

## 待ち行列ネットワークにおけるリンク張り替えによる構造最適化

松村有祐<sup>†,†††</sup> 川村秀憲<sup>†,††</sup>  
車谷浩一<sup>††,†††</sup> 大内東<sup>†,††</sup>

Gnutella などのインターネット上に構築される大規模情報通信ネットワークが提供する高品質なサービスはある特徴的なネットワーク構造によって実現されると考えられている。また、別の研究では特徴的な構造はある単純な生成規則によって生成されることが明らかになった。

著者はこれらのことに鑑み、これまで情報通信ネットワークにおいて通信を効率化する構造の生成規則の設計方法について研究を実施してきた。本論文では、P2P ネットワークにおいてリンク張り替えによって動的に効率的なネットワーク構造を保持するメカニズムが取り入れられていることに注目し、リンク張り替えによる構造最適化問題を提案し、どれだけ少ないリンク張り替えによって効率的なパケットフローを実現する構造を生成できるかについて検討する。数値実験では、2.5~5%程度のリンク張り替えによって効率的なパケットフローを実現する構造を生成できることが明らかとなった。

### Structure Optimization with Link Exchange in Queuing Network

YUSUKE MATSUMURA,<sup>†</sup> HIDENORI KAWAMURA,<sup>†,††</sup>  
KOICHI KURUMATANI<sup>††,†††</sup> and AZUMA OHUCHI<sup>†,††</sup>

Recent research revealed that the high quality service provided by large scale telecommunication network constructed on the Internet such as Gnutella is realized by characteristic structure of network. Another research found that these characteristic structures are constructed by simple generation rules. Up to now, the authors have been researching the method of designing the rule that makes the communication efficiency on the telecommunication network paying attention to these works. Authors propose the structural optimization problem with the link exchange, and examine the structure to achieve efficient packet flow by very few link exchanges generable in this thesis. Numerical experiments verified that few link exchanges can generate structures with efficient packet flow.

#### 1. はじめに

ネットワークの構造に注目する研究は、1990年代後半の Watts や Barabási らの研究成果に端を発して盛んになり、複雑ネットワークと呼ばれる研究分野が確立し、これまでに現実に存在するさまざまなネットワークの構造とその生成過程を分析してきた。その結果、それらネットワークが持つ複雑な構造はある単純な生成規則下で生成されることが分った。さらに、その生成規則によって生成される構造が、ノード破壊に対する高い頑強性などの機能的特長を有することも明

らかとなった<sup>2)~4),14)~17)</sup>。

一方で近年、Skype や Gnutella などのファイル交換ソフトウェアなどのように数万から数百万規模の情報通信ネットワークを構成するネットワークアプリケーションが、高品質なサービスを提供することから人気を博している。このようなアプリケーションにおいては、大量のトラフィックが効率的に流通するようにネットワーク構造やトラフィック制御の手法、負荷分散の手法などさまざまな要素を考慮したネットワーク設計が求められる。Adamic らの研究は、これらのアプリケーションが自律分散的に構築する大規模情報通信ネットワークが、特徴的な構造を持つことを明らかにした<sup>1),7)</sup>。このことは、大規模情報通信ネットワークにおいて効率的なトラフィック流通をもたらす構造の生成規則が存在することを示唆する。

また、増加を続けるインターネット上のホスト数が約4億に上る中、skype に接続しているホスト数はその1~2%程度であり、この割合は今後さらに増加が見

† 北海道大学 大学院情報科学研究科  
Graduate School of Information Science and Technology, Hokkaido University  
†† 産業技術総合研究所  
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)  
††† 科学技術振興機構, CREST  
CREST, Japan Science and Technology Agency

込まれる。さらに今後も P2P のようにネットワークのリンク構造を応用した様々な形態のサービスの登場が期待される。このような状況下で、ネットワークアプリケーションが通信性能の維持・向上を図るためには、インターネット上に構築されるそれぞれのサービスの特徴と利用出来るインフラの特徴に応じたより高性能の構造生成が必要となると考えられる。しかし、これまでに設計されてきたネットワークの構造生成・管理のメカニズムはある通信条件下で有効なものであり、サービスの特徴が異なれば通信条件も変化するため高い有効性は期待できない。また、これまでの設計手法は最適性の観点に基づくものではないため、そのメカニズムはさらに改良の余地がある。そのため、このようなネットワークアプリケーションにおいて望まれる段階的リンク生成規則について理論的な設計手法の確立が必要となると考えられる。

