

特別研究報告

題目

仮想化技術に基づくモバイルアクセスネットワークの
消費電力の削減効果に関する解析的性能評価

指導教員

松岡 茂登 教授

報告者

山崎 里奈

平成 29 年 2 月 14 日

大阪大学 基礎工学部 情報科学科

仮想化技術に基づくモバイルアクセスネットワークの
消費電力の削減効果に関する解析的性能評価

山崎 里奈

内容梗概

近年、第5世代携帯電話網の実現に向けて、モバイルネットワークを構成する Radio Access Network (RAN) やフロントホールネットワーク、バックホールネットワークの再考が進んでいる。そのような新たなネットワークにおいては、資源利用効率を高めるために、計算機資源やネットワーク資源の仮想化技術が前提となっている。特に、Software Defined Network (SDN) 技術は、ネットワークの柔軟な制御を可能とする重要な技術として考えられている。モバイルネットワークに対して仮想化技術を適用することで、トラフィック需要の変動に応じた柔軟な計算機資源の制御やネットワーク制御が可能となる。また、ネットワークの省電力化に対しても有効であると考えられている。しかし、特にモバイルネットワークにおいては、仮想化技術の適用によるそれらの効果の定量的な評価はほとんど行われていない。

本研究においては、モバイルアクセスネットワークに着目し、仮想化技術に基づいた集中制御の有効性を明らかにすることを目的とする。そのために、まず、評価対象である、仮想化技術を前提としたアクセスネットワークのモデル化を行う。次に、そのモデルをモバイルアクセスネットワークへ適用し、数値評価を行う。性能評価は、端末を含めたネットワーク全体の消費電力、端末の通信時に発生する遅延時間やスループットの観点で行う。評価の結果、消費電力が低く抑えられる一方で遅延時間やスループットが悪化する場合があるということがわかった。

主な用語

第5世代携帯電話網, モバイルアクセスネットワーク, Software Defined Network (SDN), 消費電力, 遅延時間, スループット, 性能評価

目次

1	はじめに	6
2	仮想化技術に基づくアクセスネットワークの性能評価モデル	8
2.1	ネットワークモデル	8
2.2	トラフィックモデル	12
2.2.1	ノード自身のトラフィックモデル	12
2.2.2	収容トラフィックモデル	12
2.3	消費電力モデル	13
2.4	遅延モデル	16
3	モバイルアクセスネットワークの性能評価	18
3.1	評価環境	18
3.2	評価指標	18
3.3	評価結果と考察	21
3.3.1	少量のデータを周期的に送信する多数の端末を収容する場合	21
3.3.2	大量のデータを継続的に送信する端末を収容する場合	22
3.3.3	接続端末台数の違いによる影響	22
3.3.4	電力比例性の高低による影響	30
4	まとめと今後の課題	39
	謝辞	40
	参考文献	41

目 次

1	ネットワークモデル	10
2	PON 技術に基づくアクセスネットワークへのモデル適用例	11
3	デバイスの電力比例性	15
4	評価対象とするアクセスネットワーク環境	19
5	評価対象のネットワークモデル	19
6	IoT 端末を収容する場合のエンド間平均パケット廃棄率とシステム全体の消費電力の関係	23
7	IoT 端末を収容する場合のエンド間平均遅延時間とシステム全体の消費電力の関係	24
8	IoT 端末を収容する場合のマクロセルに接続する端末のエンド間平均パケット廃棄率とシステム全体の消費電力の関係	25
9	IoT 端末を収容する場合の小セルに接続する端末のエンド間平均パケット廃棄率とシステム全体の消費電力の関係	26
10	監視カメラ端末を収容する場合のエンド間平均パケット廃棄率とシステム全体の消費電力の関係	27
11	監視カメラ端末を収容する場合のエンド間平均遅延時間とシステム全体の消費電力の関係	28
12	監視カメラ端末を収容する場合のエンド間平均パケット廃棄率とネットワーク部分のみの消費電力の関係	29
13	端末数が 100 台である場合のエンド間平均パケット廃棄率とシステム全体の消費電力の関係	31
14	端末数が 100 台である場合のエンド間平均遅延時間とシステム全体の消費電力の関係	32
15	端末数が 100 台である場合のエンド間平均パケット廃棄率とネットワーク部分のみの消費電力の関係	33
16	ネットワーク機器の電力比例性が高い場合のエンド間平均パケット廃棄率とシステム全体の消費電力の関係	35
17	ネットワーク機器の電力比例性が高い場合のエンド間平均遅延時間とシステム全体の消費電力の関係	36
18	ネットワーク機器の電力比例性が高い場合のエンド間平均パケット廃棄率とネットワーク部分のみの消費電力の関係	37

19	ネットワーク機器の電力比例性が高く端末数が100台である場合のエンド間 平均パケット廃棄率とネットワーク部分のみの消費電力の関係	38
----	---	----

表 目 次

1	各ノードの消費電力	20
2	各ノードのネットワークインタフェースのリンク帯域と消費電力特性	20
3	各ノードの消費電力の変更部分	31
4	各ノードのネットワークインタフェースのリンク帯域と消費電力特性の変更部分	32

1 はじめに

第5世代携帯電話網 (5G ネットワーク) [1] の実現に向けて、近年急増しているモバイルネットワークトラフィックを収容するために5G ネットワークに必要とされる容量を達成するためには、Coordinated MultiPoint (CoMP) [2] や Carrier Aggregation (CA) [3]、Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) [4] などの新しい無線ネットワーク技術 [5] を広くサポートすることが必要となると考えられている。さらに、モバイルネットワークを構成する Radio Access Network (RAN) やフロントホールネットワーク、バックホールネットワークの構成の見直しも進んでいる [6] [7]。中でも、RAN の基地局部分をクラウド化する Cloud RAN (C-RAN) [8] が注目されている。C-RAN を実現する重要なネットワーク技術として、Software Defined Network (SDN) [9] や Network Functions Virtualization (NFV) [10] といった技術が存在する。

文献 [6] においては、C-RAN の実現のために解決すべき現在のフロントホールネットワークの問題点を指摘し、Base Band Unit (BBU) と Remote Radio Head (RRH) の機能分割を改め、フロントホールネットワークのデータをパケット化して転送する Next-Generation Fronthaul Interface (NGFI) アーキテクチャを提案している。それにより、大規模アンテナシステムに対応でき、データ転送効率を改善できるとしている。また、NGFI は伝送にイーサネットを用いるので信頼性や柔軟性を向上することができるとしている。文献 [7] においては、モバイルネットワークにおけるフロントホールネットワークとバックホールネットワークの統合制御が提案されており、その実現のために、仮想化技術が重要な役割を果たすと考えられている。

フロントホールネットワークに対して仮想化技術を適用することにより、ベースバンド処理を行うモジュールを仮想化し、クラウド環境でリソースプールとして提供することが可能となる。これにより、ネットワーク制御を集中的に行うことができるため、制御効率や資源利用効率の向上が期待される。また、フロントホールネットワークとバックホールネットワークを統合制御 [7] [11] することにより、ネットワーク資源やサーバ資源を動的に再配置することや、フロントホールネットワークとバックホールネットワークのネットワークリソースを共有することが可能となる。これにより、制御効率や資源利用効率の向上が期待される。それらの結果、モバイルネットワークの端末処理能力や端末スループットの向上、またモバイルネットワーク全体の省電力化が可能になると考えられる。しかし、特にモバイルネットワークにおいては、仮想化技術に基づく制御によるそれらの効果の定量的な評価はほとんど行われていない。

そこで本報告においては、仮想化技術に基づいた集中制御を前提としたモバイルアクセスネットワークに着目し、数学的解析手法に基づいて、その性能評価を行う。そのためにま

ず、評価対象である、仮想化技術に基づいた集中制御を前提としたアクセスネットワークのモデル化を行い、各ノードや各インタフェースを通過するトラフィック量、消費電力、パケット廃棄率および遅延時間を導出するための数学的解析を行う。次に、解析結果を用いて、モバイルアクセスネットワークを対象とした性能評価を行い、仮想化技術に基づいた集中制御の有効性を示す。具体的には、端末を含めたネットワーク全体の消費電力、端末の通信時に発生する遅延時間やスループットの観点で、ネットワークに対する端末接続台数の増加にもなうネットワーク性能の変化を確認する。

本報告の構成は以下のとおりである。2章に、解析モデルとして用いるネットワークモデルやトラフィックモデル、消費電力モデル、および遅延モデルを示す。また、3章においては、2章で示した解析結果を用いた性能評価を示す。最後に、4章でまとめと今後の課題について述べる。

2 仮想化技術に基づくアクセスネットワークの性能評価モデル

2.1 ネットワークモデル

図1に、ネットワークモデルの概要を示す。本モデルには N^{NODE} 個のノード $n_1, n_2, \dots, n_{N^{NODE}}$ が存在する。ノードの集合を \mathbf{N} とする。ノード n_i は N_i^U 個のアップリンクインタフェース $f_{i,1}^U, f_{i,2}^U, \dots, f_{i,N_i^U}^U$ と、 N_i^D 個のダウンリンクインタフェース $f_{i,1}^D, f_{i,2}^D, \dots, f_{i,N_i^D}^D$ を持つ。ノード n_i が持つアップリンクインタフェースおよびダウンリンクインタフェースの集合をそれぞれ $\mathbf{F}_{n_i}^U$ 、 $\mathbf{F}_{n_i}^D$ 、とし、 $\mathbf{F}_{n_i} = \mathbf{F}_{n_i}^U \cup \mathbf{F}_{n_i}^D$ とする。ノード n_i のインタフェース $f_{i,j}$ のリンク帯域を $l_{f_{i,j}}$ とする。

ノードのアップリンクインタフェースは接続先となる他のノードのダウンリンクインタフェースに対応する。その対応の集合 $\mathbf{T} = \{(f^U, f^D)\}$ をネットワークトポロジと呼ぶ。1つのアップリンクインタフェースは、1つのダウンリンクインタフェースに対応するが、1つのダウンリンクインタフェースは複数のアップリンクインタフェースに対応することがある。これは、無線LANのアクセスポイントのように1つのインタフェースで複数の端末への接続を行うことに相当する。

ノード n_i は自身が持つアップリンクインタフェースのうち1つである $f_{i,u}^U (1 \leq u \leq N_i^U)$ のみを用いて n_i が発生させるトラヒック、および n_i に流入するトラヒックを送信する。送信先のノードを n_j 、対応するインタフェースを $f_{j,d}^D (1 \leq d \leq N_j^D)$ とする。ただし $(f_{i,u}^U, f_{j,d}^D) \in \mathbf{T}$ である。このとき、すべてのノードがトラヒック送受信に用いるインタフェース対の集合 $\mathbf{T}^{USE} = \{(f^U, f^D)\} (\subseteq \mathbf{T})$ をトラヒックトポロジと呼ぶ。また、 \mathbf{T}^{USE} が与えられたときに、 n_i が収容しているほかのノードの集合を $\mathbf{A}_i = \{n_k \mid \exists (f_{k,u}^U, f_{i,d}^D) \in \mathbf{T}^{USE}\}$ と定義する。図2に、Passive Optical Network (PON) 技術 [12] に基づいて構築されるアクセスネットワークに対してネットワークモデルを適用した様子を示す。このネットワークモデルは、ネットワーク仮想化技術が適用されたような環境において、集中制御による柔軟な経路制御やトポロジ制御が行われるような場合も対象とすることができる。なぜなら、ネットワークトポロジに対してトラヒックトポロジを別に定義していることで、あるノードが複数リンクを持ち、トラヒック量などに応じてそれらのリンクを選択して用いるような状況に対応できるためである。

