

P2P 形映像配信サービスにおけるザッピング発生時のトラフィック分析

中村 優子[†] 三好 匠[†] オリヴィエ フルモー^{††}

[†] 芝浦工業大学大学院工学研究科電気電子情報工学専攻

〒337-8570 埼玉県さいたま市見沼区深作 307

^{††} ピエール&マリー・キュリー大学 情報学研究所

E-mail: [†]{m110099,miyoshi}@shibaura-it.ac.jp, ^{††}olivier.fourmaux@upmc.fr

あらまし P2P アプリケーションの多くは、物理トポロジーを考慮しないで P2P オーバレイを構築するため、ネットワークへの負荷が大きく、ISP (Internet Service Provider) にとってこの問題への対処が急務である。また近年では、P2P 技術を利用した映像配信サービスが普及し始めており、欧州では TV 局と提携してテレビと同じ番組を配信するアプリケーションが増加している。このようなアプリケーションでは、テレビと同様に頻繁なチャンネル切替 (ザッピング) が発生し、それに伴って急激なトラフィック増加を引き起こす可能性がある。本稿では、P2P 形映像配信サービスである PPStream において、ザッピングが発生した際のトラフィック特性を分析した。分析の結果、特にドラマなどの長時間コンテンツにおいて、ザッピング時に受信スループットと同時接続ピア数が顕著に増加することが明らかになった。

キーワード P2P, 映像配信, トラフィック, ザッピング, 分析

Traffic Analysis Considering Channel Zapping on P2P Video Delivery Service

Yuko NAKAMURA[†], Takumi MIYOSHI[†], and Olivier FOURMAUX^{††}

[†] Department of Electrical Engineering and Computer Science

Graduate School of Engineering, Shibaura Institute of Technology

307 Fukasaku, Minuma-ku, Saitama-shi, Saitama, 337-8570 Japan

^{††} UPMC Sorbonne Universités 4, Place Jussieu, Paris, 75005 France

E-mail: [†]{m110099,miyoshi}@shibaura-it.ac.jp, ^{††}olivier.fourmaux@upmc.fr

Abstract Since P2P applications generate large amount of traffic on the network without considering the physical network topology, it is an urgent issue for Internet service providers to solve the problem. In recent years, content delivery services have been introducing P2P mechanisms and started delivering video contents same as TV programs, in partnership with broadcasting stations, mainly in Europe. It is concerned that the traffic might rapidly increase due to frequent channel switching, i.e., zapping like on TV. In this paper, we analyzed the traffic characteristics of a P2P video content delivery service, PPStream, when a peer zapped channels. The results show that both the receiving throughput and the number of connected peers significantly increase while zapping especially on long video contents.

Key words P2P, Content delivery, Traffic, Zapping, Analysis

1. ま え が き

ブロードバンド基盤の整備に伴い、画像や映像等のリッチコンテンツを扱うサービスが急増している。特に、映像配信サービスにおいては、ユーザの拡大に伴うサーバコストの増大が問

題視されている。こうしたなかで、P2P を映像配信に応用する技術に注目が集まっている。P2P では端末同士でコンテンツのやりとりを行うため、従来のクライアント/サーバモデルと比較して、サーバへの負荷集中を大幅に軽減することができる。中国では、PPStream [1] や PPLive [2] などの映像配信形 P2P

アプリケーションが盛んに開発され、世界中で利用者が急増している。欧州においては、Zattoo [3] が P2P 技術を用いてテレビの商用再配信を開始しており、ユーザ数を年々増やしている。また、CNN や BBC 等の大手放送局も、P2P による映像配信サービスを積極的に行っている。

P2P 形映像配信サービスが増加するにつれて、コンテンツの視聴形態も今後大きく変化する可能性がある。例えば、P2P 形映像配信サービスが多チャンネル化し、リビングルームのような場所で視聴されるほど普及すると、テレビ番組を視聴するのと同じようなユーザ行動が現れると考えられる。一般に、テレビ視聴時には、短時間に頻繁にチャンネルを切り替えて視聴したい番組を探す「ザッピング」が行われる。もし P2P 形映像配信サービスにおいてザッピングが行われたならば、他ピアとの接続処理や切断処理が集中的に発生するため、これまで以上にトラフィックが増大するおそれがある。

