
LEO衛星ネットワークにおける 事業者間提携のモデル化

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

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)において性能を十分に非発揮

■ 目的

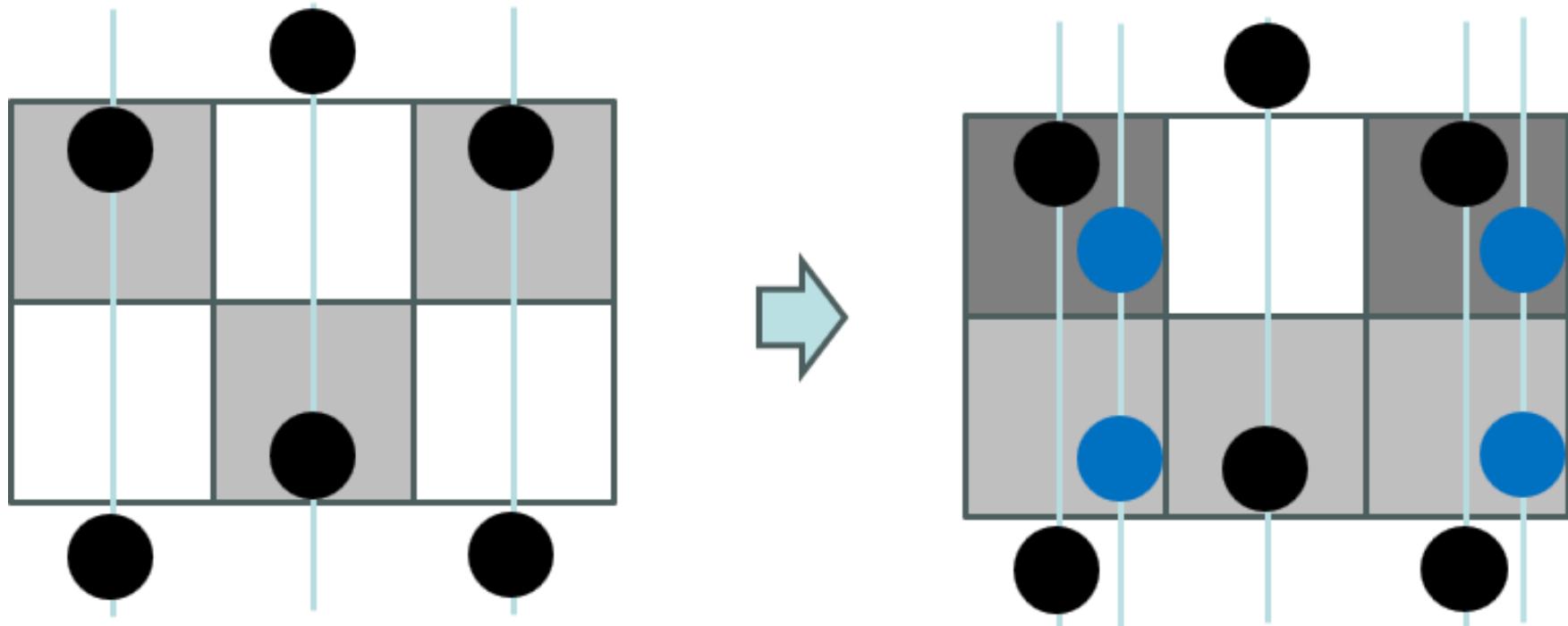
- LEO衛星事業者の協力サービスモデルを提案し、初期段階における参加事業者の適切な分配額を導出

■ 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
- 提携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: グリッドを引き, 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が広がり、カバレッジ多重度が上昇
 - カバレッジ多重度: グリッドセル内の衛星数
3. 契約者の満足度が上昇
 - 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拡大
 - 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
4. 契約率が上昇
5. 収益が上昇
6. 事業者間で収益を分配
 - シャープレイ値

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 ν
 - 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 ν を用いてシャープレイ値 φ を計算

モデル化(通信範囲 R_s , シャープレイ値 φ)

