
LEO衛星ネットワークの 事業者間提携の収益分配

立命館大学大学院情報理工学研究科 近藤海斗

立命館大学情報理工学部 上山憲昭

東京科学大学工学院 宮田純子

背景

- LEO(Low Earth Orbit)衛星
 - 高度2,000kmまでの低軌道で、約90～120分で地球を一周
 - 通信が可能な地表面は狭いが、低遅延での通信が可能
- LEO衛星通信ネットワーク
 - 多数のLEO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

概要

■ 課題

- 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)において性能を非発揮
- 衛星が常に動くため、衛星数が少ないと、地球を十分にカバー不可

■ 目的

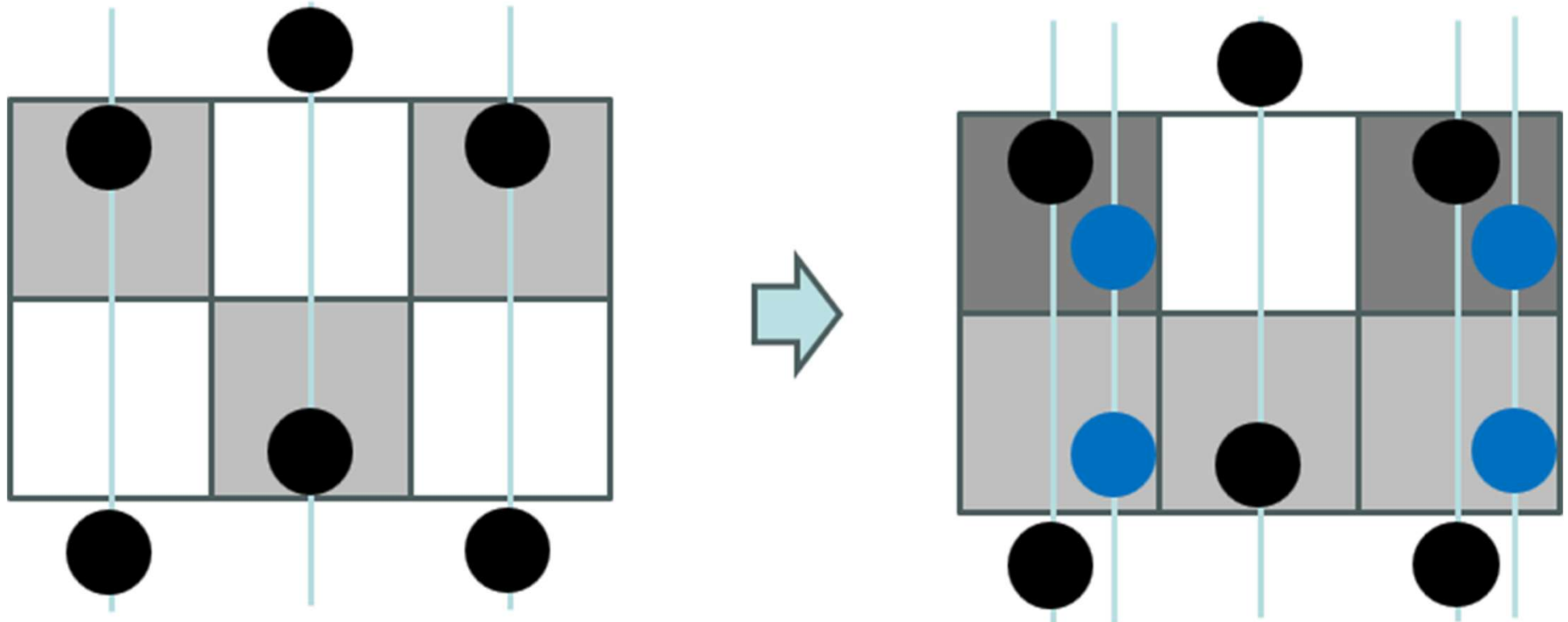
- LEO衛星事業者の協力サービスモデルを提案
- 参加事業者の適切な分配額を導出

■ アプローチ

- 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
- 協力ゲーム理論を用いた収益配分法を提案し、シミュレーションを通じて有効性を提示

想定条件

- 契約形態: 月額制(事業者によらず一定額)
- 数値評価: 収益額
- 衛星の通信範囲: グリッドセルに分割
- LEO衛星同士の通信は, どの事業者間でも可能



事業者間協力

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
2. 衛星通信のカバー範囲の拡大, カバレッジ多重度が上昇
 - カバレッジ多重度:グリットセル内の衛星数
3. 契約者の満足度が上昇
 - カバー範囲の拡大→サービスを利用可能な範囲の拡大
 - カバレッジ多重度の上昇→ユーザの通信速度が上昇
4. 契約率が上昇
5. 収益が上昇
6. 事業者間で収益を分配
 - 提携ゲーム

提携ゲーム

- 協力ゲーム理論の基本モデル
 - 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
- シャープレイ値
 - 各プレイヤーの「限界貢献度」(提携に参加することで追加される価値の期待値)を計算し、分配
- 特性関数 v
 - 提携が達成できる最大の価値(収益)を割り当てる関数
- 特性関数 v を用いてシャープレイ値 φ を計算

モデル化

R_s : 衛星の通信範囲

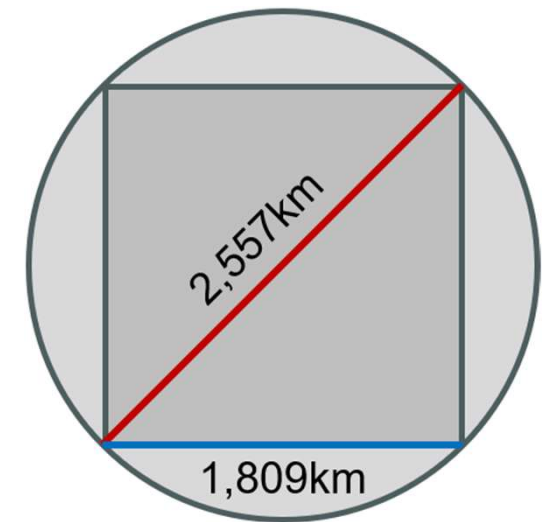
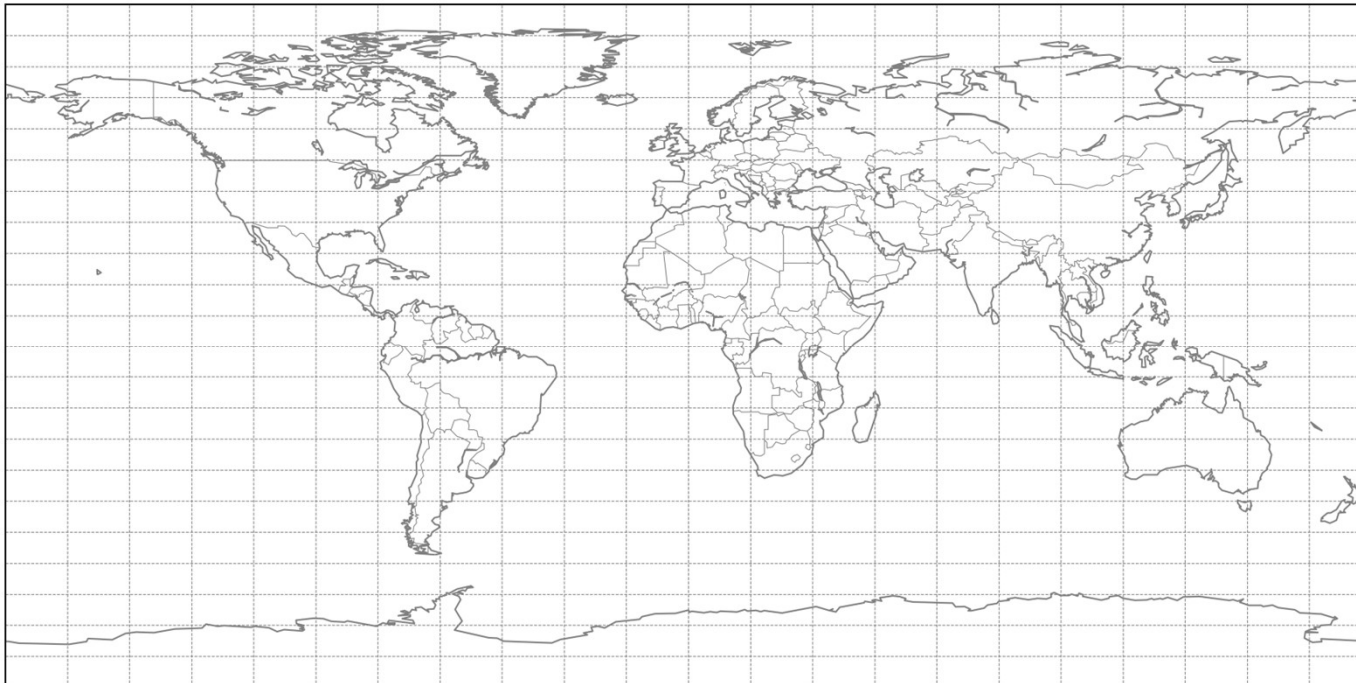
$$R_s = R_e \cos^{-1} \left(\frac{R_e}{R_e + H} \right)$$

