

自動車走行支援のための
専用狭域通信システムの構成方法に関する研究

A Study on the Composing Method
of the Dedicated Short Range Communication System
to Support Safety Driving of the Vehicles

平成 15 年度

福井 良太郎
Ryotaro FUKUI

目 次

第 1 章 序論	1
第 2 章 研究の背景と目的	6
2.1 ITS の概念	6
2.2 ITS と情報通信技術	8
2.3 DSRC の開発状況	11
2.3.1 DSRC 開発初期の状況	11
2.3.2 実用化された DSRC システム	13
2.3.3 研究開発中の DSRC システム	21
2.3.4 海外の状況	23
2.4 研究の目的	28
第 3 章 走行支援のための DSRC	31
3.1 汎用通信手段と DSRC の比較	31
3.1.1 自動車内で利用される情報	31
3.1.2 情報の特性と通信手段	32
3.1.3 DSRC の基本特性	32
3.2 走行支援のための DSRC	33
3.2.1 走行支援機能の概念	33
3.2.2 走行支援のレベルと支援タイミング	34
3.2.3 走行支援用 DSRC に要求される特性	37
3.2.4 連続型無線ゾーン構成方法の例	38
3.3 漏洩同軸ケーブルを用いた連続型路車間通信	40
3.3.1 LCX ケーブルによる AHS 用通信の研究	40
3.3.2 LCX ケーブルによる無線ゾーンの特性	40
3.3.3 LCX 通信方式の基礎実験	42
3.3.4 LCX 通信方式を用いた自動走行実験	43
3.3.5 LCX 通信方式の問題点	44

第4章 連続型路車間通信方式の提案	46
4.1 局所型 DSRC とシャドウイング	46
4.2 研究開発状況と問題点	48
4.3 道路照明柱を利用した無線ゾーンの構成方法	50
4.3.1 道路照明施設の設置基準	51
4.3.2 見通し条件の幾何学的検討	52
4.3.3 道路照明を利用した提案モデル	56
4.4 提案モデルの評価	57
4.4.1 シャドウイングに関する評価	59
4.4.2 アンテナ間隔に関する評価	63
4.4.3 評価のまとめ	71
4.5 ROF を用いた無線ゾーン構成	73
4.6 連続型無線ゾーン構成モデルのまとめ	75
第5章 可変無線ゾーン構成と動的スロット多重	76
5.1 ROF ゾーンと通信可能車両台数に関する問題	76
5.1.1 DRSC 標準規格 (ARIB STD-T75)	76
5.1.2 無線ゾーンの大きさと通信可能車両台数	79
5.2 車両密度の問題に対応する通信方式の提案	80
5.2.1 基本的な考え方	80
5.2.2 システム構成	81
5.2.3 可変無線ゾーン構成法	82
5.2.4 動的スロット多重方式	86
5.3 提案方式の評価	89
5.3.1 評価の条件	89
5.3.2 車両密度とハンドオフ回数	90
5.3.3 車両密度とハンドオフ成功確率	93
5.3.4 車両密度と連続受信バイト数	95
5.3.5 車両密度と平均バイトレート	97
5.3.6 受信量のばらつき	99

5.4 可変無線ゾーン構成と動的スロット多重のまとめ	103
第6章 結論	105
謝辞	108
参考文献	109
英字略語集	116

第1章 序論

「交通」とは運輸・通信の機関による人の往復，貨物の輸送，通信などの総称である（広辞苑）。一般的には「交通」は人および物の空間的な移動と認識されているが，言葉の定義のように広い意味では情報の移動としての「通信」を含んでいる。以下本書における「交通」は，一般的な狭義の概念として取り扱うが，交通システムも情報通信システムも，社会経済を支える重要なインフラストラクチャであり，これらの基盤整備は国家の重要な課題である。

21世紀に入った現在，情報通信技術の発展が社会経済を大きく変化させようとしている。高速・大容量の通信ネットワーク（情報ハイウェイ）が地球の隅々まで張り巡らされ，必要な情報が利用しやすい形態（マルチメディア）で瞬時に伝達し合える高度情報通信社会の出現である。これまでの電話に代表される音声通話に加え，インターネットの利用が一般の家庭レベルまで浸透し，社会経済活動は大きな質的变化を遂げつつある。

こうした時代背景のもとに，主題である「交通システム」に目を転じた場合，やはり大きな変化点にあるものと考えられる。情報通信の高度化が，一面では不必要な物や人の移動を削減する効果を有しているが，それにも増して情報のグローバル化が更に物流，人流の動きを加速しつつある。ますます社会経済活動における交通機能の重要性が高まると共に，交通システムの高度化への期待も大きくなると思われる。

増大する交通需要への対処や，移動手段のスピードアップなどのニーズへの対応は，交通機関そのものの機能アップや道路網，鉄道網などの整備が基本となるが，一方で情報通信技術を用いた交通システムの高度情報化（インテリジェント化）が，交通の抱える様々な問題を解決する手段として期待されている。その主な点をまとめると，以下のようになる。



効率のよい交通流を作ること

交通インフラ側と移動体側の個々のインテリジェント化を進めるとともに、インフラと移動体の協調によって全体としての利用効率を追求していくことである。その結果として、エネルギー問題や環境問題に対する間接的な寄与が期待できる。

● 安全性を飛躍的に向上させること

移動中に変化する気象や災害などの自然現象に対する対処，人的なミスによる事故を未然に防ぐための対処，事故が発生したときには生命を守り2次災害を防ぐための迅速な対処などを情報通信技術で支援することができる。

● 情報化社会に対応した快適な移動空間を作ること

マルチメディア社会の到来によって、オフィスの作業環境や家庭の生活環境が大きく変化しようとしているが、それに伴って交通機関利用者は移動中でも同様の情報通信環境が提供されることを望むようになる。

交通機関の中で航空，鉄道，船舶などの公共交通機関では、その性格上早くから情報通信技術による交通管制や運行管理システムが導入されてきた。一方、自動車による道路交通手段は不特定多数のドライバに運行が任されているために、公共交通機関のような中央管制的なシステムの適用が非常に難しい。その結果として、モータリゼーションの拡大に伴う渋滞問題，事故問題，環境汚染問題など至急対策が必要な社会的課題が多数発生している。こうした背景から、世界的にITS (Intelligent Transport Systems)と呼ばれる高度道路交通システムの研究開発への取り組みが始まっている[1][2][3]。

ITS の各種機能を実現するためには移動体通信技術が重要であり、国際的にDSRC (Dedicated Short Range Communication) と呼ばれる ITS 専用の移動通信システムの開発及び実用化が進められてきた。日本では、道路交通情報を提供するためのVICS (Vehicle Information & Communication System) 用の通信手段や、有料道路における自動料金収受のためのETC (Electronic Toll Collection) 用通信手段としてDSRCが実用化された。しかしながら、交通対策の中で最も

重要な「安全性を飛躍的に向上させること」に対する通信手段についてはまだ研究開発段階である。

安全走行を支援するためには、道路に沿った連続的な無線ゾーンを構築する必要があり、各種の方式提案と実験が行われている。現在 ITS に利用できる DSRC 用の 5.8GHz 帯マイクロ波や、将来利用が期待されているミリ波などの周波数は直進性が高く、安定な通信を行うためには見通し伝搬路の確保が重要である。大型車から軽自動車までの形状の異なる各種の車両が混在して走行している道路において、路側のアンテナと走行中の自動車の間で見通しを確保しながら連側的な無線ゾーンを構成することは非常に難しい。

本研究では、安全走行支援のための連続的型無線ゾーンを構築するために、DSRC の路側アンテナを道路照明灯に合わせて設置する方式を提案し、見通し伝搬路の確保に非常に有効であることをシミュレーションで評価した。更に、複数の連続した路側アンテナを共通の無線装置に接続して一つの長い無線ゾーンを構成することによって、ハンドオフによる通信効率の低下を防ぐ構成を考えた。無線ゾーンが広がるとゾーン内の車両数が増加するが、DSRC では通信スロットが限られているために一つの無線ゾーンで通信可能な車両の数が制限される問題が生じる。この問題に対して、車両台数の増減により無線ゾーンの構成を変化させる動的無線ゾーンの構成法と、車両密度が非常に高くなったときに通信スロットを複数の車両で共有・多重利用するスロット多重方式を提案して評価した。

以上の研究の結果として、すでに ETC などでも実用化されている 5.8GHz 帯の局所的な DSRC 技術を基本として連続型の無線ゾーンを経済的に構成することが可能であり、安全走行支援に要求される高品質の通信を効率よく提供できることが判った。

将来の自動運転や自動車の制御を伴う安全走行支援の機能は、ドライバーの受容性の議論や、事故の際の責任問題などの法制度の整備が必要であり、直ちに実用化できるわけではないが、本研究結果によって技術的な可能性を示すことができた。

本論文における第2章～第6章の内容は以下の通りである。

[第2章] : 研究の背景と目的

ITSにおける情報通信の役割と DSRC の実用化状況及び開発状況を説明し、本研究の意味について述べる。

[第3章] : 走行支援のための DSRC

自動車の走行支援のための DSRC に対する考え方や、従来の研究内容を概説する。DSRC と汎用移動体通信の違いを説明し、安全走行支援に求められる連続型の無線ゾーンの各種構成方法について比較検討する。日本の官民共同研究の自動走行実験で用いられた漏洩同軸ケーブルによる連続通信の方式に関する概要を示すとともに、この方式による研究が中断された理由を述べる。

[第4章] : 連続型路車間通信方式の提案

連続型無線ゾーンを構築するために、局所型 DSRC の路側アンテナを道路照明灯の基準に合わせて設置する方式を提案し、見通し伝搬路の確保に非常に有効であることをシミュレーションで評価した。更に、複数の路側アンテナを共通の無線装置に接続して一つの長い無線ゾーンを構成することによって、ハンドオフによる通信効率の低下を防ぐ構成を提案した。

[第5章] : 可変無線ゾーン構成と動的スロット多重

無線ゾーンが広がるとゾーン内の車両数が増加し、通信可能な車両の数が制限される問題を提起した。この問題に対して、車両台数の増減により無線ゾーンの構成を変化させる動的無線ゾーンの構

成法と，車両密度が非常に高くなったときに通信スロットを複数の車両で共有・多重利用するスロット多重方式を提案して評価した．

[第6章] 結論

局所的な DSRC 技術を基本として連続型の無線ゾーンを経済的に構成することが可能であり，走行支援に要求される高品質の通信を効率よく提供できることを成果として要約した．また将来に向けた研究の課題に関する意見を記載した．

第2章 研究の背景と目的

2.1 ITS の概念

ITS(Intelligent Transport Systems)は人や物の移動にかかわる「交通」が抱える諸問題をインテリジェントな方法（情報化技術等を用いる方法）によって解決し、高度化を図ろうとするものである。ITS はその名称のとおり本来「交通」全体が対象であるが、日本では「高度道路交通システム」と呼ばれており、各種の交通手段の中でも特に道路交通を対象としている[4]。道路交通が ITS の中心的な対象として取り上げられている理由は道路交通の特性にある。自動車はドア・ツー・ドアの移動手段であり、その運行（運転）も利用者が直接行うことができる。この自由度が道路交通の最大の特性であり、魅力ある移動手段である一方、多くの社会的な問題（渋滞、事故、環境破壊など）を発生させている原因にもなっている[5]。

このような問題を解決するために、古くから道路交通インフラを対象とした情報化への取り組みが行われてきた。特に日本では車両感知器などを用いて交通流を計測し、交通信号をコンピュータで制御したり、交通情報を可変情報板で提供したりすることによって交通流の改善が図られてきた。また、自動車側でもいわゆるカーエレクトロニクスと呼ばれる各種の電子化技術の導入によって、安全性や快適性の向上、排気ガスの低減などが進められてきた。しかしながら、モータリゼーションの急速な発達は、このように各々独自に進められてきたインテリジェント化では対処しきれない多くの社会問題を発生させている[6][7]。

ITS は道路インフラと道路利用者の間を情報通信技術で協調させることによって、道路交通におけるさまざまな社会的課題を解決しようとするものである。こうした道路交通に対する観点から筆者は ITS の概念を図 2.1 のようにまとめた[8][9]。すなわち、ITS は道路交通の構成要素（道路、自動車、歩行者など）の間で協調をとり、総合的に各種の社会的な問題に対処しようとするものである。

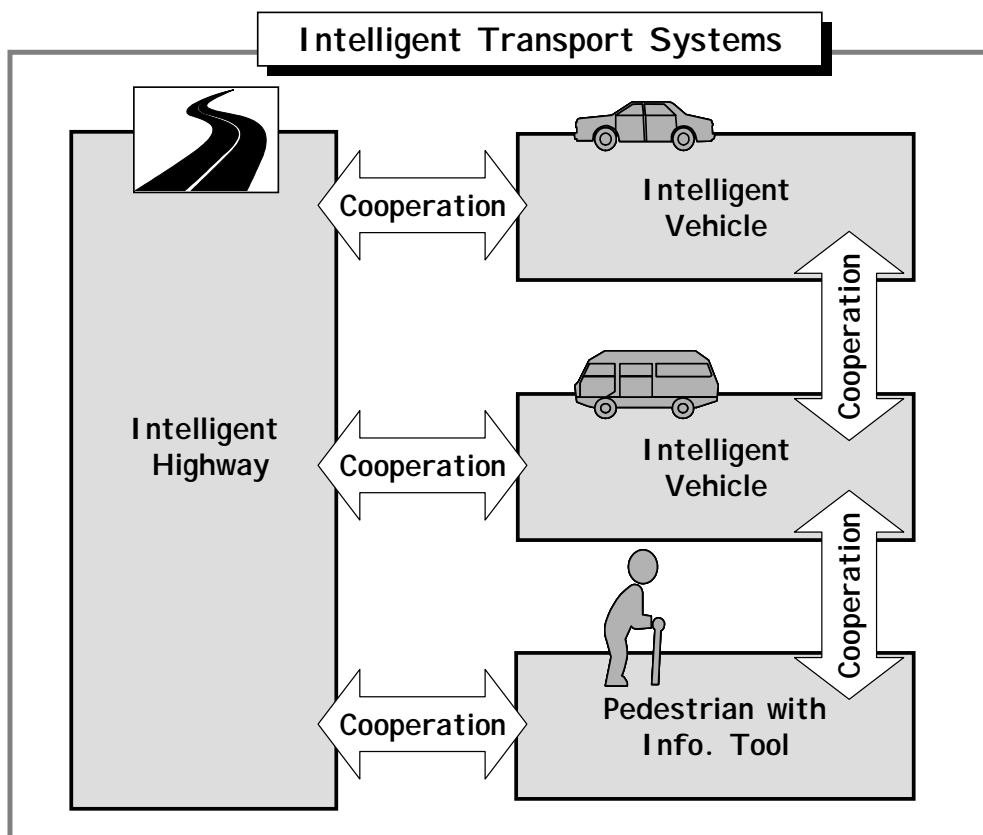


図 2.1 ITS の概念

日本の ITS 関連 5 省庁（現在の 4 省庁）は、1999 年 8 月に「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」を設定している。図 2.2 は日本のシステムアーキテクチャ（S/A）の基本になるサブシステム接続図である。この構成から機能ごとに更に詳細に展開され、物理モデルと論理モデルが策定されている[10][11].

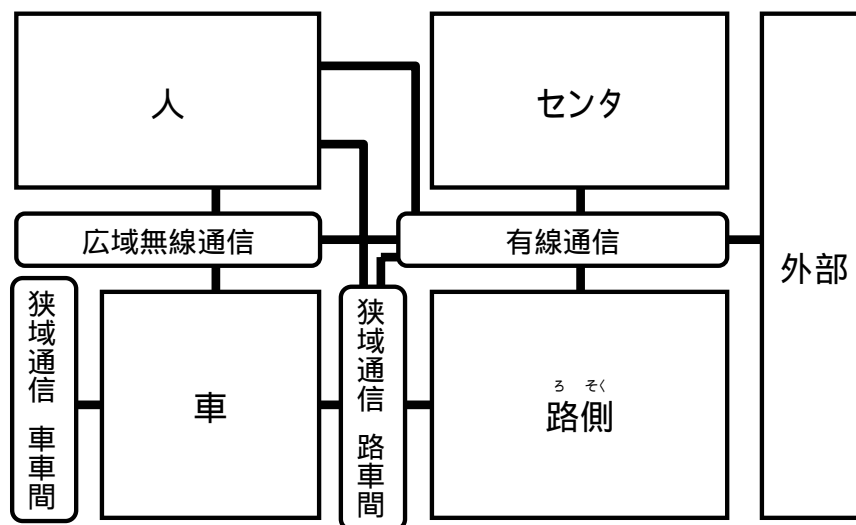


図 2.2 日本の S/A におけるサブシステム相互接続図

2.2 ITS と情報通信技術

道路や自動車、歩行者などの間の協調を実現する手段が情報通信技術である。「交通」における諸問題を扱うということは、対象が「移動」することを前提としているわけであり、関連する情報通信技術の中でも特に無線による移動通信技術が重要な役割を持っている。移動通信システム以外にも、情報の収集・処理・提供を行うためのバックボーンとなる固定通信（有線通信）ネットワークや、家庭・オフィスで交通情報を入手するための公衆通信システムなども ITS の機能を実現するために必要である。図 2.3 に ITS に利用される通信技術を分類して示す[12][13]。

移動を目的とする旅行者などが、出発前に交通手段に関する情報を入手したい場合には、公衆の通信手段（電話回線、インターネットなどの固定通信）を利用することが多い。一方、各種の交通情報を提供する道路交通管理者が情報収集や提供を行うためのバックボーンとなる通信ネットワークとして、自営の光ファイバ回線やメタル回線などの固定（有線）回線が利用されている。旅行者の移動中には、公衆の携帯電話による音声通信やパケット通信などの移動通

第2章 研究の背景と目的

信手段が必要である。道路交通管理者も、移動中の管理車両との間で情報交換を行うために自営の移動通信手段を利用している。

これらの従来から利用されてきた通信手段に対して、近年新しい ITS 専用の移動通信手段の開発が進められている。現在研究開発や国際標準化などが進められている専用狭域通信は国際的に DSRC(Dedicated Short Range Communication)と呼ばれている。DSRC は従来の音声を主体として発達してきた自動車電話や業務用連絡無線では取り扱いが難しかった局地性やリアルタイム性などを要求する ITS のアプリケーションを提供するための専用通信手段である。

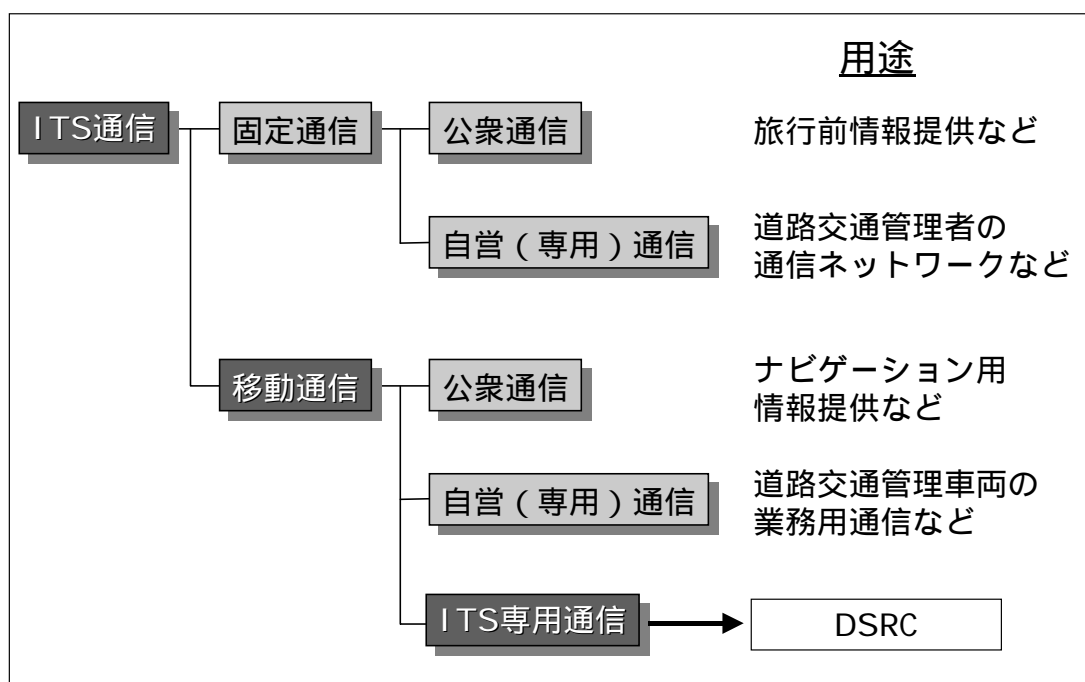


図 2.3 ITS 通信技術の体系

第2章 研究の背景と目的

筆者はDSRC技術を通信の相手によって図 2.4 ように体系的に整理した。道路と自動車間の通信を路車間通信（RVC: Road Vehicle Communication）^{ろしゃかん}，自動車同士を車車間通信（IVC: Inter-Vehicle Communication）^{しゃしゃかん}，道路と歩行者間を路人間通信（RPC: Road Pedestrian Communication）^{ろじんかん}，自動車と歩行者間を車人間通信（VPC: Vehicle Pedestrian Communication）^{しゃじんかん}と名付けた。RVCには、通信ゾーンがスポット状の通信ゾーン単独のものと、道路に沿って必要な区間を連続的に構成したのものがあ、本書では前者を局所型RVC、後者を連続型RVCと呼ぶことにする。IVCの場合には、限られたグループで構成する車群で通信する特定グループ車群IVCと、隣接して走行する不特定の車両間で通信を行う不特定車群IVCに区分できる[14][15][16]。

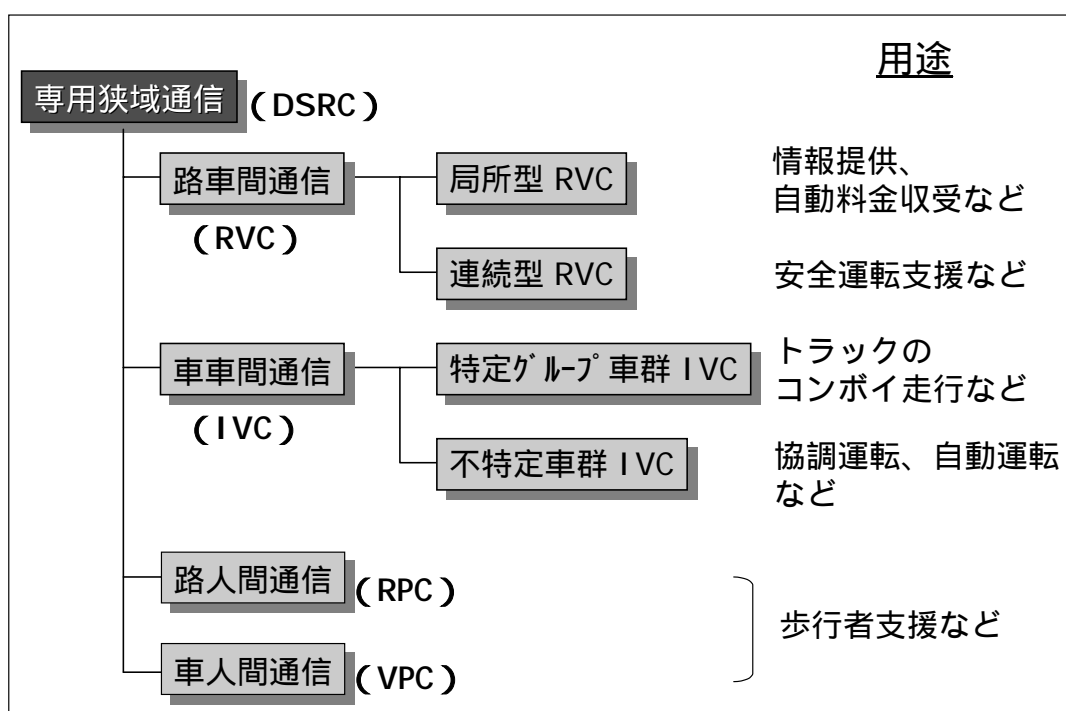


図 2.4 DSRC の体系

2.3 DSRC の開発状況

2.3.1 DSRC 開発初期の状況

「ITS」の名称は、1994年に第1回世界会議をパリで開催するのに際して日本からの提案で名付けられたものである。それまでは各国で各種のプロジェクトごとに異なった名称が用いられていた。日本で最初にITSのような機能を研究するプロジェクトへの取り組みが行われたのは1970年代までさかのぼる。これは通産省の主導で行われたCACS (Comprehensive Automobile Control System) と呼ばれる大規模プロジェクトで、現在のカーナビゲーションの基本となる経路誘導の実験が行われている。CACSでは、道路に通信用のループコイルを埋め込み、車両との間を誘導無線方式で接続した。

その後、関連する各省庁が各種のプロジェクトを推進し、それらを受けて1990年代半ばからITSとして統合された。1990年に筆者が報告した“道路～車両間 情報通信システムの開発状況” (電子情報通信学会誌) に、それまでの国内外の研究開発状況がまとめられており、その中の「路車間情報システムの概要」にはすでに現在のDSRCの基本的な考え方が示されている[17]。

(1) 路車間情報システム

路車間情報システム研究会は旧建設省土木研究所と民間25社が共同で推進されたもので、その成果として後述のVICS (Vehicle Information & Communication System)の原型となるRACS (Road Automobile Communication System)の開発及び実験が行われている[18]。

この研究の元来の目的は、走行中の自動車に対する位置情報を提供する手段の開発であった。当時はまだGPS (Global Positioning System) 衛星を利用した位置特定技術は実用化段階でなかったため、電波による位置のマーカ (電波ビーコン) を利用する方法を開発する必要があった。その後の研究の中で、電波ビーコンによる位置情報の提供だけでなく、道路交通情報の提供や個別の車両との通信手段とすることが考えられた。RACSの開発によって、CACSが1980年代に実験し実用に至らなかった経路誘導などの高度な利用が具体的に実現できることになる[19]。こうした検討の経緯を背景に、間欠極小型の電波ビーコ

ンの実験が行われた。実験用の電波には、まだ移動体通信として使用されていなかった準マイクロ波帯（1～3GHz）を用い、512kbpsの伝送速度を実現した[20]。当時としては、移動体無線通信におけるこのような高速の伝送は驚異的なものであった。

(2) 間欠極小無線ゾーンの特徴

現在の DSRC の基になる考え方は、RACS の開発段階で示されている。間欠的に配置された極小の無線ゾーンは、従来セルラ無線を中心として考えられてきた移動体通信とは大きく異なった特性を持っている。路車間情報システム研究会でまとめられた間欠極小無線ゾーンの特徴は図 2.5 の通りである[17][21]。

前述のように、電波ビーコンの初期の目的は位置情報の提供であったが、その後の GPS による位置特定技術が経済的に利用できるようになったことと、カーナビゲーション装置が電子地図を装備できるようになったために、現在ではあまり意味を持っていない。しかし、図 2.5 に示された特徴は、ITS を実現するための DSRC を考える上で、現在でも基本的に考慮しておく必要がある。情報化社会の進展で移動体通信のニーズが非常に高まっており、それに伴って電波リソースの問題が顕在化している。局所的な通信では、マイクロ波・ミリ波から光領域まで利用が可能であり、ITS 本来の機能実現のための DSRC と一般の公衆移動通信を最適に組み合わせることによって、今後の情報化ニーズに対応していくことが可能となる。

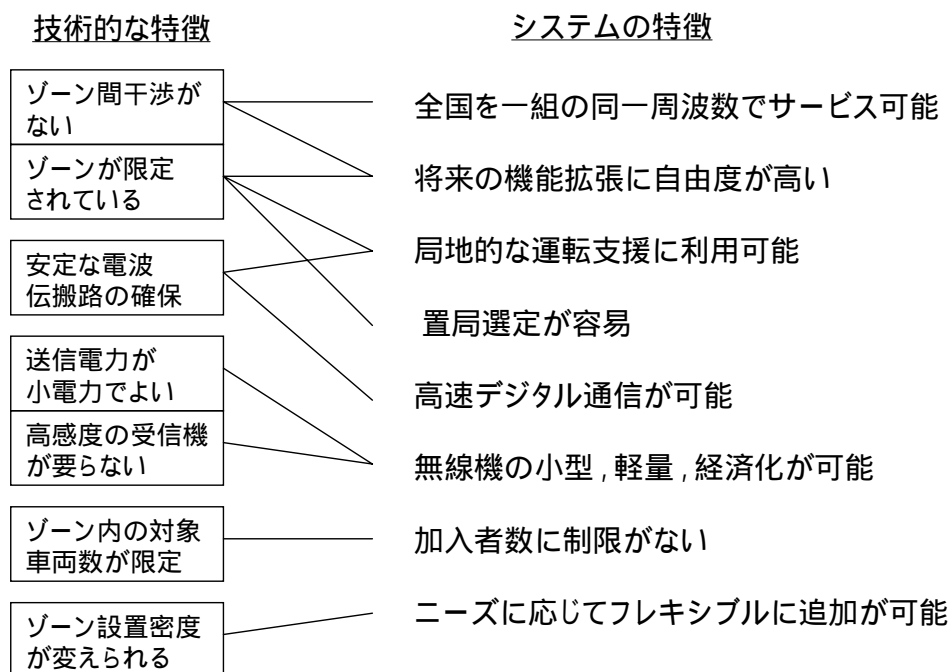


図 2.5 間欠極小無線ゾーンの特徴

2.3.2 実用化された DSRC システム

日本の政府は 1995 年 2 月の「高度情報通信社会推進に向けた基本方針」の中で ITS を推進する方針決定を行い、1995 年 8 月に「道路・交通・車両分野における情報化実施指針」として 9 つの開発分野を決めた。さらに 1996 年 7 月「高度道路交通システム (ITS) 推進に関する全体構想」で 20 の利用者サービスを設定して実用化を進めている[22].

