

## 無線アドホックネットワークにおけるフロー間の公平性の改善

Oyunchimeg SHAGDAR<sup>†</sup>      中川 健治<sup>††</sup>      張 兵<sup>†</sup>

Achieving Per-Flow Fairness in Wireless Ad Hoc Networks

Oyunchimeg SHAGDAR<sup>†</sup>, Kenji NAKAGAWA<sup>††</sup>, and Bing ZHANG<sup>†</sup>

あらまし 無線アドホックネットワークは、将来のモバイル通信の一形態として最も注目されており、IEEE 802.11 準拠の無線 LAN デバイスの利用が一般的と考えられる。無線アドホックネットワークの広い実現のため、QoS (Quality of Service) 制御の要求が高まっている。その中でも、フロー間の公平性は非常に重要な要素である。伝統的な有線ネットワークでは、フロー間における公平性の問題は、主にリンク層によるものだが、無線アドホックネットワークにおいては、MAC 層にも大きく起因する。具体的には、IEEE 802.11MAC は無線端末間に公平なチャンネル割当を行っているが、フロー間の公平を実現するには、フロー数に応じてチャンネル割当を行う方式が必要となる。そこで、本研究では、各フローに同等なチャンネルアクセスを割り当てることで、MAC 層でのフロー間の公平を実現する方式を提案する。提案方式は公平性の改善だけでなく、ネットワーク全体のパフォーマンス、チャンネルユーティリティなども改善できる。また、ネットワークシミュレータによる特性評価を行い、提案方式の有効性を確認した。

キーワード 無線アドホックネットワーク、公平性、IEEE 802.11MAC、DCF

## 1. ま え が き

アドホックネットワークは、基地局や交換機等のインフラストラクチャに依存しないネットワークであり、将来のモバイル通信の一形態として、最も注目されている [1]。無線アドホックネットワークにおいて、IEEE 802.11 準拠の無線 LAN デバイスの利用が一般的であり、その応用はセンサネットワーク、パーソナル・エリア・ネットワーク、第四世代セルラシステムにおける基地局中継網などの、様々なアプリケーションへの適用が想定されている [2]。

無線アドホックネットワークの広い実現のため、QoS (Quality of Service) 制御の要求が高まっている。QoS はサービスの品質を意味し、公平性、安定性、通信のパフォーマンスなどの様々な要素に着目しなければならない。その中でも、フロー間の公平性は重要な要素である。今まで、公平性に関する研究は、有線ネットワークを対象に数多く行われてきた [3] ~ [5]。有線ネット

ワークにおいて、フロー間の公平性が劣る主な原因は、異なるトラヒックの混在である。例えば、ネットワーク上に UDP トラヒックと TCP トラヒックが混在する場合において、ボトルネックでふくそうが発生すると、TCP はふくそう制御を行い、転送レートを減少させるが、UDP は転送レートを変化させない。このような非対称的な対応の結果、最悪の場合、TCP トラヒックが停止されるという最も不公平な状態も発生し得る。有線ネットワークで生じる公平性の問題の改善策として、バッファ・マネージメント [3]、またはスケジューリング [4], [5] といったリンク層に着目した方式が多く提案されている。しかし、無線アドホックネットワークにおける公平性の問題は、MAC 層にも大きく影響されるため、従来の手法だけでは十分に解決されない。無線アドホックネットワークで発生するフロー間の公平性の問題は、下記のように分類できる。

## (1) リンク層におけるフロー間の公平性の問題

無線アドホックネットワークは、専用ルータや基地局などのインフラに依存しないネットワークである。直接通信が行えない端末間の通信は、途中の端末の中継によって行われる。このように、他のフローに中継サービスを与える無線端末のバッファは、複数のフローに共有される。したがって、中継端末のバッファ

<sup>†</sup> ATR 適応コミュニケーション研究所, 京都府  
ATR Adaptive Communication Research Laboratories,  
Kyoto-fu, 619-0288 Japan

<sup>††</sup> 長岡技術科学大学, 長岡市  
Nagaoka University of Technology, Nagaoka-shi, 940-2188  
Japan



となる．式 (2) と式 (4) に基づいて，各フローのスループットを図 2 に表す．図 2 より， $G$  の増加に伴って，フロー間の公平性が著しく悪化することが分かる．このようなフロー間の不公平の問題は，転送端末のバッファが各フローに不公平に割り当てられるため発生し，これはリンク層での不公平が原因と考えられる．

2.2 MAC 層におけるフロー間の不公平の例

図 3 のトポロジーを考える．本モデルは， $S1$  と  $M1$  間及び， $S1$  と  $M2$  間にそれぞれ，Flow1 と Flow2 が存在する．更に， $S1$  と同一通信範囲に位置する  $S0$  と  $M0$  間に Flow0 が存在する．前例と同様に，送信端末で発生する各トラヒックのレートを  $G$ ，無線リンク帯域幅を  $B$  とする． $S1$  のリンク層において，バッファがフロー間に平等に割り当てられている場合，Flow1 と Flow2 のスループットが等しくなり，それを  $Th1$  と記す．更に，Flow0 のスループットを  $Th0$  と記す．802.11MAC ベースの従来方式では，端末間に平等なチャンネルアクセス権利を与えるため，各フローが得るスループットは式 (5) で表される．

$$\begin{cases} Th0 = Th1 = G & (\text{if } G < B/3) \\ Th0 = G, \quad Th1 = (B - G)/2 & (\text{if } B/3 \leq G < B/2) \\ Th0 = B/2, \quad Th1 = B/4 & (\text{if } G \geq B/2) \end{cases} \quad (5)$$

