

# 700 MHz 帯車車間通信による交通情報共有手法の検討

大西 亮吉<sup>1,a)</sup> 吉岡 顕<sup>1</sup>

受付日 2014年4月9日, 採録日 2014年10月8日

**概要:** 700 MHz 帯高度道路交通システムの車載無線機を利用した, 車車間通信による交通情報共有の基本システム, および2つの効率化方式を考案した. 効率化方式の1つは, 送信, または受信した情報を一定時間送信の対象外とする方式(重複送信抑制)である. もう1つは情報の相対値表現によりデータサイズを削減することで情報の高密度化を行い, 複数のリンク情報をまとめて送信する方式(まとめ送り)である. 都市の密集エリアを模擬したシミュレーションを行い, システム普及初期における提案方式の情報共有性能と効率化の限界について評価した. 重複送信抑制とまとめ送りの効率化によって情報の伝搬速度は向上し, より新鮮な情報を豊富に広範囲に供給できることを確認した. さらに普及率の増加に対しても評価を行い, 工夫なしの方式と同じ傾向の計算量の要求にとどまり, 普及が進んでも低普及期と同等の情報量の改善を見込めることも確認した.

**キーワード:** センタレスプローブ, リンク旅行時間, 重複送信抑制, まとめ送り, シミュレーション

## Inter-vehicle Traffic Information Sharing over 700 MHz Band ITS Communication

RYOKICHI ONISHI<sup>1,a)</sup> AKIRA YOSHIOKA<sup>1</sup>

Received: April 9, 2014, Accepted: October 8, 2014

**Abstract:** We propose method for inter-vehicle traffic information sharing and two enhancement options. The system assumes the use of 700 MHz band ITS communication module. One option is to exclude information transmitted or received from transmitting queue for a while. We expect the system may suppress redundant transmissions and enhance information diversity as well as its freshness. The other one is to use relative value for geo-location of information. The system may transmit multiple entries of this compact information together into a packet and deliver more information. We build a simulator in order to determine performance as well as limitation of the proposed system. The scope of the simulation scenario is at the introductory phase of the system penetration in a dense urban area. We conclude the proposed system can encourage fast information dissemination, hence fresh information gets enriched and wide-spread. Then we evaluate system scalability on increased penetration scenario. It turns out that our proposed system requires the computational time as low as one of the naïve method, while it maintains the same benefit on information volume at any penetration rate.

**Keywords:** floating car data, link travel time, transmission suppression, data aggregation, simulation

### 1. はじめに

#### 1.1 背景

交通情報, とりわけ渋滞に関する情報は, 車両を運行す

るドライバーにとって有用である. 渋滞情報は, 道路側に設置されたセンサで測定された車両の交通量や, 車両に搭載されたセンサで測定された位置や速度などのプローブ情報を集めて分析することで生成される. これらの情報は, たとえば路側センサであれば有線網, 車載センサであればセルラ網を介して情報センタに集められ, 渋滞情報を形成し, 道路情報掲示板やカーナビゲーションシステム, あるいは

<sup>1</sup> 株式会社トヨタ IT 開発センター  
Toyota InfoTechnology Center, Co., Ltd., Minato, Tokyo  
107-0052, Japan

<sup>a)</sup> onishi@jp.toyota-itc.com

ウェブサイトを通じてドライバへ提供される。ドライバは混雑状況を把握することで、渋滞を回避した快適な運転が可能となる。より多くのドライバが回避行動を行うことで交通流の負荷分散が促進され、旅行時間短縮、排ガス低減、エネルギー効率改善などの効果が期待される。

## 1.2 想定する将来の姿

このようなドライバへの交通情報提供の将来像として、700 MHz 帯高度道路交通システムの車載無線機を活用した車車間交通情報共有のコラボレーション技術に着目する。700 MHz 帯高度道路交通システムの車載無線機は、2012 年 2 月に ARIB-STDT109 [1] として電波産業会において標準規格化されており、安全運転支援に向けた情報提供の目的で使用される。

車車間通信の利用により、セルラ網を利用できない状況においても、車両は近隣の車両とすれ違いのタイミングで交通情報を交換し、周辺の状態を把握することが期待できる。セルラ網を利用できない原因には、車両が通信装置を持たない場合、通信圏外を走行している場合、あるいは大災害の発生により通信網が損壊した場合などが考えられる。特に大災害の発生後、2011 年 3 月 11 日の東日本大震災のように道路インフラも甚大な被害にあうことが考えられ、そのような状況で通行実績のある道路情報を、インフラに頼らない車車間の絆、グループウェアによって共有することは、セルラ網が復旧するまでの初動の避難行動や救助活動に有効であることが期待できる。

## 1.3 実現に向けた課題

そのような将来像を実現するための第 1 の課題は、ドライバに提示すべき情報の要件定義、第 2 の課題はその要件を満足する情報伝達方式の提案である。本論文では、第 1 の課題に対しては単純に、車両の保有する情報が新鮮かつ多様で、豊富であるほど良いものと仮定し、第 2 の課題、そのようなベストエフォートの要件を満足する車車間の情報伝達方式を研究対象とする。車車間の交通情報共有の効果は旅行時間短縮以外にも、混雑緩和や排ガス低減、通行実績把握など様々なものが考えられるが、本論文では個別のアプリケーションは追求せず、前述の要件（新鮮さ、多様さ、豊富さ）において良好となるような交通情報の共有手法を検討する。

本論文で扱う車車間通信の基本設計は、通信利用型実用化システム基本設計書 [2] で確認することができる。車両は 100 ミリ秒周期で無線のプロードキャスト、つまり送信先を指定せず、無線の到達範囲内の不特定多数の車両に宛てたシングルホップの通信を行う。プロードキャストされるメッセージには、車両の ID や運行情報（位置・速度・方向・車線）などの基本データセットのほかに、アプリケーションが任意に利用できる 160 ビットのデータ領域が用意

されている。本論文では通信機に手を加えずそのまま利用するものとし、任意に利用可能なデータ領域の活用を考える。通信システムの普及初期はすれ違い通信の機会が稀であり、また 1 回の通信で伝達できる情報量も有限であるため、通信のチャンスを効率的に利用する情報伝達の仕組みについて検討する。

## 1.4 課題解決の方策と検証方法

前述の課題に対して、2 つの効率化方式を組み合わせた解決を考える。1 つは送信または受信した情報の伝達を一定時間控える方式であり、「重複送信抑制」と呼ぶ。同じ情報の繰返し伝達を避けることで、新鮮で多様な情報を展開する効果を期待する。もう 1 つは、同じ交差点を端とする複数のリンク情報をまとめ送りする方式であり、「まとめ送り」と呼ぶ。豊富な情報を展開する効果を期待する。

