

平成 21 年 4 月 1 日現在

研究種目：基盤研究(C)  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19560390  
 研究課題名（和文）利己的ユーザを含む MAC 層プロトコルのゲーム理論的取り扱いに関する研究  
 研究課題名（英文）Study on Game-Theoretic Perspective of MAC Protocols with Selfish Users  
 研究代表者  
 榑原 勝己 (SAKAKIBARA KATSUMI)  
 岡山県立大学・情報工学部・教授  
 研究者番号：10235137

## 研究成果の概要：

MAC 層プロトコルとしてスロット付アロハ方式を、パケット再送のための指数バックオフ・アルゴリズム（特に、バックオフ係数）を改変する利己的ユーザと、改変しない一般ユーザの間の非協力2人ゲームとして捕らえ、各々のバックオフ係数を戦略とし、各ユーザのスループロットを利得関数とし定式化した。そして、利己的ユーザの任意の戦略に対して、一般ユーザの最適な戦略が一意に存在することを、理論的に証明した。また、一般ユーザの任意の戦略に対して、利己的ユーザの最適な戦略が一意に存在することに関する部分的な証明を与えた。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2008年度	1,500,000	450,000	1,950,000
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

## 研究分野：

科研費の分科・細目：

キーワード：移動体通信, 情報通信工学, ネットワーク, ゲーム理論, 通信プロトコル

## 1. 研究開始当初の背景

BluetoothあるいはIEEE 802.11規格に準拠した無線 LAN 製品の実用化と普及、無線センサーネットワークあるいは無線アドホック・ネットワークに関する研究・開発の促進等、来るべきユビキタス情報化社会の実現に向けた通信インフラの整備は加速的に発展しつつある。通常の通信システム、特に無線システムでは、法的規制あるいは技術的困難さ等のため、ハードウェアあるいはソフトウェアによる通信プロトコルの改変は、ほぼ不可能なものとなっている。また、通信システム(プロトコル)の設計に際して、プロトコルの改

変あるいは改変による影響は全く考慮されていない。すなわち、コンピュータ・ウイルス等のセキュリティに関する事項を除き、通信システムのユーザは、通信プロトコルの改変を行わない「協力的」であるものとして想定され、全ユーザの協力により通信システム全体のパフォーマンス(回線利用効率あるいは公平性等)が最大化されるように設計されている。

しかしながら、ユビキタス情報化社会における通信インフラで重要な役割を演じるものと想定される無線センサーネットワーク等の小規模かつ簡易な通信システムでは、その利便性・簡便性のため、各ユーザにおいて端末に埋め込まれて

いる通信プロトコルのパラメータ等を変更することは、現状よりも簡易であるものと予想される。このため、自己(あるいは自己を含む一部のグループ)のみが通信回線を優先的に利用できるように恣意的な変更を行うユーザ(利己的ユーザ)の出現を否定することはできない。利己的なユーザの出現は、通信システム全体のパフォーマンスにマイナスの影響を与えることは明らかである。このような状況では、利己的なユーザが(他者の犠牲の下で)取るべき戦略を予見・分析し、利己的なユーザの出現が、一般の協力的なユーザのパフォーマンスに与える影響を最小化・回避できる通信プロトコルを設計することは不可欠なことである。

一方において、通常の通信システムにおける協力的な状況とは異なり、社会における経済活動では、個々の行動主体(個人、法人)の目的が自己の利益を追求することに存在する局面が多くを占めている。このように、複数の意思決定主体が存在する状況における意思決定の理論として発展してきた「ゲーム理論」は、通信システムにおける利己的ユーザの戦略を決定、予見する有力な数学的ツールとなりうることが期待される。

## 2. 研究の目的

通信プロトコルの階層構造を考慮すると、特に無線通信システムにおけるプロトコルの改変は、物理層における送信電力、データリンク層における MAC 層パラメータ、ネットワーク層におけるルーティングを目標とすることが予想される。本研究では、このうち、MAC 層におけるパラメータの改変、特に、無線 LAN あるいは無線センサーネットワークで広く利用されている CSMA (Carrier Sense Multiple Access) あるいは ALOHA 等のランダムアクセス方式のパラメータ改変に着目する。特に

- (1) 利己的ユーザが通信プロトコルの MAC 層パラメータの改変という意味において取るべき戦略を、ゲーム理論を用いて明らかにすること
- (2) 利己的ユーザの戦略が、一般の協力的なユーザのパフォーマンスに与える影響を明らかにすること
- (3) 利己的ユーザの存在に依存することなく一般ユーザの性能を維持できる MAC 層パラメータの設計手法を構築することを目的とする。

