

# ピアの参加離脱を考慮した インセンティブベースのピース拡散手法

武田 苑子<sup>1,a)</sup> 梅田 沙也華<sup>1,b)</sup> 重野 寛<sup>1,c)</sup>

受付日 2014年5月13日, 採録日 2014年11月10日

**概要:** P2P を用いたファイル共有ソフトの 1 つである BitTorrent では, データのアップロードに消極的なフリーライダーと呼ばれるユーザが存在する. このユーザに対し, 評価値ベースのインセンティブメカニズム (RBIM) が研究されている. 評価値とはピアの過去の送受信量からネットワークへの貢献度を数値化した値である. 評価値の高いピアが優先的にピースを取得可能とすることで, ネットワークへ貢献するインセンティブをピアに付与している. しかし, RBIM ではピアの参加離脱によりピースの拡散が遅れ, ネットワーク全体でのダウンロード効率が低下するという問題がある. そこで, 本論文ではピアの参加離脱が発生する環境下において効率的にピースの拡散を促進する手法 (PDJL) を提案する. まず, PDJL では新規参加ピアに対し希少なピースを優先提供する. また, ピアの保持ピース数に応じてダウンロードの許可判断を行う. 提案手法の評価はシミュレーションにより行い, ピースをより効率的に拡散させることでファイルの取得効率を向上させているという結果から PDJL の有用性を示す.

**キーワード:** P2P ファイル共有, インセンティブメカニズム, トラスト

## An Incentive-based Piece Diffusion Method Considering Peer Join and Leave

SONOKO TAKEDA<sup>1,a)</sup> SAYAKA UMEDA<sup>1,b)</sup> HIROSHI SHIGENO<sup>1,c)</sup>

Received: May 13, 2014, Accepted: November 10, 2014

**Abstract:** In BitTorrent which is a file sharing application utilizing peer-to-peer (P2P) system, there are free riders that have no conscious interest in uploading pieces to others. Against such users, reputation-based incentive mechanisms (RBIMs) have been studied. By allowing the peer having the higher reputation value to get the intended piece more preferentially, RBIM can give peers an incentive to upload much more pieces. However, RBIM does not consider the problems that cause delay in the distribution of the pieces by peer's join to the network and leave from the network. Thus, the efficiency in downloading piece is worsened in the whole network. We propose an effective piece diffusion method considering Peer Join and Leave (PDJL). PDJL provide rare pieces which many peers do not have with newcomers. Furthermore, peers decide whether or not to upload pieces to the requester based on the number of pieces that each peer collects. We evaluate PDJL through the computer simulation. The results show that improve the efficiency in downloading pieces of the whole network.

**Keywords:** file sharing in peer-to-peer, incentive mechanism, trust

### 1. はじめに

P2P を用いたファイル共有アプリケーションの 1 つに BitTorrent がある [1]. BitTorrent ではファイルをピースと呼ばれる単位で送信し合うことで, ピアと呼ばれる一般ユーザ間でのファイル共有を目的としている. BitTorrent

<sup>1</sup> 慶應義塾大学大学院理工学研究科  
Graduate School of Science and Technology, Keio University,  
Yokohama, Kanagawa 223–8522, Japan

a) takeda@mos.ics.keio.ac.jp

b) umeda@mos.ics.keio.ac.jp

c) shigeno@mos.ics.keio.ac.jp

では様々な性能のピア間でピースの送受信のバランスをとるため、Tit for Tat と呼ばれる方式が採用されている [1]. これは短期的なファイル交換に適したアルゴリズムであり、長期的なピースアップロードの動機付けにはならない [1]. また、ピースのアップロードに消極的なフリーライダーと呼ばれるピアも存在する [7].

そこで、ピア間の過去の送受信量からネットワーク全体に対する貢献量（アップロード量）を数値化した評価値を算出し、評価値を用いてピースのアップロードを促進させるインセンティブメカニズム（RBIM）が研究されている [2], [3]. このメカニズムでは、評価値の高いピアほど、より早いダウンロードスピードを享受できる.

しかし、RBIM ではピアの参加離脱が発生する環境下においてピースの拡散が遅れ、ネットワーク全体でのダウンロード効率が低下するという問題がある. 原因として、新規参加ピアのピース交換不参加問題、ピアの離脱にともなうピース拡散遅延問題の2つがあげられる. まず、新規に参加したピアに対する評価値は低いいため、有効な帯域を保持しているが、ピースの獲得が進まず、ピース交換に参加することができない. 次に、すべてのピースを取得しファイルを完成させた後のピアは、すぐにネットワークから離脱してしまうことが報告されている [5], [6], [8]. この場合、ピースの配信元が減少し、拡散の遅れるピースが発生することで以後のピース取得の完了が大きく遅れる.

そこで、本論文では評価値を用いたインセンティブメカニズムでのピアの参加離脱が発生する環境下において効率的にピースの拡散を促進する手法 PDJL (Piece Diffusion Method Considering Peer Join and Leave) を提案する. 提案手法では、まず新規参加ピアのピース交換不参加問題の対応として、新規参加ピアに対し普及の遅れている希少ピースを優先提供することで、新規参加ピアの帯域を有効活用し、新規参加ピアが参加の序盤から他ピアとピース交換ができるようにする. また、ピアの離脱にともなうピース拡散遅延問題の対応として、保持ピース数に応じた閾値を設定しダウンロードの許可判断をすることで、ピアの離脱前にピースをよりアップロードさせ、ピースの拡散を促す. 以上2つの対応策から、ネットワーク全体でのダウンロード効率の向上を図る.

以下本論文では、2章において関連研究について述べ、3章でPDJLを提案し、4章でシミュレーション評価により提案手法の有効性を示す. 最後に5章で結論を述べる.

