

Design of Next Generation Vehicle Wireless Communication Systems and Their Application for Urban Safety & Comfort

東京大学大学院工学系研究科都市工学専攻 37-106992 坪井 務

This paper describes research for the next generation vehicle wireless communication system design especially safety and comfort application in urban environment. The next generation vehicle wireless communication system is under development and it is called WAVE or Wireless Access in Vehicle Environment and it will be used in commercial by year 2015 in North America and Europe. The WAVE system main application is traffic safety for vehicles such as driving vehicle information towards cross sections, emergency vehicle approach warning, traffic signal and sign information and so on. The WAVE technology study has been started in wireless communication research but they are almost technical research level. In this research, it is more focused on real environment based on current traffic condition and accident status analysis especially urban area because majority of traffic accidents are occurred in urban cross section. Therefore author analyzes year 2010 road traffic census in 23 wards of Tokyo and three central wards of Tokyo and defines WAVE system base station location point at main roads cross sections. It shows effectiveness of WAVE system for safety application compares among other potential wireless communication systems such as mobile phone system and high speed multimedia communication services. Author also defines harmonized Japanese standard proposal with worldwide standards, Europe and North America based from the view point of the safety application research.

1. はじめに：本研究は、次世代車載無線通信（WAVE：Wireless Access in Vehicle Environment）に関するシステム技術の検討とその応用である自動車における無線通信を活用した安全・安心に焦点を当て、特に交通事故が発生しやすい市街地を例に具体的に検討する。

本研究テーマにて取り上げる次世代車載無線通信技術は2005年より、とりわけ欧米を中心として自動車における無線通信の検討が開始され、安全・安心な走行を支援するための通信としての検討が行われてきた。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、標準化の推進が開始された。

車載無線技術としては、国内では元々高速道路等の課金システムとして使用されてきた ETC (Electric Toll Collection) 技術が利用されており、導入に関しては先行してきたといえる。国内ではこの ETC 技術は 5.8GHz 周波数を用いており、この応用として取扱う通信方式と、2012 年よりアナログテレビ放送で使用していた UHF 帯 (700MHz 帯) の周波数が空いたことによるこの周波数帯の通信の 2 方式を対象に検討している。また、欧米にて検討されている車載無線通信技術 (DSRC : Dedicated Short Range Communications) は周波数の 5.9GHz を使用している。これらの技術を国内では、総務省が中心となって ITS における電波メディアの位置づけと DSRC における展開図として図 1¹⁾に示す車載無線技術への取り組みを示しており、国内においては各種機関での検討が行われ、電波伝搬の検討および衝突回避等細部にわたる試験等が行われてきている。ここでは、5.8GHz 帯はその ETC としての歴史的経緯から、主に路車間を中心としており、一方車車間通信に関しては 700MHz

帯を中心とした検討となっている。ここで使用する WAVE と DSRC の定義は、700MHz 帯、5.8GHz 帯、5.9GHz 帯で使用される車載無線通信全体を WAVE として用い、5.8GHz、5.9GHz 帯の無線を使用する車載無線通信を DSRC として用いる区別を行うこととする。

