

特別研究報告

題目

コアノード配置とサーバ資源分配に着目した
広域モバイルコアネットワークの性能向上

指導教員

松岡 茂登 教授

報告者

安達 智哉

平成 30 年 2 月 14 日

大阪大学 基礎工学部 情報科学科

コアノード配置とサーバ資源分配に着目した
広域モバイルコアネットワークの性能向上

安達 智哉

内容梗概

スマートフォン等の携帯端末利用者の増加、及び端末の高機能化によって、LTE や第 5 世代移動通信システムなどのモバイルネットワークにおける輻輳への対応が課題となっている。また、モバイルネットワークに接続される端末として Machine-to-Machine (M2M) 及び Internet of Things (IoT) 端末が注目されており、多数の端末が接続されることによって、ユーザプレーンのトラフィック量だけでなく制御プレーンのトラフィック量も増加することが指摘されている。我々の研究グループは、この問題に対して、M2M/IoT 端末を収容することに適したモバイルコアネットワークに関する研究を進めている。特に、ネットワークが収容可能な端末数を向上させるためのコアノード機能の構成方法や、通信負荷を低減するための手法を検討し、その有効性を数値評価を行うことで示してきた。しかし、これらの評価は単一の Evolved Packet Core (EPC) で構成されたモバイルコアネットワークを対象としており、複数の EPC で構成されるような大規模なモバイルコアネットワークにおける性能は明らかになっていない。

そこで本報告では、日本全土に展開されるような広域モバイルコアネットワークを対象とし、端末のベアラ確立時間及びネットワークの端末収容能力の評価を行うことで、広域モバイルコアネットワークの性能向上に関する検討を行った。まず、主要な EPC ノードである、Packet Data Network Gateway 及び Mobility Management Entity の配置がベアラ確立時間に与える影響を明らかにした。次に、各ノードに対するサーバ資源の割り当て方法が、モバイルコアネットワークの端末収容能力に与える影響を評価した。さらに、EPC ノードの負荷に応じて端末を分散収容することによって、サーバ資源の利用効率を向上させ、モバイルコアネットワークの収容端末数を向上する手法を評価した。

評価の結果、EPC ノードを適切に分散配置することにより、M2M/IoT 端末のベアラ確立時間が最大 7.5% 減少することを示した。また、サーバ資源の割り当て手法が、収容可能な端末数に最大 42% の影響を与えること、及び、端末を分散収容することにより、収容可能な端末数が最大 23% 増加することを示した。

主な用語

Long Term Evolution (LTE), Machine-to-Machine (M2M) 通信, Internet of Things (IoT), Evolved Packet Core (EPC), モバイルコアネットワーク, Dedicated Core Network (DCN)

目次

1	はじめに	7
2	モバイルコアネットワーク	9
2.1	ネットワークモデル	9
2.2	シグナリング手順	11
2.3	LTE/EPC ノードの配置	11
2.4	EPC ノードに対するサーバ資源の割り当て	20
2.5	EPC 負荷に応じた UE の分散収容	20
3	性能解析	23
3.1	変数定義	23
3.2	ベアラ確立時間の導出	23
3.2.1	ノードにおけるシグナリング処理時間	24
3.2.2	シグナリング通信におけるノード間の伝搬遅延時間	24
4	性能評価	25
4.1	パラメータ設定	25
4.2	評価結果と考察	25
4.2.1	端末収容台数とベアラ確立時間の関係	25
4.2.2	EPC ノードの配置の影響	25
4.2.3	サーバ1台あたりの資源量の影響	35
4.2.4	EPC 負荷に応じた UE の分散収容の効果	45
5	まとめと今後の課題	52
	謝辞	53
	参考文献	54
	付録	57
1	UE の分散収容の手順	57

目 次

1	単一の EPC で構成された LTE/EPC ネットワーク	10
2	複数の EPC で構成された広域モバイルコアネットワーク	10
3	OAI を基にしたシグナリング手順	12
4	バックボーンネットワーク	13
5	ネットワーク構成	14
6	UE の分散収容	22
7	UE の収容率とベアラ確立時間の関係	28
8	MME 及び HSS が 1 台、PGW が 7 台の場合のベアラ確立時間	29
9	MME 及び HSS が 1 台、PGW が 47 台の場合のベアラ確立時間	30
10	MME 及び HSS が 2 台、PGW が 7 台の場合のベアラ確立時間	31
11	MME 及び HSS が 2 台、PGW が 47 台の場合のベアラ確立時間	32
12	MME 及び HSS が 7 台、PGW が 7 台の場合のベアラ確立時間	33
13	MME 及び HSS が 7 台、PGW が 47 台の場合のベアラ確立時間	34
14	MME 及び HSS が 1 台、PGW が 7 台、サーバ 1 台あたりの資源が 100,000 [statements/sec] の場合の評価結果	36
15	MME 及び HSS が 1 台、PGW が 7 台、サーバ 1 台あたりの資源が 400,000 [statements/sec] の場合の評価結果	37
16	MME 及び HSS が 1 台、PGW が 7 台、サーバ 1 台あたりの資源が 1,600,000 [statements/sec] の場合の評価結果	38
17	MME 及び HSS が 1 台、PGW が 7 台、サーバ 1 台あたりの資源が 6,400,000 [statements/sec] の場合の評価結果	39
18	MME 及び HSS が 1 台、PGW が 7 台、サーバ資源を EPC ノードに均等に分配した場合の評価結果	40
19	MME 及び HSS が 7 台、PGW が 47 台、サーバ 1 台あたりの資源が 100,000 [statements/sec] の場合の評価結果	41
20	MME 及び HSS が 7 台、PGW が 47 台、サーバ 1 台あたりの資源が 400,000 [statements/sec] の場合の評価結果	42
21	MME 及び HSS が 7 台、PGW が 47 台、サーバ 1 台あたりの資源が 1,600,000 [statements/sec] の場合の評価結果	43
22	MME 及び HSS が 7 台、PGW が 47 台、サーバ資源を EPC ノードに均等に分配した場合の評価結果	44

23	MME 及び HSS が 1 台、PGW が 7 台、UE の分散収容を適用した場合の評価結果	46
24	MME 及び HSS が 1 台、PGW が 7 台、UE の分散収容を適用しない場合の評価結果	47
25	MME 及び HSS が 1 台、PGW が 7 台の場合において、UE の分散収容がベアラ確立時間の分布に与える影響	48
26	MME 及び HSS が 7 台、PGW が 47 台、UE の分散収容を適用する場合の評価結果	49
27	MME 及び HSS が 7 台、PGW が 47 台、UE の分散収容を適用しない場合の評価結果	50
28	MME 及び HSS が 7 台、PGW が 47 台の場合において、UE の分散収容がベアラ確立時間の分布に与える影響	51

表目次

1	サーバ資源の総量	28
2	各ノードのインデックス番号	60

1 はじめに

モバイルネットワークに接続される携帯電話やスマートフォン等の端末数は著しく増加し、Long Term Evolution (LTE) [1] や第5世代移動通信システム [2] などのモバイルネットワークにおいて、輻輳への対応が課題となっている。さらに、モバイルネットワークの利用形態として Machine-to-Machine (M2M) [3] 及び Internet of Things (IoT) [4] 端末の接続が着目されており、モバイルネットワークに接続される端末数は今後も増加の一途を辿ると考えられている。文献 [4] によると、2020 年までに、インターネットに接続される IoT 端末の数は 2,120 億台になり、2022 年までには、M2M 通信を行う端末のトラヒックは、ネットワーク全体の 45% を占めるようになるとされている。

M2M/IoT 端末をネットワークに接続する方法として、従来のセルラ無線とは異なる、Low Power, Wide Area (LPWA) [5] と呼ばれる、省電力であり、かつ広域を被覆することが可能な無線ネットワークが提案されている。日本国内においても、2016 年 9 月にソフトバンク株式会社が LPWA ネットワークの 1 つである Long Range WAN (LoRaWAN) [6] の提供を発表し [7]、同年 11 月には株式会社 NTT ドコモが LPWA 通信の実証実験を開始することを発表した [8]。また同月には、京セラコミュニケーションシステム株式会社が、LPWA ネットワークの 1 つである SIGFOX [9] を日本で展開することを発表するなど [10]、非セルラ無線ネットワークによる M2M/IoT 通信収容の広がりが見られる。しかしながら、LPWA を実現するためには、新たなインフラ網を構築する必要があるなど、コスト面における課題が存在している。これに対し、従来のセルラ無線網に M2M/IoT 端末を収容する方式では、既存のインフラ網を有効に活用できるという利点がある。

一方、従来のセルラ無線網に多数の M2M/IoT 端末を収容すると、端末の通信特性に起因する輻輳の問題が発生すると考えられる。M2M/IoT 通信は、携帯電話やスマートフォンなどの従来端末の通信とはその特性が大きく異なり、周期性や間欠性を持つ場合がある。また、M2M/IoT 端末の多くは移動頻度が低く、データの送信量に対して受信量が少ないという特徴がある。そのため、M2M/IoT 端末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、端末のネットワーク接続やデータ送信に必要なシグナリングに関する通信や処理を行う、制御プレーンの輻輳が悪化すると考えられる。このような問題に対し、文献 [11, 12, 13, 14] では、モバイルコアネットワークのノードを Software Defined Networks (SDN) 化し、制御プレーンをクラウドネットワーク内に設置することでノードの処理負荷を減少させる方法について検討している。また、Serving Gateway (SGW) と Packet Data Network Gateway (PGW) との間に確立されるベアラを、端末固有に設定するのではなく複数端末で共用することで、モバイルコアネットワーク内の資源利用を抑える方法 [15, 16] や、即時性を有するユーザの通信に比べて遅延制約が緩い M2M/IoT 端末を収容する際に、

EPC ノードの処理負荷を軽減する手法が考えられている [17]。さらに、文献 [18] では、収容可能な端末数を向上させるため、ノード仮想化、C/U 分離及びベアラ集約をネットワークに適用することによる端末収容能力への影響を待ち行列理論に基づく数学的解析により評価している。しかし、これらの性能評価は単一の Evolved Packet Core (EPC) で構成されたモバイルコアネットワークを対象としており、複数の EPC で構成される大規模なモバイルコアネットワークの性能は明らかになっていない。より現実的な評価を行うためには、複数の EPC で構成された広域モバイルコアネットワークを対象とした評価を行うことが必要である。

そこで本報告では、日本全土に展開される広域モバイルコアネットワークを対象とし、モバイルコアネットワークにおける端末のベアラ確立時間、及びネットワークの端末収容能力を評価することで、広域モバイルネットワークの性能向上に関する検討を行う。まず、広域モバイルコアネットワークにおける EPC ノードの配置がベアラ確立時間に与える影響を評価する。具体的には、全国に存在する EPC ノードのうち、PGW 及び Mobility Management Entity (MME) の地理的な配置を検討し、これらのノードを集中的に配置する場合と、広域ネットワークに分散的に配置する場合の性能比較を行う。次に、サーバ資源の分配方法がモバイルコアネットワークの端末収容能力に与える影響の評価を行う。具体的には、EPC ノードが必要とするサーバ資源量に応じて、サーバを配置することによって、1 台のサーバ資源量の大きさが端末収容能力及びサーバ資源の利用効率に与える影響を評価する。さらに、端末の通信特性に応じて接続するコアネットワークを変化させる、Dedicated Core Network (DCN) 技術 [19] に基づき、EPC ノードの負荷に応じて端末を収容する EPC ノードを切替えることによって、サーバ資源の利用効率を高め、端末収容能力が向上することを示す。

以上の評価を行うために、文献 [18, 20, 21] で用いている数学的解析手法を応用し、広域かつ大規模なモバイルコアネットワークにおける端末のベアラ確立時間を導出する。その際、端末を収容する EPC ノード間の距離や分散配置されたサーバの資源量が、ベアラ確立時間に与える影響を考慮することにより、広域モバイルコアネットワークの特性を明らかにする。

本報告の構成は以下の通りである。2 章では、本報告で評価するモバイルコアネットワークアーキテクチャについて述べる。3 章では、EPC ノードの実装コードの命令文数に基づき、待ち行列理論を用いた数学的解析によって、端末のベアラ確立時間及びネットワークの端末収容能力を導出する。4 章では解析結果に基づき、EPC ノードの配置、サーバ資源の割り当て方法、及び端末の分散収容がモバイルコアネットワークの性能向上に与える影響を評価する。最後に 5 章でまとめと今後の課題について述べる。