はじめに、利己的ユーザが一般ユーザの犠牲の下で取るべき最適な戦略を明らかにするとともに、この改変が、利己的ユーザと一般ユーザの回線利用効率(スループット)、エネルギー効率、公平性等のパフォーマンスに与える影響を理論的に示す。また、この戦略がナッシュ均衡あるいはパレート最適となっているか否かを証明

する。次に、利己的ユーザの存在が開示された場合に、通信システム全体のパフォーマンス劣化を最小限に抑制するための戦略(通信プロトコル)を明らかにする。また、この戦略がナッシュ均衡あるいはパレート最適となっているか否かを証明する。

## 3. 研究の方法

研究期間内において、以下の方法・手順で研究を実施した。

- (1) 通信プロトコルにおける利己的ユーザの取り扱いに関する調査

MAC 層に限定することなく、通信プロトコルの性能評価あるいは設計に際して、利己的ユーザを想定した上で検討を行っている文献あるいは特許(キーワード検索)を調査するとともに、ゲーム理論の MAC 層への適用に関して問題点等を抽出した。

- (2) 利己的ユーザの戦略と利得関数の定式化

利己的ユーザが MAC 層プロトコルを改変する際に考えられる戦略と利得関数を明らかにし、ゲーム理論としての取り扱いが可能となるようなモデル化および定式化を行った。

- (3) 利己的ユーザの存在が一般ユーザに与える影響の解析

利己的ユーザが MAC 層プロトコルを改変した場合、一般ユーザに与える影響を解析し、一般ユーザが取るべき戦略と利得関数を定式化し、ゲーム理論としての取り扱いが可能となるようなモデル化を行った。

- (4) ナッシュ均衡に関する解析

利己的ユーザと一般ユーザの各々の戦略と利得関数を定式化した後、ゲーム理論におけるナッシュ均衡の存在の有無に関して解析を行った。

- (5) 無線センサーネットワーク評価キットの実験環境整備

研究開発用に流通している無線センサーネットワーク評価キットおよび制御用ノートパソコンを購入し、予備実験により実験環境のキャリブレーションを行った。

## 4. 研究成果

(1) ゲーム理論

① ゲームの構成要素

経済活動のように意思決定主体が複数存在する状況においては、他者の行動が自己の意思決定に影響を与える。このようなゲーム的状況において、ゲーム理論は、行動の判断基準を各意思決定主体に提供する。ゲームは 3 個の要素によって構成される。意思決定主体の集合(プレイヤー)、各プレイヤーが取りうる行動の集合(戦略)、行動の結果によって得られる利益(利得)である。各プレイヤーの利得は、他のプレイヤーの戦略の関数として与えられる。

② ナッシュ均衡

ゲームの状況では、他のプレイヤーの行動を予測することによって、各プレイヤーは自己の利得を最大とするような戦略を選択することが合理的である。他のプレイヤーの戦略が与えられた下で、自己の利得を最大とする戦略を“最適戦略”と呼ぶ。全プレイヤーの戦略の組が、各プレイヤーの最適戦略でのみ構成される場合、その組は“ナッシュ均衡”と呼ばれる。ゲームにおいては、ナッシュ均衡が存在しない場合もある。複数のナッシュ均衡が存在する場合もある。あるプレイヤーがナッシュ均衡以外の戦略を採択することは、自己の利得を低下させることを意味する。このため、ナッシュ均衡が存在する場合、ゲームはナッシュ均衡点において膠着する。

(2) 非協力アロハゲーム

① モデル

スロット付アロハにおけるバックオフパラメータは、送信確率の初期値  $r$ 、バックオフ係数  $\alpha$ 、ステージ数  $m + 1$  によって与えられる。すなわち、各ユーザのバッファ内にあるパケットの送信失敗回数を  $i$  とすれば、次スロット以降、確率  $r\alpha^{\min\{m,i\}}$  でパケットを再送する。ここで、バックオフパラメータを改変しないユーザのグループを“一般ユーザ”と呼び、送信確率が常に一定値  $\tau_C$  となるよう改変するユーザのグループを“利己的ユーザ”と呼ぶ( $\alpha = 1, m = 0$ )。

[定義 1] 一般ユーザと利己的ユーザが、各々のパケット送信確率の初期値  $r$  および  $\tau_C$  を戦略として、自己のスループットを利得とする 2 人ゲームを“非協力アロハゲーム”と定義する。 ■

ただし、各ユーザはパケット送信に成功した直後に次のパケットを発生するものとし、他のユーザの送信パケットと衝突しなければ送信に成功するものとする。

表 1 に示すように、一般ユーザ数を  $N$ 、利己的ユーザ数を  $C$  とする。一般ユーザに対しては、図 1 に示すように、バッファ内にあるパケットの送信確率に関する状態遷移を考えることができる。

表1. 非協力アロハゲームのパラメータ

プレーヤ	一般ユーザ	利己的ユーザ
・ユーザ数	$N$	$C$
送信確率		
・初期値(戦略)	$r$	$\tau_C$
・バックオフ係数	$\alpha$	1
・ステージ数	$m + 1$	1
平衡状態		
・送信確率	$\tau_N$	$\tau_C$
・失敗確率	$p_N$	$p_C$
利得関数	$U_N$	$U_C$

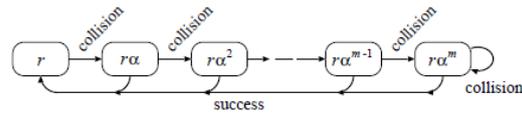


図1. パケット送信確率による一般ユーザの状態遷移

図 1 において、 $p_N$  は平衡状態における一般ユーザの失敗確率である。このとき、平衡状態における一般ユーザの平均送信確率  $\tau_N$  は、非線形方程式

$$\tau_N = \frac{r}{1 + (1 - \alpha) \sum_{i=1}^m \left(\frac{p_N}{\alpha}\right)^i} \quad (1)$$

$$p_N = 1 - (1 - \tau_N)^{N-1} (1 - \tau_C)^C \quad (2)$$

の解として求められる。このとき、次の命題を証明することができる。

[命題 1] 任意の  $\tau_C$  に対し ( $0 < \tau_C < 1$ )、非線形方程式(1)、(2)は区間(0,1)内に唯一の解をもつ。 ■

また、一般ユーザおよび利己的ユーザの戦略  $r$ 、 $\tau_C$  に対し、個々のユーザが得るスループット、すなわち、利得  $U_N$ 、 $U_C$  は、それぞれ、

$$U_N = \tau_N (1 - \tau_N)^{N-1} (1 - \tau_C)^C = \tau_N (1 - p_N)$$

$$U_C = \tau_C (1 - \tau_N)^N (1 - \tau_C)^{C-1} = \tau_C (1 - p_C)$$

で与えられる

② 一般ユーザの最適戦略

非協力アロハゲームにおけるナッシュ均衡を求めるためには、一般ユーザおよび利己的ユーザの最適戦略の存在を確認しなければならない。利己的ユーザの戦略  $\tau_C$  が与えられたとき、一般ユーザの利得  $U_N$  を最大にする戦略  $r$  に関し、次の命題を証明することができる。

[命題 2] 利己的ユーザの任意の戦略  $\tau_C$  に対し、一般ユーザの最適戦略  $r_{opt}$  は一意に

$$r_{\text{opt}} = \min \left[ 1, \frac{1}{N} g \left( 1 - \left( 1 - \frac{1}{N} \right)^{N-1} (1 - \tau_C)^C \right) \right]$$

ただし,

$$g(x) = 1 + (1 - \alpha) \sum_{i=1}^m \left( \frac{x}{\alpha} \right)^i$$

で与えられる. ■

### ③ 利己的ユーザの最適戦略

一般ユーザの戦略  $r$  が与えられたとき, 利己的ユーザの利得  $U_C$  を最大にする戦略  $\tau_C$  に関し, 次の予想を立てている(証明は未完).

[予想1] 一般ユーザの任意の戦略  $r$  に対し, 利己的ユーザの最適戦略  $\tau_{C,\text{opt}}$  は一意に決定される. ■

予想1を証明することができれば, 非協力アロハゲームのナッシュ均衡  $(r_{\text{opt}}, \tau_{C,\text{opt}})$  は一意であることを示すことができる.

### (3) 数値例

一般ユーザ数を  $N = 18$ , 利己的ユーザ数を  $C = 2$  とする. 一般ユーザのバックオフパラメータとして  $\alpha = 0.8$ ,  $m = 5$  に対する利得  $S_N$  および  $S_C$  を図2および図3に示す. 図2および図3より, 相手および自己の戦略に依存して, 利得は大きく変化している. すなわち, 自己の戦略を誤ると利得は激減することがわかる. この場合, 一般ユーザと利己的ユーザの間において, 不公正が生じることとなる. 公平性の評価尺度として広く用いられている Fairness Index を図4に示す. Fairness Index は0以上1以下の値をとり, 1に近いほど公平であることを表している.