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

N :ゲームに参加する全プレイヤの集合

$N = \{i, j\}$ である衛星事業者 i と j の2者のゲームにおいて

$\varphi_i(v)$:衛星事業者 i のシャープレイ値

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

- $v(i)$:衛星事業者 i の収益(特性関数)

モデル化(特性関数 ν)

$\nu(i, j)$:衛星事業者 i と j の提携時の収益(特性関数)

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

- 事業者が重なるグリッドセルでは、合同で契約者 α を計算
 - 1つのコンステレーションになっているため
- $G_{\{i, S_k\}}$:衛星事業者 i のグリッドセル k の収益

$$G_{\{i, k\}} = \alpha_{\{i, k\}} \beta$$

- S_i :衛星事業者 i のカバーするのグリッドセル
- $\alpha_{\{i, S_k\}}$:グリッドセル k の契約者数(説明は省略)
- β :月額の料金

モデル化(契約者数 α)

$\alpha_{\{i,k\}}$: 衛星事業者*i*のグリッドセル*k*の契約者数

$$\alpha_{\{i,k\}} = \begin{cases} \sum_{c \in s_k} P_{\{k,c\}} C_{\{i,c\}}, & \sum_{c \in s_k} \frac{\mu_{\{i,k\}} \gamma_i}{P_{\{k,c\}} C_{\{i,c\}} U} \geq 1 \\ \frac{\mu_{\{i,k\}} \gamma_i}{U}, & \sum_{c \in s_k} \frac{\mu_{\{i,k\}} \gamma_i}{P_{\{k,c\}} C_{\{i,c\}} U} < 1 \end{cases}$$

- $P_{\{k,c\}}$: グリッドセル*k*の国*c*の人口
- $C_{\{i,c\}}$: 衛星事業者*i*の国*c*の契約率
 - $s_k = \{\text{US, Japan, } \dots\}$: グリッドセル*k*に存在する国の集合
- U : 契約者の平均衛星通信量(bps)
- γ_i : 衛星事業者*i*の衛星1基の帯域幅(bps)
- $\mu_{\{i,k\}}$: 衛星事業者*i*のグリッドセル*k*のカバレッジ多重度
 - $\frac{\mu_{\{i,k\}} \gamma_i}{P_{\{k,c\}} C_{\{i,c\}} U} \cdot \frac{\text{グリッドセル } k \text{ 内の供給通信量}}{\text{グリッドセル } k \text{ 内の需要通信量}}$

モデル化(人口 P)

$P_{\{k,c\}}$: グリッドセル k の国 c の人口

- グリッドセルの各国の面積と人口密度から計算

$$P_{\{k,c\}} = \lambda_{\{k,c\}} \eta_c$$

- $\lambda_{\{k,c\}}$: グリッドセル k の国 c の面積

- Natural Earth データセットより

- η_c : 国 c の人口密度

- 世界銀行の2021年のデータ

モデル化(契約率C)

$C_{\{i,c\}}$: 衛星事業者*i*の国*c*の契約率

$$C_{\{i,c\}} = \tau_i \left(C_{c_min} + \frac{C_{c_max} - C_{c_min}}{1 + e^{-10(\varepsilon_i - 0.5)}} \right)$$

$$F_c = \frac{P_c}{P_{US}}, C_{c_min} = C_{US_min} F_c, C_{c_max} = C_{US_max} F_c$$

- τ_i : 事業者ごとの係数(事業者の評価)
- ε_i : 衛星事業者*i*の満足度(0~1)
- C_{c_min} : 国*c*の契約率の下限
 - $C_{US_min}(= 0)$: アメリカの契約率の下限
- C_{c_max} : 国*c*の契約率の上限
 - $C_{US_max}(= 0.01)$: アメリカの契約率の上限
 - Starlinkの契約者の数から計算
- F_c : スケール因子
- P_c : 国*c*のインターネット普及率

モデル化(満足度 ε)

