

# P2P ネットワークにおける サービス安定性向上のためのレプリケーション配置手法

後藤 嘉宏 † 阿多 信吾 ‡ 村田 正幸 §

† 大阪大学 大学院基礎工学研究科  
〒 560-8531 豊中市待兼山町 1-3  
peer E-mail: y-gotou@ics.es.osaka-u.ac.jp

‡ 大阪市立大学 大学院工学研究科  
〒 558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138  
E-mail: ata@info.eng.osaka-cu.ac.jp

§ 大阪大学 サイバーメディアセンター  
〒 560-0043 大阪府豊中市待兼山町 1-30  
E-mail: murata@cmc.osaka-u.ac.jp

あらまし ピア・ツー・ピア (P2P) サービスでは、ピアの頻繁な参加、離脱により、安定したサービスが著しく損なわれる。そこで、ピアが提供する情報の複製 (レプリケーション) を他のピアにも配置させる手法が有効である。しかしながら、レプリケーションの効果は配置するピアの物理的位置や接続性に大きく影響を受けることから、効率的なレプリケーションの配置には物理ネットワークの特性を考慮することが必要である。本稿では、P2P サービスにおけるレプリケーション配置に着目し、物理ネットワークの特性を考慮した配置手法を提案する。また、シミュレーションによる性能評価でその有効性を示す。

和文キーワード ピア・ツー・ピア (P2P)、レプリケーション、論理ネットワーク、power-law、small-world

## Replication Methods to Improve the Service Robustness in P2P Networks

Yoshihiro Gotou † Shingo Ata ‡ Masayuki Murata §

† Graduate School of Engineering Science,  
Osaka University  
1-3 Machikaneyama, Toyonaka,  
Osaka 560-8531, Japan  
E-mail: y-gotou@ics.es.osaka-u.ac.jp

‡ Graduate School of Engineering,  
Osaka City University  
3-3-138 Sugimoto, Sumiyoshi-ku,  
Osaka 558-8585, Japan  
E-mail: ata@info.eng.osaka-cu.ac.jp

§ Cybermedia Center,  
Osaka University  
1-30 Machikaneyama, Toyonaka,  
Osaka 560-0043, Japan  
E-mail: murata@cmc.osaka-u.ac.jp

**Abstract** In peer-to-peer services it is very important to consider robustness against frequent peer failures (e.g., leaving their logical network), since comings and goings of peers are directly affect the stability of their logical network. Replication of a content is one of useful techniques to improve such robustness. However, the effectiveness of replication is heavily dependent on the topology of the logical network. In this paper, we first investigate the effect of the logical network topology (especially the power-law nature) on replication methods. We then consider new query forwarding methods taking the logical network's power-law property into account to improve the performance of P2P service. Our simulation results show that there is a possibility to improve the query performance greatly by considering the nature of power-law in P2P networks.

**key words** peer-to-peer (P2P), replication, logical network, power-law, small-world

### 1 はじめに

インターネットにおける新たなネットワークモデルとして、ピア・ツー・ピア (P2P) サービスが注目されている。P2P サービスでは、サービスに参加する端末 (ノード) はピア (peer) と呼ばれる。ピアが一つあるいは複数の別のピアに接続することで、ピア同士で接続された論理ネットワークが構成される。ピア上のユーザによってサービスが要求されると、ピアは論理ネットワーク内で要求されたサービスを提供できるピアを検索し、検索にヒットしたピアからサービスの提供を受ける。また、ピアは自身が提供できるサービスを公開することで、そのサービスを必要とする別のピアからの要求を受け付ける。このように、P2P ネットワークに接続されたピアのそれぞれが状況に応じてサービスを提供する側あるいは受ける側になることでサービスが実現されている。

しかしながら、P2P 論理ネットワーク上のピアは、一般にユーザが実行するアプリケーションソフトウェア上で動作する。すなわち、例えば Web サーバのようにその継続的なサービス提供が必須条件とされるようなシステムとは異なり、ピアの頻繁な参加離脱により、論理ネットワークの安定性が低下し、提供されるサービス品質に大きな影響を与え

