

効果的なデータ拡散に向けたオーバーレイトポロジの比較

齋藤 義文^{†1} 阿部 洋丈^{†1} 梅村 恭司^{†1}

大容量データをネットワーク内のノードへ効率的に配布するためには、データ配布の際に利用されるオーバーレイネットワークの構造を考える必要がある。先行研究では、リング型が有効であることを示しているが、実ネットワークでの実験は行われていない。本研究では、データ配布に適したオーバーレイトポロジを求めめるために評価システムを構築した。実ネットワークを利用したテストベッドである PlanetLab を用いて評価実験を実施し、代表的なトポロジにおけるデータ転送時間を比較した。また、データ配布に適したオーバーレイトポロジを求めめるための評価指標を提案し、各指標値と比較した。

Comparison on Overlay Topology for Effective Data Dissemination

YOSHIBUMI SAITO,^{†1} HIROTAKE ABE^{†1} and KYOJI UMEMURA^{†1}

It is necessary to consider the overlay network configuration used by data dissemination for effective dissemination of large volume data to nodes in the network. In preceding studies, it is shown that the ring type topology is effective. However, experiments in the real network is not conducted. In this study, we developed the evaluation system in order to search the overlay network topology suitable for data dissemination. We conducted an evaluation experiment on PlanetLab, a test bed on the real Internet, and compared data transmission time in representative topologies. In addition, we proposed an evaluation index in order to search the overlay network topology suitable for data dissemination. And also we compared it with other typical index value.

1. はじめに

近年、インターネット上で提供されるサービスの必要性から、ネットワーク障害の対策が重要となっている。インターネット上で起こりうる障害として、機器の故障といったハードウェア障害から、DoS 攻撃やウイルスによる不正プログラムといった人為的な要因まで多くの種類がある。これらの障害によってインターネット上のデータへのアクセスが不可能になると、それまで利用できていたサービスが停止し、稼働しているシステムに多大な影響を及ぼす問題がある。このような問題に対して、サービスが可能な限り利用可能な状態を維持することを目指した、サステナブルサービスを提供する基盤の研究がされている¹³⁾¹⁰⁾。これらの研究は、サーバ自体を継続的に動作させることを目的とするのではなく、広域分散環境に置かれたコンピュータが自律的に協調動作することで、サービスを維持させることを目的としている。

サステナブルサービスのためのアプローチとして、仮想マシンを複数の計算機において動作させる方

式が研究されている。この方式において、仮想マシンのディスクイメージの効率的な転送技術は重要である。また、この方式の他にもディザスタリカバリのためにミラーサーバを構築する手法も考えられるが、この場合においてもマスターサーバの変更を効率的に反映できることは重要である。

仮想マシンイメージなどの大容量データをネットワーク内のノードへ効率的に配布するためには、データ配布の際に利用されるオーバーレイネットワークの構造を考える必要がある。どういったオーバーレイトポロジがデータ配布に適しているかを調べるため、様々なトポロジの特徴を調査したいと考える。

短時間でデータ転送が可能なマルチキャスト通信システムとして、先行研究¹²⁾¹¹⁾が行われている。これらの先行研究では、データ転送の際のオーバーレイトポロジとしてリング型をもとにしたトポロジが用いられている。先行研究では計算機クラスタを用いたシミュレーション実験によって、リング型をもとにしたトポロジがデータ配布の際に効率的であると述べられている。このシミュレーション実験では実効帯域が狭いノードがいる状況を意図的に作り出しているが、実ネットワークのようにルータ間の帯域は考慮されていない。

^{†1} 豊橋技術科学大学

Toyohashi University of Technology

本研究では、データ配布に適したオーバレイトポロジを求めるために評価システムを構築した。そして、構築した評価システムを利用して実ネットワークを用いた評価実験を実施した。実ネットワーク上に代表的なトポロジのオーバレイを構築してデータ配布実験を行い、各トポロジにおける転送時間を比較した。また、データ配布に適したオーバレイトポロジを求めるための評価指標を提案し、評価システムで得られた結果を使用して指標値を比較した。

