.pdf

⁶ ETSI, “Network Functions Virtualization Introductory White Paper,” October 22, 2012, URL: https://portal.etsi.org/nfv/nfv_white_paper.pdf

ONE Solution Brief, “OpenFlow-enabled SDN and Network Functions Virtualization”, February 17, 2014: <https://www.opennetworking.org/images/stories/downloads/sdn-resources/solution-briefs/sb-sdn-nfv-solution.pdf>

図表 3 NFV を活用したビジョン



出典： ETSI⁷

NFV と SDN の関係について、ETSI は、両者は非常に高い補完関係にあるが、お互いに依存しているわけではないため、それぞれが個別に運用されることも可能であると分析している。実際に、既存の多くのデータセンタは、SDN ではないメカニズムで運用されているが、こういったデータセンタに NFV を導入する事は可能である。しかしながら、NFV が SDN にネットワークインフラを提供し、SDN がネットワーク制御とフォワーディング機能の切り離しを行えば、ネットワークのパフォーマンス向上、既存の設備との互換性向上、維持管理メカニズムの強化等が期待できる。また NFV も SDN も、汎用性の高いサーバの利用を促進するという共通の目標を掲げている⁸。

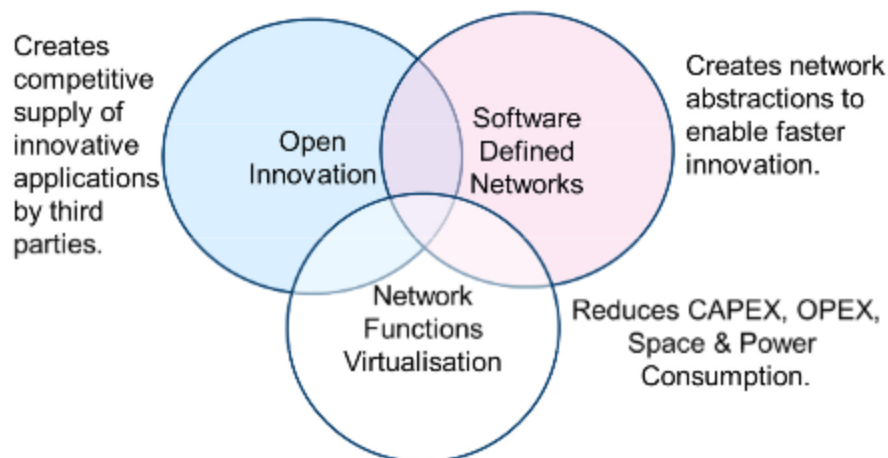
以下の図は、こういった NFV と SDN の相関関係を示したものである。NFV は設備投資費用 (CAPEX) や運用費用 (OPEX)、設備スペース、消費電力等の削減に役立つという利点を持ち、また SDN も、ネットワークを概念化することで、ネットワークの調整を容易にするほか、迅速なイノベーションを実現することに役立つという利点を持つ。このため、NFV と SDN のそれぞれの概念やソリューションを組み合わせることによ

⁷ 同上、p.5

⁸ 同上、p.5-6

って、より大きな価値を生み出すことができる。加えて NFV や SDN は、組織の垣根を超えたオープンなソフトウェアやハードウェアによって運用されることも多く、「オープンイノベーション」の推進にも役立つ⁹。

図表 4 NFV と SDN、オープンイノベーションの関係



出典：ETSI¹⁰

2 米連邦政府機関による SDN/NFV 研究開発支援

ここでは、米国の連邦政府機関が実施している、SDN と NFV の研究開発や普及に向けた取り組みを、機関ごとに紹介する。

2.1 NITRD

A. 2013 年 12 月の SDN ワークショップと提案

連邦政府による SDN 関連技術の研究開発の支援をけん引している主要組織の一つは、NITRD である。NITRD の PCA の一つである 大規模ネットワーク (LSN) のワーキンググループは、少なくとも 2011 年頃から SDN 関連技術の開発に注目しており、2011 年 5 月には、当時スタンフォード大学の Open Network Research Center でエグゼクティブ・ディレクタを務めていた Guru Parulkar 教授が LSN メンバを訪れ、SDN についてのプレゼンを実施した。同プレゼンは、NSF、Cisco、Docomo、DT、Ericsson、Google、Huawei、NEC、Xilinx 等の支援を受けていたもので、LSN のメンバに対し、SDN 技術の概要や、SDN を必要とするネットワークの課題、OpenFlow についてのブリーフィングを行うことを目的とした。Prular 氏は同説明の中で、SDN 技術が、ネットワーク上におけるイノベーションを促すきっかけになるだろうとの見解を示し、NITRD による SDN 技術開発への支援を促した¹¹。

⁹ 同上、p.6

¹⁰ 同上、p.6

¹¹ Guru Parulkar, "OpenFlow/Software Defined Networking: Enable Network Innovations", May 10, 2011, URL: <https://www.nitrd.gov/nitrdgroups/images/c/c2/SDN-LSN-May2011-DIST.pdf>

Parulkar 氏によるプレゼン後、NITRD は 2012 年の段階で US Ignite の支援を開始し、更に 2013 年 12 月 16 日と 17 日に NSF 本部で開催された、SDN についての官民連携ワークショップにも参加している。同ワークショップには、NSF や NITRD の関係者だけでなく、アルゴンヌ国立研究所等の DOD や DARPA、DOE 傘下の国立研究所のに加え、パデュー大学やウィスコンシン大学マディソン校、インディアナ大学等の大学、Google や IBM、Verizon 等の民間企業の関係者が参加した。これらの関係者は、米国のイノベーションを後押しすることを目的とした、SDN を基盤としたプロトタイプ・ネットワークの開発・設置・運用についての議論を実施したほか、プロトタイプ実現に向けたロードマップの策定も行った。同ワークショップで議論された主な議題は以下の通り¹²。

- 現在の SDN の能力と、既存の公共インターネットとのシームレスな相互運用を可能とする SDN プロトタイプ・ネットワークの開発と運用に必要なリソース
- SDN プロトタイプ・ネットワークを開発するにあたって必要な、研究の内容やリソース、複数組織間の共同プロジェクト
- マルチドメイン SDN のプロトタイプ・ネットワークを運用するにあたって必要な、ソフトウェアツールの課題
- コンピューティングや、データストレージ用のクラウド技術等との相互運用を可能とする SDN 仮想化ネットワークの可能性
- NITRD の関連小委員会や、OSTP に提出する、SDN プロトタイプ・ネットワーク実現に必要な研究開発プロジェクトやリソース、共同プロジェクト等についての提案をまとめた、ワークショップの結果報告書の内容

ワークショップの参加者らは最終的に、米国や諸外国において SDN 関連の研究開発はすでに多数実施されているが、それらのプロジェクトは孤立したネットワーク環境でのみ実証実験等を行っているとの問題点を指摘し、連邦政府やその関係機関は今後、複数のネットワーク・ドメインを跨いで運用可能な SDN を開発するべきであると主張した。これは、複数の組織、科学機器、コンピューティング・リソース間において共同研究を実施する場合には、複数のネットワークを横断的に跨ぐ必要があり、それに伴い、SDN も複数のネットワークを最適化させる能力を備える必要があるためである。2013 年 12 月の SDN ワークショップが提示した、最終的な提案事項は以下の通り¹³。

- 連邦政府機関は、可能な限り早い段階で、マルチドメイン環境で運用が可能な SDN 技術を研究、構築、運用するべきである

¹² White House, “Fact Sheet: Bolstering High-Speed Broadband to Boost the Economy”, June 13, 2012, URL: https://www.whitehouse.gov/sites/default/files/microsites/ostp/broadband_fact_sheet_06_13_2012.pdf
DOE, NITRD, and NSF, “Operationalization of Software-Defined Networks (SDN) Program Review”, December 16-17, 2013, URL: https://www.nitrd.gov/pubs/SDN_Program_Review_Report_2013.pdf

¹³ DOE, NITRD, and NSF, “Operationalization of Software-Defined Networks (SDN) Program Review”, December 16-17, 2013, URL: https://www.nitrd.gov/pubs/SDN_Program_Review_Report_2013.pdf

- 初期の段階では、既存のインターネット・インフラ上で新しいアプローチを運用可能な、ソフトウェア・デファインド・エクスチェンジ(Software Defined Exchange: SDX)を含む、SDN の実際の運用や管理に焦点を当てた技術の開発を行うべきである。
- サイバーセキュリティの強化は、マルチドメイン、マルチレイヤによって構成される SDN にとって不可欠であり、関連分野の研究開発は、精力的かつ持続的に実施されるべきである。
- コンピューティング、データストレージ、センサ等のソフトウェア・デファインド・インフラ内の他の要素を統合できるよう、注力する。
- SDN 導入を加速させるため、構築ツールや、関連する技術や知識への投資を惜しまない。
- SDN の構築や運用の方法を広めるため、関連組織間の連携を強化する。

B. SDX 開発

SDX の開発は、前述の 2013 年 12 月に NSF 本部で開催された、官民連携 SDN ワークショップが提示した主要な提案の一つであった。SDX とは、マルチドメイン SDN において、ネットワーク・ピアリングや、サービス・エクスチェンジの起点となるポイントを自動制御するというコンセプト、もしくはそのポイントのことであり、SDX が実現できれば、SDN のパフォーマンスが上がるだけでなく、SDN と非 SDN の 2 種類のネットワークの連結をスムーズにすることができると期待されている。言い換えれば、SDX は、SDN 同士、もしくは SDN と非 SDN 同士の相互接続ポイントとして作用し、広大なネットワーク(ワイドエリアネットワーク: WAN)全体を管制するためのコントロールプレーンの役割を担うものである。連邦政府が開発を進めている SDX の例としては、DOE が開発したハイパフォーマンスネットワークである「Energy Science Network (ESnet)」の SDX がある(ESnet の詳細については後述)¹⁴。

同 SDN ワークショップでは、4 年以内に新しい SDX を開発し、運用も開始することを目的とした技術ロードマップも策定された。同ロードマップは、連邦政府や大学、Internet2(次世代インターネットを用いた、研究・教育用のインターネット・インフラ開発を目指す産学官プロジェクト)等が、新しい SDX の研究開発において主要な役割を担うとしながらも、民間セクタの役割も徐々に増えていくことを想定しており、ロードマップの最終年(2018 年頃)には、米国の民間ベンダが開発した機器を利用して、SDX の運用を行うとしている。同ロードマップの概要は以下のとおり¹⁵。

¹⁴ DOE ASCR, “Software Defined Networking for Extreme-scale Science,” August 5-6, 2014, URL: <http://www.oraui.gov/ioninfrastructure2014/intelligent-network-infrastructure-workshop-report.pdf> (p. 10)

A. Gupta, et al., “SDX: A Software Defined Internet Exchange,” August 17, 2014, URL: <http://qtnoise.net/papers/2014/gupta-sigcomm2014.pdf>

¹⁵ DOE, NITRD, and NSF, “Operationalization of Software-Defined Networks (SDN) Program Review”, December 16-17, 2013, URL: https://www.nitrd.gov/pubs/SDN_Program_Review_Report_2013.pdf

図表 5 米連邦政府の SDX 技術開発ロードマップ

年後	主導機関	目標
1	NSF、DOE、GENI、US Ignite、大学、Internet2、民間組織	初期型の SDX を構築し、初期型の機器や、次世代アプリケーション等の開発を実施する。
2-3	より多くの連邦政府機関、セキュリティ研究機関・専門家、民間組織関係者	セキュリティやマルチドメイン等を含む、SDX 技術に対する理解や概念を洗練し、様々な種類のネットワークを連結して異機種ネットワークとしての水準を上げ (increase heterogeneity)、参加者を増やし、標準化や相互運用を開始する。
4	ネットワーク・オペレータ、ベンダ、アプリケーションや機器の開発者、教育機関	少なくとも 2-3 バージョンの SDX を試し、最終的な運用を開始する。同時に新技術についての教育や訓練セッションを開催する。

出典： NSF、DOE、NITRD¹⁶

2013 年 12 月の SDN ワークショップによる SDX への提案は、その後の連邦政府機関の SDX 開発の起爆剤になったとも言える。例えば Global Environment for Network Innovations (GENI) パートナーシップが中心となって 2014 年 6 月に開催した SDX 検討ワークショップでは、SDX は複数のドメインを跨ぐネットワークの運用を支え、ネットワークやソフトウェア・デファインド・インフラ、クラウドコンピューティング、ビッグデータ等の運用に必要な新しいアプローチを開拓し、別々のドメインに存在するリソースを利用して、科学研究を促進する役割を担うとの見解が示された。同ワークショップは、SDX はバーチャルなもの、実体のあるもの、もしくはその混合のものにもなり得ると分析し、SDX への要求条件を以下のように提示している¹⁷。

- 定義されたルールを基に、ドメイン同士を繋ぐ。
- アプリケーションによるドメイン間の接続、ルーティング、個別ネットワーク運用等を支援する。
- 個別のドメインのポリシーに従い、原則、独自のポリシーの定義は行わない。
- ドメイン間、リソース・プロバイダ間の信頼を高めるブローカの役割を担う。
- (ネットワーク) サービスの取引市場としての役割を担う。

2.2 DOE

A. SDN 関連技術開発と提案

前述の通り、DOE は独自の SDX コンセプトや技術を開発する等、SDN 関連技術の研究開発を推進している連邦政府の主要機関となっている。DOE 先端科学コンピューティング研究局 (Office of Advanced Scientific Computing Research: ASCR) は、ESnet の能力強化や、ESnet を利用した科学研究の促進を含む、同省内の SDN 関連研究開発を主導している。ACSR が SDN 関連の技術開発を推進する目的の一つは、DOE が実施しているエクストリームスケール科学研究 (Extreme-scale Science research) に SDN を用い、研究プロジェクトに恩恵をもたらすことにある¹⁸。

エクストリームスケール科学研究に携わる DOE 傘下の研究者らは、ネットワークの仮想化とクラウドコンピューティング分野の技術開発によって、データストレージの最適化や、データセンタにおけるコンピューティン

¹⁶ DOE, NITRD, and NSF, "Operationalization of Software-Defined Networks (SDN) Program Review", December 16-17, 2013, URL: https://www.nitrd.gov/pubs/SDN_Program_Review_Report_2013.pdf

¹⁷ GENI, "Workshop on Prototyping and Deploying Experimental Software Defined Exchanges," June 5-6, 2014, URL: <http://groups.geni.net/geni/attachment/wiki/SDXandSDIWorkshop/SDX%20Workshop%20Outbrief%20-%20Draft.pdf>

¹⁸ DOE ASCR, "Software Defined Networking for Extreme-scale Science.", August 5-6, 2014, URL: <https://www.orau.gov/ionInfrastructure2014/intelligent-network-infrastructure-workshop-report.pdf>

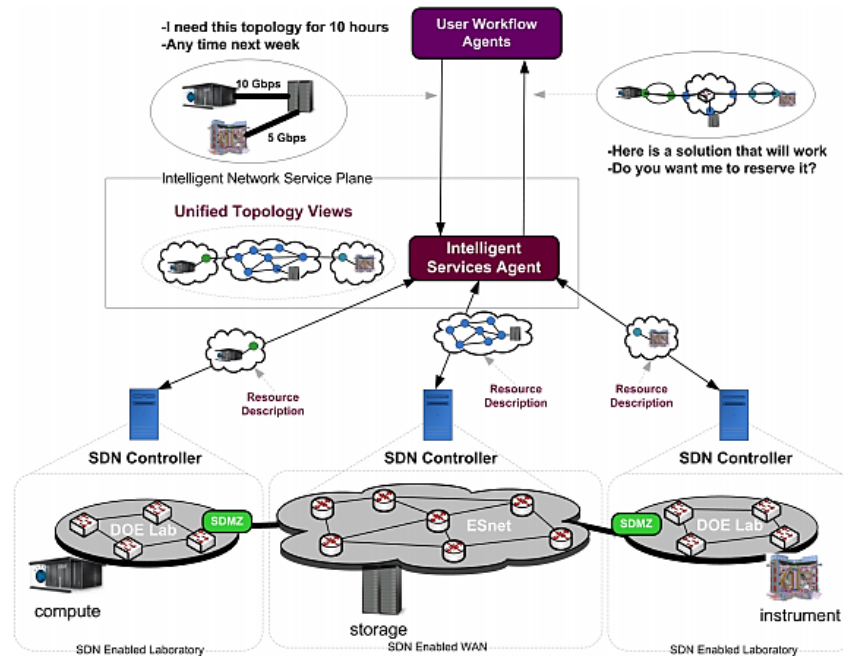
グ・リソースの最適化等が可能になれば、リアルタイムに、且つ容易に研究に必要なネットワークの環境設定を行う事ができる評価しつつも、ネットワーク・アーキテクチャそのものの機敏性や柔軟性はいまだ不足している状況あるとし、ネットワークの能力が同研究のボトルネックになっていると主張している。特にセンサ等の科学機器をリモート環境で運用する場合など、レイテンシに敏感な研究をリアルタイムで行う際に、人間による介入無しでネットワークをより早く再構成するネットワーク自体の能力が求められるとの見解を示している。また、民間セクタにおける SDN 開発に向けた取り組みも、DOE やその傘下の研究者らに SDN 開発の重要性をさらに印象付けるものとなった¹⁹。

現場の研究者の声も受けて、DOE の ASCR は、ユーザ視点のインテリジェント・サービス・プレーン (Intelligent Service Plane) の開発を目指す SDN 研究開発プロジェクトに、助成金を投入する計画を立ち上げた。インテリジェント・サービス・プレーンは、個別の SDN のコントローラよりも上位に配置されるもので、マルチドメイン環境において、センサなどの機器、データストレージ、コンピュータ、ネットワーク等の複数要素を制御する役割を担う。インテリジェント・サービス・プレーンはユーザ提示するタスクの要求に応じ、リソースを構成する機能を有することとなるが、サービス・プレーンは、各 SDN コントローラと連携するため、ユーザはあくまでも抽象的・概念的なタスク要件のみを入力すれば良い。下記の図は、この様なインテリジェント・サービス・プレーンと、各 SDN コントローラの機能、役割を図式化したものである²⁰。

¹⁹ DOE ASCR, "Software Defined Networking for Extreme-scale Science.", August 5-6, 2014, URL: <https://www.ornl.gov/ionInfrastructure2014/intelligent-network-infrastructure-workshop-report.pdf> (p.2)

²⁰ DOE ASCR, "Software Defined Networking for Extreme-scale Science.", August 5-6, 2014, URL: <https://www.ornl.gov/ionInfrastructure2014/intelligent-network-infrastructure-workshop-report.pdf>

図表 6 DOE が開発している SDN を基盤としたインテリジェント・サービス・プレーン



出典： DOE²¹

ASCR は 2014 年 8 月 5 日と 6 日、エクストリームスケール科学研究における SDN の役割について議論するワークショップを開催し、同省の関連研究機関らが適切なインテリジェント・サービス・プレーンを開発できるよう、複数の提案を行った。ワークショップの提案は以下の通り。またこのワークショップは、ワークショップの提案を実際に実行に移すために、DOE 傘下の複数の研究開発機関を ESnet で繋ぐ必要があるため、試験運用向けのテストベッドを創設するように求めた。

SDN 技術開発に対する提案

- SDN の台頭によって生み出された、ネットワークのプログラミング機能を生かし、自動制御可能な、次世代型テラビット・ネットワークを構築する。同ネットワークは、エクストリームスケール科学研究に資するものとする。
- SDN プログラミングに係る開発を進め、既存のネットワークインフラをより自動制御可能で、機敏なインフラに発展させ、新しいイノベーションや、科学アプリの素早い変化に対応できるようにする。
- 正常動作時、壊滅的な問題発生時、サイバー攻撃時など、様々な環境下において、テラビット・ネットワークのパフォーマンスや機敏性を測定できるような測定モデル、方法、最適化の枠組み等を開発する。
- ネットワークの複雑度を減らし、科学アプリケーションやワークフロー向けに利用しやすくする。

²¹ DOE ASCR, "Software Defined Networking for Extreme-scale Science.", August 5-6, 2014, URL: <https://www.orau.gov/ionInfrastructure2014/intelligent-network-infrastructure-workshop-report.pdf>(p.12)

