

# 車車間通信システムのための 分散協調方式における伝送性能解析

藤井 雅弘<sup>1,a)</sup>

受付日 2016年4月6日, 採録日 2016年10月4日

**概要:** 本論文では, ARIB STD-T109 に準拠する ITS 通信のためのメディアアクセス制御の性能解析に関する新しい手法について提案し, その有効性を評価する. ARIB STD-T109 での車車間通信システムでは CSMA/CA とランダムバックオフに基づく分散協調によるアクセス制御が採用されている. これまで, 無線 LAN の標準規格である IEEE 802.11 やその ITS 向けの規格である IEEE 802.11p/WAVE に関する性能解析は行われてきているが, ARIB STD-T109 に基づくシステムでの十分な性能解析はまだない. ARIB STD-T109 は基本的にこれらの規格に準拠しているので, 従来の解析手法を応用することが可能である. 本論文では従来の解析で考慮されていなかった事象を正確に扱うことでより頑強な解析手法を提案し, その精度をネットワークシミュレータを用いて計測した結果と比較することで, その有効性を示す.

**キーワード:** ITS 通信, メディアアクセス制御, CSMA/CA, ランダムバックオフ, ARIB STD-T109

## Analysis for Transmission Efficiency for Distributed Cooperative Scheme of Inter-vehicle Communication Systems

MASAHIRO FUJII<sup>1,a)</sup>

Received: April 6, 2016, Accepted: October 4, 2016

**Abstract:** In this paper, we propose a new analysis method for media access control of Intelligent Transport Systems (ITS) based on the ARIB STD-T109 and evaluate some results by the proposed analysis in comparison with them by computer simulations. The ARIB STD-T109 adopts a distributed cooperative scheme based on Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance and random back-off for Inter-Vehicle Communications. Although there have been several studies that tried to analyze system performances for the IEEE 802.11, which is a standard for wireless local area network, and the IEEE 802.11p/WAVE expanded for ITS, few attempts have been made at those for the ARIB STD-T109. It is possible to apply the conventional analysis methods to them for the ARIB STD-T109. Moreover, we propose a robust analysis method to analyze the system performance by introducing unconsidered phenomenons. We evaluate an ability of the proposed analysis method by comparing with some results by the computer simulations.

**Keywords:** ITS communications, media access control, CSMA/CA, random back-off, ARIB STD-T109

### 1. はじめに

IEEE 802.11 は無線 LAN (Local Area Networks) の伝送制御方式のために標準化されており, その基本的な

MAC (Media Access Control) プロトコルとしての DCF (Distributed Coordinate Function) は CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) に基づいている [1]. CSMA/CA では, それぞれの同時接続局がチャンネルを観測 (Carrier Sense (CS)) し, 規定の信号レベルと比較することで, チャンネルがビジーかアイドルかを判定する. もし, チャンネルがビジーであると判定された場合, チャンネルを専有するフレーム伝送が終了まで自局

<sup>1</sup> 宇都宮大学大学院工学研究科情報システム科学専攻  
Department of Information Science, Faculty of Engineering, Utsunomiya University, Utsunomiya, Tochigi 321-8585, Japan

<sup>a)</sup> fujii@is.utsunomiya-u.ac.jp

の送信を控える。チャンネルがアイドルであると判定された場合、規定の分散スペース時間待機後、ランダム値で設定された待ち時間だけ待機し、その後自局の送信プロセスに移行する。ITS (Intelligent Transport Systems) 通信に目を向けると、欧米においては、WAVE (Wireless Access in Vehicle Environment) を組み込み、IEEE 802.11 標準を拡張する形で IEEE 802.11p として標準化が行われている [3]。さらに、その上位層のために IEEE 1609 による規格化が行われている。一方で、国内においては、2009 年の ITS 情報通信システム推進会議による運転支援通信用実験ガイドラインである RC-006 の策定 [4] を経て、電波産業会により 2012 年に ARIB STD-T109 として 700 MHz 帯高度道路交通システムが標準規格 [5] として策定されている。ARIB STD-T109 では、760 [MHz] を中心周波数とする 10 [MHz] 帯域の 1 チャンネルにおいて、車車間、路車間が時分割で協調してアクセス制御を行うことが定められている。この規格では、車車間通信期間と路車間通信期間を仮想 CS 技術によって時分割することで、互いの通信を阻害しないような設計になっている。車車間通信期間におけるアクセス制御方式は IEEE 802.11 の DCF に基づいて設計されており、フレーム衝突確率の削減のために CSMA/CA とランダムバックオフが採用されている。ARIB STD-T109 では周辺車両への同報通信のみを規定しており、IEEE 802.11 の DCF と異なり、受信局からの確認応答フレームに基づく再送制御と RTS/CTS (Request To Send/Clear To Send) によるフロー制御は規定されていない。また、ITS 通信でのフレーム生起モデルは、無線 LAN のようなオンデマンド型の生起モデルではなく、安全運転支援のために周期的な同報通信により自局情報を周辺車両に伝達することが想定されている。想定される ITS 通信データ量は無線 LAN のそれと比較すると相対的に小さいが、同一ネットワーク内で最大数百台規模の移動局の同報通信要求が周期的に発生することになる [6]。

CSMA/CA とランダムバックオフに基づく無線通信システムの MAC 層でのスループット性能は、ランダムバックオフ期間の重複による複数局での同時でのフレーム送信に起因するフレーム衝突に主に支配される。再送制御やフロー制御を用いる IEEE 802.11 DCF に関しては、Bianchi の解析 [7] を起点として、その詳細版 [8] と比較評価 [9]、高負荷環境での解析 [10]、可変スロットの影響 [11]、有限再送回数条件での解析 [12]、スループットと送信機会公平性のトレードオフ [13] など様々な視点での性能解析の研究が進められている。また、IEEE 802.11p/WAVE における性能解析 [14] や、IEEE 1609.4 に基づく優先制御 [15]、その拡張 [16] に関する性能解析の研究が行われているが、ARIB STD-T109 での性能解析の研究はほとんど行われていない。そこでこれまで、ARIB STD-T109 におけるシステム性能の新しい理論解析手法について提案し、高アク

セス負荷時での検証 [17]、負荷量を可変パラメータとして扱った場合の検討を行ってきた [18]。本論文ではこれらの成果を集約し、提案解析手法の総合的な有効性を評価する。ARIB STD-T109 でのアクセス制御プロトコルは基本的に IEEE 802.11 DCF に基づいており、これまで IEEE 802.11 DCF や IEEE 802.11p/WAVE において検討されてきた解析手法を応用することが可能である。本論文では、特にこれまでの従来解析では考慮されてこなかった事象を新たに導入し、より精度の高い頑強な解析手法を提案する。さらに、従来解析ではその容易性のために一定として解析されていたアクセス負荷量を確率変数として取り扱う手法を提案し、実際のフレーム生起現象を適切に扱うことができる新しい解析の枠組みを提案する。最後に、ARIB STD-T109 のアクセス制御プロトコルに基づくネットワークシミュレータを用いて計測された評価値が、提案する解析手法によって得られた結果とよく一致することを示す。

## 2. システムモデル

ARIB STD-T109 に準拠する同報通信を想定するとき、その MAC 層でのアクセス制御は CSMA/CA とランダムバックオフに従うことになる。ある時刻において送信フレーム (ARIB STD-T109 で規定される MPDU (MAC Protocol Data Unit) に相当。なお、本論文では特に断らない限り、フレームは MPDU フレームを指す) を生じた移動局は、ランダムバックオフ期間を設定し、CS 機能によりチャンネルがビジーであれば、そのまま受信プロセスを継続する。ランダムバックオフ期間は  $[0, W - 1]$  の閉区間整数での一様乱数から生起されたスロット数とスロットタイム (ARIB STD-T109 では 13 [ $\mu$ s] で規定) の積で決定される。チャンネルを専有していたフレームの伝送が終了し、CS 機能によりチャンネルがアイドルと判定されたら、分散スペース (ARIB STD-T109 では 58 [ $\mu$ s] で規定) だけ送信を待機し、ランダムバックオフ期間に移行する。ランダムバックオフはスロットタイムごとに減算され、減算途中でチャンネルビジーと判断されたら、減算を一時停止し、受信プロセスに移行する。スロットタイムごとに減算された残スロット数が 0 に達したら、フレーム送信を開始する。ランダムバックオフ減算中にチャンネルがビジーと判断された移動局では、その受信プロセスが完了しチャンネルがアイドルとなったら、再度、分散スペースだけ待機し、ランダムバックオフ期間に移行する。このとき、改めてランダムバックオフ期間を定めるのではなく、直前のランダムバックオフ期間で減算した残スロット数をそのまま持ち越し、減算を再開する。IEEE 802.11 DCF では到達確認応答フレームを用いた再送制御を具備しているため、再送要求があった場合、 $W$  を増加してフレーム衝突率の軽減を図っているが、ARIB STD-T109 では再送制御を想定していないので、 $W$  は 64 に固定されている。また、ARIB STD-T109 では、上

