

# 移動通信 TCP トラフィックにおける 複合無線アクセスネットワークの特性評価

川原隆靖<sup>†1</sup> 仙石翔太<sup>†2</sup> 安達直世<sup>†2</sup> 滝沢泰久<sup>†2</sup>

<sup>†1</sup> 関西大学大学院理工学研究科<sup>†2</sup> 関西大学環境都市工学部

近年無線通信において、周波数不足の解決のためコグニティブ無線の研究が活発に行われており、コグニティブ無線により無線機が広い周波数帯から利用可能な無線メディアを発見可能となる。このようなコグニティブ無線を前提として我々は利用可能な多数の異種無線メディアを複合して高スループットかつ低遅延を実現する無線アクセスネットワークを提案している。本方式では、無線アクセスネットワークを構成する複数の異種無線メディアにトラフィックを分配するが、その際に無線メディアの特性や利用状況によりトラフィックの到着順序乱れが発生し、有効なデータフローを提供できない可能性がある。本稿では、TCP を使用した移動通信環境における複合無線アクセスネットワークのシミュレーション評価からトラフィック到着順序乱れの通信性能への影響を報告し、その影響に基づき移動通信環境における複合無線アクセスネットワークの特性に関して議論する。

## 1. はじめに

近年、携帯電話、無線 LAN システム等の数多くの無線システムの普及が進んでいる。同時に、無線通信において多様なコンテンツが増加し、通信するデータ量、ユーザ数も増えている。このような現状において、要求を満たす無線通信を実現する為には、広い周波数帯域が必要である。しかし、広周波数帯域を確保する事は困難であり、空き周波数帯が不足している。この問題を解決する技術としてコグニティブ無線がある[1]。コグニティブ無線とは、無線機が周囲の電波利用状況を認識し、状況に応じて無線システムを適宜使い分ける技術である。無線アクセスネットワークはコグニティブ無線により発見された多様な無線メディアの内から最適な無線メディアを利用するに留まる。しかし、コグニティブ無線により発見される多様な無線メディアを集約することにより、単一无線メディアに比べ、広帯域な通信を提供することが可能である。従って、我々は同時に利用可能な多様な無線メディアを可能な限り組み合わせることで高度に活用する複合無線アクセスネットワーク(以降、CWAN)とそのトラフィック制御方式を提案している[2]。本方式は従来方式と比較して圧倒的に高いスループットと低い遅延時間を実現できる事を確認している。また、端末の移動に関して考慮するために、MobileIP[6] (以下、MIP) との統合を実施して、CWAN を移動通信環境に適合した動的な構成方式[3]としている。CWAN はそれを構成する複数の無線メディアにトラフィックを分配するが、その際に無線メディアの特性や利用状況によりトラフィックの到着順序乱れが発生し、有効なデータフローを提供できない可能性がある。本稿では、TCP を使用した移動通信環境における複合無線アクセスネットワークのシミュレーション評価からトラフィック到着順序乱れの通信性能への影響を示し、その影響に基づき移動通信

環境における複合無線アクセスネットワークの特性に関して議論する。

## 2. 複合無線アクセスネットワークの構成

無線通信環境がWiFi,WiMAX,LTEなど多様な無線メディアが混在する環境となっている。従って、それらが重複している通信カバレッジ内では、モバイル端末が複数の無線メディアを利用することができる。以上のことから、想定するCWANの一例を以下に示す(図1参照)。

- モバイル端末(以降,MN:MobileNode)とアクセスポイント(AP)は、それぞれIEEE802.11b(以降,11b)とIEEE802.11a(以降,11a)の2つの無線I/Fを装備する。
- ネットワークはIPネットワークを想定する。
- MNはAPの11a,11bカバレッジ内にある為、2つの無線メディアを利用できる。

上記条件により、AP から MN にトラフィックを送信する場合は 11a,11b を直接通信で並列利用して送信可能である。

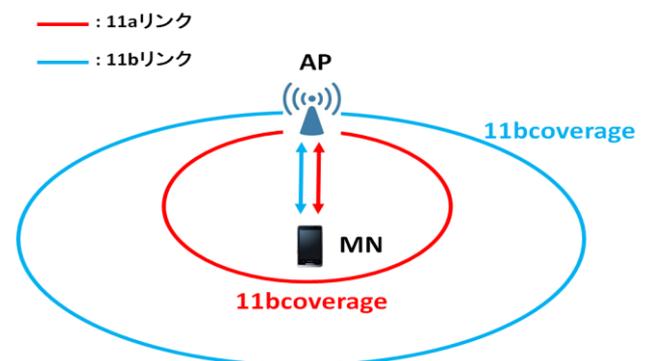


図 1 複合無線アクセスネットワーク

### 3. 複合無線アクセスネットワークのアーキテクチャ

本節では MobileIP に基づいた CWAN のレイヤ構造, ネットワーク構成, および制御方式について説明する.

#### 3.1 MobileIP

MobileIP(MIP)により,MN がアクセスネットワーク間を移動した(以降,ハンドオーバー)場合であっても,通信相手端末(以降,CN:CorrespondentNode)と通信を継続可能とする. また MIP により,ネットワーク上に設置された HomeAgent(HA)と ForeignAgent(FA)とよばれるノードが,移動に応じて変化しない固定なアドレスであるホームアドレス(HoA)と,MN が移動先のネットワークで一時的に利用する Care-ofAddress(CoA)との対応関係(以下,バインディングリスト)を管理する.MN がハンドオーバーする際に CoA が変更した場合,MN は HA に対してバインディングの更新(以降,BU:BindingUpdate)を行う.CN は,MN の訪問しているネットワークに関わらず,常時,MN の宛先を HoA として送信する.HA はそれを受信して,バインディングリストから HoA に対応している CoA を宛先として更新,CN からのデータを,FA を介して MN に転送する.これにより,CN から移動端末の移動を隠蔽できるようになり,移動しながらの通信の継続が実現できる.(図2参照)

