

ISP 間の経済的公平性を目的とした パケットスケジューリング法

NS研究会

2026年3月4日

立命館大学 情報理工学部

佐野愛莉 上山憲昭

研究背景

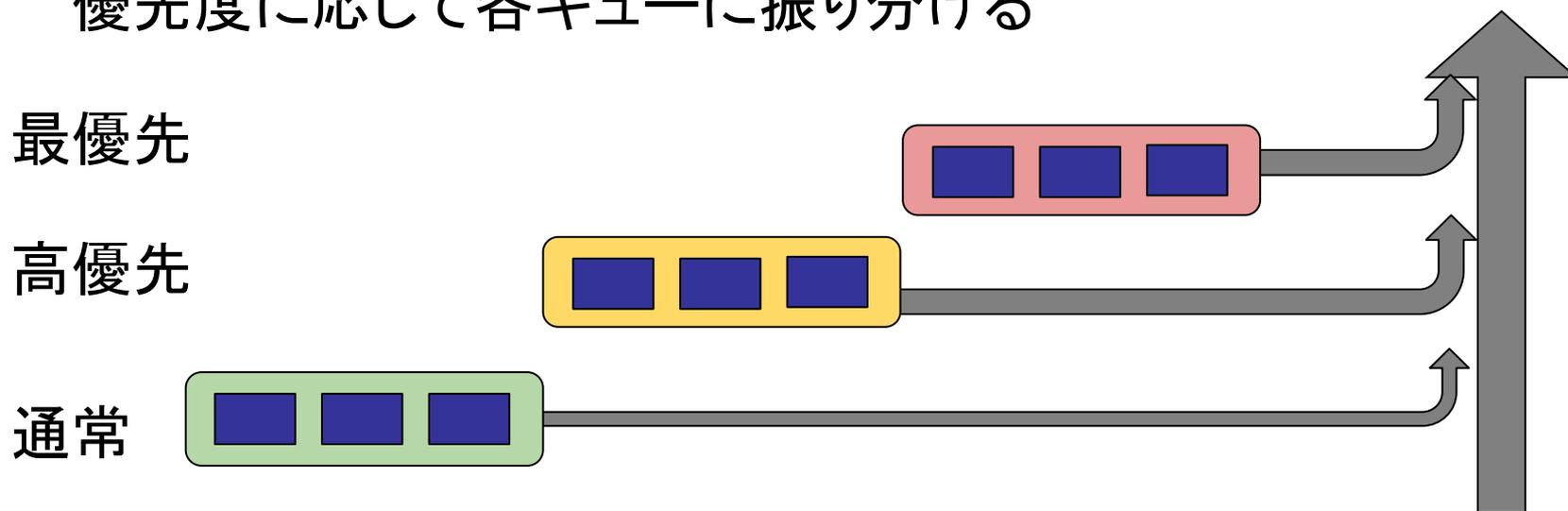
- インターネットの通信プロトコル: TCP/IPやUDP/IP
 - ベストエフォート型サービス: 通信速度や品質について最大限の努力はするものの、その性能や速度を保証するものではない
- その結果トラフィックが増加すると、遅延やスループットの低下が起こり、特定の人やサービスに不公平が生じる問題が発生
- フロー間で優先度や重みを付けることで、公平性を改善

アクセスISPにおける公平性の改善策

- 以下の3つの方式の組み合わせ
 - SPQ (Strict Priority Queueing)
 - WFQ (Weighted Fair Queueing)
 - DWRR (Deficit Weighted Round Robin)

SPQ (Strict Priority Queuing)

- パケットに付与された優先度 (priority) に基づき, 階層化された送出制御を行う方式
- ルータ内に複数の優先度別キューを用意し, パケットをその優先度に応じて各キューに振り分ける



- 利点: VoIPやリアルタイムビデオ会議など, 遅延に敏感なトラフィックに対して, 最小の遅延を保証可能
- 欠点: 最優先度のトラフィックが帯域を占有し続けた場合, 低優先度のキューが全く処理されない

WFQ (Weighted Fair Queuing)

