

平成22年4月21日現在

研究種目：若手研究 (B)  
研究期間：2008～2009  
課題番号：20700061  
研究課題名 (和文) ユーザの利己的な振る舞いに対してロバストな大規模分散システムの実現  
研究課題名 (英文) Realization of Large-Scale Distributed Systems Robust Against Selfish User Behavior  
研究代表者  
笹部 昌弘 (SASABE MASAHIRO)  
大阪大学・工学研究科・助教  
研究者番号：10379109

## 研究成果の概要 (和文)：

大規模分散システムの一例である P2P ファイル共有システムを対象に、個々のユーザの利己的な振る舞いとシステム全体の性能との関係を調査した。ユーザの利己的な振る舞いをゲーム理論の枠組みでモデル化し、ユーザ間の駆け引きがシステム全体としての性能に与える影響を進化ゲーム理論を用いて数学的解析とシミュレーション評価の両面から考察した。その結果、周囲からファイルが消失しそうな場合に限りファイルを共有するという合理性の下では、ユーザの利己的な度合いによらずファイル消失に対してロバストなシステムの実現が可能であることがわかった。

## 研究成果の概要 (英文)：

I focused on P2P file-sharing systems as an example of large-scale distributed systems and examined the relationship between selfish user behavior and system performance. I first made modeling of the selfish user behavior under the framework of game theory, then revealed how the interactions among selfish users affects the system performance with the help of evolutionary game theory. Through mathematical analyses and simulation evaluations, we can achieve robust file-sharing systems against file disappearance independent of the degree of user selfishness when each user rationally behaves: He/she keeps and shares a file only when the file is likely to disappear from the network without his/her help.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,200,000	660,000	2,860,000

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：分散システム、ロバスト性、進化ゲーム理論、ネットワーク、情報通信工学

1. 研究開始当初の背景

コンピュータの高性能化・低価格化，及び有線・無線ネットワークの普及に伴い，大規模分散型ネットワークシステムが注目されつつあった．特に，ユーザの使用する端末同士で独自の仮想的なネットワークを構築し，そのネットワーク上でサービスを展開する Peer-to-Peer (P2P) 型システムが普及し，例えば，インターネットを介した安価な映像・音声通信を実現する Skype，OS のインストールメディアのイメージファイルなどファイルサイズの大きなファイルを高速に分割ダウンロード可能な BitTorrent などがユーザ数を伸ばしていた．

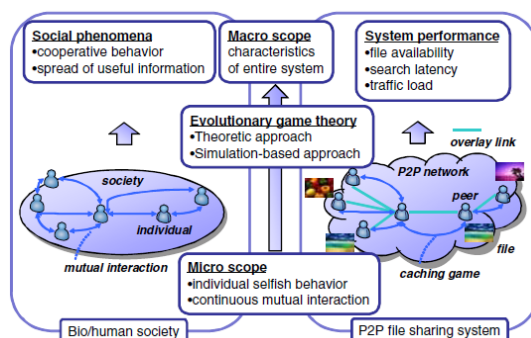
P2P 型システムの特徴の一つに，ネットワークを構成するノードがユーザの使用する端末であるという点が挙げられる．これに対しインターネットなどのインフラでは，インフラを構成するノード（ルータ）はネットワーク事業者によって管理されており，ネットワーク全体としての性能向上（回線利用率の向上，ルータでのパケットロス率の軽減など）を目的に制御されている．一方，P2P では各ノードの振る舞いはそのノードを操作するユーザの意思により決定される．すなわち，各ノードはシステム全体としての効率，性能よりも，各自にとっての利益（低遅延・広帯域通信，低負荷など）を優先して行動する傾向がある．一方で，システム全体として効率よく機能するためには，システム内の各ノードがファイルの共有，メッセージ・ファイルの中継・転送といった他のノードの利益につながる協力的な行動を取る必要があり，両者の間には隔たりが存在する．

