

## [ポスター展示] 無線 LAN 同士の干渉を考慮したスループット特性の解析

青木 拓実<sup>†</sup> 眞田 耕輔<sup>††</sup> 小室 信喜<sup>†</sup> 本吉 彦<sup>†††</sup> 山垣 則夫<sup>†††</sup>

塩田 茂雄<sup>†</sup> 阪田 史郎<sup>†</sup> 村瀬 勉<sup>†††</sup> 関屋 大雄<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 千葉大学大学院 〒 263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33

<sup>††</sup> 三重大学大学院工学研究科 〒 514-8507 津市栗真町屋町 1577

<sup>†††</sup> NEC クラウドシステム研究所 〒 211-8666 川崎市中原区下沼部 1753

<sup>††††</sup> 名古屋大学情報基盤センター 〒 464-8601 名古屋市千種区不老町

E-mail: †{aoki@, kmr@faculty., shioda@faculty., sekiya@faculty.}chiba-u.jp, ††k.sanada@elec.mie-u.ac.jp

あらまし 複数のアクセスポイントが狭い範囲で共存する環境において、無線ローカルエリアネットワーク (WLAN) 同士での干渉が発生し、特定の WLAN のスループットが低下するという事象が報告されている。本研究では、この事象を解析によって明らかにすることを目的とする。端末の状態を時間の平均場で表現するエアタイムという概念を用いて、各端末の送信状態、キャリアセンス状態、アイドル状態に区分することにより、各ネットワークのスループットを解析的に得る。具体的に直線上に並ぶ WLAN 環境について各 WLAN のスループットを解析的に評価する。その結果、ネットワーク間のキャリアセンスが特定の WLAN のスループットを大幅に制限する可能性があることが示唆される。解析の妥当性はシミュレーション結果との定量的な一致により示される。

キーワード IEEE 802.11, スループット解析, ネットワーク間, 干渉, 無線 LAN

## Throughput characteristics Analysis of Wireless LANs considering Inter-network Interference

Takumi AOKI<sup>†</sup>, Kosuke SANADA<sup>††</sup>, Nobuyoshi KOMURO<sup>†</sup>, Gen MOTOYOSHI<sup>†††</sup>, Norio YAMAGAKI<sup>†††</sup>, Shigeo SHIODA<sup>†</sup>, Shiro SAKATA<sup>†</sup>, Tsutomu MURASE<sup>††††</sup>, and Hiroo SEKIYA<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Advanced Integration Science, Chiba University 1-33, Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba, 263-8522 Japan

<sup>††</sup> Graduate School of Engineering, Mie University 1577, Kurimamachiya-cho, Tsu-shi, Mie, 514-8507 Japan

<sup>†††</sup> Cloud System Research Laboratories, NEC Corporation 1753 Shimonumabe, Nakahara-ku, Kawasaki, 211-8666 Japan

<sup>††††</sup> Information Technology Center, Nagoya University Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8601 Japan

E-mail: †{aoki@, kmr@faculty., shioda@faculty., sekiya@faculty.}chiba-u.jp, ††k.sanada@elec.mie-u.ac.jp

**Abstract** Recently, the environment where there are many Access-Points(AP) in a small area exists everywhere. In this environment, network throughput of certain WLAN reduces significantly because of inter-network interference. This manuscript presents analytical expressions of network throughputs for wireless LANs with airtime concepts taking into account inter-network interference. each network throughput can be obtained analytically by expressing frame collision probability and frame-existence probabilities with respect to each node. The validities of the analytical expressions are confirmed from quantitative agreements between analytical and simulation results.

**Key words** IEEE 802.11, throughput analysis, inter-network, interference, WLAN

## 1. はじめに

近年、通信環境の発達・整備により、タブレット端末等と WiMAX 等のモバイル Wi-Fi ルータを Wi-Fi で接続し、携帯電話回線を利用してインターネットに接続することが普及している。これにより一つのアクセスポイント (AP) に対し多数の端末を接続するというネットワークよりも、タブレット端末とモバイル Wi-Fi ルータのように、1 対 1 の関係を持つプライベートな AP が密集して存在する環境が日常的に生じつつある。このような複数の AP が狭い範囲で共存する環境において、WLAN 同士での干渉が発生し、スループットが低下するという事象が報告されている [1]。文献 [1] の現象は空間上の現象であるが、これを周波数に置き換えるとマルチチャネル間の干渉による不公平性の問題と等価である。このような事象が発生するメカニズムを明らかにするために、理論解析に基づく数理モデルの構築が有効な手段となる。