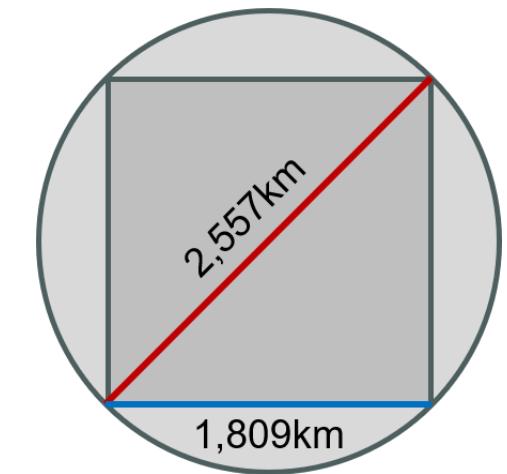
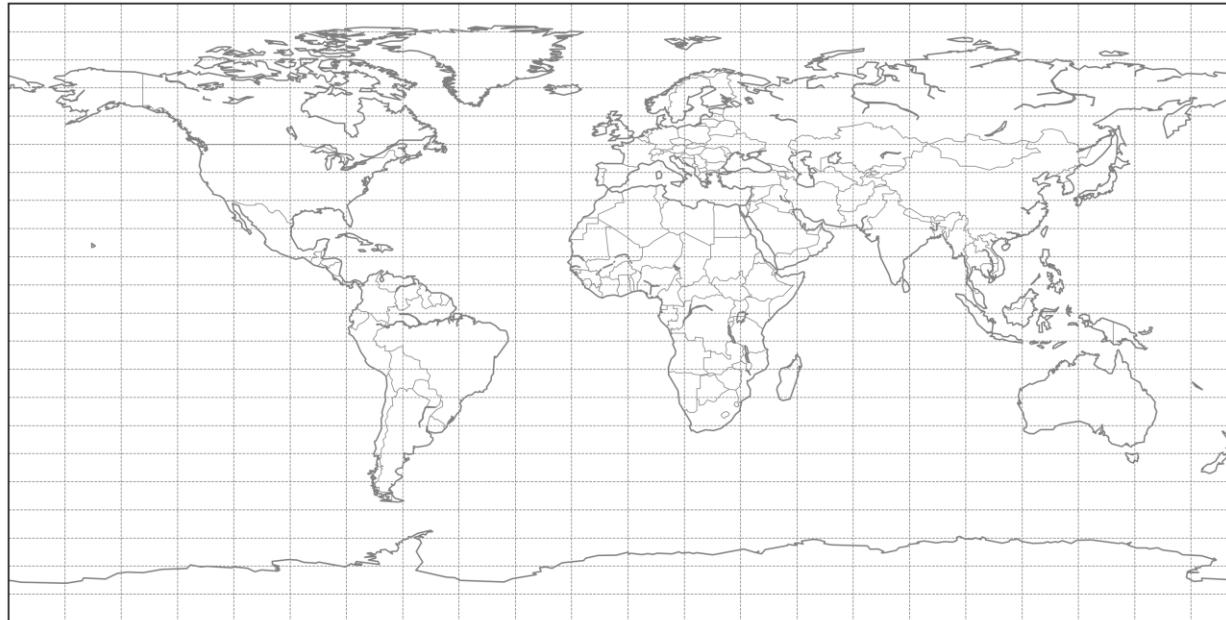
ε_i :衛星事業者*i*の満足度(0~1)

$$\varepsilon_i = \log 1.5\{\rho\omega_i + (1 - \rho)\mu_i\}$$

- $\omega_i = \overline{\omega_{\{i,k\}}}$:平均カバー率(0~1)
- $\mu_i = \overline{\mu_{\{i,k\}}}$:平均カバレッジ多重度(0~)
- ρ :重み(0.5~1)
 - 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
 - カバー率の上昇:カバー範囲(通信範囲)の拡大
 - カバレッジ多重度の上昇:帯域幅の上昇

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)

conste1とconste2の協力を想定

- conste1: OneWebを模したコンステレーション
 - OneWeb: イギリスに本社を構える企業
 - 高度: 1,200km, 傾斜角: 87.9度, 軌道面: 18, 総衛星数: 648
- conste2: Qianfan(千帆)を模したコンステレーション
 - Qianfan(千帆): 中国に本社を構える企業
 - 高度: 813km, 傾斜角: 89度, 軌道面: 18, 総衛星数: 648

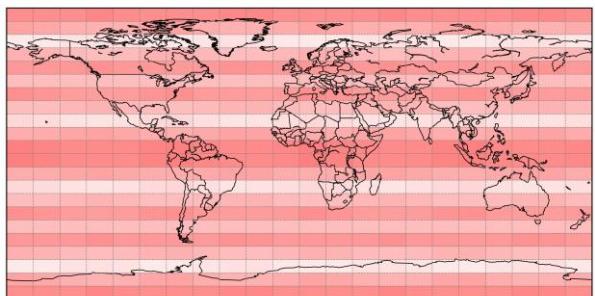
収益を求めるために必要なパラメータ

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

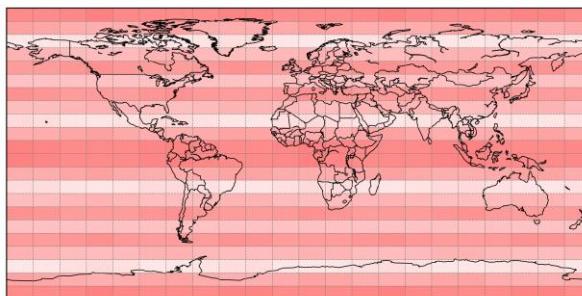
カバー率 ω , カバレッジ多重度 μ

- $\omega_{\{c_1+c_2,k\}}$ は $\omega_{\{c_1,k\}}, \omega_{\{c_2,k\}}$ よりも大きい
- $\mu_{\{c_1+c_2,k\}}$ は $\mu_{\{c_1,k\}}, \mu_{\{c_2,k\}}$ よりも大きい