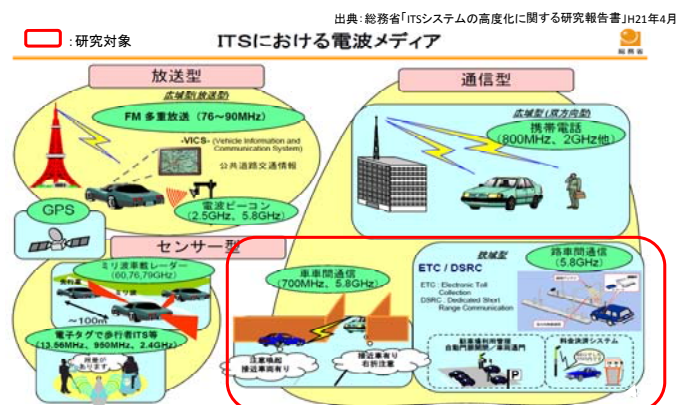


図 1. 国内における ITS と車載無線通信

2. 車載無線システム開発：筆者は2008年から本研究で求められるWAVEシステム鍵となる通信半導体の開発を目指しており、システム仕様を明確化するために、まずは通信プラットフォームの開発を1次試作、2次試作として行ってきた。このプラットフォームを用いることで実際の各種実証試験に参画し、実際の使用面でのフィードバックを得ることが可能となった。特に先行する欧州における実証試験に関しては実際に参画し、ハードウェア、ソフトウェアにおいてフィードバックを得ることができた。そのフィードバックを受けてWAVEシステム仕様を決め、最終的

に評価用サンプルを開発し、試作品となる半導体の試作を行い、事仕様に合わせた開発の合わせ込みを行った上で、量産化に向けたサンプルの製造が可能となる。その後、信頼度試験を行い、自動車メーカーおよび電装部品メーカーへの納入となる。現時点では、欧米において2015年を目処に実車装着を目指しており、特にドイツ、アメリカでは法令化の整備も合わせ推進されている。こうした車載無線システムの開発の流れを図2に示す。

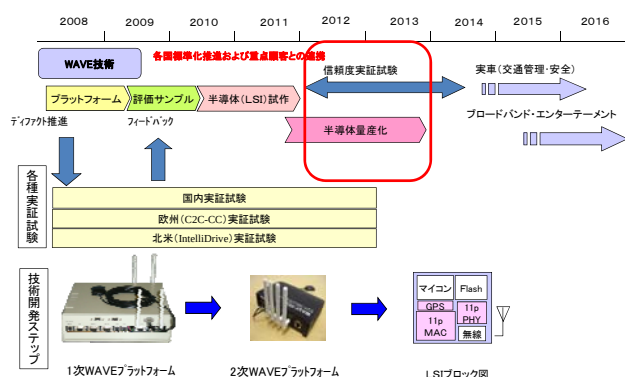


図2. 車載無線システムの開発の流れ

3. 市場分析：車載無線システムの目指す交通安全への貢献を見るために、現在における国内の交通事故の分析を行う。交通死亡事故の状態別における発生件数の動向を図3にまとめる。また、地形別における発生件数の動向を図4にまとめる。²⁾

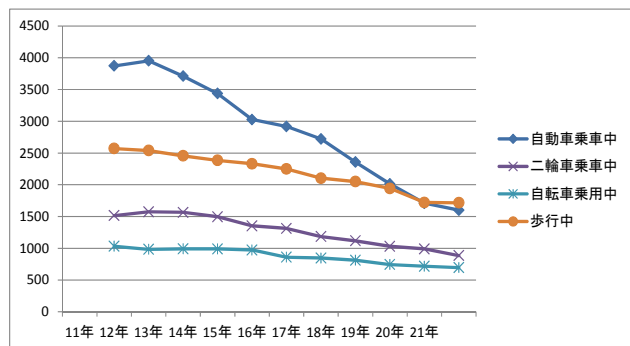


図3. 状態別死亡事故動向

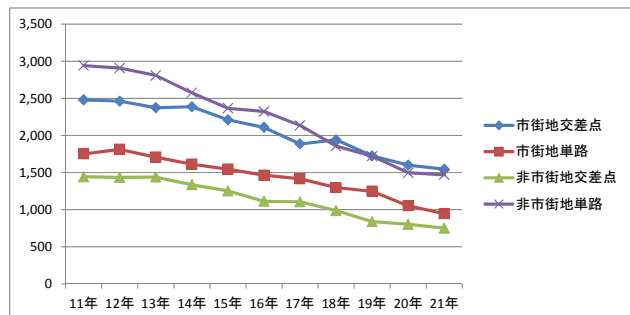


図4. 地形別死亡事故動向

それぞれの図より、近年における死亡事故の発生傾向は全体としては減少傾向にあるものの、自動車同士の事故から人と自動車の事故が近年では率が多くなっている点の特徴

的である。また、地形別においては、非市街地単路の事故が多かったのが、近年では市街地交差点での事故が地形別による死亡事故の主要原因となりつつある傾向が見受けられる。以上から、市街地の交差点における車両同士の事故および人と車による事故が大きな問題となっているといえる。続いて、東京23区における2011年の交通事故の発生を東京都のデータをGIS表記すると図5となる。³⁾

