

A bstract

無線通信には同一チャネル干渉やユーザ間の公平性といった課題があり、これらは主体間の相互作用に起因しているといえることができる。この相互作用を扱う理論として数学や経済学の分野で研究が進められてきたゲーム理論がある。このため、無線通信の周波数利用の効率化の観点から、無線リソース制御をはじめとする制御や無線通信システムの性能解析へのゲーム理論の応用が行われている。本稿ではゲーム理論と最適化理論の相違を明確にしつつ、ゲーム理論の基本である戦略形ゲームと交渉ゲーム、それらの解概念であるナッシュ均衡とナッシュ交渉解について説明するとともに、無線通信分野への応用例を示し、ゲーム理論全般の応用について研究動向を紹介する。

キーワード：ゲーム理論、無線通信、リソース制御、公平性

1. はじめに

無線通信においては電波の同報性ゆえに、同一周波数で同時に異なる複数の信号を送ると、受信局において単純には同一チャネル干渉を生じる。この同一チャネル干渉は無線通信の間の相互作用と捉えることができる。また、複数ユーザが存在する無線通信システムにおいて、全ユーザのスループットの和で定義されるシステムスループットなどシステム全体としての特性を上げようとする場合、単純には効率の低いユーザを受け付けないという手段があり得る。しかし、これはユーザ間の公平性を低下させる。このような議論が発生する一因も、複数ユーザの性能の間に存在する相互作用である。

このような相互作用——特に複数の意思決定主体の間に存在する相互作用——がある状況における意思決定を扱う数学理論として、ゲーム理論^{(1), (2)}がある。このため、ゲーム理論の無線通信への応用が検討されている^{(3), (4)}。

一言で相互作用といっても、様々な形態の相互作用、様々な状況における相互作用が考えられる。このため、

ゲーム理論は多くの細分化された課題を扱う理論の集合体であり、全体像をつかむのは難しいと感じる方も多いと思う。しかし、例えば非協力ゲーム理論においては、戦略形ゲームと呼ばれる一番基本となるゲームを理解していさえいけば、そこから何が違うのかを考えることで他のゲームの位置付けを理解することが可能である。

また、ゲーム理論の文献は多数あるが、ゲーム理論特有の表現が多く、本会誌の読者の多くには敷居が高い表現が多いように感じられる。一方、本会誌の読者は、ゲーム理論は知らないとしても、最適化理論は知っている方が多いと考えられる。そこで、最適化理論と対比させる形でゲーム理論の基礎である戦略形ゲームと交渉ゲームの概要を説明し、無線通信への応用と研究動向を述べる。

2. 非協力ゲーム理論

ゲーム理論は非協力ゲーム理論と協力ゲーム理論に大きく分けることができる。非協力ゲーム理論では、意思決定主体は独立しており、その際に社会全体でどのような行動の分布になるのかを検討する。これに対し協力ゲーム理論では、複数の意思決定主体がグループを組むことが可能と考え、その際にグループが得る利得の各主体への配分を検討する⁽⁵⁾。本章では非協力ゲーム理論の基礎である戦略形ゲームと、その解概念であるナッシュ均衡について述べる。

山本高至 正員：シニア会員 京都大学大学院情報学研究所通信情報システム専攻
E-mail kyamamot@i.kyoto-u.ac.jp
Koji YAMAMOTO, Senior Member (Graduate School of Informatics, Kyoto University, Kyoto-shi, 606-8501 Japan).
電子情報通信学会誌 Vol.95 No.12 pp.1089-1093 2012年12月
©電子情報通信学会 2012

2.1 戦略形ゲームとは何か

最適化理論とは最適化問題を議論するための数学理論である。最適化問題は例えば式(1)により表される。

$$\max_{(x_1, x_2)} f(x_1, x_2) \quad (1)$$

これは、目的関数 f が最大となる変数 x_1, x_2 、並びにその際の目的関数 f の値を求める問題である。

同様に、ゲーム理論はゲームというものを議論するための数学理論である。非協力ゲームの中で最も基本的な戦略形二人ゲームと呼ばれるゲームは、最適化問題(1)の表現を用いれば式(2)で表される。

$$\begin{cases} \max_{x_1} f_1(x_1, x_2) \\ \max_{x_2} f_2(x_1, x_2) \end{cases} \quad (2)$$

