

# モバイルデータトラフィックの時間的局所性を解消する モバイルデータオフローディングプロトコルの提案

西岡 哲朗<sup>1</sup> 町田 樹<sup>2</sup> 荒井 大輔<sup>3</sup> 大岸 智彦<sup>3</sup> 峰野 博史<sup>1,a)</sup>

受付日 2016年3月23日, 採録日 2016年10月4日

**概要:** IoT (Internet of Things) の普及にともない, モバイルデータ通信の需要は今後も増え続けると予想される. 携帯電話キャリアは Wi-Fi スポットを設置してモバイルデータ通信網の負荷を分散するモバイルデータオフローディングに力を注いでいる. 一方で, 今日のモバイルデータ通信は時間帯や地域によって通信インフラの負荷が偏り, モバイルデータトラフィックの収容効率が低下するという課題がある. そこで遅延耐性のあるモバイルデータトラフィックを適切に遅延させ, 通信インフラの負荷を分散してモバイルデータ通信の空間利用効率を高めるモバイルデータオフローディングプロトコル (MDOP) を提案する. MDOP は, eNB の負荷状態, モバイル端末の移動, データの遅延耐性を考慮し, トラフィックの送信レートを制御することで, 時間的, 空間的, 通信路的の 3 つの次元でモバイルデータ通信の負荷を分散する. 本稿では特に MDOP の時間的オフローディングにおける具体的な処理, 実現可能性について検討し, シミュレーションを用いて評価を行った. 時間的局所性を再現したシナリオ上で MDOP を評価した結果, 時間的に集中していた eNB の負荷を分散し, 設定した許容負荷まで抑えられることが確認できた.

**キーワード:** モバイルネットワークプロトコル, オフローディング, 負荷分散, スケジューリング, 遅延耐性

## Proposal of Mobile Data Offloading Protocol to Reduce Temporal Locality of Mobile Data Traffic

TETSUROU NISHIOKA<sup>1</sup> TATSUKI MACHIDA<sup>2</sup> DAISUKE ARAI<sup>3</sup> TOMOHIKO OGISHI<sup>3</sup>  
HIROSHI MINENO<sup>1,a)</sup>

Received: March 23, 2016, Accepted: October 4, 2016

**Abstract:** Internet-of-Things (IoT) has been getting popular. The demand for mobile data communication is predicted to be rapidly increased. Although the cellular carriers deploy the Wi-Fi access point at the public area to offload mobile data traffic, it is difficult to adapt with the rapid increasing demands. On the other hand, there is a locality of the mobile data traffic such as locality for time and place. We propose the Mobile Data Offloading Protocol (MDOP) which delays the delay tolerant contents to balance the load of cellular infrastructures. MDOP balances the load in view of time, place and link by considering the load of base station, mobility of the users and delay tolerant of the contents. In this paper, we focused on the time wise offloading function in MDOP and evaluated its effect. The results showed the MDOP balanced the load of base station which was varied by time.

**Keywords:** mobile network protocols, mobile data offloading, load balancing and scheduling, delay tolerant

<sup>1</sup> 静岡大学大学院情報学研究科  
Graduate School of Informatics, Shizuoka University,  
Hamamatsu, Shizuoka 432-8011, Japan  
<sup>2</sup> 静岡大学大学院総合科学技術研究科  
Graduate School of Integrated Science and Technology,  
Shizuoka University, Hamamatsu, Shizuoka 432-8011, Japan  
<sup>3</sup> 株式会社 KDDI 総合研究所  
KDDI Research, Inc., Fujimino, Saitama 356-8502, Japan  
a) mineno@inf.shizuoka.ac.jp

### 1. はじめに

スマートフォンの性能向上にともなってコンテンツのリッチ化が進み, モバイルデータ通信の需要は今後も増える一方である. モバイルデータ通信のトラフィック量は, 2019 年には 2015 年の約 10 倍に達すると予想されており [1], 大量のモバイルデータトラフィック (以下, トラ

フィック)を効率的にネットワークへ收容することが重要となる。特に Machine-to-Machine (M2M) のトラフィックは、モバイル端末の中で最も急激に増加すると予想されている。M2M では、端末どうしが自律的に通信を行うため、スマートフォンでの動画視聴などのユーザが起因する通信に比べ、通信速度の変動や遅延がユーザの体感品質の悪化につながりにくい。また、定期的に撮影した画像データや動画データをクラウドサーバへアップロードするライブログカメラやドライブレコーダ、クラウド上の地図データのローカル同期など、1日程度の遅延耐性を持つアプリケーションは少なくない。このように、トラフィックの中には遅延をある程度許容するデータ(以下、遅延耐性データ)が存在すると考える[2]。

一方、トラフィックの特徴として、特定の時間帯や場所に発生量が偏る「局所性」がある[3], [4]。トラフィックを効率的に收容するためには、基地局(eNB: evolved Node B)などの通信設備の使用率(負荷)を規定の許容値に収めつつ、一定以上に保つことが望ましい。しかしトラフィックの局所性を考慮して通信設備を増強すると、トラフィック量が少ない地域や時間帯での設備使用率が低下し、トラフィックの收容効率が悪化するという課題がある。ここで、トラフィックが特定の時間帯に偏る局所性を「時間的局所性」、特定の場所に偏る局所性を「空間的局所性」と定義する。

本研究では、以上に示した遅延耐性データの増加とトラフィックの局所性という2つの背景をふまえ、トラフィックの收容効率の向上を目的としたモバイルデータオフローディングプロトコル(MDOP: Mobile Data Offloading Protocol)を提案する。MDOPは、通信設備の負荷が高い時間や地域において、遅延耐性データの送信レートを制御し、時間的局所性や空間的局所性を解消する。本稿では特に、時間的局所性を解消する「時間的オフローディング」に焦点を絞り検討と基礎評価を行う。

以下、2章で関連研究について述べ、3章でMDOPの具体的な仕様やアルゴリズムを説明する。4章でMDOPにおける時間的オフローディングの評価結果を述べた後、5章で本稿をまとめる。

## 2. 関連研究

eNB負荷の時間的局所性を解消する様々な手法が提案されている[5], [6], [7]。特に、User Plane Congestion Management (UPCON) [5]は、通信設備の負荷やデータの種類、ユーザの契約内容などを考慮してQoSを制御し、通信設備の一時的な過負荷状態を抑制する手法である。UPCONでは、eNBが負荷値を示す制御情報(RCI: RAN user plane Congestion Information)をCore Network (CN)へ送信し、CN内のPolicy Charging Enforcement Function (PCEF)サーバが、eNBの負荷に基づいて端末(UE: User Equip-

ment) UEやアプリケーション(以降、アプリ)ごとにQoS制御を行う。しかしUPCONは、The 3rd Generation Partnership Project (3GPP)内で検討を重ねている段階であり、RCIに基づいたQoSの制御方法などについては、具体的に決定されていない。また、これまで提案された手法では、eNB負荷や通信優先度、通信品質などを考慮する一方で、データの遅延耐性については考慮されていない。

空間的局所性を解消する手法についても様々な検討が行われている[8], [9], [10], [11], [12]。特に通信キャリアが活発に行っている手法として、Heterogeneous Network (HetNet) [8]がある。HetNetでは、セル半径が異なるeNBを同一エリアに重ねて配置することで、eNBごとの負荷を分散させる。また、HetNetのように複数のeNBの通信範囲が重複する環境において、UEの接続先eNBを動的に変更し、それぞれのeNB負荷を平滑化する手法も数多く提案されている[9], [10], [11], [12]。一方で、時間的局所性を解消する手法と同様に、データの遅延耐性については考慮されておらず、負荷分散の性能を向上させる余地があると考える。

