

M2M通信収容のための 仮想モバイルコアネットワークアーキテクチャに関する一検討

長谷川 剛[†] 村田 正幸^{††}

[†] 大阪大学 サイバーメディアセンター 〒 560-0043 大阪府豊中市待兼山町 1-43

^{††} 大阪大学 大学院情報科学研究科 〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-5

E-mail: [†]hasegawa@cmc.osaka-u.ac.jp, ^{††}murata@ist.osaka-u.ac.jp

あらまし 本報告では、今後拡大が予想される M2M 通信を収容するためのモバイルコアネットワークアーキテクチャとして、データプレーンとコントロールプレーンを分離し、一方、あるいは双方をクラウド環境へ設置するものを探り上げ、その効果を数学的解析手法によって明らかにする。仮想化によって容易となるコアノードへの柔軟な資源割当により、M2M 端末の収容可能台数が約 30% 増加することを明らかにする。さらに、研究グループが過去に提案した通信集約手法を組み合わせることで、その効果が最大で 124% に拡大することを示す。

キーワード モバイルコアネットワーク、Evolved Packet Core (EPC)、Machine-to-Machine (M2M) 通信、Software Defined Networks (SDN)、プレーン分離

Virtualized mobile core network architecture for accommodating M2M traffic

Go HASEGAWA[†] and Masayuki MURATA^{††}

[†] Cybermedia Center, Osaka University

1-43, Machikaneyama-cho, Toyonaka, Osaka 560-0043, Japan

^{††} Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

1-5 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871, Japan

E-mail: [†]hasegawa@cmc.osaka-u.ac.jp, ^{††}murata@ist.osaka-u.ac.jp

Abstract In this report, we focus on the mobile core networks based on SDN architecture for accommodating M2M communication terminals, that separates data plane and control plane and utilizes cloud environment to accommodate one or both planes. We give a mathematical analysis results to reveal the performance characteristics of possible network architectures. The evaluation results confirm that we can increase the capacity of the mobile core network by up to 124% in terms of the number of accommodated M2M terminals, by appropriate plane separation and resource sharing in the cloud environment, and by combining communication aggregation method.

Key words Mobile core networks, Evolved Packet Core (EPC), Machine-to-Machine (M2M) Communication, Software Defined Networks (SDN), plane separation

1. はじめに

携帯電話加入者数の増加や高性能なスマートフォン等の普及により、3G や LTE などのモバイルネットワークにおいて、データプレーンとコントロールプレーンの双方において発生する輻輳への対応が課題となっている。また、スマートフォンの常駐アプリケーションが定期的に発生させる制御メッセージの通信がモバイルネットワークを圧迫していることが大きな問題となっている。加えて、モバイルネットワークの新たな需要拡大を伴う通信形態として、Machine-to-Machine (M2M) 通信が注目されている。M2M 通信は、従来端末のとはその通信特性は大きく異なり、通信データ量は小さいが、端末数が膨大

になるとされている。そのため、M2M 通信を行う端末 (以下では M2M 端末と呼ぶ) を従来の携帯電話端末と同じ方式でモバイルネットワークに接続すると、特にコントロールプレーンの輻輳が悪化すると考えられる。M2M 通信の輻輳問題については [1] などでも検討が行われている。

このような問題に対し我々の研究グループでは、Device-to-Device (D2D) 通信などの近距離無線通信などを用いた端末のグループ化や、モバイルコアネットワーク内でのベアラ集約によって、モバイルコアネットワークのコントロールプレーン負荷を軽減する手法に着目し、数学的解析手法によってその性能評価を行った [2]。性能評価の結果、モバイルコアネットワークのゲートウェイノードである Serving Gateway (SGW) におい

で通信集約を行うことで、収容可能な端末数が15%増加することがわかった。また、モバイルコアネットワーク全体におけるボトルネックは Mobility Management Entity (MME) であり、MME へ十分な処理性能を与えることで、通信集約手法の効果を飛躍的に大きくできることが明らかとなった。

一方、モバイルコアネットワークを仮想化し、コントロールプレーンとデータプレーンを分離するアーキテクチャが提案されている [3]。また、モバイルコアネットワークを Software Defined Networks (SDN) 化することによって、資源利用効率の向上や制御の柔軟性を高めることが検討されている [4-6]。これらの検討においては、コントロールプレーンの機能をクラウド環境に設置することで、サーバ資源の利用効率の向上、低コスト化が可能となるとされている。

以上より、モバイルコアネットワークを SDN 化し、ノードを仮想化しクラウド環境へ設置することによって、ノード間でサーバ資源を効率的に利用することで、我々が提案した通信集約手法の効果が拡大することが考えられる。

しかし、そのようなネットワークアーキテクチャにおいてモバイルネットワークを運用すると、モバイルコアネットワークにおける従来のシグナリング処理に加えて、仮想化された機能モジュール間のシグナリング処理や、SDN を制御するためのシグナリング処理が増加することが考えられる。特に、今後需要が拡大すると考えられる、M2M 端末をそのようなモバイルコアネットワークで収容し、端末からの周期的な通信が集中的に発生すると、仮想化及び SDN 化によって増加したシグナリングオーバーヘッドが原因となり、収容可能な端末数の減少や、通信に発生する遅延時間が増大することが考えられる。[3] においてはそのことを考慮し、モバイルコアネットワークを仮想化する場合に考えられる複数のシナリオを提案しているが、シグナリング負荷の増大に関する定量的な評価には至っていない。

