

# トランスポート層プロトコルと無線機器の省電力機構の連携

長谷川 剛 (ごう)、村田正幸  
 1大阪大学サイバーメディアセンター  
 2大阪大学大学院情報科学研究科

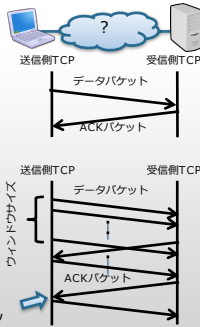
[9] M. Hashimoto, G. Hasegawa, and M. Murata, "An analysis of energy consumption for TCP data transfer with burst transmission over a wireless LAN," *International Journal of Communication Systems (Online)*, July 2014.  
 [10] M. Hashimoto, G. Hasegawa, and M. Murata, "SCTP tunneling: Flow aggregation and burst transmission to save energy for multiple TCP flows over a WLAN," *IEICE Transactions on Communications*, vol. E96-B, pp. 2615-2624, Oct. 2013.  
 [12] M. Hashimoto, G. Hasegawa, and M. Murata, "Experimental evaluation of SCTP tunneling for energy-efficient TCP data transfer over a WLAN," in *Proceedings of IWCMC 2014*, pp. 833-838, Aug. 2014.

## 目次

- TCPの輻輳制御機構の概要
- 無線ネットワークを介したTCPデータ通信の問題点
- 無線LANデバイスの消費電力モデル
- 研究紹介
  - TCPの輻輳制御機構を考慮した無線LANデバイスの消費電力解析
  - 無線LANデバイスの消費電力を削減するトランスポート層プロトコルアーキテクチャの提案と実装評価
- まとめと今後の課題

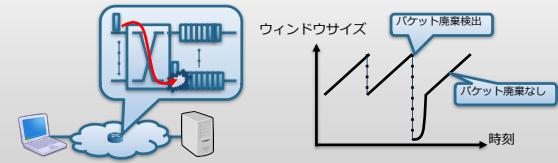
## TCPの輻輳制御機構 (1)

- End-to-end 制御
  - ホスト間のネットワークに前提を置かない
- データパケットの送信に対して、ACKパケットを受信する
- ウィンドウフロー制御
  - ウィンドウサイズ以内のパケットはACKを待たずに送信
  - ネットワーク内に注入されるデータ量に相当
  - スループット  $\approx$  ウィンドウサイズ/ラウンドトリップ時間
  - ウィンドウサイズをネットワークの輻輳状態に応じて増減させる
- Self Clocking
  - データパケットの送信タイミングが、ACKパケットの受信タイミングに支配される



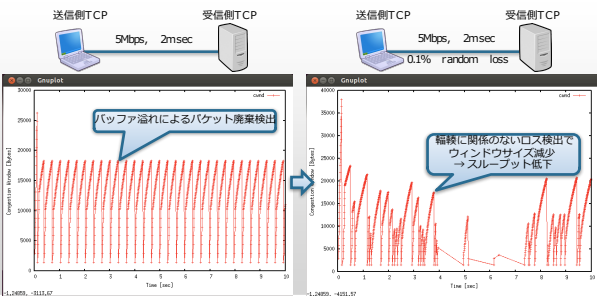
## TCPの輻輳制御機構 (2)

- ウィンドウサイズ制御アルゴリズム
  - ネットワーク輻輳 = バッファ溢れによるパケット廃棄の発生
  - パケット廃棄が発生しない (つまり、送信したデータパケットに対するACKパケットを受信) = ネットワークは輻輳していない  $\rightarrow$  ウィンドウサイズ増加
  - パケット廃棄が発生したと思われる (ACKが届かない等から推測) = ネットワークは輻輳している  $\rightarrow$  ウィンドウサイズ減少