2 モバイルコアネットワーク

2.1 ネットワークモデル

本報告においては、我々の研究グループの既存研究 [21] において対象とした、単一の EPC からなる LTE/EPC ネットワークのモデルを拡張し、複数の EPC からなる広域モバイルコアネットワークモデルを構築する。図 1 に単一の EPC により構成された LTE/EPC ネットワークの構成を示す。図 1 における各ノードの主な機能を以下に示す。

User Equipment (UE)

M2M/IoT 端末。

evolved NodeB (eNodeB)

UE と無線で通信を行い、MME 及び SGW と制御通信を行う基地局。

Mobility Management Entity (MME)

UE やユーザの認証、UE の移動管理及びパケットの経路設定の制御などを行い、EPC 内におけるシグナリング処理の中核となるノード。

Home Subscriber Server (HSS)

ユーザごとの契約情報、認証用のキーデータ及び MME のアドレスなどを管理するノード。

Serving Gateway (SGW)

MME からの制御メッセージに基づいて、UE と PGW との間で IP パケットの伝達を行うノード。UE が eNodeB 間を移動した時のアンカーポイントとしても機能する。

Packet Data Network Gateway (PGW)

LTE/EPC ネットワークと外部のネットワーク (External IP Network) を接続するノード。

図 2 に、本報告で取り扱う、複数の EPC からなる広域モバイルコアネットワークの概念図を示す。図 1 では単一であった EPC が複数存在し、EPC ごとに外部ネットワークとの接点を持つ。UE は接続している eNodeB を経由していずれか 1 つの EPC に接続し、外部ネットワークへアクセスを行う。

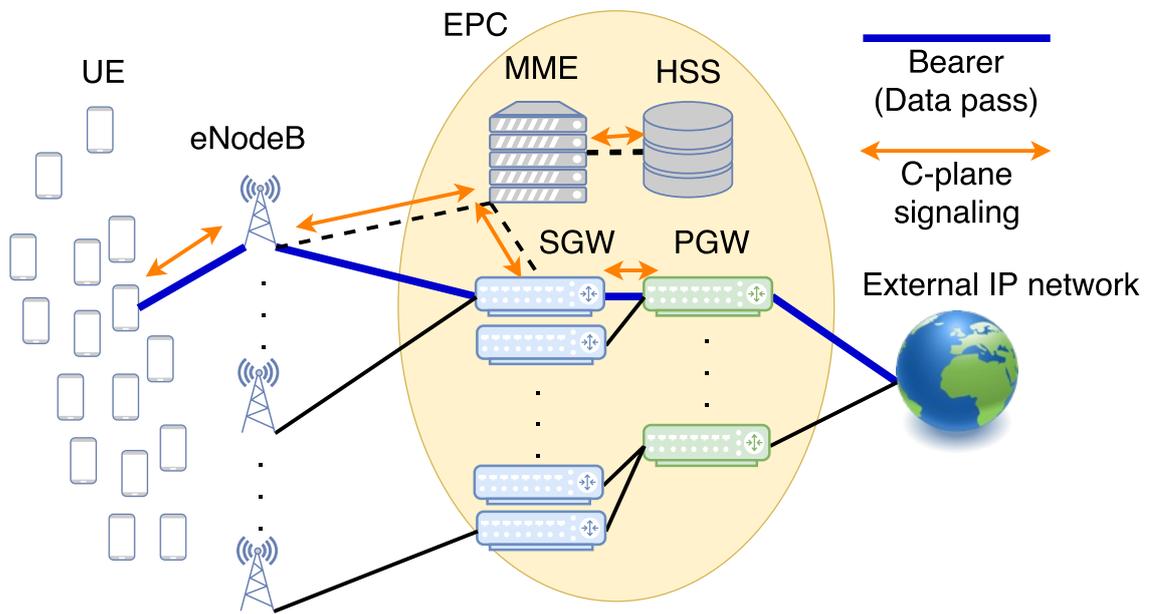


図 1: 単一の EPC で構成された LTE/EPC ネットワーク

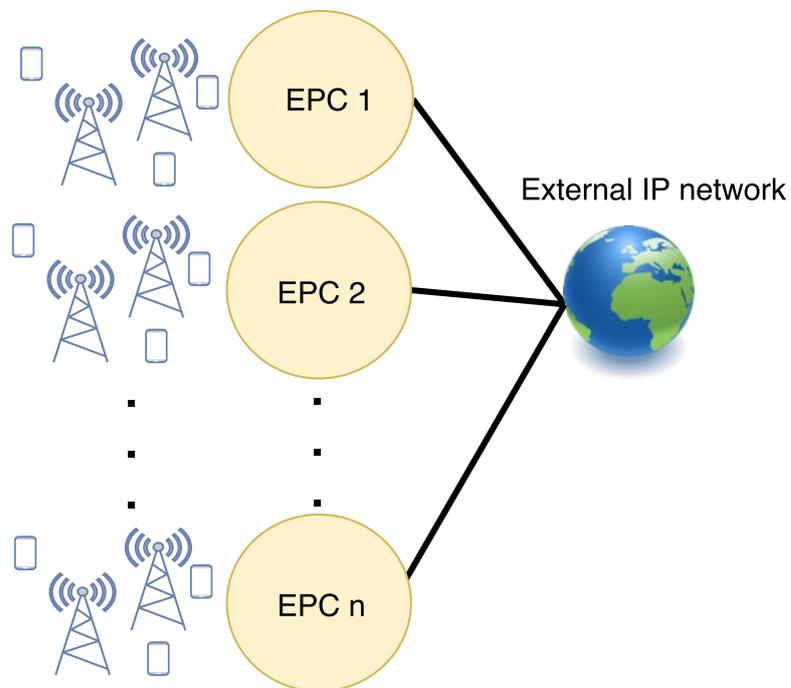


図 2: 複数の EPC で構成された広域モバイルコアネットワーク

2.2 シグナリング手順

図3に、モバイルコアネットワーク機能を実装したオープンソースソフトウェアである、OpenAirInterface (OAI) [22] のソースコードに基づいた、UE をモバイルネットワークに登録するアタッチ処理の際のシグナリング手順を示す。図3に示した矢印はノード間のシグナリングの伝搬を表し、矢印に付された記述はシグナリングメッセージの概要を表す。RRC Process 及び Process は各ノードにおけるシグナリング処理を示す。RRC Process 及び Process の横に記した数値は、その処理に相当する、OAI のソースコードの命令文数を表しており、3章における性能解析において、各シグナリング処理の負荷の大きさを決定する指標として用いる。

2.3 LTE/EPC ノードの配置

本節では、本報告において性能評価の対象とする、広域モバイルコアネットワークの具体的な構成を説明する。図4に文献[23]をもとに作成した日本全土を収容するバックボーンネットワークを示す。この図に示したノードは、札幌、仙台、東京、名古屋、大阪、広島、及び福岡に存在している。これらのノードには、主に MME、HSS 及び PGW が設置されるものとする。その他のノードについては以下のように決定する。文献[24]に基づき、UE の総数の最大値を7,620万台とする。また、文献[25]から得られた各都道府県の人口に比例した台数の UE が、各都道府県に存在し、UE は、各都道府県に設置される2,000台の eNodeB に均等に収容される。SGW は、各県庁所在地に1台ずつ存在し、eNodeB と接続される。SGW は直線距離が最も近い PGW に接続される。MME は、バックボーンネットワークノードに設置され、以下の場合を想定して配置する。

- 1箇所が存在: 東京
- 2箇所が存在: 東京及び大阪
- 7箇所が存在: すべてのバックボーンネットワークノード

HSS は、MME と同じノード上に存在するものとする。PGW は、バックボーンネットワークを構成するすべてのバックボーンネットワークノードに存在する場合と、各都道府県に存在する SGW と同一ノード上 (47箇所) に存在する場合を想定する。図5a-5fに、本報告において評価対象とする広域モバイルコアネットワークの構成を示す。これらは、前述した MME、HSS、及び PGW の配置場所を組み合わせたものである。これらのネットワークを用いて評価することによって、EPC ノードの地理的配置が、UE のベアラ確立時間に与える影響を評価する。