インテリジェント・ネットワーク・サービス・プレーン開発に対する提案

- 研究者によるサービスディスカバリやオーケストレーション等を単純化させる、自動制御可能(スマート)なアプリケーションプログラミングインターフェース(API)や、自動のネットワーク・サービス等を開発する。
- マルチドメイン・サービスを可能とするため、オーケストレーション・プロトコルや、メカニズムを開発する。
- これらの自動制御可能なサービスを、データストレージ、コンピューティング、機器等の多数の要素を含んだネットワークでも運用可能とするため、適切なネットワーク・アーキテクチャやメカニズムを開発する。

部門横断的なサイバーインフラ技術開発への提案

- ネットワーク、データ、コンピューティング、機器、アプリケーション等の様々なドメインに見識の深い専門家を擁する、サイバー・インフラ技術の研究開発グループを組織する。
- SDNプログラミング、インテリジェント・ネットワーク・サービス・プレーン、その他のプログラミング機能を統合させた、「ソフトウェア・デファインド・リソース(Software Defined Resource)」機能を開発する。
- 目標・目的重視で科学アプリケーションや問題解決法、新しい機能等を開発することを目的とした、部門横断的な開発チームの創設を目指す。

2015年5月時点でASCRは、このワークショップで提示された提案に沿った研究に対し、資金提供を開始すると発表した。ASCRの計画では、関連研究に対し、3年間に亘って毎年500万ドル(計1,500万ドル)を提供する予定であるほか、技術開発に成功した研究機関には、褒賞を与えることも検討している²²。

このような研究は、最終的に、バックボーンで毎秒テラビットの通信容量を擁し、更にエンド・ツー・エンドで40~100Gbpsを達成する、SDNハイパフォーマンスネットワーク(SDN-enabled High Performance Networks : SDN-HPON)を実現することを目指している。こういったネットワークにおいてSDNは、科学研究の求める目標を達成するために、ネットワークのパフォーマンスを最適化する主要な役割を果たすと想定されている。ASCRが研究開発に資金を投入することを決めている開発分野は以下の通り。

- **SDN-HPON コントロール・プレーン・アーキテクチャとプロトコル:** マルチドメイン環境において、SDNコントローラがネットワークの能力を管理できるようにする、アーキテクチャやプロトコルの開発を行う。
- **SDN-HPON とネットワーク基盤のアプリケーションのためのインテリジェント・サービス:** エクストリームスケール科学研究に資するため、SDNコントローラを利用し、自動制御可能なインテリジェント・サービスや、ネットワークやアプリケーションを開発する。

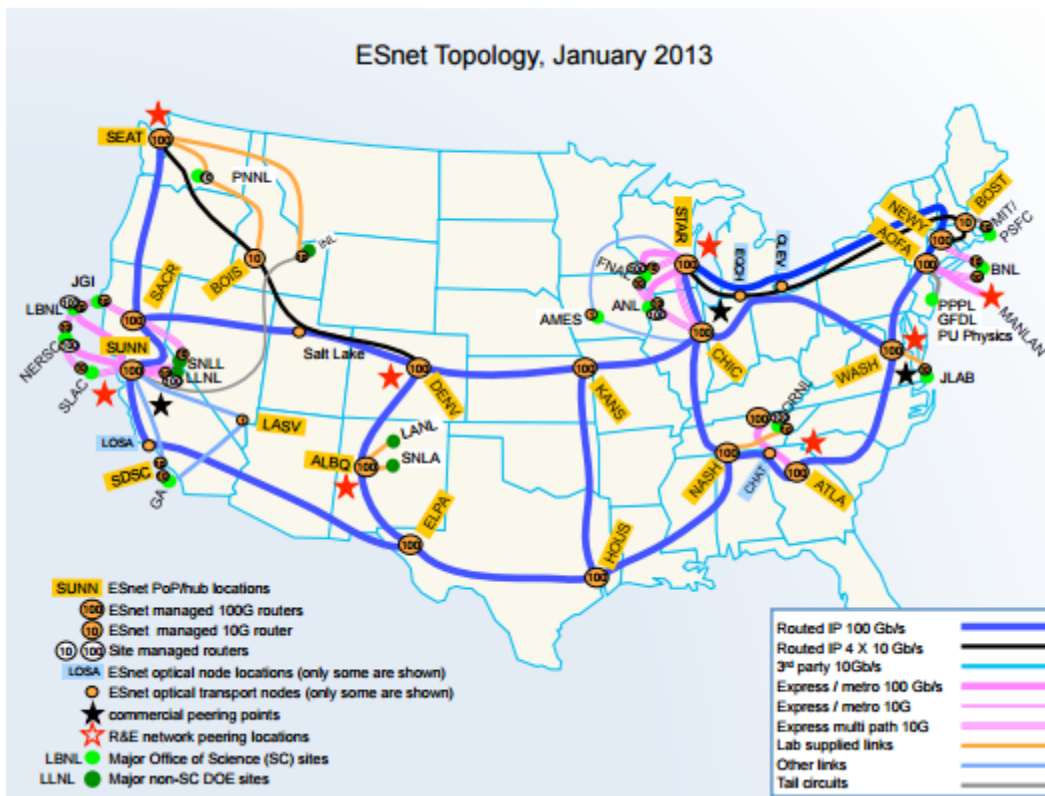
²² ASCR, "SDN-Enabled Terabits Optical networks for Extreme-Scale Science," May 20, 2015, URL: http://science.energy.gov/~media/grants/pdf/foas/2015/SC_FOA_0001295.pdf

- **エンド・ツー・エンド対応の SDN-HPON の高度配備:** 科学研究における SDN-HPON のエンド・ツー・エンド能力を証明することを目的とした、パイロットプロジェクトを創設する。これらのプロジェクトは、新しい SDN ミドルウェアやサービスの設置を必要とする。

B. ESnet

また、DOE が以前から開発・運用しているハイパフォーマンス・ネットワークの ESnet は、科学研究の生産性を底上げし、且つ地理的制約の影響を受けないようなネットワークを実現することを目指したものであり、同省傘下の国立研究所であるローレンス・バークレー国立研究所 (LBNL) によって管理されている。ESnet は、同国立研究所とその他の 40 程度の同省傘下の研究開発機関を横断的に繋いでいるほか、ネットワーク上で共有されているリソースは、Internet2(次世代インターネットを用いた、研究・教育用のインターネット・インフラ開発を目指す産学官プロジェクト)や、その他の 140 の商用・研究用ネットワークと共有されている。以下は、ESnet の 2013 年 1 月時点でのネットワーク・トポロジである²³。

図表 7 ESnet の 2013 年 1 月時点でのトポロジ



出典: ESnet²⁴

²³ ESnet, URL: <https://www.es.net/>

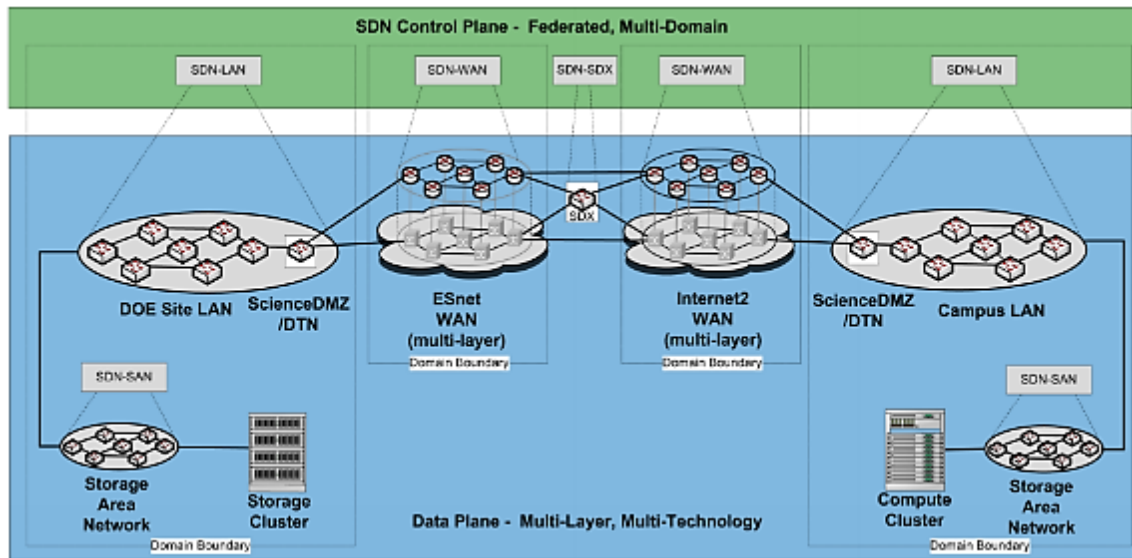
ESnet, "ESnet Update: With a Focus on R&D," June 1, 2015, URL:

http://indico.cern.ch/event/376098/contribution/13/attachments/749547/1028312/LHCONE_ESnet_update.pdf

²⁴ ESnet, "Strategic Plan FY2014-FY2023", March 1, 2013, URL: <https://www.es.net/assets/Uploads/ESnet-Strategic-Plan-March-2-2013.pdf> (p.2)

また以下の図は、ESnet のアーキテクチャを示したものであり、個別の DOE 傘下の研究所のネットワークがマルチドメイン SDN で繋がっているほか、ESnet によって、DOE のネットワークと Internet2、その他の大学のネットワーク(ローカル・エリア・ネットワーク[LAN]や、科学教育・研究用サブネットワークの Science DMZ)が繋がっていることを示したものである。SDX は、ESnet と Internet2 の連結ポイントの役割を担っているほか(図中央)、マルチドメイン SDN 全体の制御も行っている²⁵。

図表 8 米連邦政府が検討しているマルチドメイン SDN 機構



出典：DOE²⁶

ESnet は、連邦政府が実施している SDN 関連の研究開発プロジェクトに大きく貢献してきた。例えば ESnet の研究チームは 2011 年、OpenFlow の標準化推進を目的として Open Network Foundation が主催した「オープン・ネットワーキング・サミット(Open Networking Summit: ONS)」において、NEC、インディアナ大学、デラウェア大学と連携して、大学が実施している科学研究データの移動を行う際に、OpenFlow がどのようにしてネットワーク全体の最適化を行うかの実証実験を行った²⁷。

同様に 2015 年 5 月に ESnet は、Open Networking Foundation やカナダのネットワークハードウェア・ベンダーである Corsa Technology、オーストラリアの連邦科学産業研究機構(Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation: CISRO)、オーストラリアの科学研究用ネットワークである Academic and Research Network(AARNet)等と連携して創設した Open Network Operating System (ONOS)プロジェクトの枠組みを通して、ESnet と AARNet の間のピアリングを実現するために、1 万

²⁵ DOE ASCR, "Software Defined Networking for Extreme-scale Science," August 5-6, 2014, URL: <http://www.ornl.gov/ioninfrastructure2014/intelligent-network-infrastructure-workshop-report.pdf> (p. 10)

²⁶ DOE ASCR, "Software Defined Networking for Extreme-scale Science," August 5-6, 2014, URL: <http://www.ornl.gov/ioninfrastructure2014/intelligent-network-infrastructure-workshop-report.pdf> (p. 10)

²⁷ ESnet, "ECSEL Leverages OpenFlow to Demonstrate New Network Directions," November 4, 2011, URL: <https://esnetupdates.wordpress.com/2011/11/04/ecsel-leverages-openflow-to-demonstrate-new-network-directions/>

5,000 の SDX ルータの設置に成功した。このプロジェクトは、DOE が ESnet を通して進めようとしている諸外国との共同研究を後押しするものであると共に、ESnet が実現を目指している 100Gbps で科学技術アプリケーション、もしくはミドルウェアを運用可能な SDN を後押しするものである²⁸。

図表 9 SDX による ESnet と AARNet とのピアリング状況



出典： ESnet²⁹

2.3 NSF

A. SDN/NFV 開発支援

SDN や NFV 分野を含む、多様な IT 分野の研究開発に対する助成金は、NSF のコンピュータ情報科学工学イニシアティブ (Computer and Information Science Engineering: CISE) によって投入されている。ただし、CISE が資金を投入しているプロジェクトは、SDN 関連のものが 87 件と圧倒的に多く、NFV のものは 4 件と、圧倒的に少ない³⁰。

SDN や NFV などの技術開発は、CISE のコンピュータ・ネットワーク・システム局 (Computer and Network Systems: CNS) によって支援されている。CNS は、コンピュータ・プログラム (Computer) とネットワーク技術システム・プログラム (Networking Technology and Systems: NeTs) の 2 つの主要プ

²⁸ ESnet, “ESnet, Coalition Partners Announce Global Breakthrough for Software-Defined Networking,” May 6, 2015, URL: <https://www.es.net/news-and-publications/esnet-news/2015/esnet-coalition-partners-announce-global-breakthrough-for-software-defined-networking/>

²⁹ ESnet, “ESnet, Coalition Partners Announce Global Breakthrough for Software-Defined Networking,” May 6, 2015, URL: <https://www.es.net/news-and-publications/esnet-news/2015/esnet-coalition-partners-announce-global-breakthrough-for-software-defined-networking/>

³⁰ NSF Awards Search, URL: <http://www.nsf.gov/awardsearch/advancedSearch.jsp>

ログラムから構成されており、SDN/NFV 関連研究は、後者の NeTs の枠組みに含まれる。NeTs の資金は、メタ・ネットワーキング、ネットワーク管理、光ネットワーク、ワイヤレス・ネットワーク・プロトコル、次世代仮想化ネットワーク、ワイヤレス・ネットワーキング・アーキテクチャの 6 つの部門に出資されており、SDN やソフトウェア・定義ド・インフラの開発は、このうちの次世代仮想化ネットワークの枠組みの中で行われている。NeTs が次世代仮想化ネットワークの枠組みの中で注力している、SDN やソフトウェア・定義ド・インフラの開発分野は以下の通り³¹。

- 仮想化インフラにおける、アプリケーションのマッピング技術
- 仮想化インフラが大規模な変化に直面する際などの状況における、仮想化インフラ管理技術
- 仮想化インフラを制御するための次世代プロトコル技術
- 仮定、企業、セルラー・ネットワーク等で利用される、ワイヤレスネットワークの仮想化技術

B. サイバーインフラ導入支援

個別の研究プロジェクトを支援することに加え、NSF は、研究機関や大学等によるサイバー・インフラの調達にも助成金を出しており、対象となるインフラには、ハイパフォーマンス・コンピューティング、ハイパフォーマンスネットワークの他、Internet2 の様な大学教育向けキャンパスネットワークも含まれる。NSF 内でこの支援を主導しているのは、CISE の先端サイバー・インフラ局 (Advanced Cyberinfrastructure: ACI) であり、技術開発プロジェクトを支援している CNS 局とも連携している³²。

ACI の支援を受け、研究機関や大学等はサイバー・インフラを調達するが、その目的は、自組織の研究者らが利用する研究・教育ネットワークの能力を底上げすることであり、個々の研究者の研究に影響を及ぼし得る、データ通信におけるラグや、レイテンシの問題等の解決が期待できる。特に、キャンパスネットワークと他の研究・教育ネットワーク (Science DMZ) との境に設置される Science DMZ ルータを利用することで、科学研究のデータと一般のデータが分離され、科学研究のデータを安全、迅速に伝達することが可能となる。Science DMZ ルータは、SDN コントローラの様な役割を担っていると言える³³。

C. SDX 開発支援

NSF はまた、SDX の開発支援も始めており、これは複数の研究・教育用ネットワーク間の連携を促進するものになると考えられる。ACI が運用している、国際研究・ネットワーク接続プログラム (International Research and Network Connections: IRNC) は、NSF が支援している研究者と、他国の研究者との連携や共同研究を促すことを目的としたハイパフォーマンスネットワークに対し、助成金を提供しており、次の 3~5 年間に おいては、総額 2,500 万ドル規模を提供予定である³⁴。

³¹ NSF CNS, URL: <http://www.nsf.gov/div/index.jsp?div=CNS>

NSF NeTs, URL:

http://www.nsf.gov/funding/pgm_summ.jsp?pims_id=503307&org=CNS&from=home

³² NSF CC-DNI, URL: <http://www.nsf.gov/pubs/2015/nsf15534/nsf15534.htm>

³³ NSF CC-DNI, URL: <http://www.nsf.gov/pubs/2015/nsf15534/nsf15534.htm>

ESnet – Science DMZ, URL: <https://fasterdata.es.net/science-dmz/>

³⁴ ESnet – Science DMZ, SDN, URL: <https://fasterdata.es.net/science-dmz/software-defined-networking/>

IRNC の助成金は、バックボーン・ネットワーク、研究・教育用交流ネットワーク、ネットワーク管制センター (NOC)、ネットワーク測定インフラ、その他のトレーニングプログラムや、諸外国のパートナーとの連携プログラム等に出資されている。IRNC は現在、少なくとも一つのドメインが米国外に存在する環境のマルチドメイン SDN 向けの SDX 開発プロポーザルを募集しており、この SDX には、SDN や OpenFlow 関連の技術や標準が用いられるべきとしている³⁵。

IRNC プログラムを通して NSF は、フロリダ国際大学 (Florida International University: FIU) とジョージア工科大学の「AtlanticWave」と呼ばれる SDX の開発プロジェクトに、2015 年 4 月 1 日までにおよそ 75 万ドルの助成金を提供している。AtlanticWave は、米フロリダ州とブラジルに存在している研究・教育用ネットワークを繋ぐことを目的としたプロジェクトである³⁶。

2.4 FCC

FCC 技術諮問委員会 (Technological Advisory Council: TAC) は、FCC が選任する有識者によって構成される諮問機関である。同委員会に所属する有識者は FCC に対し、技術的問題や開発に関する助言を行うほか、同分野に関連する政策提言も行っている³⁷。TAC は 2003 年に設置され、現在は 2010 年に任命された第 5 期委員によって運営されており、AT&T、Comcast、XO Communications、Alcatel-Lucent、Cisco、Ericsson、Samsung といった通信事業者や関連機器メーカーの代表者が委員を務めている。また TAC は、特定分野の研究に精通する外部有識者 (産業界、学術界含む) に意見を求めることも多く、近年ではセキュリティおよび周波数管理に関連する多数の研究を大規模に行ってきた³⁸。

2015 年、TAC は、SDN と NFV 向けのサイバーセキュリティに関する研究を行い、2016 年 1 月にはその研究に基づくホワイトペーパーを発表し、SDN と NFV の開発や運用におけるサイバーセキュリティ上のリスクや課題、その対策について論じた (なお、このホワイトペーパーは、産業界の関係者を想定読者と設定しており、FCC への政策提言を目的としたものではないと明示されている)。ホワイトペーパーの中で TAC は、SDN のコントロールレイヤはサイバー攻撃のターゲットになり易いと分析し、もしコントロールレイヤが不正侵入を受けた場合、インフラ・レイヤへの容易な不正侵入を許してしまう可能性を指摘した³⁹。

また TAC は、NFV について、外部からの攻撃を受けやすいソフトウェアがネットワークの機能管理に使用されていることから、その脆弱性を指摘している。同ホワイトペーパーは、Open Networking Lab (ON.Lab) や OpenDaylight といった規格開発機関が NFV の脆弱性対策に様々な取り組みや提案を行っていることを紹介しているほか、SDN と NFV の規格標準間で相互運用性を高める事は、セキュリティーレベルの維持

³⁵ NSF IRNC, URL: <http://www.nsf.gov/pubs/2014/nsf14554/nsf14554.htm>

³⁶ NSF, “AtlanticWave – Software Defined Exchange,” April 2, 2015, URL: https://www.nsf.gov/awardsearch/showAward?AWD_ID=1451024&HistoricalAwards=false

³⁷ FCC Technological Advisory Council, URL: <https://www.fcc.gov/general/technological-advisory-council>

³⁸ FCC Technological Advisory Council – Reports, URL: <https://www.fcc.gov/general/tac-reports-and-papers>

³⁹ FCC Technological Advisory Council, “White Paper: Considerations for Securing SDN/NFV,” January 2016, URL: <https://transition.fcc.gov/bureaus/oet/tac/tacdocs/reports/2016/Securing%20SDN-NFV%20SWG-WP-Final.pdf>

