

# 物理網構成を考慮したハイブリッド型 P2P 動画像ストリーミング配信機構の提案と評価

末次 信介<sup>†</sup> 若宮 直紀<sup>†</sup> 村田 正幸<sup>†</sup> 小西 弘一<sup>††</sup> 谷口 邦弘<sup>††</sup>

<sup>†</sup> 大阪大学大学院情報科学研究科 〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-5

<sup>††</sup> NEC インターネットシステム研究所 〒 211-8666 神奈川県川崎市中原区下沼部 1753

E-mail: <sup>†</sup>{suetugu,wakamiya,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, <sup>††</sup>k-konishi@cq.jp.nec.com,

<sup>†††</sup>k-taniguchi@da.jp.nec.com

あらまし 近年, P2P 通信技術を利用した動画像ストリーミング配信が注目されている. 本稿では, P2P ネットワークにおけるスケーラブルで耐故障性のある動画像配信機構を提案する. 提案機構では, 企業ネットワークのように拠点, 事業部といった組織構成にもとづいて構築されたネットワークにおいて, 物理網構成を考慮した階層的な配信ツリーを構築する. 本稿では, 多数のユーザに途切れのない動画像配信を提供するためのスケジューリングアルゴリズム, 分散制御により迅速に配信ツリーを構築するための配信ツリー構築機構, およびピアの離脱などの障害発生時にピア間の局所的なやりとりによって配信ツリーを再構築し, 動画像ストリーミング配信を継続するための障害回復機構を提案している. シミュレーションにより, 提案機構を用いることで, ピアの離脱の発生する環境において, 数千から数万人規模のユーザに再生の途切れのない動画像配信サービスが提供できることを示した.

キーワード ピアツーピア, 動画像ストリーミング配信, マルチキャスト

## Study on a Hybrid Video Streaming Scheme on Hierarchical P2P Networks

Shinsuke SUETSUGU<sup>†</sup>, Naoki WAKAMIYA<sup>†</sup>, Masayuki MURATA<sup>†</sup>,

Koichi KONISHI<sup>††</sup>, and Kunihiro TANIGUCHI<sup>††</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

1-5 Yamadaoka, Suita-shi, Osaka 565-0871, Japan

<sup>††</sup> Internet Systems Research Labs., NEC Corporation

1753 Shimonumabe, Nakahara-ku, Kawasaki-shi, Kanagawa 211-8666, Japan

E-mail: <sup>†</sup>{suetugu,wakamiya,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, <sup>††</sup>k-konishi@cq.jp.nec.com,

<sup>†††</sup>k-taniguchi@da.jp.nec.com

**Abstract** Video streaming based on peer-to-peer networking technology has received much attention from researchers and developers. In this paper, we propose a new scheme for scalable and robust video streaming on P2P networks. Our scheme constructs hierarchical distribution trees from peers and considers the physical structure of underlying hierarchically organized networks, such as an enterprise network. A centric server manages the construction of a higher-level tree among branches, but lower-level trees are built through local communication among peers. Peers recover from faults by themselves, using partial information they have. Through simulation experiments, we verified that our scheme can provide thousands or ten thousands of users with continuous video streaming services on an unreliable P2P network.

**Key words** peer-to-peer, video streaming, multicast

## 1. はじめに

アクセス回線の高速化，パーソナルコンピュータの高性能化を背景に，動画像ストリーミング配信技術を利用した動画像の配信，視聴が一般的になりつつある．しかしながら，多数のユーザに品質の高い動画像を提供するには，広い帯域や高性能なサーバ，さらにユーザの分布にあわせてミラーサーバやプロキシサーバを配置することなどが必要となる．また，IP マルチキャスト技術を用いれば，サーバやサーバ近傍のネットワークに対する負荷を軽減することができるが，現在のインターネットでは一般に利用可能なマルチキャストルータは少なく，実用には至っていない．そこで，近年，P2P 通信技術を利用したアプリケーションレベルのマルチキャストによる動画像ストリーミング配信技術が注目され，多くの研究が行われている [1] ~ [3] ．