本報告におけるネットワークモデルにおいては、ノードが複数のアップリンクインタフェースを同時に用いてトラヒックを伝送するような状況を考慮しない。しかし、文献 [7] においては、ネットワークトラヒック量に応じて複数のアップリンクインタフェースを用いることが考えられている。そのようなネットワークに対してモデルを適用するためには、モデルの拡張が必要となる。具体的には、ノード n_i は自身が持つアップリンクインタフェースのうち1つまたは複数を用いて、トラヒックを送信するものとする。この際、複数のアプリ

ンクインタフェースに対してトラフィックを分配する方法を考える必要があり、例えば、トラフィックを均等に分配する方法や、各アップリンクインタフェースの物理帯域に比例するように分配する方法などが考えられる。このようなモデルの拡張と評価に関しては今後の課題とする。

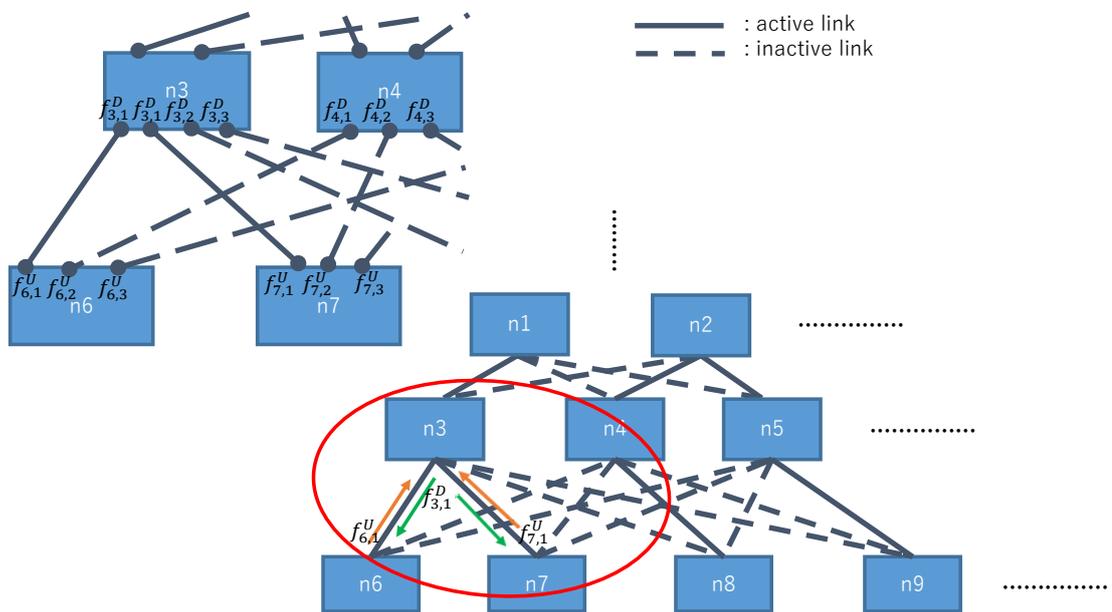


図 1: ネットワークモデル

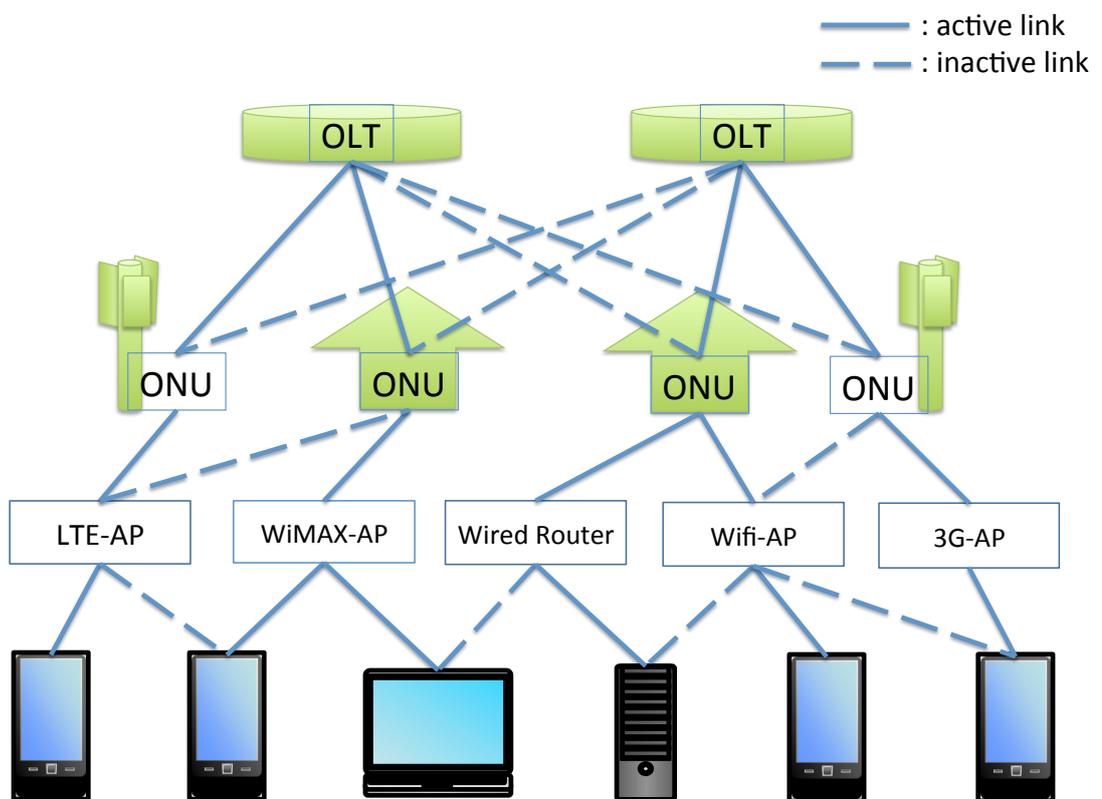


図 2: PON 技術に基づくアクセスネットワークへのモデル適用例

2.2 トラヒックモデル

2.2.1 ノード自身のトラヒックモデル

あるノードからトラヒックが発生するとき、そのトラヒックは、パケットが発生する時間区間（ON 区間）と発生しない時間区間（OFF 区間）を持つものとする。ノード n_i の ON 区間の長さを $T_{n_i}^{ON}$ 、OFF 区間の長さを $T_{n_i}^{OFF}$ とし、ON 区間と OFF 区間の和を n_i の通信周期 $T_{n_i}(= T_{n_i}^{ON} + T_{n_i}^{OFF})$ とする。

ON 区間において n_i がトラヒックトポロジの最上位ノードへ向けて送信するパケット数を m_{n_i} とする。パケットサイズは n_i にかかわらず、平均 s の指数分布を持つものとする。パケットは ON 区間において時間的な偏りなく、かつランダムな時刻に送信されるものとする。このとき、ON 区間におけるトラヒックの平均ビットレートを b_{n_i} とすると、 $b_{n_i} = \frac{s \cdot m_{n_i}}{T_{n_i}^{ON}}$ となる。ノードのトラヒック特性は $T_{n_i}^{ON}$ 、 $T_{n_i}^{OFF}$ 、 s 、 m_{n_i} および b_{n_i} で表現される。

スマートフォンのように、1つのノードが複数のアプリケーションを同時に稼働させ、それらから特性の異なる複数のトラヒックが発生する場合が考えられる。本モデルにおいては、そのようなトラヒックは、アプリケーション毎にノードを定義することで表現する。

2.2.2 収容トラヒックモデル

ノード n_i のあるインタフェースに、複数ノードからのトラヒックが収容されている場合、すなわち、ノード n_i が送信するトラヒックや、1つのインタフェースで複数ノードからのトラヒックを受信している場合には、収容されたトラヒックの特性を、ON 区間の長さ、OFF 区間の長さ、および ON 区間に発生させるトラヒックの平均ビットレート、さらに、ノード n_i のインタフェース $f_{i,j}$ におけるパケット廃棄率 $p_{f_{i,j}}$ を用いて表現する。以下においては簡単のために、ノードの1つのインタフェースが収容するトラヒックの通信周期は均一であるとし、ノード n_i のインタフェース $f_{i,j}$ が収容するトラヒックの通信周期は、 $T_{f_{i,j}}$ であるとする。通信周期が異なる端末を収容する場合については今後の課題とする。以下においては、インタフェース $f_{i,j}$ がトラヒックを収容しているノードの集合を $\mathbf{N}_{f_{i,j}}$ とする。

$f_{i,j}$ に収容されるトラヒックを発生させているノード $n_k (\in \mathbf{N}_{f_{i,j}})$ の通信周期を T_{n_k} 、ON 区間と OFF 区間の長さをそれぞれ $T_{n_k}^{ON}$ 、 $T_{n_k}^{OFF}$ とする ($T_{n_k} = T_{n_k}^{ON} + T_{n_k}^{OFF}$)。 $f_{i,j}$ に収容されるトラヒックの ON 区間の同期の度合いを示す指標として同期度 $\sigma_{f_{i,j}}$ ($0 \leq \sigma_{f_{i,j}} \leq 1$) を定義する。周期の開始時刻を 0、終了時刻を $T_{f_{i,j}}$ とすると、 $f_{i,j}$ に収容されるトラヒックの ON 区間は $[0, (1 - \sigma_{f_{i,j}})T_{f_{i,j}}]$ の区間内で開始し、かつ、 $(1 - \sigma_{f_{i,j}})T_{f_{i,j}}$ に終了するトラヒックがあるものとする。ただし、すべての端末の通信は通信周期の間に終了するものとする。これは、 $0 \leq \sigma_{f_{i,j}} \leq 1 - \frac{\max_k(T_{n_k}^{ON})}{T_{f_{i,j}}}$ であることを意味する。

$\sigma_{f_{i,j}} = 0$ である場合は、收容されているノードの ON 区間は全く同期されていない。一方、 $\sigma_{f_{i,j}} = 1 - \frac{\max_k(T_{n_k}^{ON})}{T_{f_{i,j}}}$ である場合は、收容されているすべてのノードの ON 区間は時刻 0 に開始され、完全に同期している。同期度が大きいほど、 $f_{i,j}$ におけるトラヒックの周期 $T_{f_{i,j}}$ に占める OFF 区間が長くなるため、OFF 区間においてスリープ制御を行う場合にはその省電力効果が高くなる一方、ON 区間におけるトラヒックの平均ビットレートが高くなる。

同期度が $\sigma_{f_{i,j}}$ の時の、インタフェース $f_{i,j}$ に到着するトラヒックの ON 区間の長さを $T_{f_{i,j}}^{ON}$ 、OFF 区間の長さを $T_{f_{i,j}}^{OFF}$ 、ON 区間におけるトラヒックの平均ビットレートを $d_{f_{i,j}}$ とする。 $d_{f_{i,j}}$ は、インタフェース $f_{i,j}$ が、ダウンリンクインタフェースの場合は $d_{f_{i,j}}^D$ と、アップリンクインタフェースの場合は $d_{f_{i,j}}^U$ と記述し、以下のように導出される。

$$T_{f_{i,j}}^{ON} = (1 - \sigma_{f_{i,j}})T_{f_{i,j}} \quad (1)$$

$$T_{f_{i,j}}^{OFF} = \sigma_{f_{i,j}}T_{f_{i,j}} \quad (2)$$

$$d_{f_{i,j}}^D = \sum_{n \in \mathbf{N}_{f_{i,j}}^D} \sum_{f \in \mathbf{F}_n^U} \left(d_f (1 - p_f) \frac{T_f^{ON}}{T_{f_{i,j}}^D} \right) \quad (3)$$

$$d_{f_{i,j}}^U = \sum_{f \in \mathbf{F}_i^D} \left(d_f \frac{T_f^{ON}}{T_{f_{i,j}}^U} \right) + b_{n_i} \frac{T_{n_i}^{ON}}{T_{f_{i,j}}^U} \quad (4)$$

