

令和元年6月3日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2018

課題番号：26280026

研究課題名(和文) 光と無線の連携協調による次世代省エネルギー型ネットワークの創出

研究課題名(英文) Development of Next-Generation Energy Efficient Network with Optical and Wireless Technology Cooperation

研究代表者

加藤 寧 (KATO, NEI)

東北大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：00236168

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,800,000円

研究成果の概要(和文)：5Gにおける要求条件の一つとして省電力化が考えられている。また、移動通信ネットワークにおける省電力化が重要となっている。次世代移動通信ネットワークのアーキテクチャとして注目を集めているC-RANにおいて、その省電力制御をRRHだけ、またはBBUだけを考慮する場合、C-RAN全体としての省電力化を妨げになる可能性がある。つまり、RRHの消費電力とBBUの消費電力の間にトレードオフ関係が考えられるため、C-RAN全体を考慮した最適な省電力制御を行うことは非常に重要である。

本研究では、C-RAN全体の消費電力を低減するための省電力制御手法を提案し、手法の妥当性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、移動通信ネットワークにおけるサービス・アプリケーションの要求が増加かつ多様化しており、次世代移動通信ネットワークである5G(第5世代移動通信システム)では、それらの様々な要求に対応するためにシステム容量の大容量化、データ伝送速度の高速化、低遅延化、超多数の端末の同時接続、低コスト・省電力化の5つの要求条件が示されている。

本研究では、C-RAN全体の消費電力を低減するための省電力制御手法を提案し、この提案手法の妥当性を確認した。本提案方式は、今後の移動通信ネットワークで必要不可欠である省電力化の解決策の一つとして利用可能だと結論付けられる。

研究成果の概要(英文)：Energy saving is considered as one of the requirements in 5G as well as mobile communication networks. Cloud-Radio Access Network (C-RAN), which has attracted attention as a next-generation network architecture, mainly consists of two parts: Remote Radio Heads (RRHs) and BaseBand Units (BBUs). They operate with energy saving scheme but such schemes do not cooperate with each other, thereby increasing the energy consumption of the C-RAN. Therefore, considering both schemes is important to optimize the energy consumption of the C-RAN because of the trade-off between energy saving of RRHs and BBUs.

In this study, we propose an energy saving scheme of C-RAN considering both RRHs and BBUs, and confirmed the validity of the scheme.

研究分野：総合領域

キーワード：光通信 無線通信 省エネルギー プロトコル ネットワーク融合 光給電

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

近年、移動通信ネットワークにおけるサービス・アプリケーションの要求が増加かつ多様化しており、次世代移動通信ネットワークである 5G（第 5 世代移動通信システム）では、それらの様々な要求に対応するためにシステム容量の大容量化、データ伝送速度の高速化、低遅延化、超多数の端末の同時接続、低コスト・省電力化の 5 つの要求条件が示されている。この要求条件を満足するために、移動体通信事業者はカバーレージを縮小した基地局を高密度に配置することで無線アクセスネットワークの大容量化を実現した。基地局のカバーレージを縮小し高密度に配置すると、ユーザ端末と基地局間の距離を短くことができ、信号雑音比を向上させ通信容量を増加させることができる。さらに、基地局のカバーレージが小さくなり無線周波数の繰り返し利用がしやすくなるため、同一面積内基地局台数が多いほど通信容量を増加させることができる。しかし、無線アクセスネットワークの総消費電力の約 60%は基地局により消費される電力であり、基地局の高密度化によりその数が莫大に増加すると、無線アクセスネットワークの消費電力が急増してしまうと考えられる。そのため、新たな無線アクセスネットワークのアーキテクチャの一つとして、クラウド無線アクセスネットワーク（C-RAN: Cloud-Radio Access Network）が注目されている。