P2P 通信技術においては，ホストはピアと呼ばれ，サーバを介することなくピア同士が直接データを交換する．したがって，ピアはサーバやクライアント，さらにはルータとして振るまうことができ，ピアが受信したデータを複製して他のピアに直接送信することで，アプリケーションレベルマルチキャストを実現することができる．リンクやルータによって構成される IP マルチキャストツリーとは異なり，動画像ストリーミング配信のためのマルチキャストツリー（以降では配信ツリーと呼ぶ）は，ピア間の論理的な接続によって，物理網上に，いわゆるオーバーレイネットワークとして構築される．物理網構成を考慮せずに構築された配信ツリーでは，同じ物理リンクに同じ動画像データが複数回流れるため帯域が無駄になる，物理網上で遠く離れたピアを接続することでデータの転送遅延が大きくなるなどの問題がある．そのため，遅延や帯域を測定することで物理網の構成や特性に関する情報を得てアプリケーションレベルマルチキャストツリーを構築する手法が提案されているが [4]，十分な精度の測定結果を得るためには，ネットワークに計測のための新たな負荷を与えつつ，長時間の観測が必要であり，また，接続先を適切に選択するためには，候補となる複数のピアに対して通信状態を測定しなければならない．

そこで，本稿では，企業や大学のネットワークのように組織構成にもとづいて物理的な階層的構造を持つネットワークを対象に，多数のユーザに途切れのない動画像ストリーミング配信を提供する機構を提案する．例えば，企業のネットワークは，各拠点ごとに構築された拠点ネットワークからなり，さらに拠点のネットワークは，部署ごとのより小規模なサブネットワークを相互接続することで構築されている．このような物理網構成は比較的安定しており，またその情報は事前に取得可能であることから，容易に適切な配信ツリーを構築することができるものと考えられる．

提案機構は配信ツリーの構築を管理，制御するサーバを要し，動画像サーバから動画像データが配信される，ハイブリッド型のアーキテクチャにもとづいている．すなわち，動画像ストリーミング配信システムは，動画像ストリーミング配信サーバ，スケジュール管理サーバ，配信ツリー管理サーバの 3 つ

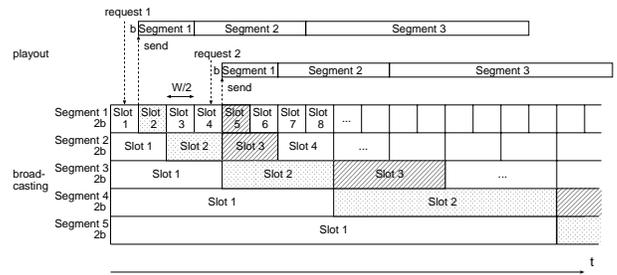


図 1 スケジュールの決定

Fig. 1 Examples of slot assignment

のサーバとピアからなる．動画像ストリーミング配信には，動画像データを一定長のセグメントに分割し，それぞれを異なるチャンネルを用いて繰り返し送出する，ニアビデオオンデマンド技術 [5] の一つであるピラミッドブロードキャストイングアルゴリズム [6] を使用し，スケジュール管理サーバがピアのセグメント受信スケジュールを管理する．また，配信ツリー管理サーバは配信ツリーの構築を管理するが，迅速に配信ツリーを構築するとともに，障害発生時にサブネット内や拠点ネットワーク内でのピア間のやりとりによって配信を回復できるように，サーバはトポロジの情報を有さず，配信ツリーは分散制御によって構築される．本稿では，そのための，セグメント受信スケジュール決定アルゴリズム，配信ツリー構築機構，および障害回復機構を提案する．また，シミュレーションにより，頻繁に障害が起きる環境においても，数千，数万のピアに再生の途切れのない動画像配信を提供できることを示す．

以降，2. では，提案機構の詳細について述べる．3. においてシミュレーションによって提案機構の有効性を評価し，4. において，本稿のまとめを行う．

## 2. ハイブリッド型 P2P 動画像ストリーミング配信機構

本章では，提案するハイブリッド型 P2P 動画像ストリーミング配信機構について，その概要と，効率のよい動画像ストリーミング配信のためのセグメント受信スケジュール決定アルゴリズム，物理網の構成を考慮した配信ツリーを迅速に構築するための配信ツリー構築機構，および途切れのない動画像再生を可能とする障害回復機構について述べる．