2.3 消費電力モデル

ノードの消費電力は、ノード自身の消費電力特性と、ノードが持つインタフェースの消費電力特性によって決定される。ノード n_i 自身の消費電力特性は、送受信するトラヒックが存在するときの消費電力 $e_{n_i}^{ACT}$ と、送受信するトラヒックが存在しないときの消費電力 $e_{n_i}^{OFF}$ によって決定される。ノード n_i が他のノードのトラヒックを收容しておらず、自身もトラヒックを発生させない場合、すなわち、 $\mathbf{A}_i = \emptyset$ かつ $b_{n_i} = 0$ である場合に、ノードの電源を落とすことができる場合には、 $e_{n_i}^{OFF} = 0$ となる。一方、トラヒック送受信がない場合にも電源を落とすことができない場合には、 $e_{n_i}^{OFF} \geq 0$ となる。

ノード n_i が持つインタフェース $f_{i,j}$ の消費電力 $e_{f_{i,j}}$ は、インタフェースにおけるトラヒックの ON 区間と OFF 区間の長さ、およびトラヒックのビットレートから以下のように決定される。

$$e_{f_{i,j}} = \begin{cases} 0 & \text{if } N_{f_{i,j}} = \emptyset \\ \frac{T_{f_{i,j}}^{ON}}{T_{f_{i,j}}^{ON} + T_{f_{i,j}}^{OFF}} E_{f_{i,j}}^{active}(d_{f_{i,j}}(1 - p_{f_{i,j}})) + \frac{T_{f_{i,j}}^{OFF}}{T_{f_{i,j}}^{ON} + T_{f_{i,j}}^{OFF}} E_{f_{i,j}}^{sleep}(T_{f_{i,j}}^{OFF}) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

関数 $E_f^{active}(x)$ は、ON 区間、すなわちデータ送信中の消費電力を与える関数であり、送信するトラヒックの平均ビットレート x を引数とする。本報告においては、文献 [13] に示されている電力比例性 (Energy Proportionality) の概念を用いて関数 $E_f^{active}(x)$ を以下のように決定する。図 3 に、文献 [13] に基づいた、トラヒックのビットレートと消費電力の関係を示す。図には、完全な電力比例性を持つ場合 (ideal power consumption)、ルータ機器などの場合で、インタフェースボードの追加が発生するような場合 (actual power consumption)、および、本報告で用いるモデル ($E_f^{active}(x)$) が示されている。本報告で用いるモデルにおいては、トラヒックが 0 である場合でも、一定の消費電力が発生し、トラヒック量の増加に対して線形的に消費電力が増加する。トラヒックのビットレートがノードのキャパシティーである B に等しい時の消費電力を e^{MAX} とし、トラヒックのビットレートが 0 の時の消費電力を e^{MIN} とする。このとき、ネットワークデバイスの Energy Proportionality Index (EPI) は $100 \cdot \frac{e^{MAX} - e^{MIN}}{e^{MAX}}$ と定義される [13]。これに倣い、関数 $E_f^{active}(x)$ を以下のように定める。

$$x = d_{f,i,j}(1 - p_{f,i,j}) \quad (6)$$

$$E_f^{active}(x) = x \frac{(e_f^{MAX} - e_f^{MIN})}{B_f} + e_f^{MIN} \quad (7)$$

ここで、 e_f^{MAX} 、 e_f^{MIN} 、および B_f は、インタフェース f の消費電力を決定するパラメータである。また、アイドル時の消費電力を表す関数 $E_f^{sleep}(t)$ は、ノードのスリープ制御を前提とし、OFF 区間の長さ t に対する関数としている。これは、トラヒックが流れない時間の長さに応じた、複数のスリープモードを持つこと [] を考慮するためである。これらより、ノード n_i の消費電力 e_{n_i} は、以下のように算出される。

$$e_{n_i} = \begin{cases} e_{n_i}^{OFF} + \sum_{f \in \mathbf{F}_{n_i}} e_f & \text{if } \mathbf{A}_i = \emptyset \text{ and } b_{n_i} = 0 \\ e_{n_i}^{ON} + \sum_{f \in \mathbf{F}_{n_i}} e_f & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

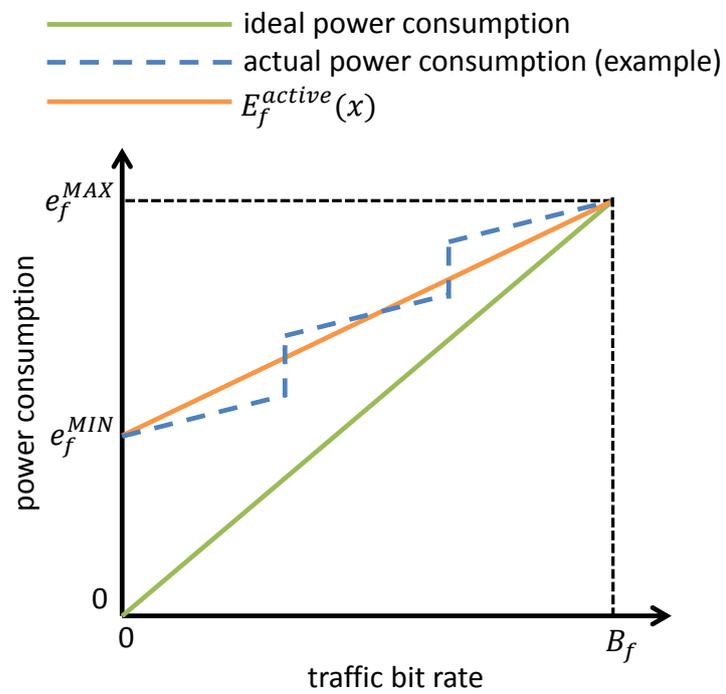


図 3: デバイスの電力比例性

2.4 遅延モデル

M2M/IoT トラヒックの性能は、端末が送信するパケットがトラヒックトポロジにおける最上位ノードへ到達するまでの遅延時間であるエンド間パケット遅延時間、およびその際に発生するパケット廃棄率であるエンド間パケット廃棄率で評価する。エンド間パケット遅延時間は、パケットが通過する各ノードにおけるバッファリング時間とパケット処理時間の和とする。エンド間パケット廃棄率は、パケットが通過する各ノードにおけるパケット廃棄率を用いて算出する。

各ノードにおけるパケット廃棄率およびバッファリング時間とパケット処理時間の和は、M/M/1/K 待ち行列モデル [14] を用いて導出する。一般に、M/M/1/K 待ち行列モデルにおける、客の平均到着間隔を $\frac{1}{\lambda}$ 、平均サービス時間を $\frac{1}{\mu}$ 、システム内容数の最大値を K とすると、棄却率 P と平均系内時間 W は次のようになる。

$$P = \frac{\rho^K}{1 + \rho + \dots + \rho^K} \quad (9)$$

$$W = \frac{1}{\lambda(1-P)} \sum_{n=0}^K n \frac{1-\rho}{1-\rho^{K+1}} \rho^n = \frac{1}{\lambda(1+\rho+\dots+\rho^{K-1})} \sum_{n=0}^K n \rho^n \quad (10)$$

ただし、 $\rho = \frac{\lambda}{\mu}$ である。

本報告においては、 λ をノードの各インタフェースに到着するパケットの到着レートの逆数、 μ を出力リンクにおける平均パケット処理速度の逆数、バッファサイズを $(K-1)$ パケットとし、棄却率をノードの各インタフェースにおけるパケット廃棄率、系内時間をパケットがノードに到着してから処理を経て出力されるまでの時間とみなす。それにより、インタフェース f において、以下の式が得られる。

$$\lambda_f = \frac{d_f}{s} \quad (11)$$

$$\mu_f = \frac{l_f}{s} \quad (12)$$

$$p_f = \frac{\rho_f^K}{1 + \rho_f + \dots + \rho_f^K} \quad (13)$$

$$w_f = \frac{1}{\lambda_f(1-p_f)} \sum_{n=0}^K n \frac{1-\rho_f}{1-\rho_f^{K+1}} \rho_f^n = \frac{1}{\lambda_f(1+\rho_f+\dots+\rho_f^{K-1})} \sum_{n=0}^K n \rho_f^n + \frac{1}{\mu_f} \quad (14)$$

ただし、 $\rho_f = \frac{\lambda_f}{\mu_f}$ である。また、(11)–(14) 式の計算は下位ノードから順に行い、ダウンリンクインタフェースにおいてはパケット廃棄は発生しないものとする。

あるノードに到着するパケットの到着レートは、端末が送出するパケットレートと、当該ノードに到着するまでに経由する他ノードにおけるパケット廃棄率を考慮して算出する。最上位ノードの出力リンクに到着すべきパケット数を M 、各端末が送信するパケット数を $M'(\geq M)$ とする。各端末が送信するパケット数を、経由するノードにおけるパケット廃棄を考慮し、最上位ノードの出力リンクに到着するパケット数が M 以上となるように決定する。このとき、ノードが収容するトラフィック量が多すぎる場合には、ネットワークのパケット廃棄率が高くなることによって、各端末からの送信パケット数をどれだけ大きくしても、到着パケット数が M に達しないことがある。その際は、ネットワークがそのトラフィックを収容することができないとみなす。ノード n_i から送信されるパケットが最上位のノードに到達するまでに通過するノードの集合を \mathbf{C}_{n_i} とする。すべての端末について、以下の手順 1. – 5. を行い、送信パケット数が変化しなくなるまで手順 3. – 5. を繰り返し行う。

1. ノード n_i が 1 つの ON 区間において送信するパケット数を、トラフィックデマンドとして与えられる値 (m_{n_i}) に初期化する。
2. ノード n_i から最上位ノードに到着すべきパケット数 M_{n_i} を求める。

$$M_{n_i} = \sum_{n \in \mathbf{C}_{n_i}} m_n \quad (15)$$

3. 各ノードのパケット廃棄率を導出する。
4. ノード n_i から送信され、最上位ノードに到着するパケット数 M''_{n_i} を求める。

$$M''_{n_i} = m_{n_i} \left(\prod_{n \in \mathbf{C}_{n_i}} (1 - p_{f_n^U}) \right) \quad (16)$$

5. $M''_{n_i} \geq M_{n_i}$ または $|M_{n_i} - M''_{n_i}| \leq \delta$ であれば、終了する。 δ は許容誤差を表す。 $|M_{n_i} - M''_{n_i}| > \delta$ であれば、各ノードが送信するパケット数を変更し、3. へ戻る。ただし、トラフィックを収容できないと判断した場合には終了する。

3 モバイルアクセスネットワークの性能評価

本章では、2章で構築したモデルを用いて、モバイルアクセスネットワークの性能評価を行った結果を示す。

3.1 評価環境

5G ネットワークにおいては、電波の届く範囲が半径数キロメートルから数十キロメートルであるマクロセルを提供する基地局と、マクロセルを補完するために用いられ、半径数百メートルから数キロメートルを被覆するスモールセルを提供する小型の基地局を併用することで、通信可能領域を広く保ちながら、収容できるトラフィック量を大きくするアーキテクチャが検討されている [15] [16] [17]。本報告においては、簡単のため、単一のマクロセルが被覆する範囲を、4つのスモールセルが被覆する環境を想定する。さらに、これらの基地局が Passive Optical Network (PON) 技術に基づくネットワークによって収容されることを前提とする。すなわち、マクロセル基地局とスモールセル基地局は、それぞれ個別の Optical Network Unit (ONU) に接続され、ONU は Optical Line Terminal (OLT) に収容されている。図4に、想定しているアクセスネットワーク環境を示す。また、端末はマクロセルとスモールセルの両方に被覆された領域に均一に分布する。すなわち、各端末はマクロセル、あるいは4つのうち1つのスモールセルに接続することができる。端末は最上位ノードである OLT に向けてトラフィックを発生させる。

