

無線メッシュネットワークにおけるゲートウェイ分散方式の提案と評価

伊藤 将志^{†1} 鹿間 敏弘^{†2} 渡邊 晃^{†1}

無線 LAN の AP (Access Point) 間をアドホックネットワークによって接続する無線メッシュネットワークの研究に注目が集まっている。無線メッシュネットワークは AP を自由に設置でき、容易に無線ネットワークの範囲を広げることができるが、実運用するにはまだ多くの課題が残されている。

無線メッシュネットワークでは、インターネットなどの外部のネットワークと接続する際に、複数の GW (Gateway) を利用する方法が研究されている。これまで、端末の所属する AP から最もホップ数の少ない GW に接続する方法が検討された例があるが、端末位置の分布に偏りが生じると、GW の利用効率が低下するという問題が生じる。また、パケットごとに複数の GW に分配する方式も検討されているが、TCP のふくそう制御により通信のスループットを低下させてしまう。そこで、我々はセッションごとに複数の GW に分配することにより、GW を効率的に利用し、かつ TCP 通信のスループットに影響を与えない方式を提案する。シミュレーションでは提案方式において、既存方式に比べて TCP 通信のスループットが大きいことを明らかにした。

A Proposal of Gateway Decentralization Method in Wireless Mesh Networks and Its Evaluation

MASASHI ITO,^{†1} SHIKAMA TOSHIHIRO^{†2} and AKIRA WATANABE^{†1}

A study of wireless mesh networks that connects APs by using the ad-hoc network are drawing much attention. Though the wireless mesh network can set APs freely and extend wireless range easily, it has various problems to be solved. In wireless mesh network, a method of using multiple GW (gateway) when connecting with an external network like the internet have been studied. There is, for instance, a way of connecting with GW with the least number of hops from AP which belongs to the terminal. However, when the same GW is used by many terminals at the same time, the utilization efficiency of the GWs decrease. Moreover, through, there is a method of transmitting packets for multiple GWs, it decreases TCP throughput because of congestion control. Thus, we propose a method of reducing the decrease in the throughput of TCP communication and at the same time improving the utilization efficiency of the GWs, by way of transmitting to GWs "in session". Based on the result of the simulation, we make clear that the TCP throughput becomes larger in the session distribution method compares with the existing method.

1. はじめに

無線 LAN は、配線が不要であり、端末が自由に移動できることから、今後とも広く普及することが期待されている。無線 LAN にはインフラストラクチャモードとアドホックモードがあり、インフラストラクチャモードでは、端末は必ず AP (Access Point) を介して通信し、アドホックモードでは端末同士で直接通信を行う。アドホックモードの応用として無線アド

ホックネットワークが研究されている。無線アドホックネットワークでは、互いに電波の届かない端末同士が通信する場合、その中間に位置する端末がパケットの中継を行う。インフラストラクチャモードに対して、無線アドホックネットワークは、AP の存在しない場所で、端末のみによるインフラ構築を可能にする。しかし、他端末のパケットを中継するため、自端末のリソースをユーザの意図に反して使用してしまうという課題がある。また、経路の安定性、安全性の問題から、活用の範囲が限られている。そこで、近年では無線アドホックネットワークを応用した無線メッシュネットワークの研究に注目が集まっている。無線メッシュネットワークは、これまで有線で接続されていた AP に無線アドホックネットワークを形成する機能を持たせ、AP 間を無線化するものである。そのため、AP

^{†1} 名城大学大学院理工学研究科

Graduate School of Science and Technology, Meijo University

^{†2} 福井工業大学電気電子工学科

Electrical and Electronic Engineering, Fukui University of Technology

の設置の自由度を向上し、容易に無線ネットワークのエリアを拡張することができる。無線メッシュネットワークは端末のリソースを勝手に消費するという問題がなく、中継装置となる AP は移動しないので、経路も比較的安定しているという特徴がある。利用用途としては、公共ネットワーク、災害時の臨時ネットワーク、ローカルな地方へのブロードバンドの提供などが期待されている。無線メッシュネットワークは現在、様々な研究機関で研究されており¹⁾⁻⁶⁾、試験的な実運用なども行われている。IEEE でも 802.11 のタスクグループ s による標準化が進められている⁷⁾。著者らも文献 8) において、シームレスハンドオーバの可能な無線メッシュネットワークを提案済みである。しかしながら、無線メッシュネットワークが実用化されるには、さらにいくつかの課題が残されている。

残された課題の 1 つとしてインターネット等の外部のネットワークとの接続方法が上げられる。無線メッシュネットワークから外部ネットワークに接続する場合、端末の所属する AP から GW (Gateway) までのホップ数はできるだけ少ない方が通信スループットは向上する。そのため、無線メッシュネットワークと外部ネットワークの間に複数の GW を設置し、AP ができるだけ高い通信スループットが見込める GW を選択する手法の研究が行われている⁹⁾⁻¹²⁾。しかし、この手法では端末の分布が 1 つの GW 近傍に集中してしまった場合、その GW が帯域を極限まで消費する一方、他の GW は帯域を余らせてしまうという問題がある。そこで、複数の GW でトラフィックを分散する方式が研究されている¹³⁾。文献 13) では、AP は端末からパケットを受けとった際、各 GW への転送比率を決め、それに従って、パケットごとに異なる GW を介して外部の端末と通信する。しかし、この方法では TCP 通信を行う際、GW ごとにパケット到達時間のゆらぎが発生するため、TCP の輻輳制御が動作し、通信のスループットを低下させてしまうという課題がある。

本稿では、パケット単位で分配するのではなく、セッション単位で複数の GW へ分配することにより、TCP 通信のスループット低下の課題を解決し、かつ、GW の利用を効率的に行える方法を提案する。

以下、2 章で既存技術とその課題について、3 章で提案方式の説明をする。4 章ではシミュレーションによる評価を述べ、5 章でまとめる。

2. 既存技術とその課題

本章では無線メッシュネットワークの既存の GW 選

択方式を単一 GW 選択方式と複数 GW 選択方式に分けて紹介する。前者は複数の GW の中から最も適切な GW を 1 つだけ選択する方式、後者は複数の GW を同時に選択し、トラフィックを分配する方式である。また、無線アドホックネットワークにおける GW 選択方式も技術的に無線メッシュネットワークの GW 選択方式と同様であるため、これらも既存技術に含めて紹介する。

2.1 単一 GW 選択方式

単一 GW 選択方式の手法は単純であり、AP は最もホップ数の近い 1 つの GW を介し、外部ネットワークの端末へパケットを転送する。文献 12) では、端末の分布に対して、効率的な GW の設置場所を選定することにより、通信スループットを高めるを試みている。しかし、実環境では GW の設置場所に制限があることが考えられ、そのような利用環境では効果を発揮できない。また、無線アドホックネットワークを扱う MANET における GW 選択方式でも単一の GW を選択することを基本として研究が行われている⁹⁾⁻¹¹⁾。MANET ではパケットの中継機能を持つ端末の移動頻度が比較的大きいことが前提であり、経路の安定性を確保するため、単一 GW 選択方式が適している。単一 GW 選択手法では、1 つの GW の近傍に端末が集中すると、トラフィックがその GW に集中し、その間他の GW は利用されないという課題がある。

2.2 複数 GW 選択方式

文献 13) では、単一 GW 選択方式の課題を解決するため、AP が複数 GW を選択し、トラフィックを分配する方式を提案している。AP は GW までのホップ数、伝送路のトラフィック余裕値などのパラメータから、各 GW へのパケットの転送比率を計算する。AP は端末からパケットを受信すると、転送比率に従って各 GW にパケットを転送する。GW はパケットをさらに MGW (Master Gateway) へ転送し、MGW がまとめて、外部ネットワークへ転送する。このとき、パケットの到達時間の揺らぎを調整するため、AP は予め計算した各 GW への転送時間に応じて、転送前に遅延を与える。しかし、この方法では同一セッション内でパケットの経路が異なるため、パケットの順序逆転が容易に発生し、TCP のふくそう制御が起こりやすくなる。また、遅延が増加するため、ウィンドウサイズの上昇を遅らせることになる。その結果、ウィンドウサイズが小さいままとなりスループットの低下を招くという課題がある。

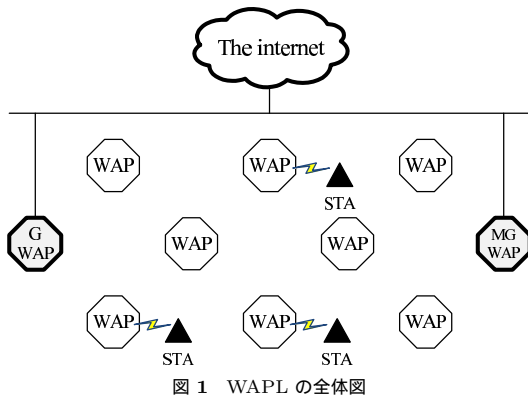


図 1 WAPL の全体図
Fig.1 Entire Schematic Picture of WAPL

3. 提案方式

本稿では、GW へのトラフィック集中を避けるため、複数 GW 選択方式を採用する。2.2 節に示したパケット単位で複数 GW に分配する方式に対して、セッション単位で分配する方式を提案する。以後、それぞれをパケット分配方式、セッション分配方式と呼ぶ。

パケット分配方式とセッション分配方式を比較評価するため、基盤となる無線メッシュネットワークとして WAPL (Wireless Access Point Link)⁸⁾ を用いる。

3.1 WAPL

WAPL の全体図を図 1 に示す。WAPL では無線化された AP を WAP (Wireless Access Point)、有線部と接続する WAP を GWAP (Gateway WAP)、パケットを集約して外部ネットワークと接続する GWAP を MGWAP (Master GWAP) と呼ぶ。外部との通信は必ず MGWAP を経由する。GWAP と MGWAP 間の通信は有線で接続し、ポトルネックになることはないものとする。MGWAP は GWAP の機能を包含する。

GWAP および MGWAP は自身の近傍のトラフィック情報とホップカウントを含むメッセージを定期的にフラッディングする。このメッセージには、各 WAP を中継する毎に、ホップ数のカウントが加算される。このメッセージにより、各 WAP はシステム内に複数存在する GWAP の近傍のトラフィック状況と GWAP までのホップ数を把握する。

3.2 セッション分配方式

セッション分配方式の概要を図 2 に示す。WAP は端末からパケットを受け取ると、パケットの宛先が外部アドレスの場合、その時点で保持している各 GWAP のトラフィックとホップ数から、最も高スループットが期待できる最適 GWAP を決定する。GWAP の決定

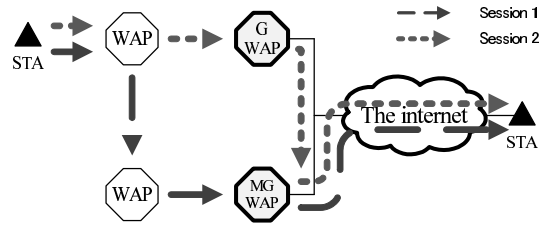


図 2 セッション分配方式
Fig.2 Session Distribution Method

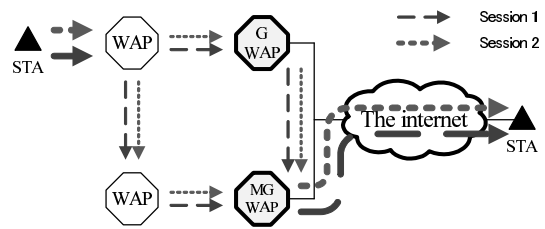


図 3 パケット分配方式
Fig.3 Packet Distribution Method

方法は 4.2 節で説明する。以後の同一セッションのパケットは最初に選択した GWAP に転送する。セッションの識別はコネクション ID (IP アドレス、ポート番号、プロトコル番号) により行う。GWAP は受信したパケットを MGWAP へ転送する。MGWAP はパケットを外部ネットワークに転送するとともに、セッションと転送元の GWAP の関係を記憶する。外部ネットワークからの同一セッションのパケットは MGWAP で記憶された内容に従って GWAP へ転送され、宛先端末の所属する WAP へ転送される。このようにして、同一セッションの往復は同一経路を通ることになる。別のセッションが開始される場合は、その時点での最適 GWAP が新たに選択される。

外部から通信が開始される場合、MGWAP は外部ネットワークからパケットを受け取ると、システム内の全 WAP に対して現時点での最適 GWAP を問い合わせるメッセージをフラッディングする。目的の端末が所属する WAP は最適 GWAP の IP アドレスを応答する。MGWAP はセッションと GWAP の関係を記憶し、経路が確定する。