### 2.1 ハイブリッド型 P2P 動画像ストリーミング配信機構の概要

提案する動画像ストリーミング配信機構は，動画像ストリーミング配信サーバ (ORG; Origin Server)，スケジュール管理サーバ (SS; Schedule Server)，配信ツリー管理サーバ (GTS; Global Tree Server) およびピアからなる．なお，これらのサーバは別々の機器でなくともよい．動画像ストリーミング配信サーバからは，ピラミッドブロードキャストイングアルゴリズム [6] にもとづいて，公比  $\alpha$  に従う長さのセグメントに分割された動画像データが，セグメントごとに割り当てられたチャンネルにおいて符号化レートの  $\alpha$  倍の転送速度で繰り返し配信される．例えば， $\alpha = 2$ ，第 1 セグメントの大きさを  $W$  とする

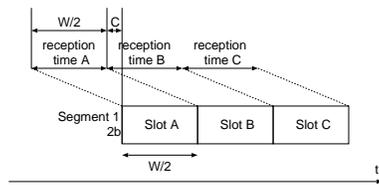


図 2 要求受付時間と要求受付予備時間  
Fig. 2 Reception time and reserved time

と、動画データは第  $i$  セグメントの大きさが  $2^{i-1}W$  となるように分割され、図 1 に示すようにそれぞれ異なるチャネルを用いて、符号化レート  $b$  の 2 倍の配信レートで送出される。なお、それぞれのチャネルにおけるセグメント配信の繰り返しをスロットと呼び、その長さはセグメント長の  $1/\alpha$  である。

動画を視聴したいピアはまず、それぞれのセグメントをどのスロットで受信すればいいのを知るため、スケジュール管理サーバ (SS) にスケジュール決定要求を送信する。SS は、ピラミッドブロードキャストにもとづいてセグメント受信のスケジュールを決定する。例えば、図中、request 1 を送信したピアにはセグメントごとに網掛けで示されたスロットが割り当てられ、これらを順次受信、再生することで、途切れなく動画を視聴できる。

次にピアは、指定されたスロットでセグメントを受信するため、セグメントごとに順次配信ツリーに参加する。配信ツリーは物理網の構成を考慮して階層化され、同じセグメントを同じスロットで受信するピアによって ORG を根として構築される。

配信ツリーの構築中やセグメントの配信中にルータやリンクの故障やピアの離脱が発生すると、セグメントの配信が妨げられ、再生の途切れなどが生じる。このような障害の発生時には、ピアは配信ツリーの構造にもとづいて迅速な障害回復を行い、セグメントの配信を再開する。

## 2.2 セグメント受信スケジュール決定アルゴリズム

スケジュール決定要求を受信するとまず、SS は、受信時刻に一番近く配信が開始される第 1 セグメントのスロットをピアに割り当てる。ただし、本稿の動画ストリーミング配信機構では、ピア間のやりとりによって配信ツリーが構築されるため、実際にセグメントが配信可能になるまでには時間がかかる。そこで SS は、図 2 に示すように第 1 セグメントのそれぞれのスロットに対して要求を受け付ける期間を定める。あるスロットの要求受付時間はそのスロットの配信開始の  $W/2 + C$  秒前から  $W/2$  秒間とする。この期間に SS がスケジュール決定要求を受信したピアに対しては、対応するスロットが割り当てられる。なお、 $C$  を要求受付予備時間と呼び、 $C$  秒前に要求を受け付けたピアを含む配信ツリーが構築されるのに十分な時間に設定される。

第 2 セグメント以降については、ピラミッドブロードキャストに従い、動画データの最初から最後まで順に、同時に高々 1 つのセグメントを受信するようスロットが割り当てられる。ただし、動画配信サービス参加直後に配信遅延や障害による配信の中断が発生し、バッファが枯渇することによって

