
次世代車載無線技術の交通マネジメント応用研究

—WAVE による新興国の交通解析と自然災害レジリエント応用—

Study for Traffic Management by WAVE technology

—Traffic analysis of Emerging Country and Resilient application

For Natural Disaster by WAVE—

Wireless Access in Vehicle Environment

2017 年 2 月

坪井 務

Tsutomu Tsuboi

目次

第1章	はじめに	1
1.1	研究の目的	1
1.2	背景と動機	2
1.3	研究の意義	4
1.4	本論の構成	5
第2章	先行研究	6
2.1	WAVE 技術の基本的先行研究	6
2.2	自動車分野の通信技術に関する先行研究（広域通信と狭域通信）	7
2.3	“Fog computing”に関する先行研究	11
2.4	プローブに関する先行研究	12
2.5	先行研究におけるまとめと課題整理	13
2.5.1	各種通信方式と適用性	13
2.5.2	規格標準化と周波数割り当て	13
2.5.3	IoT/M2M の動向	14
2.5.4	700MHz 帯と 5GHz 帯 WAVE の位置付け	15
2.5.5	Cloud と” Fog computing” の位置付け	15
2.5.6	プローブ情報と交通特性	15
2.5.7	WAVE 普及のシナリオ	16
2.6	交通実情と無線通信技術の調査	17
2.6.1	世界の交通事情	17
2.6.2	国内交通事情	23
2.6.3	対象とする広域通信技術	26
2.6.4	対象の狭域通信技術	27
第3章	新興国交通定量分析	32
3.1	インド ITS 実証試	33
3.2	新興国交通の可視化	34
3.3	新興国交通交通流ビッグデータ解析と理論	36
第4章	新興国交通渋滞解析	42
4.1	交通流における渋滞解析	43
4.1.1	交通量変化と渋滞	44
4.1.2	交通渋滞パラメータ	45
4.2	渋滞の確証	52

4.3	データのサンプリング検証	57
4.4	インド都市交通の面的分析	59
4.5	車速比 (v_{ave}/v_f) 閾値の考察	60
第 5 章	ネットワーク定量解析と課題への考察	64
5.1	“Fog computing”	64
5.1.1	“Fog computing”の定義	64
5.1.2	環境モデルとネットワーク定量評価	65
5.1.3	“Fog computing”の応用	73
5.2	交通インフラへの応用	75
5.2.1	大都市圏への応用	75
5.2.2	地方都市カバー率	79
5.3	自然災害対策への応用 (QoL)	83
5.4	減災の地域性課題と対応 (QoL)	88
第 6 章	まとめ	92
6.1	WAVE 技術の有効性	93
6.2	今後の課題	95
図表一覧	.....	97
謝辞	.....	103
参考文献	.....	104
付録資料	.....	110
付録資料 1	: ネットワーク定量解析パラメータ	110
付録資料 2	: インド交通基本特性データ	115
付録資料 3	: 700MHz/5GHz による WAVE 特長比較	127
付録資料 4	: WAVE システム地域応用例	142
付録資料 5	: 自動車分野における IoT/M2M	151
付録資料 6	: WAVE 標準化への国際協調性課題	156
付録資料 7	: 隠れ端末問題解析	161
付録資料 8	: 世界の交通事故死者数と車両登録数相関	172
本論文に関する原著論文	.....	174
A)	学術論文	174
B)	国際学会 (査読付き論文)	174
C)	主な関連特許	175

第1章 はじめに

1.1 研究の目的

本研究は、2007 年より先進諸国を中心に開発が開始され 2015 年に国内で世界に先駆け商用化を開始した次世代車載無線技術（WAVE：Wireless Access in Vehicle Environment）の機能・仕様・応用に関するものである。技術進化が著しい情報通信技術（ICT：Information Communication Technology）の中で、WAVE はどのような特長を持ち具体的にどのようなメリットを輸送分野にもたらすかについて、対象となる様々な通信ネットワークを取り上げ、通信のパフォーマンス評価と対象となる交通流の定量解析により、渋滞・事故といった交通ネガティブ要因に対する交通マネジメントとしての位置付けと役割を明確にすることを目的としている。特に、交通渋滞による深刻な状態に直面している新興国における交通解析を進めるとともに、近年顕著になりつつある自然災害の社会環境破壊脅威に耐えられるいわゆる「レジリエント」な支援ツールとしての WAVE 技術の応用を検証する。

本論文の特長は、以下の 3 点があげられる。まず、先進国にて開発されてきた WAVE 技術を用いることで、交通渋滞による深刻な状況にある振興国においても役立つ可能性について、交通状況をリアルタイムに把握できるいわゆるプローブ応用による有効性を確認する。そのため具体的都市にて入手したビッグデータをもとに交通流の解析を初めて実施した点にある。このようなビッグデータはこれまでの先行研究では行っておらず、その解析から観測データと交通理論比較により交通基本特性を導いている。2 つ目の特長は、得られた交通基本特性から走行車両の平均速度と自由速度との比により渋滞の定量解析が可能であることを示し、市街地の複数個所に設置した画像トラフィックカメラによる一定期間（5 ヶ月）を経過した交通量の変化をとらえ交通の変化を面的にとらえたことにある。さらにその車速比が非圧縮性粘性流体の層流と乱流の境界条件の値と類似性があることを発見し、その類似性を検証することができた点にある。最後に、WAVE 技術の通信としての特長と応用例を検討した。交通量の把握としてのプローブデータは一般的にクラウドコンピューティング（Cloud computing）の世界で収集され扱われるこれまでの解釈から、クラウドとエンド端末（車両）の中間に新たなネットワーク領域として提言された「フォッグコンピューティング」”Fog computing”を定量化した。そのために対象となる各種通信技術を統一環境かつ統一手法による定量解析を実施し、解析の中で”Fog computing”としての特定化および他の移動体通信技術との比較を行った。その結果 WAVE システムは”Fog computing”に最適な通信技術であり、交通マネジメントに適した技術であることを示すことができた。また WAVE システムは将来主要交差点や信号機に設置されることが計画されており、大都市および地方都市におけるその有効

性を確認している。こうした道路インフラへの充実を見越し、交通以外の広い応用を検討すべく、近年問題となりつつある自然災害への対応に着目した。これは WAVE のリアルタイム通信の特長を生かした災害発生時のリアルタイム環境モニタリングポストへの活用を検討し、災害発生初期時点での住民への状況通知や避難誘導への支援とする災害に強いまちづくり応用としての拡張性を検証することとした。

1.2 背景と動機

近年 IoT (Internet of Things) というキーワードが頻繁に聞かれるように、様々な「モノ」がインターネットに接続されることで、新たなサービスの提供が可能とする時代の潮流になってきている。これを受けて自動車分野においても IoT 化への検討が行われ始め、人を介さずに車の制御を行う将来の自動運転につながる重要なテーマとなっている。また、リアルタイム制御として M2M (Machine to Machine) も合わせ聞かれるようになってきた。IoT/M2M の自動車分野への応用は、近年の情報通信技術 (ICT) の目覚ましい発展によるところが大きいといえる。自動車分野への応用が可能になった情報通信技術のはじまりは、1970 年代ごろになる。アナログ通信からデジタル通信への進化に端を発し、これまでのアナログ音声情報を主に伝える電話通信からデータ情報を高速にしかも大量に送ることができるデジタル通信になったため、自動車環境に必要な大量情報を扱えるようになった。筆者は 2003 年から次世代車載無線通信技術 (WAVE) の開発に携わる機会に恵まれシステムの検討として各種実証試験、標準化活動にも参加し、自動車メーカーと一体となった開発を行ってきた。この WAVE の開発は、国内においてもなかなか減らない交通事故や経済発展による物流ニーズに伴う人も含む輸送車両の増加による交通渋滞に対して ICT の活用で削減・緩和することを目的に行なわれてきた。また、ICT の代表でもある携帯電話の技術進化による世代開発が激しく起きており、現在では第 3 世代から第 4 世代端末となっており、現在では第 5 世代携帯通信の仕様検討の段階に入っている。この第 3 世代携帯通信 (3G) では高速パケット通信も可能に、第 4 世代 (4G) では LTE (Long Term Evolution) や WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) 通信サービスが開始され、毎秒数十メガビット (Mbps) の高速データ通信も可能となっている。これにより高速移動交通機関 (電車、自動車) においても通信アクセスが容易に行なえ、運転支援としてナビゲーション機能も交通渋滞情報と合わせた交通マネジメントへの応用として広がりつつある。このため WAVE システムと高速移動体通信システムの利用目的においては次第に明確な境界はなくなりつつある。そして、本格的な IoT 時代になると当然情報量は莫大になると容易に想定され、各種情報通信の効率の良い使い方が課題となってきているといえる。

一方で、電波利用の観点から、電波使用料が徴収され運用されている携帯通信システムに対し、WAVE システムはその公共利用目的のため無線 LAN 同様電波利用料を徴収せず世界的に利用できることになっている。この電波利用に関しては、電波の出力制限

はあるものの自動車分野への応用に免許不要で使用が許可されている 2.4GHz 帯や 5GHz 帯での使用認可は特に問題視されていなかった。ところが 2011 年のアナログテレビ放送終了に伴い UHF 帯（ここでは 700MHz 帯）に WAVE システム用として自動車分野へ使用可能な周波数として 10MHz の帯域が割り当てられた。これに対し通信使用料を支払っているキャリア側から問題視された経緯がある。この背景は 700MHz 帯無線通信の通信距離が 5GHz 帯と比較し長距離伝送できる点や電波の回り込み（回折）効果により見通しのきかない環境「見通し外通信」（NLOS : Non-Line of Sight）においても使用できるといった利点があり、通信業者として自動車分野への無料の周波数割り当てに対する不公平感が残ったことにある。このことが有限な電波利用の観点から問題視されている原因となっている。そのため WAVE 開発側にとっては明確な電波利用目的とその効果を示すことは重要な課題でもある。また、この UHF 帯利用の WAVE システムは現時点では日本のみとなっており、世界からもその動向が注目されている。WAVE として欧米をはじめ世界的に利用が認められている周波数は 5GHz 帯のみであるが、国内ではこの 700MHz 帯システムと 5.8GHz 帯システムの 2 種類が提供されており、自動車分野への積極的な展開が行われているため、その有効性を示すことは義務でもあるといえる。

さて本研究の WAVE 技術は、交通事故、交通渋滞への対応として先進国にて開発されてきた技術ではあるが、事故・渋滞といった問題は先進国のみの課題ではなく、むしろ産業の発展が目覚ましい新興国ではその深刻さを増しているといえる。例えば、アジア諸国の中でも高い経済成長（年間経済成長率 5～7%）を続けているインドでは慢性的な交通渋滞が発生しており、渋滞による環境破壊とこれに対する経済損出はビジネスウィーク誌の報告で 2007 年に約 6600 億円（約 60 億米ドル）¹にも及んでいるとの報告がある。また、インド国内の自動車販売台数は 2013 年には 300 万台から、2020 年には 3 倍の 930 万台になると予測²されており状況はさらに加速されるものと考えられる。さらに交通事故による死亡者数ははっきりとは報告されていないものの年間約 14 万人（2011 年）³を超す状況と報告されている（WHO では 2010 年で 23 万人となっている）。また、乗客輸送量は、2010 年の 583BPKM（10 億人・km）から、2020 年は 1,111BPKM、2050 年には 4,083BPKM と飛躍的に増大し、何も対策を講じない場合（BaU: Business as Usual scenario）では 2010 年での CO2 排出量（基準値）の 3,600 万トンから 2020 年

¹ Businessweek.com “The trouble with India”,

<http://www.bloomberg.com/news/articles/2007-03-18/the-trouble-with-india>

² JD パワー予測 <http://www.sankeibiz.jp/macro/news/130410/mcb1304100503010-n1.htm>

³ インド交通事故死者数

<https://data.gov.in/resources/total-number-persons-killed-road-accidents-india-during-2003-2011/download>

には 5,200 万トン、2040 年には 1.4 億トンとなる⁴。

このような状況は中国でも同様に起きており今後東南アジアをはじめとする新興国共通の課題であることは明確になっている。こうした課題は当事国の問題であるばかりか、影響は地球全体の温暖化原因のひとつとして世界的規模の問題にもなっており早急な対応が望まれている。

1.3 研究の意義

これらの背景から本研究は以下のような大きく 3 つの意義をもっている。第 1 に、WAVE 技術は先進国で開発されているシステムではあるが、交通実態把握が途上にある新興国への応用の可能性を実際の交通解析することで WAVE 技術の応用を検討する。第 2 に、新興国における渋滞解析は、交通の実態把握も十分でない状況下において、市街地に複数設置した観測地点による長期にわたる観測データに基づき、交通解析で鰐て田基本特性に合わせて渋滞パラメータを提案している。そして第 3 に、自動車の IoT により通信は Cloud computing から”Fog computing”という新たなネットワーク領域で生かされ、WAVE 技術を含む各種対象通信技術の定量評価によりその役割を明確にし、今後の交通機関への大規模展開計画を受けて、大都市圏と比較しインフラ整備に差がある国内地方都市における応用例をもとに導入シナリオを示している。この検討では、交通分野以外の環境センサー（自然災害対策応用）としての発展可能性を示している。これらより WAVE の技術的優位性を生かした地域への具体的応用を示すことができる。

ここで、本研究の過程において活用および導入する手法を以下にまとめる。(1)新興国の交通実態に関して、2 ヶ月間もの交通流の観測を実施することにより得られたビッグデータをもとに交通基本特性の論理式を導き出し、渋滞パラメータとして自由速度との車速比により解析した手法を導入した。また、走行車両の平均速度と基本特性から得られる自由速度との車速比が、渋滞を表すパラメータとしての機能となることを検証している。ここで得られた解析手法は世界で初めての試みとなっている。(2)各種無線通信技術の通信距離をセル設計の最適化手法としてアーランの公式（アーランの B 式）を応用し、仕様の異なる通信方式に対して環境パラメータの一元化を図ることで通信機能の有意差を比較する手法を用いた。アーランの公式は携帯通信方式では一般となっているが、無線 LAN や WAVE といった狭域無線通信への適用はこれまでには存在していなかった。このためそれぞれの通信技術のモデル化を把握することで統一的に使用することが示せた。(3)地域防災を目指した無線基地局の最適配置に関して、対象空間における通信カバー範囲に空間カバー率を導入し、目標とする空間カバー率を得るための無線基地局の設置候補をメッシュ区分することで優先順位を決定し、所要の空間カバー率を得るため

⁴ P.R.Shukla”Integrated Assessment Modelling Activities in India in 2014-15”20th AIM International Workshop,2015.1

の手法を確立した。これらは WAVE 以外のセンサーネットワーク (IoT) としての応用に適用可能と考える。

1.4 本論の構成

本論文は 1.3 節の 3 つの意義をそれぞれの観点から以下の構成で展開し、WAVE 技術のネットワークの位置付けと交通マネジメントへの役割を示す。

まず、1 章 (本章) は、本論文の目的・意義・背景の概要を紹介した。2 章では、WAVE 技術の動向について、これまでの WAVE 開発にともない実施された先行研究とその検討から見える課題の整理と交通分野にはどのような通信技術が対象となるかを、交通実態把握としての調査を行なった。3 章では、筆者が調査する機会を得たインド国における交通ビッグデータの実態解析による交通基本特性の獲得と WAVE によるプローブ応用を検討の考察行なう。また、第 4 章では第 3 章の結果から得た交通基本特性の自由速度と道路での平均車速の比が、新興国の渋滞解析を行えるパラメータになりえることを示し、将来の WAVE の導入によるリアルタイム性の展開を示した。第 5 章では現在まだ概念として新しい“Fog computing”が今後の IoT における重要な役割を果たすと考えられることから、通信技術のネットワーク解析を行なうことで“Fog computing”における WAVE の位置付けと果たす役割を検証する。また、WAVE 技術の応用拡大として国内地方都市を例にとり、WAVE システムの導入および防災・減災システムへの応用として、生活の質向上 (QoL : Quality of Life) ひいては災害に強いレジリエントな環境づくりへの WAVE 活用考察につなげる。6 章は、WAVE 技術の優位性を総合的にまとめ、今後の課題となる項目の整理を行なう。また、本論の検証で用いる数値パラメータの導入や、解析代表例以外の解析データ結果ならびに標準化における課題など個別に詳細検証が必要な項目に関して、参考資料として付録資料 1~8 にまとめる。本論にて参照が必要な場合にその付録資料番号を付記し、本論では主テーマを中心に考え方をまとめる構成とした。

第2章 先行研究

2.1 WAVE 技術の基本的先行研究

WAVE 技術の基本的な先行研究として以下の 2 件があげられる。

WAVE 技術は、はじめに述べたように 2007 年ごろから本格的な開発と実証が日本を含む先進国にて行なわれてきた。日本において世界に先駆け WAVE の商用化を 2015 年より推進した研究の中心となったのが、民間企業・政府関係機関等約 100 団体による「ITS 情報通信システム推進会議」である。この推進会議は 1999 年の設立から現在も WAVE 技術に係る標準化と普及啓発活動を推進しており、なかでも世界最初の商用を開始した日本の WAVE 技術は UHF 帯である 700MHz の周波数帯を用いたシステムに関して詳細検討を行っている。この技術の開発の基礎的研究となったのが 2009 年 6 月にまとめた報告書「700MHz 帯を用いた運転支援通信システムと隣接システムとの周波数条件に関する技術資料」ITS Forum RC-007 1.0 版[1]が基本となっている。この技術資料では、これまでテレビ放送に使用していた周波数帯を放送終了に伴う車載無線通信への割り当てにより、システム環境における通信機能の検討が特に詳細に行なわれている。この先行研究の主な成果のうち、本テーマに関係する項目は以下の通りとなる。

- ・ 700MHz 帯の通信環境の道路モデル化
(都市周辺環境の 4 通りのモデルを規定)
- ・ 通信電波の基本特性の確定
(車載機、路側機の諸元および通信仕様)

上記項目は、自動車通信としての環境パラメータとして重要であり、本論の次章以降の定量解析の基本条件として導入し、この先行研究結果の継続性を持たせることでこれまでの研究成果との比較を容易にしている。この先行研究は 700MHz 帯 WAVE システム評価の評価となっているため、本研究において他の高速移動体通信方式との比較検証への基本環境モデルとしても採用することで統一的環境条件での比較検証が可能となる。

次の先行研究は 5.8GHz 帯 WAVE として徳田[2]が、テレマティックサービス実現に向けた通信システムの開発として画像情報を含むデータの実証を含む成果が報告されている。この先行研究において本テーマに関係する項目は以下となる。

- ・ 5.8GHz 帯 WAVE としての性能実証
- ・ 車・車間の動画通信実証

この先行研究の特長は 5GHz 帯 WAVE の動画転送応用の可能性を示し、マルチメデ

ニア通信を検討した具体例として参考となり、自動車通信の応用の広がりの可能性として活用できる。

2.2 自動車分野の通信技術に関する先行研究（広域通信と狭域通信）

本項の先行研究の紹介の前に、本研究の対象とする通信技術の範囲を見てみる。WAVE 技術と同様に高速移動体通信を可能にする通信技術は各種存在しているが、本論の扱う範囲である自動車分野に範囲を限定する。大まかに通信技術を区分すると、WAVE 技術や無線 LAN (WiFi) といった通信距離が狭い狭域通信と携帯電話通信技術のように比較的広範囲における通信サービスを提供する広帯域通信とに分けられる。これら代表的な無線通信技術に関して開発時期を含めた関係を図 1 に示す[3]。

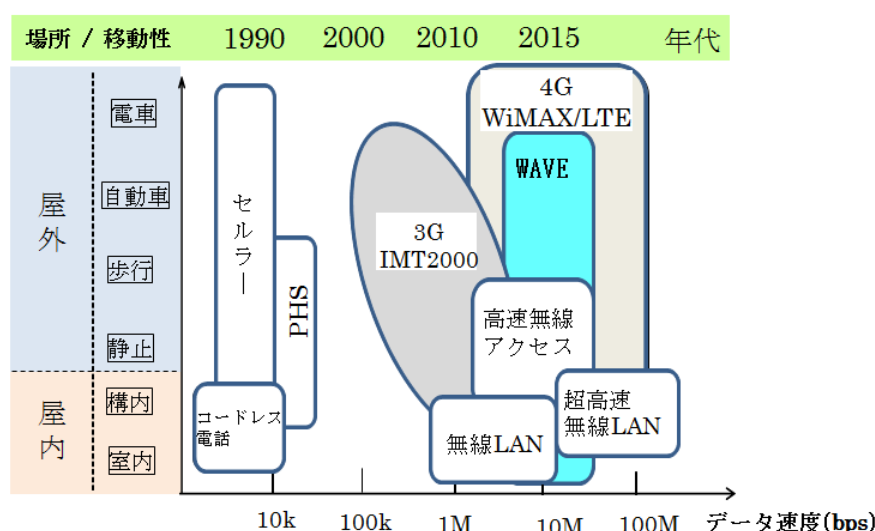


図 1 無線通信技術の位置付け

図 1 に示すように、一般的に高速無線通信技術が普及し始めるのは 1990 年に入ってからのことである。また、屋内用途の無線 LAN (WiFi) システムはもともと 1980 年代に開発された有線のパソコン LAN が 1990 年代には無線化に発展し、車載無線技術 (WAVE) への適用にまで広がってきた。電話回線システムは、屋内のコードレス電話から、屋外の高速移動通信が可能なセルラー無線へ、アナログ通信からデジタルデータ通信を可能とした PHS (Personal Handy phone System) 開発へと進化し、現在の携帯電話の主流である IMT2000 (International Mobile Telecommunication 2000) へと展開が進んだ。この IMT2000 は国際通信連合 (ITU : International Telecommunication Union) の第 3 世代移動通信システム (3G) として確立されている。また、携帯電話通信サービス分野で先行する日本において、第 4 世代通信 (4G) として LTE (Long Term Evolution) が高速データ通信サービスを含めて拡大普及する段階となっており、データ通信専用サービスの WiMAX (Worldwide Interoperability for

Microwave Access) も国内での普及も進み、新幹線等の高速走行環境においても使用可能となっている。

これらの無線通信技術において大きなポイントとなるのは、使用される環境が屋外か屋内かであると同時に通信範囲（アクセス距離）である。携帯電話通信サービスの到達範囲は通常半径で数 km の広域領域に対し、無線 LAN を中心とする狭域通信の通信範囲は半径で数百 m の狭い領域となっている。このため、広域通信ではサポートされるユーザ数は多くなるため、各ユーザのサポートされるデータ速度はユーザ数に反比例することになり、一般的に個別ユーザアクセス速度は低い値とならざるを得ない。一方、狭域通信の無線 LAN は、サポートされるユーザ数は広域通信と比較して少なくなるため、各ユーザにおけるデータ速度は使用される端末数の密度にもよるものの比較的高速といえる。本研究ではこれら広域通信、狭域通信を含め自動車分野応用としての検証を行なう。

話しを対象となる通信技術を扱った先行研究に戻すと以下の 8 件があげられる。

各種移動体通信方式の包括的な比較の研究として、Alomari.A ら[4]が行っており、無線 LAN(WiFi)、広域通信(WiMAX: Worldwide Interoperability for Microwave Access、3G: 第 3 世代携帯電話回線)等の仕様と各通信方式間の通信(ハンドオーバ)に関する紹介として報告されている。関係する主な先行研究の成果項目は以下の通りとなる。

- ・ WiFi、WiMAX、3G 仕様比較とセルサイズによるネットワーク領域規定
- ・ 各通信領域におけるシームレス接続

この先行研究では WAVE 技術のベースとなる WiFi と広域通信との関係を包括的にまとめている点および通信接続する基地局の切り替え(ハンドオーバ)により通信のシームレス接続を検討しており、それぞれのネットワーク領域内における定量解析の条件として参考とした。

また、WAVE 技術であつかう情報は、テキスト情報、画像情報が主体と想定しているものの、メディアはデジタル情報であるため音声情報も含まれないとは限らない。そこで、音声通信に関して、Tsankov.B ら[5]無線 LAN と広域通信(WiMAX)間での WiFi における通信トラフィックのオーバフローを WiMAX にて補う研究を行っており、シームレスな通信の可能性を示している。関係する主な研究成果は以下の通りとなる。

- ・ WiFi-WiMAX 間のスループットの検証
- ・ シームレス接続のオーバフロー処理アルゴリズムの検討

これら 2 つの先行研究では音声通話としてではあるが具体的に WiFi と WiMAX 間でのトラフィック量をネットワークの性能評価の一例として検討している点で参考とな

る。

さらに、WAVE 技術の対象とする交通事故低減にむけた応用を考える上で、市街地等での車両の密集した環境における研究が必須となる。この WAVE 技術における車両数が拡大した場合における広域通信（WiMAX）への拡張（ハンドオーバ）としての先行研究として、Vinel.A, Chilamkurti.N, Kouchieryavy.Y ら[6]が行なっている。関係する主な研究成果は以下の通りとなる。

- ・ WAVE と WiMAX を統合したネットワーク（BWA）の定義
- ・ データトラフィック量と収容車両数のシミュレーション

この先行研究では、車両密集環境を想定した情報トラフィックの増加による WAVE 技術の処理性能評価と、その処理能力範囲を超える情報に関して広域通信（WiMAX）へとハンドオーバする検証のシミュレーションを行っており、今回の研究テーマにおける WAVE 技術の処理能力および広域通信とのネットワーク分担としての考え方が参考となる。

一方、広域通信に目を向けると、携帯通信技術の第1世代から第5世代まで全体を包括し、それぞれの仕様のまとめと比較検討が行なわれている先行研究として、Kalra.B、Chauhan.D.K ら[7]の報告がある。このなかで将来の 5G の処理能力向上により音声およびデータすべてのアプリケーションが統合できるとしたマルチメディア通信の対応を扱っている点で参考となる。関係する主な先行研究の成果は以下の通りである。

- ・ 携帯電話網 1G から 5G までの仕様・性能比較
- ・ データ通信 WiMAX、WiFi は 5G に統合

ここでは、まだ仕様策定段階中であるが 5G により、今までの情報通信をまとめる集大成の位置付けとして紹介されており、同じ広域通信であるデータ通信 WiMAX に関しても統合できるとしている。この先行研究の広域通信技術と本研究での WAVE 技術のネットワーク解析としての処理能力の検証として参考となる。ただし 5G は仕様が未定な部分も多く本論では比較対象外とした。

また、WAVE 技術と他の無線通信との比較を行なった例として、徳田[8]による比較研究がある。ここでは電気自動車（EV）への ITS 応用として想定される要件と処理可能な WAVE 性能としての検討を報告している。関係する主な研究成果は以下の通りである。

- ・ WAVE、WiFi、WiMAX、3G での仕様比較と役割
- ・ 700MHz／5.8GHz マルチバンド仕様提案

この先行研究では WAVE 技術と他の無線通信との仕様比較を示し、それぞれのネットワーク領域の役割を区別し、周波数の異なる 700 帯および 5GHz 帯 WAVE 技術の性能

評価を行なっている点で参考となる。

続いて紹介する先行研究は、筆者グループ Tsubo.T ら[9][10]がはじめて各種通信技術におけるネットワーク比較を行なっている。このネットワーク比較において、それぞれの通信の可能領域（セル）におけるシステム最適設計手法を用いたことを特長としている。関係する主な研究成果は以下の通りとなる。

- ・ WAVE におけるスループットとセル内車両数の検討
- ・ 3G、WAVE、WiMAX 各種通信における最適セル設計

この研究は著者の最初の WAVE 技術に関する狭域通信と広域通信技術との比較を検討したものであるが、WAVE 技術の規格制定前のため基本データが古い。よって、今回本研究において規格化された最新 WAVE 仕様を用いるとともに、システム設計最適化手法を比較検証のベースとして活用する。

最後に、WAVE 技術の基になる技術として無線 LAN (WiFi) の先行研究がある。これは WAVE 技術がもともと無線 LAN (WiFi) 技術をベースとして発展してきたという経緯から、狭域通信の代表としての先行研究に位置する。ここでは以下の 2 つの先行研究を紹介する。

まず、実際の公衆 WiFi の設置されている環境の実測にもとづき、WiFi ネットワークの情報理論モデルにも続いて解析した研究が、AT&T 研究所の Ghosh.A ら[11]が行なっている。関係する主な研究成果は以下の通りとなる。

- ・ WiFi 系のネットワークモデル ($M_t/G/\infty$)

この先行研究による WiFi 技術のネットワークモデル化は、本研究における狭域通信のネットワーク定量評価にアーランの B 式が適用できるための根拠として活用できる。アーランの B 式はもともと電話回線における広域通信網における通信システムの通信するための回線数を求める理論として古くから用いられてきているが、この先行研究により狭域通信である WiFi、WAVE に導入できる点で有効となりうる。

続いて、WAVE 技術がまだ規格化前の段階で、WAVE としての機能の実証化に関する研究として、筆者グループ Tsuboi.T ら[12]の報告がある。これは、WiFi をベースとした WAVE 実証試験装置を試作し、実際にパケット通信を行なった際のパケット到達率の確認による車載無線通信評価を行なっている。関係する主な研究成果は以下の通りとなる。

- ・ 車載無線のデュアルバンド化による通信の安定性
- ・ マルチチャネル通信 (CCH/SCH) の実現

この先行研究では著者が WAVE の標準化準備段階でデュアルチャネルによる通信の必要性を実証したものでマルチチャネル化に関する課題で活用できる。

2.3 “Fog computing”に関する先行研究

近年（2011 年）車載無線通信の領域において”Fog computing”という新たなネットワーク概念が Cisco Systems 社 Bonomi.F ら[13][14]が提唱しはじめた。この概念はこれまでの Cloud computing と対比し、データのリアルタイム性と大量データのため通信範囲が限定的な環境を想定し、これまでの端末と Cloud との間に新たなネットワーク領域の必要性を提案している。このため、車両（端末）密度が高い市街地の環境における交通事故削減・渋滞緩和を目的とする WAVE 技術の役割を検討する上で重要な概念になる。現時点の”Fog computing”の対象範囲はこの先行研究では、WAVE および WiFi、携帯電話網（3G、4G）、公衆の WiFi アクセス可能なホットスポットも含め自動車通信に関するネットワークとしての通信領域を対象にしようとしている。関係する主な研究成果は以下の通りとなる。

- ・ “Fog computing”概念提案
- ・ “Fog computing”と Cloud computing の位置付け

この先行研究ではじめて”Fog computing”の概念の紹介は、WAVE 技術と他の通信ネットワークとの比較を行なうための基本的考え方が示されており、本研究でのネットワーク定量解析の中で WAVE としての”Fog computing”も加え定量化することになっている。

また、Cisco Systems 社から提唱された”Fog computing”を受けて、以下の 2 件の先行研究が報告されている。

最初に、”Fog computing”が ITS (Intelligent Transport Systems) 支援機能を支えるネットワークとしての先行研究が Roy.S ら[15]が IoT の一例として交通違反への注意機能を例に取り上げ報告している。関係する主な研究成果は以下の通りである。

- ・ “Fog computing”による運転支援の局所サービス有効性

この先行研究は”Fog computing”の具体的な応用をあつかった事例として参考とした。

続いて、”Fog computing”の車載無線通信としての活用について Truong.N ら[16]の研究も報告されている。関係する主な研究成果は以下の通りとなる。

- ・ 車載無線通信のネットワーク位置付けと応用（信号機、車両運転状況）
- ・ 各種ネットワークへの最適アクセス（SDN: Software Define Network）

この先行研究は WAVE 技術の”Fog computing”の実践的な応用例を取り上げ検討しており、特に WAVE 技術の”Fog computing”としての応用の参考とした。

以上、“Fog computing”はまだ新しいネットワーク概念であり、本研究における定量評価は“Fog computing”の位置付けを行なう解析として有効と考える。

2.4 プローブに関する先行研究

WAVE 技術における交通マネジメントへの活用のひとつとして、交通状況の把握がある。これは WAVE システムが車載機器（OBE : On Board Equipment）として走行中の車両情報（位置、速度、方向、車種など）をいわゆるプローブ情報としてネットワーク上に提供することで、道路管理者が渋滞情報等の交通情報生成するデータとして利用される。これは従来方式として、路側に設置された車両感知器（超音波、埋設ループコイル、画像カメラなど）により、実際の交通量を決められた場所での観測することで得られたデータから交通情報生成まで一般的に 5 分間程度⁵かかるのに対し、WAVE ではデータが常にネットワーク上に提供されことでリアルタイム性が上がる特長を持つ。また路側設置場所の制約が比較的少ないので、より広い範囲でのデータの収集が可能になる点で大いに期待されている。このプローブ研究として、三輪ら[17]が既存のカメラ情報による交通情報に対して、プローブデータを用いたシミュレーションにて同様な交通状態を把握できることを報告している。関係する主な研究成果は以下の通りとなる。

・ プローブ情報と画像カメラ情報による交通状態の比較

この先行研究では従来の画像カメラによる交通情報のデータとプローブ情報のデータ比較を行なった点でプローブ技術の重要性を示している。4 章の考察において後述するが、紹介した先行研究ではカメラで得られた交通情報が交通状態を表わす真値としている点で測定データのバラツキを踏まえた検証の必要性があると考ええる。

さらに具体的な交通状態の先行研究として Salim.A ら[18]が実際の道路において車頭間隔（Headway）の測定とその交通状態の解析をおこなっている。関係する主な研究成果は以下の通りとなる。

・ Headway の測定による実施の交通流の解析

この先行研究における画像カメラを用いた交通状態の測定により求めていることと、対象としている交通渋滞を理論的に導く過程が示されており、プローブ情報としての考え方を参考にできる。しかしながら、これらいずれの先行研究やそれ以外のプローブに関する先行研究の用いている観測データはまだわずかな量のデータに頼っており、結論としている渋滞に関する道路規格への導入には難がある。また、これまでの事例の測定環境は大半が先進国がとなっている点で限定的となっているのも新興国における評価を難しくしている。今回の研究のインド国を例にした新興国におけるプローブ解析に

⁵ VICS システム各メディアの特性 <http://www.vics.or.jp/know/structure/media.html>

関しての報告は極めて限られている。このため新興国におけるプローブ研究は本論も含めてこれから展開されるものとする。

2.5 先行研究におけるまとめと課題整理

2.1 節から 2.4 節までの自動車無線通信技術に関係し参考となる先行研究を見てきた。ここでこれらの先駆研究を検討すべき技術課題別に整理し、本研究の位置付けを示す。

2.5.1 各種通信方式と適用性

すでに、WAVE 技術の商用化を開始した日本では、携帯電話網（3G、4G）の高速化や各種高速データ通信サービス（WiMAX）の展開も行なわれており、これまでの先行の基礎研究のなかで、WAVE 技術も含めた総合的なネットワーク研究はなかった。WAVE 技術の目的とした交通マネジメントとしての役割の検証という意味では、実証試験を含む各種先行研究は存在している。このため、各種通信方式での自動車分野への応用という点では語られても、各通信技術のそれぞれの性能に応じたサービスとしての明確な適応性に関する比較・検討はなされていなかった。これは携帯電話サービスを提供する通信企業と車載無線通信を提供する自動車関連企業においては、それぞれの独自のサービス展開をそれぞれのビジネスモデルにより推進している背景にあるといえる。特に、広域で通信サービスをカバーする通信企業では、自動車を含む高速移動交通機関での通信を行ないたいユーザのニーズにこたえるために、各種通信方式および機能の改良と拡張を行なっている。一方、WAVE 技術は IEEE802.11p の規格から明らかのように、WiFi 通信の標準規格である IEEE802.11 グループからの派生であり、携帯通信網とはそもそもデータ通信を主体とする方式を採用している。このため単純に各通信方式の仕様での機能の比較のみでは、それぞれの通信方式の特長を生かした優位性の判断は困難といえる。これはユーザにとって各種ネットワークにおける明確な領域を理解したうえで、サービスを決めることは難しいといったことにも繋がっている。また、筆者(Tsuboi.T)による既研究[9][10]は WAVE 仕様決定前の段階の研究にあたり、シミュレーション値において最終仕様との違いによるパラメータの不確定要素が多く存在していた。このため異機種ネットワークの比較としての定量解析として本論が最新の仕様に基づいた再評価が必要となる。次章以降に自動車分野としての各種通信技術の評価を行なう。比較検証は、対象環境条件の統一と評価手法の統一により同じ評価土俵を条件に行なう必要があり、本論ではシステム最適化手法を用いて各種通信技術の特長を明らかにする。

2.5.2 規格標準化と周波数割り当て

WAVE に限らず無線通信技術は、限られた周波数領域をそれぞれの国の事情に合わせ、サービスを提供する企業に割り当てられその使用許可されているのが一般となっている。このため地域によっては同じ通信方式を採用するにおいても、異なる周波数帯を使用しなければならない事情がでてくる。今回の研究の検討対象としている日本の商用化

された WAVE は UHF 帯 (760MHz) を使用しているのに対し、欧米等にて開発されている WAVE システムでは 5GHz 帯 (5.9GHz) を使用しており、700MHz 帯 WAVE の使用は日本以外はまだ認められていない。さらに、使用可能なバンド幅に関しても周波数割り当ての制約から、国によって異なっている。国内 700MHz 帯 WAVE は、中心周波数 760MHz で使用可能なバンド幅は 9MHz (ガードバンドを含め 10MHz) となっている。一方、米国の 5.9GHz 帯 WAVE では、バンド幅は 70MHz と国内の 7 倍以上となっており、複数の通信チャネルのサービス提供が可能となっている。また、欧州の 5.9GHz WAVE の使用可能バンド幅は 30MHz が現状であるが、現在米国との国際規格協調性が議論されており、米国同様のバンド幅への拡張が検討されている。国内においても国際協調性の議論は行なわれているものの、商用化を先行としたため具体的な国際協調への検討には入っていない。国内でも 5GHz 帯 WAVE の規格も制定されており、こちらは 2001 年より本格導入された道路料金課金システム (ETC) に 2015 年で 5,000 万台以上の登録がされており、この ETC 技術の拡張として規定されている。これらの事情を踏まえた国際協調性について付録資料 6 に補足説明を加えた。

2.5.3 IoT/M2M の動向

インターネットの普及にともないすべての「モノ」がネットワークにつながることで、さまざまなデータが収集され、これらの集められたデータから、新たなビジネスの創造をめざす動きが先進国を中心におきている。いわゆる IoT である。IoT 自体はビジネスモデルまで含む広い範囲での定義となるが、ここでは交通マネジメントの観点で検討することとする。ネットワーク領域の役割を検討する点において IoT の動向をみておくことは必要であり、特に標準化の動きとして重要となる。また、IoT の一部として M2M (Machine to Machine) の概念も検討する必要性が高い。例えば、走行支援として交差点における信号機の状態と連動した走行が行なえるように、交差点を通過する車両に対して自動的な制御を行なうといった応用が検討されている。例えば、赤信号状態の交差点に進入する車に対して、安全なタイミングでの進入を制御する応用などがある。これまでの通信と比較して、「人」が介在しない制御系への通信はリアルタイム性が問われる。IoT/M2M は主に欧州を中心に標準化を進める動きがあるものの、自動車分野に関しては、現時点では先行する WAVE 技術を中心とした標準規格をフォローする段階にとどまっている。しかし、この自動車分野での IoT/M2M 規格化標準される段階になると各国の WAVE 規格をはじめとするさまざまな広域通信ネットワークに関しての規格も交通分野 IoT/M2M として定義されることになり、WAVE 技術世界標準化と合わせグローバル分野となる自動車分野を目指す日本においても無視できない存在となることは間違いのないといえる。すなわちインターネット接続の普及に伴い自動車も含む広い意味での「モノ」がつながるという点で WAVE 技術のネットワーク領域における位置付けおよび役割に関して IoT/M2M の動向を正しく認識する必要があるといえる。本項目

の詳細は付録資料5にて説明を補足している。

2.5.4 700MHz 帯と 5GHz 帯 WAVE の位置付け

国内 700MHz 帯 WAVE に対して、欧米の 5GHz 帯 WAVE の存在することは 2.5.2 項で述べたが、国内においても 5.8GHz 帯の WAVE システムが存在している。国内の 5.8GHz を使用した車載用無線通信は、2001 年より有料道路の課金システムに ETC (Electric Toll Collection) が 5.8GHz 帯の車載無線システムとして使用されており、2015 年末時点で 7000 万件を超える契約状況となっている。5.8GHz 帯 WAVE はその拡張として路車間通信の仕様が決定されている。このような状況から、国内では 700MHz 帯 WAVE は車車間通信、5.8GHz 帯 WAVE は路車間通信とした先行研究としておこなわれているものの、明確な周波数による直接的な比較検討は実施されていない。従って、WAVE システム検討においては周波数の違いによる通信の果たす役割に関しても、比較検討の対象とする。本研究におけるテーマとしては 700MHz 帯と 5GHz 帯 WAVE に関しては、これらを WAVE 技術としてまとめて議論するものとし、周波数個別の詳細比較検証については付録資料3に解説を加えた。付録資料3では電波の回り込み（回折）による影周波数の影響が実際の応用例でどのような差として生じるかを検証している。

2.5.5 Cloud と” Fog computing” の位置付け

これまでの基礎的先行研究の中で示したように、ネットワーク機器企業の Cisco Systems 社が”Fog computing”と提唱した新たなネットワーク領域は、WAVE 技術の役割を考える上で検討の必要性がでてきた。それは、これまで車がインターネットに接続されることで、走行車両からの各種データが Cloud 上に集約されとする考え方が一般的であり、ネットワークに接続されるのは車両であっても、収集されるデータは車内には各種電子機器が存在するため車の数以上の膨大なデータ（ビッグデータ）となる可能性がでてきたためである。すなわち、車両情報のデータ以外に、搭載されている部品に関するデータ、搭乗者の携帯電話をはじめとする様々な個人データが、各車両から発信されることになり、結果そのデータ量は車両数の数百倍以上になることは容易に推定される。このため電話回線網などの広域通信ネットワークを利用した Cloud 環境で扱うにはその容量をはるかに超える可能性がでてくることになり、処理能力の限界になる結果となってしまう。このため車環境における通信を検討する上である適当な環境におけるネットワークを考慮する必要がある。すべてのデータの中で Cloud に集中するものと、ある特定の環境で処理を行えばよい場合とに区別することで、全体のネットワークの負荷分散を図る必要がある。これが”Fog computing”としての解析が必要となってくる背景にもなっている。第5章 5.1 節にてその詳細考察を行なう。

2.5.6 プローブ情報と交通特性

WAVE 技術の応用として、交通渋滞情報を直接 WAVE の車載機からのデータを活用

するいわゆるプローブシステムがあげられる。交通渋滞に対する交通流の理論解析に関する研究はさまざま行なわれてきているが、先行研究では測定されたデータ量は数時間から数日であることから限定的な解析になっていた。このため、プローブ情報から交通渋滞や交通量の比較検討を行なう上で、プローブ情報をどのようにあつかうかに関して検証する必要がある。プローブ情報は一般的に道路に設置された超音波による車両感知、道路に埋設したループコイルの上を車両の通過にともなう起電力による車両感知、あるいは道路設置されたカメラから得られる画像解析による交通量の把握を行っており、このプローブ情報から交通渋滞状況等の判断に用いられてきた。また、収集されたデータの統計処理により渋滞の予測等へも活用が期待されているものの渋滞は当然地域性が高く、測定個所と実際の走行している環境との間での有効性に課題があった。WAVE 技術はこれまでのプローブ検出とは異なり、インフラに設置された基地局のみならず、車両に搭載された車載機によっても GPS による正確な位置情報と車両の走行状態を捉えることで広域範囲を面でとらえることが可能であるとともに、情報がリアルタイムで扱える点で、交通渋滞等の即時的交通状況の把握に有効と考えられる。しかしながら、実際の交通流に関する研究は、その解析に用いられるデータが少ないためあまり進んでいないのも事実である。また、今後交通状況の管理の必要性が切実である新興国においては、インフラ設備への投資が増大する輸送機関の量に追いつかないのが実情で、その対応策は緊急を要する。こうしたプローブによる交通量予測はエネルギー低炭素社会実現に向けた取り組みにおいて必須の課題であり、WAVE の役割を検討する上で大量データの測定と詳細な解析が求められる。第3章、第4章に詳細考察を展開すると同時にプローブデータと交通流の理論的關係を検証し、付録資料2として、今回観測した新興国（インド）における全観測データ結果をまとめた。

2.5.7 WAVE 普及のシナリオ

これまで見てきたように、WAVE 技術による交通マネジメントは、技術進化が目覚ましい情報通信技術（ICT：Information Communication Technology）の活用により車社会、すなわち人、物の移動を行うモビリティの効率向上と安全性の拡大に寄与することを目指している。しかしながら、これまでの先行研究においては、WAVE 技術そのものの性能や特長に関するものが主体であり、技術普及のための応用シナリオは、政府が主導する主要交差点への基地局（RSE：Road Side Equipment）の設置や、衝突防止支援としての自動車企業およびティアワン企業の努力による車載機機（OBE：On Board Equipment）の適用拡大や、通信キャリアによる広域ネットワークによる Cloud サポートによるところが大きい。これは、WAVE の普及には時間がかかることを意味することになる。従って、人間の暮らしの向上を目指す QoL（Quality of Life）として議論されているスマートシティへの展開の研究と連動・拡大することで、交通におけるスマートモビリティの実現につなげ、WAVE 普及にむけた研究へと展開する必要がある。第5章

5.2 節に詳細考察を展開し、補足として公共交通としての RSE としてバス停応用の詳細を付録資料 4 にて追加補足を行った。

以上、本論のテーマである「次世代車載無線（WAVE）技術の交通マネジメント応用の研究」に関係する先行する研究での課題は多岐にわたっているが、本論ではこれまでの研究実績が少ない新興国の交通流解析を主体に交通特性、交通渋滞解析を行っている。また WAVE 技術の位置づけとその役割に関しても、応用面を考える上で重要な前提条件として必要であるため、その背景や比較検討として第 5 章にまとめて展開することになっている。そのため、検証・解析に必要な計算式の導入等細部の解説に関しては論旨の妨げにならないように適宜、付録資料にその詳細検証を回すこととし、主テーマに関わる課題を核としてその考察を本論で展開する形式をとる構成とした。

2.6 交通実情と無線通信技術の調査

本研究のはじめに述べたように、WAVE 技術開発の目的は、そもそも交通の近代化と増加による交通事故、交通渋滞の改善するための交通マネジメントを ICT の技術の積極的活用により支援することにあった。しかしながら、車がインターネットにつながることで、様々な情報の授受が可能となるため、新たなビジネス創出にも展開できる。従って、ここでの交通マネジメントに関しては、事故、渋滞といった改善しなければならない基本的な問題にむけた解決や、車がインターネットに接続することで得られる目的地までのドライブ支援や目的地の情報の入手などのサービスまで、幅広く管理することを含めた無線通信技術を扱うことにする。

まず、現在の我々の置かれている交通環境の把握のための調査を行なう。交通事故および渋滞に関する詳細調査分析に関しては、それぞれの専門機関が行なっているため、ここでは交通事情の全体像の把握として世界および日本国内の交通実態調査をまとめ、次に本研究の解析を進めるための自動車分野に用いられる無線通信技術の抽出とその仕様および WAVE 技術開発経緯も含めた概要をまとめる。

2.6.1 世界の交通事情

ここで世界の最近の交通状況を概観する。国の経済の発展に伴い世界で都市化が進み、その結果として人や物の移動が活発となり、その移動による交通量の増加がおきる。この交通量の増加は結果的に、交通機関から排出される排気ガス等による環境の悪化や交通事故の増加といった負の状況変化を引き起こしている。事実、世界における交通事故死者数でみると、世界保健機構（WHO : World Health Organization）の 2010 年統計データ[19]にあるように、世界で約 124 万人に上っている。具体的な国別数字で示すと表 1 に示すとおりで、日本においても毎年の交通事故削減を積極的に推進しているにも

関わらず、31番目と先進国と比較すると決して良い状況に至っていない。しかしながら、人口10万人当たりにおける交通事故死者数でみると調査181カ国中、日本は163番目という順位となり、人口に占める割合では比較的低い数字になっている。この傾向は他の先進国も同様に人口に占める割合の交通事故死者数で見ると、その順位では相対的に低いところに位置しており、これまでの事故対策に対する取り組みの成果であるともいえる。主な国の人口10万人あたりの交通事故死者数を表2に示す。表中の番号は調査対象の国総数(181カ国)における順位を示しており、一部省略した国の番号も含んでいるため数字は連続していない。

表1 世界の交通事故死者数

No.	Country	Death
1	China	275,983
2	India	231,027
3	Nigeria	53,339
4	Brazil	43,869
5	Indonesia	42,434
6	United States of America	35,490
7	Pakistan	30,131
8	Russian Federation	26,567
9	Thailand	26,312
10	Iran (Islamic Republic of)	25,224
11	Viet Nam	21,651
12	Bangladesh	17,289
13	Mexico	16,714
14	South Africa	15,995
15	Ethiopia	14,606
16	Democratic Republic of the Congo	13,764
17	Sudan	10,935
18	Venezuela (Bolivarian Republic of)	10,791
19	Egypt	10,729
20	United Republic of Tanzania	10,162
21	Iraq	9,962
22	Uganda	9,655
23	Turkey	8,758
24	Philippines	8,499
25	Kenya	8,484
26	Colombia	7,225
27	Myanmar	7,177
28	Malaysia	7,085
29	Saudi Arabia	6,800
30	Republic of Korea	6,784
31	Japan	6,625
44	Italy	4,371
48	France	3,992
51	Germany	3,830
62	Spain	2,478
66	Canada	2,296

表1では人口が多く経済発展率も高い新興国（中国、インド）が交通事故による死者数の世界で1位、2位といった上位に位置しており、その数も他の国と比較して桁違いに大きく社会損失の影響が著しい状況が理解できる。また、先進国でも米国、ロシア

といった大国においても交通事故死者数が、上位の新興国の中にはいっているのも特徴的となっている。

また、人口 10 万人あたりの数字では中国、インドはそれぞれ 50 位と 63 位となり世界的にみると中位にあたる。ただし、ロシアは人口 10 万人あたりの交通事故死者数で見ると、米国を含む他の先進国と比較して上位（68 位）に位置していることも表 2 から理解できる。一方中近東アフリカ諸国は人口あたりの交通事故死者数が多いのはインフラ環境が整わない状況からであると推定される。

表 2 人口 10 万人当たりの交通事故死者数

No.	Country	Death/100 thousand
1	Niue	68.3
2	Dominican Republic	41.7
3	Thailand	38.1
4	Venezuela (Bolivarian Republic of)	37.2
5	Iran (Islamic Republic of)	34.1
6	Nigeria	33.7
7	South Africa	31.9
8	Iraq	31.5
9	Guinea-Bissau	31.2
10	Oman	30.4
11	Chad	29.7
12	Uganda	28.9
13	Lesotho	28.4
14	Mauritania	28
15	Guyana	27.8
16	Burkina Faso	27.7
17	Ecuador	27
18	Sudan	25.1
19	Malaysia	25
20	Namibia	25
21	Saudi Arabia	24.8
22	Viet Nam	24.7
23	Benin	23.9
24	Zambia	23.8
25	Niger	23.7
26	Yemen	23.7
27	Swaziland	23.4
28	Angola	23.1
29	Mali	23.1
30	Jordan	22.9
50	China	20.5
63	India	18.9
68	Russian Federation	18.6
127	United States of America	11.4
149	Italy	7.2
156	France	6.4
162	Spain	5.4
163	Japan	5.2
164	Finland	5.1
165	Singapore	5.1
166	Denmark	4.7
167	Germany	4.7
175	United Kingdom of Great Britain and N	3.7

さらに、世界における車両登録数に関して、主な国上位 30 カ国をみると先述の 2010 年 WHO データ[19]を示すと表 3 の通りとなる。表 3 より日本はアメリカ、中国、インドに次ぐ世界で 4 位となっており自動車大国となっていることがわかる。

表 3 世界の車両登録数

No.	Country	Vehicle registration
1	United States of America	258,957,503
2	China	207,061,286
3	India	114,952,000
4	Japan	89,871,090
5	Indonesia	72,692,951
6	Brazil	64,817,974
7	Italy	52,586,499
8	Germany	50,184,000
9	Russian Federation	43,325,312
10	United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland	35,170,629
11	France	34,276,000
12	Viet Nam	33,166,411
13	Spain	31,086,035
14	Mexico	30,904,659
15	Thailand	28,484,829
16	Poland	22,024,697
17	Canada	21,387,132
18	Iran (Islamic Republic of)	20,657,627
19	Malaysia	20,188,565
20	Republic of Korea	19,710,776
21	Australia	16,061,098
22	Turkey	15,095,603
23	Ukraine	14,427,680
24	Argentina	14,163,125
25	Nigeria	12,545,177
26	South Africa	9,587,781
27	Netherlands	9,340,006
28	Portugal	8,730,885
29	Greece	7,910,565
30	Pakistan	7,853,022

ここで、表 3 の登録車両数（表は上位 30 各国）とそれぞれの交通死亡事故を表 1 のデータを組み合わせると表 4 のとおりになる。また、車両登録数と交通事故死者数の相関は図 2 のように表され、相関係数は 61% ($R^2=0.3768=(0.6138)^2$) となり弱い相関ではあるものの車両の多い国にて交通事故死亡数も多い関係にあるといえる（相関に関して付録資料 8 参照）。さらに図 2 からは、中国、インドにおいて車両登録、交通事故死者数も他国と比較において極めて大きいことが明確であり、アメリカをはじめとする先進国は、車両登録の割には交通事故死者数が比較的低いことがわかる。従って、今後新興国の現状を如何に世界の平均に近づけ、世界の平均全体を先進の状態に近づけるかが目標となるといい。すなわち本研究において WAVE 技術を導入することで図 2 にしめすシナリオに近づけるかを検証する意義を持っているといえる。図 3 は表 4 を図に表したものである。

表 4 車両登録数と交通事故死亡数との関係

No.	Country	Vehicle registration	Death
1	United States of America	258,957,503	35,490
2	China	207,061,286	275,983
3	India	114,952,000	231,027
4	Japan	89,871,090	6,625
5	Indonesia	72,692,951	42,434
6	Brazil	64,817,974	43,869
7	Italy	52,586,499	4,371
8	Germany	50,184,000	3,830
9	Russian Federation	43,325,312	26,567
10	United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland	35,170,629	2,278
11	France	34,276,000	3,992
12	Viet Nam	33,166,411	21,651
13	Spain	31,086,035	2,478
14	Mexico	30,904,659	16,714
15	Thailand	28,484,829	26,312
16	Poland	22,024,697	4,509
17	Canada	21,387,132	2,296
18	Iran (Islamic Republic of)	20,657,627	25,224
19	Malaysia	20,188,565	7,085
20	Republic of Korea	19,710,776	6,784
21	Australia	16,061,098	1,363
22	Turkey	15,095,603	8,758
23	Ukraine	14,427,680	6,121
24	Argentina	14,163,125	5,094
25	Nigeria	12,545,177	53,339
26	South Africa	9,587,781	15,995
27	Netherlands	9,340,006	640
28	Portugal	8,730,885	1,257
29	Greece	7,910,565	1,385
30	Pakistan	7,853,022	30,131

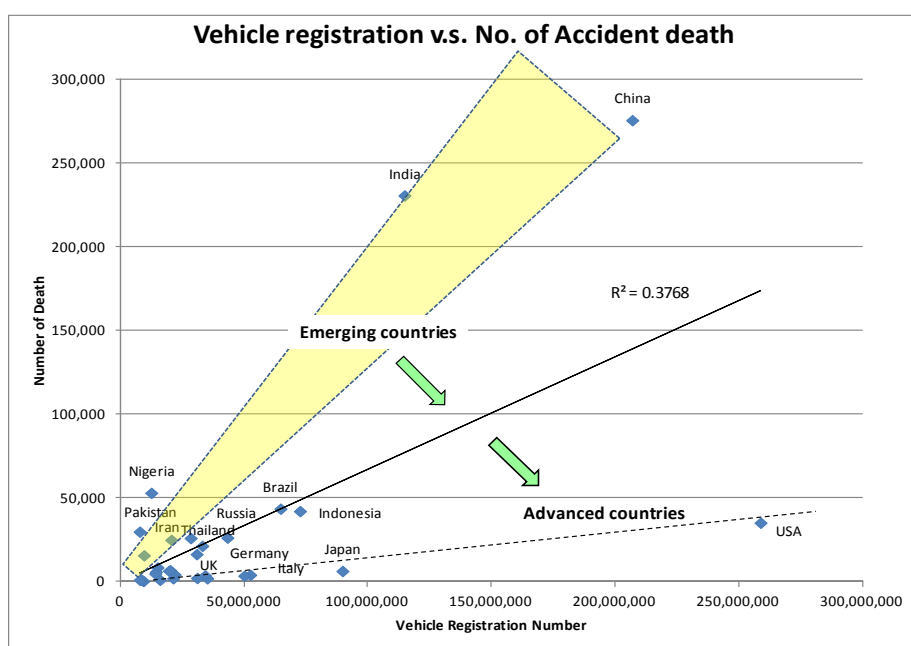


図 2 車両登録数と交通事故死亡数の相関関係

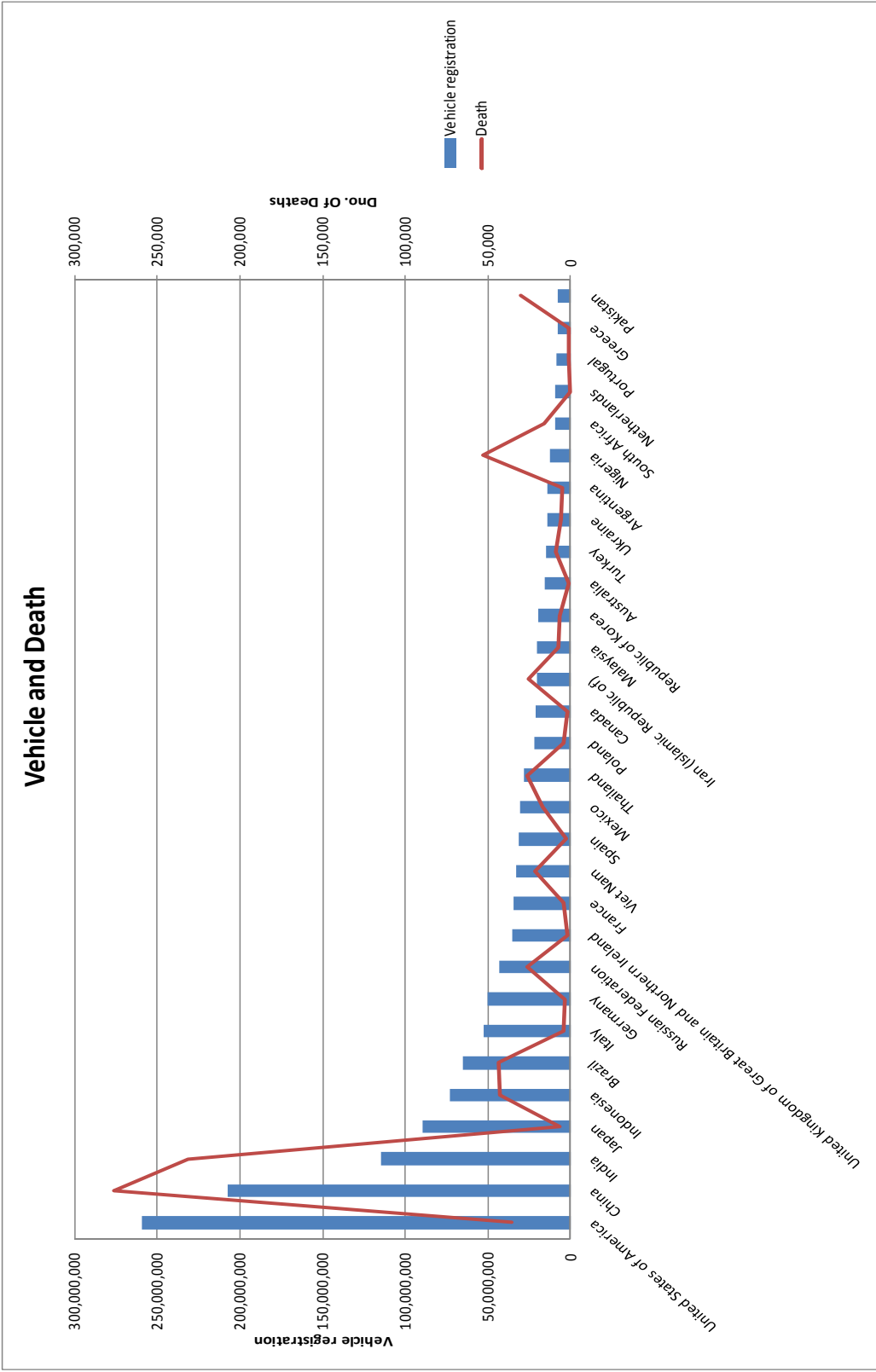


図 3 国別の車両登録数と交通事故死亡者数

2.6.2 国内交通事故

前項に示したように、2010年のWHO統計で日本は31番目に交通事故死者数が多い国であるが、最近の交通事故の状況を調査した。2014年（平成26年度）に発生した国内交通事故件数[20]は4,113名で、地域別件数の順位は、愛知県(204名)、神奈川県(185名)、千葉県、兵庫県（182名）、埼玉県（179名）、東京(172名)となっている。順位の傾向は近年あまり変わっておらず、大都市圏を中心に事故発生件数が多い。（図4参照）