にとって極めて重要であり、オープンソース標準や相互運用性を確立するためには、規格開発機構間の連携が必要であるとの見解を示している⁴⁰。

3 SDN 関連の研究・教育ネットワーク

SDN の研究開発や運用は、米国の研究・教育ネットワークや、そのネットワークを運営している団体を通しても行われている。ここでは、Internet2、GENI、US Ignite の取り組みについて取り上げる。

3.1 Internet2

Internet2 は、1996 年に発足した研究・教育ネットワーク(R&E ネットワーク)で、州や地域レベルの 42 の小規模 R&E ネットワークを繋ぐ基幹ネットワークとしての役割を果たしている⁴¹。42 の R&E ネットワークの関係者の他に、大学、業界団体、研究機関、公的機関、および非営利団体が Internet2 コンソーシアムのメンバーとして参加しており、全米の幼稚園、小中学校、高校、大学、コミュニティーカレッジ、ヘルスケア関連機関、公安機関に対し、光ファイバ基盤の IP ネットワークを通して教育・研究向けのネットワーク・サービスを提供すると共に、安全なネットワーク環境を提供している。Internet2 の主な財源は、ネットワーク・サービス費、会員費、補助金等で、2013 年には 5,540 万ドルの収益を上げた⁴²。

2012 年、Internet2 は、ネットワークを 100Gbps 対応に改良したほか、OpenFlow を基盤とした Brocade と Juniper の 2 企業が開発した新ルータを採用し、SDN 機能も導入した⁴³。この新ルータを使用することにより、ユーザは Internet2 のネットワークから、OpenFlow を基盤としている第 3 のネットワークへ接続するネットワーク展開が可能となる。SDN は、エンドユーザが Internet2 のネットワークを、視覚的にスライス分割することができ、目的に応じて、各スライスの範囲でネットワークをカスタマイズすることができる。この機能によりユーザは、各スライスで実行する各アプリケーションの要件に見合ったネットワーク環境を利用できる⁴⁴。

Internet2 のネットワークを利用している大学は、接続や維持に係る資金調達を行う義務があり、資金調達に関しては、NSF や各州政府へ補助金を申請することが可能である。また大学は、研究向けネットワークの機能・価値を向上させる目的で、Internet2 イノベーション・プラットフォーム(Internet2 Innovation Platform)というアーキテクチャを別途導入することもできる。同プラットフォームは、100Gbps と SDN に対応しており、研究者用のネットワークをその他のネットワークから分離することができるため、高品質のサービスを保証

⁴⁰ FCC Technological Advisory Council, "White Paper: Considerations for Securing SDN/NFV," January 2016, URL: <https://transition.fcc.gov/bureaus/oet/tac/tacdocs/reports/2016/Securing%20SDN-NFV%20SWG-WP-Final.pdf>

⁴¹ Internet2, URL: <http://www.internet2.edu/>

⁴² Internet2 – Financial Overview, Historical Financials, URL: <http://www.internet2.edu/about-us/financial-overview/#historical-financials>

⁴³ Network World, "Internet2 readies 100G OpenFlow SDN for Big Data," July 9, 2012, URL: <http://www.networkworld.com/article/2189808/lan-wan/internet2-readies-100g-openflow-sdn-for-big-data.html>

⁴⁴ SDNZone, "Internet2 Deploys SDN Slicing, Offering Alternatives to VPNs," November 10, 2014, URL: <http://www.sdnzone.com/topics/software-defined-network/articles/393333-internet2-deploys-sdn-slicing-offering-alternative-vpns.htm>

することがかできる⁴⁵。例えばフロリダ大学では、同プラットフォームを導入しており、Internet2 への接続に、OpenFlow を基盤としたホワイトボックススイッチ（米企業 Brocade 製）を活用して SDN 運用している。フロリダ大学は SDN を導入した背景として、同大学の研究者の多くが GENI の様な SDN 基盤のネットワークを使用しており、SDN アプリケーションを用いて研究を行っていることを挙げている⁴⁶。

3.2 GENI

GENI は実験用のテストベッドあり、研究者がネットワーキングリサーチのための大規模な実験の際に活用する、Internet2 に接続することができる。2007 年、NSF は GENI の支援を開始し、2015 年までに 8,000 ドルの資金を投入してきた。現在、大学や企業による 29 のチームが連携し、GENI 上でのネットワーキングリサーチを行っている。GENI の目的は以下の通り。

- 大規模で複雑なネットワークシステム上での、繰り返し可能な実験を可能にすること
- ネットワーク・サイエンス、およびネットワーク・エンジニアリングの最先端で、変革的なリサーチ手段を開拓すること
- 社会経済に好影響を与える画期的な発明に繋がる可能性を刺激し、加速させること

GENI はラックに収めた状態で、全米 30 カ所に配置されている。GENI ラックは、OpenFlow と OpenStack を採用しており、SDN 機能を搭載しているほか、コンピューティングとストレージ機能を備えている。同 GENI ラックにより、研究者をネットワークスライスの切り出しや、カスタマイズを行うことができる。また GENI ラックは、US Ignite による複数のアプリケーションを支えていることから、「US Ignite ラック」としても知られる。ネットワークスライスの切り出しに SDN を活用することにより、GENI は要件に見合ったネットワークを通して、アプリケーションが確実に実行できるようにしている。

3.3 US Ignite

2012 年、ホワイトハウスは、GENI プロジェクトの発展形である官民パートナーシップ「US Ignite」を立ち上げた。GENI は SDN を含む高度なネットワーキング機能を研究者にもたらすテストベッドであるのに対し、US Ignite は官民、および産学界で連携し、これらの新機能を応用した公共の利益に貢献できるアプリケーションの創造を目指すイニシアティブである。US Ignite は、スマートシティ開発の一環として、米国連邦政府より支援を受けている⁴⁷。

例えば、US Ignite の大学メンバの一角であるマサチューセッツ大学アマースト校は、「協調的環境適応センシングのための超高速大容量通信 (Ultra-High Speed Bandwidth for Collaborative Adaptive Sensing of the Environment)」という研究開発プロジェクトを主導している（詳細後述）。このプロジェクトでは、SDN を

⁴⁵ Internet2 – Innovation Platform, URL: <http://www.internet2.edu/vision-initiatives/initiatives/innovation-platform/>

⁴⁶ Network World, “University of Florida Gets 100Gbps Link to Internet2, Upgrades Campus Research Net to 200Gbps,” December 18, 2013, URL: <http://www.networkworld.com/article/2172791/data-center/university-of-florida-gets-100gbps-link-to-internet2-upgrades-campus-research-net-to-20.html>

⁴⁷ US Ignite, URL: <https://www.us-ignite.org/>

活用し、気象予報や偵察機に使用されるレーダのための、信頼性のある高機能ネットワークの研究開発を行っている。同大学では SDN 自体の開発ではなく、より正確な気象予報を行うための、SDN を活用したアプリケーションの開発に焦点を当てている。

4 米国における SDN/NFV のエコシステム

ここでは、米国において SDN/NFV 関連技術の開発や普及に貢献している主な組織と、それらの組織が構成するエコシステムの概要について説明する。

4.1 SDN エコシステム

米国における SDN エコシステムを構成している主なプレイヤーには、OpenFlow 標準を開発した Open Networking Foundation と、Open Flow 標準を基に SDN 研究開発を主導しているオープン・ネットワーキング研究センタ (Open Networking Research Center: ONRC)、Open Networking Foundation と対を成す形で SDN 普及を目指している OpenDaylight、データセンタ向けの製品開発を通して SDN 向けスイッチの開発などにも取り組んでいる Open Compute Project が挙げられる。

A. Open Networking Foundation と OpenFlow

Open Networking Foundation は、オープンソース SDN の主要な標準規格である OpenFlow の普及を行う非営利団体である。同団体は、Deutsche Telekom、Facebook、Google、Microsoft、Verizon、Yahoo を設立会員として 2011 年に設立された⁴⁸。現在は、IT サービス事業者、通信サービス事業者、ネットワーク機器ベンダ、そして半導体メーカーなどの多種多様な 125 団体が加盟しており、各ベンダの製品の適合性検査や、ネットワーキング・エンジニアの専門家認定などの活動も行っている⁴⁹。

OpenFlow 標準は、スタンフォード大学が 2008 年に主導した研究を基盤としており、SDN 経由で完全にプログラム可能、かつ現実世界での導入にも適したネットワークを実現するために開発された⁵⁰。現在、ネットワーク・スイッチ半導体メーカーの間では、オープン API (アプリケーションプログラミングインターフェース) によって自社半導体をサードパーティに公開するという業界トレンドが存在しているが、OpenFlow はこれと協調し、SDN の現実世界導入を支援すると期待されている。以下の図に示されるように、OpenFlow は SDN コントローラとネットワーキング・スイッチ間の API 標準と位置付けられている。

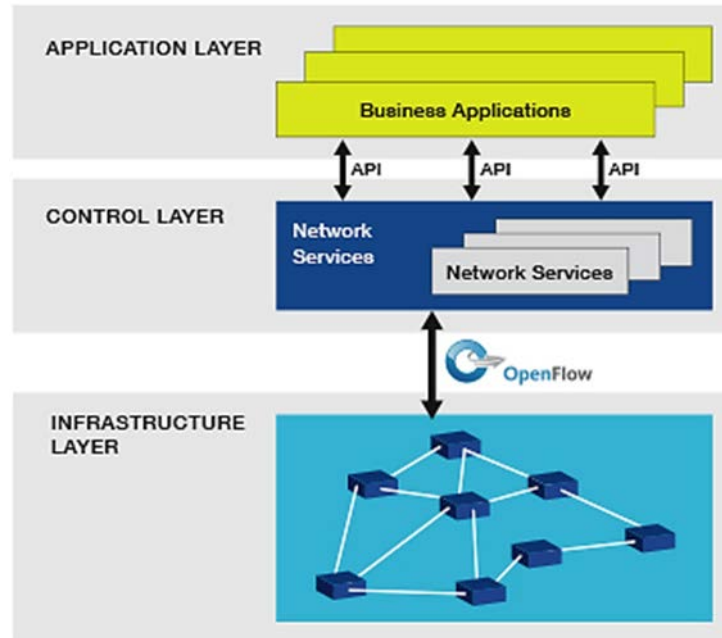
図表 10 SDN アーキテクチャにおける OpenFlow の役割

⁴⁸ Open Networking Foundation – Members, URL: <https://www.opennetworking.org/our-members>

⁴⁹ Open Networking Foundation – Certification, URL: <https://www.opennetworking.org/certification>

⁵⁰ Association for Computing Machinery, “OpenFlow: Enabling Innovation in Campus Networks,” 2008, URL: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1355734.1355746>

Feamster, Nick, et al, “The Road to SDN: An Intellectual History of Programmable Networks,” 2013, URL: <http://david.choffnes.com/classes/cs4700sp15/papers/sdnhistory.pdf>



出典： Open Networking Foundation⁵¹

Open Networking Foundation は 2015 年 6 月、OpenFlow を他のオープンソース SDN と統合させる事のできるオープンソース・ソフトウェア「Atrium」をリリースした。前掲の図にあるように、OpenFlow はコントロールレイヤとインフラ・レイヤ間の API として機能するが、Atrium を利用すれば、コントロールレイヤにおける SDN コントローラのオープンソース標準である ONOS および OpenDaylight を、OpenFlow と統合することができる。また、レガシー・ネットワークで使われる、従来のネットワーク・ルーティングの標準であるボーダー・ゲートウェイ・プロトコル(Border Gateway Protocol)もサポートしている⁵²。

B. ONRC、ON.Lab、ONOS

SDN の基礎は、スタンフォード大学の Nick McKeown 教授と Martin Casado 教授、そしてカリフォルニア大学バークレー校の Scott Shenker 教授が行った研究を基盤としている。これら教授とその研究機関は、SDN の知的基盤、システム、そしてツールを開発する事を目的とし、非営利団体のオープン・ネットワーキング研究センター(Open Networking Research Center: ONRC)を 2012 年に設立した。ONRC はその設立時に、CableLabs、Cisco、Ericsson、Google、HP、Huawei、Intel、Juniper、NEC、NTT ドコモ、Texas Instruments、VMware 等から出資を受けている⁵³。

ONRC は SDN の知的および技術的基盤に焦点を置いているが、その活動はスタンフォード大学とカリフォルニア大学バークレー校が支援する非営利団体の Open Networking Lab(ON.Lab)と補完的關係にあ

⁵¹ Open Networking Foundation – OpenFlow, URL: <https://www.opennetworking.org/sdn-resources/openflow>

⁵² Open Networking Foundation, “Introducing Atrium,” June 9, 2015, URL: https://www.opennetworking.org/?p=1757&option=com_wordpress&Itemid=316

⁵³ ONRC, URL: <http://onrc.stanford.edu/>

る。ON.Lab は、Alcatel-Lucent、AT&T、China Unicom、Ciena、Cisco、Ericsson、富士通、Huawei、Intel、NEC、NTT コミュニケーションズ、SK Telecom、そして Verizon から出資を受けており、アプリケーション、制御、インフラのすべてのスタックにわたり、オープンソース SDN 向けツールと標準の開発と導入、実演を手掛けている。これらの活動は、SDN エコシステム構築を支援する技術を開発するために ONRC が行った研究を基に実施される。ON.Lab は現在、以下のプロジェクトを進めている⁵⁴。

- **SDN-IP ピアリング(SDN-IP Peering)**: SDN ネットワークと従来の IP ネットワーク間のピアリングを可能にし、エンドユーザが IP ネットワーク事業者との既存のピアリング契約を変更することなく SDN を採用できるようにすることを目指すプロジェクト。
- **オープン・ネットワーク・オペレーティング・システム(Open Network Operating System: ONOS)**: ONOS は、SDN コントローラのオープンソース標準で、「データセンタとしてのセントラルオフィス再設計(Central Office Re-architected as a Datacenter: CORD)」などのプロジェクトの基盤となるものである(CORD については詳細後述)。CORD は、通信事業者に対し、SDN とホワイトボックス・ハードウェアに基づく、より柔軟性の高い中央オフィスの構築を可能にするプロジェクトである。
- **テストオン(TestON)**: SDN ネットワーク試験の開発と導入、報告、そして試験によって特定された問題をデバッグするためのオープンソース・システムの開発プロジェクト。
- **フローバイザ(FlowVisor)**: OpenFlow スイッチを採用した物理的ネットワーク内にネットワークの仮想スライスを作る、オープンソース・ハイパーバイザの開発プロジェクト。
- **ミニネット(Mininet)**: OpenFlow を採用した SDN ネットワークのシミュレーションを構築する、オープンソース・ネットワーク・エミュレータの開発を目指すプロジェクト。

中でも ONOS は、ON.Lab の SDN エコシステムに対し、最も重要な貢献を行うものである。後述する OpenDaylight は、ネットワーク機器ベンダが主導するものであるため、その研究の目的は、既存ベンダの位置付けの強化と分析する有識者もいる。一方で、2014 年 11 月にリリースされた ONOS は、ベンダに囚われない SDN コントローラの開発・導入を検討している通信事業者や IT サービス事業者のニーズを満たすことを目的としている。また、ONOS は Open Networking Foundation からサポートを受けており、複数の ON.Lab プロジェクトが OpenFlow 標準を採用している⁵⁵。

C. OpenDaylight

OpenDaylight コンソーシアムは、オープンソース SDN コントローラ、ならびにオープンソース NFV 向けのソフトウェア・コードの開発を目的とし、2013 年 4 月に設立された。設立メンバは Big Switch Networks、Brocade、Cisco Systems、Citrix、Ericsson、IBM、Juniper Networks、Microsoft、Red Hat などであり、現在は 50 社が加盟している⁵⁶。会員レベルは 3 層(プラチナ、ゴールド、シルバー)から成り、会員レベル

⁵⁴ ON.Lab, URL: <http://onlab.us/>

⁵⁵ Network World, "AT&T, Others Launch OpenDaylight SDN Alternative," November 4, 2014, URL: <http://www.networkworld.com/article/2842859/sdn/atandt-others-launch-opendaylight-sdn-alternative.html>

⁵⁶ OpenDaylight Consortium, URL: <https://www.opendaylight.org/membership/>

と売上高によって、会員は2年間で5,000～50万ドルの会員を払う必要があるほか、会員レベルごとに最低1～3人、多ければ10人程度の開発者をコンソーシアムに派遣しなければならない⁵⁷。

OpenDaylight コンソーシアムは、設立当時、SDN と NFV 向けにオープンソース・アーキテクチャとソフトウェア・コードを開発すると謳っていたが、実際の活動は SDN の普及促進が中心となっている。同コンソーシアムのエグゼクティブ・ディレクターを務める Neela Jaques 氏によると、NFV は「単に面白くない」、またサービス事業者にとって重要な NFV ユースケースには SDN が必要であるとの理由から、同コンソーシアムは NFV 関連の開発に取り組んでいないという⁵⁸。OpenDaylight は 2015 年 6 月、独自のアーキテクチャならびにソフトウェアの第 3 版として「Lithium」をリリースした。ユーザは Lithium を使い、独自の SDN ネットワークを開発するか、あるいはベンダが商業開発した Lithium 対応 SDN コントローラを使い、独自のネットワークを導入し、管理することができる⁵⁹。

OpenDaylight の本当の目的については、その設立当初から論争的となっている。OpenDaylight の設立メンバーは、主に大手ネットワーク機器ベンダであるため、その活動の目的は、オープンソース・エコシステムをサポートすることではなく、設立メンバーがすでに導入している SDN インフラを普及させることなのではないかと疑問視する者も多い⁶⁰。米 IT 専門コンサルである Gartner で副代表を務める Mark Fabbi 氏は、「私は OpenDaylight にあまり期待していない。私個人の意見だが、OpenDaylight は、SDN をめぐる議論（の焦点）を、オープンソース・ムーブメントを主導してきた開発者らから遠ざけ、現状維持に強い関心を持つ大手プレイヤーの手中に戻すための試みという傾向が非常に強い」と述べている⁶¹。

こういった懸念は、SDN 関連製品を販売するスタートアップ企業の Big Switch Networks（拠点はカリフォルニア州サンタクララ市）が 2013 年 6 月、OpenDaylight コンソーシアムにおける Cisco の影響力が強すぎる事を理由に、会員レベルをプラチナから事実上のオブザーバであるシルバーに下げると発表したことで、さらに広がった。Big Switch Networks は結局、OpenDaylight から離脱し、オープン・コンピューティング・プロジェクト（Open Compute Project: OCP）に加盟し、後述する OCP のオープン・ネットワーク・リナックス（Open Network Linux: ONL）の発足に貢献した。加えて、キャリア主導型の OpenDaylight の大體機関として、ON.Lab の ONOS が 2014 年 11 月に誕生した。OpenDaylight は、現在も独自の活動を続けているが、そ

⁵⁷ Webtorials, “An Update on OpenDaylight,” August 5, 2014, URL: <http://www.webtorials.com/content/2014/08/an-update-on-.opendaylight.html>

⁵⁸ OpenDaylight – Lithium, URL: <https://www.opendaylight.org/lithium>

⁵⁹ OpenDaylight – Lithium, URL: <https://www.opendaylight.org/lithium>

⁶⁰ SearchSDN, “OpenDaylight: Can Hardware Vendors Really Lead Open Source SDN?” April 9, 2013, URL: <http://searchsdn.techtarget.com/news/2240181155/OpenDaylight-Can-hardware-vendors-really-lead-open-source-SDN>

Network World, “Skepticism Follows Cisco-IBM Led OpenDaylight SDN Consortium,” April 9, 2013, URL: <http://www.networkworld.com/article/2165155/lan-wan/skepticism-follows-cisco-ibm-led-.opendaylight-sdn-consortium.html>

⁶¹ SearchSDN, “OpenDaylight: Can Hardware Vendors Really Lead Open Source SDN?” April 9, 2013, URL: <http://searchsdn.techtarget.com/news/2240181155/OpenDaylight-Can-hardware-vendors-really-lead-open-source-SDN>