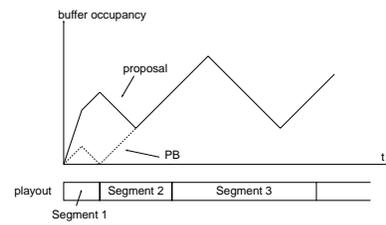


図 3 バッファ内データ容量の比較  
Fig. 3 Comparison of buffer occupancy

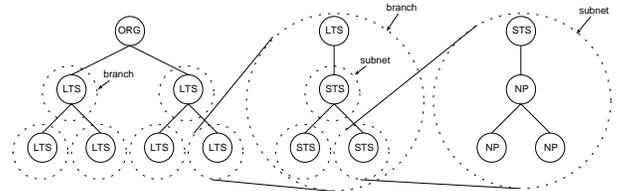


図 4 配信ツリーの階層化  
Fig. 4 Hierarchical Distribution Tree

再生が途切れることを防ぐため、第 1 セグメントと第 2 セグメントは同時に受信できるものとする。すなわち、図 1 において、request 2 に対応するスケジュール決定要求を送信したピアには、斜線で示されたスロットが割り当てられ、第 1 セグメントと同時に第 2 セグメントを受信することとなる。その結果、図 3 に示すバッファ内データ量の推移のとおり、サービス参加直後にバッファ内に多くの動画データが蓄積することができる。

セグメント  $i$  を時刻  $t_i$  から始まるスロット  $s_i$  で受信するためには、ピアは配信ツリー参加要求を、時刻  $t_i - W/2 - C$  から  $t_i - C$  の間に送信しなければならない。SS は、スケジュール決定要求に対し、スロット番号  $s_i$  と配信ツリー参加要求の送信期間  $[t_i - W/2 - C, t_i - C]$  を返信する。

## 2.3 配信ツリー構築機構

企業や大学のような組織においては、拠点や学部ごとの拠点ネットワーク、さらに事業部や学科ごとのより小さなサブネットワークのように、組織構成にもとづいた階層的な物理網構成がとられる。提案機構では、セグメント配信のための配信ツリーは、物理網構成を考慮して図 4 のように階層化される。すなわち配信ツリーは、まず ORG を根とし、それぞれの拠点において同じスロットで同じセグメントを受信するピアの中から選ばれた LTS (Local Tree Server) と呼ばれる拠点代表からなる拠点間ツリーによって構成される。さらにそれぞれの拠点のネットワークは、サブネットごとのサブネット代表 (STS; Subnet Tree Server) によって構成されるサブネット間ツリーからなる。サブネット間ツリーの根にあたる STS は、その拠点の LTS に接続される。また、LTS, STS のいずれでもないピアを NP (Normal Peer) と呼び、それぞれのサブネットのネットワークは同じサブネットに属する NP 間のツリーからなる。NP 間ツリーの根にあたる NP は、そのサブネットの STS に接続される。なお、LTS に直接接続された STS, STS に直接接続された NP のように親と種類の異なる子を、直下の子

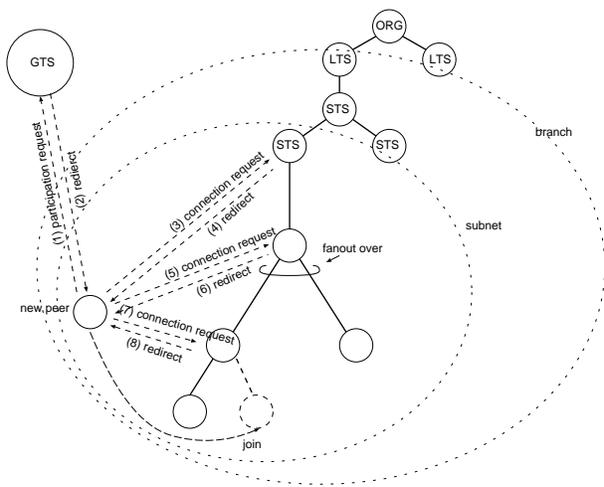


図 5 配信ツリーへの参加

Fig. 5 Joining in distribution tree

と呼ぶ。また、ORG, LTS, STS, NP のいずれも、回線容量やシステム性能によって接続可能な子の数に制限があり、これをファンアウト数と呼ぶ。動画像セグメントの配信に間に合うよう配信ツリーを構築するとともに、障害発生時に局所的なやりとりで配信を回復できるよう、配信ツリーは、TBCP [7] や HMTP [8] と同様に、順次他のピアに接続先の紹介を受けることによって構築される (図 5)。

