

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 5 月 21 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23300021

研究課題名(和文) ギガビット光回線網を用いた大融合ネットワークにおけるサービス品質保証に関する研究

研究課題名(英文) Research on the performance guarantee of the highly integrated network using gigabits optical lines

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) 9,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、一般家庭をはじめ現在広く利用されているPONに注目しており、今後異種ネットワークを融合させるコア網としてPONを利用するために必要となるコア技術の創出を目的としている。異種ネットワークを束ねるPONにおいて効率的な通信を実現するためには、異種ネットワークとのトラフィック制御技術の融合が不可欠であり、本研究ではPONと無線ネットワークが相互連携するトラフィック制御技術を考案し、数学的な解析及びシミュレーション実験によりその有効性を示した。

研究成果の概要(英文)：In this research, we focus on the Passive Optical Networks (PONs), which have become popular in our daily life. In order to take the advantages of PONs, the future networks are expected to integrate PONs, as the basis, with other types of networks. However, the main issue for the integration of PON and other types of networks is the differences in controlling traffic. Therefore, we proposed a novel traffic control method to solve the problem and validated the performance of the proposal using numerical analysis.

研究分野：総合領域

キーワード：QoS 光通信 ギガビット プロトコル ネットワーク融合

## 1. 研究開始当初の背景

近年、ユーザとインターネットを結ぶアクセスネットワークと呼ばれるネットワークでは、ユーザ側の無線通信ネットワークを光通信ネットワークがインターネットまで接続する形態が広く普及している。Wireless Local Area Network (WLAN) や Long Term Evolution (LTE) に代表される無線通信ネットワークの特徴は、有線ケーブルを必要としないことであり、ユーザのモビリティに対応した柔軟な通信を提供できることである。Passive Optical Network (PON) に代表される光通信ネットワークの特徴は、広帯域な光ファイバを用いることにより低遅延かつ長距離の通信を実現できるため、ユーザからのトラヒックをインターネットまで高速に伝送することが可能である。しかしながら、従来のアクセスネットワークでは、アクセスネットワーク全体で統一した制御は存在せず、光通信ネットワークと無線通信ネットワークはそれぞれ独立の制御方式に基づき動作していたために非効率な通信が発生することが問題視されていた。そこで、これを解決するため、光と無線通信が連携して動作する Fiber Wireless (FiWi) アクセスネットワークに注目が集まっている。FiWi アクセスネットワークでは、光と無線通信ネットワークが連携制御することにより、FiWi アクセスネットワーク全体で効率的な制御を目指すネットワークである。また、第五世代移動体通信 (5G) では、アクセスネットワークにおける遅延が 5 ミリ秒以下になることを目指しており、FiWi アクセスネットワークにおいてもこれを満たす低遅延なネットワークが求められている。

FiWi アクセスネットワークを構成する無線通信ネットワークと光通信ネットワークの組み合わせは様々考えられる。本研究では、無線通信ネットワークとして WLAN を、光通信ネットワークとして PON を想定し、特に上りトラヒックについて着目する。WLAN は 1 台の Access Point (AP) と複数台の STA (Station) と呼ばれるユーザ端末から構成される。WLAN の特徴としては、AP の設置が容易であり、基地局の設置の際に詳細な設計が必要なセルラネットワークと比較して柔軟なネットワーク構成が可能であることが挙げられる。また、PON は 1 台の Optical Line Terminal (OLT) と複数台の Optical Network Unit (ONU) から構成される。ONU はユーザ側の端末装置であり、AP と有線ケーブルによって接続される。本研究では、Home GateWay (HGW) と呼ばれる AP と ONU の役割を併せ持つデバイスを想定する。STA と HGW は Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoid (CSMA/CA) と呼ばれる技術によりトラヒックが制御されている。ここで、STA から送信されたトラヒックは HGW を経由し、OLT に送信される。PON の特徴としては、OLT-HGW 間の光ファイバを複数の HGW で共有するため、

Multi Point Control Protocol (MPCP) と呼ばれる技術により OLT が複数の HGW における上りトラヒックを集中制御することが挙げられる。OLT に到着した上りトラヒックは、エッジルータ (ER) と呼ばれるインターネットへのゲートウェイに送信される。複数台の OLT が ER の周辺に配置されており、OLT にそれぞれ接続している HGW によってユーザを収容している。ER は各 OLT から到着した上りトラヒックに対し、トラヒックポリシングと呼ばれる制御を行うことでインターネットへのトラヒックを制御する。