2. 関連研究

2.1 従来の研究

データを配布する手法にはさまざまな研究がすでに行われている。以下に挙げる従来の研究ではいかに帯域幅を最大化するか、ということが述べられているが、データ配布途中にいかにか完成されたデータを持ったノードが多いか、という状態については述べられていない。本論文ではデータ配布途中の状態にも注目するため、これらの研究とは目的が異なる。

Overcast⁶⁾は一つのノードからデータを転送する手法であり、オーバレイトポロジとしてツリー構造を用いている。データを配布する際に10kByteのデータ転送時間を利用してツリー構造の最適化を行っている。

Bullet⁷⁾は特に大きなデータ(マルチメディアデータ・ストリーミングデータ)を多くのノードに配布したいとき、帯域を最大化するための分散アルゴリズムである。Bulletではメッシュ型のオーバレイトポロジを用いており、あるノードに対してデータを転送する転送元のノードを増やすことによって、ボトルネックの影響を小さくしており、ネットワークの帯域を最大限活用可能にしている。

SplitStream¹⁾はアプリケーションレベルのマルチキャストに基づいた広帯域コンテンツ分散システムである。SplitStreamでは転送するデータを複数に分割して、複数のストライプを利用して転送している。ストライプとはツリー構造の転送路であり、これを複数用いることでフォレスト構造を作成している。ツリー構造のマルチキャストでは、参加しているノードの一部がマルチキャストメッセージ転送のために多くの負荷を負っている。それでは不公平なため、参加しているノードすべてにノードのネットワーク帯域を考慮しながら均等に負荷を割り振るための負荷分散システムの提案がなされている。

MutualCast⁵⁾はpeer-to-peer(P2P)ネットワークにおけるファイル配布の手法である。MutualCastはひとつのノードが他のすべてのノードと接続されたフ

ルメッシュ型を用いている。ノードすべてが相互に接続し、ネットワーク全体の実効帯域を監視しながら転送の性能を最大にすることを目指している。全結合型のトポロジであるため、接続のコネクションが多いという特徴もある。また、ネットワーク性能が偏った環境であっても高い性能で転送が可能であると予測される。Hierarchical Collaborative Multicast⁸⁾はMutualCastを利用した研究であり、大域的にはツリー構造を利用し、局所的にMutualCastを利用した全結合型のトポロジを用いている。ノード数が多くなると全結合の負荷が大きくなるので、少数のノードで全結合している構造を連結させている。これによりコネクションが多くなることを防いでいる。

2.2 吉野らの研究

吉野らの先行研究¹²⁾では、Overcastのツリー構造に着目している。データを転送する際にネットワークのボトルネックの影響を小さくするためには、分岐の少ないツリー構造が有効であると考えられている。分岐の少ないツリー構造を構築するために、リング構造に意図的に分岐を作り出すことで分岐を抑えたツリー構造が構築できる。吉野らはリングにショートカットリンクを追加した構造から最小全域木を作成し、分岐を抑えたツリー構造を作成する方式を考察した。同程度のネットワーク性能では、単純なツリー構造を利用した場合に比べ、短時間でデータ転送ができることが確認されている。また、文献11)では、リングの形状をしたオーバレイネットワークを複数利用したアプリケーションレベルのマルチキャスト通信が提案されている。この提案は複数のツリーを使う先行研究とリングを使う先行研究の方式を組み合わせたものである。リングの先行研究に対して複数のツリーを使う研究の成果を利用することで、短時間でデータ転送が可能なマルチキャスト通信システムが構築されている。文献11)では文献12)と同様に、リング構造に対してショートカットリンクの張り方が考察されている。ネットワーク性能が同程度の環境においては、ツリーを用いる方式よりも転送性能が高いことが予測されているが、文献11)ではネットワーク遅延を考慮した実験が行われていないため、本研究では、想定環境である実ネットワークにおける評価を行う。

