

## CSMA/CD ネットワークにおけるコネクション型 LLC プロトコルの解析

正 員 鈴木 隆宏<sup>†</sup>      正 員 田坂 修二<sup>†</sup>

An Analysis of a Connection-Oriented LLC Protocol in CSMA/CD Networks  
Takahiro SUZUKI<sup>†</sup>, and Shuji TASAKA<sup>†</sup>, Members

<sup>†</sup> 名古屋工業大学工学部電気情報工学科, 名古屋市

Faculty of Engineering, Nagoya Institute of Technology, Nagoya-shi, 466  
Japan

あらまし slotted nonpersistent CSMA/CD ネットワークを対象として, 優先 ACK 方式 (I) を用いた CO-LLC プロトコルの性能を評価する. このシステムの近似モデルを構成し, 平衡点解析の手法により解析を行う.

### 1. まえがき

CSMA/CD ローカルエリアネットワークにおける論理リンク制御 (LLC) プロトコルには, コネクション型 (CO) とコネクションレス型 (CL) とがある. これら二つの LLC プロトコルの性能比較は, 既に, 筆者らが解析的に行っている<sup>(1)</sup>. 文献(1)では, MAC プロトコルとして, CL-LLC プロトコルにおいては, 各種 ACK の送信にのみ優先権を付与した優先 ACK 方式 (I) (以下, P-ACK I)<sup>(2)</sup>を用いている. しかし, CO-LLC プロトコルにおいては, 各種 ACK の送信の他, 1 回目のデータフレームの送信およびコネクション終結フレームの送信にも優先権を付与した方式を用いている (ここではこの方式を P-FRAME 方式と呼ぶ). このため, 文献(1)では, CO および CL-LLC プロトコルの性能比較を同じ条件で行っているとは言えない. すなわち, P-FRAME 方式の場合, 次に送信すべきフレームが, 各種 ACK, 1 回目に送信するデータフレーム, コネクション終結フレームのいずれかであるか否かを, MAC 副層において完全に判別できなければならないという強い制約がある. これに対し, P-ACK I 方式は, P-FRAME 方式よりも制御が簡単であり, 実現が容易である. そこで, 本論文では, MAC プロトコルとして, P-ACK I 方式による slotted nonpersistent CSMA/CD を用いた場合の, CO-LLC プロトコルの解析を行う. 解析には, 平衡点解析 (EPA)<sup>(3)</sup>の手法を用いる.

## 2. CO-LLC プロトコルの解析

### 2.1 MAC および LLC プロトコル

CO-LLC プロトコルの場合, 一つのメッセージを発

生した端末は, まず, 相手端末に向けて, コネクション確立 (CE) フレームを送信する. 受信側は, CE フレームを受信すると, CE フレームに対する ACK (CE-ACK) を返送する. 送信側が CE-ACK を正しく受信した時点で, コネクションが確立される. 送信側は, 次にデータフレームの送信に取り掛かる. データフレーム送信の際, サイズ  $W$  フレームのウィンドウフロー制御が行われる. 受信側は, データフレームを受信すると, これに対して ACK (D-ACK) を返送する. 送信側は, 最後に送信したデータフレームに対する D-ACK を受信すると, コネクション終結 (CT) フレームの送信を行う. そして, それに対する ACK (CT-ACK) を送信側が受信した時点でコネクションの終結が行われる.

本論文の MAC プロトコルによるフレーム送信規則は, 次のようになる.

- (R1) アイドル期間中にチャネルを検知した端末は, いかなるフレームでも送信できる.
- (R2) 何らかの伝送期間終了直後にチャネルを (アイドル) と検知した端末は, 各種 ACK (すなわち, CE-ACK, D-ACK, CT-ACK) の送信のみを許可する. 他のフレームを送信しようとする端末は, ビジーと検知したごとく動作する.

文献(1)で対象としている P-FRAME 方式の場合には, 何らかの伝送期間終了直後にチャネルを (アイドル) と検知した端末は, 各種 ACK, 1 回目に送信すべきデータフレーム, コネクション終結フレームの送信のみが許可される. 従って, P-FRAME 方式においては, CE フレームと 2 回目以降のデータフレームの送信にのみ衝突の可能性がある. 一方, P-ACK I 方式の場合, P-FRAME 方式における衝突の可能性のほか, 1 回目のデータフレームおよび CT フレームの送信にも衝突の可能性がある.

