

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 23 日現在

機関番号：32515

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26870856

研究課題名(和文) 利己的な多主体による相互承認によって形成されるネットワークのモデル化

研究課題名(英文) Modeling of network formation constructed by mutual contracts among many self-interest agents

研究代表者

今井 哲郎 (IMAI, Tetsuo)

東京情報大学・総合情報学部・助教

研究者番号：10436173

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：様々な分野において観測されるネットワークが複雑ネットワークと呼ばれる特性を持つことが確認されている。複雑NWの一部は自律的な判断能力を持った多数の主体によって構築されたものであり、これらを説明できる新たなモデルとしてゲーム理論に立脚した動学的ネットワーク形成ゲームモデルが提案されている。しかし、これまでは計算量の問題から十分に大きな規模のネットワークに関してこのモデルの妥当性が評価できていなかった。本研究課題では、大規模並列計算機を用いて2000ノード規模の大規模NWに関してシミュレーションを実施し、本モデルが複雑ネットワークの特徴を持つネットワークを生成することができることが確認された。

研究成果の概要(英文)：It is confirmed that networks observed in various fields have a characteristic called complex networks. Some of complex networks are built by a large number of agents with high judgment ability, and a dynamic network formation game model based on the game theory has been proposed as the new explanatory model for these features. However the validity of this model for large scale networks had not been evaluated enough because it needs high computational ability. In this research theme, simulations for large-scale networks of 2,000 nodes were carried out by a large-scale parallel computer and it is confirmed that complex networks can emerge by this model.

研究分野：ネットワーク科学，ゲーム理論，情報工学，通信工学

キーワード：複雑ネットワーク ネットワーク形成ゲーム 大規模並列計算 グラフ探索 グラフ解析 インターネット
トポロジ ゲーム理論 動学的ネットワーク形成ゲームモデル

1. 研究開始当初の背景

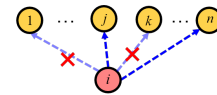
情報通信や社会学, 生物学など多様な分野において, 要素とその要素間の関係で構成される NW 構造(トポロジ)が複雑 NW と呼ばれる特性を持っていることが明らかになってきており, 複雑 NW のトポロジを生成することができるモデルの提案も, これまでに数多く行われている. 近年隆盛の Facebook や mixi などに代表される SNS ネットワークのトポロジも, 複雑 NW の特徴を持つトポロジの一つと見られている. SNS ネットワークのトポロジは, 自律的な判断能力を持った多数のユーザによって構築されたものであるが, これまでの複雑 NW 生成のモデルでは, 多数の主体が利己的な選好を持ち, お互いの相互承認によってリンクが形成されているという面を十分に表現しきれていなかった.

利己的な多主体によるゲーム的な状況下で構築されるトポロジを明らかにする取り組みとしては, 経済学のゲーム理論の分野における NW 形成ゲーム[1]の研究がある(図1). これまでに, 単純な状況においてスモールワールド性を持つトポロジを生成することを示した解析的な研究[2]や, 20 ノードの NW におけるシミュレーションによって非対称な次数分布が生成されることを明らかにした研究[3]などが知られているが, 大規模で多様な状況下で構築される複雑 NW 形成を説明するモデルという意味では, 十分ではない. また, 伝統的ゲーム理論による NW 形成ゲームの取り組みは, 大規模で多様な状況下で構築されるトポロジを明らかにするための方法としては, 「予想されるトポロジの計算が困難」, 「設計主体に多大な観測能力・計算能力を仮定」, 「一般に無差別な多数の解が存在する」などの問題点があった.

研究代表者は, 通信ネットワークの設計と制御についての研究に従事した経験を持つ. その経験で得た問題意識は, 「インターネットなどの集中管理機構を持たない NW では, 制御のための本質的な方法論が確立されていないため, 様々なトラブルに対して対症的な手段で対応せざるを得ない」という点である. この問題を本質的に解決するためには, NW 形成の仕組みを利己的な多主体による系として捉え, インセンティブ設計によって解決する必要がある. 研究代表者は, これまでに動学的 NW 形成ゲームモデルを提案している(以下, 本モデルと記述する)(図2). 研究代表者は, このモデルがある条件において複雑 NW の特徴の一つとして知られるスケールフリー性を持つ NW を生成する傾向があることを計算機シミュレーションによって明らかにした[5,6]. これらの成果は, 大規模で多様なゲーム的な状況下で構築されるトポロジを明らかにしたが, 計算資源の限界によってシミュレーションの規模は数百ノードにとどまっていた. 一方で実 NW は, 例えば AS 間トポロジは 2 万から 4 万程度のノード数を持ち[4], その差は 2 桁である.

