

通信性能のロバスト性を考慮したネットワーク資源の仮想化に関する研究

代表研究者

橘 拓至

福井大学 工学部 准教授

1 はじめに

現在、ネットワーク仮想化に関する様々な研究・開発が世界中で行われており、新世代ネットワークにおいても基盤技術としてネットワーク仮想化の利用が期待されている。GENI (Global Environment for Network Innovation) initiative [1]や、Emulab[2], PlanetLab[3]では、ネットワーク仮想化技術のテストベッドが構築されており、実用化に向けた実験も盛んに行われている。

図1は、ネットワーク仮想化技術によって、物理ネットワーク上に2つの仮想ネットワークが構築されている場合を示している。本技術を用いて、仮想ネットワークがユーザに提供されると、ユーザは仮想ネットワークを専用網として独自に利用することができる。そのため、クラウドコンピューティングなど様々な用途に仮想ネットワークが利用されることが想定できる。その一方で、物理ネットワークのネットワーク資源（帯域、CPU、メモリなど）が、複数の仮想ネットワークによって共有されることになる。それゆえ、仮想ネットワークを構築・提供する際には、ネットワーク資源の有効利用を考慮したトポロジ設計および資源割り当てが必要不可欠となる[4]。

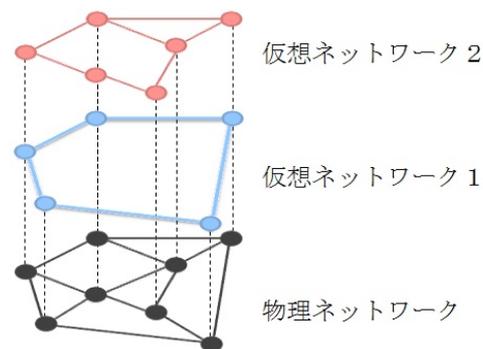


図1 ネットワーク仮想化技術

現在、様々な経路選択アルゴリズムや資源割り当てアルゴリズムの研究が行われている[5, 6, 7]。その一方で、近年はネットワークの通信性能に関するSLA (Service Level Agreement) が締結される場合も多いことから[8]、仮想ネットワークもパケット損失・伝送遅延・故障回復時間などに関してロバストであることが期待される。さらに、物理ネットワークでは、仮想ネットワークに提供していない残余資源を使ってパケット伝送を行なう場合が想定される。この場合には、物理ネットワークに関して通信性能のロバスト性を維持しなければならない。

そこで本研究では、物理ネットワークと仮想ネットワークのロバスト性を考慮した、仮想ネットワークのトポロジ設計法、および受付制御技術を提案する。提案方式では、最初に、物理ネットワークのリンク資源とノード資源を考慮した新たなラプラシアン行列を生成し、物理ネットワークのロバスト性を評価する。その後、ユーザから仮想ネットワーク構築リクエストを受けると、指定したノード全てを経由するトポロジをKMB アルゴリズムによって決定する。ここで、このトポロジ決定問題はシュタイナー最小木問題であることに注意する。そして、決定した仮想ネットワークをユーザへ提供した場合に、物理ネットワークのロバスト性がどのように変化するかを評価し、まだ高いロバスト性を維持できている場合に限り、ユーザに仮想ネットワークを提供する。さもなければ、物理ネットワークのロバスト性を優先し、仮想ネットワークの構築リクエストを棄却する。本方式の性能をシミュレーションで評価し、提案方式の有効性を示す。

ここで、上記のトポロジ設計法・受付制御技術方式を用いると、物理ネットワークのロバスト性を考慮して仮想ネットワークを構築・提供することが可能となる。その一方で、仮想ネットワークの提供可能数があらかじめ設定した閾値によって制限されてしまうため、ユーザのリクエスト状況に関わらず、仮想ネットワークを構築・提供できない状況が発生する。したがって、できるだけ多くの仮想ネットワークを構築するためには、仮想ネットワークの構築を前提としたロバストな物理ネットワークの設計が必要となる。

それゆえ、本研究ではさらに、仮想ネットワーク構築に適したロバストな物理ネットワークの設計技術を提案する。提案する設計法は、物理ネットワークのトポロジが既に決定されている場合の資源割当てと、物理ネットワークのトポロジが決定されていない場合を想定している。前者に対する資源割当て法では、物理ネットワークの資源割当てを最適化問題として定式化する。具体的には、ノード資源とリンク資源のコストを制約条件とし、ロバスト性に関する評価指標の最小化を目指す。ここで、本最適化問題は凸計画問題であり、さらに、この凸計画問題は半正定値計画問題に変形することができる。この半正定値計画問題は、凸計画問題の中でも比較的高速に最適解が見つかることが知られているため、本技術では、半正定値計画問題を解くこ

とで、物理ネットワークのロバスト性を向上させる最適な資源割当を実現する。また、後者に対するトポロジ設計法では、ネットワークのロバスト性とネットワークの構築コストを考慮した最適な物理ネットワークトポロジを導出する。本方式においても、トポロジ設計問題を凸計画問題で定式化し、さらに半正定値計画問題に変換して高速な最適解の導出を試みる。両技術の性能はシミュレーションで評価し、様々なネットワークトポロジでの有効性を調査する。

本稿は以下のように構成される。2章では、関連研究について紹介し、続く3章において、提案する受付制御技術について紹介する。さらに4章では、2つの物理ネットワーク設計法について述べる。5章では、提案方式の性能評価結果を示し、6章においてまとめを述べる。

2 関連研究

2-1 仮想ネットワークのトポロジ設計と資源割り当て

ネットワーク仮想化技術では、構築する仮想ネットワークのトポロジ設計と資源割当が重要な研究課題となっている。仮想ネットワークのトポロジに関しては、[5]において、ノードとリンクの負荷が最小となるように経路を決定する方法が提案されている。また、資源割り当ての簡便さを考慮して、仮想ネットワークのトポロジをあらかじめスター型に限定するトポロジ設計法[9]も提案されている。さらには、リンクが独立した仮想ネットワークを構築するために k-shortest path アルゴリズムを用いた経路決定法[10]も提案されている。

仮想ネットワークの資源割り当てに関しては、[10]において、経済面を考慮して収入を最大にする資源割当方式が検討されている。さらに、ネットワーク資源の利用状況に応じて、仮想ネットワークで使用する資源量を動的に調整する方式も提案されている[11]。

2-2 通信ネットワークのロバスト性評価

通信ネットワークでは、データ伝送の伝送遅延、パケット損失、故障回復時間などに関して、ユーザの様々な要求を満足することが望まれる。そのため近年では、ユーザと通信ネットワーク所有者との間で、これらの要求を保証するための SLA (Service Level Agreement) が締結されることがある。したがって、通信ネットワーク所有者としてはロバスト性の高いネットワークの構築が必須であり、そのためにも、通信ネットワークのロバスト性を適切に評価することが重要である。

[12]では、通信ネットワークの構造を表すラプラシアン行列 L を利用し、行列 L に対する非ゼロの最小固有値を用いてネットワークのロバスト性を評価している。非ゼロ最小固有値の大きいネットワークはロバスト性が高いことが示されており、様々なネットワークのロバスト性評価にこの性能評価指標が用いられている。その一方で、本指標を用いると、ノード数がロバスト性に与える影響を過小評価する傾向があるため、大規模ネットワークのロバスト性評価には不十分である。