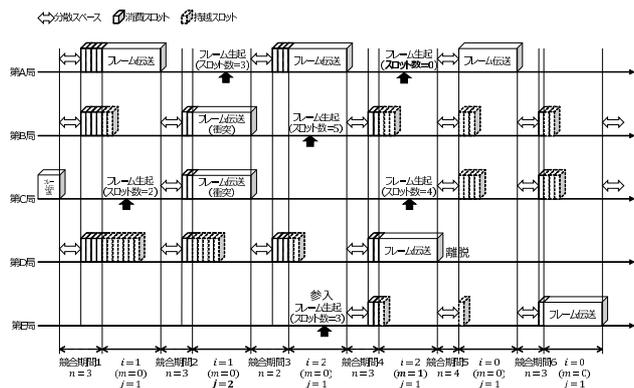


図1 CSMA/CA とランダムバックオフによるアクセス制御例  
**Fig. 1** An example of access control by CSMA/CA and random back-off.

位層で MSDU (MAC Service Data Unit) を生起しても前回のアクセス制御開始から 100 [ms] 以上経過していないと MPDU フレームを生成できない点が IEEE 802.11 DCF と異なる。

**2.1 競合期間と競合局数**

本論文では、隠れ端末問題は発生していない状況を想定し、CS 機能が正常に動作する  $N$  局の移動局が存在するものとして議論を進める。CSMA/CA に基づくアクセス制御においては、隠れ端末問題は不可避の現象である。制御局を用いる無線 LAN では RTS/CTS 機能に基づく NAV (Network Allocation Vector) によって隠れ端末問題を回避可能であるが、制御局の存在を必須としない ARIB STD-T109 はその機能を具備していない。ITS 通信においても無線 LAN 同様、建物などの遮蔽物によって隠れ端末現象が発生することが危惧されるが、本論文では基礎的な理論解析のために、隠れ端末問題が発生していない環境での解析を行い、今後、隠れ端末現象も統合した理論解析手法を検討する予定である。

また、ある時刻で  $n$  局がフレームを保持しアクセス制御開始から、分散スペースとランダムバックオフを経過し、そのうちの 1 局以上がフレーム送信を開始するまでの期間を「競合期間」と呼ぶこととする。ただし、ある競合期間中は  $n$  は変化しないものと想定する。 $n$  を「競合局数」と呼び、競合期間ごとに  $n$  は異なる可能性があるため、 $n$  は  $[1, N]$  の閉区間での整数確率変数として扱うことができる。この確率変数の確率密度を  $\pi_n$  ( $0 \leq \pi_n \leq 1$ ) と表し、2.6 節で具象化を行う。図 1 に CSMA/CA とランダムバックオフにおけるアクセス制御の例を示す。本論文では、従来解析で一定と見なされて解析されていた競合局数  $n$  が競合期間ごとに異なると想定する現実に即した新たな解析手法を導入し、それが  $\pi_n$  に従う確率変数として扱われていることに注意する。また、本論文での解析では個々の局を示す指標 (図 1 に示す A から E) は意味を持たず、競合期間ごと

の競合局数  $n$  に基づいて解析が可能であるので、その要素局がネットワークに参入・離脱した場合であっても、競合局数の競合期間ごとの変化として扱うことができる。

**2.2 残スロット数 0 局数の確率密度  $\rho_{m|n}$**

競合期間開始時点で残スロット数が 0 である局数を  $m$  とすると、 $m$  は閉区間  $[0, n]$  の整数値をとり、その排反となる残スロット数が 0 でない  $n - m$  局は 1 以上の残スロット数を有することになる。残スロット数が 0 である  $m$  局は、以前の競合期間で自局のフレーム送信が完了し、新たにフレームが生起しランダムバックオフ期間を決定するためにスロット数を乱数で決定した際にそのスロット数が 0 となった局を意味する (図 1 の競合期間 4 と 5 の間での第 A 局参照)。残スロット数が 1 以上の  $n - m$  局は、直前の競合期間で他局がフレーム送信を行ったために残スロット数の持ち越しが発生した局もしくは、新しいフレーム生起の際の乱数によって決定されたスロット数が 1 以上で設定された局を意味する。従来解析においてはこの 2 種類の局群の分類を明確に考慮されていなかったが、ランダムバックオフ期間の決定に 0 以上の整数乱数を用いる限り、この事象が発生することに注意しなければならない。残スロット数が 0 である、すなわち、新しいフレーム生起にともなう乱数値によるスロット数が 0 となった  $m$  局は、その競合期間における分散スペース終了直後にフレーム送信を開始するので CS が機能せず、 $m$  局のフレーム衝突が発生する。一方で、残スロット数が 1 以上のその他の  $n - m$  局は、残スロット数 0 の局のフレーム送信を CS 機能で検知するので、残スロット数を 1 つも消費できずにその競合期間を終えることになる (図 1 の競合期間 5 の後の第 B, C, E 局参照)。 $m$  もまた確率変数であるため、競合期間ごとにその値は異なる可能性があり、その確率密度を  $\rho_{m|n}$  と表す。 $\rho_{m|n}$  は、 $n$  の条件付きとなることに注意する。Bianchi の解析 [7] では、 $m = 0$ 、つまり、 $\rho_{m|n} = \delta_{m,0}$  を前提として解析されており、残スロット数が 0 の局の存在は考慮されていない。 $\delta_{i,j}$  はクロネッカーのデルタを示し、

$$\delta_{i,j} = \begin{cases} 1 & , (i = j) \\ 0 & , (i \neq j) \end{cases} \quad (1)$$

と定義される。なお、2.9 節で  $\rho_{m|n}$  の具象化を行う。

**2.3 フレーム送信局数の確率密度  $q_j|n$**

CSMA/CA とランダムバックオフを用いるシステムにおいてその性能を支配する主要因は、ある競合期間において複数の局が同時にフレーム送信を開始することによるフレーム衝突である (図 1 の競合期間 2 の後の第 B, C 局参照)。そこで、本節では競合局数が  $n$  である競合期間終了時に、 $j$  ( $j = 1, \dots, n$ ) 局が同時にフレーム送信を開始する事象について解析を行う。まず、 $m = 0$  (残スロット

数が0である局が存在しない)のある競合期間について考える。その競合期間開始時において  $n$  局がアクセス制御を開始し、各局には  $l = 1, \dots, n$  の番号が振られているものとする。  $a_l$  ( $l = 1, \dots, n$ ) を0か1の2値をとる確率変数とし、  $a_l = 1$  を競合期間終了時にフレーム送信を開始する事象、  $a_l = 0$  を他局がフレーム送信を開始したことをCS機能により検知したためフレーム送信を開始できない事象とし、生起確率を  $\Pr(a_l = 1) = \tau$ 、その排反事象の確率を  $\Pr(a_l = 0) = 1 - \tau$  とする。2.4節で具象化される  $\tau$  ( $0 \leq \tau \leq 1$ ) はある局がフレーム送信を開始する確率を意味しており、ランダムバックオフは各局で独立に決定されるので  $l$  には依存せず、また、  $a_l$  は  $l$  に関して独立であることに注意する。  $b = \sum_{l=1}^n a_l$  なる新たな確率変数を導入すると、  $a_l$  は0, 1の2値であるので、  $b$  は  $[0, n]$  の閉区間での整数確率変数となる。このとき、  $j$  局が同時にフレーム送信を開始し、  $n - j$  局がその送信をCS機能で検知したためにフレーム送信を開始できないという事象の生起確率は

$$\Pr(b = j) = {}_n C_j \tau^j (1 - \tau)^{n-j} \quad (2)$$

で与えられる。競合期間終了時には必ず1局以上がフレーム送信を開始するので、  $j$  局が同時にフレーム送信を開始する確率密度は

$$\tilde{q}_{j|n} = \Pr(b = j | 1 \leq j \leq n) = \frac{{}_n C_j \tau^j (1 - \tau)^{n-j}}{1 - (1 - \tau)^n} \quad (3)$$