のメンバの中には、より広範な SDN エコシステムへの貢献を望み、別の団体に参加しているメンバも存在する⁶²。

D. Open Compute Project

オープン・コンピュート・プロジェクト(Open Compute Project: OCP)は、Facebook が主導する協調的オープンソース・プロジェクトであり、コンピューティング、ネットワーク、ストレージなど、データセンターで使用されるオープンソース・ハードウェアとソフトウェア向け仕様とデザインの開発を目的とする。本プロジェクトは、より効率的なデータセンターの設計と構築、運用を目指す、Facebook 独自の研究に基づくものであり、Facebook のような主要なデータセンター・オペレータが使用する製品とサービスの市場活性化を目的に、オープンソースの仕様やデザインを提案している。Facebook のほか、OCP は Apple、Intel、Goldman Sachs、Microsoft、Rackspace Hosting によって主導されている⁶³。

SDN スイッチベンダの Big Switch Networks の貢献を基に、OCP は 2015 年 3 月 10 日、「Open Network Linux(ONL)」と呼ばれる新プロジェクトを発足した。ONL の基盤技術は、Big Switch Networks が自社の商用ネットワーク・スイッチ製品用に開発したネットワーク・オペレーティング・システム(OS)である⁶⁴。Big Switch Networks は、独自の OS である「Big Switch OS」を採用したスイッチ製品を OCP に提供した。同社は自社 OS を ONL の基盤とすることで、各種アップデートやパッチ開発で貢献する開発者コミュニティから、より大きなサポートを期待できる。同社 OS は、ONL 採用メーカによる幅広いハードウェア製品でも動作する⁶⁵。

2015 年 10 月時点で、ONL は 15 強のオープンソース・スイッチ・ハードウェア製品によってサポートされている。Big Switch Networks、Facebook、そして NTT は、大型データセンターにおいて ONL の実演に成功している⁶⁶。

4.2 NFV エコシステム

米国における NFV エコシステムを構成する主なプレイヤーとしては、リナックス財団(Linux Foundation)が主導する OPNFV と、米国電気通信産業ソリューション連合(The Alliance for Telecommunications Industry Solutions: ATIS)が主導する ATIS NFV フォーラムが挙げられる。国際的な NFV の標準やソリ

⁶² SearchSDN, “Big Switch Abandons OpenDaylight After Controller Spat with Cisco,” June 6, 2013, URL: <http://searchsdn.techtarget.com/news/2240185480/Big-Switch-abandons-OpenDaylight-after-controller-spat-with-Cisco>

⁶³ Open Compute Project, URL: <http://www.opencompute.org/>

⁶⁴ Big Switch Network, “Open Compute Project (OCP) Formally Accepts Open Network Linux (ONL),” March 10, 2015, URL: <http://www.bigswitch.com/press-releases/2015/03/10/open-compute-project-ocp-formally-accepts-open-network-linux-onl>

⁶⁵ Ars Technica, “Open Network Linux Could Boost Viability of Vendor Neutral Switches,” April 3, 2014, URL: <http://arstechnica.com/information-technology/2014/04/open-network-linux-could-boost-viability-of-bare-metal-switches/>

⁶⁶ Big Switch Networks, “Open Network Linux (ONL) Unifies Open Compute Project (OCP) Network Operating System Stack, Accelerates Adoption By Both Users and Developers,” October 8, 2015, URL: <http://www.bigswitch.com/press-releases/2015/10/07/open-network-linux-onl-unifies-open-compute-project-ocp-network-operating>

ユーシヨンの開発に関しては、欧州電気通信標準化機構(European Telecommunications Standards Institute: ETSI)が中心的な役割を担っている状況であるため、米国主体の OPNFV や ATIS は、標準化を手がけているというよりは、どちらかと言うとリファレンス・プラットフォームやユースケースの策定に注力している状況である。

A. OPNFV

オープンソース OS である Linux を支持する非営利団体のリナックス財団(Linux Foundation)は 2014 年 9 月 30 日、NFV オープン・プラットフォーム・プロジェクト(Open Platform for NFV: OPNFV)の発足を発表した。OPNFV は、キャリア級 NFV 製品とサービスの開発を目指すベンダと通信事業者向けに、オープンソース・リファレンス・プラットフォームを開発することを目指す、協調的プロジェクトである。そのプラットフォームは、ハードウェアおよびソフトウェア両製品による使用が想定されている。

OPNFV は、AT&T、Brocade、China Mobile、Cisco、Dell、Ericsson、HP、Huawei、IBM、Intel、Juniper Networks、NEC、Nokia Networks、NTT ドコモ、Red Hat、Telecom Italia、Vodafone を含む 39 社を設立会員として発足した。現在の会員数は、通信事業者とベンダを中心に 58 社に上る。OPNFV は、独自の標準開発は予定しておらず、ETSI や Open Networking Foundation などの標準化団体のオープンソース標準に基づくリファレンス・プラットフォーム構築を目指している。プロジェクトは以下の目標を掲げている⁶⁷。

- NFV の中核的機能の研究と実演のための、統合かつ検証されたオープンソース・プラットフォームの開発
- エンドユーザ・コミュニティのニーズを確実に満たすための、主要エンドユーザによる積極的な参加の推進
- OPNFV リファレンス・プラットフォームにおいて活用できると考えられる、関連オープンソース・プロジェクトへの貢献と参加
- オープン標準とオープンソース・ソフトウェアに基づく NFV ソリューションのための、オープン・エコシステムの構築
- 推奨オープン・リファレンス・プラットフォームとしての OPNFV の推進

OPNFV は 2015 年 6 月 4 日、同団体初、且つ現時点で唯一のオープンソース・ソフトウェア「Arno」をリリースした。Arno は、エンドユーザならびにベンダ向けに、仮想化ネットワーク機能(virtualized network functions: VNF)の検証と導入、統合を自動化するものである。これによってユーザは、ネットワーク内での NFV 導入と管理をより簡単に行えるようになる⁶⁸。

⁶⁷ OPNFV, “Telecom Industry and Vendors Unite to Build Common Open Platform to Accelerate Network Functions Virtualization,” September 30, 2014, URL: <http://www.linuxfoundation.org/news-media/announcements/2014/09/telecom-industry-and-vendors-unite-build-common-open-platform>

⁶⁸ OPNFV, “OPNFV Delivers Open Source Software to Enable Deployment of Network Functions Virtualization Solutions,” June 4, 2015, URL: <https://www.opnfv.org/news-faq/press-release/2015/06/opnfv-delivers-open-source-software-enable-deployment-network>

B. ATIS NFV フォーラム

ATIS は、通信セクタ向けに標準規格、仕様、ユースケース、ツールキット、オープンソース・ソフトウェア、そして互換性試験手順の策定および開発に取り組む業界団体であり、現在は通信事業者や IT サービス事業者、ベンダを含む約 150 社が加盟している。ATIS は、NFV、5G、サイバーセキュリティ、IP ネットワーク相互接続、PSTN-to-IP マイグレーション (PSTN から IP への移行)、オープン API、政策提言を含むさまざまな分野で積極的に活動を行っている⁶⁹

ATIS は、複数通信事業者のネットワークを横断する NFV の開発による新たな価値を創造する目的で、2014 年 9 月に NFV フォーラムを設立した。NFV フォーラムでは、NFV を導入する通信事業者のためのユースケースの定義、複数ネットワークに NFV を導入・統合するための要件の特定、そして ETSI や Open Networking Foundation、OPNFV など、NFV 標準とソリューション開発を手掛ける様々な組織が策定・開発した NFV API とツールの一覧作成に取り組むこととしている⁷⁰。

ATIS は NFV ユースケースの作成を通して、通信事業者が NFV 採用によって期待できる経費削減と価値創造機会を特定しようとしている。ATIS が 2015 年 4 月に発表したユースケースは以下の通り⁷¹。

- 仮想ネットワーク事業者 (Virtual Network Operator) — ネットワークの一部、またはネットワークを部分的に仮想化するネットワーク事業者
- 協調的クラウド基盤コンテンツ・デリバリ・ネットワーク・アレンジメント (Cooperative, Cloud-Based Content Delivery Network Arrangements)
- 仮想 CDN を利用する複数アクセス・ドメイン対応仮想コンテンツ・デリバリ (Virtualized Content Delivery across Multiple Access Domains by using a Virtualized CDN)
- ローミング (Roaming) — モバイル・ローミング加入者に対するサービス提供の効率改善
- 効率的なホーム経由ボイス・オーバー LTE ローミング・アレンジメント (Efficient Home Routed Voice over LTE Roaming Arrangements)
- 効率的な法人向けボイス/コラボレーション・アレンジメント (Efficient Enterprise Voice/Collaboration Arrangements)
- サードパーティ仮想化ネットワーク機能 (VNF) アプリケーション事業者とのサービス・ファンクション・チェーンの実現 (Enabling Service Function Chains with Third Party virtualized network function [VNF] Application Providers)
- サードパーティ VNF アプリケーションの実現 (Enabling Third Party VNF Applications)

⁶⁹ ATIS, “ATIS Overview,” 2015, URL: <http://www.atis.org/about/images/ATIS%20Overview%20UPDATED-2015.pdf>

⁷⁰ ATIS, “New ATIS Network Functions Virtualization Forum Brings Inter-Provider Solutions to Today’s Rapidly Evolving Virtualized Infrastructure,” September 16, 2014, URL: <http://www.atis.org/press/pressreleases2014/091614.asp>

⁷¹ FierceTelecom, “ATIS Launches NFV Forum to Address Virtualization, Service Roaming,” September 16, 2014, URL: <http://www.fiercetelecom.com/story/atis-launches-nfv-forum-address-virtualization-service-roaming/2014-09-16>
ATIS, “NFV Forum Use Cases,” April 14, 2015, URL: https://access.atis.org/apps/group_public/download.php/22973/NFV-Forum-Use-Cases.pdf

5 エッジ・コンピューティング

エッジ・コンピューティング (Edge Computing) は、ネットワークの端 (エッジ) に存在するエンドユーザが操る膨大な数の異種 (ワイヤレス、そして時に自律型の場合もある) でユビキタス、かつ分散した機器・端末を、相互にネットワークと通信・協調させ、サードパーティを介することなく、ストレージおよび処理タスク (コンピューティング) を実行するシナリオである。エッジ・コンピューティングによく似た概念として、フォグ・コンピューティング (fog computing) があるが、フォグ・コンピューティングは、分散処理環境としてのフォグ (雲) が、エッジ・クラウド (エッジにあるクラウドコンピューティング・センタ) と機器の間に配置されることで、ネットワークとの通信・強調と処理タスクをエンド側で実施するという概念である。以下は、Cisco が発表している、フォグ・コンピューティングを含む IoT アーキテクチャを示した図である⁷²。

図表 11 Cisco の IoT アーキテクチャ
シスコ IoT アーキテクチャー



出典: Cisco⁷³

エッジ・コンピューティングは、エンドユーザの近くにある機器・端末からインターネットを介して、データをエッジ・クラウドに送って処理するよりも、ネットワークのエッジにあるセンサや機器でタスクを実行する方が効率が良い、多大な経費削減が可能であるというアイデアから生まれ、実際の処理能力の進歩によって実現したシナリオである。処理能力や電池寿命、ネットワーク速度、エッジ・コンピューティングのパフォーマンス次

⁷² Luis Vaquero, Luis Roderer-Merino, "Finding your Way in the Fog: Towards a Comprehensive Definition of Fog Computing," October 2014, URL:

<http://www.sigcomm.org/sites/default/files/ccr/papers/2014/October/0000000-0000003.pdf>

⁷³ Cisco, "シスコ、日本に Internet of Things (IoT) インキュベーションラボを開設", October 23, 2012:

<http://www.cisco.com/web/JP/news/pr/2012/035.html>

第では、センサ、またはモバイル機器によって、または携帯電話基地局に設置されたマイクロ・データセンタにおいてネットワークとの通信やデータの処理が実行できると想定されている⁷⁴。

マサチューセッツ州マルボロ市を拠点とするソフトウェア企業 Wikibon の 2015 年の調べによると、エッジ・コンピューティングとクラウドコンピューティングを組み合わせ、データの 95%をエッジで処理し、残りを 200 マイル離れたデータセンタに送って処理する場合、データの処理費用はクラウドで全データを処理する場合のわずか 36%に削減される⁷⁵。エッジ・コンピューティングのその他の利点は以下の通り。

- 要求されるネットワーク容量の縮小
- 処理能力がネットワークの混雑具合に由来ほど左右されないことによる、可用性の拡大
- IoT 向けリアルタイム・アプリケーションに適した低遅延性
- 1 件の IPv6 アドレスをセンサ単位ではなくネットワーク全体に割り当てることによる、センサ・ネットワーク管理の向上

エッジ・コンピューティングは、まだ新しい概念だが、そのエコシステムに参加することにより恩恵を受けるセクタは多い。例えば、インフラおよび機器・端末製造業者は、自社製品にエッジ・コンピューティング機能を導入することで、競合他社との差別化を図ることができ、またクラウド・サービス事業者は、クラウドとエッジ・コンピューティングを組み合わせ、複数の異種アーキテクチャを跨ぐ形態の比較的安価なサービスを導入できると考えられる。また通信サービス事業者は、自社ネットワークを活用し、携帯電話基地局にマイクロ・データセンタを設置するといったエッジ・コンピューティング・サービスの提供が可能となる⁷⁶。

一方でエンドユーザも、エッジ・コンピューティングが導入されれば、これまで唯一の選択肢とされてきたクラウドコンピューティングに縛られるのではなく、個々の特定の要件を満たすコンピューティング環境を選べる事ができるようになる。以下の表は、エッジからクラウドまでのそれぞれの環境やパフォーマンス、アプリケーションの例を示した Cisco による解析結果である⁷⁷。

⁷⁴ Wikibon, "The Vital Role of Edge Computing in the Internet of Things," October 20, 2015, URL: <http://wikibon.com/the-vital-role-of-edge-computing-in-the-internet-of-things/>

Thoughts on Cloud, "7 Reasons Edge Computing is Critical to IoT," July 10, 2015, URL: <http://www.thoughtsoncloud.com/2015/07/7-reasons-edge-computing-is-critical-to-iot/>

⁷⁵ Wikibon, "The Vital Role of Edge Computing in the Internet of Things," October 20, 2015, URL: <http://wikibon.com/the-vital-role-of-edge-computing-in-the-internet-of-things/>

⁷⁶ Mahdev Satyanarayanan, et al., "An Open Ecosystem for Mobile Cloud Convergence," IEEE Communications Magazine, March 2015, URL: <http://elijah.cs.cmu.edu/DOCS/satya-cloudlet-ecosystem-2015.pdf>

⁷⁷ Cisco, "Fog Computing and the Internet of Things: Extend the Cloud to Where the Things Are," 2015, URL: <https://www.cisco.com/web/solutions/trends/iot/docs/computing-overview.pdf>

図表 12 コンピューティング環境とそれぞれに期待できるパフォーマンス

種類	エッジ	エッジ・アグリゲーション・ノード	クラウド
応答時間	瞬時	数秒～数分	数分、数日、または数週間
データストレージ	一時的	数時間、数日、または数週間	数か月又は数年
地理的範囲	限られた地域	地域	世界
アプリケーション例	タッチ・インターフェース、 拡張現実 (Augmented reality)	シンプルな解析	ビッグデータ解析

出典：Cisco の資料を基に作成⁷⁸

ここでは、米国におけるエッジ・コンピューティングとフォグ・コンピューティングの研究開発や普及を主導している、Cisco と IBM の取り組みについて紹介する。

5.1 Cisco のフォグ・コンピューティング

フォグ・コンピューティング戦略

Cisco Systems は、エッジ・コンピューティング概念を「フォグ・コンピューティング」と呼び、2012 年から推進している。同社は「フォグ・コンピューティングと、IoT におけるその役割 (Fog Computing and its Role in the Internet of Things)」と題した論文を発表し、その中でフォグ・コンピューティングを、「IoT をサポートするために必要なプラットフォームであり、ネットワーク末端部において多種多様な新サービスとアプリケーションを実現するプラットフォームの自然な構成要素」と定義した⁷⁹。

Cisco 目的は、自社のネットワーキング製品に処理能力とインテリジェンスを追加し、ネットワーク末端部に配置される「フォグ・ノード」として活用する(=アプリケーションの主要な管理機能を、遠く離れたクラウドコンピューティング・センタからフォグ・ノードに移行する)ことで、ネットワーキング機器メーカーとしての市場優位性を確保することである⁸⁰。Cisco は、自らを IoT 実現のための主要プレイヤーと位置づけ、以下の図の通り、公共安全、製造、エネルギー・物質、運輸、官民間の電子商取引 (B2G) 等の様々な分野へのソリューション提供を目指している⁸¹。

⁷⁸ Cisco, “Fog Computing and the Internet of Things: Extend the Cloud to Where the Things Are,” 2015, URL: <https://www.cisco.com/web/solutions/trends/iot/docs/computing-overview.pdf>

⁷⁹ Cisco Systems, “Fog Computing and its Role in the Internet of Things,” August 17, 2012, URL: <http://conferences.sigcomm.org/sigcomm/2012/paper/mcc/p13.pdf> (pp. 13, 15)

⁸⁰ Wall Street Journal, “Forget the Cloud: The ‘Fog’ is Tech’s Future,” May 18, 2014, URL: <http://www.wsj.com/articles/SB10001424052702304908304579566662320279406>

⁸¹ Cisco Systems, “Enabling the Internet of Everything: Cisco’s IoT Architecture, BRKIOT-2442,” February 15, 2015, URL: <http://www.slideshare.net/Cisco/enabling-the-internet-of-everything-ciscos-iot-architecture> (Slide 48)

図表 13 Cisco が標的とする IoT ソリューション

Industries	Verticals	Solutions and Use Cases				GTM
Public Sector	Connected City	SCC Infrastructure Management (City Wi-Fi, Parking, Lighting, Location, Traffic, Safety and Security)		Workspaces (Smart Spaces and REGS)		IoT Sales, BT
	Connected Public Safety	Connected Schools	Connected Border	Connected Law Enforcement	Connected Defense	
Manufacturing	Connected Factory	Connected Factory Energy Mgmt.	Connected Factory Wireless	Connected Factory Security	Connected Factory Automation	+
Energy and Minerals	Connected Utilities	Connected Mobile Workforce	Connected AMI	Connected Substation Automation	Connected Distribution Automation	Ecosystem partners
	Connected Oil and Gas	Connected Pipelines	Connected Refinery	Secure Ops	Connected Oilfield	+
	Connected Mining	Asset Visibility and Monitoring	Connected Predictive Maintenance	Connected Mine Remote Operations	Secure Ops	+
Transportation	Connected Transportation	Connected Roadways	Connected Trains	Connected Stations	Connected Trackside	CCS
B2C	Connected Retail	Store-in-a-box	CMX digital Experience	Remote Expert/ Mobile Advisor	Digital Media Store Experience	+
	Connected Sports and Entertainment	Connected Stadium	Connected Stadium Wi-Fi	Stadium/Vision	Stadium/Vision Mobile	Services (A.S.TS)
	Connected SP /M2M	Remote Tower Management		Fleet/Asset Management		+
	Connected Health	Virtual Patient Observation	Patient Wayfinding	Patient Media Experience	Cisco Health Presence	
	FSI	Omni-channel Customer Interaction	Pervasive Employee Collaboration	In-branch customer experience	Energy Management	Solution SKUs (VSG)

出典: Cisco⁸²

全ての IoT プラットフォーム

Cisco は 2014 年 10 月、同社のエッジ・コンピューティング戦略の中核として機能する予定の、「Internet of Everything (IOx)」と呼ばれる新しいプラットフォームを発表した。IOx とは、顧客の IoT ソリューション導入を支援する、関連ハードウェア、ソフトウェア、専門サービス、そして提携企業のポートフォリオである。Cisco はこれまでに、約 20 のルータ製品に IOx ソフトウェア・プラットフォームを追加し、それらを物理的な改ざんから守るための堅牢化を施した⁸³。

