

エッジコンピューティングにおける ネットワーク要件に関する一考察

岡田 和也^{1,a)} 阿部 博^{2,b)}

概要：エッジコンピューティングは、端末に論理的・物理的に近いネットワークの縁に計算資源を設置し、低遅延で大容量のサービスを実現する。また、通信事業者の視点からは、従来のように外部の事業者やクラウドとの通信をエッジで担うことにより、通信容量の逼迫回避といった効果が期待されている。エッジコンピューティングの用途はコンテンツ配信、自動運転など多岐に渡り、様々な研究開発、事例検証が行われている。そのため、エッジコンピューティングを提供するネットワークは、許容される遅延や帯域が異なる各種サービス、アプリケーションに応じた制御が求められる。本論文では、各種エッジコンピューティングの用途、通信要件を整理する。また、既存の経路制御技術等を組み合わせて、要件を満たす制御が可能か机上検討を行い考察する。

An Analysis of Network Requirements on Edge Computing

KAZUYA OKADA^{1,a)} HIROSHI ABE^{2,b)}

1. はじめに

ネットワークの利用者・端末に対してより大容量で低遅延なサービスを提供する技術として、エッジコンピューティングが注目されている。エッジコンピューティングは、Multi-access Edge Computing の略から MEC とも呼ばれている。図 1 は、既存のクラウドコンピューティング等によるコンテンツ配信やサービス提供形態とエッジコンピューティングを比較したものである。従来のクラウドコンピューティングは、インターネット側に設置されたクラウド環境 (IaaS, PaaS, SaaS など) からサービスを提供していた。そのため、サービスを利用する端末はインターネットサービスプロバイダ (ISP) などの通信網を介してクラウドに設置されたサービスと通信を行うため、接続している通信網とクラウド事業者の論理的・物理的な距離に応じた遅延が生じる。これに対して、エッジコンピューティングでは、端末が接続している通信網内に設置されたサ-

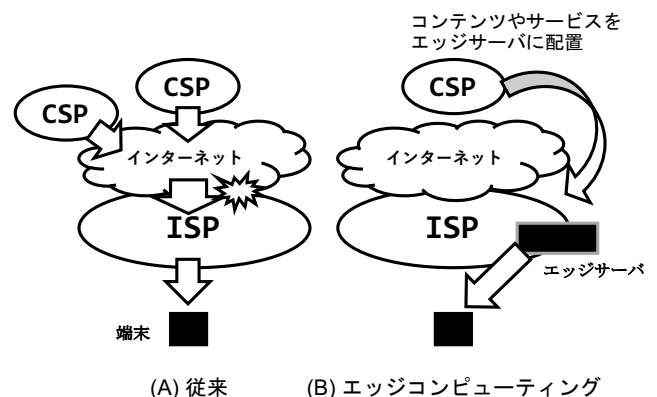


図 1 クラウドとエッジコンピューティングの比較

Fig. 1 Cloud Computing vs Edge Computing

バからサービスを提供することで、クラウドコンピューティングよりも低遅延で大容量なサービスを可能にする。

エッジコンピューティングの低遅延・大容量通信の特性を生かした様々なサービスが検討されている。コンテンツ配信の用途では、エッジに設置されたコンテンツ配信サーバもしくはキャッシュサーバから大容量の動画データ等を配信し、現在よりも高速に大容量なコンテンツを利用者に

¹ 東京大学 情報基盤センター 情報メディア教育研究部門

² トヨタ自動車株式会社

^{a)} okada@ecc.u-tokyo.ac.jp

^{b)} hiroshi_abe_af@mail.toyota.co.jp

配信する活用が検討されている。また、4K/8K 動画コンテンツはデータ容量が大きく、クラウドなどに設置されたコンテンツ事業者などからの配信では、配信経路上のネットワーク帯域を圧迫してしまう。エッジコンピューティングにより網内のサーバから配信できれば、コンテンツ事業者などの外部組織から流入するトラフィック量を大幅に削減できる。Augmented Reality (AR) / Virtual Reality (VR) では、端末の場所に応じた AR/VR コンテンツをリアルタイムで端末に配信する活用が検討されている。他にもコネクテッド自動車、オンラインゲームの反応性の向上などが期待されている。