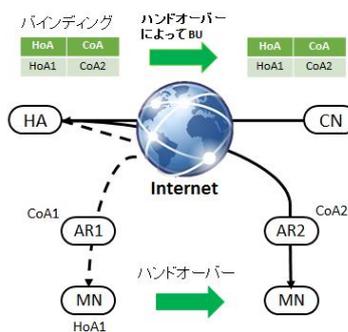


図2 MobileIP

#### 3.2 Multiple Care-of-Address(MCoA)

MobileIP では, HA は1つの HoA に対して1つの CoA を登録する為,1つの HoA に対して複数の CoA を登録する事は不可能である.従って,複数の I/F で MN が BU を行った場合,最後に登録された I/F のみで,MN は通信する. 一方で,MCoA[6]は1つの HoA に対して複数の CoA を登録することが出来る為,複数の I/F で MN は BU を行うことが可能である(図3参照).

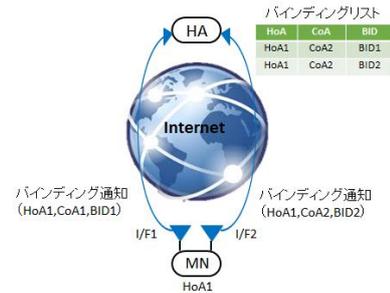


図3 Multiple Care-of-Address(MCoA)

#### 3.3 階層型 HMIP

MobileIP では,MN の接続先によっては,HA と MN 間の距離が大きく離れる場合がある.その場合,ハンドオーバーが発生する度に MN から遠くに位置する HA に BU を行う必要がある.その結果,ハンドオーバーによる遅延が増大する問題が生じる.階層型 MobileIP (以下,HMIP: Hierarchical MobileIP) [9]は,MN は CoA として,アクセスルーター(以下,AR)配下の On-link-CareofAddress(LCoA)と,MAP 配下の RegionalCare-ofAddress(RCoA)を保持する.図4に LCoA と RCoA の関係を示す.

例えば図4では,AR1,AR2 における LCoA がそれぞれ LCoA1,LCoA2 である.MAP の RCoA が RCoA1 であり,ハンドオーバーにより,MN が利用アクセスネットワークを AR1 から AR2 へ切替えた場合,LCoA が LCoA1 から LCoA2 に変更される.一方,RCoA は MAP ドメイン内で変更しないアドレスである.その為,MAP ドメイン内のハンドオーバーは MAP に対して BU を行うのみで完了する.図4の様に CN からの HoA 宛の packets は,まず HA で受信され,RCoA 宛に転送される.次に MAP で受信すると,LCoA 宛に転送される.すなわち,HA では RCoA を MN の CoA とみなし,MAP では LCoA を MN の CoA とみなす.

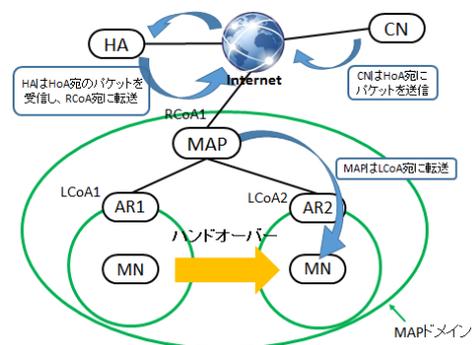


図4 階層型 HMIP

#### 3.4 複合無線アクセスネットワークのレイヤ構造

複数の無線メディア I/F を装備した端末に,通常単一の無線メディアにより無線アクセスネットワークを構成する.

これは、アプリケーション層からデータを送信する際に、送信元アドレスとして I/F を必ず 1 つ指定しなければならないからである。従って、複合無線アクセスネットワークにおいて複数の無線メディアを同時に並列利用する為に、アプリケーション層から、複数の無線メディアを隠蔽する必要がある。こうしたことから、複数の無線メディアを集約する仮想複合レイヤ(以下、Composite レイヤ)を IP レイヤと Mac レイヤ (I/F) の間において構成する (図 5 参照)。Composite レイヤはアプリケーションに対して複数の無線メディアを隠蔽し、単一広帯域無線メディアとして提供する。このレイヤ構造により、アプリケーション層はデータを送信する際に、送信先アドレスとして複数の無線メディアで構成される CWAN の IP アドレスを用いる。CWAN はアプリケーションからのパケットを Composite レイヤで、複数の無線メディアにパケットを分配することで、並列利用を実現している。

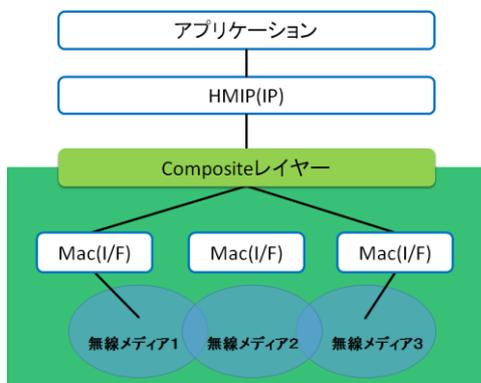


図 5 複合無線アクセスネットワークのレイヤ構造

### 3.5 複合無線アクセスネットワークのネットワーク構成方式

CWAN は、MN の移動を隠蔽する為、HMIP に基づいたネットワーク構成とする。以下に、その構成を示す。

- HA は 1 つの HoA に対し、1 つの CoA を持つ。またその CoA とは MAP が持つ RCoA とする。
- MAP は MCoA の機能を有し、1 つの HoA に対して複数の CoA、すなわち LCoA を持つ。
- MAP と AR は互いに経路を既知であるとする。MAP と AR は高速ネットワークで接続されている。
- 本稿では MAP は 1 つのみとし、MN の移動は MAP ドメイン内に限るとする。
- AR が持つ複数の無線 I/F の通信カバレッジおよび異なる AR において通信カバレッジが重なっている箇所が存在する。
- MN が装備する各無線 I/F はコグニティブ無線の機能を有して、動的に利用可能な無線メディアを発見し切り替えることが可能である。