- GPS (Generalized Processor Sharing)と呼ばれる理想的なビット単位の公平分配モデルを、パケット単位のネットワークで近似するために提案された方式

- 分配比率

$$R_f = R \times \frac{w_f}{\sum_{k \in F} w_k}$$

R_f : フロー f に割り当てられる帯域
 R : ポート全体の帯域
 w_f : 各フロー f に対する重み

- 各パケットの仮想終了時刻を計算し、早い順に送出
- 欠点: パケットごとに仮想終了時刻を計算・ソートする必要があるため計算コストがかかる

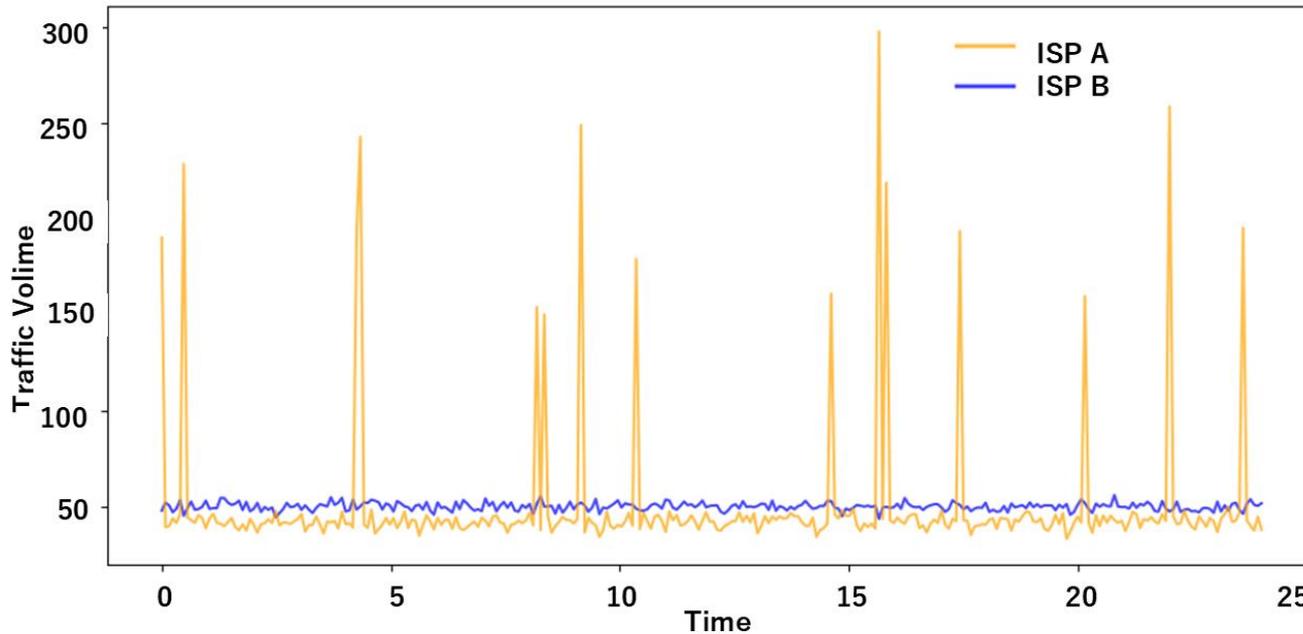
DWRR (Deficit Weighted Round Robin)

- キューごとに異なる重みを設定可能にしたスケジューリングアルゴリズム
- 可変長パケットが存在する環境下でフロー間の帯域を重みに比例して正確に分配することを目的としている。
- メカニズム
 - Quantum (Q_i): 設定した重みに比例して各キューに与えられる送信権限
 - Deficit Counter (DC_i): 前のラウンドで使い切れなかった送信権限を次へ繰り越すための変数。パケットサイズの違いを DC_i で吸収し、長期的に正確な重み付け配分を実現する。

バックボーンネットワークにおける公平性の改善策

- バックボーンネットワーク
 - 数百万本以上のフローがルータを経由するためWFQのようにフローごとに制御することがスケールしない
 - ※スケールしない＝処理しきれない
 - QoSクラス(優先度)ごとに帯域を制御
- 課題:ISP同士が接続料を支払って帯域を使っているため、このQoSクラス単位の制御では、支払い料金に応じた公平性を実現するのが難しい