3.3 改良パケット分配方式

セッション分配方式の効果を明らかにするため、パケット分配方式を WAPL に適用する。WAPL に適用したパケット分配方式の概要を図 3 に示す。WAP は各 GWAP のトラフィックとホップ数から各 GWAP の転送効率を計算し、各 GWAP に対する転送比率を決定する。転送比率の決定方法は 4.2 節で説明する。WAP が端末からパケットを受け取ると、セッション

とは無関係に転送比率に従って、パケットを各 GWAP に分配する。GWAP はこれらのパケットを MGWAP に集約し、MGWAP は外部ネットワークにパケットを転送する。外部から通信が開始される場合、MGWAP は端末からパケットを受け取ると、WAP に対して各 GWAP への転送比率を求めるメッセージをフラッディングする。目的の端末が所属する WAP は各 GWAP に対する転送比率を応答する。MGWAP はその比率に従って GWAP へパケットを分配する。ここで、文献 13) のように経路ごとの遅延時間の調整を行うために送信時間に遅延を挿入することも可能であるが、経路ごとに背景負荷が異なったり、背景負荷が急激に変化する場合は考えると、この方法ではパケットの順序逆転が極めて発生しやすい。そこで、本論文では WAP および MGWAP 内で、パケットをバッファリングして順序制御を行うことにした。内部端末から外部端末への通信開始の場合、WAP ではパケットにシーケンス番号を付加する。MGWAP では、各 GWAP から受け取ったパケットに対してシーケンス番号を元に順序制御を行い、外部ネットワークへ転送する。一定時間シーケンス番号が揃わない場合は、そのまま順序制御されたパケットを外部ネットワークへ転送する。外部端末から内部端末への通信開始の場合、MGWAP がシーケンス番号を付加し、WAP が順序制御の役割を担う。この方式を文献 13) のパケット分配方式と区別するため改良パケット分配方式と呼ぶ。

4. シミュレーションによる評価

WAPL の有効性を示すため、ネットワークシミュレータ ns-2 (network simulator-2)¹⁴⁾ を利用してセッション分配方式と改良パケット分配方式の比較評価を行った。各方式において TCP スループットの比較、ネットワークトラヒックの公平性を比較評価した。

4.1 シミュレータの実装

ns-2 は研究機関で一般に利用されているフリーソフトである。しかし、ns-2 はアドホックネットワークの機能は充実しているものの、現時点では無線 LAN インフラストラクチャモードの機能が備わっていない。従ってそのままではメッシュネットワークのシミュレーションもできない。そこで、ns-2 に以下のような改造を施し、シミュレーション環境を構築した。ns-2 の IEEE802.11 機能実行モジュールにビーコンの発信、電波強度による AP 離脱と次の AP への移動の判断、離脱・参加処理を追加した。また、無線メッシュネットワークは AP がインフラストラクチャモードとアドホックモードの 2 種類のインタフェースをもつ必要

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

背景負荷発生端末	
台数	0~60 台
通信タイプ	FTP (外部-内部) ストリーミング (外部-内部) VoIP (外部-内部, 内部-内部)
ホップ数 (AP 間)	1, 2, 3, 4, 5
メッシュネットワーク	
WAP 台数	37 台
電波到達距離	100m
WAP (iAP) 間の距離	80m
フィールド	860x580 (m)
MAC プロトコル	IEEE802.11g

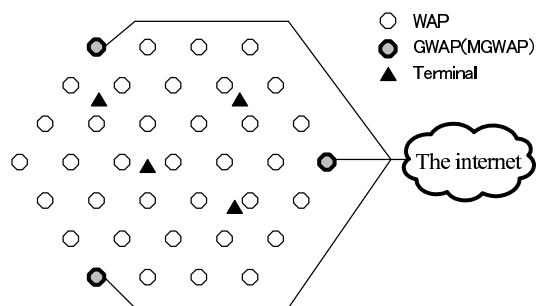


図 4 シミュレーションフィールド
Fig. 4 Simulation field.

があるが、それぞれのインタフェースを持つノードの内部モジュール間のインタフェース同士をネットワークを介さず直接接続することにより WAP を実現した。さらに、3 章で説明したセッション分配方式と改良パケット分配方式の両方式を実装した。今回のシミュレーションでは簡単のためインフラストラクチャモード側はアドホックモード側と干渉しない上で同一チャネルとした。

4.2 GWAP の決定方法

セッション分配方式においても、改良パケット分配方式においても、WAP が端末からのパケットを受け取った際に、GWAP の比較評価を行い、セッション分配方式であれば最適 GWAP を決定し、改良パケット分配方式であれば、各 GWAP に対する転送比率を決定する。本研究では、予め調査したネットワークトラヒックと通信スループットの関係式を利用して GWAP を比較することにした。GWAP 周辺トラヒックと、内部と外部の端末間の TCP セッションのスループットの関係性を一次方程式にした。この一次方程式を内部端末の所属する AP から GWAP までのホップ数ごとに生成した。この式を導くために使用したシミュレーションパラメータを表 1 に示す。また、このときのシミュレーションフィールドを図 4 に示す。

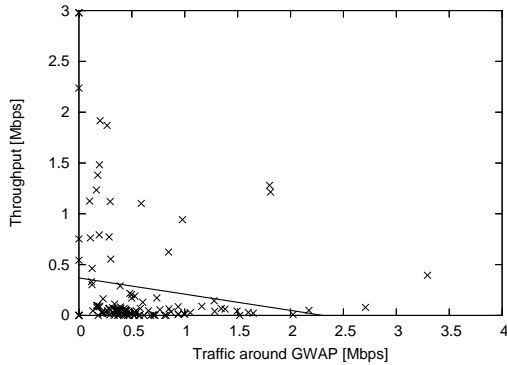


図5 GWAP 周辺トラフィックと TCP スループットの関係
Fig. 5 Relation of traffic around GWAP and TCP throughput.

表2 ホップ数ごとの一次方程式

Table 2 Linear equations of each number of hops.

ホップ数	一次方程式
1	$-7.08x + 6.32$
2	$-3.30x + 2.14$
3	$-0.16x + 0.37$
4	$-0.26x + 0.33$
5	$-0.24x + 0.28$

図4に示すように，WAPの台数は37台とし，WAP同士の距離はすべて等間隔の80mで近隣のWAPが六角形を作るように配置した．背景負荷を発生させるための端末をWAP内に複数台設置する．背景負荷用端末の台数を調整し，トラフィック量を変化させた．背景負荷用端末が発生するセッションは外部とのFTP通信，外部から受信するストリーミング通信，内部端末同士のVoIP通信，内部と外部の端末間のVoIP通信を想定した．これらのセッションは端末の台数に関わらず，1:1:1:1のトラフィック量とした．GWAP周辺トラフィックとTCPスループットの関係をホップ数ごとに散布図にプロットし，線形近似曲線を計算した．図5に3ホップのときのGWAP周辺トラフィックとTCPスループットの関係を示す．この結果より，近似直線の方程式は $y = -0.16x + 0.37$ となった．このようにして求めたホップ数ごとの一次方程式を表2に示す．以下のシミュレーションでは，この線形近似曲線によって得た一次方程式を基にGWAPの決定を行った．

4.3 TCP通信に与える影響

セッション分配方式と改良パケット分配方式がTCPスループットに与える影響をシミュレーションによって比較評価した．図6にスループット測定時のシミュレーションフィールドを示す．フィールドには横一列

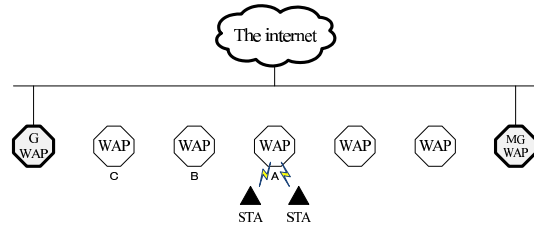


図6 スループット測定時のシミュレーションフィールド
Fig. 6 Simulation field of throughput measurement

表3 スループットの比較

Table 3 Comparison of throughputs.

位置		A	B	C
パケット分配方式	セッション1	2.6	2.1	1.5
	セッション2	1.8	1.6	1.2
	合計1	4.4	3.7	2.7
セッション分配方式	セッション1	3.4	5.9	10.6
	セッション2	2.7	1.6	1.7
	合計1	6.1	7.5	12.3

単位 [%]

にGWAPとMGWAPを1台ずつ，WAPを5台設置した．GWAPとMGWAPは列の両端に配置した．シミュレーションパラメータは表1のメッシュネットワーク部と同様である．この状態で1つのWAPに2台の端末を接続し，外部に対して2つのTCPセッションを張る．GWAPとMGWAPへのホップ数ごとの評価を行うため，端末の位置をA,B,Cと変えて，それぞれシミュレーションを行った．

シミュレーションの結果を表3に示す．セッション分配方式では，位置Cへ移動するほどセッション1のスループットは向上し，セッション2のスループットは低下する．これはセッション2はセッション1のトラフィックを避け，端末が所属するWAPからのホップ数の大きいMGWAPへの経路を選ぶためである．改良パケット分配方式では，どちらのセッションも位置Cへ移動するほど，スループットは小さくなる．これは，所属WAPからのホップ数の大きいMGWAPへ送信されたパケットの遅延が大きくなり，これがMGWAPにおける順序制御によりセッション全体の遅延を大きくしてしまうためである．転送遅延が大きくなると，ふくそうウィンドウの上昇率が低くなり，スループットの低下に繋がる．即ち，改良パケット分配方式では，どれか1つの経路がGWAP(MGWAP)から遠くなると，その経路の影響で全体のスループットが低下する．それに対して，セッション分配方式はセッションごとにホップ数に応じた本来のスループットとなる．その結果，合計スループットを比べるとセッション分配方式の方が高く，提案方式により利用効率が向上す

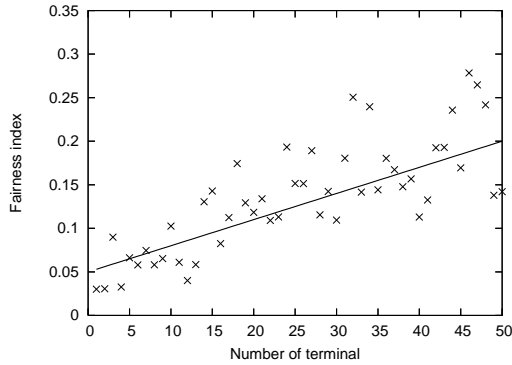


図 7 セッション分配方式における Fairness Index
Fig. 7 Fairness Index for session distribution method.

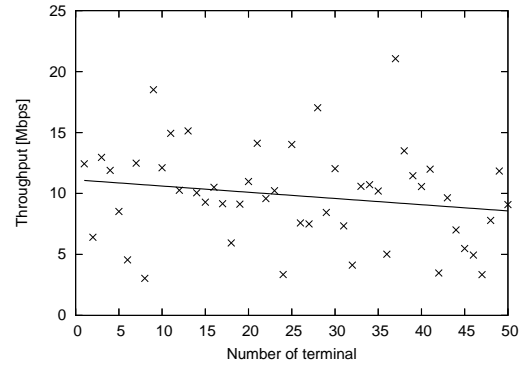


図 9 セッション分配方式における総スループット
Fig. 9 Total throughput for session distribution method.

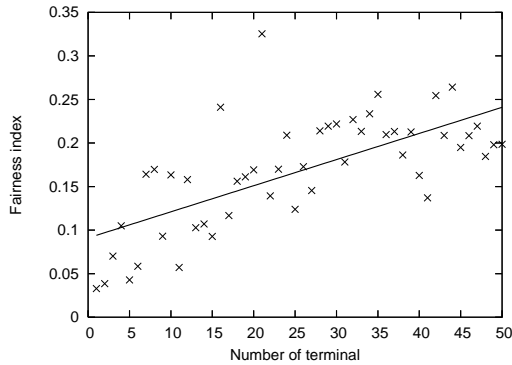


図 8 改良パケット分配方式における Fairness Index
Fig. 8 Fairness Index for improved session distribution method.

