

大型車両を基点とした車車間・路車間融合通信システムにおける リンクブロッキング率の改善効果に関する検討

牛谷 善哉^{†a)} 今尾 勝崇[†] 東野 武史[†] 塚本 勝俊[†]
小牧 省三[†]

Improvement Effect in Link Blocking Rate for Joint Inter-Vehicle and
Road-to-Vehicle Communication System with Large-Sized Vehicle Operation

Yoshiya USHITANI^{†a)}, Masataka IMAO[†], Takeshi HIGASHINO[†],
Katsutoshi TSUKAMOTO[†], and Shozo KOMAKI[†]

あらまし 高度道路交通システムでは、交通事故防止、危険回避、及び渋滞解消の実現といった安全運転の自動支援のために、マルチホップ無線中継を用いた車車間通信を用いて、車両が有するプローブ情報を車車間ネットワーク内で共有することが不可欠である。また、離れた車群間でプローブ情報を共有するには、路車間ネットワークと連携した路車間・車車間融合通信ネットワークが必要となる。しかしながら、路車間リンクで発生するシャドウイングをはじめとしたリンクブロッキングは致命的な信号品質劣化をもたらす。そこで本論文では、車種によって異なる車載器設置位置に起因してシャドウイング発生率が異なることに着目して、通常車載器の設置位置が高い大型車両に車群情報を路側基地局に送信する路車間通信機能を集約し、普通車両については大型車両を基点とする車車間マルチホップを用いて車群内の情報転送を行うという、新しい車車間・路車間融合通信システムを提案する。交通流を考慮した計算機シミュレーションにより、提案手法がリンクブロッキング率の低減、及び平均実効伝送速度の改善に大きく寄与できることを明らかにする。

キーワード 車車間・路車間融合通信、マルチホップ、リンクブロッキング、プローブ情報、交通流

1. ま え が き

安全運転、安全走行のレベルがドライバー自身に依存していた時代から、安全支援制御や通信システムなど車両・道路に依存する時代に移行する中で、最先端の情報通信技術を用いた高度道路交通システム (ITS: Intelligent Transport Systems) に関心が集まっており、多種多様な研究開発が行われている [1] ~ [3]。

ITS で用いられる通信手法は、路側-車両の路車間通信 (RVC: Road-to-Vehicle Communication) と車両同士が直接データのやり取りを行う車車間通信 (IVC: Inter-Vehicle Communication) に大別される。RVC は道路交通情報通信システム (VICS: Vehicle Infor-

mation and Communication System) や自動料金収受システム (ETC: Electronic Toll Collection system) として実用化が始まっている。一方、IVC は走行支援道路システム (AHS: Advanced cruise-assist Highway Systems) の実現に必要な通信手段であり [4]、開発例として、車両前方の視界が死角となる状況で前方走行車両から IVC を用いて前方画像データを転送するシステム [5] や、車載レーダに IVC 機能を付加した車載器 [6] などがある。また、IVC は一つの車群内にローカルなネットワークを構築する車車間ネットワークにおいて問題となるルートの確立誤りや周波数リソースの浪費を解消するため、文献 [7] では、時空符号化協力中継を用いた通信ルートの接続性向上及び伝送容量の増大に関する検討が行われている。

ところで、車車間ネットワークにおいて、マルチホップ通信によって中継される周辺車両の速度や位置などといったプローブ情報をできる限り多くの車両から収集し、かつ車両間で共有することは、交通事故防止、

[†] 大阪大学大学院工学研究科電気電子情報工学専攻、吹田市
Division of Electrical, Electronic and Information Engineering,
Osaka University, 2-1 Yamada-oka, Suita-shi, 565-0871
Japan

a) E-mail: ushitani@roms.comm.eng.osaka-u.ac.jp

危険回避、及び渋滞解消に効果が高い。また、RVCを用いてこれらの車両のプロープ情報を確実に路側ユニット (RSU: Road Side Unit) にアップロードして、他の車群に配信することで、いっそうの道路交通の高度化に寄与できると考えられるため、このような路車間・車車間融合通信ネットワークがいくつか検討されている [8], [9]。文献 [8] では、RVC と IVC を併用することで、RVC のみを用いる方式において RSU の設置数を容易に増大できないことで発生する不感地帯を解消し、間欠的に設置された RVC スポットの通信エリアを拡張するシステムが提案されている。同様な検討として、文献 [9] では、RVC と IVC の統合によりすべての車両がシャドウイングの状態に応じて RVC と IVC を切り換えることによるシャドウイング低減の効果が示されている。一方、RVC では大型車両によるシャドウイングなどに起因するリンクブロッキングが致命的な信号品質劣化をもたらす [10] ~ [12] が、その発生率は車種によって異なる車載器設置位置に大きく依存することが示されている [13]。ゆえに、この点に着目することで、更なるリンクブロッキング発生率の低減が可能となり、プロープ情報の伝送及び確実なマルチホップ中継に必要不可欠とされる RVC の信頼性を高められることが期待される。しかしながら、大型車両を利用することによるシャドウイングの回避手法の検討は行われていない。更に、RSU までの通信ルートを確認させるために車種ごとに通信手段の役割分担を明確化した路車間・車車間融合通信ネットワークの検討も行われていない。

そこで本論文では、できる限り多くの車両のプロープ情報を RSU まで確実に転送することを目的として、通常車載器の設置位置が高く、シャドウイングの発生頻度が普通車両に比べ非常に少ない大型車両に、車群情報を RSU に送信する RVC 機能を集約し、普通車両は IVC を用いて車群内の情報転送を行うという、大型車両を基点とした車車間・路車間融合通信システムを提案する。本提案システムでは、路車間通信と車車間通信の役割分担を行うことで、車載器コストの低減が可能となり、車車間ネットワークを構築する際に不可欠とされる車載器普及率の向上や複雑な無線通信制御の解消が期待できるという特徴を有する。

まず 2. では、提案する大型車両を基点とした車車間・路車間融合通信システムにおける車群の形成方法とアップリンク通信時のプロープ情報伝送方式について述べ、3. では、電波伝搬と交通流のシミュレーシ

ョンモデルについて述べる。次に 4. では、提案システムにおいて、大型車両混入率、普通車両の IVC 車載器搭載率、RSU 間隔を変化させたときのリンクブロッキング率、また大型車両混入率に対する平均実効伝送速度の計算機シミュレーションによる結果を示し、提案方式の有効性を明らかにする。最後に、5. で本論文のまとめを述べる。