式 (5) の上段は， $G$  が低いために，無線帯域が保証され，各フローのスループットが  $G$  に等しくなることを示す．式 (5) の下段は，各送信端末 ( $S0$  と  $S1$ ) が無線リンク帯域の半分以上の使用を要求される場合である．この場合，802.11MAC ベースの従来方式は端末に平等にチャンネルを割り当てるため， $S0$  と  $S1$  がそれぞれ， $B/2$  帯域を使用する．このときのチャンネル割当の様子を図 4 に示す (ここで，短時間における端末間の不公平 ([7]) が問題とならないと仮定する)．図 4 から分かるように， $S0$  と  $S1$  は順番にチャンネルアクセスし，パケットを 1 個ずつ送信する．したがって，フロー間のチャンネルアクセスの割合は，Flow0 : Flow1 : Flow2 = 2 : 1 : 1 と不公平になる．なお，式 (5) の中段は， $S0$  端末が要求する帯域  $G$  が  $B/2$  に満たないため， $S0$  が  $G$  帯域を使用し，残りの無線帯域 ( $B - G$ ) が  $S1$  がもつ Flow1 と Flow2 の送信に割り当てられることを表す．式 (5) に基づいて，各フローのスループットを図 5 に示す．図 5 から分かるように，図 3 で示すモデルにおいても，フロー間の不公平の問題がある．この問題は，MAC 層でのチャンネルアクセス方式に起因するため，その解決は，

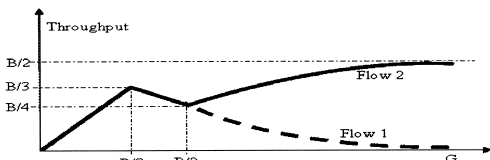


図 2 各フローのスループット (例 1)  
Fig. 2 Throughput achieved by individual flows.

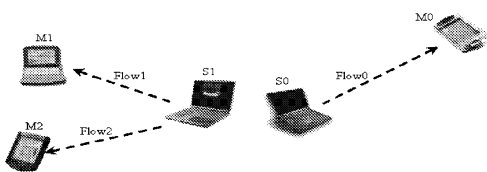


図 3 MAC 層におけるフロー間の不公平の例  
Fig. 3 Per-flow unfairness due to the MAC layer.

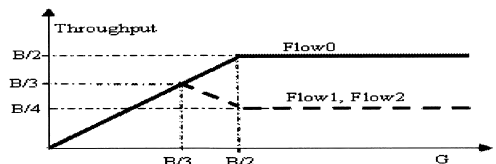


図 5 各フローのスループット (例 2)  
Fig. 5 Throughput achieved by individual flows.

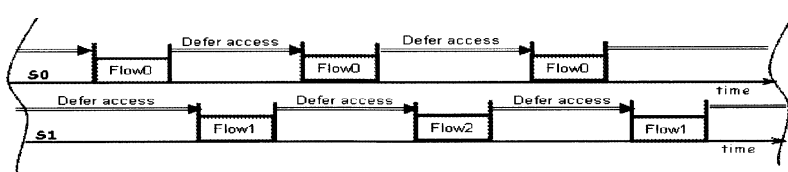


図 4 802.11MAC におけるチャンネル割当の様子  
Fig. 4 Channel access operation of the 802.11MAC.

MAC 層に着目しなければならない。

### 3. 関連研究

無線ネットワークにおける、フロー間の公平性に関する研究はいくつも行われてきた ([8]~[13])。

[8] はチャネルユーティリティと公平性の相互関係に着目し、チャネルユーティリティの改善を優先しながら、より公平なサービスを与えるパケット転送スケジューリングモデルを提案した。しかし、[8] はネットワークトポロジー及び、各フローの情報を集中的に管理するスケジューラが存在すると仮定しているため、アドホックネットワークには適用的でないと考えられる。

[9] はリンク層だけでなく、MAC 層でも優先順位をもつバッファを設け、公平性及びチャネルユーティリティの改善を行う方法を提案した。また、[10] はアクセスポイントが集中的にパケット転送スケジューリングを行うことで、フロー間の公平性を改善した。[11] は MAC 層がパケットロスを観測し、トラフィックレートをコントロールする方法を提案した。しかし、[9]~[11] では、リンク層におけるフロー間の公平性の問題だけを改善し、MAC 層におけるフロー間の公平性の問題に未着手であるため、トポロジー依存となる。更に、[10] はアクセスポイントなどのインフラを必要とする欠点がある。

MACAW [12] では、コンテンションウィンドウ [6] のばらつきによって生じる不公平を指摘し、その解決方法として、無線端末同士がバックオフに関するパラメータを交換することによって、コンテンションウィンドウを一致させる方法を提案した。この方式は、短時間における端末間の公平性の問題 ([7]) に有効であるが、フロー間の公平性には対応できない。更に、MACAW では複数のフローの送信端末に、複数のバックオフカウンタをもたせることによって、フロー間の公平性が改善できると述べているが、それに対する詳しい検討は行われていない。また、このような手法は、MAC802.11e [13] でも提案された。MAC802.11e は、フロー間のプライオリティに注目した研究であるが、フロー間の公平性にも有効であると考えられる。しかし、公平性に関する検討が十分に検証されていないのが現実である。MACAW や MAC802.11e における複数のフローの送信端末に、複数のバックオフカウンタをもたせる方式は、フロー数が増加するに伴ってチャネル競争が激しくなり、干渉やチャネルユーティリティ

を悪化させるおそれがある。

### 4. 提案方式

DCF チャネルアクセス方式に基づき、無線アドホックネットワークにおける、フロー間の公平性を改善する方式を提案する。提案方式は、802.11MAC ベースの従来方式に若干の修正を加えるだけで、フロー間の公平性だけでなく、ネットワーク全体のパフォーマンス、チャネルユーティリティなどを改善できる。

#### 4.1 リンク層におけるフロー間の公平性の改善

2.1 から分かるように、フロー間の公平性がリンク層における不公平が原因で劣る場合がある。このような公平性の問題を解決するためには、リンク層におけるフロー間の公平性を改善する必要がある。RR (Round Robin) スケジューリング方式は FIFO スケジューリング方式に比べて、リンク層におけるフロー間の公平性が改善できると考えられる。FIFO スケジューラを使用する無線端末はすべてのフローに対して 1 個のバッファしかもたないため、その名の通り、パケットがバッファに格納された順で送信される。したがって、パケットがフロー間における不公平な状態でバッファに格納されていれば、パケットは不公平のまま MAC 層へ送信されることとなる。それに対して、RR スケジューラはフローごとに異なるバッファを設けることにより、パケットを MAC 層へ送信するとき、各バッファからパケットを 1 個ずつ取り出して送信を行うため、リンク層においてフロー間の公平性を改善することができる。