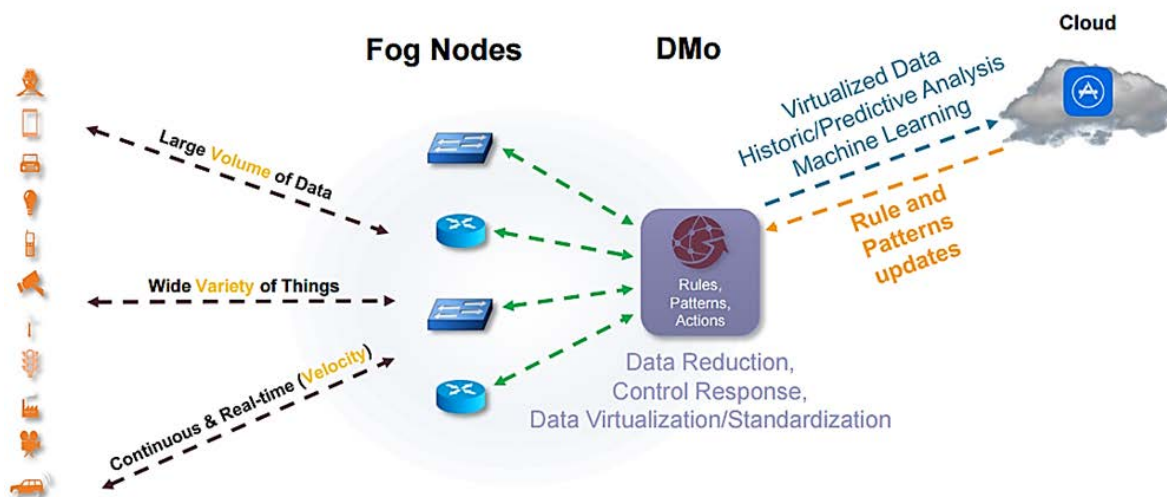
IOx には、Cisco が「Data in Motion (DMo)」呼ぶ、フォグ・ノード向けデータ管理・解析用ソフトウェアが搭載される。DMo ソフトウェアは、クラウドとフォグ・ノード間の通信を司り、一つ、またはそれ以上のフォグ・ノードにホストされる。次の図は、Cisco の DMo とフォグ・ノード・アーキテクチャの概要を示したものである。図右側のクラウドから DMo に対しては、データに関するルールやパターンが定期的に送られ、逆に DMo はクラウドに対し、ビジュアル化されたデータ(データの持つ意味を正確・効率的に伝えるためのチャートやグラフ等)に加え、過去の傾向についての分析や、マシン・ラーニングの結果等が提供される。DMo においては、データの解析や処理、削減、応答管理等が行われ、それぞれのフォグ・ノードをサポートする。図左

⁸² Cisco Systems, “Enabling the Internet of Everything: Cisco’s IoT Architecture, BRKIOT-2442,” February 15, 2015, URL: <http://www.slideshare.net/Cisco/enabling-the-internet-of-everything-ciscos-iot-architecture> (Slide 48)

⁸³ Cisco, “Cisco Doubles Down to Accelerate IoT Adoption with New Application Deployment Options at the Edge and Expanded Fog Computing Portfolio,” October 14, 2014, URL: <http://newsroom.cisco.com/press-release-content?articleId=1499867>

側に示されている様々な IoT アプリケーション (オレンジ色のアイコン) と Fog ノードの間では、各アプリケーションが必要とする種類や規模のデータのやり取りが行われる⁸⁴。

図表 14 Cisco の DMo と Fog ノード、クラウドを含むアーキテクチャ



出典: Cisco⁸⁵

IOx プラットフォームは、Cisco と提携する GE、Itron、OSISoft、Intel、Smart River、そして日本の smartFOA などによってすでに採用されており、IoT ソリューション導入に利用されている。具体的には、GE は石油とガス分野向け、Itron はスマート・グリッド向け、smartFOA は製造業向け IoT ソリューションとして IOx を導入した⁸⁶。

IoT ワールド・フォーラム・リファレンス・モデル

IoT ワールド・フォーラム (IoT World Forum) は、IoT に特化した、世界規模の年次業界会議である。IoT ワールド・フォーラム自体は、Cisco が主催している会議ではないが、Cisco が積極的にリーダーシップをとり、その活動に深く関与している。Cisco、GE、IBM、Intel、Itron、Oracle、SAP を含む同フォーラムの 28 会員が所属するアーキテクチャ・管理・解析作業部会 (Architecture, Management and Analytics Working Group) は、IoT ワールド・フォーラム・リファレンス・モデル (IoT World Forum Reference Model) を共同で作成した。同リファレンス・モデルでは IoT エコシステムの構成要素をレイヤとして整理し、それらレイヤ間の相互互換性の促進を目指している。以下の図は、リファレンス・モデルの 7 つのレイヤを示したものである。レイヤの一つにエッジ・コンピューティングが含まれることは、Cisco と IoT ワールド・フォーラムのその他会

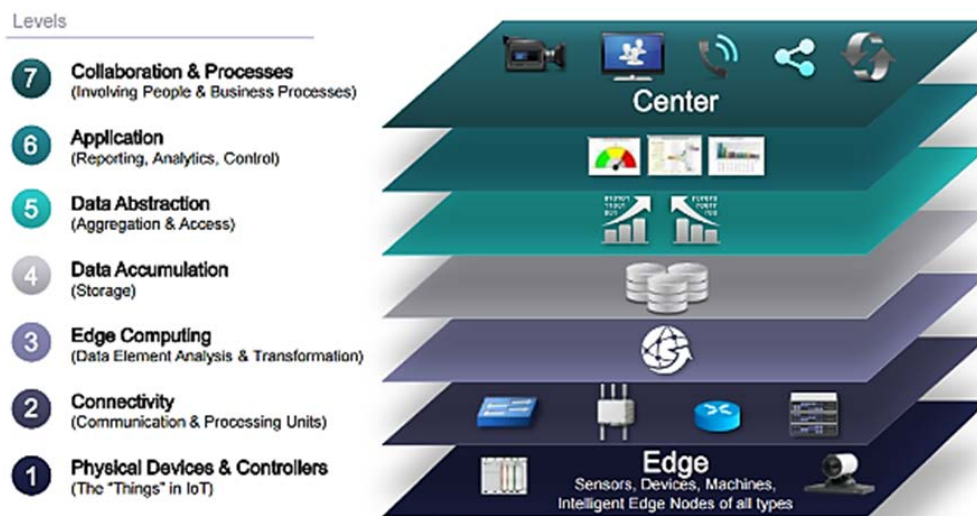
⁸⁴ Cisco Systems, "Enabling the Internet of Everything: Cisco's IoT Architecture, BRKIOT-2442," February 15, 2015, URL: <http://www.slideshare.net/Cisco/enabling-the-internet-of-everything-ciscos-iot-architecture> (Slide 45)

⁸⁵ Cisco Systems, "Enabling the Internet of Everything: Cisco's IoT Architecture, BRKIOT-2442," February 15, 2015, URL: <http://www.slideshare.net/Cisco/enabling-the-internet-of-everything-ciscos-iot-architecture> (Slide 45)

⁸⁶ Cisco, "Cisco Doubles Down to Accelerate IoT Adoption with New Application Deployment Options at the Edge and Expanded Fog Computing Portfolio," October 14, 2014, URL: <http://newsroom.cisco.com/press-release-content?articleId=1499867>

員がエッジ・コンピューティングを IoT エコシステムの基本構成要素の一つと捉えていることの表れであり、特筆に値する⁸⁷。

図表 15 IoT ワールド・フォーラム・リファレンス・モデル



出典： IoT ワールドフォーラム⁸⁸

28 会員が策定したリファレンス・モデルは、エッジ・コンピューティングにおける個別レイヤの役割を、「データ要素の解析、およびデータ変換の実行」と定義しており、これら機能は実際には Cisco の DMo ソフトウェアによって実行される。エッジ・コンピューティング・レイヤが手掛ける具体的な機能としては、データのフィルタリング、クリーンアップとアグリゲーション、データ・パケットの精査、ネットワークおよびデータ解析、ユーザ定義閾値モニタリング、そして定期的な報告などが挙げられる⁸⁹。

リファレンス・モデルの開発担当者は、今後、既存の標準策定組織と協力し、これらレイヤにおける標準の特定・策定に取り組む予定である。また、レイヤ間のインターフェースの開発や、リファレンス・モデルに基づく IoT ソリューションのプロトタイプ制作・実証試験も実施する予定であり、シスコはそれらを通じて提携先と協力し、自社の IOx プラットフォームの普及を目指す⁹⁰。

⁸⁷ Cisco, "The Internet of Things World Forum Unites Industry Leaders in Chicago to Accelerate the Adoption of IoT Business Models," October 14, 2014, URL: <http://newsroom.cisco.com/press-release-content?articleId=1499853>

⁸⁸ Cisco, "The Internet of Things World Forum Unites Industry Leaders in Chicago to Accelerate the Adoption of IoT Business Models," October 14, 2014, URL: <http://newsroom.cisco.com/press-release-content?articleId=1499853>

⁸⁹ Cisco, "The Internet of Things Reference Model White Paper," June 4, 2014, URL: http://cdn.iotwf.com/resources/71/IoT_Reference_Model_White_Paper_June_4_2014.pdf

⁹⁰ Cisco, "The Internet of Things Reference Model White Paper," June 4, 2014, URL: http://cdn.iotwf.com/resources/71/IoT_Reference_Model_White_Paper_June_4_2014.pdf

5.2 IBMのエッジ・コンピューティング

IBMは、情報の統合・管理・解析分野に強みを持つ企業だが、IoT等のセンサは、情報収集にとって必要不可欠の要素であり、その点においてIBMの情報管理と解析能力を補完・強化するものとなり得る。またネットワークのエッジで初期処理を行うエッジ・コンピューティングも、IBMの解析ソリューションと互換性が高く、ユーザは、それぞれの業種ごとにカスタマイズされた、詳細な解析を実行することができるかと期待されている⁹¹。

IBMは、エッジ・コンピューティングを基盤とした、スマートシティ向けのソリューションの開発・展開を目指している。米企業経営コンサルのNavigant Researchによれば、2014年にスマートシティ実現を支援した事業者の1位と2位はIBMとCiscoであり、これら2社は、スマートシティ関連技術やサービスの開発に注力しているほか、その戦略方針や提携パートナーが確立しており、市場におけるシェアも十分に擁している⁹²。

Navigant Researchは、IBMのスマートシティ関連のアプリケーションやソリューションが、世界の様々な都市のサービスと業務に幅広い恩恵をもたらしていると分析しており、今後の注視すべきものとして、IBMの「スマーター・シティーズ・ソリューション(Smarter Cities Solutions)」を挙げている。同ソリューションは、IBMが開発した、都市管理統合プラットフォームである、インテリジェント・オペレーションズ・センタ(Intelligent Operations Center: IOC)を中核としている。このプラットフォームは、各都市の行政拠点を支援する事を目的としており、IBMのデータ管理、解析、イベント管理機能を持つソフトウェア等を基盤として構成されている⁹³。

IBMは、各行政拠点のニーズや役割によってインテリジェント・オペレーションズ・センタをカスタマイズし、IBM緊急管理センタ(IBM Emergency Management Center)、IBM水資源管理センタ(IBM Water Management Center)、IBM交通管理センタ(IBM Transportation Management Center)等の導入を終え、今後はインフラ、ヘルスケア、雇用等の業務向けにもプラットフォームを追加導入することを計画している。IBMは、各センタに設置されたセンサから集められた情報を、自社内で開発した質問応答・意思決定支援システムである「Watson」プログラムを通して分析・管理し、各行政拠点がより効率的に業務管理できるよう、追加支援を提供することも視野に入れている。この枠組みは、エッジ・コンピューティングの概念が基盤になっていると考えられる⁹⁴。

IBMのスマーター・シティーズ戦略は、機器・端末(instrumentation)、相互接続性(interconnectedness)、そしてインテリジェンス(Intelligence)の3つ「I(アイ)」を柱としており、各都市の行政拠点は、機器・端末で

⁹¹ Wall Street Journal, "Forget the Cloud: The 'Fog' is Tech's Future," May 18, 2014, URL: <http://www.wsj.com/articles/SB10001424052702304908304579566662320279406>

⁹² Navigant Research, "Navigant Research Leaderboard Report: Smart City Suppliers," 2014, URL:

http://www.ibm.com/smarterplanet/global/files/us_en_us_smarter_cities_navigant_research_report.pdf (pp. 13)

⁹³ IBM, "IBM Intelligent Operations Center": <http://www-03.ibm.com/software/products/en/intelligent-operations-center>

⁹⁴ IBM, "IBM Intelligent Operations Center": <http://www-03.ibm.com/software/products/en/intelligent-operations-center>
IBM – Watson, URL: <http://www.ibm.com/smarterplanet/us/en/ibmwatson/>

ある IoT を通して、車両やユーティリティメータ、カメラやその他機器に設置されたセンサから膨大な量のデータを収集し、IBM のインテリジェント・オペレーションズ・センタが提供する相互接続性やインテリジェンス機能を活用して解析できるようになる。これまでに IBM のインテリジェント・オペレーションズ・センタは、ブラジルの リオデジャネイロ、中国の鎮江市、ベトナムのホーチミン市等の行政業務を支援している⁹⁵。

ETSI のモバイル・エッジ・コンピューティング

2014 年 9 月、ETSI はモバイル・エッジ・コンピューティング (Mobile Edge Computing: MEC) と呼ばれるイニシアティブを立ち上げた。発足時の参加企業は、Huawei、IBM、Intel、Nokia Networks、NTT DoCoMo、そして Vodafone であり、現在の会員数は 28 に上る。「モバイル・エッジ・コンピューティング」は、エッジ・コンピューティングの機能を、モバイル通信ネットワークに導入する事を目的としており、レイテンシが極端に低いことや、利用する周波数帯が比較的高いこと、リアルタイムでの無線ネットワーク情報にアクセスできること等の特徴がある。ETSI の同名イニシアティブでは、モバイル・エッジ・コンピューティングの運用に必要な技術要件、フレームワークとリファレンス・アーキテクチャ、そして API 仕様の策定と開発に取り組んでいる⁹⁶。

モバイル・エッジ・コンピューティングでは、モバイル事業者がそれぞれの携帯電話基地局や、都市環境や屋内で配置されることの多い短距離セル・サイトである小型セルを複数集約したポイントにおいて導入可能な、専用サーバ (MEC サーバ) を開発することを目指している。MEC サーバは、ホワイトボックス・ハードウェアによって構築される予定で、これはコスト削減のためである。安価なサーバを開発することは、多数のモバイル通信事業者のネットワークに導入するために非常に重要である。ETSI によれば、MEC サーバには仮想化ネットワーク機能 (VNF) のホストにも適したアーキテクチャを採用する予定で、その結果、モバイル事業は共通インフラへの投資によって、MEC と NFV の両方を導入することが可能になる⁹⁷。

MEC サーバは、ネットワーク末端部近くに設置されるクラウドコンピューティング・システムとして機能し、様々な処理およびストレージ機能を実行する。MEC は、以下に示すようなユースケースをサポートすることが想定されている⁹⁸。

⁹⁵ Frost and Sullivan, “IBM: 2014 Global Best-in-Class Smart City Integrator Visionary Innovation Leadership Award,” 2014, URL: http://www.ibm.com/smarterplanet/global/files/us_en_us_cities_FS_IBM_Award_Report.pdf
SiliconAngle, “Internet of Things and Smart Cities: What Happens When the Unconnected Connect,” January 7, 2015, URL: <http://siliconangle.com/blog/2015/01/07/internet-of-things-and-smart-cities-what-happens-when-the-unconnected-connect/>

⁹⁶ ETSI – Mobile Edge Computing, URL:

<https://portal.etsi.org/portals/0/tbpages/mec/docs/mec%20executive%20brief%20v1%2028-09-14.pdf>

⁹⁷ Embedded Systems Engineering, “How Mobile Edge Computing is Helping Operators Face the Challenges of Today’s Evolving Mobile Networks,” August 17, 2015, URL:

<http://eecatalog.com/intel/2015/08/17/how-mobile-edge-computing-is-helping-operators-face-the-challenges-of-todays-evolving-mobile-networks/>

⁹⁸ ETSI, “MEC Introductory Technical White Paper,” September 2014, URL:

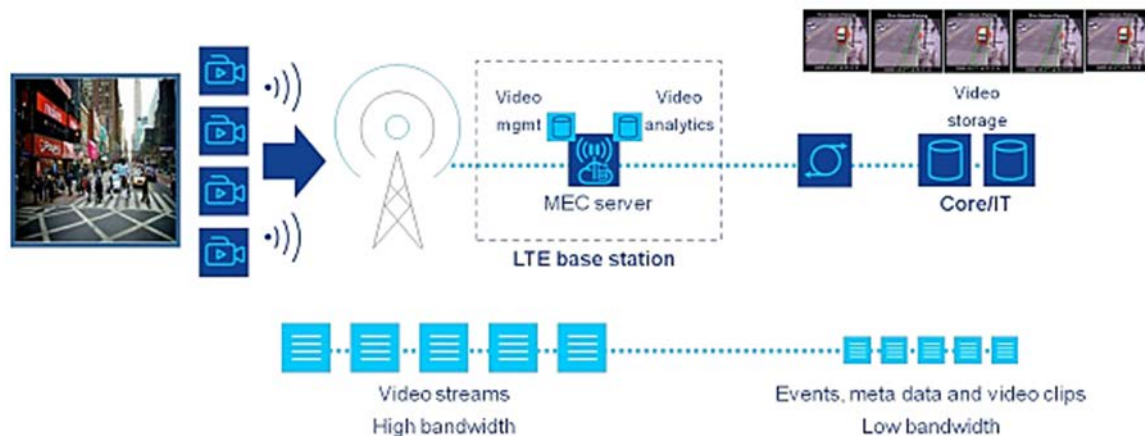
https://portal.etsi.org/Portals/0/TBpages/MEC/Docs/Mobile-edge_Computing_-_Introductory_Technical_White_Paper_V1%2018-09-14.pdf

- **能動的機器ロケーション追跡(Active device location tracking)**: 広告やスマートシティ向けの、位置情報追跡
- **拡張現実コンテンツのデリバリー(Augmented reality content delivery)**: スマートフォンやタブレット、ウェアラブル機器等で視聴される動画を使った、追加コンテンツのオーバーレイ
- **動画解析(Video analytics)**: スマートシティ向け等を目的とした、カメラで撮影した動画の解析
- **無線アクセス・ネットワーク考慮型コンテンツの最適化(Radio access network-aware content optimization)**: 携帯ネットワークやモバイル機器の容量・能力に基づく、動画配信の質の改良
- **分散型コンテンツと DNS キャッシング(Distributed content and DNS caching)**: コンテンツおよびドメイン・ネーム・システム(DNS)データをエンドユーザにより近い場所にキャッシュすることにより、バックホール・ネットワークのネットワーク・トラフィックを軽減
- **アプリケーション考慮型パフォーマンス最適化(Application aware performance optimization)**: 携帯ネットワークおよびモバイル機器の容量・能力に基づくアプリケーション性能の改良

これらのユースケースには、後述するカーネギーメロン大学や Intel 等が協力して開発している、動画データ解析アーキテクチャの「GigaSight」に類似した、動画解析を含む複数のユースケースが含まれる。以下の図は、MEC による動画解析サポートの例を示しており、この例では、モバイル機器で撮影された動画データが、携帯電話基地局に設置された MEC サーバに送信され、MEC サーバ上で管理や解析が行われた後、注目されるべき物体や人物(迷子や探し人、忘れ物、障害物等)が移った動画のみが抽出され、動画データのメタデータと共にリモート・サーバに保存される。リモート・サーバでは、物体や人物のキーワードや動画データのメタデータ等を基にデータベース化され、検索等が可能となる。GigaSight と同様、MEC サーバの活用分野も、公共安全やスマートシティ等、多岐に及ぶ⁹⁹。

⁹⁹ ETSI, “MEC Introductory Technical White Paper,” September 2014, URL: https://portal.etsi.org/Portals/0/TBpages/MEC/Docs/Mobile-edge_Computing_-_Introductory_Technical_White_Paper_V1%2018-09-14.pdf

