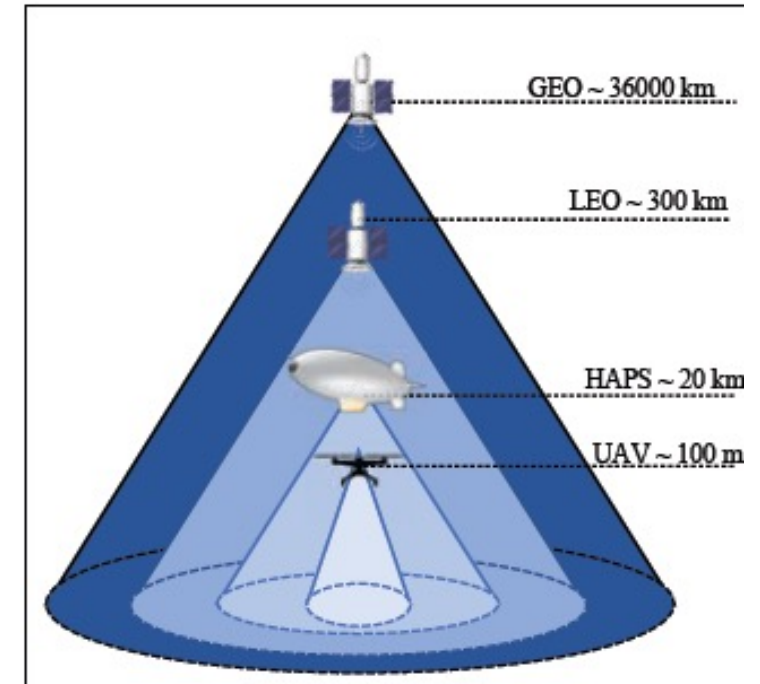

LEO衛星ネットワークにおける需要の空間的 局所性を活かすキャッシュ制御法

立命館大学

岡崎直人 上山憲昭

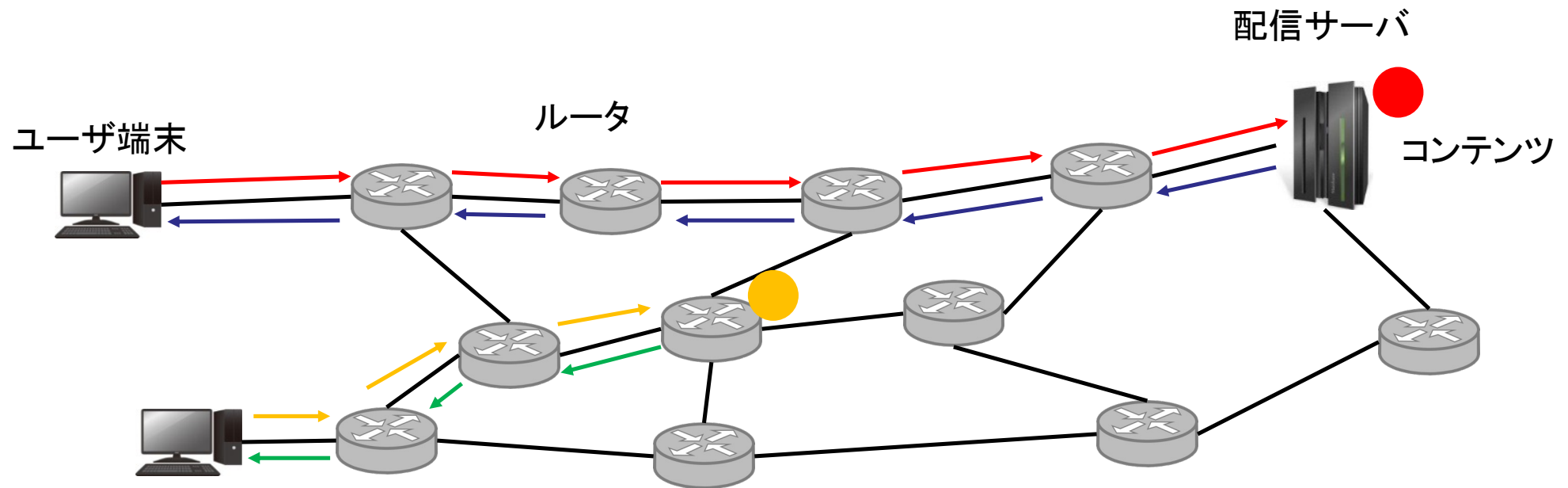
背景:LEO衛星ネットワーク

- 高度2,000km以下の低軌道を周回する衛星を中継ノードとして用いたネットワーク
- 低電力・低遅延・大容量の通信が可能
- LEO衛星は高速で移動し、かつカバーエリアが狭いため、何千もの衛星が必要
- 有効な応用:
 - デジタルデバイドの解消
 - 空・海や過疎地域へのブロードバンド提供
 - バックアップ
 - 災害対策



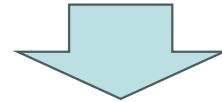
背景: 情報指向ネットワーク (ICN: Information-Centric Networking)

- コンテンツ自体に名前をつけることにより、コンテンツ名でのデータ通信が可能
- 各デバイスはルータ兼キャッシュの役割を果たす
- 配信経路上のルータからコンテンツを配信することが可能

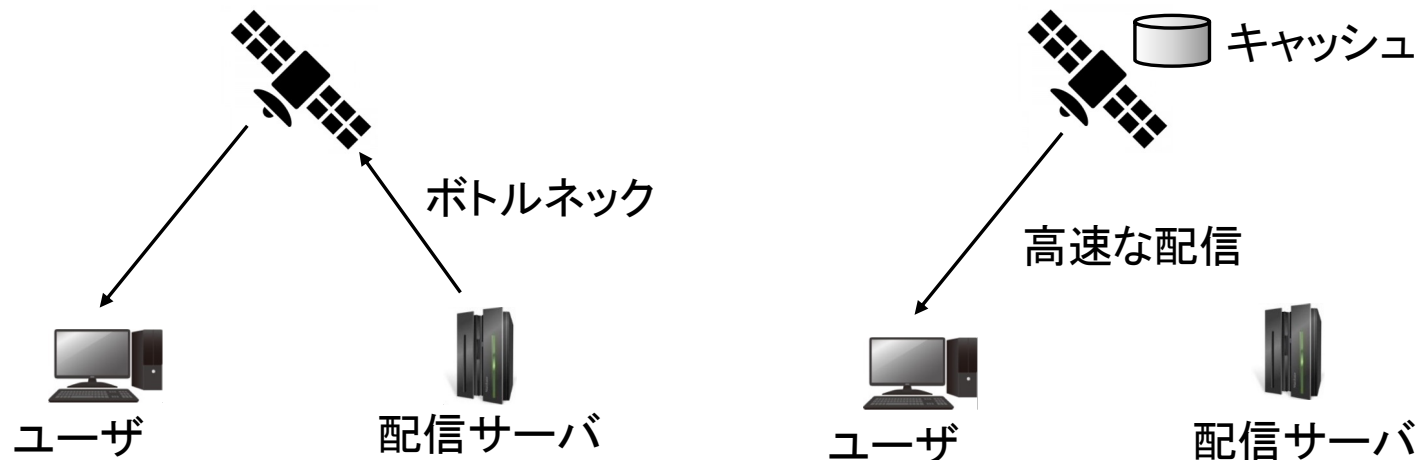


LEO衛星でのキャッシュ配信

- LEO衛星はダウンリンクを優先するためにアップリンクのスループットが低い
→ 地上に存在するサーバからLEO衛星経由で大容量のコンテンツを地上の端末に配信すると、アップリンクのスループットがボトルネック