著者はこれまでにこの経緯と、情報通信ネットワークにおける通信効率化の重要性に鑑み、P2P ネットワーク等を対象とし待ち行列ネットワークのモデルを用いてパケットの平均待ち時間が小となるネットワーク構造およびその生成規則に関する研究を実施してきた<sup>11),12),19)~24)</sup>。その結果、ネットワークに段階的にリンクを生成し、通信効率の高い待ち行列ネットワークを設計することが可能であることを示唆された。しかし、著者のこれまでの研究は複雑ネットワーク研究におけるネットワークダイナミクスを念頭においたものであり、ネットワークにおけるノード・リンクの単調増加のみを考慮した研究を実施してきたため、P2P ネットワークで用いられるリンク生成プロトコルのように、動的に構造を改良するメカニズムを考慮していない。そこで、本論文では、問題を緩和しネットワークにおけるリンク張り替えによるネットワーク構造の改良を許容し、かつリンクを段階的に生成する問題に拡張する。具体的には、複雑ネットワーク研究で示されるネットワークモデルにおいて、ネットワークにノードが追加される際に、既存のネットワークとの間のリンク生成を最適化すると同時に、既存のノード間のリンクを一定の割合で張り替えて段階的なリンク生成および構造最適化を実施する問題を考える。本論文で、この問題を提案し、その解法を明らかにする。

これらのことが明らかとなれば、どのような特徴のリンクを除去し、またどのような特徴のリンクを生成すべきかについて理論的な分析が可能となる。このことは、本研究が目指す局所ルールにもとづく大規模待ち行列ネットワークの構造生成に寄与する成果となるため、重要な研究課題である。

以下、2章で待ち行列ネットワークにおける段階的リンク設計問題を定義し、3章では遺伝的アルゴリズムによる解法を提案し、4章で提案手法の有効性を検証するために数値実験を実施する。5章で結論を述べる。

## 2. 待ち行列ネットワークにおける段階的リンク設計問題

### 2.1 問題のモデル化

本章では本論文が提案する問題を以下に定義する。ここでは、

- P2P 等の情報通信ネットワークを対象としていること
- P2P 等の動的に構造が変化するネットワークを対象としていること

に注目し問題を定義する。ネットワークの通信モデルについては、情報通信ネットワークの解析的モデルである待ち行列ネットワークで定義する。そして、動的な構造変化については、近年の複雑ネットワーク研究がインターネットや P2P ネットワークを対象として成果を挙げてきたことから、複雑ネットワーク研究で提案された成長型ネットワークモデルにおける成長ルールに基づいて扱うこととする。これらのことに基づき、以下にまず本問題における待ち行列ネットワークおよび段階的リンク生成について定義する。

現状では、ネットワークの成長に伴い、どのような生成規則に基づいてリンクを生成または張り替えることが望まれるかについての知見は明らかになっていない。そのため、本論文では最適化の手法によってリンクを生成または張り替えることを試み、まずは、どの程度のリンクの張り替えをすべきかについて調べるために、張り替えリンク数に関する制約つきリンク最適化問題を定義する。

### 2.2 待ち行列ネットワークの定義

以下に、ネットワークを待ち行列ネットワークでモデル化する。待ち行列ネットワークの構造はグラフ  $G(V, E)$  で示す。  $V, E$  はそれぞれノード集合およびリンク集合を示す。  $|V| = n$  および  $|E| = m$  であり、各ノードが 1 つの待ち行列システムに対応する。ここで、平均次数  $k$  は  $k = m/2n$  である。ここでは、インターネットなどの情報通信ネットワークのように、あるノードで発生したトラフィックが、ある別のノードに到達するまでに、いくつかのノードにおいてトラフィックの中継が必要となるモデルを考える。トラフィックを中継する際は、トラフィックの経路計算などを行うため、待ち時間が生ずる。ここでは、サービスを、トラフィックを中継することとし、待ち行列シ

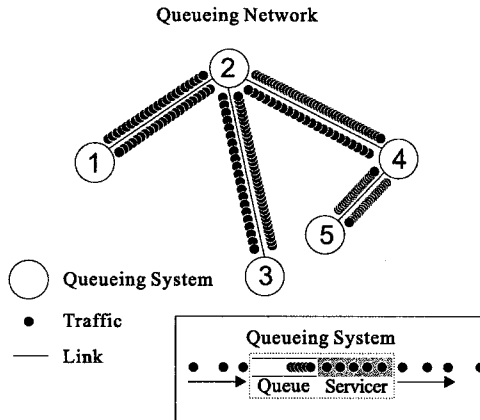


図1 待ち行列ネットワークおよび待ち行列システムの模式図

システムに流入したトラフィックを先入順にシステム出口に導き隣接する待ち行列システムに流入可能な状態にすることを中継とする。待ち行列ネットワークは、このような待ち行列システムが網状に接続されたものであり、隣接するノード対で、一方の待ち行列システムのトラフィックの出口が、他方の入り口となっている。図1に待ち行列ネットワークおよび待ち行列システムの模式図を示す。ただしここでは、待ち行列ネットワークにおける構造と待ち時間の関係を理論的に調査するため、リンク長やそれに対応するトラフィックの移動時間などは考慮しない。