図表 16 MEC 動画解析の例



出典： ETSI

6 米国の SDN/NFV、エッジ・コンピューティング研究開発プロジェクト

ここでは、米国の大学や研究機関等で実施されている、SDN/NFV、エッジ・コンピューティングに関する個別の研究開発プロジェクトについて、プロジェクトの背景・概要、参加組織、予算・出資組織、今後のスケジュール等の情報をまとめる。

6.1 SDN/NFV

A. プリンストン大学とジョージア工科大学

開発中の技術： ソフトウェア・デファインド・インターネット・エクスチェンジ (Software Defined Internet Exchange: SDX)

参加機関： プリンストン大学、ジョージア工科大学、カリフォルニア大学バークレー校、メリーランド大学、南カリフォルニア大学、Google

背景・概要： 従来のインターネット環境では、単一のネットワーク・ドメインから他のドメインへのデータ転送経路を制御するに辺り、通信プロトコルの一種である BGP (Border Gateway Protocol) を採用している。しかしこの場合、データの転送先は、隣り合っているネットワークに限定されてしまい、ネットワーク全体を俯瞰することが難しく、エンドユーザの要求に応じたデータ転送を効果的に管理できないという問題がある。このため、例えば隣り合うネットワークがサイバー攻撃の被害を被っていたとしても、BGP がこのネットワークに自動的にデータを転送してしまうといったこともあり得る。BGP に基づくネットワーク管理ポリシーは、策定や問題解決、セキュリティ確保が困難になりがちであり、これらの問題を克服するため、BGP を修正する取り組みもあるものの、まだ成功には至っていない¹⁰⁰。

¹⁰⁰ Nick Feamster, et al. "SDX: A Software Defined Internet Exchange," 2013, URL: <http://gtnoise.net/papers/2013/feamster-ons2013.pdf>

BGP の代替技術として、プリンストン大学とジョージア工科大学に主導される複数大学は、SDN のネットワーク管理機能を活用し、より柔軟性が高く、プログラミングも可能なマルチドメイン SDN の構築に着手した。このネットワークにおいては、SDX に配置される SDN コントローラによって、ネットワークの性能、費用、セキュリティ状況等を含む特性情報を、複数のネットワークから受信する。情報を受け取った SDN コントローラは、ネットワークの性能、料金、そして転送データ元のアプリケーションのセキュリティ要件を考慮し、エンド・ツー・エンドのデータ転送経路を決定する。この機能は、以下のようなユースケースをサポートすると考えられている¹⁰¹。

- **ドメイン基盤またはアプリケーション特定ピアリング (Domain-based or application-specific peering)**: インターネットサービスプロバイダ、またはアプリケーションプロバイダは、特定のネットワークを使ったデータ転送サービス(例えば動画ストリーミング・サービス)に優遇価格を設定し、市場競争力を高めることができる。ただし、これにはネットワーク側との交渉が必要である。
- **遠隔制御ピアリング (Remote control peering)**: アプリケーションプロバイダは、データ転送に際し、特定の性能を持つネットワークの利用を要求することにより、サービスの質を確保することができる。SDX は、そういったサービスの質の確保を求めるアプリケーション事業者に対し、特別料金を請求できる。
- **拘束力のあるマルチドメイン・ポリシー (Enforceable multi-domain policies)**: BGP は、ネットワーク・ポリシー順守の点で難点があり、仮にサイバー攻撃を受けると、エンドユーザのポリシーに違反するネットワークへ無意識に、または故意にデータを転送する可能性がある。SDX の場合、エンドユーザの条件に合うドメインだけにデータを転送することができるため、ネットワーク性能とセキュリティの改善が可能になる。
- **動的ネットワーク・トラフィック・エンジニアリング (Dynamic network traffic engineering)**: SDX は複数のネットワークからネットワーク性能マトリクスを受信し、ネットワークおよびアプリケーション事業者からの要件を満たすため、これらネットワーク間でのデータ転送を自動的に調整する。

本プロジェクトには、Google も支援を行っている。Google は、自社で行っていた SDX 開発プロジェクト「プロジェクト・カーディガン (Project Cardigan)」に関する情報を、プリンストン大学とジョージア工科大学に提供することで、SDX の開発を推進してきた。プロジェクト・ガーディアンは、ニュージーランドの研究・教育ネットワークである「研究・教育ネットワーク・ニュージーランド (Research and Education Network New Zealand: REANNZ)」のネットワーク性能の最適化を目的としている¹⁰²。

¹⁰¹ Nick Feamster, et al. "SDX: A Software Defined Internet Exchange," 2013, URL: <http://gtnoise.net/papers/2013/feamster-ons2013.pdf>

¹⁰² Google, "Project Cardigan: An SDN Controlled Exchange Fabric," URL: <https://www.nanog.org/meetings/nanog57/presentations/Wednesday/wed.lightning3.whyte.sdn.controlled.exchange.fabric.pdf>; REANNZ, URL: <https://reannz.co.nz/>

プリンストン大学とジョージア工科大学が主導するプロジェクトに参加している研究者らは、BGP を利用してネットワーク属性情報を受け取るなど、SDX の支援を目的として、今後も短期的に BGP を利用することを検討している。ただし、長期的には BGP を代替し、また複数のネットワークをインターコネクトする一次的手法として、複数の SDX を導入する可能性を検討している。この目的を達成するために、本プロジェクトでは、ピアリング関係を確立する方法と、複数 SDX 間でデータを経由する方法を確立する必要がある¹⁰³。

予算と出資機関： 本プロジェクトには、NSF が少なくとも 2010 年~2014 年に至るまで助成金を出しており、その総額は最低 357 万ドルに上る。それぞれの助成金の詳細は以下の通り¹⁰⁴。

- NSF 助成金 #1040705 (コンピュータ・システム・ネットワーク局がプリンストン大学に対し、2010 年 10 月~2014 年 9 月で 20 万ドルを付与)
- NSF 助成金 #1040838 (コンピュータ・システム・ネットワーク局が国際コンピュータ科学研究所 [International Computer Science Institute] に対し、2010 年 10 月~2015 年 9 月で 210 万ドルを付与)
- NSF 助成金 #1261357 (コンピュータ・システム・ネットワーク局がメリーランド大学に対し、2012 年 9 月~2015 年 4 月で 42.8 万ドルを付与)
- NSF 助成金 #1409056 (コンピュータ・システム・ネットワーク局がプリンストン大学に対し、2014 年 10 月~2017 年 9 月で 35 万ドルを付与)
- NSF 助成金 #1409076 (コンピュータ・システム・ネットワーク局が Georgia Tech Research Corporation¹⁰⁵ に対し、2014 年 10 月~2015 年 3 月で 50 万ドルを付与)

スケジュール： NSF による SDX への資金提供は 2010 年に開始され、少なくとも 2017 年までの継続が予定されている。NSF は、2017 年以降も助成金追加の形で資金提供を続ける可能性がある。

B. ON.Lab と AT&T

プロジェクト名： データセンタとしてのセントラルオフィス再設計 (Central Office Re-architected as a Datacenter: CORD)

参加機関： ON.Lab、AT&T、PMC-Sierra (ネットワーク機器およびソフトウェア事業者)、Skipio (高速モデム分野に強い半導体メーカ)、ONOS 等

背景・概要： On.Lab と AT&T が率いる CORD は、AT&T などの通信事業者が自社のネットワーク管理に使用するセントラルオフィス (central office、CO: 通信局舎) の近代化に取り組むプロジェクトである。従来のセントラルオフィスには、事業者がネットワークを運用するのに必要な、約 300 種類の機器・アプライアンス

¹⁰³ NSF, "NeTS: Medium: Collaborative Research: A Software Defined Internet Exchange, Award 1409056," August 11, 2014, URL: http://www.nsf.gov/awardsearch/showAward?AWD_ID=1409056

¹⁰⁴ なお、NSF CNS-1261462 の情報は入手できなかった。

¹⁰⁵ Georgia Tech Research Corporation は、Georgia Tech がスピンオフした研究開発企業である。

スが導入されており、事業者はそれらを一台ずつ物理的にインストールし、専用サービスによって管理する必要がある。これらの機器は、原則プロプライエタリ・システムを利用しており、設備投資や運用費が高く、柔軟性にも欠けることが問題点として指摘される。コスト削減と柔軟性向上のため、SDN と NFV の原理を取り入れる試みもあるが、それらの取り組みはセントラルオフィス全体への包括的アプローチというよりは、アプライアンスの特定サブセットのみを対象とした、比較的限定的なものである¹⁰⁶。

CORD プロジェクトでは、セントラルオフィスを構成するプロプライエタリ機器・サービスを、汎用性のあるホワイトボックス・アプライアンス (white box appliance) 上で稼働するネットワーク・サービスに置き換えられるようなセントラルオフィスのアーキテクチャを開発することにより、これらの問題を解決しようとしている。SDN および NFV の原理をセントラルオフィス全体に採用することで、通信事業者は、クラウド・サービス環境の場合と同じようにネットワークを柔軟に管理することが可能になる。それによって事業者は、設備投資と運用費を削減できるほか、新しい(もしくは既存のサービスを改良した)サービスを導入する際に、ネットワークをより迅速に再プログラムできるようになるため、サービスの市場投入を加速させる事ができる。

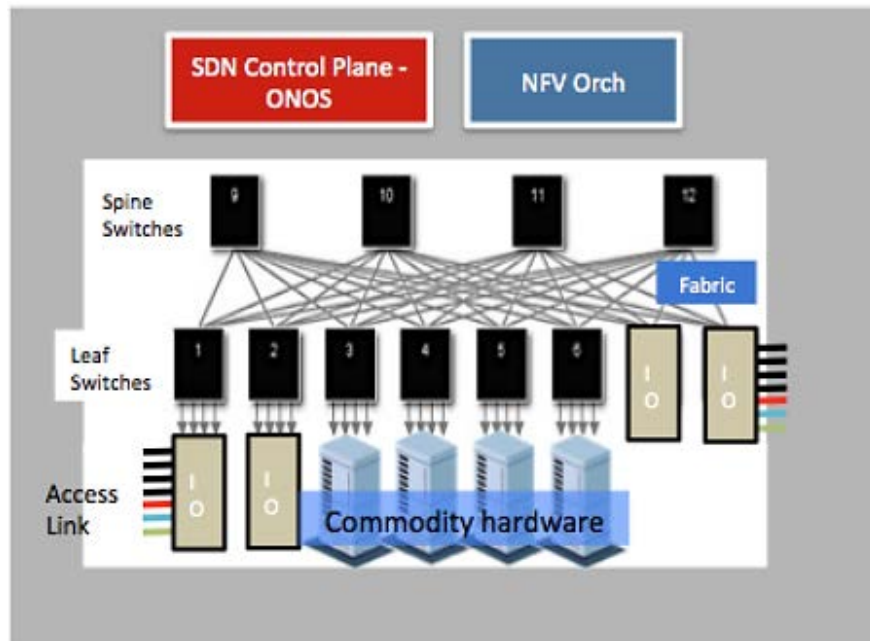
また同プロジェクトでは、従来はプロプライエタリ機器によって実行されていたネットワーク・サービスを仮想化し、汎用性のあるホワイトボックス・サーバーとストレージ機器、スイッチによってホストされる仮想機械 (virtual machine: VM) 上で稼働させる、NFV 原理を採用した。これらの仮想化ネットワーク・サービスは、ノースバウンド・インターフェースとサウスバウンド・インターフェースに ONOS 標準を採用した、SDN 制御プレーンによって管理される。仮想化ネットワーク・サービスと SDN 制御サービスの詳細は、要約した上でアプリケーション開発元とエンドユーザに公開され、ON.Lab の拡張可能クラウド・オペレーティング・システム (extensible cloud operating system: XOS) 標準に基づく NFV オーケストレータによって制御される¹⁰⁷。

以下の図は、CORD アーキテクチャの概念図である。この図はセントラルオフィスのアクセス・ネットワークへのリンクを示しており、図左部のエンドユーザ側アクセスリンクと、図右部の事業者のバックボーン・ネットワークへのアクセスリンクに接続している。ネットワーク全体は、図上部の SDN 制御プレーンと NFV オーケストレータによって管制され、ネットワーク・サービスは図下部の汎用機器 (Commodity hardware) 上でホストされる。

¹⁰⁶ XOS Project, "CORD FAQs," URL: <http://xosproject.org/wp-content/uploads/2015/06/CORD-FAQs.pdf> (pp. 1 – 2)

¹⁰⁷ ONOS Project, "Proof of Concept CORD White Paper," June 2015, URL: http://onosproject.org/wp-content/uploads/2015/06/PoC_CORD.pdf (p. 2)

図表 17 CORD アーキテクチャ



出典： ONOS プロジェクト¹⁰⁸

AT&Tのセントラルオフィスは、現在300以上のプロプライエタリ機器によって構成されており、同社はいずれこのレガシー・インフラを、ONOS、XOS、そしてOpenStackをインストールしたホワイトボックスで校正される共通インフラに置き換え、仮想化インフラを管理することを計画している。AT&Tはホワイトボックス導入の利点はコスト削減に留まらないと考えており、柔軟性の改善や製品の市場投入時間の短縮により、顧客向けの画期的ソリューションの迅速な導入が可能になるとしている。同時にAT&Tは、ONOS、XOS、OpenStackなどのオープンソース・ソフトウェアとホワイトボックス機器との統合が、現在の大きな課題となっていることを認めている¹⁰⁹。

AT&TとOn.Labは、モバイルCORD(Mobile CORD: M-CORD)と呼ばれるプロジェクトを新たに発足し、CORDの対象をモバイル・ネットワークにも広げることが計画されている。M-CORDでは、CORDアーキテクチャにエッジ・コンピューティングの概念を追加し、モバイル・ネットワークのエッジ(端)に分散型マイクロ・データセンタを構築することを目指す。マイクロ・データセンタの構築によって、AT&Tはすべてのデータをネットワークの中心部に戻す代わりに、ネットワークのエッジで一部処理を実行できるようになる。また、一部処

¹⁰⁸ ONOS Project, "Proof of Concept CORD White Paper," June 2015, URL: http://onosproject.org/wp-content/uploads/2015/06/PoC_CORD.pdf (p. 2)

¹⁰⁹ Light Reading, "Highlights of Light Reading's White Box Strategies for Common Service Providers," November 22, 2015, URL: <http://community.comsoc.org/blogs/alanweissberger/highlights-light-readings-white-box-strategies-communications-service-provider>

理をエッジで行うことにより、動画解析、市内全域のリアルタイム顔認識、そして IoT アプリケーションといったデータ集約的アプリケーションを、ネットワークがより効率的に扱えるようになると期待されている¹¹⁰。

予算・出資元: 本プロジェクトの予算情報は公開されていないが、ON.Lab と AT&T が出資していることがわかっている。

スケジュール: ON.Lab と AT&T は 2015 年 1 月に CORD ビジョンを策定し、同年 6 月に概念実証を行った。両者は試験展開を 2016 年に、本格展開を 2016 年末、または 2017 年初めに予定している¹¹¹。

C. マサチューセッツ大学アマースト校

プロジェクト名: 協調的環境適応センシングのための超高速大容量通信 (Ultra-High Speed Bandwidth for Collaborative Adaptive Sensing of the Environment)

参加機関: マサチューセッツ大学アマースト校

背景・概要: マサチューセッツ大学アマースト校は 2003 年に、強調的大気適応センシング・センタ (Center for Collaborative Adaptive Sensing of the Atmosphere: CASA) を設立した。CASA は、大学と産業界の研究者が協力し、天気予報と偵察機に使用されるレーダを配置・展開するための新たなアプローチの開発と実証に取り組んでおり、NSF からの助成金も得ている。産業界からは、軍需製品メーカーの米 Raytheon、天気予報関連機材・サービスを販売する米 EWR Weather Radar、気象観測機器・ソフトウェアを製造している米 Viasala、アンテナ・システムの開発を手掛ける米 First RF といった、レーダおよび天気予報分野の企業がパートナーとして CASA に参加しているが、SDN ベンダや通信サービス事業者による参加はまだない¹¹²。

従来のレーダ・ネットワークは、全米で展開される少数の超大型レーダによって構成されているが、大型レーダの場合、地球が球体であることから、遠く離れたところから地球表面に近接する部分の状況を検出することは難しく、精度の面で問題があった。一方 CASA は、近接エリアにおいて、より正確な読み取りが可能な小型レーダを大量に使う方法を提案し、研究を進めている。これらの小型レーダは精度に優れ、15 分後の天候を予想する「Nowcast」と呼ばれる新しいタイプの天気予報に採用されている。高精度で即時性もある予報は、竜巻などの悪天候の発見に役立つと期待されている。また、レーダの高密度ネットワークは、無人機 (unmanned aerial vehicle: UAV) の追跡に有用と考えられている¹¹³。

¹¹⁰ ON.Lab, “CORD: Central Office Re-architected as a Data Center,” URL: <http://SDxCentral.com/news/cord-onos-att/2015/06/>
<https://www.sdxcentral.com/articles/news/cord-onos-att/2015/06/>
<https://www.sdxcentral.com/articles/news/cord-onos-att/2015/06/>
<https://www.sdxcentral.com/articles/news/cord-onos-att/2015/06/> (Slides 22 - 42)

¹¹² UMass, CASA – About, URL: http://www.casa.umass.edu/main/about_us/overview/
UMass, CASA – Industry Collaboration, URL: http://www.casa.umass.edu/main/casa-nsf/industrial_collaboration/current_members/

¹¹³ UMass, CASA – About, URL: http://www.casa.umass.edu/main/about_us/overview/
UMass, CASA – Industry Collaboration, URL: http://www.casa.umass.edu/main/casa-nsf/industrial_collaboration/current_members/

CASA が取り組むもう一つの技術的課題は、レーダ・データを転送するネットワークの改善である。インターネットのデータ転送能力には限界があり、それを補うため、通常レーダ・データはかなり圧縮されて伝送される。しかし、圧縮によって情報に損失が生じるため、天気予報と偵察機の運用精度が犠牲になることが指摘されており、改善が求められている¹¹⁴。

それに対し CASA は 2012 年から、SDN を導入し、エンド・ツー・エンドでネットワークを管理することにより、この問題を解決しようとしている。また、GENI テストベッドを利用し、CASA の分散型レーダ・ネットワークによって使用されるリソースごとに、仮想ネットワークとして「スライス」を構築し、センシング、コンピューテーション、ストレージといった特定の機能には、それぞれの機能のパフォーマンスが最大となるように最適化された専用スライスで実行することが検討されている¹¹⁵。

CASA はこれまで独自ネットワークの開発と展開に成功したが、研究成果の商業化にはまだ至っていない。CASA は現在、レーダ・データ転送ネットワークを SDX によって管理する可能性を検討しており、Internet2 のエクステンジ・ポイントであるジョージア州アトランタ市の Southern Crossroads (SoX)、イリノイ州シカゴ市の Starlight を利用し、レーダ・データを転送するマルチドメイン SDN を管理することを想定している。SDX の場合、気象災害発見のためのサービスの質と住民の安全を保証するために、例えば汎用目的の動画データよりも悪天候予報データの優先順位を上げるなど、ネットワーク・ポリシーを確実に実施することも可能になる。

予算と出資機関： CASA の年間予算 4,000 万ドルであるが、SDN 関連の研究向けに NSF から 2012 年 4 月~2014 年 3 月の期間で提供された助成金は 28 万 9,000 ドル程度である。同助成金は、NSF のコンピュータ・ネットワーク・システム局から付与された¹¹⁶。

スケジュール： CASA が SDN 研究を開始したのは 2012 年であり、具体的な活動については 2014 年から開始されている。

¹¹⁴ UMass, “Computer Researchers Help Lay Groundwork for White House US Ignite Initiative,” URL: <https://www.umass.edu/newsoffice/article/computer-researchers-help-lay-groundwork-white-house-us-ignite-initiative>

¹¹⁵ UMass, “Nowcasting: UMass/CASA Weather Radar Demonstration,” January 7, 2013, URL: http://www.euroview2011.com/fileadmin/content/euroview2011/slides/slides_distribution_zink.pdf (Slide 6)

¹¹⁶ NSF, “Award Abstract #1238485”: http://www.nsf.gov/awardsearch/showAward?AWD_ID=1238485

