

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

Challenges to New Network Architectures Based on Hierarchical Structure of Time Scales

会田雅樹 高野知佐 作元雄輔



情報通信ネットワークは人間が作り出した世界最大規模のシステムであり、日々進化を続けている。このような大規模複雑システムを適切かつ持続的に運用するためにはどのようなネットワーク設計・制御技術が求められるであろうか。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わけではない。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。これにより我々は、例えば原子分子レベルの複雑な運動に気を留めることなく、日々の生活を繰り返すことができるわけである。本稿では、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の試みについて解説する。

キーワード：大規模複雑システム，時間スケール，近接作用，自律分散制御，繰り込み変換，階層構造

1. はじめに

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付きの深まり、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・管理していくためにはどのような仕組みが必要となるであろうか。本稿の具体的な説明に入る前に、筆者らがこの課題に対してどのような考え方にに基づいた考察を行っているのかを説明しておきたい。

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であろう。では、この究極のシステムたる世界はなぜ「安定」して存在しているのだろうか。我々は、明日の朝も目覚めたらやはり世界は存在していて、これまでと同じように日が昇ると信じて疑わない。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一切期待できない世界であるにも関わらず、である。このような身の回りの世界の安定性や秩序はどこから来るのかを追求することは、以下のような問い掛けに対応するかもしれない。もし神様が世の中を創造したとすれば、そのときに考慮したであろう「世界に秩序が生まれるための仕掛け」とは何であろうか。別の表現をするなら「この世界にあたかも神様が存在しているように見える仕掛け」とは何か、と言い換えてもよい。

本稿は、そのような「仕掛け」が何であるかを考察し、それを情報通信ネットワークの設計に利用することで、大規模複雑システムとしての情報通信ネットワークの安定な設計・制御法を生み出すことを目指す取組みについての解説である。つまり、工学的なシステムの創造主たる人間が、神様が世界を創造したのをまねて、秩序ある大規模複雑システムを作り出すために、どのような方向で検討を進めるべきかを考察する。この中で、具体

会田雅樹 正員 首都大学東京大学院システムデザイン研究科経営システムデザイン学域
E-mail maida@sd.tmu.ac.jp
高野知佐 正員 広島市立大学大学院情報科学研究科情報工学専攻
E-mail takano@hiroshima-cu.ac.jp
作元雄輔 正員 首都大学東京大学院システムデザイン研究科経営システムデザイン学域
E-mail yusuke@sd.tmu.ac.jp
Masaki AIDA, Yusuke SAKUMOTO, Members (Graduate School of System Design, Tokyo Metropolitan University, Hino-shi, 191-1165 Japan), and Chisa TAKANO, Member (Graduate School of Information Sciences, Hiroshima City University, Hiroshima-shi, 731-3194 Japan).
電子情報通信学会誌 Vol.94 No.5 pp.401-406 2011 年 5 月
©電子情報通信学会 2011

的には動作時間スケールから考えた通信ネットワークの制御動作のあり方、及び時間スケールによる階層構造を基盤とするネットワークアーキテクチャへの取組み状況について解説する。

2. 自然界の秩序はどこから来るのか？

世界が安定して存在するための「仕掛け」とは何かという問いに対し、人それぞれいろいろな考えが存在するであろう。例えば、人間原理的な立場では以下のような説明も可能かもしれない。そもそも、世界が安定して存在するからこそ人間のような知的生命体が出現することができて、この世界の安定性について思いを巡らすことができる。つまり「世界はなぜ安定して存在しているのか？」という問い掛けは安定している世界でしか発生しないもので、問い掛け自体が一種のトートロジーである、うんぬんと。

当然のことながら我々は「仕掛け」に関して完全な回答を与えることはできない。なぜなら、現時点で、自然界の仕掛けが全て解明されているわけではないからである。しかし我々は自然を理解すること自体が目的ではなく、工学的応用が目的であるので、現時点で考えられる「仕掛け」に当たりを付け、工学的な有用性を試してみることができる。この「仕掛け」として、筆者らは以下の二つの要因を想定している。

・ 近接作用（局所相互作用）⁽¹⁾

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と、作用の及ぼし方によって遠隔作用と近接作用の二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なく、作用が直接伝わるのは近隣のみであって、近隣同士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。

・ 繰り込み可能性（粗視化による自由度の縮約可能性）

繰り込み理論とは、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の見方の変換を繰り込み変換という。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、繰り込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繰り込み可能であるという。繰り込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、適用する問題ごとにカスタマイズした繰り込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⁽²⁾。

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付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、世界をミクロレベルで見たときの膨大な自由度が、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ほとんど消えてしまい、比較的少数のマクロなパラメータのみによっ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繰り込み可能であることに他ならない。

以降では、これら二つの考え方に基づいて筆者らが目指している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の概略を述べ、引き続き関連する具体的課題として自律分散制御と階層分離アーキテクチャの検討状況を述べる。最後にまとめと今後の課題を述べる。

3. 時間スケールによる階層化構造

自然界に現れる各種システムでは、システム全体の秩序ある振舞いの背後に、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。筆者らの考えでは、2. で見た二つの「仕掛け」はこの階層構造を構成する上で不可欠のものであり、世界が安定して存在したりダイナミックな秩序が現れたりする現象を支えていると位置付けている。ここでは、二つの「仕掛け」と階層構造がどのような形で工学的システムのあり方に結び付くのかについて、筆者らの目指すゴールのイメージを簡単に説明する。

まず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^(注1)。各点にお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しよう。このとき時刻 t における位置 x から $x+r$ への単位時間当りの遷移率を $w(x, r, t)$ とすると、密度関数 $p(x, t)$ の時間発展は master 方程式と呼ばれる以下の形に書ける。

$$\frac{\partial}{\partial t} p(x, t) = - \int_{-\infty}^{\infty} w(x, r, t) p(x, t) dr + \int_{-\infty}^{\infty} w(x-r, r, t) p(x-r, t) dr \quad (1)$$

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

$$c_n(x, t) := \int_{-\infty}^{\infty} r^n w(x, r, t) dr \quad (2)$$

とし、関数 $f(x)$ のテイラー展開 $f(x-r) = e^{-r \frac{\partial}{\partial x}} f(x)$ を用いると、 $p(x, t)$ の時間発展が空間微分の級数として

$$\frac{\partial}{\partial t} p(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n!} \frac{\partial^n}{\partial x^n} c_n(x, t) p(x, t) \quad (3)$$

と書ける。これを Kramers-Moyal 展開という⁽³⁾。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、式(3)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で打ち切る (truncate) することができれば、つまり、特定の n_0 に対し全ての $n > n_0$ で $c_n(x, t) = 0$ となれば、 $p(x, t)$ の時間発展は x の無限小近傍の情報のみで決定される^(注2)。これは近接作用に対応すると考えてよい。したがって、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または差分方程式に基づくモデルを扱うことになる。

我々が扱う工学的対象に関していえば、近接作用とか

(注1) 5. で述べる例のように x は抽象的なパラメータ空間における「位置」を表すこともできる。

(注2) もちろん、現実のモデルに適用するときは、時間と空間を離散化することになるので、有限階の差分でも随分遠くの情報が必要になることがある。隣接情報での動作については4. で触れる。

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いくと異なる性質が見えてくるかもしれない。あるスケールにおいて「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できなくなっていくわけである (図1)。工学的な応用では、ある時間スケールで考えたとき、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得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。

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⁽²⁾。例えば後述する拡散方程式では、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ことができる。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全ての影響を、係数の「値」に繰り込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

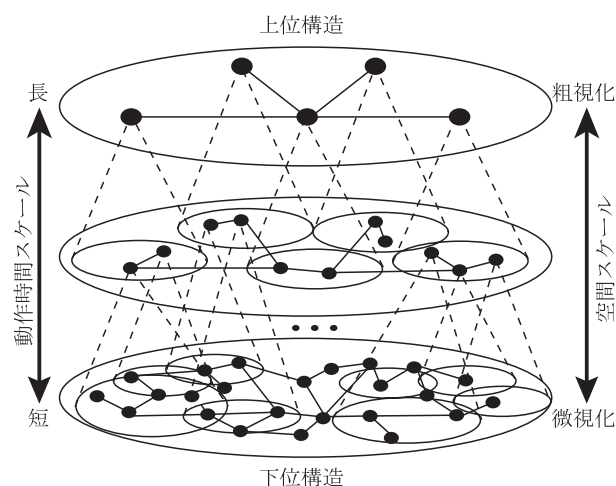


図1 時間的・空間的スケールとネットワーク構造の見え方
ネットワークでは近接作用が意味する局所性はスケールによる相対的なものである。

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換などに対応）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、筆者らのゴールは以下のような階層構造の理解に基づき、具体的な階層形ネットワークアーキテクチャの設計原理を明らかにしていくことである。

- ・ 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な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。

- ・ 階層間で相互に及ぼされる影響の理解

階層間の影響は、ミ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る、情報通信ネットワークにカスタマイズした繰り返し理論の展開が必要となる。

