

## 車車間通信サービスにおける CSMA/CA 通信品質の解析

今井 悟史<sup>†1</sup> 宇式 一雅<sup>†1</sup> 藤野 信次<sup>†1</sup>  
町田 守<sup>†2</sup> 森谷 正義<sup>†2</sup> 蔡 晟 尉<sup>†3</sup>  
間瀬 公太<sup>†3</sup> 丹羽 栄 二<sup>†3</sup>

近年、安全運転を支援する車車間通信サービスが注目されている。車車間通信の代表的な通信方式として CSMA/CA があるが、事故を回避する運転支援サービスの実現に向け、車車間通信の品質特性を明確化することは急務である。CSMA/CA の品質を解析する数理モデルは古くから存在するが、理想的な環境を前提としており、実際の車車間通信の振舞いとは合致しない。そこで本稿では、従来のモデルを実際の車車間通信に適用する場合の課題と対策について述べ、特定の車両間の通信品質を評価可能な数理モデルを提案する。さらに、特定事故ケースを想定し、提案モデルを用いて運転支援を実現する車車間通信品質の評価を行う。

### Quality Analysis of CSMA/CA Communications in Inter-vehicle Communication Services

SATOSHI IMAI,<sup>†1</sup> KAZUMASA USHIKI,<sup>†1</sup>  
NOBUTSUGU FUJINO,<sup>†1</sup> MAMORU MACHIDA,<sup>†2</sup>  
MASAYOSHI MORIYA,<sup>†2</sup> SEI SAI,<sup>†3</sup> KOUTA MASE<sup>†3</sup>  
and EIJI NIWA<sup>†3</sup>

Recently, inter-vehicle communication services which support safe driving have been attracting significant attention. CSMA/CA is a representative communication method in inter-vehicle communications. It is necessary to clarify the quality characteristics of inter-vehicle communication in order to achieve driving support. Although there are conventional models for CSMA/CA which are derived using an ideal environment, they are not consistent with behavior in actual inter-vehicle communication. This paper proposes a mathematical model that can analyze communication quality between the specific vehicles by dealing with the discrepancies between conventional theory and practice. Fur-

thermore, we analyze communication performance between vehicles in specific accidents using the proposed model.

#### 1. はじめに

近年、P2P (Peer-to-Peer) 無線通信の応用として、ITS (Intelligent Transportation Systems) における車車間通信が注目されている。特に、車両間の無線通信による危険車両の警告、注意喚起などを実現することを目指した安全運転支援サービスへの応用に対する期待は高い。車車間通信サービスの代表的な通信プロトコルとして、ブロードキャスト型の CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance)<sup>†1</sup> がある。CSMA/CA を用いた車車間通信サービスにおいて、事故を回避する運転支援を実現するためには、数百 m に及ぶ通信可能領域 (サービスエリア) をカバーし、パケットの到達性を明確にする必要がある。一方で、このようなサービスエリアが実現された場合、同一の通信リソースを共有する車両や隠れ端末となる車両の台数も膨大になるため、パケット衝突による干渉影響が懸念される。したがって、車車間通信サービスの普及に向けて、サービス成立性を議論し、運転支援を実現する通信条件およびその問題点を明確化することが重要な課題となる。

通信品質を評価するうえで、ネットワークシミュレータによる評価が一般的だが、評価環境の規模が大きくなるほど必要となる計算リソースは増大し、サービスエリア内に多くの車両が存在する条件下で車車間通信品質を評価することは容易ではない。そこで本稿では、ブロードキャスト型 CSMA/CA 機構に従うアドホック通信環境を前提とし、車車間通信サービスにおける特定の送受信車両間のパケット到達特性を、車両位置と周辺車両から発生するトラフィック量に基づいてモデル化を行う。さらに構築したモデルにより、様々な評価シナリオで通信品質を解析・評価することで、サービスの成立条件を明確化することを目指す。基本的なアプローチとして、“送受信車両に対しキャリアセンスが働く範囲内の CSMA/CA 通信特性”と“受信車両の周りで送信車両の信号をキャリアセンスできずにパケットを送出してしまいう隠れ端末に起因する通信特性”を独立事象として考え、それぞれの特性を数理モ

<sup>†1</sup> 株式会社富士通研究所  
Fujitsu Laboratories Ltd.

<sup>†2</sup> 富士通株式会社  
Fujitsu Limited

<sup>†3</sup> 株式会社トヨタ IT 開発センター  
Toyota InfoTechnology Center, Co., Ltd.

デルにより解析する．さらに，それらの解析結果を統合評価することにより，車車間通信特性を統計的にとらえる．

ここで，車車間通信における“CSMA/CA”および“隠れ端末”に関わるパケット衝突事象は，トラフィック量とパケット到達性（スループット）の関係が定式化されている従来の数理モデル<sup>2)</sup>で近似解釈することができる．前者の CSMA/CA 特性は，車両間でキャリアセンスしながら確率的にパケット送信をスケジューリングする p-persistent モデルに近く，後者の隠れ端末特性では，各車両がお互いにキャリアセンスせず自由にパケット送信を行う Pure-ALOHA モデルに近い．しかしながら，それらの数理モデルでは，パケット生起や干渉影響に対し，個々の通信間で相関のない独立事象を前提としているため，キャリアセンス処理にともなうパケット生起への影響や D/U 比（Desired to Undesired signal ratio）に基づくパケット誤りへの影響などを考慮しておらず，現実の通信特性と大きく乖離する．

したがって，本稿では従来の数理モデルに存在する現実環境との乖離問題を解決し，“CSMA/CA の通信特性”と“隠れ端末に起因する通信特性”を高精度に評価可能な数理モデルを提案する．さらに，提案モデルを用いて特定事故ケースにおける車車間通信品質の評価を行い，運転支援を実現する通信条件を検証する．

以下，2 章では，車車間通信サービスの要件と品質評価に向けた課題を示し，3 章で関連研究について紹介する．4 章では，提案する数理モデルによる評価アプローチとモデル化手法を示し，5 章で提案モデルによる評価結果と NS-2<sup>3)</sup>によるシミュレーション結果を比較することにより提案モデルの妥当性を確認する．さらに，6 章で提案モデルを用いた特定事故ケースにおける車車間通信特性を評価し，最後にまとめる．

## 2. サービス要件と課題

車車間通信を用いた安全運転支援サービスは，その実現に向け各所で検討されている<sup>4),5)</sup>．たとえば，車両が路地から優先道路へ出る際の出会い頭衝突事故や，交差点での右折時に対向車線から来る直進車両との右直事故などの頻発事故を防ぐことを目的とし，自車両の位置および速度などの情報を近隣車両へ通知することで，危険車両の存在をドライバへ警告，注意喚起などを実施することを目指している．

### 2.1 車車間通信サービス要件

一般に，車車間通信では，ACK パケット応答や再送を行わないブロードキャスト型の CSMA/CA 方式の適用が想定されるが，運転支援を実現するためには，通信要件として，以下が重要になる．

- サービスエリアの実現  
車両の周囲全方向の数百 m にわたって，サービスエリアをカバーする必要がある．
- 情報伝達の確実性  
車両へのパケット到達性を明確にする必要がある．

また，通信に影響を与える干渉要素としては，“他車両から送出されたパケットとの衝突”や，“隣接周波数帯を利用する他システムからの電力干渉”などが考えられるが，これらの干渉影響下で，安全運転支援向けの車車間通信サービスを成立させるためには，パケット受信に対して厳しい品質基準が要求される．

### 2.2 品質評価に向けた課題

車車間通信サービスの実現に向け，パケット到達率と通信条件（車両台数，データサイズ，送信周期など）の関係を明確化することは急務である．一方，前節のサービス要件を想定すると，サービスエリアで考慮すべき車両台数も膨大になることから，シミュレーション評価は容易ではない．そこで，通信品質を簡易的に評価可能な手段として，通信特性をモデル化して品質特性を統計的にとらえる手法が有効である．しかしながら，実際の車車間通信では，様々な車両位置関係によって通信特性が大きく異なることが考えられ，それらの車両位置関係を考慮した品質特性を評価できる数理モデルは存在しない．

## 3. 関連研究

従来より，CSMA/CA 通信のスループット特性を解析する方法として，数理モデルによる通信解析が行われてきた<sup>2)</sup>．特に，CSMA/CA 特性は，キャリアセンス後のランダム待ち時間（バックオフ時間）に大きく依存することが想定され，バックオフ機構のモデル化による解析手法が多く提案されている<sup>6)-12)</sup>．なかでも，Kleinrock らが提案している p-persistent モデル<sup>6)</sup>は，多くの CSMA 特性の解析に用いられている．文献 9) では，IEEE 802.11 プロトコルにおけるバックオフ時間とスループット限界の関係を p-persistent モデルで理論解析し，スループットが理論限界に近づくように，動的にバックオフ制御を実施する方法を提案している．さらに，バックオフ時間を決定するランダム時間窓（コンテンションウィンドウサイズ）と p-persistent モデルにおける確率  $p$  の関係を近似的に定式化できることを示している．また，文献 10) では，WAVE (IEEE 802.11p Wireless Access in Vehicular Environment) を想定し，周辺車両台数に応じて各車両のコンテンションウィンドウを，パケット送信が成功する時間間隔（VT: Virtual Transmission Time）を最小化しよう動的に調整する方法を提案している．ここでも，IEEE 802.11p の通信特性を slotted p-persistent モデルで