- 衛星から地平線までの視野角により通信可能範囲が決定
- R_e : 地球の半径
- H : 衛星の高度

- グリッドセルごとに, 収益を計算
 - 契約者 × 月額料金
 - 衛星の容量を閾値に
 - カバレッジ多重度(衛星数)の平均を用いる
 - 衛星の動きをシミュレーション

評価条件(1/2)

- R_s (通信範囲)は約2,557km
 - R_e (地球の半径)は約6,371km, H (衛星の高度)を550kmとする
- 世界地図を22*22のグリッドセルに分割
 - 直径 R_s の円に内接する正方形の一辺は約1,809kmで, 地球の円周を39,798kmと近似



評価条件(2/2)

衛星コンステレーションの構成

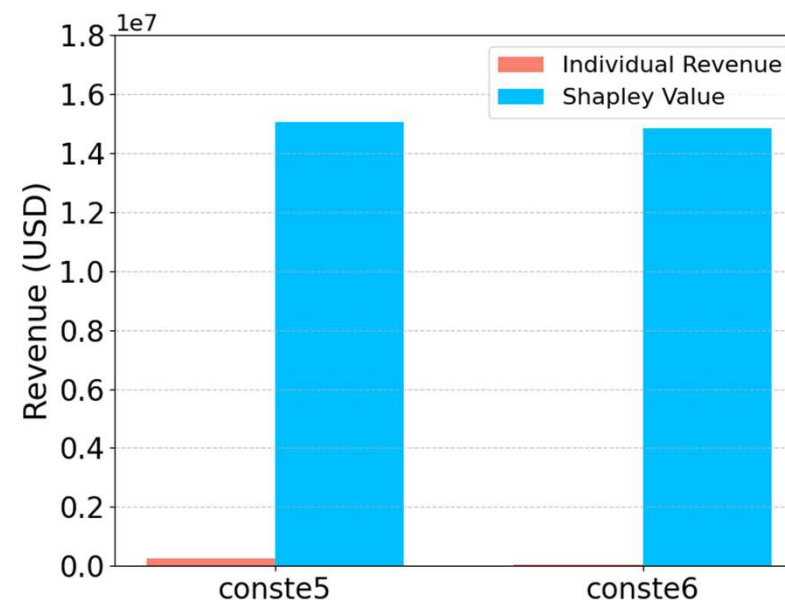
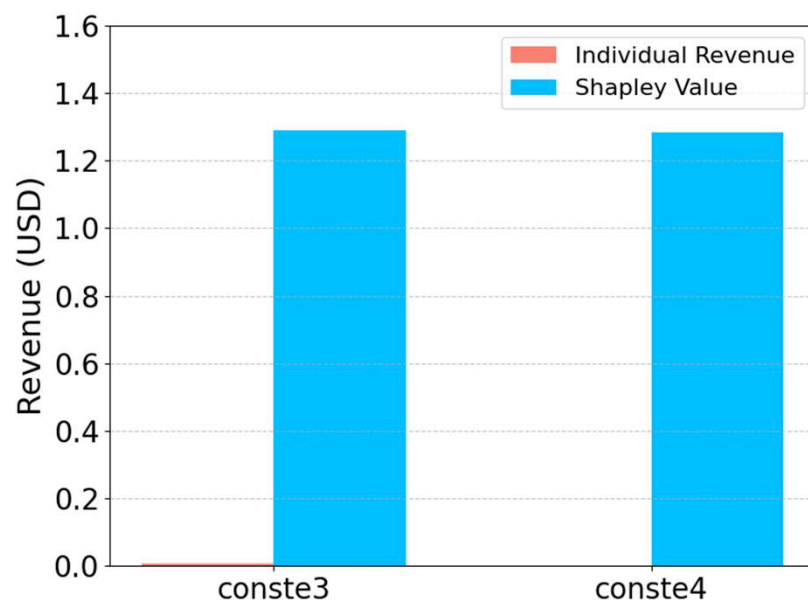
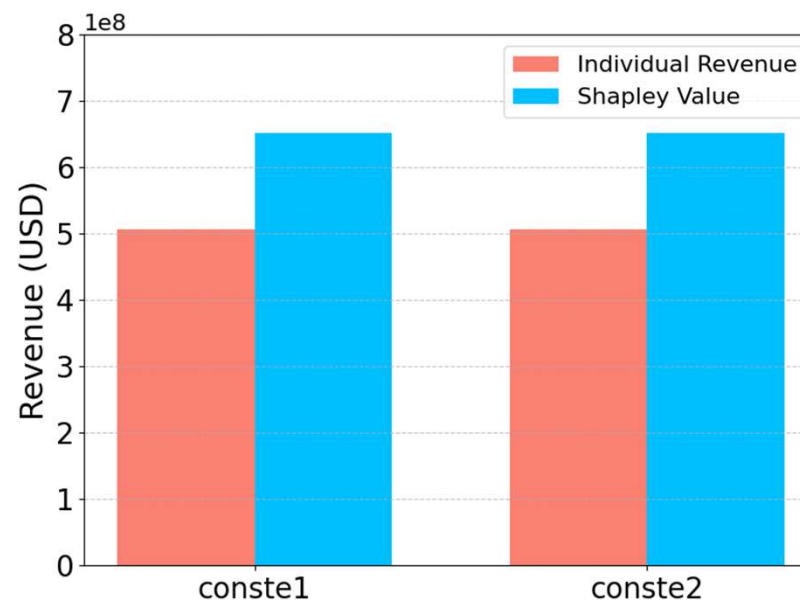
名前	軌道	衛星数
conste1	極軌道	648
conste2	極軌道	648
conste3	極軌道	36
conste4	傾斜軌道	30
conste5	極軌道	216
conste6	傾斜軌道	216

