

東京大学大学院 工学系研究科 電気系工学専攻  
修士論文

車車間・路車間通信を用いたストリーミング配信における  
帯域利用効率改善手法およびパケット到達率改善手法

Improving Bandwidth Usage and Packet Delivery Ratio for Streaming over  
Inter-Vehicle and Road-to-Vehicle Communication

2010年2月9日

指導教員 若原 恭 教授

37-086518

松岡 健太郎

# 概要

近年、車両からカーナビや ETC などを利用して通信を行う機会が増加しており、今後さらに、安全運転支援や娯楽などさまざまな目的で車両からの通信需要の増加が考えられる。

車両からのインターネットアクセスを実現する手段として、携帯電話網やモバイル WiMAX (IEEE 802.16e) を利用する方法が考えられるが、地下やトンネル内など電波が届かない場所が存在するためインターネットサービスの継続的な利用は困難であるうえ、携帯電話網設備の減価償却を勘案すると無料に近い料金での利用は困難と思われる。

別のインターネットアクセスのための手段としては、路肩に設置された基地局を介して利用する RVC(路車間通信: Road-to-Vehicle Communication) が挙げられる。ただし、すべての道路に十分な基地局を設置するには多大なコストが必要なため、近い将来までにインフラとして整備されるとは考え難く、基地局の設置が不十分な時期では、車両からインターネットにアクセスできる領域が限定される。このような環境でも、VC(車車間通信: Inter-Vehicle Communication) を用いて、車両と基地局との間での通信を中継することで、インターネットアクセス可能な領域を拡大できると考えられる。既に運転の安全化や快適化を目的として RVC や IVC を活用することが考えられており、これらを応用したインターネットアクセスは追加の設備投資が少なく済むため有力な一候補と考えられる。RVC や IVC を利用したインターネットアクセスを考えた場合、マルチホップ無線通信となるため、一般的には通信帯域、パケット到達率、ジッタ、伝送遅延の問題点が懸念される。

IVC 利用して基地局にアクセスするため、多数の車両が基地局にアクセスすることが考えられる。有線通信よりも無線通信の方が利用できる帯域が小さいことが考えられるため、基地局が利用する無線帯域がボトルネックとなってしまうことが予想される。また各車両がそれぞれ独自に無線通信を行うと電波干渉による帯域利用効率低下が考えられる。

また、現状では基地局の設置数が乏しく車両から基地局までの距離が遠くなってしまい、パケット到達率が極端に小さくなることが十分に考えられる。この場合、伝送遅延やジッタの増大も招くことになるが、パケットが到達しない限り、通信サービスを受けることができず、パケットさえ到達すれば、伝送遅延はジッタは許容できる状況は十分に考えられ、優先順位としては、パケット到達率の問題に対して取り組むべきであると考えられる。

本論文では、より優先度の高い問題として考えられる帯域利用効率とパケット到達率について焦点を当てる。インターネットサービスとして、伝送帯域を多く利用し、パケット到達率が重要となると考えられる映像や音声などのリアルタイムストリーミングをトランスポート層

ロトコルとして UDP を利用することを想定する．帯域利用効率については，サービス利用のためにアドミッション制御を行う環境下で，全車両の同時利用帯域の向上を目的として，各通信車両で利用する無線チャンネルと割り当てとアクセス先基地局の選定を行う手法の提案を行う．パケット到達率については，送信機と受信機との間の距離に応じて電波が減衰すること想定し，アクセス先候補となる基地局の中からパケット到達率が最大となる基地局を選択する手法を提案する．さらに，それぞれの提案手法について，シミュレーション実験による評価を行い，その特性と有効性について検証を行う．

# 目次

第 1 章	背景と目的	1
1.1	車両からのインターネット利用	1
1.2	インターネット利用のための無線通信技術	2
1.3	IVC と RVC によるインターネットアクセスの課題	3
1.4	本論文における目的	6
第 2 章	提案手法	8
2.1	帯域利用効率改善手法	8
2.2	パケット到達率改善手法	15
第 3 章	評価	24
3.1	帯域利用効率改善手法の評価	24
3.2	パケット到達率改善手法の評価	40
第 4 章	結論と今後の課題	49
	参考文献	52
	発表文献	54
付録 A	車両走行モデル	55
付録 B	遮蔽モデル	59

# 目次

1.1	IVC と RVC を利用した車両からのインターネットアクセス . . . . .	3
1.2	IVC と RVC を利用したインターネット利用環境でのハンドオーバ . . . . .	4
2.1	基地局のハローパケットの中継と中継車両の選定 . . . . .	9
2.2	優先基地局による中継車両の選定 . . . . .	10
2.3	単純割り当て . . . . .	11
2.4	隣接エリアとの電波干渉問題 . . . . .	12
2.5	中継車両減少時のチャンネル再割り当て . . . . .	13
2.6	中継車両増加時のチャンネル再割り当て . . . . .	14
2.7	中継車両の入れ替わり時のチャンネル再割り当て . . . . .	14
2.8	ハローパケットの中継 . . . . .	18
2.9	データパケットの中継 . . . . .	19
2.10	I2I ハンドオーバ . . . . .	21
2.11	V2I ハンドオーバの例 . . . . .	22
2.12	V2I ハンドオーバ . . . . .	23
3.1	通信状態の状態遷移図 . . . . .	25
3.2	パラメータセット 1 の各位置におけるサービス利用帯域 . . . . .	29
3.3	パラメータセット 1 の 2,500 ~ 3,000m 区間のサービス利用帯域 . . . . .	29
3.4	パラメータセット 1 の 2,500 ~ 3,000m 区間における通信負荷増大によるセッション失敗率 . . . . .	30
3.5	パラメータセット 1 の 2,500 ~ 3,000m 区間における同時サービス利用帯域 . . . . .	31
3.6	パラメータセット 2 の各位置におけるサービス利用帯域 . . . . .	31
3.7	パラメータセット 2 の 2,500 ~ 3,000m 区間のサービス利用帯域 . . . . .	32
3.8	パラメータセット 2 の 2,500 ~ 3,000m 区間における通信負荷増大によるセッション失敗率 . . . . .	32
3.9	パラメータセット 2 の 2,500 ~ 3,000m 区間における同時サービス利用帯域 . . . . .	33
3.10	パラメータセット 3 の各位置におけるサービス利用帯域 . . . . .	33
3.11	パラメータセット 3 の全体区間における通信負荷増大によるセッション失敗率 . . . . .	34
3.12	パラメータセット 3 の 1,500 ~ 2,000m 区間における同時サービス利用帯域 . . . . .	35

3.13	パラメータセット 3 の 2,500 ~ 3,000m 区間における同時サービス利用帯域 . . .	36
3.14	パラメータセット 3 の 3,000 ~ 3,500m 区間における同時サービス利用帯域 . . .	36
3.15	パラメータセット 4 の各位置におけるサービス利用帯域 . . . . .	37
3.16	パラメータセット 4 の全体区間における通信負荷増大によるセッション失敗率	38
3.17	パラメータセット 4 の 1,500 ~ 2,000m 区間における同時サービス利用帯域 . . .	38
3.18	パラメータセット 4 の 2,500 ~ 3,000m 区間における同時サービス利用帯域 . . .	39
3.19	パラメータセット 4 の 3,000 ~ 3,500m 区間における同時サービス利用帯域 . . .	40
3.20	パケット到達率と通信距離の関係 . . . . .	42
3.21	走行位置と各基地局までのパケット到達率の関係 (渋滞なし) . . . . .	44
3.22	パケット到達率改善手法と基本手法のパケット到達率の比較 (渋滞なし) . . . . .	44
3.23	走行位置と各基地局までのパケット到達率の関係 (0m から 500m 区間を渋滞 エリア) . . . . .	45
3.24	パケット到達率改善手法と基本手法のパケット到達率の比較 (0m から 500m 区間を渋滞エリア) . . . . .	45
3.25	走行位置と基地局までのパケット到達率の関係 (500m から 1,000m 区間を渋 滞エリア) . . . . .	46
3.26	パケット到達率改善手法と基本手法のパケット到達率の比較 (500m から 1,000m 区間を渋滞エリア) . . . . .	47
3.27	基地局設置間隔と期待されるパケット到達率の関係 . . . . .	47
A.1	車両走行モデルにおける走行位置と車両速度の関係 . . . . .	58
A.2	車両走行モデルにおける走行位置と車両密度の関係 . . . . .	58

# 表目次

2.1	C1, C2, C3 の経路表 (例 1.) . . . . .	18
2.2	C1, C2, C3 の経路表 (図 2.9) . . . . .	19
2.3	C1, C2, C3 の中継表 (図 2.9) . . . . .	19
3.1	車両走行モデルに関するパラメータ . . . . .	26
3.2	通信環境に関するパラメータ . . . . .	27
3.3	各パラメータセットの値 . . . . .	28
3.4	遮蔽モデルに関するパラメータ . . . . .	41
3.5	車両走行モデルに関するパラメータ . . . . .	43
A.1	自由走行モードの加速度テーブル . . . . .	56
A.2	安全に車線変更が行える条件 . . . . .	57

# 第1章

## 背景と目的

本章では、車両から利用する通信サービスと、この実現のために考えられる無線通信技術の問題について触れる。そして、これらの問題を解決するために必要と思われる条件を挙げ、本論文の目的を述べる。

### 1.1 車両からのインターネット利用

インターネットの利用需要は年々高まっており、現在では企業や家庭内から利用するだけでなく、携帯電話などのモバイル機器からのインターネットアクセスも当たり前のように行われている。今後考えられるインターネット利用形態として、走行している車両からのインターネットアクセスが考えられる。

#### 1.1.1 現在の車載通信サービス

国土交通省道路局による高度道路交通システム (ITS: Intelligent Transport Systems)<sup>\*1</sup>によって以下の車載サービスが実用化されている。

- 道路交通情報提供サービス (VICS)<sup>\*2</sup>  
路肩に設置されたビーコンにより車両の速度情報を収集し、中央サーバに集約する。集約した車両の速度情報から渋滞が起こっている道路を解析する。この情報を FM 多重放送などを利用して各車両に配信することにより、カーナビゲーションサービスなどに役立てる。VICS により、車のドライバーは渋滞エリアを避けることができ、全体としても渋滞緩和に役立っている。
- 自動料金支払いシステム (ETC)<sup>\*3</sup>  
有料道路での料金の支払を自動化するシステムである。料金所に設置された ETC レーンと ETC 車載器が DSRC(Dedicated Short Range Communication) による無線通信

---

\*1 国土交通省道路局 ITS : <http://www.mlit.go.jp/road/ITS/j-html/>

\*2 道路交通情報センター : <http://www.vics.or.jp/>

\*3 ETC 総合情報ポータルサイト : <http://www.go-etc.jp/>

によって、これまで人の手で行われていた料金の収受を自動化し、料金所の混雑の緩和に成功している。

### 1.1.2 今後期待される車載通信サービス

安価な無線通信モジュールやユーザインタフェース機器を用いてインターネットを媒介としたサービス利用形態にすることにより、既存の車載サービスだけでなく、インターネットブラウジングや音楽や動画のストリーミングサービスなど多種多様な通信サービスを安価に利用することが可能となる。現在、広く利用されているカーナビゲーションシステムもインターネット通信を利用することで、高価な専用機器を利用することなく利用できるようになると考えられる。従って、今後の車載通信サービスはインターネットを媒介とした形態に移行していくと予想できる。

## 1.2 インターネット利用のための無線通信技術

インターネット利用のための無線通信技術として、携帯電話網などの広域無線通信技術や IVC(車車間通信: Inter-Vehicular Communication) と RVC(路車間通信: Road-to-Vehicle Communication) を利用した方式が考えられる。本節では、それぞれの技術について触れる。

### 1.2.1 広域無線通信技術

車両からのインターネットアクセスを実現する手段として、携帯電話網やモバイル WiMAX (IEEE 802.16e)[1] などの広域無線通信技術の利用が考えられる。これらの通信インフラは都市部の地上エリアは広くカバーされていると言える。しかし、地下やトンネル内など電波が届かない場所が存在するためインターネットサービスの継続的な利用は困難であり、基地局設置費用の高さからも地下やトンネルを含めた全てのエリアをカバーするの非現実的であると言える。さらに、基地局設置費用に関連して、地上での基地局に十分にアクセスできる環境下でも基地局の減価償却費を勘案すると無料に近い料金での利用は困難と思われる。

### 1.2.2 IVC と RVC

広域無線通信技術以外の方法として、IEEE 802.11[2] のような伝送距離は短い、安価な無線通信モジュールとなる規格を利用する方法がある。このような無線規格を用いて、車両からインターネットにアクセスする場合は、路肩に設置された基地局にアクセスして利用する通信形態、つまり RVC(路車間通信: Road-to-Vehicle Communication) による方法となる。

しかし、全ての道路に十分な基地局が設置されるのは設置数が膨大となるため、非現実的であり、可能であったとしても遠い未来の話となってしまう。従って、このような環境や、これ以外でも地下やトンネル内部などの基地局からの電波が届きにくい環境でもインターネットアクセスを可能にするためには、車両から基地局までの通信を IVC(車車間通信: Inter-Vehicular

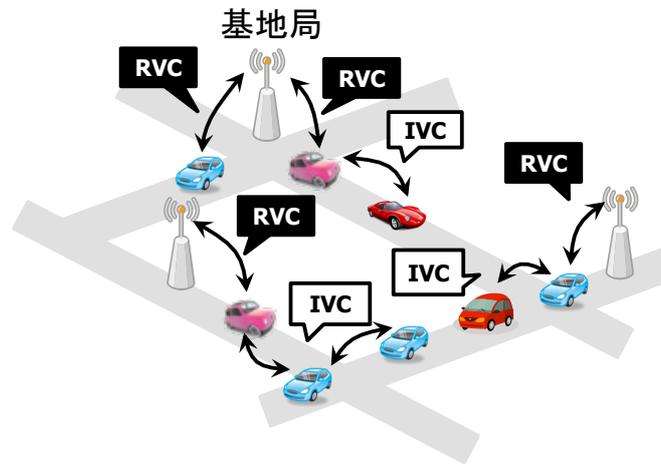


図 1.1: IVC と RVC を利用した車両からのインターネットアクセス

Communication) によって行う方法が考えられる。既に運転の安全化や快適化を目的として RVC や IVC を活用することが考えられており [3, 4]，これらを応用したインターネットアクセスは追加の設備投資が少なく済むため有力な候補と考えられる。

本論文では，IVC と RVC を利用したインターネットアクセス環境を想定し，図 1.1 のように各車両は道路に沿って自由に走行し，基地局へ直接アクセスすることが困難であれば他車を中継車両として利用し基地局にアクセスする。

### 1.3 IVC と RVC によるインターネットアクセスの課題

IVC と RVC によるインターネットアクセス環境を考えた場合，移動と共にインターネット上の通信相手までの経路が変更になっても通信を維持する移動性管理，無線通信帯域，サービス品質の課題が挙げられる。

#### 1.3.1 移動性管理

図 1.1 のような通信環境で，走行に伴ってアクセスすべき基地局が変わった場合には，適宜アクセス先の基地局を変更するため，高品質なサービスを利用するためには通信中であってもセッションを切断せずにアクセス先の基地局を変更するための移動性管理のための技術が必要となる。

変更先の基地局が以前の基地局と同じネットワーク内のものであれば，基地局との利用のための認証などの手続き，つまり L2 ハンドオーバーを行う。変更先の基地局が別ネットワークのものであれば IP アドレスの変更などの手続き，つまり L3 ハンドオーバーを行う。

IVC と RVC を利用したインターネットアクセスを考えた場合，Mobile IPv6 で想定しているような，有線インフラ内の通信経路だけでなく，IVC 内の通信経路の変更（ハンドオー

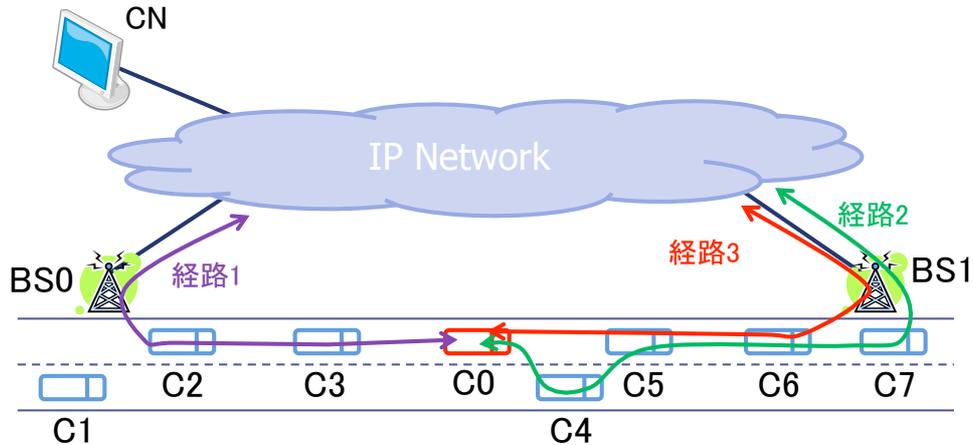


図 1.2: IVC と RVC を利用したインターネット利用環境でのハンドオーバー

バ) も考慮する必要がある。本論文が想定する環境下でのハンドオーバーを，I2I ハンドオーバー (Infrastructure to Infrastructure)，V2I ハンドオーバー (Vehicle to Infrastructure)，V2V ハンドオーバー (Vehicle to Vehicle) の 3 種類に大別する。

- I2I ハンドオーバー

I2I ハンドオーバーとは，有線インフラ内の通信経路の変更のための処理である。利用している基地局が変更する場合，車両との通信相手 CN (Correspondent Node) から基地局までの経路が変わるためこの処理が必要となる。

- V2I ハンドオーバー

V2I ハンドオーバーとは，IVC 経路を見たときに基地局に直接アクセスしている車両が変わったときに，終端車両と基地局との間で行われる処理である。IVC を利用して基地局にアクセスしている場合，自車とは別の車両が基地局に対してパケットのやり取りを行うことになる (この車両を終端車両と呼ぶ)。車両の走行と共に，終端車両は次々に変わっていくため，この処理が必要となる。

- V2V ハンドオーバー

V2V ハンドオーバーとは，IVC 内の通信経路の変更のための処理である。車両の追い越しや，車両間隔の変動によって，自車から基地局までの最適経路が動的に変わってしまうことが考えられるため，この処理が必要となる。

例として，図 1.2 のように車両 C0 がインターネット上の通信相手 CN と通信を行っている状況を考える。もともと，C0 は経路 1 で通信を行っており，その後，通信経路を経路 2，経路 3 と切り替えを行って板とする。経路 1 から経路 2 への切り替えを行った場合は，アクセス先の基地局が BS0 から BS1 に変わるため，CN から基地局までの経路が変化し，このとき I2I ハンドオーバーがの処理が必要となる。さらに，C0 から基地局までの経路も変化するため，V2I ハンドオーバーと V2V ハンドオーバーも必要となる。その後，経路 2 から経路 3 への切り替えを行っ

た場合は、CN から基地局までの経路は変更されないため、I2I ハンドオーバーは不要である。しかし、終端車両が C6 から C7 に変化しているため、V2I ハンドオーバーは必要となる。また、 $C0 \leftrightarrow C4 \leftrightarrow C5$  の経路が  $C0 \leftrightarrow C5$  に変更されているため、V2V ハンドオーバーの処理も必要となる。

これらの移動性管理のための技術としては、既に RFC となっている Mobile IPv6(RFC 3775)[5]、Hierarchical Mobile IPv6(HMIPv6)(RFC 4140)[6]、Mobile IPv6 Fast Handovers(FMIPv6)(RFC 5268)[7] などの他、高速化や高いサービス品質を保ちながらハンドオーバーを行うための研究が数多くなされている [8, 9, 10]。これらの技術を IVC 利用環境に応用することにより十分に高品質なことができると予想されるため、移動管理については本論文では大きな問題として扱わないものとする。

### 1.3.2 無線通信帯域

IVC を利用して基地局にアクセスする場合、基地局の設置数が乏しいような状況では、基地局に多数の車両がアクセスすることも考えられる。有線ネットワークと比較して無線ネットワークの帯域は限られているため、インターネットを利用する際に基地局の無線帯域がボトルネックとなることが考えられ、特に各車両が UDP ストリーミングサービスのような大きな通信トラフィックとなるサービスを利用している場合により重要な問題となる。アクセス先となる基地局の選定を行う単純な方法として、常に最寄りの基地局を利用するという方式が考えられるが、突発的な車両密度の偏りにより特定の基地局にアクセスが集中してしまい、別の基地局の帯域が空いているにもかかわらず十分なサービスを利用できなくなることが考えられるため、帯域利用効率を向上させるため適切なアクセス先の選定手法が必要となる。

さらに IVC 環境では、各車両が独立に無線通信を行うことになるため、電波干渉が起きる可能性がある。電波干渉がおきる状況でも CSMA/CA によってパケットの衝突は回避できるが、1 台当たりが利用できる帯域が減少してしまう。十分な帯域を確保しながら通信サービスを利用するためには、電波干渉を回避することが必要となる。また、基地局までの IVC 経路を適切に選択しないと無線チャネルをどのように割り当てても干渉が起きてしまう。

