

## 無線 LAN のための VoIP 通信優先手法についての考察

小野良司<sup>†</sup> 坂倉隆史<sup>†</sup> 黒田正博<sup>††</sup>

無線ネットワーク利用の拡大とともに、現在有線ネットワーク上で利用されている VoIP や WWW などのサービスが無線ネットワーク上でも利用されることが想定されてきている。現状で普及している 802.11b 無線 LAN の MAC プロトコル DCF は CSMA 型のプロトコルであり、無線リンク上の帯域が複数アプリケーションで共有される。VoIP と HTTP によるトラフィックが同一リンクに混在し、無線リンク上の負荷が上昇すると、VoIP パケットに無線リンク上での競合/衝突が高頻度で発生し、遅延増やパケットロスの増加につながるということが指摘されている。我々は、エッジルータにおける IP 層の機能 (ルータ機能) の一つとして、VoIP セッション保護機構を提案する。同機構は、TCP コネクションの転送レートを一定値以下に抑えることで、無線アクセスネットワーク内のトラフィックの過剰な増加を抑制し、VoIP パケットの遅延およびロスを低減することができる。本稿では、同機構の機能とその検証システムの概要を述べ、機能の理論的な検討を通じて、問題点および検討課題をまとめる。

### A Study on Preferential Filtering Method for VoIP over Wireless LAN

RYOJI ONO,<sup>†</sup> TAKASHI SAKAKURA<sup>†</sup> and MASAHIRO KURODA<sup>††</sup>

VoIP sessions over 802.11b wireless LAN, based on CSMA/CA MAC protocol (DCF), suffer from increased delay and frequent packet losses as the network load in a wireless link gets higher. We propose a preferential filtering method on an internet edge router, which keeps the traffic in a radio access network (i.e. wireless LAN) relatively low by preferentially dropping packets from a TCP connection, when a throughput exceeds a dynamically reconfigurable threshold. This paper gives an outline of this mechanism and its implementation.

#### 1. はじめに

屋内外における無線ネットワーク利用が普及し始め、802.11b アクセスポイントを使用した無線 LAN ホットスポットサービスが街頭や店舗・施設内において提供されており、今後も増大の傾向にある。また、無線アクセスネットワーク (Radio Access Network; RAN) の種類は多様化しており、適用環境および用途に応じて異なる RAN が利用されると予想される。

これらの無線ネットワークのもとでは、現状の携帯電話の延長線としての携帯情報端末を用いた VoIP サービスや、現在でも携帯電話などの RAN 上で広く利用されている WWW (HTTP アクセス) など、有線ネットワークと同様の様々なサービスが利用される

ことが想定できる。VoIP は、IP ネットワーク上で音声通話を可能とする技術であり、ネットワーク接続環境の普及とその高速化に伴って急速に普及しつつある。一方、HTTP は典型的なリクエスト/レスポンス型のプロトコルであり、サーバ上のデータの閲覧や各種サーバ・クライアント型サービスに非常に幅広く使用されている。

VoIP セッションによるトラフィックは、比較的小さい一定サイズの IP パケットが、一定間隔で、双方向に送受信されるものである。VoIP セッションにおいては、パケット送信間隔および遅延の一定以上のずれの発生、パケットロスおよび遅延の増大によって音質劣化や通話の途切れが生じるため、パケットロス率が低く、遅延および遅延のばらつきが小さいことが求められる。一方、HTTP によるデータ転送のトラフィックでは、MSS (Maximum Segment Size) に近いサイズのでセグメントが主に下り方向へ、連続的または間欠的に送信される。

802.11b 無線 LAN の基本的な MAC プロトコルである DCF (Distributed Coordination Function) は

<sup>†</sup> 三菱電機株式会社情報技術総合研究所  
Information Technology R & D Center, Mitsubishi  
Electric Corporation  
axt@isl.melco.co.jp

<sup>††</sup> 独立行政法人通信総合研究所横須賀無線通信研究センター  
Yokosuka Radio Communications Research Center,  
Communications Research Laboratory