## 2. 関連研究

本章では BitTorrent のメカニズムやアルゴリズムを説明し、フリーライダーへの対応策における関連研究をあげ、評価値の算出方法や利用方法について述べる.

### 2.1 BitTorrent における Tit for Tat

BitTorrent とは、ピアの参加状況や ID 管理などをサーバが行い、実際のファイル交換はピア間のみで行うハイブリッド型 P2P システムである.

BitTorrent ではゲーム理論の1つである Tit for Tat の概念を取り入れたチョークアルゴリズムを用いてピースの需給バランスをとっている [1]. P2P における Tit for Tat は、過去に相手が貢献した分だけ自身も貢献するというものである [1], [4]. また、チョークアルゴリズムとはピア間の互いに対する貢献量に基づきピース送信先を選択するものである. 貢献量とは過去数秒間での取得データ量で表される. また、「チョークする」とはピースのアップロードを禁止することを示し、「アンチョークする」とはピースのアップロードを許可することを示す. BitTorrent では、一度に4つのピアに対しアンチョークを行い、この4つのピアの決定に関して基本的アンチョークと楽観的アンチョークの2つを用いる.

- 基本的アンチョーク

ピースのダウンロード要求があったピアのうち過去30秒間での貢献量が大きい順に3つのピアに対しアンチョークする.

- 楽観的アンチョーク

1つのピアに対しその貢献量にかかわらずアンチョークする. アンチョークするピアは30秒ごとに変更する.

まず、基本的アンチョークによりアップロードを許可する. そして、楽観的アンチョークによりランダムに選択したピアに対してもアップロードを許可することで、貢献量は低い希少なピースを持つピアからもアップロードを許可でき、ピース取得の偏りをなくすることができる.

一方、最低限のアップロード量で必要なピースのダウンロードのみを行うフリーライダーと呼ばれるピアも存在する [7]. フリーライダーはピースを所望するときだけそのピースを保持するピアへの貢献量を上げることで効率的に所望ピースを取得しようとする [9]. このように、チョークアルゴリズムは1対1の関係で成り立つ短期的なアルゴリズムであるため、フリーライダーのような最小限の貢献量でピースを収集するピアへの対策になり難い.

### 2.2 長期的なアップロードのインセンティブメカニズム

ネットワーク全体への貢献量を把握し、フリーライダーに対してはネットワークに対する貢献量以上にピースを取得させないようにする必要がある. ネットワークに対する長期的なアップロードのインセンティブを目的とした手法は大きく3つに分けられる. 以下ではその3つの手法について言及する.

#### 2.2.1 仮想クレジットを用いたインセンティブメカニズム

これはネットワーク内で有効な仮想的なクレジットを設け、ピースを要求するピア間でオークションを行い、クレ

ジットの提示額の高いピアに対しアップロードを許可するものである [10]. 所望するピースをダウンロードするためには、自身の保持するピースをオークションにかけアップロードすることで対価を稼がなければならない構造となっている. クレジットを管理するための信頼できる中央機関が必要となり、実際の P2P 環境への適応の際にはよく考慮する必要がある [10].

2.2.2 ゲーム理論を用いたインセンティブメカニズム

アップロードを拒み自身の利得、すなわちダウンロードスピードを最大化するよういかに戦略を代えても、より高い利得は得られないような戦略の組合せ、つまりナッシュ均衡となるようピアの戦略を決定するものである [11]. しかし、戦略を立てるうえでネットワーク全体のピアの性能や行動を把握する必要があるため理論的には成立するが、現実への実装は敷居が高い [11].

2.2.3 評価値を用いたインセンティブメカニズム

ピース交換経験から相手の自身への貢献度を独自に数値化した値である評価値を用いて、ピア間で分散的にアップロード先を決定するものである [2], [3]. 以下では、評価値の算出方法と、評価値を用いたアップロードのインセンティブの付与について説明する.

(a) 評価値の算出

評価値は互いに対する貢献量に基づいて算出される. RBIM では、最大フローアルゴリズムを適用し、過去のデータの流入量、流出量を把握している. そしてピア  $i$  からピア  $j$  への貢献量は  $i$  から  $j$  への最大フローで定義される [3]. 最大フローアルゴリズムはフォードファルカーソン法 [12] に従う. また、図 1 に最大フローの算出例を示す.

まず、各ピアは自身に対しアップロード量の多い上位  $N_h$  個のピアと直近にやりとりをした  $N_r$  個のピアをグラフの節とする. そして、各ピア間の過去のデータの流入出力量を把握する. 図 1 では、ピア  $i$  がピア  $j$  への最大フローを算出する. 左のグラフが過去に各ピアで交換した総データ量を表している. ピア  $i$  は、最大フローアルゴリズムによりピア  $j$  への最大フローを計算する. この例では、最大フローは 50 [MB] と計算される. 評価値は最大フローアルゴリズムに基づいて算出されるため、ネットワーク全体へのアップロード量が多いほど評価値が高くなる.

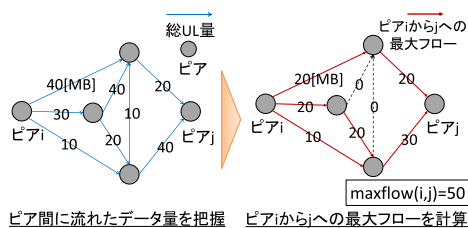


図 1 最大フローの算出例

Fig. 1 Example of calculating of maxflow between peers.