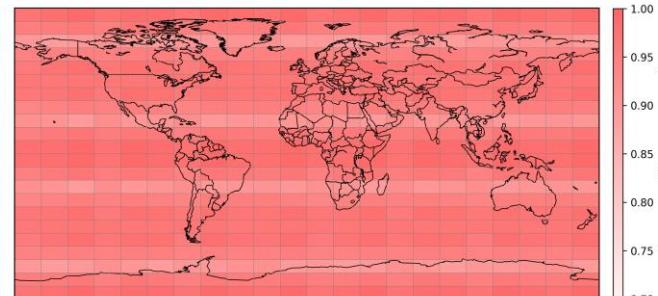
カバー率 ω



$\omega_{\{c_1,k\}}$

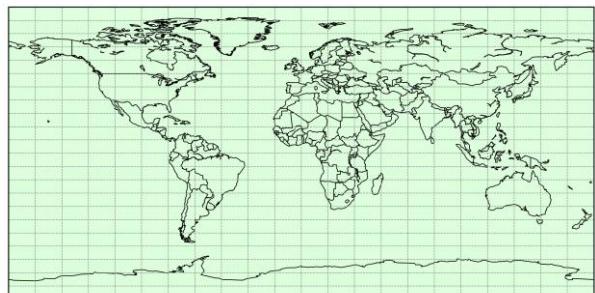


$\omega_{\{c_2,k\}}$

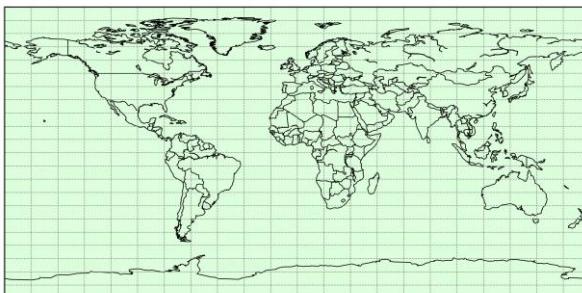


$\omega_{\{c_1+c_2,k\}}$

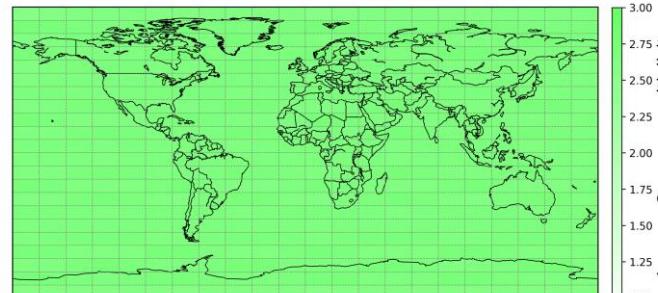
カバレッジ多重度 μ



$\mu_{\{c_1,k\}}$



$\mu_{\{c_2,k\}}$



$\mu_{\{c_1+c_2,k\}}$

評価シナリオ

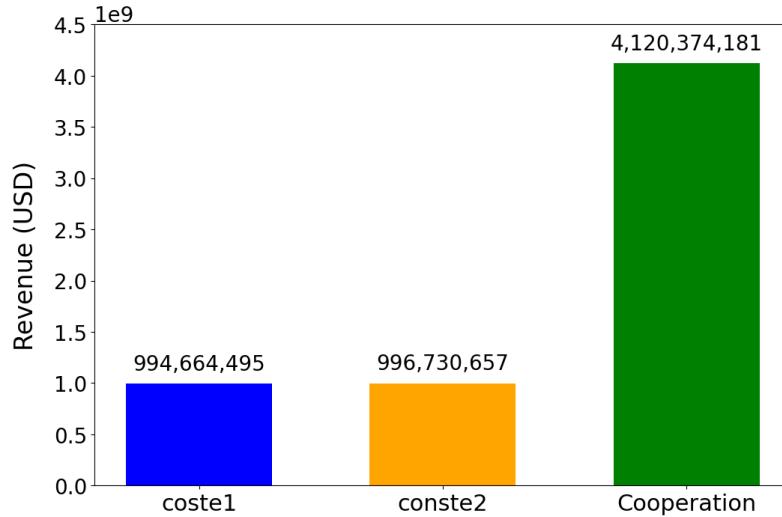
衛星通信を利用する際の1人当たりの平均通信量 U について、以下の4つのシナリオを想定

U	備考
0.05	U_0 の1/10倍
0.1	U_0 の1/5倍
0.5 (= U_0)	スマートフォンでの平均的な通信をすべて衛星通信で行ったときの通信量を想定
5.0	U_0 の5倍

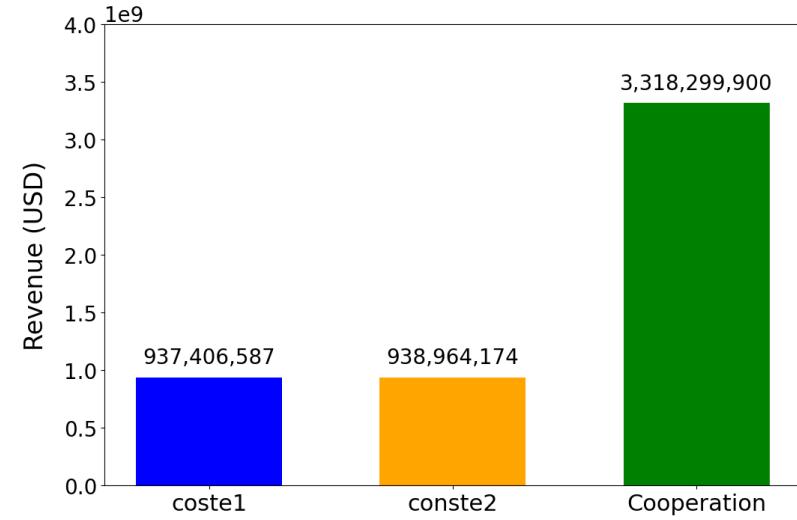
それについて収益を計算し、優加法性を満たす場合、シャープレイ値を用いて分配を行う

