

化学反応式モデルに基づく仮想サービス配置手法の安定性評価

長谷川 剛[†] 村田 正幸^{††}

[†] 大阪大学 サイバーメディアセンター 〒 560-0043 大阪府豊中市待兼山町 1-32

^{††} 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: †hasegawa@cmc.osaka-u.ac.jp, ††murata@ist.osaka-u.ac.jp

あらまし 我々の研究グループでは、NFVのような仮想ネットワークシステムにおけるサービスの適切な配置を、システムを構成する物理ノードが自身が持つサービスを自律分散的に決定することができる手法として、化学反応式を用いた空間協調モデルに基づく手法を提案している。本システムは、各ノードにおける化学反応式の反応速度を決定するためのパラメータを多数持つため、パラメータ設定がシステム性能に与える影響を評価する必要がある。本報告では、コンピュータシミュレーションに基づく手法によって評価を行う。具体的には、システムを構成するノードのパラメータを無作為に決定し、システム性能を評価することによって、パラメータのばらつきがシステム性能のばらつきに与える影響を検証する。評価の結果、システムを構成するノード数が増えると、システムの安定性は向上し、個々のノードのパラメータ設定の影響を受けにくくなること、また、ノードが接続されるネットワークトポロジの影響はほとんど無いことがわかった。

キーワード 空間強調モデル、化学反応式、システム安定性、シミュレーション、パラメータ設定

Stability evaluation of chemical-inspired placement method of virtualized services

Go HASEGAWA[†] and Masayuki MURATA^{††}

[†] Cybermedia Center, Osaka University 1-32, Machikaneyama-cho, Toyonaka, Osaka, 560-0043 Japan

^{††} Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University 1-5, Yamadaoka, Suita, Osaka, 565-0871 Japan

E-mail: †hasegawa@cmc.osaka-u.ac.jp, ††murata@ist.osaka-u.ac.jp

Abstract We have proposed service placement method in virtualized network system based on the chemical-inspired tuple space model, where the behavior of each node in the system is determined by pre-defined chemical reactions in a distributed fashion. Since this system has many control parameters that determines the reaction speed of each chemical reaction, the effect of parameter settings in large system on the system performance is important. In this report, we exploit simulation-based technique to reveal the stability of the proposed system against parameter setting variations. In detail, we set the parameter values in each node randomly and observe the fluctuation of the system behavior. From the evaluation results we have found that the system stability becomes improved when the number of nodes in the system increases, while the effect of the network topology can be almost ignored.

Key words Tuple space model, chemical reactions, stability, simulation, parameter setting

1. はじめに

生物ネットワークの特性を情報ネットワークアーキテクチャへ活かす観点での研究は、例えばトポロジカルな特徴であるスケールフリー性 [1] やスモールワールド性 [2] をネットワークトポロジ研究などに適用・応用する検討が近年活発に行われている [3-6]。我々の研究グループでも、遺伝子ネットワークや

神経回路ネットワークなどの生物ネットワークに見られる特徴の一つである、ネットワークを構成する各要素が、ある環境では異なる機能や出力を行うが、異なる環境では等しい、あるいは非常に似た機能や出力を行う、縮退特性 [7] と呼ばれる性質、及び、それに基づいて大規模システムにおいて見られるネットワーク化バッファリング (Networked Buffering) 性 [8] に着目し、その性質に基づく情報ネットワークシステムの冗長化手法を提

