

平成 30 年 6 月 8 日現在

機関番号：32641

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K11988

研究課題名(和文)高度連結巨大ネットワーク世界で生じる学際的トピックへのアルゴリズム論的アプローチ

研究課題名(英文)An algorithmic approach to interdisciplinary topics on highly connected giant network world

研究代表者

浅野 孝夫 (Asano, Takao)

中央大学・理工学部・教授

研究者番号：90124544

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：高度連結巨大ネットワーク世界で起こる現実問題および潜在的問題に対する学際的研究トピックに注目して、情報学・経済学・社会学の総合的な観点からアルゴリズム論的研究を行った。具体的には、ネットワークにおける重要な問題であるシュタイナー森問題に対するアルゴリズムの提案と計算機実験による品質検証を遂行した。さらに、組合せオークションにおける最適解と高品質なナッシュ均衡解の存在に関して研究を遂行してその成果を情報処理学会英文論文誌および電子情報通信学会英文論文誌に発表した。また、デマンドバス運行を抽象化した後悔最小化ダイヤルライド問題に対する研究を行い、その成果を機械学会英文論文誌に発表した。

研究成果の概要(英文)：We have done algorithmic researches on interdisciplinary topics on highly connected giant network world from the viewpoint of informatics, economics and sociology. Specifically, we proposed an algorithm for the Steiner forest problem, which is a kind of generalization of the Steiner tree problem and one of most important problems in computer science, and evaluated its approximation performance by computational experiment and by comparing the known algorithms for the Steiner forest problem. We also considered a combinatorial auction problem and gave characterizations for the existence of a Nash equilibrium in such a combinatorial auction. These results were published in Journal of Information Processing Society of Japan (and will be published in IEICE Transactions on Fundamentals). Furthermore, we considered the dial-a-ride problem with regret minimization and the result will be published as a paper in Journal of Japan Society of Mechanical Engineers.

研究分野：総合領域

キーワード：アルゴリズム ネットワーク 近似保証 組合せオークション ナッシュ均衡

## 1. 研究開始当初の背景

最近、ビッグデータ、ソーシャルネットワーク、インターネットオークション、ウェブ検索、推薦システム、情報カスケード、ニッチな商品のロングテールなどの用語が活発に取り上げられている。これらは、インターネットやウェブの急速な発展に伴い、ニュースや金融危機が猛烈なスピードで全世界に行き渡ることから、現代社会の複雑な連結性に対する人々の関心がますます大きくなるとともに、個人の欲望や大衆の集団行動とも関係して人々を結びつけるリンク構造や各人の意思決定が、他人の意思決定に複雑な影響を与えることに基づいている。地球規模のこのような展開に促進されて、現代社会の高度連結巨大ネットワークシステムがどのように動作するのかを科学的に理解・体系化しようとする研究から、多岐にわたる研究分野の融合がもたらされてきた。情報学からはシステムの複雑性が発生するメカニズムについての枠組みが構築され、経済学からは人々の行動が各自の欲望と他人の行動に対する期待と予想にどのように影響されるのかについての視点が与えられ、社会学からはグループや集団において生じる特徴的な構造と相互作用についての洞察が与えられた。これらのアイデアや成果が統合されて、複雑な社会的・経済的・技術的システムで起こる現象に焦点を当てた、新しい研究分野の誕生していることが実感されてきている。Cornell 大学の D. Easley と J. Kleinberg の著書 ( Networks, Crowds, and Markets, Cambridge University Press, 2010, 727 pages (邦訳: 浅野孝夫、浅野泰仁: ネットワーク・大衆・マーケット、共立出版、2013, 781 ページ) ) では、この新研究分野誕生の背景と初歩的解説が系統的に与えられているが、多くは未解決問題で今後の研究の重要性が指摘されている。さらに、この分野の研究を促進するための国際会議 ( ACM EC、Conference on Economics and Computation ) も 2014 年から名前を変えて開催されている。

## 2. 研究の目的

本研究は、上記の学術的背景を踏まえて、高度連結巨大ネットワークシステムの科学的理解・体系化に貢献することを目的としている。そこで、高度連結巨大ネットワーク世界で起こる現実問題および潜在的問題に対する学際的トピックに注目して、情報学・経済学・社会学の総合的な視点からアルゴリズム論的研究を行う。そして公平で納得のいく解決策とシステムの安定かつ効率的運用のための理論的成果を提案する。とくに、インターネットオークションをモデル化した組合せオークションおよびネットワークでの各位置による他位置への影響力に対する理論的成果を提案する。さらに、輸送ネットワーク等で生じる新路線の開設によりハード面でシステムが改善されても、それを利用