ユーザ間の相互作用がシステム全体としての性能に与える影響は，システム内のユーザ数が増加するに伴い複雑化するため，両者の関係性を明らかにすることは非常に重要である．

2. 研究の目的

こうしたユーザの利己性と集団としての協力的行動との関係性については，社会学の分野でも研究が行われている．特に，進化ゲーム理論を用いることで，個々のユーザ間の相互作用と集団全体としての現象の出現との関係を動的的に記述することができることから，この考えを P2P ファイル共有システムにおける端末間のファイル共有に対する駆け引きとその結果として表れるシステム内のキャッシュファイル数の推移に当てはめることで，両者の関係を明らかにすることができる（右上図）．

P2P ファイル共有システムでは，ファイルのキャッシングにはストレージ容量や帯域の消費などのコストがともなうことから，ユー



ザはファイル共有に対して非協力的になりやすい．さらに，こうしたファイル共有への積極性は端末やアクセス回線の性能，ファイルに対する価値観によりユーザごとに異なるものと考えられる．加えて，ユーザを取り巻く環境を決める P2P ネットワークの構造もユーザ数の増加にともない多様化する．本研究では，こうした多様な環境下におけるシステム性能について，進化ゲーム理論を用いて考察する．

進化ゲーム理論には，マイクロ-マクロダイナミクスと呼ばれる理論的な枠組みと，エージェントベースダイナミクスと呼ばれるシミュレーションベースの枠組みがある．マイクロ-マクロダイナミクスを用いた理論的解析により，ユーザの利己的な度合いとシステム性能との関係やシステムが安定するための条件などを数学的に表現できる．一方で，マイクロ-マクロダイナミクスでは簡単化のために各ノードが大域的な情報を保持しているという前提が置かれていることから，トポロジ構造の多様性については取り扱えない．各ノードが局所的な情報のみに基づいて行動する場合のシステム性能は，エージェントベースダイナミクスを用いたシミュレーション評価により明らかにできる．特に，ノード間の同期性や特定ノードの振る舞いがシステム性能に与える影響，システム内におけるキャッシュファイルの分布などを明らかにすることができる．

3. 研究の方法

進化ゲーム理論による考察のために，まずファイルのキャッシングに対するユーザ間の潜在的な駆け引きを 2 者間のキャッシングゲームとしてモデル化する．また，システムに参加しているユーザは多様であり，ファイルのキャッシングに対するコストの観点から，非協力的なユーザがシステムの大半を占めると想定されることから，キャッシングに対する協力の度合いを閾値と呼ばれるパラメータで表現し，その閾値の分布が Zipf 則に従うようモデル化する．得られたキャッシングゲームとユーザの多様性のモデルに対

して進化ゲーム理論を適用することで、ユーザの多様性、トポロジ構造の多様性とシステム性能との関係を考察する。

(1) システムのモデル化

①概要

本研究で想定する P2P ファイル共有システムを以下に述べる。まず、システムには N 個のノードが存在すると仮定する。各ノードは、P2P ファイル共有システムを対象とした既存のファイル検索手法を用いることで、所望のファイルを保持するノードの集合を得る。ノードは得られたノード集合に含まれる 1 つ以上のノードからファイルを取得し、新たなファイル保持者となる。前述のように、ファイルのキャッシングにはコストが発生するため、同じファイルを保持するノード間ではファイルをキャッシュに残すかどうかの駆け引きが潜在的に行われている。本研究では、対戦相手がランダムに選ばれるという前提の下、この駆け引きを 2 者間でのキャッシングゲームとしてモデル化する。各ノードは同一ファイルを保持する他のノードと一定回数ゲームを行った時点で選ばれた戦略に基づき、ファイルをキャッシュするかどうかを判断するものとする。なお、以降では単一ファイルの場合のキャッシングゲームについて述べるが、複数ファイルの場合は単一ファイルについてのゲームの集まりとして拡張することができる。

②キャッシングゲーム

・戦略と利得

ゲーム理論では、2 者間において、ユーザの取り得る戦略と得られる利得の関係を下表に示すような利得行列の形で与え、ゲームをモデル化する。

	プレイヤー j	協力	非協力
プレイヤー i	協力	(R <sub>i</sub> , R <sub>j</sub> )	(S <sub>i</sub> , T <sub>j</sub> )
	非協力	(T <sub>i</sub> , S <sub>j</sub> )	(P <sub>i</sub> , P <sub>j</sub> )

例えば、右上の (S, T) は、自分が「協力」、相手が「裏切り」の戦略をとったとき、自分が S、相手が T の利得を得ることを示している。両者が協力 (非協力) の戦略をとったとき、両者とも R (P) の利得を得る。先行研究により、T>R≥S>P であれば協力的なキャッシングが実現できることが示されている。ここで、実際の P2P ファイル共有システムでは、不特定多数のユーザがシステムに参加しており、ユーザごとに同じファイルに対する価値観が異なるものと考えられる。したがって、利得行列のパラメータはユーザごとに異なると考えられる。

P2P ファイル共有システムにおいて、あるファイルに対してユーザの取り得る戦略は、ファイルをキャッシュする (協力)、キャッシュしない (非協力) のどちらかである。

・戦略の決定方法

前述のように、ユーザは他のユーザと一定回数のキャッシングゲームを行った後、ファイルをキャッシュするかどうかを決定する。各回のゲームでは、ユーザは合理的な判断に基づき行動するという前提の下、キャッシュをするという戦略 (S<sub>c</sub>) を選択する場合の期待利得と、キャッシュをしないという戦略 (S<sub>n</sub>) を選択する場合の期待利得を比較し、より大きな期待利得を得られる戦略を選択する。その結果、戦略の推移は次式で表される。

$$X_i(t+1) = \begin{cases} S_c, & p(t) < \theta_i \\ S_n, & p(t) \geq \theta_i \end{cases}$$

ただし、t は時点、X<sub>i</sub>(t+1) は時点 t+1 での戦略、p(t) は時点 t における S<sub>c</sub> の割合である。また、θ<sub>i</sub> は利得行列から次式で与えられるものであり、ユーザ i のキャッシングへの協力の度合いを表すパラメータとなる。

$$\theta_i = \frac{S_i - P_i}{T_i - R_i + S_i - P_i}$$

θ<sub>i</sub> は 0 から 1 の値をとり、値が大きいほどユーザ i は潜在的にキャッシングに協力的となる。

③環境の多様性

・ユーザの多様性

P2P ファイル共有システムでは、同じファイルのキャッシングに対してユーザごとに協力の度合いが異なる。ここでは、このユーザの多様性を、閾値 θ<sub>i</sub> のばらつきとしてモデル化する。ファイルのキャッシングにはストレージ容量などのコストがともなうため、キャッシングに協力的なユーザよりも、非協力的なユーザが多数を占めるものと考えられる。そこで本研究では、閾値 θ<sub>i</sub> の分布が Zipf 則に従うものと仮定する。すなわち θ<sub>i</sub> (I = 1, 2, ..., N) は、独立同一な、範囲が [1/K, 1]、形状パラメータが α > 0 の切断パレート分布に従う。f(θ) を θ<sub>i</sub> の確率密度関数とすると、以下ようになる。

$$f(\theta) = \begin{cases} \frac{1}{\log K} \cdot \theta^{-1}, & \alpha = 1 \\ \frac{\alpha - 1}{K^{\alpha-1} - 1} \cdot \theta^{-\alpha}, & \alpha \neq 1 \end{cases}$$

ただし、本研究において、K と α はそれぞれ、閾値 θ の種類数と、その偏りの度合いを決める。つまり、ユーザの多様性の度合いは主に K によって決定され、K の値が大きくなるほどユーザの多様性が高くなる。

・トポロジ構造の多様性

実際の P2P ファイル共有システムでは、トポロジ構造も多様である。トポロジ構造は、それぞれのノードが他ノードとのやり取りを通して得られるファイルや情報の局所性を決定する。また、2 ノード間でのホップ数の増加に伴い、そのやり取りの際に生ずるオーバーヘッドが増加する。トポロジ構造はノード間の接続関係を決定する規則と平均リンク

数によって決定される。本研究では、多様なトポロジ構造として以下のものを想定している。まずは、システム内のすべてのノード同士が直接論理リンクを有するフルメッシュネットワークである。詳しくは後述するが、システムの基本特性の理論的解析の際にトポロジ構造としてフルメッシュネットワークを用いる。一方で、システム規模の増大に伴い、トラヒック負荷や制御にかかるオーバーヘッドの観点からフルメッシュネットワークの実現は非現実的となる。そこでより現実的な P2P ファイル共有システムにおいてトポロジ構造がシステム性能に与える影響をより深く考察するために、Waxman アルゴリズムに従うランダムネットワークと、Barabasi-Albert (BA) モデルに基づくスケールフリーネットワークを用いる。

### (2) 進化ゲーム理論を用いた理論的解析

多数の異質な個体がとる行動をそれぞれマイクロな行為とし、マイクロな行為が相互作用した結果、それらの個体からなる集団がとる挙動をマクロな行為とする。個体のマイクロな行為とそれらの集団のマクロな行為との間に生まれる相互関係をマイクロ-マクロループと呼び、マイクロ-マクロループの動学的な挙動を数学的に表したものがマイクロ-マクロダイナミクスである。したがって、マイクロ-マクロダイナミクスを用いることで、多様なノード間のキャッシングに対する駆け引きが、システム全体としてのキャッシングの状態に与える影響を解析的に明らかにできる。

マイクロ-マクロダイナミクスでは、ノード間のキャッシングに対する駆け引きの結果を  $p(t)$  の推移を用いて表現する。 $p(t)$  は時点  $t$  におけるキャッシュをするという戦略を選択するノードの割合である。前述のように、各ノードはこの  $p(t)$  とそれぞれが持つ閾値  $\theta_i$  のみに基づいて、次の時点  $t+1$  での戦略を決定する。ここで、閾値の累積分布関数  $F(\theta)$  は前述の密度関数を積分することで得られる。

時点  $t+1$  における協力的な戦略を選択するノードの割合  $p(t+1)$  は、時点  $t$  において  $p(t) < \theta_i$  となるノードの割合によって与えられる。したがって  $F(p(t))$  は、 $p(t) \geq \theta_i$  となるノードの割合  $1-p(t+1)$  となることか

$$p(t+1) = 1 - F(p(t))$$

ら次式を得る。

### (3) 進化ゲーム理論を用いたシミュレーション評価

マイクロ-マクロダイナミクスによる解析はシステムの挙動、特にユーザの利己的な度合いとシステム性能との関係やシステムが安定するための条件などを数学的に表現できる点が強みである。ただしマイクロ-マクロダイナミクスでは、全てのノードが大域的な情報

である  $p(t)$  を得ることができるという前提条件がある。しかしながら、実際の P2P ネットワークでこのことを実現しようとする、各ノードが最新の  $p(t)$  を常に把握し続けるために発生するトラヒック負荷の観点から現実的ではない。現実的には、P2P ネットワークのトポロジ構造により決まる近隣のノード間でファイル共有に関する駆け引きが行われているものと考えられる。

こうしたトポロジ構造がシステムの挙動に与える影響についてはエージェントベースダイナミクスを用いることで明らかにできる。エージェントベースダイナミクスでは、ネットワーク内で隣接ノードのみとのやり取りによる各ノードの意思決定を基に、優れた戦略が隣接する個体を通してネットワーク内に広まるという現象をモデル化している。これにより、マイクロ-マクロダイナミクスによる解析的な評価のみでは不十分な点を補うことができる。マイクロ-マクロダイナミクスは、システム内の全ノード間に直接的なつながりがあるフルメッシュネットワークにおけるエージェントベースダイナミクスと同等のものである。

エージェントベースダイナミクスを P2P ファイル共有システムに適用する場合、各ノードは  $d$  ( $d \geq 1$ ) ホップ以内のノードとの間で情報をやり取りすることにより、自身の取る行動を決定するものと見なせる。ここで、 $d=1$  とするとエージェントベースダイナミクスの、 $d = \infty$  とするとマイクロ-マクロダイナミクスの想定する状況と等しくなる。 $d$  を制限することにより、ノード間の局所的なやり取りに基づくキャッシングが、システム全体の性能に与える影響を明らかにすることができる。さらに、個々のノードの取る戦略がわかることから、システム内のキャッシュファイルの分布も知ることができる。以下では、P2P ファイル共有システムにおけるエージェントベースダイナミクスの詳細について述べる。

まず初めに、戦略の更新の間隔を世代と定義する。本研究では同期型と非同期型の 2 種類のシステムを考える。同期型システムでは、1 世代で全てのノードが同時に戦略の更新を行い、非同期型システムでは、1 世代でランダムに選ばれた 1 ノードのみが戦略の更新を行う。世代  $g$  ( $g = 1, 2, \dots$ ) において、ランダムに選ばれたノード  $i$  が  $d$  ホップ以内に存在する各ノードとそれぞれ 1 回ずつゲームを行う。そして、自身も含めたそれらの中でキャッシングに協力的な戦略を選択するノードの割合  $p_i(g)$  を算出する。この  $p_i(g)$  を用いて、ノード  $i$  は世代  $g+1$  における戦略  $X_i(g+1)$  を以下のように決定する。

$$X_i(g+1) = \begin{cases} S_c, & p_i(g) < \theta_i \\ S_n, & p_i(g) \geq \theta_i \end{cases}$$

#### 4. 研究成果

##### (1) 理論的解析による考察

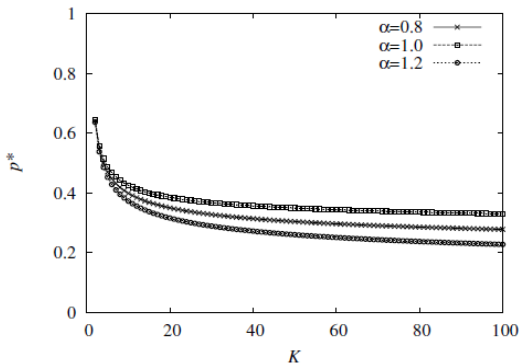
各ノードにとってファイルの利用のしやすさを評価するために、ファイル可用性を定義する。システムに定常状態が存在する場合、その時達成されるキャッシングに協力的な戦略を選択するノードの割合をファイル可用性と定義する。これは前述の差分方程式の均衡点  $p^*$  で与えられ、以下の方程式を解

$$p^* = 1 - F(p^*)$$

くことで得られる。

この式は非線形方程式であるため、ニュートン法により解を求める。

下図に、 $\alpha = 0.8, 1.0, 1.2$  の場合の均衡点  $p^*$  を示す。全ての場合において、均衡点  $p^*$  は  $2 \leq K \leq 10$  の範囲で急激に低下するが、 $K$  の増加とともに  $\alpha$  の値に依存した一定の値に収束する。また、 $K$  や  $\alpha$  が大きいと均衡点  $p^*$  の値は小さくなる、すなわち、ユーザの多様性が高いとファイル可用性が低くなることからわかる。これは式(6)より、 $K$  や  $\alpha$  の値の増加とともにキャッシングに非協力的なノードの割合が増加することから起こる現象である。また、いずれの場合も均衡点  $p^*$  の値が 0 にならないことから、システム内に少なくとも 1 つはキャッシュファイルが存在するということがわかる。



その他に、均衡点  $p^*$  の安定性に関して解析的に導出することで、ファイル共有システムの安定性についても明らかにした。解析の結果、ユーザの多様性が高いほど、システムはより安定することがわかっている。

##### (2) シミュレーションによる考察

###### ① シミュレーションモデル

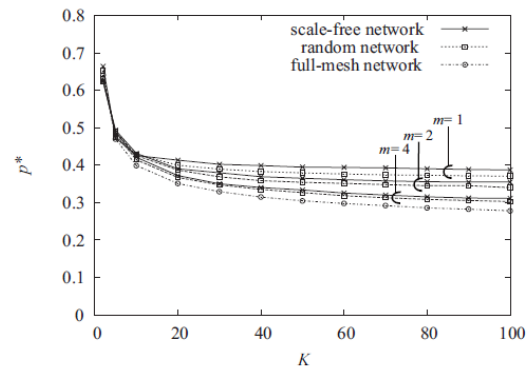
NetLogo を用いて以下の条件に従ってシミュレーションを行った。ネットワークトポロジには、ノード数 1000 のフルメッシュネットワーク、Waxman アルゴリズムに従うランダムネットワーク ( $\alpha = 0.15, \beta = 0.2$ )、Barabasi-Albert (BA) モデルに基づくスケールフリーネットワークを用いた。BA モデルにおける新規参加ノードの接続数  $m$  は 1, 2, 4 とした。スケールフリーネットワークの平均次数と揃えるため、ランダムネットワ

ークの平均次数は  $2m$  とした。

ノード  $i$  が持つキャッシングへの協力度合いを表す閾値  $\theta_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 1000$ ) は、以下のようにして与えている。まず、前述の密度関数 ( $\alpha=1$  の場合) において 1000 個の  $\theta_i$  を得る。次に、これらをノードに対してランダムに割り当てる。さらに、 $d=1$  とする。すなわち各ノードは隣接ノードとのみやり取りを行うことができる。さらに、シミュレーション開始時のノードの戦略分布はキャッシュをする、キャッシュをしない共に 5 割ずつとなるようにランダムに設定した。トポロジ構造と初期の戦略分布を 1 セットとし、各  $K$  ごとにそれぞれ 10 セット用意した。以降では、各  $K$  ごとに計 10 回のシミュレーションを行い、世代ごとの平均値を用いて結果を考察する。

###### ① トポロジ構造が与える影響

スケールフリーネットワークとランダムネットワークで、 $m = 1, 2, 4$  とした場合の非同同期型システムにおける  $K$  とファイル可用性  $p^*$  の関係を下図に示す。



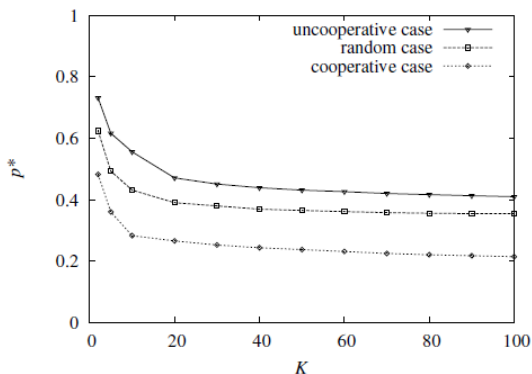
先に述べたように、 $K$  の値が大きいほどユーザの多様性は高くなる。スケールフリーネットワークとランダムネットワークでは、 $m$  によらずフルメッシュネットワークよりファイル可用性が高くなり、さらに両ネットワーク間でほぼ同じ値になる。また、 $m$  が小さくなるとファイル可用性が高くなることもわかる。

これは、対戦相手と逆の戦略を選択することで高い利得を得ることができるというゲームの構造上、非協力戦略を選択するノードは協力戦略を選択するノードのまわりに集まりやすくなり、各ノードから 1 ホップ以内にキャッシュファイルが存在する可能性が高くなるためである。 $m$  の値が大きくなると隣接ノード数が増加することを考えると、上と同じ理由で  $m$  が大きくなるにともない非協力戦略を選択するノードの割合が増加することも説明できる。