そこで[13]において、大規模ネットワークのロバスト性を評価できる新たな性能指標が提案されている。今、通信ネットワーク内のノード数を n ($n > 0$) とし、対応するラプラシアン行列を L とする。このとき、性能評価指標 τ は以下の式で与えられる。

$$\tau = 2n \text{Tr}(L^+) \quad (1)$$

式(1)において、 L^+ はラプラシアン行列の疑似逆行列を示し、演算子 Tr は行列の対角和を表している。ここで、ラプラシアン行列 L は正則ではないことに注意する。

評価指標 τ は、前述の固有値とは異なり、値の小さいネットワークほどロバスト性が高くなる。また、ノード数がロバスト性に与える影響も適切に評価できるため、大規模ネットワークのロバスト性評価に有効である。

3 提案する仮想ネットワーク構築技術

本章では、仮想ネットワークに対するロバスト性を考慮したトポロジ設計法と受付制御技術について説明する。

3-1 概要

以下では、仮想ネットワークの利用を希望するユーザが、使用したい仮想ネットワークの経由ノードと資源

量だけを指定する場合を考える。ここで、物理網所有者（サービス提供者）は、指定されたノードを経由し使用する資源量が要求量を満たすような仮想ネットワークを構築し、ユーザに提供する。

図2は、提案する仮想ネットワーク構築アルゴリズムの処理手順を示している。この図にも示されているように、以下の手順に従ってトポロジ設計と受付制御を行い、仮想ネットワークを構築・提供する。

- Step 1 物理ネットワークのロバスト性を評価するために、ノード性能とリンク性能を考慮したラプラシアン行列を構築
- Step 2 生成したラプラシアン行列から評価指標 τ を計算。得られた τ を初期値 τ_{ini} とし、さらに閾値 τ_{ref} を設定
- Step 3 ユーザから仮想ネットワークの構築リクエスト（経由ノードと資源量の情報）が到着
- Step 4 KMB アルゴリズムを用いて仮想ネットワークのトポロジを設計
- Step 5 上記のStep4で設計した仮想ネットワークを提供した場合の残余ネットワークに対して、評価指標 τ_{new} を計算
- Step 6 受付制御によって、 $\tau_{new} < \tau_{ref}$ ならば、上記仮想ネットワークを構築してユーザに提供。
 $\tau_{new} \geq \tau_{ref}$ ならば、上記仮想ネットワークは構築せずリクエストを棄却。Step 3に戻る。

以下では、各ステップについて詳細を説明する。

3-2 物理ネットワークのロバスト性評価

図3は、物理ネットワーク $G = \{V, E, W^V, W^E\}$ を示している。ここで、 $V = \{v_1, \dots, v_M\}$ はノードの集合、 $E = \{e_1, \dots, e_N\}$ はリンクの集合を表しており、 M と N はそれぞれ、ノード数とリンク数を示している。さらに、 $w_i^v > 0$ と $w_i^e > 0$ を、それぞれノード v_i とリンク e_i の性能を示す重みとする。また、 $W^V = \{w_1^v, \dots, w_M^v\}$ と $W^E = \{w_1^e, \dots, w_N^e\}$ は、ノードとリンクそれぞれの重みの集合を表している。以下では、 w_i^v と w_i^e は同じ評価尺度になるように事前に設定されていると仮定する。

提案アルゴリズムでは、最初に、元の物理ネットワークに対して評価指標 τ を計算する。前節の式(1)で示したように、指標 τ はラプラシアン行列 L を使って計算することができる。しかしながら、行列 L にはリンク性能（重み）だけしか含まれていないため、仮想ネットワーク構築に必要な不可欠なノード性能（重み）を考慮することができない。そこで、物理ネットワークのロバスト性評価にノード性能も考慮できるように、以下の手順で新たなラプラシアン行列 L^v を構築する。

今、ノード v_i ($i=1, \dots, M$) の接続リンク数を $h_i > 1$ とする。このとき、ノード v_i を h_i 個の新しいノード $\{v_i^1, \dots, v_i^{h_i}\}$ に分割し（図4参照）、新しく生成されたノード v_i^j ($j=1, \dots, h_i$) に h_i 本のリンクを1本ずつ再接続する。さらに、 $\{v_i^1, \dots, v_i^{h_i}\}$ 同士を $h_i(h_i-1)/2$ 本の新しいリンクでフルメッシュに接続する。ここで、新しいリンクの重み

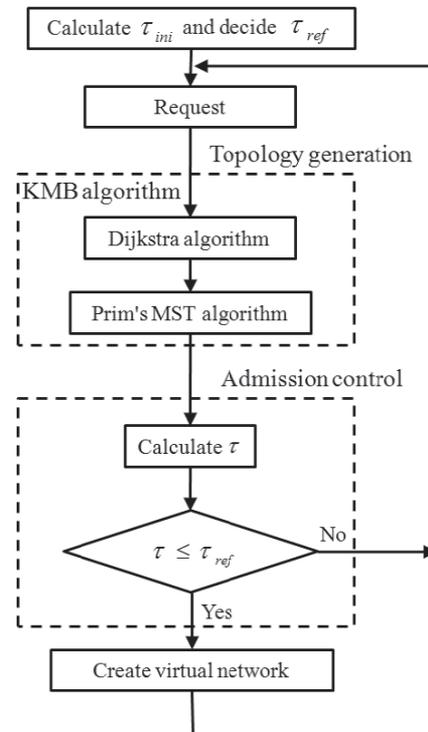


図2 提案する仮想ネットワーク受付制御アルゴリズム

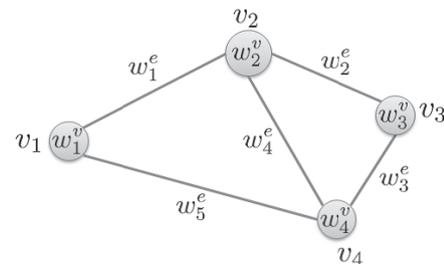


図3 物理ネットワーク

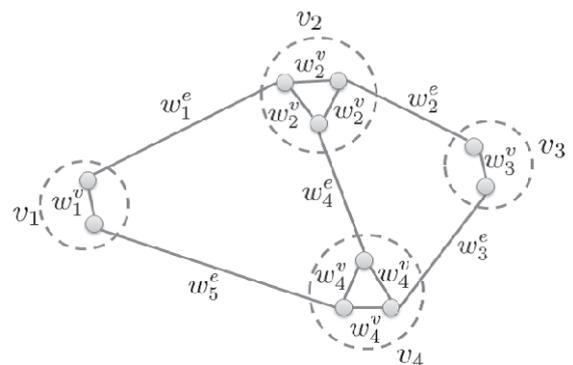


図4 拡張した物理ネットワーク

はノード v_i の重み w_i^v と同じ値に設定する．結果として，図 4 に示すような，ノード性能をリンク性能に変換した新しいネットワークが構築される．

その後，ノード性能を考慮したこのネットワークに対して新しいラプラシアン行列 L^v を生成する．このラプラシアン行列 L^v は $\Sigma h_i \times \Sigma h_i$ 行列であり， $h_i \times h_i$ 行列 A_i と $h_i \times h_j$ 行列 B_{ij} を使って，以下のような形で表される．

$$L^v = \begin{bmatrix} A_1 & B_{12} & \cdots & B_{1M} \\ B_{21} & A_2 & \cdots & B_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{M1} & B_{M2} & \cdots & A_M \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$A_i = \begin{bmatrix} 0 & w_i^v & \cdots & w_i^v \\ w_i^v & 0 & \cdots & w_i^v \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_i^v & w_i^v & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$B_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & w_{ij}^e & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