2. 大型車両を基点とした車車間・路車間融合通信システムの提案

路車間通信システムにおいては、ある車両の車載アンテナと路側アンテナを結び見通し線が周辺車両により遮断されるシャドウイングが頻繁に発生するが、その要因として大型車両が普通車両に引き起こす場合が特に高いことが指摘されている [10] ~ [12]。そこで本論文では、このことを逆手に利用したシャドウイングを回避するためのシステムとして、シャドウイングの発生が少ない大型車両を基点とした新しい車車間・路車間融合通信システムを提案する。

図 1 に提案システムの構成を示す。本システムでは、安全にかかわる車両速度や位置などのプロープ情報を車車間通信及び路車間通信を用いてネットワークに転送する。本論文では、路車間通信部分に各車線のガントリ上に設置された路側アンテナとの通信を想定し、狭域無線通信 (DSRC: Dedicated Short-Range Communication) 規格 [14] に基づいて 5.8 GHz のマイクロ波を用いる。また、車車間通信部分は隣接車線への干渉の影響が最も低いと考えられる直進性の鋭いミリ波を用いた同一車線内通信を想定する。これにより、送受信アンテナの指向方向を進行方向真正面及び真背面に固定できるという利点があり、アンテナの簡易化及び干渉対策が期待できるため、複数の車線で車

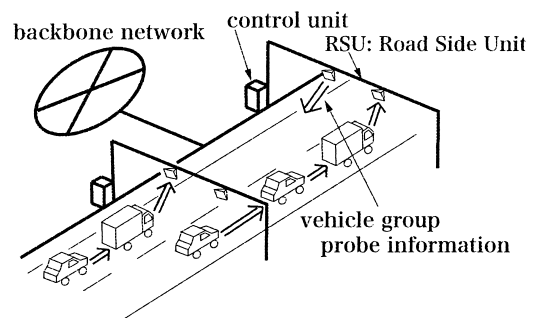


図 1 提案システムの構成

Fig. 1 Configuration of proposed system.

群を形成する手法に対してより高い有効性があるという特徴を有する。

本システムでは、ある車線内の大型車両を親 (master) とし、同一車線内でその親に後続するいくつかの車両が子 (slave) となって車群 (vehicle group) を形成する。子は車車間通信を用いて車群の最後尾の車両から前車両にプローブ情報を親まで次々とマルチホップ中継を行い、車群先頭の大型車両は、得られた車群内情報を路車間アップリンクで RSU に送信する。また、RSU は得られた車群内情報をバックボーンネットワークに転送する一方、路車間通信を用いて後に RSU 通信エリアに進入した後続車群に配信する。これにより、安全情報の車群間通信を実現することが可能となる。本論文では、車群の形成方法として、LV-master (Large-sized Vehicle-master) 方式と CommLV-master (Communicable Large-sized Vehicle-master) 方式の 2 種類を提案する。

2.1 LV-master 方式

図 2 に、車群形成方式として用いる LV-master 方式を示す。本方式では、大型車両自身のシャドウイング発生の有無にかかわらず、すべての大型車両が親となり、その親から次の親までの間に後続する普通車両が子となって車群を形成する。ただし、大型車両の後続に普通車両が存在しない場合は、大型車両一台が車群となる。図 2 の具体例では、すべての大型車両が親となるので車両 1, 5, 6 がそれぞれ車群 A, B, C の親となる。一方、親に後続する普通車両が子となるので、車両 2, 3, 4 が車群 A, 車両 7 が車群 C の子として属する。また、車群 B は後続する普通車両が存在しないため、車両 5 すなわち親のみが車群となる。

上述した車群形成方法では、車群最後尾となる車両の判断が必要とされるが、例えば図 3 に示すように、制御チャネルを用いて親である大型車両から後方の車両に車群形成のための制御メッセージを順次転送・更新していき、普通車両のみがその制御メッセージに対する確認応答 (ACK: ACKnowledgment) を返すような手法をとることで、ACK をある

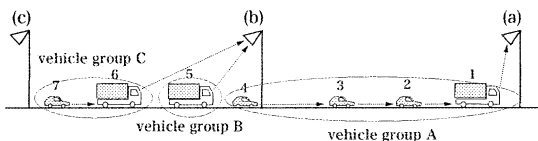


図 2 LV-master 方式
Fig. 2 LV-master method.

タイムアウト時間内に受信できない車両が車群最後尾と認識することが可能である。また、車群最後尾であると判断した車両が、転送されてきた車群形成のための制御メッセージを基に車群内車両数等の制御メッセージを作成し、前方の車両にその制御メッセージを順次転送していくことで、各車両は車群内車両数や自車両から車群最後尾までの車両数を把握することが可能となる。

2.2 CommLV-master 方式

2.1 の LV-master 方式では、大型車両にシャドウイングが発生すると車群全体にその影響が及び、そこで、その対策として図 4 に示す CommLV-master 方式を提案する。本方式では、大型車両にシャドウイング判別機能 [15] をもたせ、シャドウイングが発生した大型車両は親とはならずシャドウイングが発生していない大型車両まで届くように前方車両に情報を車車間転送する。ただし、シャドウイングが発生していない大型車両の後続に、普通車両あるいはシャドウイングが発生している大型車両が存在しない場合は、その大型車両 1 台が車群となる。図 4 に示す具体例では、シャドウイングが発生していない大型車両が親となるので車

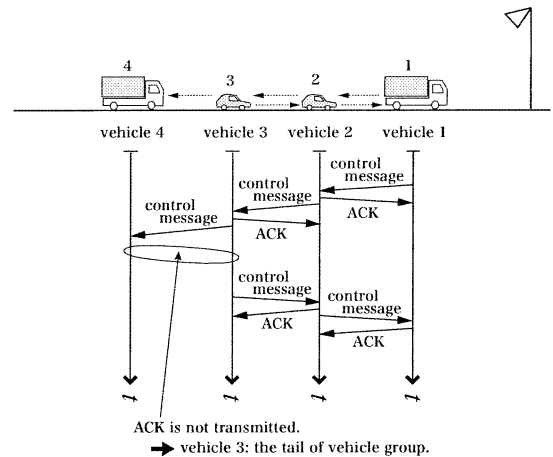


図 3 車群形成時の制御メッセージの流れ
Fig. 3 Control message flow in vehicle group forming.

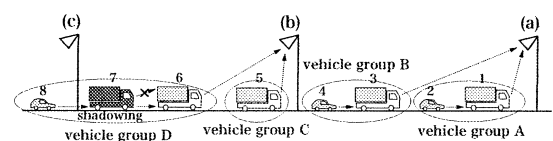


図 4 CommLV-master 方式
Fig. 4 CommLV-master method.

