

# トラフィックマトリクスを取りうる範囲を考慮した マルチレイヤトラフィックエンジニアリング

大下 裕一<sup>†</sup> 宮村 崇<sup>††</sup> 荒川 伸一<sup>†††</sup> 塩本 公平<sup>††</sup> 村田 正幸<sup>†††</sup>

<sup>†</sup> 大阪大学 大学院経済学研究科

<sup>†††</sup> 大阪大学 大学院情報科学研究科

<sup>††</sup> 日本電信電話株式会社 ネットワークサービスシステム研究所

E-mail: <sup>†</sup>y-ohsita@econ.osaka-u.ac.jp, <sup>††</sup>{miyamura.takashi,kohei.shiomoto}@lab.ntt.co.jp,

<sup>†††</sup>{arakawa,murata}@ist.osaka-u.ac.jp

あらまし 動的に論理トポロジ・経路の設計を行うことにより、大容量のトラフィックを効率的に転送するマルチレイヤトラフィックエンジニアリング (TE) に関する研究が進められている。従来のマルチレイヤ TE はトラフィックマトリクスが入力として必要とされるが、トラフィックマトリクスを直接観測することは大規模ネットワークでは難しく、リンク使用率等から推定した場合は推定誤差が悪影響を与えてしまう。そこで、本稿では、トラフィックマトリクスを直接観測できないような状況においても、観測されたリンク使用率を元に、トラフィックマトリクスの取りうる範囲を求め、その範囲内のトラフィックマトリクスすべてを考慮に入れることにより、推定誤差の影響を受けずに、マルチレイヤ TE を行う手法を導入する。また、本稿では、TE に影響を与える一部の対地間トラフィックを観測対象として選択・観測することにより、リンク使用率の観測結果が少ない場合であっても、適切な論理トポロジ・経路の設計を行うことができる手法を提案する。シミュレーションにより、提案手法が、正確なトラフィックマトリクスが把握できない場合であっても、適切に観測対象の対地間トラフィックを選択し、最大リンク使用率を削減する論理トポロジ・経路を設計できることを示す。

キーワード トラフィックエンジニアリング、GMPLS、トラフィックマトリクス、Oblivious Routing

## Multi-layer Traffic Engineering Considering All Possible Traffic Matrices Based on Monitored Link Loads

Yuichi OHSITA<sup>†</sup>, Takashi MIYAMURA<sup>††</sup>, Shin'ichi ARAKAWA<sup>†††</sup>, Kohei SHIOMOTO<sup>††</sup>, and  
Masayuki MURATA<sup>†††</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Economics, Osaka University

<sup>†††</sup> Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

<sup>††</sup> NTT Network Service Systems Laboratories

E-mail: <sup>†</sup>y-ohsita@econ.osaka-u.ac.jp, <sup>††</sup>{miyamura.takashi,kohei.shiomoto}@lab.ntt.co.jp,

<sup>†††</sup>{arakawa,murata}@ist.osaka-u.ac.jp

**Abstract** Multilayer traffic engineering (TE) is one efficient way for accommodating traffic that fluctuates unpredictably, which optimizes resource usage by dynamically reconfiguring the VNT (virtual network topology). However, the traffic matrices, which are required by the existing multilayer TE, are hard to monitor directly. Though several methods to estimate traffic matrices are proposed, the estimated traffic matrices include estimation errors. In this paper, we introduce a method which can efficiently reconfigure the VNT without the impact of estimation errors even when we cannot monitor traffic matrices directly. In this method, we reconfigure the VNT considering all possible traffic matrices based on the monitored link loads. Moreover, we propose a method which select and monitor a small number of end-to-end traffic to add the efficient measurement for the VNT reconfiguration. In this paper, we evaluate our method by simulation to show that our method can select and monitor end-to-end traffic effectively to reconfigure the VNT without high link utilizations.