行列 B_{ij} に関して， w_{ij}^e は v_i-v_j 間のリンクの重みを示している．さらに， w_{i-j}^e が行列 L^v の s 行 t 列要素のとき， s 行および t 列の他の要素は A_i と A_j 内の要素を除いて全て 0 となる．

最終的に，行列 L^v を使って評価指標 τ を以下の式で計算する．

$$\tau = 2n \text{Tr}(L^{v+}) \quad (5)$$

そして，得られた τ を初期値 τ_{ini} とし，さらに，物理ネットワークに対する τ の上限として閾値 $\tau_{\text{ref}} > \tau$ を設定する．

3-3 仮想ネットワーク構築リクエスト

本技術では，各ユーザが経由ノードと資源量だけを指定して，仮想ネットワーク構築をリクエストする．今，ユーザが指定した経由ノード数を H ($0 < H \leq M$) とし，指定ノードの集合を $\{v_1^*, \dots, v_H^*\}$ とする．さらに，指定した仮想ネットワークの資源量を $I > 0$ とする．このとき，このユーザのリクエストは， $\{v_1^*, \dots, v_H^*, I\}$ と表される．

物理網所有者は，ユーザからのリクエストを受けると， $\{v_1^*, \dots, v_H^*, I\}$ を基に，提供する仮想ネットワークのトポロジを設計する．このとき，物理ネットワークと仮想ネットワークのロバスト性を考慮するために，図 3 に示されたノード性能を考慮したネットワークに対して，全ての重みを以下のコストに変更する．

$$\begin{aligned} w_i^v &\rightarrow \text{cost}_i^v = \tau + w_i^v \frac{\partial \tau}{\partial w_i^v} \\ w_i^e &\rightarrow \text{cost}_i^e = \tau + w_i^e \frac{\partial \tau}{\partial w_i^e} \end{aligned} \quad (6)$$

ここで，コスト cost_i^v (cost_i^e) は，ノード資源(リンク資源)を利用した場合の τ の増加率を示している．

3-4 仮想ネットワーク構築リクエスト

前節で構築した新しい重みをもつネットワークに対して，ユーザが指定した全ノードを經由し，かつ経路全体のコストが最小となるトポロジを決定する．この問題はシュタイナー最小木問題となり，NP 完全問題であることが知られている．そこで本提案方式では，近似解を導出するために KMB アルゴリズム[14]を使用す

る。KMB アルゴリズムは最短経路探索と最小木問題を組み合わせたアルゴリズムであり、特に以下では、それぞれダイクストラアルゴリズムとプリムのアルゴリズムを利用する。

図 5 は、KMB アルゴリズムを用いて仮想ネットワークのトポロジがどのように決定されるかを示している。最初に、2つのコスト(6)を重みとしたネットワーク上で、 $\{v_1^*, \dots, v_H^*\}$ 内の各2点間の最短経路をダイクストラアルゴリズムによって導出する。

これにより、 $\{v_1^*, \dots, v_H^*\}$ をノードにもつフルメッシュネットワークが生成される。そして、このフルメッシュネットワークに対して、プリムのアルゴリズムを用いて最小木を構築する。最終的に、得られた最小木が仮想ネットワークのトポロジとなる

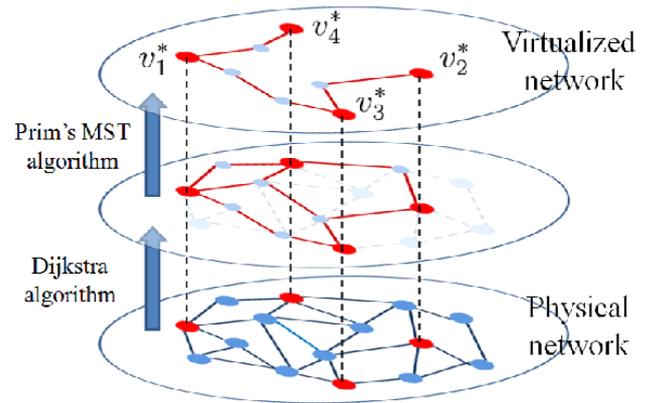


図 5 KMB アルゴリズムを用いた仮想ネットワークトポロジ設計

3-5 受付制御

仮想ネットワークのトポロジが決定したら、物理ネットワークの残余資源から、資源 l の仮想ネットワークが提供できるかを調査する。提供できない場合には、直ちにリクエストは棄却され、提供できる場合には以下のようなロバスト性を考慮した受付制御を行う。

今、仮想ネットワークが構築される全リンク e_k に対して、 w_k^e から l を引いた後に式(5)を使って τ_{new} を計算する。このとき、一部のリンクの重み(資源)が減少しているため、指標 τ_{new} は必ず増加する。

導出された τ_{new} を閾値 τ_{ref} と比較し、 $\tau_{new} \leq \tau_{ref}$ ならば仮想ネットワークを構築し、実際にユーザへ提供する。一方で、もし $\tau_{new} > \tau_{ref}$ であれば、残余ネットワークのロバスト性が不十分だと判断し、仮想ネットワークの構築リクエストを棄却する。

4 提案する物理ネットワーク設計技術

3章で述べた提案方式を用いると、物理ネットワークのロバスト性を考慮して仮想ネットワークを構築・提供することが可能となる。その一方で、仮想ネットワークの提供可能数があらかじめ設定した閾値によって制限されてしまうため、ユーザのリクエスト状況に関わらず、仮想ネットワークを構築・提供できない状況が発生する。したがって、できるだけ多くの仮想ネットワークを構築するためには、仮想ネットワークの構築を前提としたロバストな物理ネットワークの設計が必要となる。そこで本章では、より多くの仮想ネットワークが構築できるように、物理ネットワークの資源割当てとトポロジ設計法を提案する。

4-1 物理ネットワークの資源割り当て

本節では、物理ネットワークのトポロジが既に与えられている時に、ロバスト性を考慮して仮想ネットワークを構築できるよう、ノードとリンクに最適な資源量を割り当てるための方式を提案する。

今、ノード数が n の物理ネットワークを考える。この物理ネットワークに対し、ノード集合を $V = \{1, 2, \dots, n\}$ で表し、ノード i ($i \in E$) の資源量を w_i^v で表す。さらに、ノード i とノード j ($i, j \in E$) の間のリンクを (i, j) で表し、ネットワークのリンク集合を $E = \{(i, j)\}$ で表す。ここで、集合 E に含まれるリンクの資源量を w_{ij}^e とし、ノード $i-j$ 間にリンクがない場合は $w_{ij}^e = 0$ となる。また、ノードペア (i, j) 間の距離を z_{ij} ($(i, j) \in E$) とする。

この物理ネットワークのロバスト性は式(5)で評価することができる。それゆえ、指標 τ を最小化することで、仮想ネットワーク構築に適したロバストな物理ネットワークを設計することができる。そこで、以下の最適化問題に対する最適解を導出することで、資源割り当て量を導出する。

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimize } \tau = 2n\text{Tr}(L^{V^+}) \\
 & \text{Subject to } \sum_{(i,j) \in E} (w_i^v + w_{ij}^e z_{ij}) \leq C \\
 & \quad w_i^v \geq 0 \\
 & \quad w_{ij}^e \geq 0
 \end{aligned} \tag{7}$$