CSMA 型のプロトコルであり、無線リンク上の帯域は、複数の端末で動作する複数のアプリケーションによって共有される<sup>5)</sup>。VoIP と HTTP によるトラフィックが同一の BSS (Basic Service Set) に混在するとき、BSS 上で送受信されるパケットの大多数が HTTP によるトラフィックで占められることが、容易に想像できる。無線リンク上の負荷が高い状況では、VoIP セッションによるパケットについても競合と衝突が高い頻度で発生し、大きな遅延、遅延の変動、パケットロスが発生する。

近年では、802.11 無線 LAN 上で VoIP を利用する際の品質を評価し、上記の問題点を VoIP パケットの優先的な処理によって解決しようとする試みが行われている<sup>6)~9),11)</sup>。これらの試みは、VoIP パケットを優先的に処理するための DCF アルゴリズムの拡張手法、VoIP パケットが優先されていることを示すための手法、優先すべきパケットの選択手法の三つに大別される。一つめの例としては、VoIP パケットの転送開始に際して競合ウィンドウ (Contention Window) やフレーム間隔 (Distributed Inter Frame Space; DIFS) を他のパケットよりも短く設定したり<sup>6),8)</sup>、VoIP 以外のパケットについて最大フレーム長を短くする<sup>6)</sup>などの手法がある。二つめの例としては、Diffserv による code point の付加などがある<sup>11)</sup>。三つめの例としては、パケット欠落位置による音声復号処理への影響の考察と、より影響の大きいパケットの選択的な優先手法が議論されている<sup>9),11)</sup>。これらに共通するのは、802.11 無線リンク内でいかに高負荷状況に対処するかを議論している点である。

これらのネットワークはインターネットを想定しているが、我々は図 1 に示すように、非常に高速かつ低遅延のバックボーンネットワークの周囲に、無線アクセスネットワークがエッジルータを介して接続されている、将来のネットワークを想定している<sup>10)</sup>。無線アクセスネットワークは、バックボーンと比較して必ずしも十分高速かつ低遅延になるとは考えていない。バックボーンと RAN との境界に位置するエッジルータは、これら性質の異なるネットワークの境界であり、バックボーンと RAN との間を適切に中継するためにどのような機能を提供すべきかが課題となる。

前述した無線 LAN 上での VoIP パケット遅延/ロスの問題に対し、我々は上記のモデルをもとに、先行する無線リンク上での直接的な解決方法に並列するものとして、エッジルータ (IP 層) における解決方法を検討している。具体的には、VoIP パケットの遅延/ロスの要因となる、無線リンク上での過剰なトラフィッ

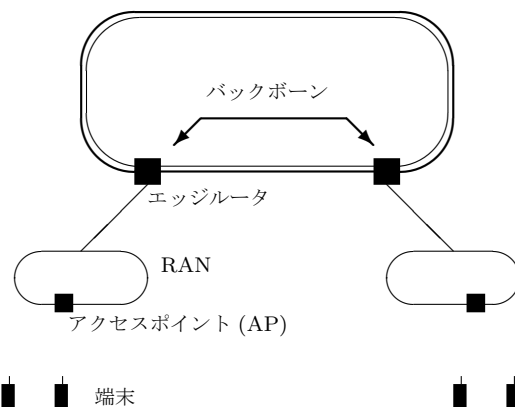


図 1 想定するネットワークの将来像

クの発生そのものに着目し、エッジルータにおいてこれを抑制することによって VoIP セッションを保護する手法を試みている。

VoIP セッション保護機構は、上記手法を実現するための機構である。同機構は、VoIP パケットの遅延/ロスを低減することを目的として、エッジルータにおいて TCP コネクションの転送レートを一定値以下に抑える機能を持つ。

本稿では、VoIP セッション保護機構の機能を概説し、現在実装中の検証システムの概要を述べる。同時に、同機構の理論的な検討を通じて、現状で判明している問題点および検討課題をまとめる。