東京都交通事故分析



図5. 東京23区の交通事故分布

さらに詳細に交通事故の分析を各区におけるエンドトリップ数および単位面積当たりでの発生状況として整理すると図6に示す通りになる。

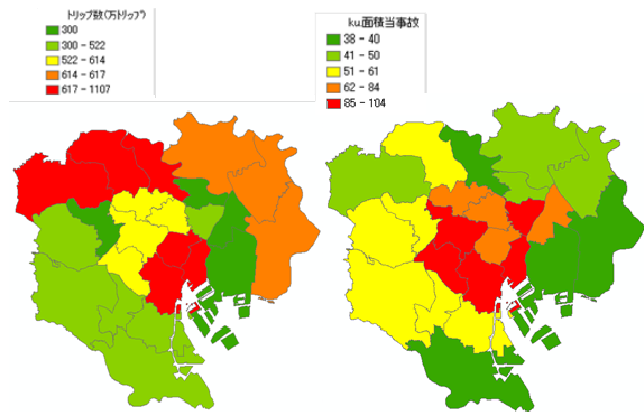


図6. 東京23区交通と単位面積当たり交通事故率の関係

東京23区の交通事故は、相対的に多い交通量が示される埼玉と東京北西部に繋がる区部および都心3区（中央区、港区、千代田区）において交通事故率が高く分布していることが判る。また、面的広がりから見た単位面積当たりの交通事故率に関しては都心部（特に都心3区）における交通事故の発生割合が高いことがうかがえる。これは狭い箇所

に交通が集中しているために起きていると判断される。

続いて、都心部における交通量を2010年度の道路交通セ

ンサス⁴⁾を基に、各道路へのマッピングを行うべく GIS ツールにて実施したものを図7に示す。交通量は、昼間12時間における主要道路を通過する車両台数を示し、混雑時における平均速度を合わせ示した。

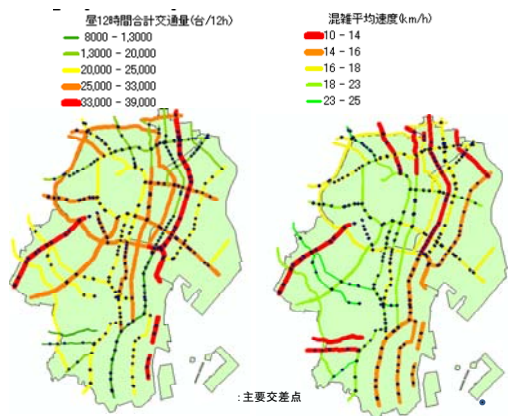


図7. 地心3区の交通量と混雑時平均速度

図7に追加して、大型車両の混入率を合わせてみると図8に示す通りになる。これにより交通量が多く混雑時に時



図8. 都心3区大型車両混入率

4. 車載無線技術のその他通信：本研究における車載無線技術は1項に示した通り、世界的には5.9GHzないし5.8GHz帯の周波数を用いた高速移動にも適用できる無線通信技術であり、国内においてはアナログテレビ放送終了に伴うUHF帯の700MHz周波数の応用の検討を行っている。先行する欧米においては、既にそれぞれの規格団体において規格制定がされている。一方国内では、現在2013年のITS世界会議に向けた成果発表に向けた準備と実証試験を行っており、2013年以降の運用を検討中となっている。こうした状況を整理すると表1のようになる。欧州規格はETSI (European Telecommunication Standard Institute) を、米国規格はIEEE (The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.) にて既に制定済みとなっている。