近似することで VT の定式化を実現している。

バックオフ機構を解析する別アプローチとして、文献 11) では、RTS (Request-To-Send)/CTS (Clear-To-Send) を前提にした動的なバックオフ (再送時にコンテンションウィンドウサイズが変化する) 特性をマルコフモデルにより解析している。また、文献 12) では、車車間通信におけるバックオフ特性を、M/G/1 モデルによって解析する手法を提案しており、DSRC (Dedicated Short Range Communication) を前提にした車車間通信の特性解析を行っている。

しかしながら、上記の文献で提案されているモデル化の論理は、すべての端末がキャリアセンスできる理想環境を想定しており、隠れ端末による影響は考慮されていない。実際、車車間通信のようにパケット送信が様々な場所で発生する環境下では、すべての車両がお互いにキャリアセンスできる状況はほとんどないと考えられ、特定の車両間通信に対して隠れ端末の影響が顕在化してくることが想定される。

一方で、文献 13) では、各端末周辺に同じ台数の隠れ端末と競合端末が存在する対称的なネットワーク環境を想定し、CSMA/CA 環境における隠れ端末特性を解析する手法を提案している。しかし、端末配置やデータ送信事象に対し理想的な環境を想定している点や、RTS/CTS 利用環境を想定している点など、本稿で想定する車車間通信環境とは異なる。

本稿では、CSMA/CA 特性および隠れ端末特性におけるパケット衝突事象に対し、従来より広く利用されてきた p-persistent モデルと Pure-ALOHA モデルによって近似解釈できるように着目する。ただし、従来の p-persistent モデルや Pure-ALOHA モデルは、個々の通信間において相関のない独立事象を前提としており、周辺端末間でのパケット送信に対する相関影響や、パケット衝突時の電力レベルに基づくパケット誤りへの影響などを考慮していない。そこで、これらの従来モデルに対してパケット送信と車両位置の相関性に関する新たな考慮を加え、実際の通信環境に適合させることを本稿の主眼とする。

#### 4. 数理モデル化

本稿では、車車間通信システムを空間的にとらえ、場所に影響されるパケット送信間の相関事象を考慮してモデル化することにより、実環境に適合した通信特性を評価できる方式を確立する。

##### 4.1 アプローチ

図 1 のように送信車両 (Tx)/受信車両 (Rx) 間の特定リンクに対し、送信車両 (Tx) の送信パケット (希望波) を受信可能な送信エリアと、希望波をキャリアセンス可能なエリア

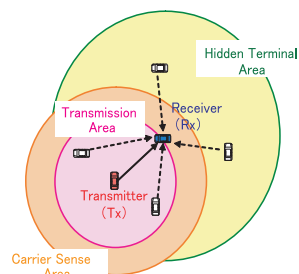


図 1 アプローチ

Fig. 1 Modeling Approach.

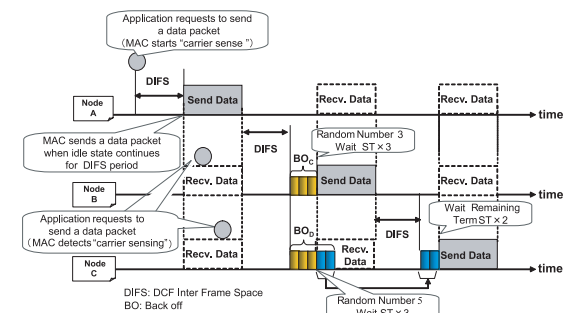


図 2 IEEE 802.11 動作概要

Fig. 2 IEEE 802.11 outline of processing.

(キャリアセンスエリア) 以外の領域で、受信車両 (Rx) に対して隠れ端末となる車両が存在する隠れ端末エリアとに分け、それぞれ独立に解析することを考える。このとき、パケット到達率は、次式で定義される。

パケット到達率

$$= (\text{送信エリア内パケット到達率}) \times (1 - \text{隠れ端末によるパケット誤り率}) \quad (1)$$

以降で、各エリア内の車両から発生するトラフィックに起因するパケット到達特性を影響領域ごとに解析し、数理モデル化を行う。

#### 4.2 送信エリア通信特性のモデル化

CSMA/CA を用いた代表的な無線通信規格 IEEE 802.11<sup>14)</sup> のブロードキャスト動作概要を図 2 に示す。一般に 802.11 には、隠れ端末対策として RTS/CTS 交換があるが、本手順はブロードキャスト通信では使用されない。以下に 802.11 の処理フローを示す。

##### 802.11 処理フロー

I) 端末が ready 状態になる

II) キャリアをセンスする

(a) idle を検出した場合

(i) idle 状態が DIFS (Distributed Coordination Function Inter Frame Space : 分散制御用フレーム間隔) 時間継続したらパケットを送信 → 終了

(ii) idle 状態が DIFS 時間継続する前に busy を検出したら III を実行

(b) busy を検出した場合、III を実行

III) idle になってから DIFS 時間経過するまで待機し、乱数を発生

(a) 乱数 = 0 で、パケットを送信 → 終了

(b) それ以外は、パケットの送信をランダム時間 (乱数 × スロット時間) だけ遅延

IV) キャリアをセンスし、idle 時間 (DIFS 時間を除く) の合計が III で決めたランダム時間に等しくなったらパケットを送信 → 終了

ここで、III におけるランダム時間を決定する乱数 (コンテンションウィンドウ) は、 $[0, CW]$  範囲の様な分布から生成されたランダムな整数値に従う。同一優先度のパケット送信が行われるとすると、 $CW = 15$  となり、最大 15 スロット時間のランダム時間が設定される。

これに対し、p-persistent モデルの処理フローを以下に示す。

p-persistent モデル処理フロー

I) 端末が ready 状態になる

II) キャリアをセンスする

(a) idle の場合

(i) 確率  $p$  で、パケットを送信 → 終了

(ii) 確率  $1 - p$  で、固定時間 (スロット時間) だけ待機

(iii) キャリアをセンスする

\* idle の場合 (a) に戻る

\* busy の場合、ランダム時間だけ待機して II に戻る

(b) busy の場合 idle 状態になるまで待機して II に戻る

802.11 との主な違いは、idle 状態になった時点で必ず乱数を発生させてパケット送信を行うか否かの確率判定を行う点にある。なお、802.11 におけるランダム時間が、 $[0, 15 (= CW)] \times$  スロットタイムで決定されることに着目すると、付録 A.1 に示すように p-persistent モデルに相当する確率  $p$  は、 $2/(CW + 1) = 1/8$  で近似できることが知られている<sup>9),10)</sup>。ただし本稿では、パケット長が可変、およびコンテンションウィンドウサイズ (CW) が、再送制御などで動的に変更されるケースは想定しないものとする。

上記近似方法に着目し、送信エリア通信特性の解析手法として p-persistent モデルを適用することを考える。p-persistent モデルは、エリア内の発生トラフィック量を正規化したトラフィック量  $G_p$  と各車両間の平均伝播遅延時間  $a$  を入力として与え、平均パケット到達率を容易に計算することができる。

$$\text{平均パケット到達率} = f_p(G_p, a) \quad (2)$$

ここで、正規化トラフィック  $G_p$  は、同時送信によりパケット干渉を生じうる車両台数  $N_1$  台と、各車両  $i$  から発生するパケット生起量  $R_{p,i}$  (packets/sec) を用いて、

$$G_p = \sum_{i=1}^{N_1} R_{p,i} \times T_{p1} \quad (3)$$

と表される。ただし、 $T_{p1}$  は p-persistent モデルの単位時間として定義されるパケット送信期間で、 $G_p$  は単位時間  $T_{p1}$  内に発生しうる総トラフィック量である。送信エリアにおいて、各車両のパケット送信がキャリアセンスに基づいて同期していることを想定すると、単位時間  $T_{p1}$  は、以下の区間で定義される。

$$T_{p1} = \text{プリアンブル送信時間} + \text{データ送信時間} + \text{DIFS 時間} \quad (4)$$

なお、式 (3) の  $G_p$  は、時間軸におけるランダムなパケット生起とその定常性を仮定したトラフィック量で、車両の位置関係や周辺車両台数に依存する“キャリアセンス動作によるパケット送信スケジューリングの影響”や“D/U 比に応じた干渉影響の不均一性”などは考慮されていない。したがって、車両位置に応じたパケット生起の相関影響を、時間軸のパケット生起過程に反映させることで、実環境に適応した正規化トラフィック  $G_p$  を算出する必要がある。そこで、以下の課題を解決する数理モデルを提案する。

課題 1 パケット再スケジューリングの考慮

課題 2 不均一な干渉影響の考慮

#### 4.2.1 パケット再スケジューリングの考慮

正規化トラフィック  $G_p$  を見積もるためには、キャリアセンスを行った結果、送信再スケジューリングされるパケット生起事象を考える必要がある。ここで、各車両のキャリアセンス範囲内に平均  $D$  台が均一に分布していると仮定し、正規化時間  $T_{p1}$  区間に各車両のキャリアセンス範囲から生起する平均パケット量を導出する。

まず、キャリアセンス範囲に存在する車両  $i$  が送信周期  $T_i$  で送出したとき、再スケジューリング要素を考慮せず  $T_{p1}$  内に送信要求される平均パケット量  $H_{re\{0\}}$  (packets/sec) は、【周期トラフィック】 $T_i$ : 全車両で一律同じパケット送信間隔

$$H_{re\{0\}} = \sum_{i=1}^D \frac{1}{T_i} \times T_{p1} \times \frac{1}{2} \quad (5)$$

【ランダムトラフィック】 $T_i$ : 車両ごとに異なるパケット送信間隔

$$H_{re\{0\}} = \sum_{i=1}^D \frac{1}{T_i} \times T_{p1} \quad (6)$$

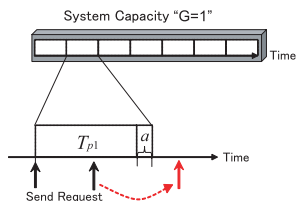


図3 再スケジュール処理  
Fig. 3 Rescheduling process.