2 つの異種無線メディア I/F を装備する AR、MN において、MN が同一の AR に接続する場合と異なる AR へ接続する

場合のネットワーク構成を図 6 に示す。

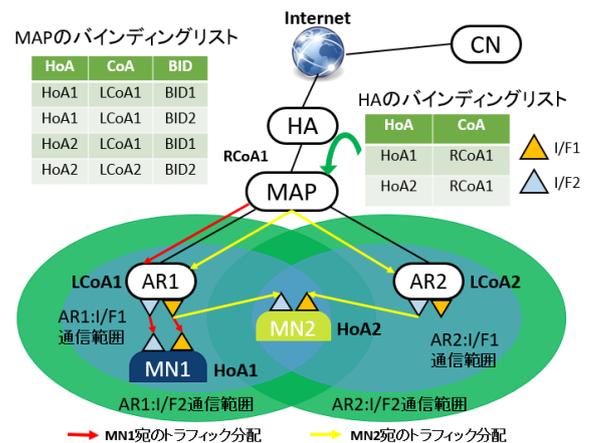


図 6 複合無線アクセスネットワークのネットワーク構成

初めに、MN1 における複数の無線 I/F1,2 が、同一の AR(AR1)に接続している状態について説明する。HA はバインディングにより、CN から受信した HoA1 宛のパケットを RCoA1 宛に転送する。MAP はバインディング ID(以下、BID)毎に異なるバインディングリストを持つ。この場合、複数の無線 I/F1,2 いずれも AR1 に接続している為、いずれのバインディングリストも LCoA1 を CoA として保持する。従って、MAP は HoA1 宛のパケットを LCoA1 に転送する。そして AR1 は MN と接続している I/F1,I/F2 に対してトラフィックを分配する。

次に MN2 における無線 I/F1 が AR1、無線 I/F2 が AR2 に接続している状態について説明する。MAP は、HoA2 に対して LCoA1 と LCoA2 を持つ。CN から HA、HA から MAP に届いたパケットは MAP 上で、LCoA1 と LCoA2 宛に対してトラフィック分配される。それを受信した AR は接続している I/F においてパケットを MN に転送する、すなわち AR1 は無線 I/F1、AR2 は無線 I/F2 を使用して MN にパケットを転送する。

以上より、MN が複数の無線 I/F によって、同一の AR に接続する場合は、当該 AR が I/F 毎にトラフィックを分配し、異なる AR に接続する場合は、MAP が AR 毎にトラフィックを分配する。

### 3.6 バインディング手順

想定するネットワーク環境において MN が MAP、HA にバインディングする手順例を以下に示す(図 7 参照)。

(STEP1)MAP は定期的にエージェント広告 (AgentAdvertisement) を AR へ送信する。AgentAdvertisement には RCoA が含まれている。

(STEP2)AR は MAP からの AgentAdvertisement を受信し、そして AgentAdvertisement に LCoA を追加する。さらに、AR は複数の無線 I/F で MN に AgentAdvertisement をブロードキャストするために、受信した AgentAdvertisement を無

線 I/F の数分複製する。そして、各無線 I/F においてブロードキャストする。

(STEP3) MN は AgentAdvertisement を受信し、RCoA と LCoA から自身がどの MAP、AR の配下にいるかを認識する。そして、MN は BU を行うために、BID を発行し、BID と HoA を登録要求メッセージ (RegistrationRequest) に付与して AgentAdvertisement 送信元の AR に送信する。

(STEP4) AR は RegistrationRequest を受信し、MN への仮の経路を記憶して、MAP に RegistrationRequest を転送する。

(STEP5) MAP は RegistrationRequest を受信し、以下のバイディング状況により処理が変わる。

- HA に BU していない場合  
 MAP は経路を仮登録して HA に RegistrationRequest を転送する
- HA に BU 中の場合  
 MAP は経路を仮登録して HA から登録応答メッセージ (RegistrationReply) を受信するまで待つ。この場合は、Step6 の処理は省略される。
- HA に BU 完了している場合  
 この状況は MAP ドメイン内で接続先の AR が変更した場合に発生する。その場合 MAP は経路を本登録し、RegistrationReply を生成して AR に送信する。この場合は、Step6、Step7 の処理は省略される。

(STEP6) HA は RegistrationRequest を受信すると MN の HoA とそれに対応する CoA として RCoA を登録する。そして、MAP に RegistrationReply を送信する。

(STEP7) MAP は RegistrationReply を受信すると、MN への経路を仮登録から本登録する。そして、AR に RegistrationReply を転送する。

(STEP8) AR は RegistrationReply を受信すると、MN への経路を仮登録から本登録する。そして、MN に RegistrationReply を転送する。