各トラフィックはあるノードでランダムな生起分布で発生し、各ノードで中継され、あるノード(到着ノード)で中継され、その出口で消滅することとする。図1の例の場合、ノード1で発生するトラフィックは、到着ノード5の待ち行列システムの出口に到達するまでに、ノード2,4および5で中継される。各ノード*i*からは各ノード*j*に向けて単位時間当たり $q_{ij}$ の量のトラフィックが発生していることとし、各トラフィックに経路 $r_{ijk}$ が与えられれば、ネットワーク全体のトラフィックフローが一意に決まる。ここで、

$$r_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{経路}(i, j) \text{ がノード } k \text{ を含む} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

である。

各待ち行列システムは、1つのサービス窓口と、サービス待ちのトラフィックからなる待ち行列で構成される。各ノード*i*では、単位時間当たり $\lambda_i$ の量のトラフィックがランダムな到着分布で流入し、サービス窓口で単位時間当たり $\mu_i$ の量の中継され、システム外に流出する。 $\lambda_i, \mu_i$ はそれぞれ到着率およびサービス

率と呼ばれる。待ち行列システムにおいて、待ち時間はトラフィックの到着率に対して指数的に増加するという統計的性質があり、ここでもそれに倣う。このとき、各待ち行列システムはM/M/1でモデル化される。

### 2.3 段階的リンク生成の定義

ここで段階的リンク生成を以下のように定義する。まず、時間ステップ*t*を導入する。これにともない、先述の各記号*G, V, E, n*および*m*を、それぞれ各時刻におけるネットワーク、ノード集合、リンク集合、ノード数およびリンク数として、それぞれ $G(t), V(t), E(t), n(t)$ および $m(t)$ に拡張する。 $t = 0$ のとき与えられるネットワークを初期ネットワークと呼び、 $G(0)$ で示す。 $G(0)$ が与えられることは、 $V(0), E(0), n(0)$ および $m(0)$ が与えられることを示す。インターネットなど本研究が対象とするネットワークにおいて、*k*はネットワークの規模にかかわらず大きく変わらないことを考慮し、ここでも*t*にかかわらず*k*は一定であることとする。すなわち、

$$k = \frac{m(0)}{2 \cdot n(0)} \quad (1)$$

が制約となる。複雑ネットワーク研究における成長型ネットワーク生成モデルと同様に各*t*においてノードが1つ $G(t-1)$ に追加されることとし、 $n(t) - n(t-1) = 1$ とする。*t*でノードが追加される際、 $V(t-1)$ に含まれるノードのうち $k/2$ 個のノードと、追加されるノードとの間にリンクを生成する。これによって、 $V(t)$ および $E(t)$ を得て、 $G(t)$ が生成される。また、一度ネットワークに含まれたノードはそれ以降そのネットワークから除外されないこととし、

$$\forall v \in V(t) \quad (v \in V(t-1), t > 0) \quad (2)$$

とする。

ネットワークは $G(0)$ から成長をはじめ、 $G(t_{max})$ まで成長することとする。すなわち、最終状態のネットワークでは $n(t_{max}) = n(0) + t_{max}$ となる。

### 2.4 リンク張り替えに基づくリンク最適化問題の定義

本問題は、 $G(0), \mu_i, q_{ij}, t_{max}$ が与えられたとき、各*t*においてネットワークが $G(t-1)$ から $G(t)$ に移移する際、目的関数*f(t)*を最小化するように $G(t)$ を決定する問題である。ただし、ノード集合については式(2)であり変更をするものではないため、 $E(t)$ のみを決定する問題となる。

P2Pネットワークの構造生成プロトコルなどが、軽微なリンク張り替えによって良好なネットワーク構造を保っていることを考慮し、ここでは張替え率 $\alpha$ を導入する。 $G(t-1)$ から $G(t)$ に移移する際、 $G(t-1)$

におけるリンクを最大で  $\alpha \cdot m(t)$  本付け替えることを許容し、 $|E(t) - E(t) \cap E(t-1)| \leq \alpha \cdot m(t)$  で示される制約および、リンク数の制約下で、 $E(t)$  を決定することとする。