収益を求めるために必要なパラメータ

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

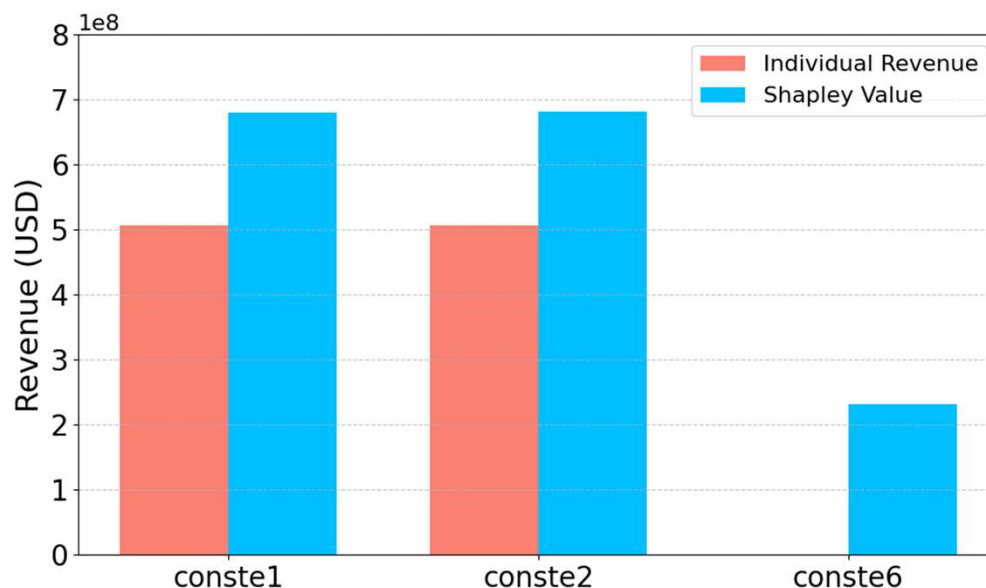
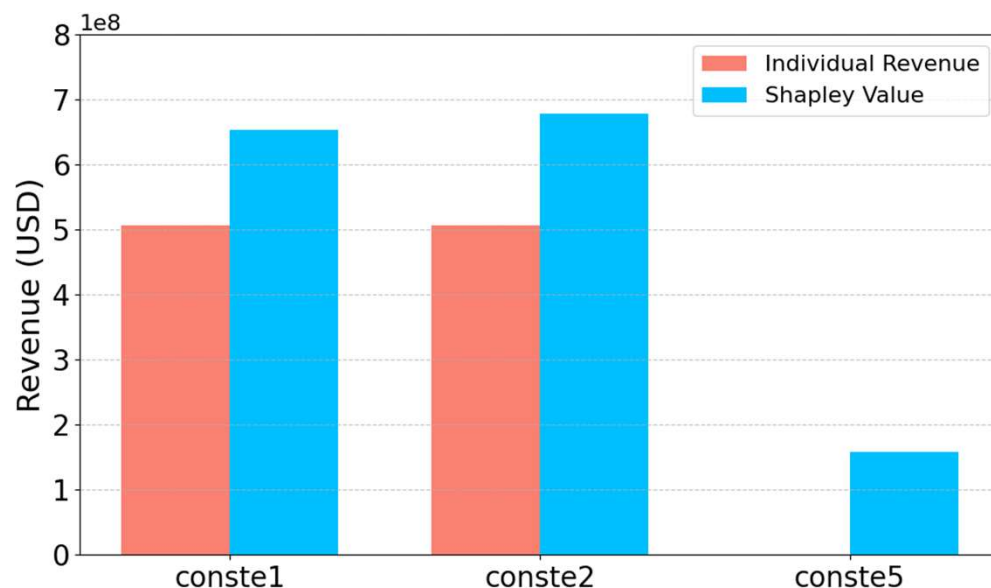
収益評価(2者間協力)

- conste1+2→先行研究
- conste3+4
 - カバー率が0.1程度だが、収益が上昇しすぎてる
 - モデルに不適合
- coste5+6
 - カバー率0.6で、不適合



収益評価(3者間協力)

- 2者での協力と比較して, 収益上昇
 - カバー率(conste1,2,5): 0.95
 - カバー率(conste1,2,6): 0.97
- 小規模事業者にとっては, 大規模事業者との協力が有効
- conste6の収益 > conste5の収益
 - cosnste6は傾斜軌道, conste5は極軌道
 - 傾斜軌道は高需要地域を重点的にカバー

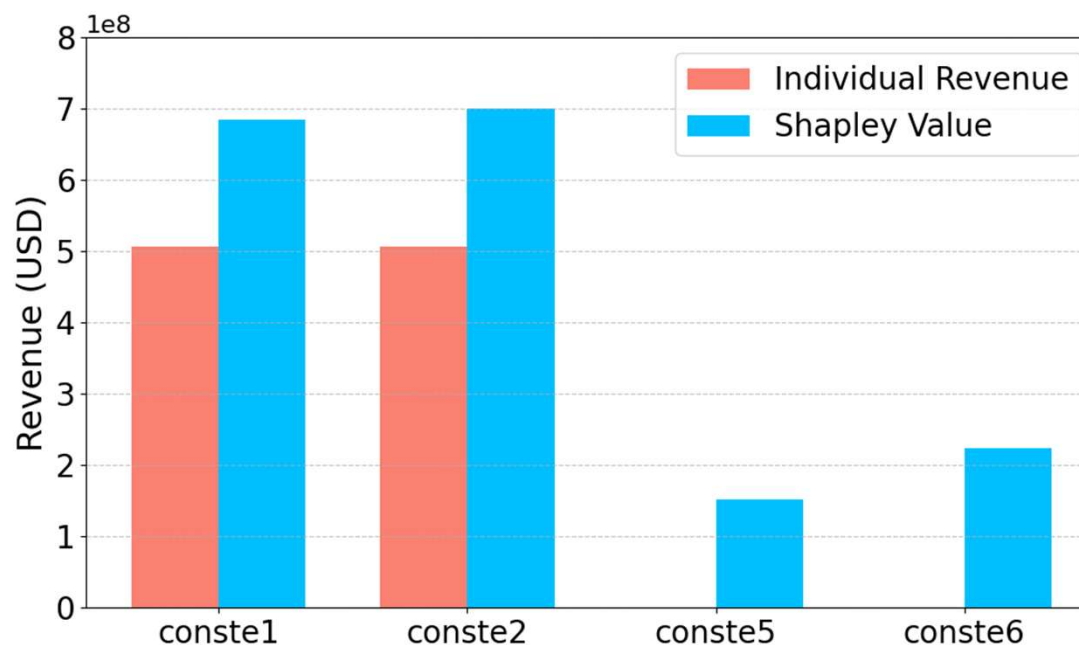


収益評価(4者間協力)

■ 3者間協力との収益比較

- conste1, conste2 → わずかに上昇
- conste5, conste6 → わずかに減少

■ 3者の協力の時点で、需要が満たされているため、追加的な協力の利得が限定的



まとめ

- 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収益分配モデルの提案・評価
- 多くの組み合わせで協力によって収益が飛躍的に増加
- 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
- 今後
 - 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
 - 時間軸やコスト構造を導入した動的モデルへの拡張