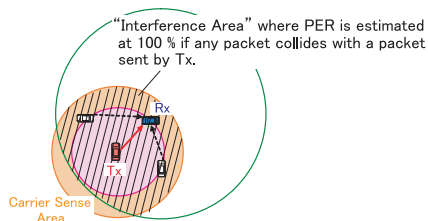


図4 干渉領域の見積り  
Fig. 4 Estimation of interference region.

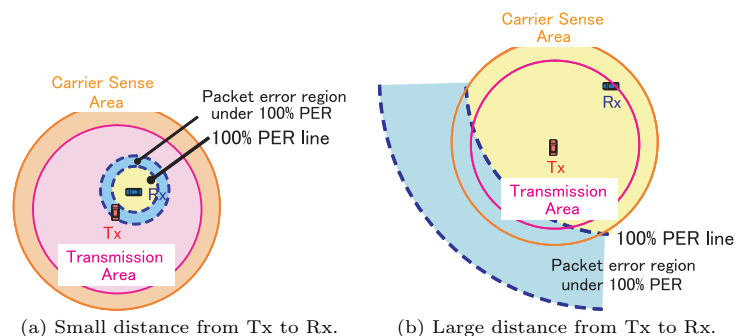


図5 PER を与える領域の変化  
Fig. 5 Changes of Packet Error Region.

となる．なお，式 (5) に示した周期性をともなうトラフィックに対する指数分布近似方法に関しては，付録 A.2 を参照されたい．

ここで，図 3 に示したパケット送信の再スケジュール処理過程を考慮すると， $H_{re\{0\}}$  に対して， $T_{p1}$  区間に 2 個以上のパケットが生起するとき，送信が再スケジュールされることから，

$$H_{re\{1\}} = H_{re\{0\}} \times (1 - e^{-(1+a)H_{re\{0\}}} - (1+a)H_{re\{0\}}e^{-(1+a)H_{re\{0\}}}) \quad (7)$$

と算出される．さらに， $H_{re\{i\}}$  ( $i = 1, 2, \dots, \infty$ ) のパケット生起に対しても同様に再スケジュールされ，

$$H_{re\{i+1\}} = H_{re\{i\}} \times (1 - e^{-(1+a)H_{re\{i\}}} - (1+a)H_{re\{i\}}e^{-(1+a)H_{re\{i\}}}) \quad (8)$$

となる．したがって，再スケジュール分を考慮したキャリアセンス範囲内から生起するパケットの総量  $H$  は，

$$H = \sum_{i=1}^{\infty} H_{re\{i\}} \quad (9)$$

となる．

これらの再スケジュール処理によってパケット生起が他の時間に繰り越され，時間軸上に対し，パケット送信時間が占有する確率が高まる．この結果，特定のパケット送信に対して，パケット衝突確率が増加するように見なすことができる．

#### 4.2.2 不均一な干渉影響の考慮

p-persistent モデルでは，すべての送受信リンクに対して，同じ干渉影響が存在するとい

う仮定の下，全送受信リンクの平均パケット到達率を算出する．しかし，実環境を想定すると，個々の送受信リンクに対する干渉影響は，送信車両 (Tx) と受信車両 (Rx) の位置関係に応じた D/U 比によって変わる．

提案モデルでは，特定の送受信リンクのパケット到達率を解析することを目的とし，p-persistent モデルで利用する干渉トラフィックの解釈を以下のようにとらえる．図 4 のように，送信車両 (Tx) から受信車両 (Rx) へのデータ受信電力に応じて D/U 比に基づくエリアを形成し，キャリアセンスエリアとの重複エリアに存在する車両から発生するトラフィックを，送信車両 (Tx) から受信車両 (Rx) への通信に対する干渉トラフィックと見なす．本稿では，干渉トラフィックを見積もる領域を，受信車両 (Rx) における D/U 比からパケット衝突時に 100% 受信誤り (PER : Packet Error Rate) を与える領域とする．ここで，p-persistent モデル (付録 A.3) における干渉トラフィックの解釈を，特定パケット受信に対して干渉を与えるトラフィックと見なしても導出論理の一般性を失わないことに着目されたい．

一般に，送信車両 (Tx) から送出されるパケット (希望波) の受信車両 (Rx) での受信において，パケット衝突時に 100% 未満の受信誤りを与える領域も存在し，それら干渉領域は，図 5 のように送信車両 (Tx) と受信車両 (Rx) の距離に応じて変化する．たとえば，図 5 (a) のように，送受信車両 (Tx/Rx) 間の距離が近い場合，希望波の受信電力が大きくなるため，パケット衝突時に干渉を与えうる領域全体が，キャリアセンスエリア内にすべて包含される．しかし，そのような干渉領域に対して，干渉影響が低い (PER 100% 未満) の

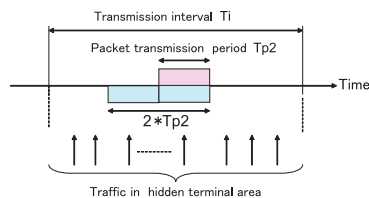


図 6 Pure-ALOHA モデル  
Fig. 6 Pure-ALOHA model.

領域は狭く、確率的に無視できるものと考えられる。一方、図 5 (b) のように、送受信車両 (Tx/Rx) 間の距離が離れている場合、希望波の受信電力が低くなるため、パケット衝突時に干渉を及ぼす領域が大きくなる。そのため、干渉影響が低い (PER100%未達) 領域は、キャリアセンスエリア内にほとんど含まれなくなることから、その影響も PER100%領域に比べて小さいと考えられる。これは、5.1 節で示す検証結果からも裏付けることができる。

したがって、式 (3) の同時送信によってパケット干渉を生じうる車両台数  $N_1$  台を、重複エリア (図 4 の斜線エリア) に存在する車両台数と見積もればよい。

結果、各車両  $i$  のキャリアセンス範囲に存在する平均車両台数  $D$  台のうち、特定送受信パケットに対して干渉を与えうる車両  $N_1$  台から生起するパケット量は、キャリアセンス範囲内から生起するパケットの総量  $H$  の  $N_1/D$  倍として表すことができる。したがって、式 (3) は、以下ようになる。

$$G_p = \sum_{i=1}^{N_1} R_{p,i} \times T_{p1} = H \times \frac{N_1}{D} \quad (10)$$

#### 4.3 隠れ端末エリア特性のモデル化

隠れ端末エリア内の車両は、送信車両 (Tx) からの希望波をキャリアセンスできないため、隠れ端末エリア内のパケット送信は、希望波送信に対して独立に発生するものと見なすことができる。このとき、希望波に対するパケット衝突に関する考え方は、図 6 のように Pure-ALOHA と同様の機構となり、車両の送信周期を  $T_i$ 、パケット送信時間長を  $T_{p2}$  とすると、希望波に干渉パケットが衝突する確率は、 $1 - e^{-(2T_{p2}/T_i)}$  と表せる。

本稿では、隠れ端末に起因するパケット衝突特性を Pure-ALOHA モデルとして解析する。隠れ端末エリア内の発生トラフィック量を正規化したパラメータ  $G_A$  を入力として与えたとき、隠れ端末によるパケット誤り率 (隠れ端末エリア内の車両が送信したパケットとの

衝突による誤り率) は、以下のように導出できる。

$$\text{平均パケット誤り率} = f_A(G_A) \quad (11)$$

ここで、正規化トラフィック  $G_A$  は、隠れ端末車両の台数が  $N_2$  台のとき、隠れ端末車両  $j$  から発生するパケット生起量  $R_{A,j}$  (packets/sec) を用いて、

$$G_A = \sum_{j=1}^{N_2} R_{A,j} \times T_{p2} \quad (12)$$

と表される。なお、隠れ端末エリアのパケット送信は、送信エリアのような同期型通信にはならないため、式 (4) の単位時間のように DIFS 時間を考慮する必要はなく、単位時間  $T_{p2}$  は、

$$T_{p2} = \text{プリアンブル送信時間} + \text{パケット送信時間} \quad (13)$$

となる。

しかし、送信エリア解析と同様、Pure-ALOHA モデルにおいても、車両位置関係に起因する以下の課題が存在するため、それらを解決する数理モデルを構築する。

課題 1 パケット再スケジューリングの考慮

課題 2 不均一な干渉影響の考慮

##### 4.3.1 パケット再スケジューリングの考慮

隠れ端末となる車両のパケットの生起過程を正確にとらえるためには、近い場所に位置する各車両間でキャリアセンスを実施した結果、再スケジュールされた後に再び生起するという事象を考えなければならない。そこで、送信エリア内の解析同様、各隠れ端末車両周辺のキャリアセンス範囲内に平均  $D$  台の車両が均一に存在するという前提を与え、式 (9) と同様にして、送信再スケジュールの影響を定式化する。