(b) 評価値の利用

文献 [2], [3] では、評価値を Ban Policy と Rank Policy の 2 つの制度に従って利用する. Ban Policy は、評価値がある閾値以下のピアの要求は破棄するというものであり、貢献度の低いピアのファイル取得を防ぐことができる. また、Rank Policy は、評価値の高いピアから要求に応えるというものであり、貢献度が高いピアほどより早いダウンロードスピードを享受できる. 以上により、評価値を用いて長期的により多くのピアにアップロードのインセンティブを付与し、フリーライダーを排除することができる.

2.3 RBIM の問題点

RBIM ではピアの参加離脱によりピースの拡散が遅れ、ネットワーク全体でのダウンロード効率が低下するという問題がある. 以下では、新規参加ピアのピース交換不参加問題とピアの離脱にともなうピース拡散遅延問題を説明する.

まず、新規参加ピアのピース交換不参加問題について説明する. RBIM では、Rank policy, Ban policy により貢献度が低く評価値の低い新規参加ピアはピース取得要求が許可され難い. そのため、新規参加ピアは有効な帯域を保持しているにもかかわらず保持ピース数が増えず、ピース取得要求が少ない. そして、他ピアへのアップロードも進まないため、評価値が上がらずに自身のピース取得要求が許可され難いというサイクルを繰り返すことになる. よって、新規参加ピアがより早くピースのアップロードができるようにするための仕組みが必要となる.

次に、ピアの離脱にともなうピース拡散遅延問題について説明する. 一般にピアの性能差などによりピースの普及スピードには差が生じ、ネットワークに分散するピース数は異なる. その結果、普及の遅いピースは取得し難くなる. ここで、本論文ではこのような取得困難な希少性の高いピースを希少ピースと定義し、ピースの希少性の度合いを希少度と定義する. 最終的にファイルを取得するためにはこのような希少ピースの取得が重要になる. RBIM では、ピース取得を完了したピアはネットワークにとどまり、ピース配分の補佐を行うことを前提としているが、実際の環境においては約 70~85% のピアがファイル完成直後に離脱しているという報告もある [13]. 特に、評価値が高く保持ピースの多い終盤ピアは新規のピースを取得しやすく、その後すぐに離脱しやすい. そして、終盤ピアの離脱により特定のピースの配信元が減少することで拡散が遅れるピースが発生し、以後のピアのファイルの完成が遅れてしまう. そのため、保持ピース数の多い終盤ピアの離脱前にピースのアップロードを促進させ、ピースの拡散を積極的に行う仕組みが必要となる.

3. PDJL の提案

本章ではピアの参加離脱が発生する環境下において効率

的にピースの拡散を促進する手法 PDJL (Piece Diffusion Method Considering Peer Join and Leave) を提案する。

### 3.1 PDJL の概要

提案手法の目的は、ネットワーク全体でのダウンロード効率の向上による全ピアの取得完了時間の短縮と各ピアの完了時間の分散を小さくすることである。まず、新規参加ピアのピース交換不参加問題に対して、新規参加ピアに対するピース交換への参加機会を提供する仕組みを導入する。具体的には、新規参加ピアに終盤ピアが希少ピースを優先提供することで、新規参加ピアが参加の序盤から他ピアとピース交換ができるようにし、帯域を有効に活用する。次に、ピアの離脱にともなうピース拡散遅延問題に対して、保持ピース数を考慮したチョークアルゴリズムを導入する。具体的には、ピアのピース保持状況によって変動し、ピース取得要求の可否を評価値で判断するための閾値を新たに設定することで、各ピアの送受信帯域をより活用させる。すなわち、新規参加ピアも含めた保持ピース数の少ないピアはダウンロードしやすくなるようにすることで、ピースの普及を促進させる。また、保持ピース数の多い終盤ピアになるほどより多くアップロードをさせるように、終盤ピアの離脱に制約を設け、希少ピースの配布に貢献させる。そして、離脱が起こる前にピースの拡散を積極的に行うようにする。

### 3.2 新規参加ピアに対するピース交換への参加機会の提供

RBIM では新規参加ピアは評価値が低く、Ban policy および Rank policy によりピースの取得が進まないため、ネットワーク参加時にピースアップロードの許可を貰うための補助を必要とする。

提案手法では、保持しているピアが少なく取得要求が多いピースであろう希少性の高いピースを優先的に付与することで、効率的に新規参加ピアが参加の序盤から他ピアとピース交換をできるようにする。このための方法として、評価値を意図的に上げるもしくはピースの初期提供が考えられる。しかし、評価値を意図的に変動可能にしてしまうと新規参加を繰り返すことで評価値を一定に保ちネットワークに貢献することなくピースを獲得されてしまうこと (whitewashing [14]) も考えられるためリスクが高い。BitTorrent におけるチョークアルゴリズムでは、ピアがランダムにピースを配布する楽観的アンチョークという機構があるが、すでに多くのピアが持つピースを提供したとしても、新規参加ピアに対するピース交換への参加機会の提供につながらないことがある。この場合、また新たなピースを付与することも考えられるが、RBIM では新規参加ピアのスタート時の評価が下がりピースの取得が困難となってしまう。

そこで、既存のピアが、新規参加ピアに希少度の高い

ピースを初期配布することで、効率的に新規参加ピアが参加の序盤からピース交換をできるようにする。また、希少度の高いピースとはその時点で隣接ピアが保持していないピースであり、要求が集中すると考えられる。そのため、希少度の高いピースを、単位時間あたりの自身の保持するピースに対して隣接ピアから最も要求を受けたピースとする。あるピース  $p$  の時刻  $t$  における希少度  $N_p(t)$  を以下の式で表す。

$$N_p(t) = \text{num}_p(\Delta t) / \Delta t \quad (1)$$

$\text{num}_p(\Delta t)$  は  $\Delta t$  における自身が保持するピース  $p$  に対する隣接ピアからの総要求数である。そのため、希少度は隣接ピアとのやりとりのみで算出し、隣接ピア間の局所的な手続きによる値である。また、その際、自身の保持する各ピースに対して隣接ピアからの要求回数を保持する。したがって、希少度を算出する際、各ピースに対して隣接ピアからの要求を監視しているだけであり、そのための新たな通信コストの増加はない。