表 2.1 に日本の ITS 関連 5 省庁 (現在の 4 省庁) が設定した ITS の開発分野と利用者サービスを示す。

表 2.1 ITS の開発分野と利用者サービス

開発分野	利用者サービス
1. ナビゲーションの高度化	(1) 交通関連情報の提供 (2) 目的地情報の提供
2. 自動料金収受システム	(3) 自動料金収受
3. 安全運転の支援	(4) 走行環境情報の提供 (5) 危険警報 (6) 運転補助 (7) 自動運転
4. 交通管理の最適化	(8) 交通流の最適化 (9) 交通事故時の交通情報の提供
5. 道路管理の効率化	(10) 維持管理業務の効率化 (11) 特殊車両などの管理 (12) 通行規制情報の提供
6. 公共交通の支援	(13) 公共交通利用者情報の提供 (14) 公共交通の運行・運行管理支援
7. 商用車の効率化	(15) 商用車の運行管理支援 (16) 商用車の連続自動運転
8. 歩行者等の支援	(17) 経路案内 (18) 危険防止
9. 緊急車両の運行支援	(19) 緊急時自動通報 (20) 緊急車両経路誘導・救援活動支援

9つの開発分野の中でこれまでに実用化されている DSRC システムには、「1. ナビゲーションの高度化」のための道路交通情報の提供（VICS: Vehicle Information & Communication System）と、「2. 自動料金収受システム」（ETC: Electronic Toll Collection）がある。

(1) 道路交通情報通信システム (VICS)

VICSは電波による路車間通信（通称：電波ビーコン）、赤外線による路車間通信（通称：光ビーコン）及びFM多重放送の3種類のメディアを用いて、渋滞や事故・規制などの道路交通情報をリアルタイムにドライバに提供するシステムである。郵政省、警察庁および建設省が連携して1996年4月に世界に先駆けて実用化し、2003年3月にサービスの全国展開を完了した。従来のカーナビゲーションシステムの機能はデジタル道路地図を基にした目的地までの静的な経路案内システム（Static Navigation System）であったのに対して、VICSから提供される情報を利用することによって、刻々変化する道路交通環境を加えた動的な経路案内システム（Dynamic Navigation System）の提供が可能となり、ナビゲーションシステムの高度化を図ることができるようになった[23][24][25][26]。

VICSの光ビーコンは一般道の交通管制エリアに光学式車両感知器などと共に設置されている。図2.6はVICS光ビーコンの構成図であり、表2.2はその電気的仕様の概要である。

一般の道路を対象としているため走行速度は70km/hを上限としている。通信ゾーンは非常に狭く、したがって路側からの交通情報の提供は1Mbpsの高速伝送となっている。

VICS電波ビーコンは主として高速道路や交通管制エリア外の国道などに整備されている。図2.7はVICS電波ビーコンの構成図であり、表2.3はその電気的仕様の概要である[27]。前項で記述したRACS技術を基本としているが、道路交通情報の提供に限定した機能となったため伝送速度は64kbpsに設定された。

ナビゲーション用の位置情報提供に関しては、無線ゾーンが約70mの面的な広がりを持つため、その位置を正確に特定する必要がある。このため、図2.8に示すような二重変調方式が適用されている。アンテナは2面の合成アンテナとなっている。装置側では変調出力を2系統に分け、位相の180度異なる振幅変調をさらに加えて二つのアンテナからそれぞれ送出する。自動車側では振幅変調成分の位相が反転した場所を検出して位置を特定することができる[28]。

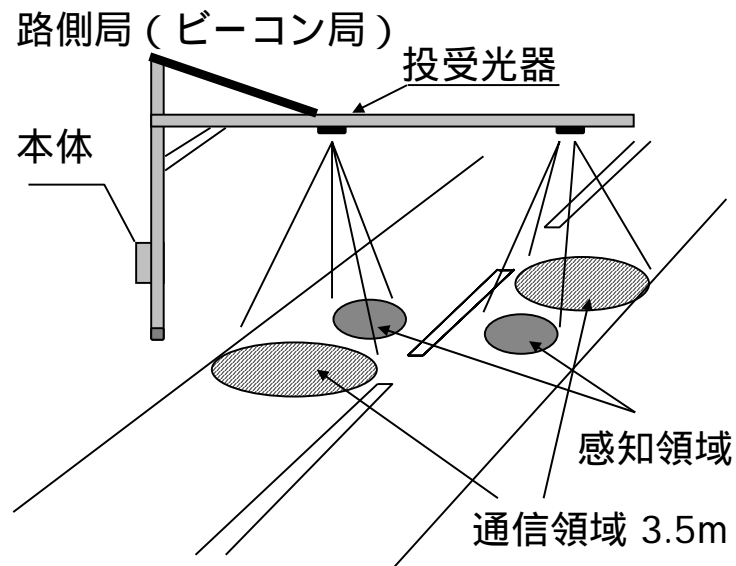


図 2.6 VICS 光ビーコンの構成

表2.2 VICS光ビーコンの電気的仕様

項 目	仕 様
通信媒体	赤外線
変調方式	パルス振幅変調方式
符号化形式	マンチェスタ
通信可能速度	0~70km/h
伝送速度	感知器→車 1Mbps 車→感知器 64kbps
伝送情報量	感知器→車 10k ^{ビット} 車→感知器 256 ^{ビット}

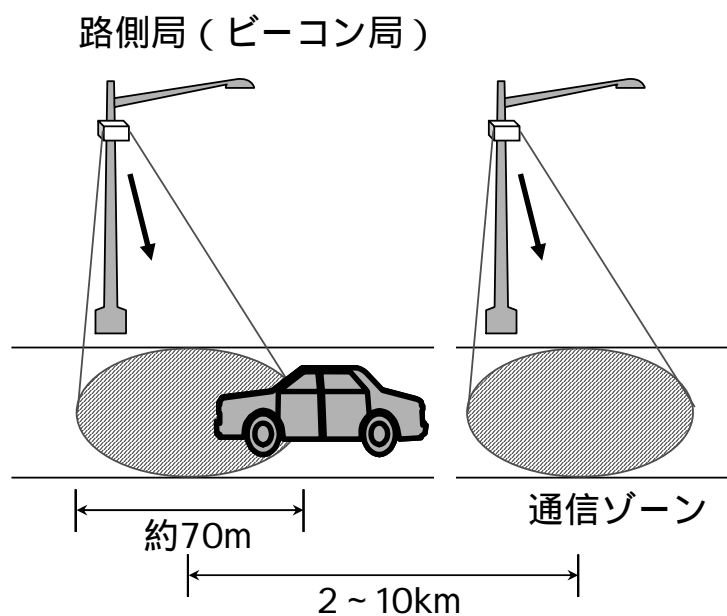


図 2.7 VICS 電波ビーコンの構成

表2.3 VICS電波ビーコンの電氣的仕様

項 目	仕 様
無線周波数	2.5GHz帯
アンテナ電力	送信装置の各出力端で10mW以下
変調方式	二重変調方式 (GMSK変調方式、振幅変調)
伝送速度	64kbps
占有周波数帯域の許容値	85kHz以下

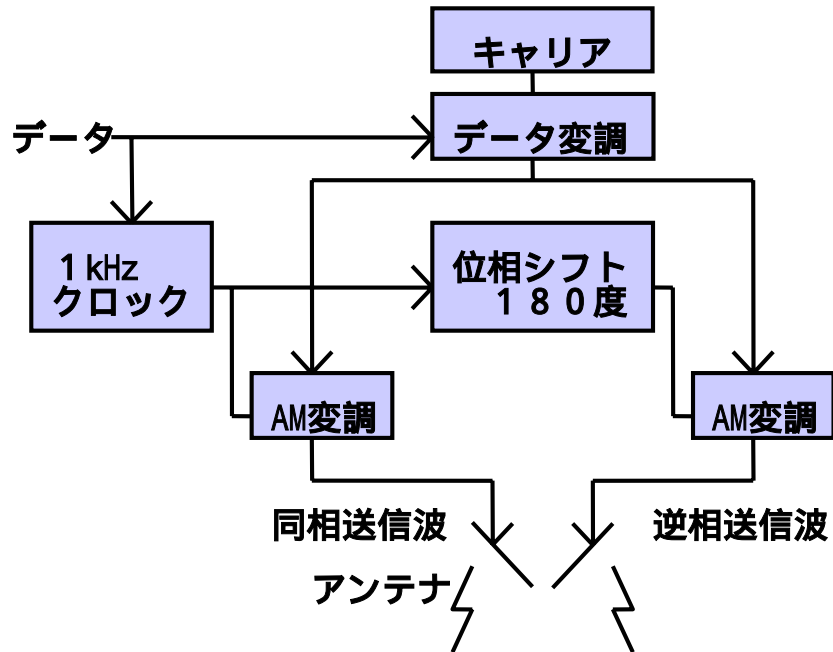


図 2.8 位置特定のための変調方式

(2) 自動料金収受 (ETC) システム

ETCは、車両に搭載した無線車載機と有料道路の料金所に設置された路側機との間をDSRCで接続することによって、高速道路などの料金所における料金徴収を一旦停止することなく自動的に行うことを可能にするシステムであり、2000年春からサービスが開始された。表2.4は電波ビーコンの電氣的仕様であり、図2.7はETCのゲート構成を示すものである[29][30][31]。

表2.4 ARIB STD-T55 電波ビーコン (ETC用) の電氣的仕様

項目	仕様
無線周波数	5.8GHz帯
送信出力	路側機 300mW 以下, 10mW 以下 車載機 10mW以下
通信方式	路側機 全二重通信 車載機 半二重通信
変調方式	ASK (Amplitude Shift Keying)
変調信号速度	1Mbps
占有周波数帯域の許容値	8MHz 以下/CH

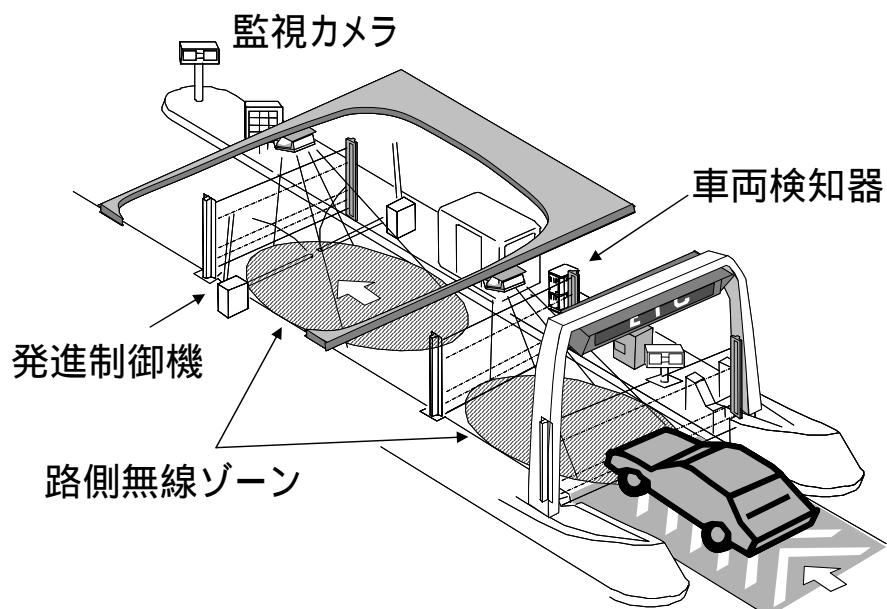


図 2.7 ETC ゲートの構成

(3) ETC用DSRCの多目的利用

日本のETC用のDSRCは5.8GHz帯の電波が割り当てられていて、電波産業会でARIB STD-T55として基準化されたものであるが、この電波帯を他のITSの目的にも利用することを可能とするために一部見直しを行い、新たにARIB STD-T75が制定されている。表2.5にSTD-T75の仕様概要を示す[32]。この新しい基準の制定によって、同じDSRC車載端末をETC以外のガソリンスタンド・駐車場・カーフェリーなどの自動決済に利用したり、車両の運行管理や各種情報の受信手段として用いることが可能となった[33]。

STD-T75ではETC用のASK変調方式に加えて、さらに効率の良い伝送が可能なQPSK変調方式も使えるようになっている。ETC以外の利用方法には以下のようなサービスが想定されている[34]。

◇物流運行管理型システム：

DSRCによって車両情報、積み荷情報、予約情報等のデータ交換を行い、トラック運行管理、物流管理、各種手続・精算の自動化等を行うシステム

◇歩行者支援型システム：

DSRCによって歩行者に地域情報の提供、経路案内・誘導、緊急通報、障害者への安全支援等のサービスを提供するシステム

◇ERP型システム：（ERP: Electronic Road Pricing）

混雑の激しい地域及びその周辺で、車の集中する時間帯における交通量を抑制するために特定地域に流入する車両に対して課金を行うシステム

◇情報提供（半静止利用）：走行速度0～20km/h

特定場所に滞留あるいは低速度で移動中のユーザが情報提供サービスやインターネット接続サービス等を受けるシステム

◇情報提供（高速走行利用）：走行速度 ～180km/h

高速で移動中のユーザが各種情報提供、運転支援等のサービスを受けるシステム

表2.5 ARIB STD-T75 電波ビーコンの電氣的仕様

項 目	仕 様
無線周波数	5.8GHz帯
送信出力	路側機 300mW 以下, 10mW 以下 車載機 10mW以下
通信方式	路側機 全二重通信 車載機 半二重通信
変調方式	ASK (Amplitude Shift Keying) QPSK (Quadrature Phase Shift Keying)
変調信号速度	1Mbps(ASK) 4Mbps(QPSK)
占有周波数帯域の許容値	4.4MHz 以下/CH

2.3.3 研究開発中の DSRC システム

(1) 運転支援のためのDSRC

日本における交通事故死者数が依然として年間1万人程度で推移していること、および今後の高齢化社会の到来を考えると、表2.1の「3. 安全運転の支援」はITSの開発分野の中で最も重要なものと考えられる。次期の路車間通信や車々間通信などのDSRCは、安全運転支援のための情報伝達手段として研究開発が進められている。

a. 走行支援道路システム (AHS)

日本におけるAHS (Advanced Cruise-Assist Highway Systems) の研究開発の推進を目的として、旧建設省 (現在の国土交通省道路局) の主導の下に、民間企業21社連携による技術研究組合 走行支援道路開発機構 (AHSRA) が1996年に設立された[35]。

AHSRAでは事故削減に効果的なサービスとして、①前方障害物衝突防止支援、②カーブ進入危険防止支援、③車線逸脱防止支援、④出会い頭衝突防止支援、

⑤右折衝突防止支援, ⑥横断歩道歩行者衝突防止支援, ⑦路面情報活用車間保持等支援という7項目を抽出し, 技術開発に対するリクワイアメントを提示している. そのもとで, AHS実現のためのKey技術として, ①道路状況を把握・検知するセンサの「収集系技術」, ②検知した情報を車両に伝える「路車間通信系技術」, ③ドライバに情報を提供する「提供系技術」の三つの技術に関する研究開発に取り組んでいる. 「路車間通信系技術」の研究開発では, 各サービスからのリクワイアメントに応じて従来のDSRC技術を応用することや, AHSの目的のための新たなDSRCの必要性などについて検討が進められている.

b. 先進安全自動車 (ASV)

AHS が道路側からの安全への取り組みであるのに対して, ASV (Advanced Safety Vehicle) は自動車側からのアプローチであり, 1991年から旧運輸省 (現在の国土交通省自動車交通局) の主導によって推進されている[36][37]. 1996年からは第2期5ヵ年計画がスタートした. 第2期のASVにおける取り組み項目には, ①予防安全技術, ②事故回避技術, ③全自動運転技術, ④衝突安全技術, ⑤災害拡大防止技術, ⑥車両基盤技術などがある[38].

ASVの研究開発はこれまで主として安全に関わる自動車単体の機能が中心であったが, これからの計画によると車両間の連携や, インフラとの連携も視野に入れている. したがって, 今後DSRCの中の車車間通信技術の利用などについても検討が進むものと思われる.

(2) シームレス通信手段としてのDSRC

最近のDSRCの研究におけるもう一つの流れは, DSRCを汎用的な移動体通信手段の一つとして位置づけ, セルラ通信などと組み合わせたシームレスな通信環境を実現しようとするものである. 理想的には自動車内で通信している人が意識することなく, ネットワーク側で自動的に最適な通信手段を選択して接続してくれる通信環境の実現を目指している. この分野では, 日本の通信・放送機構 (Telecommunications Advanced Organization of Japan : TAO) が Smart Gateway 技術と称して研究を行っている[39][40][41]. また, ITSの国際標準化機関であるISO (International Organization for Standardization) のTC204では,

CALM (Communication Air-interface Long and Medium range) の名称で総合的な通信システムのアーキテクチャを提案し、検討を進めている。

こうした取り組みは移動体通信全体に関わる問題であり、単に技術論だけでは実用化が難しい。筆者は次章で述べるように、当面 DSRC 技術の研究開発の目的を ITS に必要不可欠な専用通信手段として扱うべきであると考えている。

2.3.4 海外の状況

(1) DSRC の開発初期

日本で RACS などの開発が行われていた 1980 年代に、欧州でも経路誘導システムの大規模な実験が行われている。このプロジェクトは西ベルリンでは LISB (Navigation and Information System Berlin) , 英国では AUTOGUIDE と呼ばれ、通信手段として交通信号機に取り付けた赤外線レーザーのビーコンを用いていた。この赤外線レーザーのビーコンは双方向の通信が可能であり、経路誘導情報の提供だけでなく、走行している車両から経路走行時間を収集する手段としても考えられていた[42]。

米国はこの分野で日欧に遅れをとっていたが、IVHS (Intelligent Vehicle Highway Systems) の名称で研究開発への取り組みを強化し、国際的に ITS 世界会議の開催や国際標準化のための ISO/TC204 の組織化を戦略的に進めた。インフラの整備を必要とする DSRC の開発に関しては、国土の広大さの理由から当初あまり積極的ではなかった。安全走行を目指した自動走行の研究やデモ実験でも、主として自動車側の自律的な技術を中心に取り組んできた[43][44]。

(2) DSRC の国際標準化

1990 年代に入って、欧州では欧州経済圏の統合に伴う各種の研究開発プロジェクトが推進された。経済圏の統合によって EU 各国の自動車は自由な移動が可能になり、域内の道路交通環境を整える必要があったため、特に道路交通分野の標準化に対する取り組みが強化された。先ず国際標準化機関 ISO の欧州組織である CEN (Comité Européen de Normalisation) で DSRC の標準化作業が開始されたが、その後 ISO に設置された ITS の標準化委員会 TC204 との並行作業となった[45]。以下に標準化作業の経過を示す。

- ◇1992年 CEN/TC278/WG9 で DSRC 標準化検討開始
(局所型 RVC に関する通信プロトコルの標準化を対象)
- ◇1994年 ISO/TC204/WG15 で DSRC 標準化検討開始
(CEN 主導で開始)
- ◇1995年 CEN で OSI7 層モデルの L1(5.8GHz、850nm)、L2、L7 のドラフト
が完了 (CEN5.8GHz はパッシブ方式)
- ◇1996年 ISO に対し日本がアクティブ方式を提唱
- ◇1997年 ISO に日本から 5.8GHz アクティブ方式のドラフトを提出
- ◇1997年 ISO に米国が 915MHz デュアル方式を提唱
- ◇1997年 CEN で L1(5.8GHz)、L2、L7 が予備規格として合意
- ◇1998年 ISO で L2-LLC、L7 のみを標準化対象とすることで合意

作業の中でポイントとなったパッシブ方式とアクティブ方式の呼称は一般的なものでないが、技術的な違いは以下の通りである。

[パッシブ方式]

質問器（路側）と応答器（車載側）を組み合わせた構成で、応答器の原理は最近急速に利用が拡大している無線タグや非接触 IC カードと同様の技術である。車載機自体から直接発信する機能は持っていない。車載機は、路側から発信された電波に、車載機側のデータで変調をかけて返す仕組みになっている。路側からの電波エネルギーを利用すれば、車載機側は無電源にすることが可能である。

[アクティブ方式]

通常無線方式のことを、パッシブ方式と区分するために名付けたものであり、無線回路そのものは路側と車載機側が同等である。

欧州の標準化組織 CEN は DSRC の主たる用途を ETC としていたため、簡易な無線タグ方式を国際標準として提案してきた。これに対して日本は、RACS や VICS, ETC などの開発を通して多目的に展開可能な通信の実用化を進めてきたため、高度な処理が可能なアクティブ方式を主張した[46]。

第2章 研究の背景と目的


ISO/TC204 の場では，日本と欧州の2つの方式の議論が進められた．欧州の中でも ETC の実用化が進んでいたイタリアはアクティブ方式であったため，欧州内でも意見の相違が見られた．結果として国際標準化としての日米欧の調整はつかなかった．

以上の経過で，国際的には DSRC の物理層を標準化することは断念され，日米欧の3極が異なった方式で実用化を進めている．表 2.6 に DSRC の L1 部分に関する日米欧の仕様を比較して示す．現在 ISO では L7 層の標準化が完了し，規格として発行される予定である[47]．

米国は一部で 915MHz による ETC が実用化されているが，DSRC の開発では日欧に遅れていた．米国では 5.8GHz 帯が利用できないため，新たに 5.9GHz 帯を ITS 専用の周波数として利用する予定である[48]．具体的な方式として，急速に利用が進んでいる無線 LAN の技術を適用する方向で検討が進められている．

表 2.6 DSRC 電波ビーコンの国際比較

項目	欧州	北米	日本
周波数	5.8GHz帯	915MHz 5.9GHz帯	5.8GHz帯
通信方式	パッシブ 半二重	アクティブ パッシブ 半二重	アクティブ 路側機全二重 車載機半二重
データ伝送速度	下り500kbps 上り250kbps	下り500kbps 上り500kbps	下り1,024kbps 上り1,024kbps
プロトコル	非同期式	同期式 非同期式	同期式

 IEEE802.11aの適用検討

(3) 「安全」に対する国際的な取り組み

欧州では e-Europe 実現のための Action Plan を策定し、その中に交通事故による死者（約4万人）の半減を目標とする e-Safety 計画を位置づけ ITS を推進している。一方、米国ではニューヨーク・テロ事件の後、国家安全保障を全面的に打ち出し、SAFETEA(Safe, Accountable, Flexible, and Efficient Transportation Equity Act)計画などの飛躍的な“Public & Safety”を目指したプロジェクトが進行中である。

欧州の eSafety 計画は、EC(European Commission)の Information Society プログラムの一つに位置づけられており、2003年初めに eSafety Forum が開始された。このフォーラムには、次のような作業グループが設置されている。

Accident Causation Data

eCall Driving Group

Human-Machine Interaction

International Co-operation

Research and Development

Real-Time Traffic and Travel Information

Road Maps

eSafety 計画では、安全走行のために車車間通信や路車間通信の開発を勧告しているほか、新たに 24GHz 帯の UWB(Ultra Wide Band)方式による近距離レーダの必要性についても記載されている。

米国の ITS の通信に対する取り組みは、米国内の標準化組織 ASTM(American Society of Testing and Materials)及び学会 IEEE(Institute Electrical and Electronics Engineers, Inc.)などで行われており、前述のように DSRC の通信仕様として急速に利用が進んでいる無線 LAN (IEEE802.11a など) の方式を道路アプリケーション用にアレンジして適用することが考えられている[49]。

米国はこの成果を ISO や ITU (International Telecommunication Union) に提案し、国際標準化を進める方針である。ISO/TC204 の広域通信作業グループ (WG16) では、CALM の名称で ITS 通信の体系化を検討しており、その中で

第2章 研究の背景と目的

表 2.7 に示すような通信のアプリケーションを考えている。米国の 5.9GHz 帯 DSRC は、特に **Public/Safety** を実現する手段として CALM の作業に対する標準化の提案を行っている。

表 2.7 CALM Applications

PUBLIC / SAFETY	PRIVATE
<ul style="list-style-type: none"> • APPROACHING EMERGENCY VEHICLE ASSISTANT *1 • EMERGENCY VEHICLE SIGNAL PREEMPTION *1 • EHVICL E BASED PROBE DATA COLLECTION *3 • TRAFFIC INFORMATION *3 • CURVE SPEED ASSISTANCE *2 • STOP LIGHT ASSISTANT – INFRASTRUCTURE *2 • INTERSECTION COLLISION WARNING/AVOIDANCE *2 • COOPERATIVE COLLISION WARNING [V-V] *2 • OPTIMAL SPEED ADVISORY *1 • COOPERATIVE VEHICLE SYSTEM – PLATOON *3 • RAILROAD COLLISION AVOIDANCE *3 • INFRASTRUCTURE BASED TRAFFIC MANAGEMENT *2 • VEHICLES AS PROBES *2 • WORK ZONE WARNING *2 • ROAD CONDITION WARNING *2 • ROLLOVER WARNING *3 • LOW BRIDGE WARNING *3 	<ul style="list-style-type: none"> • ACCESS CONTROL *3 • DRIVE-THRU PAYMENT *3 • PARKING LOT PAYMENT *3 • DATA TRANSFER / INFOFUELING *3 < ATIS DATA < DIAGNOSTIC DATA < REPAIR-SERVICE RECORD < VEHICLE COMPUTER PROGRAM UPDATES < MAP and MUSIC DATA UPDATES < VIDEO UPLOADS • DATA TRANSFER / CVO / TRUCK STOP *2 • ENHANCED ROUTE PLANNING and GUIDANCE *3 • RENTAL CAR PROCESSING *3 • UNIQUE CVO FLEET MANAGEMENT *3 • DATA TRANSFER / TRANSIT VEHICLE (yard) *2 • TRANSIT VEHICLE REFUELING MANAGEMENT *3 • LOCOMOTIVE FUEL MONITORING *3 • DATA TRANSFER / LOCOMOTIVE *3 <p>Internet Applications</p>
<ul style="list-style-type: none"> • LOCATION BASED PROBE DATA COLLECTION *3 • TRANSIT VEHICLE DATA TRANSFER (gate) *3 • TRANSIT VEHICLE SIGNAL PRIORITY *1 • EMERGENCY VEHICLE VIDEO RELAY *1 • MAINLINE SCREENING *3 • BORDER CLEARANCE *3 • ON-BOARD SAFETY DATA TRANSFER *3 • VEHICLE SAFETY INSPECTION *3 • DRIVER' S DAILY LOG *3 	<p>Note:</p> <p>ATIS – Advanced Traveler Information Systems CVO – Commercial Vehicle Operations</p> <p>*1 Long Range Applications (up to 1000 meters) *2 Medium/Long Range Applications (90-300 m) *3 Medium Range Application (Up to 90 meters)</p>

2.4 研究の目的

ITS の目的は、最先端の情報通信技術を用いて道路と車と人を一体のシステムとして構築し、「安全性の向上」, 「輸送効率の向上」, 「快適性の向上」を達成し、「環境保全」に資する高度道路交通システムの推進である。これらの目的の中で、前項に記載のように国際的に「安全」への取り組みが強化されている。図 2.8 は日本の交通事故に関する統計を示すもので、交通事故の発生件数は自動車の保有台数の増加と比例して年々増加し、最近では約 100 万件に達している[50]。

このような背景から、日本としても「安全性の向上」にかかわる ITS 機能の開発が非常に重要と考えられる。これまでの ITS への取り組みはナビゲーションの高度化や ETC の開発が先行しているが、これらの機能は間接的に事故の軽減に役立つものの、直接的に事故件数を低減させるものではない。ITS による「安全性の向上」のために、走行支援機能を早期に実用化するための開発を推進しなければならない。

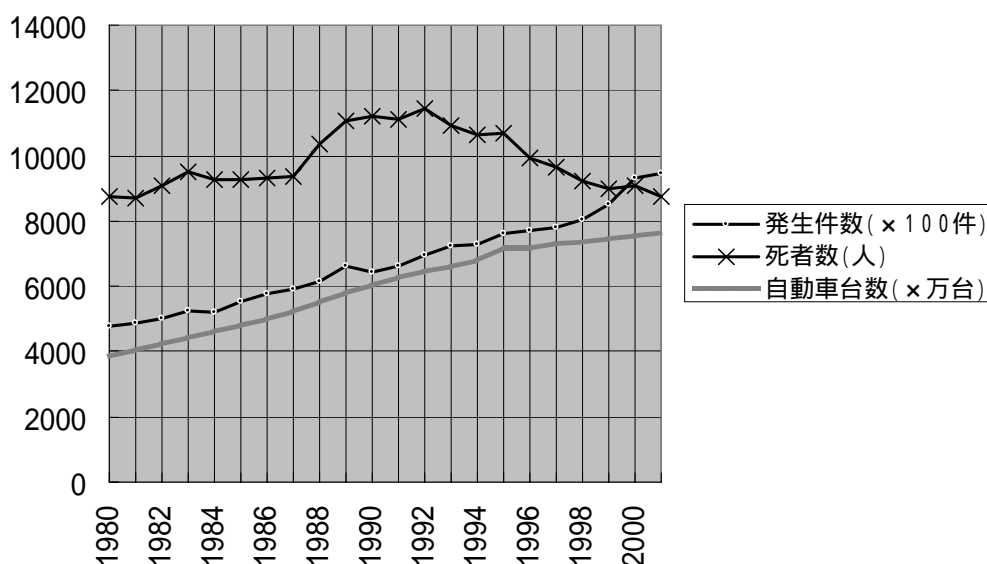


図 2.8 日本の交通事故発生件数

日本の DSRC はすでに VICS と ETC に利用されていて、そのための車載機は急速に普及している。また、ITS のために 5.8GHz 帯の電波割り当て基準も整備され、国際的にも ITU で認知されている。一方、前項に記載した表 2.7 の CALM の機能実現のために、現在国際標準化の場で Public/Safety を含む総合的な通信に関する検討が進められている。日本としてもこうした国際標準化作業に積極的に貢献していかなければならないが、すでに ETC 端末が 200 万台（2003 年 12 月 14 日現在）を突破して急速に普及している状況から、ARIB STD-T75 に準拠することで提供可能な走行支援機能から早期に整備を進めることが現実的である。CALM などの国際的な研究開発に対しては、日本の次世代の ITS 総合通信手段と位置づけて、これまでの実用化の実績や走行支援の研究開発に基づく国際貢献活動を推進する必要がある。

日本の走行支援システムの研究開発は官民が協力して進めており、2.3.3 項に記載したように事故削減に効果的な 7 項目のサービスの実現を目指している。そのためには、走行中の車両の前方の状況をリアルタイムに収集し伝達するための新しい通信手段が必要である。通信手段への要求内容の中で、従来の DSRC 技術では不十分と思われる項目は以下の 3 点である。

- 運転支援のために必要とされる区間で、連続通信が可能であること。
- 通信の信頼性が十分確保できること。
- 通信ゾーン内の全ての車両に情報が伝達できること。

これまで実用化された ETC を初めとする DSRC 技術は、局所的な用途のために通信ゾーンが約 30m となっている。AHSRA の研究報告によると、走行支援のための路車間通信設備に要求される通信領域は、自動車専用道路で 600m 以上、一般道路で 420m 以上が必要とされている。

通信の品質についてはまだ公表された明確な目標値がない。一般的な通信品質の尺度としては、平均的な誤り率が用いられることが多いが、走行支援のための情報の量はそれほど大きなものでなく、平均的な誤り率よりもバースト的な欠落が問題となる。連続して通信が不能な状況にならないければ、情報に冗長性を持たせることで誤りを改善することが可能である。したがって、通信ゾー

ン内の全ての車両が連続的な誤りを受けることなく通信が可能な方式の開発が必要となる。

こうした要求に対して、各種の提案や実験が行われているが、通信路の信頼性や経済性の問題、施工上の問題など実用化に向けての課題が多く残っている。走行支援機能を早期に実用化するためには車載機の普及が重要であり、既存のETCなどの局所型 DSRC との共用を考えなければならない。

以上から本研究は、日本における DSRC の開発及び実用化の流れを考慮しつつ、これからの安全のための走行支援システムに対して、信頼性の高い通信手段を提供するための DSRC の構成方法について提案することを目的とする。研究に際して、すでに利用が進んでいる局所型の DSRC との共用を十分考慮することと、路側設備の整備に対する B/C (Benefit/Cost) の視点を重視した実現可能な提案をすることを前提とした。

研究の内容は大きく2つに区分される。まず、走行支援に要求される信頼度の高い連続型 DSRC を構成する方法に関して提案する。

さらに提案した構成方法を用いて、走行支援機能に要求される通信ゾーン内の全ての車両との交信を可能とする通信効率の向上策を提案し、その有効性を評価することを目的とする。

第3章．走行支援のための DSRC

3.1 汎用移動通信手段と DSRC の比較

3.1.1 自動車内で利用される情報

従来の移動通信技術は、音声通信主体の自動車電話や業務用連絡無線として発達してきた。こうした通信手段と DSRC が異なる点は、伝達する情報の内容にある。自動車内で必要とされる情報には、自動車の運転・運行に直接必要な情報とそれ以外の情報に大きく区分できる。前者はナビゲーションや安全運転支援などの運転に直接関連した情報であり Front Seat Information（または Driver's Seat Information）と呼んでいる。後者はオフィス・家庭との連絡やエンターテイメントなどの情報であり、Rear Seat Information と呼ぶ。従来の自動車電話などの通信システムは、主として Rear Seat Information に関連する情報伝達手段であった。一方、DSRC は ITS に必要な Front Seat Information を伝達するための新たな通信手段と考えることができる。図 3.1 は自動車内で利用される情報と通信手段の関係を概念化したものである。