従来の無線アクセスネットワークでは、無線送受信装置（RRH: Remote Radio Head）と、無線送受信の信号処理を行うベースバンドユニット（BBU: BaseBand Unit）が同一基地局に存在していた。そのため、1 台の RRH には必ず 1 台の BBU が必要となり、莫大な基地局を配置するには莫大の BBU が必要となった。一方、C-RAN では RRH と BBU を分離し、BBU を BBU pool と呼ばれる収容局に集約させている。従来の無線アクセスネットワークでは 1 台の BBU に対し 1 台の RRH の信号処理しかできなかったが、C-RAN では 1 台の BBU で複数の RRH における信号処理が可能となり、無線送受信の信号処理を効率的に行うことはもちろん、統計多重効果のおかげでより少数の BBU でより多数の RRH の信号処理が可能となる。さらに、C-RAN の RRH には信号処理のための BBU 機能がなくなり、無線送受信機能だけを持つ装置が搭載されているため、冷却のための装置を簡略化することができる。その結果、C-RAN の RRH は従来の基地局に比べ消費電力が減少することはもちろん、その構成を軽量化することができ、高密度に配置することが容易になる。そのため、C-RAN アーキテクチャを用いることで、従来の無線アクセスネットワークより容易に大量のトラヒックに対応することが可能となる。

一方、トラヒック要求は時間帯により大きく変動するため、大量のトラヒックに対応可能な C-RAN をトラヒック要求の少ない時間帯にそのまま稼働すると、C-RAN に無駄な消費電力が発生する可能性が高い。その無駄な消費電力を削減するための、大量のトラヒックが発生していない時に C-RAN の消費電力を低減させる省電力制御が重要とされている。C-RAN では RRH 側と BBU 側でそれぞれ省電力制御が行われている。まず、RRH 側では Cell zooming と呼ばれる技術を利用しており、トラヒック要求が少ない時に RRH 1 台のカバーレージを拡大し他の RRH の稼働台数を減少させることで省電力化を図っている。そして、BBU 側では BBU aggregation と呼ばれる技術を利用しており、多数の RRH における信号処理を少数の BBU にまとめて処理し BBU の稼働台数を減少させることで省電力化を図っている。

しかしながら、上記の RRH 側及び BBU 側の省電力制御はそれぞれ独立して行われているため、C-RAN 全体として必ずしも最適な省電力制御が行われているとは限らない。例を挙げてその理由を説明する。BBU 1 台が処理可能な RRH の台数は、その RRH にどのくらいのトラヒック要求が発生しているかによって異なる。そこで、RRH が Cell zooming によりそのカバーレージを拡大すると、複数の RRH に分散されたトラヒック要求が 1 台の RRH に集中するため、その RRH に発生するトラヒック要求が増加する。このような RRH が多数存在すると、BBU 側において BBU aggregation がうまく行われず、BBU の省電力制御の効率が低下する。つまり、RRH 側の省電力制御により BBU 側の消費電力を増加させる可能性があると考えられる。逆の場合も同様に、BBU aggregation のために多数の RRH にトラヒック要求を分散させると、BBU 側の省電力制御の効率が上がる一方、多数の RRH を稼働することになり RRH 側の省電力制御の効率が低下する。このように、RRH の消費電力と BBU の消費電力の間にトレードオフ関係が考えられるため、C-RAN 全体を考慮した最適な省電力制御を行うことは非常に重要である。

### 2. 研究の目的

上記で述べた通り、5G における要求条件の一つとして省電力化が考えられており、移動通信ネットワークにおける省電力化が重要となっている。次世代移動通信ネットワークのアーキテクチャとして注目を集めている C-RAN において、その省電力制御を RRH だけ、または BBU だけを考慮する場合、C-RAN 全体としての省電力化の妨げになる可能性がある。よって、本研究では以下の 2 点に焦点を当てる。

- (1) まず、C-RAN における RRH 側の省電力制御及び BBU 側の省電力制御の関係を明らかにする。そして、C-RAN における省電力制御を行う際には RRH 側及び BBU 側の両方を考慮する必要があることを示す。
- (2) さらに、C-RAN の RRH 側及び BBU 側の両方の消費電力を考慮し、C-RAN 全体の消費電力を低減するための省電力制御の手法を提案し、その有効性を確認する。