この仮説の検証方法として、この 2 つの効率化方式が、工夫のない単純な方式 (naïve) と効率化限界方式 (ideal) との間で、新鮮さ、多様さ、豊富さにおいてどの程度の改善を示すのか計算機上のシミュレーションで調べる。車両は送信のタイミングにおいて、工夫のない方式ではランダムに情報を選択して送出するのに対して、効率化限界方式では伝送速度の制限がない理想状態を仮定してすべての保有データを送出する。ここで、効率化限界は重複送信抑制やまとめ送りの方式個別の限界ではなく、一般的な効率化方式の限界となる。さらにシミュレーション実行時間にも着目し、効率化に要する計算量の観点でも考察する。

## 1.5 本論文の構成

本論文では、700 MHz 帯高度道路交通システムの車載無線機の利用を前提とした車車間の情報伝達アルゴリズムの提案と、シミュレーションによる情報伝達特性の評価結果を紹介する。本論文の構成は次のとおりとなる。2 章では関連研究を紹介し、本論文の訴求点を明らかにする。3 章で車車間通信による情報共有方式と 2 つの効率化方式を提案し、4 章でシミュレーション評価方法と評価結果の考察を述べる。5 章でまとめと今後の課題を述べる。

## 2. 関連研究

車車間通信による交通情報共有に関する主要な先行研究として文献 [3], [4] に着目する。いずれも独自の工夫により情報を集約し、それぞれの想定需要に応えるように展開する情報伝達アルゴリズムを提案している。

文献 [3] では、道路地図を格子状のエリアに分割し、車両はエリアを通過後にエリア ID、入口リンク ID、出口リンク ID、エリアの旅行時間を含むエリア通過情報をプロードキャストする。この情報を受信した他の周辺車両は、走行中のエリアかその隣接エリアの情報の場合に限り保持する。これは全エリアの情報を保持するのが記憶容量の制約

上困難であることを理由とする。同一エリア，同一リンクに関する複数の情報は統計的に集約されて1つの情報（統計情報）とすることで冗長性を抑制する。それ以外にも車両は定期的にブロードキャストしており，ナビゲーションシステムの予定経路上のエリア情報（需要情報）や，そうした需要の多いエリアや混雑のひどいエリアの情報を優先して伝達する。

文献 [4] では，道路地図をセル（計測単位区間）に分割し，車両はセルを通過後にセルの旅行時間が所定の閾値よりも大きい値の場合に渋滞情報を生成する。さらに道路地図上に所定の円形エリアを設定し，生成された渋滞情報は車車間の中継（収束モード）によりエリアの中心方向へ伝達される。車両で，同一のセル・時間・方向の渋滞情報が複数得られた場合は，1つの渋滞情報に統合することで冗長性を抑制する。統合数（品質レベル）が一定数を越えた渋滞情報は，その数量を示すレベル情報を車車間の中継（拡散モード）により所定の需要エリアへ伝達される。さらに文献 [5] では前述の 700 MHz 帯無線機を活用して，収束モードの動作検証を行っている。交通情報の伝達は，本来の用途である安全支援用通信（非 IP）とは別の IP 通信を用意して行う。EDCA によるアクセス制御よりも，SNMP で通知する仕組みの方が，安全支援用通信への悪影響が少ない点を紹介している。

いずれの研究も，情報の統合や需要の考慮により情報伝達の効用を高める工夫を行っているが，ランダムに情報を選択して伝達する方式（工夫なし）やすべての情報を伝達する方式（効率化限界）と比較して，どれほどの効果を得られるのか，計算量を必要とするのかについては言及されていない。

続いて，提案する 2 つの効率化方式「重複送信抑制」「まとめ送り」に関する先行研究として，それぞれ文献 [6], [7] に着目する。

文献 [6] では送信する情報を選択するポリシーごとの性能について検討している。保有情報の受信時刻に着目したポリシーであり，ランダムな情報選択も含まれる。しかし，「重複送信抑制」のようにランダムに情報を選択した後，その情報の再送を一定時間抑制するオプション，つまり送信時刻に着目したポリシーは検討されていない。

文献 [7] では位置情報を共有する際に，速度情報からの予測値を利用することで通信を間引く，つまり通信頻度を減らすことを検討している。速度情報からの予測位置は，位置情報の相対値と考えることができるが，100 ミリ秒ごとに位置情報を伝送する車載無線機で重要なのは 1 回の通信でより多くの情報を送ることであり，「まとめ送り」とは目的が異なる。

本論文の提案方式は，700 MHz 帯無線機の安全支援用通信（非 IP）の任意データ領域の活用に主眼をあてている点で制約条件が異なり，これらの研究とは単純に比較できな

いが，2 つの効率化方式が，何の工夫もない方式（naïve）と効率化限界（ideal）との間で，新鮮さ，多様さ，豊富さにおいてどの程度の改善を示すのかを，計算量の目安も含めて，シミュレーションで調べる。効果は効率化限界に，計算量は工夫なしにそれぞれ近いほど良いものとする。

### 3. 車車間通信による交通情報共有方式

#### 3.1 情報共有方式

本論文で扱う交通情報は，交差点間の道路リンクの旅行に関する情報（リンク情報）とする。リンク情報のライフサイクルとして生成と破棄，そして共有について説明する。情報伝達システムの動作フローは図 1 に示すとおりとなる。

##### 3.1.1 リンク情報の生成

リンク情報は，対象となる道路リンクの始点・終点位置，区間平均速度，終点位置を通過した時刻で構成される。道路リンクは一般に交差点間の道路であり，ナビゲーションシステムで利用される地図データベースなどにおいて定義されるものとする。進行方向が異なる場合は区別され，位置や形態などの静的な情報も含まれる。地図データベースには独自に道路リンクとその ID を定義するものも存在するが，互換性の確保が困難であると考えて両端の位置座標で道路リンクを表現する方法を考えた。実際の利用では，リンク両端の位置から道路リンクを特定するためにはマップマッチングなどの補正処理が必要であると思われるが，本論文では情報共有の効率化を検討対象としており，位置精度に関する問題は扱わないものとする。GPS などの位置標定装置により道路リンクへの進入と退出を検知した際の時刻の差分により旅行時間を計測することができる。これと旅行距離から道路リンクの区間平均速度を求めることができ，リンク情報が生成される。新しくリンク情報を生成した場合は，生成フラグを ON にして車載記憶装置に記録する。リンク情報の生成時刻は，道路リンクの終点を通過した時刻とする。

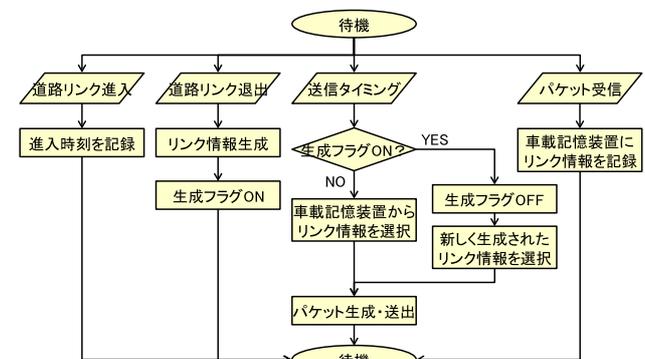


図 1 情報伝達システムの動作フロー  
Fig. 1 Communication system flow chart.

### 3.1.2 リンク情報の破棄

リンク情報は有効とする時間やエリア（自車両の走行位置からの距離）があらかじめ設定され、有効期間やエリアから外れた場合は破棄される。破棄は送信時に車載記憶装置から情報を選択する際に行うものでも、定期的な処理によるものでもよい。図1の動作フローでの記載は省略する。

### 3.1.3 リンク情報の共有

車両は100ミリ秒周期で無線ブロードキャストを行う。送信タイミングで、リンク情報の生成フラグがONの場合は、生成フラグをOFFに変えて、新しく生成されたリンク情報を優先的に送出する。それ以外の場合は、車載記憶装置に記録されている有効なリンク情報の中からランダムに1つを選択して送出する。一方、他の車両からのブロードキャストを受信した場合、車載記憶装置に同一の情報があれば記録する。

## 3.2 効率化方式

車車間通信によるリンク情報共有について、2つの効率化方式を考案した。1つは「重複送信抑制」と呼び、送信または受信した情報を一定時間送信の対象外とする方式である。もう1つは「まとめ送り」と呼び、同じ交差点を端とする複数のリンク情報をまとめ送りする方式である。

### 3.2.1 重複送信抑制

自車両が送信した情報はもとより、他車両から受信した情報も一定時間送信の対象外とする。この工夫により、同一情報の冗長な伝達が抑制され、様々な情報に送信機会が与えられる効果が期待される。なお、保有するすべての情報が抑制されている場合は、通常どおりランダムに選択して送出する。図1の動作フローでは、送信タイミングの割込み後、生成フラグONではない場合に車載記憶装置から有効リンク情報を選択する際に、送信抑制が機能する。

### 3.2.2 まとめ送り

文献[2]の車車間通信用メッセージセットによれば、送信元の位置（要素No.8~13, 15）は70ビットで表現される。この位置情報のデータ量をそのままリンク情報にも適用すると、リンクの始点と終点の位置だけで140ビットも使用することになり、任意に利用可能な領域（要素No.45）の160ビットではたかだか1つのリンク情報しか送信できない。そこで相対表現による節約した表現方法により、多くのリンク情報を送る方法について検討した。

前述のとおり送信元の位置は伝達されるため、リンク情報の終点位置は送信元の位置の相対値、リンク情報の始点位置はリンクの終点位置の相対値で表現することでデータ量を削減できる。リンク情報の有効エリアを生成場所から周辺12km四方とし、一般的な車線幅が7mであることから進行方向のレーン分解能を意識して3m精度を設定する場合、南北方向13ビット、東西方向13ビットの計26ビットの相対値でリンクの終点位置を表現できる。リンクの始

フィールド	bit	最小構成 61ビット
終点位置【送信元の位置±12km四方@3m精度】	26	リンク1
伝達リンク数【4リンク分】	2	
始点位置1【終点位置±3km四方@3m精度】	22	
経過時間1【15分間,15秒精度】	6	
平均速度1【0-64+km/h@2km/h精度】	5	リンク2
始点位置2【終点位置±3km四方@3m精度】	22	
経過時間2【15分間@15秒精度】	6	リンク3
平均速度2【0-64+km/h@2km/h精度】	5	
始点位置3【終点位置±3km四方@3m精度】	22	リンク4
経過時間3【15分間@15秒精度】	6	
平均速度3【0-64+km/h@2km/h精度】	5	
始点位置4【終点位置±3km四方@3m精度】	22	
経過時間4【15分間@15秒精度】	6	
平均速度4【0-64+km/h@2km/h精度】	5	

図2 まとめ送りのデータ構造

Fig. 2 Data structure.

点位置はリンク終点位置の周辺3km四方エリアで設定する場合、南北方向11ビット、東西方向11ビットの計22ビットの相対値でリンクの始点位置を表現できる。

リンク情報の有効時間を生成時刻から15分とし15秒精度で6ビット、道路リンクの区間平均速度を0~64km/h超過の範囲とし2km/h精度で5ビット、さらに伝達するリンク情報数を2ビットで示した場合、1つのリンク情報は61ビットとなる。さらに道路リンクの終点位置を共有した場合、図2に示すように4つのリンク情報を160ビットで送れることが分かる。送信するリンク情報の選択は、まず1つのリンク情報を選択し、そのリンク情報の終点位置を共有する別のリンクに関するリンク情報があれば、設定上限数までランダムに選択する。図1の動作フローでは、送信タイミングの割込み後、生成フラグON/OFFに限らずリンク情報を選択した際に、さらに終点位置を共有する他のリンク情報を追加選択する形で機能する。ここで終点の代わりに始点位置を共有してもよい。

## 4. シミュレーション評価

### 4.1 シミュレータの構築

筆者らは、提案方式を実装した交通情報共有のアプリケーションシミュレータを新たに開発し、先に開発した統合シミュレーションプラットフォーム[8]上で評価を行った。統合シミュレーションプラットフォームは接続インタフェースを定義するだけで多様なシミュレータを連携させることができ、フィールド実験では困難な大規模システムの評価を可能とする。交通シミュレータにはMATES[9]を利用する。MATESは車両のモビリティ情報を生成するために用いられ、通信結果を車両のモビリティにフィードバックすることは行わない。通信シミュレータは通信距離300mまでをパケット到達率100%とし、それ以降を到達不能とする簡易的なものを新たに作成して利用する。シミュレーションを高速化するためであり、電波干渉や回折・遮

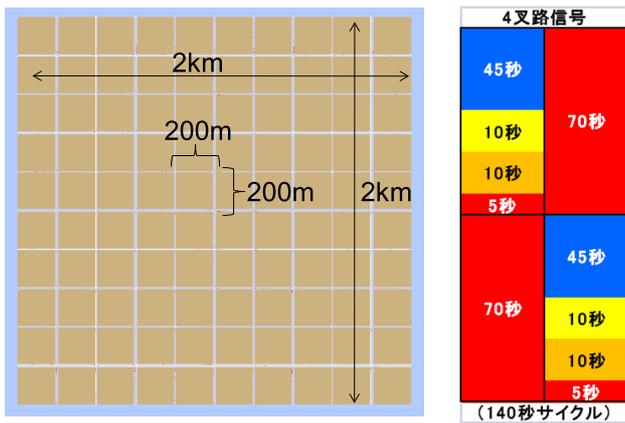


図 3 シミュレーションエリアの道路構造と信号サイクル

Fig. 3 Simulation map and traffic signal pattern.

蔽の影響も扱わない。車車間通信の見通し内における通信距離の要件として、ITS 無線システムの高度化に関する研究会 [10] では緊急車両の警告灯目視要件 300 m という法令上の取り決めを参照しており、本論文でもその値を参考にして通信距離を設定する。

#### 4.2 評価シナリオの設定

銀座などの密集した都市部を想定し、その道路構造と信号サイクルは ITS 通信シミュレーションの標準的な評価シナリオを策定する文献 [11] のグリッド状道路モデル (マンハッタンモデル) を参考にして設定する。2km 四方のエリアに道路中心線間隔で 200 m ごとに、東西方向に 9 本、南北方向に 9 本の道路が並行に配置する。東から西へ、北から南へ、奇数番目の道路が片側 2 車線、それ以外は片側 1 車線である。エリアの辺縁には道路は存在しない。すべての交差点に信号を設置し、140 秒の信号サイクルとする。その内訳は、青 45 秒、黄 10 秒、右折専用 10 秒、全方向赤 5 秒、赤 70 秒であるが、右折レーンは存在しないため、右折専用は赤信号と同じである。各交差点の信号には最大で 140 秒のランダムな開始時間遅れを与える。道路構造と信号サイクルは図 3 のとおりとなる。

交通流入量は渋滞が発生しない程度に負荷の高い状況を想定し、毎時 200 台/レーンと設定する。また車両の移動は直進のみとする。シミュレーションエリア内に存在する車両数の時間推移は図 4 のグラフのとおりとなる。経過時間 15 分 (900 秒) で車両は 1400 台程度で安定し、またシステム搭載車両数も搭載率 (1%, 10%) に応じた台数で推移する。車両速度の上限は毎時 60 km に設定されており、平均は毎時 31.6 km であった。

シミュレーションでは、1) ランダムに 1 つの情報を選んで送信する方式 (工夫なし)、2) 重複送信抑制、3) まとめ送り、4) 重複送信抑制とまとめ送りを組み合わせた方式、5) 理想的に、送信タイミングに保有するすべての情報を送出する方式 (効率化限界) の 5 つの方式を比較する。ま

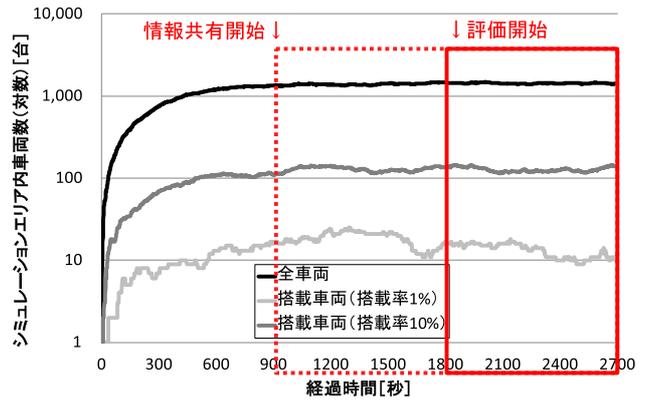


図 4 シミュレーションエリア内の車両数の時間推移

Fig. 4 Simulation time vs. #vehicles.

表 1 シミュレーションの主な設定値

Table 1 Simulation setup.

設定項目	設定値
システム搭載率	1%, 10%
送信周期	100 ミリ秒
情報の有効期限	最新 15 分間 (900 秒)
情報の有効エリア	周辺 12km 四方
シミュレーション時間	45 分間
情報共有時間	15-45 分目
評価時間	30-45 分目
通信特性 (通信距離対パケット到達率)	[0m,300m]で 100% (300m,∞)で 0%
送信抑制時間 (重複送信抑制の場合に適用)	10 秒

め送りでは、終点位置を共有したリンク情報を最大 4 つまで送信できるが、将来アプリケーションを識別するためのフラグなどが入る可能性も考えられるため、本評価では余裕を持って 3 つまで送信できるものとする。システムの普及初期を想定して 1% と 10% のシステム搭載率について、車両が保有するリンク情報の豊富さ、多様さ、新鮮さに関する評価を行い、情報共有の効率化とその限界について調べる。車両台数が安定的に推移する 15 分後に情報共有を開始、最初のリンク情報の有効期限を迎える 30 分後に評価を開始して、45 分後にシミュレーションを終える。シミュレーションの主な設定値を表 1 にまとめる。

重複送信抑制の場合に適用される送信抑制時間を 10 秒に設定している。平均速度が毎時 30 km 程度であることから、およそ 80 m の区間は再送が抑制されることになる。通信距離は 300 m であることから、対向ですれ違う場合でも、どの情報も少なくとも 1 回は抑制が解除されて送信の候補となりうる設定であり、過度な抑制を防止する。

#### 4.3 提案方式の情報共有の効率化に関する評価

##### 4.3.1 豊富さの評価

リンク情報が豊富であることを、車両が保有するリンク情報の量が多いことと定義する。その指標として各車両が

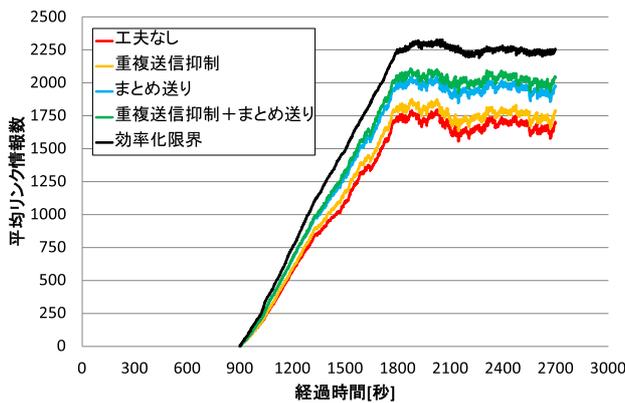


図 5 平均情報数の時間推移 (搭載率 10%)

Fig. 5 Sim. time vs. mean #data (10% penetration).

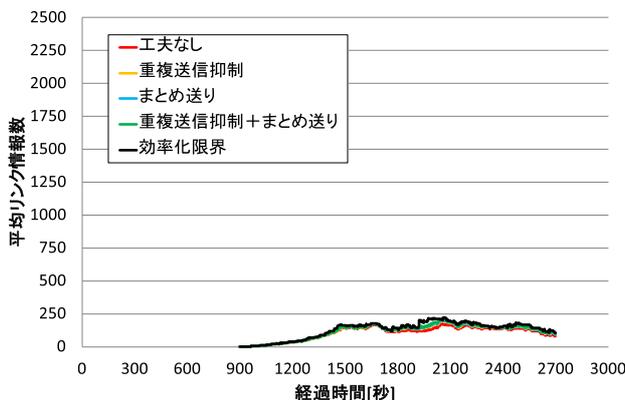


図 6 平均情報数の時間推移 (搭載率 1%)

Fig. 6 Sim. time vs. mean #data (1% penetration).

保有する情報数の平均値 (平均情報数) を用いて, 時間推移を調べた結果は図 5, 図 6 のとおりであった.

時刻 (経過時間)  $t$  において, 車両  $ID = v$  の車両が保有する情報の数を求める関数を  $\text{count}(t, v)$  とする. ある時刻  $t$  に存在した搭載車両数を  $V(t)$  とすると, 時刻  $t$  における平均情報数  $C(t)$  は式 (1) により求められる.

$$C(t) = \frac{\sum_v \text{count}(t, v)}{V(t)} \quad (1)$$

搭載率 10% の場合, 評価時間 (1,800–2,700 秒) の区間平均値は, 効率化限界方式を 1 とした比で (効率化限界, 重複送信抑制 + まとめ送り, まとめ送り, 重複送信抑制, 工夫なし) = (1, 0.90, 0.87, 0.78, 0.75) であった. 重複送信抑制とまとめ送りはそれぞれ補完的に効率化が可能であり, 2 つの方式を合わせることで情報数は効率化限界比で 15% 増加し, 効率化限界の 90% まで迫ることが分かった. 情報量を豊富にする効果は確認できたが, 搭載率 1% と 10% の効率化限界を比較すれば, やはり普及初期は搭載率による影響が支配的であることも確認できた.

#### 4.3.2 多様さの評価

リンク情報が多様であることを, 車両の保有するリンク情報の発生地点が多岐にわたることと定義する. その指標として, 平均情報数の効率化限界方式を 1 とした比を用い

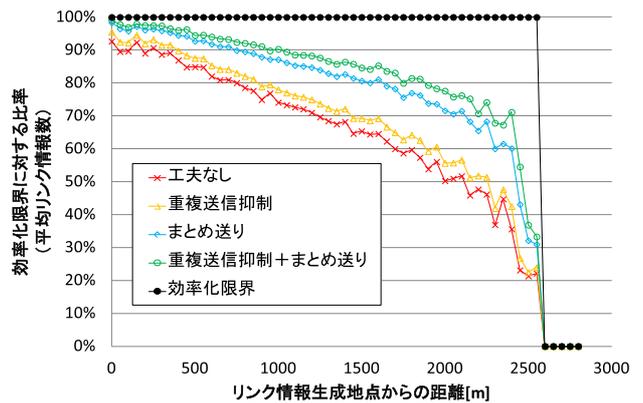


図 7 拡散範囲に対する平均情報数の効率化限界比分布 (搭載率 10%)

Fig. 7 Ratio of mean #data to ideal per travel distance (10% penetration).

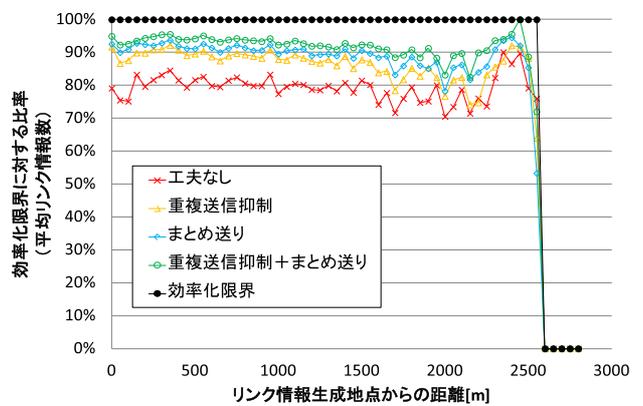


図 8 拡散範囲に対する平均情報数の効率化限界比分布 (搭載率 1%)

Fig. 8 Ratio of mean #data to ideal per travel distance (1% penetration).

て, 情報の拡散範囲ごとに調べた結果は図 7, 図 8 のとおりであった.

リンク情報の拡散範囲は, 情報の生成地点から車両の走行位置までの距離とし, 50m ごとに集計する. 時刻  $t$  において, 車両  $ID = v$  の車両が保有する情報のうち, 生成地点までの距離が  $[Di, D(i+1))$  の範囲に存在する情報の数を求める関数を  $\text{count}(t, v, i, D)$  とする. ここで  $D$  は距離区間定数であり, 集計単位の 50m となる. ある時刻  $t$  に存在した搭載車両数を  $V(t)$ , 評価時間を  $T$  とすると, 距離区間  $[Di, D(i+1))$  における平均情報数  $C(i, D)$  は式 (2) により求められる.

$$C(i, D) = \frac{\sum_t \frac{\sum_v \text{count}(t, v, i, D)}{V(t)}}{T} \quad (2)$$

効率化限界との比較を容易にするために, 各方式の平均情報数を効率化限界の平均情報数との比で表現する.

搭載率 10% の場合, 情報生成地点までの距離の増加につれて, 効率化限界に対する工夫なしの平均情報数の比がほぼ線形に減少している. 500m 離れたところで生成された情報は (効率化限界, 重複送信抑制 + まとめ送り, まとめ

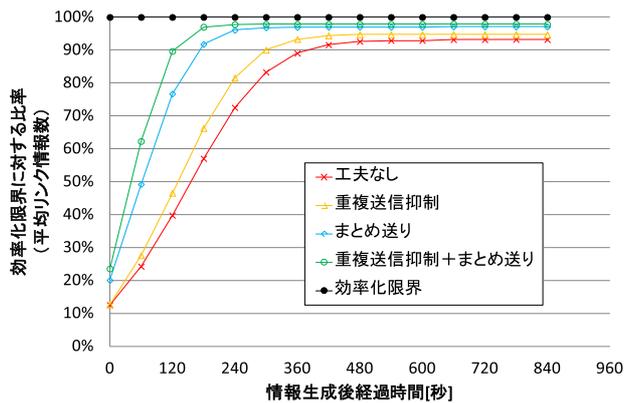


図 9 経過時間に対する平均情報数の効率化限界比分布 (搭載率 10%)  
 Fig. 9 Ratio of mean #data to ideal per travel time (10% penetration).

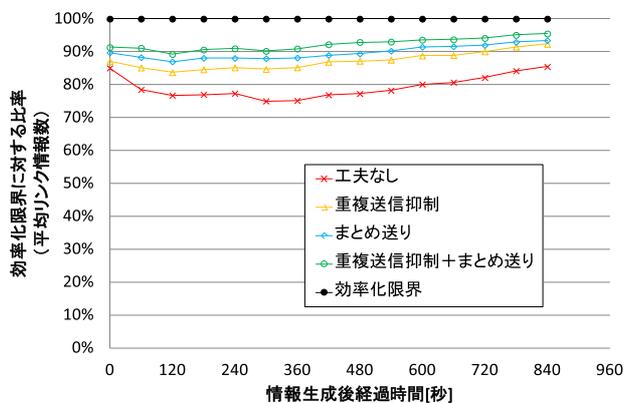


図 10 経過時間に対する平均情報数の効率化限界比分布 (搭載率 1%)  
 Fig. 10 Ratio of mean #data to ideal per travel time (1% penetration).

送り, 重複送信抑制, 工夫なし) = (1, 0.94, 0.92, 0.87, 0.84) であるのに対し, 2,000 m 離れたところで生成された情報は, (1, 0.77, 0.71, 0.55, 0.50) であることが確認できる. 重複送信抑制とまとめ送りはそれぞれ補完的に効率化が可能であり, 2つの方式を合わせることで情報数は効率化限界比で 500 m 離れた情報に対して 10% 増加, 2,000 m 離れた情報に対して 27% 増加を見込めることが分かった. このことから, 重複送信抑制とまとめ送りはそれぞれ遠方のリンク情報ほど効果が高く, リンクの多様性を増加させる効果があることが確認できた.

搭載率 1% の場合にはそのような特性が見られなかったが, 受信機会がきわめて少なく全保有情報を送信する効率化限界の場合もランダムに 1 つ送信する工夫なしの場合も差が出なかったためと思われる.

#### 4.3.3 新鮮さの評価

リンク情報が新鮮であることを, 車両の保有するリンク情報の発生時刻が新しいことと定義する. その指標として, 平均情報数の効率化限界方式を 1 とした比を用いて, 情報生成後の経過時間ごとに調べた結果は, 図 9, 図 10

のとおりであった.

グラフは情報生成後の経過時間を 60 秒ごとに集計している. 式 (2) の  $D$  を経過時間の区間定数として, 集計単位の 60 秒とすれば, 経過時間区間  $[Di, D(i+1))$  における平均情報数  $C(i, D)$  を同様に求めることができる. 効率化限界との比較を容易にするために, 各方式の平均情報数を効率化限界の平均情報数との比で表現する.

搭載率 10% の場合, 情報生成後の経過時間の初期の増加につれて, 効率化限界に対する工夫なしの平均情報数の比がほぼ線形に増加している. 生成後経過時間 60~120 秒の区間の情報は (効率化限界, 重複送信抑制 + まとめ送り, まとめ送り, 重複送信抑制, 工夫なし) = (1, 0.62, 0.49, 0.27, 0.24) であるのに対し, 600~660 秒区間の情報は, (1, 0.97, 0.96, 0.94, 0.92) であることが確認できる. 重複送信抑制とまとめ送りはそれぞれ補完的に効率化が可能であり, 2つの方式を合わせることで情報数は効率化限界比で生成後 60~120 秒の区間で経過した情報について 38% 増加, 600~660 秒の区間で経過した情報について 5% 増加を見込めることが分かった. このことから, 重複送信抑制とまとめ送りはそれぞれ生成初期のリンク情報に対する効果が高く, 新鮮なリンク情報を増加させる効果があることが確認できた.

搭載率 1% の場合にはその差が見られなかったが, これも同様に受信機会がきわめて少ないためと思われる.

#### 4.3.4 評価結果の考察

豊富さ, 多様さ, 新鮮さの指標において, 重複送信抑制, およびまとめ送りはいずれも改善を示し, かつそれらを組み合わせる場合も効果が減じることなく加算される様子が確認できた. ただし 1.4 節で想定した効果, つまり重複送信抑制が新鮮で多様な情報を展開する特性, およびまとめ送りが豊富な情報を展開する特性は顕著には確認できず, どちらも効率化限界と工夫なしの差が大きい遠方の情報, 新鮮な情報を増加する効果を確認した. また重複送信抑制よりもまとめ送りの方が, 改善度が大きい結果となった. これは重複送信抑制が情報量を増加させない質的な改善であるのに対して, まとめ送りは情報量を増加させる量的な改善であり, シミュレーションが模擬する現実の利用環境においては, 質的改善よりも量的改善の方が効果的であることを示す.

重複送信抑制 + まとめ送りの提案方式は, 効率化限界につねに及ばない結果となっている. これは効率化限界方式が伝送速度の制限がない理想状態を仮定して保有情報をすべて送信するのに対して, 重複送信抑制 + まとめ送りの方式は伝送速度の制限上, 保有情報から一部を選択して送信するためと考えられる. したがって, この結果は条件にかかわらずつねに再現されると考えられる.

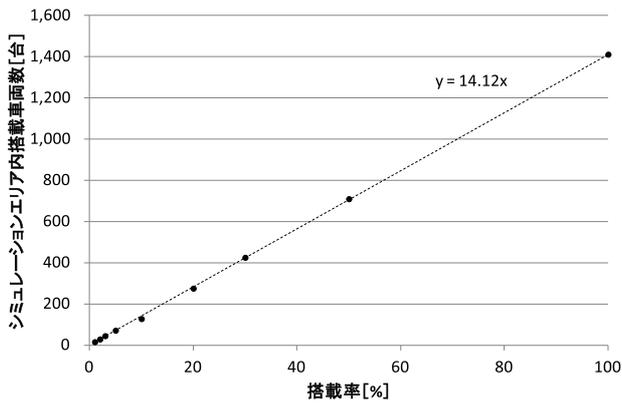


図 11 搭載率に対する搭載車両数の推移  
Fig. 11 Penetration rate vs. #vehicles.

