

P2P ストリーミングを支援するプラットフォーム

松本 真弥[†] 森川 裕介[†] 柏 大[†] 重野 寛[†] 岡田 謙一[†] 松下 温^{††}

[†] 慶應義塾大学理工学部 〒 223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1

^{††} 東京工科大学 〒 192-0982 東京都八王子市片倉町 1404-1

{matumoto,morikawa,kashiwa,shigeno,okada,on}@mos.ics.keio.ac.jp

概要: P2P システムはコンピュータ間の新しい通信形態として注目を集め、流通する情報の即時的な更新やスケーラブルな検索を可能とする。このシステムはファイル交換やグループウェアに利用されているが、P2P システムの広がりを見るとストリーミングへの応用が求められる。本論文では、P2P ストリーミングを行うためのアクティブネットワーク技術を利用した P2P ストリーミングプラットフォームを提案する。このプラットフォームは、2つの機能を実現している。一つは動的な空き帯域情報の測定とそれに基づく検索パケットのルーティングである。これにより、ストリーミングを行うのに適したサーバに検索をかけることができる。もう一つはストリーミング通信時の動的な帯域制御であり、通信相手があらかじめ分かっている P2P システムにおいても安定したストリーミングを可能とする。我々は、前述の P2P ストリーミングプラットフォームを実装し、その上で動作する P2P マルチメディアチャットシステムを実現した。

The Platform to Support P2P Streaming

Shin-ya MATSUMOTO[†], Yusuke MORIKAWA[†], Dai KASHIWA[†], Hiroshi SHIGENO[†],
Ken-ichi OKADA[†], Yutaka MATSUSHITA^{††}

[†] Faculty of Science and Engineering, Keio University Hiyoshi 3-14-1, Kouhoku-ku,
Yokohama-shi, 223-8522 Japan

^{††} Tokyo University of Technology Katakura-cho 1404-1, Hachioji-shi, 192-0982 Japan
{matumoto,morikawa,kashiwa,shigeno,okada,on}@mos.ics.keio.ac.jp

Abstract: In this paper, we propose the platform to support the Peer-to-Peer streaming. This platform has two functions. One is the measurement of dynamic bandwidth and the routing based on the result of the measurement. Another is the dynamic bandwidth control through the communication of the streaming. As a result, we can send the query packet to the peer suitable for the streaming communication and get the stable streaming. We implemented this platform and the multimedia chat system on this platform.

1 導入

コンピュータの接続形態として P2P システム [1] が注目を集めている。この P2P システムにはクライアントやサーバは存在せず、すべてのコンピュータ (Peer という) が対等な関係にある。つまりすべての Peer が情報を提供するサーバであり、情報を要求するクライアントでもある。この P2P システムが発展することによって Web サーバのような特

定のコンピュータにのみ存在する情報だけでなく、ユーザ個人が持っている情報まで交換することが可能となった。また多くのユーザが必要としている情報はネットワークを通して交換され多くの Peer 端末に存在し、需要の多いコンテンツは自立的に増殖される。

この P2P を利用したサービスとしては Napster [6] や Gnutella [4] をはじめとしたファイル交換が有名

であるが、グループウェアの分野でも P2P は注目を集めている [7]。それは P2P システムにはサーバが存在しないため、サーバダウンなどによるネットワーク障害が発生しにくく、ネットワークの管理がクライアント/サーバシステムに比べて簡単であるからである。

グループウェアの分野では、アウェアネスを考慮したコラボレーションの研究が進んでいる。たとえばチャットを例にあげると、テキストのみの会話だけでは相手に感情などが伝わりにくかった。これは表情、視線や声などが伝わりやすいためである。また言葉では表現しきれないジェスチャを伝えることも出来なかった。これを解決するための手段の一つとして、音声や映像といったストリーミング通信を用いたマルチメディアチャットシステムがある。

本研究では、グループウェアの一つであるマルチメディアチャットに着目し、これを P2P という柔軟なネットワーク上で実現するために P2P ストリーミング支援プラットフォームを提案する。