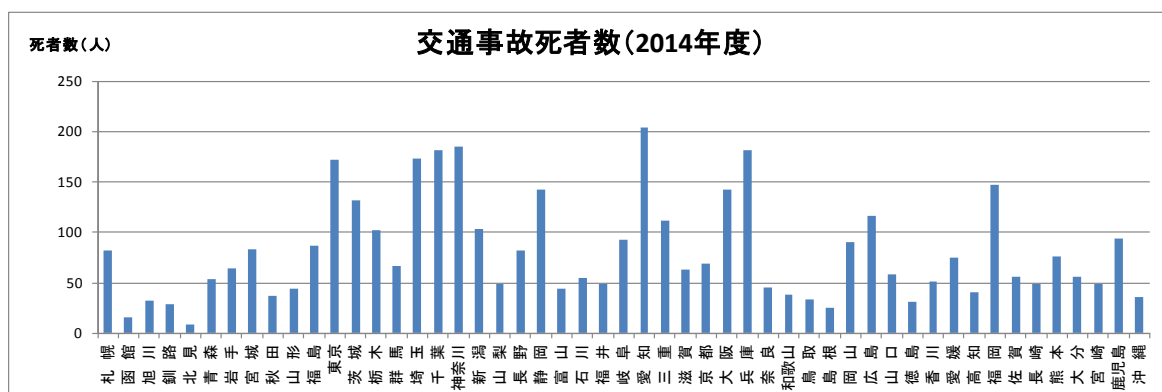


図4 全国交通事故死亡者数（2014年度）

交通事故発生件数は総務省統計局のデータ[21]から減少傾向にあるものの全国総件数としては573,842件と大きな値となっている。ここで2014年度の国内全国自動車登録数[22]と交通事故死者数との関係を図5に示す。

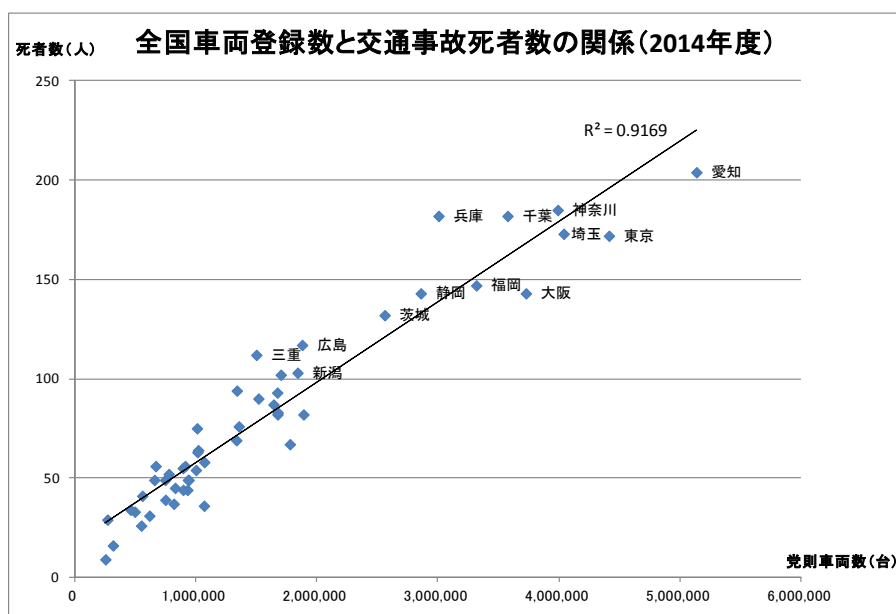


図5 全国車両登録数と交通事故死亡者数の相関関係

図5より、自動車登録数と交通事故死者数の相関係数は95%以上 ($R^2=0.9169=(0.9575)^2$) となっており、世界の交通状況より強い相関があることが判る。また、図5の結果から車両登録の多い地域にて交通事故死亡数も多い関係にあることも判明した。これは、地域性や様々な事故原因等の関係の報告もされているが、車両の多さが交通事故を引き起こす可能性が大きい要因となっていると考えられる。従って、交通事故削減には走行車両数を減らすために公共交通へのガイドも必要にはなるものの、交通事故の具体的な検証は必要と考える。ここで国内統計局データに報告されている交通事故に関する道路形状や発生箇所の2014年の実績データから主な特徴をまとめると以下のようになる。

- ・市街地における交通事故数は全体の75%を占める (図6)
- ・市街地の事故における交差点での事故の割合は56%を占める (図6)
- ・事故形態は車両同士による事故率が約65%を占めている (図7)
- ・車両同士事故の主な原因は出会い頭衝突が44%を占めている (図7)

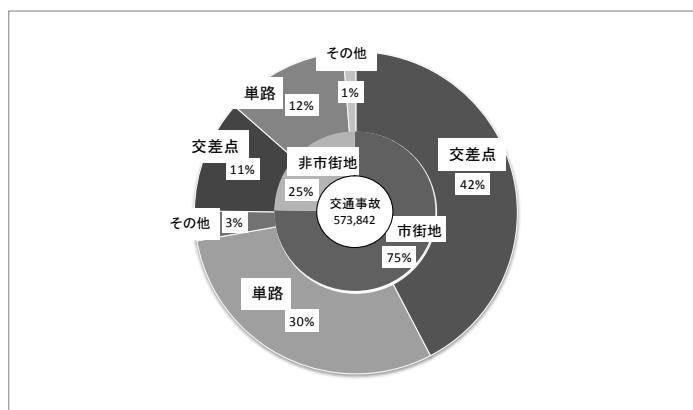


図6 道路形状別交通事故状況 (2014年度)

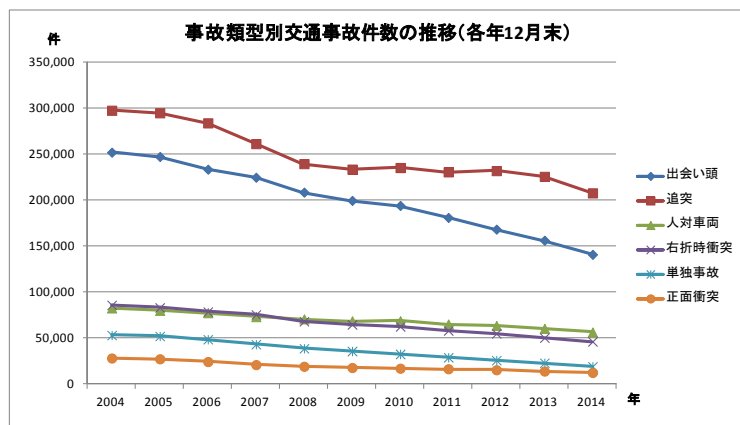


図7 事故類型別交通事故件数の推移

これらの分析から、交通事故は市街地、交差点、車両同士、出会い頭衝突によるものが多いことが判明し、見通しがきかずかつ交通量が集中する環境下で発生していると判断できる。すなわち人の視野認識に関係した原因が関係しているといえる。

このため、交通事故対策として検討すべき要因は交通密集でかつ見通しが難しい状況ということができ、この要因への具体的な解決手段を検討することが交通事故の軽減に効果的であると考えられる。これまで交通事故削減への取り組みとしては、シートベルトの着用徹底、車両のエアバック搭載義務、エアバック搭載義務などによる対策等が運転者ならびに同乗者への徹底等の改善がされているものの、上記に示した交通事故要因分析結果から、事故要因につながる事象へのさらなる具体策の検討が必要となってきたといえる。このため本テーマに上げた次世代車載無線技術（WAVE）の活用により、見通しがきかない交通密集環境下での出会い頭衝突の危険性に対して、いかに有効に働くかの検証が大きな意義を持つと考える。この WAVE 技術の具体的な有効性の解析と考察については第5章で展開する。

本節において世界および国内の交通事情を見てきた。輸送機器の増加は世産業の発展の観点からある程度は避けられない事象といえる。そのために交通事故や渋滞は負の影響として生じえる事態に対し、これまで行政や自動車関連メーカーによる安全対策は行なわれてきている。それでも都市化は世界的にも進んでおり、特に日本においては市街地交差点等での出会い頭衝突事故が顕著になっていることが明確になってきた。また、新興国でも今後輸送交通の発展は急速に進むと考えられ、特に人口および国土面積が大きく、経済発展度も顕著な中国、インドではその規模においてその国レベルにとどまらず、近年の地球温暖化による地球規模での環境問題として、特に交通渋滞による影響が懸念されており、2016年1月のCNN報告では交通渋滞により「世界保健機関（WHO）が2014年に発表した統計によれば、微小粒子状物質 PM2.5 の濃度は世界 1600 都市の中でニューデリーが最も高い」⁶ また「特に自家用車は急速に普及が進み、ニューデリーの登録車両は約 900 万台。1 日当たり 1400 台のペースで増え続けている。一方でバスの利用者は急減していた」との報告がされている。また一方でインドをはじめとする新興国での情報通信の発展は先進国のようにインフラ設備の変更する必要がなく、一挙に最先端技術の導入が可能であるために、ICT 技術の活用によっては深刻な事態を招く前に改善できる余地も残されているといえる。よって本テーマで扱う ICT 技術のひとつである WAVE 技術を積極的に活用することで世界規模的課題となる交通問題への対策を講じる研究課題への重要性はますます高くなっており、国内で先行している 700MHz 帯 WAVE 技術に関しても、こうした背景から国際協調性に向けた取り組みも注意深く見ておく必要があることも忘れてはならない。

⁶ <http://www.cnn.co.jp/world/35075714.html>

2.6.3 対象とする広域通信技術

先行研究にて紹介した広域通信について具体的な定量評価を行なうためにその詳細仕様を調査した結果を紹介する。

2.2 節で紹介したように、2000 年以降に携帯電話回線を中心とする広域通信の技術革新は大きく、高速で移動する交通機関においても高速データ通信が可能になってきた。広帯域通信の中で対象となる通信技術は、現在一般的にひろく使われている第3世代携帯通信(3G)と、高速マルチメディア通信が可能な第4世代(4G)の代表とされる LTE、高速データ通信が可能な WiMAX が対象となる。今後、第5世代の携帯電話通信や、次世代の WiMAX である WiMAX-2 に関しても対象には上げられるが、仕様のバージョンアップや使われる帯域条件が変化する可能性があるため、ここでは上記の3種類を代表広域無線通信として扱うものとした。また、狭帯域通信では既に WAVE の仕様が固まり、世界的に実証試験も大規模に行なわれている 5GHz 帯 WAVE (IEEE802.11p) および国内にて利用が開始された 700 帯 WAVE (ARIB STD-T109) の2種類をその検討の対象とすることとした。これらの主な仕様(周波数、ユーザデータ速度、通信到達半径)を整理すると表5のようになる。

表5 自動車分野対応可能な広域通信仕様

ネットワーク	3G (HSDPA)	LTE	WiMAX	
周波数	800MHz	800MHz	700MHz	2.5GHz
データ速度	7.2Mbps	100Mbps	15Mbps	15Mbps
帯域幅	5MHz	20MHz	12MHz	20MHz
変調方式	QPSK, 16QAM	QPSK, 16QAM, 64QAM	QPSK, 16QAM, 64QAM	
多重化	FDD	OFDMA	FDD/TDD	OFDMA
通信距離半径	3km	4km	4km	1.5km
規格	IMT-2000	LTE-Advanced	IEEE802.16e	
ARIB規格	T-64	T-104	T-94	T-94

注：表中の記号の意味は以下の通り

QPSK：Quadrature Phase Shift Keying、4位相偏移変調方式

QAM：Quadrature Amplitude Modulation、直交振幅変調

FDD：Frequency Division Duplex、周波数帯域の利用手法のひとつ

OFDMA：Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access、直交周波数分割多重変調方式

TDD：Time Division Duplex、時分割複信方式

広域通信技術としての選択は以下の条件により選択した。3G において、対象となる回線サービスは高速データ通信を可能としている 800MHz 帯の HSDPA (High Speed Downlink Packet Access) を候補とする。さらに HSDPA の中でユーザデータ速度 7.2Mbps、通信半径 3km の標準的な仕様のシステムを今回の比較対象通信技術とする[24]。LTE において、カテゴリー3 の 800MHz 帯周波数で一般的に使用されているも

のを候補として選んだ[25]。LTEでは、フルサービスLTEが1.7GHz帯および1.5GHz帯のシステムが開発されているが、そのサービスの限定的、一部仕様が変更になる可能性もあり、今回の選択肢の中からは除外した[26]。WiMAXにおいて、現在700MHz帯と2.5GHz帯の周波数でのサービスが可能となっており、それぞれを比較対象として検討することとした[27][28]。

2.6.4 対象の狭域通信技術

続いて、狭域通信技術の選択の前に、まず対象とするWAVE技術はそもそも1990年よりパーソナルコンピュータ同士の接続として開発が進められてきた無線LANがもとになっており、無線LANはこれまでの有線ネットワークの代表とされてきたイーサネットから無線でのサービスが提供されることで格段の移動性と応用範囲を広げることが可能となったことを理解する必要がある。このデータ通信対応の無線の規格を中心的に推進まとめてきたのが、IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) 団体であり、IEEE802.11グループの中でその仕様が定められ、世界で広く採用されてきた。この広く普及している802.11シリーズの規格を表6にまとめる。

表6 主な無線LAN規格

規格名\特徴	周波数帯	公称通信速度	チャンネル幅	策定時期	用途
IEEE802.11	2.4GHz	2Mbps	22MHz	1997年6月	無線LAN
IEEE802.11b	2.4GHz	11Mbps / 22Mbps	22MHz	1999年10月	
IEEE802.11a	5GHz	54Mbps	20MHz	1999年10月	
IEEE802.11g	2.4GHz	54Mbps	20MHz	2003年6月	
IEEE802.11n	2.4GHz / 5GHz	65Mbps - 600Mbps	20/40MHz	2009年9月	
IEEE802.11p	5.9GHz	3Mbps - 27Mbps / 6Mbps - 54Mbps	10/20MHz	2010年7月	車載用無線LAN
IEEE802.11ac	5GHz	290Mbps - 6.9Gbps	80/160MHz	2014年1月	高速無線LAN
IEEE802.11af	54 - 790MHz	20Mbps - 30Mbps	6/7/8MHz	2014年2月	長距離無線LAN
IEEE802.11ah	868MHz/920MHz	100kbps以上	1/2/4/8/16MHz	2016年3月以降	M2M/IoT向け

IEEE802.11関連規格は、表6以外にも規定されているが、ここでは車載応用として、関係する規格仕様をまとめた。このようにIEEE802.11系は幅広い用途に使用され、現在もその展開は継続されている。車載用途として無線LANシステムが検討された背景は、狭帯域通信のユーザ速度が速いという理由以外に、IEEE802.11系の無線LAN技術の無線通信システムの実績多さと、新規にゼロからプロトコルを含めて仕様を作りあげる時間とコストがかかることを避け、IEEE802.11系の展開として規格化されてきたことはよく知られている。

また、日本国内の自動車分野への通信技術の商用化は、高速道路をはじめとする有料道路の課金システム(ETC: Electric Toll Collection)として、2001年より運用を開始されている。ここで使用された無線通信は5.8GHz帯周波数を使用しており、国内の無線技術の仕様は一般社団法人電波産業会ARIB (Association of Radio Industries and

Business) 規格として ARIB T-75 にて 2001 年 9 月に制定されている。ETC としての普及をみると搭載実績 500 万台を超え、国内の乗用車の約 70% に使用されており、世界に先駆けた市場導入を果たした実績を有していることも特長的となっている[29]。実際の通信モジュールを搭載したカーナビの出荷台数を図 8 に示す[30]。

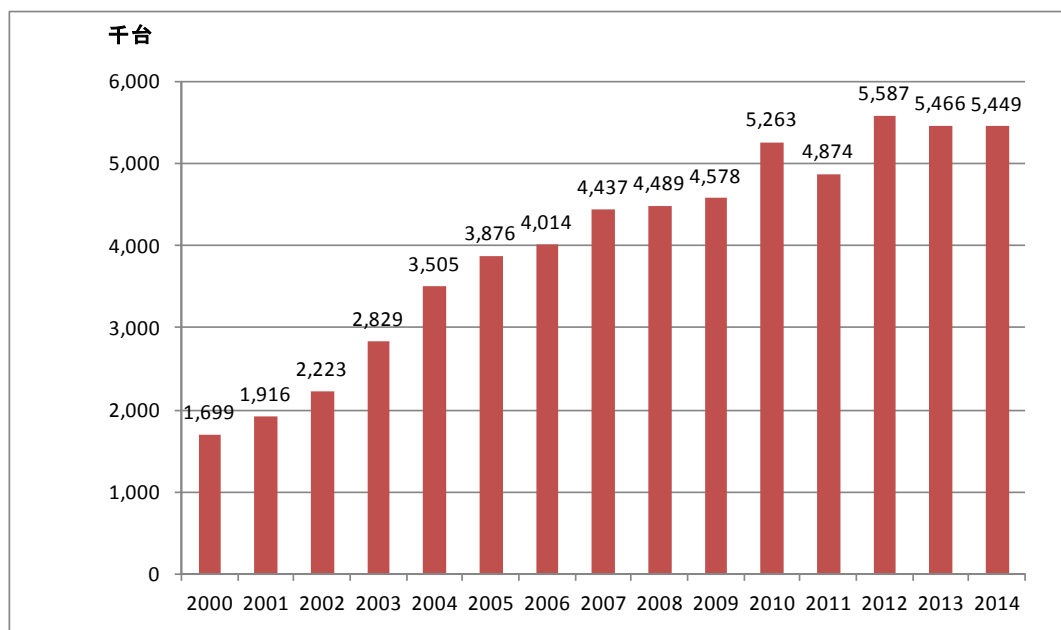


図 8 国内カーナビの年間出荷台数

この ETC 実績をもとに、ARIB T-75 は ITS 応用の路車間通信用 WAVE として ARIB T-88 にて定められている。さらに日本規格の特長としてあげられるのが、5GHz 帯域以外の周波数帯で ITS の応用が行なわれたことにある。これは先に紹介したように、アナログテレビ放送に使用してきた帯域のうち UHF 帯の一部（700MHz 帯）を車載無線技術として開放したことにある。アナログテレビ放送の 2011 年 7 月（全国では 2015 年 3 月）停止にともなう周波数再編成を国が積極的に支援し、ARIB T-109 規格として 2013 年 12 月制定された。この UHF 帯周波数を車載無線通信用途に展開した主な理由は、付録資料 3 にて詳細に紹介しているが、5GHz 帯に比べ、電波の回り込みによる通信の到達範囲が広がる特長を生かし、市街地における交通事故軽減に向けた ITS 応用として活用できたことがある。これらの 2 つの WAVE の ARIB 規格の成り立ちを表 7 として示す。また、700 帯と 5.8GHz 帯 WAVE 技術の国内詳細仕様を表 8 にまとめた。

表 7 国内車載無線通信規格

規格名	周波数	交渉通信速度	チャンネル幅	策定期間	用途
T75	5.8GHz	1Mbps - 4Mbps	4.4MHz	2001年9月	ETC/DSRC
T88	—	—	—	2007年12月	ITSアプリケーション
T109	760MHz	6Mbps - 18Mbps	9MHz	2013年12月	ITS

表 8 国内 WAVE 仕様

ネットワーク	WAVE	
周波数	760MHz	5.9GHz
データ速度	18Mbps	27Mbps
帯域幅	9MHz	20MHz
変調方式	BPSK, QPSK, 16QAM	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM
多重化	OFDM	OFDM
通信距離半径	224m	150m
国際規格	N.A.	IEEE802.11p
ARIB規格	T-109	T-75

続いて、現在の WAVE としての国際標準の動きに目を向けたい。まず規格化に向けた背景としては以下ようになる。

WAVE システムの開発は 2007 年から本格的に、欧米および国内において開始され、2010 年には規格が制定されるにいたった。WAVE の特長は先述した最も多い事故となる出会い頭衝突事故に対して、未然に防ぐことや事故を軽減することを目指している。これら衝突事故に様々なケースを想定し実証する取り組みも各地で行なわれてきた。その代表例として米国にて 2005 年より進めている VII (Vehicle Infrastructure Integration) が行なわれ、その後 2009 年からは政府主導による IntelliDrive™ として大規模な実証試験が展開されてきた。また、欧州においても自動車メーカーを中心としたコンソーシアムの C2C-CC (Car to Car Communication Consortium) が主導し、米国と同様の実証試験を欧州において展開を進めてきた。そして国内においては、2010 年以降 ITS 推進協議会として実証試験および標準化に向けた活動の推進役を担ってきており、その活動報告も盛んに行なわれてきた[31]。

日本における WAVE システム開発の特徴として、欧米と共通である 5GHz 帯の周波数のシステム以外に、2011 年 7 月 24 日のアナログ放送終了に伴う 700MHz (UHF) 帯の周波数を用いたシステムの開発が行われた。この 700MHz 帯周波数を用いることで、電波の回り込み（回折）性能に優れる電波の特長を活用し、これまでの路・車間通信以外に、車・車間通信としての活用が期待されている。特に市街地における高層ビル間における通信においては、直進性に優れる 5GHz 帯の通信システムと比較して優位であるとされている[32]。

さて、標準化の推進は各国で以下のような経緯によりまとめられてきた。WAVE 開発の先行してきた欧州では 2007 年 12 月には欧州標準化推進団体 ETSI (European Telecommunication Standard Institute) の TC-ITS (Technical Committee - Intelligent Transport System) が設立され、欧州規格 CEN EN1225 (Comité Européen de Normalisation) として規格化された。また、同じく先行する米国では 2010 年 7 月に 2004 年より検討されてきた IEEE802.11p タスクグループでの検討が IEEE (The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.) にて正式に IEEE802.11p/IEEE1609 として承認された。一方、国内においては、ARIB (Association Radio Industries and Business) にて 2009 年より規格案としてドラフトが作成され、5.8GHz 帯システムが ARIB T-75 および ARIB T-88 として、700MHz 帯システムが ARIB T-109 として 2012 年 2 月に制定されている。これらの欧米、国内の規格の特長をまとめると表 9 のようになる。

表 9 世界 WAVE 技術の仕様まとめ

	日本		米国 (DSRC)	欧州 (DSRC)
	DSRC	700MHz		
アプリケーション層	アプリ ETC	アプリ 衝突安全防止	アプリ ●衝突安全防止 ●高速データサービス	アプリ ●衝突安全防止 ●高速データサービス
上位 プロトコル	DSRC プロトコル 処理	国内独自 (現時点)	アプリ管理 IEEE1609	アプリ管理 UDP/TCP, IPv6 WSMP(非IP) LLC
アクセス方式	TDM/FDD	CSMA/CA	802.11p	CSMA/CA
変調方式	QPSK	OFDM (BPSK/QPSK/16QAM)		
CH数	5MHzx7ch x2(上り/下り)	■CCH 10MHzx1ch (内1MHzはガードバンド)	■CCH ■SCH 10MHzx7ch (20MHz幅オプション)	■CCH ■SCH 10MHzx3ch
使用周波数	5.8GHz帯	700MHz帯	5.9GHz帯	5.9GHz帯

表 9 において、全体を俯瞰して大きく差異が見えるのが、データフレーム構成を含む規定をまとめる上位プロトコルと周波数帯域規定である通信チャネル数が異なっている。国内の 5.8GHz 帯システムは、もともと ETC (Electric Toll Collection) として 2001 年より展開されてきた技術を車載無線通信の拡張としての展開を進めている経緯により、欧米の WAVE システムとの比較において共通する点を見つけることは難しいのはやむを得ない。

一方、国内の 700MHz 帯システムは使用する周波数は異なるものの、欧米にて開発しているシステムとほぼ同じ時期に開発が行なわれてきており、700MHz 帯の電波の優位

性を積極的に活用する背景として推進してきた。また、商用化に関しても 2015 年において大手自動車メーカより実車搭載が開始されるとともに、地域は限定されているものの、交差点信号機にインフラ側の無線基地局（RSE）として設置が行なわれ、現在実証データを公道において集積を図っている。

規格の話に戻すと、国内規格と欧米規格における大きな違いのひとつである通信チャネル数であった。すなわち、欧米規格においては安全運転支援として専用に使用される制御チャネル（CCH: Control CHanel）とユーザに解放されるサービスチャネル（SCH: Service Chanel）が用意されている。このためこの SCH を活用した自動車の安全運転支援以外の応用範囲として広げられる要素を持っている。すなわち、インターネット情報を車においても積極的に活用しようというテレマティックスサービスである。国内でのテレマティックスサービスは既に、カーナビゲーションや携帯電話を活用したインターネットサービスが自動車メーカにより展開されてきている。しかし、対応する携帯電話やカーナビゲーションの組み合わせは、企業や車両によって異なり、規格統一はなされていないのが実態となっているため、ユーザの利用には制限があると言わざるを得ない。一方、欧米では同様な動きもあると同時に、WAVE システムの開発において世界規格統一を図り、帯域幅に関しても米国では SCH として 60MHz、欧州では 20MHz の周波数割り当てされており、WAVE 応用の適用範囲が広い条件を満足できるよう整えている。また、こうした動きは欧米のそれぞれの標準化団体が、事前に意見調整を行なう国際協調性としての活動を行なっていることも無視できない。従って、商用には先行している日本の WAVE 技術ではあるが、世界的観点から考えた普及のシナリオの点で不安が残されているといえる。この国際協調性に関する日本の WAVE 規格に関する課題として付録資料 6 にて詳細検証と考察を加えている。

第3章 新興国交通定量分析

前章までは WAVE システムの開発で先行している主に先進国における検討を中心に紹介してきた。先に述べた近年経済発展が目覚ましい新興国において、車をはじめとする交通機関の増加が、道路等のインフラ整備が追い付かない状況になっている。この深刻な交通渋滞や交通事故の増加、さらには渋滞による経済損失のみならず、環境破壊による人の健康問題にまで大きく問題となっており、環境破壊では当事者国のみならず地球規模課題に及んでいる状況にもなっている。そこで、新興国に対して先進国にて開発されたこうした課題に対する対応技術の導入は急務であり、先進国各国もその対応を積極的に推進している。日本も政府が中心的に、独立財団法人国際協力機構（JICA）を通じた ODA により交通問題解決のための技術供与および教育等を進めている。

その中で、筆者は 2014 年 10 月より JICA による「民間提案型普及・実証事業プログラム」に参画する機会を得て、インド国にて交通渋滞を緩和するための情報を車運転者へ提供するサービスを開始している。ここでは市内の主要道路 14 ヶ所に画像トラックカウンタを設置し、その交通情報の解析をもとに渋滞情報を作成することで、市内に 4 ヶ所設置した情報板（VMS: Variable Message Sign）に交通情報の提供を行っている。この事業で得た具体的なプローブ情報をもとに現地の課題となる交通渋滞に対して WAVE システム活用の可能性を前提に検証する。これまで先行研究にて紹介したようにインド国におけるプローブカーでの実証は未実施であるため、画像トラフィックモニタで得られたデータはどのようなもので、渋滞緩和に向けた渋滞の状況の把握へのヒントが得られないかを検討した。

国内においてもプローブ検討は行なわれており、先に紹介した三輪ら[17]の研究にて一般道におけるプローブカーを導入したデータと路側観測交通量との比較を実施している。この研究では路側機における測定データを真値として扱い、プローブデータから得られる情報をその真値との比較においてプローブ情報の有効性を論じている。また、この先行研究では先進国である日本の都市でのデータ観測にて評価を行っているとともに、観測データの詳細検討に関しては行なわれておらず、単に交通状態の真値としてプローブデータとの比較にて、プローブデータの有効性を検討しており、観測データの解釈が詳細にされていないためプローブデータの真の有効性確認がされていない。

よって本章では、まず新興国（インド）における具体的な交通の把握ため比較的長期（2 ヶ月）における観測を行った貴重なデータの解析を行うことで新興国の交通分析の検証を行なうものとする。

3.1 インド ITS 実証試

今回 JICA プログラムによって ITS 実証を行なった全体概要に関して説明を行なう。実施対象地域はインド国グジャラート州アーメダバード市における市街地での交通渋滞緩和を目指した ITS システムの構築と実証である。

そもそもインド国における交通事情は近年 5%~7%の経済成長が進む中、交通渋滞による年間の経済損失は約 60 億ドル[33]とも言われており、交通渋滞による労働時間の損失に加え、不要な燃料消費や大気汚染とそれによる健康被害となって現れている。原因の根本は、増大する自動車輸送機器に対し、道路整備のインフラ設備の改善が間に合わないことにあり、経済成長を止めることなく整備を進めなければならない新興国ならではの事情があることはわかっている。

アーメダバード市はインド西部、グジャラート州の主要都市であり、人口は 2011 年には 600 万人を超え、10 年間で 26.61%増加しており、車の数は 255 万 5 千台。年間 10 万台ペースで増加してきている[34]。都市交通の特長として、行政のバス専用レーン（BRT）等の設置の計画と実行、交通警察による混雑時の人的交通管理の実施を継続的に行なっている。本市中を流れる川の西岸に位置する渋滞の激しいニュータウンで、市内の交通状況をモニタする画像トラフィックモニタカメラを 14 台、そこから得られる情報をもとに交通渋滞情報を市内に 4 基設置された交通情報板（VMS）に配信することで、これまで交通情報がまったくなかった市民へのリアルタイム情報の提供により、すいている道路等へのガイドを促すプログラムを展開している。このシステムの全体構成を図 9 に示す。



図 9 アーメダバード市 ITS 実証システム概要

画像トラフィックモニタで得られた交通情報は、携帯通信網 3G 回線を通じてクラウドシステムとして構築している。また、将来のタクシーによるプローブ情報やスマートフォン等の携帯ユーザからの情報もシステムに取り込む仕組みを構築し、画像トラフィックモニタ以外のプローブ情報を得る機能も追加されている。交通警察にはタブレット端末を提供し、インターネット上で VMS の状況の確認と現場における事故等の緊急情報の入力を行ない VMS への表示を行なうシステムとなっている。このシステムの具体的設置個所に関して図 10 に示した。図中 $EIB_{x=1,2,3,4}$ の表記が VMS、 $CTS_{x=1\sim 10}$ の表記が画像トラフィックモニタとなっており、画像トラフィックモニタは VMS にも搭載されているので、その台数は $10+4$ の計 14 台となる。

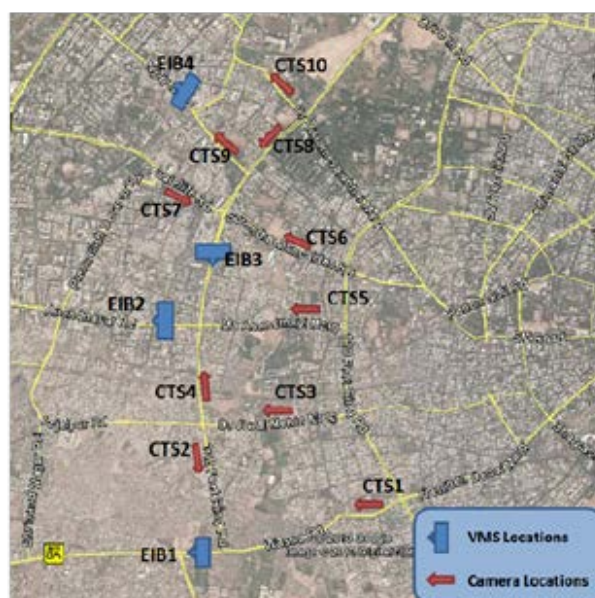


図 10 アーメダバード市 ITS 装置設置個所

3.2 新興国交通の可視化

今回の ITS システムの導入による大きな成果は新興国市内の交通量の把握が可能となったことにある。例として 2015 年 2 月における 1 ヶ月の交通量と車両速度の時間別平均を図 11、12 に示す。両図から夕方のラッシュ時の交通量および車速から渋滞の様子がうかがえる。特に夕方（18 時～20 時）の平均車速が落ち込んでおりラッシュの状況がよくうかがえる。全観測地点での詳細観測データは付録資料 2 にまとめるが、他の観測場所ではその状況は類似した傾向にあることが判明している。

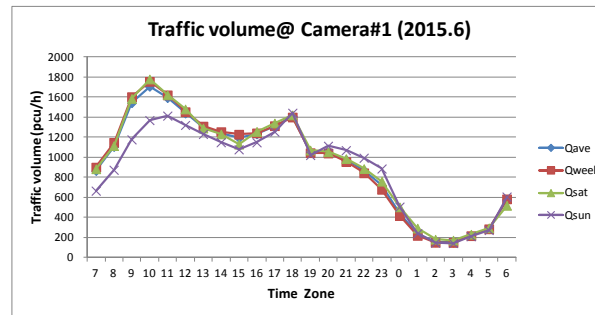


図 11 カメラ#1 の時間帯交通量 (2015 年 6 月)

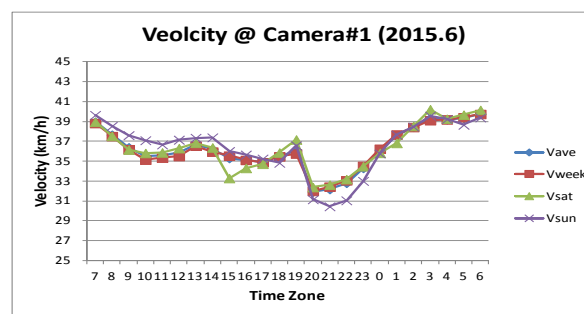


図 12 カメラ#1 の時間帯別速度 (2015 年 6 月)

このように、これまで実際の交通状態を定量的に把握できる環境にはなかったものが、具体的な数字で日常の交通状態の把握が可能となったことは画期的な成果となっている。

今回の ITS 実証事業では新興国の特徴でもある道路整備等交通インフラへの予算確保が難しい環境下で運営するのは困難を伴うことが想定された。このため、交通情報を提供する情報版 (VMS) の半分を企業広告に貸し出すことで、その広告費を事業の運営・メンテナンスに充てる PPP (Public Private Partnership) ビジネスモデルを採用した点で注目を浴びている。写真 1 に実際の情報版の表示例を示す。



写真 1 インド ITS システムの VMS 拡大写真

写真 1 に示すように、右半分は道路の混雑状況を表示し、空いている道路への迂回を促すことを自動車のドライバー向けの情報提供サービスを行っている。そして、左半分には現地企業をはじめとする一般企業に対しての広告をスペースとして貸し出すこと

を行った。一方で、こうした取り組みはすべての地域で受け入れられるものではなく、地域によっては州の判断により道路上での企業広告に対して、規制がある所も存在している。

そこで現地政府との試行錯誤の内、一般企業に広告として貸し出しているスペースに公共的要素を含む宣伝（例えば、交通マナー）の表示を行うアイデアが生まれ、これまで道路情報版への広告表示に消極的であった州からも賛同の意向を頂く結果となった。写真2には、その例として車運転中の携帯電話禁止を伝える表示を紹介する。



写真 2 公共広告表示の情報版写真

嬉しいことに、この公共広告に対して、2013 年よりインドにおける新会社法として、一定の規模あるいは利益を上げている会社は、その年の営業利益の 2% を CSR (Corporat Social Responsibility) 活動として提供する法律が施行された。これにより、写真2の公共広告の下に、この表示をするスポンサーとして企業の名前を一行追加することで、立派に CSR 活動の一環であることを示す活動とすることが認められ、PPP ビジネスモデルの新たな展開パターンとして活動することが可能となっている。

以上から図 11、12 で把握可能となった交通状況により、行政側として市街地の交通事情を定常的に把握することが可能になり、これらの情報をもとに、今後の道路拡張やバイパスの建設といった効率の良い都市環境整備への足掛かりともなる効果として期待ができる。

3.3 新興国交通交通流ビッグデータ解析と理論

今回の ITS 実証試験で使用した画像トラフィックモニタは市販のカメラを用い、設置した道路での毎分ごとの車両数、車両間隔 (Gap) や車頭間隔 (Headway) から測定箇所の車両密度 (k)、交通量 (q) のデータが得られている。代表例として車両密度 (k) と車両速度 (v) の関係 (通常 $k-v$ 曲線と呼ばれる) と、車両密度 (k) と交通量 (q) の関係 (通常 $k-q$ 曲線と呼ばれる) をカメラ#1 (CTS1) の 2016 年 6 月一ヶ月のデータを図 13 にそれぞれ示す。これらのデータは実測データであり、その値自体は真値ではあるが、測定された道路における交通特性としてとらえた場合、測定値 = (道路特性と

しての) 真値として良いかが先行研究で指摘した課題となる。先進国における交通特性は、今回測定で得た新興国のデータと比較すると、先進国のデータは比較的交通流理論における特性に当てはまることが一般に知られている。一方、今回のようなインド国におけるデータは図 13 からみても、ばらつきの大きさが問題となってくるのは明らかである。従って、この程度のばらつきを持つ新興国の交通データの扱いについては、現時点では確立されていない。むしろ新興国の実際の交通データは、今回のケースも含めてようやくデータ自体が取り始められたといってもよい。

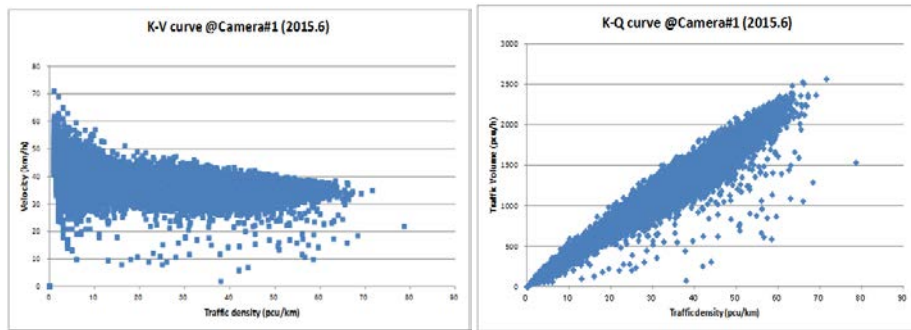


図 13 カメラ#1における交通特性 (k - v 曲線、 k - q 曲線) (2015 年 6 月)

図 13はカメラ#1から得られた毎分ごとの2015年6月1ヶ月分の交通密度、交通量、車両速をプロットしておりそれぞれ約 40,000 ポイントを超えるデータとなる。これ以外の測定箇所のデータも同様な傾向の特性が得られており、詳細データは付録資料 2 にて示す。このままの状態では国内で見られるような最小自乗法によるデータの平均化による交通流の判定は困難といえる。そこで以下に示す交通理論による基本特性から新興国(インド)の交通特性の解析を行なうことを行った。交通量の把握は古くよりトラフィック理論として研究されており、交通流の特性として以下の基本式が確立されている。すなわち、交通量(q)、空間平均速度(v)、交通密度(k)との間にはつぎのような基本式(1)が成立することが一般的に知られている⁷。

$$q = k \times v \quad (1)$$

⁷ 式(7)に関して：ある車両間隔 x の道路にて、 n 台の車両が走行する条件で、ある時間 T の間の交通量 (q) は $q = n/T$ で与えられる。このとき、 x 間隔を通り過ぎる時間 t_i とすると T 時間における交通密度 (k) は次式であらわされる。

$$k = \frac{\left(\frac{\sum_{i=1}^n t_i}{T} \right)}{x}$$

以上両式から q/k を求めることで下式が得られ式(7)が導入される。

$$\frac{q}{k} = \frac{\left(\frac{n}{T} \right) x}{\frac{\sum_{i=1}^n t_i}{T}} = \frac{x}{\sum_{i=1}^n t_i / n} = v$$

この関係から交通密度 (k) と車速 (v) との関係から交通量 (q) が得られる。これを一般的な $k-v$ 曲線で示すと図 14 のように表わされる。すなわちある $k-v$ 曲線が得られるとある地点での交通密度 (k_0) と車速 (v_0) の積により交通量 (q_0) が求められる。また、交通密度 (k) がゼロ (0) の時に車速は定義より自由速度 (v_f) となり、交通密度 (k) が飽和状態の飽和密度 (k_j) の時に交通量 (q) は定義よりゼロ (0) となる。交通流の連続性の性質からこの関係を式 (2) のように表わすことができる。

$$q(k) = v_f \left(1 - \frac{k}{k_j} \right) k \quad (2)$$

式 (2) を変形することで式 (3) を得られる。

$$q(k) = -\frac{v_f}{k_j} \left(k - \frac{k_j}{2} \right)^2 + \frac{v_f k_j}{4} \quad (3)$$

式 (3) を $k-q$ 曲線の関係で示すと図 14 のように示した通りで、局大値を持つ 2 次曲線となることがわかる。これより交通密度 (k) が $0 \sim k_c$ の間では交通流が比較的自由に流れる自由流領域にあり、 $k_c \sim k_j$ では渋滞流領域にあることが理解できる。以上から飽和交通量 (q_c)、臨界密度 (k_c)、臨界速度 (v_c) は付式 (4)、(5)、(6) にて表わすことができる。

$$q_c = \frac{v_f \times k_j}{4} \quad (4)$$

$$k_c = \frac{k_j}{2} \quad (5)$$

$$v_c = \frac{q_c}{k_c} = \frac{v_f}{2} \quad (6)$$

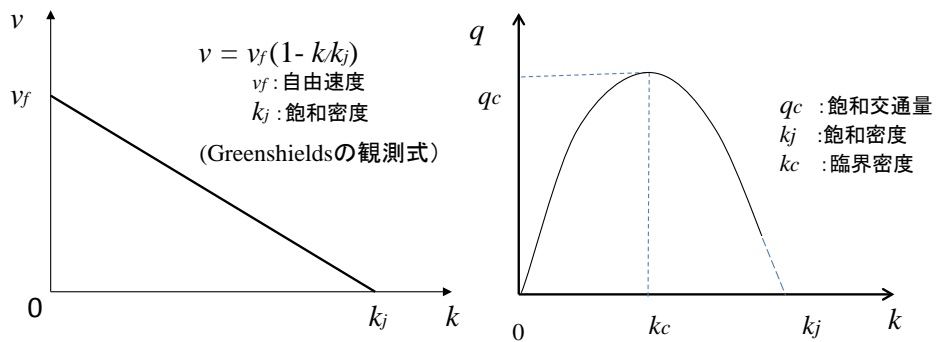


図 14 一般的な $k-v$ 曲線と $k-q$ 曲線

実測との比較においては例えば、交通量 (q) と速度 (v) や、交通密度 (k) と速度 (v) との関係においてはその他にも観測式が提案されており、直線関係とした Greenshields の式[35]などが $k-v$ 曲線として使用され、これまでに数多くの測定例も報告されており、その有効性が確認されてきた[36]。

式(1)式(3)から Greenshields の式(7)を求めることができる。

$$v = -\frac{v_f}{k_j}k + v_f \quad (7)$$

以上から図 13 の観測データと図 14 の理論曲線との比較により、インドにおける交通流の基本パラメータとその特性の推定が可能となる。最初に図 13 の $k-v$ 曲線より最小自乗法により観測データから Greenshields の式として近似線を求めると図 15 のようになる。これより近似式の第 2 項は式(3)から交通渋滞のない自由速度を表していることを考えると $v_f = 38 \text{ km/h}$ となり、観測データとの比較で矛盾が生じていることがわかる。

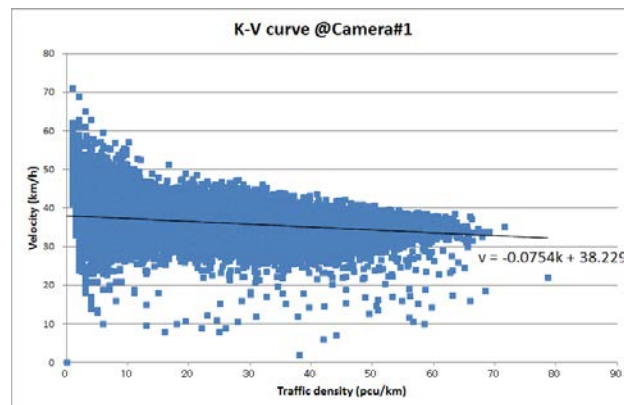


図 15 カメラ#1 の $k-v$ 曲線と近似式 (2015 年 6 月)

そこで、 $k-q$ 特性式として、観測データの境界線が存在している点に着目し、この境界線をもとにした近似曲線を求める。求め方は境界線の近似曲線を式(3)にあてはめることでその地点での交通特性式として与える。この交通特性式から得られる自由速度 (v_f) は 54 km/h となる。すると先ほどの最小自乗法で求めた自由速度の値に対して、比較の実態に沿った値となることがわかる。これにより、新興国での交通基本特性として、観測で得られた $k-q$ 特性をもとに、極大点を持つ 2 字曲線の境界線から $k-q$ 特性を近似し、そこから得られるパラメータ値を式(3)に当てはめることで求め、ここから得られるパラメータ値を用い $k-v$ 特性近似式である Greenshields の式を式(7)が求められる。これらをカメラ #1 における $k-v$ 特性と $k-q$ 特性としてまとめると図 16 のようにな

り、今回のインドの交通流を表す式としては適していることが理解できる。

このように、本手法で求める新興国の交通特性を $k-q$ 特性を式(3)、 $k-v$ 特性の Greenshields の式として式(7)を使用することは意味のある理論式として扱うことが可能となり、交通基本特性のパラメータを特定できることになった。

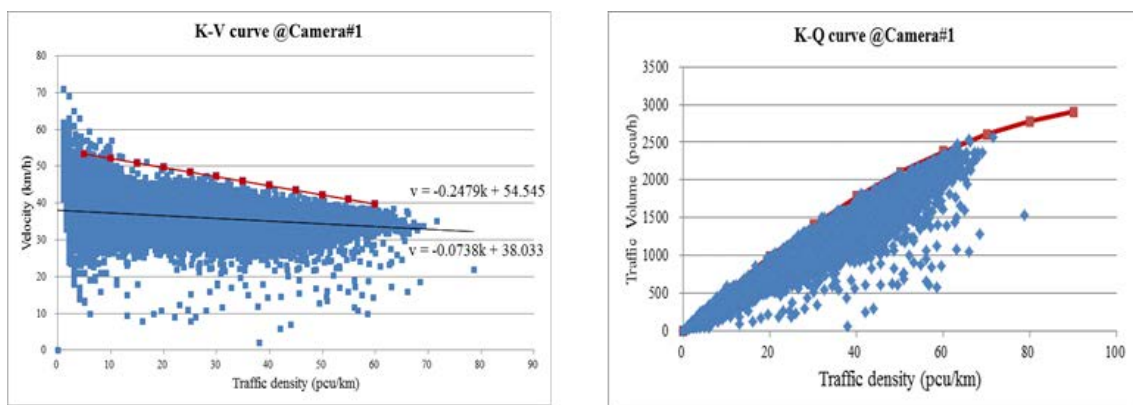


図 16 カメラ#1 の近似線と交通基本特性（2015 年 6 月）

ところで、 $k-v$ 曲線における近似式に関しては Greenshields の式以外にも提案されていることは先に述べたとおりである。主な近似式としては Greenberg[37]や Underwood[38]が知られている。これらの Greenberg の式および Underwood の式を表すと式 (8)、(9) に示す通りになる。

$$v = v_c \ln\left(\frac{k_j}{k}\right) \quad (8)$$

$$v = v_f e^{-k/k_c} \quad (9)$$

カメラ #1 の $k-q$ 特性のパラメータから、2015 年 6 月の測定データに対する Greenberd と Underwood の近似式を求め、全近似式をまとめると表 10 のようになる。また、これらの近似式をグラフに示すと図 17 のようになり、Greenshields の式が 3 種類の近似式では最も測定結果を表わしているといえる。

表 10 カメラ#1 の各種近似式

種類	近似式
Greenshields	$v = -0.2479 k + 54.545$
Greenberg	$v = -27.3 \ln(k) + 147.1$
Underwood	$v = 54.545 \exp(-k / 110)$

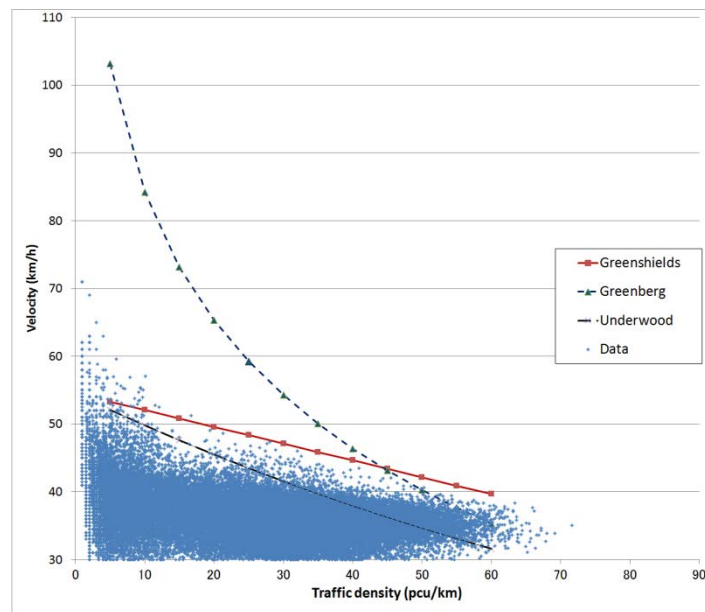


図 17 カメラ#1 における $k-v$ 曲線と各種近似式

最後に、今回の測定した 2015 年 2 月と 6 月の全データに関しても同様になることを確認しており、一連の観測データから観測理論式も実態をよく表している結果を得た。
(付録資料 2 参照)

第4章 新興国交通渋滞解析

第3章では新興国プローブ情報は、そのまま真値として扱うのではなく、データから得られる特性の解釈を分析したうえで扱うことで観測理論値が得られ、それにより新興国の基本交通特性を式で表せることを示した。また、対象とする道路におけるデータは各環境による特殊性が存在するため道路の交通基本特性の把握においてはデータの蓄積による把握が必要であり、クラウドによるデータ把握が重要といえる。一方こうした交通基本特性の把握できた道路を現在走行している車両に関しては、自車の走行速度をみることで交通基本特性との比較により自由流走行を行っているか渋滞流走行を行っているかに関して間接的に交通状態を判定することが可能となる。すなわち、特定道路における交通基本特性の比較をクラウドにより把握することでドライバーは比較的容易に渋滞状況を把握できることになる。よって、現在走行中の車両の速度 (v_x) であった場合、それに相当する車両密度 (k_x) が $k-v$ 特性より判定でき、この車両密度 (k_x) の値により $k-q$ 曲線における自分の位置の把握が可能となり自由流領域か渋滞流領域かの判定が可能となる。この様子を図18に示す。そして将来の新興国における交通マネジメントをイメージしたシステム構成例を図19として示す。これより新興国におけるリアルタイム交通渋滞が把握できれば、市街地に設置した情報版により交通情報をドライバーに提供することで、ドライバーに迂回路を促すことで交通量の分散を図ることができる。今回のインド ITS システムにおける車両の検出は画像カメラを用いており、夜間や車の重なり等が発生すると正確な交通情報を取ることは困難となっている。このため本論で研究している次世代車載無線通信技術の WAVE システムが搭載されるようになれば、より車両の正確な把握が可能になるのみではなく、将来的には信号機等の連携により、渋滞長の制御にまで拡張できることが可能となる。図19のイメージ図にはそれを反映した図となっている。また、図19中のクラウドおよび“Fog computing”と交通情報収集システムを表現しているが、このコンピュータネットワークに関しては第5章にて解説することにする。

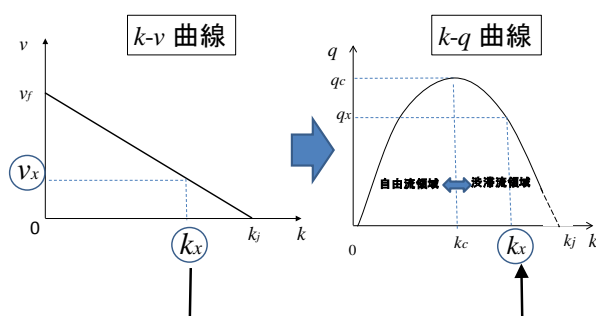


図18 交通基本特性と交通領域

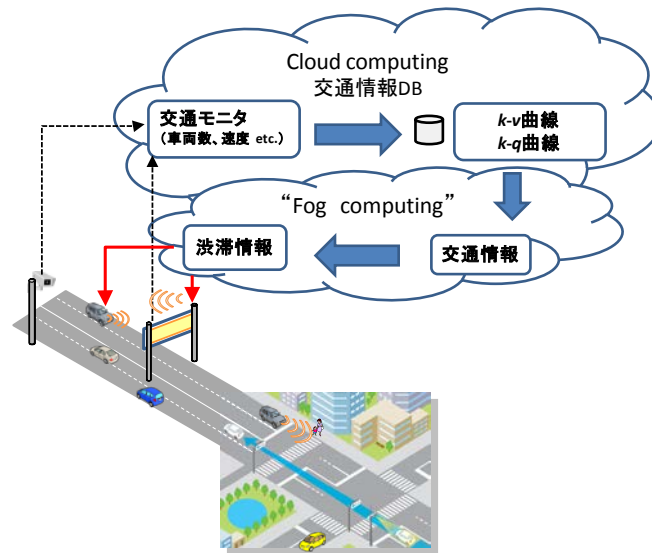


図 19 地域交通渋滞マネジメントイメージ

以上から先進国にて開発が進んだ WAVE システムのすべての車両への WAVE システムの導入には時間を要するものと思われるが、交通情報把握のための画像トラフィックカウンタの設置や大型情報板設置にはなおインフラ設備に必要な予算も必要となる。また、自動車メーカーの努力による事故防止としての車・車間通信の期待を担っている WAVE システムでもあり、技術の普及が期待される可能性は少なくは無い。すなわち、今後の先進国も含めた連携により WAVE 技術導入の早期実現によって、経済発展とともに交通事情悪化が著しい新興国への有効な手段として WAVE 技術が期待できると考えられる。

4.1 交通流における渋滞解析

第3章にて求められた新興国の基本特性をもとに、さらにデータ解析を掘り下げてみる。測定データは前述の通り、2015年2月と6月に実施したインド国グジャラート州アーメダバード市における交通モニタカメラからの観測データを扱っている。そしてそれぞれの測定点における交通基本特性 $k-q$ 特性、 $k-v$ 特性を第3章に示した境界線から交通パラメータを求めた。さらに観測データ2月の時点と6月の時点の推移した交通量と車速のデータをまとめることができた。表11に2月、表12に6月のそれぞれの測定箇所における交通パラメータをまとめる。

これ以降の交通解析の基本特性としてはここで示した表11と表12を基本として話を進めるものとする。

表 11 2015 年 2 月交通パラメータ

Location	Data analysis						Measurement		
	v_f/k_j	k_c	q_c	v_c	Formula	v_f	q ave (pcu/h)	v ave	k ave(pcu/km)
Cam#1	0.2600	100	2,600	26	$-0.2800(k-100)^2+2800$	52.000	884	35	26
Cam#2	0.2314	110	2,800	25	$-0.2314(k-110)^2+2800$	50.909	719	31	26
Cam#3	0.2750	100	2,750	28	$-0.2750(k-100)^2+2750$	55.000	672	30	20
Cam#4	0.3200	100	3,200	32	$-0.3200(k-100)^2+3200$	64.000	904	44	22
Cam#5	0.2893	110	3,500	32	$-0.2893(k-110)^2+3500$	63.636	927	46	21
Cam#6	0.2500	120	3,600	30	$-0.2500(k-120)^2+3600$	60.000	1,118	39	31
Cam#7	0.3000	100	3,000	30	$-0.3000(k-100)^2+3000$	60.000	921	39	25
Cam#8	0.2810	110	3,400	31	$-0.2810(k-110)^2+3400$	61.818	725	43	19
Cam#9	0.4219	80	2,700	34	$-0.4219(k-80)^2+2700$	67.500	686	48	15
Cam#10	0.4082	70	2,000	29	$-0.4082(k-70)^2+2000$	57.143	611	37	17
VMS#1	0.2600	100	2,600	26	$-0.2600(k-100)^2+2600$	52.000	1,137	32	37
VMS#2	0.2400	100	2,400	24	$-0.2400(k-100)^2+2400$	48.000	924	29	32
VMS#3	0.2361	120	3,400	28	$-0.2361(k-120)^2+3400$	56.667	913	40	30

注：VMS#4 に関して観測データが測定器不具合のため 10 日間分不足により省略

表 12 2015 年 6 月交通パラメータ

Location	Data analysis						Measurement		
	v_f/k_j	k_c	q_c	v_c	Formula	v_f	q ave (pcu/h)	v ave	k ave(pcu/km)
Cam#1	0.2479	110	3,000	27	$-0.2479(k-110)^2+3000$	54.545	1,134	36	32
Cam#2	0.1556	150	3,500	23	$-0.1556(k-150)^2+3500$	46.667	736	26	31
Cam#3	0.2153	120	3,100	26	$-0.2153(k-120)^2+3100$	51.667	683	34	20
Cam#4	0.3200	100	3,200	32	$-0.3200(k-100)^2+3200$	64.000	887	44	21
Cam#5	0.3704	90	3,000	33	$-0.3704(k-90)^2+3000$	66.667	927	46	21
Cam#6	0.2367	130	4,000	31	$-0.2367(k-130)^2+4000$	61.538	1,185	39	32
Cam#7	0.2361	120	3,400	28	$-0.2361(k-120)^2+3400$	56.667	921	39	25
Cam#8	0.3200	100	3,200	32	$-0.3200(k-100)^2+3200$	64.000	766	47	18
Cam#9	0.4898	70	2,400	34	$-0.4898(k-70)^2+2400$	68.571	644	47	14
Cam#10	0.3438	80	2,200	28	$-0.3438(k-80)^2+2200$	55.000	613	37	17
VMS#3	0.2361	120	3,400	28	$-0.2361(k-120)^2+3400$	56.667	1,092	41	30

注：VMS#1,#2,#4 に関して測定機不具合のため省略

Cam#9 は 1 日～15 日までのデータのみ（参考値）

4.1.1 交通量変化と渋滞

本節では具体的に関心事である交通渋滞の解析に話を進める。まず、観測地点における交通量の変化を見ていく。2015 年 2 月から 6 月において各観測地点における昼 12 時間の交通量変化を表 13 にまとめる。データは各測定地点における交通量の全体平均、平日平均、日曜平均に関して区分けしている。また変化を見るために 2 月の交通量に対する 6 月の交通量の増減比として示した。これにより、平日においてカメラ #7、カメラ #9、カメラ #10 地点では明らかに昼 12 時間交通量の減少傾向が出ている。一方でカメラ #1、カメラ #8 においては増加傾向になっていることが判明した。また付表 3 から 2 月～6 月の交通量変化についての散布図を図 20 に示す。図 20 の破線は 2 月と 6 月の交通量が等しい境界線を表しており、破線上部が 6 月時点で交通量の増加した箇所、

破線下部は減少した箇所を表している。

表 13 アーメダバード市の交通量変化

Time	Location	Cam#1	Cam#2	Cam#3	Cam#4	Cam#5	Cam#6	Cam#7	Cam#8	Cam#9	Cam#10	VMS#3	Total
Feb 2015	Average	23,254	14,911	18,382	25,420	19,993	21,417	33,906	24,882	24,209	24,932	29,675	260,981
	Weekday	23,584	15,025	18,895	25,915	20,892	25,676	29,052	25,440	28,815	29,515	29,223	272,032
	Sunday	21,942	14,384	15,353	22,657	14,841	18,921	20,569	22,854	16,920	17,932	28,716	215,089
Jun 2015	Average	27,100	16,301	18,761	24,118	21,164	23,617	24,390	29,009	22,810	24,080	30,874	262,224
	Weekday	27,516	16,602	19,271	24,475	22,335	24,260	25,191	29,565	23,824	25,131	31,789	269,959
	Sunday	24,573	15,371	15,766	21,829	15,006	20,117	20,253	26,344	17,214	18,629	25,255	220,357
Q_Ratio =(Jun/Feb)-1	Average	0.165	0.093	0.021	▲ 0.051	0.059	0.103	▲ 0.281	0.166	▲ 0.058	▲ 0.034	0.040	0.005
	Weekday	0.167	0.105	0.020	▲ 0.056	0.069	▲ 0.055	▲ 0.133	0.162	▲ 0.173	▲ 0.149	0.088	▲ 0.008
	Sunday	0.120	0.069	0.027	▲ 0.037	0.011	0.063	▲ 0.015	0.153	0.017	0.039	▲ 0.121	0.024