表1. 車載無線通信規格比較

	日本		米国 (DSRC)	欧州 (DSRC)
アプリ層	アプリ ETU	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)	IEEE1609	UDP/TCP, IPv6 WSMP (3P) 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	6MHz/ch x2(上/下)	CCH 1CMHz/ch	CCH 8CH 10MHz/ch SCH 7CH 10MHz/ch	CCH 8CH 10MHz/ch
使用周波数	5.8GHz帯	700MHz帯	5.9GHz帯	5.9GHz帯

国内規格は現在作成状態であり、上位プロトコルは独自であり、700MHz帯では制御チャンネル (CCH) 1本に対して、欧米は上位プロトコル含めて互換性を保ち、制御チャンネル (CCH) 以外にサービスチャンネル (SCH) を複数もてる仕組みとなっている。

続いて他の通信 (携帯電話網 (3G) および高速データ通信 (WiMAX)) との比較を行う。その対象仕様を表2にまとめる。端末転送速度は通信範囲内にある車両の端末でのデータ通信速度を表し、通信範囲 (セル) の収容できる車両数とそのセルの半径を示している。

表2. 車載無線通信の仕様比較

種類	周波数	速度	収容台数(台)	端末速度(kbps)	セル半径(m)
3G	800MHz	8Mbps	14,130	130	3000
WiMAX(700)	700MHz	20Mbps	25,120	210	4000
WiMAX(2.5G)	2.5GHz		1,570	2000	1000
WAVE(700)	700MHz	30Mbps	78	17000	224
WAVE(5.9G)	5.9GHz		35	20000	150

これらの通信の特長を数値的にまとめると図9に示す通りとなる。技術の詳細はTSUBOI⁹⁾に譲るとして概略を示すと、以下ようになる。通信可能な範囲「セル」をベースに、車両密度を想定すると共にセル内部で通信する通信のトラフィック量とその車両が実際に通信可能な速度での最適値が存在することを Erlang⁹⁾の公式を導入することで求める解析を実施した。

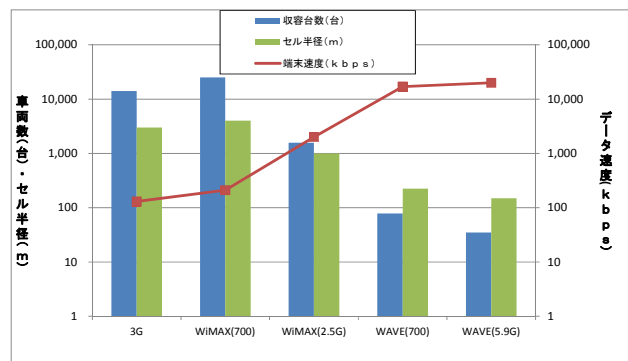


図9. 各種車載無線技術と性能比較

WAVE技術の特長は近距離無線における高速データ通信が可能となっており、マルチメディア通信が可能な10Mbps (Mビット/秒) 以上の高速通信が可能である。一方、携帯通信網に関しては、高速通信はいかなくともサポートされ

る車両数は1,000 台以上となり、広域でのサポートが可能であることが判る。

また、周波数の違いに関して、700MHz 帯は5GHz 帯と比較し電波の回り込みが可能な帯域であり、特に見通し外通信における特長が挙げられる。例として市街地交差点における交差する車両同士に WAVE の通信を行うことであらかじめ事前に交差点侵入を相互に衝突前に停止できる範囲（距離）を定量的に解析する。解析方法は坪井⁷⁾によるものとして、電波の回折を定量的に算出する。回折モデルを図 10 に、表 3 はめぬたアスファルト道路における衝突回避可能な車速と通信条件におけるシミュレーション結果を示す。