本研究の目的は C-RAN 全体の消費電力を削減することであり、これは移動通信ネットワークにおけるエネルギー問題の解決策の一つとして大きく寄与するものである。

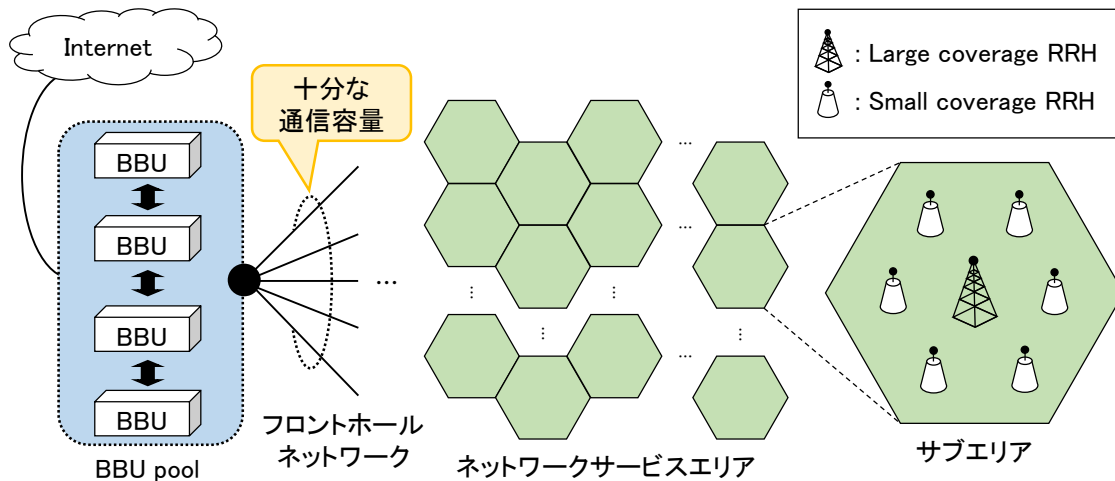


図 1. 想定ネットワーク

### 3. 研究の方法

#### (1) 想定環境の設定

図 1 に本研究で想定する C-RAN のアーキテクチャを持ったネットワークを示す。ネットワークサービスエリアはいくつかのサブエリアで構成されており、各サブエリアには 1 台の Large coverage RRH (以下 LC RRH) と複数台の Small coverage RRH (以下 SC RRH) が存在する。1 台の LC RRH はサブエリアの中心に存在し、そのサブエリアの面積分のカバーレッジを持つことが可能である。一方、SC RRH はサブエリアの一部分の面積だけのカバーレッジを持つ。これらの LC RRH と SC RRH は十分な通信容量を持つフロントホールネットワークを介して BBU pool と接続している。BBU pool は複数の BBU で構成されており、Internet からのデータを RRH に送信、または RRH からのデータを受信し Internet に送信する。

想定ネットワークの RRH 及び BBU は「1. 研究開始当初の背景」で述べたように、RRH 側では Cell zooming を用いた省電力制御、BBU 側では BBU aggregation を行う。図 1 で示した想定ネットワークにおいて、RRH 側の Cell zooming は次のように行われる。あるサブエリアにおいてトラフィック要求が多い場合は SC RRH 及び LC RRH 全てを稼働する(この状態を SC モードとし、これらの RRH を全て SC mode RRH とする)。ただし、この時の LC RRH のカバーレッジは他の SC RRH と同様に、サブエリアの一部分の面積のカバーレッジを持つ。一方、トラフィック要求が少ない場合は SC RRH をスリープし LC RRH のみ稼働することでそのサブエリアにおける RRH の消費電力を低減する(この状態を LC モードとし、これらの RRH を LC mode RRH とする)。この時の LC RRH はサブエリアの面積分のカバーレッジを持つ。BBU 側の BBU aggregation においては、LC RRH と SC RRH を区別せず、トラフィック要求が少量発生している RRH を 1 台の BBU にまとめて処理すると想定する。それから、1 台の BBU の処理能力(処理可能なトラフィック要求量)を 100% とし、RRH におけるトラフィック要求量も BBU の処理能力の割合で表現する。

#### (2) C-RAN における RRH 側の省電力制御及び BBU 側の省電力制御の関係

想定ネットワークのサブエリアは、そのサブエリアで発生しているトラフィック要求量に応じて SC モードまたは LC モードで稼働する。この 2 つのモードを切り替える際の基準点をトラフィックスレッショルドと定義する。あるサブエリアで発生しているトラフィック要求量がトラフィックスレッショルド以下の場合、そのサブエリアは LC モードで稼働する。一方、あるサブエリアで発生しているトラフィック要求量がトラフィックスレッショルドを超える場合、そのサブエリアは SC モードで稼働する。このトラフィックスレッショルドにより、稼働する LC mode RRH 台数と SC mode RRH 台数が変化する。さらに、同一のトラフィック要求発生量に対して LC モードで稼働している場合、SC モードに比べ 1 台の RRH におけるトラフィック発生量が多いため、BBU aggregation が柔軟に行われない可能性が高い。つまり、トラフィックスレッショルドは RRH 側の省電力制御及び BBU 側の省電力制御の両方に影響を与えるため、このパラメータを用いることで RRH と BBU 間の省電力制御の関係を導くことが可能である。