また、トラフィックを他通信路へ分散する手法として様々な手法が検討されている[13], [14], [15], [16], [17], [18]。昨今では通信キャリアが公衆向けWi-Fiアクセスポイント(Wi-Fi AP)を各所に展開しているため、Wi-Fi APにトラフィックを迂回する研究[14], [15], [16]が活発に行われている。また、複数の通信路を同時に使用し、各通信路の帯域割合を制御する手法[17]や、デバイス間通信を用いた手法[18]も提案されている。

## 3. Mobile Data Offloading Protocol

### 3.1 概要

限られた通信設備に効率良くトラフィックを收容する手法については様々な研究が行われてきたが、遅延耐性データに着目した手法は議論されていない。本研究では、遅延耐性データの遅延時間に応じてモバイルデータオフローディングを行うMDOPを提案する。図1にMDOPの動作概要を示す。MDOPはアプリケーションレイヤの下位に位置するミドルウェアとして実装し、MDOP対応アプリケーションが送受信する遅延耐性データの送信レートを制御することで、モバイルデータオフローディングを実現する。もちろん、全トラフィックをフィルタリングして遅延耐性時間に合わせて制御できるように下位層で実装する方法も考えられる。

送信レートを制御する方法(オフローディングポリシー)には、モバイルデータ通信路上のトラフィックを削減する「通信路的オフローディング」、空間的局所性を解消する「空間的オフローディング」、時間的局所性を解消する「時間的オフローディング」の3つを想定している。MDOPは、データの遅延耐性やUEとeNBの状態に応じてオフ

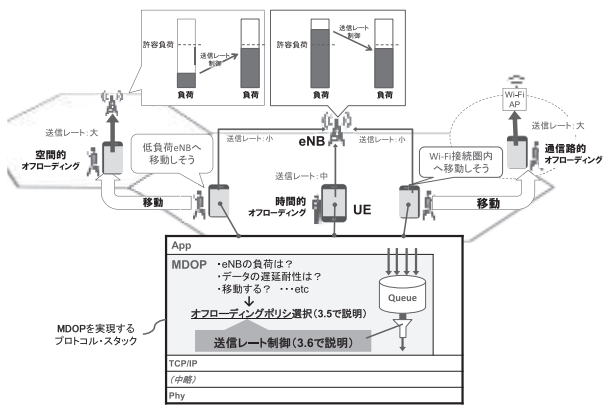


図 1 MDOP の概要図

Fig. 1 Overview of MDOP.

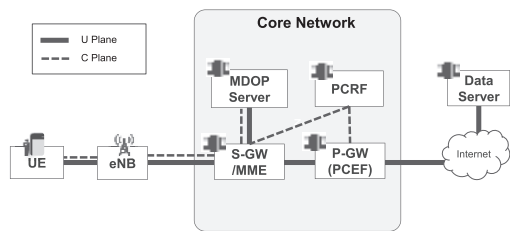


図 2 MDOP のネットワークアーキテクチャ

Fig. 2 Network architecture of MDOP.

ローディングポリシーを1つ選択し、送信レート制御を実行する。ここで、同一 UE 内で MDOP 対応アプリによる遅延耐性データと MDOP 非対応アプリによる通常通信が混在する場合、遅延耐性データの通信よりもリアルタイム性の求められる一般アプリの通信を優先することとする。また、同一 UE 内の MDOP 対応アプリが複数動作する場合も考えられる。このように複数の MDOP 対応アプリと非対応アプリの混在環境が現実的だが、条件が複雑となるため本稿では混在して動作する際の制御方法詳細については今後の課題とする。

### 3.2 ネットワークアーキテクチャ

MDOP のネットワークアーキテクチャを図 2 に示す。MDOP は、LTE の既存ネットワークアーキテクチャ [19] に MDOP サーバを加えたアーキテクチャとする。eNB は UPCON [5] と同様に、定期的に負荷情報 (RCI) を CN へ送信するものとする。MDOP サーバは、RCI から得られる eNB 負荷情報と UE が定期的に送信する制御情報を集約し、環境情報として UE やデータサーバに配信する。これにより、データ送信者が送信レートを制御できる。しかし、インターネット上のデータサーバは、通信キャリアの管理が及ばず MDOP サーバの役割を持たせることが難しい。そこで、UE が MDOP に対応していないデータサーバからデータをダウンロードする場合は、MDOP サーバがプロキシサーバのように通信を仲介し、データサーバの代わりに送信レート制御を行うものとする。

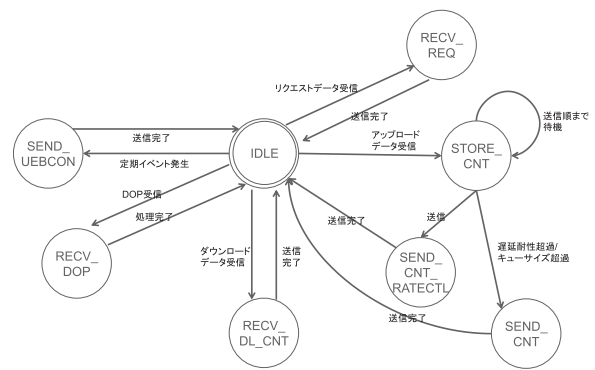


図 3 UE 上の MDOP 状態遷移図

Fig. 3 MDOP state transition on UE.

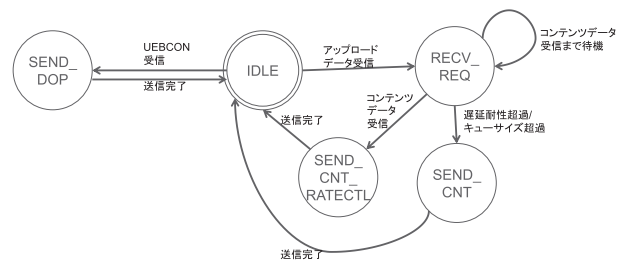


図 4 MDOP サーバ上の MDOP 状態遷移図

Fig. 4 MDOP state transition on MDOP server.

### 3.3 状態遷移

MDOP は、データの送受信に応じて状態遷移を行い、状態ごとに定められた処理を行う。本節では UE と MDOP サーバで動作する MDOP の状態遷移を説明する。

UE に搭載された MDOP の状態遷移を図 3 に示す。UE は周期的に SEND\_UEBCON へ状態遷移し、自状態を示す制御情報「UE-beacon」を MDOP サーバへ送信する。また、MDOP サーバから、他 UE や eNB の情報を示す Data Offloading Policy (DOP) を受信すると、RECV\_DOP 状態に遷移し、DOP の情報に基づいて送信レートを導出する。MDOP の上位レイヤから、コンテンツデータをデータサーバに要求するデータ (リクエストデータ) を受信した場合は、RECV\_REQ 状態へ遷移し、リクエストデータに MDOP のヘッダ (MDOP ヘッダ) を付加して MDOP サーバへ送信する。一方、上位レイヤからコンテンツデータを受信した場合は、STORE\_CNT へ状態遷移してコンテンツデータをキューに蓄積する。その後、蓄積したコンテンツデータを、DOP 受信時に導出した送信レートで下位レイヤに送信する。ただし遅延耐性時間を超過したデータは、ただちに最大送信レートで送信するものとする。また、MDOP の下位レイヤからデータを受信すると、RECV\_DL\_CNT 状態に遷移し、受信したデータを宛先アプリケーションに届ける。

MDOP サーバ上の MDOP の状態遷移を図 4 に示す。UE-beacon を取得すると、SEND\_DOP 状態へ遷移する。SEND\_DOP 状態では、UE-beacon の情報に基づいて DOP

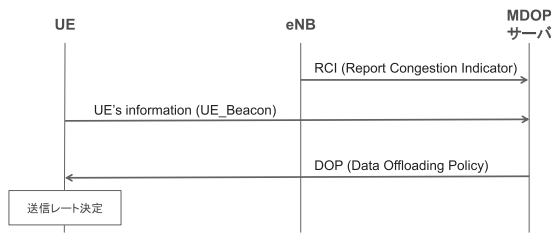


図 5 MDOP 制御情報のフロー  
Fig. 5 Flow of MDOP control message.