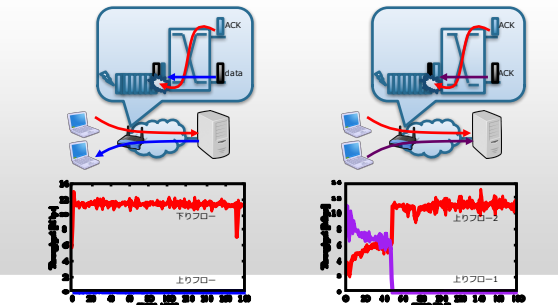
## 無線ネットワークを介したTCPデータ通信

- ネットワーク輻輳に関係のないパケット廃棄の発生が性能低下を招く



## 無線LAN環境下でのTCPフローの不公平性

- ステーションとアクセスポイントが機会均等でアクセスすることによる、アクセスポイントの無線IFの輻輳が原因



### 改善手法例

- 無線ネットワーク部分の修正
  - アクセスポイントのアクセスを優先
  - MACプロトコルのパラメータチューニング
  - MACプロトコル自体の改変
- TCPの修正
  - パケット廃棄検出に対する挙動の修正
  - ネットワーク輻輳によるパケットロスと、無線ネットワーク品質劣化によるパケットロスの区別
- クロスレイヤ制御
  - 無線ネットワーク品質に応じた適応的なTCP輻輳制御

The diagram illustrates the interaction between an Access Point (AP) and a Station (STA). It shows the flow of CTS, RTS, SIFS, ACK, and DATA frames. Below this, a flowchart details congestion control logic: 'Sending packets' leads to 'New RTT?'. If 'NO', it results in 'Immediate recovery'. If 'YES', it checks 'Congestion Event?'. If 'YES', it sets 'cwnd = cwnd/2' and 'softthreshold = cwnd'. If 'NO', it checks 'j > k/n?'. If 'YES', it results in 'Non-congestion Error'. If 'NO', it results in 'Immediate recovery'.

### 無線 LAN 環境における消費電力

無線LAN チップの消費電力データ例

品名 (発表年)	送信	受信	アイドル	スリープ
Atheros AR5004 (2003年)	1.4 W	0.9 W	0.8 W	0.16 W
Atheros AR6002 (2007年)	0.8 W	0.5 W	0.05 W	0.002 W
Atheros AR9462 (2013年)	0.9 W	0.6 W	0.02 W	-

- 無線ネットワークデバイスの省電力化は進んでいる
  - 消費電力は全体的に低下
  - 送受信時の消費電力は1/2に、アイドル時あるいはスリープ時の消費電力は1/10に削減
- MAC プロトコルレベルにおいても省電力化が行われている
  - IEEE 802.11 Power Saving Mode (PSM) や IEEE 802.11e Unscheduled Automatic Power Save Delivery (U-APSD) によって省電力化が可能
  - スループットの低下や遅延の増加など、ネットワーク性能を損ねる場合がある

### 無線ネットワークデバイスの省電力効果

- アプリケーションやトランスポート層プロトコルがパケット送受信のタイミングを決定しており、そのタイミングがスリープ効率を決定する
  - アプリケーションの定期的な通信
  - 動画データ等のレート制御された転送
  - TCPの輻輳制御機構によるスループット制御
  - Self Clockingによるパケット転送タイミング
  - ...

⇒ 効率的なスリープを行うには上位層プロトコルの挙動を考慮する必要がある

### TCPの動作を考慮した無線LANデバイスの消費電力モデル

- MAC レベルのモデルと TCP レベルのモデルの組合せで消費電力モデルを構築
- 理想的にスリープした場合とそうでない場合の消費電力を比較し、消費電力を削減するうえで効果的な要素を明らかにする
- 省電力効果と転送時間のトレードオフを評価する