## 2. VoIP セッション保護機構

VoIP セッション保護機構は、TCP コネクションの転送レートを継続的に測定し、規定の転送レートを超える TCP コネクションについて間欠的にパケットを破棄することにより、TCP コネクションの転送レートをほぼ一定以下に保つ。これにより、RAN 内の TCP コネクションによる帯域占有が抑制され、VoIP パケットの過大な遅延を回避する。

本機構は、TCP Reno/NewReno<sup>3),4)</sup> で用いられるアルゴリズム Congestion Avoidance および Fast Retransmit/Fast Recovery を利用した、パケット破棄による TCP コネクションの転送レート制限を主な機能とする。また、転送レート制限を有効に機能させるために、さらに ACK 遅延処理による RTT 延長、TCP コネクションの転送レート測定の二つの機能を持つ。以下に各機能の詳細を述べる。

### 2.1 パケット破棄による TCP コネクションの転送レート制限

本機構は、エッジルータを通過するすべての TCP コネクションの転送レートを監視し、規定転送レート

$R_t$  [pkts/sec] 以上の転送レートが観測された TCP コネクションについて、速やかにデータパケットを 1 個破棄する。破棄対象となったパケット以外のパケットは、通常通り転送する。転送レート測定については後述する。

パケットの破棄が行われると、Congestion Avoidance および Fast Retransmit/Fast Recovery のアルゴリズムにより、当該 TCP コネクションの送信ノードと受信ノードで以下のような動作が行われる<sup>3)</sup>。受信ノードは、破棄パケットの直後に通常通り転送されたパケットを受信し、シーケンス番号の欠落から、パケットの欠落を検知する。欠落を検知した受信ノードは、検知以降に受信される各パケットに対して、検知直前に受信を期待していたシーケンス番号を示す ACK (Duplicate ACK) を送信する。送信ノードは 3 個以上の Duplicate ACK を受信すると Fast Recovery を実行し、欠落したシーケンス番号を埋めるパケットの再送を行う。このとき送信ノードは、輻輳ウィンドウ (Congestion Window; cwnd) を欠落発生以前のほぼ半分の値に再設定する。

輻輳ウィンドウは、送信ノードにおいて RTT 1 回分の時間内に送信できるセグメント数の最大値を示すので、TCP コネクションにおける転送レートは、cwnd の大きさに依存する。cwnd がほぼ半減することによって、転送レートが抑制されることになる。

本機構ではパケット破棄以降も TCP コネクションの転送レートの測定を継続し、規定転送レート  $R_t$  以上になるたびにパケットの破棄を行う。これは、Congestion Avoidance アルゴリズムでは cwnd が RTT あたり 1 セグメントずつ増加するので、パケット欠落の検知によって減少した cwnd は、やがて再びパケット破棄以前の値に戻るためである。ただし、転送レート測定に要する負荷の抑制と、過剰なパケットの破棄の防止のため、一度破棄が行われた後、最小パケット破棄間隔  $d$  [pkts] で示される期間内はパケットの破棄を行わない。最小パケット破棄間隔  $d$  は、2 回のパケット破棄の間に転送されるパケット数  $P$  [pkts] を基準として、

$$P \geq d \quad (1)$$

となるように設定する。

## 2.2 ACK 遅延処理による RTT 延長

上記のようなパケット破棄による転送レート制御が有効に機能するためには、cwnd が初期値  $W_0$  [pkts] であるときの転送レート  $R_0$  [pkts/sec] が、 $R_t$  よりも十分小さい必要がある。そうでなければ、データ送信開始直後または Slow Start アルゴリズム実行中に