を作成し、UE-beacon の送信元 UE に送信する。またリクエストデータを受信すると、MDOP サーバは RECV\_REQ 状態へ遷移し、受信したリクエストデータをデータサーバへ送信して、コンテンツデータを代理でダウンロードする。コンテンツデータのダウンロードが完了すると、データの遅延耐性や eNB 負荷などの状況を考慮して、適用可能なオフローディングポリシーを選択し、送信レートを導出する。いずれかのオフローディングポリシーを適用できる場合は、SEND\_CNT\_RATECTL 状態に遷移し、導出した送信レートでリクエストデータ送信元の UE へデータを送信する。一方、どのオフローディングポリシーも適用できない場合は、SEND\_CNT 状態に遷移してコンテンツデータを最大送信レートでただちに送信する。

### 3.4 通信フロー

MDOP のアーキテクチャを構成する端末間の通信フローについて述べる。MDOP の通信フローは、制御情報の交換、コンテンツのアップロード・ダウンロードがある。

制御情報の交換では、MDOP サーバが UE と eNB から受信した情報を集計し、送信レートを導出する際に必要な情報を UE へ提供する。この制御情報の通信フローを、図 5 に示す。まず、SEND\_UEBCON 状態に遷移した UE は UE-beacon を MDOP サーバへ送信する。UE-beacon には、MDOP がキューに蓄積した送信待ちデータの総量(キューサイズ)、送信したコンテンツデータ量、接続先 eNB、UE の移動軌跡を含めるものとする。ここで移動軌跡は、UE の過去の移動を緯度・軽度・時刻の情報を列挙して表した情報とする。次に、UE-beacon を受信して SEND\_DOP 状態に遷移した MDOP サーバは、UE-beacon が含む情報と、RCI が含む eNB 負荷情報を集約して DOP を作成し、UE-beacon の送信元 UE へ送信する。DOP は、eNB 負荷と許容負荷、eNB に接続している UE 台数と合計キューサイズを含む制御情報で構成する。MDOP サーバから DOP を受信した UE は、RECV\_DOP 状態へ遷移し、DOP の情報に基づいて送信レートを導出する。

UE がコンテンツデータをデータサーバへアップロードする場合の通信フローを図 6 に示す。アップロードの対象となるデータに加えてアプリの遅延可能な最大の遅延耐性時間を MDOP ヘッダに挿入する。この遅延耐性時間は、

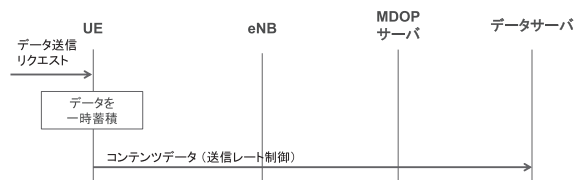


図 6 コンテンツアップロード時のフロー  
Fig. 6 Flow of uploading contents.

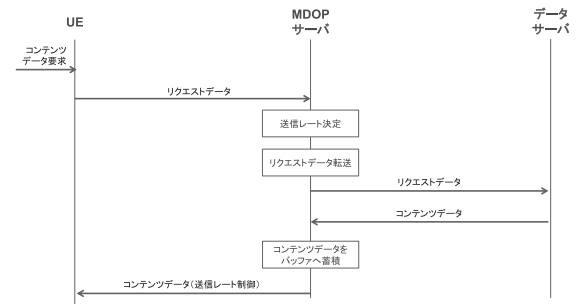


図 7 コンテンツダウンロード時のフロー  
Fig. 7 Flow of downloading contents.

現時点では MDOP 対応アプリ開発者が事前に設定しておくことを想定しているが、コンテンツ種別ごとに動的に設定するような実装もありうる。UE 内の MDOP は、上位レイヤからデータを受信して STORE\_CNT 状態に遷移すると、データをキューへ蓄積し、DOP 受信時に決定した送信レートでコンテンツデータをアップロードする。ただし、遅延耐性時間を超過するデータは、キューへ蓄積せずにただちに送信する。

UE がデータサーバからコンテンツデータをダウンロードする場合の通信シーケンスを図 7 に示す。UE 内の MDOP は、上位レイヤから受け取ったリクエストデータを MDOP サーバへ送信する。リクエストデータを受信した MDOP サーバは、RECV\_REQ 状態に遷移する。RECV\_REQ 状態に遷移した MDOP サーバは、ダウンロードするデータの遅延耐性と eNB や各 UE の状態に基づいて、データ送信時の送信レートを決定し、データサーバにリクエストデータを転送してコンテンツデータをダウンロードする。コンテンツデータを取得した MDOP サーバは SEND\_CNT\_RATECTL 状態に遷移し、コンテンツデータをキューへ蓄積する。その後、蓄積したコンテンツデータを RECV\_REQ 状態時に決定した送信レートで UE へ送信する。

図 8 に UE がデータをダウンロードする場合における MDOP の詳細な動作を示す。UE のアプリケーション層でコンテンツデータ要求が生じる際、そのコンテンツをいつまでに取得したいのかを示す遅延耐性時間や、送信元・宛先アドレスやポート番号を MDOP ヘッダに挿入し、MDOP サーバへ送信する。この遅延耐性時間は、現時点では MDOP 対応アプリ開発者が事前に設定しておくことを想定しているが、コンテンツ種別ごとに動的に設定するよ



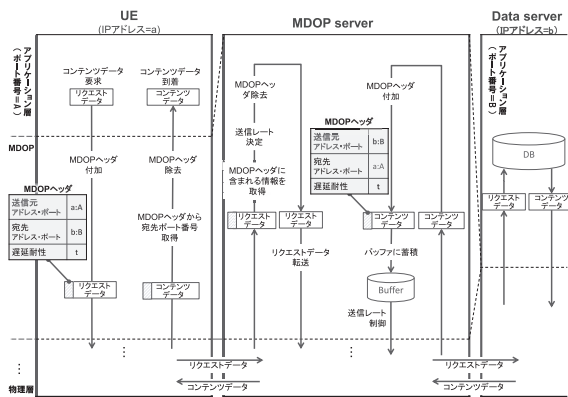


図 8 コンテンツダウンロード時の詳細フロー  
Fig. 8 Detailed flow of downloading contents.