4. 近接作用と自律分散制御

ここでは拡散現象を例にして、近接作用に基づく自律分散制御技術の検討状況を解説する。各点でのある量の変化は空間的に連続的な移動のみであり、生成・消滅やジャンプを伴わないとすれば密度関数 $p(x, t)$ の時間発展は以下の連続の式を満たす。

$$\frac{\partial p(x, t)}{\partial t} = - \frac{\partial J(x, t)}{\partial x} \quad (4)$$

ここで $J(x, t)$ は単位時間当りに点 x を通過する $p(x, t)$ の移動量と方向を表す一次元ベクトルである。拡散現象では、密度勾配に比例したレートで密度の高い方から低い方に向かって流れが生じるため、比例係数を κ とすると以下のように書ける。

$$J(x, t) = -\kappa \frac{\partial p(x, t)}{\partial x} \quad (5)$$

ここで κ は正の定数で拡散係数と呼ばれる。式(5)を式(4)に代入することにより、 $p(x, t)$ の時間発展方程式として以下の偏微分方程式を得る。

$$\frac{\partial p(x, t)}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 p(x, t)}{\partial x^2} \quad (6)$$

これはよく知られた拡散方程式である。拡散現象は自然界のあらゆるところに見られるありふれた現象であり、

拡散する対象や拡散が起こる媒質の種類や構造などに様々なバリエーションがある。それにも関わらず、3.で述べたように拡散方程式(6)はそれらの様々なバリエーションのある現象を統一的に記述するとともに、対象ごとの違いは拡散係数という少数の（というか唯一の）パラメータの値に繰り返り込んでいる。

この方程式は、初期条件として $p(x, 0) = p_0(x)$ を与えると以下の解を持つことが知られている。

$$p(x, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} N(x-y, 2\kappa t) p_0(y) dy \quad (7)$$

ただし $N(x, \sigma^2)$ は平均 0、分散 σ^2 の正規分布の密度関数

$$N(x, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (8)$$

である。拡散方程式の解(7)の物理的意味は、初期状態の各点での密度分布がそれぞれ正規分布に従いながら均一化していく状況を重ね合わせたものである。

この例で分かるように、近接作用で動作するシステムを工学的な立場で見ると、自律分散制御の枠組みに対応付けすることができる⁽⁴⁾。システム全体の情報を知っている存在はなく、システムの各点はあらかじめ決められたルールで近隣の点と相互作用しているという状況にも関わらず、システム全体の状態は偏微分方程式の解で与えられるような大域的に秩序ある振舞いを生み出している。拡散現象を利用した自律分散制御の応用としては、システムの負荷分散やネットワークのふくそう回避制御が考えられる。

近接作用に基づく自律分散制御機構を設計するための手順を図2に示す⁽¹⁾。これにより、局所的な動作ルールを適切に設計することによって、システム全体の状態を間接的に制御する機構を実現することができる。拡散現象の例では平滑化をする性質を持った制御機構を考えたが、有限なサイズの構造を自律的に生み出すような自律分散制御機構も考えることができる。まず式(7)を利用

- システム全体の状態が持つべき大域的な性質を考え、そのような性質を備えた解を持つ偏微分方程式を考える(式(6)に対応)。
- その偏微分方程式が記述している(近接作用としての)局所作用を考え(式(5)に対応)、それを動作ルールとするようなサブシステムの設計を行う。
- その結果、サブシステムは局所的な状態情報のみに基づいて自律分散的に動作するにも関わらず、システム全体の状態を(対応する偏微分方程式の解として)望ましい方向に導く。

図2 近接作用に基づく自律分散制御メカニズム設計の処方箋

して新しい関数

$$q(x, t) := \frac{\sqrt{2\kappa e^{2ct}}}{\sigma} p\left(\frac{\sqrt{2\kappa e^{2ct}}}{\sigma} x, e^{2ct}\right) \quad (9)$$

を考える。ただし c, σ は正の定数である。これは拡散方程式の解(7)を時間発展させて平滑化させると同時に、拡散による空間的な広がりの方だけ空間スケールを縮小させるもので、極限分布は $\lim_{t \rightarrow \infty} q(x, t) = N(x, \sigma^2)$ となる。この変換(9)は一種の繰り込み変換である。図2の手順に従い、 $q(x, t)$ の時間発展方程式と対応する局所作用を調べると

$$\frac{\partial}{\partial t} q(x, t) = c \left(\frac{\partial}{\partial x} x + \sigma^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) q(x, t) \quad (10)$$

$$J(x, t) = -c \left(x + \sigma^2 \frac{\partial}{\partial x} \right) q(x, t) \quad (11)$$

となり、自律分散制御の動作ルールを導くことができる。この制御はあらかじめ与えたパラメータ σ で決まる有限サイズの分布構造を作り出すため、自律分散クラスタリング技術等に応用可能である。また、二階までの微分しか含まないため、空間をネットワークに対応させた場合でも、隣接ノードまでの局所情報によって動作ルールを構成可能である。ただし、任意のネットワークトポロジーに適用するために、動作ルールが座標系に依存しないように若干工夫する必要がある^{(5), (6)}。

5. 階層分離と準静的アプローチ

異なるスケールの階層間で起こる影響はどのように考えればよいだろうか。システムを粗視化すると自由度が減るという現象自体は特段珍しい考え方ではなく、通信ネットワークで現れる大群化効果などはその典型例である。これは、大規模化することで統計的な性質が効いてきて、平均値の周りの相対的なばらつきが小さくなったり、平均値での議論が良い近似を与えるような例である。筆者らはこれに加え「ネットワークらしさ」も併せ

て取り扱えることが望ましいと考えている。ネットワークらしさの意味するイメージは以下のようなものである。システム全体の特性を理解する際に、システムを構成要素に分割し、それら構成要素の単体としての性質を詳しく調べていくような「要素還元論」的な考え方では不十分で、構成要素間の相互関係による影響が何らかの形で支配的になる状況である。つまり、粗視化に伴い構成要素の単体としての性質の寄与は弱まるが、逆にサブシステム間の相互関係やネットワークによる結び付きによる影響が支配的になり、これにより、システム全体の性質として、構成要素単体の性質自体からは非自明であるような構造が顕在化するような現象を許すようなモデルが望ましい。

このような想定を満たすモデルの例として、筆者らは、再試行のある IP 電話に関する入力トラヒックの安定性を評価するための「準静的アプローチ」を検討してきた⁽⁷⁾。これは以下の特徴を持つ。

・ 通信システムとユーザの相互作用の記述

通信システムがふくそうするとユーザの処理待ち時間などが増加し、そのことがユーザからの再試行トラヒックを励起して通信システムの更なるふくそうを招く。このようにユーザや通信システムの動きはそれぞれ単体の性質で決まっているのではなく、相互関係が本質的になる。

・ ユーザと通信システムの階層分離

通信システムの動作速度は人間の体感可能な時間スケールに比べて極めて速いとし、その違いを利用して一種の繰り込み変換を行う。

準静的アプローチでは、以下のような考え方に基づいて通信システムとユーザの相互関係を取り扱う。もしユーザの状態と通信システムの状態を組み合わせでマルコフチェーンを定義してモデル化すると、それはシステム動作速度が非常に遅い（相対的には人間の観察能力についての時間分解能が極めて高い）ことを意味する。つまり、現時点でのシステムの状態をユーザが知り得ることを暗に前提としている。実は、この条件では再試行ト

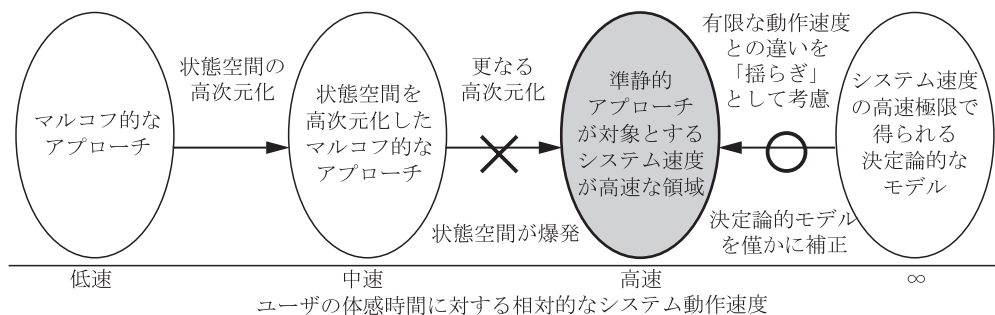


図3 準静的アプローチの狙い

ラヒックの入力量が発散してしまうのである。システムを徐々に高速にしていくと、ユーザは現時点のシステム状態を体感できず、過去一定期間の平均的振舞いを体感するようになる。それに伴い、再試行トラヒックの振舞いはおとなしくなっていく。この操作は、人間の時間分解能を粗くすると同時に時間スケールの変換を行うことに対応していて、一種の繰り込み変換と考えることができる。