文献 [1] では、端末の状態とフレームキュー長の変化を連続時間マルコフ連鎖でモデル化し、直線上に並んだテザリングユーザが互いに干渉し合うシナリオを取り上げ、解析とシミュレーションによりモデルの評価をしている。しかし端末の定常状態確率を求める式は複雑であり、ネットワーク数が増加すると、その表現は急激に複雑化する。

本研究では、WLAN 混在環境において、ネットワークの干渉の影響をモデル化し、その動作を評価する。エアタイム [4] の概念を用いることにより、各ネットワークのスループットを解析的に得る。本稿では具体的例として、直線状に並ぶ WLAN 環境についてネットワークの動作を解析的に評価する。その結果、ネットワーク間のキャリアセンスが特定の WLAN のスループットを大幅に制限する場合があることが示唆される。シミュレーション結果との定量的な一致により、解析の妥当性を示す。

## 2. 関連研究

### 2.1 WLAN 間の干渉における各端末の影響

図 1 に本研究で対象とするネットワーク構成図を示す。本研究では複数の WLAN が存在し、その間で干渉が生じる例として、各ネットワークが端末とアクセスポイントが 1 対 1 で接続し、ネットワーク間で干渉し合う状況を想定する。WLAN が直線上に並び、隣り合う WLAN は互いにその通信をキャリアセンスできるものとする。 $N = 3$  の場合について文献 [1] で検討されている。この場合、ネットワーク 2 のキャリアセンス範囲にはネットワーク 1 と 3 が存在する。一方で、ネットワーク 1 と 3 は互いの通信を検知できない位置関係にある。したがって 1 と 3 はランダムに断続して送信を続ける。このとき、ネットワーク 2 は、ネットワーク 1 と 3 の通信を検知するキャリアセンス状態が支配的となり、バックオフタイムの削減が出来ない。これにより、送信機会が極端に減少していく。一方、ネットワーク 1 と 3 は、ネットワーク 2 の送信機会が減少した分、送信機会を得る。ネットワーク 2 は、送信機会が増加したネットワーク 1 と 3 の送信を検知し続けてさらに送信機会を失う。このように、ある特定の WLAN の送信機会が大幅に減少する

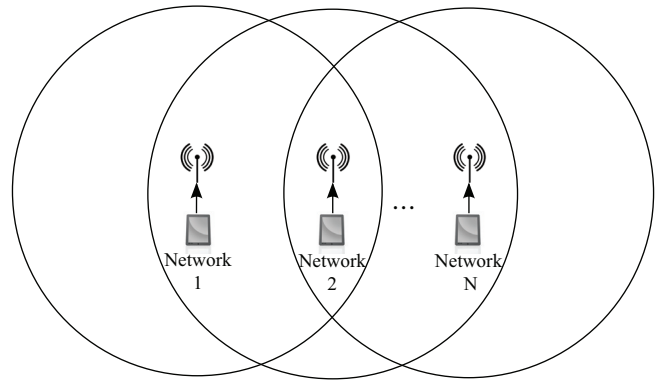


図 1 ネットワーク数 3 における WLAN の干渉範囲

という事象が発生する。

### 2.2 エアタイムによる理論解析

近年、無線マルチホップネットワークにおける理論解析に注目が集まっている。理論解析には多くの理想化を必要とし、かつ数式の導出に時間がかかるという欠点があるが、一度式が導出されればシミュレーションや実機実験に比べて容易に解が導出可能であり、ネットワークの挙動を把握できる利点を持つ。また、パラメータとネットワークの特性が明に表現されるため、数理モデルはネットワークの動作の直感的な理解を助ける。さらに数理モデルを通じてシステムの最適化や制御に応用できるなど、数理モデル導出による利点は少なくない。

文献 [1] では、図 1 のネットワークにおいて端末の状態とフレームキュー長の変化を連続時間マルコフ連鎖でモデル化して、直線上に並んだテザリングユーザが互いに干渉し合うシナリオを取り上げ、解析とシミュレーションによりモデルの評価をしている。文献 [4] と比較してキュー長の変化をより詳細に表現することが可能となった。しかし、各端末の定常状態確率を求める際に、多数の方程式を解かなければならない。したがって、ネットワークの数が増加すると、その解析モデルは指数関数的に複雑となる。