そして、本方式では、新規参加ピアの隣人のうち、最も保持ピース数の多い終盤ピアに、最も希少度の高いピースを新規参加ピアに対して優先提供させる。提供元が終盤ピアであるのは、終盤ピアであるほどピース交換経験が豊富であり、ピースの希少度を最も相対的に判断できるためである。さらに、新規参加ピアが終盤ピアから希少なピースを引き継ぐことになるため、終盤ピアが離脱した際の配信元の減少を抑えることを意味し、ピースの拡散遅延を低減させることができる。

ここで図 2 に終盤ピアであるかの判断と初期ピース選択の例を示す。この例では、新規参加ピア X がピア B は終盤ピアであると判断し、終盤ピア B が新規参加ピア X に初期配布するピースを選択する例を指している。まず、隣人リスト内でお互いが保持していないピースのリストを交換し合う。そして、新規参加ピア X は隣人リスト内で保持ピース数が最も多いピア B を終盤ピアと判断し、ピースの要求のみを出す。また、終盤ピアは自身の保持するピースの中で最も希少度の高いピース d を優先提供する。以上により、新規参加ピアに希少度の高いピースを提供することで参加の序盤から他ピアとピース交換ができるようにし、さらにピアの離脱が起きた際のピースの配信元の減少を抑制することができる。

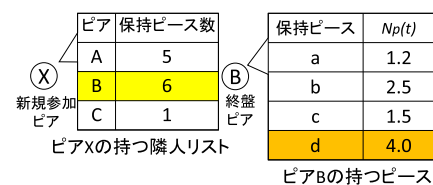


図 2 初期ピース選択の例

Fig. 2 The example of selecting a initial piece.

**Algorithm 1** Choke algorithm based on threshold  $T_{ij}$ .

**INPUT:** *neighbor\_list*: A set of peers that are neighbor of peer  $i$ ;  
**INPUT:** *request\_list*: A set of neighbor peers that sent a query to peer  $i$ ;  
**INPUT:** *upload\_num*: The number of pieces that peer  $i$  upload;  
**INPUT:** *max\_num*: The maximum number of pieces that peer  $i$  is able to upload;  
**OUTPUT:** *unchoke\_list*: A set of peers that peer  $i$  permits to upload;

```

1: upload_num ← 0
2: for each peer  $j \in neighbor\_list$  do
3:    $R_{ij} = \frac{\arctan(\maxflow(j,i)) - \arctan(\maxflow(i,j))}{\pi/2}$ 
4:    $T_{ij} = X_j^2 - \alpha$ 
5: end for
6: for each peer  $k \in request\_list$  do
7:   if  $max\_num > upload\_num$  then
8:     if  $R_{ij} \geq T_{ij}$  then
9:       unchoke_list ← ID of peer  $k$ 
10:      upload_num ← upload_num + the number of pieces
          that peer  $k$  requests
11:     else
12:       Refuse the query from peer  $k$ 
13:     end if
14:   end if
15: end for
16: for each peer  $l \in unchoke\_list$  do
17:   Permit to upload pieces that peer  $l$  requests
18: end for

```

**3.3 保持ピース数を考慮したチョークアルゴリズム**

RBIM では終盤ピアは実環境において希少ピースを提供することなくすぐに離脱してしまうため、離脱前にピースを積極的に拡散させる必要がある。そこで、提案手法では Ban policy の概念を正常ピアにまで拡張する。すなわち、ピアのピース保持状況によって変動し、ピース取得要求の可否を評価値で判断するための閾値  $T_{ij}$  を設定することでピアのピースアップロード、ダウンロードの制御を行う。

Algorithm 1 に閾値  $T_{ij}$  に基づくチョークアルゴリズムを示す。ピア  $i$  は要求者からのピースの要求を受け取り、要求者に対してチョークするかどうか、すなわち要求者にダウンロードを許可するかを決定するピアである。閾値  $T_{ij}$  はピース提供者  $i$  が要求者  $j$  に対して算出する値であり、保持ピース数に比例するような値である。提案手法における閾値  $T_{ij}$  ( $-1 < T_{ij} < 1$ ) を式 (2) から算出する。

$$T_{ij} = X_j^2 - \alpha \tag{2}$$

$X_j$  ( $0 \leq X_j \leq 1$ ) は要求者  $j$  の保持ピース率を表す。ここで、要求者  $j$  の保持ピース率  $X_j$  を、対象となるファイルの全ピース数のうち、要求者  $j$  が保持するピース数の割合と定義する。 $\alpha$  ( $0 < \alpha < 1$ ) は終盤ピアのダウンロードにどの程度制限をかけるかの制限係数である。さらに、提案手法において、要求者  $j$  に対する評価値  $R_{ij}$  が以下の式 (3) の条件を満たすとき、要求者  $j$  のピースのダウンロー

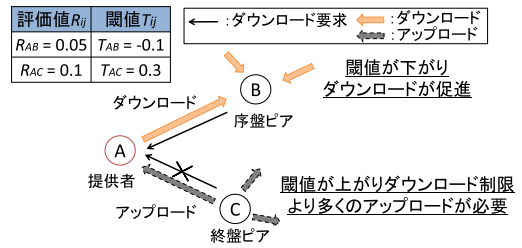


図 3 閾値  $T_{ij}$  を用いたダウンロード可否判断の例  
 Fig. 3 The example of choke based on threshold  $T_{ij}$ .

ドを許可する。

$$R_{ij} \geq T_{ij} \tag{3}$$

また、PDJL では、評価値  $R_{ij}$  を RBIM に基づいて式 (4) から算出する [3].

$$R_{ij} = \frac{\arctan(\maxflow(j,i)) - \arctan(\maxflow(i,j))}{\frac{\pi}{2}} \tag{4}$$

$\maxflow(j,i)$  はピア  $j$  からピア  $i$  への最大フローを示す。より多くのピアに、より多くのデータをアップロードする程評価値が高くなるように設定される。

ここで、図 3 に閾値  $T_{ij}$  を用いた要求者のダウンロード可否判断の例を示す。この例では、保持ピース数の少ない序盤ピア B と保持ピース数の多い終盤ピア C がピア A に対しピースの取得要求を指している。RBIM では評価値の高いピアの要求に応えるため、終盤ピア C の要求が許可されピースの取得が進み離脱しやすくなる。しかし、提案手法では保持ピース数に比例した閾値  $T_{ij}$  により要求者のダウンロードの可否判断を行う。ここでは、保持ピース数の少ない序盤ピア B に対する閾値  $T_{AB}$  を下げることで、ピア B はピア A に対して要求したピースのダウンロードが容易になる。一方、保持ピース数の多い終盤ピア C に対しては閾値  $T_{AC}$  を上げることで、終盤ピアの要求は拒否されやすくなり、ダウンロードが制限される。そのため、ピア C は新たなピースを取得するためには、評価値  $R_{AC}$  を上げる必要があり、より多くのアップロードが必要になる。このように、新規参加ピアも含めた保持ピース数の少ない序盤ピアのダウンロード量を向上させ、また保持ピース数の多い離脱前の終盤ピアのアップロード量を向上させることでピアの離脱前にピースの拡散を積極的に行うようにする。

また、図 4 に  $X_j$  と閾値  $T_{ij}$  の関係を示す。閾値  $T_{ij}$  は保持ピース率が大きいほど閾値が大きくなるように設定されている。保持ピース率が  $\sqrt{\alpha}$  以下のとき、要求ピア  $j$  はダウンロードが許可されやすくなる。つまり、序盤ピアへ優先的にピースを拡散する。また、保持ピース率が  $\sqrt{\alpha}$  以上のとき、要求ピア  $j$  のダウンロードが制限されより多くのアップロードを要求される。つまり、終盤ピアの

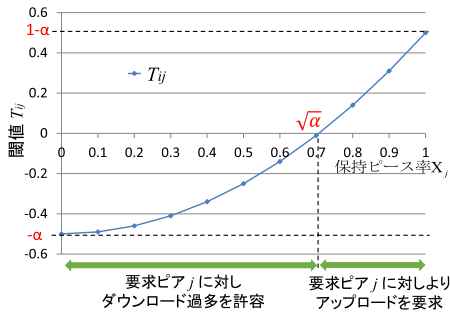


図 4  $X_j$  と  $T_{ij}$  の関係性  
 Fig. 4 The relationship between  $X_j$  and  $T_{ij}$ .

離脱前にピースのアップロードを促進する。

以上により、ピアの離脱が起きた際の希少ピース配信元減少とネットワーク全体でのダウンロード効率の低下を抑制することができる。

#### 4. シミュレーション評価

提案手法 PDJL の有用性を示すため、シミュレーションにより評価を行った。シミュレーションの時間をラウンドと呼び、1 ラウンド 2 秒に設定した。

##### 4.1 シミュレーションモデル

シミュレーションのパラメータを表 1 に示す。シミュレーションにおけるネットワークは、正常ピアとフリーライダから構成される。本論文では、便宜上フリーライダ以外のピアを正常ピアと呼ぶ。ピアの参加モデルは平均到着率  $\lambda$  のポワソン到着とした。また、シミュレーションのシナリオはネットワークに元々  $N_e$  個の既存ピアが存在し、その後  $N_n$  個のピアの新規参加が開始する。そして参加離脱が並行したあと、参加が終了し、離脱のみが発生するものとした。ピアの離脱は、4,000 ピース集まったら離脱する。4,000 ピースとは約 1GB のファイルに相当する。また、高い性能を持つピアと通常の性能を持つピアが存在するものとし、ファイル共有に参加するピアの有効帯域を調査した文献 [6] に従って設定した。また、ピアの参加モデルであるピアの平均到着率は、文献 [15], [16] に従って設定した。さらに、RBIM と共通のパラメータに関しては、文献 [2], [3] に従って設定した。提案手法が、ピアの参加離脱が発生する環境下において効率的にピースの拡散を促進しネットワーク全体でのダウンロード効率を向上させていることを示すため、以下の 3 つの項目により提案手法の性能を評価する。比較対象は RBIM [2] である。

- 新規参加ピアの平均帯域利用率  
 新規参加ピアを含めた序盤ピアのダウンロード量とアップロード量の向上について確認する。帯域利用率は次式で表される。

$$\text{帯域利用率} = \frac{\text{各ピアの実際の使用帯域}}{\text{最大使用可能帯域}} \quad (5)$$

表 1 シミュレーションパラメータ  
 Table 1 Basic simulation parameters.