図5に、上述したモバイルアクセスネットワークを、2章で述べたネットワークモデルに基づいて表現したトラヒックトポロジ、およびネットワークトポロジを示す。このネットワークトポロジに対して、接続する端末数、マクロセルとスモールセルのそれぞれに接続する端末の割合、および基地局や ONU の消費電力特性などが、ネットワークの消費電力や端末のネットワーク性能に与える影響を評価する。表1および表2に、各ノードの消費電力、およびインタフェースの消費電力特性をそれぞれ示す。表2中の、A → B というインタフェースの表記は、ノード A とノード B を接続しているリンクの、ノード A 側のインタフェースの消費電力特性を表す。以降では、特に断りのない限り、これらの表に示した設定値を用いて評価を行う。

3.2 評価指標

端末のネットワーク性能を評価するために、エンド間パケット廃棄率とエンド間遅延時間を用いる。これらは、端末から OLT までの経路上に存在する各ノードのインタフェースにおける遅延時間およびパケット廃棄率から算出する。また、消費電力の評価のために、端末

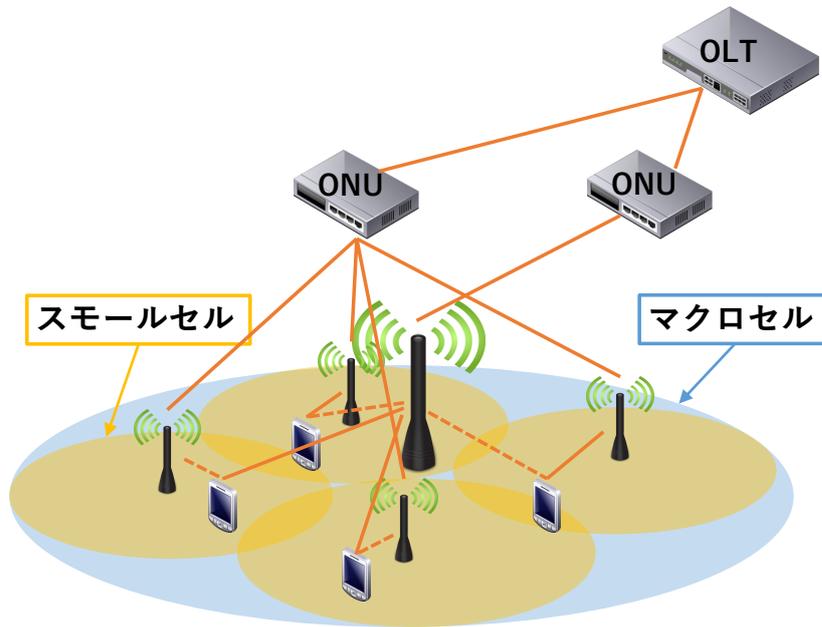


図 4: 評価対象とするアクセスネットワーク環境

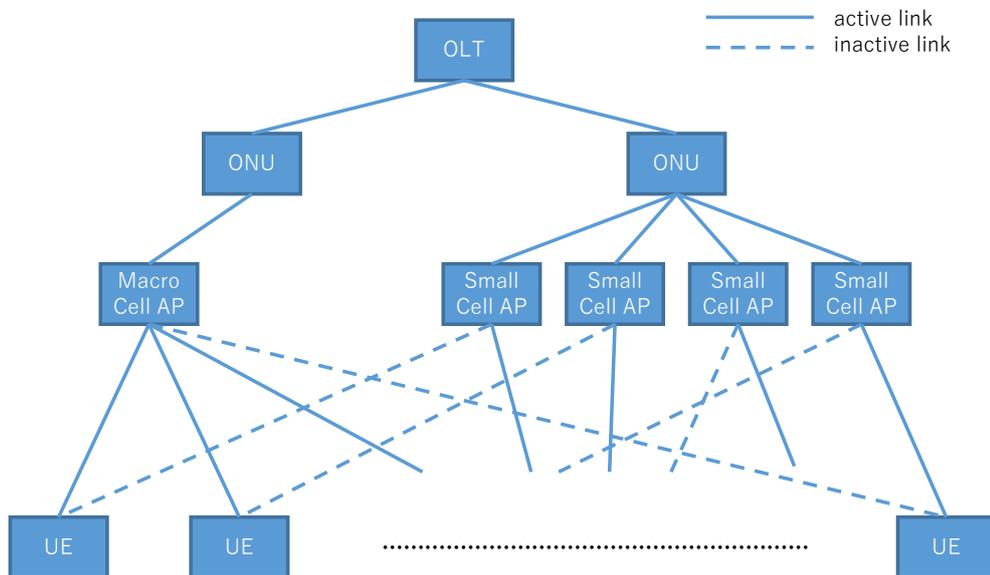


図 5: 評価対象のネットワークモデル

表 1: 各ノードの消費電力

ノードの種類	e_n^{ACT}	e_n^{OFF}
OLT	200 W	200 W
ONU	50 W	0 W
マクロセル基地局	300 W	300 W
スモールセル基地局	300 W	0 W
端末	0 W	0 W

表 2: 各ノードのネットワークインタフェースのリンク帯域と消費電力特性

インタフェース	リンク帯域	e_f^{MAX}	e_f^{MIN}	E_f^{sleep}
OLT → ONU	10 Mbps	10 W	10 W	10 W
ONU → OLT	10 Mbps	10 W	10 W	10 W
ONU → 基地局	10 Mbps	4 W	3 W	3 W
基地局 → ONU	10 Mbps	4 W	3 W	3 W
マクロセル基地局 → 端末	10 Mbps	0.02 W	0.02 W	0.02 W
スモールセル基地局 → 端末	10 Mbps	0.01 W	0.01 W	0.01 W
端末 → マクロセル基地局	10 Mbps	1.0 W	0.7 W	0.01 W
端末 → スモールセル基地局	10 Mbps	0.4 W	0.1 W	0.01 W

を含めたシステム全体の消費電力、および、端末を除いたネットワーク部分のみの消費電力を用いる。消費電力は、対象となるすべてのノードの消費電力と、ノードが持つすべてのインタフェースの消費電力の総和である。

3.3 評価結果と考察

以降に示す評価結果においては、端末は領域内に均一に存在し、指定した割合の端末がマクロセル基地局に、残りの端末がスモールセル基地局に接続する。マクロセル基地局への接続割合を0.1から0.9まで変化させることによって、端末の接続分布が与える影響を評価する。端末の接続先は、指定された割合を用いてランダムに決定される。評価はそれぞれのマクロセル基地局への接続割合に対して、100回ずつ行った。

3.3.1 少量のデータを周期的に送信する多数の端末を収容する場合

まず、端末のトラヒックモデルを、通信周期を10分、ON区間を1分、OFF区間を9分、ON区間における送信パケット数を10、パケットサイズを1,500バイトとした。ON区間におけるトラヒックの平均ビットレートは2Kbpsとなる。これは、少量のデータを定期的に送信するIoT端末を想定している。端末台数は5,000台とした。

図6に、端末の平均エンド間パケット廃棄率とシステム全体の消費電力の関係を、図7には端末の平均エンド間遅延時間とシステム全体の消費電力の関係を示している。また、図8および図9には、それぞれマクロセル基地局とスモールセル基地局へ接続している端末の、平均パケット廃棄率とシステム全体の消費電力の関係を示している。図6より、マクロセル基地局への接続割合が高い場合には、消費電力とパケット廃棄率が大きいことがわかる。これは、多くの端末がマクロセル基地局へ接続を行うため、端末の消費電力が大きくなるとともに、マクロセル基地局のアップリンクインタフェースが輻輳するためである。また、図7から、マクロセル基地局への接続割合が大きい場合には、エンド間遅延時間も大きいことがわかる。

一方、マクロセル基地局への接続割合が低下すると、システム全体の消費電力は低下することがわかる。これは、より多くの端末がスモールセル基地局へ接続することによって、端末の消費電力が下がることに主に起因している。しかし、エンド間パケット廃棄率およびエンド間遅延時間は、低下した後に増加に転じていることがわかる。これは、スモールセル基地局への接続割合が増加することによって、図8に示すように、マクロセル基地局へ接続している端末のパケット廃棄率は低下するが、図9に示すように、スモールセル基地局へ接続している端末のパケット廃棄率が増加するためである。すなわち、多くの端末がスモール

セル基地局へ接続することで、スモールセル基地局のアップリンクインタフェースが輻輳する。以降に示す評価結果においても、端末の基地局への接続率がそれぞれの基地局へ接続する端末の packets 廃棄率に与える影響は同様であるため、記述を省略する。

図6-図9の評価結果においては、マクロセルへの接続割合が0.3である場合に、エンド間遅延時間あるいはエンド間 packets 廃棄率が小さい場合と大きい場合の2とおりの結果が得られていることが確認できる。これは、スモールセル基地局のアップリンクインタフェースが輻輳する場合としない場合があり、輻輳する場合には packets 廃棄率が上昇し、端末の送信 packets 数が増加することを意味している。

3.3.2 大量のデータを継続的に送信する端末を収容する場合

次に、端末のトラフィックモデルを、通信周期を1分、ON区間を1分、OFF区間を0分、ON区間における送信 packets 数を1,000、packets サイズを1,500バイトとする。ON区間におけるトラフィックの平均ビットレートは200 Kbpsとなる。これは、大量のデータを継続的に送信する監視カメラ端末などを想定している。端末台数を500台とし、基地局-ONU間、およびONU-OLT間のネットワークのリンク帯域をすべて100 Mbpsとした。ON区間においてすべての端末から送信されるデータのビットレートの総和は、3.3.1節のIoT端末を収容する場合と等しい。

図10と図11にはそれぞれ、図6と図7と同様の評価結果を示している。これらの図を比較すると、監視カメラ端末を収容する場合のほうが、IoT端末を収容する場合に比べてシステム全体の消費電力がやや小さいことがわかる。これは、収容する端末数が5,000台から500台に減少していることに主に起因している。

図12に、端末の平均エンド間 packets 廃棄率とネットワーク部分のみの消費電力の関係を示している。図から、端末のマクロセル基地局への接続割合が変化した際の、消費電力の変化幅が、図10に比べて小さいことがわかる。これは、端末のマクロセル基地局への接続割合が変化しても、基地局より上位のネットワークに流入するトラフィック量はほとんど変化しないためである。

3.3.3 接続端末台数の違いによる影響

端末のトラフィックモデルおよびネットワークモデルは、3.3.2節と同一のものとし、端末の台数を100台とした場合の結果を示す。

図13-図15に、図10-図12と同様の評価結果を示す。図13と図10、および図14と図11を比較することにより、システム全体の消費電力が小さくなっていることがわかる。これは、端末台数が減少したことに主に起因している。一方、図15と図12を比較すると、ネッ