**Key words** Traffic engineering, GMPLS, Traffic matrix, Oblivious Routing

## 1. はじめに

近年、Peer-to-Peer や Video-on-Demand 等の様々なアプリケーションが普及し、トラヒックの時間変化が大きくなっている。そのようなトラヒックを適切に収容するため、ネットワークの構成を各時刻のトラヒックに合わせて変更する手法が必要とされている。このような各時刻のトラヒックに合わせてネットワークの構成を変更する手法は、トラヒックエンジニアリング (TE) と呼ばれ、様々な研究が行われている [1-4]。中でも、光ネットワーク上でネットワークを仮想化する技術を用い、論理トポロジと論理トポロジ上の経路をあわせて最適化する、マルチレイヤトラヒックエンジニアリングは、大容量のトラヒックを効率的に転送する手法として期待されている [2-4]。これらの手法では、対地間のトラヒック量をあらず、トラヒックマトリクスを入力として用いることにより、そのトラヒックに適した論理トポロジ・経路の設計を行う。

しかしながら、すべての対地間トラヒックを直接観測することは、スケーラビリティの問題や、ネットワーク機器に負荷をかけてしまうといった問題があり、難しい。そこで、より観測が容易な各リンクを流れるトラヒック量からトラヒックマトリクスを推定する手法に関する研究が進められている [4,5]。しかしながら、推定されたトラヒックマトリクスを用いた TE では、推定誤差の影響を受けてしまい、必要な箇所に資源を十分に配置することができず、輻輳を回避できない、あるいは、新たに輻輳を発生させてしまう等、適切な TE を行うことができない可能性がある。

そのため、適切な TE を行うには、トラヒックマトリクスの推定誤差を考慮する必要がある。トラヒックマトリクスの推定誤差を考慮する一つの方法として、TE とトラヒックマトリクス推定が連携し、推定誤差を削減しつつ、段階的に論理トポロジ・経路を移行する手法が提案されている [4]。しかしながら、ネットワークが大規模になり、観測可能なリンク数が対地間トラヒックの本数に対して極めて少ない場合、十分に推定誤差を削減し、適切なトポロジが構築されるまで、多くの経路変更が要求される可能性や、誤差が削減されるまでは、不適切なトポロジが構築されてしまう可能性がある。

トラヒックマトリクスを正確に把握できない場合であっても不適切な論理トポロジ・経路が構築されてしまうことを防ぐには、トラヒックマトリクスの取りうる範囲を考慮して論理トポロジ・経路を設計する手法が必要となる。トラヒックマトリクスの取りうる範囲を考慮して経路設計を行う手法は、Oblivious Routing と呼ばれ、さまざまな研究がおこなわれている [6-9]。本稿では、Oblivious Routing で行われているトラヒックの取りうる範囲の考慮を、経路設計のみならず、論理トポロジの設計も同時に行うマルチレイヤ TE に対して導入する。具体的には、現在観測されているトラヒック量を条件として用い、取りうるトラヒックマトリクスをすべて考慮に入れた上で、最大リンク使用率の最悪値が閾値以下となる論理トポロジ・経路の設計を行うことにより、リンク使用率が高くなり輻輳が発生することを防ぐ。

しかしながら、トラヒックの取りうる範囲の考慮を TE に取り入れるのみでは、観測できるリンクの本数が対地間トラヒックの本数に対して著しく小さい大規模ネットワークにおいては、トラヒックマトリクスの取りうる範囲が広がってしまい、その結果、リンク使用率の最悪値を十分に削減できず、輻輳を回避しきれない可能性がある。

そこで、本稿では、観測可能なリンクの本数が著しく小さい場合であっても、適切に論理トポロジ・経路設計が行えるように、マルチレイヤ TE を考慮したトラヒックの観測を行う手法についても提案する。この手法では、現在得られているトラヒック観測結果を元に、TE にとって最も有用であると考えられる一部の対地間トラヒックを選択し、直接観測を行う。そして、直接観測された対地間トラヒックもあわせて論理トポロジ・経路設計に用いることにより、適切な論理トポロジ・経路の設計を行う。

以下、2. において、トラヒックマトリクスの取りうる範囲を考慮した論理トポロジ・経路を設計する手法について述べ、3. において、論理トポロジ・経路設計を考慮した観測手法について述べる。そして、4. で評価を行い、5. でまとめを述べる。