一方、無線マルチホップネットワークにおける解析手法の一つとして、各端末の状態の時間占有率を示すエアタイム [4]-[7] を用いた手法が挙げられる。この手法では、一つの端末を送信、キャリアセンス及びアイドル状態の 3 状態に分類し、その状態確率を変数とし端末の状態を表現する。エアタイムの概念を用いることにより、各端末の送信状態、さらにキャリアセンス状態の相互関係を容易に表現できる。その点でエアタイムを用いた手法は、本研究で本研究で扱う問題のようにキャリアセンスによる相互作用をモデル化するために適した解析手法であると考えられ、本研究ではエアタイムを用いた解析モデルを提案する。

### 3. 干渉を考慮したスループット解析

本解析では、図 1 のネットワークトポロジを対象に、送信エアタイム、キャリアセンスエアタイム、アイドルエアタイム、フレーム保持確率、衝突確率の関係式を導出し、ネットワークのスループットを求める。本解析では次の仮定に従う。

1. 各 WLAN の端末はポアソン分布に従って、それぞれの

アクセスポイント宛に UDP フレームを生成する．

2. 端末とルーター間の距離は非常に短いものとし，端末の隣接する WLAN はキャリアセンス範囲にある．

3. 物理層チャンネルは理想的であるとし，データ送信の失敗はデータ送信の失敗はデータフレームの衝突によってのみ生じる．

4. キャプチャ効果は考慮しないものとする

### 3.1 送信エアタイム

ネットワーク  $i$  の送信エアタイムは，全体時間に対して正規化された送信時間であり，送信成功時間と送信失敗時間が含まれる．十分に長い時間  $[0, Time]$  を考えるとき，ネットワーク  $i$  の送信エアタイムは

$$X_i = \lim_{Time \rightarrow \infty} \frac{|S_i|}{Time} \quad (1)$$

と表せる． $S_i$  はネットワーク  $i$  の送信成功時間 ( $DIFS + FRAME + SIFS + ACK$ ) の時間の合計であり， $DIFS$  は DIFS(DCF InterFrame Space) 期間， $FRAME$  はフレーム送信時間， $SIFS$  は SIFS(Short InterFrame Space) 期間， $ACK$  は ACK フレーム送信時間である．式 (1) より，端末  $i$  のスループットは

$$E_i = \frac{X_i(1 - \gamma_i)P}{T} \quad (2)$$

と表せる．ここで  $\gamma_i$  は端末  $i$  の衝突確率， $T$  は送信成功時間であり， $P$  はデータペイロードサイズである．

### 3.2 キャリアセンスエアタイム

ネットワーク  $i$  のキャリアセンスエアタイムは，キャリアセンス範囲内にある他のネットワークの送信エアタイムを用いて表現できる．複数のネットワークの同時送信による重複時間を考慮することにより，ネットワーク  $i$  のキャリアセンスエアタイムは次のように表すことができる．

$$Y_i = X_{i-1}(1 - \gamma_{i-1,i}) + X_{i+1}(1 - \gamma_{i+1,i}) - \frac{X_{i-1}(1 - \gamma_{i-1,i})X_{i+1}(1 - \gamma_{i+1,i})}{1 - X_i} \quad (3)$$

ここで， $\gamma_{j,i}$  はネットワーク  $j$  から送信されたフレームが，端末  $i$  からのフレームと衝突する確率である．この衝突時間は  $X_i$  に含まれる．つまり， $\gamma_{j,i} \neq \gamma_{i,j}$  であることに注意する．右辺の最終項は，ネットワーク  $i$  が送信していない時の，ネットワーク  $i-1$  と  $i+1$  の重複時間を表している．