これらの状況は、珍しいことではなく、また十分な対応策や研究もなされていないため、本論文が扱う大きな問題とする。

### 1.3.3 サービス品質

現状の無線技術でマルチホップ通信を行うと、パケット到達率、伝送遅延、ジッタの品質劣化により十分なサービス品質が保てない可能性がある。基地局が十分に設置されていないような現状を勘案すると、パケット到達率が非常に低くなってしまいう状況が起こりうることが考えられる。この場合、伝送遅延やジッタの増大も招くことになるが、パケットが到達しない限り、通信サービスを受けることができず、パケットさえ到達すれば、伝送遅延はジッタは許容できる状況は十分に考えられ、優先順位としては、パケット到達率の問題に対して取り組むべきで

あると考える。

また、同じ通信距離であっても、障害物の存在や電波の反射などの様々な状況の違いによって受信側の電波強度は常に異なるフェージングが起きるため、通信距離に応じてパケット到達率は連続的に変化すると考えられる。IVC 経路探索の方法として最小ホップ数による方法が考えられるが、この方式ではより遠くの車両を中継ノードとして選択するためパケット到達率が最大となる経路を探索できるとは限らない。車両密度の偏りにより、最寄りの基地局よりも遠くの基地局をアクセス先として利用した方がパケット到達率が向上することも考えられるため、車両の走行環境の変化の応じて動的にアクセス先基地局を選択することも重要となる。

これらの状況に関しても、十分な十分な対応策や研究もなされていないため、本論文ではサービス品質として、特にパケット到達率の問題にも焦点を当て取り組むこととする。

## 1.4 本論文における目的

本章では、車両からインターネットを利用する状況が今後増加することを想定し、IVC(車車間通信: Inter-Vehicular Communication)、RVC(路車間通信: Road-to-Vehicle Communication)によるインターネットアクセスの方式を示した。その中で、IVC と RVC によるインターネットアクセス方式での無線通信帯域とパケット到達率の問題点について言及した。

本論文では、両者の問題を解決するために、以下のことを満たした帯域利用効率改善手法とパケット到達率改善手法を実現することが本論文における目的である。

- 帯域利用効率改善手法

- ボトルネック利用帯域の最小化

IVC を利用することにより、基地局の設置数が乏しい環境でもインターネットアクセスが可能となるが、特定の基地局の無線通信負荷が増大してしまい十分に通信サービスが利用できないことが考えられる。これを回避するため、無線通信負荷の分散を図り、全体の帯域利用効率の改善を目指す。

- 電波干渉の回避

各車両が独立に通信を行うため、電波の干渉が起き可用帯域が減少してしまう。干渉が起きない複数の無線チャネルを利用できる状況では、電波干渉が起こりうる車両同士で別のチャネルを利用することで回避が可能となる。IVC の中継車両の選択と各車両が利用する無線チャネルを割り当てを適切に行うことにより、帯域利用効率を改善する。

- パケット到達率改善手法

- IVC 経路探索

パケット到達率が通信距離に応じて連続的に変化する状況では、最小ホップ数による方式だとパケット到達率が最小となる IVC 経路とならない可能性が高いと予想できる。このため、パケット到達率を最大化する IVC 経路探索手法が必要となる。

- アクセス先基地局の選択

パケット到達率が通信距離に応じて連続的に変化する状況では、車両密度が高くなると基地局から距離が離れていても高いパケット到達率を維持できること考えられ、単純に基地局までの距離によってパケット到達率が最大となるアクセス先基地局を選択することができない。そこで、車両密度の動的な変化に応じて常にパケット到達率を最大となるアクセス先基地局を選択する。

## 第2章

# 提案手法

本章では，1章で述べた目的を達成する手法の提案を行う．

### 2.1 帯域利用効率改善手法

基地局や車両が利用する無線電波の干渉が起きてしまったり特定の基地局にアクセスが集中したりすると，帯域が効率的に利用されない場合がある．本節では，帯域利用効率改善手法として，主に，電波干渉を起こらないような無線チャネルの割り当て手法とインターネット利用車両のアクセス先基地局選択手法について示す．

#### 2.1.1 前提条件

帯域利用効率改善手法では以下の条件を前提とする．

- 各車両は複数個の基地局にアクセスできる
- 各車両，各基地局は無指向性アンテナを備えている
- 各車両，各基地局の無線アンテナの電波到達範囲は同一である
- 電波到達範囲内では必ずパケットが到達するものとする
- 電波到達範囲と電波干渉範囲は同一とする
- 同時に利用できる無線チャネルが複数存在し，これらの無線チャネルのみ利用する
- 同一チャネルの電波同士が届く位置では必ず干渉が起きるものとする
- 全ての無線リンクのペアラ速度は同一かつ一定とする
- アドミッション制御を行い，十分に帯域を確保できないような場合は通信をできないように制御する

#### 2.1.2 中継車両の選定

IVC(車車間通信: Inter-Vehicle Communication) のための中継車両の選定を行う．帯域利用効率の向上のためには，無駄な無線チャネルの干渉を回避する必要がある．各車両毎に基地

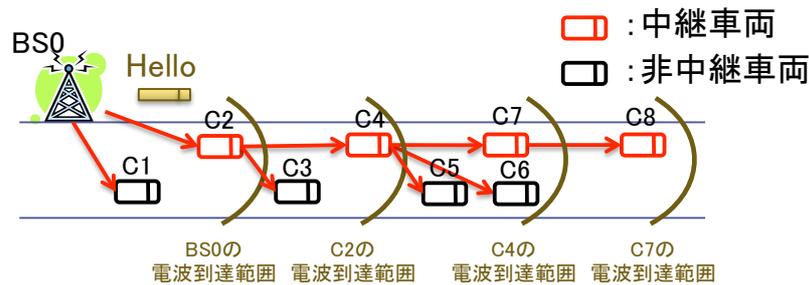


図 2.1: 基地局のハローパケットの中継と中継車両の選定

局までの IVC 経路を構築してしまうと、中継車両が増えすぎてしまうため、どのように無線チャンネルを割り当てても干渉が回避できなくなる恐れがある。また、中継車両間の距離が短くなりすぎてしまっても同様の問題が発生する。本項では、これらの問題を解決する中継車両の選定方式を示す。

まず、各ノードの役割を、基地局、中継車両、非中継車両の 3 つに分類する。基地局と中継車両はパケットの中継を行う。各基地局は一定時間間隔でハローパケットを送信する。ハローパケットに含まれる情報は以下の通りである。

- 基地局 ID
- 基地局位置情報
- 利用チャンネルと利用帯域
- 基地局までのホップ数

このハローパケットを受信した車両は、基地局からの距離に応じた時間だけ待った後に中継する [11] が、待機中に他の車両が中継したことを認識した場合は中継を行わない。即ち、中継可能な車両のうち最も遠くの車両のみが中継を行う。以降、ハローパケットの中継を行った車両を、ハローパケットを生成した基地局への IVC 経路の中継車両として利用する。この経路制御によって、基本的には、同一の中継車から構成される基地局までの最小ホップ数経路を全車両が利用することになり、無駄な無線チャンネル干渉を回避できると期待される。

図 2.1 の例では、基地局 BS0 が送信したハローパケットを、電波到達範囲に位置している車両 C1 と C2 が受信する。ハローパケット受信時に、C1 と C2 は BS0 の位置と自車の位置から待ち時間を決定する。このとき、BS0 からより遠くに位置している C2 の方が待ち時間が短くなる。C2 は待ち時間の後、ハローパケットの中継を行う。この時、C2 は中継車両となる。C2 が中継したハローパケットは、C1、C3、C4 が受信する。待ち時間中であった C1 は C2 が中継を行ったことを知り、中継を行わないものとする。このとき、C1 は非中継車両となる。C3 と C4 に関しては、C2 からより遠くに存在する C4 が中継することになる。これを繰り返すことにより、中継車両と非中継車両を決定する。

ある基地局の囲まれた区間 (エリアと呼ぶ) を考えた場合、一つのエリアで複数の基地局から

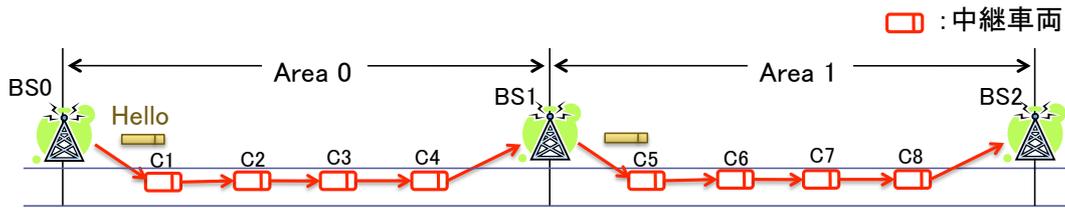


図 2.2: 優先基地局による中継車両の選定

のハローパケットを受信することになる。本論文では、IVC 経路のパターンが増加することによるチャンネル割り当て制御の複雑さを防ぐために、中継車両の台数を最小限にする方法を取る。まず、一つのエリアに対して基地局の優先度をあらかじめ決めておき、最も優先度の高い基地局からのハローパケットで中継車の選定を行うものとする。

図 2.2 のように、3 基の基地局 BS0, BS1, BS2 が存在し、Area 0 の優先基地局が BS0, Area 1 の優先基地局が BS1 であったとする。Area 0 に位置している車両は、BS0 と BS1 からのハローパケットを受信することになる。通常は、BS0 のハローパケットによって中継車両の選定を行う。BS0 からのハローパケットを一定時間内に受信できなかった場合に BS1 からのハローパケットによって中継車両の選定を行う。各車両は、アクセス先候補となる基地局を常に把握する必要があるため、各中継車両は優先度の低い基地局のハローパケットも常に中継を行うものとする。

### 2.1.3 チャンネル割り当て

帯域利用効率向上のために、各基地局・中継車両が利用するチャンネルが干渉しないことが必要である。本項では、隣接エリアまで考慮した中継車両・基地局間での干渉回避を目的とした手法を示す。

本論文では、リアルタイム UDP ストリーミングサービスを対象としているため、車両からインターネットへのアップロードパケットよりもダウンロードパケットに利用する帯域の方が十分に大きくなると考えられる。従って、チャンネル割り当てにはダウンロードに利用する帯域のみを考慮する。非中継車はインターネット利用開始時にサービスのリクエストパケットの送信を行うが、データパケットの送信（中継）は行わない。本項では、基地局及び中継車両が利用するダウンロードリンクでのチャンネル割り当て手法の提案を行う。アップロードリンクに利用するチャンネルは、ランダムに決定または常に特定のチャンネルを利用するなどの方法で行う。

まず、中継車両間で干渉回避のためのチャンネル割り当て手法について述べる。最小ホップ数により中継車両が選択されている状態で、干渉が起きる可能性があるのは次の 2 つのパターンである。

- 隣接中継車両間で同一のチャンネルを同時に利用した場合
- 2 ホップ先の中継車両間で同一のチャンネルを同時に利用した場合

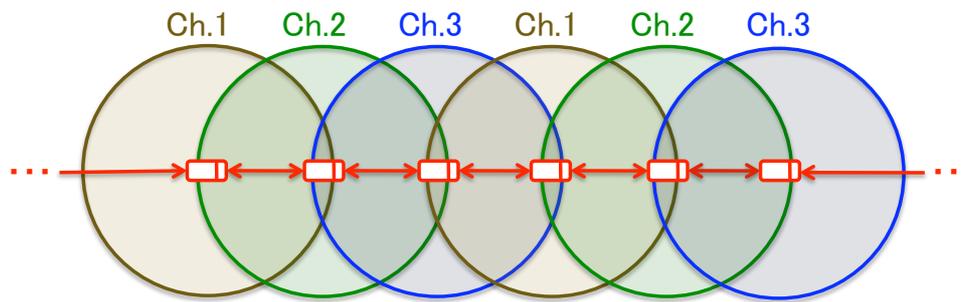


図 2.3: 単純割り当て

2 ホップ先の中継車両間で同一のチャンネルを同時に利用した場合の電波干渉はいわゆる隠れ端末問題である。例えば、3 台中継車両 C1, C2, C3 がこの順番で並んでいたとする。C1, C2, C3 は最小ホップ数によって選ばれた車両であり、C1 と C3 の電波は C2 に届く状況である。この状況で C1 と C3 が同一のチャンネルを同時に利用した場合、C2 付近の空間で干渉が起きてしまう。

従って、中継車両間で電波干渉を回避するためには、2 ホップ間の中継車両と別のチャンネルを利用する必要がある。このためには、中継車両の通信用に最低 3 チャンネル必要となる。3 チャンネル利用した場合の中継車両のチャンネル割り当ての例を図 2.3 に示す。図 2.3 の円は各車両の電波到達範囲を表しており、各中継車両が同時に通信を行ったときの様子を表している。中継車両に割り当てるチャンネル数が 3 つの場合は、図 2.3 のように中継車両の列の順番に一定周期でチャンネルを割り当てる必要がある。このように一定周期で無線チャンネルを割り当てる方法を単純割り当てと呼ぶこととする。

帯域利用効率改善手法では、中継車両間の電波干渉による帯域利用効率の低下を防ぐために、中継車両が利用するチャンネルを単純割り当てによって決定させる。基地局が利用するチャンネルもこの単純割り当てによって決める場合、隣接エリアとの電波干渉の問題が起こる。図 2.4 のように、Area 0 の優先基地局が BS0、Area 1 の優先基地局が BS1 である状況を考える。ここで、Area 0 のでは BS0 から順に単純割り当てによって各基地局と中継車両が利用するチャンネルを決定しており、ある時刻において Area 0 の終端中継車両である Cn に割り当てたチャンネルが 1 であったとする。同様に BS1 が利用するチャンネルが 1 であった場合ここで電波干渉が起こってしまう。これを防ぐためには、全ての基地局を同期を取って、中継車両と基地局で利用するチャンネルを決定するという方法も考えられるが、現実的に無限とも言える空間に位置する全ての基地局と同期を取るのとは不可能と言える。そこで、帯域利用効率改善手法では、中継車両が利用するチャンネルとは干渉しない独立なチャンネルを基地局が利用する専用チャンネルとし、それ以外のチャンネルを中継車両が利用するチャンネルとする。

次に、チャンネル再割り当て方式について示す。チャンネル再割り当てとは、現在利用しているチャンネルでは電波干渉を起こす場合に、別のチャンネルを利用するように切り替えを行うことである。基地局は、独立したチャンネルを利用しているため、中継車両と電波干渉を起こす心配が

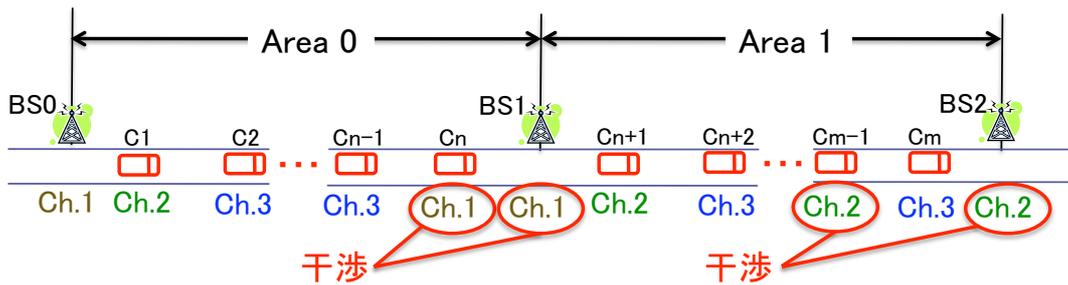


図 2.4: 隣接エリアとの電波干渉問題

ないが、中継車両は、1 車両同士の位置関係が変化すると電波干渉を起こす可能性がある。各中継車両は、自車が受信する電波のチャンネルを常に把握し、自車と同じチャンネルを他の中継車両が利用している場合にチャンネルの再割り当てを行うものとする。

帯域利用効率改善手法では、電波干渉が起こる可能性があるのは V2I/V2V ハンドオーバー時となる。ただし、基地局に中継車両とは独立した専用チャンネルを割り当てている場合は、V2I ハンドオーバー時に電波干渉は起こらない。V2I ハンドオーバー時に新しい中継車両が現れた場合は、2 ホップ先の中継車両までで利用されていないチャンネルを新中継車両が利用すれば、電波干渉を起こさないチャンネルを利用することができる。

従って、電波干渉が発生しうるのは V2V ハンドオーバー時となるが、V2V ハンドオーバーのチャンネル再割り当て方式は、次の 3 つに分けることができる。

1. 中継車両減少時
2. 中継車両増加時
3. 中継車両の入れ替わり時

中継車両減少時とは、中継車両間の間隔が短くなり、2 ホップ先の中継車両に電波が届くようになったタイミングである。この場合は、間に位置している中継車両を省略することができるため、中継車両が減少する。

中継車両増加時とは、中継車両間の間隔が長くなり、その間に位置していた非中継車両を新たな中継車両として利用するタイミングである。この場合は、新たに中継車両が出現するため、中継車両が増加する。

中継車両の入れ替わり時とは、中継車両減少時と状況としては似ているが、中継車両減少時の処理を行う前に車両の追い越しが発生したタイミングである。ハローパケットの送信間隔が長くなるとこの状況が起こりうる。

1. 中継車両減少時

単純割り当てで利用するチャンネル数が 3 の場合、V2V ハンドオーバーによって中継車両が減少すると、必ず電波干渉が起こる。図 2.5 を用いて説明する。中継車両 C1 から C7 まで単純割り当てによって各車両が図 2.5 のようにチャンネルを利用していたとする。ある

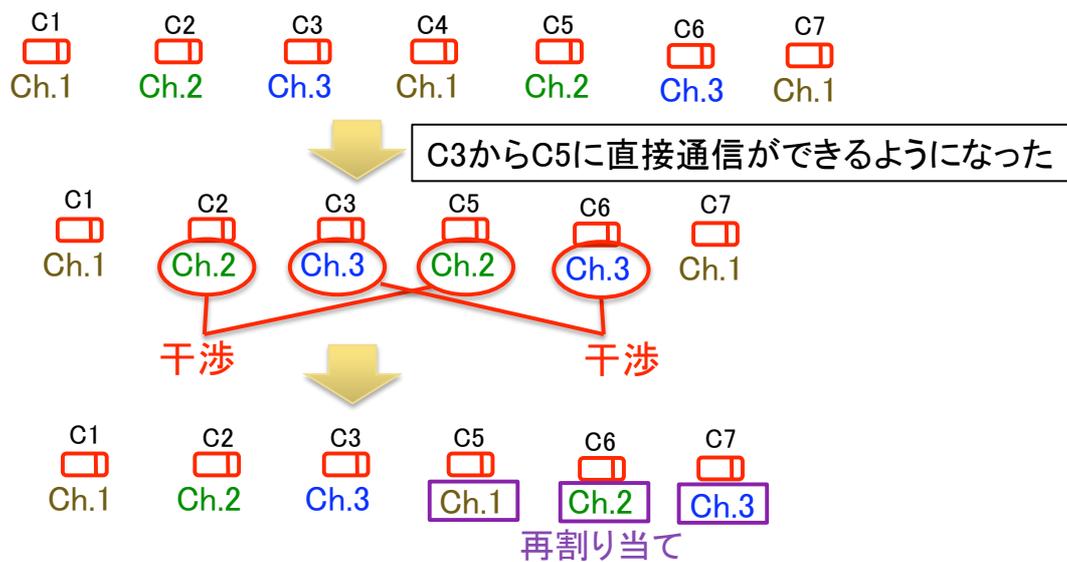


図 2.5: 中継車両減少時のチャンネル再割り当て

時刻に、C3 から C5 の車両間隔が縮まり、C3 から C5 に直接通信ができるようになったとする。この場合、C4 を非中継車両とするが、このときに電波の干渉が発生する。次のタイミングのハローパケットにより、電波干渉を検知し、チャンネルの再割り当てを行う。ここで、優先基地局が C1 側に位置しており、このハローパケットが C1 から順に中継されていたとすると、C5 と C6 が電波干渉を検知する。C5 と C6 は隣接中継車両の利用チャンネルから自車で利用するチャンネルを決定できる。C5 と C6 のチャンネルの変更により、さらに後続の中継車両のチャンネル再割り当てが必要となるので、終端中継車両までこれを繰り返す。

## 2. 中継車両増加時

単純割り当てで利用するチャンネル数が 3 の場合、V2V ハンドオーバーによって中継車両が増加すると、必ず電波干渉が起こる。図 2.6 を用いて説明する。ある時刻に、C3 から C4 の車両間隔が拡大し、C3 から C4 に直接通信ができなくなったとする。この場合、C3 と C4 の間に位置していた C8 を新中継車両とするが、このとき C8 がどのチャンネルを利用したとしても電波の干渉が発生する。C8 は、優先基地局の方向に位置する最寄りの 2 つの中継車両 C2, C3 で利用していないチャンネルを利用する。その後の手順は、中継車両減少時と同様である。次のタイミングのハローパケットにより、電波干渉を検知し、終端中継車両まで繰り返しながらチャンネル再割り当てを行う。

## 3. 中継車両の入れ替わり時

中継車両減少時のように、車両間隔が縮まるが、中継車両の減少のための処理が行われる前に車両の入れ替わりが起こった場合、電波干渉が起こってしまう。図 2.7 を用いて

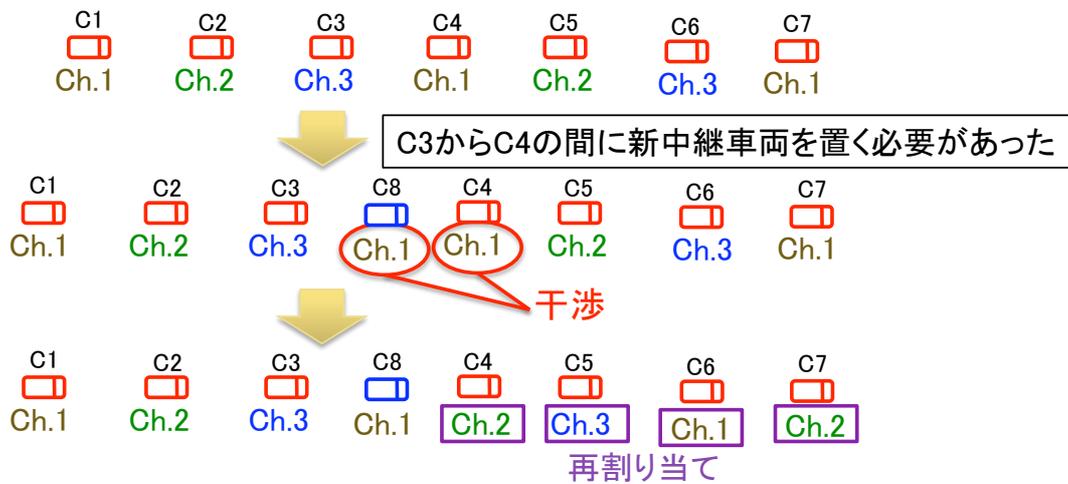


図 2.6: 中継車両増加時のチャンネル再割り当て

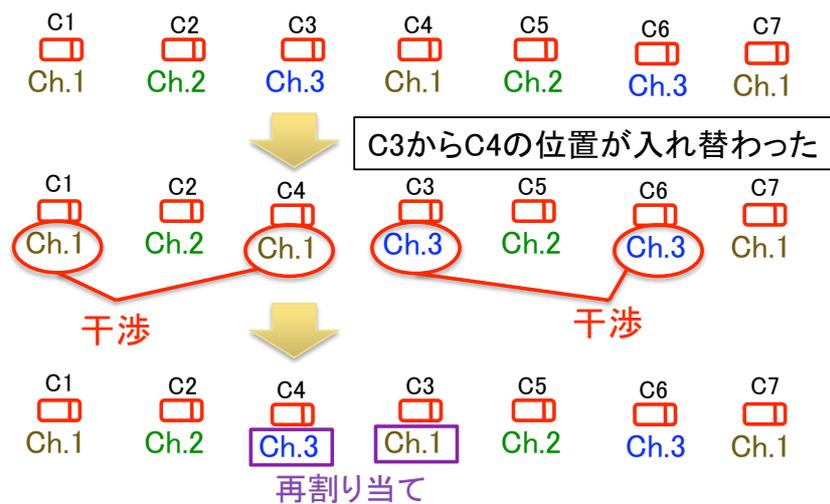


図 2.7: 中継車両の入れ替わり時のチャンネル再割り当て

説明する．中継車両 C3 と C4 が入れ替わると，図 2.7 のように C3，C4 で利用しているそれぞれのチャンネルによって電波干渉が起こる．この場合も次のタイミングのハローパケットによってチャンネル再割り当てを行うが，この場合は C3 と C4 のみのチャンネル再割り当てで良い．

### 2.1.4 アクセス先基地局の選択

特定の基地局にトラフィックが集中してしまうと，十分に帯域を利用できない状況が考えられる．特に，車両密度の偏りによる要因でトラフィックの集中が起きてしまうと，他の基地局

の帯域が空いているにもかかわらず帯域を利用できなくなってしまうということが考えられる。そこで、車両密度の偏りが起こった場合に、特定の基地局に通信トラフィックを集中させない負荷分散のための方式について示す。

アクセス先基地局の選定のための判断指標としては、自車両から基地局までの空間のボトルネックとなる空き帯域と基地局までの距離 (ホップ数) の2つが考えられる。負荷分散を図る場合には、ボトルネックのみを考慮すれば良いということも考えられるが、基地局までのホップ数を考慮しないと、各車両互いに遠くの基地局にアクセスしてしまい、ホップ数増大による品質劣化が起きる可能性がある。そこで、対応する基地局  $BS_i$  を利用する場合のボトルネックリンクの空き帯域  $AB_i$  とホップ数  $Hop_i$  から、式 (2.1) のように  $W_1, W_2$  は重みづけ評価によってアクセス先基地局を決定する。式 (2.1) によって求められる  $EV_i$  を基地局  $BS_i$  の評価値とし、インターネット利用車両はこの評価値が最も大きくなる基地局をアクセス先として利用する。

$$EV_i = AB_i \times W_1 - Hop_i \times W_2 \quad (2.1)$$

ボトルネックの空き帯域と基地局までのホップ数の情報は基地局からのハローパケットに含めて中継を行うものとする。各中継車両は、自車両及び近傍の車両で利用している無線チャネルで利用されている無線帯域を測定し、ハローパケット中継時に追加挿入する。中継を行う際に、基地局までのホップ数の情報をインクリメントする。式 (2.1) での評価はハローパケットを受信する毎に行い、必要であればアクセス先の基地局とそこまでの IVC 経路を変更を行う。

## 2.2 パケット到達率改善手法

パケット到達率を最大とする基地局の選定については、各基地局からの受信電波の強度に基づいて決定する方式が考えられる。しかし、想定する環境では、周囲にある基地局や車両からの電波強度のみでは、安定して基地局まで通信できる経路を決定することはできない。具体的には、IVC(車車間通信: Inter-Vehicle Communication) により基地局へアクセスする場合、通信経路上の車両密度が高ければ、基地局までの高いパケット到達率が期待できるが、車両密度が低い場合には、パケット到達率が低くなると考えられる。そこで、提案手法を用いることにより、各車両が走行中に複数の基地局にアクセス可能となった場合にパケット到達率が最大となる基地局を選択できる。

パケット到達率が最大となる基地局を各車両が選択するには、車両から各基地局へのパケット到達率を推定する必要がある。提案手法では、各車両間で、基地局や車両の位置情報を一定時間間隔で交換し、これらの情報を用いて車両から基地局までのパケット到達率を推定する。推定したパケット到達率に基づいて、各車両は基地局を選定する。

### 2.2.1 前提条件

パケット到達率改善手法では以下の条件を前提とする。

- 各車両は複数個の基地局にアクセスできる
- 各車両，各基地局は無指向性アンテナを備えている
- フェージングが起こるものとし，通信距離に応じてパケット到達率が連続的に変化するものとする
- 通信距離からパケット到達率を推定できるものとする
- 通信帯域は十分に確保されており，アドミッション制御は行わないものとする
- MAC 層での再送制御は行わないものとする

## 2.2.2 IVC ルーティング

各車両は基地局までの通信で IVC を利用することが考えられる．

IVC ルーティングのために通信車両が最低限知る必要のある情報は以下の通りとなる．

- アクセス先候補となる基地局 ID
- 基地局までの経路情報

次節より，ルーティングで利用する情報の交換，車両と BS との最適経路の探索，データパケットの中継制御の 3 つの方式について示す．

### 2.2.2.1 ハローパケットの中継

アクセス可能な基地局情報の取得や基地局までの経路決定のための情報の交換を行う．各基地局は，一定時間周期でハローパケットをブロードキャストし，このパケットを受信した車両は，別の車両に中継する．ハローパケット中継時に各車両は，基地局までの最適経路探索とパケット到達率の推定を行う．

中継を行う範囲は，隣接する基地局同士が設置されている領域とし，隣接する基地局にハローパケットが到達したら中継をやめる．これは，車両から見たアクセス先の候補となる基地局は前方と後方の 2 つに限られ，各車両にとってこれより遠くに設置されている基地局の情報は不要なためである．また，パケットのループを防ぐために，ハローパケットにはシーケンス番号を割り当て，同一のシーケンス番号のパケットを受信した場合はその場で破棄する．

ハローパケットに含む情報を以下に示す．

- 基地局 ID
- 基地局の位置
- 中継車両 ID
- 中継車両位置
- 中継車両から基地局までのパケット到達率

基地局がこのパケットを送信する際には，基地局 ID，基地局の位置の 2 つの情報しか含まれておらず，車両が中継するときにはその他の情報（中継車両 ID，中継車両位置，中継車両から基

地局までのパケット到達率) を付加する。

ハローパケットの中継を行う範囲は、そのハローパケットを利用する可能性があるノードが存在する範囲で十分である。例えば、BS1, BS2, BS3, BS4, BS5 の順に並んで設置されている場合、BS3 のに関する情報をフラッディングする範囲は BS2 から BS4 の間に存在する車両のみで十分である。従って、隣接する基地局の位置までハローパケットが到達したら中継を行わず、ハローパケットを破棄する。

#### 2.2.2.2 車両と基地局間のパケット到達率の推定と基地局の選択

基地局からハローパケットを直接受信した車両は、基地局の位置と自車両の位置から基地局までのパケット到達率を求める。この車両の場合、ここで求めた値が該当基地局までのパケット到達率となり、ハローパケットに自車両の情報を付加してパケットの中継する。中継されたハローパケットを受信した車両は、受信パケットから中継車両位置とパケット到達率の値を取得する。中継車両位置と自車両位置からその中継車両までのパケット到達率を求め、この値と中継車両から基地局までのパケット到達率の積を自車両から基地局までのパケット到達率とする。そして同様に、中継車両 ID, 中継車両位置, パケット到達率を自車両の情報として書き換え、その後中継を行う。

各車両は基地局までの経路表を持ち、この経路表に各基地局を利用した場合の IVC 経路情報(ただし、隣接車両のみ)とパケット到達率のエントリを登録する。インターネットアクセスしていない車両も他の車両のパケットの中継する必要があるため、すべての車両において経路表を更新する。例えば、図 2.8 のように BS1 のハローパケットが車両 C3, C2, C1 の順に中継された場合、表 2.1 のような経路表が生成される。この例では、C1 から C2 までの到達率が  $x$ 、C2 から C3 までの到達率が  $y$ 、C3 から BS1 までの到達率が  $z$  であるとしている。

ハローパケットを複数の車両から受信した場合はより最適な中継車両を選択する必要がある。厳密には同時にこのパケットを複数受信することはないため、既に経路表に登録されている基地局のパケットを新たに受信した際は、必要な場合のみ経路表を更新する。

例えば、図 2.8 に示すように車両が並んでおり、表 2.1 のような経路表が既に作成されている状況で、C1 が C3 から BS1 のハローパケットを受信した場合を考える。表 2.1 の C3 の経路表から、C2 を経由した場合の BS1 までのパケット到達率が分かる(この場合、 $x * y * z$  となる)。C3 から受信したハローパケットにより、C3 を経由した場合の C1 から BS1 までのパケット到達率の推定する。既に登録されている C2 を経由した場合のパケット到達率と比較して良い値であれば、C3 は経路表を更新し、このハローパケットの中継する。悪い値であれば、このパケットを破棄し、中継しない。

この手順により、通信車両から基地局までの経路は決定できるが、基地局から通信車両までの経路は決まっていない。通信車両から基地局までのパケット到達率を最大化した最適経路が決まっているとしたとき、基地局から通信車両までの経路はこの逆の経路で良いことになる。

基地局から通信車両までの経路はリアクティブに行う。通信車両は利用する基地局に RREQ(Route Request) パケットを送信する。中継車両はこの RREQ パケットの中継を行う

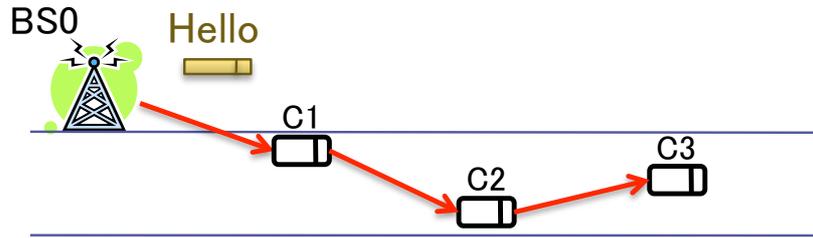


図 2.8: ハローパケットの中継

表 2.1: C1, C2, C3 の経路表 (例 1.)

C1		
基地局 ID	隣接中継車両 ID	パケット到達率
BS1	C2	$x$

C2		
基地局 ID	隣接中継車両 ID	パケット到達率
BS1	C3	$x * y$

C3		
基地局 ID	隣接中継車両 ID	パケット到達率
BS1	BS1	$x * y * z$

ときに、中継表に通信車両 IP アドレス、通信車両利用先基地局 ID、隣接中継車両 ID の対応付けを行う。この RREQ パケットを該当基地局が受信すると、その基地局は RREP(Route Reply) パケットをその経路に対して送信を行う。

これにより、それぞれの車両は、IP アドレスと隣接中継車両 ID を対応させた中継表を持つことができ、車両から基地局までの双方向の経路で通信を行うため準備が完了する。

### 2.2.2.3 データパケットの転送制御

車両がインターネット通信を行う際には経路表と中継表を利用する。

図 2.9 のように BS1, C1, C2, C3 が位置し、C1 がインターネット上のノードである CN と通信を行う状況を考える。このとき、C1, C2, C3 の経路表と中継表はそれぞれ、表 2.2, 表 2.3 のようになっているとする。また、図 2.9 の例では、ノードの ID として MAC アドレスを利用し、これをパケットの中継に利用する。

C1 は CN に対して BS1 を利用してパケットを送信するときに、経路表を参照して、BS1 に対応する隣接中継車両 ID である C2 を指定してパケットの送信を行う。これを受信した C2 は、送信元の IP アドレスを参照し、経路表からその IP アドレスに対応する基地局 ID を検索

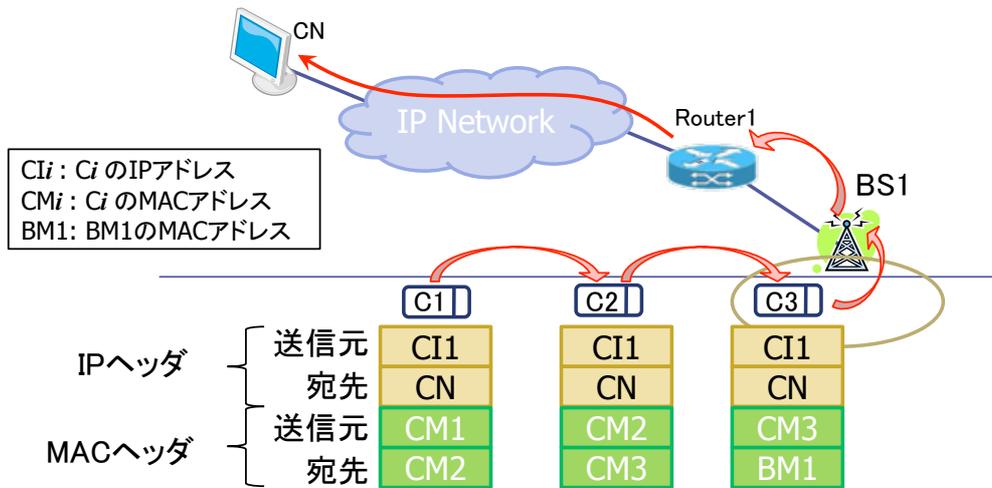


図 2.9: データパケットの中継

表 2.2:  $C1, C2, C3$  の経路表 (図 2.9)

C1		
基地局 ID	隣接中継車両 ID	パケット到達率
BM1	CM2	$x$

C2		
基地局 ID	隣接中継車両 ID	パケット到達率
BM1	CM3	$y$

C3		
基地局 ID	隣接中継車両 ID	パケット到達率
BM1	BM1	$z$

表 2.3:  $C1, C2, C3$  の中継表 (図 2.9)

C1		
IP アドレス	基地局 ID	隣接中継車両 ID
No Entry		

C2		
IP アドレス	基地局 ID	隣接中継車両 ID
$CI1$	BM1	CM1

C3		
IP アドレス	基地局 ID	隣接中継車両 ID
$CI1$	BM1	CM2

し、これが  $BM1$  であることが分かる。さらに経路表から  $BM1$  に対応する隣接中継車両 ID を検索し、これが  $CM3$  であることが分かる。C2 は MAC ヘッダの宛先アドレスを検索結果である  $CM3$  とし、送信元を自車の MAC アドレスである  $CM2$  を指定して中継を行う。

CN から  $C1$  に対するパケットに関しては、送信先 IP アドレスを参照し、中継表からこれに対応する隣接中継車両 ID を宛先 MAC アドレスと指定して中継を行う。

つまり、各車両はデータパケットの IP ヘッダの送信元アドレスか宛先アドレスが中継表に登録されていれば中継を行う。送信元 IP アドレスが登録されていれば、中継表と経路表の両方を用いて、宛先 IP アドレスが登録されていれば、中継表のみを用いて中継を行う。

### 2.2.3 I2I/V2I/V2V ハンドオーバー

車両とインターネット上の対応ノード CN が通信を行っている状態で、車両から CN までの経路を変更すると、その変更箇所に応じて I2I/V2I/V2V ハンドオーバーが必要となる。I2I ハンドオーバーとは有線インフラの通信経路変更手順、V2I ハンドオーバーとは基地局に直接アクセスする中継車両（終端車両）の変更手順、V2V ハンドオーバーとは終端車両を除いた IVC 経路の変更手順のことである。本節ではそれぞれのハンドオーバーの手順について示す。

また、1.3.1 で示した通り、ハンドオーバーのための研究は数多く行われおり、それら技術を IVC/RCV 環境に応用した手法とする。ハンドオーバー時のサスペンド時間を短縮する技術及び、ハンドオーバー中のパケットロスを低減させるためのプロトコルとして、Mobile IPv6 Fast Handovers (FMIPv6) (RFC 5268)[7] があり、本項では、この FMIPv6 を応用した手法について示す。

#### 2.2.3.1 I2I ハンドオーバー

車両が利用する基地局の変更が起こると、CN から基地局までの経路が変わるため、必ず I2I ハンドオーバーが起こる。

また、L3 の処理が必要かどうかで、この手順は異なる。L3 の処理が不要の場合、つまり PBS(Previous BS) と NBS(New BS) が同一のネットワークである場合、NBS の上位の L2 スイッチの MAC テーブルの更新のみで処理を完了できる。この場合は、車両が NBS に対して RREQ を送信し、これを受信した NBS が該当 L2 スイッチに対して MAC テーブルの更新のための制御パケットを送信することにより行う。

次に、L3 処理が必要な場合についてを図 2.10 示す。FMIPv6 では、パケットロスを減少させるために、車両が利用する BS を切り替える前に PAR(Previous Access Router) から NAR(New Access Router) に CN からのパケットを転送し、NAR にバッファさせておくために処理を行う。その後、車両は NAR とハンドオーバー完了の処理を行う。つまり、FBU(Fast Binding Update)、HI(Handover Initiate)、FNA(Fast Neighbor Advertisement) のみのやり取りを行い、L3 ハンドオーバーを行う。さらに、車両は Binding Update と Return Routability を行うことにより、CN との直接通信を可能とする。

L2 処理は既に基地局に直接している車両があらかじめ行っておくため、L2 処理のみの I2I ハンドオーバーでは、原理的にはパケットロスは発生しない。L3 処理が発生する場合においても、図 2.10 に示す通り、バッファ処理によってパケットロスは発生せず伝送遅延の影響も無視できる程度と予想される。

#### 2.2.3.2 V2I ハンドオーバー

時間の経過とともに、車両が移動して、基地局に対して直接アクセスして中継を行っていた車両（終端車両）が変更となるような状況でのハンドオーバー処理である。

定期的に基地局から送信されているハローパケットの取得により、通信車両から基地局まで

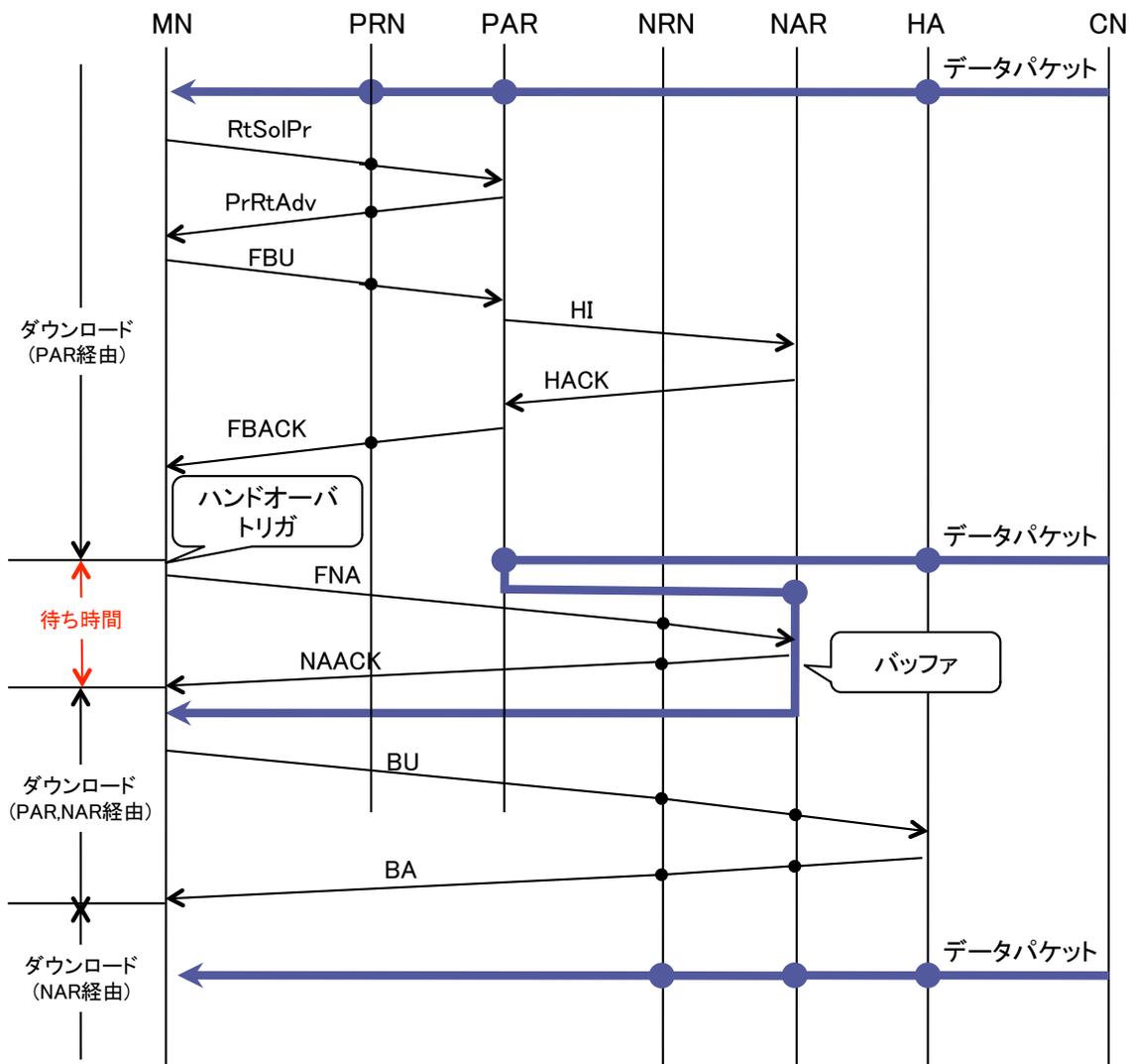


図 2.10: I2I ハンドオーバー

の常にパケット到達率が最も高くなる経路を選択する．通信中の車両が存在する場合は，経路に変更があった車両間で RREQ のやりとりを行い，経路の修復を行う．

また，基地局の無線到達範囲に入った車両はパケットの中継の有無に限らず，基地局との間で IEEE 802.11 の認証とアソシエーションの処理を行い，いつでもその BS を利用できるような状態にしておく．これは，利用先の BS が自車から見て前方に設置されているか，後方に設置されているかで方法が異なる．

車両の進行方向に対して前方の基地局を利用している場合，例えば図 2.11 のような状況が考えられる．

この状況での V2I ハンドオーバーの手順を図 2.12 に示す．もともと車両 C1 が，C2，C3 を経由して前方の BS1 を利用している状況を考える．このとき，C3 が BS1 に直接アクセスしてい

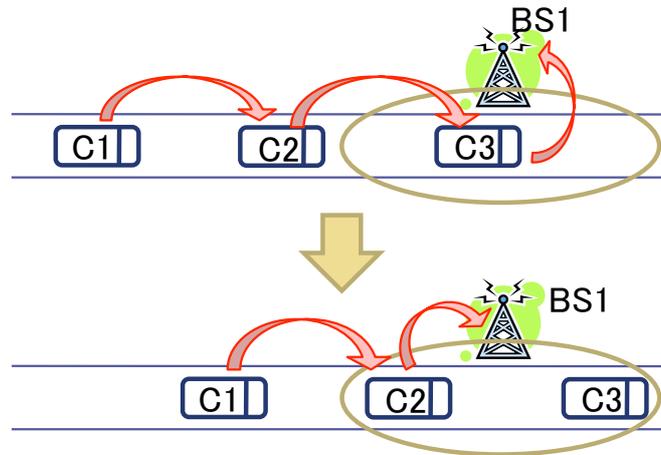


図 2.11: V2I ハンドオーバーの例

る。C2 は BS1 の無線エリア内に入ったときに、パケットの中継の有無に限らず、BS1 との間で、IEEE 802.11 の認証とアソシエーションの処理を行い、いつでも BS1 を利用できるような状態にしておく。この処理の間、C2 は C1 のパケットの中継を並行して行うため、パケットの遅延などは起こらない。この後、最適経路探索の結果より、C3 を経由せず、C2 が直接 BS1 にアクセスした方がパケット到達率が増加する場合には、経路の再設定を行う。この場合は、C2 が C1 の代理で RREQ を BS1 に送信することにより、新しい経路を確立する。

後方の基地局を利用している場合、例えば、C1 が C2 を経由して後方の BS0 にアクセスしており、C2 の後方にはさらに C3 が走行している状況を考える。この場合も前方の場合と同じように、BS 情報により、C3 を経由した方が有利になった場合に、C2 が C1 の RREQ を代理で BS0 に対して送信して新しい経路の確立を行う。

図 2.12 に示す通り、V2I ハンドオーバーでは原理的にパケットロスが発生しないことが分かる。

### 2.2.3.3 V2V ハンドオーバー

車両の追い越し、車両間隔の変動など要因は様々あるが、車両から基地局までの IVC の経路の変更を行う場合に V2V ハンドオーバーの処理が必要となる。

V2I ハンドオーバーの場合と同様に、定期的送信されている基地局からのハローパケットの取得により、通信車両から基地局までの常にパケットロス率が最も低くなる経路を選択する。通信中の車両が存在する場合は、経路に変更があった車両間で RREQ のやりとりを行い、経路の修復を行う。

例えば、車両 C1 が C2, C3, C4 を中継 C として BS1 からパケットを受信している状況であったとする。そこで、C3 が追い越しを行い、C3 と C4 の位置が入れ替わり、最適な経路が、C1, C2, C4, C3, BS1 となった場合を考える。この場合、C2 と C4, C4 と C3, C3 と BS1 の間で、C1 に関する経路の再設定を行う。

また、中継車両と車両間隔が広がってしまい、C1 と BS の通信経路が断絶してしまう可能

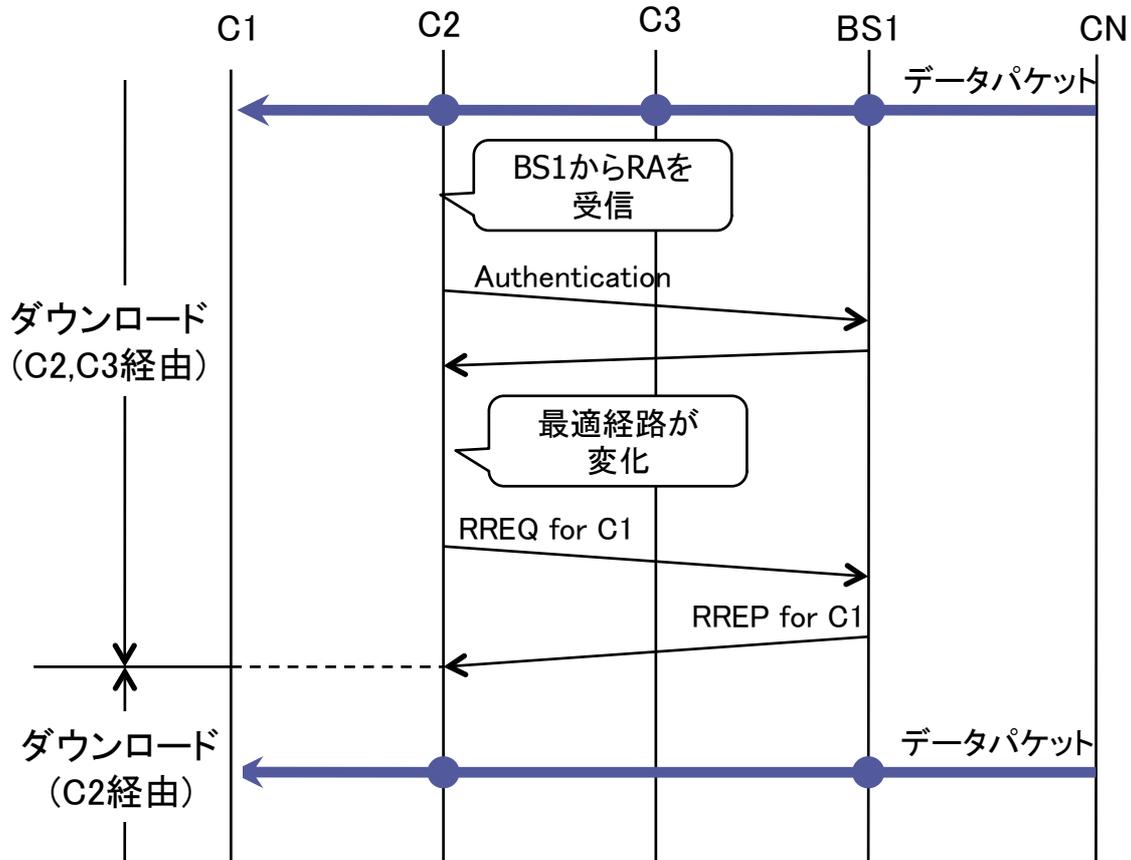


図 2.12: V2I ハンドオーバー

性がある。この場合は、その時点でもう一つの候補となっている BS を利用する必要がある。例えば、もともと通信車両の前方に設置されている BS を利用しており、その BS までの経路が切断されてしまった場合は、利用先の BS を後方に設置されている BS に切り替える。

利用先の基地局からのハローパケットを受信できなくなった時に基地局までの経路が切断されたと判断する。この場合は、通信車両が別の基地局に対して RREQ を送信し、新しい基地局への経路を確立させる。このとき、必要であれば L2/L3 ハンドオーバーを行う。

## 第3章

# 評価

帯域利用効率改善手法およびパケット到達率改善手法の特性と有効性の検証のために、シミュレーションによる評価実験を行う。

### 3.1 帯域利用効率改善手法の評価

帯域利用率改善手法のシミュレーション実験のための前提条件、インターネット利用モデル、アドミッション制御の方式について示し、帯域利用率の測定およびアクセス先基地局選択のためのパラメータ(式(2.1)における $W_1$ および $W_2$ )と帯域利用効率の関係を示す。また、常に最寄りの基地局を優先的に利用した手法( $W_1:W_2=0:1$ とした場合)との比較して、どれだけ帯域利用効率が改善されるかについても示す。

#### 3.1.1 前提条件

シミュレーションにおける前提条件を以下にまとめる。

- 走行道路は直線である
- 車両の追い越しや動的な速度変化が起こり、車両密度に偏りが発生する
- 各車両が利用するUDPストリーミングサービスは固定ビットレートである
- 各車両は次の情報を遅延なく常に知っている
  - 全車両の位置
  - 基地局の位置
  - 全車両の利用帯域
  - 各リンクで利用する無線チャンネル
  - 中継車両
- 基地局のハローパケットによるトラフィックは帯域に影響を与えないほど小さい
- 利用する無線規格には同時に使えるチャンネルが複数存在
- 一つの車両が送信時に同時に複数チャンネルを使うことはできないが、利用チャンネルの切り替えは可能
- 一つの車両が同時に複数のチャンネルの電波を受信することが可能
- インターネットの利用にアドミッション制御を行う

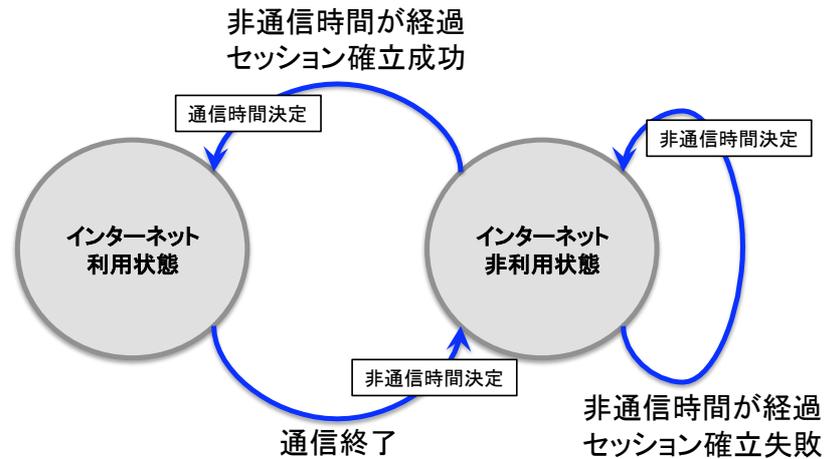


図 3.1: 通信状態の状態遷移図

### 3.1.2 インターネット利用モデル

シミュレーション実験での各車両のインターネット利用モデルを示す。各車両はインターネットを利用するか否か、サービスの利用帯域を動的に決定する。まず、インターネット利用状態とインターネット非利用状態の2つの状態を定義する。この2つの状態遷移図を図3.1に示す。インターネット利用状態の平均継続時間として平均連続通信時間、インターネット非利用状態の平均継続時間として平均連続非通信時間という2つのパラメータを与え、状態が遷移する時に、遷移先の状態の継続時間を指数乱数によって決定する。車両発生時では、各車両はインターネット非利用状態とし、車両発生時に状態継続時間を平均連続非通信時間に基づく指数乱数によって決定する。

次に、インターネット利用時のサービス利用帯域の決定方法について示す。サービス利用帯域の最小値と最大値をパラメータとして与える。各車両は通信開始時にサービス利用帯域を最小値と最大値のパラメータから一様乱数で決定する。1度のセッションでのサービス利用帯域は一定とし、別のセッションでは利用帯域が異なる可能性があるものとした。

### 3.1.3 アドミッション制御の方式

シミュレーション実験でのアドミッション制御の方式を示す。基地局までのIVC経路の通信負荷状態によってインターネットを利用できるか否かを制御する方式について述べる。通信帯域に上限が決まっているという前提で、多数の車両が同時にストリーミングサービスのような大きなトラフィックを利用しようとする時、全ての車両が十分にサービスを利用できないという状況が考えられる。そこで、帯域利用効率改善手法ではセッション開始時にアドミッション制御を行うものとしている。

直線道路を想定した場合、アクセス先候補となる基地局は車両の進行方向に対して、前方と

表 3.1: 車両走行モデルに関するパラメータ

パラメータ	値
道路長	5,000 m
車線数	3 車線
基地局設置間隔	500 m
基地局数	11 基
車両希望平均速度	100 km/h
渋滞時車両速度	20 km/h
平均車両発生時間間隔	1 秒/台
渋滞区間	なし, 1,750 ~ 3,250m

後方の 2 基の基地局となる。セッション開始時に、それぞれの基地局に対して IVC 経路が確保できるかを確認する。どちらか一方にでも IVC 経路があった場合は、式 (3.1) のアドミッション制御関数によってセッションを開始できるかを判定する。あらかじめパラメータとして設定した無線リンクのベアラ速度  $BearerRate$  および、アドミッション制御関数しきい値決定ウェイト  $ThreshWeight$  からアドミッション制御関数しきい値  $AdmThresh$  を決定する。セッション開始車両から対象基地局までの間の空間の空き帯域をチャンネル毎にスキャンして、最も小さな空き帯域となる値を  $Bottleneck$  として、 $Bottleneck$  の値が  $AdmThresh$  を下回っている場合にその基地局をアクセス先として利用可能とする。

$$AdmThresh = BearerRate \times ThreshWeight \quad (3.1)$$

### 3.1.4 実験パラメータ

シミュレーション実験で利用する各パラメータについて述べる

#### 1. 車両走行モデル

車両走行モデルは、文献 [12] によるモデルを採用する。車両走行モデルの詳細については、付録 A に掲載する。

車両走行モデルに関わるパラメータは表 3.1 のように設定した。

車両走行モデルの収束地点である 40,000m(付録 A.0.12) を評価実験では 0m 地点としている。通常、一つの基地局に対して 2 つのエリアの通信トラフィックの負荷が掛かるが、道路の始点と終点に位置する基地局は 1 つのエリアの通信トラフィックの影響しか受けない特殊な状況と言える。定常状態での提案手法の特性を測るためには、ある程度の数の隣接して設置された基地局の中の中央付近に位置するエリアの通信特性を評価する必要がある。このため、評価実験では、単純に 2 基の基地局を設置したその間の帯域利用効率を調査するのではなく、11 基の基地局を設置して実験を行った。0m 地点から 500m

表 3.2: 通信環境に関するパラメータ

パラメータ	値
電波到達距離	100 m
無線ベアラ速度	11 Mbps (全ての無線リンクで同一)
サービス利用帯域	100 kbps ~ 2 Mbps
平均連続通信時間	10 秒
平均連続非通信時間	5 秒, 30 秒
最大同時利用チャンネル数	4 チャンネル
アクセス先 BS 選択関数ウェイト	$(W_1 : W_2) = (1 : 0), (1 : 0.1), (1 : 0.5),$ $(1 : 1.0), (1 : 1.5), (1 : 2.0), (0 : 1)$
アドミッション制御関数しきい値決定ウェイト	0.9

おきに設置される 11 基の基地局を, 0m 地点の基地局から順に, BS0,BS1,BS2,...,BS10 と呼ぶことにする .

平均車両発生時間間隔は国土交通省道路局の平成 17 年度道路交通センサス [13] における都市高速道路の日中 7 時から 19 時の平均交通量から導出した値である . シミュレーション実験では, 各基地局までの IVC 経路が十分に確保できるような状況での帯域利用効率の評価を行うため, 設定した平均車両発生時間間隔から十分に IVC 経路確保できると思われる基地局設置間隔を 500m とした .

## 2. 通信環境

通信環境に関わるパラメータは表 3.2 のようになる .

評価実験では, IEEE802.11 を想定し, 各無線リンクのベアラ速度を 11Mbps, 電波到達距離を 100m と設定した . サービス利用帯域は 3.1.2 で示した通り, セッション開始時に 100kbps ~ 2Mbps の範囲で一様乱数で決定し, 一つのセッションでの利用帯域は一定とする . 一般的な動画配信サービスである Yahoo!テレビ<sup>\*1</sup>, Gyao<sup>\*2</sup>, Youtube<sup>\*3</sup>, ニコニコ動画<sup>\*4</sup>で 100kbps ~ 2Mbps 程度の範囲でサービスで行っているため, この値を設定した .

ベアラ速度が 11Mbps であり, 1 セッションでの平均サービス利用帯域は 1.05Mbps となるため, 1 セッション分以上の空き帯域があればインターネットを利用可能とするため, アドミッション制御関数しきい値決定ウェイトを 0.9 とした .

\*1 Yahoo!テレビ : <http://tv.yahoo.co.jp/>

\*2 Gyao : <http://gyao.yahoo.co.jp/>

\*3 Youtube : <http://www.youtube.com/>

\*4 ニコニコ動画 : <http://www.nicovideo.jp/>

表 3.3: 各パラメータセットの値

パラメータセット	渋滞区間	平均連続通信時間	平均連続非通信時間
パラメータセット 1	なし	10 秒	5 秒
パラメータセット 2	なし	10 秒	30 秒
パラメータセット 3	1,750 ~ 3,250m	10 秒	5 秒
パラメータセット 4	1,750 ~ 3,250m	10 秒	30 秒

### 3.1.5 実験シナリオ

車両密度の変化と各車両の平均利用帯域の関係から帯域利用効率改善手法の特性評価と有効性の検証のため、表 3.3 の 4 つのパラメータセットによる評価実験を行う。

全車両が常にどこかの基地局を利用できる状況を考えると、平均連続通信時間 10 秒、平均非連続通信時間 5 秒の場合は全車両の 66% が同時にインターネットを利用していることになる。車両走行モデルにおける平均車両密度が 0.047 台/m であるため (付録 A.0.12)、0m 地点から 5,000m 地点まで間に位置している平均車両台数は、235 台となる。平均サービス利用帯域 1.05Mbps であることを考えると、全エリアで同時に利用する平均サービス利用帯域は 163Mbps となり、5,000m 区間に存在する 11 基分の全基地局の総通信容量である 121Mbps を超過し、アドミッション制御によりインターネットアクセスができなくなる車両が発生する状況である。これに対し、平均連続通信時間 10 秒、平均非連続通信時間 30 秒の場合は全エリアで同時に利用する平均サービス利用帯域は 61Mbps であり、インターネットを利用できる可能性が十分にあるという状況を想定している。平均連続通信時間 10 秒、平均非連続通信時間 5 秒の場合、特定の一台の車両に注目すると、常に通信を行うことができる環境下では、ある時刻における通信率は 66% となる。サービスに利用される平均通信帯域が 1.05Mbps であるため、一台当たりの任意の時刻における平均利用帯域は 0.70Mbps となる。

渋滞区間の設定については、車両密度の変化が提案手法の特性にどのような影響を与えるかを評価するために行った。

各パラメータセットのシミュレーション回数は 300 回であり、実験結果の信頼区間は 95% としている。

### 3.1.6 結果と考察

各パラメータセットにおける結果とその考察について示す。

[パラメータセット 1.]