まず、ピアは SS から受信したスケジュールに従い、GTS に配信ツリー参加要求を送信する。配信ツリー参加要求には、動画像の識別子、セグメント番号、スロット番号、および自身の IP アドレスが含まれる。GTS はピアから配信ツリー参加要求を受け取ると、アドレステーブルにもとづいてピアのピアタイプ (LTS, STS, NP) を決定し、ピアの接続先となる仮親を紹介する。アドレステーブルは、セグメント、スロットごとに管理され、拠点、サブネットを識別するためのネットワークアドレス、拠点ごとに拠点名と LTS の IP アドレス、および拠点内の STS の IP アドレスからなる。ただし、拠点、サブネットのネットワークアドレスおよび拠点名は、事前にシステム管理者によって与えられる。LTS および STS の IP アドレスは、LTS, STS が未指名の場合、いずれも 0.0.0.0 に初期化されている。GTS は、それぞれの拠点、サブネットごとの LTS, STS を管理しているが、配信ツリーのトポロジなどの情報は持たない。配信ツリー参加要求の受信時に、そのピアが属する拠点にまだ LTS が存在しない場合は、GTS はピアを LTS に任命し、仮親として ORG の IP アドレスを通知するとともに、ピアの IP アドレスをその拠点の LTS としてアドレステーブルに登録する。ピアの属する拠点の LTS は既にあるがサブネットに STS がいない場合には、ピアを STS に任命し、仮親として LTS の IP アドレスを通知するとともにピアを STS として登録する。STS がすでにある場合には、ピアは NP となり、GTS はピアの属するサブネットの STS を仮親として通知する。

ピアは GTS から返信を受け取ると、通知された仮親の IP アドレスを最初の仮親としてリストに記録し、仮親へ接続要求を送信する。仮親はピアから接続要求を受け取ると、それぞれ

のピアタイプと自身が既に持つ子の数から、そのピアを子として受け入れるかどうかを決定する。ピア A がピア B の接続要求を受信したとする。まず、A は自身のピアタイプと B のピアタイプを比較する。それらが同じ場合には、子の数がファンアウト数より少なければ、A は B を子として受け入れる。A は B の IP アドレスを自身の子のリストに追加し、B との接続を確認する。子の数がファンアウト数に等しければ、子のうちの 1 つを新しい仮親としてピア B に通知する。新たな仮親は子の中からラウンドロビンに従って選出されるため、配信ツリーは幅優先で構築されることになり、ORG からピアへの動画像セグメントの配信遅延を抑えることができる。一方、ピアタイプが異なる場合には、A が直下の子を持たなければ、B を直下の子として登録し、接続する。既に直下の子を持つ場合は、直下の子を新たな仮親として B に紹介する。

新たに仮親を紹介された B は、紹介された仮親を仮親のリストに追加し、改めて新しい仮親への接続を試みる。したがって、配信ツリーへの参加に成功した時点で、B はその祖先ピアの IP アドレスのリストを持つことになる。

続くセグメントに対する配信ツリーへの参加は、前セグメントでのピアタイプによって異なる。なお、配信ツリーへの参加はセグメント順とし、第 1 セグメントと第 2 セグメントを同時に受信するよう指示されている場合にも、第 1 セグメントの配信ツリーの参加後に、第 2 セグメントの配信ツリー参加要求または接続要求を送信する。前セグメントで NP であったピアは、前回の STS を仮親とし、要求受付が既に開始されている場合はすぐに、そうでない場合には受付時間のうち一様分布に従うランダムな時刻に、接続要求を送信する。以後、第 1 セグメントと同様に、仮親の紹介、接続を繰り返すことで配信ツリーに参加できる。前セグメントで STS であったピアが LTS に昇格していた場合、ピアはその通知を受け、新しい STS を知るため、改めて GTS に配信ツリー参加要求を送信する。

一方、前セグメントで LTS または STS であったピアは、NP であったピアの接続要求を受信、処理できるよう、いち早く上位階層の配信ツリーを構築しなければならない。そのため、要求受付の開始と同時に、または、要求受付が既に始まっている場合にはただちに、GTS に配信ツリー参加要求を送信する。

#### 2.4 障害回復機構

配信ツリーの構築中に指定された仮親にアクセスできなくなる、動画像データの受信中に親が離脱する、リンクやルータなどのネットワーク機器が故障する、などのように動画像データの配信に支障が生じることを、障害と呼ぶ。障害が発生した場合には、障害回復により配信ツリーを再構築する。これらの障害によってアクセス不能となったピアを、離脱したピアと呼ぶ。障害は事前の通知なく発生するものとし、その影響を受ける周囲のピアによって検出される。離脱したピアの親は、離脱したピアを子のリストから削除する。離脱したピアに接続を試みていたピア、および離脱したピアの子は、障害回復を行う。障害回復により NP が STS に、もしくは STS が LTS に昇格した場合、昇格したピアの子は、親に障害が起きたとみなし、同様に障害回復を行う。