WLAN と PON により構成される従来のアクセスネットワークでは、各ネットワークが独立に上りトラヒックを制御する。このため、現状では各ネットワーク内においてトラヒックを制御することは可能であるが、ネットワーク間のトラヒックを制御する仕組みは現状では存在しない。これにより、各 STA から送信された上りトラヒックの合流部分である ER では、ER の閾値以上のトラヒックが到着する可能性があり、ER では、トラヒックポリシングにより閾値以上のトラヒックは破棄する。これを解決するためには、FiWi アクセスネットワーク全体で統一的なトラヒック制御を行い、ER に到着するトラヒックを制御する必要がある。また、FiWi アクセスネットワークにおける統一的なトラヒック制御を提案する上で、FiWi アクセスネットワーク全体で 5 ミリ秒以下に遅延を抑える必要がある。以上から、本研究では ER におけるトラヒックの集中を回避するため、FiWi アクセスネットワーク全体における低遅延な集中制御方式の実現を目指す。

## 2. 研究の目的

従来のアクセスネットワークでは、光と無線通信ネットワークにおける制御がそれぞれ独立しているため、各ネットワーク内でトラヒックの集中を制御可能だが、トラヒックの合流部分である ER ではトラヒックの集中が発生する可能性がある。これを解決するためには、FiWi アクセスネットワーク全体で集中制御を行う必要がある。他方、集中制御を行うために必要な制御オーバーヘッドとして遅延が発生する。FiWi アクセスネットワークでは、許容遅延として 5 ミリ秒が設定されており、許容遅延以下に遅延を抑える必要がある。そこで、本研究では FiWi アクセスネットワーク全体で 5 ミリ秒以下の遅延を満たす集中制御方法の提案を目指す。提案する集中制御方法では、ER が各 HGW を集中制御することにより、ER における上りの到着トラヒックを制御することが可能となる。集中制御を行う上で、ER の帯域制御方式は時分割方式とレート分割方式の 2 つの方式を検討し、より低遅延な制御を行える方式を手法として採用する。

### 3. 研究の方法

本研究の目指すネットワークはWLANとPONの技術的非連携により発生する非効率な通信の解消である。既存のFiWiアクセスネットワークでは、WLANとPONはERのリンクレートを考慮せずにトラヒックを送信するため、ERにおいて輻輳が発生する可能性があった。そこで、この課題を解決するためFiWiアクセスネットワーク全体で統一した集中制御方法を提案した。提案手法では、ER-HGW間における集中制御のプロトコルとして一対多の通信で用いられるMPCPと呼ばれるプロトコルを採用した。MPCPでは、集中制御を行うERと集中制御を受ける側であるHGWがREPORTメッセージとGATEメッセージを交換することにより、集中制御を実現する。ここで、ERが各HGWの帯域を制御する方式として時分割方式とレート分割方式の2つが考えられる。本研究の目的として、低遅延なFiWiアクセスネットワークの設計を目指しているため、我々は遅延の観点から時分割方式とレート分割方式の2つを検討し、より低遅延な方式を提案手法の方式として採用した。ここで、時分割方式をER-HGW間に適用する際には、ミリ秒オーダーの制御遅延がかかる。一方で、レート分割方式をER-HGW間に適用する際には、各HGWの合計のトラフィックレートはERのリンクレート以下となるように決定され、尚且つ、時分割方式で発生した制御遅延は発生しない。以上より、提案手法ではレート分割方式によるMPCPを採用する。また、提案手法により発生する制御遅延が5Gの許容遅延である5ミリ秒以下であるか評価するため、ネットワークモデルを定義し、制御遅延を数学的に解析した。制御遅延のモデル化では、トラヒックがHGWに到着してからERに送信されるまでにかかる遅延を制御遅延として定義した。また、モデル化では制御遅延を解析する上で必要なパラメータとしてERからHGWに割り当てられるトラフィックレートやHGWに到着するトラフィックレートの定義を行った。制御遅延の解析評価では、トラフィックレートのモデルとして正規分布を想定し、評価を行った。評価結果からは、トラヒックの到着時刻に対して制御遅延は最小値と最大値を持つことがわかり、制御遅延の特性を理解することができた。

以上の数値解析結果の妥当性を検証するためにシミュレーションを用いた実験を行った。シミュレーション実験では、制御遅延を評価することにより、理論とシミュレーションの2つの評価による提案手法の有効性を確認した。