各  $t$  (ただし  $t > 0$ ) におけるリンク最適化問題は、次に定式化される。

$$\min_{E(t)} f(t) \quad (3)$$

subject to

$$|E(t) - E(t) \cap E(t-1)| \leq \alpha \cdot m(t) \quad (4)$$

$$|E(t)| = \frac{n(t) \cdot k}{2} \quad (5)$$

ここで、各トラフィックの待ち時間の公平化することや、各ノードにかかる負荷を平均化するなどいくつかの待ち時間に関する目的関数が考えられる。目的関数はネットワーク最適化の目的によってさまざまに考えられるが、ここでは具体的な現実問題を解くのではないため、目的関数  $f(t)$  を待ち行列ネットワークの全体的パフォーマンスを調べるための代表的な指標である平均待ち時間で与えることとした。 $f(t)$  は次式で示される。

$$f(t) = \frac{1}{Q} \sum_{i \in V(t)} \sum_{j \in V(t), j \neq i} w_{ij} q_{ij} \quad (6)$$

ここで、 $Q$  はネットワーク全体で単位時間当たりが発生するトラフィックの総数であり、次式で示される。

$$Q = \sum_{i \in V(t)} \sum_{j \in V(t), j \neq i} q_{ij} \quad (7)$$

$w_{ij}$  は、ノード  $i$  で発生しノード  $j$  に到着する 1 トラフィックあたりの合計待ち時間であり、各ノードにおいて中継を受ける際にかかる待ち時間を合計する。

$$w_{ij} = \sum_{k \in V(t), k \neq i} r_{ijk} \tau_k \quad (8)$$

$\tau_i$  はノード  $i$  における 1 トラフィック当たりの平均滞在時間である。 $\tau_i$  は  $\mu_i$  と  $\lambda_i$  から計算される。 $\lambda_i$  は  $q_{ij}$  と  $r_{ijk}$  から計算される。各トラフィックの経路が決定されると、次式によって各ノード  $i$  の待ち行列システムにおける到着率  $\lambda_i$  が計算できる。

$$\lambda_i = \sum_{j \in V, j \neq i} \sum_{k \in V, k \neq j} r_{jki} q_{jk} \quad (9)$$

ただし、ここで  $r_{ijk}$  は与えられていないことに注意されたい。 $r_{ijk}$  のとり方によって平均待ち時間は異なる。ここでは、各トラフィックをなるべく最小の待ち時間で目的ノードに到着させるために、待ち行列ネットワークにおける待ち時間解析の際に一般的に用いられるフロー偏差法<sup>6),8)</sup>によって  $f(t)$  を準最小にする

$r_{ijk}$  を手順的に決定する。フロー偏差法の概要は後述する。

$\mu_i$  と  $\lambda_i$  から平均待ち行列長  $\rho_i$  が計算される。 $M/M/1$  の平均待ち行列長は次式で示される。<sup>9)</sup>

$$\rho_i = \begin{cases} \lambda_i / (\mu_i - \lambda_i) & \mu_i - \lambda_i > 0 \\ \infty & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

$\rho_i$  と  $\tau_i$  の関係は、次式に示すリトルの公式で示される<sup>9),10),18)</sup>。

$$\rho_i = \lambda_i \tau_i \quad (11)$$

ここで、式 (10) および式 (11) より、

$$\tau_i = \begin{cases} 1 / (\mu_i - \lambda_i) & \mu_i - \lambda_i > 0 \\ \infty & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

が導かれる。

### 2.5 フロー偏差法による経路生成

フロー偏差法は各リンクにコストを想定し、経路をリンクの集合とみなし、経路へのリンクの組み換えを繰り返して準最適な経路に近づける方法である。ここではトラフィックがリンクを通過する際のコストを定義しておらず、トラフィックに課されるコストはノードで中継される際の待ち時間のみなので、フロー偏差法の計算で用いるコスト  $C_{ij}$  を、 $C_{ij} = \tau_j$  で与えることとする。ここで、 $C_{ij}$  は 1 トラフィックがリンク  $(i, j)$  を  $i$  から  $j$  方向に通過する際にかかるコストである。

フロー偏差法における初期の経路はランダムに実行可能なものを与える。その後、全ノード対について、各経路の実行可能性を保ちつつ、コストが小さくなるように段階的に経路を変更し、最終的に準最適な経路を与える。

## 3. 山登り法による解法

本論文が扱うネットワークの解の組み合わせは数は  $n(t)(n(t)-1)/2 C_m(t)$  と膨大である。また、先のモデルの場合、待ち時間の計算の際にフロー偏差法によって経路生成を実施しているため  $O(n(t)^3)$  オーダーの計算量を要する。このため、計算時間の観点から列挙法などの厳密解法の適用は困難と考えられ、発見的手法により近似解を求めることとした。具体的には山登り法による解法を適用した。

まず、解表現を次のように決定した。待ち時間の最小化なる目的関数のもとで構造を最適化する際に有効な解表現は未知であるため、解空間を過不足なく表現するものとして、 $E(t)$  を隣接行列として表現し解として用いることとした。また、プログラム上では図 2 のように解を扱うこととした。ここで、近傍解数を  $N_p$