本提案方式では、リンク層におけるフロー間の不公平を改善するために、リンク層に RR スケジューラを使用する。具体的には、送信すべきパケットがリンク層に到着すると、パケットに含まれるソケット情報 ( 送受信端末の IP アドレスとポート番号 ) をもとに、どのフローのパケットであるかを識別し、異なるフローのパケットを異なるバッファに格納する。パケットをバッファから取り出すときは、各バッファからパケットを 1 個ずつ取り出して MAC 層へ送信する。提案方式の MAC 層は、チャネルアクセス権利を獲得してから、異なるフローのパケットを複数送信するが、そのフロー数の決定はリンク層で行われる。図 6 に、そのアルゴリズムを示す。これは、各バッファにパケットが格納されているかをチェックし、送信するフロー数を求めるものである。図 6 における MAX<sub>f</sub> については、後述する。

4.2 MAC 層におけるフロー間の公平性の改善

複数のフローをもつ無線端末は、チャネルアクセス権利を獲得してから、フロー数に応じて複数のパケット送信を可能にする。つまり、従来の DCF チャネルアクセス方式においては、送信端末はパケット送信が成功すれば、ポストバックオフ処理（通信が成功した際、次に送信すべきパケットの有無にかかわらず、特定のバックオフ時間待処理）に入るが、本方式において、複数のフローのパケットをもつ送信端末は、パケット送信が成功した後にポストバックオフ処理を行わず、DIFS (DCF Inter Frame Space)[6] 時間だけを待ってから、次の異なるフローのパケットを送信する。

無線端末が 1 回のチャネルアクセスで送信するパケットの最大数を MAX<sub>f</sub> とすると、端末がもっているフロー数が MAX<sub>f</sub> を超える場合は、MAX<sub>f</sub> だけ送信を行う。この場合、公平性は若干劣るが、802.11MAC ベースの従来方式より公平性の改善ができると考えられる。MAX<sub>f</sub> は、無線帯域、無線リンクの状態、ネットワークポロジ、チャネルを共有するフロー数と

いった様々な要素によって異なる。現段階では、同一の通信範囲に位置する無線端末において、MAX<sub>f</sub> を決める各要素が同様であると考え、同一通信範囲に位置するすべての無線端末における MAX<sub>f</sub> が同一であることを前提条件とする。

図 7 は、パケット送信アルゴリズムであり、提案方式において追加した動作を太字で示す。つまり、パケット送信が成功し、次に送信すべき異なるフローのパケットが存在すれば、ポストバックオフ処理に入らず、次のパケットを送信する。これを繰り返すことで、1 回のチャネルアクセスで異なるフローのパケットを複数送信することができる。

図 8 に、図 3 で示すネットワークモデルに提案方式を適用した場合のチャネル割当の様子を示す。図 3 モデルにおいて、S1 は 2 本のフローをもつため、図 8 で示すように、1 回のチャネルアクセスにおいて Flow1 と Flow2 のパケットをそれぞれ 1 個ずつ送信する。したがって、提案方式は、各フローにおいて同等なス

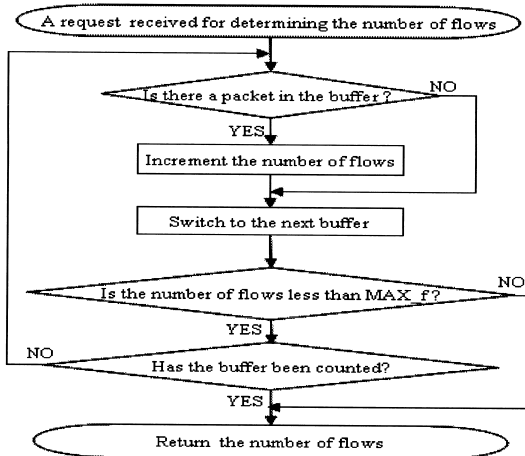


図 6 フロー数の決定  
Fig. 6 Determining number of flows.

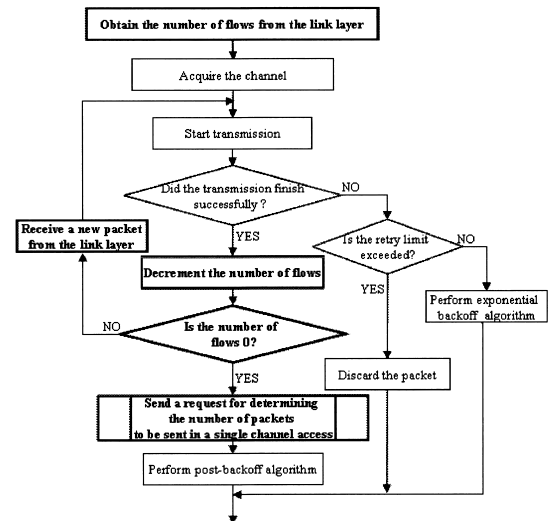


図 7 パケット送信アルゴリズム  
Fig. 7 Packet transmission algorithm.

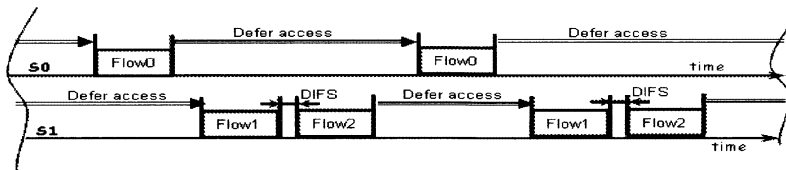


図 8 提案方式におけるチャネル割当の様子  
Fig. 8 Channel access operation of the proposed scheme.