• プレイヤー

- ノード



• 戦略

- 全ての他ノードに対し,
リンク形成を提案するかどうかを示す $n-1$ 次元ベクトル

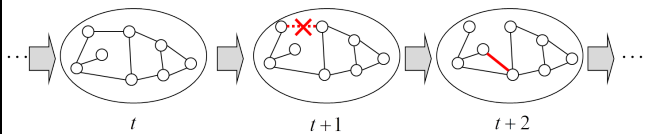
• 帰結

- リンクの両端のノードが共にリンク形成を提案したときのみ, リンクが形成される

• 利得関数

- 直接的接続: **最大の便益** (赤矢) / **接続コスト** (青矢)
 - 間接的接続: **減衰された便益** (緑矢) / **接続コストなし** (赤矢)
 - コストを払えば高い品質の情報を得ることができ, コストを払わなければ劣化された情報のみを得られる.

図1: 我々の提案モデルの基礎となっている(静学的)ネットワーク形成ゲーム



- 各タイムステップに1本だけリンクが変化する
- 受け入れ可能なリンクのうち, **最も利得を改善するもの**が変化する

- 受け入れ可能なリンク:
 - ▷ リンク付加について
 - 両端のノードが共に利得を増加させる
 - ▷ リンク除去について
 - 少なくとも一端のノードが利得を増加させる

図2: 我々が提案している動学的ネットワーク形成ゲームモデルのルール[2]

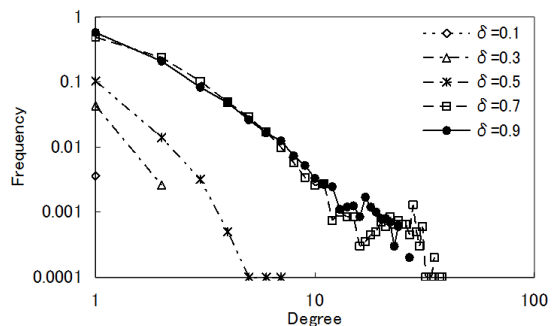


図3: トランスファー付きの動学的ネットワーク形成ゲームモデルは, ある条件でスケールフリートポロジを形成しうる[2].
 べき指数: $\delta=0.7$ で2.38, $\delta=0.9$ で2.43
 (実AS間トポロジのべき指数: skitter: 2.25, BGP-tables: 2.16)

NW 科学の分野において提案されている NW 特徴量には, 適切な正規化手法が確立されていないために, 異なる規模の NW に関する詳細な比較は困難であるという問題がある. そのため, 本モデルが生成する NW トポロジが, AS 間トポロジをはじめとする実 NW トポロジのモデルとして妥当であるかを判断するためには, より大規模な NW の生成を行う必要がある.

2. 研究の目的

本研究課題の目的は, 以下の2点であった.

- (1) 本モデルによって数万ノード規模の NW を生成することによる, AS 間 NW 形成の説明モデルとしての本モデルの妥当性の評価をすること. 大規模並列計算機を用いて実際の AS 間 NW に匹敵する数万ノード規模の NW を本

モデルによって生成し、本モデルによって生成される NW トポロジと、実 AS 間 NW トポロジの特徴量の詳細比較を行うことによって、本モデルの妥当性を評価する。

(2) AS 間 NW トポロジ形成をより精密に表現するための本モデルを精緻化すること。本モデルは、利得関数の設定や各主体の戦略決定アルゴリズムなど、様々なパラメータを持ち、これらの設定によって生成 NW トポロジの特徴量は大きく変わる。本モデルの妥当性をさらに向上させるために、上記 1 の結果を基に、実 AS 間 NW とのデータ同化を行う。

3. 研究の方法

(1) 平成 26 年度には、並列計算技術を用いて、本モデルによって数万ノード規模の NW の生成する。またモデルによって生成された NW と、実 NW との詳細比較をする。

本研究課題で扱うモデルは、分散的な多主体による意思決定を基礎とするモデルであることから、シミュレーションの大規模化・効率化には並列計算の技術が本質的に有効である。また大規模環境では、各主体が自身にとっての最適な意思決定をするための計算量も増大することから、スカラ型並列計算システムが有効となる。

研究代表者は研究課題開始時点で既に、本モデルのシミュレーションプログラムの MPI(Message Passing Interface)を用いた並列化を完了させている。また 300 ノード規模の NW 形成のシミュレーションを、最大 128 プロセスの並列計算機により実行し、計算効率向上のために改善すべき処理部分(ホットスポット)の特定を行っている[7]。

本モデルのシミュレーションは、グラフ上の最短路探索処理(Dijkstra),MPI 通信処理,その他の処理の 3 つに分けられるが、全体の処理時間の多くの部分が最短路探索の処理に費やされており、MPI 通信の負荷が非常に低く抑えられていることが分かっている(図 4)。したがって、計算量の削減の問題に対しては、グラフ上の最短路探索処理の効率向上を狙い、幅優先探索アルゴリズムを導入する。既存の Dijkstra アルゴリズムは重み付きグラフ上の最短経路を求めるアルゴリズムであるのに対して、本モデルが必要とするのは重みなしグラフ上の最短経路であり、そのための幅優先探索アルゴリズムを用いることで計算量の削減が見込める。

また研究代表者は、「京」を含む HPCI システム共用計算資源の利用研究課題(若手人材育成課題枠)へ応募する予定であった。「京」は 82,944 個の計算ノードを持ち、663,552 プロセスの並列計算をすることができる世界でもトップクラスのスーパーコンピュータであり、この計算資源を利用することができれば、数万ノード規模の NW 形成シミュレーションを実行することは、十分に可能であると考えられる。

(2) 平成 27 年度には、実 NW との詳細な比較

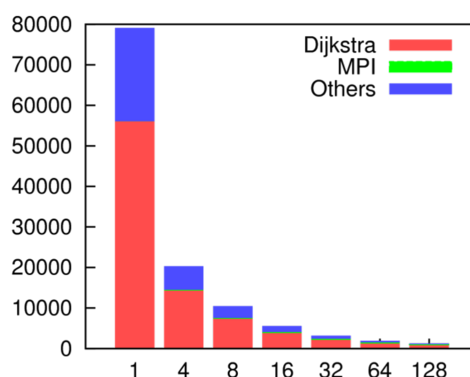


図4: 本モデルの計算効率向上のために改善すべき処理部分(ホットスポット)の特定したグラフ。最短路探索部分の効率化が必要であることが分かる。

に基づいたモデルの更なる精緻化を行う。

本モデルは、利得関数の設定や各主体の戦略決定アルゴリズムなど、様々なパラメータを持ち、これらの設定によって生成 NW トポロジの特徴量は大きく変わる。特に大規模 NW に関しては、各パラメータと生成 NW トポロジの特徴量との関係は未だ明らかになっていないために、実 NW トポロジと十分に近い特徴量を持つ NW トポロジを生成する条件を発見し、本モデルが実 NW の形成を説明するモデルとして妥当であることを示すためには、膨大なパラメータ空間上の試行錯誤的探索が必要となる。

本研究課題の開始時点で、スーパーコンピュータを含む様々な計算資源でシミュレーション群を効率良く実行し、結果を管理できるフレームワークが、理化学研究所計算科学研究機構で開発されている。これは社会現象のシミュレーション高効率化を図るために開発されているものであるが、一般の試行錯誤的探索にも利用可能であるため、このフレームワークを用いることでシミュレーションの効率化を図ることができる。また、これらのシミュレーションの結果、本モデルでは実 NW の特徴を表現できない場合も十分に考えられ、その際にはモデル自体の更なる修正・精緻化を検討する。

4. 研究成果

平成 26 年度は、動学的ネットワーク形成ゲームモデルによる 2000 ノード規模のネットワーク形成のシミュレーションを、様々なシミュレーションパラメータに対して、大規模並列計算技術を用いて実施した。これを実現するに当たり、以下の 3 つを実施した。

第 1 に、本モデルのシミュレーション群を大規模並列計算システムを利用して実施することで、これまでになく 2,000 規模の大規模シミュレーション群を実施した。そのために、平成 26 年度 HPCI システム利用研究課題へ応募した。当初スーパーコンピュータ「京」の利用として申請したが、結果として「京」利用の研究課題としては採択されず、代替資源として申請していた北海道大学情報基盤センターの大型計算機システム SR1600/M1 利

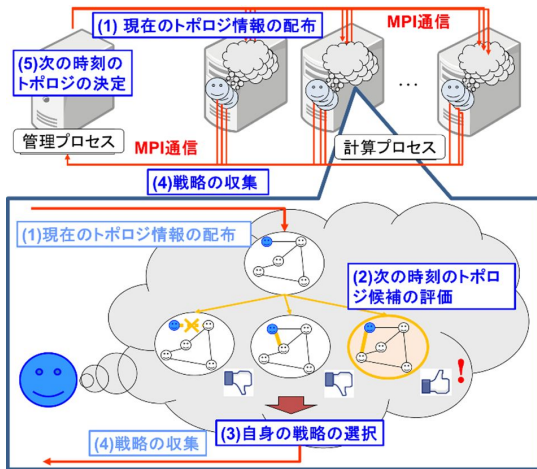


図5: 本モデルのシミュレーションの並列化手法

用の研究課題として採択された(研究課題名:「利己的な多数の主体によって形成される大規模複雑ネットワーク形成」, 課題番号: hp140070)。割り当てられた計算資源は255,645 ノード時間である。本研究課題のシミュレーションを, 1,024 プロセスの大規模並列プログラムとして実装, 割り当てられた計算資源を利用して実行することで(図5), はじめ1,000 ノード規模[学会発表], 最終的には2,000 ノード規模のこれまでにない大規模なシミュレーション群を実施することができた[学会発表]。2,000 ノード規模のネットワーク形成のシミュレーションは, 当初の研究計画であり実際の AS 間ネットワークと比較すると約 1/10 の規模であるものの, これまでに現実的に実行可能であった数百ノードと比較すると約 10 倍程度の, 大きなネットワーク規模であり, 大きな成果である。

第2に, 幅優先探索のアルゴリズムの導入により, 計算量の削減を行った。本モデルのシミュレーションにおいては, 各タイムステップのネットワークトポロジの評価にこれまで用いていた Dijkstra アルゴリズムに代わって幅優先探索アルゴリズムを用いれば良いことが分かっていた。このため平成 26 年度では, 本モデルのシミュレーションプログラムに, 幅優先探索アルゴリズムを採用, その実装として, 高速なグラフ探索のための C++ ライブラリとして知られる LEMON (Library for Efficient Modeling and Optimization in Networks)[8]を導入した。その結果, シミュレーションのための計算量を大幅に削減することができた。

第3に, 理化学研究所計算科学研究機構で開発されている, 様々な計算資源でシミュレーション群を効率よく実行し結果を管理できるフレームワークである OACIS[9]を用い, シミュレーション群の実行管理を行った。本研究課題で実施したシミュレーションは様々なパラメータに関して行ったために, その数は最終的には約 1,500 にも及ぶが, OACIS を用いることでこれらの実行および結果の管理を効率的に行うことができた。

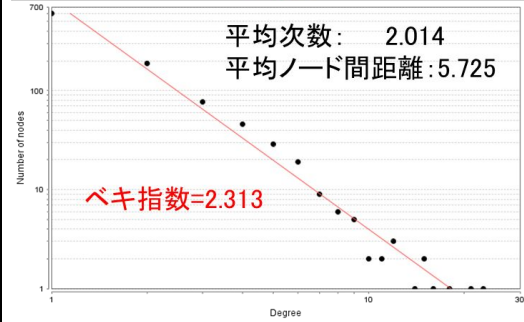
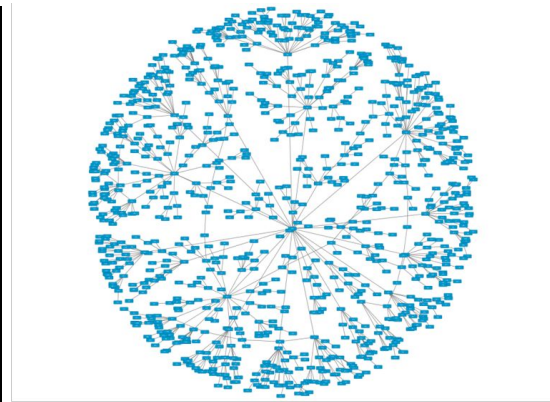


図6 2,000ノードでのシミュレーション結果の一部

平成 27 年度には, 第 1 に実 AS ネットワークとの詳細比較を行った。これには, 前年度に実施したシミュレーションによって生成された数多くのネットワークの時系列変化のデータを分析する必要がある。そのため平成 27 年度は, グラフ解析のための SNAP ライブラリ[10]を用いて, 効率的な並列解析プログラムを実装した。また, この並列解析プログラムを実行するための小規模並列計算機用 PC サーバを購入し, 解析を実行した。この解析により, 2,000 ノード規模の大規模ネットワークにおいても複雑ネットワークの特徴であるスケールフリー性が生じる場合があることが示されたが(図6), 一方で, 解析結果の詳細については未整理に留まった。