一般ユーザの最適戦略および, 利己的ユーザの最適戦略を求めた結果を図5示す. 今回の数値例では, ナッシュ均衡は唯一である.  $N + C = 20$  と固定した状態で, 利己的ユーザ数  $C$  を増加させた場合の, ナッシュ均衡の遷移を図6に示す.  $\alpha \leq 0.5$  では, 利己的ユーザ数  $C$  に依存せず, 一般ユーザの最適戦略は  $r_{\text{opt}} = 1$  となる.

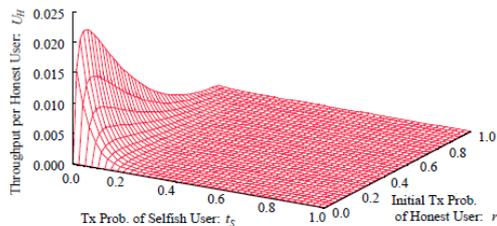


図2. 一般ユーザの利得 ( $N = 18$ ,  $C = 2$ ,  $\alpha = 0.8$ )

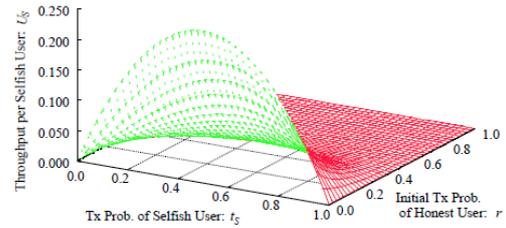


図3. 利己的ユーザの利得 ( $N = 18$ ,  $C = 2$ ,  $\alpha = 0.8$ )

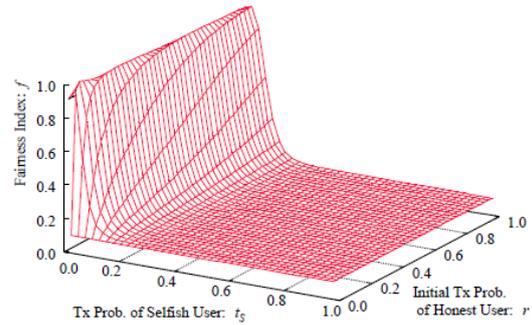


図4. Fairness Index ( $N = 18$ ,  $C = 2$ ,  $\alpha = 0.8$ )

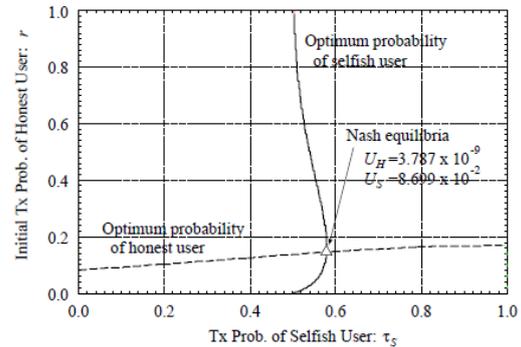


図5. 最適戦略とナッシュ均衡 ( $N = 18$ ,  $C = 2$ ,  $\alpha = 0.8$ )

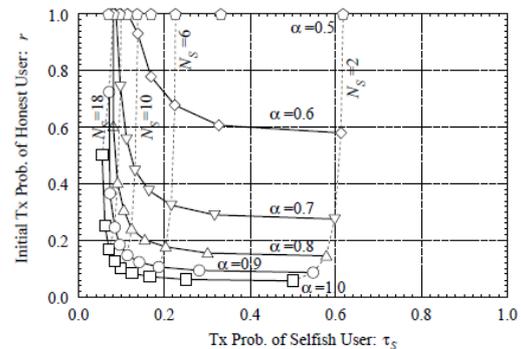


図6. ナッシュ均衡の遷移

#### (4) まとめと今後の課題

本研究ではスロット付アロハ方式に基づく、非協力アロハゲームを定義し、利己的ユーザの存在が一般ユーザの利得に与える影響について考察した。一般ユーザの最適戦略が一意であることを証明した。数値的ではあるが、ナッシュ均衡の存在が唯一であることを証明した。残された課題は予想1を示すことにより、次の予想を示すことである。

[予想 2] 非協力アロハゲームのナッシュ均衡は唯一である。 ■

また、本研究では、利己的ユーザおよび一般ユーザの人数が、全ユーザにおいて既知であるものと想定した。しかしながら、実際の環境を考慮した場合、この値が未知である場合への拡張を行わなければならない。

#### (5) 参考文献

- ① A.B.MacKenzie and S.B.Wicker, "Game theory and the design of self-configuring, adaptive wireless networks," IEEE Commun. Mag., vol.39, no.11, pp.126-131, Nov. 2001.
- ② M.Cagalj, S.Ganeriwal, I.Aad and J.P.Hubaux, "On selfish behavior in CSMA/CA networks," Proceedings of IEEE INFOCOM 2005, Miami, FL, Mar. 2005.
- ③ J.Konorski, "Solvability of a Markovian model of an IEEE 802.11 LAN under a backoff attack," Proceedings of IEEE MASCOTS 2005, Atlanta, GA, Sep. 2005.
- ④ J.Konorski, "A game-theoretic study of CSMA/CA under a backoff attack," IEEE/ACM Transactions on Networking, vol.14, no.6, pp.1167-1178, Dec. 2006.
- ⑤ Kumar, E.Altman, D.Miorandi and M.Goyal, "New insights from a fixed-point analysis of single cell IEEE 802.11 WLANs," IEEE/ACM Transactions on Networking, vol.15, no.3, pp.588-601, June 2007.
- ⑥ L.Chen and J.Leneutre, "Selfishness, not always a nightmare: Modeling selfish MAC behaviors in wireless ad hoc networks," Proceedings of IEEE ICDCS 2007, Toronto, Canada, June 2007.
- ⑦ P.Nuggehalli, M.Sarkar and R.R.Rao, "QoS and selfish users: A MAC layer perspective," Proceedings of IEEE GLOBECOM 2007, Washington, D.C., Nov. 2007.
- ⑧ L.Guang, C.M.Assi and A.Benslimane, "Enhancing IEEE 802.11 random backoff in selfish environments," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol.57, no.3,

pp.1806-1822, May 2008.

- ⑨ P.Marbach and R.Pang, "Transmission costs, selfish nodes, and protocol design," Wireless Networks, vol.14, no.5, pp.615-631, Oct. 2008.

#### 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 2 件)

- ① 榎原勝己, 武次潤平, 山北次郎, "On the uniqueness of Nash equilibrium in ALOHA games with group of selfish users," Proceedings of the International Conference on Information Networking (ICOIN2009), CD-ROM, 2009 年, 査読有り
- ② 榎原勝己, 小林洋平, 武次潤平, "Saturation throughput of IEEE 802.11 using carrier sense mechanism in backoff intervals," Proceedings of the 3rd IEEE International Symposium on Communications, Control, and Signal Processing (ISCCSP2008), CD-ROM, 2008 年, 査読有り

[学会発表] (計 6 件)

- ① 武次潤平, 糸島千都, 榎原勝己, "無線LANにおけるMACプロトコルの不正検出のためのバックオフ値測定法に関する一検討," 電子情報通信学会 2009 年総合大会, 2009 年 3 月, 松山
- ② 佐藤歩美, 榎原勝己, 武次潤平, "バックオフ時の搬送波検出機能を利用したIEEE 802.11 DCFの非飽和スループット," 第 10 回IEEE広島支部学生シンポジウム (HISS2008), 2008 年 11 月, 広島
- ③ 小林洋平, 榎原勝己, 武次潤平, "バックオフ期間における搬送波検出機能を利用したIEEE 802.11 DCFの解析," 平成 20 年度電気・情報関連学会中国支部連合大会, 2008 年 10 月, 鳥取
- ④ 小林洋平, 榎原勝己, 武次潤平, "バックオフ期間における搬送波検出機能を利用したIEEE 802.11 DCFの提案," 第 9 回IEEE広島支部学生シンポジウム (HISS2007), 2007 年 11 月, 鳥取
- ⑤ 小林洋平, 榎原勝己, 武次潤平, "バックオフ期間における搬送波検出機能を利用したIEEE 802.11 DCFの性能," 平成 19 年度電気・情報関連学会中国支部連合大会, 2007 年 10 月, 広島
- ⑥ 榎原勝己, 小林洋平, 武次潤平, 山北次郎, "バックオフ時の搬送波検出機能を利用したIEEE 802.11 DCFの改善に関する検討," 電子情報通信学会 2007 年ソサイエティ大会,

2007年9月, 鳥取

6. 研究組織

(1) 研究代表者

榑原 勝己 (SAKAKIBARA KATSUMI)  
岡山県立大学・情報工学部・教授  
研究者番号: 10235137

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

山北 次郎 (YAMAKITA JIRO)  
岡山県立大学・情報工学部・教授  
研究者番号: 20145816