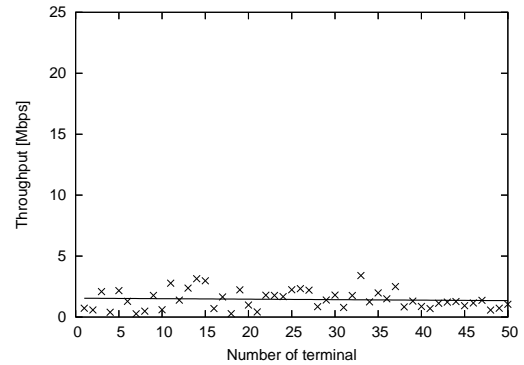


図 10 改良パケット分配方式における総スループット
Fig. 10 Total throughput for improved session distribution method.

ることがわかる。

4.4 公平性

セッション分配方式では、改良パケット分配方式よりも分配の単位が粗いため、ネットワーク全体のトラフィックの公平性を低下させ、各通信のスループットに影響を与える可能性がある。そのため、セッション分配方式と改良パケット分配方式により発生するネットワークトラフィックの公平性の評価を行った。シミュレーションパラメータとトラフィックの発生方法は 4.2 節と同様であり、これらの WAP にセッション分配方式と改良パケット分配方式を適用する。本シミュレーションでは GWAP を 2 台、MGWAP を 1 台設置した。各 WAP で転送したトラフィックを測定し、ネットワーク全体における WAP の負荷の公平性を評価した。公平性の評価には文献 15) による以下の式を利用した。

$$FI = \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n \sum_{i=1}^n (x_i)^2} \quad (1)$$

FI (FairnessIndex) の値は 1 に近いほど公平性が高い。n は全 WAP の台数、 n_i は WAP i の転送トラ

フィックを示す。図 7 にセッション分配方式、図 8 に改良パケット分配方式における FI を示す。

それぞれの横軸はトラフィック発生用の端末の台数、縦軸は FI を示す。データの線形近似曲線に注目すると、端末数が 5 台のときはセッション分配方式では 0.07、改良パケット分配方式では 0.1 を示している。端末数が 50 台のときはセッション分配方式では 0.2、改良パケット分配方式では 0.24 を示している。これより、トラフィック発生端末の台数が少ないほど改良パケット分配方式の方が公平性に優れていることがわかる。ただし、端末数が多くなるほど、改良パケット分配方式とセッション分配方式における公平性の差の割合は小さくなる。これは、どちらの分配方式においても、トラフィックの発生元が多くなるほどトラフィック分散効果が高くなり、その効果が分配単位の粗さの差を打ち消すためである。公平性はトラフィック量が大いときに重要であり、セッション分配方式は十分にトラフィック公平化の効果があるといえる。

次に、ネットワークの公平性が通信に及ぼす影響を

評価するため、内部と外部の間で行われた通信の総スループットを測定した。総スループットを求めるため、MGWAPにおける総転送スループットを測定した。図9にセッション分配方式、図10に改良パケット分配方式におけるトラフィック発生端末の数とMGWAPで転送した通信の総スループットの関係を示す。セッション分配方式は9~11Mbps、改良パケット分配方式は約2Mbpsを示している。両者を比較すると、セッション分配方式の方が高いスループットを達成していることがわかる。これは改良パケット分配方式が転送遅延の増加によりTCPスループットが低下することに加え、1つのセッションが複数の経路に分割されることにより、パケット損失の危険性を高めているためであると考えられる。TCPセッションにおいては、複数の経路のうちの1つでもパケットの損失が発生すると、輻輳制御が発生し、セッション全体のスループットを下げることになる。この現象は、どの端末がどの位置にいても同様に発生する。セッション分配方式では、セッションごとに1つの経路を選択するため、パケット損失の危険性の高い経路を選んだセッションのスループットは低く、パケット損失の危険性の低い経路を選んだセッションのスループットは高い。そのため、ネットワーク全体では効率が上がる。また、両方式とも端末数の増加に対して、総スループットが低下している。これは、端末数の少ないときからGWAP周辺の帯域を限界まで利用していたTCPセッションのスループットが、トラフィックの増加により低下するためである。

以上の結果より、セッション分配方式は公平性において改良パケット分配方式に比べて大きな差はない。うえ、全体のスループットでは格段に優れているといえる。

5. ま と め

本稿では、無線メッシュネットワークと外部ネットワークとの通信におけるTCPスループットの向上とGWの効率的な利用を目的とし、セッション分配方式を提案した。パケットの順序不整合が発生し難いようにした改良パケット分配方式とセッション分配方式の比較評価を行った。その結果、セッション分配方式は改良パケット分配方式よりTCPスループットが改善されることがわかった。また、ネットワークトラフィックの公平性において、セッション分配方式はパケット分配方式と比較しても大きな差がないことを示した。さらに、外部ネットワークとの総通信スループットにおいてはセッション分配方式の方が各段に優れている

ことがわかった。今後はセッション分配方式を実機に実装し、評価を行う。

参 考 文 献

- 1) 大和田泰伯, 照井宏康, 間瀬憲一, 今井博英: マルチホップ無線LANの提案と実装, 電子情報通信学会論文誌B, Vol.J89-B, No.11, pp.2092-2102 (2006).
- 2) MetroMesh:
<http://www.tropos.com/>.
- 3) MeshCruzer:
<http://www.thinktube.com/>.
- 4) Packethop:
<http://www.packethop.com/>.
- 5) Amir, Y., Danilov, C., Hilsdale, M. et al.: Fast Handoff for Seamless Wireless Mesh Networks, *ACM MobiSys* (2006).
- 6) Navda, V., Kashyap, A. and Das, S.R.: Design and evaluation of iMesh: an infrastructure-mode wireless mesh network, *World of Wireless Mobile and Multimedia Networks*, pp.164-170 (2005).
- 7) IEEE802.11:
<http://grouper.ieee.org/groups/802/11/>.
- 8) 伊藤将志, 鹿間敏弘, 渡邊 晃: 無線メッシュネットワーク "WAPL" の提案とシミュレーション評価, 情報処理学会論文誌, Vol.49, No.6 (2008).
- 9) Wakikawa, R., Malinen, J.T., Perkins, C.E., Nilsson, A. and Tuominen, A.J.: Global connectivity for IPv6 Mobile Ad Hoc Networks, *draft-wakikawa-manet-globalv6-05* (2006).
- 10) Jelger, C., Noel, T. and Frey, A.: Gateway and address autoconfiguration for IPv6 adhoc networks, *draft-jelger-manet-gateway-autoconf-v6-02* (2004).
- 11) Ruffino, S. and Stupar, P.: Automatic configuration of IPv6 addresses for MANET with multiple, *draft-ruffino-manet-autoconf-multigw-03* (2006).
- 12) 野村洋平, 新田友里子, 田島滋人, 船曳信生, 中西 透: 無線メッシュネットワークのアクセスポイント間通信での優先度制御に関する一検討, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.106, No.418, pp.9-12 (2006).
- 13) Lakshmanan, S., Sundaresan, K. and Sivakumar, R.: On Multi-Gateway Association in Wireless Mesh Networks, *WiMesh 2006; Second IEEE Workshop on Wireless Mesh Networks*, pp.64-730 (2006).
- 14) ns2:
<http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
- 15) Jain, R.: The art of computer systems performance analysis, *John Wiley Sons* (1991).

無線メッシュネットワークにおける ゲートウェイ分散方式の提案と評価



伊藤 将志[†] 鹿間 敏弘[‡] 渡邊 晃[†]