#### (3) C-RAN 全体の消費電力を低減するための省電力制御手法

上記で述べたトラフィックスレッショルドは RRH 側の省電力制御及び BBU 側の省電力制御の両方に影響を与える。さらに、トラフィックスレッショルドの値を RRH 側の省電力制御を重視するように設定すると、BBU 側の省電力制御がうまく行われないと考えられる。反面、トラフィックスレッショルドの値を BBU 側の省電力制御を重視するように設定すると、RRH 側の省電力制御がうまく行われないと考えられる。このように、RRH 側と BBU 側の省電力制御はお互いにトレードオフ関係であるため、RRH 及び BBU の消費電力の和、つまり C-RAN 全体の消費電力を最小とするトラフィックスレッショルドの値が存在すると考えられる。そのため、RRH 側と BBU 側の省電力制御の関係を数学的に解析し、C-RAN 全体の消費電力が最小となるトラフィックスレッショルドの値を計算する手法を提案し、その妥当性を評価する。

#### 4. 研究成果

##### (1) RRH 及び BBU における省電力制御の関係

本研究では、トラヒックスレッシュォルドを導入し、その値を調整することで RRH 及び BBU における省電力制御を調整すると想定している。図 2 にトラヒックスレッシュォルドにより変化する LC mode RRH, SC mode RRH 及び BBU の稼働台数を示す。この稼働台数は、本研究で提案する数式による手法により導出されたものである。ただし、図 2 に示されているものは、ネットワークサービスエリアの各サブエリアにおいてトラヒック要求量が 60%付近で確率的に発生している場合の結果である。ここで、稼働台数が少ないほど省電力制御がうまく行われていることを意味する。

トラヒックスレッシュォルドが 0~50%の時、LC mode で稼働している RRH は少数しか存在せず、ほぼ全ての RRH が SC mode RRH として稼働している。その理由は、トラヒックスレッシュォルドの値が小さく設定されていると、そのレッシュォルドの値を超えてしまうサブエリアが数多く存在することになるためである。一方、BBU の稼働台数は 0~50%の領域が他の領域より少ない。その理由は、SC mode RRH にはそれぞれ少なめのトラヒック要求量が発生しているため、BBU の省電力制御において RRH をまとめて処理するのに有利になるためである。

トラヒックスレッシュォルドが 50~80%の時、トラヒックスレッシュォルドが増加するに連れ、SC mode RRH の稼働台数は急激に減少する反面、LC mode RRH の稼働台数は緩やかに増加する。これは、RRH における省電力制御の効率が増加していることを意味する。一方、トラヒックスレッシュォルドが約 62%から BBU の稼働台数が増加することが見られる。この BBU の稼働台数は LC mode RRH の稼働台数に近いが、その理由は LC mode RRH の 2 台を 1 台の BBU に処理することが困難であり、LC mode RRH 1 台当たり BBU 1 台が必要となるためである。

トラヒックスレッシュォルドが 80~100%の時は、0~50%の時と逆に、SC mode で稼働している RRH が少数しか存在せず、ほぼ全ての RRH が LC mode RRH として稼働している。その理由は、トラヒックスレッシュォルドの値が大きく設定されていると、トラヒック要求発生量が 50%を超える RRH が多く、それらの RRH を BBU にまとめて処理することができないためである。

これらの結果から、RRH 側の省電力制御と BBU 側の省電力制御の間にはトレードオフ関係が存在することが明らかになった。この関係より C-RAN 全体の消費電力を最小とする最適トラヒックスレッシュォルドの値を導出する。

##### (2) C-RAN の消費電力を最小とする最適トラヒックスレッシュォルド

ネットワークサービスエリアの各サブエリアにおいてトラヒック要求量が 60%付近で確率的に発生している場合を想定し、本研究で提案する数式による手法より計算した RRH の消費電力と BBU の消費電力の和、つまり C-RAN 全体の消費電力の期待値を図 3 に示す。図 3 より、C-RAN 全体の消費電力を最小とするトラヒックスレッシュォルドが存在することが確認でき、その値は約 62%であった。この値は、図 2 の説明で述べた BBU の稼働台数が増加し始める値である。一般的に、BBU 1 台の消費電力は RRH 1 台の消費電力より大きいため、BBU の稼働台数は C-RAN 全体の消費電力に大きな影響を与える。そのため、BBU の稼働台数が増加し始めるトラヒックスレッシュォルドの値が C-RAN 全体の消費電力を最小とする最適トラヒックスレッシュォルドであると言える。

