

LEO 衛星ネットワークの事業者間提携の収益分配

近藤 海斗[†] 上山 憲昭^{††} 宮田 純子^{†††}

[†] 立命館大学大学院 情報理工学研究科

〒 567-8570 大阪府茨木市岩倉町 2-150

^{††} 立命館大学 情報理工学部

〒 567-8570 大阪府茨木市岩倉町 2-150

^{†††} 東京科学大学 工学院

〒 152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1

E-mail: [†]is0559xk@ed.ritsumeikan.ac.jp, ^{††}kamiaki@ritsumeikan.ac.jp, ^{†††}sumiko@ict.eng.isct.ac.jp

あらまし 近年, LEO (Low Earth Orbit) 衛星を活用したネットワークに基づく通信サービスの提供が注目されている. 低軌道に位置する LEO 衛星は遅延が短い通信を可能にするが, 個々の衛星の通信範囲が狭いため, 多数の衛星を用いた衛星コンステレーションが必要となる. LEO 衛星ネットワーク事業者は, 事業の初期段階における衛星数の制約から, サービス提供エリアや通信時間が限定的となり, 利用者の確保が課題となる. そこで筆者らはこれまでに, 2 者の LEO 衛星ネットワーク事業者が協力して 1 つの衛星コンステレーションを構築し, サービスを提供するモデルを提案し, その収益を協力ゲーム理論のシャープレイ値に基づき配分することを提案した. また事業者間の協力による通信サービスの拡張可能性を示した. しかし, 3 者以上の協力に関しては未検討である. そこで本研稿では, 3 者および 4 者の LEO 衛星事業者間の協力を対象に数値評価を行い, 協力によって得られる利益の分配方法を多角的に検討する. これにより, 複数の事業者が連携することで, より広範な地域へのサービス展開が可能となることを示唆する.

キーワード LEO 衛星, 協力ゲーム, シャープレイ値

Revenue Sharing among Operators in LEO Satellite Network Cooperation

Kaito KONDO[†], Noriaki KAMIYAMA^{††}, and Sumiko MIYATA^{†††}

[†] Graduate School of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University

2-150, Iwakura-cho, Ibaraki, Osaka 567-8570

^{††} College of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University

2-150, Iwakura-cho, Ibaraki, Osaka 567-8570

^{†††} School of Engineering, Institute of Science Tokyo

2-12-1, Ookayama, Meguro-ku, Tokyo, 152-8552

E-mail: [†]is0559xk@ed.ritsumeikan.ac.jp, ^{††}kamiaki@ritsumeikan.ac.jp, ^{†††}sumiko@ict.eng.isct.ac.jp

Abstract In recent years, the provision of communication services based on networks using LEO (Low Earth Orbit) satellites has been attracting attention. LEO satellites in low orbit enable communication with low latency, but because the communication range of each satellite is narrow, a satellite constellation using a large number of satellites is required. Due to the limited number of satellites in the early stages of the business, the service area and communication time are limited, making it difficult to secure users. Therefore, the authors have previously proposed a model in which two LEO satellite operators cooperate to build a satellite constellation and provide services, and proposed distributing the revenue based on the Shapley value of cooperative game theory. We also showed the possibility of expanding communication services through cooperation between operators. However, cooperation between three or more parties has not been considered. Therefore, in this paper, we numerically evaluate cooperation among three or four LEO satellite networks and examine the distribution method of the profits obtained from cooperation from various angles. This suggests that by collaborating with multiple operators, it is possible to expand services to a wider area.

Key words LEO satellite, cooperative game, shapley value

1. はじめに

近年、大規模な衛星コンステレーションを備えた LEO 衛星ネットワークによって提供されるブロードバンドへの関心が高まっている [1]. 衛星通信ネットワークは LEO (Low Earth Orbit), MEO (Middle Earth Orbit), GEO (Geostationary Orbit) の軌道を持つ衛星で構成されている. LEO は高度 2,000km までの低軌道のことで、約 90~120 分で地球を一周する. 地球の表面の一部を見ることができない反面、高い空間解像度で観測することができ、低遅延での通信が可能である. MEO は地上 2,000km から 36,000km の中軌道であり、LEO 衛星よりも広く地球を観測することができる. GEO は、高度は 36,000km の静止軌道である. この軌道上の衛星は自転と同じ速度で移動するため、地球上のほぼ同じ場所を観察し続けることができる. また、衛星は目的によって分類することができ、刻々と変化する地球環境の長期的な観測を行う地球観測衛星では LEO や GEO が、位置情報の計測に必要な信号の送信を行う測位衛星には MEO が、無線通信の中継や放送を行う通信衛星、放送衛星には LEO, MEO, GEO の軌道が用いられる.