両 1, 3, 5, 6 がそれぞれ車群 A, B, C, D の親となる。一方、子は親に後続する普通車両またはシャドウイングが発生している大型車両であり、車両 2 が車群 A, 車両 4 が車群 B, 車両 7 と 8 が車群 D に属する。また、車群 C は後続が別の車群の親であるため、親である車両 5 のみが車群となる。

上述した車群形成方法では、LV-master 方式と同様に各車両が車群最後尾であるか否かの認識が必要とされるが、例えば LV-master 方式で述べた図 3 のような方法においてシャドウイング発生時のみ ACK を返すような機能を大型車両に追加することで判断可能となる。

2.3 プローブ情報伝送方式

図 5 に、時分割多元接続方式 (TDMA: Time Division Multiple Access) を用いた各車両のプローブ情報の流れを示す。ただし、車車間通信、路車間通信で独立したタイムスロットを用い、車群内における車両間での時間同期は、最も簡便かつ広範囲にわたって容易に同期を行うことが可能である GPS 信号を用いる手法 [16] により完全であるものと仮定する。道路の周辺環境により、GPS 信号が受信できない場合の対策

については、今後検討を行う。また、IVC において車群内の通信可能な各々の子に一つずつスロットを割り当てるために必要となるフレーム数の周期 N_{IVC} 、及び RVC において一つの RSU にアクセスする各々の親に一つずつスロットを割り当てるために必要となるフレーム数の周期 N_{RVC} は

$$N_{IVC} = \left\lceil \frac{\text{車群内の通信可能な子の数}}{\text{IVC で用いる 1 フレーム当りの TDMA スロット数}} \right\rceil$$

$$N_{RVC} = \left\lceil \frac{\text{一つの RSU にアクセスする親の数}}{\text{RVC で用いる 1 フレーム当りの TDMA スロット数}} \right\rceil$$

でそれぞれ与えられる。例えば、IVC で用いる 1 フレーム当りの TDMA スロット数を 8、車群内の通信可能な子の数を 3 台とすれば、上式の計算により、各々の子は 1 フレームごとに一つずつスロットが割り当てられる ($N_{IVC} = 1$) ことになる。また、RVC で用いる 1 フレーム当りの TDMA スロット数を 8、RSU にアクセスする親の数を 10 台とすれば、上式の計算により、各々の親は 2 フレームごとに一つずつスロットが割り当てられる ($N_{RVC} = 2$) ことになる。

提案システムでは、車群を形成した後、再生中継車車間通信を用いて車群内に存在する最後尾の子から前方の子にプローブ情報を送信する。また、プローブ情報を受信した子は、受信したプローブ情報に自車両のプローブ情報を付加し、更に前方の子にその情報を送信する。これを繰り返して、車群内に存在する子のプローブ情報を車群先頭の親まで送信する。次に、親は、得られたプローブ情報に自車両のプローブ情報を付加し、路車間通信を用いて車群内プローブ情報を前方に存在する最近接の RSU に送信する。ただし、車群内に子が存在しない場合は、親は自車両のプローブ情報のみを RSU に送信する。以上のように、子は車車間通信を用いて前車両に、親は路車間通信を用いて前方 RSU に送信することで、車群から RSU への通信すなわちアップリンク通信を確立する。

3. シミュレーションモデル

図 6 にシミュレーションモデルを示す。本モデルでは、直接波及び大地反射波の 2 波を考慮した電波伝搬モデルを用いる。また、RSU の通信エリア内においてダッシュボード上の車載アンテナから路側アンテナが幾何学的に見通せない範囲をシャドウイングエリアと

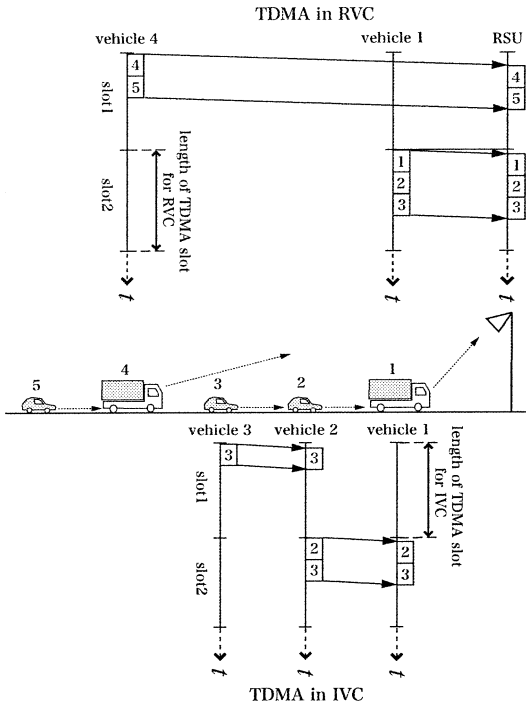


図 5 各車両のプローブ情報の流れ
 Fig. 5 Probe information relay method for each vehicle.

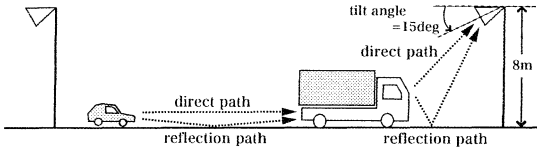


図 6 シミュレーションモデル
Fig. 6 Simulation model.

定義し，路車間通信リンクは遮断される．ただし，隣接車線を走行する車両との電波干渉は，車線ごとに異なる周波数チャンネルを用いることで無視できるものと仮定する．

また，路側アンテナはガントリ上に設置され，設置高 8m，チルト角 15 deg の方形開口アンテナとする．一方，大型車両の路車間通信車載アンテナはダッシュボード上に設置された無指向性アンテナを仮定し，車車間通信車載アンテナは前後のナンバープレート上に設置された方形開口アンテナを仮定する．

更に，交通流モデルとして車頭時間にアーラン分布 [17], [18] を導入し，車種に大型車両と普通車両を仮定することで，交通密度と大型車両混入率をパラメータとして変化させる．

4. 計算機シミュレーション

本章では，2. で述べた提案システムを 3. で示したシミュレーションモデルに適用し，大型車両を親にすることで，大型車両混入率 (LVR : Large-sized Vehicle Ratio)，車載器搭載率 (DIR : Device Implementation Rate)，及び RSU 間隔に対するリンクブロッキング率が改善されることを計算機シミュレーションにより評価する．また，平均実効伝送速度についても評価を行うことで提案システムの有効性を明らかにする．ただし，本論文では，車群内プローブ情報を RSU まで確実に転送することを目的としているため，アップリンク通信を検討対象とする．

表 1，表 2 及び表 3 に，本論文で用いたシミュレーション条件，車両モデルに関するパラメータ及び交通流モデルに関するパラメータをそれぞれ示す．ただし，表 1 中の TDMA スロット数とスロット長は DSRC の標準規格 [14] に基づいた．また，表 3 中の自由流及び渋滞流における交通流パラメータは実交通流に基づいた値 [19] である．

提案方式と比較検討するためのシステムとして，Random 方式 (Random method) と RVC 方式 (RVC method) を従来方式とする．Random 方式は大型車

表 1 シミュレーション条件
Table 1 Simulation parameters.

	IVC	RVC
Transmitting frequency	60 [GHz]	5.8 [GHz]
Transmitting power	10 [dBm]	
RSU antenna gain	—	10 [dBi]
OBE antenna gain	23 [dBi]	2 [dBi]
Modulation method	QPSK	
RSU/OBE bandwidth	5 [MHz]	
RSU/OBE noise figure	10 [dB]	
RSU/OBE temperature	300 [K]	
RSU/OBE sensitivity	-82 [dBm]	
RSU/OBE required CNR	15 [dB]	
Reflection coefficient	0.8	
Oxygen absorption attenuation constant	0.015 [dB/m]	—
Number of TDMA slot per frame	8	8
Length of TDMA slot	1 [ms]	1 [ms]

RSU: Road Side Unit, OBE: On-Board Equipment

表 2 車両モデルに関するパラメータ
Table 2 Vehicle model parameters.

	Lrg	Std
Vehicle length	10.0 [m]	4.5 [m]
Vehicle height	4.0 [m]	1.5 [m]
Dashboard height	2.5 [m]	1.0 [m]
License plate height	0.5 [m]	0.5 [m]
Probe information	1 [kbit]	

Lrg: Large-sized vehicle, Std: Standard-sized vehicle

表 3 交通流モデルに関するパラメータ
Table 3 Traffic flow parameters.

	Free flow	Congested flow
Vehicle speed	80 [km/h]	20 [km/h]
Traffic density	15 [veh/km/lane]	36 [veh/km/lane]
Erlang phase	3	6

両と普通車両を区別せず，同一車線内の車両から親をランダムに選択し車群を形成する．一方，RVC 方式は車群を形成せず，すべての車両が各々路車間通信を行う．また，本論文では大型車両及び普通車両の路車間通信車載アンテナの設置箇所はダッシュボード上としており，大型車両同士及び普通車両同士のシャドウイングが発生し得る環境を想定している．更に，表 4 に本論文で仮定する車載器搭載率を示す．

4.1 リンクブロッキング率

本論文では，シャドウイングにより RSU がプローブ情報を受信できない場合，無線リンクにおける信号電力減衰により受信 CNR が所要 CNR 以下となり受信が失敗する場合，及びマルチホップ中継車両が車載器を搭載していないためにプローブ情報を転送できな

表 4 車載器搭載率

Table 4 Device implementation rate for IVC and RVC.

		Lrg	Std	
			master	slave
Proposal method	IVC	100%	—	0 ~ 100% ()
	RVC		—	0%
Random method	IVC	100%	100%	0 ~ 100% ()
	RVC		100%	0%

DIR: Device Implementation Rate

い場合を合わせてリンクブロッキング (link blocking) と定義する。また、各車両にリンクブロッキングが発生する確率の平均値をリンクブロッキング率 (LBR: Link Blocking Rate) とする。

4.1.1 大型車両混入率に対するリンクブロッキング率

図 7 及び図 8 に、RSU 間隔が 500 m のときの、自由流と渋滞流の場合における LVR に対する LBR をそれぞれ示す。ただし、LVR は現実的な平均車群長を想定して 0.1 から 1 の間で変化させた。また、本項以降では子となる普通車両の IVC 車載器搭載率 (表 4 中の 部分) を単に DIR と呼ぶことにし、図中では DIR = 0.3, 0.7 及び 1.0 とした。

まず、提案方式の特性について検討する。

(1) LV-master 方式

図 7 及び図 8 より、自由流と渋滞流における LBR は LVR に対してほぼ同じ特性を示していることが分かる。また、DIR が 0.3 及び 0.7 の場合では自由流で LVR < 0.5, 渋滞流で LVR < 0.4 の範囲では LBR が減少し、以降 LBR は増加していることが同図より分かる。これは、低 LVR の範囲では LVR の増加に従って車群が短くなる割合が高いため、普通車両の IVC 車載器の非搭載による車車間通信部分でのリンクブロッキングの影響が小さくなる一方、高 LVR になると大型車両が 1 台で車群を形成する傾向が強くなり、大型車両同士のシャドウイングによる路車間通信部分でのリンクブロッキングの発生が支配的となるからである。これに対して、DIR が 1.0 の場合は LVR が高くなるに従って LBR が増加していることが同図より分かる。これは、LVR が高くなるに従って大型車両が 1 台で車群を形成する傾向が強くなり、大型車両同士のシャドウイングによる路車間通信部分でのリンクブロッキングの発生が常に支配的となるからである。

(2) CommLV-master 方式

図 7 及び図 8 より、自由流と渋滞流における

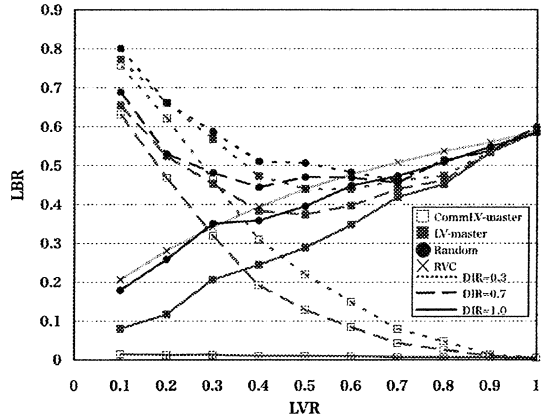


図 7 大型車両混入率に対するリンクブロッキング率 (自由流)

Fig. 7 LBR to LVR (Free flow).

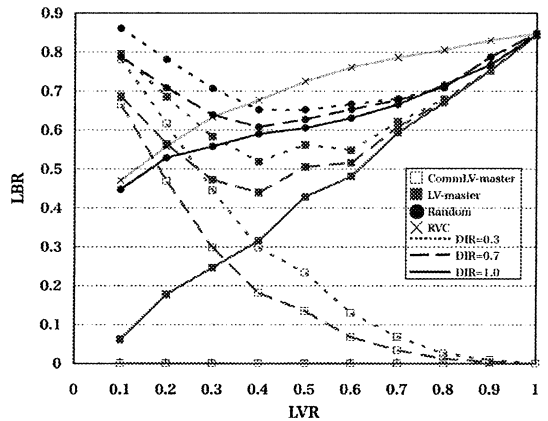


図 8 大型車両混入率に対するリンクブロッキング率 (渋滞流)

Fig. 8 LBR to LVR (Congested flow).