と書くことができる。この確率密度は、  $m = 0$  を前提としている従来解析においても同様の結果が与えられている。

次に、  $m = 1, \dots, n$  のとき、残スロット数が0である  $m$  局は分散スペース終了後ただちにフレーム送信を開始するので、その競合期間終了後に  $j$  ( $= m$ ) 局がフレーム送信を開始する確率密度は2.2節で定義した  $\rho_{m|n}$  と一致する。前述のように、  $m = 0$  となる事象と  $m = 1, \dots, n$  となる事象は排反であり、確率変数  $m$  と  $b$  は互いに独立であるので、競合期間終了後に  $j$  局がフレーム送信を開始する確率密度は

$$\begin{aligned} q_{j|n} &= \Pr(m = 0, b = j | 1 \leq j \leq n) + \rho_{j|n} \\ &= \tilde{q}_{j|n} \rho_{0|n} + \rho_{j|n} \end{aligned} \quad (4)$$

と書くことができる。これは  $\rho_{m|n} = \delta_{m,0}$  を前提とする従来解析では  $q_{j|n} = \tilde{q}_{j|n}$  となるので従来解析を包含し、従来解析を提案解析の特別な場合として表現することを可能とした汎化性の高い解析結果である。

## 2.4 フレーム送信確率 $\tau$ の具象化

本節では、2.3節で定義したフレーム送信確率  $\tau$  について詳細に議論する。フレーム生起時にランダムバックオフ決定のためのスロット数は  $[0, W - 1]$  の整数一様乱数によって与えられるので、生成された整数値を状態として

状態  $w$  となる定常確率を  $\tau_w$  ( $w = 0, \dots, W - 1$ ) として解析することができる [8]。  $\tau_0$  はフレーム生起時にスロット数が0となる確率を意味し、状態0に遷移するとただちにフレーム送信を開始するので、  $\tau = \tau_0$  を満たす。残スロット数の状態  $w_1$  から  $w_2$  への推移確率を  $u_{w_1, w_2}$  とすると、  $\sum_{w_2=0}^{W-1} u_{w_1, w_2} = 1$  ( $w_1 = 0, \dots, W - 1$ ) を満たす必要がある。ある競合期間で状態0に達しフレームが送信され、新たなフレーム生起によりそのフレーム送信のためのランダムバックオフ決定のために  $[0, W - 1]$  の閉区間で一様整数乱数値が生成されるので、状態0から状態0を含むすべての状態への遷移確率は等しく  $u_{0, w_2} = 1/W$  ( $w_2 = 0, \dots, W - 1$ ) である。状態  $w_1 = 1, \dots, W - 1$  (状態0以外) では、遷移確率1で  $w_2 = w_1 - 1$  に遷移するので、  $u_{w_1, w_1-1} = 1$  ( $w_1 = 1, \dots, W - 1$ ) を満たす。この一様な有限状態マルコフ連鎖はある状態から他のいかなる状態へも到達可能であるので既約である。この有限状態空間のすべての状態は再帰点かつ正常点であるので定常分布を持ち、その定常確率密度は

$$\begin{aligned} \tau_{w_1} &= \sum_{w_2=0}^{W-1} \tau_{w_2} u_{w_2, w_1} \\ &= \frac{\tau_0}{W} + \begin{cases} \tau_{w_1+1} & , (w_1 = 0, \dots, W - 2) \\ 0 & , (w_1 = W - 1) \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

を満たす。この恒等関係は  $w_1 = W - 1, \dots, 0$  の順での再帰計算から

$$\tau_w = \frac{W - w}{W} \tau_0, (w = 0, \dots, W - 1) \quad (6)$$

と変形することができる。一方で、  $\tau_w$  は

$$1 = \sum_{w=0}^{W-1} \tau_w = \tau_0 - \frac{1}{W} \sum_{w=0}^{W-1} w = \frac{W + 1}{2} \tau_0 \quad (7)$$

を満たす必要があるので、最終的に

$$\tau = \tau_0 = \frac{2}{W + 1} \quad (8)$$

の閉形式で与えることができる。

## 2.5 平均フレーム衝突率と平均フレーム成功率

CSMA/CAとランダムバックオフによるアクセス制御系では、ランダムバックオフ期間の重複による複数局の同時でのフレーム送信開始に起因するフレーム衝突がその性能低下の主要因である。フレーム衝突が発生する事象とは、ある競合期間終了時に2局以上が同時にフレーム送信を開始する事象であり、その発生確率は

$$P_n^{(c)} = \sum_{j=2}^n q_{j|n} = 1 - q_{1|n} \quad (9)$$

と定義できる。

また、衝突なく送信されたフレームであっても、伝搬環

境の悪化により受信側での信号対雑音比が低下しフレームの受信に失敗することがある。ここでは、ある競合期間で  $n$  局が存在し、そのうち1局のみがフレーム送信し、他の  $n-1$  局がそれを受信する同報通信を想定している。そこで、 $n-1$  局の受信局のうち1局でもフレーム受信に失敗する確率を  $P^{(e)}$  とする。フレームが衝突なくただ1局のみのフレームが送信される事象と、そのフレームがすべての受信局で正しく受信できる事象は独立であるので、フレーム成功率は

$$P_n^{(s)} = (1 - P^{(e)})q_{1|n} \quad (10)$$

と定義できる。  $P_n^{(c)}$  と  $P_n^{(s)}$  はその競合期間での競合局数  $n$  に依存することに注意する。競合局数が  $n$  となる確率密度は 2.1 節で定義した  $\pi_n$  で与えられるので、平均フレーム衝突率は  $\bar{P}^{(c)} = \sum_{n=1}^N \pi_n P_n^{(c)}$ 、平均フレーム成功率は  $\bar{P}^{(s)} = \sum_{n=1}^N \pi_n P_n^{(s)}$  と定義できる。

## 2.6 競合局数の確率密度 $\pi_n$ の具象化

本節では、2.1 節で定義された競合局数の確率密度  $\pi_n$  の詳細について示す。ある競合期間で競合局数が  $n$  であったとき、その次の競合期間での競合局数が  $n+k$  ( $k=1-n, \dots, N-n$ ) となることを考える。この競合期間の間での競合局数の推移確率を  $v_{n,n+k}$  と表す。ただし、推移確率であるので、 $\sum_{k=1-n}^{N-n} v_{n,n+k} = 1$  ( $n=1, \dots, N$ ) を満たす。なお、2.8 節で  $v_{n,n+k}$  の具象化を行う。競合局数の推移は、2.4 節でのスロット数の遷移と同様に、競合局数を状態とする一様な有限状態マルコフ連鎖であり、この連鎖もまた既約である。また、すべての状態は再帰的正常であるので定常分布を持ち、定常確率密度は

$$\pi_{n_2} = \sum_{n_1=1}^N \pi_{n_1} v_{n_1, n_2}, (n_2 = 1, \dots, N) \quad (11)$$

を満たさなければならない。この恒等関係は  $v_{n_1, n_2}$  を第  $(n_1, n_2)$  要素とする  $N \times N$  行列を推移確率行列  $\mathbf{V}$ 、 $\boldsymbol{\pi} = [\pi_1, \dots, \pi_N]$  とするとき、

$$\boldsymbol{\pi}(\mathbf{V} - \mathbf{I}_N) = \mathbf{0}_N \quad (12)$$

と書き直すことができる。ここで、 $\mathbf{I}_N$  は  $N \times N$  の単位行列、 $\mathbf{0}_N = [0, \dots, 0]$  は要素数  $N$  の全零ベクトルである。今、 $\mathbf{V} = \mathbf{G}\boldsymbol{\Lambda}\mathbf{H}^T$  のように固有値分解可能であるとする。ここで、 $^T$  は転置を意味し、 $\boldsymbol{\Lambda} = \text{diag}[\lambda_1, \dots, \lambda_N]$  は  $\mathbf{V}$  の  $N$  個の固有値  $\{\lambda_n\}_{n=1, \dots, N}$  を対角成分に並べた対角行列を表す。また、固有値  $\lambda_n$  に対する右固有ベクトルを  $\underline{g}_n = [g_{n,1}, \dots, g_{n,N}]$  とするとき、 $\mathbf{G} = [\underline{g}_1^T, \dots, \underline{g}_N^T]$  を満たし、左固有ベクトルを  $\underline{h}_n = [h_{n,1}, \dots, h_{n,N}]$  とするとき、 $\mathbf{H} = [\underline{h}_1^T, \dots, \underline{h}_N^T]$  を満たす。ただし、 $\mathbf{V}$  は推移確率行列であるので  $\lambda_n \leq 1$  ( $n=1, \dots, N$ ) を満たし、この連鎖は既約であるので  $\mathbf{V}$  の固有方程式は単根で1の固有