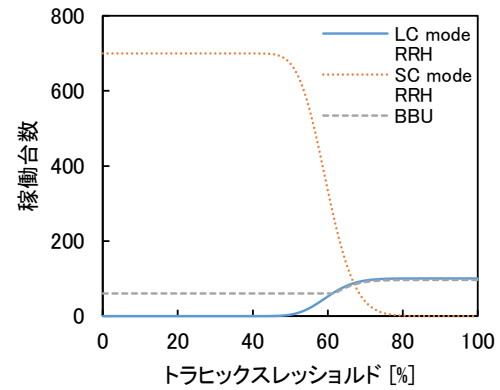


図 2. トラヒックスレッシュォルドによる RRH 及び BBU の稼働台数の変化

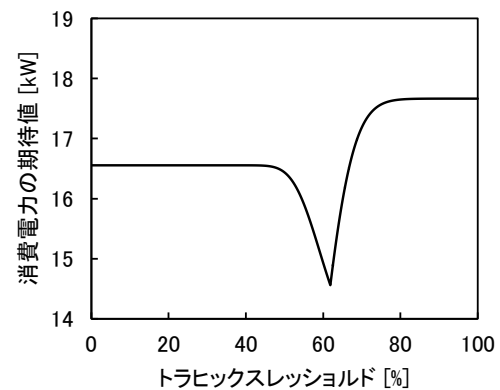


図 3. トラヒックスレッシュォルドによる RRH 及び BBU の消費電力の和の期待値

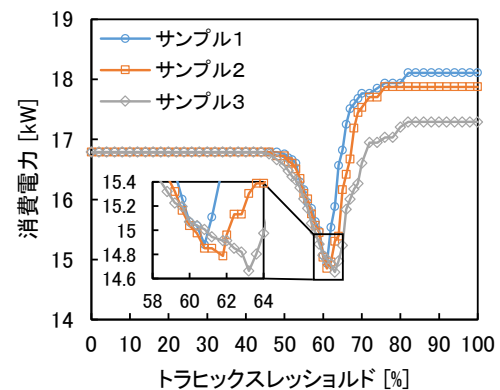


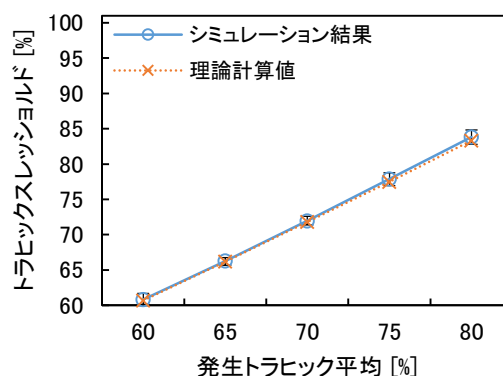
図 4. ランダムサンプルにおけるトラヒックスレッシュォルドによる消費電力の変化



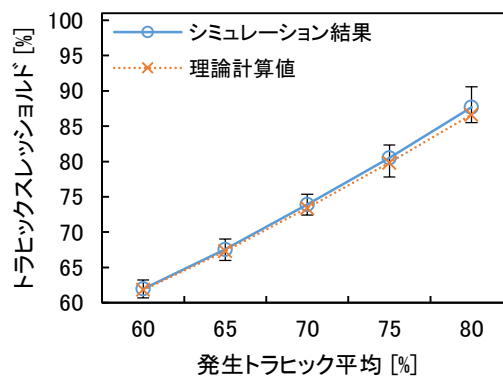
それから、図3と同様な条件でトラヒック要求量をランダムに発生させた場合のシミュレーション結果のうち3つを図4に示す。図3と図4のグラフの形が似ていることから、本研究で提案する手法が妥当であることが言える。シミュレーションでランダムに発生させたトラヒック要求量にはばらつきが存在するため、C-RANの消費電力を最小とするトラヒックスレッシュホールドの値にもばらつきが存在する。しかし、その値は全て62%付近に存在するため、ある程度のばらつきが存在しても、理論計算値によりC-RAN全体の消費電力を低減することが可能である。