多くの P2P アプリケーションでは、物理ネットワークポロジを考慮せずに P2P の論理ネットワークを構築する。そのため、非効率なピア選択や経路選択による想定外の輻輳が、インターネットサービス提供事業者 (ISP: Internet Service Provider) にとって大きな問題となっている。この問題に対処するため、P2P アプリケーションが ISP のもつ物理ネットワーク情報を得ることで、効率的な通信経路を構築する手法が提案されている [4]。しかし、本手法を利用するためにはアプリケーションやシステムの対応が必要であり、既存の P2P アプリケーションに適用することが困難である。アプリケーションやシステムの対応を必要としない汎用的なネットワーク制御を行うためには、P2P アプリケーションのトラフィック特性からトラフィックが増大するメカニズムを把握する必要がある。

本稿では、今後増大すると考えられる P2P 形映像配信サービスにおいて、頻繁なチャンネル切替動作であるザッピングが行われた際に発生するトラフィックを分析する。P2P 形映像配信サービスとして、中国を中心にサービスを展開している PPStream を用い、PPStream において頻繁にチャンネル切替が発生した際のトラフィックを測定する。測定データを用いて、送受信スループット、及び同時接続ピア数についての特性分析を行う。

2. 従来研究

PPStream の分析を行った報告として、文献 [5]- [9] がある。文献 [5] では、PPStream の 5-tuple やデータ長の特徴を分析し、P2P ストリーミングのトラフィックを判別する手法を提案している。文献 [6] では、PPStream の Crawler を用いて、地理的な特性、ピアの接続性、参加/離脱時の特徴、映像再生性能、送受信性能、トポロジ等を分析している。PPStream では、映像データをチャンクと呼ばれる小さな塊に分け、チャンク単位でデータのやりとりを行っている。これらのチャンクは、ピア同士がもつ再生時間オフセットとバッファマップを基に交換される。文献 [7] では、チャンクの挙動について分析を行っている。文献 [8] では、PPStream における接続数、スループットの変化、及びフローに関する分析を行っている。フロー分析では、

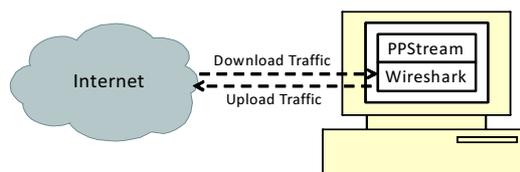


図 1 測定イメージ

フロー生起間隔、フロー持続時間、フローサイズ、フローレートの特徴を、累積分布関数を用いてモデル化している。また文献 [9] では、PPStream のほかに PPLive, SOPCast, TVants を加えた 4 種類の P2P アプリケーションにおいて、それぞれのパケット数や通信速度の変化、及び映像トラフィックのライフタイムについて分析を行っている。

関連研究としては、他の P2P 形映像配信サービスのトラフィック分析に関する文献 [10]- [11] がある。文献 [10] では、PPLive における通信時の挙動として、複数番組におけるピアの参加率、離脱数、接続数の変化、及びスループットに関して分析を行っている。文献 [11] では TVants, SopCast, TVUPlayer の三つの映像配信サービスにおいて、それぞれのデータ量におけるプロトコル別割合、制御信号と映像データの割合、スループット、及び地理的分布について分析している。

一方、映像配信サービスにおけるチャンネル変化を考慮した研究として、文献 [12]- [15] がある。文献 [12] では、Zattoo におけるチャンネル視聴開始時の遅延時間を分析している。文献 [13] では、インターネット映像配信 (IPTV) 視聴時におけるセッションの特徴や、ユーザのチャンネル切替の行動、視聴者数の変動、地理的分布について分析している。文献 [14] では、IPTV におけるザッピング発生時に、本編開始前の広告がユーザ体感品質にどのように影響するかを分析している。文献 [15] では、IPTV におけるザッピングに伴う遅延時間を減らすために、ユーザの行動に基づいて、次に視聴するチャンネルを事前に予測する手法を提案している。

以上のように、P2P 形映像配信サービスにおける通信トラフィックの特徴を捉える研究は盛んに行われている。PPStream においてもシステムの挙動をはじめとして様々な分析が行われているが、その多くは数時間に及ぶ定常的な分析である。短時間に頻繁にチャンネル切替が行われるザッピングのような過渡状態を考慮した研究では、ユーザの挙動やザッピングにより生じる遅延時間に焦点を置いたものがほとんどであり、トラフィックの変化に着目した分析はまだ行われていない。

