

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 6 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2013

課題番号：21500068

研究課題名(和文) 情報ネットワークや分散システムにおけるゲーム理論的追究

研究課題名(英文) Game-Theoretic Studies on Information Networks and Distributed Systems

研究代表者

亀田 壽夫 (Kameda, Hisao)

筑波大学・名誉教授

研究者番号：10011660

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円、(間接経費) 990,000円

研究成果の概要(和文)：近年、情報処理システムやネットワークは、多くの独立したユーザが共用される。つまり、ネットワークやシステムに、独立したエージェントが多数存在する。各ユーザがシステム内で、(ゲーム理論における各プレイヤーのように)資源を競い合う状況は、ゲーム理論的な観点から論じることができる。各ユーザが、独立に自己に関わるパケット/計算のみの処理コスト/応答時間を追究する状況を独立分散管理ということにする。独立分散管理はある種の公平さをもたらすが、全ユーザに性能劣化をもたらすことがあり得る。本研究は、全ユーザに性能劣化をもたらさず独立分散管理による公平さを反映した資源割り当て法を、ゲーム理論に基づき追究を試みた。

研究成果の概要(英文)：Information networks and distributed systems are shared by a number of independent users and organizations who may be independent/noncooperative decision makers. It may be expected that the entire performance of the networks will be guided to overall improvement, if each decision maker pursues its own performance objective unilaterally by means of the noncooperative decisions. In addition, it is anticipated that mutual independent decision making, i.e. noncooperative optimization may bring about the 'fair' situations such that all decision makers may receive worse benefits than some other ways of decision making may do, as exemplified by the prisoners' dilemma and the Braess paradox. We call them such degradations of utilities 'paradoxes.' That is, the noncooperative decision making may be Pareto inefficient. In this study, we have searched the scheme that may be Pareto efficient but may reflect the fairness of the noncooperative decision making.

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：トラフィックエンジニアリング 独立分散管理 情報通信工学 ゲーム理論 情報ネットワーク 計算機システム 負荷均衡 経路選択

## 1. 研究開始当初の背景

「情報処理システムやネットワークのゲーム理論的観点」近年、情報処理システムやネットワークは、ますます多くの独立したユーザが共用ようになってきている。つまり、ネットワークやシステムに、独立したエージェントが多数存在する。例えば、情報ネットワークである **Internet** では、多数の独立な使用者やプロバイダが自己に関わるパケットを扱う。また、**GRID** 等の分散システムでは、各ユーザは自己の計算応答性能に関心がある。ワイヤレスネットワークにおいては、各モバイル端末のユーザが限られた容量の電波空間を共用する。このように、各ユーザがシステム内に共存し、(ゲーム理論における各プレーヤのように) 資源を競い合う状況は、**von Neumann** や **Nash** 等がはじめたゲーム理論的な観点から論じることができる。

システムやネットワークを共用する各ユーザ毎に、資源割当が決まり、それぞれに関わるコストが定まった状態を、システム状態と呼ぶことにする。

「独立分散管理」各ユーザが、独立に自己に関わるパケット/計算のみの処理コスト/応答時間を追究する状況が考えられる。これらを独立分散管理ということにする。ゲーム理論の概念では、これは非協力ゲームと見なされる。独立分散管理によりもたらされるシステム状態は、ゲーム理論の基礎概念である **Nash** 均衡状態とみなせる。

「独立分散管理のもたらす公平性」独立分散管理による資源割当ての結果(すなわち **Nash** 均衡) は、談合や結託などをする事なしに、各主体が独自の努力や決定をすることによるものである。ある種の公平さを反映している。この「独立分散管理のもたらす公平

性」は、本研究代表者が、他の研究者に先駆けて着目したものである。さらに、独立分散管理することにより、システム全体の利用効率が向上し、全ての個人・企業体・組織体に、高い効用のシステム状態がもたらされると、一般に、信じられている。情報ネットワークや分散システムにおいても、独立分散管理が、各ユーザに対して全般的に高い効用があるシステム状態をもたらしてくれると信ずるのが自然である。「独立分散管理の問題点」ところが、下記(1) 研究の学術的背景 で示すパラドックス研究の経過を通して、独立分散管理によるシステム状態 (**Nash** 均衡) が、効率が良くないことがある、すなわち全ユーザにとって、よりコストの低い他のシステム状態が存在することが多く、その非効率の程度が非常に大きい場合があるということが、具体的に認識される状況になった。独立分散管理による公平さを取り入れつつ、かつ非効率でない、資源割り当て法を追究するのが、本研究の主な目的である。