6.2 エッジ・コンピューティング

A. シカゴ大学とアルゴンヌ国立研究所

プロジェクト名: シカゴ・アレー・オブ・シングス(Chicago Array of Things)

参加機関: シカゴ大学(University of Chicago)、DOE アルゴンヌ国立研究所、シカゴ市、Cisco、Microsoft、Intel、Motorola Solutions、Schneider Electric、Zebra Technologies、Qualcomm、シカゴ美術館付属美術大学(School of the Art Institute of Chicago)

背景・概要: シカゴ・アレー・オブ・シングス(Chicago Array of Things: AoT)とは、行政や研究者がシカゴ市内の状況をモニタするのに役立つ、様々なデータを収集、処理、転送するために、イリノイ州シカゴ全域で街路灯にノードを配置することを目指すプロジェクトであり、同様の試みとしては、全米初のプロジェクトと言われている。シカゴ市全域に、電力、インターネット、センサ、組み込み情報システム能力等の機能を擁するノードを 500 程度設置し、都市部の物理環境を持続的に計測し、新しい研究開発の基盤となる事が期待されている。

設置が検討されている 500 のノードには、気温、湿度、気圧、太陽光、振動、一酸化炭素、二酸化窒素、二酸化硫黄、オゾン、そして音をモニタ可能なセンサを搭載する予定である。将来はノードをアップグレードすることも計画されており、センサを追加したり、あるいは喘息患者向けの大気汚染警告など、市民への情報周知のために LED 照明を取り入れる事も検討されている。データは、有線イーサネット、Wi-Fi、またはセルラー・ネットワーク経由でシカゴ市のオープン・データ・システムであるシカゴ・データ・ポータル(Chicago Data Portal)へ転送され、市または第 3 者のアプリケーションによって、情報へのアクセスや処理が行われる。2015 年の GCTC の参加プロジェクトの一つにも名を連ねる¹¹⁷。

次の図は、AoT ノードと、ノードの道路設置予定図である。ノードから市民に情報を伝える方法として、ビジュアル・インディケータ照明(LED の予定)を使う方法と、市民のスマートフォンにノードから情報を配信する方法が検討されている。

¹¹⁷ Array of Things – FAQ, URL: <https://arrayofthings.github.io/faq.html>

図表 18 AoT ノードの技術計画と市内設置構想



出典: Postscapes¹¹⁸

AoT ノードを活用すれば、特定エリアの状況について、詳細に情報を収集できる。例えばシカゴ市は、大型トラックやバスが道路を損傷させている主な原因であると考えており、損傷を最小化する方法を模索している。道路を走行する大型車両情報を振動センサによって収集することにより、大型車両の市道への影響を軽減するために、道路整備スケジュールや迂回路を調整することが可能となる¹¹⁹。

また AoT ノードを通して大気汚染データを収集することで、市民に対し、汚染の比較的小さいウォーキング順路を提案することも可能であるほか、熱波に見舞われた場合には、健康リスクを引き起こす都市部のヒートアイランド現象を特定することも可能である。また、都市部で起きた洪水を検出したり、公共の安全のため、

¹¹⁸ “City Environmental Sensors: Array of Things”: <http://postscapes.com/city-environmental-sensors-array-of-things>

¹¹⁹ Chicago Magazine, “Chicago’s ‘Array of Things’ Takes Another Step Towards Reality,” September 17, 2015, URL: <http://www.chicagomag.com/city-life/September-2015/Chicagos-Array-of-Things-Takes-Another-Step-Towards-Reality/>

夜間は人気の多い場所を選んで歩きたいという歩行者へのアドバイスを提供したりなど、様々な活用方法が検討されている。一方で、AoT ノードは、Wi-Fi や Bluetooth の信号を検出することにより、特定の場所に人が何人いるかを調べる機能も擁しているが、無線端末を携行した人の人数しかわからないことや、またプライバシー侵害懸念もあることから、その機能は AoT ノードには盛り込まれなかった¹²⁰。

AoT ノードは、DOE のアルゴンヌ国立研究所が開発した、センサ・コンピューティング・コミュニケーション統合プラットフォームの「Waggle」を基盤としている。同研究所は、約 100 万ドルを投資して Waggle を開発し、AoT に提供した。Waggle には、エッジ・コンピューティングの概念が採用されており、限定的な初期処理を実行可能なオンボードコンピューティング機能が実装されている。例えば、AoT ノードによって音を集め、騒音モニタの一環として車のクラクションを検出する場合、集めた音の全てをクラウドに転送して処理する代わりに、オンボード処理機能によってクラクションを特定し、クラクションの時間と場所を記録し、クラクションのログだけをクラウドに転送することが可能である¹²¹。

AoT ノードで初期処理を実行することは、クラウドとの通信に必要な通信帯域を最小化できるというメリットがある。アルゴンヌ国立研究所の上級コンピュータ・サイエンティストである Pete Beckman 氏は、Waggle を基に AoT ノードの機能を開発した背景について、「収集したデータを単純に他に転送するだけのセンサは、データロガー (data logger)、またはデータ処理能力を持たない無用の IoT (Internet of Dumb Things) に成り下がってしまうという懸念があったため、それを避けたかった」と述べている¹²²。

AoT の産業界パートナーである Cisco、Microsoft、Intel、Motorola Solutions、Schneider Electric、Zebra Technologies、Qualcomm は、シカゴ大学やアルゴンヌ国立研究所に対し、それぞれの持つ専門知識やノウハウを提供したと言われているが、詳細情報については公開されていない。シカゴ市には、AoT に関心を持つ世界の都市から照会が寄せられており、AoT は今後、ノード仕様をソフトウェア開発プロジェクトのための共有ウェブサイトである「Github」で公開し、シカゴ以外の地域への普及を計画している¹²³。

予算・出資元: AoT に対しては、以下の組織がそれぞれ助成金や予算を提供している。

- NSF: 310 万ドル(このうち、150 万ドルについては、2015 年 6 月 15 日にコンピュータ・ネットワーク・システム局より付与されており、予定期限は 2017 年 5 月である)¹²⁴
- アルゴンヌ国立研究所: 15 万ドル
- シカゴ大学イノベーション基金 (Innovation Fund): 15 万ドル¹²⁵

¹²⁰ Array of Things – FAQ, URL: <https://arrayofthings.github.io/faq.html>

¹²¹ Governing, “Obama Places \$160 Million Bet on Smart Cities, Internet of Things,” September 16, 2015, URL: <http://www.govtech.com/Obama-Places-160-Million-Bet-on-Smart-Cities-Internet-of-Things.html>

¹²² RFID Journal, “Waggle: An IOT Platform by Scientists, for Scientists,” May 18, 2015, URL: <http://www.rfidjournal.com/articles/view?12823/2>

¹²³ UChicago News, “University of Chicago to Serve as Testbed for Array of Things Project,” July 13, 2015, URL: <http://news.uchicago.edu/article/2015/07/13/university-chicago-serve-test-bed-array-things-project>

Github – Array of Things, URL: <https://github.com/ArrayOfThings>

¹²⁴ Rob Mitchum, “National Science Foundation awards \$3.1 million to Array of Things project”, September 14, 2015: <http://news.uchicago.edu/article/2015/09/14/national-science-foundation-awards-31-million-array-things-project#sthash.BSb7hRgs.dpuf>

スケジュール: AoT の計画立案は 2013 年に開始され、2015 年 9 月に NSF から助成金が付与された。シカゴ市は、2017 年までに 500 の AoT ノードを設置することを計画している¹²⁶。

B. カーネギーメロン大学と Intel

プロジェクト名: GigaSight

参加機関: カーネギーメロン大学、Intel ラボ - ピッツバーグ、ゲント大学 (Ghent University: ベルギー)、アルト大学 (Aalto University: フィンランド)

背景・概要: インターネット経由でクラウドコンピューティング・センタとの間でやり取りされる動画データのトラフィックは、ネットワークに多大な負荷を与える可能性がある。エンド・ユーザが動画を撮影し、それをクラウドに保存し、クラウドで動画解析を行うアプリケーションを導入するたび、ネットワークには大きな負荷と混乱が生じる。動画解析アプリケーションの例としては、マーケティングや広告、道路障害物を検出する Telematics や、トラフィック管理や公共安全維持向けのスマートシティ・アプリケーション等が挙げられるが、これらのアプリケーションをよりスムーズに導入するためには、ネットワーク容量を超える動画データのトラフィックによってネットワークに負荷をかけないようにする必要がある。

カーネギーメロン大学、ペンシルバニア州ピッツバーグ市にある Intel ラボ - ピッツバーグ、フィンランドのアルト大学、そしてベルギーのゲント大学の研究者は連携し、ネットワークのエッジで動画を解析する新アーキテクチャ、「GigaSight」を開発してきた。GigaSight はハイブリッド・クラウド・アーキテクチャであり、「cloudlet」と呼ばれる小型処理システムにおいて動画の初期解析を実行する。

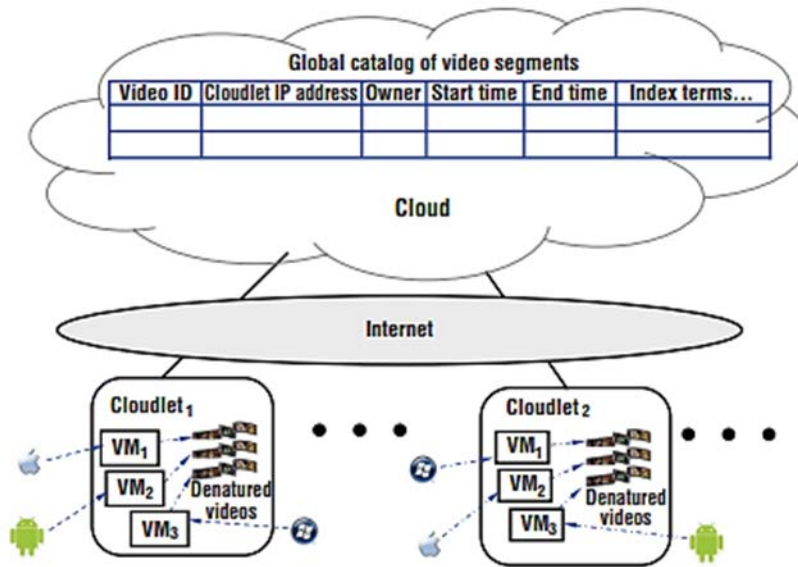
以下の図は、cloudlet に配置された仮想機械 (VM) によって動画データを処理する仕組みを示している。ユーザがモバイル機器等で動画撮影すると、動画データはまず cloudlet に送られる (図下部)。cloudlet では、動画データに含まれている物質や人間の特徴や情報が個別のタグに分類されるほか、動画データの保有者や動画を撮影した場所、撮影時間などのメタデータの分析も行われる。これらの処理が完了した段階で、タグとメタデータはクラウドに送付され、動画データの ID、cloudlet の IP アドレス、動画データの保有者、その他のタグ情報が整理され、クラウド上での動画の閲覧や検索が簡易化される (図上部)。cloudlet を用いれば、動画データのストレージの最適化が期待できるだけでなく、cloudlet における解析・処理の段階で、動画データ保有者のプライバシーを侵害する恐れのある部分が自動的に不鮮明化、もしくは除外されるため、動画データの保有者のプライバシーを保護する事も出来る。この機能は変性 [denaturing] と呼ばれる¹²⁷。

¹²⁵ UChicago News, "University of Chicago to Serve as Testbed for Array of Things Project," July 13, 2015, URL: <http://news.uchicago.edu/article/2015/07/13/university-chicago-serve-test-bed-array-things-project>

¹²⁶ City Environmental Sensors: Array of Things": <http://postscapes.com/city-environmental-sensors-array-of-things>

¹²⁷ Mahdev Satyanarayanan, et al., "Edge Analytics in the Internet of Things," April/June 2015, URL: <http://elijah.cs.cmu.edu/DOCS/satya-edge2015.pdf>

図表 19 GigaSight アーキテクチャ



出典： GigaSight プロジェクト¹²⁸

動画の撮影者が動画を編集しようとする場合でも、初期段階では動画データは cloudlet に保留され、cloudlet で解析や処理が行われるため、ネットワークへの負荷が軽減でき、また道路障害物の検出などの一刻を争う処理のスピードが早まることも期待できる。例えば、道路障害物を検出する車載カメラから収集した動画を GigaSight によって処理する場合、車両と、最寄りの携帯電話基地局に設置された cloudlet によって動画を処理し、道路に障害物があるかどうかを判断する。こうすることで、カメラが撮影した全動画を継続的にクラウドに送るのではなく、道路障害物が映った動画など、特定のデータだけをクラウドに転送することができ、ネットワークへの負担が軽減される¹²⁹。

予算と出資元： GigaSight プロジェクトに対しては、NSF と Intel、DOD 等が出資を行っていると思われるが、Intel と DOD からの出資額についての情報は公開情報から見つける事は出来なかった¹³⁰。NSF からの出資については、以下の様な助成金プログラムから、少なくとも 127 万ドルが投入されていることが分かっている。

- NSF 助成金 #0833882 (NSF のコンピュータ・ネットワーク・システム局がカーネギーメロン大学に対し、2008 年 8 月~2013 年 8 月の期間で 48.6 万ドル規模を提供¹³¹)

¹²⁸ Mahdev Satyanarayanan, et al., "Edge Analytics in the Internet of Things," April/June 2015, URL: <http://elijah.cs.cmu.edu/DOCS/satya-edge2015.pdf>

¹²⁹ Mahdev Satyanarayanan, et al., "Edge Analytics in the Internet of Things," April/June 2015, URL: <http://elijah.cs.cmu.edu/DOCS/satya-edge2015.pdf>

¹³⁰ Carnegie Mellon University の Software Engineering Institute は、連邦政府資金によって運営される研究開発センターである。DOD が資金を提供し、ソフトウェアの研究開発を手掛けている。詳細は次を参照のこと：
<http://www.sei.cmu.edu/about/>

¹³¹ "Award Abstract # #0833882": http://www.nsf.gov/awardsearch/showAward?AWD_ID=0833882

- NSF 助成金 #1065336 (NSF の情報インテリジェンス・システム局 [IIS] がカーネギーメロン大学に対し、2011 年 8 月 30 日~2015 年 8 月 31 日の期間で 127 万ドル規模を提供¹³²⁾)

スケジュール: GigaSight の研究は 2011 年に開始され、現在も続いている。同プロジェクトの今後の予定は、公開情報上では見受けられない。

7 その他の関連トピックについて

ここでは、SDN や NFV、エッジ・コンピューティングに関連するトピックについての、追加情報をまとめる。

7.1 トランスポート・ネットワークのホワイトボックス化

トランスポート・ネットワークへの SDN 導入とホワイトボックス化に注力している主要な米国組織は、Open Networking Foundation である。同財団が 2015 年 12 月に開催したウェブ会議では、同財団傘下のオープン・トランスポート・ワーキンググループ (Open Transport Working Group) が実施している、光ネットワークやトランスポート・ネットワークに SDN を導入する取り組みについての議論が行われたほか、トランスポート SDN の必要性やその課題について議論が行われた。同会議では、以下の様な理由から、トランスポート・ネットワークが SDN を必要としていると指摘された¹³³⁾。

- 光ネットワークやトランスポート・ネットワークの運用には、多数のマニュアルでの処理が必要であるほか、サービスの提供にまで比較的長い時間が掛かるため、運用が困難で、費用も嵩む。
- SDN と仮想化は、光トランスポート・ネットワークの管制を容易にし、管制に柔軟性をもたらし、また再プログラミングをとして迅速に新しいサービスを適応させることに役立つため。
- COTS (汎用) ハードウェアと仮想化ソフトウェアへと、コントロールと管理プレーンを移行する事により、光スイッチ (optical switch) に係る費用を削減できる。
- 中央集約的なネットワーク管理とコントロールによって、ネットワーク運用の効率化と高速化を実現する。

一方で、Open Networking Foundation のオープン・トランスポート・ワーキンググループによれば、トランスポート・ネットワークに SDN アーキテクチャを導入する際には、以下の様な課題がある¹³⁴⁾。

¹³² NSF, "Award Abstract #1065336": http://nsf.gov/awardsearch/showAward?AWD_ID=1065336c

¹³³ Open Networking Foundation, "SDM Hottest Topics: A Panel Discussion", URL: <https://www.sdxcentral.com/wp-content/uploads/2015/12/ONF-SDN-NFV-Optical-Networks-Webinar-Slides.pdf>

¹³⁴ Open Networking Foundation, "SDM Hottest Topics: A Panel Discussion", URL: <https://www.sdxcentral.com/wp-content/uploads/2015/12/ONF-SDN-NFV-Optical-Networks-Webinar-Slides.pdf>

図表 20 トランスポートネットワークへの SDN 導入の課題

・マルチ・ドメインの管制	・既存のトランスポート・モデルとの統合
・マルチ・レイヤの管制	・移行経路の設定
・個別のネットワーク管理プロトコル間の連携 (OpenFlow と EMS/NMS のコントロール間の連携)	・標準化団体 (SDO) の取り組みやオープンソース・ソフトウェアの統合・活用
・オペレーションの簡易化	・サービス提供の差別化
・ネットワークの安全性	・災害時などへの対応、迅速な復旧

出典： Open Networking Foundation¹³⁵

A. Open Networking Foundation と Optical Internatworking Forum の取り組み

Open Networking Foundation のオープントランスポート・ワーキンググループは、キャリア・トランスポートネットワーク向けの SDN と OpenFlow 標準に基づいたコントロール・ケイパビリティの開発を進めており、Ciena、Verizon、Huawei、NEC などのマイクロ波回路ベンダ関係者が、グループの代表と副代表を務めている。また、スペインの大手通信事業者 Telefonía が支援を行っているほか、Optical Internatworking Forum (OIF) のキャリア・ワーキング・グループ (Carrier working Group) とも連携している。以前はオプティカル・トランスポート・ワーキンググループ (Optical Transport WG) という名称を使っていたが、グループにワイヤレス・トランスポートネットワークを運用する事業者が参加したことで、現在のグループ名に変更された。

同ワーキンググループは、これまでにトランスポート SDN の要件やユースケースの策定、光トランスポートネットワーク向けの OpenFlow エクステンションの開発、クラウドサービス向けのトランスポート SDN による周波数帯域提供に係る実証実験を実施した (2014 年秋に実施したもので、実験場所は Verizon の研究所)。現在は、トランスポート API やインフォメーション・モデル、基礎的なマイクロ波エクステションを搭載した ONOS コントローラ基盤の開発を進めており、ホワイトペーパーも発表している。トランスポート SDN において、OpenFlow はサウスバウンド・インターフェースを標準化し、簡易なモデル上で、複数レイヤのコントロールを可能とする。またオープントランスポート・ワーキンググループでは、ホワイトボックスをの活用を前提として開発を行っている¹³⁶。

同ワーキンググループは、2016 年秋にも OIF と合同の実証実験を予定しており、同実験では、ネットワークの過密状態によって引き起こされるトランスポート接続の構築 (congestion-triggered transport connection setup) や、SDN に対応した NFV の導入実験等、実践的なシナリオの検討が行われる予定で

¹³⁵ Open Networking Foundation, "SDM Hottest Topics: A Panel Discussion", URL: <https://www.sdxcentral.com/wp-content/uploads/2015/12/ONF-SDN-NFV-Optical-Networks-Webinar-Slides.pdf>

¹³⁶ Open Networking Foundation, "SDM Hottest Topics: A Panel Discussion", URL: <https://www.sdxcentral.com/wp-content/uploads/2015/12/ONF-SDN-NFV-Optical-Networks-Webinar-Slides.pdf>

Roy Chua, "ONF Webinar Q&A + Video: Solving Interoperability & Operations Issues — The Guide to SDN for Optical Networks", December 11, 2015, URL: <https://www.sdxcentral.com/articles/featured/optical-networks-onf-webinar-qa/2015/12/>