既存ピア数: $N_e$	200
新規参加ピア数: $N_n$	800
総ピース数: $P_A$	4000
シミュレーション時間: round	2 second
隣人更新周期: $T_{up}$	3 round
最大隣人数: $N_{max}$	15
高性能ピアの最大アップロード帯域: $U_H$	5 pieces/round
高性能ピアの最大ダウンロード帯域: $D_H$	10 pieces/round
通常性能ピアの最大アップロード帯域: $U_L$	1 pieces/round
通常性能ピアの最大ダウンロード帯域: $D_L$	3 pieces/round
高性能ピア数: 通常性能ピア数	3:7
フリーライダの割合: $N_f$	30%
フリーライダのアップロード拒否確率: $P_f$	80%
$N_r, N_h$	$N_r = 10, N_h = 10$
制限係数: $\alpha$	0.6
平均到着率: $\lambda$	0.25

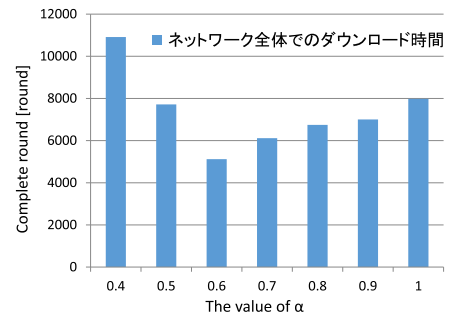


図 5  $\alpha$  の変化にともなうネットワーク全体のピース取得完了時間  
 Fig. 5 Complete round of all peers to download every piece with varying value of  $\alpha$ .

- 取得完了した正常ピア数  
 ピアの参加離脱が発生する環境下において正常ピアのダウンロード効率の向上、ダウンロード完了時間について確認する。
- フリーライダの平均ダウンロード帯域利用率  
 フリーライダによるダウンロード量の低下について確認する。

##### 4.2 制限係数 $\alpha$ の設定

提案手法における制限係数  $\alpha$  を決定するために、予備実験を行った。図 5 に、制限係数  $\alpha$  を変化させたときのネットワーク全体のダウンロード完了時間を示す。図 5 より、 $\alpha$  の値が小さすぎると、式 (2) より、閾値  $T_{ij}$  の最大値が高くなる。すなわち、要求者のダウンロードの制約が強くなり、ネットワーク全体のファイル取得に影響を与える。また、 $\alpha$  の値が大きすぎると要求者のダウンロードの制約が弱くなる。ここで、 $\alpha$  を、ネットワーク全体のダウンロード完了時間を最小化する値をとるように設定している理由は、本論文の目的がネットワーク全体でのダウンロード効

率による全ピアの取得完了時間の短縮と各ピアの完了時間の分散を小さくすることを目的としているためである。各ピアの平均取得完了時間を用いることも考えられるが、終了が極端に遅いピアが存在する場合でも平均時間は短縮されることがあり、各ピアの終了時間の分散は大きく、すべてのピアの完了時間が短縮されているかは判断ができないと考えられる。したがって、本論文の目的を達成するためには、最後のピアがダウンロードを完了し離脱するまでの時間の短縮が重要である。よって、 $\alpha$ は、ネットワーク全体でのダウンロード時間が最小となるような値を設定する。予備実験の結果より、制限係数 $\alpha$ を0.6に設定した。

### 4.3 新規参加ピアの平均帯域使用率

新規参加ピアの平均帯域使用率は、新規参加ピアのダウンロードとアップロードがどれだけ行われているかを表す。新規参加ピアの平均ダウンロード帯域使用率と平均アップロード帯域使用率をそれぞれ図6、図7に示す。全体として既存手法RBIMに対し、提案手法PDJLは平均ダウンロード帯域使用率は16.5%、平均アップロード帯域使用率は18.3%向上したことを確認した。

図6より、ネットワークへの参加初期に、既存手法RBIMでは平均ダウンロード帯域使用率が低下し、提案手法PDJLでは高い値となっていることが見て取れる。既存手法では、ネットワークへの参加初期は要求が多少許可されるが、序盤は保持ピース数が少なく提供可能なピースが少ないため、評価値が低下し平均ダウンロード帯域使用率が低下したと考えられる。これに対し、提案手法PDJLでは参加初期に希少ピースが提供されるためアップロードすることができる。その結果評価値の低下を防ぎ、またネットワークへの参加時間の序盤ほどダウンロードできるように閾値を設定しているため、早い段階で帯域使用率が高い値となったと考えられる。

次に図7より、提案手法ではダウンロード帯域を有効に活用したことで帯域使用率が向上し、より多くのピースを早い段階で取得し提供できるようになる。その結果、新規参加ピアのアップロード量が増加し、平均アップロード帯域使用率も向上したと考えられる。

### 4.4 取得完了した正常ピア数

本論文の目的は、すべてのピアの完了時間の短縮と各ピアの完了時間の分散を小さくすることである。そのためには、最後のピアがダウンロードを完了し離脱するまでの時間の短縮が重要となる。そのため、ピアの参加離脱が発生する環境下における取得完了した正常ピア数と完了時間を図8に示す。また、既存手法RBIMと提案手法PDJLにおける、各正常ピアのダウンロード完了時間の比較を図9に示す。これらの結果から、RBIMでは6342ラウンド、PDJLでは5202ラウンドで取得完了し、RBIMに対しネッ

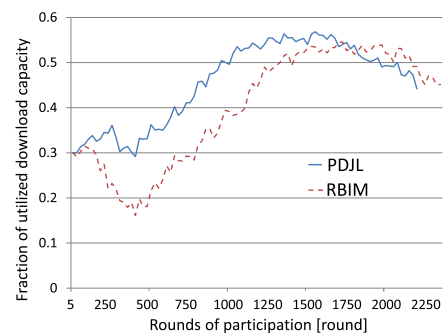


図6 新規参加ピアの平均ダウンロード帯域使用率  
Fig. 6 Average fraction of utilized download capacity of newcomers.