### ネットワークモデル

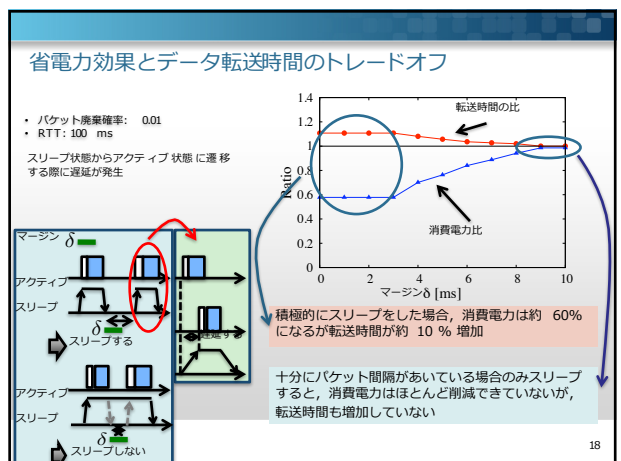
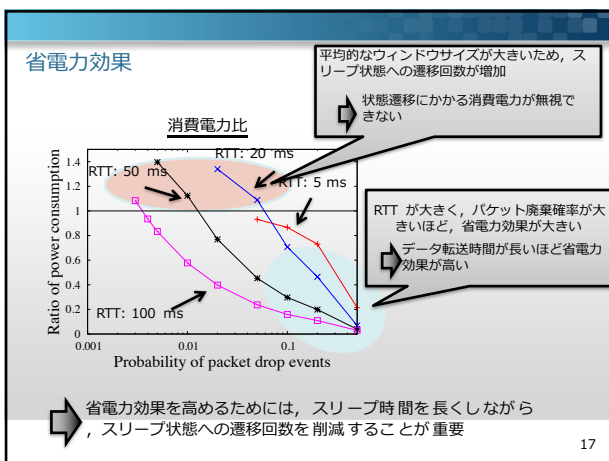
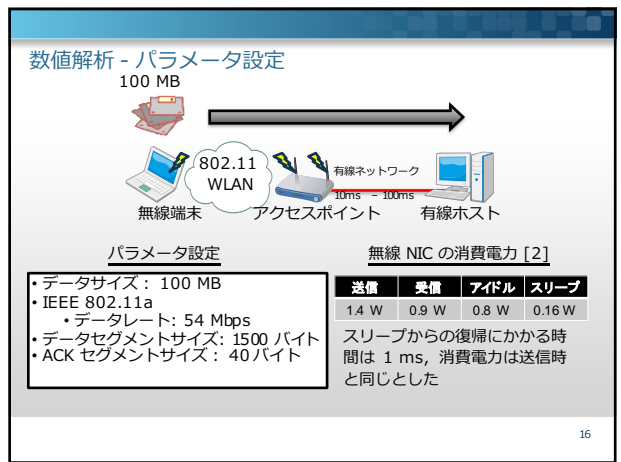
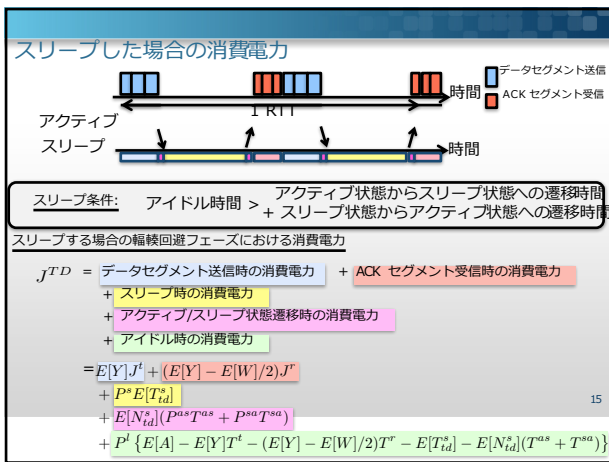
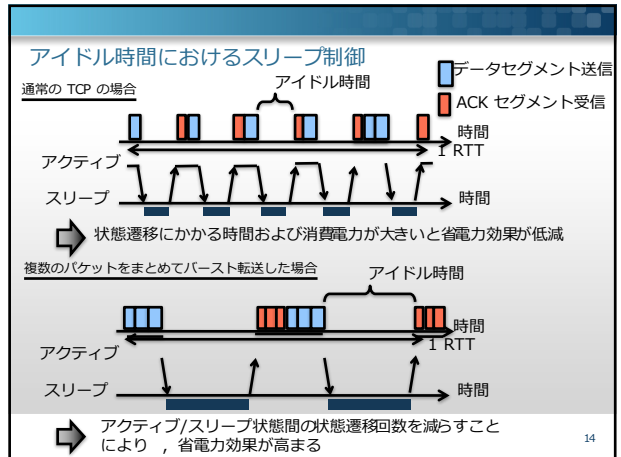
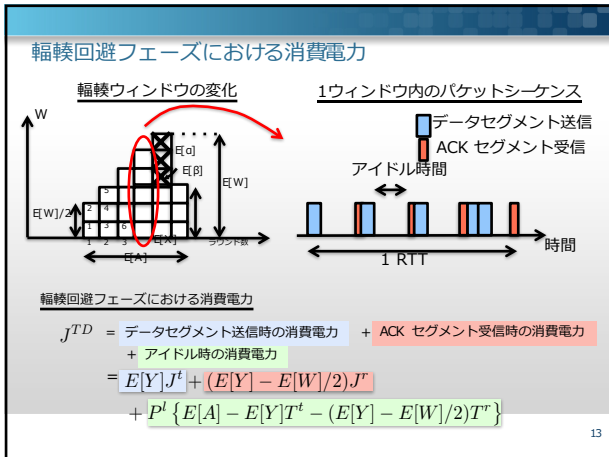
上り TCP データ転送をした場合に、無線端末 (STA) において消費される電力をモデル化