ここで、 C は物理ネットワークの構築に使用可能なノード資源とリンク資源の最大コストを表している。また、ノード i - j 間のリンク資源コストは、リンク間距離 z_{ij} に比例すると仮定している。

上記の最適化問題において、目的関数は凸関数であることが示される[13]。また、制約条件も凸集合であるため、本問題は凸計画化問題となる。凸計画問題の実行可能領域は凸集合であるため、本問題には局所的最適解は存在せず、大域的最適解のみとなる。したがって本問題は、理論上及び計算上、取り扱いやすい問題である[15]。

さらに、本問題は、以下のような半正定値計画問題に変形することができる。

$$\text{Minimize } 2n\text{Tr}(\Gamma) - 2n$$

Subject to:

$$\text{Vec}(W^V) \text{Vec}(Z_i)^T + \text{Vec}(W^E) \text{Vec}(Z)^T = C$$

$$\begin{pmatrix} \Gamma & I \\ I & L^V + \frac{J}{n} \end{pmatrix} \geq 0 \quad (8)$$

$$\text{Diag}(\text{Vec}(W^V)) \geq 0$$

$$\text{Diag}(\text{Vec}(W^E)) \geq 0$$

このように、凸計画問題を半正定値計画問題に変換することで、より限定的な問題設定となり、専用のソルバを使用して、高精度かつ高速に解の導出が可能となる。

4-2 物理ネットワークのトポロジ設計

本節では、前節とは異なり、物理ネットワークの最適な資源量と最適なトポロジを導出する方式を提案する。

今、ノード数が N の物理ネットワークを考え、完全グラフ $G = \{V, E, W^V, W^E\}$ が構築されたとする。ここで、この完全グラフでは、3章で述べたように、 n 個の複数のノードに分割されているとする。このとき、リンク数は $M = n(n-1)/2$ となる。このグラフに対して、 $w_i^v \geq 0$ ($i=1, \dots, N$) はノード v_i の資源量を表し、 $w_i^e > 0$ ($i=1, \dots, M$) はリンク e_i の資源量を表す。 w_i^e が 0 のときには、リンク e_i が存在しないことを表している。また、もし全ての i に対して $w_i^v > 0$ であれば、ネットワークは完全グラフとなる。

これら 2 つの重み集合 $W^V = \{w_1^v, \dots, w_N^v\}$ と $W^E = \{w_1^e, \dots, w_M^e\}$ を定義する。この 2 つの集合から、行列 W_v が以下のように得られる。

$$W_v = \begin{bmatrix} A_1 & B_{12} & \cdots & B_{1N} \\ B_{21} & A_2 & \cdots & B_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{N1} & B_{N2} & \cdots & A_N \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$A_i = \begin{bmatrix} 0 & w_i^v & \cdots & w_i^v \\ w_i^v & 0 & \cdots & w_i^v \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_i^v & w_i^v & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$B_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & w_{i-j}^e & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

ここで、行列 W_v のサイズは、 $MM \times MM$ となる。そして、行列 W_v を使って新しいラプラシアン行列 L^v を構築し、ネットワーククリティカリティ τ を以下のように計算する。

$$\tau = 2N\text{Tr}(L^{V^+}) \quad (12)$$

提案するトポロジ設計法では、最適なリンク接続と資源割当をネットワーククリティカリティを基に計算する。

ここで、 C は利用可能な最大資源量を表し、 D は利用可能な最大ノード資源量を表すとする。さらに、 z_{ij} はノード i - j 間の距離を示し、 $Z=\{z_{ij}\}$ をその距離集合とする。このとき、ネットワークのロバスト性とネットワークコストを基にネットワークトポロジを設計できるように、最適化問題を以下の式で定式化する。

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } (1-\rho)\tau + \rho \frac{\text{Vec}(W^E)\text{Vec}(Z)^T + \text{Vec}(W^V)}{\text{Vec}(W_0^E)\text{Vec}(Z)^T + \text{Vec}(W_0^V)}, \\ & \text{Subject to } \sum_{(i,j) \in E} w_{ij}^e \leq C, \\ & \sum_{(i,j) \in E} w_{ij}^v \leq D, \\ & w_{ij}^e \geq 0, \\ & w_{ij}^v \geq 0. \end{aligned} \quad (13)$$

ここで、 $\text{Vec}(X)$ は、行列 X の全ての行を連結させて得られるベクトルである。

上記の目的関数において、最初の項は物理ネットワークのネットワーククリティカリティ τ を表している。一方、2番目の項は、リンク資源とネットワーク資源に対するネットワークコストを表している。さらに、 ρ ($0 \leq \rho \leq 1$)は重みパラメータであり、 ρ が0に近くなると、ネットワークのロバスト性を重視してネットワーク設計を行ない、 ρ が1に近くなるとネットワークコストを重視するようになる。さらに、2番目の項において、 τ_0, W_0^E, W_0^V は $\rho=0$ の場合の最適解を示している。

また、最終的に上記の最適化問題は、以下の半正定計画問題に変形することができる。

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } (1-\rho)(2N\text{Tr}(\Gamma) - 2N) + \rho \frac{\{\text{Vec}(W^E)\text{Vec}(Z)^T + \text{Vec}(W^V)\}\tau_0}{\text{Vec}(W_0^E)\text{Vec}(Z)^T + \text{Vec}(W_0^V)} \\ & \text{Subject to} \\ & \text{Vec}(W^V) \dot{\mathbf{1}} = C \\ & \text{Vec}(W^E) \dot{\mathbf{1}} = D \\ & \begin{pmatrix} \Gamma & I \\ I & L_v + \frac{J}{N} \end{pmatrix} \geq 0 \\ & \text{Diag}(\text{Vec}(W^V)) \geq 0 \\ & \text{Diag}(\text{Vec}(W^E)) \geq 0 \end{aligned} \quad (14)$$

このような半正定計画問題は、SeDuMi や、LMILAB, SDPT3, CSDP, SDPA-Mのようなソフトウェアを利用すれば簡単に計算することができる。

5 数値例

本章では、仮想ネットワークに対するロバスト性を考慮した受付制御法、および資源割当法、トポロジ設計法について、シミュレーションによる性能評価を行なう。

5-1 受付制御法

本節では、ロバスト性を考慮した受付制御法の性能について調査する。

図6および図7は、シミュレーションで用いる物理ネットワークを示している。図6のネットワークは、ノード数とリンク数がそれぞれ10と18であり、各性能が10~26の数字で記されている。また、式(5)から、この物理ネットワークの初期値 τ_{ini} は84.2657である。一方、図7のネットワークは、ノード数とリンク数

がそれぞれ 15 と 20 で、各性能が 10~35 の数字で記されており、 τ_{ini} は 160.0955 である。

この 2 つの物理ネットワークに対して、仮想ネットワークの構築リクエストが率 λ でポアソン到着すると仮定する。到着した構築リクエストは、提案方式に従ってトポロジの設計および受付制御が行われる。構築が許可された仮想ネットワークはユーザに提供され、利用時間は平均 1.0 の指数分布に従うと仮定する。使用が終わった仮想ネットワーク（ネットワーク資源）は直ちに物理ネットワークに返却される。また、提案方式と性能比較を行うために、従来法として式(6)を使用しない仮想ネットワーク構築アルゴリズムの性能も評価する。