## 2. トラヒックマトリクスの取りうる範囲を考慮した論理トポロジ・経路設計手法

本稿では、論理トポロジ上の各リンク（以下、光パスと呼ぶ）を流れるトラヒック量が観測可能という条件において、観測されたトラヒック量を元に、現在のトラヒックを適切に収容できるよう論理トポロジを再構成するという考えを考へる。各光パス上で観測されたトラヒック量をあらず行列を  $X$  とし、トラヒックマトリクスを  $T$  とおく。そして、光パス上のルーティングを表す行列を  $A$  とおくと、以下の関係が成り立つ。

$$X = AT \quad (1)$$

これを利用し、式 (1) が成り立つすべてのトラヒックマトリクスに対して、リンク使用率の最悪値が閾値  $T_H$  以下となるような経路・論理トポロジの設計を行う。本稿においては、論理トポロジ・経路の設計は定期的に行われるものとする。また、論理トポロジ・経路の計算負荷の削減のため、[3] と同様、一度に追加・削除される光パスの本数を制限する。具体的には、現在の最大リンク使用率が閾値よりも高い場合は、一度に追加される光パスの本数を制限した上で、光パスの追加のみを行い、リンク使用率の最小化、輻輳の回避を試みる (2.2)。また、リンク使用率が閾値を下回る場合は、リンク使用率が閾値以下になるという条件下で、使用波長資源数を最小化するように論理トポロジの設計を行い、波長資源の解放を行う (2.3)。

以下、論理トポロジ再構成の方法について、線形計画問題として定式化を行う。

### 2.1 定数・変数

a) 入力として与えられる定数

- トラヒック量の観測結果  $X$

-  $X_m$  は  $X$  の  $m$  番目に対応する値

- トラヒック量観測時の論理トポロジ上のルーティング  $A$ 
  - $A_{s,d,m}$  は  $A$  の対地間トラヒック  $s,d$  の  $m$  番目の制約に対応する値
- 再構成前の光パス  $V$ 
  - $V_{i,j,q}$  は  $ij$  間に  $q$  本目の光パスが構築されていれば 1、それ以外は 0
- 物理トポロジ (各ノード間の波長数)  $P$ 
  - $P_{i,j}$  は  $ij$  間に存在する物理リンクの波長数
- 再構成前の論理トポロジ上のルーティング  $F$ 
  - $f_{i,j,q}^{s,d}$  は  $ij$  間の  $q$  本目の光パスを経由する  $sd$  間のトラヒックの割合
- 最大リンク使用率の閾値  $T_H$
- 一度に追加可能な光パスの本数の上限  $N$
- 光パス一本あたりに用いられる波長資源数の上限  $W$

b) 変数:

- 再構成後の光パス  $V'$ 
  - $V'_{i,j,q}$  は  $ij$  間に  $q$  本目の光パスが構築されていれば 1、それ以外は 0
- 再構成後の光パスの経路  $p'$ 
  - $p'_{a,b}{}^{i,j,q}$  は  $ij$  間の  $q$  本目の光パスが  $a,b$  間の物理リンクを経由する場合は 1、それ以外は 0
- 再構成後の論理トポロジ上のルーティング  $F'$ 
  - $f'_{i,j,q}{}^{s,d}$  は  $ij$  間の  $q$  本目の光パスを経由する  $sd$  間のトラヒックの割合

## 2.2 現在の最大リンク使用率が閾値 $T_H$ 以上の場合

最大リンク使用率が閾値  $T_H$  を超える場合は、以下の線形計画問題を解き、輻輳の回避を行う。

c) 制約条件

制約条件 1 再構成後の光パス  $V'$  が、すべて物理トポロジ  $P$  に収容可能である。

制約条件 2 再構成前の光パス  $V$  は、再構成後も構築されたままである。

$$\bullet \forall i, j, q: V'_{i,j,q} \geq V_{i,j,q}$$

制約条件 3 追加された光パスの本数は  $N$  本以下である。

$$\bullet \sum_{i,j,q} V'_{i,j,q} - V_{i,j,q} \leq N$$

制約条件 4 観測結果から想定されるトラヒックマトリクスすべてについて、最大リンク使用率が  $M$  以下である。ただし、 $M$  は変数とする。

$$\bullet \forall i, j, q: C_{i,j,q}(F') < M$$

• ただし、 $C_{i,j,q}(F')$  は、取りうるすべてのトラヒックマトリクスを用いて計算された、ルーティングが  $F'$  の場合の  $ij$  間の  $q$  番目の光パスを経由するトラヒック量の最大値とする。