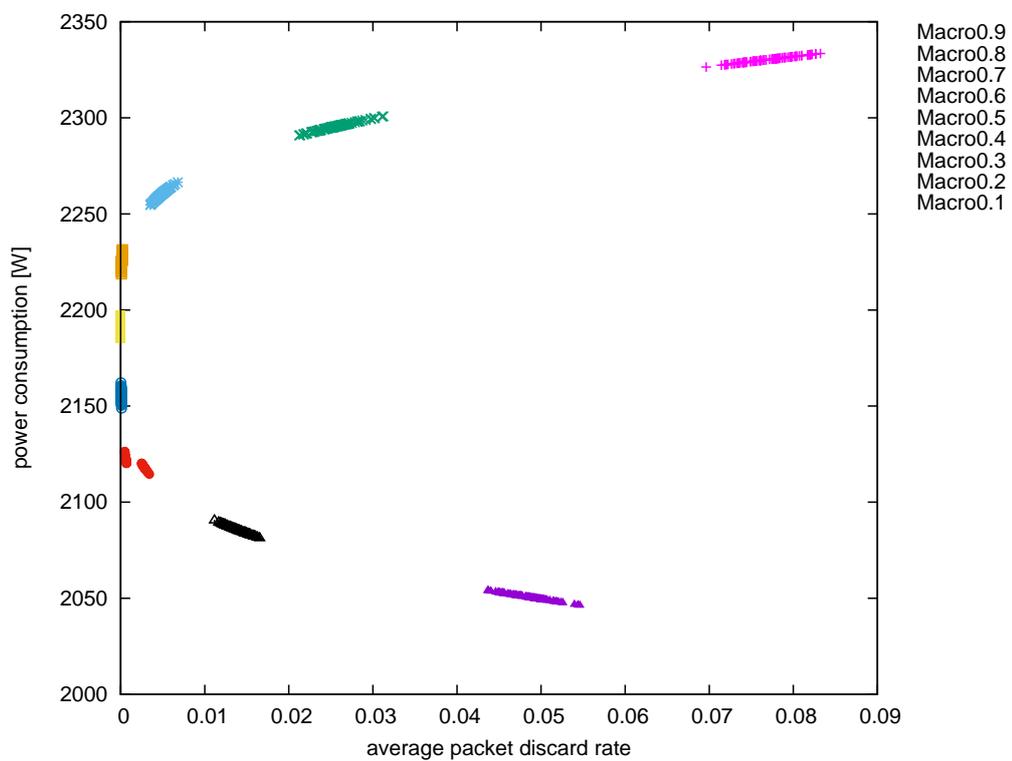


図 6: IoT 端末を収容する場合のエンド間平均パケット廃棄率とシステム全体の消費電力の関係

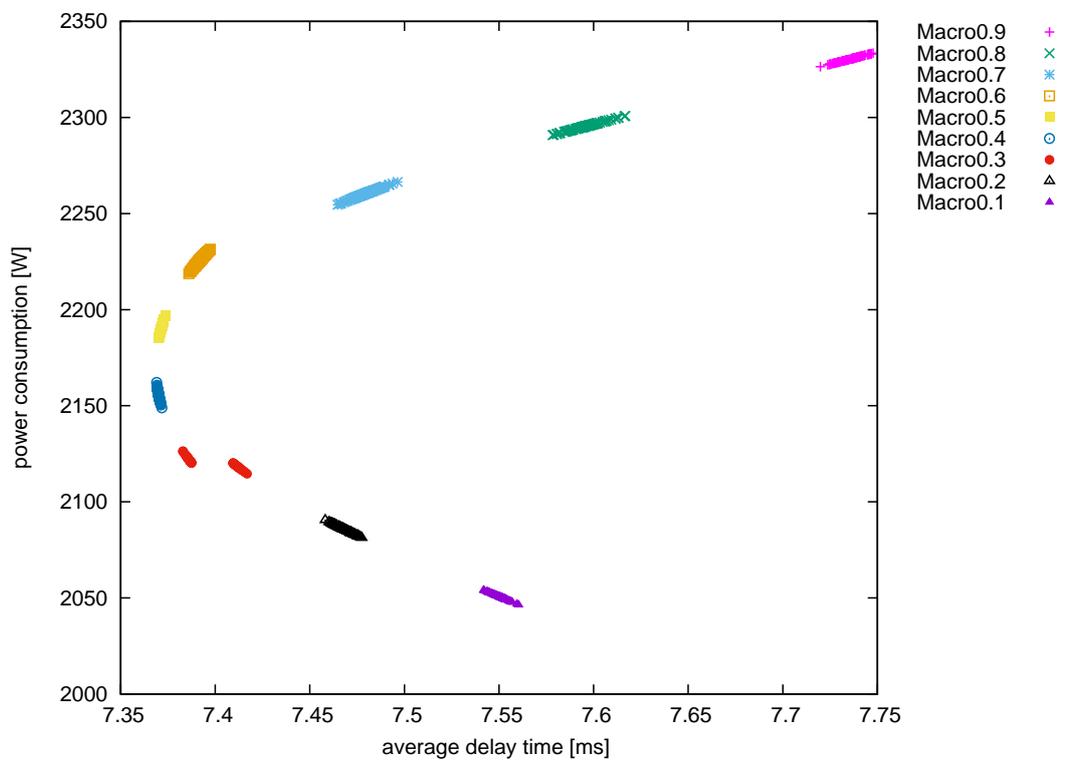


図 7: IoT 端末を収容する場合のエンド間平均遅延時間とシステム全体の消費電力の関係

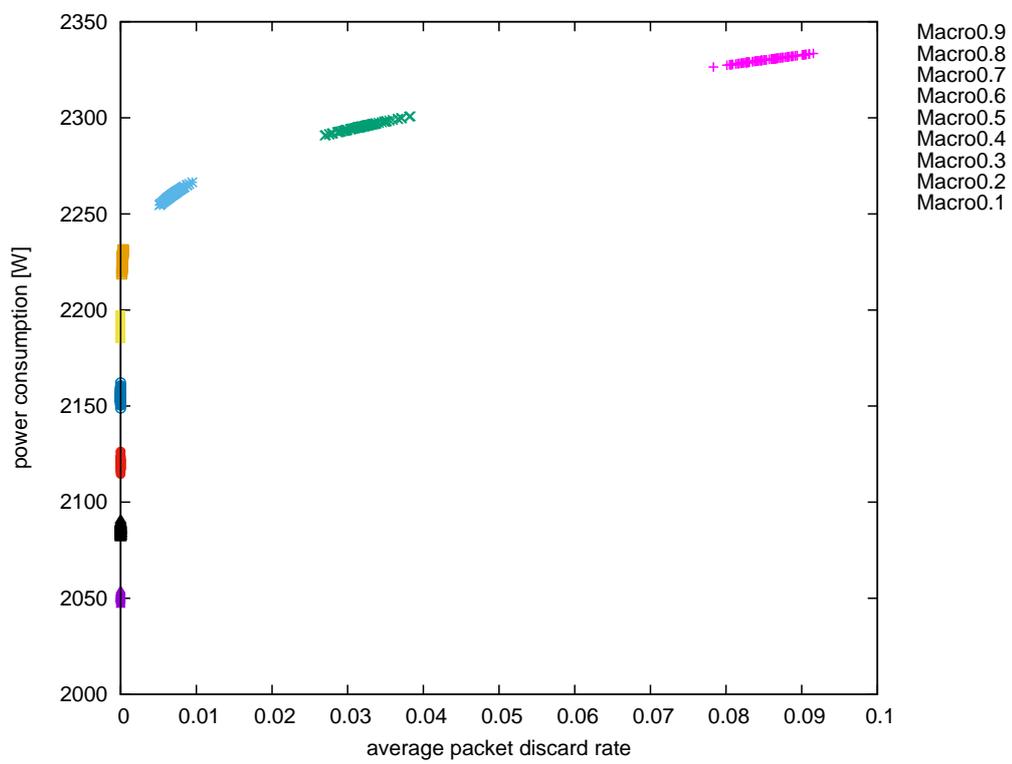


図 8: IoT 端末を収容する場合のマクロセルに接続する端末のエンド間平均パケット廃棄率とシステム全体の消費電力の関係

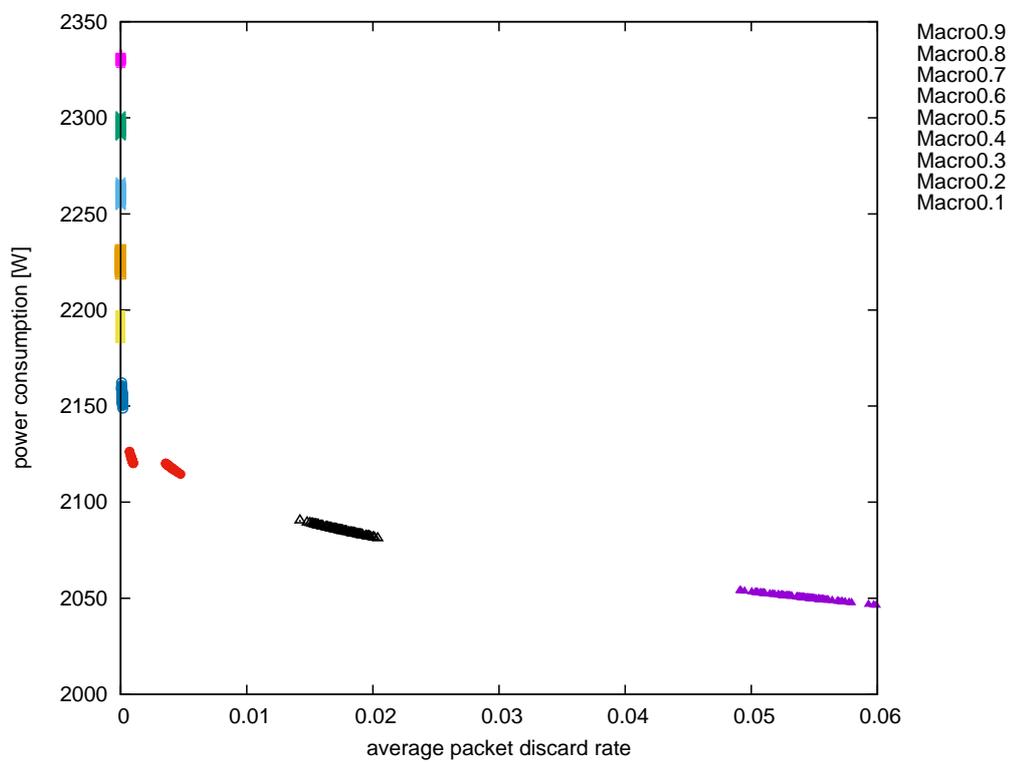


図 9: IoT 端末を収容する場合のスマールセルに接続する端末のエンド間平均パケット廃棄率とシステム全体の消費電力の関係

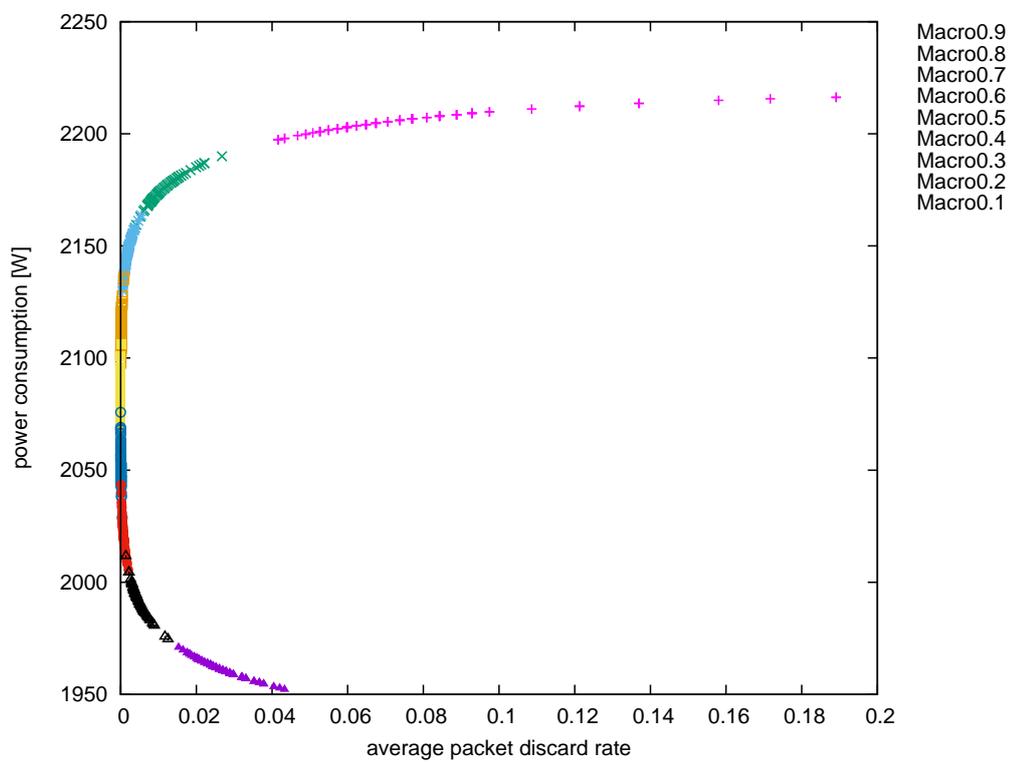


図 10: 監視カメラ端末を収容する場合のエンド間平均パケット廃棄率とシステム全体の消費電力の関係

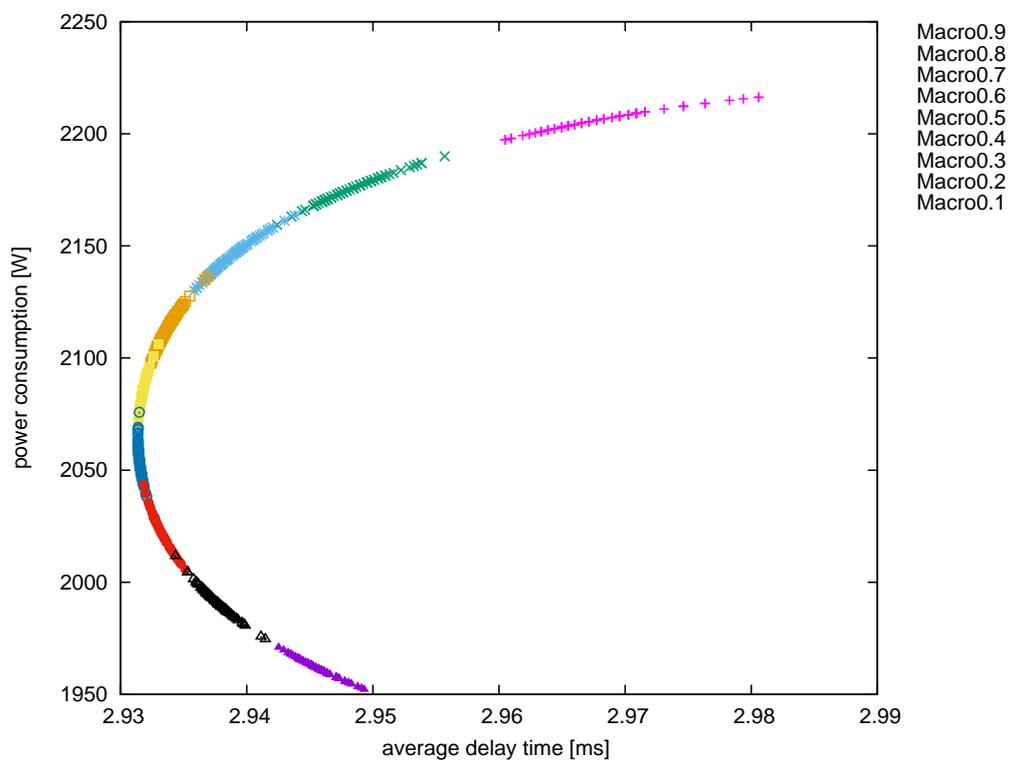


図 11: 監視カメラ端末を収容する場合のエンド間平均遅延時間とシステム全体の消費電力の関係

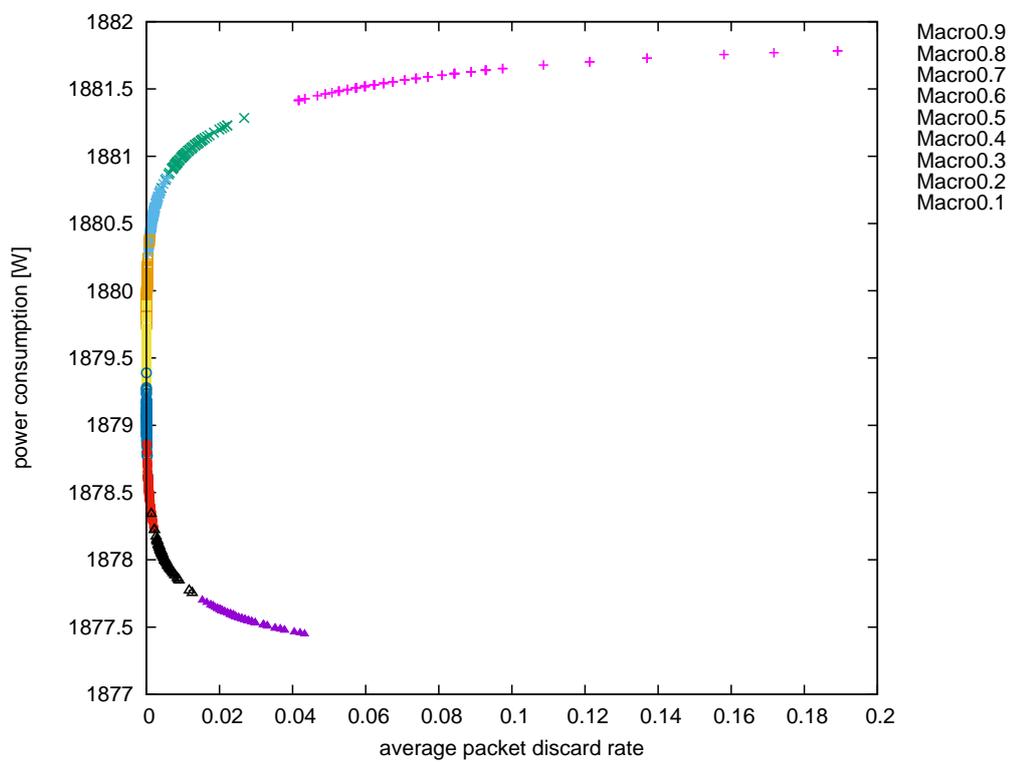


図 12: 監視カメラ端末を収容する場合のエンド間平均パケット廃棄率とネットワーク部分のみの消費電力の関係

トワーク部分のみの消費電力はほとんど変化していないことがわかる。これは、基地局より上位のネットワークのインタフェースの消費電力は、送信されるトラフィック量に対して大きく変化しないためである。

また、端末のエンド間パケット廃棄率およびエンド間遅延時間が小さくなっていることがわかる。これも、端末台数が減少したことにより、ネットワークの輻輳がほとんど発生していないためである。

3.3.4 電力比例性の高低による影響