離脱した仮親または親と自身のピアタイプが同じであった場合には、配信ツリー参加時に作成した祖先のリストにもとづき、祖父母のピアに接続要求を送信することで、配信ツリーの再構築を試みる。ピアは、接続に成功すれば、障害回復を完了する。ファンアウト数の制限により接続に失敗した場合には、祖父母より仮親の紹介を受け、配信ツリー構築時と同様の手順でいずれ配信ツリーに参加することができる。祖父母が障害によりアクセスできなかった場合は、リストに従って順に祖先をさかのぼっていく。障害回復中に祖先リストが空になった場合は、再び GTS に配信ツリー参加要求を送信する。なお、アクセスできなかった仮親または離脱した親が LTS, STS であった場合には、GTS にその離脱を通知する。通知を受け取った GTS は、アドレステーブルから対応する拠点、またはサブネットの LTS または STS のアドレスを初期化する。一方、離脱した仮親または親と自身のピアタイプが異なる場合は、仮親または親は LTS または STS であるため、ピアは GTS に親の離脱を通知し、さらに GTS に配信ツリー参加要求を送信する。

障害回復が完了すると、新たな親から動画像セグメントの続きを受信する。ピアは、障害回復により新たに接続した子に動画像データを提供できるように、再生完了後も動画像データを一定時間蓄積しておく。

### 3. シミュレーション評価

本章では、シミュレーションにより提案機構の特性および有効性を評価する。

#### 3.1 シミュレーション条件

シミュレーションにおいては、GTS やピアの負荷、再生開始までの待ち時間、障害回復時間、再生の途切れ時間により提案機構を評価した。1 秒間あたりに GTS が受信した配信ツリー参加要求と LTS や STS の離脱通知の総数を GTS の負荷とする。また、ピアごとの 1 秒間あたりに受信した接続要求の最大数をピアの負荷とする。SS にスケジュール決定要求を送信してから第 1 セグメントの受信が開始されるまでの時間を再生開始までの待ち時間とし、障害を検出してから新しい親ピアへの接続を完了するまでの時間を障害回復時間とする。障害回復や配信遅延によりバッファが枯渇し、再生が中断した時間の合計を再生の途切れ時間と呼ぶ。

シミュレーションにおいては、拠点数は 5、各拠点内のサブネット数も 5 とした。ピアの所属するサブネットはランダムに定めた。拠点、サブネットによらず、ピアと GTS, ORG, SS との間の伝搬遅延をいずれも 200 ms とし、ピア間の伝搬遅延は 10 ms とした。また、全てのピア、ORG のファンアウト数は 3 とした。ただし直下の子はファンアウト数の制限を受けず、全てのピアは直下の子を 1 つ持つことができるものとした。

1 Mbps の符号化レートで符号化された 186 秒の 1 本の動画像が、 $\alpha = 2$  のピラミッドブロードキャストに従い、第 1 セグメントの長さを 6 秒として、5 つのセグメントに分割され、配信される。したがって、要求受付時間  $W/2$  は 3 秒となる。また、要求受付予備時間  $C$  を 1 秒とした。

スケジュール決定要求は、1 秒あたり平均 30 の一様分布で

表 1 シミュレーション結果

Table 1 Summary of simulation results

	最大	平均	最小
GTS の負荷	611	87.3	13
ピアの負荷	49	4.81	0
再生開始までの待ち時間 [sec]	5.35	2.94	1.44
障害回復時間 [sec]	1.82	0.147	0.0200
再生の途切れ時間 [sec]	0.98	0.0019	0