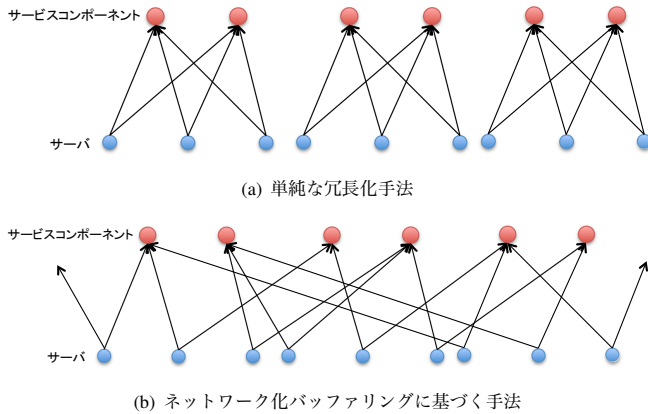


図1 冗長化手法

案している [9, 10]。例えば、データセンタ環境などにおいて、物理サーバ上に複数の仮想サーバやサービスコンポーネントを配置して実行する際に、物理サーバや接続されているネットワーク機器の障害発生時に短時間での復旧を可能とするために準備する冗長資源の配置方法に適用することができる。具体的には、図1(a)に示すように、同じサービスコンポーネントをインストールした複数のサーバを準備する単純な冗長化ではなく、図1(b)に示すように、各サーバがインストールするサービスコンポーネントの関係を部分的に重複させることによって、サーバに障害が発生してサービスを継続できなくなった際にも、他のサーバが実行するサービスコンポーネントを変化させることによって、障害からの復旧が可能となる。本手法は、単純な冗長化手法に比べて、非常に少ない冗長資源によって高い障害耐性を実現することができることが特長である。

さらに、上述のような冗長化手法を前提とし、需要の変動や障害発生の際に各サーバが実行するサービスを変化させるための手法として、化学反応式を用いた空間協調モデル [11] に基づいた、仮想ネットワーク空間構築手法を提案している [12]。具体的には、仮想ネットワーク空間を構成するノード (物理サーバ等) の挙動を化学反応式として決定し、要素間の情報交換を定めることによって、各要素における自律的な動作によってシステム全体の挙動を制御する。

提案手法においては、ノードが持つ化学反応式の反応速度を決定するパラメータが存在する。そのパラメータ設定は、物理サーバの性能や実行するサービスのサーバ負荷、ノード間のネットワーク帯域などを考慮して決定することが望ましい。[12]においては、1つのノードに着目し、パラメータ設定がノードの挙動に与える影響を評価している。しかし、多数のノードから構成される大規模な仮想ネットワーク空間において、各ノードのパラメータ設定が個別に行われることによって、システム全体の挙動が予期できないものになることが考えられる。

そこで本報告では、複数のノードから構成される仮想ネットワーク空間の構築を提案手法を用いて行い、各ノードのパラメータ設定を個別に行った場合におけるシステム安定性の評価を行う。具体的には、各ノードのパラメータ設定を無作為に決定してシミュレーション評価を行い、システムの挙動を観察す

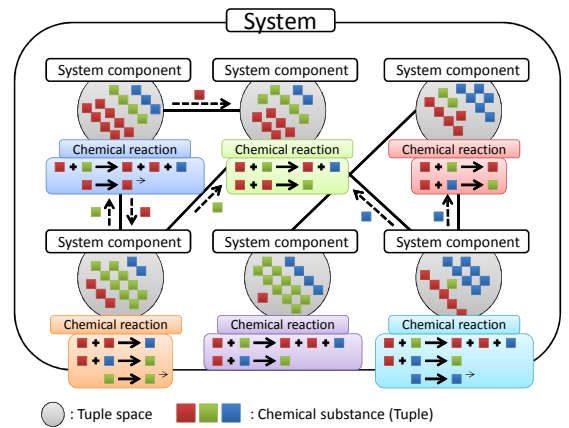


図2 化学反応式を用いた空間協調モデルの概要

ることで、パラメータ設定が与える影響を明らかにする。その際、システムを構成するノード数や、ノードが構成するネットワークトポロジが与える影響を検証する。

以下、2.章においては、提案手法である、化学反応式に基づく仮想ネットワーク空間構築手法を簡単に説明し、3.章において提案手法を説明する。4.章においては、提案手法のシステム安定性の評価結果を示す。最後に5.章で本稿のまとめと今後の課題について述べる。

2. 化学反応式を用いた空間協調モデル

本章では、提案手法の基となっている化学反応式を用いた空間協調モデルを説明し、仮想ネットワーク空間を構築する提案手法への適用について述べる。

2.1 概要

文献 [13] においては、化学反応式を用いた空間協調モデルが提案されている。図2に、モデルの概要を示している。モデルにおいては、システムを構成するコンポーネントはタプルスペース (tuple space) としてモデル化され、複数のタプルスペースはネットワークを構成している。各タプルスペースにおいては、局所情報が化学物質 ([14] においてはタプルと呼ばれる) として記述され、情報の量はタプルスペース内における化学物質の濃度で表現される。さらに、システムコンポーネントの挙動を記述するために、化学反応式が定義される。タプルスペース内の化学反応式に基づいて化学反応を起こすことで、時間経過とともに化学物質の濃度が変化する。以下では、空港において、利用者が近づくると利用者の嗜好に基づいた広告表示や、利用者の行き先の案内などを行う分散型ディスプレイサービスを想定し、本モデルの適用例を示す。

2.2 化学反応式による空間協調

空港の様々な場所に設置されたディスプレイが、タプルスペースとしてモデル化される。各タプルスペースにおいては、以下の化学反応式が定義され、サービスに対する要求の実行や、サービスの成長や衰退が表現される。

$$SERV | REQ \xrightarrow{u} SERV | SERV | toserv(SERV, REQ) \quad (1)$$



物質 $SERV$ は、ディスプレイで行われる特定のサービスを表し、物質 REQ はディスプレイの付近にいる利用者からのサービスに対する要求を表す。 $toserv(SERV, REQ)$ は、要求に対してサービスが行われることを表す。反応式 (1) は、タプルスペースにおける 2 つの挙動を記述している。1 つは、要求に対してサービスが実行されることである。もう 1 つは、実行されたサービスが成長することによって実現されている。一方、反応式 (2) は、サービスの衰退を表している。これは、物質 $SERV$ が消滅することによって実現されている。

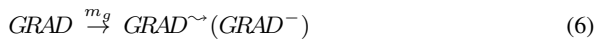
これらの反応式の実行速度は、反応式の左辺に存在する全ての物質の濃度と、それぞれの反応式に設定される反応速度パラメータ (反応式 (1)、(2) における u 、 d に相当) の積で決定される。このことから、反応式 (1) 及び (2) は、サービスに対する要求が存在すれば、サービスが実行されて成長するが、要求が存在しないと、そのサービスは衰退する、ということを実現していると言える。

以下の反応式 (3) は、あるタプルスペースに存在するサービスが、接続されている他のタプルスペースに拡散することを表している。



m は反応速度パラメータである。この式の反応速度も、上述の反応式 (1) 及び (2) と同様に決定されるため、サービス濃度が高ければ、周囲への拡散速度も高くなる。つまり、あるタプルスペースでサービスに対する要求が多く実行され、サービス濃度が高くなると、そのサービスは周囲へより拡散する。これにより、複数のタプルスペースが空間的に協調し、利用者の要求に応じたサービスの成長及び衰退が実現される。

以下の 4 つの反応式は、物質 REQ が、要求するサービスが存在するタプルスペースへ移動するために用いられる。



p 、 d_g 、 m_g 、 m_r は、それぞれ反応式 (4)、(5)、(6)、(7) の反応速度パラメータである。物質 $PUMP$ は、サービスが行われているタプルスペースに挿入され、反応式 (4) に基づいて物質 $GRAD$ を生成する。物質 $GRAD$ は、システム内に勾配を生成するための物質である。反応式 (6) は物質 $GRAD$ の周囲のより $GRAD$ の濃度が低いタプルスペースへの拡散を表している。すなわち、あるタプルスペースで生成された物質 $GRAD$ が周囲へ拡散していくことで、そのタプルスペースを頂点とする勾配場が形成される。反応式 (7) は、物質 REQ が、物質 $GRAD$ の濃度が高い他のタプルスペースへ移動する様子を表している。すなわち、サービスが存在する場所が勾配場の頂点であれば、物質 REQ はサービスが存在する場所へ移動し、そこでサービス