隠れ端末車両  $j$  がパケットを送出する間隔を  $T_j$  (sec) としたとき、送信再スケジュールを考慮した各隠れ端末車両周辺のキャリアセンス範囲内から生起する平均パケット量  $H$  は、

$$H = \sum_{k=0}^{\infty} H_{re\{k\}} \quad (14)$$

となる。ただし、

$$H_{re\{k+1\}} = H_{re\{k\}} \times (1 - e^{-(1+a)H_{re\{k\}}} - (1+a)H_{re\{k\}}e^{-(1+a)H_{re\{k\}}}) \quad (15)$$



$$\text{周期トラフィック} : H_{re\{0\}} = \sum_{j=1}^D \frac{1}{T_j} \times T_{p1} \times \frac{1}{2} \quad (16)$$

$$\text{ランダムトラフィック} : H_{re\{0\}} = \sum_{j=1}^D \frac{1}{T_j} \times T_{p1} \quad (17)$$

とする。

ここで、キャリアセンス範囲内に存在する車両間のパケット送信は相関事象であり、一方で隠れ端末エリアの離れた車両間のパケット送信は独立事象になることを想定し、隠れ端末エリアの車両から生起する総パケット量を導出する。パケット送信が再スケジュールされ、パケット生起確率が増大するように見なせることから、式(12)の隠れ端末エリアに存在する車両  $j$  のパケット生起量  $R_{A,j}$  は、以下のように表すことができる。

$$R_{A,j} = \frac{1}{T_j} \times \frac{H}{H_{re\{0\}}} \quad (18)$$

なお、パケット生起量  $R_{A,j}$  は、再スケジュール分を含めランダム事象になっていることに注意されたい。

#### 4.3.2 不均一な干渉影響の考慮

希望波へのパケット衝突時に与える干渉影響は、同時衝突するパケット数、および車両位置関係によって決定される干渉電力に依存する。そこで、D/U 比の違いにともなう不均一な干渉影響を統計的に解析する方式を提案する。

1 図7に示すように、隠れ端末エリアを、単一干渉パケットが希望波に衝突したとき同程度の D/U 比を与えるエリアでカテゴライズする。さらに、各分割エリアの干渉電力を同一干渉電力で定義し、各エリアごとの車両台数を求める。このように電力レベルごとにエリアをカテゴライズすることで、D/U 比解析パターンを有限個に抑えることができる。なお、本稿で対象とする隠れ端末エリアの境界は、単一パケットが希望波と衝突した際にパケット誤りを 1%以上与える領域までとする。

2 各分割エリア内の車両から送出されるパケット衝突パターンごとの総干渉電力に基づいて決定されるパケット誤り率から、隠れ端末エリアに起因する平均パケット誤り率を求める。

上記手順に従い、各エリア  $i$  ( $1 \leq i \leq m$ ) に存在する車両台数  $h_i$  を用いて、パケット誤り率を解析する。まず、隠れ端末エリア全域および各分割エリアで発生する正規化トラフィック量  $G_A, G_{A,i}$  を、式(18)を用いて以下のように導出する。

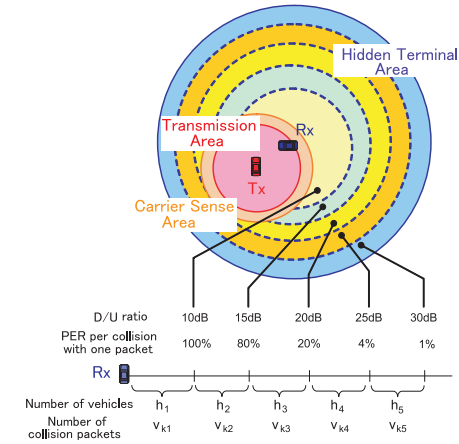


図7 隠れ端末エリアの分割(例)  
Fig. 7 Division of hidden terminal area (example).

$$G_A = \sum_{i=1}^m G_{A,i}, \quad G_{A,i} = \sum_{j=1}^{h_i} R_{A,j} \times T_{p2} \quad (19)$$

ここで、隠れ端末エリア全域で、 $k$  個のパケットが送信されたときに希望波に対する平均パケット誤り率  $E_k$  は、

$$E_k = \sum_{\mathbf{v}_k \in \mathbf{V}_k} \left\{ \text{PER}_{\mathbf{v}_k} \prod_{i=1}^m \text{Pr}_{v_{ki}}(G_{A,i}) \right\} \quad (20)$$

$$\mathbf{V}_k = \left\{ \mathbf{v}_k = (v_{k1}, v_{k2}, \dots, v_{km}) \mid \sum_{i=1}^m v_{ki} = k \right\}$$

と表される。ただし、 $\text{PER}_{\mathbf{v}_k}$  は、隠れ端末エリア全域で  $k$  個のパケットが送信される条件下で、各分割エリアから  $\mathbf{v}_k = (v_{k1}, v_{k2}, \dots, v_{km})$  個のパケットが同時衝突したときの D/U 比に応じて決定される平均パケット誤り率であり、図8のような D/U 比-PER 特性から決定される。また、 $\text{Pr}_{v_{ki}}(G_{A,i})$  は、各分割エリアから発生しうるパケット数パターン  $\mathbf{v}_k = (v_{k1}, v_{k2}, \dots, v_{km})$  に対し、分割エリア  $i$  から  $v_{ki}$  個のパケットが送出され、希望波に同時衝突する確率を表す。

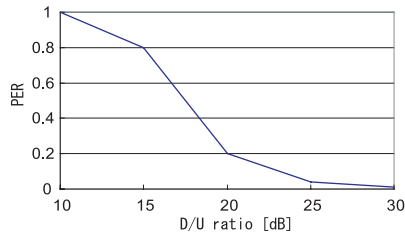


図 8 D/U 比-PER 特性  
Fig. 8 D/U ratio-PER characteristics.

$$\Pr_{v_{ki}}(G_{A,i}) = \frac{(2G_{A,i})^{v_{ki}}}{v_{ki}!} e^{-2G_{A,i}} \quad (21)$$

したがって、式 (11) の隠れ端末エリアに起因する平均パケット誤り率は、式 (20) を用いて、

$$\text{平均パケット誤り率} = \sum_{k=1}^{\infty} E_k \quad (22)$$

と表される。なお、隠れ端末エリアからパケットが同時送信される個数  $k$  がある値よりも大きくなると、その事象が発生する確率

$$\Pr\{k > K\} = 1 - \sum_{k=0}^K \frac{(2G_A)^k}{k!} e^{-2G_A} \quad (23)$$

は微小になるため、式 (22) で考慮すべき隠れ端末エリアから同時送信されるパケット個数  $k$  は、 $k \leq K$  まで計算すればよい。

### 5. 妥当性評価

特定車両間通信 (Tx → Rx) に対し、各エリアに車両を増加配置したときの、受信車両 (Rx) におけるパケット到達率の解析結果と、NS-2 による同一条件下でのシミュレーション結果を比較することで、提案モデルの妥当性を検証する。なお、提案モデルおよび NS-2 の設定条件を、ITS における UHF 帯の割当を示す情報通信審議会情報通信技術分科会電波有効利用方策委員会報告書<sup>15)</sup> および標準化作業中の IEEE 802.11p<sup>16),17)</sup> の仕様を例に、表 1 のように与えた。NS-2 シミュレーションでは、送信開始の初期条件で周期解に陥るこ

表 1 設定パラメータ  
Table 1 Design parameters.

周波数帯	700 MHz 帯
帯域幅	10 MHz
ペイロード長	100 byte
MAC ヘッダ+FCS	28 byte
変調方式	16QAM (符号化率 1/2)
送信電力	100 mW
送信周期	100 ms
CW (コンテンツンションウィンドウサイズ)	15
DIFS 時間	64 μs
プリアンプ	40 μs
電波伝播モデル	Walfisch-Ikegami モデル <sup>18)</sup>
キャリアセンスレベル/最低着信限界	-77 dBm
D/U 比-PER 特性	図 8
平均伝播遅延時間	300 ~ 500 ns
シンボル区間	8 μs

とを避けるため、特定車両台数条件でのシミュレーション施行ごとに、各車両のパケット送信開始時間を変え、同じ車両台数条件下で 50 回施行分の送信エリア内パケット到達率、および隠れ端末エリアに起因するパケット誤り率の平均値を計測・集計した。さらに、1 回のシミュレーション時間を 10 秒とし、各施行ごとの計測値 (パケット到達率、パケット誤り率) の偏差を求め、平均値に対する 95%信頼区間範囲を導出した。

評価シナリオは、着信限界レベルとキャリアセンスレベルを同一値 (-77 dBm) として与え、図 9 のように、送信車両 (Tx) を中心とした送信エリア (半径: 最低着信限界) の境界端に受信車両 (Rx) が位置するときのパケット到達率を評価する。なお、解析する領域 (送信エリアおよび隠れ端末エリア) を規定している Walfisch-Ikegami モデル<sup>18)</sup> は、送受信車両の距離  $d$  [m] により、見通し内および見通し外の 2 つのモデルで定義される伝播損失モデルである。本評価では、周波数帯を 725 MHz、基地局/移動局のアンテナ高を 1.5 m、建物高/建物間隔/道路幅を 15 m、車両の走行方向と電波の到来方向の角度 0°, Urban area の都市モデルをパラメータに基づいて算出される以下の伝播損失モデルを利用した。