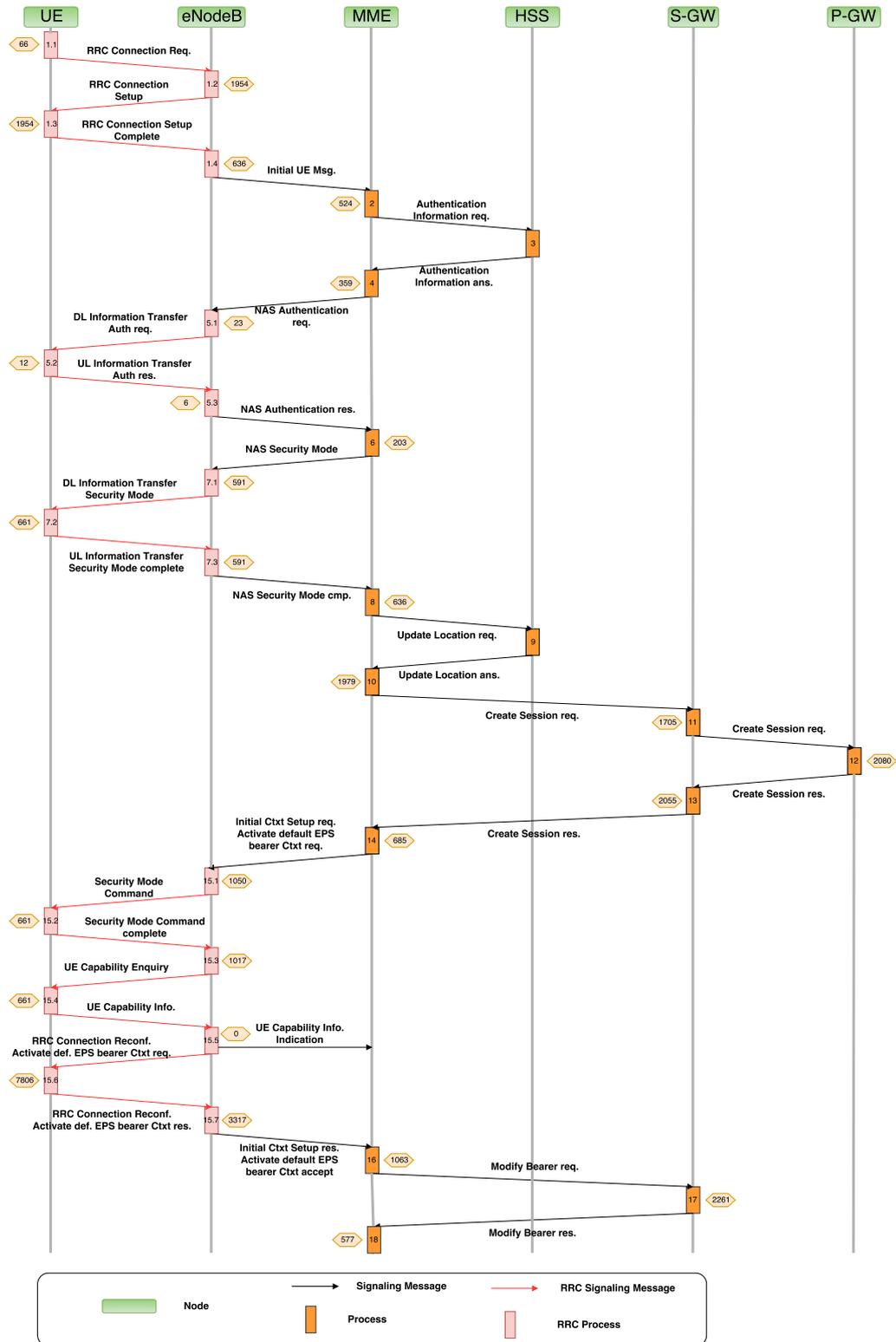


図 3: OAI を基にしたシグナリング手順

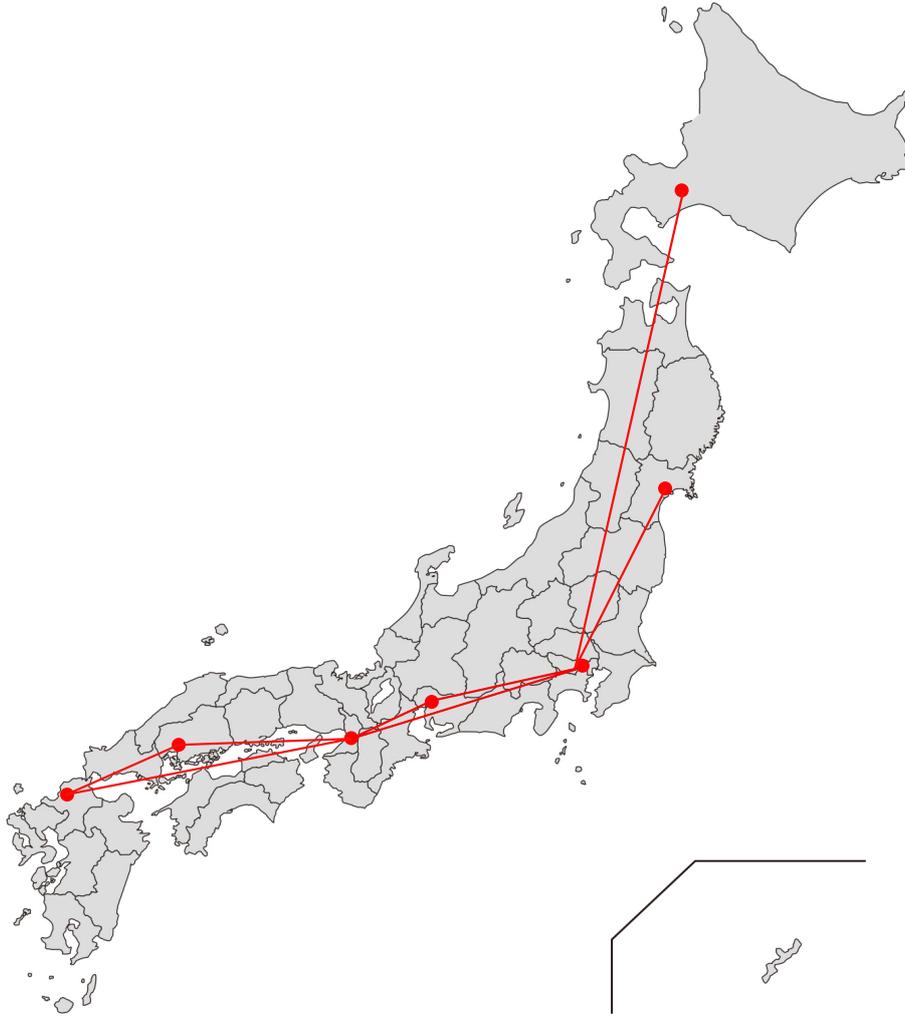
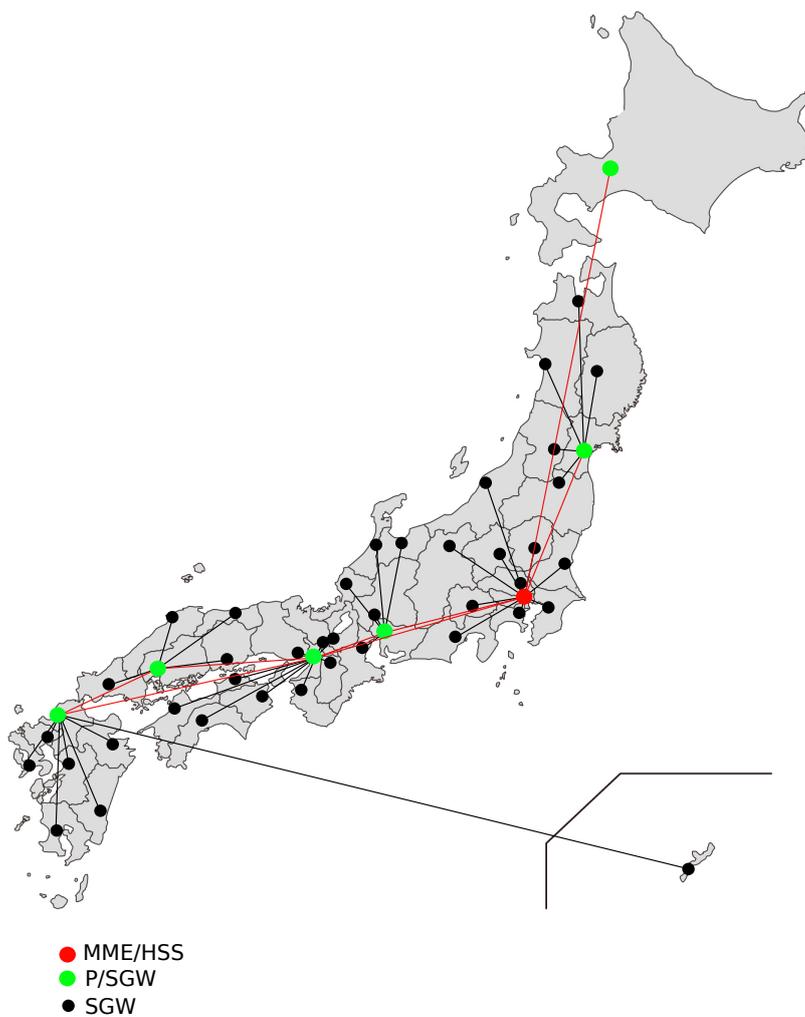
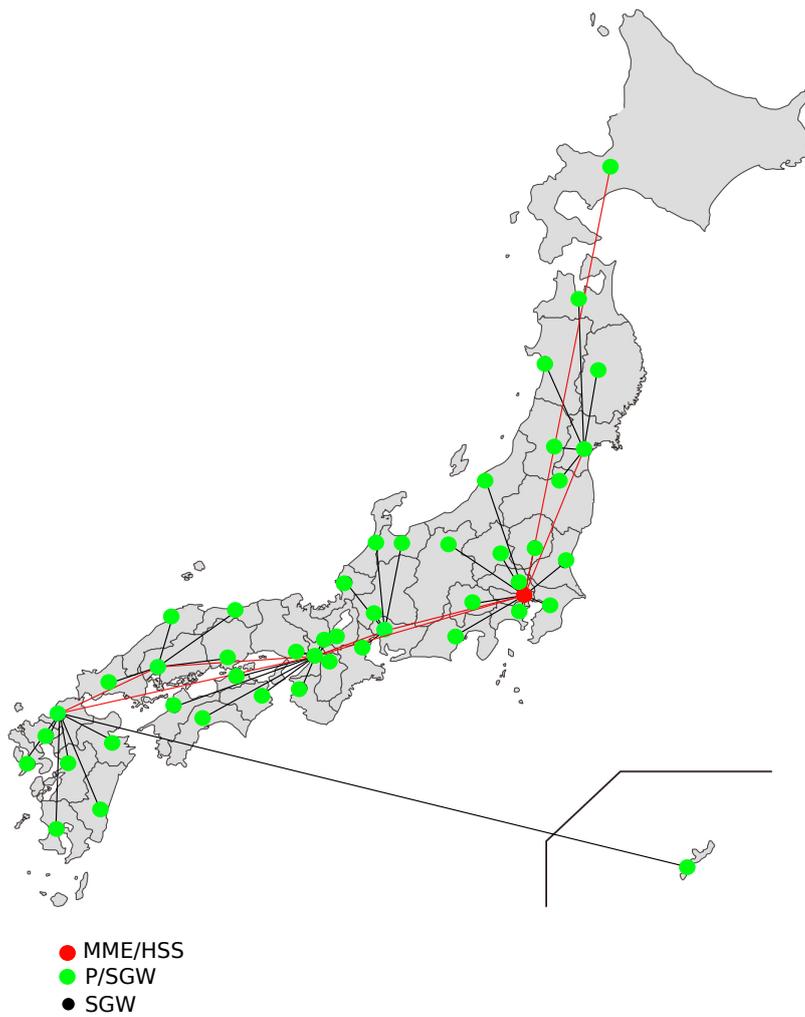