### 2.2 モデル化のための仮定

システムのモデル化のために次の仮定を置く.

- (1) システムは  $M$  個の端末からなる.
- (2) 一つの端末のメッセージ発生間隔は, 平均  $1/\sigma$  スロットの指数分布に従う.
- (3) 一つのメッセージは, 一つの端末に向けられる.
- (4) 一つのメッセージは, 1 個以上のデータフレームからなり, その数は, 平均  $h=1/\gamma$  の幾何分布をなしている.
- (5) 一つのメッセージを発生した端末は, コネク

ションが終結するまで、次のメッセージを発生しない。

(6) すべてのフレームは固定長であるとする。CE フレームは  $L$  スロット長、CE-ACK と CT-ACK は  $R$  スロット長、データフレームは  $H$  スロット長、D-ACK は  $J$  スロット長、CT フレームは  $N$  スロット長とする。

(7) すべての端末でのウィンドウサイズを  $W$  とする。

(8) 受信したフレームの処理時間および ACK の作成時間は各種フレームの伝送時間に含めて考える。

(9) フレームのスケジューリングレートは、平均  $1/\nu$  の指数分布に従う。

(10) フレームの衝突が生じた場合、送信開始から  $K$  スロット後にすべての送信が中止される。

### 2.3 モデル

前節までに示したシステムの近似モデル図を図 1 に示す。このモデル図の作成に当り、更に、ACK 仮説による近似およびメッセージ長の近似を用いている<sup>(1)</sup>。

・ACK 仮説による近似 各端末が、他端末宛に返送する何らかの ACK の送信活動に伴う状態を無視する。一つの端末がどの端末とコネクションの確立、終結を行うかはモデルには反映しない。

・メッセージ長の近似 送信すべきデータフレームを

持っているにもかかわらずウィンドウが閉じた端末が D-ACK を受信したとき、次に送信しようとするデータフレーム数は、平均  $h=1/\gamma$  の幾何分布に従って新たに決定される。

図 1 のモデルの各モードの意味を次に示す。但し、添字「0」のモードはチャネル伝搬遅延の影響を表す。

TH および TR モードは、送信すべきメッセージを持っていない状態 (T モード) と CE フレーム送信のためにスケジューリングを行っている状態 (B モード) とを変形したものである<sup>(3)</sup>。T モードは、TH モードと TR モードに分割され、B モードは TR モードの一部になっている。TD および TT モードは、各々、データフレームおよび CT フレーム送信のためにスケジューリングを行っている状態を表す。CE<sub>h</sub> モード ( $0 \leq h \leq L$ ) は、CE フレームの成功送信を表す。S<sub>k,hh</sub> ~ S<sub>k,h0</sub> モード ( $1 \leq k \leq W$ ) は、 $k$  個のデータフレームの連続送信の成功を表しており、この送信によって、手持ちのデータフレームの送信が終了した場合に対応する。S<sub>c,v</sub> モード ( $0 \leq v \leq WH$ ) は、 $W$  個のデータフレームの連続送信の成功を表しており、送信端末には、まだ送信すべきデータフレームが残っている場合に対応する。CT<sub>n</sub> モード ( $0 \leq n \leq N$ ) は、CT フレームの成功送信を表す。AE<sub>r</sub>, AD<sub>u</sub>, AC<sub>u</sub>, および AT<sub>r</sub> モード (0

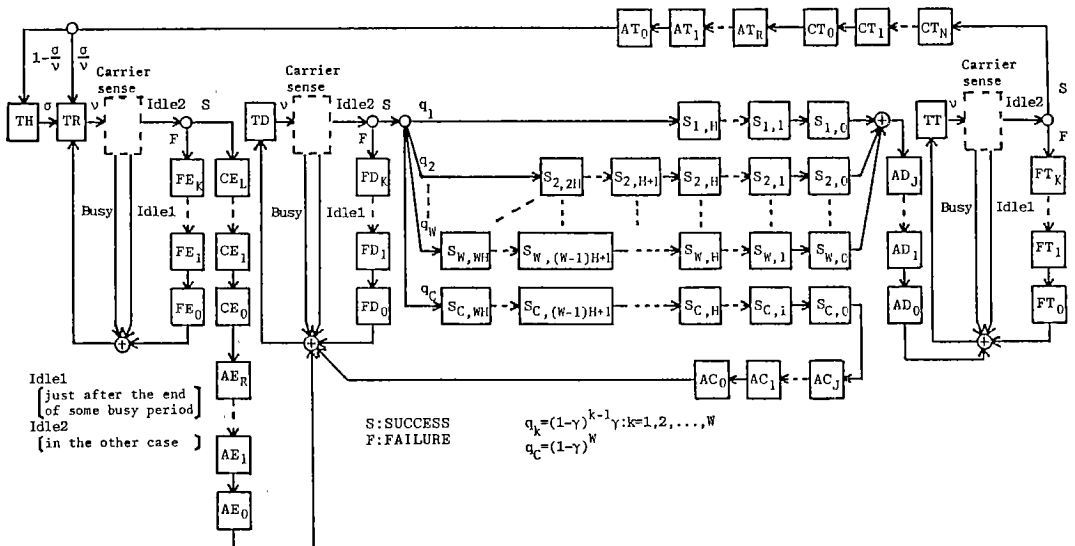


図 1 P-ACK I 方式による CO-LLC プロトコルを用いた slotted nonpersistent CSMA/CD ネットワークの近似モデル

Fig. 1 An approximate model of a slotted nonpersistent CSMA/CD network under a CO-LLC protocol with the P-ACK I scheme.

$\leq r \leq R, 0 \leq u \leq J$ ) は, ACK 仮説に基づいた相手端末による D-ACK の送信を表す.  $FE_z, FD_z$  および  $FT_z$  モード ( $0 \leq z \leq K$ ) は, フレームの衝突を表す.

また, 図 1 において, 確率  $q_k (1 \leq k \leq W)$ ,  $q_c$  は仮定 (4) とメッセージ長の近似によって, 次式で与えられる.

$$\begin{aligned} q_k &= (1-\gamma)^{k-1} \gamma : 1 \leq k \leq W \\ q_c &= (1-\gamma)^W \end{aligned} \quad (1)$$

## 2.4 解 析

図 1 のモデルにおいて,  $TR$  モードにある端末数を  $t_r$  とする. これを,  $TR \rightarrow t_r$  と表す. 他のモードについても同様に,  $CE_h (0 \leq h \leq L) \rightarrow c_{eh}$ ,  $AE_r (0 \leq r \leq R) \rightarrow a_{er}$ ,  $FE_z (0 \leq z \leq K) \rightarrow f_{ez}$ ,  $TD \rightarrow t_d$ ,  $S_{k,i} (1 \leq k \leq W, 0 \leq i \leq kH) \rightarrow s_{ki}$ ,  $SC_v (0 \leq v \leq WH) \rightarrow s_{cv}$ ,  $AD_u (0 \leq u \leq J) \rightarrow a_{du}$ ,  $AC_u (0 \leq u \leq J) \rightarrow a_{cu}$ ,  $FD_z (0 \leq z \leq K) \rightarrow f_{dz}$ ,  $TT \rightarrow t_t$ ,  $CT_n (0 \leq n \leq N) \rightarrow c_{tn}$ ,  $AT_r (0 \leq r \leq R) \rightarrow a_{tr}$ ,  $FT_z (0 \leq z \leq K) \rightarrow f_{tz}$  とする. このとき, これらの変数すべてを成分とする多次元ベクトルをもって, システムの状態ベクトル  $\mathbf{n}$  とする.