渋滞が無く、全体の通信トラフィック量が基地局の通信容量を超えてしまう状況での、帯域利用効率改善手法の評価結果となる。

IVC 経路確立できなかったことによるセッション失敗確率は 2.1 ~ 2.2% と低い水準となって

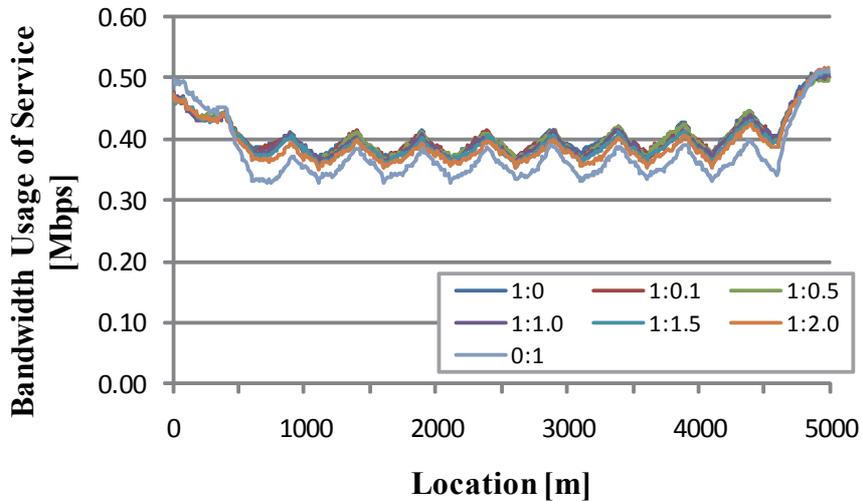


図 3.2: パラメータセット 1 の各位置におけるサービス利用帯域

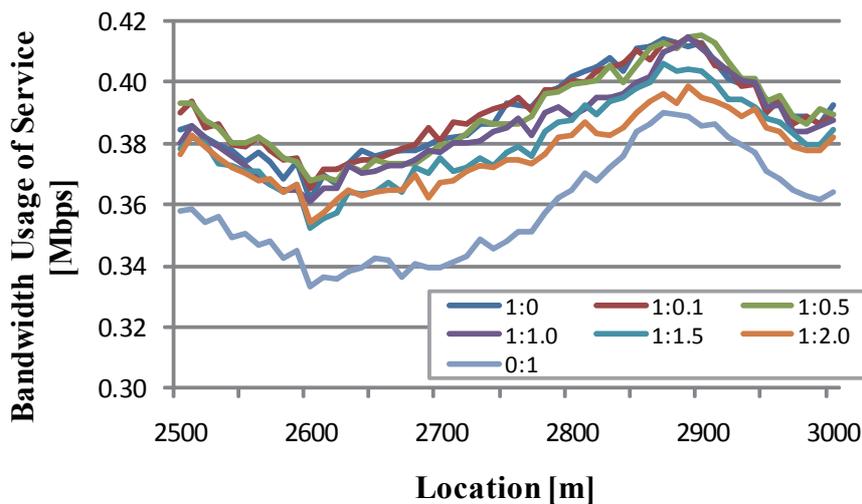


図 3.3: パラメータセット 1 の 2,500 ~ 3,000m 区間のサービス利用帯域

おり、各車両が利用できる帯域は、帯域利用効率によって決まると考えられる。

各位置における車両一台当たりのサービス利用帯域を図 3.2 に示す。0m と 5,000m 地点付近のサービス利用帯域が高いのは、道路の両端に位置する BS0 と BS10 がそれぞれ 1 つのエリアの通信トラフィックの負荷しか受けないので、他の基地局と比較して通信負荷が低くなり、セッション確立の成功率が高くなるためである。

中央の位置である 2,500m 地点に近くなるほど、サービス利用帯域が減少する傾向にあるが、2,000m から 3,000m 区間で十分に収束していると言える。

2,500m から 3,000m の区間のサービス利用帯域を図 3.3 に示す。この結果から基地局通過後

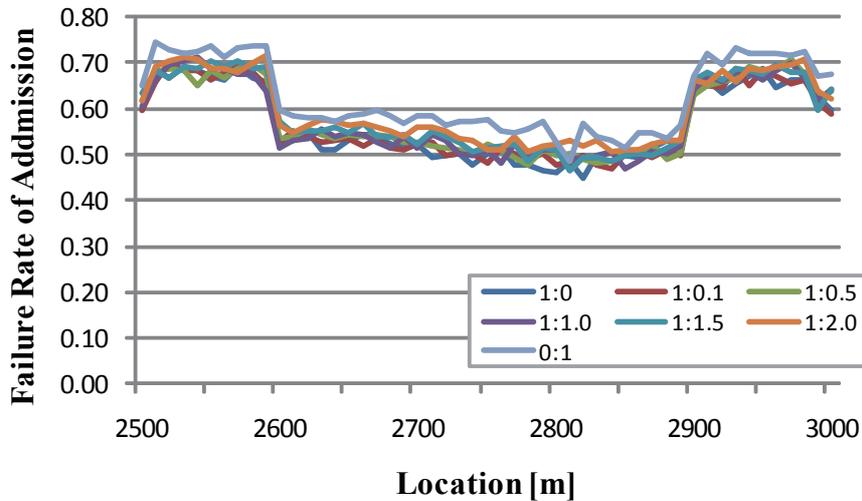


図 3.4: パラメータセット 1 の 2,500 ~ 3,000m 区間における通信負荷増大によるセッション失敗率

100m 地点で最小となり、基地局到着前 100m 地点で最大となることから、これは、ボトルネックの空き帯域の評価を自車の位置から対象の基地局の空間を評価して行うことが原因となる。例えば、2,550m 地点に位置する車両 C1 が BS5 と BS6 までのボトルネックを評価しようとする。ここで、BS6 よりも BS5 の通信負荷が大きいとする。BS5 からの電波は、2,600m 地点まで到達するため、BS5 の通信負荷がどれだけ小さくても BS6 までのボトルネックは BS5 の通信負荷で決まってしまう。従って、基地局からの電波の到達する区間である、基地局設置位置の前後 100m はサービス利用帯域が減少する傾向になってしまったと考えられる。図 3.4 に示す通り、通信負荷増大によるセッション失敗率の分布も基地局の前後 100m に分布していることが分かる。

次に、アクセス先基地局選択のためのパラメータと帯域利用効率の関係を示す。図 3.5 に 2,000m から 2,500m 区間で同時に利用するサービス利用帯域とウェイトの関係を示す。 $W_1 : W_2 = 0 : 1$  つまり常に、最も近い基地局を優先的に利用するパラメータと比較して、 $1 : 0$  つまり常に空き帯域が大きくなる基地局を選択するパラメータの方が 9% ほど全体の利用帯域が向上することが分かった。

以上をまとめると、車両密度が均一の状態では、全体の要求トラフィック負荷が基地局の通信容量を超える場合では、空き帯域のウェイトを大きく評価することが帯域利用効率の向上につながるということが分かった。

#### [パラメータセット 2.]

渋滞が無く、全体の通信トラフィック量が基地局の通信容量を超えない状況での、帯域利用効率改善手法の評価結果となる。

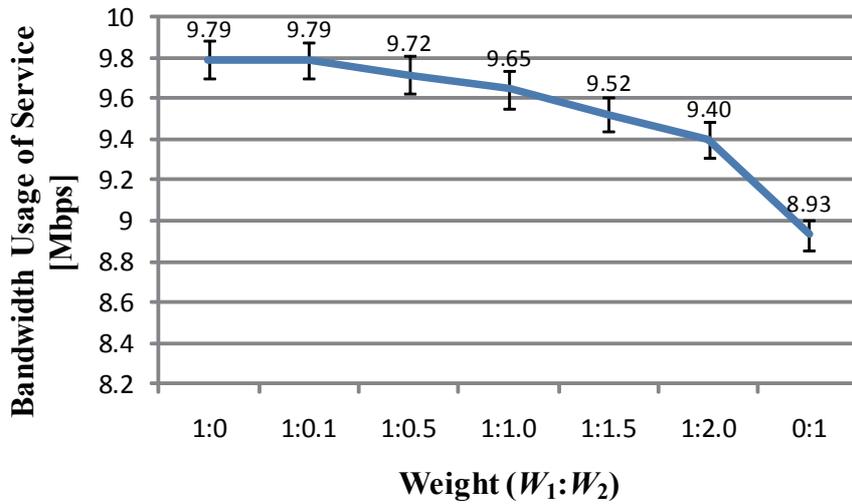


図 3.5: パラメータセット 1 の 2,500 ~ 3,000m 区間における同時サービス利用帯域

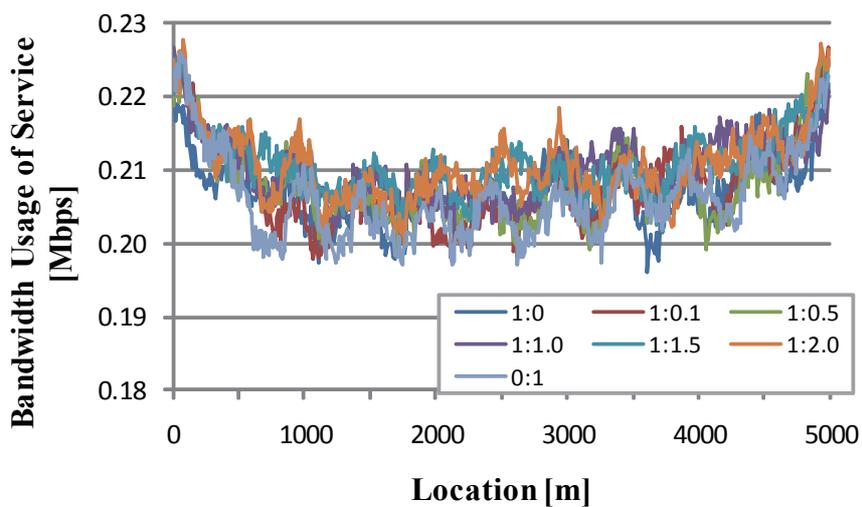


図 3.6: パラメータセット 2 の各位置におけるサービス利用帯域

パラメータセット 2 に関しても、IVC 経路確立できなかったことによるセッション失敗確率は 1.7 ~ 1.8% と低い水準となっており、各車両が利用できる帯域は、帯域利用効率によって決まると考えられる。

パラメータセット 2 における各位置における車両一台当たりのサービス利用帯域を図 3.6 に示す。BS0 と BS10 のサービス利用帯域が大きくなるのは、パラメータセット 1 と同様の傾向である。

パラメータセット 2 における、2,500m から 3,000m の区間のサービス利用帯域を図 3.3 に示す。パラメータセット 2 はパラメータセット 1 と比較して帯域に余裕がある状況であるため、

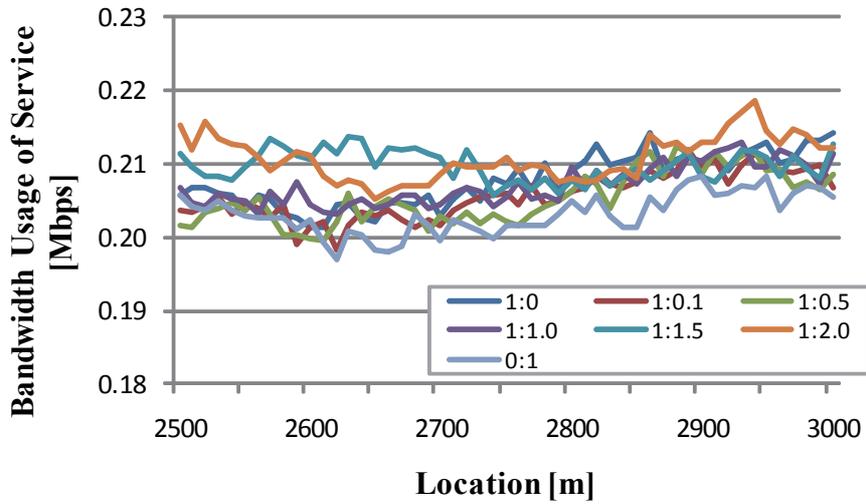


図 3.7: パラメータセット 2 の 2,500~3,000m 区間のサービス利用帯域

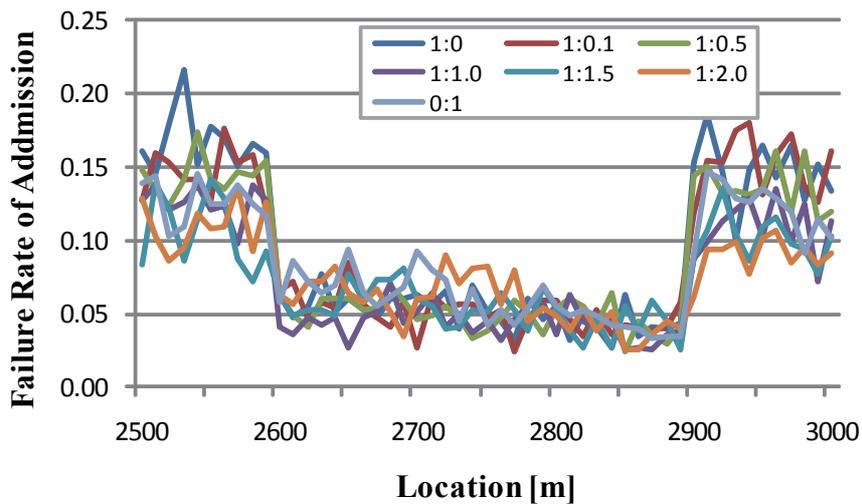


図 3.8: パラメータセット 2 の 2,500~3,000m 区間における通信負荷増大によるセッション失敗率

位置によるサービス利用帯域の差はそれほど大きくはならなかった．図 3.8 に示す通り，パラメータセット 1 と同様に基地局の周囲 100m の区間では，セッション失敗率が増加するが，基地局の周囲 100m とそれ以外とは，10% 程度の違いしか見られず，パラメータセット 1 と比較して落差が小さいことが分かった．

次に，アクセス先基地局選択のためのパラメータと帯域利用効率の関係を示す．図 3.9 に 2,500m から 3,000m の区間で同時に利用するサービス利用帯域とウェイトの関係を示す．パラメータセット 2 の場合では，各ウェイト間でのサービス利用帯域に有意差が見られなかった．

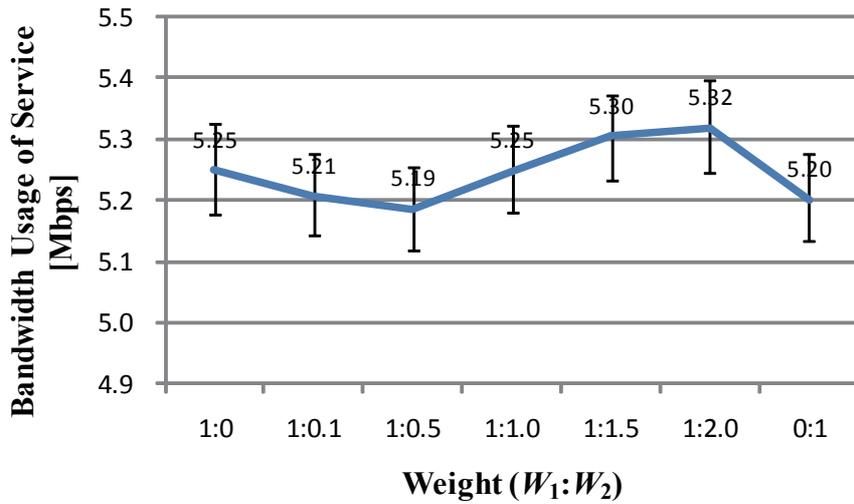


図 3.9: パラメータセット 2 の 2,500 ~ 3,000m 区間における同時サービス利用帯域

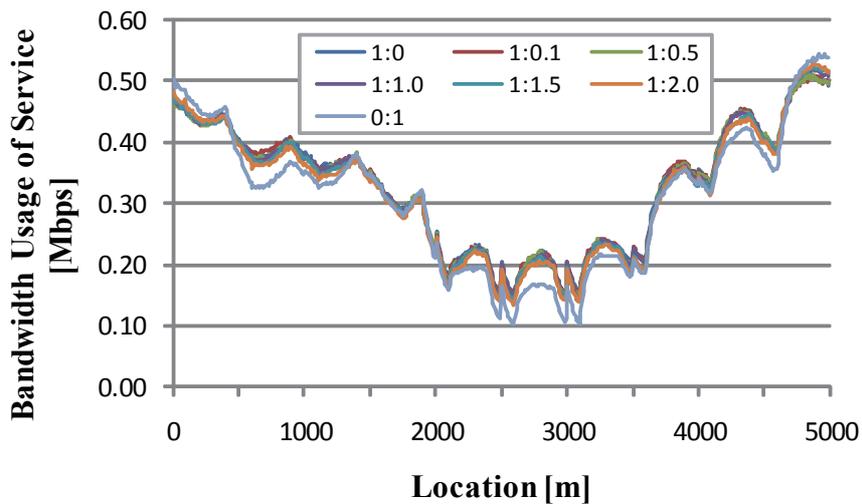


図 3.10: パラメータセット 3 の各位置におけるサービス利用帯域

これは、基地局までの IVC 経路さえあればアクセスできる可能性が高い状況であるため、ウェイトの設定による基地局の通信負荷の配分が大きな意味をなさなかったためと考えられる。

[パラメータセット 3.]

渋滞の発生により走行位置によって車両密度が異なり、全体の通信トラフィック量が基地局の通信容量を超える状況での、帯域利用効率改善手法の評価結果となる。パラメータセット 3 に関しても、IVC 経路確立できなかったことによるセッション失敗確率は 3.5 ~ 3.6% と低い水準となっており、各車両が利用できる帯域は、帯域利用効率によって決まると考えられる。

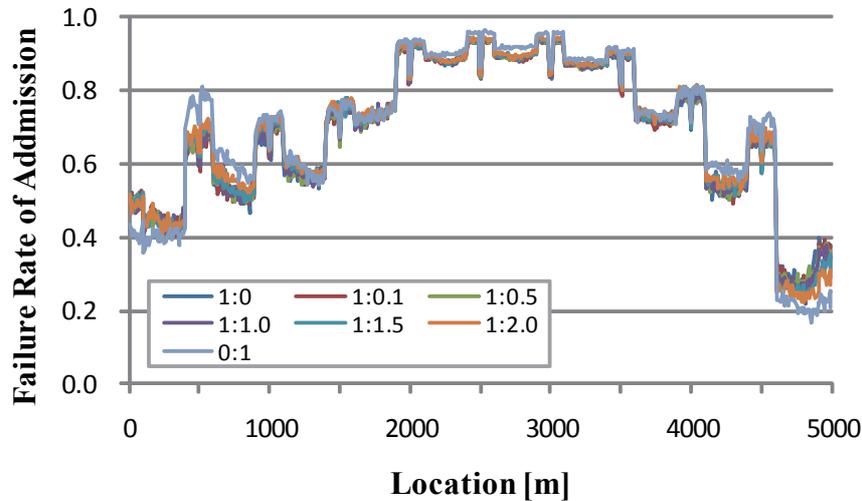


図 3.11: パラメータセット 3 の全体区間における通信負荷増大によるセッション失敗率

パラメータセット 3 における各位置における車両一台当たりのサービス利用帯域を図 3.10 に示す。渋滞区間である 1,750m から 3,250m にかけてサービス利用帯域が減少することが分かる。グラフの形状が左右非対称であるのは、渋滞エリア進入時から  $1\text{m/s}^2$  で減速し、渋滞エリアから通常走行エリアに戻るときに、追従走行モードに従い加速を行う車両走行モデルの特性によるものである。この特性は、渋滞エリア進入時よりも、通常走行エリアに戻る走行区間の方が車両密度が大きくなる傾向があり、結果的に道路の前半区間よりも後半区間の方が車両密度が高くなり、グラフの形状が左右非対称となったと考えられる。パラメータセット 3 の実験では、1,750m 地点から渋滞エリアとなるが、渋滞時車両速度である  $20\text{km/h}$  まで減速が完了するまで、平均 210m 走行する結果となり、1,750m から 1,960m から区間が渋滞移行区間となった。これに対して、渋滞エリアから抜けて定常速度に戻るまでは約 1,090m 走行する必要がある。3,250m から 4,340m までの区間が渋滞緩和区間となった。

図 3.11 にパラメータセット 3 の全体区間における通信負荷増大によるセッション失敗率を示す。渋滞時車両速度は  $20\text{km/h}$ 、渋滞時減速度は  $1\text{m/s}^2$  で全車両で共通の値としており、車両速度が  $120\text{km/h}$  を超えることはないため、2,500m から 3,000m 地点は全ての車両が  $20\text{km/h}$  で走行していることになるため、純粋渋滞エリアと呼ぶことにする。このときの車両密度は、 $0.18$  台/m となるため、2,500m から 3,000m 地点までの平均車両台数は 90 台となる。平均連続通信時間と平均連続非通信時間がそれぞれ、10 秒、5 秒であるため、常に通信できるとしたとき、全体の 66.7% の車両が通信を行っていることになる。従って、純粋渋滞エリアが要求する総トラフィック量は  $63.0\text{Mbps}$  となり、2 基の基地局の通信容量を超えてしまい、セッション失敗率が高くなったと考えられる。また、通信を開始できなかった車両は、3.1.2 で示した通り、インターネット非利用状態となる。従って、セッションを開始できない車両は平均 5 秒間隔でセッションを試みることになり、セッション確立できにくい環境では、通信失敗率がより

