

LEO 衛星ネットワークにおける事業者間提携のモデル化

近藤 海斗[†] 上山 憲昭^{††} 宮田 純子^{†††}

[†] 立命館大学 情報理工学研究科

〒 567-8570 大阪府茨本市岩倉町 2-150

^{††} 立命館大学 情報理工学部

〒 567-8570 大阪府茨本市岩倉町 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.ritsumei.ac.jp, ^{††}kamiaki@ritsumei.ac.jp, ^{†††}sumiko@ict.e.titech.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 衛星は遅延が少な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. 事業の初期段階における衛星数の制限から, 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. 本稿では, 複数の LEO 衛星事業者が協力して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する. そして事業者間の協力による通信サービスの拡張可能性を数値評価により検証する.

キーワード LEO 衛星, 協力ゲーム, シャープレイ値

Modeling Cooperation Between Operators In LEO Satellite Network

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.ritsumei.ac.jp, ^{††}kamiaki@ritsumei.ac.jp, ^{†††}sumiko@ict.e.titech.ac.jp

Abstract In recent years, communication services utilizing networks based on Low Earth Orbit (LEO) satellites have garnered significant attention. LEO satellites, positioned in low orbits, enable low-latency communication; however, their limited coverage necessitates the deployment of large-scale satellite constellations. Due to constraints on the number of satellites in the early stages of business operations, service availability in terms of geographic coverage and time is limited, posing a challenge in securing users. This paper proposes a cooperative service provision model involving multiple LEO satellite operators and introduces a revenue-sharing scheme based on the Shapley value from cooperative game theory. Furthermore, we conduct a numerical evaluation to assess the potential for service expansion through inter-operator cooperation.

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しかできない反面, 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、軌道が低いため、遅延が低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。そこで本研究では、LEO 衛星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分配額を導出し、その有効性を示す。そのためのアプローチとして、LEO 衛星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収益配分法を提案する。そして計算機シミュレーションにより収益が向上することを示す。

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バレッジ、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 衛星事業者を評価している [3]。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。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 よりも低いが、収益性は大幅に高いことを示している [4]。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。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 [5]。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。

本稿では、LEO 衛星コンステレーションを用いた衛星通信の初期段階における事業者の収益性に関する分析を行う。また、初期段階の収益性が低いもしくはない状態の解決策として、LEO 衛星事業者が協力することを提案し、提携ゲームによる収益配分法を提案し、数値評価を行う。

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 [7]。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 [8]。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ると仮定し、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ると仮定する点異なる。本研究では、プレイヤーの貢献を公平に評価し、分配を明確にしているため、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、本稿でも月額制を用いる。月額料金に関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、グリッドセルに分割する。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事業者の衛星である。衛星がグリッドセル内に存在していれば、そのグリッドセル内の契約しているユーザは通信が可能であり、グリッド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。このグリッドセル内の衛星の台数をカバ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。

シナリオは以下のようになる。

- (1) LEO 衛星コンステレーションの構成の初期段階である事業者が他の事業者と協力する。
- (2) 衛星通信のカバー範囲が広がり、カバレッジ多重度が上昇する。
- (3) 契約者の満足が上昇する。これは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るためであり、カバレッジ多重度が上昇すると、ユーザの通信速度が上昇するためである。
- (4) 契約率が上昇する。
- (5) 収益が上昇する。
- (6) 事業者間で収益を分配する。

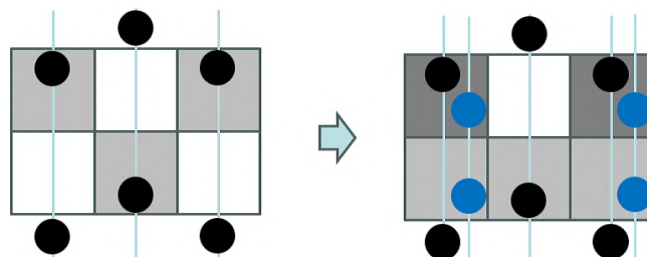


図 1 Cooperation of operators

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, 計算機シミュレーションに大きな誤差は生じない。

衛星事業者 i のグリッドセル k の収益 $G_{\{i,s_k\}}$ は式 (2) で得られる。

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

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。 $\alpha_{\{i,s_k\}}$ 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の費用である。