さて、繰り込み変換したモデルをマルコフチェーンで表現すると、状態空間の次元が増え、通常のアプローチでは現実的には計算ができない。準静的アプローチでは、繰り込み変換を無限に施した状態として、ユーザの体感速度に対してシステム動作速度の高速極限をとる。このとき、ユーザとシステムの動作速度の違いから、通信システムは定常状態を保ちながらゆっくりと「準静的」に変化すると考えられる。すると、ユーザと通信システムの関係を非常に単純な形で抜き出すことができ、決定論的な取扱いが可能になる。

現実には、通信システムの動作は（高速ではあるが）有限であるので、決定論的な取扱いからのずれを「揺らぎ」として考慮する（図3）。このとき、再試行を含む入力レートに関係する量 $X(t)$ をうまく選んで、 $X(t)$ の時間発展が以下のようなランジュバン方程式に従うようにする。

$$\frac{d}{dt} X(t) = g(X) + \xi(t) \quad (12)$$

ここで、 $g(X)$ は $X(t)$ の値自身で決まる確定的な変化量を表し、通信システムの動作速度の高速極限を考えたモデルから得られる。 $\xi(t)$ は高速極限からのずれを表す揺らぎで、 $E[\xi(t)] = 0$ 、 $E[\xi(t)\xi(s)] = 2\kappa\delta(t-s)$ となる白色ガウス雑音である。見方を変えて $X(t)$ の密度関数を $f(x, t)$ とすると、 $f(x, t)$ の時間発展方程式は以下の偏微分方程式で記述される。

$$\frac{\partial}{\partial t} f(x, t) = \left(\frac{\partial}{\partial x} g(x) + \kappa \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) f(x, t) \quad (13)$$

このとき、特に大規模システムでは、通信システムの詳細（待ち行列システムとしてのモデルの詳細）は、ユーザの体感時間に関する時間スケールでの振舞いを記述する式(12)や式(13)にはほとんど影響しないことが分かっている。このように、準静的アプローチでは、動作時間スケールの違いを積極的に利用して、下位層のモデルの詳細を縮約したり、階層間の相互関係を反映したモデル化を行っている。

6. まとめと今後の課題

本稿では、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ための考え方や研究動向を解説した。その鍵として、筆者らは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繰り込み可能性にターゲットを定めている。本検討の最終的な到達点は、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繰り込み理論により与えられる枠組みを目指している。

文 献

- (1) 高野知佐, 会田雅樹, “物理的近接作用に学ぶ——拡散現象を指導原理とした自律分散型フロー制御技術——,” 信学誌, vol. 91, no. 10, pp. 875-880, Oct. 2008.
- (2) 大野克嗣, 田崎晴明, 東島 清, “くりこみ理論の地平,” 数理解科学, vol. 35, no. 4, pp. 5-12, 1997.
- (3) N.G. van Kampen, Stochastic Processes in Physics and Chemistry, 3rd ed., North Holland, 2007.
- (4) M. Aida and C. Takano, “Principle of autonomous decentralized flow control and layered structure of network control with respect to time scales,” Supplement of the ISADS 2003 Conference Fast Abstracts, pp. 3-4, 2003.
- (5) C. Takano, M. Aida, M. Murata, and M. Imase, “New framework of back diffusion-based autonomous decentralized control and its application to clustering scheme,” IEEE Globecom 2010 Workshop on the Network of the Future (FutureNet III), 2010.
- (6) 高野知佐, 会田雅樹, 村田正幸, 今瀬 真, “近接作用に基づく自律分散的構造形成技術の検討,” 信学技報, IN2010-49, pp. 31-36, Sept. 2010.
- (7) 会田雅樹, 高野知佐, 村田正幸, 今瀬 真, “再試行を含む通信システムのための準静的な安定性評価法,” 日本オペレーションズリサーチ学会誌, vol. 53, no. 6, pp. 334-339, 2008.

(平成 22 年 11 月 17 日受付)

あいだ まさき
会田 雅樹 (正員)



昭 62 立教大・理・物理卒。平元同大学院博士前期課程了。同年 NTT 入社。平 17 首都大東京・システムデザイン・准教授。平 19 同大学院・教授。博士 (工学)。

たかの ちさき
高野 知佐 (正員)



平 12 阪大・工・電子通信卒。平 20 首都大東京大学院博士後期課程了。平 12 NTT アドバンステクノロジー入社。平 20 広島市大・情報科学・准教授。博士 (工学)。

さくもと ひろふみ
作元 雄輔 (正員)



平 18 阪大・基礎工卒。平 20 同大学院博士前期課程了。平 22 同大学院博士後期課程了。平 22 首都大東京・システムデザイン・助教。博士 (情報科学)。