ストリーミングを行うためには帯域を確保する必要があるが、P2P では相手が不定であるので、それをどうやって実現するかが問題となる。それらは、具体的には以下の 2 つの課題に整理される。

1. 通信相手の検索方法：ストリーミングを行うのに十分な余剰帯域のある通信相手を探す必要がある。
2. ストリーミングの QoS 保証：ストリーミングを送信する前に、両者間の帯域を動的に保証する必要がある。

一方で、基盤ネットワークにおける技術革新スピードの遅さを克服し、柔軟で高機能なネットワークサービスを迅速に導入することを目的として、1995 年頃からアクティブネットワーク [5] の概念が提唱され、様々な視点から研究が進められている。アクティブネットワークとは、「ルータによってアプリケーションレイヤまでの処理を実行可能にし、さらにユーザがプログラムを注入することでネットワークをプログラムすることが可能」なネットワークであり、このようなネットワークの柔軟な特性を利用した新しいネットワークサービスの登場が期待されている。

我々は、前述の課題を解決するためにはエンド端末のみの改善では不十分と考え、アクティブネット

ワーク技術を用いることによりこれを解決し、P2P ストリーミングプラットフォームを提案する。このプラットフォームでは、柔軟な検索を行うために、動的な空き帯域を測定し、それを利用した検索メッセージのルーチングを行う。そして、P2P での安定したストリーミングを実現するために、動的な帯域制御を行なっている。

2 章では既存の P2P のルーチングの仕組みを 3 章でアクティブネットワーク技術について述べる。4 章では提案アーキテクチャを、それに基づく実装と評価を 5 章で述べ 6 章で結論とする。

2 P2P

P2P 型通信システムとは、ネットワークを構成するコンピュータが対等に処理を行うシステムのことである。P2P システムは、検索をサーバで行う Hybrid 型 P2P システムと、ネットワーク中で検索メッセージをルーチングして検索を行う Pure 型 P2P システムの 2 つに分類されるが、本章では P2P システムの仕組みの中でも検索メッセージのルーチングに着目し、既存研究である Gnutella と SIONet[3] の概要を説明する。

2.1 Gnutella

Gnutella は Pure 型 P2P システムであり、サーバが存在しない。そのため Peer 同士が接続することで GnutellaNet という仮想的なネットワークを形成し、その中で通信を行うシステムである。図 1 は GnutellaNet の例であり、(A-B, A-C, B-C, B-D) 間それぞれ接続された状態である。ここで、A が探している情報を D が持っているとして仮定すると、検索の流れは次のようになる。

1. A が接続されている Peer(B, C) に検索メッセージを送信する。
2. B は接続されている Peer(C, D) に A から受け取った検索メッセージを転送する。C も同様に B に転送する。ここで接続されている Peer が大量に存在した場合は、そのなかからランダムに選び (ユーザの設定した個数) 転送を行う。

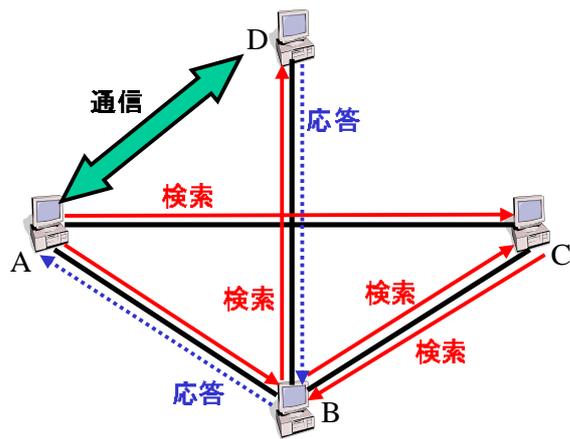


図 1: Gnutella の概念図

3. 検索にヒットする Peer(D) は、検索メッセージの送信元 Peer(B) に対して、検索応答メッセージを返信する。
4. 検索応答メッセージを受け取った Peer(B) は検索メッセージの送信元 (A) に検索応答メッセージを転送し、A と D の通信が可能となる。