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。 $v(i, j)$ を衛星事業者 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。

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

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。

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

ただし P_c は国 c の人口, s_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), δ はサービス提供の閾値である。

$\sum_{c \in s_k} \frac{\mu_{i,k} \gamma_i}{P_c C_{i,c} U}$ 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。この値が閾値 δ 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 γ_i を δ で割った商となる。人口 P_c は面積と人口密度から次式で得られる。

$$P_c = \lambda_c \eta_c \quad (5)$$

ただし λ_c は国 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係数となる。 ϵ_{i,s_k} は, 衛星事業者 i のグリッドセル k での満足度である。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。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 [9]。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。

$$F_c = \frac{P_c}{P_{US}} \quad (7)$$

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

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

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 ω_{i,s_k} の平均である。 ω_{i,s_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 μ_{i,s_k} の平均である。 μ_{i,s_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により, 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。この範囲を一辺 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 [9]。

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。

図 4 と図 5 は conste1 のグリッドセルごとのカバー率 $\omega_{\{c1,s_k\}}$ とカバレッジ多重度 $\mu_{\{c1,s_k\}}$ を表している。conste1 は傾斜角

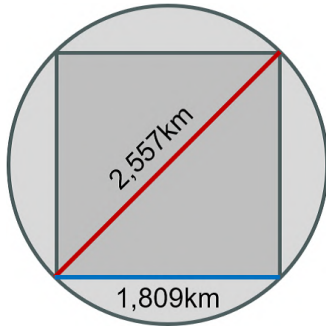


図 2 Grid cell size

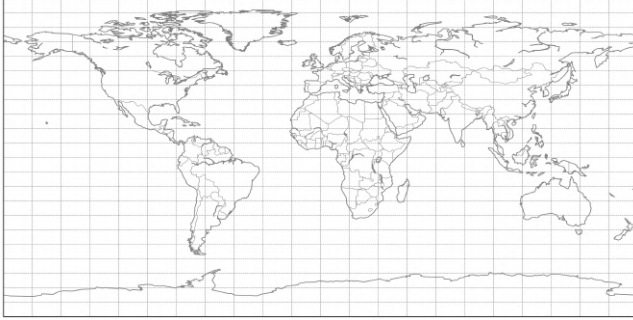


図 3 World grid division

が 87.9 度と 90 度に近いため、衛星が北極点と南極点の近くを通る極軌道のコンテレーションであるため、グリッドセルごとで衛星のカバー率もカバレッジ多重度も大きくは変化しない。また, constel1 のカバー率は $\omega_{\{c1,s_k\}}$ で, カバレッジ多重度は $\mu_{\{c1,s_k\}}$ で表記する。この平均が ω_{c1} と μ_{c1} となる。