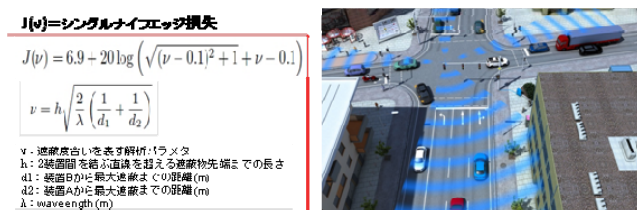


図 10. 交差点における電波回折モデル例

表 3. 車載無線通信範囲と自動車制動距離

車速 (km/h)	停止距離 (m)	衝突回避の可否								
		5.8GHz 通信距離			2.4GHz 通信距離			700MHz 通信距離		
		+10 dBm	+19.2 dBm	+33 dBm	+10 dBm	+19.2 dBm	+33 dBm	+10 dBm	+19.2 dBm	+33 dBm
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	×	×	×	×	×	×	×	×	×

続いて、2011 年 3 月 11 日に起きた東日本大震災での経験を踏まえて、次世代車載無線技術が応用できる可能性に関して整理を行う。被害程度の想定は困難であるため、通信のインフラ設備が破壊された状況を想定した場合での検討に絞る。すなわち、インフラ設備が有効であれば、当然携帯電話以外の通信手段としての有効性は想定されるので、この点に関しての応用検討は後に簡単にまとめることにのみ行うものとする。車載無線通信は、災害時等にも役に立つケースが考えられ、特に既存のインフラ通信網に異常が生じたときにもその効力は発揮されると期待される。ここでの応用はインフラ設備が使用できない状況を想定したケースを検討し、応用例としては 4 シーンを想定した。①災害情報のローカルデータ保存と後続車両への伝達、②災害時には WAVE の現行最大送信出力の +19.2dBm に対して、携帯通信網と同様な +33dBm まで許可されるとすれば、既存の携帯網と同様な通信距離（半径＝4km）程度までカバー、③電源が無くなった場合の基地局に電気自動車などでのローカル給電により電源確保、④電気自動車を疑似基地局と

しての動作を許可によりインフラ設備に支障ある場合での使用に耐えることが可能となる。災害時におけるこれらの応用イメージを図 11 に示す。



図 11. 災害時の車載無線通信の応用例

5. WAVE システムの具体的な応用：WAVE システムは 3 項で見てきたように特有な機能を有しており、特に市場分析で行った市街地交差点での交通事故増加に対して、どのように有効な機能を発揮できるかを示す。交通量の多い東京都心 3 区における状況は図 7、8 にて見た通りである。こうした状況に対して、WAVE システムの配置を検討すると高速自動車道、都市高速道路、指定市の一般市道を除く一般国道、主要地方道、一般都道府県道の主要道路を基に、交差点の存在する箇所 WAVE の基地局を設置することを検討する。この結果

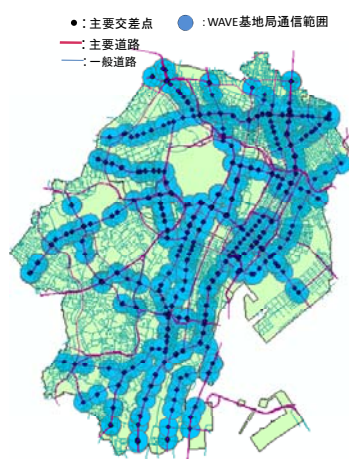


図 12. 都心 3 区の WAVE 配置

この結果 WAVE の配置状況は図 12 のようになる。WAVE の基地局における通信範囲は見通し外通信にて優位差を持つ 700MHz 帯を基本として検討を進めることとした。WAVE 通信による電波到達距離に関しては国内 ITS 推進会議にて「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共用条件に関する技術資料」⁷⁾にて、一般の状態での伝送距離 400m に対して、Extended-Hata SDR の計算モデルにより、市街地における伝送距離を 224m と規定した。計算および実測によるデータからの規定値であり、筆者も今回市街地交差点での検討においては 700MHz 帯の WAVE 電波到達距離を 224m に採用することとした。以上から、図 8 の大型車両の混入する箇所をカバーでき、面的に WAVE システムを主要交差点に配置することで、交通混雑箇所における交通事故回避に向けた情報配信による対策の可能性を示せた。