このようにこのシステムではルーチング先をランダムに選んでおり、ファイル交換などには問題ないが、サービスによっては適切な検索が出来ないことも考えられる。特に本研究で扱うストリーミングの場合、通信相手を見つけても、その通信相手の回線が遅かった場合、十分なクオリティは得られない。また、仮に高速な回線を持った相手を見つけれることが出来たととしても、その通信速度を維持することが出来なければストリーミング通信には適していない。以上のような理由から Gnutella は P2P ストリーミングには適していないと考えられる。

2.2 SIONet

SIONet とは意味情報に基づくパケット配送を行うことにより、情報のよりよい探索と配信を目指して提案されたネットワークである。現在使われている IP ネットワークが宛先 IP アドレスを基にルーチングするのに対して、SIONet では意味情報に基づいてルーチングを行う。この意味情報とは、たとえば「東京在住者」であったり、「クラシックに興味のある人」であったりし、ユーザはあらかじめこれらの意味情報を SIONet に登録しておく。情報の送信者はデータに意味情報を付与して SIONet に送

信することで、情報を要求しているユーザに配送される。

このネットワークを使用すると、不特定多数のエンティティ(ユーザ)の中から、特定のエンティティを動的に探索でき、特定のものに興味を持つ人の中でコミュニティを形成することが容易となる。このように SIONet は、柔軟な検索が可能となっているが、ストリーミングのような QoS を必要とする通信を行うためには、意味情報によるルーチングだけでは Gnutella 同様に不十分であり、QoS を基にしたルーチングが必要となってくることが考えられる。

3 アクティブネットワーク技術

情報ネットワークはパケットを宛先に転送する機能のみを提供するものと考えられてきた。つまりネットワークノードでは、パケットのルーチング処理とフォワーディング処理を基本とし、ネットワークでの処理と、ユーザによる処理の間にははっきりと境界があった。しかし、このようなネットワークではアプリケーションサービスはエンド端末で処理する必要があるため、柔軟なサービスが困難であり、また新しいサービスを迅速に展開することも困難であった。このような背景から、現在のネットワークとは大きく異なるアクティブネットワークの概念が、1995 年頃 DARPA によって提案された。アクティブネットワークとは、「ルータにアプリケーションレイヤまでの処理を実行可能にし、さらにユーザがプログラムを導入することでネットワークをプログラムすることが可能」なネットワーク [2] である。

本研究では、ネットワーク中の空き帯域の測定とネットワークノード間の情報共有、および動的な帯域制御を行うために、アクティブネットワーク技術を使用した。従来、アプリケーションプロトコルにネットワークノードは関与せず、エンド端末のみで実装するのが主流であったが、ストリーミングのようなアプリケーションではエンド端末のみで行うのは困難であると考えられる。ストリーミングを考える時は、ネットワーク QoS 抜きで考えることは不可能であり、またネットワーク QoS の問題をエンド端末のみで解決するのは非常に困難であるからである。

以上のような理由から本研究では、アクティブネットワーク技術の「アプリケーションレイヤまで

の処理が可能である」という特徴を利用して、検索や帯域制御をアプリケーションの動作に応じて動的に実行するノード設計を行い、P2P ストリーミングプラットフォームを実装した。

4 提案アーキテクチャ

提案システムでは ISP のバックボーンネットワークの構成をエッジルータとコアルータという 2 種類のルータに分けて考えている。エッジルータとはバックボーンネットワークの端に位置し、ユーザ端末の存在する LAN や他の ISP と接続されている。コアルータは一つのバックボーン内でのみルーチングするルータであり、他のコアルータあるいはエッジルータと接続されている。本提案ではバックボーン内のエッジルータに着目しこれをアクティブネットワーク技術を用いて設計することにより、P2P ストリーミングを支援するエージェント PPSA (Peer-to-Peer Streaming Agent) の動作を可能とした。一方コアルータにはアクティブネットワーク技術を適用せず、従来の "Store and Forward" のみを行うルータとする。これは近年、バックボーンネットワークは非常に高速化しており、ボトルネックとならないため複雑な QoS 制御を行うよりも、高速にルーチングの方がパフォーマンスを上げることが出来るためである。