CommLV-master 方式の LBR は LVR に対してほぼ同じ特性を示していることが分かる。また、LV-master 方式とは異なり、DIR によらず LVR が高くなるに従って LBR が減少していることが同図より分かる。これは、DIR が 0.3 及び 0.7 の場合においては、自由流で LVR < 0.4, 渋滞流で LVR < 0.3 の範囲では LVR の増加に従って車群が短くなる割合が高いため、普通車両の IVC 車載器の非搭載による車車間通信部分でのリンクブロッキングの影響が小さくなり、高 LVR では DIR にかかわらず大型車両同士の距離が長ければ路車間通信、短ければ車車間通信を行うといったように、シャドウイングを回避するための手段が多くなり、複数台の大型車両で一つの車群を形成するからである。

更に、DIR が 1.0 の場合においては、大型車両の増加に伴ってシャドウイングを回避するための手段が多くなりその効果がより顕著に現れていることが同図より分かる。

次に、提案方式と従来方式の比較を行う。

図 7 及び図 8 より、自由流と渋滞流における LV-master 方式、Random 方式及び RVC 方式は、LVR が 1 に近づくにつれ、大型車両 1 台で車群を形成する傾向がより強くなるため LBR は等しい値に収束していることが分かる。

次に、図 7 より、自由流の場合における LV-master 方式と Random 方式を比較すると、DIR が 0.3 及び 0.7 の場合においては、LV-master 方式は Random 方式と比べて LBR の改善が見られるものの大幅な改善は得られないことが分かる。これに対して、DIR が 1.0 の場合においては、LV-master 方式は Random 方式と比べて低 LVR で特に大幅な改善が見られ、LVR = 0.1 のとき LBR を約半分に改善できることが同図より分かる。これは、高 LVR では車群が短く大型車両同士のシャドウイングが発生しやすいが、低 LVR では車群が長く大型車両同士のシャドウイングが発生しにくいからである。また、CommLV-master 方式では、DIR が 0.3 及び 0.7 の場合においては、Random 方式と比べて LVR > 0.4 の範囲で LBR の大幅な改善が得られ、LVR = 0.6 で LBR をそれぞれ 3/10、1/5 にできることが同図より分かる。これに対して、DIR が 1.0 の場合においては、全 LVR で Random 方式と比べて LBR の大幅な改善が得られ、LVR = 0.2 のときは LBR を 1/20、LVR = 0.9 のときは LBR を 1/100 とできている。一方、図 7 より、CommLV-master 方式と RVC 方式を比較すると、DIR が 0.3 及び 0.7 においてそれぞれ LVR が 0.4 以上及び 0.3 以上であれば、CommLV-master 方式は RVC 方式に対して LBR の改善に寄与できていることを確認できる。また、DIR が 1.0 の場合においては、CommLV-master 方式は RVC 方式に対して全 LVR で LBR の改善に寄与でき、Random 方式と比較した場合の改善度とほぼ同等の LBR の改善が得られる。

更に図 8 より、渋滞流の場合における LV-master 方式と Random 方式を比較すると、自由流と同様の結果が得られ、DIR が 1.0 の場合においては低 LVR で大幅な改善が得られ、LVR = 0.1 のとき LBR を 3/20 にできることが分かる。また、CommLV-master 方式についても自由流と同様の結果が得られ、DIR が

0.3 及び 0.7 の場合においては Random 方式に対して LVR > 0.3 の範囲で LBR の大幅な改善が得られ、LVR = 0.6 で LBR をそれぞれ 1/5 及び 1/10 にできることが同図より分かる。これに対して、DIR が 1.0 の場合においては、CommLV-master 方式を用いることであらゆる LVR に対してリンクブロッキングをほぼ完全に解消できている。一方、図 8 より、CommLV-master 方式と RVC 方式を比較すると、DIR が 0.3 及び 0.7 においてはともに LVR が 0.2 以上であれば、CommLV-master 方式は RVC 方式に対して LBR の改善に寄与できていることを確認できる。また、DIR が 1.0 の場合においては、CommLV-master 方式は RVC 方式に対して、全 LVR で LBR の改善に寄与でき、Random 方式と比較した場合の改善度とほぼ同等の LBR の改善が得られる。

4.1.2 普通車両の IVC 車載器搭載率に対するリンクブロッキング率

図 9 及び図 10 に、自由流と渋滞流の場合における DIR (表 4 中の 部分) に対する LBR をそれぞれ示す。ただし、RSU 間隔は 500m、LVR は実交通流に基づいたおおよその両極端の値 [19] である 0.3 及び 0.7 とした。

図 9 より、自由流の場合における LV-master 方式と Random 方式を比較すると、LVR = 0.3 及び 0.7 の場合ともに LV-master 方式は Random 方式に対してほとんど LBR の改善は得られないことが分かる。これに対して、CommLV-master 方式は Random 方式に対して LVR = 0.3 のときは DIR > 0.8 の範囲で 40%以上、LVR = 0.7 のときには DIR > 0.1 の範

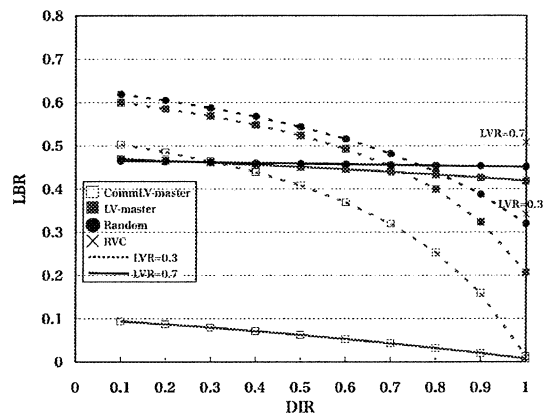


図 9 普通車両の IVC 車載器搭載率に対するリンクブロッキング率 (自由流)

Fig. 9 LBR to DIR (Free flow).

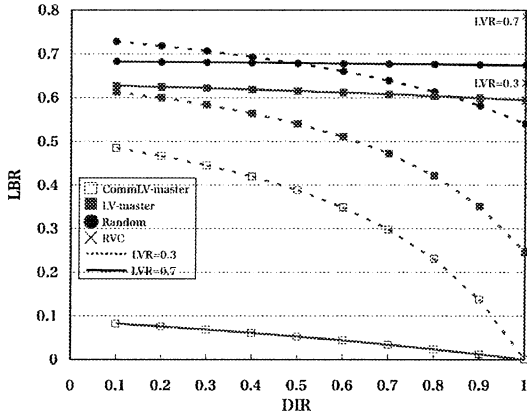


図 10 普通車両の IVC 車載器搭載率に対するリンクブロッキング率 (渋滞流)
Fig. 10 LBR to DIR (Congested flow).

困で 80%以上のリンクブロッキングを解消できる。更に、定量的な評価を行うと、LVR = 0.3 で DIR = 0.9 のときに LBR が 2/5, LVR = 0.7 で DIR = 0.2, 0.9 のときに LBR がそれぞれ 1/5, 1/20 になることが同図より分かる。一方、図 9 より、CommLV-master 方式と RVC 方式を比較すると、LVR = 0.7 の場合、CommLV-master 方式は RVC 方式に対して LBR が大きく改善されており、DIR が 0.5 以下であっても、LBR を少なくとも 1/5 にできることが分かる。しかしながら、LVR = 0.3 の場合、DIR が 0.6 以下となると LBR は RVC 方式に対して悪化することが分かる。これは、RVC 方式では全車両が RVC 車載器を搭載しているのに対し、CommLV-master 方式において LVR 及び DIR がともに低い場合は、親となる大型車両が少ない上、IVC 車載器を搭載していない普通車両が多くなるからであると考えられる。このような環境では、複数車線での車群の形成が効果的であるが、これに関する検討は今後の課題としたい。

次に図 10 より、渋滞流の場合における LV-master 方式と Random 方式を比較すると、Random 方式に対する LV-master 方式の LBR の改善度は自由流よりは大きいものの、大幅な改善が得られているとはいえない。これに対して、CommLV-master 方式は Random 方式に対して、LVR = 0.3 のときは DIR > 0.5 の範囲で 40%以上、LVR = 0.7 のときには DIR > 0.1 の範囲で 85%以上のリンクブロッキングを解消できる。更に、定量的な評価を行うと、LVR = 0.3 で DIR = 0.6 のときに LBR が 1/2, LVR = 0.7 で DIR = 0.2, 0.9

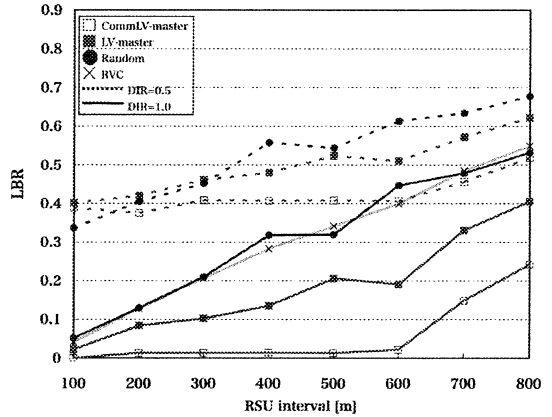


図 11 RSU 間隔に対するリンクブロッキング率 (自由流, LVR = 0.3)
Fig. 11 LBR to RSU interval (Free flow, LVR = 0.3).

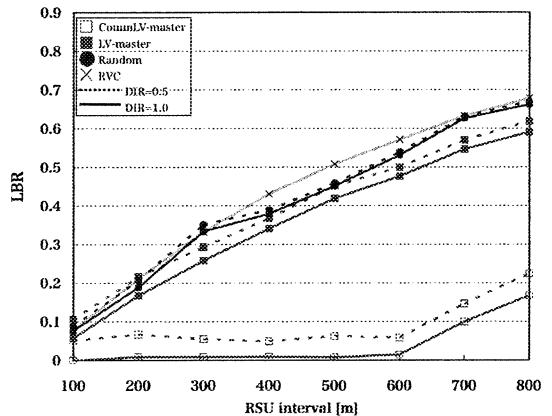


図 12 RSU 間隔に対するリンクブロッキング率 (自由流, LVR = 0.7)
Fig. 12 LBR to RSU interval (Free flow, LVR = 0.7).

のときに LBR がそれぞれ 1/10, 1/50 になることが同図より分かる。一方、図 10 より、CommLV-master 方式と RVC 方式を比較すると、LVR = 0.3 及び 0.7 の場合ともに CommLV-master 方式は RVC 方式に対して LBR が大きく改善され、DIR が 0.5 以下であっても、LBR をそれぞれ少なくとも 3/4 及び 1/10 に減少できることが分かる。

4.1.3 RSU 間隔に対するリンクブロッキング率

図 11 及び図 13 に、LVR = 0.3 での自由流と渋滞流における RSU 間隔に対する LBR をそれぞれ示す。また、図 12 及び図 14 に LVR = 0.7 での自由流と渋滞流における RSU 間隔に対する LBR をそれぞれ示す。ただし、これらの LVR は実交通流に基づいたおおよその両極端の値 [19] である。また、DIR (表 4 中

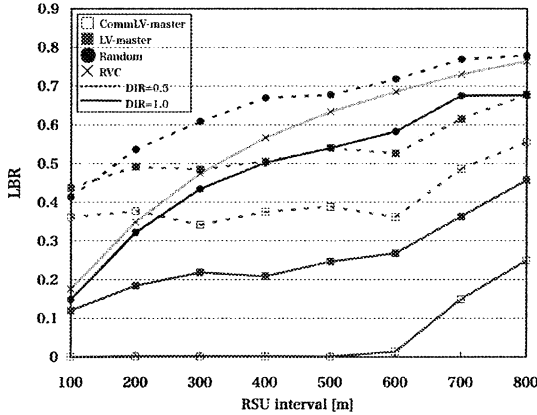


図 13 RSU 間隔に対するリンクブロッキング率 (渋滞流, LVR = 0.3)
Fig. 13 LBR to RSU interval (Congested flow, LVR = 0.3).

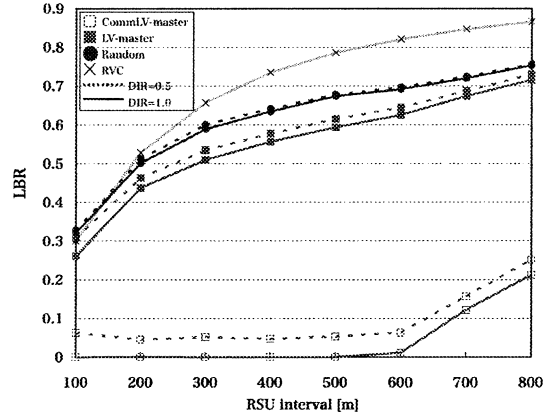


図 14 RSU 間隔に対するリンクブロッキング率 (渋滞流, LVR = 0.7)
Fig. 14 LBR to RSU interval (Congested flow, LVR = 0.7).