現在、エッジコンピューティング技術は様々なユースケース毎に研究開発が進んでいる。また、エッジコンピューティングの有効性を確認するための概念実証 (Proof of Concept: PoC) も各国で実施されている。エッジコンピューティングの標準化は、欧州の標準化団体である欧州電気通信標準化機構 (European Telecommunications Standards Institute:ETSI) の Multi-access Edge Computing (MEC) Industry Specification Group (ISG) [1] にて、アーキテクチャ、API などの標準化が行われている。エッジコンピューティングは、単一の新しい技術で実現されるわけではなく、クラウドコンピューティング、Software Defined Networking (SDN)/Network Function Virtualization (NFV) 技術、経路制御技術など様々な技術を組み合わせることで実現される。

本論文では、エッジコンピューティングの用途を整理し、それぞれの用途での許容遅延、帯域などの通信要件を整理する。要件の整理では、Third Generation Partnership Project (3GPP) などでの標準化文書などから要件を抽出する。その後、通信要件を実現するための経路制御方式について机上検討を行う。

第 2 節では、エッジコンピューティング技術の全体像と概要を説明する。第 3 節では、エッジコンピューティングの用途毎に通信要件を整理する。第 4 節では、各要件に対して通信網側でどのようにして満たすべきかを経路制御技術を活用したトラフィック誘導などを中心に議論する。

2. エッジコンピューティング技術

本節では、エッジコンピューティングについて技術の概要を述べる。そしてエッジコンピューティング実現に必要な技術について整理する。

2.1 エッジコンピューティングの概要

エッジコンピューティングは、従来クラウド等のインターネット側で提供されていたサービスを、利用者端末が接続している通信事業者などの網内にエッジサーバに配置し、利用者に提供する。これにより、クラウドからサービスを提供していた場合と比べて、大幅に通信遅延を削減できる。また、通信事業者の外部から流入トラフィックも削

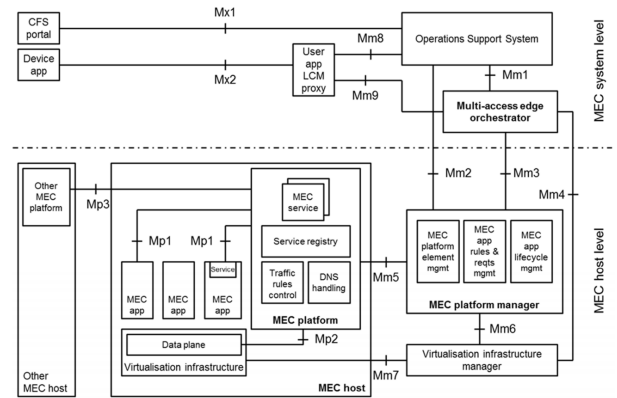


図 2 ETSI ISG MEC 参照アーキテクチャ

Fig. 2 A Reference Architecture for MEC defined in ETSI MEC ISG

減でき、通信網内の帯域逼迫を改善できる可能性がある。

エッジコンピューティングは、ETSI MEC ISG でアーキテクチャ、API などの標準化が行われている。図 2 は、ETSI MEC ISG [1] にて提案されている MEC の参照アーキテクチャである [2]。標準化が始まった当初は、移動体通信網での用途を想定して Mobile Edge Computing (MEC) として活動していた。現在は、移動体通信以外の固定網での利用など幅広い通信網を想定して、Multi-access Edge Computing (MEC) となっている。エッジコンピューティングの実装については、Linux Foundation の傘下にある LF Edge [3] などのオープンソースプロジェクトでフレームワークなどの実装や、関連する Open Source Software (OSS) プロジェクトへのコード提供・フィードバックなど行われている。

2.2 5G での活用

MEC は、第 5 世代移動通信システム (5G) での活用が期待されており、5G 関連技術の標準化を行っている 3GPP でも Rel17 での議論が始まっている。5G は、次世代の移動通信システムであり、2020 年から日本をはじめ世界各国の事業者で本サービスが開始される。3GPP, ITU-R/ITU-T をはじめ日本の第 5 世代モバイル推進フォーラム (5GMF)、米国の 5G Americas など様々な組織や団体が 5G に関する勧告案や白書などを発表している。5G では多岐に渡るサービスやアプリケーションをサポートするため、ITU-R の文献 [4] では、ユースケースとして、モバイルブロードバンドの拡張 (eMBB)、大規模なマシン型通信 (mIoT)、超高信頼低遅延通信 (URLLC) に大きく分類されている。また、5G を実現するためには、超高速データレート、超低遅延、省電力、高い規模拡張性、安定した接続性、セキュリティが鍵となる技術課題である [5]。特に、5G の要求項目の中で、超低遅延 (1ms 程度) は最も困難な技術課題の一つであると言える。