(STEP9) MN は RegistrationReply を受信すると、経路を確定させ、BU が完了する。

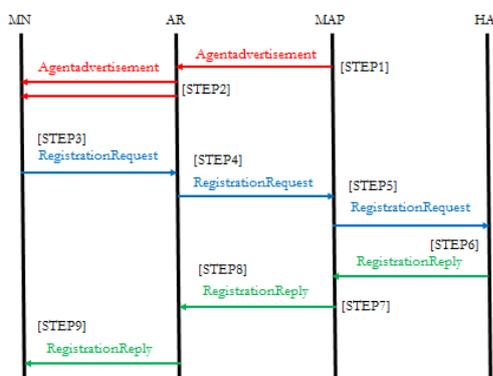


図 7 バイディング手順

### 3.7 複合無線アクセスネットワークの経路切替制御

MN が移動することにより、新たに利用可能な AR を発見する。この新たに発見された AR の遅延時間が、MN が集約する AR において遅延時間が最も高い AR よりも小さい場合、この高遅延の AR から新たな AR へ経路を切り替え、MAP が収容する(MAP ドメイン) AR 間の遅延均等化を図る。この経路切替制御を実施するため、MN は経路遅延時間が最も高い I/F において全チャンネルをスキャンして複数の AR からのルーター広告を傍受する。ルーター広告にはそれぞれの AR の遅延時間が付与されており、この遅延時間が当該 I/F の経路遅延時間より低くかつ最小の遅延時間となる AR へ経路を切り替える。しかし、MN 個々が独自に経路切替制御を実施すると、MN 間の経路切替において共振現象が発生する可能性が高い。このため、MN の経路切替を MAP が制御する。MAP は最も遅延時間が高い AR における、最も遅延時間が高い MN に対して経路切り替えを指示する。しかし、MAP からは MN が別の AR へ経路切り替え可能であるかは分からない。よって、単純に MAP が最も遅延時間が高い AR における最も遅延時間が高い MN を選別し経路切り替えを指示しても、MN 自身が経路切り替え可能でなければ、経路切り替えは成立しない。この問題を防ぐために、経路切り替え可能な MN が経路切り替え可能であることを MAP に通知する。その手順を、図 8 を用いて説明する。

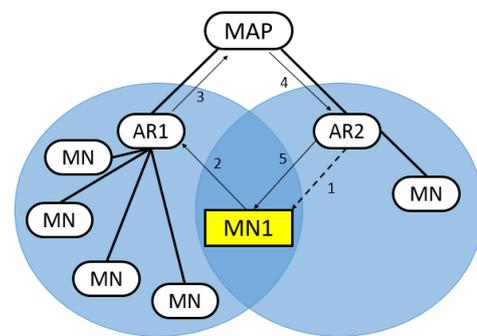


図 8 複合無線アクセスネットワークの経路切替制御

1. MN は各 I/F で全チャンネルから受信した最も低遅延なルーター広告を保持する。
2. MN は保持している最も低遅延のルーター広告の送信元 AR が現在接続している AR と異なる場合は経路切り替えが可能である。従って、現在接続している AR に経路切り替え可能であることを通知する。
3. それを各 MN から受信した AR は自身のグローバル遅延時間と、通知された MN の中から最も遅延時間が高い MN の HoA と BID を MAP に通知する。
4. 各 AR から通知を受けた MAP は、グローバル遅延時間が最も高い AR から通知された HoA と BID を保持す

る MN を経路切り替え端末として選別し、その HoA と BID を選別的ルーター広告に付与し送信する。

- ルーター広告を受信した MN は、ルーター広告に付与された HoA が自身の HoA と一致すれば、指定された BID において経路切り替えを実施する。

#### 4. パケット到着乱れ

##### 4.1 複合無線アクセスネットワークにおけるパケット到着乱れ

CWAN は Composite レイヤで集約する無線リンクにパケットを分配する。しかし、パケット分配した無線リンクは、異種の無線メディア（送信速度、送信手順が異なる）であり、また通信状況（競合するノード数やトラフィック量など）も異なる。従って、パケットが送信順に到着することが保証されない（図 9）。パケットが送信順に到着しない（パケット到着乱れ）場合、上位レイヤのデータフローとして無効になる可能性が高く、複数の無線メディアを集約した効果を得られなくなる問題がある。

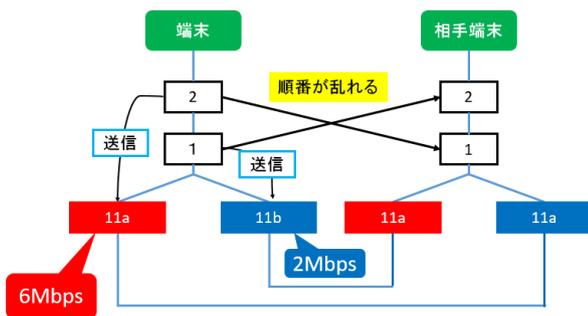


図 9 パケット分配における到着乱れ

##### 4.2 パケット到着乱れが TCP に与える影響

CWAN のパケット分配において、先発パケットが通信速度の遅い無線メディアに分配され、後発パケットが速い無線メディアに分配された場合、パケット到着乱れが発生する可能性がある。（図 9）パケット到着乱れにより TCP においてデータセグメントの追い越しが発生すると TCP は再送を要求する確認応答を送る。この確認応答が 3 回連続すると TCP は輻輳発生と判断し高速再送制御を実施する。高速再送制御は TCP の輻輳ウインドウを半減して送信を抑制する（図 10）。従って、CWAN により複数の無線メディアを集約し、帯域を拡大しても、TCP は CWAN によるパケット到着乱れを輻輳と判断して送信を抑制する。さらに、TCP において再送制御のためのパケットにより帯域を浪費する。すなわち、広げた帯域を有効活用できないことになり、上位アプリケーションの通信性能を向上が図れない。

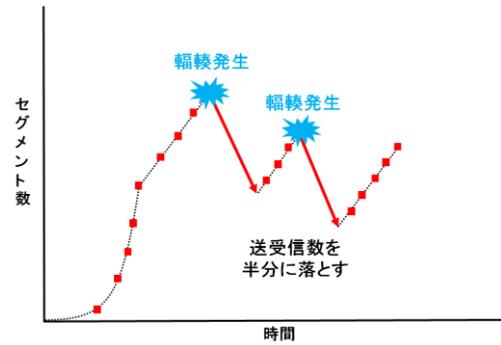


図 10 パケット到着乱れが輻輳ウインドウへ与える影響

#### 5. シミュレーション

本章では TCP を使用した移動通信環境における複合無線アクセスネットワークのシミュレーション実験を通じて、トラフィック到着順序乱れがアプリケーションの通信性能に与える影響の検証を行う。