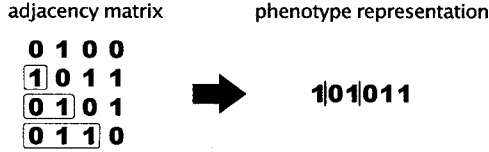


図2 プログラム上での解の取り扱い

とし、構造探索は次に示す手順に基づいて実施する。

平均待ち時間を最小化する構造を探索するにあたって、平均待ち時間に対応する他の定量的指標はないため、近傍解  $i$  の適応度  $f_i$  は、式 (6) に示される平均待ち時間で与えることとした。

$t = 0$  における学習初期の個体群はランダムグラフの一般的生成法である ER モデル<sup>5),13)</sup> でそれぞれ生成することとした。ここで、 $t$  は学習ステップではなく前章におけるネットワーク成長の時間ステップであることに注意されたい。 $t > 1$  の各  $t$  における学習初期の解は、 $t-1$  で最適化が終了した  $E(t-1)$  について、前章3節で示したように新たに追加されるノードと既存ノード間にランダムにリンクを生成する。このとき、式 (5) に示す張り替え制約は遵守される。

各  $t$  における各学習世代においては、 $E(t)$  からランダムに  $\lfloor e \cdot m(t) \rfloor$  本のリンクを除去し、同数を追加することによって、 $N_g$  個の近傍解を作成する。近傍解群の中で最も  $f_i$  が小となる近傍解  $i$  を  $E(t)$  に戻す。解の改善が  $N_g$  世代に連続して発生しなければ、 $t$  を  $t+1$  としてネットワークを生成する。

## 4. 実験

### 4.1 実験設定

本論文で提案するリンク設計問題について、3章で示した解法の有効性を調査し、待ち行列ネットワークに与えられる諸条件下でどのように張り替え率  $\alpha$  を設定するのが望ましいかを調査するために、以下の実験を実施する。

前章で定式化したリンク設計問題における、各パラメータ  $G(0)$ 、 $\mu_i$ 、 $q_{ij}$ 、 $t_{max}$  および  $\alpha$  を以下のように与えた。ここで、 $G(0)$  を与えることは、 $V(0)$ 、 $E(0)$ 、 $n(0)$  および  $m(0)$  を与えることに等しい。前章に示した解法において、 $t = 0$  における初期解を ER モデルで与えることとしたので、ここでは  $n(0)$  および  $m(0)$  を与え、ランダムグラフを生成することとする。

まず  $n(0) = 10$  および  $t_{max} = 90$  とし、10 ノードのネットワークから 100 ノードに達するまで段階的に生成する。 $m(0)$  によって  $k$  が決定される。ここで  $k$  多少によってネットワーク密度が決まるが、ネッ

トワークを密にした場合、その構造は完全グラフのような構造に近づき、構造よりもトラフィックの経路などによる待ち時間への影響が大きくなる。また、インターネットの平均次数が 3.81 であることを考慮し、ここでは、 $t = t_{max}$  のときに疎なネットワークを構成することとし、 $m(0) = 20$  とする。この時  $k = 4$  である。

次に、 $\mu_i$  および  $q_{ij}$  の与え方を示す。予備実験では、 $\mu_i$  および  $q_{ij}$  を、それぞれある平均値となるようにいくつかの分布乱数で与えることを試みた。結果、 $\mu_i$  の全ノード平均値  $\mu_{avg}$  と、 $q_{ij}$  の全ノード対平均値  $q_{avg}$  の比が一定ならば、どの確率分布でトラヒックを与えても最適化されたネットワークの評価にあまり影響しないことが分った。一方で、 $\mu_{avg}$  と  $q_{avg}$  の比および、サービス率の確率分布はそれぞれに影響することが分った。ここで、 $\mu_{avg}$  および  $q_{avg}$  は以下のとおりである。

$$\mu_{avg} = \sum_{i=1}^{n(t_{max})} \mu_i / n(t_{max})$$

$$q_{avg} = \sum_{i=1}^{n(t_{max})} \sum_{j=1, j \neq i}^{n(t_{max})} q_{ij} / n(t_{max})(n(t_{max}) - 1)$$

以上のことから、全ノード対のトラヒック量を一定 ( $q_{ij} = 1, i \in V, j \in V, i \neq j$ ) とし、以下のようにサービス率を与えることとする。実在するさまざまな情報通信ネットワークにおいて、端末の性能がごく高いものがほとんどで、性能が低いものが少数という状況は少ないため、サービス率は、正規分布乱数でサービス率を与えることとした。また、 $\mu_{avg} = 400$  とした。

最後に  $\alpha$  の与え方を示す。P2P ネットワークの設計研究で提案されるリンク生成手法において、ネットワークにおけるノードの出入りに際して、軽微な構造変化をもたらす。本論文が提案するネットワークのモデルにおいて、 $\alpha \geq 0.1$  としたとき、ノードが 1 つ加えられる度にリンクを 10% も張り替えることとなり、これは軽微な構造変化とは言えない。そこで、 $\alpha = 0, 0.025, 0.05, 0.075, 0.1, 0.2, 1.0$  の場合についてそれぞれ調査する。ここで  $\alpha = 0$  の場合は、新たに追加されたノードから既存ノードへのリンク生成を最適化する場合である。そして、 $\alpha = 1.0$  の場合は、リンク最適化の際にの張り替えリンク数の制約が無い状況と同様である。

### 4.2 実験結果

3章で示した山登り法によって  $t = 0$  から  $t = t_{max}$  までネットワークを段階的に生成し、その実験結果を以下に示す。各実験における山登り法の計算パラメー

タは、 $N_g = 200$ ,  $N_p = 80$ ,  $P_e = 2\%$ とした。また、各実験結果で示される数値は20回試行の平均値である。

実験結果は5つのグラフで示される。まず、各 $\alpha$ 、各ノード数 $n(t)$ における待ち時間 $f(t)$ を比較する。次に、リンク張り替えの制約がどの程度通信効率に変化をもたらすかを調べるために、各 $\alpha$ 、各ノード数 $n(t)$ に待ち時間比を比較する。ここで待ち時間比とは、各 $\alpha$ における待ち時間を同条件下において、 $\alpha = 100\%$ の待ち時間で除したもとする。そして、各時間ステップでどの程度のリンク張り替えが実施されたかを確認するために、各 $\alpha$ 、各ノード数 $n(t)$ における実張り替え率を比較する。実張り替え率 $\beta(t)$ は $\beta(t) = |E(t) - E(t) \cap E(t-1)|/m(t)$ で示すこととする。最後に、各 $\alpha$ 、各ノード数 $n(t)$ における構造の特徴量を比較する。具体的には、クラスタリング係数 $C$ および最短平均パス長 $L$ で比較する。これらの指標は複雑ネットワーク研究における構造分析・比較の際の有効な指標として知られている。

図3は各張り替え率 $\alpha$ 、各ノード数 $n(t)$ における待ち時間 $f(t)$ を示す。横軸は $n(t)$ 、縦軸は $f(t)$ を示す。ここで、 $t = n(t) - 10$ である。

図4は各 $\alpha$ 、各ノード数 $n(t)$ における待ち時間比を示す。横軸は $n(t)$ 、縦軸は待ち時間比を示す。ここで、 $t = n(t) - 10$ である。

図5は各 $\alpha$ 、各ノード数 $n(t)$ における実張り替え率 $\beta(t)$ を示す。横軸は $n(t)$ 、縦軸は $\beta(t)$ を示す。ここで、 $t = n(t) - 10$ である。 $\alpha = 100\%$ のとき、多くのリンク張り替えが実施されたことが分かる。

図6は各 $\alpha$ 、各ノード数 $n(t)$ におけるクラスタリング係数 $C$ を示す。横軸は $n(t)$ 、縦軸は $C$ を示す。ここで、 $t = n(t) - 10$ である。

図7は各 $\alpha$ 、各ノード数 $n(t)$ における最短平均パス長 $L$ を示す。横軸は $n(t)$ 、縦軸は $L$ を示す。ここで、 $t = n(t) - 10$ である。

図4および図7において、 $n = 20$ 付近で $\alpha$ によって異なる傾向が示された。これは、ある1試行においてサービス率が高いノードがネットワークに追加されたためと考えられる。サービス率が高いノードが追加されたとき、多くのノードはそのノードとの間にリンクを生成し、ネットワークの平均パス長を短くすることが平均待ち時間の短縮に寄与する。ただし、ここで $\alpha$ が小さいほど待ち時間が大となっているのは、このようなネットワークの性質の変化に対して張り替えられるリンク数が少ないためと考えられる。しかし、全体的には $\alpha$ にかかわらず待ち時間比は1.1~1.2以下で

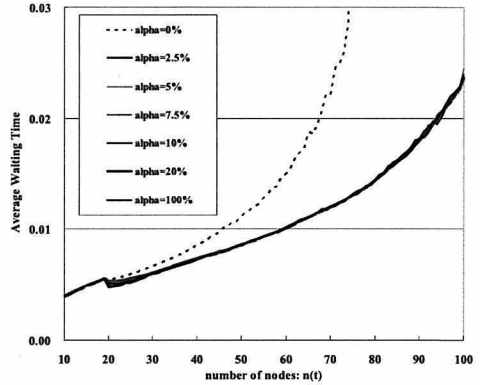


図3 各張り替え率 $\alpha$ 、各ノード数 $n(t)$ における待ち時間 $f(t)$ . 横軸は $n(t)$ 、縦軸は $f(t)$ . ただし、 $t = n(t) - 10$ .