###### ② 高次数ノードの特性・振る舞いが与える影響

スケールフリーネットワークには少数の高次数ノードが存在する。これらの高次数ノ

ドは他の多数の低次数ノードよりもシステム性能に与える影響力が高いと考えられる。これらの高次数ノードの特性や振る舞いが、システム性能に与える影響を評価するために、次数の高いノードがキャッシングにより協力的(非協力的)となるように、各ノードにキャッシングへの協力度を表す閾値  $\theta$  を与えるシナリオを検討した。また、次数と協力の度合いが無相関であるランダムなケースとも比較評価した。



上図より、次数の高いノードほどキャッシングにより非協力的な状況では、その逆の状況よりファイル可用性が高くなることわかる。これは、ゲームの構造とトポロジの構造に依存して起こる現象である。つまり、ゲームの構造として対戦相手と逆の戦略をとることでより高い利得を得ることができ、また、高次数ノードには多数のノードが接続されているという状況から、高次数ノードが非協力戦略(協力戦略)を選択すると、多数の隣接ノードが協力戦略(非協力戦略)を選択しやすくなるためである。

### (3)まとめと今後の展望

本研究では、主にP2Pファイル共有システムを対象に、利己的なユーザ間での相互作用がシステム全体としての性能に与える影響を解析とシミュレーション評価の両面で明らかにした。5章で示すように、研究成果の一部は雑誌論文に掲載されるとともに国際会議で発表しており、その成果は広く世に公開されていると言える。今後は、得られた知見を基に、P2Pファイル共有システム以外のネットワークシステムにも話を展開していきたい。

## 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)

① Yusuke Matsuda, Masahiro Sasabe, and Tetsuya Takine, "Evolutionary Game Theory-Based Evaluation of P2P File-Sharing Systems in Heterogeneous Environments," International Journal of

Digital Multimedia Broadcasting, vol. 2010, pp. 1-12, Mar. 2010. 査読有

② K. H. Kabir, Masahiro Sasabe, and Tetsuya Takine, "Evolutionary Game Theoretic Approach to Self-Organized Data Aggregation in Delay Tolerant Networks," IEICE Transactions on Communications, vol. E93-B, No. 3, pp. 490-500, Mar. 2010. 査読有

③ Masahiro Sasabe, Naoki Wakamiya, and Masayuki Murata, "User Selfishness vs. File Availability in P2P File-Sharing Systems: Evolutionary Game Theoretic Approach," Peer-to-Peer Networking and Applications (Online First), Apr. 2009. 査読有

[学会発表] (計3件)

① Yusuke Matsuda, Masahiro Sasabe, and Tetsuya Takine, "Simulation-Based Evaluation of P2P File-Sharing Systems under Heterogeneous Environments: Evolutionary Game Theoretic Approach," in Proceedings of the 2009 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA'09), pp. 101-104, Oct. 18-21, 2009, Sapporo Japan. 査読有

② K. H. Kabir, Masahiro Sasabe, and Tetsuya Takine, "Design and Analysis of Self-Organized Data Aggregation Using Evolutionary Game Theory in Delay Tolerant Networks," in Proceedings of The Third IEEE WoWMoM Workshop on Autonomic and Opportunistic Communications (CD-ROM), June 15-19, 2009, Kos Greece. 査読有

③ Masahiro Sasabe, Yusuke Matsuda, and Tetsuya Takine, "How Does User Heterogeneity Affect Performance of P2P Caching?: Evolutionary Game Theoretic Approach," in Proceedings of 1st International Workshop on Technologies for Ambient Information Society (TAIS'08), (CD-ROM), Nov. 28, 2008, Awaji Japan. 査読有

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

笹部 昌弘 (SASABE MASAHIRO)

大阪大学・工学研究科・助教

研究者番号：10379109

### (2)研究分担者

該当なし

### (3)連携研究者

該当なし