##### 5.1 シミュレーション評価方法

無線空間におけるフィールドの大きさを 350m×300m とし、図 11 のように MN15 台、AR2 台、MAP を一台配置する。

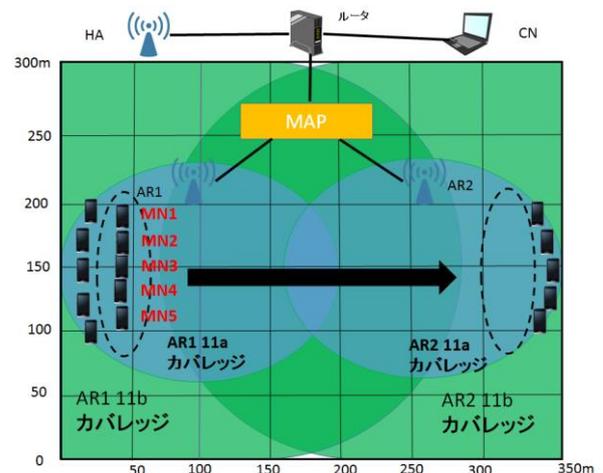


図 11 複合無線アクセスネットワーク構成図

評価条件を以下に示す。

無線 I/F	伝送速度	通信範囲
IEEE802.11a	6Mbps	100m
IEEE802.11b	2Mbps	200m

表 1 無線メディアの伝送速度と通信範囲

- 各 AR の 11b と 11a のチャンネルは異なり、MN は AR からのルーター広告を全チャンネルからスキャンし、いずれかの AR に 11b、11a で接続する。
- AR と MAP 間は高速有線接続とし、無線通信と比較して十分な容量と通信速度があるとして、この間の遅延時間を無視することとする。
- 送信元は MN15 台、宛先は CN。

- アプリケーショントラフィックは TCP を用いた FTP で各 MN から CN へのアップロードトラフィックとする。送信開始時刻は 50 秒とする。
- シミュレーション時間は 1000 秒、パケット分配率更新周期は 5 秒、初期移動率は 0.1、移動率減衰割合は 0.9 とする。ルーター広告の送信間隔は 5 秒～10 秒の間でランダムとする。
- 初めは AR1 の 11b カバレッジ内かつ 11a カバレッジ内かつ AR2 の 11b カバレッジ外に MN が 10 台配置される（図 11 参照）。すなわち、AR1 における 11b, 11a のチャンネルからルーター広告は受信可能で、AR2 からのルーター広告は受信不可能な位置に配置される。同様に残りの 5 台の MN は AR2 における 11b, 11a のチャンネルからルーター広告は受信可能で、AR1 からのルーター広告は受信不可能な位置に配置される。シミュレーション時間が 50 秒経過すると、AR1 の黒円内にいる 5 台の MN が AR2 の黒円内のエリアに向かって移動を開始する。移動速度は全 MN 1m/秒で歩行者を想定とする。AR1 の黒円内から移動した MN は最終的に 350 秒で AR2 の黒円内に止まる。黒円外の MN に関しては移動しない。

評価指標としてネットワーク全体の TCP スループットを 10 秒周期で計測する。また、提案方式の有効性を示すために以下の方式と比較する。

- シングルリンク：通信速度の速い 11a のみを利用。

## 5.2 シミュレーション結果

ネットワーク全体の TCP スループットの結果を移動 MN の TCP スループット、輻輳ウィンドウサイズ、パケット分配率を用いて説明する。図 12 において、各 MN が移動している 0 から 210 秒及び、各 MN が移動をしない 320 秒から 1000 秒において、CWAN はシングルリンクと比較して高スループットである。また、図 14 の同時帯において、各ノードではパケット到着乱れによる高速再送制御が発生しているが、CWAN は移動通信環境においてもパケット到着乱れに多大な影響を受けずに高スループットを出力する。しかし 210 秒から 320 秒において、CWAN はシングルリンクと比較して低スループットである。図 13 の 210 秒において TCP スループットが減少している。これは MN1 が AR1 の 11a カバレッジ外に移動し、11a との通信が切断された為である。この場合、MN は AR2 の 11a からの AgentAdvertisement に応答する。この応答は MAP の選別的経路切替の制約を受けずに AR2 の 11a の AgentAdvertisement へ応答し、経路を優先的に作成する。しかし、移動する 5 台の MN が同時に経路切れを発生して、同時に AgentAdvertisement へ RegistrationRequest により応答することにより、これらのパケットが競合を起こしていると考えられる。そのために、RegistrationRequest の再送処理が発生し、経路作成までに時間を要していると考えられる。MN が接続 AR との無線リンク削

除をしてから他の AR と接続するまでが長時間であるほど、この原因がスループットに与える影響は大きい。図 13 の 300 秒～330 秒において TCP スループットが減少している。MN1 において、AR1 の 11b から AR2 の 11b へ経路の切り替えが行われているからである。経路切り替えが完了した場合、図 15 の 300 秒の様に、各無線リンクに対するパケットの分配率は 50% に初期化される。その場合、図 15 の 300 秒から 400 秒の様に、ネットワーク状況に最適なパケット分配の探索に時間を要する。最適なパケット分配率を発見するまでは、パケット到着乱れが増加する。その為、図 14 の 310 秒から 320 秒の間に高速再送制御が多発、輻輳ウィンドウが縮小し、スループットが減少する。初期化されたパケット分配率が理想値から乖離しているほど、この問題は顕著になる。MN2 の TCP スループット、TCP 輻輳ウィンドウサイズ、パケット分配率をそれぞれ図 16, 17, 18 に、MN3 の TCP スループット、TCP 輻輳ウィンドウサイズ、パケット分配率をそれぞれ図 19, 20, 21 に、MN4 の TCP スループット、TCP 輻輳ウィンドウサイズ、パケット分配率をそれぞれ図 22, 23, 24 に、MN5 の TCP スループット、TCP 輻輳ウィンドウサイズ、パケット分配率をそれぞれ図 25, 26, 27 に示す。これらの図から分かるように、MN2, MN3, MN4, MN5 のいずれも同様の傾向であることが分かる。従って、経路切り替えの際に、MN1 と同原因による問題が発生している。従って、図 12 の 210 秒から 320 秒でスループットが減少する理由は、経路切り替えを複数の MN が同じ時間帯に行うからである。