最後に、ネットワークを構成する機器の電力比例性が高い場合を想定した評価結果を示す。端末のトラフィックモデルは3.3.2節と同様であり、端末台数を500台とする。本節で用いるノードの消費電力、およびインタフェースの消費電力特性のうち、表1および表2と異なる値を設定した箇所を表3および表4にそれぞれ示す。具体的には、ノードの消費電力を小さくし、インタフェースの消費電力特性を、送信されるトラフィック量に応じて変動するように変更している。インタフェースにリンク帯域に等しい量のトラフィックが流れる場合の総消費電力は、3.3.2節における評価と等しい。

図16-図18に、図10-図12と同様の評価結果を示す。図16と図10、図17とを比較することによって、ネットワーク機器の電力比例性が高くなると、システム全体の消費電力が小さくなることがわかる。これは、端末のマクロセル基地局への接続割合が変化すると、マクロセル基地局とスモールセル基地局を収容している上位ネットワークの使用率が変化するが、それに伴って、ノードのインタフェースの消費電力が適応的に変化するためである。

一方、図18と図12を比較すると、ネットワーク部分のみの消費電力に着目した場合には、マクロセル基地局への接続割合が低下すると、消費電力が増加に転じる場合があることがわかる。これは、スモールセル基地局のアップリンクインタフェースが輻輳し、端末の送信パケット数が増加することに起因している。一方で、端末接続台数を100台にした場合にはこのような現象が発生していないことが、図19からわかる。これは、輻輳がほとんど発生しないためである。

また、図18から、ネットワーク部分の消費電力を削減するための適切な端末のマクロセル基地局への接続割合と、端末のネットワーク性能を最適化するためのそれが異なることがわかる。図7、11、14、17からも、端末のネットワーク性能を最適化するようなマクロセル基地局への節ぞ高割合は、端末台数、端末のトラフィック特性、上位ネットワークのリンク帯域、ノードの電力比例性など様々な要因によって変化することがわかる。このことは、ネットワーク環境や、最適化の指標が異なることによって、最適となるネットワーク制御内容が異なることを示している。仮想化技術が適用されたネットワーク環境においては、ネット