注：単位は台／12 時間、交通量比率は単位無し。

$$Q_Ratio = (6\text{月平均交通量} / 2\text{月平均交通}) - 1$$

測定点合計車両数 (Total) は全測定地点の昼 12 時間交通量の合計を表している。

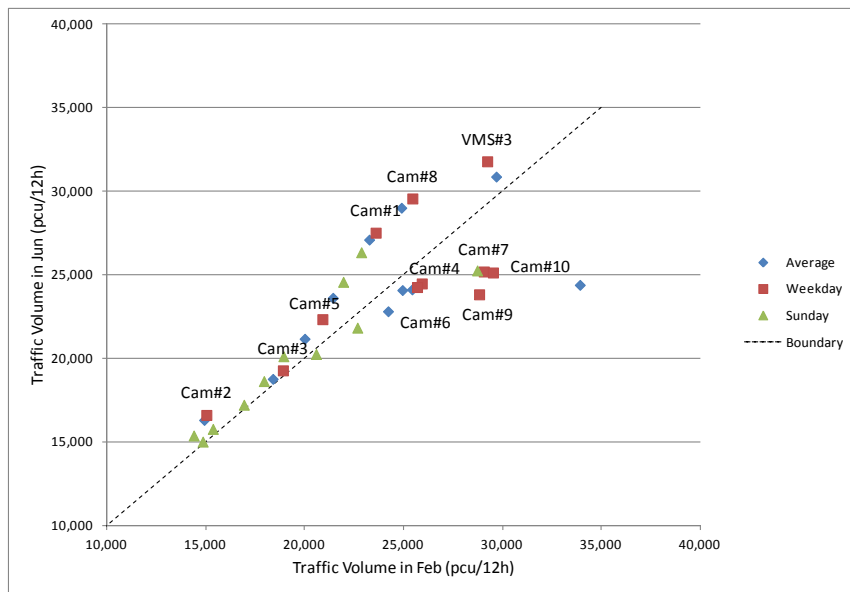


図 20 交通量 2 月—6 月散布図

4.1.2 交通渋滞パラメータ

ここでは筆者らは更に踏み込んで交通渋滞の把握を簡易に判断のできるパラメータを検証しており[39]、以下具体的にその過程を見ていくことにする。

得られた観測データから求めた交通基本特性パラメータを表 14 にまとめる。

表 14 アーメダバード市交通特性パラメータ

No.	Location	2015.02					2015.06				
		Vf	$Vave$	$Vave/Vf$	$Qave$	$Kave$	Vf	$Vave$	$Vave/Vf$	$Qave$	$Kave$
1	Cam#1	56.0	35	0.63	1768.00	52	54.5	36	0.66	2268.00	64
2	Cam#2	52.0	31	0.60	1438.00	52	46.7	26	0.56	1472.00	62
3	Cam#3	50.9	30	0.59	1344.00	40	51.7	34	0.66	1366.00	40
4	Cam#4	64.0	44	0.69	1808.00	44	64.0	44	0.69	1774.00	42
5	Cam#5	63.6	46	0.72	1854.00	42	66.7	46	0.69	1854.00	42
6	Cam#6	60.0	39	0.65	2236.00	62	61.5	39	0.63	2370.00	64
7	Cam#7	60.0	39	0.65	1842.00	50	56.7	39	0.69	1842.00	50
8	Cam#8	61.8	43	0.70	2175.00	57	64.0	47	0.73	2298.00	54
9	Cam#9	67.5	48	0.71	2058.00	45	68.6	47	0.69	1932.00	42
10	Cam#10	57.1	37	0.65	1833.00	51	55.0	37	0.67	1839.00	51
11	VMS#3	56.7	40	0.71	1826.00	60	56.7	41	0.72	2184.00	60

表 14 のパラメータから平均交通量(q)と平均交通密度(k)をそれぞれの観測地点でのグラフとしてまとめると図 21 のようになる。

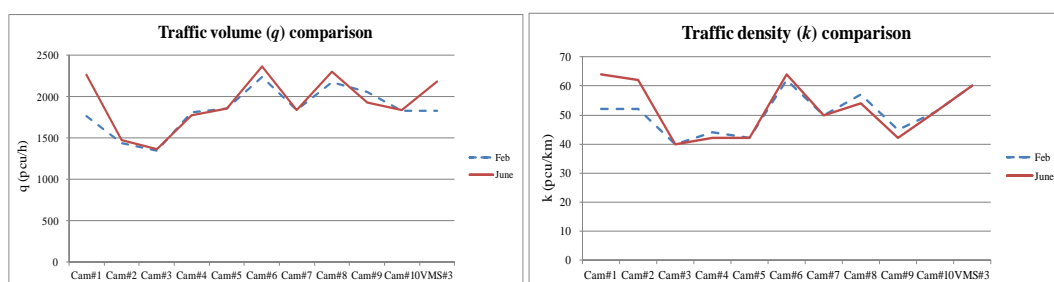


図 21 アーメダバード市交通データ比較 (交通量、交通密度)

図 21 より 2015 年 2 月、6 月において変化している箇所は交通量でカメラ#1、交通密度でカメラ#1、カメラ#2 は増加していることがわかる。交通基本式 (1) より、交通量 (q) は交通密度 (k) と車速 (v) の積で与えられる。このため平均車速の状況を検証することで交通状況の変化をとらえることができると考えられるため、各測定地点での平均車速の変位を見ると図 22 のようになる。

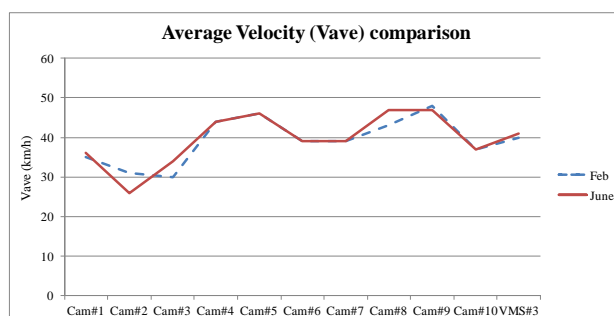


図 22 アーメダバード市車両速度比較

図 22 から 2 月と 6 月での平均車速の比較において、カメラ#2 における速度の低下が

目立つ以外カメラ#3、カメラ#8では逆に速度が上がっている。ここで今回の観測地点における車速を表15にまとめた。

表15 アーメダバード市車速比（平日観測データ）

Time	Location	Cam#1	Cam#2	Cam#3	Cam#4	Cam#5	Cam#6	Cam#7	Cam#8	Cam#9	Cam#10	VMS#3
Feb 2015	Vave	35	31	35	44	46	39	39	43	48	37	40
	Vf	56	51	55	64	63	60	60	62	68	57	57
Jun 2015	Vave	36	26	34	44	46	39	39	47	47	37	41
	Vf	55	51	52	64	67	62	57	64	69	55	57
Feb	Vave/Vf	0.625	0.608	0.643	0.688	0.730	0.650	0.650	0.694	0.711	0.649	0.707
Jun	Vave/Vf	0.655	0.510	0.653	0.688	0.687	0.629	0.684	0.734	0.681	0.673	0.719
V_Ratio =(Jun/Feb-1)		0.0473	▲ 0.1613	0.0158	0.0000	▲ 0.0597	▲ 0.0323	0.0526	0.0589	▲ 0.0421	0.0364	0.0178

注：V_Ratio = (6月の平均車速／2月の平均車速) - 1

表15からそれぞれの自由速度（ v_f ）に着目し、平均車速（ v_{ave} ）との比を考える。これは現在走行中の車群の走行速度の自由速度に対する余裕度を示すことを意味することになる。よって、各測定点での v_{ave}/v_f の状態を図23に示すと平均車速の自由速度との比の値が極端に低い場所はカメラ#2であり、0.6を下回っていることがわかる。また、カメラ#5においても変化が見られるものの比の値は0.65を上回っており、大きな車速の低下と見なせない。さらに、カメラ#3では2月と比較して6月の平均車速は自由速度に対して0.6から0.65を超える値となって車両が相対的に流れている状態になっていると考えられる。では車速比が2月および6月の時点でも0.65より下回り渋滞が発生していると思われるカメラ#2について、お2月と6月の時間帯別の交通量および車速に関する変化を調べると図24と図25のようになり、いずれも夕方18時から20時において車速が20km/時以下の渋滞が明らかに発生している様子がうかがえる。

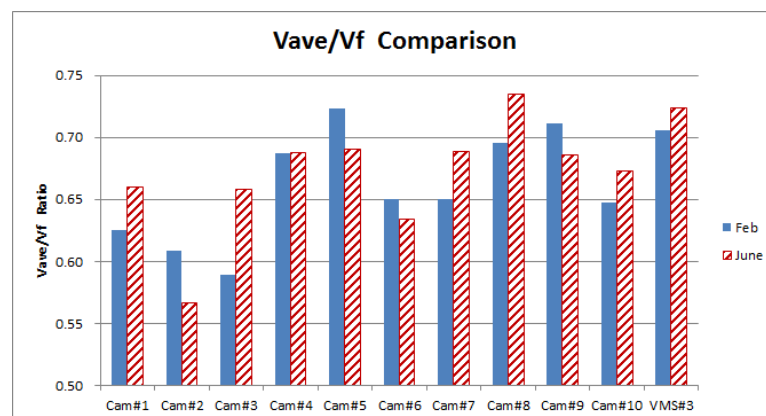


図23 各測定点での v_{ave}/v_f 比

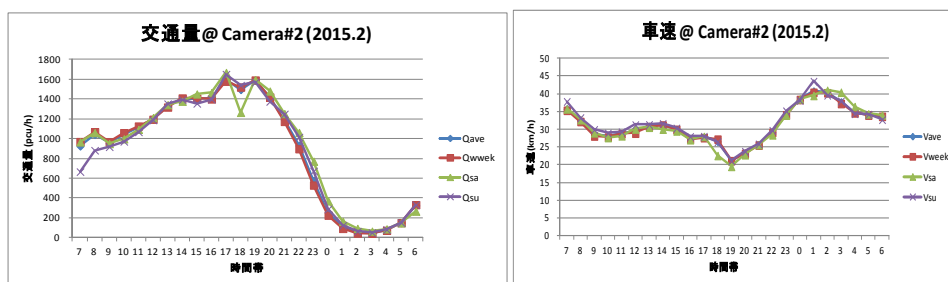


図 24 カメラ#2 の交通量と車速の時間推移 (2015 年 2 月)

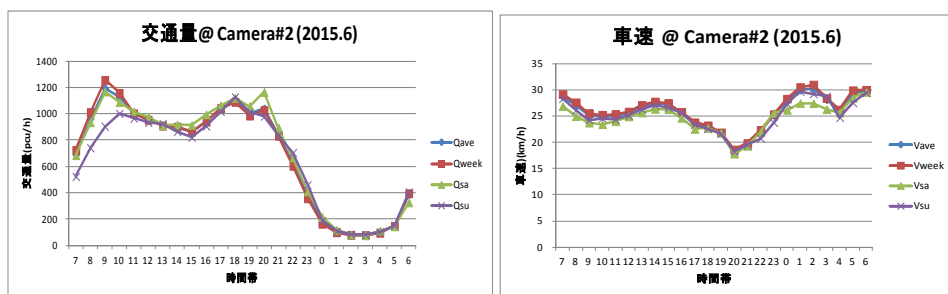


図 25 カメラ#2 の交通量と車速の時間推移 (2015 年 6 月)

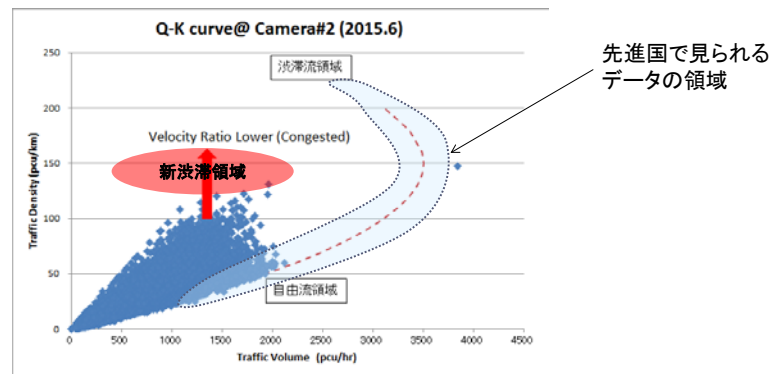
図 24、25 の比較において 2 月および 6 月において多少交通量の変化はあるものどちらも夕方 17 時～20 時の時間帯における車速の低さが目立つ。ここで 6 月のデータに着目し、境界線近似による Greenshields の式を求めると式 (10) となり

$$v = -0.1556 \times k + 46.667 \quad (10)$$

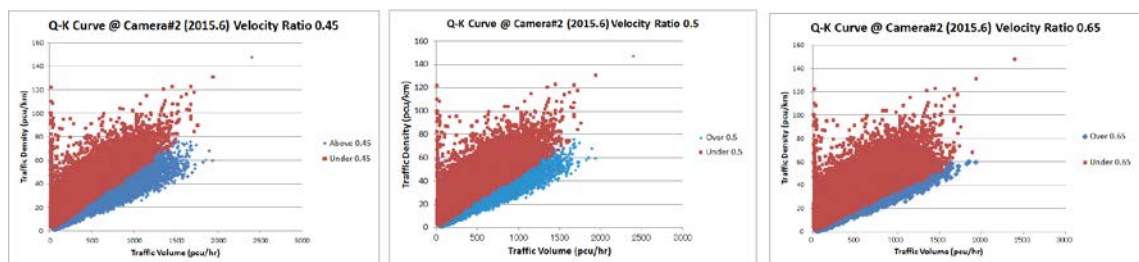
$V_{ave}=26(\text{km/h})$ となる交通密度 (k) は 148 (pcu/km) となる。またカメラ#2 の $k-q$ 曲線近似式は式 (11) となり

$$q = -0.1556 \times (k - 150)^2 + 35000 \quad (11)$$

式 (11) より臨界密度 (k_c) = 150 となり、Greenshields の式から求めた平均速度 (v_{ave}) = 26 から求めた交通密度 (k) = 148 は臨界密度に近い状態であり、渋滞領域に入りつつある状態といえる。カメラ#2 の 2015 年 6 月の $q-k$ 曲線を図 26 に示す。ここで示す $q-k$ 曲線は本来の交通流特性の基本であり、前述の $k-q$ 曲線は境界線が 2 次式にてグラフ表記するのに容易であるために便宜的に示したものである。図 26 にて車速比を 0.45～0.65 まで変化させると矢印のように車速比が低いデータが分布する状態となりより渋滞した状態は境界線の中で自由流領域から、渋滞流領域へシフトしていく様子が理解できる。

図 26 カメラ#2 の 2015 年 6 月 $q-k$ 曲線

ちなみに、車速比が 0.45、0.50、0.65 である値を閾値とした場合に、それぞれの車速比以下となるデータが $q-k$ 曲線のどの位置に存在するかをまとめた様子を図 27 に示した。ここから判ることは、車速比が閾値以下にあるデータは $q-k$ 曲線の内側に位置していることが分かった。車速比が閾値以下であることは交通渋滞を意味しており、反対に $q-k$ 曲線に近い値は車速比が閾値以上となり、こちらは交通自由流状態であることを意味する。従って、図 26 に示したように交通密度(k)の低い状態における境界線付近が自由流を表し、それより内側になると渋滞が発生している領域であることになる。これは先進国でみられる交通渋滞領域は交通密度(k)の大きくなった場合の、 $q-k$ 曲線上にあるとした一般的な交通工学の常識とは異なる結果となり、新興国の交通状態を $q-k$ 曲線との関係にて初めて示した発見といえる。

図 27 カメラ #2 の車速比変化による $q-k$ 曲線分布

まとめると、図 26、27 により新興国の交通流解析における境界線を導入したことは、自由流領域のデータから対象とする道路における特性を抽出することを意味しており、次第に混雑してくる渋滞状況は境界線の中の領域を埋めていくことになり、最終的に交通量の過飽和状態（いわゆる渋滞領域）を形成していくことになることを表しているといえる。先進国の交通状況は比較的 $q-k$ 曲線付近に分布することが知られているが、今回の新興国における交通解析では $q-k$ 曲線として採用した境界線以外にも多数デー

タが存在しており、これは実は交通渋滞している状況を表したデータであり、過飽和領域に行く前に渋滞がおきている様子を表すものと定義付けられる。

ところで、2015年6月のカメラ#3の交通流解析から Greenshields は式(12)で表わされ、 $k-q$ 曲線の近似式は式(13)で表わされる。

$$v = -0.2153 \times k + 51.667 \quad (12)$$

$$q = -0.2153 \times (k - 120)^2 + 3100 \quad (13)$$

表14よりカメラ#3の平均速度 (v_{ave}) = 34 となり、この時の交通密度 (k) = 82 となり、臨界密度 (k_c) = 120 であることから十分自由流領域にあることが理解できる。以上の検証から、平均车速の自由速度比は交通渋滞を表わすパラメータのひとつとして活用できるといえる。ここで、車速比を2月と6月の時点での散布図を図28に示す。図から渋滞傾向にある測定点を車速比 0.65 以下の部分を示すと、カメラ#1、#2、#3、#6 であることが判明する。また、図28の破線部より上部は6月の時点で2月より渋滞が緩和されていることを意味しており、下部はその逆で交通渋滞の悪化を表している。情報板 (VMS) が設置されて約5ヶ月を過ぎ、カメラ#2、#6 以外は概ね現状維持か渋滞改善傾向にあることが理解できる。特にカメラ#2での渋滞が激しくなっていることが時間帯別の交通量と車速のグラフ (図24、図25) の助けを借りなくとも推定できる。

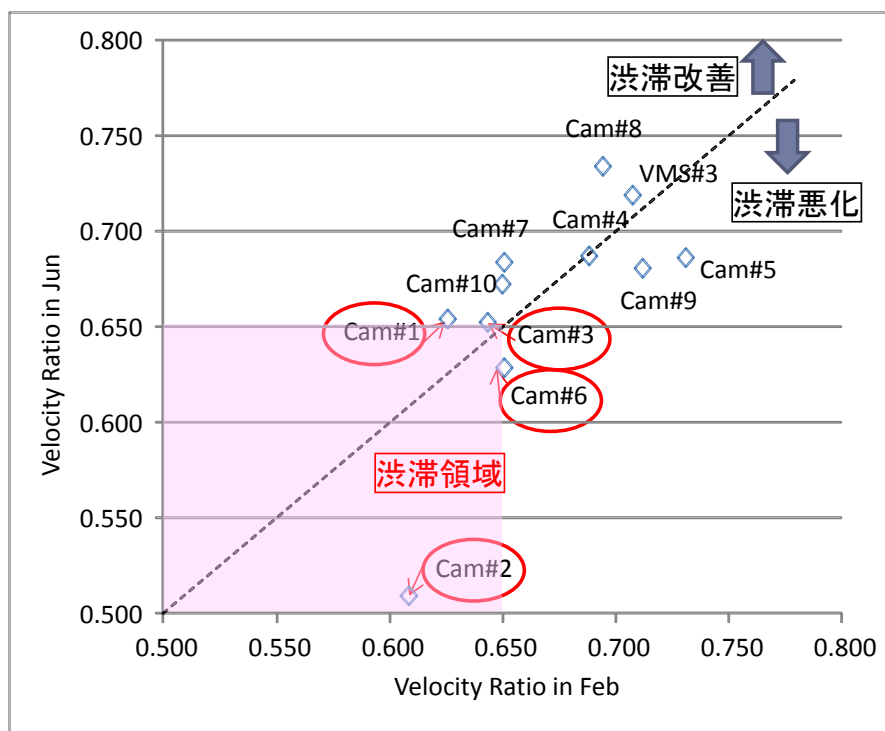


図 28 2月—6月車速比変化

今回アーメダバード市に交通情報板（VMS）を設置することで市民への交通情報の提供が可能となり、これにより 2014 年 10 月よりサービスを開始し、2015 年 2 月と 2015 年 6 月の収集できたそれぞれ 1 ヶ月の情報から交通量(q)および平均車速(v)の変化をグラフ化した様子を図 29 に示す。

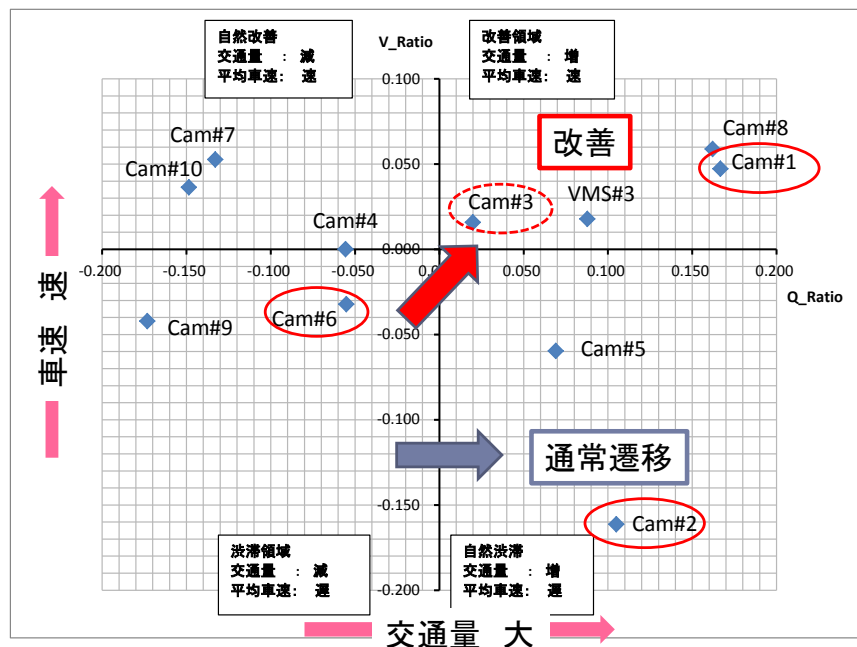


図 29 アーメダバード市の交通状態推移

交通量と車速の分散から、全体が 4 つの領域に区分されることが容易にわかる。それぞれの領域の特徴をまとめると以下のようなことが見えてくる。

- ・ 第 1 象限：改善領域
交通量の増加にも関わらず平均車速が早く交通渋滞が改善されている領域（カメラ#1、#3、#8、VMS#3）
- ・ 第 2 象限：自然改善領域
交通量の減少により平均車速が早く交通渋滞が起きていない領域（カメラ#4、#7、#10）
- ・ 第 3 象限：渋滞領域
交通量の減少にも関わらず平均車速が遅くなっており渋滞が生じている領域（カメラ#6、#9）
- ・ 第 4 象限：自然渋滞領域
交通量が増加しており平均車速が遅くなっており渋滞が生じている領域（カメラ#2、#5）

上記象限別まとめにおいて下線部を引いた個所は、図 28 において車速比が 0.65 以下であることを示している。また図 29 との比較を見ると必ずしも慢性渋滞しているというわけでもないことが判る。これは渋滞解消のためのヒントが隠されているともいえる。

以上より新興国の交通流において対象とする道路における平均車速と交通基本特性から求められた自由速度の車速比を渋滞のパラメータとして適用することで、対照する道路の混雑度合をとらえることができ、交通マネジメントへの有効な有効な手段として考えられる。さらに、WAVE 技術の将来の適用によりより一層交通状況のリアルタイム把握が可能となることが期待できる。

4.2 渋滞の確証

前節までで、交通渋滞を表すパラメータの候補として平均速度と自由速度の車速比を用いることが可能であることを述べてきた。ここで、図 28 の車速比 0.65 以下で渋滞領域にあると考えられるカメラ #1、#2、#3、#6 について、その渋滞の確かさに関して観測データにもとづき検証することとする。

そもそも交通渋滞の定義は論理的には、待ち行列理論での非定常状態とされ、交通需要を対象とする処理系では処理できずにオーバフローした状態を表し、「処理能力の超過」状態であると考えられている。また公益財団法人日本交通情報センターにおいては表 16 に従い渋滞・規制図では渋滞を「赤色」、混雑は「橙色」で表示している。さらに NEXCO 中日本/東日本/西日本が管理する高速道路における渋滞とは、時速 40km 以下で低速走行あるいは停止発進を繰り返す車列が、1km 以上かつ 15 分以上継続した状態を渋滞としている。このように国内をはじめとする先進国では道路によってこれまでの経験からある程度の渋滞状態の共通認識が可能であるが、インドをはじめとする新興国での交通渋滞定義の一般化は困難な状況となっている。

表 16 国内における渋滞の判定例

区 分	高速道路	都市高速道路	一般道路
渋 滞	時速40km以下	時速20km以下	時速10km以下
混 雑	—	時速40km以下	時速20km以下

図 28 に示したカメラ #2 と #6 に関して、2 月から 6 月に経過した際の平均車速の検定を行ない、その変化の有意を確認する手法をとることとした。この場合 2 月の車速観測値の母集団と 6 月の母集団は等分散である確証はないため、それぞれの母平均の差の検定となることからウェルチの検定が活用できる。検定の仮説は 2 月の車両平均速度は 6 月の車両平均速度に等しいとした帰無仮説になる。ここで、カメラ #2 の 2 月と 6 月の昼 12 時間の平均車両速度を \bar{V}_F 、 \bar{V}_J 、標本数 n_F 、 n_J を抽出したとしその時の普遍分散を S_F 、 S_J とおくと、統計量 T は自由度 ν の t 分布に従うことになる。ウェルチ検定を数式

に表すと式(14)で与えられる。

$$T = \frac{\bar{V}_F - \bar{V}_J}{\sqrt{\frac{S_F^2}{n_F} + \frac{S_J^2}{n_J}}} \quad (14)$$

ここで、自由度 ν は次の式(15)にて与えられた最も近い整数で与えられる。

$$\nu = \frac{\left(\frac{S_F^2}{n_F} + \frac{S_J^2}{n_J}\right)^2}{\frac{\left(\frac{S_F^2}{n_F}\right)^2}{n_F - 1} + \frac{\left(\frac{S_J^2}{n_J}\right)^2}{n_J - 1}} \quad (15)$$

ここで、自由度 ν は次の付式(9)にて与えられた最も近い整数で与えられる。

以上よりカメラ#2における平均車速観測データおよび式(14)、(15)のウェルチの検定を行う。平均車速データは観測地点におけるそれぞれの車速データをもとにしている。この時の両側検定の有意水準 5%とすると付表 6 のようになる。 $T=85.58$ となり、両側 1%有意水準点は 2.575 となり、 T は両側 1%有意水準より十分大きいことから仮説棄却領域にはいるため帰無仮説は棄却され、2月と6月の平均車速は等しくないと判明でき、平均速度が下がっていることから渋滞が6月の時点で進んでいると判断できる。

表 17 カメラ#2における平日車速のウェルチ検定

	2月	6月
平均 (V)	30.5758773	25.70891305
分散 (s)	55.03323207	58.84100446
観測数 (n)	35211	35211
仮説平均との差異	0	
自由度 (ν)	70341	
T	85.58242674	
有意水準 (p)	0.01	
P(t<=T) 片側 (t)	0	
片側 p%	2.326400868	
P(t<=T) 両側	0	
両側 p% (t)	2.575899189	

6月に渋滞悪化

有意差あり

$|T| > p\%(t)$

同様にカメラ#6に関しても平均車速の2月と6月時点での両側検定有意水準 1%で求めると表 18 に示すような結果となり、 $T=5.533$ で両側 1%有意水準点の 2.575 より大きいため、両側有意水準 1%を満たし、カメラ#6における平均車速の帰無仮説（カメラ#6の2月と6月の平均車速は等しい）は棄却され、渋滞の傾向にあることがわかる。

表 18 カメラ#6 における平日車速のウェルチ検定

	2月	6月
平均 (V)	38.85434778	38.56103452
分散 (s)	56.57147404	49.69016442
観測数 (n)	37818	37818
仮説平均との差異	0	
自由度 (ν)	75318	
T	5.533408335	
有意水準 (α)	0.01	
P($t \leq T$) 片側 (t)	1.57554E-08	
片側 p%	2.326397365	
P($t \leq T$) 両側	3.15109E-08	
両側 p% (t)	2.57589457	

6月に渋滞悪化

有意差あり

$$|T| > p\%(t)$$

また、6月の時点で渋滞が改善されている傾向にみられるカメラ#1 とカメラ#3 に関しても同様にウェルチ検定を行う。

カメラ#1 に関して平日車速の2月と6月時点での両側検定水準1%で求めると表19に示す結果を得た。これにより、 $T = -45.017$ で両側1%優位水準点の -2.575 を超えるので、帰無仮説（カメラ#1の2月と6月の併記車速は等しい）棄却され、平均車速は早くなっており、渋滞が緩和されていると判断される。

表 19 カメラ#1 における平日車速のウェルチ検定

	2月	6月
平均 (V)	34.72359837	36.27387668
分散 (s)	25.05227874	16.70453806
観測数 (n)	35211	35211
仮説平均との差異	0	
自由度 (ν)	67714	
T	-45.01789209	
有意水準 (α)	0.01	
P($t \leq T$) 片側 (t)	0	
片側 p%	2.326402925	
P($t \leq T$) 両側	0	
両側 p% (t)	2.575901901	

6月に渋滞改善

有意差あり

$$|T| > p\%(t)$$

さらに、カメラ#3 に関しても平均車速の2月と6月時点での両側検定有意水準1%で求めると表20に示す結果を得た。これより、 $T = 0.168$ で両側1%有意水準点の 2.575 を満たさず、帰無仮説（カメラ#3の2月と6月の併記車速は等しい）の棄却水準に達しないため、平均車速は同等と判断される。

表 20 カメラ#3 における平日車速のウェルチ検定

	2月	6月
平均 (V)	34.21717258	34.21155467
分散 (s)	17.79878633	21.56289142
観測数 (n)	35211	35211
仮説平均との差異	0	
自由度 (ν)	69782	
T	0.168026218	
有意水準 (ρ)	0.01	
P(t<=T) 片側 (t)	0.43328157	
片側 $\rho\%$	2.326401293	
P(t<=T) 両側	0.86656314	
両側 $\rho\%$ (t)	2.575899749	

変化なし

有意差なし

$$|T| < \rho\%(t)$$

これらにより、図 28 にて渋滞の判定とした車速比 0.65 付近は有効であると判断でき、先行研究にて筆者が示した測定道路における平均車速の自由速度に対する車速比による渋滞の判定は有効であることが裏付けられた。

ここで用いた車速比は、当該道路における平均車速は測定期間 1 ヶ月における走行車両の平均速度と自由速度の比を用いてきた。これによりマクロ的に渋滞状態をウェルチ検定による判定にて有意差を示した。渋滞状況は図 24、図 25 の例でみてきたように時間帯による交通量により変化しており、経過時間を考慮することでより渋滞状況を詳細にとらえることが可能となる。表 17 における車速比の有意差がみられたカメラ #2 について、今度は時間ごとにおける車速に注目し、自由速度に対する時間別車速比を図 30 に示す。

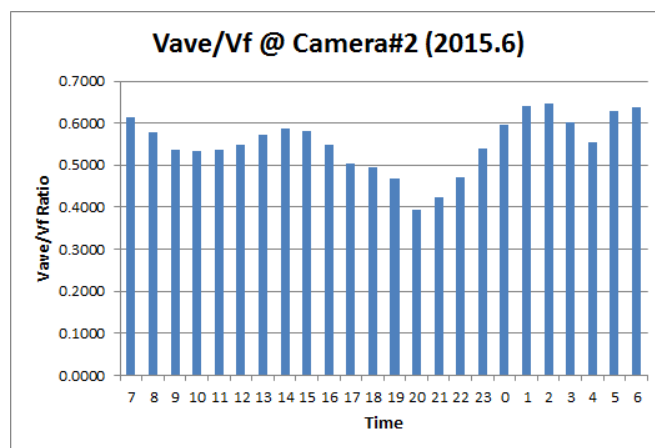


図 30 カメラ#2 の時間帯別車速比 (2015.6)

図 30 より時間帯別車速比を導入することで、それぞれの道路における渋滞する様子が容易に把握できる。平均車速と自由速度比の閾値は 0.65 としているが、時間帯車速と

自由速度比の閾値は図 30 から 0.5 前後とすることでより明確に渋滞状態を示すことができると考えられる。ちなみにウェルチ有意差判定で有意差があまりみえなかったカメラ #3 における時間帯別車速比を図 31 に示す。

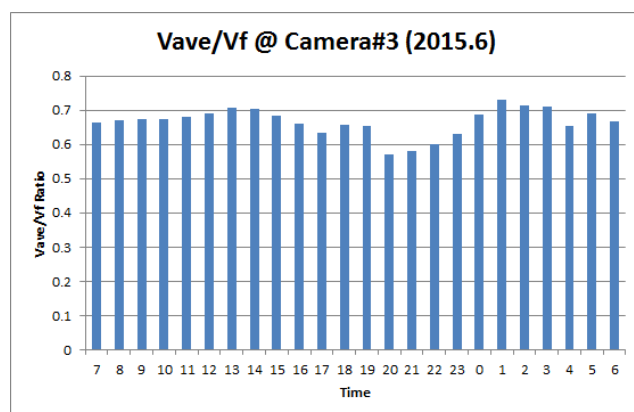


図 31 カメラ#3 の時間帯別車速比 (2015.6)

図 31 より時間帯別車速比が 0.5 以下となる部分は存在せず、明らかにカメラ#3 の位置での渋滞が起きている判別は難しいことが明らかとなった。

ここで用いた車速比および時間帯別車速比に関して、交通基本特性 ($q-k$ 曲線) との関係を検証する。 $q-k$ 曲線としてカメラ#2 の 2015 年 6 月 1 ヶ月における毎分データを利用し、閾値として時間帯別車速比で使った 0.5 を用いることで、0.5 以上とそれ以下の場合の分析を示すことにする。図 30 にて閾値 0.5 以下で渋滞が起きている状態となっているので、渋滞流の起きている状態が $q-k$ 曲線でのどの領域にあたるかを図 32 に示す。

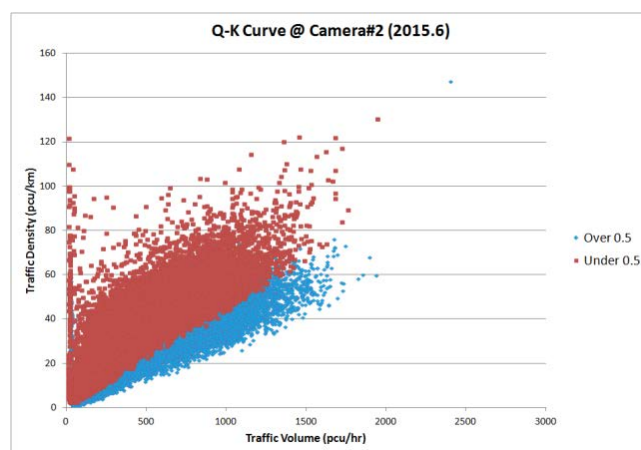


図 32 カメラ#2 の $q-k$ 特性と渋滞領域

図 32 より、アーメダバード市における渋滞は $q-k$ 曲線の一般的に考えられる渋滞領

域には存在しないことが判明した。これはカメラ#2 における渋滞している領域（閾値 0.5 以下）は閾値 0.5 を超える交通状態の良い状態と比較し、交通密度(k)の交通量(q)に対する値が高い傾向にあることが図 32 より判明したことになる。

4.3 データのサンプリング検証

アーメダバード市のトラフィックデータは画像モニタカメラによる毎分の観測データをもとにグラフ化し、その交通特性から境界線による観測理論値へとガイドすることで交通基本特性を算出してきた。また、この境界線による近似は $k-v$ 曲線の Greenshields の式との比較によりその妥当性を本論で示した。ここまでは毎分時の観測データによる $k-q$ 曲線データから境界線による近似特性による基本交通特性を求めてきたが、サンプリングを毎時単位にまとめることでデータのバラツキを押さえた場合の考察を行なう。例として、本論にもあった 2015 年 6 月のカメラ#2 のデータを例として図 33 に各時間帯でまとめた $k-q$ 曲線を示す。また、境界線近似による近似曲線を合わせ破線で示した。

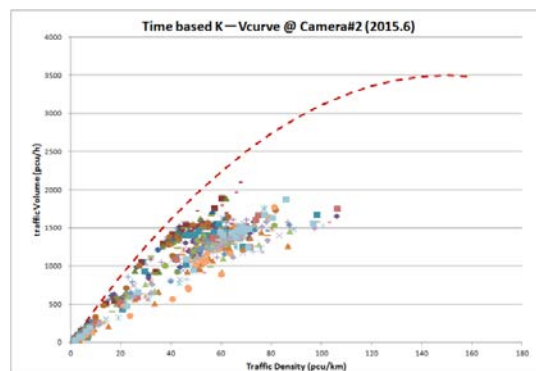
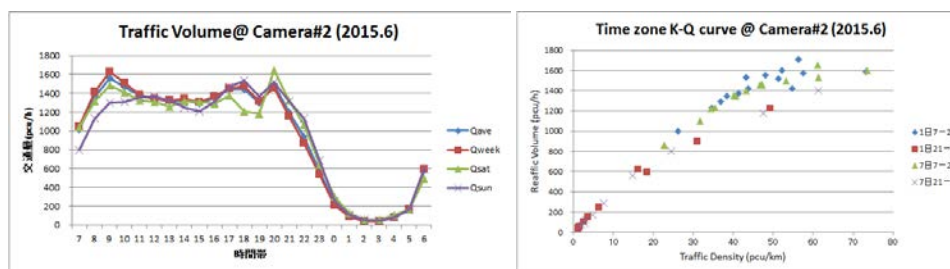


図 33 時間単位サンプリング $k-q$ 曲線

図 33 から判明することは、サンプリングを毎時単位でまとめるとデータのバラツキは毎分単位データより少なくなるものの境界線近似との開きが大きくなる。この原因は境界線近似が毎分の観測データのバラツキを含んだ測定値の境界をもとに近似しており、時間単位サンプリングではこのバラツキが平準化されるためと推察できる。さらにここで図 33 のデータの広がりへの検証を行う。図 34 (A) にカメラ#2 の 2015 年 6 月における時間単位の交通量と図 34 (B) に 1 日、7 日の日中から夕方（7 時から 20 時ごろ）までの交通量の多い時間帯と深夜から翌早朝（21 時から 6 時）の時間帯を分けた交通量の $k-q$ 曲線を示す。

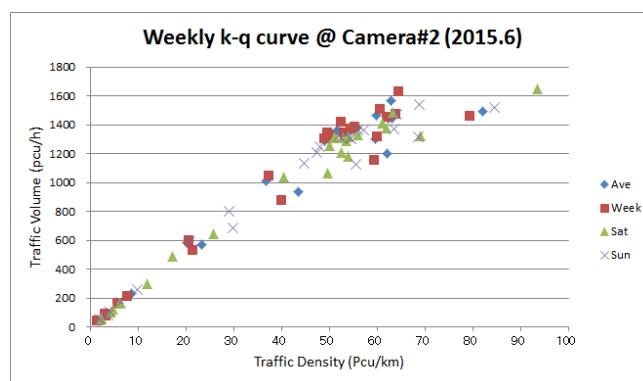


(A) カメラ#2 時間帯別交通量

(B) カメラ#2 の1日/7日の $k-q$ 曲線

図 34 カメラ#2 の交通特性検証

図 34 (B) から交通量の少ない時間帯 (21 時～6 時) および 6 月 7 日 (日曜日) が $k-q$ 曲線の k 軸に近い領域に位置し、交通量の多い時間帯はその k 軸から離れた領域に位置することがわかる。すなわち、 $k-q$ 曲線における近似線はその測定対象時間帯により異なることを意味している。参考としてカメラ #2 の 2015 年 6 月における $k-q$ 曲線を全体平均、平日平均、土曜平均、日曜平均として図 35 に示す。時間帯および曜日による交通量の違いにより $k-q$ 曲線として近似曲線が変化することが理解できる。

図 35 カメラ #2 の曜日別 $k-q$ 曲線

以上から、今回測定したインド国アーメダバード市の交通基本特性として対象道路の交通状態による把握と推定が重要となり、以下のことがまとめられる。

- ・ <マクロ的交通特性>
境界線近似による基本特性：当該箇所の全体特性の把握に有効
- ・ <ミクロ的交通特性>
時間単位による基本特性：当該箇所の交通量に応じた特性把握に有効

よって、マクロ的交通特性により対象とする道路での一般的な交通量把握が可能で、都市交通計画としてのデータとして有用であり、ミクロ的交通特性は対象の道路における日常の交通渋滞把握としてのデータ活用が可能と考えられる

4.4 インド都市交通の面的分析

これまで測定してきたアーメダバード市における平日の交通量の全体を俯瞰してみよう。2015年2月と6月の状態を地図上に表すと図36のようになり、北西部分の道路にて車の減少がみられる。この地図上における交通状況の把握は、今後の地理的条件の渋滞に現れる原因の調査等で有効と考える。特に新興国のようにインフラ整備と交通管理の課題は同時進行することが多く、詳細渋滞調査としては今後OD調査等を含めたトリップ状況の解析が合わせて必要となると考える。また、アーメダバード市内に設置した情報板は現時点では4機となっているが、住民に対しては初めての交通情報を提供し、この交通情報をもとに住民に対して、混雑していない迂回ルートへのガイド等の期待もあり、継続調査を行なうとともに警察官によるヒアリングアンケートを実施する。本実証事業は現在（2016年12月）も継続中であり、さらなる解析は今後の研究によるものとする。

また、行政側からは情報板と画像モニタカメラの市中を流れる河川道路への追加設置要請から、1年後には新設される計画となっている。予定では2017年初めには情報版7機、画像トラフィックカメラが18台を約20kmにわたり、河川道路およびその並行して走る街道に対して設置される予定となっている。この場所はリバーフロントと呼ばれ、空港から市内に向かう行政としては力を入れた再開発事業と位置付けられ、今後のインドで展開されるスマートシティを100都市構築する施策のひとつとして挙げられている。こうした地域連携による交通渋滞緩和に向けた展開が今後も期待される。

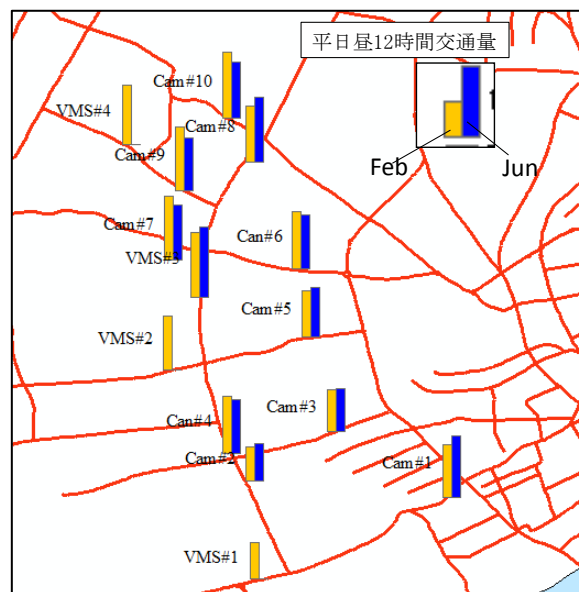


図 36 アーメダバード市交通量変化マップ

4.5 車速比 (v_{ave}/v_f) 閾値の考察

ここで、渋滞状況を表すパラメータの候補である車速比に関する考察を交通工学の原点に立ち戻り考察を行う。すなわち、交通流はこれまで見てきたように、交通の流れを流体解析の応用として交通基本特性を求められた。流体力学において、様々な環境における流れの解析は行われており、交通流に近似する平行平板間の層流モデルとして捉えてみる。すなわち、図 37 に示すように、間隔 h の平行におかれた 2 枚の静止した平板の間を非圧縮性粘性流体が流れる場合を仮定する。すると、非圧縮性粘性流体の流れにおいて、流れの乱れがない層流と周囲の流れに乱れが生じる乱流があることは一般的に知られており、それらの様子を図示すると図 38 のように表される。乱流は周囲の流体の平均流速 (v_{ave}) が中心部の最大流速 (v_f) に近い値になる状態として表される。すなわち平均流速 (v_{ave}) と最大流速 (v_f) の比の値は、層流の時と比較して大きな値をとることになる。この層流と乱流の状態を表し、交通流の状態に置き換えると、乱流は自由流に近く、層流は渋滞流に近い状態を表しているといつてよい。このように交通流を仮定すると、層流（渋滞流）における平均流速 (v_{ave}) と最大流速 (v_f) の比の関係を求めることで、流れが層流（渋滞流）になる条件を求めることになり、流体力学 [40] より、式 (16) の関係があることが求められている。

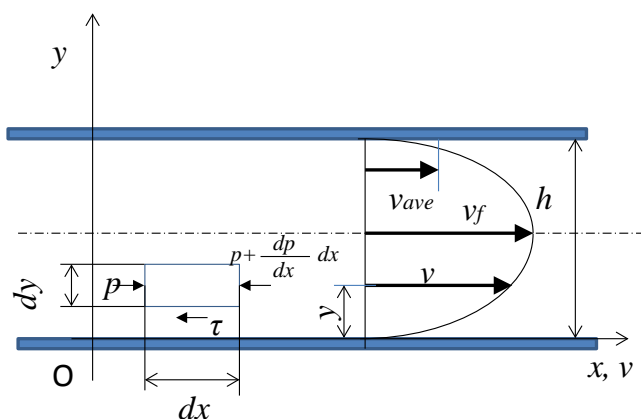


図 37 並行平板間の流れ

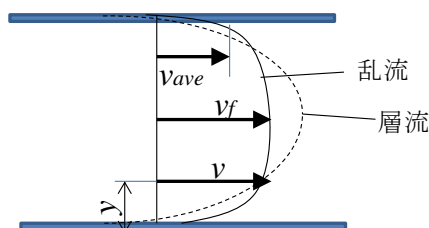


図 38 層流と乱流

$$v_{ave} = \frac{2}{3} v_f \quad (16)$$

付(16)は、引用文献[40]から以下のように証明される。

図37において、 x 軸から y の距離の流体中に、各辺の長さが dx 、 dy 、厚みが1の微小体積をもつ流体粒子を考える。この流体の各面には圧力よる力と粘性による摩擦力が働く。これらの力の x 方向に働く力はそれぞれ以下のように表される。圧力よる力は式(17)となる。

$$p dy - \left(p + \frac{dp}{dx} dx \right) dy = - \frac{dp}{dx} dx dy \quad (17)$$

また、せん断応力よる力は式(18)のようになる。

$$\tau dx + \left(\tau + \frac{d\tau}{dy} dy \right) dx = \frac{d\tau}{dy} dx dy \quad (18)$$

これらの力は釣合う関係になることから、式(19)が成立する。

$$\text{式(17)} + \text{式(18)} = - \frac{dp}{dx} dx dy + \frac{d\tau}{dy} dx dy = 0 \quad (19)$$

ゆえに式(20)の関係を得る。

$$\frac{d\tau}{dy} = \frac{dp}{dx} \quad (20)$$

この流れは層流であることから、ニュートンの粘性法則よりせん断応力は

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy} \quad (21)$$

であり、この関係を式(20)に用いると、式(22)が求められる。

$$\frac{dv^2}{dy^2} = \frac{1}{\mu} \frac{dp}{dx} \quad (22)$$

μ は粘度が一定であり、圧力勾配 dp/dx は一つの断面上では等しく、 y の関数ではないと考えられるから、式(22)を y に関して2回積分すると式(23)と求められる。

$$v = \frac{1}{2\mu} \frac{dp}{dx} y^2 + C_1 y + C_2 \quad (23)$$

ここで、 C_1 、 C_2 は積分定数を表す。

境界条件として、 $y=0$ で $v=0$ であり、 $y=h$ においても $v=0$ であるから、 $C_2=0$ 、 $C_1=-(1/2\mu)(dp/dx)h$ となり、これらを式(23)に代入すると式(24)を得る。

$$v = -\frac{1}{2\mu} \frac{dp}{dx} (hy - y^2) \quad (24)$$

これより y 軸方向の単位あたりの流量 q は式(24)の積分で表される。

$$q = \int_0^h v dy = -\frac{1}{12\mu} \frac{dp}{dx} h^3 \quad (25)$$

ここで、 dp/dx は流れの方向の圧力の勾配で、一つの断面上では等しく、 y には無関係の値である。式(24)より、流れの分布は放物線になることがわかる。2 平板の中央 $y=h/2$ における速度を v_f とすると

$$v_f = -\frac{1}{8} \frac{dp}{dx} h^2 \quad (26)$$

であり、平均流速を v_{ave} とすれば

$$v_{ave} = \frac{q}{h} = -\frac{1}{12} \frac{dp}{dx} h^2 \quad (27)$$

となる。したがって、式(26)と式(27)から、

$$v_{ave} = \frac{2}{3} v_f \quad (28)$$

の関係をj得る。これにより式(16)が証明された。

式(16)から流速比 (v_{ave}/v_f) は 0.66 ($=2/3$) となり、これは交通流における車速比閾値 0.65 に近い値をとることが判明した。これにより渋滞流となる閾値 0.65 の流体力学上の層流となる平均流速と最大流速の比の関係としてとらえることができ、交通流の流体流との近似性を見てとることができ、基本交通特性以外にも交通流を流体の流れの現象として導かれる興味ある結果をとらえることができた。

ちなみに、車速比(v_{ave}/v_f)=0.5 とは、平均車速が自由速度の半分であり、これは交通流特性から臨界速度 (v_c) が自由速度 (v_f) の半分であることから、車速比 0.5 以下では理論上も渋滞領域であることを表しているに他ならない。しなしながら、今回のインドにおける実際の交通流の測定において、交通流の状態を一般的に表している1日の交通量変化から、車速比が 0.65 に近い値で渋滞流との境界を示している点は、新興国の交通

状態の特徴としてよく目にする道路いっぱいに交通機関が広がる状況を考慮すると、平行平板の非圧縮性粘性流体の流れによる層流と乱流の境界に相当する近似ができたと推察できる。詳細分析は今後の研究課題としたい。

また、これらのモデルに関しては、今後の新興国における交通インフラの整備や交通分散などによる交通マネジメント施策が進むと、これらのモデルから現在の先進国における交通流モデルへと遷移していくと考える必要が出てくるといえる。

第5章 ネットワーク定量解析と課題への考察

第3章、第4章では経済発展とともに交通事情悪化が著しい新興国の実際の交通分析を行い、その中で平均車速度と交通特性から得られた自由速度の比により渋滞を判定できることを論じてきた。ここで交通流を測る手段としては画像トラフィックカメラによるものが主であったが、これからの次世代車載無線通信である WAVE 技術を応用することで、よりリアルタイムに交通流の把握が可能となり、新興国における交通マネジメントへの応用に期待できることを示してきた。

本章では、先行研究にて新たなネットワークとして提唱された“Fog computing”について、詳細にその位置づけと定量解析を行う。また、WAVE 技術は将来インフラシステムへの設置として計画されている大都市圏での主要交差点における WAVE 基地局に着目し、その都市環境におけるカバー率を検討するとともに、地方都市における同様のカバー率を検証する。地方都市は当然大都市圏と比較し、交通インフラ密度が大きくなり、主要交差点での WAVE 採用では WAVE の効果には限界があると想定できる。このため WAVE の普及促進を QoL の観点で公共的役割に関する考察を展開する。

5.1 “Fog computing”

5.1.1 “Fog computing”の定義

先行研究にて示した “Fog computing”は、2011 年の車両アドホックネットワーク (VANET) のワークショップで Cisco Systems の Bonomi.F らが提唱しはじめたのが最初であった。特に次世代車載無線通信技術 WAVE を中心に、これまでの一般的な通信サービスであるクラウドに対して、さらにリアルタイム性に富み、かつクラウド程規模が大きい領域で、その領域内における頻度の高いアクセスが行なわれるようなネットワークを扱う必要性から唱えている。Cisco Systems の White Paper[41]にはクラウドとデバイスの中間領域に “Fog computing”を定義しており、“Fog computing”は、車両、船舶、鉄道、工場施設におけるデータ通信端末環境を想定するとともに、その接続は数千台またはそれ以上、データ解析は1秒以下の処理が必要とされる環境として紹介されている。この White Paper からの “Fog Computing” の位置付けをおこなっている構成図を図 39 に示す。なお、図では車載無線通信を DSRC (Dedicated Short Range Communication) と記述されているが、ここでは WAVE と等価的意味で使用している。

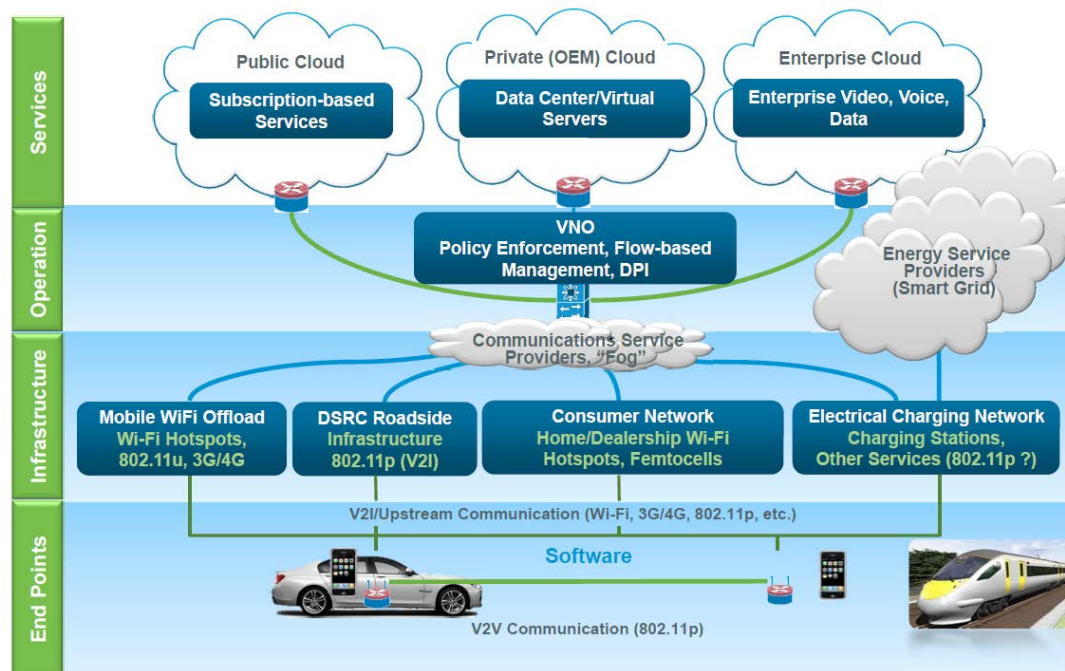


図 39 “Fog computing”の概念と位置付け

図 39 から明らかなように“Fog computing”は移動体に関するインフラ通信サービスとしての位置付けをとらえており、対象通信技術としては、3G/4G, Wi-Fi（無線 LAN）および WAVE を対象としていることがわかる。

5.1.2 環境モデルとネットワーク定量評価

WAVE の”Fog computing”の観点での定量解析の実施において、以下の前提条件を明確にする必要がある。

【前提条件】

- ・ 評価環境は先行研究の 4 つの道路モデルを基本とする（**車両密度**）
- ・ ネットワーク内のアクセスはその通信範囲内で継続する（**通信継続性**）
- ・ ネットワーク内の端末数とそのアクセス速度はアーランの B 式を用いる（**回線理論**）

車両密度：解析環境の車両密度に関しては、先行研究の ITS 情報通信システム推進会議における 4 つの道路モデルを継承する。すなわち、中心市街地、都心部、副都心部、郊外のそれぞれの道路を片側 3 車線、2 車線、1 車線に区分し、3 車線と 2 車線道路の車両密度を経験値から 90 台/km を、1 車線道路では 30 台/km をあて対象領域の車両数を採用している。データの詳細算出導入に関しては付録資料 1 にて解説する。

通信連続性： WAVE システムの通信範囲（セル）内における通信の継続性に関して、先行する実証試験[42]および佐藤[43]らの報告によりセル内の受信電波強度（RSSI：Receive Signal Strength Indicator）よりネットワークが確立すると RSSI が十分な領域での通信継続が可能であることを承知している。実証試験の概略を以下に示す。実施した試験は図 40 に示すテストコースにて WAVE の通信機搭載の基地局（RSE）2 機を設置し、そこを同じく WAVE の通信機搭載の車両（OBE）が時速 80km にて走行し、RSE1 にて記録した走行画像をサーバに蓄え、OBE が RSE2 を通過する際に画像を転送し再生することを確認するものである。図 40 右に実証試験の装置設置の概略とテストコース写真を示す。図 41 に実証試験で行なった OBE における RSSI の測定および各 RSE からのデータパケット到達率を示す。なお、試験に使用した周波数は電波法の制約により 2.4GHz 帯を用いており、WAVE のプロトコルは IEEE802.11p に準拠している。図 41 より試験車は各セル突入後 1 秒以内に通信リンクを確立し通信を開始しており、セル内の通信継続が確認できる。これにより主要交差点における WAVE のセル範囲内でリンク確立後 1 回の通信アクセスが継続して行なわれるものとして扱うことができる。このことは後にのべる通信回線理論において、アーランの公式を利用できる条件となる。試験にて測定した RSSI およびパケットデータ到達率の結果を図 41 に示す。

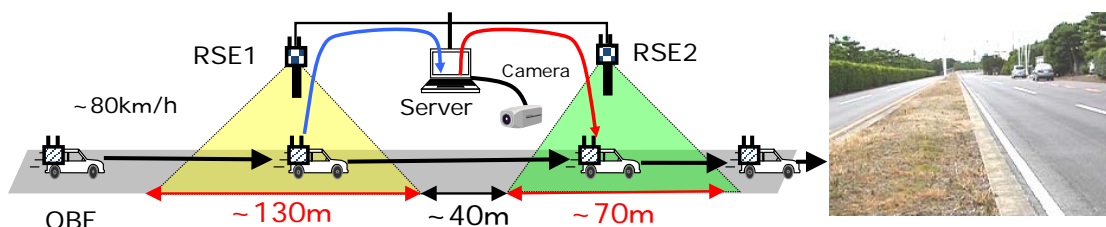


図 40 WAVE フィールド画像転送実証試験

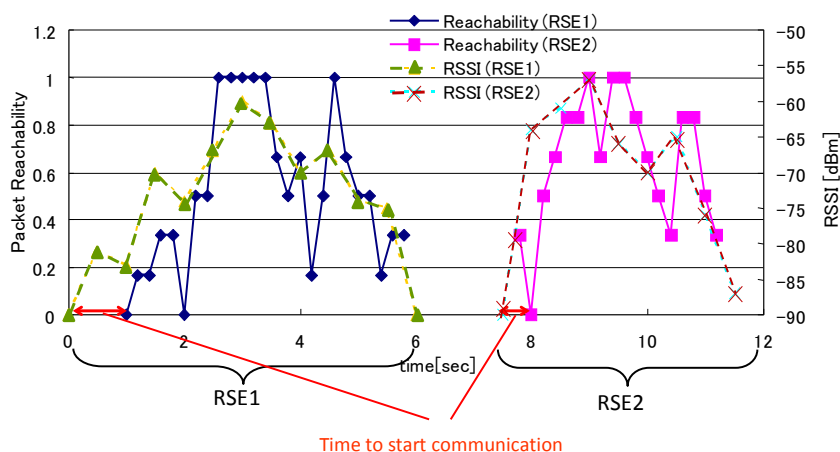


図 41 WAVE フィールド試験結果

回線理論：アーランの B 式は一般的に情報理論の中で用いられており、特に電話回線における回線設計にて知られている。広域通信であるネットワークでのアーランの B 式適用に関してはこれらの経験から問題ないと考えられる。しかしながら、WiFi を基本とした WAVE システムのような狭域通信においてアーランの B 式の採用に関しては、先行研究にある AT&T 研究所の Ghosh.A らの WiFi モデルは $(M_t/G/\infty)$ の報告がされている。一方、電話回線網のモデルは一般的に $(M/M/S)$ で扱われておりトラフィック解析としてアーランの B 式が用いられている。3G 回線は有線とは回線数 (S) に対してネットワーク内にてカバーできる回線容量にて決定されることから、今アクセスされた通信がすべて処理されるとすると、 $S = \infty$ おくことができ、3G 回線のモデルは $(M/M/\infty)$ と置くことができる。ここで $(M/M/\infty)$ と $(M/G/\infty)$ は等価であることが報告されており [44]、 M_t は時間変化のポアソンモデルを表わし、基本的にマルコフ変調ポアソン過程 (MMPP) とされる到着時間の拡張を意味することから、 $(M_t/G/\infty)$ と $(M/G/\infty)$ も等価である。これにより狭域通信に関してもアーランの B 式の適用は妥当と考え、狭帯域通信、広帯域通信ともに共通した手法での比較が可能となる。

【定量解析手法】

ネットワーク内収容車両数とユーザアクセス速度の求め方は以下のステップに沿って行なう。

STEP1：対象となる以下の諸元のネットワークを検討する。(図 42 参照)

- ・システム容量 (回線最大速度) (S) Mbps
- ・セル内車両数 (n) 台/セル
- ・ユーザアクセス速度 (s_i) Mbps
- ・セル半径 (R) m