以降では、1000 個のリクエストに対して仮想ネットワークの構築・提供を実施する。

5-1-1 到着率がリクエスト棄却率に与える影響

本節では、リクエストの到着率 λ が仮想ネットワーク構築リクエストの棄却率に与える影響を調査する。図 8 と図 9 はそれぞれ、トポロジ 1 とトポロジ 2 において、到着率 λ がリクエストの棄却率に与える影響を示している。

図 8 は、指標 τ の閾値 τ_{ref} が 110 と 150 の場合の結果を示しており、図 9 は、指標 τ の閾値 τ_{ref} が 300 と 350 の場合の結果を示している。これら 2 つの結果から、到着率 λ によらず提案方式の棄却率が従来法の棄却率よりも小さいことが分かる。また、閾値 τ_{ref} とネットワークトポロジにもよらず、提案法の棄却率の方が小さい。とくに、トポロジ 1 とトポロジ 2 を比較すると、トポロジ 2 でより提案方式が有効となる。これは、トポロジ 2 のロバスト性が元々低かったため、提案法の効果が大きくなったと考えられる。

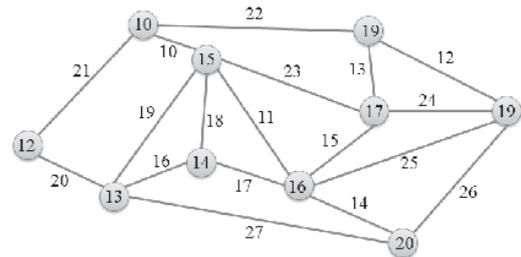


図 6 トポロジ 1

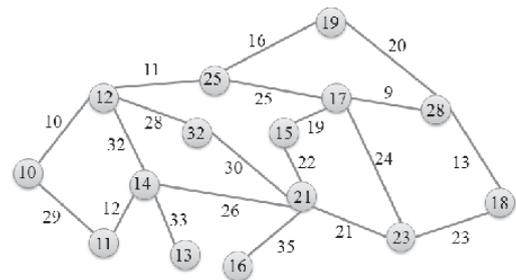


図 7 トポロジ 2

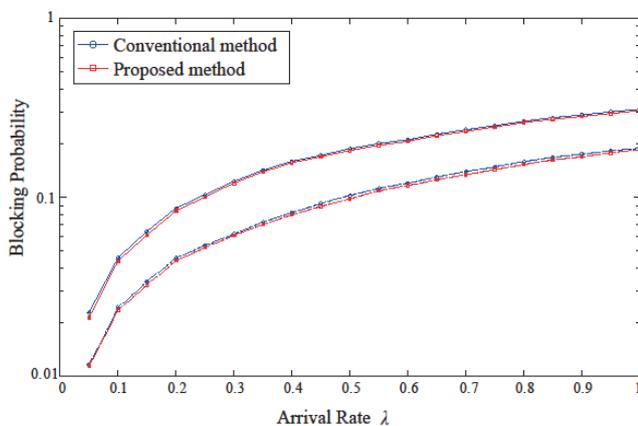


図 8 トポロジ 1 におけるリクエスト棄却率

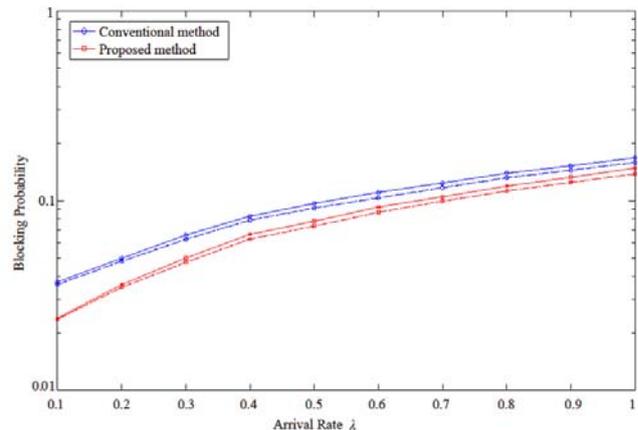


図 9 トポロジ 2 におけるリクエスト棄却率

5-1-2 仮想ネットワークのロバスト性評価

本節では、構築された仮想ネットワークのロバスト性について検討する。

図 10 と図 11 はそれぞれ、トポロジ 1 とトポロジ 2 において、構築された仮想ネットワークの指標 τ の変化を示している。

これらの図から、提案方式によって構築された仮想ネットワークの τ が、従来法の τ よりも到着率および閾値 τ_{ref} によらず、常に小さいことが分かる。さらに、ネットワークトポロジが違うにも関わらず、提案によって構築された仮想ネットワークの方が常にロバストであることがわかる。さらに、仮想ネットワークのロバスト性に関しても、トポロジ 2 において提案法がより効果的であることがわかる。

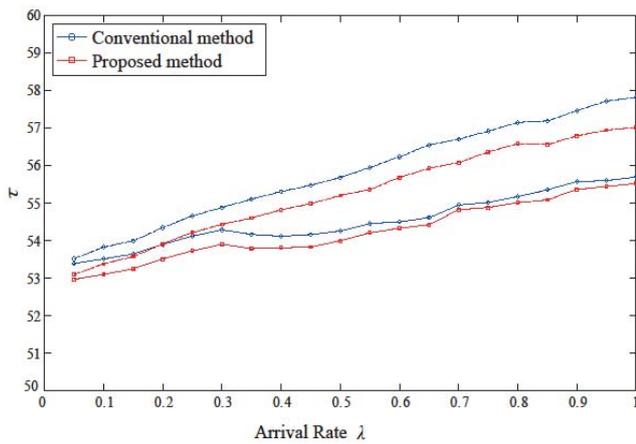


図 10 トポロジ 1 における構築された仮想ネットワークの指標

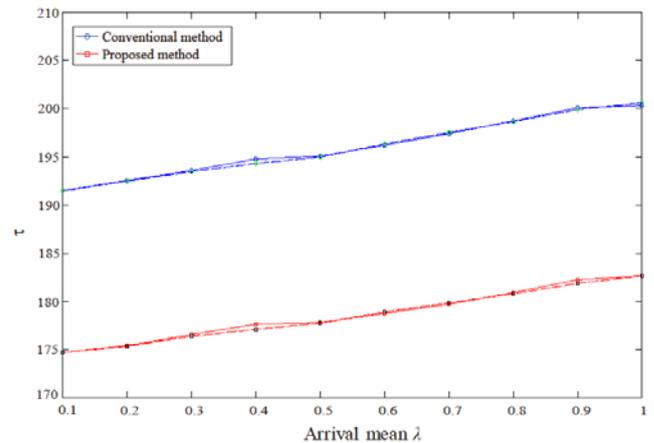


図 11 トポロジ 2 における構築された仮想ネットワークの指標

5-1-3 仮想ネットワークの平均リンク数

最後に、構築された仮想ネットワークの平均リンク数を調査する。図 12 は、トポロジ 1 で構築された仮想ネットワークの平均リンク数を示している。この図から、提案方式と従来法で構築される仮想ネットワークは、平均リンク数がほぼ同じであることがわかる。前節と図 12 から、提案方式で構築される仮想ネットワークは、無駄なネットワーク資源を使用することなくロバスト性が向上しており、提案するトポロジ設計が有効である。