する各利用者の利己的な行動により、逆に遅延が大きくなってしまふ Braess ( プレイス ) のパラドックスに対して、ゲーム理論に基づくアルゴリズム論的アプローチを提案する。そして様々なデータなどを用いて成果の実際の性能解析を行い評価する。

## 3. 研究の方法

高度連結巨大ネットワークシステムの科学的理解・体系化に貢献することが本研究の目的であるので、高度連結巨大ネットワーク世界で起こる学際的研究トピックに対して、情報学・経済学・社会学の総合的な観点から、アルゴリズム論的研究を、連携研究者と討論しながら、以下のとおり実行した。

( 1 ) 高度連結巨大ネットワーク世界で生じる学際的トピックに対して、情報学・経済学・社会学の観点から系統的に資料収集・研究調査を行った。具体的には、この分野の研究を主目的とする国際会議、情報学の世界的権威の国際会議および国内の学会会議に基づいて資料収集を行うと同時に、これらの会議の発表者とその場で情報交換・研究討論して研究調査を行った。さらに、高度連結巨大ネットワーク世界で生じる学際的トピックに対して、資料収集・研究調査で得られた知見とアルゴリズム研究を通して獲得している知見を合わせて、情報学・経済学・社会学の観点から有用となる理論的研究成果を提案した。とくに、インターネットオークションのモデル化であるアイテム入札に基づく組合せオークションにおいて、各参加者の評価関数が劣加法性を満たすときのナッシュ均衡の存在に対する未解決問題に対して、限界と可能性を明らかにした。

( 2 ) 提案した理論的成果を大規模実物データを用いて計算機実験を行い、その有効性を検証した。なお、これらのアルゴリズムの提案および検証の計算機実験は、連携研究者の京都大学浅野泰仁特定准教授と綿密に研究打合せをして実行した。

( 3 ) 研究成果を学会口頭発表論文、研究会論文、および国際会議論文として発表した。また、国内外の研究者から評価・批判をもらい、情報学・社会学・経済学の総合的な観点から再度検討した。その検討に基づいてさらに研究を進めて得られた成果を学会論文誌に投稿して、採録決定されている。さらに学術書等でも発表する予定であり、この分野の研究の発展につながることを期待している。

## 4. 研究成果

上記の研究方法に基づいて研究を遂行して得られた研究成果について述べる。そこで、まず、5. の主な発表論文等の [ 雑誌論文 ] の各論文の概要 ( の日本語訳 ) を与える。さらに、[ 学会発表 ] および [ 図書 ] に挙げているものについてもその概要を与える。

[ 雑誌論文 ] は、入札者二人の評価関数がともに対称性と劣加法性を満たすときに、ナ

ッシュ均衡が存在するための必要十分条件を与えたものである。これからナッシュ均衡が存在するかどうかを判定するアルゴリズムも得られる。さらに、評価関数が対称的で劣モジュラー性を満たすときには、常にナッシュ均衡が存在し、その解も多項式時間で得られることも注意している。

は、の論文の入札者二人という制約をなくして一般化したものである。具体的には、 $n$  人の各入札者の評価関数が対称性と劣加法性を満たすときに、そのような組合せオークションにナッシュ均衡が存在するための特徴付けを与えたものである。この特徴付けからそのような組合せオークションにナッシュ均衡が存在するかどうかを判定するアルゴリズムが得られる。以下は論文のより詳しい概要である。