### 3.3 アイドルエアタイム

アイドル状態では，送信開始のためにバックオフタイムを削減しているか，フレームを持たず呼の発生待ちの状態のいずれかとなる．端末の状態を 3 状態で表現することを考えると，アイドルエアタイムは

$$Z_i = 1 - X_i - Y_i \quad (4)$$

と表せる．

### 3.4 フレーム保持確率

アイドル状態において，フレームを持たずに呼の発生待ちの

状態を表現するため，端末  $i$  のフレーム保持確率を定義する．フレーム保持確率は端末  $i$  がアイドル状態において送信バッファに少なくとも 1 つのフレームを持つ確率である．すなわち，全体のアイドル時間において，バックオフタイムを削減が占める時間の割合を表す．したがって，フレーム保持確率は

$$q_i = \min\left(1, \frac{\lambda_i V_i \sigma}{Z_i}\right) \quad (5)$$

と表せる．ここで， $\sigma$  はスロットタイム， $V_i$  は端末  $i$  が 1 つのフレームを送信成功するまでのバックオフ回数の期待値であり，詳細な表現は次節 3.5 で示される． $\lambda_i$  は端末  $i$  のフレーム生起確率であり，

$$\lambda_i = \frac{O_i}{P} \quad (6)$$

と表すことができ， $O_i$  は端末  $i$  の送信負荷を表す． $q_i < 1$  のとき，端末  $i$  は非飽和状態であり， $q_i = 1$  のとき，端末  $i$  は飽和状態となり，アイドル状態では常にバックオフタイムを削減する． $\min$  関数を用いることで，各端末の非飽和および飽和状態を 1 つの式で表現できる．

### 3.5 フレーム送信試行確率

との乗算に等しいので送信のためのバックオフタイムの削減は，端末がアイドル状態のときに行われる．つまり，アイドル状態であり，かつ端末がフレームを保持している場合のみ生じる事象である．文献 [8] では，飽和状態における端末  $i$  の送信確率を表現しており，

$$G_i = \frac{R_i}{V_i} = \frac{\sum_{s=0}^K \gamma_i^s}{\sum_{s=0}^K \frac{\gamma_i^s W_s}{2}} \quad (7)$$

と表せる．ここで  $R_i$  は端末  $i$  が 1 つのフレームを送信成功するまでに必要とする送信回数の期待値である．また

$$W_s = \begin{cases} 2^s(CW_{min} + 1) - 1 & 0 \leq s \leq K' - 1 \\ 2^{K'}(CW_{min} + 1) - 1 = CW_{max} & K' \leq s \leq K \end{cases} \quad (8)$$

であり， $CW_{min}$ ， $CW_{max}$  は Contention Window の最小値および最大値， $K' = \log_2 \frac{CW_{max} + 1}{CW_{min} + 1}$ ， $K$  は最大再送回数である．(5)，(7) より，端末  $i$  のフレーム送信試行確率は，

$$\tau_i = q_i G_i \quad (9)$$

と表せる．ところで，送信エアタイムは，1 つのフレームの送信に要する時間と送信したフレーム数を用いて，

$$X_i = \frac{q_i Z_i G_i T}{\sigma} \quad (10)$$

と表すこともできる．ここで  $\sigma$  はスロットタイムであり， $q_i Z_i$  は端末  $i$  がバックオフカウントを行うエアタイムを表す．(4)，(10) より，アイドルエアタイムと送信エアタイムは 2 通りの表現で関連付けられる．

### 3.6 衝突確率

本節では各ネットワークの衝突確率を導出していくが、隣接ネットワークのみお互いの送信を検知するので、ある時間に送信状態にあるネットワークとキャリアセンス状態にあるネットワークが共有する。そのため、各ネットワークの状態を個々に考慮しなければならない。ネットワーク  $i$  がバックオフタイマーをカウントできる時のネットワーク  $i \pm 1$  は、キャリアセンス状態である。キャリアセンス状態から送信を開始する、すなわちバックオフタイマーをカウントする状態に移る確率  $U_{j,i}$  は

$$U_{i,i\pm 1} = \frac{Z_{i\pm 1}}{1 - X_{i\pm 1} - X_i(1 - \gamma_{i,i\pm 1})} \quad (11)$$

と表せる。ただし、直線状に WLAN が並んでいる状況において、両端のネットワークの1つ内側にあるネットワーク 2 とネットワーク  $N - 1$  が送信した時、両端のネットワーク 1 と  $N$  がフレームを送信することによる衝突を考えた場合、ネットワーク 2 およびネットワーク  $N - 1$  がバックオフカウントできる時のネットワーク 1 およびネットワーク  $N$  の状態は、アイドル状態のみとなることに注意する。

端末  $j$  が送信したフレームに、端末  $i$  から送信されたフレームが衝突する確率  $\gamma_{j,i}$  は、端末  $j$  が送信する時に端末  $i$  がバックオフタイマーをカウントできる状態である確率と、端末  $i$  がアイドル状態である時に端末  $i$  が送信する確率の乗算で表せる。したがって

$$\gamma_{j,i} = \begin{cases} \tau_i & (j = 2, i = 1 \text{ or } j = N - 1, i = N) \\ U_{j,i} \cdot \tau_i & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (12)$$