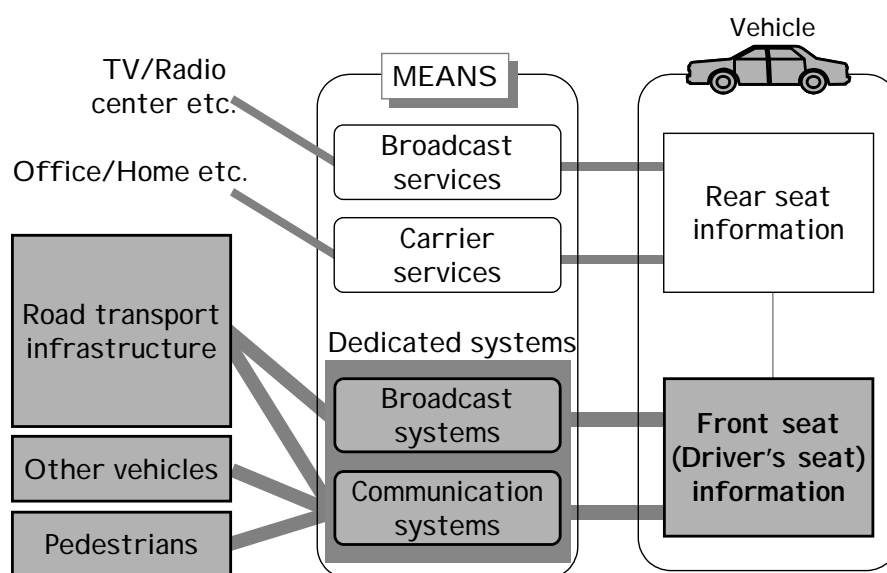


図 3.1 自動車内の情報と通信手段の関係

3.1.2 情報の特性と通信手段

Front Seat Information は、移動目的のために必要な情報（移動目的情報）と言い換えることができる。移動目的情報には、移動中の自動車に必要な目的地までのルートに関する情報や、移動の安全性に関する情報、場所に応じた課金のための情報、周辺の案内情報などがあり、いずれも移動者の現在位置にリンクした情報である。さらに、安全な移動のために直近の状況変化を知らせたり警告したりする機能ではリアルタイム性と確実性が重要となる。従来の汎用移動通信に対して、DSRC はこのような場所に依存したリアルタイム情報を確実に伝達するための手段として開発・実用化が進められている。

Rear Seat Information に関しては、最近「インターネット ITS」の呼称で多くの研究報告が行われている[51][52][53][54][55][56]。インターネット経由の情報には ITS 関連のコンテンツも含まれるが、移動中におけるインターネットの利用は本来 Mobile Internet として移動体通信全体で考えるべき問題である。したがって、DSRC の開発はまず Front Seat Information の利用を第1に考えて進めるべきである。その結果として構築された DSRC は、次の段階として可能な範囲で他の目的にも有効利用すればよい。

3.1.3 DSRC の基本特性

DSRC は、従来のセルラ無線のような汎用移動体通信手段とは異なった特徴を持っている。図 3.2 は局所型 RVC の構成と受信電力の変化に関する概念図である。路側アンテナと自動車のアンテナの距離が非常に短く、見通しによる安定した電波伝搬路を確保することができる。そのために、従来の移動体通信では利用できなかった直進性の強いマイクロ波やミリ波が使用可能であり、非常に高速の伝送路を構成することができる。一般的な移動体通信では無指向性アンテナを用い、受信機はできるだけ感度を良くして受信可能な領域を広げるように設計されるが、局所型 RVC では指向性アンテナと最低受信レベルの設定で安定な領域のみを通信に利用する。従って、通信領域内における路側と自動車のアンテナの間は、瞬間的にあたかも固定マイクロ回線の伝搬路が構成されたように考えることができる。

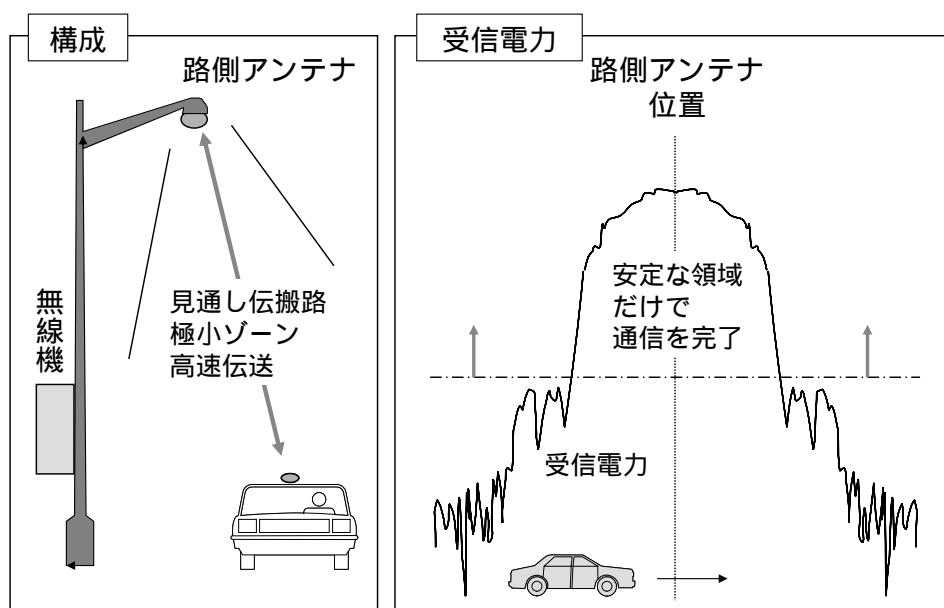


図 3.2 DSRC の構成と受信電力の変化

3.2 走行支援のための DSRC

3.2.1 走行支援機能の概念

DSRC は Front Seat Information の伝達手段であるが、特に安全走行を支援するための情報伝達機能は重要である。筆者は DSRC を利用した安全走行支援機能について説明する目的で、図 3.3 の概念図を作成し提案した。現在は自動車の運転操作に必要な全ての情報の入手を、ドライバの視覚に頼っている。夜間やトンネル内などの走行のためには、自動車のヘッドライトや道路設備による照明が視覚を補助し安全な走行を支援している。しかし、前方道路にカーブ・起伏などがあって見通しが取れない場合や、雨・霧・雪などの気象現象で視覚が遮られる場合には視覚に頼った安全走行が困難である。また、路面が湿潤状態なのか凍結しているのかなどの条件は、視覚だけでは判断できないことも多い。DSRC による走行支援情報の収集と提供は、このような視覚の及ばない範囲の状況をドライバに知らせることが第1の目的である。

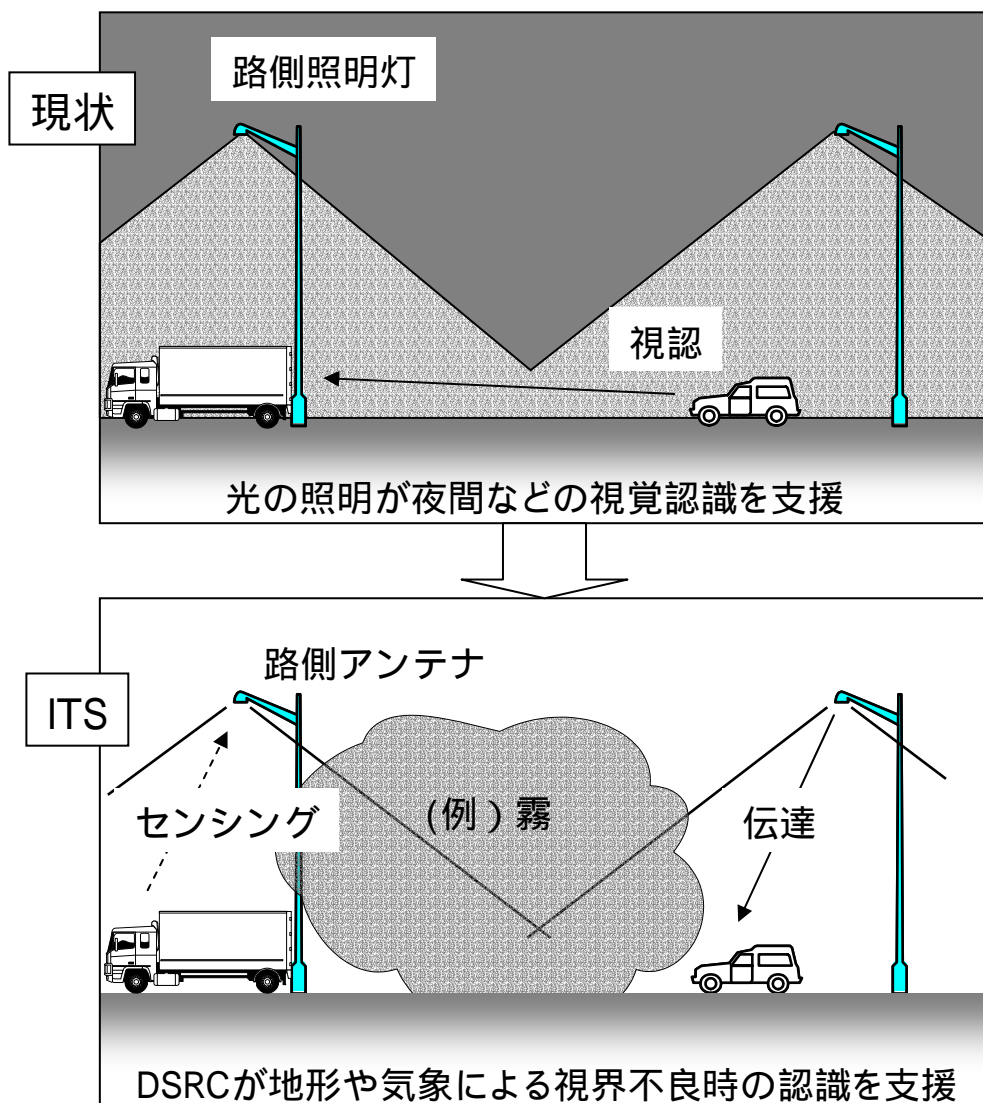


図 3.3 安全走行支援の概念

3.2.2 走行支援のレベルと支援タイミング

技術研究組合 走行支援道路開発機構（AHSRA）の研究報告によると，走行支援の支援レベルを以下の3つに分類している[57][58].

- AHS-i：ドライバの情報収集の一部をシステムが支援するレベル
- AHS-c：ドライバの情報収集に加えて運転操作の一部をシステムが支援するレベル
- AHS-a：情報収集と運転操作の全てをシステムが負うレベル

究極の走行支援機能である自動運転（AHS-a）は技術的な問題だけでなく法制度面やドライバの受容性、費用対効果等の多くの課題を有するため、まだ将来に向けての検討段階である。現在の研究開発は AHS-i と AHS-c に重点が置かれている。AHS-i 及び AHS-c の支援レベルに対する走行支援の方法としては、情報提供・警報・操作支援の3段階で実施する。図 3.4 は段階ごとの支援のタイミングを示すものである[59]。

例えば見通しが悪く事故を起こしやすい地点があった場合に、支援情報を提供してからドライバが安全に停止するためには、その地点に到達する前に情報を提供しておく必要がある。図 3.4 によると、情報提供から停止までに最低限必要な距離 D_s は以下のようになる。

$$D_s = d_1 + d_2 + d_3 \quad (3-1)$$

- d_1 : ドライバの反応時間 (T_{di}) で走行する距離
- d_2 : 制動の対上がり時間 (t_1) で走行する距離
- d_3 : 制動から停止に要する距離

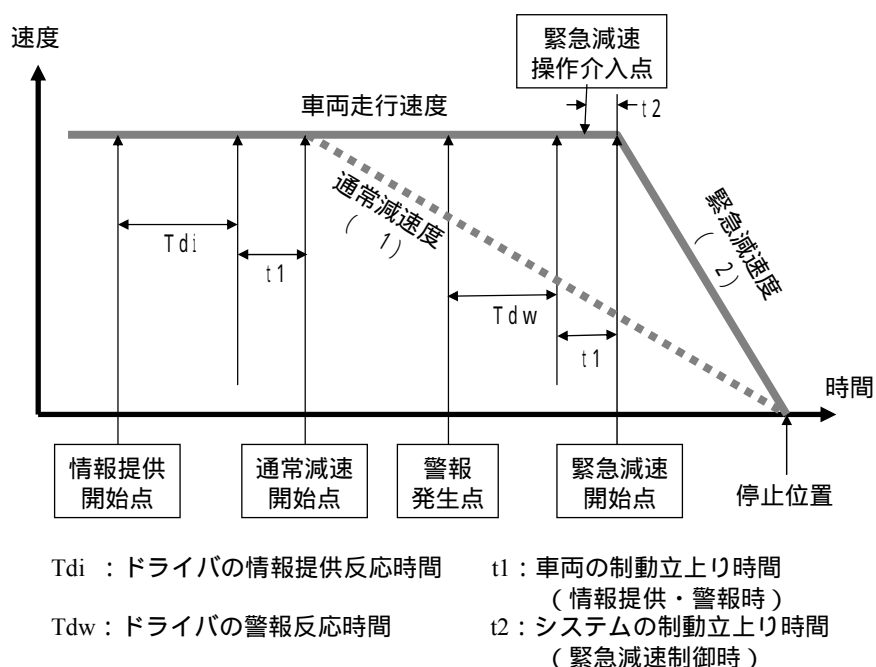


図 3.4 走行支援の段階とタイミング

こうした検討から、路車間通信設備に要求される通信領域は、走行支援を必要とする道路部分の情報収集に必要な計測範囲 (D_c) と情報提供から安全に停止するまでの距離 (D_s) を加えたものとなり、自動車専用道路(自専道)で 600m、一般道で 420m 以上が必要であると報告されている。

自専道で通信領域 600m 以上が必要とする考え方は以下の通りである[60].

- (1) 機能：前方障害物衝突防止支援
 - (2) 道路条件：図 3.5 の形状の道路
 - (3) 情報提供区間 (D_s)：(走行速度 120km/h)
 - ・ ドライバ反応時間 $T_{di}=2.65$ 秒 $\rightarrow d_1=83.3$ m
 - ・ 制動立上り時間 $t_1=0.5$ 秒 $\rightarrow d_2=16.7$ m
 - ・ 制動から停止に要する距離 $\rightarrow d_3=185.2$ m
- } 285.2m \approx 300m
- (4) 計測範囲： $D_c=300$ m
 - (5) 通信領域： $D_s + D_c = 600$ m

制動から停止に要する距離は、減速度 3.0m/s^2 の条件で計算されたものである。減速度は路面の状況やタイヤの磨耗などの影響を受けるが、ここでの前提として、路面は湿潤状態 ($\mu=0.5$ 以上) であり、通常の走行に適するタイヤを有する乗用車を対象としている。

計測範囲は道路形状に基づいて変化する。自専道における計測範囲は、400R の 1/8 周(300m)の道路形状を想定している。

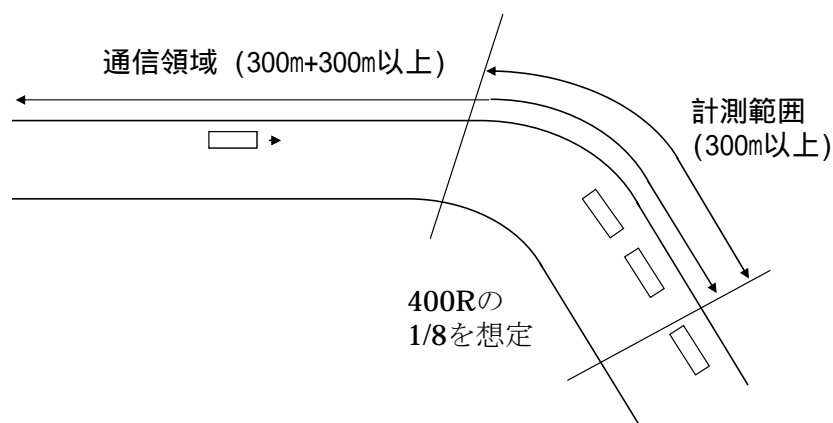


図 3.5 前方障害物衝突防止(自専道)の通信範囲例

3.2.3 走行支援用 DSRC に要求される特性

AHSRA の基本検討から、安全運転支援のための通信に要求される特性をまとめると以下ようになる。

- 運転支援のために必要とされる区間で、連続通信が可能であること。
- 通信処理の時間遅れが車両走行の制御時間に比べて十分小さいこと。
- 走行場所に応じた局所的な情報の伝達が可能であること。
- 通信の信頼性が十分確保できること。
- 通信ゾーン内の全ての車両に情報が伝達できること。

第1番目の連続通信については、前項に記載したように自専道で 600m 以上の通信区間が必要である。

AHSRA の検討によると第2番目のリアルタイム性については、人間以上の応答性能を要求されるため、インフラシステムの動作時間としておよそ 0.3sec の目標値を設定している。この目標値をインフラでの事象検出時間・情報処理時間・路車間通信時間に各々均等に 100msec ずつ配分している。

通信の品質についてはまだ公表された明確な値が示されていないが、暫定値として、AHS-iの場合で 1×10^{-3} 、AHS-cの場合で 1×10^{-4} のメッセージ誤り率とされている。しかしながら走行支援のような機能の場合には、平均的な誤り率だけで評価するのは危険である。DSRCのような移動体通信の場合の誤りは第4章で記載するシャドウイングによるバースト的な誤りの可能性がある。そのため、通信の品質をどのように評価するかは現在検討中である。当面の目標は連続的な誤りが生じる可能性の無い通信方式を検討することである。

こうした要求に対して、現在実用化されている DSRC は ETC を初めとする局所型のアプリケーションを想定して開発されたものであり、通信ゾーンは約 30m である。前述のように走行支援情報の提供タイミングから要求される通信ゾーンは高速道路で少なくとも 600m が必要であり、連続的な通信のために新しい方式の開発が必要である。

3.2.4 連続型無線ゾーン構成方法の例

道路に沿って連続的な無線ゾーンを構成するには、図 3.6 に示すように広域無線ゾーンの構成、漏洩ケーブルによる構成、及び極小ゾーンを連続的に配置する構成などの形態が考えられる。

最初の広域無線ゾーンによる方法は、携帯電話や業務用移動無線などの一般的な移動通信システムで利用されている。使用されている周波数は VHF 帯 (30～300MHz) や UHF 帯 (300MHz～3,000MHz) であり、マイクロ波などに比べ伝搬損失が少ないため長距離の通信も可能である。一方、広域ゾーンの構成は、周囲の建物や地形による反射波や散乱波によって多重伝搬路の特性を示す。伝搬路の異なる多数の波が合成されると、互いに干渉して複雑な定在波が生じ激しいフェージングとなる。また、伝搬路の路程差が伝搬遅延時間差となり、デジタル通信では波形の歪を生じるため、伝送速度を高速化することが困難となる。

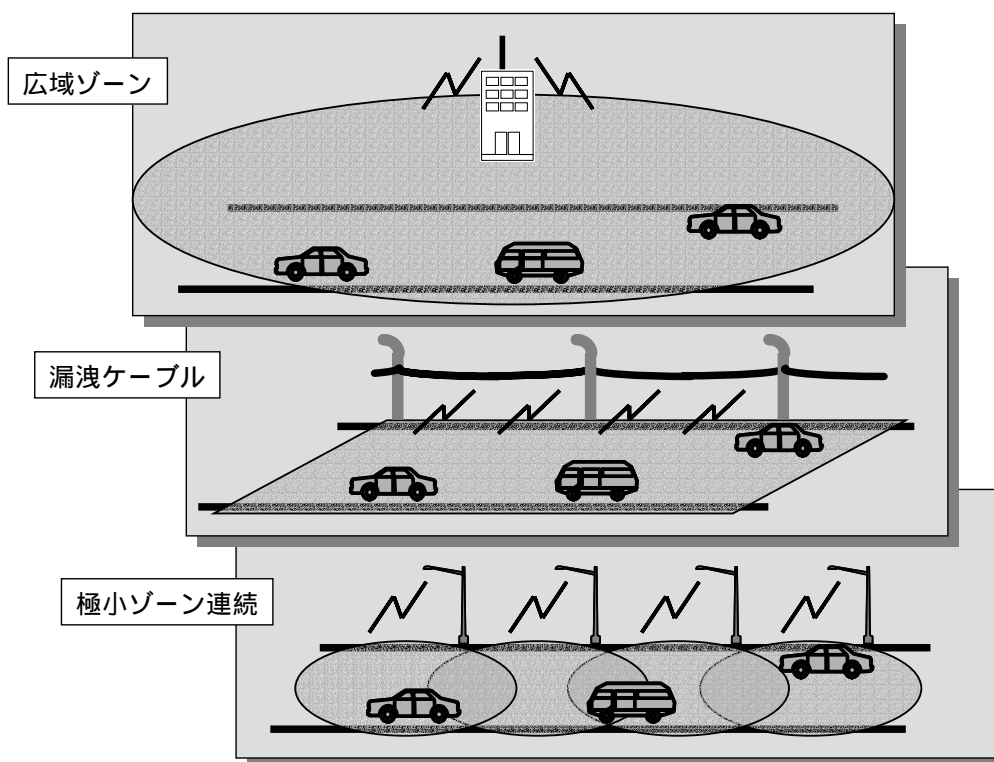


図 3.6 連続型無線ゾーンの構成方法例

携帯電話のような公衆セルラ無線サービスでは、ゾーン内の端末の通信呼に対する呼損率を定めてチャンネルの割当をしているために、呼が集中すると接続ができない状況が起こる可能性がある。さらに通信路の設定に時間を要するため、走行支援で要求されるリアルタイムな動作時間（システム全体で 0.3sec、通信として 0.1sec）を満足することが難しい。将来、走行支援を目的として専用チャンネルを設けたり、リアルタイム性を確保するようなシステム変更を行うことによって技術的に利用可能にすることも考えられるが、技術面以外にも移動通信事業として考えた場合の設備投資や通信費用の負担などの問題を解決しなければならない。

したがって、広域無線ゾーンによる構成は、前項で示した安全運転支援のための通信に要求される特性に対して、連続的な通信の点では満足するが、その他の面では課題が多く、早期に実用化が困難である。

漏洩ケーブルを用いる方法は、無線機のアンテナの代わりに漏洩ケーブルを接続してケーブルに沿った線的な無線ゾーンを構成するもので、鉄道（地下鉄、新幹線など）やトンネル、地下街などで広く利用されている。

漏洩ケーブルとしては、一般的なメタルケーブルや、専用の漏洩同軸（通称 LCX : Leaky Coaxial）ケーブルがあり、周波数などに応じて使い分けている。LCX ケーブルは、同軸ケーブルの外皮導体に電波の漏れるスリットが切られた構造になっていて、移動無線に利用される VHF 帯や UHF 帯で利用される。この LCX ケーブルを道路に沿って敷設すれば、連続的な無線ゾーン構成が可能であるため、AHS の研究開発でもいくつかの実験が行われている。

もう一つの方法が、極小の無線ゾーンを連続的に配置する方法である。極小型の無線ゾーンは信頼性や局所性の面で安全運転支援のための通信に適しているため、複数の無線ゾーンを道路に沿って並べて連続性を確保する。この方法で問題となるのは、設置工事を含めたコストの問題と通信の信頼性の関係である。アンテナの間隔を広くすればコスト面で有利であるが、せっかくの極小無線ゾーンの持つ特性が犠牲となってしまう。

3.3 漏洩同軸ケーブルを用いた連続型路車間通信

3.3.1 LCX ケーブルによる AHS 用通信の研究

日本の道路交通分野では、漏洩ケーブルは以下の目的に利用されている[61].

①一般道路

- ・ 道路交通情報の放送 (1620kHz)

②閉鎖空間 (トンネルなど)

- ・ 放送番組の再輻射と緊急放送 (中波放送, FM 放送)
- ・ 道路管理車両無線, 緊急車両無線の中継機能 (VHF, UHF)
- ・ 自動車電話の中継機能 (800~900MHz)

こうした実用化実績を背景に、新しく漏洩ケーブルを用いた AHS のための通信システムの研究開発が進められた[62][63]. 旧建設省土木研究所と (財) 道路新産業開発機構及び民間企業による協同研究の中で、1992 年に LCX ケーブルによる連続型路車間通信の基礎実験が行われた。筆者等は実験結果を 1996 年の IEEE Communications Magazine 誌に報告している[64].

3.3.2 LCX ケーブルによる無線ゾーンの特性

LCX ケーブルは図 3.7 に示すように、同軸ケーブルの外皮導体にスリットが設けられており、同軸内を伝わる電波が漏洩するような構造になっている。LCX の特性はケーブル内を電波が伝わる時のケーブル減衰量と、スロットからの電波放射量を示すケーブル結合損失で規定される。この2つの量は、結合損失の小さい (電波放射量の大きい) ケーブルはケーブル減衰量が大きくなり、結合損失の大きいケーブルはケーブル減衰量が小さくなる関係にある[65].

LCX ケーブルを用いて無線ゾーンを構成した場合、ケーブル側に接続した送信機の送信電力と受信電力の関係は以下ようになる。

$$Pr = Pt - (Lw + Lc + Ld + L\alpha) + Gar \quad (3-2)$$

Pr : 受信電力(dBm)

Pt : 送信電力(dBm)

Lw : ケーブル減衰量(dB)

Lc : ケーブル結合損失(dB)

Ld : 距離損失(dB)

L α : 接続損失等の付加損失(dB)

Gar : 受信アンテナ利得(dB)

結合損失 Lc (dB) は, ケーブルから 1.5m 離れた標準ダイポールアンテナで受信したレベル Er とその点におけるケーブルのレベル Et の比を示す値である.

$$Lc = 20 \log (Er / Et) \quad (3-3)$$

距離損失 Ld (dB) はケーブルから受信点までの距離 D (m) と 1.5m の比である.

$$Ld = 10 \log (D / 1.5) \quad (3-4)$$

一般的なアンテナからの自由空間損失はアンテナ間の距離の自乗に比例するが, LCX ケーブルの場合の空間損失 (Ld) は式 (3-4) のように単に距離に比例するだけである. このため, ケーブルに対して直角な方向の減衰が少なくなり, ケーブルに沿って安定した無線ゾーンを構成することができる. 以上から, 道路に沿って LCX を敷設することで AHS に要求される連続的で信頼性の高い通信回線が期待できる.

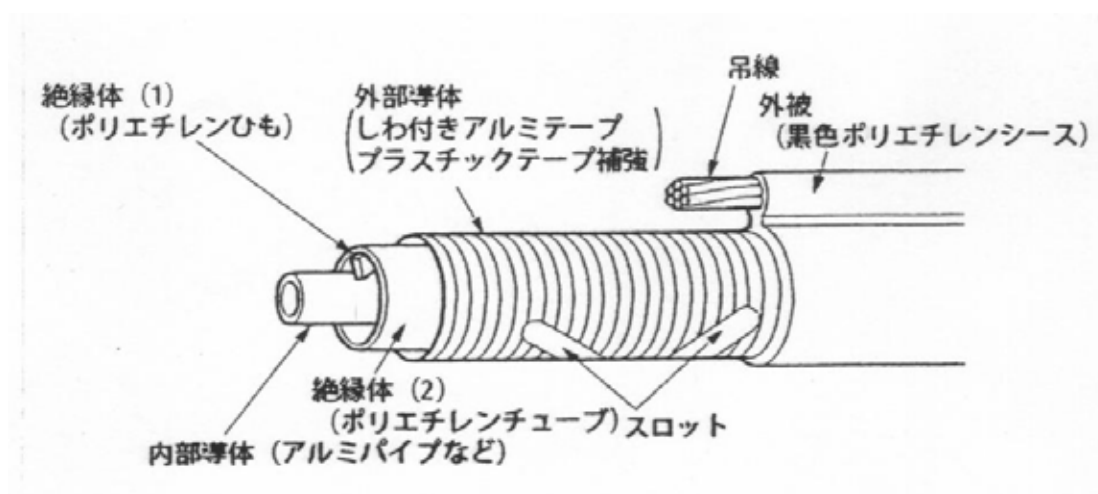


図 3.7 LCX の構造

3.3.3 LCX 通信方式の基礎実験

実験に用いた LCX の利用周波数は、VICS 電波ビーコンの周波数との共用を考慮して準マイクロ波帯 (2.6GHz) を選択した。準マイクロ波帯は、LCX ケーブルの使用が可能な上限の周波数帯である。

実験は試験用の LCX ケーブルを土木研究所のテストコース沿いに 200m 張り、電界強度分布と誤り発生状況を測定した。データ伝送速度は 512kbps とした。

実験の結果、LCX ケーブルを使用すると、テストコース上の電界強度のレベル変動が少なく、車両の走行速度に関わらず安定な通信ができること、天候(雨)にも影響されないことなど、従来の空中線を対向させた電波伝搬に比べて安定な伝搬特性が容易に得られることが確認された。図 3.8 は得られた受信電力分布と誤り率特性の例を示している。レベル変動が少なく低電界でも安定に受信ができていることがわかる。図の中で、LCX ケーブルの繋ぎ目において誤りが発生しているが、原因はケーブル間の位相特性の調整を行っていないためであった。この実験結果から、少なくとも敷設した LCX ケーブルに沿った 1 車線を AHS 専用車線として利用するのであれば、実用上十分な通信回線を提供することが可能である。

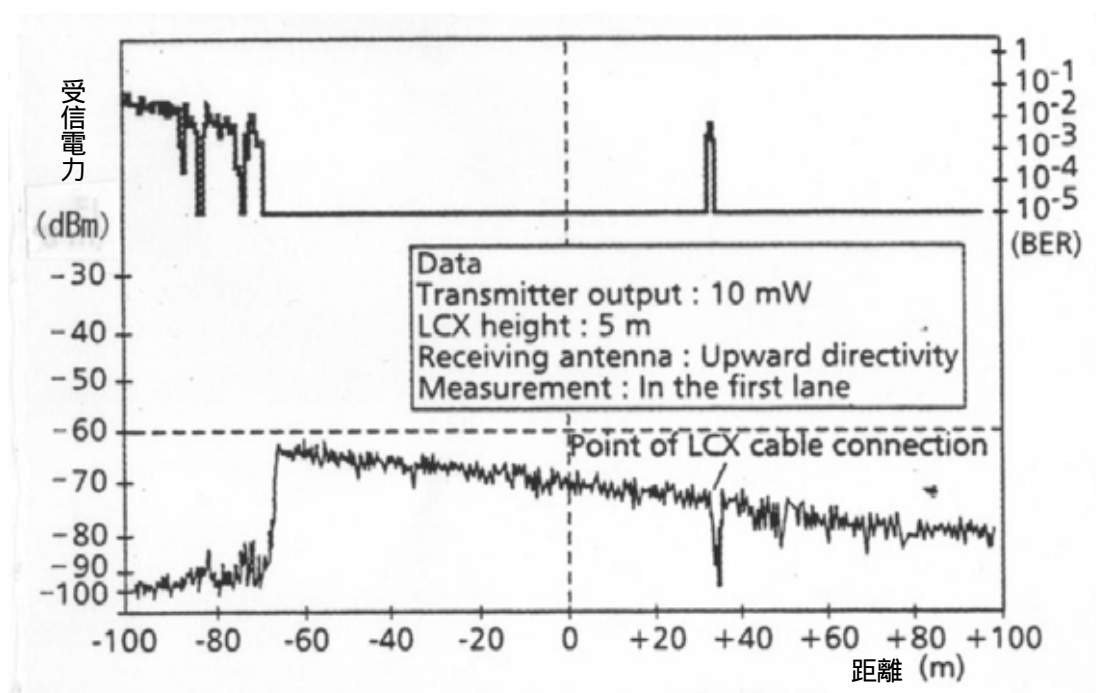


図 3.8 LCX 通信の基礎実験結果

3.3.4 LCX 通信方式を用いた自動走行実験

LCX 通信の基礎実験結果を受けて、1995 年に土木研究所のテストコースで AHS の基礎的な機能に関する公開実験が行われ、次の年 1996 年には供用前の日本道路公団上信越自動車道で 11 台の車両による AHS のフェージビリティ実験が行われた。これらの走行実験には、前述の 2.5GHz 帯の LCX による通信システムが用いられている。上信越道における実験システムの構成を図 3.9 に示す[66][67].