### 4. 研究成果

#### (1) 平成23年度の成果概要

初年度である平成23年度は、第1段階に該当する研究を行った。具体的には、まずPONの特徴を最大限に利用したトラフィック制御技術の基礎を確立するために必要となる

以下の情報を明らかにした。PONの特徴とPONで用いられている制御機構の詳細を把握することにより、サービス品質を左右し得る制御パラメータを特定すると共にモデル化を行った。また、PONに接続される様々なネットワークを抽象化したモデルを作成した。そして、PONの制御機構に関するモデルとPONに接続されるネットワークのモデルに基づき、サービス品質を向上するためのトラフィック制御技術を考案した。

#### (2) 平成24年度の成果概要

平成24年度は、第2段階に該当する研究を行った。具体的には、PONと一つの種類のネットワークが接続した融合ネットワークにおいて、それぞれの特性を最大限に利用したトラフィック・経路制御技術の基礎を確立するため以下の情報を明らかにした。まず、第1段階まで明らかにしたPONの制御パラメータと通信モデルを基にして、PONと接続するネットワークの特徴を具体化した際のサービス品質を左右し得る制御パラメータを特定すると共に、融合ネットワークのモデル化を行った。そして、PONと接続するネットワークが持つ特性を考慮してPONとの接続点(ONU)を選択することによって、第1段階で開発したトラフィック制御技術と経路制御技術の改良を行った。

#### (3) 平成25年度の成果概要

平成25年度は、平成24年度から継続して第2段階の研究を行った。第2段階では、第1段階で一般化したネットワーク環境を具体化し、各ネットワークの特性に基づいた経路制御技術の研究を行った。一般に、経路制御は各ネットワークの中で閉じた独自の方法によって行われるが、PONと他のネットワークの接続のように両者間に複数の接続点(ONU)が存在する場合、その接続点の選択が新たな自由度として経路制御に加わる。各接続点において通信特性が異なるため、接続点の選択によってサービス品質が変化することを考慮に入れた経路制御技術が必要となる。そこで、ネットワークのグリーン化が重要視されている近年の社会的背景から、本年度は電力消費を考慮した経路制御技術について検討を行った。

#### (4) 技術の概要

本研究の成果として位置づけられる主な提案技術として、本研究報告では、ERにおけるトラヒックの損失を回避することを可能とするERとHGW間における集中制御方法を取り上げる。ERとHGW間の集中制御ではMPCPを用いており、その帯域制御方式としてはレート分割方式を採用した。これにより、HGWに到着したトラヒックは一旦、ERに通知された後、ERから送信可能なトラヒックを通知されることで送信することが可能となる。ここで、トラヒックを送信する際の帯域制御方式

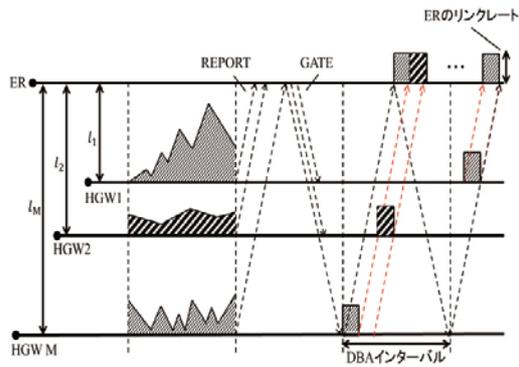


図 1:時分割方式による MPCP の概要図

として時分割方式とレート分割方式の2つの方式が考えられる。提案手法では、MPCPを利用することでHGWの送信トラフィックをERのリンクレート以下に制御することが可能であり、ERにおけるトラフィックの輻輳を回避することが可能である。以下では提案手法の技術的な動作説明と理論解析及びシミュレーション結果を示す。

#### ① MPCPの動作説明

図1はER-HGW間におけるMPCPの概要図である。ER-HGW間におけるMPCPでは、各HGWにDBA(Dynamic Bandwidth Allocation)インターバル中に到着したトラフィックの合計はREPORTメッセージによってOLTに通知される。OLTは、全HGWからのREPORTメッセージを受信した後、DBAアルゴリズムに基づき、GATEメッセージによって各HGWに許可する帯域を決定する。ここで、ERとOLTの距離はOLTの配置場所によって異なるため、ER-HGW間の伝搬遅延は、各HGWが接続するOLTの場所によってそれぞれ異なる。例えば、ERから遠い場所に配置されたOLTに接続するHGWほど、ER-HGW間の伝搬遅延は大きくなる。ここで、DBAインターバルは、最低でもREPORTメッセージとGATEメッセージを交換する時間以上は必要であるため、ER-HGW間の往復伝搬遅延の最大値より大きく設定する必要がある。GATEメッセージによって通知する内容は、時分割方式とレート分割方式によりそれぞれ異なる。時分割方式ではトラフィックの送信タイミングと送信時間を通知し、レート分割方式ではHGWがトラフィックを送信する際のトラフィックレートを通知する。