- 見通し内モデル

$$L_{LOS}(\text{dB}) = 21.8 + 26 \log(d) \quad (24)$$

- 見通し外モデル

$$L_{NLOS}(\text{dB}) = 51.5 \log(d) + 0.0216d - 13.6 \quad (25)$$



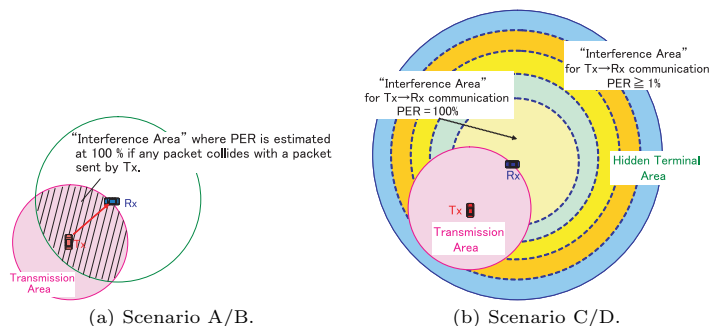


図 9 評価シナリオ  
Fig. 9 Evaluation scenarios.

また、希望波に対する D/U 比に応じた平均パケット誤り率 (PER) 特性は、図 8 のように設定した。本特性は、通信方式 IEEE 802.11p, 変調方式 16QAM, 符号化率 1/2, パケット長 100 bytes の条件で取得した計測データを参考にしている。

### 5.1 送信エリア評価

以下の車両配置シナリオ A, B (図 9(a)) に対し、提案モデルによる解析結果とシミュレーション結果を比較した。

- シナリオ A : 再スケジュール対処の効果検証

希望波との衝突時に 100% 受信誤りを与える範囲 (D/U 比 < 10 dB) で、図 9(a) に示すような送信エリアと重複する領域内 (斜線部) のみに車両を配置したときの、配置台数とパケット到達率の関係を評価する。

- シナリオ B : 不均一な干渉影響対処の効果検証

送信エリア全体に車両を配置したときの、シナリオ A 同様の重複領域内に存在する車両の配置台数とパケット到達率の関係を評価する。

図 10 に示すシナリオ A の評価結果より、提案モデルによる解析結果が、NS-2 シミュレーション結果と近い特性になっていることが確認できる。さらに、従来モデル (p-persistent モデル) で解析した結果と比較すると、再スケジュール動作を考慮した提案モデルの効果が見られることが分かる。一方、図 11 に示すシナリオ B の評価結果もまた、提案モデルによる解析結果が、NS-2 シミュレーション結果に近い特性を示している。

さらに、シナリオ A, B の NS-2 シミュレーション結果が、ほぼ同一特性になっているこ

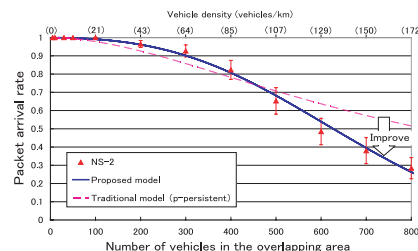


図 10 シナリオ A : 評価結果  
Fig. 10 Scenario A: evaluation results.

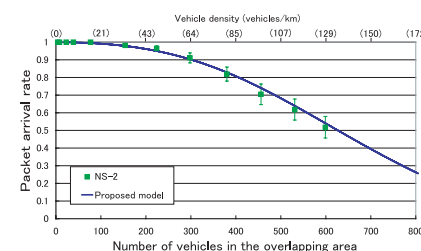


図 11 シナリオ B : 評価結果  
Fig. 11 Scenario B: evaluation results.

とから、4.2.2 項で示した 100% 受信誤りを与える領域のみを考慮すれば、妥当な評価が実施できることが分かる。

### 5.2 隠れ端末エリア評価

以下の車両配置シナリオ C, D (図 9(b)) に対する、提案モデルによる解析結果とシミュレーション結果を比較する。

- シナリオ C : 再スケジュール対処の効果検証

希望波との衝突時に 100% 受信誤りを与える領域 (D/U 比 < 10 dB) の隠れ端末エリア内に車両を配置したときの、配置台数とパケット到達率の関係を評価する。

- シナリオ D : 不均一な干渉影響対処の効果検証

希望波との衝突時に 1% 以上の受信誤りを与える領域 (D/U 比 < 30 dB) である隠れ端末エリア全体に車両を配置したときの、配置台数とパケット到達率の関係を評価する。ただし、図 9(b) に示すように、隠れ端末エリア分割数  $m$  は 5 としている。

図 12 に示すシナリオ C の評価結果より、提案モデルによる解析結果が、NS-2 によるシミュレーション結果と近い特性になっていることが確認できる。さらに、従来モデル (Pure-ALOHA モデル) で解析した結果と比較すると、再スケジュール動作を考慮した提案モデルの効果が見られている。一方、図 13 に示すシナリオ D の評価結果もまた、提案モデルによる解析結果が、NS-2 によるシミュレーション結果と近い特性を示している。

### 5.3 考察

提案モデルは、送信エリア/隠れ端末エリア評価で定義される干渉領域に存在する車両台数から特定送受信間のパケット到達性を評価することを目的としている。したがって、各エリア (送信エリア/隠れ端末エリア) に対して、干渉領域に配置した車両台数とパケット到達性の関係を、シミュレーション評価と比較検証することで、提案モデルの妥当性が確認で

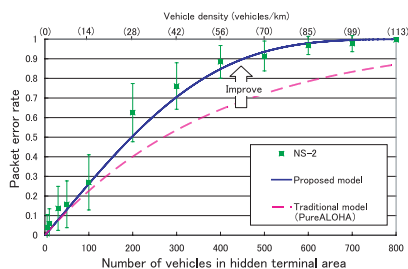


図 12 シナリオ C: 評価結果

Fig. 12 Scenario C: evaluation results.

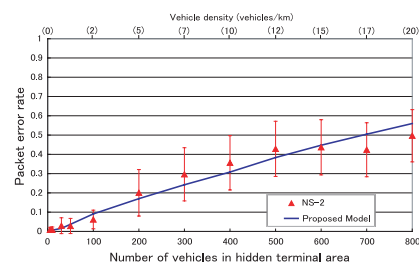


図 13 シナリオ D: 評価結果

Fig. 13 Scenario D: evaluation results.

きる。

ここで、シナリオ C/D の評価が、シナリオ A/B に比べて結果が劣化する理由は、事象発生に周期性が大きく影響されているためと考えられる。シナリオ C/D の評価では、各施行内に発生する衝突事象に周期性が強くなり、計測データの分散（希望波に周期的に衝突する、あるいはまったく衝突しないといったばらつき）が大きい傾向を示している。一方、シナリオ A/B の評価では、各施行においても、キャリアセンシング処理やバックオフ制御に起因して、衝突事象の周期性が大きく崩れる傾向があり、ランダムなサンプリングが行われた結果として、シナリオ C/D と比較すると計測データの分散が小さい。したがって、図 10～13 に示す平均データの信頼区間は、シナリオ C/D がシナリオ A/B に比べて大きくなる傾向にあるが、どの結果においても、NS-2 により取得した平均値の 95% 信頼区間内に提案モデルによる評価結果が含まれており、妥当な評価が行われているといえる。

なお、本稿で定義する各干渉領域に存在する車両台数が同じ条件のときは、パケット到達特性は本評価結果と同じ特性を持つ。一方で、干渉領域の範囲は送受信車両の位置関係に応じて変化するため、車両密度 (台/km) は変化する。本章の評価シナリオでは、送受信車両間の位置が最も離れているため、干渉領域が大きい状況を想定しているが、送受信車両間の距離が近づくと干渉領域は狭くなり、干渉領域に同じ車両台数が存在する場合でも、そのときの車両密度は高くなる。

参考値として、図 10～13 に対し、干渉領域に配置した車両台数に対応した車両密度 (km/台) を示す。一般に、車両長が 5 m 程度で、車間距離が存在することを想定すると、過密時でも 1 車線あたり 100 台/km 程度が限界になると考えられる。したがって、図 10, 11 の送信エリア評価においては、干渉領域内に現実的に存在する車両台数は、500 台程度に限

界になる。なお、送受信車両の距離が近づくにつれ、送信エリア解析で定義される干渉領域に存在できる車両台数はより少なくなることから、そのときの送信エリア特性に起因するパケット到達率は高い値を示すことが想定される。一方で、図 13 の隠れ端末エリア全域 (PER1%以上の領域) に対しては、送受信車両の距離が近づいて干渉領域が狭くなったとしても、干渉領域内にまだ多くの車両が存在できる可能性があり、パケット到達性に与える影響は、送信エリア特性に比べて非常に大きくなることが考えられる。