制約条件 5 追加する 1 本の光パスにより、大量の波長資源が用いられることを防ぐために、光パス 1 本あたりに用いられる波長資源を  $W$  以下とする。

$$\bullet \forall i, j, q: \sum_{a,b} p'_{a,b}{}^{i,j,q} \leq W$$

d) 目的関数

• 取りうる最大リンク使用率の最小化

*minimize*  $M$

## 2.3 リンク使用率が閾値 $T_H$ 未満の場合

最大リンク使用率が閾値  $T_H$  より小さい場合は、以下の線形計画問題を解き、使用している波長資源の解放を行う。

e) 制約条件

制約条件 i 再構成後の光パス  $V'$  が、すべて物理トポロジ  $P$  に収容可能である。

制約条件 ii 再構成後に新たに追加される光パスは存在しない。

$$\bullet \forall i, j, q: V'_{i,j,q} \leq V_{i,j,q}$$

制約条件 iii 観測結果から想定されるトラヒックマトリクスすべてについて、最大リンク使用率が  $T_H$  以下である。

$$\bullet \forall i, j, q: C_{i,j,q}(F') < T_H$$

f) 目的関数

• 使用される波長資源の最小化

$$\text{minimize } \sum_{i,j,q,a,b} p'_{a,b}{}^{i,j,q}$$

## 2.4 $C_{i,j,q}(F')$ の定め方

上記の定式化において、 $C_{i,j,q}(F')$  は、 $ij$  間の  $q$  番目の光パスを経由するトラヒック量の最大値である。これは、以下の線形計画問題の答えとして定めることが可能である。

g) 目的関数

• 取りうるトラヒックマトリクスの範囲において、 $ij$  間の  $q$  番目の光パスを経由するトラヒック量を最大化

$$- C_{i,j,q}(F') = \text{maximize } \sum_{s,d} t_{s,d} f'_{i,j,q}{}^{s,d}$$

h) 制約条件

制約条件 a トラヒックマトリクスが式 (1) を満たす。

$$\bullet \forall m: \sum_{s,d} d A_{s,d,m} t_{s,d} = X_m$$

制約条件 b トラヒックマトリクスの要素はすべて正である。

$$\bullet \forall s, d: t_{s,d} \geq 0$$

$C_{i,j,q}(F')$  を計算する上述の最適化問題を経路設計問題を合わせてひとつの線形計画問題として解く手法が [6] において提案されている。そこで、本稿においても、この手法を適用し、 $C_{i,j,q}(F')$  を計算と論理トポロジ・経路の設計問題を合わせてひとつの線形計画問題として解くものとする。

## 3. 論理トポロジ・経路設計手法を考慮した対地間トラヒック観測手法

上記の論理トポロジ・経路設計手法では、取りうるすべてのトラヒックマトリクスに対して、リンク使用率が閾値以下となるような経路設計を行うことを試みている。しかしながら、観

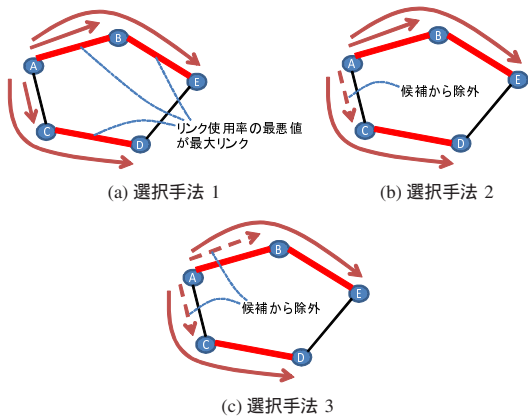


図1 各選択手法で観測対象の候補となる対地間トラヒック

測されている条件数が不十分な場合は、トラヒックマトリクスを取りうる範囲が広く、リンク使用率を閾値以下まで削減することができない場合がある。その場合、新たな観測結果を追加することにより、トラヒックマトリクスを取りうる範囲を削減することが必要であると考えられる。そこで、本稿では、一部の対地間トラヒックについて、Netflow等を用いて直接観測可能であるという状況を考え、直接観測された対地間トラヒック量と、リンク使用率双方をトラヒックマトリクスに対する条件として用いる。論理トポロジ・経路設計手法にとって効果的な対地間トラヒックのみ、直接観測する対象とすることにより、ルータやネットワークの負荷を増大させることなく、適切に論理トポロジ・経路を設計する際に必要な情報を収集することが可能となる。