図 4: バックボーンネットワーク

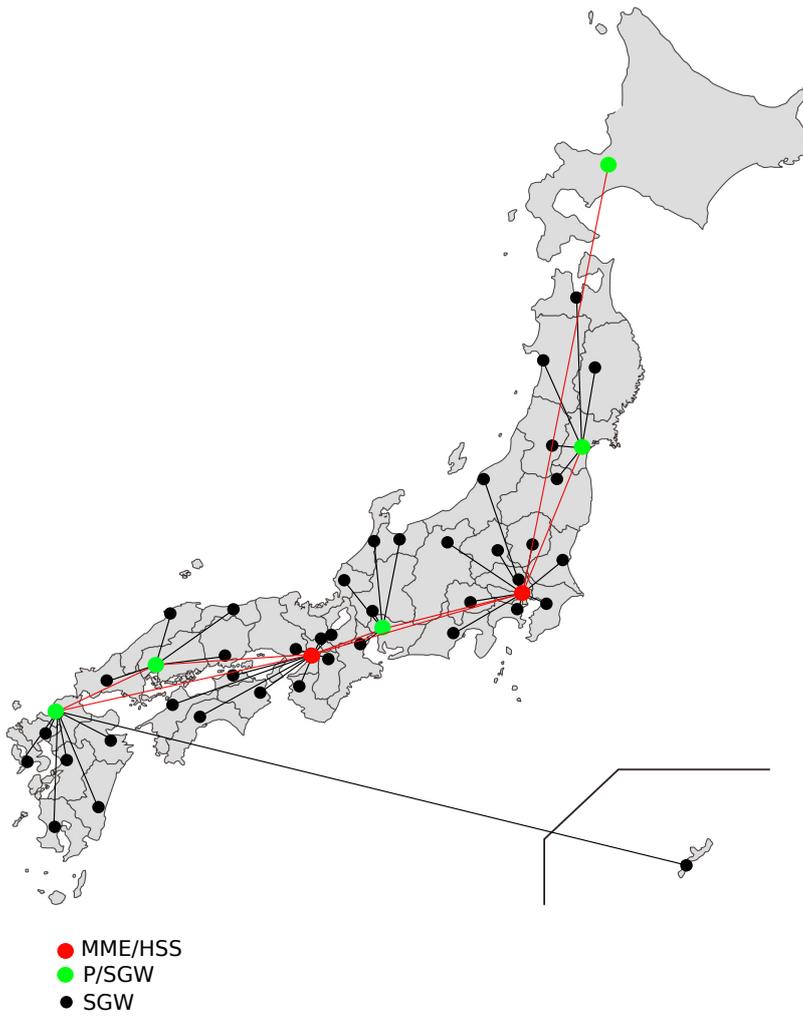


(a) MME 及び HSS が 1 台、PGW が 7 台の場合

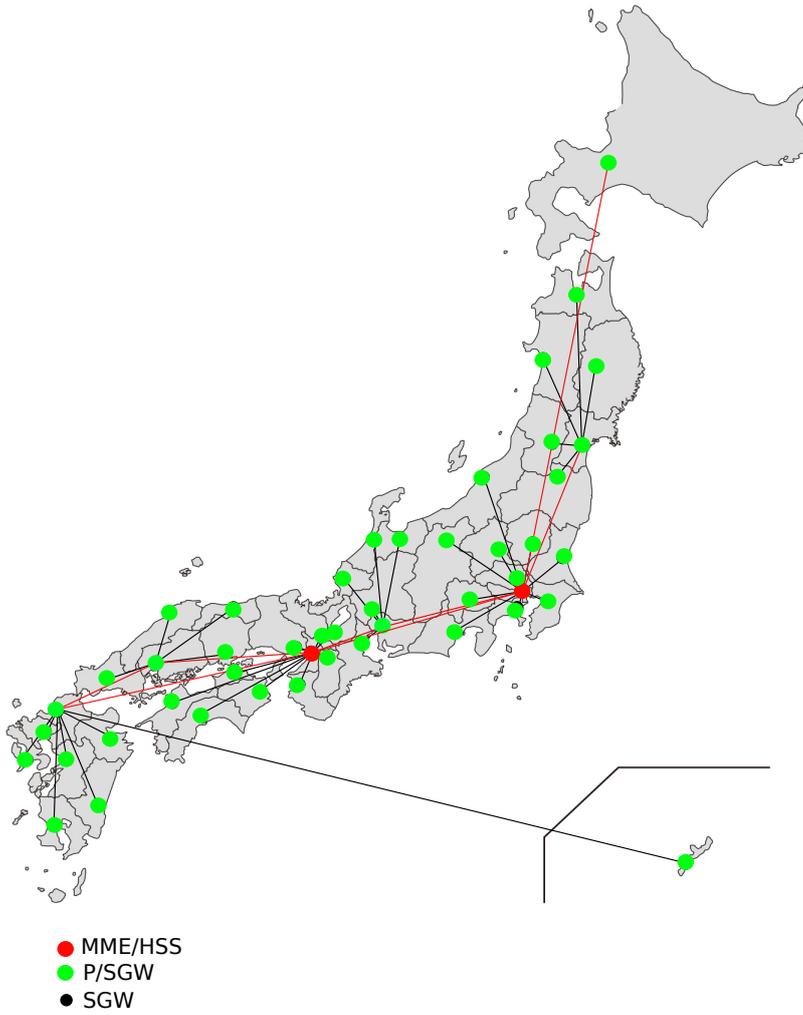
図 5: ネットワーク構成



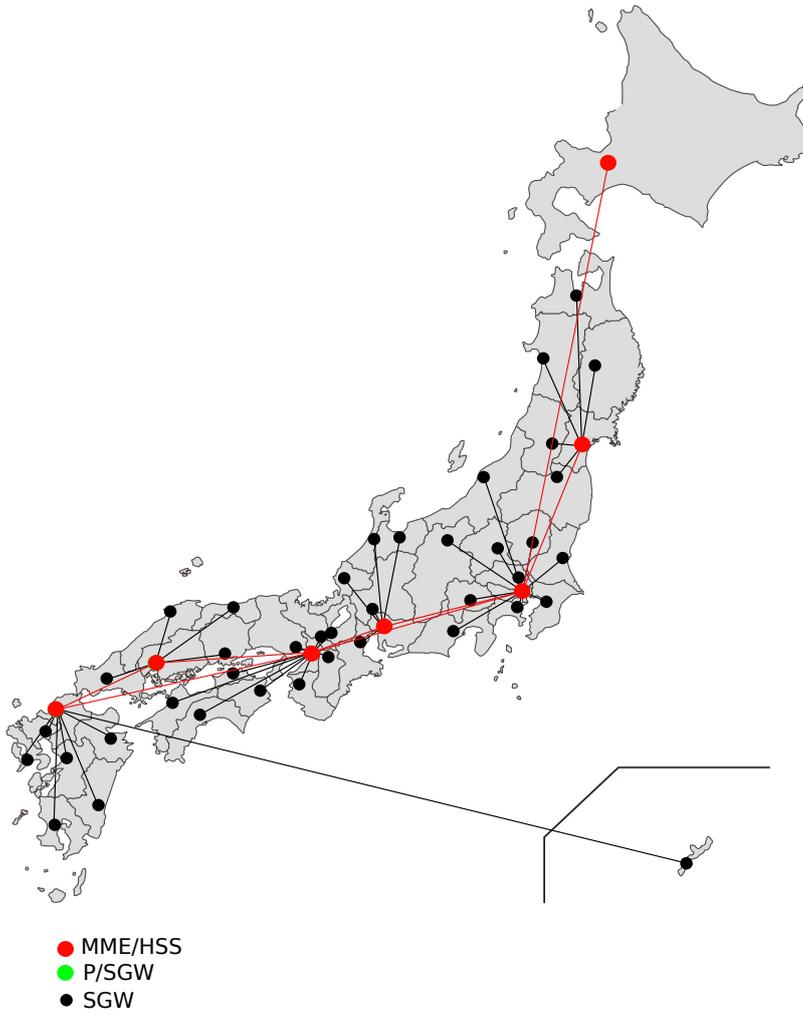
(b) MME 及び HSS が 1 台、PGW が 47 台の場合



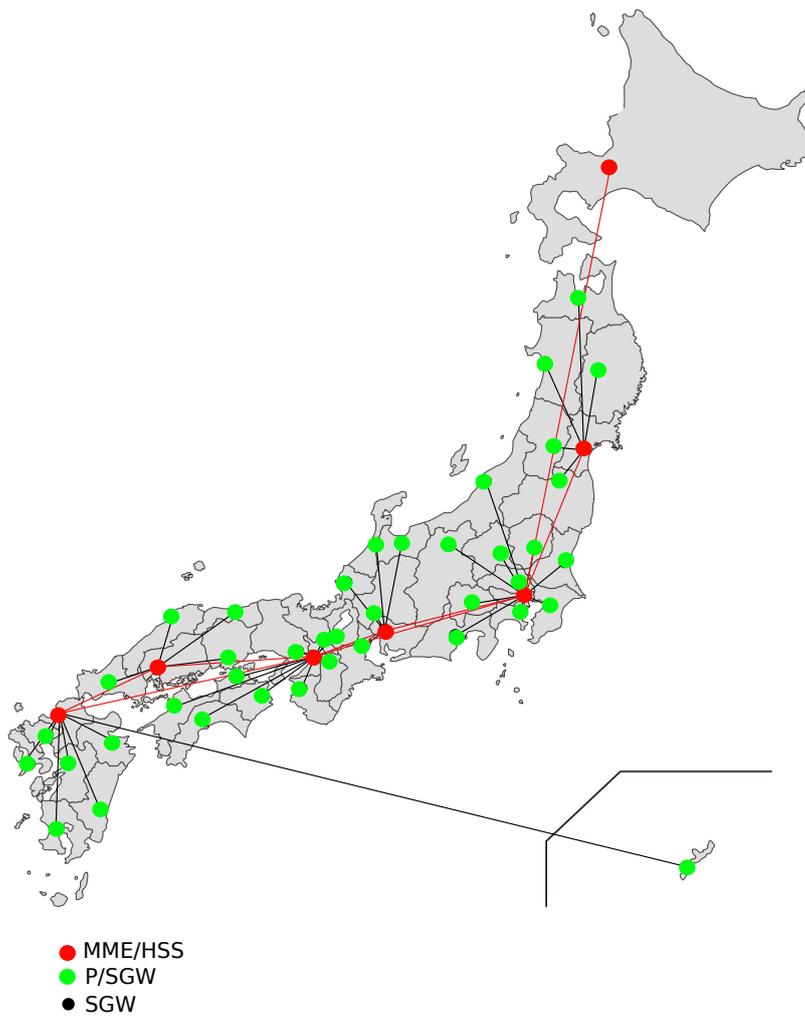
(c) MME 及び HSS が 2 台、PGW が 7 台の場合



(d) MME 及び HSS が 2 台、PGW が 47 台の場合



(e) MME 及び HSS が 7 台、PGW が 7 台の場合



(f) MME 及び HSS が 7 台、PGW が 47 台の場合

2.4 EPC ノードに対するサーバ資源の割り当て

3章に示す解析結果により、SGW、PGW 及び MME がすべての UE を收容するために必要とするサーバ資源の総量が導出される。これらのノードが複数箇所に配置される場合には、各ノードに対して、收容する UE 数に応じた台数のサーバを割り当てる。このとき、サーバ 1 台あたりの資源量の大きさに依存して、各ノードにおいて割り当てられるサーバ資源の過不足が発生する。ここでは、サーバ 1 台あたりの資源量を考慮した、各ノードに割り当てるサーバの台数を決定する方法を示す。具体的には、以下の手順を SGW、PGW 及び MME それぞれに適用し、各ノードに割り当てるサーバの台数を決定する。

サーバを割り当てるノード数を n とし、各ノードを N_i と表記する。サーバ資源の総量を R 、1 台のサーバが持つ資源量を r ($r \leq R/n$)、サーバの総数を K ($R = Kr$)、ノード N_i が必要とするサーバ資源量を D_i とし、割り当てられたサーバ資源量を a_i とする。

Step 1

各ノードにサーバを 1 台割り当てる ($a_1 = a_2 = \dots = a_n = r$)。 $k = n$ とし、Step 2 へ。

Step 2

$k = K$ なら終了。 $k < K$ なら Step 3 へ。

Step 3

a_i/D_i が最も小さいノードに対して、サーバを 1 台割り当てる ($x = \underset{1 \leq i \leq n}{\operatorname{argmin}}(a_i/D_i)$, $a_x = a_x + r$, $k = k + 1$)。 Step 2 へ。

r が R に対して十分小さい場合には、各ノードに必要なサーバ資源が過不足なく割り当てられるため、すべての UE が收容可能となる。一方、 r が大きくなると、各ノードに割り当てられるサーバ資源に発生する過不足が大きくなるため、サーバ資源が不足するノードとサーバ資源に余剰が発生するノードが存在するようになり、モバイルコアネットワーク全体として收容可能な UE 台数が少なくなる。

2.5 EPC 負荷に応じた UE の分散收容

2.4 節で説明したように、サーバ 1 台あたりの資源量が大きい場合には、サーバ資源が不足する EPC ノードが発生するため、その EPC が收容すべきすべての UE を收容することはできない。一方で、過剰なサーバ資源が割り当てられている EPC ノードが收容すべき UE はすべて收容され、かつ、サーバ資源に余剰が発生する。そのようなサーバ資源の不足及び余剰の発生を避けるための解決策として、サーバ 1 台あたりの資源量を小さくすることによって、各地域の需要に合わせてサーバ資源を過不足なく分配する方法が挙げられる。

しかし、そのようにサーバ資源を分配することは現実には難しいと考えられる。なぜなら、そのような制御を実現するためには、各地域で収容される UE 数や、各 UE の通信要求頻度及び移動特性などを正確に把握する必要があり、さらに、それらの時間的変動にサーバ資源の配分を追随させる必要があるためである。また、資源量の小さなサーバを用いることはコスト面で不利である。

一方、LTE ネットワークや第 5 世代移動通信システムにおいては、端末の特性に応じて接続する EPC を切り換えることができる DCN というアーキテクチャが提案されている [19]。DCN においては、UE 固有の情報に基づいて接続する EPC が事前に決められていることが想定されているが、この手法を応用することによって、接続要求が発生した UE を収容する EPC をその負荷などに応じて適応的に切り替えることが可能になると考えられる。図 6 に、UE を収容する EPC を切り替える例を示す。この図においては、EPC 1 の負荷が大きく、収容できない UE が存在する一方、EPC 2 は負荷が小さい。このとき、一部の UE の収容を EPC 1 から EPC 2 に切り替えることにより、EPC 1 においてベアラを確立できなかった UE が、EPC 2 を経由することにより、ベアラを確立できるようになる。本報告では、上述のような手法が実現されることを想定し、EPC の負荷が高く、収容することができない UE を、負荷の低い EPC に分散的に収容することの効果の評価する。以下では、そのための分散収容手法の概要を説明する。詳細な手順は付録 1 に示す。

最初に、ネットワーク中に存在するすべての MME について、MME の配下にある都道府県に存在する UE の総数が、その MME の収容可能な UE 数を超えている場合には、収容できない UE の収容先 MME を、近隣の MME に変更する。これを、すべての UE が収容可能となるか、収容先 MME を変更しても収容できる UE 数に変化がなくなるまで繰り返す。次に、各 MME の配下にある PGW について、PGW の配下にある都道府県に存在する UE の総数が、その PGW の収容可能な UE 数を越えている場合には、収容できない UE の収容先 PGW を、近隣の PGW に変更する。これを、すべての UE が収容可能となるか、収容先 PGW を変更しても収容できる UE 数に変化がなくなるまで繰り返す。最後に、各 PGW の配下にある SGW について、SGW の配下にある都道府県に存在する UE の総数が、その SGW が収容可能な UE 数を超えている場合には、収容できない UE の収容先 SGW を、近隣の SGW に変更する。このようにして、EPC の上位ノードからすべての UE を収容可能か否かを調べ、収容できない場合には近隣のノードへ収容されるように変更する。