上信越道における AHS 公道実験の内容は以下の通りである。

(1) 自動走行機能

LCX からの指示速度と車両に搭載されたレーダによって車間制御を行いながら 11 台のプラトーン走行を行った。

(2) 安全走行システム

- 上限速度保持機能

LCX から送られる限界速度情報を超えると警告を与えたり、自動ブレーキにより限界速度まで減速する機能。

- 指示速度対応オートクルーズ機能

LCX から送られる上限速度に応じて、オートクルーズの設定速度を変更してクルーズする機能。

- 車線逸脱警告機能

道路に設置された磁気ネイルや白線を検知することにより車両が車線を逸脱しそうになるとドライバに警告を与える機能。

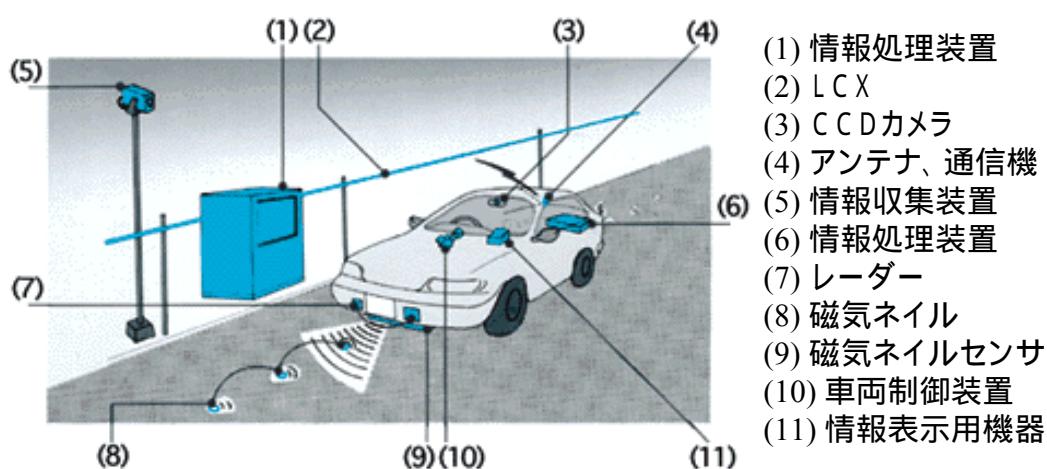


図 3.9 AHS フィージビリティ実験の構成

3.3.5 LCX 通信方式の問題点

道路に沿って連続的な無線ゾーンを構成する方法として、LCX 通信の利用は技術的に見て非常に有効であることが判ったが、具体的な実用化を考えた場合、以下のような大きな問題点を有している。

(1) 電波割り当て上の問題

ITS に関する国際標準化機関として ISO/TC204 が設けられ、作業グループ WG15 では DSRC の国際標準についての審議が行われている。その審議の中で、DSRC に使用する周波数に関して、日本は VICS で実用化された 2.5GHz 帯の準マイクロ波を国際的に提案した。これに対して欧州では 2.5GHz 帯はすでに使われている国が多く、欧州全体で利用可能な周波数帯として 5.8GHz 帯のマイクロ波を選択した。

こうした国際的な動きを背景に、日本では ETC の開発段階で新たに 5.8GHz 帯を割り当てることとした。2.5GHz 帯も 5.8GHz 帯も ISM Band (Industrial, Scientific and Medical Band) であるが、特に 2.5GHz 帯は電子レンジや医療機器に使用されていて、フィールド雑音も多い。そこで 5.8GHz 帯を今後の ITS 専用周波数とすることにしたのである。

3GHz 以上のマイクロ波帯を使用することになると、従来の漏洩同軸ケーブル技術ではケーブル損失が大きくて使用できないことになる。5.8GHz 帯の伝送路としては導波管が必要になる。漏洩導波管に関する研究も一部で行われているが、まだ開発段階で取り扱いが難しく、技術上の問題以外にも施工上の問題や経済性の問題が残っている。

筆者は DSRC に最適な電波として将来ミリ波の利用を考えているが、ミリ波では更に漏洩ケーブル方式の構成が難しくなる。

(2) 一般道への敷設

漏洩ケーブルは道路に沿って高い位置に敷設しなければならないが、高速道路のような自動車専用道路の直線部分は別として、一般の道路では構造が複雑で配置方法が容易でない。LCX を敷設する場合に、十分な強度を持った支柱を新たに設置することも困難である。すでに実用化されている路側通信（交通情報を提供する 1,620KHz の路側放送）の場合も、自動車専用道路では漏洩ケーブルが用いられているが、一般道路では無線基地局のアンテナから発信している。

(3) 道路景観上の問題

道路に沿った高い位置に太いケーブルが敷設されている状況は、道路の景観上も非常に問題である。高速道路の防音壁のような構造物に取り付けたり、トンネルの中で使用する場合は問題ないが、一般の道路ではケーブル地中化の施策に逆行することになり施工が困難である。

将来の自動運転を実現するための手段として、漏洩ケーブル方式は非常に有効な手段と考えられる。漏洩導波管技術の開発も進められているので、上記(2)や(3)の問題の無いトンネル部分には漏洩ケーブル方式の適用が最適である。しかし漏洩ケーブル方式を一般のオープン道路に適用することは、上記問題点があり非常に困難である。したがって、こうしたオープン道路を対象として、3.2.5項で示した連続型路車間通信の構成方法の中で残っている、極小の無線ゾーンを連続的に配置する方法についての研究開発を推進する必要がある。

第4章 連続型路車間通信方式の提案

4.1 局所型 DSRC とシャドウイング

第3章の検討結果から、連続型無線ゾーンの構成方法として極小無線ゾーンを連続的に並べる方法を選択する。極小無線ゾーンとしては、ETCなどで利用されている局所型 DSRC を利用することが現実的である。局所型 DSRC を連続的に配置する場合に基本的に検討しなければならない課題がシャドウイングである。シャドウイングとは、路側アンテナと車両の間の電波伝搬路に他の車両や障害物が存在することで電波が遮られて、通信に影響を与える現象である。現在の ETC で用いられている 5.8GHz などのマイクロ波や将来利用が期待されているミリ波では回折伝搬が期待できないため、シャドウイングは通信品質に大きく影響する。またシャドウイングはごく短時間の場合もあるが、システムの構成方法によっては大型の車両の陰の影響で比較的長時間にわたる通信遮断につながる可能性もあり、安全走行支援情報などを取り扱う場合の大きな問題となる。

連続型 DSRC による路車間通信システムを構成する際には、以下に示すような近隣の車両や障害物によるシャドウイングが考えられる。

- 前後車両のシャドウイング

図 4.1 に、小型車が前後の大型車両によって受けるシャドウイングの様子を示す。この図のように車両上部に車載アンテナを配置した場合にはシャドウイングに対して条件の良い配置となるが、図のように極端に車間距離が狭くなると、小型車両が前後の大型車両の陰に隠れてしまう状況が発生する。

また図 4.2 のように追い越し車線側にいる前後車両に関するシャドウイングも起こると考えられる。追い越し車線の場合は大型車両の幅が小型車両の通信に影響を与える。

● 隣接車線に関するシャドウイング

図 4.3 に、走行車線側に大型車両、追い越し車線側に小型車両が並走している場合のシャドウイングの様子を示す。アンテナの高さが十分でない場合には、小型車両は大型車両のシャドウイングの影響を受け、電波を受信できない状態になる。

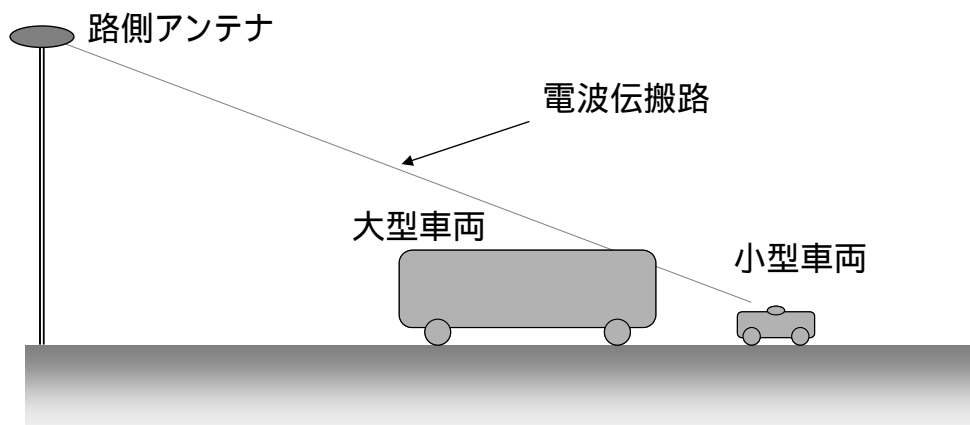


図 4.1 前後車両によるシャドウイングの例 1

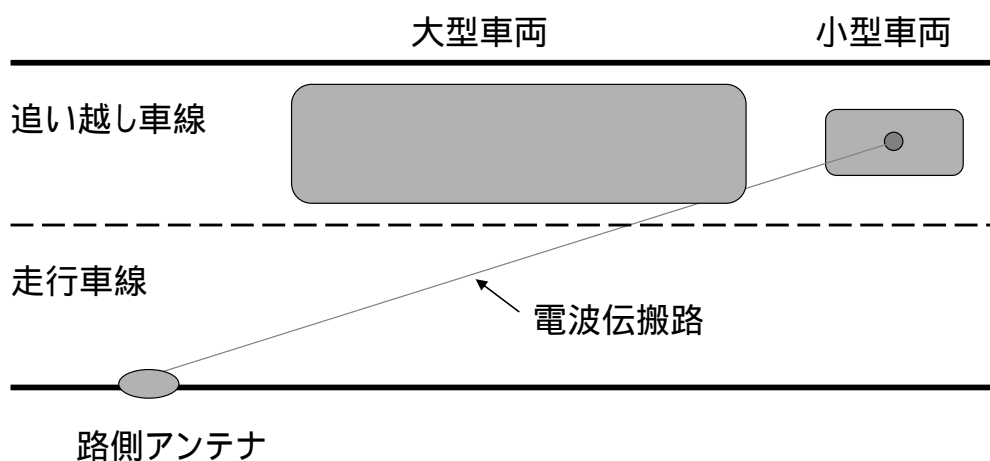


図 4.2 前後車両によるシャドウイングの例 2

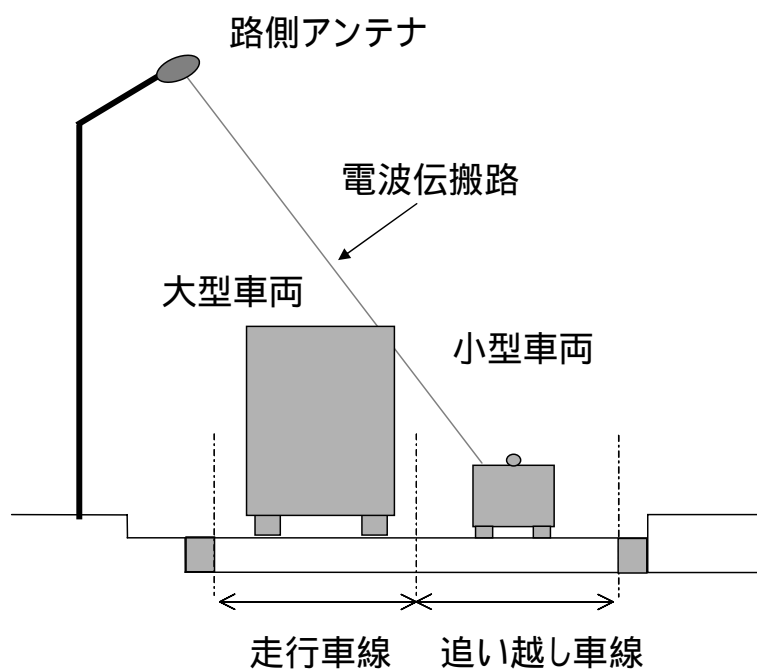


図 4.3 車両の並走によるシャドウイングの例

- 道路標識・看板・街路樹によるシャドウイング

道路には道路標識や行き先案内の看板などが設置されている。路側アンテナの設置条件によっては、車両がこうした設備や街路樹などの陰になってしまい、電波を受信することができない状態も発生しうる。

4.2 研究開発状況と問題点

局所型 DSRC を連続的に配置する無線ゾーンの構成に関しては、走行支援道路機構 (AHSRA) や電波産業会 (ARIB) の研究会で検討が進められているほか、5.8GHz のマイクロ波やミリ波を用いたいくつかの研究報告が行われている。これらの研究で考えられている無線ゾーンの構成は図 4.4 のようなもので、アンテナ間隔は 100m、アンテナの指向性は自動車のフロントに対向するようになっている[68].

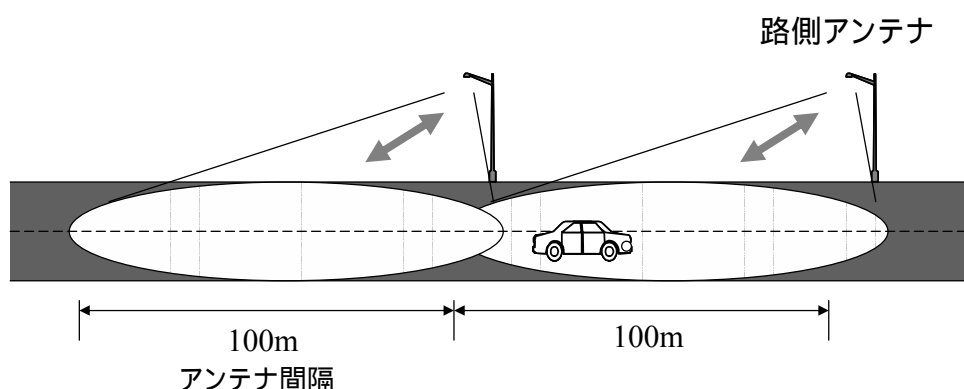


図 4.4 従来の無線ゾーン構成の考え方

アンテナの指向性が車両のフロントを向いているのは、ETCの構成に準じたためである。一方、アンテナ間隔を100mとしている根拠はあまり明確でない。前節で述べたシャドウイングを考えると、アンテナの設置間隔を密にし、高さを高くすれば通信の信頼度は良くなるが、設置コストが増大する。アンテナ間隔100mの値は通信の信頼度と経済性の両面からこの程度が適当と考えられたものと思われる。

しかし、図4.4の構成には以下のような問題点がある。

- (1) 路側アンテナを取り付けるための支柱やガントリを設置する場合を考えると、アンテナ高は約5m~10m程度と想定される。この場合、路側アンテナの直下を通過した車両から見て、交信可能な次の路側アンテナとの仰角が非常に小さくなる。当該車両と路側アンテナの間に大型車両が存在すると、シャドウイングによる回線断が生じる確率が高い。
- (2) 路側アンテナの指向性が道路に対して平行に近くなるため、路面の反射波が非常に遠くまで到達し、干渉波として他の無線ゾーンに影響を与える恐れがある。

この問題点に対して、本研究では基本的な考え方を以下のように整理した。

- (1) 路側アンテナの間隔及び高さは、シャドウイング確率の評価に基づいた根拠のあるものとする。

- (2) 路側アンテナの指向性は真下方向とし、ゾーン間の干渉を少なくすること。
- (3) 車載アンテナはルーフ上に取り付け、指向性を真上方向として路面反射などの影響を避けると共に、路側アンテナとの見通し確率を高くすること[69].

車載アンテナの設置場所や指向性についてはさらに議論が必要である。初期のETCユニットは、既存の車両に後から取り付けたものであり、主としてフロントのダッシュボードに設置されている。このため、ETC用のアンテナが路面や構造物からの反射波の影響を受けやすいことも報告されている[70][71]。また、そのための対策として、アンテナの指向性をコントロールする技術の研究[72]も報告されているが、アンテナをルーフ上に取り付けられれば、安定な通信が期待できる。

一方、自動車のデザイン上の自由度が無くなるとの意見も予想される。しかし、ITSのためにDSRCに割り当てられた5.8GHz帯や、将来利用が想定されるミリ波などの電波は波長が非常に短いため、従来の放送受信用のアンテナなどと比べて非常に小型であり、デザイン上の制約は少ない。

いずれにしても、走行支援の機能はこれまで実用化されたITSの機能と異なり、「安全」のためのものであり、自動車本体の設計時点からもっとも確実な情報伝達を可能とする構造を考えるべきである。

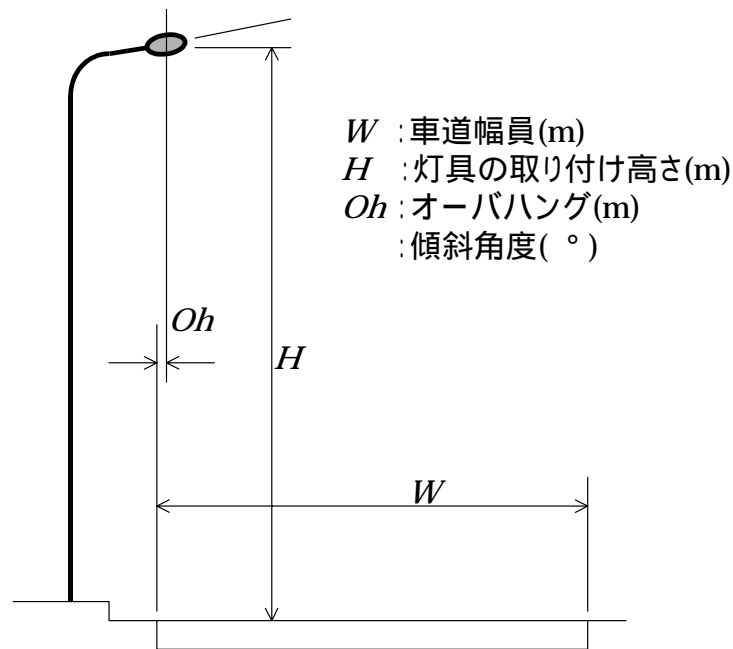
4.3 道路照明柱を利用した無線ゾーンの構成方法

ITSの国際標準である5.8GHz帯によるDSRCを用いて無線ゾーンを構成する場合には、電波の直進性が高いため、直接波による見通し内伝播路を確保することが非常に重用である。そのためにはシャドウイング発生確率の少ない連続型路車間通信システムを構築しなければならない。こうした背景から、シャドウイングの問題を解決し経済的に優れた連続型路車間通信を実現するために、道路照明の設置基準に着目した連続無線ゾーンの構成方法を提案する[73].

4.3.1 道路照明施設の設置基準

道路の照明はできる限り影を少なくかつ必要な照度が得られるような基準によって設置されている。もし、照明柱の照明具と DSRC 路側アンテナを一体化した構成がとれば、シャドウイング確率の低減と経済性を両立させる面で有利である。

道路の照明設備は、道路照明施設設置基準で設計されている。設置基準では、図 4.5 のような道路の断面方向から見た灯具の配置と各パラメータが定められている[74]。



灯具 1 灯あたりの光束(lm)	H (m)	Oh (m)	(°)
15000未満	8以上	-1 Oh 1	5以下
15000以上30000未満	10以上	但し発光部分が0.6m以上の灯具は	
30000以上	12以上	-1.5 Oh 1.5	

図 4.5 道路照明の設置基準

4.3.2 見通し条件の幾何学的検討

道路照明灯の位置に路側アンテナを取り付ける方法がどの程度意味があるかを確認するために、路側アンテナと車載アンテナとの見通し条件に関する幾何学的な評価を試みた。路側アンテナの高さ（H）は図 4.5 のパラメータ表から 12m とし、道路の幅（W）は 3.5m の 2 車線道路を想定する。路側アンテナの設置間隔は 36m，走行車両は大型バス（幅 2.5m，高さ 3.8m，長さ 10m）と小型乗用車（幅 1.4m，高さ 1.3m，長さ 3m）の組合せとする。

(1) 第1車線の検討

図 4.6 のように、隣接した 2 箇所の路側アンテナの間の中央付近にモデル小型車両があり、前後にモデル大型車両が挟んで走行しているときがもっとも厳しい条件となる。この場合、小型車と大型車両の間の距離と見通しとの関係は図 4.7 のようになる。隣り合った路側アンテナの中間点で 2.7m 以上の車間距離があれば、シャドウイングにはならない。

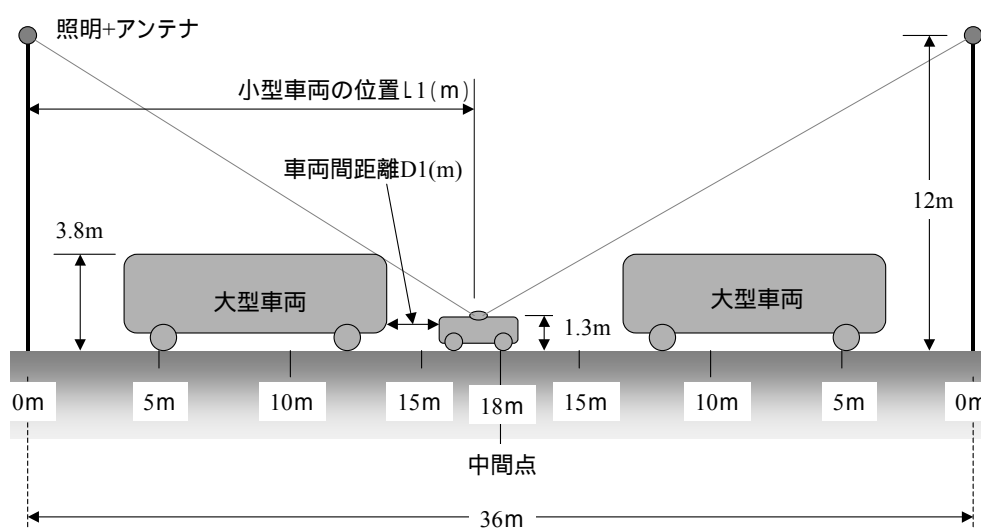


図 4.6 第1車線の見通し検討

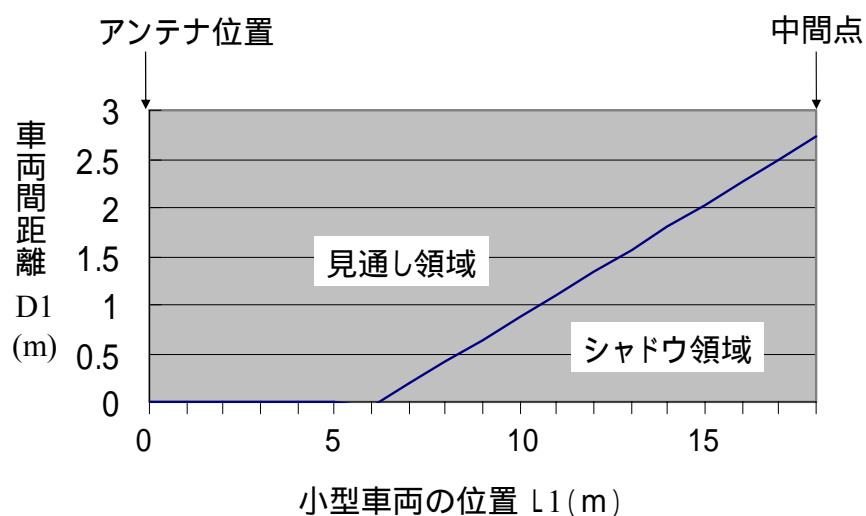


図 4.7 第 1 車線の見通し条件

(2) 第 2 車線の検討

4.1 項の図 4.8 に示したような、第 1 車線に大型車、第 2 車線に小型車が並走している時の小型車側に対するシャドウイングは計算上問題とならないことが判った。

第 1 車線の場合と同様に大型車に挟まれて走行する小型車が問題となる。第 2 車線の場合は大型車の高さ方向よりも幅方向が見通しに対して主導的となる (図 4.9)。この場合、小型車と大型車との距離と見通しとの関係は図 4.10 のようになる。やはり隣り合った路側アンテナの中間点でもっともシャドウイングの可能性が高くなり、車間距離が 2.8m 以下になると影響が出ることになる。

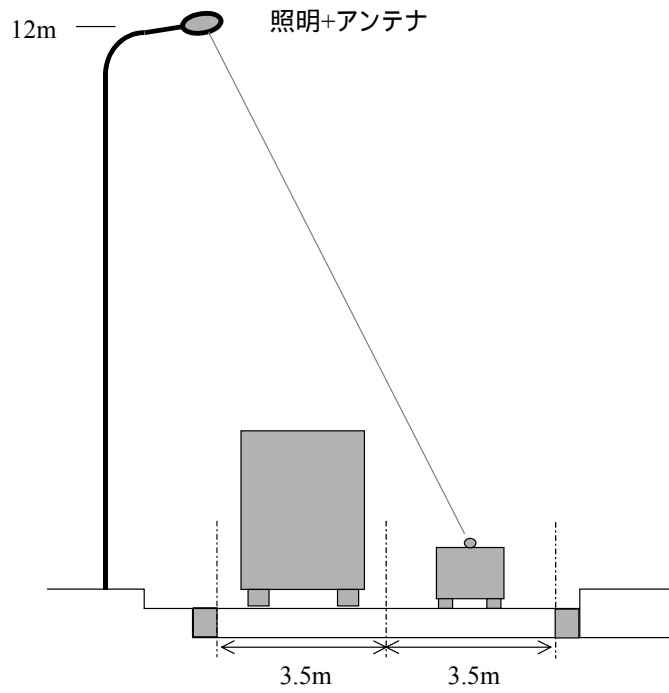


図 4.8 並走の場合

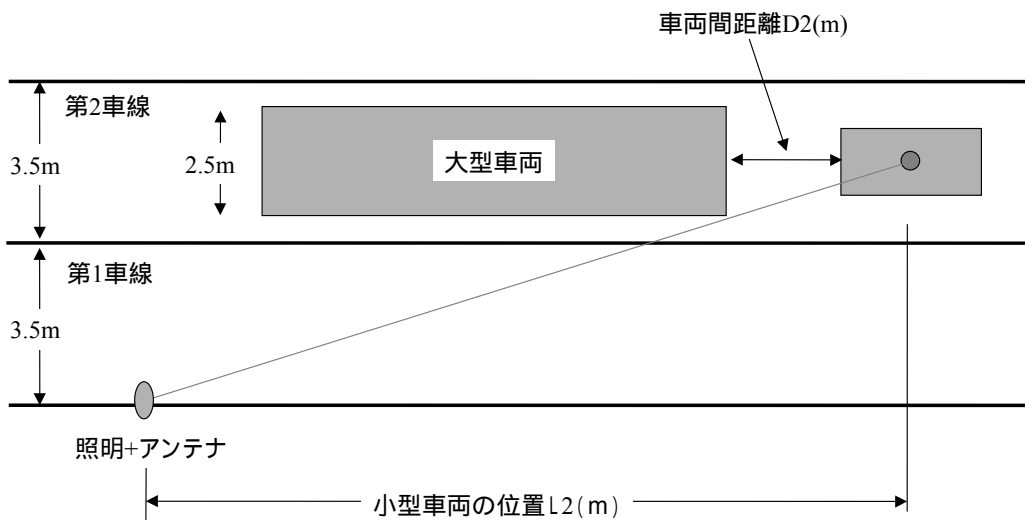


図 4.9 第2車線の見通し検討

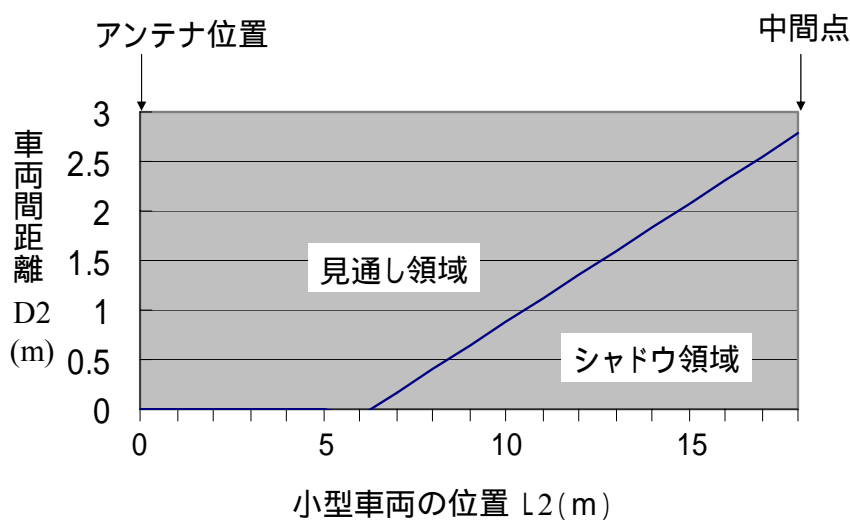


図 4.10 第2車線の見通し条件

以上の検討から、第1車線と第2車線がほぼ同様の見通し条件となり車間距離約 2.8m 以上で走行している場合には見通しが確保されることが分かった。

このような条件の走行がどの程度起こるのかが問題となる。こうした観点で採られたデータはないが、以下に交通工学上の各種データから推測を試みる。

図 4.11 は国道 2 号線における追従走行時の車頭間距離のデータであり、36km/h～42km/h の速度では車頭間距離は約 13m～16m 程度と考えられる[75]。このデータは乗用車および小型のトラックのものであり、車両の長さは大きめに見て 5m 程度と考えると、車間距離は約 8m～10m 程度となる。もちろん異常に接近した走行を行うドライバーもあるが、通常の走行ではシャドウイングが発生する確率は極めて少ないものと思われる。

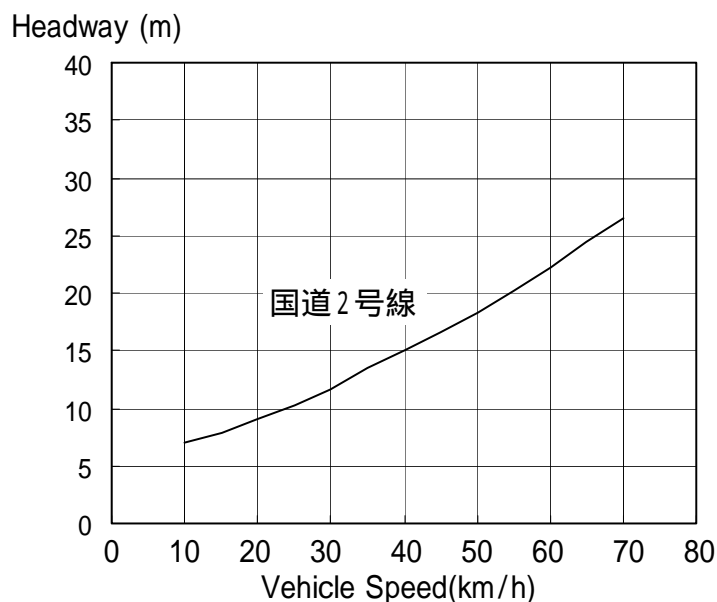


図 4.11 追隨走行時の車頭間距離

4.3.3 道路照明を利用した提案モデル

道路照明はできるだけ障害物による影を少なくするように設置基準がきめられており，照明の光を電波に置き換えれば路車間通信で問題となるシャドウイングを生じない良好な伝搬路が確保できると考えられる．幾何学的な事前検討の結果を基にして，筆者は道路照明の設置基準に準じて路側アンテナを設置する連続無線ゾーンの構成方法を提案し，図 4.12 のような提案モデルを設定した．

照明柱の間隔は交通工学ハンドブックによると照明灯の高さ(H)と関連しており， $3.0 \times H(m)$ で示されている[75]．照明灯の高さには通常 8m，10m，12m の種類がある．したがって，照明柱の間隔はそれぞれ 24m，30m，36m となる．照明柱の間隔（＝路側アンテナの間隔）は大きくなるほどシャドウイングが発生する確率が高くなる．

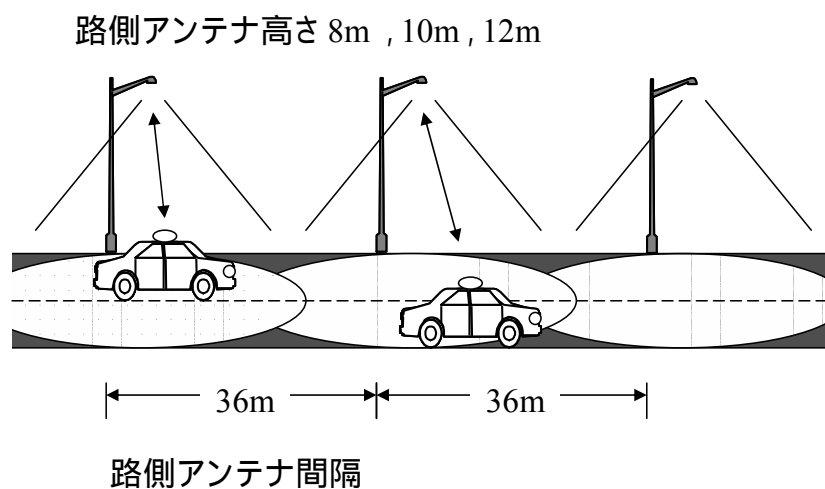


図 4.12 提案モデルの構成

本研究モデルでは Worst Case を考えて、最も間隔の大きい 36m を採用した。路側アンテナの指向性は真下の方向に円形のパターンを持つものとし、各路側アンテナによる無線ゾーンの周波数は同一周波数とする。車載アンテナについては、車両の屋根の中央部分に取り付け、指向性を上方にすることによって路面反射波の影響を避ける構成とする。

4.4 提案モデルの評価

提案した連続無線ゾーンの構成モデルにおけるシャドウイングの発生状況を評価するために計算機シミュレーションを行った。

シミュレーションの条件は表 4.1 のとおりである。前後車両によるシャドウイングと並走車両によるシャドウイングが考えられるため、片側 2 車線の高速道路を対象とする。各車両は車線の中央を走行するものとした。自動車の種類としては軽乗用車から大型トレーラまでの 5 種類を考え、それぞれの大きさと高速道路上の混在率を表 4.2 のように設定した[76]。

表 4.1 シミュレーションの条件

項 目	内 容
道路の長さ	1,000m 直線道路
道路の車線	2 車線
路側アンテナ高	8m または 12m
路側アンテナ間隔	36m
シミュレーション時間	3,600sec
車両の流れ	ポアソン流
車両速度	第 1 車線 : 80km/h 第 2 車線 : 100km/h
送信電力	10mW
路側, 車載アンテナ利得	3dB

表 4.2 車両の大きさと混在率

自動車 種類	車高 (m)	車長 (m)	車幅 (m)	混在率 (%)
軽自動車	1.3	3.2	1.4	3.6
普通乗用車	1.5	5.0	1.6	80.6
普通貨物車	2.5	8.0	2.0	8.9
大型貨物車	3.0	12.0	2.5	5.8
大型トレーラ	3.5	16.5	2.5	1.1

4.4.1 シャドウイングに関する評価

提案モデルのシャドウイングに対する有効性を確認するために、路車間の見通しに関する評価を以下の2項目について行う。

- 車両密度とシャドウイングの関係
車両台数の増加によりどのくらいシャドウイングが発生するかを評価する。車両密度は、1つの車線で1kmに何台の車両が存在するかで表す。
- 車両位置とシャドウイングの関係
車両が路側アンテナに対してどの位置でどのくらいシャドウイングを受けるかを評価する。

4.2 節で述べた従来の無線ゾーン構成と比較して評価するために、ETC システムを拡張したモデル構成を考え比較の対象とした。現在の ETC 端末はダッシュボードに取り付けられていて、料金所ゲートの路側アンテナは車両のフロント部に向け斜めの指向性を持たせている。この関係を高速道路上に拡張したモデルの構成を図 4.13 に示す。ETC 拡張モデルでは、路側のアンテナは2車線をまたぐガントリの中央部に取り付けるものとした。

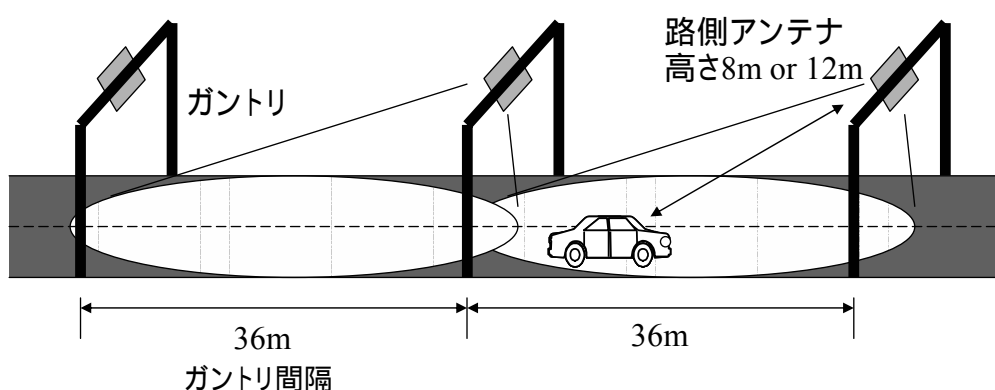


図 4.13 比較のための ETC 拡張モデル

提案した連続無線ゾーン構成モデルと ETC 拡張モデルについて、車両密度に対するシャドウイング確率と車両の位置によるシャドウイング確率で比較する。シャドウイング確率とは、シミュレーションの全過程において、シャドウイングされた回数をカウントし、それをすべての測定回数で割ったもので表す。

図 4.14 が車両密度に対するシャドウイング確率である。ETC 拡張モデルが車両密度の増加に比例してシャドウイング確率が増加しているのに対して、提案モデルでは増加率が非常に少ないことが判る。また、アンテナ高の 8m の場合と 12m の場合を比較すると、どちらのモデルでも 12m の方がシャドウイング確率は低く、アンテナ高を高くすることが見通し確保に重要であることが判る。

次に、車両位置によるシャドウイング確率の比較を図 4.15 に示す。横軸は車両の位置とアンテナの位置関係を示している。横軸の 0m, 36m 及び 72m の場所にアンテナが位置している。ETC 拡張モデルでは路側アンテナが車両のフロント部に向け斜めの指向性を持たせてあり、ダッシュボードに置かれた車両のアンテナは路側アンテナの直下を通過すると次の路側アンテナの方向を向くことになる。そのときの仰角がもっとも小さくなるため、シャドウイングの確率は大きくなる。一方、提案モデルでは路側アンテナの指向性は下向きであり、車両のアンテナは屋根の中央で上向きであるため、路側アンテナ直下を過ぎても電波の受信が継続する。隣接する 2 つの路側アンテナの中間点がもっとも仰角が小さくなるが、その角度は ETC 拡張モデルに比べるとかなり大きい。したがって、提案モデルの方が他の車両によるシャドウイングの確率はかなり低くなる。

以上から、提案した連続無線ゾーン構成モデルは一般に想定されている ETC を拡張したモデルに比べてシャドウイング確率を低下させることが可能で、見通し伝搬路を十分確保できることが判った。

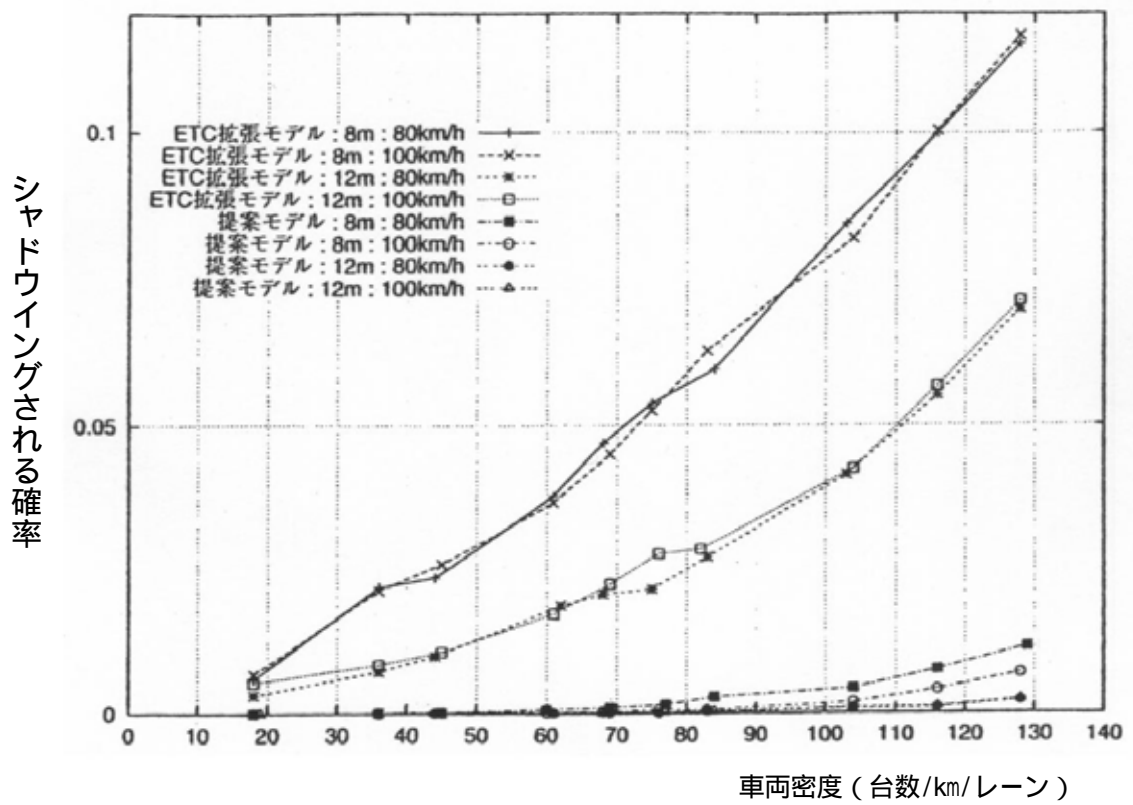


図 4.14 車両密度とシャドウイング確率

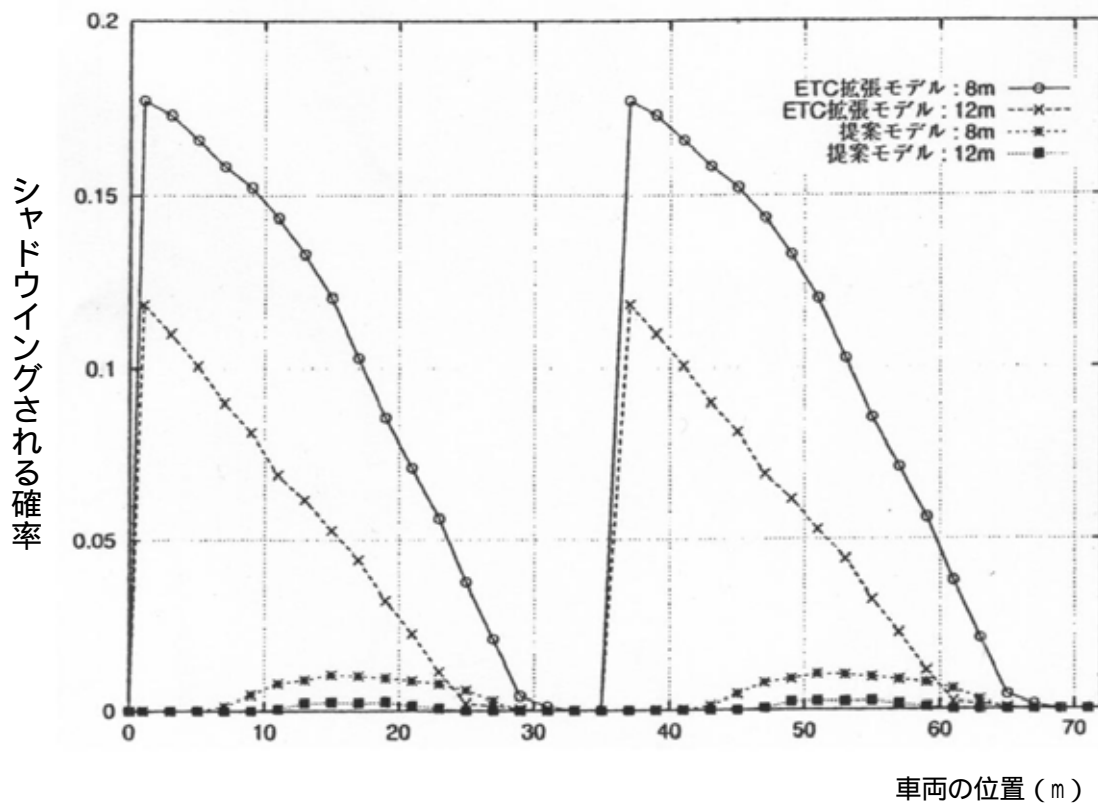


図4.15 車両の位置とシャドウイング確率

4.4.2 アンテナ間隔に関する評価

提案モデルは、道路照明の設置基準に合わせて路側アンテナを取り付けることによって設置コストを抑えることができると共に、シャドウイングに対して非常に有効であることが判った。ここではさらに実際の導入時における投資対効果（Benefit/Cost）の判断のために、安全走行支援として考えられている情報提供・警報・操作支援の段階的な導入に合わせた路側インフラの整備を想定して、路側アンテナの設置密度がどのような影響を与えるかを評価する。評価は以下の2項目について行う。

- 車両密度と受信確率の関係

路側アンテナ間の距離をパラメータとして、車両台数が受信確率にどのような影響があるのかを評価する。車両の受信確率とは、

$$\text{受信確率} = 1 - P_n \quad (4-1)$$

である。P_nは他の車両によるシャドウイングによって受信できないか、受信電力が閾値（-60dBm）を割ってしまっていて受信できない確率である。閾値の-60dBmのレベルは、ETCで設定されている基準に準じた。

- 車間距離と連続してシャドウイングされる距離の関係

路側アンテナ間の距離をパラメータとして、車間距離に対する連続シャドウイング距離の関係を評価する。連続シャドウイング距離とは、走行中の車両がある地点でシャドウイングを受けてから次に路側アンテナから電波を受信できるようになるまでの走行距離である。

評価のパラメータとして、路側アンテナの設置間隔が照明柱すべてに連続的に配置した36mの場合、一つおきに配置した72mの場合及び二つおきに配置した108mの場合の3種類を設定して比較することとした。

(1) 車両密度と受信確率

車両密度に対する受信確率の関係を調べた。受信電力は以下の計算で求められる[77]。

$$Pr = Pt + Gt - Ls + Gr \quad (4-2)$$

Pr : 受信電力(dBm) Pt : 送信電力(dBm)

Gt : 送信アンテナ利得(dB) Ls : 空間損失(dB)

Gr : 受信アンテナ利得(dB)

ここで空間損失 Ls は,

$$Ls = 10 \log (4 \pi d / \lambda)^2 \quad (4-3)$$

d : アンテナ間の距離 λ : 波長

で計算される。

受信電力の計算は、車両近傍の路側アンテナから受ける直接波と、周囲の車両から受ける反射波（1次反射のみ）をベクトル合成して求めた[78][79].

路側アンテナと対象車両の関係は、図4.16のように最も近い路側アンテナと前後のアンテナについて計算した。計算は距離による損失のほか、伝搬路の路程差による位相ずれの干渉を考慮している。路面からの反射波の影響は、車載アンテナの指向性を上向きにすることで影響しないものとした。

周囲の車両からの反射波については、路側アンテナと反射する車両及び当該車両との間で構成される入射角と反射角が等しくなる関係の場合に影響するものとした。

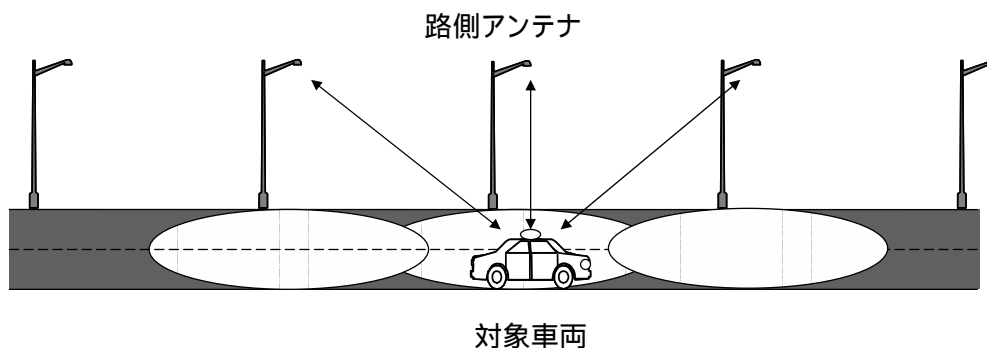


図4.16 路側アンテナと対象車両の関係

図4.17と図4.18は車両密度に対する受信確率の関係をシミュレーションにより求めた結果であり、図4.17は路側アンテナの高さが8mの場合、図4.18は12mの場合である。どちらの場合も、路側アンテナの間隔を36m、72m、108mと大きくするにしたがって、受信確率が低下する。車両密度が低い領域で路側アンテナの高さの影響がほとんど見られないのは、シャドウイングの影響よりも電波伝搬路の距離による損失が支配的なためである。車両密度が高くなるとシャドウイングの影響が出てくるために、路側アンテナ高8mより12mの場合の受信確率が良好となる。

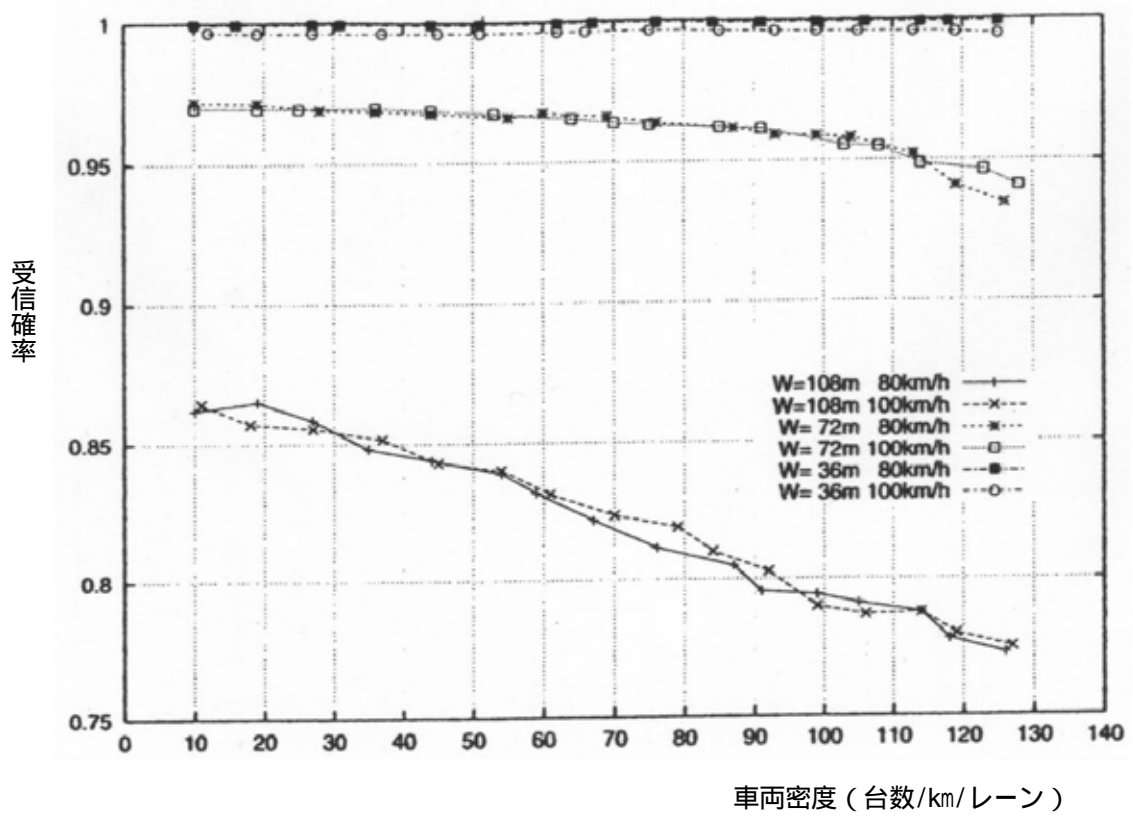


図 4.17 車両密度と受信確率 (アンテナ高 8m)

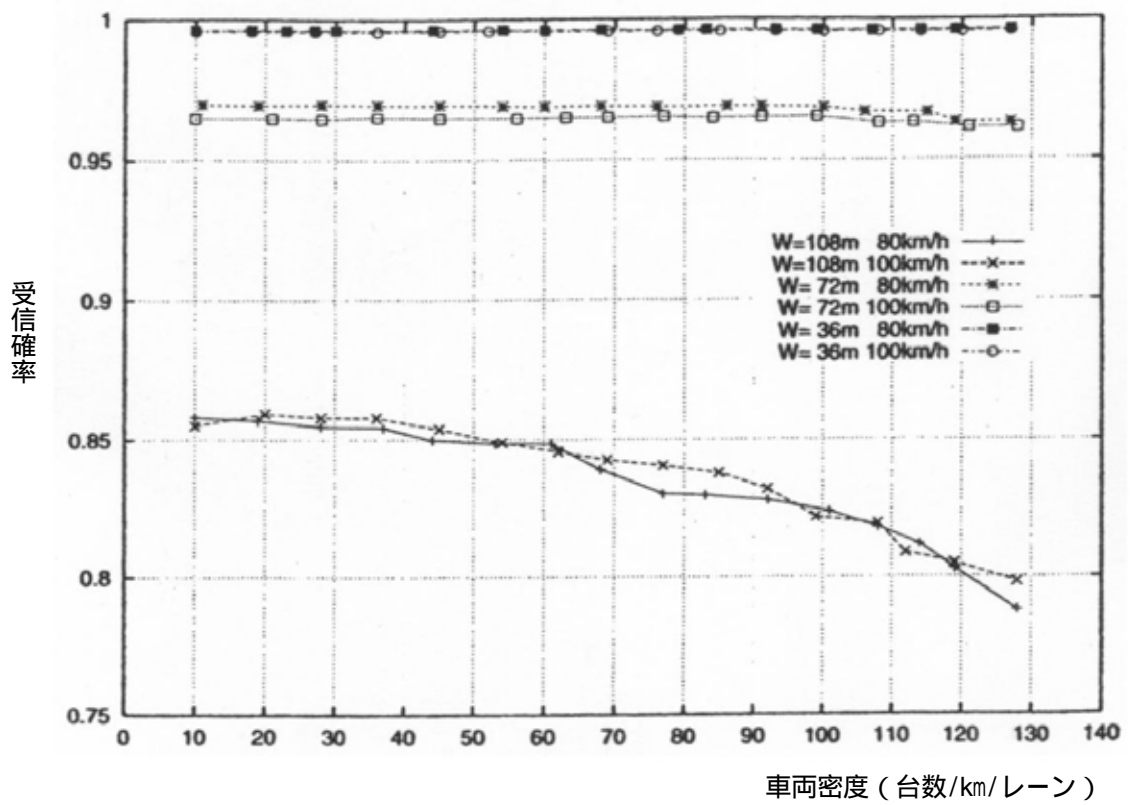


図 4.18 車両密度と受信確率 (アンテナ高 12m)

(2) 車間距離と連続してシャドウイングされる距離

アンテナ間隔が広くなるとシャドウイング状態が長くつづく可能性があるため、車間距離に対する連続シャドウイング距離の関係についてアンテナ間隔をパラメータとして評価した。図 4.19 は路側アンテナの高さが 8m の場合であり、図 4.20 は高さ 12m の場合である。この結果から、アンテナの設置間隔と高さが連続シャドウイング距離に大きく影響することが判る。

前述の図 4.17 と図 4.18 を見ると、アンテナ高の差はあまり受信確率に影響していないが、車両がシャドウイングを受ける状況になった場合におけるシャドウイング距離はアンテナ高を 12m とすることでかなり短くすることができる。

連続シャドウイング
距離 (m)

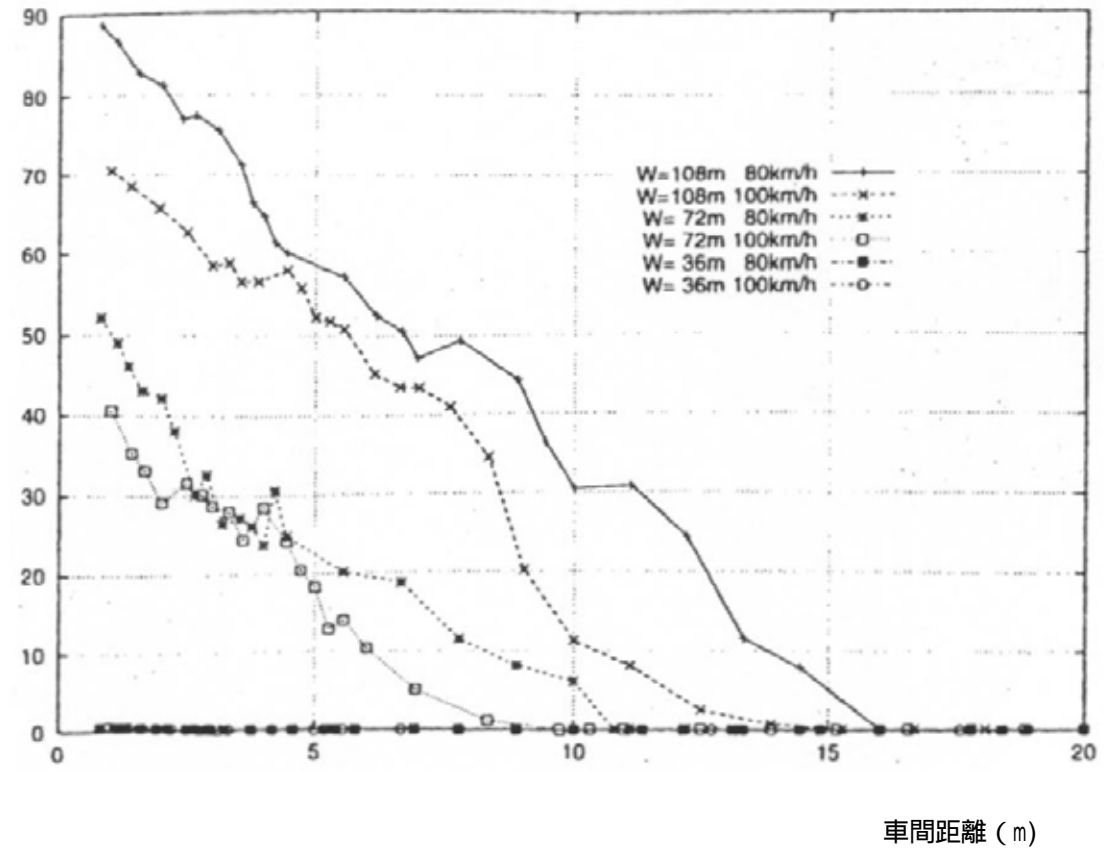


図 4.19 車間距離と連続シャドウイング距離 (アンテナ高 8m)

連続シャドウイング
距離 (m)

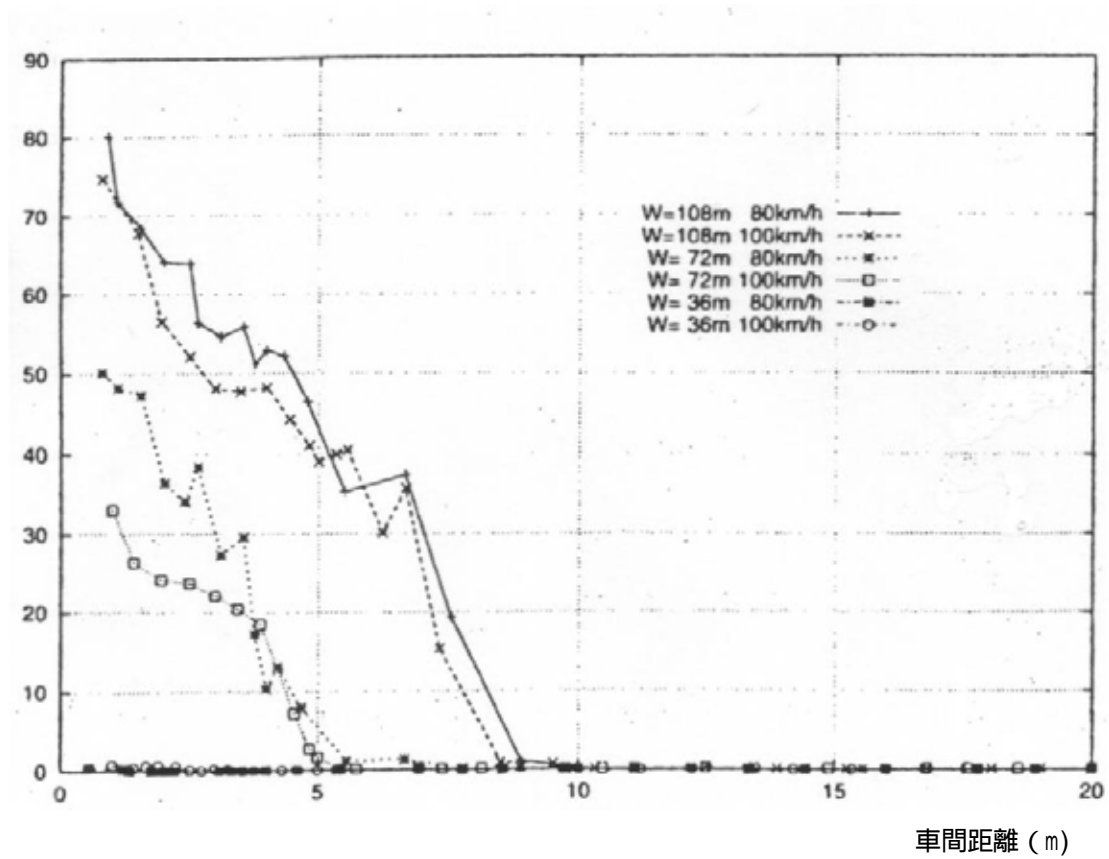


図 4.20 車間距離と連続シャドウイング距離(アンテナ高 12m)