優加法性を満たす条件: $v(i, j) > v(i) + v(j)$

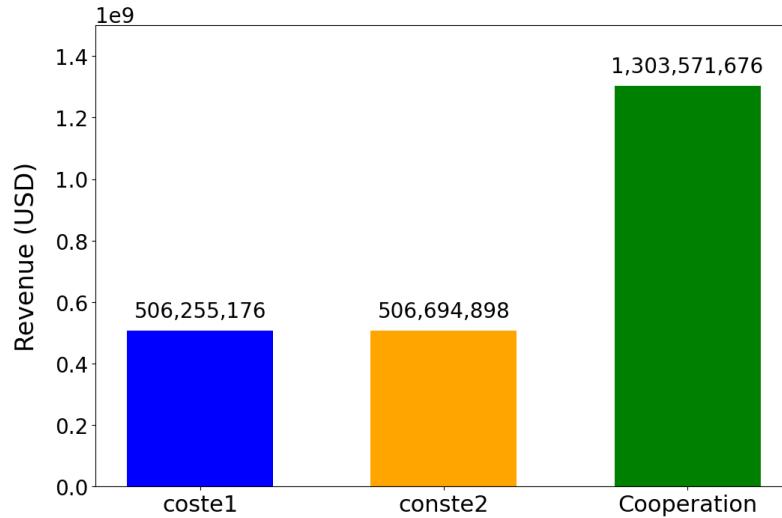
評価(収益)