式(2)の表現は必ずしも一般的ではないが、この表現を用いることで最適化問題とゲームの相違を明確に捉えることができる。

大きな違いは、戦略形二人ゲームでは、最適化問題にない相互作用が表現できている点である。式(2)における二つの最適化問題は、二人のプレーヤと呼ばれる意思決定主体の行動に対応している。プレーヤ1は目的関数 f_1 が最大となるよう x_1 のみを変更可能である。プレーヤ2も同様である。ここで、 f_1 を最大化する x_1 の値により、もう一つの目的関数 f_2 の値や、 f_2 を最大にする x_2 の値が変わる。そしてその x_2 の値によって f_1 の値や f_1 を最大にする x_1 の値が更に変わる。このような相互作用を戦略形二人ゲームという表現形態を用いることで定式化することができる。

以上では最適化理論の用語を用いてゲームを説明したが、ゲーム理論においては表1のとおり最適化理論とは別の用語を慣例的に用いる。以下では変数、目的関数の

表1 最適化理論とゲーム理論における用語の対比

最適化理論における用語	ゲーム理論における用語
最適化問題 (対応する用語は存在しない)	ゲーム
変数	プレーヤ
変数の制約条件	戦略
目的関数	戦略空間 利得関数

表2 戦略形二人ゲームの例 各要素は $f_1(x_1, x_2), f_2(x_1, x_2)$ の値を表す。

		x_2		
		X	Y	Z
x_1	A	7, 6	1, 7	2, 3
	B	4, 2	3, 5	6, 2
	C	2, 1	1, 3	2, 1

代わりに戦略、利得関数という言葉を用いる。

戦略が離散的なインデックスの場合には、例えば表2により戦略形二人ゲームに必要な情報を全て書き出すことができる。この表の各要素は $f_1(x_1, x_2), f_2(x_1, x_2)$ を表しており、例えば左上の“7, 6”は $f_1(A, X), f_2(A, X)$ の値を表している。この表で表される戦略形二人ゲームについては次節で引き続き説明する。

2.2 ナッシュ均衡

戦略形ゲームの解概念は、ナッシュ均衡と呼ばれるものである。ナッシュ均衡は、「各プレーヤは自分の戦略のみを変更することでは自分の利得関数をそれ以上上げられない戦略の組合せ」として定義される。

表2により定義されるゲームのナッシュ均衡を、図1を用いて説明する。この図では、各プレーヤの戦略の変更により利得関数を変化できる方向のみ線をつないでおり、 f_1 はプレーヤ1が x_1 を変化させることで意図的に変化できるため x_1 方向に線を結んでいるが、 f_2 は直接変化させることができないため x_2 方向には結んでいない。

図1におけるナッシュ均衡は、結論から述べると、 $(x_1, x_2) = (B, Y)$ という1点のみである。これは f_1 を結ぶ線と f_2 を結ぶ線の両方が最大となる点であり、そのような点は他には存在しない。この点ではいずれのプレーヤも自分のみが戦略を変更する限りにおいては利得を上げることができない。

まず点 $(x_1, x_2) = (A, X)$ を考える。この点は、ナッシュ均衡ではない。これは、プレーヤ2は戦略を $x_2 = X$ から $x_2 = Y$ に変化させることで自分の利得 f_2 を増加させられるためである。変化させた点 $(x_1, x_2) = (A, Y)$ もナッシュ均衡ではない。今度はプレーヤ1が戦略を $x_1 = A$ から $x_1 = B$ に変化させることで利得 f_1 を増加させられるためである。

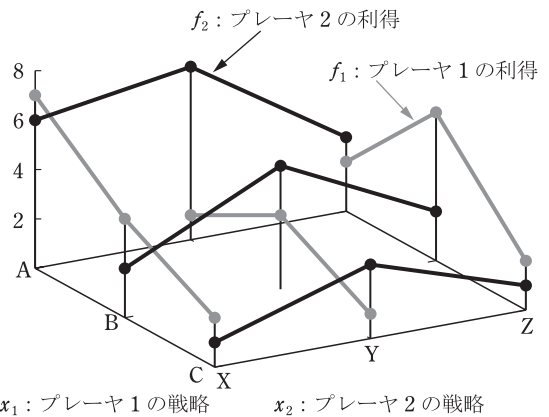


図1 表2におけるナッシュ均衡の視覚的理解 $(x_1, x_2) = (B, Y)$ が唯一のナッシュ均衡である。この点以外で少なくとも片方のプレーヤは利得を上げる別の戦略を有する。

更に変化させた点 $(x_1, x_2) = (B, Y)$ が先に述べたとおり ナッシュ均衡である。ただし、最初の点 $(x_1, x_2) = (A, X)$ に対し、ナッシュ均衡 $(x_1, x_2) = (B, Y)$ においてはどちらのプレーヤの利得も低い。ゲームによってはナッシュ均衡が全体最適となる場合もあるが、このゲームのようにそうならない場合もある。

2.3 無線通信への応用

式(2)の形に定式化できる無線通信の制御であれば、非協力ゲーム理論を用いて議論することができる。相互作用を起し得る代表的な自由度としては、送信電力、アンテナ指向性、周波数チャネル、接続先基地局などがある。

非協力ゲーム理論を用いた研究は大きく二つに分類できる。一つは、ゲーム理論を用いた性能解析であり、集中制御と分散制御の特性比較や収束性の評価がなされる。もう一つは、ナッシュ均衡に到達する具体的な適応制御アルゴリズムの検討である。

ゲーム理論を用いた性能解析の際に、分散制御の性能を評価する尺度として PoA (Price of Anarchy)⁽⁶⁾ がある。これは、集中制御と分散制御の利得和の比で定義される。この際、集中制御は全ての可能性のうちで利得和が最大のもの、分散制御の性能はナッシュ均衡のうちで利得和が最小のものとする。PoA が大きいことは、集中制御から分散制御に変えることで、特性が大きく下がり得ることを意味する。

一方、ゲームの形になる適応制御アルゴリズムとして初期のものに、CDMA セルラ上り回線における送信電力制御⁽⁷⁾がある。送信電力制御の定式化としては、送信局をプレーヤ、送信電力を戦略とすることは共通であり、利得関数の設計に自由度がある。

利得関数を単純に受信信号対干渉雑音電力比 (SINR)、あるいは受信 SINR に対して単調増加するスループットや通信路容量とすると、ナッシュ均衡は全ての送信局が最大電力を用いることとなる。これは、自局の送信電力のみを変化させられる場合には、送信電力を下げると受信 SINR は下がるだけであり、利得関数を大きくする意味では送信電力を下げるという動機を持たないためである。このため、利得関数として送信電力などのコストを差し引いたものがよく用いられる。

3. 協力ゲーム理論

協力ゲーム理論は主に提携形ゲームを扱うことが多いが、本章では無線通信との関連が深い交渉ゲームと、その解概念であるナッシュ交渉解について述べる。

3.1 交渉ゲームとは何か

式(1)のように目的関数が一つである最適化問題は、

特に単目的最適化問題と呼ばれる。これに対して、式(3)のように目的関数が複数あるものを多目的最適化問題と呼ぶ⁽⁸⁾。

$$\max_{(x_1, x_2)} (f_1(x_1, x_2), f_2(x_1, x_2)) \quad (3)$$

図2を用いて説明する。変数 x_1 と x_2 を変えることで、二つの目的関数 f_1 と f_2 の取り得る値の組合せが図2の三角形 ABO の内側になるとする。多目的最適化においては、解はパレートフロンティアと呼ばれるもので、片方の目的関数の値を下げることなくもう片方の目的関数の値を上げられない点の集合により定義される。図2におけるパレートフロンティアは、線分 AB である。

交渉ゲームは、多目的最適化の解であるパレートフロンティアの中で、全主体が納得する1点の妥結点を選ぶルールを議論する。一般に交渉ゲームは、三角形 ABO のような交渉の実現可能集合と、交渉が決裂した場合の利得を意味する交渉の不一致点の利得 $(f_1, f_2) = (f_1^{\min}, f_2^{\min})$ により定義され、変数 x_1, x_2 を必ずしも意識せずに議論する。

3.2 ナッシュ交渉解

交渉ゲームの解として代表的なものにナッシュ交渉解がある。ナッシュ交渉解とは、次式のように不一致点からの利得の増分の積を最大とする点を妥結点とするものである。

$$\max_{(f_1, f_2)} (f_1 - f_1^{\min})(f_2 - f_2^{\min}) \quad (4)$$

図2においては、双曲線とパレートフロンティアとの接点 C がナッシュ交渉解における妥結点となる。

ナッシュ交渉解には、交渉の不一致点より大きい利得が得られるほか、利得の尺度を変えたとしても唯一の妥結点を得られるなどの性質があり、よく用いられる。

このほか、 $f_1 - f_1^{\min}$ と $f_2 - f_2^{\min}$ の和を最大とする功

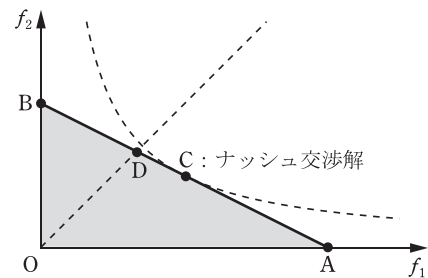


図2 交渉ゲームの例 ABO を交渉の実現可能領域、O を交渉の不一致点とする交渉ゲームにおいては、パレートフロンティア AB と双曲線との接点 C、傾き 45 度の直線との交点 D、点 A が、それぞれナッシュ交渉解、均等解、功利主義的解による妥結点となる。

利主義的解や、小さい方を最大とする均等解が知られている⁽⁹⁾。図2においては功利主義的解による妥結点は点Aであり、均等解による妥結点は傾き45度の直線とパレートフロンティアとの交点Dである。功利主義的解は妥結点を1点に定められないことがあり、均等解による妥結点はパレート最適でないことがある。これらも、ナッシュ交渉解が交渉ゲームの解としてよく用いられる理由である。

3.3 無線通信への応用

例として、単一チャネルを用いる2ユーザに対する集中制御的な時間スケジューリングを考える。ユーザ1と2の伝送速度をそれぞれ10 Mbit/s, 1 Mbit/sとし、割り当てる時間割合をそれぞれ t , $1-t$ ($0 \leq t \leq 1$)とすると、スループットはそれぞれ $10t$ Mbit/s, $(1-t)$ Mbit/sとなる。これは図2の線分ABに対応する。スケジューリングの尺度を決めることは、全ユーザのスループットの実現可能集合において動作点を決めるという問題である。そして、この問題設定は交渉ゲームと同じである。

個々の無線通信ではなく、複数の無線通信からなる無線通信システムの評価指標として、スループットの和であるシステムスループットがある。システムスループットが最大となる動作点は功利主義的解による妥結点に対応する。

この例においてシステムスループットを最大とするには、ユーザ1のみに全時間を割り当て、ユーザ2には割り当てなければよい。しかし、ユーザ間の公平性が大きく損なわれる。

比例公平性 (proportional fairness)⁽¹⁰⁾ という通信で頻繁に用いられる公平性の尺度が最大となる動作点は、ナッシュ交渉解の妥結点を求める式(4)において $f_1^{\min} = f_2^{\min} = 0$ の場合、すなわち単に利得関数の積を最大とすることと等価となることが知られている⁽¹¹⁾。例においてスループットの積が最大となるのは $t=1/2$ の場合であり、各ユーザの伝送速度には依存せずに決まる。これはいわゆる機会の公平性に対応している。時変チャネルにおいては、比例公平スケジューリング (proportional fair scheduling)⁽¹²⁾によりこの動作点を実現できる。

一方でmax-min公平性と呼ばれる公平性の指標が最大となる動作点は、交渉ゲームで交渉の基準点を原点とした際の均等解による妥結点に対応している。これはいわゆる結果の公平性に対応しており、伝送速度に反比例する時間を割り当てられれば、2ユーザのスループットを等しくすることができ、この指標を満たす。

4. 研究動向と今後の展開

ゲーム理論の無線通信への応用に関しては多くの研究

が既にある⁽⁴⁾。個人的な意見としては、様々なゲームを広く無線通信に適用することが研究になるフェーズから、その中で有望なアプローチについて深く掘り下げるフェーズに移りつつあるように感じている。

有望なアプローチとして、ポテンシャルゲーム、スーパモジュラゲームなどよく使われるゲームがあり、これらのゲームの条件を満たすような目的関数の設計が行われる⁽⁴⁾。ポテンシャルゲームの応用としてチャネル割当⁽¹³⁾がある。複数の周波数チャネルから一つを選択する際に、利得関数を被干渉電力と干渉電力の和と設定した戦略形ゲームは、ポテンシャルゲームという特殊なゲームの条件を満たす。ポテンシャルゲームにおいてはナッシュ均衡の存在が保証され、特にチャネル割当のように戦略が離散的なインデックスで有限である場合には、有限回数でナッシュ均衡に収束するアルゴリズムの存在が保証される。

また、マクロセルとピコセル・フェムトセルが混在するヘテロジニアスネットワークや、プライマリユーザとセカンダリユーザのような主従があるコグニティブ無線においては、シュタッケルベルクゲーム⁽¹⁾がよく使われる^{(4), (14), (15)}。シュタッケルベルクゲームは、複占市場において先に自社製品の価格を決定する先導企業と、その情報を知った上で価格を設定する追随企業が存在する状況のモデルである。

他には、ゲーム理論が無線通信以外の分野に応用されて発展したものを、更に無線通信に応用することが考えられる。ゲーム理論の経済学における応用として、メカニズムデザインがある⁽¹⁶⁾。これは、オークションのルールを議論するオークション理論⁽¹⁷⁾や、学校選択制などに実際に用いられているマッチング理論⁽¹⁸⁾などを含むものである。オークションやマッチングの仕組みによっては、自分の希望、すなわち自分の落札したい金額や、行きたい学校ではないものを提示する方が最終的に自分の希望に近くなることがある。このような行動を戦略的行動と呼ぶ。メカニズムデザインの目的の一つは、戦略的行動を排除する仕組みを構築し、自分の希望をそのまま提示することが最善のメカニズムの構築を目指している。

5. おわりに

筆者がゲーム理論の応用に取り組んできた理由は二つある。一つは、先に述べたとおり、相互作用を表現できる数学理論として有用であるためである。もう一つは、無線通信だけでなく、経済学、政治科学においても用いられるため、これらを総合して議論でき、通信に限らず社会インフラの構築に役立つ可能性があるためである。実際に普及する無線システムはその技術的優位性のみによるわけではなく、経済原理にも左右される。また、新

たな技術が生まれたとしても、電波法など法律の改正が必要かもしれない。これらを統一的に議論し、将来の社会を構築する基礎理論の構築ができればよいと考えている。

また、ゲーム理論の枠組みは、研究に限らず様々な事柄を把握したり、有効な解を見いだす上で非常に有益である。例えば戦略形ゲームの構成要素は、プレーヤ、戦略、利得の三つのみと非常にシンプルなものであった。日常生活において何か問題が起こったり、何か行動を起こすべきときには、まず現状のプレーヤ、戦略、利得を考え、ナッシュ均衡がどこにあるかを考えてみるとよい。例えば一見受け入れがたい行動をとっている人がいるとしても、それはその人の置かれているゲームにおけるナッシュ均衡に陥っているだけであると捉えれば、状況を把握することができる。また、他人の行動を本当に変えたいならば、プレーヤ、戦略、利得のいずれかを変えることでゲームを変え、ナッシュ均衡を自分の受け入れやすい方向に移動させてやればよい。このためには、単に文献などによる座学だけでなく、日常生活に当てはめて考えるという行動を起こすことが大切である。

文 献

- (1) 岡田 章, ゲーム理論新版, 有斐閣, 東京, 2011.
- (2) 武藤滋夫, “ゲーム理論,” 信学誌, vol. 90, no. 1, pp. 58-59, Jan. 2007.
- (3) 無線分散ネットワーク, 三瓶政一, 阪口 啓(編), 電子情報通信学会, 東京 2011.
- (4) Z. Han, D. Niyato, W. Saad, T. Basar, and A. Hjørungnes, Game Theory in Wireless and Communication Networks : Theory, Models, and Applications, Cambridge Univ. Pr., 2011.
- (5) グレーヴァ香子, 非協力ゲーム理論, 知泉書館, 東京, 2011.
- (6) N. Nisan, T. Roughgarden, E. Tardos, and V.V. Vazirani, Algorithmic Game Theory, Cambridge Univ. Pr., 2007.

- (7) C. Saraydar, N. Mandayam, and D. Goodman, “Efficient power control via pricing in wireless data networks,” IEEE Trans. Commun., vol. 50, no. 2, pp. 291-303, Feb. 2002.
- (8) 中山弘隆, 谷野哲三, 多目的計画法の理論と応用, コロナ社, 東京, 1994.
- (9) 鈴木光男, 新ゲーム理論, 勁草書房, 東京, 1994.
- (10) F.P. Kelly, A.K. Maulloo, and D.K.H. Tan, “Rate control for communication networks : Shadow prices, proportional fairness and stability,” J. Oper. Res. Soc., vol. 49, no. 3, pp. 237-252, March 1998.
- (11) Z. Han, Z. Ji, and K.J.R. Liu, “Fair multiuser channel allocation for OFDMA networks using Nash bargaining solutions and coalitions,” IEEE Trans. Commun., vol. 53, no. 8, pp. 1366-1376, Aug. 2005.
- (12) P. Viswanath, D.N.C. Tse, and R. Laroia, “Opportunistic beamforming using dumb antennas,” IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 48, no. 6, pp. 1277-1294, June 2002.
- (13) N. Nie and C. Comaniciu, “Adaptive channel allocation spectrum etiquette for cognitive radio networks,” Mobile Netw. Appl., vol. 11, no. 6, pp. 779-797, Dec. 2006.
- (14) D. Niyato and E. Hossain, “Integration of WiMAX and WiFi : Optimal pricing for bandwidth sharing,” IEEE Commun. Mag., vol. 45, no. 5, pp. 140-146, May 2007.
- (15) O. Simeone, I. Stanojev, S. Savazzi, Y. B.-Ness, U. Spagnolini, and R. Pickholtz, “Spectrum leasing to cooperating secondary ad hoc networks,” IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 26, no. 1, pp. 203-213, Jan. 2008.
- (16) 坂井豊貴, 藤中裕二, 若山琢磨, メカニズムデザイン—資源配分制度の設計とインセンティブ, ミネルヴァ書房, 京都, 2008.
- (17) 横尾 真, オークション理論の基礎—ゲーム理論と情報科学の先端領域, 東京電機大学出版局, 東京, 2006.
- (18) 安田洋祐, 学校選択制のデザイン—ゲーム理論アプローチ, エヌティティ出版, 東京, 2010.

(平成 24 年 6 月 1 日受付 平成 24 年 7 月 3 日最終受付)



やまもと こうじ
山本 高至 (正員: シニア会員)

平 14 京大・工・電気電子卒, 平 17 同大学院情報学研究所博士課程了。同年同大学院助手。平 23 同准教授。平 20~21 スウェーデン王立工科大客員研究員。博士(情報学)。M2M 無線ネットワーク, ゲーム理論の応用に関する研究に従事。本会平 19 年度学術奨励賞, 平 22 年度論文賞各受賞。