る。また、論理ネットワークが安定しないことによって制御トラフィックの増大、検索時間の劣化等の影響も考えられる。

このような論理ネットワークの不安定に対する解決法として、サービスおよび情報の複製を別のピアに作成する、レプリケーションと呼ばれる方法がある [1]。レプリケーションによって、一つのサービスは複数のピアによって提供可能であることから、そのうち一部のピアが論理ネットワークから離脱した場合でもサービスの提供が可能である。また、複数のピアが検索に対して応答できることから、サービス提供までの遅延の軽減が期待できる。さらに、検索の結果得られた複数のピアから、通信速度がもっとも大きいピアを選択するといったことも実現可能である。

以上のように、レプリケーションはピアの障害 (ただし、ここでの障害は物理的なピア故障ではなく、ピアの P2P 論理ネットワークからの離脱を言う) への耐性向上、検索時間の短縮などの利点があるが、これらの性能は論理ネットワークの形状に影響されると考えられる。特に、近年の研究によってインターネットはべき法則 (power-law) [2]、ならびに small-world [3] の性質を持つことが明らかになっている。さらに、この上で動作する P2P の論理ネットワークも同様に power-law の性質があると報告されている [4]。この

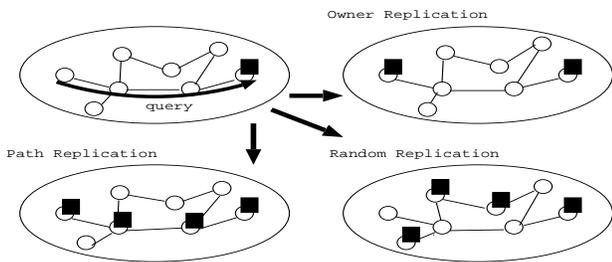


図 1: レプリケーションの例

ことは、論理ネットワーク上のすべてのピアがランダムに接続されているのではなく、限られた数のピアが論理ネットワークの基幹を構成し、論理ネットワークの安定性に大きな影響を与えることを表している。

本稿では特に論理ネットワークのトポロジーの性質に着目したレプリケーション手法について検討する。すなわち、P2P 論理ネットワークが持つ、べき法則の性質を利用し、ピアの離脱などによる論理ネットワークの安定性低下を向上させるレプリケーション配置方法を提案する。本稿では P2P サービスとして、gnutella [5] や Freenet [6] などの構造化されていない (unstructured) ネットワークを対象とする。ただし、JXTA [7] などの構造化 / 階層化ネットワークにおけるサーチハブやリフレクタの配置問題についても同様に適用可能である。

まず、2 章でレプリケーションの概要について示す。次に、3 章でべき法則 (power-law) の性質が論理ネットワーク上でのレプリケーションに与える影響について明らかにする。これらの結果より、4 章でし、耐障害性を向上させるレプリケーションについて検討する。最後に 5 章で、まとめと今後の課題を述べる。

## 2 P2P 検索サービスにおけるレプリケーション

本章では、レプリケーション手法の概要に説明する。はじめに 2.1 節でレプリケーションの方法について説明し、2.2 節でその効果について示す。

### 2.1 レプリケーション

レプリケーションとは、提供されたサービスの複製 (レプリカ) を別のピアに配置することであり、たとえばファイル取得サービスであれば要求されたファイルの複製を一つまたは複数の別ピアにコピーすることを表す。レプリケーションはさまざまな手法が考えられるが、例えば以下で示す方法がある [1]。

- **Owner Replication:** サービスを受けたピアがその結果を保持し、以降発生する同じサービスに対する要求に応答する。
- **Random Replication:** 複製を論理ネットワーク上の複数のピアにランダムに配置する。
- **Path Replication:** サービス提供ピアおよび受信ピア間の経路上に存在するピアに複製を配置する。

図 1 に各方式の違いを示す。このうち、Path Replication 方式が中間ピア上でサービス内容をキャッシングすることで容易に実装可能であり、複数のレプリカを作成可能であるから、本稿では Path Replication を対象として考える。

### 2.2 レプリケーションの効果

本節では、レプリケーションの基本的な効果を明らかにするため、シミュレーションを用いた数値結果を示す。主なシミュレーション条件を表 1 に示す。シミュレーションは、

表 1: シミュレーション条件

| パラメータ    | 値                       |
|----------|-------------------------|
| ネットワーク形態 | ランダム or power-law (3 章) |
| ピア数      | 10,000                  |
| リンク数     | 20,000                  |
| ファイル数    | 100                     |
| TTL      | 500                     |

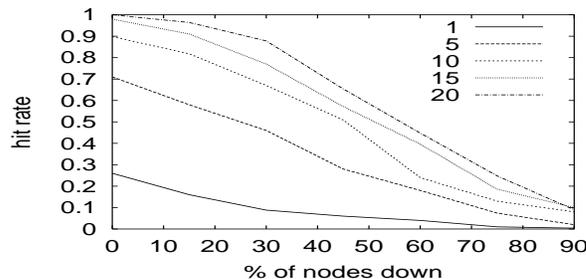


図 2: レプリカ数とピア離脱時のヒット率

ランダムにトポロジを生成した論理ネットワーク [8] 上でのファイル検索を対象とする。ファイル検索要求およびその結果は論理ネットワーク上のピアにホップバイホップで伝送される。この時、ピアを通過するごとに TTL を 1 減少させ、TTL が 0 となれば検索が失敗したものとす。また、検索のファイルが取得できた確率を検索ヒット率と呼ぶ。

はじめに、レプリケーションによる耐障害性の向上について調べる。図 2 は、レプリカを配置後、全体の 0, 15, 30, 45, 60, 75, 90 % のピアをランダムに取り除いた後の論理ネットワークにおける、レプリカ数と検索ヒット率の関係を示したものである。レプリカの配置は Random Replication を用い、配置するレプリカはファイルごとにそれぞれ 1, 5, 10, 15, 20 個とする。ただし、レプリカ数 1 はレプリケーションを行わないことを表す。図より、レプリケーションを行わない場合、30% のピアが論理ネットワークから離脱すればヒット率が約 10% まで低下するのに対し、レプリカを 5 個作成するだけで、検索ヒット率がピアの離脱がまったくない場合と同等の値が得られることを示している。また、図 3 に、検索に要したホップ数 (経由ピア数) の分布を示す。図よりレプリケーションを作成することで検索ホップ数が大幅に減少させられることがわかる。その結果、検索結果を得られるまでの時間が軽減されることが考えられる。紙面の都合上結果を示さないが、レプリケーションの数を増やすことで、ヒット率も向上できる。

## 3 べき法則がレプリケーションに与える影響

これまでの多くの研究により、インターネット上で構成される P2P 論理ネットワークはべき法則に従うことが示されている [4]。ここで、ネットワーク上のあるノード  $i$  における隣接ノードの数をノード  $i$  の degree と呼び、 $x_i$  で表す。

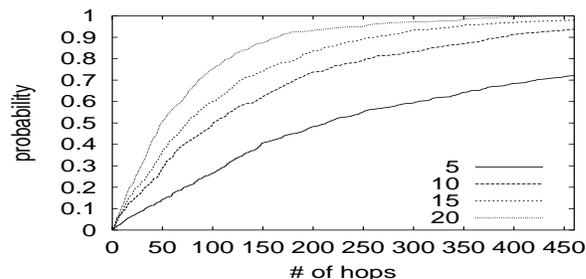


図 3: ホップ数の分布

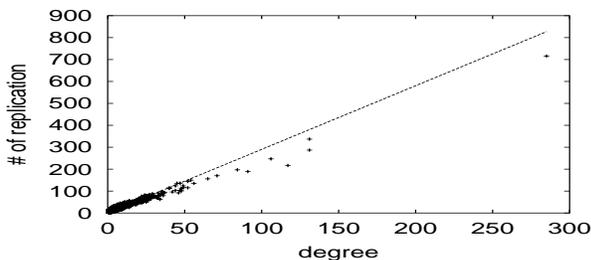


図 4: degree とレプリカ作成回数の関係 (power-law)

この時、 $x_i$  の分布が以下で示す関数  $f(x)$  に従うとき、このネットワークはべき法則に従うという。

$$f(x) = x^{-\alpha} \quad (1)$$

論理ネットワークがべき法則に従うことがその上で展開されるサービス品質に与える影響は、これまでの研究によって明らかにされている [9][10]。例えば、power-law のネットワークではごく一部のノードが非常に高い degree を持つが、一方で多数のノードは degree が小さい。このため、ピアの離脱がランダムに発生する場合、その多くピアの degree は、ランダムネットワークの場合よりも小さい。このため、P2P ネットワークにおいてもピア離脱が論理ネットワークに与える影響はランダムネットワークよりも小さいと考えられる [9]。しかしながら、power-law ネットワークでは、論理ネットワークは高い degree のピアを中心として構成されることから、高 degree のピアが意図的に攻撃された場合、論理ネットワークに深刻な影響を与えることになる [10]。

一方、検索に対する性能の点では、例えば高い degree のノードに検索クエリを転送させることで、より少ないホップ数で多くのノードに転送させることが可能となる [3]。

以上の結果と同様、レプリケーションについても power-law の性質が障害耐性や検索性能に影響を及ぼすと考えられる。しかしながら、これまでの研究では power-law の性質を考慮したレプリケーションの効果については明らかにされていない。そこで本章では、まずレプリケーションにおける power-law の影響について、シミュレーション結果を用いて明らかにする。本章で行うシミュレーションは、ネットワーク形態が power-law の性質を持つ [8] 以外は、表 1 と同じである。

### 3.1 ピアの degree とレプリカ数の関係

はじめに、power-law の性質がレプリカ数にどのような影響を与えるかを調べるため、表 1 の power-law 論理ネットワークにおいて 50,000 回の検索を行った後、各ピアの degree と作成レプリカ数の関係を示した結果を図 4 に示す。ここでは、各ピアで作成可能なレプリカ数（以下ではレプリカ容量と呼ぶ）は無量大とする。ただし、ファイル数が 100 であるため、最大作成レプリカ数は 100 である。図より、degree と作成レプリカ数の関係には強い相関関係があり（相関係数：0.953）、図 5 より作成レプリカ数もまたべき法則の性質を示していることがわかる。

### 3.2 degree によるレプリカの効果

power-law 論理ネットワークでのファイル検索を考えた場合、高い degree のピアほど検索メッセージを受け取る可能性も大きい。このため、同じレプリカでも degree の大きさによってその利用頻度が変化すると考えられる。ここでは、論理ネットワーク上のピアを degree が 10 未満のピアとそれ以外のピアに分類し、それぞれピア数、平均レプリカ数、平均レプリカ利用率を求めた結果を表 2 に示す。低 degree の

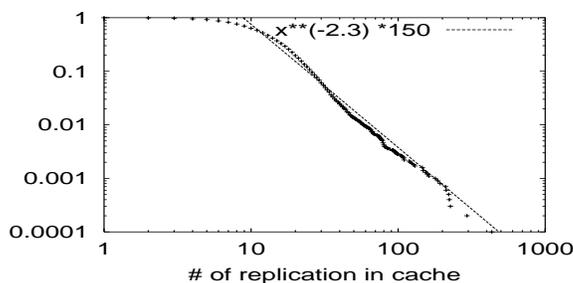


図 5: レプリカ数の分布

表 2: degree の高低とレプリカの参照される割合の関係

| degree              | low ( $\leq 10$ ) | high ( $> 10$ ) |
|---------------------|-------------------|-----------------|
| # of peers          | 9497              | 503             |
| avg # of replicas   | 13.53             | 50.71           |
| avg # of access     | 2.52              | 51.87           |
| avg refer ratio (%) | 4.6               | 95.3            |

ノードに置かれたレプリカは平均 2.5 回しか実際には使われていないのに対し、高 degree のノードに置かれたレプリカはその 20 倍以上の頻度で使われていることがわかる。

### 3.3 レプリカ容量による影響

前節では、レプリカ容量は無量大を仮定したが、実際にはレプリカ容量はピア上のディスク容量であることから、その値は有限である。レプリカを作成するときに、レプリカ容量を越える場合は、過去に作成したレプリカを削除しなければならない。これは、www などのプロキシサーバのキャッシュと同様である。本稿では、レプリカの置き換え方法として、もっとも単純な手法である FIFO を用いる。レプリカ容量を有限にした場合、レプリカの利用率はピアの degree によって変化することが考えられる。

#### レプリカ容量と検索ヒット率の関係

図 6 にレプリカ容量とヒット率の関係を示す。この図を見ると、ランダムの方が power-law よりも上に現れている。これは、power-law のトポロジーにおいて初期状態では各アイテムが低 degree のノードにある確率が高く、検索の面で逆に不利になっているからだと考えられる。

#### レプリカ容量と検索ホップ数の関係

次に、レプリカ容量と検索に必要なホップ数との関係について調べる。図 7、8 はそれぞれランダム、power-law ネットワークにおいて、50,000 回の検索を行なった場合の、25,000 回目から 45,000 回目までの検索に要した検索ホップ数の分布を示したものである。図中、レプリカ容量はそれぞれ 5、10、15、20、40、100 に設定した。これらの図より、レプリカ容量を大きくすることでより多くのレプリカが作成され、検索に必要なホップ数は減少することが分かる。しかし、ランダムと power-law を比較した場合、power-law ネットワークの

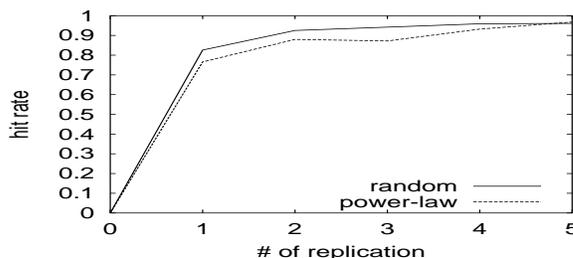


図 6: レプリカ容量と検索ヒット率の関係

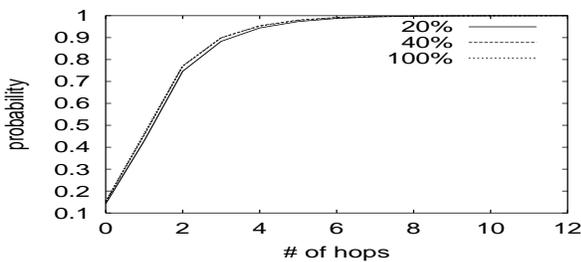


図 7: レプリカ容量と検索ホップ数分布の関係 (random)

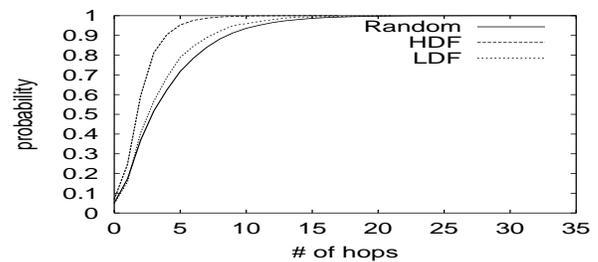


図 9: ホップ数分布の比較 (HDF, LDF, Random)

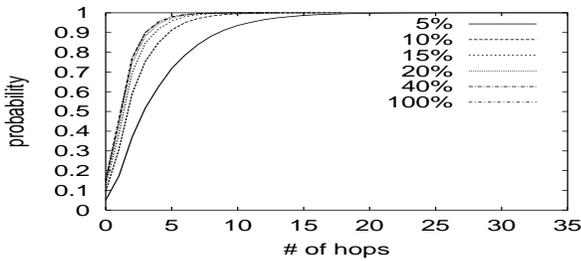


図 8: レプリカ容量と検索ホップ数分布の関係 (power-law)

方がレプリカ容量による影響が大きい。これは、power-law のネットワークの方が degree の高いピアに検索が集中するため、高 degree のピアにおけるレプリカ容量の増加による効果が非常に大きいためであると考えられる。しかし一方で、低 degree のピアではレプリカ容量を増加させてもほとんど利用されず、レプリケーションによるオーバーヘッドのみが浪費されることにもなる。したがって、レプリケーションのオーバーヘッドを考えた場合、degree が低いピアにおけるレプリケーションも効果的に利用できるように検索手法を考える必要がある。

#### 4 power-law の性質を考慮したレプリケーション手法

これまでに述べた通り、power-law ネットワークでは degree の大きさによってピアの重要性が大きく異なることから、degree を考慮したレプリケーションを考える必要がある。本章では、隣接ピアの degree に応じた検索の転送を行なうことで、効率的なレプリケーションを実現する手法について考える。

##### 4.1 提案手法の概要

これまでの P2P 論理ネットワークでは、隣接ピアが複数ある場合には、転送先は隣接ピアの中からランダムに選ばれていた。これに対して提案手法では、転送先は隣接ピアの degree に応じて重み付けされた確率をもとに選ばれる。はじめに、各ピアは隣接ピアの degree を何らかの方法で取得可能であると仮定する。ここで、あるピアの degree を  $d$  とし、隣接ピアをそれぞれ  $n_1, \dots, n_d$  で表す。さらに、各隣接ピアの degree を  $d_{n_1}, \dots, d_{n_d}$  とする。この時、次に転送されるピア  $n_i$  を選ぶ確率を

$$p(i) = \frac{d_{n_i}}{\sum_{k=1}^d d_{n_k}} \quad (2)$$

$$p(i) = \frac{1/d_{n_i}}{1/\sum_{k=1}^d d_{n_k}} \quad (3)$$

と設定する。ここで、式 (2)、(3) による転送をそれぞれ HDF (Higher Degree Forwarding)、LDF (Lower Degree Forwarding) と呼ぶ。

HDF はより高い degree のピアに優先的に転送させる方式で、ネットワークのべき法則および small-world の性質を利

用して、検索結果までの必要ホップ数を減少させることを目標とする。しかし、一方では degree の高いノードはレプリカの置換えが頻繁に発生することから、検索ヒット率が低下することも考えられる。

これに対して、LDF はより degree が小さいピア、すなわちレプリカの作成が少ないピアに優先的に転送させることで、多くのレプリカを作成し、検索ヒット率を向上させる効果が期待できる。しかしながら、検索に必要なホップ数は増加するものと予測される。

#### 4.2 シミュレーション結果

ここでは、HDF、LDF の手法について、シミュレーションによりその有効性を確かめる。まず、図 9 に HDF、LDF と従来手法 (Random) における、検索に必要なホップ数分布の比較結果を示す。ここで、レプリカ容量は 5 である。図の結果より、特に HDF においてホップ数分布が大きく低下しており、degree を考慮することにより、検索の時間を短縮させることが可能であることが分かる。

### 5 まとめと今後の課題

本稿では P2P ネットワークの耐障害性向上手法であるレプリケーションについて、power-law に従う P2P 論理ネットワークでの影響を明らかにし、そこでのレプリケーションについて検討を行った。

今後の課題としては、論理ネットワーク内での中心、外縁といった位置の考慮とその振り分け、物理ネットワークも考慮に加えることなどがあげられる。

#### 参考文献

- [1] Q. Lv, P. Cao, E. Cohen, K. Li, and S. Shenker, "Search and replication in unstructured peer-to-peer networks," in *Proceedings of 16th ACM International Conference on Supercomputing (ICS'02)*, June 2002.
- [2] A.-L. Barabási and R. Albert, "Emergence of scaling in random networks," *Science*, vol. 286, pp. 509–512, 1999.
- [3] J. Kleinberg, "The small-world phenomenon: an algorithm perspective," in *Proceedings of the thirty-second annual ACM symposium on Theory of computing*, pp. 163–170, ACM Press, 2000.
- [4] L. A. Adamic, R. M. Lukose, A. R. Puniyani, and B. A. Huberman, "Search in power-law networks," *Physical Review E*, 64 46135, 2001.
- [5] "gnutella." <http://gnutella.wego.com/>.
- [6] "Freenet." <http://freenetproject.org/>.
- [7] "JXTA." <http://www.jxta.org/>.
- [8] T. Bu and D. Towsley, "On distinguishing between internet power law topology generators," in *Proceedings of INFOCOM, 2002*, 2002.
- [9] S. Saroiu, P. K. Gummadi, and S. D. Gribble, "A measurement study of peer-to-peer file sharing systems," Tech. Rep. UW-CSE-01-06-02, Department of Computer Science and Engineering University of Washington, 2001.
- [10] P. Keyani, B. Larson, and M. Senthil, "Peer pressure: Distributed recovery from attacks in peer-to-peer systems," in *Proceedings of The IFIP Workshop on Peer-to-Peer Computing*, 2002.