値を有し  $\lambda_n < \lambda_1 = 1$  ( $n=2, \dots, N$ ) が成立する [19]。  $\mathbf{G}\mathbf{H}^T = \mathbf{I}_N$  が満たされることに注意すると、式 (12) は

$$(\lambda_n - 1)\boldsymbol{\pi}\underline{g}_n^T \underline{h}_n = 0, (n=1, \dots, N) \quad (13)$$

と等価である。また、 $\lambda_1 = 1$  であることに注意すると、 $\boldsymbol{\pi} = \underline{h}_1$  とすればよいことは明らかである。したがって、推移確率行列  $\mathbf{V}$  が与えられたとき、単根で1となる固有値  $\lambda_1$  に対応する左固有ベクトル  $\underline{h}_1$  が  $\boldsymbol{\pi}$  に一致する。

## 2.7 フレーム生起局数の確率密度 $p_{i|j,n}$

2.6 節で詳細に導出されたように、競合局数の確率密度ベクトル  $\boldsymbol{\pi}$  を得るためには競合局数の推移確率  $v_{n_1, n_2}$  を要素として持つ  $\mathbf{V}$  を決定しなければならない。そこで本節では、 $v_{n_1, n_2}$  を算出するために、連続する2つの競合期間の間で新たにフレームを生起する局数について検討する。ある競合期間で競合局数が  $n$  であったとき、その競合期間終了後に  $j$  局がフレームを送信し、次の競合期間開始までに  $i$  局が新たにフレームを生起し、次の競合期間開始時点で競合局数が  $n-j+i$  となることを考える。 $k=i-j$  とすると、 $k=1-n, \dots, N-n$  で制限され、この範囲で  $k$  が定められたとき、 $j = \max(1, -k), \dots, n$  で制限され、さらに、この範囲で  $j$  が定められたとき、 $i = \max(0, j+1-n) = \delta_{j,n}, \dots, j+N-n$  で制限されることに注意する。

ある競合期間が終了し、次の競合期間が開始されるまでにフレームが生成される確率を  $\mu$  とする。ARIB STD-T109 では、MSDU を生起しても前回のアクセス制御開始から 100 [msec] 以上経過していないと MPDU フレームを生成できない。そこで、この制約を確率的事象として扱い、フレームの生起を  $\mu$  をパラメータとして解析を行う。2.3 節での解析と同様に、ある競合期間において各局には  $l=1, \dots, j+N-n$  の番号が振られているものとする。 $c_l$  を0か1の2値をとる確率変数とし、 $c_l=1$  をある2つの連続する競合期間の間でフレームを生起する事象、 $c_l=0$  をその排反である生起しない事象とし、それぞれの生起確率を  $\Pr(c_l=1) = \mu$ 、 $\Pr(c_l=0) = 1-\mu$  とする。フレーム生起は各局で独立であるので、 $\mu$  ( $0 < \mu \leq 1$ ) は  $l$  に依存せず、また、 $c_l$  は  $l$  に関して独立であることに注意する。 $d = \sum_{l=1}^{j+N-n} c_l$  なる新たな確率変数を導入すると、 $c_l$  は0か1の2値であるので、 $d$  は  $[0, j+N-n]$  の閉区間での整数確率変数となる。この  $d$  は2つの連続する競合期間の間でのフレーム生起局数に相当するので、その範囲に注意すると、2.3 節での議論と同様に、 $i$  局がその間でフレームを生起する確率密度は、

$$\begin{aligned} p_{i|j,n} &= \Pr(d=i | d \geq \delta_{j,n}) \\ &= \frac{j+N-n C_i \mu^i (1-\mu)^{j+N-n-i}}{1 - \delta_{j,n} (1-\mu)^N} \end{aligned} \quad (14)$$

と書くことができる。

### 2.8 競合局数遷移確率 $v_{n,n+k}$ の具象化

2つの連続する競合期間の間で、前方の競合期間での  $n$  局の競合局のうち  $j$  局がフレーム送信を開始し、次の競合期間開始までに新たに  $i$  局がフレームを生起し、結局、後方の競合期間での競合局数が  $n+k$  ( $k=i-j$ ) に推移する推移確率は式 (4) と式 (14) を用いて、

$$v_{n,n+k} = \sum_{j=\max(1,-k)}^n p_{j+k|j,n} q_{j|n} \quad (15)$$

と書くことができる。これにより、2.6 節で導入された競合局数の遷移確率  $v_{n,n+k}$  を具象化できる。

### 2.9 残スロット数が 0 の局数の確率密度 $\rho_{m|n}$ の具象化

本節では、2.2 節で導入した残スロット数が 0 となる競合局数の確率密度  $\rho_{m|n}$  について詳細に述べる。2つの連続する競合期間の間に新たに  $i$  局がフレーム生起し、スロット数を  $[0, W-1]$  の閉区間の一様整数乱数で決定することを考える。このとき、乱数で決定されたスロット数が即座に残スロット数となるので、残スロット数が 0 となる確率は  $1/W$  であり、1 以上となる確率は  $1-1/W$  である。したがって、 $i$  局がフレーム生起する条件の下で、 $m$  ( $m=0, \dots, i$ ) 局の残スロット数が 0 となる確率密度は

$$r_{m|i} = {}_i C_m \left(\frac{1}{W}\right)^m \left(1 - \frac{1}{W}\right)^{i-m} \quad (16)$$

と書くことができる。2.7 節で示したように、フレーム生起局数  $i$  は確率密度  $p_{i|j,n}$  に従う確率変数であり、 $i$  もまた確率変数であるフレーム送信局数  $j$  と競合局数  $n$  に依存するので、残スロット数が 0 となる局数の確率密度は

$$\rho_{m|n} = \pi_n \sum_{j=1}^n q_{j|n} \sum_{i=\max(m, \delta_{j,n})}^{j+N-n} p_{i|j,n} r_{m|i} \quad (17)$$

で与えられる。図 2 に、パラメータ、確率変数、確率密度の依存関係をまとめる。

#### 2.9.1 $n = N$ の場合

本項では、いかなる競合期間でもその競合局数  $n$  がつねに最大局数  $N$  に等しくなる  $\pi_n = \delta_{n,N}$  の特別な場合を考える。このとき、式 (17) は

$$\rho_{m|n} = \begin{cases} 0 & , (n \neq N) \\ \sum_{j=1}^N q_{j|N} \sum_{i=\max(m, \delta_{j,N})}^j p_{i|j,N} r_{m|i} & , (n = N) \end{cases} \quad (18)$$

のように書くことができる。この条件の下では、ある競合期間終了後にフレーム送信した局はただちにフレーム生起し、次の競合期間開始時には競合局の 1 つとなることを意味する。これは、フレーム生起確率  $\mu$  が 1 であることと等価であり、このとき、 $i$  局がフレーム生起する確率密度は  $p_{i|j,N} = \delta_{i,j}$  となる。これは、フレーム送信した局数  $j$

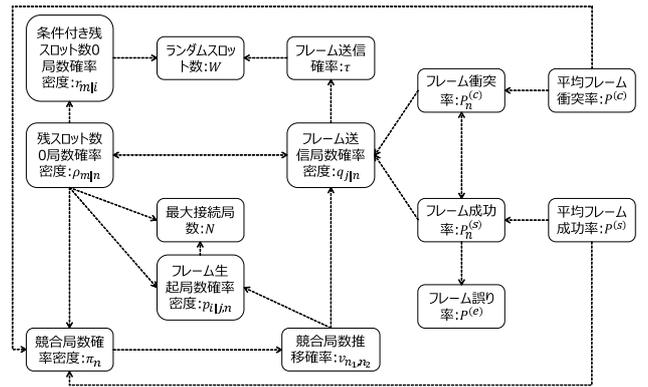


図 2 パラメータ、確率変数と確率密度の依存関係

Fig. 2 Dependency of parameters, random variables, and probability density.

と引き続きフレーム生起した局数  $i$  が等しくなる確率が 1 であることを意味している。この想定は ARIB STD-T109 における前回アクセス制御開始から 100 [ms] 以上経過していないとフレーム生起ができないという制約に反するが、この条件はアクセス負荷が最大となることと等価であり、ITS 通信のように最悪性能で設計されるべきシステムの評価では重要な条件であり、文献 [7], [10], [11] においても同様の条件で解析が行われている。この条件の下で、式 (18) は、任意の競合期間終了後に必ず 1 局以上がフレーム送信を開始する条件を考慮すると

$$\rho_{m|N} = \sum_{j=\max(1,m)}^N q_{j|N} r_{m|j} \quad (19)$$

のように簡単化できる。これは、ある競合期間終了後に  $j$  局がフレーム送信を行い、その  $j$  局が次の競合期間開始までにフレーム生起し、スロット数を乱数で決定した際に残スロット数が 0 となる局数が  $m$  となる事象の生起する確率密度を表しており、前述の想定と合致することが確認できる。式 (19) に式 (4) を代入すると、

$$\rho_{m|N} = \alpha_m \rho_{0|N} + \sum_{j=\max(1,m)}^N r_{m|j} \rho_{j|N} \quad (20)$$

と書くことができる。ここで、 $\alpha_m = \sum_{j=\max(1,m)}^N r_{m|j} \tilde{q}_{j|N}$  とした。さらに、 $m=1, \dots, N$  において、

$$\beta_m = \frac{\alpha_m + \sum_{j=m+1}^N r_{m|j} \beta_j}{1 - r_{m|m}} \quad (21)$$

とすると、

$$\rho_{m|N} = \beta_m \rho_{0|N} \quad (22)$$

と書き直すことができる。 $\beta_m$  は  $m=N, \dots, 1$  の順で再帰計算可能であり、 $\rho_{m|N}$  は

$$1 = \sum_{m=0}^N \rho_{m|N} = \rho_{0|N} + \sum_{m=1}^N \beta_m \rho_{0|N} \quad (23)$$

を満たす必要があるので、 $\rho_{0|N}$  は

$$\rho_{0|N} = \frac{1}{1 + \sum_{m=1}^M \beta_m} \quad (24)$$

として定まる. 式 (24) を式 (22) に代入することで、 $\rho_{m|N}$  を具象化できる.

### 3. 数値計算例

CSMA/CA とランダムバックオフに基づくアクセス制御系では、2.5 節で定義した平均フレーム衝突率  $\bar{P}^{(c)}$  と平均フレーム成功率  $\bar{P}^{(s)}$  がシステム性能評価の重要な指標となる. そこで、本章では、ARIB STD-T109 のアクセス制御プロトコルに準拠するネットワークシミュレータを用いて計測されたこれらの指標と比較することで、提案する理論解析手法の有効性を評価する.

最初にシステムの最悪性能を評価するために、2.9.1 項で示したアクセス負荷最大の場合として、競合局数  $n$  が競合期間に依存せずつねに最大局数  $N$  である場合について検証を行う. この場合、 $\pi_n = \delta_{n,N}$  であるので、平均フレーム衝突率と平均フレーム成功率はそれぞれ  $\bar{P}^{(c)} = 1 - q_{1|N}$ 、 $\bar{P}^{(s)} = (1 - P^{(e)})q_{1|N}$  となる. これらは任意の競合期間終了後にただ 1 局のみがフレーム送信を開始する確率密度  $q_{1|N}$  にのみ依存することに注意する. まず、式 (4) で与えられる提案解析手法による  $q_{j|N}$  と、式 (3) で与えられる従来解析手法による  $\tilde{q}_{j|N}$  の比較から検証を始める. ARIB STD-T109 での規定どおり  $W = 64$  としたときのフレーム送信局数  $j$  の変化に対する  $q_{j|N}$  と  $\tilde{q}_{j|N}$  を図 3 に示す. 最大局数  $N$  は数百局が想定されているため [6]、ここでは様々な  $N$  に対して評価を行う. 図中の実線は  $q_{j|N}$ 、破線

は  $\tilde{q}_{j|N}$  であり、プロットはネットワークシミュレータにより競合期間ごとに計測されたフレーム送信局数  $j$  の頻度分布に相当する. ただし、 $q_{j|N}$  と  $\tilde{q}_{j|N}$  は  $j$  に関する離散密度関数であるが、判別を容易にするために線分で結んで提示してある.  $N$  が小さい ( $N = 50$ ) とき、 $q_{j|N}$  と  $\tilde{q}_{j|N}$  とシミュレーション結果はほとんど一致している. しかしながら、 $N$  が大きくなるにつれて、特に  $j = 1$  において、 $\tilde{q}_{j|N}$  とシミュレーション結果には大きな隔たりが生じる. 前述の条件では、 $\bar{P}^{(c)}$  と  $\bar{P}^{(s)}$  は  $q_{1|N}$  によって決定されるので、従来解析手法での  $\tilde{q}_{1|N}$  によるこの見積りの不整合はシステム性能評価上大きな問題がある. これに対して、提案解析手法による  $q_{j|N}$  は  $N$  と  $j$  によらずシミュレーション結果とよく一致している. これは残スロット数が 0 となる局の考慮の差である.

競合局数  $N$  に対する 2.5 節で定義した平均フレーム衝突率  $\bar{P}^{(c)}$  特性を図 4 に、同じく平均フレーム成功率  $\bar{P}^{(s)}$  を図 5 に示す. ただし、ここではフレーム受信失敗確率を  $P^{(e)} = 0$  としているため、 $\bar{P}^{(c)}$  と  $\bar{P}^{(s)}$  は互いに排反な事象の確率であることに注意する. ARIB STD-T109 では  $W = 64$  で規定されているが、参考のために、様々な  $W$  における評価も同時に示す. 図 3 での結果から、フレーム送信局数確率密度の見積りとして、従来解析での  $\tilde{q}_{1|N}$  は  $N$  が大きい場合、シミュレーション結果に対して不整合が生じるが、提案解析での  $q_{1|N}$  はそれとよく一致している. 図 4 と図 5 において、破線で示す従来解析特性は  $\tilde{q}_{1|N}$  によって見積もられ、競合局数  $N$  が小さい場合はシミュレーション結果と同程度の結果が得られるが、 $N$  が大きくなるにつれてその差が大きくなる. これは、 $W$  が小

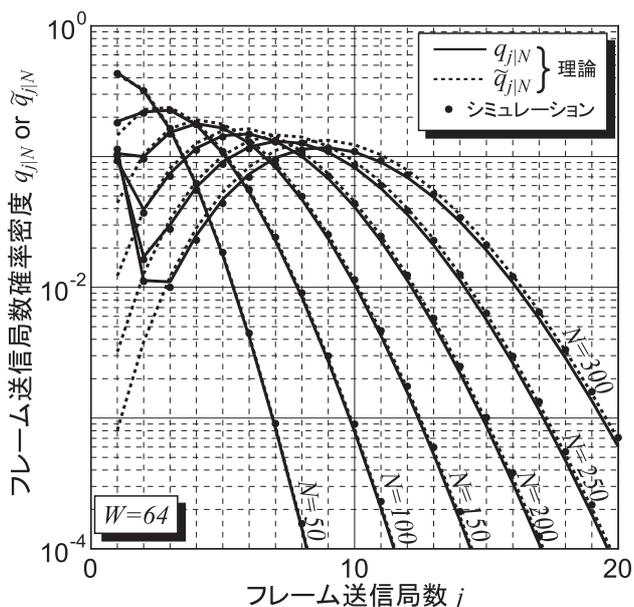


図 3 フレーム送信局数の確率密度

Fig. 3 Probability density function of the number of frame transmission station.