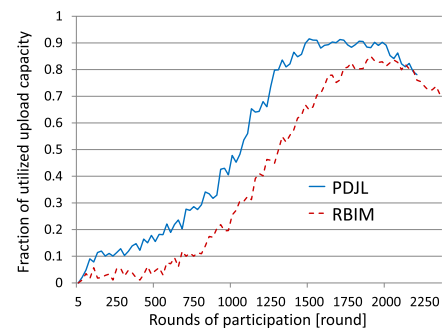


図7 新規参加ピアの平均アップロード帯域使用率  
Fig. 7 Average fraction of utilized upload capacity of newcomers.

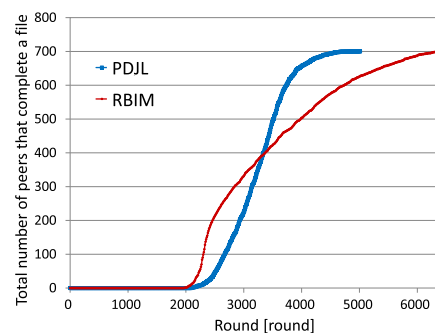


図8 取得完了した正常ピア数  
Fig. 8 Total number of normal peers that complete a file.

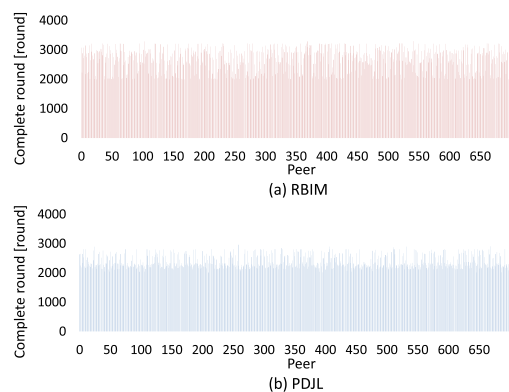


図9 各正常ピアのダウンロード完了時間  
Fig. 9 Complete round of normal peers.

トワーク全体でのダウンロード完了時間を18%削減したことを確認した。さらに、各正常ピアのダウンロードの平均時間はRBIMでは2657ラウンド、PDJLでは2343ラウンド、また、各正常ピアの完了時間の標準偏差はRBIMでは44.9、PDJLでは30.7となり、ダウンロードの平均時間を12%削減したことを確認した。

まず、図8より、PDJLは早い時間にピア取得を完了していることが分かる。RBIMではすでに存在していたピアは約2000ラウンドから離脱し、PDJLでは約2100ラウンドから離脱している。離脱の開始はPDJLの方が遅れているが、RBIMではピアの離脱後に取得完了ピア数の増加が減少していくことが分かり、参加離脱が入り乱れた状況ではPDJLの方が取得完了ピア数の増加が大きいのことが分かる。つまり、提案手法において、最後のピアが取得を完了し離脱するまでの時間を短縮できていることが分かる。これは、参加離脱が発生する環境下において序盤ピアに積極的にピアを拡散させ、終盤ピアのアップロード量を増やし積極的にピアの拡散を行い、離脱による配信元の減少を抑制したためであると考えられる。

次に図9より、RBIMとPDJLを比較すると、RBIMよりもPDJLの方が各正常ピアのダウンロード完了時間のばらつきが抑えられていることが見て取れ、全体として各正常ピアのダウンロード時間が短縮できていることが分かる。

これにより、ピアの参加離脱が発生する環境下における提案手法PDJLの効果を確認できる。

#### 4.5 フリーライダの平均ダウンロード帯域利用率

フリーライダの平均ダウンロード帯域利用率を図10に示す。図より、PDJLはRBIMに対しネットワーク参加の序盤はダウンロード帯域利用率は大きくなっているが、時間が進むにつれてダウンロード帯域利用率が低下していることが見て取れ、フリーライダの平均ダウンロード帯域利用率を全体で13.5%抑制したことを確認した。PDJLでは、ネットワーク参加時の希少ピアの提供や、RBIMに対して序盤にピアを取得しやすいことから、序盤はフリーライダの平均ダウンロード帯域利用率も大きくなる。しかし、各ピアのピアの取得が進むにつれて閾値が上がり、より多くのアップロードが要求されるため、アップロードを拒むフリーライダのピア取得が次第に困難になっていき、時間が進むにつれて平均ダウンロード帯域利用率が低下すると考えられる。

また、フリーライダのダウンロードの平均時間に関して、RBIMが5225ラウンド、PDJLが7350ラウンドで取得が完了し、正常ピアのダウンロードの平均時間よりも遅く、さらにPDJLの方がRBIMよりもダウンロード完了までに長く時間がかかることを確認した。PDJLでは、終盤に進むほどアップロードがより要求され、フリーライダのダウンロード効率が低下したためであると考えられる。これ

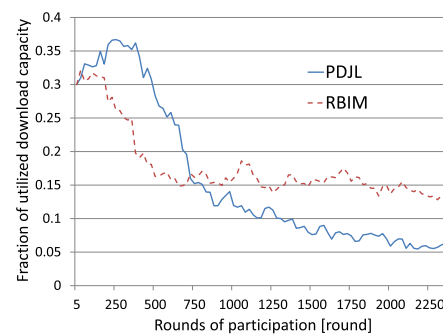


図10 フリーライダの平均ダウンロード帯域利用率  
Fig. 10 Average fraction of utilized download capacity of freerider.