3. トラフィック分析

3.1 測定方法

本稿では、P2P 形映像配信サービスが普及してテレビと同じような感覚で視聴されるようになった場合を想定し、ユーザがチャンネルを頻繁に切り替えて視聴したい番組を選択する状況、すなわちザッピング発生時のトラフィック特性について分析を行う。分析に先立ち、以下のネットワーク環境を用いてトラフィックを収集する。

表 1 カテゴリ A (広告あり) のチャンネルセット

	再生時間	ビットレート
チャンネル 1	1:34:38	441kbps
チャンネル 2	1:35:38	441kbps
チャンネル 3	23:34	441kbps
チャンネル 4	1:39:50	441kbps
チャンネル 5	1:11:28	390kbps

表 2 カテゴリ B (広告なし) のチャンネルセット

	再生時間	ビットレート
チャンネル 1	1:28	441kbps
チャンネル 2	1:37	441kbps
チャンネル 3	6:21	441kbps
チャンネル 4	2:20	441kbps
チャンネル 5	2:12	390kbps

- 接続回線: フレッツ光ネクスト ファミリータイプ
 - ISP: ぷらら
 - 測定 PC: Celeron 1.6GHz, 2GB RAM, Windows XP
- 本稿では、P2P 形映像配信サービスとして PPStream を使用し、またトラヒックの収集には Wireshark を使用する。図 1 に示すように、測定用のコンピュータに PPStream と Wireshark をインストールし、PPStream にて映像視聴中にコンピュータが送受信したパケットをすべてキャプチャする。送信したパケットの集合を送信トラヒック、受信したパケットの集合を受信トラヒックとして扱う。

チャンネル切替に用いる番組は予め決定する。チャンネル切替から次のチャンネル切替までの経過時間をザッピング間隔と定義する。PPStream では、ドラマのような長時間動画には本編開始前に広告が含まれるが、ニュースのように数分程度しかない動画には広告が含まれない。広告の有無により本編開始までの待ち時間が異なるため、広告ありの動画と広告なしの動画に分けて測定を行う。広告ありの場合はドラマ及びアニメチャンネル、広告なしの場合はニュースチャンネルを用いることとし、それぞれカテゴリ A、カテゴリ B と称する。表 1、表 2 に選択したチャンネルのコンテンツ長とビットレートを示す。

測定スケジュールとして、図 2 と図 3 の 2 種類を用意した。図 2 の測定スケジュールでは、チャンネル切替を行わずに同一チャンネルを一定時間視聴する。このときに視聴するチャンネルは、表 1、表 2 で選択したコンテンツを使用する。図 3 の測定スケジュールでは、ザッピングを行いながら表 1、表 2 で選択した 5 チャンネルを連続して視聴する。なお、同一チャンネルを視聴する測定スケジュールは、ザッピングを行った場合のトラヒックを分析するための基準データを取得するためのものである。

ザッピング時の測定スケジュールでは、チャンネル切替間隔が変化した際のトラヒックの変化を観察するため、ザッピング間隔を変えて計測を行う。ザッピングの間隔は広告の有無による再生開始までの待ち時間の違いを考慮して、本編開始前に広告のあるカテゴリ A では 15 秒、20 秒、25 秒、30 秒、35 秒、本編開始前に広告のないカテゴリ B では 5 秒、10 秒、15 秒、20