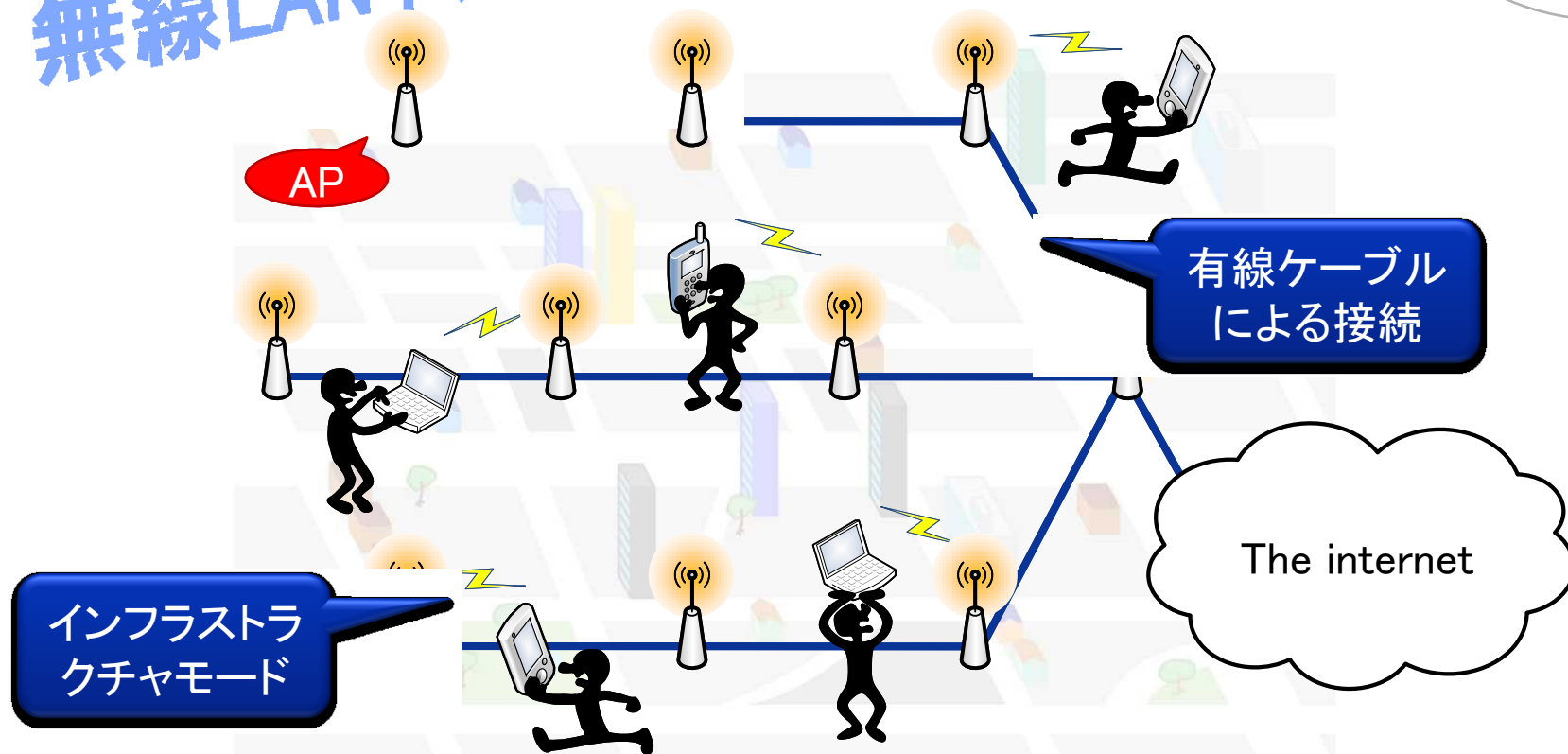
[†]名城大学理工学研究科

[‡]福井工業大学電気電子工学科

無線メッシュネットワークとは



これまでの
無線LANネットワーク

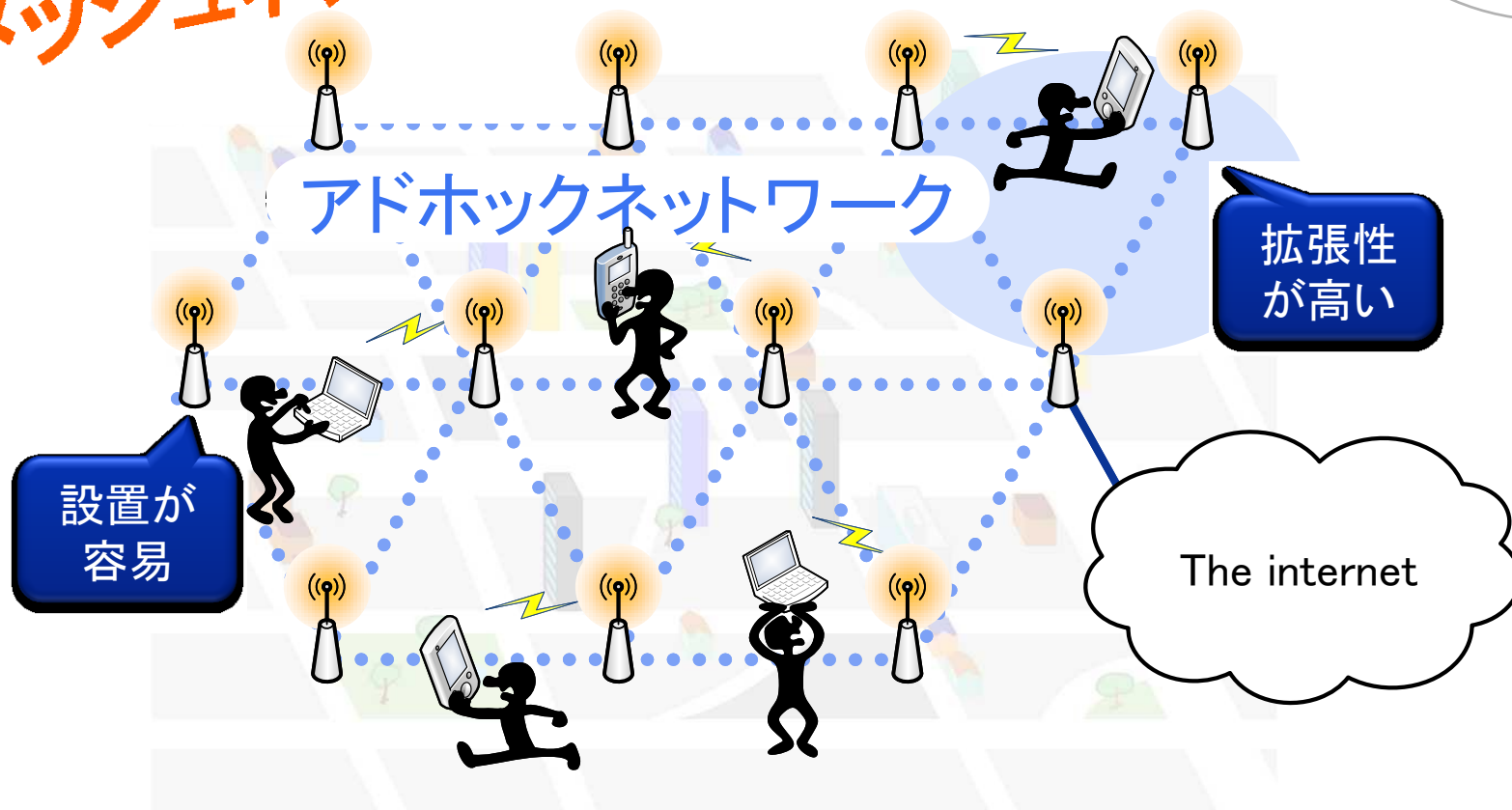


端末の自由な配置と移動性, 通信速度の高速化により普及

無線メッシュネットワークとは



無線 メッシュネットワーク



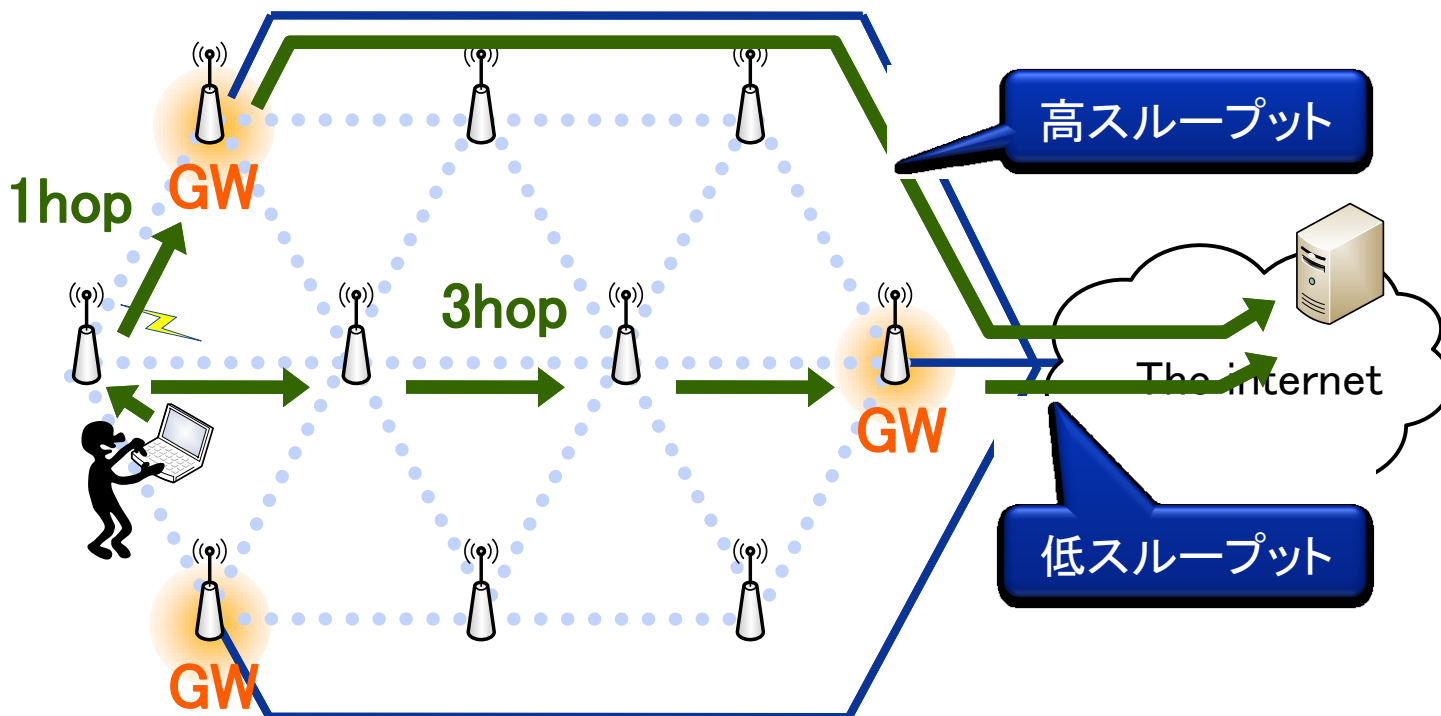
公衆無線LANとしての運用，対災害用にも期待されている

インターネットとの接続



スループットの低下を避けるには
ゲートウェイまでの距離を減らすことが必要

➡ **複数ゲートウェイの設置**



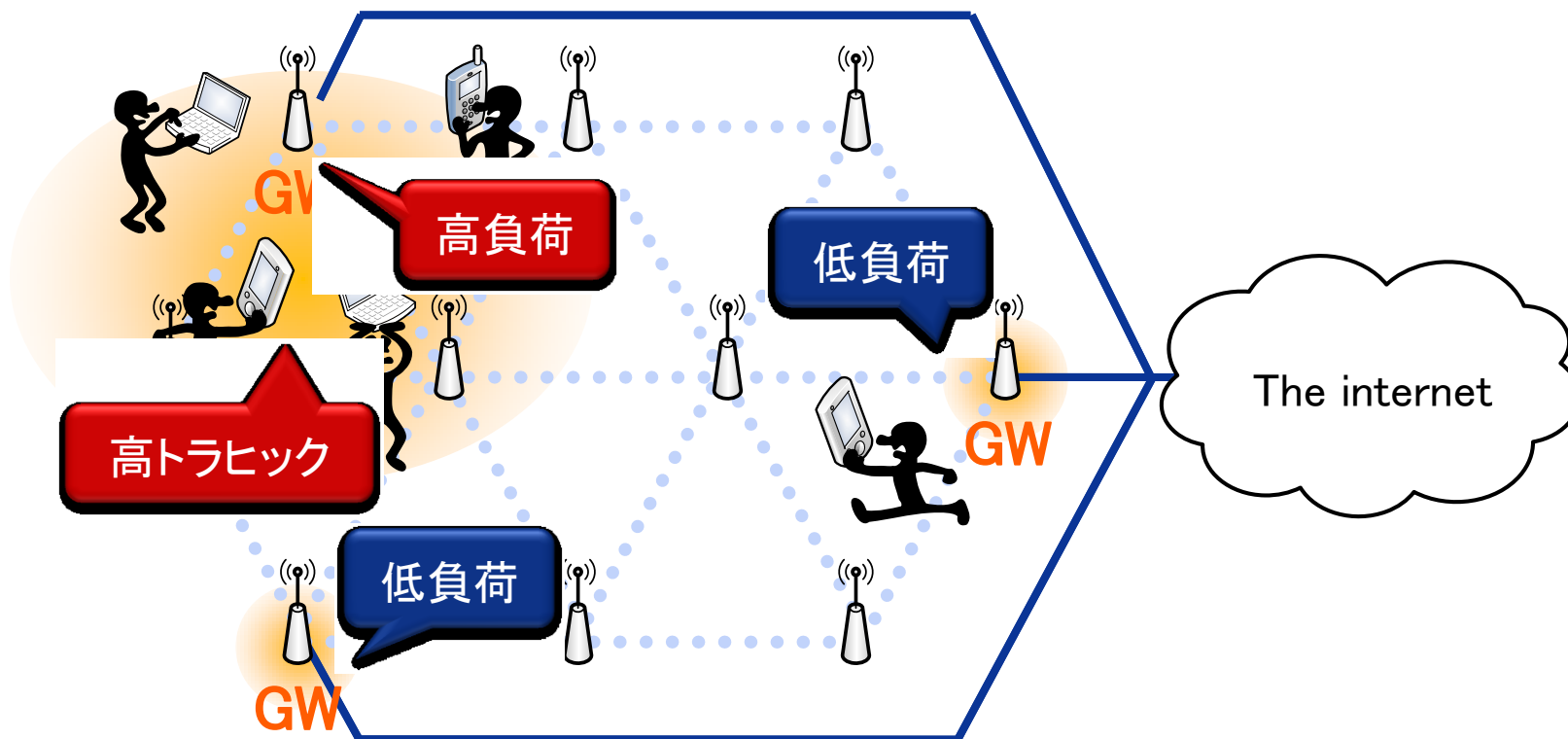
インターネット接続の課題



端末の分布が1つのゲートウェイ近傍に集中したとき



そのゲートウェイは帯域を**極限まで消費**し
他のゲートウェイは帯域を**持て余す**

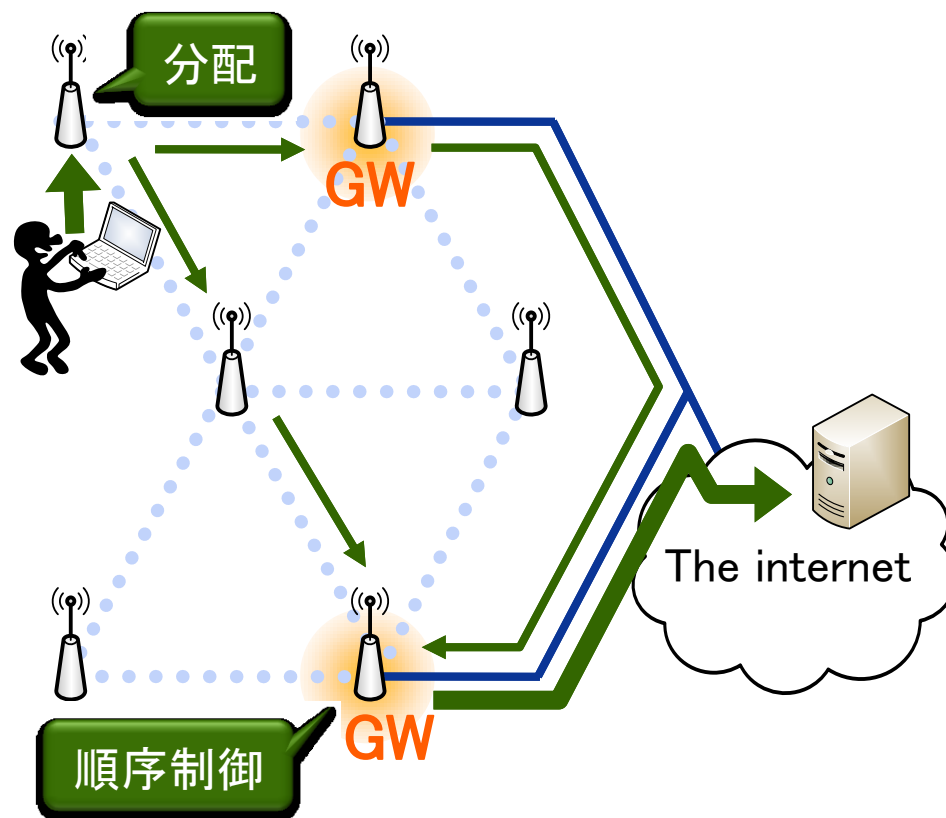




■ MGA: Multi Gateway Association

パケットを複数のゲートウェイに分散する方式

- 各GWまでの経路のホップ数やトラヒックなどから各GWに対する転送比率を決める
- 比率に従い、パケット単位で各GWに分配
- Super-gatewayが各GWからパケットを集約、順序制御を行い、外部端末へ転送