Introduction(序論)は以下の通りである。

組合せオークションでは、売りに出される  $m$  個のアイテムの集合  $M=\{1,2,\dots,m\}$  とそれらを買いたい  $n$  人の入札者の集合が  $N=\{1,2,\dots,n\}$  がある。各入札者  $i$  は、 $M$  の各部分集合  $S$  に対して非負の値を割り当てる評価関数  $f_i$  を持っている。目標は、入札者間でのアイテム集合  $M$  の分割  $S_1, S_2, \dots, S_n$  のうちで各入札者が獲得する評価  $f_i(S_i)$  のすべての入札者にわたる和である社会的幸福度が最大になるようなものを求めることである。組合せオークションは、入札者の戦略的な利己的行動を無視するときには、社会的幸福度最大化問題とも呼ばれる。Vickrey, Clarke and Groves による VCG メカニズムにより、利己的な行動をする入札者がいる場合でも、社会的幸福度は最大化できる。しかし、それはきわめて複雑で、その実行には、 $m$  と  $n$  の指数関数の時間が必要となる。実際、社会的幸福度最大化問題は、Lehmann, Lehmann and Nisan により、各評価関数  $f_i$  が劣モジュラー性を満たすときでも、NP-困難であることが示されている(関数  $f_i$  は、 $M$  のすべての部分集合  $S, T$  に対して、 $f_i(S \cup T) + f_i(S \cap T)$  が  $f_i(S) + f_i(T)$  以下であるとき劣モジュラーと呼ばれる)。したがって、社会的幸福度最大化問題(組合せオークション)に対して、近似アルゴリズムが提案されてきている。各評価関数  $f_i$  は  $2^m$  乗個の  $M$  の部分集合上で定義されているので、たいいていの近似アルゴリズムは、オラクルモデルに基づいている。なかでも、値問合せモデルと需要問合せモデルの二つのモデルがよく用いられている。さらに、各  $f_i$  にも様々な条件が課されてきている。よく用いられる条件としては、劣モジュラー性と劣加法性が挙げられる。値問合せモデルのもとで、すべての評価関数が劣モジュラー性を満たすような社会的幸福度最大化問題に対しては、以下のことが知られている。Lehmann, Lehmann and Nisan により、 $1/2$  近似アルゴリズムが提案された。Khot らは、 $P=NP$  でない限り、 $1-1/e$  より良い性

能保証を達成することができないことを示した。なお、 $e$  は自然対数の底である。Vondrak は乱択  $(1-1/e)$  近似アルゴリズムを提案した。より強力な需要問合せモデルでは、すべての評価関数が劣モジュラー性を満たすような社会的幸福度最大化問題に対しては、Dobzinski and Schapira により、より良い性能保証の  $(1-1/e)$  近似アルゴリズムが提案された。一方、より一般的なすべての評価関数が劣加法性を満たすような社会的幸福度最大化問題に対しては以下のことが知られている。値問合せモデルのもとで、Dobzinski, Nisan, and Schapira により、

$(1/\log m)$  近似アルゴリズムが提案された。より強力な需要問合せモデルでは、Feige により、 $1/2$  近似アルゴリズムが与えられた。また、彼は、 $1/2$  より良い性能保証を達成することは NP-困難であることも与えた。より強い小数劣加法性の条件(これは劣モジュラー性より弱い条件)を満たす社会的幸福度最大化問題に対して、彼は  $(1-1/e)$  近似アルゴリズムも与えた。 $M$  の分割  $S_1, S_2, \dots, S_n$  に対して、各  $S_i$  には価格が付随する。それを  $price(S_i)$  と表記する。すると、入札者  $i$  の利得は  $f_i(S_i) - price(S_i)$  として定義される。利己的な各入札者  $i$  は、組合せオークションにおいて、自身の利得を最大化したいと考える。実際に用いられている組合せオークションでは、VCG メカニズムとは異なるメカニズムが用いられている。たとえば、eBay では、各アイテムごとに独立に第二価格オークションが用いられている。したがって、アイテム入札は、組合せオークションのスキームとして、自然に行われていると考えられる。この種の組合せオークションがアイテム入札による組合せオークションと呼ばれる。したがって、入札者の戦略は、各アイテムへの入札からなる  $m$  次元のベクトルとなる。上記のように、利己的な各入札者は、自身の獲得できる利得を最大化したいと考える。全員の入札ベクトルのプロファイルにおいて、どの入札者も(他の入札者が入札ベクトルを変えないという条件の下で)自身の入札ベクトルを変えたいと思わないとき、そのプロファイルはナッシュ均衡であると呼ばれる。アイテム入札による組合せオークションにおいて、すべての入札者の評価関数が劣モジュラー性を満たすときには、Christodoulou, Kovacs, and Schapira により、常にナッシュ均衡が存在することが示されている。さらに、彼らは、幸福度最大化問題に対する最適解の値の  $1/2$  以上の社会的な幸福度を達成するナッシュ均衡を  $m$  と  $n$  の多項式時間で求めるアルゴリズムも与えた。Bhawalkar and Roughgarden は、より一般的なすべての入札者の評価関数が劣加法性を満たすときのアイテム入札による組合せオークションにおいて、各入札者が自分の評価より高い入札は行わないという条件の下で、どのナッシュ均衡も、存在するときに