(1) 「研究の学術的背景--パラドックスの発見による独立分散管理の問題点の顕在化」独立分散管理の下で、新たな通信装置を増強すると、かえって、全てのユーザに対する応答性が悪化する逆説的な現象の存在が、ネットワーク経路選択において、指摘された(先ず道路交通網において **Braess** による、その後待ち行列ネットワークにおいて **Cohen & Kelly** による、等)。この現象は、独立分散管理の下で、意志決定の自由度が増すと、かえって全てのユーザにとってコストが増大する、非効率なシステム状態に陥るということであり、直観的には信じ難く逆説的であり、パラドックスと呼ばれる。我々は、さらに、パラドックスの害が限り

なく大きくなる深刻な場合があり得ることを発見している(Kameda & Pourtallier, *J.ACM* '02)。このことは、独立分散管理には、効率上の大きな困難の可能性があることを示している。

よって、独立分散管理による**Internet** や **GRID** 等の分散システムでも、パラドックス発生の可能性があり、いずれも、その害が限りなく大きく深刻になる可能性がある。近年、Braess のパラドックスが話題となり、数多くの情報通信ネットワークの専門家が、ゲーム理論の応用に関心を持ちはじめ、専門誌 *IEEE/ACM Trans. Networking*、*IEEE Trans. Commun.*、*IEEE Trans. Automatic Control* 等、*J.ACM* 等に、関連結果が数多く発表されるようになった。さらに、コンピュータ基礎理論家の間でも、ゲーム理論的観点の重要性が認識され、*JCSS*、*TCS*、等の *Journal* や、*ACM STOC* や *IEEE FOCS* 等の会議に研究成果が発表された。我々は、以前よりそれらの動きとは独立に研究を進めてきており、それらの動きに追随するのではなく、独創的な研究成果を積み重ねてきた。しかし、我々は、パラドックスという特殊な場合ばかりでなく、独立分散管理によるシステム状態（すなわち **Nash** 均衡）が、具体的な広範囲な場合において、全ての人に他のシステム状態よりも大きいコストをもたらすことが多いということを認識するに至った。我々は、この結果の一部について *IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Special Issue on Game Theory in Communication Systems* (Sept. '08) において発表した。すなわち、独立分散管理によってもたらされるシステム状態（**Nash** 均衡）が、全ユーザに性能

劣化をもたらすである具体的な場合が多いという、認識に至っている。

(2) 当該分野における本研究の学術的な特色・独創的な点及び予想される結果と意義  
独立分散管理の状態は、非協力ゲームの枠組み(Nash 均衡) の例である。本研究が進めば、非協力ゲームが非効率であることによる、被害の見積もり、さらに意志決定における公平さ等に関する知見が得られ、また、これまでなかった「独立分散管理による公平さを反映した資源割り当て法」の提案等が、ゲームの理論・最適化理論の進展にも刺激を与えることが期待される。

## 2. 研究の目的

全ユーザに性能劣化をもたらさずに、独立分散管理による公平さを反映した資源割り当て法を追究するのが本研究の主な目的である。まず、本研究は、独立分散管理が非効率である状況をさらに広く追究した。さらに、独立分散管理の、談合や結託のないという公平さを反映し、なおかつ効率的である管理方式に対する見通しを得、方式を定式化し、その計算アルゴリズムを求め、具体的な実現方法を探ることを、目的とした。

ネットワークやシステムに、独立したエージェントが多数存在する。各ユーザがシステム内に共存し、（ゲーム理論における各プレーヤのように）資源を競い合う状況は、ゲーム理論的な観点から論じることができる。各ユーザが、独立に自己に関わるパケット/計算のみの処理コスト/応答時間を追究する状況（独立分散管理）はある種の公平さをもたらすが、全ユーザに性能劣化をもたらすことがあり得る。全ユーザに性能劣化をもたらさず独