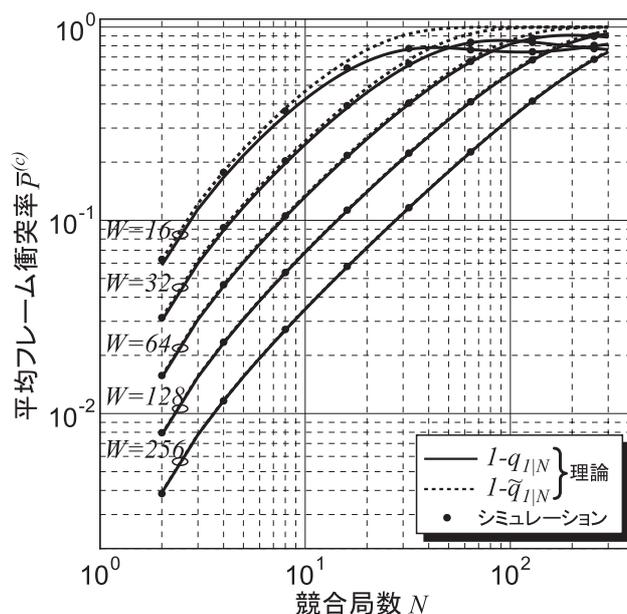


図 4  $n = N$  での競合局数  $N$  に対する平均フレーム衝突率  $\bar{P}^{(c)}$

Fig. 4 Average frame collision rate  $\bar{P}^{(c)}$  vs. number of station  $N$  in case that  $n = N$ .

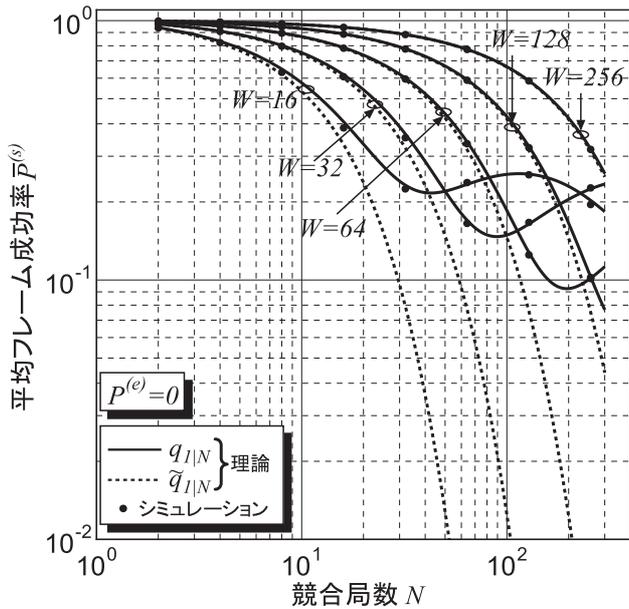


図5  $n = N$  での競合局数  $N$  に対する平均フレーム成功率  $\bar{P}^{(s)}$   
 Fig. 5 Average frame success rate  $\bar{P}^{(e)}$  vs. number of station  $N$  in case that  $n = N$ .

い場合により顕著である。これに対して、 $q_{1|N}$  によって見積られる提案解析特性は、 $N$  と  $W$  に依存せず、シミュレーション結果とよく一致する結果となる。したがって、従来解析はおよそ  $N < W$  の範囲であれば近似的に適用可能であるが、パラメータの範囲に依存性のない提案解析の方がより頑強であることがいえる。 $N < W$  の範囲においては、従来解析特性でも近似的には有効であるが、ARIB STD-T109 では  $W = 64$  で規定されており、文献 [6] で想定されるような数百台規模のネットワークにおける性能解析のためには従来解析手法では対応不可能である。さらに、提案解析手法は、従来解析手法をその特殊な場合として包含しているため汎用であり、従来解析において考慮されていなかったフレーム生起時の残スロット数が 0 となる局の存在が、大規模なネットワークにおいてはその影響が顕著に現れるという新たな知見に基づき、アクセスプロトコルの詳細な解析やその改良に資することが可能であると考えられる。また、特徴的な傾向として、 $N$  が大きくなるにつれてどちらの特性も振動現象が発生している。式 (4) から  $q_{1|N} = \tilde{q}_{1|N}\rho_{0|N} + \rho_{1|N}$  であるので、 $q_{1|N}$  を構成する  $\tilde{q}_{1|N}$ ,  $\rho_{0|N}$ ,  $\rho_{1|N}$  の 3 要素について次に詳細に解析を行う。

図 6 に競合局数  $N$  に対する  $\tilde{q}_{1|N}$ ,  $\rho_{0|N}$ ,  $\rho_{1|N}$  のそれぞれの特性を示す。それぞれの特性はシミュレータによって観測された結果とよく一致している。 $\tilde{q}_{1|N}$  はただ 1 局のみがフレーム送信する確率密度であるので、 $N$  の増加とともに減少するのは明らかである。 $\rho_{0|N}$  は  $N$  の増加に対して単調減少関数であるが、 $\rho_{1|N}$  は  $W = 16$  以外は、この範囲の  $N$  において増加関数である。 $q_{1|N}$  が  $N$  の増加に対して単調減少関数である  $\tilde{q}_{1|N}\rho_{0|N}$  と増加関数である  $\rho_{1|N}$  の和であることに注意すると、 $N$  が小さいときは、

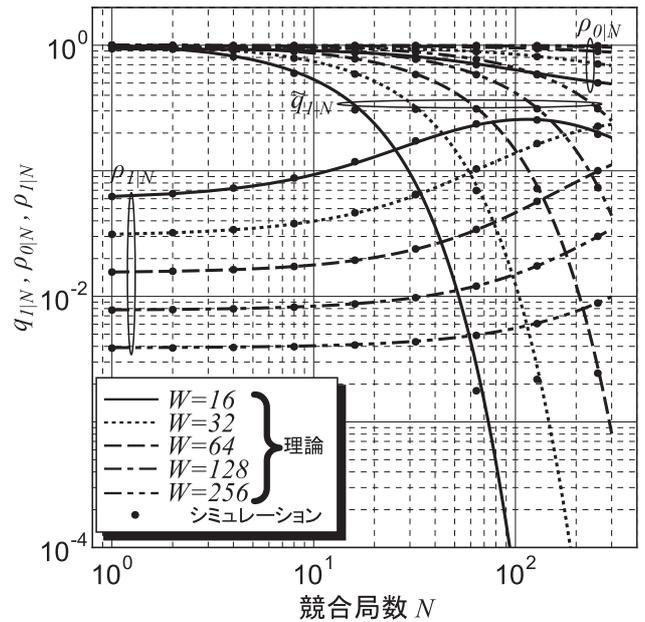


図6  $\tilde{q}_{1|N}$ ,  $\rho_{0|N}$ ,  $\rho_{1|N}$  の特性  
 Fig. 6 Characteristics of  $\tilde{q}_{1|N}$ ,  $\rho_{0|N}$ , and  $\rho_{1|N}$ .

$\tilde{q}_{1|N}\rho_{0|N} \gg \rho_{1|N}$  であつ  $\rho_{0|N} \approx 1$  であるので、 $q_{1|N}$  は  $\tilde{q}_{1|N}$  によって支配され、 $N$  の増加とともに  $\tilde{q}_{1|N}$  の特徴から  $q_{1|N}$  もまた減少に転じる。そして、 $\tilde{q}_{1|N}\rho_{0|N} = \rho_{1|N}$  となる  $N$  において極小値をとり、それより大きな  $N$  では  $\rho_{1|N}$  が  $q_{1|N}$  に対して支配的になり、 $\rho_{1|N}$  が増加関数であるので  $q_{1|N}$  もまた増加に転じる。たとえば、 $\bar{P}^{(s)}$  特性において、競合局数  $N$  が増加すれば、伝送に成功するフレーム数が減少し、 $\bar{P}^{(s)} \rightarrow 0$  へ収束する従来解析が直感的には正当と考えられるが、 $N$  の増加によりフレーム生起時のランダムバックオフが 0 となる局が発生する確率も上昇するため、このような局が 1 局だけとなる競合期間においては、フレーム伝送が成功することになる。 $N$  の増加にともなうこれらの事象発生の均衡が振動減少の原因である。

