

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 25 年 4 月 8 日現在

機関番号：14401

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2011～2012

課題番号：23800037

研究課題名（和文）

計算資源マーケットにおける協力的戦略の数値モデリングと経済学的分析

研究課題名（英文）

Mathematical modeling and economic analysis for cooperative strategies in computational resource market

研究代表者

岡家 豊 (Okaie Yutaka)

大阪大学・大学院工学研究科・特任研究員

研究者番号：10614125

研究成果の概要（和文）：

一般個人による計算資源の自由売買が可能なシステムにおいて、市場原理に基づいて計算資源価格の設定を行う計算資源マーケットを設計した。設計したマーケットでは、計算資源提供者と計算資源利用者の相互作用の結果、市場原理に基づいた価格が形成される。本研究では、数値モデリングと数値計算を通してモデルパラメータが計算資源の利用価格に与える影響を分析した。さらにモデルを拡張することにより、グリーン IT に向けた基礎的な成果を得た。

研究成果の概要（英文）：

We designed computational resource market, where resource providers decide their resource prices based on market mechanism in the system where individuals are allowed to freely sell and buy their computational resources. In the market designed, the prices are formed as a result of interactions among resource providers and resource consumers. In our research project, we analyzed the impact of model parameters on resource prices through mathematical modeling and numerical computation. Furthermore, we obtained preliminary results toward Green IT by expanding our proposed model.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2011 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2012 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,500,000	750,000	3,250,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：メディア情報学・データベース

キーワード：情報システム，情報通信工学，数理工学，経済理論，ネットワーク

1. 研究開始当初の背景

クラウドコンピューティングの台頭により、インターネットを通じて計算資源提供者のサーバを低価格で利用することが可能となった。その結果、企業の IT 投資に含まれていた、サーバの導入、管理、および、

運用のコストの大幅な削減が実現されている。本研究は、このような他者の計算資源の利用が行われるシステムを企業レベルだけでなく、個人レベルにまで拡張し、一般個人による計算資源の自由売買が行えるシステムの構築を目標とするものである。

2. 研究の目的

本研究は、計算資源（CPU サイクル等）を一般個人が自由に売買できるマーケット（「計算資源マーケット」と呼ぶ）をインターネット上に構築し、新たな経済活動の基盤を構築することを最終的な目標とする。これまでの当該研究では想定されていなかった、計算資源の協力的な振る舞いをモデルに取り入れることで、より現実に近い数学モデルの構築と、その上でのシミュレーション、および、解析を行う。

3. 研究の方法

研究の具体的な方法は以下の通り。

(1) 数学的モデルの構築

本研究において、申請者は図 1. に示すモデルを提案する。このモデルは、サービス利用者、サービス提供者・計算資源利用者、および、計算資源提供者の三層からなる。サービス利用者は、サービス提供者が提供するアプリケーションサービス（以下、サービスと呼ぶ）を利用する顧客の層である。サービス提供者は、計算資源を利用して、サービス利用者に様々なサービスを提供し、その対価を受け取る層である。計算資源提供者は、サービス提供者がサービス提供に必要な計算資源を提供し、その対価を受け取る層である。

各層間における財と共通通貨を介した相互作用は、それぞれ、サービスマーケット、および、計算資源マーケットとしてモデル化され、市場原理に基づいた価格決定が行われる。本研究は、システム全体の基盤となる、計算資源マーケットに焦点を当てる。

計算資源マーケットにおいて売り手は、計算資源（計算機、携帯機器など）を管理しており、それぞれの計算資源に対して利用価格を決定できる。計算機（計算資源）は通信ネットワークを構成しており、互いに情報交換している。計算資源利用者は同じネットワークを介して、計算資源を選択することができる。例えば、売り手が、買い手にとって妥当ではない利用価格を設定すると、買い手は、他の売り手に乗り換えることができる。

このようなマーケットにおいて、売り手は自身の利益を最大化するよう、自身が保持する複数の計算資源の利用価格を決定する。すなわち、以下の数式で示す効用関数の最大化問題を解く。