ある。具体的な実験内容については、2016年4月に確定予定の参加者の意見も取り入れてから決める予定であり、同年夏に最終化される¹³⁷。

B. Vello Systems 主導の OSO の取り組み

カリフォルニア州メンローパーク市に拠点を構える Vello Systems は 2014 年 3 月、オープンソース・オプティカル・フォーラム (Open Source Optical: OSO) を創設した。同フォーラムには、光通信システムのベンダ、ソフトウェア開発企業、チャンネル・パートナー、エンドユーザ等の各分野の代表者が参加しており、標準に基づき、ベンダ間での相互運用が可能で使いやすく、且つエネルギー効率の良い光ネットワークング技術を開発し、データセンタやクラウドへの導入を目指している。特に、オープンソースの光ソリューションの開発がフォーラムの柱となっており、米国に本拠地を置く企業の CoAdna、CrossFiber、O-Net、Pacnet の他、中国の Accelinku、香港の Pacnet、イスラエルの PacketLight 等も参加している¹³⁸。

OSO のメンバーは、OpenFlow コントローラやアプリケーションに適応する OSO 独自のソフトウェアを開発する予定で、一部のメンバーは完成と共に、それぞれの既存の光通信システムにこのソフトウェアの導入を検討している。他のメンバーは、「Native OpenFlow」と呼ばれる、エンタープライズ向けの 10G/40G/100G 1RU の光通信システムを開発し、新たなソリューションとして市場に売り出すことを考えている。最終的に、OpenFlow Version 1.4 をサポートするソフトウェアソリューションであれば、OSO の光ソリューションの導入が可能なる様に環境設定を行う予定である。また Vello は別途、他の OpenFlow ネットワークコントローラに統合可能な、オプティカル・エクステンション (optical extension) の開発を進める予定である¹³⁹。

Vello は Open Networking Foundation を通して、OpenFlow Version 1.4 の開発に携わっており、OSO が開発するシステムと OpenFlow との互換性向上に力を入れており、OSO のシステムと OpenFlow 基盤のイーサネット・スイッチを一緒に設置し、現代の複雑な光システムの管理が一つの画面で行えるような環境構築を目指している。Vello の代表を務める Karl May 氏は、OSO の枠組みを通して、ハードウェアとソフトウェアのイノベーション・サイクルを分離し、それぞれのベンダが個々の分野で最大限の開発ができるようにすることが最大の目的だとしている¹⁴⁰。

7.2 ホワイトボックス・スイッチ市場動向

ソフトウェアを含まない、ODM ベンダ製のネットワーク・スイッチであるホワイトボックス・スイッチは、ソフトウェアとハードウェアが統合されて販売されている従来のスイッチとは異なり、ユーザに対し、ソフトウェアの選択や開発の自由を与えるものとして注目されている。「ホワイトボックス」の概念自体は、1980～1990 年代

¹³⁷ Roy Chua, "ONF Webinar Q&A + Video: Solving Interoperability & Operations Issues — The Guide to SDN for Optical Networks", December 11, 2015, URL: <https://www.sdxcentral.com/articles/featured/optical-networks-onf-webinar-qa/2015/12/>

¹³⁸ "Vello Starts Open Source Optical Forum", March 10, 2014, URL: <http://www.lightreading.com/optical/packet-optical/vello-starts-open-source-optical-forum/d/d-id/708156>

¹³⁹ "Vello Starts Open Source Optical Forum", March 10, 2014, URL: <http://www.lightreading.com/optical/packet-optical/vello-starts-open-source-optical-forum/d/d-id/708156>

¹⁴⁰ "Vello Starts Open Source Optical Forum", March 10, 2014, URL: <http://www.lightreading.com/optical/packet-optical/vello-starts-open-source-optical-forum/d/d-id/708156>

に、中小 ODM ベンダが開発したデスクトップ型コンピュータを指すために生まれたが、その後 SDN 標準の登場と共に、ホワイトボックス・スイッチが台頭した。ソフトウェアを含まないホワイトボックス・スイッチにとっては、オープンソース・ソフトウェアとの相性も良く、またフォワーディング機能の汎用化とコスト減を目指す SDN や、再プログラミング可能なデータ・パスを構築して多様なネットワーク要素の迅速な再構成を可能とする NFV との互換性も高いと言われている¹⁴¹。

現在、ホワイトボックス・スイッチは、主にクラウドサービスプロバイダや通信キャリア等によって利用されていると考えられ、スイッチ市場全体に占める割合も年々増加傾向にある。IT 専門コンサル企業 Gartner の調査によれば、2014 年時点では Cisco がイーサネット・スイッチやルータ市場において 5 割以上の市場シェアを占めているが（これは市場シェア 2 位以下の 5 つのベンダの合計シェアの 2 倍以上にあたる）、ホワイトボックス・スイッチの市場シェアも近年急速に伸びており、2013 年時点では市場の 3.8% を占めるまでとなった。なお以下の図は、Gartner と同様の市場調査結果を提示している Dell' Oro Group の資料を基に作成した、イーサネット・スイッチの 2014 年売り上げに占める、各ベンダの市場シェアを示したものである¹⁴²。

図表 21 イーサネット・スイッチ市場売り上げ全体に占める各ベンダのシェアランキング(2014 年)

ベンダ	市場シェア
Cisco	61%
HP	11%
Huawei	4%以下
Juniper	(詳細シェア不明)
ホワイトボックス・スイッチ	(詳細シェア不明)
Arista	(詳細シェア不明)
Dell	(詳細シェア不明)

出典： Dell' Oro Group の資料を基に作成¹⁴³

Gartner は、2018 年までにインストールされる予定の約 1,800 万ポートのうち、10% (180 万ポート) はホワイトボックス・スイッチが占めるようになるだろうと推測しており、これは Brocade 製や Arista 製のポートのシェアよりも規模が大きいほか、Juniper 製の 10 ギガビットポートの市場シェアと同規模である¹⁴⁴。

またデータセンタ向けのスイッチやサーバ、ストレージ・ネットワーク等の市場分析を専門とする米 Crehan Research も同様の分析を示している。クラウドデータセンタ向けイーサネットポート市場は、2012 年時点は 400 万ポート規模であったが、2017 年までに 1,200 万ポートにまで増える予定である。これに伴い、ホワイ

¹⁴¹ Bernard Cole, "The White-Boxing of Software-Defined Networking", June 23, 2015, URL: http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1326942

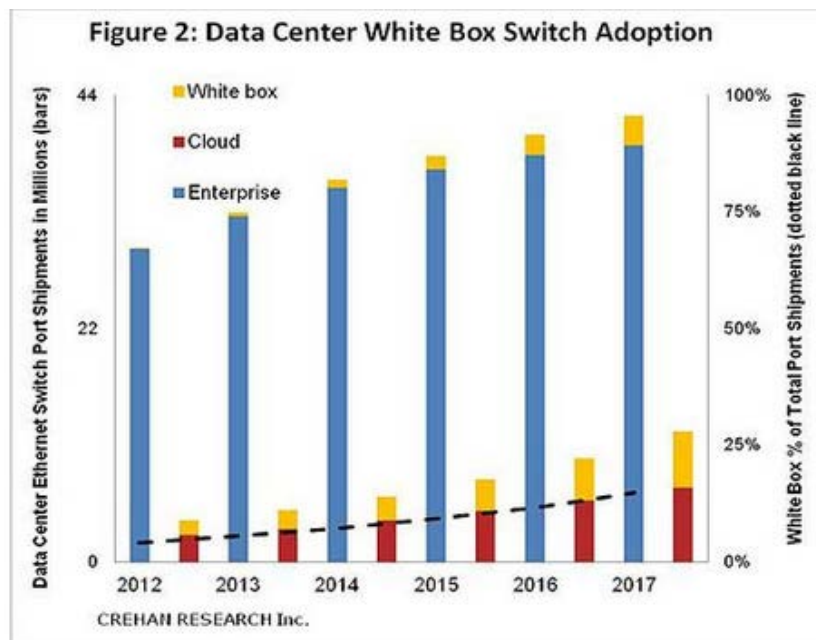
¹⁴²¹⁴² Andrew Lerner, "White-Box Switching Market Share", September 2, 2014, URL: <http://blogs.gartner.com/andrew-lerner/2014/09/02/hellowwhitebox/>

¹⁴³ Dell'Oro Group, "SDN and the Cloud: Will They Revolutionize Ethernet Markets?" April 2015, URL: http://www.ethernetsummit.com/English/Collaterals/Proceedings/2015/20150416_Keynote6_Weckel.pdf

¹⁴⁴ Andrew Lerner, "White-Box Switching Market Share", September 2, 2014, URL: <http://blogs.gartner.com/andrew-lerner/2014/09/02/hellowwhitebox/>

トボックス・スイッチのシェア増加も見込まれており、2017年までにシェアは32%まで成長し、およそ500万ポートがホワイトボックス・スイッチとなる見込みである(下図の赤棒グラフ参照)¹⁴⁵。

図表 22 データセンタへのホワイトボックス・スイッチの導入変化予測



出典: Crehan Research¹⁴⁶

一方、クラウドサービスプロバイダ以外の企業に関しては、各企業がプロプライエタリ・スイッチの製造ベンダとより緊密な関係にある場合が多いため(多くの企業が、既存のスイッチベンダから包括的なソリューションやテクニカル・サポートを受けているため)、クラウドデータセンタのホワイトボックス・スイッチ導入と比べると、ゆっくりとした導入になると考えられるが、2017年に向けて導入は確実に増えて行くと思われる。Crehan Researchは、クラウドデータセンタとその他企業を合わせた場合、2014年におけるホワイトボックス・スイッチの導入状況は300万ポート(全体のおよそ7%)と見ているが、これは2017年までに800万ポート(15%)にまで増えると予測している(上図の青棒グラフと赤棒グラフ参照)¹⁴⁷。

米調査会社IHSの2014年の調査でも、同年第2四半期における、世界全体のデータセンタ向けイーサネット・スイッチ全体の売り上げ(約21億ドル)に占める、ホワイトボックス・スイッチの売り上げは、およそ6%

¹⁴⁵ Bernard Cole, "The White-Boxing of Software-Defined Networking", June 23, 2015, URL: http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1326942

¹⁴⁶ Bernard Cole, "The White-Boxing of Software-Defined Networking", June 23, 2015, URL: http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1326942

¹⁴⁷ Steve Garrison, "The rise of white-box switch", November 20, 2013, URL: <http://www.infoworld.com/article/2609937/sdn/the-rise-of-white-box-switches.html?page=2>

(1.2 億ドル)であり、これは同年第 1 四半期よりも 14%、前年比で 95%増えた事を示す。また、ホワイトボックス・スイッチのポート増加数で見ると、第 1 四半期に比べ、12%増加したことになる¹⁴⁸。

一方で、2015 年～2016 年にかけて、多くのクラウドサービスプロバイダが、10GbE SerDes 基盤から、25GbE SerDes 基盤シリコンへと移行を進める関係で、100 ギガビット・イーサネット用のポートの導入が本格化している。こういった移行の中で、プロプライエタリ・スイッチの需要が伸びている一方で、ホワイトボックス・スイッチへの需要は停滞傾向にある。しかし IHS は、2015 年末～2016 年初頭にかけて 25/100GbE ソリューションの導入が安定次第、再びホワイトボックス・スイッチの需要が増えるとしている¹⁴⁹。

マーケティング・コンサル企業の IDC でモバイル・セキュリティ・インフラ技術を専門とする Abhi Dugar 氏も、オープンソース・ソフトウェアや SDN、NFV 等のトレンドを踏まえると、ホワイトボックス・スイッチの市場は、今後も成長を見せるだろうと分析している。これまでは、ハードウェアとソフトウェアをパッケージ化して、プロプライエタリ・ソリューションとして提供してきた Arista や Brocade、Cisco、Jupiter 等が市場を占有してきたが、ホワイトボックス・スイッチの台頭で市場の競争が激化し、今後の市場の方向性は、Facebook や Google、Amazon などのユーザ側の決定に左右されると見られる。これらの企業は、よりスピーディでフレキシブル、且つ安価なシステムを求めている¹⁵⁰。

7.3 ソフトウェアスイッチ市場動向

イギリスの市場調査会社である TechNavio が 2012 年に実施した調査によれば、ソフトウェアスイッチの世界市場は、2010 年頃まで停滞していたが、2011 年以降、モバイルソフトスイッチの需要の高まりや、ベンダーロックインを回避する市場傾向もあり、2011～2015 年で 4%程度成長すると分析されている。一方で同社は、VoIP 電話のコストが高額であることは、逆に需要を縮小させる要素になりかねないとの見解を示した¹⁵¹。

また米 IHS が 2015 年に実施した調査によれば、2015 年第 2 四半期における VoIP と IMS 機器の市場売り上げは、前年比で 46%成長し、13 億ドル規模となった。これには、ソフトスイッチの他、トランク・メディア・ゲートウェイ(Trunk media gateways)、SBC(session border controllers)、メディアサーバ、ボイス・アプリケーション・サーバ、固定・モバイル IMS コアネットワーク機器等も含まれており、特に SBC の需要の伸び

¹⁴⁸ Clifford Grossner, "White box switching having a big impact on data center networking, up 95% from a year ago", September 29, 2014, URL: <http://www.infonetics.com/pr/2014/2Q14-Data-Center-Network-Equipment-Market-Highlights.asp>

¹⁴⁹ Stephen Hardy, "White box switch sales pause", September 22, 2015, URL:

<http://www.lightwaveonline.com/articles/2015/09/white-box-switch-sales-pause.html>

¹⁵⁰ Bernard Cole, "The White-Boxing of Software-Defined Networking", June 23, 2015, URL:

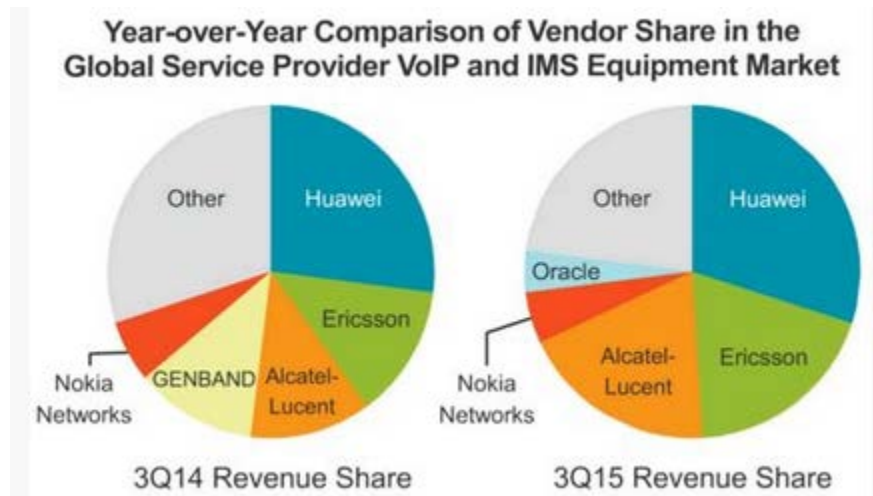
http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1326942

¹⁵¹ "Research and Markets: Global Softswitch Market 2011-2015 Report Discusses That the Main Challenge Faced By the Market Is the High Cost of VoIP Phones", November 15, 2012, URL:

<http://www.businesswire.com/news/home/20121115006223/en/Research-Markets-Global-Softswitch-Market-2011-2015-Report>

が目立った¹⁵²。また同社による2015年第3四半期の調査においては、同市場の規模は14億ドルに到達し、各社のシェアは以下の図の右の様に、HuaweiとEricsson、Alcatel-Lucentが市場の7割程度を分け合う形となっている。ただし第3四半期では、前年と比べてソフトスイッチとHSS(home subscriber server)の成長が鈍化したと分析されている¹⁵³。

図表 23 ソフトスイッチを含む VoIP と IMS 機器の市場状況(2014 年と 2015 年の第 3 四半期比較)



出典: IHS¹⁵⁴

7.4 ROADM のホワイトボックス化

米国でROADMのホワイトボックス化に取り組んでいる主な団体には、ON.LabやAT&Tが挙げられる。同2団体は2016年1月、IEEEに「メトロネットワークの再考(Rethinking Metro Networks)」と題した論文を寄稿した。同論文では、前述のCORDプロジェクトを基盤に、メトロネットワークを新たにデザインする事を提案しており、その結果、(1)ONOSベースのSDNコントロールによって、光パケットネットワークを作り出すこと、(2)メトロサービスのイノベーションを推進すること、(3)ホワイトボックスとしてのROADMを構築することの3つの可能性を提示している¹⁵⁵。

ROADMのホワイトボックス化について、同論文は、ネットワークングハードウェアを垂直に統合する事は、ベンダ・ロックインに繋がるものであるが、ON.LabとAT&Tはベンダ・ロックインを避けてオープンソースを利用し、尚且つ再プログラミングが可能で、人間の介入無しで問題を発見・修復するような自動ネットワーク

¹⁵² Diane Myers, "Service Provider VoIP and IMS Market Soars 46 Percent YoY in 2nd Quarter", August 18, 2015, URL: <http://www.infonetics.com/pr/2015/2Q15-Service-Provider-VoIP-IMS.asp>

¹⁵³ Peter Bernstein, "VoLTE Spending Lifts IMS Market in Third Quarter 2015", November 20, 2015, URL: <http://www.telecomsignaling.com/topics/telecomsignaling/articles/413324-volte-spending-lifts-ims-market-third-quarter-2015.htm>

¹⁵⁴ Peter Bernstein, "VoLTE Spending Lifts IMS Market in Third Quarter 2015", November 20, 2015, URL: <http://www.telecomsignaling.com/topics/telecomsignaling/articles/413324-volte-spending-lifts-ims-market-third-quarter-2015.htm>

¹⁵⁵ Marc De Leenheer and Tom Tofigh, "Rethinking Metro Networks," January 2016, URL: <http://sdn.ieee.org/newsletter/january-2016/rethinking-metro-networks>

の構築を目指していると主張。この目標を達成するためには、機能ブロック(functional block)に光機器を分解し、ベンダや技術に縛られない、ジェネリック・インターフェースに作り替える必要があるとして、従来のROADMのデザインを分解し、個別のトランスポンダやスイッチ・ファブリックとマニュアルで相互接続する事などを提案している¹⁵⁶。

7.5 関連研究開発におけるオープンソース・ソフトウェアの利用

今回の調査では、米国におけるSDNやクラウドネットワーク関連で、助成金が投入されている研究開発プロジェクトにおけるオープンソース・ソフトウェアやOpenStackの利用状況についての詳細は分からなかったが、インタビューを行ったNSFの関係者によれば、NSFは、自組織が助成金を提供している研究開発プロジェクトが、どの程度オープンソース・ソフトウェアを利用しているのか、また利用しているとすれば、どのソフトウェアなのか等のデータを収集していないという。しかし、NSFから助成金を付与されているほとんどの研究者が、オープンソース・ソフトウェアやオープンソース・ハードウェアを活用しているとのことで、オープンソースは、ツールの再利用と研究者間の共同研究を促進するので、研究者の間ではとても役立っていると同氏は語った¹⁵⁷。

実際に、オープンソース・ソフトウェアを基に、SDNやクラウドネットワーク関係の新技术やテストベッドを構築している研究開発プロジェクトが、NSFから助成金を得ているケースは公開情報からも複数確認できる。例えば、テキサス大学サンアントニオ校やシカゴ大学などの5つの研究機関は、2015年9月にNSFから1,000万ドルの助成金を獲得し、クラウドコンピューティング・テストベッド「Chameleon」の開発を始めた。Chameleonは、650のクラウドノードと、5つのペタバイト・ストレージによって構成される。同テストベッドの開発の中心を担うテキサス大学サンアントニオ校のクラウド・ビッグデータ研究所は、オープンソース・ハードウェアや、Open Compute、OpenStack、SDNなどのクラウド・ビッグデータ技術を通して、国際的なコンピューティングプラットフォームの改善に取り組んでおり、産業界からも手厚い支援を受けている¹⁵⁸

¹⁵⁶ Marc De Leenheer and Tom Tofigh, "Rethinking Metro Networks," January 2016, URL: <http://sdn.ieee.org/newsletter/january-2016/rethinking-metro-networks>

¹⁵⁷ NSFの関係者へのインタビュー調査に基づく情報。

¹⁵⁸ Kris Rodriguez, "USTA partners on \$10 M NSF grant to create cloud computing testbed", September 18, 2014, URL: <http://www.utsa.edu/today/2014/09/chameleon.html>