最初に, 次の定義をする.

$$P_I(\mathbf{n}) \triangleq \begin{cases} 1: \text{現スロットでの状態が } \mathbf{n} \text{ のとき, 次の} \\ \text{スロットの開始時点でチャネルがアイ} \\ \text{ドルのとき} \\ 0: \text{その他} \end{cases} \quad (2)$$

$$P_E(\mathbf{n}) \triangleq \begin{cases} 1: \text{現スロットでの状態が } \mathbf{n} \text{ のとき, 次の} \\ \text{スロットの開始時点が何らかの伝送期} \\ \text{間終了直後のとき} \\ 0: \text{その他} \end{cases} \quad (3)$$

次に, 現スロットの開始時点でシステムの状態が  $\mathbf{n}$  のとき, 次のスロットの開始時点でチャネルがアイドルであるという条件の下での CE フレームの送信成功確率を  $s_1(\mathbf{n})$ , データフレームの送信成功確率を  $s_2(\mathbf{n})$ , CT フレームの送信成功確率を  $s_3(\mathbf{n})$  とする. このとき, 次式が成り立つ.

$$s_1(\mathbf{n})P_I(\mathbf{n}) = \{P_I(\mathbf{n}) - P_E(\mathbf{n})\} t_{r\nu} e^{-t_{r\nu}} \cdot e^{-t_{d\nu}} \cdot e^{-t_{t\nu}} \quad (4)$$

$$s_2(\mathbf{n})P_I(\mathbf{n}) = \{P_I(\mathbf{n}) - P_E(\mathbf{n})\} t_{d\nu} e^{-t_{d\nu}} \cdot e^{-t_{r\nu}} \cdot e^{-t_{t\nu}} \quad (5)$$

$$s_3(\mathbf{n})P_I(\mathbf{n}) = \{P_I(\mathbf{n}) - P_E(\mathbf{n})\} t_{t\nu} e^{-t_{t\nu}} \cdot e^{-t_{r\nu}} \cdot e^{-t_{d\nu}} \quad (6)$$

但し, 上式において, 状態  $\mathbf{n}$  で  $TR, TD, TT$  の各モードでキャリヤセンスする端末数が各々平均  $t_{r\nu}, t_{d\nu},$

$t_{t\nu}$  のポアソン分布に従うと近似している.

図 1 のモデルにおいて, フレーム送信のためにスケジューリングを行っている状態を表すモードは,  $TR, TD$  および  $TT$  モードの 3 種類である. 一方, P-FRAME 方式による CO-LLC プロトコルのモデル図<sup>(1)</sup> の場合, この種のモードは 2 種類である. このため, P-FRAME 方式を用いた場合の解析においては, 先に定義した  $s_1(\mathbf{n}), s_2(\mathbf{n}), s_3(\mathbf{n})$  に対応する変数は 2 種類でよい<sup>(1)</sup>. 従って,  $s_1(\mathbf{n}), s_2(\mathbf{n}), s_3(\mathbf{n})$  の三つの変数のうちの一つを消去することができれば, P-ACK I 方式による CO-LLC プロトコルの解析は P-FRAME 方式を用いた場合の解析とほぼ同様にして行うことができる.

状態  $\mathbf{n}$  が与えられたとき, 各モードにおける 1 スロット当りの増加端末数の条件付期待値を求めて 0 とおき, その結果の独立な式をまとめると次のようになる.

$$\begin{aligned} & \left\{ M - t_r - t_d - t_t - \sum_{h=0}^L c_{eh} - \sum_{k=1}^W \sum_{i=0}^{kH} s_{ki} - \sum_{v=0}^{WH} s_{cv} \right. \\ & \quad - \sum_{n=0}^N c_{tn} - \sum_{r=0}^R (a_{er} + a_{tr}) - \sum_{u=0}^J (a_{du} + a_{cu}) \\ & \quad \left. - \sum_{z=0}^K (f_{ez} + f_{dz} + f_{tz}) \right\} \sigma = (1 - \sigma/\nu) a_{T0} \end{aligned} \quad (7)$$

$$c_{E0} = c_{E1} = \dots = c_{EL} = s_1(\mathbf{n})P_I(\mathbf{n}) \quad (8)$$

$$a_{E0} = a_{E1} = \dots = a_{ER} = c_{E0} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} f_{E0} = f_{E1} = \dots = f_{EK} = t_{r\nu} \{ & P_I(\mathbf{n}) \\ & - P_E(\mathbf{n}) \} - s_1(\mathbf{n})P_I(\mathbf{n}) \end{aligned} \quad (10)$$

$$s_{k0} = s_{k1} = \dots = s_{k,kH} = q_k s_2(\mathbf{n})P_I(\mathbf{n}) \quad 1 \leq k \leq W \quad (11)$$

$$s_{C0} = s_{C1} = \dots = s_{CN} = q_c s_2(\mathbf{n})P_I(\mathbf{n}) \quad (12)$$

$$a_{C0} = a_{C1} = \dots = a_{CJ} = s_{C0} \quad (13)$$

$$a_{D0} = a_{D1} = \dots = a_{DJ} = \sum_{k=1}^W s_{k0} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} f_{D0} = f_{D1} = \dots = f_{DK} = t_{d\nu} \{ & P_I(\mathbf{n}) \\ & - P_E(\mathbf{n}) \} - s_2(\mathbf{n})P_I(\mathbf{n}) \end{aligned} \quad (15)$$

$$c_{T0} = c_{T1} = \dots = c_{TN} = s_3(\mathbf{n})P_I(\mathbf{n}) \quad (16)$$

$$a_{T0} = a_{T1} = \dots = a_{TR} = c_{T0} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} f_{T0} = f_{T1} = \dots = f_{TK} = t_{t\nu} \{ & P_I(\mathbf{n}) \\ & - P_E(\mathbf{n}) \} - s_3(\mathbf{n})P_I(\mathbf{n}) \end{aligned} \quad (18)$$

$$t_{d\nu} \{ P_I(\mathbf{n}) - P_E(\mathbf{n}) \} = a_{E0} + a_{C0} + f_{D0} \quad (19)$$

$$t_{r\nu} \{ P_I(\mathbf{n}) - P_E(\mathbf{n}) \} = a_{D0} + f_{T0} \quad (20)$$

以上の連立方程式の解が平衡点  $\mathbf{n}_e$  である.

まず,  $s_1(\mathbf{n}_e), s_2(\mathbf{n}_e)$  および  $s_3(\mathbf{n}_e)$  の関係式を求める. 式 (1), (8), (9), (11)~(15), (18)~(20) より次式を得る.

$$s_1(\mathbf{n}_e) = (1 - q_c) s_2(\mathbf{n}_e) = s_3(\mathbf{n}_e) \quad (21)$$

従って、式(21)と式(4)～(6)より次式が成り立つ。

$$t_{re} = (1 - q_c)t_{de} = t_{re} \quad (22)$$

以下、文献(1)とほぼ同様の議論により、次の平衡点方程式を求めることができる。但し、以下の方程式においては、添字  $e$  を省略している。

$$P_i(n) = \frac{2 - (1 + 2t_R\nu + t_D\nu)e^{-(2t_R+t_D)\nu}}{[2 - (1 + 2t_R\nu + t_D\nu)e^{-(2t_R+t_D)\nu}] \cdot [1 + (L + N + 2R)s_1(n) + \left\{ \left( \sum_{k=1}^W kq_k \right) + Wq_c \right\} H + J] s_2(n) + K[1 - 2(2 \cdot s_1(n) + s_2(n)) \cdot \{1 - (1 + 2t_R\nu + t_D\nu) \cdot e^{-(2t_R+t_D)\nu}\}]} \quad (23)$$

$$s_1(n) = \frac{t_R\nu e^{-(2t_R+t_D)\nu}}{[2 - (1 + 2t_R\nu + t_D\nu)e^{-(2t_R+t_D)\nu}] + 2t_R\nu e^{-(2t_R+t_D)\nu} \{2 + 1/(1 - q_c)\}} \quad (24)$$

$$M - 2t_R - t_D - [(L + N + 2R + 4)s_1(n) + \left\{ \left( \sum_{k=1}^W kq_k \right) + Wq_c \right\} H + J + 2] s_2(n) + (K + 1) \cdot (e^{(2t_R+t_D)\nu} - 1) \cdot [2s_1(n) + s_2(n)] P_i(n) = (1/\sigma - 1/\nu) s_1(n) P_i(n) \quad (25)$$