交通事故の昼間夜間における 2012 年上期のデータ⁸⁾からはほぼ同じ比率であるものの、事故の内容に関しては図 13 に示すように昼夜では差がある。即ち、昼間は自動車同時の事故が主要因となっていることに対し、夜間においては

歩行者との交通事故が主要因となっている。

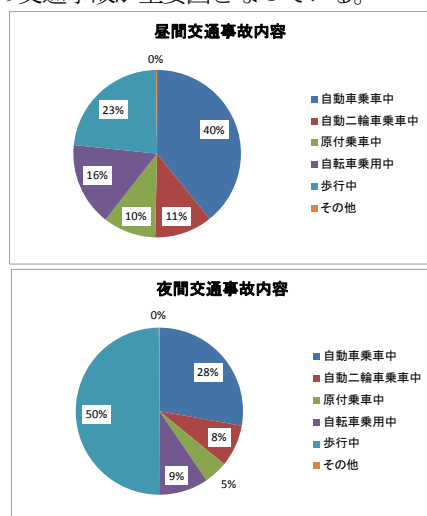


図13. 昼夜間交通事故形態別データ (2012年)

以上から、交通事故は交差点では出会い頭による車同士の衝突事故が主要因となっていること、全国の年齢層別交通事故は75歳以上に件数が多く、昼夜における交通事故は昼間の自動車同時の事故に対して、夜間は人と車の事故に主要因がある傾向が見える。こうした現状の交通事故対策に向けた次世代車載無線通信の応用としての期待をまとめると以下のような可能性としてまとめられる。

① 交差点出会い頭衝突の防止 (表3参照)

交差点では見通し外通信が有効になり、車車間通信あるいは路肩 (信号機等) に設置される、基地局から対向車両への情報を伝達する路車間通信への応用が有効となる。

② 高齢者対策は、自動車運転側および歩行者側の両方のケースがあり、

- i) 自動車側の立場には、運転支援として衝突防止以外に積極的に車制御を行う技術の検討を行っている。(具体的には車載制御専用バスであるCAN (Controller Area Network) への強制停止信号として危険の回避を積極的に行う方法も含む。)
- ii) 歩行者側の立場には、次項にて説明する歩行者対策としてのサポートに高齢者へのガイドとして携帯電話等への着信音あるいは振動による通知あるいは音声による注意喚起のメッセージによる車両接近の警告等が考えられるが、事故防止には車側での積極的制御が有効と判断する。

③ 車同士衝突防止 (昼間の事故主要形態) には、衝突防止としての事前警告等の支援および他の自動車安全制御機能として衝突防止用レーダーとの連携による制動制御への積極的展開がある。また、WAVE無線が届かない距離における前方の情報を車車間通信の連続による無線通信 (アドホック) により情報を伝達することも有効な手段となる。また、アドホック通信は緊急車用の通知を電波が届かない後方車両への通知をすることにおいても有効性が発揮できると考える。

④ 歩行者と車との事故防止 (夜間の事故主要形態) には、

次世代車載無線通信システムの携帯電話等への搭載による交差点等での車接近警告や、高齢者等への適切な警告支援を行う能動的な対応が検討されている。また、交差点等における歩行者数の量に応じた混雑情報を交差点等に配置する基地局にデータを収集し、対向する車への通知を積極的に行うことで自動車運転者への警告または制御を行う受動的な対応が検討されている。

続いて、都心3区におけるWAVE基地局配置と同様に、東京23区の場合を検討する。高速自動車道、都市高速道路、指定市の一般市道を除く一般国道、主要地方道、一般都道府県道の主要道路を基に、交差点の存在する箇所をWAVEの基地局を設置すると図14に示す通りの配置となる。

