

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月24日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21300027

研究課題名（和文）

時間スケールの階層構造を用いた情報システムの制御アーキテクチャ設計

研究課題名（英文） Design of Control Architecture for Information Systems  
Based on Hierarchical Structures of Time Scales

研究代表者

會田 雅樹（AIDA MASAKI）

首都大学東京・システムデザイン研究科・教授

研究者番号：60404935

研究成果の概要（和文）：

本研究は、大規模複雑システムとしての情報通信ネットワークに必要な設計・制御技術について、時間スケールに関する階層構造を用いて統一的理解を図るアーキテクチャ設計を検討したものである。自然界に見られる階層構造に学ぶ新しいネットワーク制御アーキテクチャとして、近接作用に基づく自律分散制御技術と、階層化を支えるくりこみ論的アプローチの観点から、具体的なアルゴリズムとネットワーク設計制御法を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

This research employs the nature-inspired approach to investigate the ideal architecture of communication networks as large-scale and complex systems. Conventional architectures are hierarchical with respect to the functions of network operations due entirely to implementation concerns and not to any fundamental conceptual benefit. In contrast, the large-scale systems found in nature are hierarchical and demonstrate orderly behavior due to their space/time scale dependencies. In this research, by examining the fundamental requirements inherent in controlling network operations, we clarify the hierarchical structure of network operations with respect to time scale. This research also describes an attempt to build a new network architecture based on the structure. In addition, as an example of the hierarchical structure, we apply the quasi-static approach to describe user-system interaction, and we describe a hierarchy model developed on the renormalization group approach.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	4,800,000	1,440,000	6,240,000
2010年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
2011年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
年度			
年度			
総計	13,200,000	3,960,000	17,160,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・計算機システム・ネットワーク

キーワード：局所相互作用，情報システム，情報通信工学，自己組織化，自律分散制御

## 1. 研究開始当初の背景

情報通信ネットワークは、空間的な広がりの意味でも接続する機器の数の意味でも世界最大規模のシステムである。アプリケーションの多様化や社会との結びつきの深まり、情報爆発などの環境変化も考えると、情報通信ネットワークは日々動的な進化を続ける「大規模複雑システム」であるといえる。このようなシステムをうまく設計し、適切に制御・管理していく為には、新しい考え方に基づくネットワーク設計・制御技術が求められる。

身の回りにある大規模複雑システムの典型例は、この世界そのものである。この世界を形成する構成要素の数や、そこから生み出される多様性は、究極の大規模複雑システムといって良い。我々の世界を構成するミクロな原子や素粒子のスケールでは、過去と同じ状態が再び繰り返されることは無いが、マクロなスケールでは極めて秩序のある世界を作り出している。本研究は、このような自然界の大規模複雑システムに学び、大規模複雑システムとしてのネットワーク設計・制御技術のあり方を検討するものである。

## 2. 研究の目的

従来のネットワーク制御アーキテクチャは、機能に基づいた階層構成をとっているが、実装面でのメリット以外に原理的な必然性がある訳ではない。一方、自然界に見られる大規模システムでは、システム全体の秩序立った振舞いの背後に、しばしば時間及び空間的スケールによる階層構造が見いだされる。

本研究は、ネットワークの内部で行われる各種の制御動作について、時間スケールから考えた動作のあり方、及び時間スケールによる階層構造を考察し、それに基づく新しいネットワークアーキテクチャ構築を目指したものである。そのために、この世界が安定したシステムとして存在するための「仕掛け」を考察し、その仕掛けの工学的応用を考えることによって、ネットワーク制御アーキテクチャのあるべき姿を明らかにすることを目的とする。

## 3. 研究の方法

この世界が安定したシステムとして存在するための「仕掛け」として、以下の2つの要因を想定し、工学的な意味付けを行った。

### (1) 近接作用（局所相互作用）

物理的なシステムにおいて異なる位置にある対象同士の間を生じる何らかの作用を考える時に、作用の及し方によって遠隔作用と近接作用の2つの考え方が存在する。遠隔作用とは離れた対象同士が直接的に作用を及ぼし合うと考えるモデルである。一方、近