そこで本報告では、SDN 化されたモバイルコアネットワークを対象とし、M2M 端末を収容する際のシグナリングオーバーヘッドやノード負荷を解析的に評価する。そのために、まず、モバイルコアネットワークの SDN 化のためのネットワークモデルを複数検討する。次に、それらのネットワークを用いて M2M 端末がベアラを確立してデータ転送を完了するまでにかかる遅延時間を数学的解析によって評価し、SDN 化の有効性やモデル間の性能比較を行う。さらに、昨年度検討した通信集約手法を組み合わせることで、両手法が相乗的に効果を発揮し、M2M 通信の収容効率のさらなる拡大が可能であることを示す。

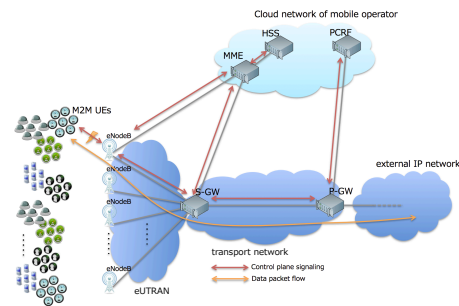
2. モバイルコアネットワークの仮想化

ここでは、[3] において提案されているモバイルコアネットワークの機能のモジュール化、及び各機能の設置方法に関する複数のシナリオを参考に、モバイルコアネットワークを SDN 化する場合の4種類のネットワークアーキテクチャを提案する。また、それらを用いて M2M 端末が通信を開始しようとする際に、それぞれの方法において発生する追加的なシグナリング処理や SDN 制御メッセージについて検討する。なお、LTE のシグナリング手順については [7] を参考にしており、SDN 化を行った際の仮想ネットワーク制御には OpenFlow を用いることを想定している。

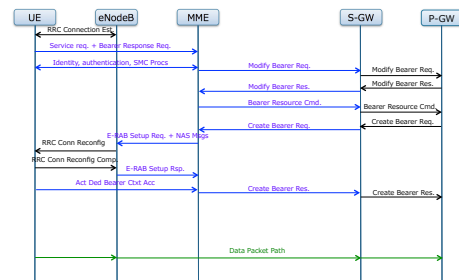
2.1 ネットワークモデル 1

図 1(a) に、コントロールプレーンのノードとなる MME、Home Subscriber Server (HSS)、及び Policy and Charging Rules Function (PCRF) をクラウドネットワーク (図中の Cloud network) に設置した場合のモバイルコアネットワークにおける Evolved Packet Core (EPC) のネットワーク構成、シグナリングメッセージおよびデータパケットの流れを示す。本モデルをネットワークモデル 1 とする。従来の EPC はほぼこのような構成であると考えられ、集中管理が行われる MME や PCRF と、基地局である Evolved Node B (eNodeB) や、トランスポートネットワーク (図中の transport network) に存在する SGW、及び PDN Gateway (PGW) との間の遅延時間が大きい。

また、図 1(b) に、この場合におけるシグナリング手順と、User Equipment (UE) と呼ばれる端末から発生したデータパケットが EPC ノードを通過する経路を示す。なお、シグナリング手順における青線及び青字は、遅延時間の大きなトランスポートネットワークとクラウドネットワーク間の通信、黒線及び黒字は遅延時間の小さなクラウドネットワーク内通信、トランスポートネットワーク内通信、及び UE と基地局間の通信を表している。MME のみがクラウドネットワークに配置されているため、シグナリング手順全体に占める、遅延時間の大き

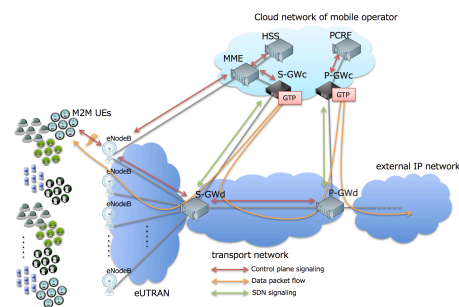


(a) ネットワークモデル

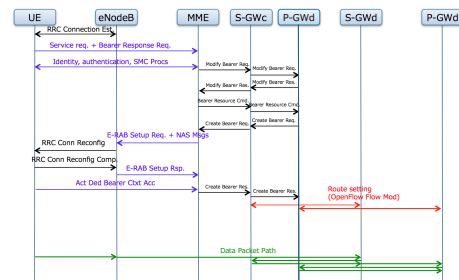


(b) シグナリングとデータパケット経路

図 1 ネットワークモデル 1: MME をクラウドネットワークに設置する場合



(a) ネットワークモデル



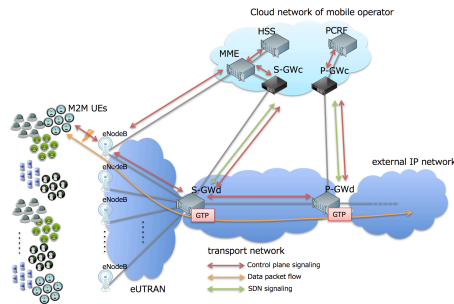
(b) シグナリングとデータパケット経路

図 2 ネットワークモデル 2: GW のコントロールプレーンをクラウドネットワークに設置する場合

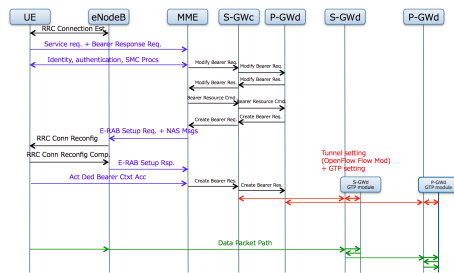
な通信の割合が大きいことがわかる。一方、データパケットの経路は他方式に比べて短い。