PPSA とは 1 章で述べた問題点を解決するために提案したアクティブルータ上で動作するエージェントであり、アプリケーションレベルでパケットを解析し、以下の 2 つを行う。

- QoS を元にした検索: 通信相手の検索にあたっては、Peer からの検索要求を一旦 PPSA でキャプチャし、空き帯域の多い Peer を収容する PPSA に優先的に転送を行う。
- 動的な帯域制御: ストリーミング開始時にアクティブルータに動的に帯域制御プロトコルを注入し、ストリーミングの QoS を保証する。

4.1 QoS を元にした検索

提案システムでは PPSA でアクセス回線 (Peer ネットワークとの回線) の空き帯域を常時測定し、ユーザの要求する帯域幅を満たすことができる Peer

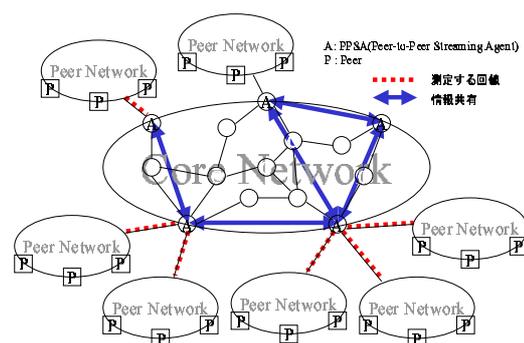


図 2: 帯域情報の共有 ($h = 3$)

にのみ検索メッセージが届くようにする。そのためには動的な空き帯域情報を PPSA 間で共有し、その情報を元に検索メッセージをルーチングする必要がある。以下にそのアーキテクチャを述べる。

4.1.1 動的な空き帯域情報の共有

PPSA では Peer と接続されているネットワークインターフェースに流れるすべてのパケットをキャプチャし、時刻 t に到着したパケットのパケット長を p_t とする。そして一定時間 m 毎にその時刻の平均使用帯域を算出する。この平均使用帯域とネットワークの最大伝送容量 M から時刻 t における平均空き帯域 f_t を求める事ができ、

$$f_t = M - \frac{1}{m} \sum_{i=t-\frac{m}{2}}^{t+\frac{m}{2}} p_i$$

となる。この式の右辺の第 2 項は t を中心として時間 m の間に到着したパケットのパケット長を合計し m で割ったもの、つまり時刻 t における平均使用帯域を表している。このようにして PPSA で算出された平均空き帯域 f_t を、近隣の PPSA (ホップ数が h 以下のルータに存在する PPSA) に時間 n 間隔で通知する (図 2)。このホップ数 h を本システムでは帯域情報共有ホップ数と呼んでいる。空き帯域情報の測定から共有までの流れを図 3 に示す。

1. 空き帯域情報を送信する PPSA は、PPSA 内にある空き帯域測定オブジェクトに空き帯域を問い合わせる。
2. IP ヘッダの TTL を h として空き帯域情報をブロードキャストする。
3. この情報を受信した PPSA は帯域情報データベースへ登録する。

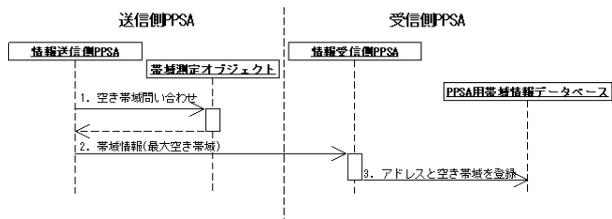


図 3: 情報共有の流れ

このように空き帯域情報を共有することにより、ストリーミングに必要な空き帯域を確保できる通信相手の検索を実現することが可能になる。

4.1.2 検索

Peer は検索を行うときに検索キーワードと一緒に要求帯域を記述した検索メッセージを送信する(図 4 の 1)。PPSA ではその検索メッセージをキャプチャし、要求帯域を満たすことのできる Peer に転送する(図 4 の 2)。同時に要求帯域を満たすことのできる Peer を管理している PPSA に対しても検索メッセージを転送する(図 4 の 3)。前節で述べたように PPSA は常に空き帯域情報を共有しているので、要求帯域より空き帯域が大きい Peer またはそのような Peer へ検索メッセージを転送することが可能な PPSA に対してのみ転送することになる。PPSA から転送された検索メッセージを受け取った PPSA も同様の動作をし(図 4 の 4)、検索メッセージは要求帯域を満たす Peer にのみ転送されることになる。