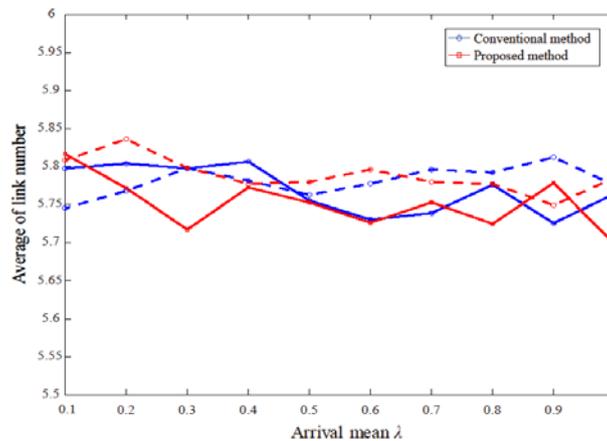


図 12 トポロジ 1 における仮想ネットワークの平均リンク数

5-2 資源割当法

本節では、提案する資源割当法の性能を Matlab を用いたシミュレーションで評価する。さらに、半正定値計画問題のソルバとして SeDuMi を利用する。

5-2-1 トポロジが最適な資源割当に与える影響

最初に、図 13 の 3 つのトポロジに対して、ネットワーク資源がどのように割り当てられるかについて検討する。ここで、各図のノードにはノード番号が示されており、リンクにはリンク距離（ノード間距離）が示されている。

表 1、表 2、および表 3 は、それぞれ、図 13(a)、図 13(b)、図 13(c)のトポロジに対する資源割当の結果を示している。各表において、 w_{ij} がリンク資源を示し、 w_i がノード資源を示している。

表 1 から、トポロジ 1 では、各ノードに対して同じ量の資源が割り当てられることが分かる。一方、表 2

や表3では、ノードによって割り当てられる資源量が異なることがわかる。一般に、接続リンク数の多いノードはトラフィック量が多くなる傾向があるため、多くの資源量を割り当てる必要がある。式(5)を用いたロバスト性の評価では、各ノードの接続リンク数が考慮されている。それゆえ、式(8)の半正定計画問題から最適解を導出する提案方式でも、接続リンクを考慮した資源割当が可能となる。

リンク資源に関しては、最適化問題の制約条件から、リンク距離が大きくなると割り当てられる資源量が少なくなる。そのため、表1や表2において、距離の長いリンクの資源量が少なくなっていることが分かる。しかしながら、表3では、距離が同じであるにもかかわらず、各リンクに割り当てられる資源量が異なっている。これは、ロバスト性の評価時に、リンクの接続形態を考慮しているためである。それゆえ、表3と図13(c)からわかるように、トラフィックの集中しやすいリンクに多くの資源を割り当てることが可能となる。

以上のことから、提案方式を用いることによって、物理ネットワークのロバスト性が向上するようにノード資源とリンク資源を割り当てることが期待できる。

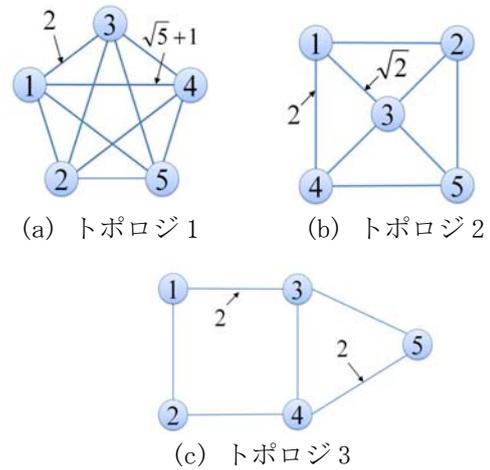


図13 5ノードのトポロジ

表1 トポロジ1の資源割当

リンク			ノード		
資源量	提案方式	ランダム割当	資源量	提案方式	ランダム割当
w_{12}^e	160.0361	98.5275	w_1^v	200	204.9313
w_{13}^e	160.0361	90.1547	w_2^v	200	169.9635
w_{14}^e	86.5024	98.1379	w_3^v	200	265.7939
w_{15}^e	86.5024	101.3844	w_4^v	200	160.8712
w_{23}^e	86.5024	135.5865	w_5^v	200	198.4401
w_{24}^e	86.5024	126.5870			
w_{25}^e	160.0361	95.1160			
w_{34}^e	160.0361	213.9446			
w_{35}^e	86.5024	88.8626			
w_{45}^e	160.0361	111.4350			

表2 トポロジ2の資源割当

リンク			ノード		
資源量	提案方式	ランダム割当	資源量	提案方式	ランダム割当
w_{12}^e	196.3598	201.3917	w_1^v	192.2988	280.6250
w_{13}^e	252.6354	176.4964	w_2^v	192.2988	171.0226
w_{14}^e	196.3598	205.8811	w_3^v	230.8048	220.4596
w_{23}^e	252.6353	225.1521	w_4^v	192.2988	178.7857
w_{25}^e	196.3598	242.1060	w_5^v	192.2988	149.1071
w_{34}^e	252.6353	186.2888			
w_{35}^e	252.6353	226.8377			
w_{45}^e	196.3598	274.4883			

表3 トポロジ3の資源割当

リンク			ノード		
資源量	提案方式	ランダム割当	資源量	提案方式	ランダム割当
w_{12}^e	293.7145	281.6428	w_1^v	187.4894	193.1753
w_{13}^e	377.5857	302.2707	w_2^v	187.4894	185.3341
w_{14}^e	377.5857	282.4413	w_3^v	245.9880	196.1368
w_{23}^e	346.4005	269.0333	w_4^v	245.9880	215.8989
w_{25}^e	302.3567	574.3039	w_5^v	133.0452	209.4549
w_{34}^e	302.3567	290.3081			

5-2-2 ノード数5のトポロジに対するロバスト性評価

次に、図13の5ノードトポロジに対して、本方式を用いた場合のロバスト性評価を行なう。以下では、比較対象として、各ネットワークに資源をランダムに割り当てる方式の性能評価も行なう。ランダム方式によって割り当てられた資源量は、それぞれ表1, 2, 3に示されている（ランダム割当の列を参照）。

表4は、各トポロジに対する物理ネットワークのロバスト性評価指標 τ を示している。この表から、全てのトポロジに対して、提案

表4 物理ネットワークのロバスト性評価

	提案方式	ランダム割当
トポロジ1	1.8782	1.9884
トポロジ2	1.0793	1.1232
トポロジ3	0.6955	0.7324

法の τ がランダム割当の τ よりも小さいことがわかる。指標 τ の値は、ネットワークがロバストであるほど小さくなるため、本方式を用いると、物理ネットワークのロバスト性が向上することがわかる。それゆえ提案方式は、トポロジによらず、仮想ネットワーク構築に適したロバストな物理ネットワークを設計することが可能となる。

5-2-3 NSFNet における仮想ネットワーク受付制御の効果

最後に、提案方式を用いて設計した物理ネットワークに対して、仮想ネットワーク受付制御の効果を調査する。図 14 は NSFnet のトポロジを示しており、各リンクの距離が示されている。このトポロジに対する資源割当の結果が、表 5 と表 6 に示されている。前節で述べたように、提案方式では主に、ノード資源量は接続リンク数に依存し、リンク資源量はリンク距離と接続形態に依存することがわかる。さらに表 7 は、提案方式とランダム割当を用いた場合のロバスト性評価指標 τ を示しており、提案方式を用いると物理ネットワークのロバスト性が向上することがわかる。