そして、特定のトラヒック要求発生量の分布に対する最適トラヒックスレッシュホールドの理論計算値及び実際のシミュレーションの結果から導出されたC-RANの消費電力を最小とするトラヒックスレッシュホールドの値を比較した結果を図5に示す。トラヒック要求発生量の分布は発生トラヒック平均及び $\sigma$ により定義され、 $\sigma$ の値が大きいほどトラヒック要求発生量のばらつきが大きくなる。また、シミュレーションは100個のランダムサンプルを用いた結果であり、丸の点は平均値、その点の上下に伸びている黒線はそれぞれ最小値と最大値を表す。全体的に、理論計算値とシミュレーション結果の平均値は大体一致することが図5から見られる。このことから、各トラヒック要求発生量の分布においてそれぞれ最適なトラヒックスレッシュホールドの値が存在し、本研究で提案する手法よりその値を計算することができると明らかになった。なお、 $\sigma$ の値が大きいほどシミュレーション結果における最小値と最大値の差が大きくなることが見られる。

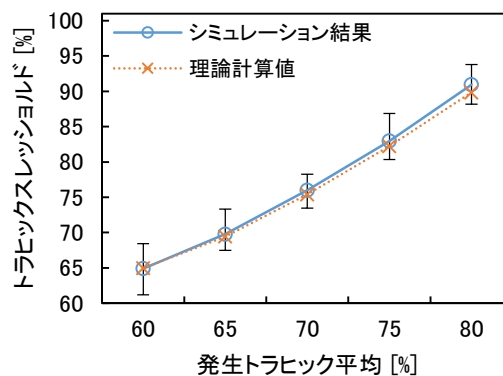
最後に、本研究で提案した手法により計算された理論計算値がどのくらいC-RAN全体の消費電力を低減するのかをシミュレーションにより評価し、その結果を図6に示す。シミュレーションに用いたトラヒック要求発生量の分布は図5と同様である。ここでは、トラヒックスレッシュホールドの値を0%の時(全てSC mode RRHとして稼働)、理論的に計算した最適値、100%の時(全てLC mode RRHとして稼働)の3つの場合についてC-RAN全体の消費電力を評価した。なお、棒グラフはシミュレーション結果の平均値を意味し、棒の上下に伸びている黒線はシミュレーション結果における最小値及び最大値を意味する。全てのトラヒック要求発生量の分布において、本研究で提案した最適値が他の設定値よりもC-RANの消費電力を低減することが可能であると考えられる。さらに、発生トラヒック平均が60%に近くなるほど、また $\sigma$ の値が小さいほど、トラヒックスレッシュホールドの最適値がC-RAN全体の消費電力を低減する効果が大きくなることが見られた。逆に、発生トラヒック平均が増加するほど、また $\sigma$ の値が大きいくほど、トラヒックスレッシュホールドの最適値がC-RAN全体の消費電力を低減する効果が小さくなった。その理由として、 $\sigma$ が増加する、つまりトラヒック要求発生量にばらつきが生じるということは、BBUにおいて様々