以降、本節では、直接観測する対地間トラヒックを選択する手法について検討を行う。

### 3.1 対地間トラヒックの取りうる範囲の大きさのみを考慮した手法 (選択手法 1)

トラヒックマトリクスを取りうる範囲を考慮したTEでは、現在観測されているリンク使用率から正確にトラヒック量を把握できていない対地間トラヒックに対しては、多めに帯域が確保され、必要な箇所に資源を分配する妨げとなる可能性がある。そこで、現在観測されている対地間トラヒックに関する条件から、対地間トラヒックの取りうる範囲を定めた場合に、その範囲が最も大きい対地間トラヒックを観測対象として選択するという手法が考えられる。最も取りうる範囲が大きい対地間トラヒックは、以下の手順によって定めることができる。

- 各対地間トラヒック  $l$  について、
  - 対地間トラヒック  $l$  の取りうる範囲の最大  $M_l$  を線形計画法により求める
  - 対地間トラヒック  $l$  の取りうる範囲の最小  $m_l$  を線形計画法により求める
- $M_l - m_l$  が最大の対地間トラヒックを観測対象の対地間トラヒックとして定める

### 3.2 最大リンク使用率を経由する箇所のみを観測対象の候補とする手法 (選択手法 2)

手法 1 では、対地間トラヒックの取りうる範囲が広い箇所を

観測対象として選択する。しかしながら、取りうる範囲が広い対地間トラヒックであっても、その対地間トラヒックが、論理トポロジ・経路設計後に、取りうるすべてのトラヒックマトリクスを元に計算されたリンク使用率の最悪値が最大となる箇所を経由せず、資源に余裕がある箇所のみを経由している場合であれば、論理トポロジ・経路設計に影響を与えない。

そこで、選択手法 2 では、以下の手順により、論理トポロジ・経路設計を行った上で、設計後の各リンク使用率の最悪値を求め、リンク使用率の最悪値が最大となる箇所を経由している対地間トラヒックの中から、観測対象の対地間トラヒックを選択する。なお、各リンク使用率の最悪値は、現在の観測結果と設計した論理トポロジ・経路から線形計画法で定めることができるため、以下の手順において、実際に論理トポロジ・経路を変更する必要はない。

*Step 1* 現在得られている条件を用いて、リンク使用率の最悪値を最小化するように経路・論理トポロジの設計を行う。

*Step 2* *Step 1* の経路において、リンク使用率が最大となるリンクを経由していない対地間トラヒックは観測対象の候補から除外する。

*Step 3* 観測対象の候補に対して、手法 1 を適用し、最も取りうる範囲の広い対地間トラヒックを選択する。

選択手法 1 と、選択手法 2 の違いは、トラヒックの取りうる範囲の大きさを基準にする前に、観測対象の候補を絞り込むという点にある。図 1(a)、図 1(b) に、選択手法 1、選択手法 2 において、観測対象の候補となる対地間トラヒックの例を示す。図は、観測されたリンク使用率を用いて仮計算した論理トポロジ・経路を示し、うち、リンク使用率の最悪値が最大となったリンクを太線でしめしている。そして、図中では、対地間トラヒックのうち、ノード A が発ノードとなっている対地間トラヒックを示し、実線矢印が観測対象の候補として含まれるトラヒック、点線矢印は観測対象の候補外のトラヒックである。図に示すように、手法 1 では、すべての対地間トラヒックが候補に含まれる。それに対して、手法 2 では、対地間トラヒックのうち、リンク使用率の最悪値を経由するトラヒックのみが候補となり、その候補の中から観測対象の対地間トラヒックが選択される。

### 3.3 トラヒックの迂回可能性を考慮する手法 (選択手法 3)

論理トポロジ・経路の設計後、リンク使用率の最悪値が最大となるリンクが複数ある場合、リンク使用率の最悪値が最大となるリンクのうち、1 箇所のみに影響を与えるトラヒックよりも、より多くの箇所に影響をあたえる対地間トラヒックの方が、TE に与える影響がより大きいと考えられる。そこで、リンク使用率の最悪値が最大のリンクのうち、より多くのリンクに影響を与える対地間トラヒックを観測対象として選択する手法の検討を行う。

ある対地間トラヒックの取りうる範囲の削減が与える影響としては、(1) 観測結果追加前に設計された論理トポロジ・経路と比べて、その対地間トラヒックが経由しているリンクの使用率の最悪値を削減できる、(2) リンク使用率の最悪値が削減されたリンクへ、リンク使用率が高い他の箇所を経由していた対地間トラヒックを移設することができる、という 2 つの影響があ