2.2 ネットワークモデル 2

図 2(a) に、SGW 及び PGW の機能をコントロールプレーンの機能 (SGWd、PGWd) とデータプレーンの機能 (SGWc、PGWc) に分離し、コントロールプレーンの機能をクラウドネットワークに設置した場合の、EPC のネットワーク構成、シグナリングメッセージおよびデータパケットの流れ、及び SDN の制御メッセージの流れを示す。本モデルをネットワークモデル 2 とする。GW のコントロールプレーンが 1 箇所集中管理さ



(a) ネットワークモデル



(b) シグナリングとデータパケット経路

図3 ネットワークモデル3: GTPトンネルのマッチング機能をトランスポートネットワークに設置する場合

れることによって、MMEやPCRFとの伝播遅延時間が大きく改善される。また、本モデルにおいては、ベアラを用いた通信のために必要となる、GTPトンネルのマッチング機能もクラウドネットワークに置かれている。これは、現在のOpenFlowの仕様では、GTPのヘッダフィールドを用いたパケットのマッチングができないため、その機能をコントローラ側で実装することが考えられるためである[3]。そのため、GTPマッチングの機能とSGWc、PGWc間の通信遅延は発生しない。

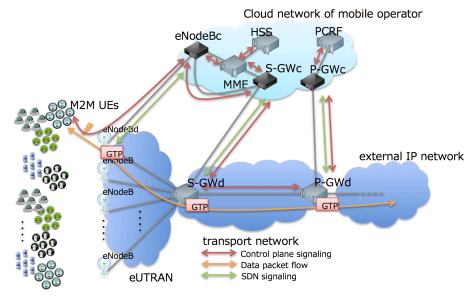
しかし、図に示すように、ベアラ確立後のデータ送受信において、全てのデータパケットがクラウドネットワークを通過するため、遅延時間の増大やスループットの大きな低下の原因となる。したがって、通信データ量の大きな端末を収容するためには不向きであると考えられる。しかし、M2M通信のように、通信データ量が少なく、ベアラ確立のオーバーヘッドが相対的に大きな端末を収容する場合には有効となる可能性がある。

また、図2(b)に、この場合におけるシグナリング手順と、UEから発生したデータパケットがEPCノードを通過する経路を示す。なお、シグナリング手順における赤線及び赤字はOpenFlowを用いて制御を行うことを想定した、SDN化されたネットワークスイッチとコントローラ間の通信を表す。これはトランスポートネットワークとクラウドネットワーク間の通信となり、遅延時間が大きい。図から、GWのコントロールプレーンがクラウドネットワークに配置されるため、ネットワークモデル1に比べて、遅延時間の小さなシグナリングの割合が大きくなっていることがわかる。特にMMEとSGW、及びSGWとPGW間のトンネル設定の手順の通信遅延時間が短くなっている。また、トランスポートネットワークにおけるゲートウェイノード(SGWd、PGWd)への通信はコントロールプレーンにおいてトンネル設定が終了してから一括で行うことができるため、遅延時間の大きな通信が全体に縮める割合は、ネットワークモデル1に比べて小さくなる。

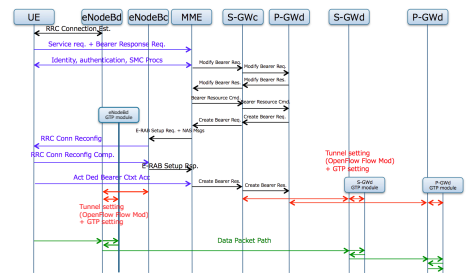
一方、データパケットの通信の遅延時間は非常に大きい。これは、GTPトンネルのマッチング処理をクラウドネットワーク側で行うため、全てのパケットがゲートウェイノードのデータプレーンノード(SGWd及びPGWd)とコントロールプレーンノード(SGWc及びPGWc)間を往復するためである。

2.3 ネットワークモデル3

図3(a)に、ネットワークモデル2の構成から、GTPトンネルのマッチング機能をトランスポートネットワーク側に移動させた場合を示す。本モデルをネットワークモデル3とする。[3]においては、GTPトンネルのマッチング機能をハードウェア実装で実現する、あるいは、OpenFlowスイッチにプログラム性を持たせ、ソフトウェア実装によって実現することが提案さ



(a) ネットワークモデル



(b) シグナリングとデータパケット経路

図4 ネットワークモデル4: eNodeBのコントロールプレーンをクラウドネットワークに設置する場合

れている。また、[4]では、SDN化によってSDNコントローラのオーバーヘッドが増大するため、複雑でない機能をエージェントとしてSDNスイッチ上に実装することが提案されている。本モデルはそのような場合に相当する。

また、図3(b)に、この場合におけるシグナリング手順と、UEから発生したデータパケットがEPCノードを通過する経路を示す。ほとんどの手順はネットワークモデル2と同様であるが、SGW、PGWにおけるベアラ設定の際にSGWc、PGWcとGTPマッチング機能との間に通信が発生する。一方、ゲートウェイノードにおけるGTPマッチング処理を、トランスポートネットワークに設置されたGTPモジュールを用いて行うため、ベアラ確立後のデータ通信においては、ゲートウェイノードとGTPモジュール間で設定のための通信が発生するが、その遅延時間はネットワークモデル2と比べて小さいため、ネットワークモデル2において懸念される遅延時間の増大やスループット低下を避けることができる。

2.4 ネットワークモデル4

図4(a)に、EPC機能のSDN化をさらに進めた場合として、eNodeBの機能をデータプレーンの機能(eNodeBd)とコントロールプレーンの機能(eNodeBc)に分離し、コントロールプレーンの機能をクラウドネットワークに設置する場合を示している。本モデルをネットワークモデル4とする。本モデルを用いることによって、基地局の電波資源の集中管理による利用率の向上などを図ることができる[4]。また、図に示すように、ベアラ確立の際に多数発生するeNodeBとMME、SGW間のシグナリングのための通信遅延が短縮される。一方、UEとeNodeBとの間のシグナリングに大きな遅延が発生する。従来モデルにおけるUEとeNodeB間の伝播遅延時間と、eNodeBとMME間の伝播遅延時間では、後者の方が大きいため、ノード負荷による遅延増大がなければ、ベアラ確立にかかる時間は短縮されると考えられる。なおここでは、eNodeBdはUEとの間のRRCコネクションをeNodeBcとの通信を必要とせずに行うことができるものとする。