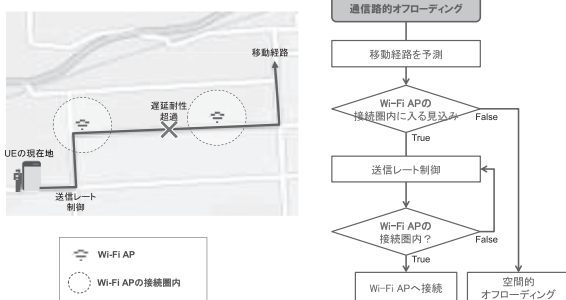


図 9 通信路的オフローディング  
Fig. 9 Link wise offloading.

うな実装もありうる。次に、リクエストデータを受信した MDOP サーバは、リクエストデータに付加された MDOP ヘッダからコンテンツデータの遅延耐性時間を読み取り、送信レートを導出する。その後、MDOP サーバは、リクエストデータをデータサーバへプロキシのように送信してデータをダウンロードし、代理でダウンロードしたコンテンツデータへ MDOP ヘッダを付加する。このとき付加する MDOP ヘッダの宛先ポート番号には、リクエストデータに付加されていた MDOP ヘッダの送信元ポート番号を指定する。最後に、MDOP サーバは、リクエストデータ送信元の UE へ、決定した送信レートで転送する。UE 内の MDOP は、データに付加された MDOP ヘッダの宛先ポート番号を参照し、データをアプリに届ける。

### 3.5 オフローディングポリシー

MDOP は、通信路的、空間的、時間的オフローディングの順にオフローディングポリシーを試行し、実行可能なものを選択して送信レートを導出する。実行可能なオフローディングポリシーがない場合は、最大送信レートを設定する。

図 9 に、トラフィックを Wi-Fi AP などの他通信路へ迂回して eNB 負荷を削減する通信路的オフローディングの動作フローを示す。MDOP サーバは、UE-beacon から得られる移動軌跡を基に UE の移動を予測する。データの遅延耐性を満たす時間内に UE が他通信路と接続できる場

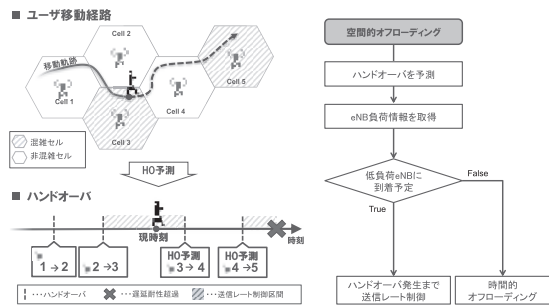


図 10 空間的オフローディング  
Fig. 10 Place wise offloading.

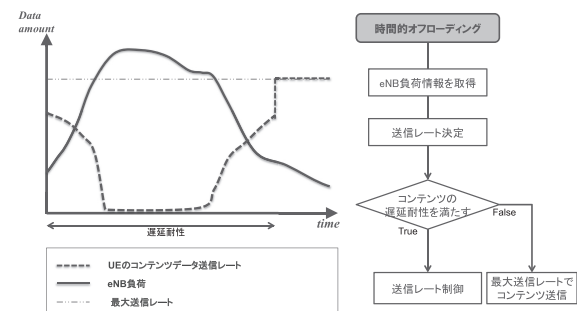


図 11 時間的オフローディング  
Fig. 11 Time wise offloading.

合は、他通信路と接続が完了するまで送信レートを制御する。一方、データの遅延耐性を満たす時間内に UE が他通信路と接続できない場合は、空間的オフローディングへ移行する。

図 10 に空間的オフローディングの動作フローを示す。空間的オフローディングは、UE が低負荷な eNB に移動するまで送信レートを制限する。UE の接続先 eNB ( $eNB_i$ ) の負荷 ( $R_i$ ) が許容負荷 ( $R_{i\_limit}$ ) を超え、かつ UE の移動先の eNB 負荷が  $R_i$  を下回る場合に、空間的オフローディングを適用する。MDOP サーバは、UE-beacon に含まれる移動経路から、UE が他の eNB ( $eNB_k$ ) に接続する時刻  $t_{eNBk}$  を予測する。 $t_{eNBk}$  において  $R_k$  が  $R_{k\_limit}$  を下回り、かつ  $t_{eNBk}$  がデータの遅延耐性時間以内である場合は、UE が  $eNB_{next}$  に接続するまでの間、送信レートを制御する。一方、コンテンツデータの遅延耐性時間までに  $R_i$  を下回る eNB へ接続できない場合は、時間的オフローディングへ移行する。

図 11 に時間的オフローディングの動作フローを示す。まず UE は、DOP から eNB 負荷情報を取得し、送信レート導出アルゴリズムを用いて送信レートを決定する。ただし、送信レートを制御した際に遅延耐性時間を満たせないデータは、最大の送信レートでただちに送信する。

### 3.6 移動予測

オフローディングポリシーのうち、通信路的、空間的オフローディングでは UE の移動予測を用いる。通信路的オフ

ローディングは、Wi-Fi AP などの他通信路との接続を予測するために、また空間的オフローディングは、接続先 eNB の変更 (ハンドオーバ) を予測するために、それぞれ UE の移動予測が必要である。そこで、UE の移動経路やハンドオーバを予測する手法について検討する。

文献 [20], [21] が提案する手法は、機械学習を用いてユーザの今後の移動経路を予測する。移動軌跡を予測する手法 [20] では、道路上を移動する UE の移動履歴を基に移動を予測したところ、50%以上の予測精度を得られたと報告している。また同様に機械学習を用いてハンドオーバを予測する手法 [21] では、人の移動を 40 日間学習したところ、約 69%の精度でハンドオーバを予測できたと報告されている。

ユーザの過去の移動軌跡からモデルを生成し、生成したモデルと現在の移動経路を比較することで、将来のユーザの移動を予測する手法も提案されている [22], [23]。ユーザの移動から決定論的モデルと確率論的モデルを作成し、ユーザのハンドオーバを予測する手法 [22] では、eNB が 30 台ある環境を想定した評価の結果、最低でも 75%以上の精度で特定のユーザにおける次セルの移動予測を実現できたと報告している。また文献 [23] では、ユーザの緯度・経度に加え、曜日や気象状況、時刻などの環境情報を考慮して移動モデルを生成し、ユーザの今後の移動を予測する手法を提案している。評価では、実際に 15 台のスマートフォンから得られた位置情報データを用いてモデルを生成して移動を予測する実験を行い、最大で 96.4%の予測精度を達成した。

また、車載機器に設定されたルートを移動経路として用いる手法 [24] もある。各自動車メーカーが実用化に向け急速に開発を進めている自動運転が実用化されれば、高精度かつ高信頼な移動予測経路を取得できると考える。

以上に示したように、ユーザの移動やハンドオーバを予測する手法については、活発に研究がなされており、空間的、通信路的オフローディングへも適用可能と考える。

### 3.7 送信レート制御アルゴリズム

オフローディングポリシーごとに適切な送信レート制御アルゴリズムが考えられ、eNB や UE の状態に応じた送信レート制御が重要となる。本節では、ハンドオーバが発生しない環境で、ある eNB (eNB<sub>a</sub>) における負荷 ( $R_a$ ) が、許容負荷  $R_{a\_limit}$  を超過しないように次時刻 ( $t + \Delta t$ ) の UE<sub>i</sub> の送信レート  $r_i(t + \Delta t)$  を決定する時間的オフローディング向け送信レート制御アルゴリズムを考える。

トラフィックの帯域利用率を一定以上に保つためには、 $R_a$  を  $R_{a\_limit}$  に近く保った状態が望ましい。 $R_a$  を  $R_{a\_limit}$  に近づけるため、eNB<sub>a</sub> に接続する UE が時刻  $t$  に設定した送信レート  $r(t)$  を、時刻 ( $t + \Delta t$ ) において新規送信レート  $r(t + \Delta t)$  に更新する場合は、その変化量  $r(t + \Delta t) - r(t)$

が、許容負荷との差分 ( $R_a - R_{a\_limit}$ ) と等しくなるように制御する。一方で、複数の UE が同時に送信レートを大きく変化させた場合、 $R_a$  が急激に変動し、時間的局所性を誘発する原因となる。そこで、( $R_a - R_{a\_limit}$ ) が 0 に近づくに従って変化量が 0 に収束する二次関数の係数を導入する。ただし、 $R_a$  が  $R_{a\_limit}$  から大きく逸脱すると、導入した係数が発散して送信レートが急激に変動してしまうことから、eNB<sub>a</sub> に接続する UE の合計キューサイズ ( $Q_i$ ) のうち、対象 UE のキューサイズ ( $q_i$ ) の割合に基づいて係数の変動が発散しないよう範囲を限定することを考えた。この時間的オフローディング向け送信レート制御アルゴリズムの例を式 (1) に示す。

$$r_i(t + \Delta t) = r_i(t) + (R_{a\_limit} - R_a) \times \min \left\{ \left( \frac{R_{a\_limit} - R_a}{R_{a\_limit}} \right)^2, \frac{q_i}{Q_a} \right\} \quad (1)$$

## 4. 評価

### 4.1 評価方針

時間的オフローディングは、UE や eNB の状態に応じて送信レートを制御し、時間的局所性を解消する。そのため、時間的局所性の生じやすい朝方や夕方といった 2 時間程度の通勤時間におけるピークシフト効果を想定した基礎評価的なシナリオを想定し、「局所性シナリオ」、「普及過渡期シナリオ」を用いてシミュレーションを実行し、時間的オフローディングの基礎的な効果を検証する。ここで、関連研究であげた UPCON は、現在標準化に向けた議論が進められており、基地局の負荷状況をどのように考慮して QoS 制御するのか未確定のため、今回の基礎評価では UPCON で想定するネットワークアーキテクチャを用いることとどめ、MDOP の時間的オフローディング適用有無による効果のみを評価することとした。基地局負荷状況のみを考慮した制御手法や、さらに遅延耐性も考慮した本手法との比較は今後の課題とする。

「局所性シナリオ」では、トラフィックが特定の時間帯に集中する時間的局所性を模擬し、「普及過渡期シナリオ」ではさらに、MDOP を搭載しない UE が混在する環境での時間的局所性を模擬する。いずれの評価シナリオにおいても、時間的オフローディングでは UE がハンドオーバしない環境を想定するため、評価シナリオ上の UE は移動しないこととする。また、通信環境モデルは 3GPP が推奨する評価シナリオ [25] に基づいて表 1 のように定め、eNB とセルを図 12 のように配置した。また、電波環境でのノイズによるパケットロスなのか、制御による通信変化なのかを区別するためパソスは考慮しない設定とし、電波伝搬モデルは Free space とした。eNB の高負荷状態を再現するため、eNB<sub>1</sub> のセルに UE を 4 台配置し、他のセルには UE を 2 台配置した。また今回は、式 (1) の送信レート制

表 1 通信環境モデル

Table 1 Evaluation model of environment.

項目	設定値
UE 送信電力	24dBm
eNB 送信電力	46dBm
ISD (Inter-site Distance)	500m
周波数	2.0GHz
帯域幅	10MHz
パスロス	考慮しない
電波伝搬モデル	Free space

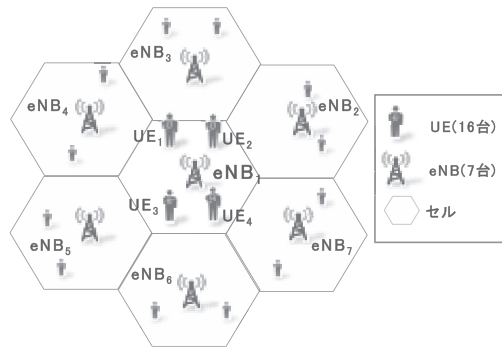


図 12 評価トポロジ

Fig. 12 Topology for evaluation.

御アルゴリズムを使用することとした。

評価項目として、特定時間に集中した局所的な通信が、時間的に分散されるか（時間的局所性の解消）を示す指標  $R_{usage}$  と、1つの eNB 内で各 UE の送信レートが平等であるかを示す指標である Jain's fairness index [26] を用いることとした。時間的オフローディング向け送信レート制御を行う式 (1) は、モバイルネットワークにおける帯域利用率を一定以上に保ち、時間的局所性の解消を目的としている。そのため、基地局 eNB<sub>k</sub> の負荷を  $R_k$ 、許容負荷を  $R_{k\_limit}$  とし、許容負荷に対して eNB<sub>k</sub> 負荷のどれだけの割合を占めているかを以下の式 (2) を用いた  $R_{usage}$  によって評価する。 $R_{usage}$  が 1.0 に近いほど eNB の性能を過不足なく活用し、時間的局所性の解消が可能であることを示す。

$$R_{usage} = \frac{R_k}{R_{k\_limit}} \quad (2)$$

また、モバイルネットワークにおいては、各ユーザが平等なデータレートで通信できることが望ましいため、データレートの公平性評価によく用いられる Jain's fairness index を用いて、eNB<sub>k</sub> に接続する UE の送信レートのフェアネスを評価する。式 (3) で示す  $J_{fairness}$  は、eNB<sub>k</sub> に接続する UE<sub>i</sub> の送信レートを  $r_i$ 、eNB<sub>k</sub> に接続する UE 数を  $n$  とすると、 $J_{fairness}$  が 1 に近いほど eNB<sub>k</sub> に接続する UE の送信レートが平等であることを示す。

$$J_{fairness} = \frac{(\sum r_i)^2}{n \sum r_i^2} \quad (3)$$

表 2 基礎評価の評価モデル

Table 2 Simulation model for basic evaluation.

項目	設定値	
UE <sub>i</sub>	データ生成量	50 KB/s
	送信レート制御	10KB/s, 30KB/s, 50KB/s
遅延耐性時間	500s	
シミュレーション時間	1000s	

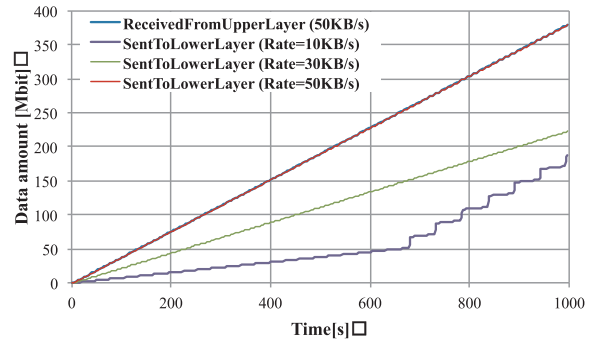


図 13 基礎評価の結果

Fig. 13 Result of basic evaluation.

#### 4.2 基礎評価

LTE 環境を模擬できるネットワークシミュレータ Scenargie [27] に MDOP の時間的オフローディング機能を実装し、時間的オフローディングの効果を評価した。まず、定期的に撮影した画像データや動画データをクラウドサーバへアップロードするライフログカメラやドライブレコーダを想定し、実装した MDOP が UE の上り方向の通信レートを制御できるか検証する。下り方向については、上り方向とアーキテクチャが異なるため今後の課題とする。UE に固定の送信レートを指定し、出力データ量が指定した送信レートに従うかを確認する。基礎評価で設定した UE のデータ生成間隔、送信レート制御、遅延耐性時間、シミュレーション時間を表 2 に示す。MDOP の出力データ量を図 13 に示す。コンテンツデータ生成量 50 KB/s を下回る送信レートを設定した場合、送信量が制限されることを確認した。また、生成量を大幅に下回る送信レート 10 KB/s を設定した場合、700 s あたりからコンテンツデータの送信が遅延耐性時間 500 s に間に合わず強制送信されている。以上のことから、実装した MDOP は、適切に送信レート制御を実行できることを確認した。

#### 4.3 局所性シナリオでの評価

本節では、時間的局所性を評価モデル上で再現し、上り方向に関して MDOP の時間的オフローディングによって時間的局所性が解消されるか検証する。下り方向については、上り方向とアーキテクチャが異なるため今後の課題とする。時間的局所性を再現した局所性シナリオの評価モデルを表 3 に示す。UE のコンテンツデータ生成モデルとし



表 3 局所性シナリオの評価モデル

Table 3 Evaluation model of locality scenario.

項目	設定値	
データ生成	200KB/30s (55.5Kbps)	
UE <sub>3</sub> , UE <sub>4</sub>	生成時間	0-8000s
UE <sub>1</sub> , UE <sub>2</sub>	生成時間	3000~6000s
遅延耐性時間	3600s	
eNB 許容負荷	160Kbps	
シミュレーション時間	8000 秒	

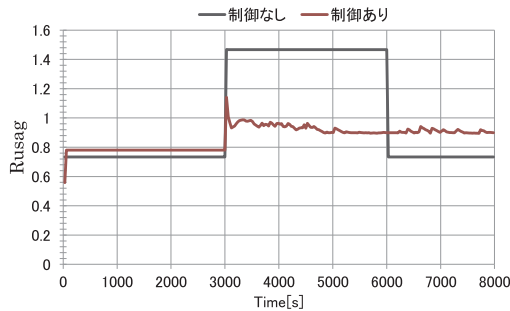


図 14 局所性シナリオにおける eNB<sub>1</sub> の  $R_{usage}$

Fig. 14  $R_{usage}$  of eNB<sub>1</sub> in locality scenario.

て、1 GB のローカルストレージを持つライフログカメラが、1280 × 720 ピクセルの画像に相当する 200 KB のデータを 30 s 間隔で生成してデータサーバへアップロードする場合を想定する。コンテンツデータの遅延耐性時間は、上記のコンテンツデータがローカルストレージ容量の上限に達するまでの時間 3600 s とした。また、eNB<sub>1</sub> に接続する 4 台の UE のうち、2 台はコンテンツデータをすべての時間帯において生成するが、その他の UE はコンテンツデータを 3000~6000 s (以後、高負荷時間帯) に生成することとした。eNB 許容負荷は、高負荷時間帯で許容負荷を超える時間的局所性が発生する状況を再現するために、UE<sub>1</sub>~UE<sub>4</sub> の合計のデータ生成量よりも小さい値である 160 Kbps を設定した。

上記の評価モデル上で MDOP を実行し、評価指標  $R_{usage}$ 、 $J_{fairness}$  について考察する。eNB<sub>1</sub> の受信量の推移を図 14 に示す。0~3000 s の低負荷時間帯では、UE<sub>1</sub>、UE<sub>2</sub> がコンテンツを生成していないため、eNB<sub>1</sub> のセルに滞留する UE が生成するコンテンツデータの総量は eNB<sub>1</sub> の許容負荷を下回っている。その後、高負荷時間帯に入ると、MDOP を使用しない場合は eNB<sub>1</sub> の負荷指標  $R_{usage}$  が理想値の 1.0 を大きく上回り時間的局所性が発生している。一方、MDOP を使用する場合は、高負荷時間帯においても eNB 負荷が 1.0 付近を遷移し、時間的局所性が低減されている。その後 6000~8000 s の  $R_{usage}$  が 1.0 付近で遷移しており、時間的オフローディングによってモバイルネットワークにおける基地局負荷の時間的局所性を解消できることを確認した。

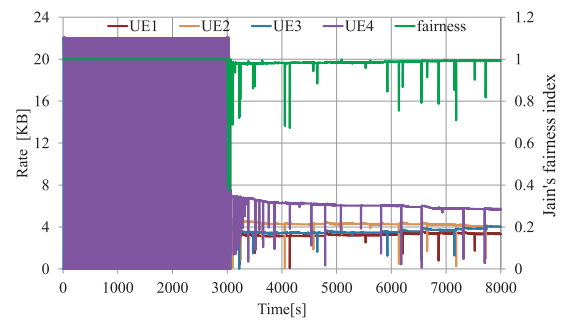


図 15 局所性シナリオでの UE の送信レート

Fig. 15 Send rate of UE in locality scenario.

次に、MDOP を使用した場合における UE<sub>1</sub>~UE<sub>4</sub> の送信レートと UE<sub>1</sub>~UE<sub>4</sub> の  $J_{fairness}$  を図 15 に示す。0~3000 s の低負荷時間帯では、UE<sub>1</sub>、UE<sub>2</sub> がコンテンツを生成しておらず十分な帯域が確保できるため、UE<sub>3</sub>、UE<sub>4</sub> で生成したデータを高レートで送信する状態と、生成した分のデータ送信が完了し送信レートが 0 となる状態が連続して繰り返され、送信レートが大きく上下変動している。 $J_{fairness}$  は 1.0 で安定しているため、公平なレート制御が行われているといえる。その後 3000~6000 s の高負荷時間帯では、UE<sub>1</sub>、UE<sub>2</sub> の通信開始とともに  $J_{fairness}$  がわずかに低下している。式 (1) の送信レート制御は、空いている帯域を MDOP の制御対象の全 UE で分割するため、帯域が空いていない場合は、新規に通信を始める UE に対し送信レートの割当て量が少なくなるという特徴を持つ。そのため、新規に通信を開始した UE<sub>1</sub>、UE<sub>2</sub> に比べ、ちょうどその時点で送信レートを多く割り当てられていた UE<sub>4</sub> の影響を受けて、 $J_{fairness}$  がわずかに低下している。また、3000~8000 s まで UE 間の送信レートが若干偏った状態で割り当てられている原因は、eNB 負荷が許容負荷に近いとき、送信レートの変化を抑えて eNB 負荷を高効率状態で保とうと維持するため、UE ごとに若干偏った送信レートの状態が維持されたと考えられる。 $J_{fairness}$  はほぼ 1.0 を維持することができており、各 UE の送信レートはほぼ公平に制御されているといえる。

以上の局所性シナリオでの評価結果から、すべての UE が MDOP を搭載する環境において、時間的局所性を解消し、帯域利用効率を向上させつつ、送信レートのフェアネスを維持できることが確認できた。

#### 4.4 普及過渡期シナリオでの評価

本節では、MDOP が普及途上である環境を想定し、MDOP を搭載しない UE が混在する普及過渡期シナリオで評価を行う。局所性シナリオと同様に、通信環境を表 1、評価トポロジを図 12 のように設定した。普及過渡期シナリオの評価モデルを表 4 に示す。局所性シナリオと異なり、eNB<sub>1</sub> に接続する UE のうち UE<sub>1</sub>、UE<sub>2</sub> の 2 台は、MDOP を搭載せず CBR アプリケーションのみ実行し、3000~6000 s



表 4 普及過渡期シナリオの評価モデル  
Table 4 Evaluation model of mixed scenario.

項目		設定値
UE <sub>3</sub> , UE <sub>4</sub> (MDOP 対応)	データ生成	200KB/30s (55.5Kbps)
	データ生成時刻	0~8000s
	遅延耐性時間	3600 秒
UE <sub>1</sub> , UE <sub>2</sub> (MDOP 非対応)	データ生成レート	55.5Kbps
	データ生成時刻	3000~6000s
eNB 許容負荷		160Kbps
シミュレーション時間		8000 秒

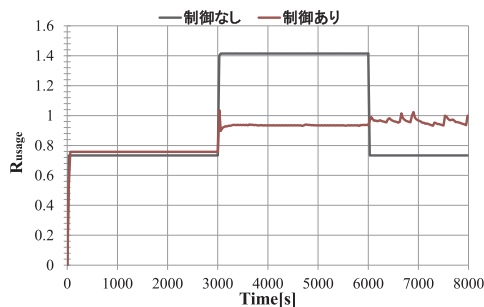


図 16 普及過渡期シナリオにおける  $R_{usage}$   
Fig. 16  $R_{usage}$  in mixed scenario.

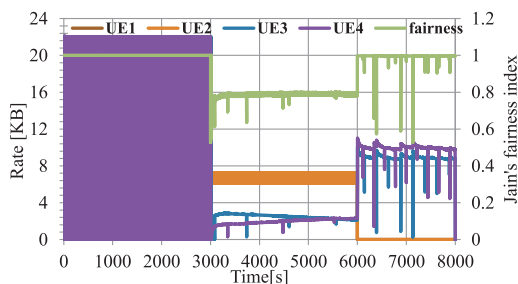


図 17 普及過渡期シナリオでの UE の送信レート  
Fig. 17 Send rate of UE in mixed scenario.

にデータを生成するようにした。

図 16 に  $R_{usage}$  の推移を示す。3000~6000s の高負荷時間帯では、MDOP の制御なしの場合と比べ、MDOP 制御ありの  $R_{usage}$  が 1.0 に近い。つまり、MDOP が普及過渡期で MDOP 搭載 UE と非搭載 UE が混在する環境においても時間的局所性の解消が確認できる。また図 17 に、MDOP 対応の UE<sub>3</sub>, UE<sub>4</sub> の送信レートと MDOP 非対応の UE<sub>1</sub>, UE<sub>2</sub> の送信レート、各 UE 間の  $J_{fairness}$  を示す。0~3000s では、局所性シナリオの結果 (図 15) と同様に、UE<sub>1</sub>, UE<sub>2</sub> がコンテンツを生成しておらず十分な帯域を確保できるため、UE<sub>3</sub>, UE<sub>4</sub> で生成したデータを高レートで送信する状態と、生成した分のデータ送信が完了し送信レートが 0 になる状態が連続して繰り返され、送信レートが大きく上下変動している。3000~6000s の高負荷時間帯では、MDOP 非対応の UE<sub>1</sub>, UE<sub>2</sub> の通信開始とともに、UE<sub>3</sub>, UE<sub>4</sub> の

送信レートが抑制されている。また、図 15 の各 UE の送信レートと比較しても UE<sub>3</sub>, UE<sub>4</sub> の送信レートが低く抑えられている。MDOP 非対応である UE<sub>1</sub>, UE<sub>2</sub> の送信レートを制御できないため、制御可能な UE<sub>3</sub>, UE<sub>4</sub> の送信レートが抑制された結果である。 $J_{fairness}$  は、MDOP 対応の UE<sub>3</sub>, UE<sub>4</sub> の間ではほぼ 1.0 を維持できているが、MDOP 非対応の UE<sub>1</sub>, UE<sub>2</sub> が混在するとフェアネスを維持できていない。ただし、高負荷時間帯でも MDOP 対応 UE 間のみであれば、送信レートのフェアネスはほぼ 1.0 を維持できていた。

以上の結果から、MDOP 非対応の UE が混在する環境においても、MDOP は時間的局所性を解消し、帯域利用効率を向上させられることを確認できた。また、MDOP 対応 UE の送信レートを抑制することで、MDOP 非対応 UE に対して帯域を割り当てることが可能なことも確認できた。

#### 4.5 考察

遅延耐性データの増加とトラフィックの局所性という背景をふまえ、時間的局所性や空間的局所性を解消するモバイルデータオフローディングプロトコルを提案した。特に、遅延耐性データの送信レートを制御し、時間的局所性を解消する時間的オフローディングに焦点を絞り検討と基礎評価を行った。評価の結果、局所性シナリオ、普及過渡期シナリオの両方で eNB 負荷の時間的局所性を解消しつつ、MDOP 対応 UE 間の送信レートのフェアネスも維持できることを確認した。

ここで、局所性シナリオで生じたコンテンツの最大遅延時間は UE<sub>1</sub> の 2128s、普及過渡期シナリオで生じたコンテンツの最大遅延時間は UE<sub>3</sub> の 1493s であり、今回のシミュレーションで設定した遅延耐性時間 3600s を超過しておらず、遅延耐性時間が経過したことで強制的に送信されることはなかった。この遅延耐性時間内に送信できるか否かは、データ量や eNB 許容負荷などのシナリオ設定値に大きく依存する。本稿では、朝方や夕方といった通勤時間帯でのピークシフト効果を意識し、2 時間程度のシミュレーションを行ったが、今後、様々な複雑な条件を想定して検討を深め、MDOP のような遅延耐性アプリ向けの通信プロトコルの有効性を示す必要がある。

#### 5. おわりに

本研究では、トラフィックの局所性を解消するため、モバイルデータ通信設備の負荷を分散する MDOP を提案した。MDOP は、通信路的、空間的、時間的という 3 つのオフローディングポリシーで遅延耐性データの送信レートを制御し、eNB の負荷を時間的または空間的に分散する。本稿では、時間的オフローディングについて具体的なアルゴリズムや送信レート導出方法を示した。評価の結果、MDOP 対応 UE のみの環境、MDOP 非対応 UE も混在する環境

のどちらの環境においても eNB 負荷の時間的局所性を低減でき、各 UE 間の送信レートのフェアネスも維持できることが確認できた。

今後、同一 UE 内に MDOP 対応アプリと非対応アプリが混在する場合だけでなく、MDOP 対応アプリ間でも優先度の異なるデータ通信を行いたい場合など、様々な現実的な条件に対応すべく MDOP の詳細設計を深めていく。さらに、ユーザが移動するなどの現実的な評価シナリオで時間的オフローディングと空間的オフローディングの評価を行い、実社会に MDOP を導入した際の効果分析を進める。

謝辞 本研究の一部は、科学研究費補助金基盤研究 (B) 「モバイルデータ 3D オフローディングの研究 (26280028)」により実施したものである。

### 参考文献

- [1] Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2014–2019, Technical report, Cisco (2015).
- [2] Biral, A., Centenaro, M., Zanella, A., Vangelista, L. and Zorzi, M.: The challenges of M2M massive access in wireless cellular networks, *Digital Communications and Networks*, Vol.1, No.1, pp.1–19 (2015).
- [3] 総務省：平成 27 年版情報通信白書，入手先 (<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h27/html/nc372220.html>) (参照 2016-03-15)。
- [4] NTT ドコモ：電波政策ビジョン懇談会ヒアリング資料 (平成 26 年 3 月 25 日)，入手先 ([http://www.soumu.go.jp/main\\_content/000282114.pdf](http://www.soumu.go.jp/main_content/000282114.pdf)) (参照 2016-03-15)。
- [5] 3GPP TR 23.705: Study on system enhancements for user plane congestion management (Rel-13) (2015).
- [6] Paul, U., Buddhikot, M.M. and Das, S.R.: Opportunistic traffic scheduling in cellular data networks, *IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DYSPAN)*, pp.339–348 (2012).
- [7] Timmer, Y., Pettersson, J., Hannu, H., Wang, M. and Johansson, I.: Network assisted rate adaptation for conversational video over LTE, concept and performance evaluation, *ACM SIGCOMM workshop on Capacity sharing workshop (CSWS)*, pp.45–50 (2014).
- [8] 3GPP TR 36.839: Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Mobility enhancements in heterogeneous networks (Rel 11) (2012).
- [9] 3GPP TR 36.902: Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Self-configuring and self-optimizing network (SON) use cases and solutions (Rel-9) (2009).
- [10] Li, Z-H., Wang, H., Pan, Z-W., Liu, N. and You, X-H.: QoS and channel state aware load balancing in 3GPP LTE multi-cell networks, *Science China Information Sciences*, Vol.56, No.4, pp.1–12 (2013).
- [11] Yang, Q-P., Kim, J-W. and Kim, T-H.: Mobility Prediction and Load Balancing Based Adaptive Handovers for LTE Systems, *International Journal on Computer Science and Engineering*, Vol.4, No.4, pp.638–646 (2012).
- [12] 芝 宏礼, 水溜智士, 嶋本 薫：基地局間負荷分散のためのユーザ行動に基づいたセル再選択方法に関する一検討, *GITI research bulletin*, pp.45–51 (2014).
- [13] 3GPP TS 24.312: Access Network Discovery and Selection Function (ANDSF) Management Object (MO) (Rel-13) (2015).
- [14] Aruba, a Hewlett Packard Enterprise company: Wi-Fi Certified Passpoint Architecture for Public Access, White Paper, available from ([http://www.aruba.networks.com/assets/wp/WP\\_Passpoint.Wi-Fi.pdf](http://www.aruba.networks.com/assets/wp/WP_Passpoint.Wi-Fi.pdf)) (参照 2016-03-15)。
- [15] Hoteit, S., Secci, S., Pujolle, G., Wietholter, S., Wolisz, A., Ziemlicki, C. and Smoreda, Z.: Quantifying the achievable cellular traffic offloading gain with passpoint hotspots, *ACM International Workshop on Wireless and Mobile Technologies for Smart Cities (WiMob-City)*, pp.19–28 (2014).
- [16] Dimatteo, S., Hui, P., Han, B. and Li, V.O.K.: *Cellular Traffic Offloading through WiFi Networks*, pp.192–201 (2011).
- [17] Wamser, F., Zinner, T., Tran-Gia, P. and Zhu, J.: Dynamic bandwidth allocation for multiple network connections: Improving user QoE and network usage of YouTube in mobile broadband, *ACM SIGCOMM Workshop on Capacity Sharing Workshop*, pp.57–62 (2014).
- [18] Andreev, S., Pyattaev, A., Johnsson, K., Galimina, O. and Koucheryavy, Y.: Cellular traffic offloading onto network-assisted device-to-device connections, *IEEE Communications Magazine*, Vol.52, No.4, pp.20–31 (2014).
- [19] 3GPP TR 36.300: Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description Stage 2, (Rel-13) (2015).
- [20] Anagnostopoulos, T., Anagnostopoulos, C.B., Hadjiefthymiades, S., Kalousis, A. and Kyriakakos, M.: Path prediction through data mining, *IEEE International Conference on Pervasive Services*, pp.128–135 (2007).
- [21] Anagnostopoulos, T., Anagnostopoulos, C. and Hadjiefthymiades, S.: Mobility prediction based on machine learning, *IEEE International Conference on Mobile Data Management (MDM)*, Vol.2, pp.27–30 (2011).
- [22] Liu, T., Bahl, P. and Chlamtac, I.: Mobility Modeling, Location Tracking, and Trajectory Prediction in Wireless ATM Networks, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol.16, No.6, pp.922–936 (1998).
- [23] Kim, J-M., Baek, H. and Park, Y.T.: Probabilistic graphical model based personal route prediction in mobile environment, *Applied Mathematics & Information Sciences*, Vol.6, No.2, pp.651S–659S (2012).
- [24] Cheng, P-C., Lee, K.C., Gerla, M. and Harri, J.: GeoDTN+Nav: Geographic DTN Routing with Navigator Prediction for Urban Vehicular Environments, *Mobile Networks and Applications*, Vol.15, No.1, pp.61–82 (2010).
- [25] 3GPP TR 25.942: Radio Frequency (RF) system scenarios (Rel-13) (2015).
- [26] Jain, R.K., Chiu, D-M.W. and Hawe, W.R.: A Quantitative Measure of Fairness and Discrimination for Resource Allocation in Shared Computer Systems, *ACM Trans. Comput. Syst.* (1984).
- [27] Space-Time Engineering, LLC.: Seanrgie, available from (<https://www.spacetime-eng.com/en/products>) (参照 2016-03-15)。



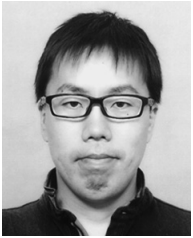
西岡 哲朗 (学生会員)

2014年静岡大学情報学部情報科学科卒業。2016年静岡大学大学院情報学研究科情報学専攻修了。モバイルデータ通信に関する研究に従事。現在、三菱電機株式会社勤務。H27年度MBL研究会奨励発表賞受賞。



町田 樹 (学生会員)

2015年静岡大学大学院総合科学技術研究科情報学専攻入学。移動モデル、モバイルデータ通信に関する研究に従事。



荒井 大輔

2006年静岡大学大学院情報学研究科修了。KDDI株式会社入社。(株)KDDI研究所出向。以来、IPネットワークの運用管理に関する研究に従事。FITヤングリサーチアワード受賞(2011年)。信学会学術奨励賞受賞(2012年)。

APNOMS Best Paper Award (2007年) 受賞。



大岸 智彦 (正会員)

1992年東京大学工学部電気工学科卒業。同年国際電信電話株式会社入社。以来、研究所にて通信システムの試験、TCP/IP、BGP等を対象としたIPネットワークの運用ならびに品質監視の研究に従事。現在、(株)KDDI

総合研究所スマートネットワーク管理グループリーダー。1998年本会学術奨励賞受賞。博士(工学)。



峰野 博史 (正会員)

1999年静岡大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年日本電信電話(株)入社。NTTサービスインテグレーション基盤研究所を経て、2002年10月より静岡大学情報学部助手。2006年九州大学大学院システム情報科学府博

士(工学)。2011年4月より静岡大学情報学部准教授。2015年12月よりJST さきがけ研究者兼務。モバイル・センサネットワーク応用システムに関する研究に従事。2012年度本学長尾真記念特別賞受賞。電子情報通信学会、IEEE、ACM各会員。