る。ここでは、(2)の影響を考え、ある対地間トラヒックの観測により移設される可能性がある対地間トラヒックの組み合わせを求め、それによりリンク使用率の最悪値が削減される可能性のあるリンクの本数が多い箇所を観測対象として選択する。

まず、ある対地間トラヒックの観測により、経路変更の可能性がある対地間トラヒックの集合を求める。経路変更の可能性がある対地間トラヒックとは、観測結果追加前に設計された論理トポロジ・経路において、観測候補の対地間トラヒックが経由していたリンクのリンク使用率の最悪値を削減することにより、リンク使用率の最悪値が最大となるリンクを経由せずに送信元から宛先まで到着可能な経路が新たに発生する対地間トラヒックである。

本手法では、推移閉包を用いて、各対地間トラヒックを観測した場合に、経路変更の可能性がある対地間トラヒックを抽出する。推移閉包とは、到達可能性を表した行列であり、その要素  $L_{a,b}$  は、 $a$  から  $b$  へ到達することが可能である場合に 1、不可能な場合に 0 となる。ウォーシャルの手法により、グラフの隣接関係から推移閉包を容易に求めることが可能である。以下、 $ij$  間の対地間トラヒックを観測した場合の経路変更の可能性がある対地間トラヒックの抽出方法について述べる。

まず、現在得られている観測結果を用いて、リンク使用率の最悪値を最小化するような経路・論理トポロジの設計を行う。そして、その設計された論理トポロジ上のリンクのうち、リンク使用率の最悪値が最大となるリンクを取り除いた隣接関係を定め、推移閉包  $L$  を求める。そして、 $ij$  間の対地間トラヒックが経由しているリンクのうち、リンク使用率の最悪値が最大となるリンクの両端のノードの隣接関係を追加し、推移閉包  $L'$  を求める。 $L' - L$  のうち、1 となる要素は、 $ij$  間のトラヒックの観測により、リンク使用率が最大となる箇所を経由しない経路が新たに存在するようになった箇所である。

さらに、リンク使用率の最悪値が最大の箇所を経由しない経路が新たに存在するようになった対地間トラヒックの移設の影響を受ける箇所についても同様に考慮を行う。つまり、 $L' - L$  のうち 1 となる要素に対応する対地間トラヒックが経由していたリンク使用率の最悪値が最大となるリンクの両端のノードの隣接関係を追加した上で、再度推移閉包を求め、 $L'$  を更新する。上記の手順を  $L'$  が変化しなくなるまで行う。そして、最終的に  $L' - L$  のうち要素が 1 となる対地間トラヒックの集合が  $ij$  間の対地間トラヒックの観測により経路が変更となる可能性のある対地間トラヒックの集合となる。

そして、このようにして求めた対地間トラヒックの集合により、経由されているリンク使用率の最悪値が最大となるリンクの本数が最も大きい対地間トラヒックを観測対象として選択する。また、該当する対地間トラヒックが複数存在する場合は、手法 1 を適用し、該当する対地間トラヒックのうち、取りうるトラヒック量の範囲が最も大きいものを観測対象として選択する。これにより、一箇所の観測で、より多くの箇所のリンク使用率の最悪値を削減できる対地間トラヒックを観測対象として選択することができる。

選択手法 2 と、選択手法 3 の違いは、トラヒックの取りうる

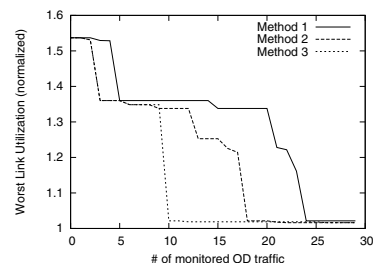


図 2 リンク使用率の最悪値 (ランダムに選択した対地間トラヒックを増加)

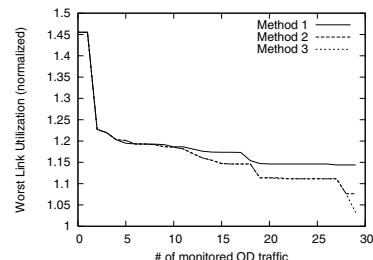


図 3 リンク使用率の最悪値 (特定のノード宛の対地間トラヒックを増加)