➡ 公平なGWの利用

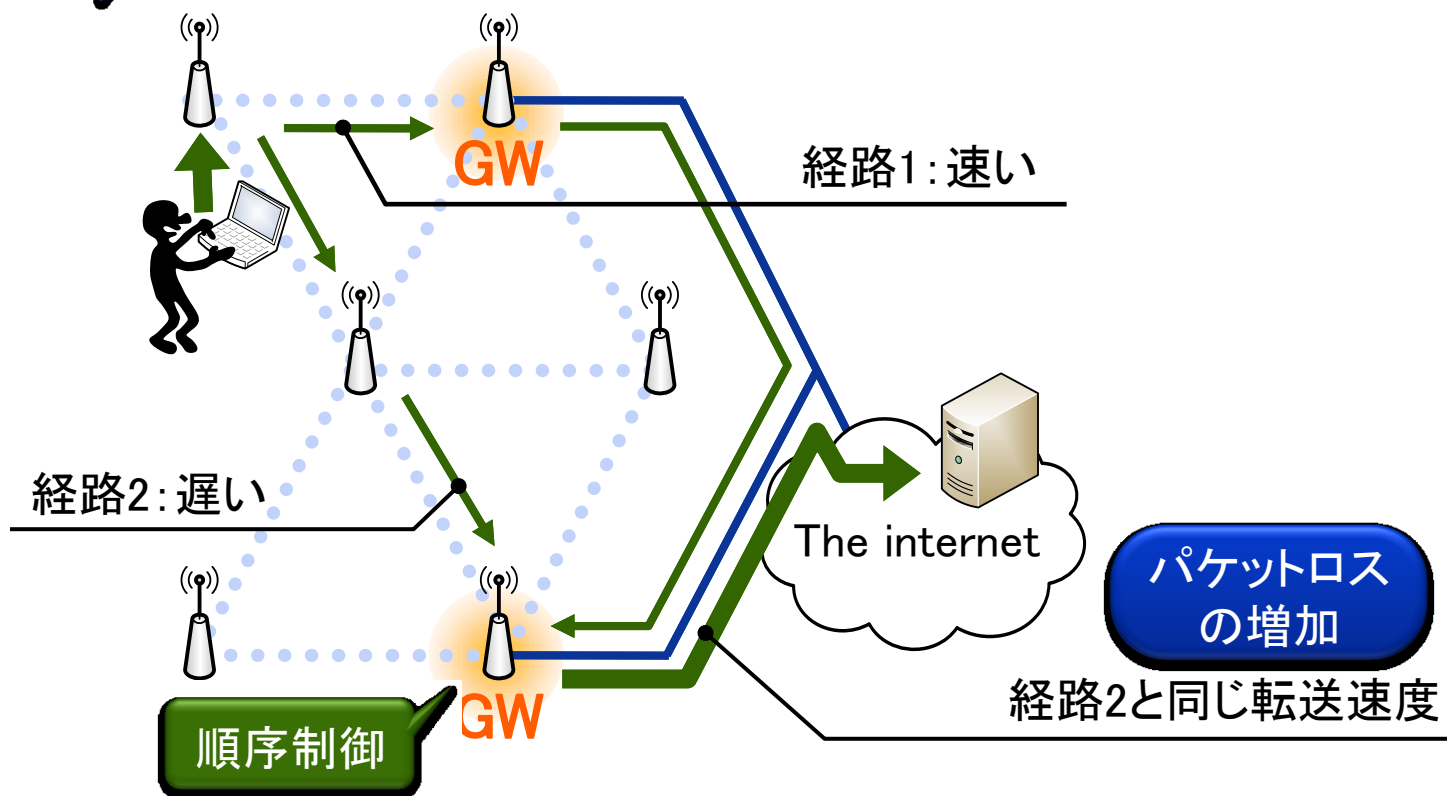
MGAの課題



1つのセッションを2つ以上の経路にわける

➡ 順序制御により転送速度は遅い経路に依存

➡ TCP通信のスループットが下がる





- 複数ゲートウェイの利用
- TCPの特性を考慮

提案方式



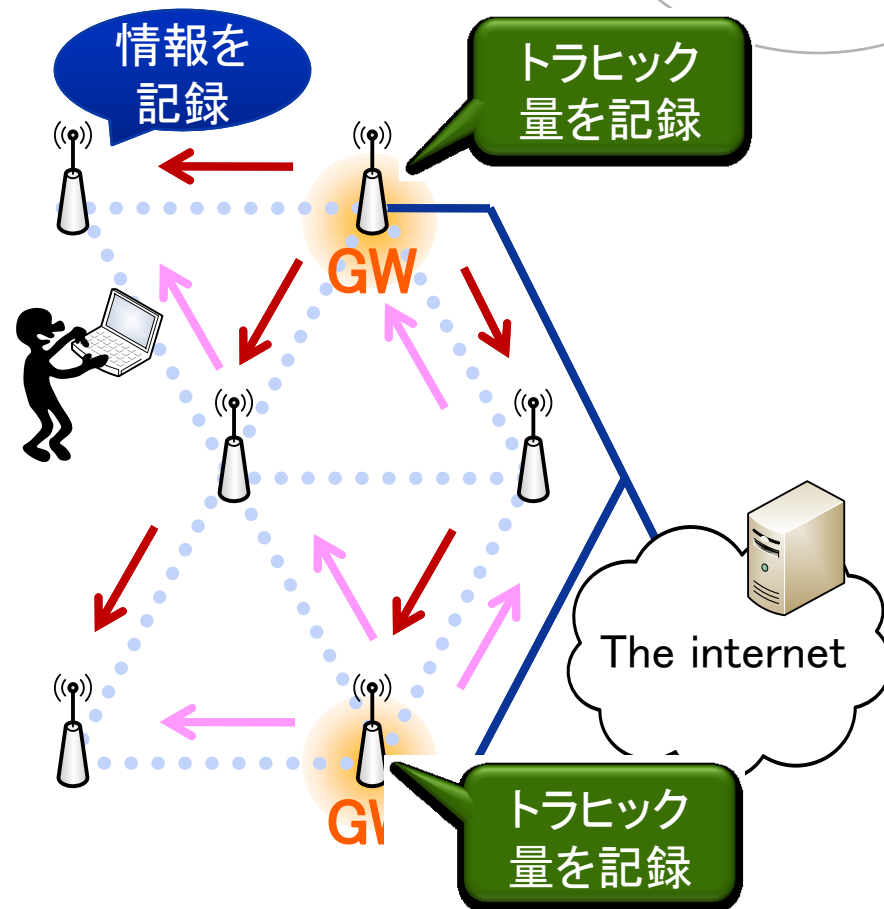
セッション単位での分配

セッション単位で経路をまとめるため、
余計な転送遅延が発生せず、
TCPスループットが向上する。



ゲートウェイ情報の配信

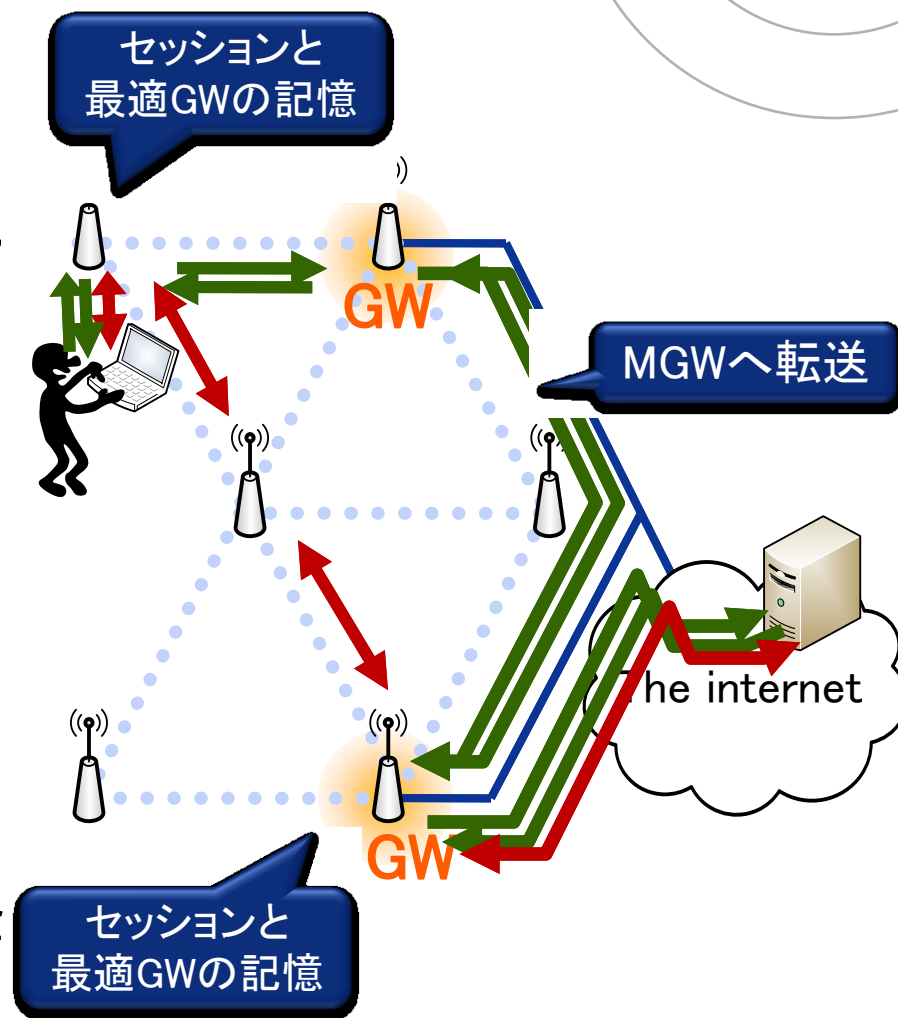
- GWは自分の無線セルに流れるトラフィック量を記録
- メッセージにトラフィック量を記載してフラッディング
- APは中継するごとにメッセージ中のホップカウントをインクリメント
- APはGWまでのホップカウントとGW周辺のトラフィック量を記録





セッションの分配方法

- APは記録した各GWの情報からスループット期待値を計算し、最適GWを決定
- APはセッションと最適GWを対応付けて記憶し、転送
- 最適GWはマスターGWにパケットを転送
- マスターGWはセッションと最適GWを対応付けて記憶
- 以後の同一セッションは同じ経路をたどる





- シミュレーションによる評価
- ns-2を改造
 - 提案方式 → セッション分配方式
 - MGA → パケット分配方式
- GWのスループット期待値の予備シミュレーション
- 公平性の評価のシミュレーション
 - セッション単位で分配することによって、ネットワーク中の利用帯域の公平性がどれだけ低下するか
- TCP通信に与える影響の評価のシミュレーション
 - セッション単位で分配することによって、パケット分配方式より、どれだけTCP通信におけるスループットが改善されるか