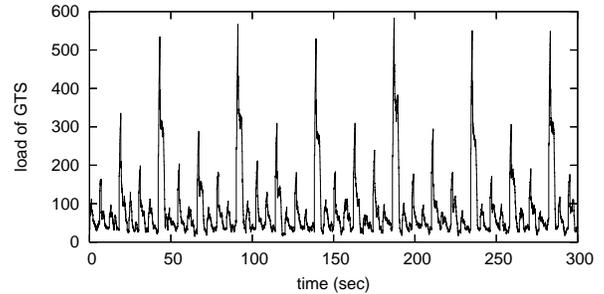


図 6 GTS の負荷の変動

Fig. 6 Transition of load of GTS

SS に到着する。要求受付時間の長さは 3 秒のため、第 1 セグメントの 1 つの配信ツリーに参加するピア数の平均は 90 である。したがって、第 2, 3, 4, 5 セグメントの配信ツリーに参加するピア数の平均は 180, 360, 720, 1,440 となり、ある瞬間に配信ツリーに参加しているピア数の合計は平均 2,790 となる。

いずれのピアも、毎秒 0.004 の確率で、配信ツリー構築中、動画像受信に関わらず、システムから離脱するものとした。なお、ピアの負荷、再生開始までの待ち時間、障害回復時間、および再生の途切れ時間については、途中で離脱したピアは算出対象から除外する。

シミュレーションは ORG, GTS, SS だけの状態から開始したが、ピア数の少ない初期状態の影響を除外するため、以降のシミュレーション結果においてはシミュレーション開始から 144 秒後を 0 とし、その後 1,440 秒間のふるまいについて示す。また、同じ条件のもとで 10 回ずつ行ったシミュレーション結果の平均値を用いた。

#### 3.2 シミュレーション結果

シミュレーション結果をまとめたものを表 1 に、また、GTS の負荷の変化、ピアごとの再生開始までの待ち時間の分布、およびピアごとの再生の途切れ時間の分布を図 6、図 7、図 8 に示す。

図 6 より、GTS への周期的な負荷集中が発生していることが分かる。これは、セグメント  $i$  をスロット  $s_i$  で受信するピアのうち、1 つ前のセグメントで LTS もしくは STS であったピアは、配信ツリー参加要求を時刻  $t_i - W/2 - C$  に同時に送信するためである。特に、全てのセグメントの配信開始が重なるとき負荷が最も高くなり、その周期は 48 秒である。

図 7 に示されるように、ピアのサービス参加は一様分布で発生するため、再生開始までの待ち時間の分布も一様となる。受

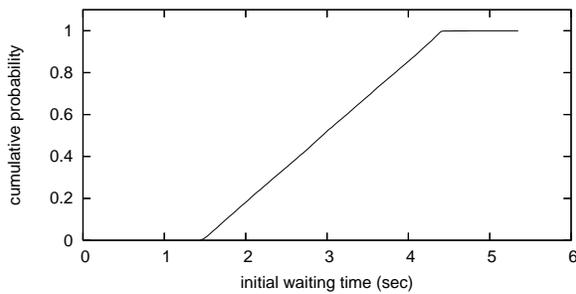


図 7 再生開始までの待ち時間の分布

Fig. 7 Distribution of initial waiting time

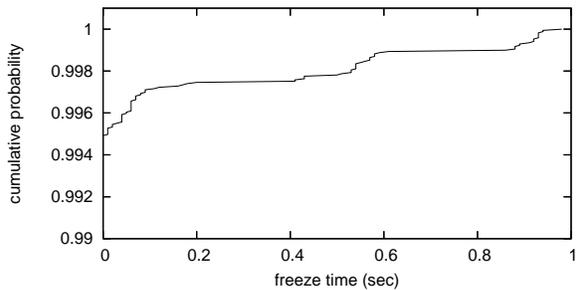


図 8 再生の途切れ時間の分布

Fig. 8 Distribution of freeze time

付開始と同時にスケジュール決定要求が受け付けられたピアの場合には、SS への伝搬遅延が 200 ミリ秒、配信開始までの待ち時間が  $W/2 + C = 4$  秒、また、配信ツリーの根に近い LTS となるため、ORG からの伝搬遅延である 200 ミリ秒、さらに、シミュレーションでは動画の受信直前に障害が発生したため、障害回復におよそ 1 秒かかり、これらの合計である 5.35 秒が、再生開始までの待ち時間の最大値となっている。一方、最短の待ち時間は 1.44 秒であり、これは、SS への伝搬遅延の 200 ミリ秒、動画配信開始までの待ち時間として要求受付予備時間  $C$  の 1 秒、ORG から LTS までの伝搬遅延が 200 ミリ秒、さらに LTS からの伝搬遅延として数ミリ秒、からなる。