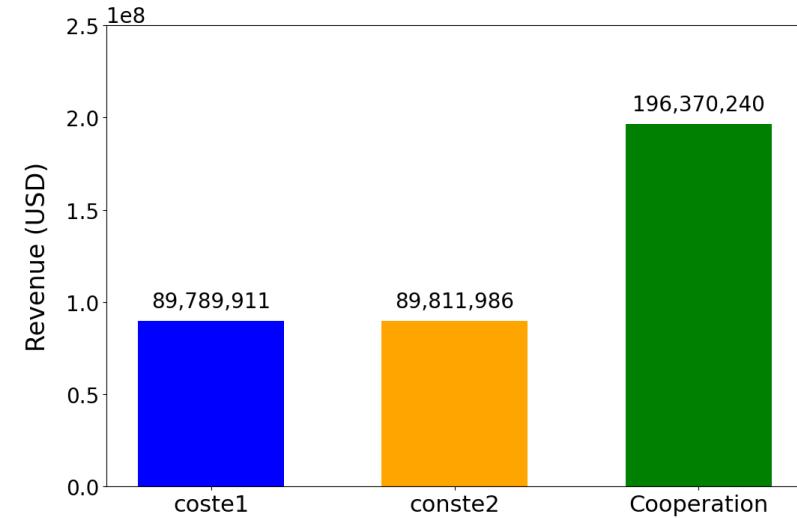
$U = 0.05$ 優加法性満たす



$U = 0.1$ 優加法性を満たす

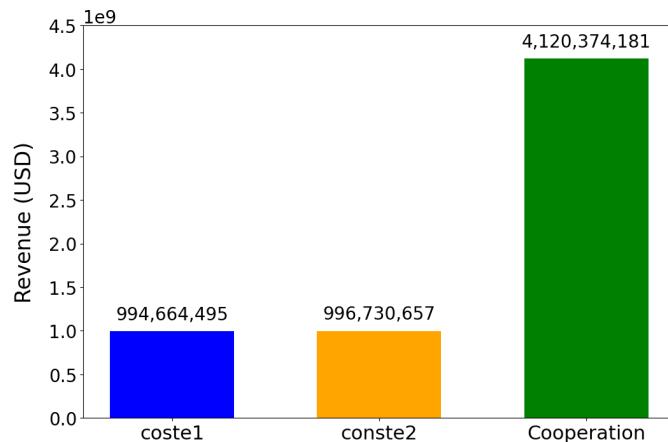


$U = 0.5$ 優加法性満たす

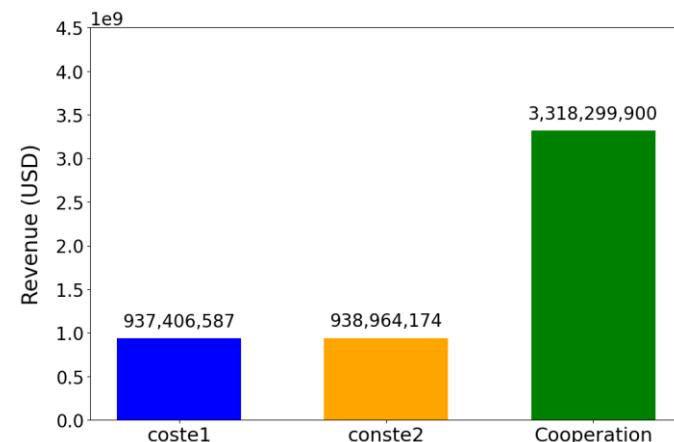


$U = 5.0$ 優加法性満たす

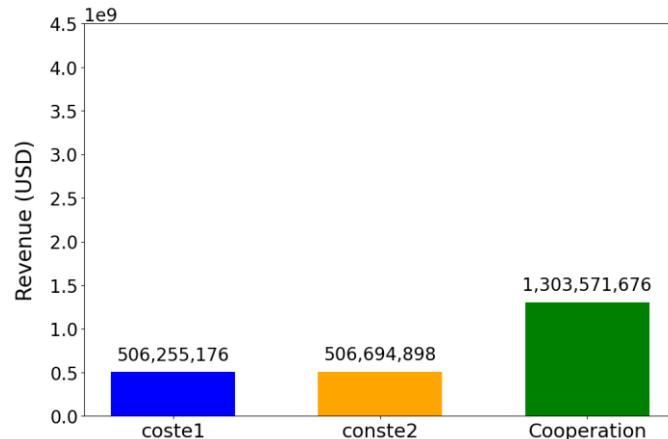
評価(収益)※同スケール



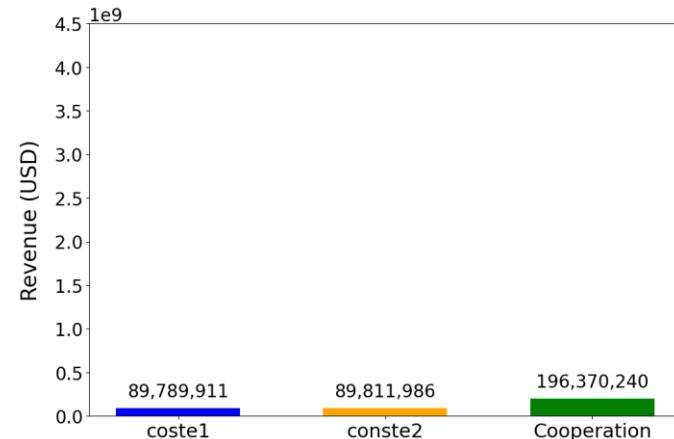
$U = 0.05$



$U = 0.1$



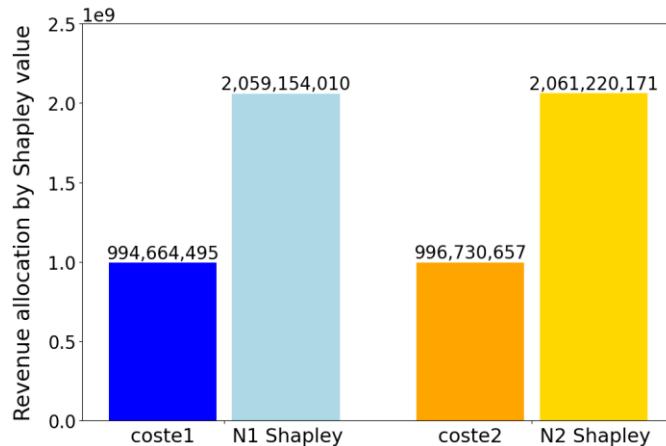
$U = 0.5$



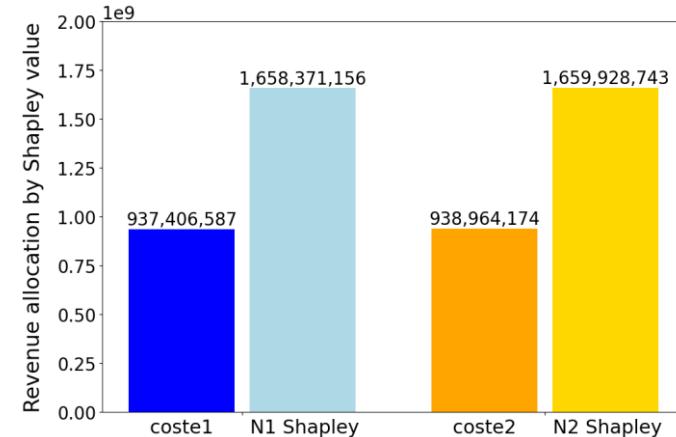
$U = 5.0$

U が小さい方が多くのユーザと契約できるため、収益が大きい

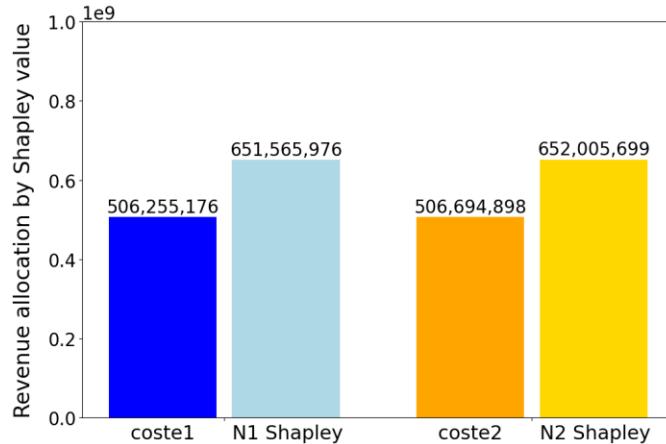
評価(シャープレイ値)