GWスループット期待値の予備シミュレーション



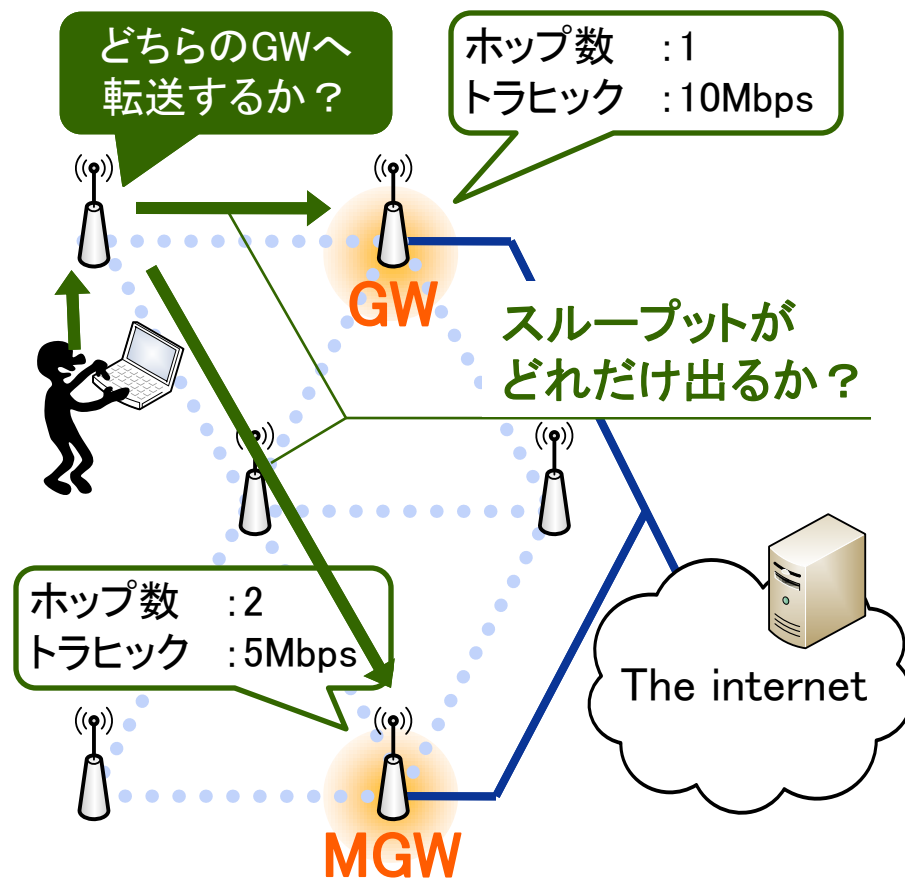
分配時にどのGWを最適GWとするか

ホップ数とトラフィック量から
スループット期待値の算出が必要



予備シミュレーションによって指標
を求める

- 各ホップ数, 各トラフィックの場合のTCPスループットを測定
- 測定結果をもとに, どちらのGWへ転送するかを決定

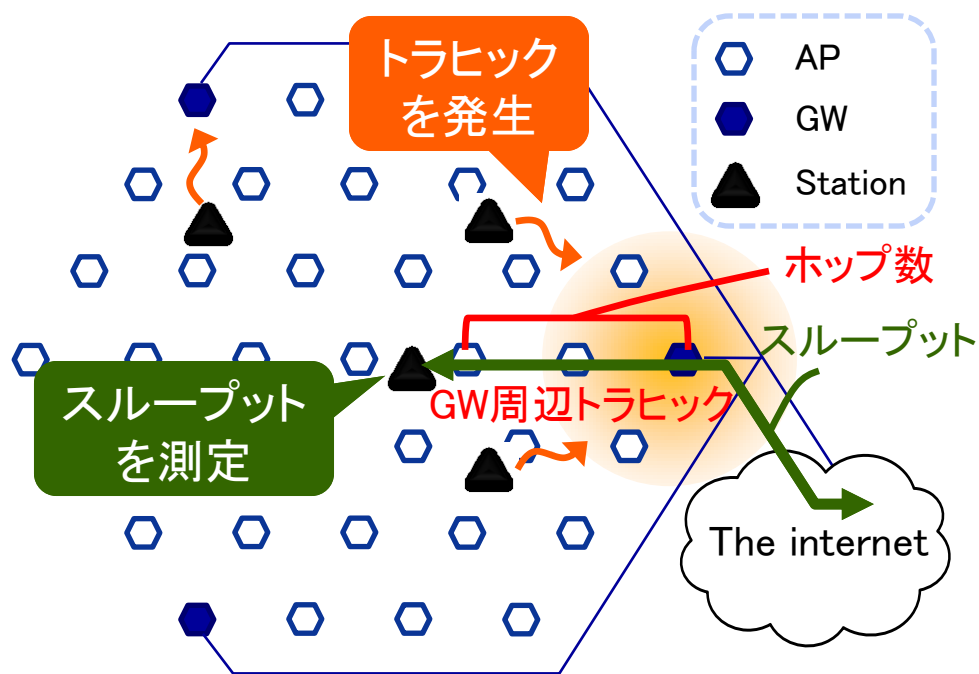


GWスループット期待値の予備シミュレーション



- 負荷トラフィック生成用端末をランダムに配置し、トラフィックを生成
- 各トラフィック, 各ホップ数ごとに特定端末からのTCPスループットを測定

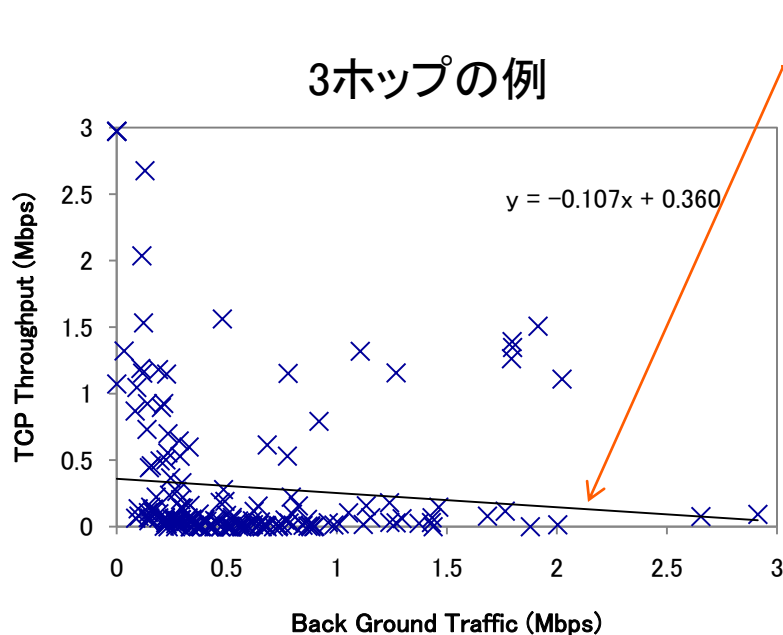
シミュレーションパラメータ	
電波到達距離	100m
AP間の距離	80m
APの台数	37台 (GWは3台)
端末台数	0~60台
通信タイプ	FTP(内部-外部) ストリーミング(外部-内部) VoIP(内部, 内部-外部)
MACプロトコル	IEEE802.11g
フィールド	860 × 580m



GWスループット期待値の予備シミュレーション



- 各トラヒック, 各ホップ数のTCPスループットを集計
- ホップ数ごとにトラヒックとTCPスループットの関係を一変方程式に変換



ホップ数	一次方程式
1	$y = -0.68x + 3.50$
2	$y = -0.26x + 1.11$
3	$y = -0.11x + 0.36$
4	$y = -0.19x + 0.26$
5	$y = -0.12x + 0.18$

スループット期待値

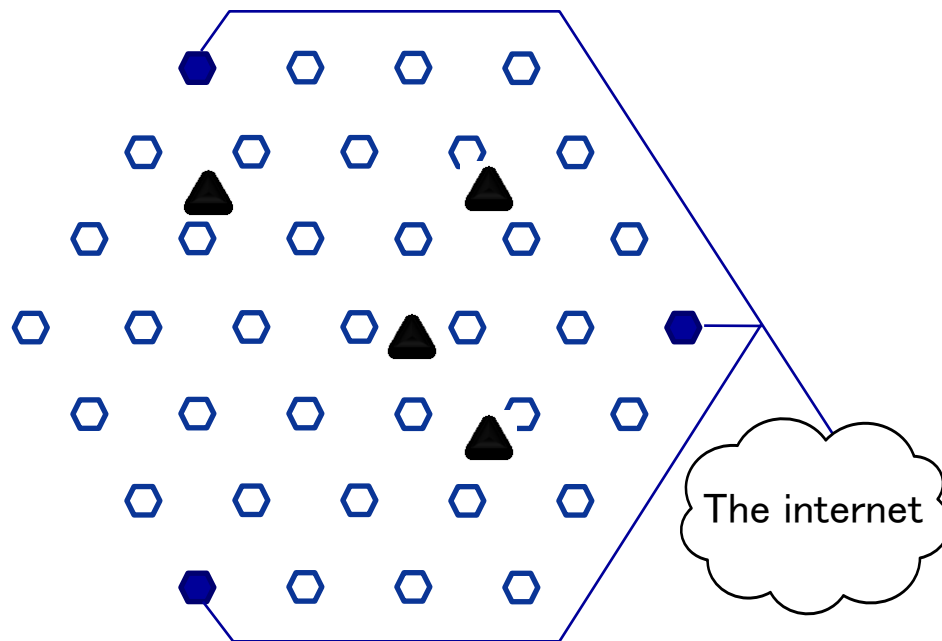
GW周辺トラヒック



- ネットワークに負荷をかけ，セッション分配方式とパケット分配方式で，使用帯域の公平性を比較する

シミュレーションパラメータ

電波到達距離	100m
AP間の距離	80m
APの台数	37台
端末台数	0~60台
通信タイプ	FTP(内部-外部) ストリーミング(外部-内部) VoIP(内部, 内部-外部)
MACプロトコル	IEEE802.11g
フィールド	860 × 580m



公平性：結果

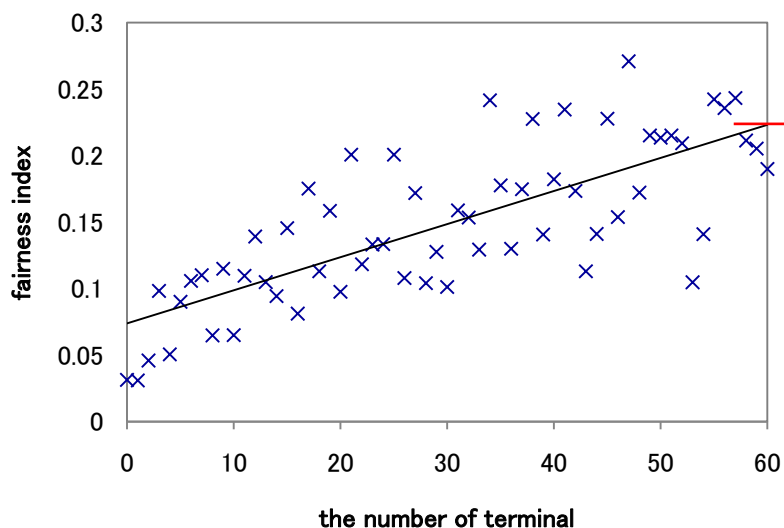


Fairness Index

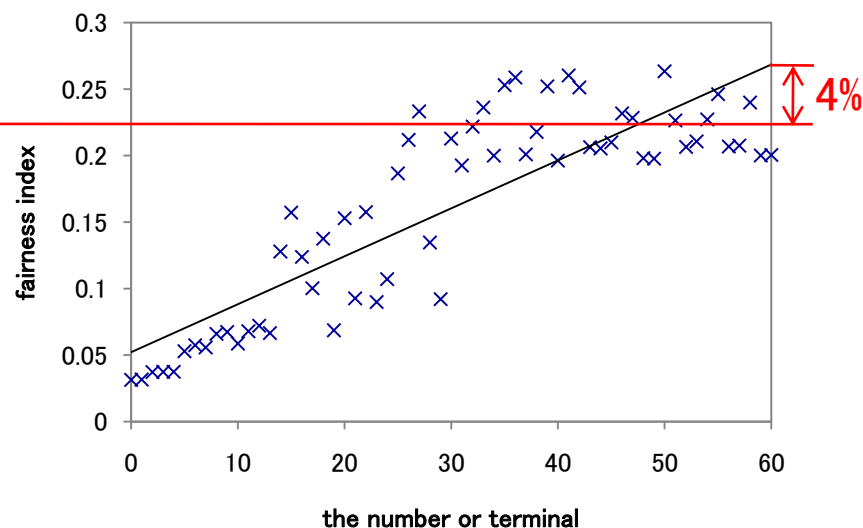
FI(FairnessIndex)の値は1に近いほど公平性が高い
 n は全APの台数, n_i は AP_i の転送トラフィックを示す

$$FI = \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n \sum_{i=1}^n (x_i)^2}$$