図4(b)に、この場合におけるシグナリング手順と、UEから発生したデータパケットがEPCノードを通過する経路を示す。ネットワークモデル3と比べると、eNodeBのコントロールプレーンがクラウドネットワークに設置されることで、eNodeBとMME間のシグナリング通信が短縮されるが、その通信そのものが、MMEとGWの通信に比べて少ないため、シグナリング遅延時間短縮の効果は、GWノードのコントロールプレーンをクラウドネットワークに設置するのに比べて小さいことが期待される。一方、データパケットの遅延時間は、eNodeBにおいてGTPモジュールをいったん通過することによって僅かに増大すると考えられる。

3. 遅延時間解析

本章では、通信時のベアラ確立にかかる時間 T 、及びデータパケットの送信遅延時間 D を導出し、前章で示した4つのネットワークモデルにおいて、与えられた数のパケットを送信するのにかかる時間を比較評価する。

3.1 ベアラ確立時間

3.1.1 変数定義

シグナリングメッセージが各ノード間を伝播するためにかかる伝播遅延時間を、 $\tau_{\text{NODE1,NODE2}}$ の形で表記する。ただし、NODE1, NODE2 は、LTE の EPC ノードである UE、eNodeB、MME、SGW、PGW、SDN 化によって SGW、PGW、および eNodeB のコントロールプレーンとデータプレーンを分離した場合のノードである SGWc、SGWd、PGWc、PGWd、eNodeBc、eNodeBd、及び、GTP モジュールである SGWgtp、PGWgtp、eNodeBgtp のいずれかである。これらの値はネットワーク構成によって決定される。

また、各ノードで1つのシグナリングメッセージを処理するのにかかる処理時間を、 t_{NODE} の形で表記する。ただし、NODE は $\tau_{\text{NODE1,NODE2}}$ における NODE1, NODE2 と同様である。これらの値は各ノードの処理能力と処理負荷によって決定される。決定方法は後述する。

3.1.2 シグナリング手順に基づくベアラ確立時間の導出

ネットワークモデル 1 (図 1) の場合、ネットワークモデル 1 において、ベアラ確立のために必要な時間 T_1 を、シグナリング手順に基づいて導出する。具体的には、図 1(b) に示した手順に基づき、シグナリングの伝播のためにかかるノード間の伝播遅延時間 τ 、及びノードでの処理時間 t を総和する。

具体的な導出方法は紙面の都合上省略するが、ネットワークモデル 1 において、通信時のベアラ確立にかかる時間 T_1 は下記のように導出される。

$$T_1 = L_{\text{RRC}} + (6t_{\text{UE}} + 4t_{\text{eNodeB}} + 9t_{\text{MME}} + 5t_{\text{SGW}} + 3t_{\text{PGW}}) + (10\tau_{\text{UE,eNodeB}} + 10\tau_{\text{eNodeB,MME}} + 5\tau_{\text{MME,SGW}} + 5\tau_{\text{SGW,PGW}})$$

ただし、 L_{RRC} は UE と eNodeB の間で RRC コネクションを確立するのにかかる時間を表す。ネットワークモデル 2 (図 2) の場合は、ネットワークモデル 1 と同じシグナリングが発生した後に、SGWc、PGWc からそれぞれ SGWd、PGWd への経路設定のためのシグナリングが発生する。それらの経路設定は OpenFlow で同時に行うことを想定する。FlowMod による経路設定にかかるメッセージの往復回数を N_{FM} とすると、ネットワークモデル 2 において、通信時のベアラ確立にかかる時間 T_2 は下記のように導出される。

$$T_2 = L_{\text{RRC}} + (6t_{\text{UE}} + 4t_{\text{eNodeB}} + 9t_{\text{MME}} + 5t_{\text{SGWc}} + 3t_{\text{PGWc}}) + (10\tau_{\text{UE,eNodeB}} + 10\tau_{\text{eNodeB,MME}} + 5\tau_{\text{MME,SGWc}} + 5\tau_{\text{SGWc,PGWc}}) + \max(2N_{\text{FM}}\tau_{\text{SGWc,SGWd}} + (N_{\text{FM}} + 1)t_{\text{SGWc}} + N_{\text{FM}}t_{\text{SGWd}}, 2N_{\text{FM}}\tau_{\text{PGWc,PGWd}} + (N_{\text{FM}} + 1)t_{\text{PGWc}} + N_{\text{FM}}t_{\text{PGWd}})$$

ネットワークモデル 3 (図 3) の場合は、ネットワークモデル 2 の場合に加えて、SGWd 及び PGWd とそれぞれの GTP モジュールとの間で GTP 設定のためのシグナリングが発生する。そのために必要なメッセージの往復回数を N_{GTP} とすると、ネットワークモデル 3 において、通信時のベアラ確立にかかる時間 T_3 は下記のように導出される。

$$T_3 = L_{\text{RRC}} + (6t_{\text{UE}} + 4t_{\text{eNodeB}} + 9t_{\text{MME}} + 5t_{\text{SGWc}} + 3t_{\text{PGWc}}) + (10\tau_{\text{UE,eNodeB}} + 10\tau_{\text{eNodeB,MME}} + 5\tau_{\text{MME,SGWc}} + 5\tau_{\text{SGWc,PGWc}}) + \max(2N_{\text{FM}}\tau_{\text{SGWc,SGWd}} + (N_{\text{FM}} + 1)t_{\text{SGWc}} + N_{\text{FM}}t_{\text{SGWd}} + 2N_{\text{GTP}}\tau_{\text{SGWd,SGWgtp}} + (N_{\text{GTP}} + 1)t_{\text{SGWd}} + N_{\text{GTP}}t_{\text{SGWgtp}}, 2N_{\text{FM}}\tau_{\text{PGWc,PGWd}} + (N_{\text{FM}} + 1)t_{\text{PGWc}} + N_{\text{FM}}t_{\text{PGWd}} + 2N_{\text{GTP}}\tau_{\text{PGWd,PGWgtp}} + (N_{\text{GTP}} + 1)t_{\text{PGWd}} + N_{\text{GTP}}t_{\text{PGWgtp}})$$

ネットワークモデル 4 (図 4(b)) の場合は、ネットワークモデル 3 の場合に加えて、eNodeBd と GTP モジュールとの間で GTP 設定のためのシグナリングが発生する。また、UE の eNodeB との通信が、eNodeBd を経由して eNodeBc と行われるようになる。通信時のベアラ確立にかかる時間 T_4 は下記のように導出される。

$$T_4 = L_{\text{RRC}} + (6t_{\text{UE}} + t_{\text{eNodeBd}} + 4t_{\text{eNodeBc}} + 9t_{\text{MME}} + 5t_{\text{SGWc}} + 3t_{\text{PGWc}}) + (10\tau_{\text{UE,eNodeBd}} + 10\tau_{\text{eNodeBc,eNodeBd}} + 10\tau_{\text{eNodeBc,MME}}) + 5\tau_{\text{MME,SGWc}} + 5\tau_{\text{SGWc,PGWc}} + \max(2N_{\text{FM}}\tau_{\text{SGWc,SGWd}} + (N_{\text{FM}} + 1)t_{\text{SGWc}} + N_{\text{FM}}t_{\text{SGWd}} + 2N_{\text{GTP}}\tau_{\text{SGWd,SGWgtp}} + (N_{\text{GTP}} + 1)t_{\text{SGWd}} + N_{\text{GTP}}t_{\text{SGWgtp}}, 2N_{\text{FM}}\tau_{\text{PGWc,PGWd}} + (N_{\text{FM}} + 1)t_{\text{PGWc}} + N_{\text{FM}}t_{\text{PGWd}} + 2N_{\text{GTP}}\tau_{\text{PGWd,PGWgtp}} + (N_{\text{GTP}} + 1)t_{\text{PGWd}} + N_{\text{GTP}}t_{\text{PGWgtp}}, 2N_{\text{FM}}\tau_{\text{eNodeBc,eNodeBd}} + (N_{\text{FM}} + 1)t_{\text{eNodeBc}} + N_{\text{FM}}t_{\text{eNodeBd}} + 2N_{\text{GTP}}\tau_{\text{eNodeBd,eNodeBgtp}} + (N_{\text{GTP}} + 1)t_{\text{eNodeBd}} + N_{\text{GTP}}t_{\text{eNodeBgtp}})$$

3.1.3 ノードにおける処理時間

各ノードにおいて必要となる処理時間 t_{NODE} は、並列数 r の M/G/1/PS 待ち行列モデルを用いて導出する。M/G/1/PS 待ち行列モデルにおいて、ジョブの到着率を λ 、ワークロード分布を $S(x)$ 、その平均を $E[S]$ 、システム利用率を $\rho = \lambda \cdot E[S]$ とすると、リクエストがサーバに到着してから、サービスが終了するまでの平均系内時間 $E[R]$ は、以下のように表される。

$$E[R] = \frac{\rho^r}{1 - \rho} \frac{E[S^2]}{2E[S]} + \frac{1 - \rho^r}{1 - \rho} E[S]$$

ジョブの到着率として、ノードのシグナリング処理頻度を用いる。また、ワークロード分布にはノードのシグナリング処理時間分布を用いるが、以降の数値例では簡単のために、全てのシグナリング処理にかかる時間が指数分布に従うとし、その平均値はノードの処理能力に応じて決定する。これによって得られる平均系内時間 $E[R]$ を、ノードにおける処理時間とする。

上述の4つのネットワークモデルにおいて、1台の UE が TCP 及び UDP を用いてデータ転送を行った場合に、各ノードで必要となるシグナリング処理回数を、2章において示したシグナリング手順に基づいて導出した。その結果は紙面の都合上省略する。ここでは、UE はサイズが S であるデータの送信を行うものとし、データパケットの送受信がデータプレーン処理に与える負荷も算入している。具体的には、TCP(UDP)/IP 及び MAC 層のヘッダサイズを P_{header} 、パケットサイズを P とし、データパケット数 N_P を $S/(P - P_{\text{header}})$ としている。TCP の場合は Delayed ACK を用いたデータ転送を行うことを仮定している。この結果を用いて、1台の UE あたりのシグナリング処理回数と、UE の通信頻度、および収容する UE の総数から、各ノードのシグナリング処理頻度を導出することができる。

3.2 パケットの片道遅延時間

次に、各ネットワークモデルにおいて、ベアラ確立後に UE が外部ネットワークとデータパケットを送受信するのにかかる片道遅延時間 O_1, O_2, O_3, O_4 を、2章において示したデータパケットが EPC ノードを通過する経路に基づき、以下のように導出した。ただしここでは、UE の通信相手となるサーバは PGW (PGWd) に隣接しているものとした。結果については紙面の都合上省略する。検討結果より、 $\tau_{\text{SGWd,SGWc}} = \tau_{\text{SGWd,SGWgtp}}$ 、 $t_{\text{SGWc}} = t_{\text{SGWgtp}}$ 、 $\tau_{\text{PGWd,PGWc}} = \tau_{\text{PGWd,PGWgtp}}$ 、 $t_{\text{PGWc}} = t_{\text{PGWgtp}}$ であれば、 $O_2 = O_3$ であることがわかった。これは、ネットワークモデル 3 における GTP モジュールがコントロールプレーンの機能を実現しているノード上に存在すれば、ネットワークモデル 3 はネットワークモデル 2 と等価であるということを意味する。