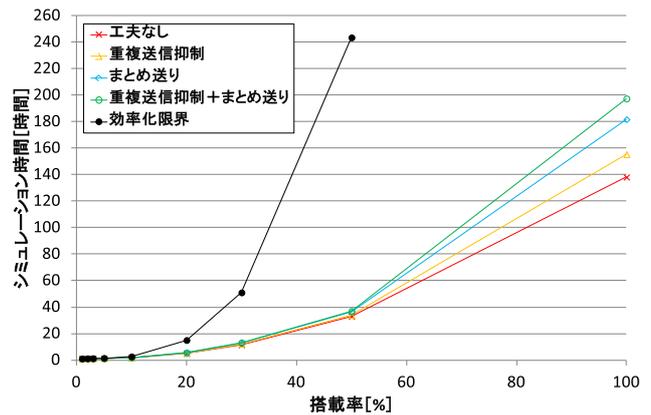


図 13 搭載率に対するシミュレーション実行時間  
Fig. 13 Penetration rate vs. total simulation time.

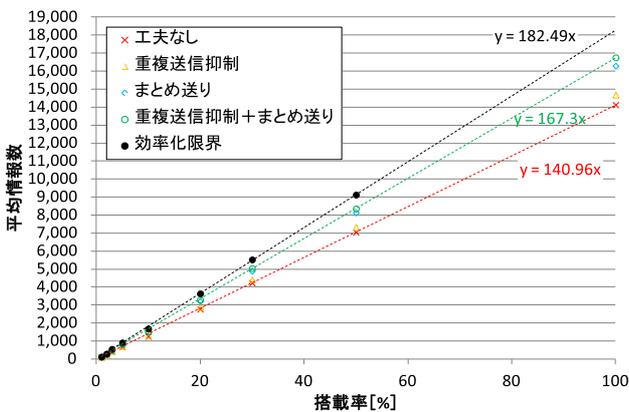


図 12 搭載率に対する平均情報数の推移  
Fig. 12 Penetration rate vs. mean #data.

#### 4.4 提案方式のスケラビリティに関する評価

さらに、システム普及後の提案方式の規模拡張性に関する評価を行う。表 1 の条件のうちシステム搭載率を (1, 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50, 100%) と変化させて、提案方式の規模拡張性に関する評価を、4.3.1 項の情報の豊富さの指標である平均情報数と、新たに各方式の計算量を示す指標としてシミュレーション実行時間に着目して行った。サーバの仕様は次のとおりとなる。CPU: Intel Xeon X5675 (3.07 GHz), メモリサイズ: 24 GB, ディスクサイズ: 1 TB, OS: Cent OS 6.3 (Final), データベース: PostgreSQL 8.4.4。なお、本シミュレータはマルチスレッドには対応していない。

図 11 は搭載率とシミュレーションエリア内搭載車両数の関係であり、図 4 と同様の比例増加を示す。図 12 は搭載率と車両が保有する平均情報数の関係、図 13 は搭載率と 45 分間相当のシミュレーションの実行に要した現実の時間 (シミュレーション実行時間) の関係を示す。搭載率 100% の効率化限界のシナリオは図 13 の傾向から 20 日程度の実行で終わる見込みがないため評価を行わなかった。

図 12 の結果から、どの方式も搭載率に対して情報量は線形の増加傾向を示すことが分かる。工夫なしは効率化限

界の 77% 程度であり、重複送信抑制とまとめ送りを合わせた方式は効率化限界の 91% 程度まで改善できることが分かる。実用的な観点での考察を試みると、工夫なしの方式が普及率 30% で達成する情報量は、重複送信抑制とまとめ送りを合わせた方式では普及率 25% で達成できることが分かる。文献 [10] の普及予測 (中位推計) で考えると、10 年目で得られる情報量が、提案方式により 9 年目で得られることとなる。

図 13 の結果は各方式のシミュレーション全体の計算量を示す。統合シミュレーションにおいて、交通シミュレータは通信シミュレータに対してモビリティ情報を一方的に提供し、その影響を受けない。そのため搭載率の増加に対して計算量の増加が見込まれるのは、通信シミュレーションの部分となる。搭載率の増加にとともに、通信シミュレーションにおける送信量は増加し、各車両での受信量も増加することが考えられる。そしてその情報処理に必要な計算量の増加が見込まれる。通信シミュレーションは送受信時の情報処理を行うが、実機の通信とは異なり無線伝送部分の処理を含まない。そのため、シミュレーション実行時間を搭載車両数、または搭載率で割った値が、各端末の通信時の情報処理負荷の傾向について目安を与えるものとして取り扱う。

工夫なしの結果をベースラインとして、提案手法 (重複送信抑制, まとめ送り) と比較すると、提案手法はいずれも送信時に特別な処理が発生するため、その分だけ工夫なしよりも大きい値をとることが考えられる。実際に図 13 の結果からは、搭載率 100% の場合で重複送信抑制 + まとめ送りを合わせた方式は、工夫なしの方式に対して 1.4 倍程度計算量が増加している。一方、効率化限界方式では伝送速度の制限がないため、搭載車両はすべての情報を送信し、かつ通信範囲に存在する他の搭載車両からのすべての情報を受信する。そのため、図 13 のように伝送速度の制限のある手法 (工夫なし, 提案方式) よりもはるかに多くの計算時間を要する。重複送信抑制とまとめ送りを合わせ

た方式は、工夫なしの方式よりも計算量が増加しているが、効率化限界の計算量と比べれば、同じ傾向のものであるといえる。

以上のことから、重複送信抑制とまとめ送りを合わせた提案方式は、普及率の増加に対しても工夫なしの方式と同じ傾向の計算量の要求にとどまり、高普及期においても低普及期と同等の情報量の改善を見込めることが確認できた。

## 5. まとめと今後の課題

車車間通信による交通情報共有の効率化を本論文の課題として設定し、700 MHz 帯高度道路交通システムの車載無線機を活用した情報共有方式、および2つの効率化方式を考案した。交通情報は交差点間のリンク情報とし、対象となる道路リンクの始点・終点位置、区間平均速度、終点位置を通過した時刻（生成時刻）で構成される。効率化方式の1つは、送信、または受信した情報を一定時間送信の対象外とすることで、様々な情報を選択する方式（重複送信抑制）である。もう1つは情報の相対値表現によりデータサイズを削減することで情報の高密度化を行い、同一終点の複数のリンク情報をまとめて送信する方式（まとめ送り）である。