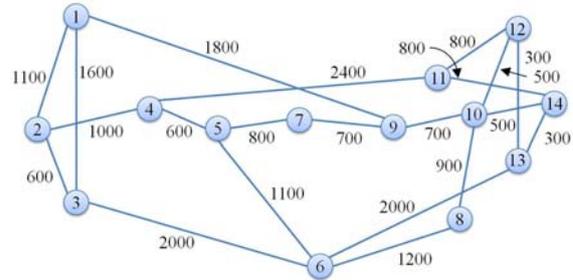


図 14 NSFnet トポロジ

このような NSFnet に対して、仮想ネットワークの構築リクエストが率 λ でポアソン到着すると仮定する。そして、リクエストが許可されて仮想ネットワークが構築されると、ユーザは仮想ネットワークの使用を開始する。ここで、各ユーザの使用時間は平均 1:0 の指数分布に従い、リクエストが棄却された場合には直ちに退去すると仮定する。

表 5 NSFNet のノード資源割当

資源量	提案方式	ランダム割当	資源量	提案方式	ランダム割当
w_1^v	65.8324	77.2198	w_8^v	56.4472	79.4836
w_2^v	72.8841	62.8351	w_9^v	88.5493	38.9497
w_3^v	65.3778	50.8176	w_{10}^v	89.2885	88.1859
w_4^v	78.0067	77.5636	w_{11}^v	65.7490	88.0497
w_5^v	74.1471	77.2685	w_{12}^v	68.9217	68.4125
w_6^v	77.9175	61.3874	w_{13}^v	67.1005	94.2369
w_7^v	60.8565	83.2296	w_{14}^v	68.9217	52.3602

表 6 NSFNet のリンク資源割当

資源量	提案方式	ランダム割当	資源量	提案方式	ランダム割当
w_{12}^e	11.7222	20.0010	w_{613}^e	9.7625	16.4411
w_{13}^e	5.9643	11.5247	w_{79}^e	18.5838	17.8616
w_{19}^e	12.6931	12.9556	w_{810}^e	15.9122	6.3787
w_{23}^e	18.9585	10.6147	w_{910}^e	28.3539	9.4624
w_{24}^e	17.6889	16.0113	w_{1012}^e	22.7978	15.7334
w_{36}^e	10.7328	6.0007	w_{1014}^e	22.7978	11.3296
w_{45}^e	21.5660	20.8746	w_{1112}^e	13.1442	10.0010
w_{411}^e	9.6017	14.2226	w_{1114}^e	13.1442	14.7011
w_{56}^e	14.2528	9.1690	w_{1213}^e	25.3101	14.6706
w_{57}^e	16.0020	12.8126	w_{1314}^e	25.3101	15.7455
w_{68}^e	11.6710	21.6506			

表 7 NSFNet における τ の比較

	提案方式	ランダム割当
τ	115.0409	132.0930

図 15 は、到着率 λ に対する仮想ネットワークのリクエスト棄却率を示している。ここで、各方式の閾値を $\tau_{ref} = 350$ と設定し、到着リクエスト数を 1000 とする。図 15 から、到着率 λ に関わらず、提案方式に対する棄却率が、ランダム割当の棄却率よりも低いことがわかる。したがって、提案方式を用いて物理ネットワークを設計すると、より多くの仮想ネットワークを構築・提供できることがわかる。

図 16 は、構築された仮想ネットワークのロバスト性評価指標 τ を示している。この図から、物理ネットワークの資源割当結果が、構築された仮想ネットワークのロバスト性にほとんど影響を与えないことが分かる。以上のことから、提案方式を用いることで物理ネットワークのロバスト性が向上し、多くの仮想ネットワークをロバスト性を劣化させることなく構築・提供できることがわかる。

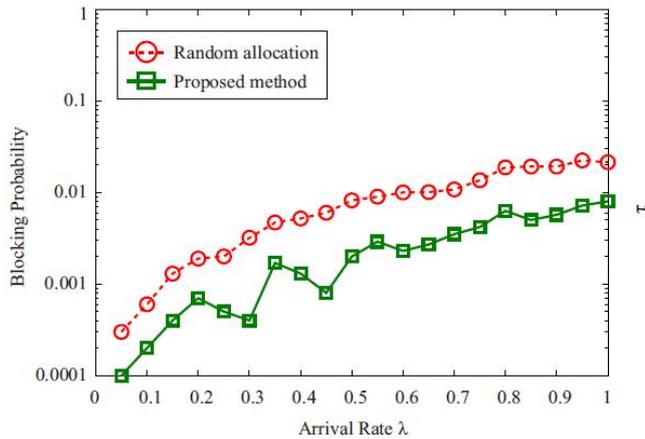


図 15 NSFNet におけるリクエスト棄却率

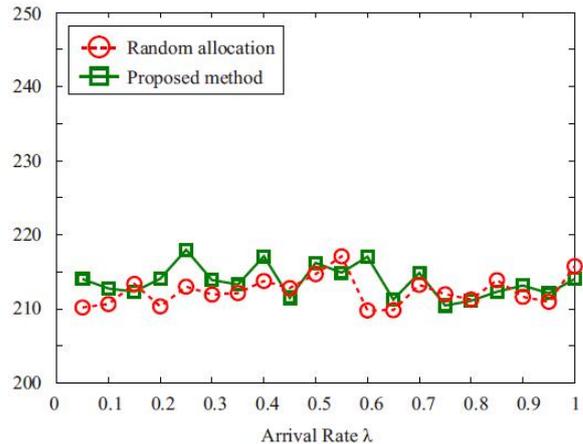


図 16 NSFNet における仮想ネットワークのネットワーククリティカリティ

5-3 トポロジ設計法

本節では、提案するトポロジ設計法の性能を Matlab を用いたシミュレーションで評価する。さらに、半正定値計画問題のソルバとして SeDuMi を利用する。

以下では、図 17 に示された 2 つのネットワークトポロジを考える。ここで、図 17(a) と (b) は、ともにノード数が 5 の場合を示している。図 17(a) のケース 1 では、4 つのノードが正方形の四角に配置され、一つのノードが正方形の中心に配置されている。また、各ノード間の距離は、図 17(a) に示されている。一方、図 17(b) のケース 2 では、5 つのノードが東京、大阪、名古屋、札幌、横浜に対応し、各ノード間の距離は表 8 に示されている。この両方の場合に対して、リンク資源の最大量を $C=3000$ とし、ノード資源の最大量を $D=2000$ とする。

図 18 は、ケース 1 に対する提案法の性能を示している。図 18(a) から、提案方式では、パラメータ ρ によってネットワークのロバスト性とネットワークコストが大きく変化することがわかる。これは、図 18(b) に示されているように、物理ネットワーク内のリンク数が、パラメータ ρ によって変化するからである。

さらに、図 18(c) は、パラメータ ρ に対する τ とネットワークコストの積を示している。この値が小さい時、ネットワークトポロジはロバストでかつ構築コストが小さい。図 18(c) から、 ρ が 0.955 より小さい時、提案方式に対するこの値がランダム設計に対する値よりも小さくなる。また、この図から、最適なパラメータが $\rho=0.528$ であることもわかる。それゆえ、パラメータを最適値に設定することで、提案方式は仮想ネットワークの構築に適した物理ネットワークを設計できることがわかる。