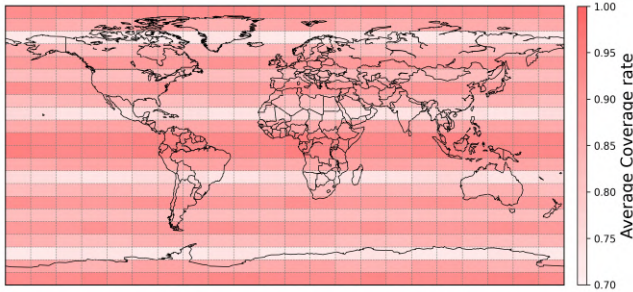


図 4 Average coverage rate of constel1

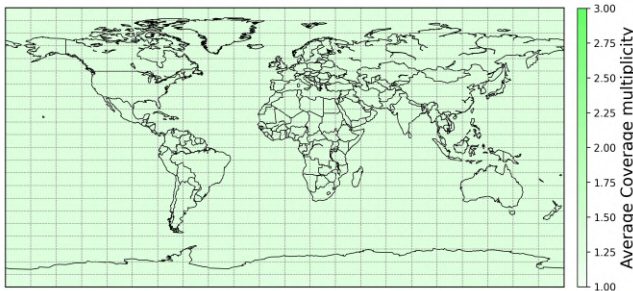


図 5 Average coverage multiplicity of constel1

図 6 と図 7 は conste2 のグリッドセルごとのカバー率 $\omega_{\{c2,s_k\}}$ とカバレッジ多重度 $\mu_{\{c2,s_k\}}$ を表している。conste2 は傾斜角が 89 度であり, constel1 と同様に極軌道のコンテレーション

であるため, グリッドセルごとで衛星のカバー率もカバレッジ多重度も大きくは変化しない。conste2 のカバー率は $\omega_{\{c2,s_k\}}$ で, カバレッジ多重度は $\mu_{\{c2,s_k\}}$ で表す。この平均が ω_{c2} と μ_{c2} となる。

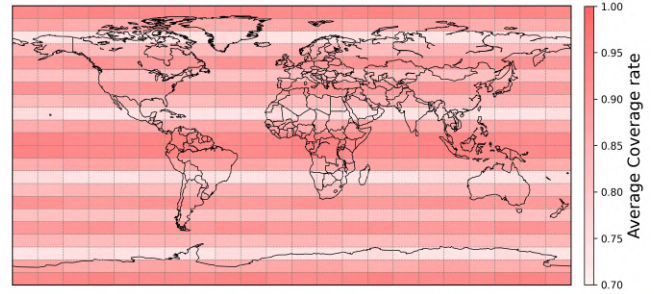


図 6 Average coverage rate of conste2

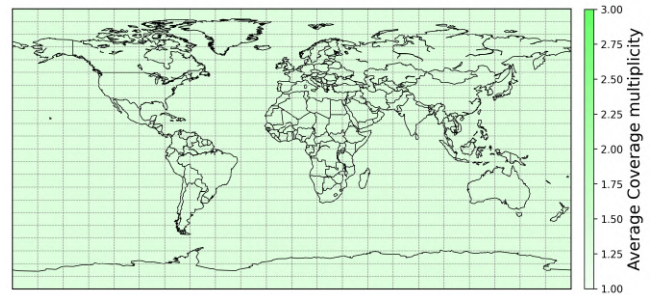


図 7 Average coverage multiplicity of conste2

図 8 と図 9 は constel1 と conste2 を合成して, 1 つの協力コンステレーションを構成したときのグリッドセルごとのカバー率 $\omega_{\{c1+c2,s_k\}}$ とカバレッジ多重度 $\mu_{\{c1+c2,s_k\}}$ を表している。協力したことにより, カバー率は 1 に近づき, カバレッジ多重度は, constel1 と conste2 のカバレッジ多重度の和となっている。協力コンステレーションのカバー率は $\omega_{\{c1+c2,s_k\}}$ で, カバレッジ多重度は $\mu_{\{c1+c2,s_k\}}$ で表記する。この平均が ω_{c1+c2} と μ_{c1+c2} となる。

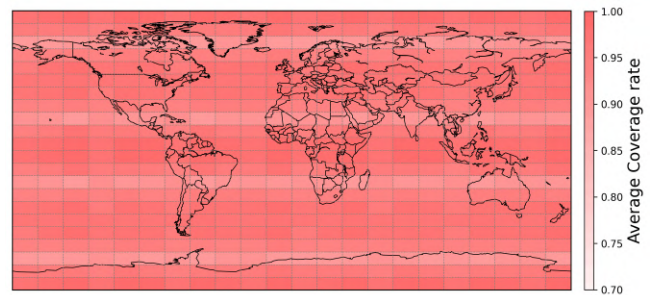


図 8 Average coverage rate of conste1+2

以下の表 1 は, 契約者数を求めるために必要なパラメタ設定値である。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, $C_{US,max}$ についても starlink のアメリカでの契約者数を参考にした。