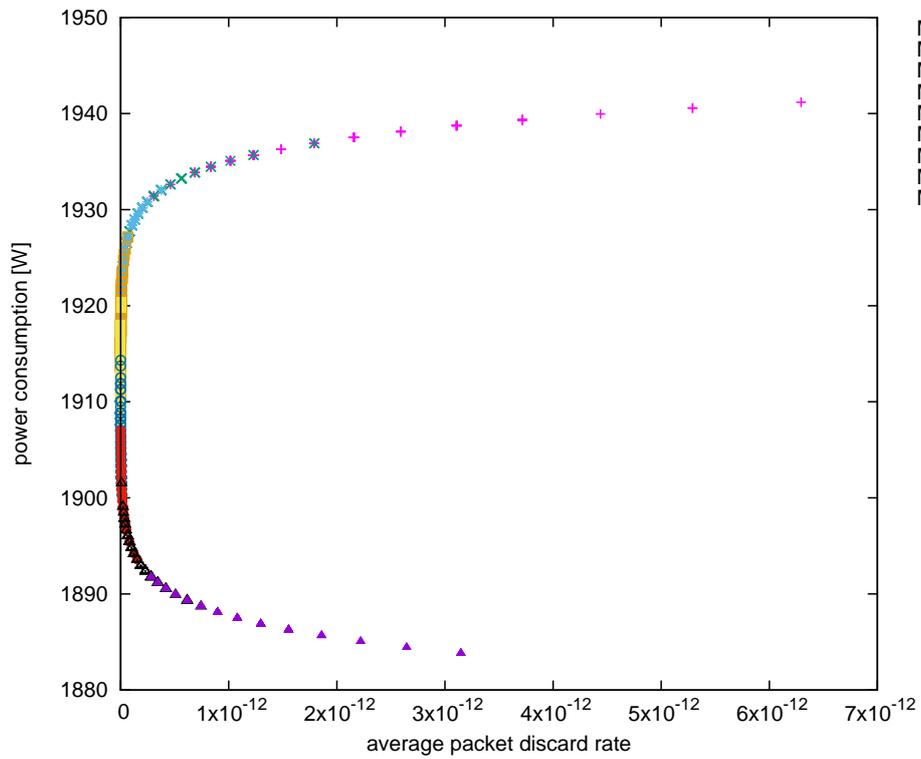


図 13: 端末数が 100 台である場合のエンド間平均パケット廃棄率とシステム全体の消費電力の関係

表 3: 各ノードの消費電力の変更部分

ノードの種類	e_n^{ACT}	e_n^{OFF}
ONU	40 W	0 W
マクロセル基地局	200 W	200 W
スモールセル基地局	200 W	0 W

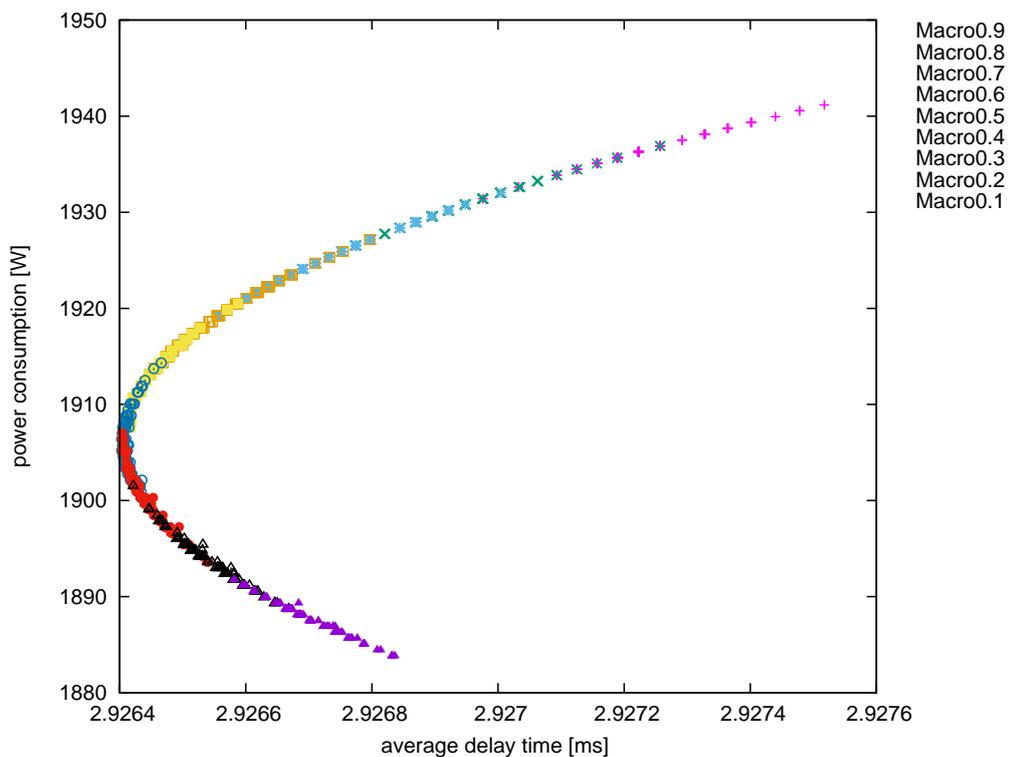


図 14: 端末数が 100 台である場合のエンド間平均遅延時間とシステム全体の消費電力の関係

表 4: 各ノードのネットワークインタフェースのリンク帯域と消費電力特性の変更部分

インタフェース	リンク帯域	e_f^{MAX}	e_f^{MIN}	E_f^{sleep}
ONU → OLT	10 Mbps	20 W	0 W	0 W
基地局 → ONU	10 Mbps	103 W	0 W	0 W

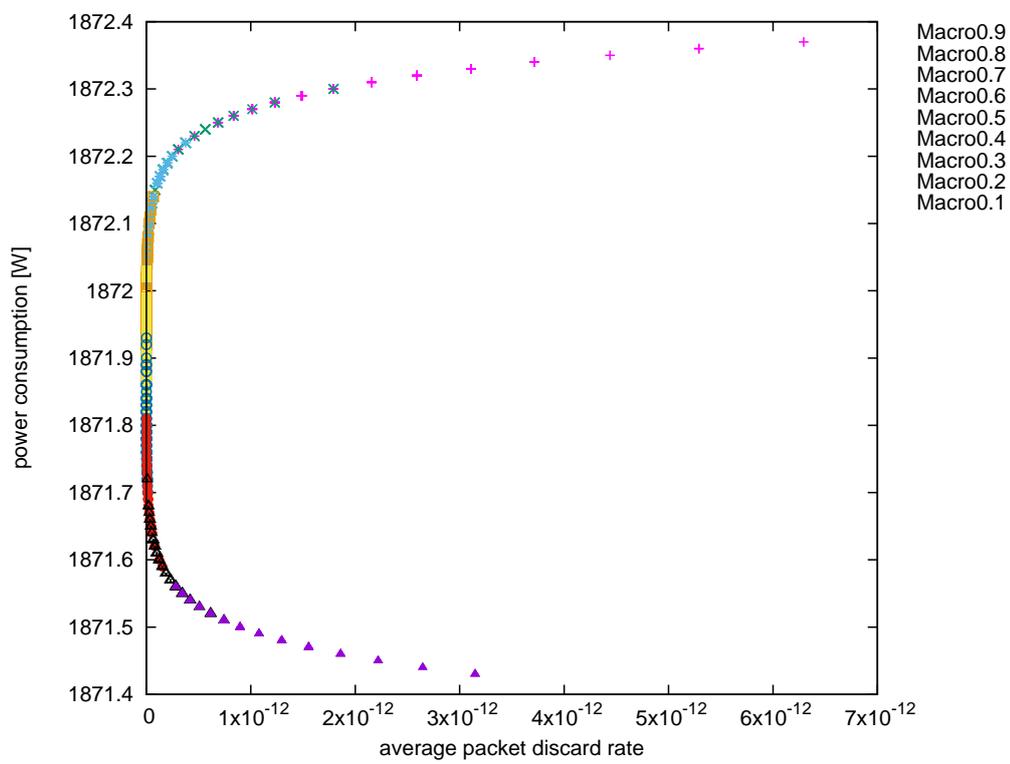


図 15: 端末数が 100 台である場合のエンド間平均パケット廃棄率とネットワーク部分のみの消費電力の関係

ワーク制御のために必要となる種々の観測情報を集中的に取り扱うことが容易になるため、このような制御の重要性がより増すと考えられる。今後の課題として、ネットワーク環境や最適化指標に応じた適切な端末接続先の決定やトラヒックトポロジの制御を行うことが挙げられる。