独立分散管理による公平さを反映した資源割り当て法を、ゲーム理論に基づき追究するのが本研究の主な目的である。

### 3. 研究の方法

情報ネットワークや、分散システムについて、理論的な追究と数値的な検討を行った。研究代表者が中心になり、総合的に検討を行った。本研究では、まず、基礎的な検討を入念に行い、そして、分散システムやネットワークの現実・現場における実験検討を次段階の研究として計画検討を試みた。

これらを活発に進行させるために、研究代表者が連携研究者の助けを得ながら追究した。特に、フランス共和国INRIA 研究所のEitan Altman 氏(INRIA ニース近郊およびアヴィニオン大学)・Odile Pourtallier 氏(INRIA ニース近郊)・Arnaud Legrand 氏・Corinne Touati 氏(INRIA グルノーブル近郊) との共同研究を行った。

### 4. 研究成果

本研究では、独立分散管理における、パラドックスの発生条件、および、その被害がどの程度になり得るかについて、明らかにし、その防止策、および、パラドックスの起こらない集中型管理方式の Fairness、等に関する見通しを得、経路選択、負荷分散、フロー制御を含む広範囲の問題に視点を置いて研究成果を得た。

(1) 平成 21 年度は、基礎的な追究にかなりのエネルギーをさいた。基礎的な研究に裏打ちされた準備的な検討を行った。まず、Internet 等の情報ネットワークや、GRID コンピューティング等の分散システム等において、独立分散管理による性能劣化がいかなる状況で起こるかを、より詳細に究めた。このために、ゲームの理論等の検討を背景

にしながら、異常な振る舞いや非効率なシステム状態をさらに具体的に追究した。どのような場合にそのようなことが起こるかをつきとめた。全ユーザに性能劣化をもたらさず独立分散管理による公平さを反映した資源割り当て法を、ゲーム理論に基づき追究し、その枠組みを検討した。

(2) 平成 22 年度も、基礎的な追究にかなりのエネルギーをさいた。全ユーザに性能劣化をもたらさず独立分散管理による公平さを反映した資源割り当て法を、ゲーム理論に基づき追究し、その枠組みを検討した。さらに、一般的なネットワークについて、意志決定の分散の度合いが極端に異なる、意志決定が極端に集中したネットワークと、意志決定が極端に分散したネットワークとについて検討し、両者の間の関連・共通した性質などを追究した。その上、社会システムネットワークについて視野を広げ、前年度検討したネットワークの性質（対称な場合に、性質が極端になるものがある）がどのように反映されるかを検討した。準備段階として、実際のネットワークについて検討した。

(3) 平成 23 年度では、準備的な研究として、一般的なネットワークの最適化問題について、理論的な枠組みについて実質的な結果を得た。あわせて、Internet 等の情報ネットワークや、分散システム等の中で最近の事情を追究するとともに、より一般的なシステムについても検討した。ゲームの理論等の検討を背景にしながら、異常な振る舞いや非効率なシステム状態をさらに具体的に追究した。また、どのような場合にそのような問題が起こるかを追究した。また、ネットワークにおけるパラドックスの大きさの、対称性の影響について、前年度の追究をさらに深めた。

また、これらの検討結果に基づき、前年度に追究した、独立分散管理による、各ユーザ

間の公平さを実現しながら、効率の良い、新しい管理方式の追究をさらに深めた。そのような方式の実現可能性について、具体的な検討を開始し、さらに、この方式を具体的なシステムにおいてどのように現実的に実現されるかを検討した。

(4) 平成24年度では、前年度に追究を深めた、独立分散管理による、各ユーザ間の公平さを実現しながら、効率の良い、新しい管理方式の一般的追究をさらに深めた。そのような方式の実現可能性について、一般的な検討をした。さらに、この方式を各種の具体的なシステムにおいてどのように現実的に実現されるべきかを検討した。

また、基礎的な研究に裏打ちされた準備的な検討をさらに進めた。それを反映しながら、上述のネットワークやシステム等において、以前から問題とされている、独立分散管理による性能劣化が、いかなる状況で起こる可能性があるかを、より詳細に究めた。このために、ゲームの理論等の検討を背景にしながら、異常な振る舞いや非効率なシステム状態をさらに具体的に追究した。また、分散システムにおけるパラドックスの大きさの、対称性の影響について、検討を深めた。

