

## 確率的モデル予測制御に基づくトラフィックエンジニアリング

大歳 達也<sup>†</sup> 大下 裕一<sup>†</sup> 村田 正幸<sup>†</sup> 高橋 洋介<sup>††</sup> 石橋 圭介<sup>††</sup>  
塩本 公平<sup>††</sup> 橋本 智昭<sup>†††</sup>

<sup>†</sup> 大阪大学 大学院情報科学研究科 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-5

<sup>††</sup> 日本電信電話株式会社 NTT ネットワーク基盤技術研究所 〒180-8585 東京都武蔵野市緑町 3-9-11

<sup>†††</sup> 大阪大学 大学院基礎工学研究科 〒560-8531 大阪府豊中市待兼山町 1-3

E-mail: †{t-otoshi,y-ohsita,murata}@ist.osaka-u.ac.jp,

††{takahashi.yousuke,ishibashi.keisuke,shiomoto.kohei}@lab.ntt.co.jp, †††thashi@sys.es.osaka-u.ac.jp

あらまし 時間変動の大きなトラフィックを収容するには、トラフィックの時間変動やネットワークの状態変化に対して動的に経路を変更するトラフィックエンジニアリング (TE; Traffic Engineering) と呼ばれる手法が有効である。しかし、各時刻のトラフィック量のみを考慮した TE では、変動への応答の遅れや、大規模な経路変更の頻発を生じ、トラフィックを安定して収容することができない。そのため、動的な TE を行う際にも、将来にわたるトラフィック変動を予測し、それを踏まえた制御が必要となる。しかしながら、どのようなトラフィック予測手法を用いてもその値には誤差が含まれており、単純に予測値に基いて計算した経路では輻輳を生じる可能性がある。本稿では、確率的モデル予測制御 (SMPC; Stochastic Model Predictive Control) に基づき、予測誤差の分布が与えられた場合に、誤差によって輻輳が生じる確率を所望の値以下に保つ TE 手法を検討する。そして、実ネットワークのトラフィックトレースを用いたシミュレーション評価により、SMPC を TE に適用することで、予測誤差の影響を吸収して輻輳を回避した経路設定が可能となることを示す。

キーワード 確率的モデル予測制御, トラフィックエンジニアリング, トラフィック予測, マルチパスルーティング

## Evaluation of Traffic Engineering Based on Model Predictive Control Using Traffic Trace in Actual Network

Tatsuya OTOSHI<sup>†</sup>, Yuichi OHSITA<sup>†</sup>, Masayuki MURATA<sup>†</sup>, Yousuke TAKAHASHI<sup>††</sup>, Keisuke ISHIBASHI<sup>††</sup>, Kohei SHIOMOTO<sup>††</sup>, and Tomoaki HASHIMOTO<sup>†††</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University 1-5 Yamadaoka, Suita, Osaka, 565-0871, Japan

<sup>††</sup> NTT Network Technology Laboratories, NTT Corporation 3-9-11, Midori-Cho, Musashino-Shi, Tokyo, 180-8585 Japan

<sup>†††</sup> Graduate School of Engineering Science, Osaka University 1-3 Machikaneyama-Cho, Toyonaka, Osaka, 560-8531, Japan

E-mail: †{t-otoshi,y-ohsita,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, ††{takahashi.yousuke,ishibashi.keisuke,shiomoto.kohei}@lab.ntt.co.jp,

†††thashi@sys.es.osaka-u.ac.jp

**Abstract** Traffic engineering with traffic prediction is one approach to accommodate time-varying traffic stably. In this approach, the routes are calculated so as to avoid congestion based on the predicted traffic. However, predicted traffic includes prediction errors. We proposed a traffic engineering method with traffic prediction, which is robust to prediction errors. To achieve the robust control against the prediction errors, our method uses the idea of the Stochastic Model Predictive Control (SMPC), which is a method of process control with predicting the system dynamics. Using the probability distribution of prediction error, our method calculates the routes so that the occurrence probability of congestion is kept lower than a desired level. Through simulation with the actual traffic trace, we clarify that our method avoids the congestion even if the predicted traffic includes errors.

**Key words** Stochastic Model Predictive Control, Traffic Engineering, Traffic Prediction, Multi-path Routing

## 1. はじめに

近年、ストリーミング配信やクラウドサービス等のインターネットを介したサービスが普及するにつれて、ネットワークを流れるトラフィックの時間変動は大きくなっている。バックボーンネットワークは、大きなトラフィック変動が生じた場合にも、輻輳を生じることなく全トラフィックを収容する必要がある。