4.2 協力時の評価

衛星通信を利用する際の 1 人当たりの平均通信量 U について 0.05, 0.1, 0.5, 5.0 の 4 つのシナリオを想定する。それぞれについて収益を計算し, 優加法性を満たしている場合, シャープレイ値を用いて分配を行う。 $U = 0.5$ はスマートフォンでの平

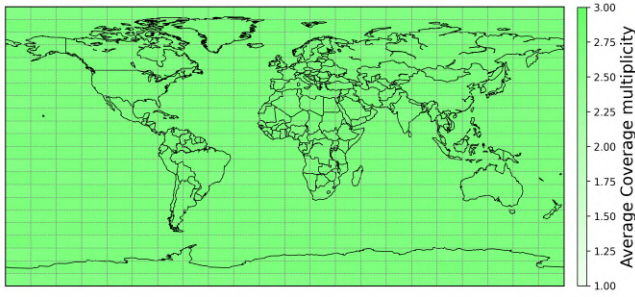


図 9 Average coverage multiplicity of conste1+2

表 1 評価に用いたパラメタ

記号	値
β	100(\$)
U	0.5(Mbps)
γ	20000(Mbps)
δ	5(Mbps)
C_{US_min}	0
C_{US_max}	0.01
ρ	0.8

均的な通信を全て衛星通信で行ったときの通信量と想定している。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る。本稿では協力コンステレーションの収益が, conste1 の収益と conste2 の収益の和よりも大きいことが優加法性を満たす条件である。

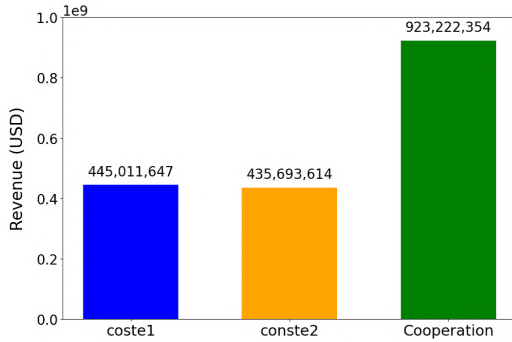


図 10 Amount of revenue in three cases ($U = 0.05$)

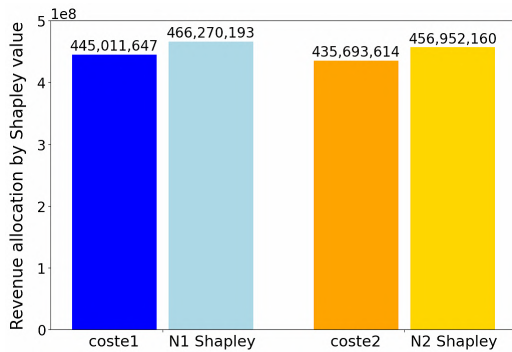


図 11 Revenue allocation based on Shapley value ($U = 0.05$)

$U = 0.05$ のときの各事業者の収益と、提携時の両事業者の収益の合計を図 10 に示す。収益は conste1 単独の場合で 445,011,647 ドル, conste2 単独の場合で 435,693,614 ドル, 協力コンステレーションの場合で, 923,222,354 ドルとなる。協力コンステレーションの収益は conste1 と conste2 の収益の和の約 1.048 倍となり, 優加法性を満たす。これは, 衛星カバ

レッジ多重度 μ の影響で, 満足度 ϵ に差が生じたためである。衛星数が等しい事業者同士で協力することで, カバレッジ多重度が conste1 と conste2 の約 2 倍になり, 満足度は conste1 の約 0.3530 と conste2 の約 0.3533 に対して, 協力時は約 0.6669 となる。また, シャープレイ値を用いて収益を分配したときの, 各事業者の収益配分と, 非提携時の収益を図 11 に示す。conste1 の配分である N1 Shapley は 445,011,647 ドルとなり, conste2 の配分である N2 Shapley は 456,952,160 ドルである。conste1 も conste2 も協力により収益を増加させることができる。

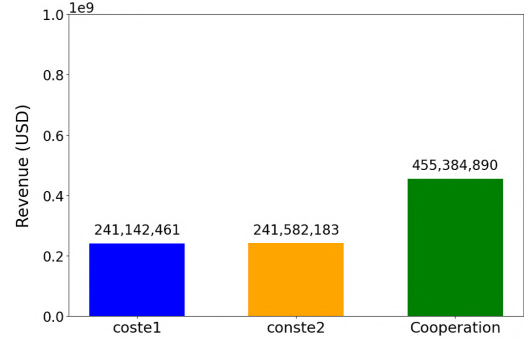


図 12 Amount of revenue in three cases ($U = 0.1$)

しかし, $U = 0.1$ のとき, 図 12 に示すように, 収益は conste1 単独の場合で 241,142,461 ドル, conste2 単独の場合で 241,582,183 ドル, 協力コンステレーションの場合で, 455,384,890 ドルとなる。協力コンステレーションの収益は conste1 と conste2 の収益の和の約 0.943 倍となり, 優加法性を満たさない。 $U = 0.05$ と同様に協力することで満足度は上昇するが, 北米や欧州, 東アジアなど契約率, 人口がともに高い地域は協力前から契約者が閾値に達するほど多く, 満足度上昇による, 協力時の契約者上昇の効果が小さいためである。

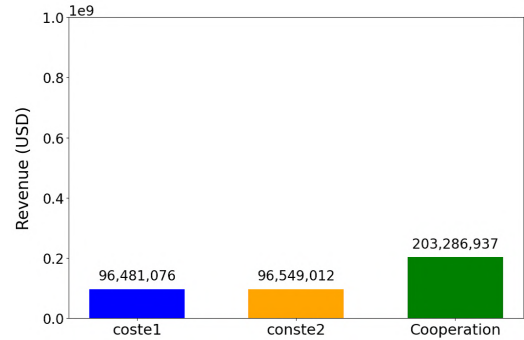


図 13 Amount of revenue in three cases ($U = 0.5$)

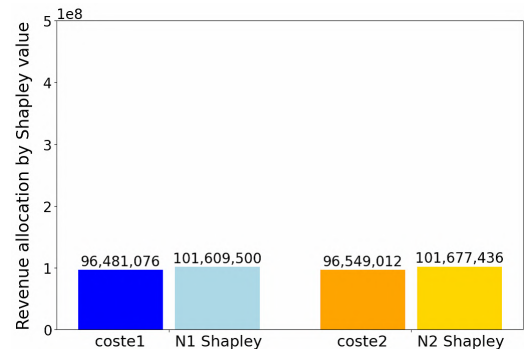


図 14 Revenue allocation based on Shapley value ($U = 0.5$)

一方で、 $U = 0.5$ のとき、図 13 に示すように、収益は conste1 単独の場合で 96,481,076 ドル、conste2 単独の場合で 96,549,012 ドル、協力コンステレーションの場合で、203,286,937 ドルとなる。協力コンステレーションの収益は conste1 と conste2 の収益の和の約 1.053 倍となり、優加法性を満たす。これは、 $U = 0.05$ のときと同様の理由である。また図 14 に示すように、シャープレイ値を用いて収益を分配すると、conste1 の配分である N1 Shapley は 101,609,500 ドルとなり、conste2 の配分である N2 Shapley は 101,677,436 ドルである。

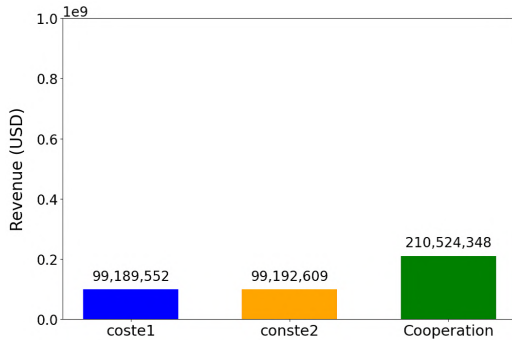


図 15 Amount of revenue in three cases ($U = 5$)

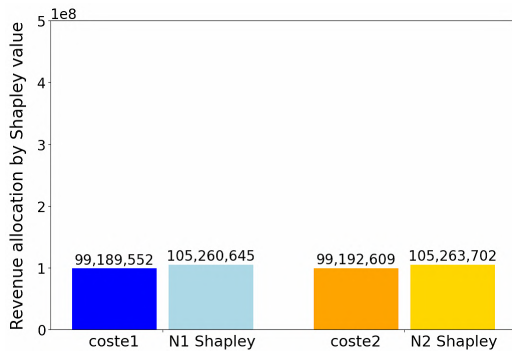


図 16 Revenue allocation based on Shapley value ($U = 5$)

$U = 5$ のとき、図 15 に示すように、収益は conste1 単独の場合で 99,189,552 ドル、conste2 単独の場合で 99,192,609 ドル、協力コンステレーションの場合で、210,524,348 ドルとなる。協力コンステレーションの収益は conste1 と conste2 の収益の和の約 1.061 倍となり、優加法性を満たす。これは、 $U = 0.05$ のときと同様の理由である。また、シャープレイ値を用いて収益を分配すると、図 16 に示すように、conste1 の配分である N1 Shapley は 105,260,645 ドルとなり、conste2 の配分である N2 Shapley は 105,263,702 ドルである。

5. ま と め

本稿では、LEO 衛星ネットワークを活用した通信サービスにおける課題に対し、複数の事業者間の協力モデルを提案し、その有効性を提携ゲーム理論の提携形ゲームおよび計算機シミュレーションを通じて検証した。従来、事業初期段階では衛星数の制約により、十分なサービスエリアの提供や利用者確保が困難であったが、本モデルは事業者間の衛星共有を可能とし、協力による収益向上とサービス拡大を実現する可能性を示した。

シミュレーション結果から、通信量の異なる複数のシナリオにおいて、協力モデルが多くの場合で優加法性を満たし事業者それぞれに収益の増加をもたらすことが確認された。特に、衛星カパレッジの向上により通信サービスの満足度が向上し、収益が拡大する傾向が見られた。一方で、通信量や地域特性によ

り協力モデルの効果が制約される場合もあり、協力モデルの適用範囲や条件の詳細な分析が必要であることが明らかとなった。

今後の研究では、まず優加法性を満たす条件を体系的に導出することにより、協力モデルの適用指針をさらに明確にしてい

く。また優加法性を満たすために最適なパラメタを探索することで、協力モデルの実現可能性をさらに高める予定である。さらに現状の 2 者間協力モデルを拡張し、3 者以上の事業者間での協力モデルを構築・検証することで、より複雑な事業環境におけるモデルの有効性を実証することを目指す。

謝辞 本研究成果は JSPS 科研費 23K21664, 23K21665, 23K28078 の助成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] 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
- [4] Z. Lian; Y. Dong; L. Yin; Y. Wang, "An Economic Evaluation Method for LEO Satellite Constellation Considering Revenue and Efficiency", ICC Workshops, 2022
- [5] 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)
- [6] S.N. Durlauf, L.E. Blume, Game Theory, Macmillan Publishers Ltd., 2010.
- [7] M.J. Osborne, A. Rubinstein, A Course in Game Theory, The MIT Press, Cambridge, 1994.
- [8] A. Kimms, D. Cetiner, Approximate nucleolus-based revenue sharing in airline alliances, European Journal of Operational Research 220 (2) (2012) 510–521.
- [9] 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].