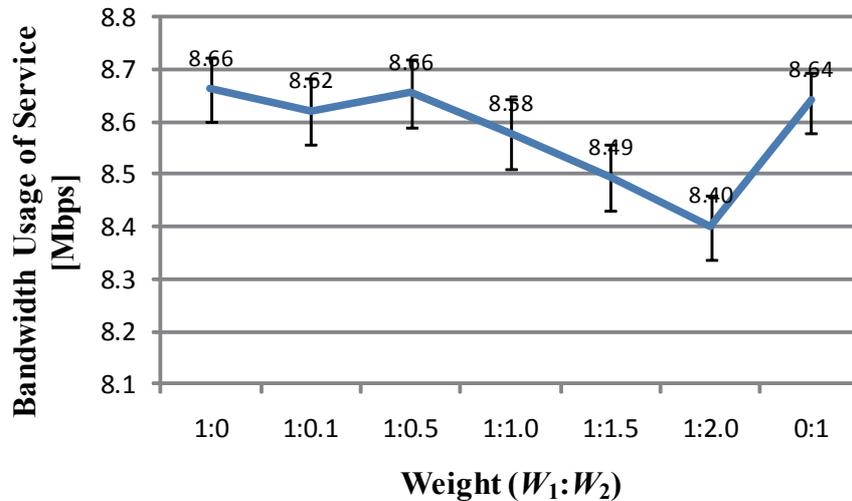


図 3.12: パラメータセット 3 の 1,500 ~ 2,000m 区間における同時サービス利用帯域

高くなってしまおうと考えられる。

このエリアだけでなく周辺のエリアの失敗率が高くなっているのは、純粋渋滞エリアの基地局の通信負荷が増大している状態であるため、この基地局は隣接エリアの車両はこの基地局を使いにくくなってしまい、もう片方の基地局を利用することになる。このように純粋渋滞エリアの通信負荷が周辺エリアにも波及し、失敗率が高くなっていると考えられる。

次に、アクセス先基地局選択のためのパラメータと帯域利用効率の関係を示す。図 3.12 に渋滞発生エリアとなる 1,500m から 2,000m の区間で同時に利用するサービス利用帯域とウェイトの関係を示す。図 3.12 に関しては、最大値と最小値の差が 2% 程度であるため、どのウェイトに設定しても有意差が見られないと考えられる。これは、2,000m から 3,000m 区間の通信トラフィックが大きく、BS4 の通信負荷が増大し、1,500m から 2,000m 区間の車両は BS3 にアクセスせざるを得ない状況が多くなってしまったため、ウェイトによる帯域利用効率の差が現れにくくなったものと考えられる。

図 3.13 に純粋渋滞エリアとなる 2,500m から 3,000m の区間で同時に利用するサービス利用帯域とウェイトの関係を示す。このエリアでは空き帯域のボトルネックによってアクセス先基地局を決めるウェイト設定 ( $W_1:W_2 = 1:0$ ) の場合と常に最寄りの基地局を利用するウェイト設定 ( $W_1:W_2 = 0:1$ ) 場合と比較して 30% 程度の改善が見られることが分かった。このエリアは平均的な車両密度は一様となると考えられるが、帯域利用効率に大きな差が見られる結果となった。この原因は、周辺エリアでの基地局の選択の方式に依っていると考えられる。例えば、図 3.12 の結果から 1,500m から 2,000m の区間では帯域利用効率に大きな差は見られなかったが、常に最寄りの基地局を利用するウェイト設定 ( $W_1:W_2 = 0:1$ ) の場合、BS4 よりも BS5 に近い位置を走行している車両は、BS5 を利用できる状態のときには BS5 を利用してしまう。周辺エリアの車両に純粋渋滞エリアに近い側の基地局を積極的に利用されてしまうと、

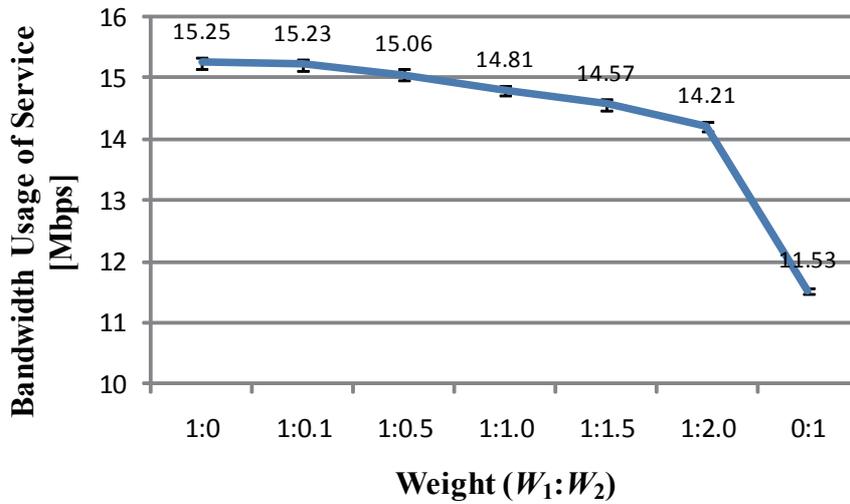


図 3.13: パラメータセット 3 の 2,500 ~ 3,000m 区間における同時サービス利用帯域

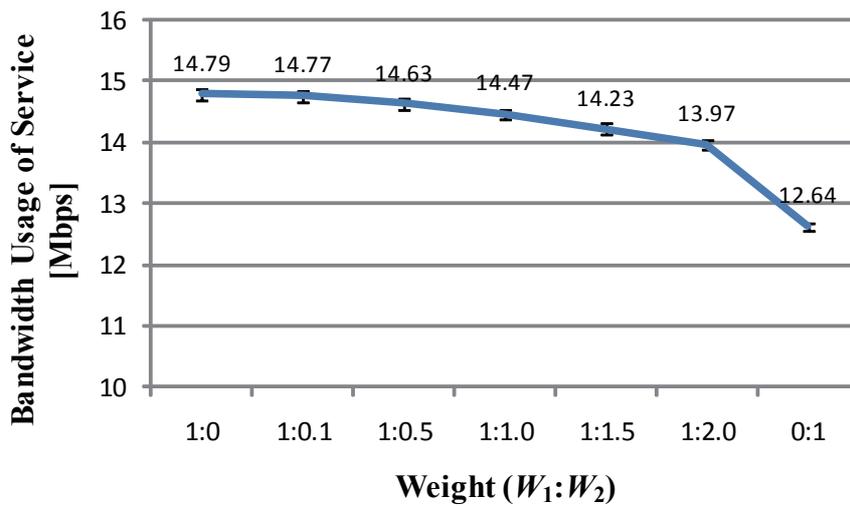


図 3.14: パラメータセット 3 の 3,000 ~ 3,500m 区間における同時サービス利用帯域

純粋渋滞エリアの車両が基地局にアクセスしにくくなってしまい、帯域利用効率を低減させてしまう結果となってしまったと考えられる。従って、周辺エリアの車両は純粋渋滞エリアとは逆側の基地局をアクセス先として利用することが、帯域利用効率の向上につながると考えられるが、常に最寄りの基地局を利用するウェイト設定ではこれが効率的に行われない。これに対して空き帯域のボトルネックによってアクセス先基地局を決めるウェイト設定の場合は、より帯域に余裕のある基地局を常に選択するため、純粋渋滞エリアとは逆側の基地局を利用しやすい傾向となり、自然と負荷分散を図り帯域利用効率の向上につながったと考えられる。

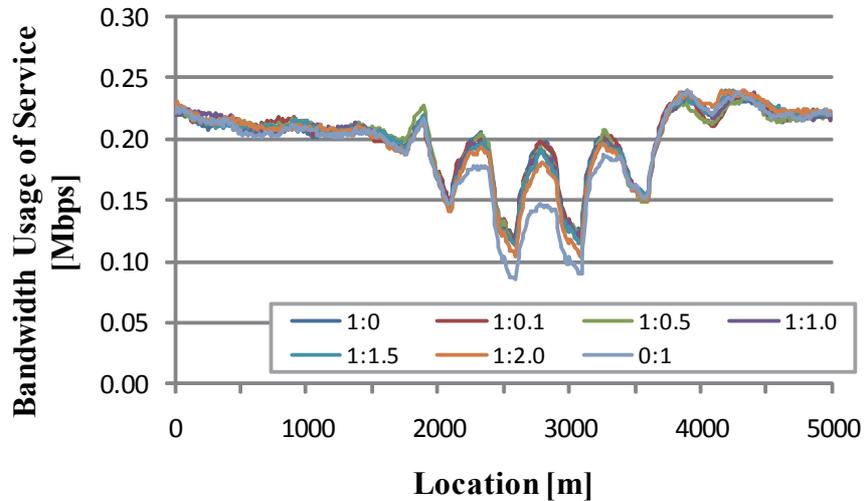


図 3.15: パラメータセット 4 の各位置におけるサービス利用帯域

図 3.14 に純粹渋滞エリアとなる 3,000m から 3,500m の区間で同時に利用するサービス利用帯域とウェイトの関係を示す。このエリアに関しても純粹渋滞エリアと同様の傾向が見られた。先述の通り、1,500m から 2,000m の区間と比較して車両密度が高くなるため、BS6 と BS7 に帯域の余裕が少ないため、図 3.13 と同様の結果となったと考えられるが、車両密度の差によりボトルネックによってアクセス先基地局を決めるウェイト設定 ( $W_1 : W_2 = 1 : 0$ ) の場合と常に最寄りの基地局を利用するウェイト設定 ( $W_1 : W_2 = 0 : 1$ ) 場合で、17% 程度の差となったと考えられる。

#### [パラメータセット 4.]

渋滞の発生により走行位置によって車両密度が異なり、全体の通信トラフィック量が基地局の通信容量を超えない状況での、帯域利用効率改善手法の評価結果となる。パラメータセット 4 に関して、IVC 経路確立できなかったことによるセッション失敗確率は 3.0% と低い水準となっており、各車両が利用できる帯域は、帯域利用効率によって決まると考えられる。

パラメータセット 4 における各位置における車両一台当たりのサービス利用帯域を図 3.15 に示す。パラメータセット 3 の結果とは異なり、渋滞エリアと比較してそれ以外でのエリアのサービス利用帯域の変化が少なかった。渋滞が少ないエリアでは、帯域に余裕があるため位置によってサービス利用帯域の差が現れにくいと考えられる。2,500m から 3,000m の区間である純粹渋滞エリアのみ注目した場合、要求される平均同時サービス利用帯域は 23.6Mbps となるため、基地局の通信容量よりも大きくなってしまふ。従って、渋滞エリアでのサービス利用帯域はパラメータセット 3 の場合と近い値になっていることが分かる。

図 3.16 にパラメータセット 4 の全体区間における通信負荷増大によるセッション失敗率を示す。要求される平均同時サービス利用帯域が、基地局の通信容量よりも大きくなってしまふた

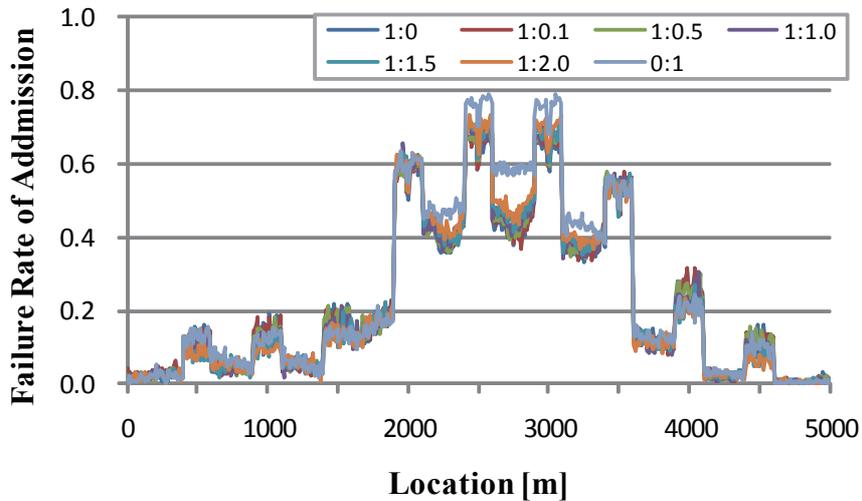


図 3.16: パラメータセット 4 の全体区間における通信負荷増大によるセッション失敗率

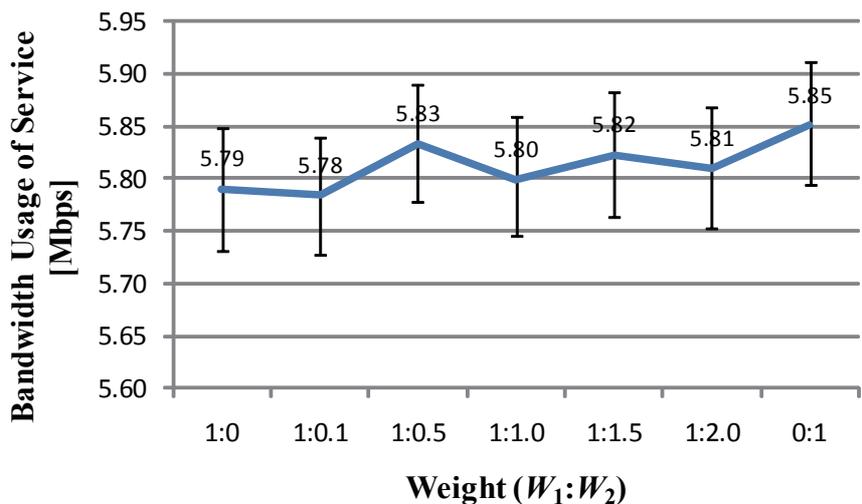


図 3.17: パラメータセット 4 の 1,500 ~ 2,000m 区間における同時サービス利用帯域

め、パラメータセット 3 と同様に純粋渋滞エリアのセッション失敗率が高くなっていることが分かる。渋滞エリアを中心として、周辺エリアでもセッション失敗率が高くなっているのもパラメータセット 3 と同様に、渋滞エリアの通信負荷が周辺エリアに波及しているためと考えられる。

次に、アクセス先基地局選択のためのパラメータと帯域利用効率の関係を示す。図 3.17 に渋滞発生エリアとなる 1,500m から 2,000m の区間で同時に利用するサービス利用帯域とウェイトの関係を示す。図 3.17 に関しては、最大値と最小値の差が 1% 程度であるため、どのウェイトに設定しても有意差が見られないと考えられる。これもパラメータセット 3 と同様に、

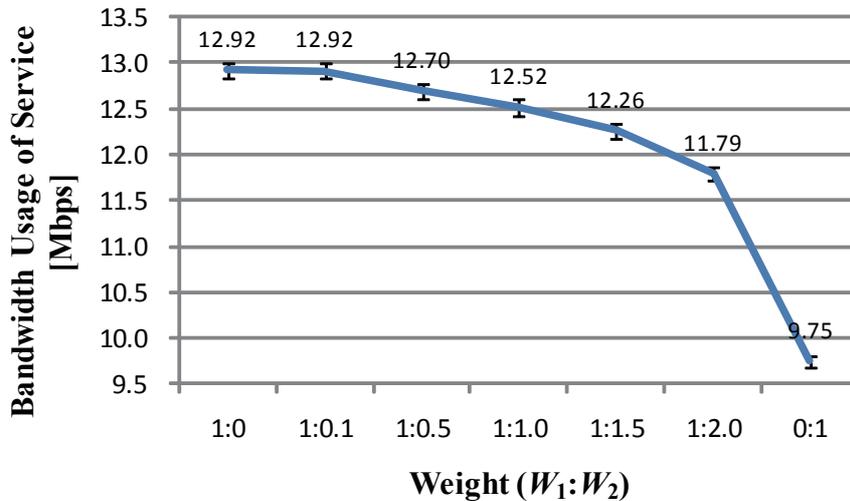


図 3.18: パラメータセット 4 の 2,500 ~ 3,000m 区間における同時サービス利用帯域

2,000m から 3,000m 区間の通信トラフィックが大きく、BS4 の通信負荷が増大し、1,500m から 2,000m 区間の車両は BS3 にアクセスせざるを得ない状況が多くなってしまったため、ウェイトによる帯域利用効率の差が現れにくくなったものと考えられる。

図 3.18 に純粋渋滞エリアとなる 2,500m から 3,000m の区間で同時に利用するサービス利用帯域とウェイトの関係を示す。このエリアでは空き帯域のボトルネックによってアクセス先基地局を決めるウェイト設定 ( $W_1 : W_2 = 1 : 0$ ) の場合と常に最寄りの基地局を利用するウェイト設定 ( $W_1 : W_2 = 0 : 1$ ) 場合と比較して 33% 程度の改善が見られることが分かり、全てのパラメータセットの中で最も大きな改善が見られた。パラメータセット 3 と同様に、純粋渋滞エリアの帯域利用効率は、周辺エリアで適切に基地局が選択されていることが重要となるが、パラメータセット 4 の場合はパラメータセット 3 の状況と比較して周辺エリアの通信負荷が小さいため、より基地局の選択方式の効果が高まったと考えられる。つまり、帯域が余っている基地局を優先的に利用することにより、周辺エリアでは十分に帯域が余っている状況であるほど渋滞エリア側の基地局の負荷をより多く低減できることになる。

図 3.19 に純粋渋滞エリアとなる 3,000m から 3,500m の区間で同時に利用するサービス利用帯域とウェイトの関係を示す。このエリアに関しても純粋渋滞エリアと同様の傾向が見られた。パラメータセット 3 と同様に、1,500m から 2,000m の区間と比較して車両密度が高くなるため、BS6 と BS7 に帯域の余裕が少ないため、図 3.18 と同様の結果となったと考えられるが、車両密度の差によりボトルネックによってアクセス先基地局を決めるウェイト設定 ( $W_1 : W_2 = 1 : 0$ ) の場合と常に最寄りの基地局を利用するウェイト設定 ( $W_1 : W_2 = 0 : 1$ ) 場合で、13% 程度の差となったと考えられる。パラメータセット 4 の場合の改善率はパラメータセット 3 と比較して小さくなった。これは、パラメータセット 4 の場合は、周辺エリアの通信負荷が小さく、3,000m から 3,500m の区間でも帯域の余裕が出たためと考えられる。

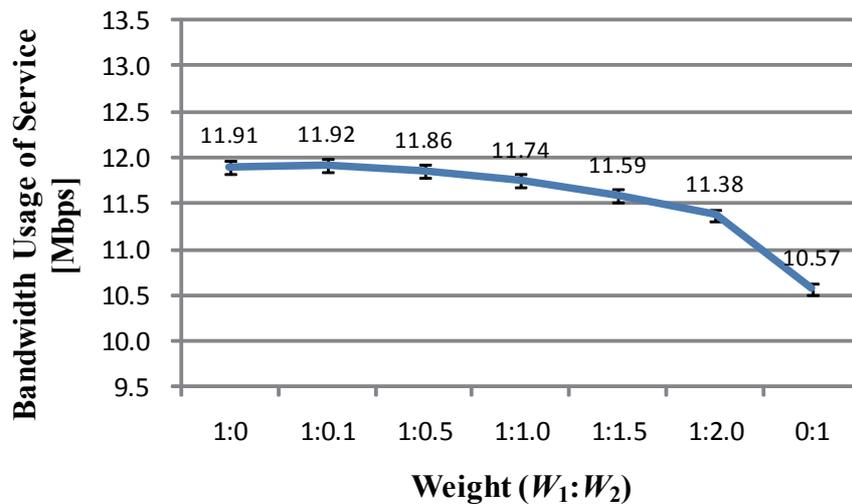


図 3.19: パラメータセット 4 の 3,000 ~ 3,500m 区間における同時サービス利用帯域

### 3.1.7 帯域利用効率改善手法の評価のまとめ

シミュレーション実験の結果から，全車両の同時利用帯域が基地局の通信容量を上回ってしまうほど高い通信負荷となる状況下では，車両密度の偏りが少ない環境下でも帯域利用効率の改善が見られた．特に全車両が渋滞速度で走行する純粋走行エリアでは，最寄りの基地局を優先的に選択する方法と比較して，全車両の同時利用帯域を 30% 程度向上させることができた．これは，ボトルネック空き帯域による基地局選択が，純粋渋滞エリアの周辺エリアである車両密度の低いエリアで負荷の小さい基地局を常に選択し，自然と負荷分散が行われ，結果的に大きな帯域利用効率の改善につながったと考えられる．

また，いずれのパラメータセットの実験結果においても基地局の前後 100m の区間で通信負荷増大によるセッション失敗率が增大することが分かる．これは，基地局の前後 100m の空間の利用帯域がボトルネックになっていることを示している．より多くのチャンネルが利用できる場合は，中継車両間で利用する無線チャンネルに割り当てるよりも，基地局に対して複数のチャンネルを割り当て同時に利用できる状況にすれば，より帯域利用率の向上が見込まれる．

## 3.2 パケット到達率改善手法の評価

パケット到達率改善手法のシミュレーション実験のための前提条件を示し，パケット到達率の定式化を行い，パケット到達率の測定および基地局の設置密度とパケット到達率の関係を示す．また，常に最寄りの基地局をアクセス先として利用する方式（基本手法と呼ぶ）と比較して，パケット到達率がどれだけ改善されるかを示す．

表 3.4: 遮蔽モデルに関するパラメータ

パラメータ	値
送信信号電力 $P_t$	10 mW
送信アンテナのゲイン $G_t$	1
受信アンテナのゲイン $G_r$	1
波長 $\lambda$	0.12 [m] (周波数:2.45GHz)
システムロス $L$	1
基準距離 $d_0$	1
距離減衰係数 $\beta$	4
遮蔽分散 $\sigma$	8 dB

### 3.2.1 前提条件

シミュレーションにおける前提条件を以下にまとめる。

- 直線の道路を想定
- 車両の追い越しや動的な速度変化が起こり、車両密度に偏りが発生する
- 各車両は次の情報を遅延なく常に知っている
  - 全車両の位置
  - 基地局の位置
- 通信距離からパケット到達率を推定できる
- MAC 層での再送制御は行わない

### 3.2.2 パケット到達率の定式化

パケット到達率改善手法では、通信距離からパケット到達率を推定できるものとしており、シミュレーション実験におけるパケット到達率の定式化を行う。パケット到達率の通信距離の関係は遮蔽モデル [14] に基づき、定式化する。遮蔽モデルの詳細については、付録 B に掲載する。

シミュレーション実験では、車間距離 150m でパケット到達率 0.5 と設定した。総務省信越総合通信局のネットワーク性能検証 [15] によると、無線伝送速度 2Mbps、送信電力 10mW、パケット長 1024byte、アンテナ高 1.04m とした条件で、車間距離 150m の場合にパケット到達率が 0.5 となることから、シミュレーション実験でもこの値をパラメータとして設定した。その他の遮蔽モデルに必要な各パラメータは表 3.4 のように定める。

IEEE 801.11 を利用することとし、 $\beta$  と  $\sigma$  の値は、屋外の都市環境を走行することを想定した場合にあらかじめ知られた値 [14] を適用した。

このとき、 $A = -87.04 + 40 \log(d)$  とすると、パケット到達率  $PDR$  とパケット到達率  $d$  の

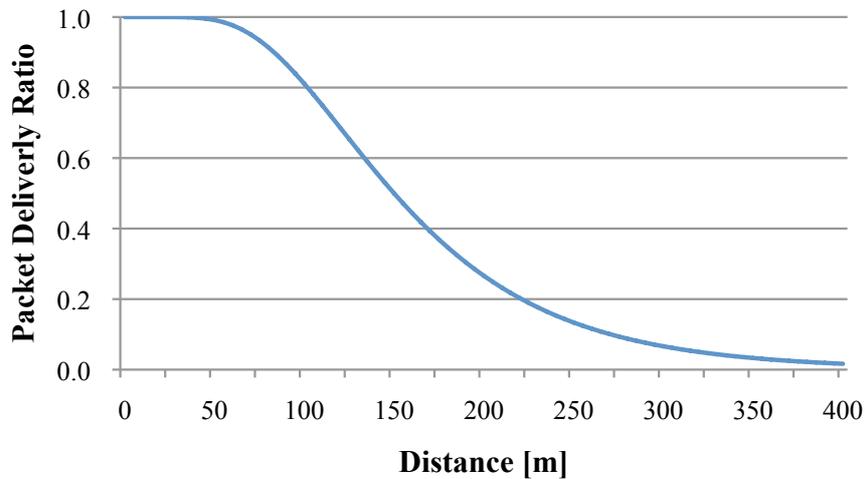


図 3.20: パケット到達率と通信距離の関係

関係は式 (B.5) によって定式化できる .

$$\begin{aligned}
 PDR\{x > A\} &= \int_A^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \\
 &= \int_A^{\infty} \frac{1}{4\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{128}}
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

通信距離とパケット到達率の関係を図 3.20 に示す .