時間変動のあるトラフィックを収容する単純な方法としては、トラフィック需要に対してリンクの帯域を過剰に増設するオーバープロビジョニング [1,2] がある。オーバープロビジョニングでは、一時的なトラフィックの増加や、ネットワーク機器の故障等に備え、通常時のトラフィックの2倍以上のリンク帯域を用意することが一般的に行われている。この場合、不必要に大きな帯域を用意するため、過剰な設備投資コストを要する。また、近年、リンク利用率の低い不要なポートの電源をオフにすることで、消費電力を削減する等 [3]、限られたリンク帯域でトラフィックを収容することが求められてきている。

ネットワークの資源を効率的に利用することで、限られた資源下においても、輻輳を生じることなくトラフィックを収容する技術として、トラフィックエンジニアリング (TE; Traffic Engineering) と呼ばれる手法に関する研究が進められている [4-7]。これらの研究では、トラフィック変動は定期的なトラフィック観測により取得し、各時刻で観測されたトラフィックに合致した経路設定に移行する手法が検討されてきた。しかしながら、これらの手法では、観測時点に合わせた経路を設定するのみであり、経路変更後に発生したトラフィック変動に対応できず、輻輳を生じる可能性がある。経路制御を分散化することにより、短い制御周期で経路変更を行うことを可能とする手法 [4,5] も検討されているものの、頻繁な経路変更はネットワークの不安定化を招き、TCP スループットの低下及び、遅延・パケットロスの増加につながる。

このような問題を解消するために、我々の研究グループでは、トラフィック予測と連携し、予測された将来のトラフィック変動を考慮した TE 制御である MP-TE (Model Predictive Traffic Engineering) を提案している [8,9]。MP-TE はモデル予測制御 (MPC; Model Predictive Control) と呼ばれるシステム制御の考えに基づいた TE 制御を行うものである。この手法では、制御サーバーが過去に観測されたトラフィック情報を基に、将来の数期先までに到着するトラフィックの時系列を予測し、それぞれの時刻において、トラフィック予測値を収容可能な経路を求める。そして、求めた経路のうちで最も直近の時刻に対応する経路のみを実際にネットワークに設定し、新たなトラフィックの観測を基に予測の修正を行い、再び経路計算を行うことで、以降の経路を設定する。これにより、トラフィックの変動傾向が変化した場合にも、それに応じた経路変更が可能となる。また、経路計算時に、各タイムスロットで行う経路変更量を抑えることで、一時的な予測誤差に対して過剰に反応することを避けることができる。

もちろん、上述の方法のみでは、予測誤差の影響を完全に回避することはできず、誤った経路の設定を投入した結果、輻輳

を生じる可能性がある。一つの方法としては、単純に予測値のみを経路計算に用いる代わりに、予測誤差の分布も考慮した上で、経路を求めることが考えられる。幸いにも、MPC においても、誤差の確率分布を考慮にいたした制御方法が確率的 MPC (SMPC; Stochastic MPC) として検討されている [10]。そこで、本稿では、この SMPC を TE 制御に応用した、予測誤差に対してロバストな TE 手法 Stochastic MP-TE (SMP-TE) を提案する。この手法では、予測誤差の確率分布に基づいて、輻輳が生じる確率を求め、その確率が許容されるレベル以下になるような経路を求めることで、誤差による輻輳を回避する。しかしながら、誤差も考慮した保守的な制御を行うことで、余分な経路変更を生じるという問題が生じる。特に、制御時点から遠く先の将来においては、一般に予測誤差が大きくなるため、実際には生じない先の将来の輻輳に対して、不要な経路変更を次時点から開始する可能性がある。そこで、不確かな遠い先の将来ほど、誤差を保障する確率を緩和することで、輻輳を回避したまま不要な経路変更も抑える制約緩和手法についても提案する。

以降の本稿の構成は次の通りである。2章では、TE とトラフィック予測のそれぞれについての概要を述べる。3章では、SMPC を適用した TE について述べ、4章では、実際のトラフィックトレースを用いたシミュレーション評価について述べる。5章で、まとめと今後の課題について述べる。

## 2. トラフィックエンジニアリングとトラフィック予測

### 2.1 トラフィックエンジニアリング

TE は、ネットワーク内の経路を各タイムスロットのトラフィックに合わせて動的に変更することにより、輻輳なくトラフィックを収容する技術である。本稿では、TE のうち、各タイムスロットのトラフィックの経路は管理サーバーにおいて集中的に計算されるものとして、集中型の TE について扱う。

集中管理型の TE では、各タイムスロットにおけるトラフィック量を把握し、そのタイムスロットのトラフィック量に適した経路を管理サーバーが計算し、ネットワークに投入する。本稿では、ネットワークの Origin-Destination (OD) 間を結ぶ複数の候補経路が予め与えられた上で、その OD 間のトラフィック量のうち、各候補経路に流す割合を、OD 間のトラフィック量に応じて決めることにより、各タイムスロットに合わせた経路を計算するものとする。