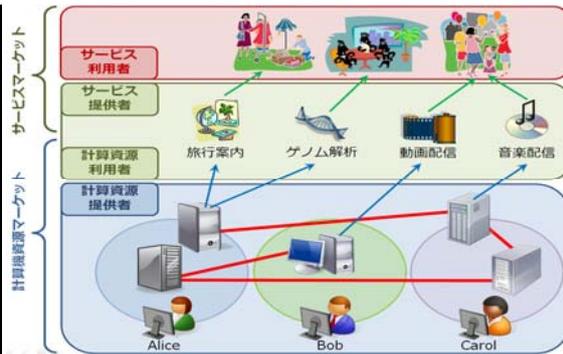


図 1. 計算資源マーケットのモデル概要

計算資源利用者の効用関数:

$$U_i(\{R_v\}_{v \in P_i}) = \sum_{v \in P_i} \hat{C}_v \times R_v$$

ここで、 R_v は計算資源 v の利用価格、 P_i は参加者 i が保有している計算資源の集合、 \hat{C}_v は計算資源 v の需要予測量である。本研究では、通信ネットワークのトポロジと、そのダイナミクスが需要に及ぼす影響を考慮し、需要予測量を定式化する。

(2) シミュレーションと理論解析

構築した協力的な計算資源マーケットのモデルに基づいて、計算機上でシミュレーションする。また、得られた結果をもとにマーケット参加者の協力的な振る舞いや、設計パラメタが、参加者の価格設定およびマーケット全体に及ぼす影響について一般化する。

シミュレーションによって発見された均衡状態を、ゲーム理論を用いて理論的な意味付けをした。また、シミュレーションで明らかになったダイナミクスから、マーケットが効率的に運営されるための指標を定義し、その条件を解析的に求める。

4. 研究成果

(1) 需要予測量の定式化

まず、計算資源マーケットのネットワークトポロジを考慮に入れない場合の需要予測量を次のように定式化した。

$$\hat{C}_v = \sum_{u \in S} \hat{p}_v C_u$$

ここで、 S は計算資源の全体集合、 C_u は計算資源 u を利用している計算資源利用者の数、 \hat{p}_v は全計算資源の需要に対する計算資源 v の需要の割合であり、以下のように定義される。



図 2. 計算資源利用者の乗り換え確率

$$\hat{p}_v = \frac{R_v^{-\alpha}}{R_v^{-\alpha} + \sum_{w \in S \setminus \{v\}} R_w^{-\alpha}}$$

ただし、 α は計算資源利用者が低価格の計算資源を求める度合いを表わすモデルパラメタである。 α は非負の値を取り、値が小さいほど、計算資源利用者の乗り換えは計算資源の価格に依存しなくなり、値が大きくなるほど低価格の計算資源を求めて乗り換える傾向が強くなる。

次に、ネットワークトポロジを考慮に入れた場合の需要予測量を考えた。図 2. において、黒丸は計算資源、その上のラベルは計算資源の識別子を表わしている。計算資源間を結ぶ直線は、計算資源マーケットを構成するネットワークのリンクを表わしている。このリンクを通じて、計算資源提供者と計算資源利用者は、隣接する計算資源の情報（計算資源の利用価格や、他の計算資源の利用者数）を取得する。さらに、計算資源利用者は計算資源の乗り換えを行う。各計算資源はネットワークトポロジの一部（隣接する計算資源までの 1 ホップのみ）しか見えていないと想定する。例えば、計算資源 u と計算資源 v を中心とする大きい白丸は、それぞれの計算資源が見える範囲を示している。 u と v のそれぞれが見える範囲内にある計算資源の集合を NB_u と NB_v と表記する。ここで、 x は u と v の両方から見えるが、リンク (v, x) は u には見えていない。同様に、 y と (v, y) は u には見えていない。さらに、 (x, y) は u と v のいずれからも見えない。つまり、ネットワークトポロジによって、計算資源提供者同士、および、計算資源利用者同士が保持する情報に非対称性が生じる。このことを考慮に入れて、需要予測量を次のように定式化した。

$$\hat{C}_v = \sum_{u \in NB_v} \hat{p}_{u,v} C_u$$

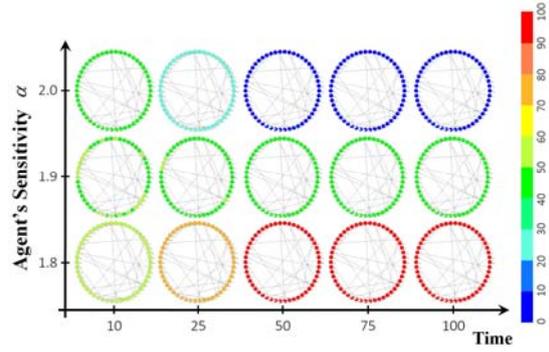


図 3. α の影響と利用価格の時間変化

ここで、 $\hat{p}_{u,v}$ は計算資源 u を利用している計算資源利用者が、計算資源 v に乗り換える確率であり、以下のように定義される。

$$\hat{p}_{u,v} = \frac{R_v^{-\alpha}}{R_v^{-\alpha} + \sum_{w \in NB_u \setminus \{v\}} R_w^{-\alpha}}$$

(2) シミュレーションと理論解析

(1) で定式化した需要予測量を用いて構築した計算資源マーケットの数理モデルにおいて、シミュレーションを行い、利用価格の過渡的な特性（図 3. を参照）、および、定常的な値（後者を以降、均衡価格と呼ぶ）と各モデルパラメタの影響に関して理解した後、計算資源の均衡価格をナッシュ均衡として捉え、その時に満たすべき条件を解析的に求めた。

また、ネットワークトポロジが均衡価格に与える影響を理解するために、図 4. に示した、正則グラフと階層的グラフを取り上げ、同様に解析を行った。正則グラフは、全てのノードの次数が等しいグラフである。階層グラフは、親とそれぞれ子供の 2 種類のノード集合で構成される。親は自分以外の全ての親、および、自分の子供との間にリンクを持っている。子供は自分の親に対してのみリンクを持っている。

これらのグラフの対称性に着目し、幾つか存在し得る均衡状態の中には、対称位置に存在する計算資源の均衡価格は全て等しくなるという仮定を置いた。すなわち、

$$\forall i \in T: \left. \frac{\partial U}{\partial R_i} \right|_{R_i=R_j=R_T, j \in T \setminus \{i\}} = 0$$

を満たすと仮定し、均衡状態が満たすべき条件と均衡価格 R_T を求めた。ただし、 T は S の部分集合で、対称位置に存在する計算資源の集合である。例えば、正則グラフでは $T = S$ の 1 つのみ、階層的グラフでは、親

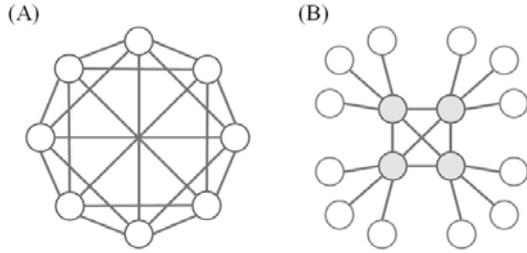


図 4. 正則グラフと階層的グラフ

の集合 T_{parent} と子の集合 T_{child} の 2 つである。

以上により、計算資源マーケットの設計者が、どのように設計パラメタを選択すれば良いか、示唆を与えることができた。

(3) グリーン IT に向けた発展研究

本研究では、さらにモデルを拡張することにより、グリーン IT に向けた基礎的な成果を得た。これは当初、研究計画には入れていなかった新しい成果である。具体的には、インターネットデータセンタの電力消費量と冷却コストをモデルに加えた。一般に、計算資源の利用者が多い程、それに比例して計算資源への負荷が高くなり消費電力も高くなる。また、利用者数の増加に伴い、計算機の冷却コストは増加するが、次第に緩やかな増加となってゆく。この仮定の下、計算資源提供者は計算資源の利用価格を適切に設定することにより、計算資源利用者の数を、間接的に調整することができる。すなわち、利用価格を高く設定すれば、利用者数は減少し、低く設定すれば、利用者数は増加する。それによって、収入（計算資源の利用費の合計）と支出（消費電力と冷却コストの合計）のバランスを取るよう、以下の効用関数を最大化するようモデル化した。