範囲の大小を基準にする前に、観測対象の候補を絞り込む方法である。図 1(a)、図 1(b)と同様、図 1(c)に、選択手法 3 において、観測対象の候補となる対地間トラヒックの例を示す。図に示したように、手法 3 では、提案手法 2 よりもさらに候補は絞り込まれ、A-B 間のトラヒックは観測対象の候補から外されている。これは、A-B 間のトラヒックの取りうる範囲を削減しても、C-D 間のトラヒックや B-E 間のトラヒックを移設させることができる新たな経路は生じず、他のリンク使用率の最悪値に影響を与えないためである。

## 4. 評価

本節では 3. で述べた 3 種類の観測対象選択手法の比較を行い、TE にとって効果的な観測対象を選択することができる手法を明らかにする。本評価では、物理トポロジとして、Abilene のバックボーントポロジ (11 ノード、14 リンク) を用い、各物理リンクあたりの最大波長数は 16 と設定した。また、初期状態の論理トポロジ・経路は、対数正規分布に従った乱数で生成された初期トラヒックに対して、リンク使用率を  $T_H = 0.5$  以下とするという条件下で使用波長数を最小化して得られたものを用いる。そして、TE を行う際のトラヒックは、(1) 初期トラヒックのうち、ランダムに選択された 3 本の対地間トラヒックを急増させる、(2) 初期トラヒックのうち、宛先ノードをランダムに選択し、選択された宛先ノード宛の対地間トラヒックのうち、ランダムに選択された 3 本のトラヒックを急増させる、(3) 初期トラヒックに依存せず、対数正規分布で新たに生成する、の 3 種類を用いた。また観測対象として選択された対地間トラヒックについては、直接観測により、正確なトラヒック量が把握可能であるとする。TE を行う際には、2. の定式化を用い、光パスを 1 本のみ追加可能という条件で、リンク使用率の最悪値を最小化するように、論理トポロジ・経路を設計した。

結果を図 2 から図 4 に示す。図では、横軸は追加された対地

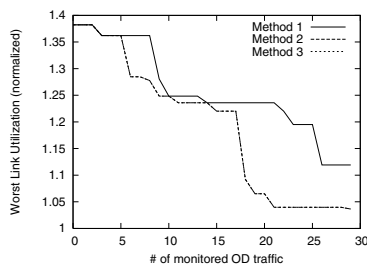


図4 リンク使用率の最悪値 (乱数でトラフィックを組み替え)

間トラフィックの観測結果の数を示し、縦軸は、正確なトラフィックマトリクスを用いて論理トポロジ・経路設計を行った場合の最大リンク使用率が1となるように正規化したリンク使用率の最悪値を示す。また、横軸が0の箇所は、観測されたリンク使用率のみをトラフィックマトリクスに対する条件として用いて論理トポロジ・経路を設計した場合を表す。図より、リンク使用率のみをトラフィックに対する条件として用いた場合では、真の対地間トラフィック量を元に最適化を行った場合と比較して、リンク使用率の最悪値が1.5倍以上と著しく高くなる場合も存在することが分かる。これは、[8]の結果よりも大きな値となっているが、本稿では光パスの追加・削除についても考えており、対地間トラフィック量の取りうる範囲の大きさが経路設計のみならず、トポロジにも影響を与えるため、対地間トラフィック量の取りうる範囲の大きさの影響が大きくなっていることが原因であると考えられる。また、観測箇所を追加するにつれ、リンク使用率の最悪値は著しく削減可能である。つまり、観測箇所を選択して、観測結果をトラフィックマトリクスに対する条件として追加することは、リンク使用率の最悪値を保証するようなマルチレイヤTEを行うにあたり、有効であると考えられる。

同じ本数の対地間トラフィックを観測した場合を考えると、選択手法1が最もリンク使用率の最悪値が高くなっている。これは、トラフィックの取りうる範囲が大きい対地間トラフィックであれば、TE後にリンク使用率の最悪値が最大となるような箇所を経由しないトラフィックであっても観測対象として選択してしまい、リンク使用率の最悪値の削減に貢献できないためである。