通信衛星として、低軌道の軌道面を持つ衛星である LEO 衛星を用いると、軌道が低いこと、遅延が短いという利点があるが、衛星から照射できる範囲が狭い. そのため、多数の衛星を使った衛星コンステレーション (群) を構築し、地球全体をカバーする必要がある. SpaceX 社の Starlink は 2020 年にインターネット通信サービスを開始し、2025 年 1 月時点で約 7,000 基の LEO 衛星が稼働中である [2]. しかし、LEO 衛星コンステレーションは事業の初期段階 (数 10 基から数 100 基程度) において性能を十分に発揮できない. これは衛星の基数が少ない状態では、地球を十分にカバーできない、またはカバーできるが、ユーザに提供できる帯域幅が狭く正常に通信サービスを提供できないからである. これにより、事業の初期状態において事業者がサービスを開始しない場合、その期間の収益は 0 となり、サービスを開始した場合でも、収益は少ない状態となる.

そこで筆者らは、LEO 衛星ネットワーク事業者間の協力サービスモデルを提案し、初期段階における参加事業者の適切な収益分配額を、協力ゲーム理論のシャープレイ値を用いて導出した [3]. アプローチとして、LEO 衛星ネットワーク事業者間で衛星を共有し、1 つの衛星コンステレーションを構成することを提案し、提携ゲーム理論を用いたシャープレイ値による収益配分法を提案した. そしてイギリスの OneWeb を模したコンステレーションをもつ事業者と中国の Qianfan を模したコンステレーションをもつ事業者の 2 者の協力を想定して評価を行った. しかし 3 者以上の LEO 衛星ネットワーク事業者が協同する場合については未評価である. そこで本稿では、これまでの 2 者に加えて、3 者および 4 者の LEO 衛星ネットワーク事業者間の協力を想定した数値評価を行う.

2. 関連研究

Osoro らは、衛星ブロードバンド接続の技術経済を評価するためのオープンソースのモデリングフレームワークを提案し、衛星数と加入者数の両方が増加する場合のカパレッジ、容量、コストへの影響を評価することで、Starlink, OneWeb, Kuiper の 3 つの主要な LEO 衛星ネットワーク事業者を評価している [4]. 衛星数を変化させることで、事業の初期段階を考慮しているが、収益には言及していない.

また Lian らは、コンステレーションの地上ユーザの実際のニーズを考慮し、収益と効率を考慮した評価方法を提案し、計算機シミュレーションにより、Starlink のコンステレーションの効率は OneWeb よりも低い、収益性は大幅に高いことを示している [5]. また Starlink のコンステレーションの構造を

調整すると、コンステレーションの効率と収益が向上することを示している. 収益について考慮しているが、衛星が十分に展開されていることを前提にしている. さらに Pachler らは、スループットと衛星効率 (平均容量使用率) の観点から Telesat, OneWeb, SpaceX (Starlink), Amazon の 4 つの LEO 衛星メガコンステレーションの初期段階と、最終段階に分けてパフォーマンスを比較し、分析している [6]. 初期段階に関する分析を行っているが、収益に関する分析は行っていない.

3. 事業者間のモデル化

3.1 提携ゲーム

協力ゲーム理論は、複数の自律的なプレイヤーがいる場合にどのような提携を形成し、各プレイヤーに利益をどう分配するかを議論する理論として知られている [8]. 協力ゲーム理論では、プレイヤー間の利益分配について、コア、交渉集合、カーネル、核小体、バンザフ値、シャープレイ値など、いくつかの解が提案されている. 例えば Kimms と Cetiner は、航空会社アライアンスに参加している個々の航空会社に利益を分配する核小体ベースのシステムを提案した [9].

コア、交渉集合、カーネルは解の集合と呼ばれるもので、一つに絞った解を得ることはできない. 一方、核小体、バンザフ値、シャープレイ値は、それぞれ異なる考え方に基づく一意の解である. 核小体は、連合が得られる利益と各プレイヤーの割り当ての合計との差である超過分を基準に、辞書式順序で最も望ましい解を求める. これに対し、バンザフ値とシャープレイ値は、各プレイヤーの平均的な限界貢献を計算する方法である. バンザフ値は連合が均等な確率で選ばれと仮定し、シャープレイ値は連合の形成順序の全ての並びが均等な確率で選ばれと仮定する点が異なる. 本研究では、プレイヤーの貢献を公平に評価し、分配を明確にしたいため、シャープレイ値を用いる.

3.2 想定条件

収益に関しては、LEO 衛星による衛星通信の契約形態は月額制が一般的であるため、本稿でも月額制を想定する. 月額料金の関係しては想定することが難しいため、本稿では、どの事業者でも一定額とし、数値評価は収益額ではなく、衛星通信の契約者数で行う. 衛星の通信範囲に関しては、地球上にグリッドを引き、グリットセルに分割する. 図 1 は事業者間の協力時の効果を表しており、黒丸と青丸は異なる衛星ネットワーク事業者の衛星である. 衛星がグリットセル内に存在していれば、そのグリットセル内の契約しているユーザは通信が可能であり、グリットセル内に複数の衛星が存在する場合、帯域幅が増加するため 1 人当たりの通信速度が早くなり、通信可能なユーザの数が増加する. このグリットセル内の衛星の台数をカパレッジ多重度と呼ぶ. LEO 衛星同士の通信に関しては、どの事業者間でも行えるものとする. 事業者が提携を行うシナリオとしては、以下のものが考えられる.

- (1) LEO 衛星コンステレーションの構成の初期段階の事業者が、他の事業者と協力
- (2) 衛星通信のカバー範囲が広がり、さらにカパレッジ多重度が上昇
- (3) カバー範囲が広がることでサービスを利用可能な範囲が広がり、さらにカパレッジ多重度が上昇すると通信速度が上昇するため、契約ユーザの満足が上昇
- (4) ユーザの契約率が上昇し、事業者の収益が上昇
- (5) 増加した収益を事業者間で分配

3.3 モデル化

まず、LEO 衛星の通信範囲 R_s を定義する. R_s は衛星から

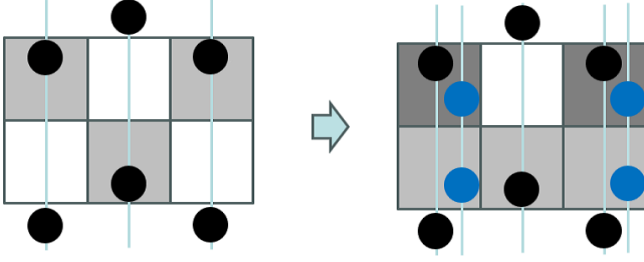


図 1 Cooperation of operators

地平線までの視野角に基づき、地球中心を結ぶ直線と地球表面に接する線の角度を用いて、式 (1) で幾何学的に求められる。

$$R_s = R_e \cos^{-1} \left(\frac{R_e}{R_e + H} \right) \quad (1)$$

R_e は地球の半径、 H は衛星の高度である。衛星があるグリッドセル内に存在する場合、そのセル内で通信可能とする。また、複数衛星が 1 セル内に存在する場合、カバレッジ多重度が上がり、ユーザにより広い帯域幅を提供できる。極地付近と赤道付近では、実際のグリッドセルの面積は大きく異なり、極地付近のグリッドセルは衛星の通信範囲を正確に表せないが、極地付近は人口が少なく、数値評価結果に大きな差異は生じない。

LEO 衛星ネットワーク事業者 i のグリッドセル k の収益 $G_{i,k}$ は式 (2) で得られる。

$$G_{i,k} = \alpha_{i,k} \beta \quad (2)$$

ただし k は地表をグリッドセルに分割し、各々のセルに付与した番号である。 $\alpha_{i,k}$ は衛星事業者 i のグリッドセル k の契約者数であり、 β は LEO 衛星通信サービスの契約者 1 人当たりの月額料金である。

協力ゲーム理論では、提携全体の利得を特性関数 v と呼ぶため、本稿での特性関数 v は協力時の提携全体の収益となる。 S_{all} は、全て地域のグリッドセルの集合であり、 S_i 、 S_j はそれぞれ事業者 i 、 j のカバーするグリッドセルの集合である。 $v(i, j)$ を LEO 衛星ネットワーク事業者 i と j の提携時の特性関数と定義すると、式 (3) で得られる。

$$\begin{aligned} v(i, j) &= \sum_{s \in S_{all}} G_{i+j, k} \\ &= \left(\sum_{k \in S_i \cap S_j} \alpha_{i+j, k} + \sum_{k \in S_i \cap \bar{S}_j} \alpha_{i, k} + \sum_{k \in \bar{S}_i \cap S_j} \alpha_{j, k} \right) \beta \end{aligned} \quad (3)$$

衛星事業者 i のグリッドセル k における契約者数 $\alpha_{i,k}$ は、以下の式 (4) で定義される。

$$\alpha_{i,k} = \begin{cases} \sum_{c \in D_k} P_c C_{i,c}, & \text{if } \sum_{c \in D_k} \frac{\mu_{i,k} \gamma_i}{P_c C_{i,c} U} > 1 \\ \frac{\mu_{i,k} \gamma_i}{U}, & \text{if } \sum_{c \in D_k} \frac{\mu_{i,k} \gamma_i}{P_c C_{i,c} U} \leq 1 \end{cases} \quad (4)$$

ただし $P_{k,c}$ は国 c の人口、 D_k はグリッドセル k に存在する国の集合、 $C_{i,c}$ は衛星事業者 i の国 c の契約率、 U は 1 人あたりの平均通信量 (bps)、 γ_i は事業者 i の衛星の帯域幅 (bps)、 $\mu_{i,k}$

は衛星事業者 i のグリッドセル k のカバレッジ多重度である。

$\sum_{c \in D_k} \frac{\mu_{i,k} \gamma_i}{P_c C_{i,c} U}$ は、グリッドセル k における契約者 1 人当たりの衛星通信量を表している。この値が 1 を超えている場合、衛星通信が正常に行われており、契約者数はグリッドセルの人口 P_c と契約率 $C_{i,c}$ の積で計算される。しかし、下回った場合、サービスが正常に提供されておらず、サービスが正常に提供できる最大の人数までしか契約者が増えないことが考えられるため、契約者数は $\mu_{i,k} \gamma_i$ を U で割った商となる。人口 $P_{k,c}$ は面積と人口密度から次式で得られる。

$$P_{k,c} = \lambda_{k,c} \eta_c \quad (5)$$

ただし $\lambda_{k,c}$ はグリッドセル k における国 c の面積、 η_c は国 c の人口密度である。契約率 $C_{i,c}$ はロジスティック関数 (6) を想定する。

$$C_{i,c} = \tau_i \left(C_{c,\min} + \frac{C_{c,\max} - C_{c,\min}}{1 + e^{-10(\epsilon_i - 0.5)}} \right) \quad (6)$$

ただし、 τ_i は、事業者の評価に基づく事業者のごとの係数となる。 ϵ_i は、衛星事業者 i の満足度である。また、国によって利用率の上限 $C_{c,\max}$ 、下限 $C_{c,\min}$ は異なると考えられているため、上限と下限を設けている。数値評価では、この上限と下限をアメリカを基準に決定する。これは、アメリカ合衆国は Starlink の契約者数から、契約率の上限を決めることが容易であるからである。各国の上限と下限は、アメリカとインターネット普及率を比較することで、インターネット普及率に対応した契約率の幅となる。国 c の I_c で定義されるインターネット普及率は世界銀行のデータを参考にする [10]。また、 $C_{US,\min}$ をアメリカ合衆国の利用率の下限、 $C_{US,\max}$ をアメリカ合衆国の利用率の上限とし、 I_{US} をアメリカ合衆国のインターネット普及率とし、 F_c をスケール因子とする。そのスケール因子と契約率の上限と下限は、式 (7) で計算される。

$$F_c = \frac{I_c}{I_{US}} \quad (7)$$

$$C_{c,\min} = C_{US,\min} F_c \quad (8)$$

$$C_{c,\max} = C_{US,\max} F_c \quad (9)$$

また、満足度 ϵ_i を対数関数 (10) で定義する。

$$\epsilon_i = \log 1.5 \{ \rho \omega_i + (1 - \rho) \mu_i \} \quad (10)$$

ω_i は衛星事業者 i の平均カバー率であり、衛星事業者 i のグリッドセル k のカバー率である $\omega_{i,k}$ の平均である。 $\omega_{i,k}$ はグリッドセル k に衛星事業者 i の衛星が存在すれば 1、しなければ 0 となる。また、 μ_i は衛星事業者 i の平均カバレッジ多重度であり、衛星事業者 i のグリッドセル k のカバレッジ多重度である $\mu_{i,k}$ の平均である。 $\mu_{i,k}$ はグリッドセル k に存在する衛星事業者 i の衛星数である。 ρ は重みであり、カバレッジ多重度が上昇することより、カバー率が上昇する方が契約者の満足度に寄与することが自然であるため、 $0.5 < \rho < 1$ である。これは、カバー率の上昇によるカバー範囲 (通信範囲) の拡大が、カバレッジ多重度の上昇による帯域幅の上昇よりも契約者は重視するためである。

協力ゲームにおいて、 N はゲームに参加する全プレイヤーの集合を表し、 $N = \{i, j\}$ である 2 者のゲームの場合、シャープレイ値は以下の式で得られる。

$$\phi_i(v) = v(i) + \frac{1}{2}\{v(i, j) - v(i) - v(j)\}, i = 1, 2 \quad (11)$$

4. 数値評価

4.1 評価条件

地球の半径 R_e を約 6,371km, 衛星高度 H を 550km とすると, 図 2 のように, 通信範囲の直径 R_s は 2,557km となる. この範囲を一边 1,809km の正方形グリッドセルに分割し, これを通信範囲とする. 地球全体は長さ 39,798km と近似し, 図 3 のように 22×22 のグリッドセルに分割する. また, 各国の面積と人口密度においては python のライブラリにある Natural Earth および世界銀行の 2021 年データを用いる [10].

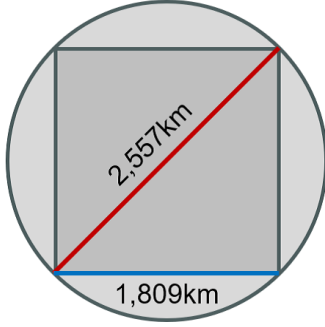


図 2 Grid cell size

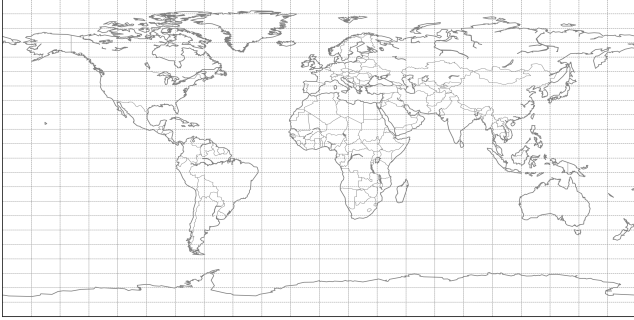


図 3 World grid division

表 1 衛星コンステレーションの構成

名前	軌道	衛星数
conste1	極軌道	648
conste2	極軌道	648
conste3	極軌道	36
conste4	傾斜軌道	30
conste5	極軌道	216
conste6	傾斜軌道	216

OneWeb を模したコンステレーションを conste1 とし, Qianfan(千帆) を模したものを conste2 とする. OneWeb はイギリスに本社を構える企業であり, Qianfan は中国に本社を構える企業である. conste1 は高度 1,200km, 傾斜角 87.9 度, 軌道面 18, 総衛星数 648 で, conste2 は高度 813km, 傾斜角 89 度, 軌道面 18, 総衛星数 648 である.

また, conste3 は高度 780km, 傾斜角 86.4 度, 軌道面 6, 総衛星数 36 で, conste4 は高度 550km, 傾斜角 53 度, 軌道面 5, 総衛星数 30, conste5 は高度 1,200km, 傾斜角 87.9 度, 軌道面 18, 総衛星数 216 で, conste6 は高度 560km, 傾斜角 43 度, 軌道面 14, 総衛星数 210 である. conste3, 5 は極軌道をもつコンステレーションであり, conste4, conste6 は傾斜軌道をも

つコンステレーションである. conste3, 4 は最小規模のコンステレーションを想定し, conste5, 6 は conste1, 2 と conste3, 4 の衛星数の中間のコンステレーションを想定している. 各コンステレーションの詳細は表 1 に示す.

以下の表 2 は, 契約者数を求めるために必要なパラメータ設定値である. 月額料金である β は Starlink の個人の利用の価格を参考にした. また, C_{US_max} に関しても starlink のアメリカでの契約者数を参考にした.

表 2 評価に用いたパラメータ

記号	値
β	100(\$)
U	0.5(Mbps)
γ	20,000(Mbps)
δ	5(Mbps)
C_{US_min}	0
C_{US_max}	0.01
ρ	0.8

4.2 協力時の評価

それぞれの事業者同士の協力を想定する. それぞれについて収益を計算し, 協力による収益の総和が単独収益の総和を上回る場合, 優加法性が満たされていると判断し, シャープレイ値を用いて分配を行う. 優加法性とは, 提携ゲームを成り立たせるために必要な条件であり, 本稿では, 協力コンステレーションの収益が, 協力に参加する事業者の収益の和よりも大きいことがこの条件に相当する.

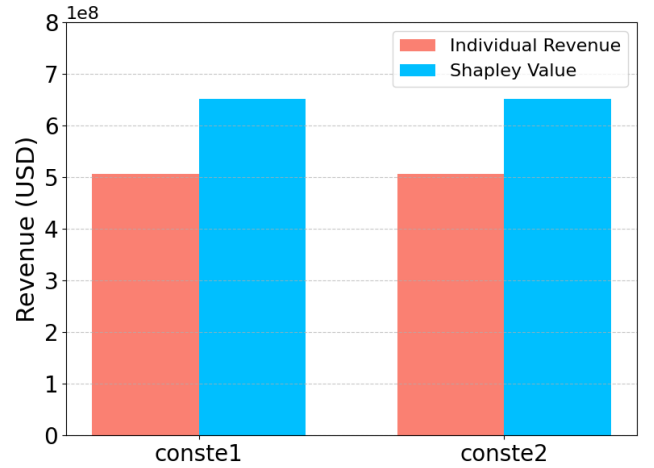


図 4 Renewal distribution by Shapley value in conste1+2

図 4 は, 先行研究の結果であり, conste1 と conste2 において協力しない場合の収益と協力し, 収益をシャープレイ値で分配した場合の収益の比較である. conste1 のシャープレイ値は 651,565,977 ドル, conste2 は 652,005,699 ドルであり, conste1 と conste2 の協力する収益は協力しない収益の約 1.29 倍となる. これは協力により, カバー率とカバレッジ多重度の上昇するからである.

図 5 は, conste3 と conste4 において協力しない場合の収益と協力し, 収益をシャープレイ値で分配した場合の収益の比較である. 協力による収益上昇率は, conste3 で約 195 倍, conste4 で約 864 倍となる. これは, 協力しないときのカバー率が小さく, 協力によってカバー率が上昇することによって, 収益が大幅に上昇したためである. この結果は, 少数衛星による単独事業ではほとんどサービスが提供できず, 協力が非常に強力な手段となることを示している. しかし, 協力している場合でも, カバー率は約 0.13 で, 地球の 1 割程度しかカバーできていないので, 地球上のほとんどの場所でサービスを楽しむことが

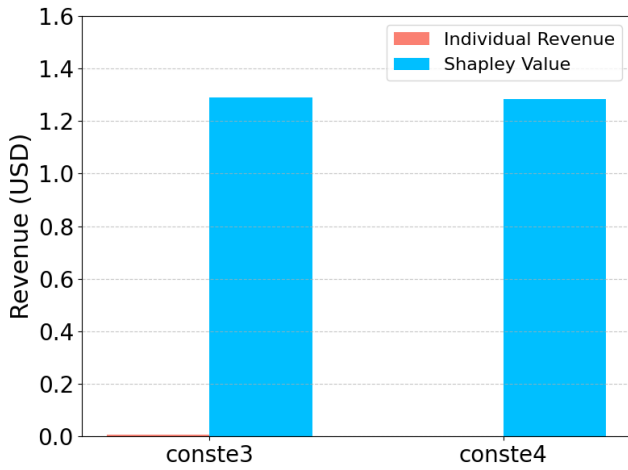


図 5 Renewal distribution by Shapley value in conste3+4

できない。そのため、現実的にはこの協力で収益が上昇するとは考えづらいため、モデルに当てはめることは適していない。また、この協力をモデル化するには、ある閾値以上のカバー率を満たさないとユーザにサービスを提供できないという制約条件の導入が必要である。

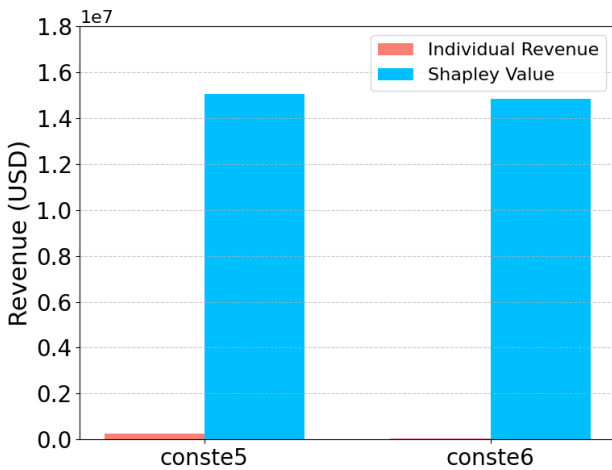


図 6 Renewal distribution by Shapley value in conste5+6

図 6は、conste5 と conste6 において協力しない場合の収益と協力し、収益をシャープレイ値で分配した場合の収益の比較である。conste5 のシャープレイ値は 15,039,069 ドル、conste6 のシャープレイ値は 14,851,028 ドルであり、協力による収益上昇率は、conste5 で約 62 倍、conste4 で約 279 倍となる。この協力も協力することで収益が大幅に上昇しているが、カバー率が約 0.60 で、低中緯度地域に限っても約 0.76 と、ユーザからすると、通信が安定しないために、モデルに適しない。

図 7は、conste1, 2, 5, 6 のそれぞれ単体の収益とそれぞれが協力した場合の収益を表している。これは、どの協力においても収益が上昇し、協力をしない場合のそれぞれの収益の和よりも大きいことを示しており、どの協力でも優加法性を満たす。このように、大規模な協力体制では、提携の経済的利得が十分に高く、提携ゲームとしての基礎条件が整っていることが確認できる。

図 8は、conste1, conste2, conste5 の 3 者の協力しない場合の収益と協力し、収益をシャープレイ値で分配した場合の収益の比較である。conste1 のシャープレイ値は、653,809,298 ドル、conste2 は 678,527,801 ドル、conste5 は 157,900,006 ドル

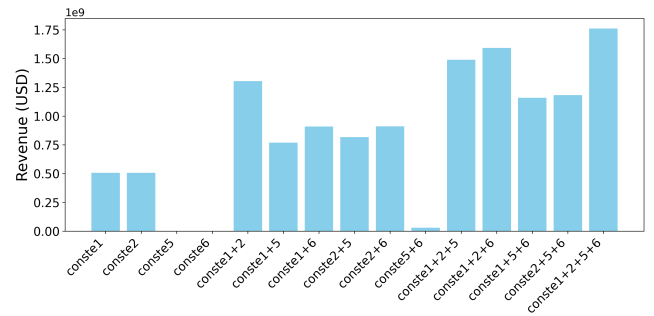


図 7 Revenue comparison

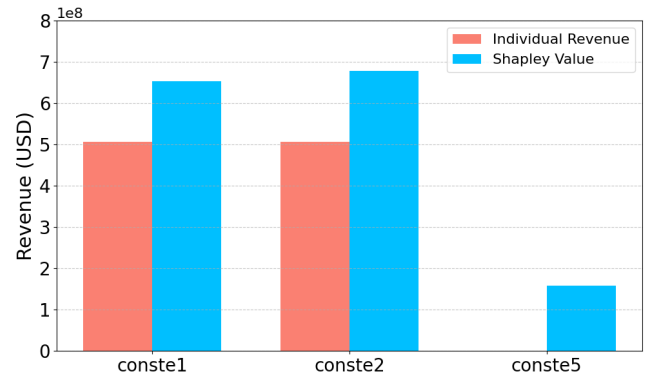


図 8 Renewal distribution by Shapley value in conste1+2+5

である。conste1 と conste2 においては、conste1 と conste2 の協力時より、シャープレイ値は上昇する。conste5 においても収益上昇率が約 655 倍と、大幅に上昇している。これは、この協力時はカバー率が 0.95 と高いためである。このことは、協力によるカバー率の飛躍的上昇が収益に直結すること、また小規模事業者 (conste5) にとっては、大規模事業者との協力が非常に有効な戦略であることを示している。

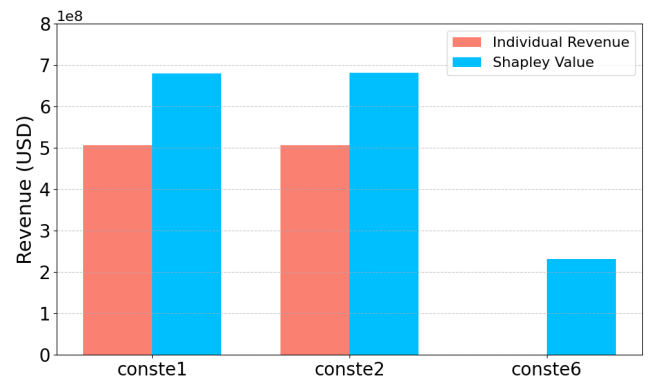


図 9 Renewal distribution by Shapley value in conste1+2+6

図 9では、conste1, conste2, conste6 の 3 者の協力である。収益は conste1 が 680,736,583 ドル、conste2 が 681,138,023 ドル、conste6 が 230,988,682 ドルとなり、特に conste6 の収益上昇率が約 4346 倍に達している。これは、この協力時のカバー率が 0.97 と高く、さらに conste6 が傾斜軌道であるため、高需要地域 (低中緯度) のカバレッジ多重度が高いことに起因する。このように、軌道特性によっても協力効果が大きく左右されることが分かる。同じ衛星数でも、カバレッジの分布がサービス

の質や契約者数に大きく影響するため、協力相手の軌道構成は慎重に選定する必要がある。

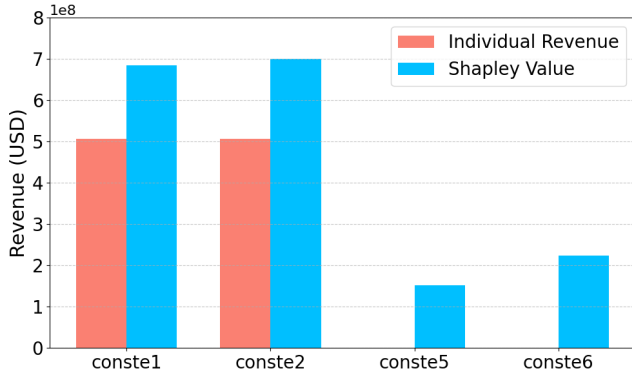


図 10 Renewal distribution by Shapley value in conste1+2+5+6

図 10では 4 者協力の結果を示しており、conste1 と conste2 のシャープレイ値は 3 者協力時より上昇しているが、conste5 と conste6 はわずかに減少している。これは、すでに需要が満たされていたため、追加的な協力の利得が限定的であることを意味する。すなわち、協力の効果には限界があり、収益上昇は飽和的な性質を持つことが示唆される。今後は、協力の最適規模の検討も重要な論点となる。

5. ま と め

本稿では、LEO 衛星ネットワークにおける複数事業者間の協力による通信サービスの提供を対象とし、提携形ゲーム理論とシャープレイ値を用いた収益分配モデルを提案・評価した。特に、カバー率と需要分布の関係を重視し、現実的なサービス提供可能性を踏まえた分析を行った。

シミュレーションにより、多くの組み合わせで協力によって収益が飛躍的に増加し、優加法性を満たすことが確認された。特に、大規模事業者と小規模事業者の協力は、小規模事業者の収益を著しく向上させることが分かった。また、衛星軌道特性が需要地域との整合性に強く影響するため、適切な協力関係の設計が重要であることも明らかとなった。

また、協力の規模が拡大することで収益増加が飽和する傾向も見られたため、最適な協力規模・構成に関する議論も今後の課題である。

今後の研究では、協力が有効となる条件や閾値の体系化、サービス可能性を制約とした現実的なモデル構築、さらには時間軸やコスト構造を導入した動的モデルへの拡張を目指す。また、3 者以上の協力モデルのさらなる一般化や、国際的・地域的な規制や競争状況を加味した戦略的分析も行っていく予定である。

謝辞 本研究成果は、JSPS 科研費 25K03113, 23K28078 の援助を受けたものである。ここに記して謝意を表す。

文 献

- [1] T. Darwish; G.K. Kurt; H. Yanikomeroglu; M. Bellmare; G. Lamontagne, "LEO Satellites in 5G and Beyond Networks: A Review From a Standardization Perspective", IEEE Access, 2022
- [2] J.C. McDowell, "Starlink Constellation Statistics", Planet4589.org, <https://planet4589.org/space/con/star/stats.html>. [Accessed: Jan. 22, 2025].
- [3] Kaito Kondo; Noriaki Kamiyama; Sumiko Miyata, "Coalition among Multiple Providers of LEO Satellite Networks", IEEE LANMAN 2025
- [4] O.B. Osoro; E.J. Oughton, "A Techno-Economic Framework for

Satellite Networks Applied to Low Earth Orbit Constellations: Assessing Starlink, OneWeb and Kuiper", IEEE Access, 2021

- [5] Z. Lian; Y. Dong; L. Yin; Y. Wang, "An Economic Evaluation Method for LEO Satellite Constellation Considering Revenue and Efficiency", ICC Workshops, 2022
- [6] Nils Pachler; Inigo del Portillo; Edward F. Crawley; Bruce G. Cameron, "An Updated Comparison of Four Low Earth Orbit Satellite Constellation Systems to Provide Global Broadband", 2021 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)
- [7] S.N. Durlauf, L.E. Blume, Game Theory, Macmillan Publishers Ltd., 2010.
- [8] M.J. Osborne, A. Rubinstein, A Course in Game Theory, The MIT Press, Cambridge, 1994.
- [9] A. Kimms, D. Cetiner, Approximate nucleolus-based revenue sharing in airline alliances, European Journal of Operational Research 220 (2) (2012) 510–521.
- [10] World Bank, "Individuals using the Internet (% of population)", <https://databank.worldbank.org/reports.aspx?dsid=2&series=IT.NET.USER.ZS#> [Accessed: Dec. 21, 2024].