(5) 平成25年度では、独立分散管理による、各ユーザ間の公平さを実現しながら、効率の良い、新しい管理方式の一般的追究をさらに深めた。そのような方式の実現可能性について、一般的な検討をした。さらに、この方式を各種の具体的なシステムにおいてどのように現実的に実現されるべきかを検討した。

また、基礎的な研究に裏打ちされた準備的なネットワークやシステム等において、以前から問題とされている、独立分散管理による性能劣化が、いかなる状況で起こる可能

性があるかを、より詳細に究めた。このために、ゲームの理論等の検討を背景にしながら、異常な振る舞いや非効率なシステム状態をさらに具体的に追究した。また、分散システムにおけるパラドックスの大きさの、対称性の影響について、検討を深めた。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

① Hisao Kameda, "Models of paradoxical coincident cost degradation in noncooperative networks," in *Game Theory Relaunch Vol 1*, Hardy Hanappi, ed., Intech, 191-214, DOI: 10.5772/54377, (2013). (査読有)

② Hisao Kameda and Takashi Ui, "Effects of symmetry on globalizing separated monopolies to a Nash-Cournot oligopoly," *International J. Game Theory Review Vol. 14* No. 2, 37-52. DOI: 10.1142/S0219198912500090 (2012) (査読有)

③ Hisao Kameda, Eitan Altman, Corinne Touati, and Arnald Legrand, "Nash equilibrium based fairness," *Mathematical Methods of Operations Research Vol. 76*, Issue 1, pp.43-65, DOI: 10.1007/s00186-012-0389-2 (2012) (査読有)

④ Hisao Kameda, Jie Li, and Eitan Altman, "Optimal routing for multiclass networks," *Advances in Operations Research, vol. 2011*, Article ID 645954, 21 pages doi:10.1155/2011/645954 (2011) (査読有)

⑤ Hisao Kameda, "Coincident cost improvement vs. degradation by adding connections to noncooperative networks and distributed systems," *Networks and Spatial Economics vol. 9*, pp. 269-287, (2009). (査読有)

[学会発表] (計 4 件)

①Eitan Altman, Odile Pourtallier, Tania Jimenez, and Hisao Kameda, "Symmetric games with networking applications," In *Proc. NetGCooP 2011(International Conference on NETwork Games, COntrol and OPTimization)*, 6 pages in USB memory, Paris, France, October 12-14 (2011). (査読有)

②Eitan Altman, Hisao Kameda, and Yazekael Hayel, "Revisiting collusion in routing games: a load balancing problem," *Proc. NetGCooP 2011(In ternational Conference on NETwork Games, COntrol and OPTimization)*, 6 pages in USB memory, Paris, France, October 12-14, (2011). (査読有)

③H. Lu, Jie Li, and Hisao Kameda, "A secure routing protocol for cluster based wireless sensor networks using ID-based digital signature," In *Proc. 53rd IEEE Global Communications Conference, GLOBECOM 2010*, 5 pages in CD-ROM, Miami, FL; December 6-10, (2010) (査読有)

④Hisao Kameda, Eitan Altman, Corinne Touati, and Arnald Legrand, "Nash quilibrium based fairness," In *Proc. 1st ICST Int. Conf. on Game Theory for Networks (GameNets 2009)*, pp. 533-539, Istanbul, Turkey, May 13-15 (2009).

[その他] ホームページ

<http://www.osdp.cs.tsukuba.ac.jp/kameda>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

亀田 壽夫 (KAMEDA HISAO)  
筑波大学・名誉教授  
研究者番号 10011660

### (2) 研究分担者

李 頡 (LI JIE)  
筑波大学・システム情報系・教授  
研究者番号 50251046

### (3) 海外研究協力者

Eitan Altman  
フランス共和国国立情報・自動制御研究所  
一級研究部長

Odile Pourtallier  
フランス共和国国立情報・自動制御研究所  
研究員

Corinne Touati  
フランス共和国国立情報・自動制御研究所  
研究員

Arnaud Regrand  
フランス共和国国立情報・自動制御研究所  
研究員