

自律分散システムによる
マイクロセルを用いた移動体ネットワークの
制御方式

2005 年度
平岩 賢志

あらまし

ネットワークサービスのグローバル化の進展により多様な情報をインターネット上のサーバから取得する環境が整備されつつある中、自動車など移動体に対しこうした環境を提供する道路交通システムのための通信基盤の確立が求められている。本研究の目的は、自律分散システムによる移動体ネットワーク制御方式を確立しこれを基盤とした通信サービスの提供を可能とすることである。道路交通システムを対象とする移動体ネットワークの特徴として、トポロジーが複雑な多数の基地局を制御する必要があること、連続稼動するシステムなので保守運用機能の充実が不可欠であることといった要件ある。こうした要件に対し、電話交換網のような集中制御ではなくインターネットのように本質的に分散ネットワークであるが高信頼な通信手段を提供する方式が有効であると考えられる。そのためのシステムアーキテクチャ、ネットワーク制御方式及びネットワークリソース管理方式を提案しその適用性を評価した。

移動体ネットワークのシステムアーキテクチャとして、道路交通システムへの適用を考えると道路に敷設される多数の基地局より構成されしかも連続稼動を不可欠とするシステムであるためフォールトトレランス性の確保が重要な課題である。この観点からシステムアーキテクチャに自律分散システムを適用することが考えられる。本研究では、移動体ネットワーク制御を自律分散でのメッセージフロー制御により実現した。

移動体ネットワーク制御方式として、道路交通システムでは、多数の移動体が連続的に配置されたマイクロセル間を高速に移動するため、局所的な領域内で頻繁に発生する端末の移動を効率良く管理する移動体管理が必要となる。ハンドオーバー期間中の通信断による実効的なスループットの低下は、セル径の小さいマイクロセルネットワークの環境では特に深刻である。提案方式ではハンドオーバー遅延特性を改善するために、ネットワーク内で移動元の接続情報を移動先に高速に引き継ぐ方式を実現した。さらに、走行支援サービスなど伝送品質に高信頼性を要求されるサービスがあり、ハンドオーバーにともなうパケット損失を低減する方式を実現した。

ネットワーク制御方式が有効に機能するためには、通信チャネルなどネットワークリソースの効率的な管理手段が不可欠となる。多くのマイクロセルにより構成される通信ゾーン内の端末に対し通信路を提供するための通信チャネル管理が重要な役割を果たす。こうした通信チャネル管理に要求される基本的な要件のひとつにフォールトトレランス性の確保がある。ネットワークの部分障害に対し障害部位を切り離し継続稼動することが求められるからである。また通信チャネルの割当はトラフィック状況に応じた動的な制御が必要となる。本研究では、自律分散システムアーキテクチャによりトラフィック状況に動的に適應する通信チャネル管理

方式を提案し実装した。

提案方式を実機及び計算機シミュレーションにより評価した。想定するネットワーク規模においてサービス要件を満足する機能，性能を得ることができた。これにより自律分散システムによる移動体ネットワーク制御方式及びネットワークリソース管理方式の有効性を検証でき，道路交通システムのための移動体ネットワークに適用可能な見通しを得ることができた。

自律分散システムによる マイクロセルを用いた移動体ネットワークの 制御方式

目次

1. 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 本研究の目的	2
1.3 本研究の提案方式概要	2
1.4 本論文の構成	4
2. 関連研究と本研究の位置づけ	6
2.1 道路交通システムにおける通信サービス研究の経緯	6
2.2 マイクロセル移動管理方式に関する研究	11
2.3 自律分散システムに関する研究	17
2.4 本研究の位置づけ	19
3. マイクロセル移動体ネットワークシステム	24
3.1 システム概要	24
3.2 マイクロセル路側ネットワークシステムに対する要求条件	25
3.2.1 通信方式に対する要求条件	25
3.2.2 システムに対する要求条件	27
3.3 実装開発の基本方針	27
4. 自律分散システム	28
4.1 自律分散システム (ADS) アーキテクチャ	28
4.2 自律分散システム (ADS) メッセージ通信方式	31
5. マイクロセル移動体ネットワーク制御方式の実装と評価	34
5.1 はじめに	34
5.2 ネットワーク制御方式実装上の課題と要求条件	35
5.3 ネットワーク制御提案方式	37
5.3.1 マイクロセルネットワーク実装構成	37

5.3.2	移動管理方式	40
5.3.3	アドレス管理方式	42
5.3.4	データキャッシュによるスループット改善方式	46
5.3.5	パケットロス回避によるスループット改善方式	48
5.4	提案方式の適用性評価	49
5.4.1	従来方式との比較	49
5.4.2	評価システム構成と評価概要	52
5.4.3	システム性能評価	60
5.4.4	ADS 網通信性能評価	62
5.4.5	上位網インタワーク性能評価	68
5.4.6	無線基地局通信性能評価	70
5.5	まとめ	74
6.	マイクロセル移動体ネットワーク通信チャンネル管理方式の実装と評価	76
6.1	はじめに	76
6.2	通信チャンネル管理実装上の課題と要求条件	79
6.3	通信チャンネル管理提案方式	83
6.3.1	通信ゾーン管理モデル	84
6.3.2	通信ゾーン最適化シナリオ	86
6.3.3	通信ゾーン制御 ADS アルゴリズム概要	87
6.3.4	通信ゾーン制御 ADS アルゴリズム実装方式	88
6.4	提案方式の適用性評価	95
6.4.1	評価目標	95
6.4.2	評価環境	95
6.4.3	評価項目	96
6.4.4	トラフィック環境に応じた通信ゾーン制御の評価	97
6.4.5	ネットワーク障害に応じた通信ゾーン制御の評価	102
6.5	まとめ	104
7.	結論	106
7.1	研究の成果.....	106
7.2	今後の課題.....	109
	参考文献	111
	本研究に関連する著書	118
	謝辞	121

第1章

序論

1. 1 研究の背景

インターネットは情報流通の基盤として定着しつつあり、これをささえるグローバルなネットワークサービスの普及により「いつでも、どこでも、だれでも」多様な情報をインターネット上のサーバから取得する環境が整備されてきている。「自動車」に目を向けると道路交通情報提供、自動料金収受等の道路交通サービスが実用に供され、さらにこれらを応用したサービスが各分野に展開されつつある。ネットワークサービスのグローバル化にともなう自動車社会進展のあり方の一つとして、自動車が移動端末としての性格を持ち、乗っている人の安全性、利便性の向上あるいは商用車の運行管理、道路管理での効率向上等、この「移動端末」を利用したサービスが拡大しつつあることが挙げられる。こうした自動車を対象とする道路交通サービスのためのアクセスネットワークには、普及インフラであるセルラーネットワークによる方式に加え局所的、特定目的に最適化された利用を目的としたセル長の小さいマイクロセルによる方式も近年注目されている。上述の道路交通システムのための移動体ネットワーク方式の確立が求められており、産学官による研究が進められてきた[19]-[26]。

道路交通システムで利用すると考えられるネットワークは、移動端末との通信を行う複数のアクセスネットワークと情報を提供するアプリケーションセンタ及びこれらと連携し情報の収集、加工、配信管理を行うサービスセンタ、バックボーンネットワークで構成される。構成される種々のアクセスネットワークは、通信可能エリア、通信速度、端末の移動許容速度に関し異なる特長を持つ。道路交通システムでの基本的な要件として利用者の位置や転送する情報の特性に応じて利用可能なアクセスネットワークの中から適切な通信経路を選択し利用者や情報提供者に意識せずにシームレスに利用できることが求められる。

アクセスネットワークにはマイクロセルを用いるものもある。これは、道路側に敷設される無線基地局を介し自動車の搭載される端末（車載端末）に対し高速な情報配信を目的とするものである。無線基地局の通信方式には、専用の狭域無線通信方式を用いることによりセル長が数 m から数十 m のマイクロセルにより構成される通信ゾーンを高速に移動する車載端末に対し情報配信する。配信する情報は、上述のような多種サービスに対応するために、通信量、通信品質の点で非常に多様化している[21][24]。

マイクロセルを用いた移動体ネットワークシステム実現の課題として下記がある。システ

第1章 序論

ム的な課題として全国一括でのシステム稼働は困難であり、初期段階では道路管理など特定目的で局所的に通信設備を導入し順次増設しながらサービスエリアを拡大していくために段階的なシステム拡張の手段が求められる。また基地局が多数あるシステム構成でありかつ連続稼働を不可欠とするシステムであるために運用時の障害対応など効率的なシステム保守の手段が求められる。通信方式上の課題として、マイクロセルにより構成される通信ゾーンを高速に移動する車載端末に対し情報配信することから移動中の電波環境の変化に追従しマイクロセルをまたがり連続的な通信を行うためのアクセスネットワーク方式が求められる。また、アクセスネットワークはテキスト、画像情報を含むマルチメディア情報を伝送することから十分なスループットを確保することが必要となる。さらには、マイクロセルにより構成される通信ゾーンでの通信チャンネルは限りがあるために、トラフィック状況あるいはシステムの稼働状況に応じ通信チャンネルを有効に利用する手段が求められる。

1. 2 本研究の目的

本研究では、上述のような通信方式上の課題、システムの課題に対し下記を実現することにより、道路交通システムに適用可能なマイクロセルによる移動体ネットワーク（路側ネットワーク）システムを確立することを目的とする：

- ・ マイクロセルを用いた移動体ネットワークのシステムアーキテクチャの確立.
- ・ 提案アーキテクチャによるマイクロセル移動体ネットワーク制御方式の確立.
- ・ 提案ネットワーク制御方式を利用したマイクロセル移動体ネットワーク通信チャンネル管理方式の確立.

1. 3 本研究での提案方式の概要

マイクロセルを用いた移動体ネットワークのシステムアーキテクチャ

上述のシステムの課題である段階的なシステム拡張や効率的なシステム保守実現のために自律分散システムを適用することが考えられる。自律分散システムは計算機システム構築技術として提案され[13]、システムの大規模化が進みシステムの一括構築の困難さやシステム停止にともなう社会的な影響が増大しつつある中、システムの無停止や稼働中の保守といったニーズを実現するためのシステム技術として情報、制御分野で適用されてきた[15]-[17]。システムを構成するサブシステムが不稼働となっても残る他のサブシステムにより稼働を継続可能とする耐故障性（フォールトトレランス性）の確保に適したアーキテクチャである。本研究の対象としている路側ネットワークへの適用を考えると路側ネッ

第1章 序論

トワーク設備は連続稼動を不可欠としており、運用時に障害部位を切り離すことにより稼動を維持する運用方式の実現が求められる。

本研究では、道路交通システムのための移動体ネットワークのシステム基盤に自律分散システムアーキテクチャを適用した。本アーキテクチャを適用し上述の通信方式上の課題を解決するために自律分散制御でのメッセージ通信（ADS メッセージ通信）により、メッセージフローによるネットワーク制御方式を確立し、さらにアクセスネットワーク内でマイクロセルが提供する通信帯域を管理するための通信チャンネル管理方式を実現した。

マイクロセル移動体ネットワーク制御方式

移動をサポートする技術として代表的な方式にインターネット上の移動を管理する Mobile IP がある。Mobile IP がインターネット上のグローバルな移動管理を目的とした方式であるのに対し、その発展型として局所的な移動管理を行うことを目的としたマイクロモビリティ方式がある[46]-[49]。局所的に頻発する移動を効率良く管理するメカニズム提供を目指した方式であるが、高速に移動する車両に対し連続的な通信環境を提供するためにはハンドオーバーレイテンシを改善する必要がある。また従来のマイクロモビリティ方式はプロトコルを簡易化することによりネットワーク負荷を低減することを狙いとしておりハンドオーバーにもなうある程度のパケット損失を許容することを前提とした方式であり、走行支援サービスなど高信頼なパケット伝送を可能とする方式が必要となる。

本研究では、自律分散システムアーキテクチャを適用し道路交通システムのためのマイクロセル移動体ネットワーク制御方式を開発した。本方式は、高速に走行する車両の移動を路側ネットワーク内に隠蔽する方式である。即ち本システムでは、セル長の小さいマイクロセルにより構成される通信ゾーンを高速に移動するために頻繁に起こるハンドオーバーを高速に処理しながら連続通信の環境を提供するマイクロモビリティを実現するものである。これにより路側ネットワークの上位網には車両の移動を意識させずに、上位網を通常の IP ルーティングによるネットワークの構成が可能となる。

また、ハンドオーバー処理期間の通信断による実効的なスループットの低下は、マイクロセルにより構成される通信ゾーンを高速に移動する路側ネットワークの環境では特に深刻である。本方式ではハンドオーバーレイテンシを低減させるために、路側ネットワーク内の基地局間で移動元の接続情報を高速に引き継ぐ方式を実現した。

さらに、運転支援サービスなど伝送品質に高信頼性を要求されるサービスがあり、無線区間での高信頼通信を実現するためにハンドオーバーにもなうパケット損失を低減する方式を実現した。

第1章 序論

上記高速移動管理方式を実装した路側ネットワークプロトタイプシステムを構築し、エンドエンドスループット性能及びハンドオーバーレテンシを決する ADS メッセージ通信特性を測定することにより適用性の評価を行った。

マイクロセル移動体ネットワーク通信チャネル管理方式

マイクロセルを利用し連続通信の環境を提供する路側ネットワークでは、多数のマイクロセルにより構成される通信ゾーンにいる車輛に対し通信帯域を提供し管理するための有効な通信チャネル管理方式が必要となる。こうした通信チャネル管理方式に要求されるシステム的な基本課題の一つにフォールトトレランス性の確保がある。路側ネットワークの一部が障害で利用できない場合でも路側ネットワークの通信サービスは稼動可能な基地局により維持する必要があるからである。さらには、マイクロセルにより構成される通信ゾーンの通信帯域を有効に利用するためには、トラフィック状況に適応し車輛に対し通信チャネルを割り当てることも必要となる。上述のようなシステム的な課題の解決を含めた実装方式の検討が必要となる。

本研究では、自律分散システムアーキテクチャによるアクセスネットワーク基盤上に、通信ゾーン内のトラフィック状況あるいは無線基地局の稼動状況に応じ通信ゾーンの大きさを動的に制御することによる通信チャネル管理方式を開発した。

- ・ ネットワーク内のトラフィック環境に適応した通信ゾーン制御
マイクロセルが提供する無線チャネルリソースは限られている。一方複数マイクロセルにより構成される通信ゾーン内のトラフィック量は一様ではない。そこでトラフィック量に応じて通信ゾーンの大きさを拡大、縮小することにより路側ネットワーク内の無線通信チャネルを負荷分散し利用する方式を実装した。
- ・ ネットワーク内の障害発生など設備稼動状況に適応した通信ゾーン制御
自律分散システムの基本特性の一つに耐故障性に対する優位性がある。路側ネットワーク内の基地局の一部が故障しても残る基地局により通信チャネルを提供しサービスを継続させる方式を実装した。

本アーキテクチャを適用し連続稼動を不可欠するシステムを構築する上で重要なフォールトトレランス性の確保を可能とした。

1. 4 本論文の構成

本論文は2章以下、下記の構成をとる。

(第2章) 関連研究と本研究の位置づけ

第1章 序論

ITS（高度道路交通システム）研究の経緯を概括し本研究で対象とするマイクロセルを用いた移動体ネットワークの位置づけについて言及する。また、本研究のテーマであるマイクロセルを用いたネットワーク制御方式及びシステム化技術としての自律分散システムについて関連研究を概括し本研究の位置づけにつき言及する。

（第3章）マイクロセル移動体ネットワークシステム

マイクロセルを用いた移動体ネットワークシステムの概要を説明し、システム的な要求条件及び通信方式上の要求条件を整理し、実装開発の方針について言及する。

（第4章）自律分散システム

システム的な課題を解決するために自律分散システムアーキテクチャを提案する。具体的には、自律分散によるメッセージフロー制御を実現するための通信方式（ADS メッセージ通信方式）を提案する。

（第5章）マイクロセル移動体ネットワーク制御方式の実装と評価

ネットワーク制御方式として、4章で提案の自律分散によるメッセージフロー制御により移動管理、アドレス管理の実現方式を提案しその適用性評価について報告する。さらにスループット改善方式としてネットワーク内でのデータキャッシュ、ハンドオーバーにともなうパケットロス回避方式を提案しその適用性評価について報告する。

（第6章）マイクロセル移動体ネットワーク通信チャンネル管理方式の実装と評価

通信チャンネル管理方式を提案し評価する。本方式は、通信ゾーン内のトラフィック状況あるいは無線基地局の稼働状況に応じ通信ゾーンの大きさを動的に制御することによる通信チャンネル管理方式である。通信ゾーン管理モデルを規定し通信ゾーンの最適化シナリオを定義する。これをもとに、トラフィック環境に応じた通信ゾーン制御及び路側ネットワーク障害時の通信ゾーン再構成制御のアルゴリズムを自律分散によるメッセージフロー制御により実現しその適用性評価について報告する。

（第7章）結論

総括として本研究の成果及び今後の課題につき報告する。

第2章 関連研究と本研究の位置づけ

2. 1 道路交通システムにおける通信方式研究の経緯

高度道路交通システム (ITS)

ITS (Intelligent Transport System : 高度道路交通システム)は、ネットワーク技術を用いて人と道路と車輛とを一体としたシステム構築をすることにより、交通管理の最適化を図り、道路交通の安全性・輸送効率・快適性の向上を実現する道路交通システムである。また渋滞の軽減など交通の円滑化を通して環境保全に寄与するなど我々の生活にも大きく貢献するものである。さらには、鉄道・航空・船舶など多様な交通機関との連携により、情報サービス産業の参入も見込まれ経済効果の面でも大きく貢献するものと考えられている。

我が国の高度経済成長は、自動車交通とともに発展してきた。1960年には330万台であった自動車保有数が2002年には7300万台に達しており、こうした自動車交通の発展により、移動に関する利便性は著しく向上したといえる。しかしながら一方では自動車交通の発展に伴ない交通事故の多発、交通渋滞による経済損失、交通公害による環境の悪化など我々の生活に深刻な問題も引き起こしている。こうした状況の中、道路交通における安全性、利便性を向上させるとともに、道路交通に大きく依存している産業の効率性を高めることがITSの目的とすることである[22]。

ITSへの取り組みは日米欧を中心とする世界的な規模で進められている。主要先進国におけるITSの取り組みにつき概括する。

米国における道路交通の情報化に関しては、1960年代に取り組みされたERGS (Electronic Route Guidance System : 電子経路案内システム)、1980年代に取り組みされたSDI (Strategic Defense Initiative : 戦略防衛構想)に基づく軍事システムとしての自動制御システムの研究が進められてきた。現在ではDOT (連邦運輸省)の配下でITS Americaが中心となり国家的な計画として全米ITSプログラムプランが策定されITSの開発や展開導入計画が推進されている。

欧州においては、1980年代から公共交通・都市問題・環境・教育・医療など社会インフラについて総合的な調査・研究が進められその一環としてITSの研究・整備が推進されてきた。推進体制としてECとその諮問機関としてのERTICO (European Road Telematics Implementation Coordinate Organization : 欧州道路交通テレマティクス実施調整機構)との

第2章 関連研究と本研究の位置づけ

連携により、上述の背景により多角的な ITS の研究が進められている。

国内における取り組みは、1970年代当時の通産省により CACS (Comprehensive Automobile traffic Control System: 自動車総合管制システム)による経路誘導システムの開発にさかのぼる。その後建設省による RACS (Road/Automobile Communication System: 路車間情報システム)、警察庁による AMTICS (Advanced Mobile Traffic Information and Communication System: 新自動車交通情報通信システム)の開発が行われ、電波システムの開発、標準化を手がけてきた郵政省とともに VICS (Vehicle Information and Communication System: 道路交通情報通信システム)が実用化された。ITS の市場形成に向けた努力も積極的に進められ官民が共同で開発したデジタル道路地図などをベースに GPS などを用いたカーナビゲーションシステムが商品化されたことにより 2004年9月には 1622万台を超える有望な市場に発展している[22]。

道路交通システムのためのネットワークモデル

近年のインターネットの発展によりネットワークサービスのグローバル化が一般化し、多様な情報をインターネット上のサーバから配信する環境が整備されてきている。しかしながら自動車からの通信環境はまだ充実しているとは言えず、グローバルネットワーク利用の環境を提供する高度道路交通システム ITS(Intelligent Transport Systems)のための通信基盤の確立が求められている。ITS の分野では車輛、人、モノの位置情報の決定と情報の通信ネットワークによる共有は重要な要としている。ITS では情報通信に関するアーキテクチャが策定されており[19]、これを図 2.1 に示す。この中で通信がかかわる部分は狭域通信(車車間通信、路車間通信)と広域無線通信である。

道路交通システムで利用すると考えられるネットワークモデル、ネットワークサービス及びその利用形態に関する研究として下記がある[69]-[73]。[69]によれば、道路交通システムで考えられなくてはならないネットワークモデルを次のように提示している。それは、移動端末との通信を行う複数のアクセス網(セルラー、DSRC、無線 LAN 等)と情報を提供するアプリケーションセンタ及びこれらと連携し情報の収集、加工、配信管理を行うサービスセンタ、バックボーンネットワークで構成される。(図 2.2 参照)構成される種々のアクセス網は、通信可能エリア、通信速度、端末の移動許容速度に関し異なる特長を持つ。道路交通システムでの基本的な要件として利用者の位置や転送する情報の特性に応じて利用可能なアクセス網の中から適切な通信経路を選択し利用者や情報提供者に意識せずにシームレスに利用できることが求められる。

第2章 関連研究と本研究の位置づけ

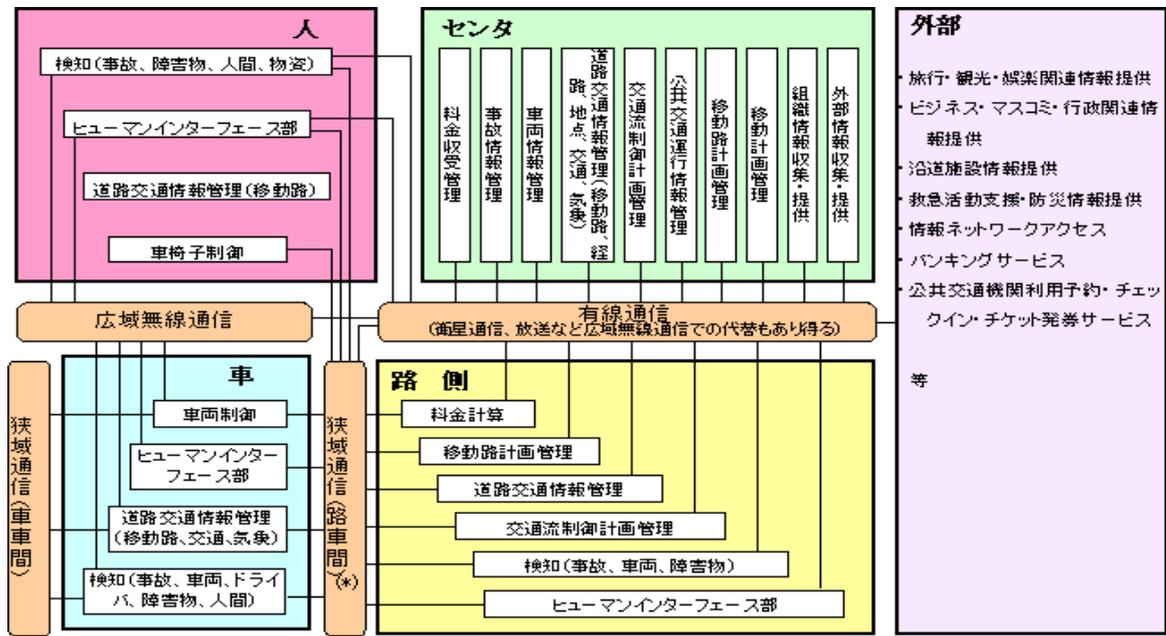


図 2.1 情報通信に関するアーキテクチャ

通信経路を意識しないシームレスな利用のために無線 LAN や DSRC のようなマイクロセルによるアクセス網がセルラー網等との相互的な利用形態が求められている。例えば、DSRC は当面は高速道路や主要道路沿いに設置されると想定されサービスエリアが限定されている。このため通信中に DSRC のサービス圏外に出てしまうことがあるが、このような場合でもサービスエリアの広いセルラー網で通信を継続し道路交通サービスを利用するといった利用形態が求められる。

道路交通システムにおける通信サービスを実現する種々の無線アクセス網は、通信可能エリア、通信速度、端末の移動許容速度などに関して、異なる特長を有する。このような環境において使い易いシステムとするために利用者の位置や転送する情報の特性に応じて利用可能な無線アクセス網の中から適切な通信路を選択し複数のアクセス網を利用者や情報提供者に意識させずにシームレスに利用できることが求められる。シームレスな利用方法として下記のような形態があり得る。

- ・ 非対称通信

移動端末から情報を入手する場合、要求する際の上りの転送量は少量でセンタから移動端末への転送量が多い場合がある。このような情報量が非対称な場合にこれに応じ通信路を選択して通信を行う。例えば、端末からの要求は帯域の小さいセルラー網を使い、情報の入手は大容量通信が可能な狭域アクセス網を利用す

第2章 関連研究と本研究の位置づけ

るなどである。

- ・ アクセス網間での通信の継続

狭域アクセス網はニーズに応じ局所的に設置されるためサービスエリアが限定される。このため通信中に狭域アクセス網のサービス圏外に出てしまう場合にもサービスエリアの広いセルラー網で通信継続するなどである。

こうした無線アクセス網のシームレスな利用形態を実現するために、経路選択の情報取得方法につき取り組みがなされている。利用可能な通信路を識別する方法として、端末で識別する方法、センタで識別する各種方式が研究されている。端末で識別する方法とは端末で各アクセス網の電波状況をプロービングし通信可能な通信路を得る、あるいはエリア情報を持ちGPSなどにより位置情報から通信可能な通信路を得るなどの方式がある。またセンタで識別する方法として、センタにてエリア情報を持ち端末から位置情報を得ることにより利用可能な通信経路を得るなどの方式が研究されている。

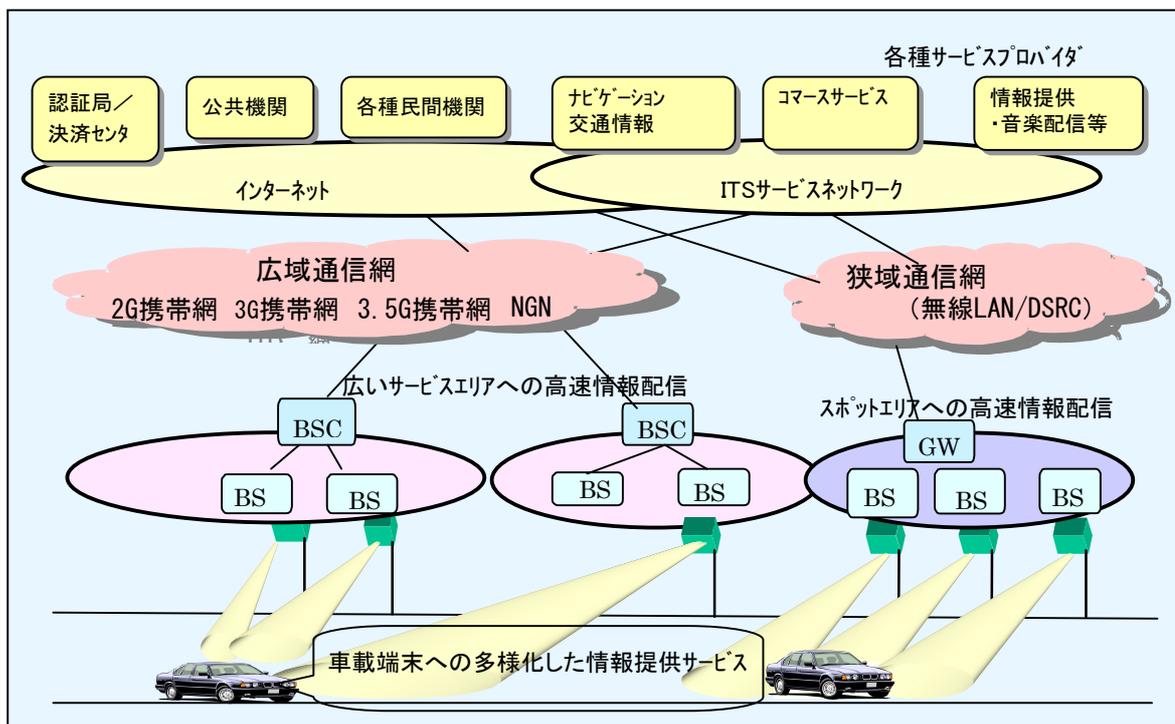


図 2.2 道路交通システムにおけるネットワークモデル

ここで、DSRCのようなマイクロセルを利用したアクセス網は、次項で言及するような道路沿いのスポット的な基地局設備の設置による走行支援サービスが実現されているが、複数のマイクロセルにより構成される通信ゾーンにおいて連続的な通信環境を提供するネットワークとしての方式が確立されていない状況がある。

第2章 関連研究と本研究の位置づけ

上述のアクセス網の多様化に加え、サービスの多様化に対応する研究が進められている[70]-[73]。道路交通システムにおける通信サービスで扱う情報には、走行支援情報の他に道路交通情報、混雑状況の映像、地域情報さらには料金所などでの決済情報などが有り、扱う情報の質（QoS）と情報量において多様性を持っている[70]。これらの多様化したサービスを共通的に扱うサービス連携を行うためのサービスプラットフォームの研究が行われている[71]。

ここでマイクロセルネットワークにおいてもこれらの多様なサービスを提供することが求められる。走行支援サービスで扱う情報は、データ量はそれほど大きくないが通信品質として安全のための走行支援サービスといったサービスの特性からデータの損失に対する要求が厳しい。一方、映像情報などマルチメディア情報を配信するアプリケーションでは通信品質に対する要求はそれほど厳しくないが **End-End** でのスループットの向上が求められる。また、通信形態の観点からは、これらのサービスはブロードキャスト型、トランザクション型、ストリーミング型の通信方式が求められる。

走行支援システム

国が主導で進められている走行支援システム **AHS(Advanced Cruise-Assist Highway System)**は、道路に敷設された無線基地局を介し車輻に対し情報をリアルタイムに配信することによりドライバの走行を支援し道路交通の安全性向上を図ることを目的としたシステムである。交通事故削減のために危険区間で障害物や道路形状などの情報、さらにデジタル地図と連携しカーブなどの道路構造や事故多発地点の情報を提供するものである。ドライバへの情報提供サービスを第一ステップとし障害物衝突防止、車線保持など基本的なユーザサービスを規定し開発が進められている[26][27]。

ネットワークに対する要求条件として、600m 程度のサービスゾーンを 120km/h までの高速移動車輻に対し同報通信、個別通信サービスを提供できることが求められる[24]。現段階では、道路管理など特定の目的で局所的に通信設備を導入し、スポット通信サービスの提供を行っている。走行支援システム実用化への今後の取り組みとして局所的に導入された通信設備を順次拡大するとともに通信サービスとしてスポット的な通信から連続通信サービスへ機能拡張されていくことが計画されている[26][27]。

ITS 通信方式

本項では ITS で利用される通信方式特に狭域通信方式についてその動向を概括する。国内では当初自動料金収受システム（**ETC : Electronic Toll Collection System**）用途として検討され、1997年に電波産業会（**ARIB: Association of Radio Industries and Businesses**）で **ARIB STD-T55**「有料道路自動料金収受システム」として標準化された。この **DSRC** 方式は、数m

第2章 関連研究と本研究の位置づけ

から数十mと比較的通信領域が狭いこと、伝送速度が高いことなどが特徴としてあげられ、ピンポイントで情報提供を行なう駐車場、ドライブスルーや、走行支援などへの応用展開が期待された。そこで、新たに汎用目的に対応可能な DSRC の技術的条件を定めるため、2000年1月に旧郵政省電気通信技術審議会に諮問が行なわれ、同年10月に DSRC 方式の汎用利用を認める答申がなされた。この答申を受け ARIB STD-T55 は改定され、DSRC 方式の汎用的な利用を目的とした通信規格 ARIB STD-T75「狭域通信 (DSRC) システム」が2001年9月に策定された[68]。ETC は既に料金所に設置されたゲートによって交通渋滞の解消やキャッシュレスによるユーザの利便性向上が期待されている。国が主導で進められている AHS では、DSRC を用いて道路情報を配信することで、ドライバの安全運転支援を目指している。さらに路側車間を DSRC で結び、車に対して事故情報等の走行支援情報やインターネット上の各種サービスを提供する実証実験が進められている。

国外では ITS の円滑かつ確実な実用化のために、ISO (International Organization for Standardization) の中の TC204 において ITS の規格化に向けて標準化の取組みが行われている。ISO/TC204/WG15 (狭域通信分科会) 及び WG16 (広域通信分科会) が中心になって推進されている。北米での DSRC は無線 LAN をベースとした方式であり、VICS (Vehicle Information and Communication System) や ETC で用いられるスポット通信を基本とした無線通信技術と異なり中広域の通信 (数m~数100m) と複数のメディアの切り替え、IP ネットワークとの親和性を特長としている。ここでの基本的な考え方は無線 LAN、セルラーを含め種々のメディアへのヘテロジーニアスな構成により合理性を追求したインフラを実現することである。上述の国内で標準化された DSRC 規格 (ARIB STD-T75) との整合性が求められるところである。

本研究では、マイクロセルを用いた移動体ネットワーク制御方式を提案しておりマイクロセルの物理仕様には依存しない方式であるが、物理的な評価システムは DSRC により構成し評価した。無線 LAN についても上述の動向を監視しつつ評価していく考えである。

2.2 マイクロセル移動管理方式に関する研究

マイクロセルを利用したネットワークにおける移動をサポートする方式について既存方式を概括し課題につき言及する。

移動体が接続する基地局を切り替えながらデータ通信を継続するハンドオーバーに関する研究は歴史が古く、携帯電話や PHS サービス導入当初より多くの研究が行われてきた。本項では、無線 LAN や道路交通システム用狭域無線通信システム (DSRC) などのマイクロセルにより構成されるネットワークにおけるハンドオーバー方式に関する既存技術を以下に示す。

移動環境においては利用者が移動により使用するネットワークの環境が変化するため無線通信の信頼性、転送速度などネットワークの接続性が問題となる。利用者は端末の移動やネ

第2章 関連研究と本研究の位置づけ

ネットワークの状態に依存せずに継続したデータ通信が可能であることを期待している。これらのデータ通信の継続性はホストモビリティと呼ばれ、これを実現するハンドオーバー技術はアプリケーションレイヤで解決する手法、レイヤ3で解決する手法、レイヤ2で解決する手法が研究されてきている。

ハンドオーバー処理にともなう通信効率低下の改善方式及びハンドオーバー処理過程で起こり得るパケット損失の低減を狙う改善方式に関する研究は数多くなされている。本研究での視点を明確にするために、一般的なハンドオーバー処理のオーバーヘッドを下記の3部位に分けて考える。

- 1° 移動端末において接続すべき無線基地局のチャンネルスキャン等による探索処理。
- 2° 無線基地局と移動端末間でのリンク確立処理。
- 3° **End-End** での通信経路の確立処理。

本研究で対象とするのは、ハンドオーバーにともなう3° **End-End** での通信経路の確立処理に関するものであり、以下これに関連しマイクロセルネットワークでのハンドオーバー方式について言及する。

End-End での通信経路確立は次に示すいくつかの方式により実現される。

- ・ レイヤ3におけるハンドオーバー処理
- ・ レイヤ2におけるハンドオーバー処理

レイヤ3におけるハンドオーバー処理とはIPルーチングによるパケット転送を基本とするネットワークにおいて、端末の移動をルーチングテーブルに動的に反映することにより現在の端末位置にパケットをルーチングさせることを基本とする方式である。一方レイヤ2におけるハンドオーバー処理とは、レイヤ2のブロードキャストドメインとして構成できるような小規模なネットワークにおいてレイヤ3に依らずレイヤ2においてハンドオーバー処理を行う方式である。以下に各方式について言及する。

レイヤ3におけるハンドオーバー方式

レイヤ3において移動をサポートする技術は、その適用領域によりインターネット上の移動を管理するマクロモビリティと局所的な移動を管理するマイクロモビリティの2方式に分けて考えることができる。Mobile IPはマクロモビリティの代表的な方式であり、移動端末が接続されるネットワークアドレスが変わってもIPによる通信が継続可能な仕組みを目指しIETF (Internet Engineering Task Force)にて標準化が進められている[34][35]。移動体の位置管理をHA (Home Agent)にて行い、移動体が位置するFA (Foreign Agent)へパケットを転送することを基本とする方式である[35][39]。Mobile IPにおいて、移動端末の移動によりFA

第2章 関連研究と本研究の位置づけ

が切り替わるハンドオーバー期間中のパケット損失が問題となり、ハンドオーバーレイテンシを短縮することでパケット損失の低減を目指した研究がさかんに行われ、一部標準化もされている [36][37][38]. ここで、セル径の小さいマイクロセルを利用したネットワークでは、ネットワーク内での端末の移動にともなうハンドオーバーも頻繁に発生することからハンドオーバーレイテンシ及びハンドオーバー期間中のパケット損失の問題はさらに深刻となる. 一方 Cellular IP や HAWAII に代表されるようなマイクロモビリティ方式はホストルーチングにより移動体の局所的な移動をネットワーク全体で管理する方式, 言い換えれば Mobile IP における移動体を管理している HA から移動体の位置する FA へのパケット転送を行わずドメイン内の移動を HA から隠蔽する方式であり高頻度の移動処理に適している.

レイヤ3ハンドオーバーにおいてそのオーバーヘッド低減により通信効率の向上あるいはハンドオーバー期間中のパケット損失の低減を目指す方式は,

- セルの連続性 (連続セル/離散セル)
- ハンドオーバーのトリガー (レイヤ3/レイヤ2)
- ハンドオーバー時のパケット転送 (転送/非転送)

の観点から表 2.1 に示す各種方式がある.

セルの連続性について, 連続セル環境とは, 隣接するセルがオーバーラップする場合あるいは, ソフトハンドオーバーと呼ばれる移動端末が複数の基地局から電波を受信するような環境を想定しており, そのような環境下では一般に良好なハンドオーバーレイテンシ特性を得ることができる. それに対し離散セル環境とは, セルがオーバーラップしないあるいは電波強度, 干渉などにより同時に複数の基地局とは通信できない環境を想定しており, そのような環境においてハンドオーバーする方式として Cellular IP [46]-[49], HAWAII [41], Neighbor Casting [37] などの方式がある.

ハンドオーバートリガーについて, ハンドオーバーを検出する層がレイヤ2情報を利用する場合は, 一般に良好なハンドオーバーレイテンシ特性を得ることができ Cellular IP でのソフトハンドオーバー[46]等が代表的な方式として研究されている.

ハンドオーバー時のパケット転送の有無について, HA から移動体の位置する FA へのパケット転送を行う方式である Mobile IP をベースとする方式では, 一般にパケット転送にともなうハンドオーバーレイテンシ及び転送パケットによるネットワークの負荷が問題となる. これらを改善するために各種方式が提案されている. 例えば, ハンドオーバーレイテンシ特性を改善させる方式として, ハンドオーバー検出後ハンドオーバー期間中に移動元 FA から移動先 FA へパケットを転送する方式 (FMIP: Fast Handovers for Mobile IP) [36]や全ての周辺 FA にパケットを予め転送する方式(Neighbor Casting)[37]などがある. さらに周辺 FA にパケット転送す

第2章 関連研究と本研究の位置づけ

ることによるネットワーク負荷を低減するための方式として、移動端末及び周辺 FA の位置情報を用いて移動先 FA を推定することによりパケット転送先を限定しネットワーク負荷の低減を図る方式(FASTMIP 及びその改善方式)[38][51][52]が提案されている。本研究で目的としているのは、多数の移動体（車両）が連続的に配置されたマイクロセル間を高速に移動するシステムであり、局所的な領域内で頻繁に発生する車両の移動を効率良く管理する方式を確立することである。上述のいずれの方式にしても移動のたびに移動体が HA に対し移動通知を行い、HA から FA へのパケット転送をとまなう方式は、路側ネットワークのような局所的に頻繁に起こるハンドオーバを高速に処理する方式としては限界がある。

これに対しハンドオーバ時にパケット転送を行わない方式は、HA から局所的な移動を隠蔽することになるために、頻繁に発生する移動を管理するマイクロモビリティを実現するのに適した方式といえる。

Cellular IP を始めとするマイクロモビリティに適用可能な各種方式では、Mobile IP のもつグローバルなホストモビリティに対し、ローカルなホストモビリティを実現するためのハンドオーバ方式及び移動体管理方式を提供している。これらの方式は、ハンドオーバあるいは移動体管理のための位置登録を簡易なプロトコルにより実現することを目的としており、ネットワーク内の制御信号の授受は軽減されるが、ハンドオーバに伴うパケット損失をある程度許容することを条件とした方式と言える。

表 2.1 ハンドオーバレイテンシ低減方式比較

ハンドオーバ方式		方式特長			適用領域
		セルの連続性	ハンドオーバトリガー	パケット転送	
Cellular IP	Hard	離散セル	レイヤ 3	無	マイクロモビリティ
	Soft	連続セル	レイヤ 2	無	マイクロモビリティ
HMIP		—	レイヤ 3	無	マイクロモビリティ
HAWAII		離散セル／ 連続セル	レイヤ 2／ レイヤ 3	無	マイクロモビリティ
FMIP		連続セル	レイヤ 2	有	マクロモビリティ
Neighbor Casting		離散セル	レイヤ 2	有	マクロモビリティ
本研究提案方式		連続セル	レイヤ 2	無	マイクロモビリティ

本研究で目的としているのは、多数の移動体が連続的に配置されたマイクロセル間を高速

第2章 関連研究と本研究の位置づけ

に移動するシステムであり、局所的な領域内で頻繁に発生する車輛の移動を効率良く管理する方式を確立することである。この観点からは、本研究は高速移動体を管理するためのマイクロモビリティ技術の一つと位置づけられる。しかしながら既存のレイヤ3でのハンドオーバ方式は、2.1項で言及したマイクロセルを用いたITS通信サービスへの適用を考えると；

- ・ 移動体からの位置登録要求により、動的に変化するルーティングテーブルを検索しながらネットワーク内をルーティングするアーキテクチャであり、十分な性能が得られない。
- ・ マイクロモビリティ方式（プロトコル）は、プロトコルを簡易化することにより制御信号授受によるネットワーク内負荷を低減することを狙いとしており、ハンドオーバにともなうパケット損失をある程度許容することを条件とした方式であり、走行支援サービス等高信頼なパケット伝送を要求する方式としては適さない。
- ・ また、マイクロモビリティ方式（プロトコル）を実装したスイッチ/ルータ及び移動端末により構成されるため、ネットワーク設備はともかく移動体への実装はITSサービス普及の観点で課題が残る。

一方、路側ネットワークは、道路に沿って設置される多くの基地局と上位ネットワークにインタワークするゲートウェイシステムから構成され、通信形態は車間での通信を考えなければスター型トポロジーが一般的であるため、IPルーティングに頼らない方式を検討した。

レイヤ2におけるハンドオーバ方式

レイヤ3におけるルーティングに依らずレイヤ2においてハンドオーバを行う方式について下記がある[53]。[53]では小規模なワイヤレスネットワークをターゲットとしネットワークを構成する無線基地局にレイヤ2スイッチの機能を付加するとともに、スイッチのアドレステーブルを更新するための特殊なパケットを定義することにより実現している。スイッチのレイヤ2パケット転送機能は、学習機能を持っており、スイッチが受信したパケットのMACアドレスからアドレステーブルを生成し、通常のパケット転送ではアドレステーブルから転送先を判断する。移動体が他のスイッチに移動したときに移動を通知するパケットを追加し定義することによりアドレステーブルを更新し移動先への経路を確立するものである。

[53]は Cellular IP, HAWAII などと同様にネットワーク内で頻繁に起こる移動に対し効率良くハンドオーバを実現することを目的としたものであるが、レイヤ3でのルーティング機能ではなく完全にレイヤ2のみで実現しており実装の簡便さ、上位プロトコルに依存しないなどの利点をもつ。一方では、スイッチを利用したレイヤ2ネットワークでは転送経路がループ構造にならないように転送経路を設定することが必要で、例えば IEEE802.1d で規定されるような STP (Spanning Tree Protocol) などの導入を考慮する必要があるなど頻繁に経路を更新する系への適用には課題が残る。

アプリケーションレイヤでのハンドオーバー方式

アプリケーションレベルでのハンドオーバーを行う方式として IETF では、セキュリティ情報、QoS 情報などより上位層を考慮したシームレスなハンドオーバー方式の研究、標準化が進められている[42][43].

また、コネクションを引き継ぐという意味でのハンドオーバーとは異なるが、マイクロセルを利用したネットワーク環境においてすまなくセルが設置されない場合も想定すると通信の断続が不定期に起こるネットワーク環境においてもサービスを継続する方式の研究が進められている[74][75]. 想定するサービスとして、運転支援、運行管理などリアルタイム性を要求するものと地域情報配信、施設予約といったリアルタイム性を要求しないサービスがある[19]. これらのサービスに対し、上述の通信の断続が不定期に起こるネットワーク環境においてサービスを継続するための手段として、通信が可能な時にメッセージ通信を行うなどの機能をもつエージェント機能を提供するものである.

本研究では上述のようなサービスレベルのハンドオーバー機能は範囲外であるが、上述のサービスが提供可能なネットワーク基盤を提供する必要がある.

位置追跡について

高速移動体の移動管理に要求される機能の一つに移動体の位置追跡がある. 移動体の位置追跡を高速に行うことが、高度な道路交通サービス提供のひとつの鍵となる. ネットワークから特定の移動体の位置を追跡できることにより、道路の交通管理、商用車の運行管理などに応用できるからである.

道路交通システムにおける車両の位置追跡として従来下記のような方式がある. 地理的位置の取得にはカーナビで広く使われている GPS を利用して経度緯度情報を取得するのが一般的である. また電波が届かないところの位置を求めるためにセンサを駆使した技術も利用されている. これらは車両側で地理的位置情報を利用する際に有効な手法である. しかしネットワーク側から位置に依存するサービスを提供するなど車両の位置を知るためには車両の現在位置を通知しつづけなければならず通信コストがかかる. こうしたネットワーク側からの位置情報取得方式として携帯電話や PHS の基地局情報を利用して利用者の位置情報を取得するサービスが実現されている. また DSRC などマイクロセルを使ったシステムにおいても基地局情報を利用した利用者の位置情報取得方式が研究されている[50]. これらの基地局情報をもとにしたネットワーク側からの位置情報取得方式は、移動端末側での特別な機能を必要としないのでカーナビほどには地理的情報の精度が要求されない用途に適している.

本研究では、道路上に設置される多数のマイクロセルよりなる路側ネットワークでの高速

第2章 関連研究と本研究の位置づけ

移動管理方式を確立することが目的である。そのために、前項で言及した車輛の移動にともなう接続の切り替えを上位網に意識させず路側ネットワーク内で移動処理を行う方式とした。これに加え交通管理や運行管理といった道路交通サービスにおいて車輛の位置情報を取得することは基本ニーズの一つであり、本システムにおいて上位のアプリケーションが基地局情報を利用した車輛の位置情報追跡可能とすることを考慮した。

無線 LAN の ITS 分野への適用について

無線 LAN として一般的に普及している IEEE802.11 方式を利用したハンドオーバ方式では数多くのレイテンシ低減方式が研究されている。それらの中には、End-End 通信経路確立に係るもの以外にも無線 LAN 物理メディアを活用したハンドオーバ高速化についての研究も多い。例えば、チャンネルスキャン時間の低減に関するもの[42]やリンクレイヤ確立の高速化[60]などがある。IEEE802.11 方式は事業所や家庭内での半固定的な使用を想定しており高速移動体への適用には難しい面もあるが、インターネット、移動体通信との親和性も高く標準化が進められている。

無線 LAN の ITS 分野への適用事例も報告されている。例えば、[65]では、IEEE802.11b 無線 LAN を高速移動体のための路車間通信方式に適用している。高速道路沿いに設置した無線 LAN 基地局を利用し道路管理車輛とエリア内での作業者の持つ情報端末を無線接続し、Mobile IP を簡略化したプロトコルにより経路制御を行っている。無線 LAN の ITS 分野への適用は、汎用性、普及性から見たコスト面の優位性、IP ネットワークとの親和性、柔軟性などユビキタスネットワークとの関係から有効な通信形態のひとつであることは明らかであるが、ITS 分野への本格的な適用を考えると必要ときに邪魔されることなく通信できるロバスト性、高信頼な通信品質の確保、通信内容の秘匿性及び DSRC など既存の通信方式との連携などが今後課題である。

本研究で提案する高速移動体のための移動管理方式では、無線アクセス方式を直接には意識しない方式であるが、移動体管理方式として通信内容の秘匿性などセキュリティ確保の観点からは無線区間を含むネットワーク認証方式の確立が不可欠であり、IEEE802.1x 系認証方式は有効な手段の一つと考えている。今後の無線 LAN 方式の発展動向によりアクセスインフラの一つとした検討を行う考えである。

2.3 自律分散システムに関する研究

本研究では、道路交通システムへの適用を考えた移動管理方式を実装するためのシステム

第2章 関連研究と本研究の位置づけ

技術として自律分散システムの適用を検討した。本項では自律分散システムの研究動向について概括する。

自律分散システムは計算機システム構築技術として発展してきた。計算機システムを取り巻く環境は情報あるいは制御の分野共に大きく変化してきている。LSI 技術、ネットワーク技術の発達が発展が技術的、経済的にシステムの分散化を可能としてきている。一方システムの大規模化が進行する中、システムの一括構築の困難さやシステム停止にともなう社会的な影響は大きく増大しつつある。こうした環境の変化の中、システムへのニーズはシステムの無停止や稼働中の保守の実現へと変化している。

こうしたシステムニーズに応えるために、自律分散の概念[13]が提案され、その後情報システム並びに制御システム分野[15]-[17]での研究が進められ国内オリジナル技術として発展してきた。

自律分散システムの概念は、「自律性を持った構成要素がいくつか集まり相互に協調することにより全体としての秩序とそれにともなう機能を生成するシステム」[1]である。この概念によれば、自律分散システムとは、「システムは不稼働なサブシステムを含みうるとの前提でそれぞれの目的と機能を持つ自律的なサブシステムから統合されたもの」として定義される。自律性とは、いかなるサブシステムが不稼働となっても残りの他サブシステムがそれぞれ生存するために制御でき（自律可制御性）、かつ互いに協調できる（自律可協調性）ことをいう。これらの特性を満たす前提として各サブシステムの均質性、平等性が挙げられる。

非自律分散システムとの比較をすると、トータルシステムが定義され、サブシステムへとブレークダウンするシステム技法に対し、自律分散システムではサブシステムが第一義に定義される。これらをシステムの評価と制御の面から位置づけると以下となる。システム内に不稼働部分がないことが前提のシステムはコストパフォーマンスで評価される。この前提で考えたシステムは不稼働部分が発生時には制御不能となるため、フォールトアボイダンス（故障回避）の対応がとられる。一方不稼働部分があることが前提のシステムでは残りの部分でどれだけの機能が続行できるかというファンクションパフォーマンス（生存機能効用）の評価が適切となる。この前提で考えたシステムは不稼働部分外のフォールトトレランス（耐故障性）に対応した構成となる。

従来の集中システムは、コストパフォーマンスの向上を狙い冗長化による故障回避に対応したシステムが中心である。こうした集中システムでは、階層的にサブシステムを構成し、一部サブシステムの異常により他サブシステムの情報が得られずに最終的にシステムダウンを生じる場合がある。一方自律分散システムでは各サブシステムが均質かつ平等で自律して制御することが狙いである。これまでに情報、制御分野での計算機システムとして実現されている自律分散システムによれば、オンラインでの拡張性を狙いとする生産システムへの適用[5][10][11]、高信頼性データベースを構築するためのフォールトトレランス・ファイルシステム[12]への適用により自律分散システムの有効性が報告されている。また、生産システムへの

第2章 関連研究と本研究の位置づけ

適用について、Ethernet ベースの自律分散ネットワークは一部標準化もされている[18].

本研究で対象としている道路交通システムへの適用を考えた通信システムは、道路に敷設される多数の無線基地局とそれらを接続するネットワーク設備により構成されている。これらの設備は連続稼動を不可欠としており、運用時に障害部位を切り離しての稼動継続（フォールトトレランス性）の確保が重要である。本研究では、高速移動体の移動管理方式を実装するためのシステム技術として自律分散の考え方を適用したフォールトトレラントシステムの実現方法を検討した。

2. 4 本研究の位置づけ

本研究により実現を目指すのは自律分散システムによる移動体ネットワーク制御方式を確立しこれを基盤とした ITS 通信サービスの提供を可能とすることである。ITS 通信サービスを含む移動体ネットワークの一般的な特徴として、多数の基地局を制御することが必要、導入過程で基地局は一度に配備されるわけではなく段階的に導入される、24 時間連続稼動するシステムなのでオンラインでの障害処理、保守機能などの運用機能の充実が不可欠といった要件がある。こうした要件に対し、一括集中制御のネットワークではなく基地局ノード間の自律制御による分散ネットワークを適用することが考えられる。電話交換網のような高価な一括集中制御方式ではなくインターネットのような本質的に分散ネットワークであるが高信頼な通信手段を提供する方式が有効であると考えられる。

自律分散システムによるネットワーク制御は「メッセージフロー制御」を基本としている。システムを構成するサブシステム間のメッセージ通信をメッセージフロー制御により実現する。サブシステムはネットワークにメッセージをブロードキャストしこれを取り込んだサブシステムは必要なプログラム（アプリケーション）を駆動するという意味でメッセージフロー制御と言う。

こうした自律分散制御を移動体ネットワーク制御に適用する際の利点を以下に示す。

柔軟なネットワーク制御

道路交通システムへの適用を考えた場合、高速道路は別としても一般道路においてはセルの隣接状態が複雑なトポロジーとなる。またそこを移動する車輛、歩行者など移動を特定することが難しい状況があり、多様な移動端末とネットワーク間のコネクション制御に柔軟性を持たせた効率的なネットワーク制御が求められる。さらには、移動端末に対し変化する電波環境に追従し適切な通信経路の提供が必要となる。分散システムでの自律性を持った構成要素が集

第2章 関連研究と本研究の位置づけ

まり相互に協調することにより全体としての秩序と機能を提供する特性はこうした柔軟なネットワーク制御の実現に対し有効である。

柔軟なシステム運用

道路側に敷設されるネットワーク設備は見通しの悪い交差点など局所的なエリアに導入され順次拡大していくなど段階的なシステム建設が予想される。こうした状況からオンライン環境での拡張性が重要となる。また、システム運用時にはネットワーク設備の障害時に現地での保守作業は効率が悪くオンラインでの保守手段が求められる。こうした状況はネットワーク規模が拡大するにつれ要求が高くなる。上述のオンライン拡張性、保守性に自律分散システムは効率的なアーキテクチャを提供する。

上述の利点を生かすことが可能な自律分散システムによるネットワーク制御の適用領域を図 2.3 に示す。

狭域ネットワーク基盤

狭域ネットワークでマイクロセルを利用した連続通信環境の提供及び高品質な通信サービスの提供による走行支援あるいはこれをベースとする利用者への利便性向上を図る情報提供を行う ITS 通信サービスが実用に供されつつある。ITS 通信サービスとして運転者への情報提供サービスとして VICS が提供されている。これはスポット型の同報（片方向）通信サービスである。また料金所における決済を実現している ETC はスポット型ではあるが利用者（車載端末ごと）の決済を行っているという意味で通信方式としてはインタラクティブ（双方向）通信サービスである。本研究では、スポット的に利用されているこれらの通信システムをネットワーク化し利用者の要求により汎用目的に適用可能な合理的な通信サービス基盤を提供することにある。

広域ネットワーク基盤

インターネットの普及とそのアクセスのブロードバンド化により e-コマース、インターネット銀行、ストリーミング音楽/ビデオ再生、音楽/動画配信等の各種アプリケーションが生まれたが、市場はそのアプリケーションをいつでも、どこでも享受したいという要求に向かっている。そのニーズに答える為には、無線アクセス網の高速化が必須であり、同時に高速性、広いサービスエリア、移動中のサービス等が必要になる。1xEV-DO など 3.5G 対応での高速のモバイルインターネット環境を提供する携帯電話システムであり、下り方向へのデータ伝送速

第2章 関連研究と本研究の位置づけ

度が 2.4Mbit/s 程度を実現し、携帯電話の特徴である広いサービスエリア、端末移動時のハンドオーバー機能等をあわせ持つ。本方式により、大容量で高速、安価な無線データ通信が行える為、屋内外を問わずパソコンからケーブルレスで高速インターネットを利用したり、PDA で音楽・配信サービスを楽しんだり、カーナビゲーション機器から最新地図をダウンロードしたりと、モバイル環境での幅広いブロードバンドサービスの実現が期待出来る。こうした 3.5G システムは 3GPP2(3rd Generation Partnership Project 2)等で仕様の標準化が進められる一方でこれを利用した携帯電話によるアプリケーションが普及しつつある。さらに NGN (次世代ネットワーク) の研究が ITU-T NGN 検討グループにて進められている。これはブロードバンド、無線アクセスを前提とし End-End の QoS 保証を伴う IP 転送を利用しセッション型サービス (ビデオチャットに代表されるインタラクティブマルチメディア通信) の提供を可能とするものである。

上述の広域無線アクセスネットワークにおいて、ネットワーク制御、システム運用の柔軟性を確保するために自律分散システムの適用が考えられるが、実装アーキテクチャに対しスケラビリティに対する評価を行う必要があり、今後の課題と考える。

車内ネットワーク基盤

自動車の IT 化が進展する中で、車内にはカーナビゲーションをはじめとする情報ネットワーク、各種センサの制御ネットワークが存在し、インターネットからの情報の取得あるいは車内でのセンサ情報のアップロードなど外部ネットワークとの相互接続を行うことが求められる。Internet Car はこうしたニーズに応えるべくネットワーク相互接続を提供するためのプロジェクトである。ネットワークの観点からは自動車の移動を隠蔽するネットワークモビリティの提供が求められる。ネットワークモビリティは Mobile IP のようなホストモビリティの追及ではなく、車載のモバイルルータにより車載端末の移動を終端する方式である。車載ルータにより車載端末の移動の隠蔽、セッションの連続性及びアクセスネットワークの種別によらないシームレスな通信を提供するものである。

上述の車内ネットワーク基盤として自律分散システムの適用が考えられるが、車内の制御系ネットワークは、情報ネットワークと比較しデータ転送に対し求められる要求条件はサービス品質の点から異なると考えられ、要件を整理し適用性を評価する必要があると考えられる。また、ネットワークモビリティの実装方式の構築が今後の課題と考える。

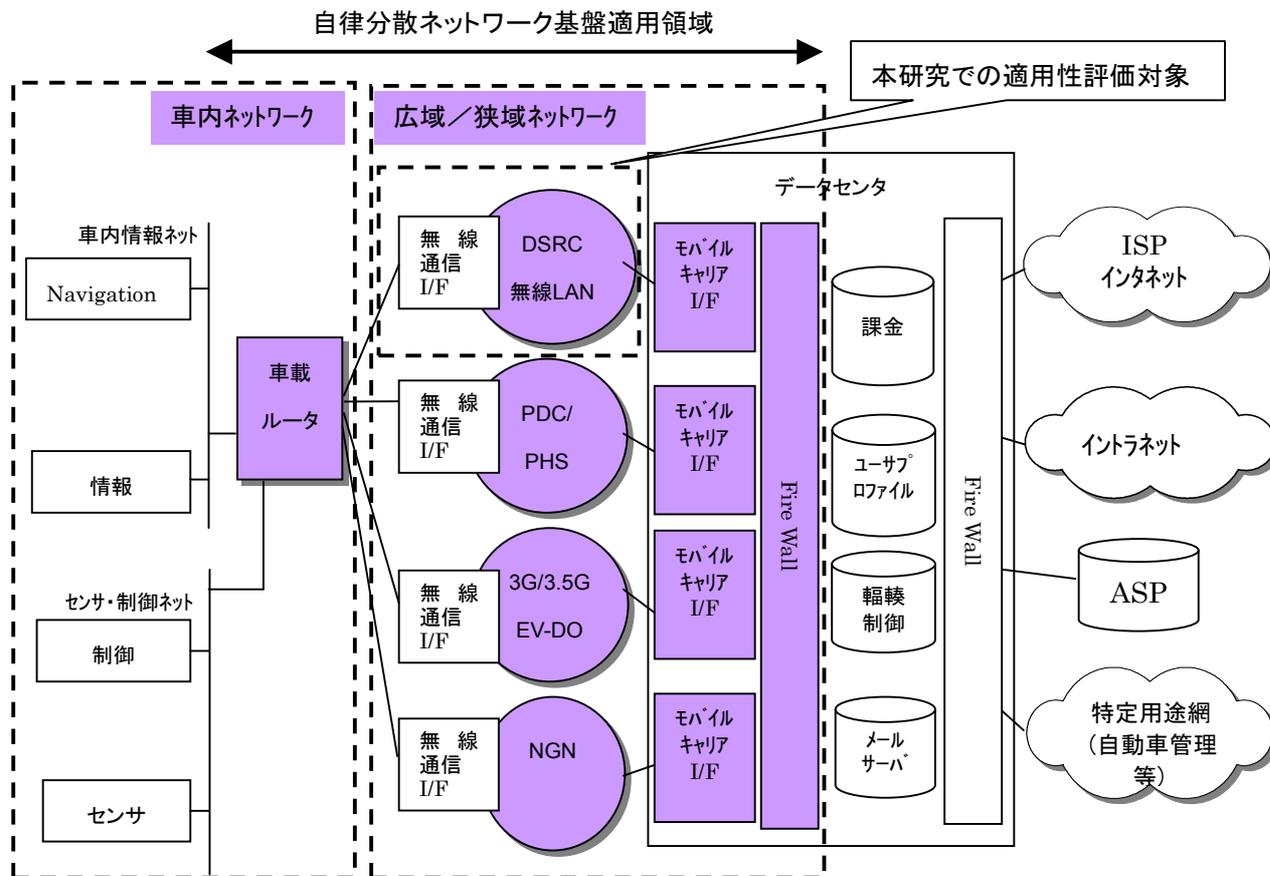


図 2.3 自律分散ネットワーク基盤の適用領域

本研究により実現する通信サービス基盤を実装開発の観点から(1)システム基盤, (2)システム基盤上に構築するネットワーク制御方式, 及び(3)ネットワーク制御方式を利用したネットワークリソース管理の階層に分けると下記のように位置づけられる。

システム基盤として, 2.1 項で言及した状況即ち道路交通システムへの適用を考えた通信システムは道路に敷設される多数のネットワーク設備より構成されしかも連続稼動を不可欠とするシステムであるという観点から自律分散システムアーキテクチャを適用した。自律分散システムは上述のように計算機システム構築技術として発展したコンセプトであるが, 本研究では, このコンセプトを路側ネットワークシステム基盤として適用し, 路側ネットワーク内のメッセージ通信方式として実現した。

システム基盤上に構築するネットワーク制御方式からみた位置づけは下記である。本研究で目的としているのは, 多数の移動体が連続的に配置されたマイクロセル間を高速に移動するシステムであり, 局所的な領域内で頻繁に発生する車輛の移動を効率良く管理する方式を確立することである。この観点からは, 2.1 項で言及したマイクロモビリティ技術の一つと位置づ

第2章 関連研究と本研究の位置づけ

けられる。しかしながら既存のマイクロモビリティ技術であるレイヤ3でのハンドオーバ方式はITS通信サービスへの適用を考えると(1)移動体からの位置登録要求により、動的に変化するルーチングテーブルを検索しながらネットワーク内をルーチングするアーキテクチャであり性能面で課題が残る。(2)既存マイクロモビリティ方式は、プロトコルを簡易化することにより制御信号授受によるネットワーク内負荷を低減することを狙いとしており、ハンドオーバにともなうパケット損失をある程度許容することを条件とした方式であり、走行支援サービス等高信頼なパケット伝送を要求する方式としては適さない。(3)マイクロモビリティ方式を実装した専用スイッチ/ルータ及び移動端末により構成されるため、特に端末にこれらを実装することはITSサービス普及の観点で適さないなどの課題がある。一方では、路側ネットワークは、物理的には道路に沿って設置される多くの基地局よりなる線型のトポロジーをとり、通信形態の上でも車間での通信を考えなければスター型トポロジーが一般的である。以上より本研究では路側ネットワークにおけるマイクロモビリティ実現のために、上述の自律分散システム基盤上のメッセージ通信方式により、IPルーチングに頼らずIPパケットを透過転送する高速パケット転送方式を採用した。

システム基盤上に構築されるネットワーク制御方式が有効に機能するためには、これが利用するネットワークリソースの効率的な管理手段が不可欠となる。マイクロセルを利用した連続通信環境を提供する路側ネットワークシステムでは多くのマイクロセルにより構成される通信ゾーン内の移動端末に対し通信路を提供するための通信チャンネル管理が重要な役割を果たす。こうした通信チャンネル管理に要求される基本的な要件のひとつにフォールトトレランス性の確保がある。路側ネットワークシステムの部分障害に対し障害部位を切り離し継続稼動することが求められる。また利用者への通信チャンネルの割当は利用状況(トラフィック状況)に応じた動的な制御が必要となる。本研究では、自律分散システム基盤上のマイクロセル移動体ネットワーク制御が利用するネットワークリソース管理として通信チャンネル管理方式を実装した。具体実装においては物理メディアとしてDSRCを想定しDSRCにより構成される通信ゾーン内で提供可能な通信チャンネル管理方式とした。DSRC通信チャンネル管理では、マイクロセルあたりの通信チャンネル数は固定であり複数のマイクロセルにより構成される通信ゾーンを動的に制御する方式を適用した。通信ゾーン制御は稼動状況、利用状況(トラフィック状況)に応じた動的制御が必要となる。利用状況に応じた通信ゾーン動的制御については過去の研究経緯がある[88]-[91]。本研究においては利用状況に応じた通信ゾーン制御に加え、システムのフォールトトレランス性確保を目的に稼動状況に応じた通信ゾーン制御も含め具体的な実装を自律分散システム基盤上に確立した。

第3章

マイクロセル移動体ネットワークシステム

3. 1 システム概要

高度道路交通システム (ITS) サービスは、道路と自動車の協調により道路交通情報提供、自動料金収受等のサービスが実用に供されさらにこれらを応用したサービスが各分野に展開されつつある。一方近年のネットワークサービスのグローバル化によりインターネットで提供されるサービスを自動車に乗っている人に提供することによる車内での利便性の向上が求められており、このためのモバイルネットワークプラットフォームとして路側ネットワークシステムの確立が必要となる。

図 3.1 にマイクロセルを用いた情報配信システムの構成例を示す。路側ネットワークシステムは、路側に敷設される無線基地局を介し自動車に搭載される端末（車載端末）に対し情報配信を行うシステムである。路側に敷設される無線基地局のネットワーク（路側ネットワーク）、バックボーンネットワーク及び情報配信を行うアプリケーションサーバ群より構成される。路側ネットワークは、道路上の局所的なエリアにおいて車載端末に対し情報提供を行うことを目的としている。アプリケーションサーバ群からの情報はバックボーンとしてのインターネットあるいは専用ネットワークを介し、路側ネットワークを経由して車載端末に配信される。路側ネットワークでの車載端末との通信方式として狭域無線通信方式[68]を使うことにより、通信ゾーンが 30m 程度のマイクロセルにより構成されるサービスエリアを高速に移動する自動車に対し情報配信する。配信する情報は道路交通情報など走行支援のための情報に加え、インターネット上のテキスト、画像、映像など多様化したマルチメディア情報が求められる。

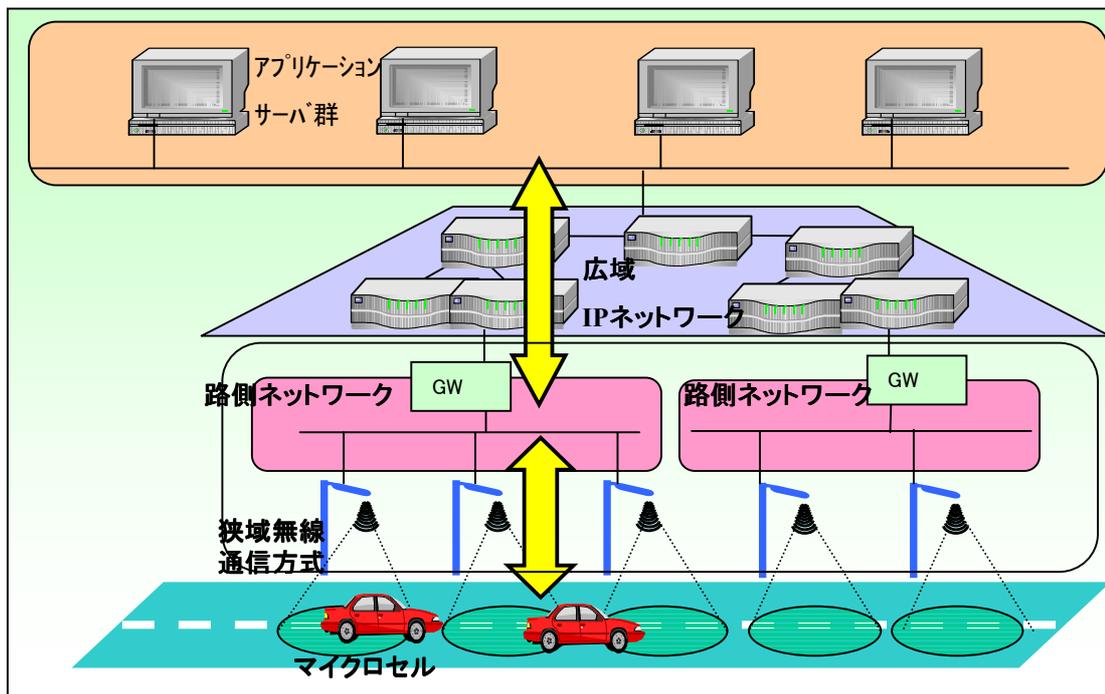


図 3.1 マイクロセルを用いた ITS 情報提供システム

3. 2 マイクロセル路側ネットワークシステムに対する要求条件

3. 2. 1 通信方式に対する要求条件

通信サービス

路側ネットワークは初期段階では公共インフラとしてETC, 走行支援など公共サービスとして立ち上がりは始めている。一方では、道路交通情報提供サービスの規制緩和等の動きに端を発した民間での情報提供のインフラとして普及していくと考えられる。さらにネットワークサービスの観点からは、グローバル化シームレス化の潮流は車載端末を携帯端末に次ぐモバイル端末に性格を変えていく。こうした潮流を踏まえ、ITS情報提供サービスを実現するための通信仕様からみた路側ネットワークが具備すべき要求条件を表3.1に示す。表3.1に示すようにITS情報提供サービスは、安全性の向上（交通事故の低減）を目的とする走行支援サービス、利便性の向上を目的とする種々マルチアプリケーションなどサービス特性の異なる多様化したサービスの提供が求められる[28]。また表3.1に示すように各サービスは同報型、トランザクション型、ストリーミング型の通信方式の提供が求められる。

走行支援サービスとは、安全運転を目的として路側のインフラ設備が収集した道路状況に基づき危険な状況を車載端末に通知するものである。道路状況は道路構造など静的な情報から

第3章 マイクロセル移動体ネットワークシステム

障害物情報など動的なものがある。その要求条件[24]によれば、高速道路や一般道路におけるカーブや分合流点でのおよそ600m程度の領域において運転者への警告をおこなうもので、そのサービス特性からリアルタイム性と高信頼性が要求される。リアルタイム性の観点からはEnd-Endでのパケット転送時間が100msec以内、高信頼性の観点からは無線区間でのパケット損失許容値として規定される。こうしたアプリケーションでは転送データ量はそれほど大きくなく数十kバイトのトランザクション型のデータ転送中心であるが、通信品質として安運転のための走行支援といったサービスの特性からデータ損失に対する要求が厳しい。一方マルチアプリケーションの典型例としては走行中の移動ユーザに音楽、映像などのマルチメディア情報の配信をおこなうサービスでEnd-Endでのスループットの向上が求められる。上述の路側ネットワークで扱う通信サービスの特性及びアクセスインフラにマイクロセルを利用することを考えると通信サービスからみた要求条件には下記がある：

- ・ マイクロセルを利用し連続通信環境を提供するシステムでは、セルの切替えが頻繁に発生しそのたびに必要となる通信コネクションの切替えが実効的な通信可能時間に影響を与える。例えばマイクロセルセルに DSRC を適用した場合には、セル長 30mであるため、移動体速度最大 120km/h までの対応するためには、狭域セル内通信時間は最大でも 900msec となる。一方上記に示すような道路交通情報、走行支援情報等の情報提供サービスでは、セル内の車輻に同報配信する必要があり、DSRC の普及インフラ (ASK) を利用した場合、実効伝送速度は最大でも 420kbit/s なのでセル内での通信を完了するためには、通信コネクション設定あるいはハンドオーバー制御処理時間 (ハンドオーバーレイテンシ) を 100msec 以内に完了することが求められる。
- ・ 安全運転を目的とした情報提供を行う走行支援サービスではリアルタイム性が要求され、その要求条件[24]からは End-End でのパケット転送遅延時間は 100sec 以内であることが求められる。

表 3.1 ITS 情報提供サービスでのネットワークへの通信要求条件

必要なサービス	リアルタイムアプリケーション	非リアルタイムアプリケーション
対象サービス	走行支援情報の提供 ・ 同報通信、個別通信 ・ トランザクション型のデータ転送中心。	一般情報提供 ・ TCPまたはUDP/IP アプリケーション中心。 ・ トランザクション、ストリーミングデータ他。
性能 (スループット)	・ 数 Kbit/s	・ 数Mbit/sまたは以上
品質	・ 1×10^{-5} (無線区間ビット誤り率)	・ 1×10^{-5} (TCP品質による)

(旧郵政省電技審, ITS 情報通信システム推進会議検討結果をベースに考察.)

ネットワークサービス

ITS 路側ネットワークサービスを提供するネットワークは、図 3.1 に示すようにバックボーンとしての広域 IP ネットワークとアクセスネットワークとしての路側ネットワークにより構成される。バックボーンは端末の移動に対しグローバルなホストモビリティが要求される。一方、路側ネットワークは局所的に端末の移動が頻繁に起こるため局所的ではあるが高速なホストモビリティが要求される。ネットワークサービスからみた要求条件には下記がある：

- ・ 路側ネットワーク内での多数の高速な車輛の移動を上位の広域 IP ネットワークに意識させないようにすること。
- ・ 一方では、上位ネットワーク上のサービスで車輛の位置を認識することによるアプリケーションは重要であり、アプリケーションからの要求により路側ネットワークは車輛の位置追跡を可能とすること。

が必要となる。

3. 2. 2 システムに対する要求条件

路側ネットワークシステムは、一括した導入は困難であり、初期の段階では高速道路や見通しの悪い交差点等に離散的に導入され、次第に基地局の配備率を高めていくなど段階的に導入が予想される。路側ネットワークシステムの稼働は停めることはできないので、システム運用時にネットワークの障害発生時に回復不能なサブシステムを切り離して稼働を継続させることが求められる。

3. 3 実装開発の基本方針

本研究では路側ネットワークシステムの実装開発にあたり路側ネットワークのシステムアーキテクチャに自律分散システムを適用し通信方式上の要求条件を満足するシステムの構築を目標とした。

第4章

自律分散システム

4. 1 自律分散システム (ADS) アーキテクチャ

3.2 項で言及したシステム課題を解決するために、自律分散システムアーキテクチャを検討した。分散システムの一般的な概念として、(1) ハードウェアが物理的に分散していること、(2) システムの各構成要素間に主従関係がなく、機能的に代替可能な各構成要素がそれぞれ独立して協調して制御可能なこと、(3) 処理されるデータが分散していることなどの条件が挙げられるが、さらに条件 (2) に各構成要素が自ら主体的に機能する (自律性) を加えたシステムを自律分散システムと考える。分散システムを動作させるのに必要な情報は可能な限り自システム内に置き他分散システムとの結合は可能な限り疎にする (データ駆動方式の採用) こととする。これにより各分散システムは独立性を保持しながら必要に応じて他分散システムと協調して動作することにより、トータルシステムとしての機能を実現する。

自律分散システムはシステムを構成する各サブシステムが他のサブシステムの影響を受けずに自身を自律的に制御でき (自律可制御性)、システムを構成する特定のサブシステムが機能しなくとも残りのサブシステムが協調して稼動を継続できる (自律可協調性) という特性で定義される[13]。これらの特性は、3.2 項で言及のように、ネットワークシステム特に ITS 通信サービスのような連続稼動を不可欠とするシステムを構築するためには、システム稼動状態での設備拡張機能 (オンライン拡張性)、運用時における障害部位を切り離しての稼動継続 (フォールトトレランス性)、システム稼動状態での保守作業 (オンライン保守性) を確保するために有効である。従来実現されている自律分散システムによれば、例えば生産システムへの適用によりオンライン拡張機能、オンライン保守機能の有効性が報告されている[10][11]。また高信頼データベースを構築するためのフォールトトレランスファイルシステムへの適用により有効性が報告されている[12]。ITS 通信サービスのような連続稼動を不可欠とするシステムを構築する上で重要な要素となるオンライン拡張性、フォールトトレランス性、オンライン保守性の実現を見据えたシステムとするために、路側ネットワークシステムを自律分散システムアーキテクチャにより設計した。

自律分散システム概念に基づいたアーキテクチャとして次の2つの構成要素をもつ構造が定義されている[13]。

第4章 自律分散システム

- ATOM

サブシステムは自らを管理し、かつ必要に応じて他のサブシステムと協調する機能を持っている。この自律したサブシステムを ATOM と呼ぶ。

- データフィールド (DF)

各 ATOM がたがいにデータを交換できるようにするため、データの内容について統一した理解を得ることが必要である。各 ATOM がデータを交換する場をデータフィールドと呼ぶ。

上述の ATOM, DF の構成要素により、自律分散システムは図 4.1 に示すように自律したサブシステムである ATOM がデータの流れる場であるデータフィールドに接続された構成をとっている。ATOM はデータフィールドにながれるデータから必要な内容のデータを選択して収集し処理を行う。ATOM で処理された結果は、データフィールドに送出される。このようにして全ての ATOM はデータフィールドだけとインタフェースを持ち他の ATOM と連携するが各 ATOM は非同期に処理を実行する。

上述のシステムアーキテクチャを持つ自律分散システムの特長をまとめると以下の通りである。

- 各 ATOM は独自の判断でデータフィールドから任意のデータを取り込み利用することができる。
- ATOM はデータフィールド上のどこに、いつ接続されても機能することができ、システム全体の構造や他 ATOM の状況を知る必要なく各々の持つ局所的な情報だけで機能することができる。
- 各 ATOM はデータフィールドを介してのみ他 ATOM と連携するため、各 ATOM の異常波及を他 ATOM へ波及することを抑制することができる。

自律分散システム的设计においては図 4.1 に示すアーキテクチャを採る。図 4.1 において ATOM は自律分散システムを構成するサブシステムを表す。データフィールド (DF) は ATOM (サブシステム) 間でメッセージを交換するための情報を共有する空間を表す。メッセージ中の内容コード (CC) はメッセージデータの内容に対応したコードを表す。各 ATOM はアプリケーション (AP) を持っている。メッセージを発生したい ATOM はそのメッセージデータに対応した内容コードを付与しデータフィールド内にブロードキャストする。各 ATOM はデータフィールドに自分の必要とする内容コードをもつデータが流れていればそれを取り込むというアーキテクチャである。上述の CC は具体的には AP に対応つけられている。各 ATOM 内の AP は CC テーブルに登録された CC とデータに付与された CC を比較して受信の判断をする。このシステムではデータの宛先を指定せずに各 ATOM の自律的な判断に基づいてデータを選択受信するため、新しい ATOM を容易に拡張することができる[13]。

第4章 自律分散システム

通信方式としての特長にさらに言及すると、従来の方式では送信側が受信側サブシステムのアドレスをする「選択送信」であるのに対し、本方式では受信アドレスではなくデータの内容に対応した内容コード (CC)を用い、受信側が自らの判断でデータをその内容で選択して受信する「選択受信」である。この方式では送信側サブシステムが受信側サブシステムの状況を意識せずに発信できるという意味でサブシステムの自律性を確保するのに適した通信方式といえる。

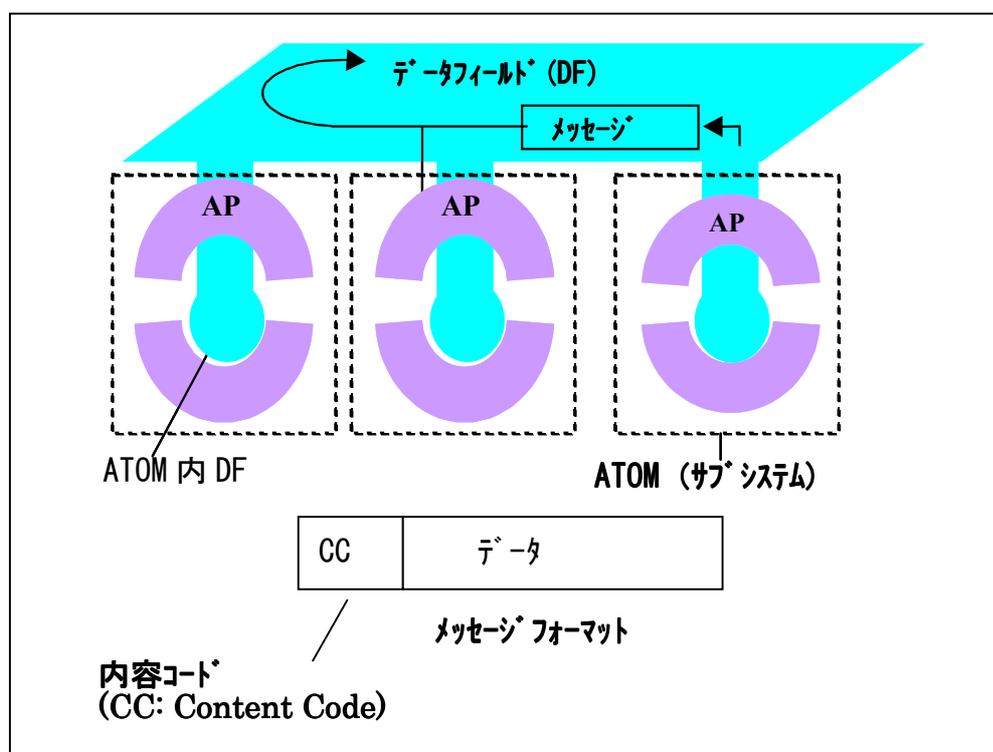


図 4.1 自律分散システムアーキテクチャ
Autonomous Decentralized System Architecture

図 4.2 にマイクロセルによる情報配信システムにおける路側ネットワークの構成を示す。路側ネットワークはゲートウェイ (GW)、基地局 (BS)、及びローカルサーバ (LS) の各ノードから構成される。これらのノードは自律分散システムにおける ATOM として定義される。路側ネットワーク内でこれらのノードが共有する情報が DF として定義される。また DF 内で交換されるメッセージがノード間でやりとりされる情報と位置付けられる。各ノードにはアプリケーション (AP) が搭載される。各ノードの AP 間でのメッセージ通信において前述の内

容コード(CC)による通信方式を適用した。

4. 2 自律分散システム (ADS) メッセージ通信方式

マイクロセルにより構成されるサービスゾーン内での高速移動体へのデータ伝送では、前項で言及のように切り替え制御のオーバーヘッドが問題となる。これを解決するために路側ネットワーク内でブロードキャストすることによるデータ伝送方式を検討した。自律分散システムアーキテクチャを採用した路側ネットワークの構成及び路側ネットワーク内でのデータ伝送方式 (ADS メッセージ通信方式) を図 4.2 に示す。

図 4.2 においてデータフィールド (DF) は路側ネットワークに相当する。路側ネットワークは複数基地局またはアプリケーションを提供するノードから構成される。各ノードは、ネットワークを介して他のノードとメッセージの送受信を行うための自律分散通信制御機能 (ADS) を持つ。ADS において前述の内容コード (CC) による通信制御を行う。CC による通信では CC に対応して動作すべき AP (ここでは BS, LS, GW 上のアプリケーション) が対応つけられており伝送メッセージ内の CC に付与されている AP データをパラメータとして AP が動作する。この意味で本通信方式はデータ駆動型のアーキテクチャである。図 4.2 において ATOM は BS, LS, GW を表しており、物理伝送路に接続されている。物理伝送路上を伝送メッセージがブロードキャストされ各 ATOM は伝送メッセージの内容コードを読み取り AP を動作させる。

ここで AP とは、BS, GW にてネットワーク制御のための機能で、図 4.2 の ADS-AP に示すように、パケット転送時の QoS 制御を行う帯域管理機能や基地局間でハンドオーバー制御を行うコネクション管理の機能などである。

以下本通信方式の動作につき言及する。図 4.2 において、各 ATOM (ノード) には内容コード (CC) と対応する AP プログラムの管理テーブルを保持している。これによりメッセージに付与された CC に基づいて自らの判断で処理を実行できる。例えば図 4.2 で①シーケンス例では、GW からの IP パケットの転送でこれを受信した基地局では CC 及び ADS-AP データより帯域管理機能を起動し車載端末へパケットを転送する。②のシーケンス例では、ハンドオーバー起動要求のパケットであるが、CC 及び ADS-AP データよりコネクション管理機能を起動し基地局間でのハンドオーバー処理を実行する。

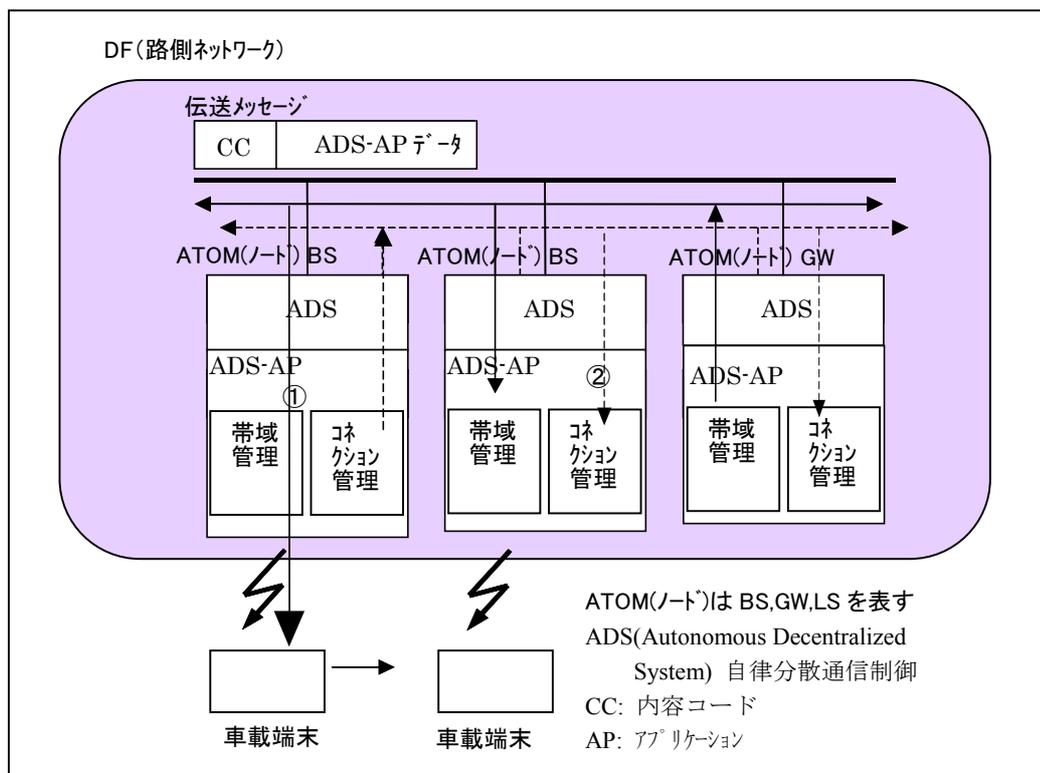


図 4.2 自律分散ネットワーク構成でのデータ伝送方式 (ADS メッセージ通信方式)

表 4.1 内容コード (CC) と起動 AP 管理テーブル

CC	ADS-AP データ	起動する AP プログラム
IP パケット転送	基地局 ID, 車両 ID, IP パケット	帯域管理 (①の例)
IP パケット転送	基地局 ID, 車両 ID, IP パケット	—
ハンドオーバ起動	コネクション情報	コネクション管理 (②の例)
ハンドオーバ完了	コネクション情報	—

本通信方式では、送信元が路側ネットワークに接続されている全ノードに対してパケットを送信し、ブロードキャストされたパケットに対して、受信側で必要なパケットのみ取り込み、処理を実行する。路側ネットワークでは、データの内容を識別する CC によって、各ノードがデータを受信するか否かを判断する。路側ネットワークに接続される各ノードは、CC と AP

第4章 自律分散システム

(アプリケーション) の対応テーブルを管理しており、自らが格納する AP の必要とする CC を持つデータを受信するとそれを取り込む。同様に、AP の処理が終了し新たなデータが生成されると、データに CC を付与して路側網にデータを送信する。送信ノード側において、AP より送信要求されたデータサイズが、伝送フレームの最大長を超える場合、分割し、フラグメンテーションを行う。

上述のように路側ネットワーク内でパケットをブロードキャストする通信方式においては、ネットワークが過負荷となりやすいことが問題となる。これは本システムのような多様なアプリケーションを扱う場合特に走行支援情報の転送などレスポンス性を求められるアプリケーションにおいて問題となる。本システムのように多様化したサービス条件に対応するためにアプリケーション毎にパケット転送に関し QoS 制御を行う事の有効性が検証されている[9]。

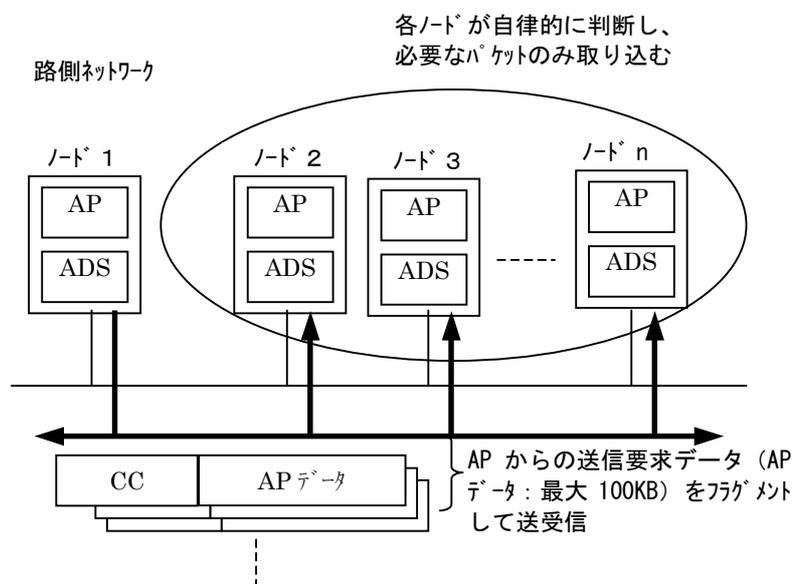


図 4.3 ブロードキャスト伝送方式
Broadcast Data Transmission

第5章

マイクロセル移動体ネットワーク制御方式の 実装と評価

5. 1 はじめに

路側ネットワークシステム実現のための課題として下記がある。システム的な課題として、全国一括でのシステム稼動は困難であり、初期段階でスポット的に導入される基地局設備を順次増設しながらサービスエリアを拡大していくために段階的なシステム拡張の手段が求められる。また基地局が多数あるシステム構成であるために運用時の障害対応など効率的なシステム保守の手段が求められる。通信方式上の課題として、狭域セルにより構成されるサービスゾーンを高速に移動する車載端末に対し情報配信をすることから移動中の電波環境の変化に追従し狭域セルを跨いで連続的な通信を行うためのデータ伝送方式を確立する必要がある。さらに上記データ伝送方式は画像、映像情報を含むマルチメディア情報を伝送することから十分なスループットを確保することが必要となる。

従来技術として、上述のシステム的な課題である段階的なシステム拡張や効率的なシステム保守の実現のために自律分散システムを適用することが考えられる。これまでにシステムの保全、改善、拡張を容易に行える方式として自律分散システムの研究成果の半導体生産システム等への適用例が報告されている[7][8]。通信方式上の課題として本システムでは30mの狭域セルを120km/hで高速移動をする車載端末に対し情報配信するために、セルを跨り通信を継続していくことが必要であるが、1つのセル内での通信時間は約900msecと非常に短くかつセルの跨りに伴う通信コネクションの切り替え（以降ハンドオーバーという）が頻繁に起こる。従ってセルの跨りにともなうハンドオーバー制御処理時間を短縮し、セル内での通信時間を確保することによりエンドエンドのスループットの向上を図ることが不可欠の課題である。さらに本システムで扱う走行支援のような高レスポンス性を要求されるアプリケーションに対し通信手段を提供することが求められる。従来の携帯ネットワークではハンドオーバー時間がかかることが挙げられる。またハンドオーバー時間を改善するものとしてマイクロモビリティ方式（セルラIP、階層型モバイルIP等）が研究されているが、セルを跨る間でのパケットの損失に伴うスループットの低下が課題となる。

上記システム課題を解決するために、本研究ではこれまでに路側ネットワークシステム

に自律分散システムアーキテクチャを適用することを提案する。本アーキテクチャを適用し連続稼動を不可欠とするシステムを構築する上で重要なオンライン拡張性、オンライン保守性、フォールトトレランス性の確保を可能とするようにした。通信方式上の課題を解決するために自律分散制御でのメッセージ通信方式（ADS メッセージ通信）により狭域セルでの高速移動体管理方式を開発した。本方式は、ネットワークと車載端末間の通信コネクション情報を路側ネットワーク内で効率的に引き継ぐことによりハンドオーバー処理時間を短縮し、狭域セル内でのデータ伝送時間の確保を狙うものである。また、本方式は、高速アドレス解決による接続制御処理時間の短縮化によりデータ伝送時間の確保を狙うものである。

また本システムではマイクロセルを利用しているがその通信効率を最大限に生かすための End-End スループット改善方法としてデータキャッシュによる伝送効率向上及び無線リンク断に伴うパケット損失回避による伝送効率の向上の方式を開発した。

路側ネットワークへの自律分散システムアーキテクチャの適用性を評価するために試作システムを開発し実証実験により検証を行った。試作システムではマイクロセルの物理インタフェースに DSRC を適用し本方式の評価を行った。実験では、路側ネットワーク内通信性能評価として、ADS メッセージ通信でのパケット転送能力、網内をハンドオーバーするトラヒックに対するハンドオーバー処理時間を評価した。また、広域ネットワーク上のアプリケーションサーバの利用を可能とする広域網へのインタワーク機能の性能評価を行った。性能評価の結果として、上記課題での要件を満足していることを検証でき、自律分散アーキテクチャの路側システムへの適用の見通しを得た。

5. 2 ネットワーク制御方式実装上の課題と要求条件

路側ネットワークは、局所的に端末の移動が頻繁に起こり高速なホストモビリティが要求されるため、実装上下記点を考慮した方式とする必要がある。

路側ネットワーク移動管理方式

路側ネットワークの上位には広域 IP ネットワークがあり、路側ネットワーク内での多数の高速に移動するローカルな車輛の移動を上位 IP ネットワークに意識させないこと即ち、路側ネットワーク内で頻繁に起こる局所的な移動を路側ネットワークの外部には隠蔽する移動管理方式を持つこととする。また、路側ネットワークから他の路側ネットワークへ車輛がグローバルに移動することを上位 IP ネットワークに通知する移動通知方式を持つこととする。

ハンドオーバー制御処理時間の低減によるデータ伝送時間の確保

狭域セルを高速に移動する端末に対し情報配信するシステムでは従来技術において下記点が課題である。即ち携帯電話ネットワークのようなワイアレスシステムにおいては、基地局と移動端末間の通信コネクションが集中的に管理されている[30][31]。移動端末が別の基地局の通信エリアに移動すると通信コネクションの切り替えが行われ新たな基地局に通信コネクションが引き継がれる。このアーキテクチャにおいては通信コネクションの切り替えに数秒かかることも有り、900msec で狭域セルを高速に移動するシステムの場合には、通信コネクションの切り替えを行っている間にセルを通過してしまうことも有り得るため適用することはできない。またこれを改善したシステムとしてはマイクロモビリティ(セルラ IP, 階層型モバイル IP など)の研究が進められている[32][33]。マイクロモビリティではレイヤ 3 (IP ルーティング) またはレイヤ 3.5 (IP トンネリング) 方式が適用されている。マイクロモビリティ機能を実装したレイヤ 3 スイッチ/ルータにより構成される。移動体からの位置登録要求により動的に変化するルーティングテーブルを検索しながらネットワーク内をルーティングするアーキテクチャとなっている。上述のマイクロモビリティ方式は、路側ネットワークでの要求条件を考えるとセル内で通信コネクションの設定時間 100msec という路側ネットワークでの要求条件に対し十分な性能が得られない。本システムでは、路側ネットワーク内での通信方式として ADS メッセージ通信を利用した高速コネクション設定方式を開発する。

高レスポンス性の確保

安全運転を目的とした情報提供を行う走行支援サービスではリアルタイム性が要求される。その要求条件[24]からは End-End でのパケット転送遅延時間は 100msec 以内であることを実装目標とする。

ハンドオーバーにともなうパケット損失の低減

パケット伝送の高信頼性とスループット確保のために、路側ネットワーク内で頻繁におこるハンドオーバーにより引き起こされるパケットロス の低下を抑える方式とする。

5.3 ネットワーク制御提案方式

5.3.1 マイクロセルネットワーク実装構成

下記に路側ネットワークによるパケットの転送メカニズムについて概要を示す。図 5.1 においてアプリケーションサーバから車載端末へのパケットの転送を考える。車載端末の位置は IP ネットワーク内でその位置が管理されている。アプリケーションサーバからの IP パケットは IP ネットワーク内でルーチングされ路側ネットワークに到達する (①)。IP パケットは GW により終端される。路側ネットワーク内では前述の自律分散アーキテクチャによるメッセージ通信が実行され IP パケットは透過的に転送される (②)。路側網内を透過的に転送された IP パケットは狭域無線プロトコルによりやはり透過的に転送され車載端末に到達する (③)。

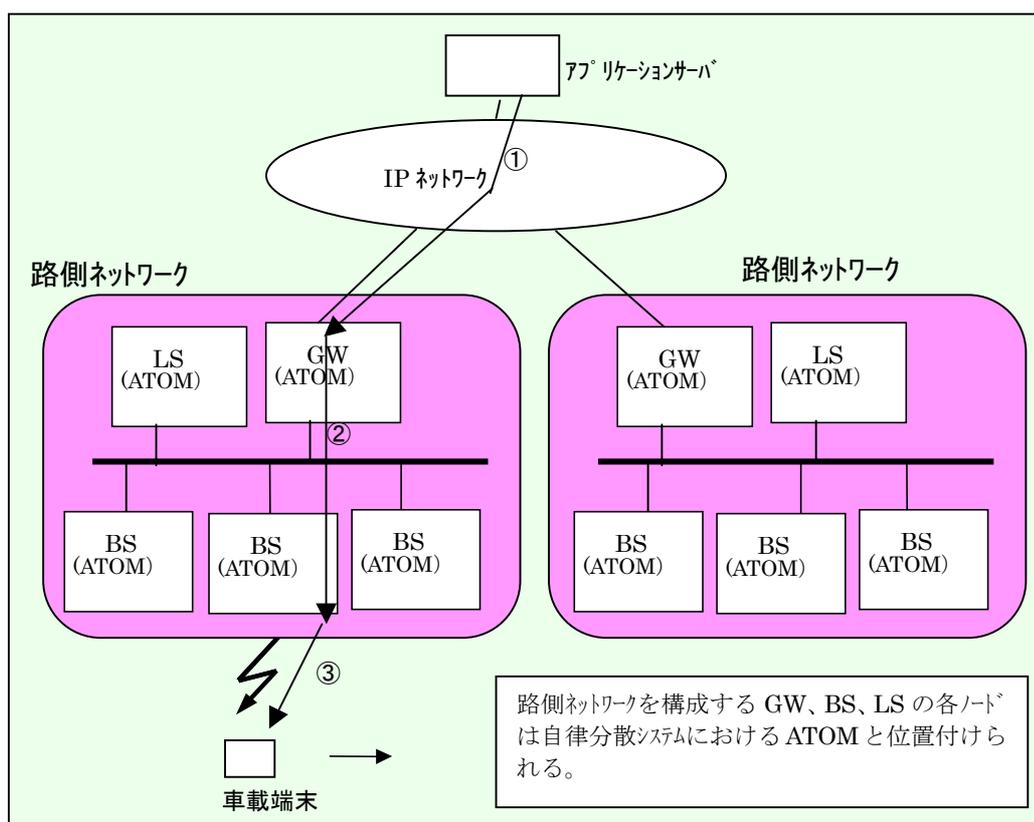


図 5.1 路側ネットワークへの自律分散アーキテクチャの適用
 Applicability of Autonomous Decentralized System to ITS Roadside networks

第5章 マイクロセル移動体ネットワーク制御方式の実装と評価

マイクロセルネットワーク制御基盤として、自律分散アーキテクチャによるメッセージ通信（ADS メッセージ通信）機能を実現し、これを利用することにより高速なホストモビリティ及びパケットロスの低減を目指した高信頼パケット通信を実現する高速移動管理方式を実現する。

道路交通システムへの適用を考えたマイクロセルネットワーク実装構成の概要を図 5.1 に示す。道路側に敷設される伝送路に無線基地局（BS）及び外部ネットワークへの IP ゲートウェイ（GW）より構成される。以下にこれらの構成要素の機能概要を示す。

IP ゲートウェイ機能（GW）

AP サーバから GW に到達した IP パケットは GW にて終端され、路側ネットワーク内では ADS メッセージ通信機能によりカプセル化され透過的に転送される。

- ADS メッセージ通信機能（ADS）
IP ゲートウェイ（GW）は、IP ネットワーク、路側ネットワークと接続している。ADS メッセージ通信（ADS）は、このうち路側ネットワークと ADS メッセージにより通信を行う。IP パケットを ADS フレームにカプセルリングし、4 章で提案の ADS メッセージ通信機能を提供する。
- ADS AP 機能（ADS-AP）
路側ネットワークを制御するためのコネクション管理機能及びアドレス管理機能を提供する。詳細を次項以降にて言及する。
- AP 機能（AP）
車載端末に提供する TCP/IP アプリケーションを提供する。

マイクロセル無線基地局機能（BS）

マイクロセル無線基地局（BS）は、マイクロセル無線通信インタフェース（MCC）を介し車載端末との間での無線通信機能を提供するとともに、マイクロセルネットワーク内での通信インタフェース（ADS）を介しネットワーク内でのパケット転送機能を提供する。

- ADS メッセージ通信機能（ADS）
ADS メッセージ通信（ADS）は、このうち路側ネットワークと ADS メッセージにより通信を行う。IP パケットを ADS フレームにカプセルリングし、3 章で言及の ADS メッセージ通信機能を提供する。
- ADS AP 機能（ADS-AP）
路側ネットワークを制御するためのコネクション管理機能及びアドレス管理機能を提供

する。詳細を次項以降にて言及する。

- ・ マイクロセル無線通信インタフェース (MCC)

マイクロセル無線通信プロトコル及び IP パケットのカプセリング機能を提供する。

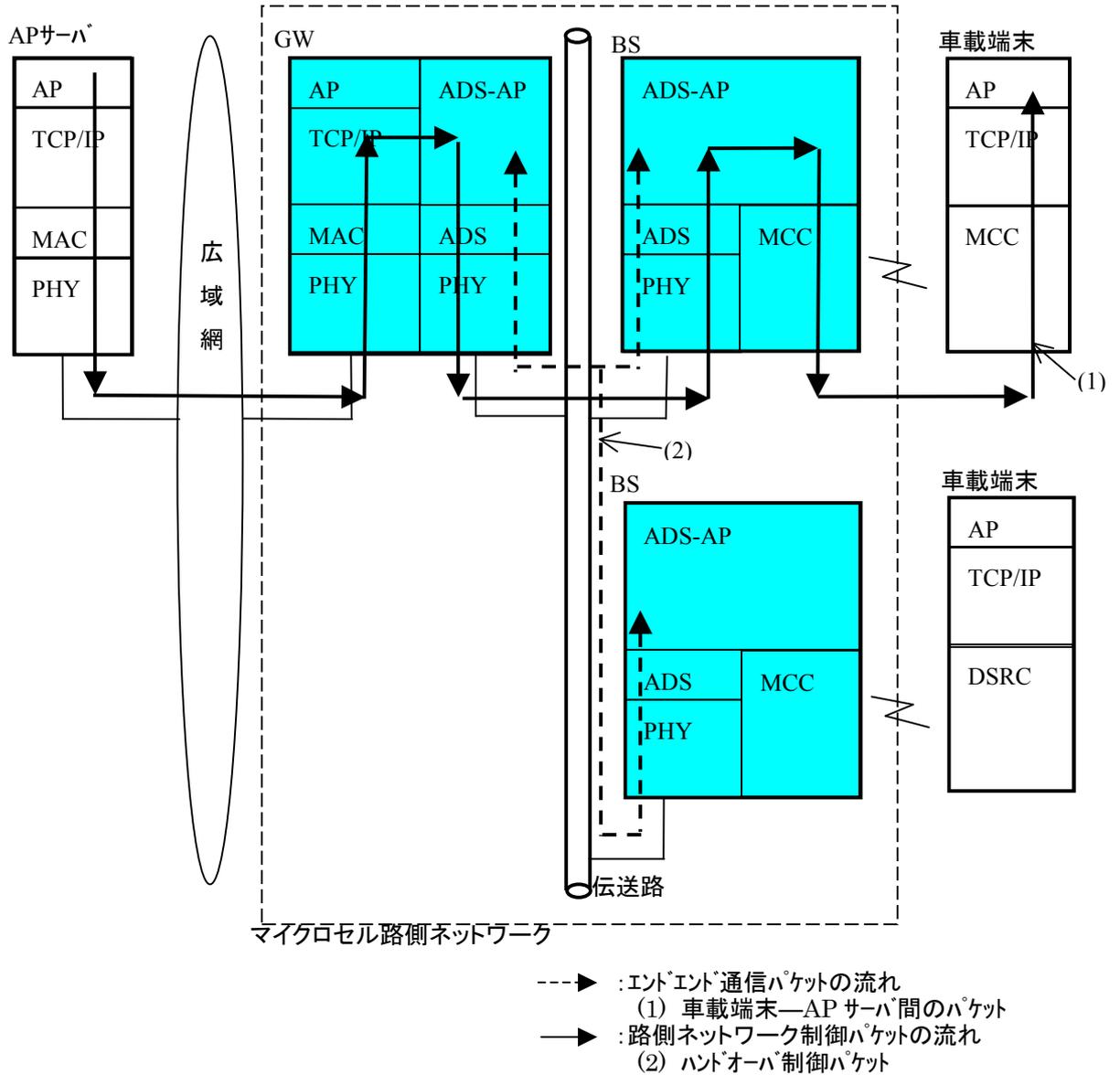


図5.2 自律分散システムによる
マイクロセルネットワークアーキテクチャ

路側ネットワーク内でのパケット転送は ADS 機能により行われる。AP サーバからのアプリケーションパケットは, GW により IP パケットとして終端され ADS 機能によりカプセリングされ ADS パケットとして路側ネットワーク内を転送される (図 5.1 矢印(1))。アプリケー

ションパケットとともに、路側ネットワーク内で起こるハンドオーバープロセスで必要となる制御信号も ADS パケットとして転送される (図 5.1 矢印(2)).

5. 3. 2 移動管理方式

マイクロセルネットワークにおける接続管理の概要を以下に示す.

- 1° 移動体がマイクロセルの通信ゾーンに入ると無線基地局 (BS) との間で無線リンクの確立を行う (①).
- 2° 無線リンクの確立を契機としゲートウェイ (GW) を介し上位ネットワーク上のアプリケーションサーバ (AP) と移動体の間で End-End での TCP/IP 接続を設定する (②).
- 3° BS は該当する移動端末と無線リンクの切断を検出すると路側ネットワーク内に該当する移動端末のハンドオーバーの発動を行い接続情報の引継ぎを行う (③).
- 4° 新たな BS との間での無線リンクの確立により引き継がれた接続情報により End-End での TCP/IP 接続を再設定する (④).

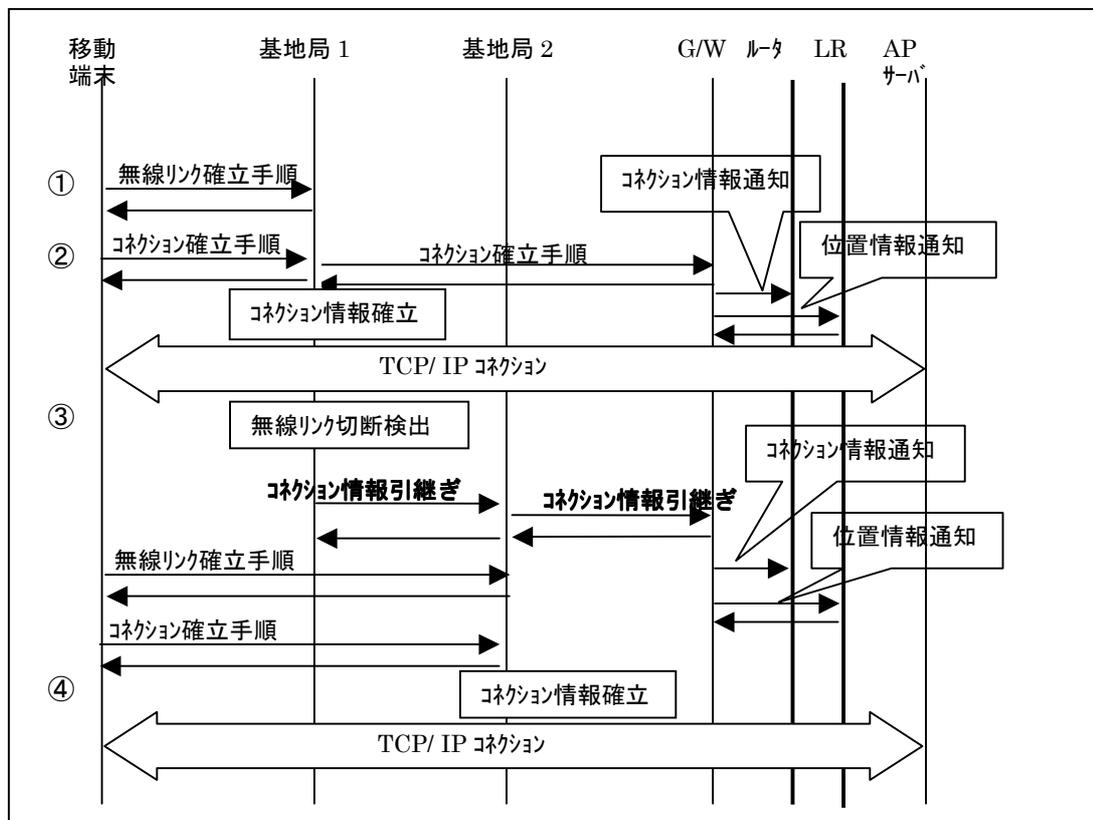


図 5.3 接続管理シーケンス

コネクション確立及びハンドオーバー時のコネクション情報引継ぎのための路側ネットワーク内での制御信号の授受を図 5.4 にしめす。

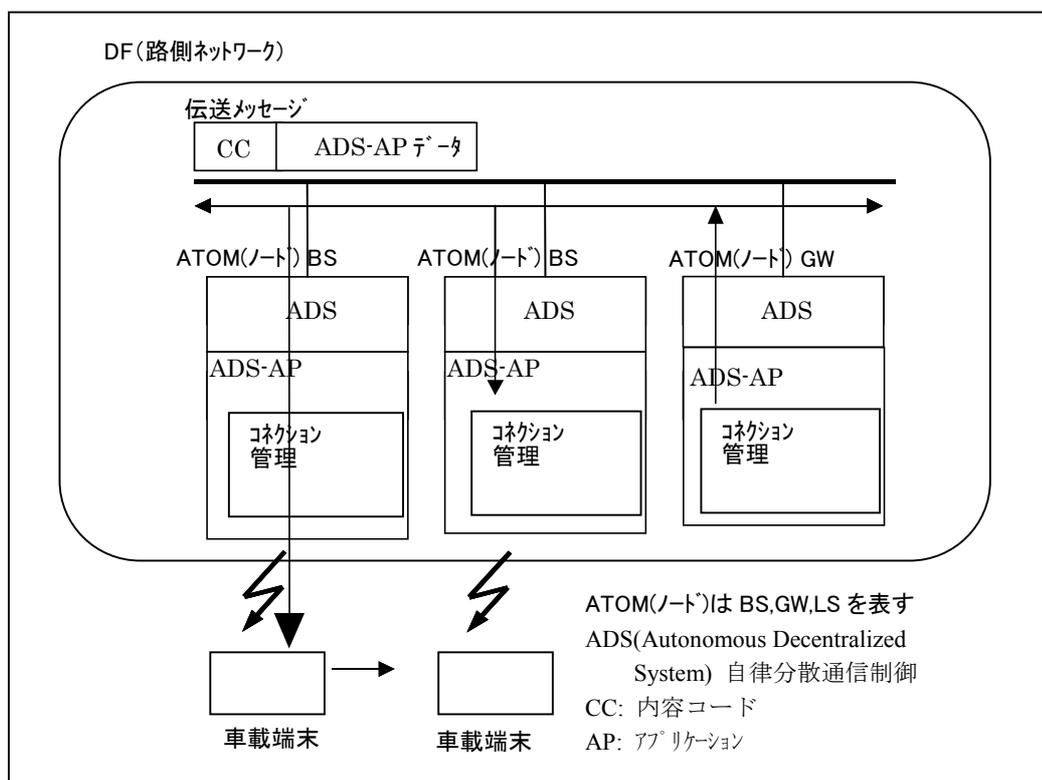


図 5.4 路側ネットワーク内の制御信号授受方式

ハンドオーバー時のコネクション情報の引継ぎは以下の単純なメカニズムにより行う。

- 1° 情報共有グループの生成
移動体からのコネクション確立要求単位（セッション）毎に情報共有グループを生成し路側ネットワーク内に情報共有グループのセッションデータを配信する準備をする。
- 2° セッションデータの共有
AP サーバからのセッションデータは、情報共有グループ内の各基地局に配信される。
- 3° 端末へのセッションデータ送信
車載端末とのコネクションを設定している基地局は、車載端末に対しセッションデータを配信する。
- 4° 送信処理の引継ぎ

- ・ セッションデータを送信中の BS がリンク切断を検出したことにより、その時点の該当するセッションデータの送信ポイントをネットワーク内の全 BS に送信。
- ・ 該当するセッションデータに対し、リンク確立した BS はその時点のポイントより継続してセッションデータを端末に配信。

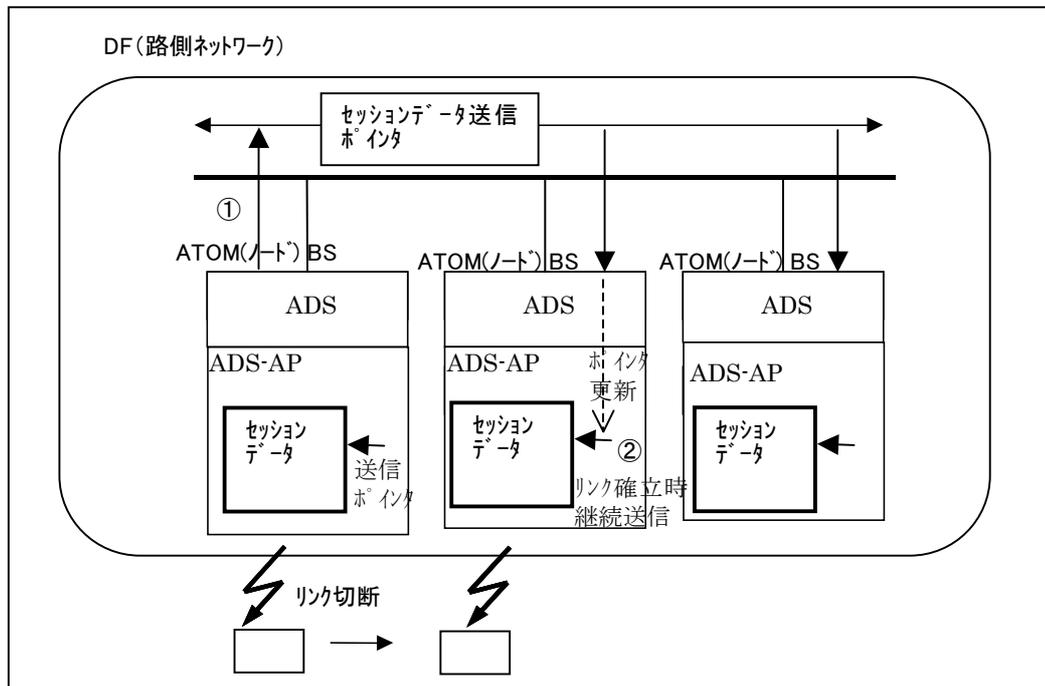


図 5.5 ハンドオーバー時の接続情報引継ぎ方式

5. 3. 3 アドレス管理方式

IP アドレス管理の考え方

車載端末に IP サービスを提供するための考慮点として；

- ・ 車載端末に IP アドレスを持たせることにより拡張性の高いサービスを実現する。
- ・ 車載端末の IP アドレスは、通常クライアント端末がそうであるようにネットワーク接続時に通信に必要な情報を入手することにより柔軟性を確保すること、及びプライバシー保護の観点からも、車載端末毎にあらかじめ固定的に付与するのではなく、ネットワークアクセス時に IP アドレスを動的付与する。

こととした。これにより、IP アドレスから直接車両を特定することができなくなるため、付与したグローバル IP アドレスを用いて、直接車両情報を取得することを抑止することができる。

狭域セルを高速に移動する端末を管理することが必要となる本システムでは、IP アドレスを動的に割り付けるための制御処理時間を短縮するために、下記を考慮し検討した。

- ・ サービスエリアに進入時に IP アドレスを付与する。
- ・ 付与した IP アドレスを路側ネットワーク内で継承できるようにした。

下記に本システムでの IP アドレス付与方式、IP アドレス継承方式につき言及する。

動的 IP アドレス付与

IP アドレスの動的付与は下記の問題を引き起こす。即ち、マイクロセルによる無線通信方式では、既存モバイルサービスと比較して非常に狭い通信ゾーン内で IP アドレスの付与が完了しなければならない。このため下記に示す高速な動的 IP アドレス付与方式を検討した。

図 5.6 にアドレスの付与方式を示す。IP アドレスの管理は GW が行なう。毎回車両進入時に車載端末に対し IP アドレスを付与するが、GW が IP アドレスを付与するのではなく、予め BS に付与可能な IP アドレスをプールする方式とした。(IP アドレスキャッシュ) これにより IP アドレスの付与時間を短縮できる。GW は BS 起動時、路側ネットワーク内通信により BS に IP アドレスをキャッシュする。BS は車両進入時、新規車両と判断したらキャッシュしている IP アドレスを捕捉し車両に付与する。この時 BS は、GW へ付与したことを通知し、GW の IP アドレス管理データを更新する。

図 5.7 にアドレス付与のシーケンスを示す。IP アドレス付与に必要な情報量・シーケンス数を最小限に抑えたプロトコルとした。上記目的のために、情報量・シーケンス数を最小限に抑え、DSRC の利用可能な APDU のサイズ (56oct) 以下とし、それぞれ 1 シーケンスでやり取りすることにより IP アドレス付与のシーケンスを最小限に抑えた。IP アドレスの管理はネットワーク内で一元管理する必要があり本システムの場合ではゲートウェイノード (GW) にて一元管理を行うが、毎回車両進入時に GW が車両に IP アドレスを付与するのではなく、予め基地局ノードに付与可能な IP アドレスをキャッシュすることにより、基地局ノードは車両進入時、新規車両に対してキャッシュしている IP アドレスを捕捉し車両に付与する方式により IP アドレス付与の高速化を図った。

IP アドレス継承機能

高速に移動する車両に対し継続的にサービスを提供する為に、付与した IP アドレスはサービス提供している間は継続的に使用できるようにした。これによりアドレス解決のための制

御処理時間短縮を図ることができる。サービスによっては例えばWebアクセスなどトランザクション型のサービスではアクセス時にアドレス解決すればよいサービスもあるが本システムではサービスエリア進入時にアドレスを割り当てサービスエリア内での継続利用によりアドレス解決のためのネットワークの負荷低減と制御処理時間の短縮を図った。

図 5.8 に IP アドレス継承のシーケンスを示す。IP アドレス付与にて車両に IP アドレスを付与した時 BS は GW へ付与を通知する。この付与通知を他 BS も受信するようにしており、GW 内（サブネットワーク）に存在する車両の IP アドレスを各 BS は格納する。これにより車両移動先 BS は、車両が検査要求してきた IP アドレスを GW に問い合わせることなく、検査結果を車両に応答することを可能となる。

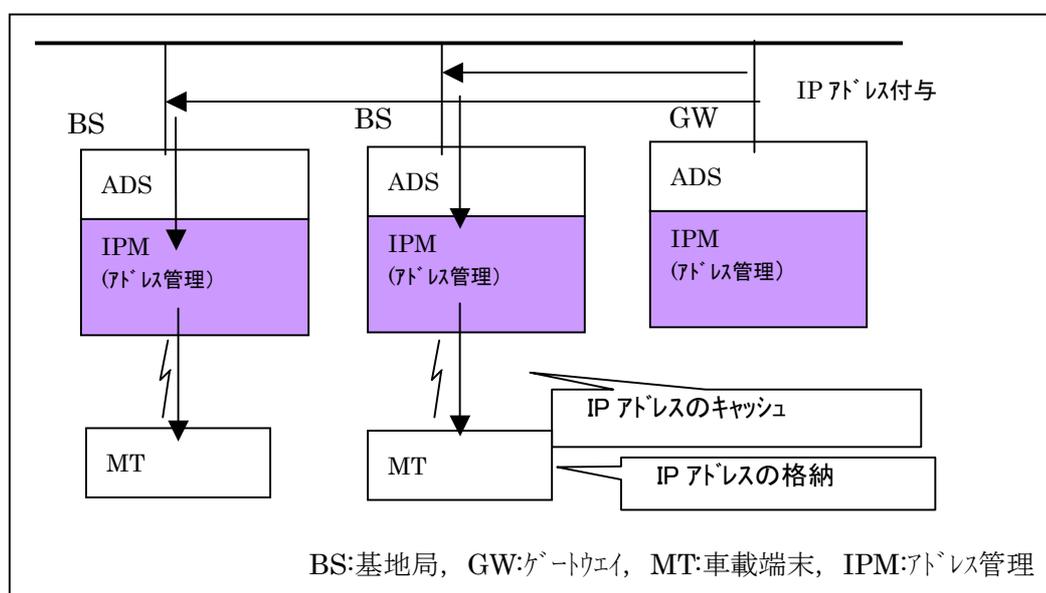


図 5.6 車両に付与する IP アドレス管理プロトコル
Protocol to handle IP addresses assigned to vehicles

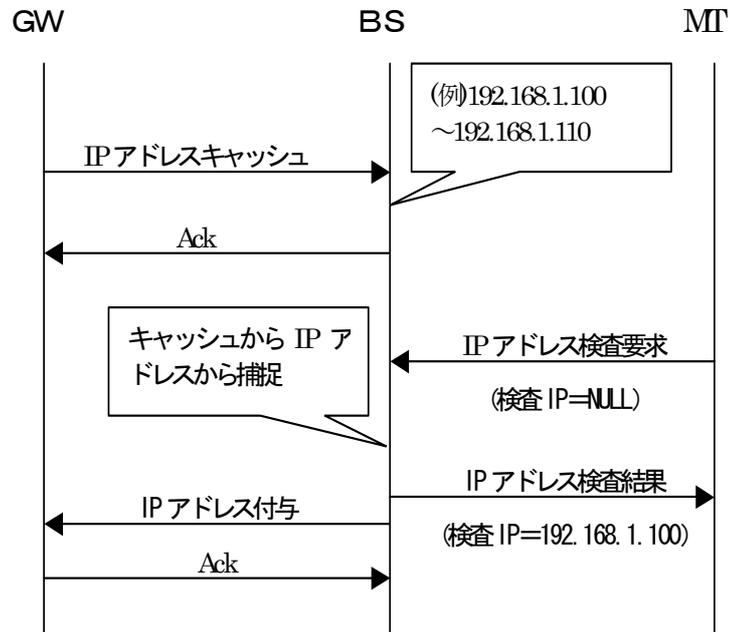


図 5.7 IP アドレス付与シーケンス

The sequence to assign an IP address to a vehicle

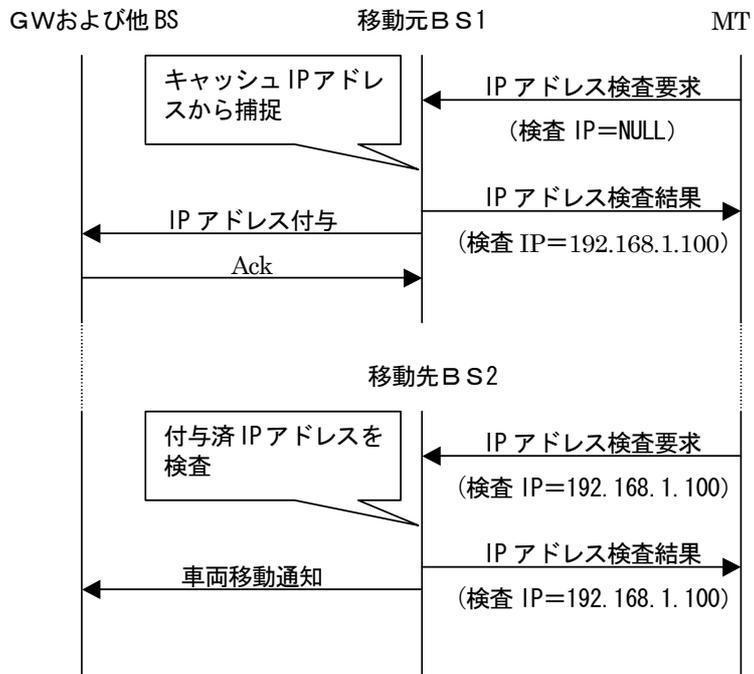


図 5.8 GW 内 BS 間 IP アドレス継承シーケンス

The sequence to take over IP addresses in between BS's in a roadside network

5. 3. 4 データキャッシュによるスループット改善方式

狭域セルを利用して高速移動車内からインターネット上の Web サーバにアクセスする場合、以下の点で End-End のスループットは低下する。

- ・メッセージ通信に TCP を利用する場合

End-End 間でメッセージの送達確認を行うため、BS 間から Web サーバに問合せをすることによるオーバーヘッドがある。その結果、路車間のスループットは低下する (図 5.9)。

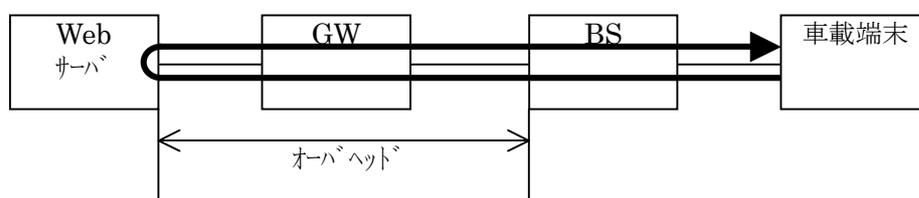


図 5.9 BS-Web サーバ間問合せによるオーバーヘッド
Overhead of Inquiry by the Base Station to Web Server

- ・メッセージ通信に UDP を利用する場合

End-End 間で送達確認が行われなため、Web サーバ から一方的にメッセージが送信される。本システムでは、基地局は離散的に設置されることから、路車間の非接続区間では大量の packets 損失を伴い、その結果路車間のスループットは低下する (図 5.10)。

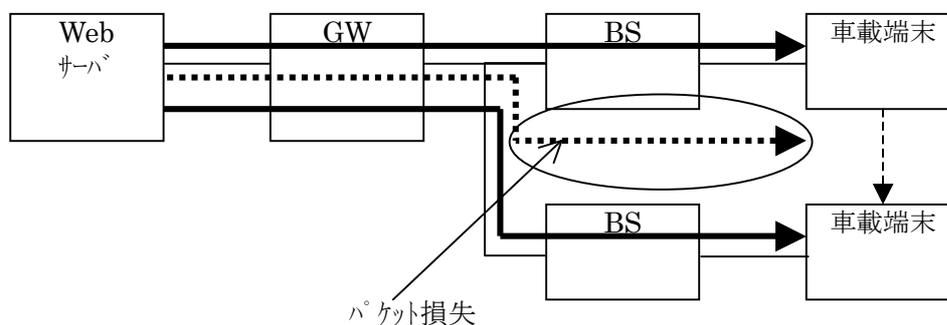


図 5.10 路車間非接続区間におけるパケット損失
Packet Loss when the Vehicle Is Not Connected to the Network

本システムでは路側ネットワーク上で、IP データを事前にキャッシュしておくことで、上記2点の問題を解決することを検討した。図5.11に、システムアーキテクチャを示す。IPデータのキャッシュは、図5.11でIPM (IP モジュール) 上に実装され、各基地局のADSにて、受信メッセージに付与されたCCに基づいてEnd-End間のIP通信に必要なメッセージを受取り、IPMに処理を委ねる。Addressは車両の宛先アドレスで、ここではIPアドレスに相当する。図5.12にIPデータキャッシュのアーキテクチャを示す。

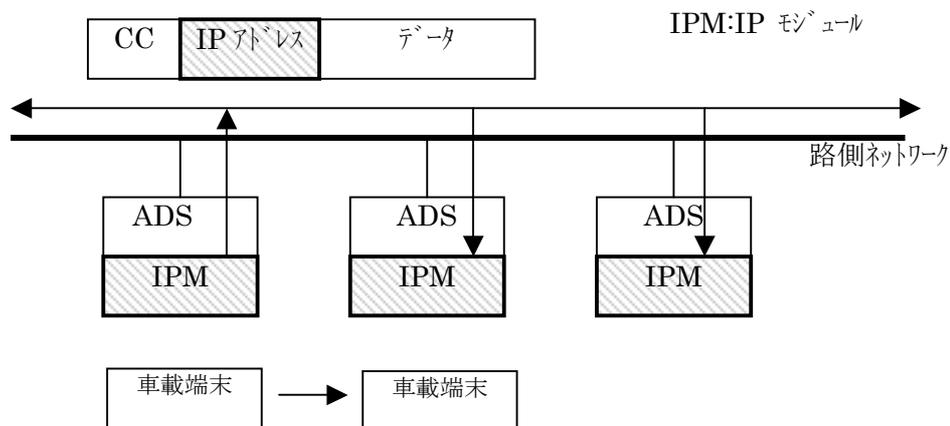


図 5.11 IP データキャッシュを搭載した
ITS モバイルネットワークアーキテクチャ
ITS Mobile Network Architecture with IP Data Caches

各基地局は、移動車両からIPデータ要求を受取ると、IPMに移動車両の宛先IPアドレスと車載端末IDの対応づけをアドレス管理テーブルを用いて行い、アドレス毎にキャッシュ領域を確保する。また、IPアドレスと車載端末IDとの対応関係は、路側ネットワークを介して他基地局にも伝達される。

各基地局は、路側ネットワークからメッセージを受取ると、メッセージ内に付与された宛先アドレスを確認し、自局が保持するアドレス管理テーブル内に同一のアドレスがある場合、予め確保したキャッシュ領域にIPデータをパケット単位で蓄積し、そうでなければ破棄する。また、メッセージ受信時、該当する車両と無線リンク確立中であれば、蓄積しているデータをパケット単位で車両に送信し、送信した旨をアドレスとCCを付与して他基地局に伝達する(IPデータの引継ぎ)。

各基地局は、引継ぎメッセージを受取ると、メッセージ内に付与された宛先アドレスが自局で管理するアドレスと同一であれば、送信済みパケットを破棄し、蓄積しているデータを更新する。

各基地局は、蓄積している IP データを全て掃きだすまで、上記処理を実行する。これにより、車両と接続した基地局は、無線リンク確立している間、蓄積していた IP データを直ちに送信することができるため、(1)で言及した課題である「TCP を使用する場合の BS から Web サーバに問合せをすることによるオーバーヘッド」を解決できると同時に、無線リンクがない区間に Web サーバより送信されたデータは、基地局内でキャッシュされているため、(2)で言及した課題である「UDP を使用した場合の無線リンクの非接続区間でのパケット損失」も解決できる。

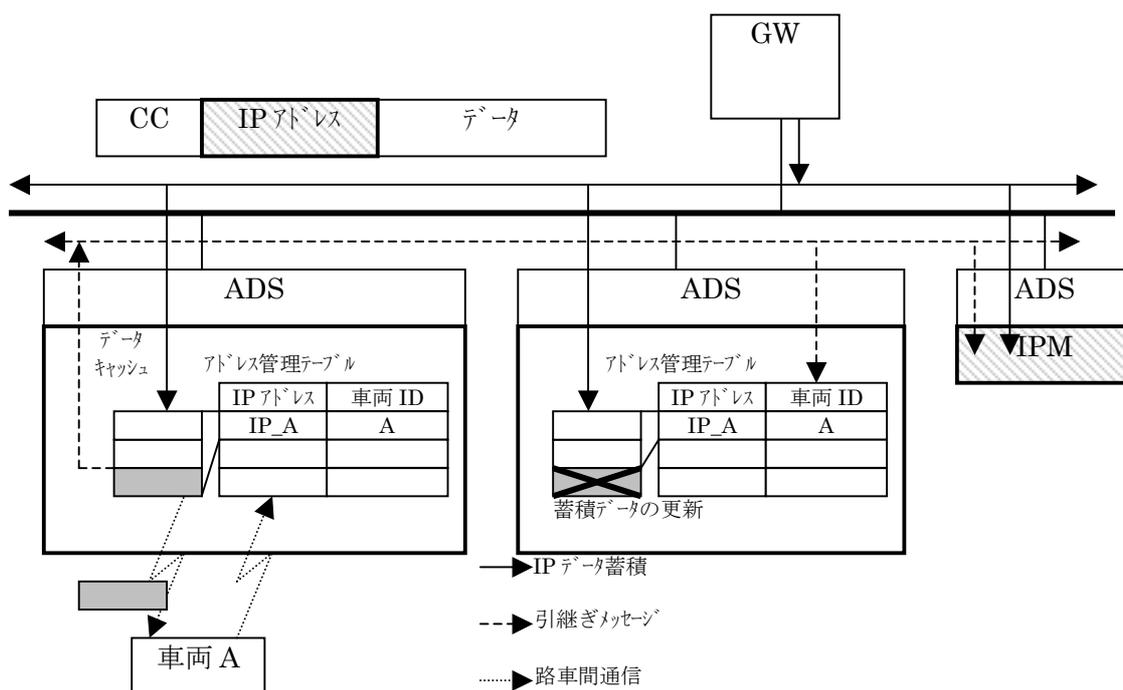


図 5.12 IP データキャッシュアーキテクチャ
IP Data Cache Scheme

5. 3. 5 パケットロス回避によるスループット改善方式

路側ネットワークでは、移動体端末とネットワークとの無線リンクの接続、切断が頻繁に起こるために送受信処理過程のパケットが正常に送達されない確率が一般の移動体ネットワークの場合と比較して高くなる。このためアプリケーションを含む上位レイヤにて再送が多発することになり、結果として End-End でのスループットの低下を招く事になる。これを解決するために、ネットワーク内基地局にて未送信として残ったパケットをネットワーク内の各基地局に引き継ぐ方式を検討した。これにより再送制御に伴う End-End スループットの低下を

抑えた。

図 5.13 に引継ぎ方式を示す。移動局の切断通知時、DSRC 上の未送信データを読み取り、路側ネットワークを介して各基地局へ転送し、移動局接続時、未送信データを DSRC へ通知して移動局へのデータの継続送信を行う。

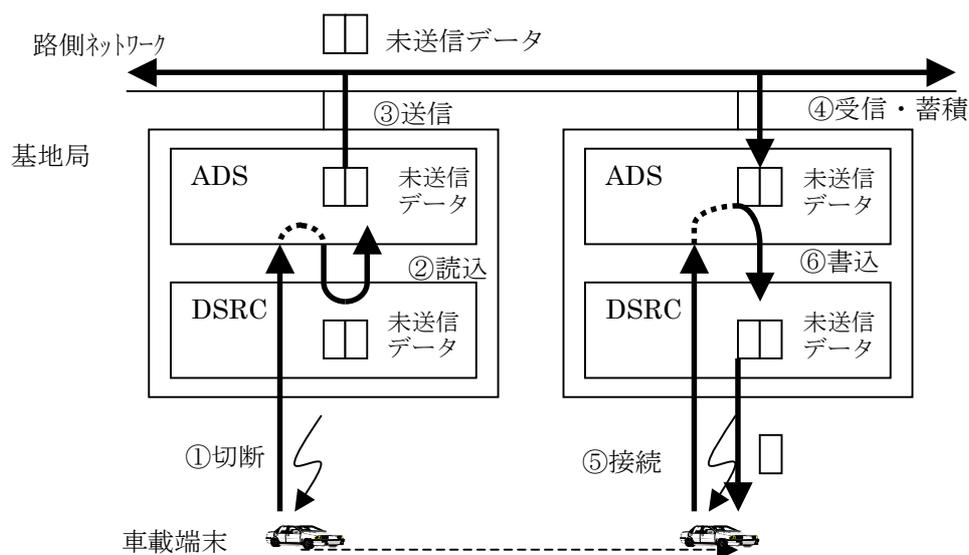


図 5.13 無線リンク断に伴う送信未完パケットの引継ぎ方式
Packet handover scheme while radio links are disconnected

5. 4 提案方式の適用性評価

5. 4. 1 従来方式との比較

従来技術として、IETF Mobile IP WG で検討されている IP ベースでの移動体通信方式がある[32][33]。ここで議論されている移動体通信方式は通常のモバイル IP での移動端末とホスト間のシグナリングオーバーヘッド例えば移動端末と HA(Home Agent)間での位置登録のためのシグナリングを少なくすることによりネットワークの負荷を低減させることを狙いとするものである。

ここで議論されている移動体通信方式として典型的なセルラ IP, HAWAII, 階層型モバイル IP でのネットワークモデルを図 5.14 に示す。セルラ IP では IP ベースの移動体通信方式を実現しており、モバイル IP ネットワークをバックボーンとしそのアクセスネットワークの位

置付けである。基本構成はワイヤレスアクセスポイントとしての機能及び IP パケットルーティングを行う基地局 (BS) により構成される。セルラ IP のアクセスネットワークはレイヤ 3 スイッチにより構成される LAN にセルラ IP ルーティングプロトコルを実装することにより動作可能としている点に注目すべきである。セルラ IP でのパケットの転送メカニズムは図 5.14 において、

- ・パケットを HA にルーティング (①通常の IP ルーティング)
- ・HA から GW にルーティング (②IP トンネリング)
- ・GW から移動端末にルーティング (③セルラ IP ルーティング)

により行われる。階層型モバイル IP においてもエンドポイントで IP トンネリング処理を行っていることを除けば基本的なネットワークモデルは同じである。

ここでパケットの転送方式に注目してみると、セルラ IP、階層型モバイル IP ともにレイヤ 3 でのルーティングを行っており、アクセスネットワーク内の全てのノード (BS) はレイヤ 3 スイッチ (ルータ) で構成されレイヤ 3 スイッチ (ルータ) はこのルーティング処理を実装している必要がある。移動体からの位置登録更新要求により動的に変化するルーティングテーブルを検索しながらアクセスネットワーク内を順次ルーティングすることが基本的なアーキテクチャである。

図 5.14 においてパケットルーティングのメカニズムを説明する。インターネット上の移動を管理するマクロモビリティを実現するプロトコルとして Mobile IP が用いられる。Mobile IP によるパケット転送のメカニズムを示す。移動端末は移動先のネットワークにおいて、FA (Foreign Agent) が定期的に流す Agent Advertisement メッセージによりあるいは移動端末が訪問先のネットワークに問い合わせることにより現在位置 (Care-of-Address) を検出・確認する。現在位置を登録するメッセージを Home Network 上のルータである HA (Home Agent) に送信する。HA は Home Address 先に送信されてきたパケットを Care-of-Address 宛のパケットにカプセル化して FA に転送する。FA はカプセル化されたパケットの中身のみを移動端末に渡す。このように Mobile IP プロトコルの動作は三角形の経路となるため経路が冗長であることやパケットのソースアドレスと実際の発信元が異なることによるセキュリティ上の課題があることが挙げられる。また、移動端末の位置登録処理に時間がかかりハンドオーバー時にパケットを移動先に転送することが失敗する要因を引き起こしている。

これに対し局所的な移動を管理する技術としてマイクロモビリティがある。マイクロモビリティを実現するプロトコルとして Cellular IP [46] のパケット転送のメカニズムを以下に示す。Cellular IP では通常の IP ルーティングにおけるルーティングテーブルに相当するものとして Route Cache を各ノード (BS) がもつ。Route Cache は GW から各移動端末へのルートを移動端末とそれが収容されている BS の組として保持しているもので、これをもちいて hop-by-hop のルーティングを行う。移動端末からのパケットは常に BS を経由し上位に位置する

GW まで届けられた後に配送される。GW は移動端末の HA に登録要求する。GW から各移動端末へのルートは移動端末とそれが収容されている BS の組として Route Cache を用いてルーチングするため通常の IP ルーチングは要求されない。各移動端末は定期的にまたはセルを移動する度に Route-update メッセージを送信し Route Cache を更新する。また、移動端末が通常のデータを送信することでも Route Cache の更新が行われる。

マイクロモビリティをサポートするプロトコルとしては、Cellular IP の他にも HAWAII (Hand-off Aware Wireless Access Internet Infrastructure)[41]がある。アクセスネットワークをホームドメインと移動先ドメインに分け、ホームドメインにいるときには最上位のルータから直接配送され、移動先ドメインにいるときにはホームドメインの最上位ルータから移動先ドメインの最上位ルータへパケットが転送され、CCoA (Co-located Care-of-Address)宛にトンネルされて配送される。最上位ルータまでは通常の IP ルーチングを行うが、それ以下では各ルータが移動端末と転送先の組を保持しこれをもとにルーチングを行う。各移動端末は BS に登録要求を送信し、BS から最上位のルータまでの転送エントリを作成する。

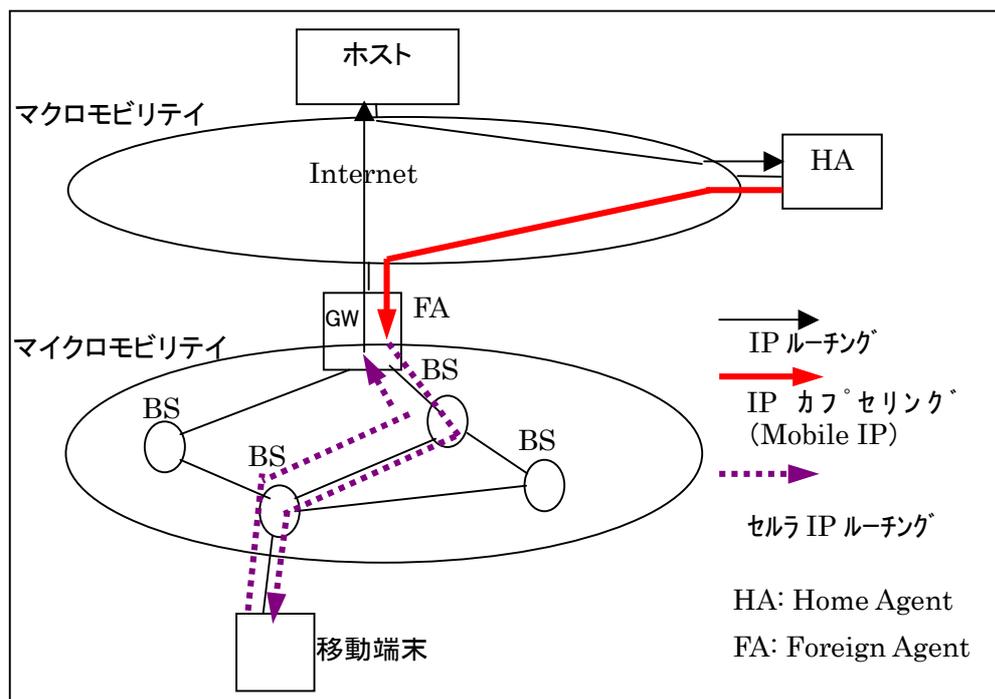


図 5.14 従来技術でのネットワークモデル

ここで路側ネットワークへの適用を考えると、

- (i) 狭域セルにより構成されるサービスゾーンを高速に通過する移動体へのパケット

転送では、セルの接続状態、車両の移動を特定しにくいネットワークトポロジーでありパケットの転送先を高速にかつ効率よく特定する方式が必要となる。

- (ii) 動的に変化するルーティングテーブルによりアクセスネットワークを順次ルーティングする方式では30mの狭域セルを高速に移動する車両に対しパケットデータの伝送時間を十分に確保できない。
- (iii) 走行支援情報のような局所的かつ高レスポンスを要求されるサービスに対し路側ネットワークに閉じた高レスポンス通信を提供する手段が必要となる。

路側ネットワークで上記課題を解決するために、4.2項で言及のADSメッセージ通信方式により路側網内での高速コネクション設定方式を開発した。次項でその適用性につき評価する。

5.4.2 評価システム構成と評価概要

自律分散アーキテクチャを適用した路側ネットワークシステムの評価を下記により実施した。路側ネットワークにおけるパケット転送方式及びハンドオーバ方式の性能評価を行うことが目的である。評価尺度として重要なのは、エンドエンドスループット性能とハンドオーバ時間を決するADS網通信性能である。本項では、本評価システムの構成と評価概要を示す。

図5.15に評価システムの構成概要をまた図5.17に評価システムの構成要素をプロトコルスタックとして示す。

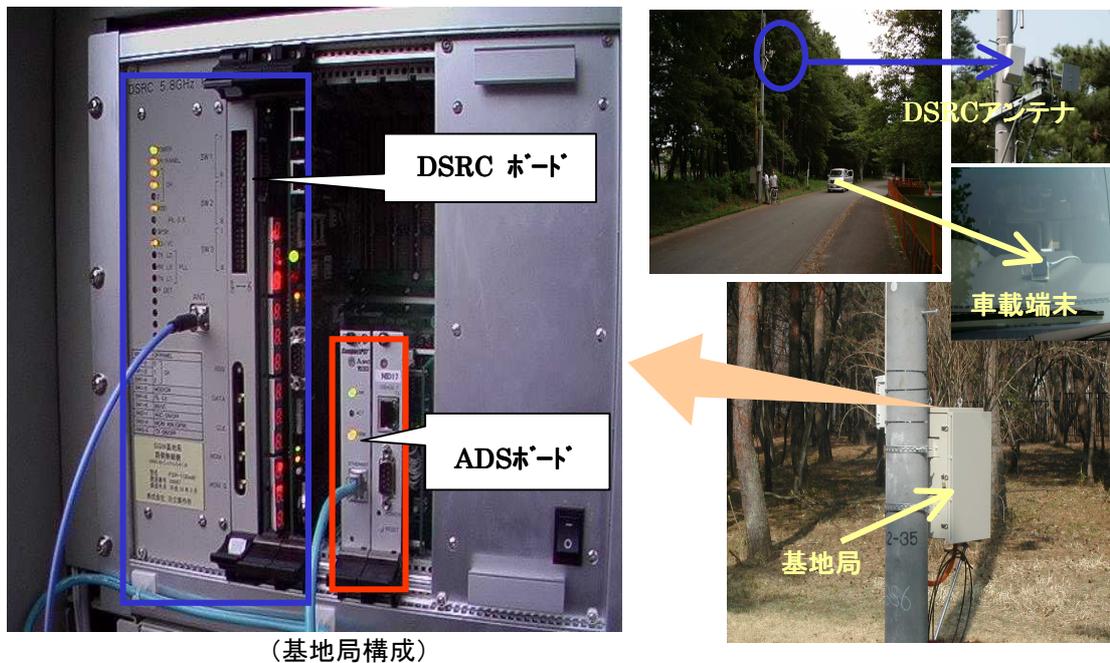
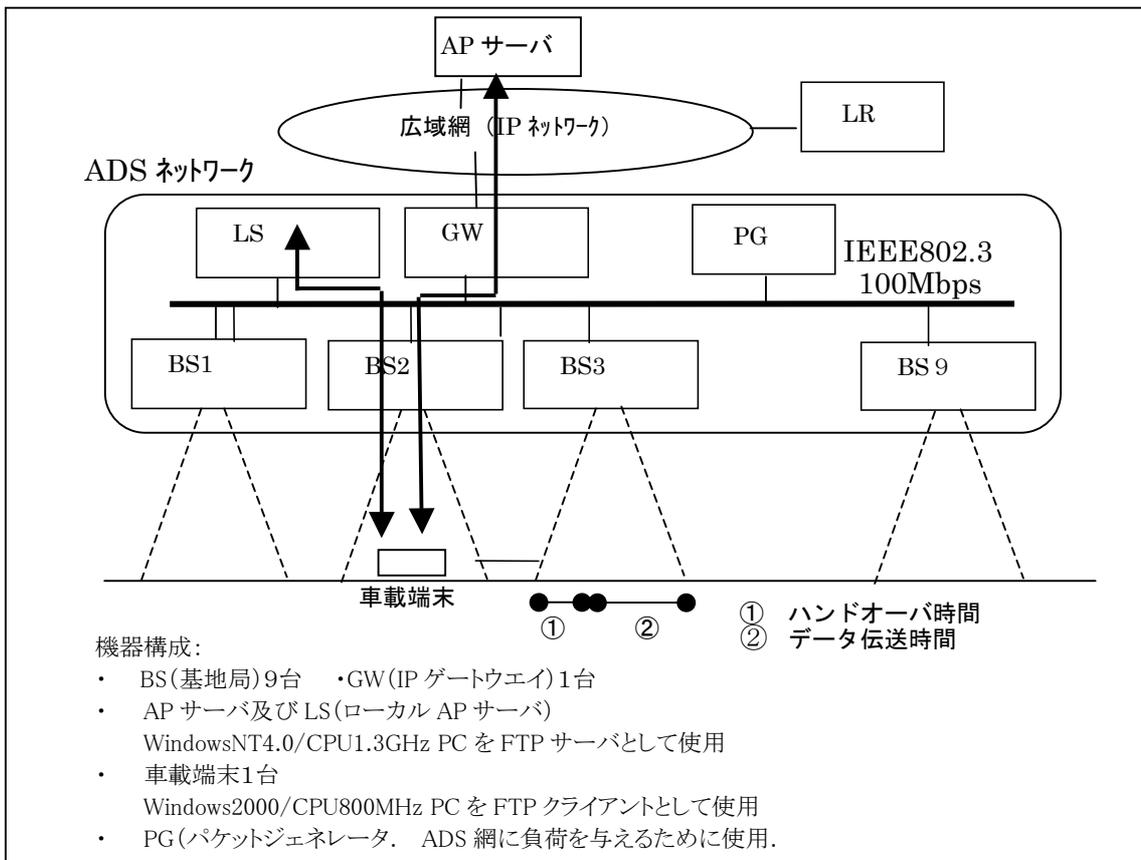


図 5.15 路側ネットワーク評価システム構成概要

図 5.15 において評価システムは、路側ネットワークと IP ゲートウェイ (GW) 経由広域網 (IP ネットワーク) を介し接続される AP サーバ、ロケーションレジスタ (LR) 及び車載端末より構成される。路側ネットワークは IP ゲートウェイ (GW)、基地局 (BS)、ローカルサーバ (LS) により構成される。下記にこれらの機能概要について説明する。また、これらの構成要素について図 5.17 プロトコルスタックを用いて説明する。

IP ゲートウェイ (GW)

AP サーバから GW に到達した IP パケットは GW にて終端され、路側ネットワーク内では ADS メッセージ通信機能によりカプセル化され透過的に転送される。

- ADS メッセージ通信機能 (図 5.17 で GW 内 ADS)

IP ゲートウェイ (GW) は、IP ネットワーク、路側ネットワークと接続している。ADS メッセージ通信 (ADS) は、このうち路側ネットワークと ADS メッセージにより通信を行う。IP パケットを ADS フレームにカプセル化する機能を実装した。

- ADS AP 機能 (図 5.17 で GW 内 ADS-AP)

路側ネットワークを制御するための帯域制御機能、コネクション管理機能 (ハンドオーバー制御機能) を実装した。

- AP 機能 (図 5.17 で GW 内 AP)

TCP/IP アプリケーションとして下記を実装した。車両に IP アドレスを付与し、また、路側ネットワーク内を車両が移動しても付与した IP アドレスを継続して利用可能とする IP アドレス継承機能など車両に付与する IP アドレス管理機能を実装した。また、LR (ロケーションレジスタ) との連携機能として、車両の位置を管理する LR に車両の IP アドレスを登録する機能を実装した。車両進入時に、位置情報を LR への通知し、LR からの問い合わせ時に位置情報を応答する。通知プロトコルは HTTP/TCP/IP により実装した。

- 路側ネットワーク側、広域ネットワーク側ともに物理インタフェースには 802.3Ether を用いた。

基地局機能 (BS)

- 路車間通信機能 (図 5.17 で BS 内 DSRC)

車載端末との無線通信機能として ARIB STD-T75 DSRC プロトコル制御機能を実装した。また、車載端末との間で IP パケットを透過的に転送するための IP カプセル化機能を DSRC のサブレイヤとして実装し IPoverDSRC 方式を提供することとした。

- ADS メッセージ通信機能 (図 5.17 で BS 内 ADS)

路側ネットワークと ADS フレームにより通信をおこなう機能で GW に実装した機能と同じ。

第5章 マイクロセル移動体ネットワーク制御方式の実装と評価

- ・ ADS-AP 機能 (図 5.17 で BS 内 ADS-AP)
路側ネットワークを制御するための帯域制御機能, コネクション管理機能 (ハンドオーバー制御機能) で GW に実装した機能と同じ.
- ・ 路側ネットワークとの接続物理インタフェースは 802.3Ether を用いた.

ローカル AP サーバ機能 (LS)

- ・ アプリケーション (AP) として FTP ファイル転送機能を搭載した.
- ・ ADS メッセージ通信機能 (ADS) については上記 GW, LS に搭載したのと同じ機能である.
- ・ 路側ネットワークとの接続物理インタフェースについては 802.3Ether を用いた.

AP サーバ機能

- ・ アプリケーション (AP) として FTP ファイル転送機能を搭載した.

ロケーションレジスタ機能 (LR)

- ・ アプリケーション (図 5.17 で LR-AP) として路側ネットワークに進入した車両の位置情報を管理する機能を搭載した. GW との間でのインタフェースプロトコルにより, 位置情報を GW から定期的に通知される.

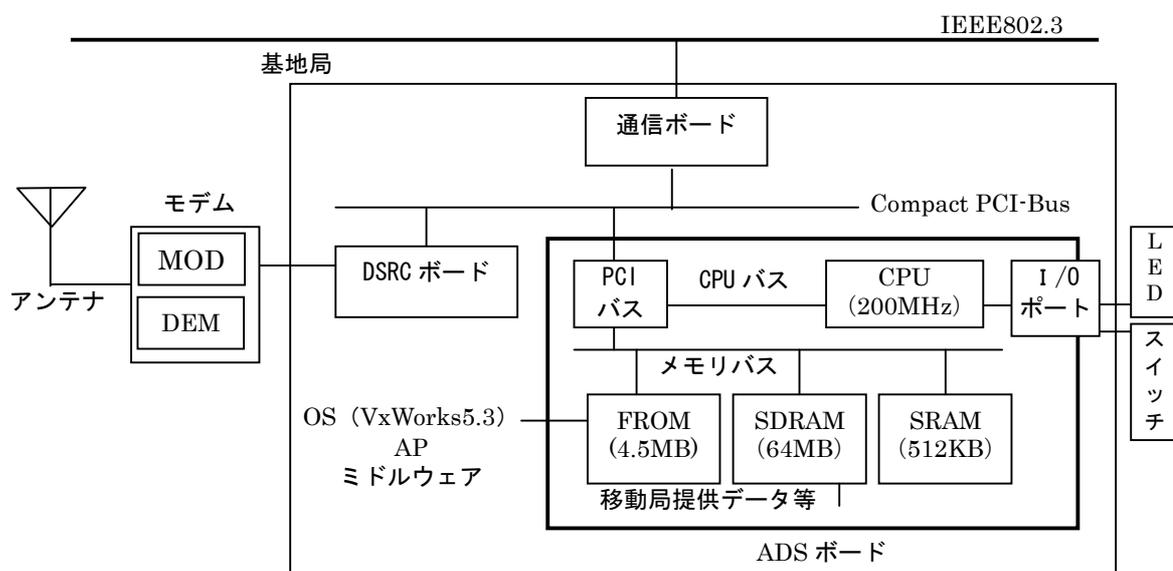
車載端末

- ・ 路車間通信機能 (図 5.17 で車載端末内 DSRC)
基地局との無線通信機能として ARIB STD-T75 DSRC プロトコル制御機能を実装した.
また, 基地局との間で IP パケットを透過的に転送するための IP カプセル化機能を DSRC のサブレイヤとして実装し IPoverDSRC 方式を提供するようにした.
- ・ アプリケーションとして FTP ファイル転送機能を搭載した.

図 5.17 において, 矢印(1)は車載端末-AP サーバ間のエンドエンド通信パケットの流れを示している. 矢印(2)は車載端末-ローカル AP サーバ間のエンドエンド通信パケットの流れを示している. また, ハンドオーバーなど路側ネットワーク内での制御パケットの流れを矢印(3)で示す. さらに, 車両位置情報を LR に通知するための広域網インタワーク制御パケットの流れを矢印(4)で示す.

ADS 実装構成

図 5.16 に ADS 機能のハードウェア構成をしめす。ADS ボード上には、CPU、FROM、SDRAM、SRAM が PCI バスブリッジを介して接続されており、また LED とネットワーク切替用スイッチが I/O ポートを通じて接続されている。OS は VxWorks を適用しこの上にミドルウェアとして ADS 機能を実装した。ADS 機能のソフトウェア構成を表 5.1 に示す。移動局への提供データは SDRAM 上に格納した。



プロセッサ	SH4 (SH7750) 内部動作周波数: 200MHz バス動作周波数: 100MHz
システムバス	CompactPCI バス
FROM	4.5MB
SDRAM	96MB (32MB (CPU 内臓) +64MB)
SRAM	512KB (バッテリーバックアップ機能付)
OS	VxWorks5.1.3

図 5.16 ADS 機能ハードウェア構成

表 5.1 ADS 機能ソフトウェア構成

		ADS ソフトウェア機能項目		機能概要
1	路側ネットワーク 制御機能	通信管理	路側ネットワーク 通信	<ul style="list-style-type: none"> ブロードキャスト通信処理. パケット順序制御, フラグメント処理.
2			ハンドオーバ	<ul style="list-style-type: none"> コネクション情報引継ぎ処理. 未送信パケットハンドオーバ処理.
3		QoS 制御	帯域制御	<ul style="list-style-type: none"> 帯域状態監視, 帯域使用率計算処理. スケジューラによる送信レート抑止処理.
4			優先制御	<ul style="list-style-type: none"> メッセージごとの優先レベルに基づくパケット送信スケジューリング処理.
5	マイクロセル 通信制御機能	アクセス 制御	IP パケット制御	<ul style="list-style-type: none"> 移動端末への IP アドレス割り当て処理. IP パケット送受信処理.
6			ADS パケット 制御	<ul style="list-style-type: none"> 無線レイヤパケット送受信処理.
7		送信制御	緊急制御	<ul style="list-style-type: none"> パケットデータの緊急度計算, 緊急度比較 処理.
8			優先制御	<ul style="list-style-type: none"> メッセージ種別ごとの優先レベル設定優先レ ベルに従ったメッセージ送信処理.
9	IP 通信制御 機能	IP アドレス 管理	IP アドレス キャッシュ	<ul style="list-style-type: none"> IP アドレスキャッシュ, 割り当て処理.
10			IP アドレス検査	<ul style="list-style-type: none"> IP アドレス取得, ハンドオーバ時のアドレス 検査処理.
11		IP データ 管理	移動体接続管理	<ul style="list-style-type: none"> IP アドレス登録, GW への通知処理.
12			IP データ転送	<ul style="list-style-type: none"> IP パケットのキャッシングと転送処理.
13			タイマ監視	<ul style="list-style-type: none"> パケット転送におけるタイマ監視処理.
14			IP アドレス開放	<ul style="list-style-type: none"> 移動端末に付与の IP アドレス開放処理.

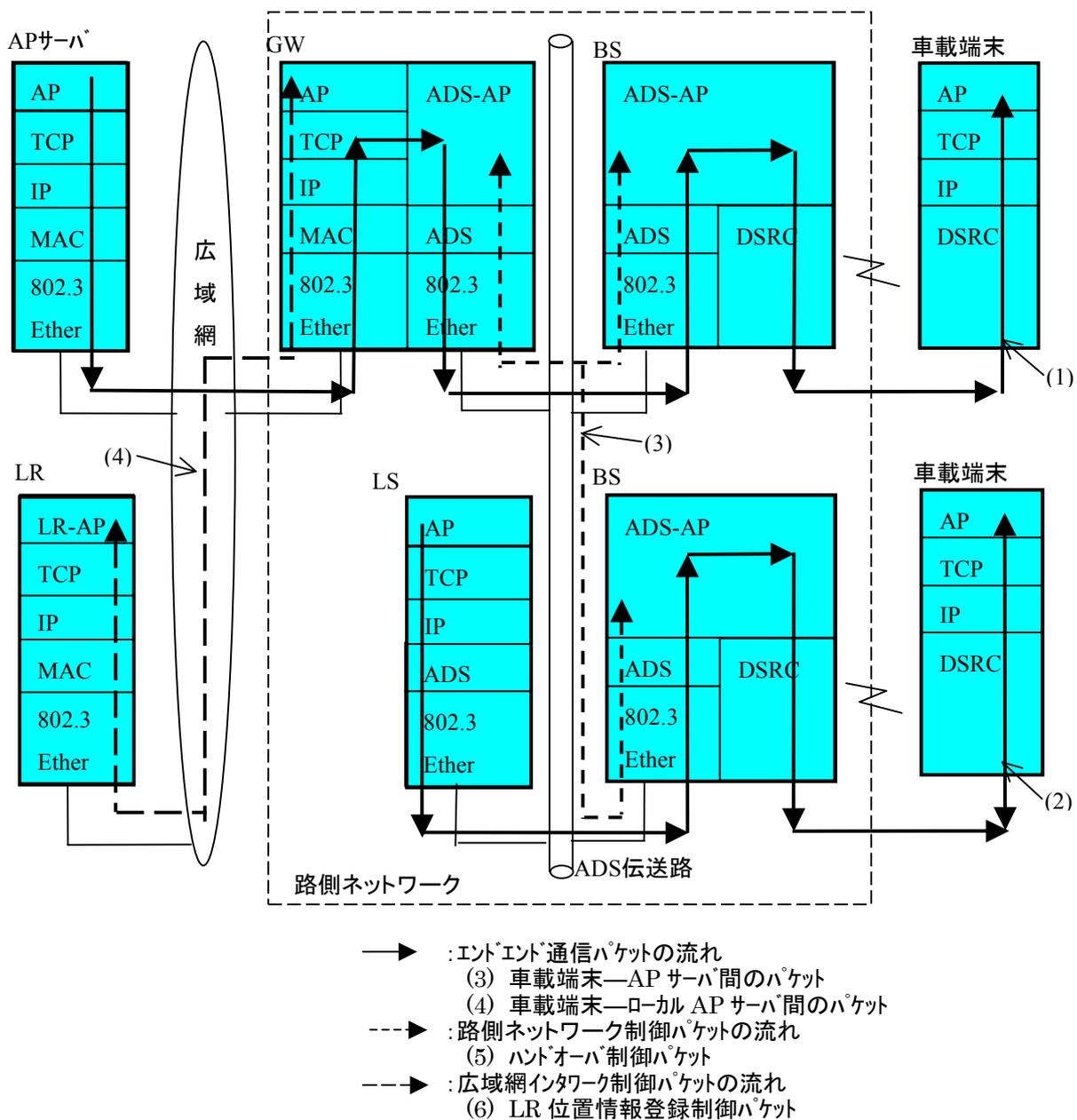


図 5.17 評価システム プロトコルスタック

第5章 マイクロセル移動体ネットワーク制御方式の実装と評価

次に、上記評価システムを用いた路側ネットワークの評価概要を表 5.2 に示す。

表 5.2 路側ネットワークシステム評価概要

	評価項目	評価概要
1	システム性能	<ul style="list-style-type: none"> 無線アクセスインフラとして DSRC を介し路側ネットワークを利用するユーザが使用できるエンドエンドのスループットを測定。 路側ネットワークは、無線アクセスインフラ DSRC を介しアクセスされる。ユーザに対し、無線アクセスインフラの伝送速度を確保することが求められる。アプリケーションサーバの設置場所により下記形態につき評価する。 <ul style="list-style-type: none"> 広域網 (IP ネットワーク) を経由して AP サーバからユーザにサービスを提供する形態 (図 5.17 で矢印 (1) のケース) 路側システム内にローカル AP サーバを設置し、そこからサービスを提供する形態 (図 5.17 で矢印 (2) のケース)
2	路側ネットワーク通信性能	<ul style="list-style-type: none"> 路側ネットワークに負荷をかけることにより <ul style="list-style-type: none"> 路側網の ADS メッセージ通信でのパケットの転送能力 網内をハンドオーバーしていくトラヒックに対しハンドオーバー時間を測定した。 路側ネットワークのパケット通信属性として、エンドエンド通信パケット (図 5.17 矢印(1)(2)) とハンドオーバー処理などネットワーク制御のための制御パケット (図 5.17 矢印(3)) がある。路側ネットワーク内のトラヒックが増加すると路側ネットワークの処理負荷が増大する。そこでパケット量を変化させ処理性能を評価する。
3	広域通信網インタワーク処理性能	<ul style="list-style-type: none"> 本路側システムは、前述のとおり 500m 程度サービス提供エリアを想定している。広域網ルータや、車両の位置管理を行うロケーションレジスタに車両の位置情報を提供することにより広域網のルーティングが可能となり、AP サーバが車両の位置を意識したサービスを提供可能となる。このことから路側システムには、車両の移動検知後、速やかに上位網へ移動の通知を送る性能が求められ LR への位置情報の通知時間を測定した。(図 5.17 で矢印(4)でのパケットの流れ) 上位レイヤで使用する LR への位置情報登録時間の測定により、上位アプリケーションよりの利用、適用性を評価する。
4	路車間通信性能	<ul style="list-style-type: none"> 路車間通信の開発では無線通信機能として QPSK 変調方式を導入し、またプロトコル処理機能として ARIB STD-75 に準拠した通信フレーム処理を実装し、通信制御機能としてマルチアプリケーション対応、ハンドオーバー、サーバ/クライアント型通信、同報通信、バルク転送の各機能の開発と実装を行い、室内通信実験でこれらの機能の動作を確認した。実環境における路車間通信の転送速度を測定した。 路車間通信の総合的な評価のために、また運用時の通信条件選定の指針とするために、変調方式や通信フレームの違いによる転送速度への影響を評価する。

5. 4. 3 システム性能評価

<性能要件>

- 1° 路側ネットワークは，無線アクセスインフラ DSRC を介しアクセスされる．ユーザに対し，無線アクセスインフラである DSRC の伝送速度を確保することが求められる．

<測定条件>

- 1° アプリケーションサーバの設置場所により下記形態につき評価する．
- ・ 広域網（IP ネットワーク）を経由して AP サーバからユーザにサービスを提供する形態（図 5.17 で矢印（1）のケース）
 - ・ 路側システム内にローカル AP サーバを設置し，そこからサービスを提供する形態（図 5.17 で矢印（2）のケース）
- 2° 評価環境

図 5.15 評価システムにおいて，車載端末 1 台が AP サーバ，ローカル AP サーバ (LS) と通信．車載端末のクライアント PC において FTP の PUT/GET を実行し実効伝送速度を測定．セキュリティポリシーを考慮し，路側ネットワーク内（図 5.17 で ADS と ADS の間）及び DSRC 無線通信区間（図 5.17 で基地局の DSRC と車載端末の DSRC の間）の暗号化/非暗号化それぞれについて測定．さらに，走行環境での使用を考慮し，車両が停止している状態と走行している状態をそれぞれ測定．車両が走行しているケースでは，基地局間をハンドオーバーしながら通信する．

<測定結果>

測定結果を表 5.3 に示す．

表 5.3 エンドエンド実効速度測定結果

	測定条件			実効伝送速度(kByte/sec)	
	暗号化		速度	移動局端末からのGet	移動局端末からのPut
	路側	無線		実効速度	実効速度
路側網内 LSからのサービス提供	無し	有り	停止	138	22
			30km/h	95	17
	有り	有り	停止	118	20
広域ネットワーク APからのサービス提供	無し	有り	停止	105	22
			30km/h	88	18
	有り	有り	停止	90	22

<考察>

LS からのサービス提供においては、停止状態で 138kByte/sec(1104kbit/sec)のスループットが測定された。実験室での DSRC 伝送能力測定によれば下記である。実験室環境では、基地局と車載端末を有線で直結し測定（暗号化せずに測定）しており、その環境で 1.2Mbit/s の測定結果を得ている。本環境では無線区間を暗号化した通信であり暗号化により約 10%のスループット低下があることを考慮すると、路側ネットワークを介した通信でも劣化のないスループットが得られることが検証できた。これはストリーミングサービスなどの大容量データサービスを提供する上で十分な性能を達成していると考えられる。

本稿においては、サービス提供者のセキュリティポリシーを考慮し路側ネットワーク内及び無線区間での暗号化処理を行った。無線区間での暗号化については従来より評価されているが、本稿では路側ネットワーク内での暗号化についても評価した。[66]では自律分散による路側ネットワークでの不正アクセス、データの盗聴、改竄を防止し通信の安全性を確保するためのセキュリティ方式についてその適用性が検証されている。本稿での評価において表 5.3 に示すように路側ネットワーク内でのデータの暗号化により 15%程度の性能の低下が見られる。実際の利用状況を考えると、暗号化対象のデータの絞込みなどを配慮することにより性能の向上を図る必要があると考えられる。

走行環境（30km/h）では停止している環境と比較すると 25～30%のスループットの低下が見られる。ARIB 規格[68]によれば、DSRC 無線通信の伝送能力は走行環境（～120km/h）でも影響はない。ここでのスループットの低下は、評価システムにおいて、基地局の立地条件上連続した無線セルを構成できず無線リンクが切断されエンドエンド通信が途絶えた時間があったことが主要因と考えられる。

LS からのサービス提供形態よりも AP アプリケーションサーバからのサービス提供形態での測定結果の方が停止状態で 24%程度の性能低下が見られる。これはゲートウェイを通過す

る際に付与された遅延時間により、TCP/IP のフロー制御が働いたと考えられる。

5. 4. 4 ADS 網通信性能評価

5.4.4.1 ADS メッセージ通信でのパケット転送能力

<性能要件>

1° 想定する路側ネットワークの規模

典型的な路側ネットワークの利用形態は、高速道路などでの走行レーン内での情報提供エリアあるいは走行レーン以外のサービスエリア、インタチェンジや分合流個所において情報提供を行うことである。このような利用形態では、路側に沿って500m程度のエリアをカバーすることが求められる。そのエリアに通信セル30mの基地局を設置し連続的な情報提供の環境を与えることが求められる。

2° 想定する路側ネットワークのトラヒック条件

DSRC 通信規格[68]によれば、基地局の提供する無線アクセスインタフェースのチャンネル数は8チャンネル/基地局である。従ってセル内に最大8台までの車輛を考える。また、基地局の提供する無線区間の伝送能力の理論値は1.8Mbpsである。一方前項(1)システム性能で路側ネットワークに負荷をかけずに行ったエンドエンドでの伝送能力は約1.1Mbpsであった。セル内の車輛はこの帯域をシェアして利用する。従って、路側ネットワーク内は接続される基地局の台数をN台とすると最大(1.1xN) Mbpsのトラヒックを処理しなければならない。一方サービス要件[24]からは、走行支援サービスなどリアルタイム性の厳しいアプリケーションではレスポンス時間(エンドエンドでのパケット転送時間)は100msec以内であることが求められる。以上のことから100msec以内のパケット転送時間で最大(1.1xN) Mbpsのトラヒックを処理することが求められる。

3° ネットワーク制御パケットに対する性能要件

路側網通信で扱うネットワーク制御パケット処理のうち、最も厳しい性能が要求される状況は、隣接した基地局間で、ハンドオーバー情報を引き継ぐ際の制御パケットの転送である。路車間通信による基地局と車載端末間の無線リンクが確立されるまでにハンドオーバー情報は引き継がれていなければならない。従って、ネットワーク制御パケットに対する性能要件として、基地局間のハンドオーバーの引継処理時間(車載端末から切断通知を受信してから、隣接基地局が路側網から受信したハンドオーバー情報に基づいてハンドオーバーの引継処理を終了させるまでの時間)が10msec以内であることを性能要件とした。

<測定条件>

第5章 マイクロセル移動体ネットワーク制御方式の実装と評価

1° 図 5.15 評価システム構成において 1 台の車載端末に対し AP サーバから FTP 転送を行う。ADS 網に対しパケットジェネレータにより負荷をかけパケットの転送遅延時間を測定し、どの程度のトラヒックに耐えられるかを評価する。パケット転送遅延時間とは、ノード (GW, BS, LS) 間でパケットを転送するための時間で、図 5.17 において GW, GS, LS に実装された ADS に組み込まれた性能測定ツールにより ADS と ADS の間でのパケット転送時間を測定する。

2° パケットのトラヒック特性をアプリケーションでの利用形態の観点から下記のように変化させて測定した：

- ①短パケット(64 バイトパケット)の連続送信
- ②長パケット(1500 バイトパケット)の連続送信
- ③短パケット(64 バイトパケット)の周期(100msec)送信
- ④長パケット(1500 バイトパケット)の周期(100msec)送信

<測定結果>

図 5.18 に、ADS 網内での IP パケットの転送遅延時間の測定結果を示す。

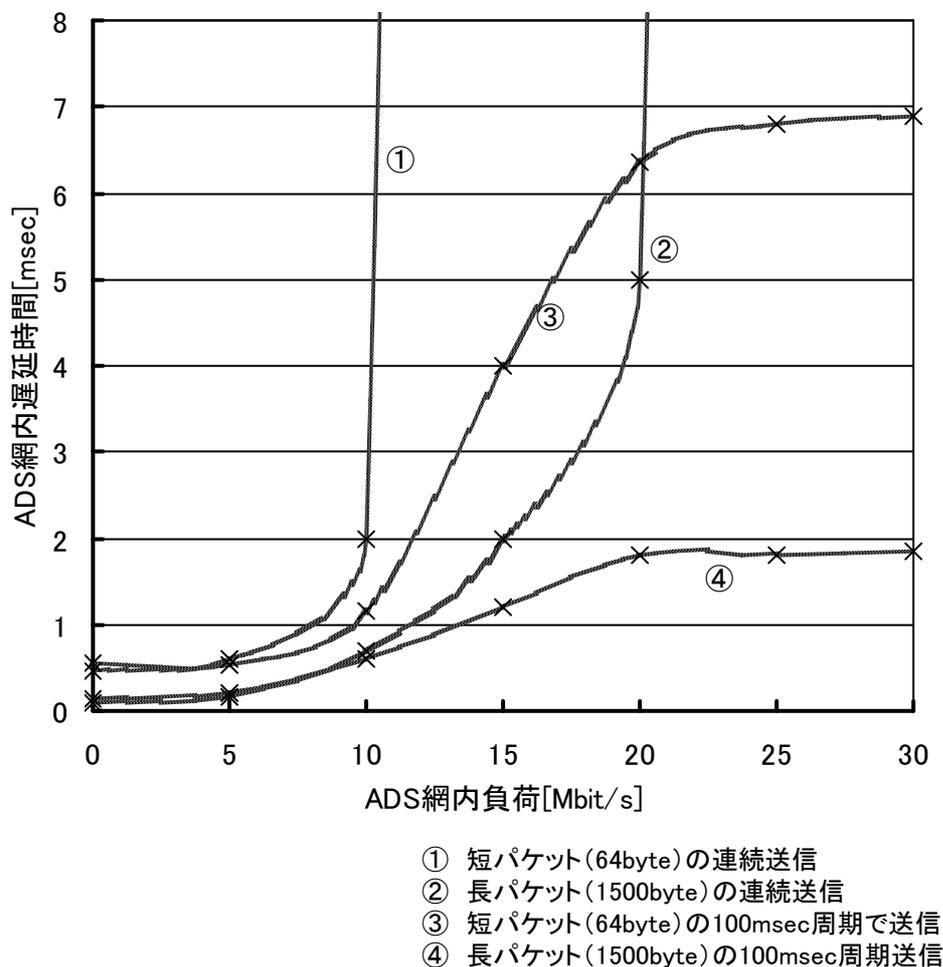


図 5.18 ADS 網内での IP パケットの転送遅延特性

<考察>

図 5.18 の測定結果によれば、短パケットと長パケットを比較すると、同じ負荷でも短パケットでは単位時間当たりのパケット転送処理回数が増えるので、処理時間が増加する。また、連続送信と周期送信を比較すると連続送信では負荷が上がると ADS 網内の遅延特性は急激に劣化する一方で、周期送信ではある一定の遅延時間で抑えられる結果を得た。

3.2 項サービス要件によれば、リアルタイムアプリケーションである走行支援サービスなどではトランザクション型のパケットサービス中心で数 100 バイトの周期的なパケット転送が主体である。その意味で上記③が現実的な利用形態での評価となる。また、非リアルタイムアプリケーションでは、TCP/IP アプリケーションが中心で最も網に負荷のかかる条件としては 1500 バイトの連続送信の場合でその意味で上記②が現実的な利用形態での評価となる。

図 5.18 の測定結果によれば、現実的な利用形態である上記②においては、ADS 網内の負

荷が20Mbps程度から処理時間の遅延が顕著に見られる。20Mbpsの負荷は、性能要件と照らし合わせてみると、 $N=18$ 即ち基地局台数を18基接続した路側ネットワーク（距離に換算すると約540m）に無線基地局の最大の伝送能力のトラヒックをかけた場合に相当する。この状況では、網内でのパケットの転送遅延は5msec（②のケース）から6.5msec（③のケース）であり、リアルタイム性の強い走行支援サービスではEnd-Endのレスポンス時間は100msec以内であることが求められるが、無線区間での遅延時間が5msecであることを含めても充分適用可能な遅延時間といえる。

以上より、性能要件での最も厳しい状況即ち無線基地局の伝送能力を最大に利用（約1.1Mbpsの帯域を基地局配下にいる最大8台の車両がシェアして利用）する状況では、約540m（基地局台数18基）の規模までは利用可能な見通しを得た。これは、高速道路で540mの渋滞の中で車両が一斉に道路交通情報などのアプリケーションサーバに接続する状況に相当する。

また、ハンドオーバー情報の引継ぎに用いられるネットワーク制御パケットもADS網内において上記評価の他のパケットと同様に網内の帯域を利用して伝送されることになるが、上述の評価で5~6.5msec程度の遅延時間であれば、ハンドオーバー制御での性能要件を満たしており、この観点からも適用の見通しを得ることができた。

5.4.4.2 ハンドオーバー処理性能

<性能条件>

- 1° 3.2項サービス要件より、狭域セル内での通信時間を十分に確保するために、基地局間でハンドオーバー時の制御処理時間を100msec以内とすることが求められる。

<測定条件>

- 1° 路側網内の狭域セルをまたがり連続通信する際のハンドオーバー処理時間を測定した。
図5.19に路側網内での通信シーケンスを示す。図5.19において、①初期接続の時間（車両がサービスゾーン内に進入し無線リンク確立手順を開始してからTCP/IP通信が可能になりIPパケットを受信するまでの時間）②ハンドオーバー時間（新たなセルに入り無線リンク確立手順を開始してから前の基地局から引き継いだコネクション情報を設定しTCP/IP通信が可能となりIPパケットを受信するまでの時間）を測定した。
- 2° 測定手順
 - ・ 車両30km/hで走行させBS1無線セル内に進入。移動端末のクライアントPCで、

第5章 マイクロセル移動体ネットワーク制御方式の実装と評価

無線リンク確立開始ポイントとIPデータ受信ポイントにタイムスタンプを置き時間を測定（図5.19の①の時間）

- ・以降BS 2～BS 9 を走行して上記と同様の手順により時間を測定（図5.19の②の時間）

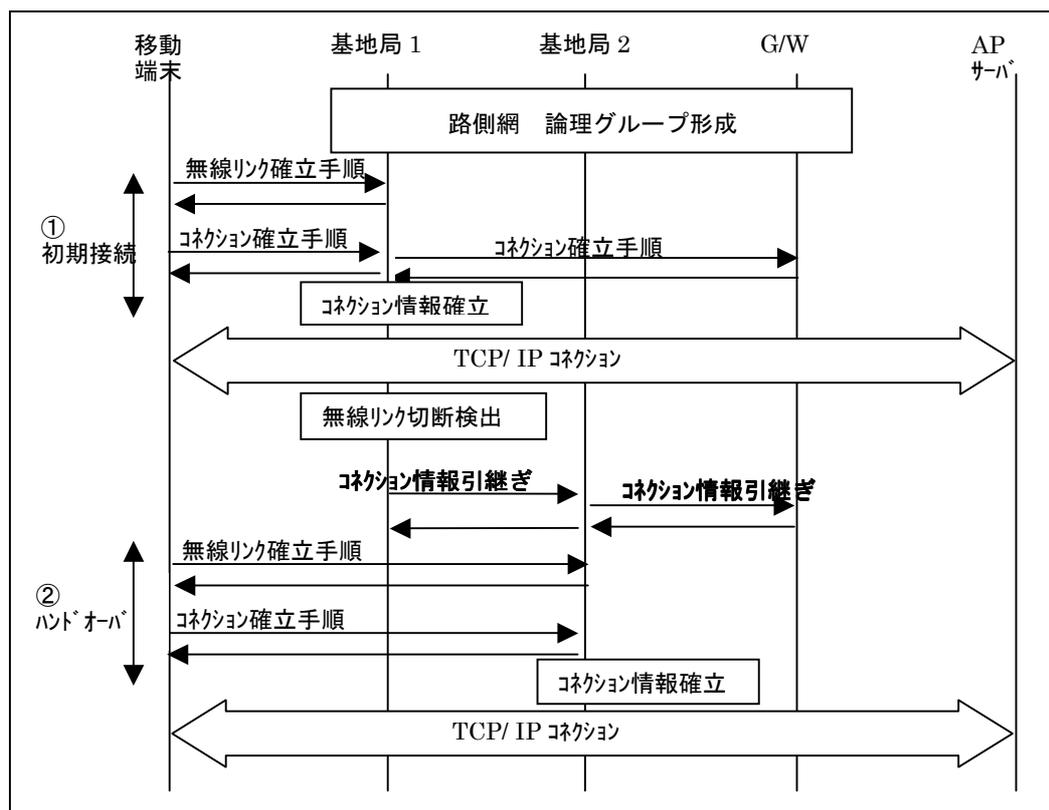


図 5.19 路側網内通信シーケンス

<測定結果>

表 5.4 にハンドオーバー時間の測定結果（上記手順を 3 回繰り返し測定した結果の平均値）を示す。

表 5.4 ハンドオーバー時間測定結果

①初期接続時間	120msec
②網内ハンドオーバー時間	39msec

ハンドオーバー時間短縮に前項性能改善策がどのくらい寄与しているかを評価するために下記

の4ケースで測定した。測定結果を図5.20に示す。

(ケース1)：データキャッシュ，高速アドレス解決，パケット損失回避機能有り

(ケース2)：パケット損失回避機能なし

(ケース3)：データキャッシュ機能なし

(ケース4)：高速アドレス解決機能なし

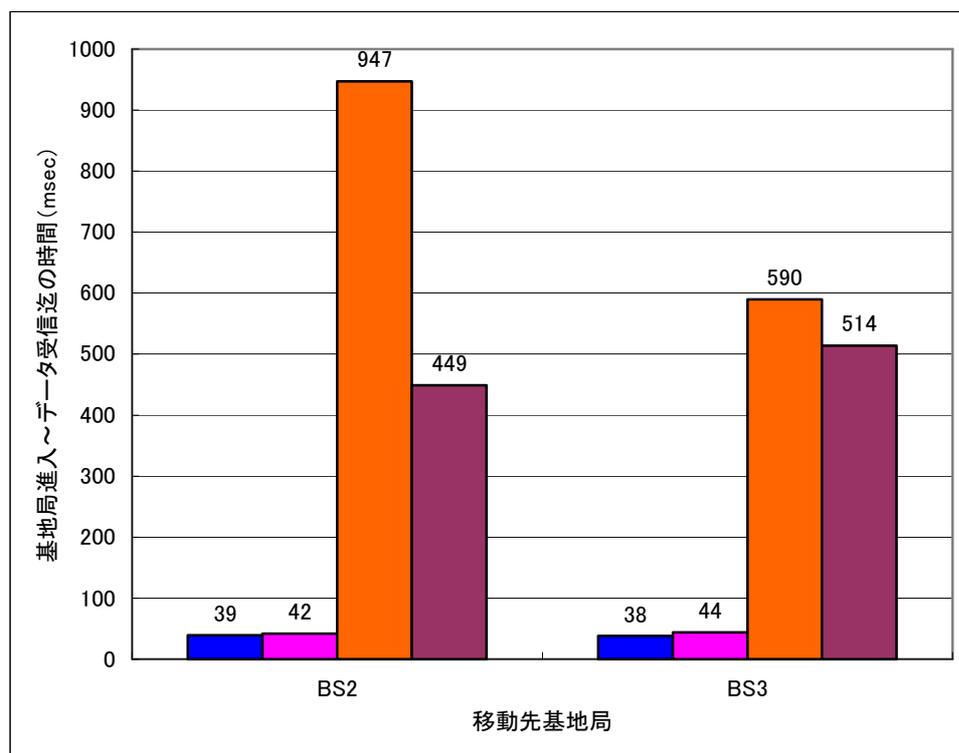


図 5.20 ハンドオーバー時間測定結果
Results of handover processing delay

<考察>

測定結果によれば，目標としているハンドオーバー処理時間（100msec 以内）を満足することが検証できた．図 5.19 路側網内通信シーケンスにおける①初期接続，②路側網内ハンドオーバー各処理において無線リンク確立時間が 5 msec 程度[68]であることを考えると，接続情報の確立にほとんどの時間を使っており，初期接続時に確立した接続情報を路側ネットワーク内で予め形成された論理グループ内の各基地局ノードに引き継ぐことによりハンドオーバー処理時間の短縮の効果が顕著に現れていることが検証できた．

また，図 5.20 の測定結果によればデータキャッシュ機能及び高速アドレス解決機能がハ

ハンドオーバー時間の短縮に大きく寄与していることが分かる。IP データのキャッシュにより、GW 配下の全 BS に車載端末に送信すべき IP パケットが接続情報とともにキャッシングされているので、キャッシングしない場合と比較すると車載端末の認証時間、アプリケーションサーバへの問い合わせ時間を短縮することができることによる効果である。高速アドレス解決機能により、IP アドレスを BS にキャッシュしておくので GW への問い合わせを省略できる分ハンドオーバー時間を短縮できることによる効果である。パケット損失の回避機能により、上位レイヤ (TCP) での再送制御によるオーバーヘッドでアプリケーションからみたスループット低下を防止することによる効果である。

上記により、性能改善機能を搭載することにより、目標とした 100msec 以内でのハンドオーバー時間を達成できることを検証できた。本評価では実機を使ってハンドオーバー時間を測定した。路側ネットワークシステムは順次基地局が配備されていく大規模なシステムであり、スケラビリティの評価をする必要があり、今後の課題である。

5. 4. 5 上位網インタワーク性能

<性能要件>

- 1° 路側網をまたがり車両に連続通信を可能とするために、路側網内での接続情報の引継ぎを路側網間でも可能とすることが求められる。(図 5.21 通信シーケンス参照)
狭域セルを高速に移動する車両に追従してその位置情報を LR に通知する必要があるために狭域セルに進入後通知するまでの目標を 100msec 以内とした。
- 2° 広域網上にある ITS アプリケーションサーバが利用する基本情報として車両の位置情報がある。車両の位置情報を広域網上にあるロケーションレジスタ (LR) に通知すること。(図 5.21 参照)

<測定条件>

図 5.21 において、車両の位置情報、接続情報の通知タイミングは、①初期接続時 ②路側網内で基地局間でのハンドオーバー時の 2 ケースあり、各々につき測定。車載端末のクライアント PC で位置情報通知ポイントと通信確認受信ポイントにタイムスタンプをおき時間を測定した。(図 5.21 の①②)

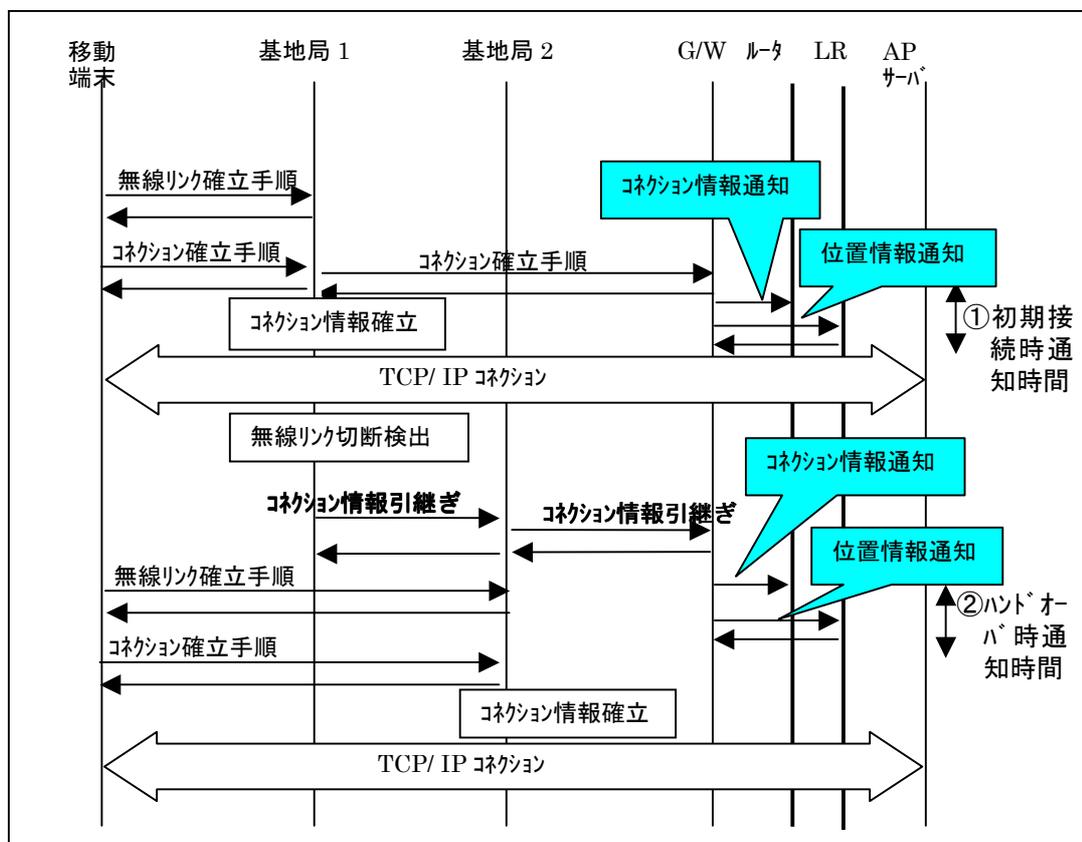


図 5.21 広域通信網インタワークシーケンス

<測定結果>

表 5.5 に LR への位置情報通知時間測定結果（上記手順を 3 回繰り返し測定した結果の平均値）を示す。

表 5.5 位置情報通知時間測定結果

①初期接続時通知時間	27msec
②路側網内ハンドオーバー時通知時間	28msec

<考察>

いずれのケースにおいても通知時間目標を満足しており、高速に移動する車両位置情報の通知により位置情報をベースとする ITS アプリケーションへの適用性を見通しを得た。

5. 4. 6 無線基地局通信性能評価

評価システム

DSRC 方式は、道路に設置した路側無線基地局と車両に搭載された車載器との間で通信を行なう路車間通信方式として国内では ETC 用途として検討され、電波産業会で ARIB STD-T55 として標準化された。この DSRC 方式は、通信領域が数mから数十mと比較的狭いこと、伝送速度が高いなどを特徴として有しており、狭域で情報提供を行うサービスへの応用展開が期待されているものである。ETC 等で利用されている ASK 変調方式に加えさらに帯域利用効率の良い QPSK 変調方式によるデータ伝送を可能とする方式が STD-T75 で規格化された。DSRC 通信制御機能の課題として、DSRC システムでは今後多様なサービス条件を持つアプリケーションの実装が想定される。高信頼なトランザクション型のパケット通信機能が必要となることに加え、ストリーミングデータなど TCP/IP アプリケーションの提供を可能とすることが求められる。このためエンドエンドでのスループットの向上が必要となる。本システムでは、STD-T75 に準拠しさらに多目的利用を可能とするために下記を新たに考慮した DSRC システムを試作開発した。

- ・ サーバ/クライアント型通信

移動端末から基地局に対して要求を發するサーバ/クライアント型通信を要求するアプリケーションがある。一方DSRCはマスタ/スレーブ型の通信方式であり、移動端末からの自発的な通信はできずこれらの要求を満足させるための通信制御方式を開発した。

- ・ 同報通信

不特定多数の移動端末に同じ内容のデータを報知する同報通信型の通信方式が必要とされており、これを可能とする通信制御方式を開発した。

- ・ 伝送速度向上

従来の ETC での DSRC (ASK 方式) の通信速度は 1.024Mbps であり、1 台の移動端末あたりの実効的な伝送速度は最大で約 191kbps になる。3 章での要件を考慮するとデータの伝送速度として 800kbps~1.6Mbps 程度が必要となるため、DSRC の伝送速度の向上が求められる。このため QPSK 方式を採用し通信速度自体を改善させるとともに論理的な手段として通信スロットを束にして車載端末に提供する機能 (バルク転送) の開発によって通信速度の改善を図った。

実装機能

- ・ サーバ/クライアント型通信制御

サーバ/クライアント型の通信を実現するために、基地局の通信制御プロトコル部は図 5.22 に示すようなポーリングセレクトティブ型の通信制御を行い、移動端末からの發信が出来る

第5章 マイクロセル移動体ネットワーク制御方式の実装と評価

受信側は、割付けられたスロットのバルクセグメントを順次取り込み、通信制御プロトコル部の受信キューへ積上げる。この際、無線通信区間での伝送エラーに対して DSRC の再送処理が働くことが想定され、受信キューには送信順にバルクセグメントが格納される保証はない。従って、受信側の通信制御プロトコル部は、バルクセグメントに付番された通し番号で組立て順を判別し PDU へ組上げる必要がある。また、再送制御による順番の入れ替わりが他の PDU との間にまで及ぶ場合を考慮 PDU の識別情報も付与する。

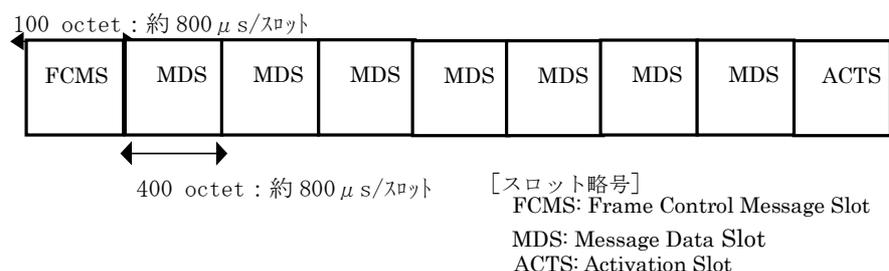


図 5.23 DSRC 通信フレーム構成
(半二重通信の例)

・ 同報通信機能

不特定多数の移動端末に向けて情報を報知するサービスを実現するため、DSRC プロトコルで規定されるグループ同報アドレスを利用し、また再送制御の代わりに情報を繰り返し送信することで誤り率を改善する同報機能を加えた。同報機能の動作概要を下記に示す。基地局は、同報で配信する PDU を受取ると、その PDU に割当てたグループ同報アドレスで送信キューを生成する。また、PDU はバルク転送制御と同様にバルクセグメント化され、生成した送信キューに格納する。この送信キューではバルク転送制御のための送信キューとは異なり、誤り率を改善するために格納したバルクセグメントを順に N 回繰り返してレイヤ 7 に連送する。移動端末では、グループ同報アドレスを検知して受信パケットを同報制御処理に振り分ける。同報制御処理に振り分けられたパケットは、バルク転送制御と同様にしてバルクセグメントの組立てを行う。この際、欠落したバルクセグメントは、以降も周期的に到来するバルクセグメントを利用して PDU を組み立てる。これにより再送制御の出来ない同報での受信誤りを改善し、同報機能の信頼性を確保している。なお、移動端末側では組み立て途中の PDU を無制限に保持しておくことは出来ないため、通信領域毎に定める利用時間で組み立て処理を打ち切り、打ち切り後は受信キューを破棄するようにしている。この利用時間は PDU に付加して基地局から通知し、通信領域ごとの対応を図るようにした。

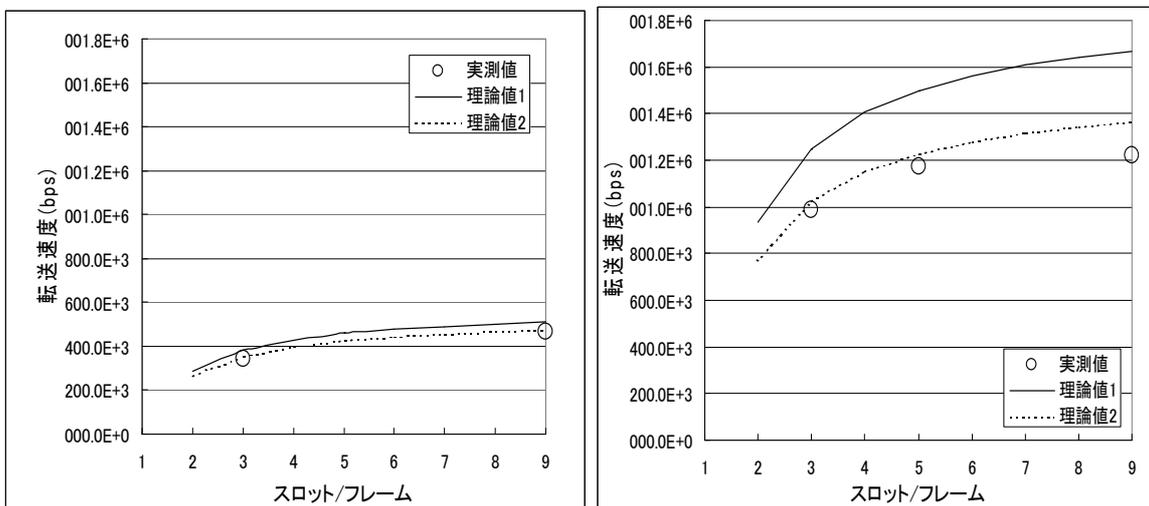
性能評価

・ 伝送速度評価

バルク転送について理論的に得られる性能と、実機での性能について比較して評価した。基地局及び移動端末間での DSRC プロトコルスタック上の通信誤りをほぼ無い状態で通信を行わせての性能について評価した。なお、伝送速度は、ASK、QPSK 両方式により Web サーバから Web クライアントにファイルをダウンロードする時間と、そのファイルサイズから求めた。通信性能を図 5.24 示す。9 スロット/フレームの場合で、ASK 方式で約 464kbps、QPSK 方式で約 1.2Mbps という実測結果が得られた。この結果、3章で考察したサービス条件においてインターネットアプリケーションに適用するための伝送レート目標値が得られることが検証できた。

・ 同報通信における誤り率評価

データを繰り返し送信しなかった場合の誤り率を図 5.25(a)に、データを繰り返し送信した場合の誤り率を図 5.25(b)にシミュレーション結果により示す。図 5.25(a)、図 5.25(b)においてアプリケーションデータが 1kByte の場合、繰り返し送信をしなければ、誤り率は 10^{-1} 以上あるが、2 回繰り返し送信では、 10^{-3} 程度、4 回繰り返しでは、 10^{-7} 程度に改善される。また、同じ誤り率でよければ、データのサイズを大きくすることができる。例えば、誤り率 0.1 となるサイズは、繰り返し送信しない場合は 600Byte 程度だが、2 回繰り返し送信では 60kByte 程度、3 回繰り返し送信では 6Mbyte 程度となる。本評価により、連送回数を増やし、同報パケットの受信誤り率を低下させることにより、DSRC を利用した同報通信サービスへの適用の見通しを得た。



理論値 1 : スロット当りの伝送速度を有効スロット数で乗じた値
 理論値 2 : サーバ/クライアント型通信制御によるオーバーヘッドを考慮した値

図 5.24 DSRC 伝送速度評価

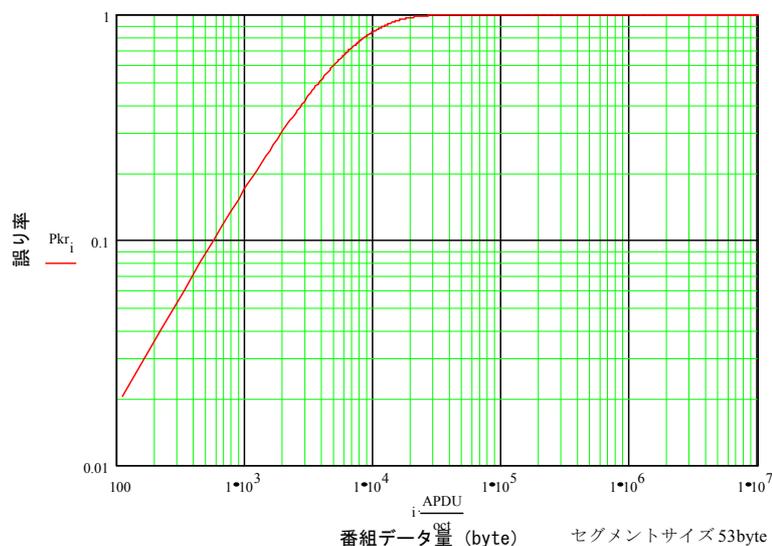


図 5.25(a) 繰り返し送信しない場合のデータの誤り率

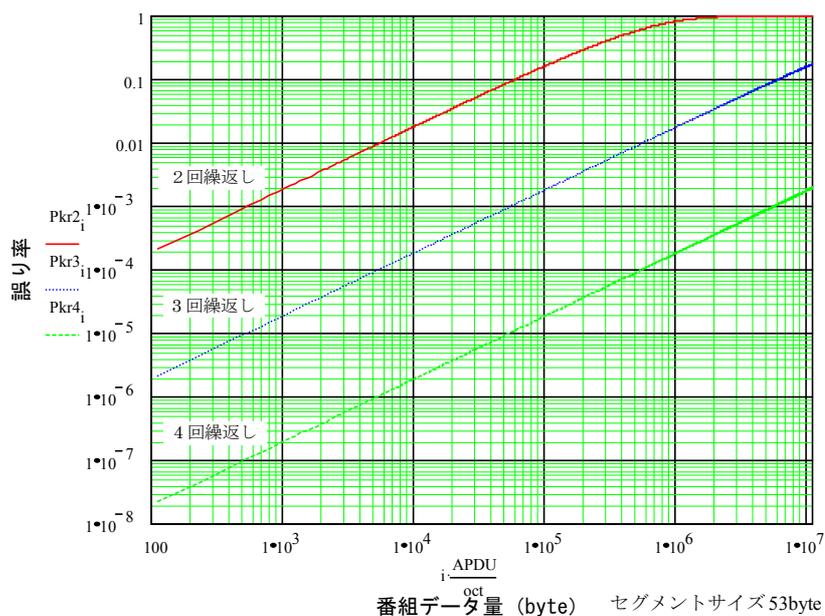


図 5.25(b) パケットの繰り返し送信による
同報通信データの誤り率改善

5.5 まとめ

本稿では、筆者が提案している ITS モバイルネットワークプラットフォームを実現するために自律分散システムによる DSRC など狭域セルでの高速移動体への情報提供方式を報告した。交通情報サービス、車載機からのインターネット利用を目標としてモバイルネットワーク

第5章 マイクロセル移動体ネットワーク制御方式の実装と評価

プラットフォームを試作開発し評価した。本評価では、DSRCを物理インタフェースとするモバイルネットワークプラットフォームは、走行支援及び車載端末からインターネットアプリケーションを利用するための基本的な機能要件、性能要件を満たし適用可能な見通しを得た。

今後さらに実用化に向けた評価を行うと同時にプロトコル実装に関し標準化への提案も行っていく考えである。

第6章

マイクロセル移動体ネットワークにおける 通信チャネル管理方式の実装と評価

6. 1 はじめに

高度道路交通システム（ITS）サービスは道路交通情報提供、自動料金收受等のサービスが実用に供されさらにこれらを応用し地域情報など各種情報提供サービスに展開されつつある。一方近年のインターネットの急速な普及によりネットワークサービスはさらにグローバル化しつつある。こうした動きの中で車社会の進展の有り方としてグローバル化されたネットワークサービスを自動車に乗っている人に提供することによる車内での利便性の向上が求められている。これを実現するために自動車を移動端末とする路側ネットワークシステムの確立が求められている。

路側ネットワークシステムは、道路側に敷設される無線基地局を介し自動車に搭載される端末（車載端末）に対し情報配信を行うシステムである。図 6.1 にマイクロセルを利用した情報配信システム構成例を示す。路側に敷設される無線基地局のネットワーク（路側ネットワーク）、バックボーンネットワーク及び情報配信を行うアプリケーションサーバ群より構成される。路側ネットワークでの通信方式として狭域無線通信方式(DSRC: Dedicated Short Range Communication)[68]を使うことにより、通信ゾーンが 30m の狭域セルにより構成されるサービスエリアを高速に移動する自動車に対し情報配信する。配信する情報は道路交通情報など走行支援のための情報に加え、インターネット上の映像、画像を含むリッチコンテンツなど多様化したマルチメディア情報が求められる。

DSRC のようなマイクロセルを利用し連続通信の環境を提供する路側ネットワークでは、多数のマイクロセルにより構成される通信ゾーン内の車輻に対し通信路を提供し管理するための有効な通信制御方式の確立が必要である。こうした通信制御方式に要求される基本的な要件のひとつにフォールトトレランス性の確保がある。路側ネットワーク内の基地局の一部が障害で利用できない場合でも路側ネットワークの通信制御を維持する必要があるからである。

路側ネットワークシステム通信制御上の課題として、狭域セルにより構成される通信ゾーンを高速に移動する車載端末に対し情報配信を行うことから移動中の電波環境の変化に追従し狭域セルをまたがり連続的な通信を行うための効率的なデータ伝送方式を確立する必要がある。

ある。さらに上記データ伝送方式はリッチコンテンツでのマルチメディア情報を伝送するなど **End-End** での十分なスループットを確保することが必要となる。しかしながら移動端末に連続通信を提供するために狭域セルをまたがるハンドオーバを行くことにより通信を維持するが、ハンドオーバ時の接続情報の引継ぎが **End-End** での通信効率の低下を引き起こしている。

筆者はこれまでに路側ネットワークシステムの通信基盤に自律分散システム (ADS) アーキテクチャを適用することを提案してきた。本アーキテクチャを適用し連続稼動を不可欠とするシステムを構築する上で重要なオンライン拡張性、オンライン保守性、フォールトトレランス性の確保を可能とするためである。ADS アーキテクチャによるメッセージ通信方式を規定し、路側ネットワーク内の通信制御を自律分散システムとして実現した。ここで、マイクロセルを利用した路側ネットワークにおける通信制御で課題となるのは、車両が路側ネットワーク内を通過する間に頻繁に起こるハンドオーバにより、エンドエンドの通信効率が低下することである。

エンドエンドでの通信効率を改善するための従来技術として、狭域セルをまたがるハンドオーバの回数を低減させる方式が提案されている[89][90]。これらは1台の無線基地局が複数の路側無線機を制御することにより仮想的に大きな通信ゾーンを構成しハンドオーバの回数の低減を図るものである。しかしながら無線基地局1台が提供する通信帯域は限られているので、通信ゾーン内に車両が多いときや特定の車両が通信帯域を占有する場合には通信できない車両がでてくる状況となり、刻々と変化する車両数、車両あたりの利用帯域などトラフィック状況に対応した通信制御が求められる。この問題を解決するために、通信ゾーンの動的制御方式を提案されている[78][91]。ここでの課題は、これらの方式は、実装を意識しない理論的なアプローチであり、実装方式を明確にする必要がある。

本研究では上記課題を解決するために、ADS アーキテクチャによる路側ネットワークの通信基盤上に通信ゾーンの動的制御方式を実現する自律分散アルゴリズム (ADS アルゴリズム) を提案する。路側ネットワーク内の基地局が車載端末からの要求により通信ゾーン内での車両数などトラフィック状況から通信帯域を動的に割り当てるための通信ゾーン管理モデルを定義する。その上で連続通信でのハンドオーバ回数の低減による通信効率の向上と通信帯域の有効利用による通信サービス向上を目的に、トラフィック適応型の柔軟な通信ゾーン制御を実現するための ADS アルゴリズムの実装方式を示す。

さらに、路側ネットワーク運用上不可欠な通信制御のフォールトトレランス性を確保するために、路側ネットワーク内の一部のノード (基地局) が障害時にも稼動可能な基地局により運用を継続するための通信ゾーン再構成方式を ADS アルゴリズムにより実現した。自律分散システムは、システム稼動状態での設備拡張機能 (オンライン拡張性)、運用時における障害部位を切り離しての稼動継続 (フォールトトレランス性) を確保する上で適したアーキテクチャである。

通信ゾーン制御アルゴリズムによる通信チャネル管理方式について計算機シミュレーシ

第6章 マイクロセル移動体ネットワークにおける通信チャネル管理方式の実装と評価

ョンによりその有効性を評価した。計算機シミュレーションでの検証結果によれば、第一にトラフィック適応型の通信ゾーン制御について、路側ネットワーク内のトラフィック量が少ない環境においては通信ゾーンを拡大しハンドオーバー回数を低減させることによりハンドオーバーによるオーバーヘッドを低減しスループットの改善が可能であることを検証できた。またトラフィック量が多い環境においては、ハンドオーバー回数は増すが通信チャネルを可能な限り車両に割り当てることにより個々の車両が通信チャネルを獲得できない確率を低減できることを確認できた。第二に障害発生時の通信ゾーン再構成について、路側ネットワークを構成する基地局の障害発生にともなう車両の通信チャネル獲得率の検証により障害発生時にも通信ゾーンを再構成し車両に対する通信チャネル提供を可能な限り続行し障害発生によるサービスへの影響を極力少なくする耐故障性に優れた通信ゾーン制御アルゴリズムの有効性を検証することができた。第三に通信ゾーン制御アルゴリズムによる通信チャネル管理方式のスケラビリティについて、処理性能は路側ネットワーク内基地局間で交換される制御パケットの転送時間に依存するが、シミュレーション結果によれば路側ネットワーク規模の要求条件を満足することを検証できた。

以下 6.2 項で実装上の課題と要求条件、6.3 項で通信チャネル管理提案方式、6.4 項で提案方式の評価、6.5 項でまとめを行う。

本章において、マイクロセルとは単一の基地局が提供する無線通信エリアを指し、通信ゾーンとは複数のマイクロセルにより構成される無線通信エリアを指す。

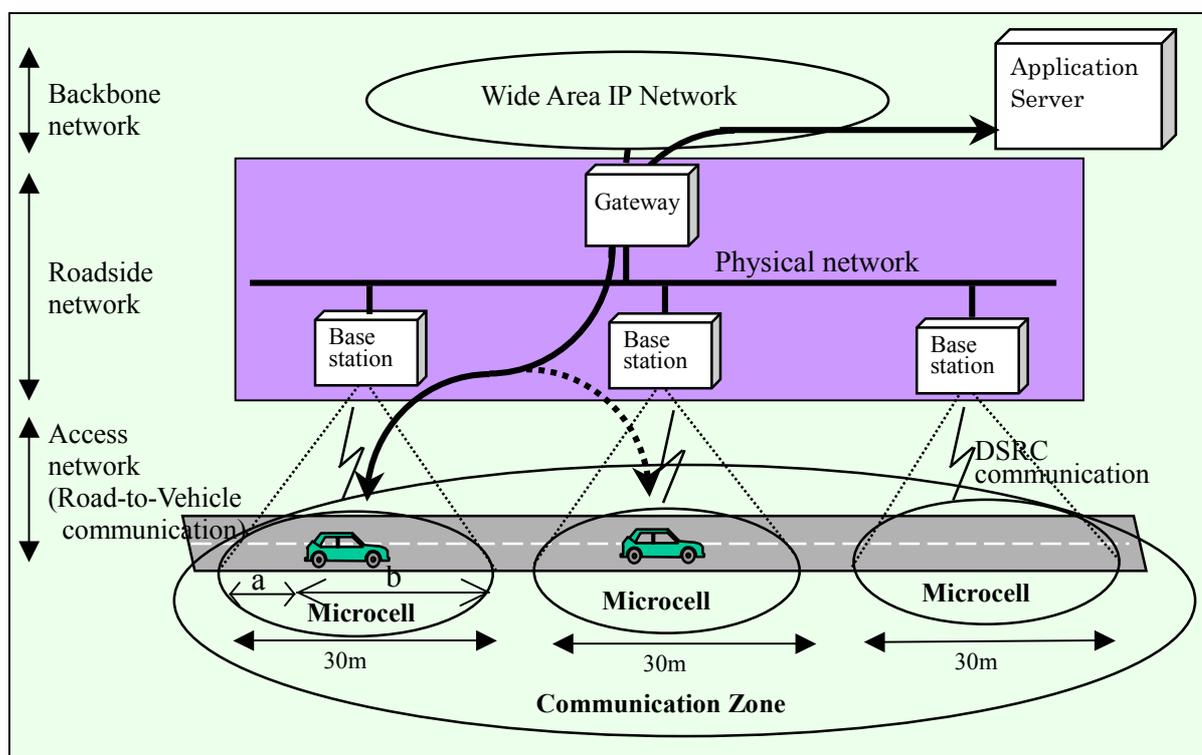


図 6.1 マイクロセルを利用した情報配信システム

6. 2 通信チャネル管理方式実装上の課題と要求条件

路側ネットワークは、通信ゾーン内で車両からの要求に応じて通信帯域を提供するが、利用される通信帯域は車両数及び車両から要求されるアプリケーションにより動的に変化する。路側ネットワークは通信帯域の利用要求に対し適切に帯域（通信チャネル）を割り当てるための管理を行う必要がある。

マイクロセルを利用した路側ネットワークにおける通信チャネル管理実装上の要求条件として下記がある。

- 通信方式上の課題として、ハンドオーバーのたびに必要となるリンク切断検出手順、リンク確立手順及び接続情報の引継ぎに伴うオーバーヘッドが **End-End** での通信効率の低下を引き起こされるため、オーバーヘッド低減を図る必要があること。
- システム的な課題として、多数の基地局からなる路側ネットワークシステムでは路側ネットワークの一部が障害で利用できない場合でも路側ネットワークの通信サービスは稼動可能な基地局により維持される必要があるため、耐故障性を考慮した方式であること。

通信ゾーン構成方法に関する従来技術

連続した通信ゾーンを構成する各ゾーンは、隣接するゾーンとの混信を防ぐために異なった周波数帯域を使用する必要がある。このため移動端末がある通信ゾーンから隣接する別の通信ゾーンへ移動する際、そのゾーン間で周波数切り替え動作が頻繁に発生し通信効率が低下する問題を引き起こす。特に DSRC のようなマイクロセルを利用したシステムの場合その通信領域が狭いという特長からこのハンドオーバーの頻度が高く通信効率の低下が著しい。この他にも既存の TCP を利用する場合に頻繁に発生するハンドオーバーに対し TCP の再送手順の頻度が高まりスループットを低下させることが示されている[97]。これらの課題を解決するために、通信ゾーンの構成方法の改善方式が提案されている。連続セル型構成、ゾーン拡張構成及び動的ゾーン構成方法である。

連続セル型ゾーン構成

連続セル型ゾーン構成では各無線機に基地局が1つずつ設置され1つの通信ゾーンを構成する。従来研究[89]では連続セル型ゾーンを構成するために例えば道路側の照明灯ごとに基地局を設置している。基地局と無線機が1対1に対応しているためシステム全体で使用できる通信チャネル数が増え、チャネルを獲得できる端末の台数が増加する利点を持つ。従って本方式では、車両密度が高い状況に適した通信ゾーンの構成方法と言える。しかしながら基地局の増加によりハンドオーバーの回数が増加し端末ごとの通信効率を低下させる欠点がある。

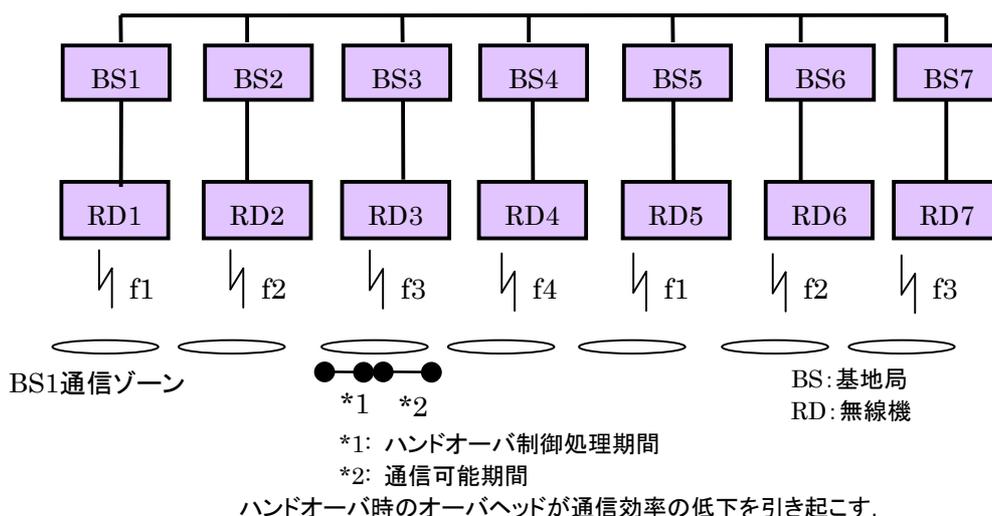


図 6.2 通信ゾーン構成方法（連続セル型ゾーン構成）

ゾーン拡張構成

ゾーン拡張構成とは例えば ROF 技術などを用いマイクロセルの通信ゾーンを拡張させる構成方法である。ROF 技術とは、無線周波数信号を光信号に変換し、光ファイバを通じ各無線機に分配した後、各無線機において元の無線周波数信号に変換する技術である。路側ネットワークは1つの統合基地局と複数の無線機、それらを結ぶ光ファイバから構成される。基地局は光信号と無線周波数信号とを変換する機能を持ちネットワークと接続される。無線機は無線周波数信号から光信号への変換またはその逆の変換機能を持つ。ゾーン拡張構成では、複数の無線機により1つの通信ゾーンを仮想的に構成する。仮想的に構成された通信ゾーンの大きさは連続セル型構成により構成されるセル(ゾーン)より大きくなる。これによりハンドオーバー回数は連続セル型構成よりも少なくなる利点がある。しかしながらその反面、通信チャンネル数は1台の基地局が提供できるチャンネル数に限られる(DSRCを利用すれば最大4チャンネル)ため通信チャンネルを利用できる車両台数が減少する欠点がある。この特性は構成する拡張ゾーンの大きさを大きくするほど顕著になる。つまり、拡張ゾーン構成方式では、低トラフィック環境ではハンドオーバー回数が低減され効率的であるが、高トラフィック環境では通信チャンネル数が不足し効率的でない。

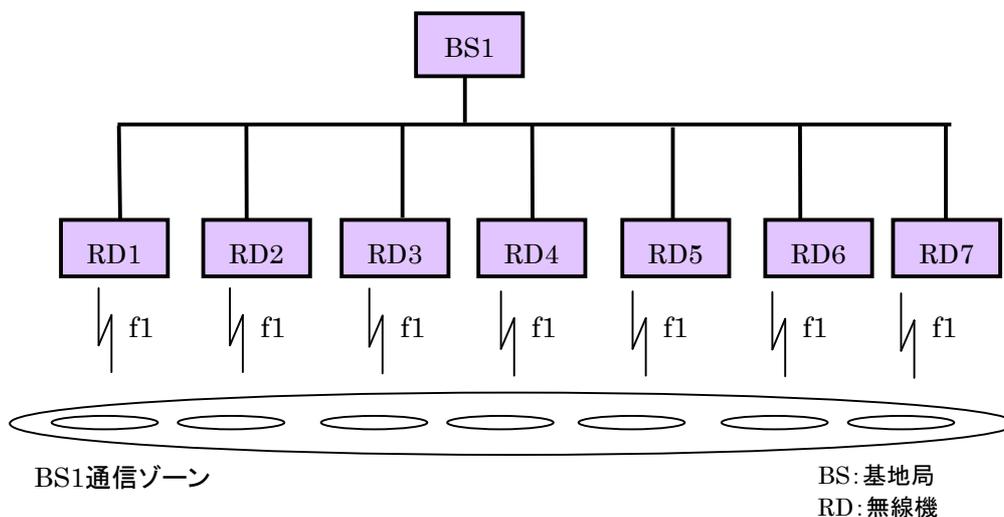


図 6.3 通信ゾーン構成方法 (ゾーン拡張構成)

動的ゾーン構成

連続セル型構成、拡張ゾーン構成の2つの構成方式は、それぞれ車両密度が高い場合、低い場合に適したゾーン構成であるが、車両密度は刻々と変化するためにその変化にゾーン構成が対応できない問題がある。そこで車両密度に応じてゾーン構成を変化させる方式が提案され

ている。この方式はマイクロセルとして DSRC を想定し全 2 重通信の利用により 1 台の基地局が最大 4 台の車輦と通信することを前提とし 1 つのゾーン内の車輦が常に 4 台以下になるように通信ゾーンを動的に変化させる方式である。これにより車輦密度が高い状況では小さなゾーンを構成し、車輦密度が低い状況では大きなゾーンを構成することが可能となる。通信ゾーンの動的構成は図 6.4 に示すように基地局と無線機及びスイッチを介し光ファイバで結び、基地局はスイッチの切り替えにより任意の無線機を制御する構成をとっている。

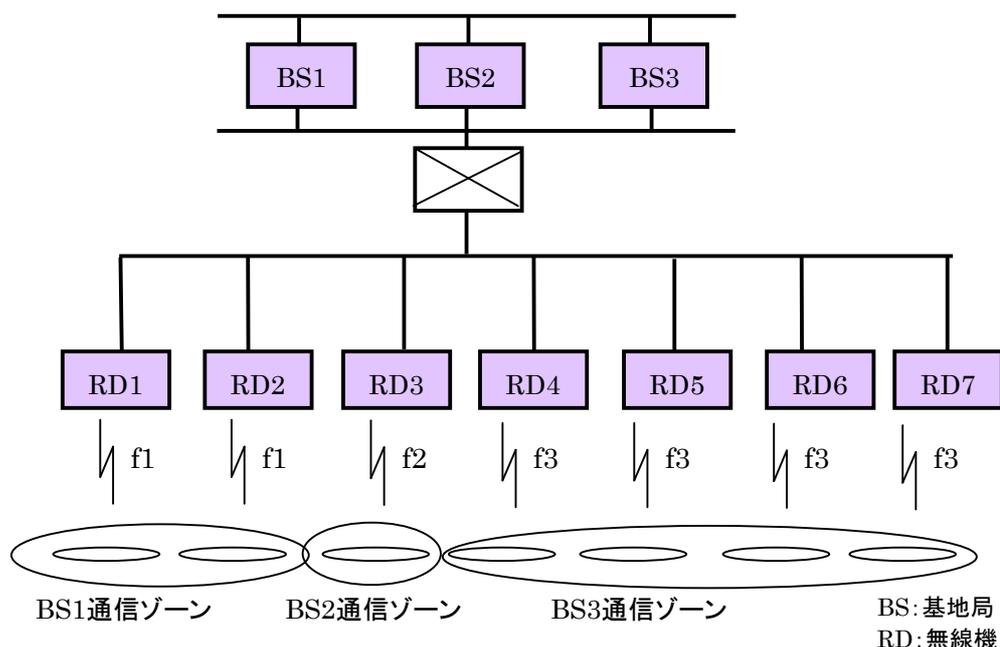


図 6.4 通信ゾーン構成方法（動的ゾーン構成）

従来技術では、通信方式の課題を解決するためにハンドオーバー回数を低減することによりスループットの改善を図る方式が提案されている。基地局に路側無線機を 1 対 1 に対応させる構成（連続セル型通信ゾーン構成）に対し、1 台の基地局が複数の路側無線機を制御することにより大きな通信ゾーンを構成（拡張ゾーン構成）しハンドオーバーの頻度を低減させることを狙いとするものである。拡張ゾーン構成では、通信ゾーンに基地局を 1 個設置し通信ゾーン内のセルは全てその基地局が制御する。通信ゾーン内に車輦数が少ない時には通信ゾーンを大きくすることによりハンドオーバーの少ない環境を提供できる。しかし車輦数が多くなると多くの通信帯域が必要となるので通信できない車輦が存在しネットワークとしての通信サービスの低下を起す。このように拡張ゾーン構成方式では車輦数の変化によりゾーンの大きさも変化させることによる動的に通信ゾーンを制御する必要がある。

通信ゾーンを動的に制御する方法として文献[88][91][92][93]が提案されている。文献[92]では IP ネットワークの環境でドメインを車輦密度に応じて変化させる方法でありマイクロセ

ルを前提にしたものではない。本提案ではマイクロセルを用いて連続通信環境を提供することが目的である。文献[93]はマイクロセルを用いる方式である。文献[93]はセンサで車群の速度を予測しゾーンの追従を行っている。この方式では車両を車群として扱っているために個々の車両に対する通信ゾーン制御ができない。本研究では個々の車両の通信を制御することが目的である。文献[91]は狭域セルを前提とした通信ゾーンの制御を行っている。個々の車両の位置を正確に把握することにより、通信ゾーン内の車両密度の変動に応じて通信ゾーンの拡大、縮を行うものである。また文献[88]は、文献[91]での車両密度に応じた通信ゾーンの拡大、縮小を局所的に最適化することによってよりきめの細かい通信ゾーン制御を狙うものである。[88]は、マイクロセル無線通信システムにおいて無線基地局アンテナを道路側の照明灯に設置し連続的な通信環境を提供するものである。照明灯に合わせたアンテナ設置の環境では連続的な通信環境は提供できるもののハンドオーバー回数が増加してしまう欠点があり、これを解決するために車両密度に合わせて通信ゾーン構成を変化させる可変ゾーン構成が提案されている。この提案では、車両密度が小さい場合にはゾーンを大きくして車両密度が大きい場合には通信ゾーンを大きくすることにより必要最低限のハンドオーバーにより通信を維持することを可能とするものである。

しかしながら上記方式は、実装を考慮しない理論的なアプローチであり、具体的な実装方式を明確にする必要がある。さらにまた具体的な実装においては、路側ネットワークの運用上不可欠な通信制御のフォールトトレランス性を確保した通信チャネル管理方式を確立する必要がある。本研究では、マイクロセルを利用した路側ネットワークの通信ゾーン制御の実装方式について提案を行う。

6. 3 通信チャネル管理提案方式

6.2 項で言及した現行方式の課題を解決するために、以下で今回開発した路側ネットワーク通信チャネル管理のための通信ゾーン動的制御の自律分散アルゴリズムによる実装方式につき報告する。

通信ゾーン動的制御の自律分散アルゴリズム開発は；

- ・ 5 章で提案したネットワーク制御方式を利用し自律分散ネットワークプラットフォーム上で動作する具体的なアルゴリズムを定義すること
- ・ 自律分散システムの優位性のひとつとして、システムを構成するサブシステムの一部が障害となっても残るサブシステムでシステム稼動を維持できることが挙げられるが、通信ゾーン制御において路側ネットワーク内の基地局の障害時に通信ゾーンの再構成により、ゾーン制御を維持するアルゴリズムを定義すること

を目標とした。

本項では、自律分散アルゴリズムを定義するために、路側ネットワークにおける通信ゾーン制御の管理モデルを規定する。

6.3.1 通信ゾーン管理モデル

路側ネットワークは、通信ゾーン内で車輛からの要求に応じて通信帯域を提供するが、利用される通信帯域は車輛数及び車輛から要求されるアプリケーションにより動的に変化する。路側ネットワークは通信帯域の利用要求に対し適切に帯域を割り当てるための管理を行う必要がある。

図6.5に前提とする路側ネットワークにおける通信チャンネル管理のシステムモデルを示す。図6.5において路側ネットワークは基地局（BS1～BS3）、基地局が利用する無線機（RD1～RD7）及び基地局からの要求により無線機の周波数帯域を設定するスイッチにより構成される。基地局（BS1～BS3）はネットワーク内の帯域の利用状況に応じてどの無線機（RD1～RD7）を自身の制御下とするかを基地局間での通信により自律的に決定する。図6.5に示す例では、基地局BS1が無線機RD1、RD2を制御し周波数 f_1 を使って通信サービスを提供している。

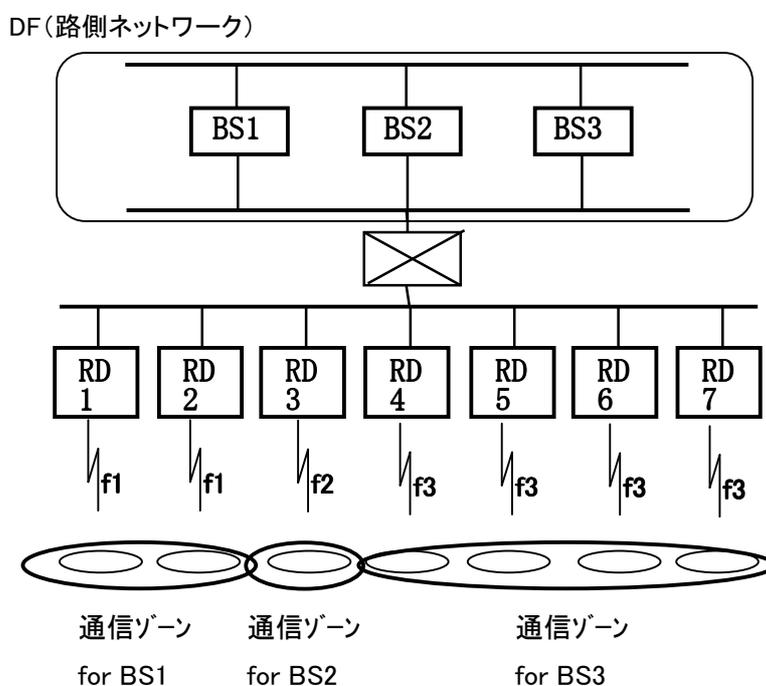


図 6.5 路側ネットワークにおける通信チャンネル管理のシステムモデル

自律分散システムでは ATOM はその特性や能力が記述された「プロファイル情報」と提

供するサービス内容が記述された「サービスシナリオ」を保持している。サービス内容が記述されたサービスシナリオに基づきデータフィールド（DF）を介し互いにメッセージを交換することにより ATOM は自律的に動作を決定することを可能としている。

自律分散アーキテクチャを路側ネットワークに適用した場合の通信ゾーンの管理モデルを図 6.6 に示す。路側ネットワークシステムでは、各基地局に通信ゾーン制御により車両にネットワークリソースを割り当てるサービスシナリオを持っている。また各基地局のネットワークリソースの利用状況をプロファイル情報として保持している。図 6.6 に示す例では、プロファイル情報は2つの管理マップより成る。1つは各基地局で車両に割り当てる通信帯域（通信チャンネル番号）を管理するマップで、他の1つは基地局ごとに自身が制御下においている無線機を管理するマップである。

路側ネットワーク内の基地局は互いのプロファイル情報を共有するために前述の内容コード（CC）によるメッセージ通信を行う。送信元の基地局は、路側ネットワーク内の全基地局に対しブロードキャストし受信側で必要なパケットを取り込み処理する。本方式では受信側基地局の状況を意識せずに送信できる点で分散処理に適した方式と言える。

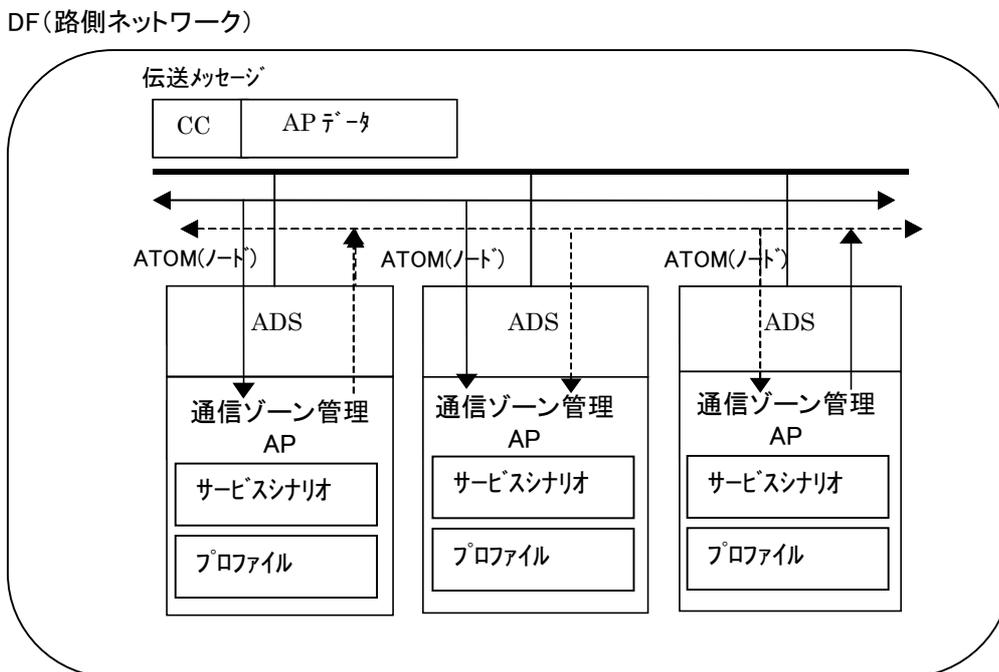


図 6.6 通信ゾーン管理モデル

プロフィール情報

通信ゾーン管理マップ(通信帯域)

基地局#	基地局の通信帯域 (チャンネル#)	車両 ID
BS1	1~4	A
	5	B
	6~8	C
BS2	1~8	D
BS3	1	E
	2	F

通信ゾーン管理マップ(ゾーン構成)

基地局#	基地局の通信帯域 (チャンネル#)	無線機#
BS1	1~4	RD1
	5	RD2
	6~8	RD2
BS2	1~8	RD3
BS3	1	RD4
	2	RD5
-	-	RD6
-	-	RD7

6. 3. 2 通信ゾーン最適化シナリオ

自律管理グループ内の各基地局(BS)は、自身が管理する通信チャネルの利用状況を把握することにより構成する通信ゾーンを拡大あるいは縮小することにより大きさを最適なものにする。基地局で実行する通信ゾーンの最適化のサービスシナリオは下記の考え方でアルゴリズムを検討した。

ゾーン拡大

BS は、自身が制御する通信ゾーン内での通信チャネルの利用率をみて、利用率が低ければ自身のゾーンを拡大してハンドオーバを極力回避することを試みる。BS はゾーンを車両の進行方向に拡大することにより他車両に影響がないか BS 間で確認し、影響がなければゾーンを拡大する。これにより、通信チャネルの利用率の低い環境では、車両がハンドオーバを行う回数を減らし、通信を維持することができる。

ゾーン縮小

BS は、自身が制御する通信ゾーン内での通信チャネルの利用率をみて、利用率が高ければ自身のゾーンを縮小して集中する通信チャネル利用要求に対し応じるようにする。BS はゾーンを車両の進行方向に縮小することにより他車両に影響がないか BS 間で確認し、影響がなければゾーンを縮小する。これにより、通信チャネルの利用率の高い環境では、各車両にとってハンドオーバ回数は増えるが集中する通信チャネル利用要求に応じ通信を維持することができる。

障害時のゾーン再構成

BS に障害が発生したことを他の BS が通信ゾーン制御過程で検知することができる。障害を検出した BS はこれを契機に通信ゾーンの再構成を要求する。通信ゾーンを制御していない BS が存在すれば障害 BS に替わり通信ゾーン制御を続行し、通信ゾーンを制御していない BS が存在しなければ既にゾーンを制御している BS がゾーンを延長することにより、障害 BS を系から切り離し残る BS により通信を維持することができる。

6. 3. 3 通信ゾーン制御 ADS アルゴリズムの概要

筆者は、自律分散システム基盤上にそのアプリケーションとして通信ゾーンの動的制御アルゴリズムを実装した。通信ゾーンの動的制御アルゴリズムは図 6.6 通信ゾーン管理モデルにおける通信ゾーン管理 AP に相当する。本項では、通信ゾーンの動的制御アルゴリズムの概要をしめす。

DSRC を用いた連続型路車間通信を行なう場合にハンドオーバーによる通信効率の低下が問題となる。この問題を解決する手法の 1 つとして、通信ゾーンを動的に制御する方法が文献 [88] で考えられている。これは通信維持できる最低限のハンドオーバー回数で車輦が走行できるように、車群の状況に応じて動的にゾーン構成を変化させる方法である。DSRC の規格は ARIB STD-T75 [68] を用いるため、1 台の基地局は同時に 4 台の車輦と全二重通信が行なえる。この特性を活かして、通信ゾーンの制御は以下に示す 4 つの動作：

- ・ ゾーン延長
- ・ ゾーン統合
- ・ ゾーン分割
- ・ 障害時ゾーン再構成

を定義する。

ゾーン延長

走行中の車輦の進行方向前方に周波数の異なる通信ゾーンが構成されており、なおかつそのゾーン内に通信中の車輦が存在しない場合にゾーンの延長は行なわれる。基地局は前方のゾーンを制御する基地局と通信を行ない、前方のゾーン内に車輦がないことを確認するとそのゾーンを構成する無線機を自身の制御下に置く。

ゾーン統合

隣接ゾーンに空き通信チャンネルが存在し、両ゾーンの使用通信チャンネル数の合計が4以下になる場合にゾーンの統合は行なわれる。基地局は隣接するゾーンと通信を行ない、そのゾーンを構成する無線機を自身の制御下に置く。この際、通信中の車輦の通信を維持する必要があるため、基地局間で車輦情報などを事前に交換し、円滑に統合処置を行なう必要がある。

ゾーン分割

あるゾーン内で空き通信チャンネルがない状態のときに、新しく車輦がゾーン内に進入してきた場合にゾーンの分割は行なわれる。基地局はまだゾーンの制御を行っていない基地局を探し出し、現在ゾーンを構成している無線機の管理を委譲する。これによって空き通信チャンネルを作ることが出来、新しく進入してきた車輦に対して通信チャンネルを割り当てることが可能となる。

障害時のゾーン再構成

ゾーンを構成中の基地局に障害が発生したときに、他の正常に動作している基地局がこの障害を検知し、障害の回復を試みる。まだゾーンを制御していない基地局が存在するときには、その基地局を障害発生基地局の代わりとし、まだゾーンを制御していない基地局が存在しないときには、既にゾーンを制御している基地局がゾーンを延長することによって、障害回復が可能となる。

以上のようなゾーン制御を行うことによって、車輦密度が低い場合はゾーンを大きくし、車輦密度が高い場合はゾーンを小さくすることが可能となる。これによって必要最低限のハンドオーバー回数で車輦は通信を維持することが可能となる。また、基地局に障害が発生したときにも、迅速に障害回復を行なうことが可能となる。

6. 3. 4 通信ゾーン制御 ADS アルゴリズムの実装方式

自律分散アーキテクチャに通信ゾーンの動的制御アルゴリズムを実装するために、以下の方針で検討を行った。

- 通信ゾーン動的制御の3つの基本動作である、ゾーンの延長、統合、分割各操作が自律分散制御路側ネットワークで動作すること。

- 自律分散制御路側ネットワークの特性を活かし、障害回復アルゴリズムが動作すること。
- 自律分散制御の特徴である自律可制御性を維持するために、基地局が他の基地局の状況を意識することなく動作すること。

上記方針を実現するために、Extension, Division, Completion, Restoration の3つのCCを定義した。図6.7のように基地局は行うべき操作に対応するCCをメッセージに載せ、そのメッセージをブロードキャストするだけで、他の基地局の状況を意識することなくゾーンを再構成することができる。CCは表6.1のように規定されており、基地局が希望する操作のCCを選択してメッセージに載せる。ブロードキャストされたメッセージを受信した基地局はCCを参照して、自身に関係あるメッセージだけを受信する。

また基地局がメッセージをブロードキャストしてゾーンを再構成する間に、他の基地局がメッセージをブロードキャストするとゾーンの再構成の処理が重なってしまう。これを回避するために、ある基地局がメッセージをブロードキャストしてからCC: Completionをブロードキャストするまでの間は、他の基地局は再構成要求をできないようにする必要がある。このゾーン再構築の期間をクリティカルエリアと呼ぶことにする。

次に通信ゾーン動的制御の分散アルゴリズムについて説明する。

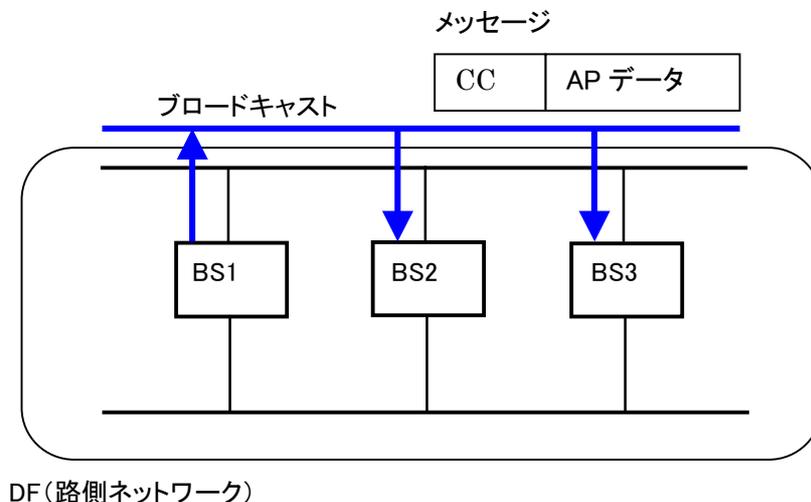


図 6.7 メッセージ通信方式

表 6.1 CC と実行操作の関係

CC	Operation
Extension	Extension and integration
Division	Division
Restoration	Restoration from faults
Completion	Completion of a critical area

ゾーン延長

図 6.8 を用いて、ゾーンの延長についての分散アルゴリズムを説明する。延長に関して、最大ゾーンサイズを決定する必要がある。AHS のリクワイアメント[24]によって最大ゾーンサイズは 600m と定められており、この値を採用することにする。尚、以下では記述の便宜上、最大ゾーンサイズを適宜設定して説明を行なう。

1° 延長要求の発動

基地局(BS1)は車両 V2 が末端の無線機 RD2 を利用して通信していることをプロファイルを参照して認識すると、メッセージの CC に Extension, AP データに自身が制御する無線機である RD1~RD2 と書き込み DF にブロードキャストする。このブロードキャストからクリティカルエリアが開始となる。

2° 各基地局からの状態通知

ブロードキャストされたメッセージの AP データを各 BS は参照し、対象となる BS はメッセージを取り込む。このとき対象となる BS とは、RD1 から無線機を制御して最大ゾーンサイズを超えない範囲の BS のことである。最大ゾーンサイズを無線機 4 台分だとすると、この場合は BS2 がメッセージを取り込む。BS2 はプロファイルを参照して自身の制御するゾーン内に車両が存在しないことを確認すると、延長可能であることを BS1 に伝達する。

3° ゾーンの再構成

BS2 から延長可能通知を受けた BS1 は管理する無線機の範囲を RD1~RD4 まで延長するようにスイッチに要求し、構成するゾーンを延長する。このとき BS1, BS2 共に自身のプロファイルも更新する。

4° クリティカルエリアの解放

BS1 は CC に Completion と書き込んだメッセージをブロードキャストし、クリティカルエリアが終了したことを他の基地局に通知する。BS 1 はこの AP データに行なった処理内容を書き込むことによって、BS2 は制御が正常に終了したことを確認する。

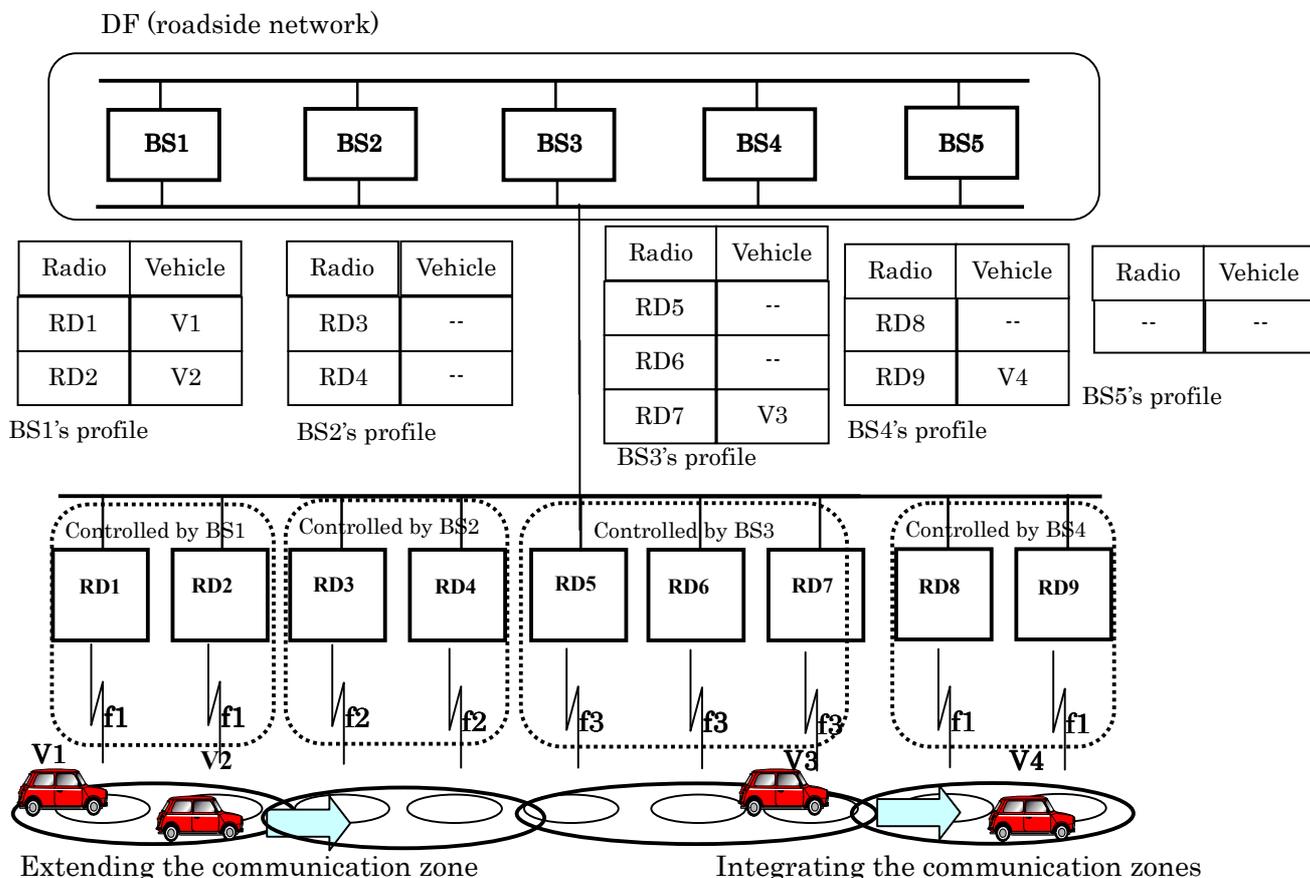


図 6.8 CC: Extension の分散アルゴリズム

ゾーン統合

図 6.8 を用いて、ゾーンの統合の分散アルゴリズムについて説明する。統合に関しても最大ゾーンサイズは 600m とする。ただし、以下では説明の便宜上、適宜最大ゾーンサイズを定義している。

1° 延長要求の発動

BS3 は車輦 V3 が末端の無線機 RD7 利用して通信していることをプロファイルを参照して認識すると、メッセージの CC に Extension, AP データに自身が制御する無線機である RD5 ~RD7 と書き込み DF にブロードキャストする。このブロードキャストからクリティカルエリアが開始となる。

2° 各基地局からの状態通知

ブロードキャストされたメッセージの AP データを各 BS は参照し、対象となる BS はメッセージを取り込む。このとき対象となる BS とは、RD1 から無線機を制御して最大ゾーンサイズを超えない範囲の BS のことである。最大ゾーンサイズを無線機 5 台だとすると、こ

の場合は BS4 がメッセージを取り込む。BS4 はプロファイルを参照して自身の制御するゾーン内に車両が 3 台以内存在することを確認すると、統合可能であることを BS3 に伝達する。

3° 統合処理の通知

BS4 から統合可能通知を受けた BS3 は、BS4 での車両台数と BS3 での車両台数の合計が 4 以下になるようであれば統合処理を行なう。BS3 は統合処理を行うことを BS4 に通知する。

4° 統合処理の了承

BS4 は統合の通知を受けると、通信中の車両に対して基地局の変更があることを通知する。車両に通知完了したことを BS3 に通知する。

5° ゾーンの再構成

BS3 はスイッチに通知を行い、BS4 が管理していた無線機を委譲してもらう。そしてゾーンの統合を行なう。このとき BS3、BS4 はそれぞれプロファイルの更新も行う。

6° クリティカルエリアの解放

BS3 は CC に Completion と書き込んだメッセージをブロードキャストし、クリティカルエリアが終了したことを他の基地局に通知する。このメッセージの AP データに制御内容を書き込むことによって、BS4 は正常に制御を完了したことを確認する。

延長と統合の同時処理

図 6.8 において、最大ゾーンサイズが無線機 9 台分だったときを考える。このとき BS1 が CC: Extension をブロードキャストすると、BS2 からは延長可能通知、BS3 からは統合可能通知、BS4 からは統合可能通知といったように複数の可能通知を受け取ることになる。このようなとき BS1 は通信ゾーン内の車両台数が 4 台以内でゾーン長を最大にするように、スイッチに要求を出す。そしてこの場合であれば RD1~RD9 までを自身の制御下に置く。このように分散アルゴリズムでは延長と統合という操作を同時に行うことが可能となる。

ゾーン分割

ゾーンの分割は以下のような手順によって行なわれる。

1° 分割要求の発動

複数の無線機を制御している BS1 が、空き通信チャンネルを持たない状態で新しい車両が進入してきたことを認識すると、メッセージの CC に Division、AP データに自身が制御する無線機を書き込み、DF にブロードキャストする。このブロードキャストからクリティカルエリアが開始となる。

2° 各基地局からの状態通知

まだ無線機を制御していない BS2 は、CC: Division のメッセージを取り込み、自身が分割されたゾーンを制御可能であることを通知する。

3° 分割処理の通知

分割可能通知を受けた BS1 は、分割した際に新しい基地局と通信をすることになる車輛情報を BS2 に通知する。

4° 分割処理の了承

車輛情報を受け取った BS2 は、分割処理の了承を BS1 に通知する。

5° ゾーンの再構成

BS1 はスイッチに通知を出し、自身の制御していた無線機を BS2 に委譲し、ゾーンの分割を行なう。このとき BS1, BS2 のプロファイルも更新する。

6° クリティカルエリアの解放

BS1 は CC に Completion と書き込んだメッセージをブロードキャストし、クリティカルエリアが終了したことを他の基地局に通知する。

障害発生時のゾーン再構成

図 6.8 において BS2 に障害が発生しているとして、障害発生時のゾーン再構成アルゴリズムについて説明する。

1° 延長要求の発動

車輛 V2 のハンドオーバを回避するために BS1 は CC に Extension を書き込んでブロードキャストし、延長要求を発動する。このとき BS1 は BS2 に障害が発生したことを認知しておらず、自身が通信を行なっている車輛 V2 のハンドオーバの回避が目的で延長要求を発動する。

2° 障害検知

延長要求を受信した各基地局は延長が可能な場合は BS1 に返信を行なう。しかしながら BS2 は障害が発生しているためにこの返信を行なえず、BS1 は BS3, BS4 だけから返信を受信することになる。このことから BS1 は BS2 に障害が発生し、RD3, RD4 を制御している基地局が損じ市内ことを検知する。

3° 障害回復の発動

BS1 は延長要求の発動で獲得したクリティカルエリアを維持したまま、CC に Restoration を書き込み、ブロードキャストする。このメッセージはまだゾーンの制御を行なっていない基地局が取り込み、自身がゾーンを制御していないことを BS1 に返信する。図 6.8 の場合は BS5 が BS1 に返信を行なうことになる。

4° ゾーン再構成

BS1はBS5からの返信を受け、BS2が今まで管理していたRD3、RD4をBS5が制御するようにスイッチの切り替えを行なう。これによってBS2の障害発生によってゾーンが存在しなかったRD3、RD4のゾーンを再構成することが可能となる。

またBS5のようにゾーンを制御していない基地局が存在しなかった場合は、BS1はCC: Restorationの返信を受けることが出来ない。この場合はBS1自身がゾーンを延長し、RD3、RD4を制御するようにスイッチの切り替えを行なうことで、ゾーンの再構成が可能となる。

5° クリティカルエリアの解放

BS1はCCにCompletionと書き込んだメッセージをブロードキャストし、クリティカルエリアが終了したと障害回復の結果を他の基地局に通知する。

ゾーン制御の遅延

延長、統合、分割のそれぞれの処理は、基地局が制御の必要性を認知してから実際にゾーンを再配置するまでに遅延時間がかかる。従ってこの時間の中に車両が移動してしまい、ゾーンの再配置が間に合わない場合がある。この場合、車両は次ゾーンの通信チャンネルの獲得を試みる。次のゾーンの通信チャンネルに空きがある場合は、車両は通常のハンドオーバーを行い通信を維持する。また、通信チャンネルに空きがない場合は、ゾーン制御によって通信チャンネルが割り当てられるまで待つことになる。

6. 4 適用と評価

6. 4. 1 評価目標

筆者は6.3項で提案した通信ゾーンの動的制御を実現するための自律分散アルゴリズムを筆者が開発した路側ネットワークプラットフォーム上で動作可能な実装し評価した。本研究ではスケーラビリティを評価するためにシミュレーションによりアルゴリズムの評価を行った。

前提となる路側ネットワークの要求仕様は以下の通りである。評価システムでは、マイクロセルの物理インフラに DSRC を用いる。DSRC 仕様は[24]に準拠するものとする。[68]によればマイクロセル長は約 30m, 物理アクセス速度は 4096Kbps/cell, セルあたりのチャンネル数は 4 チャンネル/セルである。また路側ネットワークの規模は走行支援システムでの要求条件[24]により約 600m である。

前項で言及した通信ゾーンの動的制御を実現する自律分散アルゴリズムの評価目標を以下のように設定した。

- 路側ネットワーク内に存在する車両のトラフィック量が少ない環境では、通信ゾーンを拡大し個々の車両が極力ハンドオーバーすることなく路側ネットワークを通過できること。スループットの視点で見ると、基地局 1 台あたりの物理的な伝送速度は 4 Mbit/s なので、ハンドオーバーによる通信切断時間が全くなければ 4Mbit/s のスループットが得られる。
- 路側ネットワーク内に存在する車両のトラフィック量が多い環境では、通信ゾーンを縮小し個々の車両がネットワークリソース (DSRC の通信チャンネル) を獲得できない確率を出来る限り低減すること。
- 自律分散アルゴリズムの処理性能は、路側ネットワーク内の基地局間で交換される制御パケットの転送時間に依存する。そして制御パケットの転送時間は、路側ネットワークの規模 (基地局の数) に依存する。3.2 項サービス要求条件によれば、路側ネットワークの規模は最大 600 m 程度までとしており、提案方式の自律分散アルゴリズムの処理性能は路側ネットワークの規模が 600 m までは上記目標性能を満足すること。
- 自律分散アルゴリズムの基本特性のひとつに耐故障性に対する優位性が上げられる。路側ネットワーク内の基地局の一部が故障しても残る基地局で通信ゾーンの動的制御を有効に機能させることができること。

6. 4. 2 評価環境

提案した自律分散制御路側ネットワークによる通信ゾーンの動的制御の実装を行ったときの路側ネットワークのトラフィックについて計算機シミュレーションで評価を行った。シミュレーション環境を表 6.2 に示す。

表 6.2 シミュレーション環境

Physical Conditions (Road-to-Vehicle communication)	- Physical Access : DSRC(ARIB STD-75) - Inter Cell Length : 36m - Physical Access Rate : 4,096kbps/cell (QPSK) - Physical Access Slots : 4 Slots/cell - Service Area : Consists of multiple consecutive zones up to 900m - Zone : Consists of multiple consecutive cells up to 600m
Physical Conditions (ADS network communication)	- ADS signaling delay - IO delay : 0.7msec/message - Processing delay : 1msec/message
Traffic Conditions	- Traffic : Poisson Distribution - Vehicles Occurrence : 0-120 vehicles/km - Configuration of Road : 3 lanes - Vehicle Speed : 80km/h (usual lane) : 100km/h (central lane) : 120km/h (fast lane)
End of Simulation	- At the time when 1000 vehicles passed the service area

マイクロセルの物理条件は DSRC [68]を前提とした。マイクロセルにより構成されるサービスエリアは走行支援システムでの要求条件[24]を条件とした。ADS ネットワーク条件としては、ネットワーク内での制御パケットの転送遅延時間が全体の性能に影響を与えるために ADS パケット制御処理時間を考慮してシミュレーションを行った。またトラフィック条件としては、車輛の出現はポアソン分布に従い車輛密度を変化させてシミュレーションを行った。

6. 4. 3 評価項目

開発した ADS アルゴリズムの性能評価を下記項目について行った。ADS アルゴリズムの性能評価は、理論的な方式[88]との比較において行った。評価対象は自律分散制御路側ネットワークの規模が 360m, 540m, 720m, 900m の 4 つのパターンを評価した。また、理論的な方式[88] にお

いて提案されている動的ゾーン制御方式の評価結果を今回のシミュレータ用に補正したものと比較している。評価項目は以下の5点である。

- ・ ハンドオーバー回数
 車両1台が通信ゾーン内で行うハンドオーバーの平均回数。
- ・ 平均ハンドオーバー成功確率
 車両1台におけるハンドオーバーの総数に対するハンドオーバー成功回数の割合。
- ・ 平均スループット
 BS1台あたりの平均スループット。
- ・ 通信チャネル獲得までの平均待ち時間
 車両が通信要求をしてから通信チャネルを獲得するまでの平均待ち時間。
- ・ BS障害時の通信チャネル獲得率推移
 路側網内BSにランダムに障害が発生した場合の通信ゾーン再構成において、稼動しているBSから通信チャネルを獲得することができる確率の推移。BS障害時に、通信ゾーン再構成を行う場合と行わない場合について比較して評価した。

6.4.4 トラフィック環境に応じた通信ゾーン制御の評価

平均ハンドオーバー回数

図6.9は車両密度と1台の車両が通信ゾーン内で経験する平均ハンドオーバー回数の関係を横軸に車両密度[vehicles/km]、縦軸に平均ハンドオーバー回数[handover occurrence rate/BS]とし、路側ネットワークの規模を変化させて表わしている。

まず[88]での理論的な方式のグラフと、今回の自律分散アルゴリズムによる方式のグラフが同じ傾向にあることが確認できる。このことから自律分散アルゴリズムによる実装方式でも動的にゾーンを制御することによって、車両密度が低い場合(50以下)はハンドオーバー回数の軽減が出来ていることが確認できる。しかしながら理論的な方式では車両密度が120[vehicles/km]程度で平均ハンドオーバー回数が1になっているのに対して、本実装方式では車両密度が80[vehicles/km]程度で平均ハンドオーバー回数が1になっている。これは理論的な方式ではゾーン再構成の要求は必ず認められ、遅延なしでゾーンの再構成を行なうことが出来るのに対して、現実にはゾーン再構成の要求の順序制御があるためゾーンの再構成までに遅延を要するためである。車両密度が80[vehicles/km]程度の場合、既にゾーン構成は最小セル構成に近づいており、このゾーン再構成の待ち時間中に車両がセルを通過してしまうため、理論的な方式よりもハンドオーバー回数が増加するものと考えられる。ただし車両密度が80[vehicles/km]という高い密度の場合までハンドオーバー回数を軽減することが出来ており、これは充分有効な値である。平均ハンドオーバー回数は、自律分散型路側ネットワーク規模には大きく依存することはないと言える。

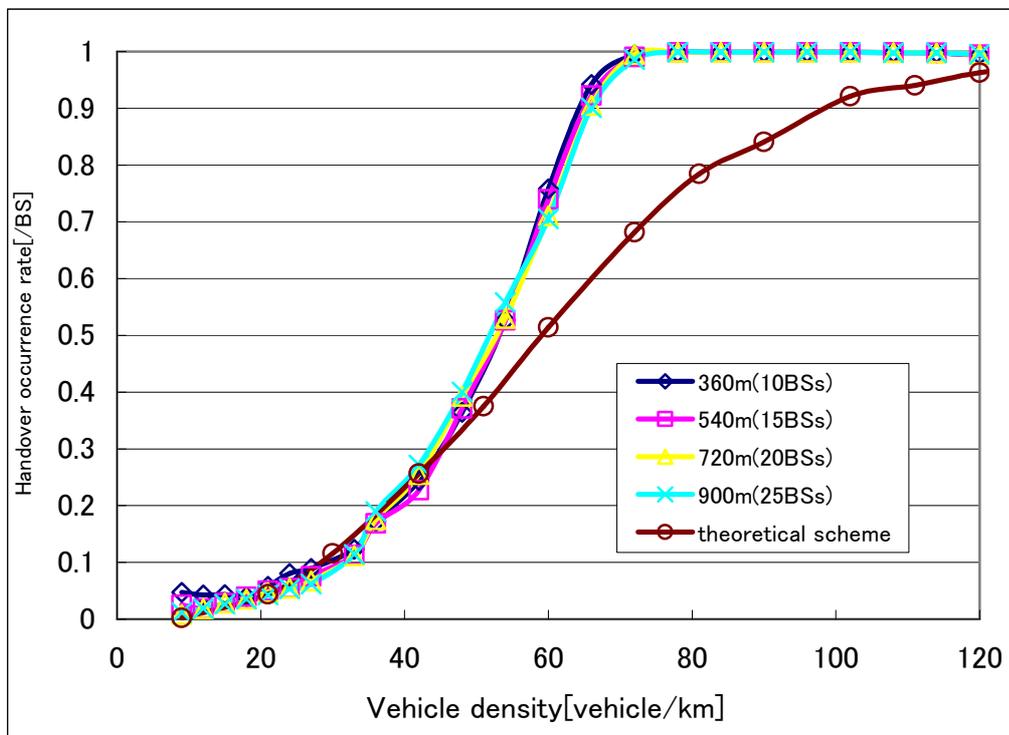


図 6.9 平均ハンドオーバー回数

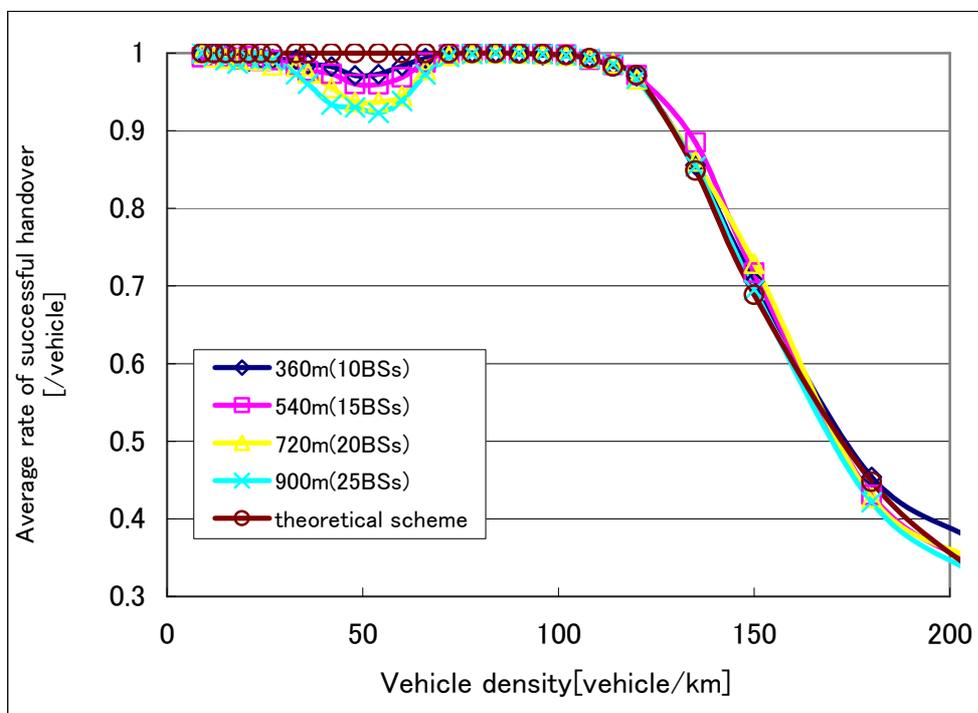


図 6.10 平均ハンドオーバー成功確率

平均ハンドオーバー成功確率

図 6.10 はハンドオーバー成功確率を横軸に車両密度[vehicles/km], 縦軸にハンドオーバー成功確率[successful handover rate/vehicle]とし路側ネットワークの規模を変化させて表している。

いずれのケースも車両密度が 120 程度まではハンドオーバー成功確率が約 1 と高い値を維持していることを確認できる。これは車両がチャネルを維持できるように動的にゾーンを制御しているためである。車両密度が 120 以上の場合ほどの方式もハンドオーバー成功確率が低下している。これは最小セル型のゾーン構成で許容できる車両密度を超えてしまったためであり、物理的に通信チャネルが不足する状況になっているためである。これにより動的にゾーンを制御することにより、可能な限り車両に通信チャネルを割り当てることが出来ていることが確認できる。また本実装方式と理論的な方式を比較すると、車両密度が 50 程度のときに本実装方式はハンドオーバー成功確率が低下していることが確認できる。これはこの車両密度のときに最もゾーンの再構成が起こるために、クリティカルエリアの獲得が車両の移動にゾーンの再構成が追いつかないためである。従って自律分散制御路側ネットワークの規模が大きいほどハンドオーバー成功確率は低下している。また、車両密度が 70 程度で再びハンドオーバー成功確率が上昇するのは、ゾーン構成が最小セル型に落ち着くためである。

以上のことから物理的に通信チャネル数が不足するまでは、車両が通信チャネルを獲得できるようにゾーンを動的に制御していることが確認でき、本提案方式の有効性を示している。

平均スループット

図 6.11 は基地局 1 台当たりのスループットと車両密度の関係を表したグラフである。縦軸がスループット[Throughput/BS], 横軸が車両密度[vehicles/km]を表している。車両密度が 40 以下の場合にはスループットの最大値である 4Mbps に近い値を示していることが確認できる。これは通信ゾーンの動的制御方式によってハンドオーバー回数を削減することができるためである。また車両密度が 70 以上の場合には約 3.6Mbps で一定の値を示している。これは車両密度の増加によってゾーン構成が最小セル型構成に動的に制御されるためである。最小セル型構成の場合にはハンドオーバーの回数が増加するために、スループットが約 10%低減するが、システム全体で使用できる通信チャネル数が最大となるために、車両がチャネルを獲得できる環境になっていることが確認できる。車両密度が 40~60 程度のときは自律分散制御路側ネットワークの規模が小さいほどスループットが高くなっている。これは自律分散制御路側ネットワークの規模が大きいほど、ハンドオーバー成功確率が低くなってしまったためで、この区間でハンドオーバーの失敗が起こっているためである。ただしその影響は小さいことも確認できる。

以上のことから通信ゾーンの動的制御によって、車両密度が低い場合はハンドオーバー回数を減少させてスループットを向上させ、車両密度が高い場合は車両が通信チャンネルを割り当てることを優先していることがわかる。この結果、車両密度が低い場合は最大スループットである 4[Mbit/s]を示しており、本提案方式の有効性を示すことが出来た。

通信チャンネル獲得平均待ち時間

図 6.12 は通信回復待ち時間を表している。縦軸に通信回復待ち時間、横軸に車両密度をとっている。図 6.12 によれば、自律分散制御路側ネットワークの規模が大きいほど通信回復待ち時間が長くなっていることが確認できる。自律分散制御路側ネットワークが大きくなると、基地局数が増加するためにゾーン再構成要求数が増加し、クリティカルエリア獲得に時間を要することになる。従って通信チャンネルを失った車両に通信チャンネルを割り当てるために、ゾーンを再構成する時間が増加するためと考えられる。ただしハンドオーバー成功確率とスループットの項で言及のように、ハンドオーバーの失敗が起こる確率は小さく、この影響によるスループットの低下は無視できる。また、今回の結果では自律分散制御路側ネットワークが 900m の場合でも最大チャンネル獲得待ち時間が約 300msec であり、これは 1 つのセル内で充分処理可能な時間であり、通信回復待ち時間として実用的な値であると考えられる。また、自律分散制御路側ネットワークの規模の限界は 600m であることから考えて、自律分散アルゴリズムによる実装方式は要求条件を満たすといえる。

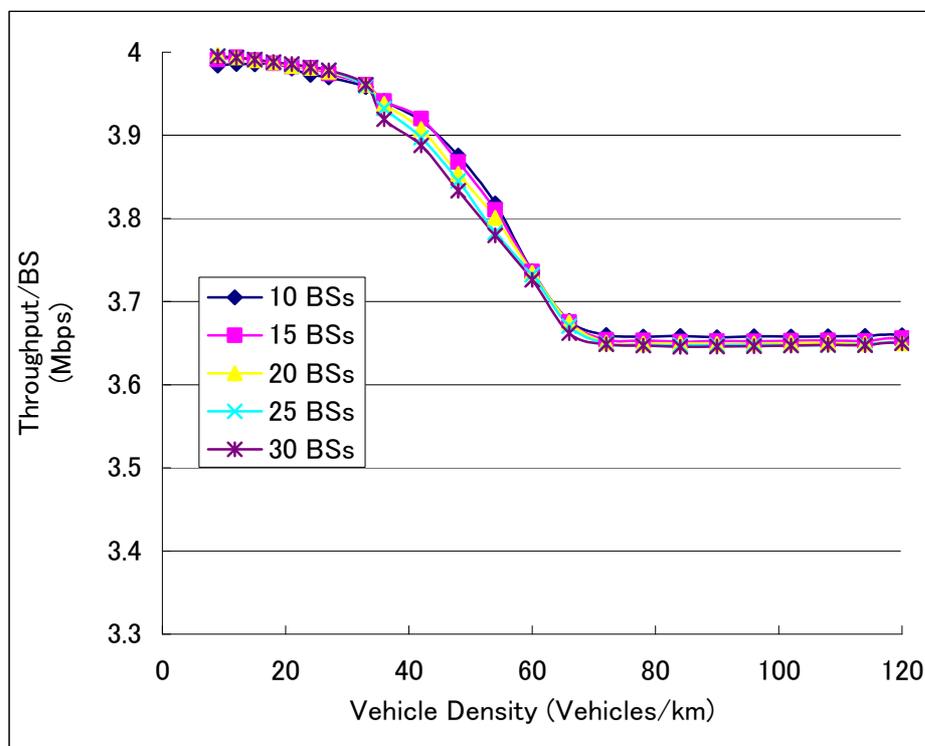


図 6.11 BS あたりの平均スループット

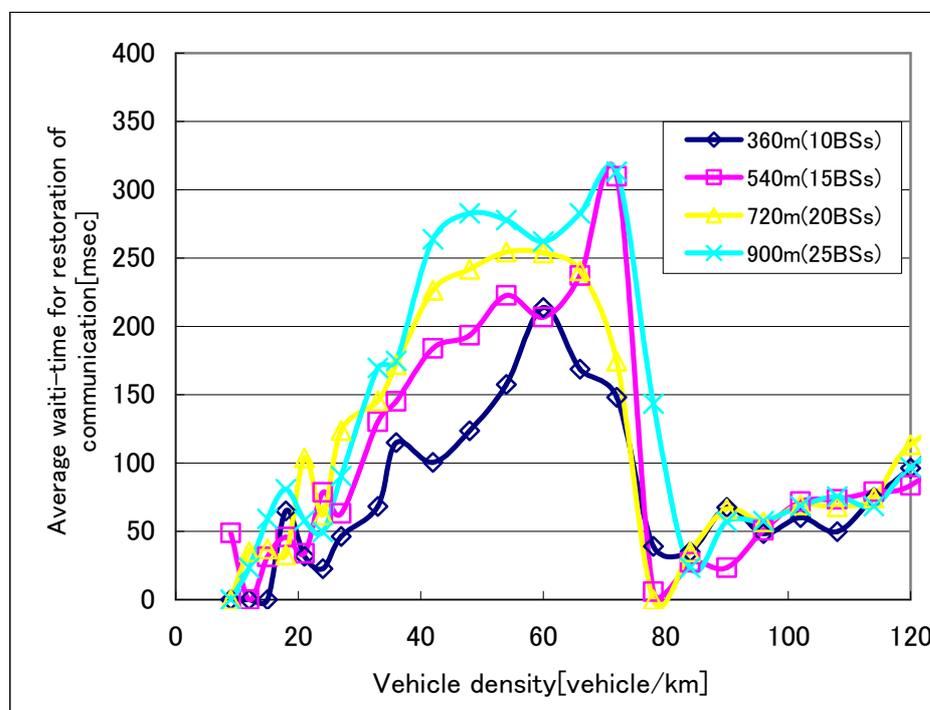


図 6.12 通信チャネル獲得平均待ち時間

6. 4. 5 ネットワーク障害に応じた通信ゾーン制御の評価

BS 障害時の通信チャネル獲得率推移

図 6.13 は障害発生時におけるチャネル獲得率を表している。縦軸がチャネル獲得率，横軸が時間である。10 秒ごとにゾーンを制御中の基地局をランダムに選択して故障させ，障害発生時のゾーン再構成アルゴリズムがあるものとなないものを比較している。また自律分散制御路側ネットワークの規模は 720[m]（基地局 20 台），車輛密度は 30[vehicles/km]に設定してある。

図 6.13 によれば，障害発生時のゾーン再構成アルゴリズムがない場合は最初の基地局が故障する 10 秒から段々にチャネル獲得率が低下している状況がわかる。これは故障した基地局が制御していたゾーンが存在しなくなるためである。車輛密度が 30[vehicles/km]程度するとき，720[m]の道路には約 22 台の車輛が走行中であり，基地局 6 台でゾーンを構成すれば全ての車輛に通信チャネルを割り当てることができる計算になる。図 6.13 グラフからは，70[sec]でチャネル獲得率が 0 になっており，これは基地局が 6 台故障する時間に相当し，この計算値と一致することが確認できる。これに対して障害発生時のゾーン再構成アルゴリズムがある場合は，最初の基地局が故障した 10 秒以降も，基地局の故障ごとに一旦チャネル獲得率が低下するが，すぐに元の高いチャネル獲得率に回復している。これは故障した基地局に代えて，まだゾーンを制御していない基地局がゾーンを制御するためである。障害発生時のゾーン再構成アルゴリズムがある場合も，150 秒付近から急激にチャネル獲得率が低下していることがわかる。150 秒のとき既に基地局は 14 台故障しており，残りの基地局数は 6 台である。従ってこれはゾーンを制御していない基地局がなくなってしまったために，既にゾーンを制御している基地局がゾーンを延長することで障害箇所をカバーしていることが原因だといえる。このゾーンの延長があるために，チャネル獲得率の低下の仕方も障害時のゾーン再構成アルゴリズムがない場合と比較すると，段階的になっており，可能な限り障害の影響を小さくしようとしていることも確認できる。

以上より自律分散制御による本実装方式の障害への耐久性が検証することができた。

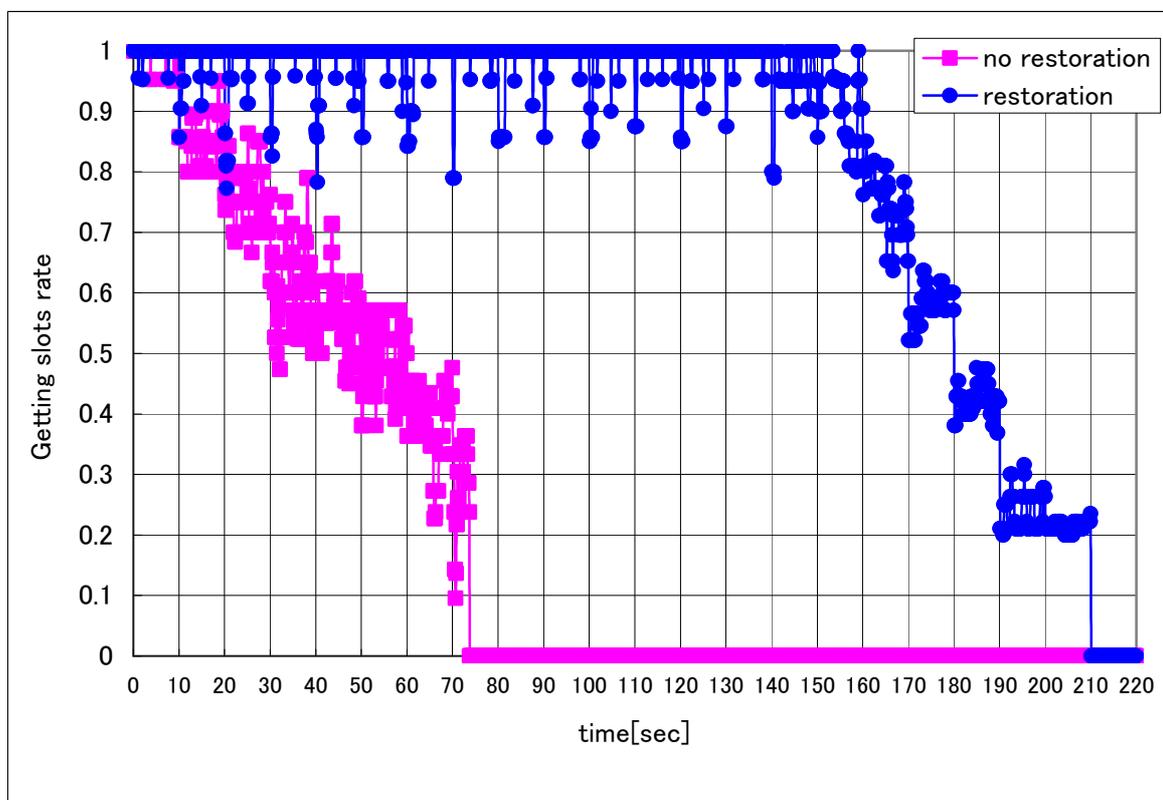


図 6.13 BS 障害時の通信チャネル獲得率推移

通信チャネル管理方式評価のまとめ

以上の考察から評価結果をまとめると下記となる。

- 車両密度が低い場合は、ハンドオーバー回数を削減するようにゾーンを再構成し、スループットを最大値である 4[Mbps]に近い値を示すことが検証できた。
- 車両密度が高い場合は、車両に通信チャネルを割り当てられるようにゾーンを再構成し、ハンドオーバー回数は増加してしまうが、スループット約 3.6[Mbps]を維持することが検証できた。
- 基地局が故障した際に、他の稼働中の基地局がその基地局の代わりにゾーンを制御するようにゾーンを再構成することで、出来る限り故障の影響を少なくし、長時間システムを稼働することが検証できた。
- 本提案方式は自律分散制御路側ネットワークの規模の限界である 600m でも正常に動作する。

以上により、本提案の有効性を示すことができたといえる。

6. 5 まとめ

DSRC のようなマイクロセルを利用し連続通信の環境を提供する路側ネットワークでは、多数のマイクロセルにより構成される通信ゾーン内の車輻に対し通信路を提供し管理するための有効な通信制御方式の確立が必要である。こうした通信制御方式に要求される基本的な要件のひとつにフォールトトレランス性の確保がある。路側ネットワーク内の基地局の一部が障害で利用できない場合でも路側ネットワークの通信制御を維持する必要があるからである。一方、マイクロセルを利用した路側ネットワークにおける通信制御上の課題として、連続通信の環境を提供するためには、ハンドオーバー時のコネクション情報引継ぎのための通信切断がスループットの低減を引き起こしているという課題がある。これらの課題を解決するために筆者は、自律分散アーキテクチャによる路側ネットワークプラットフォーム上に、そのアプリケーションとして通信ゾーンを制御する自律分散アルゴリズムを開発し評価した。

本研究にて開発したアルゴリズムの有効性を検証する上で、5章で示した指標と対応をつけ、各々の指標に対して検証結果をしめすことにより、適用性を評価した。

第一に、トラフィック環境に応じた通信ゾーン制御アルゴリズムを開発しその適用性を評価した。路側ネットワーク内に存在する車輻のトラフィック量が少ない環境では、通信ゾーンを拡大し個々の車輻が極力ハンドオーバーすることなく路側ネットワークを通過できることが求められる。スループットの視点で見ると、基地局1台あたりの物理的な伝送速度は4 Mbit/sなので、ハンドオーバーによる通信切断時間が全くなければ4Mbit/sのスループットが得られる。また、路側ネットワーク内に存在する車輻のトラフィック量が多い環境では、通信ゾーンを縮小し個々の車輻がネットワークリソース（DSRCの通信チャンネル）を獲得できない確率を出来る限り低減することが求められる。これを実現するために自律分散アルゴリズムとして実装し上記特性を検証した。

結果として6.4項での検証により、トラフィック量が少ない環境（50台/km程度まで）ではハンドオーバー回数を低減させることにより、ハンドオーバーによるオーバーヘッド低減により、スループットを改善できることが確認できた。また、トラフィック量が多い環境（80台/km程度以上）では、ハンドオーバーの回数は増えるがネットワークリソース（チャンネル）提供が可能な限り車輻に割り当てることにより、個々の車輻が通信チャンネルを獲得できない確率を出来る限り低減することが確認できた。以上によりトラフィック環境に応じた通信ゾーンの動的制御の有効性を検証できた。

第二に、ネットワーク障害時の通信ゾーン再構成制御アルゴリズムを開発しその適用性を評価した。自律分散アルゴリズムの基本特性のひとつに耐故障性に対する優位性が上げられる。路側ネットワーク内の基地局の一部が故障しても残る基地局で通信ゾーンの動的制御を有効に機能させることができることが求められる。ネットワーク障害時の通信ゾーン再構成制御を

実現する自律分散アルゴリズムとして実装し上記特性を検証した。

結果として 6.4 項障害発生時の通信チャネル獲得率の検証により，障害発生時にも通信ゾーンを再構成し，車輛に対し通信チャネルが提供可能な限り提供を続行することにより，障害発生によるシステムへの影響を極力少なくする通信ゾーン再構成制御の有効性を検証できた。

第三に，路側ネットワークのスケラビリティを評価した。自律分散アルゴリズムの処理性能は，路側ネットワーク内の基地局間で交換される制御パケットの転送時間に依存する。そして制御パケットの転送時間は，路側ネットワークの規模（基地局の数）に依存する。文献 3. 2 項で言及のサービス要件によれば，路側ネットワークの規模は最大 600m 程度までとしており，提案方式の自律分散アルゴリズムの処理性能は路側ネットワークの規模が 600m までは上記目標性能を満足することが求められる。6.4 項の各評価結果により，路側ネットワークの要求規模に対し，上記制御が有効に機能することを検証できた。

以上により，自律分散による通信ゾーン制御アルゴリズムの有効性を検証でき，路側ネットワークシステムへの適用可能な見通しを得た。

第7章

結論

7. 1 研究の成果

本研究の目的とした道路交通システムのための移動体ネットワーク基盤を確立することに対し、(1)ネットワークアーキテクチャ、(2)ネットワーク制御方式及び(3)ネットワーク制御方式を利用したネットワークリソース管理方式を提案しその適用性を評価した。本項では、研究成果の総括を行う。

移動体ネットワークアーキテクチャ

路側ネットワークのシステム基盤として、道路交通システムへの適用を考えた通信システムは道路に敷設される多数のネットワーク設備より構成されしかも連続稼動を不可欠とするシステムであるという観点から自律分散システムアーキテクチャを適用した。システムを動作させるのに必要な情報は可能な限り自システム内に置き他分散システムとの結合は可能な限り疎にすることとし、各分散システムは独立性を保持しながら必要に応じて他分散システムと協調して動作することにより、トータルシステムとしての機能を実現することを目標とした。

これを実現するために、路側ネットワーク内でメッセージフロー制御によるメッセージ通信方式を定義し、これを用いた路側ネットワーク制御及びリソース管理方式を実装した。

表7.1に本研究にて構築した自律分散システムによる移動体ネットワーク基盤の適用性評価結果を纏めたものを示す。

ネットワーク制御方式

路側ネットワークは車載端末に対する情報提供を目的とするが、その適用領域は走行支援及び利用者への一般情報提供である。具体的な目標値が明確になっている走行支援サービスについては、その要求条件を目標値とした。また一般情報提供においては具体的な目標値の規定はないが、一般のTCP/IPアプリケーション特にネットワークへの負荷が厳しいFTPアプリケーションが利用可能な環境を提供することを目標とした。ここで重要となるのはマイクロセルを用いる路側ネットワークにおいて高速に移動する車輛にとって移動処理が頻繁におこる

ために、ハンドオーバー処理にともなう通信効率の低下が特に深刻となることである。通信効率の低下を抑制するために、高能率なハンドオーバー処理を提案した。

表 7.1 自律分散ネットワーク適用性評価結果

移動体ネットワークシステム基盤としての適用性評価項目		基本要件	本研究にて適用性評価結果		今後の課題	
			狭域ネットワーク	広域ネットワーク	車内ネットワーク	
機能	ネットワーク制御方式	IP 転送(CL)機能	○ ・IP 転送(UDP/TCP IP)のサポート.	CO の提供が課題. NGN(ITU-T)での QoS 保証型 IP 転送方式の実装が考えられる.	Network Mobility (IETF)の動きを監視. 実装要件の検討が必要. 制御系パケット転送の要求条件を整理することが必要.	
		QoS 機能	○ ・ADSレベルでのパケット転送の優先制御(制御信号, ユーザパケットのスケジューリング)機能のサポート.			
		移動管理機能	○ ・マイクロモビリティのサポート. ・ハンドオーバー遅延特性改善による高速ハンドオーバーのサポート. (ハンドオーバー遅延時間は, 目標 100msec に対し, 39msec; 従来方式の 1/10 以下の性能を達成.) ・ハンドオーバー時パケットロス低減による高信頼パケット転送機能のサポート.	Mobile IP ベースのマイクロモビリティサポート(狭域網との連携において)が課題.		
		外部網インタワーク機能	○ ・上位 IP ネットワークへのインタワーク機能のサポート.			
リソース管理方式	ネットワークリソース管理機能	○ ・無線通信ゾーン動的制御による通信チャネルの適応型制御機能 ・ネットワークリソース管理のフォールトトレランス性確保を検証.	リソース管理要件の整理が必要.	リソース管理要件の整理が必要.		
API 方式	ネットワークミドルウェアに対するインタフェース機能	○ ・ADS レベルで上位ネットワークミドルウェアに対する API の提供. ITS アプリケーション(障害物センシング)の実装により検証.	広域網におけるアプリケーションインタフェースの検討が必要.	車内端末(情報, 制御)でのアプリケーションインタフェースの検討が必要.		
性能	スループット	要求ネットワーク規模に対する物理アクセスレートのスループット	○ ・ITS での基地局ネットワークにて検証. ・ADS パケット転送機能をソフトウェアにより実現し, トータルスループットは約 20Mbps. これは, 約 18 ノードをブロードキャストメインとする ITS 基地局ネットワーク(約 500m 程度の路側設備)において物理アクセスレートのスループットを提供できることを意味しており, ITS サービスの観点からは, 高速道路などでの情報提供サービスに適用可能な見通しを得た.	スケーラビリティの検討が必要. 場合により LSI 化による処理能力向上が必要.	要求性能の分析が必要.	

第7章 結論

また、上記性能目標は実運用環境においては利用状況つまり車輛のトラフィック状況によらず提供できることが重要であり、渋滞している状況においても可能な通信帯域内において車載端末に対する情報提供を継続できることが求められる。

マイクロセルを用いた路側ネットワークの制御方式実装上の要件として、(1) ネットワーク内で頻繁に発生する移動処理を上位ネットワークに意識させない移動管理方式の実現、(2) データ伝送時間を確保のために移動にともなうハンドオーバー処理時間の低減、(3) アプリケーションとしてリアルタイム性の要求される走行支援サービスへの適用を考え高レスポンス性を確保したパケット転送方式とすること及び(4) パケット転送の高信頼性確保のためにハンドオーバーにともなうパケット損失低減を考慮したパケット転送方式とすることがある。

こうした条件を満足する路側ネットワークの制御方式として下記を提案し評価した。移動管理方式として、路側ネットワーク内の移動処理を上位ネットワークから隠蔽するためにゲートウェイをおき IP レイヤを終端するアーキテクチャとした。路側内のパケット転送は ADS メッセージ通信により IP パケットを透過転送する。路側内の車輛移動にともなうハンドオーバー処理を高能率におこなうために端末の IP アドレスを含むコネクション情報を路側ネットワーク内で引き継ぎ、そのための制御パケットの転送処理も ADS メッセージ通信によりおこなう方式とした。さらにハンドオーバー期間中 IP パケットをゲートウェイにてキャッシングすることにより移動後の通信再開処理の高速化を可能とした。

路側ネットワーク制御方式を評価するために試作システムを開発し実機による検証をおこなった。機能の有効性を検証するとともに、擬似車載端末による過負荷試験により、想定する路側ネットワークの規模において目標の性能を得ることができ、自律分散システム基盤上に構築したネットワーク制御方式の有効性を検証することができた。

通信チャネル管理方式

マイクロセルを利用した連続通信環境を提供する路側ネットワークシステムでは多くのマイクロセルにより構成される通信ゾーン内の移動端末に対し通信路を提供するための効率的な通信チャネル管理手法が求められる。こうした通信チャネル管理に要求される基本的な要件のひとつにフォールトトレランス性の確保がある。路側ネットワークシステムの部分障害に対し障害部位を切り離し継続稼動することが求められるからである。また利用者への通信チャネルの割当はトラフィック状況に応じた動的な制御が必要となる。

本研究では、自律分散システム基盤上のマイクロセル移動体ネットワーク制御が利用するネットワークリソース管理として通信チャネル管理方式を実装した。具体実装においては物理メディアとして DSRC を想定し DSRC により構成される通信ゾーン内で提供可能な通信チャネル管理方式とした。自律分散システム基盤上に、通信ゾーン内のトラフィック状況あるいは無線基地局の稼動状況に応じ通信ゾーンの大きさを動的に制御することによる通信チャネル

第7章 結論

管理方式を開発した。マイクロセルが提供する無線チャネルリソースは限られている。一方複数マイクロセルにより構成される通信ゾーン内のトラフィック量は一律ではない。そこでトラフィック量に応じて通信ゾーンの大きさを拡大、縮小することにより路側ネットワーク内の無線通信チャネルを負荷分散し利用する方式を実装した。また、路側ネットワーク内の基地局の一部が故障しても残る基地局により通信チャネルを提供しサービスを継続させる方式を実装した。

自律分散システム基盤上に実装した路側ネットワークの通信チャネル管理方式の適用性を計算機シミュレーションにより評価した。評価結果によれば、想定される路側ネットワーク規模に対し機能、性能ともに満足していることを検証することができ、路側ネットワークにおける通信チャネル管理方式として適用可能であることを検証することができた。

提案方式の適用について

官庁主導による実証実験システムに適用した。本実証実験システムは、走行支援及び関連するサービスの実証を行うことを目的とするもので、走行支援サービスとして障害物検知、関連するサービスとして車輻からの旅行予約の実現性を検証することを目標として実施された。本実証実験システムにおける路側ネットワークシステムとして本研究成果を適用し機能、性能面から実証検証した。

7. 2 今後の課題

マイクロセルを利用した車載端末への情報配信サービスはインフラの整備状況、提供アプリケーションともに現在発展段階にある。車載端末からのブロードバンドネットワーク接続を実現することにより、道路管理の高度化や緊急車輻通信の高度化などが期待できる。また、一般車輻への通信サービスとしてカーナビゲーションシステムへの情報提供や、交通情報や地域情報の供給なども期待できるが、アプリケーションサービスは利用者にとどのような付加価値を提供できるか実現コストを含めたビジネスモデルの策定が重要である。またインフラ整備の観点からは、携帯電話網の整備が進められる状況において、本システムの特長である局所性あるいは高速性を生かし相互補完的に発展していくものと考えられる。

本研究において提案した自律分散システムによる移動体ネットワーク制御方式は、マイクロセルを用いた狭域ネットワークに対しその適用性を評価した。道路交通システムへの適用に際し本研究では高速道路における連続的な通信環境の提供に焦点を当てモデルを単純化した。が、道路交通システムへの適用を考えると一般道路についても評価する必要がある。さらには端末も車載端末のみでなく、歩行者も視野に入れる必要がある。こうした環境においては、ネ

第7章 結論

ネットワークのトポロジーが複雑になるとともに端末の移動を特定しにくい状況が著しくなり、これらに対応したネットワーク制御の拡張を行っていくことが課題である。

2章で言及のように自律分散システムの移動体ネットワーク制御への適用は、狭域ネットワークの他にも広域ネットワークあるいは車内ネットワーク、さらにはデータセンタ内 LAN への適用が考えられる。広域ネットワークは、従来の音声中心の携帯ネットワークから高速のモバイルインタネット環境を提供するインフラとして定着しつつありカーナビゲーションシステムでの利用など市場が急速に立ち上がりつつある。ネットワークサービスとしてはブロードバンド無線アクセスを前提とし End-End の QoS 保証をとまなう IP 転送を利用しセッション型サービスの提供を可能とするものである。このようなブロードバンド無線アクセスネットワークにおいて、ネットワーク制御、システム運用の柔軟性を確保するために自律分散システムの適用が考えられるが、実装アーキテクチャに対しスケーラビリティに対する評価を行う必要があり、今後の課題と考える。また、本研究ではデータ転送アプリケーションを対象とし QoS 保証を行うためのパケット転送における帯域制御、優先制御を考慮したが、広域無線アクセスネットワークとしては音声への適用性を評価することが課題である。

自動車の IT 化が進展する中で、車内にはカーナビゲーションをはじめとする情報ネットワーク、各種センサの制御ネットワークが存在し、インタネットからの情報の取得あるいは車内でのセンサ情報のアップロードなど外部ネットワークとの相互接続を行うことが求められる。ネットワークの観点からは自動車の移動を隠蔽するネットワークモビリティの提供が求められる。Mobile IP のようなホストモビリティの追及ではなく、車載のモバイルルータにより車載端末の移動を終端する方式である。車載ルータにより車載端末の移動の隠蔽、セッションの連続性及びアクセスネットワークの種別によらないシームレスな通信を提供するものである。上述のような車内ネットワーク基盤として自律分散システムの適用が考えられるが、ネットワークモビリティの実装方式の構築が今後の課題と考える。

本研究において適用の見通しを得ることができた自律分散システムによるマイクロセルを用いた路側ネットワーク制御方式は、その実サービスでの適用のためには、方式を標準化すること及びセキュリティを含めた運用性の向上を図ることが重要な課題であると認識しており、この観点からさらなる研究を推進する考えである。

本論文で提案し評価した自律分散システムによる移動体ネットワークアーキテクチャ及びネットワーク制御方式が移動体ネットワーク環境を改善しさらなる発展に貢献できることを願いつつ本論文を締めくくりたいと思う。

— 以上 —

参考文献

- [1] Ihara, H. et al.: Autonomous Decentralized Computer Control Systems, IEEE Computer, Vol.17, No.8 (1984).
- [2] Mori, K. et al.: On-line Maintenance in Autonomous Decentralized Loop Network: ADL, Proc. COMPCON '84(1984).
- [3] Mori, K. et al.: Autonomous Decentralized Software Structure and Its Application, Proc. Fall Joint Computer Conference (1986).
- [4] Kawano, K. et al: Autonomous Decentralized System Technique, Proc. COMPSAC '89.
- [5] Mashino, Y. et al.: An Autonomous Decentralized Process Computer System for Steel Production, Proc. IEEE International Symposium on Autonomous Decentralized Systems (ISADS 93).
- [6] Mori, K.: Autonomous decentralized systems – concept, data field architecture and future trends, Proc. IEEE International Symposium on Autonomous Decentralized Systems (ISADS'93).
- [7] Aizono, T.: Enhancing Intelligent Devices towards Developing Highly-Performance and Flexible Production Systems, IEICE Trans. Inf. Syst., Vol1.E84-D, No.10 (2001).
- [8] Aizono.T., Kawano, K., Wataya, H. and Mori, K.: Autonomous Decentralized Software Structure for Integration of Information and Control Systems, Proc. IEEE Computer Software and Application Conference (COMPSAC '97).
- [9] Shimura, A.: A Highly-Reliable Quality of Service (QoS) Control Method Based on an Autonomous Decentralized System Concept for Smart Gateways, 8th ITS World Congress, Sydney (2001).
- [10] Kim, K., Mori, K. and Nakanishi, H.: Realization of Autonomous Decentralized Computing with RTO. Object Structuring Scheme and the HU-DF Inter-Process-Group Communication Scheme, Proc. IEEE International Symposium on Autonomous Decentralized System (ISADS'95), pp.305-312 (1995).
- [11] Yau, S.S. and Oh, G.H.: An Object-Oriented Approach to Software Development for Autonomous Decentralized Systems, Proc. IEEE International Symposium on Autonomous Decentralized System (ISADS '93).
- [12] Orimo, M., Hirasawa, S., Fujise, H., Takeuchi, M. and Mori, K.: Autonomous Decentralized File System and Its Application, Proc. IEEE 3rd Future Trends of Distributed Computing Systems (FTDCS) (1992).

- [13] 森欣司他：自律分散概念の提案，電気学会論文集 Vol.104-c, No.12(1984).
- [14] 河野克己：自律分散システム，情報処理学会会誌， Vol.36, No.11 (1995).
- [15] 特集：分散と協調，計測自動制御学会誌，計測と制御， Vol.26, No.1(1987).
- [16] 特集：自律分散システム，計測自動制御学会誌，計測と制御， Vol.29, No.10(1990).
- [17] 特集：自律分散システムの新たなる展開，計測自動制御学会誌，計測と制御， Vol.32, No.10 (1993).
- [18] 社団法人日本機械工業連合会・財団法人製造科学技術センター：FA の国際標準化事業報告書（平成 11 年度），<http://www.mstc.or.jp/fa-stan/H11farep.PDF>.
- [19] ITS 関連省庁：高度道路交通システム（ITS）に係るシステムアーキテクチャ(1999).
- [20] ITS 関連省庁：我が国の ITS 取り組みの経緯と現状，
<http://www.ITS.go.jp/ITS/j-html/SAview/gaiyou/chap2.htm>.
- [21] 総務省：平成 15 年度情報通信白書，<http://www.johotsushintokei.somu.go.jp/>.
- [22] 国土交通省：ITS ハンドブック，<http://www.its.go.jp/>.
- [23] 交通工学研究会（編）：交通工学ハンドブック(1998).
- [24] AHSRA：AHS 第 1 次リクワイアメント概要，AHSRA 調査研究，<http://www.ahsra.or.jp/>.
- [25] AHSRA:道路交通の安全性向上を目指した AHS, AHSRA 調査研究,<http://www.ahsra.or.jp/>.
- [26] AHSRA：実用化への今後の取り組み，AHSRA 調査研究，<http://www.ahsra.or.jp/>.
- [27] 田中靖資他：AHS の要素技術開発情報通信システム，情報処理学会 ITS 研究会(2000).
- [28] 通信・放送機構：平成 13 年度研究 開発成果報告書走行支援システム実現のためのスマートゲートウェイ技術の研究開発 (2002).
- [29] 中村博行，篠永英之，竹内章平，金光寛幸，田村成美，平岩賢志：走行支援システム実現のためのスマートゲートウェイ技術の研究開発，平成 15 年度通信・放送機構研究発表会予稿集，通信・放送機構 (2003).
- [30] Tripathi, N.D., Reed, N.J.H and VanLandingham, H.F.: Handoff In Cellular Systems, IEEE Personal Communications, pp.26-37 (1998).
- [31] Park, S., Lee, S., Song, Y.J., Cho, D.H. and Dhong, Y.B.: Performance Improvement of Forward Handover Based on Path Rerouting and Extension in Wireless ATM, IEICE Trans. Communication, Vol. E82-B, No.9, pp.1485-1495 (1999).
- [32] Campbell, A.T., Kim, G.J., Turanyi, S., Wan, CY.Z. and Valko, A.: Comparison of IP Micro-Mobility Protocols, IEEE Wireless Communications Magazine, Vol.9, No.1(2002).

- [33] Campbell, A.T., Kim, G.J., Turanyi, S., Wan, C.Y.Z. and Valko, A.: Design Implementation and Evaluation of Cellular IP, IEEE Personal Communications, Special Issue on IP-based Mobile Telecommunications Networks (2000).
- [34] Perkins, C.E.: Mobile IP, IEEE Communications Magazine, pp.66-82 (2002).
- [35] Perkins, C.E.: IP Mobility Support for Ipv4, IETF RFC 3344 (2002).
- [36] Koodli, R.: Fast Handovers for Mobile Ipv6, IETF Internet Draft, work in progress (2002).
- [37] Shim, E., et al.: Low Latency Handoff for Wireless IP QoS with Neighbor-casting, ICC '02, pp.3245-3249 (2002).
- [38] Ergen, M., et al.: Application of GPS to Mobile IP and Routing in Wireless Networks, VTC2002 Fall (2002).
- [39] Johnson D., et al.: IP Mobility Support for Ipv6, IETF Internet Draft (2003).
- [40] Soliman, H., et al.: Hierarchical Mobile Ipv6 mobility management, IETF Internet Draft, work in progress (2003).
- [41] Ramjee, R., et al.: HAWAII: A domain-based approach for supporting mobility in wide-area wireless networks, IEEE/ACM Trans. Networking, Vol.10, No.3, pp.396-410 (2002).
- [42] Liebsch, M., et al.: Candidate access router discovery, IETF Internet Draft (2003).
- [43] Loughney, J., et al.: Context transfer protocol, IETF Internet Draft, work in progress (2003).
- [44] Zenel, B., et al.: A General Purpose Proxy Filtering Mechanism Applied to the Mobile Environment, MOBICOM'97.
- [45] Perkins, C.E. et al.: Mobility Support in Ipv6, MOBICOM'96 (1996).
- [46] Campbell, A., et al.: An Overview of Cellular IP, IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC'99), New Orleans.
- [47] Valko, A.: Cellular IP – A New Approach to Internet Host Mobility, ACM Computer Communication Review (1999).
- [48] Valko, A., et al.: Cellular IP, Internet Draft, draft-valko-cellularip-00.txt, November 1998. Slides of the presentation at 43rd IETF, Mobile IP WG, Orlando (1998).
- [49] Valko, A., et al.: On the Analysis of Cellular IP Access Network, IFIP Sixth International Workshop on Protocols for High Speed Networks, Salem Massachusetts.
- [50] Mitra, A., Shin, M., and Arbaugh, W.: An Empirical Analysis of the IEEE 802.11 MAC Layer Handoff Process, CS-TR-4395, University of Maryland Department of Computer Science (2002).

- [51] Ergen, M., et al.: Position Leverage Smooth Handover Algorithm for Mobile IP, Proc. ICN '02.
- [52] 萬代雅希, 笹瀬巖: MobileIP における位置情報を用いた低レイテンシなハンドオフ方式, 情報処理学会論文誌, Vol.45, No.4 (2004).
- [53] 金沢学志他: ワイヤレスネットワークに適したレイヤ 2 転送, インタネットコンファレンス 2001, S2-2.
- [54] 水越康博他: DSRC 網における IP ハンドオーバー方式の評価, 情報処理学会高度道路交通システム研究会報告 No.025 (2003).
- [55] 水越康博他: DSRC Ipv6 網における車輛位置追跡機構の実現, 情報処理学会モバイルコンピューティングとユビキタス通信 No.112 (2000).
- [56] 水越康博他: DSRC 網における IP ハンドオーバーのソフトウェアシミュレーション, 情報処理学会モバイルコンピューティングとユビキタス通信 No.013 (2001).
- [57] 森岡仁志: 無線 LAN を使った高速ハンドオーバー, 情報処理学会会誌 IPSJ Magazine Vol.45, No.8 (2004).
- [58] 森川博之他: 無線 LAN とモバイル IP 新世代モバイルネットワークへの展開, 情報処理学会会誌 IPSJ Magazine Vol.45, No.8 (2004).
- [59] 古村隆明他: 無線 LAN とモバイル IP を用いた移動車輛通信導入事例, 情報処理学会会誌 IPSJ Magazine Vol.45, No.8 (2004).
- [60] 横田英俊他: 無線 LAN 環境における Mobile IP ハンドオフ高速化に関する検討, 情報処理学会研究報告, モバイルコンピューティングとユビキタス通信, Vol2001, No.108 (2001).
- [61] 井戸上彰他: モバイル IP バックボーンにおけるレイヤ 2 機能を用いた高速ハンドオーバー方式の検討, 信学技報, CQ2000-45 (2000).
- [62] 長谷川孝明: 無線 LAN 技術を利用したインタネットの構築: ITS における無線 LAN の活用と標準化の課題, 情報処理学会会誌 IPSJ Magazine Vol.45, No.8 (2004).
- [63] 長谷川孝明: ITS とシステム創成に関する一考察, 電子情報通信学会技術研究報告, ITS2002-120 (2003).
- [64] 屋代智之, 松下温: 路車間・車車間通信統合 MAC プロトコル: I-Warp II, 情報処理学会論文誌, Vol.42, No.7 (2003).
- [65] 真野浩: 無線 LAN とモバイル IP を利用した高速移動体通信, 情報処理学会会誌 IPSJ Magazine Vol.45, No.8 (2004).
- [66] 福澤寧子他: 自律分散制御路側網システムのセキュリテイ機能の開発, 情報処理学会論文

誌, Vol.44, No.12 (2003).

[67] ARIB: ARIB STD-T55: Dedicated Short Range Communication (DSRC) for Transport Information and Control Systems (TICS) ARIB standards, ARIB, (1988).

[68] ARIB: ARIB STD-T75: Dedicated Short Range Communication (DSRC) for Transport Information and Control Systems (TICS) ARIB standards, ARIB (2001).

[69] 久保田創一他 : ITS ネットワークでの通信路選択のための情報取得方法についての一考察, 情報通信研究開発機構横須賀 ITS リサーチセンター, 高度道路交通システム (ITS) 実現のための情報通信技術の研究開発プロジェクト研究開発報告書 (2000).

[70] 前田幹夫他 : TAO 横須賀 ITS リサーチセンタにおける研究の取り組み状況, 情報通信研究開発機構横須賀 ITS リサーチセンター, 高度道路交通システム (ITS) 実現のための情報通信技術の研究開発プロジェクト研究開発報告書 (2000).

[71] 久保田創一他 : モバイルネットワーク環境におけるサービス連続技術に関する検討, 情報通信研究開発機構横須賀 ITS リサーチセンター, 高度道路交通システム (ITS) 実現のための情報通信技術の研究開発プロジェクト研究開発報告書 (2003).

[72] 山本達史他 : ITS ネットワークにおけるマルチキャストグループ管理方式とその評価について, 情報通信研究開発機構横須賀 ITS リサーチセンター, 高度道路交通システム (ITS) 実現のための情報通信技術の研究開発プロジェクト研究開発報告書 (2000).

[73] 無中達司他 : Advanced Join によるマルチキャストグループ管理方式の提案, 情報通信研究開発機構横須賀 ITS リサーチセンター, 高度道路交通システム (ITS) 実現のための情報通信技術の研究開発プロジェクト研究開発報告書 (2000).

[74] 佐藤健哉他 : 移動経路情報を利用した路車間通信方式のシミュレーションによる評価, 情報処理学会論文誌, Vol.40, No.10 (2001)

[75] 山本達史他 : ITS ネットワークにおけるマルチキャスト通信のための再送処理機能について, DICOMO2001 シンポジウム (2001)

[76] Yonezawa, K., et. al.: An Experimental Evaluation of Handover Activating Methods for Roadside Vehicle Communications System, The 3rd International Workshop on ITS Telecommunications, (ITST2002), pp.203-208 (2002).

[77] Hattori, G. et. al. : Proposal on Improvement of TCP Throughput for Vehicle-Road Communication via DSRC, ITS Telecommunications (ITST2002) (2002).

[78] Wakikawa, R., Mitsuya, K., Uehara, K., Ernst, T., Murai, J.: Basic Network Mobility Support for Internet ITS, IPSJ Journal, Vol.44, No.12 (2003).

- [79] 小田森賢史, 金子普丈, 森川博之, 青山友紀: 自律分散的マイクロモビリティサポートのための基地局間マルチホップ網, 電子情報通信学会信学技報, モバイルマルチメディア通信研究会, Vol.103, No.38 (2004).
- [80] 森川博之: ワイヤレスが開くユビキタスネットワーク, 電子情報通信学会, Vol.87, No.5 (2004).
- [81] 新藤晃浩, 金子普丈, 森川博之, 青山友紀: サービスモビリティを考慮したセッション管理機構の設計と実装, 電子情報通信学会技術研究報告, IN2003-260, NS2003-305 (2004).
- [82] Shimura, A., Sakaibara, T., Aizono, T.: Evaluating Urgent Message Transmission Performance of Highly Reliable Quality of Service (QoS) Method for Smart Gateways, Proc. of ITS World Congress Workshop 2002, Chicago (2002).
- [83] Shimura, A., Aizono, T., Sakaibara, T., Shioya, M.: Group-Handover Technology for Roadside Systems based on DSRC Communications, Proc. of ITST2001 (2001).
- [84] 服部元他: DSRC ネットワークを利用する ITS アプリケーションのためのミドルウェアの設計と実装, 情報処理学会論文誌, Vol.44, No.12 (2003).
- [85] 前田幹夫他: TAO 横須賀 ITS リサーチセンターにおける研究取り組み状況, 情報通信研究開発機構横須賀 ITS リサーチセンター, 高度道路交通システム (ITS) 実現のための情報通信技術の研究開発プロジェクト研究開発報告書 (2000).
- [86] 山崎泰他: 路車間通信用照射領域可変路側アンテナの検討, 情報通信研究開発機構横須賀 ITS リサーチセンター, 高度道路交通システム (ITS) 実現のための情報通信技術の研究開発プロジェクト研究開発報告書 (2000).
- [87] 山崎泰他: 路車間通信における無線ゾーン動的制御システムに関する一検討, 情報通信研究開発機構横須賀 ITS リサーチセンター, 高度道路交通システム (ITS) 実現のための情報通信技術の研究開発プロジェクト研究開発報告書 (2000).
- [88] 福井良太郎, 中村めぐみ, 柿田法之, 屋代智之, 重野寛, 岡田謙一, 松下温: DSRC を用いた連続型路車間通信における可変無線ゾーンの構成と動的スロット多重, 情報処理学会論文誌 Vol.J44, No.12, pp.3050-3059 (2003).
- [89] 福井良太郎, 柿田法之, 屋代智之, 重野寛, 松下温: 道路照明を用いた連続無線ゾーン構成法による路車間通信システムの実用性の評価, 情報処理学会論文誌, Vol.J43, No.12 (2002).
- [90] 中村めぐみ, 柿田法之, 福井良太郎, 屋代智之, 重野寛, 岡田謙一, 松下温: DSRC を用いた連続型路車間通信におけるシステム構成の検討, 情報処理学会大 11 回高度交通システム研究会(2002-ITS-11), Vol.2002, No.115 (2002).
- [91] 朝倉啓充, 福井良太郎, 中村めぐみ, 屋代智之, 重野寛, 岡田謙一: 動的ゾーン制御を用い

た連続型路車間通信システム, 情報処理学会第 25 回モバイルコンピューティングとユビキタス通信研究会, 2003-MBL-25, pp.77-84 (2003).

[92] 西野健一, 長谷川孝明: 道路プラットフォーム “ドット ITS” における IP 接続に関する一検討, 2003 年電子情報通信学会技術研究報告, 通信ゾーン制御方式 ITS2002-180 (2003).

[93] Akira Yamaguchi, Yoshio Takeuchi, Masayuki Yasunaga: Dynamic Radio Zone Communication System for ITS, ITS00133, 8th World Congress on Intelligent Transport Systems (2001).

[94] 朝倉啓充, 柿田法之, 中村めぐみ, 福井良太郎, 屋代智之, 重野寛, 岡田謙一: 連続ゾーン路車間通信における動的ゾーン制御方式, 情報処理学会第 65 回全国大会, Vol3 (2003).

[95] 福井良太郎: ビーコン連続型 DSRC システムの構成方法, 情報処理学会第 2 回高度道路交通システム研究会(2000-ITS-2), Vol.2000, No.83 (2000).

[96] 柿田法之, 栗原良太, 福井良太郎, 屋代智之, 重野寛, 松下温: 安全支援システムの実現に向けた連続無線ゾーンの構成方法, 情報処理学会研究報告, Vol.2001, No.47 (2001).

[97] 服部元, 小野智弘, 西山智, 堀内浩規: DSRC を利用した路車間通信における TCP スループットの評価と向上方法の検討, 情報処理学会第 9 回高度道路交通システム研究会, 2002-ITS-9, Vol.2002, No.48(2002).

[98] Yamaguchi, A., Takeuchi, Y. and Yasunaga, M.: Dynamic Radio Zone Communication System for ITS, ITS00133, 8th World Congress on Intelligent Transport Systems (2001).

[99] Yamasaki, Y., Yasunaga, M., Murakami, Y. and Moribe, H.: Development of Beam Control Array Antenna for Road to Vehicle Communications, ITS00153, 8th World Congress on Intelligent Transport Systems (2001).

[100] Yamada, S.: The Strategy and Deployment Plan for VICS, IEEE Communications, Vol.34, No.10 (1996).

[101] Aoki, Y., Okada, M., Sasaki, K., Harada, H. and Fujise, M.: Spot Access System for Milimeter-wave Road-to-Vehicle Communication Systems using Radio-on-Fiber Technology, ITST-2000.

本研究に関連する著書

- [1] 平岩賢志, 志村明俊, 相菌岳生: 自律分散による高度道路交通システム (ITS) のためのモバイルネットワーク・プラットフォームの実装と評価, 情報処理学会論文誌, ユビキタス環境のモバイル通信システムと ITS, Vol.44 No.12 (Dec. 2003).
- [2] 平岩賢志, 坂本 敏幸, 野明俊道, 森 光正, 西澤隆彦: DSRC(ARIB STD-T75 準拠)システムの実装及び評価, 電子情報通学会論文誌ワイドバンドシステム小特集号, Vol.J86-A No.12 (Dec. 2003).
- [3] 平岩賢志, 志村明俊, 相菌岳生, 岡田謙一: 自律分散によるモバイルネットワークプラットフォーム適用性評価, 情報処理学会論文誌, 次世代移動体通信システム, Vol.45 No.12 (Dec. 2004).
- [4] Hiraiwa, M., Asakura, H., Narita, T., Yashiro, T., Shigeno, H., Okada, K.: Dynamic Communication Zone Control Method on Autonomous Decentralized based Roadside Network Infrastructure, IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, Vol.E88-A, No.7 (July 2005 to appear).
- [5] 福澤寧子, 石田修一, 平岩賢志, 瀬戸洋一: 自律分散制御路側網システムのセキュリティ機能の開発, 情報処理学会論文誌, ユビキタス環境のモバイル通信システムと ITS, Vol.44, No.12 (Dec.2003).
- [6] 志村明俊, 相菌岳生, 平岩賢志, 河野克己: 狭域無線を用いた移動体への高信頼大容量データ配信を保障する自律基地局グルーピング方式, 電子情報通信学会論文誌 ITS 技術論文特集, Vol.J88-A No.2 (Feb.2005).
- [7] Hiraiwa, M., Shioya, M., Seto, Y., Sakamoto, T., Ogura, T., Noake, T.: A Proposal of Mobile Network Platform to implement highly reliable communications on Smart Gateway, Proc. of ITS World Congress Workshop 2001, Sydney (Oct. 2001).
- [8] Hiraiwa, M., Aizono, T., Sakamoto, T., Fukuzawa, Y., Noake, T., Mori, M.: Implementation and Evaluation of Mobile Network Platform to implement highly reliable communications on Smart Gateway, Proc. of ITS World Congress Workshop 2002, Chicago (Oct. 2002).

- [9] Hiraiwa, M., Aizono, T., Shimura, A., Ishikawa, H., Sugiyama, K., Shinonaga, H.: Implementation and Evaluation of Autonomous Decentralized Systems based Mobile Communications Platform for ITS Services, Proc. of IEEE International Symposium on Autonomous Decentralized System (ISADS2003) (April 2003).
- [10] Hiraiwa, M., Asakura, H., Narita, T., Yashiro, T., Shigeno, H., Okada, K.: Study on mobile communication platform for ITS services – Dynamic Communication Zone Control Method on Autonomous Decentralized based Roadside Network Infrastructure, Proc. of ITS World Congress Nagoya (Oct. 2004).
- [11] 平岩賢志, 坂本 敏幸, 野明俊道, 森 光正 : DSRC システムの実装及び評価, 情報処理学会研究報告 2002-ITS-10-9 (2002).
- [12] 平岩賢志, 森 光正, 野明俊道 : ITS モバイルネットワークのためのマイクロセルモビリティ管理方式の検討, 情報処理学会, マルチメディア・分散・協調とモバイル (DICOMO2003) シンポジウム予稿集 (2003).
- [13] 平岩賢志, 森 光正, 野明俊道 : DSRC アクセスネットワークの実装と評価, 情報処理学会研究報告 2003-ITS-13-6 (2003).
- [14] 野明俊道, 平岩賢志, 森光正 : スマートゲートウェイにおけるモバイル IP・プラットフォームの提案, 情報処理学会モバイルコンピューティングとワイヤレス通信(18-21)高度交通システム研究会(6-21)報告 (2001).
- [15] 平岩賢志他 : ITS 情報通信システム運用管理プラットフォームについての考察, 情報処理学会 ITS 研究会報告 (1999).
- [16] 谷崎正明, 嶋田茂, 平岩賢志 : 分散オブジェクト指向空間情報システム DO-GSIS の空間オブジェクトキャッシュ機構と AHS 施設情報管理への適用性検討, 情報処理学会データベース研究会報告 120-16 (2000).
- [17] 平岩賢志, 相菌岳生, 坂本 敏幸, 野明 俊道, 森 光正 : スマートゲートウェイにおける高信頼通信を実現するための ITS モバイルネットワーク・プラットフォーム, 第 1 回 ITS シン

ポジウム Proceedings P1-20 (2002).

[18] 平岩賢志, 酒井原徹, 福澤寧子, 石田修一, 志村明俊, 野明俊道: 走行支援システム実現のためのスマートゲートウェイ技術の研究開発, 通信・放送機構委託研究報告 (2002).

[19] 志村明俊, 酒井原徹, 平岩賢志, 相菌岳生: 自律グループ管理モデルの提案と ITS スマートゲートウェイシステムへの適用, 電子情報通信学会アシュランス研究会 (2001).

[20] 志村明俊, 酒井原徹, 相菌岳生, 平岩賢志: ITS 路側システムにおける情報の緊急性に着目した道路情報モデルの一考察, 電子情報通信学会 ITS 研究会報告 (2002).

[21] Shimura, A., Sakaibara, T., Hiraiwa, M., Aizono, T.,: Proposal of Autonomous Group-Management Model and its Application to Intelligent Transport System, Proc. of IEEE International Symposium on Autonomous Decentralized System (ISADS2003) (April 2003).

謝辞

本研究は、2004年より2005年まで慶應義塾大学理工学研究科 岡田・重野研究室にて行われました。大変多数の方々から御協力、御支援を頂き、ここに深く感謝の意を表わします。

はじめに、本研究において、一貫して御懇切な御指導、御鞭撻ならびに様々な御配慮を賜りました慶應義塾大学理工学部情報工学科 岡田謙一教授に深く感謝致します。

論文審査を快くお引き受け下さり、研究の方向性あるいはシステムの視点での御示唆、御指導を賜りました慶應義塾大学理工学部情報工学科 中川正雄教授、天野英晴教授に深く感謝致します。

研究の方向性あるいは論文作成にあたっての御懇切な御指導、御助言を頂きました慶應義塾大学理工学部情報工学科 重野寛助教授、千葉工業大学 屋代智之助教授に深く感謝致します。また、本研究の場を与えていただくことに御支援を頂きました東京工科大学 星徹教授に感謝致します。研究の推進につき御示唆、御助言を頂きました日立製作所システム開発研究所 船橋主管研究長に感謝致します。

研究の推進、論文作成他多面の支援を頂きました慶應義塾大学理工学研究科 朝倉啓充氏、成田千城氏他岡田・重野研究室の方々、日立製作所システム開発研究所 相菌岳生氏、志村明俊氏に感謝致します。

本研究の場を与えていただくとともに、推進に関し支援を頂きました日立製作所ネットワークソリューション事業部諸氏に感謝致します。

最後に、私を支えて頂いた両親そして妻美穂子に感謝致します。

平成 17 年夏

平岩 賢志