連立方程式(21)～(25)は、 $t_R$  に関して、数値的に解くことができる。この解を用いれば、容易に平衡点  $n_e$  を求めることができる。

また、スループット  $\bar{S}$  と平均応答時間  $D_r$  は、文献(1)と同様の議論により、次式で与えられる。

$$\bar{S} = \left( \sum_{k=1}^W kq_k + Wq_c \right) H s_2(n) P_i(n) \quad (26)$$

$$D_r = \left( \sum_{k=1}^W kq_k + Wq_c \right) M / \left( \bar{S} \sum_{k=1}^W q_k \right) - 1/(\sigma H) + 1/(2H) \quad [\text{単位: データフレーム伝送時間}] \quad (27)$$

### 3. 数値例

P-ACK I 方式による CO-LLC プロトコルの解析結果およびシミュレーション結果の一例を図 2 に示す。この図には、比較のため、P-FRAME 方式による CO-LLC プロトコルおよび P-ACK I 方式による CL-LLC プロトコルを用いた場合についても示してある。シミュレーションにおいては、ACK 仮説およびメッセージ長の近似は用いていない。また、各端末は、他のすべての端末の各々に対して等確率でメッセージを送るとした。この図は、 $W=6$ ,  $h=9$  とした場合の、スケジューリングレート  $\nu$  に対するスループットおよび平均応答時間の値を示したものである。

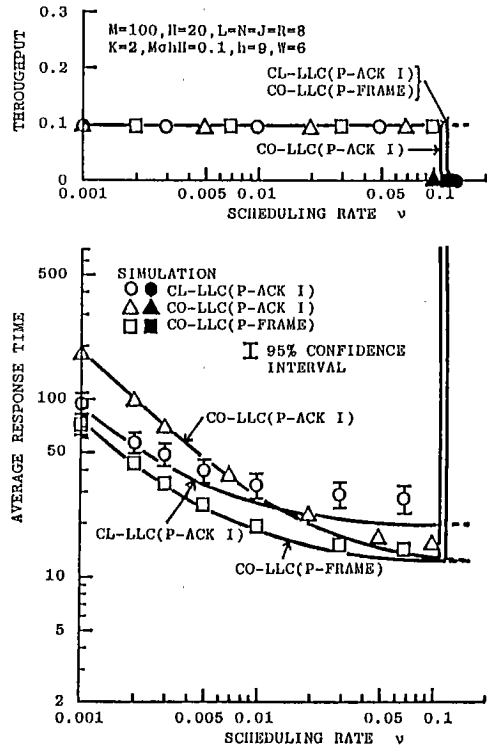


図 2 スループットおよび平均応答時間特性  
Fig.2 The throughput and average response time versus scheduling rate.

図 2 において、P-FRAME 方式による CO-LLC プロトコルの解析結果の精度が、文献(1)のものより向上している。これは、平衡点方程式を数値計算で解く際のアロリズムの改良によるものである。

図 2 から、P-ACK I 方式による CO-LLC プロトコルの方が、P-FRAME 方式による CO-LLC プロトコルよりも、平均応答時間の値が大きいことがわかる。しかし、この図は、 $\nu$  の値を適切に選択すれば、これら二つの方式の間の平均応答時間の差はかなり小さくなることを示している。

### 4. むすび

本論文では、slotted nonpersistent CSMA/CD ネットワークを対象として、P-ACK I 方式による CO-LLC プロトコルの解析を行った。そして、このプロトコルと P-FRAME 方式による CO-LLC プロトコルの性能比較を行った。その結果、 $\nu$  の値を適切に選択すれば、二つの方式の間の性能差はかなり小さくなることがわかった。

謝辞 本研究は、文部省科学研究費補助金一般研究

(C)(02650244)によって行われた。

# 文 献

- (1) 田坂修二, 廣田雅也: “CSMA/CD ネットワークにおけるリンクレベルコネクション方式の性能比較”, 信学論(B-I), **J72-B-I**, 6, pp. 492-503 (1990-06).
- (2) 田坂修二, 谷 正徳, 高橋健一: “CSMA-CD システムにおける ACK トラヒックの解析”, 信学論(B), **J68-B**, 10, pp. 1093-1102 (1985-10).
- (3) Tasaka, S.: “Performance Analysis of Multiple Access Protocols”, MIT Press, Cambridge, MA (1986).

(平成 2 年 12 月 26 日受付)