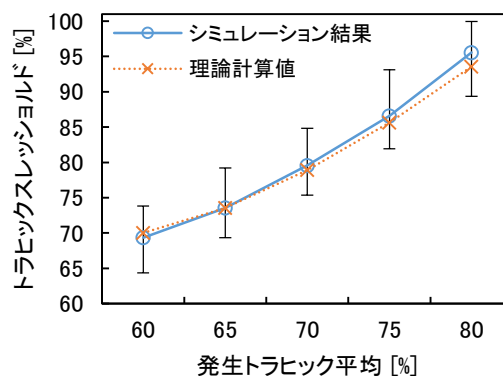
(ア)  $\sigma = 0.05$



(イ)  $\sigma = 0.1$

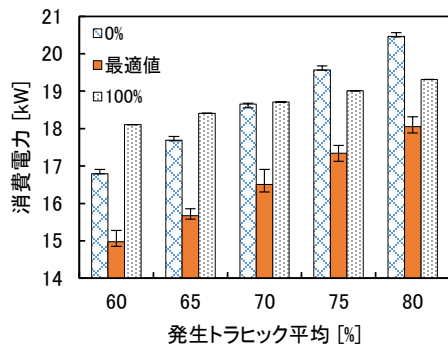


(ウ)  $\sigma = 0.15$

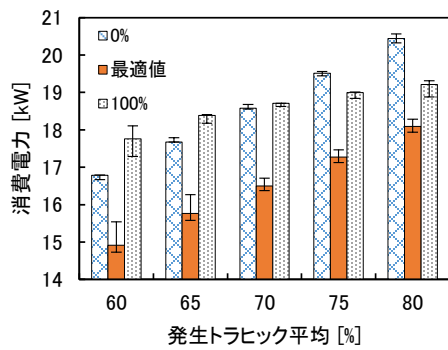


(エ)  $\sigma = 0.2$

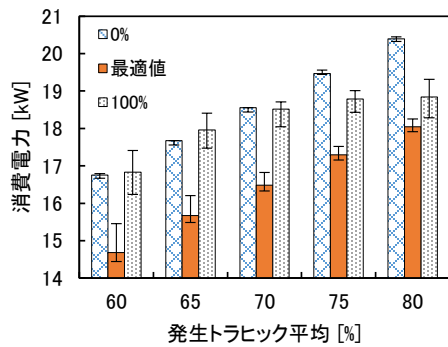
図5. シミュレーション結果における最適なトラヒックスレッシュホールドと理論的に計算した最適なトラヒックスレッシュホールドの比較



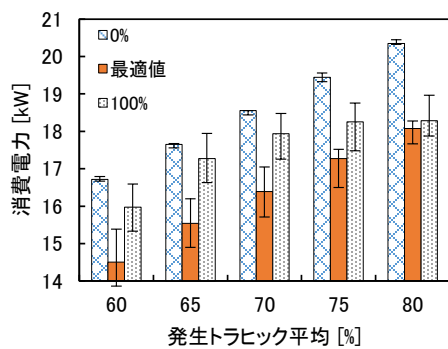
(ア)  $\sigma = 0.05$



(イ)  $\sigma = 0.1$



(ウ)  $\sigma = 0.15$



(エ)  $\sigma = 0.2$

図6. トラヒックスレッシュホールドが0%の時、理論最適値の時、100%の時におけるネットワーク全体の消費電力のシミュレーション結果

なRRHをまとめる際により柔軟にまとめることが可能となり、BBUの稼働台数が減少するからだと考えられる。さらに、発生トラヒックが多い場合は、既に多くのBBUを稼働する必要が生じるため、BBUの稼働台数を減少させる省電力制御があまり効果がないと考えられる。特に、発生トラヒック平均が80%で、 $\sigma$ が0.2の場合は、トラヒックスレッシュホールドの設定値が100%の時とあまり差がないが、それでも最適値のほうの消費電力が低い結果が見られる。

以上から、本研究で提案するC-RAN全体の消費電力を低減するための省電力制御手法は十分妥当性があり、今後の移動通信ネットワークにおけるエネルギー問題の解決策の一つとして利用可能だと結論付けられる。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

1. Yunseong Lee, Keisuke Miyanabe, Hiroki Nishiyama, Nei Kato, and Takashi Yamada, "Threshold-Based RRH Switching Scheme Considering Baseband Unit Aggregation for Power Saving in a Cloud Radio Access Network," *IEEE Systems Journal*, 査読有, In press. DOI: 10.1109/JSYST.2018.2890130.
2. Keisuke MIYANABE, Katsuya Suto, Zubair Md. Fadlullah, Hiroki Nishiyama, Nei Kato, Hirotaka Ujikawa, and Ken-Ichi Suzuki, "A cloud radio access network with power over fiber toward 5G networks: QoE-guaranteed design and operation," *IEEE Wireless Communications*, 査読有, vol. 22, no. 4, pp. 58-64, Aug. 2015.

[学会発表] (計 2 件)

1. Yunseong Lee, Katsuya Suto, Hiroki Nishiyama, Nei Kato, Hirotaka Ujikawa, and Ken-Ichi Suzuki, "A Novel Network Design and Operation for Reducing Transmission Power in Cloud Radio Access Network with Power over Fiber," *IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC 2015)*, 査読有, Shenzhen, China, Nov. 2015.
2. 宮鍋慶介, 西山大樹, 加藤寧, "光給電型無線アクセス網の実現に向けた省電力化技術," 2015 電子情報通信学会総合大会, 滋賀県草津市, 2015年3月.

[その他]

ホームページ等

<http://www.it.is.tohoku.ac.jp/>

## 6. 研究組織

(1) 研究分担者  
なし

(2) 研究協力者  
なし