は、幸福度最大化問題に対する最適解の値の  $1/2$  以上の社会的な幸福度を達成することを示した。したがって、無秩序の対価 (price of anarchy) は高々  $2$  である。さらに、Bhawalkar and Roughgarden は、「すべての入札者の評価関数が劣加法性を満たすときのアイテム入札による組合せオークションにおいて、ナッシュ均衡が存在するための特徴付けを与えよ。」という未解決問題を挙げている。

本論文では、各入札者が自分の評価より高い入札は行わないという条件の下で、入札者の評価関数が劣加法性と対称性を満たすときのアイテム入札による組合せオークションにおいて、ナッシュ均衡が存在するための特徴付けを与えた。なお、 $|S|=|T|$  を満たす  $M$  のすべての部分集合  $S, T$  に対して  $f_i(S) = f_i(T)$  であるとき、評価関数  $f_i$  は対称性を満たすと呼ばれる。

学術的な議論の詳細がその後続き、最後の Concluding Remarks (結論と課題) は以下のとおりである。

本論文では、アイテム入札による組合せオークションにおいて、評価関数のプロファイル  $(v_1, v_2, \dots, v_n)$  が対称性と劣加法性を満たすときに、ナッシュ均衡が存在するための特徴付けを与えた。最後に、本論文のモデルの組合せオークションにおいて、ナッシュ均衡が存在するかどうかを判定する多項式時間のアルゴリズムは存在するのだろうか？また、対称性の条件を緩和して、Bhawalkar and Roughgarden が提起した未解決問題の解決につながるようにすることはできるのだろうか？

は、デマンドバスの運行に関係するもので、バスを使用する各乗客の乗る場所と降りる場所 (目的地) および目的地への希望到着時刻が入力として与えられたとき、バスに乗車している時間 (所要時間) と最短での所要時間との差を第一の後悔量とし、さらに目的地への希望到着時刻から実際に到着する時刻を引いた時間を第二の後悔量として、後悔を定義し、後悔量を最小化するようなバスの運行経路を求める問題を議論している。そして複数の指標のもとでこの問題の整数線形計画問題としての定式化を与え、理論的な提案をするとともに、様々なデータのもとで数値実験をして評価し、最適と思われる指標を提案した。

〔学会発表〕 は、ホールケーキのカット問題において、各人の評価関数のもとで、(i) カット数最小、(ii) 無羨望性、(iii) 戦略的操作不可能性を達成する多項式時間のメカニズムを提案したものである。

は、〔雑誌論文〕 のもとになった成果を発表した国際会議論文である。

は、〔雑誌論文〕 のもとになった成果を発表した国際会議論文である。

はシュタイナー森問題を取り上げた論文である。シュタイナー森問題は、各辺に非

負のコストの付随する無向グラフと  $k$  組のターミナル点対が与えられたときに、どのターミナル点対も連結となるような辺部分集合で誘導される部分グラフのなかで最小コストのものを求める問題である。この NP 困難問題に対する近似性能保証アルゴリズムとしては、Agrawal, Klein and Ravi のアルゴリズムと Gupta and Kumar のアルゴリズムが有名である。は、シュタイナー森問題に対するこれら二つのアルゴリズムを含む各種アルゴリズムを実装して、DIMACS のシュタイナー木問題の一部の入力および様々な入力に対する実験を行い性能の詳細な比較・評価を与えたものである。なお、これは、との予備的な成果をもとにしている。

〔図書〕 は、グラフ・ネットワークアルゴリズムの研究動向を調査して、グラフ・ネットワークアルゴリズム研究の基礎となるアルゴリズムとともに C 言語による実装プログラムを与えたものであり、〔学会発表〕 のにもそれらのプログラムが用いられている。

は、アルゴリズムとデータ構造の研究動向を調査して、アルゴリズムとデータ構造の研究の基礎となるアルゴリズムとともに C 言語による実装プログラムを与えたものであり、〔学会発表〕 のにもそれらのプログラムが用いられている。

は、2011 年に Cambridge University Press から出版されたコーネル大学の D. Williamson と D. Shmoys による「The Design of Approximation Algorithms」に対する研究調査に基づく注釈付きの日本語訳版である。具体的な構成は以下のとおりである。