と表せる。 $\tau_i$  は端末  $i$  のアイドル状態における送信確率である。(12) は条件付き衝突確率であるので、各ネットワークの衝突確率は

$$\gamma_i = 1 - \prod_{\substack{j=i-1 \\ j \neq i}}^{j=i+1} (1 - \gamma_{i,j}) \quad (13)$$

と表せる。式 (3), (4), (5), (7), (12) から、各パラメータを式 (10) に代入することにより、 $X_i$  に関する  $N$  個の連立方程式が得られ、それらの解を導出することにより、各端末の送信エアタイムを求めることができる。

#### 4. 解析の評価

本研究では、図 1 のネットワークにおいて、 $N = 3, 4$  の場合について、各ネットワーク端末の送信負荷に対する各ネットワークのスループットを調べる。 $N = 3$  をシナリオ 1,  $N = 4$  をシナリオ 2 とする。表 1 にシミュレーションの諸元を示す。

##### 4.1 シナリオ 1: ネットワーク数 3 の場合

図 4 にシナリオ 1 に対する各ネットワークのスループット、フレーム保持確率、キャリアセンスエアタイム、衝突確率を示す。図 4(a), 図 4(b) より、全てのネットワークのフレーム保持確率が 1 未満のとき、スループットは送信負荷に比例して増加する。送信負荷約 13.3 Mbps でネットワーク 2 のフレーム

表 1 シミュレーション諸元

Data payload	1500 bytes
PHY header	24 bytes
MAC header	24 bytes
ACK size	10 bytes
Data rate	54 Mbps
ACK bit rate	24 Mbps
DATA	252 $\mu$ s
DIFS	34 $\mu$ s
SIFS	16 $\mu$ s
Slot time( $\sigma$ )	9 $\mu$ s
$CW_{min}$	15
$CW_{max}$	1023
Retry limit( $K$ )	7
Inter-network distance	30 m
Transmission range	45 m
Carrier sense range	45 m

保持確率が 1 となる。図 2(c) より送信負荷約 13.3 Mbps より大きいとき、ネットワーク 2 がネットワーク 1 と 3 の通信をキャリアセンスする時間が増加するがネットワーク 1, 2 のそれは減少することが分かる。図 4(c) および図 4(d) から、ネットワーク 2 のスループットの低下はキャリアセンスエアタイムと衝突確率することによることに起因しており、特にキャリアセンス時間の増加により送信機会が減少している効果が大きいことが分かる。送信負荷が 28.1 Mbps のとき全ての端末が飽和する。飽和状態では、スループットは送信不可によらず一定となる。

##### 4.2 シナリオ 2: ネットワーク数 4 の場合

図 5 に  $N = 4$  のときの特性を示す。図 5(a), 図 5(b) より、送信負荷約 13.2 Mbps でネットワーク 2 と 3 のフレーム保持確率が 1 となる。図 5(c) より、ネットワーク 2, 3 のみが飽和状態にあるとき、ネットワーク 2 と 3 のキャリアセンス時間は増大し、1, 4 のそれは減少することが分かる。図 5(c) および図 5(d) より、ネットワーク 2 と 3 のスループットの低下はキャリアセンスエアタイムと衝突確率に起因することが分かる。端末送信負荷が 20.5Mbps のとき、全ての端末が飽和状態となる。全ての端末が飽和状態である場合、送信負荷によらずスループットは一定となる。

##### 4.3 シナリオ 1 とシナリオ 2 の比較による考察

次に、シナリオ 1 とシナリオ 2 を比較する。シナリオ 1 において、飽和状態におけるネットワーク 1 および 3 とネットワーク 2 のスループットの差は約 25.9Mbps であるのに対し、シナリオ 2 では、ネットワーク 1 および 4 と、ネットワーク 2 および 3 のスループットの差は約 10.9Mbps となり、シナリオ 1 と比較して差が縮まっている。これは、シナリオ 1 はネットワーク 2 が両端のネットワークから送信機会減少の影響を受けるのに対し、シナリオ 2 ではネットワーク 2, 3 がそれぞれ片側のネットワークからしか影響を受けないためである。あるネットワークの送信機会が減少すると、その隣接ネットワークの送信機会が増加し、それによりまたネットワークの送信機会が