検索メッセージを受け取った Peer はキーワードにより検索を行い、検索メッセージの送信元 Peer へ応答が返される(図 4 の 5)。

この QoS を意識した検索メッセージのルーティングにより無駄な検索を削減しつつ、ユーザが求める(ストリーミング通信が可能な)Peer を見つけることが可能となる。

4.2 動的な帯域制御

Peer は検索メッセージに対する応答を受け取ると、ストリーミングの要求メッセージを PPSA に出す。そのメッセージを受け取った PPSA は通信する Peer 間のストリーミングの QoS を保証する。

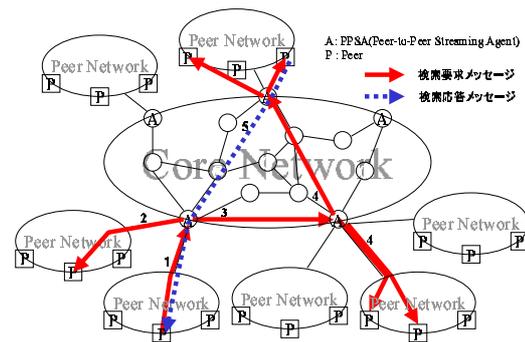


図 4: 検索メッセージのルーティング

本システムでは図 5 に示す方法で帯域制御設定を行っている。

1. 検索によって見つけた Peer に対してストリーミング要求メッセージを出すと PPSA はそれをキャプチャする。
2. PPSA はキャプチャしたメッセージからストリーミング送信 Peer のアドレスを取り出し、そのアドレスから受信 Peer(メッセージ送信 Peer)へ流れるストリーミングの QoS を Peer-PPSA 間で保証するように帯域制御設定を行う。
3. ストリーミング要求メッセージ転送し、ストリーミング送信側に存在する PPSA も同様の動作を行う。

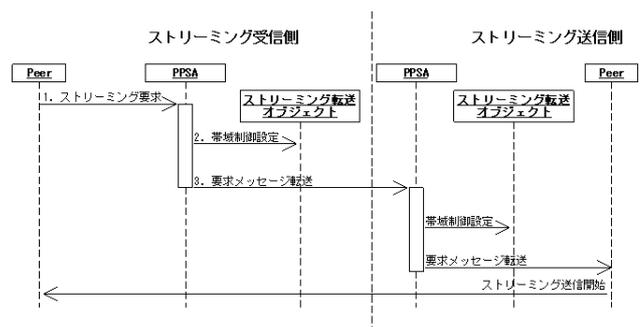


図 5: 帯域制御設定の流れ

本システムでは、前述のような方法を用いたが、アクティブネットワーク技術では新しいプロトコルを動的に導入することも可能なので、本システムに有効な帯域制御アルゴリズムが開発されれば、それを迅速に導入することも可能である。

5 実装/評価

5.1 P2P マルチメディアチャットの実装

4章で述べた P2P ストリームプラットフォームの上に P2P マルチメディアチャットシステムを実装した。ここで実装した P2P マルチメディアチャットシステムは、動画ストリームとテキストの2つのチャネルを用いてチャットを行うシステムである。このシステムのユーザは、自分がチャットをしたいテーマを自分の端末のプログラムに登録しておく。チャットをしようとするユーザは図6に示すように、チャットをしたいテーマを検索キーワードとして入力し、動画ストリームのクオリティとして相手に要求する空き帯域を設定し Query ボタンを押して検索を実行する。検索が実行され Peer 端末から検索キーワードと要求する帯域が記述された検索メッセージが送信されると、4.1 節で述べたアーキテクチャで要求帯域を満たす Peer へのみ検索メッセージが転送される。実行した検索に対する応答が返ってきた時は、応答を返した Peer の一覧が下に表示され、ユーザはその中から一つを選び Connect ボタンを押すと、4.2 節で述べた方法で帯域を確保しながらセッション要求が相手に送信される。セッション要求を受け取った Peer はセッション要求に応じる場合、帯域を確保しながらセッション応答メッセージを返信する。このようにすることによって帯域の確保できる端末に検索を行なうことができ、さらに帯域制御が出来るので安定したストリーミング通信が可能となる。