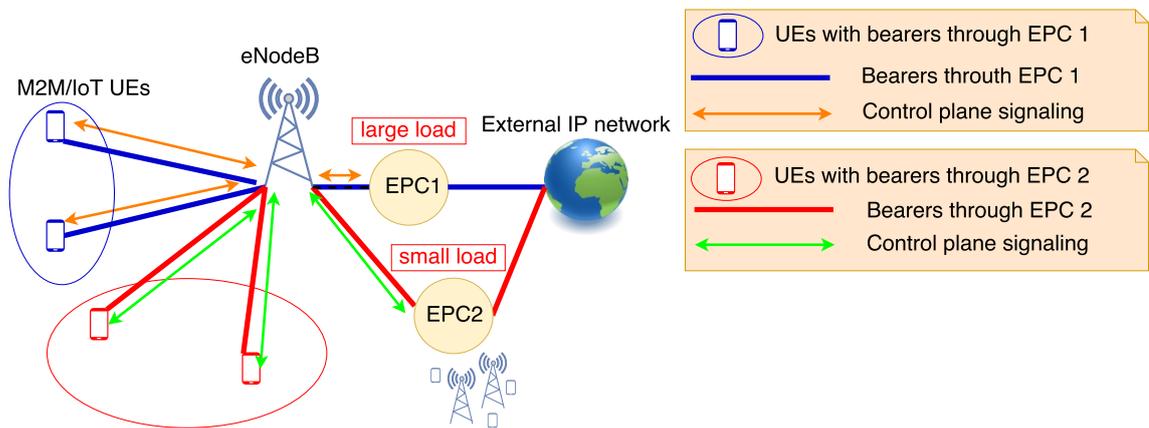


図 6: UE の分散収容

3 性能解析

ある UE を収容する EPC ノードは、その UE の位置及び 2.3 節で示したネットワーク構成に基づいて決定される。具体的には、ある都道府県に存在する UE は、同一都道府県に存在する eNodeB 及び SGW に収容され、さらにその SGW からネットワーク経路が最も短い PGW、及び MME に収容される。以下では、ある UE 及びその UE を収容する EPC ノードが与えられた状況において、2 章において検討したモデル及びシグナリング手順を用いて、UE が通信要求を行ってから、ベアラを確立するまでの時間を解析的に導出する手順を、文献 [21] を引用することで説明する。

3.1 変数定義

解析で用いる変数を以下のように定義する。ただし、UE、eNodeB、MME、HSS、SGW 及び PGW をそれぞれ U 、 B 、 M 、 H 、 S 及び P と略記し、それらを総称するためのノードを N と表記する。また、ノード $N1-N2$ 間の伝搬遅延時間を $\tau_{N1,N2}$ と表現し、ノード $N1-N2$ 間のシグナリングの伝搬回数を $C_{N1,N2}$ と表現する。また、1 回ベアラを確立するときに、ノード N におけるシグナリング処理回数を F_N 、ノード N における i 番目のシグナリングメッセージの処理を行うときに実行される命令文数を L_{Ni} 、ノード N におけるシグナリングメッセージの平均処理遅延時間を t_N と表す。

3.2 ベアラ確立時間の導出

ベアラ確立時間を T 、シグナリングの過程で発生するすべてのノードにおける処理時間 t の総和を T_t 、伝搬遅延時間 τ の総和を T_τ とすると、 T は以下の式 (1) で表せる。

$$T = T_t + T_\tau \quad (1)$$

T_t は U 、 B 、 M 、 S 、 P 、 t_N 及び F_N を用いて図 3 より以下の式 (2) で表せる。

$$T_t = F_U t_U + F_B t_B + F_M t_M + F_S t_S + F_P t_P \quad (2)$$

また、 T_τ は U 、 B 、 M 、 H 、 S 、 P 、 $\tau_{N1,N2}$ 及び $C_{N1,N2}$ を用いて図 3 より以下の式 (3) で表せる。

$$T_\tau = C_{U,B} \tau_{U,B} + C_{B,M} \tau_{B,M} + C_{M,H} \tau_{M,H} + C_{M,S} \tau_{M,S} + C_{S,P} \tau_{S,P} \quad (3)$$

3.2.1 ノードにおけるシグナリング処理時間

ノード N において必要となる処理時間 t_N は、サーバの並列数が r である 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 $E[S]$ 、システム使用率を $\rho = \lambda E[S]$ 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 $E[R]$ は以下の式 (4) で表せる。

$$E[R] = \frac{\rho^r}{1 - \rho} \frac{E[S^2]}{2E[S]} + \frac{1 - \rho^r}{1 - \rho} E[R] \quad (4)$$

ジョブの到着率の導出には、ノード N 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 N におけるシグナリングメッセージの処理遅延時間分布を用いる。シグナリング命令文数分布は、ノードにおいて発生するシグナリング処理に関連するコードの命令文数の分布である。従って、その平均 $E[S_N]$ はノード N におけるすべてのシグナリング処理に関連するコードの命令文数の平均値となる。ノード N の台数を n_N 、単位時間当たり処理できる命令文数を A_N (以降では処理能力と表記する)、UE の台数を n_U 、通信周期を D とすると、ノード N における λ_N 、 $E[S_N]$ 及び $E[S_N^2]$ は以下の式 (5)、(6) 及び (7) で表せる。

$$\lambda_N = \frac{P_N n_U}{D n_N} \quad (5)$$

$$E[S_N] = \sum_{i=1}^{F_N} \frac{L_{N_i}}{A_N F_N} \quad (6)$$

$$E[S_N^2] = \sum_{i=1}^{F_N} \frac{L_{N_i}^2}{A_N^2 F_N} \quad (7)$$

3.2.2 シグナリング通信におけるノード間の伝搬遅延時間

2章で定義したネットワークトポロジに基づいた $\tau_{N1,N2}$ は、ノード間の経路の距離とシグナリングの伝搬速度によって導出できる。 $N1-N2$ 間のリンクの距離を $d_{N1,N2}$ 、 $N1-N2$ 間のシグナリングの伝搬速度を $V_{N1,N2}$ とすると、 $N1-N2$ 間におけるシグナリングの伝搬遅延時間 $\tau_{N1,N2}$ は以下の式 (8) で表せる。

$$\tau_{N1,N2} = \frac{d_{N1,N2}}{V_{N1,N2}} \quad (8)$$

4 性能評価

本章では3章における解析の数値例を示すことによって、2章で検討したネットワークアーキテクチャの性能評価を行う。

4.1 パラメータ設定

UEの通信周期は600 [sec]とし、eNodeB-MME間、MME-SGW間及びSGW-PGW間のシグナリングメッセージの伝搬遅延時間は、3.2.2項に従い、伝搬速度及びノード間の距離をもとに導出する。シグナリングメッセージの伝搬速度は文献[26]に基づき、190,000 [km/sec]とし、隣接するノード間の距離は、Google Map [27]の機能を用いて得られた直線距離を用いる。UE-eNodeB間、及びMME-HSS間のシグナリングメッセージの伝搬遅延時間は固定とし、文献[21]に基づき、それぞれ20 [msec]、1 [msec]とする。処理遅延時間は3.2.1項に示した解析結果を用いて導出する。UE及びeNodeB 1台あたりの処理能力はそれぞれ30,000 [statements/sec]、300,000 [statements/sec]とした。EPCノードの処理能力は2.4節に従い、EPCノードのサーバ資源の総量及びサーバ1台あたりの資源量から導出する。表1に、MME、SGW、PGWそれぞれが持つサーバ資源の総量を示す。これは、サーバ1台あたりの資源量が十分小さく、各ノードへサーバ資源を過不足なく割り当てることができる場合に、すべてのUEを収容するために必要なサーバ資源の総量を、3章で示した解析に基づいて導出したものである。

4.2 評価結果と考察

4.2.1 端末収容台数とベアラ確立時間の関係

図7にMME及びHSSが1台、PGWが7台存在するネットワークモデルにおける、端末収容台数とベアラ確立時間の関係を示す。横軸はUE数7,620万台を100%としたときの、ネットワーク全体におけるUEの収容率を表し、縦軸は各都道府県に存在するUEのベアラ確立時間の平均を表す。この結果より、UEの収容率が100%付近でベアラ確立時間の平均が急激に増加していることがわかる。一方、UEの収容率が90%以下である場合の変化量は小さいことがわかる。

4.2.2 EPCノードの配置の影響

本項では、EPCノードの配置がネットワークに与える影響を評価する。ここでは、サーバ1台あたりの資源量は十分小さく、各ノードが必要とする資源量に合わせて、サーバ資源

が過不足なく割り当てられるものとする。そのため、ノードのサーバ資源の過不足は発生せず、かつ2.5節で説明した分散収容を行うことなく、すべてのUEが収容される。図8-13に、2章で定義した各ネットワークモデルにおける、各都道府県に存在するUEのベアラ確立時間の評価結果を示す。各図の(a)は、ベアラ確立時間に占める、伝搬遅延時間とノード処理時間の内訳の表している。また、各図の(b)は、UE、eNodeB、及び各EPCノード間の伝搬遅延時間の内訳を示している。なお、図中の“node1_node2”という表記は、node1とnode2間において発生したシグナリングメッセージの伝搬遅延時間の総和を意味する。なお、本項における評価では、UEが1,000台存在する場合のベアラ確立時間を示している。これは、4.2.1項で示したように、UEの収容率が100%に近づかない限りは、ベアラ確立時間はほぼ一定であるためである。

図8(a)-13(a)に示した結果より、EPCノードの配置やUEが存在する都道府県の違いがノード処理時間に与える影響は、伝搬遅延時間に比べて小さいことがわかる。具体的には、UEが存在する都道府県がノード処理時間に与える影響は最大で0.81%、EPCノードの配置が与える影響は最大で0.82%であった。

図8(b)-13(b)に示した結果より、UE-eNodeB間及びMME-HSS間のシグナリングメッセージの伝搬遅延時間は、EPCノードの配置及び都道府県に依らず一定であることがわかる。一方、eNodeB-MME間、MME-SGW間及びSGW-PGW間のシグナリングメッセージの伝搬遅延時間は、EPCノードの配置及びUEが存在する都道府県に応じて変化する。図8(b)及び図9(b)においては、MMEが東京のみに存在するため、東京から地理的に離れている都道府県におけるeNodeB-MME間及びMME-SGW間の伝搬遅延時間が大きくなっていることが確認できる。また、図10(b)及び図11(b)においては、MMEが東京及び大阪に存在するため、これらの地点から地理的に離れた都道府県におけるeNodeB-MME間及びMME-SGW間の伝搬遅延時間が大きくなっていることが確認できる。図8(b)及び図9(b)の結果と図10(b)及び図11(b)の結果を比較すると、西日本に存在する都道府県の伝搬遅延時間が減少していることがわかる。これは西日本の都道府県に存在するUEが、東京よりも地理的に近い大阪のMMEに収容されたためである。図12(b)及び図13(b)の結果では、MMEが7箇所分散配置されるため、eNodeB-MME間及びSGW-MME間の伝搬遅延時間が全体的に減少すると同時に、UEが存在する都道府県による伝搬遅延時間の差が小さくなっていることが確認できる。しかし、沖縄に存在するUEの伝搬遅延時間は、他の都道府県に存在するUEの伝搬遅延時間と比べて依然として大きい。これは、沖縄はバックボーンネットワークからの距離が他の都道府県に比べて大きいためである。

一方、SGW-PGW間の伝搬遅延時間に着目すると、図8(b)、図10(b)及び図12(b)においては、PGWが7箇所存在するため、一部の都道府県に存在するUEにおいて、SGW-PGW間の伝搬遅延が発生している。しかし、図9(b)、図11(b)及び図13(b)においては、

PGW が各都道府県に分散配置されているため、すべての都道府県に存在する UE について、SGW-PGW 間の伝搬遅延時間が 0 になり、全体の伝搬遅延時間の減少に寄与していることがわかる。さらに、図 8-13 の結果より、EPC ノードを分散配置することによって、UE のベアラ確立時間が最大で 7.5%、平均で 2.7% 削減されることがわかった。