$R_t$  を超える転送レートが発生し、上記の方法ではこれを抑えることができない。すなわち  $\alpha > 1$  を用いて、

$$R_0 \leq \frac{R_t}{\alpha} \quad (2)$$

と表せる。TCP コネクションの RTT を  $r$  [sec] とすると、

$$W_0 = R_0 r \quad (3)$$

であり、 $W_0$  は TCP スタックの実装に依存する規定値なので、 $R_0$  は  $r$  に依存する。

本機構では、パケットを遅延させることによって  $r$  を延長し、 $R_0$  を調整する。具体的には、全ての TCP コネクションに対して ACK パケットを遅延することにより、RTT の延長を行う。ACK パケットを遅延するのは、データパケットを遅延するよりも遅延処理に使用するバッファの量がより少ないことが期待できるためである。本機構は、すべての TCP コネクションについて上り ACK パケットをバッファし、規定の ACK 遅延幅  $r_d$  [sec] で表される時間が経過した後に転送する。

このとき必要なバッファの量を  $S_{ACK}$  [pkts] で表し、必要なバッファ量の評価/準備に用いる。

## 2.3 TCP コネクションの転送レート測定

転送レートが  $R_t$  を超える TCP コネクションを検知するため、各 TCP コネクションについて転送レートの測定が必要である。

測定すべき値、すなわち  $R_t$  との比較対象は、測定時点における瞬間的な転送レート (即時転送レート)  $R_i$  [pkts/sec] である。しかし、 $R_i$  の正確な値を得るには cwnd と RTT の正確な値を知る必要があるが、cwnd は送信ノードのローカルな情報であり、エッジルータでの計測は困難である。

本機構では、平均転送レート  $\bar{R}$  [pkts/sec] を計測し、以下の式によって即時転送レートを推定する。

$$R_i = \beta \bar{R} \quad (4)$$

各 TCP コネクションについて転送パケット数をカウントし、時間  $t_e$  [sec] にわたるパケット数から  $\bar{R}$  を算出する。測定間隔は  $t_d$  [sec] とする。

## 3. パラメータ定義

上で述べた各機能で用いられるパラメータ  $R_t$ ,  $r_d$ ,  $d$ ,  $S_{ACK}$ ,  $t_e$ ,  $t_d$ ,  $\beta$  について、以下にその定義を述べる。

### 3.1 規定転送レート $R_t$

パケット破棄による転送レート抑制の対象となる TCP コネクションを判断するために、規定転送レ

ト  $R_t$  を規定する。  $R_t$  は、ある時点において個々の TCP コネクションに許容する (概ね) 最大の転送レートを表す。

本機構の目的は、 RAN 内における TCP コネクションの転送レートを制限することによって RTP セッション (VoIP セッション) を保護することなので、  $R_t$  の設定値には、 RAN 内の RTP セッション全体を保護できる値であることと、すべての TCP コネクションによる影響を考慮した値であることが求められる。

ここでは、 RAN 内における実効最大転送レート  $R_m$  [pkts/sec] を基準とし、ここから RTP セッションで使用する転送レートを除いた残りを、全 TCP コネクションで共有することとする。 TCP セグメント長  $B$  [bytes] が一定であると仮定し、ある時点での TCP コネクション数、 RTP セッション数をそれぞれ  $n_{TCP}$ 、  $n_{RTP}$ 、 RTP セッション (VoIP セッション) 一つあたりの転送レートを  $B$  で正規化した値を  $R_{RTP}$  [pkts/sec] とするとき、規定転送レート  $R_t$  を以下のように規定する。

$$R_t = \frac{R_m - n_{RTP} R_{RTP}}{n_{TCP}} \quad (5)$$

802.11b 無線 LAN では、  $R_m = 500$  ( $B = 1500$  [bytes] で 6 Mbps) 程度である。一方、 VoIP セッションの符号化方式として G.729 を使い、パケット送出間隔を 20 msec (1 パケットあたり 2 個 = 20 bytes のサンプリングデータ) に設定したとすると、 RTP パケットのサイズは IP ヘッダまで含めて 80 [bytes] であり、  $B = 1500$  [bytes] とすれば  $R_{RTP} = (80/0.02)/1500 \approx 2.7$  である。したがって、概ね以下の近似が成り立つ。

$$R_t \approx \frac{R_m}{n_{TCP}} \quad (6)$$

### 3.2 ACK 遅延幅 $r_d$

式 (2), (3), (6) から、  $r$  に対する条件は、

$$r \geq \frac{\alpha W_0}{R_t} \approx \frac{\alpha W_0 n_{TCP}}{R_m} \quad (7)$$