都市の密集エリアを模擬したシミュレーション環境を構築し、システム普及当初における提案方式の情報共有性能と効率化の限界について評価した。情報の豊富さについて、各車両が保有するリンク情報数の平均値（平均情報数）の時間推移を調べた。情報の多様さは情報の生成地点までの距離について、情報の新鮮さは情報の生成後経過時間について、それぞれ平均情報数の分布を調べた。システム搭載率1%と10%について調べ、2つの効率化方式はいずれの指標においても改善余地、つまり工夫なしの方式と効率化限界のギャップに応じた改善を示し、かつ互いに補完可能であることが分かった。情報の豊富さについては搭載率の影響が支配的であり、搭載率1%では通信機会がきわめて少なく、搭載率10%に比べて効果は限定的であった。搭載率10%の結果から、重複送信抑制とまとめ送りの効率化によって情報の伝搬速度は向上し、より新鮮な情報を、豊富に広範囲に供給できることを確認した。また、重複送信抑制とまとめ送りを合わせた提案方式は、普及率の増加に対しても工夫なしの方式と同じ傾向の計算量の要求にとどまり、低普及期と同等の情報量の改善を高普及期においても見込めることも確認した。

今後の課題として、プロトコルの実機上での計算量オーバーヘッドの評価があげられる。本論文では検証作業に必要なコストを抑えるために、まずは目安を知ることが目的としてシミュレーションに要した実時間から簡便に推測する方法をとっている。しかし、実際はソフト・ハードの実装や通信環境の影響が考えられ、実機開発に向けては丁寧な検証が必要になると考えられる。

またシミュレーションにおいても、今回検討の対象外とした要素（電波伝搬、位置精度）の取扱い、より現実的な評価シナリオ（普及率、交通流など）の設定、そして詳細な設計値（送信周期や重複送信抑制の抑制時間など）の評価が考えられる。特に、各方式において重複して受信する度合い、重複送信抑制とまとめ送りのそれぞれの方式の効率化の限界、重複送信抑制がまとめ送りよりも効率となる条件などを調べることにより、さらに提案手法の理解が進むものと思われる。今回は通信システムの普及初期を想定し、貴重なすれ違い通信機会の効率的利用を検討したが、今後普及が進んで混雑した状況を検討する際には、電波干渉の影響の評価が追加が必要であり、ns-3などの一般的な通信シミュレータの利用が考えられる。

新鮮で多様で豊富になった情報に基づき、ドライバにどのような情報を提示して、どのような目標を達成すべきなのか。本研究の情報共有ネットワークサービスのうえで、旅行時間の短縮を含む社会システムの様々な問題の解決に向けた、高次のコラボレーション技術の研究が期待される。

## 参考文献

- [1] 700 MHz 帯高度道路交通システム標準規格 ARIB-STD-T109 1.1 版, 電波産業会 (2012), 入手先 ([http://www.arib.or.jp/english/html/overview/doc/1-STD-T109\\_v1.1.pdf](http://www.arib.or.jp/english/html/overview/doc/1-STD-T109_v1.1.pdf)).
- [2] 先進安全自動車 (ASV) 推進計画報告書—第4期 ASV 計画における活動成果について, 先進安全自動車推進検討会, pp.89–180, 国土交通省 (2011), 入手先 ([http://www.mlit.go.jp/jidosha/anzen/01asv/resource/data/asv4pamphlet\\_seika.pdf](http://www.mlit.go.jp/jidosha/anzen/01asv/resource/data/asv4pamphlet_seika.pdf)).
- [3] 寺内隆志, 柴田直樹, 安本慶一, 東野輝夫, 伊藤 実: 渋滞緩和を目的とした車車間通信による混雑状況の伝播方式, 信学技報, ITS 105(260), pp.37–42 (2005).
- [4] 佐藤雅明, 石田剛朗, 堀口良太, 清水克正, 春田 仁, 和田光示, 植原啓介, 村井 純: 実車両を用いたセンタレスプローブ情報システムによる道路交通情報生成アルゴリズムの提案と評価, 情報処理学会論文誌, Vol.49, No.1, pp.189–198 (2008).
- [5] 伊藤 寛: 700 MHz 帯近距離移動体通信を使ったセンタレスプローブの開発と成果周知活動, 自動車研究, Vol.33, No.10, pp.55–58, 日本自動車研究所 (2011).
- [6] Saito, M., Tsukamoto, J., Umedu, T. and Higashino, T.: Design and Evaluation of Inter-Vehicle Dissemination Protocol for Propagation of Preceding Traffic Information, *IEEE Trans. Intelligent Transportation Systems*, Vol.8, No.3, pp.379–390, IEEE (2007).
- [7] 後藤由人, 長谷川孝明: 車々間通信における位置情報の符号化について, 信学技報, ITS, Vol.100, No.75, pp.31–36 (2000).
- [8] 吉岡 顕, 小佐井潤, 本多輝彦: ITS 通信アプリケーション評価用統合シミュレータの開発, 情報処理学会シンポジウム論文集, Vol.2007, No.1, pp.1762–1766 (2007).
- [9] 吉村 忍, 西川紘史, 守安 智: 知的マルチエージェント交通流シミュレータ MATES の開発, シミュレーション, Vol.23, No.4, pp.228–237, 日本シミュレーション学会 (2004).
- [10] ITS 無線システムの高度化に関する研究会報告書, 総務省 (2009), 入手先 ([http://www.soumu.go.jp/menu\\_news/s-news/14422.html](http://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/14422.html)).

- [11] ITS 通信シミュレーション評価シナリオ (Ver1.2), ITS シミュレータ利用促進検討委員会, pp.88-89, 日本自動車研究所 (2013), 入手先 ([http://www.jari.or.jp/Portals/0/resource/pdf/H23\\_simyu/%EF%BC%88Ver1.2%EF%BC%8920131010.pdf](http://www.jari.or.jp/Portals/0/resource/pdf/H23_simyu/%EF%BC%88Ver1.2%EF%BC%8920131010.pdf)).



大西 亮吉 (正会員)

1999年東京大学工学部電子情報工学科卒業。2001年同大学大学院電子情報工学修士課程修了。2001年(株)トヨタIT開発センターより現職。自動車向け無線ネットワーク, およびシミュレーションによる評価手法の研究

に従事。



吉岡 顕 (正会員)

1991年東京大学大学院工学研究科原子力工学専攻博士課程修了。1992年東京大学大型計算機センター助手, 1997年同教育用計算機センター助教授, 2001年(株)トヨタIT開発センターより現職。自動車向け無線ネット

ワーク, およびシミュレーションによる評価手法の研究に従事。