ここから、2.9.1 項で示した  $\mu = 1$  と同義である  $n = N$  の特別な場合でなく、フレーム生起がその確率  $\mu$  によって決定される場合について議論を進める。このとき、残スロット数が 0 の局数が  $m$  となる確率密度  $\rho_{m|n}$  と競合局数の確率密度  $\pi_n$  が  $q_{j|n}$  に依存するため、閉形式での解析結果を得ることができない。そこで、式 (4) で与えられる  $q_{j|n}$  を式 (3) で与えられる  $\tilde{q}_{j|n}$  で近似して解析を行う。この従来手法に基づく解析では図 4 と図 5 に関する議論で明らかとなったように大きな  $N$  では解析誤差が大きくなるのが懸念されるが、 $q_{j|n}$  の  $\rho_{j|n}$  への依存性を回避するため、閉形式での解析結果を得ることが可能となる。この解析手順に基づき、図 7 にフレーム生起確率  $\mu$  に対する平均フレーム衝突率  $\bar{P}^{(c)}$  を、図 8 にフレーム生起確率  $\mu$  に対する平均フレーム成功率  $\bar{P}^{(s)}$  をそれぞれ示す。 $\mu = 1$  のときは、フレーム送信を完了した局がただちにフレームを生起し、次の競合期間に参入するので、 $n = N$  の場合と

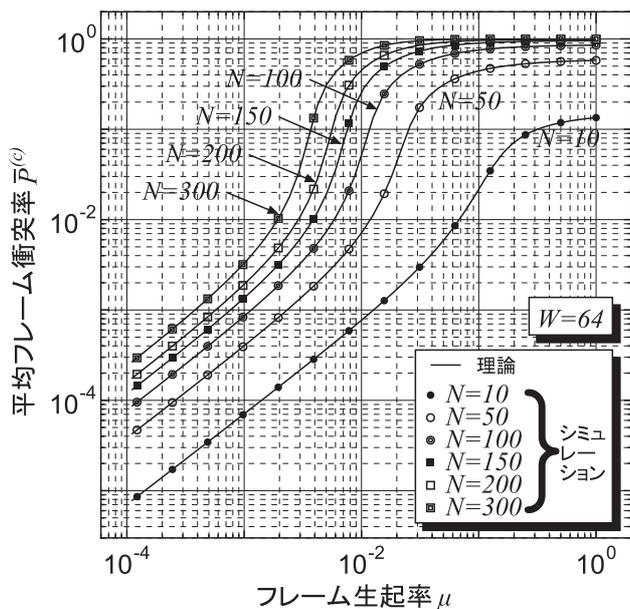


図 7 フレーム生起率  $\mu$  に対する平均フレーム衝突率  $\bar{P}^{(c)}$   
 Fig. 7 Average frame collision rate  $\bar{P}^{(c)}$  vs. frame occurrence rate  $\mu$ .

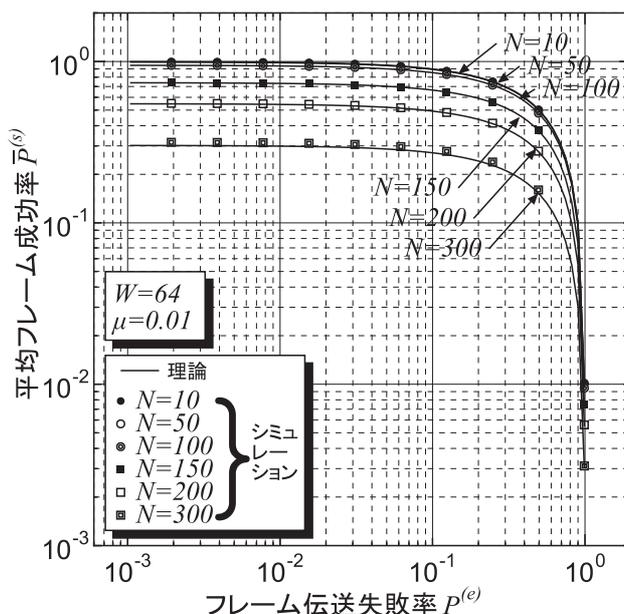


図 9 フレーム伝送失敗率  $P^{(e)}$  に対する平均フレーム成功率  $\bar{P}^{(s)}$   
 Fig. 9 Average frame success rate  $\bar{P}^{(s)}$  vs. frame error rate  $P^{(e)}$ .

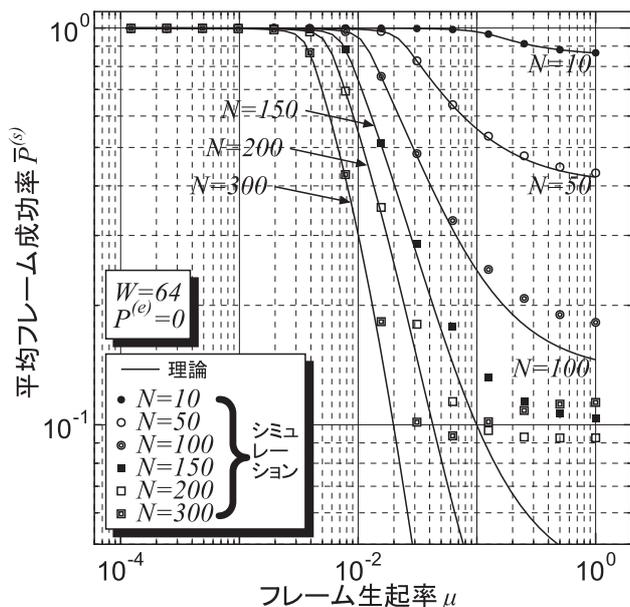


図 8 フレーム生起率  $\mu$  に対する平均フレーム成功率  $\bar{P}^{(s)}$   
 Fig. 8 Average frame success rate  $\bar{P}^{(s)}$  vs. frame occurrence rate  $\mu$ .

等価である。逆に、 $\mu$  が小さくなるにつれて、競合局数は減少することになる。図 7 の平均フレーム衝突率特性は、 $N$  と  $\mu$  のどちらかが大きくなると、解析の近似の影響で誤差が大きくなるが、図 4 の結果を参照すると、その差はわずかである。一方で、図 8 の平均フレーム成功率特性は  $N$  と  $\mu$  が大きくなると、解析特性とシミュレーション結果の特性に大きな解析誤差を生じることとなる。したがって、提案手法での解析でも従来解析での  $\tilde{q}_{j|n}$  をその要素に含んでしまっているため、 $N$  と  $\mu$  が大きい環境ではこの

近似手法は適用できないが、 $\mu < 0.01$  程度（100 競合期間あたりに 1 回のフレーム生起相当）であれば、 $N = 300$  程度までは提案手法は有効である。一方で、 $\mu$  が大きくなるにつれて、フレーム生起してアクセス制御を開始する競合局数は増加することになる。フレーム生起する局数が多くなると、そのアクセス制御開始のためのランダムスロット決定時にその一様乱数値が 0 となる局数も相対的に多くなる。ある競合期間において、その前の競合期間でフレーム送信権を得られなかった局の残スロット数は必ず 1 以上なので、フレーム生起によりランダムスロット値が 0 となった局が分散スペース後にただちにフレーム送信を開始し、残スロット数が 1 以上の持ち越しフレームを保持している局はさらに、次の競合期間にフレーム送信を持ち越すことになる（図 1 の競合期間 5 参照）。このフレーム生起時のランダムスロット値が  $1/W$  の確率で 0 となった局は、同時にランダムスロット値が 0 となった局間での衝突のみの低いフレーム衝突率でフレーム伝送が成功するので、 $N$  や  $\mu$  が大きい場合でも平均フレーム成功率はある程度の値を維持する結果となる。ARIB STD-T109 では 1 度アクセス制御を開始するとタイムアウトする機構を持たないため、初期ランダムスロット値が 0 となった局のフレームが優先的に送信されてしまう。しかしながら、この現象はフレーム送信機会の公平性の観点から好ましくないと考えられる。

次に、 $\mu = 0.01$  のときのフレーム伝送失敗率  $P^{(e)}$  に対する平均フレーム成功率  $\bar{P}^{(s)}$  特性を図 9 に示す。この結果から、 $P^{(e)} < 0.1$  であれば、 $P^{(e)}$  は  $\bar{P}^{(s)}$  にほとんど影響しないことが分かる。つまり、 $P^{(e)}$  をより小さくなるよう

に物理層を設計しても平均フレーム成功率  $\bar{P}^{(s)}$  の改善は見込めず、これを改善するためにはアクセス制御方式を改良する必要がある。

#### 4. まとめと今後の課題

本論文では、ARIB STD-T109 に基づく ITS 通信システムの MAC 層における平均フレーム衝突率と平均フレーム成功率を解析的に導出する手法を提案し、その有効性を検証した。従来の解析手法で考慮されていなかったフレーム生起時に残スロット数が 0 となる局の事象を正確に表現する解析手法を提案し、高フレーム生起確率の環境でシミュレーション結果と比較することで、提案解析手法の頑強性を示した。また、従来解析手法の近似の導入の下で、フレーム生起事象を確率的に取り扱うことで、実用的な環境での解析手法の有効性を示した。

今後の課題として、提案解析に含まれる残スロット数が 0 となる局数の確率密度の解析における近似を行わずに、繰返し計算によって近似を含まない形式でより頑強な解析手法を検討する予定である。また、本論文では考慮されていない隠れ端末問題を統合した理論解析手法について取り組むことが必要である。

**謝辞** 本研究の一部は公益財団法人 KDDI 財団による助成によるものである。

#### 参考文献

[1] IEEE Computer Society: IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications (2007).