図 8 に、ピアごとの再生の途切れ時間の分布を示す。1,440 秒間のシミュレーションにおいてサービスに参加した 43,200 のピアのうち、最後まで動画を見終えたピアは、約 20,000 であった。そのうち約 0.5% にあたる約 100 ピアにおいて動画再生の途切れが発生しているが、最大でも約 0.98 秒であることから、障害の発生する環境においてもほぼ途切れのない動画ストリーミング配信が可能であるといえる。

紙幅の制限のため詳細は省略するが、スケジュール決定要求の到着率、拠点数やサブネット数、障害頻度、ファンアウト数、動画の長さなどについて、様々な条件のもとでシミュレーションを行った。例えば、1 秒当たりのスケジュール決定要求の到着数を平均 70 とした場合には、同時に 6,510 のピアがシステムに参加することになるが、GTS やピアの負荷はピア数に比例して増加する一方で、平均障害回復時間は減少した。これは、LTS や STS は拠点数、サブネット数によって定められるため、多くのピアは NP となり、それら NP は障害が発生しても祖父

母に接続ができれば迅速に障害から回復できることによる。また、秒あたりの障害発生確率が 0.005 のとき、シミュレーション時間内にシステムに参加した 43,200 ピアのうち、動画を全て視聴したピアは、全体のおよそ 39% であった。障害回復処理中に新たな障害が発生する可能性が高くなるため、障害回復時間は最大 2.2 秒となったが、再生の途切れ時間は最大でも 1 秒以下であった。

以上より、提案機構により、ピアの離脱の発生する不安定な P2P ネットワークにおいて、数千、数万のピアに再生の途切れのない動画配信を提供できることが示された。

#### 4. おわりに

本稿では、階層的な構造を持つネットワークにおいて、数千から数万のユーザに、再生開始までの待ち時間が小さく、再生の途切れのない動画ストリーミング配信を提供するためのハイブリッド型 P2P 動画ストリーミング配信機構を提案し、その有効性をシミュレーションにより示した。また、本稿では述べていないが、予備実験においては、サブネットワーク内に深さ 10 の完全二分木で構築された NP 間ネットワークにおいて、STS および深さ 9 以下の全ての NP が同時に離脱した場合にも、約 2 秒以内に残りのピア間で配信ツリーが再構築されることが示されている。

ただし、拠点間の物理リンクを同じスロットの同じ動画セグメントが複数回転送されるなど、冗長な配信ツリーが構築されるため、より効率的な配信ツリーの構築機構について検討する必要がある。また、GTS に周期的に負荷が集中するため、配信ツリー構築の迅速さ、障害回復の分散処理などの特性を保ちつつ、負荷を軽減する手法について検討したい。

#### 文 献

- [1] A. Nicolosi and S. Annappureddy: "P2PCAST: A Peer-to-Peer Multicast Scheme for Streaming Data", Proceedings of First IRIS Student Workshop (2003).
- [2] V. N. Padmanabhan, H. J. Wang and P. A. Chou: "Resilient Peer-to-Peer Streaming", Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Network Protocols (2003).
- [3] M. Hefeeda, A. Habib, B. Botev, D. Xu and B. Bhargava: "PROMISE: Peer-to-Peer Media Streaming Using Collect-Cast", Proceedings of ACM Multimedia 2003, pp. 45-54 (2003).
- [4] A. El-Sayed, V. Roca and I. Rhone-Alpes: "A Survey of Proposals for an Alternative Group Communication Service", IEEE Network (2003).
- [5] A. Hu: "Video-on-Demand Broadcasting Protocols: a Comprehensive Study", Proceedings of INFOCOM 2001, pp. 508-517 (2001).
- [6] S. Viswanathan and T. Imilelinski: "Pyramid Broadcasting for Video on Demand Service", Proceedings of the SPIE Multimedia Computing and Networking Conference, Vol. 2417, pp. 66-67 (1995).
- [7] L. Mathy, R. Canonico and D. Hutchison: "An Overlay Tree Building Control Protocol", Lecture Notes in Computer Science, **2233**, pp. 78-87 (2001).
- [8] B. Zhang, S. Jamin and L. Zhang: "Host Multicast: A Framework for Delivering Multicast to End Users", Proceedings of INFOCOM 2002 (2002).