#### ② 時分割方式による帯域制御方法

時分割方式では、DBAインターバルを各HGWで共有するため、ERはGATEメッセージにトラフィックの送信タイミングと送信時間を記載してHGWに通知する。ここで、各HGWは、ERにおけるリンクレート以下のトラフィックレートでトラフィックをERに送信する。これにより、ERにおける到着トラフィックをリンクレート以下に制御することが可能となり、ER

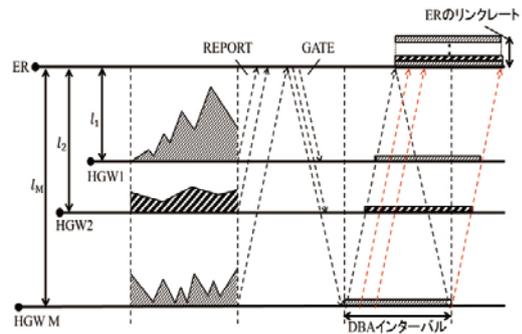


図 2:レート分割方式による MPCP の概要図

における輻輳の可能性を理論的にゼロにすることが可能となる。ここで、各HGWにGATEメッセージによって通知する送信タイミングは、各HGWとERの伝搬遅延の違いを考慮して決定する必要がある。例えば、ERからの伝搬遅延がi番目に大きいHGWは、伝搬遅延が(i-1)番目に大きいHGWが送信を終了した後、両HGWとERの伝搬遅延の差分の時間待つてからトラフィックを送信することで、ERの帯域を余すことなく利用可能となる。時分割方式は、元々OLT-HGW間の伝搬遅延がマイクロ秒オーダーであるPONに適用されていた方式である。この方式を、ER-HGW間に適用するとネットワーク内の伝搬遅延が大きくなるため、REPORTメッセージとGATEメッセージを交換する際にかかる遅延が増加し、結果的にDBAインターバルはミリ秒オーダーとなる。ここで、時分割方式では、各HGWはGATEメッセージを受信後、各自の送信タイミングまでトラフィックの送信を待つ必要がある。このため、送信タイミングが最後のHGWは、最も遅くトラフィックを送信することになる。この制御遅延は、PONにおける時分割方式ではマイクロ秒オーダーの遅延であったため、無視できていたが、ER-HGW間ではミリ秒オーダーの遅延となり、無視できない。以上より、時分割方式によるMPCPでは、ERにおける輻輳は回避できるものの、その制御遅延は比較的大きくなる。

#### ③ レート分割方式による帯域制御方法

図2はレート分割方式によるMPCPの概要図である。レート分割方式では、各HGWはGATEメッセージで許可されたトラフィックレート以下でDBAインターバルの間トラフィックを送信する。ここで、ERは各HGWのトラフィックレートの合計がERのリンクレート以下になるようにGATEメッセージを送信することによって、ERにおける輻輳を回避することが可能である。各HGWとERの伝搬遅延はそれぞれ異なるため、各HGWのトラフィックがERに到着し始める時間と送信を終了する時間が等しくなるように、各HGWはトラフィックの送信開始と送信終了のタイミングを調整する必

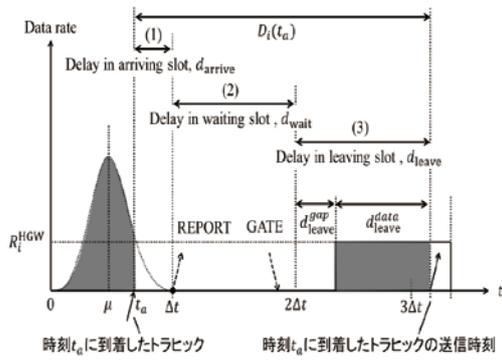


図 3:制御遅延の解析の概要図

要がある. そこで, ER-HGW 間の伝搬遅延が最も長い HGW から伝搬遅延の長い順に送信することで, ER におけるトラヒックの到着時間を等しくすることが可能となり, ER は HGW のトラヒックレートを制御することが可能となる. ER-HGW 間でレート分割方式による MPCP を行う際は, レイヤー3 において REPORT メッセージと GATE メッセージを交換するため, PON や ER-OLT 間においてトラヒックの衝突は発生しない. また, レート分割方式による MPCP では, 時分割方式で発生していた制御遅延が発生しないため, ER-HGW 間で MPCP を適用する際はレート分割方式が適していることがわかった.