The diagram shows a wireless LAN environment with a wireless terminal (STA), an access point (AP), and a wired host. It illustrates the flow of TCP data streams and ACK streams between the STA and AP, and between the AP and the host.

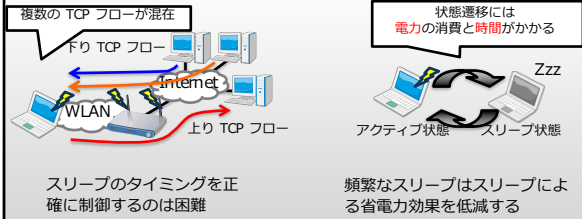
### 消費電力モデルの構成

無線端末上におけるパケット送受信の時系列

The diagram shows the timing of packet transmission and reception at the wireless terminal. It includes a timeline for CSMA/CA frame exchange (RTS, SIFS, CTS, SIFS, ACK, DATA) and a graph showing the change in TCP window size over time. A note states: '1 RTT 間に送受信されるパケット数は輻輳ウィンドウサイズによって決定'.



## バースト転送実現のための課題



19

## バースト転送の実現方法

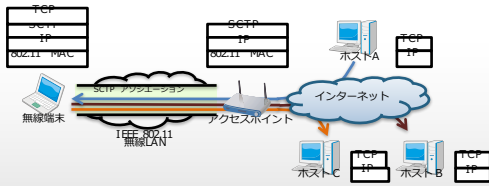
### アイデア

- 無線端末とアクセスポイントの間で複数の TCP フローを集約する
- 複数のパケットをまとめてバースト的に転送することによって1回あたりのスリープ時間を長くする



- TCP データ転送の省電力化を行う SCTP トンネリングを提案
  - Stream Control Transmission Protocol (SCTP) を利用
  - Delayed ACKを用いたバースト転送の実現
- SCTP トンネリングの消費電力モデルを構築し、提案方式の省電力効果を評価

## SCTP トンネリングの概要



- 複数の TCP フローを 1 本の SCTP アソシエーションに集約する
  - SCTP マルチストリーミングを利用
- 各 SCTP パケットをバースト転送することによって 1 回あたりアイドル時間を長くする
  - Delayed ACK を利用

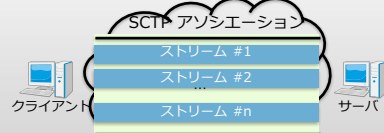
## Stream Control Transmission Protocol (SCTP)