### 3.2.3 実験パラメータ

シミュレーション実験で利用する各パラメータについて述べる

車両走行モデルは, 文献 [12] によるモデルを採用する . 車両走行モデルの詳細については, 付録 A に掲載する .

車両走行モデルに関わるパラメータは表 3.5 のように設定する . A.0.12 で示した 40,000m である収束地点を評価実験では 0m としている . 平均車両発生時間間隔は国土交通省道路局の平成 17 年度道路交通センサス [13] における都市高速道路の日中 7時から 19 時の平均交通量から導出した値である .

### 3.2.4 実験シナリオ

2つの基地局 BS0 から BS1 までを走行する間のパケット到達率の測定を行う . パケット到達率改善手法の特性評価のためのシナリオ 1 とまた, 各実験結果のシミュレーション回数は 100 回であり, 信頼区間は 95% としている .

表 3.5: 車両走行モデルに関するパラメータ

パラメータ	値
車線数	3 車線
基地局設置間隔	250 ~ 2,000 m
車両希望平均速度	100 km/h
渋滞時車両速度	20 km/h
平均車両発生時間間隔	1 秒/台
渋滞区間	なし, エリアの前半区間, エリアの後半区間

#### 3.2.4.1 シナリオ 1

パケット到達率改善手法の特性評価のため、車両位置や車両密度とパケット到達率の関係を評価を行う。BS0 と BS1 の設置間隔は 1,000m とし、渋滞なし、0m から 500m 区間を渋滞エリア、500m から 1,000m 区間を渋滞エリアとした 3 パターンについて行う。

#### 3.2.4.2 シナリオ 2

パケット到達率改善手法の有効性の検証のため、基地局設置間隔とパケット到達率の関係を評価する。基地局設置間隔は、250m、500m、750m、1,000m、1,250m、1,500m、1,750m、2,000m の 8 パターンについて行い、渋滞は発生しないものとした。

### 3.2.5 シナリオ 1 の結果と考察

BS0 と BS1 の設置間隔を 1,000m とした時のパケット到達率の測定結果を示す。

渋滞が発生しておらず、走行位置によって車両密度の偏りが少ない状況での走行位置と各基地局までのパケット到達率の関係を図 3.21 に示す。基地局に近い地点では、パケット到達率は 1 に近い値となり、1,000m 離れた地点では約 0.5 となる結果となった。式 (B.5) から、1,000m 離れた基地局に直接アクセスしようとするパケット到達率が限りなく 0 に近い値となるが、パケット到達率改善手法による IVC 経路探索により、0.5 程度のパケット到達率となることが分かる。車両密度の偏りが少ない環境では、BS0 までのパケット到達率の変化と、BS1 までのパケット到達率の変化はほぼ左右対称となることが分かった。

図 3.22 に渋滞が発生しない場合のパケット到達率改善手法と基本手法のパケット到達率の比較を示す。常に最寄りの基地局を利用する基本手法では、パケット到達率の最小値が 0.76 となるのに対し、パケット到達率改善手法では 0.93 に改善できることが分かった。図 3.21 の結果から、BS0 までのパケット到達率と BS1 までのパケット到達率は、ほぼ基地局設置間隔の中間地点で交差しているため、このような車両密度の偏りが少ない状況では基本手法でも最適なパケット到達率となると思われるかもしれない。しかし、渋滞エリアを設定しなくても、車両の速度にはばらつきがあるため、突発的に車両の偏りが発生し、実際には基地局設置位置の中央

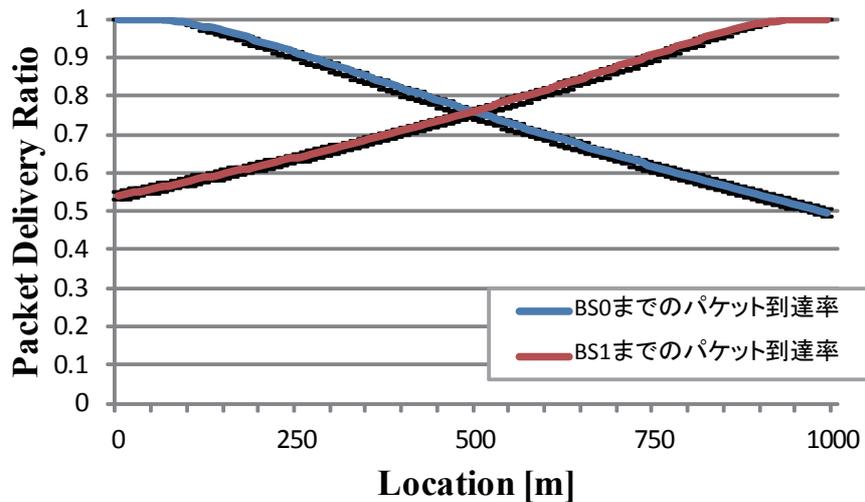


図 3.21: 走行位置と各基地局までのパケット到達率の関係 (渋滞なし)

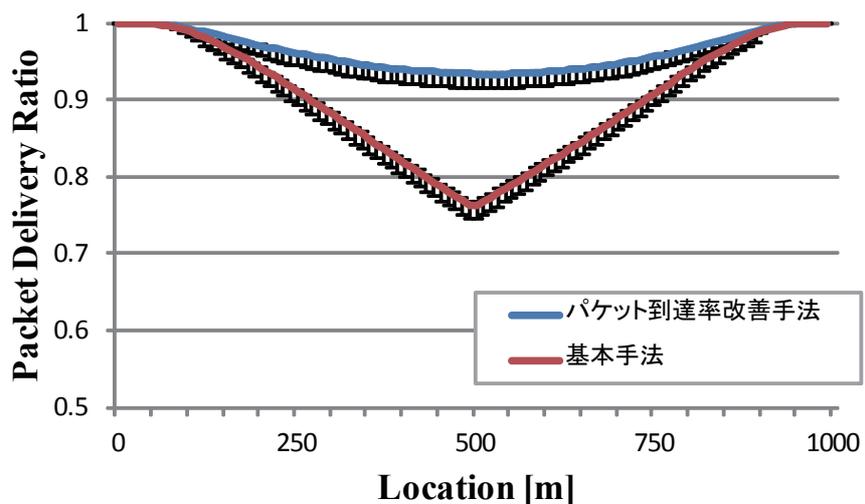


図 3.22: パケット到達率改善手法と基本手法のパケット到達率の比較 (渋滞なし)

地点ではない位置が最適なアクセス先基地局の切り替えタイミングとなる状況が起こりうる。パケット到達率改善手法では、突発的な車両の偏りがあったとしても常にパケット到達率の高い基地局をアクセス先として利用するため、基本手法よりも高いパケット到達率を維持することができたと考えられる。

基地局設置区間の前半区間が渋滞が渋滞エリアとした状況での走行位置と各基地局までのパケット到達率の関係を図 3.23 に示す。全体的な車両密度が高くなるため、図 3.21 よりも全体的にパケット到達率が高い結果となった。BS0 までのパケット到達率に注目した場合、渋滞区

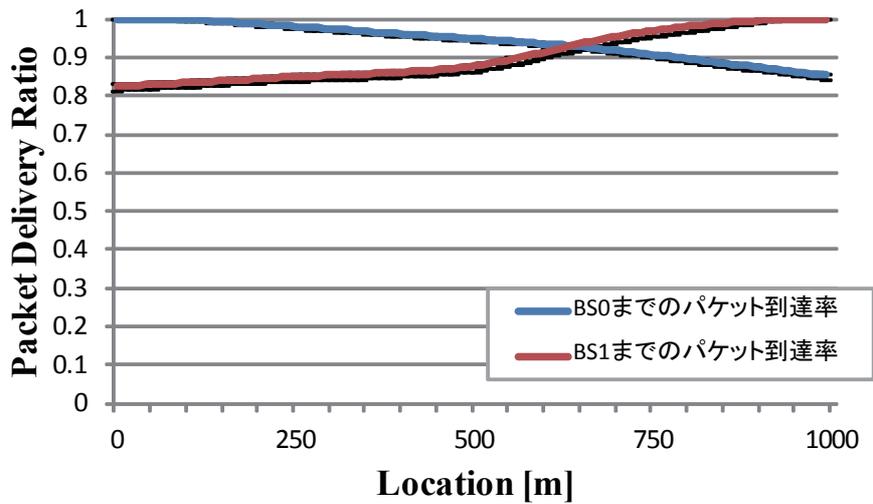


図 3.23: 走行位置と各基地局までのパケット到達率の関係 (0m から 500m 区間を渋滞エリア)

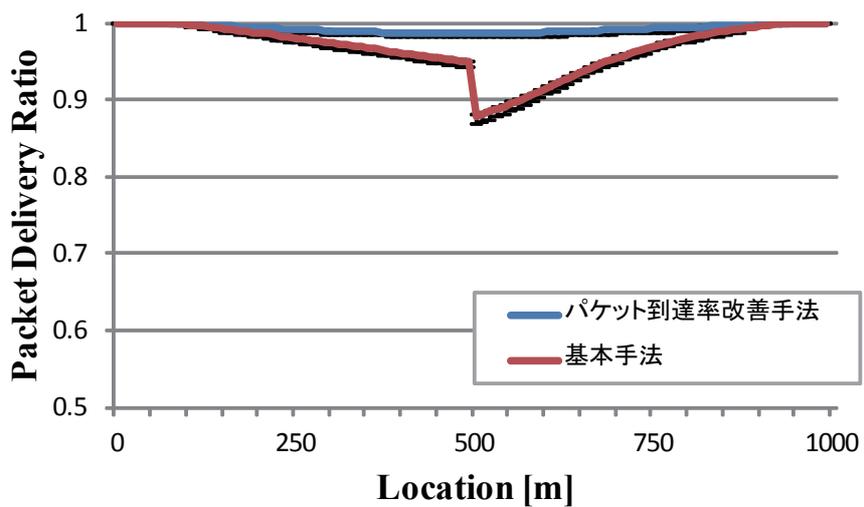


図 3.24: パケット到達率改善手法と基本手法のパケット到達率の比較 (0m から 500m 区間を渋滞エリア)

間での車両密度の高さから，基地局までの距離が離れてもパケット到達率が減少しにくいことがわかる．前半区間を渋滞エリアとして設定しているため，前半区間よりも後半区間の方が車両密度が低くなり，BS0 までのパケット到達率の減少傾向が強くなったと考えられる．車両密度の偏りによりそれぞれの基地局までのパケット到達率の曲線の交差する位置が中央地点よりも後半となることが分かる．

図 3.24 に前半区間を渋滞エリアとした場合のパケット到達率改善手法と基本手法のパケット

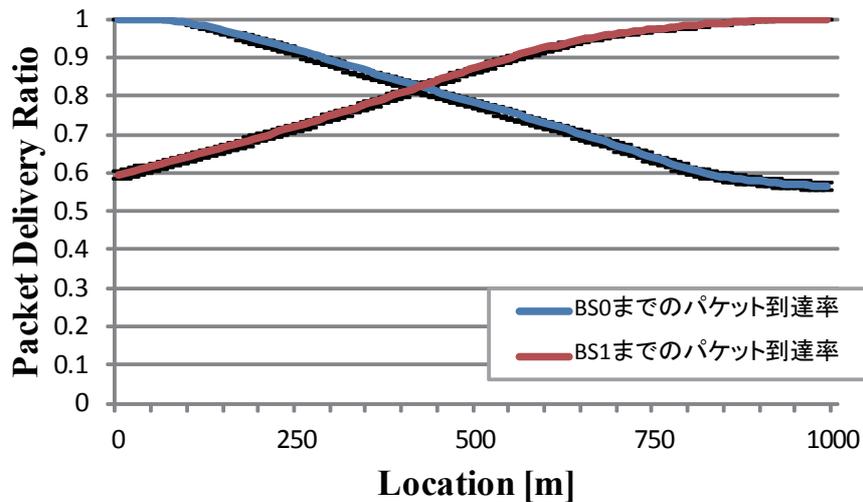


図 3.25: 走行位置と基地局までのパケット到達率の関係 (500m から 1,000m 区間を渋滞エリア)

到達率の比較を示す。常に最寄りの基地局を利用する基本手法では、パケット到達率の最小値が 0.89 となるのに対し、パケット到達率改善手法では 0.99 に改善できることが分かった。車両密度に偏りがある状況の場合、基本手法では明らかに適切な基地局の選択を行っていないことは、グラフの形状からも想像できる。パケット到達率改善手法では、このような状況でも最適な基地局の選択を行うことができ、結果として 0.99 という高いパケット到達率を達成することができた。

基地局設置区間の後半区間が渋滞が渋滞エリアとした状況での走行位置と各基地局までのパケット到達率の関係を図 3.25 に示す。同じ基地局設置間隔の半分を渋滞エリアとして設定していたにもかかわらず、図 3.23 よりも全体的にパケット到達率が低い結果となった。これは、前半区間を渋滞エリアとしたケースでは、0m から 1,000m 区間が純粹渋滞エリアとなっており、この区間では全車両が渋滞時速度 20km/h で走行しており、渋滞エリアを抜ける 500m 地点から減速を始める。これに対して、後半区間を渋滞エリアとして設定したケースでは、渋滞エリア侵入地点である 500m 地点から減速を開始するため、前半区間を渋滞エリアと設定したケースと比較して全体的なパケット到達率が低くなったと考えられる。

図 3.26 に後半区間を渋滞エリアとした場合のパケット到達率改善手法と基本手法のパケット到達率の比較を示す。常に最寄りの基地局を利用する基本手法では、パケット到達率の最小値が 0.79 となるのに対し、パケット到達率改善手法では 0.95 に改善できることが分かった。後半区間を渋滞エリアとして設定したケースと同様に、結果として 0.95 という高いパケット到達率を期待できることが分かった。

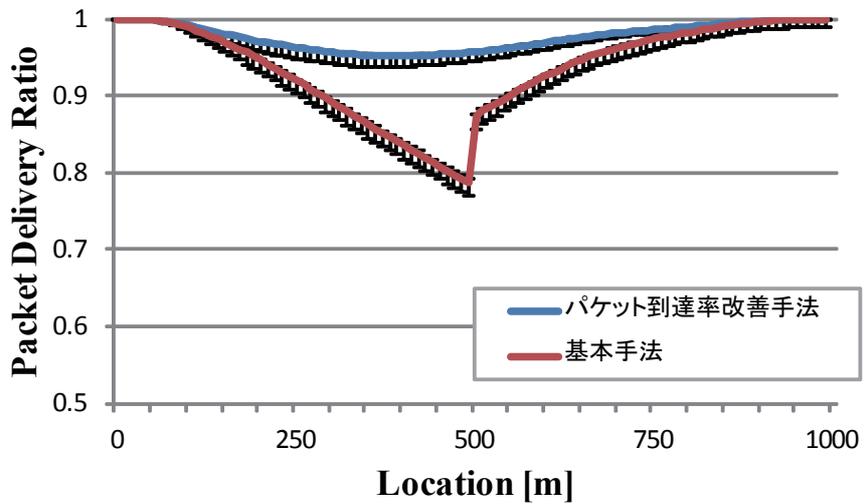


図 3.26: パケット到達率改善手法と基本手法のパケット到達率の比較 (500m から 1,000m 区間を渋滞エリア)

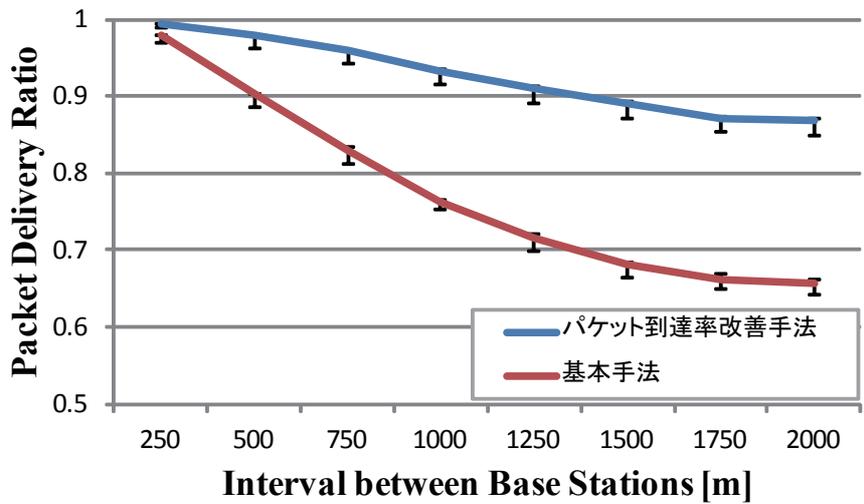


図 3.27: 基地局設置間隔と期待されるパケット到達率の関係

### 3.2.6 シナリオ 2 の結果と考察

基地局設置間隔と期待されるパケット到達率の関係を図 3.27 に示す。基地局設置間隔が短い場合は基本手法と比較して大きな差は見られないが、基地局設置間隔が長くなるほどパケット到達率の差が顕著に現れることが分かる。

また、基地局設置間隔が 500m であった場合の基本手法でのパケット到達率は 0.90 であり、

基地局設置間隔が 1,500m の場合の packets 到達率改善手法では 0.89 となった。基地局の設置コストの観点からすると、渋滞が発生しない日常的な車両走行状態であれば、packets 到達率改善手法を利用すると基本手法と比較して、同一の packets 到達率を達成するために、基地局設置数を 1/3 程度に抑えられることも予想される。

### 3.2.7 packets 到達率改善手法の評価のまとめ

シミュレーション実験の結果から、基地局設置間隔が 1,000m の場合、渋滞エリアなし、前半区間を渋滞エリア、後半区間を渋滞エリアいずれの場合でも packets 到達率を改善できることが分かった。渋滞が発生していない日常的な状況を考えた場合、平均的には車両の偏りはなく、隣接する基地局設置位置の中間地点でアクセス先を切り替える方式で十分であるとも考えられたが、実際には突発的な車両密度の変化にも柔軟に対応出来る packets 到達率改善手法により十分に改善できたことを示した。

基地局設置間隔と期待される packets 到達率の関係から、packets 到達率 0.90 程度を達成したいという要求があった場合には、基地局設置台数を 1/3 程度に減少できることも示した。

## 第4章

# 結論と今後の課題

本論文では、車両からインターネットを利用する状況が今後増加することを想定し、目的として、IVC(車車間通信: Inter-Vehicular Communication), RVC(路車間通信: Road-to-Vehicle Communication) によりインターネットにアクセスする環境で、無線帯域利用効率とパケット到達率を向上させることを挙げた。この目的を達成するため、帯域利用効率改善手法として、ボトルネック利用帯域の評価によるアクセス先基地局の選定と単純割り当ておよび基地局用の無線チャネルを予約する手法を提案し、パケット到達率改善手法としては、ハローパケットの中継による IVC 経路探索手法を提案した。