接作用では、離れた対象同士が直接的に作用を及ぼし合うことは無く、作用が直接伝わるのは近隣のみであって、近隣同士間の作用の影響が徐々に空間を伝わっていくことで、離れた対象に作用が到達すると考える。現代の物理学では近接作用の立場を支持しており、相互作用は局所的に起こるとしている。このようなモデルでは、空間の各点に何らかの物理量があるとする「場」を考え、ある点での物理量の変化が空間各点の近隣同士の相互作用を介して時間とともに有限の速度で空間を伝わっていくことになる。

### (2) くりこみ可能性（粗視化による自由度の縮約可能性）

くりこみ理論とは、何らかの対象を観察する際に、観察のスケール（時間的または空間的な分解能など）を粗くするような「ものの見方の変換」を考え、その変換に対してもの見え方がどのように変化するか「応答」をシステマティックに記述しようとする理論の枠組みである。ここで用いられるもの見方の変換をくりこみ変換という。ミクロスケールで観測したときに多数の（または無限の）自由度で記述されるようなシステムが、くりこみ変換によってマクロスケールでは少数の（または有限の）自由度で記述できるような自由度の縮約が可能な場合に、観測対象のシステムはくりこみ可能であるという。くりこみ理論は物理学の諸分野において多くの鮮やかな成功例がある反面、適用する問題毎にカスタマイズしたくりこみ理論が必要であり、現状では必ずしも誰にでも使える汎用的な分析手法とはいえないようである。

近接作用では、ある対象が他者から影響を受けたり他者に影響を与えたりするのは、瞬間的には近隣のみであることになる。遠隔作用の世界では、宇宙の果てを含む全ての場所で起こった現象が瞬間的に自分に影響を与え、逆に自分は世界の全現象に即座に影響を与えることになり、恐らく世界はその構成要素同士が非常に強く結びついた自縄自縛の世界になるに違いない。このことから近接作用の世界は、局所的な行動の自由を確保しつつ、システム全体に安定な秩序を与えるための鍵であると思われる。

我々は世界の仕組みを完全には理解していなかったとしても、また原子のようなミクロな構成要素の存在を知らなかったとしても、世界の秩序を実感することができる。これは、世界をマイクロレベルで見た時の膨大な自由度が、人間が観察可能なレベルの粗いスケールで見たときには殆ど消えてしまい、比較的少数のマクロなパラメータのみによ

て世界が記述できるからである。これは世界がある意味でくりこみ可能であることに他ならない。

本研究では、これら2つの考え方に基づいて、時間スケールで階層化されたネットワークアーキテクチャを考察し、関連する具体的な課題として自律分散制御と階層分離アーキテクチャを検討した。

#### 4. 研究成果

議論を単純化するため、一次元空間上に分布したある量の密度関数  $p(x, t)$  を考えよう。この関数は適当な尺度によってシステムの状態や性能特性を表しているものとする。また  $x$  はネットワーク内の論理的または物理的な位置を表す変数であるとする。各点に於けるある量の変化は移動のみによって生じ、生成や消滅を伴わないとする。このとき時刻  $t$  に於ける位置  $x$  から  $x+r$  への単位時間あたりの遷移率を  $w(x, r, t)$  とすると、密度関数  $p(x, t)$  の時間発展はマスター方程式と呼ばれる以下の形に書ける。

$$\frac{\partial}{\partial t} p(x, t) = - \int_{-\infty}^{\infty} w(x, r, t) p(x, t) dr + \int_{-\infty}^{\infty} w(x-r, r, t) p(x-r, t) dr$$

ここで、遷移率  $w(x, r, t)$  の遷移量  $r$  に関するモーメントを

$$c_n(x, t) := \int_{-\infty}^{\infty} r^n w(x, r, t) dr$$

とし、関数  $f(x)$  の Taylor 展開を用いると、 $p(x, t)$  の時間発展が空間微分の級数として

$$\frac{\partial}{\partial t} p(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n!} \frac{\partial^n}{\partial x^n} c_n(x, t) p(x, t)$$

と書ける。右辺の級数は一般に無限階の空間微分を含んでいるので、ある点  $x$  での  $p(x, t)$  の時間発展は、 $x$  から  $r$  だけ離れた点  $x+r$  における同時刻の状態  $p(x+r, t)$  からも影響を受けることになる。ここで  $r$  は任意の値を許すことから、これは遠隔作用的な影響を含むことを意味している。しかし、もし右辺の級数を有限階まで打ち切ることができれば、 $p(x, t)$  の時間発展は  $x$  の無限小近傍の情報のみで決定される（勿論、現実のモデルに適用する時は、時間と空間を離散化することになるので、無限小近傍というわけではない）。これは近接作用に対応すると考えてよい。従って、近接作用の考え方に従うと、我々は必然的に有限階の偏微分方程式又は差分方程式に基づくモデルを扱うことになる。

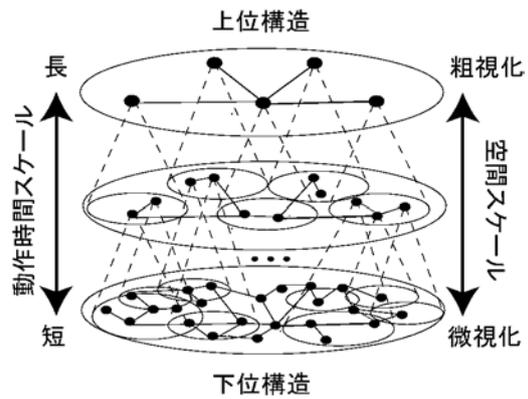


図1：時間的・空間的スケールとネットワーク構造の見え方

本研究が対象とする工学的システムに関しては、近接作用とか局所相互作用とはいっても、注目している観察対象をある特定の時間及び空間スケールで考えた場合の振舞いに関する性質の記述にすぎないのであって、観察対象をもっと拡大してミクロな構造を見て行くと異なる性質が見えてくるかもしれない。あるスケールに於いて「自分自身と近隣の状態に関する局所的情報」を扱うとしても、拡大して細かいスケールで見れば近隣との距離は無視出来なくなってく訳である。工学的な応用では、ある時間スケールで考えた時、情報の劣化が無視できる範囲で状態情報を知ることができる情報の種類、空間的範囲、また逆に何かの動作が直接影響を与える空間的範囲に限定して考察しており、それより細かいスケールで見ると違った特性や仕掛けが見えてくる、ということに対応する（図1参照）。

自然現象の興味深いところは、ミクロな構造が著しく異なる観測対象であっても、より粗いスケールで見ると本質的に同じ時間発展方程式で記述されるような例が頻出するところであり、自然現象のユニバーサリティと呼ばれている。例えば拡散方程式では、拡散現象の起きる媒質が水、空気、土などであっても、方程式の形自身は変わらない。このとき変化するのは拡散係数と呼ばれる定数のみで、媒質のミクロな構造の違いに関する情報は全てこの係数に縮約されている。この意味で、近接作用に基づくある種の時間発展方程式は、スケールによる階層構造の分離を表していると考えられる。また、これこそが我々が世界を安定して認識できる仕掛けの主要部に対応するものであろう。注目するスケールでの動作規則を方程式の形で表し、それより細かい下位スケールからのすべての影響を、係数の「値」にくりこんでいると考えられるのである。また、翻って上位スケールの方を考えると、時間発展方程式の初期条件や境界条件に影響を与えたり、時

間発展方程式自体を取り替えたり（自然現象としては分からないが、工学的な応用としては動作方式の切り替えなどに対応）する形で、上位スケールの動作との関係が作られていると考えることができる。

以上の考察から、本研究では以下のような階層構造の理解に基づき、具体的な階層型ネットワークアーキテクチャの設計原理を検討した。

#### (1) 階層内の動作規則の設計

ある時間スケールにおいて収集及び利用が可能で状態情報のみに基づき、影響の及ぶ範囲のみに何らかのアクションを起こすことを考えると、近接作用に基づく自律分散制御の枠組みとなる必要がある。

#### (2) 階層間で相互に及ぼされる影響の理解

階層間の影響は、マイクロで雑多な自由度がマクロスケールでどのように見えるのかを理解する必要があり、情報通信ネットワークにカスタマイズしたくりこみ理論の展開が必要となる。

階層内の動作規則の設計については、近接作用に基づく自律分散制御技術として、2種類の制御機構を考案した。一つ目は、ネットワークの輻輳回避、データセンタネットワークの負荷分散などを対象とした平滑化・負荷分散技術である。これは拡散現象を表す偏微分方程式を利用し、自律分散的な局所制御動作と大域的な性能特性を結びつけるものである。もう一つは、アドホックネットワークの自律分散クラスタリングアルゴリズムを対象としてネットワーク上に特定の空間構造を生み出すための、自律分散的構造形成技術である。これは、拡散現象の一種のくりこみ変換として空間パターンを生成する自律分散アルゴリズムで、既存技術の生物学的なアナロジーによる反応拡散方程式をベースにした類似方式に比べ、約30倍の収束速度で空間構造を形成できることが明らかとなった。

階層間で相互に及ぼされる影響の理解については、近年深刻な問題となっているユーザと通信システムの相互作用によって引き起こされる大規模システム障害の未然防止を目的とした、ユーザとシステムの相互作用の理解に向けた検討を行った。ユーザとシステムの相互関係の記述は、情報通信システムに現れる時間スケールによる階層化として典型的な例となっている。この検討の中で、階層構造をくりこみ変換の枠組みで理解する方法論を検討し、具体的にシステムの安定性評価や設計技術に結びつけるための「準静的アプローチ」という方法を開発した。

以上のように、本研究では大規模複雑システムとしての情報通信ネットワークを、自然界の秩序や動的な安定性に学んだアプローチによって、人智が及ぶように設計する為の考え方とその具体例を検討した。そのための技術的な鍵として、時間スケールによる階層構造とそれを支える近接作用とくりこみ可能性の概念に重要な可能性を見出してきた。

本研究の今後の課題としては、多重の階層構造を持つ新しいネットワークアーキテクチャの創造が必要であり、そこでは各階層の動作が近接作用に基づく独自の偏微分方程式により動作規則が規定され、その方程式の係数、形、境界条件、初期条件などは、情報通信ネットワーク用にカスタマイズされたくりこみ理論により与えられる枠組みを目指していく予定である。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計5件)

① Masaki Aida, ``Using a renormalization group to create ideal hierarchical network architecture with time scale dependency,`` IEICE Transactions on Communications, 査読有, vol.E95-B, no.5, 2012, 1488-1500.

② 多田知正, 今瀬真, 村田正幸, ``地理的に離れたデータセンタ間の負荷分散におけるネットワークの消費電力の影響,`` 電子情報通信学会論文誌, 査読有, vol. J95-B, no.4, 2012, 534-546.

③ Masao Tanabe, Hirofumi Akaike, Masaki Aida, Masayuki Murata, Makoto Imase, ``Adaptive timer-based countermeasures against TCP SYN flood attacks,`` IEICE Transactions on Communications, 査読有, vol.E95-B, no.3, 2012, 866-875.

④ Yudai Honma, Masaki Aida, Hideyuki Shimonishi, Atsushi Iwata, ``A new multi-path routing methodology based on logit-type probability assignment,`` IEICE Transactions on Communications, 査読有, vol.E94-B, no.8, 2011, 2282-2291.

⑤ Kohei Watabe, Yudai Honma and Masaki Aida, ``Probe interval designs that improve accuracy of CoMPACT monitor,`` Simulation Modelling Practice and Theory, Elsevier, 査読有, vol.18, no.1, 2011, 56-68.

[学会発表] (計54件)

① Kenji Takagi, Yusuke Sakumoto, Chisa Takano, Masaki Aida, ``On convergence rate of autonomous decentralized

structure formation technology for clustering in ad hoc networks,' ' IEEE ICDCS 2012 Workshops (ADSN 2012), 査読有, 2012.

② Kohei Watabe, Masaki Aida, `` On modeling of fluctuations in quasi-static approach describing the temporal evolution of retry traffic,' ' ITC23, The 23rd International Teletraffic Congress, 査読有, 2011.

③ Chisa Takano, Masaki Aida, Masayuki Murata, Makoto Imase, `` Autonomous decentralized mechanism of structure formation adapting to network conditions,' ' SAINT 2011, The 11th IEEE/IPSJ International Symposium on Applications and the Internet Workshops, 査読有, 2011.

④ Harumasa Tada, `` Nearest neighbor task allocation for large-scale distributed systems,' ' ISADS 2011, The 10th International Symposium on Autonomous Decentralized Systems, 査読有, 2011.

⑤ Kohei Watabe and Masaki Aida, `` Analysis on the fluctuation magnitude in probe interval for active measurement,' ' IEEE INFOCOM 2011, 査読有, 2011.

⑥ Hirokazu Kariya and Masaki Aida, `` Hierarchical combination of detour-type local routing and autonomous decentralized flow control,' ' International Symposium on Aware Computing (ISAC 2010), 査読有, 2010.

⑦ Yoshiyuki Ishii, Kohei Watabe and Masaki Aida, `` Quasi-static approach for retry traffic with different service time,' ' International Symposium on Aware Computing (ISAC 2010), 査読有, 2010.

⑧ Harumasa Tada, `` Evaluation of Effect of Network Energy Consumption in Load Distribution across Data Centers,' ' Green networking 2010, Architecture, protocols and algorithms for a sustainable Internet, 査読有, 2010.

⑨ Yudai Honma and Masaki Aida, `` A new multi-path routing methodology based on logit type assignment,' ' The 2nd International Workshop on the Network of the Future (FutureNet II), 査読有, 2009.  
(その他, 国内発表 4 5 件)

[図書] (計 2 件)

① 会田雅樹, 高野知佐, 作元雄輔, `` 動作時間スケールの階層構造を基盤とするネットワークアーキテクチャ,' ' 電子情報通信

学会誌, 特集 情報爆発時代に向けた新たな通信技術 - 限界打破への挑戦 -, vol.94, no.5, 2011, 401-406.

② Masaki Aida and Hideyuki Koto, `` Structure and dynamics of social networks revealed by data analysis of actual communication services,' ' Book Chapter in Handbook of Social Network Technologies and Applications, Borko Furht (Ed.), Chapter 2, Springer, 2010, 23-43.

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

首都大学東京会田研究室研究実績

<http://exmgaity.sd.tmu.ac.jp/~aida/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

会田 雅樹 (AIDA MASAKI)

首都大学東京・システムデザイン研究科・教授

研究者番号: 60404935

### (2) 研究分担者

今瀬 眞 (IMASE MAKOTO)

大阪大学・情報科学研究科・教授

研究者番号: 30346176

### (3) 研究分担者

村田 正幸 (MURATA MASAYUKI)

大阪大学・情報科学研究科・教授

研究者番号: 80200301

### (4) 研究分担者

高野 知佐 (TAKANO CHISA)

広島市立大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号: 60509058

### (5) 研究分担者

多田 知正 (TADA HARUMASA)

京都教育大学・教育学部・准教授

研究者番号: 10301277