と表せる。あらかじめ規定する  $n_{TCP}$  の最大値  $n_{max}$  を用いて、  $r_d$  を以下のように規定する。

$$r_d = \frac{\alpha W_0 n_{max}}{R_m} \quad (8)$$

### 3.3 最小パケット破棄間隔 $d$

ある一つの TCP コネクションについて、 RTT が一定であり、 cwnd に対して受信ウィンドウ (rwnd) が十分大きいと仮定する。また、当該 TCP コネクションでは Congestion Avoidance アルゴリズムが実行されていると仮定する。

規定転送レート  $R_t$  における当該コネクションの cwnd を  $W_t$  [pkts] とすると、

$$W_t = R_t r \quad (9)$$

である。パケットの破棄は、転送レートが  $R_t$  のとき、すなわち cwnd が  $W_t$  のときに行われ、パケット破棄直後の cwnd は Fast Recovery によって  $W_t/2$  となる。 Congestion Avoidance によって、 RTT 分の時間経過ごとに cwnd が 1 セグメントずつ増加するので、 cwnd はやがて  $W_t$  となり、再びパケットの破棄が発生する。

連続する 2 回のパケット破棄の間に送信されるパケット数  $P$  は、 cwnd が  $W_t/2$  から  $W_t$  になるまでに送信されるパケット数に等しく、以下ようになる。

$$\begin{aligned} P &= \sum_{i=\frac{W_t}{2}}^{W_t-1} i = \frac{3}{8} W_t^2 - \frac{1}{4} W_t \\ &\approx \frac{3}{8} W_t^2 = \frac{3}{8} R_t^2 r^2 \end{aligned} \quad (10)$$

ここで  $r \geq r_d$  であることから、

$$P \geq \frac{3}{8} R_t^2 r_d^2 \quad (11)$$

これにしたがい、最小パケット破棄間隔  $d$  を以下のように設定する。

$$d = \frac{3}{8} R_t^2 r_d^2 \quad (12)$$

### 3.4 必要バッファ量 $S_{ACK}$

ACK 遅延のためには、 ACK を受信してから転送するまでの  $r_d$  [sec] の間、 ACK パケットをエッジルータにおいてバッファする必要がある。このために必要なバッファの量  $S_{ACK}$  [pkts] は、すべての TCP コネクションについて  $r_d$  の間に到来する ACK パケット数の最大値以下、すなわち、  $r_d$  の間に転送する下りパケット数の最大値以下である。

$$S_{ACK} \leq n_{TCP} R_m r_d \quad (13)$$

$$= n_{TCP} R_m \frac{\alpha W_0 n_{max}}{R_m} \quad (14)$$

$$\leq \alpha n_{max}^2 W_0 \quad (15)$$

$\alpha = 5$ 、  $W_0 = 2$ 、  $n_{max} = 10$  のとき、  $S_{ACK} < 1000$  程度である。

### 3.5 測定間隔 $t_d$ 、測定期間 $t_e$ 、係数 $\beta$

転送レートの測定間隔  $t_d$  は、 TCP コネクションの転送レート変化をより迅速に検知するため、実装において可能な最小の時間間隔とする。後述する実証システムでは、概ね  $t_d = 0.01$  [sec] である。

平均転送レート  $\bar{R}$  を算出するためのパケット数累計期間  $t_e$  および係数  $\beta$  については、現在のところ厳

密に規定できていない。パケット送出間隔のばらつきによる測定誤差を抑えるには  $t_e \gg r$  である必要があるが、 $t_e$  が長すぎると、即時転送レート  $R_i$  の推計が困難になる。今回は整数  $m$  を用いて  $t_e = mr_d$  と規定し、 $m$  および  $\beta$  の最適値を経験的に規定することにする。