3.3 データ転送遅延時間

UE からのパケットが TCP を用いて送信され、かつ、送信データサイズが小さく、TCP のスロースタート中に送信が終了すると仮定した場合に、UE においてサイズが S であるデータの送信要求が発生してからデータ送信が完了するまでにかかる時間 $C_{\text{TCP}}(S)$ を以下のように導出する。ただし、ベアラ確立時間を T 、パケットの片道遅延時間を O 、無線区間のビットレートを B_{wireless} 、コアネットワークのビットレートを B_{core} 、TCP/IP 及び MAC 層のヘッダサイズを P_{header} 、パケットサイズを P としている。なお、ここでは、各ネットワークモデルにおける遅延時間の差を評価することが目的であるため、無線ネットワークを含めたネットワーク全体でパケットロスが発生しないと仮定している。

$$C_{TCP}(S) \approx T + 2 \left(O + \frac{P_{header}}{B_{wireless}} + \frac{P_{header}}{B_{core}} \right) + 2 \left(\log_2 \left(\left\lfloor \frac{S}{P - P_{header}} \right\rfloor + 1 \right) + 1 \right) \cdot \left(O + \frac{P}{B_{wireless}} + \frac{P}{B_{core}} \right) \quad (1)$$

一方、データ転送がUDPで行われる場合のデータ転送時間は下記のように算出できる。

$$C_{UDP}(S) \approx T + \left(O + \frac{P_{header}}{B_{wireless}} + \frac{P_{header}}{B_{core}} \right) + \left(\left\lfloor \frac{S}{P - P_{header}} \right\rfloor + 1 \right) \cdot \min(B_{wireless}, B_{core}) \quad (2)$$

4. 数値例

4.1 ネットワークモデル間の比較

各ノード間の遅延時間を以下のように決定する。

- UE と eUTRAN のノード間: 20 msec
- eUTRAN と Transport Network 間: 7.5 msec
- Transport Network 内の SGW-PGW 間: 7.5 msec
- eUTRAN とクラウドネットワーク間: 10 msec
- Transport Network とクラウドネットワーク間: 10 msec
- クラウドネットワーク内ノード間: 1 msec
- GTP モジュールとデータプレーンノード間: 1 msec

L_{RRC} を 45 msec、1つの UE の通信周期を 600 秒、無線ネットワークのビットレートを 10Mbps、コアネットワークのビットレートを 1000Mbps とする。また、パケットサイズを 128 バイト、ヘッダサイズを TCP の場合は 40 バイト、UDP の場合 28 バイトとする。各ノードのシグナリングメッセージの処理能力は下記のように決定する。

- UE: 1,000 メッセージ/秒
- eNodeB: 1,000 メッセージ/秒
- MME: 10,000 メッセージ/秒
- SGW: 10,000 メッセージ/秒
- PGW: 10,000 メッセージ/秒
- GTP モジュール: 100 Gbps

また、eNodeB、SGW、PGW に関して、コントロールプレーンとデータプレーンを分けた場合は、それぞれの処理能力は元の能力と同じものとする。

モバイルコアネットワークのノードを仮想化してクラウドネットワークに設置することによって、ノード負荷に応じてノード処理性能を増減させることが可能となり、サーバ資源の効率的な利用が期待される。本章ではノード間で処理性能を融通できると仮定した場合における、モバイルコアネットワーク性能の評価を行う。

ここでは、MMEのみをクラウドネットワークに設置し、処理性能の融通ができないネットワークモデル 1、SGW 及び PGW のコントロールプレーンをクラウドネットワークに設置し、MME とのノード間で処理性能の融通が可能となるネットワークモデル 3、及び、eNodeB のコントロールプレーンもクラウドネットワークに設置し、4 ノード間で処理性能の融通が可能となるネットワークモデル 4 を比較対象とする。

ネットワークモデル 3 及び 4 においては、上記の処理性能を初期値とし、処理性能の総和を保ちながらデータ転送遅延時間が小さくなるように処理性能を増減する。各ノードの処理性能はランダム探索に基づく山登り法によって決定する。

図 5 に、TCP 及び UDP を用いて UE が 1,000 バイトのデータを送信する場合における、収容するノード数に対するデータ転送時間の変化を示している。なお、グラフには、ネットワークモデル 3 及び 4 において、ノード処理性能の融通を行わない場合の結果を合わせて示している。

この結果から、UDP を用いる場合においては、ネットワークモデル 3 及び 4 において、ノード処理性能の融通を行わなくてもネットワークモデル 1 よりもデータ転送時間が小さいことがわかる。これは PGW、SGW のコントロールプレーンをクラウドネットワークに設置したことによって、ベアラ確立時のシグナリング遅延が短縮されたためである。一方、TCP を用いる場合にはネットワークモデル 4 のデータ転送時間がネットワークモデル 1 よりも大きくなっている。これは eNodeB の