これらの条件にて各ユーザ (車両) のアクセス量 (s_i) とするとその合計はシステム容量 (S) を超えることはできない (式(29))。

$$S \geq \sum_{i=0}^n s_i \quad (29)$$

従って、セル内車両数 (n) はユーザアクセス速度 (s_i) が一定であると仮定すると、システム容量 (S) 最大は

$$S = n \times s_i \quad (30)$$

で表される。また、システム系の通信接続が行われずデータが失われる呼（損失呼）の発生確率は呼損率（ B ）とした場合、ネットワークの呼量（ A ）はアーランの B 式が成立する（式(31)）。

$$B = \frac{\frac{A^n}{n!}}{\sum_{x=0}^n \frac{A^x}{x!}} \quad (31)$$

この時、ネットワーク呼量（ A ）はユーザアクセス速度（ s_i ）の変数となっている点に留意する。

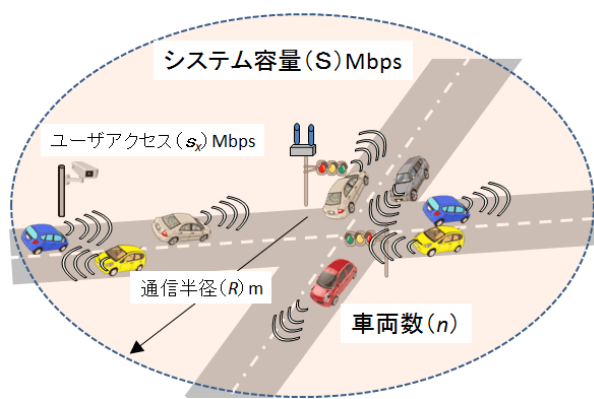


図 42 WAVE アクセスモデル

STEP2：ユーザがネットワーク内でアクセスできるユーザ呼量（ A_x ）は、ユーザのアクセス回数（ここでは1回）とその通信時間（ t ）およびネットワーク集中係数（ α ）とおくと、

$$A_x = 1 \times t \times \alpha \quad (32)$$

にて与えられる。通信時間（ t ）は、ネットワーク内に存在する間継続されるものとする、車両の速度（ v ）とすると

$$t = 2 \times R \div v \quad (33)$$

式(33)にて与えられる（図 43 参照）。

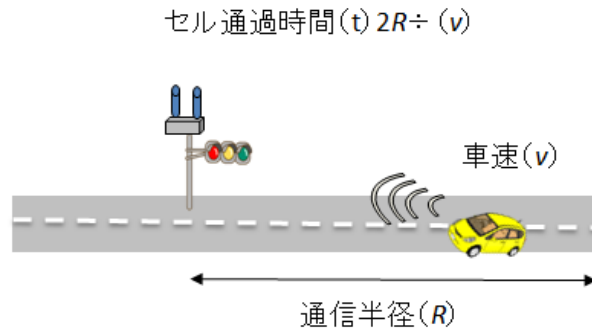


図 43 対象ネットワーク内通過車両のアクセス

STEP3: 以上から STEP1 のシステム呼量 (A) で与えられるネットワーク内に存在するユーザが STEP2 のユーザアクセス呼量 (A_x) であるためのネットワーク内の収容可能車両数 (N_x) は

$$N_x = A \div A_x \quad (34)$$

で与えられる。セル内の車両密度 (M) は道路モデルにより規定されるため、ネットワーク収容可能車両数 (N_x) はセル内車両密度 (M) に等しい場合が最適なネットワーク設計といえることができる。

よって、式(34)を満足するようにユーザアクセス速度 (s_x) を調整することで、ネットワークの定量比較としてのネットワーク車両収容可能数 (M) とネットワーク内の車両のアクセス速度 (s_x) をネットワークの最適化条件のもと求められることになる。

【定量解析】

今回比較する対象として広域通信システムは表 5 のシステムとし、WAVE である狭域通信システムは表 8 に示すシステムを対象とし、上記の STEP1~3 のネットワーク最適化手法により、ネットワーク収容可能車両数とユーザアクセス速度を求める。

最初に本論の関心事である WAVE システムの定量評価を進める。解析のための諸元に関して、通信距離は表 8 を用い、道路モデルは付録資料 1 のデータをもとに行なう。ここで解析に不足しているパラメータは車両の速度とネットワーク集中率となる。車両速度に関しては 2010 年に調査された道路交通センサス情報[45]から、中心市街地の平均から時速 15km、郊外の平均から時速 35km として採用した。また、集中率はデータ通信回線での日経 SYSTEMS 社の調査[46]にて使用率が 0.5~0.7 で 0.5 を目安に回線品質を行なっている企業が多いことから 0.5 とする。これらの条件から 700MHz 帯 WAVE の定量評価諸元を表 21 にまとめる。

表 21 700MHz 帯 WAVE 解析諸元

道路モデル	セルサイズ（半径：m）	車両密度（台）	車速（km/h）	ユーザ呼量（erl）
中心市街地	224	1055	15	0.01493
都心部	224	484	15	0.01493
副都心部	412	742	35	0.02747
郊外	1362	2382	35	0.09080

同様に 5GHz 帯 WAVE の定量評価諸元を表 21 の 700MHz 帯 WAVE より換算および同一道路モデルでの値を求めると表 22 のようになる。

表 22 5GHz 帯 WAVE 解析諸元

道路モデル	セルサイズ（半径：m）	車両密度（台）	車速（km/h）	ユーザ呼量（erl）
中心市街地	150	576	15	0.0100
都心部	150	324	15	0.0100
副都心部	276	480	35	0.0079
郊外	2382	1405	35	0.0681

これらの解析諸元をもとにネットワークの最適化手法により求めた解析結果を表 23 にまとめ、収容可能な車両台数とユーザアクセス速度との関係を図 44 にまとめる。

WAVE システムの交通事故低減に最も生かされると考えられるものが、中心市街地における出会い頭の衝突事故への対応があった。特に交差点における事故が主要な要因であったことから、図 44 における中心市街地の WAVE システムの定量解析に着目すると、700MHz 帯、5GHz 帯 WAVE とともに 800kbps～2.5Mbps の高速データ通信が可能でリアルタイム性のある情報提供できることがいえる。また、その時の収容車両可能台数は 600 台～1,000 台となり、中心市街地道路モデルの実情を満足する結果となっていると言える。

表 23 道路モデルによる WAVE 定量解析結果

通信方式	周波数	モデル	通信半径（m）	収容車両数	アクセス速度（kbps）
WAVE	700MHz	中心市街地	224	1055	800
		都心部	224	484	800
		副都心部	412	742	650
		郊外	1362	2382	80
	5GHz	中心市街地	150	567	2500
		都心部	150	324	2500
		副都心部	276	480	3500
		郊外	912	1405	220

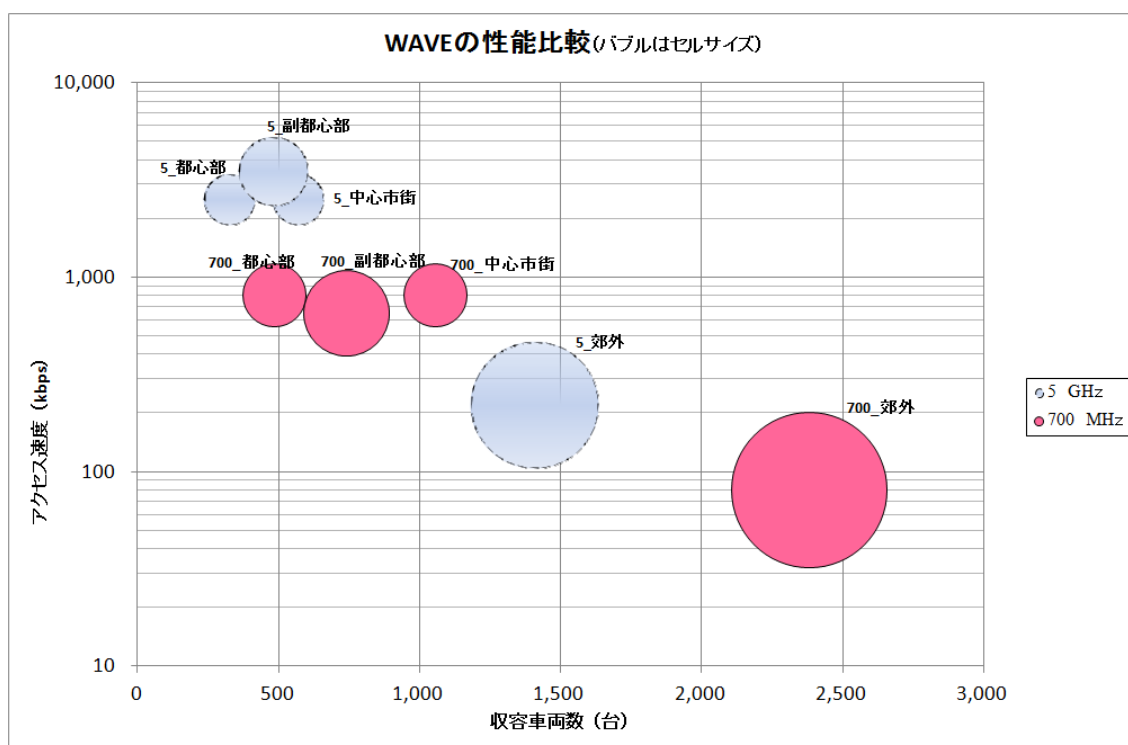


図 44 道路モデルによる WAVE 定量評価結果

続いて、中心市街地モデルにおいて同様の解析を広域通信に適用してみる。詳細解析諸元と解析結果を表 24 に、定量評価結果を図 45 にまとめる。詳細パラメータ算出は付録資料 1 に示した。

表 24 広域通信解析諸元と解析結果

通信方式	セルサイズ (半径 : m)	車両密度 (台)	車速 (km/h)	ユーザ呼量 (er1)	アクセス速度 (kbps)
3G	3000	17740	15	0.04000	10
LTE	4000	27858	15	0.05333	85
WiMAX(700)	4000	27858	15	0.05333	13
WiMAX(2,5G)	1500	4455	15	0.02000	150

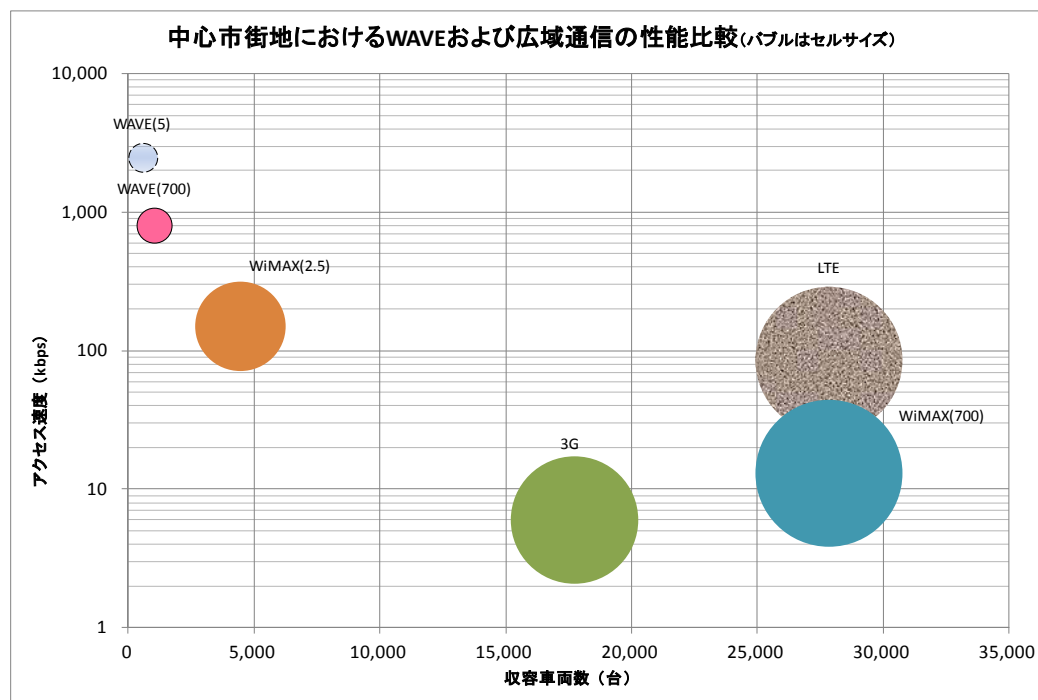


図 45 中心市街地モデルでの WAVE と広域通信定量評価結果

図 45 の定量評価結果により中心市街地道路モデルとした環境において狭域通信システムである WAVE の収容車両数は 1,000 台／セル程度であるが、アクセス速度は 800kbps 以上であるのに対し、広域通信システムである 3G、LTE、WiMAX の収容車両数は 4,500～21,000 台／セルとなるもののアクセス速度は 150kbps 以下となり、通信システム性能の明白な差異が判明した。

以上より、WAVE は先行研究で提唱した”Fog computing”として定義される領域に含まれることを定量化することができた。一方 3G、LTE、WiMAX(700MHz 帯)は収容車両数は多いもののリアルタイム性として扱える情報量に制約が生じるため、扱う情報量の制約により”Fog computing”というより、むしろクラウド的扱いに適しているといえる。実際の自動車環境を取り巻く事象を時間軸のリアルタイム性が要求される事象をまとめると、衝突事故→危険通知→交通渋滞→道路工事通知→地図アップデートの順に厳しさがあるといえ、対象とする車両数に関しては衝突事故等であれば対象とする台数は少なくても済み、地図情報のアップデートのようなアプリケーションでは逆に多くのドライバーへの通知が期待される。これらをイメージ的に整理すると図 46 のようにまとめることができる。すなわち Cloud ではリアルタイム性の伴わない広く利用されるアプリケーションに、一方”Fog computing”は衝突防止をはじめとするリアルタイム性の高い応用例に限られた環境に適用できる。これにより WAVE 技術は”Fog computing”として交通マネジメント（事故・渋滞等）の支援が可能であり、これからの IoT 時代のなかで効果を発揮できる技術であるといえる。

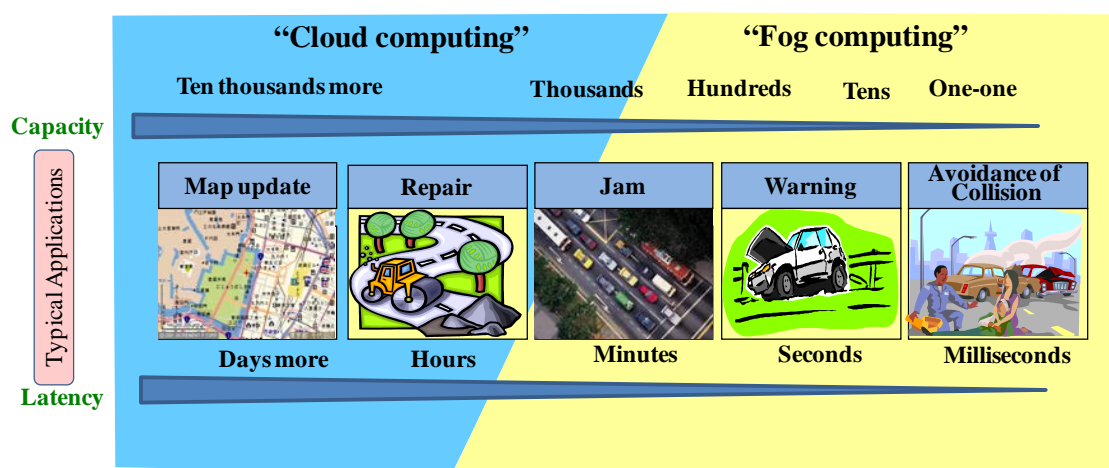


図 46 WAVE による“Fog computing”の位置付け

本論では広域通信の詳細は検証しないが、一般的に広域通信技術においても環境条件により基地局の送信出力を制御することで通信距離範囲を制限することで、セル内の端末に対するネットワークの品質をあげるサービス（ヘムトセル）も対応できる。このサービスにより広域通信であっても WAVE と同様な通信アクセス距離に限定することも可能となり、本論で示した“Fog computing”化も可能となるため、WAVE システムのみが“Fog computing”であるとするものではない。

5.1.3 “Fog computing”の応用

前項にて、WAVE 技術による“Fog computing”として、主要交差点における出会い頭衝突事故等のように危険情報をリアルタイムに運転者へ提供する支援としての定量解析によるネットワーク側からみたデータ通信アクセス速度と交差点等での対応できる車両数のイメージを検討してきた。図 46 に示した“Fog computing”においてさほどリアルタイム性には問わないものの（但し、数分から数十分程度の）交通の流れに影響ある車両混雑をモニタ・管理することも応用の範囲に入れることが可能となる。

交通の流れの管理面では、現在国内における信号機制御は一般的に MODARATO[47]という方式が採用されており、MODARATO では、交差点への流入交通量と信号待ち行列長から計算される負荷率に基づいて、信号青時間を決定されている制御を行っている。この交差点への進入車両の情報（プローブ情報）を複数もつことで信号待ち状態の最適化が可能になる研究も行なわれている[48]。また、WAVE システムを活用した実証試験として運転者への注意喚起支援の報告[49]として運転者のアンケートによる安全運転支援への有効性も報告されている。これらは対象となる交差点における狭域に関する ICT 活用の事例として報告されており、渋滞にかかわるプローブ情報の収集としての“Fog computing”応用の 1 例といえる。一方、行き先運行支援システムとしてのいわゆるナビゲーションに関しては、目的地は複数の交差点および場合によっては郊外に

まで広域におよぶことが想定されるため、広域の交通渋滞情報においては“Fog computing”よりもクラウドによるサービスに頼ることになることは容易に推定できる。

プローブデータ収集については、これまでに超音波方式、光ビーコン方式、画像方式、ループ方式、マイクロ波方式とさまざまな方式が開発されてきた。中でも、近年では容易に設置できるとともに、比較的正確な数値データが求められるとして、画像トラフィックモニタカメラによるプローブ情報が広く用いられるようになってきている。国内では1970年代ごろから、主要な道路・ハイウェイへの適用されており、その車両把握のためのソフトの改良ならびにカメラの性能向上により広く適用される状況にある。ただし、あくまで画像認識による処理であり、車道における車の重なりや車種の認識は更なるシステム開発も必要なことも課題となっている。また、情報通信技術の進歩により携帯電話を活用したプローブ情報収集の動きも目立つようになってきた。国内では2013年6月より、Smartphone ITS Consortium が11社の企業にて活動を開始しており、車のCAN (Controller Area Network) 情報をスマートフォンで収集し、クラウド基盤に集約することで道路交通情報としてまとめ活用することを目指している[50]。CAN情報としては、車速、エンジン回転数、燃料噴射量、ブレークペダルのストローク量、ステアリングの舵角など多岐にわたり、急ブレーキ車両、ABS(Antilock Brake System)を働かせた車両の数等の路上危険情報の特定の活用や、ワイパー作動による降雨情報の地域特定化などさまざまな応用の検討が行われている。これらの活動はWAVEシステムと同様にCANデータの集積とその活用を自動車メーカーが主体で行なう活動に近いものの、オープンシステムにて一般企業に対しても情報を公開していくオープンプラットフォームを目指している。従って、使用されるデータの制限やセキュリティに関しても、一定の制約の中で実施されることになる。一方、WAVEシステムは自動車メーカーを主体に進められているためにCAN情報へのアクセスはSmartphone ITS Consortiumにて扱えない項目に関しても活用することはより詳細な車両情報を扱え、よりきめの細かいサービスの提供が行えるものと考えられる。

以上から“Fog computing”の活用は衝突防止用支援システムのようにリアルタイム性を有する応用と渋滞情報等の分単位でのプローブシステム応用として信号機制御や車両そのものの状況の把握による環境の推定等幅広い応用の可能性があるといえる。これらWAVEの機能を“Cloud computing”と“Fog computing”として整理すると表25のようにまとめることができる。すなわち“Fog computing”では交差点およびその周辺を含む比較的狭い範囲をより詳細な交通情報をまとめることでリアルタイム性のとんだアプリケーションに有効であり、“Cloud computing”では比較的広域範囲における交通渋滞情報や道路工事や事故情報をまとめることで将来の交通渋滞に対処するアプリケーションとして有効となり、それぞれの役割と位置付けが見えてくる。

表 25 WAVE の機能とネットワーク領域

	事故	渋滞	時間	範囲	数量
Fog computing	出会い頭衝突	区域渋滞 (交差点等)	ミリ秒 ～ 秒	メートル ～ 数十メートル	～10
	信号管理 (信号無視等防止)	地域渋滞 (道路)	秒 ～ 分	数十メートル ～ 数百メートル	
Cloud computing	事故通知	地区渋滞 (町丁目)	分 ～ 時	数百メートル ～ 数キロメートル	～1,000

5.2 交通インフラへの応用

5.1 節では WAVE システムのネットワーク領域における定量解析により、新たに提唱されている”Fog computing”としての役割を果たすことでリアルタイム性に富んだ運転支援が行なえ近年の交通事故主要原因である出会い頭衝突への対応の可能性を示した。さらに 4.2 節では経済発展が著しい新興国における交通流解析を行なう中で WAVE システムの導入によりインフラコストがかさむ交通対策に向けた渋滞マネジメントへの活用可能性を見てきた。本節では話を先進国に戻し、WAVE システム導入の主目的である交差点における出会い頭衝突の削減に向けた投資として信号機への展開を、具体的都市を例に考察を行なう。最初に先行研究にもあるように交通事故死亡者数の多い大都市圏に着目し WAVE システムの主要交差点への設置による「カバー率」に関して検討を行ない、続いて地方都市に関しても同様の検討を行なう。また、WAVE システムの優位技術をさらに広く展開するための応用を検証することで市民への生活向上につながる QoL (Quality of Life) の観点での検証を加えることで WAVE 技術の普及は交通マネジメントを含む QoL 向上へのポテンシャルを持つ可能性の検討を行なう。

5.2.1 大都市圏への応用

日本では 700MHz 帯 WAVE システムの商用化が大手自動車メーカにより世界に先駆け 2015 年開始された。WAVE システムの普及には、車両の搭載のみならず、インフラ設備等への普及が鍵であり、そのためには今回の国主導で進めている安全運転支援（例えば、一般社団法人 UTMS 協会：Universal Traffic Management Systems における安全運転支援システム DSSS：Driving Safety Support Systems）以外への拡大が重要な位置付けになってくると考える。そのため、具体的に本システムの適用を検討するため、ある都市を具体例にその活用と課題、そして普及拡大のための新たな適用例を考察する。

WAVE システムの開発は先に示してきたように、車両の安全運転支援を主な目的とし、

特に交通事故の主要原因である交差点における出会い頭衝突の軽減とプローブデータを活用した交通情報をリアルタイムに把握し交通渋滞緩和を目指すことにあった。このため、インフラ基地局としては主要交差点にある信号機への設置がその WAVE の RSU として対象の第一候補となる。この分析は筆者が既に東京 23 区の主要交差点への RSU 設置検討を実施している。既論文[51]で解析した東京 23 区の主要交差点への WAVE 基地局 RSE 設置イメージを図 47 に示す。既論文では 23 区内の交差点全数に対する RSE の設置個所によるカバー率の評価を実施している。その内容は以下に示す通りである。ただし、引用図表番号は本論文に合わせている。

『23 区の交差点にある信号機が 7,152 基であることより、交差点での信号機の数 は 2 基ないし 4 基であることを考慮し、十字路を 4 基とすると、23 区全主要交差点の約 3%とあることから、信号機総数量から換算する 23 区の交差点推定数は約 3,470 カ所 ($=7152 \div (2 \times 0.97 + 4 \times 0.03)$) となり、今回の約 3,000 カ所の交差点での設置により、約 86%のカバー率となっている。東京 23 区は、総面積 621.98km²、総人口 8,949,8639 人(平成 23 年 4 月時点)となっている。この空間にして、図 47 に配置した WAVE 基地局の条件をまとめると、表 26 のような諸元となる。ちなみに、この WAVE の処理能力は、セル内の車両に対して、17Mbps のデータ通信サービスを可能とする条件での配置としている。(本例は、一般的な車両密度 500 台/km²の場合を示している。)]



図 47 東京 23 区における主要交差点への RSE 設置イメージ

表 26 東京 23 区 WAVE 基地局

No,	項目	数値
1	WAVE 基地局数 (局/23 区)	2,985
2	収容車両容量 (台/局)	78

既研究では RSE の設置カバーを 23 区内全交差点における数での比率で約 86% のカバーとし、1 基地局における収容車両数は交通密度を面積あたりで 500 台/km² としてアクセス速度 17Mbps とした点で、後者のパラメータは本研究により単純面積による判断は実際の環境とは離れていることがわかる。ここでは都市道路モデル化を実施しており、少なくとも中心市街地および都心部における WAVE システムの性能は表 27 より、収容車両数は 484~1055 台/セルかつアクセス速度は 800kbps であることが判明している。ここで収容車両数を平均値の 770 台/セルとして新たに表 27 の条件での再評価を行なう。

表 27 東京 23 区 WAVE 基地局 (改定)

No,	項目	数値
1	WAVE 基地局数 (局/23 区)	2,985
2	収容車両容量 (台/局)	770

表 27 の条件で、東京 23 区全体の昼 12 時間の全交通量は 153 万台/ (12h) の状況下での、時間帯平均交通量は約 130 万台/h となり、この条件で、WAVE 基地局としての処理能力の評価を行なうと以下のように結論づけられる。すなわち、WAVE 基地 1 局当たりの処理しなければならない車両は、23 区内に設置する WAVE 基地局総数にて平均化すると

$$130 \text{ (万台/h)} \div 2,985 \text{ (局)} = 435 \text{ (台/h・局)} \quad (35)$$

となる。都心部における平均車速を 15km としているため、700MHz 帯 WAVE (セル半径=224m) の通過する時間は 1.8 分 (=0.224×2÷ (15/60)) であるので、セル当たりの処理車両台数は

$$435 \text{ (台/h・局)} \times (1.8/60) = 13 \text{ (台/局)} \quad (36)$$

となり WAVE 基地局のセル範囲内での処理能力 770 台にて十分処理可能な範囲であることがわかる。ちなみに都内通行車両が平均時速 30km となったと想定しても RSE にて処理すべき車両台数は式 (36) の倍の 26 台/局となり十分といえる。

また、筆者の先行研究[52]では、東京 23 区の内交通量の最も多い都心 3 区（中央区、千代田区、港区）に交通事故が相対的に多く発生していることを示しており、対象となる道路の全長に対する RSE の通信によるカバー率としてミクロ的解析を行なっている。これによると都心 3 区における 700MHz 帯 WAVE の主要道路長における面的カバー率および RSE の通信による実際のカバーの様子は図 48 に示す通りになる。また、これに対する都心 3 区の交通事故発生状況および道路長（km）あたりの事故発生状況を図 49 に同様に示す。値は図 48、図 49 の比較により麻布地区を除いて WAVE システムの主要交差点設置により交通事故の発生しやすいポイントへの対応ができるといえる。ただし、麻布地区のように主要交差点が存在せず事故発生が高い箇所においても出会い頭による衝突事故が多いためこちらは WAVE のもう一つの通信の特長である車・車間通信によるお互いの車両同士の通信による事故抑制支援によるところが大きいと判断する。この衝突事故支援としての WAVE の性能評価は付録資料 3 にて解説する。

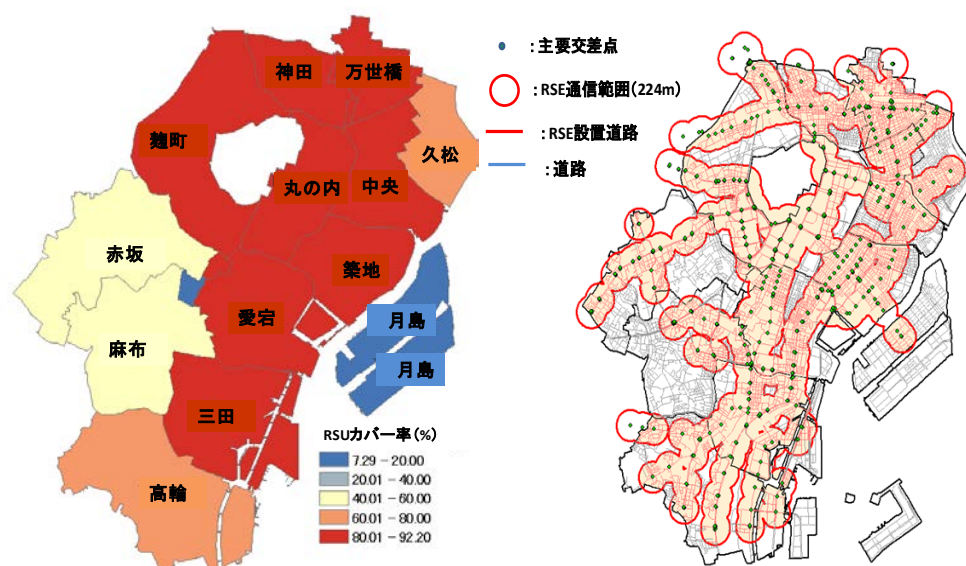


図 48 都心 3 区における RSE カバー率と通信範囲

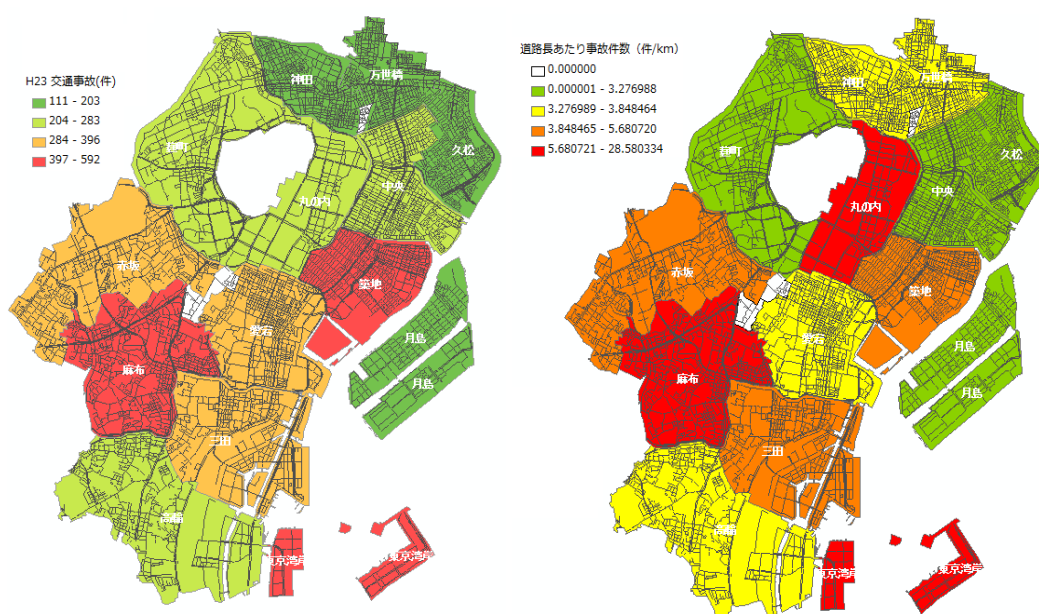


図 49 都心 3 区における交通事故発生状況と道路長 (km) 当たりの発生割合

5.2.2 地方都市カバー率

前項では東京を例に大都市における WAVE システムの将来の普及にともなう主要交差点への基地局 (RSE) 設置という観点で、GIS (Geographical Information System) ツールを用いてカバー率の検証を行なった。一般的に大都市圏での交通インフラは比較的整備が進んでいるために WAVE システムの主要交差点への設置による効果はある程度確保されることは理解できる。一方、地方都市の状況は大都市圏とは異なり主要交差点への WAVE システム設置によるカバーには困難が伴うことは容易に推定できる。よってここでは代表的な地方都市を例に WAVE システムの地方都市への応用として検証を行ってみる。最初に代表的な地方都市の抽出において主要都道府県における最近の交通事故状況を確認することとする。表 28 に警察庁交通局がまとめた平成 26 年度都道府県別交通事故分析報告書[52]から抜粋したデータをまとめる。東京をはじめとする大都市圏の状況は交通事故の上位を占めるが、地方都市でも人口あたりの正規化数値でみると全国トップは静岡県となっている。さらに静岡県の中の都市を見てみると浜松市が大きく、全国政令 20 都市の中交通事故死亡者数順位で 1 位とかなり悪い状況にあることがわかる[53]。また、浜松市の行政レポートから人口あたりの自動車登録数も同市が 1 位となっており、自動車保有数が多い地方都市、トラフィック量の多い大都市圏での交通事故はどうしても事故の起きる確率が高くなっており、これは世界の交通事故分析 (図 2) と同様といえる。よって、ここでは静岡県浜松市を代表的地方都市の例として将来の WAVE システム導入を見据えた分析を行なうものとする。

表 28 主な都道府県別交通事故状況（平成 24 年）

都道府県名	全体事故数（件）	死亡事故（件）	負傷事故（件）	人口（人）	正規化全体事故	正規化死亡事故	正規化負傷事故
愛知	49,651	235	61,576	7,427	669	3	829
大阪	48,212	182	57,804	8,856	544	2	653
東京	47,429	183	54,837	13,230	358	1	414
福岡	43,178	161	56,670	5,085	849	3	1,114
神奈川	37,049	179	44,135	9,067	409	2	487
静岡	36,946	155	48,178	3,735	989	4	1,290
埼玉	35,600	200	43,519	7,212	494	3	603
兵庫	34,056	179	42,073	5,571	611	3	755
千葉	22,931	175	28,558	6,195	370	3	461
群馬	18,430	106	23,306	1,992	925	5	1,170

注：正規化数は人口 100 人あたりの件数で算出

WAVE システムはその目的において主要交差点への設置を最初の導入として検討されているため、浜松市における主要交差点の位置を分析してみる。GIS ツールを用いて地図上に主要交差点の位置を表示した結果を図 50 に示す。図 50 から明らかなようにこの主要交差点に WAVE の基地局（RSE）が設置されるとすると、その「カバー率」は、大都市圏のように密とはなっていないことが一目瞭然となる。すなわち、それぞれの交差点において単独の情報情報をもとに通知を行なうことになり、大都市圏でみる交差点間でデータ通信の連続性（ハンドオーバー）を保つことは物理的に困難とである。交差点における出会い頭衝突に対する交通状況の把握としては、それぞれの交差点での特異環境条件により単独交通情報の通知自体は意義を持っているものの、渋滞という観点では付近の交差点での交通情報はより面的な情報も活用する方がきめ細かな交通渋滞情報が提供できないという欠点も見えてくる。図 51 に示すように”Fog A”と”Fog B”での情報のやり取りは “Cloud”を通して出ないと難しいといえる。

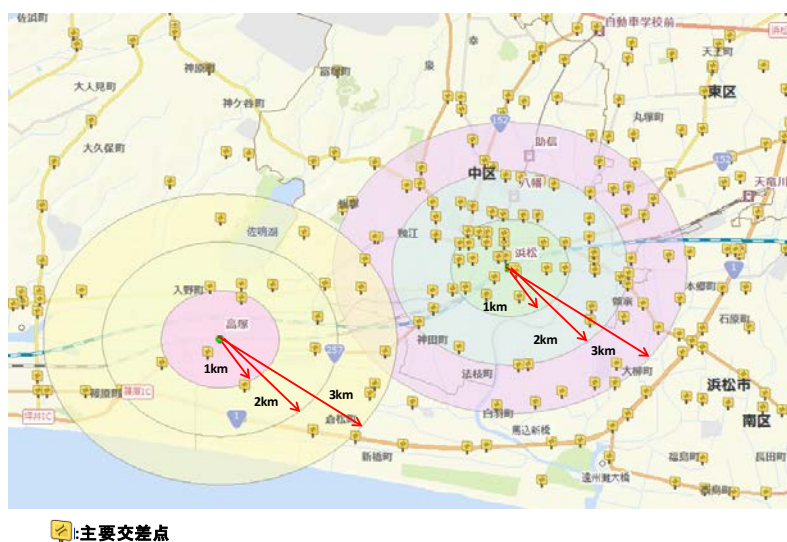


図 50 浜松市内主要交差点の位置

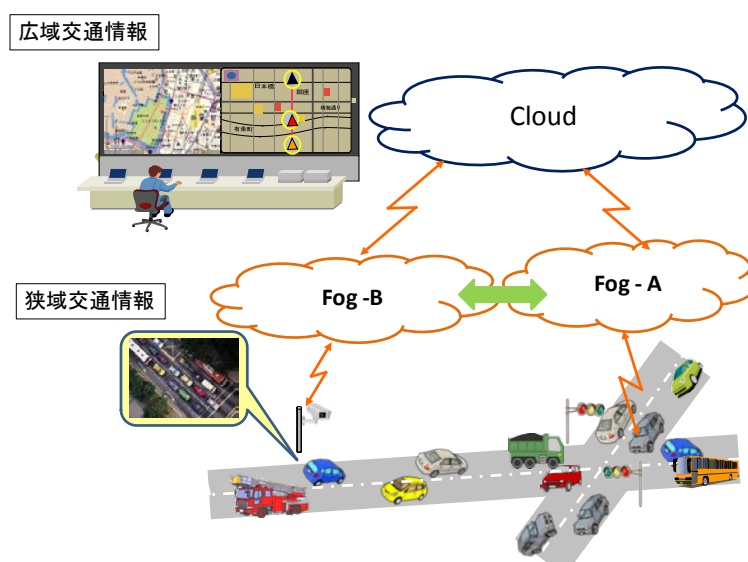


図 51 地域交通情報とネットワーク

ここで、地方都市における WAVE システムの「カバー率」の定量化を検討する必要がある。図 50 に JR の駅（浜松駅、高塚駅）を中心に半径 1～3km の範囲を示した。これは住民が主要駅周辺の交通渋滞がリアルタイムに入手可能であれば、目的地によっては車ではなく他の交通手段（例えば市内電車）の活用につながる可能性がある。よって対象とする地点に対して、WAVE システムの通信によるカバーの程度がある程度期待されれば地域交通情報の共有化ができると考えられる。そこで先に検証した道路長当たりの「カバー率」に対して、通信範囲であるセル空間としての「カバー率」を導入し、WAVE システムの設置により対象エリアへの通信による空間カバーを検証する定量解析を行なう。

【空間カバー率】

本項で導入する「空間カバー率」を以下に定義する。図 52 に示すある対象範囲（図では駅を中心としたある半径の空間）に WAVE 基地局（RSE）が 4 局存在しているとし、それぞれの RSE がお互いに通信可能な範囲（700MHz 帯 WAVE では半径 224m）に存在する RSE の数の割合を「空間カバー率」とする。すなわち RSE4 局のうちお互いが通信範囲内にある RSE は、A、B、D が対象となり C は対象範囲を外れているため空間的カバーに寄与していないとなる。この 4 局の中で、2 局間の通信を行なう全ケースは組み合わせ計算となり ${}_4C_2=6$ 通りとなる。このうちお互いの距離が WAVE の通信到達距離 224 メートル以内の RSE の組は 3 通りとなっているため、「空間カバー率」は 50%（ $=3/6$ ）となる。すなわち「空間カバー率」は式（37）にて定義される。

$$\text{空間カバー率} = \frac{\text{2 局間 RSE が WAVE 通信距離以内の組み合わせ数}}{\text{対象地区の WAVE の 2 局間通信の総組み合わせ数}} \quad (37)$$

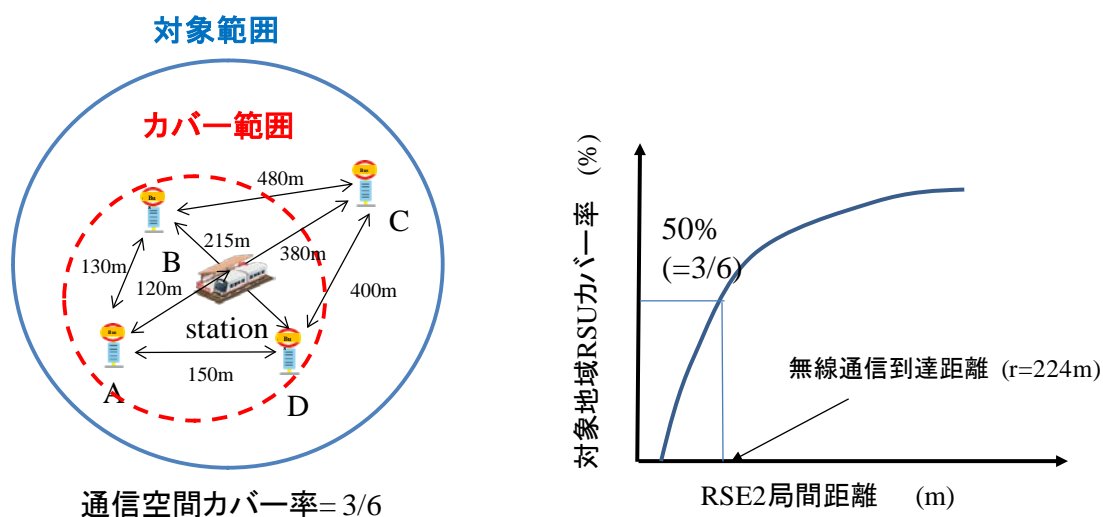


図 52 空間カバー率イメージと基地局間距離とカバー率

以上から図 50 の浜松駅を中心に半径 2 キロメートルを対象範囲とした場合の「空間カバー率」を求めると図 53 のようになる。結果、浜松駅を中心とした半径 2 キロメートルの対象範囲における主要交差点に設置した RSE の「空間カバー率」は 42%となることが判明した。

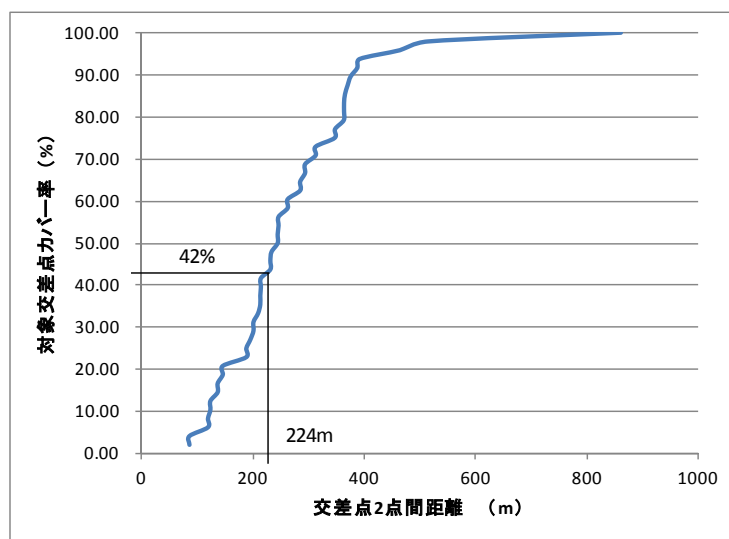


図 53 浜松駅を中心とした交差点の空間カバー率（半径 2 キロメートル）

これにより WAVE システムの主要交差点設置による地方都市における「空間カバー率」は、例えば浜松市 JR 駅を中心とした半径 2km の範囲では 42%となり、主要交差点へ

の WAVE 基地局設置による基地局同士の情報共有は半分以下でしか実現できないことが判明した。従って、今回の浜松市を例とした将来の WAVE 基地局が主要交差点に設置された場合は、その交差点における単独ネットワークによる出会い頭による衝突事故低減に向けた施策および WAVE システムによる車・車間通信による衝突事故への対応に期待することになる。

5.3 自然災害対策への応用（QoL）

WAVE システムの展開は、その車載機（OBE）は自動車関連企業により今後自動運転への展開もあり進んでいくものと考えられ、交通事故削減に向けた国の方針として主要交差点への WAVE 基地局（RSE）の設置がインフラ事業として進められることが期待できる。ただし、前項でみてきたように対象となる環境条件により WAVE の有効活用に様々な違いが生じることも確かである。ここで WAVE システムの地域応用としてさらに発展できる可能性について検討を進める。

WAVE システム車載機は当然一般の自家用車のみならず公共交通機関への導入も行なわれる。この点に着目し公共交通の手段として年々減少は続いているもののバスへの WAVE システムの応用が考えられる。ここで車載機以外にバス運行に関してのインフラを考えるとバス停への WAVE 応用を考えることは自然である。よってここで再度浜松市を例にとりバス停への WAVE 基地局（RSE）の設置を行なったことを想定して検証を続ける。最初に浜松市におけるバス停の配置状況を GIS ツールにて地図上に展開する。その様子を図 54 に示す。さらに主要交差点での WAVE システム「空間カバー率」を求めた「空間カバー率」を同様に算出し、図 55 にグラフを示す。

バス停に RSE を設置したとするとその「空間カバー率」は浜松市のバス停に RSE を設置することで、浜松駅を中心に半径 1 キロメートル、2 キロメートル、3 キロメートルとも「空間カバー率」は 99%を確保できることが判明した。これにより WAVE システムの主要交差点における RSE 設置のみでは、その「カバー率」の確保が難しい地方都市において、WAVE システムの効果的活用として公共交通であるバス停を新たな RSE 追加の候補として設置することで、対象とする地域における無線通信範囲の拡大が期待でき、交通事故削減に向けた本来の WAVE システムの目的に対するインフラ設備への展開として意味があると考えられる。またバス停に WAVE システムを設置することでバス停付近での交通事故の削減への効果以外にさらに以下のような応用の効果も考えられる。

- ・ バス接近情報の通知
- ・ バス運行管理
- ・ バス停付近の各種ローカル情報（地域施設、イベント、広告紹介等）

バス停への WAVE 基地局設置によるこれらの具体的応用の検討に関しては付録資料 4 にその詳細を示す。

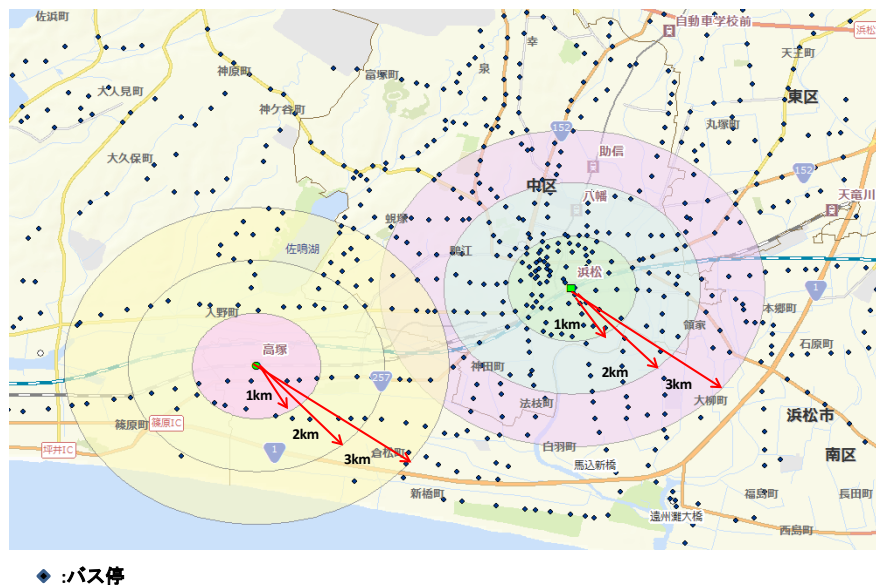


図 54 浜松市のバス停位置

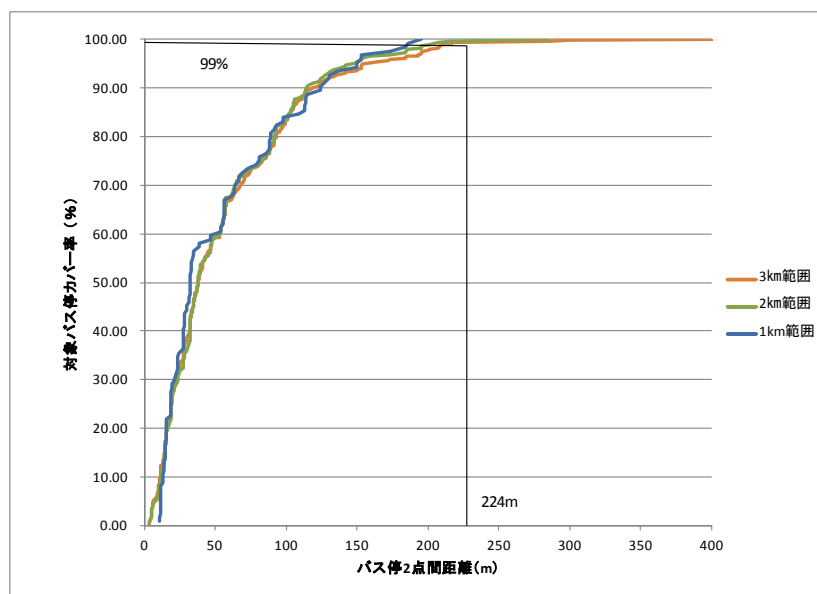


図 55 浜松市内のバス停 RSE 設置による空間カバー率（浜松駅中心）

浜松駅を中心としたバス停への WAVE 設置による「空間カバー率」をみてきた。結果はバス停の配置にもよるものの「カバー率」は駅から半径 1～3km において 99%という高い数値が得られた。しかし場所によっては常にこのような高い「空間カバー率」が得られることはまれであると考えるのが普通である。ここで浜松駅の隣駅の高塚駅に関して

同様の「空間カバー率」を求めると図 56 のような結果を得る。

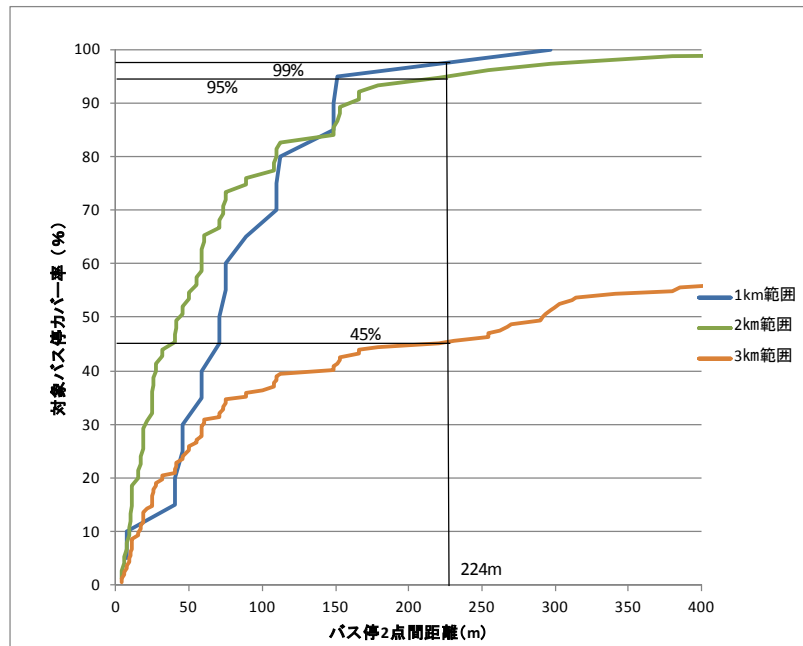


図 56 高塚駅周辺バス停 RSE による空間カバー率

結果は高塚駅半径 1～2km の範囲では 9 割以上の「空間カバー率」を有しているものの半径 3km になると 45%と低い結果になる。すなわち、地方都市における公共交通機関であるバス停所への WAVE 基地局設置は必ずしも場所により高い「空間カバー率」を得られるとは限らない現実があることが判明した。

WAVE システムの交通関連応用としてはここまでであるが、浜松地域への WAVE 応用検討の中で行政がかかえる問題として地域災害の話が入ってきた。この問題は日本全土における深刻な問題のひとつでもある地震による津波災害であった。浜松を含む東海地方では南海トラフ地震による津波災害の危機にさらされて久しい。そのため筆者はこれまで検討してきた WAVE システムの応用として地域に設置される WAVE の通信を活用した環境モニタポストとしての役割を検討するに至った。その詳細検討は先行研究 [54][55]によるものとするが、WAVE の応用としては重要なテーマであるためその概略を以下に示し、WAVE の QoL 応用としての役割を考察する。

【災害への WAVE による IoT 応用】

近年盛んに自然災害の猛威による人命を含む大きな社会損失の危険性が問題となっている。特に地震に関しては 2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災の災害は記憶に深く刻まされている。日本は特に地震による災害がこれまでの歴史で多く岐路されてきており、最近ではいつ起きてもおかしくない地震の中で南海トラフ地震が想定されてい

る。浜松市を含む東海地域においても行政側は防潮堤の建設、避難タワーの建設、避難路の確保のためのハザードマップ作製等対策が進められている。しかしながら南海トラフ地震による津波の災害が広範囲に及ぶため必ずしも万全な対策とは言えない現実がある。内閣府より発表されているデータ[56]から津波の浸水予測を図 57 に示す。



図 57 南海トラフ地震津波浸水予測

図 57 からさらに浜松市付近における南海トラフ地震による津波浸水の詳細を先のバスの位置も含めた予測を図 58 に示す。



図 58 浜松市付近南海トラフ地震津波浸水予測とバス停配置

図 58 より海岸線から約 3km（場所によっては 5km）まで水深 1m 以上の地震による津波の影響があることが推定されている。また海岸線付近では浸水が 10m を超える深刻な被害が予測されている。現状の対策は先に示した防潮堤や避難タワー等の設置も行な

われているものの住民 100%の避難確保対策には至っていない。また、バス管理会社では現状津波発生した場合は、人命を優先する避難を勧告しており、バス乗客に対しては北に向かって（津波とは反対方向）への誘導と、防災無線による呼びかけとなっており、さらに自動車関連産業の製造業が発達している本地域での物流会社では、運転手は早期にトラックを放棄して人命を守る逃避対策を行なうことを減災対策としている。すなわち、ある程度の被害は止むを得ないとした状況での対策となっているのが実情である。

図 55 で示したように、浜松駅を中心とした半径 3km の範囲ではバス停による WAVE の基地局設置により 99%のエリアが通信網でカバーできることが理解できた。一方、図 56 で示したように、高塚駅周辺で駅を中心とした半径 1~2km であれば 95%以上の「空間カバー率」を確保できるものの、半径 3km のエリアでは「空間カバー率」は 45%であった。すなわち場所の環境条件によって当然バス停への WAVE 基地局設置ではカバーできないのは当然であり、このために WAVE システムを災害のためのセンサーとしての役割にまで拡大した場合には、バス停以外への設置に関する検討が必須となる。そこで高塚駅周辺半径 3km における WAVE システムの拡張を検討するにあたって、特に自動車を活用した避難を考える上でガソリンスタンドへの拡張を考えた。GIS を使い浜松地域のガソリンスタンドも含めた WAVE の基地局設置の様子を図 59 に示す。

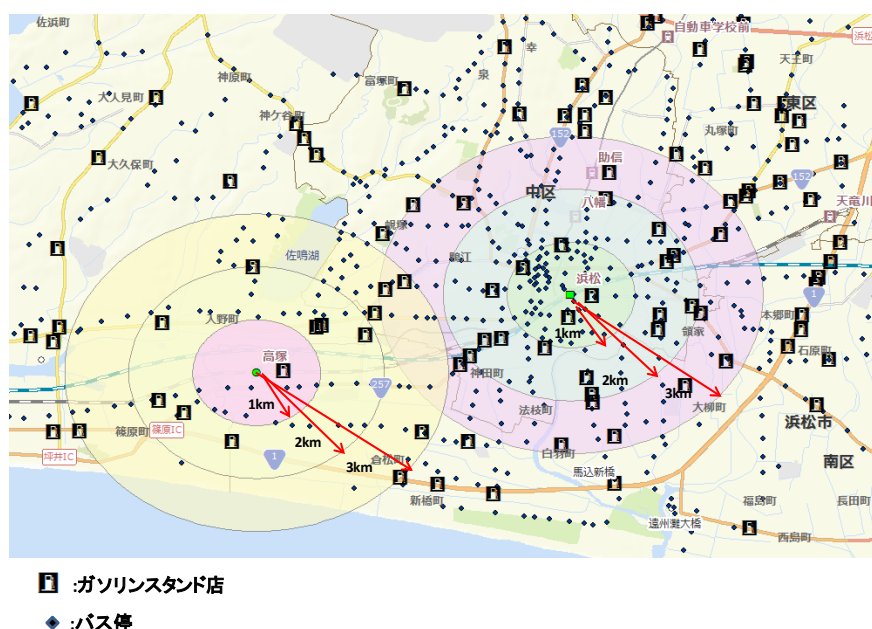


図 59 浜松地域のバス停およびガソリンスタンドの配置

このガソリンスタンドとバス停を加えた WAVE 基地局の設置を行なった場合の「空間カバー率」の検討を行なうと図 60 に示す結果のように高塚駅半径 3km においても「空間カバー率」95%を得ることができた。

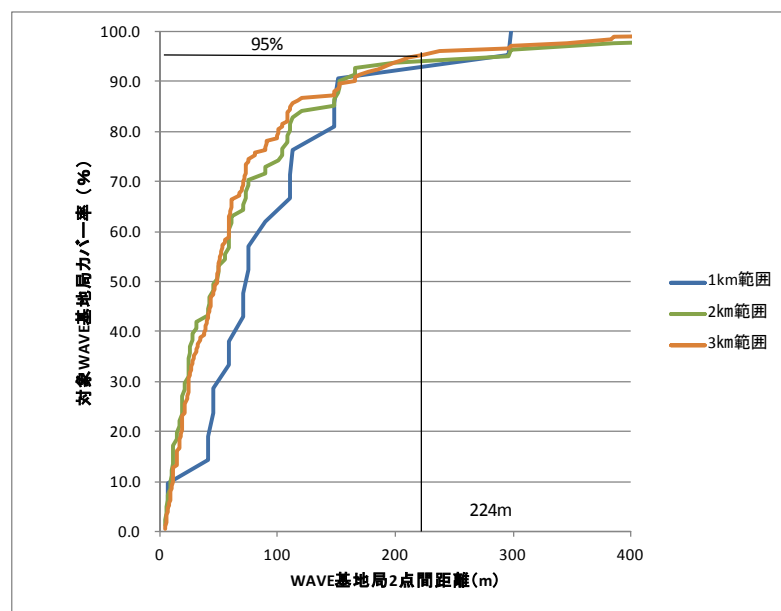


図 60 高塚駅周辺バス停およびガソリンスタンドの RSE 設置による空間カバー率

RSE 設置に関しては、その地域における環境条件を考慮し、どのような場所に設置するのがふさわしいか地域住民と行政と一体となった検討と取り組みの必要性が見えてくる。浜松市以外の応用検討として隣接の湖西市での検証は付録資料 8 にて解説することにする。

以上より本節では WAVE システムの将来設置が計画される主要交差点での交通マネジメントとしての「カバー率」を大都市圏および地方都市を例に WAVE 設置の範囲を「道路カバー率」およびその通信範囲を考慮した「空間カバー率」により評価した。また交通マネジメントから地震等の自然災害になった場合への WAVE の「カバー率」をセンサーネットワークとしての IoT 応用に広げ人命を守るための QoL 向上につながる WAVE 技術の可能性を見てきた。これにより WAVE 技術の普及は交通マネジメントを含む QoL 向上へのポテンシャルを持つことの有効性を示すことができたと考える。

5.4 減災の地域性課題と対応 (QoL)

前項において WAVE システムの地域応用として南海トラフ地震による津波対策としての応用例として浜松市を例にとり検討した。先述の通り WAVE の地域応用には、対象とする地域における環境条件に左右されることが大きい。WAVE システムの主要交差点およびバス停への拡張により浜松市における対策が見えた。ここでは浜松市の隣接の湖西市に関して同様の検討を行ない事例の検証を追加する。湖西市は静岡県浜松市の西に浜名湖を挟んだ都市であり、自動車関連産業企業が多く存在している。

湖西市における南海トラフ地震による津波の想定浸水を浜松市同様内閣府のデータより10m メッシュにて示すと図 61 のようになる。特長として一部市域を除いて浜松市と比較し低地面が少ないため津波浸水被害は新居町以外比較的影響が少ない。しかし、新居町ではほぼ町内全体が浸水の被害を受けることから何らかの対策が必要とされる。そこで新居町に対して WAVE システムの設置による対応の可能性を検討する。

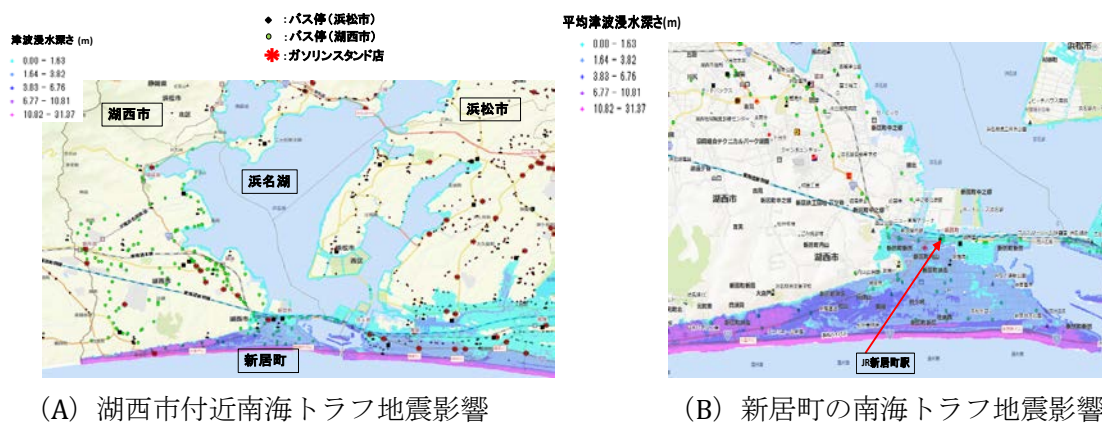


図 61 湖西市における南海トラフ地震津波浸水想定

湖西市における南海トラフ地震津波浸水想定

問題となる新居町での駅を中心とした半径 1～2km の範囲におけるバス停に WAVE 基地局を設置した場合の「空間カバー率」を求めた結果を図 62 に示す。

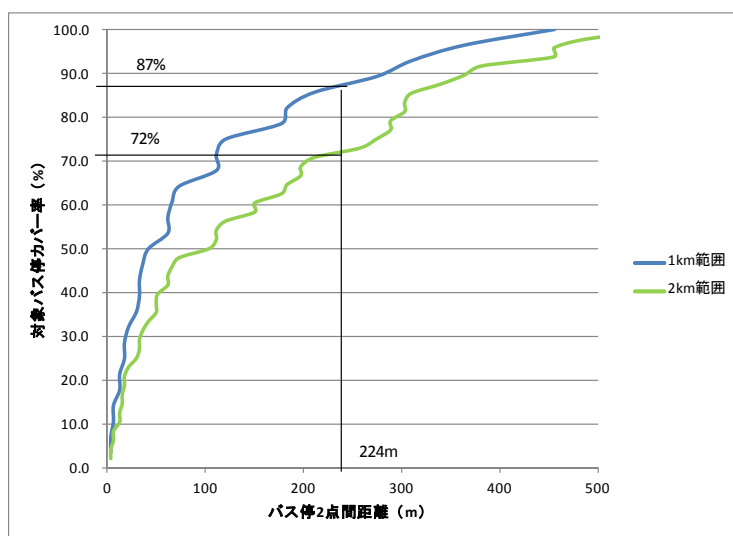


図 62 新居町バス停の WAVE による空間カバー率

シミュレーション結果はバス停の WAVE 化で新居町駅から 1km で 87%、2km で 72%と

なり十分な「カバー率」とは言えない状況が判明した。そのため浜松市高塚駅にて検討した RSE の設置個所の拡大としてガソリンスタンド、付近の学校、郵便局、警察署、公社を検討したところ図 63 に示す通り「空間カバー率」の大きな改善となる適当な設置個所が見当たらなかった。これにより別途 WAVE 基地局の新規設置を検討する必要性が出てくる。

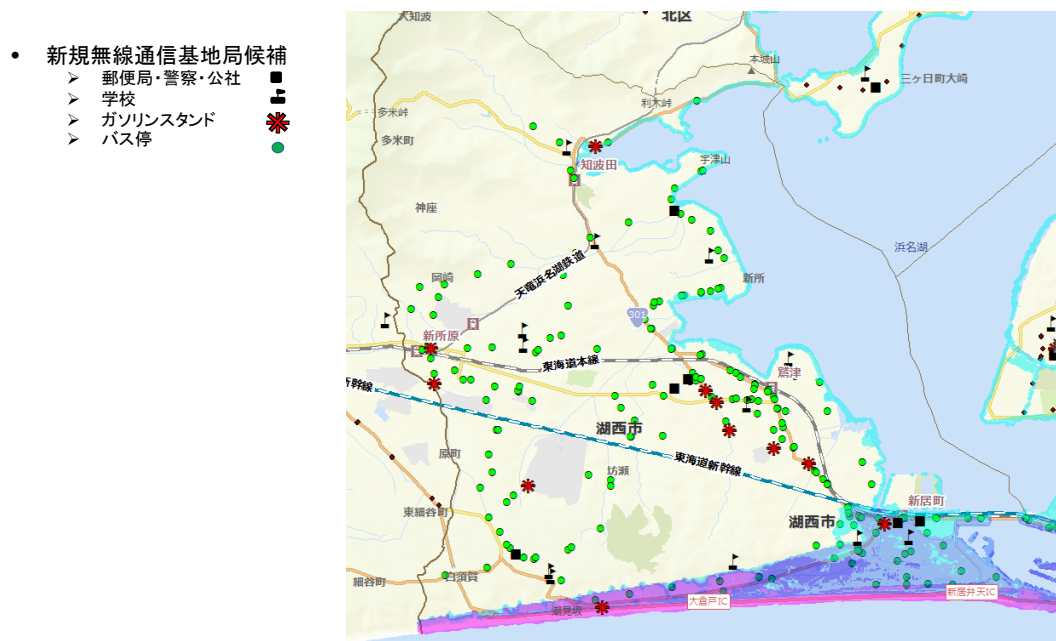


図 63 湖西市の RSE 拡張候補の検討

WAVE 基地局の新規設置に関しては、極力目的の「空間カバー率」を得るために効率的な手法である必要がある。

そこで対象となる新居町に例えば 700MHz 帯 WAVE の通信直径 448m より小さい 250m のメッシュ空間で区別を行なう。そのメッシュ内に存在する WAVE 基地局 (RSE) の数により区分判定を行う (図 64 (A))。そこへ RSE の設置候補として、現在 RSE が存在するメッシュ領域に、現在 RSE が存在しないメッシュとが重なる領域を求める。これは次に設置する RSE により、通信可能な RSE が存在するメッシュに近いメッシュ範囲内に設置するのが最も効率よく追加する RSE との通信が確保できる領域を得られることによる。その領域を RSE が存在している領域との位置関係を図 64 (B) に示す。この手法により新規に RSE を設置すべき領域候補を選び出すことができ、その候補領域を図に表すと図 65 のように求まる。今回の手法を用いることで、インフラ設備の少ない箇所においても、所要となる「空間カバー率」が得られるよう順次設置することを容易に判定できることになった。

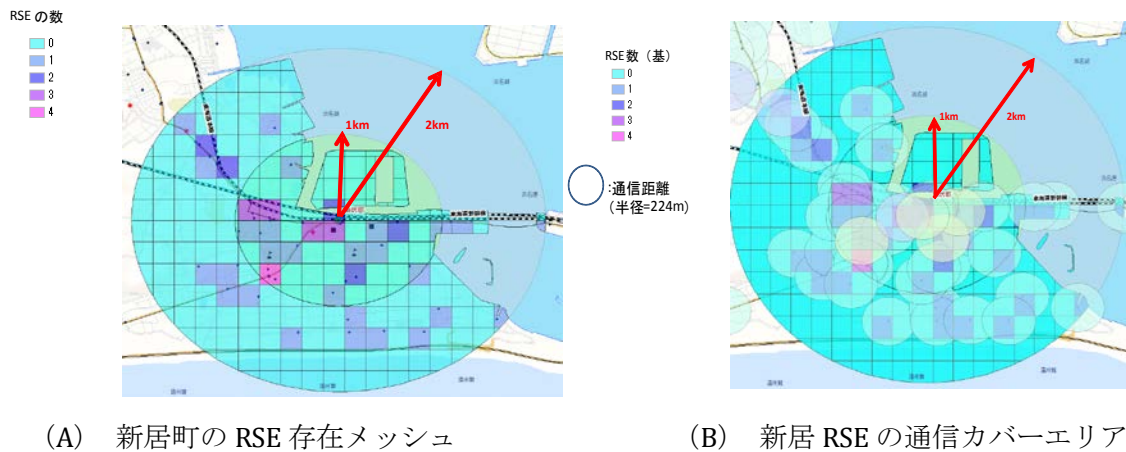


図 64 新居町の RSE 存在メッシュと通信カバーエリア

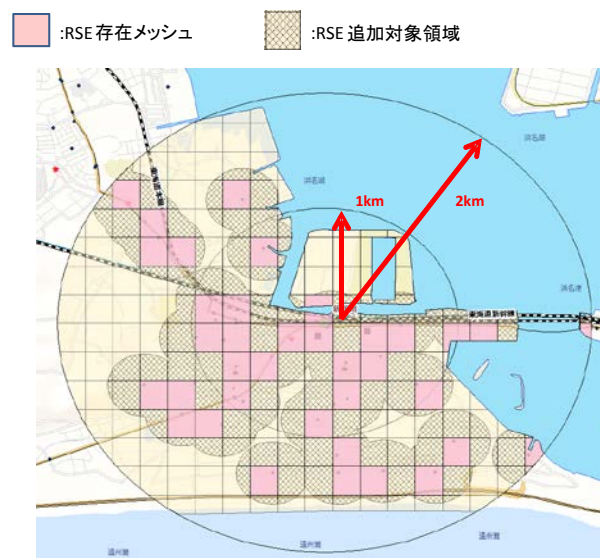


図 65 新居町の新規 RSE 設置候補領域

以上から、WAVE の環境モニタポストとして地域に適当に配置することで、災害発生時（地震による津波）の減災支援ツールへの役割が重要となることを示した。一般的に大規模災害が発生した際、初期避難が被害を少なくすることに効果的であることを我々はすでに過去の例から学んでいる。こうした新しい技術の有効活用は、災害に強いまちづくりとして期待が持てると考える。また、平常時には交通安全やバス停の例に見るように運行管理等への活用として役立つことはすでに示した通りである。

第6章 まとめ

本論文は、筆者が開発に携わってきた次世代車載無線技術（WAVE）システムに関して、開発の主目的であった交通事故死亡者数削減および交通渋滞緩和に向けた検討からネットワーク領域としての観点から、WAVE 技術の有効性を確認することを目的としてスタートした。そのため近年の交通事故分析から交通事故の主要原因が市街地における交差点での出会い頭衝突事故となっていることが調査で明確となった。一方で、こうした交通事故は先進国よりも、むしろ新興国において著しい状況であることも調査結果から歴然とした事実となっている。さらに、新興国では経済発展が著しい反面、道路整備等の交通インフラ網整備にかかる予算の制限もあるために十分ではなく、結果交通渋滞によるエネルギーの無駄な消費や排気ガス等による環境破壊も目に見える状況にすらなってきた。

そのため、新興国への WAVE 技術の応用を最初に検討すべく、なかなか実態がつかめない新興国の交通を解析することを行った。2014 年 10 月よりインドの最西部に位置するグジャラート州アーメダバード市において、初めて市内の交通状況を把握し道路混雑を避けるためのリアルタイムに交通情報を提供するインド ITS 事業を立ち上げた。複数の道路に設置した画像トラフィックカメラにより把握した交通状況を、道路に設置した電子情報板に提供し、ドライバーに混雑を避けるよう促すために交通情報の提供サービスを行うものである。これによりこれまで見えなかった交通状況の把握と、得られたデータの解析から詳細な交通特性が可視化されることに成功した。

インドの交通情報を 2 ヶ月にわたる長期の計測によるビッグデータ解析を行うことで、交通基本特性を求めること手法を確立した。その中で、交通工学のこれまで一般とされてきた交通量(q)－交通密度(k)特性に、新興国ならではのユニークさの発見があった。これは実際に観測されたデータの分布から、 q － k 特性に一定の境界線が存在しており、この境界線が対象とする道路の自由流領域を表すものとなっていることを突き止めた。また、渋滞領域は境界線より内側に存在しており、 q － k 曲線上に必ずしも存在していないことも発見することができた。この境界線を外挿することで対象となる道路の交通基本特性を導き出すことで、交通の定量化を式で表すことができ、これにより新興国での交通基本特性を求めることができるようになった。一方で、この交通基本特性を用い、実際の平均車速と自由速度との比により、新興国での交通渋滞を示すパラメータとして有効であることを証明した。このことから今回対象とした次世代車載無線技術である WAVE の導入により、これまでの画像トラフィックカメラでとらえていた交通情報からリアルタイムで正確な数字を出す可能性が見えてきた。

そして WAVE システムの通信技術そのものの自体の解析として他の高速無線通信技術との比較を同一環境、同一手法を用い、新たなネットワークとして注目されている”Fog computing”にこの WAVE 技術が最適であると同時に、将来の自然災害等にも WAVE 技術の応用により、環境モニタセンサとして役割を検証し、他の高速移動体通信技術との差を定量化することで、WAVE 技術の有効性をまとめることができた。

6.1 WAVE 技術の有効性

一番目に、WAVE の新興国への応用である。これは経済の発展に伴い輸送ニーズの増加が顕著となっている。とりわけインド国、中国をはじめとする東南アジア地域での交通渋滞がますます深刻な状況にあり、インド国グジャラート州アーメダバード市における 2 ヶ月の ITS 実証事業での交通流解析から、これまでなかなか交通状況の実態把握が困難であった環境での交通基本特性把握を実施した。これにより交通の流れを把握するプローブ情報の重要性和交通渋滞の把握の手段として現在採用されつつある交通モニタカメラによる画像認識から、将来の WAVE システムの導入により新興国においても広く交通マネジメントが行なえるようになる展望も見えてきた。これにより先進国にて開発された WAVE 技術であるが新興国においても交通状況をより正確に把握できるための手段として期待がでる。図 19 に示した新興国における交通マネジメントのイメージを図 66 として再掲する。

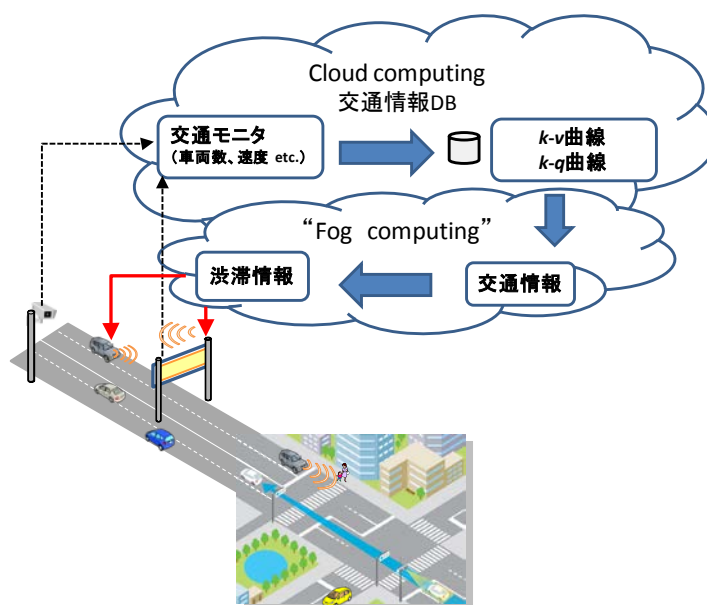


図 66 新興国における交通マネジメントイメージ

二番目に、新しいネットワークへの対応がある。次世代車載無線通信技術として開発された WAVE 技術を含む各種高速移動体通信技術に対して、使用される環境を自動車分野に絞るとともに、先行研究にて規定された都市環境道路モデルに準拠し、対象とするエリアのネットワーク最適化の手法をもとに定量解析し、WAVE 技術の位置付けと役割を明確化した。さらにすべての「モノ」がネットワークにつながることで快適さと便利さが一層確保されることで新たなサービスの提供が期待されている IoT の世界が広がりつつあり、ネットワーク化されることで人を介することなく最適な制御を行なう M2M が可能となる。一方で多量のデータがネットワーク経由クラウドに接続されることになるためすべての処理を一様に処理することは困難が伴うだけでなく、効率も悪くなる。そのため、すべてをクラウドで処理するのではなく、端末とクラウドの中間に狭い範囲ではあるが緊急に処理が可能な「Fog computing」としての存在の必然性が生まれてきた。これらの解析から交通事故削減や交通渋滞緩和として開発された WAVE 技術が対象とする限定された範囲での緊急性に対応できる特長が「Fog computing」として生かされることを見てきた。また、交通渋滞管理や運転支援への展開については広い範囲での交通情報が重要であるためこれまでのクラウドとの連携が必要となる。これをイメージ的にまとめると図 67 のように表わすことができる。

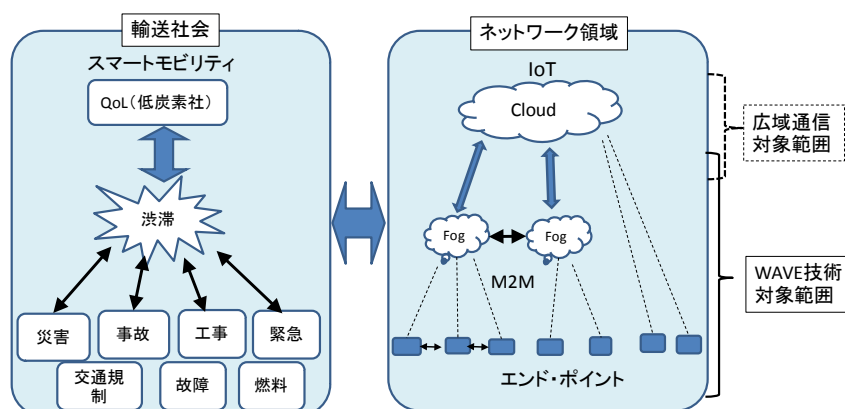


図 67 輸送社会とネットワーク技術の関係

最後に、WAVE 技術 QoL としての応用である。WAVE 技術活用の主要目的である交通事故の多くの要因である交差点における出会い頭衝突への支援に着目し、具体的に主要交差点への WAVE 基地局の配置を道路のカバー率と通信範囲を考慮した空間カバー率による大都市圏（東京 23 区）および地方都市（浜松市）における定量解析を行なった。これにより主要交差点への WAVE 配置では交差点における交通事故への対策としての効果は発揮できるものの、今後全車両への WAVE システム導入が検討されるなか、WAVE システムの特長を生かしたさらなる応用を公共交通機関であるバスおよびバス停への導入をイメージした検討を行なった。これによる交通マネジメントへの WAVE 技術の応用からさらに地域情報の配信および災害時へのセンシングとしての活用の可能

性を示した。このことは WAVE 技術の地域住民に対する生活の向上や災害時における命を守るためのツールとしての可能性を示すことで QoL への応用としての活用が期待できる。まとめとしてのイメージを図 68 に示す。

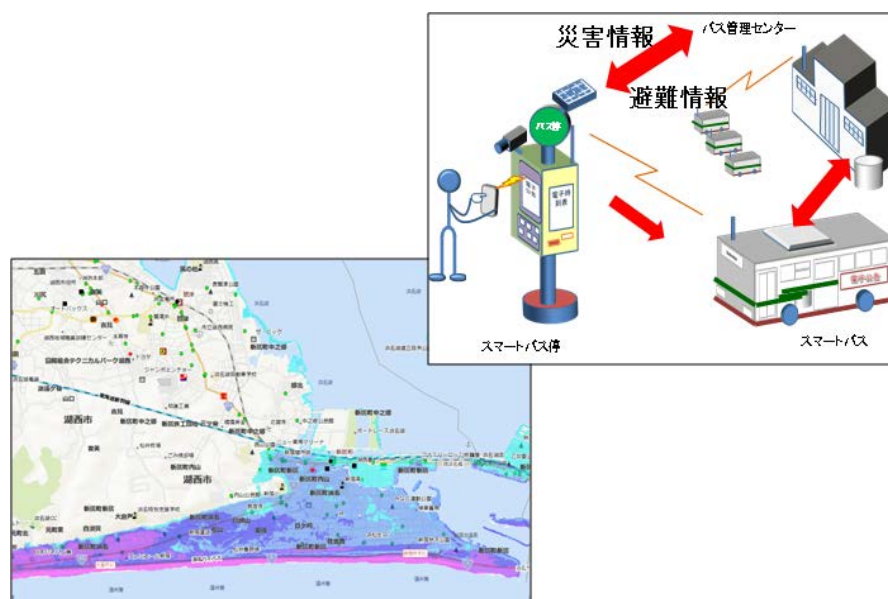


図 68 WAVE システムの地域応用例

6.2 今後の課題

本研究では、先進国を中心に開発実証されている次世代車載無線通信技術（WAVE）の新興国への適用を考える上で、新興国の代表でもあるインド国の一都市にて行われている ITS 事業をもとに交通解析を行った。本技術の普及には時間がかかることも想定されるものの、新興国の交通特性の把握を可能にした点は意義のあるものとなっている。その上で、WAVE 技術の優位性をネットワーク比較の実施、環境センサモニタへの応用を示し、将来への QoL 応用への貢献できる役割に触れることができた。

またインド国においては 2016 年から「100 スマートシティ」施策が展開され、インド国内の 100 都市に様々なスマートシティ構築を政府主導で行なう動きがでており、交通問題に対する意識も高まっている。

今後の技術的課題として、実際の WAVE システムの設置は環境条件によりさまざまな制約もあり、具体的社会実装においては以下のような課題を暫時解決する必要があり、継続的な研究推進課題として扱いたい。

1. WAVE システム通信特性改善
 - 1)基地局設置個所における通信指向性による改善（交差点での通信範囲拡張）
 - 2)車載機の電波干渉に対する適切な送信出力制御の確立
 - 3)市街地における電波反射対策（マルチパス）（マルチアンテナ等）
2. WAVE 基地局設置個所
 - 1)主要交差点以外への設置拡大の検討
 - 2)非常時における電源確保
 - 3)非常時における送信出力の拡大（非常時での法的制約等）
3. 標準化と拡大
 - 1)国内規格と世界規格との国際協調性の確保
 - 2)700MHz 帯を含むサブ GHz 周波数の世界的利用の検討
 - 3)交通マネジメント以外の応用拡大の具体的検討
4. 他の新興国都市の交通解析
 - 1)インドアーメダバード市のさらなる継続した交通流解析
 - 2)インドにおける他の交通都市における継続した交通流解析
 - 3)インド以外の新興国における同様な交通解析の可能性の検討

上記以外にも検討項目は存在すると思うが、1. 2)、3. 1)に関して付録資料 7、付録資料 6 にて一部検討を行なった項目を紹介する。また、4.1)に関しては、2014 年 10 月に開始したインド ITS 事業が継続しているとともに、市行政から同市への事業拡大の案件もいただいております、さらなるデータの積み上げと解析の正確性に関しても行っていくものと期待ができる。

図表一覧

2 章

- 図 1 無線通信技術の位置付け
- 図 2 車両登録数と交通事故死亡数の相関関係
- 図 3 国別の車両登録数と交通事故死亡者数
- 図 4 全国交通事故死亡者数（2014 年度）
- 図 5 全国車両登録数と交通事故死亡者数の相関関係
- 図 6 道路形状別交通事故状況（2014 年度）
- 図 7 事故類型別交通事故件数の推移
- 図 8 国内カーナビの年間出荷台数

- 表 1 世界の交通事故死者数
- 表 2 人口 10 万人当たりの交通事故死者数
- 表 3 世界の車両登録数
- 表 4 車両登録数と交通事故死亡数との関係
- 表 5 自動車分野対応可能な広域通信仕様
- 表 6 主な無線 LAN 規格
- 表 7 国内車載無線通信規格
- 表 8 国内 WAVE 仕様
- 表 9 世界 WAVE 技術の仕様まとめ

3 章

- 図 9 アーメダバード市 ITS 実証システム概要
 - 図 10 アーメダバード市 ITS 装置設置箇所
 - 図 11 カメラ#1 の時間帯交通量（2015 年 6 月）
 - 図 12 カメラ#1 の時間帯別速度（2015 年 6 月）
 - 図 13 カメラ#1 における交通特性（ $k-v$ 曲線、 $k-q$ 曲線）
 - 図 14 一般的な $k-v$ 曲線と $k-q$ 曲線
 - 図 15 カメラ#1 の $k-v$ 曲線と近似式
 - 図 16 カメラ#1 の近似線と交通基本特性
 - 図 17 カメラ#1 における $k-v$ 曲線と各種近似式
- 表 10 カメラ#1 の各種近似式

写真 1 インド ITS システムの VMS 拡大写真

写真 2 公共広告表示の情報板写真

4 章

- 図 18 交通基本特性と交通領域
- 図 19 地域交通渋滞マネジメントイメージ
- 図 20 地域交通渋滞マネジメントイメージ
- 図 21 アーメダバード市交通データ比較（交通量、交通密度）
- 図 22 アーメダバード市車両速度比較
- 図 23 各測定点での v_{ave}/v_f 比
- 図 24 カメラ#2 の交通量と車速の時間推移（2015 年 2 月）
- 図 25 カメラ#2 の交通量と車速の時間推移（2015 年 6 月）
- 図 26 カメラ#2 の 2015 年 6 月 $q-k$ 曲線
- 図 27 カメラ#2 の車速比変化による $q-k$ 曲線分布
- 図 28 2 月—6 月車速比変化
- 図 29 アーメダバード市交通量変化マップ
- 図 30 カメラ#2 の時間帯別車速比（2015.6）
- 図 31 カメラ#3 の時間帯別車速比（2015.6）
- 図 32 カメラ#2 の $q-k$ 特性と渋滞領域
- 図 33 時間単位サンプリング $k-q$ 曲線
- 図 34 カメラ#2 の交通特性検証
- 図 35 カメラ#2 の曜日別 $k-q$ 曲線
- 図 36 アーメダバード市交通量変化マップ
- 図 37 並行平板間の流れ
- 図 38 層流と乱流

- 表 11 2015 年 2 月交通パラメータ
- 表 12 2015 年 6 月交通パラメータ
- 表 13 アーメダバード市の交通量変化
- 表 14 アーメダバード市交通特性パラメータ
- 表 15 アーメダバード市車速比（平日観測データ）
- 表 16 国内における渋滞の判定例
- 表 17 カメラ#2 における平日車速のウェルチ検定
- 表 18 カメラ#6 における平日車速のウェルチ検定
- 表 19 カメラ#1 における平日車速のウェルチ検定
- 表 20 カメラ#3 における平日車速のウェルチ検定

5 章

- 図 39 “Fog computing” の概念と位置付け
- 図 40 WAVE フィールド画像転送実証試験
- 図 41 WAVE フィールド試験結果
- 図 42 WAVE アクセスモデル
- 図 43 対象ネットワーク内通過車両のアクセス
- 図 44 道路モデルによる WAVE 定量評価結果
- 図 45 中心市街地モデルでの WAVE と広域通信定量評価結果
- 図 46 WAVE による” Fog computing” の位置付け
- 図 47 東京 23 区における主要交差点への RSE 設置イメージ
- 図 48 都心 3 区における RSE カバー率と通信範囲
- 図 49 都心 3 区における交通事故発生状況と道路長 (km) 当たりの発生割合
- 図 50 浜松市内主要交差点の位置
- 図 51 地域交通情報とネットワーク
- 図 52 空間カバー率イメージと基地局間距離とカバー率
- 図 53 浜松駅を中心とした交差点の空間カバー率 (半径 2 キロメートル)
- 図 54 浜松市のバス停位置
- 図 55 浜松市内のバス停 RSE 設置による空間カバー率 (浜松駅中心)
- 図 56 高塚駅周辺バス停 RSE による空間カバー率
- 図 57 南海トラフ地震津波浸水予測
- 図 58 浜松市付近南海トラフ地震津波浸水予測とバス停配置
- 図 59 浜松地域のバス停およびガソリンスタンドの配置
- 図 60 高塚駅周辺バス停およびガソリンスタンドの RSE 設置による空間カバー率
- 図 61 湖西市における南海トラフ地震津波浸水想定
- 図 62 新居町バス停の WAVE による空間カバー率
- 図 63 湖西市の RSE 拡張候補の検討
- 図 64 新居町の RSE 存在メッシュと通信カバーエリア
- 図 65 新居町の新規 RSE 設置候補領域

- 表 21 700MHz 帯 WAVE 解析諸元
- 表 22 5GHz 帯 WAVE 解析諸元
- 表 23 道路モデルによる WAVE 定量解析結果
- 表 24 広域通信解析諸元と解析結果
- 表 25 WAVE の機能とネットワーク領域
- 表 26 東京 23 区 WAVE 基地局

- 表 27 東京 23 区 WAVE 基地局（改定）
表 28 主な都道府県別交通事故状況（平成 24 年）

6 章

- 図 66 新興国における交通マネジメントイメージ
図 67 輸送社会とネットワーク技術の関係
図 68 WAVE システムの地域応用例

付録資料 1

- 付図 1 中心市街地道路モデル
付図 2 都心部道路モデル
付図 3 副都心部道路モデル
付図 4 郊外道路モデル
付図 5 広域通信の中心市街地道路モデル

- 付表 1 広域通信のセル範囲収容車両数（中心市街地道路モデル）

付録資料 3

- 付図 6 シングルナイフエッジモデル
付図 7 回析時の環境条件
付図 8 回析時伝搬損失 理論計算結果
付図 9 反射波の 2 波モデル
付図 10 見通し内伝搬損出実測結果
付図 11 回析時伝搬特性 実測結果と理論値
付図 12 700MHz 帯 WAVE 交差点・出会い頭衝突シーンの実験環境
付図 13 交差点・出会い頭衝突シーン実験環境のパラメータ
付図 14 パラメータ（ h_{sld} 、 $d1$ 、 $d2$ ）算出図形
付図 15 700MHz 帯 WAVE 実験結果と理論値の比較
付図 16 5.8GHz 帯回析時伝搬特性
付図 17 2.4GHz 帯回析時伝搬特性
付図 18 700MHz 帯回析時伝搬特性
付図 19 めれたアスファルト道路での見通し外通信による停止可能距離比較

- 付表 2 反射波 2 波モデル伝搬特性実測条件
付表 3 反射波による影響確認
付表 4 周波数別通信による出会い頭衝突検討諸元

付表 5 周波数別通信の電力と回析時最大通信距離

付表 6 車速とぬれたアスファルト道路における停止距離

付録資料 4

付図 20 700MHz 帯 WAVE のバス停基地局化

付図 21 バス停・バス間における通信フレーム

付図 22 車速に対する通信可能データ量（半径 224m のセル内）

付図 23 バス停 RSE によるバス運行管理アプリケーション構成図例

付図 24 広告のアプリケーションシステム構成例

付図 25 運転者管理支援アプリケーションシステム概要

付図 26 安否確認サービスのシステム概要例

付表 7 WAVE システムの地域応用例

付表 8 バス運行管理サービス

付表 9 バス運行管理通信概要

付表 10 広告（サイネージ）サービス概要

付表 11 広告（サイネージ）サービス通信概要

付表 12 運転者管理支援サービス概要

付表 13 運転者管理支援システム通信概要

付表 14 安否確認サービス概要

付表 15 安否確認システム通信概要

付録資料 5

付図 27 ETSI における M2M の位置付け

付図 28 ETSI における M2M の応用

付図 29 ETSI における M2M 規格

付図 30 ETSI 規格における自動車 M2M の応用例 1

付図 31 ETSI 規格における自動車 M2M の応用例 2

付録資料 6

付図 32 700 帯 WAVE の都市環境と変調方式による必要帯域幅

付図 33 700MHz 帯 WAVE システムのマルチチャネル化拡張

付図 34 700MHz 帯 WAVE における国際協調性対応例

付表 16 WAVE システムの仕様比較まとめ

付表 17 700MHz 帯 WAVE のフレーム構成

付表 18 16QAM 変調に必要な帯域幅

付表 19 700 帯 WAVE の変調方式と周波数効率の関係

付録資料 7

付図 35 隠れ端末解析モデル例

付図 36 700MHz 帯 WAVE の伝搬特性

付図 37 700MHz 帯 WAVE の送信出力とセル半径

付図 38 送信電力とセル内車両数 ($\rho=1000$ の場合)

付図 39 所要 DUR と干渉車両数

付図 40 伝送速度とフレーム長の関係仕様

付図 41 各通信環境におけるパケットエラー率と車両数の関係

付図 42 所要のパケットエラー率となる伝送速度と許容車両数の関係

付図 43 セル半径と最大許容干渉車両数

付図 44 セル半径と最大許容干渉車両数 (車両密度見直し)

付表 20 700MHz 帯 WAVE の仕様

付表 21 700MHz 帯 WAVE 伝搬特性回線設計緒元

付表 22 中心市街地での隠れ端末車両処理可能数とセル半径

付表 23 中心市街地道路モデルとセル半径別車両密度

付表 24 中心市街地での隠れ端末車両処理可能数とセル半径 (車両密度に直し)

付録資料 8

付図 45 交通事故死者数、車両登録数の人口に対する相関関係

付表 25 世界交通事故死者数と車両登録数および人口

付表 26 人口を変量とした交通事故死者数および車両登録数の差分

謝辞

本論文をまとめるにあたって全体で指導頂いた愛知県立大学大学院情報科学研究科小栗宏次教授、河中治樹准教に感謝いたします。

また、無線通信技術のセル設計から評価手法における専門的アドバイスを頂いた（株）サイバー創研吉川憲昭博士および故山田純博士、WAVE システム評価において実験実測および結果解析において共同作業いただいた元（株）日立情報通信エンジニアリング丸山哲弘氏、山田出氏、市川広輝氏、松本徳博氏に感謝いたします。さらに本研究推進にあたり温かく見守っていただいた元（公益財団法人）浜松地域イノベーション推進機構の津田紘氏ならびに同機構増田洋介氏に感謝します。

欧州における活動および標準化での情報および意見を頂いた Hitachi Europe Ltd. の Dr. Massimiliano Lenardi 研究所長、元 Renesas Electronics Europe の林正人博士にお世話になりました。また、欧州自動車カンファレンスにおいて Nets4Cars の Workshop Co-Chair で意見を頂いきお世話になった Halmstad University Dr.Alexey Vinel Professor に感謝します。

Geographic Information System（GIS：地理情報システム）および GIS ツールを用いた解析手法に関するサポートアドバイスを頂いた中央大学関口達也助教にお世話になりました。

インド国における JICA 民間提案型普及・実証事業の ITS 事業での共同推進およびデータ共有頂いた（株）ゼロサム菊池力氏および Zero-Sum ITS Pvt. India の B.Mallesha 氏に感謝します。

最後に陰ながら生活を支えてくれた妻孝枝に感謝します。

参考文献

第 2 章

- [1] ITS 情報通信システム推進会議, 「700MHz 帯を用いた運転支援システムと隣接システムとの周波数教養条件に関する技術資料」, ITS FRUM RC-007 1.0 版, 2009, pp.175-79
- [2] 徳田清仁, 「テレマティクスサービス実現に向けた DSRC 型通信システムの開発」, 沖テクニカルレビュー, 大 198 号, Vol.71 No.2 (2004), pp.64-7
- [3] 木村磐根、石尾秀樹、小川英一、他, 『光・無線通信システム』, 1998, p.124, オーム社に加筆
- [4] Alomari.A, Sumari.P, Taghizadeh.A, “A Comprehensive Study of Wireless Communication Technology for the Future Mobile Devices”, *European Journal of Science Research*, ISSN 1450-216X Vol.60 No.4 (2011), pp.565-573
- [5] Tsankov.B, Kassev.K, Pachamanov.R., “WLAN/WMAN Integration Architecture and Traffic Control For Voice Transmission”, *Information research and Applications, i-Tech 2008*, , pp.62-8
- [6] Venil.A,Chilamkurti.N, Koucheryavy.Y, “Scalability analysis of infrastructure networks for vehicular safety applications”, *International Conference on Connected Vehicles and Expo*, 2012, pp.124-7
- [7] Kalra.B, Chauhan.D.K, “A Comparative Study of Mobile Wireless Communication Network: 1G to 5G”, *International Journal of Computer Science and Information Technology Research*, ISSN 2348-1196 Vol.2, Issue 3 (2014), pp.430-3
- [8] 徳田清仁, 「EV 向け次世代 ITS 無線システムの研究」、電子情報通信学会, *Fundamentals Review* Vol.4 No.2, (2010), pp.136-42
- [9] Tsuboi, T. Yamada, J. Yamauchi, N. Yoshikawa, N., “Cell design for Next DSRC applications”, *Ultra Modern Telecommunications & Workshops, ICUMT'09* (2009), pp.1-5
- [10] Tsuboi, T. Yoshikawa, N., “WAVE design for next DSRC applications”, *Wireless Telecommunications Symposium (WTS)* (2010), pp.1-6
- [11] Gohs.A, Jana.R, Ramaswami.V, *et al*, “Modeling and Characterization of Large-Scale Wi-Fi Traffic in Public Hot-Spots”, *IEEE Infocom 2011*, pp.2926-26
- [12] Tsuboi.T, Yamada.J, Yamauchi .N, Yoshikawa.N, “Dual Receiver Communication System for DSRC”, *Future Generation Communication and Networking Vol.1* (2008), pp.459-64
- [13] Bonomi,F, “Connected vehicles, the internet of things, and fog computing”, *The Eighth ACM International Workshop on Vehicular Inter-Networking (VANET)*, Las Vegas, USA, (2011)
- [14] Bonomi.F, Milito.R, Zhu.J, Addepalli.S, “Fog computing and Its Role in the Internet of Things”, *Mobile Cloud Computing Workshop* (2012), pp.13-6

- [15] Roy.S, Bose.R, Sarddar.D, “A Fog-Based DSS Model for Driving Violation Monitoring Framework on the Internet of Things”, *International Journal of Advanced Science and Technology Vol.82* (2015), pp.23-32
- [16] Truong.N, Lee.G, Ghamri.Y, “Software Defined Networking-based Vehicular Adhoc Network with Fog Computing”, *International Workshop on Management of the Future Internet (ManFI)* (2015), pp.1202-7
- [17] 三輪富生、山本俊行、竹下知範、森川高行、「プローブカーの速度情報を用いた動的 OD 交通量の推定可能性に関する研究」、名古屋大学大学院、(2007)、
<http://www.trans.civil.nagoya-u.ac.jp/~miwa/paper/OD_NU_TM.pdf>、(2015.11.23 アクセス)
- [18] Salim.A, Vanajakshi.L, Subramanian.C, “Estimation of Average Space Headway under Heterogeneous Traffic Conditions”, *International J. of Recent Trends in Engineering and Technology, Vol. 3, No. 5*, (2010)
- [19] World Health Organization,” Number of road traffic deaths”, *Global Health Observatory (GHO) data*, 2010.
<http://www.who.int/gho/road_safety/mortality/traffic_deaths_number/en/>
(2015/07/31 アクセス)
- [20] 総務省統計局, 『政府統計の総合窓口 平成 26 年中の交通事故死者数について』 <
<<http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?lid=000001128896>> (2015・07・31 アクセス)
- [21] 総務省統計局, 『政府統計の総合窓口 平成 26 年中の交通事故死者数について』 <
<<http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?lid=000001128896>> (2015・07・31 アクセス)
- [22] 一般財団法人 自動車検査登録情報協会, 『自動車保有台数』, <
<<https://www.airia.or.jp/publish/statistics/number.html>> (2015/08/03 アクセス)
- [23] 木村磐根、石尾秀樹、小川英一、他, 『光・無線通信システム』,1998, p.124, オーム社に加筆
- [24] 松岡久司, 中森武志. 飯塚洋介,小川真資,「HSPDA 移動端末の開発および無線伝送特性」, 『NTT DoCoMo テクニカルジャーナル』 Vol. 14 No.3, 2006, p.15
- [25] 中森武志, 石川太郎,古沢祐之,澤田流布一,「グローバル展開を目指した LTE 対応端末通信プラットフォームの開発」, 『NTT DoCoMo テクニカルジャーナル』 Vol. 19 No.1, 2011, p.39
- [26] Ito.Y, Takeda.Y et all, “Developing and Commercializing Multiband RoF Equipment and Indoor Antennas”, *NTT DoCoMo Technical Journal Vol. 16 No.1*, 1008, p.35
- [27] 一般社団法人 電波産業会,『第 104 回 電波利用懇談会 移動通信技術・サービスの最新動向と今後の展望について』, 2013,

- <<http://www.arib.or.jp/osirase/seminar/no104konwakai.pdf>> (2015/08/07 アクセス)
- [28] WiMAX Forum, “WiMAX Forum Positioning paper for WiMAX Technology in the 700MHz band”, *WiMAX Forum document library*, 2008
- [29] 総務省, 『平成 26 年版 情報通信白書』, 2012,
<<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h26/html/nc141320.html>>
(2015/08/7 アクセス)
- [30] 一般社団法人 電子情報技術産業協会, 『民生用電子機器国内出荷統計』, 2015,
<<http://www.jeita.or.jp/japanese/stat/shipment/>> (2015/08/07 アクセス)
- [31] Japan Automobile Research Institute (JARI), (2014).” ITS 協調システムの情報項目の標準化に関する分析・検証 報告書” . pp.23-39
- [32] 電波産業協会 (2012) 『700MHz 帯高度道路交通システムの標準規格の概要について』, 第 94 回電波利用懇談会. pp.8-15

3 章

- [33] Bloomberg Business,” The Trouble With India”, (2007)
<<http://www.bloomberg.com/bw/stories/2007-03-18/the-trouble-with-india>>
(2015.11.24 アクセス)
- [34] Mohapatra.G, 「市内におけるウォークアビリティ確保計画」、CEPT 大学 (アーメダバード) 都市交通に関する CoE プログラム、(20013)
- [35] Grennshields B.D.:A Study of Traffic Capaci, Proc.H.R.B., 14, pp.448-477, (1935)
- [36] 河上省吾, 松井寛: 交通工学, 第 2 版, p.105, 森北出版 (2007)
- [37] Greenberg h., An Analysis of Traffic Flow, Oper. Res.(7), pp.79-85,1959
- [38] Underwood R.T, Speed, Volume and Density Relationships, in Quality and Theoryof Traffic Flow, Bureau of Highway Traffic, Yale University, pp.141-188

4 章

- [39] 坪井務、小栗宏次、「新興国における交通流解析」、情報処理学会論文誌 Vol.57 No.4 pp.1284-9 (2016)
- [40] 松岡祥浩、青山邑里、児島忠倫他、「流れの力学 —基礎と演習—」、コロナ社、pp.120、137-138、2013

5 章

- [41] Cisco Systems White Paper, “Fog Computing and the Internet of Things: Extend the Cloud to Where the Things Are,” (2015) p.3
<<https://www.cisco.com/web/solutions/trends/iot/docs/computing-overview.pdf>> (アクセス 2015.12.24)

- [42] Tsuboi.T, Yamada.J, et al, "Dual Receiver Communication System for DSRC", Future Generation Communication and Networking, (2008), pp.459-464
- [43] 佐藤勝善, 原田博司, 児島史秀, 他, 「3-4-2 ミリ波路車間通信技術」, 通信総合研究所季報 Vol.47 No.4, 2001, P.112
- [44] 秋丸春夫、川島幸之助, 『情報通信トラフィック —基礎と応用—』, p.41
- [45] 全国道路・街路時交通情勢調査, 「平成 22 年度 全国道路・街路時交通情勢調査 (道路交通センサス) 一般交通量集計表」
<<http://www.mlit.go.jp/road/census/h22-1/data/pdf/kasyo13.pdf>> (2015/08/28 アクセス)
- [46] 日経 SYSTEMS、『トラブル 110 番』, 日経 BP 社, 2000, p.190
- [47] Sakakibara.H, Usami.T, et al, "MODERATO (Management by Origin-Destination Related Adaptation for Traffic Optimization)", The 6th World Congress on ITS '99 Toronto
- [48] 長島靖、服部理、小林雅文、 「プローブ情報の活用による信号制御高度化」、S E I テクニカルレビュー・第 184 号 (2014)、pp.40-43
- [49] 谷口裕一、大田利文、小林雅文他、 「電波活用安全運転支援システム」、S E I テクニカルレビュー・第 184 号 (2014) pp.10-14
- [50] スマートフォン ITS コンソーシアム、 「自動車とスマートフォンの連携による新マーケットの創造」、< <http://www.kiic.co.jp/sitsc/about/index.html>> (2015.11.20 アクセス)
- [51] 坪井務、 「次世代車載無線通信技術 (WAVE) のシステム設計と市街地における安全・安心への応用に関する研究」、東京大学大学院、(2012)
- [52] 総務省統計局, 『政府統計の総合窓 平成 26 年中の交通事故死者数について』 <
<<http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?lid=000001128896>> (2015・07・31 アクセス)
- [53] 浜松市、 「平成 25 年 浜松市の交通事故発生状況について」、 p.5、
<https://www.city.hamamatsu.shizuoka.jp/douro/traffic/taisakukaigi/documents/zikojo_ukeyou.pdf> (2015.11. 19 アクセス)
- [54] Tsuboi.T, Oguri.K, "Advanced ITS Application for Natural Disaster Protection", International Journal of Computing and Network Technology Vol.1, No. 3, pp.159-170 (2013),
- [55] Tsuboi.T, Oguri.K, Sekiguchi.T, "ITS Base Station Optimized Allocation Design For Disaster Mitigation", International Journal of Research in Wireless Systems, Vol. 3, No. 1, pp.23-31, April, 2014
- [56] 内閣府の南海地震津波シミュレーションデータ(2012.8)10m メッシュより GIS 展開
<<http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/>>

付録資料 3

- [付1] RECOMMENDATION ITU-R p526-5 、 "PROPAGATION BY DIFFRACTION" 、
<https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.526-5-199708-S!!PDF-E.pdf>
(2015/10/15 アクセス)
- [付2] ITS 情報通信システム推進会議、「運転支援通信システムの標準化」、2009、
<http://www.acr.atr.jp/events/FRAN2009/download/ATR_FRAN_N1_Horimatsu.pdf>
(2015.11.3 アクセス)
- [付3] 総務省、「「ITS 無線システムの高度化に関する研究会」報告書（案）に対する意見募集の結果及び報告書の公表」、2009
< http://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/14422.html> (2016.4.20 アクセス)
- [付4] ITS 情報通信システム推進会議、「5.8GHz を用いた車車間通信システムの実験用ガイドライン」, ITS FORUM RC-005 1.0 版、pp.21-23、2009
- [付5] 江守一郎、「新版自動車事故工学」。技術書院、p.45、1993
- [付6] 清水勇男、岡本弘、「新訂交通事故捜査の基礎と要点」、令文社、(2003)、p.84
- [付7] 交通警察実務研究会編、「交通捜査実務パーフェクトガイド」、東京法令出版、p.104、2000

付録資料 4

- [付8] 電波産業会、「700MHz 帯高度道路交通システム陸上移動局の接続性確認に係る試験項目・試験条件」、技術資料、p.9、2012
- [付9] ソフトバンク、「FAQ 番号：80683 データ量の目安」、
<<http://faq.mb.softbank.jp/detail.aspx?cid=80683&id=e2b5a4c75616233576f646e57466b627448377733616e553841487077535061574b4271576b4d37446861733d>>
(2015.11.20 アクセス)

付録資料 5

- [付10] ETSI Technical Report, "Machine to Machine communications (M2M); Use cases of Automotive Applications in M2M capable networks", *ETSI TR 102 898 v1.1.1*pp.11-14, 2013

付録資料 6

- [付11] 総務省、沖電気、「狭帯域通信システム（DSRC）高度化技術に関する検討調査＜周波数ひっ迫対のための技術試験事務＞」2014
<<http://mic-its-conference.net/docs/oki.pdf>> (2015.11.13 アクセス)

付録資料 7

- [付12] 坪井 務, 山田 出, 吉川憲昭、「WAVE/DSRC システムにおける隠れ端末によるパケット衝突の影響理論値」、情報処理学会 2011-ITS-44(5)、pp.1-6 、2011
- [付13] 電波産業会、「700MHz 帯高度道路交通システム陸上移動局の接続試験に係る試験項目・試験条件」、ARIB TR-T20(1.1 版)、p.10、p.8、2012
- [付14] 総務省、「基本計画 移動通信システムにおける周波数の高度利用に向けた要素技術研究開発～超高速移動通信システムの実現に向けた要素技術の研究開発～」、別紙 1、
< http://www.soumu.go.jp/main_content/000013417.pdf> (2016.02.02 アクセス)
- [付15] 自動車研究所、「ITS 通信シミュレーション評価シナリオ (Ver 1.2)」、ITS シミュレータ利用促進検討委員会、pp.24-25、2012

付録資料

付録資料 1：ネットワーク定量解析パラメータ

5.1 節にて導入したネットワークの定量解析に必要な環境モデルを紹介する。道路モデルとして「ITS 情報通信システム会議」[1]をもとに以下の 4 種類の道路モデルを採用している。ただし、このモデル検討は 700MHzWAVE の開発の中で行なわれたため他のシステムにおいては換算が必要となるため、本節の後半に広域通信を含めた計算を示す。以下前提条件および 4 種類の道路モデルに関しては「ITS 情報通信システム会議」資料からの抜粋を示す。

【前提条件】

通信エリア

16QAM 1/2 の受信感度-77dBm を基準に伝搬損失 101dB の範囲内とし、伝搬距離は Extended-Hata SDR モデルによって以下の通り算出した。

- Metropolitan 224m
- Urban 224m
- Suburban 412m
- Rural 1362m

車両密度

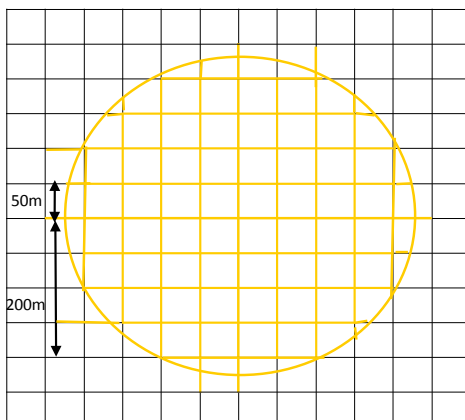
Greenshields の関数式を基に片側 3 車線及び片側 2 車線道路は渋滞流、片側 1 車線道路は自由流を想定し、以下の密度を適用した。

- 片側 3 車線 90 台/km
- 片側 2 車線 90 台/km
- 片側 1 車線 30 台/km

送信確率基準

OFDM (8.3MHz 幅) のシステムを想定し、変調方式 16QAM 1/2、パケットサイズ 200Byte の場合収容台数 299 台を基準とした。通信エリア内の車両台数が 299 台を上回る場合、送信確率は「1」を設定した。

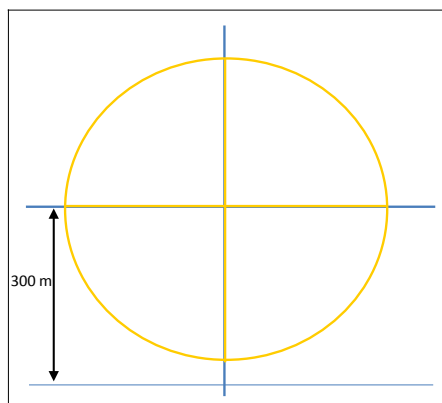
中心市街地：道路モデルとして付図 1 を用い、その他内訳は以下の仮定と計算による。



付図 1 中心市街地道路モデル

通信エリア（半径）	224m
通信エリア（面積）	$(0.22)^2 \times \pi = 0.15\text{km}^2$
通信エリアの道路長	
・ 片側 3 車線	$224 \times 4 \times 6 = 5376\text{m}$
・ 片側 2 車線	$100.8 \times 8 \times 4 = 3225.6\text{m}$
・ 片側 1 車線	$(166.3 + 200.4 + 218.3) \times 8 \times 2 = 9360\text{m}$
通信エリア内の車両台数	
・ $8602 \times 90 + 9360 \times 30 = 1055$ 台	

●都心部：道路モデルとして付図 2 を用い、その他内訳は以下の仮定と計算による。



付図 2 都心部道路モデル

通信エリア（半径）	224m
-----------	------

通信エリア（面積） $(0.22)^2 \times \pi = 0.15\text{km}^2$

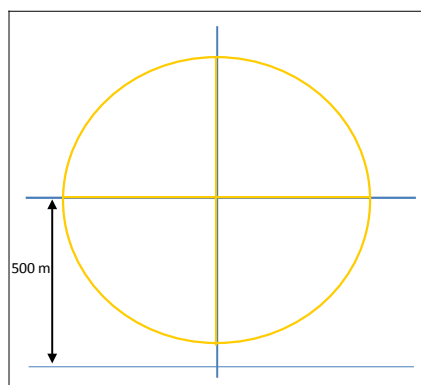
通信エリアの道路長

・片側 3 車線 $224 \times 4 \times 6 = 5376\text{m}$

通信エリア内の車両台数

・ $5376 \times 90 = 484$ 台

●副都心部：道路モデルとして付図 3 を用い、その他内訳は以下の仮定と計算による。



付図 3 副都心部道路モデル

通信エリア（半径） 412m

通信エリア（面積） $(0.41)^2 \times \pi = 0.53\text{km}^2$

通信エリアの道路長

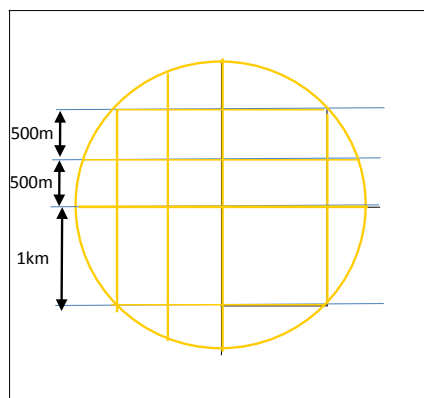
・片側 3 車線 $412 \times 2 \times 6 = 4944 \text{ m}$

・片側 2 車線 $412 \times 2 \times 4 = 3296 \text{ m}$

通信エリア内の車両台数

・ $8240 \times 90 = 742$ 台

●郊外：道路モデルとして付図 4 を用い、その他内訳は以下の仮定と計算による。



付図 4 郊外道路モデル

通信エリア（半径）	1362m
通信エリア（面積）	$(1.36)^2 \times \pi = 5.8\text{m}^2$
通信エリアの道路長	
・ 片側 3 車線	$1362 \times 2 \times 6 = 16344 \text{ m}$
・ 片側 1 車線	$(1362 \times 2 + 1266.9 \times 4 + 924.7 \times 8) \times 2 = 30378.4 \text{ m}$
通信エリア内の車両台数	
・	$16344 \times 90 + 30378 \times 30 = 2382 \text{ 台}$

（—以上までが抜粋—）

続いてユーザ呼量に関する値を求める。ユーザ呼量（ A_x ）は式（32）、（33）にて求められる。

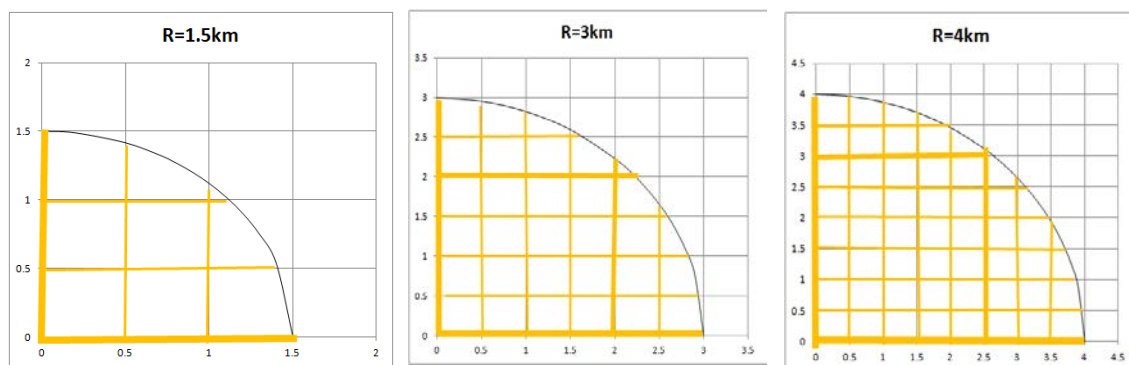
従って、セル半径（ R ）＝224m、平均車速（ v ）＝15km／時、集中率（ α ）＝0.5であるので、

$$A_x = 1 \times \left(\frac{2 \times R}{v} \right) \times \alpha = 1 \times \left(\frac{2 \times 0.224}{15} \right) \times 0.5 = 0.01493 \quad \text{付式 (1)}$$

同様に、セルサイズが異なる副都心部、郊外に関しての R を代入し第 5 章表 21（p.70）の解析諸元を得ることができる。

5GHz 帯 WAVE に関しては、700MHz 帯 WAVE の諸元をもとにセル半径の換算を行ない、表 22 の解析諸元を得ることができる。

続いて、広域通信における解析諸元を求める。セルサイズ（ R ）は第 5 章表 24（p.71）より、 $R=1500$ 、 3000 、 4000 の 3 種類となり、これを道路モデルに従い車両数を計算することになる。関心事は車両が集中する中心市街地になるので、中心市街地道路モデルをそれぞれのセル半径に対する収容車両数を算出する。そのための道路カバーの様子を 1/4 のモデル分として付図 5 に示した。また、対象となるセル範囲における収容車両数を求めると付表 1 のようになる。



付図 5 広域通信の中心市街地道路モデル

付表 1 広域通信のセル範囲収容車両数（中心市街地道路モデル）

セル半径 (km)	3車線長	2車線長	1車線長	車両密度 (台)
1.5	36	0	40.52	4455
3.0	72	71.6	160.69	17740
4.0	96	110.9	308.07	27859

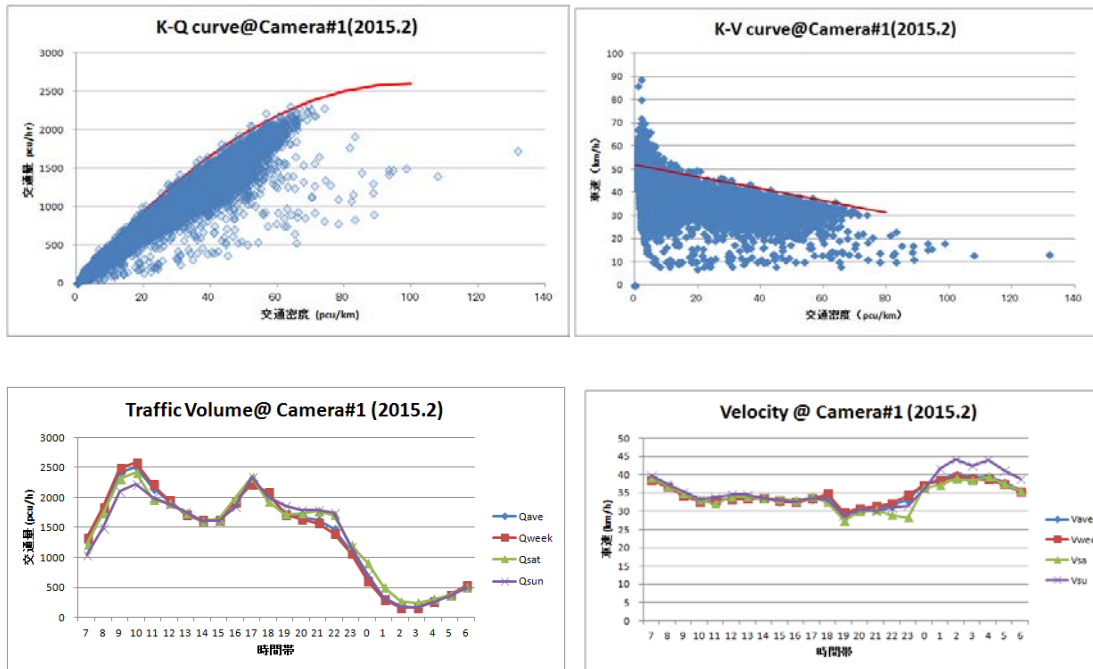
以上より、第 5 章の図 45（p.72）の結果が得られる。

付録資料 2：インド交通基本特性データ

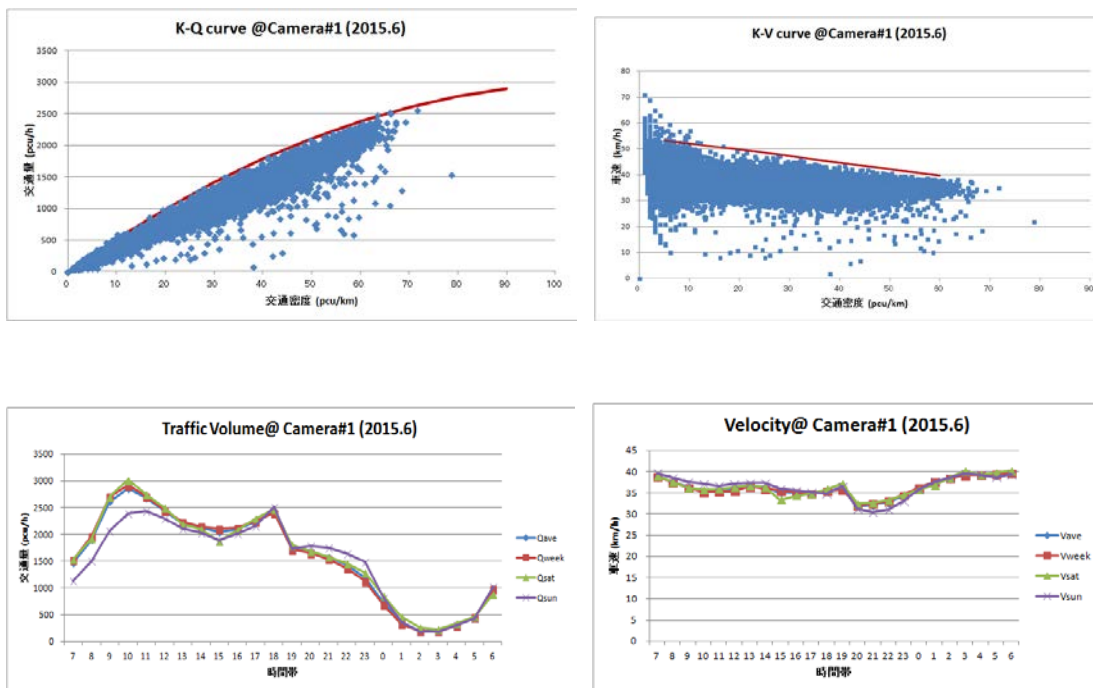
数が多いため図番は省略。

【カメラ#1】

2015 年 2 月

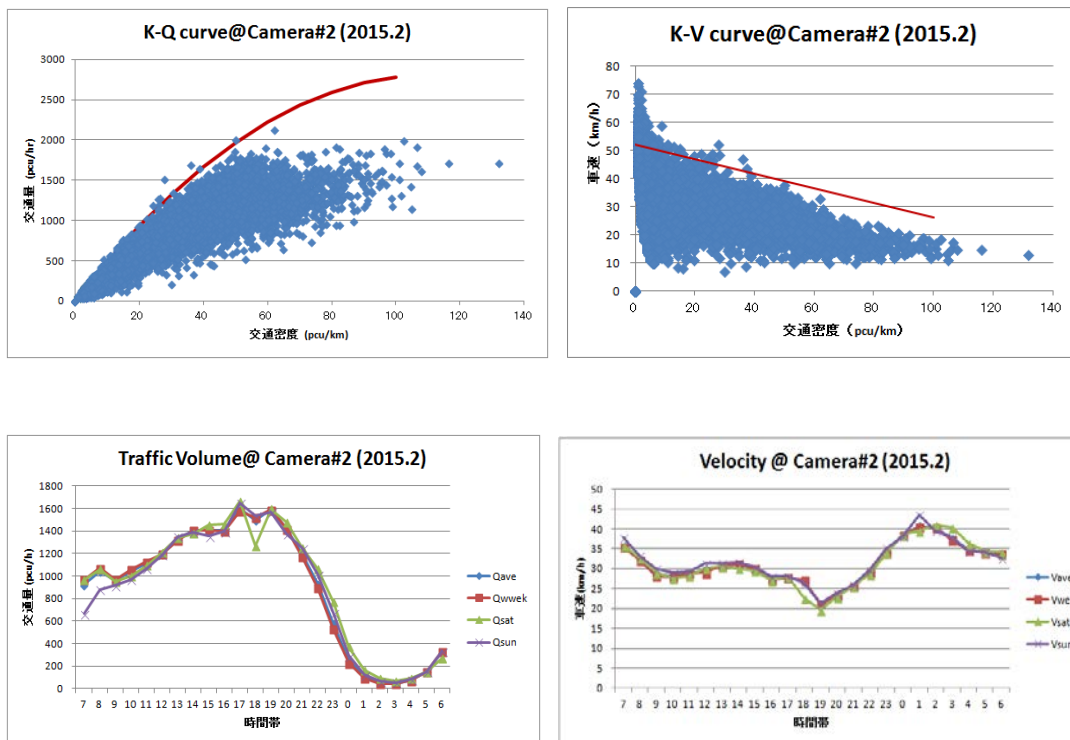


2015 年 6 月

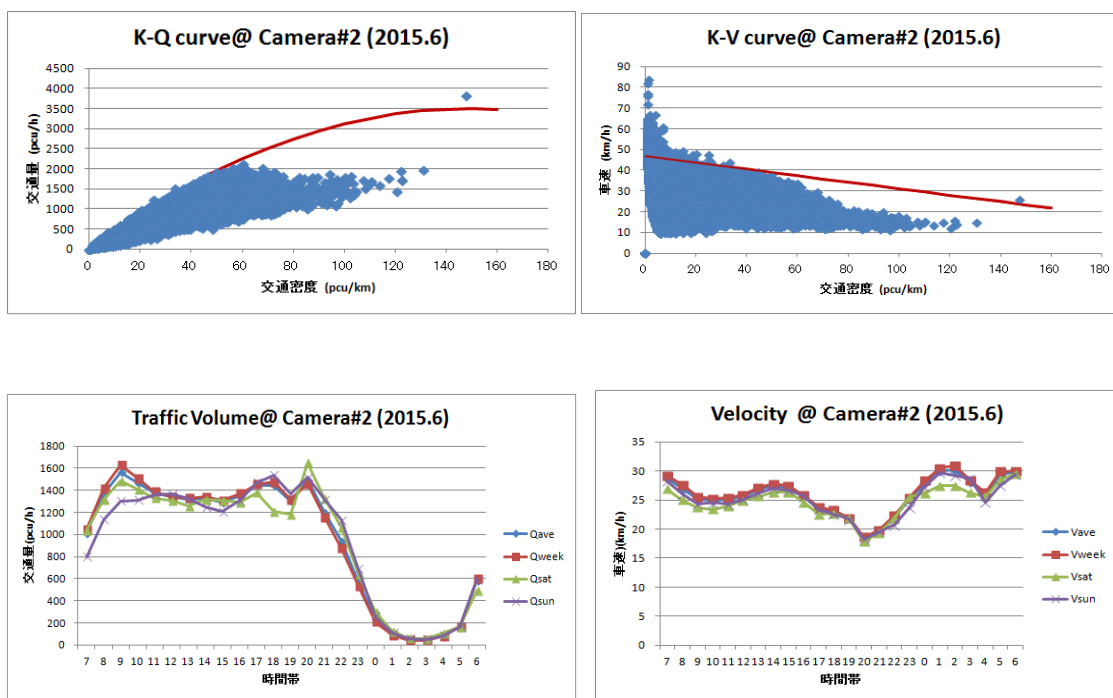


【カメラ#2】

2015 年 2 月

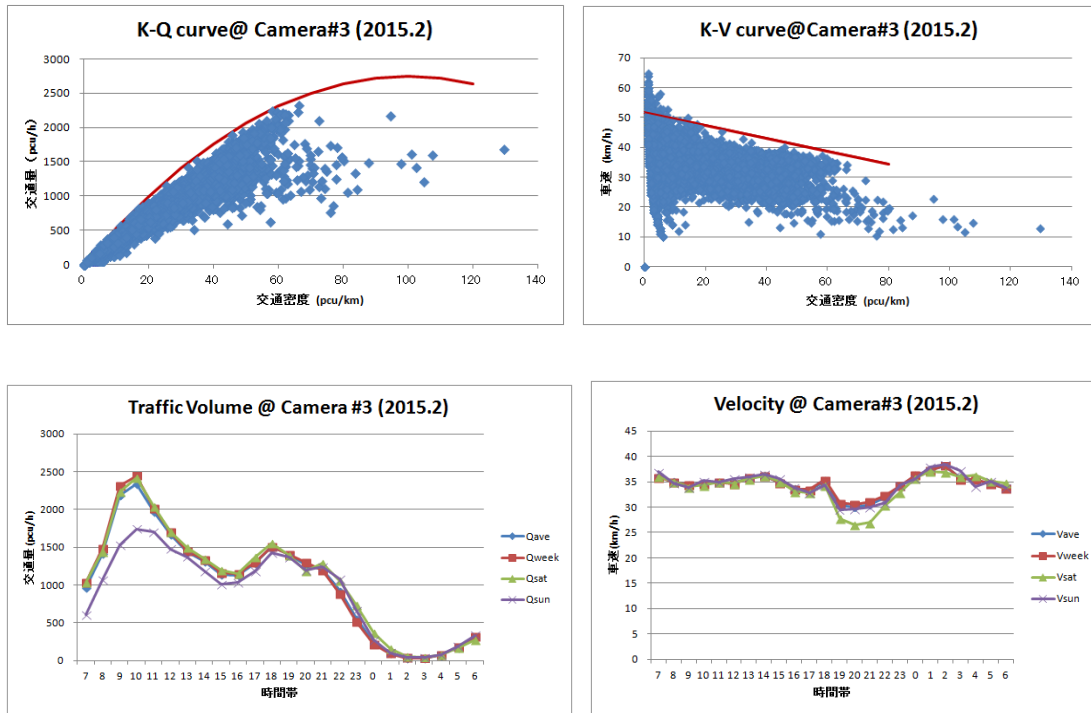


2015 年 6 月

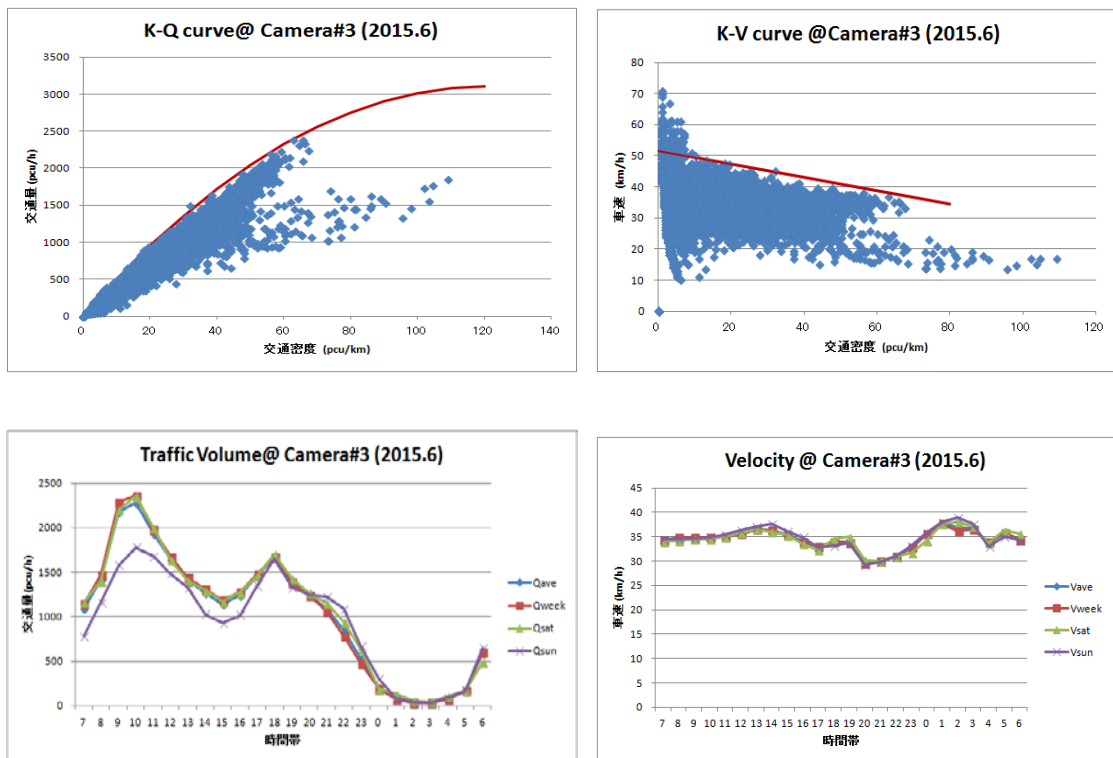


【カメラ#3】

2015 年 2 月

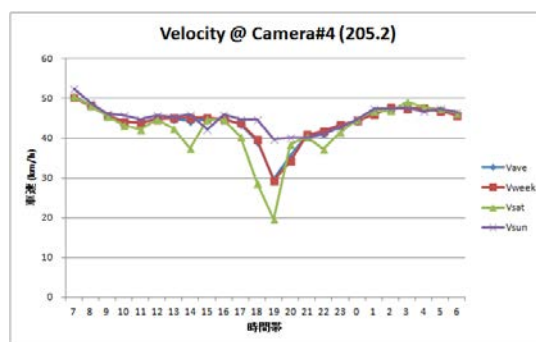
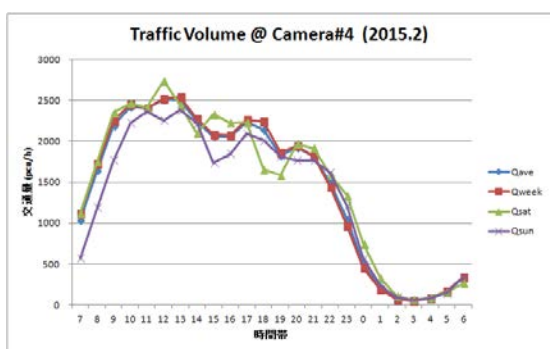
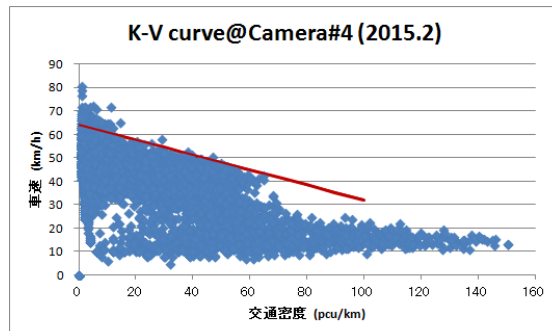
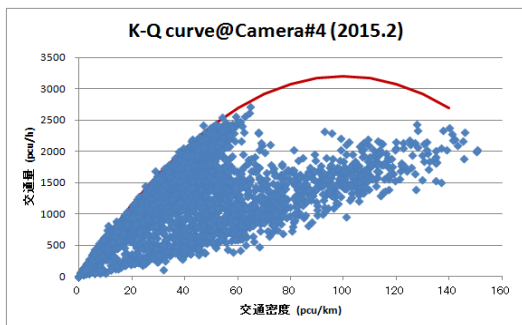


2015 年 6 月

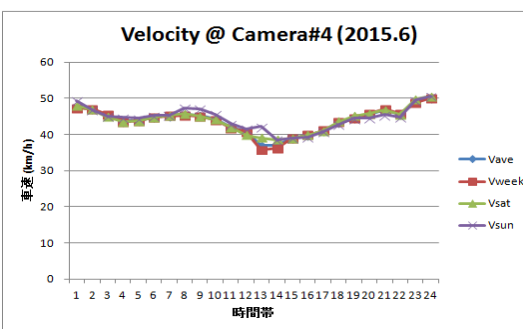
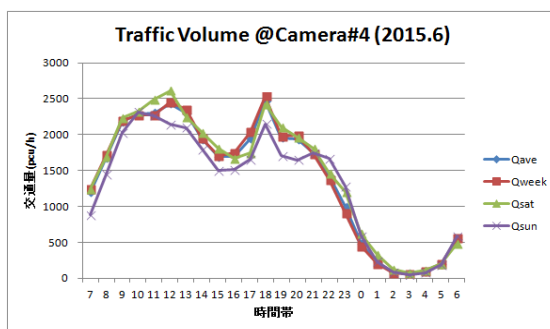
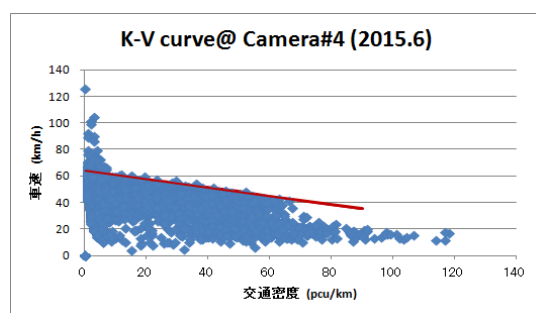
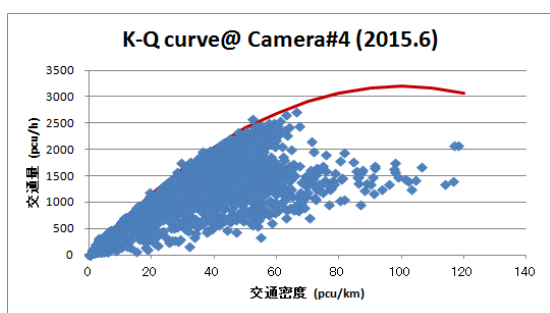


【カメラ#4】

2015 年 2 月

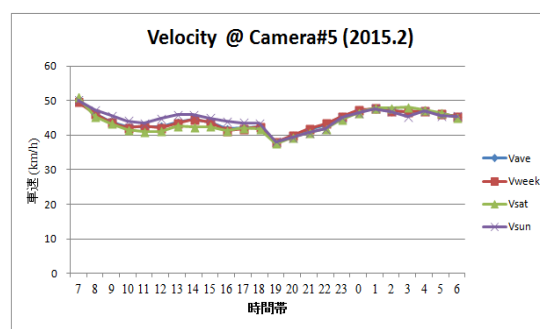
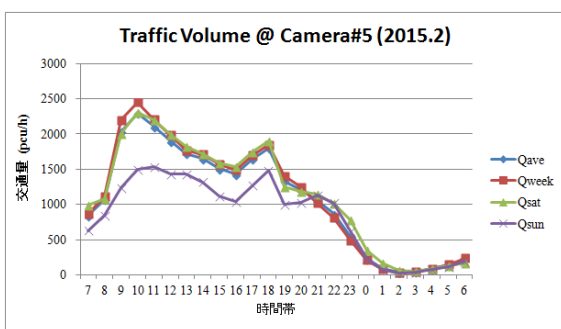
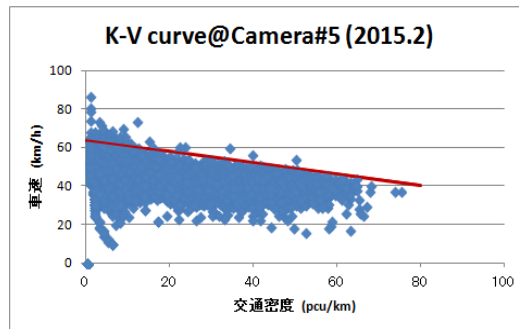
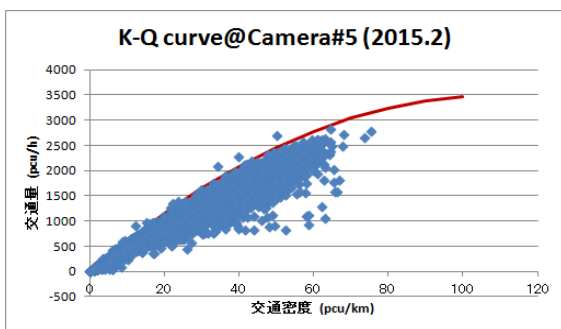


2015 年 6 月

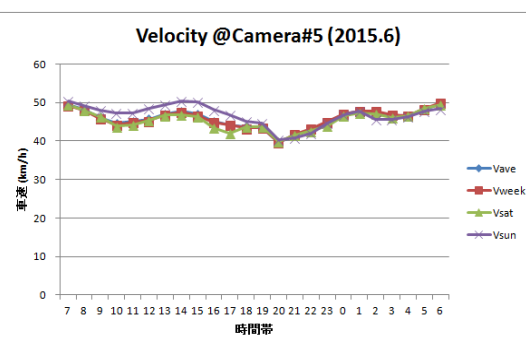
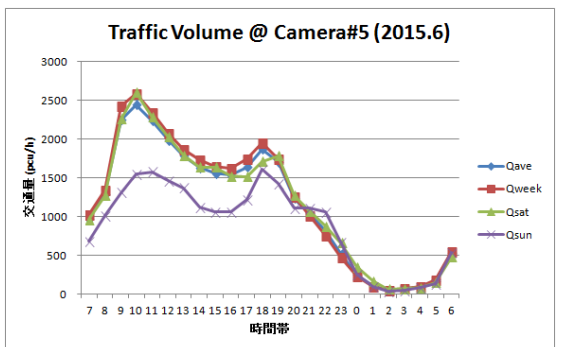
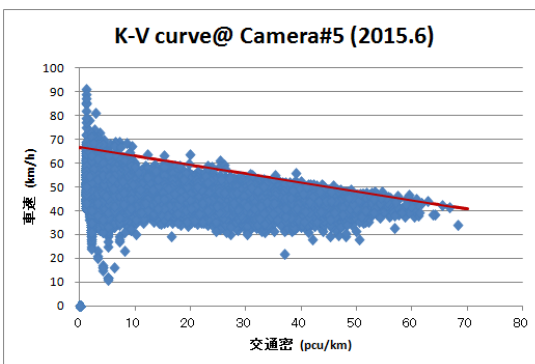
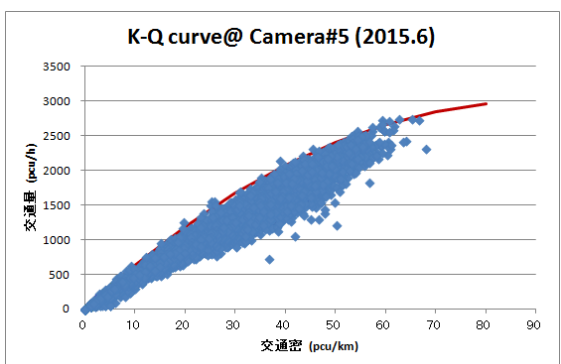


【カメラ#5】

2015 年 2 月

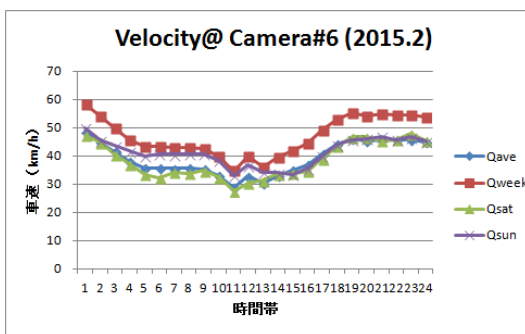
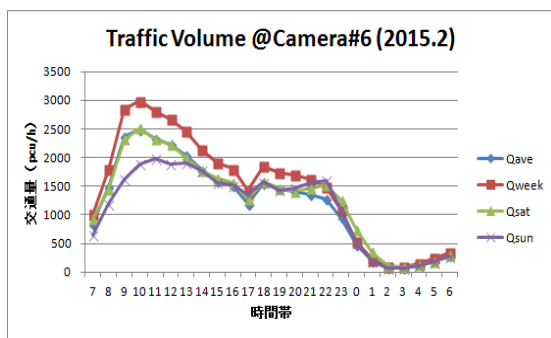
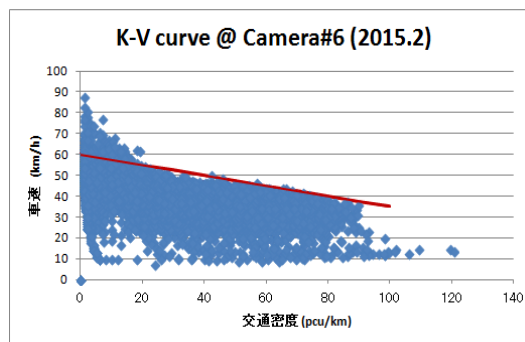
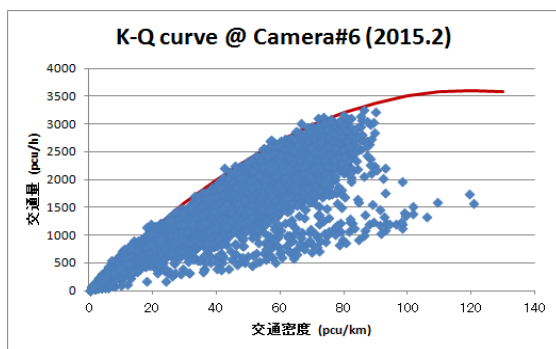


2015 年 6 月

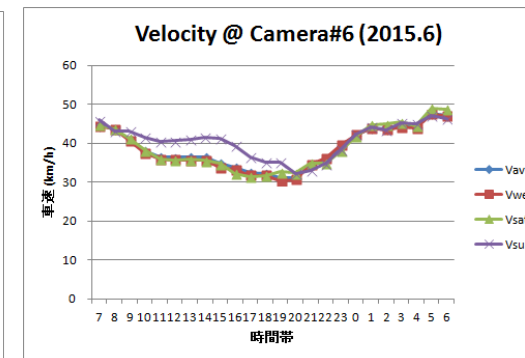
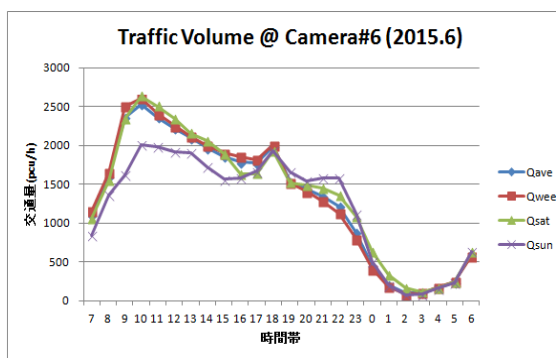
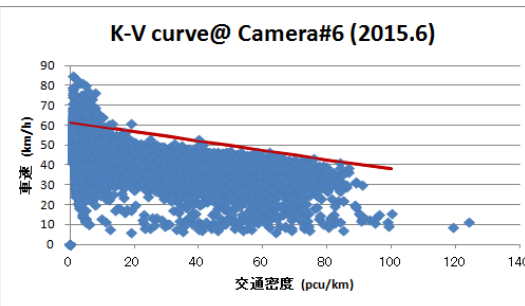
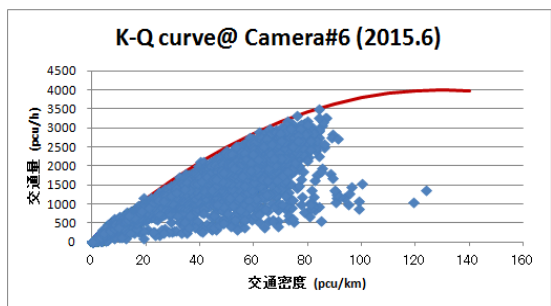


【カメラ#6】

2015 年 2 月

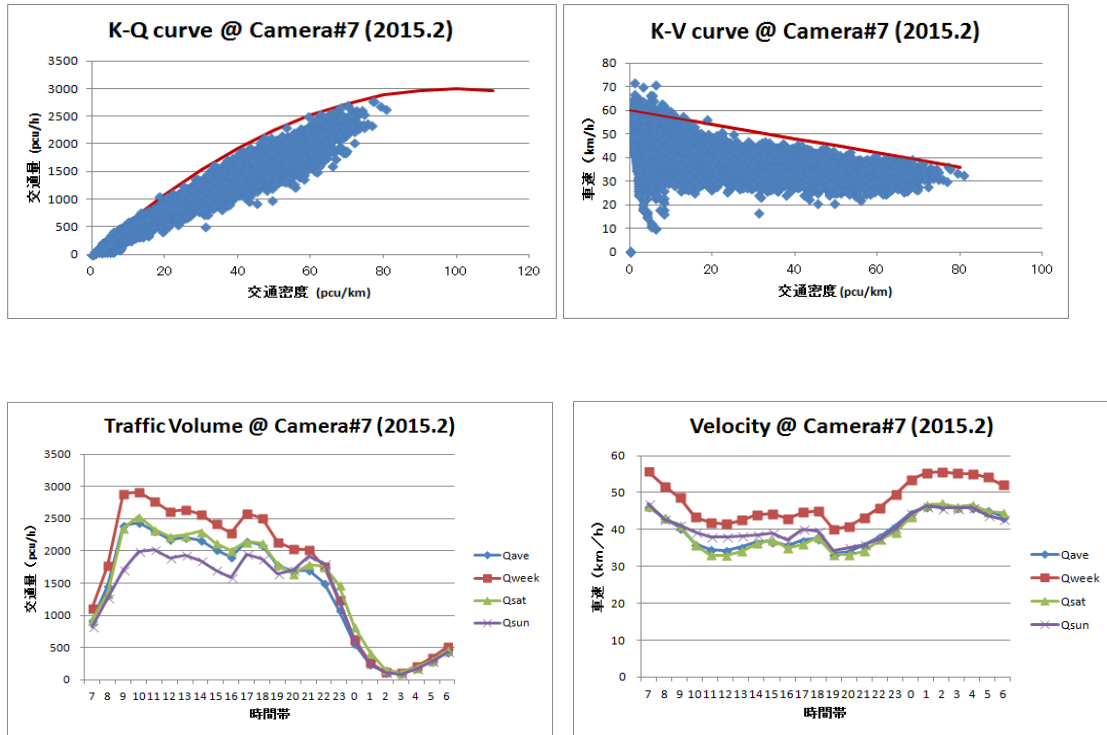


2015 年 6 月

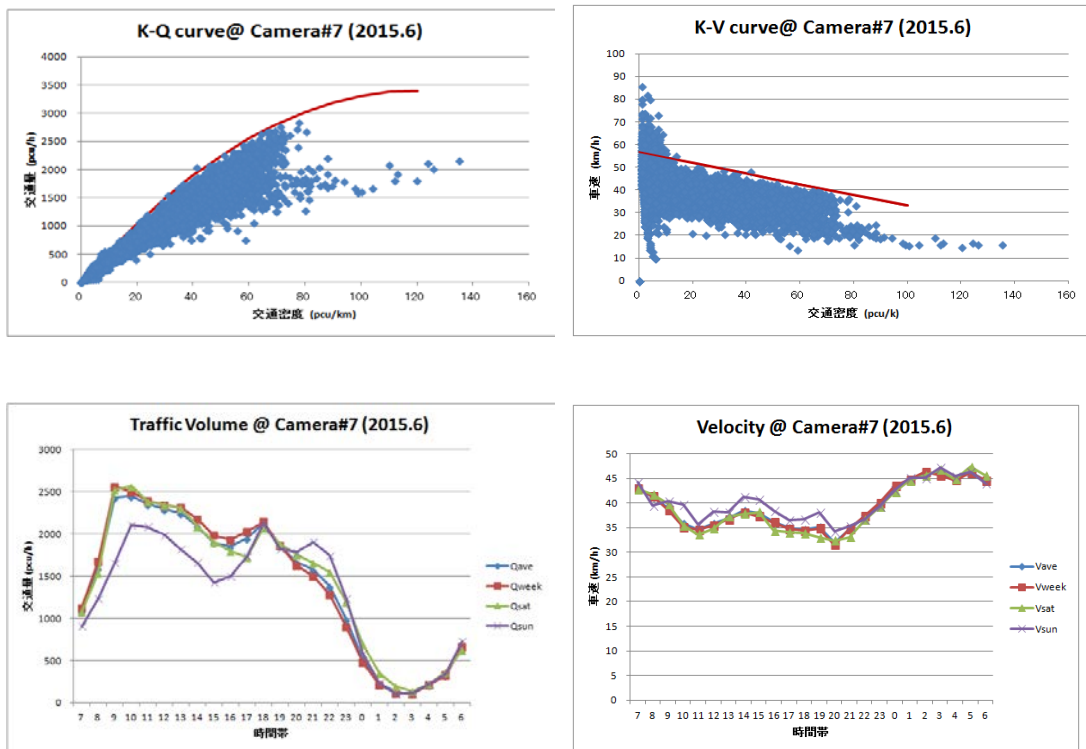


【カメラ#7】

2015 年 2 月

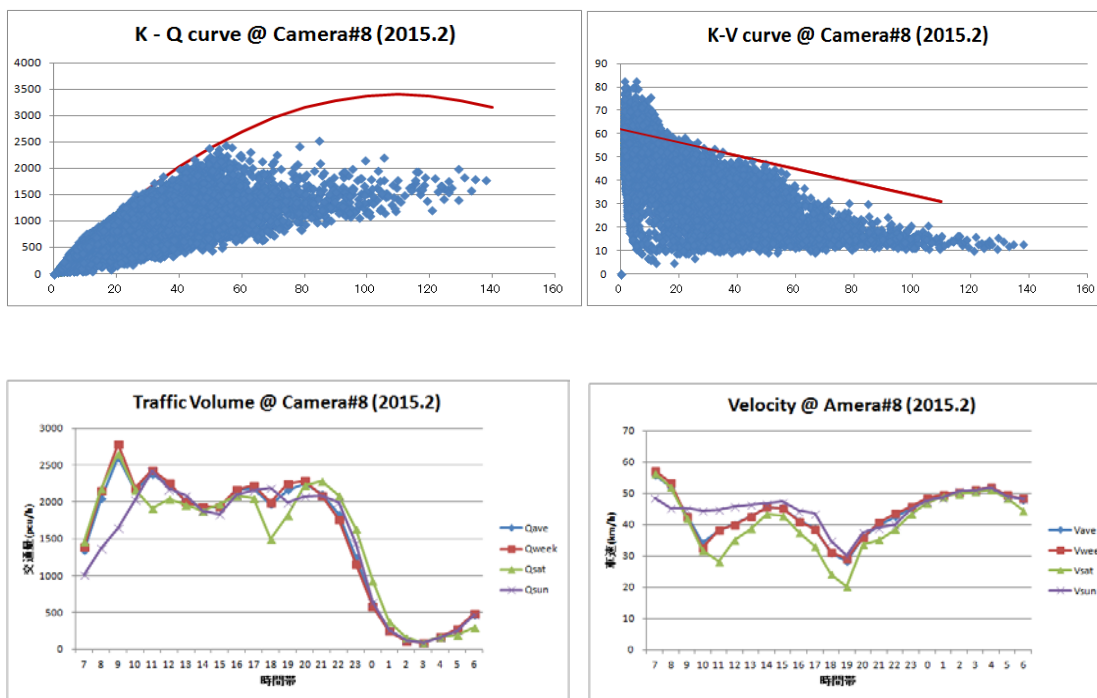


2015 年 6 月

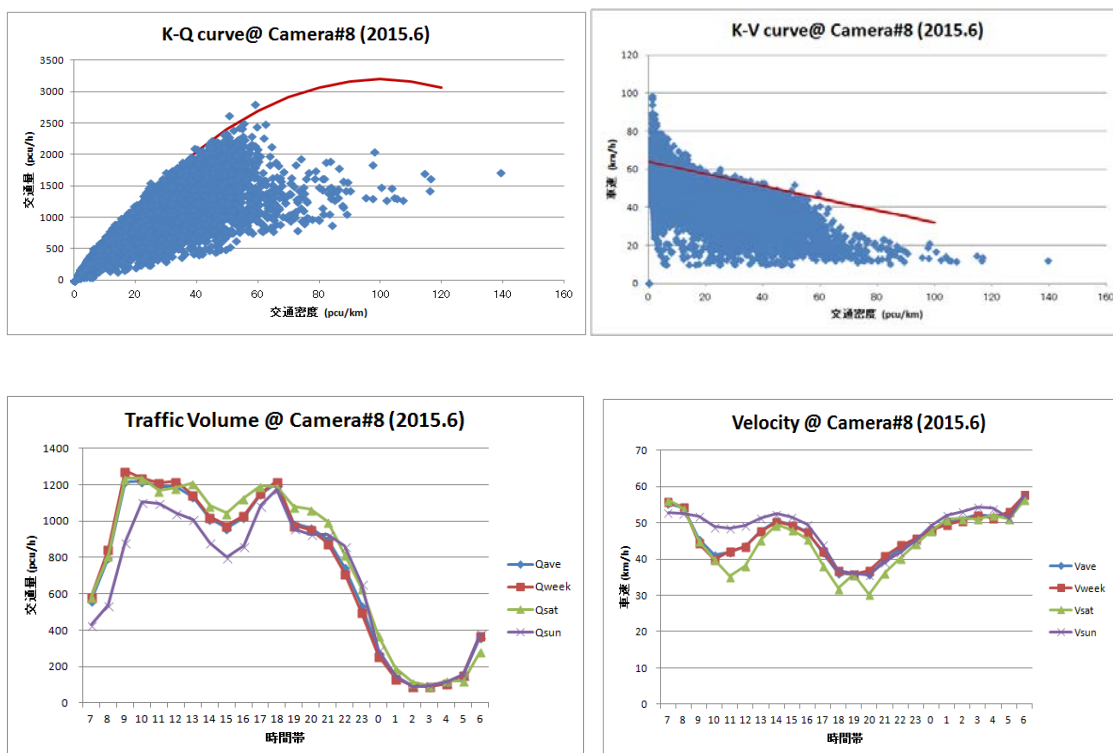


【カメラ#8】

2015 年 2 月

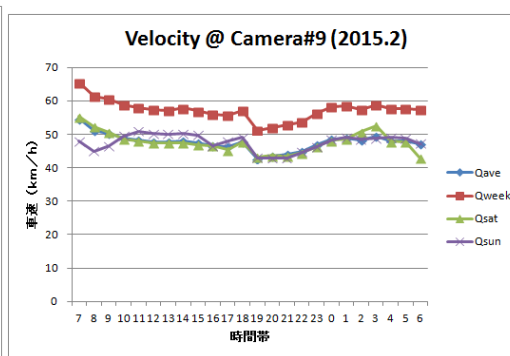
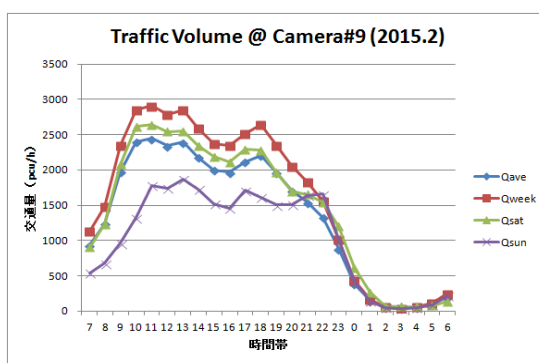
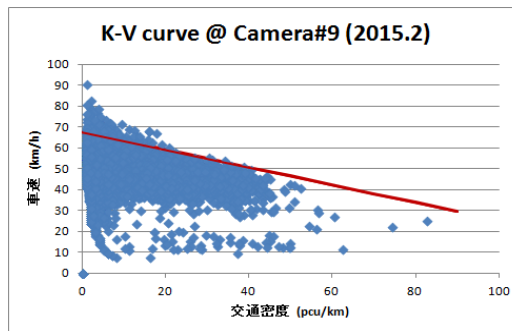
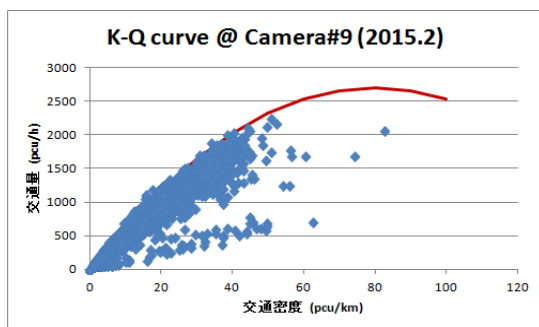


2015 年 6 月

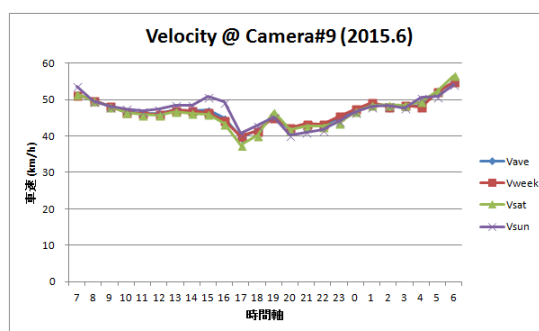
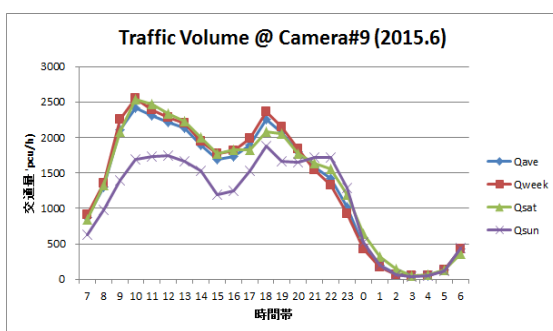
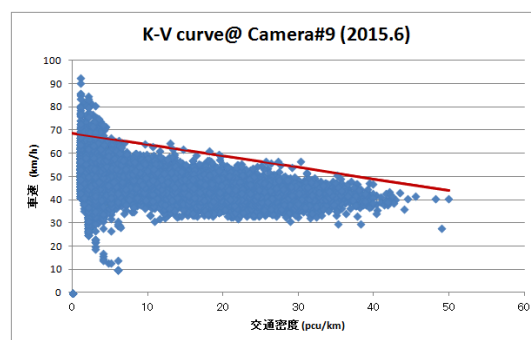
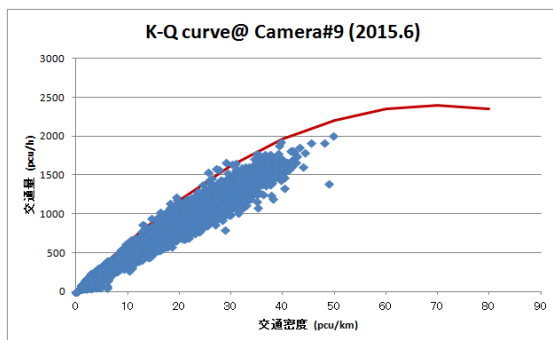


【カメラ#9】

2015 年 2 月

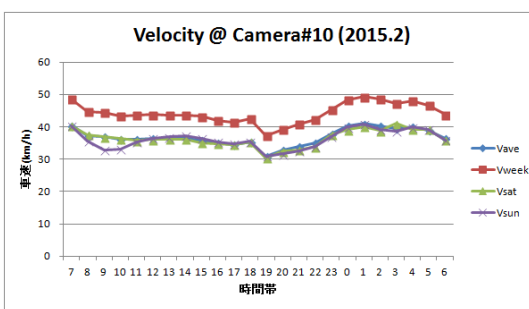
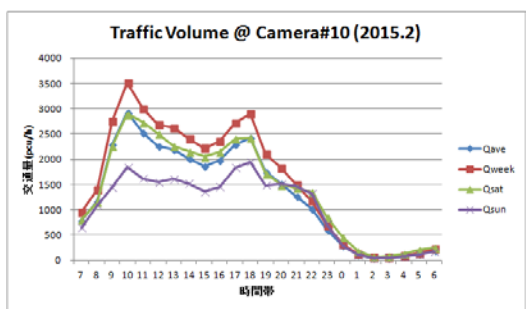
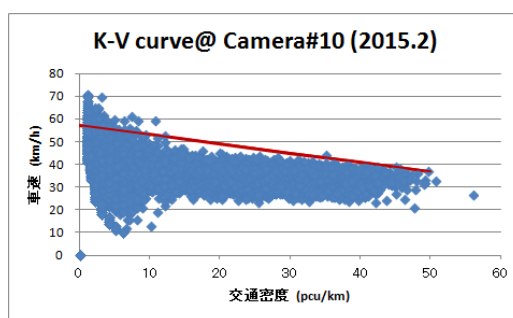
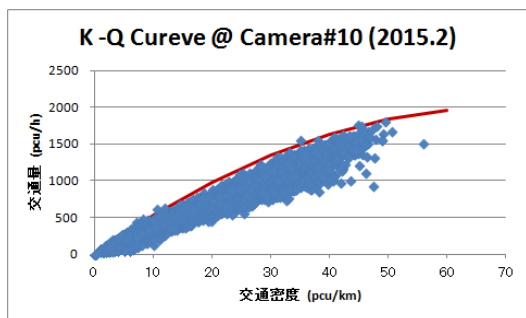


2015 年 6 月

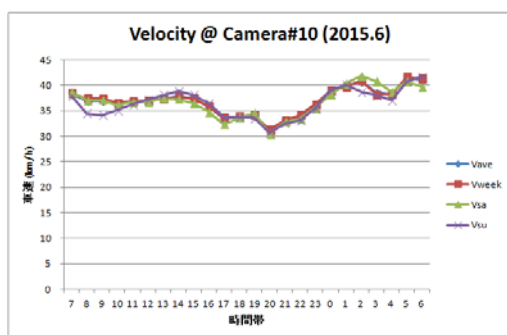
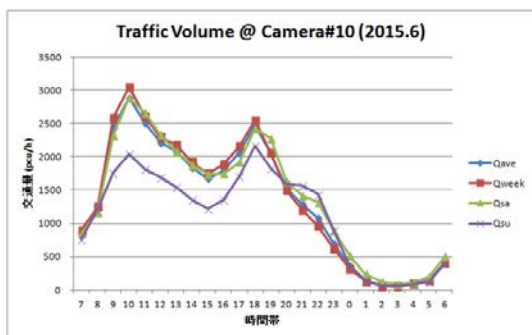
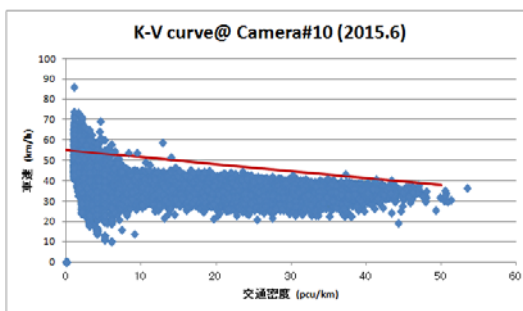
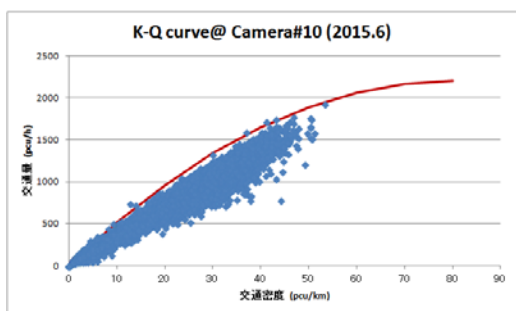


【カメラ#10】

2015 年 2 月

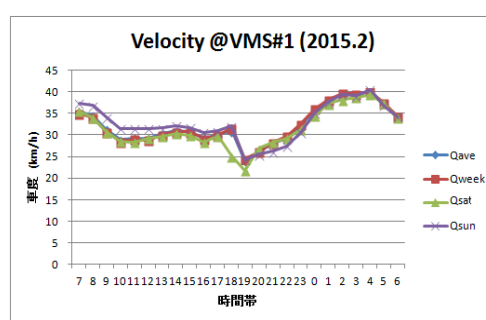
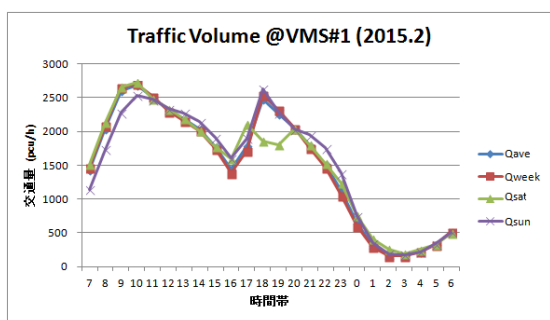
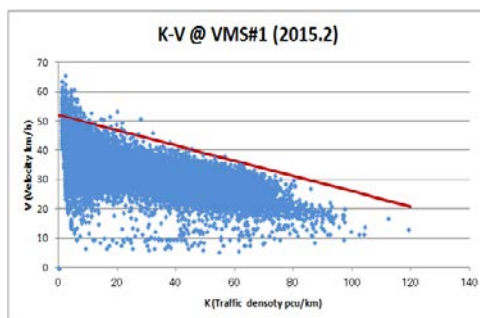
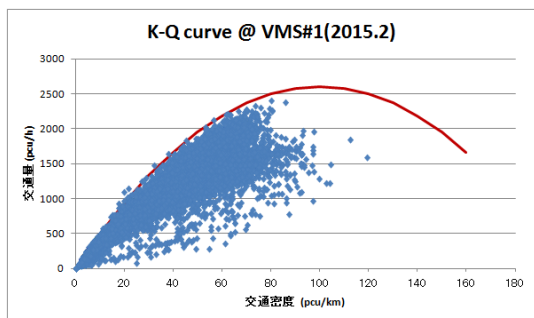


2015 年 6 月



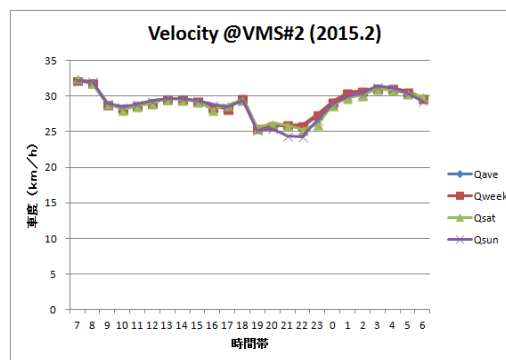
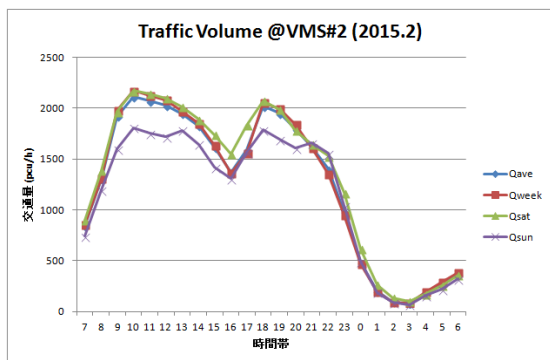
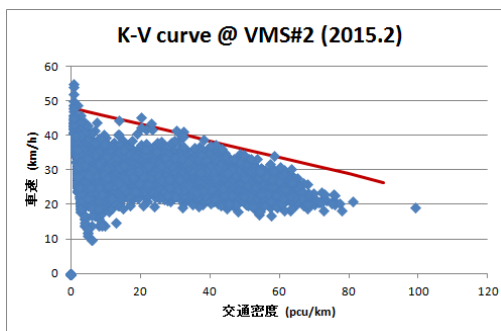
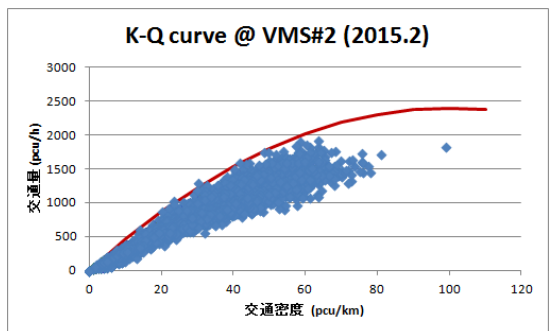
【VMS#1】

2015 年 2 月



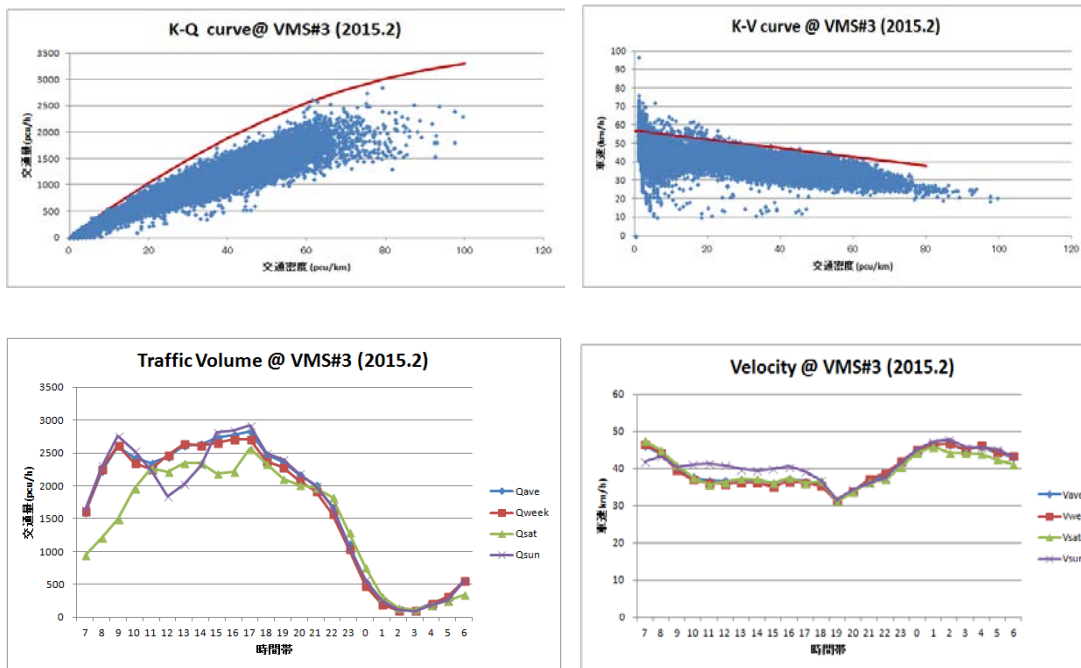
【VMS#2】

2015 年 2 月

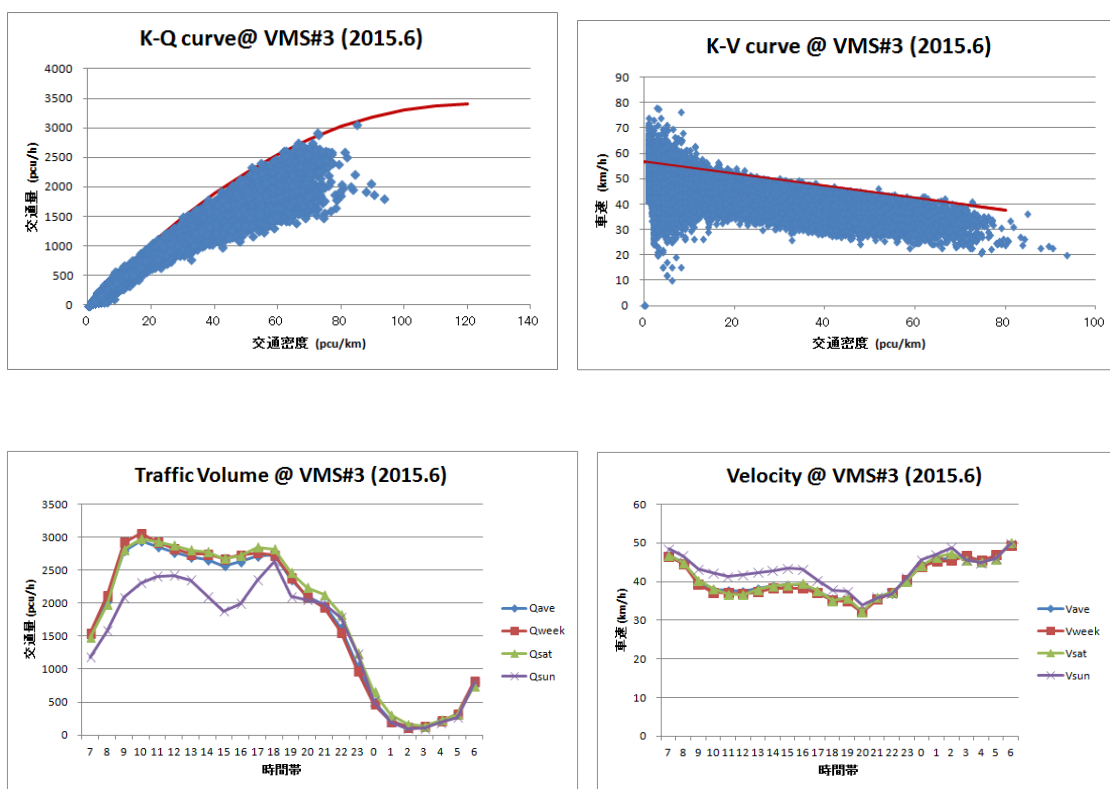


【VMS#3】

2015 年 2 月



2015 年 6 月



付録資料 3 : 700MHz/5GHz による WAVE 特長比較

本付録資料では交差点等における出会い頭衝突に重要な役割を果たす WAVE の車・車間通信に関して特に 700MHz 帯と 5GHz 帯 WAVE の特性比較についての検討を行なう。そもそも都市における交通事故は交差点や、高層ビル等のビル間から飛び出す車の出会い頭衝突等が多いことを見てきた。また、こうした都市構造物による無線通信の電波の反射の影響がでることも容易に想定できる。そのため無線通信における「電波の回り込み」による見通し外通信 (NLOS : Non Line of Sight) は、都市環境においては重要な役割を果たすことが期待でき、その特長の検証は重要な項目といえる。日本では国主導により 2008 年 10 月に行なわれた共同実験が公開されており、このデータを活用して 700MHz 帯 WAVE システムの見通し外特性の検証を行なうものとする。まず検証に必要なモデル化および解析に向けた下準備を行なう。電波の回り込みに関して一般的に使用されている無線 LAN システム 2.4GHz システムでの電波伝搬特性の理論値と実測値の比較を行なう。ここでは理論値として自由空間電波伝搬特性式および回折効果をシングルナイフエッジ損失式にてモデル化し、実測結果との比較検証した上で、シングルナイフエッジを共同実験検証への応用することを考える。

【回折時電波伝搬特性理論式】

今回用いる式は自由空間電波伝搬特性式と電気通信分野における国際連合の専門機関である国際電気通信連合 (ITU: International Telecommunication Union) の無線通信部門 (ITU-R: ITU Radio communication Sector) にて用いられているシングルナイフエッジ損失式を用いた。回折時の電波伝搬特性理論式は自由空間伝搬損失と、シングルナイフエッジ損失の和で表すことができる。付式 (2) に示す。

$$\text{回折時伝搬損失} = L_{\text{free}}(d) + J(\nu) \quad \text{付式 (2)}$$

$L_{\text{free}}(d)$: 自由空間伝搬損失

$J(\nu)$: シングルナイフエッジ損失

d : 2 点間の距離

また自由空間伝搬損失は一般的に付式 (3) にて表わされる。

$$L_{\text{free}}(d) = 20 \log_{10}(4 \pi d / \lambda) \quad \text{付式 (3)}$$

λ : 波長

また、シングルナイフエッジ損失式は付式 (4) で表わされる[付 1]。

$$J(\nu) = 6.9 + 20 \log \left(\sqrt{(\nu - 0.1)^2 + 1} + \nu - 0.1 \right) \quad \text{付式 (4)}$$

$$v = h \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)} \quad \text{付式(5)}$$

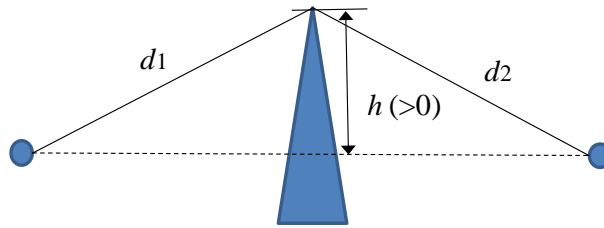
v : 遮蔽度合いを表わすパラメータ

h : 2 装置間を直線で結ぶラインからの遮蔽物の高さ

d_1 : 装置から最大遮蔽までの距離

d_2 : もう一方の装置から最大遮蔽までの距離

ナイフエッジ回折モデルを付図 6 に示す。ただし、付式 (5) は、 $v \geq -0.7$ で有効な近似式となっている。



付図 6 シングルナイフエッジモデル

【理論値計算】

ここでは、回折時電波伝搬特性理論値の計算例を示す。回折時の条件を付図 7 に示す。本条件における計算例として、周波数を 2.412GHz、アンテナ高さ (h_{ant}) を 1.5m、遮蔽物までの距離 (x) を 3m とした。

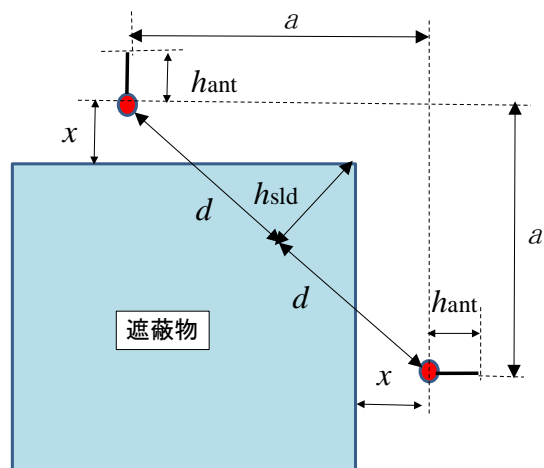
本条件における付式 (4)、(5) に関して、それぞれ波長と距離の関係としては付式 (6)、(7) のようにおける。

$$L_{free}(d) = 20 \log_{10}(8 \pi d / \lambda) \quad \text{付式 (6)}$$

$$J(v) = 6.9 + 20 \log \left(\sqrt{(v - 0.1)^2 + 1} + v - 0.1 \right) \quad \text{付式 (7)}$$

$$v = h_{sld} \sqrt{\frac{2}{\lambda} \times \frac{2}{d}}$$

但し、 $v < -0.7$ においては $J(v) = 0$ として扱っている。また、装置から最大遮蔽までの距離 d と最大遮蔽長 h_{sld} は、付図 7 より三角形の定理から付式 (28) (29) と求められる。



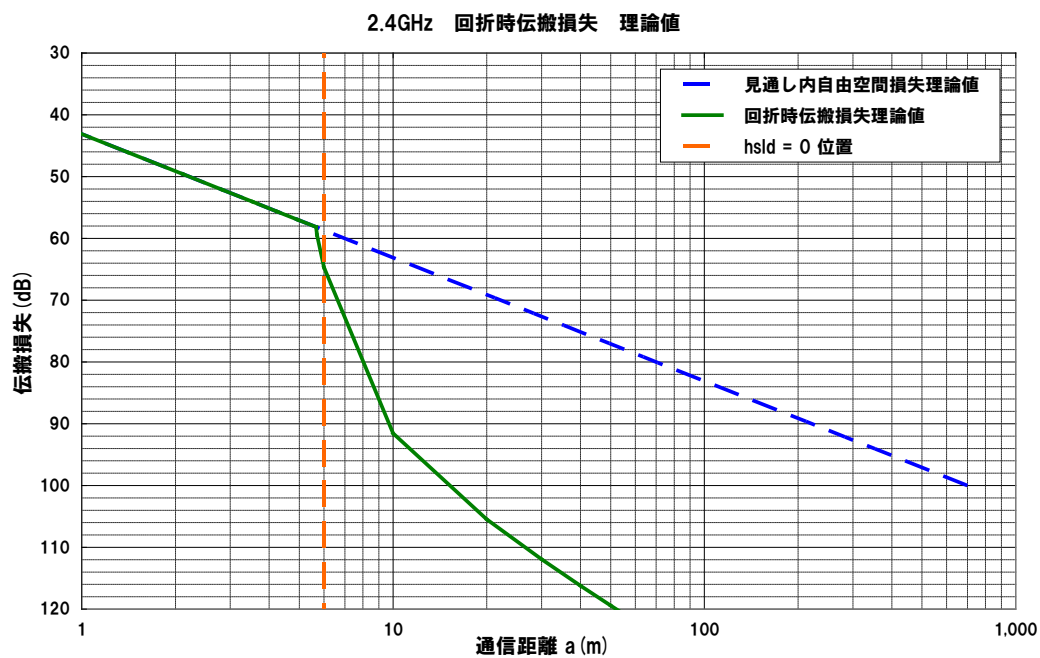
a : 回析時通信距離
 x : 装置から遮蔽物までの距離
 d : 装置から最大遮蔽までの距離
 h_{sld} : 2装置間を直線で結ぶ最大遮蔽長
 h_{ant} : 装置のアンテナ高さ

付図 7 回析時の環境条件

$$d = \frac{a\sqrt{2}}{2} \quad \text{付式 (8)}$$

$$h_{sld} = \begin{cases} \frac{a-2x}{\sqrt{2}} & , a > 2x, (h_{sld} \geq 0) \\ -\left(\frac{2x}{\sqrt{2}} - \frac{a}{\sqrt{2}}\right) & , a < 2x, (h_{sld} < 0) \end{cases} \quad \text{付式 (9)}$$

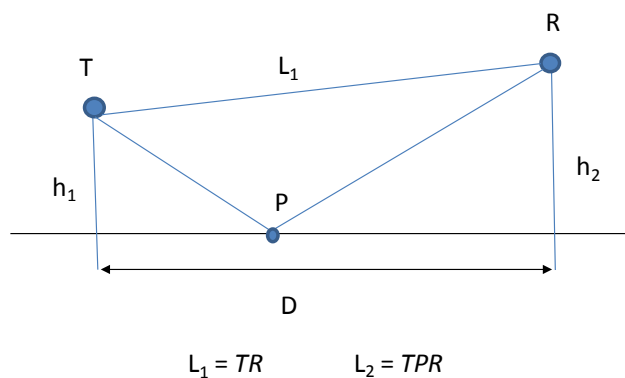
以上より評価結果を付図 8 に示す。



付図 8 回折時伝搬損失 理論計算結果

【WiFi による検証実験（大地反射波）】

回折時の伝搬特性の理論式は求められたところで、ここで実際のフィールドにおける検証実験により、理論値の妥当性の評価を行なう。最初に反射波による 2 波モデルの理論式をしめす。付図 9 に反射の 2 波モデルをしめす。送信 T 点、受信 R 点のそれぞれのアンテナ高さを h_1 、 h_2 とし、TR の距離を L_1 、反射 P 点を含む TPR の距離を L_2 とおく。



付図 9 反射波の 2 波モデル

付図 9 より、 L_1 を求めると

$$\begin{aligned}
L_1^2 &= D^2 + (h_1 - h_2)^2 \\
&= D^2 \left[1 + \left\{ \frac{h_1 - h_2}{D} \right\}^2 \right]
\end{aligned}
\tag{付式(10)}$$

付式 (10) より、 $h_1, h_2 \ll D$ とすると L_1 は付式 (11) となる。

$$\begin{aligned}
L_1 &\doteq \frac{D \left(1 + \left(\frac{h_1 - h_2}{D} \right)^2 \right)}{2} \\
&= D + \frac{(h_1 - h_2)^2}{2D}
\end{aligned}
\tag{付式(11)}$$

同様に、 L_2 を求めると

$$L_2 \doteq D + \frac{(h_1 + h_2)^2}{2D} \tag{付式(12)}$$

よって、反射点を経由する経路長 L_2 と直接波の経路長 L_1 との経路差 ΔL は

$$\begin{aligned}
\Delta L &= L_2 - L_1 \\
&= D + \frac{(h_1 + h_2)^2}{2D} - \left(D + \frac{(h_1 - h_2)^2}{2D} \right) \\
&= \frac{2h_1 h_2}{D}
\end{aligned}
\tag{付式(13)}$$

付式 (13) は経路差を表わしているので位相差 $\Delta\phi$ に変換するため、波長を λ とすると、

$$\lambda : 2\pi = \Delta L : \Delta\phi$$

の関係が成り立つことから $\Delta\phi$ を求めると付式 (14) が求められる。

$$\begin{aligned}
\Delta\phi &= \frac{2\pi\Delta L}{\lambda} \\
&= \frac{2\pi h_1 h_2}{D}
\end{aligned}
\tag{付式(14)}$$

反射係数を 1 とすると振幅が同じで位相差が $\angle \phi$ の 2 波のベクトル合成波の受信電界強度 E は、直接波の受信強度を E_0 とすると付式 (15) が求められる。

$$\begin{aligned}
 E &= E_0 \sqrt{1^2 + 1^2 - 2 \cos(\pi - \Delta\phi)} \\
 &= E_0 \sqrt{2 + 2 \cos(\Delta\phi)} \\
 &= \sqrt{2} E_0 \sqrt{1 + \cos(\Delta\phi)} \\
 &= 2 E_0 \sin(\Delta\phi / 2) \\
 &= 2 E_0 \sin((2\pi h_1 h_2) / \lambda D)
 \end{aligned}
 \tag{付式 (15)}$$

E : 合成波の受信電界強度 (V/m)

E_0 : 直接波の(受信電界強度 (V/m)

h_1 : 送信アンテナ高さ (m)

h_2 : 受信アンテナ高さ (m)

λ : 波長 (m)

d : 距離 (m)

付式 (35) を dBm 単位に変形すると付式 (16) となる。

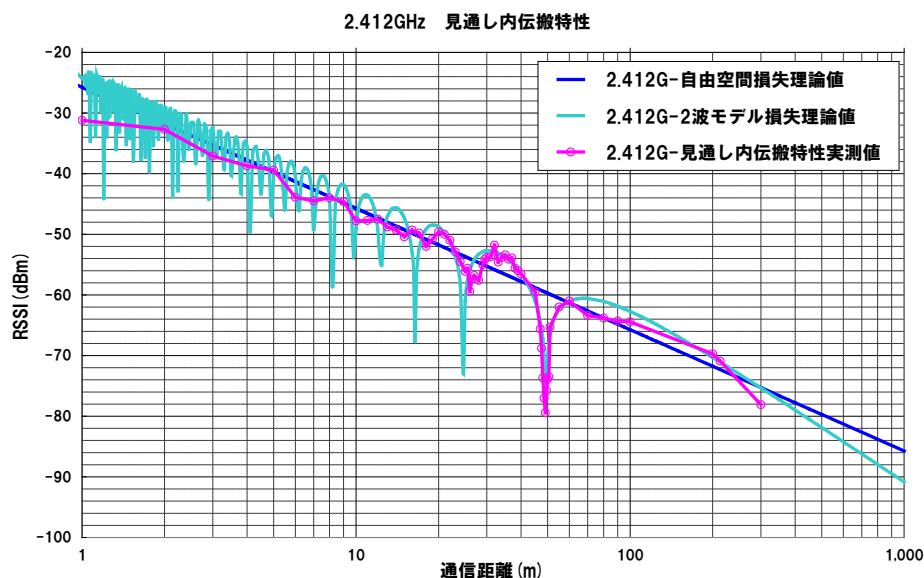
$$L(E) = 10 \log_{10}(2 E_0 \sin((2\pi h_1 h_2) / \lambda D)) \tag{付式 (16)}$$

実測条件を付表 2 にまとめる。

付表 2 反射波 2 波モデル伝搬特性実測条件

項目	値
周波数	2.412 MHz
帯域幅	20 MHz
アンテナ高さ	1.75 m
アンテナ種類	ダイポール (7dBi)
アンテナ端出力	14.18 dBm
ケーブル損失	9.64 dB

以上より実測および理論値の結果をまとめると付図 10 に示す通りになった。



付図 10 見通し内伝搬損出実測結果

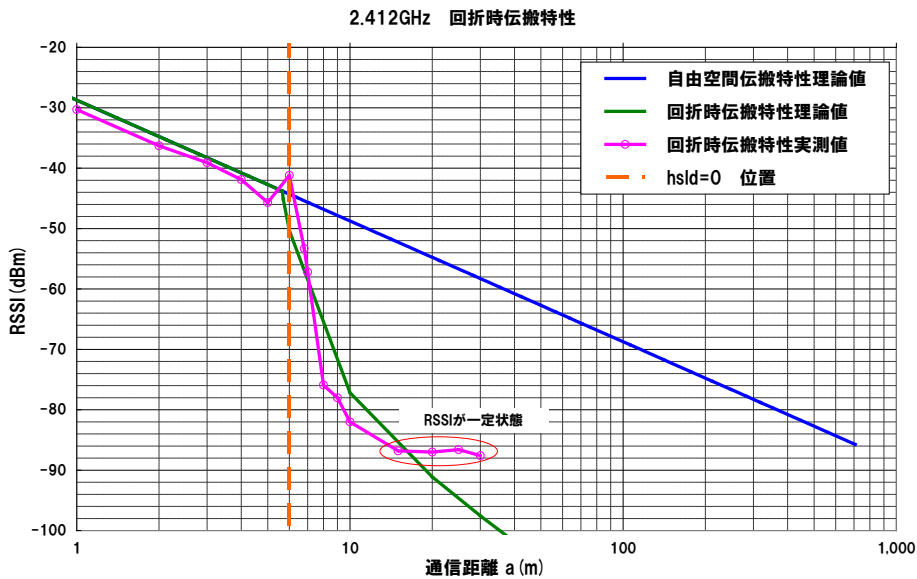
付図 10 の結果から、大地反射を考慮した反射波 2 波モデル伝搬損失理論値は、実測値に近い値を得ることができた。ただし、実測値の通信距離 15 メートル以下では、2 波合成による変動がみられず、25 メートル付近で合成波の傾向は理論値に近い。これは実験の測定環境が不平整地であることやアンテナ高さの変動による影響によるものと推測できる。

【WiFi による検証実験（回析）】

続いて、回析時の理論値との比較を行なう。先の大地反射波の実測結果から 2 装置間のデータ受信に関しては、装置間に遮蔽物が存在するために大地反射による受信電力への影響は少ないと考えられ、回析時伝搬特性では、自由空間損失理論値とシングルナイフエッジ回析理論値を組み合わせた特性として解析を進めることができる。実測に関しては付図 23 に示した条件と同一とし測定を実施するものとした。付図 10 の実測結果の理論値との回析特性の比較で示すと、付図 11 のようになる。

付図 11 より、通信距離 (a) が 15m 以下では回析時伝搬特性理論値に近い値となる一方、距離 (a) が 15m~30m の地点では定常状態となっている。受信信号強度 (RSSI: Received Signal Strength Indication) をみると $\text{RSSI} = -87\text{dBm}$ 程度で一定となっている。これは距離 (a) を伸ばしていくとある地点から大地からの反射波が現れてくることを意味するものと思われる。確認としてアンテナ指向性の高い八木アンテナを用いて、回析時通信距離 15m、20m における反射波の確認を実施し、2 方向で反射による RSSI の値が出ていることを確認できた。実測においてはダイポールアンテナを用いて実施したため、八木アンテナでの測定値を第ポールアンテナで換算すると付表 3 に示す通りの -85dBm の値が出ていることが確認

できる。よって、推定した距離 (a) が 15m～30m での理論値との差異は、回析によるものではなく、反射波の影響がでているためと結論づけられる。



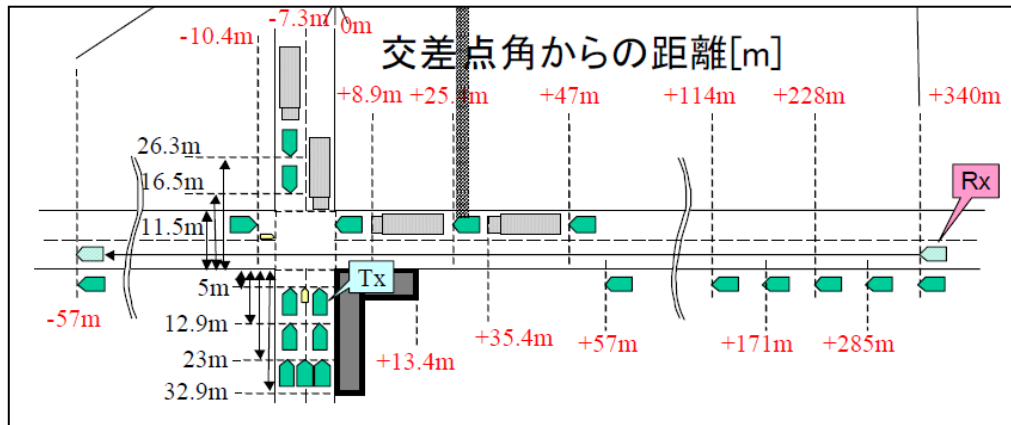
付図 11 回折時伝搬特性 実測結果と理論値

付表 3 反射波による影響確認

距離 a	八木アンテナ		実測ダイポール
	偏波垂直面	偏波水平面	アンテナ換算
15m	-74dBm	-74dBm	-85dBm
20m	-74dBm	-74dBm	-85dBm

【700MHz 帯 WAVE の回折実証試験】

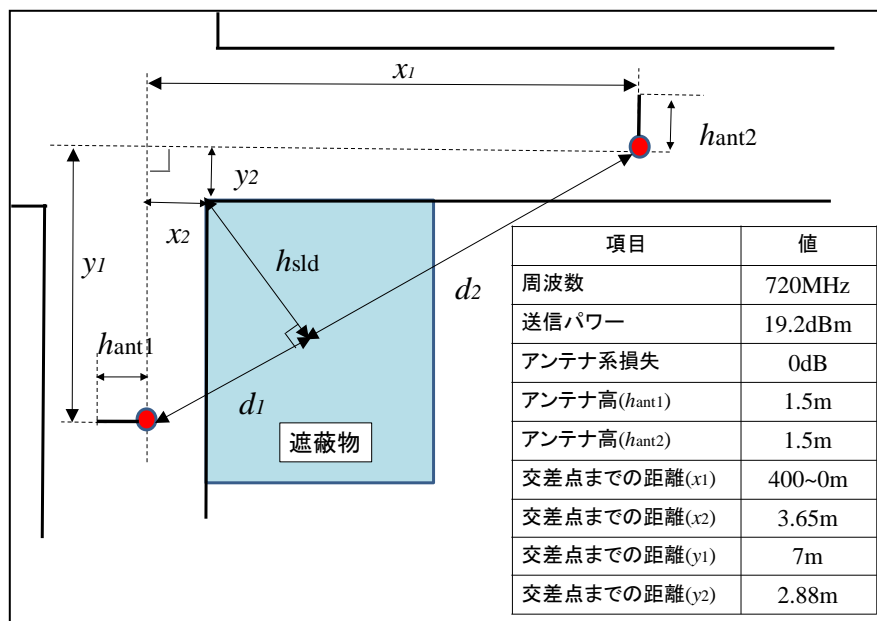
これまでの回折時伝搬伝搬の理論式および WiFi の実測試験による妥当性の確認により、700MHz 帯 WAVE に関する検証を行なう。ここでは 2008 年 10 月に総務省・国土交通省が主導で行なった見通し外交差点・出会い頭衝突シーンを想定して行なわれた共同実験結果 [付 3] が公開されているためこのデータを活用し検討するものとする。共同試験での WAVE システムは 700MHz 帯の標準化仕様決定前であったため、使用された周波数は現在の規格 ARIB T-109 で規定されている 760MHz 中心周波数に対して、720MHz 中心での実験となっているが、700MHz 帯の特長を捉える意味においては問題ないと判断し話しを進める。実験環境を付図 12 に示す。



付図 12 700MHz 帯 WAVE 交差点・出会い頭衝突シーンの実験環境

付図 12 において、図中上下方向の道路に信号待ちで停車中の車両の車載機（OBE）から交差点近傍に存在するおよび交差点に進入してくる車両に対して、車の存在情報を送信する（図中“Tx”）。これに対し、図中左右方向の道路の右端から交差点に向かって走行し、交差点に進入する車両がどの位置で、送信信号を受信できるか（図中“Rx”）をそれぞれの車両の交差点中心点までの距離をさまざまに変化させるとともに、情報を送信している車両の位置に関しても変化された場合の実験を行なっている。

この実験環境を解析すべく算出条件および距離を含むパラメータを付図 29 にまとめる。この付図 13 の実験環境パラメータの条件で、付式(2)～付式(4)を用いて、電波回析時の伝搬損失を求める。



付図 13 交差点・出会い頭衝突シーン実験環境のパラメータ

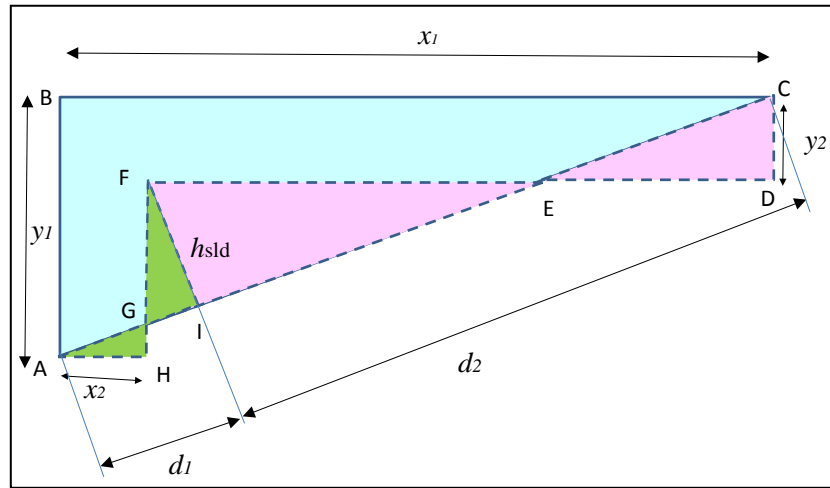
付式 (6)、(7) に付図 11 のパラメータを当てはめると、付式 (17)、(18) のようになる。

$$L_{\text{free}}(d) = 20 \log_{10}(4 \pi (d_1 + d_2) / \lambda) \quad \text{付式 (17)}$$

$$J(v) = 6.9 + 20 \log \left(\sqrt{(v - 0.1)^2 + 1} + v - 0.1 \right)$$

$$v = h_{\text{sld}} \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)} \quad \text{付式 (18)}$$

ここで、 h_{sld} および d_1 、 d_2 を求めるために、付図 12 の算出条件から関係する部分の幾何学図形に着目し、付図 14 として関係図をまとめる。付図 14 より、三角形 ABC、三角形 CDE、三角形 EFG、三角形 FGI、三角形 AGH はすべて相似の直角三角形となっている点になっていることから、 h_{sld} 、 d_1 、 d_2 はそれぞれ付式 (19)、(20)、(21) で求められる。



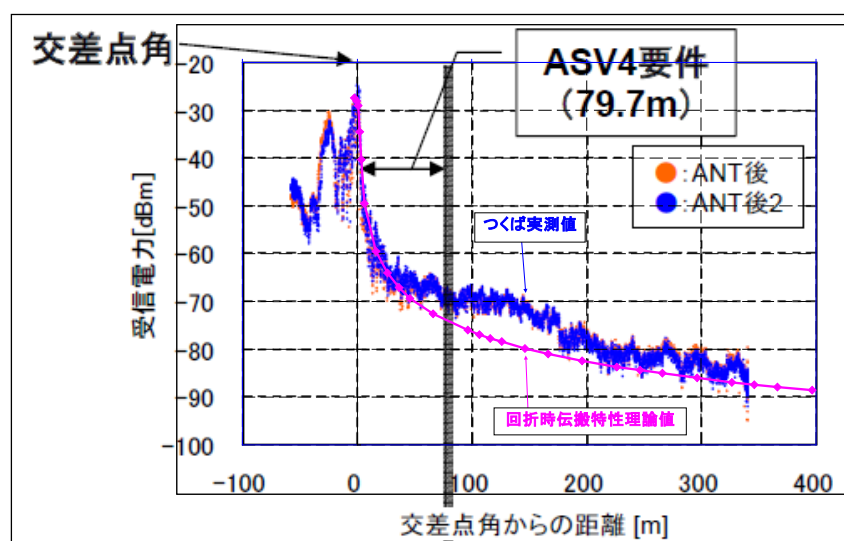
付図 14 パラメータ (h_{sld} 、 d_1 、 d_2) 算出図形

$$h_{\text{sld}} = \frac{y_1 \left(x_1 - x_2 - \left(\frac{x_1 y_2}{y_1} \right) \right)}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}} \quad \text{付式 (19)}$$

$$d_1 = \sqrt{x_1^2 + y_1^2} \times \frac{x_2}{x_1} + \frac{y_1}{x_1} \left(\frac{y_1 \left(x_1 - x_2 - \left(\frac{x_1 y_2}{y_1} \right) \right)}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}} \right) \quad \text{付式 (20)}$$

$$d_2 = \sqrt{x_1^2 + y_1^2} \times \frac{y_2}{y_1} + \frac{x_1}{y_1} \left(\frac{y_1 \left(x_1 - x_2 - \left(\frac{x_1 y_2}{y_1} \right) \right)}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}} \right) \quad \text{付式(21)}$$

これらの式を用いて、回析時電波伝搬特性理論値をもとめ、720MHz 帯見通し外通信の交差点・出会い頭衝突シーン実験結果と比較して付図 15 に示す。



付図 15 700MHz 帯 WAVE 実験結果と理論値の比較

付図 15 より、シングルナイフエッジモデルを利用した回析時伝搬特性理論値は、実験結果に対して交差点に進入してくる車が交差点から、距離 40m の範囲までにおいて実測値とよく一致している。40m 以上の距離において、実測値は理論値に対して受信電力は大きな値となっている。この影響は、距離が交差点から離れるに従って、道路からの反射波による影響によるものと考えられる。これらは先の WiFi の実証試験にて確認した結果と一致している。この結果から交差点から総務省の「ITS 無線システムの高度化に関する研究会」での交差点における出会い頭衝突にむけた通信要件として交差点から 79.7m[付 3]を用いていた。この地点での受信電力は-73dBm 以上であり、700MHz 帯 WAVE の受信感度-73dBm～-85dBm をクリアしており要件を満足していると考ええる。

【出会い頭衝突検討】

交通事故原因の主因である交差点における出会い頭衝突事故に関する 700MHz 帯 WAVE システムが明らかになった。ここでもう一つの 5GHz 帯システムにおける同様の検討を行うことで WAVE システム全体としての特長の把握が可能になる。先の実証試験では WiFi も

含まれていたため、ここでの回折時伝搬特性比較としての比較を 700MHz 帯、5GHz 帯、WiFi (2.4GHz 帯) の 3 ケースに関する検討を行なう。各諸元を付表 4 に示す。

付表 4 周波数別通信による出会い頭衝突検討諸元

項目	値
周波数	5.82GHz、2.412GHz、720MHz
アンテナ高	1.5 m ※1
遮蔽物までの距離	2 m ※2
送信電力	10dBm、19.2dBm、33dBm ※3
受信電力	-86dBm ※4

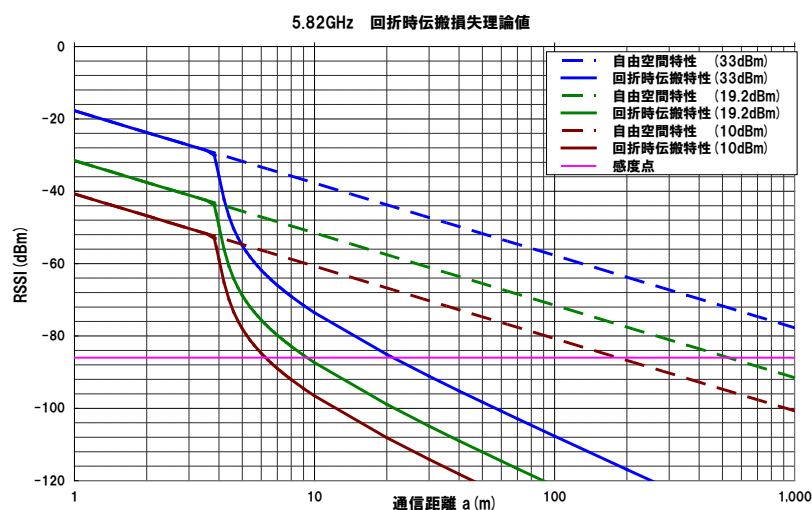
※1：普通乗用車を想定し、1.5m とした。

※2：建築基準法第 42 条第 2 項から 2m とした。国内においては幅員 4m 未満の道路（2 項道路）が多く存在しているため出会い頭衝突の可能性を考慮し、道路中線までの距離を基準とした。

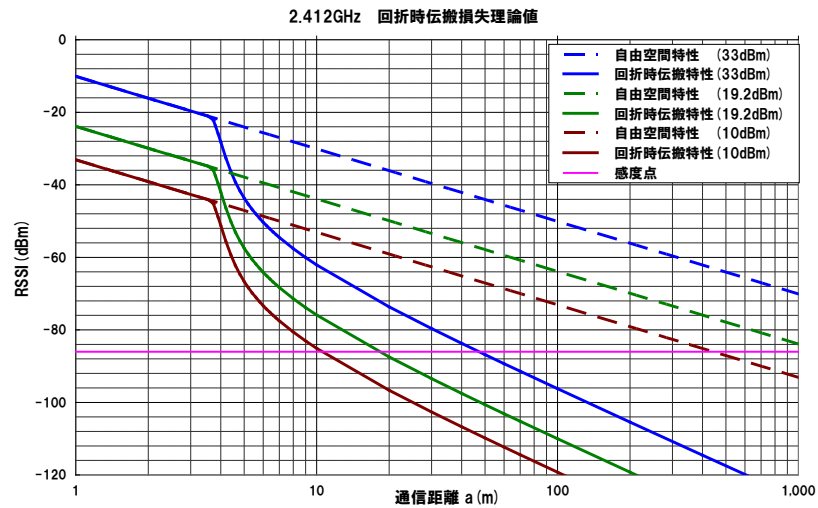
※3：送信電力は ITS FORUM RC-005[付 5]より 10dBm、ITS FORUM RC-006 より 19.2dBm、IEE802.11p (2010) より 33dBm とした。

※4：ITS FORUM RC-005 より、-86dBm とした。

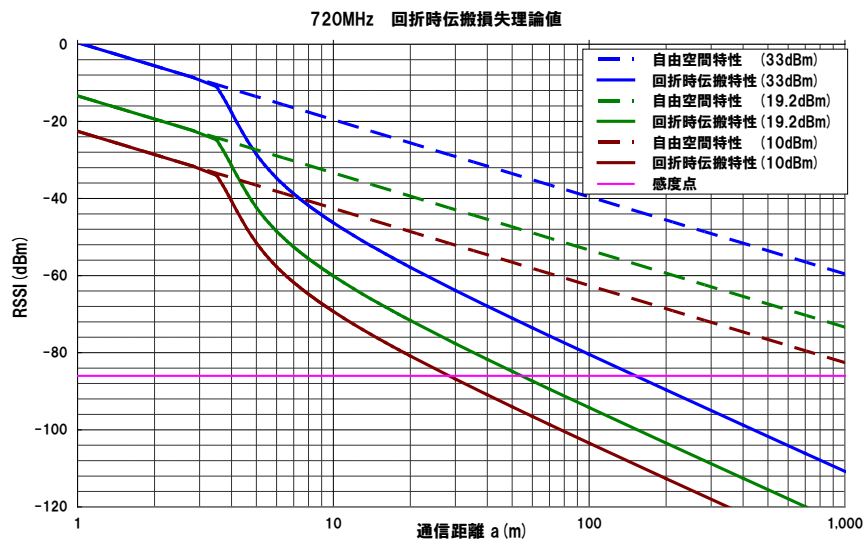
付表 4 の条件をもとに、各周波数における通信距離と受信信号強度（RSSI : Receive Signal Strength Indicator）の関係のシミュレーションを行なう。回折時伝搬特性は自由空間特性とシングルナイフエッジモデルで導入した式を用いる。それぞれのシミュレーション結果を付図 16、17、18 に示す。



付図 16 5.8GHz 帯回折時伝搬特性



付図 17 2.4GHz 帯回折時伝搬特性



付図 18 700MHz 帯回折時伝搬特性

付図 16～付図 18 の回折時伝搬損失特性において、受信の感度の限界とした -86dBm の感度点が最大通信距離ととらえることができ、それぞれの条件における通信距離を付表 5 にまとめる。

付表 5 周波数別通信の電力と回析時最大通信距離

送信出力	5.8GHz	2.4GHz	700MHz
+10dBm	6.2m	10.5m	28.2m
+19.2dBm	9.3m	18.2m	54.4m
+33dBm	21.3m	47.1m	151.6m

交差点における出会い頭衝突を避けるために、ここまで検討してきた見通し外通信での回析時伝搬特性を用いる。出会い頭衝突では走行中の車両のドライバーに衝突の危険性を WAVE にて伝え、衝突回避に間に合う距離で停止できることが課題となる。すなわち付図 16 の Tx と Rx に示された車両同士の通信に関して、交差点に進行中の Rx 車両が情報を受け取ってから交差点の手前で停止できるまでの車速を比較パラメータとしてそれぞれの周波数条件において検証する。一般的に、走行中の車両の停止距離は付式 (22) にて与えられる[付 5][付 6][付 7]。

$$(\text{停止距離}) = (\text{空走行距離}) + (\text{制動距離}) \quad \text{付式 (22)}$$

$$\text{空走行距離} = \text{反応速度 (秒)} \times \text{聖堂前の車速 (m/秒)}$$

$$\text{制動距離} = \text{制動前お時速 (km/h) の 2 乗} \div (254 \times \text{摩擦係数})$$

$$\text{反応時間} : 0.75 \text{ 秒 (通常人の平均的な反応時間)}$$

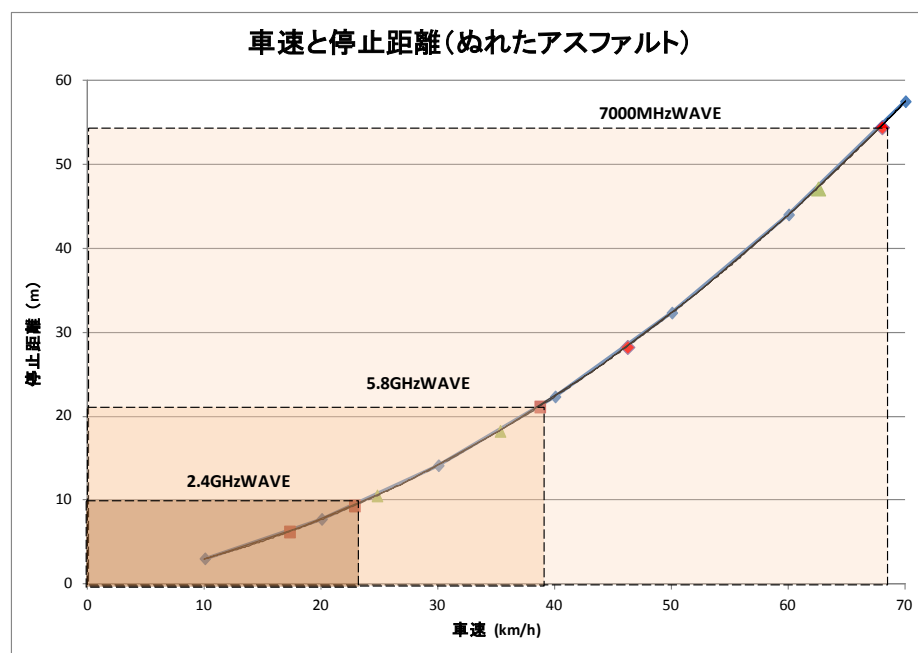
$$\text{摩擦係数} : 0.45 \text{ (ぬれたアスファルト)}$$

以上から、ぬれたアスファルト道路における車速に対する停止距離を求めた結果を付表 6 に示す。これらから、各無線通信の最大出力の場合における回析時の通信距離と停止距離との関係を付図 19 にまとめる。各通信での最大出力は、5.8GHz では欧米での WAVE システムの最大出力の 33dBm、2.4GHz では WiFi の現行規格である 10dBm、700MHz WAVE は、現行の仕様 ARIB-T109 より 19.2dBm を基準とした。付図 19 に示す曲線はぬれたアスファルト道路における車速に対する停止距離との関係を表し、各通信の最大出力条件での回析時における通信到達距離の範囲を表示している。

付図 19 の結果から、700 帯 WAVE は、交差点を想定した見通し外回析通信において、ぬれたアスファルト道路の条件で、交差点に進入する車両に対して交差点手前で停止可能な条件は、交差点までの距離 54 メートルで時速 68 キロメートル以下となる。これに対して、5GHz 帯 WAVE に関しては、交差点までの距離 21 メートルで時速 39 メートル以下となる。この結果から、700MHz 帯 WAVE の中心市街地主要交差点における出会い頭衝突に対して 5GHz 帯 WAVE と比較して有効な運転支援を提供できるといえる。

付表 6 車速とぬれたアスファルト道路における停止距離

車速 (km/h)	停止距離 (m)
10	3.0
20	7.7
30	14.1
40	22.3
50	32.3
60	44.0
70	57.5
80	72.7
90	89.6
100	108.3
110	128.8
120	151.0
130	174.9



付図 19 ぬれたアスファルト道路での見通し外通信による停止可能距離比較

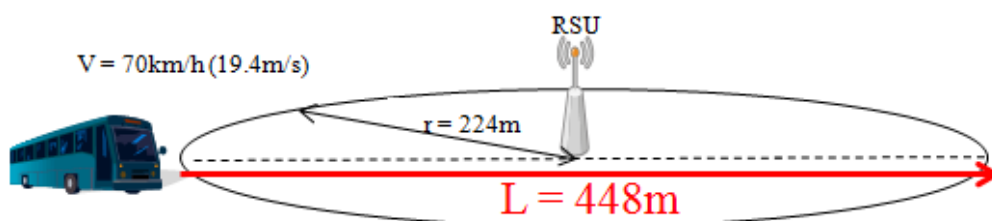
付録資料 4 : WAVE システム地域応用例

WAVE システムの地方都市の応用例として公共交通であるバスの停留所に基地局展開を検討してきた。ここではこのバスへの応用としてどのような展開が可能となるかを具体的なシステム実現可能性を含めて検討する。ここでは代表的応用例としては付表 15 に示す応用例を検討する。

付表 7 WAVE システムの地域応用例

No.	項目	内容
1	運行管理	バス運行状況や到着時間のバス停表示
2	広告（サイネージ）	バス停付近のローカル情報のバスへの配信による乗客への情報提供
3	運転者管理	バス運転手の健康状態を路線バス停後に健康状態データを送信することでバス会社が健康管理を把握する
4	安否確認	災害時等乗客の乗降記録のバス停ごとの把握による安否確認

最初にバス停に WAVE 基地局を設置した際の通信能力を詳細に見積もることとする。700MHz 帯 WAVE は、これまでの検討で最大速度 18Mbps、セル半径 224m を前提に評価してきたので、この条件を前提にバス停の RSE 化としての検討を行なう。いま、付図 20 のバス停 RSE を実現したとする。このバス停に対してバスが定速走行している場合を考える。



付図 20 700MHz 帯 WAVE のバス停基地局化

走行バスの速度 ($V=30\text{km/h}$) に、RSE セル内 (直径 L) において、変調レート 18Mbps で路車間通信できる時間 (t) は

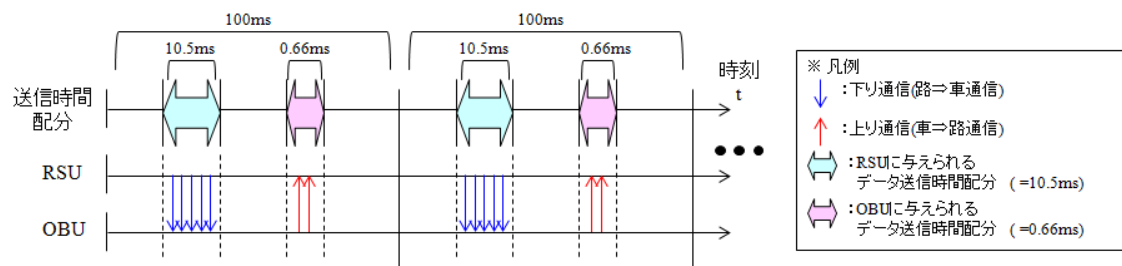
$$t = L/V = 448/8.3 \approx 54 \text{ (s)} \quad \text{付式(23)}$$

ここで、バス停（RSE）とバス車載器（OBE）間にて通信する時間は、ARIB T-109 の仕様から 100ms 周期ごとに RSE は 10.5ms、OBE は 0.66ms のみ通信フレームを送信可能であることから、そのデューティ比が問題となる。RSE および OBE のそれぞれの送信可能な時間のデューティ比をそれぞれ、 D_r 、 D_o とおくと、その値は以下の通りとなる。

$$D_r = 10.5/100 = 0.105$$

$$D_o = 0.66/100 = 0.0066$$

この時のそれぞれの通信フレームは付図 21 のように表わされる。



付図 21 バス停・バス間における通信フレーム

以上の条件から、RSE、OBE の送信可能なデータ量を算出する。ARIB TR-T20 (1.1 版)[付 8]にて、受信感度は『1000byte のデータを PER10%以下で受信できる受信レベル』の定義があることから、パケット長を 1000byte とし、常時 10%の PER が生じることを前提に算出を進める。ここで、計算に必要なパラメータを以下のように定義する。

- ・ R : 変調レート
- ・ D_p : 1 パケットのデータ長 (1000byte = 8000bit)
- ・ t : 車両がセル内に滞在する時間
- ・ T_p : 1 パケットの送信所要時間
- ・ N_r : RSE が送信可能なパケット数
- ・ N_o : OBE が送信可能なパケット数
- ・ D_r : RSE が無線フレームを送信可能な時間のデューティ比
- ・ D_o : OBE が無線フレームを送信可能な時間のデューティ比
- ・ S_r : RSE が通信可能なデータ量
- ・ S_o : OBE が通信可能なデータ量
- ・ P_{er} : パケットエラーレート(10%)

算出する通信データ量 S_r 、 S_o を以下のステップで求める。

1 パケットあたりの送信所要時間 T_p :

$$T_p = \frac{D_p}{R} = \frac{1000 \times 8}{18 \times 10^6} \approx 4.4 \times 10^{-4} \text{ (s)}$$

送信可能なパケット数 N_r 、 N_o :

$$N_r = \frac{t \times D_r}{T_p} = \frac{54 \times 0.105}{4.4 \times 10^{-4}} \approx 12,886 \text{ (個)}$$

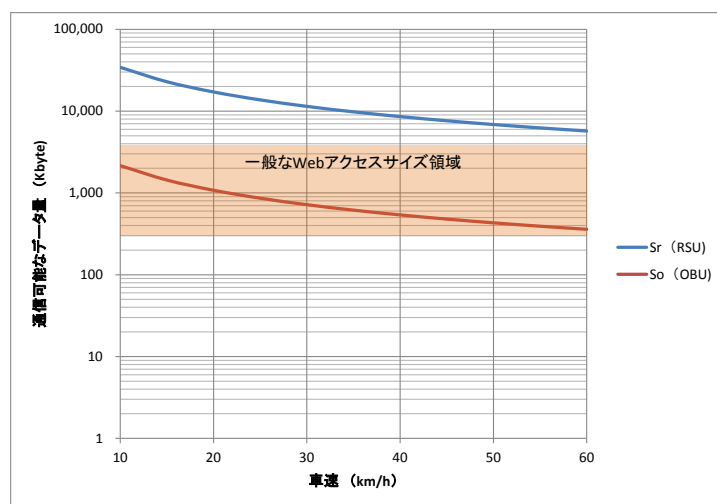
$$N_o = \frac{t \times D_o}{T_p} = \frac{54 \times 0.0066}{4.4 \times 10^{-4}} \approx 810 \text{ (個)}$$

通信可能なデータ量 S_r 、 S_o :

$$S_r = N_r \times D_p \times (1 - P_{er}) = 12886 \times 1000 \times (1 - 0.1) \approx 11.6 \text{ (Mbyte)}$$

$$S_o = N_o \times D_p \times (1 - P_{er}) = 810 \times 1000 \times (1 - 0.1) \approx 729 \text{ (Kbyte)}$$

以上より、バス停 (RSE) からセル内を通過するバス (OBE) に対して、約 11.6Mbyte、通過するバス (OBE) からバス停 (RSE) へは、約 729Kbyte のデータ送信が可能であることがわかった。一般にインターネットサービスにおいてウェブサイト 1 ページあたりのデータ量は 300Kbyte から 4Mbyte[付 9]となっており、アクセスとしては十分な性能が確保できる。車速に対する RSE および OBE の通信可能なデータ量の関係を付図 22 に示す。



付図 22 車速に対する通信可能データ量 (半径 224m のセル内)

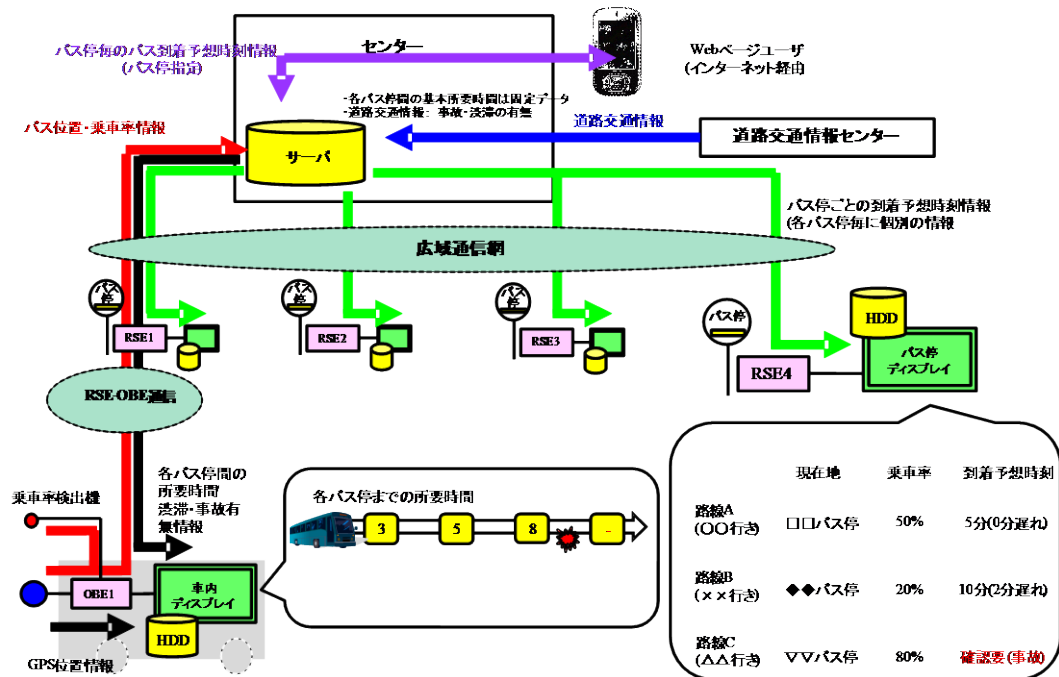
付図 22 より 700MHz 帯 WAVE のバス停基地局を設置した際、バス停を通過するバスは十分インターネットアクセスによるサイトの表示が可能な性能を有していることが理解できる。これにより付表 7 に示した各種応用に関して通信可能な性能を前提として具体的な実装の検証を行なうことができる。

【運行管理】

バス停の RSE 化に関して、路線自体が特定化されているために、各バス停に設置された RSE を通過することで、バスの運行状況を簡易的に把握し、バスを待つ乗客への情報提供を目的とする。サービスの概要を付表 8 に、全体のシステム構成例を付図 23 に、通信概要を付表 9 にまとめた。

付表 8 バス運行管理サービス

No	項目	内容	目的
1	バス停ディスプレイ表示	バス停ディスプレイに以下の情報を表示 ①バスが到着する予想時刻(分単位) ②①の情報を路線毎に表示 ③バスの運行状況(定刻からの遅れ、渋滞有無等) ④バスの乗車率	バス停で待つ乗客に対して、乗車したいバスの到着予想時刻や乗車率を提供する。
2	バス車内ディスプレイ表示	バス車内ディスプレイに以下の情報を表示 ①各バス停までの所要時間 ②バスの運行状況(定刻からの遅れ、渋滞有無等)	乗客に対して、現在のバスの位置や、各バス停までの所要時間を提供する。
3	Web情報サービス	Webユーザに対して下記情報の提供 ①選択したバスの指定バス停への到着予想時刻 ②①の路線毎の情報 ③バスの運行状況 ④バスの乗車率	これからバス停に向かう乗客に対して、到着予想時刻や乗車率を提供する。 ⇒バス到着直前のタイミングで、バス停に向かう事が可能。



付図 23 バス停 RSE によるバス運行管理アプリケーション構成図例

付表 9 バス運行管理通信概要

No	項目	内容	通信区間		通信契機
			送信元	受信先	
1	バス位置・乗車率情報	位置情報(どのバス停間に存在するか)と、乗車率をセンターへ通知する。	OBE	センター	RSU通過時
2	バス停毎のバス到着予想時刻情報	各バス停毎に、バスの到着予想時刻情報と、乗車率の情報を送信する。	センター	RSE	常時 (1回/1分)
3	各バス停間の渋滞・事故情報	バス停間の事故・渋滞の有無を各バスに送信する。	センター	OBE	事故・渋滞発生時

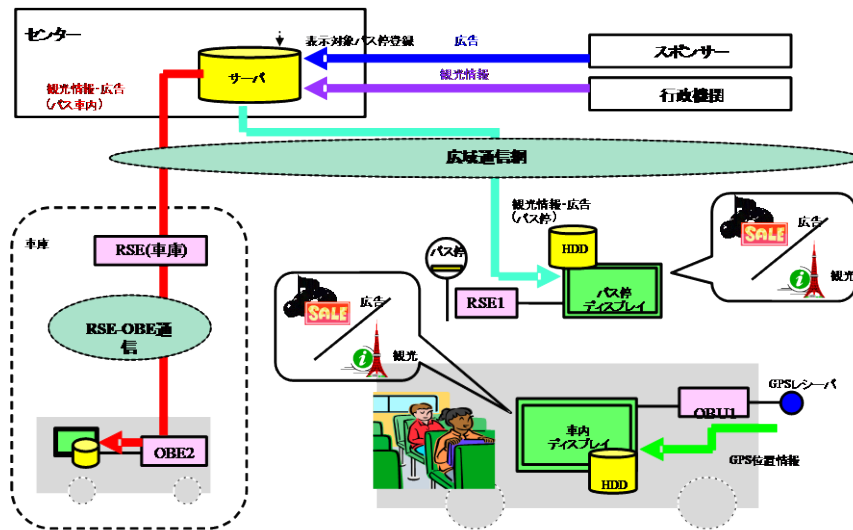
本運行管理システムの特長は、WAVE 機能を用いることで OBE を搭載したバスの通信範囲が届く範囲に入った瞬間からバス停に対してアクセスすることによりバス停で待つ乗客への通知およびバス停を経由したバス管理会社のセンターへバスの運行状態を通知することで簡易的に運行管理システムを構築が可能となる。また、バス乗車率等もセンター側でバス内蔵カメラあるいは乗車時の自動運賃システムからの情報等で把握が可能となる。さらにバス停間で起きた事故や渋滞情報等をバスに対して配信するなどの応用も考えられる。すでに国内ではいくつかの都市で通信を活用したバス運行システムの導入もされているが、携帯通信網を利用した通信費の必要性および専用車載装置の設置等のコストがかかっているのが現状であり、WAVE による運行管理システムの拡張の可能性は高いと考える。

【広告（サイネージ）】

バス停を活用した行政および一般企業からの広告をバス車内あるいはバス停への表示サービスを行なう。また、デジタル版としての広告のメリットとして、広告更新や掲示期間等の管理が容易になると共に広告収入ビジネスの展開にもつながる。アクセスサービスの概要を付表 10 に、システム構成例を付図 24 に、通信概要を付表 11 にまとめた。

付表 10 広告（サイネージ）サービス概要

No	項目	内容	目的
1	観光情報表示(動画)	バス車内のディスプレイ、及びバスディスプレイに、観光情報を表示する。	バス車内の乗客、バス停で待つ乗客に対して、観光情報を提供する。
2	広告表示(動画)	バス車内のディスプレイ、及びバスディスプレイに、広告を表示する。	バス車内の乗客、バス停で待つ乗客に対して、広告を視聴させる。 ⇒ バス会社が、広告掲載収入を得る。
3	バス位置に応じた表示内容の切り替え	バス車内の観光情報・広告の表示内容を、バスの位置に応じて変更する。	表示する観光情報・広告を有効なタイミングで表示する。(店舗付近走行中に広告表示...など) ⇒ 広告掲載元の集客効果を高める。 ⇒ 広告掲載需要増。 ⇒ バス会社への広告収入増。



付図 24 広告のアプリケーションシステム構成例

付表 11 広告（サイネージ）サービス通信概要

No	項目	内容	通信区間		通信契機
			送信元	受信先	
1	観光情報・広告配信 (バス車内)	バス車庫内において、以下の情報をバス内に配信する。 ① 観光情報 ② 広告	センター	OBE	バス運行 時間外 1回/月
2	観光情報・広告情報 (バス停)	バス停に以下の情報を配信する。 ① 観光情報 ② 広告	センター	RSE	バス運行 時間外 1回/月

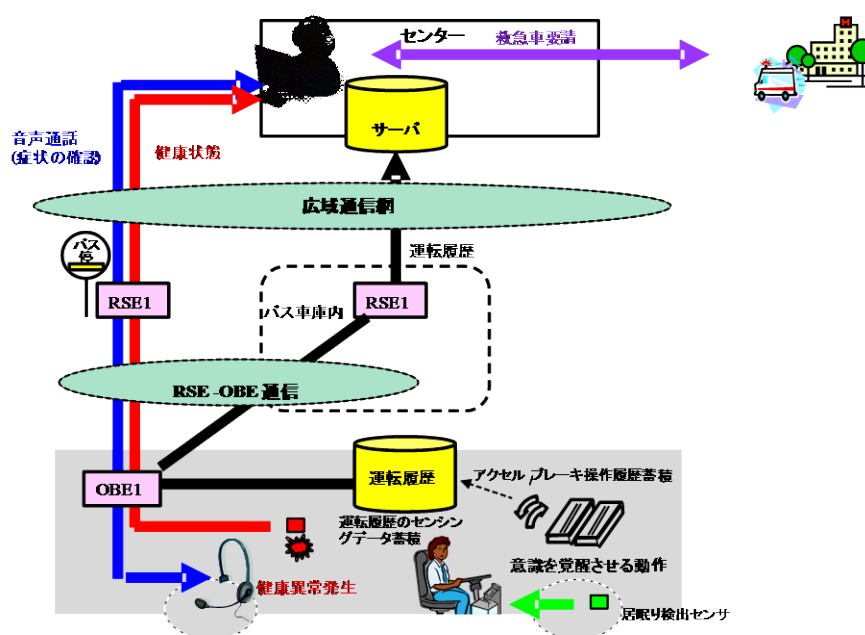
広告サービスでは、これまでのバス車内広告やバス停における広告をすべて電子化することで観光情報や地域業者からの広告をリアルタイムで表示を可能にする。また、バス停付近のお店からの広告や時間帯によるクーポンの提供等もこのアプリケーションの展開としてさらに応用も可能となる。

【運転者管理】

バス運転者の健康管理として、運行管理あるいは運転履歴を取ることで間接的に運転者のデータを取る場合や、運転者にセンサー等を装着し、直接的に健康状態のモニタ情報を日常的にバス停通過時点でのデータ蓄積による判断することで、健康管理を行なうことが可能となる。また、直接センター側のオペレータとの音声通話やりとりで状況確認を行なうなどのサービスを提供する。監視サービス概要を付表 12 に、運転者管理アプリケーションのシステム概要例を付図 25、通信システム概要を付表 13 に示す。

付表 12 運転者管理支援サービス概要

No	項目	内容	目的
1	ドライバーの健康異常の兆候検出	バス運行中のドライバーのその日の健康状態と、いつもの健康状態を比較し、異常な兆候が見られないか検出する。	運行中の症状悪化の予防 事故防止、バス運行停止のリスク回避
2	居眠り運転の防止	ドライバーの居眠り運転の兆候を検出し、ドライバーの意識を覚醒させる。	居眠り運転の防止 事故防止
3	突発的な健康異常検出	バス運行中のドライバーに突発的な健康異常が発生したとき、センター側でドライバーの症状を確認し、速やかに救急通報する。	速やかな救急通報によるドライバー生命の保護
4	ドライバーの運転履歴収集	バス路線上のドライバーの運転履歴情報(アクセル、ブレーキの操作履歴)を収集する。 各ドライバーがブレーキを踏んだ地点を総合して、危険地点を検出する。	バス路線で運転に留意すべき地点などの検出 ドライバーへの注意喚起



付図 25 運転者管理支援アプリケーションシステム概要

付表 13 運転者管理支援システム通信概要

No	項目	内容	通信区間		通信実績
			送信元	受信先	
1	健康状態	ドライバーセンサの情報を定期的にバス会社へ送信する。 ①ドライバーセンサ情報 ②位置情報・時刻情報	OBE	センター	RSU通過時
2	音声通話	バス会社のオペレータがバスの運転手の症状等を確認する。 ①音声通信データ	OBE	センター	健康異常発生後の常時
3	運転履歴	バス路線上のドライバーの運転履歴情報を運行終了後にバス車庫内で送信する。 ①アクセルブレーキ操作履歴 ②位置情報・時刻情報	OBE	センター	運行終了後

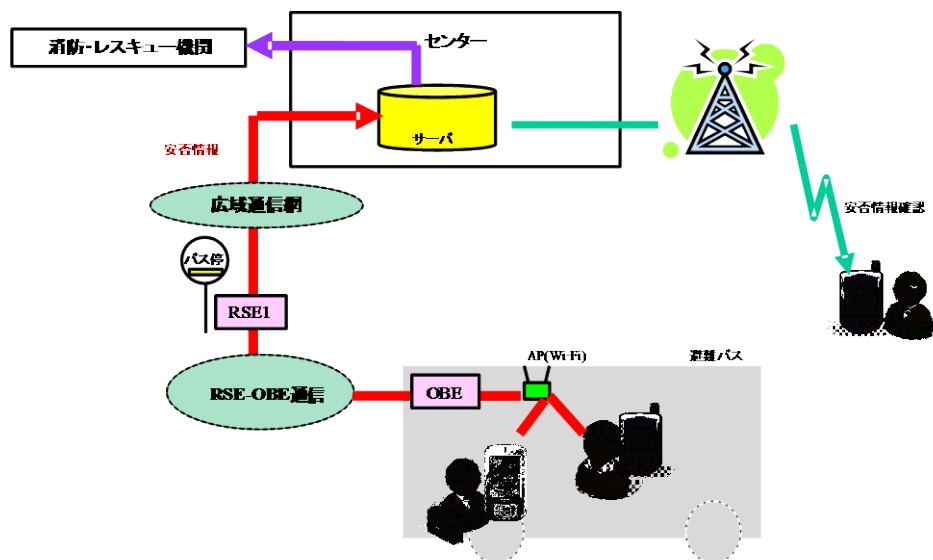
運転者管理支援システムでは近年バス運転者の健康異常による事故が起きており運転者への管理会社からの健康管理への問題が報道されることがある。しかし事前のチェックにも関わらず運転中の急な運転者の異常発生もあることからバス停通過時に運転者の状況の把握をセンター側で確認できることで安全な運行と運転者への健康管理面で支援することを可能とする。

【安否確認】

バス車内における異常事態発生や災害発生時における乗客への災害情報の配信や、乗客の安否情報をバス停経由にセンター側へ提供することで乗客の安否確認サービスを行なう。また必要に応じて消防やレスキューへの情報共有の配信を行なう。サービス概要を付表 14 に、安否確認のシステム概要例を付図 26 に、通信概要を付表 15 に示す。

付表 14 安否確認サービス概要

No	項目	内容	目的
1	乗客の安否情報収集・報知	災害発生時に、バス乗車中の乗客の安否情報を収集し、ワンセグ電波で安否情報を同報送信する。	バスの乗客の安否情報を、周辺地域へ報知する。



付図 26 安否確認サービスのシステム概要例

付表 15 安否確認システム通信概要

No	項目	内容	通信区間		通信契機
			送信元	受信先	
1	安否情報収集	バス乗客の安否情報を収集する。	乗客のスマートフォン	センター	災害発生時

安否確認システムでは乗車中の乗客がバスの通過した地域での安否情報としてセンター側に通知することで災害時の混乱した環境における安否確認情報として活用し、発生した災害情報をバス乗客に対して情報提供を行なうことで冷静な行動を促すことに応用する事例である。

ここに上げた事例はあくまでも WAVE システムの交通マネジメント以外にも応用できる例としてあげてものであり、さらに色々な応用検討も可能と考える。

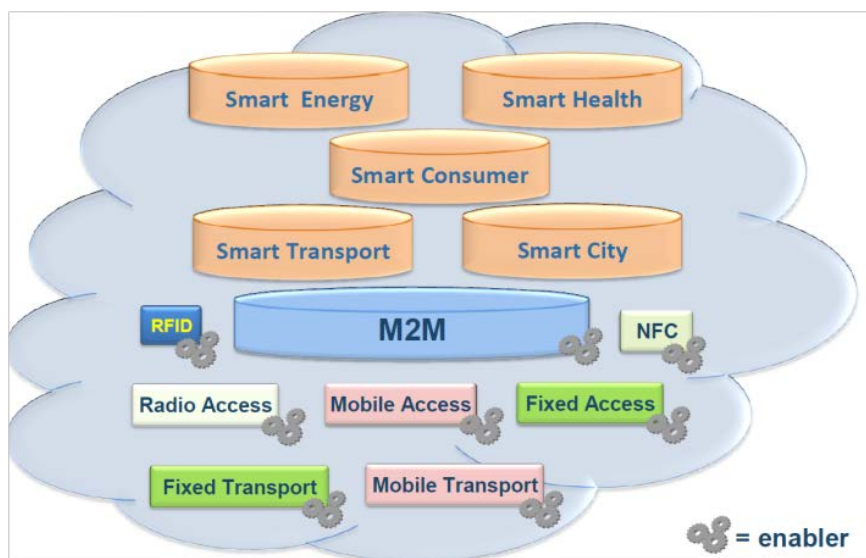
付録資料 5：自動車分野における IoT/M2M

WAVE 規格とならんで車載無線通信では、近年（2010 年以降）IoT、M2M の言葉がよく聞かれるようになってきた。

IoT とは一般的に、情報通信機器以外の分野において、様々なモノに通信機能を持たせることで、インターネットへの接続や、インターネットを介することでお互いに通信することで、自動認識、自動計測、遠隔制御等を可能にすることを意味している。さらにモバイル端末やウェアラブル機器にも拡大して使用されるケースもある。また、こうしてさまざまな機器がつながることで、人の関与することなく直接制御を可能にすることを M2M としてさらに踏み込んだ標準化としての動きが活発化され、2012 年 7 月には各国の 7 つの標準化団体が世界標準化に向けた「oneM2M」の設立が行なわれ、世界レベルでの標準化としてまとめる活動が開始されている。

ここでは、本テーマである車載無線通信の観点から、特に M2M に関してその動きをまとめる。IoT/M2M での議論の特長は、これまでの通信業界、センサーネットワーク業界、インターネット業界での「ネットワーク」に関する議論から、その応用として様々な対象分野への展開を見せている点にある。対象分野は、エネルギー関連、健康と医療関連、交通・輸送関連、ゲーム等のコンシューマー分野など幅広い方面への展開を見せており、スマートシティと言われている「街」全体の管理分野にまで広まっている。これら標準化への動きは、全世界で共通化することで様々な機器の開発効率を上げるとともに、対象となる分野の広がりをつけることで活用される市場の拡大を意味し、企業にとっては大きなビジネスチャンスを目指すインセンティブとなっている。WAVE システムは、交通事故や交通渋滞を削減することを目指して、開発されていることは、これまで説明してきたが、これらは死亡事故の削減による社会的損失の軽減や、交通渋滞による環境破壊や温暖化現象などの経済的損失の軽減を目指すことであり、いわゆる「低炭素社会」の実現を目指すことにつながる。以下に M2M で先行している欧州における動きを特に WAVE システムに関係する点に絞りまとめる。

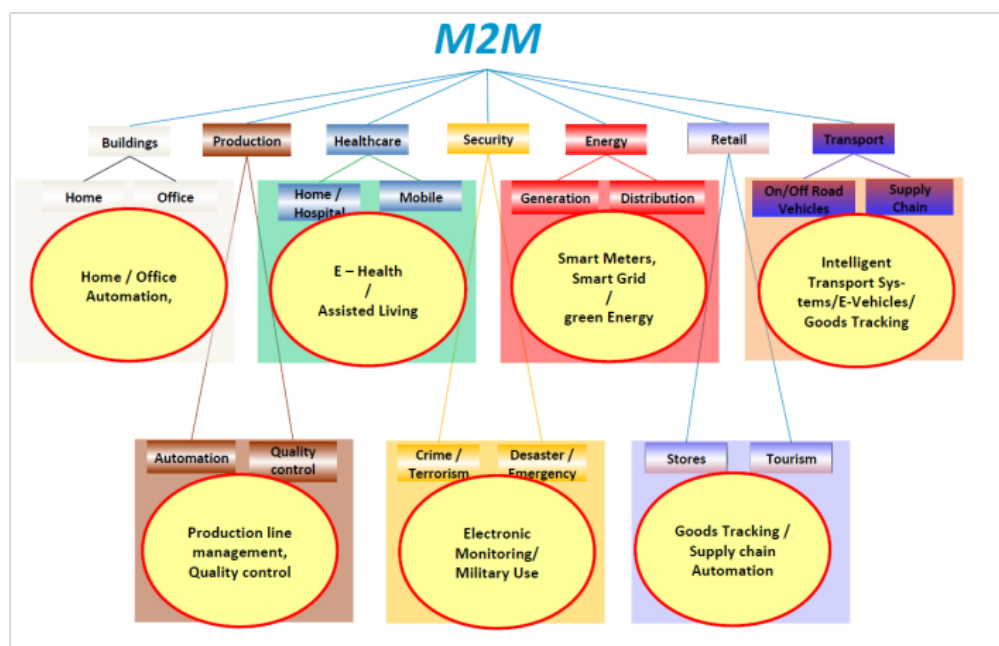
欧州における M2M の標準化は 2009 年に開始されており、これまでのインターネット接続を検討する IoT（Internet of Things）や無線 LAN、ZigBee 等のセンサーネットワーク、携帯電話における標準化 3GPP（Third Generation Partnership Project）をもとに検討され 2012 年にサービスレイヤーのプロトコルの標準化が提案された。欧州標準化団体である ETSI（European Telecommunications Standards Institute）では M2M は主に使用されるサービスとそのサービスに必要なネットワークに接続された機器（Enabler と表現）の接続としてまとめられている。付図 27 に ETSI の資料から抜粋し、M2M の位置付けをまとめる[付 10]。