以降、タイムスロット  $k$  における全  $f$  本の OD フローのトラフィック需要をベクトル  $\mathbf{x}(k) = {}^t(x_1(k), \dots, x_f(k))$  と表す。タイムスロット  $k$  において OD フロー  $j$  のトラフィックのうち、経路  $i$  に送出されるものの割合を  $R_{i,j}(k)$  と表す。また、 $R_{i,j}(k)$  を要素とする  $p \times f$  行列を  $R(k)$  と表す。 $R(k)$  に従って、OD フローのトラフィック需要  $\mathbf{x}(k)$  を転送する時、全  $l$  本のリンク上を流れるトラフィック  $\mathbf{y}(k) = {}^t(y_1, \dots, y_l)$  は

$$\mathbf{y}(k) = G \cdot R(k) \cdot \mathbf{x}(k) \quad (1)$$

として表される。ここで、 $G$  は各候補経路が経由するリンクを表す  $l \times p$  行列で、その  $(i, j)$  成分は候補経路  $j$  がリンク  $i$  を経由する時に 1 それ以外は 0 を取る。TE では、 $\mathbf{y}(k)$  を各

リンクにおいて収容可能なトラヒック量以下に保ちつつ、遅延等のコスト関数  $f(R(k))$  を最小化するような経路を設定する。以降、各リンクで適切に収容可能なトラヒック量の上限を  $\mathbf{c} = {}^t(c_1, \dots, c_l)$  とする。

## 2.2 トラヒック予測を用いたトラヒックエンジニアリング

従来 TE では、タイムスロット  $t$  において計測したトラヒック需要  $\mathbf{x}(t)$  を元に、次のタイムスロット  $t+1$  における経路  $R(t+1)$  を設定する。しかしながら、トラヒック変動のため  $\mathbf{x}(t) \neq \mathbf{x}(t+1)$  であり、このように設定された  $R(t+1)$  は、タイムスロット  $t+1$  のトラヒックに合致したものとはならない。特にトラヒック変動が激しい場合は、 $\mathbf{x}(t)$  と  $\mathbf{x}(t+1)$  の乖離が激しく、経路  $R(t+1)$  では輻輳を回避できない。そのため、 $R(t+1)$  の計算には、 $\mathbf{x}(t)$  ではなく、タイムスロット  $t+1$  のトラヒックの予測値  $\hat{\mathbf{x}}(t+1)$  を用いて計算することが必要となる。

さらに、将来のトラヒック変動の予測を用いることにより、頻繁な経路変更を必要としない安定的なトラヒック収容が可能となる。例えば、タイムスロット  $t+1$  からタイムスロット  $t+h$  までのトラヒック量の予測をもとに、いずれのタイムスロットでも輻輳を発生しないような経路を計算することにより、タイムスロット  $t+1$  から  $t+h$  まで経路変更をすることなく、輻輳を回避することができる。しかしながら、トラヒック予測には、予測誤差が含まれる。特に先の将来の予測ほど誤差が増大する。その結果、輻輳が生じてしまう可能性がある。このため、予測を用いた TE では、単に予測結果に合わせて経路を計算するだけでなく、予測誤差に対してロバストとなるような設定が必要となる。

## 3. 確率的モデル予測制御のトラヒックエンジニアリングへの適用

### 3.1 確率的モデル予測制御

#### 3.1.1 モデル予測制御

MPC は、システムの動作（出力）が設定したターゲットに近づくように、システムのパラメータ（入力）を最適化するのは従来のシステム制御と同様であるが、その際に現時刻だけではなく、将来のある一定の区間（予測ホライズン）におけるシステムの振る舞いを考慮した上で、入力の最適化を行う。すなわち、時刻  $k$  の出力を  $y(k)$ 、ターゲットを  $r_y(k)$  とすると、現時刻  $t$  において、将来の  $h$  ステップ先の区間  $[t+1, t+h]$  全体に渡ってターゲットからのずれ  $J_1 = \sum_{k=t+1}^{t+h} \|y(k) - r_y(k)\|^2$  を最小化する入力列を

$$(u(t+1), \dots, u(t+h)) = \arg \min_{u(t+1), \dots, u(t+h)} J_1 \quad (2)$$

として求める。ここで、 $\|\cdot\|$  はユークリッドノルムを表す。

上記の最適化を行う際には、時刻  $t$  において、入力  $u(k)$  が与えられた際の出力  $y(k)$  を予測することが必要となる。システムに入力を与えた時の出力の時間発展関係はシステムモデルとして表され、次式のようなシステムの各時刻での状態  $z(k)$  も考慮した状態空間モデルが主に用いられる。

$$z(k+1) = \phi(k, z(k), u(k)) \quad (3)$$

$$y(k) = \psi(k, z(k), u(k)) \quad (4)$$

ここで、 $\phi, \psi$  は入力・出力・状態の関係性を表す関数である

しかし、システムのモデル化の際に誤差が含まれることがあり、それに基づいた出力の予測値  $\hat{y}(k)$  は誤差が生じ得る。特に、先の将来の予測ほど予測誤差が大きくなるため、予測ホライズン  $[t+1, t+h]$  において最適化した入力  $u(t+1), \dots, u(t+h)$  の内、実際にシステムに投入するのは直近の  $u(t+1)$  のみとする。以降の入力設定は、観測フィードバックを元に予測値を修正し、再度入力の最適化を行うことで決定する。

また、予測誤差の影響を受けて過剰に入力変更を行い、システムが不安定になる可能性がある。そこで、各時刻での入力の変更量  $\Delta u(k) = u(k) - u(k-1)$  を抑えることで、システムを安定化させる。これは、予測ホライズン  $[t+1, t+h]$  全体における入力の変更量  $J_2 = \sum_{k=t+1}^{t+h} \|\Delta u(k)\|$  を式 (2) の目的関数  $J_1$  と同時に最小化することで可能である。すなわち、 $J_1$  と  $J_2$  のバランスを表すパラメータ  $w$  を導入して、予測ホライズンにおける入力列を式 (2) の代わりに

$$(u(t+1), \dots, u(t+h)) = \arg \min_{u(t+1), \dots, u(t+h)} J_1 + w J_2 \quad (5)$$

として求める。ここで、 $w$  はその値が大きほど入力の変更を避け、現状の入力を維持した入力設計を行う。

#### 3.1.2 確率制約

実際のシステムには、物理的な限界として入出力に上限または下限が存在する場合が多い。このため、システムのコントローラーはこのような入出力の制約の範囲内で、適切な入力を決定することが必要となる。例えば、システムの出力に上限が存在する場合は、次のような制約の下で最適な入力を求めることとなる。

$$y(t+k) \leq y_u, k = 1, \dots, h \quad (6)$$

ここで、 $y_u$  は出力の上限値を表す。

しかしながら、システムのモデルから推定される  $y(t+k)$  には誤差が含まれるため、推定値を  $\hat{y}(t+k)$  とし、実際の値からの誤差を  $\epsilon_y(t+k) = \hat{y}(t+k) - y$  とすると、推定値上で制約式  $\hat{y}(t+k) \leq y_u$  を満たしていても、 $\epsilon(t+k)$  が大きければ  $y(t+k) > y_u$  となり、制約を満たせない可能性がある。あらかじめ誤差の上限  $\epsilon \leq |\epsilon(t+k)|$  が分かっているならば、制約式  $\hat{y}(t+k) + \epsilon < y_u$  を満たすことで、どのような誤差が生じても、元の制約式 (6) を満たすことができる。ただし、これは最悪時を保障した保守的な制御となるため、通常時の性能を劣化させる可能性がある。また、通常システムでは、誤差の上限はあらかじめ分からない場合が多く、このような方法は利用できない可能性がある。

別の方法として、予測誤差の確率分布を用いて、予測誤差によって制約を破るリスクが生じる確率を許容できる範囲に抑えるという方法が考えられる。すなわち、誤差  $\epsilon_y(t+k)$  は、ある一定の確率分布に従う確率変数であるとして、実際の出力値  $y(t+k)$  が上限値を超過する確率  $P[y(t+k) > y_u]$  を一定の確率  $p$  以下に保つように入力を決定する。従って、コントローラーは次式の制約式の下で、最適な入力の計算を行う。

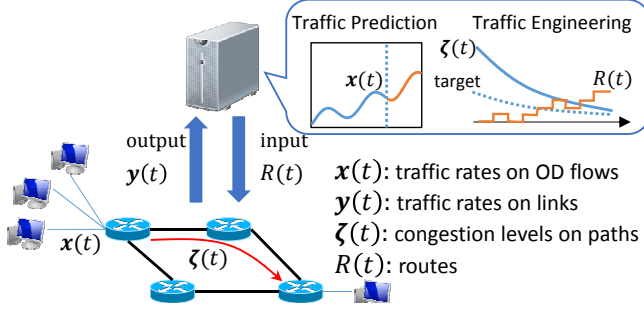


図1 SMPCを適用したTEの概要図

$$P[y(t+k) > y_u] < p, k = 1, \dots, h \quad (7)$$

式(7)は $p$ の値が小さいほど、上限値に対してより厳しい制約となり、 $p = 0$ の時、上述の最悪時を保障する制御と等価になる。SMPCでは、 $p$ に従って、ごく稀な上限値の超過を許容することで、通常時の性能劣化を抑えつつ、予測誤差の影響を回避することが可能となる。

### 3.2 確率的モデル予測制御のトラフィックエンジニアリングへの適用

#### 3.2.1 概要

図1に本稿で用いるSMPCを適用したTE(SMP-TE)の概要を示す。TEでは、制御サーバーがコントローラーとして、ネットワークに各タイムスロットにおける経路 $R(k)$ を入力し、その結果リンク上に流れるトラフィック $y(k)$ を出力として制御する。制御サーバーは次のような動作を周期的に行うことで、経路の変更を行う。1) 過去に観測されたトラフィックデータから対象となる将来のODフローの全トラフィック量を予測する。2) トラフィック予測に基づき、輻輳の生じる確率を一定値以下に保ちつつ、遅延等のコスト関数 $f(R(k))$ を最小化するような経路を計算する。

#### 3.2.2 最適化問題としての定式化

SMP-TEでは、予測の対象期間全体に渡って、各時点での輻輳の生起確率を一定値以下に保った上で、コスト関数の和 $J_1 = \sum_{k=t+1}^{t+h} f(y(k))$ を最小化することで、適切な経路を設定する。この時、予測ホライズン全体での経路割り当ての変更予定量 $J_2 = \sum_{k=t+1}^{t+h} \|\Delta R(k)\|$ も同時に最小化することで、急激な経路変更を避け、安定した経路変更を実現する。

本稿のTEにおいて、各タイムスロット $t$ で制御サーバーが解く最適化問題を以下に示す。

$$\text{minimize} : \sum_{k=t+1}^{t+h} ((1-w)f(y(k)) + w\|\Delta R(k)\|) \quad (8)$$

$$\text{subject to } \forall k, \hat{y}(k) = G \cdot R(k) \cdot \hat{x}(k) \quad (9)$$

$$\forall k, l, P[y_l(k) > c_l(k)] \leq p \quad (10)$$

$$\forall k, \forall i, \forall j, R_{i,j}(k) \in [0, 1] \quad (11)$$

$$\forall k, \sum_{i \in \varphi(j)} R_{i,j}(k) = 1 \quad (12)$$

ここで、 $c(k)$ ,  $\hat{x}(k)$ ,  $G$ ,  $p$ は最適化問題に与える変数であり、 $R(k)$ ,  $\hat{y}(k)$ は最適化問題を解くことによって得られる変数である。 $0 \leq w \leq 1$ は経路変更に対する重みで、値が大きい方が、現在の経路を維持した経路制御を行う。最適化問題を解くこと

で、予測ホライズン全体に渡る入力 $R(t+1), \dots, R(t+h)$ が得られるが、実際に投入するのは、直近の設定 $R(t+1)$ のみで、以降の設定は、新たな観測値を基に予測値 $\hat{x}(k)$ を修正して最適化問題を再計算することにより決定する。

#### 3.2.3 確率制約の緩和

上述のSMP-TEでは、対象となる将来の区間において、どのタイムスロットにおいても輻輳が生じる確率を $p$ 以下に保つような経路を選択する。しかしながら、先の将来の時刻における経路は予測の修正後再計算されるため、予測誤差が設定される経路に大きく影響するのは直近のタイムスロット $t+1$ についてのみである。また、一般に将来の予測ほど、その予測誤差は徐々に増大するため、そのような将来の不確かなトラフィック需要について、高い精度で輻輳を回避しようとするとは実際には輻輳が生じないにも関わらず不要な経路変更を行う可能性がある。そこで、先の将来におけるタイムスロットほど、式(10)の確率制約を緩和することで、不要な経路変更を避ける方法が考えられる。本稿では、タイムスロット $k$ において、輻輳なくトラフィックを収容する確率 $q(k)$ を導入し、 $q(k)$ を $k$ について指数関数的に減少させることで、確率制約の緩和を行う。すなわち、 $q(k)$ を次式で定義し、式(10)の $p$ の代わりに $p(k) = 1 - q(k)$ を用いることで確率制約の緩和を実現する。

$$q(k) = q(t+1) \exp\left(-\frac{k-t-1}{\tau}\right) \quad (13)$$

ここで、 $\tau$ は $q(k)$ の減少の速さを表す時定数であり、 $q(t+1) = 1 - p$ である。

## 4. 評価

### 4.1 評価方法

#### 4.1.1 評価環境

SMPCを適用したTEの実ネットワークにおける有効性を議論するため、Internet2のバックボーンネットワークのトポロジー及びトラフィックトレース[11]を用いてシミュレーションを行う。図2に、Internet2のトポロジーを示す。Internet2には、9つのPoP(Point-of-Presence)ルーターが存在し、それぞれのPoP間を流れる計72本のODフローが存在する。Internet2のトラフィックトレースデータは、各PoPルーターがNetFlowを用いてフロー単位のトラフィックを計測したものである。各PoPルーターでは、100パケットに1パケットのサンプリングレートで、パケットのサンプリングを行い、5分毎に集計したフロー情報を出力する。パケットのサンプリングによるフロー計測は、収集される情報に欠落が生じ、トラフィックの統計情報の精度が劣化するという問題が発生する。しかし、TEで対象とするのは、ODフローに集約したフローであり、サンプル数が十分大きいものとなるため、サンプリングの誤差は本評価において大きな問題とはならない。

帯域のオーバプロビジョニングのため、Internet2での最大リンク利用率は20%以下に保たれている。評価では、限られた資源上で、輻輳をどのように回避するか注目するため、トラフィック量を単純に5倍とし、目標のリンク利用率を95%としてシミュレーションを行った。図3にシミュレーションに用いたトラフィックトレースデータを示す。

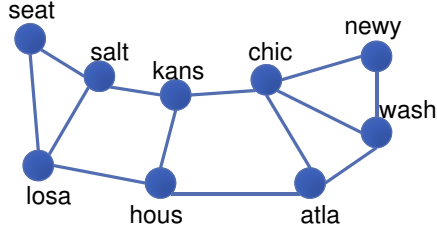


図 2 評価に用いたネットワークポロジ

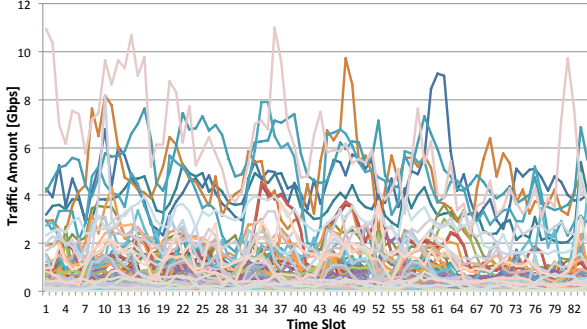


図 3 OD フロー単位で集約した Internet2 のトラヒックトレース (2 時間粒度)

#### 4.1.2 予測誤差モデル

本評価においては、実際のトラフィックレートに対して、正規分布  $N(\mu, \sigma^2)$  に従う予測誤差を加えることで、SMP-TE の予測誤差に対するロバスト性の評価を行う。  $\mu \neq 0$  の場合は、予測値に対して、誤差の平均を減算することで、容易に予測誤差を除くことができるため、ここでは  $\mu = 0$  とし、誤差の分散の影響の評価に注目することとする。フロー  $j$  の予測誤差の分散の大きさは、次式で表される正規化平均二乗誤差 (NMSE) に基づいて決定する。

$$\text{NMSE} = \frac{\sigma_j^2}{V[x_j(t)]} \quad (14)$$

ここで、 $\sigma_j^2$  はフロー  $j$  の予測誤差の分散、 $V[x_j(t)]$  は元のトラフィック変動の分散の大きさを表す。NMSE は文献 [12] の値を用いて、 $\sigma_j^2$  の値を  $\sigma_j^2 = 0.3V[x_j(t)]$  に設定する。また、将来の時刻ほど予測誤差が増大することを反映するため、 $k$  ステップ先の誤差の分散は  $\sigma_j^2 t$  に従って増大するものとする。

#### 4.1.3 コスト関数

本評価では、コスト関数として、全 OD フローについて、トラフィックを転送する経路の平均ホップ長を用いる。すなわち、経路  $j$  のホップ長を  $d_j$  として、 $f(R(k)) = \frac{1}{\max_j d_j} \frac{1}{n(n-1)} \sum_i \sum_{j \in \varphi(i)} R_{i,j} d_j$  を用いる。ただし、コスト関数は平均のホップ長を最大のホップ長で正規化したものを用いている。リンク上で転送されるトラフィックレートが、適切な帯域内に抑えられている時、キューイング遅延はほとんど無視することができ、平均ホップ長を最小化することで、エンドホスト間の遅延を最小化することができる。

#### 4.1.4 経路計算

式 (8)–(12) で定義される最適化問題には、確率的な制約式が含まれているが、文献 [13] と同様な手順で、次式のような確定的制約に等価に置き換えられる。

$$\hat{y}_i(k) + \Phi^{-1}(1-p) \sqrt{\sum_j A_{i,j}(k)^2 \sigma_j^2 k} \leq c_i(k) \quad (15)$$

ここで、 $\Phi^{-1}$  は正規分布の累積分布関数の逆関数であり、 $A_{i,j}(k)$  は  $A(k) = G \cdot R(k)$  の  $(i, j)$  成分を表す。

制約式の変換の結果得られた最適化問題は二次錘計画問題と呼ばれる凸最適化問題の一種であり、一般的な凸最適化問題のソルバーを用いて計算可能である。本評価では、4 つの CPU (Xeon E7-4879) を搭載した計算機上で、CPLEX [14] を用いて最適化問題を解くことで、経路計算を行った。

#### 4.1.5 比較対象

SMP-TE により、予測誤差の分布を考慮することで、誤差が生じた場合にも輻輳なく適切な経路にトラフィックが収容可能となることを確認するために、文献 [8, 9] のように予測されるトラフィックをそのもののみを用いて MPC に基づく TE (MP-TE) を行った場合との比較を行う。MP-TE は SMP-TE の特殊な場合とみなすことができ、SMP-TE において  $p = 0.5$  と置いた場合と等価である。

#### 4.2 評価結果

##### 4.2.1 キューイング遅延

予測ホライズンの長さ  $h$  を 5 スロットとした場合のシミュレーションの結果を図 4 に示す。また、経路変更の重みの値は  $w = 0.5$  とした。図では、MP-TE と SMP-TE について、各時刻におけるボトルネックリンク上の 99.9% 遅延を示す。ここで、99.9% 遅延は 99.9% のパケットがその値以下の遅延で転送される値を意味する。図中で、relaxed と記したものは確率制約の緩和を行った SMP-TE の結果を表しており、そうでないものは、制約の緩和を行わない SMP-TE の結果を示したものである。

図より、MP-TE では、輻輳の発生によりキューイング遅延が大きくなっているタイムスロットが存在するが、SMP-TE ではキューイング遅延が抑えられていることが分かる。これは、MP-TE では予測誤差が生じた際に、誤った経路設定が行われ、目標としている帯域以上にトラフィックを転送する場合があるためである。SMP-TE では、誤差が生じた場合でも目標帯域内にトラフィックを収容する経路を設定するため、輻輳が回避できている。また、確率の緩和を行った場合でも、実際に投入される直近の経路については、緩和を行わない場合と同じく、輻輳の生じる確率をもとものの  $p$  の値以下に抑えるため、ほぼ同様の傾向がみられている。

##### 4.2.2 経路変更割合

また、先の将来を予測することで、トラフィック変動に合わせて徐々に経路変更を行うことで、急激な経路変更を避ける効果を確認するため、各タイムスロット毎に要した経路変更の割合 ( $\Delta R_p(k)$ ) を調べた。表 1 に  $\Delta R_p(k)$  の最大値と平均値、および、全体のタイムスロットのうち 1% 以上の経路変更が生じたタイムスロットの割合 (経路変更頻度) を示す。

表より、同じ手法間で 1 期先予測のみを用いた場合と 5 期先予測を用いた場合を比較すると、1 期先予測を用いた方が生じた経路変更の最大値が大きくなっていることが確認できる。これは、1 期先予測のみでは、大きなトラフィック変動により経路変更が必要となった瞬間に急激に経路変更を行うのに対して、5 期先予測を用いると、変動が生じるよりも先に、それに備え



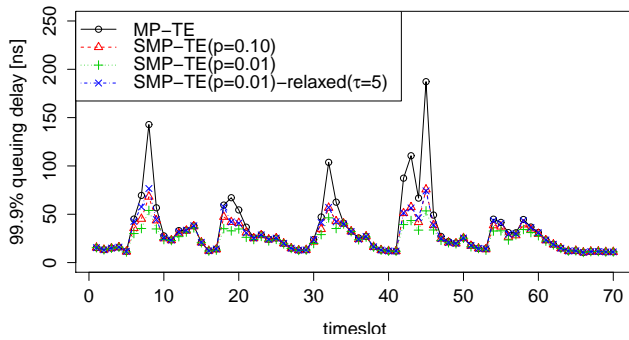


図4 ボトルネックにおける99.9%キューイング遅延 ( $h = 5$ )  
表1 1タイムスロットあたりに生じた経路変更の割合

1期先予測を用いた場合			
	平均	最大	経路変更頻度
MP-TE	0.083%	10.3%	15.9%
SMP-TE( $p = 0.1$ )	0.094%	13.7%	23.2%
SMP-TE( $p = 0.01$ )	0.11%	16.4%	36.2%
5期先予測を用いた場合			
	average	max	frequency
MP-TE	0.074%	6.28%	33.3%
SMP-TE( $p = 0.1$ )-relaxed( $\tau = 5$ )	0.088%	8.90%	42.0%
SMP-TE( $p = 0.1$ )-relaxed( $\tau = 20$ )	0.089%	7.14%	46.3%
SMP-TE( $p = 0.1$ )	0.090%	6.04%	50.7%
SMP-TE( $p = 0.01$ )-relaxed( $\tau = 5$ )	0.10%	11.6%	52.2%
SMP-TE( $p = 0.01$ )-relaxed( $\tau = 20$ )	0.11%	8.91%	62.3%
SMP-TE( $p = 0.01$ )	0.012%	5.97%	78.2%

て徐々に経路変更を進めることができているためである。

一方で、経路変更の頻度に着目すると、5期先予測を用いた方が頻度は増加していることが確認できる。これは、先の将来のトラフィックを予測した際に、輻輳が予測された場合、それが実際には生じない輻輳であっても、それに備えて次のステップから、経路変更進めてしまうためである。このような傾向は、SMP-TEにおいて特に顕著であり、確率制約の緩和を行わない場合は、将来の大きな予測誤差に過剰に対応した結果、頻繁な経路変更を行っている。SMP-TEにおいて確率制約の緩和を行った場合は、先の将来に予測される輻輳をある程度許容することで、このような経路変更の頻発を避けることができている。特に $\tau$ が小さくすると、より確率制約を緩めるため、経路変更の頻度もそれに伴って低くなっている。一方で、制約を緩めると、実際に生じる輻輳への反応も遅くなるため、経路変更割合の最大値は若干増加することが確認できる。このことから、制約を緩和するパラメータ $\tau$ は、一度に生じる経路変更の大きさと、経路変更の頻度のトレードオフを考慮して決定する必要がある。

## 5. まとめ

本稿では、SMPCをTEに適用することで、予測誤差の確率分布を用いて、誤差が生じる場合でもトラフィックを適切な経路に収容可能な手法SMP-TEを提案した。また、実際のネットワークトポロジー、トラフィックトレースを用いたシミュレーション評価を行い、単純に予測値を用いた場合には予測誤差の影響により輻輳が生じる状況であっても、SMP-TEは適切にトラフィックを収容できていることが確認できた。さらに、SMP-TEにおける確率制約の緩和により、過剰に将来の予測誤差に敏感

な経路変更を行うことを避けることで、トラフィックを収容するために必要な経路変更も小さく保つことが可能となった。

今後の課題としては、MPCを適用したTEに対して予測誤差の与える影響を制御理論に基づき理論的に解析することと、MPCを適用したTEを分散制御に拡張しスケラビリティを確保することが挙げられる。また、シミュレーションでは考慮し切れない、経路変更がTCP等の他のネットワーク制御に与える影響も含めた評価を実機を用いて行うことが挙げられる。

謝辞 本研究の一部は戦略的情報通信研究開発推進事業(SCOPE)によっている。

## 文 献

- [1] C. Graleigh, F. Tobagi, and C. Diot, "Provisioning IP backbone networks to support latency sensitive traffic," in *Proceedings of IEEE INFOCOM 2003*, Apr. 2003, pp. 375–385.
- [2] M. Roughan, "Robust network planning," *Guide to Reliable Internet Services and Applications Computer Communications and Networks*, pp. 137–177, 2010.
- [3] W. Fisher, M. Suchara, and J. Rexford, "Greening backbone networks: reducing energy consumption by shutting off cables in bundled links," in *Proceedings of ACM SIGCOMM Workshop on Green networking*, Aug. 2010, pp. 29–34.
- [4] S. Kandula, D. Katabi, B. Davie, and A. Charny, "Walking the tightrope: responsive yet stable traffic engineering," in *Proceedings of ACM SIGCOMM 2005*, Aug. 2005, pp. 253–264.
- [5] E. Anwar, C. Jin, L. Steven, and W. Indra, "MATE: MPLS adaptive traffic engineering," in *Proceedings of IEEE INFOCOM 2001*, Apr. 2001, pp. 1300–1309.
- [6] 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 2006*, vol. 36, no. 4, Aug. 2006, pp. 99–110.
- [7] N. Wang, K. H. Ho, G. Pavlou, and M. Howarth, "An overview of routing optimization for Internet traffic engineering," *IEEE Communications Survey & Tutorials*, vol. 10, no. 1, pp. 36–56, first quarter 2008.
- [8] 大歳 達也, 大下 裕一, 村田 正幸, 高橋 洋介, 上山 憲昭, 石橋 圭介, 塩本 公平, 橋本 智昭, "トラフィック予測を考慮したトラフィックエンジニアリングの検討と評価," *電子情報通信学会 技術研究報告 (IN2013-78)*, vol. 113, no. 245, pp. 7–12, October 2013.
- [9] —, "モデル予測制御にもとづくトラフィックエンジニアリングの実ネットワークにおけるトラフィックデータを用いた評価," *電子情報通信学会 技術研究報告 (IN2013-194)*, vol. 113, no. 473, pp. 299–304, March 2013.
- [10] T. Hashimoto, "Probabilistic constrained model predictive control for linear discrete-time systems with additive stochastic disturbances," in *Proceedings of IEEE 52nd Annual Conference on Decision and Control*, Dec. 2013, pp. 6434–6439.
- [11] "Internet2 data," available from <http://internet2.edu/observatory/archive/data-collections.html>.
- [12] S. Han-Lin, J. Yue-Hui, C. Yi-Dong, and C. Shi-Duan, "Network traffic prediction by a wavelet-based combined model," *Chinese Physics B*, vol. 18, no. 11, pp. 4760–4768, Nov. 2009.
- [13] M. Johnston, H.-W. Lee, and E. Modiano, "Robust network design for stochastic traffic demands," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 31, no. 18, pp. 3104–3116, Sep. 2013.
- [14] "IBM ILOG CPLEX Optimizer," optimization software : <http://www-01.ibm.com/software/integration/optimization/cplex-optimizer>.