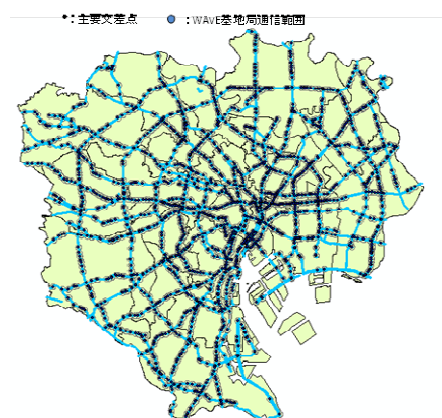


図14. 東京23区WAVE設置例

東京23区における一般的な車両密度を500台/km²の場合を例にとるとWAVE基地局の諸元は表4のようになる。

表4. 東京23区WAVE基地局諸元

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

本WAVE配置検討における許容される車両容量を求めると、23区WAVE基地局に収容可能な車両数全体は、

$$78 \text{ 台} \times 2,985 = 232,830 \text{ 台} \dots \dots \dots (1 \text{ 式})$$

であり、通信半径224mのセルの中を、混雑時の車両速度を平均時速10km/hと仮定した場合の車両通過する時間は

$$0.224 \text{ km} \times 2 / (10 \text{ km/h}) = 0.0488 \text{ h} \dots \dots \dots (2 \text{ 式})$$

となり、本システムでの時間平均の交通量としては、

$$232,830 \div 0.0488 = 477 \text{ 万台/h} \dots \dots \dots (3 \text{ 式})$$

相当となり、2010年の道路交通センサスのデータより、東京23区全体の昼12時間の全交通量は153万台/12h、時間帯平均交通量は約130万台/hを十分カバーできる能力を有すると判断できる。以上より、東京首都圏における主要道路での交差点に次世代車載無線通信 (WAVE) を設置することにより、交通事故の起きやすい箇所をカバーすると共に、交通渋滞重点箇所での情報伝達による改善が領域的に行われることを示した。

6. WAVE 国際標準化と提言：WAVE の国際規格化としての米国の規格である IEEE と欧州の規格である ETSI において、国際協調性の観点で周波数の帯域に関しては差があるものの基本的仕様面での共通性が確保されている。一方、国内では世界標準とは異なる発展をしており、700MHz 帯の WAVE 規格に関しては、世界に先駆けて推進している経緯もあり、現時点では世界標準とは異なる仕様となっている。現状の比較表を表 5 としてまとめる。

表 5. WAVE 国際規格比較

	日本		米国 (DSRC)	欧州 (DSRC)
周波数	DSRC 700MHz	700MHz	DSRC	DSRC
サービス	ETD	ETD	ETD	ETD
上位プロトコル	DSRC プロトコル 処理	国内独自 (標準化)	IEEE1609	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)	OFDM (BPSK/QPSK/16QAM)	OFDM (BPSK/QPSK/16QAM)
CH 数	6MHz/ch x2上x2下	10MHz/ch	10MHz/ch 5MHz/ch 2.5MHz/ch	10MHz/ch 5MHz/ch 2.5MHz/ch
使用周波数	5.8GHz帯	700MHz帯	5.9GHz帯	5.9GHz帯

周波数に関しては、各国の規制があるために異なることは既に携帯電話をはじめとして特に珍しいことではないが、サービスを行うためのチャンネル数 (SCH の存在とその数) が国内では存在しておらず、国際的に見て共通化が難しくなっている。更に、上位プロトコル仕様においては、国内では全くオリジナルとなっており、今後の自動車メーカーが開発する安全対応アプリケーション等も異なる切り口となってしまうことが、容易に判る。筆者らは周波数の国事情を考慮して除いた項目に関して、チャンネル数および上位プロトコルに関する国際協調性を提案している。⁹⁾ その提案内容を表 5 に加えた形で表 6 に示す。

表 6. WAVE 国際標準への提言比較

	日本		米国 (DSRC)	欧州 (DSRC)
周波数	DSRC 700MHz	700MHz	DSRC	DSRC
サービス	ETD	ETD	ETD	ETD
上位プロトコル	DSRC プロトコル 処理	国内独自 (標準化)	IEEE1609	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)	OFDM (BPSK/QPSK/16QAM)	OFDM (BPSK/QPSK/16QAM)
CH 数	6MHz/ch x2上x2下	10MHz/ch	10MHz/ch 5MHz/ch 2.5MHz/ch	10MHz/ch 5MHz/ch 2.5MHz/ch
使用周波数	5.8GHz帯	700MHz帯	5.9GHz帯	5.9GHz帯