### SCTP パケットの構成

SCTP パケットは1つ以上のチャンクから構成

DATA: ユーザーメッセージが格納されるチャンク  
SACK: 受信したパケットの確認応答用のチャンク

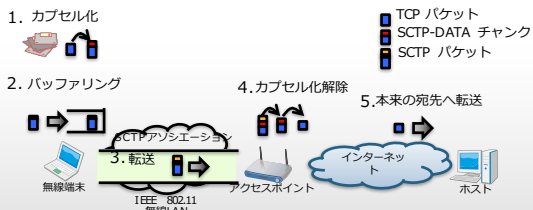
### SCTP マルチストリーミング



1つのアソシエーションに複数のストリームを多重化可能

22

## SCTP トンネリング - TCP フローの集約 -



- TCP パケットを SCTP-DATA チャンクに格納する
- SCTP-DATA チャンクを送信キューにバッファリングする
- 送信可能なタイミングで SCTP-DATA チャンクから SCTP パケットを生成する
  - 送信タイミングは SCTP 輻射制御機構にしたがう
- 受信した SCTP パケットから TCP パケットを取り出す
- TCP パケットを本来の宛先に転送する

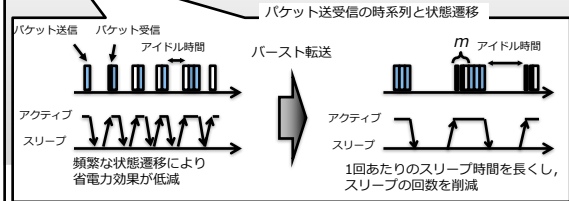
23

## SCTP トンネリング - バースト転送 -

### Delayed ACK によるバースト転送

複数パケットに対する確認応答を1つの SCTP-SACK チャンクで行う

- $m$  個の SCTP パケットを受信すると SCTP-SACK チャンクが生成される
- SCTP-SACK チャンクが含まれる SCTP パケットを受信すると、 $m$  個の SCTP パケットが送信可能となる



### Delayed ACK

- TCP, SCTPで利用可能
- ACKパケットをデータパケットの受信毎に返すのではなく、複数個のデータパケットの受信に対してACKパケットを1つ返す

送信側 受信側

Delayed ACK 無

Delayed ACK 有

25

### SCTP トンネリングによる遅延の増加

バースト転送するためにパケットをバッファリングする必要がある → 各 TCP パケットに遅延が生じる

IEEE 802.11 無線LAN

無線端末

アクセスポイント

#### TCP パケットの平均バッファリング遅延

バースト転送するパケット数

$$D = \frac{m-1}{2} \frac{1}{R}$$

TCP パケットの到着率

### 数値解析 - パラメータ設定 -

複数のアプリケーションが TCP データ転送を行う

無線端末

IEEE 802.11b 無線LAN

インターネット

アクセスポイント

ホスト

データフレームは確率的に廃棄

#### パラメータ設定

- IEEE 802.11a
  - データレート: 54 Mbps
- TCP-DATA パケットサイズ: 1500 バイト
- TCP-ACK パケットサイズ: 40 バイト
- 1本あたりのTCP フローの平均スループット: 150 KB/s

無線 NIC の消費電力 [15]

送信	受信	アイドル	スリープ
1.4 W	0.9 W	0.8 W	0.016 W

スリープからの復帰にかかる時間は 1 ms、消費電力は送信時と同じとした

#### 評価メトリック

- 消費電力
- 平均バッファリング遅延

27

### 数値例 - 消費電力 -

上り TCP フローのみの場合の消費電力

データフレーム転送の失敗確率  $q = 0.1$   
 最大フレーム再送回数  $N = 7$   
 バースト転送するパケット数:  $m$

消費電力 [W]

TCP フローの合計スループット [KB/s]

スリープなし

スリープ (バースト転送  $m=5$ )

スリープ (バースト転送  $m=2$ )

スリープ (バースト転送なし)

スリープした場合の消費電力がスリープしなかった場合の消費電力を超えている

スリープによって削減される消費電力より、状態遷移による消費電力が大きいため

十分な間隔がなければスリープしないことで回避可能

スリープすることによって消費電力を大きく削減

合計スループットが大きい場合でも、 $m$  を大きくすることで省電力化できる

状態遷移回数を削減し、状態遷移にかかる電力を削減できたため

28

### 数値例 - 省電力効果と遅延のトレードオフ -

消費電力比 =  $\frac{\text{スリープしたときの消費電力}}{\text{スリープしなかったときの消費電力}}$

消費電力比

平均バッファリング遅延 [ms]

バースト転送するパケット数  $m$

TCP スループット: 1MB/s

TCP スループット: 500KB/s

TCP スループット: 200KB/s

$m$  が大きくなるにつれて、消費電力比は減少しある値に収束

TCP スループットが大きいほど、消費電力比の減少幅が大きい

$m$  が大きくなるにつれて、遅延は線形に増加

TCP スループットが大きいほど、遅延の増加幅は小さい

TCP スループットが大きいときに、わずかな遅延の増加で大きく消費電力を削減できる

29

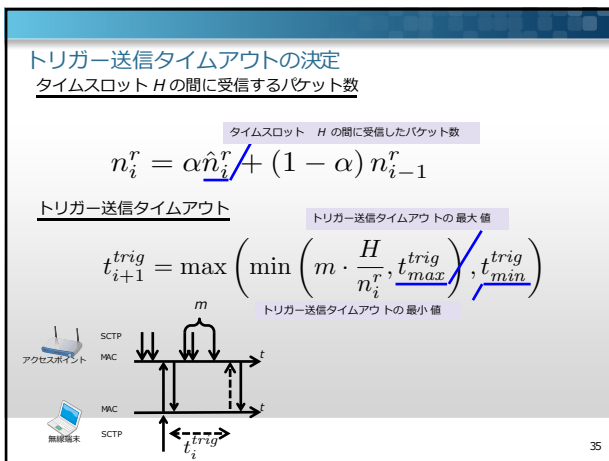
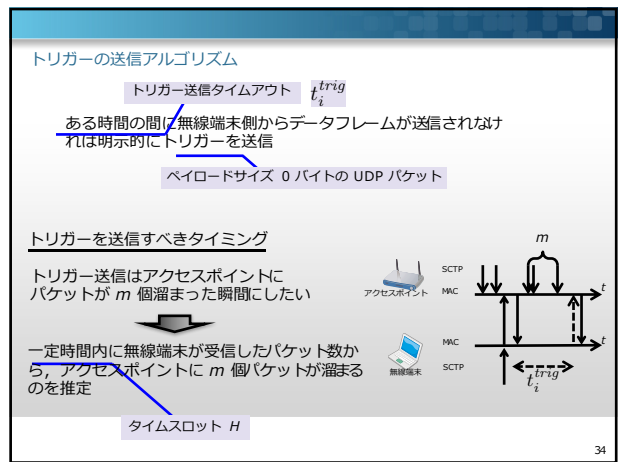
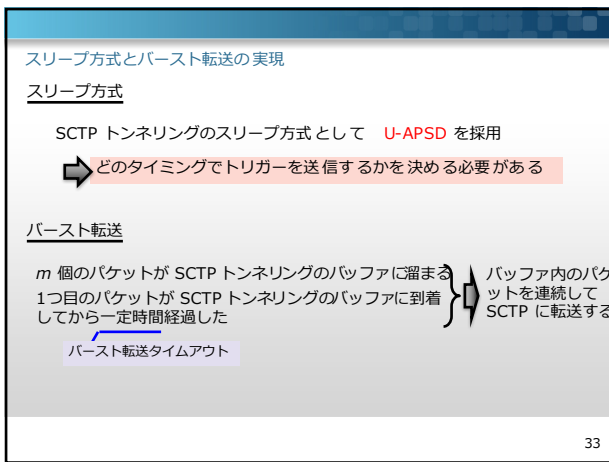
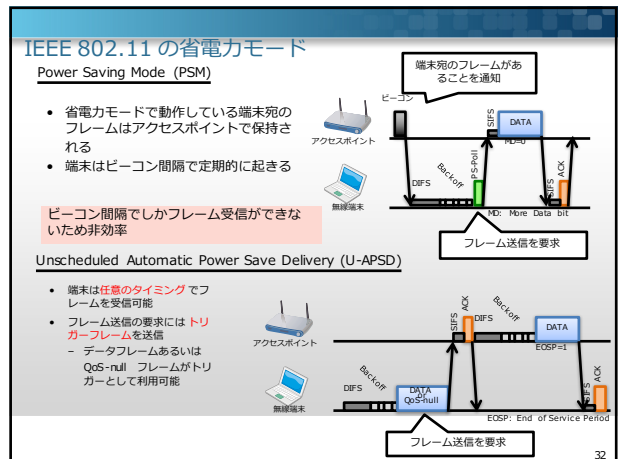
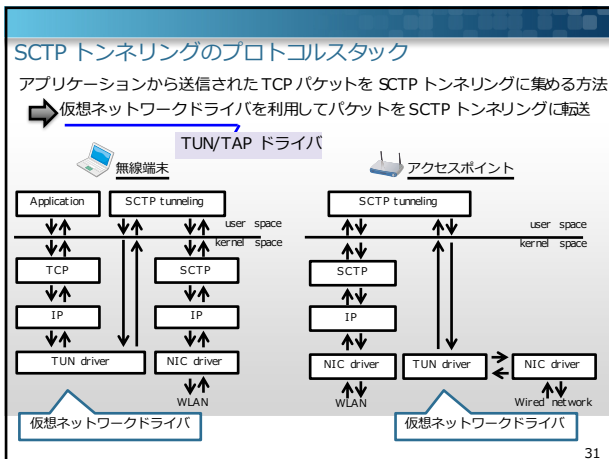
### SCTP トンネリングの実装