3. 評価方法

3.1 実ネットワークでの評価

広域ネットワーク上で動作するシステムの評価方法として、実際の環境を用いる方法やシミュレーションする方法などがある。実際の環境を用いる場合、機

器の用意や実験規模といったコスト面の問題があり、シミュレーションの場合は結果の精度といった問題がある。ネットワーク技術の検証は、その技術が運用される環境に近い環境で行う必要がある。我々は大規模なネットワークを想定した評価をするため、実ネットワーク実験環境を利用したい。

本研究では、実ネットワークを利用した大規模テストベッドである PlanetLab²⁾ を用いる。テストベッドとは大規模なシステム開発で用いられる実際の運用環境に近づけた試験用プラットフォームの総称であり、PlanetLab もその一つである。PlanetLab は、一定の条件を満たすことで企業、大学を問わずそこに所属する研究者は誰でも参加可能な研究ネットワークである。実際のインターネットに接続された何百台の PC を使用してオーバーレイネットワークを構築し、従来、実験が困難だった分散アプリケーションなどの研究が可能になっている。PlanetLab で使用されているノードは、CoMon⁹⁾ を用いることによりステータスが確認できる。

3.2 提案指標

一般的なデータ転送の評価ではネットワークの帯域幅を比較することが多い。障害に対するサービスの維持のためには、いかに速くすべてのノードにデータを配布し終えるかということや、いかに早い時期に多くのノードが完成されたデータを持っているか、といったことが重要になる。帯域幅のみを用いた従来の評価では我々が望む結果が得られないかもしれない。

- そこで我々はデータ配布において重要となる、
- すべてのノードにデータを配布し終えた時間
 - データ配布が完了したノードの割合

という二つの観点を合わせ持った指標として、以下の式で表される値を比較することを提案する。

$$\sigma = \int_0^{\infty} (1 - f(t)) dt \quad (1)$$

ここで、 $f(t)$ は時間に対するデータ配布が完了したノードの割合の関数である。

例として、図 1 や図 2 のような横軸にデータ配布時間、縦軸にデータ配布が完了したノードの割合をとったグラフを考える。これら A~D のグラフはデータ配布の過程における、さまざまな傾向を表している。図 1 および図 2 の A は「データ配布開始直後はあまり多くのノードにデータ配布が完了していないが、配布完了直前に急激に割合が増える」傾向を、1 の B は「データ配布開始直後から多くのノードにデータ配布が完了しているが、全体に行き渡るまで時間がかかる」傾向を、図 2 の C は「ほぼ一定にデータを持って

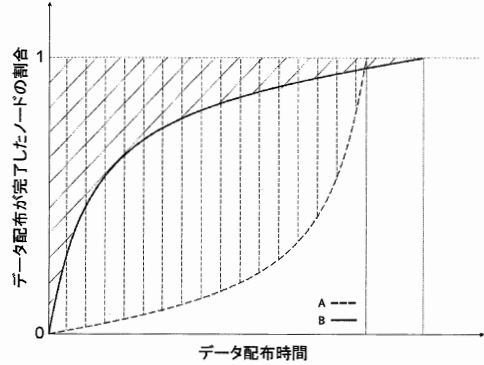


図 1 提案指標の例：傾きがほぼ同じ場合

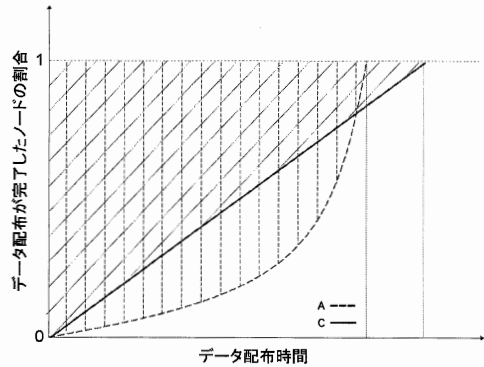


図 2 提案指標の例：傾きが異なる場合

るノードの割合が増える」傾向を表している。

各グラフにおいて、斜線および縦線で示された領域はデータを持っていないノードの期待値であるため、この値を比較し、より小さな値である方が「短い時間で多くのノードがデータを所持している」といえる。これはデータ配布中に障害が発生した場合でも、既に多くのノードにデータを配布し終えた状態であることを示す。配布データが仮想マシンイメージであるような場合、多くのノードが完成されたデータを持っていることが重要になるため、それぞれのグラフにおいて、実線で示した曲線の状態の方が配布時間が多少遅い場合でもデータ拡散に優れているといえる。

また、各グラフの傾きに注目する。帯域幅のみを重視した場合は曲線 A のように傾きが急になる。図 1 の二つのグラフを比べると、それぞれのグラフの傾きはほぼ同じであるが、配布途中のノードの状態は曲線 B の方が優れているといえる。また図 2 では、グラフの傾きは曲線 A の方が急であるが、配布途中のノードの状態は直線 C の方が優れている。

以上のようなデータ配布途中の状態を示すグラフと、

グラフの傾きやデータの配布完了時間といった値は必ずしも一致しない。データの配布にかかった時間や、グラフの傾きだけの直感的な評価では分からないため、式(1)に示した提案をする。この提案指標はそれぞれのパラメータを自然に結合しており、重みなどのパラメータ無しに考えることができる。

4. 評価システム

評価の際のデータを収集するため、一つのソースノードに置かれたデータを複数のノードに配布し、その際に各ノードが完成されたデータを得るまでに要した時間を計測するシステムを構築した。このシステムにより、各ノード単位でのデータ配布に要した時間や、すべてのノードに配布し終えるまでの時間などを計測することができる。ソースノードとデータを配布するノードを指定し、各ノード間で任意のオーバーレイネットワークを構築することが可能である。この評価システムはBitTorrent³⁾を基にしており、Pythonで実装している。BitTorrentの特徴のようにデータを断片化し、断片化したデータ単位でのP2P方式の転送により通信を高速化している。また、どのノードがどのデータ断片を所持しているかという情報をまとめるトラッカーが存在する。BitTorrentとの違いは、オーバーレイを構築するために任意のノード間でのみ転送をしたいため、データを転送する際にノード間の転送を制御できることである。

5. 実験方法

作成した評価システムを用いてPlanetLab上でのデータ転送実験を実施した。実験期間は2008年12月25日～2009年1月3日である。

CoMonを利用し、PlanetLab上で稼働しているノードのうち、主な米国教育機関のドメインであるeduドメインのノードをランダムに50サイト確保した。今回はすべての実験に同じノードを使用している。ソースノード(planetlab1.csail.mit.edu)に置かれた10MBのデータをすべてのノードに配布し終えるまでの時間を計測した。今回の実験での評価システムにおけるデータ分割数は5であり、一つの断片あたりの容量は約2MB(2,097,152byte)である。オーバーレイポロジは、関連研究でよく用いられており、P2Pでのデータ配布に適していると推察されるメッシュ型(図3)、先行研究¹²⁾で良い結果とされているリング型(図4)、データ配布には適さないと推察できるスター型(図5)のトポロジを用いた。ここでのメッシュ型は、あるノードがその他すべてのノードと接続されているフルメッ

シュ(全結合)型である。リング型でのノードの配置は、予備実験として各ノード間でpingコマンドを実行し、そのRTTの速いノード順にソースノードの近くになるよう配置している。各トポロジでノードの配置は実験ごとに変更せず、固定している。以上の条件で20回の転送実験をして平均をとり、各トポロジのデータ配布における全過程の平均帯域幅を求めた。データ配布が完了したノード数が全50ノードのうち、10ノード(20%)、25ノード(50%)、50ノード(100%)に達したときの時間をそれぞれ求めた。また、各トポロジの提案指標の値 σ も計算した。

以上の指標の他に、3.2節で例を挙げたグラフと同様に、横軸にデータ配布時間、縦軸にデータ配布が完了したノードの割合をとったグラフを各トポロジについて作成し、その傾きを求めた。ここでの傾きは、単位時間あたりにデータの収集が完了するノード数の、全ノード数に対する割合である。この傾きは単位時間における帯域幅の近似であることが期待される。すると、先行研究において目標とされている帯域幅最大化は、この傾きを大きくすることに相当する。傾きとして求めた値は、代表点としてプロット5点(データ配布が10,20,30,40,50ノードに達した時)を抽出し、5点のみでグラフを描いた場合における最大値、平均、最小値である。グラフにおいて各プロット点はノード一つを示し、そのノードにデータ配布完了した平均時間を表す。

PlanetLabで実験する場合、一つのノードで使用できる1日あたりの転送量が定められており、それを越えると帯域制限がかかるため正確な実験が不可能になる。想定する環境では数100MB～GB単位の大きなデータを用いたが、今回の実験では傾向を見るため、データ転送の際の帯域を絞ることにより、相対的に大きなデータを転送しているようにみせている。帯域幅の制限にはTrickle⁴⁾を用いた。Trickleではノード間の転送の上りと下りの帯域幅を指定することができる。今回の実験では何も制限をかけない通常の状態の他に、上り下り共に100kB/secに帯域を制限して前述と同様の条件下で実験し、各指標値を求めた。

6. 実験結果

評価システムを用いた実験によって得られた計測データをもとに、横軸をデータ転送時間、縦軸をデータ配布が完了したノードの割合としたグラフを作成した。このグラフは、通常の場合と帯域制限をかけた場合を比較するグラフである。なお、実験データを見ると不定期に異常に大きな値が発生していたため、グラ

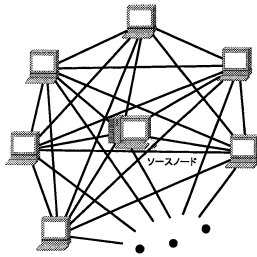


図 3 メッシュ型のトポロジ

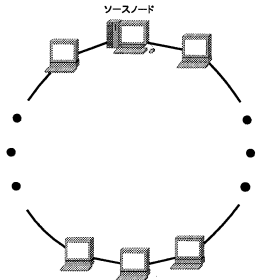


図 4 リング型のトポロジ

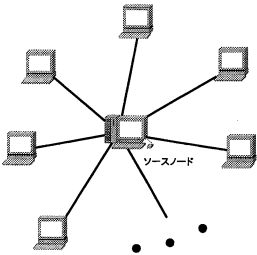


図 5 スター型のトポロジ

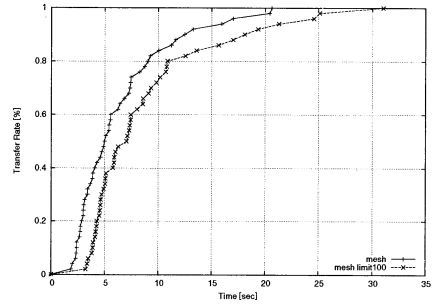


図 6 メッシュ

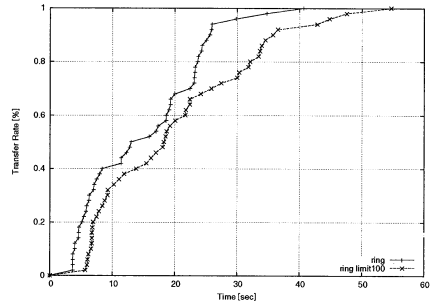


図 7 リング

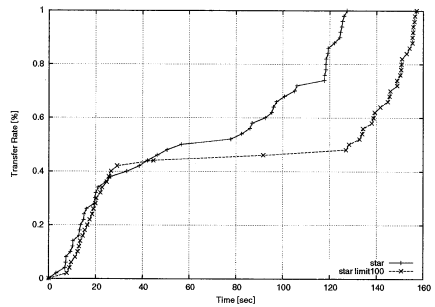


図 8 スター

フ作成の際にはその値を除いた。メッシュ型の結果を図 6、リング型の結果を図 7、スター型の結果を図 8 にそれぞれ示す。また、通常の転送の場合の各トポロジでの結果をまとめたグラフを図 9、帯域制限をかけた場合の各トポロジでの結果をまとめたグラフを図 10 に示す。さらに、それぞれの場合での各トポロジにおける指標値を表 1 と表 2 に示す。

表 1 各トポロジの指標値：通常の転送（帯域幅 kB/sec, 配布時間 sec, 傾き 1/s）

	帯域幅	配布時間（20%～50%～100%）	傾き（最大～平均～最小）	σ値
mesh	62.03	2.87 ～ 4.97 ～ 20.64	0.17 ～ 0.09 ～ 0.02	6.31
ring	31.47	5.14 ～ 13.05 ～ 40.67	0.06 ～ 0.03 ～ 0.01	14.68
star	9.84	13.16 ～ 49.96 ～ 130.13	0.03 ～ 0.01 ～ 0.00	64.17

表 2 各トポロジの指標値：帯域制限をかけた転送（帯域幅 kB/sec, 配布時間 sec, 傾き 1/s）

	帯域幅	配布時間（20%～50%～100%）	傾き（最大～平均～最小）	σ値
mesh	41.24	4.27 ～ 7.05 ～ 31.03	0.13 ～ 0.07 ～ 0.01	8.67
ring	23.41	6.94 ～ 18.24 ～ 54.68	0.03 ～ 0.02 ～ 0.01	19.69
star	8.14	16.52 ～ 128.30 ～ 157.17	0.03 ～ 0.02 ～ 0.00	87.48

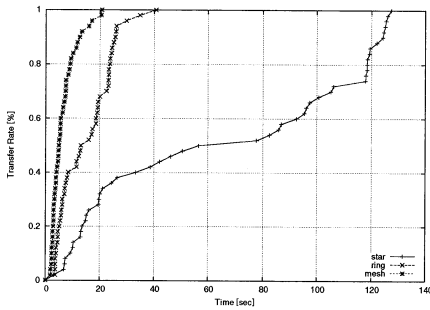


図 9 通常の転送

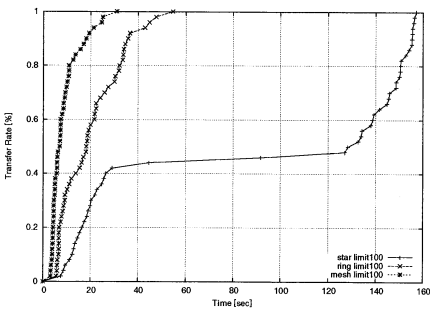


図 10 帯域制限をかけた転送

7. 考 察

7.1 グラフの比較

実験によって得られた各グラフを比較する。図 8 はスター型のトポロジを用いた場合のグラフである。このグラフから、速いノードのグループと遅いノードのグループに分かれていることがわかる。帯域制限をかけた場合、速いノードのグループでは通常の場合よりも一部では配布が早くなるという現象が起こった。これは、帯域を制限したことにより、速いノードにおいてはデータ配布の効率が上がる可能性があると考ええる。グラフの概形としては、速いノードのグループではあまり変化がなかったが、遅いノードのグループは右にシフトした形になっている。この結果を得たのち、速いノードのグループだけ、遅いノードのグループだけで同様の実験をしたところ、それぞれのグループのデータ配布の速さは変化が無かった。さらに、速いノードと遅いノードを混ぜたグループを作り同様の実験をしても、それぞれの速さに変化が無いことを確認した。よって今回の実験に用いたノード群は、データ配布に使用するノードの選択をランダムにしたことにより、速いノードと遅いノードがほぼ均等に入り交じっていることがわかる。データ配布に使用するノードがこのような傾向をしている場合に、他のトポロジではどうなるかを以下に述べる。

図 6 はメッシュ型のトポロジを用いた場合のグラフである。データ配布開始直後に急激に多くのノードの配布が完了するが、時間が経つにつれて徐々に傾きが緩やかになっている。グラフの所々には傾きが急に緩やかになっている部分もある。データ配布完了直前や傾きが緩やかになっている部分は、遅いノードが影響していると考ええる。帯域制限をかけた場合は、グラフの概形が通常の場合をほぼ右にシフトした状態になっている。また、帯域制限をかけた場合の方が遅いノードの影響が顕著に現れているように見える。

図 7 はリング型のトポロジを用いた場合のグラフ

である。メッシュ型よりもやや緩やかにデータが行き渡っていることがわかる。メッシュ型と同様にグラフの所々に傾きが緩やかになっている部分がある。これは、リング型ではこの部分で遅いノードに当たり、それまでのノード間の速さと差が出たためではないかと考える。データ配布完了直前に遅いノードが集まっているため、ある部分で突然グラフの傾きが緩やかになっている。また、帯域制限をかけた場合は、グラフの概形がメッシュ型と同じように通常の場合を右にシフトした状態になっており、通常の場合よりもさらに傾きが緩やかになっている。

図 9 は通常の転送の場合における 3 つのトポロジのグラフである。各トポロジにおけるデータ転送時間を比較すると、スター型はもっともデータ配布完了時間が遅いことから、他の 2 つのトポロジに比べて効率が悪いことがわかる。メッシュ型とリング型を比較すると全体的にメッシュ型の方が速く、今回の実験下でのデータ配布ではもっとも効率が良い。メッシュ型とリング型ではグラフがどちらも同じような概形をしているが、傾きが異なる。また、どちらのトポロジでもデータ配布完了直前に傾きが緩くなっている。グラフの所々で傾きが緩くなっているところは、遅いノードが影響しているといえる。図 10 の帯域制限をかけた場合でも同様のことがいえることから、大容量データを配布した場合でも似たような傾向を得ると推察する。どちらのグラフからも明らかであるように、今回の実験の条件下ではメッシュ型がもっともデータ拡散に適しているといえる。

7.2 指標値の比較

実験によって得られた各指標値を比較する。各表で示している帯域幅は、各トポロジのデータ配布における全過程を通しての帯域幅である。表 1 および表 2 から、帯域幅はメッシュがもっとも優れていることがわかる。各トポロジでの帯域の利用率がほぼ一定であったことから、単純にノード間の帯域によって指標値が変化していると考えられる。

表 1, 表 2 に示したように、データ配布が完了したノード数が全 50 ノードのうち、10 ノード (20%), 25 ノード (50%), 50 ノード (100%) に達したときの配布時間を各トポロジごとにグラフに表すと図 11, 図 12 のようになる。このグラフにおいて、メッシュ型とリング型のデータ配布の遷移を比較すると、10 ノードに達する時間は大差ないことが分かる。今回の実験で用いたリング型は完全なリング状であったため、先行研究のようにショートカットリンクを実装すれば、メッシュ型よりも速くなる可能性がある。

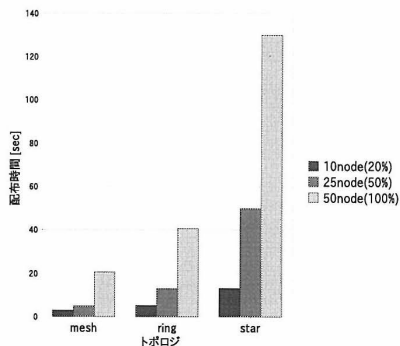


図 11 通常の場合：データ配布の推移

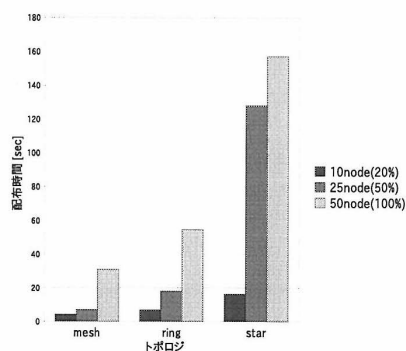


図 12 帯域制限をかけた場合：データ配布の推移

各トポロジにおける提案指標値 σ を比較すると、メッシュ型の値がもっとも小さいため、今回の条件下ではデータ配布に優れているといえる。

以上より、今回の実験の条件下ではメッシュ型がもっともデータ配布に優れていることがわかった。先行研究ではリング型がもっとも優れているとされていたが、実ネットワークでの実験により、シミュレーションとは異なる結果が得られた。先行研究のようにショートカットリンクなどの改善を加えれば、リング型が速くなる可能性があると考えられる。

8. おわりに

効果的なデータ拡散に向けたオーバーレイトポロジを評価するため、評価システムを構築した。構築したシステムを用いて、実ネットワークを利用したテストベッドである PlanetLab 上でデータ転送実験を実施した。データ配布における評価指標を提案し、評価システムを用いて得られた結果に対して他指標と比較した。今回の実験の条件下ではメッシュ型がもっともデータ配布に優れていることがわかった。実ネットワークでの

実験により、先行研究でのシミュレーションとは異なり、リング型がデータ配布に最適ではない可能性が示された。

今後の課題として、評価システム上でより様々なオーバレイを構築してデータ配布実験を行うこと、実験結果を用いて提案指標による評価をし、効果的なデータ拡散に向けたオーバレイポロジの比較をすることなどがある。

謝辞 本研究は科学技術振興機構 CREST「自律連合型基盤システム」の支援を受けている。

参 考 文 献

- 1) Castro, M., Druschel, P., Kermarrec, A.-M., Nandi, A., Rowstron, A. and Singh, A.: Split-Stream: high-bandwidth multicast in cooperative environments, *SOSP '03: Proceedings of the nineteenth ACM symposium on Operating systems principles*, New York, NY, USA, ACM, pp.298-313 (2003).
- 2) Chun, B., Culler, D., Roscoe, T., Bavier, A., Peterson, L., Wawrzoniak, M. and Bowman, M.: PlanetLab: an overlay testbed for broad-coverage services, *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, Vol.33, No.3, pp.3-12 (2003).
- 3) Cohen, B.: Incentives build robustness in BitTorrent (2003).
- 4) Eriksen, M. A.: Trickle: A Userland Bandwidth Shaper for Unix-like Systems, USENIX Annual Technical Conference, FREENIX Track.
- 5) J Li, PA Chou, C Zhang: Mutualcast: An efficient mechanism for one-to-many content distribution (2005). research.microsoft.com.
- 6) Jannotti, J., Gifford, D. K., Johnson, K. L., Kaashoek, M. F. and James W. O'Toole, J.: Overcast: reliable multicasting with on overlay network, *OSDI'00: Proceedings of the 4th conference on Symposium on Operating System Design & Implementation*, Berkeley, CA, USA, USENIX Association, pp.14-14 (2000).
- 7) Kostić, D., Rodriguez, A., Albrecht, J. and Vahdat, A.: Bullet: high bandwidth data dissemination using an overlay mesh, *SOSP '03: Proceedings of the nineteenth ACM symposium on Operating systems principles* (2003).
- 8) López-Fuentes, F. A. and Steinbach, E.: Hierarchical collaborative multicast, *MULTIMEDIA '07: Proceedings of the 15th international conference on Multimedia*, New York, NY, USA, ACM, pp.763-766 (2007).
- 9) Park, K. and Pai, V. S.: CoMon: a mostly-scalable monitoring system for PlanetLab, *SIGOPS Oper. Syst. Rev.*, Vol.40, No.1, pp.65-74 (2006).
- 10) 小磯知之, 阿部洋丈, 鈴木与範, Potter, R., 池嶋俊, 加藤和彦: サステナブルサービスための基盤ツールキットの設計, 情報処理学会論文誌: コンピューティングシステム, Vol. 48, No. SIG3 (ACS 17), pp.12-26 (2007年2月).
- 11) 吉野純平: 広域ネットワークにおけるデータ配布手法に関する研究, 修士論文, 筑波大学大学院システム情報工学研究科修士論文 (2008年).
- 12) 吉野純平, 阿部洋丈, 加藤和彦: 広域ネットワークにおける大規模データ転送手法の検討, 情報処理学会第70回全国大会 (2008年).
- 13) 杉木章義, 大和崎啓, 加藤和彦: 広域分散環境のための仮想機械を利用したサービス協調複製基盤, コンピュータシステム・シンポジウム論文集, pp.3-12 (2008年).