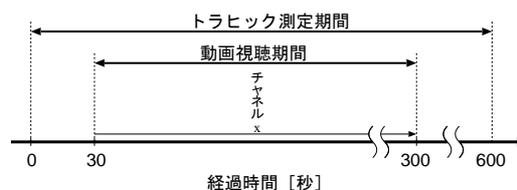


図 2 チャンネルごとの測定スケジュール

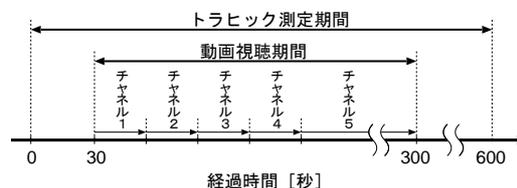


図 3 ザッピング時の測定スケジュール

秒、25 秒とする。なお、測定スケジュールが終了するたびに P2P アプリケーションを再起動し、キャッシュをクリアするものとする。

3.2 分析方法

測定したトラヒックデータから IP パケットのヘッダ情報を抽出し、送受信それぞれにおいて番組視聴中のスループット、及び同時接続ピア数の時間変化を分析する。それぞれの値の算出は、0.1 秒ごとを実施する。すなわち、スループットは 0.1 秒間に送受信した総パケットサイズから算出し、同時接続ピア数は 0.1 秒間の送受信アドレス数から算出する。スループットに関しては、映像配信に対するピアの寄与や偏りを調査するため、送受信それぞれの通信量が多い順に上位 10 位までのピアを色分けして明示する。なお、順位は、ザッピングが行われている間に送受信されたトラヒックに基づいて算出する。例えば、ザッピング間隔が 15 秒の場合、視聴開始から 75 秒間の範囲で通信量が多い順に 10 個のピアを抽出する。

4. 分析結果

4.1 チャンネルごとのトラヒック分析

まず、図 2 に示すように、同一チャンネルを継続視聴した場合のトラヒック分析を行った。実際には、カテゴリ A、B の全 10 チャンネルの測定を実施したが、本稿では紙面の都合から、各カテゴリのチャンネル 1 を視聴した場合の測定結果をそれぞれ図 4、図 5 に示す。グラフの上半分が受信トラヒック、下半分が送信トラヒックを表す。

これらの図より、受信スループットが 10Mbps 程度まで増加するのに対して、送信スループットは 1Mbps 程度であり、受信のほうが圧倒的に大きいことが分かる。一方、同時接続ピア数は送受信とも同程度であり、平均的には約 35、最大で約 70 まで上昇する。スループットも同時接続ピア数も値の大きいバースト状態の時期がほぼ一致することから、スループットと同時接続ピア数はある程度連動していると言える。また、受信スループットや同時接続ピア数は、再生開始時に最も高い状態になっていることが分かる。これは、スループットに関しては、PPStream では再生開始時に映像データのバッファリングを行