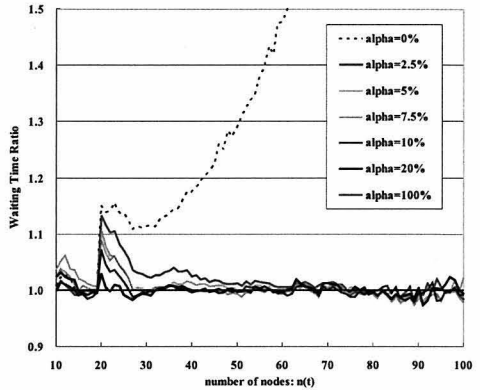


図4 各張り替え率 $\alpha$ 、各ノード数 $n(t)$ における待ち時間比. 横軸は $n(t)$ 、縦軸は待ち時間比. ただし、 $t = n(t) - 10$ .

あること、および、図5からわかるように、 $\alpha = 100\%$ の場合も前述したようにネットワークの性質が大きく変化する場合を除いて実張り替え率がほとんど10%以下となっていることとなっていることから、2.5~5%程度の張り替え率の制約下で十分待ち時間の小さいネットワークを生成可能であることが明らかとなった。

## 5. 結 論

著者らは、待ち行列ネットワークにおいて待ち時間が最小なるネットワークの構造をリンク張り替えを実施しながら段階的にリンク生成する問題を提案し、その解法の有効性を検証した。具体的には、(1) ネットワークを待ち行列ネットワークでモデル化し、(2) リンク張り替え制約付きのリンク最適化問題を定式化し、(3) 山登り法による解法を提案した。数値実験で

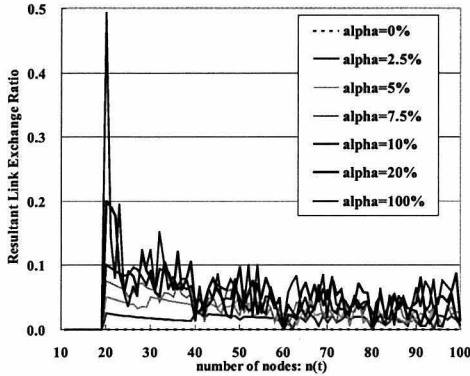


図5 各張り替え率  $\alpha$ , 各ノード数  $n(t)$  における実張り替え率  $\beta(t)$ . 横軸は  $n(t)$ , 縦軸は  $\beta(t)$ . ただし,  $(t = n(t) - 10)$ .

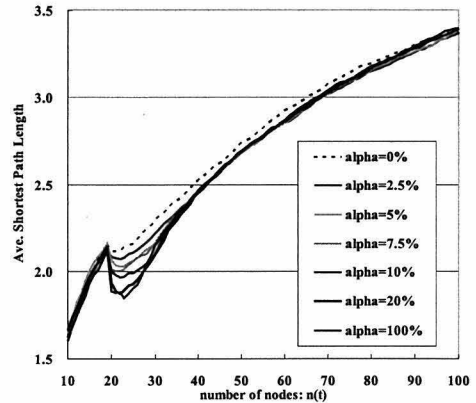


図7 各張り替え率  $\alpha$ , 各ノード数  $n(t)$  における最短平均パス長. 横軸は  $n(t)$ , 縦軸は  $L$ . ただし,  $(t = n(t) - 10)$ .

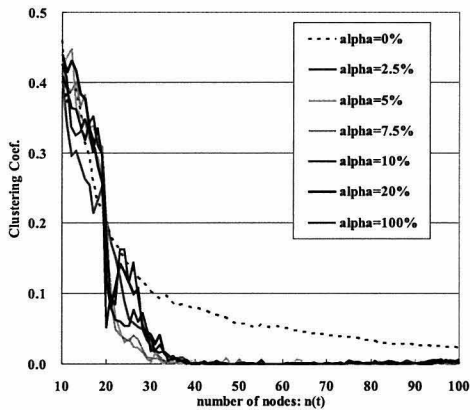


図6 各張り替え率  $\alpha$ , 各ノード数  $n(t)$  におけるクラスタリング係数. 横軸は  $n(t)$ , 縦軸は  $C$ . ただし,  $(t = n(t) - 10)$ .

はリンク張り替えに基づく段階的リンク生成の有効性を検証した。その結果、2.5~5%以下という小さい張り替え率の制約下で待ち時間の小さい待ち行列ネットワークの構造を生成できることが明らかになった。

今後は、最適化によらない局所ルールによる段階的リンク生成規則を設計するために、今回の実験における最適化の過程で、どのような特徴のリンクを除去され、どのような特徴のリンクが生成されたかについて調査する。

**謝辞** 本論文の執筆に当たり、北海道大学の山本雅人氏および産業技術総合研究所の山下倫央氏には多大なご助言、ご助力を賜った。ここに心から感謝の意を表したい。また本研究の一部は、科学技術振興機構(JST)の戦略的基礎研究推進事業(CREST)における研究領域「先進的統合センシング技術」の研究課題

「安全と利便性を両立した空間見守りシステム」の支援による。

### 参考文献

- 1) Adamic, L.A., Lukose, R.M., Puniyani, A.R. and Huberman, B.A.: Search in power-law networks, *Physical Review E* (2001).
- 2) Albert, R. and Barabási, A.-L.: Statistical mechanism of complex network, *Review of Modern Physics*, Vol.74 (2002).
- 3) Barabási, A.-L.: *LINKED: The New Science of Networks*, Perseus Publishing (2002).
- 4) Dorogovtsev, S. N. and Mendes, J. F. F.: Evolution of networks, *Advances in Physics*, Vol.51, No.4 (2002).
- 5) Erdős, P. and Rényi, A.: On random graphs, *Publicationes Mathematicae*, Vol.6 (1959).
- 6) Fratta, L., Gerla, M. and Kleinrock, L.: The Flow Deviation Method: An Approach to Store-and-forward Network Design, *Networks*, Vol.3, pp.97-133 (1973).
- 7) Jovanovic, M. J., Annexstein, F. S. and Berman, K.A.: Scalability Issues in Large Peer-to-Peer Networks - A Case Study of Gnutella, *Technical report, Univ. of Cincinnati* (2001).
- 8) Katou, J., Arakawa, S. and Murata, M.: A Design Method of Logical Topology with Stable Packet Routing in IP over WDM Network, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* (2001).
- 9) Kleinrock, L.: *Queueing systems*, Vol. 1, Wiley-Interscience (1975).
- 10) Little, J.: A proof of the queueing formula  $L = \lambda W$ , *Operations Research*, Vol.9 (1961).

- 11) Matsumura, Y., Kawamura, H. and Ohuchi, A.: Desirable Design Methodology for Queueing Networks, *The First International Workshop on Artificial Computational Economics & Social Simulation 2005*, Hakodate(Japan) (2005).
- 12) Matsumura, Y., Kawamura, H. and Ohuchi, A.: Desirable Design of Queueing Networks Excluding Linking Costs, *Workshop on Emergent Intelligence on Networked Agents (WEIN06)*, Hakodate(Japan), pp.12-24 (2006).
- 13) 増田直紀, 今野紀雄: 複雑ネットワークの科学, 産業図書 (2005).
- 14) Newman, M. E.J.: The Structure and Function of Complex Networks, *SIAM Review* (2003).
- 15) Strogatz, S.H.: Exploring complex networks, *Nature*, Vol.410 (2001).
- 16) Watts, D.J.: *Nature*, Vol.393, No.440 (1998).
- 17) Watts, D. J. and Strogatz, S. H.: Collective dynamics of 'small-world' networks, *Nature*, Vol.393 (1998).
- 18) Whitt, W.: A review of  $L = \lambda W$  and extensions, *Queueing Systems*, Vol.9, No.3 (1991).
- 19) 松村有祐, 川村秀憲, 大内 東: トポロジー探索により得られる複雑ネットワークの特徴解析, 合同エージェントワークショップ&シンポジウム 2005 JAWS2005, 箱根, pp.447-452 (2005).
- 20) 松村有祐, 川村秀憲, 大内 東: トラヒック遅れを生ずるネットワークのトポロジー設計, ネットワークが創発する知能研究会 第1回ワークショップ WEIN2005, 伊東, pp.141-146 (2005).
- 21) 松村有祐, 川村秀憲, 大内 東: 待ち行列ネットワークにおけるトラヒック遅延を最小化するトポロジー設計, 情報処理北海道シンポジウム 2005 講演論文集 (2005).
- 22) 松村有祐, 川村秀憲, 大内 東: リンクコストを考慮しない待ち行列ネットワークの最適設計, 情報処理学会研究報告, Vol.2006-ICS-1, 小樽, pp. 1-8 (2006).
- 23) 松村有祐, 川村秀憲, 大内 東: 待ち行列ネットワークの複雑ネットワーク理論を用いた最適設計, 日本オペレーションズ・リサーチ学会春期研究発表会, 東京, pp.204-205 (2006).
- 24) 松村有祐, 川村秀憲, 大内 東: 成長する待ち行列ネットワークにおけるトポロジー生成規則の最適性, コンピュータソフトウェア, Vol.24, No.1, pp.40-49 (2007).