付図 27 ETSI における M2M の位置付け

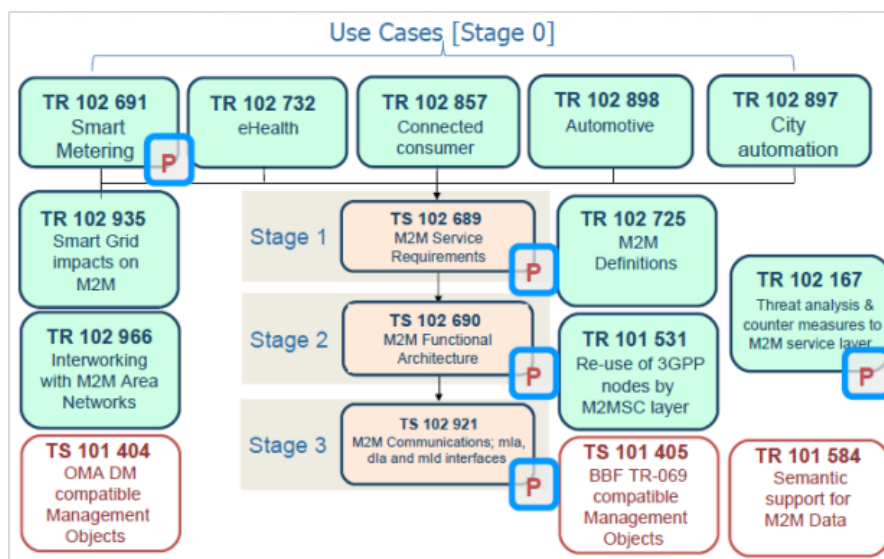
付図 27 から明らかなように、M2M はサービスとネットワークに接続された機器をつなげるための標準化の位置付けにあるといえる。さらに続いて同資料から付図 28 に M2M のアプリケーションとしての例が提供されている。

付図 28 からは、ビル管理、工業生産管理、健康管理、セキュリティ管理、エネルギー管理、物販管理、交通管理の様々な方面への適用が検討されていることがわかる。さらに、ビル管理では家庭や事務所における自動制御、生産管理ではラインでの品質保証、健康管理では各人の健康状態のモニタから生活面への支援、エネルギー管理ではスマートメーターに代表される各家庭および事務所の消費電力の管理と電力系統へのピーク電力制御、物販管理では各製品のサプライチェーンにおけるトラッキングによる記録の管理、交通管理では、ITS や電気自動車（EV 車）の充電施設への誘導とエネルギー管理ならびに物流管理（トラッキング）等への応用が期待されている。この交通分野の M2M は、ITS が交通分野における車両（資料では On / Off Road Vehicle）に関する代表的な応用として位置付けられている。また、技術委員会（TC : Technical Committee）では特に通信に関するハイレベルな End-to-End 全体の開発と維持を M2M のアーキテクチャとして検討することを前提に、現在存在している規格に対象となるアプリケーションのギャップを埋めるための規定の補充を行なうことを明確に宣言している。また、他の標準化委員会とも連携したオープンな対応を行ない、それらの資料は ETSI の技術レポート（TR）や技術コメント（TC）として公開することを約束している。



付図 28 ETSI における M2M の応用

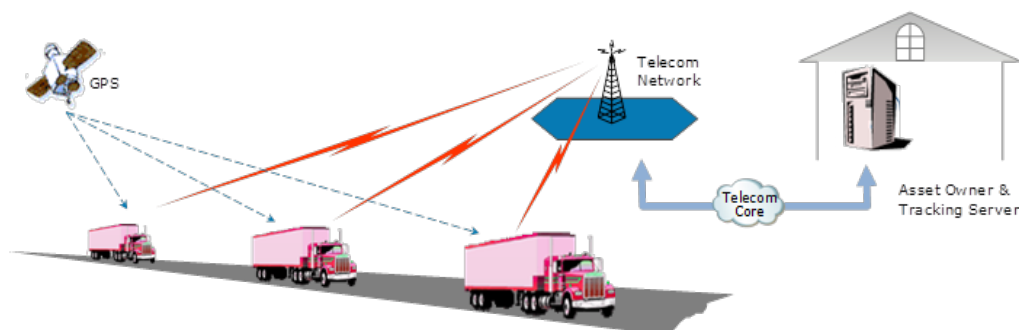
自動車分野に関係する M2M の詳細についての 2012 年 3 月時点での整備状況を付図 29 に示す。図中の記号 P {右下} 表示された規格番号は、既に規定されたものを示し、それ以外はドラフトないし今後作成される規格番号を表わしている。付図 29 のうち、自動車応用を規定している規格は TR 102 898 となっており、タイトルは「Use cases of Automotive Applications in M2M capable networks」とされており、車載向け通信の M2M に関する規定であり、今後詳細規定がされる予定となっている。全体としては、既存携帯電話のネットワーク（UMTS：Universal Mobile Telecommunications System）、LTE、3GPP における識別モジュール規定（USIM：Universal Subscriber Identity Module）を中心とした議論となっており、自動車向けアプリケーションに関しては TR 102 898 の中で、次の 2 点に関して、応用例 1 および応用例 2 として検討が行なわれている。



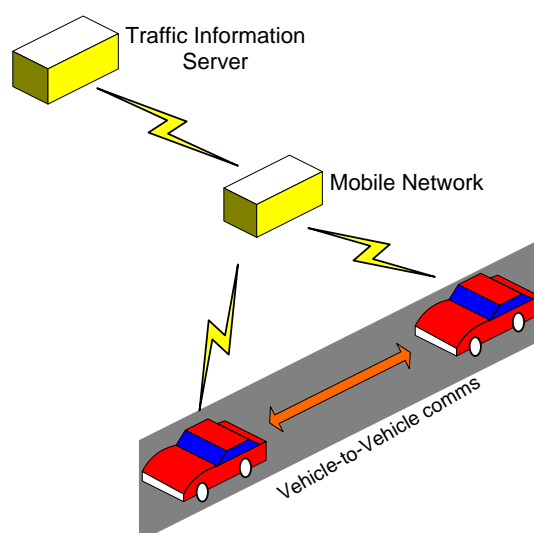
付図 29 ETSI における M2M 規格

2 つの応用例は ETSI TR 102 898 の規格から、代表されるアプリケーションを抜粋すると付図 30、付図 31 に示す物流トラッキング管理（応用例 1）と交通状況の把握（応用例 2）になっている。

まず、物流トラッキング管理（応用例 1）に関して、GPS を活用した運搬車両の位置情報、移動速度情報を物流管理サーバに情報を上げ、位置情報による物流の管理を行なうアプリケーションを規定している。その中で、車載搭載される M2M 端末およびサーバに接続される M2M サーバの定義を行ない、今後具体的なアクセス仕様や広域の位置情報の統合や、それぞれの情報の自動処理に関する規定が新たに必要となるものとしている。



付図 30 ETSI 規格における自動車 M2M の応用例 1



付図 31 ETSI 規格における自動車 M2M の応用例 2

また、交通状況の把握（応用例 2）に関して、本研究テーマでもある WAVE システムに関する規定を応用面の立場からまとめ直している。応用例 1 同様に車載 M2M 端末およびサーバ M2M に関する規定およびセキュリティに関する記載があるものの詳細な規定はされていないが、WAVE システムにて既に規格化されている規定との整合をとってまとめていくものと推察される。

このように自動車における M2M 規格化への動きは、すでに先行している WAVE システムの規格をフォローする中で整備されるが、本 ETSI TR 102 898 の前文には上記アプリケーション以外にも、Mobile TV、インターネット接続（ブラウザと電子メール）等の応用例もあげており、WAVE 規格としての欧州規格 CEN EN1225 や米国規格 IEEE802.11p の規定されている制御チャネル（CCH）以外に、ユーザ応用に用意されているサービスチャネル（SCH）への展開を意識した規格化の動きと考えられ、国際協調性に関して特に UHF 帯 WAVE 技術を推進する日本において課題となると考える。

付録資料 6 : WAVE 標準化への国際協調性課題

本 WAVE 開発に先行してきた欧米では、欧州では 2007 年 12 月には欧州標準化推進団体 ETSI (European Telecommunication Standard Institute) の TC-ITS (Technical Committee - Intelligent Transport System) が設立され、欧州規格 CEN EN1225 (Comité Européen de Normalisation) として規格化された。また、米国では 2010 年 7 月に 2004 年より検討されてきた IEEE802.11p タスクグループでの検討が IEEE (The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.) にて正式に IEEE802.11p/IEEE1609 として承認された。国内においては、ARIB (Association Radio Industries and Business) にて 2009 年より規格案としてドラフトが作成され、5.8GHz 帯システムが ARIB STD-T75 および ARIB STD-T88 として、700MHz 帯システムが ARIB STD-T109 として 2012 年 2 月に制定されている。

これらの欧米、国内の規格の特長をまとめは本論表 9 にて示しているが、再度付表 16 として再掲する。

付表 16 WAVE システムの仕様比較まとめ

	日本		米国 (DSRC)	欧州 (DSRC)
	DSRC	700MHz		
アプリケーション層	アプリ ETC	アプリ 衝突安全防止	アプリ ●衝突安全防止 ●高速データサービス	アプリ ●衝突安全防止 ●高速データサービス
上位 プロトコル	DSRC プロトコル 処理	国内独自 (現時点)	アプリ管理 IEEE1609	アプリ管理 UDP/TCP, IPv6 WSMP(非IP) LLC
アクセス方式	TDM/FDD	CSMA/CA	802.11p CSMA/CA	CSMA/CA
変調方式	QPSK	OFDM (BPSK/QPSK/16QAM)		
CH数	5MHzx7ch x2(上り/下り)	■CCH 10MHzx1ch (内1MHzはガードバンド)	■CCH ■SCH 10MHzx7ch (20MHz幅オプション)	■CCH ■SCH 10MHzx3ch
使用周波数	5.8GHz帯	700MHz帯	5.9GHz帯	5.9GHz帯

付表 16 での国内規格と世界標準との差は 5 章にて指摘した通り、チャンネル数の割り当てと上位プロトコルであった。国内 5.8GHzDSRC 仕様は 2001 年より ETC 用途として使用されてきたために国際協調性の議論には向かないが、700MHz 帯に関して周波数は異なるもののアクセス方式では共通した仕様となっている。したがって、ここでは 700 帯 WAVE に関し、もう少し詳細に仕様をみていくことにする。

【国内 WAVE 仕様】

国内 700MHz 帯 WAVE システムの仕様は、付表 14 に示したとおり、通信チャネルとして CCH の 1 チャネルの利用となっている。これは、700MHz 帯周波数を車載無線通信に活用した歴史的背景からの制約であったことは自明となっている。すなわち、国内で 2007 年 7 月 24 日に、アナログテレビ放送を終了しデジタルテレビ放送に切り替え、これによってアナログテレビ放送にて使用していた周波数帯域が空き、特に UHF 帯を次世代携帯電話用と車載無線通信として週は数割り当てを行なった。このため、現在の有限である無線技術周波数にて有効活用すべく、政府の公平性な割り当てとすべく、車載無線通信には 760MHz を中心周波数とする 10MHz の割り当てとなった経緯がある。このため、欧米のように複数のサービスチャネルとしての割り当てができなかった。ここで、700MHz 帯 WAVE システムの仕様に関して具体的に内容を確認する。まず、使用されるデータの構成は ARIB T-109 規格より、フレーム構成を付表 17 に示す。

付表 17 700MHz 帯 WAVE のフレーム構成

設定単位	ヘッダ・フッタ	ヘッダ・フッタ長 (オクテット)
フレーム毎	MAC制御フィールド	24
	LLC制御フィールド	8
	IR制御フィールド	22
	レイヤー7フィールド	2
	EL基地局ヘッダ またはEL移動局ヘッダ	5
	FCSフィールド	4
	合計	65

注) MAC: Media Access Control LLC: Logical Link Control
EL: Extended Layer (拡張レイヤ) FCS: Frame Check Sequence

本仕様にもとづき、このフレームを送信可能なための必要帯域を検討する。検討する環境の車両数 D (台)、データの送信周期 T (ms)、送信データ長 L (オクテット)、伝送容量 S (Mbps)、送信変調の周波数効率 η (bit/Hz)、伝送帯域 W (MHz) とする。この内、車両数 D 、送信周期 T 、送信データ長 L 、周波数効率 η は、変調方式が決定されれば規定値となり、これより伝送容量 S と伝送帯域 W を求めることを検討する。伝送容量 S は、全体の車両 D から必要なデータ長 L を決まった周期 T で送信する場合、付式 (24) で求められる。

$$S = (D \times L \times 8) / (T \times 1000) \quad \text{付式 (24)}$$

変調方式を決めれば周波数効率 η がきまるので、この伝送容量から必要な伝送帯域 W は以

下で求められる。

$$W = S / \eta \quad \text{付式(25)}$$

ここで変調方式を 16QAM(1/2) ($\eta=1.37$)、車両数 D は中心市街地モデル (1055 台) 周期を国際標準の IEEE802.11p の 100 ミリ秒を用いると、65 オクテットのデータ転送に必要な帯域 W は 4MHz となる。その計算例を付表 18 に示す。

付表 18 16QAM 変調に必要な帯域幅

記号	項目	単位	値	備考
D	車両数	台	1055	中心市街地モデル
T	送信周期	ミリ秒	100	
L	送信データ	Byte	65	
S	伝送容量	Mbps	5.486	$=D \times L \times 8 / (T/1000)$
η	周波数利用効率	bit/Hz	1.371	16QAM(1/2)
W	伝送帯域	MHz	4.00	$=S/\eta$

ここで 700MHz 帯 WAVE の変調方式とそれぞれの場合の周波数効率を付表 19 にまとめる。

付表 19 700 帯 WAVE の変調方式と周波数効率の関係

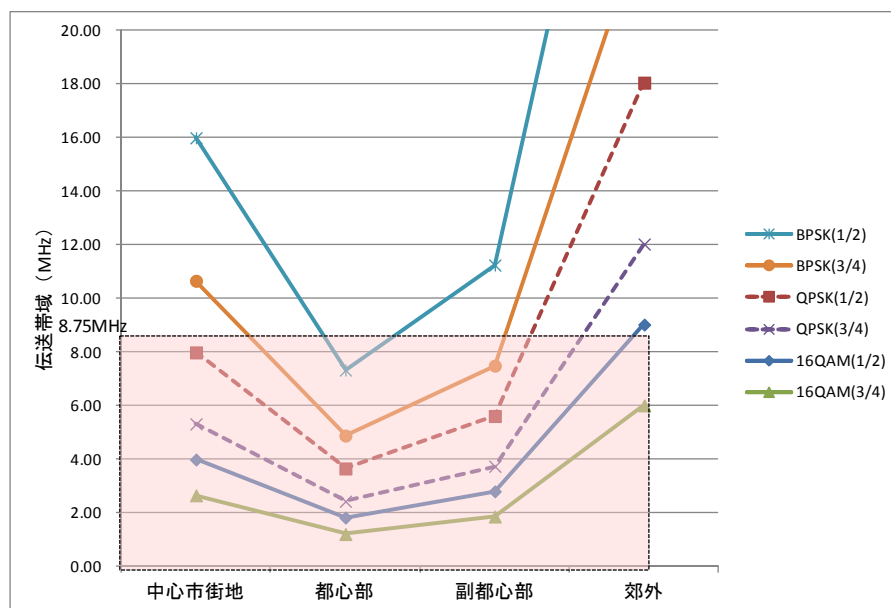
変調方式	速度 (Mbps)	週数利用率
BPSK(1/2)	3	0.343
BPSK(3/4)	4.5	0.514
QPSK(1/2)	6	0.686
QPSK(3/4)	9	1.029
16QAM(1/2)	12	1.371
16QAM(3/4)	18	2.057

周波数利用効率 = (行なわれた通信量) / (使用したスペクトル)
使用帯域幅: 8.75MHz

付表 19 のパラメータをもとに添付資料 1 に示した 4 つの道路環境モデルにて変調方式と必要な帯域幅の関係を求め、この結果を付図 32 に示す。

ここで使用周波数帯域幅は付表 19 より 8.75MHz であることから、それぞれの変調式で対応できる範囲は、この帯域幅以下の領域である必要がある。関心事は中心市街地における必要な周波数帯域幅であり、付図 32 より高速通信用変調方式の QAM(1/2)、QAM(3/4)において使用帯域幅 (8.75MHz) の 50%にて対応できることが判明した。このことは使われる周波数帯域幅にはまだ余裕があることになり、必要に応じて余分な周波数帯域を効率よく

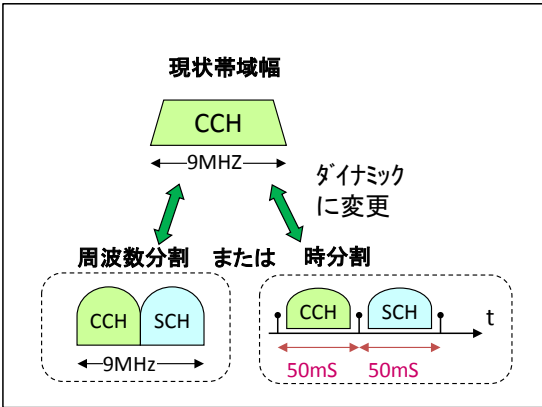
使用することも可能であることを意味している。この周波数帯域使用の効率化を活用することで現行の 700MHz 帯 WAVE の国際協調性に関する検討につなげる。



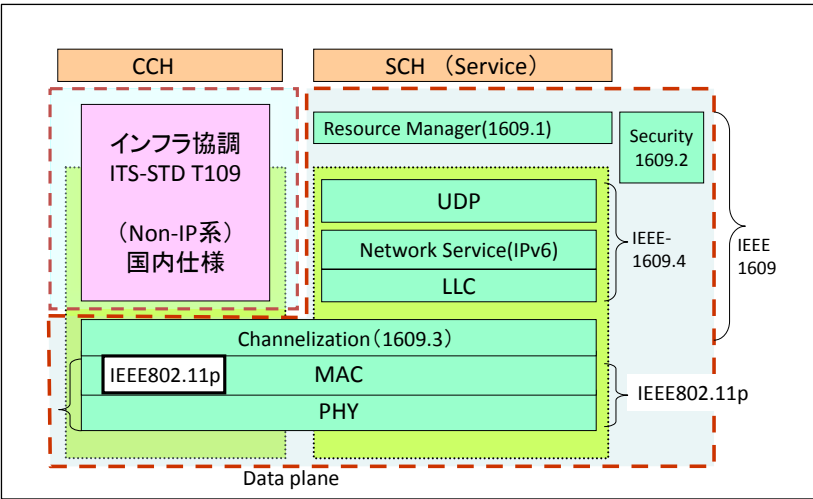
付図 32 700 帯 WAVE の都市環境と変調方式による必要帯域幅

【700MHz 帯 WAVE の国際標準協調性】

国内 700MHz 帯 WAVE システムは現状では欧米の WAVE システムに対して上位プロトコルおよび通信チャネル設定にて仕様が大きく異なっており、国際標準化の動きに対して対応が難しい状況にあることは先に示した通りである。欧米では、それぞれの標準化団体は、それぞれの仕様の共通化を図るべく、国際協調に向けた会合を定期的実施しており、CCH および SCH の仕様に関しては同調する方向で仕様の改善を実施している。また、欧州においては、現在米国と比較して帯域幅が、CCH+SCH の 3 チャンネルであり狭い状況に対して、拡張の議論も行なわれ始めている[付 11]。 付表 18 にて示したように、国内の安全運転支援のアプリケーションとしての必要な伝送帯域は、中心市街地においても現状の伝送帯域の半分にて対応可能であることがわかった。これにより現状の 700MHz 帯 WAVE 方式に対して、帯域を周波数にて分割する方法や、時間軸にて分割し多重する方式の適用可能性があると言え、その多重も対象地域により 2~4 分割での多重化が考えられる。この多重化のイメージを付図 33 に示す。700MHz 帯 WAVE にて適用してきた安全支援に関しては従来通り CCH に適用し、CCH 以外に多重化により SCH を設けることで、課題となっているチャネルに関する国際協調性への対応の道が開ける。すなわち、CCH には現行の国内規格 ARIB T-109 を適用し、SCH には欧米にて実施している上位プロトコル IEEE1609 シリーズの適用が可能となる。その適用イメージ例を付図 34 に示した。



付図 33 700MHz 帯 WAVE システムのマルチチャネル化拡張



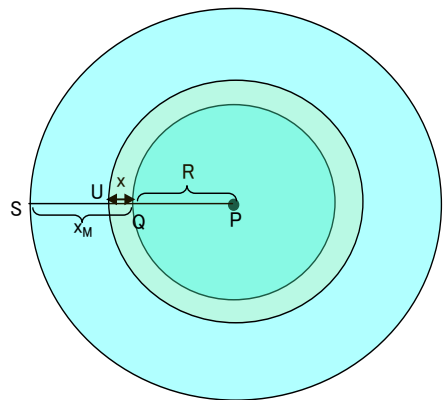
付図 34 700MHz 帯 WAVE における国際協調性対応例

付録資料 7：隠れ端末問題解析

今後の課題で指摘した「隠れ端末」問題は WAVE システムに限らず無線通信である限り課題となる項目であるが、WAVE としても検討を行なっておく必要がある。この問題は車が密集する環境下でのデータパケット通信が、お互いの車両から送信するパケット同士の衝突による通信ができなくなるという状況を招くことがある。WAVE システムの通信アクセス方式は CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access Collision Avoidance) を採用し、アクセスが競合する際の回避を行なう方式を用いているため、一般的な無線 LAN においてはさほど問題にはならないが、WAVE システムが適用される移動する車両環境下での検討は必要となる。坪井らの既論文[付 12]「WAVE・DSRC システムにおける隠れ端末によるパケット衝突の影響の理論値」では、基本的解析手法を紹介しているが、パケット誤り率と車両台数に関しての解析において、パラメータが古いため、今回の車両密度および 760MHz 帯システムの ARIB T-109 仕様にに基づき以下全体見直しと再計算を行なう。

【隠れ端末モデル】

環境モデルとして付図 35 を検討する。通信を行なう P 点の車両が、通信範囲内にある受信範囲にある Q 点の車両に対してパケット送信を行なう場合を考える。この時、受信対象車両には、当該送信車両の通信範囲外に存在する S 点の車両からの送信される可能性のある通信パケットデータは先の P 点から同じく通信を Q 点の車両に行なおうとしている車両には通信到達範囲外であるため見えないことになる。Q 点の車両は P 点の車両のキャリアセンス可能な位置の上限の距離 R 離れた位置に存在しているとする。一方 P 点の車両の通信範囲外である U 点から S 点の範囲に存在する車両は、Q 点の車両に対して通信可能範囲におり、P 点の車両にとって U 点から S 点に存在している車両は「隠れ端末」として存在することになる。ここで P 点の車両のキャリアセンス範囲内にある P 点から Q 点の車両に関しては、WAVE システムの通信方式 CSMA/CA により管理されているので、ここでは隠れ端末による受信への影響はないと判断できる。



付図 35 隠れ端末解析モデル例

ここで、再度国内における規格は ARIB T-109 の仕様および接続試験として同 ARIB（電波産業会）に ARIB TR-T20[付 13]の仕様を参照する。700MHz 帯 WAVE の基本パラメータを付表 20(A)に示す。また 700MHz 帯 WAVE の受信感度仕様を付表 20(B)に示した。

今回の「隠れ端末」は車の密集地帯すなわち中心市街地、都心部にて検討が必要であった。この環境下での伝搬特性は見通し外通信となることが想定されるため、本考察においても見通し外通信環境を適用する。見通し外通信における伝搬損失は周波数の 2.5 乗程度で増加し、伝搬距離の 3.5 乗で急激に増大することが一般的に知られている[付 14]。

付表 20 700MHz 帯 WAVE の仕様

(A) 700MHz 帯 WAVE 基本パラメータ

項目	内容
中心周波数	760MHz
データレート	3、4.5、6、9、12及び18Mbps
サブキャリア変調	BPSK、QPSK、16QAM
符号化率	1/2及び3/4
副搬送波の数	52
OFDMシンボル間隔	8.0 μ s
ガードインターバル	1.6 μ s
PSDU長	1000オクテット
変調信号	ITU-T勧告O.150による9段PN符号

(B) 700MHz 帯 WAVE 受信感度仕様

伝送速度 (Mbps)	所要受信入力 (dBm)	変調方式	符号化率
18Mbps	-73	16QAM	3/4
12Mbps	-77	16QAM	1/2
9Mbps	-80	QPSK	3/4
6Mbps	-82	QPSK	1/2
4.5Mbps	-84	BPSK	3/4
3Mbps	-85	BPSK	1/2

以上の前提にもとづき、伝搬特性を求めることとする。まず、見通し内 (LOS: Line Of Sight) の 伝搬損失算出式は、自動車研究所のガイドラインである「ITS 通信シミュレーション評価シナリオ (Ver 1.2) [付 15]を参考に、以下の式を用いて算出することとした。送受信点間距離 $d(m)$ の伝搬損失 $L_{los}(dB)$ は、付式(26) にて与えられる。

$$L_{\text{los}} = L_{\text{bp}} L_{\text{bp}} + 66 + \begin{cases} 20 \log_{10} \left(\frac{d}{R_{\text{bp}}} \right) & d \leq R_{\text{bp}} \\ 40 \log_{10} \left(\frac{d}{R_{\text{bp}}} \right) & d > R_{\text{bp}} \end{cases} \quad \text{付式(26)}$$

ここで、 R_{bp} は、送信点から伝搬損失が変化するブレイクポイントまでの距離であり、付式(27)にて与えられる。

$$R_{\text{bp}} \approx \frac{4h_b h_m}{\lambda} \quad \text{付式(27)}$$

h_b ：送信アンテナ地上高 (m)

h_m ：受信アンテナ地上高 (m)

λ ：無線通信キャリア周波数

L_{bp} (dB) は送信点からブレイクポイントまでの伝搬損失であり、付式(28)にて与えられることが一般的に用いられている。

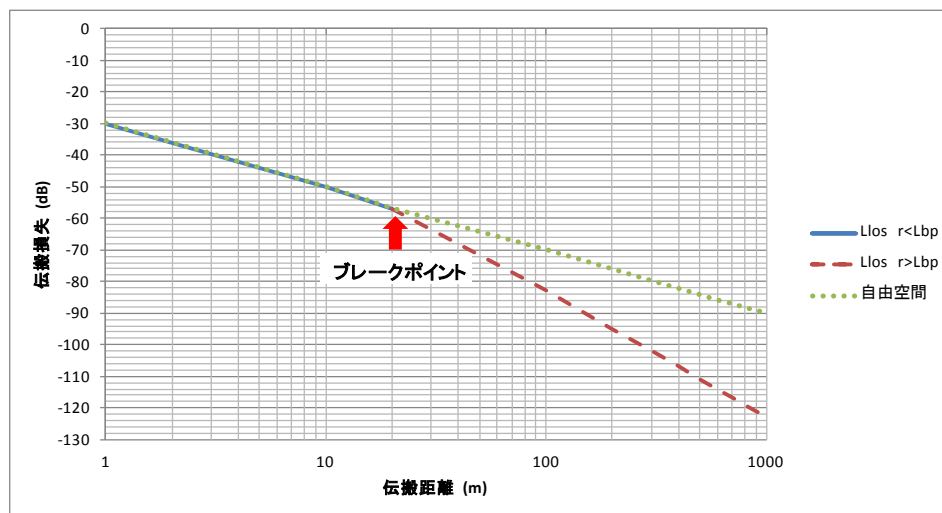
$$L_{\text{bp}} = 20 \log_{10} \left(\frac{\lambda^2}{8\pi h_b h_m} \right) \quad \text{付式(28)}$$

700MHz 帯 WAVE の伝搬特性に使用する一般的に用いられる回線設計緒元を付表 21 にまとめ、以下この緒元をもとに伝搬特性を求める。

付表 21 700MHz 帯 WAVE 伝搬特性回線設計緒元

	項目	記号	単位	仕様例	記事
送信側	送信出力	Pt	dBm	0-30dBm	パラメータ
	送信系ハード損失	Lt	dB	-3.0	
	送信アンテナ利得	Gt	dBi	3.0	
	送信eirp	Pe	dBm		=Pt+Lt+Gt
	送信アンテナ高	Ht	m	1.5	
伝搬	許容伝搬損失	Ld	dB		
	変動マージン	Mσ	dB	9	σ=7dB, 90%値(1.28σ)
受信側	アンテナ利得	Gr	dBi	3.0	
	受信系ハード損失	Lr	dB	-3.0	
	所要受信入力	Ps	dBm		受信感度値を用いる
	受信アンテナ高	Hr	m	1.5	

700MHz 帯 WAVE の仕様 ARIB T-109 をもとに、伝搬損失特性を求める。送受信アンテナの地上高を一般的な乗用車を想定し、1.5m にて設定すると、付図 36 に示す特性となる。

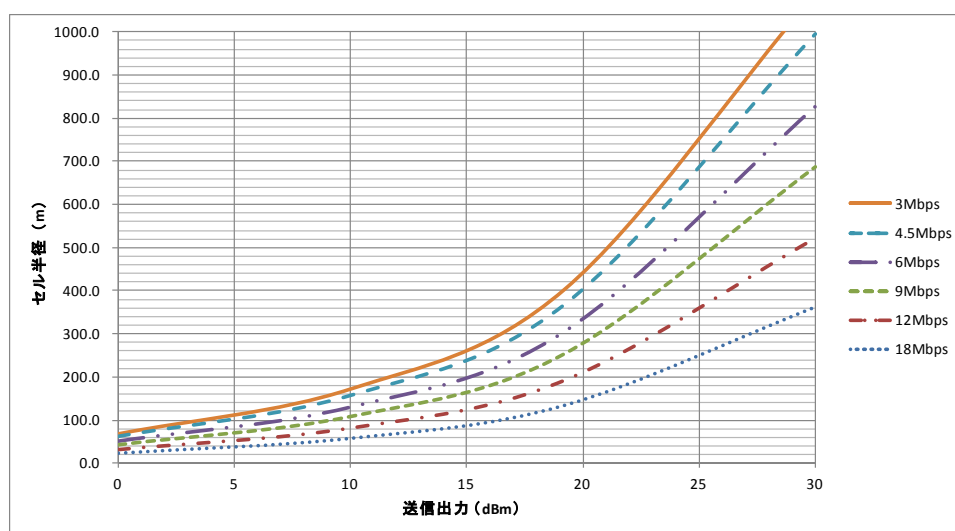


付図 36 700MHz 帯 WAVE の伝搬特性

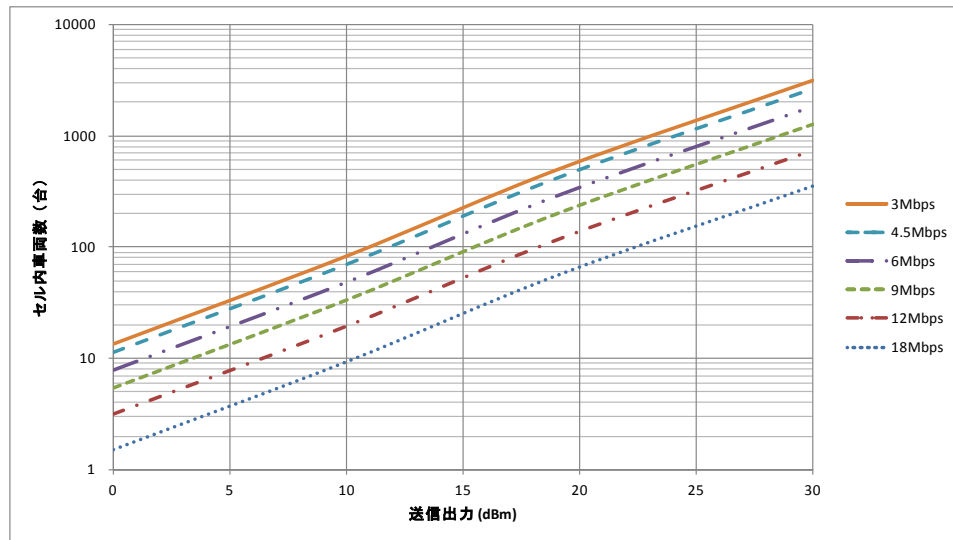
続いて、送信出力による通信範囲（セル半径）の特性を求める。通信範囲の端（セル端）における所要受信入力 P_s は付表 21 の諸元をもとに、以下の式で求められる。

$$P_s = (P_t + L_t + G_t) + (G_r - L_r + M\sigma) - \text{許容損失} \quad \text{付式(29)}$$

この付式(29)に付表 20 (B) に示した伝送速度と所要受信入力を用いて送信出力を算出し、通信距離（セル半径）を算出することで送信出力とそのセル半径の関係を求めることができ、その結果を付図 37 に示す。



付図 37 700MHz 帯 WAVE の送信出力とセル半径

付図 38 送信電力とセル内車両数 ($\rho=1000$ の場合)

これにより、送信出力とセル半径の関係が求められたので、対象とする範囲の車両密度 (ρ) が与えられるとそのセル内に存在する車両数を求めることができる。例えば、 $\rho=1000$ (台/km²) とすると、付図 37 の関係から、付図 38 の送信電力と車両数の関係を得ることができる。この車両密度に関しては計算導入の理解のためにわかり易く便宜的にしているが、中心市街地のモデルでの検討を後半にて検証するものとする。

付図 35 に示した隠れ端末解析モデルにおいて、P 点の車両が、Q 点の車両と通信する際に、Q 点から x だけ離れた U 点にいる車両が Q 点にいる車両への干渉を与えるとする。この場合、P 点の車両から Q 点の車両に通信する信号を一般的に希望波 (D 波) と呼ばれ、U 点の車両から Q 点の車両に入ってくる信号は、P 点と Q 点間の通信からすると不要波 (U 波) として扱うことができる。このため干渉の度合いを表わすパラメータとして DU 比 (DUR) を用いることができる。対象とする環境の伝搬減衰係数を α とすると、距離特性の $-\alpha$ 乗となる関係から、DUR は付式(30)のように表わされる。

$$\text{DUR} = \frac{D}{U} = \frac{R^{-\alpha}}{x^{-\alpha}} \quad \text{付式(30)}$$

ここで、DUR が所要値 β を満足する位置の上限地点を S 点とすると、Q 点の車両に対して干渉を与えている車両数は、U 点から S 点に存在する車両の合計になり、これが隠れ端末としての車両数となる。即ち、付図 33 の Q 点から S 点までの外環部分に存在する車両の数 N_c となる。当該環境下の車両密度を ρ とすると、 N_c は付式(31)で求められる。

$$N_c = \rho \int_{x=0}^{x=x_m} 2\pi(R+x) dx = \rho(2\pi R x_m + \pi R x_m^2) \quad \text{付式(31)}$$

ここで付式(30)より

$$\text{DUR} = \frac{D}{U} = \beta = \frac{R^{-\alpha}}{x_m^{-\alpha}} \quad \text{付式(32)}$$

と表わすことができるので、 x_m は付式(33)として求められる。

$$x_m = R(1/\beta)^\alpha \quad \text{付式(33)}$$

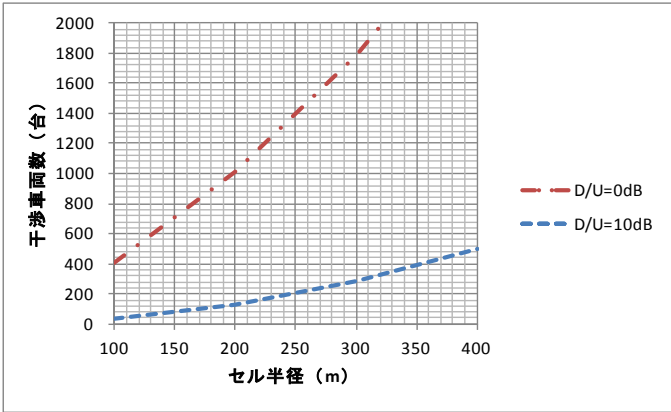
付式(33)を付式(31)に代入することで、付式(34)が求められる。

$$N_c = \rho \int_{x=0}^{x=x_m} 2\pi(R+x) dx = \rho(2\pi R^2 (1/\beta)^\alpha + \pi R(1/\beta)^{2\alpha}) \quad \text{付式(34)}$$

一方、対象とするセル内の車両数 N_{c0} は付式(35)で与えられる。

$$N_{c0} = \rho \pi R^2 \quad \text{付式(35)}$$

以上から干渉車両数は Q 点の車両から見て外環に存在する車両数 (N_c) と内部の車両数 (N_{c0}) の和となる。よって、車両密度 $\rho=1000$ とした場合の干渉車両数と DUR の関係を、DUR=0dB および 10dB として求めると付図 39 の結果ようになる。付図 39 のセル半径 200m の地位点において、所要の DUR を 0dB から 10dB に変化させると、干渉車両数は 1000 台から、130 台になる。これは DUR を大きく制限するほど、 x_m が小さくなり、隠れ端末数が減少するためである。

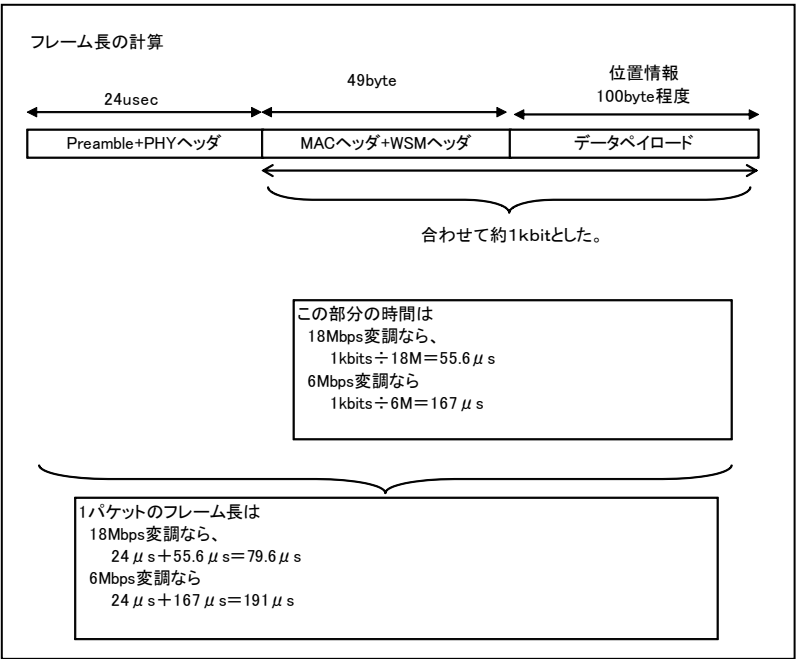


付図 39 所要 DUR と干渉車両数

【パケット衝突】

続いて、P 点と S 点の位置にある車両から Q 点の車両にそれぞれ送信されるパケットの衝突に関して検討を行なう。すなわちこれは送信パケットの衝突確率の問題となる。WAVE システムでは各車両から送信されるパケットデータが衝突を起こした場合、そのパケットが再送されることで通信の継続が行なわれるため、この再送回数による通信が成功する場合がどの程度あるかによって評価を行なう必要がある。

ちなみに WAVE システムは、その仕様により伝送速度に応じてそのフレーム長を可変に制御している。従って、パケット衝突を考える上で、伝送速度によるフレーム長によりその衝突確率も異なってくることに留意する必要がある。WAVE システム仕様から伝送速度とフレーム長の関係仕様を示すと付図 40 のようになる。



付図 40 伝送速度とフレーム長の関係仕様

これより、伝送速度 (S) Mbps とした際の packets 長 (T_p) は、付式(36)で表わされる。

$$T_p = 24 + \frac{1000}{S} \quad (\mu s) \quad \text{付式(36)}$$

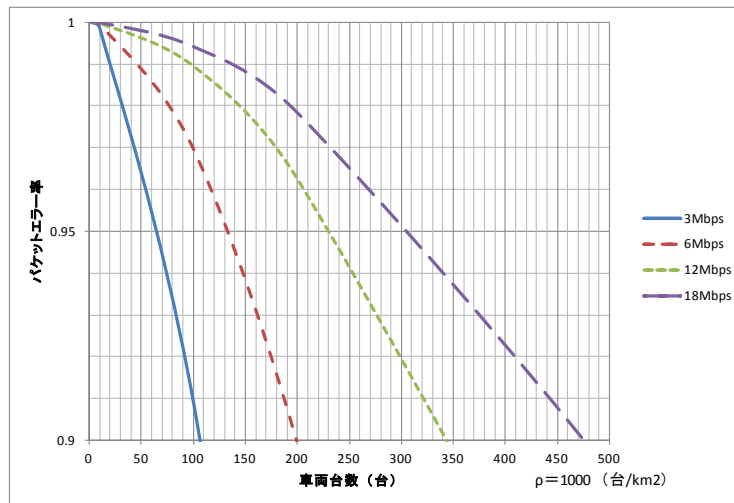
各車両端末 (OBE) は自分の位置情報等を他の車両や基地局に提供するために、ビーコンパケットとして送信しており、そのパケットが衝突すると再送することになる。隠れ端末車両からのパケット衝突としてもっとも発生する可能性はこのビーコンパケットによるものが高いため、今回のモデルとして扱うことにする。ここで、干渉車両数を N 、フレーム送信間隔を T_f 、再送回数を n とし、OBU からの送信が成功する確率を $p(1)$ とおくと、OBE から最初にパケットを送信している時間内に、他の OBU からデータを送信しないと仮定すると、 $p(1)$ は以下のように表わされる。

$$p(1) = (1 - T_f \times T_p)^N \quad \text{付式(37)}$$

さらに、 $(n-1)$ 回送信に失敗して、 n 回目に成功する確率 $p(n)$ をとおくと、付式(38)で求められる。

$$p(n) = (1 - \sum_{m=1}^{n-1} p(m)) \times p(1) \quad \text{付式(38)}$$

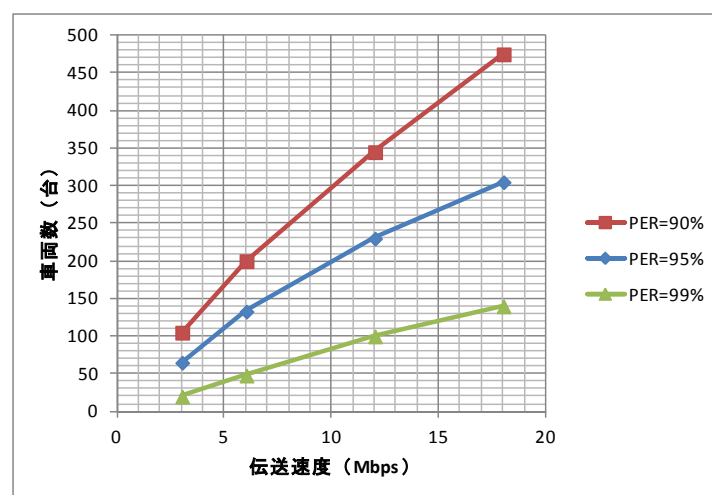
ここでは、再送回数を 2 回とし、干渉車両からデータを送信された場合の干渉車両 (付図 46 の S 点の車両) からのデータを、Q 点の車両が受信することで、P 点の車両からのデータが受信されなくなってしまうケースを考える。すなわち、本来 P 点の車両と Q 点の車両が通信している環境にとっては、S 点からのデータ通信は干渉となる。この場合、S 点の車両と Q 点の車両との通信は極めて少ない状況ではあるが、干渉車両の数と、S 点と Q 点の車両間における通信状況のパラメータとしてパケットエラー率 (PER: Packet Error Rate) との関係を見ることで、Q 点の車両への干渉程度を図ることが可能となる。干渉として働く S 点、Q 点の車両間での PER は、本来の P 点、Q 点の車両間の通信に対して、通信できる可能性は低いと見ることが出来るため、ここでは 90%~100%の間での検討を行なう。対象とする範囲での単位面積車両密度 ($\rho=1000$) の送信出力と車両数の関係は、付図 38 にてすでに求められているので、この関係を利用し、付式(38)をもとに、2 回の再送を行なった場合の PER と車両数の関係を求めると付図 41 の結果を得る。



付図 41 各通信環境におけるパケットエラー率と車両数の関係

求められた結果の付図 41 において、送信速度が大きくなるほど、パケットエラー率が大きいままであるのは、送信速度が大きくなるほど、パケット長が短くなり、そのためセル内の車両数を多くとることができ、このためかえってパケットの衝突の確率が高くなるために生じるためと判断できる。

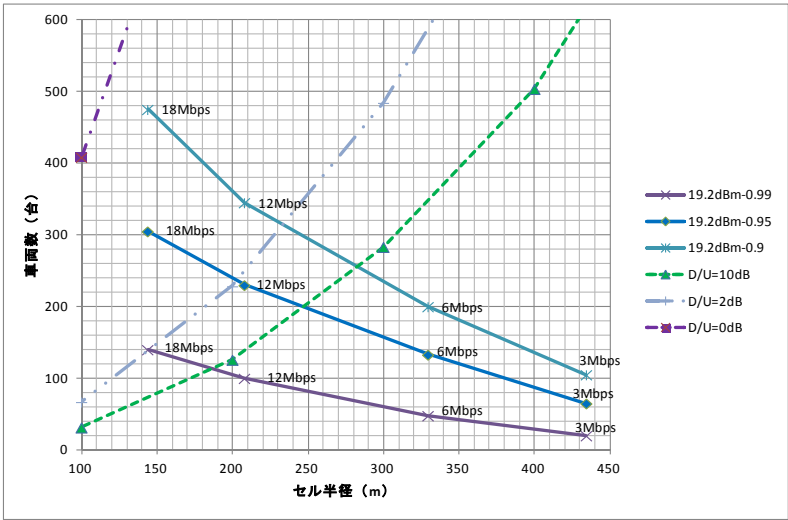
ここで、所要のパケットエラー率になるための転送速度と許容車両数との関係でみると、付図 42 のようになる。干渉となるパケットエラー率を厳しくすると（この場合は PER を上げる）、許容される車両数は少なくなることが理解できる。伝送速度 12Mbps において、PER を 90%、95%、99% を実現するための許容車両数は、それぞれ 345 台、230 台、100 台であることがわかる。



付図 42 所要のパケットエラー率となる伝送速度と許容車両数の関係

以上の検討から、対象とする範囲での車両密度が判明していれば、700MHz 帯 WAVE システムとしてのセルサイズと送信出力により、その範囲内に存在する車両数が求められた。その際、隠れ端末車両による干渉の可能性のある干渉車両数に関しても、それぞれのセルサイズによりパケットエラー率との関係で求めることができた。

これらから、700MHz 帯 WAVE の最大干渉車両数を付表 24 の伝搬特性回線設計諸元を用い、各通信条件における許容干渉車両数を算出する。そして希望波と不要波との DUR をもとに干渉車両数を算出したグラフ（付図 41）を重ね合わせることで、どの程度の車両数であれば、その環境において対応できるかを、許容車両数とセル半径として示すことが可能となる。付図 43 に 700MHz 帯 WAVE の最大送信出力 19.2dBm の場合を示す。付図 43 の結果より、希望波と不要波の D/U 比 DUR=0dB とした場合、干渉による影響のため「隠れ端末」による影響が無視できない範囲にあることがわかる。すなわち、D/U 比を上げることで干渉による許容車両数の確保を行なう必要がある。DUR=2dB、10dB とした場合の各 PER における許容干渉車両数とその対象セル半径を付表 22 にまとめる。



付図 43 セル半径と最大許容干渉車両数

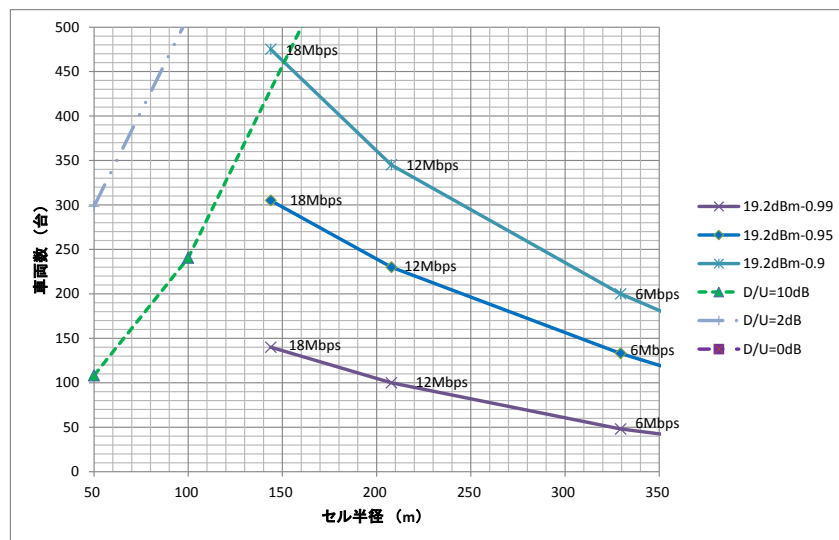
付表 22 中心市街地での隠れ端末車両処理可能数とセル半径

DUR (dB)	車両数 (台)	セル半径 (m)	PER (%)
2.0	320	235	90
	208	205	95
	120	145	99
10.0	260	282	90
	200	245	95
	115	185	99

ここまでの解析の車両密度 (ρ) はセル半径に関係なく一定としてきた。付録資料 1 で見てきたように環境により道路モデルを規定しており、セル半径により車両密度は異なる。よって中心市街地道路モデルによる車両密度を加えることにする。モデルは付録資料 1 の付図 1 に示した中心市街地道路モデルを採用した場合のセル半径 50m～300m の車両密度を計算すると付表 23 の示す通りになる。この車両密度をもとに付図 43 のセル半径と最大許容車両数の関係を付図 44 に、また付表 24 に車両密度を見直した中心市街地での隠れ端末車両処理可能数とセル半径の関係を示す。

付表 23 中心市街地道路モデルとセル半径別車両密度

セル半径 (m)	3車線車両	2車線車両	1車線車両	総車両数	面積 (km ²)	車両密度 (台/km ²)
50	108	0	0	108	0.007853982	13751
100	216	0	24	240	0.031415927	7639
200	432	0	240	672	0.125663706	5344
300	648	644	482	1774	0.282743339	6274



付図 44 セル半径と最大許容干渉車両数 (車両密度見直し)

付表 24 中心市街地での隠れ端末車両処理可能数とセル半径 (車両密度に直し)

DUR (dB)	車両数 (台)	セル半径 (m)	PER (%)
10.0	460	150	90

このように「隠れ端末」問題による電波干渉は WAVE においても課題であり、DUR を上げる必要があり、例えば車両からの送信出力自体を制限する方法があり、標準化の中で検討することになっている。

付録資料 8：世界の交通事故死者数と車両登録数相関

2 章 (図 2) にて示した世界の交通事故死者数と車両登録数の相関係数は 61% ($R^2=0.3768=(0.6138)^2$) であった。この相関係数が偽相関であるかどうかを調べるため、人口を第 3 の変量として加えた偏相関係数を調べる。

表 4 に対し対象国の 2010 年の人口を加えた表を付表 25 に示す。

付表 25 世界交通事故死者数と車両登録数および人口

No.	Country	Vehicle registration	Number of Death	Population
1	United States of America	258,957,503	35,490	1,181,412,000
2	China	207,061,286	275,983	1,344,920,000
3	India	114,952,000	231,027	1,181,412,000
4	Japan	89,871,090	6,625	127,293,000
5	Indonesia	72,692,951	42,434	227,345,000
6	Brazil	64,817,974	43,869	191,972,000
7	Italy	52,586,499	4,371	59,604,000
8	Germany	50,184,000	3,830	32,264,000
9	Russian Federation	43,325,312	26,567	141,394,000
10	United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland	35,170,629	2,278	61,231,000
11	France	34,276,000	3,992	62,036,000
12	Viet Nam	33,166,411	21,651	87,096,000
13	Spain	31,086,035	2,478	44,486,000
14	Mexico	30,904,659	16,714	108,555,000
15	Thailand	28,484,829	26,312	67,386,000
16	Poland	22,024,697	4,509	38,104,000
17	Canada	21,387,132	2,296	33,259,000
18	Iran (Islamic Republic of)	20,657,627	25,224	73,312,000
19	Malaysia	20,188,565	7,085	27,014,000
20	Republic of Korea	19,710,776	6,784	48,152,000
21	Australia	16,061,098	1,363	21,074,000
22	Turkey	15,095,603	8,758	73,914,000
23	Ukraine	14,427,680	6,121	45,992,000
24	Argentina	14,163,125	5,094	39,883,000
25	Nigeria	12,545,177	53,339	151,212,000
26	South Africa	9,587,781	15,995	49,668,000
27	Netherlands	9,340,006	640	16,528,000
28	Portugal	8,730,885	1,257	10,677,000
29	Greece	7,910,565	1,385	11,137,000
30	Pakistan	7,853,022	30,131	176,952,000

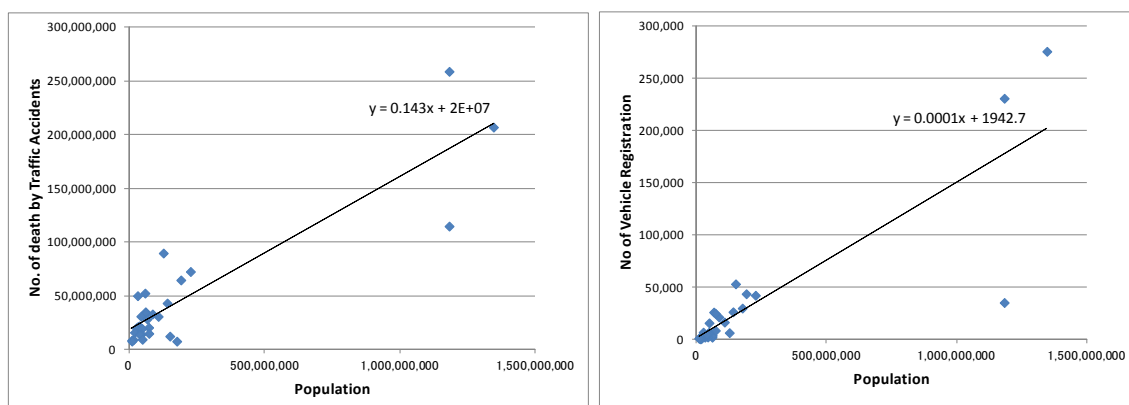
付表 25 より交通事故死者数および車両登録数の人口に対するそれぞれの相関関数を求めると付図 45 に示す。

$$(\text{交通事故死者数}) = 0.143 \times (\text{人口}) + 2 \times 10^7 \quad \text{付式(39)}$$

$$(\text{車両登録数}) = 0.0001 \times (\text{人口}) + 1942.7 \quad \text{付式(40)}$$

となる。付式(39) (40) より交通事故死者数および車両登録数の差分を求めると付表 26 を得る。

付表 25 の交通事故死者数および車両登録数の人口を第 3 の変量とした差分を求めると付表 26 の結果を得る。



(A) 交通事故死者数と人口相関

(B) 車両登録数と人口相関

付図 45 交通事故死者数、車両登録数の人口に対する相関関係

付表 26 人口を変量とした交通事故死者数および車両登録数の差分

No.	Country	Vehicle registration	Number of Death	Residual_Vehicle	Residual_Death
1	United States of America	258,957,503	35,490	70015587	-84593.9
2	China	207,061,286	275,983	-5262274	139548.3
3	India	114,952,000	231,027	-73989916	110943.1
4	Japan	89,871,090	6,625	51668191	-8047
5	Indonesia	72,692,951	42,434	20182616	17756.8
6	Brazil	64,817,974	43,869	17365978	22729.1
7	Italy	52,586,499	4,371	24063127	-3532.1
8	Germany	50,184,000	3,830	25570248	-1339.1
9	Russian Federation	43,325,312	26,567	3105970	10484.9
10	United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland	35,170,629	2,278	6414596	-5787.8
11	France	34,276,000	3,992	5404852	-4154.3
12	Viet Nam	33,166,411	21,651	711683	10998.7
13	Spain	31,086,035	2,478	4724537	-3913.3
14	Mexico	30,904,659	16,714	-4618706	3915.8
15	Thailand	28,484,829	26,312	-1151369	17630.7
16	Poland	22,024,697	4,509	-3424175	-1244.1
17	Canada	21,387,132	2,296	-3368905	-2972.6
18	Iran (Islamic Republic of)	20,657,627	25,224	-9825989	15950.1
19	Malaysia	20,188,565	7,085	-3674437	2440.9
20	Republic of Korea	19,710,776	6,784	-7174960	26.1
21	Australia	16,061,098	1,363	-6952484	-2687.1
22	Turkey	15,095,603	8,758	-15474099	-576.1
23	Ukraine	14,427,680	6,121	-12149176	-420.9
24	Argentina	14,163,125	5,094	-11540144	-837
25	Nigeria	12,545,177	53,339	-29078139	36275.1
26	South Africa	9,587,781	15,995	-17514743	9085.5
27	Netherlands	9,340,006	640	-13023498	-2955.5
28	Portugal	8,730,885	1,257	-12795926	-1753.4
29	Greece	7,910,565	1,385	-13682026	-1671.4
30	Pakistan	7,853,022	30,131	-37451114	10493.1

以上から差分の相関係数を求めると $R=0.58$ を得る。よって交通事故死者数と車両登録数の相関は有意であることが示された。

本論文に関する原著論文

A) 学術論文

1. Tsuboi.T, Oguri.K, Sekiguchi.T, “ITS Base Station Optimized Allocation Design For Disaster Mitigation”, International Journal of Research in Wireless Systems, Vol. 3, No. 1, pp.23-31, Apr. 2014
2. Tsuboi.T, Oguri.K, “Advanced ITS Application for Natural Disaster Protection”, International Journal of Computing and Network Technology Vol.1, No. 3, pp.159-170 Sep. 2013
3. 坪井 務、小栗宏次、「新興国の交通流と交通渋滞解析」、情報処理学会論文誌 Vol.57 No.12, pp.2819-2826, Dec. 2016
4. 坪井 務、小栗宏次、「新興国における交通流解析」、情報処理学会論文誌 Vol.57 No.4 pp.1284-1289, Apr. 2016

B) 国際学会（査読付き論文）

1. Tsuboi.T, Sekiguchi.T, “Optimization for Wireless Vehicular Network System in Urban Area”, 6th International Workshop Nets4Cars/Nets4Trains, pp.126-132, May. 2014
2. Tsuboi.T, “Wireless Vehicular Standard Harmonization”, 5th International Workshop Nets4Cars/Nets4Trains, pp.75-83, May, 2013
3. Tsuboi.T, Yoshikawa.N, “WAVE system architecture design in Urban area”, 11th International Conference on Telecommunications for Intelligent Transport Systems (ITST2011), pp.442-446, Aug. 2011
4. Tsuboi.T, Yoshikawa.N, “Next UHF Band WAVE System Architecture Design”, IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pp.43-47, Jun. 2011
5. Tsuboi.T, Yamada.J. Yamauchi.N, “Vehicle wireless communication cell design”, th International Symposium on Communication Systems Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP), pp.92-96, Jul. 2010

6. Tsuboi.T, N. Yoshikawa.N, "WAVE design for next DSRC applications", 9th Annual Wireless Telcommunication Symposium, pp.1-6, Apr, 2010
7. Tsuboi.T, Yamada.J, Yamauchi.N, Yoshikawa.N, "Cell design for Next DSRC applications", International Conference on Ultra Modern Telecommunications & Workshops, pp.1-5, Oct. 2009
8. Tsuboi.T, Yamada.J, Yamauchi.N, Yoshikawa.N, "Dual Receiver Communication System for DSRC", IEEE The 2nd International Conference on Future Generation Communication and Networking (FGCN 2008), pp.459-464, Dec. 2008

C) 主な関連特許

1. 坪井務、山田出、原田仁志「バス位置表示方法、バス映像取得方法、交差点映像取得方法及び映像配信方法」特開 2011－18149
2. 坪井務、山田出、市川広輝「無線通信装置及び無線通信装置の通信方法」特開 2011－29952
3. Tsutomu Tsuboi, Izuru Yamada, Hiroki Ichikawa, "Wireless Communication Device and Communication Method of Wireless Communication Device" US 8,249,637 B2 Aug.21, 2012