表 1: サーバ資源の総量

ノード	サーバ資源 [statements/sec]
SGW	7.65×10^8
PGW	2.65×10^8
MME	7.65×10^8

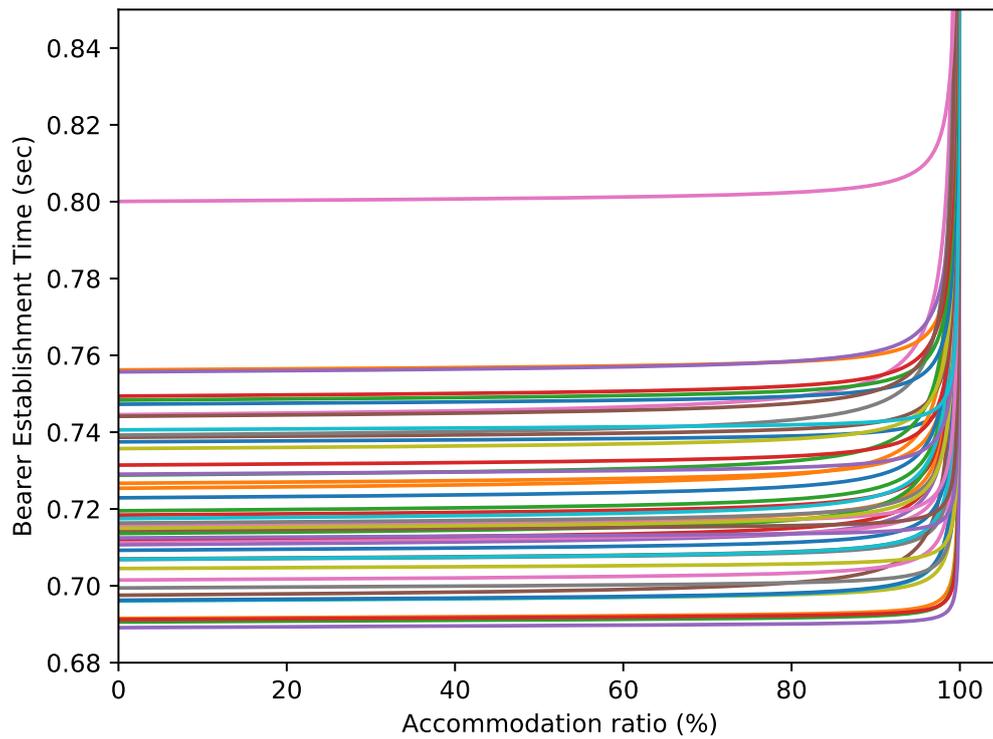
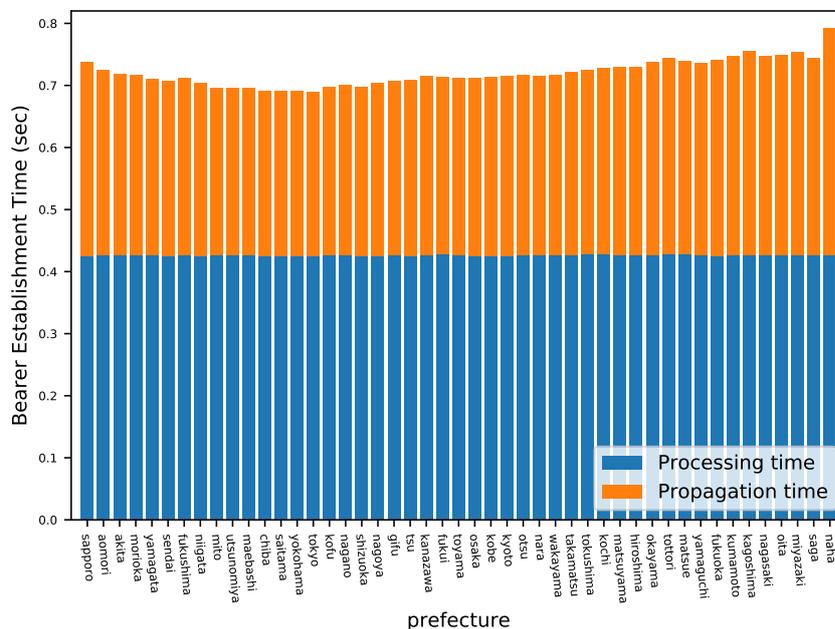
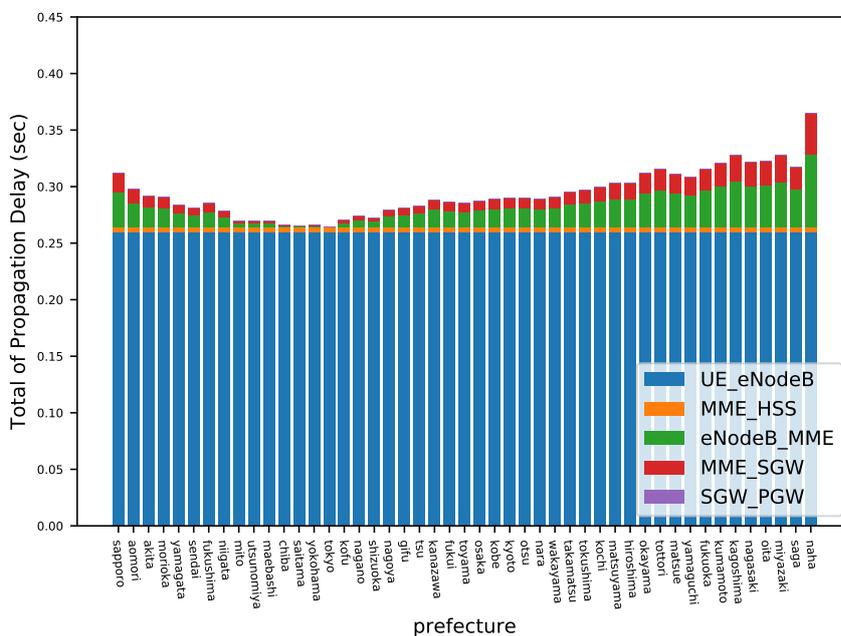


図 7: UE の収容率とベアラ確立時間の関係



(a) 伝搬遅延時間とノード処理時間の内訳



(b) 伝搬遅延時間の内訳

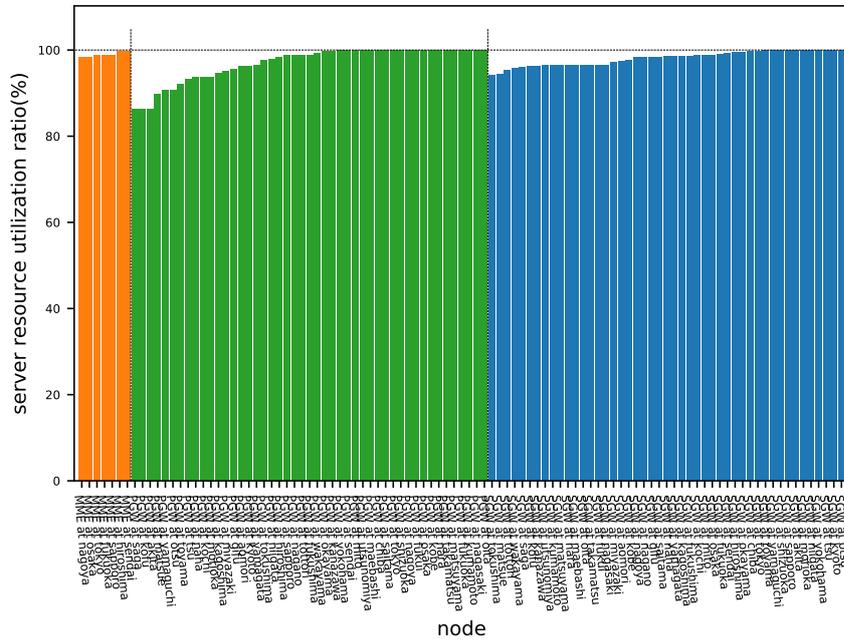
図 9: MME 及び HSS が 1 台、PGW が 47 台の場合のペア確立時間

4.2.3 サーバ1台あたりの資源量の影響

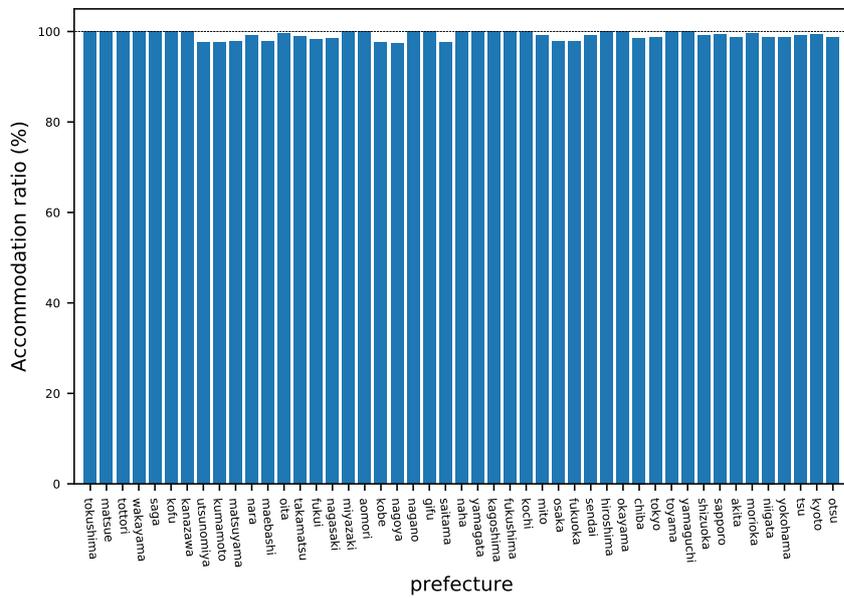
本項では、サーバ1台あたりの資源量がネットワークに与える影響を評価する。ここでは、UEの分散収容を適用しない場合の結果を示す。

図14-18に、MME及びHSSが1台、PGWが7台存在するネットワークモデルにおいて、サーバ1台あたりの資源量を変化させた場合の評価結果を示す。なお、図18は、各ノードに均等に資源を割り当てた場合の評価結果である。各図の(a)は、各EPCノードにおけるサーバ資源の使用率を表している。また、各図の(b)は、各都道府県におけるUEの収容率を表している。図14(a)-18(a)から、サーバ1台あたりの資源量が大きくなると、各EPCノードのサーバ資源の使用率が減少することが確認できる。図14(a)においては、サーバ資源の使用率が100%付近であるのに対し、図18(a)においてはサーバ資源の使用率が60%を下回っているEPCノードが複数存在する。さらに、図14(b)-18(b)から、サーバ1台あたりの性能が大きくなるに従い、各都道府県のUEの収容率が減少することがわかる。また、ネットワーク全体でのUEの収容率は、サーバ1台あたりの資源量が100,000 [statements/sec]、400,000 [statements/sec]、1,600,000 [statements/sec]、6,400,000 [statements/sec]及びサーバ資源を各EPCノードに均等に分配した場合において、それぞれ99.9%、94.4%、97.9%、91.3%及び58.4%であった。これらの結果により、サーバ1台あたりの資源量が大きくなることで、各ノードに割り当てられるサーバ資源量に過不足が発生するため、サーバ資源が過剰に割り当てられたEPCノードではサーバ資源の使用率が低下し、サーバ資源が不足しているEPCノードではすべてのUEを収容できず、ネットワーク全体でのUEの収容率が低下することがわかる。

図19-22に、MME及びHSSが7台、PGWが47台存在するネットワークモデルにおいて、同様に評価した結果を示す。なお、ネットワーク全体でのUEの収容率は、サーバ1台あたりの資源量が100,000 [statements/sec]、400,000 [statements/sec]、1,600,000 [statements/sec]及びサーバ資源を各EPCノードに均等に分配した場合において、それぞれ99.8%、98.7%、93.2%及び58.3%であった。図14-18と図19-22に関して、サーバ1台あたりの資源が同じ評価結果を比較すると、EPCノードをより分散して配置することによって、サーバ資源の使用率とUEの収容率が小さくなることがわかる。これはネットワーク全体に存在するEPCノードの数が増加し、各ノードが必要とするサーバ資源量が小さくなったことにより、各EPCノードが必要とするサーバ資源量と、割り当てられるサーバ資源量との差が大きくなるためである。一方で、4.2.2項で示した結果より、EPCノードを分散配置することで、ベアラ確立時間は減少する。これらの結果から、EPCノードを分散配置する際は、ベアラ確立時間とサーバ資源の使用率及びUEの収容率との間にトレードオフの関係があることがわかった。



(a) サーバ資源の使用率



(b) UE の収容率

図 20: MME 及び HSS が 7 台、PGW が 47 台、サーバ 1 台あたりの資源が 400,000 [statements/sec] の場合の評価結果

4.2.4 EPC 負荷に応じた UE の分散収容の効果

本項では、2.5 節で述べた UE の分散収容の効果を評価する。

図 23 に MME 及び HSS が 1 台、PGW が 7 台存在するネットワークモデルにおいて、各 EPC ノードに均等にサーバ資源を分配し、UE の分散収容を適用した場合の評価結果を示す。比較のために、図 24 に、分散収容を適用しない場合の評価結果を示す。これらの図から、UE を分散収容することによって、EPC ノードにおけるサーバ資源の使用率が向上し、各都道府県における UE の収容率が增加することがわかる。ネットワーク全体の UE の収容率は、UE を分散収容した場合には 81.3%、UE を分散収容しない場合には 58.4% であった。図 25 に、UE の分散収容を適用した場合の、各都道府県に存在する UE のベアラ確立時間の分布を示す。この図から、UE の分散収容を適用することによって、UE のベアラ確立時間が増加する場合と減少する場合があることがわかる。これは、分散収容を行う際に、UE と EPC ノード間の距離が、増加する場合と減少する場合があるためである。しかし、分散収容によるベアラ確立時間の増加割合の最大値は 2.9% であり、その影響は小さいことがわかった。