[2] Li, Y.: An Overview of the DSCR/WAVE Technology, Quality, Reliability, *Security and Robustness in Heterogeneous Networks*, pp.544–558 (2010).

[3] 小山 敏: ITS 情報通信システムの国際標準化, 電子情報通信学会誌, Vol.95, No.8, pp.684–689 (2012).

[4] ITS 情報通信システム推進会議: 700MHz 帯を用いた運転支援通信システムの実験用ガイドライン (2009).

[5] 電波産業会: 700MHz 帯高度交通システム—ARIB STD-T109 1.2 版 (2013).

[6] 堀松哲夫, 佐々木邦彦, 浜口雅春: マシンツーマシン通信を代表する ITS の現状と展望, 電子情報通信学会通信ソサイエティマガジン, Vol.5, No.3, pp.220–227 (2011).

[7] Bianchi, G.: IEEE 802.11 – Saturation Throughput Analysis, *IEEE Commun. Lett.*, Vol.2, No.12, pp.318–320 (1998).

[8] Bianchi, G.: Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function, *IEEE J. Select. Areas Commun.*, Vol.18, No.3, pp.535–547 (2000).

[9] Bianchi, G. and Tinnirello, I.: Remarks on IEEE802.11 DCF Performance Analysis, *IEEE Commun., Lett.*, Vol.9, No.8, pp.765–767 (2005).

[10] Ziouva, E. and Antonakopoulos, T.: CSMA/CA performance under high traffic conditions: throughput and delay analysis, *Computer Communications*, Vol.25, pp.313–321 (2002).

[11] Vitsas, V.: Performance Analysis of the Advanced Infrared (AIr) CSMA/CA MAC Protocol for Wireless LANs, *Wireless Networks*, Vol.9, pp.495–507 (2003).

[12] Chatzimisios, P., Boucouvalas, A.C. and Vitsas, V.: IEEE 802.11 Packet Delay – A Finite Retry Limit Analysis, *IEEE GLOBECOM 2003*, pp.950–954 (2003).

[13] Wang, X. and Kar, K.: Throughput Modeling and Fairness Issues in CSMA/CA based on Ad-Hoc Networks, *IEEE INFOCOM 2005*, pp.23–34 (2005).

[14] Campolo, C., Vinel, A., Molinaro, A. and Koucheryavy, Y.: Modeling Broadcasting in IEEE 802.11p/WAVE Vehicular Networks, *IEEE Trans. Commun. Lett.*, Vol.12, No.2, pp.199–201 (2011).

[15] Campolo, C., Molinaro, A., Vinel, A. and Zhang, Y.: Modeling Prioritized Broadcasting in Multichannel Vehicular Networks, *IEEE Trans. Vehicular Tech.*, Vol.61, No.2, pp.687–701 (2012).

[16] Jeong, D.: Performance Analysis of Distributed Broadcasting in IEEE 802.11p MAC Protocol, *IEICE Trans. Commun.*, Vol.E98-B, No.6, pp.1086–1094 (2015).

[17] 藤井雅弘, 五十嵐悠理, 横森崇宏, 羽多野裕之, 伊藤 篤, 渡辺 裕: ITS 通信システムにおける CSMA/CA の高負荷時での性能解析, 第 13 回 ITS シンポジウム 2015, 1-1B-03 (2015).

[18] 藤井雅弘, 羽多野裕之, 伊藤 篤, 渡辺 裕: ITS 通信システムのためのメディアアクセス制御性能解析に関する一検討, 電子情報通信学会高度交通システム研究会技術報告, Vol.IEICE-115, No.365, pp.13–18 (2015).

[19] 北川敏男: マルコフ過程, 共立出版 (1967).

#### 付 録

##### A.1 式 (22) の導出

式 (20) は,  $m = 0$  のとき,

$$\rho_{0|N} = \alpha_0 \rho_{0|N} + \sum_{j=1}^N r_{0|j} \rho_{j|N} \quad (\text{A.1})$$

と書くことができる。また,  $m = 1, \dots, N$  のときは,  $\max(1, m) = m$  であることに注意すると,

$$\rho_{m|N} = \alpha_m \rho_{0|N} + r_{m|m} \rho_{m|N} + \sum_{j=m+1}^N r_{m|j} \rho_{j|N} \quad (\text{A.2})$$

と書くことができる。さらに, 式 (A.2) の左辺と右辺の第 2 項の  $\rho_{m|N}$  は共通なので,

$$\rho_{m|N} = \frac{\alpha_m \rho_{0|N} + \sum_{j=m+1}^N r_{m|j} \rho_{j|N}}{1 - r_{m|m}} \quad (\text{A.3})$$

のように書き直すことができる。次に, 式 (21) を用いて,  $m = N, \dots, 1$  の順で式 (A.3) の  $\rho_{m|N}$  を書き下すと,

$$\begin{aligned} \rho_{N|N} &= \frac{\alpha_N \rho_{0|N}}{1 - r_{N|N}} = \beta_N \rho_{0|N} \\ \rho_{N-1|N} &= \frac{\alpha_{N-1} \rho_{0|N} + r_{N-1|N} \beta_N \rho_{0|N}}{1 - r_{N-1|N-1}} \\ &= \frac{\alpha_{N-1} + r_{N-1|N} \beta_N}{1 - r_{N-1|N-1}} \rho_{0|N} = \beta_{N-1} \rho_{0|N} \\ \rho_{N-2|N} &= \frac{\alpha_{N-2} \rho_{0|N} + \sum_{j=N-1}^N r_{N-2|j} \rho_{j|N}}{1 - r_{N-2|N-2}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\alpha_{N-2} + \sum_{j=N-1}^N r_{N-2|j} \beta_j}{1 - r_{N-2|N-2}} \rho_{0|N} \\
 &= \beta_{N-2} \rho_{0|N} \\
 &\vdots \\
 \rho_{m|N} &= \frac{\alpha_m \rho_{0|N} + \sum_{j=m+1}^N r_{m|j} \rho_{j|N}}{1 - r_{m|m}} \\
 &= \frac{\alpha_m + \sum_{j=m+1}^N r_{m|j} \beta_j}{1 - r_{m|m}} \rho_{0|N} = \beta_m \rho_{0|N} \\
 &\vdots \\
 \rho_{1|N} &= \frac{\alpha_1 \rho_{0|N} + \sum_{j=2}^N r_{1|j} \rho_{j|N}}{1 - r_{1|1}} = \beta_1 \rho_{0|N}
 \end{aligned}$$

のように再帰的に記述することができ、式 (22) として一般化することができる。



藤井 雅弘 (正会員)

1975 年生。1998 年東京理科大学基礎工学部電子応用工学科卒業。2000 年同大学大学院修士課程修了。2003 年同大学院博士後期課程修了。博士（工学）。2003 年同大学基礎工学部助手。

2006 年宇都宮大学工学部助手。2010

年宇都宮大学大学院工学研究科准教授，現在に至る。ITS，無線通信システムとその応用の研究に従事。電子情報通信学会 ITS 研究専門委員会副委員長，東京支部運営委員，基礎・境界ソサイエティ英文論文誌編集委員，IEEE ITS Society Tokyo Chapter Secretary 等。2002 年 IEEE VTS Japan Researcher's Encouragement Award。2005 年情報理論とその応用学会研究奨励賞。2009 年電子情報通信学会基礎・境界ソサイエティ編集活動感謝状。2012 年同学会基礎・境界ソサイエティ貢献賞。2014 年同学会基礎・境界ソサイエティ貢献賞。2014 年同学会通信ソサイエティ活動功労賞。電子情報通信学会シニア会員。IEEE 会員。