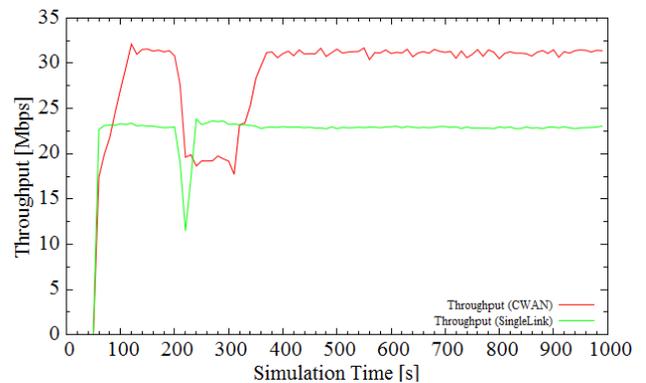


図 12 ネットワーク全体の TCP スループット

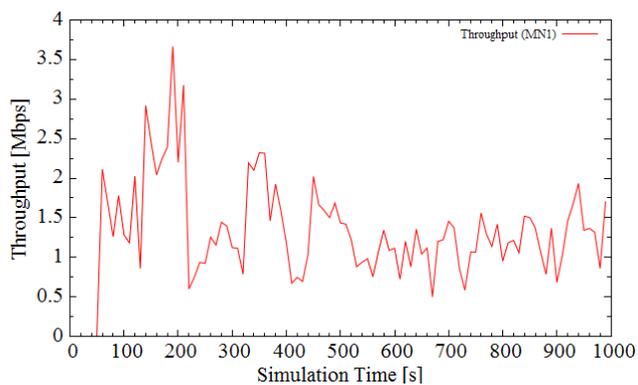


図 13 MN1 の TCP スループット

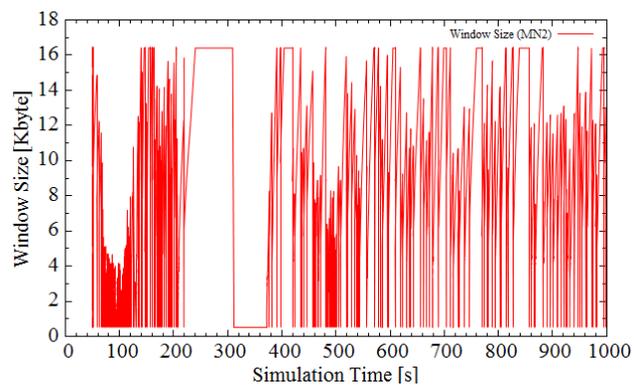


図 17 MN2 の輻輳ウィンドウサイズ

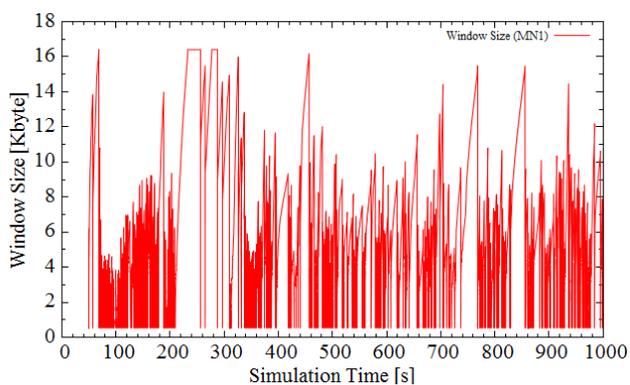


図 14 MN1 の輻輳ウィンドウサイズ

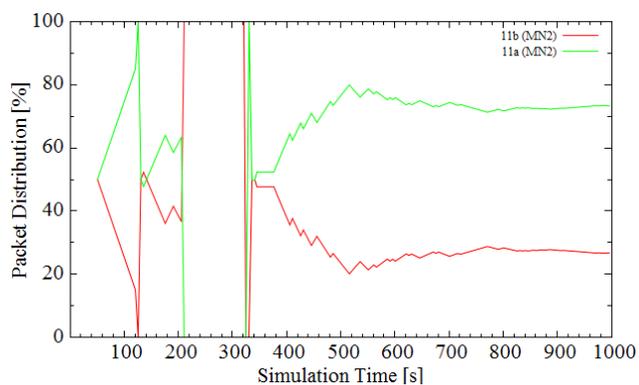


図 18 MN2 の分配率

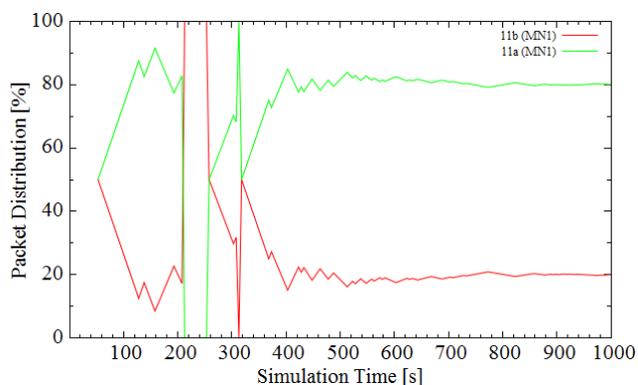


図 15 MN1 の分配率

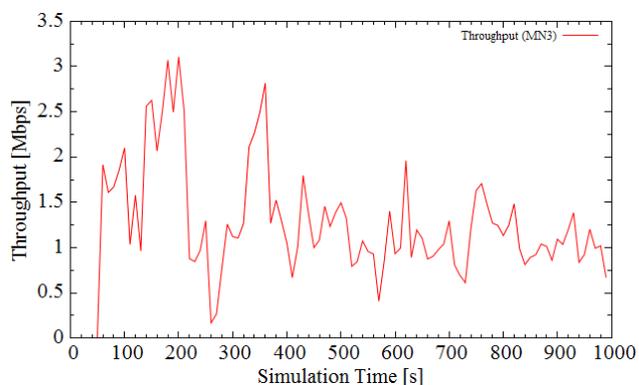


図 19 MN3 の TCP スループット

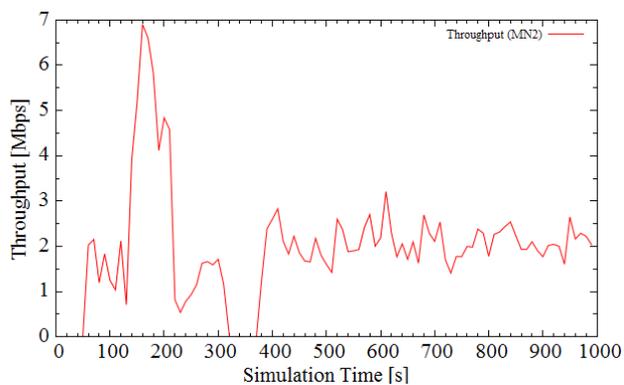


図 16 MN2 の TCP スループット

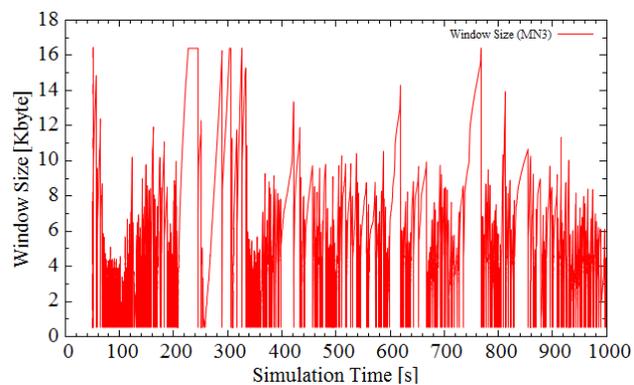


図 20 MN3 の輻輳ウィンドウサイズ

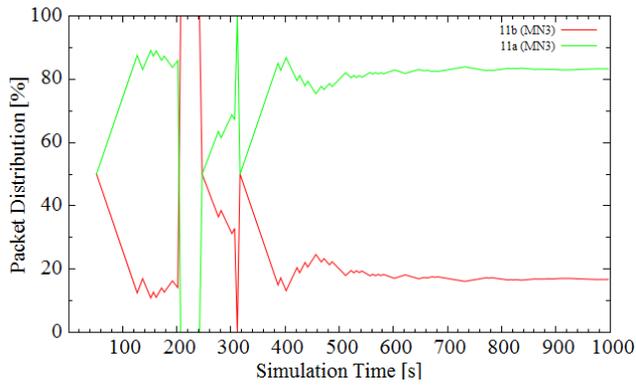


図 21 MN3 の分配率

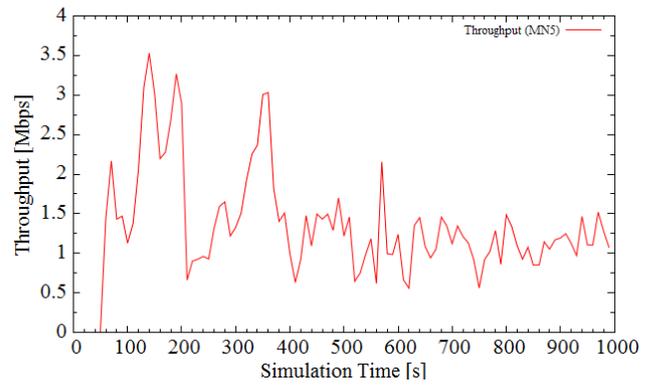


図 25 MN5 の TCP スループット

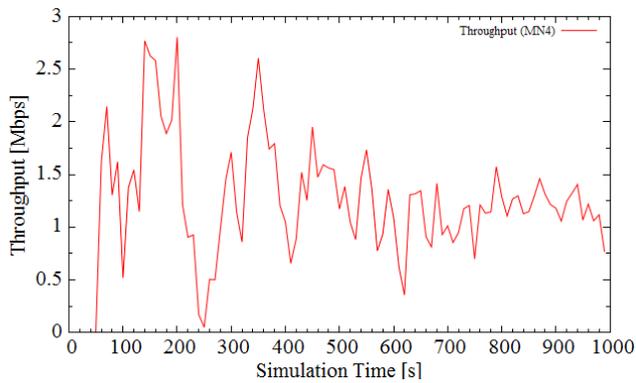


図 22 MN4 の TCP スループット

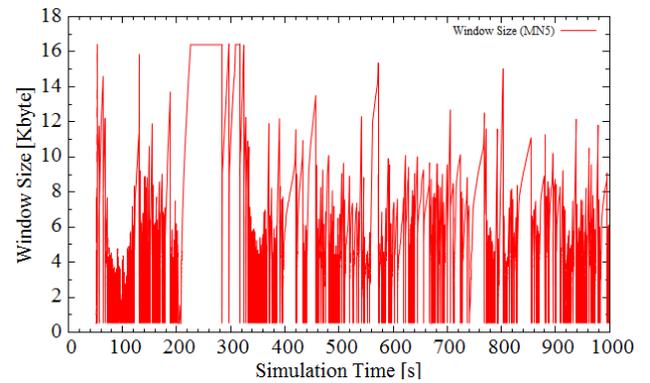