#### ④ HGW における制御遅延の数値解析結果

本研究では, 提案手法により生じる制御遅延を数学的に解析し, その特性評価を行った. まず, 制御遅延をモデル化により定義した後, 解析評価を行うことで制御遅延の特性を評価した. 図 3 に本研究の数値解析に用いた解析モデルの概要図を示す. 導出したい制御遅延は Arriving slot, Waiting slot, Leaving slot の 3 つに分割することができ, 各スロットの特性を解析した. 本解析では, HGW に到着したトラヒックは正規分布に従うものと仮定した. また, ER が HGW に割り当てるトラヒックレートは Proportional Fairness と呼ばれるアルゴリズムに基づくものと仮定した. Proportional Fairness では, HGW が REPORT メッセージによって要求するトラヒックが多ければ多いほど, ER は他の HGW と比較して相対的に多くの帯域を割り当てるアルゴリズムである.

図 4 は制御遅延の解析結果である. Arriving slot は, トラヒックの到着時刻が 1 ミリ秒に近づくほど減少する. MPCP を利用した ER-HGW 間の通信では, 到着したトラヒックは一度 ER に REPORT されるため, Arriving slot の終わりに HGW に到着したトラヒックほど, REPORT メッセージが送信されるまでの待ち時間が短いことがわかる. 一方で, Arriving slot の始めに HGW に到着したトラヒックは REPORT メッセージが送信され

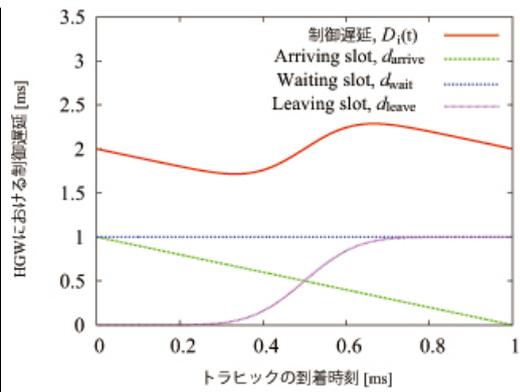


図 4:制御遅延の解析結果

るまでの待ち時間が長くなることがわかる.

Waiting slot では, ER-HGW 間で集中制御を行うために REPORT メッセージと GATE メッセージを交換する必要があり, この時間は DBA インターバルで固定されているため, Waiting slot は 1 ミリ秒と示されている.

Leaving slot は, トラヒックの到着時刻が 1 ミリ秒に近づくほど, 増加する. なぜなら, Arriving slot の後半に到着したトラヒックほど, 時刻 0 から HGW に既に到着しているトラヒックが多いため, Leaving slot において, 送信される順番が遅くなる. また, Leaving slot は時刻 0 ミリ秒と時刻 1 ミリ秒付近では緩やかな曲線を示し, 時刻 0.5 ミリ秒付近では急な曲線を示すことが確認される. ここで, トラヒック関数である正規分布の特徴として, トラヒック関数のピーク時刻である 0.5 ミリ秒付近において波形の変化が激しくなり, ピーク時刻からの時間が離れるほど, 緩やかな波形を示す. このため, Leaving slot は, トラヒック関数のピーク時刻である 0.5 ミリ秒付近において波形の増加率が激しくなり, ピーク時刻から遠い時刻 0 ミリ秒と時刻 1 ミリ秒付近では, 波形の増加率が緩やかになっている.

HGW に到着したトラヒックが送信されるまでにかかる制御遅延は, 以上で述べた Arriving slot, Waiting slot, Leaving slot の 3 つの制御遅延の和であり, 図 4 より最小値と最大値を持つことが確認できる. ここで, Leaving slot は時刻 0.5 ミリ秒付近において波形の変化が激しくなり, ピーク時刻から時間が離れるほど, 緩やかな波形を示す. これにより, 時刻 0 ミリ秒から Arriving slot の減少率を Leaving slot の増加率が越える時刻までは, 制御遅延は減少関数となっている. 一方で, 時刻 0.5 ミリ秒付近では, Leaving slot の増加率が激しくなるため, Arriving slot の減少率を Leaving slot の増加率が越える時間帯が存在し, 制御遅延は増加関数となる. これにより, 制御遅延は Arriving slot の減少率を Leaving slot の増加率が越える時刻において極小値をとることがわかる. また, Leaving slot は, 時刻 0.5 ミリ秒を過ぎるとその増加率は緩やかになるため,