第2に, 複雑ネットワークを制御するための方法について考察を行った[学会発表]。これは, 複雑ネットワークの一部がゲームの状況下で動的に形成されるという特徴を

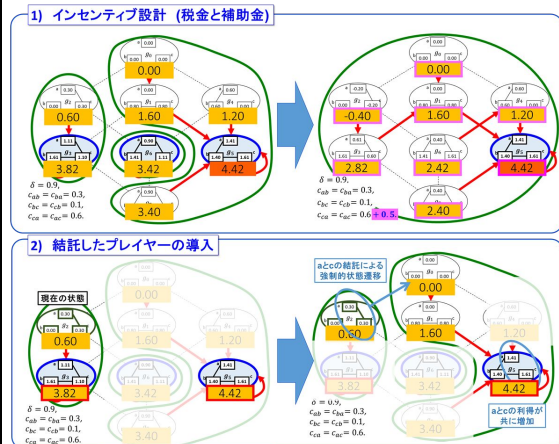


図7: ゲームの状況下で動的に形成されるネットワークが社会的合理性を満たさない問題に対する, 2つのアプローチ

捉え、帰結として得られるネットワークポロジがもたらす不合理な特徴が、社会的合理性と個人合理性の不一致の問題として捉えられることを示したものである。またこの解消方法の整理を行い、2つのアプローチがあることを示した。一つは税金と補助金のアプローチ、もう一つは一部のプレイヤーの結託による状態の強制的遷移というアプローチである(図7)。これらのアプローチ特徴の比較を行い、後者が有望であることを示した。

<引用文献>

- [1] M. O. Jackson, et al., "A strategic model of social and economic networks," *Journal of Economic Theory*, vol. 71, pp. 41-74, 1996.
- [2] M. O. Jackson, et al., "The Economics of Small Worlds," *Journal of the European Economic Association*, vol. 3 No. 2-3, pp. 617-627, 2005.
- [3] N. Carayol, et al, "Knowledge flows and the geography of networks: A strategic model of small world formation," *Journal of Economic Behavior & Organization*, vol. 71, pp. 414-427, 2009.
- [4] P. Mahadevan, et.al., "The Internet AS-level topology: three data sources and one definitive metric," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 36, No. 1, pp. 17-26, 2006.
- [5] Tetsuo IMAI and Atsushi TANAKA, "A Game Theoretic Model for AS Topology Formation with the Scale-Free Property," *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems*, Vol.E93-D, No.11, pp.3051-3058, Nov. 2010.
- [6] 今井哲郎, 田中敦, "AS ネットワークポロジのためのゲーム理論的トポロジ形成モデルの提案," 第7回 NW 生態学シンポジウム予稿集, 03-2, pp.120-127, 2011年3月.
- [7] 今井哲郎, 田中敦, "利己的・分散的な多主体による複雑 NW 形成モデルの並列計算技術による大規模化へ向けた評価," 第10回ネットワーク生態学シンポジウム予稿集, P26, 2013年9月.
- [8] LEMON : <http://lemon.cs.elte.hu/trac/lemon>
- [9] Y. Murase, T. Uchitane, and N. Ito, "A tool for parameter-space explorations", *Physics Procedia*, Vol. 57, pp. 73-76, 2014.
- [10] SNAP : <https://snap.stanford.edu/snap/>

5. 主な発表論文等

[学会発表](計4件)

今井哲郎, 田中敦, "利己的な多主体によって形成されるネットワークポロジの制御方法の確立へ向けて," 第10回計測自動制御学会システム・情報部門社会システム部

会研究会, 2016年3月.

今井哲郎, "動学的ネットワーク形成ゲームモデルによる1/10サイズのAS間ネットワーク形成のシミュレーション," 第5回 SNS ネットワーク分析研究会, 2014年12月

Tetsuo Imai and Atsushi Tanaka "1/10 Scale Simulation of the Inter-AS Network Formation by a Dynamic Network Formation Game Model," *Social Modeling and Simulations + Econophysics Colloquium 2014 (SMSEC2014)*, Kobe, Nov. 2014.

今井哲郎, 田中敦, "1/10サイズのAS間ネットワークのネットワーク形成シミュレーション," 第11回ネットワーク生態学シンポジウム, 2014年9月.

6. 研究組織

(1)研究代表者

今井 哲郎 (IMAI, Tetsuo)

東京情報大学・総合情報学部・助教

研究者番号: 10436173