また、図 19 は、ケース 2 に対する性能を示している。図 19 から、提案法に対する τ とネットワークコストの積は、リンク数が減ることによって小さな値になることがわかる。以上のことから、提案方式は、ノード配置によらず物理ネットワークのトポロジ設計に効果的であることが示される。

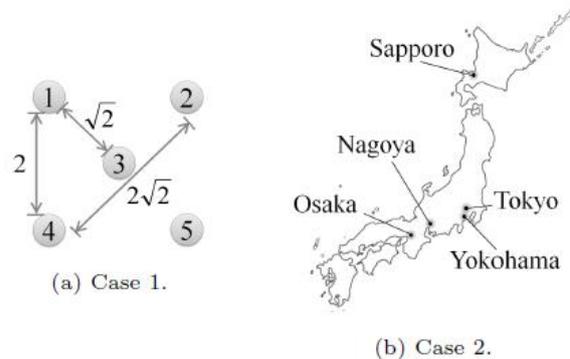


図 17 5 ノードの配置問題

表 8 図 17 の Case 2 に対するノード間距離

	Tokyo	Yokohama	Osaka	Nagoya	Sapporo
Tokyo	0	12.268	246.616	160.853	517.626
Yokohama	12.268	0	239.804	155.242	534.893
Osaka	246.616	239.804	0	86.477	658.646
Nagoya	160.853	155.242	86.477	0	594.844
Sapporo	517.626	534.893	658.646	594.844	0

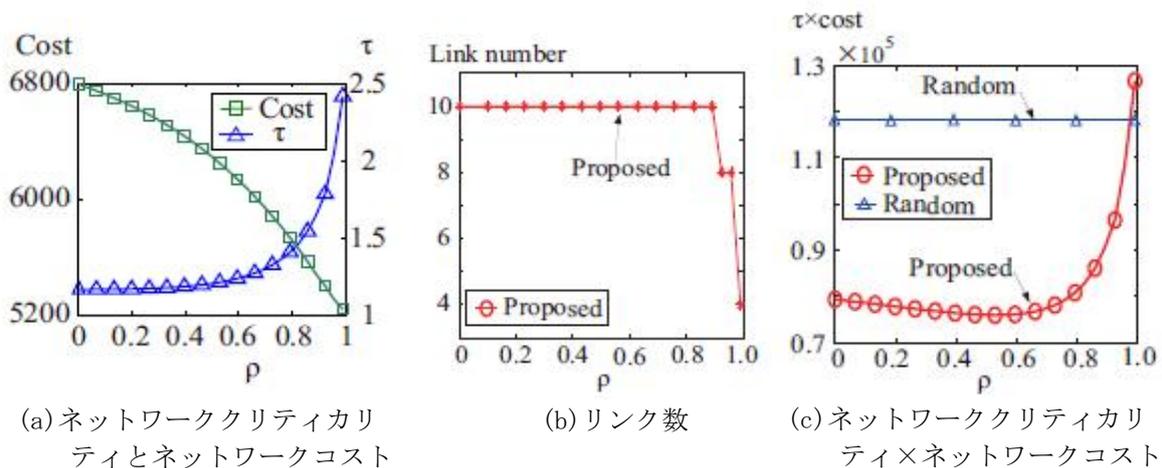


図 18 ケース 1 に対する性能

6 まとめ

本研究では、仮想ネットワークに対するロバスト性を考慮したトポロジ設計法と受付制御技術を提案した。さらに、仮想ネットワーク構築に適した物理ネットワークの資源割当法、および、トポロジ設計法を提案した。そして、様々なネットワークに対する提案方式の性能を、シミュレーションで評価した。性能評価結果から、提案する仮想ネットワークの受付制御法により、通信性能のロバスト性を考慮したネットワーク仮想化が可能になることが分かった。また、資源割当法及びトポロジ設計法を用いることで、仮想ネットワーク構築に適した物理ネットワークを設計することができることが示された。

以上の結果から、将来のネットワーク仮想化技術において、通信性能のロバスト性を考慮可能な本方式が、広く利用されることが期待できる。

【参考文献】

- [1] GENI, <http://www.geni.net/>.
- [2] Emulab - Network Emulation Testbed, <http://www.emulab.net/>.
- [3] PlanetLab, <http://www.planet-lab.org/>.
- [4] A.Haider, R.Potter, and A.Nakao, "Challenges in Resource Allocation in Network Virtualization," in *Proc. the 20th ITC Specialist Seminar on Network Virtualization*, Hoi An, Vietnam, May 2009.
- [5] Y. Zhu and M. Ammar, "Algorithms for Assigning Substrate Network Resources to Virtual Network Components," in *Proc. IEEE INFOCOM 2006*, Apr. 2006, pp. 1-12.
- [6] M. Yu, Y. Yi, J. Rexford, and M. Chiang, "Rethinking Virtual Network Embedding: Substrate Support for Path Splitting and Migration," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 38, no. 2, pp. 17-29, Apr. 2008.
- [7] A.H. Dekker and B.D. Colbert, "Network Robustness and Graph Topology," in *Proc. ACSC 2004*, 2004, pp. 359-368.
- [8] R.S. Gracia, Y. Labit, J.D. Pascual, and P. Owezarski, "Towards an Efficient Service Level Agreement Assessment," in *Proc. IEEE INFOCOM 2009*, Apr. 2009.
- [9] J. Lu and J. Turner, "Efficient Mapping of Virtual Networks onto a Shared Substrate," *Washington University Technical Report*, WUCSE-2006-35, 2006.
- [10] M. Yu, Y. Yi, J. Rexford, and M. Chiang, "Rethinking Virtual Network Embedding: Substrate Support for Path Splitting and Migration," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 38, no. 2, pp. 17-29, Apr. 2008.
- [11] L. Peterson, A. Bavier, M.E. Fiuczynski, and S. Muir, "A Taxonomy of Rerouting in

- Circuit-Switched Networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 37, no. 11, pp. 116-122, Nov.1999.
- [12] M. Fiedler, "Algebraic Connectivity of Graphs," *Czechoslovak Math. Journal*, vol. 23, no. 98, pp. 298-305, 1973.
- [13] A. Tizghadam and A. Leon-Garcia, "Autonomic Traffic Engineering for Network Robustness" *IEEE Journal on Selected Areas in Communication*, vol. 28, no. 1, pp. 1-12, Jan. 2010.
- [14] L.Kou, G. Markowsky, and L. Berman, "A Fast Algorithm for Steiner Trees," *Acta Informatica*, vol. 15, no. 2, pp. 141-145, June 1981.
- [15] D.S. Bernstein. Matrix Mathematics. Princeton University Press, 2005.

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
ロバストな仮想ネットワークを提供するための物理ネットワーク設計法の検討	インターネット技術第 163 委員会 新世代ネットワーク構築のための 基盤技術研究分科会	2011 年 9 月
A Proposed Topology Design and Admission Control Approach for Improved Network Robustness in Network Virtualization	<i>The IEEE Global Communications Conference 2011 (GLOBECOM 2011)</i>	2011 年 12 月
仮想ネットワークの構築に適した物理ネットワークの設計技術の検討	電子情報通信学会技術報告 NS2011-169	2012 年 1 月
Topology Design of Physical Networks for Network Virtualization with Semidefinite Programming,	電子情報通信学会技術報告 NS2011-22	2012 年 3 月