図 3 は、ETSI MEC ISG のホワイトペーパーで提案され

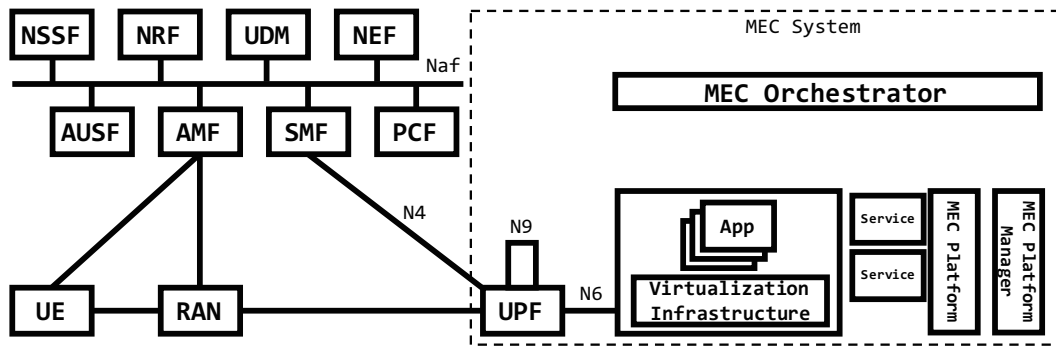


図 3 5G ネットワークにおける MEC 構成
Fig. 3 Integrated MEC deployment in 5G network

ている 5G ネットワークにおける MEC の実現形式を示した物である [6]。図中の左半分が 5G システムを構成する制御プレーン (C-Plane) とユーザプレーン (U-Plane) であり、右半分の点線で囲われた部分が MEC システムになる。UE (User Equipment の略) と記された部分が端末に相当する。MEC システムがない 5G の場合、端末からの通信は RAN を経由して UPF から通信事業者のバックボーンネットワークを経由して転送される。MEC では、UPF の横に N6 インターフェイスを介して MEC アプリケーションを動かす仮想基盤 (Virtualization Infrastructure) を設置し、MEC システム内のアプリケーションで処理すべきトラフィックを誘導する。処理されたデータは、エッジから UE に返送されるため遅延を短くできる。

5G や既存の固定通信網においてエッジコンピューティングを実装する際に、ネットワークのどの部分にエッジコンピューティングの設備を展開するかが課題となる。特定の決まった場所ではなく、ネットワークの構成や、提供するサービスの種別、投資費用などの状況に応じて異なると考えられる。図 4 は、米国の大手通信事業者である AT&T が発行したエッジコンピューティングに関するホワイトペーパー [7] に記載されている移動体通信網における各所の推定遅延を図示した物である*1。端末からバックホールまでの間に企業や自宅内のネットワーク、基地局等のアクセス網、そして地域の局舎といった設備がある。各区間の推定遅延と規模（端末数、設置台数）をそれぞれ示しており、端末からバックホールまでの遅延は数ミリ秒から数十ミリ秒を要することがわかる。サービスを提供するエッジサーバは、各所に設置できる。遅延を最短にするには、端末に最も近い自宅・企業内ネットワークもしくは基地局に相当する箇所への設置が望ましい。しかし、遅延を短くできる一方で、エッジサーバの設置台数が多くなってしまう。加えて、端末に近い場所に設置するほど、一台のエッジサーバあたりで収容する端末数も少なくなり、設備費用に対して効率が低くなってしまう。

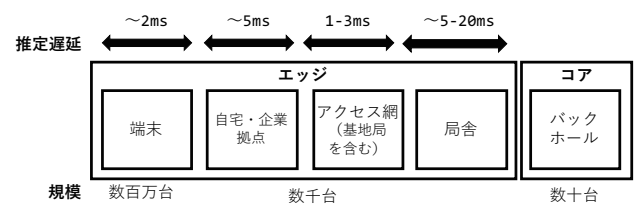


図 4 エッジコンピューティングの配置と推定遅延
Fig. 4 Estimated Latency on Edge Computing Placement

これまでに MEC 以外にも、Cloudlet [8]、Fog Computing [9] が提案・研究開発が行われている。Cloudlet 及び Fog Computing はインターネット全般を対象としているのに対し、MEC は 5G をベースとした技術として提案が行われている。

2.3 実現に必要な技術

エッジコンピューティングを実現するには、前述のように MEC システムとして構築するために様々な機能が必要となる。ETSI MEC の標準 [2] では、MEC のサービス要件として、以下の機能が必要と記されている。

- モバイルエッジサービス
- コネクティビティ
- ストレージ
- トラフィックルーティング
- DNS サポート
- 時刻提供

他にもエッジサービス用のアプリケーションをホスティングするための計算機基盤が必要となる。また、エッジサーバの設置箇所にも依存するが、数百から数千拠点のエッジサーバ群を管理する仕組みも必要である。複数のサーバを集約し運用するという点ではクラウド技術と類似する部分が多い。しかし、既存のクラウド環境とは異なり、エッジコンピューティングでは一箇所あたりの計算機資源が少なく且、地理的にも分散して配置される。このような大規模に分散した資源を統合し、管理・運用するための仕組みが必要不可欠である。

*1 実際の遅延は事業者の構成や規模に大きく依存する

エッジコンピューティングでは、エッジサーバで処理されるべき通信と、インターネットへと転送されるべき通信の二種類が混在する。そのため、通信網内で端末からのトラフィックをエッジサーバに転送すべきか否かを常時判断し、適切な転送先へと配送しなければならない。例えば5Gでのエッジコンピューティングであれば、図3中のUPFがトラフィック分類を行う箇所になる。

5Gなどの移動体通信網では、端末が固定されているわけではなく、スマートフォンのように利用者が携帯して移動しながら利用する。そのため、固定通信網のように端末が接続する（誘導される）エッジサーバが一定ではなく、端末の移動に伴い動的に接続先のエッジサーバが変わっていく。従って、移動に追従してサービス提供元であるエッジサーバを切り替える処理が必要になる。処理状態を保持しないサービス（例えば静的なウェブコンテンツの配信など）であれば、移動先のエッジサーバで移動前のサーバでの状態を引き継がなくて良い。一方で、AR/VR処理のようにエッジサーバでの処理状態を、端末が移動先で新しく接続したエッジサーバに引き継がなければならない場合もある。特にコネクテッドカーの用途では、移動速度が人の場合と比べて高速であるため、高速な移動に追従したサービスの提供が必要となる。

上記の通り、エッジコンピューティングの実現には、これまで培われてきた様々な技術を融合しなければならない。ここで述べた要件以外にも、セキュリティの確保なども必要である。

3. ネットワーク要件

本節では、エッジコンピューティングの用途からネットワークに対する要件を整理する。

3.1 エッジの用途と要件

3GPPでは、5Gにおいてシステムを利用するサービスに応じて、通信の優先度を制御するQuality of Service (QoS)が定義されている。表1は、3GPPのTS23.501 [10]にて規定されている5Gにおけるサービスの識別(5QI)とそれらの通信要件をまとめた表を抜粋したものである。各サービス毎に5QIの値が割り当てられ、5Gネットワークではこの識別子に対応したQoS制御を行う。ここで許容転送遅延は、UE（端末）からUPFまでの間で許容される通信遅延を示しており、End-to-Endの遅延ではない。サービス毎に許容されるパケットエラー率が異なることがわかる。リアルタイム通信や自動車の遠隔運転をサービスとして想定している場合には、エラー率が他よりも低く設定されている。

また、3GPPでは自動車用途を想定したシナリオを作成しており、TS22.186 [11]にまとめられている。先ほどの表1中のV2Xに関連する値は、このTSを元にして作成さ

れている。表2は、TS22.186で規定されている遠隔運転を想定した通信の要件である。車を制御する元から制御対象の車までのEnd-to-Endの遅延は、5msとなっている。また、アップリンク(UL)の帯域が25Mbps、ダウンリンク(DL)の帯域が1Mbpsとされている。アップリンクの方がダウンリンクより帯域が高く設定されている。これは、遠隔運転の場合、車からリアルタイムで送られてくる映像やセンサデータを元に運転制御を行うためであると考えられる。この遠隔運転のシナリオでは、End-to-Endの遅延は5msしか許容されない。図4からもわかるように、クラウドなどの外部ネットワークからの制御は遅延が大きすぎてできない。そのため、遠隔運転をはじめV2Xの用途では、自動車により近い周辺の基地局単位でのエッジサーバの配置と制御が必然的に必要となっている。

Cellular-V2X (C-V2X)を推進している米国の業界団体5G Automotive Association (5GAA)では、C-V2Xの用途として協調運転(Cooperative Driving)を含むユースケースを整理したホワイトペーパー[12]を発行している。同ホワイトペーパーは、ユースケース毎にC-V2Xでの許容遅延、信頼度、速度、通信要件を示している。遅延については10msの物から数十秒の物まで幅広い。C-V2Xのユースケースでは、車車間通信/路車間通信により車両同士が周囲の情報を交換・把握し事故の防止などを行う。そのため、通信遅延の揺らぎや増大は事故に直結するため、信号機等に設置されるエッジサーバ相当のものと連携して処理時間を短縮すると想定される。

他の用途では、既存のContents Delivery Network (CDN)のように動画等の大容量のコンテンツをエッジ近くから配信し、帯域の有効活用と低遅延化を目指したものがある。前述のV2Xの場合とは異なり、遅延については柔軟に許容できる。一方で、帯域については4K/8Kのコンテンツが増えてくると数十Mbps程度の帯域を保証しなければならない。

サービスチェイニングの用途では、エッジにネットワークのサービス（例えばファイアウォール、サンドボックス、ルータなど）を配置し、利用者の要望に応じて動的に必要なサービスを接続した提供が想定されている[13][14][15]。サービスチェイニングでは、遅延が小さい方が望ましく、帯域も利用者の契約やサービスの内容に応じて保証する必要がある。一方で、端末が移動した場合であっても、移動先に近いエッジサーバにて同じサービスを提供しなければならない。元のエッジサーバを利用することで、移動後も継続してサービスチェイニングを提供できるが、遅延が大きくなってしまふ。端末の移動への追従、サービスチェイニングの順序といった状態を維持した移動が求められる。

3.2 まとめ

前節にてユースケースの調査から、エッジコンピュー

表 1 5QI の定義 (一部)

Table 1 Standardized 5QI to QoS Characteristics Mapping

5QI	優先順位	許容転送遅延	パケット エラー率	標準 MDBV*1	標準最大帯域 保証期間*2	対象サービス例
1	20	100 ms	10^{-2}	N/A	2000 ms	会話
2	40	150 ms	10^{-3}	N/A	2000 ms	ライブストリーミング
3	30	50 ms	10^{-3}	N/A	2000 ms	リアルタイムゲーム, V2X メッセージ通知
4	50	300 ms	10^{-6}	N/A	2000 ms	ビデオストリーミング (バッファあり)
65	7	75 ms	10^{-2}	N/A	2000 ms	緊急音声配信 (同報配信など)
66	20	100 ms	10^{-2}	N/A	2000 ms	非緊急音声配信
67	15	100 ms	10^{-3}	N/A	2000 ms	緊急ビデオ配信
83	24	30 ms	10^{-6}	255 bytes	2000 ms	V2X メッセージ通知 (遠隔運転)

表 2 遠隔運転向けの通信要件

Table 2 Performance requirements for remote driving

シナリオ	Req #	最大 End-to-End 遅延 (ms)	信頼率 (%)	通信帯域 (Mbps)
UE の V2X アプリケーションと V2X サーバの通信	[R.5.5-002]	5	99.999	UL: 25 DL:1

ティングを実現するにあたり、ネットワークでは下記の機能が必要になると考える。

- トラフィック誘導
エッジコンピューティングの全ての用途で、エッジサーバに対象となるトラフィックを漏れなく転送し処理しなければならない。
- QoS の保証
端末もしくはネットワーク側でサービスを同定し、サービスに対応する QoS 要件を保証しなければならない。
- 遅延の保証
V2X の用途など遅延に対する要件が厳しい場合に、遅延要件を満たすトラフィックの転送、遅延の安定が求められる。
- 移動への追従
端末が移動した場合にもサービスを提供するために、適切なエッジサーバにサービスを移動もしくは動的に立ち上げるによりサービスの継続性の維持が必要である。

他にもサービスチェイニングの用途では、ネットワークの機能として複数のサービスを接続するチェイニング機能が求められる。

4. 議論

前節で整理した通りエッジコンピューティングでは、ネットワークの要件としてトラフィック誘導、QoS の保証、遅

延の保証、移動への追従が必要不可欠である。本節では、これまでの提案と関連する研究を元に当該要件を満たしているか議論を行う。

筆者らは、先行研究においてエッジコンピューティングにおけるステートレスなトラフィック誘導方式 GoEdge を提案した [16]。GoEdge は、DNS の Response Policy Zone (RPZ) と IP エニーキャストを組み合わせたトラフィック誘導方式である。図 5 は、当該方式の動作を図示したものである。この方式では、DNS サーバにて、予めエッジサーバに誘導したいサービスの Fully Qualified Domain Name (FQDN) に対して、エッジサーバのプライベートもしくはグローバル IP アドレス割り当て、当該 FQDN に対する端末からの DNS クエリに対して外部の IP アドレスを解決することなく、エッジサーバのアドレスを応答する。これにより端末は、接続先のサービスがクラウド等の外部で処理される、エッジで処理されるかを感知することなくエッジに接続可能となる。また、網内のエッジサーバは共通の IP アドレスを保持しており、IP エニーキャストにより近傍のルータへと経路広告を行う。そのため、端末が移動し接続先のエッジサーバが変わる場合であっても、端末はどのエッジサーバかを気にすることなく DNS の名前解決後に最も近傍のエッジサーバに自動で転送され、サービスを享受できる。

本方式では先に挙げた要件のうちトラフィック誘導と移動への追従 (一部) を実現している。一方で、QoS の保証

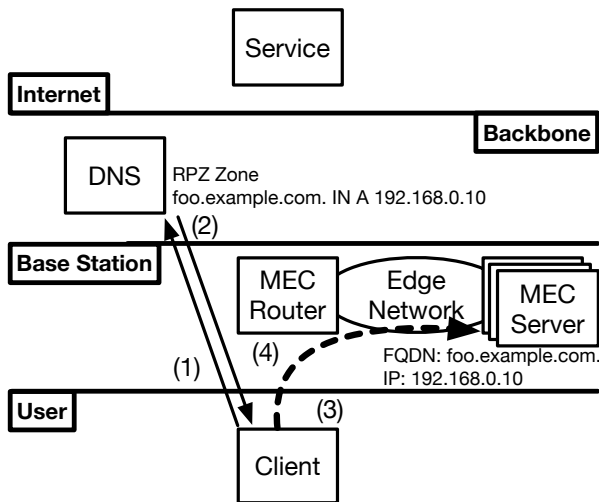


図 5 DNS RPZ と IP エニーキャストによるトラフィック誘導

Fig. 5 Traffic Steering by combination of DNS RPZ and IP Anycast

と遅延の保証については仕組み上、ベストエフォートな構成となっており、特定トラフィックの優先や帯域制御ができない。そのため、第 3 節で挙げた、遅延や帯域の要件を満たせない。

上記の遅延要件を満たすには、5QI に対応する識別子をパケットに付与しなければならない。5G では、端末にてパケットヘッダに QCI 値を記し、網側でその値を元にした QoS 制御などが可能である。しかし、QoS 制御を施し、通信の優先度を付与したとしても、許容遅延の保証は依然として課題である。GoEdge は、QoS で優先順位が付与されたとしても、最終的にトラフィックを同じ近傍のエッジサーバに転送してしまう。この結果、エッジサーバの逼迫を招いてしまい、短い遅延を求める V2X などの処理が遅れる可能性がある。

解決策としては、QCI 値を元にしてエッジサーバの転送先を変更し、端末に最も近いエッジサーバで処理されるべき通信と、そうでない通信に分類し、転送先のエッジサーバを変更する方式が考えられる。既存手法では宛先 IP アドレスのみで転送先を判定していたのに対して、QCI 値など優先度を表す識別子が必要となる。一つの候補としては、IETF で標準化されている Segment Routing (SR) [17] が活用できる。SR は、Segment Identifier (SID) と呼ばれる識別子をパケットに付与し、SID に基づいてパスの振り分けやサービスチェイニング、VPN などの機能を提供する。QCI に応じた SID を含む SR ヘッダをパケットに付与することで、SID に応じたエッジサーバへの転送が可能となる。

5. おわりに

通信網において低遅延・大容量な通信を実現する手段として、エッジコンピューティング技術が注目されている。

エッジコンピューティングはコンテンツ配信から AR/VR、自動運転などといった様々な用途での活用が期待されている。本論文では、3GPP などの標準文書を参考に各用途において、ネットワークに求められる帯域、遅延などの通信要件を整理した。また、各種要件に対して既存の経路制御技術などにより実現可能か否かを机上検討を通して議論した。

今後は、本論文で机上検討したトラフィック誘導手法や経路制御技術について、各種通信要件を満たせるかを実装し評価を行う。

謝辞 本研究成果は、科学技術振興機構事業研究成果最適展開支援プログラム A-STEP 機能検証フェーズの支援を受けた。

参考文献

- [1] ETSI: ETSI Multi-access Edge Computing ISG, <https://www.etsi.org/technologies/multi-access-edge-computing> (2014).
- [2] ETSI: Mobile Edge Computing (MEC); Framework and Reference Architecture, ETSI GS MEC 003 V1.1.1 (2016).
- [3] Linux Foundation: LF Edge, <https://www.lfedge.org/> (2019).
- [4] ITU-R: IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond, Technical report (2015).
- [5] Akyildiz, I. F., Nie, S., Lin, S.-C. and Chandrasekaran, M.: 5G roadmap: 10 key enabling technologies, *Computer Networks*, Vol. 106, pp. 17–48 (online), available from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128616301918> (2016).
- [6] ETSI: MEC in 5G networks, White Paper (2018).
- [7] AT&T Labs & AT&T Foundry: AT&T Edge Cloud (AEC) (2017).
- [8] Satyanarayanan, M., Bahl, P., Caceres, R. and Davies, N.: The Case for VM-Based Cloudlets in Mobile Computing, *IEEE Pervasive Computing*, Vol. 8, No. 4, pp. 14–23 (2009).
- [9] Bonomi, F., Milito, R., Zhu, J. and Addepalli, S.: Fog Computing and Its Role in the Internet of Things, *Proceedings of the first edition of the MCC workshop on Mobile cloud computing*, pp. 13–16 (2012).
- [10] 3GPP: System architecture for the 5G System (5GS), Technical Specification (TS) Version 16.3.0, 23.501, 3rd Generation Partnership Project (3GPP) (2019).
- [11] 3GPP: Service requirements for enhanced V2X scenarios, Technical Specification (TS) Version 16.2.0, 22.186, 3rd Generation Partnership Project (3GPP) (2019).
- [12] 5GAA: C-V2X Use Cases Methodology, Examples and Service Level Requirements, White Paper (2019).
- [13] Dinh-Xuan, L., Seufert, M., Wamser, F., Tran-Gia, P., Vassilakis, C. and Zafeiropoulos, A.: Performance Evaluation of Service Functions Chain Placement Algorithms in Edge Cloud, pp. 227–235 (2018).
- [14] Ying Zhang, Beheshti, N., Beliveau, L., Lefebvre, G., Manghirmalani, R., Mishra, R., Patney, R., Shirazipour, M., Subrahmaniam, R., Truchan, C. and Tatipamula, M.: STEERING: A software-defined networking for inline service chaining, *2013 21st IEEE In-*

- ternational Conference on Network Protocols (ICNP)*, pp. 1–10 (online), DOI: 10.1109/ICNP.2013.6733615 (2013).
- [15] Chaudhary, R., Kumar, N. and Zeadally, S.: Network Service Chaining in Fog and Cloud Computing for the 5G Environment: Data Management and Security Challenges, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 55, No. 11, pp. 114–122 (2017).
- [16] Okada, K., Kashiara, S., Kawanishi, N., Suzuki, N., Sugiyama, K. and Kadobayashi, Y.: GoEdge: A Scalable and Stateless Local Breakout Method, *Proceedings of the 2018 Workshop on Theory and Practice for Integrated Cloud, Fog and Edge Computing Paradigms, TOPIC ' 18*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 29–34 (2018).
- [17] Filsfil, C., Previdi, S., Ginsberg, L., Decraene, B., Litkowski, S. and Shakir, R.: Segment Routing Architecture, RFC 8402 (2018).