セッション分配方式



パケット分配方式

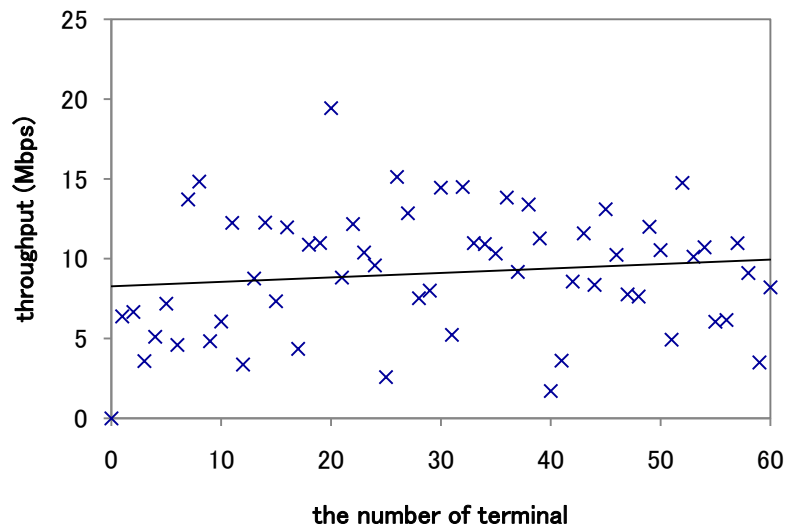




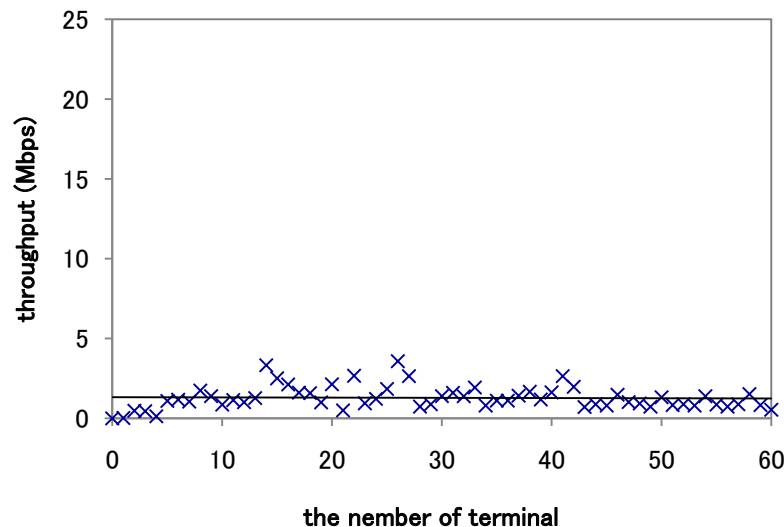
MGWの転送スループット

内部から外部への通信がどれだけ転送されたかを測定

セッション分配方式



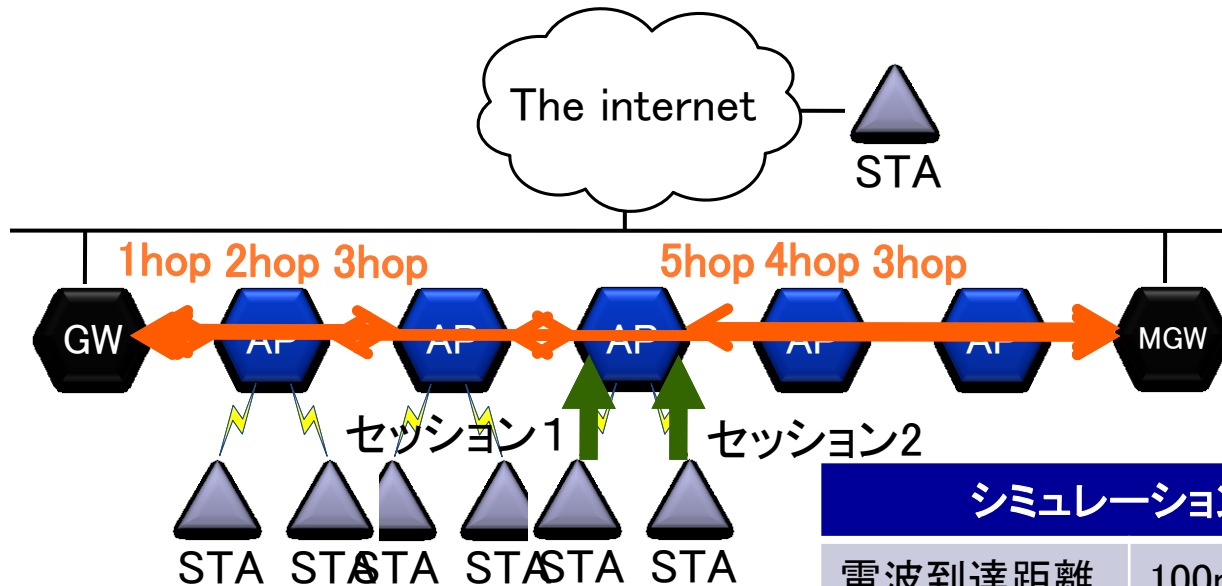
パケット分配方式



- セッション分配方式の方がGWを有効に使えている



セッション分配によるスループットの改善を評価



- 1つのAPから2つのTCPセッションを外部端末に対して開始
- 端末の位置を変えてスループットを測定

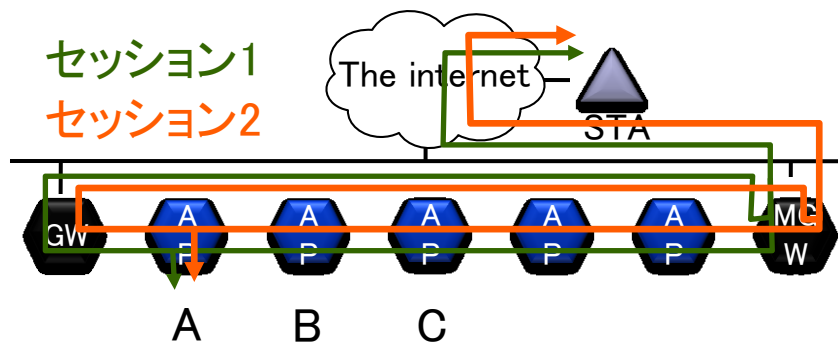
シミュレーションパラメータ

電波到達距離	100m
AP間の距離	80m
通信タイプ	FTP
MACプロトコル	IEEE802.11g
フィールド	860 × 300m

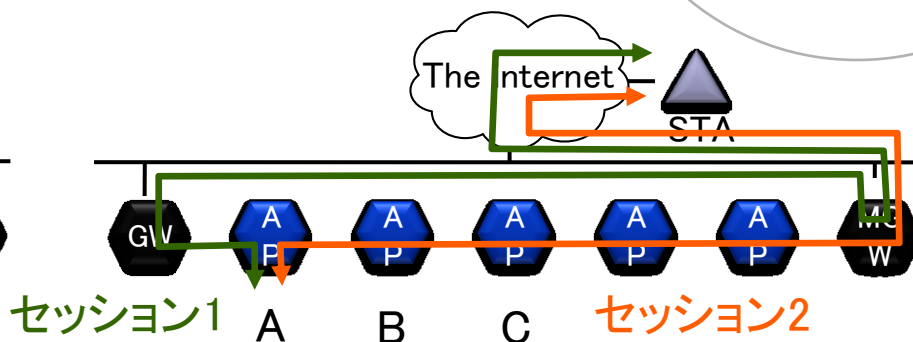
TCP通信に与える影響：結果



パケット分配方式



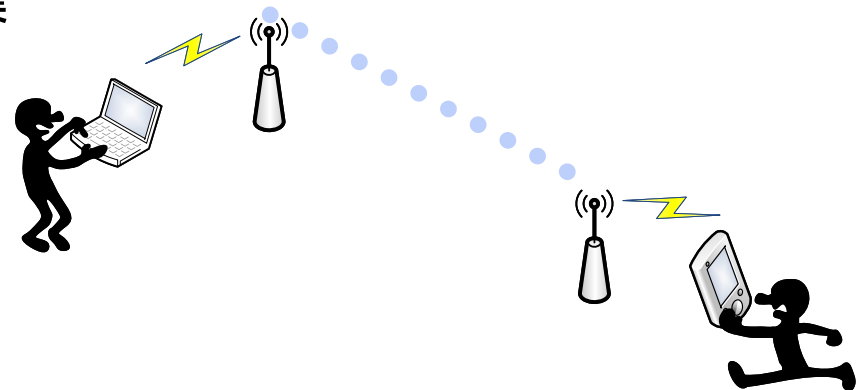
セッション分配方式



位置		A	B	C
パケット分配方式	セッション1	1.5	2.1	2.6
	セッション2	1.2	1.6	1.8
	合計	2.7	3.7	4.4
セッション分配方式	セッション1	10.6	5.9	3.4
	セッション2	1.7	1.6	2.7
	合計	12.3	7.5	6.1



- **既存のパケット分配方式に対してセッション分配方式を提案**
 - GWがGW周辺のトラヒックとAPまでのホップ数をフラッディング
 - APはGW情報を利用して最適GWを決定し分配する
- **シミュレーションによる評価**
 - セッション分配方式ではTCP通信において効率が良い
 - 公平性もさほど変わらない
- **今後**
 - 実機にも実装済み
 - 実機での性能等のデータの収集





- **MGAでは経路上のトラフィック情報を集め、複数のGWに対する転送比率を決定する**
 - パケットを転送し始めると、別のセッションのTCPの輻輳制御によりトラフィック情報が変わり転送比率が変動する
 - 次にトラフィック情報を集めるまではその転送比率のまま
 - 適切な転送比率でないとロスや遅延が大きくなる
- **セッション分配方式ではGW周辺のトラフィック情報とGWまでのホップ数により、転送するGWを決定する**
 - パケットを転送し始めると、別のセッションのTCPの輻輳制御によりトラフィック情報が変わるが、
- **あ**