5 章では、評価精度の観点での議論を行ってきたが、評価時間の観点においても提案モデルは利点を持つ。本稿で想定する車車間通信では、パケット長は短い反面、パケット送信間隔が短く、同時接続端末数も多いため、他の通信環境と比較して、リソース競合にともなうパケット衝突が発生しやすい環境だと考えられる。さらに、ブロードキャスト型通信のために、隠れ端末エリアのパケット衝突影響が顕在化することが想定される。そのような通信環境を評価するうえで、提案モデルによる解析は有用であり、実際に、今回の NS-2 シミュレーション評価では、packet-by-packet の挙動を評価するために膨大な計算時間を要したのに対し、提案モデルでは、各評価シナリオに対して短時間で統計的な評価を実施できることを確認している。

## 6. 車車間通信サービス成立条件の評価

本章では、提案モデルを用いて車車間通信サービスの成立性を検証する。具体的には、パケット到達率と通信条件の関係を明確化することを目的とし、代表的な出会い頭衝突事故および右直事故を想定した車両配置シナリオに対し、特定車両間のパケット到達性を評価する。

### 6.1 評価シナリオ

各車線上の車両を車両密度 {30【低】、60【中】、90【高】} (台/km) と一律配置した条件下で、交差点付近に位置する受信車両 (Rx) に対し、送信車両 (Tx) を移動させたときの、パケット到達率を評価する。評価対象とする道路は、図 14(a) に示す都心道路を模擬した片側 3 車線の主要道路の交差点とし、交差点を中心に 200 m 間隔で片側 2 車線の幹線道路、50 m 間隔で片側 1 車線の細街路が格子状に存在する環境を想定する<sup>19)</sup>。さらに、出会い頭衝突事故および右直事故に対するサービスエリア<sup>20)</sup> を、図 14(b), 14(c) のように設定し、車両間のパケット到達率要件を 0.8 と仮定した<sup>1), 20)</sup>。

なお、各車両のパケット送信間隔は 100 ms 一律固定を想定する。提案モデルにおける設定パラメータは表 1 と同様にし、隠れ端末エリアの分割数を  $m = 5$  としている。

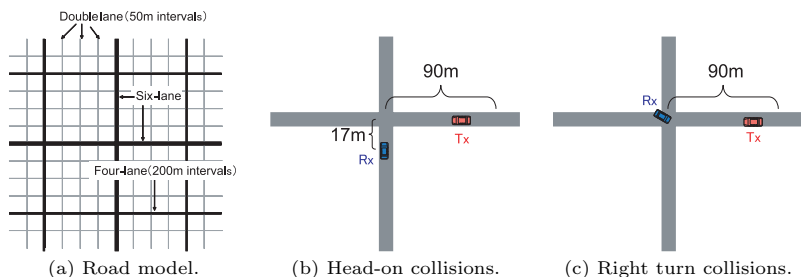


図 14 事故シナリオ  
Fig. 14 Accidents scenarios.

## 6.2 評価結果

### 6.2.1 出会い頭衝突事故

図 14(b) に示す出会い頭衝突事故に対する、サービスエリア（見通し内 90m + 回折 17m）に対し、受信車両（Rx）を片側 3 車線の交差点から、17m 手前に配置し、送信車両（Tx）の交差点中心からの位置を {90, 80, 70, 60, 50, 40, 30, 20, 10} (m) と近づけていったときの、各車両密度 {30, 60, 90} (台/km) の条件下でのパケット到達率を評価した。図 15 に評価結果を示す。

結果、車両密度 {30, 60, 90} (台/km) のいずれの場合でも、送信車両（Tx）が交差点から約 20m 以内で送信車両（Tx）と受信車両（Rx）が近距離に位置するときは、パケット到達率 0.8 を満たすことができるが、送受信車両間の距離が離れるにつれてパケット到達率は低下し、サービスエリア全領域でパケット到達率要件を満たすことは難しくなる。

### 6.2.2 右直事故

図 14(c) に示す右直事故に対する、サービスエリア（見通し内 90m）に対し、受信車両（Rx）を片側 3 車線の交差点中心に配置し、送信車両（Tx）の交差点中心からの位置を {90, 80, 70, 60, 50, 40, 30, 20, 10} (m) と近づけていったときの、各車両密度 {30, 60, 90} (台/km) の条件下でのパケット到達率を評価した。図 16 に評価結果を示す。

結果、出会い頭衝突事故の場合と同様に、送受信車両間の距離が離れるにつれてパケット到達率は低下し、サービスエリア全領域でパケット到達率要件 0.8 を満たすことは難しくなる。一方で、出会い頭衝突事故の場合に比べて、パケット到達率が全体的に良い傾向を示しており、たとえば、車両密度 30 (台/km) のときには、送信車両（Tx）の交差点からの位置が 60m 付近までパケット到達率 0.8 を満たすことが可能になる。この理由として、送

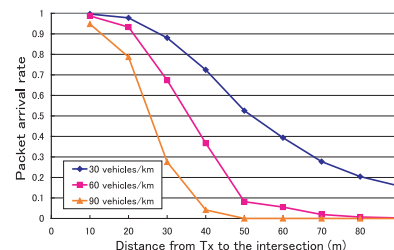


図 15 評価結果：出会い頭事故

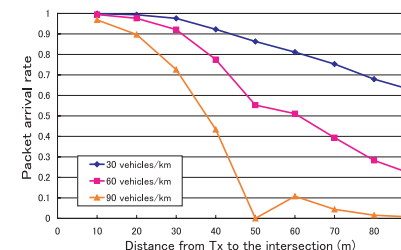
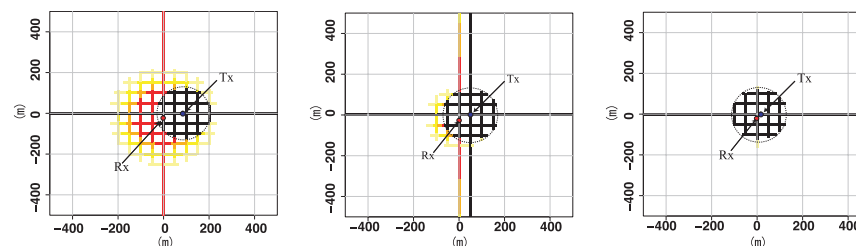


図 16 評価結果：右直事故

Fig. 15 Evaluation results: Head-on collisions. Fig. 16 Evaluation results: Right turn collisions.



(a) Tx is located at a distance of 90 m from the intersection. (b) Tx is located at a distance of 50 m from the intersection. (c) Tx is located at a distance of 10 m from the intersection.

図 17 出会い頭事故：エリア変化

Fig. 17 Communication area changes for head-on collisions.

信車両が見通し内に存在するために、送受信車両の位置が見通し外になる出会い頭衝突事故の場合より、受信車両（Rx）での希望波受信電力が高くなるためと考えられる。つまり、高い D/U 比が確保でき、パケット衝突時でもパケット受信が成功する確率が高い傾向を示す。なお、送信車両（Tx）の交差点からの位置が 50m のとき、パケット到達率の低下が顕著に現れている理由は、送信車両（Tx）が細街路の交差点に入り、見通し内の送信エリアが新たに発生することで、リソースを共有する車両台数が他の送信車両位置のケースに比べて多くなるためである。

## 6.3 考察

出会い頭衝突事故の評価結果を例に、送信エリアと隠れ端末エリアの変化の様子を図 17 に示す。なお、送信エリアおよび隠れ端末エリアは、Walfisch-Ikegami 伝播モデルに従って、直線状の見通し内エリアと円型の見通し外エリアの組合せとして形成されている。送信

車両 (Tx) を中心として形成される円型エリアは見通し外の送信エリア, 水平方向の道路に沿って伸びている直線状のエリアは, 見通し内の送信エリアを示す. また, 送信エリア以外の領域で, 受信車両 (Rx) を中心として形成される円型エリアは見通し外の隠れ端末エリア, 垂直方向の道路に沿って伸びている直線状のエリアは, 見通し内の隠れ端末エリアを示す. ここで図示している隠れ端末エリアとは, 隠れ端末となる車両から生じた 1 つのパケットと希望波が衝突した際にパケット誤り率が 1%以上となるエリアを示しており, 隠れ端末による希望波へのパケット衝突影響範囲を視覚化したものである.

なお, 表 1 に示す条件下で, 着信限界レベル (-77 dBm) で規定される送信エリアは, 見通し内距離 780 m/見通し外距離 125 m となる. 一方, 隠れ端末エリアは, 送受信車両の位置関係に応じて以下のように変化する.

- 図 17(a): Rx での希望波受信電力 -69.4 dBm に対する干渉領域は, 見通し外距離 289 m/見通し内距離 5,680 m となり, キャリアセンス可能な領域 (送信エリア/キャリアセンスエリア) 以外の隠れ端末エリアの領域は広い.
- 図 17(b): Rx での希望波受信電力 -56.3 dBm に対する干渉領域は, 見通し外距離 179 m/見通し内距離 1,772 m となり, キャリアセンス可能な領域にほとんど包含される.
- 図 17(c): Rx での希望波受信電力 -33.5 dBm に対する干渉領域は, 見通し外距離 72 m/見通し内距離 236 m となり, キャリアセンス可能な領域にすべて包含されて隠れ端末による干渉影響はなくなる.

結果, 送信車両 (Tx) の交差点からの距離が近づくにつれ, 希望波の受信電力が高くなることで, 隠れ端末エリアが小さくなり, 交差点からの距離が 10 m の地点では, 隠れ端末エリアが送信エリア内にほとんど包含されてしまう. このため, 送信車両 (Tx) が受信車両 (Rx) に近づくにつれて, 隠れ端末の影響が軽減されていき, パケット到達率が向上することが分かる.