の部分)は 0.5 及び 1.0 とした。

図 11 ~ 図 14 より, LV-master 方式, Random 方式及び RVC 方式での LBR は RSU 間隔が広がるに連れて増加しているが, CommLV-master 方式の LBR は RSU 間隔 = 600 m まではほぼ一定値であることが分かる。これは, RSU 間隔が広がるに連れて大型車両が引き起こすシャドウイングエリアが拡大されるものの, CommLV-master 方式ではシャドウイングを回避する手段が他の方式に比べて増えるからである。また, RSU 間隔 > 600 m とすれば, CommLV-master 方式は DIR = 0.5 であってもほとんどの RSU 間隔に対して他の 3 方式よりも LBR を抑えられることを同図より確認することができる。定量的に評価すると, DIR が 1.0 の場合においては, LV-master 方式, Random 方式及び RVC 方式で LBR を 0.01 とするためには, RSU 間隔を 100 m 以下にしなければならないが, CommLV-master 方式では RSU 間隔を 500 m としても LBR を 0.01 以下に維持できることが同図より分かる。すなわち, CommLV-master 方式は, RSU 間隔を他の 3 方式の少なくとも 5 倍以上としても, 十分に低い LBR を維持して通信を行うことが可能であるといえる。

4.2 平均実効伝送速度

本節では, CommLV-master 方式を用いた場合の平均実効伝送速度について考察を加える。ただし, M 台の車両で構成される車群中, 先頭から i 番目の車両 i の送信プローブ情報量を P_{s_i} [bit], プローブ情報の送信周期を T_i [s] としたとき, 車両 i の実効伝送速度

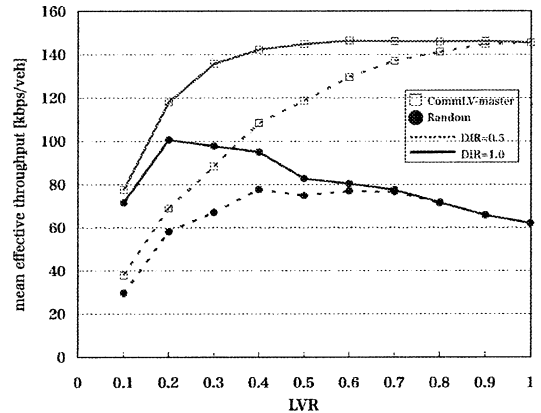


図 15 平均実効伝送速度 (自由流)
Fig. 15 Mean effective throughput (Free flow).

T_{p_i} [bit/s] は

$$T_{p_i} = \frac{P_{s_i}}{T_i} \quad (i = 1, 2, \dots, M)$$

で与えられるものとする。

図 15 及び図 16 に, RSU 間隔 = 500 m のときの, 自由流と渋滞流における CommLV-master 方式及び Random 方式での LVR に対する平均実効伝送速度をそれぞれ示す。ただし, LVR は現実的な平均車群長を想定して 0.1 から 1 の間で変化させた。また, DIR (表 4 中の部分)は 0.5 及び 1.0 とした。

まず, CommLV-master 方式の特性について検討する。

図 15 及び図 16 より, 自由流と渋滞流を比較すると, 低 LVR では LVR の増加とともに平均実効伝送速度も

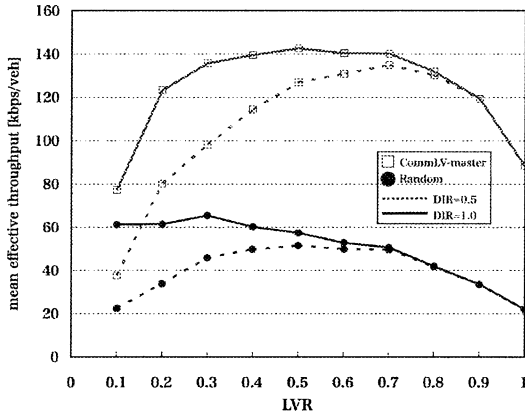


図 16 平均実効伝送速度 (渋滞流)

Fig. 16 Mean effective throughput (Congested flow).

増加していることが分かる。これは、4.1.1 で述べた LBR の改善に加え、LVR の増加に伴う車群内車両数の減少により、車群ごとの子数が 1 フレーム内のタイムスロット数に相当する 8 台より少なくなる確率が増加することに起因する。これに対して、高 LVR での平均実効伝送速度は、自由流においては一定値に近づく傾向にあることが同図より分かる。これは、複数台の大型車両で一つの車群を形成することによる LBR の改善に加え、自由流では平均車間距離が長く大型車両がシャドウイングを受ける可能性が極めて少ないため、車群ごとの子数及び一つの RSU にアクセスする大型車両の数がともに 8 以下となり、車車間通信及び路車間通信用に準備されたタイムスロットを効率良く使用できているからである。一方、渋滞流においては $LVR > 0.7$ となると平均実効伝送速度が減少する傾向にあることが同図より分かる。これは、複数台の大型車両で一つの車群を形成することによる LBR の改善に対し、渋滞流では平均車間距離が短く大型車両がシャドウイングを受ける可能性が高いため、大型車両がプローブ情報を送信するために車車間通信のタイムスロットをより多く使用することによるタイムスロット利用効率の劣化が支配的となるからであると考えられる。

次に、CommLV-master 方式と Random 方式の比較を行う。

図 15 より、自由流の場合における CommLV-master 方式の平均実効伝送速度は常に Random 方式の場合を上回り、 $DIR = 0.5, 1.0$ の場合に対して $LVR = 0.9$ のときに Random 方式に比べてともに最大 2.2 倍となることが分かる。

また、図 16 より、渋滞流の場合における CommLV-master 方式の平均実効伝送速度は自由流と同様に常に Random 方式の場合を上回り、 $DIR = 0.5, 1.0$ の場合に対して $LVR = 0.9$ のときに Random 方式に比べてともに最大 3.5 倍となることが分かる。

5. むすび

本論文では、大型車両を基点とした新しい車車間・路車間融合通信システムを提案し、更に車群構成法として LV-master 方式と CommLV-master 方式を提案し、それぞれのリンクブロッキング率と CommLV-master 方式の平均実効伝送速度を計算機シミュレーションにより評価した。その結果、以下のことが明らかになった。

- CommLV-master 方式を用いた場合のリンクブロッキング率は、普通車両の IVC 車載器搭載率が 1.0 のとき、自由流、渋滞流ともに LV-master 方式、Random 方式及び RVC 方式と比べて大幅に改善し、あらゆる LVR に対して $1/5$ 以下となる。

- CommLV-master 方式を用いた場合の普通車両の IVC 車載器搭載率に対するリンクブロッキング率は、RVC 方式に対しては、自由流において LVR が 0.7 以上、渋滞流において LVR が 0.3 以上であれば、普通車両の IVC 車載器搭載率によらず常に改善され、LV-master 方式及び Random 方式に対してはあらゆる状態において改善した。