5.2 テストベッドの構築と評価

実装した P2P ストリーミングプラットフォームでの検索方法の有効性を証明するために、1台のコアルータと3台のアクティブルータからなるテストベッド(図7)を構築した。このテストベッドは一つのISP内のネットワークを想定している。ISP内のエッジルータの関係にはネットワーク的に近いものや遠いものがあるため、このテストベッドではアクティブルータ1と2および1と3はネットワーク的に近い環境を、アクティブルータ2と3はネットワーク的に遠い環境を想定し、近いルータ同士は空き帯域情報を共有し、遠いもの同士は共有しないようにしてある。

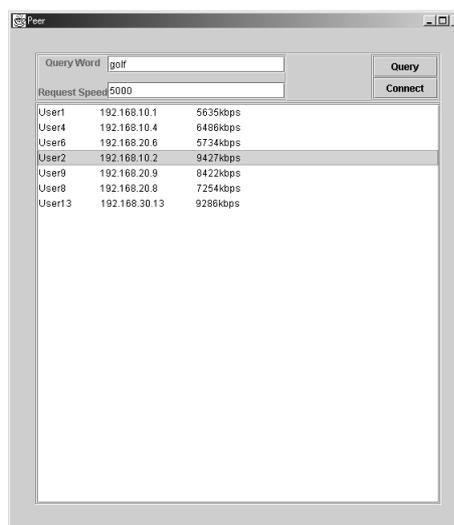


図6: P2P マルチメディアチャットシステムの検索画面

4台のルータは全てLinuxを搭載したPCで構築されており、10Mbpsのイーサネットで図のように接続されている。コアルータではアクティブルータ2と3の間で転送するときはIPヘッダのTTLを5減少させるようにし、アクティブルータ2と3はネットワーク的に離れた位置になるよう設定してある。3台のアクティブルータはプロトコルの実行環境としてJVMを搭載しており、その上でPPSAが動いている。PPSAの空き帯域情報共有ホップ数(4.1.1参照)は3に設定されており、ネットワーク的に近いアクティブルータ1と2および1と3の間でのみ帯域情報を交換するように設定されている。

このネットワークにPeer端末を、図7に示すようにアクティブルータ1に4台、アクティブルータ2に13台、アクティブルータ3に5台接続し、実際のネットワークを模擬するために以下に示すような方法でトラフィックを発生させた。

ネットワーク中の各Peerは他のPeerをランダムに選び、この2つの端末間で0MBから10MBまでのランダムなトラフィックを、ランダムに設定した時間だけかける。この操作を繰り返すことで、テストベッド内のトラフィックをより現実的なネットワークのトラフィックに近づけることができる。

このような環境で実験を行い、空き帯域情報に基づくルーティングと単純にブロードキャストする方

法とで比較を行った．ここでいうブロードキャストする方法とは空き帯域情報を利用せずに，近隣のPPSA および Peer 全てに検索メッセージを転送することである．

図8は，PeerNetwork3内のPeerから要求帯域を3MBとして8回検索を行ったときの結果をグラフにしたものである．検索に対する応答のあったPeerの空き帯域を横軸にとり，その空き帯域で検索に応答したPeerの数を縦軸示している．たとえば帯域情報を利用した方式では，検索に応答したPeerのうち空き帯域が6MbpsであったPeerが15個あり，ブロードキャスト方式では13個あったことを示している．このグラフで着目したいのは3Mbps以下のところである．ブロードキャストルーチング方式では応答数が14, 6, 3となっているのに対して，提案した帯域情報に基づくルーチングでは応答数がすべて0になっている．これは検索メッセージの送信時に3Mbpsの空き帯域を保証できるPeerに検索をかけるようにしたためであり，本システムのルーチングにより帯域保証が可能なPeerに対してのみ検索されていることがわかる．