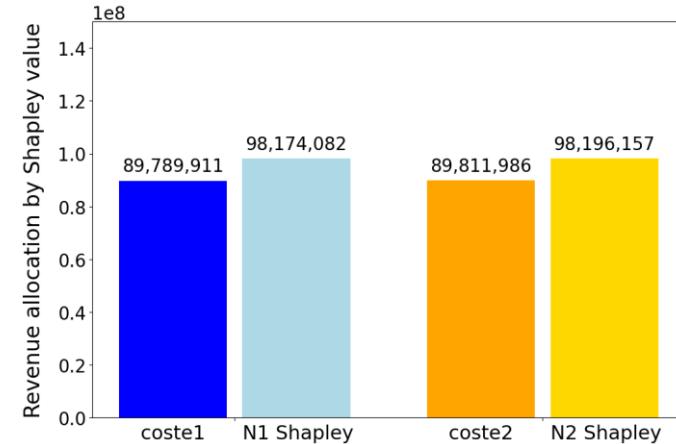
$U = 0.05$, 収益増加率 : 約2.07



$U = 0.1$, 収益増加率 : 約1.77



$U = 0.5$, 収益増加率 : 約1.29



$U = 5.0$, 収益増加率 : 約1.09

- U が大きいと、非協力状態においても需要が供給を超えているグリッドセルが多くいため

まとめ

- LEO衛星ネットワークの通信サービス課題に対し、事業者間の協力モデルを提案し、提携形ゲームおよび計算機シミュレーションを通じて有効性を検証
- 協力により、収益向上
- 協力モデルの適用範囲や条件の詳細な分析が必要
 - 地域特性など
- 今後
 - 協力モデルの実現可能性をより高める
 - 協力モデルを拡張し、より複雑な事業環境でのモデルを構築・検証

質問

- 座長
 - 衛星の動きをモデルに組み込んでいるのか
 - 平均を組み込んでいる
 - ユーザの移動を考慮しているのか
 - 考慮していない
-
- 質問が座長しかなかった
 - やはり発表が下手
 - モデル化について話しそぎでは
 - スライドに文字が多い