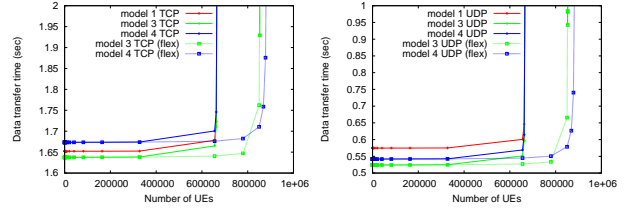


図 5 ノード処理性能の融通がデータ転送時間に与える影響

コントロールプレーンがクラウドネットワークに設置されることによって UE から遠くなったため、片道遅延時間が大きくなり、TCP によるデータ転送が大きな影響を受けたためであると考えられる。

また、ノード処理性能の融通を行わない場合においては、収容可能な UE 数の上限は全てのネットワークモデルにおいて等しい。これは、全てのネットワークモデルにおけるボトルネックは MME であり、仮想化を行うネットワークモデル 3 及び 4 においても MME において追加的なシグナリング処理は発生しないためである。

一方、ノード処理性能の融通を行うことで、特に収容 UE 数が多い場合にデータ転送時間が短縮されるとともに、収容可能な UE 数が増加することがわかる。仮想化を行うことによって SDN の設定や GTP モジュールへの設定投入のための追加的なシグナリングが発生するため、ネットワークモデル 3 及び 4 はネットワークモデル 1 に比べてシステム全体に対するシグナリング負荷は大きい。しかし、負荷の低いノードから、負荷の高い MME へ処理性能を融通することによって、MME の処理負荷が低下するため、ノード処理時間が短縮され、収容可能な UE 数も増加する。また、ネットワークモデル 3 に比べてネットワークモデル 4 の収容可能 UE 数が多いのは、余裕がある eNodeB のコントロールプレーンノードの処理性能を他のノードへ融通できるためである。

5. 通信集約の適用

ここでは、昨年度の研究で検討した通信集約手法を上述のネットワークアーキテクチャに統合することを考える。通信集約手法はベアラ確立時シグナリング手順そのものの修正によって実現されるため、上述のノードが仮想化されたモバイルコアネットワークへも適用可能である。

昨年度の研究における評価結果より、通信集約手法によって MME、SGW、及び PGW のシグナリング負荷が低下するため、収容可能端末数が増加することがわかっている。さらに、クラウド化によってノード間の処理能力の融通が可能になると、通信集約手法によって SGW、PGW の処理オーバーヘッドが低下するため、余剰の処理能力をより多く MME に融通することができる。そのため、クラウド化したモバイルコアネットワークへ通信集約手法を適用することは、双方の手法の効果を増大させる効果を持つ。

5.1 提案手法

以下では、これまでに検討したネットワークモデルのうち、図 3 に示すネットワークモデル 3 を用いて、SGW において通信集約を行う場合について示す。これまでの解析と同様にノード負荷を評価し、ベアラ確立時間とデータ転送時間評価を行った。

通信集約手法を適用することにより、ベアラ確立処理における MME、SGW、及び PGW のシグナリングメッセージ処理回数が削減される。ここでは、集約度が K となるような通信集約を行った場合に、 K 台の端末の通信に対して 1 回のシグナリングメッセージ処理が発生するものに関しては、1 台あたり $1/K$ 回のシグナリングメッセージ処理が発生すると考える。

3. 章における解析では、1 台の端末の通信に対して、MME、SGW のコントロールプレーン、PGW のコントロールプレーンはそれぞれ 9、6、3 回のシグナリングメッセージ処理を行うとしていた。集約度 K の通信集約により、これらの処理が、それぞれ $6.5 + 2.5/K$ 、 $1 + 4/K$ 、 $3/K$ 回となる。すなわち、集約度 K が大きくなるにつれて、MME、SGW のコントロールプレーン、PGW のコントロールプレーンの処理負荷は低下するため、遅延時間が発散することなく収容できる端末数が増加することが期待される。また、特に SGW のコントロール

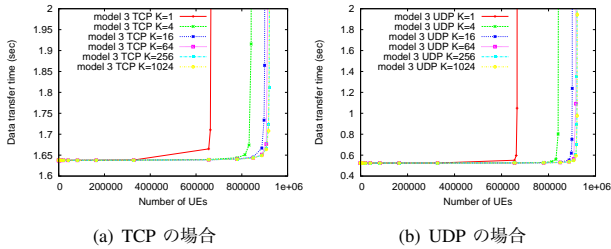


図6 通信集約手法の効果

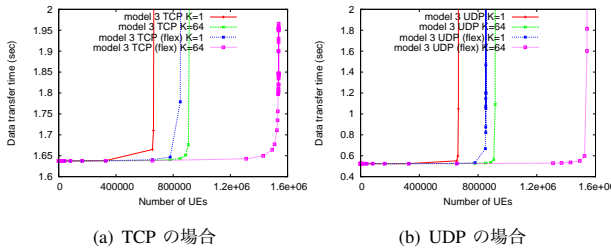


図7 通信集約手法とノード仮想化の組み合わせの効果

プレーン、PGWのコントロールプレーンの処理負荷の低下が大きいこと、余剰となったこれらのノードの処理能力が、ボトルネックであるMMEへ融通されることで、さらに収容端末数が大きくなると考えられる。

5.2 性能評価結果

図6に、通信集約手法のみを適用した場合の評価結果を示す。TCP、UDP双方の場合において、通信集約手法を適用することによって、収容可能端末数が最大で37%拡大している。また、集約度は64以上になると改善効果が見られなくなることがわかる。これは、1台の端末の通信において、集約によって削減されるシグナリングオーバーヘッドが十分小さくなるためである。

図7に、通信集約手法($K=64$)のみ、仮想化によるノード処理能力の融通、およびその両方を適用した場合における評価結果を示す。図より、それぞれの手法を同時に適用することによって、さらに収容可能端末数が増大することがわかる。また、増大幅が、それぞれの手法を単独で適用した場合の効果の和よりも拡大していることがわかる。これは、通信集約手法の適用により、SGW、PGWのコントロールプレーンの処理能力の余剰量が大きくなり、それがMMEに融通されるため、MMEの負荷軽減効果が高くなるためであると考えられる。今回の評価結果においては、両手法を同時に適用することで、適用しない場合に比べて収容可能端末数が124%増大している。

これらの結果から、以下のようなことが言えると考えられる。モバイルコアネットワークのSDN化のみでは、SGWやPGWなどのゲートウェイ機器の負荷を大きく削減することはできないため、システムボトルネックであるMMEへ融通できる処理能力が限られている。そのため、性能向上度は限定的である。一方、SDN化を行わず、通信集約のみを行う場合は、MMEの負荷がある程度下がるのみであるため、やはり性能向上度は限定敵である。そこで、SDN化と通信集約を組み合わせることで、MMEの負荷軽減とゲートウェイ機器からの処理能力の融通の両方の効果が活かされるため、性能向上度が大きくなる。

6. まとめと今後の課題

本稿では、M2M通信の収容能力の拡大を目的とし、モバイルコアネットワークをSDN化することの効果、数学的解析手法によって評価した。その結果、適切なプレーン分離とノード配置によって、M2M端末の収容可能台数が約30%増加すること、また、研究グループが過去に提案した通信集約手法を組み合わせることで、その効果が最大で124%に拡大することを明らかにした。

今後は、2.章において提案したネットワークモデルを実現する場合のネットワーク構築コストを評価し、それぞれのモデルの総合的な評価を行いたい。また、SDN化によるノード資源共有をさらに進め、地理的に分散したMMEやSGW、PGW

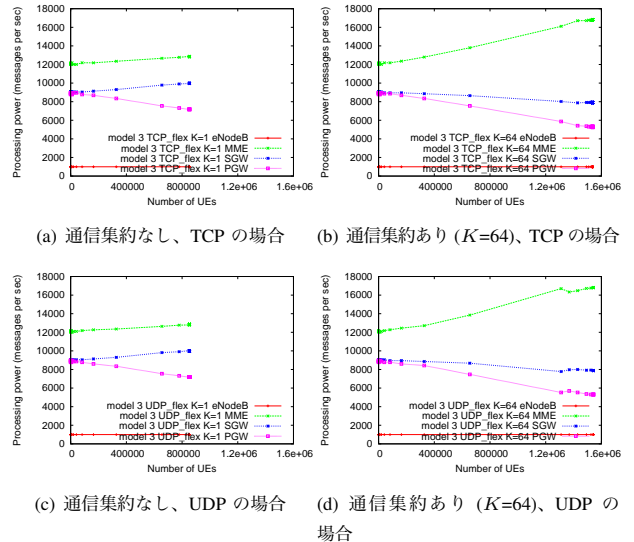


図8 ノード処理性能の融通結果

などのノードの処理能力を、各地域で発生する通信量に応じて融通することで、広域モバイルコアネットワークにおける資源利用効率をさらに高める手法を検討する。

さらに、ベアラを確立して端末通信を行う現在の通信形態ではなく、ベアラを設定せずにルーティングによってパケット送受信を行うネットワークアーキテクチャの検討を行う。このためには、従来のネットワークアーキテクチャにおいてベアラ(GTPトンネル)を用いて実現しているモビリティ、課金処理、QoS制御などの機能をどのような方法で実現するのかについて検討が必要である。その上で、GTPトンネルによる処理とルーティング処理の、ノード負荷の比較を行い、これまでと同様の解析手法で、ルーティングによって実現する場合の性能評価を行い、ベアラを用いる場合との比較を行いたい。

謝辞

本研究を進めるにあたり、詳細かつ示唆に富む意見をいただいた株式会社NTTドコモ先進技術研究所 滝田亘氏、尾花和昭氏、田村基氏、及びNTT未来ねっと研究所 清水敬司氏に謝意を示す。また、大阪大学 宮原秀夫名誉教授、NTTネットワーク基盤技術研究所 塩本公平氏、上山憲昭氏、中野雄介氏から多数の有益な助言をいただいた。ここに記し謝意を示す。

文献

- [1] D. Bouallouche, "Congestion control in the context of machine type communications in 3GPP LTE networks," *Master thesis internship report, University of Rennes*, Aug. 2012.
- [2] 長谷川剛, 村田正幸, "モバイルコアネットワークにおけるM2M通信集約手法の解析的評価," *電子情報通信学会技術研究報告 (MoNA2014-25)*, vol. 114, pp. 51–56, July 2014.
- [3] A. Khan, D. Jurca, K. Kozu, W. Kellerer, and M. Yabusaki, "The reconfigurable mobile network," in *Proceedings of ICC 2011*, pp. 1–5, June 2011.
- [4] L. E. Li, Z. M. Mao, and J. Rexford, "Toward software-defined cellular networks li erran li z. morley mao jennifer rexford," in *Proceedings of EWSN 2012*, pp. 7–12, Oct. 2012.
- [5] A. Khan, W. Kellerer, K. Kozu, and M. Yabusaki, "Network sharing in the next mobile network: TCO reduction, management flexibility, and operational independence," *IEEE Communication Magazine*, vol. 49, pp. 134–142, Oct. 2011.
- [6] A. Basta, W. Kellerer, M. Hoffmann, K. Hoffmann, and E.-D. Schmidt, "A virtual SDN-enabled LTE EPC architecture: A case study for S-/P-gateways functions," in *Proceedings of SDN4FNS 2013*, pp. 8–14b, Nov. 2013.
- [7] V. S. Rao and R. Gajula, "Protocol signaling procedures in LTE," *White Paper, Radisys Corporation*, Sept. 2011.