第 部 技法：入門、第 1 章 近似アルゴリズムへの序論、第 2 章 グリーディアルゴリズムと局所探索アルゴリズム、第 3 章 データのラウンディングと動的計画、第 4 章 線形計画問題の解の確定的ラウンディング、第 5 章 ランダムサンプリングと線形計画問題の乱択ラウンディング、第 6 章 半正定値計画問題の乱択ラウンディング、第 7 章 主双対法、第 8 章 カットとメトリック、第 部 技法：発展、第 9 章 グリーディアルゴリズムと局所探索アルゴリズムのさらなる利用、第 10 章 データのラウンディングと動的計画のさらなる利用、第 11 章 線形計画問題の解の確定的ラウンディングのさらなる利用、第 12 章 ランダムサンプリングと線形計画問題の乱択ラウンディングのさらなる利用、第 13 章 半正定値計画問題の乱択ラウンディングのさらなる利用、第 14 章 主双対法のさらなる利用、第 15 章 カットとメトリックのさらなる利用、第 16 章 近似困難性の証明技法、第 17 章 未解決問題。

## 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 3件)

Hiroyuki Umeda, Takao Asano: Nash equilibria in combinatorial auctions with item bidding by two players, Journal of Information Processing, Vol.25, Aug.2017, pp.745-754. (査読有り)

Hiroyuki Umeda, Takao Asano: Nash equilibria in combinatorial auctions with item bidding and subadditive symmetric valuations, IEICE Transactions on Fundamentals, Vol.E101-A, No.9, 2018, 掲載予定.(査読有り:採録決定済み)

Makoto Miyaoaka, Noriyoshi Sukegawa, Takao Asano: The dial-a-ride problem with fairness, Journal of Japan Society of Mechanical Engineers, Special Issue on Advanced Production Scheduling (ISS2017:JAMDSM), 2018, 掲載予定.(査読有り:採録済み)

〔学会発表〕(計 6件)

梅田博之、浅野孝夫: ホールケーキカット問題に対するカット数最小の無羨望メカニズム、情報処理学会第78回全国大会、早稲田大学、2018年3月13~15日。(査読なし)

Hiroyuki Umeda, Takao Asano: Nash equilibria in combinatorial auctions with item bidding and subadditive valuations, Proceedings of 10<sup>th</sup> Japanese-Hungarian Symposium on Discrete Mathematics and Its Applications, Budapest, Hungary, May 22-25, 2017, pp.493-501.(査読有り)

Makoto Miyaoaka, Noriyoshi Sukegawa, Takao Asano: The dial-a-ride problem with regret minimization, Proceedings of 8<sup>th</sup> International Symposium on Scheduling, Nagoya, June 23-25, 2017, pp.151-156.(査読有り)

浅野孝夫: シュタイナー森に対する近似アルゴリズムの性能評価、情報処理学会アルゴリズム研究会、神戸情報大学院大学、2016年11月24~25日。(査読なし)

浅野孝夫: シュタイナー森に対する近似アルゴリズムの実際的な性能比較、電子情報通信学会ソサイエティ大会、北海道大学、2016年9月20~23日。(査読なし)

菅原惇平、鮎川矩義、浅野孝夫: シュタイナー森に対する近似アルゴリズムの実際的な性能評価、情報処理学会第78回全国大会、慶応大学、2016年3月10~12日。(査読なし)

〔図書〕(計 3件)

浅野孝夫: グラフ・ネットワークアルゴリズムの基礎、近代科学社、2017、233

ページ.

浅野孝夫: アルゴリズムの基礎とデータ構造、近代科学社、2017、223ページ.

浅野孝夫: 近似アルゴリズムデザイン(D. P. Williamson and D.B. Shmoys: The Design of Approximation Algorithms, Cambridge University Press, 2011の日本語訳) 共立出版、2015、591ページ.

〔産業財産権〕

出願状況(計 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

取得状況(計 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

[www.ise.chuo-u.ac.jp/ise-labs/asano-lab/asano](http://www.ise.chuo-u.ac.jp/ise-labs/asano-lab/asano)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

浅野 孝夫 (ASANO TAKAO)  
中央大学・理工学部・教授  
研究者番号: 90124544

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

浅野 泰仁 (ASANO YASUHITO)  
京都大学・情報学研究科・准教授  
研究者番号: 20361157

研究者番号: