

# 進化ゲームを用いたMVNO市場ダイナミクス分析

上山 憲昭<sup>†</sup> 中尾 彰宏<sup>††</sup>

<sup>†</sup> 福岡大学工学部電子情報工学科

hskip1zw 〒 814-0180 福岡市城南区七隈 8-19-1

<sup>††</sup> 東京大学大学院 情報学環・学際情報学府 〒 113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1

E-mail: <sup>†</sup>kamiyama@fukuoka-u.ac.jp, <sup>††</sup>nakao@nakao-lab.org

あらまし 移動通信事業者 (MNO: mobile network operator) の通信設備を借りて移動通信サービスを提供する仮想移動通信事業者 (MVNO: mobile virtual network operator) の出現は、利用者にとっての移動通信サービスの選択肢を多様化し、マーケットの拡大に寄与している。一方で MNO や MVNO との間での利用者獲得の競争が激化し、MVNO は様々なサービスプランを開発することで利用者獲得数の増加を図っている。例えば、動画などを提供する特定のコンテンツ事業者 (CP: content provider) のコンテンツ配信によって生じるトラフィックを課金対象外とするゼロレーティング (ZR: zero rating) が一部の MVNO によって提供されている。しかし ZR は特定の事業者のトラフィックを他のトラフィックと差別化するためネットワーク中立性に抵触する恐れがあり、一部の国では ZR が規制されている。しかし ZR に対する規制を含めた望ましい制度設計を明らかにするには、サービスを楽しむユーザが ZR により被る影響を分析する必要がある。そこで本稿では、まず日本の代表的な MVNO の料金プランを分析し、ZR MVNO の価格設定戦略を明らかにする。さらに戦略分布で表現される社会状態の変化を分析可能な動学的な理論体系である進化ゲームを用いて、低価格と ZR のいずれかの戦略を用いる MVNO の市場ダイナミクスをモデル化する。そして均衡状態ではいずれか 1 つの戦略を用いる MVNO で市場が独占され多数のユーザのコストが増加すること、ZR で恩恵を受けないユーザに対するサービスプランの導入が ZR MVNO に求められることを明らかにする。

キーワード MVNO, ゼロレーティング, 進化ゲーム

## Analyzing Dynamics of MVNO Market Using Evolutionary Game Theory

Noriaki KAMIYAMA<sup>†</sup> and Akihiro NAKAO<sup>††</sup>

<sup>†</sup> Faculty of Engineering, Fukuoka University

8-19-1, Nanakuma, Jonan-ku Fukuoka, 814-0180 Japan

<sup>††</sup> The University of Tokyo 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033

E-mail: <sup>†</sup>kamiyama@fukuoka-u.ac.jp, <sup>††</sup>nakao@nakao-lab.org

**Abstract** Existence of mobile virtual network operators (MVNOs) which provide mobile network services to end users by leasing the bandwidth of wireless access networks has diversified the market of mobile network for end users and has contributed to enlarge the market of mobile networks. To attract users and increase the number of subscribers, MVNOs introduce various service plans, e.g., zero rating (ZR) which exempts traffic of specific content providers (CPs) from usage-based charging. However, ZR differentiates traffic of specific CPs from those of other CPs, so ZR might violate the principle of network neutrality, and some countries prohibit ZR. However, to clarify the desirable rules for ZR, we need to analyze the influence of ZR on end users. In this paper, we investigate the charging strategy of ZR MVNOs by analyzing the charging plans of major MVNOs in Japan, and we model the dynamics of MVNO market consisting of low-price MVNOs and ZR MVNOs by using the evolutionary game theory which can model the dynamics of social environment described by strategic distribution. We show that the MVNO market will be dominated by MVNOs using a homogeneous strategy, and the monthly fee of a part of users will increase at the steady state. Therefore, we conclude that ZR MVNOs will be required to introduce a service plan for users who do not benefit from ZR.

**Key words** MVNO, zero rating, evolutionary game theory

### 1. はじめに

スマートフォンなどの移動端末に対し、広範囲に無線接続サービスを提供する移動通信ネットワーク (NW) サービスは、世界の多くの国でライフラインとして広く普及している。無線基地局やそれらを結ぶ有線の NW などの NW 設備を保有し移動通信 NW サービスを提供する MNO (mobile network operator) に加え、MNO から無線帯域を借りてエンドユーザに対し移動

通信 NW サービスを提供する MVNO (mobile virtual network operator) が、多くの国でサービスを提供している [6]。例えば日本国内では 2018 年 6 月末時点で、契約者数が 3 万人以上の MVNO が 58 存在し、移動系通信全体の契約者数の MVNO 契約者の占める割合は 10%程度で、MVNO 契約者数の増加傾向が続いている [8]。

MNO は著名で規模の大きな企業であるのに対し、MVNO の多くは中小規模の企業であることから、ユーザを獲得するための様々な差別化戦略が用いられる。代表的な差別化戦略として

は、安い料金でサービスを提供する Cost Leadership, 独自コンテンツの提供などの付加価値を与える Differentiation, 若年層といった一部のユーザにフォーカスし訴求効果の高いプランを提供する Segmentation などが挙げられる [6]. しかし近年, YouTube や Google Play Music といった特定のコンテンツの配信によって生じるトラフィックを課金対象外とするゼロレーティング (ZR: zero rating) が新しい差別化戦略として一部の MNO や MVNO によって提供されている [12]. 多くの MNO や MVNO はユーザに対する課金方式として, 月間の送受信トラフィック量が一定の上限値までは一定の料金を徴収し, 上限値を超過した場合には超過トラフィック量に比例する従量課金を用いている [13]. しかし ZR を採用する MVNO の場合, ZR 対象コンテンツの送受信により発生するトラフィックは月間の送受信トラフィック量から除外されるため, 特に ZR 対象コンテンツを多く視聴するユーザに対し訴求力の高い差別化戦略となる.

しかし ZR は特定のコンテンツのみを課金対象外とすることから, インターネットは公共性の高い NW でありコンテンツを差別化すべきではないとする NW 中立性 [11] に抵触するという指摘もなされており, 実際, チリやインドでは政府が MNO や MVNO の ZR を禁止している [1]. ZR を規制する主な理由は, MNO や MVNO が有力 CP のコンテンツを無償で配信する結果, ZR 対象以外の CP のコンテンツをユーザが視聴する機会が減少し, 中小の CP や新規に市場に参入する CP が収益を得ることが難しくなり, イノベーションが生まれにくくなることである [1]. しかし多くの国の政府は, ZR は NW 事業者, CP, ユーザにとってメリットが大きく, MNO や MVNO による ZR をサポートもしくは静観する立場をとっている. 米国の FCC は MNO や MVNO の間で十分な競争環境が維持されていれば ZR は認めるべきであり, ZR 対象外の CP のコンテンツをブロックすることや, 特定のアプリケーションにユーザをロックインさせるなど問題がある ZR のみを規制すべきとの立場をとっている [1].