4.4.3 評価のまとめ

以上の結果から、36m 間隔で設置されている照明柱にすべて路側アンテナを設置した場合は非常に良好な通信路が確保できることが判った。

4.2 項に記載したように従来の研究ではアンテナの設置間隔を 100m に設定していたが、アンテナ間隔 108m で評価した結果、シャドウイングの影響がかなり大きくなることも判った。

以上の評価は、マイクロ波やミリ波を用いる DSRC の場合に回折伝搬路の利用が期待できないことを前提としている。そこで、ETC 拡張モデルにおける 5.8GHz の回折伝搬路について評価を行ってみる。

図4.21のように大型車両のシャドウイングを受けている小型車両の場合を想定し、伝搬路にナイフエッジが存在するモデルに置き換える。この場合のナイフエッジによる付加損失は、両方のアンテナの間のナイフエッジの高さ (Cs) と、その地点の第1フレネル半径 (Rf) の比によって図4.22のような値をとる [80]。Rf は波長 (λ) とアンテナ～ナイフエッジ間の距離から以下の式で計算される。ここでは d1 と d2 の関係を各々30m と 6m に設定して計算した。

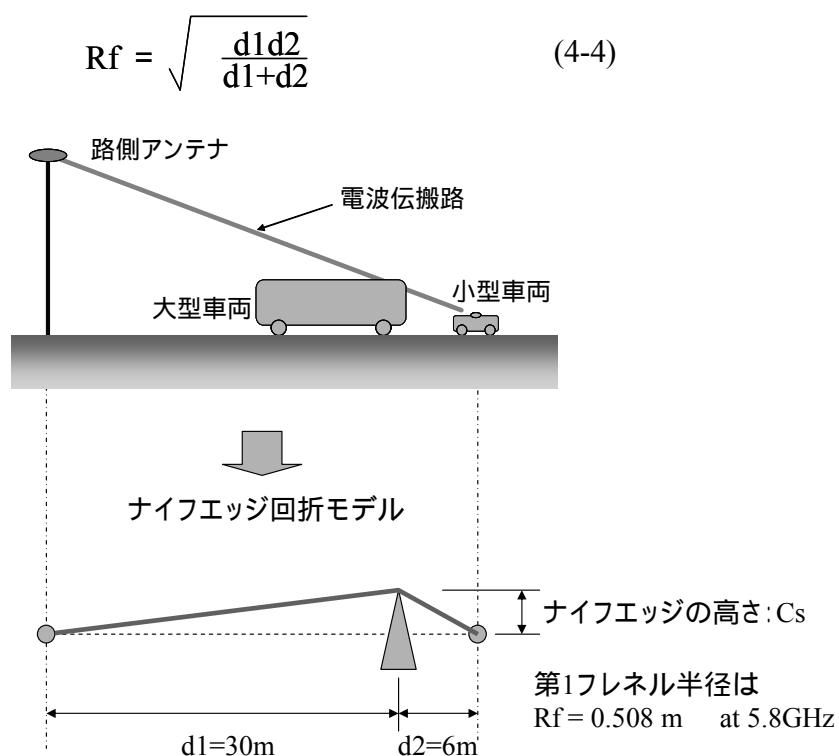


図 4.21 回折損失の検討

図4.22から、ナイフエッジの高さがゼロで見通しぎりぎりの伝搬路となった場合で付加損失が6dBとなり、ナイフエッジの高さが約25cmとなると10dBの付加損失となることが判る。ここでは大型車両の影響をナイフエッジに置き換えて考えているが、実際の車両の形状によってはさらに急激に損失が増加する可能性がある。

DSRCによるRVCの基本概念は、第3章の図3.2に示したように最低受信レベルを設定して安定な領域のみで通信を行うように考えられており、ETCにおける受信機の閾値は-60dBmとなっている。一般の移動体通信のように-80dBm～-90dBmの受信感度まで通信に利用する場合と異なり、DSRCによるRVCはマージンを少なくしてあるため、回折伝搬の領域は不安定領域と見なす必要がある。したがって、通信の評価を行う場合にシャドウイングの確率が非常に重要な問題となる。

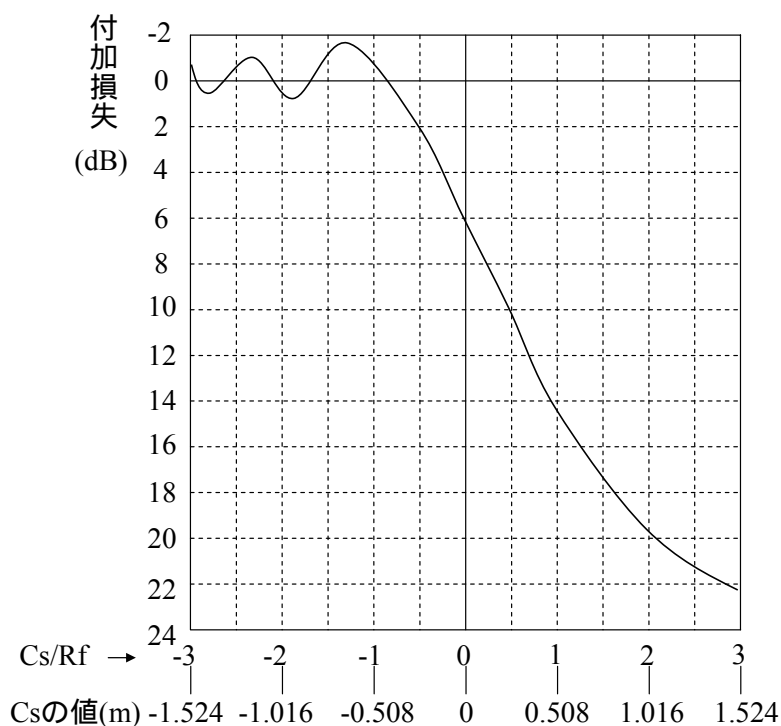


図4.22 ナイフエッジによる付加損失

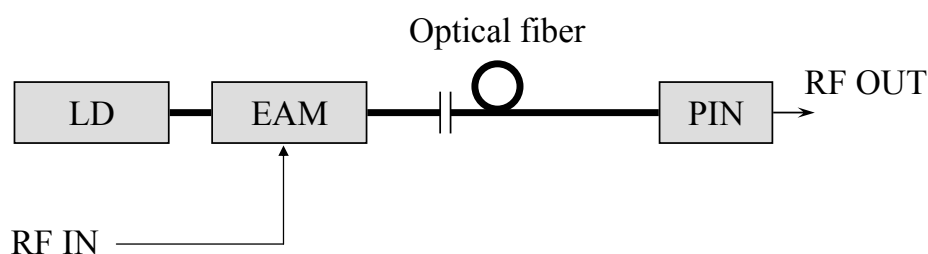
4.5 ROF を用いた無線ゾーン構成

照明柱を利用した連続型路車間通信システムでは、照明柱の設置間隔ごとに小さな無線ゾーンが連続的に配置されるため、移動局は頻繁にゾーン間ハンドオフを繰り返すことになる[81][82][83]。無線ゾーン間のハンドオフの増加は、リンク確立などの要求データのために通信効率を低下させる原因になる。こうした問題に対処するために、連続した複数の路側アンテナに対して一つの無線装置を設置し、その出力を ROF(Radio on Fiber)技術で分配する方式を適用する。

ROF 技術は、トンネル内や地下街などの無線装置を設置するスペースが確保しにくい場所で、無線装置とアンテナとの間を自由に離して設置できるようにする目的で開発された技術である。最近では ROF の持つ自由度を活かして一般の道路上で利用する検討も進められている[84][85][86]。

一般に無線装置の高周波出力とアンテナの間は同軸ケーブルや導波管などの高周波フィードで接続するが、長さに比例して損失が増加するため、フィード長に限界がある。そこで、光ファイバケーブルの持つ低損失と広帯域の特性と、非常に細いケーブル外形のために通線が容易であることを活かして、無線装置とアンテナ間を光ファイバケーブルで接続する方法が開発された。

図 4.23 に ROF 技術の原理を示す。光源であるレーザダイオード (LD) で発光した光を変調モジュール (EAM) に入れ、無線電波で直接変調する。変調光を光ファイバケーブルで離れた場所まで伝送し、フォトダイオードで再び無線電波に戻す。



LD: Laser diode module
 EAM: Electro-absorption modulator module
 PIN: p-i-n photo diode module

図 4.23 ROF の構成

この ROF 技術を無線機の出力端とアンテナの間に適用する。無線装置の高周波出力は直接光信号に変換され、光ファイバケーブルを通過してアンテナ側まで伝送され、変換ユニットで元の高周波に戻されてアンテナから輻射される。この方式を利用すれば、アンテナの取り付け場所と無線装置の設置場所との間を非常に長い距離伸ばすことが可能となる。

図 4.24 に ROF 技術を用いて連続型無線ゾーンを構成する方法を示す。この構成によって、複数のアンテナによる無線ゾーンを道路に沿った一つの長い無線ゾーンとして扱うことが可能である。また、照明柱ごとに無線装置を配置する場合に比べ、設置コストの面や保守性の面で有利となる。

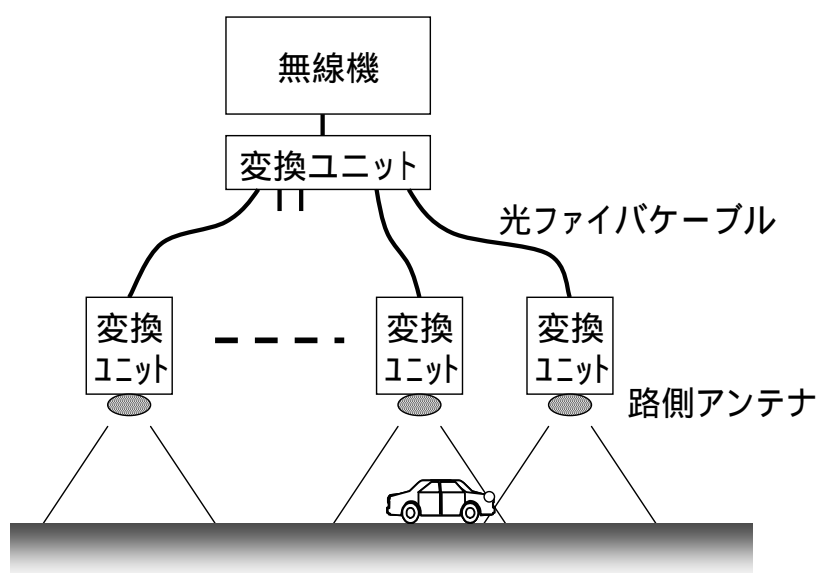


図 4.24 ROF を利用した無線ゾーン構成

4.6 連続型無線ゾーン構成モデルのまとめ

以上の検討結果から，局所型 DSRC を連続的に配置する方法による連続無線ゾーン構成のモデルは以下のようにまとめられる．

- 局所型 DSRC の路側アンテナを，道路照明の設置基準に合わせて設置することによって，シャドウイングの影響を少なくし，安定な見通し伝搬路を確保する．
- 連続した複数の路側アンテナに対して一つの無線装置を対応させ，無線装置と路側アンテナの間に ROF 技術を適用することによって，道路に沿った一つの長い無線ゾーンを形成し，無線ゾーン間のハンドオフによる通信効率の低下を防ぐ．

図 4.25 に連続型無線ゾーン構成モデルを示す．

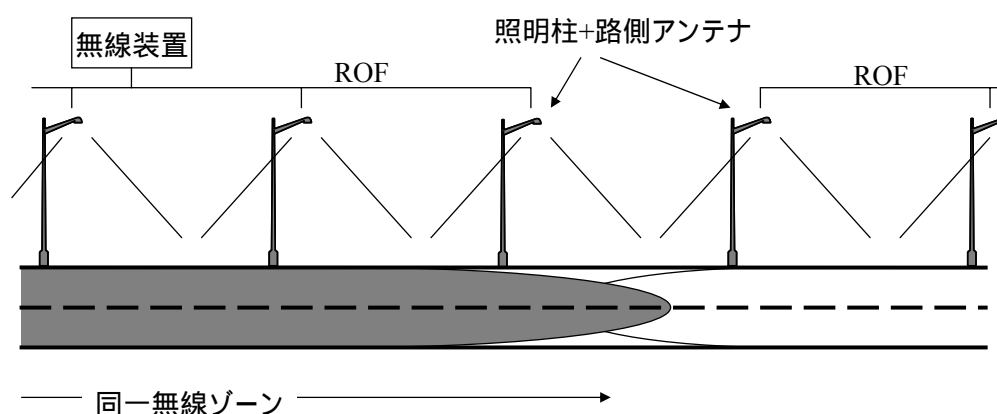


図 4.25 連続型無線ゾーン構成モデル

第5章 可変無線ゾーン構成と動的スロット多重

前章で提案した連続無線ゾーン構成モデルでは，路側アンテナごとの複数の極小無線ゾーンを ROF 技術によって連続的に一体化する構造となっている．このように一体化された無線ゾーンを ROF ゾーンと呼び，ROF ゾーンを構成する極小無線ゾーンは無線セルと呼ぶことにする．本章では ROF ゾーンの大きさと車両密度の関係から生じる課題を説明し，対策案の提案とその評価について述べる．

5.1 ROF ゾーンと通信可能車両台数に関する問題

5.1.1 DSRC 標準規格 (ARIB STD-T75)

自動車を取り巻く情報化は急速に進みつつあり，そのための放送や通信の手段が多様化してくると共に，車両内の搭載機器も非常に増えている．こうした状況から，アンテナを含む車載無線機器はできるだけ多くの機能に対して供用化できることが望まれる．日本の DSRC はすでに ETC で実用化されており，さらに多目的な利用が可能ないように STD-T75 が制定されている．走行支援のための連続型路車間通信に用いる無線方式も，可能な限り STD-T75 に準拠することが必要と考える．そのために，現在制定されている ARIB STD-T75 の内容を以下に整理しておく [32]．

STD-T75 は，電波ビーコンを使ったスポット型路車間通信を対象として制定されている．DSRC の標準規格は OSI 参照モデルの 7 層構造 [87][88] の中で，レイヤ 1，レイヤ 2，レイヤ 7 が対象である．移動局が基地局の小さな通信ゾーンを通過するごとに交信が短時間に行なわれることを考慮して，レイヤ 3 からレイヤ 6 は対象外とされ，関係する機能が必要な場合には，レイヤ 7 に搭載することとしている．

伝送方式の緒元を表 5.1 に示す．

表 5.1 ARIB STD-T75 伝送方式の諸元

項 目	諸 元	
無線アクセス方式	TDMA-FDD	
TDMA 多重数	8 以下 (2,4,8)	
送受信周波数間隔	40MHz	
変調方式	ASK	/4 シフト QPSK
伝送速度	1,024Kbps	4,096Kbps
媒体アクセス制御方式	アダプティブスロットドアロハ方式	

DRSCの伝送フレームは、フレーム制御用で固定データ長のFCMS（フレームコントロールメッセージスロット）、複数のMDS（メッセージデータスロット）、1つのWCNC（ワイヤレスコールナンバーチャネル）、多重領域を有するWCNS（ワイヤレスコールナンバーズスロット）、複数のACTS（アクチベーションスロット）からなる可変フレーム構造の構成である。図5.1は全二重通信の場合のフレーム構成である。

通信はアソシエーションフェーズと通信フェーズの2つに分けられる。

(1) アソシエーションフェーズ

移動局が基地局に対し通信の登録をするフェーズであり、リンクチャネル確立フェーズとサービス確立フェーズに分けられる。通信フレームはFCMS, MDS, ACTS からなる。

- リンクチャネル確立フェーズ

移動局は基地局からのフレーム構成等の通信制御情報等が付加されているFCMSを受信し、必要ならばプロトコル種別を含む通信制御情報を付加する。

移動局はFCMS内の内容を判別し、ACTS内のACTCをランダムに選択してリンクアドレスを付加してACTCを基地局へ送付し、アソシエーションの要求を行なう。次フレームで基地局はFCMCの情報フィールドに移動局のリンクアドレスとデータスロットの割付情報を付加して伝送する。移動局

では当該リンクアドレスが付加されたFCMCを正常受信し、その情報を解釈することにより、リンクチャネル確立フェーズが終了する。

● サービス確立フェーズ

アプリケーションの選択確立するフェーズであり、どの基地局と移動局間でどのアプリケーションを用いて通信を行なうかを決める。基地局はMDS内のMDCデータを用いて基地局がサービス可能なアプリケーションリストを送付する。移動局は記載されたアプリケーションに対応した返答をMDCを用いて車両サービステーブルとして基地局に送付し、互いに通信を行なうアプリケーションを確定して通信フェーズに入る。

(2) 通信フェーズ

基地局は必要な移動局単位あるいは複数の移動局グループにアップリンクあるいはダウンリンクのMDSを割り付けて、当該スロット内のMDCデータの交換を行なう。同一スロット内でACKC（アックチャンネル）を用いてACK/NACKを送信し、NACK受信の場合および規定のタイミングでACK/NACKを受信できなかった場合に再送信制御を行なう。

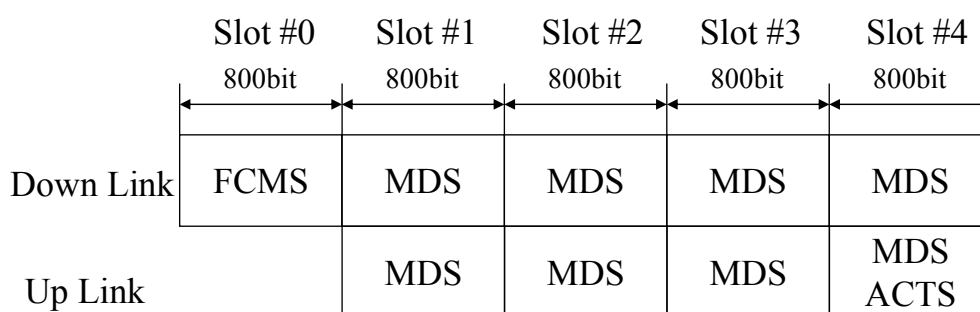


図 5.1 DRSC の基本フレーム構成（全二重通信）

5.1.2 無線ゾーンの大きさと通信可能車両台数

第4章でまとめた構成モデルでは、1つのROFゾーンが1台の基地局無線装置に対応していて、ゾーン内の複数の無線セルに存在する車両は全てその基地局無線装置との通信となる。車両密度が低い場合には、ROFゾーンを大きくする（ゾーン内の無線セルの数を多くする）ことによってハンドオフの少ない通信が可能である。しかし同一ゾーン内で通信できる車両の台数が限られているため、図5.2のように車両密度が高くなると通信できない車両の数が増加する。前項で記述したように、日本のDSRCの仕様はARIB STD-T75で規格化されていて、1フレームのデータ用スロットは最大で4スロットであるため、同一のゾーン内で同時に通信できる車両は4台までである。逆にROFゾーンを小さくすれば通信可能な車両の台数は増えるが、ハンドオフの回数が増加して通信の効率が下がる。

このようにROFゾーンの適切な大きさは車両密度によって変化するので、あらかじめ一意に決定することができない。

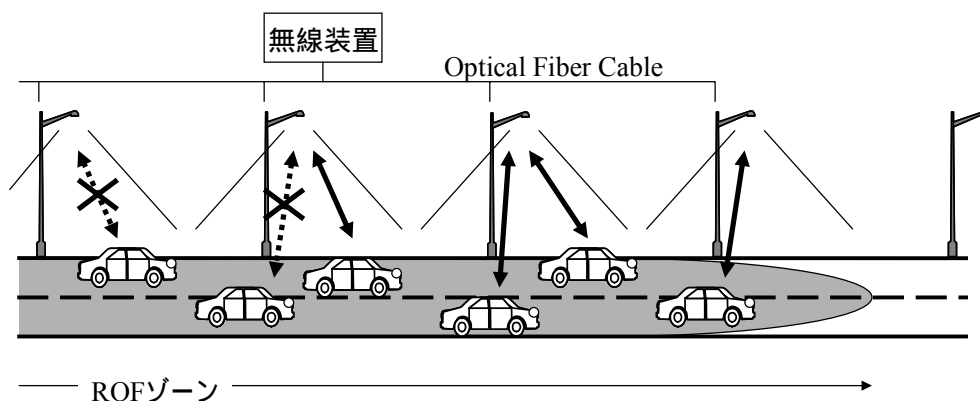


図 5.2 ROF ゾーンの大きさと通信可能車両の関係

5.2 車両密度の問題に対応する通信方法の提案

前節で提起した課題に対して、車両密度の変化に合わせて動的に ROF ゾーンの大きさを変化させる可変無線ゾーン構成方法と、車両密度が高い場合にリアルタイム性を確保するための動的スロット多重方法を提案する。

5.2.1 基本的な考え方

(1) 可変無線ゾーン構成法

ハンドオフ回数の減少を目指すため、複数の無線セルをまとめて大きなゾーンを構成する ROF ゾーン構成を利用する。ROF ゾーン内の車両台数が少ない（車両密度が低い）時は、ROF ゾーンを構成する無線セルを増やしそのゾーンを大きくする。車両密度が高くなり、ROF ゾーンに対する車両の収容率が高くなってしまうと、スロットを獲得できない車両が増加し始める。それに対処するため、適切にゾーンの大きさを小さくしていく。ゾーンの大きさを常に固定しておくのではなく、車両台数の増減によって適宜無線ゾーンの構成を変化させ、ハンドオフ回数の減少を目指す可変無線ゾーンの構成法を提案する。

(2) 動的スロット多重の適用

車両密度が高くなると ROF ゾーン構成からもっとも小さい無線ゾーンであるセル構成へと移行していく。しかし、セル構成になってしまうとそれ以上に車両台数が増加した場合、車両収容可能台数をこえてしまうのでスロットを獲得できずにリンクが切断されてしまう。それを回避するため、スロットを複数の車両で共有多重する動的スロット多重を提案する。

(3) 関連する研究との比較

通信範囲を動的に変化させる方法に関する研究はいくつか報告されている。

第1番目の文献[89]は、車両密度に応じてドメインを変化させるという手法であり、ハンドオフ地点を磁気マーカによる高精度の位置情報で予測する手法を用いている。このため DSRC の規格を用いることを前提としていない。本提案では、DSRC 規格を用いることで路車間通信におけるスポット通信と連続通信を同一プロトコルで行なうという目的がある。

第2番目の文献[90]は、センサーで車群の速度を予測してゾーンの追従を行な

っている。この方式は車両を車群として扱っているため、個々の車両に対する通信範囲の制御を行なうことができない。本稿では、個々の車両速度に合わせ、それぞれが通信を継続させるような制御方式を提案する。

第3番目の文献[91]はアンテナの照射パターンを変化させることで照射範囲を変化させている。この方式は通信範囲を車両に適合させる方法として有効であると考えられるが、広い照射範囲を分割することで車両の動きに合わせる方法であるため、シャドウイングの影響が大きいと考えられる。

本研究の提案のポイントは、前章で確認したシャドウイングに有効なアンテナ設置条件を用いて高品質の通信を確保することと、既存の局所型のITSサービスとの共用を前提としていることにある。

5.2.2 システム構成

図 5.3 にシステムの構成を示す。路側システムは基地局 (BS) , 光ファイバケーブル, 路側アンテナ (A) , 制御装置 (CONT) , スイッチ (SW) で構成されている。

制御装置の役割は、基地局と路側アンテナの対応関係を示すマップを作成し、管理することである。スイッチの役割は、制御装置によって作成されたマップに従い、路側アンテナの切り換え操作を行なうことである。基地局は無線ゾーンの延長・分割・統合といった操作を行なうため、使用周波数や通信車両台数等の情報を、隣接基地局間との通信によって交換する。さらに、分割や統合を行なう際に、アンテナ構成の変更をスイッチに伝える。

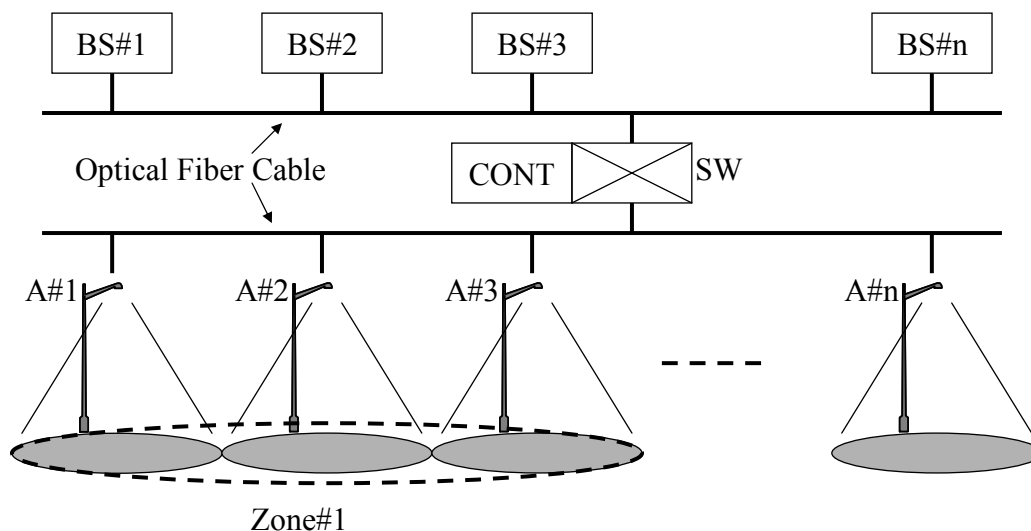


図 5.3 システム構成

5.2.3 可変無線ゾーン構成法

ROFゾーンの大きさを、車両密度の変動に合わせて適切に大小させることで、通信可能な車両台数を確保したままハンドオフ回数を減少させることを目指す。

車両密度が低い場合にはROFゾーンを大きくし、車両密度が高い場合にはROFゾーンを小さくする。また、車両は走行中の進行方向が変化しないと考え、進行方向に合わせてゾーンの拡大・縮小を行なう。

可変無線ゾーンにおけるゾーンの拡大・縮小の動作は、以下に示すような無線ゾーンの延長・統合・分割の3つの動作パターンを想定する。

(1) 延長

無線ゾーンの延長は、車両が進行する方向のゾーンに他車両が存在しないときに、車両が使用している無線ゾーンのカバー範囲を前方へ延長する方法である。

当該BSは車両進行方向の隣接ゾーンを制御するBSと通信し、ゾーンに車両が存在しないことがわかるとそのゾーンのアンテナまでを管理下におく。例えば、図5.4のようにBS1がA1～A2でゾーン1を、BS2がA3～A4でゾーン2を構成しているとする。BS1は隣接ゾーンを管理するBS2と通信してBS2に通信車両が存在

しないことを確認すると、ゾーン2の終端のアンテナ(A4)までを管理下におくように変更する。スイッチに対してBS1はマップ変更要求を伝え、BS2は登録削除要求を出して図5.5の構成となる。

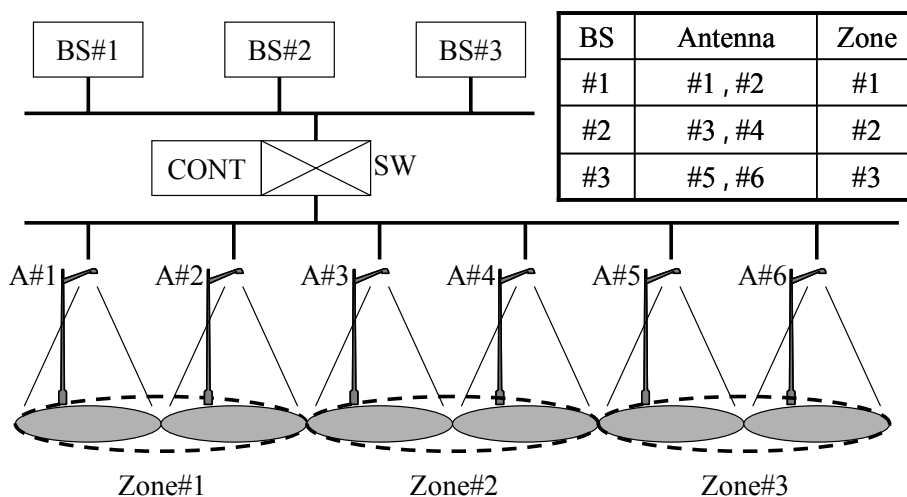


図5.4 ROFゾーンの延長（変更前）

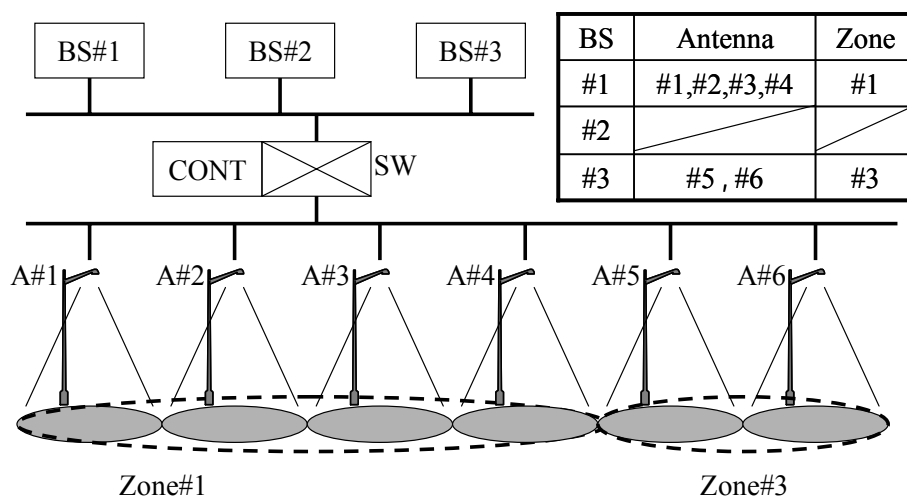


図5.5 ROFゾーンの延長（変更後）

(3) 分割

無線ゾーンの分割は、あるゾーンにおけるスロットが全て使用中の場合に、1つのゾーンを2つのゾーンへと分割することでゾーンを管理するBSの数を増やし、通信可能な車両台数を増やすものである。例えば図5.8の構成で、BS2においてスロットを全て使用している場合に、その時点でゾーンを管理していないBS3を選択する。そして選択したBS3に対して新たに管理を委譲するアンテナ番号を通知する。同時にBS1はスイッチに対してアンテナの管理を委譲したというマップ変更要求を伝える（図5.9）。