図 26 MN5 の輻輳ウィンドウサイズ

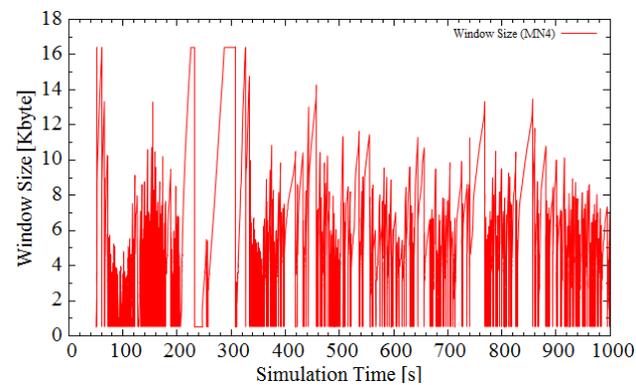


図 23 MN4 の輻輳ウィンドウサイズ

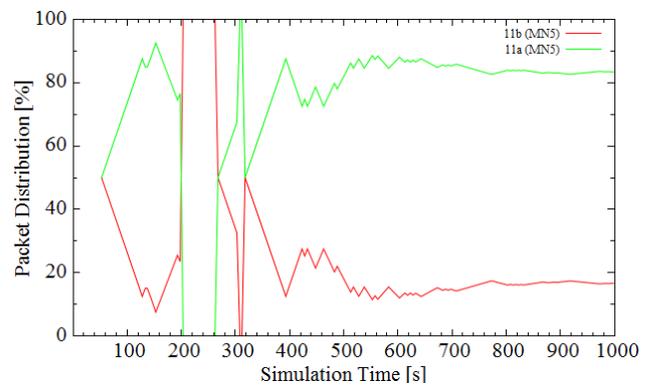


図 27 MN5 の分配率

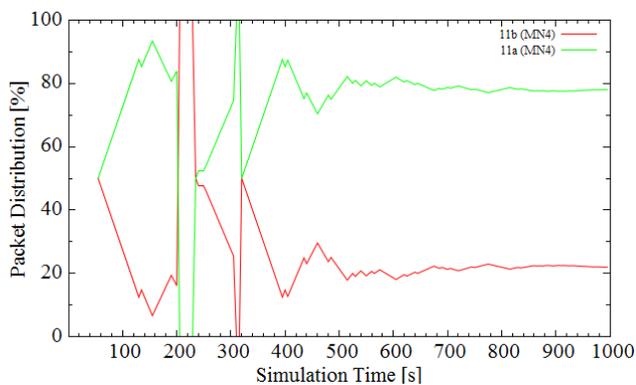


図 24 MN4 の分配率

## 6. 結論と今後

本稿では TCP を使用した移動通信環境における、CWAN の特性評価を行った。CWAN は移動通信環境においても、既存のアクセスネットワークと比較して高スループットである。しかし複数の MN が経路切り替えをした場合、短期間にトラフィック到着乱れが多発、輻輳ウィンドウが減少し、通信性能への影響を与えることがわかった。今後は経路切り替えの際のトラフィック到着乱れを抑制する方式を検討していく。

### 参考文献

- [1] 原田博司, “コグニティブ無線機の実現に向けた要素技

術の研究開発”, 電子情報通信学会論文誌 BVol.J91-B, No.11, pp.1320-1331 2008.

[2] 滝沢, 植田, 小花, “IEEE802.11 と IEEE802.16 を用いた複合アクセス経路のパケット分配制御方式,” 情報処理学会論文誌, Vol.52 No.2 pp.543-557 2011.

[3] 滝沢, 野田, 安達, “移動通信環境における複合アクセスネットワークの MIP との統合,” 情報処理学会研究報告マルチメディア通信と分散処理(DPS), Vol.153, No.10, pp.1-8 2012.

[4] <http://www.7key.jp/nw/tcpip/tcp/tcp2.html>