減少するという相互作用性を持つ。このことは、図 3, 4(c) においてキャリアセンス時間の増加と減少が同時に起こっていることから理解できる。

図 3, 4 より、解析結果はシミュレーション結果と定量的に致しており、各ネットワークのスループットが大きく偏る現象を理論解析によって正しく捉えられていることがわかる。

## 5. おわりに

本研究では、無線 LAN 同士の干渉により特定の LAN のスループットが大きく低下する事象を解析的に表現し、その動作を評価した。エアタイムという概念を用いて、各端末の送信状態、キャリアセンス状態、アイドル状態を表現し、フレーム衝突率とフレーム保持確率を導出することにより、各ネットワークのスループットを解析的に得ることができた。直線状に並ぶ無線ネットワーク環境についてネットワークの動作を解析的に評価し、シミュレーション結果との定量的な一致により、解析の妥当性を示した。

## 参考文献

- [1] 成田侑樹, 李想, 後藤優太, 塩田茂雄, 小室信喜, 関屋大雄, 阪田史郎, 村瀬勉, 本吉彦, 山垣則夫, “連続時間マルコフ連鎖を用いた Wi-Fi 性能評価法の提案と Wi-Fi 間干渉評価,” 日本オペレーションズ・リサーチ学会 2015 年度待ち行列シンポジウム「確率モデルとその応用」, 2016.
- [2] Minh Huy Bui, Kokuse Sanada, Nobuyoshi Komuro, Shigeo Shioda, Shiro Sakata, Kazunori Miyoshi, Tutomu Murase and Hiroo Sekiya, “Throughput analysis of wireless networks with Tethering function,” *IEEE Wireless communications and networking conference (WCNC2015)*, pp.125-130, Mar. 2015.
- [3] 万胤, 眞田耕輔, 小室信喜, 本吉彦, 山垣則夫, 塩田茂雄, 阪田史郎, 関屋大雄, “フレーム長の異なるフローが共存するテザリングネットワークにおける解析,” 電子情報通信学会 複雑コミュニケーションサイエンス研究会, vol.115, no.300, pp.81-86, Nov. 2015.
- [4] P. C. Ng, and S. C. Liew, “Throughput analysis of IEEE 802.11 multi-hop ad hoc networks,” *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 15, no. 2, pp. 309-322, Apr. 2007.
- [5] Y. D. Barowski, S. Biaz, and P. Agrawal, “Towards the Performance Analysis of IEEE 802.11 in Multi-hop Ad-Hoc Network,” *Proc. WCNC*, New Orleans, USA, vol. 1, pp. 100-106, Mar. 2005.
- [6] J. Shi, H. Sekiya, K. Sanada, N. Komuro, and S. Sakata, “Delay Analysis for IEEE 802.11 String Topology Multi-hop Networks,” *Proc. NCSP*, Hawaii, USA, vol. 15, no. 2, pp. 393-396, Mar. 2013.
- [7] K. Sanada, J. Shi, N. Komuro, and H. Sekiya, “End-to-end delay analysis for IEEE 802.11 string-topology multi-hop networks,” *IEICE Trans. on Communications*, vol. E98-B, no. 7, pp. 1284-1293, July. 2015.
- [8] A. Kumar, E. Altman, D. Miorandi, and M. Goyal, “New insights from a fixed point analysis of single cell IEEE 802.11 Wireless LANs,” *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 15, no. 3, pp. 588-600, Jun. 2007.

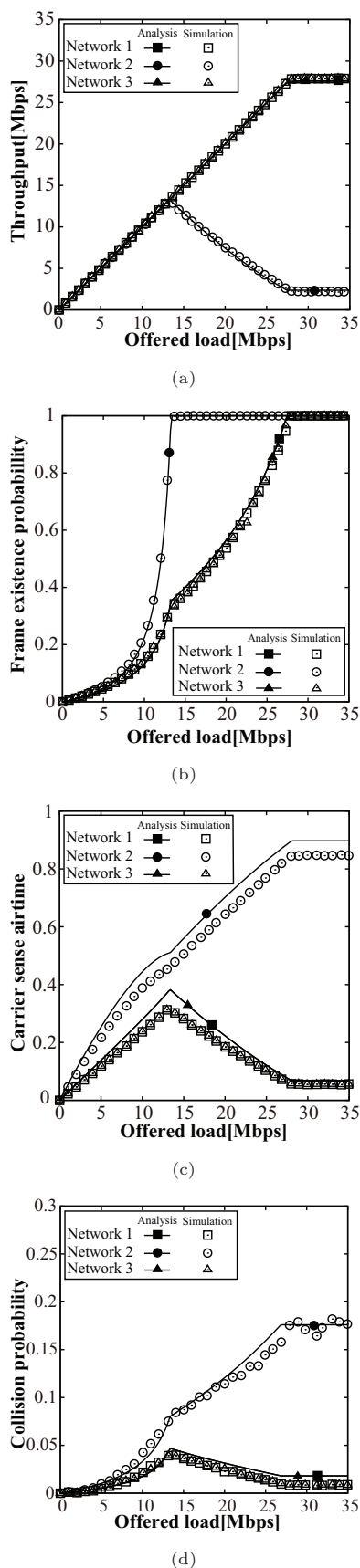
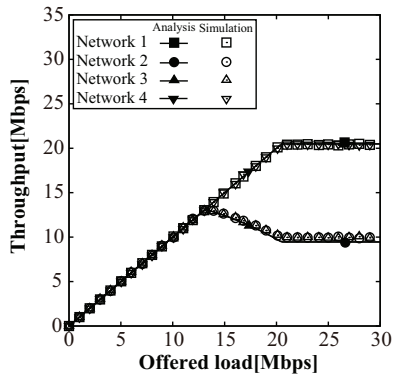
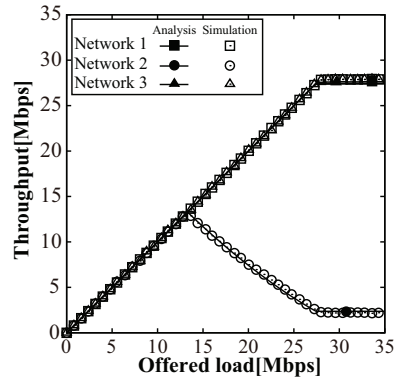


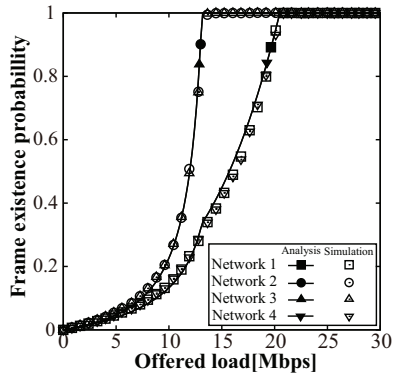
図 2 ネットワーク数 3 における送信負荷に対する結果  
 (a):スループット (b):フレーム保持確率  
 (c):キャリアセンスエアタイム (d):衝突確率  
 (実線：解析結果 プロット：シミュレーション結果)



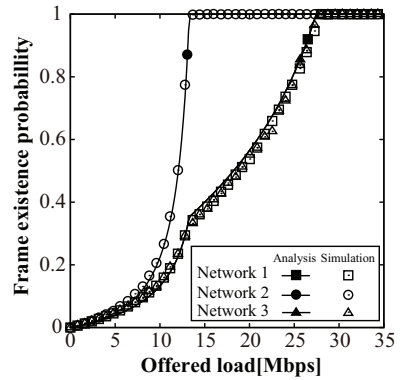
(a)



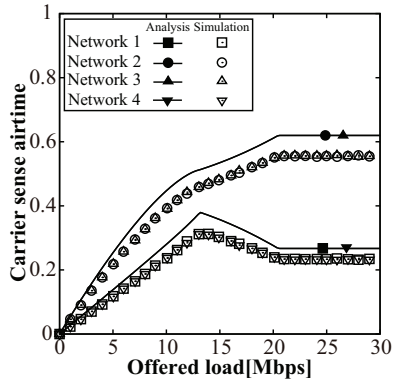
(a) スループット



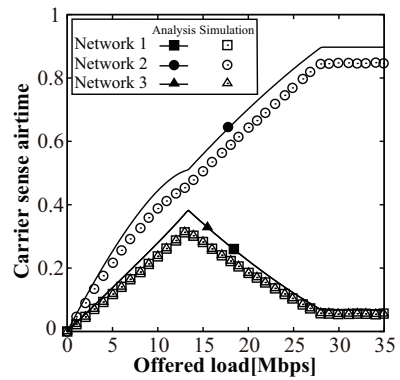
(b)