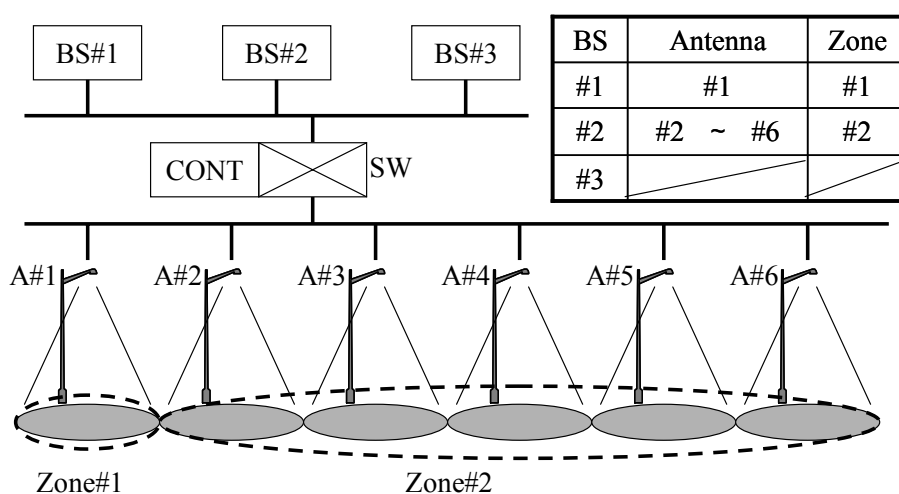


図5.8 ROFゾーンの分割（変更前）

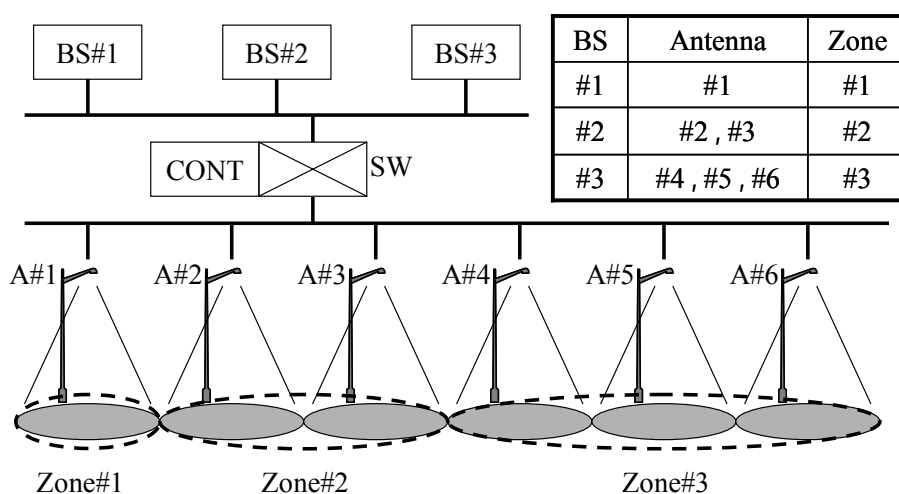


図5.9 ROFゾーンの分割（変更後）

5.2.4 動的スロット多重方式

可変無線ゾーン構成を取り入れると、車両密度が高くなった場合にROF構成からもっとも小さい無線ゾーンであるセル構成へと移行する。しかしセル構成になると、それ以上に車両密度が増加した場合にはゾーン構成を適応させることができず、車両収容可能台数を超えてしまう。そのため通信スロットを使用できずにリンクが切断されてしまう車両が現われる。それを回避するため、通信スロットを複数の車両で共有多重する。

ARIB STD-T75によると、DSRC基地局では基地局と車両との間で確立されているリンク数であるNUMLINK と、基地局が許可するリンク数の最大を示すMAXLINKを保持している。NUMLINKは通信リンクが確立されるごとに一つずつ増加する。基地局はNUMLINKがMAXLINKを超えたと判断すると、これ以上リンクを確立しないよう、車両からのリンク確立要求を拒否する。これに対し本提案では、NUMLINKがMAXLINKを超えた場合、車両からのリンク確立のための要求を拒否せずに、動的スロット多重の手続きに入る。

本提案では、MAC層においてスロット取得フェーズ、待機フェーズを設ける。スロット取得フェーズは、次のフレーム作成時にスロットを使用できる車両が登録され、待機フェーズは次のフレーム作成時に待ち状態になる車両が登録される。

例えば、1セルに6台が存在する場合を考える。DSRCの通信スロットは4スロットなので同時通信が可能な台数は4台である。そのため、2台あふれた状態である。

ある時間 t_1 で通信スロットを車両A, B, C, Dが使用しているとする(図5.10)。車両EとFはこの時点で通信スロットを獲得できていないが路側には登録されていて、優先的に次のフレーム作成時に通信スロットが割り当てられるようにスロット獲得フェーズに置かれる。次にフレームではE, Fのほかにもう2つスロットが使えるので、現在使用中の車両から2台(C, D)を選択する。A, Bは次のフレームに対し通信待機フェーズに置かれる。

次の時間 t_2 になると、先ほどの t_1 でスロット獲得フェーズに置かれた車両C, D, E, Fが通信スロットを獲得することになる(図5.11)。 t_1 で通信待機フェーズに置かれたA, Bは、次のフレームに対し優先的にスロット獲得フェーズに置かれる。残りの2つの通信スロットは、通信機会が公平になるようにEとFが選択される。したがって、C, Dは通信待機フェーズに置かれる。

この方法によって、時間的に交互にスロットを使用し複数の車両で通信スロット共有することにより、全車両が途切れのない通信を行なうことができる。

この方式により各車両に割り当てられる通信量は減少する。しかし安全性を高めるための通信には、通信の量よりも途切れのない通信を実現することのほうが重要である。継続的に通信可能な環境を構築することで、危険警告などの緊急性の高い情報をリアルタイムに伝送することができる。

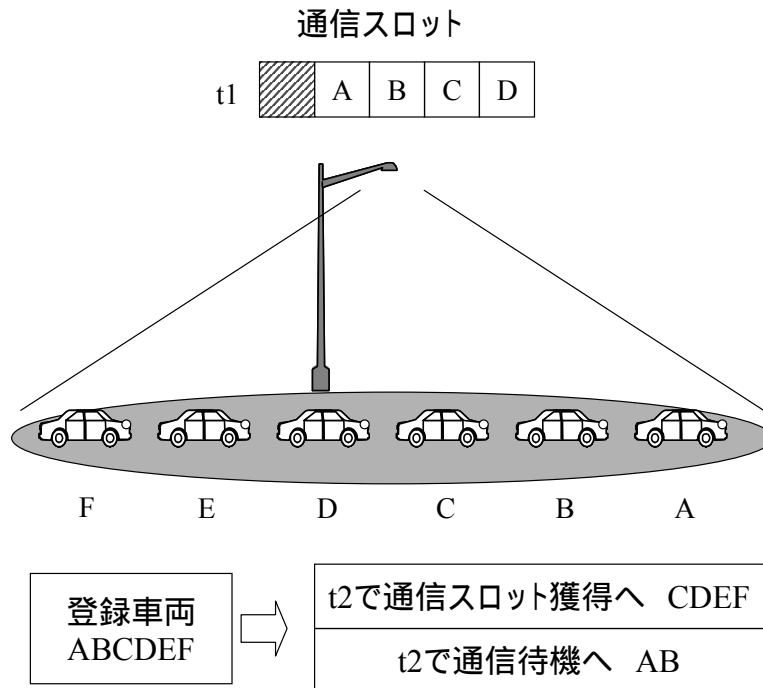


図 5.10 動的スロット多重 (t1)

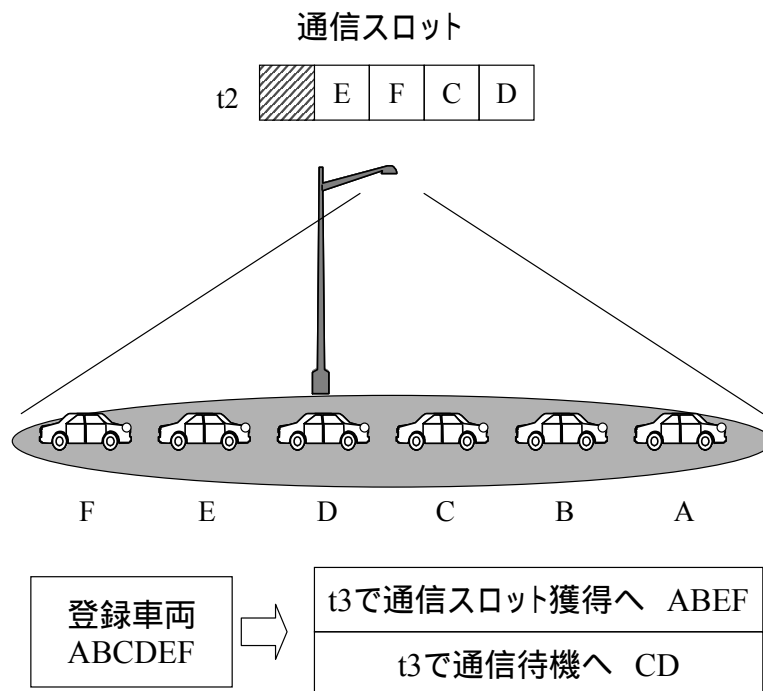


図 5.11 動的スロット多重 (t2)

5.3 提案方式の評価

5.3.1 評価の条件

提案の有効性を示すため、計算機シミュレーションにより評価を行った。シミュレーション条件を表 5.2 に示す。前章の検討結果から、照明灯と路側アンテナの設置位置を一致させ、アンテナの高さと間隔は道路照明の設置基準から、路車間での見通しが最もよくなる高さ 12m、間隔 36m とした。路側アンテナの指向性は真下方向に円形とする。また受信において路面反射波が最も大きな干渉波として影響を及ぼすと考えられるため、車載アンテナはそれを抑制するために車両の上部に取り付け、指向性を上向きとする。

道路は片側 3 車線の高速道路を想定し、各車両は各車線の中央を走行するものとする。車両速度は通常走行車線を 80km/h、中央車線を 100km/h、追い越し車線を 120km/h とする。

表 5.2 シミュレーションの条件

項目	内容
道路	3 車線, 直線道路 1,080m(路側アンテナ 30 基)
路側アンテナ高	12m
路側アンテナ間隔	36m
車両の流れ	ポアソン分布
車両速度	通常走行車線 : 80km/h 中央車線 : 100km/h 追い越し車線 : 120km/h
信号伝送速度	4,096kbps ($\pi/4$ シフト QPSK 変調)
シミュレーションの終了条件	車両 3,000 台の処理終了

車両の種類と発生頻度は前章の表 4.2 と同様の条件である。発生する車両の大きさはシャドウイングに影響を及ぼす。路側アンテナから車両側アンテナへ直接波および反射波が到達可能であるかどうかを計算し、受信電力が閾値 -60dBm を上回る場合にパケットを受信する。

シミュレーションでは以下の 3 つの方式を比較する。

- 方式 A (Scheme A) : 各路側アンテナに 1 つずつ基地局を固定的に割り当てるセル型構成のモデル
- 方式 B (Scheme B) : 可変無線ゾーン構成法を適用したモデル
- 方式 C (Scheme C) : 可変無線ゾーン構成法と動的スロット多重の両方を適用したモデル

評価する項目は以下のとおりである。

- 車両密度とハンドオフ回数の関係
- 車両密度とハンドオフ成功確率の関係
- 車両密度と連続受信バイト数の関係
- 車両密度と平均バイトレートの関係
- 各車両に対する受信量のばらつき

車両密度とは 1 車線の 1km の間に存在する車両台数である。連続受信バイト数とは、ある車両がスロットを取得して通信を開始してから、スロットを取得できずに通信が途切れるまでの間に連続して受信したバイト数である。

5.3.2 車両密度とハンドオフ回数

図 5.12 に車両密度とハンドオフ回数の関係を示す。横軸は車両密度、縦軸は車両 1 台あたりの平均ハンドオフ回数である。シミュレーションモデルにおいて路側アンテナ数は 30 個であるので、ハンドオフ回数は 29 回が上限である。

Scheme A ではセルが 30 個で固定されているので、ハンドオフ回数は上限の 29 回に近い値で横ばいになっている。

Scheme B と Scheme C では、車両密度が 30 [台/km/lane] 以下になるとハンドオフ回数は半分以下になっていることがわかる。これは、提案の可変無線ゾ

ゾーン構成法を取り入れることで、車両の台数がスロットを満たすまでゾーンを延長・統合するため、複数のセルに跨った長い距離をハンドオフなしで走行できるからである。

しかし、車両密度が 30 [台/km/lane] 以上になると、可変無線ゾーン構成を取り入れた 2 つのモデル(Scheme B, Scheme C)でもハンドオフ回数が増加していく。これは、車両台数が増加するに従ってゾーンの大きさが小さくなり連続セル型構成に近づくためである。

車両密度が 50 [台/km/lane] 以上になると、Scheme A と Scheme B はハンドオフの回数が低下している。これは、車両密度が増加したことでスロットを使用できない車両が増え、セルを移動した際のハンドオフに失敗したためである。これに対して Scheme C は動的スロット多重方式を用いているので、セルを移動した場合に確実にスロットを使用できる。そのため、Scheme A と Scheme B のような落ち込みがない。

車両が 100km/h で走行しているときは 100m 程度の車間距離をとることが望ましいということを考えると、車両密度は 10 [台/km/lane] 程度である。そのような車両密度の低い場合にはハンドオフ回数の低下を達成できている。車両の速度が遅く、渋滞しているような場合は、走行時間に対するハンドオフにかかる時間が占める割合が低い。そのため、可変無線ゾーン構成を取り入れることで、車両密度が低い時、つまり高速移動が可能な時のハンドオフ回数を減少できたことは、効果が大きい。

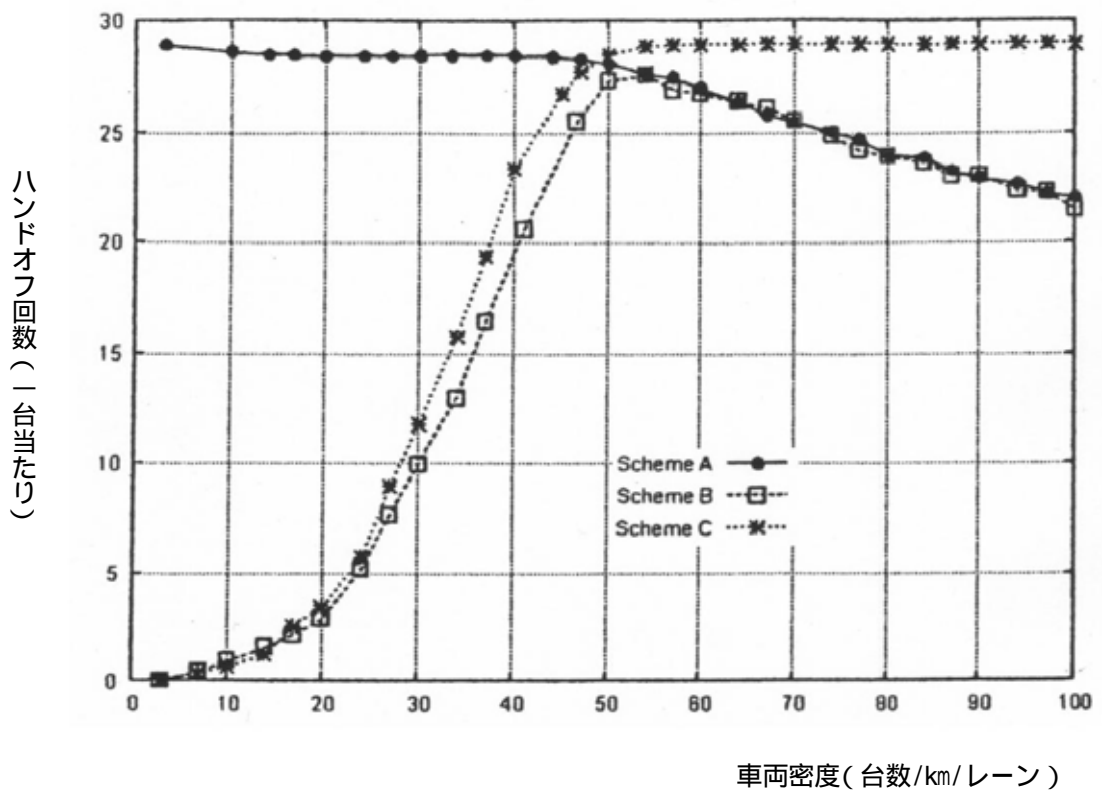


図 5.12 車両密度とハンドオフ回数

5.3.3 車両密度とハンドオフ成功確率

図 5.13 に車両密度とハンドオフ成功確率の関係を示す。横軸は車両密度，縦軸はハンドオフの成功確率である。

車両密度が低いとき，Scheme B と Scheme C は，Scheme A より改善されている。これは可変無線ゾーン構成法の効果であり，車両台数に応じて確実にスロットを使用できるようにゾーン構成を変化させているためである。

車両密度の高いときは，可変無線ゾーン構成法により通信エリアはセル型に近くなるので，動的スロット多重方式を用いて移動先で確実にスロットを使用できる Scheme C のみが，高いハンドオフ成功確率を得ている。

可変無線ゾーン構成法と動的スロット多重方式の2つを取り入れた Scheme C は，ハンドオフの成功確率は常に 1 となっている。

この結果からも分かるように，Scheme A と Scheme B が図 5.12 の車両密度 50 [台/km/lane] 以上におけるハンドオフ回数の減少となったのは，移動先のゾーンにおいてスロットを使用できないというハンドオフ成功確率の低さが原因である。

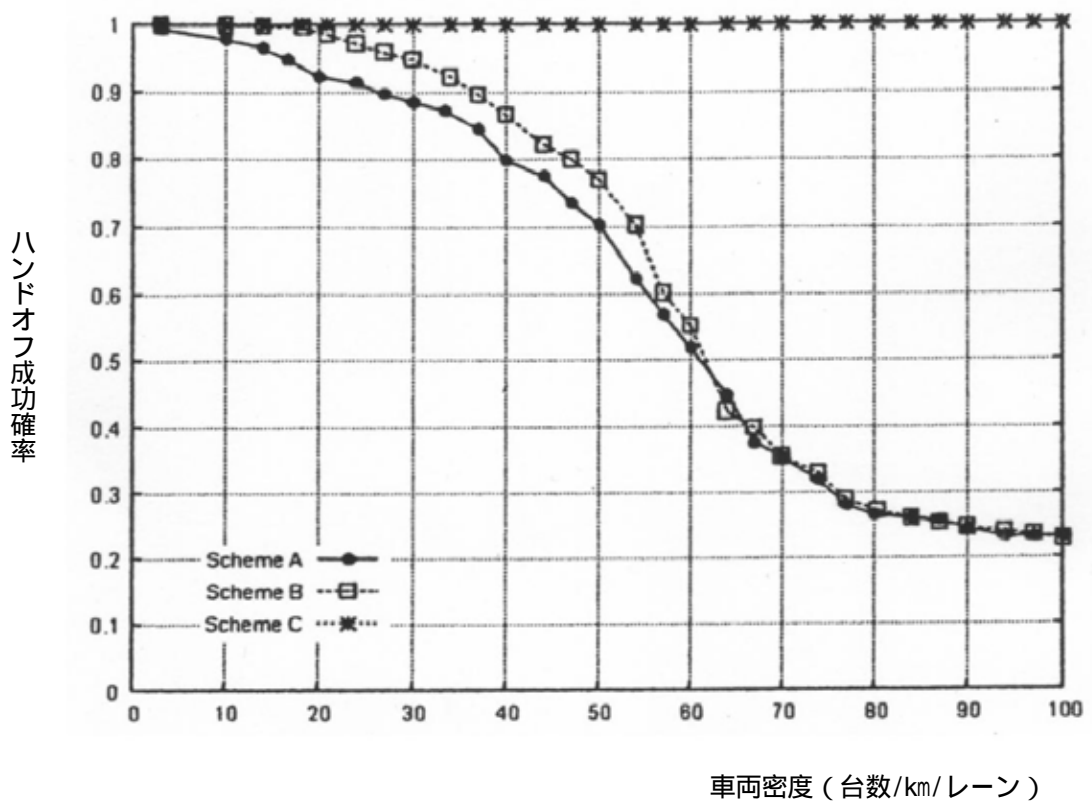


図 5.13 車両密度とハンドオフ成功確率

5.3.4 車両密度と連続受信バイト数

図 5.14 に車両密度と連続受信バイト数の関係を示す。横軸は車両密度、縦軸は車両 1 台が連続的に受信できたバイト数である。

Scheme B と Scheme C は、Scheme A に比べて、車両密度が低い領域、すなわち車両密度 30 [台/km/lane] 以下において連続受信量が多い。可変無線ゾーン構成法では、スロットの使用状況を見ながらゾーン構成を変動させているため、ハンドオフの失敗が起こらず、また、ゾーンを大きくとるのでハンドオフ回数が少ない。そのため、一度スロットを取得すると長時間通信を継続させることができるからである。

しかし、Scheme B の場合は車両密度が高くなると連続受信量は急激に減少する。これは、車両密度が高くなると無線ゾーンが小さくなり連続セル型構成の状態に近づくため、ハンドオフ回数が増加するからである。Scheme A と Scheme B における連続受信バイト数の極度の低下は、図 5.13 からわかるように、移動先のゾーンにおいてスロットを使用できないというハンドオフ成功確率の低さが理由である。

これに対して Scheme C でも、車両密度が高くなるに従って連続受信バイト数に若干の低下は見られるが、Scheme A, Scheme B に対しては大幅に改善している。これは、ハンドオフの回数は増加するものの、動的スロット多重を行うことによりリンクが途切れず、他の 2 つのモデルのような急激な落ち込みがないためである。ただし動的スロット多重方式は一種の帯域分割方式であるため、受信量は減少する。

グラフから、動的スロット多重は、特に車両密度が高い領域において有効であるといえる。

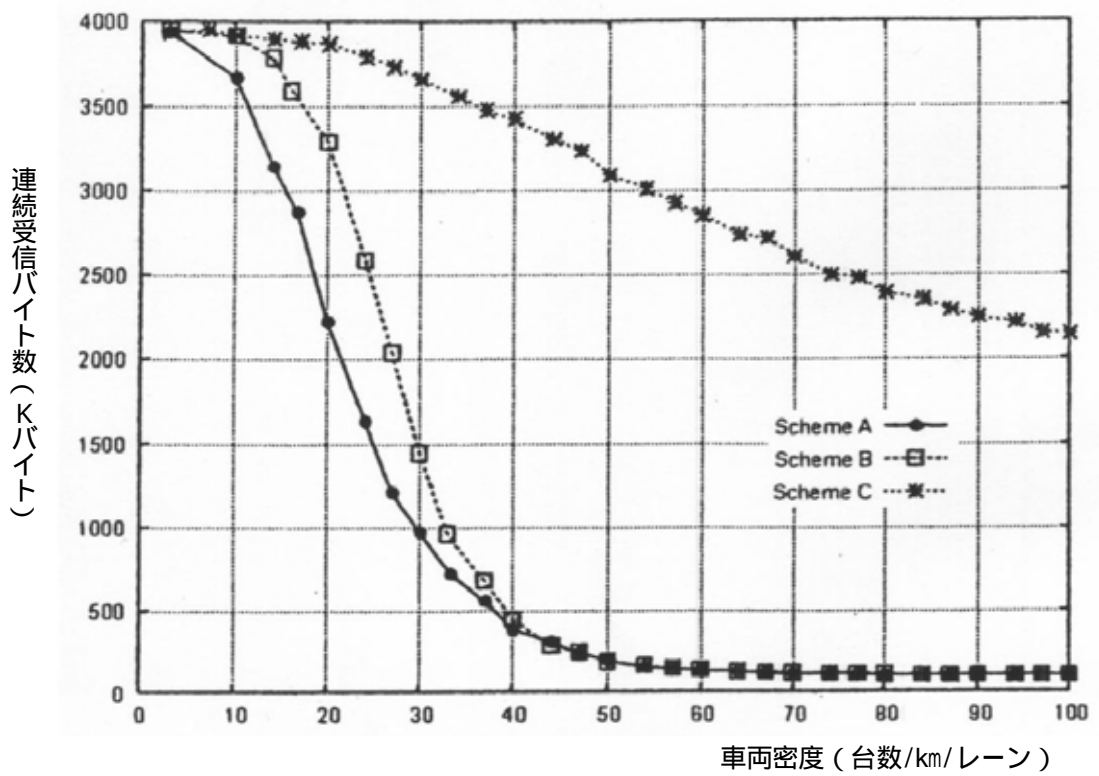


図 5.14 車両密度と連続受信バイト数

5.3.5 車両密度と平均バイトレート

図 5.15 に車両密度と平均バイトレートの関係を示す。横軸は車両密度、縦軸はシミュレーション区間内における車両 1 台あたりの平均バイトレートである。

車両密度の低い領域(車両密度 50[台/km/lane]以下)における平均バイトレートは、Scheme B と Scheme C が Scheme A を上回っている。これは、Scheme A はハンドオフ回数が多いため、ハンドオフが失敗する機会も多くなるからである。

それに対して Scheme B と Scheme C では可変無線ゾーン構成を用いることで不要なハンドオフが生じないので、より長い距離に渡って通信を継続させることができるため、Scheme A より平均バイトレートが高くなる。

車両密度の高い領域においては、Scheme C が Scheme A 及び Scheme B を大きく上回っている。これは、動的スロット多重を用いることで Scheme C のみが移動先のセルにおいて確実にスロットを使用できるからである。Scheme A と Scheme B ではハンドオフをしたとき、スロットを使用できずに通信が途切れてしまうため、平均バイトレートは低下する。

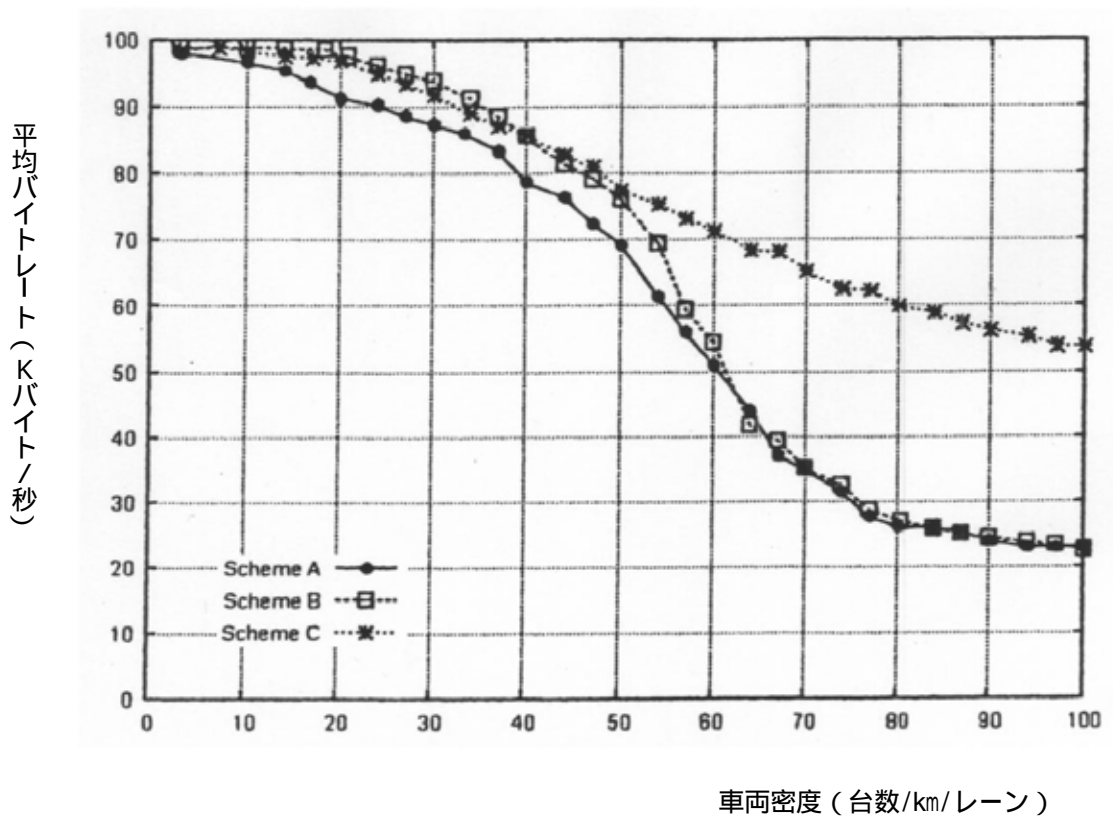


図 5.15 車両密度と平均バイトレート

5.3.6 受信量のばらつき

走行支援を行う場合には、車両によって受信量に偏りが生じるのではなく、各車両が平等かつ連続受信できることが望まれる。連続受信に関してはすでに前節で議論した。ここでは各車両の受信量の分散について検討する。最も受信量にばらつきが出るのは、車両密度が高くなりスロットの競合が多くなってきた時である。そこで、車両密度が 60[台/km/lane]の時に絞って評価する。

通常走行車線、中央車線、追い越し車線における受信バイト数の分散について、Scheme A と Scheme C を比較した。

図 5.16 に、通常走行車線における受信バイト数の分散を示す。

図 5.17 に、中央車線における受信バイト数の分散を示す。

図 5.18 に、追い越し車線における受信バイト数の分散を示す。

この図から、Scheme C に比べて Scheme A のほうが受信バイト数の少ない領域への分散が大きいことがわかる。これは、車両密度が高いことから、Scheme A ではスロットを使用できない車両が多く発生するためだと考えられる。

表 5.3 に各車線における受信量の分散値をまとめた。この表から、いずれの場合も Scheme C の方が受信量の分散値が小さいことがわかる。また車線別で比較をすると、走行速度の遅い車線のほうが分散値が大きい。これは、ゾーン内の通過時間が長くなるため、スロットを取得したときの車両とスロットを使用できなかった車両の受信量の差が大きくなるためである。

以上から、提案した可変無線ゾーン構成に動的スロット多重を適用した方式は、車両によって受信量に偏りの少ない連続型路車間通信システムであることが分かる。

表 5.3 各車線における受信量の分布

	Scheme A	Scheme C
通常走行車線	168×10^3	82×10^3
中央車線	151×10^3	68×10^3
追い越し車線	125×10^3	47×10^3

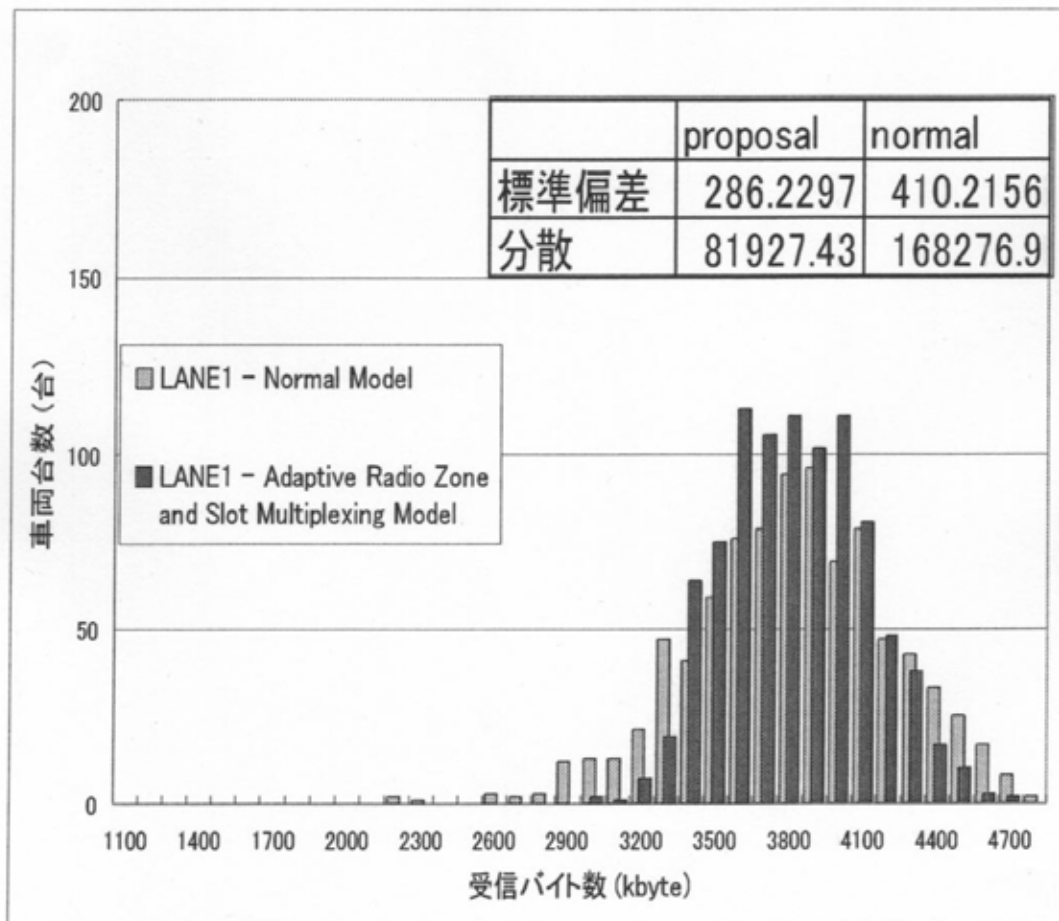


図 5.16 受信量の分散 (通常走行車線)