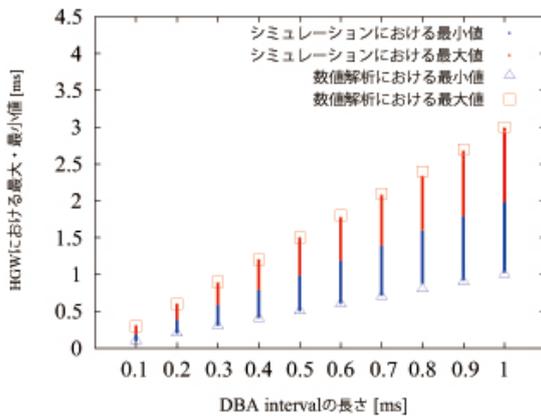


図 5: シミュレーション結果

Leaving slot の増加率を Arriving slot の減少率が越える時刻が存在し、その時刻以降の制御遅延は減少関数となる。これにより、制御遅延は Leaving slot の増加率を Arriving slot の減少率が越える時刻において極大値をとることがわかる。また、Arriving slot は時刻 0 ミリ秒において最大値である 1 ミリ秒を示し、時刻 1 ミリ秒において最小値である 0 ミリ秒を示す。一方で、Leaving slot は時刻 0 ミリ秒において最小値である 0 ミリ秒を示し、時刻 1 ミリ秒において最大値である 1 ミリ秒を示す。以上から、制御遅延が示す極小値と極大値はそれぞれ最小値と最大値であることが証明できる。

#### ⑤ シミュレーションによる性能評価

本評価では、HGW に到着したトラフィックが送信されるまでにかかる制御遅延をシミュレーション実験によって評価する。また、シミュレーションによって得られた結果を数値解析結果と比較することによって、数値解析の妥当性を確認する。シミュレーション実験では、トラフィック関数の波形をランダムに変化させ、各場合における制御遅延の最小値と最大値をプロットする。

図 5 に制御遅延の評価結果を示す。縦軸は HGW に到着したトラフィックが送信されるまでにかかる制御遅延を表しており、横軸は DBA インターバルを表す。また、シミュレーション結果と共に各 DBA インターバルにおいてそれぞれ数値解析による理論的な最小値と最大値がプロットされている。シミュレーション結果と解析結果との比較検討により、数値解析結果の妥当性が確認された。また、各 DBA インターバルにおいて提案手法によって HGW で発生する制御遅延は DBA インターバルの 1 倍以上 3 倍以下に抑えられている。さらに、制御遅延は DBA インターバルが 1 ミリ秒の場合でも最大で 3 ミリ秒程度であり、5G における許容遅延である 5 ミリ秒を下回っている。以上より、提案手法は DBA インターバルが異なる様々な FiWi アクセスネットワークの形態においても制御遅延を許容遅延以下に抑えることが可能であり、提案手法の有効性を

確認することができた。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

1. Kei Saito, Hiroki Nishiyama, Nei Kato, Hirotaka Ujikawa, and Ken-Ichi Suzuki, "A MCP-PC-Based Centralized Rate Control Method for Mobile Stations in FiWi Access Networks," IEEE Wireless Communications Letters, 査読有 vol. 4, no. 2, pp. 205-208, Jan. 2015.  
<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=7021931>
2. Zubair Md. Fadlullah, Hiroki Nishiyama, Yuichi Kawamoto, Hirotaka Ujikawa, Kenichi Suzuki, and Naoto Yoshimoto, "Cooperative QoS Control Scheme based on Scheduling Information in FiWi Access Network," IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing (TETC), 査読有 vol. 1, no. 2, pp. 375-383, Dec. 2013.  
[http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=6584774](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6584774)

[学会発表] (計 1 件)

1. Kenta Suzuki, Hiroki Nishiyama, Nei Kato, Hirotaka Ujikawa, Ken-Ichi Suzuki, and Naoto Yoshimoto, "A Bandwidth Allocation Method to Improve User QoS Satisfaction Without Decreasing System Throughput in Wireless Access Networks," 23rd IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communication (PIMRC 2012), 9-12 Sep. 2012. Sydney (Australia)

[その他]

(1) ホームページ

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

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

加藤 寧 (NEI, KATO)

東北大学・大学院情報科学研究科・教授  
研究者番号：00236168

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし