

# アトラクタ選択モデルに基づく プロアクティブ型経路制御手法の提案と評価

隠塚 尚孝<sup>†</sup> 若宮 直紀<sup>†</sup> 村田 正幸<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

E-mail: †{n-onduka,wakamiya,murata}@ist.osaka-u.ac.jp

あらまし ネットワークの大規模化，複雑化に伴い，最適化を目指した従来の設計思想に基づく通信制御の限界が指摘されている．例えば，OSPF は任意のノード間の最短経路を算出，構築できるものの，ノード数，リンク数の増加に対して計算量が急激に大きくなり，また，トラヒック変動などに対処できないという問題がある．これまで，我々の研究グループでは，生物の環境適応機構に着想を得たモバイルアドホックネットワーク向け経路制御手法を提案しており，適応性，耐故障性，拡張性に優れていることを示している．本稿では，この経路制御手法の有線網への適用を提案する．まず，プロアクティブ型経路制御で問題となる制御オーバーヘッドの削減手法を提案し，シミュレーションにより約 58% の削減効果が得られることを示した．また，Waxman モデルネットワークにおいて，OSPF と同程度の長さの経路を構築，維持できること，平常時の制御オーバーヘッドが OSPF の約 1/8 であることを示した．

キーワード 経路制御，アトラクタ選択モデル，制御オーバーヘッド，計算量

## Proposal and evaluation of an attractor selection-based proactive routing protocol

Naotaka ONZUKA<sup>†</sup>, Naoki WAKAMIYA<sup>†</sup>, and Masayuki MURATA<sup>†</sup>

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

1-5 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871, Japan

E-mail: †{n-onduka,wakamiya,murata}@ist.osaka-u.ac.jp

**Abstract** As the scale and complexity of network systems grow, traditional and conventional networking mechanisms suffer from lack of scalability, adaptability, and robustness. For example, OSPF, a widely used an IGP routing protocol involves complicated calculation in the order of  $O(E + N \log(N))$  to  $O(N^2)$  for a network with  $N$  nodes and  $E$  links, whereas each node can derive the optimal shortest path to all other nodes in the network. In our former research for mobile ad-hoc networks, we proposed a routing mechanism which was shown to be more adaptive and robust than conventional protocols and in addition required simple calculation in the order of  $O(N)$ . In this paper, we adopt the mechanism to a wired network. Being as a proactive protocol it has to build and maintain paths to all other nodes, but it involves considerable overheads with naive implementation. Therefore we propose overhead reduction mechanisms which allows nodes to appropriate control messages sent by other node and avoid sending redundant messages. Through simulation experiments, we show that the amount of control overheads can be reduced by about 58 percent and our proposal can build and maintain as short paths as OSPF with about 1/8 as much overhead as OSPF in normal condition.

**Key words** routing protocol, attractor selection model, control overhead, computational complexity

### 1. はじめに

光ネットワーク技術の発展に伴うコア網の大容量化，LTE などの高速な無線アクセス網の拡大，また，スマートフォンやス

マートメータ，車載通信システムなどの多様な通信機器の普及によって，ネットワークが大規模化，複雑化するに従って，最適化を目指した従来の設計思想に基づくネットワークシステムやネットワーク技術の限界が指摘されている [1]．例えば，現

在 IGP (Inter Gateway Protocol) として広く用いられている OSPF (Open Shortest Path First) [2] は、定期的にノード間でトポロジ情報を交換することによって、全ノードがネットワーク全体のトポロジを把握し、それぞれのノードがダイクストラアルゴリズムを用いることによって他の全ノードに対する最短経路を決定する。ノード故障などの障害が発生した場合には、その情報がネットワーク全体に伝播し、経路の再計算を行うため、再構築に要する時間も短い。しかしながら、ネットワーク内のノード数を  $N$  とすると、ノードあたりの計算量は  $O(N^2)$ 、疎なネットワークを前提として高速化した場合でも  $O(E + N \log(N))$  ( $E$  はリンク数) であるため、ネットワークの大規模化に伴い、計算量が増大する [3], [4]。また、メトリックとして帯域の逆数で与えられるコストを用いるため、トラフィック変動による輻輳など動的な通信状態の変化に適応できない。

我々の研究グループでは、通信環境の変化に適応的な経路制御を行うことのできる、アトラクタ選択モデルを応用した経路制御手法を提案している [5], [6]。アトラクタ選択モデルは、大腸菌の代謝ネットワークにおいて、環境の栄養状態に応じて適切な栄養生成が行われるように、自律的に遺伝子発現が調整される機構の数値モデルである [7]。アトラクタ選択モデルでは、代謝ネットワークは、2種類の栄養のいずれかを生成する2つのアトラクタを有する非線形力学系としてモデル化される。環境に不足している栄養を生成するように遺伝子が発現するとアクティビティと呼ばれる評価値が高くなり、その遺伝子発現状態、すなわちアトラクタへの収束が促進されるとともに、安定的にアトラクタにとどまる。一方、適切な栄養生成が行われない場合、アクティビティが低下し、遺伝子発現が変動するようになる。たまたま環境に適した栄養が生成されるとアクティビティが高くなり、環境適応が促される。大腸菌におけるアクティビティは成長率や活性度に相当し、大腸菌は、栄養状態が変化する環境において生存、成長できるように、環境に不足する栄養を適応的に選択して生成する。

アトラクタ選択モデルを応用した経路制御手法では、データメッセージを送信、転送する次ホップノードの選択が、大腸菌における選択的な栄養生成に相当する。選択された隣接ノードを経由してデータメッセージが受信側ノードに到達すると、受信側ノードでフィードバックメッセージが生成され、データメッセージの通った経路を逆に辿って送信側ノードにたどり着く。送信側ノード及び中継ノードでは、受信側ノードに対する次ホップノードの選択の適切さを、受信側ノードまでの経路の遅延やホップ数などに基づいて評価し、これをアクティビティに用いる。それぞれのノードがアクティビティが高くなるような次ホップノード選択を自律分散的に行うことにより、送受信ノード間で遅延あるいはホップ数の小さい経路が構築される。

文献 [6] で提案した経路制御手法 MARAS (Mobile Ad-hoc Routing with Attractor Selection) は、ノード移動、故障などによって通信環境が変動するモバイルアドホックネットワークにおいて、従来手法と比較して、高い通信性能、適応性、頑健性を有することが示されている。さらに、ある受信側ノードに対するノードあたりの計算量は、隣接ノード数を  $M$  とする

と  $O(M)$  であり、ネットワークの全ノードに対して経路制御を行う場合でも  $O(N)$  となる ( $M \ll N$ )。このことから、大規模な有線ネットワークにおいても、アトラクタ選択モデルを応用した経路制御手法を用いることにより、小さな計算量でトラフィック変動に適応的な経路制御が期待できる。

しかしながら、モバイルアドホックネットワーク向けに提案した MARAS は、リアクティブ型であり、通信の必要が生じた時に初めてその送受信ノード間に経路を構築し、通信終了とともに経路情報は消去される。一方、有線網においては、ノード故障、リンク切断の頻度はそれほど高くないため、通信の有無によらず、定期的に制御メッセージをやりとりし、全ノードが他の全ノードに対する経路情報を更新、維持する、プロアクティブ型の経路制御を行うのが一般的である。MARAS を有線網にプロアクティブ型経路制御としてそのまま適用すると、それぞれのノードが、自身以外のすべてのノードのそれぞれに対して、経路制御メッセージの定期的な送信、受信した経路制御メッセージに対するフィードバックメッセージの送信、および、受信したフィードバックメッセージに基づいた経路情報の更新を行うこととなる。経路制御メッセージとフィードバックメッセージをやりとりする送受信ノードの組み合わせは、ネットワークの全ノード数を  $N$  とすると  $N(N-1)$  となってしまう。

そこで本稿ではまず、アトラクタ選択モデルを応用した経路制御手法を有線網におけるプロアクティブ型経路制御に適用する際の、制御メッセージコストの削減手法を提案し、その効果を確認する。さらに、制御オーバーヘッド、経路長の観点から OSPF との比較を行い、提案手法の有効性を示す。

本稿の構成は以下の通りである。2章でアトラクタ選択モデルの説明を行い、3章でアトラクタ選択モデルに基づくプロアクティブ型経路制御手法の説明、4章で制御オーバーヘッド削減手法の説明を行う。5章でシミュレーション評価のシナリオについて述べ、6章でシミュレーション結果と考察を示す。7章で本稿のまとめと今後の課題について述べる。

## 2. アトラクタ選択モデル

アトラクタとは、非線形力学系において、システムが過渡状態を経た後に到達する安定状態のことである。また、アトラクタ選択モデルとは、大腸菌が周囲の栄養状態に応じて、適応的に栄養生成を行う仕組みを表した非線形数値モデルである [7]。大腸菌は自らの成長に必要な栄養を体内で生成するための代謝ネットワークを有しており、文献 [7] では、2種類の栄養生成の代謝ネットワークにおいて、一方の栄養生成の代謝を促進する遺伝子発現が生じている場合に他方の栄養生成が行われない相互抑制関係となるように大腸菌を遺伝子操作し、環境適応実験を行っている。実験では、いずれかの栄養が不足している培地に置かれた大腸菌の体内において、不足する栄養を生成する遺伝子発現が選択的に活性化されることが示されている。大腸菌が、信号伝達機構のようなルールの埋め込みがないにもかかわらず、相互抑制関係にある代謝ネットワークだけで環境適応できる仕組みは、次の非線形ダイナミクスでモデル化される。

2種類の栄養を栄養1、栄養2とし、栄養1に対応する遺伝



て送出する．フィードバックメッセージを受信した中継ノードは、自身が記憶した制御メッセージ送信時刻とフィードバックメッセージに書き込まれた受信側ノードでの受信時刻との差から、自身から受信側ノードまでのエンド間片道遅延を算出する．エンド間片道遅延はフィードバックウィンドウと呼ばれる遅延情報の履歴のリストに追加される．フィードバックウィンドウの最大長は  $W$  であり、これを超える場合には最も古い遅延情報が廃棄される．ノードは、後述するように、フィードバックウィンドウの情報を用いてアクティビティと状態値ベクトルを更新し、ホップ情報に書かれた次ホップノード、すなわち送信側ノードから受信側ノードへの経路における前段ノードにフィードバックメッセージを転送する．同じ手順を繰り返すことで、フィードバックメッセージは順次送信側ノードへ向けて転送され、送信側ノードでも経路情報の更新を行う．

ノードは、受信側ノード  $i$  から  $h$  個目のフィードバックメッセージを受信すると、アクティビティ  $\alpha_i(h)$  を次式で算出し、これを経路情報として記憶する．

$$\alpha'_i = \frac{\min_{0 \leq k \leq W-1} d_i(h-k)}{d_i(h)} \quad (3)$$

$$\alpha_i(h) = \begin{cases} \alpha'_i & \text{if } \alpha_i(h-1) \leq \alpha'_i \\ \alpha_i(h-1) + c(\alpha'_i - \alpha_i(h-1)) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 $d_i(h)$  は  $h$  個目のフィードバックメッセージから求めた自身から受信側ノード  $i$  までの片道遅延である．また、 $c$  ( $0 \leq c \leq 1$ ) は移動平均の係数である．

次に、アクティビティ  $\alpha_i(h)$  を用いて、受信側ノード  $i$  に対する隣接ノード  $j$  の状態値  $m_{i,j}$  を次式によって更新する．

$$\frac{dm_{i,j}}{dt} = \frac{S(\alpha_i(h))}{1 + m_{max}^2 - m_{i,j}^2} - D(\alpha_i(h))m_{i,j} + \eta \quad (5)$$

なお、 $m_{max} = \max_{1 \leq j \leq M} m_{i,j}$  である．また、 $S(\alpha_i(h)) = \alpha_i(h)(\beta\alpha_i(h)^\gamma + \varphi^*)$ 、 $D(\alpha_i(h)) = \alpha_i(h)$ 、 $\eta$  は平均 0、分散 1 の正規乱数であり、計算毎に生成される．

#### 4. 経路制御メッセージ削減手法

提案手法では、送受信ノード対で経路制御メッセージとフィードバックメッセージをやりとりすることで、送信側ノードおよび経路上の中継ノードで受信側ノードに対する経路情報を更新している．削減手法では、このメッセージを拡張することで、1 回のやりとりによって、より多くの経路情報を更新できるようにする．具体的には、経路制御メッセージには、送受信ノードアドレスとホップ情報だけでなく、送信側ノードにおける経路制御メッセージの送信時刻と、中継ノードにおける経路制御メッセージの送受信時刻を含める．また、フィードバックメッセージには、送受信ノードアドレスとホップ情報、受信側ノードにおける経路制御メッセージの受信時刻に加えて、拡張された経路制御メッセージから得られる、送信側ノードにおける経路制御メッセージの送信時刻と中継ノードにおける経路制御メッセージの送受信時刻の情報を含める．なお、中継ノードにおける経路制御メッセージの転送処理遅延が無視できる場合に

は、経路制御メッセージの受信時刻または送信時刻のいずれか一方だけでも良い．

まず、送信側ノードは拡張されたフィードバックメッセージを受信すると、各中継ノードが経路制御メッセージを受信した時刻から、自身が経路制御メッセージを送出した時刻を減ずることにより、自身からそれぞれの中継ノードのエンド間片道遅延を算出することができる．したがって、送信側ノードは、拡張されたフィードバックメッセージの受信により、経路上の全てのの中継ノードと受信側ノードに関する経路情報を更新することができる．

次に、受信側ノードは、経路制御メッセージを受信すると、送信側ノードと中継ノードにおける経路制御メッセージの送信時刻と、自身における受信時刻の差から、送信側ノードと全てのの中継ノードへのそれぞれからのエンド間片道遅延を算出することができる．エンド間片道遅延が双方向で等しいと仮定することにより、受信側ノードはこれらの遅延情報を用いて、送信側ノードおよび全てのの中継ノードのそれぞれに対する経路情報を更新することができる．

最後に、中継ノードは、経路制御メッセージを受信することにより、送信側ノードおよび送信側ノードから自身との間のの中継ノードにおける経路制御メッセージの送信時刻と、自身における受信時刻との差から、それらのノードからのエンド間片道遅延を得ることができる．エンド間片道遅延が双方向で等しいと仮定することにより、中継ノードは、送信側ノードおよび送信側ノードと自身の間に位置する中継ノードに関する経路情報を更新できる．また、同様に、フィードバックメッセージを受信すると、受信側ノードまでの経路上の中継ノードおよび受信側ノードのそれぞれへのエンド間片道遅延を算出することができるため、それらのノードに関する経路情報を更新できる．

以上より、拡張した経路制御メッセージとフィードバックメッセージを用い、エンド間片道遅延が双方向で等しいと仮定することにより、1 組の経路制御メッセージとフィードバックメッセージのやりとりによって、送受信側ノードを含む経路上の全てのノードにおいて、互いの経路情報を更新できる．

それぞれのノードは、あるノードの経路情報を更新すると、そのノードに関する経路制御メッセージ送信タイムを次式で算出される  $T'$  [s] に設定する．なお、フィードバックメッセージを受信した送信側ノードが、受信側ノードに対する経路制御情報を更新した場合には、受信側ノードに関する経路制御メッセージ送信タイムを  $T$  [s] に設定する．

$$T' = T + \max(T/100, J) \quad (6)$$

ここで、 $J$  [s] はフィードバックウィンドウに格納された遅延情報から得られる遅延ジッタであり、 $h$  回目の経路情報の更新の場合、 $J = \max_{0 \leq j \leq W-1} d(h-j) - \min_{0 \leq j \leq W-1} d(h-j)$  で得られる．経路情報の更新とともに経路制御メッセージ送信タイムを  $T$  [s] に設定すると、経路上の全てのノードの経路制御メッセージの送信タイミングが短期間に集中し、同一受信側ノード宛の経路制御メッセージ送信が重複してしまう．そこで、式 (6) で遅延ジッタを加味することにより、経路制御メッセー

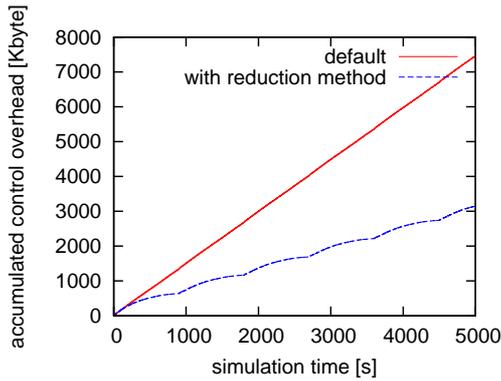


図 2 BA モデルネットワークにおける削減手法の効果

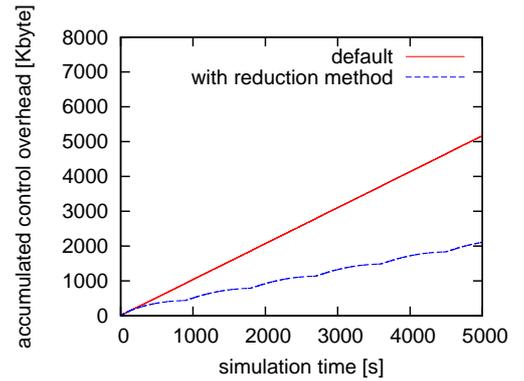


図 3 Waxman モデルネットワークにおける削減手法の効果

ジの送信タイミングをずらし、効果的な制御コスト削減を行う。

## 5. 評価シナリオ

シミュレーションは、提案手法について ns-2, OSPF について Omnet++ を用いて行った。経路制御手法のパラメータとしては、 $\beta = 1000$ ,  $\gamma = 3$ ,  $\varphi^* = 1/\sqrt{2}$ ,  $c = 0.1$ , フィードバックウィンドウサイズ  $W$  を 20, 更新間隔  $T$  を 900 秒とする。また、ノードはシミュレーション開始時にランダムなタイミングで経路制御を開始する。なお、提案手法では MARAS と同様にフラディングによって初期経路を構築し終えた時点と、一方、OSPF では全てのノードが完全なトポロジ情報を取得して経路算出を終えた時点とを、シミュレーション時刻 0 秒とする。バックグラウンドトラフィックやデータ通信はない状態で評価を行う。性能指標としては、累積制御メッセージ量と平均経路長を用いる。累積制御メッセージ量は、全ノード間の経路情報が生成された後の 5000 秒のシミュレーションにおける、各時刻までに送出、転送された、提案手法の経路制御メッセージとフィードバックメッセージ、OSPF の DD メッセージ、LSR メッセージ、LSU メッセージ、LSAck メッセージの累積量である。提案手法については、経路制御メッセージとフィードバックメッセージともに、ヘッダ部 4 バイトに、アドレス 4 バイトと時刻情報 4 バイトをノード数だけ加えた大きさとする。OSPF のメッセージサイズは標準に従う。なお、HELLO メッセージ、および IP 層以下でのヘッダ等は累積制御メッセージ量に含めない。また、シミュレーション終了時点でネットワーク内に存在するメッセージについては、送信途中のものについて加算し、バッファに蓄積されたものは含めない。平均経路長は、シミュレーションの終了時に各ノードが保持している経路表に基づいて計算した全ノード対の経路長の平均とする。

評価には、BA モデル [13] と Waxman モデル [14] を用いて、それぞれ 10 種のトポロジを生成し、次章の評価ではモデル毎に得られた結果の平均値を示す。ノード数 100, リンク容量 10 [Mbps], リンク遅延 0.1 [ms], バッファサイズ 100 [Kbyte] とする。ただし、BA モデルのリンク数は 99, Waxman モデルのリンク数は約 200 である。

## 6. 評価結果

図 2, 図 3 に、BA モデル, Waxman モデルのそれぞれのネットワークにおける累積制御メッセージ量の変化を、削減手法を用いない場合と用いた場合について示す。図より、いずれのネットワークモデルにおいても、削減手法によって、累積制御メッセージ量がおおよそ 58% 削減できていることが分かる。また、ノード数が等しいにもかかわらず、BA モデルのネットワークの方が Waxman モデルのネットワークよりも累積制御メッセージ量が多い。これは、Waxman モデルネットワークの方がノードあたりの隣接ノード数が多く、それらに対しては経路制御メッセージを送信する必要がないこと、また、リンク数が多いために BA モデルネットワークと比較して平均経路長が短く、メッセージの転送回数が少ないことによる。

次に、図 4, 図 5 に、BA モデル, Waxman モデルで生成したネットワークにおける累積制御メッセージ量の変化を、削減手法を適用した提案手法と OSPF について示す。図 4 より、BA モデルネットワークでは、提案手法と OSPF で累積制御メッセージ量がほぼ等しいことが分かる。シミュレーション全体を通じた制御メッセージの平均使用帯域は、提案手法で約 5.036 [Kbps], OSPF で約 5.536 [Kbps] であった。OSPF では、LSA の更新タイミングがノード間で同期するため、30 分ごとに累積制御メッセージ量が増加する。一方、提案手法では、ノード間で経路制御のタイミングがばらついているため、時刻によらず平均的に制御オーバーヘッドが発生している。なお、円弧状の変化が見られるのは、他のノードから送出された経路制御メッセージやその応答であるフィードバックメッセージを中継することによって、経路制御メッセージの送信を取りやめるノードが生じるためである。

一方、図 5 に示されるように、Waxman モデルネットワークでは、OSPF の累積制御メッセージ量が BA モデルネットワークと比較して増加しており、また、提案手法のおおよそ 8 倍となっている。これは、OSPF がリンクステート型の経路制御手法であり、やりとりされるリンクステート情報がリンク数の増加に伴って増大するためである。なお、シミュレーション全体を通じた制御メッセージの使用帯域は、提案手法で約 3.372 [Kbps], OSPF で約 30.994 [Kbps] であった。提案手法では、リンク数

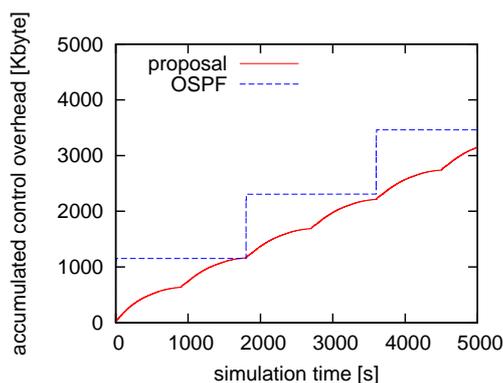


図 4 BA モデルネットワークにおける提案手法と OSPF の比較  
最後に、Waxman モデルネットワークにおける平均経路長は、提案手法で 3.26、OSPF で 3.22 であり、ほぼ同等の経路が構築、維持されていることが分かる。

## 7. おわりに

本稿では、適応性、耐故障性、拡張性に優れた有線網向けプロアクティブ型経路制御の実現を目指し、アトラクタ選択モデルを応用した経路制御手法の検討を行った。まず、プロアクティブ型経路制御で問題となる制御オーバーヘッドの削減手法を提案し、約 58%削減できることを示した。しかしながら、本稿で提案した削減手法は、ノード数に対して 2 乗のオーダで増加することが予想される制御オーバーヘッドを相対比で抑制するものと考えられるため、高い拡張性を達成するためにはさらなる削減に取り組む必要がある。また、OSPF と比較して同程度の経路を構築、維持できるとともに、平常時の制御オーバーヘッドを最大 1/8 に抑えられることを示した。提案手法は、経路制御メッセージとフィードバックメッセージのやりとりによって通信状態を観測し、適応的に経路更新を行う手法であるため、トラフィック変動に対する適応性の高さは制御間隔に影響される。本結果は、OSPF と同程度の制御オーバーヘッドが許容される環境においては、約 2 分の制御間隔を適用可能であることを示唆しているが、制御間隔と適応性の関係について今後検証を行い、適切な制御間隔について検討する。

が増加すると平均経路長が短くなり、経路制御メッセージとフィードバックメッセージに格納されるノードの情報が少なくなるため、メッセージのサイズが小さくなる。一方で、1 組の経路制御メッセージとフィードバックメッセージのやりとりで経路情報を更新することのできるノード数も減少するため、やりとりされるメッセージが増加する。また、BA モデルネットワークでは、他のノード対の経路に含まれやすいノード、すなわち媒介中心性が高いノードにおける削減効果が高い一方で、媒介中心性が低い多数のノードでは経路制御メッセージの送信を効果的に抑制できない。一方で、Waxman モデルネットワークでは、ノードの媒介中心性が一様であり、いずれのノードでもある程度の削減効果が得られる。これらの影響により、本稿でのシミュレーション条件では、Waxman モデルネットワークにおける制御オーバーヘッドが BA モデルネットワークの約 2/3 となっている。

謝辞 本研究の一部は平成 23 年度総務省委託研究「脳の仕組みを活かしたイノベーション創成型研究開発（脳の動作原理の活用による省エネで外乱に強いネットワーク制御基盤技術）」によるものである。ここに記して謝意を表す。

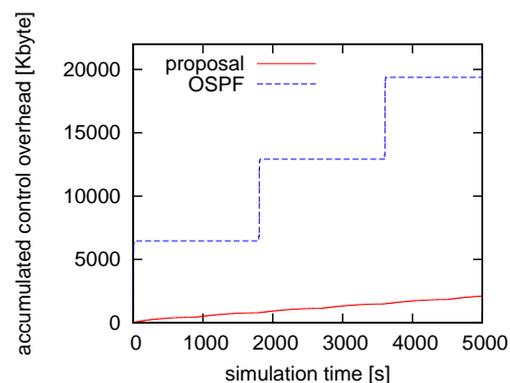


図 5 Waxman モデルネットワークにおける提案手法と OSPF の比較

## 文 献

- [1] S. Paul, J. Pan, and R. Jain, “Architectures for the Future Networks and the Next Generation Internet: A Survey,” *Computer Communications*, vol. 34, pp. 2–42, Jan. 2011.
- [2] R. Coltun, D. Fergunson, and J. Moy, “OSPF for IPv6,” *RFC 2740*, pp. 1–94, Dec. 1999.
- [3] AKARI アーキテクチャ設計プロジェクト, “新世代ネットワーク・アーキテクチャ AKARI 概念設計書改訂版 (ver2.0),” Sept. 2009.
- [4] M. Sniedovich, “Dijkstra’s algorithm revisited: the dynamic programming connexion,” *Control and cybernetics*, vol. 35, pp. 599–620, 2006.
- [5] K. Leibnitz, N. Wakamiya, and M. Murata, “A bio-inspired robust routing protocol for mobile ad hoc networks,” *Computer Communications and Networks*, vol. 16, pp. 321–326, Aug. 2007.
- [6] N. Asvarujanon, K. Leibnitz, N. Wakamiya, and M. Murata, “Extension and evaluation of biologically-inspired routing protocol for MANETs,” 電子情報通信学会技術研究報告, NS2009-52, vol. 109, pp. 55–60, July 2009.
- [7] A. Kashiwagi, I. Urabe, K. Kaneko, and T. Yomo, “Adaptive response of a gene network to environmental changes by fitness-induced attractor selection,” *PLoS ONE*, vol. 1, p. e49, Dec. 2006.
- [8] K. Leibnitz, N. Wakamiya, and M. Murata, “Resilient multi-path routing based on a biological attractor selection scheme,” in *Proceedings of Biologically Inspired Approaches to Advanced Information Technology*, vol. 3853, pp. 48–63, Feb. 2006.
- [9] K. Leibnitz, N. Wakamiya, and M. Murata, “Biologically inspired self-adaptive multi-path routing in overlay networks,” *Communications of the ACM*, vol. 49, pp. 62–67, Mar. 2006.
- [10] N. Asvarujanon, K. Leibnitz, N. Wakamiya, and M. Murata, “Robust and adaptive mobile ad hoc routing with attractor selection,” in *Proceedings of Adaptive and Dependable Mobile Ubiquitous Systems*, July 2010.
- [11] C. Perkins, E. Belding-Royer, and S. Das, “Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing,” *RFC 3561*, pp. 1–37, July 2003.
- [12] K. Leibnitz, N. Wakamiya, and M. Murata, “A bio-inspired robust routing protocol for mobile ad hoc networks,” in *Proceedings of Computer Communications and Networks*, pp. 321–326, 2007.
- [13] A.-L. Barabási and R. Albert, “Emergence of scaling in random networks,” *Science*, vol. 286, pp. 509–512, Oct. 1999.
- [14] B. M. Waxman, “Routing of multipoint connections,” *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, vol. 6, pp. 1617–1622, Dec. 1988.