ループットが得られ、フロー間の公平が実現できる。

### 4.3 提案方式の特性と解析

ここで、提案方式の特性を理論的に解析する。解析は、公平性及び、チャンネルユーティリティに着目する。また、解析に使用するパラメータの定義及び、説明を行う。

#### 4.3.1 公平性に関する特性

提案方式の公平性に関する特性を検証する。まず、複数のフローからなるシステムの公平性を評価するパラメータである FairnessIndex の説明を行う。

本研究では、[14]において、式(6)のように定義された FairnessIndex を使用する。

$$\text{FairnessIndex} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \text{Ave}|}{2(n-1)\text{Ave}} \quad (6)$$

ここで、 $n$  は全フロー数、 $x_i$  はフロー  $i$  のスループット、 $\text{Ave}$  はネットワークの平均スループットを示す。式(6)で定義される FairnessIndex は 0 から 1 の間の値をとり、その値が 1 に近いほど、フロー間の公平性が優れていることを意味する。右辺の第 2 番目の項の分子は、各フローのスループットと平均スループットの差の絶対値の和を示し、分母は、ネットワークが一番不公平なとき、つまり、1 本のフローだけが帯域を使用し、他のフローに帯域が割り当てられていない状態の、各フローのスループットと平均スループットの差の絶対値を示す。ここで、2. で挙げたネットワークモデルを対象に FairnessIndex を計算する。

まず、図 1 で示すモデルを対象に、802.11MAC ベースの従来方式と提案方式における FairnessIndex を計算する。802.11MAC ベースの従来方式における FairnessIndex は、式(2)と式(4)を式(6)に代入することにより、式(7)となる。

$$\text{FairnessIndex} = \begin{cases} 1 & (\text{if } G < B/2) \\ 2B/(2G + B) & (\text{if } G \geq B/2) \end{cases} \quad (7)$$

提案方式はリンク層において RR スケジューラを用いるため、M2 における Flow1 用と Flow2 用の両方のバッファにパケットが格納されている限り、パケットがフロー間に公平に MAC 層へ送信される。更に、MAC 層において、フロー間で公平にチャンネル割当が行われるため、各フローのスループットは等しい。そこで、Flow1 と Flow2 ののスループットを  $\text{Th}$  と記す

と、 $\text{Th}$  は次式で表される。

$$\text{Th} = \begin{cases} G & (\text{if } G < B/3) \\ B/3 & (\text{if } G \geq B/3) \end{cases} \quad (8)$$

式(8)と式(6)より、提案方式における FairnessIndex は、 $G$  の全範囲で 1 となる。これらの結果に基づき、両方式における FairnessIndex の比較を図 9 に示す。点線は 802.11MAC ベースの従来方式、実線は提案方式における FairnessIndex である。

次に、図 3 で示すモデルを対象に、802.11MAC ベースの従来方式と提案方式における FairnessIndex を求める。802.11MAC ベースの従来方式における FairnessIndex は、式(5)と式(6)より、式(9)となる。

$$\text{FairnessIndex} = \begin{cases} 1 & (\text{if } G < B/3) \\ 3(B - G)/(2B) & (\text{if } B/3 \leq G < B/2) \\ 3/4 & (\text{if } G \geq B/2) \end{cases} \quad (9)$$

提案方式は図 8 より、フロー間において公平であるため、 $G$  の全範囲において各フローのスループットが等しくなり、FairnessIndex = 1 となる。これらの結果に基づき、両方式における FairnessIndex の比較を図 10 に示す。点線は 802.11MAC ベースの従来方式、実線は提案方式における FairnessIndex である。図 9 と図 10 から、提案方式は、802.11MAC ベースの従来方式に比べて、フロー間の公平性が改善できることが分かる。

#### 4.3.2 チャンネルユーティリティに関する特性

チャンネルユーティリティは、チャンネルを有効に活用

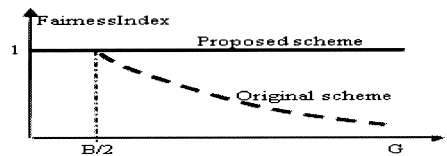


図 9 各方式における FairnessIndex の比較 (例 1)  
Fig. 9 FairnessIndex comparison of each scheme.

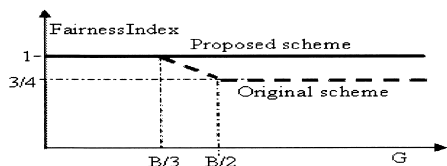


図 10 各方式における FairnessIndex の比較 (例 2)  
Fig. 10 FairnessIndex comparison of each scheme.

している割合を表し、各端末が無線チャネルを共有する無線アドホックネットワークでは、重要なパラメータである。チャネルユーティリティを評価するために式 (10) を用いる。

$$\text{ChannelUtility} = \frac{\text{使用時間}}{\text{トータル時間}} \times 100 [\%] \quad (10)$$

ここで、使用時間は干渉などによって失敗に終わった通信時間を除く、チャネルを有効に活用した時間を表す。

提案方式では、複数のフローをもつ送信端末は、1回のチャネルアクセスで複数のパケット送信を行っているため、802.11MAC ベースの従来方式に比べ、パケットごとの送信に必要なバックオフ時間が節約できる。それによって、式 (10) での使用時間が増加し、チャネルユーティリティが向上する。また、チャネルユーティリティの向上は、ネットワーク全体のパフォーマンスの改善にもつながる。

### 5. シミュレーション評価

提案方式の有効性を確認するために、NS ネットワークシミュレータ [15] を用いて評価を行う。シミュレーションで用いるパラメータを表 1 に示す。シミュレーション実験で、UDP トラフィックと TCP トラフィック両方において、各フローのスループット、ネットワークのトータルスループット、フロー間の公平性及び、チャネルユーティリティの各面で評価を行う。公平性及び、チャネルユーティリティは、それぞれ式 (6)、式 (10) で算出する。更に、CBR のパケット送信間隔は [16] を参照に、データ、ビデオ及び音声通信などを想定して設定した。[16] ではフロー間のプライオリティに注目してシミュレーションを行っているため、異なる

レート of the traffic が混在しているが、本シミュレーションでは公平性に注目しているため、同一レート of the traffic を用いることとする。本シミュレーションでは、表 2 で示す三つの方式 (ori(FIFO), ori(RR), proposed) の比較を行う。提案方式では、1 回のチャネルアクセスで送信できる最大のフロー数 (MAX\_f) を 4 に固定する。シミュレーションでは、MAC 層における公平性の改善を確認できるシングルホップモデル、リンク層における公平性の改善を確認できるマルチホップモデル更に、リンク層及び MAC 層における公平性の改善を総合的に確認できる複合型ネットワークモデルを対象に、特性評価を行う。

#### 5.1 シングルホップモデル

図 11 で示すネットワークモデルを対象に特性評価を行う。本モデルにおいて、S0 と S1 はお互いの通信範囲に位置する。S0 は 1 本のフロー、S1 は  $n$  本のフローをもつとする。

まず、図 11 において  $n = 2$  の場合を考える。図 12 に、CBR パケット送信間隔が 10 ミリ秒の場合の、各フローのスループット比較を示す。図 12 から分かるように、ori(FIFO) では各フローのスループットの差が

表 2 比較する方式の特徴  
Table 2 Characteristics of individual schemes.

方式	リンク層	MAC 層
ori(FIFO)	FIFO スケジューリング方式	IEEE 802.11b
ori(RR)	RR スケジューリング方式	IEEE 802.11b
proposed	RR スケジューリング方式	提案方式

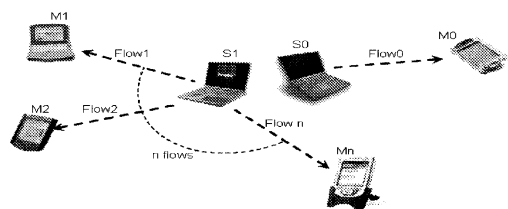


図 11 シングルホップモデル  
Fig. 11 Single-hop model.

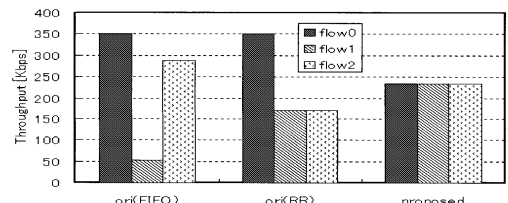


図 12 各フローのスループット (シングルホップモデル)  
Fig. 12 Throughput achieved by each flow.

表 1 シミュレーションパラメータ  
Table 1 Simulation parameters.

シミュレーション時間	50 [s]
アンテナ	Omni directional
無線伝搬モデル	Free space & Two-ray
通信範囲	250 [m]
MAC プロトコル	IEEE 802.11b (RTS/CTS 使用)
無線リンクの帯域	2 [Mbit/s]
バッファタイプ	FIFO, RR
バッファサイズ	50 [pkts]
ルーティングプロトコル	DSDV
トラフィックタイプ	UDP (CBR), TCP (FTP)
CBR パケット送信間隔	1 ~ 20 [ms]
TCP 最大ウィンドウサイズ	20 [pkts]
パケットサイズ	512 [Byte], 1 [kByte]

表 3 トータルスループット (シングルホップモデル)  
Table 3 Total throughput.

ori (FIFO)	691.49 [kbit/s]
ori (RR)	691.90 [kbit/s]
proposed	699.68 [kbit/s]

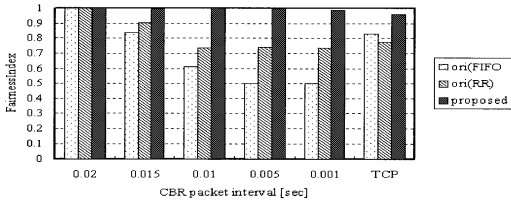


図 13 FairnessIndex の比較 (シングルホップモデル)  
Fig. 13 FairnessIndex comparison of each scheme.

大きい．それに比べて，ori(RR) では Flow1 と Flow2 のスループットはほぼ等しいが，Flow0 のスループットが他のフローに比べて著しく高い．これらの従来方式では，Flow1 及び Flow2 のスループットの和は Flow0 のスループットに等しくなる．それに対し，提案方式では，各フローのスループットがほぼ等しい値になることが確認できた．

ネットワークのトータルスループットの比較を表 3 に示す．表 3 より，提案方式がその他の方式より約 8 [kbit/s] 高いスループットを得ることができた．このトータルスループットの改善は，チャネルユーティリティの改善によるものであると考えられる．これらの結果から分かるように，提案方式はフロー間の公平性の改善だけでなく，ネットワーク全体のパフォーマンスを改善できることが明らかとなった．

図 13 は，CBR パケットの送信間隔の変化に対する，各方式における FairnessIndex の比較を表す．図の右端に FTP の結果を併せて示す．ori(FIFO) は，CBR 送信レートが増加するにつれて，フロー間の公平性が著しく悪化する．ori(RR) は Flow1 と Flow2 間の公平性の改善ができた分，FairnessIndex が ori(FIFO) より優れるが，Flow0 のスループットが他のフローに比べ，依然として高いため，FairnessIndex は提案方式より劣る．これらの従来方式において，CBR 送信レートが増加するに伴って，フロー間の公平性が悪化することは，式 (5) で説明される．図 13 で示すように，提案方式は，全送信レートにおいて，FairnessIndex が 1 に近い値を得た．ここで，図 13 で表す ori(RR) と proposed の FairnessIndex と 4.3.1 で得られた結果 (図 10) で表す各 FairnessIndex の傾向について考え

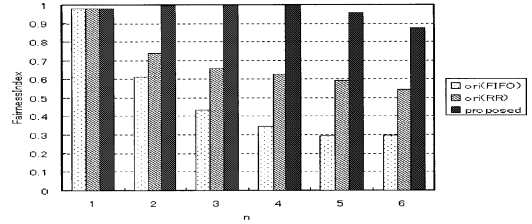


図 14 FairnessIndex の比較 (CBR)  
Fig. 14 FairnessIndex comparison (CBR).

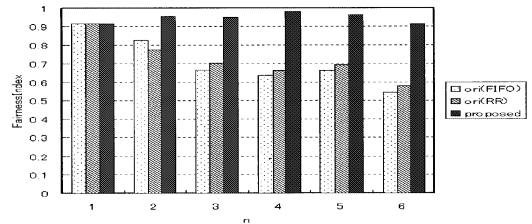


図 15 FairnessIndex の比較 (TCP)  
Fig. 15 FairnessIndex comparison (TCP).

る．図 10 の横軸は CBR 送信レート ( $G$ ) を表しており， $G$  が CBR のパケット送信間隔 (ここで  $\Delta t$  と示す) と  $G = PacketSize/\Delta t$  の関係をもつ．ここで， $PacketSize$  (パケットサイズ) は一定であるため， $\Delta t$  の減少 (図 13 の横軸) は  $G$  の増加 (図 10 の横軸) を意味し，図 10 と図 13 で示す FairnessIndex は同様な傾向を示すことが明らかである．図 13 から分かるように，proposed における FairnessIndex は，横軸の全範囲で 1 であるのに対して，ori(RR) においては，横軸の左端に 1 をとるが，その後は 1 からほぼ  $0.75 (= 3/4)$  まで減少し，それ以降は  $0.75$  に定着する．これらの FairnessIndex は，図 10 で表す各 FairnessIndex と同様な傾向を示しており，理論的な解析の正当性が確認できた．

次に，S1 がもつフロー数  $n$  が 1~6 と変化する場合における，フロー間の公平性を調べた．図 14 は CBR 通信 (パケット送信間隔が 10 ミリ秒)，図 15 は TCP 通信を対象にした結果を示す．これらの結果より，S1 がもつフローの数が増加するに伴って，両方の従来方式におけるフロー間の公平性が劣っていくことが分かった．それに対して，提案方式は  $n$  の全範囲で公平性が優れており，S1 がもつフロー数  $n$  が MAX.f ( $= 4$ ) を超える場合でも，公平性の改善が確認できた．最後に，S1 がもつフロー数  $n$  に対する，チャネルユーティリティの特性評価を行った．図 16 が CBR 通信 (パケット送信間隔が 10 ミリ秒) を対象にした結果を



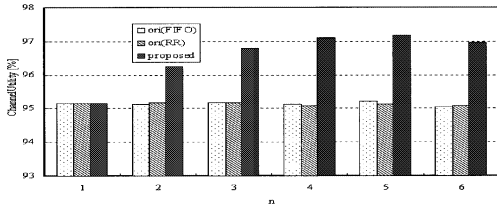


図 16 ChannelUtility の比較 (シングルホップモデル)  
Fig. 16 Channel utility comparison (single-hop model).

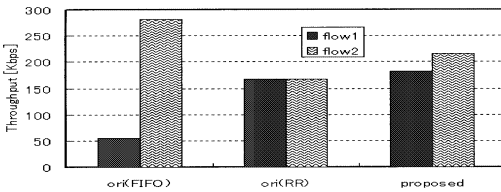


図 17 各フローのスループット (マルチホップモデル)  
Fig. 17 Throughput achieved by individual flows.

示す。結果より、提案方式は従来方式と比べ、最大で約 2% 近くのチャネルユーティリティの改善が確認できた。

### 5.2 マルチホップモデル

図 1 に示すマルチホップモデルを用いて、特性評価を行う。M1 と M2 はそれぞれ、M3 ヘデータ通信を行っている。M2 は、M1 と M3 間のフローに中継サービスも与える。図 17 は、CBR パケット送信間隔が 10 ミリ秒の場合の、各フローのスループット比較を示す。図 17 から分かるように、ori(FIFO) では各フローのスループット差が非常に大きい。それに比べ、提案方式は両フローのスループット差が小さい。しかし、本モデルにおいて、ori(RR) が公平性の面では、提案方式よりも優れている。その原因について以下のように考える。図 1 において、M2 における RR スケジューラが Flow1 と Flow2 を公平に送信するためには、Flow1 用と Flow2 用の両方のバッファからパケットを順番に取り出して送信する必要がある。もし、Flow1 用または Flow2 用のバッファのどちらかが空である状態が続くと、RR スケジューラがもう一方のフローのパケットを連続して送ることになり、フロー間の公平性が劣る。具体的に、図 1 に示す M2 における Flow2 用のバッファを考える場合、Flow2 は M2 で発生しており、トラヒック発生レートが無線リンク帯域より高いため、M2 のリンク層における Flow2 用のバッファにはパケットがたまっている状態となる。次に、ori(RR) と提案方式において、M2 における Flow1 用のバッ

表 4 トータルスループット (マルチホップモデル)  
Table 4 Total throughput.

ori (FIFO)	334.48 [kbit/s]
ori (RR)	334.48 [kbit/s]
proposed	398.46 [kbit/s]

ファについて考える。ori(RR) における、802.11MAC ベースの従来方式は、端末間に同等な帯域を割り当てており、M1 が 1 本のフロー (Flow1)、M2 が 2 本のフロー (Flow1、Flow2) の送信を行うため、M1 が送信する Flow1 (M2 が受信する) のレートは M2 が送信する Flow1 及び Flow2 のレートの和に等しくなる。したがって、M2 が受信する Flow1 のレートは M2 が送信する Flow1 のレートより高いことが分かる。よって、M2 の Flow1 用のバッファにもパケットがたまることになり、RR スケジューラは、Flow1 用と Flow2 用の両方のバッファからパケットを順番に取り出して送信することができ、フロー間に公平性が改善される。それに対して、提案方式はフロー間に同等な帯域を割り当てるため、M2 に到着する Flow1 と M2 から送信される Flow1 のレートがほぼ等しくなる。したがって、M2 の Flow1 用のバッファにおいて、パケットの受信と送信は同等なレートで行われる。これによって、M2 の Flow1 用のバッファが空となる状態がたびたび生じるため、RR スケジューラが Flow2 のパケットを連続して送信してしまい、Flow1 と Flow2 間の公平性が劣ったと考えられる。

表 4 にネットワークのトータルスループットの比較を示す。表 4 で示されるように、提案方式は、従来方式に比べて 64 [kbit/s] 高いトータルスループットを得ることができた。表 3 と表 4 から、提案方式によるトータルスループットの改善は、シングルホップモデル (図 11) においてわずかであるが、本マルチホップモデル (図 1) においてその改善は非常に大きいことが分かる。その原因は次のように考えられる。図 11 のようなシングルホップモデル ( $n = 2$ ) において、提案方式は、S0 に割り当てられる帯域を減少させ、その分 S1 に割り当てられる帯域を増加させることになる。これは、S0 がもつ Flow0 のスループットが  $\Delta$  Th だけ減少し、S1 がもつ Flow1 と Flow2 のスループットの和が  $\Delta$  Th だけ増加することを意味する。トータルスループットは、全フローのスループットの和で示されるため、提案方式によって得られるトータルスループットの改善分は次式で表される。

$$\Delta Total(SingleHop) = -\Delta Th + \Delta Th + \alpha = \alpha \quad (11)$$

ここで、 $\alpha$  は提案方式におけるチャネルユーティリティの改善によるスループットの増加分を示す。一方、図 1 で示すマルチホップモデルにおいても、提案方式は M1 に割り当てられる帯域を減少させ、その分 M2 に割り当てられる帯域を増加させる。これは、M1 と M2 間で転送される Flow1 のスループットが  $\Delta Th$  だけ減少し、M2 と M3 間で転送される Flow1 と Flow2 のスループットの和が  $\Delta Th$  だけ増加することを意味する。しかし、本マルチホップモデルにおけるトータルスループットは、M2 が送信する Flow1 と Flow2 のスループットの和で示されるため、提案方式によるトータルスループットの改善分は次式で表される。

$$\Delta Total(MultiHop) = \Delta Th + \alpha \quad (12)$$

式 (11) で示すように、シングルホップモデルにおいて、トータルスループットの改善は、提案方式によるチャネルユーティリティの改善によるもののみである。それに対して、式 (12) で示すように、本マルチホップモデルにおいて、トータルスループットの改善は、提案方式によるチャネルユーティリティの改善だけでなく、帯域幅の割当処理によるものもある。したがって、図 11 のようなシングルホップモデルに比べて、本マルチホップモデルにおけるトータルスループットの改善が大きいことが分かる。

図 18 に CBR パケット送信間隔の変化に対する、ネットワークの公平性の比較を表す。図 18 では、ori(FIFO) において、CBR パケット送信間隔が 0.005 秒及び 0.001 秒の場合、FairnessIndex は 0.009 及び 0.0005 という非常に小さい値をとる。図 18 から、ori(FIFO) で、CBR 送信レートが増加するに伴って、フロー間の公平性が著しく悪化することが確認できた。これに対し、提案方式及び ori(RR) は、FairnessIndex が高いことが分かった。ここで、ori(RR) は最大で

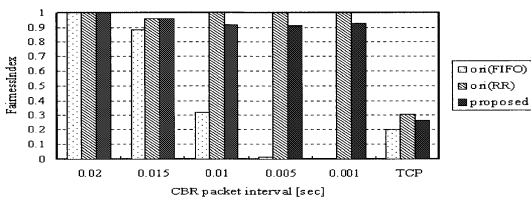


図 18 FairnessIndex の比較 (マルチホップモデル)  
Fig. 18 FairnessIndex comparison of each scheme.

99%、提案方式は 92%の公平性の改善ができた。しかし、TCP トラヒックの場合、FairnessIndex がすべての方式において、0.30 を上回らない。これは、Flow1 の送信 TCP がランダムロスなどに敏感に反応し、頻繁にふくそう制御を行ってしまうためだと考えられる。この問題に関しては、TCP プロトコルが無線ネットワークにおいてかかえている様々な問題 [17] を解決することが先決であると考えられる。最後に、図 19 は、CBR パケット送信間隔の変化に対する、チャネルユーティリティの特性比較を表す。図 19 から、本マルチホップモデルにおいても、提案方式によるチャネルユーティリティの改善が確認できた。

### 5.3 複合型モデル

5.1 と 5.2 において、フロー間の不公平の原因が主に MAC 層またはリンク層に存在するネットワークモデル (図 11 と図 1) を対象に特性評価を行った。ここで、図 11 と図 1 を包含するネットワークモデル (複合型モデルと呼ぶことにする) を対象に、フロー間の不公平の原因がリンク層と MAC 層の両方に存在する場合において、提案方式の特性評価を行う。複合型モデル (図 20) において、S0 と M0 間に Flow0、S0 と M1 間に Flow1、更に S0 を経由して S1 と M2 間に Flow2 が存在する。図 21 は、CBR パケット送信間隔の変化に対するネットワークの公平性の比較を示す。図 21 から、ori(FIFO) と ori(RR) は CBR 送信レートが増加するに伴って、フロー間の公平性が著しく悪化する。それに対して、提案方式はフロー間の公

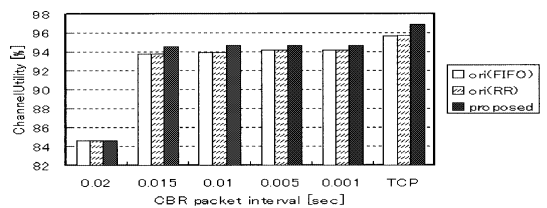


図 19 ChannelUtility の比較 (マルチホップモデル)  
Fig. 19 Channel utility comparison of each scheme.

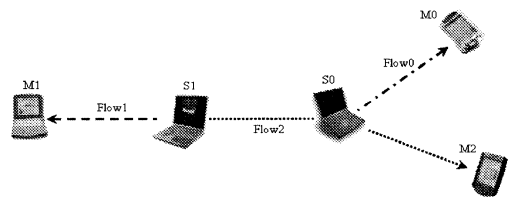


図 20 複合型モデル  
Fig. 20 Complex model.

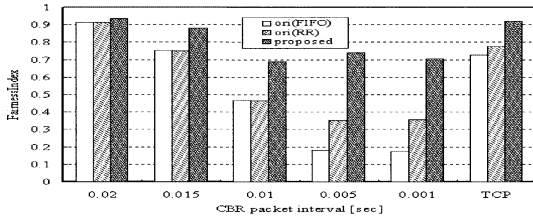


図 21 FairnessIndex の比較 (複合型モデル)  
Fig. 21 FairnessIndex comparison of each scheme.

表 5 トータルスループット (複合型モデル)  
Table 5 Total throughput (complex model).

ori (FIFO)	592.69 [kbit/s]
ori (RR)	591.40 [kbit/s]
proposed	597.87 [kbit/s]

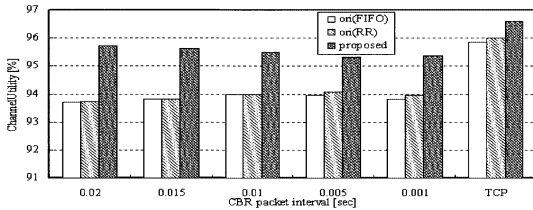


図 22 ChannelUtility の比較 (複合型モデル)  
Fig. 22 Channel utility comparison of each scheme.

公平性を著しく改善することが確認できた。また、表 5 は、CBR のパケット送信間隔が 0.01 秒の場合におけるトータルスループットの比較を示す。最後に、図 22 は、CBR パケット送信間隔の変化に対するチャネルユーティリティの比較を、FTP の結果を図の右端に併せて表す。図 22 から、提案方式におけるチャネルユーティリティが最大で 2% ぐらいの改善ができることが確認できた。

## 6. む す び

本研究では、無線アドホックネットワークにおいて、1 回のチャネルアクセスで異なるフローのパケットを複数送信する、フロー間の公平性の改善方式を提案した。提案方式は、802.11MAC ベースの従来方式に若干の修正を加えるだけで、フロー間の公平性だけでなく、ネットワーク全体のパフォーマンス及び、チャネルユーティリティなど、様々な面で有効である。提案方式の有効性を確認するため、NS ネットワークシミュレータによる性能評価を行った。シミュレーションは、MAC 層におけるフロー間の公平性の改善を確認できるシングルホップモデル、リンク層におけるフロー間

の改善を確認できるマルチホップモデル更に、リンク層及び MAC 層におけるフロー間の公平性の改善を総合的に確認できる複合型ネットワークモデルを対象に提案方式の有効性を確認できた。

本論文では、1 回のチャネルアクセスで送信するパケット数を固定値にしているが、今後はネットワークの状態に応じて、変更可能な方式を検討する。更に、今回のシミュレーションでは、無線端末の移動を考慮していないが、今後はアドホックネットワークにおいてモビリティに関する評価実験を行う予定である。

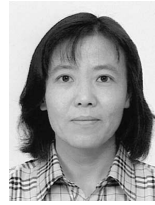
謝辞 本研究を進めるにあたり、日ごろからごべんたつ頂く幣所小花所長、小宮山所長、有益な助言を頂いた情報通信研究機構主任研究員シラジ様、幣研究室研究員ボルジン様並びに研究員各位に感謝する。また、本研究は独立行政法人「情報通信研究機構」の研究委託により実施したものである。

## 文 献

- [1] M. Frodigh, S. Parkvall, C. Roobol, P. Johansson, and P. Larsson, "Future-generation wireless networks," IEEE Pers. Commun. Mag., vol.8, no.5, pp.10-17, Oct. 2001.
- [2] H.Y. Hsieh and R. Sivakumar, "Performance comparison of cellular and multi-hop wireless networks: A quantitative study," Proc. ACM SIGMETRICS, pp.113-122, Boston, MA, USA, June 2001.
- [3] T. Miyamura, T. Kirimoto, K. Nakagawa, P. Dhananjaya, M. Aoki, and N. Yamanaka, "A buffer management mechanism for achieving approximately fair bandwidth allocation in high-speed networks," IEICE Trans. Commun., vol.E85-B, no.8, pp.1434-1441, Aug. 2002.
- [4] E.L. Hahne and R.G. Gallager, "Round robin scheduling for fair control in data communication networks," Proc. IEEE ICC, pp.103-107, June 1986.
- [5] M. Katevenis, S. Stefanos, and C. Courcoubetis, "Weighted round-robin sell multiplexing in a general-purpose ATM switch chip," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol.9, no.8, pp.1265-1279, Oct. 1991.
- [6] ANSI/IEEE Std 802.11, "Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications," 1999.
- [7] C.E. Koksai, H. Kassab, and H. Balakrishnan, "An analysis of short-term fairness in wireless media access protocols," ACM SIG-METRICS 2000, pp.118-119, Santa Clara, CA, June 2000.
- [8] H. Luo, S. Lu, and V. Bharghavan, "A new model for packet scheduling in multihop wireless networks," MOBICOM, pp.76-86, Aug. 2000.
- [9] J. Jangeun and M.L. Sichitiu, "Fairness and QoS in multihop wireless networks," IEEE Vehicular Technology Conference, vol.5, 6-9, pp.2936-2940, Oct.

- 2003.
- [10] I. Gruber, A. Baessler, and H. Li, "Fair WLAN scheduling for ad hoc networks with access points," poster, MobiHoc'04, Tokyo, Japan, May 2004.
- [11] A. Woo and D.E. Culler, "A transmission control scheme for media access in sensor networks," MobiCom'01, pp.221-235, Rome, Italy, July 2001.
- [12] V. Bharghavan, A. Demers, S. Shenker, and L. Zhang, "MACAW: A media access protocol for wireless LANs," SIGCOMM'94, pp.212-225, Sept. 1994.
- [13] IEEE 802.11 WG, Draft Supplement to Part 11: Wireless Medium Access Control (MAC) and physical layer (PHY) specifications: Medium Access Control (MAC) Enhancements for Quality of Service (QoS), IEEE 802.11e/D2.0, Nov. 2001.
- [14] D. Vardalis, On the Efficiency and Fairness of Wired/Wireless Networks, Master Thesis, State University of New York at Stony Brook, 2001.
- [15] USB/LBNL/VINT Network Simulator ns (version2), <http://www.isi.edu/nsnam/ns>
- [16] S. Choi, J. del Prado, S. Shankar, and S. Mangold, "IEEE 802.11e contention-based channel access (EDCF) performance evaluation," Proc. IEEE ICC 2003, pp.1151-1156, Anchorage, AL, USA, May 2003.
- [17] K. Pentikousis, "TCP in wired-cum-wireless environments," IEEE Commun. Surveys, vol.3, no.4, pp.2-14, Fourth Quarter, 2000.

(平成 16 年 6 月 28 日受付, 10 月 12 日再受付)



張 兵 (正員)

昭 58 中国北京航空航天大学卒。平 2 広島大学院博士課程了。平 3 郵政省通信総合研究所(現(独)情報通信研究機構)入所。以来,統合的画像処理,ニューラルネットワーク研究に従事。その間,平 7~8 米国テネシー大学神経・解剖学科博士研究員。平 12 ATR 適応コミュニケーション研究所に出入。現在,適応的 QoS 制御方式,無線 TCP の研究に従事。主任研究員。工博。



奥村 千恵 シャグダル  
(正員)

平 14 長岡技科大・工・電気・電子システム卒。平 16 同大学院修士課程了。同年 ATR 適応コミュニケーション研究所に入所。適応的 QoS 制御方式の研究に従事。



中川 健治 (正員)

昭 55 東工大・理・数学卒。昭 60 同大学院博士課程満期退学。昭 60 NTT 研究所入社。平 4 長岡技科大工学部助教授。待ち行列,ネットワーク特性評価,大偏差理論等の研究に従事。理博。IEEE,情報理論とその応用学会,日本数学会各会員。