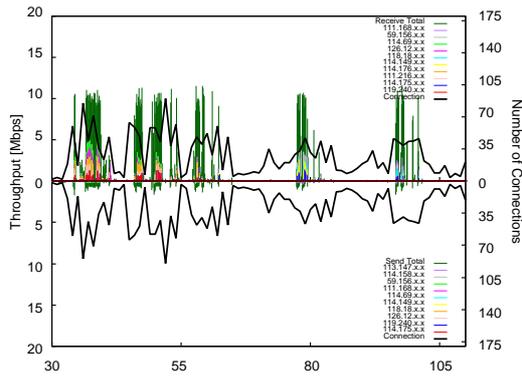


図 4 カテゴリ A, チャンネル 1 を継続視聴した場合の特性

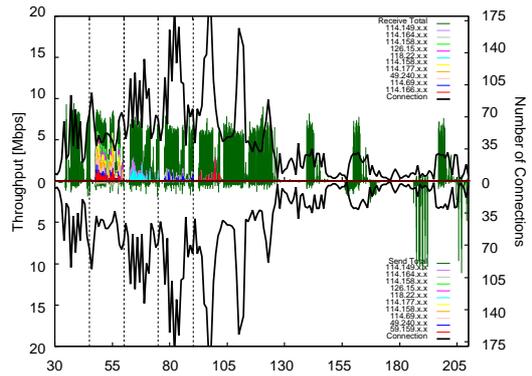


図 6 カテゴリ A, ザッピング間隔 15 秒の場合の特性

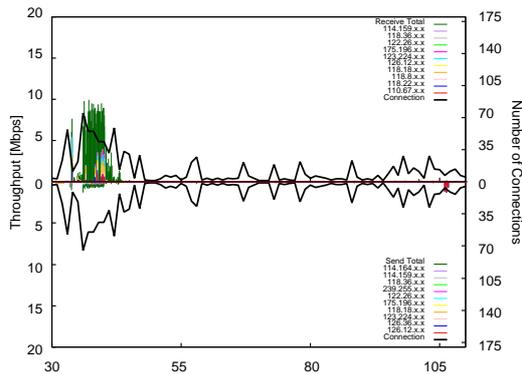


図 5 カテゴリ B, チャンネル 1 を継続視聴した場合の特性

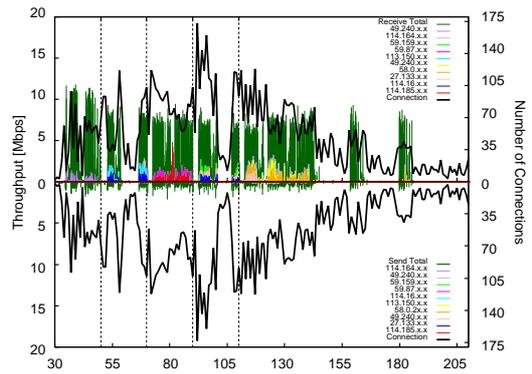


図 7 カテゴリ A, ザッピング間隔 20 秒の場合の特性

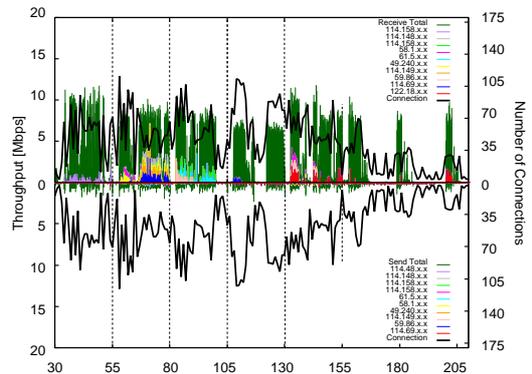


図 8 カテゴリ A, ザッピング間隔 25 秒の場合の特性

うため、通常時よりも多くの映像データを受信することが原因と考えられる。接続ピア数に関しては、チャンネル変更に伴って接続するピアに変更が生じ、多くの制御信号が送受信されるためと考えられる。

一方、カテゴリ A の動画では最初のデータ受信以降も一定の間隔でスループットの上昇が見られるのに対し、カテゴリ B の動画では同時接続ピア数が増加するもののスループットの上昇は見られない。これは、ドラマやアニメ等のコンテンツ長の大きいカテゴリ A では、再生中のバッファアンダーフローを防ぐ必要から定期的にデータの受信を行っている一方で、カテゴリ B のような短時間の動画では最初の受信のみですべてのデータ受信が完了するためであると考えられる。特に、視聴開始時は、途中で映像が停止しないようにバッファを十分に満たす必要があるため、受信スループットのバースト状態が長く持続すると考えられる。また、カテゴリ B では、受信スループットがほとんど増加しないときにも定期的に同時接続数が上昇していることから、ピアとの接続関係を確認するための制御信号のやり取りが行われていると考えられる。

4.2 ザッピング時のトラフィック分析

図 3 に示すように、測定開始後 30 秒が経過した時点からザッピングを行いながら動画視聴を開始し、5 チャンネル目を選択した後はそのまま同じ番組を再生し続ける場合のトラフィック分析を行った。スループットと同時接続ピア数の時間的遷移を、図 6～図 15 に示す。カテゴリ A に対してザッピング間隔を 15 秒から 35 秒に設定した結果を図 6～図 10 に、カテゴリ B に対してザッピング間隔を 5 秒から 25 秒に設定した結果を図 11～

図 15 に示す。図は上半分が受信トラフィック、下半分が送信トラフィックを表している。また、スループットに関しては、送受信それぞれにおいて通信量の多い順に上位 10 位までのピアを色分けして明示している。

これらの図より、同一チャンネルを継続視聴した際に発生するトラフィックと同様に、受信スループットは 10Mbps 程度まで増加するのに対して、送信スループットはほぼ 1Mbps であり、受信のほうが圧倒的に大きいことが分かる。また、同時接続ピア数も、同一チャンネル視聴時のトラフィックと同様に、スループットとある程度連動して変化している様子が見られる。一方、図 6、図 7、図 14 においては、80 秒付近において同時接続ピア数が著しく上昇している。これは、ザッピングによるチャンネル切替にピアの切断処理が追いつかず、一時的にピア数が増加したためと考えられる。

図 6～図 10 より、本編開始前に広告が入るカテゴリ A では、

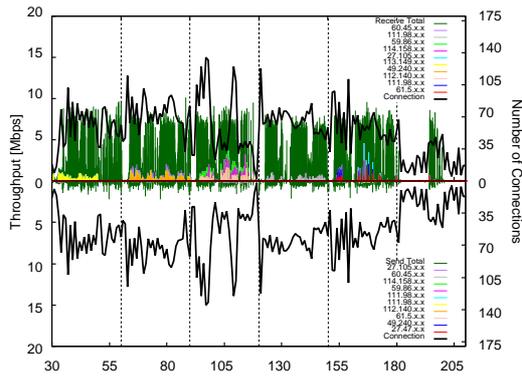


図 9 カテゴリ A, ザッピング間隔 30 秒の場合の特性

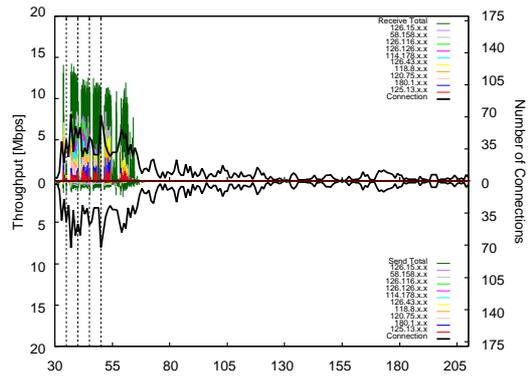


図 11 カテゴリ B, ザッピング間隔 5 秒の場合の特性

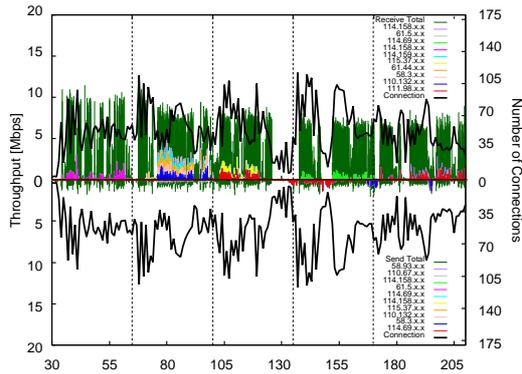


図 10 カテゴリ A, ザッピング間隔 35 秒の場合の特性

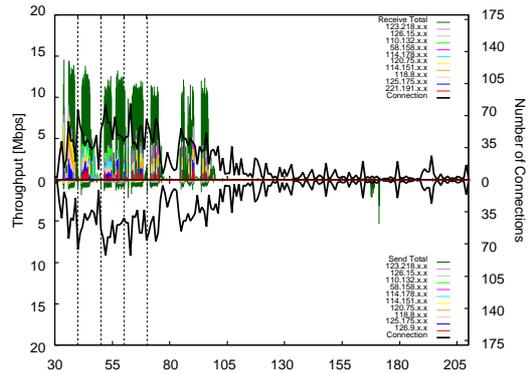


図 12 カテゴリ B, ザッピング間隔 10 秒の場合の特性

ザッピング中は受信スループットが 10Mbps 程度まで上昇し、終始バースト状態となっているのに対して、ザッピング終了後は 20 秒～40 秒の間隔をもって比較的短いバーストが発生していることが分かる。これは、ドラマやアニメといった長時間コンテンツを再生する際には、バッファアンダーフローを防ぐために定期的にデータを受信する必要があるためと考えられる。特に、視聴開始時にはバッファを十分に満たす必要があるが、ザッピングによってチャンネル切替が発生すると、すでに受信した映像データが無駄になり、次の映像データを受信しなければならない。以上の理由から、ザッピングが継続している間はスループットは低下せず、高負荷状態が続くと考えられる。図 10 より、ザッピング間隔が 35 秒の場合であっても高スループット状態が続いていることから、ザッピング間隔と通信負荷の関係を明確にするためには、もう少し長いザッピング間隔を設定した場合の特性分析が必要であろう。

一方、送信スループットは、図 6 の 185 秒経過時点で 10Mbps 程度の送信トラフィックが短時間発生しているのが確認できるが、それ以外は常に低い状態を維持している。これは、ザッピングを行うことで受信要求主体の接続となり、映像データがほとんどバッファリングされないため、他のピアに対してデータを送信できる機会が極端に少なくなっているためと考えられる。

また、スループットに対するピアごとの貢献に関しては、チャンネルが変化するとデータ受信に貢献するピアが変化していることが分かる。このことから、カテゴリ A ではチャンネルごとに貢献するピアが異なる傾向があると考えられる。

同時接続ピア数については、スループットとある程度連動し

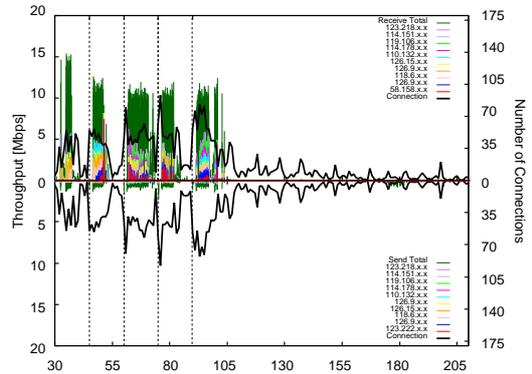


図 13 カテゴリ B, ザッピング間隔 15 秒の場合の特性

て変化していることが分かる。ザッピングが発生している間、送信トラフィックの同時接続ピア数は多くとも 100 程度であるが、図 6、図 7 では最大で 175 程度まで上昇している。同様に、受信トラフィックの同時接続ピア数も 70～100 程度であるが、最大で 140 程度まで上昇している。一方で、ザッピング終了後は、送受信ともに平均約 10、最大で約 35 まで低下する。

次に、図 11～図 15 より、本編開始前に広告が入らないカテゴリ B においても、ザッピング中は受信スループットが 10～15Mbps となることがあり、カテゴリ A と同様の高スループットとなる。ザッピング間隔が短い図 11 や図 12 では、ザッピング中は終始バースト状態となっている。これに対し、ザッピング間隔が 15 秒以上となる図 13～図 15 では、バースト状態の間に低スループットとなる状態が見られる。これは、ザッピング間隔が増加すると十分にバッファを満たすことが可能とな

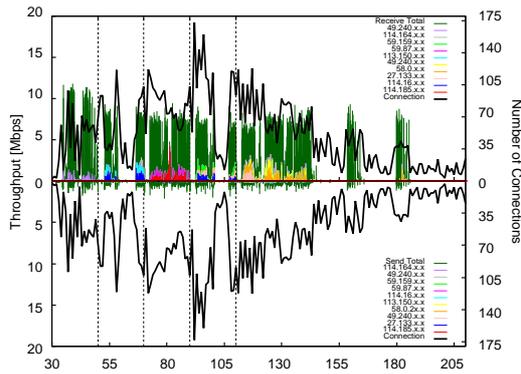


図 14 カテゴリ B, ザッピング間隔 20 秒の場合の特性

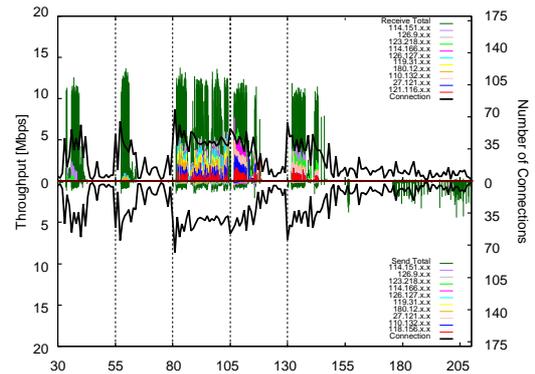


図 15 カテゴリ B, ザッピング間隔 25 秒の場合の特性

り、一時的にデータの受信が停止しているためと考えられる。また、図 5 から分かるように、ニュースのような短時間コンテンツの場合には、チャンネル切替前にすべての映像データを受信することができる場合もある。このことから、カテゴリ B では、ザッピング間隔を 10 秒以内に設定すると、通信負荷が非常に高い状態になると考えられる。

スループットに対するピアごとの貢献に関しては、チャンネル切替が発生した場合であっても、同一のピアがデータ受信に貢献していることが確認できる。これは、カテゴリ A とは異なる特性である。カテゴリ B のような再生時間の短いニュースコンテンツでは、同一ユーザが複数のコンテンツを連続して受信している場合があり、同一ピアから異なるチャンネルのデータを受信できる可能性が高くなると考えられる。

同時接続数については、スループットとある程度連動して変化していることが分かる。ザッピングが発生している間、送受信トラフィックの同時接続ピア数は 70 程度であるが、図 14 では最大で 175 程度まで上昇している。一方、ザッピング終了後は、送受信ともに 30 未満の接続ピア数を保っている。