SCTP トンネリングの適用可能性を検証するために、SCTP トンネリングを Linux アプリケーションとして実装

#### 解決すべき問題

- アプリケーションから送信されたTCP パケットを SCTP トンネリングに集める方法
- スリープ方式
- バースト転送の実現方法

30



### 性能評価 - 実験方法

無線端末が FTP を用いて 10 MB ファイルをダウンロード

評価指標

- ファイル転送時間
- 消費電力量

比較方式

- Continuously Active Mode (CAM)
- U-APSD
  - トリガーとして 100 ms 間隔で UDP パケットを送信

SCTP トンネリングのパラメータ

パラメータ	設定値
$C_k$	1.8
$H$	100 ms
バースト転送タイムアウト	20 ms
$t_{min}^{trig}$	2 ms
$t_{max}^{trig}$	15 ms
Delayed SACK タイムアウト	5 ms

※ 予めパラメータは調整済み

### 実験結果 - ファイル転送時間

$m$ : 一度にバースト転送するパケット数

ボトルネックリンクの片道遅延: 25 ms

ボトルネックリンクの片道遅延: 50 ms

ファイル転送時間の関係

CAM < SCTP トンネリング < U-APSD

1度にバースト転送するパケット数を多くすると、SCTP トンネリングのファイル転送時間は大きくなる

### 実験結果 - 消費電力量

消費電力量比 =  $\frac{\text{各方式利用時の消費電力量}}{\text{CAM 利用時の消費電力量}}$   $m$ : 一度にバースト転送するパケット数

ボトルネックリンクの片道遅延: 25 ms

ボトルネックリンクの片道遅延: 50 ms

SCTP トンネリング( $m=2$  あるいは  $m=5$ ) は U-APSD を単独で用いた場合と同程度の省電力効果

SCTP トンネリングは、帯域遅延積が大きい環境において、消費電力量の削減幅が大きい

### まとめと今後の課題

- まとめ
  - トランスポート層プロトコルの挙動を考慮した無線ネットワークを介したデータ転送の消費電力削減
  - 従来の省電力モード並みの消費電力で、省電力モードを使わない場合とほぼ同等のスループットを達成
- 今後の課題
  - セルラネットワーク環境への適用