

# 特別研究報告

題目

生化学反応モデルに着想を得た  
仮想ネットワーク機能の配置手法の提案と評価

指導教員

村田 正幸 教授

報告者

坂田 航樹

2016年2月16日

大阪大学 基礎工学部 情報科学科

生化学反応モデルに着想を得た  
仮想ネットワーク機能の配置手法の提案と評価

坂田 航樹

## 内容梗概

近年、スマートフォンやタブレットが普及したことや、モノのインターネット (Internet of Things: IoT) 技術の発展等により、ネットワークに接続される機器の種類や量が増加している。その結果、ネットワークサービスの種類が多様化され、トラフィック量も急増している。そのようなネットワーク需要の増加に対応するための設備投資として、従来のように専用のハードウェアによって実現されたネットワーク機器を用いると、設備投資や運用のためのコストが膨大になる。また、システム障害や急激な需要変化等の環境変動への対応にも手間がかかり柔軟性が低い。

このような問題に対処するため 1 つの技術として、ネットワーク機能仮想化技術 (Network Function Virtualization: NFV) がある。NFV では、様々な仮想ネットワーク機能 (Virtual Network Function: VNF) が物理サーバあるいは仮想サーバ上に配置され、複数の VNF が 1 台のサーバ資源を共有する。NFV で提供される VNF を必要とするフローは、所望の VNF の適用順で示されるサービスチェイニング要求を持つ。従って、NFV 環境の効率的な運用のためには、VNF の配置、各 VNF への資源配分、及びフローの経路を、サービスチェイニング要求やトラフィック量等に応じて適切に決定することが求められる。また、このような NFV システムのうようなネットワークサービスは、環境変動に素早く対応し、かつ、サービスの拡張性を保持するために自律分散的に動作することが望ましい。そのような動作を実現する一つの方法として、自律分散性や自己組織性が高い、生化学機構を用いる方法がある。

我々の研究グループではこれまでに、生化学機構に着想を得た、生化学反応式を用いたタプル空間モデルに基づくサービス空間構築手法を提案している。この手法により、仮想ネットワークシステムにおける、分散配置された各サーバにおける提供するサービスの決定、複数種類のサービスによるサーバ資源の共有、サービスの分散実行、及び負荷分散等を実現することができる。また、化学反応式はそれぞれのタプル空間で独立に定義されて動作するため、自律分散的な挙動をモデル化するのに適している。しかし、過去の研究においては、本モデルの具体的なネットワークサービスへの適用に関する検討は行われていない。

そこで本報告では、上述のモデルが NFV システムにおける VNF の配置、各 VNF への資源配分、及びフローの経路を、フローのサービスチェイニング要求やトラフィック量等に応じて適応的に決定するために有用であると考え、その適用方法を検討した。具体的には、NFV システムにおけるフローのパケットへの VNF の適用、フローによるサーバ資源の利用、サービスチェイニングの実現、同一サーバ上での複数の VNF の共存等を化学反応式を用いたタプル空間モデルを用いて記述した。

提案手法の有効性を検証するために、複数のシナリオに基づくコンピュータシミュレーションを行い、NFV システムに求められる機能を実現できることを明らかにした。さらに、VNF をネットワーク内の各ノードに固定的に配置する手法との性能比較を行った結果、提案手法を適用することによって、フローへの VNF 提供にかかる時間を 77%削減できることを明らかにした。

#### 主な用語

ネットワーク機能仮想化技術 (NFV)、生化学機構、生化学反応式、仮想ネットワークシステム、タプル空間モデル

# 目次

<b>1</b>	<b>はじめに</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>生化学反応式を用いたタプル空間モデルに基づくサービス空間構築手法</b>	<b>10</b>
2.1	化学反応式を用いたタプル空間モデル	10
2.2	サービスの実行及びその成長と衰退	10
2.3	サーバの資源量による制約	12
2.4	サービスの拡散	12
2.5	サービス要求の移動	13
2.6	複数のサービスの共存	13
2.7	まとめ	15
<b>3</b>	<b>NFV への適用</b>	<b>16</b>
3.1	サービスチェイニング要求	16
3.2	フローへの VNF の適用	16
3.3	フローのサーバ資源の利用	17
3.4	VNF の NFV システム内での拡散	17
3.5	フロー経路の決定	18
3.6	同一サーバ上での複数の VNF の共存	18
3.7	まとめ	18
<b>4</b>	<b>動作検証</b>	<b>21</b>
4.1	シミュレーション方法	21
4.2	ネットワークトポロジ	21
4.3	パラメータ設定	23
4.4	シミュレーション結果と考察	23
4.4.1	シナリオ 1: フロー経路の決定	23
4.4.2	シナリオ 2: VNF の配置とサーバ資源配分	24
4.4.3	シナリオ 3: VNF の分散実行	24
<b>5</b>	<b>性能評価</b>	<b>33</b>
5.1	パラメータ設定	33
5.2	評価指標	33
5.3	比較手法	33
5.4	評価結果と考察	34

6 おわりに	39
謝辞	40
参考文献	41

## 図目次

1	ネットワーク機能仮想化 (NFV) 環境 . . . . .	8
2	生化学反応式を用いたタプル空間モデル [1] . . . . .	11
3	勾配場によるリクエストの移動 . . . . .	14
4	$c = \{f_0, f_1, f_2\}$ を持つフローのパケットの勾配場による移動 . . . . .	19
5	シミュレーションに用いるネットワークトポロジ . . . . .	22
6	シナリオ 1: 時刻 400msec における勾配場 . . . . .	26
7	シナリオ 1: 各ノードにおける <i>toserve</i> の発生数の時間変化 . . . . .	27
8	シナリオ 2: 各ノードにおける <i>VNF</i> の濃度の時間変化 . . . . .	28
9	シナリオ 2: 各ノードにおける <i>toserve</i> の発生数の時間変化 . . . . .	29
10	シナリオ 2: ノード 8 における <i>RSRC</i> 、 <i>MEDIATE</i> <sub><i>c</i>0</sub> 、 <i>MEDIATE</i> <sub><i>c</i>1</sub> の濃度の時間変化 . . . . .	30
11	シナリオ 3: 各ノードにおける <i>toserve</i> の発生数の時間変化 . . . . .	31
12	シナリオ 3: ノード 8 における <i>RSRC</i> 、 <i>MEDIATE</i> <sub><i>c</i>0</sub> 、 <i>MEDIATE</i> <sub><i>c</i>1</sub> の濃度の時間変化 . . . . .	32
13	パケット処理時間分布 . . . . .	35
14	パケットホップ数分布 . . . . .	36

## 表 目 次

1	生化学反応式を用いたタプル空間モデルと仮想ネットワークシステムの対応 付け . . . . .	11
2	フローのパラメータ設定 . . . . .	37
3	ノードにおける VNF の適用回数 . . . . .	38

## 1 はじめに

近年、スマートフォンやタブレットが普及したことや、身の周りの様々な機器がネットワークに繋がるモノのインターネット (Internet of Things: IoT) 技術 [2] の発展等により、ネットワークに接続される機器が増加している。その結果、ネットワークサービスの種類が多様化され、トラフィック量も急増している。そのようなネットワーク需要の増加に対応するための設備投資として、従来のように専用のハードウェアによって実現されたネットワーク機器を用いると、新たなネットワークサービスを立ち上げるために新たな専用のハードウェアが必要となり、初期導入コストや運用のための電力コストの増加を引き起こす。また、多種多様なサービスに対して専用のハードウェアが必要となり、かつ近年それらの製品寿命が短くなっていることから、設備投資コストが膨大になる。さらに、システム障害や急激な需要変化等の環境変動への対応にも手間がかかり柔軟性が低い。

このような問題に対処するための1つの技術として、ネットワーク機能仮想化技術 (Network Function Virtualization: NFV) [3] がある。NFV は、サーバ仮想化技術をネットワーク機能に応用したものであり、これまで専用のハードウェアで実現されてきたファイアウォール [4]、Deep Packet Inspection (DPI) [5]、ネットワークアドレス変換機能 (Network Address Translation: NAT) [6] や Evolved Packet Core (EPC) [7] 等のネットワーク機能を、汎用サーバ上で動作するソフトウェアによって実現する技術である [8,9]。このようにソフトウェアによって実現された機能を仮想ネットワーク機能 (Virtual Network Function: VNF) と呼ぶ。図1にNFVに基づくネットワーク環境を示す。以降ではこのような環境をNFVシステムと呼ぶ。様々なVNFが物理サーバあるいは仮想サーバ上に配置され、複数のVNFが1台のサーバ資源を共有する。このようにしてネットワーク機能を仮想化することにより、運用コストや設備投資コストを抑え、また、システム障害や急激な需要変化等の環境変動に対しても柔軟に対応することができる。

NFVで提供されるVNFを必要とするフローは、所望のVNFの適用順で示されるサービスチェイニング要求を持つ。NFVシステムに到着したフローは、サービスチェイニング要求に従う順でVNFを適用され、システムから退出する。従って、NFVシステムの効率的な運用のためには、VNFの配置、VNFへの資源配分、及びフローの経路を、サービスチェイニング要求やフローのトラフィック量等に応じて決定することが求められる。文献 [10] では、これらを決定する手法が提案されているが、その手法では全てのフローのサービスチェイニング要求を事前に知る必要がある。また、結果を得るために膨大な計算時間が必要となるため、様々なフローが動的に発生するような環境には適用することができない。

一方、NFVシステムのようなネットワークサービスは、サーバ障害や需要の変化等の環境変動に素早く対応し、かつ、サービスの拡張性を保持するために運用者の介入なしで自律



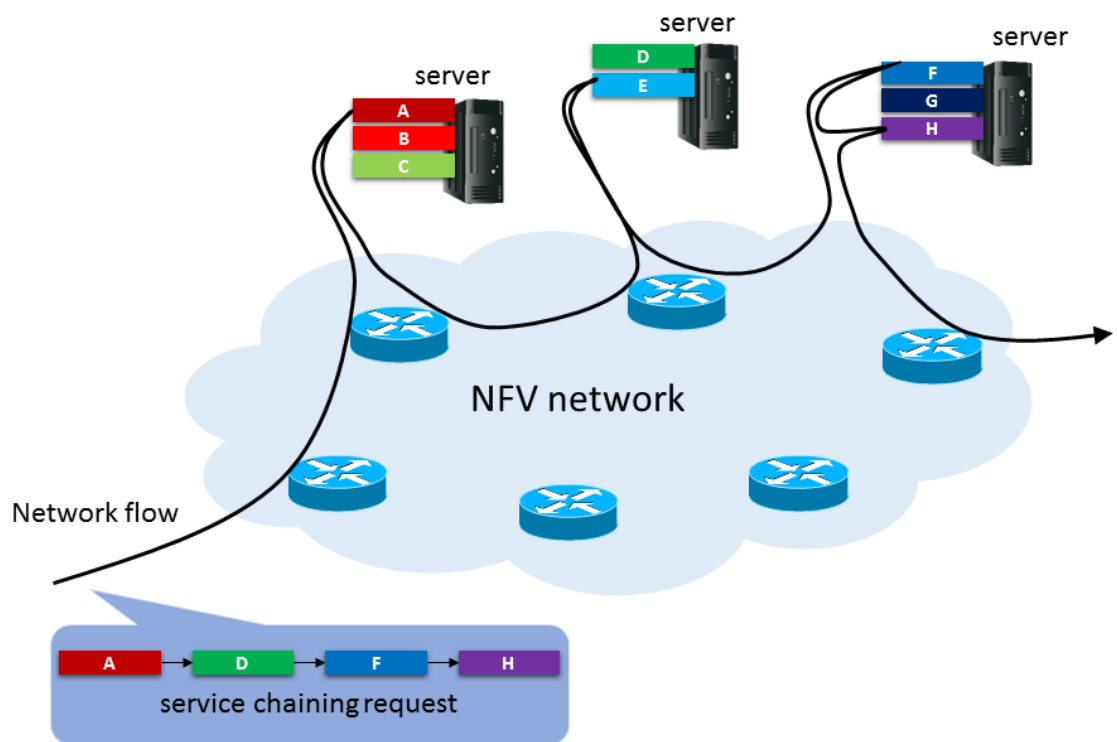


図 1: ネットワーク機能仮想化 (NFV) 環境

分散的に動作することが望ましい [11]。そのような挙動を実現する一つの方法として、自律分散性や自己組織性が高い、生化学機構を用いる方法がある [12-14]。

我々の研究グループではこれまでに、生化学機構に着想を得た、生化学反応式を用いたタプル空間モデルに基づくサービス空間構築手法を提案している [1, 15]。この手法では、仮想ネットワークシステムにおいて、サーバをタプル空間として、サービス要求、サービス需要、及びサーバ資源等をタプル空間内の化学物質としてモデル化し、サーバの挙動をタプル空間における化学反応式として記述する。さらに、複数のタプル空間を接続してネットワークを構成することで、複数のサーバから構成されるネットワークサービス環境における、サービスや要求の移動や拡散を表すことができる。これにより、仮想ネットワークシステムにおける、分散配置されたサーバにおける提供サービスの決定、複数種類のサービスによるサーバ資源の共有、サービスの分散実行、及び負荷分散等を実現することができる。また、化学反応式はそれぞれのタプル空間で独立に定義され、反応物の濃度によって決定される速度で実行されるため、自律分散的な挙動をモデル化するのに適している。しかし、過去の研究においては、本モデルの具体的なネットワークサービスへの適用に関する検討は行われていない。

そこで本報告では、上述のモデルがNFVシステムにおけるVNFの配置、VNFへの資源配分、及びフローの経路を、フローのサービスチェイニング要求やトラフィック量等に応じて適応的、かつ、自律分散的に決定するために有用であると考え、その適用方法を検討する。まず初めに、上述のモデルをNFVシステムに適用する際に、モデルにおける化学物質や化学反応式と、NFVシステムにおける各要素やVNFとの適合について検討する。またその際、NFVシステムに適用するために既存モデルに不足している化学物質や化学反応式を提案する。具体的には、NFVシステムにおけるフローの packets へのVNFの適用、フローによるサーバ資源の利用、サービスチェイニングの実現、同一サーバ上での複数のVNFの共存等を、化学反応式を用いたタプル空間モデルを用いて記述する。

次に、提案方式の有効性の検証のために、 $\tau$ -leaping法 [16]に基づくコンピュータシミュレーションを行う。その結果から、NFVシステムに求められる機能を実現できることを明らかにする。さらに、VNFをネットワーク内の各ノードに固定的に配置する手法との性能比較を行う。

本報告の構成は以下の通りである。まず2章では、本報告において用いた、生化学反応式を用いたタプル空間モデルに基づくサービス空間構築手法について述べる。3章では、2章で述べた手法をNFVに適用する方法を説明する。4章では、提案方式の妥当性や特性をコンピュータシミュレーションにより確認する。5章では、単純なVNF配置方法との性能比較を行う。最後に6章で本報告のまとめと今後の課題について述べる。

## 2 生化学反応式を用いたタプル空間モデルに基づくサービス空間構築手法

本章では、本報告で用いた、仮想ネットワークシステムにおける、化学反応式を用いたタプル空間モデルに基づくサービス空間構築手法 [1] について述べる。

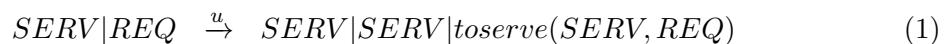
### 2.1 化学反応式を用いたタプル空間モデル

タプル空間を化学反応が起こる場とする。タプル空間内のタプルは化学物質に相当し、その量は化学物質の濃度に相当する。タプル空間内で起こる反応を説明する化学反応式を定義することにより、タプル濃度の増減や拡散等の様々な挙動が定められる。化学反応式の反応速度は、それぞれの化学反応式に定義された反応速度係数と各反応物の濃度の積で決定される。さらに、このように定義された複数のタプル空間を接続してネットワークを構成し、タプル空間の間のタプルの拡散や移動を定義することによって、ネットワーク全体の挙動を記述する。各タプル空間における化学反応は独立に起こるため、本モデルを用いることによって、自律分散的な動作を記述することができる。このような化学反応式を用いたタプル空間モデルの概要を図2に示す。

仮想ネットワークシステムでは、様々なサービスや機能が仮想サーバあるいは物理サーバに配置され、システム全体として1つのサービスを提供する、サービス空間が構築される。表1に文献 [1, 15] において用いられている、タプル空間モデルと仮想ネットワークシステム間の対応付けを示す。以降では、文献 [1, 15] で提案されている、タプル空間モデルの仮想ネットワークシステムへの適用方法について概略する。

### 2.2 サービスの実行及びその成長と衰退

最初に、1つのタプル空間、つまり1つのサーバにおける化学反応式を説明する。仮想ネットワークシステムにおけるサーバへのサービス配置はサービスの需要に従って決定される必要がある。また、需要の少ないサービスは衰退し、需要の多いサービスは成長させることが求められる。このような挙動は式 (1)、(2) によって実現される。



ここで、 $SERV$  はサービスの識別子を表し、その濃度が大きいほど、そのサービスの需要が多いことを意味する。 $REQ$  はサービス要求を表す。 $toserv(SERV, REQ)$  はサービス要

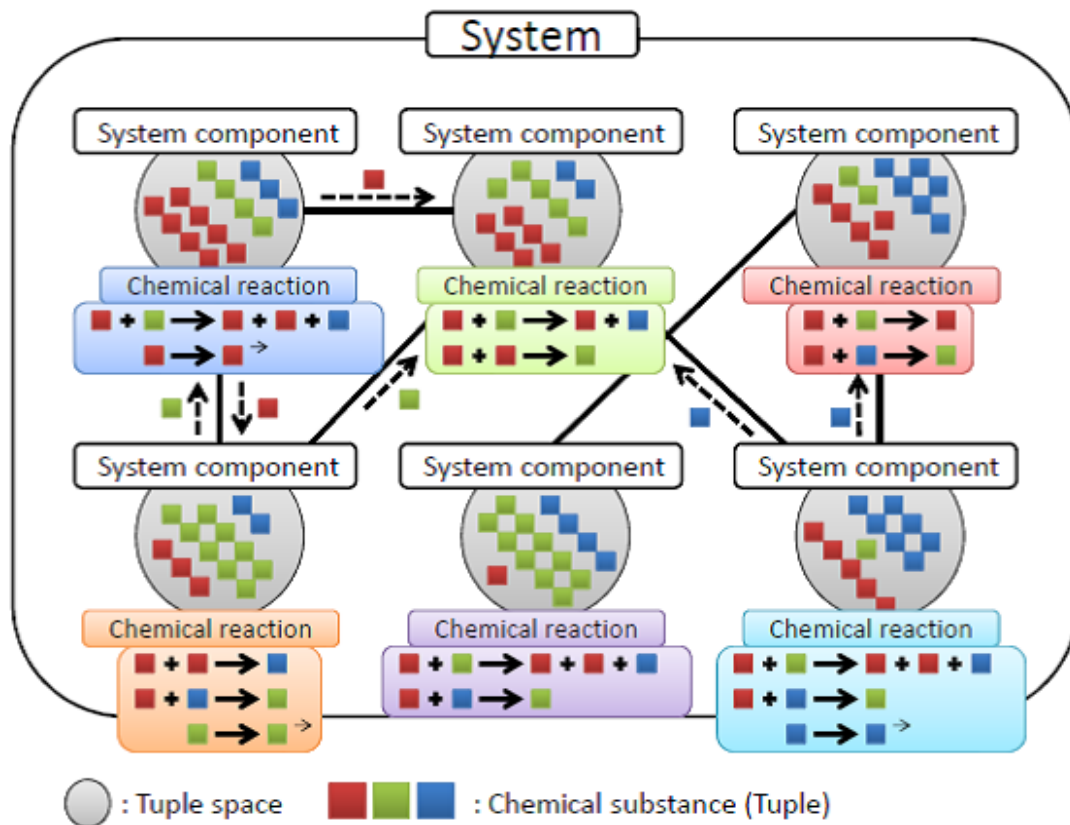


図 2: 生化学反応式を用いたタプル空間モデル [1]

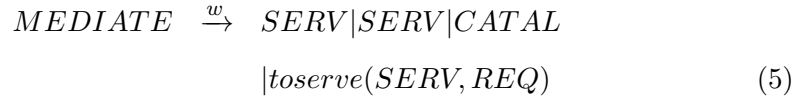
表 1: 生化学反応式を用いたタプル空間モデルと仮想ネットワークシステムの対応付け

タプル空間モデル	仮想ネットワークシステム
タプル空間	物理サーバ
化学物質	ユーザリクエスト、サービス需要、サーバ資源等
化学反応式	サーバにおける様々な処理

求に対してサービスを実行したことやその結果を表す。化学反応式の矢印の上にかかれた変数は、その化学反応の反応速度係数を表す。式 (1) は、サービス要求に対してサービスを実行し、その要求を削除すること、及び、実行されたサービスを成長させる、という2つの役割を持つ。式 (2) は、実行されないサービスが徐々に衰退することを表している。

### 2.3 サーバの資源量による制約

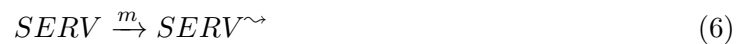
化学反応の速度は、その反応における各反応物の濃度の積に比例して決定される。これに従うと、例えば、式 (1) においては、 $SERV$  及び  $REQ$  の濃度が大きくなると、それに応じて反応速度が際限なく増加する。しかし、実際のサーバでは、CPU 能力やメモリサイズ等の資源量によって、サービスの実行速度に制約が存在する。そのため、式 (1) のみを用いるのは、実際の仮想ネットワークシステムの挙動を記述するためには不適切である。この問題に対し、酵素触媒反応に基づく反応式を用いる。酵素触媒反応では、触媒は反応そのものには影響を与えないが、その濃度によって反応速度を制御することができる。そこで、文献 [17] において説明されている酵素触媒反応のモデルを用いて、式 (1) を以下のように拡張する。



ここで、 $CATAL$  は触媒を表し、仮想ネットワークシステムにおいてはサーバにおける利用可能な資源量を表す。したがって、あるタプル空間における  $CATAL$  の初期濃度は、対応するサーバ資源の総量によって決定される。 $MEDIANE$  は酵素触媒反応を説明するために仮想的に導入された酵素・基質複合体を表し、その濃度は、サービスに割り当てられたサーバ資源量に相当する。式 (3) から、 $SERV$  及び  $REQ$  の濃度が大きい場合においても、 $CATAL$  の濃度が小さい場合には反応速度が小さくなることがわかる。

### 2.4 サービスの拡散

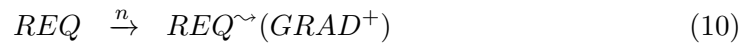
ネットワークによって接続された複数のサーバから構成される仮想ネットワークシステムを記述するために、タプル空間を接続したネットワークを構築する。また、あるサーバにおけるサービスが他のサーバへ拡散する様子を、以下の反応式を導入することによって記述する。



上式は、 $SERV$  がその濃度に比例した速度で周囲の接続されたタプル空間に拡散することを表している。これは、あるサーバにおける需要の多いサービスが、仮想ネットワークサービス空間内の他のサーバへ広がることに対応している。

## 2.5 サービス要求の移動

あるサーバに存在するサービス要求に対して、そのサーバ上でサービスを実行できない場合には、サービス要求は対応するサービスが提供されているサーバへ移動することが求められる。また、その移動先は、要求するサービスが提供されているサーバに近づく方向であることが望ましい。このような挙動を実現するために、各サーバにおけるサービス需要とサーバ資源量に基づく勾配場を形成し、サービス要求が勾配場に従って移動することを目的とし、以下の化学反応式を用いる。



ここで、 $GRAD$  は勾配場を形成するための物質である。式 (7) は、 $GRAD$  が、 $SERV$  と  $CATAL$  の濃度に応じた速度で生成されることを意味している。式 (9) は、 $GRAD$  が一定の速度で消失することを意味している。すなわち、 $SERV$  や  $CATAL$  の濃度が小さく、式 (8) による  $GRAD$  の生成が行われなようなタプル空間では、 $GRAD$  の濃度が徐々に小さくなる。式 (9) は、 $GRAD$  がその濃度の小さい周囲の接続されたタプル空間へ拡散することを表している。したがって、 $GRAD$  による勾配場は、 $SERV$  や  $CATAL$  の濃度が大きく、 $GRAD$  が大きな速度で生成されるタプル空間を頂上とし、その周囲に向かって裾野が広がるように形成される。式 (10) は、 $REQ$  が  $GRAD$  の濃度の高い周囲の接続されたタプル空間へ移動することを表している。これらの反応式を導入することによって、サービス要求が、対応するサービス需要がより多く、かつ、資源がより多く残存しているサーバの方向へ移動する、という挙動が実現される。図 3 に、式 (7)-(10) によって実現される勾配場の形成、及びサービス要求の移動の様子を表す。

## 2.6 複数のサービスの共存

1 台のサーバ上に複数のサービスが共存する場合、それぞれのサービスの需要に応じてサーバ資源を割り当てることで、需要に応じた資源共有を行うことが求められる。これを実

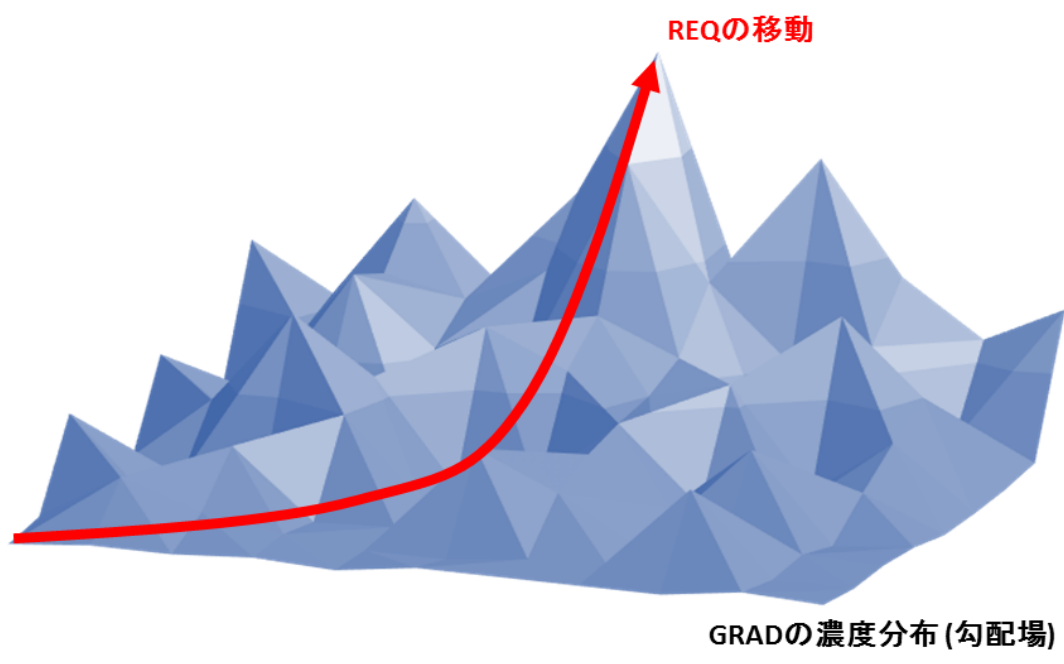


図 3: 勾配場によるリクエストの移動

現するために、上述した化学反応式をサービス毎に定義する。

## 2.7 まとめ

2.2節から2.6節までで説明した化学反応式をまとめると、式(11)-(19)のようになる。これらは、タプル空間  $t$  におけるサービス  $i$  に関して定義される化学反応式を表している。 $I$  はタプル空間に存在する全てのサービスの集合である。

$$\forall i \in I \text{ } SERV_i | REQ_i | CATAL_t \xrightarrow{u} \text{ } MEDIATE_{i,t} \quad (11)$$

$$\forall i \in I \text{ } MEDIATE_{i,t} \xrightarrow{v} \text{ } SERV_i | REQ_i | CATAL_t \quad (12)$$

$$\forall i \in I \text{ } MEDIATE_{i,t} \xrightarrow{w} \text{ } SERV_i | SERV_i | CATAL_t \quad (13)$$

$$| \text{ } toserve(SERV_i, REQ_i) \quad (13)$$

$$\forall i \in I \text{ } SERV_i \xrightarrow{d} 0 \quad (14)$$

$$\forall i \in I \text{ } SERV_i \xrightarrow{m} \text{ } SERV_i^{\rightsquigarrow} \quad (15)$$

$$\forall i \in I \text{ } SERV_i | CATAL_t \xrightarrow{g} \text{ } SERV_i | CATAL_t | GRAD_i \quad (16)$$

$$\forall i \in I \text{ } GRAD_i \xrightarrow{h} 0 \quad (17)$$

$$\forall i \in I \text{ } GRAD_i \xrightarrow{k} \text{ } GRAD_i^{\rightsquigarrow} (GRAD_i^-) \quad (18)$$

$$\forall i \in I \text{ } REQ_i \xrightarrow{n} \text{ } REQ_i^{\rightsquigarrow} (GRAD_i^+) \quad (19)$$

式(11)-(19)をタプル空間毎に定義することによって、仮想ネットワークシステムにおけるサービス空間の構築、分散配置された各サーバが提供するサービスの決定、サーバ資源の共有、及びサービスの分散実行等を記述することができる。



### 3 NFV への適用

NFV システムにおける VNF の配置、VNF への資源配分、フローの経路等をサーバ資源量や VNF に対する需要の変化に応じて適応的、かつ、自律分散的に決定するために、2 章において説明した手法を適用する。本報告においては、VNF はフローを構成する個々のパケットに対して実行されるものと仮定する。

#### 3.1 サービスチェイニング要求

あるフローに対して、そのサービスチェイニング要求により実行される VNF を順に  $f_1, f_2, \dots$  とする。この時、フローのサービスチェイニング要求  $c$  を以下のように表す。

$$c = \{f_1, f_2, f_3, \dots\}$$

サービスチェイニング要求  $c$  を持つフローに対して、VNF  $f_1$  が実行された場合には、 $c$  が以下のように変化するものとする。

$$c \leftarrow c \setminus \{f_1\} = \{f_2, f_3, \dots, f_{end}\}$$

サービスチェイニング要求  $c$  が次に実行を要求している VNF を  $f^1(c)$  と表す。以下では、化学物質の添え字  $f$  はフローを、 $c$  はサービスチェイニング要求を表す。

#### 3.2 フローへの VNF の適用

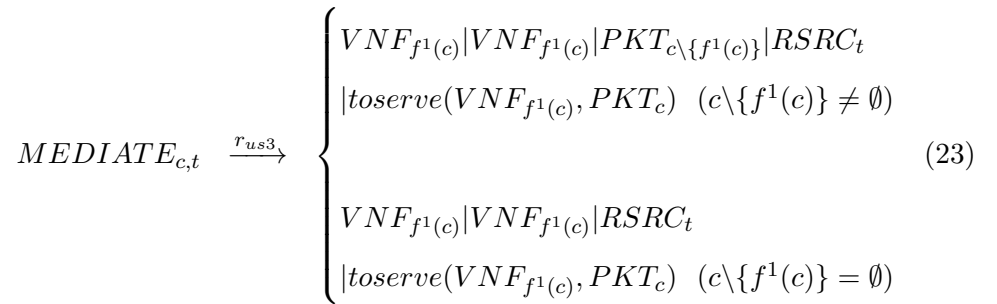
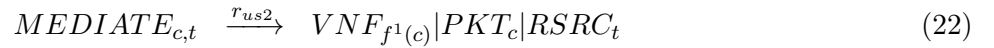
文献 [1] における手法では、式 (1) に示すように、サービス要求に対するサービスが実行されると、そのサービス要求は消失する。NFV システムにおいては、サービス要求はフローを構成するパケットと見なす。また、サービスチェイニング要求が複数の VNF から構成されている場合には、パケットは消失するのではなく、次に適用される VNF に対応したパケットに変化すると考える。このような挙動を実現するため、式 (1) を以下のように拡張する。

$$VNF_{f^1(c)}|PKT_c \xrightarrow{rus} \begin{cases} VNF_{f^1(c)}|VNF_{f^1(c)}|PKT_{c \setminus \{f^1(c)\}} \\ |toserve(VNF_{f^1(c)}, PKT_c) \quad (c \setminus \{f^1(c)\} \neq \emptyset) \\ \\ VNF_{f^1(c)}|VNF_{f^1(c)} \\ |toserve(VNF_{f^1(c)}, PKT_c) \quad (c \setminus \{f^1(c)\} = \emptyset) \end{cases} \quad (20)$$

$VNF_f$  は  $VNF_f$  を表し、その濃度が大きいほどその VNF に対する需要が多いことを表す。 $PKT_c$  はサービスチェイニング要求が  $c$  であるフローを構成するパケットを表す。 $toserve(VNF_{f^1(c)}, PKT_c)$  はサービスチェイニング要求が  $c$  であるフローのパケットに対して、次に適用すべき VNF が実行されたことを表す。また、VNF が適用された際、サービスチェイニング要求に適用すべき VNF が残っている場合にはフローのチェイニング要求  $c$  は、 $c \setminus \{f^1(c)\}$  に変化することによって、次に適用すべき VNF の実行要求を持つフローのパケットに変化する。一方、全ての VNF の適用が完了した場合には、 $PKT_c$  は消失する。

### 3.3 フローのサーバ資源の利用

NFV システムにおける、VNF が配置されているサーバの資源量に応じた VNF の実行速度の制約を記述するために、式 (3)-(5) に基づき、式 (20) を以下のように拡張する。



$RSRC$  および  $MEDIATE$  の濃度は、サーバにおける利用可能なサーバ資源量、及び、サーバが提供している VNF に割り当てられたサーバ資源量をそれぞれ表す。

### 3.4 VNF の NFV システム内での拡散

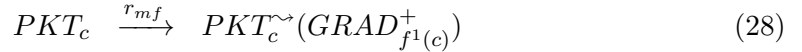
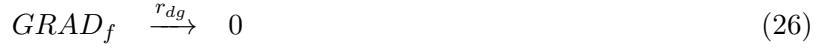
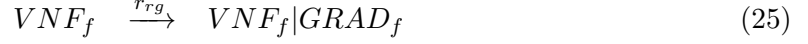
2.4 節と同様に、NFV システム内の他のサーバへ VNF が拡散することを、以下の化学反応式を導入することによって表現する。



これにより、NFV システム内で需要の多い VNF がネットワーク内の複数のサーバへ拡散し、分散実行されることが期待される。

### 3.5 フロー経路の決定

フローのパケットが次に適用すべき VNF が存在するサーバの方向へ移動する挙動は、式 (7)-(10) に基づき、以下に示す化学反応式で記述する。



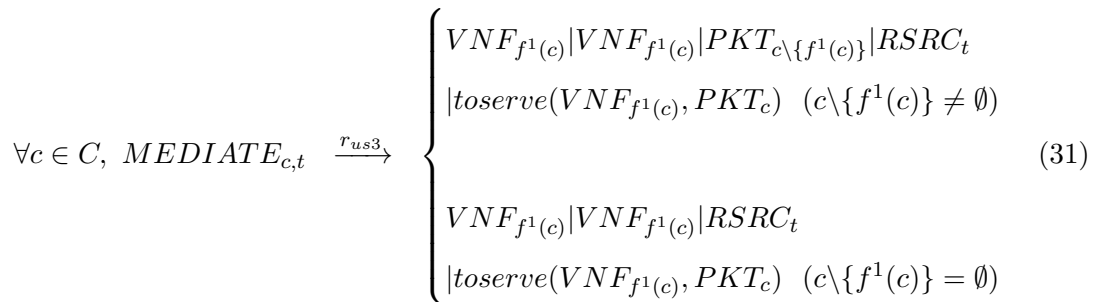
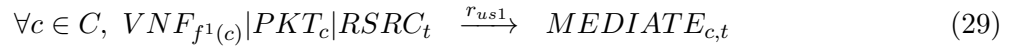
これらの化学反応式を用いることにより、VNF 毎に勾配場を形成し、フローのパケットは、次に適用される VNF の勾配場に従って移動することが表現される。サービスチェイニング要求  $c = \{f_0, f_1, f_2\}$  を持つフローのパケットの移動の様子を図 4 に示す。

### 3.6 同一サーバ上での複数の VNF の共存

2.6 節と同様に、各サーバで実行することができる全ての VNF に対して、上述した化学反応式を導入することで、1 台のサーバにおいて、VNF の需要に応じたサーバ資源の共有を行う。

### 3.7 まとめ

3.1 節から 3.6 節までをまとめると、タプル空間  $t$  において定義される化学反応式は以下のようなになる。ここで、 $F$  は NFV システムで提供される全ての VNF の集合、また、 $C$  は NFV システム内に存在し得る全てのサービスチェイニング要求の集合である。ここで、 $C$  には、部分的に適用が完了したサービスチェイニング要求も含まれる。



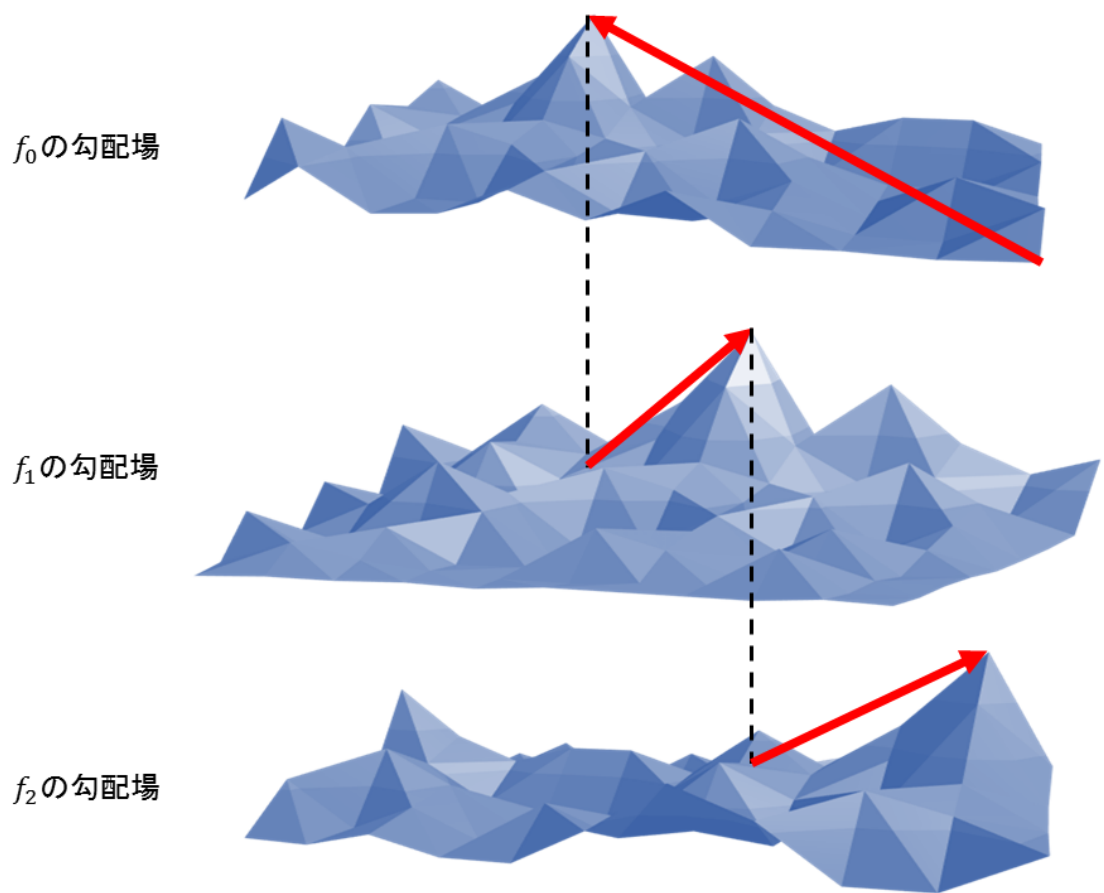


図 4:  $c = \{f_0, f_1, f_2\}$  を持つフローのパケットの勾配場による移動

$$\forall f \in F \text{ VNF}_f \xrightarrow{r_{ds}} 0 \quad (32)$$

$$\forall f \in F \text{ VNF}_f \xrightarrow{r_{ms}} \text{VNF}_f^{\rightsquigarrow} \quad (33)$$

$$\forall f \in F \text{ VNF}_f | \text{RSRC}_t \xrightarrow{r_{rg}} \text{VNF}_f | \text{RSRC}_t | \text{GRAD}_f \quad (34)$$

$$\forall f \in F \text{ GRAD}_f \xrightarrow{r_{dg}} 0 \quad (35)$$

$$\forall f \in F \text{ GRAD}_f \xrightarrow{r_{mg}} \text{GRAD}_f^{\rightsquigarrow} (\text{GRAD}_f^-) \quad (36)$$

$$\forall c \in C \text{ PKT}_c \xrightarrow{r_{mf}} \text{PKT}_c^{\rightsquigarrow} (\text{GRAD}_{f^1(c)}^+) \quad (37)$$

式 (29)-(37) をタプル空間毎に定義することによって、NFV システムにおけるフローのパケットへの VNF の適用、フローによるサーバ資源の利用、サービスチェイニングの実現、同一サーバ上での複数の VNF の共存等を表現することができる。

## 4 動作検証

本章では、3章において定義した化学反応式によって、NFVシステムにおけるVNFの配置、VNFへの資源配分、及びフローの経路が、フローのサービスチェイニング要求やトラヒック量等に応じて適切に決定されることを確認する。

### 4.1 シミュレーション方法

化学反応式を用いたモデルのシミュレーションを行うために、文献 [18] で提案されている  $\tau$ -leaping 法を用いる。 $\tau$ -leaping 法は、時間間隔  $\tau$  毎に各化学反応式をまとめて実行することで、化学反応式による化学物質の濃度の時間変化を短時間で得る手法であり、以下の手順で進められる。

- (1) 時間間隔  $\tau$  を決定する
- (2) 各化学反応式の反応速度を、反応物の濃度と反応速度係数の積によって決定する
- (3)  $\tau$  の間に各反応式が起こる回数をポアソン分布に従う乱数によって決定する
- (4) (3) で導出した回数だけ化学反応を起こし、化学物質の濃度を更新する
- (5) シミュレーション時刻を  $\tau$  だけ進める
- (6) (2)-(5) をシミュレーション終了時刻まで繰り返す

本報告においては、時間間隔  $\tau$  は 0.6msec と設定した。シミュレーション時間は 1 秒とする。

### 4.2 ネットワークトポロジ

シミュレーション評価に用いるネットワークトポロジとして、図 5 に示す、学術情報ネットワーク SINET [19] のバックボーンネットワークトポロジを用いる。トポロジは 8 つのノードと 13 本のリンクから構成される。本報告においては、リンクの伝播遅延時間は無視する。以下では、札幌、仙台、東京、金沢、名古屋、大阪、広島、及び博多に設置されたノードを、それぞれノード 1-8 と呼ぶ。各ノードには VNF を収容できるサーバが 1 台ずつ設置されているものとする。

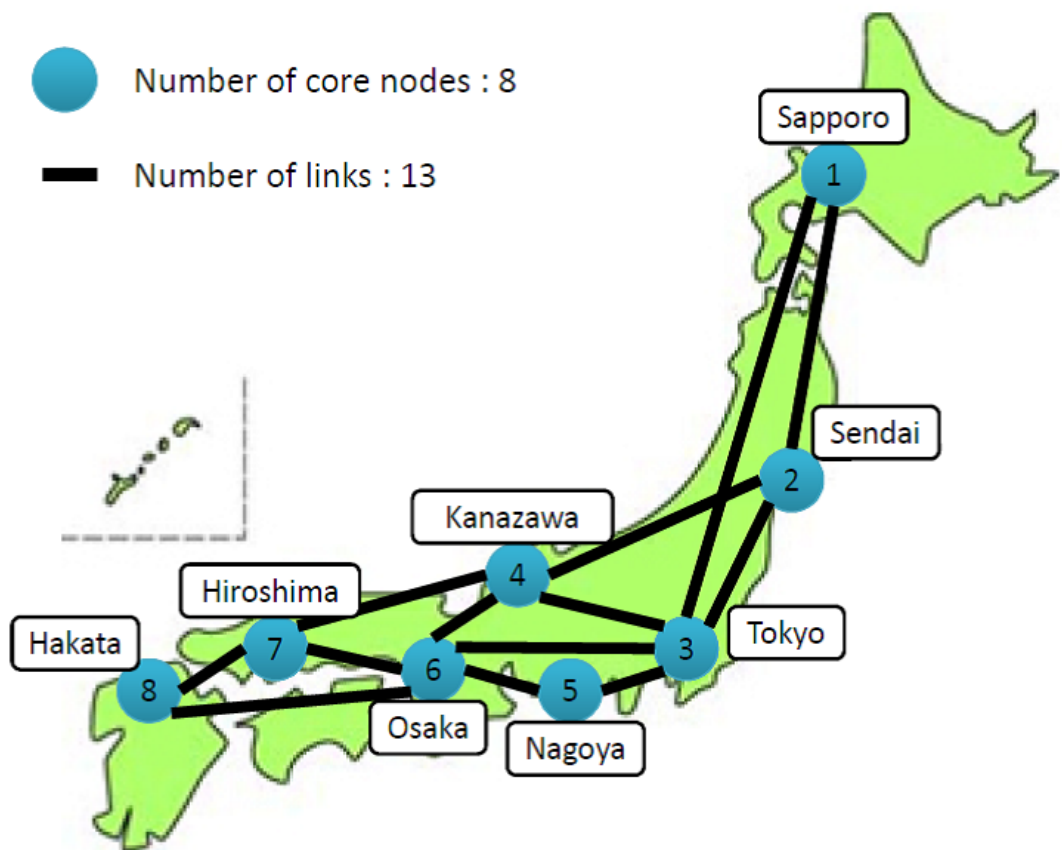


図 5: シミュレーションに用いるネットワークポロジ

### 4.3 パラメータ設定

式 (29)-(37) における各化学物質のシミュレーション開始時の濃度を以下のように決定する。ノード 6 の  $VNF_{f_0}$  の濃度、及びノード 2 の  $VNF_{f_1}$  の濃度の初期値をそれぞれを 2,000 とし、それ以外の全てのノードにおける VNF の濃度は全て 0 とする。全てのノードの  $RSRC$  の濃度の初期値を 1,000 とする。これは、VNF はフローの個々のパケットに対して適用されるものとする、各ノードにおいて、パケットへの VNF の適用を最大約 83 Kpps のスループットで実行できることを意味する。また、フローのパケットサイズを 1,500 Bytes とすると、約 1 Gbps のスループットに相当する。また、他の化学物質の濃度の初期値は 0 とした。

以下、特に断りのない限り提案方式における式 (29)-(37) の反応速度係数を、それぞれ  $r_{us1} = 0.0001$ 、 $r_{us2} = 0.0001$ 、 $r_{us3} = 0.05$ 、 $r_{ds} = 0.01$ 、 $r_{ms} = 0.003$ 、 $r_{rg} = 0.0001$ 、 $r_{dg} = 0.03$ 、 $r_{mg} = 0.005$ 、 $r_{mf} = 0.3$  とする。

### 4.4 シミュレーション結果と考察

提案手法の有効性を評価するために、3つのシナリオに基づいてシミュレーションを行い、その結果を確認する。

#### 4.4.1 シナリオ 1: フロー経路の決定

本シナリオにおいては、ノード 8 にチェイニング要求  $c = \{f_0, f_1\}$  を持ったフローのパケットが 33 Kpps で到着する。なお、VNF の拡散を表す式 (33) の反応速度係数  $r_{ms}$  を 0 と設定することで、物質  $VNF$  の拡散が起こらないようにする。これにより、フローが VNF の需要及びサーバ資源の残量に従って形成された勾配場に従って適切なノードに移動し、サービスチェイニング要求の順に従って VNF が実行されることを確認する。

図 6 に、シミュレーション時刻 400 msec における、各ノードにおける  $GRAD_{f_0}$  及び  $GRAD_{f_1}$  の濃度を示す。図より、 $VNF_{f_0}$  の勾配物質である  $GRAD_{f_0}$  はノード 6 を頂上として、 $VNF_{f_1}$  の勾配物質である  $GRAD_{f_1}$  はノード 2 を頂上として勾配場を形成していることがわかる。図 7 に、各ノードにおける  $toserve(VNF_{f_0}, PKT_{c_0})$  及び  $toserve(VNF_{f_1}, PKT_{c_1})$  の発生数の時間変化を示す。図より、 $VNF_{f_0}$  はノード 6 で、 $VNF_{f_1}$  はノード 2 でそれぞれ実行されていることがわかる。これにより、フローが適切なノードに移動し、VNF が実行されていることが確認された。



#### 4.4.2 シナリオ 2: VNF の配置とサーバ資源配分

本シナリオにおいては、ノード 8 にチェイニング要求  $c = \{f_0, f_1\}$  を持ったフローのパケットが 33 Kpps で到着する。シナリオ 1 とは異なり、 $r_{ms}$  を 0.003 と設定しているため、VNF の拡散が発生する。これにより、VNF の適切なノードへの配置及び複数の VNF へのサーバ資源配分が適切に行われることを確認する。

図 8 に、各ノードにおける  $VNF_{f_0}$  及び  $VNF_{f_1}$  の濃度の時間変化を示す。図より、 $VNF_{f_0}$  がノード 6 から、また  $VNF_{f_1}$  がノード 2 から、フローのパケットが到着するノード 8 へ移動していることがわかる。これは、VNF が拡散反応により拡散し、拡散先にその VNF の実行要求を持ったパケットが存在すれば VNF が成長するためである。図 9 に各ノードにおける  $toserve(VNF_{f_0}, PKT_{c_0})$  及び  $toserve(VNF_{f_1}, PKT_{c_1})$  の発生数の時間変化を示す。図より、シミュレーション開始直後は、 $GRAD_{f_0}$  がノード 6 を頂上として、 $GRAD_{f_1}$  がノード 2 を頂上として勾配場を形成するため、ノード 8 に到着したパケットが勾配場に従って VNF の需要が高く、かつ、サーバの利用可能な資源量が多い適切なノードに移動して VNF が実行されていることがわかる。時間が経過するにつれて、 $VNF_{f_0}$  及び  $VNF_{f_1}$  の移動に伴い、勾配場の頂上がノード 8 に移動し、パケットがノード 8 で処理されていることがわかる。また、時間が十分に経過した後も、ノード 6 において  $VNF_{f_1}$  がわずかに実行されていることがわかる。これは勾配場が VNF の需要及びサーバの利用可能な資源量に基づいて形成されるため、ノード 8 のサーバの利用可能な資源量が減少してノード 6 の方が勾配が高くなったためである。以上より、勾配場が適切に形成され、それに応じてフローの経路が決まり、パケットが移動して VNF が適用されていることが確認された。図 10 に、ノード 8 における  $RSRC$ 、 $MEDIATE_{c_0}$  及び  $MEDIATE_{c_1}$  の濃度の時間変化を示す。図より、ノード 8 において複数の VNF に対して適切に資源配分が行われていることが確認された。

#### 4.4.3 シナリオ 3: VNF の分散実行

本シナリオにおいては、シナリオ 2 とは異なり、ノード 8 にチェイニング要求  $c = \{f_0, f_1\}$  を持ったフローのパケットが 67 Kpps で到着する。ここで、1つのサーバでは 83 Kpps しかパケットを処理できないため、分散実行が行われる。よって、これにより、適切に VNF の分散実行が行われることを確認する。

図 11 に各ノードにおける  $toserve(VNF_{f_0}, PKT_{c_0})$  及び  $toserve(VNF_{f_1}, PKT_{c_1})$  の発生数の時間変化を示す。図より、シミュレーション開始直後はシナリオ 2 と同様にノード 8 に到着したパケットが勾配場に従って適切なサーバに移動して VNF が実行され、時間が経過するにつれて勾配場の頂上がノード 8 に移動してパケットがそこで処理されている。しかし、本シナリオにおいては、ノード 8 にその処理能力以上のパケットが到着する。ここで、図 12

にノード 8 における  $RSRC$ 、 $MEDIATE_{c_0}$ 、 $MEDIATE_{c_1}$  の濃度の時間変化を示す。図より、ノード 8 では 200msec 以降、利用可能なサーバ資源がほとんど残っていないことがわかる。勾配場は VNF の需要とサーバの利用可能な資源量に基づいて形成されるため、ノード 8 の勾配が低くなる。その結果ノード 8 にその処理能力以上レートで到着したパケットが周囲に接続されたノード 6、7 に移動し、そこで VNF が適用されていることがわかる。以上より、VNF の分散実行が行われていることが確認された。

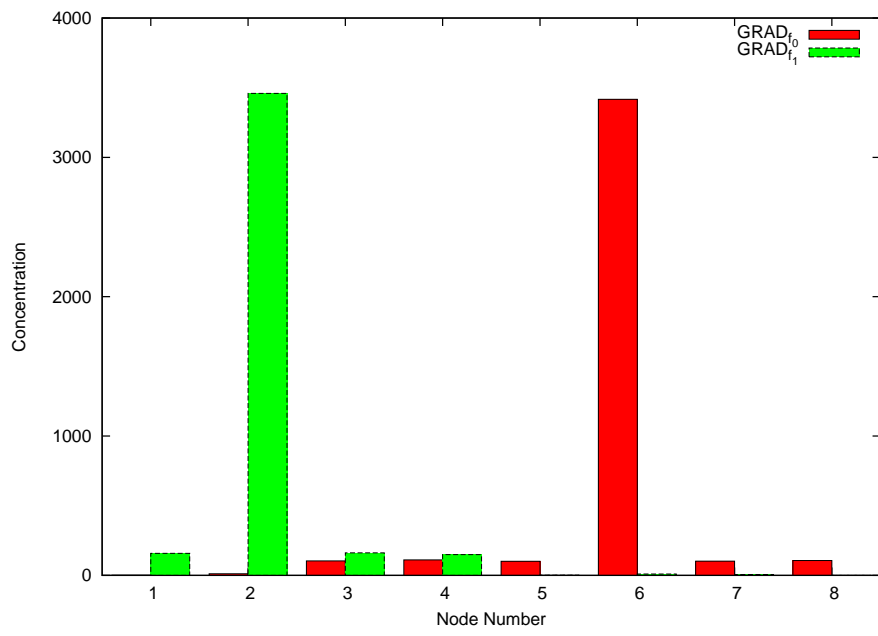
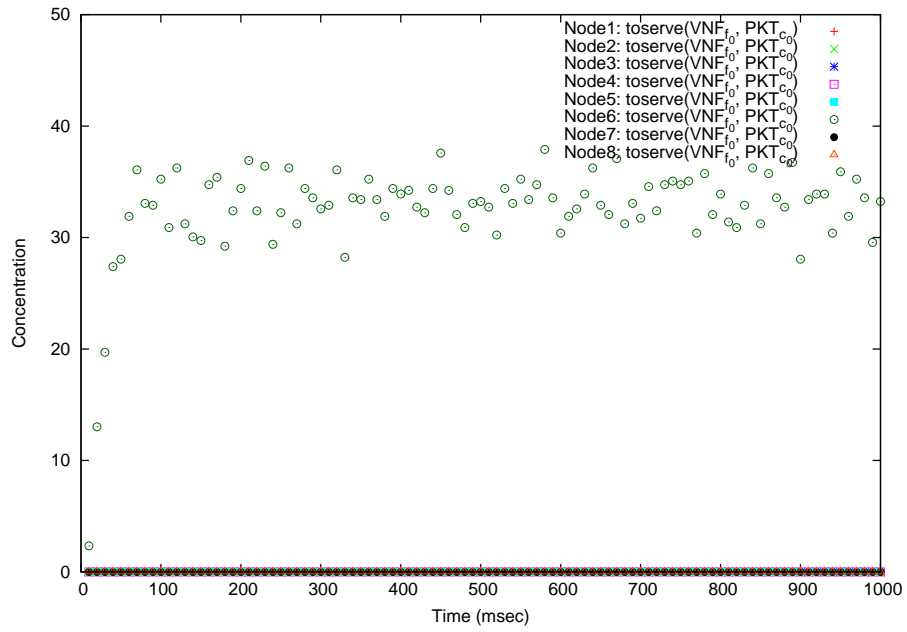
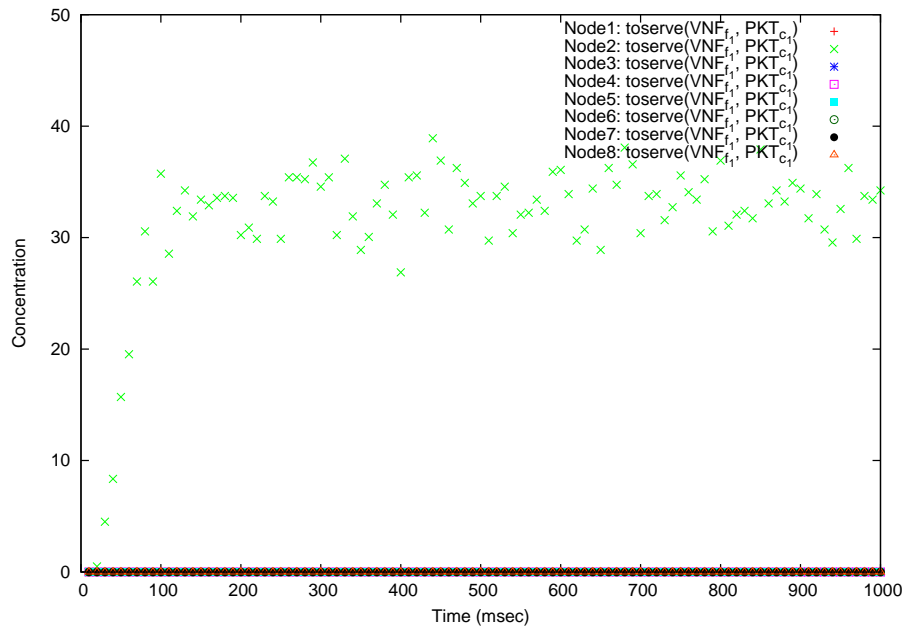


図 6: シナリオ 1: 時刻 400msec における勾配場

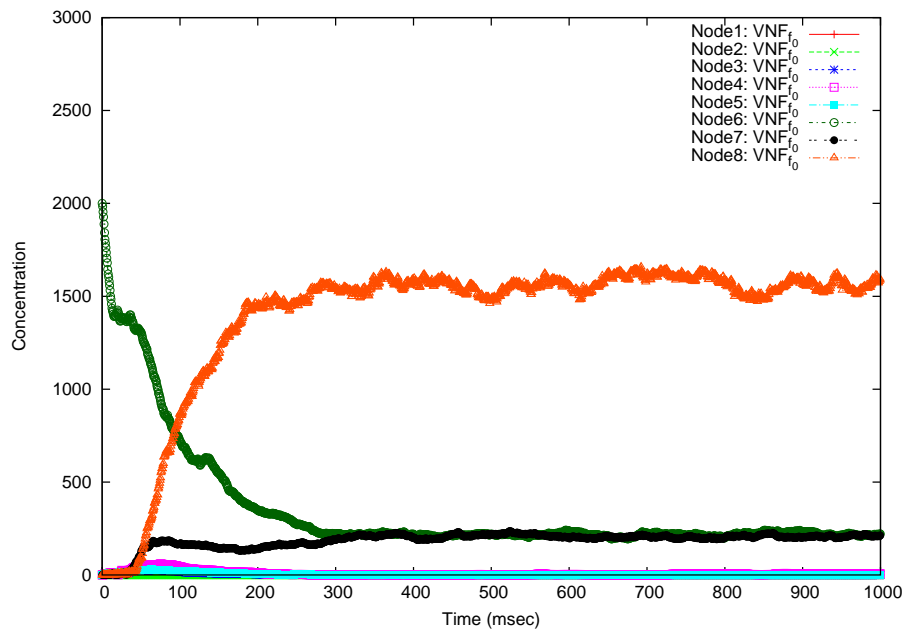


(a)  $toserve(VNF_{f_0}, PKT_{c_0})$

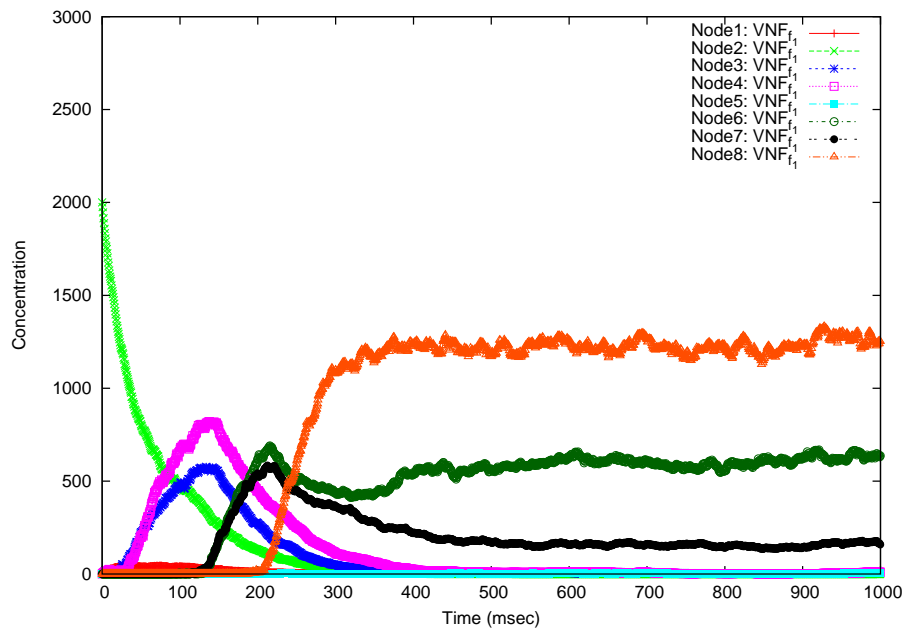


(b)  $toserve(VNF_{f_1}, PKT_{c_1})$

図 7: シナリオ 1: 各ノードにおける  $toserve$  の発生数の時間変化

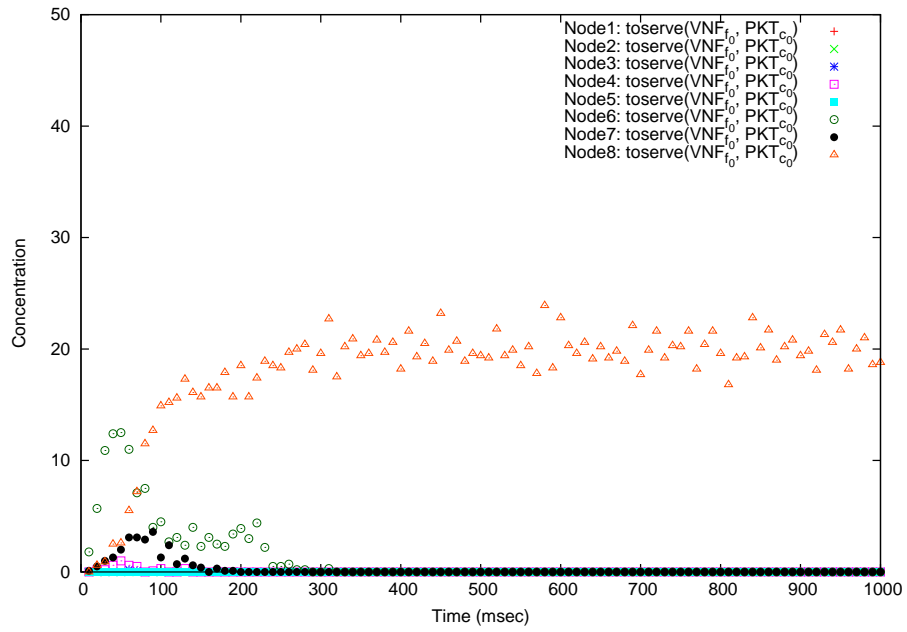


(a)  $VNF_{f_0}$

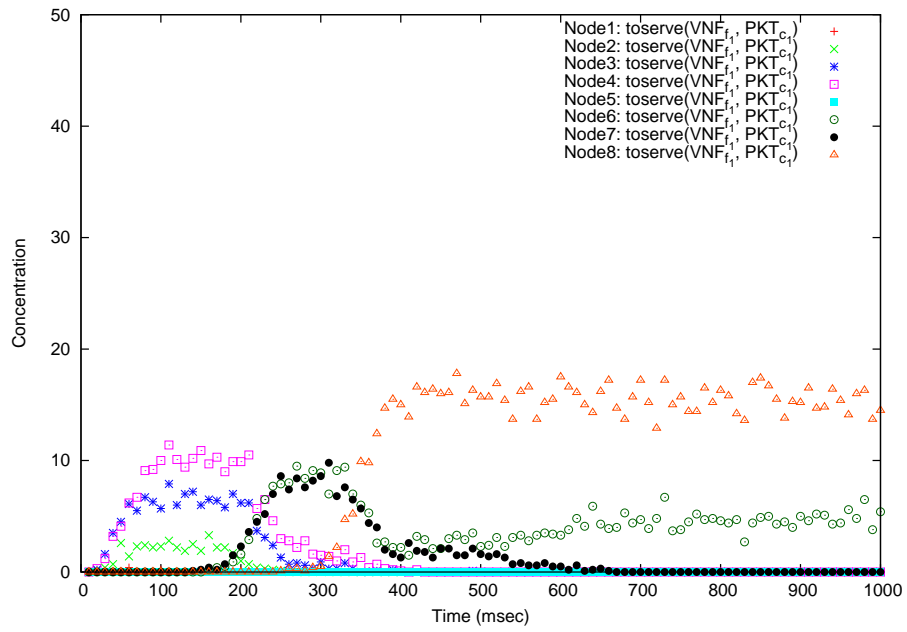


(b)  $VNF_{f_1}$

図 8: シナリオ 2: 各ノードにおける  $VNF$  の濃度の時間変化



(a)  $toserve(VNF_{f_0}, PKT_{c_0})$



(b)  $toserve(VNF_{f_1}, PKT_{c_1})$

図 9: シナリオ 2: 各ノードにおける  $toserve$  の発生数の時間変化

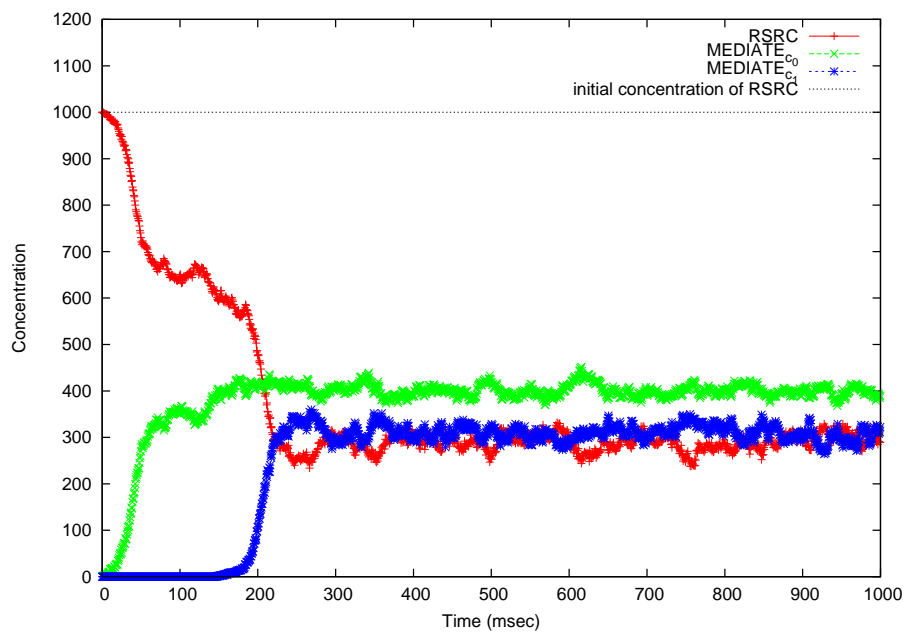
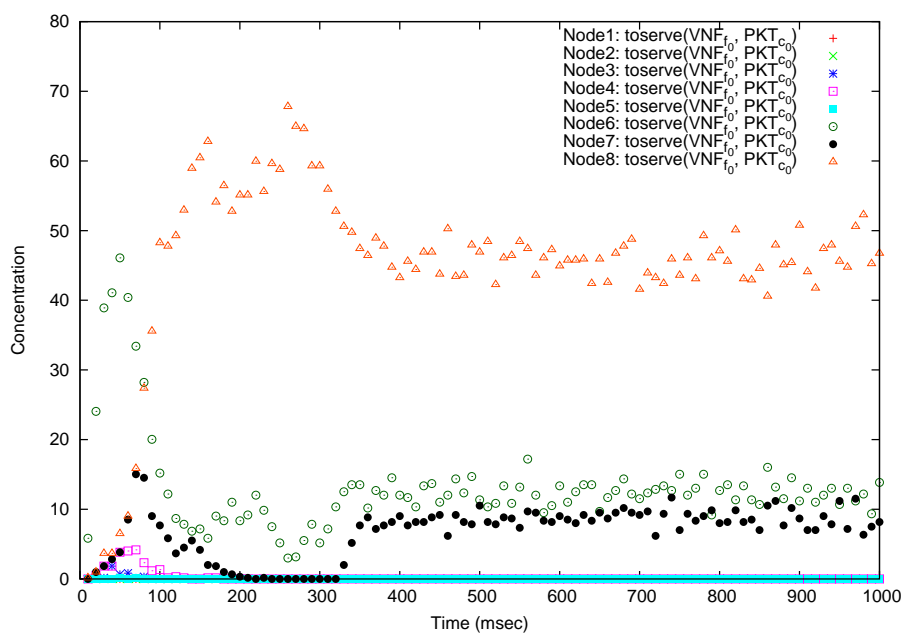
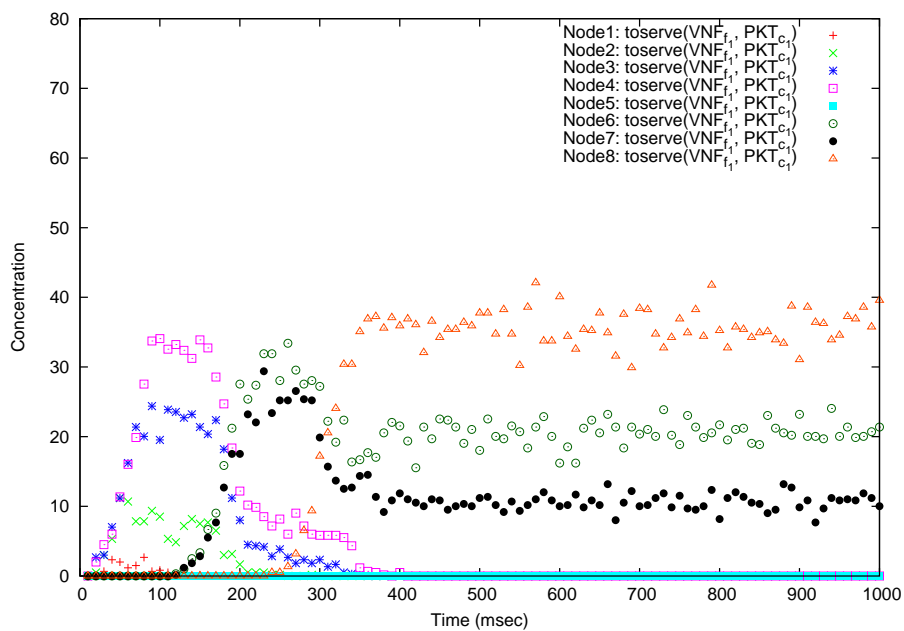


図 10: シナリオ 2: ノード 8 における  $RSRC$ 、 $MEDIATE_{c_0}$ 、 $MEDIATE_{c_1}$  の濃度の時間変化



(a)  $toserve(VNF_{f_0}, PKT_{c_0})$



(b)  $toserve(VNF_{f_1}, PKT_{c_1})$

図 11: シナリオ 3: 各ノードにおける  $toserve$  の発生数の時間変化



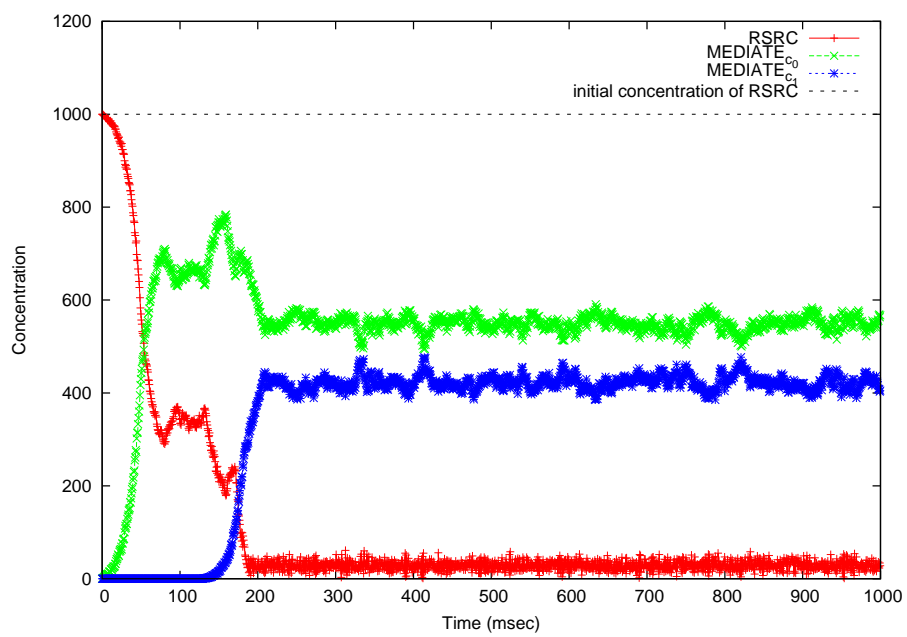


図 12: シナリオ 3: ノード 8 における  $RSRC$ 、 $MEDIATE_{c_0}$ 、 $MEDIATE_{c_1}$  の濃度の時間変化

## 5 性能評価

本章では、3章で提案したNFVシステムのコンピュータシミュレーションによる性能評価を行う。シミュレーション方法、ネットワークトポロジ、RSRCの濃度の初期値、各化学反応の反応速度係数は4章と同じものを用いる。

### 5.1 パラメータ設定

式(29)-(37)における各化学物質のシミュレーション開始時の濃度を以下のように決定する。NFVシステムに存在するVNFの種類数を8とし、ノード1、2、...、8における $VNF_{f_0}$ 、 $VNF_{f_1}$ 、...、 $VNF_{f_7}$ の濃度をそれぞれ2,000とする。なお、VNFの濃度の初期値は、シミュレーション開始直後のシステムの挙動にのみ影響し、十分時間が経過した時点での濃度には影響しないことがわかっている。また、他の化学物質の濃度の初期値は0とした。

VNFを適用するためにシステムに到着するフローを表2のように決定した。フローは、VNFの順序列で定義されるサービスチェイニング要求、フローの packets が到着するノード、及びフローの packets 到着レートによって表現される。なお、表1に示した全てのフローの、サービスチェイニング要求に含まれるVNF数と packets 到着レートの積の和は642 Kppsであり、これは、図5に示すNFVシステムのシステム全体での処理能力である664 Kpps ( $= 83Kpps \times 8$ )を超えていない。

### 5.2 評価指標

性能評価のための指標として、packets 処理時間と、packets ホップ数を用いる。ここで、packets 処理時間及びpackets ホップ数は、それぞれ、フローの packets が指定されたノードに到着してから、サービスチェイニング要求に含まれる全てのVNFが適用されるまでにかかった時間及びノード間の移動回数である。また、シミュレーション開始から終了までに、ノードにおいて各VNFが適用された回数を評価することによって、NFVシステム内におけるVNFの分散実行を確認する。

### 5.3 比較手法

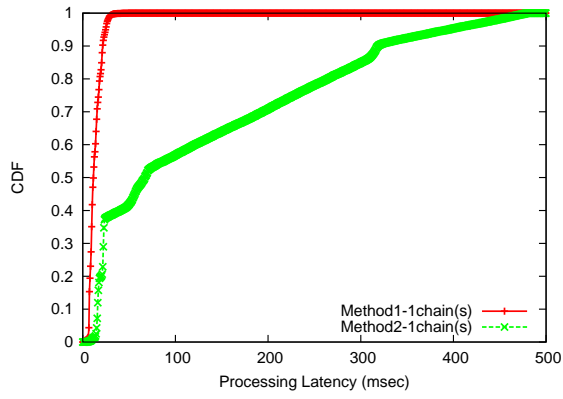
提案方式の有効性を示すために、比較手法として、図5に示す8つのノードに8つのVNFをそれぞれ設置し、かつ、式(34)の反応速度係数 $r_{ms} = 0$ としたものを用いる。これは、各VNFの需要の大きさに関わらず、各サーバに1種類のVNFのみをそれぞれ設置する場合に相当する。

## 5.4 評価結果と考察

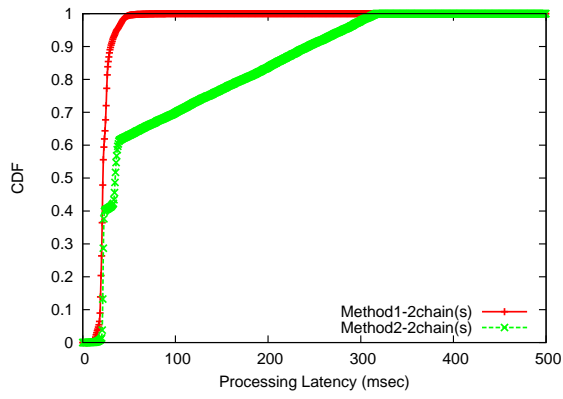
表3に、提案手法と比較手法のそれぞれにおける、各ノードにおける各VNFをパケット適用した回数を示す。この表より、比較手法においては、各ノードで1種類のVNFのみが設置され、VNFの拡散が発生しないため、各ノードにおいては設置されたVNFのみが実行されていることがわかる。一方で、提案手法においては、各VNFが複数ノードにおいて実行されていることがわかる。また、その実行比率は、表2に示したフローのサービスチェイニング要求に含まれるVNFとフローのパケット到着レートに応じたものとなっている。このことから、提案手法によって、各VNFがその需要に応じてNFVシステム内で分散実行されていることが確認された。

図13に、提案手法と比較手法のそれぞれにおける、フローのサービスチェイニング要求に含まれるVNF数毎に集計した、パケット処理時間の累積密度分布を示す。ここで、全てのパケットに対する平均のパケット処理時間は、提案手法においては13.5msec(図13(a))、23.9msec(図13(b))、及び90.9msec(図13(c))、また比較手法においては150.3msec(図13(a))、113.0msec(図13(b))、及び307.1msec(図13(c))であった。図より、提案手法は、比較手法に比べて短い処理時間でパケットへ全てのVNFを適用していることがわかる。また、比較手法において、パケット処理遅延時間の累積密度分布が線形的に変化していることがわかる。これは、表2に示した各フローの設定から、フローのパケット到着レートの総和が83 Kppsを超えるVNFが存在するため、各VNFを1つのノードでのみ実行する比較手法においては、パケットを処理し切れずに過負荷となっているノードが存在するためである。一方、提案手法においては、表3に示すように、システム全体で各VNFが需要に応じて分散実行されるため、過負荷になるノードがほとんど存在しない。

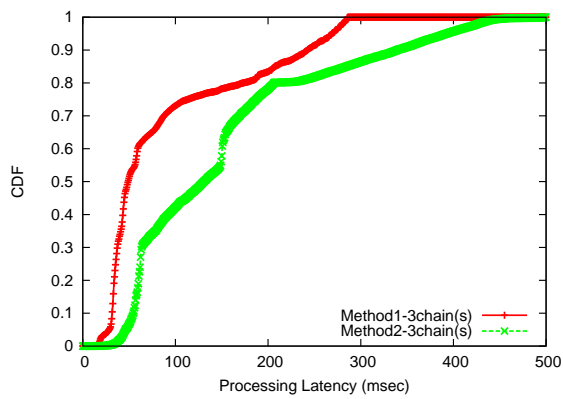
図14に、提案手法と比較手法のそれぞれにおける、フローのサービスチェイニング要求に含まれるVNF数毎に集計した、パケットホップ数の累積密度分布を示す。図より、提案手法は、ほとんどのパケットに対して比較手法に比べて小さなホップ数で処理を完了しているが、サービスチェイニング要求に含まれるVNF数が3の場合(図14(c))に、一部のパケットのホップ数が比較手法よりも大きくなっていることがわかる。これは、提案手法におけるパケットのノード間の移動は、化学物質GRADによって形成される勾配場に応じてランダムに決定されるため、パケットが要求しているVNFが実行されているノードへ最短のホップ数で到達できるとは限らないためである。



(a) VNF 数が 1 の場合

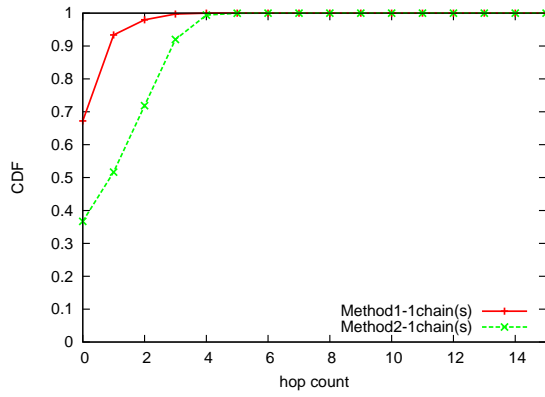


(b) VNF 数が 2 の場合

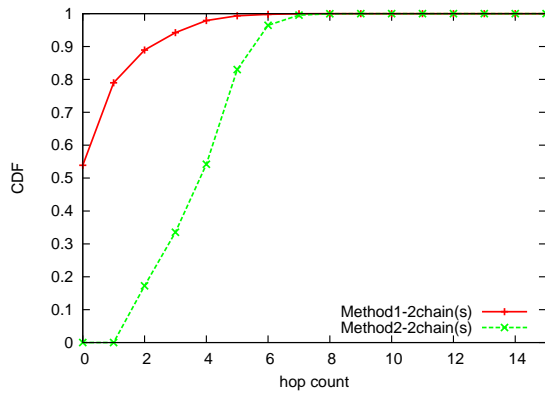


(c) VNF 数が 3 の場合

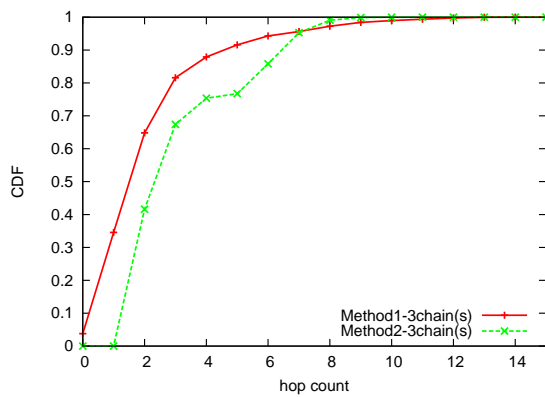
図 13: パケット処理時間分布



(a) VNF 数が 1 の場合



(b) VNF 数が 2 の場合



(c) VNF 数が 3 の場合

図 14: パケットホップ数分布

表 2: フローのパラメータ設定

フロー名	サービスチェイニング要求	パケット到着ノード	パケット到着レート (Kpps)
$c_0$	$\{f_5, f_3\}$	ノード 5	17
$c_1$	$\{f_6\}$	ノード 2	8
$c_2$	$\{f_7\}$	ノード 5	17
$c_3$	$\{f_3\}$	ノード 6	17
$c_4$	$\{f_3, f_6, f_2\}$	ノード 2	67
$c_5$	$\{f_0\}$	ノード 7	33
$c_6$	$\{f_4, f_0\}$	ノード 8	8
$c_7$	$\{f_6, f_0\}$	ノード 5	17
$c_8$	$\{f_1, f_2, f_5\}$	ノード 2	67
$c_9$	$\{f_6\}$	ノード 7	67
$c_{10}$	$\{f_4, f_1\}$	ノード 1	17

表 3: ノードにおける VNF の適用回数

	$VNF_{f_0}$	$VNF_{f_1}$	$VNF_{f_2}$	$VNF_{f_3}$	$VNF_{f_4}$	$VNF_{f_5}$	$VNF_{f_6}$	$VNF_{f_7}$
提案手法: ノード 1	12270	30654	22662	0	4	11928	1045	0
提案手法: ノード 2	23763	253160	16610	3	1	2551	12142	0
提案手法: ノード 3	7312	5433	27979	404	5595	21710	11525	0
提案手法: ノード 4	22899	425	22410	1528	37	4695	26284	0
提案手法: ノード 5	9786	3	1276	10684	1185	22826	13011	13744
提案手法: ノード 6	110160	714	15916	20022	1921	5221	20833	1897
提案手法: ノード 7	24323	0	4354	110	90	82	50035	42
提案手法: ノード 8	11729	0	6527	0	7596	280	20597	784
比較手法: ノード 1	80222	0	0	0	0	0	0	0
比較手法: ノード 2	0	73861	0	0	0	0	0	0
比較手法: ノード 3	0	0	77627	0	0	0	0	0
比較手法: ノード 4	0	0	0	32615	0	0	0	0
比較手法: ノード 5	0	0	0	0	16398	0	0	0
比較手法: ノード 6	0	0	0	0	0	69310	0	0
比較手法: ノード 7	0	0	0	0	0	0	79957	0
比較手法: ノード 8	0	0	0	0	0	0	0	16411

## 6 おわりに

本報告においては、NFVにおけるVNFの配置、VNFへの資源配分、及びフローの経路を、サービスチェイニング要求やトラフィック量等に応じて適切に決定するために、生化学反応式を用いたタプル空間モデルに基づくサービス空間構築手法を適用する方法を検討した。具体的には、NFVシステムにおけるフローの packets へのVNFの適用、フローによるサーバ資源の利用、サービスチェイニングの実現、同一サーバ上での複数のVNFの共存等を化学反応式を用いたタプル空間モデルを用いて記述した。そして、複数のシナリオに基づくコンピュータシミュレーションを行い、提案手法がNFVに求められる機能をで実現できることを明らかにした。さらに、VNFをネットワーク内の各ノードに固定的に配置する手法との性能比較を行った結果、提案手法を適用することによって、フローへのVNF提供にかかる時間を77%削減できることを明らかにした。一方で、パケットが経由するノード間の移動ホップ数は比較手法に比べて大きくなる場合があることを明らかにした。

今後の課題として、提案手法のより詳細な性能評価が挙げられる。特に、ノード間の伝播遅延時間やリンク帯域を考慮した評価を行いたい。さらに、実際のネットワークサービスにより近づけるために、化学反応式を変更する方法を検討する必要がある。例えば、VNFの種類によって使用するリソース量が異なること、などが考えられる。また、提案手法に基づくNFVシステムの設計及び実装を行い、実験評価を行うことも重要であると考えられる。



## 謝辞

本報告を終えるにあたり、御多忙の中、日頃より熱心に御指導、御教授を頂きました大阪大学大学院情報科学研究科の村田正幸教授に厚く御礼申し上げます。ならびに、研究の方針、本報告の作成に関して直接御指導頂きました大阪大学大学院情報科学研究科の長谷川剛准教授には、様々な面で常に適切な御指導を頂きましたことを、心より御礼申し上げます。また、平素から適切な御助言や御指導を頂きました大阪大学大学院情報科学研究科の荒川伸一准教授、大下裕一助教、そして大阪大学大学院経済学研究科の小南大智助教に感謝いたします。最後に、日頃より様々な御助言と御助力を頂きました、村田研究室の皆様に御礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] Shun Sakurai, “Construction method of service space in virtualized network system based on chemical-inspired tuple space model,” Master’s thesis, Osaka University, Feb. 2015.
- [2] A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari, and M. Ayyash, “Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications,” *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, vol. 17, no. 4, pp. 2347–2376, 2015.
- [3] ESTI, “Network functions virtualisation - white paper 3.” [https://portal.etsi.org/Portals/0/TBpages/NFV/Docs/NFV\\_White\\_Paper3.pdf](https://portal.etsi.org/Portals/0/TBpages/NFV/Docs/NFV_White_Paper3.pdf).
- [4] K. Ingham and S. Forrest, “A history and survey of network firewalls,” *University of New Mexico, Tech. Rep*, 2002.
- [5] M. Finsterbusch, C. Richter, E. Rocha, J.-A. Muller, and K. Hanssgen, “A survey of payload-based traffic classification approaches,” *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, vol. 16, no. 2, pp. 1135–1156, 2014.
- [6] D. Wing, “Network address translation: extending the internet address space,” *IEEE internet computing*, vol. 14, no. 4, pp. 66–70, 2010.
- [7] M. Olsson, S. Rommer, C. Mulligan, S. Sultana, and L. Frid, *SAE and the Evolved Packet Core: Driving the mobile broadband revolution*. Academic Press, 2009.
- [8] J. Carapinha and J. Jimenez, “Network virtualization - a view from the bottom,” in *Proceedings of VISA 2009*, pp. 73–80, June 2009.
- [9] D. King and C. Ford, “A critical survey of network functions virtualization,” in *Proceedings of the Accounting and Finance 2013*, pp. 1–21, July 2013.
- [10] S. Mehraghdam, M. Keller, and H. Karl, “Specifying and placing chains of virtual network functions,” *Networking and Internet Architecture*, vol. 1058, pp. 1–7, June 2014.
- [11] C. Kesselman, C. Lee, and B. Lindell, “A distributed resource management architecture that supports advance reservations and co-allocation,” in *Proceedings of International Workshop on Quality of Service 1999*, pp. 27–36, June 1999.

- [12] Marco Piraccini, “Biotucson: biochemical extension of tucson to support self-organising coordination,” Master’s thesis, University of Bologna, Mar. 2013.
- [13] Mirko Viroli, Matteo Casadei, Sara Montagna, Franco Zambonelli, “Spatial coordination of pervasive services through chemical-inspired tuple spaces,” *ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems*, vol. 6, pp. 1–24, June 2011.
- [14] M. Viroli, M. Casadei, and Matteo, “Chemical-inspired self-composition of competing services,” in *Proceedings of the ACM Symposium on Applied Computing 2010*, pp. 2029–2036, July 2006.
- [15] 桜井 駿, 長谷川剛, 村田正幸, “化学反応式を用いた空間協調モデルに基づく仮想化ネットワークシステムにおけるサービス空間構築手法,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 114, pp. 69–74, Mar. 2015.
- [16] D. T. Gillespie, “Stochastic simulations for chemical kinetics,” *Annual Review of Physical Chemistry*, vol. 58, pp. 35–55, Oct. 2006.
- [17] W. W. Cleland, “The kinetics of enzyme-catalyzed reactions with two or more substrates or products,” *Science Direct*, vol. 67, pp. 173–187, May 1962.
- [18] H. Li, Y. Cao, and D. T. Gillespie, “Algorithms and software for stochastic simulation of biochemical reacting systems,” *Biotechnology Progress*, vol. 24, pp. 56–61, Feb. 2008.
- [19] “学術情報ネットワーク (sinet4、サイネット・フォー).” <http://www.sinet.ad.jp/>.