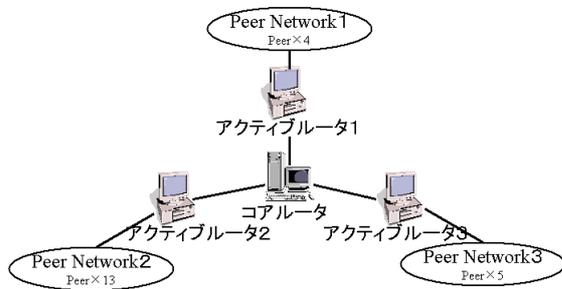


図7: テストベッド

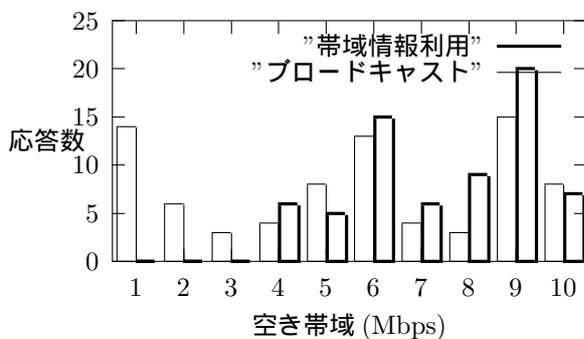


図8: 動的な帯域情報の利用の有無による比較

6 結論

本研究ではアクティブネットワーク技術を用いて動的な空き帯域情報を測定，共有しその情報を利用した検索メッセージのルーチングと，ストリーミング送信時の動的なQoS制御手法を提案し，これによりユーザの要求する帯域を持つ通信相手を見つけ，動的にQoSを保証しストリーミングを送ることが可能となりP2Pストリーミングを実現することが可能となった．このP2Pストリーミングは，グループウェアに用いられるマルチメディアチャットに用いることができ，電話などに変わる新しいコミュニケーションツールとして用いることができるであろう．

最後に，本研究の提案をより良いものとし実用化するために今後の課題を述べておく．

1. 空き帯域の測定方法の評価: 空き帯域情報測定時の測定間隔 m をどのように設定すべきか． m は小さい方がネットワークの状態をリアルタイムに測定していることになるが，ルータの処理速度が低下すると考えられ，そのトレードオフを調べ，最適な測定間隔を見つける必要がある．
2. 情報共有方法の評価: 測定した空き帯域情報の共有をする時の，ホップ数 h と通知間隔 n を調べる． h が増えればPPSAは扱う情報量が増えるため柔軟に検索が行えるが処理速度が低下すると考えられる．また， n が増えればPPSAの処理量は減るが共有した情報の即時性が下がり柔軟な検索が困難になると考えられる．
3. 実用化されているネットワークを想定したアーキテクチャの検討: 本研究では図4に示したような1つのISP内のネットワークを想定してアーキテクチャを考えた．しかしP2Pストリーミングをインターネット上で行うためには，複数のISPにまたがる環境も想定しなくてはならないだろう．また，図4ではエッジルータに直接Peerが接続されているが，実際に使われているネットワークでは，エッジルータとPeerの間にもいくつかのルータがある場合も多い．このような点を考慮してアーキテクチャを見直し，評価を取る必要がある

だろう。

参考文献

- [1] Lisa Gutberlet. Peer-to-peer computing - a technology fad or fact ? -.
- [2] Konstantinos Psounis. Active networks: Applications, security, safety and architectures. In *IEEE Communications Surveys*. First Quarter 1999.
- [3] 星合隆成, 小柳恵一, SUKHBAATAR B, 久保田稔, 柴田弘, 酒井隆道. 意味情報ネットワークアーキテクチャ. pp. 411-424, 2001.
- [4] Gnutella website. <http://gnutella.wego.com/>.
- [5] 池田 博昌山本 幹. アクティブネットワークの技術動向. 電子情報通信学会信学技報 IN99-117, pp. 19-24, 2000.
- [6] Napster. <http://www.napster.com/>.
- [7] Groove networks, introducing groove. <http://www.groovenetworks.com/>, 2002.