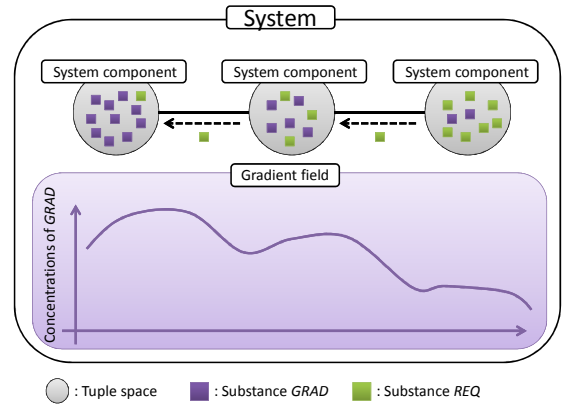


図3 勾配場の形成と物質 REQ の移動

が実行される。その様子を図3に示す。

2.3 仮想ネットワークサービスへの適用

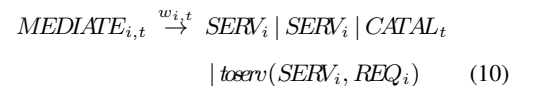
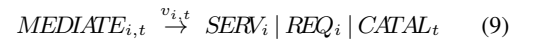
上述のモデルは、NFV などの仮想ネットワークサービスへの適用が下記のように可能であると考えられる。図2における $system\ component$ は、サービスや機能を実行する物理サーバと見なし、物理サーバが接続されるネットワークをタプルスペースが構成するネットワークとする。物質 $SERV$ と REQ は物理サーバで提供されるサービスと、そのサービスに対するユーザからのリクエストと見なす。各サーバで化学反応式を実行することにより、要求に応じたサービスの実行、物理サーバ資源の複数サービス間での共有、要求の多いサービスの他サーバへの展開、ユーザからのリクエストの適切なサーバへの転送などが実現できる。次章では、本モデルに基づく、仮想ネットワークサービス空間の具体的な構築手法を示す。

3. 仮想ネットワーク空間構築手法

本章では、前章で説明した空間協調モデルを利用した仮想ネットワークサービス空間構築手法について述べる。具体的には、仮想ネットワークサービス空間における様々な挙動を実現するために導入した化学反応式を説明する。

3.1 物理サーバ資源のサービス間共有

あるタプルスペース t (物理サーバに相当する) におけるサービス i の実行に関して、以下の化学反応式を導入する。



$u_{i,t}$ 、 $v_{i,t}$ 、 $w_{i,t}$ 、 $d_{i,t}$ は、それぞれ反応式 (8)、(9)、(10)、(11) の反応速度パラメータである。物質 $SERV_i$ は、サービス i を表す。この物質がタプルスペースに存在することは、そのサービスが物理サーバ上で実行可能であることを表す。物質 REQ_i は、サービス i に対するユーザからの要求を表す。 $toserv(SERV_i, REQ_i)$

は、サービス i がユーザからの要求に基づいて実行されることを示す。

前章で説明した空間協調モデルにおいては、反応式 (1)、(2) などの実行速度は、反応式の左辺に存在する化学物質の濃度の積に比例する。例えば、反応式 (1) においては、物質 $SERV$ の濃度が高くなると、それに応じて反応式の実行速度が増加し、物質 $SERV$ の濃度はより高くなる。しかし、実際のシステムにおいては、サービスを実行する物理サーバの能力にはサーバ資源量に応じた上限があり、ある一定以上の速度でサービスを実行することはできない。そこで、提案手法においては、酵素触媒反応 [15] の反応速度を説明するミカエリス・メンテン式 [16] を導入することで、反応速度に上限を設けている。酵素触媒反応においては、反応速度は触媒の濃度で制御することができる一方で、触媒そのものは反応しない。[16] においては、実際には存在しない中間体と呼ばれる物質を導入することで、そのような反応を説明している。

提案手法においては、反応式 (1) を拡張し、反応式 (8)、(9)、(10) を構築している。物質 $CATAL_t$ は、タプルスペース t に存在する触媒を表す。これは、物理サーバで利用可能なサーバ資源に対応する。物質 $MEDIATE_{i,t}$ はタプルスペース t でサービス i のために用いられている資源量を表す。物質 $CATAL_t$ の初期濃度を、物理サーバの資源量に応じて設定することで、反応速度の上限を設けることができる。

3.2 サービスの拡散

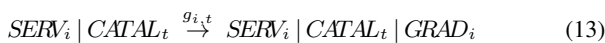
サービスが接続された周囲の他のサーバへ拡散することを実現するために以下の反応式を追加する。



$m_{i,t}$ は反応速度パラメータである。この反応式に基づいてサービスが他の物理サーバへ拡散し、その物理サーバでサービスの実行要求が存在すれば、反応式 (8)、(9)、(10) に基づいて実行されると、さらにサービスが成長する。すなわち、実行要求の大きなサービスがより多くのサーバで実行されるようになる。一方、拡散先の物理サーバでサービスの実行要求が存在しなければ、反応式 (11) に基づいてサービスは衰退する。

3.3 ユーザのサービス実行要求の移動

あるユーザのサービス実行要求が、存在する物理サーバ上で対応するサービスを発見できない、すなわち、タプルスペース内に物質 $SERV$ が存在しない場合には、そのリクエストはサービスが存在する他の物理サーバへ移動する必要がある。そのため、前章で説明したモデルにおける反応式 (4)、(5)、(6)、(7) を拡張した以下の反応式を導入する。



$g_{i,t}$ 、 $h_{i,t}$ 、 $k_{i,t}$ 、 $n_{i,t}$ は、それぞれ反応式 (13)、(14)、(15)、(16) の反応速度パラメータである。反応式 (13) は、反応式 (4) を拡

張したものであり、サービス i を表す物質物質 $SERV_i$ と、サーバの残存資源を表す物質 $CATAL_t$ が存在すれば、勾配を形成するための物質 $GRAD_i$ が生成され、周囲に拡散することで、サービス i の勾配場が形成される。サービス i に対する実行要求 REQ_i は、サービス i の勾配場に基づいてタプルスペース間を移動する。

4. システム安定性評価

文献 [12] において、前章で示した提案方式の基本的な挙動の検証を行い、物理サーバ資源の複数サービス間での共有、要求の多いサービスの他サーバへの展開、ユーザからのリクエストの適切なサーバへの転送などが実現されることを示した。本報告においては、提案方式が持つパラメータの設定がシステム安定性に与える影響を評価する。

反応式 (8)–(16) は、それぞれ、反応速度を決定するための反応速度パラメータを持つ。これらのパラメータは、物理サーバ資源、サービスを実行する際のサーバ負荷、サーバ間を接続するネットワーク帯域などに応じて設定することによって、それぞれの環境に応じたサービスの実行などが実現される。具体的には、文献 [12] においては、これらのパラメータは、全ての物理サーバにおいて $u_{i,t}=0.0005$ 、 $v_{i,t}=w_{i,t}=0.05$ 、 $d_{i,t}=m_{i,t}=0.01$ 、 $g_{i,t}=0.00001$ 、 $h_{i,t}=0.05$ 、 $k_{i,t}=0.01$ 、 $n_{i,t}=1.0$ として評価を行った。

しかし、これらのパラメータが物理サーバ毎に個別に設定されることで、仮想ネットワークサービス空間全体において、サービスが安定的に実行されるか否かの検証は行っていない。特に、システム規模が大きくなり、物理サーバ数が増加すると、それに比例してシステムが持つパラメータの総数は増加する。そこで本節では、これらのパラメータが個別に、かつランダムに設定される場合を想定し、システム全体でサービスが実行される様子を観察することで、パラメータ設定に対するシステムのロバスト性を評価する。具体的には、文献 [17] の手法に基づいて、これらのパラメータ設定に対する提案システムのロバスト性を評価する。

複数の物理サーバから構成される提案システムの出力として、各タプルスペースにおける物質 $toserve$ の生成速度、全てのタプルスペースにおける物質 $toserve$ の生成速度の和、及び各タプルスペースにおける物質 REQ の濃度値を用いる。これらは、それぞれ、各物理サーバにおけるサービスの実行速度、システム全体でのサービスの実行速度、及びリクエストが処理されるまでの平均遅延時間を表す指標である。パラメータ設定に対するシステムのロバスト性を評価するために、上述した反応速度パラメータを、文献 [12] における評価で設定した値の 1/100 倍、1/10 倍、1 倍、10 倍、100 倍の 5 通りの中からランダムに設定してシミュレーションを行い、物質 $toserve$ の生成速度と、物質 REQ の濃度値を評価する。これにより、パラメータの設定がシステムの挙動に与える影響を明らかにする。

評価するシステムは、物理サーバ数を 2、4、8、16 とし、ネットワークトポロジはフルメッシュ、リング、及び直線ネットワークとする。1 つのタプルスペースは 9 つの反応速度パラメータ

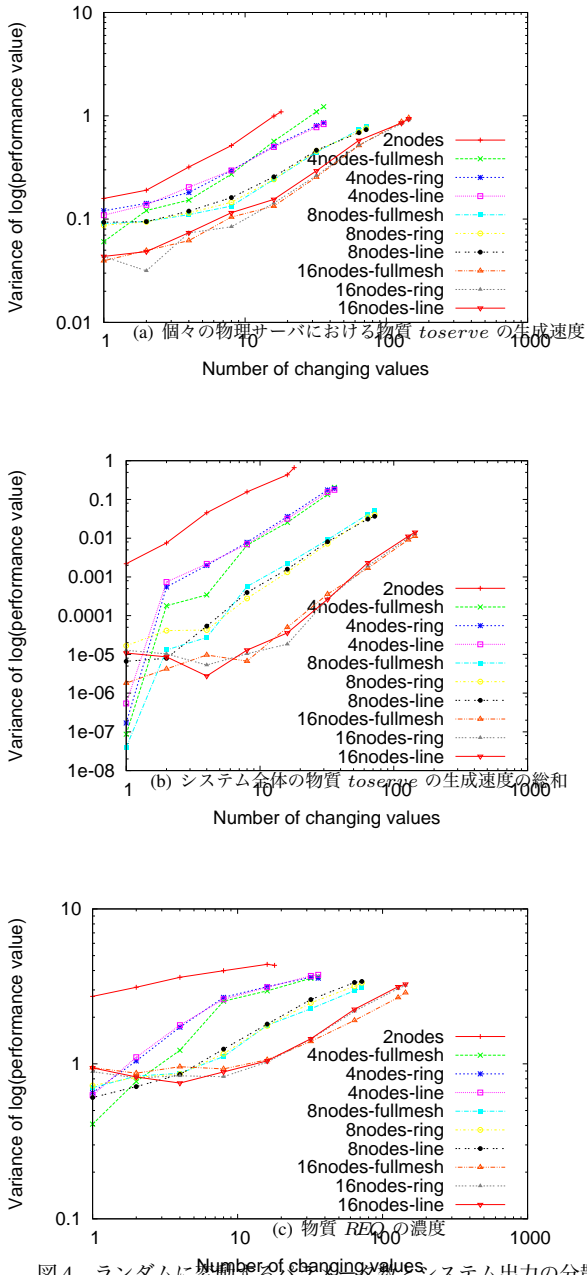


図4 ランダムに変動するパラメータ数とシステム出力の分散値の関係

を持つため、例えば物理サーバ数を16ノードとすると、システムが持つパラメータの総数は144となる。それらのパラメータのうち、いくつかのパラメータをランダムに変動させ、システムの出力を評価することで、パラメータ変動の度合いがシステムに与える影響を評価する。提供するサービスは1種類とし、物質 *REQ* は単位時間あたり50の速度でシステムに投入される。物質 *CATAL* の濃度の初期値は、システム全体での利用率が50%となるように設定した。シミュレーション時間を2,000単位時間とし、物質 *toserve* の生成速度は後半の1,000単位時間における平均値を、また物質 *REQ* 濃度はシミュレーション終了時の値を用いた。

図4には、システムを構成する物理サーバ数とネットワークトポロジを変化させた場合の、ランダムに変動するパラメータ

数とシステム出力の分散値の関係を現している。システム出力の分散値が小さいことは、パラメータ変動に対してシステムの挙動のばらつきが小さいことを示すため、パラメータ変動に対するロバスト性が高いことを現している。本図から、どのシステム出力値に対しても、変動するパラメータ数が増えると、システムのロバスト性は悪化することがわかる。これは、ランダムに変動するパラメータが増えることで、サービスを安定的に実行することができない物理サーバが増加するためであると考えられる。一方、システムを構成する物理サーバ数が増加すると、パラメータ変動に対するロバスト性が大きく向上することがわかる。これは、多くの物理サーバがネットワーク接続されることで、ある物理サーバでサービスが行われない場合においても、リクエストが他の物理サーバへ異動して実行されるためであると考えられる。また、ネットワークトポロジが与える影響はほとんど無いことがわかる。これは、本評価において設定したシミュレーション時間である2,000単位時間が、ネットワークトポロジによらずシステム出力値が収束するのに十分であったことを示している。

次に、システム出力値が収束するまでにかかる時間を評価する。収束時間の評価においては、物質 *SERV* の濃度の時間変化に着目し、その収束にかかる時間を評価する。具体的には、収束時間を以下のように定義する。

- シミュレーション時刻 $t (= 1, 2, \dots, 2000)$ において、時間幅 $[t - 99, t]$ における物質 *SERV* の濃度の標準偏差を $\sigma(t)$ とする。この時、下記を満たす最大の T を *SERV* の収束時間とする。

$$\sigma(T - 1) > \max_{1001 \leq t \leq 2000} (\sigma(t))$$

$$\forall t \geq T \sigma(t) \leq \max_{1001 \leq t \leq 2000} (\sigma(t))$$

上記の収束時間の定義は、物質 *SERV* の濃度分布の標準偏差が、収束していると考えているシミュレーション後半のものに十分近づくために必要な時間を意味している。

図5に、ネットワークトポロジをフルメッシュとした場合において、変動させるパラメータ数を変化させた場合における、システムを構成する物理サーバ数と収束時間分布の関係を示している。図から、物理サーバ数が小さい場合においては、収束時間が小さい場合と、収束時間が大きい場合に分布が二極化するが、物理サーバ数が大きくなるにつれてその傾向が小さくなり、収束時間のばらつきが小さくなることがわかる。これは、物理サーバ数が少ない場合にはパラメータ設定の変動を受けやすく、各ノードにおける *SERV* 濃度の収束値にばらつきが大きいため、その収束時間のばらつきも大きくなっていることによるものと考えられる。このことから、物理サーバ数が増えることによって、システム全体としてロバスト性が高まると言うことができる。

5. まとめと今後の課題

本報告では、化学反応式を用いた空間協調モデルに基づく仮想ネットワークサービス空間構築手法の、パラメータ設定に対

する安定性評価を行った。その結果、システムを構成するコンポーネント数が増加するにつれて、システムが持つパラメータ数は増加するが、パラメータ設定に対するシステム性能のロバスト性は高まることがわかった。このことは、提案手法が大規模な仮想ネットワークサービス空間を構築するのに適していることを示していると言える。

今後の課題として、提案している仮想ネットワークサービス空間に対して、需要変動や障害発生に対応するための予備系資源の配置方法を検討することが挙げられる。

文 献

- [1] A. Barabasi and R. Albert, "Emergence of scaling in random networks," *Science*, vol. 286, pp. 509–512, Oct. 1999.
- [2] D. Watts and S. Strogatz, "Collective dynamics of small-world networks," *Nature*, vol. 393, pp. 440–442, June 1998.
- [3] S. Balasubramaniam, K. Leibnitz, P. Lio, D. Botvich, and M. Murata, "Biological principles for future Internet architecture design," *IEEE Communications Magazine*, vol. 49, pp. 44–52, July 2011.
- [4] M. Meisel, V. Pappas, and L. Zhang, "A taxonomy of biologically inspired research in computer networking," *Computer Networks*, vol. 54, pp. 901–916, Apr. 2010.
- [5] F. Dressler and O. B. Akan, "Bio-inspired networking: From theory to practice," *IEEE Communications Magazine*, vol. 48, pp. 176–183, Nov. 2010.
- [6] A. Tero, S. Takagi, T. Saigusa, K. Ito, D. P. Bebber, M. D. Fricker, K. Yumiki, R. Kobayashi, and T. Nakagaki, "Rules for biologically inspired adaptive network design," *Science*, vol. 327, pp. 439–442, Jan. 2010.
- [7] G. Tononi, O. Sporns, and G. M. Edelman, "Measures of degeneracy and redundancy in biological networks," *Rules for Biologically Inspired Adaptive Network Design*, vol. 96, pp. 3257–3262, Mar. 1999.
- [8] J. M. Whitacre and A. Bender, "Networked buffering: A basic mechanism for distributed robustness in complex adaptive systems," *Theoretical Biology and Medical Modelling*, vol. 7, Mar. 2010.
- [9] 長谷川剛, 村田正幸, "生物ネットワークの縮重性・冗長性に基づく情報ネットワーク設計に関する一検討," **電子情報通信学会技術研究報告**, vol. 112, pp. 29–34, July 2012.
- [10] 岡崎 拓郎, 長谷川 剛, 村田 正幸, "生物ネットワークの縮退特性に基づく頑強性を有する情報ネットワークシステムの冗長化手法," **電子情報通信学会技術研究報告**, vol. 112, pp. 595–600, Mar. 2013.
- [11] M. Viroli, M. Casadei, and S. Montagna, "Spatial coordination of pervasive services through chemical-inspired tuple spaces," *ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems*, vol. 6, June 2011.
- [12] Shun Sakurai, Go Hasegawa, Masayuki Murata, "Construction method of service space in virtualized network system based on chemical-inspired spatial coordination model," **電子情報通信学会技術研究報告**, vol. 114, pp. 69–74, Mar. 2015.
- [13] M. Viroli, M. Casadei, and S. Montagna, "Spatial coordination of pervasive services through chemical-inspired tuple spaces," *ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems*, vol. 6, pp. 14:1–14:24, June 2011.
- [14] M. Viroli and M. Casadei, "Biochemical tuple spaces for self-organising coordination," vol. 5521, pp. 143–162, June 2009.
- [15] R. N. Goldberg, Y. B. Tewari, and T. N. Bhat, "Thermodynamics of enzyme-catalyzed reactions," *Science and Mathematics, Bioinformatics*, vol. 20, pp. 2874–2877, May 2004.
- [16] M. L., M. ML., J. KA., and G. RS., "The original Michaelis constant: Translation of the 1913 Michaelis-Menten paper," *Biochemistry*, vol. 50, pp. 8264–8269, Sept. 2011.
- [17] A. N. Gorban and O. Radulescu, "Dynamical robustness of biological networks with hierarchical distribution of time scales," *IET Systems Biology*, vol. 1, pp. 238–246, July 2007.

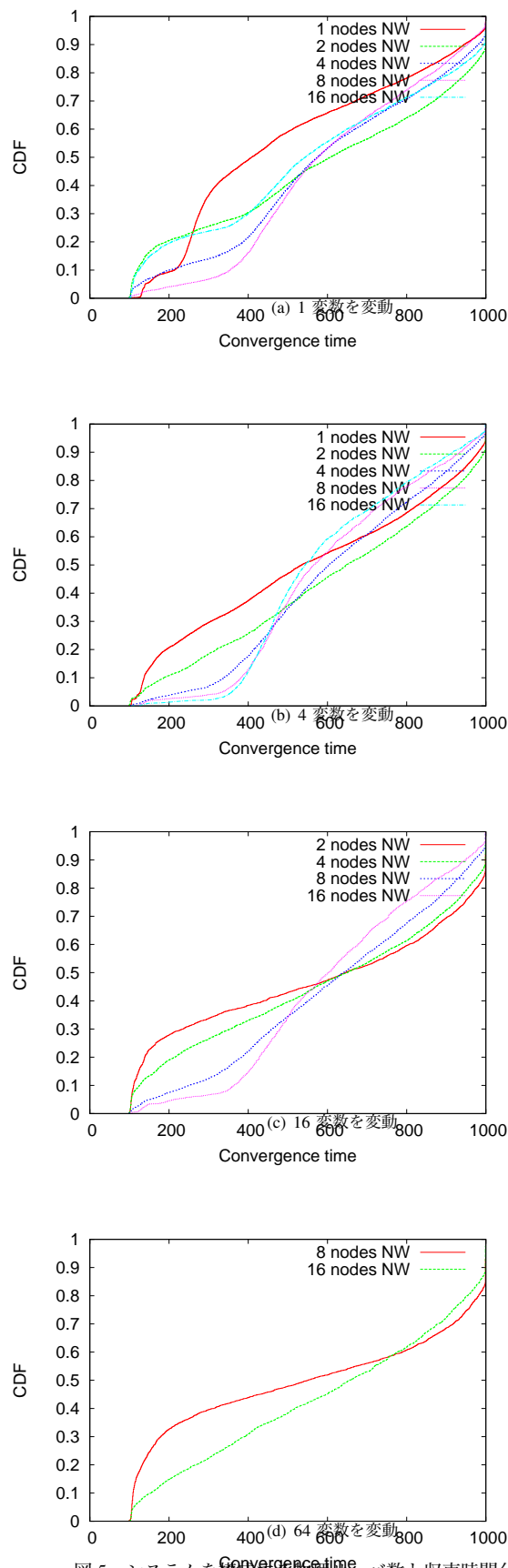


図5 システムを構成する物理リーバ数と収束時間分布の関係