

LEO衛星ネットワークの 事業者間提携のモデリング

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、地球全体をカバーする必要
- SpaceX社のStarlinkは2020年にサービスを開始し、2025年1月時点で約7,000基弱のLEO衛星が稼働中

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
- 契約者数が少数
 - 十分に地球をカバー不可
 - 提供できる帯域幅が狭小

■ 目的

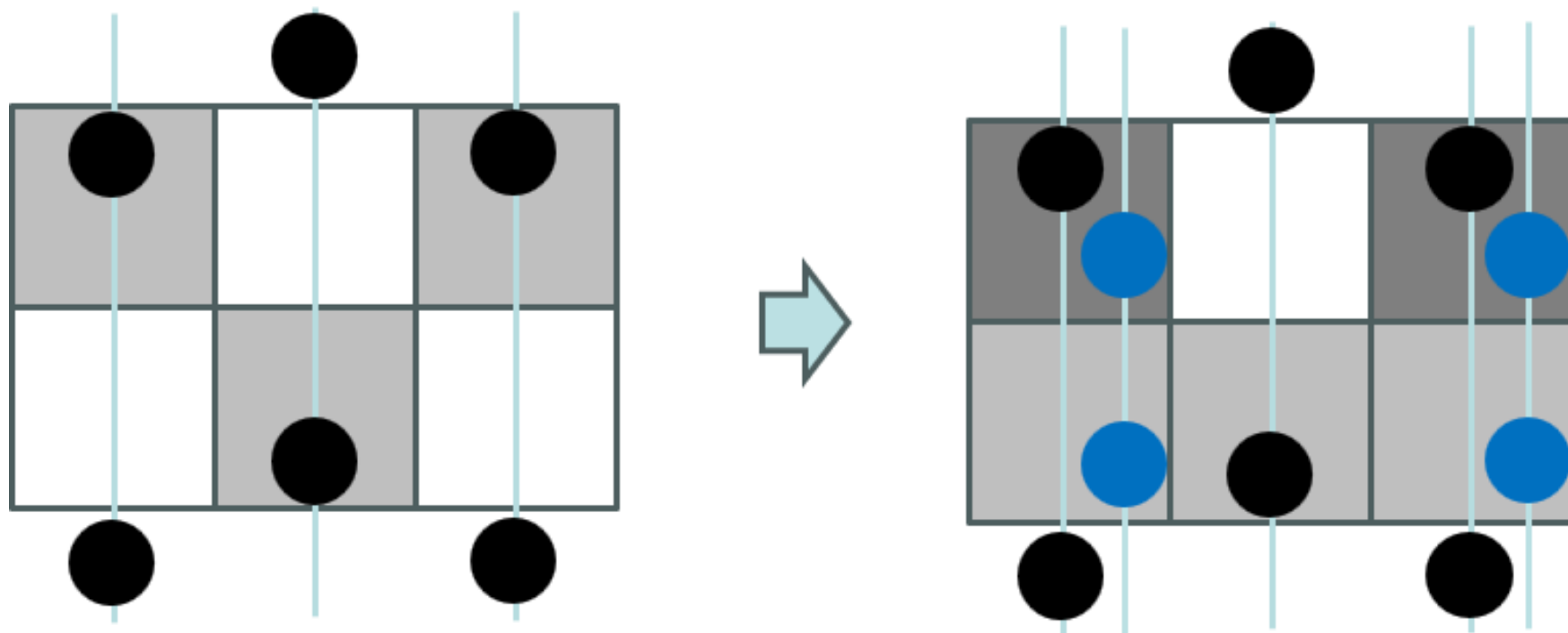
- LEO衛星事業者の協力サービスモデルを提案し、初期段階における参加事業者の適切な分配額を導出

■ 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:グリットセル内の衛星数
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 を用いてシャーププレイ値 ϕ を計算

モデル化(通信範囲 R_s , シヤープレイ値 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ーの集合

$N = \{i, j\}$ 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 のシヤープレイ値

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

- $v(i)$: 衛星事業者 i の収益(特性関数)

モデル化(特性関数 v)

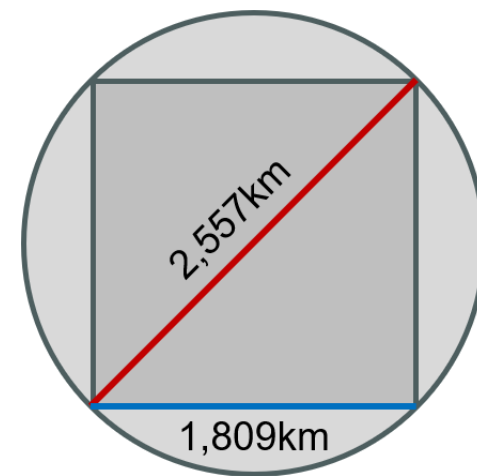
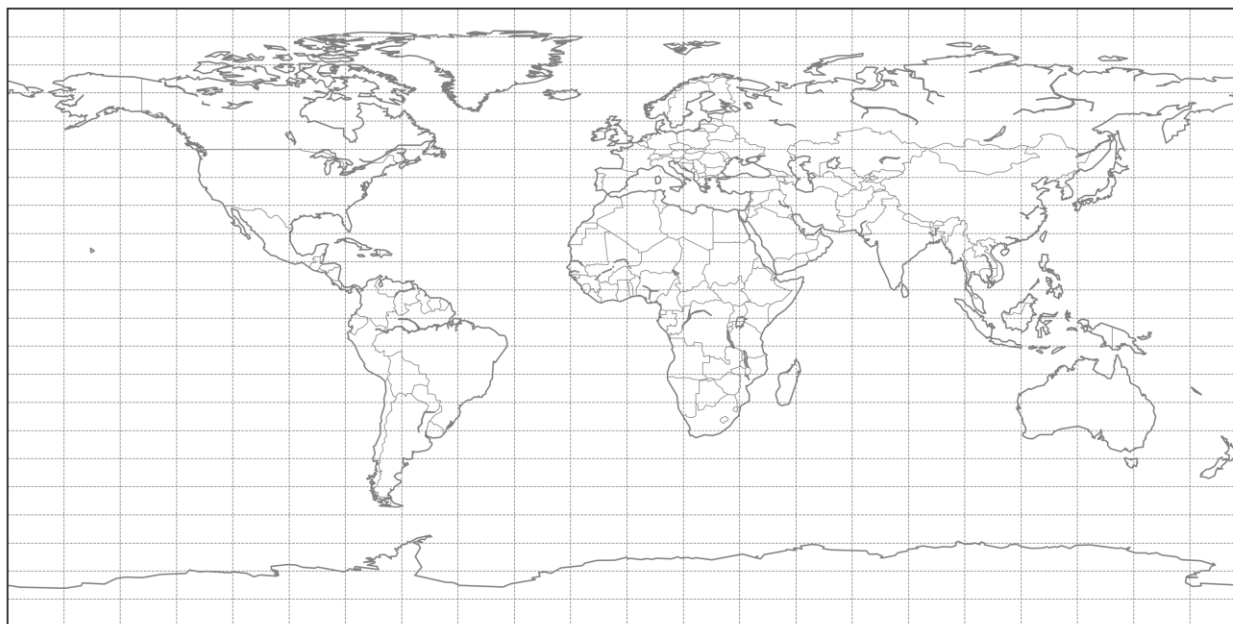
$v(i, j)$: 衛星事業者 i と j の提携時の収益(特性関数)

$$v(i, j) = \sum_{k \in S_{all}} \alpha_{i+j, k} \beta$$

- 1つのコンステレーションとして計算
- S_i : 衛星事業者 i のカバーするのグリッドセル
- α_{i, S_k} : グリッドセル k の契約者数
- β : 月額料金の

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

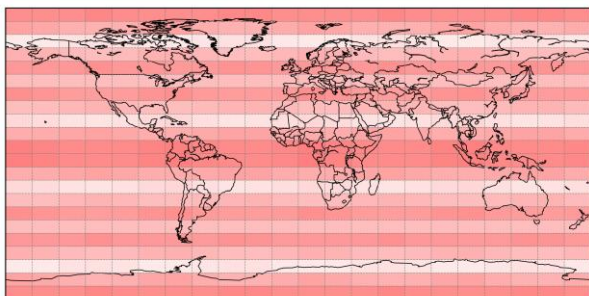
記号	値
β	100(\$)
U	0.5(Mbps)
γ	20000(Mbps)
δ	5(Mbps)
C_{US_min}	0
C_{US_max}	0.01
ρ	0.8

カバー率 ω , カバレッジ多重度 μ

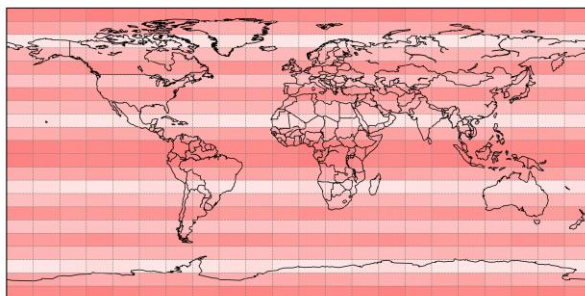
衛星のシミュレーション

- $\omega_{\{c1+c2,k\}}$ は $\omega_{\{c1,k\}}$, $\omega_{\{c2,k\}}$ よりも大きい
- $\mu_{\{c1+c2,k\}}$ は $\mu_{\{c1,k\}}$, $\mu_{\{c2,k\}}$ よりも大きい

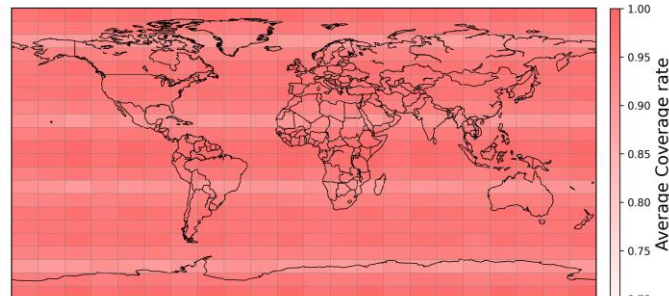
カバー率 ω



$\omega_{\{c1,k\}}$

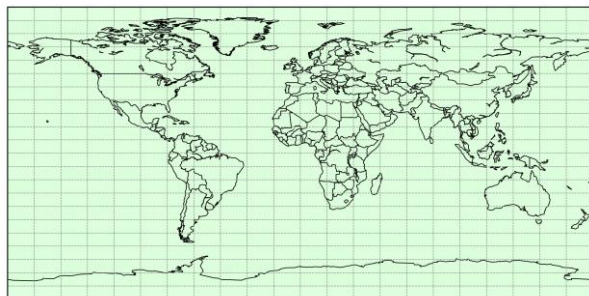


$\omega_{\{c2,k\}}$

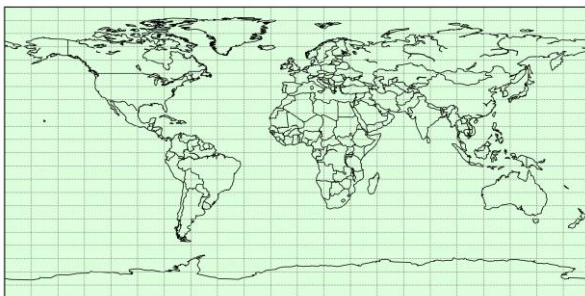


$\omega_{\{c1+c2,k\}}$

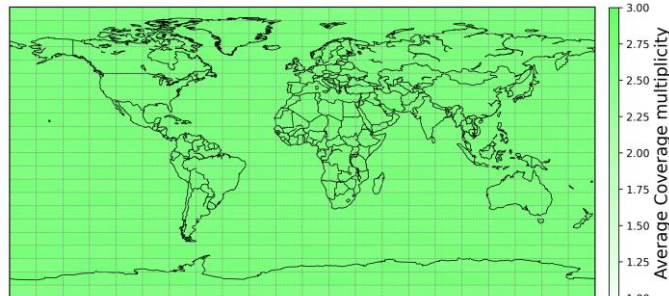
カバレッジ多重度 μ



$\mu_{\{c1,k\}}$

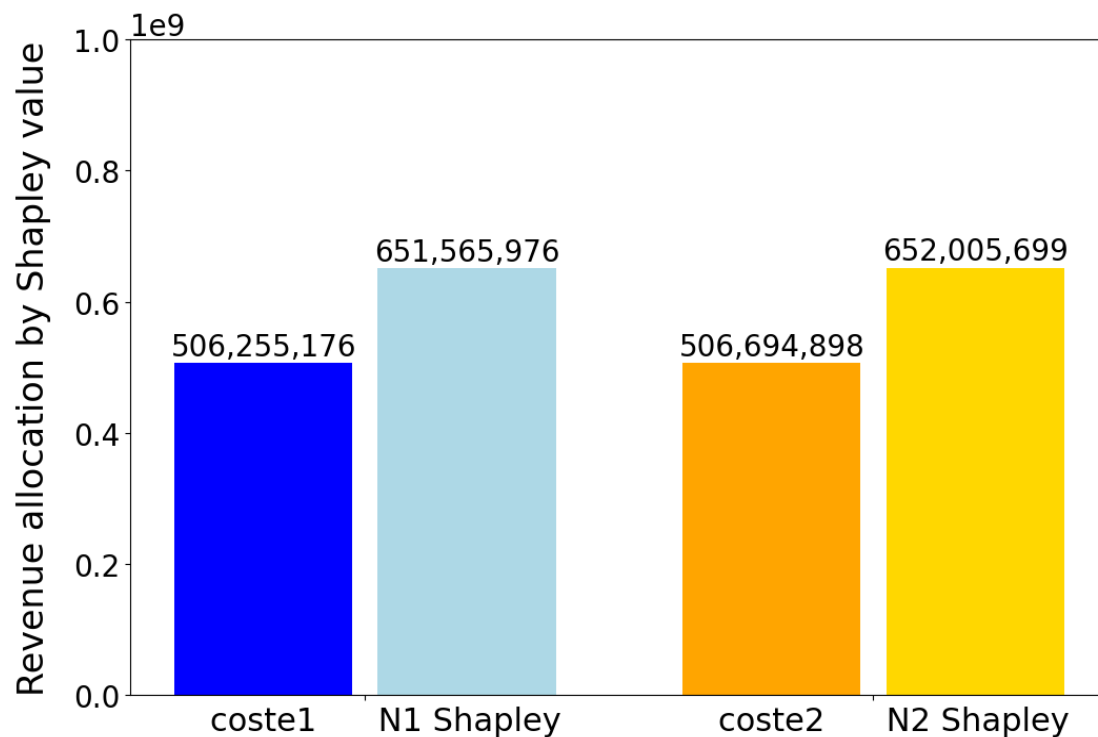


$\mu_{\{c2,k\}}$



$\mu_{\{c1+c2,k\}}$

評価



- 収益増加率: 約1.29
- 協力時に, 衛星カバレッジ多重度 μ が上昇したことで, 満足度 ε が上昇したため.

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
- 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