計算資源利用者の効用関数の拡張版:

$$U_i(\{R_v\}_{v \in P_i}) = \sum_{v \in P_i} \{\hat{C}_v \times R_v - e_v\}$$

ここで、 e_v は計算資源 v の消費電力と冷却コストの合計であり、以下のように表わされると仮定する。

$$e_v = \beta \hat{C}_v + \frac{\gamma}{\eta + \hat{C}_v} \hat{C}_v$$

ただし、 β は電力コスト、 γ と η は冷却コストを決定するモデルパラメタである。このモデル上で、ネットワークトポロジは考慮せず、電力コストおよび冷却コストが全ての計算資源において均一であるという仮定の下、すなわち、

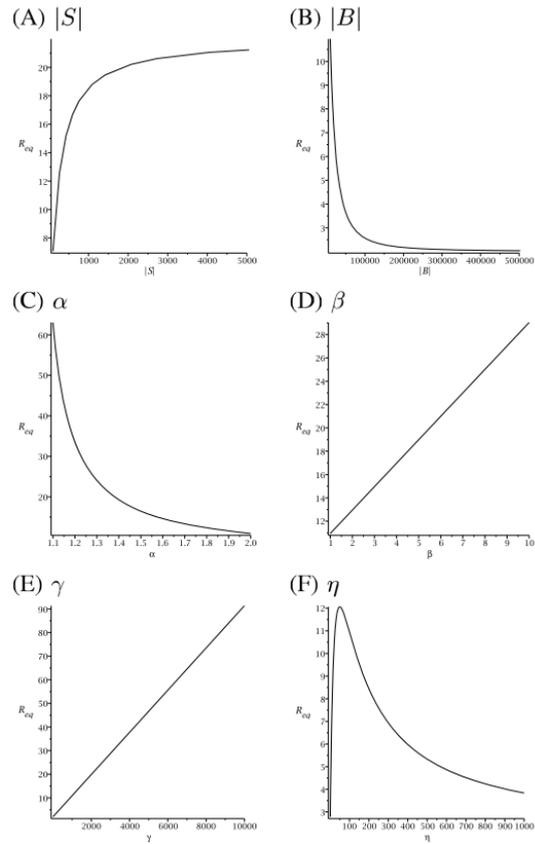


図 5. エネルギーコストを考慮した均衡価格

$$\forall i, v \in P_i : \frac{\partial}{\partial R_v} \left\{ \hat{C}_v \times R_v - e_v \right\} \Big|_{R_v=R_{eq}} = 0$$

が成立する時、全ての計算資源の利用価格が価格 R_{eq} で均衡するとして数値計算を行い、モデルパラメタの均衡価格に対する影響を理解することができた (図 5. 参照)。より現実的なモデルへと拡張し、さらなる理論解析とモデルパラメタの均衡価格への影響の理解をすることが、本研究の新しい課題である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 1 件)

- ① Y. Okaie and T. Nakano, “Resource Pricing Games on Graphs: Existence of Nash Equilibria,” Optimization Letters, 2011 (online first). DOI:10.1007/s11590-011-0411-2

〔学会発表〕 (計 1 件)

- ① Y. Okaie and T. Nakano, “An Energy-aware Resource Pricing Model

for Internet Data Centers,” The 6th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems & The 13th International Symposium on Advanced Intelligent Systems (SCIS-ISIS 2012), pp. 2312 - 2313, 2012.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡家 豊 (Okaie Yutaka)
大阪大学・大学院工学研究科・特任研究員
研究者番号：10614125