#### 4. 検証システム

VoIP セッション保護機構の動作を検証するため、実機を使用した検証システムを構築中である。以下にその構成と検証方法の概要を示す。

##### 4.1 構成

全体構成を図 2 に示す。検証システムは、RAN 相当のネットワークとバックボーン相当のネットワークとを、エッジルータを想定したルータで接続する構成である。VoIP セッション保護機構はエッジルータ上で動作する。エッジルータの RAN 側には、Ethernet を介して 802.11b 無線 LAN AP (アクセスポイント) が接続される。802.11b 無線 LAN で構成される RAN 内には、VoIP での通話を行う VoIP 端末 (a) と、HTTP でのファイル取得を行う HTTP 端末が存在する。エッジルータのバックボーン側には、VoIP 端末 (a) と通話を行う VoIP 端末 (b) と、HTTP 端末からの要求を処理する HTTP サーバが、いずれも Ethernet を介して接続される。

ソフトウェア構成を図 3 に示す。エッジルータ上の VoIP セッション保護機構は、IP スタック中に実装する。いずれのノードについても、OS には Linux (カーネル 2.4.19) を使用し、TCP/UDP/IP スタックには Linux カーネル標準のものを使用する。

##### 4.2 検証方法

典型的な検証方法としては、まず VoIP 端末 (a)(b) 間で VoIP セッションを開始し、HTTP 端末から HTTP サーバへ、十分大きなファイルの取得要求を行って、ファイル転送中の VoIP 品質および HTTP セッションの状態を観測する。VoIP 品質としては、遅延およびパケットロス率の推移を計測する。HTTP セッションの状態としては、転送レートの推移を計測する。

**有効性実証** エッジルータにおける VoIP セッション保護機構は、オペレータの操作により有効/無効の切り替えが可能である。同機構を有効にした状態と無効にした状態の比較を行う。

**パラメータ検証** 上記で値が規定されていないパラメータ  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $m$  について、値を変化しながら観測を行い、最適なパラメータ値の抽出を行う。

## 5. 課題

現在作業中のものも含め、今後の課題としては以下が挙げられる。

### (1) 有効性検証

前述のように検証システムを実装中である。検証システムを用いて、本機構の有効性を検証する。

### (2) パラメータ検証, 理論検討

本稿で値が規定されていないパラメータ  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $m$  について、検証システムを用いた評価を行う。また、評価結果を踏まえ、理論的解析を行う。より具体的には、RTT と本機構の動作および転送レート測定との関連、転送レート測定手法、Slow Start アルゴリズムの影響についての検討を含む。

### (3) RAN 内および VoIP セッションの理論解析

現状ではエッジルータにおけるトラフィック解析のみを行っており、802.11b 無線 LAN 上のトラフィックの状態がどのように変化し、それによって VoIP セッションへどのような影響が生じるかについては、詳細な検討を行っていない。802.11 MAC 層で見たトラフィック状況の、本機構の使用による変化について、理論的な解析を行う。

### (4) 処理遅延

エッジルータにおいて本機構が動作することによる、ルータ処理遅延の検討および評価を行う。

### (5) 双方向通信

本機構は TCP コネクションにおける主なデータ送信方向が片方向 (下り方向) であることを仮定している。上下の転送量に比較差がない場合に対応するための方法について検討する。

## 6. まとめ

本稿では、VoIP セッション保護機構の機能を概説し、検証システムの概要について述べた。同機構の機能的な設計は完了しており、検証システムを実装中である。今後、検証システムを用いた有効性の検証を行っていく。また、同機構では詳細な値の想定ができていないパラメータがいくつか存在しており、検証においてはこれらのパラメータについての検討も行っていく。

現状ではエッジルータにおける機能およびその解析のみを実施しており、本機構により 802.11b 無線 LAN の MAC 層におけるトラフィックの変化については未検証である。これらの検証も進めていきたい。