提案方式

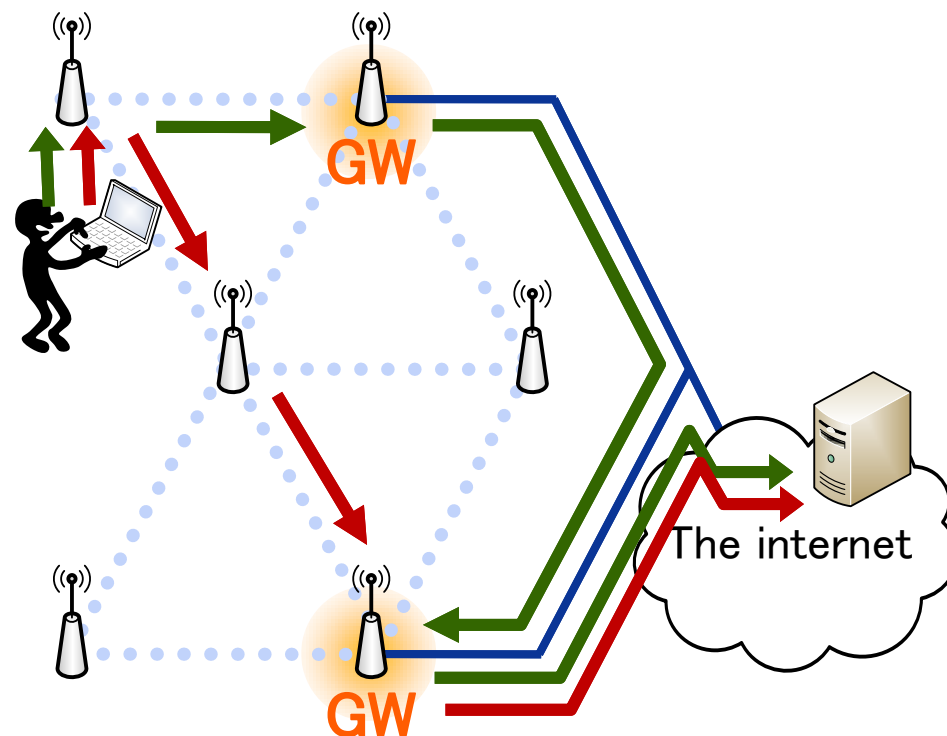


- 複数ゲートウェイの利用
- TCPの特性を考慮



セッション単位での分配

- APは各GWの周辺トラヒック量とホップ数から最適GWを決定
- セッションが開始されるごとに最適GWを割り当て、セッションごとに分配する

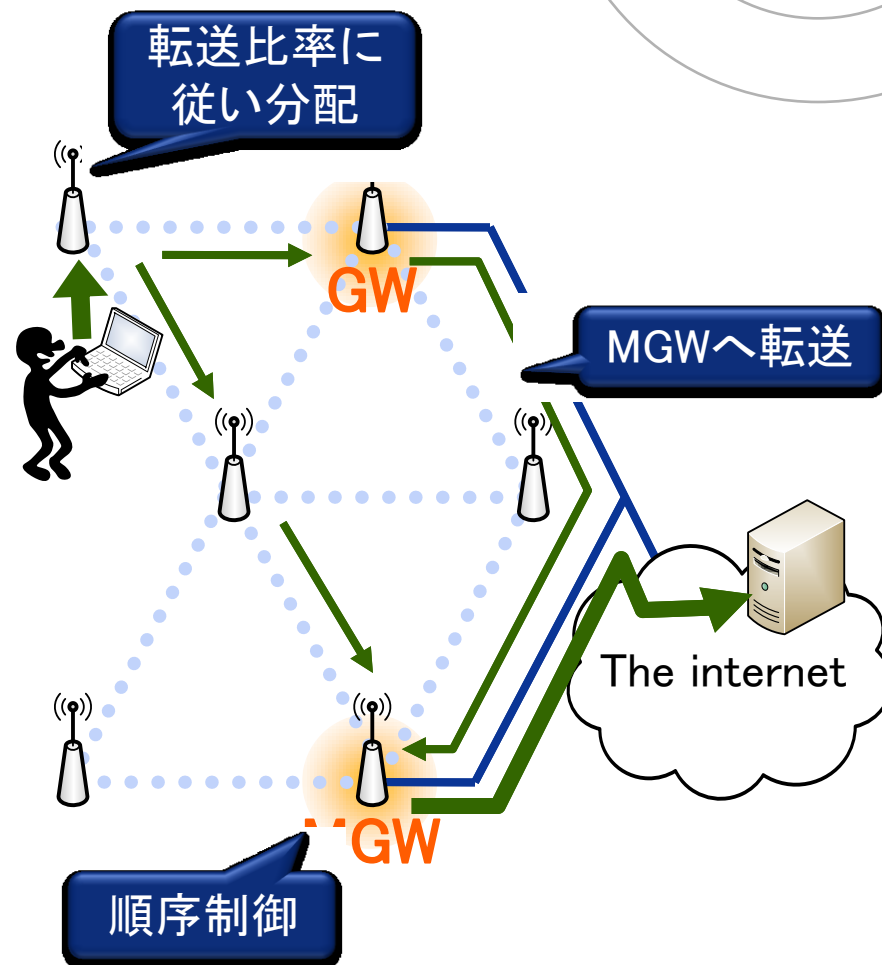


パケット分配方式 (MGA) の改良



改良パケット分配方式

- APは端末からパケットを受信すると各GWのスループット期待値から転送比率を決定
- APはセッション開始時に転送比率を記憶
- 最適GWはマスターGWにパケットを転送
- マスターGWはパケットをキューに入れ, 順序制御を行い, 端末へ転送



1次関数の近似曲線



最小2乗法

1次関数 $f(x) = ax + b$ を求める

- 計測点 (x, y) において x の時, y と $f(x)$ の差を計算
- 差の2乗 $(y - f(x))^2$ が小さければ, y と $f(x)$ は近い値となる
- 同様にすべての点で, 差の2乗を合計

$$T = \sum (y - f(x))^2 \quad \dots (1)$$

- (1)式の T (合計)が最少となる係数 a, b を求める

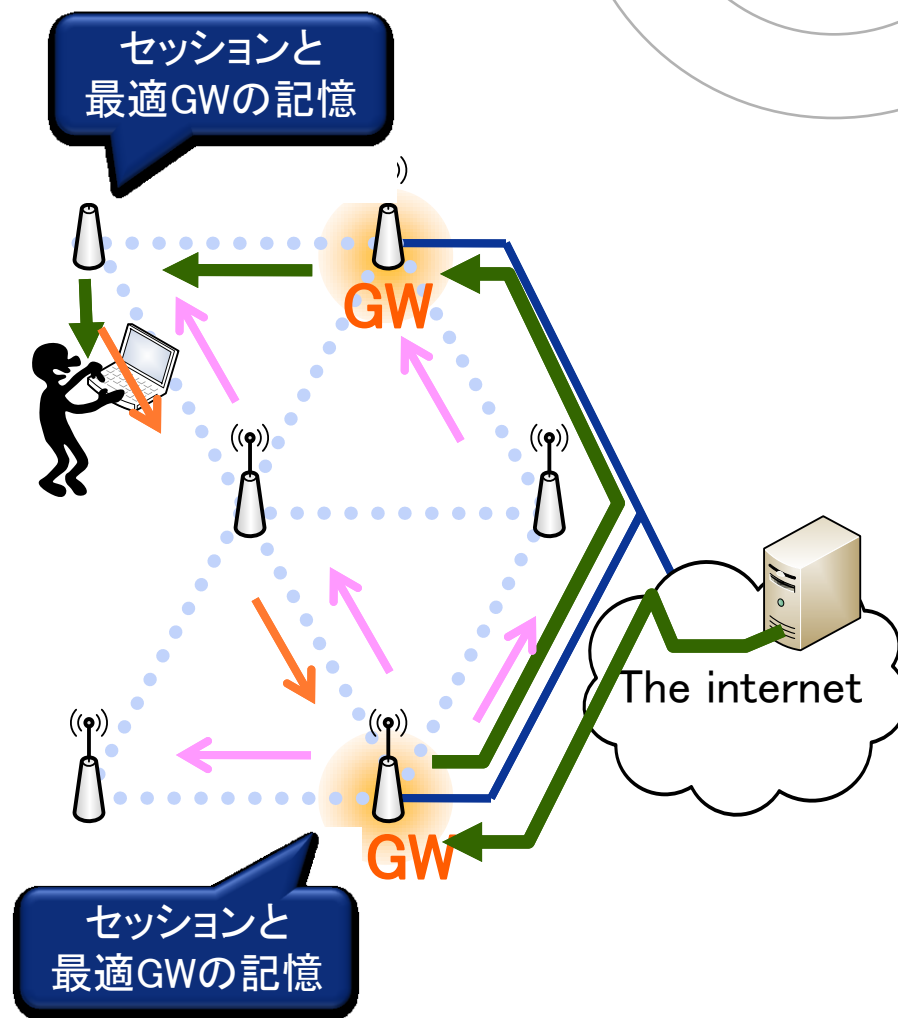


- Jain, R.: The art of computer systems performance analysis, John Wiley Sons (1991)

提案方式の外部からの通信開始



- 外部からのパケットはマスターGWに届く
- マスターGWは相手端末のIPアドレスを載せたメッセージをAP側にフラッディング
- 相手端末の所属するAPはその時の最適GWのIPアドレスを返信する
- マスターGWは最適GWとセッションの対応を記録する





■ GWAP-RT (Gateway WAP Resolution Table)

- GWAPのIPアドレス
- セッション識別子
 - 宛先IPアドレス
 - 送信元IPアドレス
 - プロトコル番号
 - 宛先ポート番号
 - 送信元ポート番号

TCPスループットの指標



TCPスループットのモデル

■ Floyd [1]

$$T \leq \frac{1.5\sqrt{2/3} \times B}{RTT \times \sqrt{P}}$$

■ Padhye [2]

$$T \approx \frac{1}{RTT \sqrt{\frac{2bP}{3}} + T_0 \min\left(1, 3\sqrt{\frac{3bP}{8}}\right) P(1+32P^2)}$$

T	スループット
RTT	最小転送遅延
B	最大セグメントサイズ
P	パケット損失率
T_0	タイムアウトが発生する時間

他にTCPセッションがあると、その輻輳制御によってトラフィックが変化し、スループット計算時とは異なる値となる

[1] Floyd, S. and Fall, K.: Promoting the Use of End-to-End Congestion Control in the Internet, IEEE/ACM Trans. Networking, Vol.7, No.4, pp.458-472(1999).

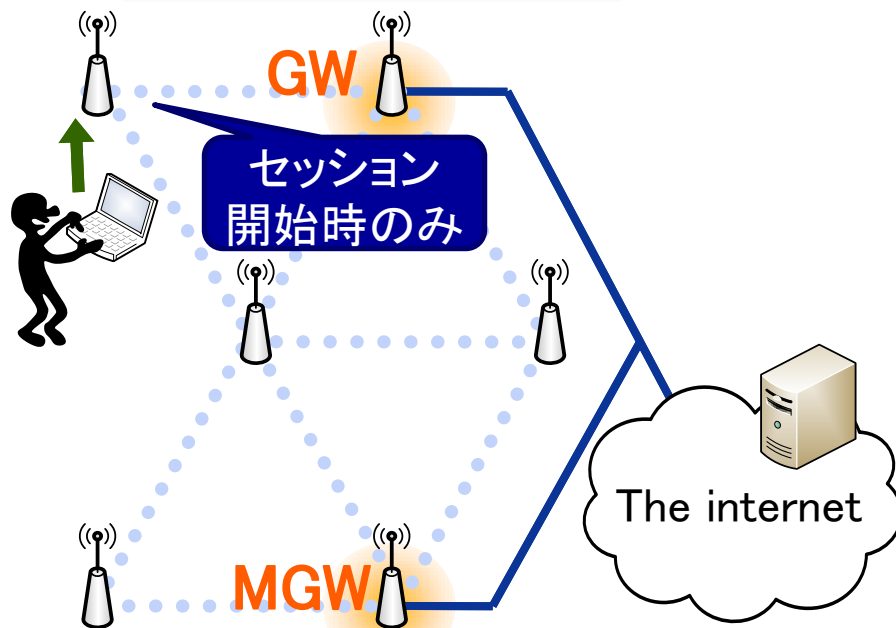
[2] Padhye, J., Firoiu, V., Towsley, D. and Kurose, J.: Modeling TCP Throughput: A Simple Model and its Empirical Validation, Proc. ACM SIGCOMM' 98, pp.303-314(1998).

分配のタイミング

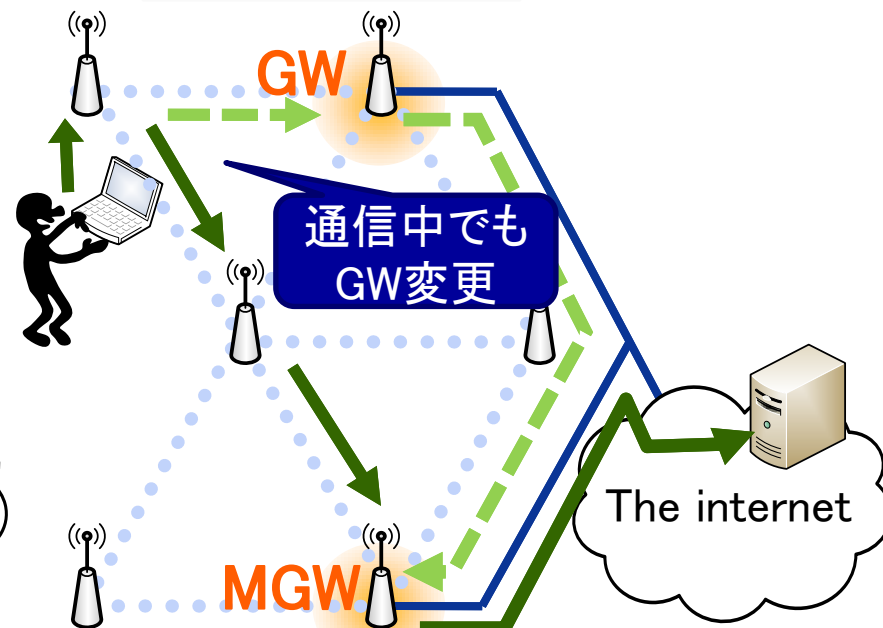


- どちらの方式もリアルタイムにTCPスループット期待値を計算し、転送比率、最適GWを変更させていくことは原理的に可能
- リアルタイムでの場合、他のTCPセッションの輻輳制御によって、変更前と変更後で背景のトラフィックが変わってしまう
- シミュレーションでは両方式ともにセッション開始時のタイミング

セッション開始時



リアルタイム



MGAからパケット分配方式への変更



- 分配比率の確定タイミング
 - リアルタイム → 通信開始時
 - スループット期待値算出のためのパラメータ
 - ロス率, 帯域余裕値, ホップ数 → ロス率, GW周辺トラヒック
 - スループット期待値の算出方法
 - 独自の計算方法 → 予備シミュレーション
- 上記方法はセッション分配方式にも適応可能
 - 比率確定タイミングがリアルタイムであると, 他のTCPセッションの輻輳制御と比率決定によるトラヒック分散が競合し, 効果が見込めない
 - ロス率等は常に通信がないとリアルタイムで取得できない