図 26-28 に、MME 及び HSS が 7 台、PGW が 47 台存在するネットワークモデルにおいて同様に評価した結果を示す。なお、UE の分散収容を適用する場合と適用しない場合における、ネットワーク全体の UE の収容率はそれぞれ、81.1%、58.3% であった。また、UE の分散収容を適用することによる、ベアラ確立時間の増加率は最大で 5.7% であった。図 23-25 と図 26-28 を比較すると、EPC ノードをより分散して配置することによって、UE の分散収容がベアラ確立時間の増大幅に与える影響が大きくなることがわかる。これは、EPC ノードを分散配置することによって、UE の分散収容を適用した際に、UE を収容する MME が変化し、eNodeB-MME 間の伝搬遅延時間が増加する場合があるためである。

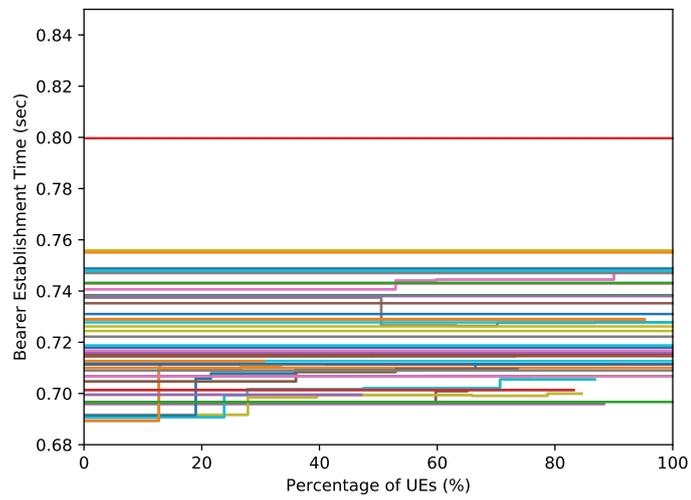
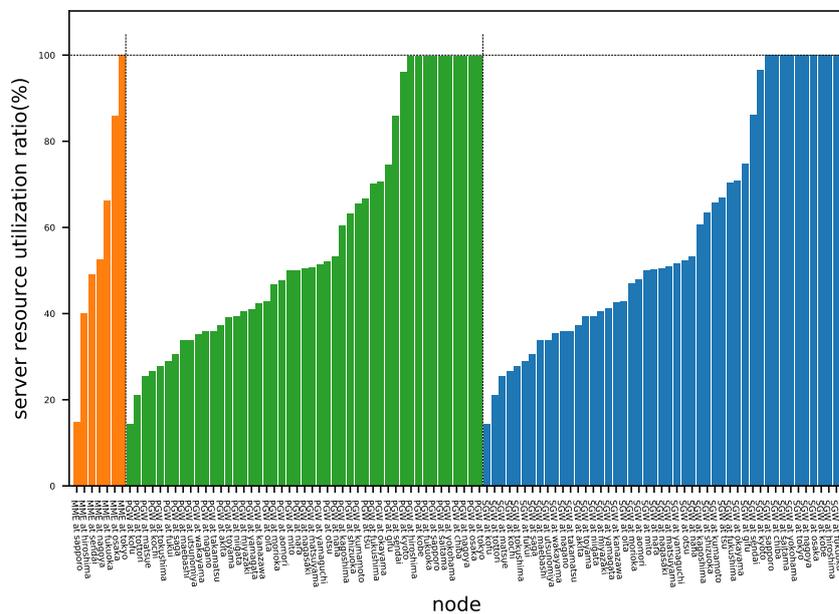
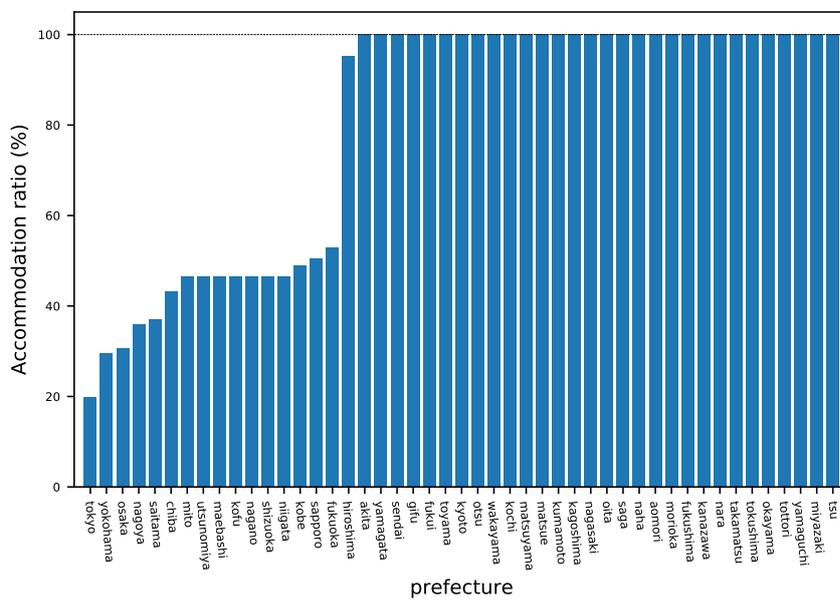


図 25: MME 及び HSS が 1 台、PGW が 7 台の場合において、UE の分散収容がベアラ確立時間の分布に与える影響



(a) サーバ資源の使用率



(b) UE の収容率

図 27: MME 及び HSS が 7 台、PGW が 47 台、UE の分散収容を適用しない場合の評価結果

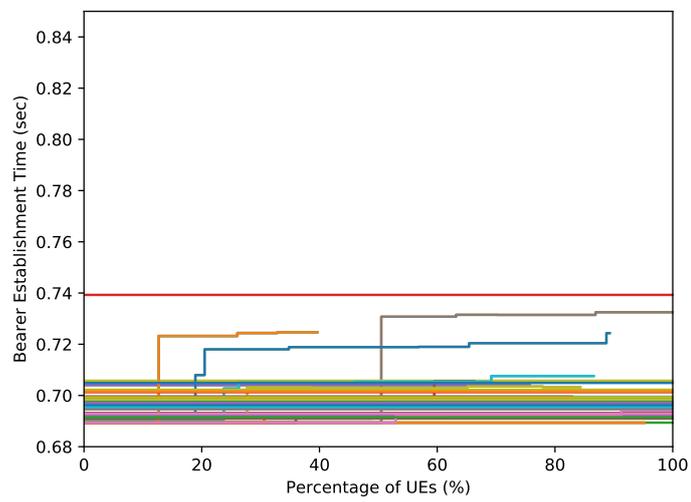


図 28: MME 及び HSS が 7 台、PGW が 47 台の場合において、UE の分散収容がベアラ確立時間の分布に与える影響

5 まとめと今後の課題

本報告では、複数の EPC から構成される広域モバイルコアネットワークの性能向上を目的として、EPC ノードの配置、EPC ノードへのサーバ資源の割り当て方法及び UE の分散収容手法が広域モバイルコアネットワークに与える影響を評価することによって、広域モバイルネットワークの性能向上に関する検討を行った。その結果、EPC ノードを適切に分散配置することにより、ベアラ確立時間が最大 7.5% 削減することがわかった。また、サーバ資源の割り当て方法により、ネットワーク全体における収容可能な UE 数が最大で 42% 変動することを示した。さらに、EPC ノードの負荷に応じて UE を分散収容する手法を適用することによって、ネットワーク全体における収容可能な UE 数が最大で 23% 増加する一方で、ベアラ確立時間が最大 5.7% 増加することを示した。

今後の課題としては、UE の分散収容手法を具体化し、制御プレーンにおいて新たに必要となるシグナリング手順及びそれにより発生するノード負荷を明らかにすることで、より現実的な状況における評価を行いたい。また、本報告で構築したモデルを拡張し、広域ネットワークに対してノード仮想化や C/U プレーン分離などの、モバイルコアネットワークの負荷を低減する様々な手法を適用することの効果も明らかにすることも重要である。

謝辞

本特別研究報告の作成にあたり、多くの先生方にご指導を頂きました。特に、松岡茂人教授、村田正幸教授、長谷川剛准教授並びに樽谷優弥助教には、日々の研究から本報告の執筆に至るまで、非常に的確、かつきめ細やかにご指導を頂きました。私の実力不足のせいでも多くのご迷惑をおかけしましたこととお詫びすると同時に、最後までご指導頂いたことに心より感謝申し上げます。また、松岡研究室の先輩方にも多くのご指導を頂きました。本報告を作成するにあたり、辛い思いをした時期もありましたが、そんなとき、適切なアドバイスや励ましの言葉をかけていただいた先輩方への御恩は一生忘れません。最後に、素晴らしい学習環境を提供して下さった、大阪大学並びに松岡研究室に感謝いたします。

参考文献

- [1] D. Astely, E. Dahlman, A. Furuskär, Y. Jading, M. Lindström, and S. Parkvall, “LTE: the Evolution of Mobile Broadband,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 47, no. 4, pp. 44–51, Apr. 2009.
- [2] P. Marsch, I. D. Silva, O. Bulakci, M. Tesanovic, S. E. E. Ayoubi, T. Rosowski, A. Kalokylos, and M. Boldi, “5G Radio Access Network Architecture: Design Guidelines and Key Considerations,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 11, pp. 24–32, Nov. 2016.
- [3] F. Ghavimi and H. H. Chen, “M2M Communications in 3GPP LTE/LTE-A Networks: Architectures, Service Requirements, Challenges, and Applications,” *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 17, no. 2, pp. 525–549, Secondquarter 2015.
- [4] A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari, and M. Ayyash, “Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols and Applications,” *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 17, pp. 2347–2376, Nov. 2015.
- [5] U. Raza, P. Kulkarni, and M. Sooriyabandara, “Low Power Wide Area Networks: An Overview,” *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 19, no. 2, pp. 855–873, Secondquarter 2017.
- [6] L. Schnel, “What is LOLAWAN.” available at <http://blog.teleplanglobe.no/what-is-lorawan>.
- [7] ソフトバンク株式会社, “ソフトバンク株式会社プレスリリース: 低消費電力での IoT を実現する「LoRaWANTM」提供開始.” available at https://www.softbank.jp/corp/group/sbm/news/press/2016/20160912_01/.
- [8] “NTTdocomo 報道発表資料: 様々な IoT サービスに利用可能な LPWA 対応 IoT ゲートウェイ機器の実証実験を開始.” available at https://www.nttdocomo.co.jp/info/news_release/2016/11/15_00.html.
- [9] “Sigfox - The Global Communications Service Provider for the Internet of Things (IoT).” available at <https://www.sigfox.com/en>.

- [10] “京セラコミュニケーションシステム株式会社ニュースリリース: IoT ネットワーク「SIGFOX」を日本で展開し、LPWA ネットワーク事業へ参入.” available at <http://www.kccs.co.jp/release/2016/1109/>.
- [11] I. Widjaja, P. Bosch, and H. L. Roche, “Comparison of MME Signaling Loads for Long-Term-Evolution Architectures,” in *Proceedings of 2009 IEEE 70th Vehicular Technology Conference Fall*, pp. 1–5, IEEE, Sept. 2009.
- [12] 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 2013 IEEE SDN for Future Networks and Services (SDN4FNS)*, pp. 1–7, Nov. 2013.
- [13] A. Basta, W. Kellerer, M. Hoffmann, H. J. Morper, and K. Hoffmann, “Applying NFV and SDN to LTE Mobile Core Gateways, the Functions Placement Problem,” in *Proceedings of AllThingsCellular@SIGCOMM*, Aug. 2014.
- [14] 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, vol. 114, no. 160, pp. 51–56, 2014 年 7 月.
- [15] 岩井 孝法, 長谷川 剛, 若宮 直紀, 本吉 彦, 吉川 隆士, “モバイルコアネットワークにおけるトンネル集約方式,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 112, no. 350, pp. 115–120, 2012 年 12 月.
- [16] 櫻井 駿, 長谷川 剛, 若宮 直紀, 岩井 孝法, “モバイルネットワークにおける通信制御コスト削減のための端末集約手法の性能評価,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 113, no. 56, pp. 193–198, 2013 年 5 月.
- [17] 岩井 孝法, 長谷川 剛, 若宮 直紀, “モバイルコアネットワークへのアクセス負荷を平滑化するためのバックオフ機構の拡張 (モバイルネットワークとアプリケーション),” 電子情報通信学会技術研究報告 = IEICE technical report : 信学技報, vol. 113, no. 398, pp. 67–72, 2014 年 1 月.
- [18] S. Abe, G. Hasegawa, and M. Murata, “Effects of C/U Plane Separation and Bearer Aggregation in Mobile Core Network,” *IEEE Transactions on Network and Service Management*, vol. PP, no. 99, pp. 1–1, Advance Publication ,2018.
- [19] 藤島 大輔, IM ザヒドル, “端末種別に基づいてトラフィック分離を実現する Dedicated Core Network,” *NTT Docomo テクニカル ジャーナル*, vol. 23, no. 4, 2016 年 1 月.