ZR を MVNO の差別化戦略として規制すべきか否か, もししくは何等かの部分的な規制を導入すべきかについては, 最終的にサービスを受けるユーザが被る利益・不利益に基づき判断することが望ましい. そのためには多数の MVNO が存在する競争環境において, ZR が移動通信 NW 市場の構造に与える影響を明らかにする必要がある. しかしこれまでに多数の MVNO が存在する状況で実現される状態をモデル化・分析した研究は見られない. そこで本稿では, まず日本の代表的な MVNO の料金プランを分析し, ZR MVNO の価格設定戦略を明らかにする. そして MVNO の差別化戦略として低価格 (LP: low price) 戦略と ZR 戦略の二つを考え, これらのどちらかを用いる MVNO が多数存在する環境を, 各戦略を用いるプレイヤー数の動的な変化を分析可能な進化ゲーム理論を用いてモデル化する. そして得られた MVNO 数に関する微分方程式を数値解析法で解くことで, 長時間経過したときに, どちらか一方の差別化戦略を用いる MVNO のみで市場が構成されることと, 各々の差別化戦略が支配的となる条件を明らかにする. また, どちらか一方の差別化戦略を用いる MVNO のみで市場が独占された状態では, 一部のユーザが不利益を被ることを明らかにする. そして ZR の恩恵を受けないユーザに対し低価格のプランを用意するなど, ユーザの便益を損なわないための ZR の在り方について提言する.

## 2. 関連研究

Debbah らは 1 つの MNO と 1 つの MVNO が存在する環境において, MNO のブランド力と MVNO の付加価値が各事業者のユーザシェアに与える影響を分析している [3]. しかしブランド重視と付加価値重視の 2 つのセグメントから構成されたユーザ集団を考え, 各事業者の料金とブランドと付加価値に対する各々のユーザ感度が固定的に与えられることを想定し, MNO・MVNO・ユーザ間の相互作用を分析していない. また Zheng らは複数の ISP から NW 資源を借りて仮想的に移動無線 NW を提供する cross-carrier (cc) MVNO のユーザに対する最適従量課金パラメタの設定法と, ISP のユーザと cc MVNO に対する最適従量課金パラメタの設定法を, 単一の

cc MVNO と複数の ISP を考慮して導出している [14]. しかしユーザの cc MVNO の使用確率を料金とは無関係に固定値で与え, cc MVNO と ISP との相互作用を分析していない.

MNO と MVNO との相互作用を考慮した分析としては, Cadre ら, Meidanis ら, Guijarro らの研究が見られる [2] [4] [7]. Cadre らは MNO と MVNO が各々一つ存在する環境で MVNO の差別化戦略として独自コンテンツを想定し, MNO の無線資源割当と MVNO の卸価格と, MNO と MVNO のユーザへの料金を最適設計する問題を対象としている. MNO の無線資源の配分比率決定, MVNO のコンテンツ投資額とユーザに対する料金決定, ユーザの契約先決定, の 3 ステージのスタックベルグゲームでモデル化することで, これら事業者間の相互作用を考慮した分析を行っている [2]. また Guijarro らは単一の MNO と MVNO との間のユーザ獲得競争を, MNO の MVNO に対する無線帯域の卸価格の決定, MNO と MVNO のユーザに対する料金の決定, ユーザの契約事業者の決定, の 3 ステージから構成されるスタックベルグゲームでモデル化し, 逆向き推論で均衡解を導出している [4]. さらに Meidanis らはユーザの支払い意志額を考慮し, やはり単一の MNO と MVNO が存在する場合に, 最初に MNO が料金を決定し, 次に MVNO が料金を決定する 2 ステージの展開型ゲームでモデル化し, ユーザの支払い意志額に関する情報を MNO と MVNO が活用することで両事業者の利益が増加する度合いを分析している [7].

これら既存研究は, プレイヤ間の関係を静的なモデルでモデル化し, 静的なナッシュ均衡解を導出する古典的な非協力ゲーム理論を用いている. しかし非協力ゲーム理論はプレイヤーが多数存在する状況ではナッシュ均衡解の導出が困難なことから, 既存研究は単一の MNO と MVNO のみを考慮しており, MVNO が多数, 存在する環境の分析はなされていない. また非協力ゲーム理論は, 各プレイヤーが自身と他の全てのプレイヤーの戦略集合と, 各戦略組に対する効用値が全て既知である完備情報を仮定しているが, 多数の MVNO が存在する環境では完備情報の想定は困難である.

## 3. 進化ゲームによる MVNO 市場ダイナミクスのモデル化

### 3.1 進化ゲーム

#### 3.1.1 進化ゲームの分類

完備情報の想定を行わないで, より現実的な方法で社会・経済現象をモデル化する新しいゲーム理論として進化ゲームが知られている. 進化ゲームはプレイヤーの出生死滅過程で集団中の戦略分布が時間の経過に伴い変化する動学的な体系であり, プレイヤーの出生死滅や学習を仮定することで集団中の戦略分布の変化を明示的に微分方程式により記述する [10]. 古典的な非協力ゲームでは複数のナッシュ均衡が存在し, どのナッシュ均衡が成立するかは不明であることが多い. しかし進化ゲームを用いることで, ある初期状態から出発したときにどのようなナッシュ均衡に収束しやすいかや, あるナッシュ均衡に収束するにはどのような初期状態や条件が必要かを分析することが可能となる. 進化ゲームには様々なバリエーションがあり, 二人のプレイヤーのみが繰り返しゲームを行う非集団モデルと, 多数のプレイヤーが存在しランダムに選択したプレイヤー同士でゲームを行う集団モデルがある. またプレイヤーの立場による違いがなく全員が同じ戦略集合・利得行列をもつ対称ゲームと, プレイヤーが立場によって複数のグループに分類され各グループからランダムに選ばれたプレイヤーどうしがゲームを行う非対称ゲームがある. さらに集団モデルを対象にプレイヤーの出生死滅を通して各戦略を用いるプレイヤーの割合の変化を分析するレプリケータ・ダイナミクスと, 同じプレイヤー集合が多数回のゲームを反復することで望ましい戦略を学習していくプロセスを分析する学習ダイナミクスがある.

#### 3.1.2 レプリケータ・ダイナミクス

レプリケータ・ダイナミクスでは, 集団中の個体は単位時間にある確率でランダムに選択した相手と対戦し, 利得から決まる数の子孫を残し自身は死亡すると考える. そして各戦略の適

応度をその戦略を用いた場合の子供の数の期待値と定義し、期待値の基準値からの増減を戦略の利得と定義する。親と子の戦略は同じとし、各戦略を用いる個体の数の微小時間  $\delta t$  の間の変化量に関する微分方程式を構築し解くことで、収束点の安定性や初期状態に応じて到達する収束点を導出する [10]。

最も基本的な形式は2つの戦略 A と B が存在し、2つのプレイヤー集合のみを考える場合である。ランダム選ばれた2人のプレイヤーが属する集団(用いる戦略)が  $i$  と  $j$  のとき、これら2人のプレイヤー間の戦闘後の各戦略グループの個体数の増減率を利得  $g_{ij}$  と定義する。すなわち  $g_{ij}$  は戦略集団  $i$  に属するプレイヤーが戦略集団  $j$  に属するプレイヤーと対戦した後に期待される戦略集団  $i$  のプレイヤー数の増減率である。戦略 A を用いるプレイヤーのシェア(比率)が  $x$  のとき、プレイヤー集合 A のプレイヤーが戦略 A もしくは B を用いるプレイヤーと対戦する確率は各々  $x$  と  $1-x$  であるため、プレイヤー集合 A のプレイヤーの1回の戦闘における平均利得  $u_a$  は  $u_a = xg_{aa} + (1-x)g_{ab}$  となる。同様にプレイヤー集合 B のプレイヤーの1回の戦闘における平均利得  $u_b$  は  $u_b = xg_{ba} + (1-x)g_{bb}$  となる。またプレイヤー全体に対する1回の戦闘における平均利得  $u$  は  $u = xu_a + (1-x)u_b$  となり、 $x$  に関し以下の微分方程式が成立する。

$$\frac{dx}{dt} = (u_a - u)x \quad (1)$$

そのため  $x$  の任意の初期値に対し本微分方程式を解くことで、任意の時点  $t$  における  $x$  を得ることができる。

### 3.2 MVNO 市場モデル化の方針

本稿ではプレイヤーとして MVNO のみを考え、MNO は考えない。また MVNO が用いる差別化戦略として LP と ZR の2つを考え、LP を用いる MVNO の集合を  $M_1$ , ZR を用いる MVNO の集合を  $M_2$  と表記する。また  $M_s$  の MVNO 数を  $x_s (s=1, 2)$  とする。そして多数の MVNO が存在するときに、ランダムに選択した2つの MVNO がユーザの獲得を巡って対戦するゲームを多数回、反復したときの  $x_s$  の収束値を導出する。2つのグループのいずれかに分類される多数の MVNO が存在することから、集団モデルかつ非対象ゲームに該当する。また各差別化戦略を用いる MVNO 数の時間経過に伴う変化を分析するため、レプリケータ・ダイナミクスを用いる。ただしレプリケータ・ダイナミクスでは各戦闘の結果、戦闘を行ったプレイヤーは死滅して子孫が生まれると考えるが、MVNO 市場に適用する場合には、MVNO の無線通信サービスの継続、撤退、新規参入のダイナミクスが生じると考える。

またレプリケータ・ダイナミクスでは、プレイヤー間の戦闘による結果を直接プレイヤー数の変化に作用させる必要があるが、この場合、MVNO 間の戦闘の結果は獲得ユーザ数の差異で現れることになり、各戦略を用いる MVNO 数の変化を直接的には意味しない。そのため獲得ユーザ数を MVNO 数の変化に反映させる仕組みを導入する必要がある。そこで1回の MVNO 間の戦闘の結果、各戦略を用いる MVNO 数の増減率を表す利得関数  $\phi(\pi)$  を、獲得するユーザ数の期待値から決まる利益  $\pi$  の関数で定義する。 $\phi(\pi)$  が1より大きい場合、その戦略を用いる MVNO がサービスを継続する可能性が高く、またその戦略を用いる新規参入 MVNO が多数存在することを意味する。一方  $\phi(\pi)$  が1より小さい場合、その戦略を用いる MVNO が市場から撤退する可能性が高く、またその戦略を用いる新規参入 MVNO が少ないことを意味する。

MVNO が事業を継続するために最小限度、獲得することが必要な月間利益の下限値を  $\pi_0$  とすると、利得関数  $\phi(\pi)$  は  $\phi(\pi_0) = 0$  を満たす。さらに  $\phi(\pi)$  は  $\pi$  の増加に対し単調に増加し、 $\phi(\pi)$  の増加率は  $\pi_0$  の付近では大きく、 $\pi$  が  $\pi_0$  から離れるほど小さくなる。さらに  $\pi \rightarrow \infty (-\infty)$  の極限で  $\phi(\pi) \rightarrow L (-L)$  に漸近することを想定する。これら要件を満たす  $\phi(\pi)$  の関数として、本稿では双曲線正接 (Hyperbolic tangent)  $\tanh x = (e^{2x} - 1)/(e^{2x} + 1)$  を用いる。すなわち  $\phi(\pi)$  を次式で与える。

$$\phi(\pi) = L \cdot \tanh\left(\frac{\pi - \pi_0}{z}\right) \quad (2)$$

ただし  $z$  は  $\pi_0$  のオーダーに応じて  $\pi$  の値をスケールする

定数パラメタであり、以後の評価では  $z = 1,000$  に設定する。

### 3.3 MVNO の想定条件

MVNO は MNO から通信帯域を調達してユーザに対し無線通信サービスを提供するが、MNO からのユーザ1人あたりの1か月の通信帯域調達コストは全ての MVNO で同一値  $c$  とする。MVNO の契約ユーザに対する課金モデルは、月間の通信データ量が契約上限量までは定額で、契約上限量を超過した通信データに対しては従量制の料金を徴収する定額+従量制を想定する。さらに LP か ZR の同一の差別化戦略を用いる全ての MVNO は同一の料金体系を用いることを想定する。 $M_s$  の MVNO は  $n_s$  個の定額料金区分を設定しており、第  $i$  番目の定額料金区分のデータ上限量を  $F_{s,i}$ , 定額料金を  $f_{s,i}$  とする。また契約上限量を超過した1GBあたりの月間データ通信量に対し、 $q_s$  USD の料金を課金する。

例えば日本の代表的な LP MVNO である AEON Mobile は  $F_{1,1} = 1\text{GB}$ ,  $f_{1,1} = 4.25\text{USD}$ <sup>(注1)</sup> から、 $F_{1,10} = 50\text{GB}$ ,  $f_{1,10} = 91.15\text{USD}$  の10個の定額料金区分を設定しており、DMM mobile は  $F_{1,1} = 1\text{GB}$ ,  $f_{1,1} = 4.25\text{USD}$  から、 $F_{1,9} = 20\text{GB}$ ,  $f_{1,9} = 35.30\text{USD}$  の9個の定額料金区分を設定している。また日本の代表的な ZR MVNO である BIGLOBE mobile は YouTube, Google Play Music, Spotify, Amazon Music など10のCPの動画・音楽を ZR 対象として提供しているが、 $F_{2,1} = 3\text{GB}$ ,  $f_{2,1} = 12.21\text{USD}$  から、 $F_{2,5} = 30\text{GB}$ ,  $f_{2,5} = 63.98\text{USD}$  の5個の定額料金区分を設定している。図1(a)に、これら3つの MVNO の  $f_{s,i}$  を  $F_{s,i}$  に対してプロットする<sup>(注2)</sup>。LP の2つの MVNO の料金プランは極めて近いこと、ZR の MVNO は LP と比較して同じ月額データ量の上限に対し定額料金が大きく、また定額料金区分の粒度が荒いことが確認できる。

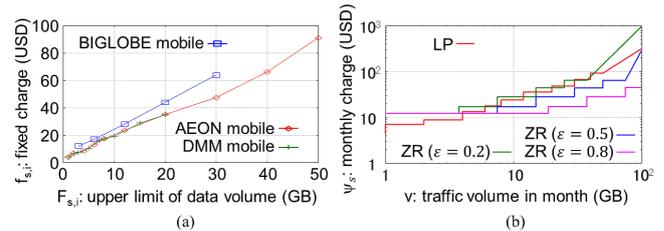


図1 (a) Price menu of major three MVNOs in Japan, (b) monthly charge against monthly traffic volume in major LP and ZR MVNOs in Japan

### 3.4 ユーザの想定条件

#### 3.4.1 ユーザの契約行動

各ユーザが1か月の間に送受信するデータ量  $v$  と、その中で ZR の対象となるデータ量が占める割合  $\epsilon$  は、ユーザごとに異なることを想定し、各ユーザの特性を2パラメタ  $(v, \epsilon)$  により規定する。 $e_s$  を  $M_s$  の MVNO が ZR を用いる場合に1を、そうでない場合に0をとる2値変数とし ( $e_1 = 0, e_2 = 1$ )、 $(v, \epsilon)$  のユーザが  $M_s$  の MVNO と契約するとき、選択する課金プラン  $k$  を  $\kappa_s(v, \epsilon)$  とする。ユーザは自身の月間トラフィック量  $v$  を下回らない最小量の課金プラン  $k$  を選択することを想定すると、 $\kappa_s(v, \epsilon)$  は  $v(1 - e_s\epsilon) \leq F_{s,k}$  を満たす  $k$  の最小値 ( $1 \leq k \leq n_s$ ) であり、 $v(1 - e_s\epsilon) > F_{s,n_s}$  のときは  $\kappa_s(v, \epsilon) = n_s$  となる。そして  $(v, \epsilon)$  のユーザが  $M_s$  の MVNO と契約したときの月間の支払い料金  $\psi_s(v, \epsilon)$  は、

$$\psi_s(v, \epsilon) = f_{s, \kappa_s(v, \epsilon)} + q_s \max\{v - e_s\epsilon v - F_{s, \kappa_s(v, \epsilon)}, 0\} \quad (3)$$

となる。図1(b)に、 $\epsilon$  を0.2, 0.5, 0.8に設定したときの LP と ZR の MVNO と契約したユーザの月間支払い料金  $\psi_s(v, \epsilon)$  を  $v$  に対してプロットする。ただし LP MVNO として AEON mobile の、ZR MVNO として BIGLOBE mobile の料金プランを用いた。LP の場合、 $\psi_s(v, \epsilon)$  は  $\epsilon$  とは無関係になる。LP

(注1)：本稿では1USD=113円の為替レートを想定する。

(注2)：2019年3月時点の料金に基づく。

MVNO も ZR MVNO も複数段階の定額料金プランを用いているため  $\psi_s(v, \epsilon)$  は  $v$  の増加に伴い階段上に増加するが、 $v$  が  $F_{s, n_s}$  を超過すると線形に増加する。  $v$  が小さい領域では LP MVNO と契約した方が、  $v$  が大きい領域では ZR MVNO と契約した方が月間支払い料金は低い。

ユーザは契約 MVNO を選択する際、支払い料金に加え、MVNO のブランドイメージやサービス品質や評判など、様々な要素を考慮すると思われる。しかし本稿では簡単のため、ユーザは支払い料金のみを考慮して契約 MVNO を選択することを想定する。すなわち  $\psi_1(v, \epsilon) < \psi_2(v, \epsilon)$  のときは LP MVNO を、  $\psi_1(v, \epsilon) \geq \psi_2(v, \epsilon)$  のときは ZR MVNO と契約する合理的行動を想定する<sup>(注3)</sup>。

### 3.4.2 LP MVNO の選択確率

MVNO と契約し移動通信 NW サービスを受けるエンドユーザの総数  $W$  は固定とし、  $W$  のユーザ集合における  $v$  と  $\epsilon$  の同時確率密度を  $D(v, \epsilon)$  とする。ユーザが LP MVNO もしくは ZR MVNO のどちらか一方と自由に契約できるとき、LP MVNO を選択する確率を  $p_1$  とすると、

$$p_1 = \int \int D(v, \epsilon) U(\psi_1(v, \epsilon) < \psi_2(v, \epsilon)) dv d\epsilon \quad (4)$$

で得られ、ZR MVNO を選択する確率  $p_2$  は  $p_2 = 1 - p_1$  となる。ただし  $U(C)$  を条件  $C$  が真のときに 1、条件  $C$  が偽のとき 0 とする 2 値関数とする。また  $M_s$  ( $s = 1, 2$ ) の MVNO が  $D(v, \epsilon)$  のユーザ集合のユーザ 1 人から獲得する 1 か月の収益の期待値  $r_s$  は次式で得られる。

$$r_s = \int \int D(v, \epsilon) \psi_s(v, \epsilon) dv d\epsilon \quad (5)$$

本稿では  $v$  と  $\epsilon$  は各々、正規分布に従うことを想定する。一般に ZR 対象となるサービスは動画配信などデータ量が大きなのが含まれることが多いことから、  $v$  が大きなユーザは  $\epsilon$  も大きくなることが予想される。すなわち  $v$  と  $\epsilon$  には正の相関性が予想される。そこで  $W$  のユーザにおける  $v$  と  $\epsilon$  の同時分布として、  $v$  と  $\epsilon$  の平均値が各々  $\mu_v$  と  $\mu_\epsilon$  で、標準偏差が各々  $\sigma_v$  と  $\sigma_\epsilon$  で、両者の相関係数が  $\rho$  の 2 変数正規分布を想定する。

### 3.5 MVNO 市場のモデル化

$M_i$  の MVNO が  $M_j$  の MVNO と対戦したときに得られる利益の期待値を  $\pi_{ij}$  と定義する。3.3 節で述べたように、  $M_s$  の MVNO が 1 か月に 1 人のユーザから得る利益の期待値は  $r_s - c$  となる。各ユーザはランダムに選んだ 2 つの MVNO を比較して契約先を選択すると仮定すると、MVNO の総数は  $x_1 + x_2$  であるため、任意の 2 つの MVNO は平均的には  $2W/(x_1 + x_2)$  のユーザの獲得を巡り対戦する。そのため異なる種別の MVNO が対戦したときの  $\pi_{ij}$  は次式で得られる。

$$\pi_{12} = \frac{2(r_1 - c)Wp_1}{x_1 + x_2} \quad (6)$$

$$\pi_{21} = \frac{2(r_2 - c)W(1 - p_1)}{x_1 + x_2} \quad (7)$$

一方、同一の種別の MVNO が対戦したときには、50%の確率で各 MVNO は各ユーザを獲得すると仮定すると、

$$\pi_{11} = \frac{(r_1 - c)W}{x_1 + x_2} \quad (8)$$

$$\pi_{22} = \frac{(r_2 - c)W}{x_1 + x_2} \quad (9)$$

が得られる。3.3 節で述べたように、  $M_i$  の MVNO が  $M_j$  の MVNO と対戦したときの利得  $g_{ij}$  は (2) 式で定義した  $\phi$  を用いて、

$$g_{ij} = \phi(\pi_{ij}) = L \cdot \tanh\left(\frac{\pi_{ij} - \pi_0}{z}\right) \quad (10)$$

(注3) :  $\psi_1(v, \epsilon) = \psi_2(v, \epsilon)$  のときは ZR を選択することを想定する。

より得られる。各 MVNO は確率  $x_s/(x_1 + x_2)$  で  $M_s$  の MVNO と対戦することから、  $M_s$  の MVNO の 1 回の対戦における利得の期待値  $G_s$  は、

$$G_s = \frac{x_1}{x_1 + x_2} g_{s1} + \frac{x_2}{x_1 + x_2} g_{s2} \quad (11)$$

より得られる。  $G_s$  を用いて、  $x_1$  と  $x_2$  に関する以下の連立微分方程式が成立する [10]。

$$\frac{dx_1}{dt} = G_1 x_1 = \frac{x_1^2}{x_1 + x_2} g_{11} + \frac{x_1 x_2}{x_1 + x_2} g_{12} \quad (12)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = G_2 x_2 = \frac{x_1 x_2}{x_1 + x_2} g_{21} + \frac{x_2^2}{x_1 + x_2} g_{22} \quad (13)$$

式 (6)-(9) に示すように  $\pi_{ij}$  は定数であることから、Runge-Kutta 法などの数値解法により、  $x_1$  と  $x_2$  の初期値を与えることで任意時点  $t$  における  $x_1$  と  $x_2$  の値を算出できる。

## 4. 数値評価

エンドユーザの総数  $W$  を 1,000 万人とする。LP MVNO と ZR MVNO の料金プランは各々、3.3 節で述べた AEON mobile と BIGLOBE mobile のものを用いる。ユーザの月間データ通信量は平均が  $\mu_v = 4.22\text{GB}$  [9] の正規分布に従うとする。

### 4.1 LP MVNO の選択確率の傾向

LP MVNO の選択確率  $p_1$  を (4) 式より陽に導出することは困難なことから、以下の方法で  $(v, \epsilon)$  のサンプルを 100,000 個生成し、  $\psi_1(v, \epsilon) < \psi_2(v, \epsilon)$  となる確率を  $p_1$  として計算する。

(1)  $v$  を  $N(\mu_v, \sigma_v)$  よりランダムに生成し、  $v < 0$  のときは  $v = 0$  に設定

(2)  $\epsilon$  を  $N(\mu_\epsilon + \rho(v - \mu_v)\sigma_\epsilon/\sigma_v, (1 - \rho^2)\sigma_\epsilon^2)$  よりランダムに生成し、  $\epsilon < 0$  のときは  $\epsilon = 0$  に、  $\epsilon > 1$  のときは  $\epsilon = 1$  に設定

(3)  $v \geq 0, 0 \leq \epsilon \leq 1$  を満たす必要があるため、生成した  $v$  と  $\epsilon$  が本範囲に入らない確率が各々 0.001 以下となる最大値に  $\sigma_v$  と  $\sigma_\epsilon$  を設定

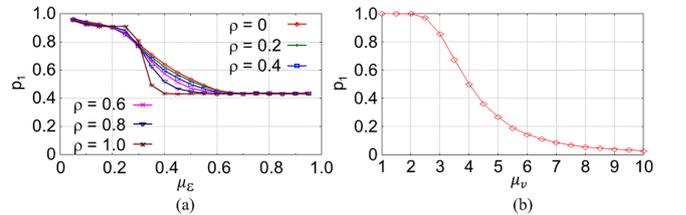


図2 (a)  $p_1$ , ratio of users subscribing LP MVNO, against  $\mu_\epsilon$ , average ratio of ZR traffic of users, (b)  $p_1$  against  $\mu_v$ , average monthly traffic volume of each user

図2(a)に  $\mu_v = 4.22\text{GB}$  に設定し、  $\mu_\epsilon$  を変化させたときの LP MVNO の選択確率  $p_1$  を  $\rho$  の 6 つの値に対しプロットする。図 1(b) で確認したように  $\epsilon$  の大きなユーザほど ZR MVNO と契約することで支払い料金が減少する。そのため  $\mu_\epsilon$  の増加に伴い  $p_1$  は減少する。しかし  $\mu_\epsilon$  が最大値 1 に近い場合、全てのユーザの ZR MVNO と契約した場合の契約プランは最小容量プラン (3GB, 12.21USD) となり、この 12.21USD を LP MVNO と契約した場合の月間料金が下回るユーザの比率が  $p_1$  となる。一方、LP MVNO と契約した場合の契約プランや月間支払い料金は  $\epsilon$  とは無関係であるため、  $\mu_\epsilon$  が 0.7 程度より大きな領域では  $p_1$  は  $\mu_\epsilon$  や  $\rho$  とは無関係に一定の値となる。また  $\rho$  の増加に伴い、  $v$  が大きなユーザは  $\epsilon$  も大きな傾向が高くなるため、ZR の恩恵が高いユーザが増加する。そのため  $\rho$  が大きなほど、  $\mu_\epsilon$  の増加に伴い  $p_1$  は急激に減少する。このことは ZR MVNO にとって、需要が高いコンテンツを ZR 対象とすることでユーザに対する訴求効果が增大することを意味する。また図 2(b) に  $\mu_\epsilon = 0.9$  に設定し  $\mu_v$  を変化させたときの  $p_1$  をプロットする。図 2(a) で見たように  $\mu_\epsilon$  が大きくなると  $p_1$  は  $\rho$  とは無関係となるため、  $\rho = 0.5$  の結果のみ示している。  $\mu_\epsilon = 0.9$  のようにユーザの ZR 比率が高い場合、  $\mu_v$  の増加に伴い ZR に

よる支払い料金低下効果が増加するため  $p_1$  は減少する。

#### 4.2 ZR MVNO の料金設定戦略

図 3(a) に  $\rho$  の 6 つの値に対し各々, (5) 式から得られる LP MVNO と ZR MVNO のユーザあたりの平均収益  $r_s$  を  $\mu_\epsilon$  に対しプロットする.  $r_1$  は  $\rho$  や  $\mu_\epsilon$  の影響を受けず一定の値となる. 一方,  $\rho$  や  $\mu_\epsilon$  の増加に伴い ZR 対象トラフィックの総量が増加するため  $r_2$  は減少するが,  $\rho$  と  $\mu_\epsilon$  の全領域で,  $r_2 > r_1$  が確認できる. しかし図 2(a) で見たように,  $\mu_\epsilon$  が大きな場合,  $p_1 < 0.5$  で半数以上のユーザは ZR MVNO の方が低コストとなり ZR MVNO を選択する.

その理由を調べるため図 3(b) に  $\rho = 0.5$  とし,  $\mu_\epsilon$  を 5 つの値に設定したときの各ユーザが ZR MVNO と LP MVNO と契約したときの月間支払い料金の差額  $\psi_2 - \psi_1$  の累積分布をプロットする.  $\mu_\epsilon$  が大きな場合, 料金差  $\psi_2 - \psi_1$  の中央値は負の値であり, 半数以上のユーザにとって ZR の方が低料金となる. そのため  $p_1 < 0.5$  となる. しかし  $\psi_2 > \psi_1$  となるユーザの料金差は,  $\psi_1 > \psi_2$  となるユーザの料金差よりも大きな場合が多く, その結果,  $r_2 > r_1$  となる. このように ZR MVNO は最低料金プランの価格を高く設定して料金区分を少なくすることで,  $v$  や  $\epsilon$  が小さなユーザに対し LP MVNO と比較して割高な設定を行っている. 一方で, 多数のユーザにとって LP MVNO より僅かに割安となる料金設定を行っている. トラフィック量が少ないユーザや ZR 比率が低いユーザにとっては割高となる一方, 多数のユーザに対し料金面での優位性をアピールすることで, 効果的にユーザ数を増やす戦略が予想される.

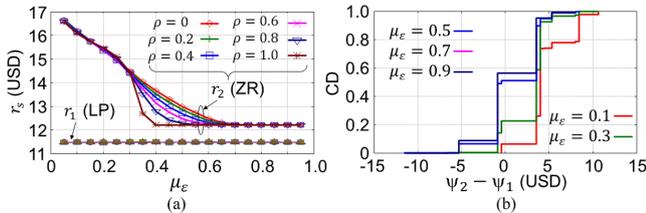


図 3 (a)  $r_s$ , average revenue of  $M_s$  MVNO obtained from each user, against against  $\mu_\epsilon$ , average ratio of ZR traffic of users, (b) cumulative distribution of charge difference  $\psi_2 - \psi_1$

#### 4.3 MVNO 数の時系列特性

ユーザあたりの帯域調達コスト  $c$  は MVNO のユーザ集約度合いに依存するが, 利益を確保するには  $c < r_\epsilon$  を満たす必要がある. 以下の評価では特に断らない限り  $c = 7$  USD に設定する. また MVNO が事業を継続するために必要な月間利益の下限値  $\pi_0$  を, LP MVNO が  $B$  人のユーザから得られる月間収益の総和の平均値とし,  $\pi_0 = Br_1$  に設定する. ただし以下の評価では特に断らない限り  $B = 1,000$  に設定する. また MVNO どちらの各戦略における利得 (MVNO 数の増減率) の極限值  $L$  を 2 に設定する.

連立微分方程式 (12)(13) を 4 次の Runge-Kutta 法 [5] を用いて数値解析的に解くことで, 任意の反復回数  $t$  における LP と ZR の各戦略を用いる  $M_s$  の MVNO 数  $x_s(t)$  を算出する. ただし各戦略グループの MVNO 数の初期値  $x_s(0)$  を 100 に設定し, Runge-Kutta 法のステップ幅  $h$  を 0.01 に設定する. 図 4(a)-(c) にユーザの平均 ZR 対象トラフィック量比率  $\mu_\epsilon$  を 0.1, 0.4, 0.9 (各々における  $p_1$  は 0.934, 0.587, 0.435) に設定したときの  $x_s(t)$  を, 繰り返しステップ数  $t$  に対してプロットする. 初期は MVNO の総数  $x_1(t) + x_2(t)$  が少ないため両戦略グループとも時間の経過に伴い MVNO 数が増加する. しかしある程度時間が経過すると, 競争力の高い戦略  $s$  を用いる MVNO 数は増加を続け一定値に収束するが, 競争力の低い戦略を用いる MVNO 数は減少し消滅する. ZR を用いる MVNO の各ユーザから得られる利益  $r_2$  は LP MVNO のそれ  $r_1$  よりも大きく, ZR MVNO は LP MVNO と比較して収益性が高いため,  $p_1$  が 0.587 であっても ZR が競争優位となり市場を独占する.

十分な時間が経過した時点の  $x_s$  の収束値を分析するため, 図 4(d) に  $t = 10,000$  の時点の各  $M_s$  の MVNO 数  $x_s(10,000)$  を  $\mu_\epsilon$  に対して示す. ただし  $0.3 < \mu_\epsilon < 0.35$  の範囲においては  $\mu_\epsilon$  を 0.001 の単位で変化させ, それ以外は  $\mu_\epsilon$  を 0.05 の単位で変化させた.  $\mu_\epsilon \leq 0.348$  のときは  $x_2$  が 0 に収束し,  $\mu_\epsilon \geq 0.348$

のときは  $x_1$  が 0 に収束した. どちらか一方の  $M_l$  は 0 となり, もう一方の競争優位となる  $M_w$  で市場が独占され, 両方の種類の MVNO が共存する状況は生じない.  $\mu_\epsilon$  が小さな ( $p_1$  が大きな) ときは, LP を用いる MVNO が, 一方  $\mu_\epsilon$  が大きな ( $p_1$  が小さな) ときは ZR を用いる MVNO が  $M_w$  となる. この場合, 競争優位となる MVNO が変わる  $\mu_\epsilon$  の境界値<sup>(注4)</sup>  $\mu_\epsilon^*$  は 0.348 となった.  $M_w$  の MVNO 数  $x_w$  の増加に伴い各 MVNO の利益は減少するが,  $W$  の全ユーザから得られる月間の収益の総和は  $W(r_s - c)$  なので,  $x_w$  の収束値  $\hat{x}_w$  は各 MVNO が得る月間利益が事業継続に必要な下限値  $\pi_0$  となるときで,

$$\hat{x}_w = W(r_w - c)/\pi_0 \quad (14)$$

より得られる. 図 3(a) で見たように,  $\mu_\epsilon$  の増加に伴い  $r_2$  は減少するため,  $M_w = M_2$  となる  $\mu_\epsilon \geq 0.349$  の領域で,  $\mu_\epsilon$  の増加に伴い  $\hat{x}_2$  は減少する.

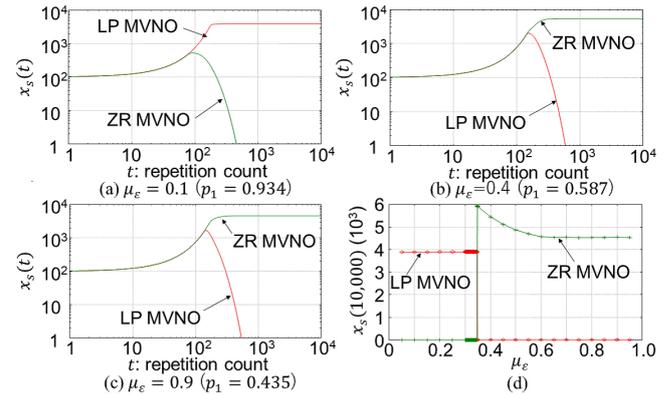


図 4 (a)-(c) Time evolution of MVNO count of each strategy type  $M_s$  for three values of  $\mu_\epsilon$ , (d) MVNO count of each strategy type  $M_s$  at steady state

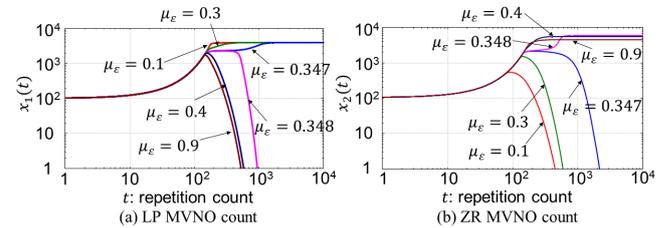


図 5 Time evolution of MVNO count of each strategy type  $M_s$  for six values of  $\mu_\epsilon$

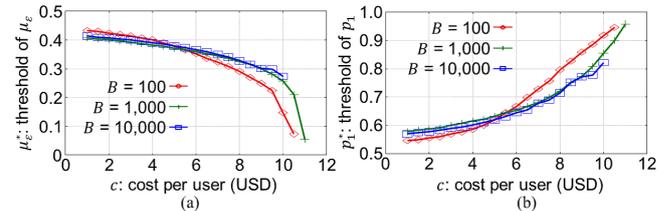


図 6 Upper limit of (a)  $\mu_\epsilon$  and (b)  $p_1$  in which LP MVNOs dominate MVNO market at equilibrium state

図 5 に,  $\mu_\epsilon$  を  $\mu_\epsilon^*$  付近の値を中心とした 6 個の値に設定したときの  $x_1$  と  $x_2$  を  $t$  に対し各々示す.  $\mu_\epsilon$  が 0.1 の場合は  $x_2$  は 700 程度までは増加するが 100 ステップあたりから減少して 0 となる. 一方  $\mu_\epsilon$  が 0.9 の場合は  $x_1$  が 200 ステップ程度までは増加するが, それ以後, 減少して 0 となる.  $\mu_\epsilon$  が境界値  $\mu_\epsilon^*$  に近づくほど,  $x_1$  と  $x_2$  が同じ値で増加する期間が増大するが,  $\mu_\epsilon < \mu_\epsilon^*$  の場合  $x_2$  は,  $\mu_\epsilon > \mu_\epsilon^*$  の場合  $x_1$  は, やがて減少に転じてからは一貫して減少し続けて 0 となる.  $\mu_\epsilon$  が  $\mu_\epsilon^*$  の近傍の値をとる場合,  $\mu_\epsilon$  の僅かな変化で  $x_1$  と  $x_2$  の時間推移パターンが大きく変化し,  $\mu_\epsilon$  が  $\mu_\epsilon^*$  に近づくほど競争力が僅か

(注4): ここでは  $M_w = M_1$  となる  $\mu_\epsilon$  の下限値と定義する.

に小さい  $M_l$  の MVNO 数が減少し始めるまでの経過時間が増加する。  $M_l$  の MVNO 数が急減する際、多数のユーザが  $M_w$  の MVNO に流れる結果、  $M_w$  の MVNO 数は再度急増し、収束値に達した後一定となる。

図 6(a) に MVNO の事業継続に必要な収益を得るためのユーザ数の下限値  $B$  の 3 つの値に対し、ユーザあたりのコスト  $c$  を変化させたときの  $\mu_c^*$  をプロットする。同様に図 6(b) に  $\mu_c^*$  における  $p_1$  の値  $p_1^*$  をプロットする。ただし  $c$  を 0.5 の単位で変化させ、  $\mu_c^* \geq 0.0$  の場合のみ結果を示している。  $r_2 > r_1$  であるため ZR MVNO の収益性が高く、  $c$  の全ての領域で  $p_1$  は 0.5 より大きい。また  $c$  の増加に伴い ZR MVNO のユーザあたりの利益  $r_2 - c$  が、LP MVNO のそれ  $r_1 - c$  に対し相対的に大きくなるため  $\mu_c^*$  は減少し  $p_1^*$  は増加する。

#### 4.4 単一種別の MVNO の市場独占による弊害

図 4(d) で見たように、  $\mu_c$  の値に応じて LP か ZR のどちらか一方の MVNO で市場が独占される。このことはユーザにとって MVNO の選択自由度が低下することを意味し、一部のユーザにとって月間支払い料金が増加する。すなわち LP MVNO が市場を独占した場合、  $\psi_1 > \psi_2$  のユーザは ZR MVNO を選択できないため月額料金が  $\psi_1 - \psi_2$  だけ増加する。反対に ZR MVNO が市場を独占した場合、  $\psi_1 < \psi_2$  のユーザは LP MVNO を選択できないため月額料金が  $\psi_2 - \psi_1$  だけ増加する。このように単一種別の MVNO が市場を独占した場合のユーザの月額費用の増加量は  $v$  と  $\epsilon$  に依存する。

そこで単一種別の MVNO が市場を独占することでユーザが被る弊害の程度を明らかにするために、4.1 節で述べた方法で  $v$  と  $\epsilon$  のサンプルを生成したときの、ユーザの月間支払い料金の増加量の累積補分布を図 7 に示す。ただし  $\mu_c$  と  $\rho$  の値の 5 つの組における結果を、LP MVNO が市場を独占する場合について図 7(a) に、ZR MVNO が市場を独占する場合について図 7(b) に各々示す。ZR MVNO は LP MVNO よりも割高なため、ZR MVNO が市場を独占したときのコスト増加量は、LP MVNO が市場を独占したときのコスト増加量よりも全体的に大きい。特に  $\mu_c$  が小さい場合 ( $\mu_c = 0.2$ )、ZR MVNO が独占したときのユーザのコスト増加量が大きく、6 割程度以上のユーザは 4USD 程度以上、月間支払い料金が増加する。それ以外の場合も、4.5 割程度以上のユーザは 3.5USD 程度以上、月間支払い料金が増加する。ユーザのトラフィック需要量と ZR 比率との相関係数  $\rho$  の影響は小さい。

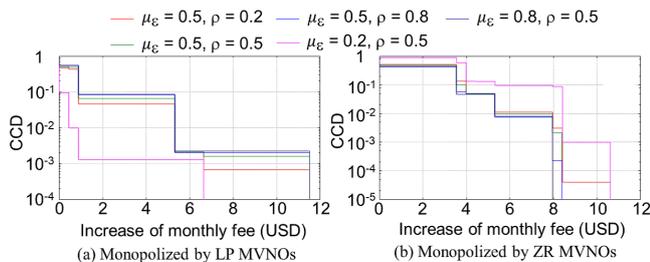


図 7 Complementary cumulative distribution of increase of monthly charge of users when one type of MVNOs dominate market

#### 4.5 数値評価で得られた主な知見

本節で示した数値評価で得られた主な知見を以下にまとめる。

- ZR MVNO は最低料金プランの価格を高く設定して料金区分を少なくし、さらに多数のユーザにとって LP MVNO より僅かに割安となる価格設定を行うことで、トラフィック量が少ないユーザや ZR 比率が低いユーザにとっては割高となる一方、多数のユーザに対し料金面での優位性をアピールし、効果的にユーザ数を増やす戦略を用いる傾向がみられる。

- 十分な時間が経過すると、LP か ZR のどちらか一方の MVNO で市場が独占され、両方の種別の MVNO が共存することは困難である。ユーザにとって LP MVNO が ZR MVNO より低料金となる ZR 対象トラフィック量比率の平均値  $\mu_c$  には境界値  $\mu_c^*$  が存在し、  $\mu_c > \mu_c^*$  の場合は ZR MVNO が、  $\mu_c \leq \mu_c^*$  の場合は LP MVNO が市場を独占する。

- $\mu_c$  の境界値  $\mu_c^*$  はユーザあたりの帯域調達コスト  $c$  の増

加に伴い減少する。  $c$  が LP MVNO のユーザあたりの収益の半分程度の場合、  $\mu_c^*$  は 0.4 程度となり、ユーザが LP MVNO を選択する確率の平均値は 0.6 程度となる。

- 日本の主な MVNO の料金プランに対し、  $\mu_c$  が 0.45 程度以上の場合、ZR MVNO で市場が独占される。ZR MVNO が市場を独占すると LP MVNO と契約する選択肢が消失するため、多くのユーザにとって支払い料金が増加する。特に  $\mu_c$  が小さい場合、ZR MVNO が独占したときのユーザのコスト増加量が大きく、6 割程度以上のユーザは 4USD 程度以上、月間支払い料金が増加する。

## 5. まとめ

近年、一部の MVNO は差別化戦略として、特定のサービスのトラフィックを課金対象外とするゼロレーティング (ZR) を導入しているが、ZR の是非を明らかにするには、多数の MVNO が存在する環境での MVNO のダイナミクスを分析し、実現する状態を明らかにする必要がある。そこで本稿では、まず日本の代表的な MVNO の料金プランを分析し、ZR MVNO の価格設定戦略を明らかにした。そして差別化戦略として低価格 (LP) と ZR のいずれかを用いる MVNO が多数存在しユーザを奪い合う環境を進化ゲームでモデル化し、いずれか一方の戦略を用いる MVNO で市場が独占されることを明らかにした。また日本の代表的な MVNO の課金プランを想定した場合、ZR を用いる MVNO で市場が独占される可能性が高いこと、その結果、多くのユーザの支払い料金が増加することを明らかにした。そのためユーザの利益を守るためには、例えば ZR 対象トラフィック量の少ないユーザが安価な料金でサービスを受けられるサービスプランを ZR MVNO が用意することが望ましい。

ところで本稿では進化ゲーム理論を用いて MVNO 市場ダイナミクスをモデル化するに際し、ユーザは月額料金のみを考慮して契約 MVNO を選択することを想定した。しかしユーザは契約 MVNO を選択する際、MVNO のブランドイメージや規模など、料金以外の要素も考慮することが考えられる。そこで今後、MVNO ごとの規模やブランド力を考慮したモデル化を検討する予定である。また契約 MVNO を変更するには契約変更の手間や初期費用が発生するため、今後はスイッチングコスト考慮した分析を行う予定である。

## 文 献

- [1] D. Brake, Mobile Zero Rating: The Economics and Innovation Behind Free Data, Information Technology & Innovation Foundation (ITIF), May 2016
- [2] H. Cadre, et al., Modeling MNO and MVNO' s Dynamic Interconnection Relations: Is Cooperative Content Investment Profitable for Both Providers?, ITC 21
- [3] M. Debbah, et al., Market share analysis between MNO and MVNO under brand appeal based segmentation, NetGCoop 2012
- [4] L. Guijarro, et al., Competition and bargaining in wireless networks with spectrum leasing, GLOBECOM 2011
- [5] F. B. Hildebrand, Introduction to Numerical Analysis: Second Edition, Dover Publications, 1987
- [6] The Emergence of Mobile Virtual Network Operators (MVNOs): An Examination of the Business Strategy in the Global MVNO Market, The International Journal on Media Management, 10, pp.10-21, 2008
- [7] C. Meidanis, et al., Pricing for Mobile Virtual Network Operators: The contribution of u-map, DYSPAN 2014
- [8] 総務省, 電気通信サービスの契約者数及びシェアに関する四半期データの公表, 平成 30 年度第 1 四半期 (6 月末)
- [9] MM 総研, スマートフォン・MVNO の月額利用料とサービス利用実態 (2016 年 12 月), <https://www.m2ri.jp/news/detail.html?id=225> (accessed on Mar. 10, 2019)
- [10] J. W. Weibull, Evolutionary Game Theory, The MIT Press, 1997
- [11] T. Wu, Network Neutrality, Broadband Discrimination, J. Telecomm. and High Tech. Law, vol. 2, pp. 141-179, June 2003
- [12] T. Yiakoumis, et al., Neutral Net Neutrality, ACM SIGCOMM 2016
- [13] L. Zhang, et al., Sponsored Data Plan: A Two-Class Service Model in Wireless Data Networks, ACM SIGMETRICS 2015
- [14] L. Zheng, et al., An Economic Analysis of Wireless Network Infrastructure Sharing, WiOpt 2017