[5] <http://www5e.biglobe.ne.jp/aji/3min/42.html>

[6] 村井純, 湧川隆次, “モバイル IP 教科書”インプレス標準教科書シリーズ インプレス R & D 2009.

[7] 野田健太郎, 安達直世, 滝沢泰久, “移動通信環境における複合アクセスネットワーク制御方式とその基本性能評価”, 情報処理学会研究報告マルチメディア通信と分散処理(DPS), Vol.156, No.11, pp.1-8, 2013.

[8] 川原隆靖, 西矢恭, 安達直世, 滝沢泰久, “TCP における複合無線アクセスネットワークの優位性の検証,” 情報処理学会研究報告マルチメディア通信と分散処理(DPS), Vol.162, No.16, pp.1-7, 2015.

[9] 阪田史郎, “[知識ベース]4 群 5 編 モバイル IP アドホックネットワーク,” 電子情報通信学会, Ver1, 2010.

[10] <http://free-illustrations.gatag.net/>

[11] 玉井森彦, 酒井憲吾, 山本俊明, 長谷川晃朗, 植田哲郎, 小花貞夫, “多様な無線システムの同時利用を考慮した階層化 MobileIPv6 による移動通信方式の提案,” 信学技報, SR2008-80, 2009.

[12] 高橋秀明, 小林亮一, 岡島一郎, 梅田成視, “Hierarchical Mobile IPv6 with Buffering Extension の通信品質評価,” 情報処理学会論文誌, Vol.46, No.2.

[13] 渥美章佳, 田中良明, “移動端末属性に応じた最適 MAP 選択方式,” 信学技報, TM2004-97, 2005.