- [20] 阿部 修也, 長谷川 剛, 村田 正幸, “シグナリング処理負荷を考慮したノード仮想化及びプレーン分離を適用したモバイルコアネットワークの性能評価,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 115, no. 507, pp. 41–46, 2016 年 3 月.
- [21] S. Abe, G. Hasegawa, and M. Murata, “Design and Performance Evaluation of Bearer Aggregation Method in Mobile Core Network with C/U Plane Separation,” in *Proceedings of 2017 IFIP Networking Conference (IFIP Networking) and Workshops*, pp. 1–8, June 2017.
- [22] “OpenAirInterface.” available at <http://www.openairinterface.org/>.
- [23] “KDDI インターネットゲートウェイ: 国内ネットワークバックボーン — インターネット — 法人・ビジネス向け — KDDI 株式会社.” available at <http://www.kddi.com/business/network/internet/internet-gateway/domestic/>.
- [24] “NTTdocomo: 事業データ.” available at <https://www.nttdocomo.co.jp/corporate/ir/finance/operator/>.
- [25] “総務省: 住民基本台帳に基づく人口、人口動態及び世帯数.” available at http://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01gyosei02_02000148.html.
- [26] D. Li, D. Wang, N. Takagi, T. Watanabe, and A. Kato, “A New Approach for Location of Electrical Faults Along Power Transmission Lines,” *IEEJ Transactions on Power and Energy*, vol. 121, no. 6, pp. 729–734, 2001.
- [27] “Google Map.” available at <https://www.google.ru/maps>.

付録

1 UEの分散収容の手順

以下に示すUEの収容されるノードを変化させる手順の擬似コードでは複数のEPCノードの集合をリストとして表現している箇所が存在する。特に指定がない場合、リストで表現されたEPCノードは表2で示した、EPCノードの存在する都市に対応するインデックス番号に関して昇順に並んでいるものとする。また、FOREACH文などでリスト内の要素を順番に選択している箇所では、インデックス番号の小さい順に選択されているものとする。

```
1 # 以下のコードでは、あるEPCノードをXと定義したとき、Xの収容可能なUEの台数をX_U、Xの収容しているUEの台数をX_uと
   定義する。
2 UE_all <- 76200000 #UEの総数
3 S_statement <- 1台のUEが1回ペアラを確立する時にSGWで実行されるプログラム行数
4 P_statement <- 1台のUEが1回ペアラを確立する時にPGWで実行されるプログラム行数
5 M_statement <- 1台のUEが1回ペアラを確立する時にMMEで実行されるプログラム行数
6 D <- 1台UEがパケットを送信する周期
7 S <- SGWの集合
8 FOREACH S
9   S_p <- Sの存在する都道府県の人口割合
10  S_u <- UE_all * S_p
11  S_r <- Sに割り当てられたサーバ資源
12  S_U <- S_r * D / S_statement
13 P <- PGWの集合
14 FOREACH P
15   S <- Pの収容するSGWの集合
16   P_u <- 0
17   FOREACH S
18     P_u <- P_u + S_u
19   P_r <- Pに割り当てられたサーバ資源
20   P_U <- P_r * D / P_statement
21 M <- MMEの集合
22 FOREACH M
23   P <- Mの収容するPGWの集合
24   M_u <- 0
25   FOREACH P
26     M_u <- M_u + P_u
27   M_r <- Mに割り当てられたサーバ資源
28   M_U <- M_r * D / M_statement
29
30 [LABEL]
31
32 P <- PGWの集合
33 FOREACH P
34   S <- Pの収容するSGWの集合
35   P_u <- 0
36   FOREACH S
37     P_u <- P_u + S_u
38 M <- MMEの集合
39 FOREACH M
40   P <- Mの収容するPGWの集合
41   M_u <- 0
42   FOREACH P
43     M_u <- M_u + P_u
44 M <- MMEの集合
45 FOREACH M
46   IF M_u > M_U
47     P <- Mの収容するPGWの集合
48     (Selected_PGW,ue) <- Select_Appropriate_node(P,M_u - M_U)
49     S <- Selected_PGWの収容するSGWの集合
50     (Selected_SGW,ue) <- Select_Appropriate_node(S,ue)
51     Candidate_SGW_List <- SGWの集合からMの収容しているSGWを除いた集合
52     WHILE Candidate_SGW_Listの要素数 > 0
53       Candidate_SGW <- Find_Closer_node(Selected_SGW,Candidate_SGW_List)
54       ue_acceptable <- Acceptable_UE(Candidate_SGW)
55       IF ue_acceptable > 0
56         IF ue > ue_acceptable
57           ue <- ue_acceptable
58         ENDF
59       Selected_SGW_u <- Selected_SGW_u - ue
```

```

60         Candidate_SGW_u <- Candidate_SGW_u + ue
61         [LABELに戻る]
62     ELSE
63         Candidate_SGW_ListからCandidate_SGWの要素を削除
64     ENDIF
65 ENDWHILE
66 Selected_SGW_u <- Selected_SGW_u - ue
67 # 収容を切り替えるSGWがないため、UEを収容できない
68 [LABELに戻る]
69 ELSE
70     P <- Mの収容しているPGWの集合
71     FOREACH P
72         IF P_u > P_U
73             S <- Pの収容しているSGWの集合
74             (Selected_SGW,ue) <- Select_Appropriate_node(S,P_u - P_U)
75             Candidate_SGW_List <- SGWの集合からPの収容しているSGWを除いた集合
76             WHILE Candidate_SGW_Listの要素数 > 0
77                 Candidate_SGW <- Find_Closer_node(Selected_SGW,Candidate_SGW_List)
78                 ue_acceptable <- Acceptable_UE(Candidate_SGW)
79                 IF ue_acceptable > 0
80                     IF ue > ue_acceptable
81                         ue <- ue_acceptable
82                     ENDIF
83                     Selected_SGW_u <- Selected_SGW_u - ue
84                     Candidate_SGW_u <- Candidate_SGW_u + ue
85                     [LABELに戻る]
86                 ELSE
87                     Candidate_SGW_ListからCandidate_SGWを削除
88                 ENDIF
89             ENDWHILE
90             Selected_SGW_u <- Selected_SGW_u - ue
91             # 収容を切り替えるSGWがないため、UEを収容できない
92             [LABELに戻る]
93         ELSE
94             S <- Pの収容しているSGWの集合
95             FOREACH S
96                 IF S_u > S_U:
97                     Selected_SGW <- S
98                     ue <- S_u - S_U
99                     Candidate_SGW_List <- SGWの集合からSを除いた集合
100                    WHILE Candidate_SGW_Listの要素数 > 0
101                        Candidate_SGW <- Find_Closer_node(Selected_SGW,Candidate_SGW_List)
102                        ue_acceptable <- Acceptable_UE(Candidate_SGW)
103                        IF ue_acceptable > 0
104                            IF ue > ue_acceptable
105                                ue <- ue_acceptable
106                            ENDIF
107                            Selected_SGWの_u <- Selected_SGW_u - ue
108                            Candidate_SGW_u <- Candidate_SGW_u + ue
109                            [LABELに戻る]
110                        ELSE
111                            Candidate_SGW_ListからCandidate_SGWを削除
112                        ENDIF
113                    ENDWHILE
114                    Selected_SGW_u <- Selected_SGW_u - ue
115                    # 収容を切り替えるSGWがないため、UEを収容できない
116                    [LABELに戻る]
117                ENDIF
118                k <- k + 1
119            ENDFOREACH
120        ENDIF
121        j <- j + 1
122    ENDFOREACH
123 ENDIF
124 i <- i + 1
125 ENDFOREACH
126 [終了]
127
128
129 # 引数Iの各ノードのサーバ資源の使用率(ノードの収容しているUE数 / ノードの収容可能なUE数)を可能な限り均等にする
    ことを目的とし、引数Iのノードの中からUEの収容されるノードを変化させるノードをIつ目の返り値とし、収容されるノ
    ードを変化させるUEの台数を2つ目の返り値として返す関数
130 [Select_Appropriate_node]
131 Select_Appropriate_node(List,ue)

```

```

132     i <- 0
133     ratio <- {}
134     WHILE i < Listの要素数
135         ratio[i] <- List[i]_ue / List[i]_UE
136         i <- i + 1
137     max <- ratio[0]
138     max_2 <- 0
139     i <- 0
140     while i < ratioの要素数
141         if max < ratio[i]
142             max <- ratio[i]
143         i <- i + 1
144     # max <- tempの要素の最大の値
145     i <- 0
146     while i < ratioの要素数
147         if max != ratio[i]
148             if max_2 < ratio[i]
149                 max_2 <- ratio[i]
150         i <- i + 1
151     # max_2 <- tempの要素の2番目に大きい値
152
153     # max_node: Listの中で、収容可能なUEの台数に対して収容しているUEの台数が最も多いノードの集合
154     max_node <- {}
155     i <- 0
156     WHILE i < ratioの要素数
157         IF temp == max
158             max_nodeにList[i]を追加
159         i <- i + 1
160     i <- 0
161     sum <- 0
162     WHILE i < max_nodeの要素数
163         sum <- sum + max_node[i]_U
164         i <- i + 1
165     ue_2 <- (max - max_2) * max_node[0]_U / sum
166     IF ue_2 < ue
167         return [ue_2,max_node[0]]
168     ELSE
169         return [ue * max_node[0]_U / sum , max_node[0]]
170
171 # Find_Closer_node(引数1,引数2) 引数1のノードから最も短い経路で到達可能なSGWを引数2の中から探し、そのSGWを返す関数
172 [Find_Closer_node]
173 Find_Closer_node(node,List)
174     min_distance <- nodeとList[0]との経路上の距離
175     min_distance_node <- List[0]
176     i <- 0
177     WHILE i < Listの要素数
178         IF min_distance > nodeとList[i]との距離
179             min_distance <- nodeとList[i]との距離
180             min_distance_node <- List[i]
181         ENDIF
182         i <- i + 1
183     ENDWHILE
184     return min_distance_node
185
186 # Acceptable_UE(引数1) 引数1のノードに追加で収容可能なUE台数を求め、その値を返す関数
187 [Acceptable_UE]
188 Acceptable_UE(node)
189     P <- nodeを収容しているPGW
190     a <- P_U - P_u
191     M <- nodeを収容しているMME
192     b <- M_U - M_u
193     c <- node_U - node_u
194     IF 最小値(a,b,c) <= 0
195         return 0
196     ELSE
197         return 最小値(a,b,c)

```

表 2: 各ノードのインデックス番号

インデックス番号	EPC ノードの位置する都道府県
0	sapporo
1	aomori
2	akita
3	morioka
4	yamagata
5	sendai
6	fukushima
7	niigata
8	mito
9	utsunomiya
10	maebashi
11	chiba
12	saitama
13	yokohama
14	tokyo
15	kofu
16	nagano
17	shizuoka
18	nagoya
19	gifu
20	tsu
21	kanazawa
22	fukui
23	toyama
24	osaka
25	kobe
26	kyoto
27	otsu
28	nara
29	wakayama
30	takamatsu
31	tokushima
32	kochi
33	matsuyama
34	hiroshima
35	okayama
36	tottori
37	matsue
38	yamaguchi
39	fukuoka
40	kumamoto
41	kagoshima
42	nagasaki
43	oita
44	miyazaki
45	saga
46	naha