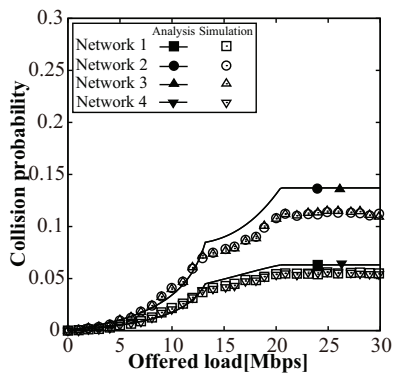
(b) フレーム保持確率



(c)

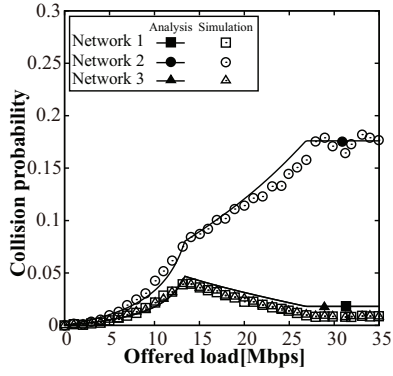


(c) キャリアセンスエアタイム



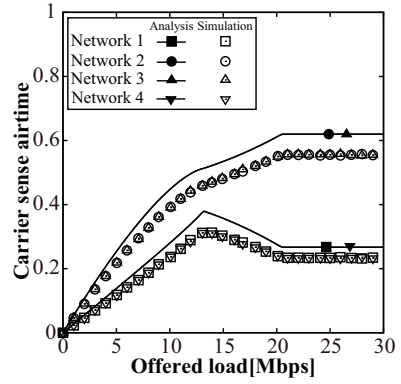
(d)

図 3 ネットワーク数 4 における送信負荷に対する結果  
 (a):スループット (b):フレーム保持確率  
 (c):キャリアセンスエアタイム (d):衝突確率  
 (実線: 解析結果 プロット: シミュレーション結果)

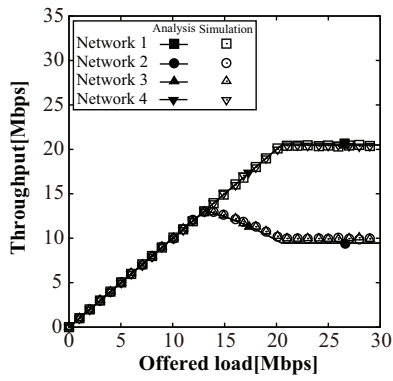


(d) 衝突確率

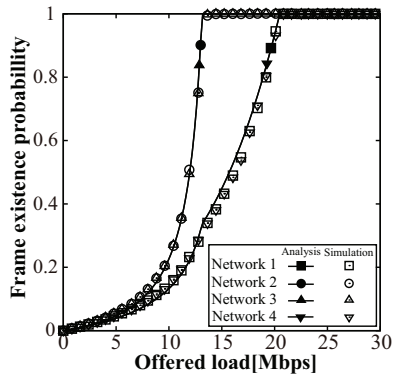
図 4 ネットワーク数 3 における送信負荷に対する結果  
 (a):スループット (b):フレーム保持確率  
 (c):キャリアセンスエアタイム (d):衝突確率  
 (実線: 解析結果 プロット: シミュレーション結果)



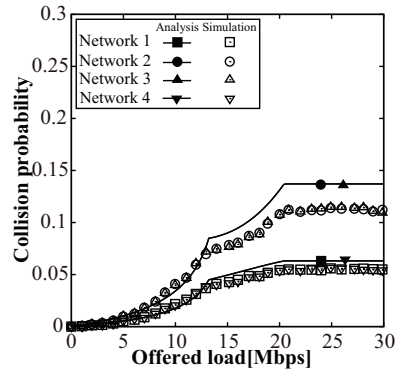
(c) キャリアセンスエアタイム



(a) スループット



(b) フレーム保持確率



(d) 衝突確率

図 5 ネットワーク数 4 における送信負荷に対する結果  
 (a):スループット (b):フレーム保持確率  
 (c):キャリアセンスエアタイム (d):衝突確率  
 (実線: 解析結果 プロット: シミュレーション結果)