IVC によりインターネットアクセスを行う環境下では、多数の車両が特定の基地局にアクセスすることも考えられ、有線通信よりも利用できる帯域が十分ではない無線通信のリンクがボトルネックと成り得る。このように無線帯域に余裕がなくなような状況で、常に最寄りの基地局をアクセス先として優先的に利用する単純な手法と比較して大きな帯域利用効率の改善が見られることが帯域利用効率改善手法の評価結果から分かった。さらに、突発的に渋滞が発生したエリアの場合、周辺の帯域負荷が小さいエリアの基地局に対して効率的に負荷分散を行うことができるため、評価実験の走行環境では全車両の同時利用帯域を 30% 程度向上させることができた。

パケット到達率改善手法の評価実験の結果から、車両密度が時間と共に変化するような状況柔軟に対応し、常に最寄りの基地局をアクセス先として利用する単純な方式と比較してパケット到達率を改善できることが分かった。また、車両密度の変化が少ない日常的な状況を考えた場合であっても、十分にパケット到達率を改善できたことを示した。また、IEEE 802.11 のような短距離無線の場合は、広い範囲を通信エリアとしてカバーしようとした場合、基地局の設置台数が増大することも考えられるが、パケット到達率改善手法より、基地局設置台数を大幅に削減できることも示した。

今後の課題としては、以下の点が挙げられる。

帯域利用効率改善手法に関しては、1 つの無線チャネルしか利用できない状況でも CDMA(Code Division Multiple Access) や TDMA(Time Division Multiple Access) の手法利用することにより電波干渉を防ぐことができ、これらと組み合わせた手法や 5 チャネル以上利用できる場合の検討が必要である。また、本論文での提案では 1 つの隣接基地局間で一列の

中継車両列としていたが、複数列を許容する場合の手法も考えられ、その場合のチャンネル割り当てについても検討の余地があると考えられる。本論文では、帯域利用効率のみの評価であったが、実際にはチャンネル再割り当ての発生による伝送遅延やジッタのサービス品質の劣化の評価も必要である。評価実験では、常に周辺ノードの位置、利用チャンネル、利用帯域の情報を常に知っているという前提であったが、実際にはこれらの情報をハローパケットによって共有するため、情報の陳腐化による影響が考えられ、これについての評価も必要であると考えられる。

パケット到達率改善手法に関しては、MAC層での再送制御によるパケット到達率の改善を考慮した手法の検討が必要である。評価実験では、パケット到達率のみの評価であったが、伝送遅延、ジッタ、伝送帯域の評価も行い総合的な品質評価が必要となる。また、ハローパケットによるノード位置情報の共有を行っていることによる情報の陳腐化や、ハンドオーバの発生によるサービス品質の劣化についての評価も必要である。

本論文では、インターネットサービスとしてUDPストリーミングサービスのみを想定していたが、実際の利用環境では多種多様なサービスが利用されるため、より複雑な通信環境に対応した帯域利用効率およびサービス品質を向上させる手法の検討を行いたい。

# 謝辞

本論文の作成にあたり，多くの方から助言をいただきました．ここにその方々への感謝の意を表します．

指導教員である若原恭教授と小川剛史講師からは終始熱心なご指導をいただきました．東京大学情報基盤センター若原中山研究室の中山雅哉准教授，関谷勇司講師からもご指導いただきました．同研究室の学生の皆様からも日常生活の中で種々の助言をいただくことができました．

以上の方々に格別の感謝を表すると共に，本論文の作成に関わられたすべての方々に御礼申し上げ，謝辞とさせていただきます．

## 参考文献

- [1] IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems Amendment 2: Physical and Medium Access Control Layers for Combined Fixed and Mobile Operation in Licensed Bands and Corrigendum 1. *IEEE Std 802.16e-2005 and IEEE Std 802.16-2004/Cor 1-2005 (Amendment and Corrigendum to IEEE Std 802.16-2004)*, pp. 0-1-822, 2006.
- [2] Supplement To IEEE Standard For Information Technology- Telecommunications And Information Exchange Between Systems- Local And Metropolitan Area Networks- Specific Requirements- Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) And Physical Layer (PHY) Specifications: Higher-speed Physical Layer Extension In The 2.4 GHz Band. *IEEE Std 802.11b-1999*, pp. i-90, 2000.
- [3] J. Luo and J. P. Hubaux. A survey of inter-vehicle communication. *Technical Report IC/2004/24, EPFL, Lausanne, Switzerland*, 2004.
- [4] 藤井治樹. ITS への期待とその発展基盤. 電子情報通信学会論文誌 A, Vol. 91-A, No. 1, pp. 2-10, 2008.
- [5] D. Johnson, C. Perkins, and J. Arkko. Mobility Support in IPv6. RFC 3775 (Proposed Standard), June 2004.
- [6] H. Soliman, C. Castelluccia, K. El Malki, and L. Bellier. Hierarchical Mobile IPv6 Mobility Management (HMIPv6). RFC 4140 (Experimental), August 2005. Obsoleted by RFC 5380.
- [7] R. Koodli. Mobile IPv6 Fast Handovers. RFC 5268 (Proposed Standard), June 2008.
- [8] M. Noh G.Koo, K.Yu and Y. Mun. Improved fast handover protocol using hmipv6 based on ieee 802.16e network. *Lecture notes in computer science*, Vol. 4706, pp. 415-423, 2007.
- [9] Ki-Sik Kong, Wonjun Lee, Youn-Hee Han, Myung-Ki Shin, and HeungRyeol You. Mobility management for all-ip mobile networks: mobile ipv6 vs. proxy mobile ipv6. *Wireless Communications, IEEE*, Vol. 15, No. 2, pp. 36-45, 2008.
- [10] Ruidong Li, Jie Li, Kui Wu, Yang Xiao, and Jiang Xie. An enhanced fast handover with low latency for mobile ipv6. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, Vol. 7, No. 1, pp. 334-342, Jan. 2008.

- [11] Y.Sekiya P.Akkhara and Y.Wakahara. Cut-through rebroadcasting using multiple channels for alarm message in vehicular ad hoc networks. *The 2009 IAENG International Conference on Communication Systems and Applications (ICCSA'09)*, March 2009.
- [12] 藤村嘉一, 長谷川孝明. 車両の安全のためのコンテンション型 MAC を用いた車車間通信・路車間通信の性能評価. 電子情報通信学会論文誌 A, Vol. J90-A, No. 6, pp. 535-550, 2007.
- [13] 国土交通省道路局. 平成 17 年度道路交通センサス. <http://www.mlit.go.jp/road/census/h17/pdf/gaiyo.pdf>, June 2006.
- [14] T.S.Rappaport. Wireless communications, principles and practice. *Prentice Hall*, 1996.
- [15] 総務省信越総合通信局. アドホックネットワークの活用に関する調査研究. [http://www.soumu.go.jp/soutsu/shinetsu/sbt/kenkyu/adhoc/adhoc\\_index.htm](http://www.soumu.go.jp/soutsu/shinetsu/sbt/kenkyu/adhoc/adhoc_index.htm), 2003.
- [16] 安達真, 森田洋平, 藤村嘉一, 長谷川孝明. 通信ネットワークを含む自律走行型交通流シミュレータに関する一検討. 電子情報通信学会技術研究報告.ITS, pp. 27-32, 2002.
- [17] Herman Gaizs, D. C. and R. W. Rothery. Non linear follow the leader model of traffic flow. *J. Operations Research*, Vol. 9, No. 4, pp. 545-567, 1961.
- [18] H. T. Friis. A note on a simple transmission formula. *Proc. IRE*, 34, 1946.

## 発表文献

- [1] 松岡健太郎, 小川剛史, 若原恭 “車車間路車間通信を用いたストリーミング配信におけるパケット到達率最大化のための基地局選択手法”, 信学技報, vol. 109, no. 273, NS2009-112, pp. 49-54, 2009.
- [2] 松岡健太郎, 小川剛史, 若原恭 “車車間・路車間通信におけるアクセス先基地局の選択及び無線通信チャンネル制御による帯域利用効率化手法”, 信学技報, 2010 (発表予定).
- [3] 松岡健太郎, 小川剛史, 若原恭 “車車間・路車間通信によるインターネットアクセスにおいて無線帯域の利用効率向上を図る経路制御手法”, 電子情報通信学会春季全国大会, 2010 (発表予定).

## 付録 A

# 車両走行モデル

文献 [12] で提案されている車両走行モデルについて示す．車道は高速道路のような信号のない直線道路であるとして，車両の速度や追い越しの意思決定の方法をモデル化する．モデル化の対象は大きく分けて以下の 3 つの項目となる．

- 車両の発生モデル
- 走行モデル
- 車線変更モデル

これらのモデルのよって実際に決まるのは車両の加速度である．0.1 秒間隔で周囲の車両の位置関係から自車の加速度を決定する．それぞれのモデルについて次項から述べる．

### A.0.8 車両の発生モデル

車両発生はポアソン分布に従うと仮定しており，発生時の車両の初速度は 70km/h とする．ただし，車両発生時に自車線上の前方車両との車頭時間間隔が 1 秒以下の場合には，車頭時間間隔が 1 秒になるまでプールで待機するものとする．

### A.0.9 走行モデル

走行モデルについては，さらに自由走行モードと追従走行モードに細分化し，文献 [16] で定義されている式 (A.1) の車頭時間間隔によって，それぞれのモードを切り替えるものとする．

$$\text{車頭時間間隔} = \frac{x_{n-1} - x_n}{\dot{x}_n} \quad (\text{A.1})$$

$x_n$  : 車両  $n$  の進行方向位置

$x_{n-1}$  : 前方車両  $n - 1$  の進行方向位置

$\dot{x}_n$  : 車両  $n$  の進行方向速度

この車両時間間隔が 2 秒より大きい場合，自由走行モードとなり，2 秒以下の場合には追従走

表 A.1: 自由走行モードの加速度テーブル

$\dot{x}_n(t)$	$\ddot{x}_n(t + \Delta)$
$\dot{x}_n(t) < 0.8\dot{x}_n$	0.25 [m/s <sup>2</sup> ]
$0.8\dot{x}_n < \dot{x}_n(t) \leq 0.95\dot{x}_n$	0.125 [m/s <sup>2</sup> ]
$0.95\dot{x}_n < \dot{x}_n(t) \leq 1.05\dot{x}_n$	0 [m/s <sup>2</sup> ]
$1.05\dot{x}_n < \dot{x}_n(t)$	-0.2 [m/s <sup>2</sup> ]

$\dot{x}_n$  : 車両  $n$  の希望速度

$\Delta$  : 反応時間遅れ (総合遅延時間)

行モードに従う。

#### A.0.9.1 自由走行モード

各車両には希望速度が設定されている。希望速度とは、運転者が希望する最大の速度である。希望速度は平均 100km/h、標準偏差 10km/h の正規分布で各車両に与えられる。ただし、最高で 120km/h、最低で 80km/h でトランケートする。自由走行モードでは現在の車両速度と希望速度から表 A.1 に従い、自車の加速度を決定する。反応時間遅れとは、状況の変化が生じてから、車両が変化に対する行動を起こすまでの人間遅延と僅かな機械遅延の和を指す。総合遅延の標準偏差は 0.3 秒、平均は 0.1 秒から 0.6 秒の値を各車両が固有に持つものとした。ただし、総合遅延は最低で 0.1 秒とする。

#### A.0.9.2 追従走行モード

追従走行モードについては、文献 [17] で提案されている式 (A.2) により決定する。

$$\ddot{x}_n(t + \Delta) = \frac{\alpha \dot{x}_n^m(t + \Delta) [\dot{x}_{n-1} - \dot{x}_n(t)]}{[x_{n-1} - x_n(t)]^l} \quad (\text{A.2})$$

$l, m, \alpha$  : 常数 ( $l=0.1, m=0.05, \alpha=0.3$ )

$\Delta$  : 反応時間遅れ (総合遅延)

$x_n$  : 車両  $n$  の位置 (m)

$\dot{x}_n$  : 車両  $n$  の速度 (m/s)

$\ddot{x}_n$  : 車両  $n$  の加速度 (m/s<sup>2</sup>)

#### A.0.10 車線変更モデル

車線変更モデルは文献 [16] で示されているモデルを適用する。

運転者は、希望速度以下かつ追従走行モードの状態において、目視で得られた情報より安全に車線変更できると判断した状況が 6 秒以上連続して続いた場合には右車線に、8 秒以上連続して続いた場合には左車線に車線変更を行うものとする。安全に車線変更できる場合の判断基

表 A.2: 安全に車線変更が行える条件

<u>以下の条件を全て満たした場合に 安全に車線変更が行える状況と判断する</u>	
✓	希望変更車線の前後50m以内に車両が存在しない
✓	変更希望車線の前後50m以内に自車線以外から侵入してきている車両が存在しない
✓	自車線以外を走行し、前方かつ自車よりも低速の車両が侵入希望車線に車線変更の合図を出していない
✓	自車線以外を走行し、後方かつ自車よりも高速の車両が侵入希望車線に車線変更の合図を出していない

準を表 A.2 に示す。表 A.2 の条件を満たしていなければ運転者は車線変更を取り止める。

#### A.0.11 渋滞モデル

特定の領域に渋滞を発生させる場合は、車両がこの渋滞領域を走行するときに、渋滞時車両速度まで減速度  $1.0\text{m/s}^2$  で減速させる。渋滞時車両速度はパラメータで設定され、各車両の希望速度に関係なく、全車両で一定の速度とする。

#### A.0.12 走行特性の分析

車両発生時の速度が  $70\text{km/h}$  であるのに対し、平均希望速度が  $100\text{km/h}$  であるため、車両速度や車両密度が収束するまでにある程度の走行距離が必要となると予想できる。そこで、本項ではシミュレーションによって走行位置と車両速度、車両密度の関係を示す。

車線数は3車線とし、平均車両発生時間間隔は国土交通省道路局の平成17年度道路交通センサス [13] における都市高速道路の日中7時から19時の平均交通量から導出した値である1秒とし、200回のシミュレーションを行った。車両発生地点を0m地点とし、50,000m走行させた時の車両速度と車両密度を測定した。

図 A.1 に車両走行モデルにおける走行位置と車両速度の関係を示す。3車線、平均車両発生間隔1秒であるため、車両発生地点である0m地点では平均車頭時間間隔は3秒となるため、A.0.9 から自由走行モードとなる。平均希望速度は  $80\sim 120\text{km/h}$  であるため、車両発生地点では加速を行う。ただし、加速により希望速度に近くなったり、または追従走行モードに遷移することによる減速が起きることが予想できる。図 A.1 から1400m地点前後で車両速度が  $89.0\text{km/h}$  となり、これ以降速度が低下し、収束に向かっていくことが分かる。40,000m地点の車両速度は  $75.9\text{km/h}$  であり、50,000m地点の車両速度は  $76.4\text{km/h}$  であるため、この区間では車両速度が十分に収束していると考えられるため、40,000m地点を収束地点として扱い、収束時の平均車両速度は  $76.0\text{km/h}$  とする。

図 A.2 に車両走行モデルにおける走行位置と車両密度の関係を示す。走行位置と車両密度

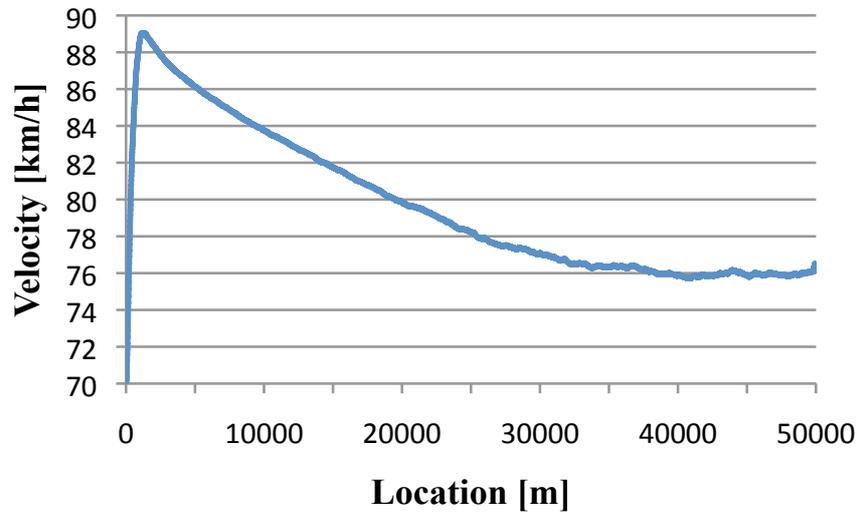


図 A.1: 車両走行モデルにおける走行位置と車両速度の関係

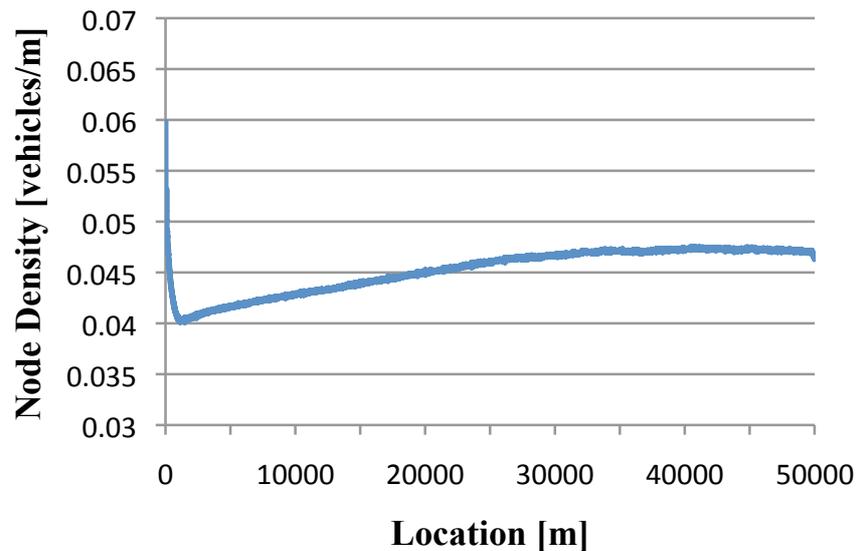


図 A.2: 車両走行モデルにおける走行位置と車両密度の関係

の関係も図 A.1 と同様の関係となった。40,000m 地点での車両密度は 0.0473 台/m であり、50,000m 地点では 0.0468 台/m となり、収束地点での車両密度を 0.047 台/m とみなす。このとき、1 車線として考えた場合の平均車両間隔は 21.3m となる。従って、隣接する基地局の間に位置している平均車両台数は (基地局間距離)/21.3 で求めることができる。

## 付録 B

# 遮蔽モデル

パケット到達率を考慮した基地局選択手法の評価実験では、フェージングによる受信側の電波強度の変動を考慮した、遮蔽モデル [14] と呼ばれる電波伝搬モデルについて示す。遮蔽モデルでは、送信アンテナから距離  $d$  離れた場所における受信信号電力  $P_r(d)$  と、距離が基準距離  $d_0$  である場合の  $P_r(d_0)$  との間に、式 (B.1) の関係が成り立つ。

$$\left[ \frac{P_r(d)}{P_r(d_0)} \right]_{dB} = -10\beta \log \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_{dB} \quad (\text{B.1})$$

$P_r(d)$  : 送信器から距離  $d$  離れた場所における受信信号電力

$d_0$  : 基準距離

$\beta$  : 距離減衰係数

$X_{dB}$  : 生起確率が正規分布 (平均=0, 標準偏差=遮蔽分散  $\sigma$ ) に従う乱数

距離減衰係数  $\beta$  が大きいほど減衰が大きいということになり、 $X_{dB}$  によりフェージングによる受信側の電波強度の変化を確率的に評価している。

$P_r(d)$  を求める方法として、自由空間モデル [18] と 2 波モデル [14] によって求める方法があり、距離  $d$  が式 (B.2) で表される  $d_c$  よりも長い場合には、2 波モデルを用いるのが好ましいと言われている。

$$d_c = \frac{4\pi h_t h_r}{\lambda} \quad (\text{B.2})$$

基準距離  $d_0$  を 1m としたとき、 $P_r(d_0)$  は自由空間モデルを用いて求めることにより、 $P_r(d)$  を式 (B.3) のように表すことができる。

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \quad (\text{B.3})$$

$P_t$  : 送信信号電力

$G_t$  : 送信アンテナのゲイン

$G_r$  : 受信アンテナのゲイン

$\lambda$  : 波長

$L$  : システムロス

ここで、通信距離  $\alpha m$  でパケット到達率 0.5 とした場合を考える。

パケット到達率 0.5 とすると、式 (B.1) の  $X_{dB}$  は 0 となる。従って、車間距離  $d$  のときにパケットを受信できるためには、式 (B.4) が成り立つ必要がある。

$$\left[ \frac{P_r(d)}{P_r(d_0)} \right]_{dB} = -10\beta \log \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_{dB} > -10\beta \log \left( \frac{\alpha}{d_0} \right) \quad (\text{B.4})$$

このとき、 $A = 10\beta \log \left( \frac{d}{\alpha} \right)$  とすると、パケット到達率  $PDR$  は式 (B.5) で求めることができる。

$$PDR\{x > A\} = \int_A^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (\text{B.5})$$