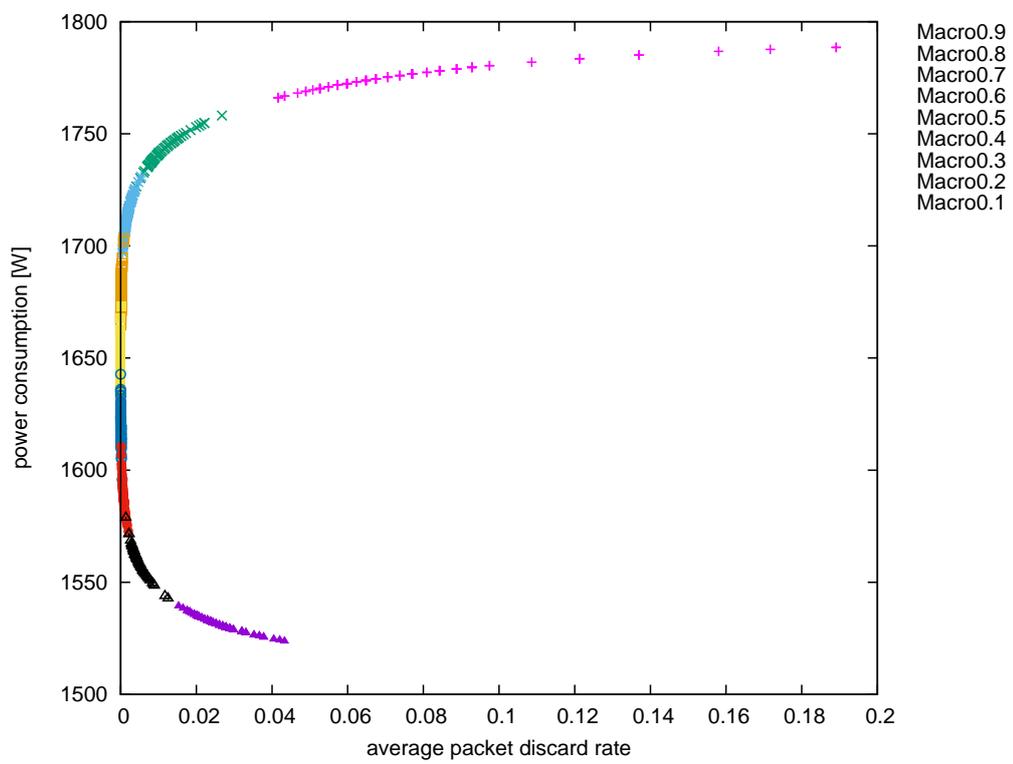


図 16: ネットワーク機器の電力比例性が高い場合のエンド間平均パケット廃棄率とシステム全体の消費電力の関係

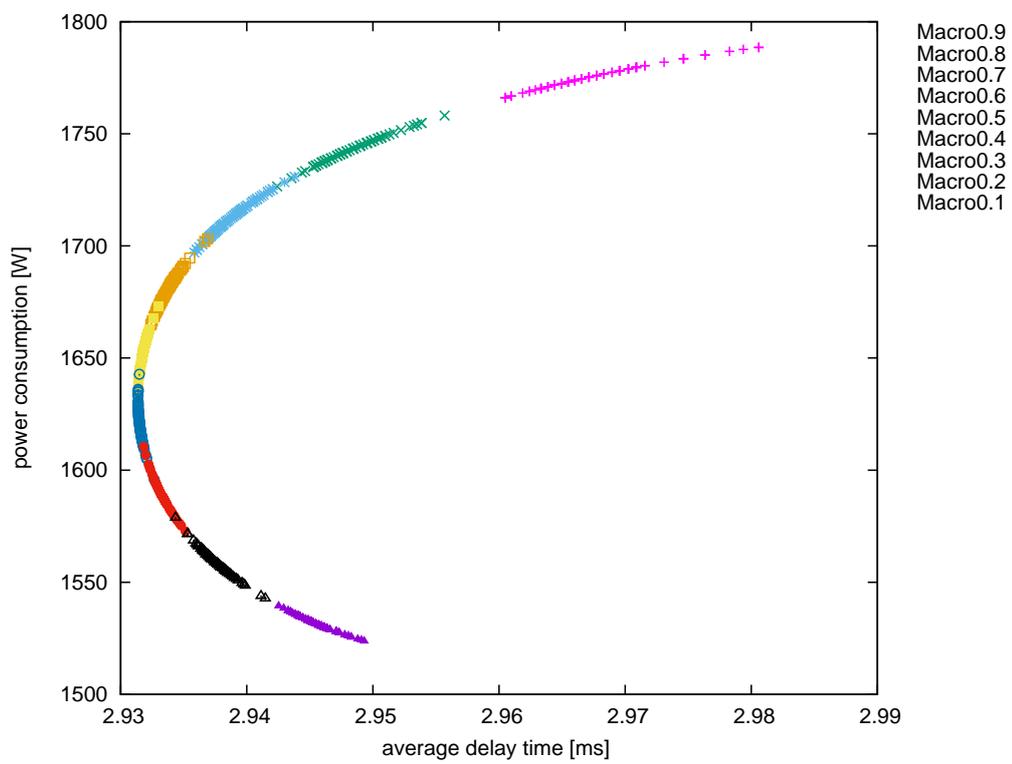


図 17: ネットワーク機器の電力比例性が高い場合のエンド間平均遅延時間とシステム全体の消費電力の関係

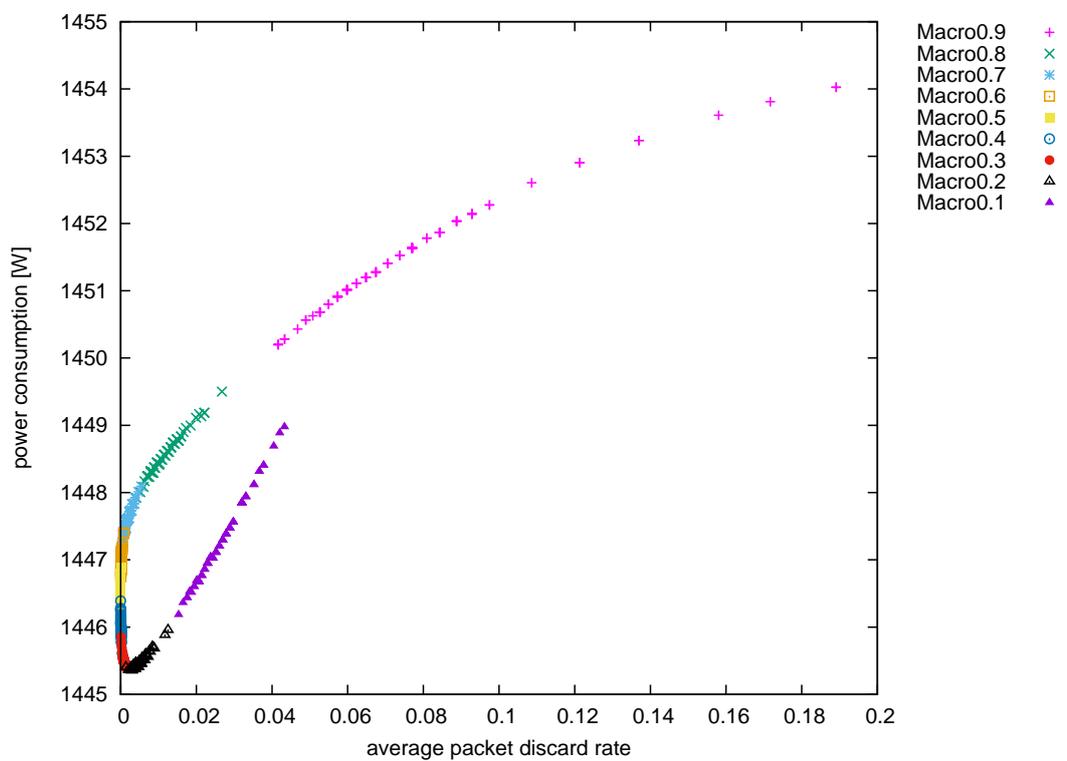


図 18: ネットワーク機器の電力比例性が高い場合のエンド間平均パケット廃棄率とネットワーク部分のみの消費電力の関係

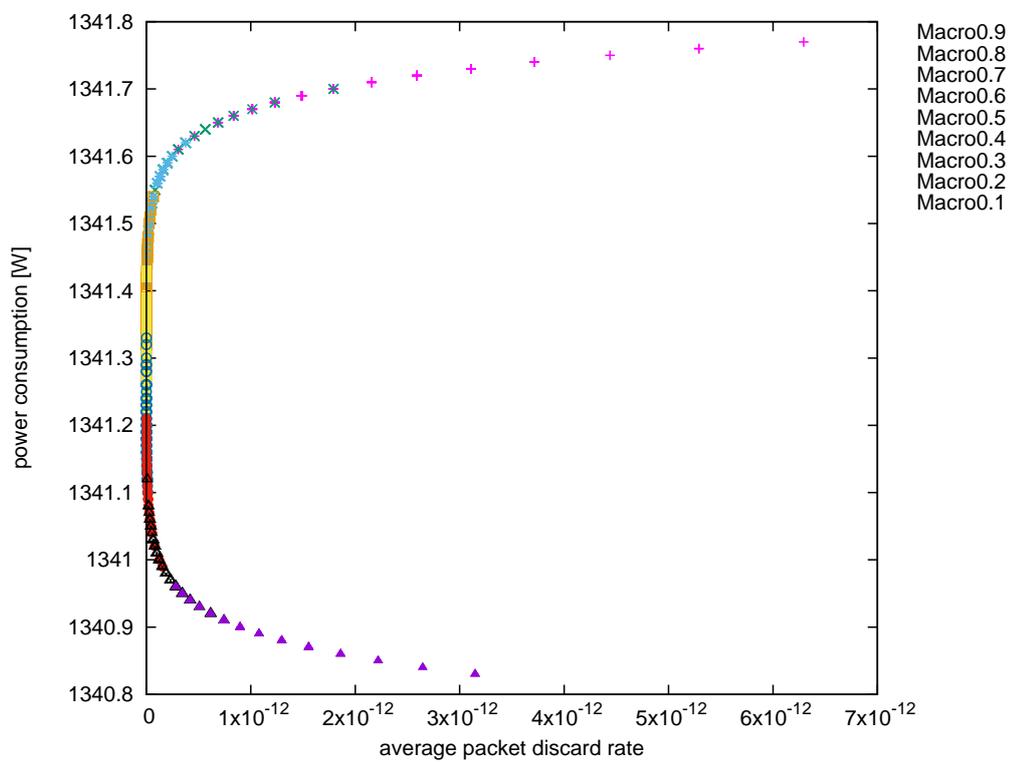


図 19: ネットワーク機器の電力比例性が高く端末数が 100 台である場合のエンド間平均パケット廃棄率とネットワーク部分のみの消費電力の関係

4 まとめと今後の課題

本報告では、仮想化技術に基づいた集中制御を前提としたモバイルアクセスネットワークに着目し、数学的解析手法に基づいて、その性能を評価した。具体的には、端末を含めたネットワーク全体の消費電力、端末の通信時に発生する遅延時間やパケット廃棄率を評価するための性能解析モデルを構築し、端末の接続分布や端末数、およびネットワーク機器の電力比例性が、端末のネットワーク性能やシステム全体の消費電力に与える影響を評価した。評価の結果、マクロセル基地局への接続割合が多くなるにつれ消費電力が増え、エンド間パケット廃棄率およびエンド間遅延時間は低下した後に増加に転じることがわかった。また、収容する端末台数が少ないと、消費電力、エンド間パケット廃棄率およびエンド間遅延時間は小さく、マクロセル基地局への接続割合が変化した際の消費電力の変動幅が小さくなることがわかった。さらに、ネットワーク機器の電力比例性が高くなると、システム全体の消費電力が小さくなることがわかった。

今後の課題として、構築した性能評価モデルを利用して、仮想化技術に基づいてネットワーク全体を集中制御する際の、制御内容の決定手法を検討することが挙げられる。また、モバイルアクセスネットワーク以外のネットワーク環境への適用も重要な課題である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々のご指導をいただきました。指導教員である松岡茂登教授には、研究内容に対する御指摘なども含め、様々な場面で御指導をいただきました。ありがとうございました。また、村田正幸教授には、様々な視点から御指摘や御指導をいただきました。自分の進めている研究についての理解の至っていないところなどをご指摘いただき、研究自体や、研究への取り組み方などを省みるきっかけとなり、大変感謝しております。ありがとうございました。そして、日々の研究から本報告の作成に至るまで、長谷川剛准教授には細部にわたって大変丁寧な御指導をいただきました。長谷川剛准教授のおかげで、研究に対しての姿勢や指針なども含め、研究に対する興味や目的を忘れず研究を続けることができました。心から深く感謝しております。ありがとうございました。樽谷優弥助教には、様々な質問に対して親身になって御指導いただきました。ありがとうございました。また、研究に関して行き詰ったときの御支援や御助言も含め、日々の生活でも様々な場面で、松岡研究室の皆さまには大変御世話になりました。心より感謝申し上げます。ありがとうございました。

参考文献

- [1] J. G. Andrews, S. Buzzi, W. Choi, S. V. Hanly, A. Lozano, A. C. K. Soong, and J. C. Zhang, “What will 5g be?,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 32, no. 6, pp. 1065–1082, 2014.
- [2] P. Marsch and G. P. Fettweis, *Coordinated Multi-Point in Mobile Communications: From Theory to Practice*. Cambridge University Press, July 2011.
- [3] G. Yuan, X. Zhang, W. Wang, and Y. Yang, “Carrier aggregation for lte-advanced mobile communication systems,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 48, no. 2, pp. 88–93, Feb. 2010.
- [4] D. Gesbert, M. Shafi, D. shan Shiu, P. J. Smith, and A. Naguib, “From theory to practice: an overview of mimo space-time coded wireless systems,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 21, no. 3, pp. 281–302, Apr. 2003.
- [5] E. G. Larsson, O. Edfors, F. Tufvesson, and T. L. Marzetta, “Massive mimo for next generation wireless systems,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 2, pp. 186–195, Feb. 2014.
- [6] C. I, Y. Yuan, J. Huang, S. Ma, C. Cui, and R. Duan, “Rethink Fronthaul for Soft RAN,” *Communications Magazine, IEEE*, Sept. 2015.
- [7] A. D. L. Oliva, X. C. Pérez, A. Azcorra, A. D. Giglio, F. Cavaliere, D. Tiegelbekkers, J. Lessmannm, T. Haustein, A. Mourad, and P. Iovanna, “Xhaul: Toward an Integrated Fronthaul/Backhaul Architecture in 5G Networks,” *IEEE Wireless Communications*, Oct. 2015.
- [8] A. Checko, H. L. Christiansen, Y. Yan, L. Scolari, G. Kardaras, M. S. Berger, and L. Dittmann, “Cloud ran for mobile networks -a technology overview,” *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 17, no. 1, pp. 405–426, Firstquarter 2015.
- [9] D. Kreutz, F. M. V. Ramos, P. E. Veríssimo, C. E. Rothenberg, S. Azodolmolky, and S. Uhlig, “Software-defined networking: A comprehensive survey,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 103, no. 1, pp. 14–76, Jan. 2015.

- [10] R. Mijumbi, J. Serrat, J. L. Gorricho, N. Bouten, F. D. Turck, and R. Boutaba, “Network function virtualization: State-of-the-art and research challenges,” *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 18, no. 1, pp. 236–262, Firstquarter 2016.
- [11] R. Martínez, A. Mayoral, R. Vilalta, R. Casellas, R. Muñoz, S. Pachnicke, T. Szyrkowiec, and A. Autenrieth, “Integrated sdn/nfv orchestration for the dynamic deployment of mobile virtual backhaul networks over a multilayer (packet/optical) aggregation infrastructure,” *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 9, no. 2, pp. A135–A142, Feb. 2017.
- [12] C. F. Lam, *Passive optical networks: principles and practice*. Academic Press, 2011.
- [13] P. Mahadevan, P. Sharma, S. Banerjee, and P. Ranganathan, *A Power Benchmarking Framework for Network Devices*, pp. 795–808. Springer Berlin Heidelberg, May 2009.
- [14] D. Gross, J. F. Shortle, J. M. Thompson, and C. M. Harris, *Fundamentals of Queueing Theory, 4th Edition*. John Wiley and Sons, Inc., 2008.
- [15] A. A. A. Haija and C. Tellambura, “Small-macro cell cooperation for hetnet uplink transmission: Spectral efficiency and reliability analyses,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 35, no. 1, pp. 118–135, Jan. 2017.
- [16] J. G. Andrews, S. Singh, Q. Ye, X. Lin, and H. S. Dhillon, “An overview of load balancing in hetnets: old myths and open problems,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 21, no. 2, pp. 18–25, April 2014.
- [17] H. Ramazanali, A. Mesodiakaki, A. Vinel, and C. Verikoukis, “Survey of user association in 5g hetnets,” in *2016 8th IEEE Latin-American Conference on Communications (LATINCOM)*, pp. 1–6, Nov. 2016.