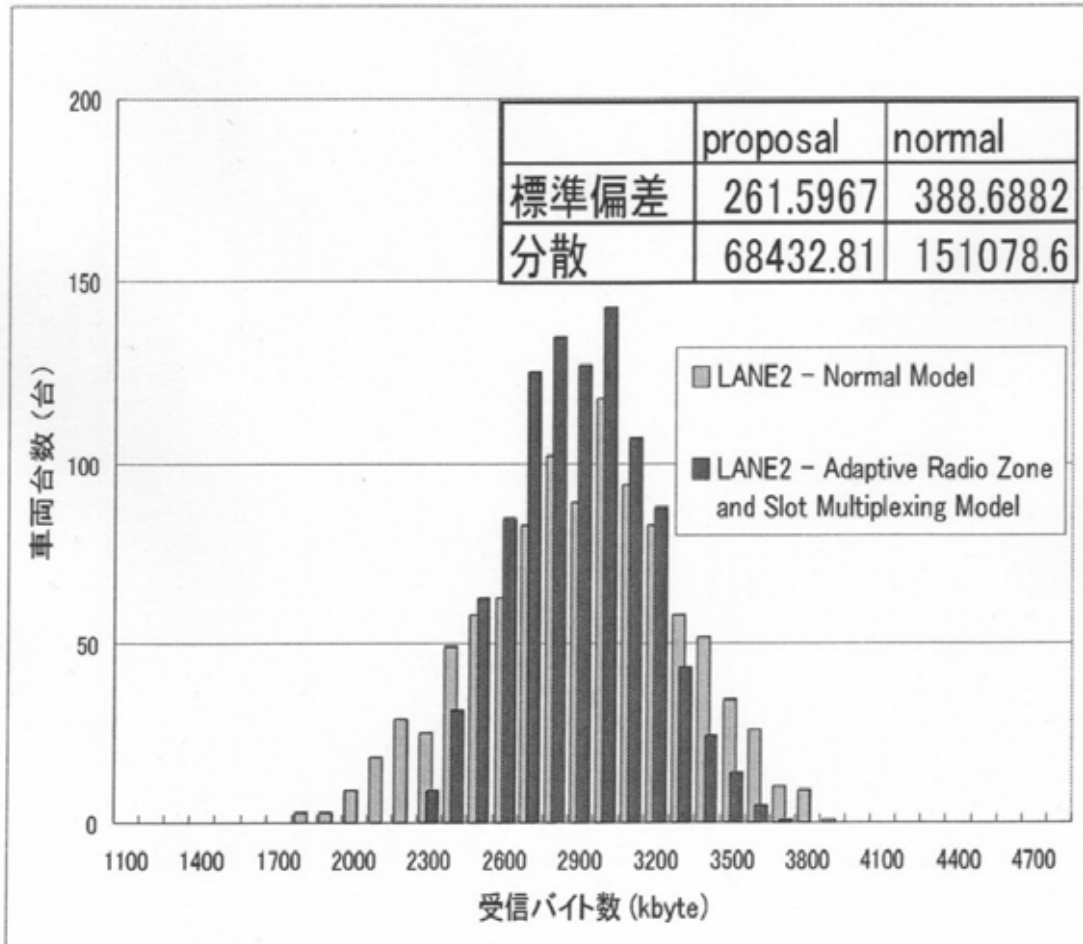


図 5.17 受信量の分散 (中央車線)

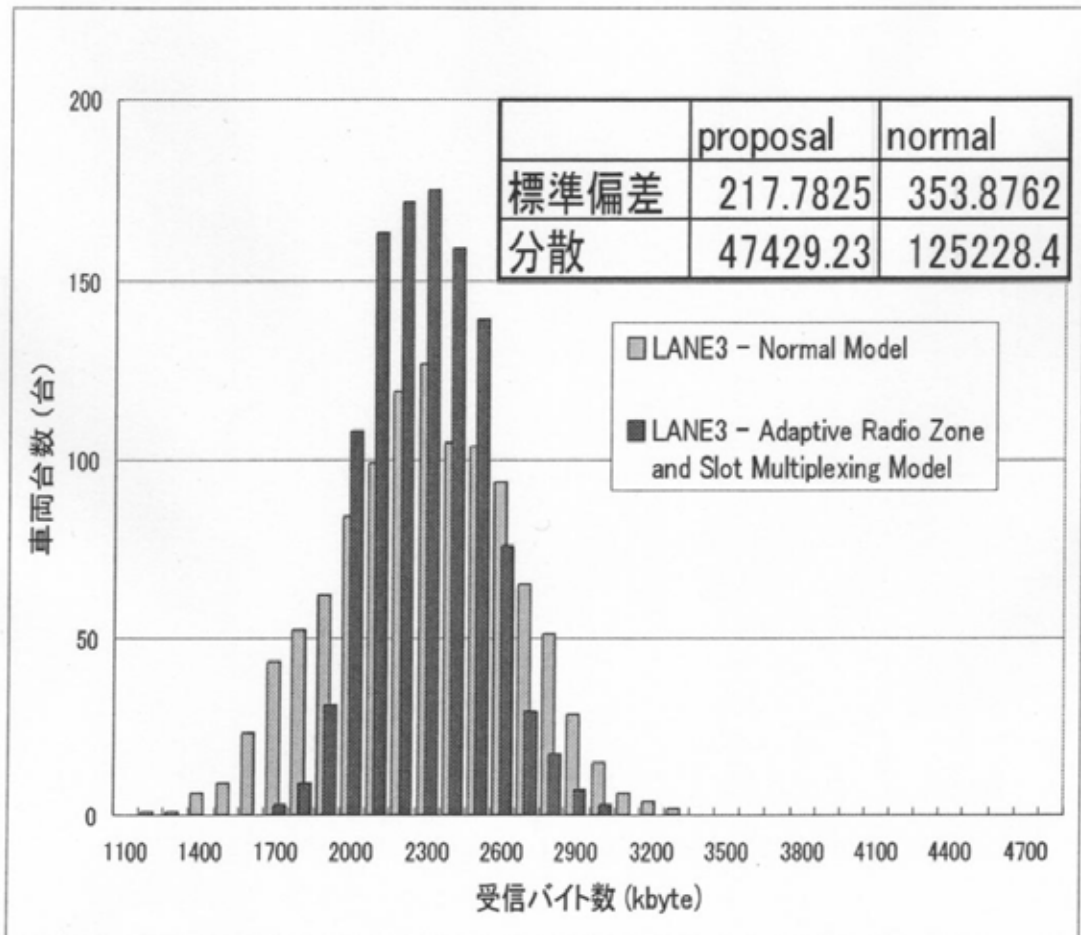


図 5.18 受信量の分散 (追い越し車線)

5.4 可変無線ゾーン構成と動的スロット多重のまとめ

第4章で提案した連続型無線ゾーン構成モデルでは、路側アンテナごとの複数の極小無線ゾーンを ROF 技術によって連続的に一体化する構成となっている。この構成の場合、車両密度が低いときには ROF ゾーンを大きくすることによってハンドオフの少ない通信が可能である。一方、同一ゾーン内で通信できる車両の台数が限られているため、車両密度が高くなると通信できない車両の数が増加する。このように ROF ゾーンの適切な大きさは車両密度によって変化するので、あらかじめ一意に決定することができない。

この問題に対して可変無線ゾーン構成法と動的スロット多重方式を提案した。可変無線ゾーン構成法は車両台数の増減により無線ゾーンの構成法を変化させるものであり、動的スロット多重方式は通信のスロットを多重化して複数の車両で共有する方式である。

シミュレーションによる評価から、以下の結果を得た。

- 可変無線ゾーン構成法では、車両密度が低い高速移動状況における通信で問題となるハンドオフの頻度を減少できることを示した。
- 動的スロット多重方式により、車両台数が増加した場合でも通信スロットを使用できるようにしたことで、ゾーン間をまたがって継続した通信を可能とした。

以上の結果から、これら2つを組み合わせた方式は、車両密度が低い場合には通信の効率を高め、車両密度が高くなった場合には多数の車両に対して通信機会を平準化するのに役立つことが判る。

シミュレーションは動的スロット多重の効果を確認するためにかなり高い走行密度まで検討している。ROF ゾーンが分割されて単独の無線セルになるのは車両密度 50 台/km/レーンを越えたあたりからである。ほとんど容量一杯の状態で流れている交通流では車頭間時間は 1.1~1.5sec が最も多く、100km/h の走行速度の場合に車頭間距離で 30.6m~41.7m になる。車両密度にすると約

24～33 台/km/レーンに相当する。50 台/km/レーンの密度は平均車頭間距離が約 20m に相当し、80km/h～120km/h の平常走行としては非常に高密度の状況といえる。この点から考えると、一般的な自専道の密度の場合や車載機の搭載率があまり高くない段階では、最小の ROF ゾーンを無線セルの 2 倍や 3 倍などの複数の無線セルとして構成すれば十分と考えられる。このように複数の無線セルが最小単位であれば、無線ユニットの数量が非常に経済的になる。設置した後に、交通量が増大したり車載機が普及して ROF ゾーンを細かくしなければならなくなった場合でも、装置の設置場所は集中しているため増設が容易である。以上のように、この方式はアンテナ支柱ごとに無線機を設置する場合に比べて工事コストや保守コストなどの面でも非常に経済的になる可能性を有している。

第6章 結論

日本の9つのITS開発分野の中で、ナビゲーションの高度化やETCの開発が先行しているが、ITSの目的を考えると安全運転にかかわる機能が非常に重要である。最近の交通事故の増大を考えると、ITSによる運転支援機能は早期に実用化しなければならない。こうした背景から、当面は「運転責任はあくまでドライバ」とし、インフラがその運転の支援を行うようなシステムの適用が現実的である。そのためには事故を起こしやすい道路区間（例えば見通しの悪いカーブなどの区間や、気象条件の悪い区間）を対象として道路と車両の間の通信が可能な無線ゾーンを構成することが求められる。

(1) 研究結果の要約

運転支援のためのDSRCに求められる連続的で信頼性の高いリアルタイム通信路を構成するために、局所型のDSRCの路側アンテナを道路照明灯の基準に合わせて設置する方式を提案し、見通し伝搬路の確保に非常に有効であることをシミュレーションで評価した。

局所型のDSRCを多数設置することは、装置類のコストよりも設置工事のコストが非常に掛かり経済的な面で実用化が難しいが、道路照明灯は道路付帯設備として基準化されており、照明柱の照明灯と路側アンテナを一体化した構成をとることで、性能と経済性を両立させることが可能となる。

次にROF技術を用いて、複数の路側アンテナを共通の無線装置に接続して一つの長い無線ゾーンを構成することによって、ハンドオフによる通信効率の低下を防ぐ構成を提案した。

こうして無線ゾーンが広がるとゾーン内の車両数が増加するが、DSRCでは通信スロットが限られているために一つの無線ゾーンで通信可能な車両の数が制限される問題が生じる。この問題に対して、車両台数の増減により無線ゾーンの構成を変化させる動的無線ゾーンの構成法と、車両密度が非常に高くなったときに通信スロットを複数の車両で共有・多重化するスロット多重方式を提案して評価した。

以上の研究の結果として、走行支援のための通信として要求される項目に対して以下の成果を得ることができた。

- 運転支援のために必要とされる区間で、連続通信が可能であること。

ETCなどで実用化されている5.8GHz帯の局所的なDSRC技術を基本として連続型の無線ゾーンを経済的に構成することが可能である。

- 通信の信頼性が十分確保できること。

照明柱の照明灯と路側アンテナを一体化した構成をとることでシャドウイングの影響は非常に少なく、シャドウイングを受けても連続的な回線断とはならない。可変無線ゾーン構成法によって、車両密度が低い高速移動状況における通信で問題となるハンドオフの頻度を減少できる。

- 通信ゾーン内の全ての車両に情報が伝達できること。

動的スロット多重方式により、車両台数が増加した場合でも通信スロットを使用できるようにしたことで、ゾーン内の全ての車両と継続した通信が可能である。

(2) 今後の課題

本論文は走行支援のための「路車間通信技術」に関するものであったが、DSRCの中の「車々間通信技術」も走行支援の通信手段として研究が進められている[92][93][94]。自動車のスペースは限られており、搭載する無線機はできるだけ統合化して多目的に利用することが望まれる。しかしながら、現在ITSに割り当てられているマイクロ波帯は、公衆移動体通信や無線LANにとっても重要な電波であり、車々間通信のために帯域を広げることは非常に困難である。

DSRCはその名称のように非常に短い距離で使用する無線システムであり、筆者は将来的にミリ波帯を用いて路車間通信と車々間通信を統合して利用すべきであると考えている[95]。特に60GHz帯は酸素の吸収による減衰が大きい特殊な電波帯であり、一般的には利用し難い電波であるが、局地的な通信を行うDSRCの場合では、干渉の少ない非常に使い易い電波とすることができる。

本論文で提案した道路照明の設置基準に準拠した連続型の路車間通信の構成法は、マイクロ波だけでなく将来のミリ波の利用にも適した方式である。

(3) おわりに

安全運転の究極の姿を考えると完全な自動運転に到達するが、実用化のためには通信以外の技術開発を含めて多くの課題があり時間が必要である。自動運転や自動車の制御を伴う安全走行支援の機能は、ドライバの受容性の議論や、事故の際の責任問題などの法制度の整備が必要であり、直ちに実用化できるわけではない。しかしながら、本研究結果によって、まずは危険の警告段階の実用化から着手することは可能と考える。道路交通における「安全」への国際的な取り組みに対して、本研究が少しでも指針的な役割を果たせれば幸いである。

謝辞

本研究をまとめるに際しまして、主査としてご指導を賜りました慶応義塾大学理工学部の岡田謙一教授に御礼申し上げます。また、本研究に道を開いていただき、一貫してご指導いただきました東京工科大学コンピュータサイエンス学部の松下温教授に感謝いたします。さらに、本論文の副査として適切なご意見を賜りました慶応義塾大学理工学部の小澤慎治教授，川嶋弘尚教授，中川正雄教授に心より御礼申し上げます。

本研究に関しまして、熱心な討論をしてくださいました慶応義塾大学理工学部の重野寛助教授，千葉工業大学の屋代智之助教授，および慶応義塾大学理工学の岡田・重野研究室の皆様感謝します。

最後に、ITS の領域で博士論文を書くように勧めてくださいました技術研究組合走行支援道路開発機構の前常務理事 故若生茂雄氏に対して心の中で研究の報告をするとともに合掌させていただきます。

[参考文献]

- [1] 西澤定律：交通システム特集号によせて -21 世紀の社会と交通システム-，沖電気研究開発，Vol.63，No.3，pp.1-2（1996）。
- [2] 森地茂，川嶋宏尚，奥野卓司：ITS とはなにか，岩波書店（2000）。
- [3] （財）自動車走行電子技術協会編：車が変わる 交通が変わる，日刊工業新聞社，（1989）。
- [4] ITS HANDBOOK in JAPAN：（財）道路新産業開発機構（1997）。
- [5] 国土交通省道路局：ITS HANDBOOK，
<http://www.its.go.jp/ITS/j-html/2000HBook/chapter1/index.html>，2000。
- [6] （社）交通工学研究会編：インテリジェント交通システム，丸善（1997）。
- [7] 徳山日出男：マルチメディア・クライシス，KK ベストセラーズ，（1994）。
- [8] ミリ波技術の基礎と応用編集委員会編：ミリ波技術の基礎と応用，（株）リアライズ社(1998)。
- [9] 福井良太郎：交通システムと高度情報化，沖電気研究開発，Vol.63，No.3，pp.3-6（1996）。
- [10] ITS-Japan：ITS に係るシステムアーキテクチャについて，
<http://www.ijnet.or.jp/vertis/j-frame.html>，（2003）。
- [11] 藤井治樹：システムアーキテクチャ プラットホーム，電子情報通信学会誌，Vol.83，No.7，pp.531-534（2000）。
- [12] 福井良太郎：ITS における通信技術とその応用，日本機械学会全国大会，ITS フォーラム予稿集（1998）。
- [13] 福井良太郎：ITS 通信技術，電子情報通信学会ソサエティ大会予稿集（1998）。
- [14] 福井良太郎：ITS 通信技術，日本ロボット学会誌，Vol.17，No.3，pp.24-28（1999.4）。
- [15] 福井良太郎：ITS 情報通信システム技術，情報処理学会誌，Vol.40，No.10，pp.970-973（1999.10）。
- [16] 屋代智之，松下温：路車間・車々間通信統合 MAC プロトコル，情報処理学会論文誌 Vol.J42，No.7，pp.1781-1789(2001)。

- [17] 福井良太郎：道路～車両間情報通信システムの開発状況，電子情報通信学会誌，Vol.73, No.3, pp.257-275 (1990.3)
- [18] 太刀川喜久男，中瀨紀雄：ITS を支える路車間通信・車々間通信の技術，沖電気研究開発，Vol.63, No.3, pp.63-68 (1996) .
- [19] 熊谷信昭監修：自動車用ナビゲーションシステムの現状と将来展望，技術図書出版 (1991) .
- [20] 移動通信における準マイクロ波帯の利用に関する調査研究会編：移動通信における準マイクロ波帯の利用の将来展望，研文社.
- [21] P.B.Goes, H.Kawashima, U.Sumita: Analysis of a New Thruway Communication System with Discrete Minimal Zones, IEEE Transactions, Vol.40, No.4, pp.754-764(1992).
- [22] 真島一男：ITS 革命，(株)ぎょうせい (2001) .
- [23] 日経ムック：ITS のすべて，日本経済新聞社 (1995) .
- [24] (財)道路交通情報通信システムセンター編：VICS の挑戦，同センター発行 (1996) .
- [25] 坂田龍松：VICS ってなに？，日刊工業新聞社，(1996) .
- [26] S.Yamada: The Strategy and Development Plan for VICS, IEEE Communications, Vol.34, No.10, pp.94-97 (1996).
- [27] 西川正明，片桐勇一郎，平山誠：VICS (道路交通情報システム)，沖電気研究開発，Vol.63, No.3, pp.7-12 (1996) .
- [28] (社)自動車技術会編：自動車の交通環境調和技術，(株)朝倉書店(1997).
- [29] (財)道路システム高度化推進機構編：ETC (イーテック) 便覧 平成 14 年度版，同機構発行，(2002) .
- [30] 進藤康史，三宅敏章，荒井広史：ノンストップ自動料金収受システムの共同研究，沖電気研究開発，Vol.63, No.3, pp.31-38 (1996) .
- [31] (社)電波産業会：有料道路自動料金収受システム標準規格，(ARIB STD-T55) (1997) .
- [32] (社)電波産業会：狭域通信 (DSRC) システム標準規格，(ARIB STD-T75) (2001) .

- [33] M.Yamazaki, S.Niimi, K.Izuhara, Y.Koike: Experiment of advanced parking lots utilizing DSRC and ETC, 9th World Congress on ITS, Chicago(2002).
- [34] DSRC システム研究会編:ITS インフォメーションシャワー, クリエイト・クルーズ (2000) .
- [35] 菊地春海: 走行支援システムの実用化に向けて, 月刊建設, 00-11, pp.33-35 (2000) .
- [36] 高田邦道監修: ITS 道路・交通・情報システムとそのアクションプログラム, 地域科学研究会 (1996) .
- [37] N.Asanuma, M.Kawai, A.Takahashi, R.Shigenari, K.Ochi: Intelligent Technologies of ASV, 7th World Congress on ITS, Turin (2000).
- [38] 先進安全自動車推進検討会: 先進安全自動車 (ASV) 推進計画 (第2期) の成果について, http://www.mlit.go.jp/jidosha/anzen/shou/index00_1.html, 国土交通省 (2003) .
- [39] K.Furuta, T.Nogami, A.Kawasaki: Development of an ITS network system, 9th World Congress on ITS, Chicago (2002).
- [40] M.Hiraiwa, T.Aizono, T.Sakamoto, Y.Fukuzawa, T.Noake, M.Mori: Implementation and evaluation of network platform for highly reliable communications on Smart Gateway, 9th World Congress on ITS, Chicago (2002).
- [41] S.Kubota, T.Misawa, T.Haraki, Y.Moriya: Seamless and efficient communication in ITS network -its experiment, 9th World Congress on ITS, Chicago (2002).
- [42] 自動車交通情報化調査専門委員会: 自動車交通情報化, 電気学会技術報告, 第II部, 第437号, pp.18-20 (1992.9)
- [43] Edited by K.Chen and J.C.Miles: ITS Handbook 2000, PIARC Committee on Intelligent Transport (2000).
- [44] ITS America: A Comparison of Intelligent Transport Systems Progress around the World through 1996, ITS America (1997).

- [45] C.H.Rokitansky: DSRC Standardisation and Conformance Testing of DSRC/EFC Equipment, 7th World Congress on ITS, Turin (2000).
- [46] S.Oyama, K.Tachikawa, M.Sato: DSRC standards and ETC systems development in Japan, 7th World Congress on ITS, Turin (2000).
- [47] (財)自動車走行電子技術協会編: ITS の標準化 2003, ITS Japan (2003) .
- [48] L.Armstrong: New DSRC Standards Under Development for North America, 7th World Congress on ITS, Turin (2000).
- [49] 伊丹誠: OFDM 変調の基礎とシステム実現のための諸技術, 電子情報通信学会誌, Vol.85, No.12, pp.925-931 (2002) .
- [50] 国土交通省: 交通白書, <http://www.mlit.go.jp/hakusyo/hakusyo.html>, (2003) .
- [51] 和泉順子, 湧川隆次, 川喜田佑介, 秋山由和: インターネット ITS プロジェクトの概要, 情報処理学会誌, Vol.43, No.4, pp.369-375 (2002).
- [52] 渡辺文夫, 藤岡雅宣: 移動通信システムの ALL IP 化の動向, 電子情報通信学会誌, Vol.86, No.1, pp.39-44 (2003) .
- [53] 鈴木豊: インターネットアクセス通信技術の現状, 情報処理学会誌, Vol.43, No.4, pp.462-467 (2002) .
- [54] 阪田史郎: モバイルインターネットの展望, 情報処理学会誌, Vol.42, No.12, pp.1193-1197 (2001) .
- [55] 高橋寿平: インターネット ITS, 車と情報, (財)自動車走行電子技術協会誌, Vol.27 (2002) .
- [56] 平岩賢志, 坂本俊幸, 藤井尚吉, 森光正: DSRC (ARIB STD-T75 準拠) システムの実装及び評価, 情報処理学会, 高度交通システム研究会, Vol.2002, No.83, pp.69-75 (2002) .
- [57] Y.Tanaka, Y.Iwasaki, A.Hosaka: Requirements of Advanced Cruise-Assist System in Japan, 6th World Congress on ITS, Toronto, (1999).
- [58] 山内照夫: 21 世紀へ向けた走行支援道路システムについて, 電子情報通信学会誌, Vol.83, No.7, pp565-568 (2000) .
- [59] 川崎茂信, 横地和彦: 走行支援システムの実証実験, 交通工学, 交通工学研究会誌, Vol.36, No.6, pp.23-29 (2001) .

- [60] (社)電波産業会編：自動車通信システムにおける周波数有効利用技術調査検討会報告書，参考資料-3，（2000）．
- [61] 田中俊之 他：低結合損失型らせん漏洩同軸ケーブルの開発，昭和電線レビュー，Vol.52，No.1，pp.27-31（2002）．
- [62] 中村亮，角町洋，福井良太郎：準マイクロ波帯における漏洩同軸ケーブル（LCX）伝送機能実験結果，電気学会，道路交通研究会，RTA-93-1~5，pp.39-47（1993.3）．
- [63] 有住正人，山田豊：AHS と車間側方コントロールシステム，沖電気研究開発，Vol.63，No.3，pp.39-46（1996）．
- [64] M.Nakamura, H.Tsunomachi, R.Fukui: Road Vehicle Communication System for Vehicle Control Using Leaky Coaxial Cable, IEEE Communications MAGAZINE, Vol.34, No.10, pp.84-89(1996).
- [65] 中村守，公賀邦明，二星明登：コルゲート型漏洩同軸ケーブルの開発，三菱電線工業時報，第100号，pp.73-78（2003）．
- [66] アサヒオリジナル [SCIas 編]：ITS 21世紀、車と道路はこう変わるー，朝日新聞社（1998）．
- [67] AHS 研究報告：AHS（自動運転道路システム）公道実験，http://www.netpark.or.jp/ahs/jpn/c05j/z_demo_j/demo02.htm，（2003）．
- [68] 阿部絃士，安達文幸，小泉寿男：ミリ波を用いた次世代 ITS のための路車間通信システムの検討，情報処理学会，高度交通システム研究会，Vol.2000，No.112，pp.121-127（2002）．
- [69] 関根雄飛，屋代智之：路車間通信における空間ダイバーシティを用いた受信環境の検討，情報処理学会，高度交通システム研究会，Vol.2002，No.115，pp.187-194（2002）．
- [70] T.Iwata: Study on Radio Transmission for 5.8GHz DSRC, 8th World Congress on ITS, ITS00260 (2001.10).
- [71] 原田知育，小渕真己：DSRC 車載機の受信制御装置，情報処理学会，高度交通システム研究会，Vol.2002，No.115，pp.113-117（2002）．

- [72] M.Obuchi, S.Matsuzawa: Analysis of the Characteristics of the On-board DSRC Antenna, 8th World Congress on ITS, ITS00498 (2001.10).
- [73] 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，高度交通システム研究会，2-10，pp.55-60 (2000.9).
- [74] 栗本典彦：道路の付属施設，交通工学研究会編，技術書院
- [75] (社)交通工学研究会編：交通工学ハンドブック 2001CD-ROM 版，丸善 (2001) .
- [76] 自動車工学全書編集委員会：自動車工学全書別巻自動車に関する法規・規格・統計，株式会社山海堂 (1980) .
- [77] 無線データ通信研究会編：無線データ通信入門解説，(株)ソフトリサーチセンタ，(1994) .
- [78] 山内雪路：デジタル移動通信方式，東京電機大学出版社 (1995) .
- [79] 室谷正芳，山本平一：デジタル無線通信，産業図書 (株) (1986) .
- [80] 桑原守二監修：デジタル移動通信，科学新聞社 (1992) .
- [81] K.Yonezawa, T.Fukuhara, H.Ishikawa, K.Sugiyama, H.Shinonaga: Performance Analysis of Future Road-to-Vehicle Communications System with Handover Function, 9th World Congress on ITS, Chicago (2002).
- [82] 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，高度交通システム研究会，Vol.2002，No.48，pp.55-62 (2002) .
- [83] 三瓶政一，森永規彦：高速ワイヤレスデータ伝送のための適応変調技術，電子情報通信学会誌，Vol.85，No.4，pp.245-251 (2002) .
- [84] 吉原貴仁，堀内浩規，児島史秀，佐藤勝善，藤瀬雅行：ROF 路車間通信技術を用いた ITS コンテンツ配信プラットフォームの提案，情報処理学会，高度交通システム研究会，Vol.2002，No.21，pp.59-66 (2002) .
- [85] Y.Aiki, M.Okada, K.Sasaki, H.Harada, M.Fujise: Spot Access System for Millimeter-wave Radio-to-Vehicle Communication Systems using Radio-on-Fiber Technology, ITST-2000, pp47-52(2000)

- [86] S.Fukushima, H.Fukano, K.Yoshino, Y.Matsuoka, S.Mitachi, K.Takahata: Bias-free access point module for a 5.8GHz fiber radio system, The 1st Japan-Korea Joint Workshop on Microwave Photonics, Th3-2, pp.119-122 (2000.2).
- [87] 松下温：やさしいLANの知識，オーム社（1994）．
- [88] 野口正一監修，松下温，近藤和実：コンピュータネットワーク入門，オーム社（1988）．
- [89] 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，電子情報通信学会，ITS研究会，ITS2002-180，pp.117-122(2003.3).
- [90] A.Yamaguchi, Y.Takeuchi, M.Yasunaga,: Dynamic Radio Zone Communication System for ITS, 8th World Congress on ITS, ITS00133 (2001.10).
- [91] Y.Yamasaki, M.Yasunaga, Y.Murakami, H.Moribe: Development of Beam Control Array Antenna for Road to Vehicle Communications, 8th World Congress on ITS, ITS00153 (2001.10).
- [92] 和田友孝 他：ミリ波車車間通信における信号伝搬特性，電子情報通信学会論文誌（B-II），Vol.J81-B-II, No.12, pp.1116-1125（1998）．
- [93] アリ・ウイドド，長谷川孝明：ITSのための新しい車々間通信ネットワークにおける位置情報の精度，通信範囲の安全性に与える影響と道路容量に関する検討，電気学会研究会資料，RTA-98-19, pp.41-46（1998）．
- [94] M.Aoki: Inter-Vehicle Communication –Technical Issues on Vehicle Control Application, In IEEE American Control Conference '91, Vol.3, pp.2539-2544 (1991).
- [95] R.Verdone: Multihop R-ALOHA for Intervehicle Communications at Millimeter Waves, IEEE Transaction on Vehicular Technology, Vol.46, N0.4, pp.992-1058 (1997).

[英字略語集]

AHS	Advanced Cruise-Assist Highway Systems
AHSRA	Advanced Cruise-Assist Highway Systems Research Association
ARIB	Association of Radio Industries and Businesses
ASK	Amplitude Shift Keying
ASTM	American Society of Testing and Materials
ASV	Advanced Safety Vehicle
CACS	Comprehensive Automobile Control System
CALM	Communication Air-interface Long and Medium range
CEN	Comité Européen de Normalisation
DSRC	Dedicated Short Range Communication
EC	European Commission
ERP	Electronic Road Pricing
ETC	Electronic Toll Collection
GPS	Global Positioning System
IEEE	Institute Electrical and Electronics Engineers, Inc.
ISM Band	Industrial, Scientific and Medical Band
ISO	International Organization for Standardization
ITS	Intelligent Transport Systems
ITU	International Telecommunication Union
IVC	Inter-Vehicle Communication
IVHS	Intelligent Vehicle Highway Systems
LCX	Leaky Coaxial
LISB	Navigation and Information System Berlin
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RACS	Road Automobile Communication System
ROF	Radio on Fiber
RPC	Road Pedestrian Communication
RVC	Road Vehicle Communication
SAFETEA	Safe, Accountable, Flexible, and Efficient Transportation Equity Act
TAO	Telecommunications Advanced Organization of Japan
UWB	Ultra Wide Band
VICS	Vehicle Information & Communication System
VPC	Vehicle Pedestrian Communication