本提案での特長は、チャンネル数に関して周波数のバンド幅は異なるものの、現行割り当てられた 10MHz の帯域を 2 分割、あるいは 4 分割することで欧米規格に存在しているサービスチャンネルの確保と、上位プロトコルの共通化を図ることで、WAVE システムの標準化によるコストおよび自動車メーカー等が準備するアプリケーションの一定の標準が図られることで、経済的効果も大きいといえる。具体的提案をまとめ図 15 に示す。

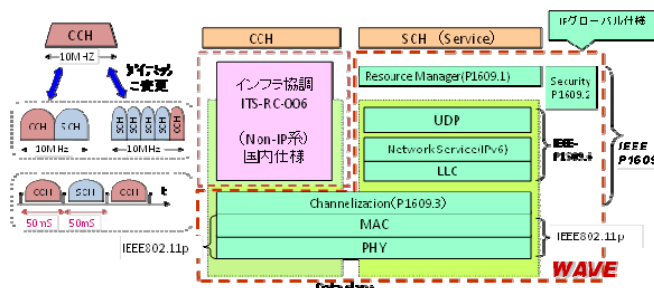


図 15. 国内 WAVE 仕様案

本提案により、サービスチャンネルでの世界標準規格との共通化が図れ、通信容量に応じて現在 1 チャンネルの割り当てに対して、ダイナミックにバンド分割を可能とし対応を図る方式、または時分割により CCH と SCH のタイミングを交互に配置することにより国際標準に対応した仕様を満足できる。また、CCH に関しては、現行の国内規格案を満足し、国内規格への準拠に関する整合性も取れると考える。

7. 結論：本研究の目的である次世代車載無線通信として ITS に向け開発中である WAVE 技術のシステム検討を行い必要とされている要件を明確にすると共に、その性能面での検証を実施した。また、市街地における交通事情の分析を行い、その分析から交通事故の起こりやすい傾向にある交差点での WAVE 基地局設置の検討として、GIS ツールを活用することで決定し、交差点におけるサービス要件を満たすことを確認した。更に、国際協調性を生かした WAVE 規格提案をまとめる研究を行い、国内検討を維持し協調性を図れる可能性を示した。

8. 今後の課題：道路交通センサスにおけるデータは、道路の路線名において蓄積された情報であり、これを拡張全国デジタル道路地図の通り名とのマッピングにおいて、一路線名に複数の通り名が含まれることから、道路交通センサスでの交通データが通り名にまで分解されていないため、通り名での正確なデータの反映とはなっていない点に留意が必要となる。

9. 謝辞：本研究の指導教官および東京大学大学院工学系都市工学科講師陣の方々に多岐にわたる考え方と新鮮な情報を提供いただき、感謝申し上げます。

参考文献

- 総務省「ITS システムの高度化に関する研究報告書」平成 21 年 4 月
- 警察庁交通局「国内の死亡事故推移と傾向」H22 年 1 月 28 日
- 警視庁 発生状況・データ 2011 年交通事故発生マップデータ
- 国土交通省「平成 22 年度道路交通センサス」
- T.Tsuboi: Vehicle wireless communication cell design (CSNDSP 2010.6)
- E.K.Erlang: The Theory of Probabilities and Telephone Conversations 1909
- 坪井務：車載無線通信の市街地における衝突防止ケーススタディ (2012 年 2 月 20 日 電子情報通信学会)
- 警察庁 統計 「平成 24 年上半年期の交通死亡事故の特徴及び道路交通法違反取締状況について」
- 吉川憲昭：(社団) 情報通信技術委員会ネットワークドカーワーキング「NWedCarWG」第 2 回会合 (2010 年 12 月 10 日)