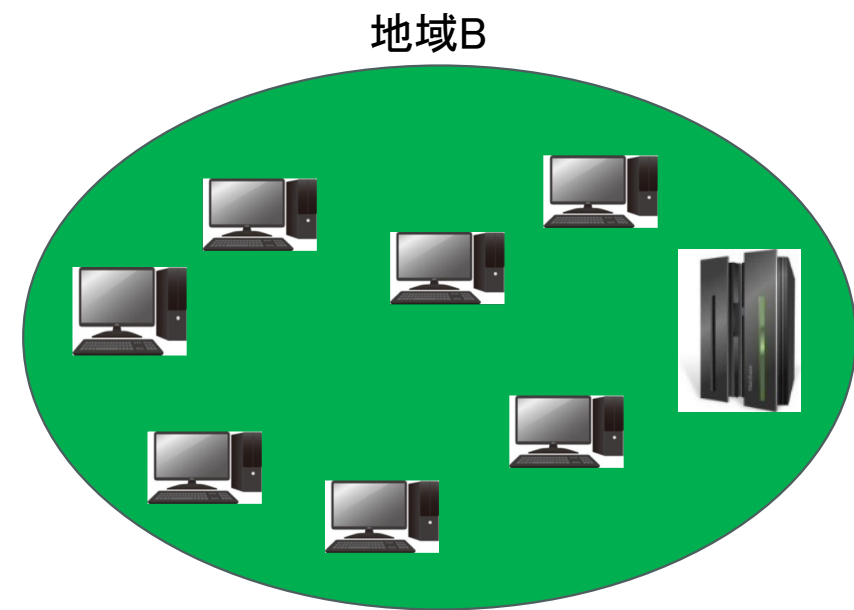
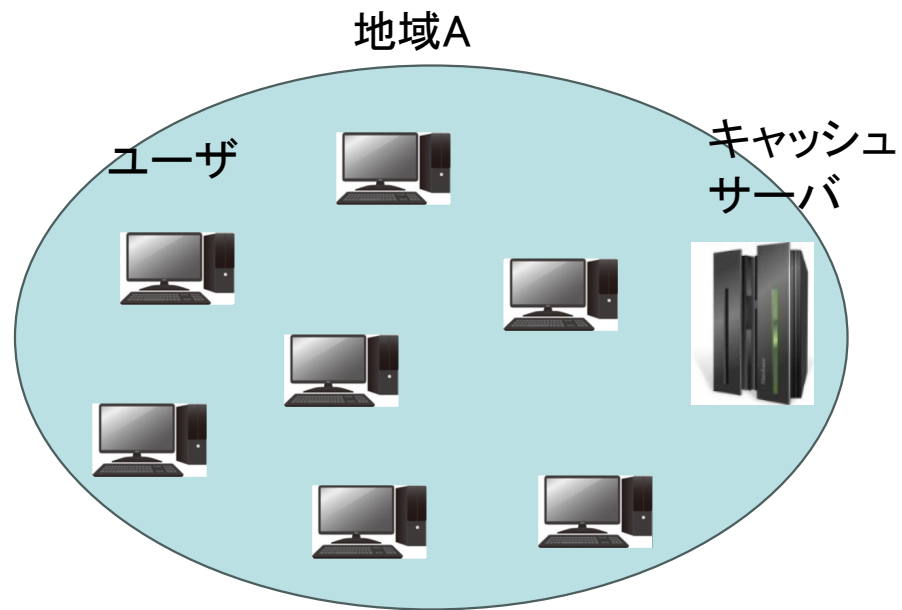


LEO衛星にキャッシュを設置し、LEO衛星からのキャッシュ配信が有効



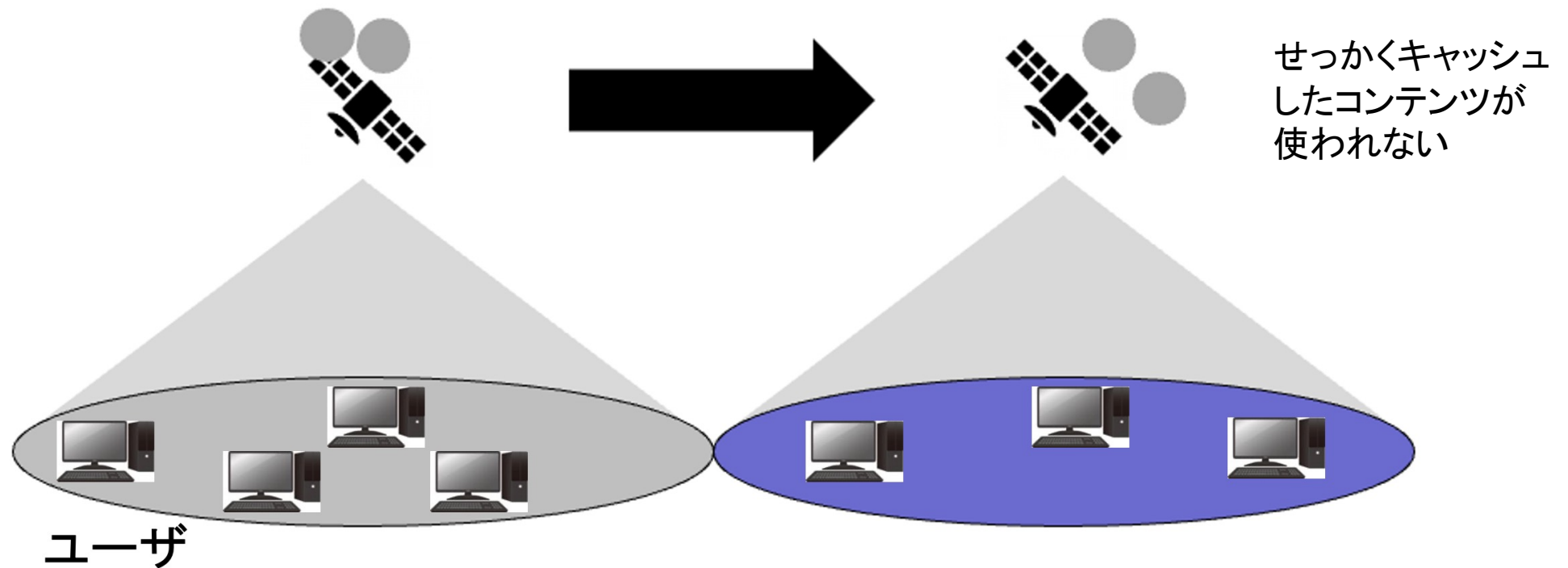
従来の地上でのキャッシュ配信

- 地上キャッシュは不動
- コンテンツ人気度の空間的局所性を活かしてキャッシュ性能を向上させていた



LEO衛星の移動する特性

- LEO衛星キャッシュ配信ではキャッシュの位置が常に変化



本研究の目的

■ 着目した課題:

- 地上のキャッシュは不動
 - ⇒ コンテンツの人気の空間的な局所性を活用
 - ⇒ キャッシュ性能を向上
- LEO衛星キャッシュ配信ではキャッシュの位置が常に変化
 - ⇒ 人気の空間的な局所性が活用できない

■ 本研究の目的:

- 人気の空間的な局所性を活用したLEO衛星キャッシュ制御法を提案
- 各衛星にキャッシュするコンテンツを, 特定エリアの高需要コンテンツに限定

先行研究

- 衛星と地上局でそれぞれ異なるコンテンツをキャッシュする2層キャッシュモデル[1]
 - 次に移動するエリアとの相関に応じてキャッシュするかを選択する方式[2]
 - 遅延削減量と要求比率からキャッシュするコンテンツを選択[3]
-
- 衛星の移動する特性を考慮していない(静止軌道衛星向けの研究)
 - 各地域で要求パターンがほとんど同じ(相関が高い)
 - 次に移動するエリアでもキャッシュしているコンテンツが要求される
 - 地域が変われば要求コンテンツはかなり変わる

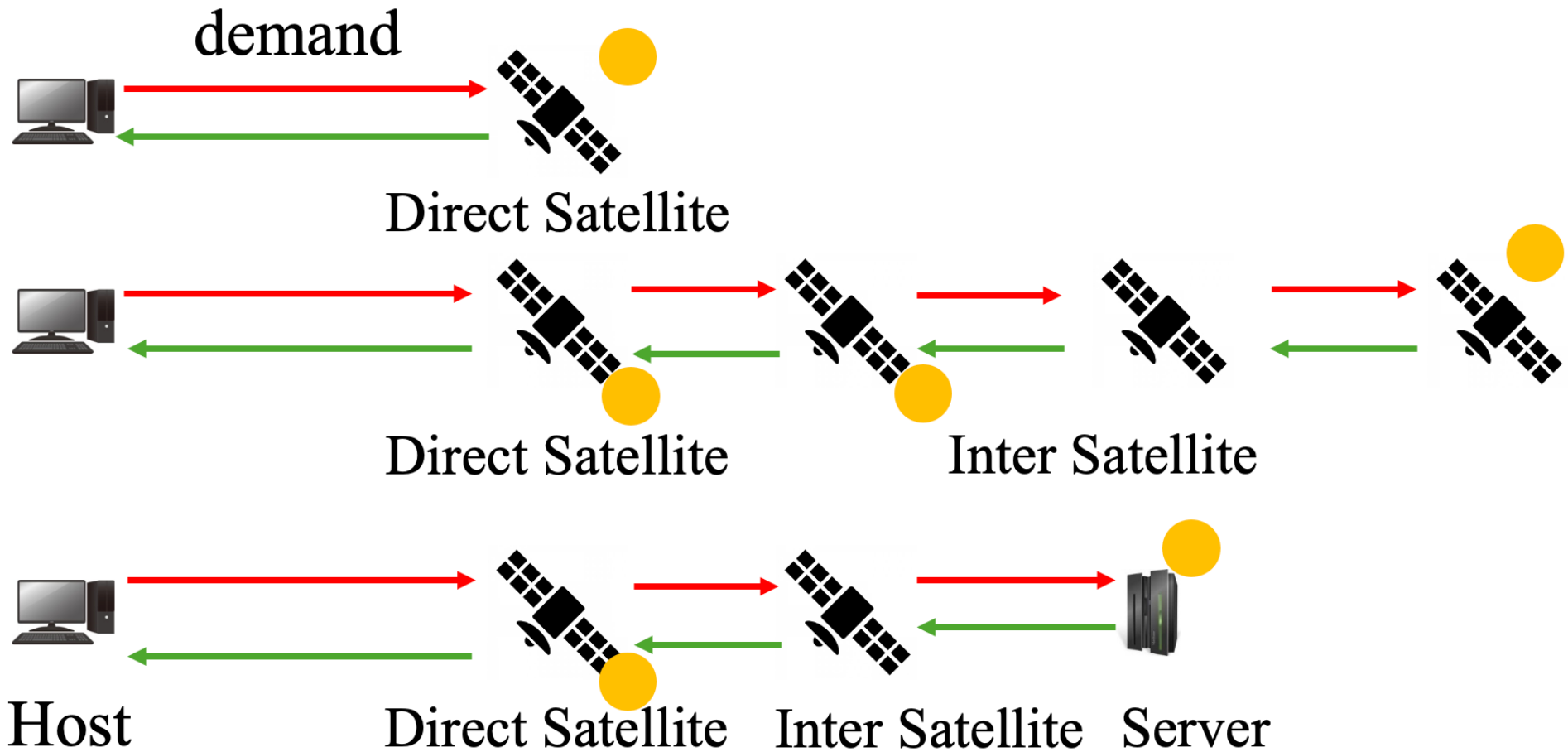
[1] H. Wu, J. Li, A Two-layer Caching Model for Content Delivery Services in Satellite-terrestrial Networks, IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM) 2016

[2] H. Lee, J. Heo, and J. Son, Weighted Caching Strategy for LEO Satellite Communication Systems, International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers, and Communications 2023

[3] Z. Zheng, J. Liu, and W. Deng, An ICN-based Strategy with Delay-Optimized Cache Replacement in LEO Satellite Networks, International Conference on Communications in China (ICCC 2024)

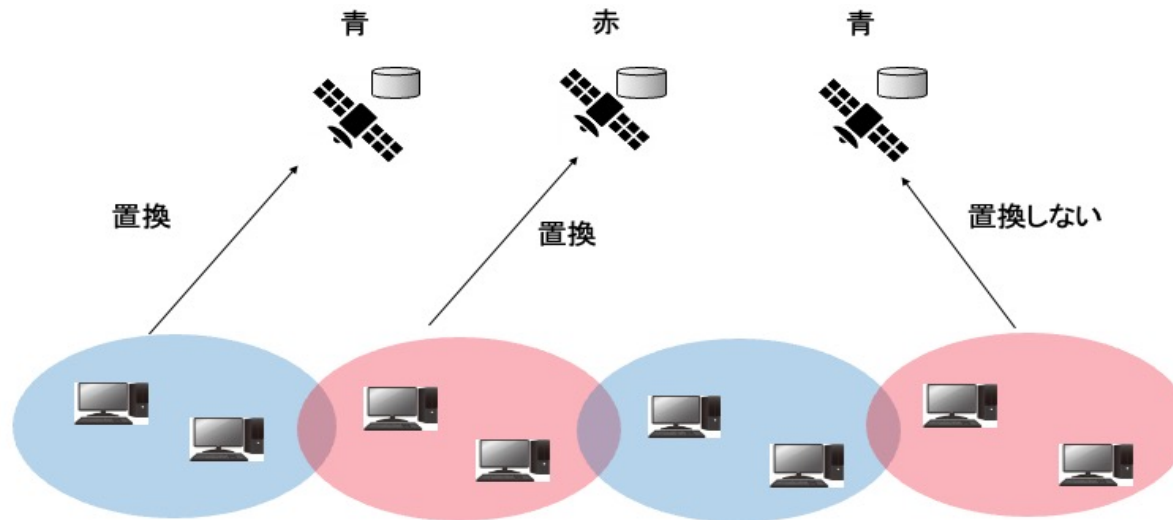
コンテンツ要求から配信までの流れ

- 配信経路上の衛星でコンテンツをキャッシュ

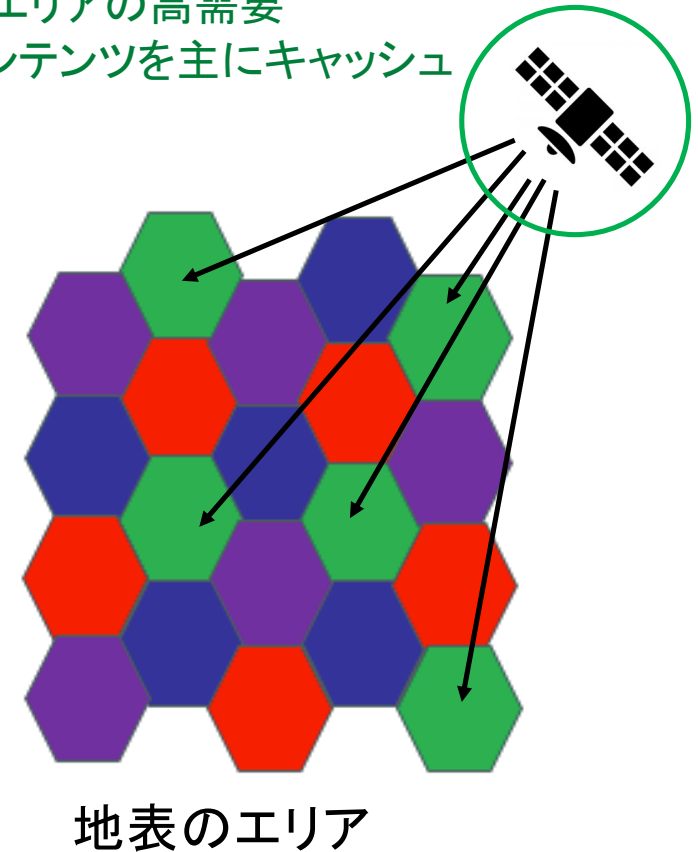


提案方式

- 同一方向に周回する衛星に対し、地表の異なるエリアを割当
- 各衛星は自身の割当エリアからの配信要求に対してのみキャッシュコンテンツを置換
- 非担当エリアにもキャッシュ配信
- 衛星のグルーピングは1,2,3,...Nと連続的に設定

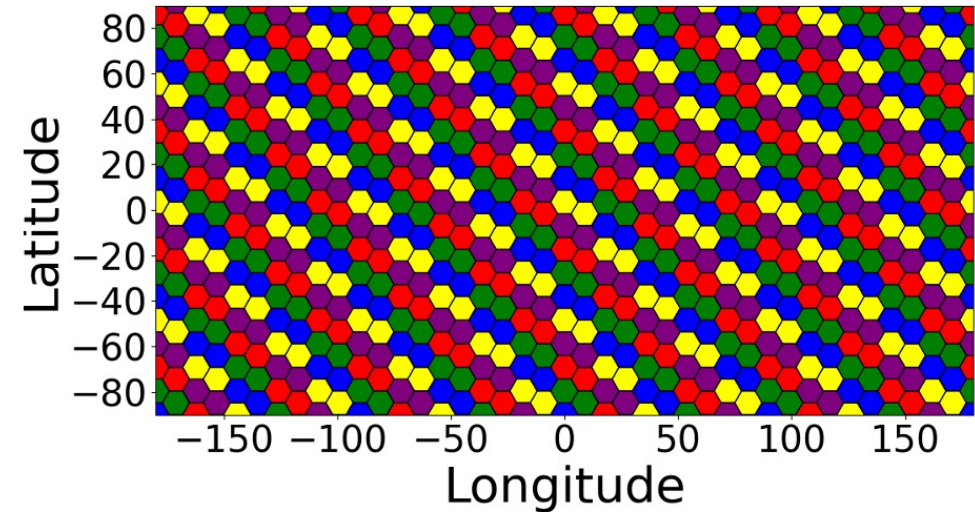
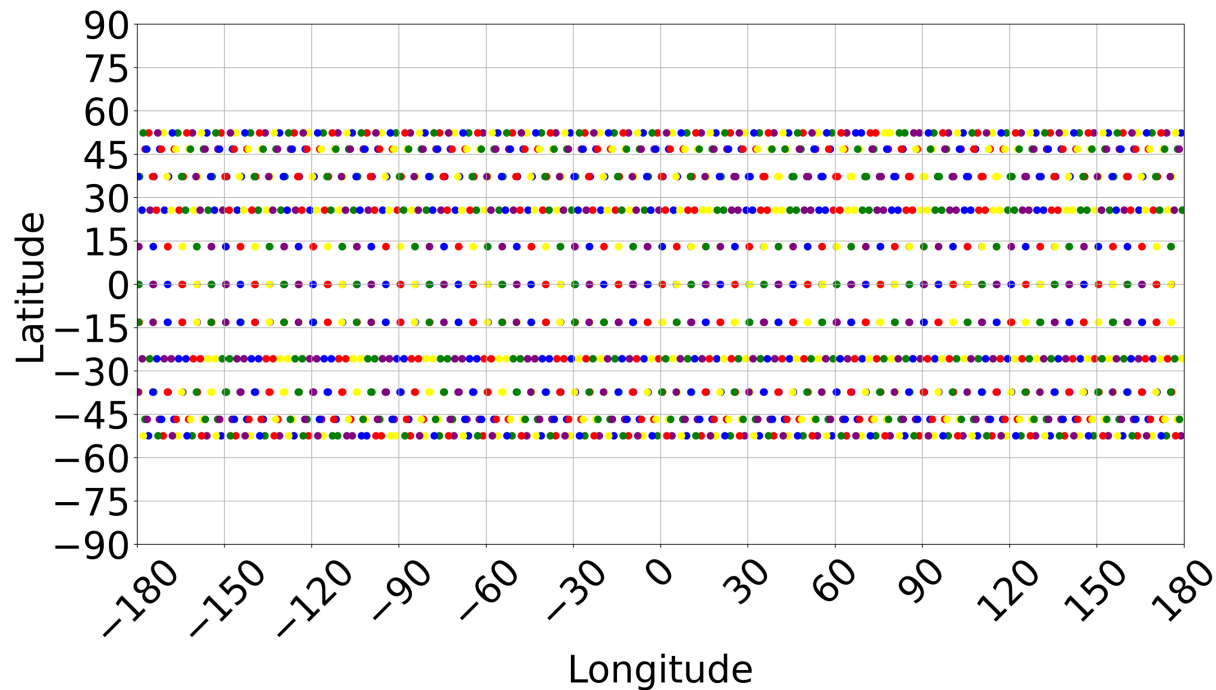


緑エリアの高需要
コンテンツを主にキャッシュ



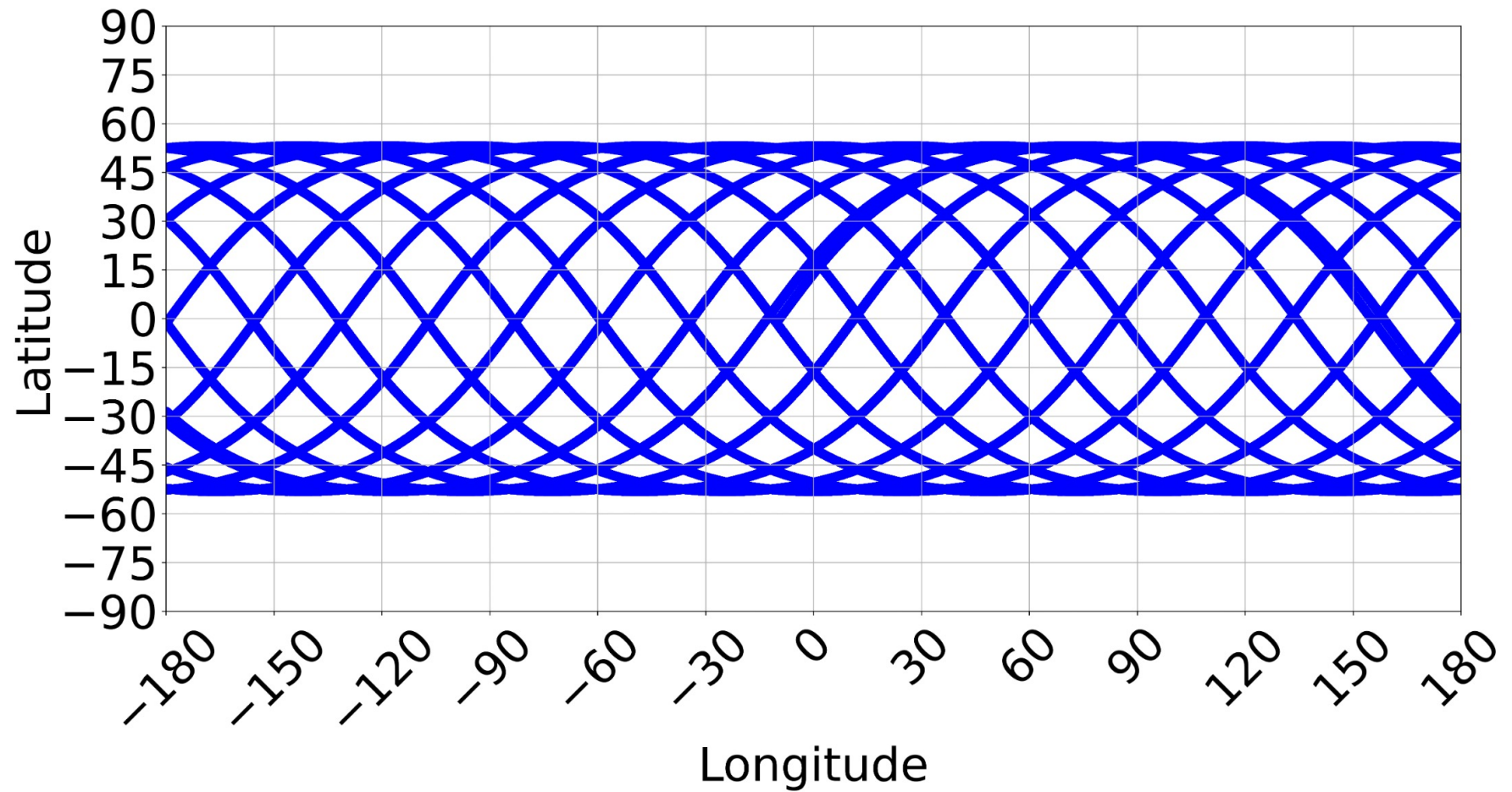
地上・衛星のグループの割り当て方

- 1,2,3,...,Nと連続的に設定
- 衛星の初期グループ分けのプロット
- 地表の割り当てプロット



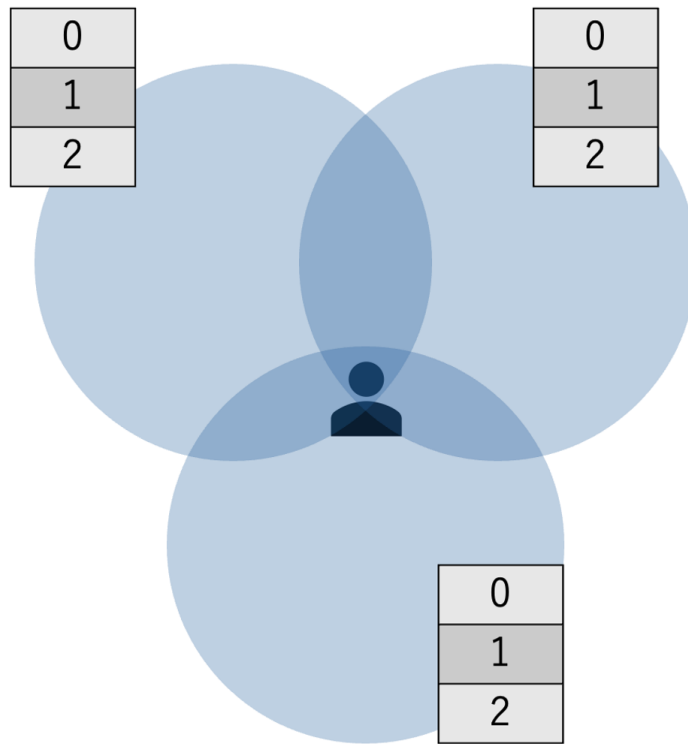
なぜ一様にグループ分けを行うのか

- 自転の影響により衛星が常に同じ位置を周回するわけではない

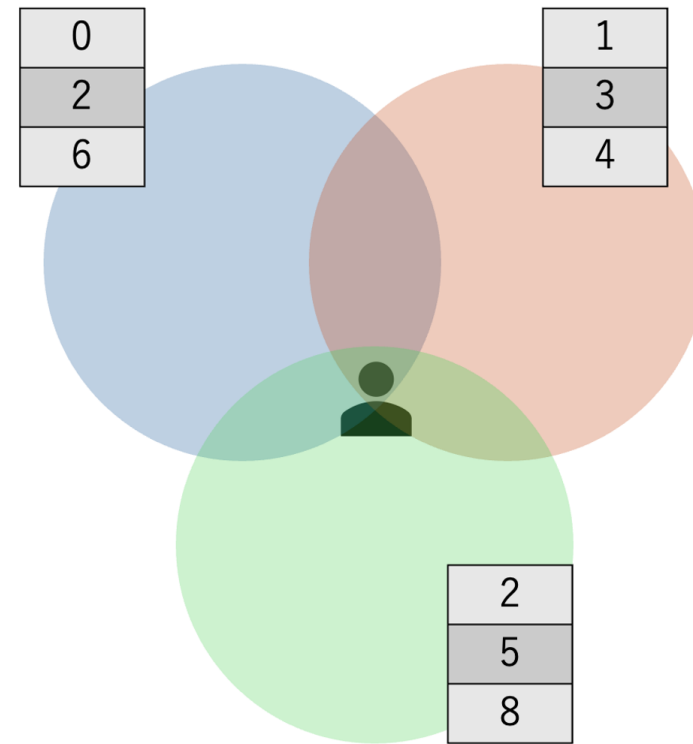


グループ分けすることのメリット

- 任意の地点のユーザが通信可能な衛星がキャッシュしているコンテンツのバリエーションが高められる



(a) Without grouping



(b) With grouping

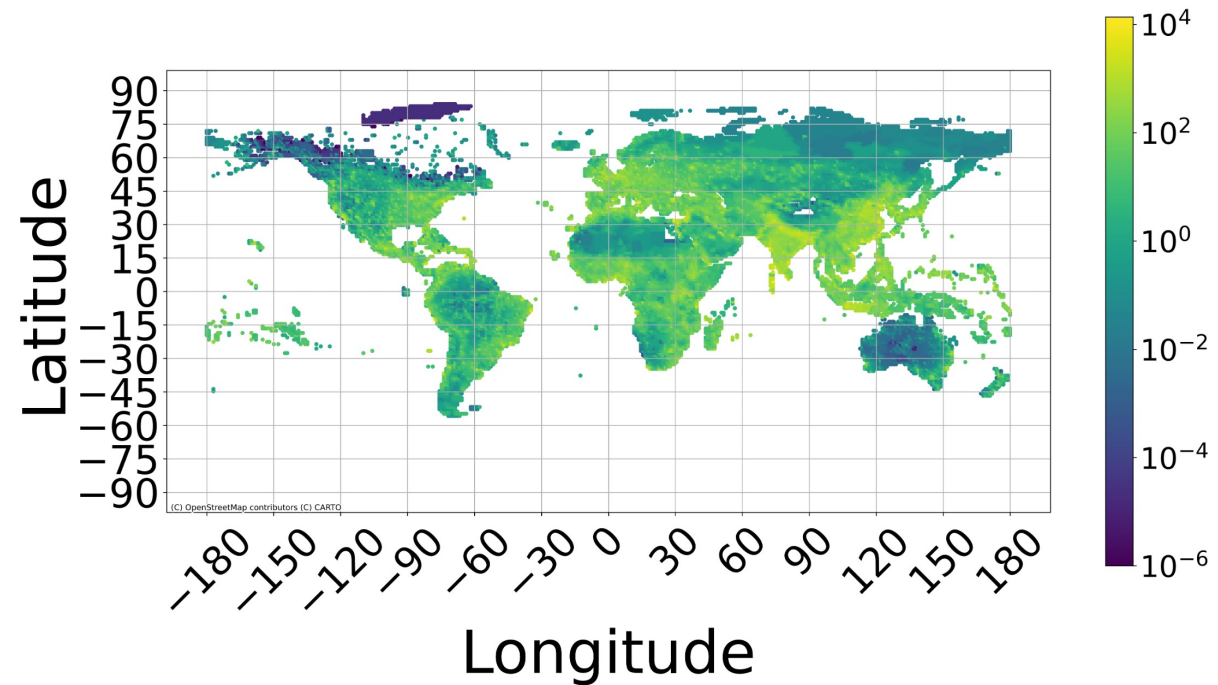
使用したLEO衛星のモデル

- 衛星の移動計算シミュレータ(Starperf)を使用
- SpaceX社が運用する「Starlink」を想定

	高度(km)	軌道周期	軌道傾斜角	軌道数	軌道内衛星数	合計衛星数
一層	550	5731	53.0	72	22	1584
二層	570	5755	70	36	20	720
三層	560	5743	97.6	10	52	520
四層	540	5718	53.2	72	22	1584

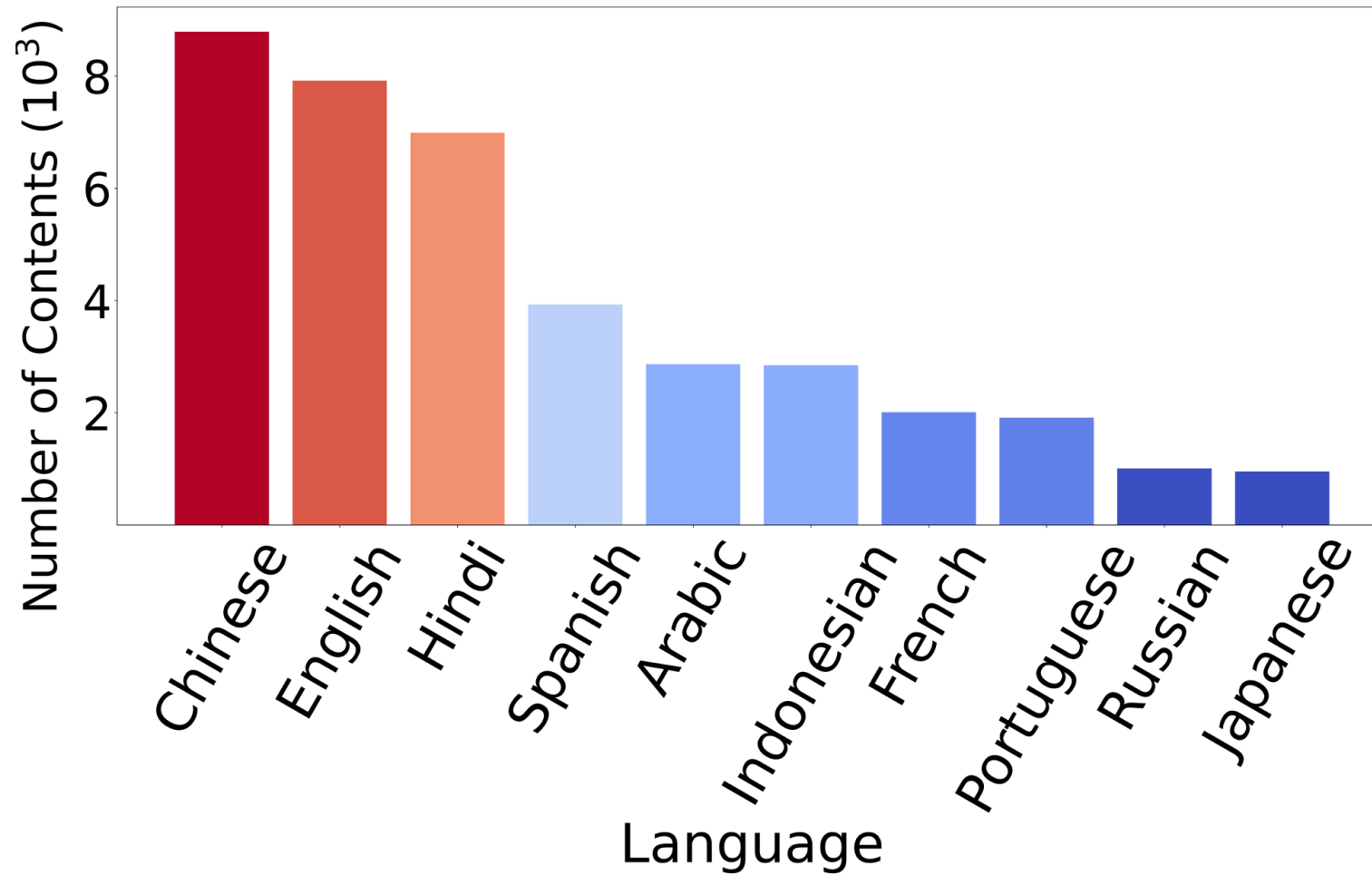
要求発生モデル

- 地表面を緯度経度1度ずつのグリッドに分割
- 各グリッドの人口に応じて1秒あたりの要求数を決定
- 言語別にコンテンツの集合を用意し、言語別に要求頻度をパラメタ0.8のzipf分布で設定
- ユーザは確率 q で自身が属するグリッドが属する国の言語に該当するコンテンツ集合から要求
- 確率 $1-q$ で全世界のコンテンツ集合からコンテンツを要求



コンテンツ数の割り当て

- 各国の人口から各言語のコンテンツ数を決定(総コンテンツ数は50,000)



想定環境

- 全人口の100分の1がLEO衛星ネットワークを利用しているものとする
- 衛星がキャッシュしていない場合、衛星間通信を通じてコンテンツを取得
 - 経路選択はダイクストラ法を使用(重みは遅延)
- オリジナルのコンテンツはいずれかのオリジンサーバが一つだけ保持
- 要求されたコンテンツは一つの衛星で応答できるものとする(ハンドオーバーは発生しない)
- 遅延は伝搬遅延のみを考慮
- 各衛星のキャッシュサイズは10
- 任意の地点のユーザが通信可能な衛星数は3-5台
- 置換方式はLRU
- ユーザが自身の属するグリッドの言語を要求する確率は0.7

衛星間通信 (Inter Satellite Links)

- 衛星ネットワークにおけるトポロジー
- LEO衛星ネットワーク内で低遅延パスを実現する上で重要な役割
 - 高いデータレート
 - ビームが狭くなり、干渉がなくなるため、セキュリティが強化
- 移動する特性上、トポロジーが変形
- 相対位置が変わりずらい上下左右の衛星と接続(Positive_Grid)[4]
- 同じ層同士の衛星でのみリンクを接続

[4]D. Bhattacharjee and A. Singla. Network topology design at 27,000 km/hour. In Proceedings of the 15th International Conference on Emerging Networking Experiments And Technologies, pages 341–354, 2019.

性能指標と試行回数

■ 性能指標

- キャッシュヒット率: ユーザが発行したコンテンツ要求のうち、対応するコンテンツがDirect SatelliteまたはInter Satelliteから返送された割合
- 遅延減少量: オリジンサーバから返送された場合の伝搬遅延から実際にかかった遅延を引く

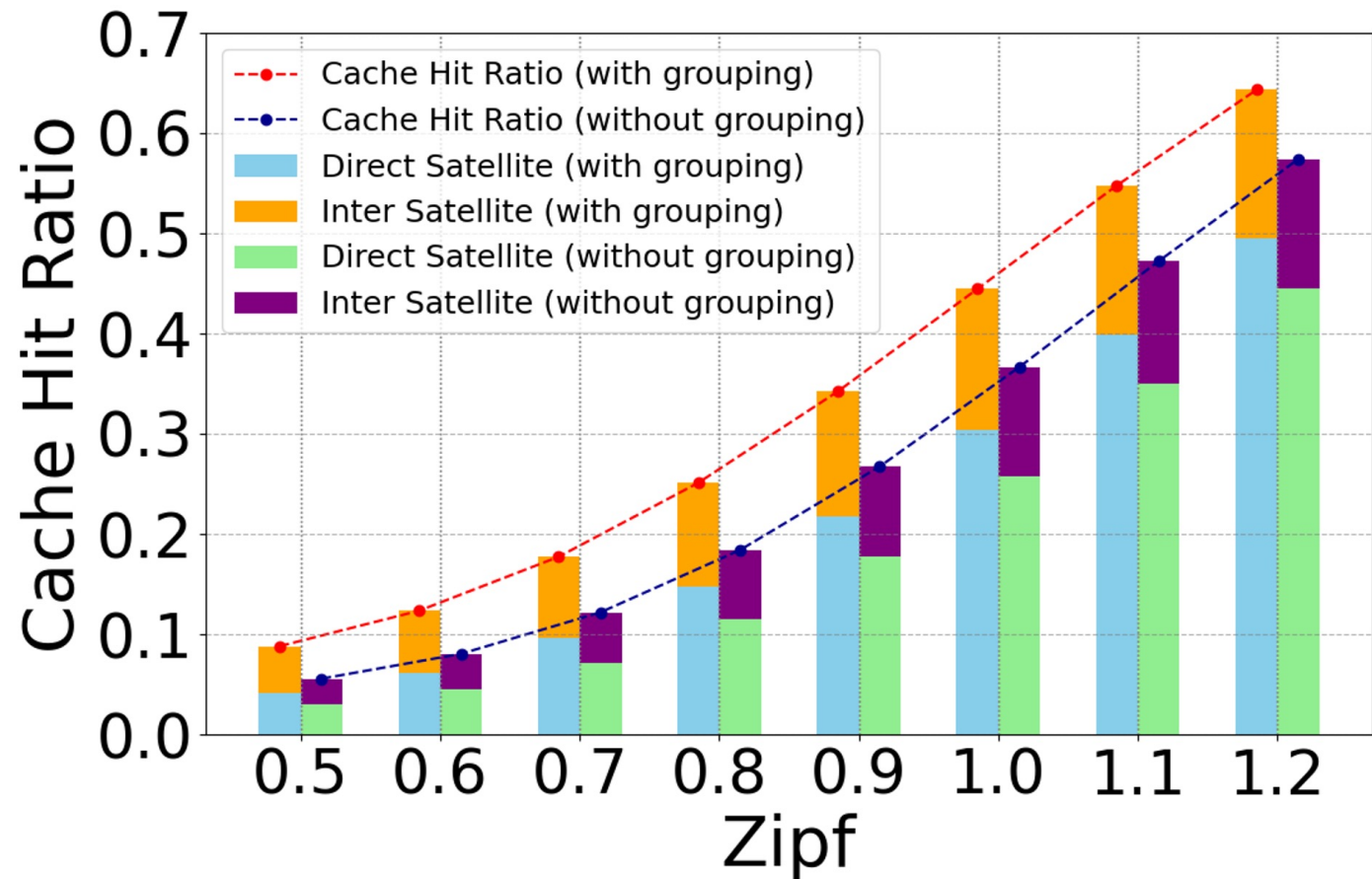
■ 試行回数

- 一秒あたりの全世界の要求数 * 60,000秒
 - 一秒あたりの要求数は1500回[5]
- 全てのキャッシュが埋まってから開始

[5] <https://jp.statista.com/statistics/1357292/most-visited-websites-worldwide>

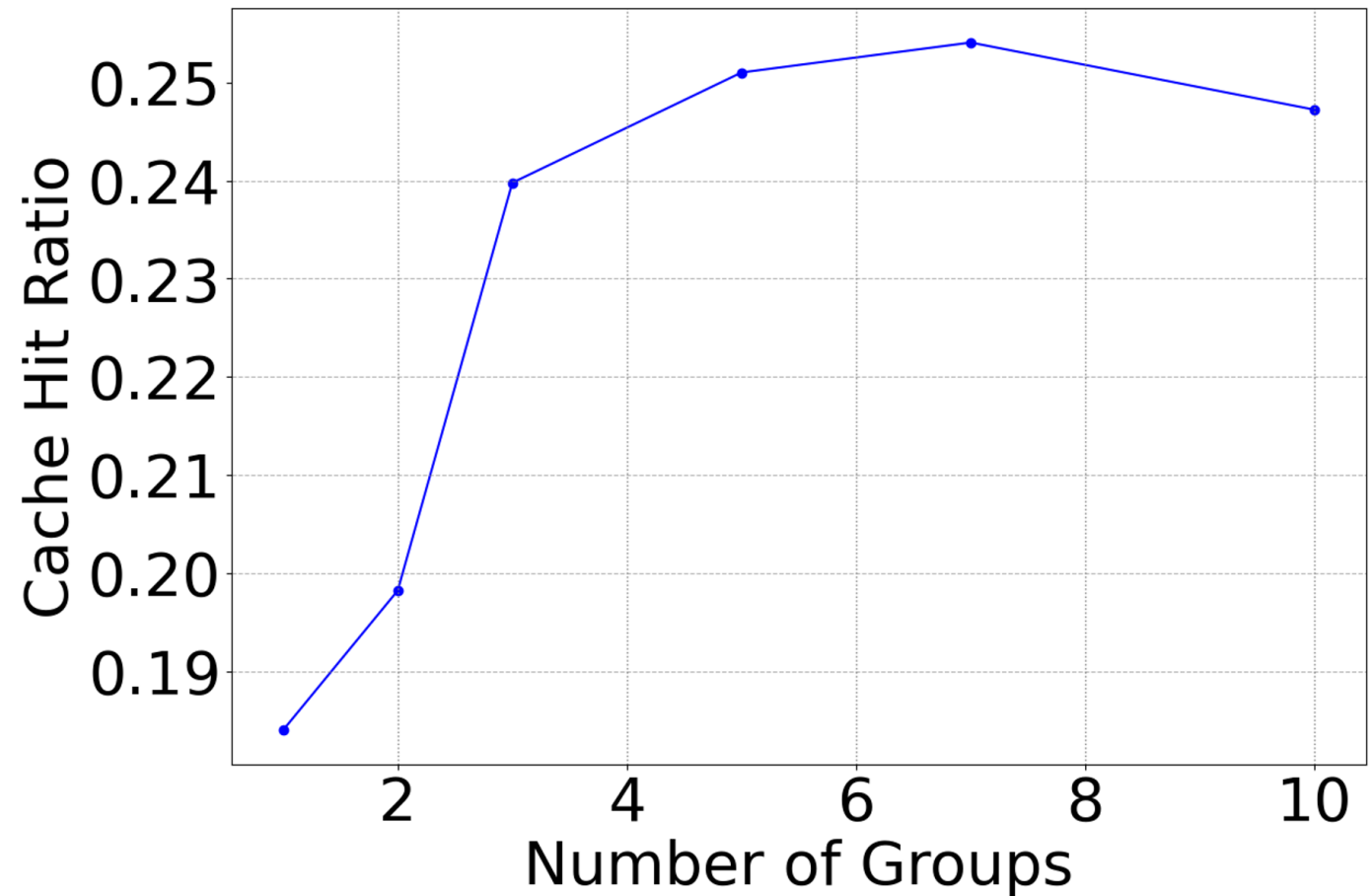
結果: キャッシュヒット率

- グループ핑しない方式と比べてどの値でもキャッシュヒット率が向上
- Direct Satelliteはコンテンツをキャッシュしている衛星を優先的に選んでいるため、高くなっている
- Inter Satelliteでのキャッシュヒット率も従来方式より向上



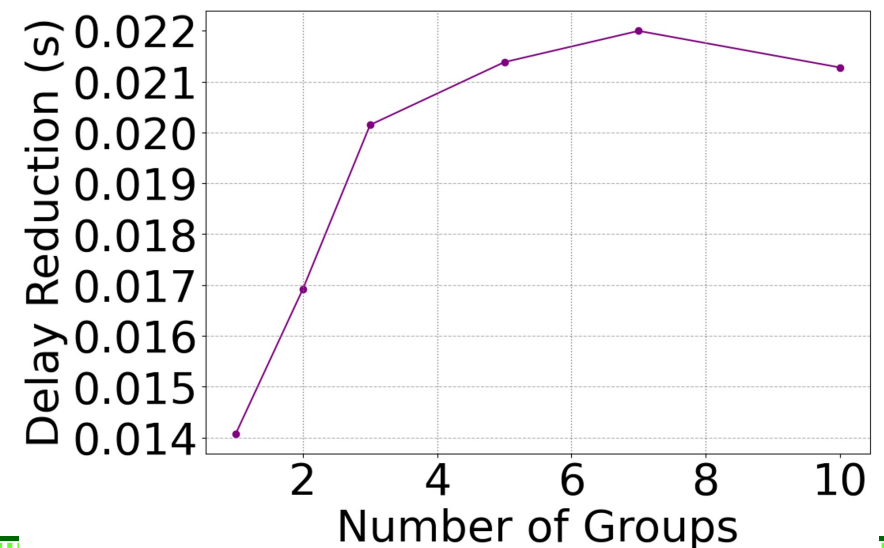
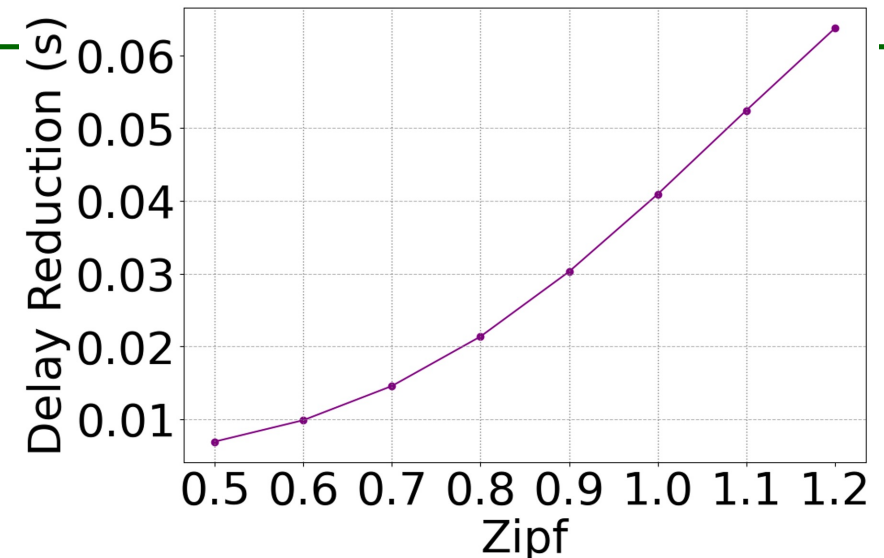
結果:グループ数によるキャッシュヒット率の変化

- グループ数によってキャッシュヒット率が変化
 - グループ数は7の時に一番キャッシュヒット率が高い
 - オリジンサーバからユーザまでコンテンツを返送する際に経由する衛星が7台程度が効率が良いため



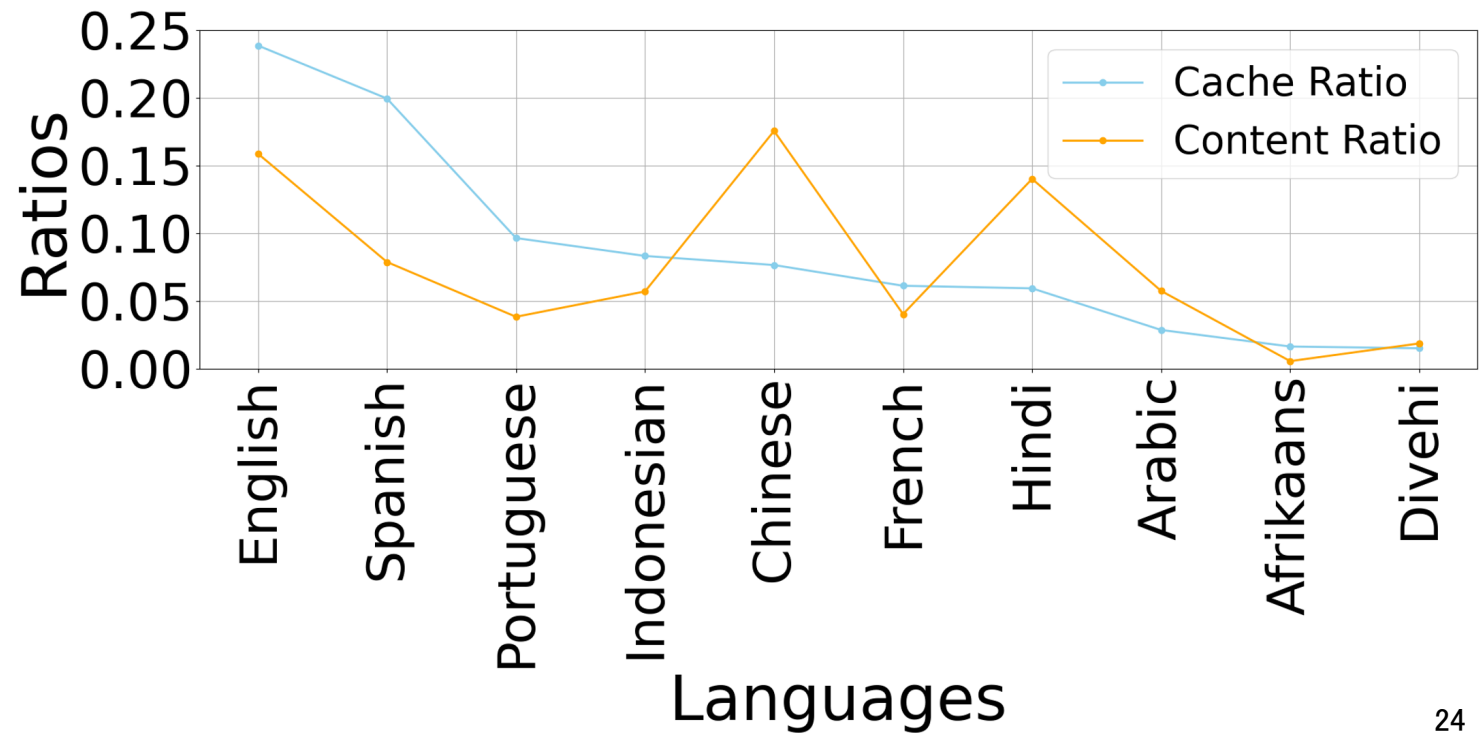
結果:遅延減少量

- Zipfの変化に伴って遅延減少量が増加
- グループ数は7が最大の遅延減少量となり、それ以上グループを増やしても効果が薄い
 - オリジンサーバまでの距離が元々近い場合、担当グループの衛星を経由しない可能性が高くなるから
- グループ分けで、よりキャッシュにヒットする確率が高くなり、遅延が減少



結果: キャッシュの中身

- コンテンツの割り当て数と衛星キャッシュの中身の分布では複数の国で使用されている言語はキャッシュされる割合が高くなり、単一の国で使われている言語はキャッシュされる割合が低くなる



まとめ

- ダウンリンクを優先するため、LEO衛星はアップリンクのスループットが低い
 - LEO衛星からのキャッシュ配信が有効
- 従来の地上キャッシュは空間的局所性を活かしてキャッシュヒット率を向上
 - LEO衛星の移動する特性を考慮しないと、ヒット率が向上しない
- 本研究ではコンテンツ人気度の局所性を考慮したキャッシュ法を提案
 - 提案方式によりキャッシュヒット率の向上を確認
- 今後の課題
 - より詳細な要求パターンでの評価
 - 伝搬遅延以外の遅延も考慮