により、PDJLにおいてフリーライダが成り立たないことを確認できる。

## 5. おわりに

本論文では、ピアの参加離脱が発生する環境下において、ピアを効率的に拡散することでネットワーク全体でのピアダウンロード効率の低下を抑制するピア拡散手法PDJLを提案した。

提案手法では、新規参加ピアに対して終盤ピアが希少度の高いピアを優先提供する仕組みを導入し、新規参加ピアに参加の序盤から他ピアとピア交換ができるようにピア交換への参加機会を与える。また、ピアのピア保持状況に応じた閾値を新たに設定し、保持状況に応じて各ピアのピアの送受信を制御する。このようにすることで、離脱が生じた際の希少ピアの配信元の減少を抑制することができる。提案手法をシミュレーションにより比較評価し、ピアを効率的に拡散させ、ネットワーク全体でのダウンロード完了時間を削減し、ダウンロード効率が向上したことを確認した。

以上より、提案手法は効率的にネットワーク全体でのピアの拡散を促進できるという有用性を示した。

## 参考文献

- [1] Mazurczyk, Wojciech, Kopiczko, Pawel: Understanding BitTorrent through real measurements, *Communications*, Vol.10, pp.107–118 (2013).
- [2] Meulpolder, M., Pouwelse, J.A., Epema, D.H.J. and Sips, H.J.: BarterCast: A practical approach to prevent lazy freeriding in P2P networks, *IEEE International Symposium on Parallel & Distributed Processing, 2009 (IPDPS 2009)*, pp.1–8 (2009).
- [3] Delaviz, R., Andrade, N. and Pouwelse, J.A.: Improving Accuracy and Coverage in an Internet-Deployed Reputation Mechanism, *2010 IEEE 10th International Conference on Peer-to-Peer Computing (P2P)*, pp.1–9 (2010).
- [4] 遠藤 伶, 高山和幸, 重野 寛: 報酬付けP2P VoD ストリーミングのための受益値を用いたピア・レンディング



- グ方式, 情報処理学会論文誌, Vol.54, No.2, pp.529-537 (2013).
- [5] 松本 敬, 遠藤 伶, 重野 寛: ブロックのレアリティを考慮した効率的な P2P ファイル共有手法, 情報処理学会論文誌, Vol.51, No.6, pp.1310-1319 (2010).
- [6] Bharambe, A.R., Herley, C. and Padmanabhan, V.N.: Analyzing and Improving a BitTorrent Networks Performance Mechanisms, *25th IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM 2006)*, pp.1-12 (2006).
- [7] Karakaya, M., Korpeoglu, I. and Ulusoy, O.: Free Riding in Peer-to-Peer Networks, *IEEE Internet Computing*, Vol.13, pp.92-98 (2009).
- [8] Ying, H. and Zhigang, C.: USMI: An Ultra-Node Selection Mechanism with Incentive in P2P Network, *2010 International Conference on Multimedia Information Networking and Security (MINES)*, pp.131-135 (2010).
- [9] Lui, S.M., Lang, K.R. and Kwok, S.H.: Participation incentive mechanisms in peer-to-peer subscription systems, *Proc. 35th Annual Hawaii International Conference*, Vol.6, pp.3925-3931 (2002).
- [10] Huang, Q., Huang, S. and Gao, C.: A Differentiated Service Based Incentive Mechanism in P2P File-sharing Systems, *IFIP International Conference on Network and Parallel Computing*, pp.419-424 (2007).
- [11] Bocek, T., Shann, M., Hausheer, D. and Stiller, B.: Game theoretical analysis of incentives for large-scale, fully decentralized collaboration networks, *IEEE International Symposium on Parallel and Distributed Processing*, pp.466-479 (2008).
- [12] Cormen, T.H., Leiserson, C.E., Rivest, R.L. and Stein, C.: *Introduction to Algorithms, 2nd edition*, pp.651-664, MIT Press and McGraw-Hill (2001).
- [13] Zhang, K., Antonopoulos, N. and Mahmood, Z.: A Review of Incentive Mechanism in Peer-to-Peer Systems, *1st International Conference on Advances in P2P Systems, (AP2PS 2009)*, pp.45-50 (2010).
- [14] Feldman, M., Papadimitriou, C., Chuang, J. and Stoica, I.: Free-riding and whitewashing in peer-to-peer systems, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, pp.1010-1019 (2006).
- [15] Sirivianos, M., Yang, X. and Jarecki, S.: Robust and efficient incentives for cooperative content distribution, *IEEE/ACM Trans. Net-working*, Vol.17, No.6, pp.1766-1779 (2009).
- [16] Jafari, A., Talebi, M., Khonsari, A. and Sepidnam, G.: Maximizing download bandwidth for file sharing in bittorrent-like peer-to-peer networks, *14th IEEE International Conference on Parallel and Distributed Systems*, pp.344-350 (2008).



武田 苑子 (学生会員)

2013 年慶應義塾大学理工学部情報工学科卒業。現在, 同大学大学院理工学研究科修士課程在学中。



梅田 沙也華 (学生会員)

2014 年慶應義塾大学理工学部情報工学科卒業。現在, 同大学大学院理工学研究科修士課程在学中。



重野 寛 (正会員)

1990 年慶應義塾大学理工学部計測工学科卒業。1997 年同大学大学院理工学研究科博士課程修了。現在, 同大学理工学部教授。博士(工学)。情報処理学会学論文誌編集委員, 同高度交通システム研究会幹事等を歴任。現在, 情報処理学会マルチメディア通信と分散処理研究会主査, 電子情報通信学会英文論文誌 B 編集委員, Vice Chair of IEEE ComSoc APB TAC. ネットワーク・プロトコル, ITS 等の研究に従事。著書『ユビキタスコンピューティング』(オーム社), 『情報学基礎第 2 版』(共立出版) 等。電子情報通信学会, IEEE, ACM 各会員。