さらに, パケット到達率を劣化させる要因として, 隠れ端末による影響が支配的であることが, 図 18 に示す結果からも確認できる. なお, 図 18 は, 出会い頭衝突事故 (車両密度 30 台/km) のパケット到達率に対し, 送信エリアおよび隠れ端末エリアの影響要素に分けたパケット到達率の評価結果を示したものである. この結果は, キャリアセンスが働く送信エリア特性であれば, 高いパケット到達率を実現できることを示しており, 隠れ端末の影響をなくす施策を講じれば, 通信要件を満たせる可能性がある.

また, 各車両から発生するトラフィック量自体を軽減するため, 車両速度に応じて送信周

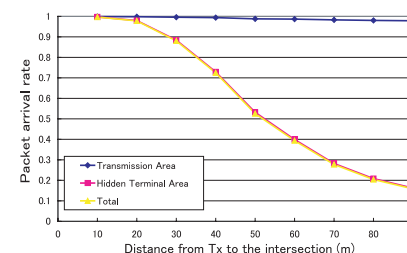


図 18 影響要因の比較

Fig. 18 Comparison for influence factors.

期を制御する仕組みも考えられ, これによりパケット到達率の向上も期待できる.

## 7. ま と め

車車間通信における CSMA/CA の通信特性を, キャリアセンス動作を基本とした送信エリアの特性と隠れ端末に起因する通信特性を独立にモデル化し, それぞれを統合評価することで, 特定の位置関係にある送受信車両間のパケット到達率を統計的に評価可能な解析手法を提案した. さらに, 提案手法と NS-2 シミュレーションの評価結果を比較することによりその妥当性を確認した.

また, 100 ms ごとのパケット送信を行う車車間通信を想定したとき, 安全サービスとして高い通信品質を満たすことは難しく, 隠れ端末による干渉影響が通信品質劣化に対して支配的な要因になるという問題点を明らかにした. 一方で, 隠れ端末問題さえ解消すれば, 品質改善効果は大きく, 安全サービスとしての品質要件を満たせる可能性があることが分かった.

提案モデルは, 通信品質の向上が期待できる, 車速に応じた送信周期制御を想定した場合にも適用可能であることから, 車車間通信サービスの実現性に関し, 様々な条件下での品質解析を実施していく予定である.

## 参 考 文 献

- 1) ITS 情報通信システム推進会議: 5.8 GHz を用いた車々間通信システムの実験用ガイドライン, ITS FORUM RC-005 1.0 版 (May 2007).
- 2) Kleinrock, L.: Computer Applications, Volume 2, Queueing Systems, John Wiley and Sons (1995).
- 3) The network simulator-ns-2. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>



- 4) 藤村嘉一, 長谷川孝明: 車両の安全のためのコンテンツ型 MAC を用いた車車間通信・路車間通信の性能評価, 電子情報通信学会論文誌 A, Vol.J90-A, No.6, pp.535-550 (2007).
- 5) 村松潤哉, 田所幸浩, 牧戸知史, 鈴木徳祥: 車々間通信環境における隠れ端末問題発生エリアの評価, 電子情報通信学会総合大会講演論文集, B-1-1 (Mar. 2007).
- 6) Kleinrock, L. and Tobagi, F.: Packet Switching in Radio Channels: Part I: Carrier Sense Multiple-Access Modes and Their Throughput-Delay Characteristics, *IEEE Trans. Communications*, Vol.Com-23, No.12 (Dec. 1975).
- 7) Raffaele, B., Marco, C. and Gregori, E.: Optimal capacity of p-persistent CSMA protocols, *IEEE Communications Letters*, Vol.7, Issue 3, pp.139-141 (2003).
- 8) Miskowicz, M.: On the Capacity of p-Persistent CSMA, *International Journal of Computer Science and Network Security (IJCSNS)*, Vol.7, No.11, pp.38-43 (2007).
- 9) Cali, F., Conti, M. and Gregori, E.: Dynamic Tuning of the IEEE 802.11 Protocol to Achieve a Theoretical Throughput Limit, *IEEE/ACM Trans. Networking*, Vol.8, Issue 6, pp.785-799 (2000).
- 10) Wang, Y., Ahmed, A., Krishnamachari, B. and Psounis, K.: IEEE 802.11p performance evaluation and protocol enhancement, *IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety (ICVES 2008)*, pp.317-322 (Sep. 2008).
- 11) Bianchi, G.: Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, pp.535-547 (Mar. 2000).
- 12) Ma, X.: Unsaturated Performance of IEEE 802.11 Broadcast Service in Vehicle-to-Vehicle Networks, *IEEE 66th Vehicular Technology Conference*, pp.1957-1961 (Sep. 2007).
- 13) Ekici, O. and Yongaoglu, A.: IEEE 802.11a Throughput Performance with Hidden Nodes, *IEEE Communications Letters*, Vol.12, No.6 (June 2008).
- 14) IEEE Std 802.11-2007 (June 2007).
- 15) 情報通信審議会情報通信技術分科会電波有効利用方策委員会報告 (June 2007).  
[http://www.soumu.go.jp/main\\_sosiki/joho\\_tsusin/policyreports/joho\\_tsusin/bunkakai/pdf/070627\\_1.1-2-1.pdf](http://www.soumu.go.jp/main_sosiki/joho_tsusin/policyreports/joho_tsusin/bunkakai/pdf/070627_1.1-2-1.pdf)
- 16) IEEE P802.11/D4.0 (Mar. 2008).
- 17) IEEE P802.11/D0.26 (Jan. 2006).
- 18) Urban transmission loss models for mobile radio in the 900- and 1800-MHz bands, Technical Report COST 231 TD(90) 119 Rev.2, COST 231 (1990).
- 19) 伊藤健二, 田所幸浩, 鈴木徳祥, 原田知育, 尾口健太郎, 伊藤修朗: 車車間通信による安全運転支援システムの性能評価, 信学技報, ITS2007-26 (Sep. 2007).
- 20) 宮本進生, 四方博之, シャグダル・オユーンチメグ, 大山 卓, マハダド・ヌリシラジ, 三浦 龍, 小花貞夫: 安全運転支援のための車々間通信における MM-SA 方式と CSMA

ベース方式の性能比較, 信学技報, ITS2008-55 (Feb. 2009).

## 付 録

### A.1 バックオフ時間に対する確率分布の近似

IEEE802.11 通信を前提としたバックオフ時間は, p-persistent モデルで前提とする幾何分布とは確率過程の乖離が存在する. そこで本稿では, バックオフ制御による待ち事象 (1 フローにおいて, バックオフ時間を経過しパケット送出が発生する事象) を平均的にとらえることを目的とし, スロット時間を単位時間とした実際の平均バックオフ時間  $E_{\text{real}}$  と, p-persistent モデルにおける平均バックオフ時間  $E_p$  が一致する確率  $p$  を導出することで, 幾何分布による平均近似を実施するものとする.

バックオフ時間が,  $[0, CW] \times$  スロットタイムの一様分布に従う場合, その平均は

$$E_{\text{real}} = \frac{CW + 1}{2} \quad (26)$$

と表される. 一方, p-persistent モデルにおける平均バックオフ時間は,

$$E_p = \frac{1}{p} \quad (27)$$

と表されることから, 平均バックオフ時間が一致する,  $E_{\text{real}} = E_p$  を満たす確率  $p$  は

$$p = \frac{2}{CW + 1} \quad (28)$$

と与えることができる.

### A.2 周期性トラフィックの指数分布近似

各パケットが固定間隔で送信される周期トラフィックに対し指数分布で近似する方法を示す.

一般に, 周期的に ( $\beta$  区間に 1 回) パケット送信が発生するフローが, 複数フロー重畳されるケースを想定したとき, 全体のトラフィック変動も周期性を持つことが考えられる. したがって,  $\beta$  区間に発生した特定パケット (希望波) に対して衝突するか否かは,  $\beta$  区間内に発生する他パケット送信事象に着目すれば解析することができる.

一方で, 従来の数理モデルをベースにパケット衝突事象を解析するためには, 確率分布の定常性 (微小時間  $\Delta$  内における事象の発生確率が均一) の仮定が必要となるが, パケット送信が周期的に発生する事象に対し, 確率分布の定常性を保証することはできない. しかし, 車両のような移動体の場合, 通信リソースを共有する領域 (送信エリア, キャリアエリ

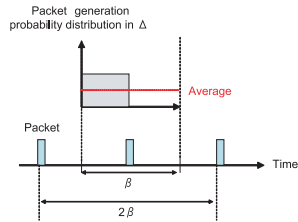


図 19 指数分布による近似  
Fig. 19 Approximation by exponential distribution.