最後に、本稿の冒頭で触れた、無線 LAN 上での VoIP の問題を RAN 内で解決する各手法と、本機構との関連や、組み合わせによる効果についても、考察

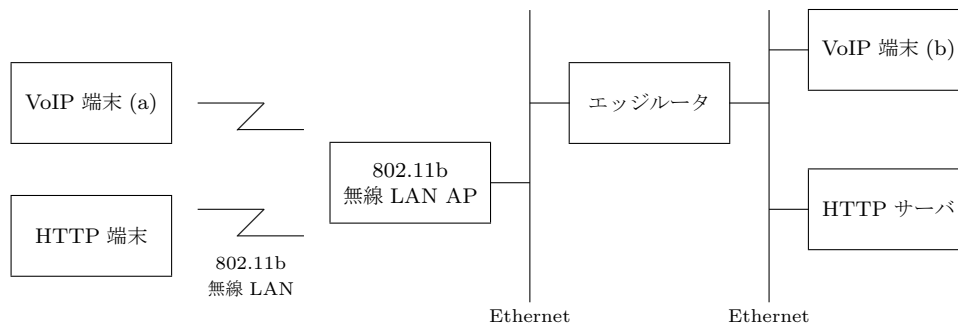


図 2 検証システム構成

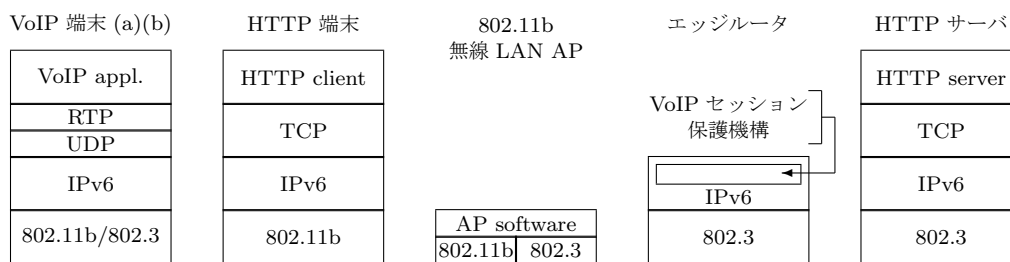


図 3 ソフトウェア構成

していきたい。

### 参 考 文 献

- 1) J. Postel, Transmission Control Protocol, RFC793, Sep. 1981.
- 2) R. Braden, Ed., Requirements for Internet Hosts - Communication Layers, RFC1122, Oct. 1989.
- 3) M. Allman, V. Paxson, and W. Stevens, TCP Congestion Control, RFC2581, Apr. 1999.
- 4) S. Floyd, and T. Henderson, The NewReno Modification to TCP's Fast Recovery Algorithm, RFC2582, Apr. 1999.
- 5) IEEE standard for Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specification, ISO/IEC 8802-11:1999, Aug. 1999.
- 6) I. Aad, and C. Castelluccia, Differentiation mechanisms for IEEE 802.11, In Proceedings of IEEE INFOCOM 2001, Apr. 2001.
- 7) B. P. Crow, I. Widjaja, J. G. Kim, and P. T. Sakai, IEEE 802.11 Wireless Local Area Network, IEEE Communications, Sep. 1997.
- 8) T. Hiraguri, T. Ichikawa, M. Iizuka, and M. Morikura, Novel Multiple Access Protocol for Voice over IP in Wireless LAN, IEICE Transactions on Communication, Oct. 2002.
- 9) C. Hoene, I. Carreras, and A. Wolisz, Voice Over IP: Improving the Quality Over Wireless LAN by Adopting a Booster Mechanism – An Experimental Approach, In Proceedings of SPIE's International Symposium on Information Technologies and Communications 2001 (ITCom'01), Aug. 2001.
- 10) M. Kuroda, T. Sakakura, T. Munaka, "Feasibility Study of Signaling Services in Wireless IP Overlay Networks", In Proceedings of 4th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communication (WPMC'01), Sep. 2001.
- 11) H. Sanneck, N. Le, M. Haardt, and W. Mohr, Selective Packet Prioritization for Wireless VoIP, In Proceedings of 4th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communication (WPMC'01), Sep. 2001.