また、手法2と手法3の比較を行うと、リンク使用率の最悪値は同程度、あるいは、手法3の方が小さくなっていることが分かる。リンク使用率の最悪値が同程度となっている場合は、リンク使用率の最悪値が最大となるリンクが数本程度しななく、多くの箇所に影響を与える対地間トラフィックが存在せず、手法3と手法2では、同一の対地間トラフィックが観測対象として選択されている。それに対して、リンク使用率の最悪値が最大となるリンクが多数存在する場合は、手法3では、リンク使用率の最悪値が最大となるすべてのリンクに影響を与える対地間トラフィックが観測対象として選ばれるのに対して、手法2では、一部のリンクにしかな影響を与えない対地間トラフィックであっても、その対地間トラフィックの取りうる範囲が大きければ観測対象として選択されてしまう。その結果、手法2を用いた場合、リンク使用率の最悪値を削減するには、より多くの対地間トラフィックの観測が必要となる。つまり、少ない観測で、TE後のリンク使用率の削減を行うには、トラフィックの迂回の可能

性を考えた上で、観測が影響を与えるリンクの本数が多い箇所を観測対象とする手法3が有効であると考えられる。

## 5. まとめ

本稿では、トラフィックマトリクスを直接観測できないような状況においても、観測されたリンク使用率を元に、トラフィックマトリクスの取りうる範囲を求め、その範囲内のトラフィックマトリクスすべてを考慮に入れることにより、推定誤差の影響を受けずに、マルチレイヤTEを行う手法を導入した。また、TEに影響を与える一部の対地間トラフィックを観測対象として選択・観測することにより、リンク使用率の観測結果が少ない場合であっても、適切な論理トポロジ・経路の設計を行うことができる手法を提案した。

本稿では、観測対象の対地間トラフィックを選択する手法として、(1)推定誤差の大きさのみを考慮した手法、(2)最大リンク使用率を経由する箇所のみを観測対象の候補とする手法、(3)トラフィックの迂回可能性を考慮する手法の3種類の手法を提案し、シミュレーションにより比較を行った。その結果、トラフィックの迂回可能性を考慮して、観測箇所を選択する手法が最も少ない観測で、効率的にTE後のリンク使用率の最悪値の削減を行うことができることがわかった。

今後の課題としては、大規模なネットワークでトラフィックマトリクスの取りうる範囲を考慮したTEを行うことを可能とする発見的な手法、対地間トラフィックを直接観測できない場合であっても適切にトラフィックマトリクスの取りうる範囲を削減できるように、論理トポロジ・経路変更を行いつつ観測を行い、その結果を論理トポロジ再構成に反映させる手法が挙げられる。

## 文 献

- [1] B. G. Jozsa, D. Orincsay, and L. Tamasi, "Multi-hour design of dynamically reconfigurable MPLS networks," in *Proceedings of Networking 2004*, pp. 502–503, May 2004.
- [2] K. Shiimoto, E. Oki, W. Imajuku, S. Okamoto, and N. Yamanaka, "Distributed virtual network topology control mechanism in GMPLS-based multiregion networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 21, pp. 1254–1262, Oct. 2003.
- [3] A. Gencata and B. Mukherjee, "Virtual-topology adaptation for WDM mesh networks under dynamic traffic," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 11, pp. 236–247, Apr. 2003.
- [4] Y. Ohsita, T. Miyamura, S. Arakawa, S. Ata, E. Oki, K. Shiimoto, and M. Murata, "Gradually reconfiguring virtual network topologies based on estimated traffic matrices," in *Proceedings of INFOCOM 2007*, pp. 2511–2515, May 2007.
- [5] Y. Zhang, M. Roughan, N. Duffield, and A. Greenberg, "Fast accurate computation of large-scale IP traffic matrices from link loads," in *Proceedings of ACM SIGMETRICS 2003*, pp. 206–217, June 2003.
- [6] D. Applegate and E. Cohen, "Making routing robust to changing traffic demands: algorithms and evaluation," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 14, pp. 1193–1206, Dec. 2006.
- [7] H. Wang, H. Xie, L. Qiu, Y. R. Yang, Y. Zhang, and A. Greenberg, "Cope: Traffic engineering in dynamic networks," in *Proceedings of ACM SIGCOMM*, Sept. 2006.
- [8] I. Juva, "Robust load balancing," in *Proceedings of IEEE Globecom 2007*, pp. 2708–2713, Nov. 2007.
- [9] H. Agrawal, A. Jennings, M. Gregory, and D. Channa, "Robust routing," in *Proceedings of Seventh IEEE/ACIS International Conference on Computer and Information Science*, pp. 695–700, May 2008.