ア、干渉エリア)で車両が出入りする事象が多く存在するため、同じエリア内に存在する車両台数が同一のときでも、パケット送信パターンは時間ごとに異なっていることが想定される。したがって、周期区間内におけるパケット送信パターンのランダム性を前提とし、パケット送信確率を平均値としてとらえる。

図 19 に示すように、特定のフロー  $i$  に対し、着目している周期区間 ( $\beta$ ) 内の微小時間  $\Delta$  において 1 パケットが送信される確率は、フロー平均レート  $r_i$  を用い、 $r_i \Delta$  で与えられる。ここで、フロー  $i$  が周期  $\beta$  でパケット送信を行う際の平均レートは、 $2\beta$  で 1 回のパケット送信が発生すると見なすことができるため、

$$r_i = \frac{1}{2\beta} \tag{29}$$

と表すことができる。

一方、独立に発生する  $D$  個のフロー  $i$  ( $1 \leq i \leq D$ ) が重畳されたときのパケット送信確率は、時間  $t$  内で 1 つもパケットが送信されない確率  $P(t)$  を用いて、 $1 - P(t)$  となる。そこで、時間  $t$  が微小時間  $\Delta$  の  $n$  倍 ( $t = n\Delta$ ) と仮定すると確率  $P(t)$  は、

$$P(t) = \prod_{i=1}^D (1 - r_i \Delta)^n \tag{30}$$

と表される。ここで、 $\Delta (= \frac{t}{n}) \rightarrow 0$ ,  $h = -\frac{r_i t}{n}$  とすると、

$$\begin{aligned} \lim_{\Delta \rightarrow 0} P(t) &= \lim_{n \rightarrow \infty} \prod_{i=1}^D \left(1 - \frac{r_i t}{n}\right)^n = \prod_{i=1}^D \lim_{h \rightarrow 0} \left\{ (1 + h)^{\frac{1}{h}} \right\}^{-r_i t} \\ &= \prod_{i=1}^D e^{-r_i t} = e^{-\left(\sum_{i=1}^D r_i\right)t} \end{aligned} \tag{31}$$

と導出できる。したがって、平均パケット送信確率は、

$$1 - e^{-\left(\sum_{i=1}^D r_i\right)t} = 1 - e^{-\left(\sum_{i=1}^D \frac{1}{2\beta}\right)t} \tag{32}$$

と与えられ、平均レート ( $\sum_{i=1}^D \frac{1}{2\beta}$ ) の指数分布に従っていることが分かる。

ただし、各車両においてパケット送信周期が固定の周期性を持たず、個々の車両のパケット送信が様々な周期で実施される場合、全体のトラフィック特性は、統計多重効果によりランダム性 (確率定常性) をともなう。その場合、前記の近似は不要となる。

### A.3 p-persistent モデルにおけるパケット到達率

p-persistent モデルを用いてパケット到達率を導出する関数  $f_p(G, a)$  は、以下で与えられる。

$$f_p(G, a) = \frac{P_a}{T_n} \tag{33}$$

ただし、 $P_a$  は、特定パケットの平均送信成功確率で、

$$P_a = \pi_0 P'_s + (1 - \pi_0) P_s. \tag{34}$$

$T_n$  は、特定区間 (パケット送信終了後、次のパケットが送信終了するまでの平均転送区間) の平均パケット生起数で、

$$T_n = G \left\{ \pi_0 \left\{ a\bar{t} + 1 + a + \frac{a}{1 - e^{-aG}} \right\} + (1 - \pi_0) \{ a\bar{t} + 1 + a \} \right\} \tag{35}$$

と表せる。

各パラメータは以下の意味を持つ。

- $P'_s$ : Busy Period の最初の TP (Transmission Period) において、送信が成功する確率
- $P_s$ : Busy Period の 2 回目以降の TP において送信が成功する確率
- $\bar{t}$ : 平均 First Initial Random Transmission Delay: [ $a$  で正規化]
- $\bar{t}$ : 平均 IRTD (Initial Random Transmission Delay): [ $a$  で正規化]
- $\pi_n$ : TP( $a+1$ ) 中に  $n$  個のパケットが到着する確率: [データ転送時間が単位 1]

各パラメータの算出方法については参考文献 6) を参照されたい。以下に p-persistent モデルの導出概要を説明する。図 20 に示すように、対象パケットが実際に転送されている期間 (TP) とその前に生起するパケット転送期間 (前 TP) のパケット生起関係に基づいて導出される。モデル導出の論理は、対象パケットにおける TP に対し直前の伝播遅延時間  $a$  において、

- 1 つのみパケット転送が行われたとき、対象パケットの送信が成功する。



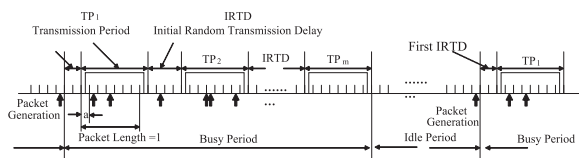


図 20 p-persistent モデルにおけるパケット転送過程  
Fig. 20 Packet transmission process in the p-persistent model.

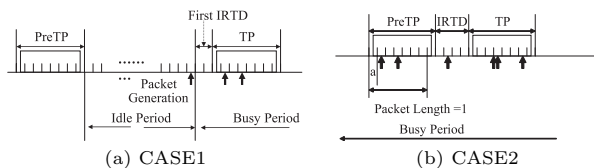


図 21 CASE1/CASE2  
Fig. 21 CASE1/CASE2.

● 2つ以上のパケット転送が行われたとき、対象パケットの送信が失敗する。という考えに基づく。また、図中の IRTD は、連続する TP 間において確率  $1 - p$  で全車両が送信を控えている時間を表している。

図 20 の状態は、以下の 2 つのケースに分けて考えることができる (図 21)。  
CASE1 前 TP を最後に Idle 状態に移し、Idle Period 期間を経過後、First IRTD  $\bar{t}$  期間を経過して、対象パケットの転送期間 (TP) に遷移する。  
CASE2 Busy 状態において、前 TP から IRTD  $\bar{t}$  期間を経過後、対象パケットの転送期間 (TP) に遷移する。

TP 区間を単位時間 1 としたとき、CASE1 で想定する直前のパケット送信終了後から注目パケットが送信終了するまでの平均転送間隔は、

$$a\bar{t} + 1 + a + \frac{a}{1 - e^{-aG}} \quad (36)$$

同様に、CASE2 で想定する平均転送間隔は、

$$a\bar{t} + 1 + a \quad (37)$$

と表すことができる。CASE1 の事象が生起する確率は、前 TP でパケットが生起しない確率で  $\pi_0$ 、CASE2 の事象が生起する確率は、前 TP で 1 つ以上のパケットが生起する確率で  $1 - \pi_0$  となることから、CASE1 と CASE2 における平均転送間隔は、

$$\pi_0 \left\{ a\bar{t} + 1 + a + \frac{a}{1 - e^{-aG}} \right\} + (1 - \pi_0) \{ a\bar{t} + 1 + a \} \quad (38)$$

となる。この平均転送間隔内に発生する平均パケット数は、式 (38) と平均レート  $G$  との積となり、式 (35) に示す  $T_n$  となる。なお、 $(1/T_n)$  が対象パケットが生起する確率になることに注意されたい。

また、同様に CASE1 を想定したときの、対象パケットの送信成功率が  $P'_s$ 、CASE2 を想定したときの対象パケットの送信成功率が  $P_s$  となることに着目すると、CASE1 と CASE2 における平均送信成功率は式 (34) となる。

(平成 21 年 5 月 25 日受付)

(平成 21 年 12 月 17 日採録)



今井 悟史

昭和 53 年生。平成 16 年大阪大学大学院基礎工学研究科システム人間系専攻修士課程修了。同年株式会社富士通研究所入社。平成 19 年度電子情報通信学会ネットワークシステム研究賞受賞。ネットワーク管理システム、およびトラフィック解析等の研究開発に従事。電子情報通信学会、システム制御情報学会、IEEE 各会員。



宇式 一雅

昭和 40 年生。平成 3 年静岡大学大学院工学研究科情報工学専攻修士課程修了。同年株式会社富士通研究所入社。平成 9 年度電子情報通信学会学術奨励賞受賞。情報通信サービス制御アーキテクチャ、移動通信ネットワークの研究開発等に従事。電子情報通信学会会員。



藤野 信次 (正会員)

昭和 35 年生。昭和 61 年大阪府立大学大学院工学研究科電子工学専攻修士課程修了。同年株式会社富士通研究所入社。博士 (情報学)。平成 15 年情報処理学会業績賞受賞。移動無線システム、無線環境用 TCP/IP、異種網統合サービス等の研究開発に従事。



町田 守

昭和 44 年生．平成 3 年東京工学院専門学校電子工学研究科卒業．同年富士通株式会社入社．無線通信に関する研究開発に従事．



森谷 正義

昭和 39 年生．平成 2 年東京大学大学院理学系研究科地球物理学専攻修士課程修了．同年富士通株式会社入社．宇宙用ロボット制御技術の研究および技術試験衛星の開発，車車間・路車間通信のアクセス制御方式，モバイルルータの研究開発等に従事．



蔡 晟尉

昭和 50 年生．平成 13 年東京大学大学院工学系研究科電子情報工学専攻修士課程修了．同年株式会社トヨタ IT 開発センター入社．車載モバイルルータ，路車・車車間通信における電波伝搬，無線方式の検討等に従事．



間瀬 公太

昭和 53 年生．平成 13 年立命館大学工学部電気電子工学科卒業．平成 19 年 6 月より株式会社トヨタ IT 開発センターにて ITS 無線通信に関する研究開発に従事．



丹羽 栄二

昭和 46 年生．平成 10 年茨城大学大学院理工学研究科修士課程修了．平成 20 年 2 月より株式会社トヨタ IT 開発センターにて ITS 無線通信に関する研究開発に従事．