5. む す び

本稿では、P2P 形映像配信サービスとして PPStream を挙げ、チャンネルを頻りに切り替えて視聴したい番組を選択するザッピングを発生させながら映像を視聴した際に発生するトラフィックを測定し、送受信スループットと同時接続ピア数に関する特性分析を行った。分析結果から、ザッピング中は新しいチャンネルの映像データを積極的にバッファリングする必要があるため、受信スループットが高い状態になり、新しいピアを検索するため同時接続ピア数も増大することが分かった。また、ドラマやアニメなどの長時間コンテンツにおいては、チャンネル切替により同一ピアからのデータ受信が難しくなるが、ニュースのような短時間コンテンツでは、チャンネル切替後も同一ピアの貢献を期待することが可能であることが分かった。

今後は、ピアの地理的分布を考慮したトラフィック分析や、他の P2P 形映像配信サービスを用いた場合の特性分析を行う予定である。また、本稿で得られた知見を基にして、P2P 形映像配信サービスのトラフィック制御手法についても検討を進める予定である。

謝辞 本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費助成事業 (課題番号 23760344) の助成を受けたものである。

文 献

- [1] PPStream, <http://www.ppstream.com/>, June 2011.
- [2] PPLive, <http://www.pptv.com/>, June 2011.
- [3] Zattoo, <http://zattoo.com/>, June 2011.
- [4] H. Xie, Y.R. Yang, A. Krishnamurthy, Y.G. Liu, and A. Silberschatz, "P4P: provider portal for applications," ACM SIGCOMM Comput. Commun. Review, Vol.38, Issue 4, pp.351-362, Oct. 2008.
- [5] G. Wu, J. Yang, "Identification of P2P streaming traffic based on integrated characteristics," IEEE Int'l Conf. on Network Infrastructure and Digital Content (IC-NIDC'09), pp.197-201, Nov. 2009.
- [6] J. Jia, C. Li, and C. Chen, "Characterizing PPStream across Internet," 2007 IFIP Int'l Conf. Network and Parallel Computing (NPC'07) Workshops, pp.413-418, Sept. 2007.
- [7] C. Li, C. Chen "Measurement based PPStream client behavior analysis," ISECS Int'l Colloquium on Computing, Communication, Control, and Management (CCCM'09), pp.341-345 Sept. 2009.
- [8] 北田裕之, 三好 匠, 黒沢 健, 辻野雅之, 岩下 基, 吉野秀明, "PP-Stream のトラフィック分析," 信学技報, NS2009-89, Oct. 2009.
- [9] T. Silverston, O. Fourmaux, A. Botta, A. Dainotti, A. Pescapé, G. Ventre, K. Salamatian, "Traffic analysis of peer-to-peer IPTV communities," Computer Networks, Vol.53, pp.470-484, 2009.
- [10] X. Hei, C. Liang, J. Liang, Y. Liu, and K.W. Ross, "A measurement study of a large-scale P2P IPTV system," IEEE Trans. Multimedia, Vol.9, Issue 8, pp.1672-1687, Dec. 2007.
- [11] J. Mendes, P. Salvador, and A. Nogueira, "P2P-TV service and user characterization," 10th Int'l Conf. on Computer and Information Technology (CIT'10), pp.2612-2620, Sept. 2010.
- [12] H. Chang, S. Jamin, W. Wang, "Live streaming performance of the Zattoo network," Proc. 9th ACM SIGCOMM Internet Measurement Conference (IMC'09), Nov. 2009.
- [13] M. Cha, P. Rodriguez, J. Crowcroft, S. Moon, X. Amatrian "Watching television over an IP Network," Proc. 8th ACM SIGCOMM Internet Measurement Conference (IMC'08), pp.71-84, Oct. 2008.
- [14] B. E. Godanam R. E. Kooij, O. K. Ahmed "Impact of advertisements during channel zapping on quality of experience," 5th Int'l Conf. Networking and Service(ICNS'09), 2009.
- [15] C. Y. Lee, C. K. Hong, K. Y. Lee "Reducing channel zapping time in IPTV based on user's channel selection behaviors," IEEE Trans. Broadcasting, Vol.56, Issue.3, pp.321-330, Sept. 2010.