- リンクブロッキング率を 0.01 以下とするための RSU 間隔は、普通車両の IVC 車載器搭載率が 1.0 の場合、自由流、渋滞流ともに CommLV-master 方式を用いることにより Random 方式及び RVC 方式に対して 5 倍以上とすることができる。

- CommLV-master 方式を用いた場合の平均実効伝送速度は、Random 方式の場合に対して常に上回り、 $LVR = 0.9$ のときは普通車両の IVC 車載器搭載率によらず、自由流で 2.2 倍、渋滞流で 3.5 倍となった。

今回は路側アンテナを各車線のガントリ上に設置したが、今後は路側に設置して複数の車線間で車群を形成する場合について検討を行う予定である。また、大型車両が存在しないときは車群形成の手法を改良する必要があるため、これについても今後検討を行う予定である。

文 献

- [1] M. Fujise, "Radio over fiber transmission technology for ITS and mobile communications," IEICE Trans.

- Fundamentals, vol.E84-A, no.8, pp.1808-1814, Aug. 2001.
- [2] 森山誠二, “ITS, セカンドステージへ” 映像学誌, vol.59, no.6, pp.818-822, June 2005.
- [3] 堀内浩規, “ITS 関連通信・ネットワーク技術” 映像学誌, vol.59, no.6, pp.837-841, June 2005.
- [4] 水井 潔, 長谷川孝明, 永長知孝, 加藤 晋, 津川定之, 羽瀨裕真, 村田英一, 高橋常夫, 徳田清仁, 堀松哲夫, 関 馨, 藤井治樹, 中川正雄, “車々間通信コンセプトモデルに関する一検討” 信学技報, ITS2002-121, March 2003.
- [5] 徳田清仁, 中林昭一, 大山 卓, “写々間通信システムの開発” 信学技報, ITS2002-82, Feb. 2003.
- [6] J. Sato, T. Horimatsu, K. Sato, A. Kato, M. Fujise, and H. Kida, “Millimeter-wave radar-based inter-vehicle communication system for safe driving,” Proc. 11th World Congress on ITS, no.3368, pp.1-8, Oct. 2004.
- [7] T. Koike, M. Tanaka, and S. Yoshida, “Capacity improvement of multihop inter-vehicle communication networks by STBC cooperative relaying,” IEICE Trans. Commun., vol.E88-B, no.9, pp.3546-3553, Sept. 2005.
- [8] Y. Hamada, M. Imao, K. Tsukamoto, and S. Komaki, “Non-regenerative millimeter-wave inter-vehicle relay scheme for spot type road-to-vehicle communication system and its improvement effect in communication outage rate,” Proc. 7th Topical Symposium on Millimeter Waves (TSMMW2005), pp.45-48, Feb. 2005.
- [9] 森田洋介, 長谷川孝明, “シャドウイング回避のための路車間・車々間統合通信について” 信学技報, ITS2002-32, Nov. 2002.
- [10] M. Imao, K. Tsukamoto, and S. Komaki, “Application of adaptive modulation for road-to-vehicle communication system and its improved effect in shadowing duration,” IEICE Trans. Fundamentals, vol.E87-A, no.10, pp.2639-2648, Oct. 2004.
- [11] 濱田悠司, 今尾勝崇, 塚本勝俊, 小牧省三, “路車間通信と車車間通信の融合によるシャドウイング発生率改善手法の一検討” 信学技報, ITS2003-09, Sept. 2003.
- [12] 井上 洋, 牧野浩志, “走行支援助路サービスにおける DSRC の安全性信頼性設計” 信学技報, ITS2003-118, March 2004.
- [13] 今尾勝崇, 高橋 伸, 杉浦泰伸, 塚本勝俊, 小牧省三, 澤 良次, 深江唯正, “路車間通信システムにおける車両トラヒックとシャドウイング発生確率の関係に関する一考察” 2002 信学総大, A-17-38, March 2002.
- [14] 電波産業会 (ARIB), 狭域通信 (DSRC) システム, ARIB STD-T75 1.0 版, Sept. 2001.
- [15] 梶原 亮, 今尾勝崇, 塚本勝俊, 小牧省三, “路車間 TCP/IP 通信システムにおける長期通信遮断推定法の提案とそのスループット改善効果” 信学技報, RCS2004-96, July 2004.
- [16] 田代信介, 田村英一, 吉田 進, “ITS 車車間通信における GPS を用いたタイミング同期に関する一検討” 2000

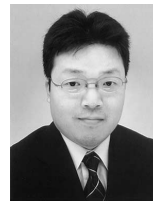
信学ソ大, A-17-3, Sept. 2000.

- [17] 越 正毅, 交通工学通論, pp.78-89, 技術書院, 1989.
- [18] 渡辺新三, 依田 浩, 推計学の交通工学への応用, pp.21-22, 技術書院, 1971.
- [19] 電波産業会, 5.8 GHz 帯における移動業務と他業務の周波数共用技術の調査検討報告書, pp.189-198, March 2002. (平成 17 年 10 月 5 日受付, 18 年 1 月 12 日再受付)



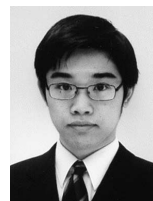
牛谷 善哉 (学生員)

2005 阪大・工・通信卒。現在, 同大大学院工学研究科電気電子情報工学専攻博士前期課程在学中。無線通信システムの研究に従事。



今尾 勝崇 (正員)

2002 阪大・工・通信卒。2003 同大大学院工学研究科通信工学専攻博士前期課程了。現在, 同博士後期課程在学中。無線通信システムの研究に従事。IEEE 学生員。



東野 武史 (正員)

2001 阪大・工・通信卒。2002 同大大学院工学研究科通信工学専攻博士前期課程了。2005 同大大学院博士後期課程了。現在, 同大学院工学研究科電気電子情報工学専攻助手。無線通信方式, 光通信方式に関する研究に従事。工博。



塚本 勝俊 (正員)

1982 阪大・工・通信卒。1984 同大大学院修士課程了。同大学助手, 講師を経て, 現在, 同助教授。光通信方式, 無線通信方式, 光電波融合通信方式に関する研究に従事。工博。ITE, IEEE 各会員。1996 本会論文賞, 2004 同業績賞受賞。



小牧 省三 (正員:フェロー)

1970 阪大・工・通信卒。1972 同大大学院修士課程了。同年電電公社 (現 NTT) 入社。1990 大阪大学助教授。1992 同大学教授。無線通信方式並びに光通信方式に関する研究に従事。工博。IEEE シニア員。1977 本会論文賞。1994 同業績賞受賞。