例) ISP間課金方式のために生じる不公平性



	ISP A (黄)	ISP B (青)
平均 値	10	10
95% 値	100	50

AもBも流したいトラフィック量は同じ。

従来：平均値ベースで帯域割合を決定

課題：ネットワークが輻輳した時、Aが課金額を高く支払っているにも関わらず同じ割合でトラフィック量を減らされる

＝支払い額が関係ない

着目課題/研究の目的

■ 着目課題

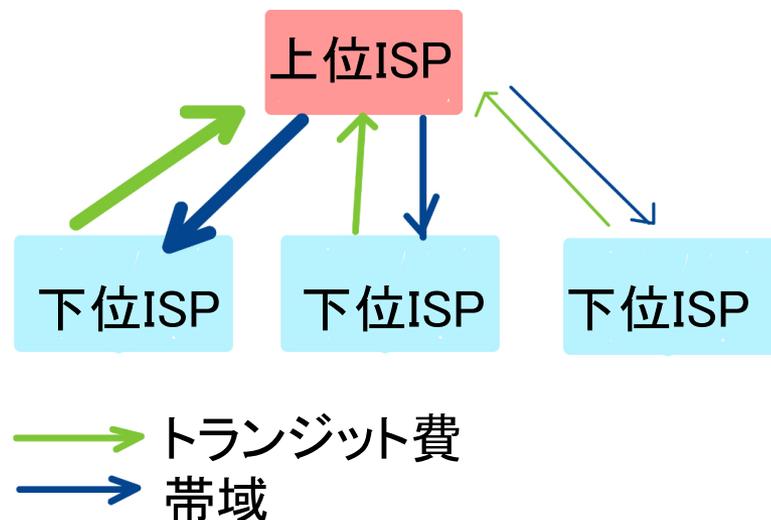
- バックボーンネットワークではフローごとのQoS制御がスケールしない
- そのため収容する下位のISP間ごとに、スループットの制御ができないため、支払いトランジット費に応じた公平性が実現困難

■ 目的

ISPの公平性を実現する
バックボーンネットワークの
DWRRを用いた
帯域制御方式を提案

■ アプローチ

- **トランジット費**に基づく
DWRRの重み設定



DWRR (Deficit Weighted Round Robin)

- キューごとに異なる重みを設定可能にしたスケジューリングアルゴリズム
- 可変長パケットが存在する環境下でフロー間の帯域を重みに比例して正確に分配することを目的としている。
- メカニズム
 - Quantum (Q_i): 設定した重みに比例して各キューに与えられる送信権限
 - Deficit Counter (DC_i): 前のラウンドで使い切れなかった送信権限を次へ繰り越すための変数。パケットサイズの違いを DC_i で吸収し、長期的に正確な重み付け配分を実現する。

例) DWRRの仕組み

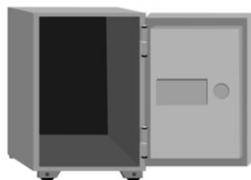
quantum
(基準値)

deficit counter
(DC)

A(重み1)



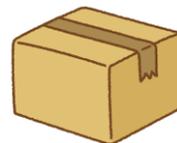
quantum × 重み
(500円 × 1)



500円



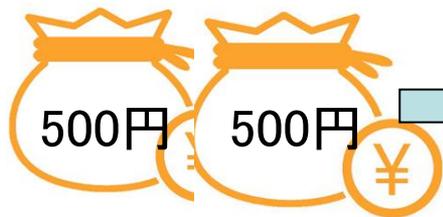
パケット① 400円
⇒ $500 > 400$
⇒ 送信可能



パケット② 300円
⇒ $500 - 400 = 100 < 300$
⇒ 送信不可能
⇒ DC+100



B(重み2)



quantum × 重み
(500円 × 2)



1000円



パケット① 600円
⇒ $1000 > 600$
⇒ 送信可能



パケット② 700円
⇒ $1000 - 600 = 400 < 700$
⇒ 送信不可能
⇒ DC+400



提案する帯域制御方式

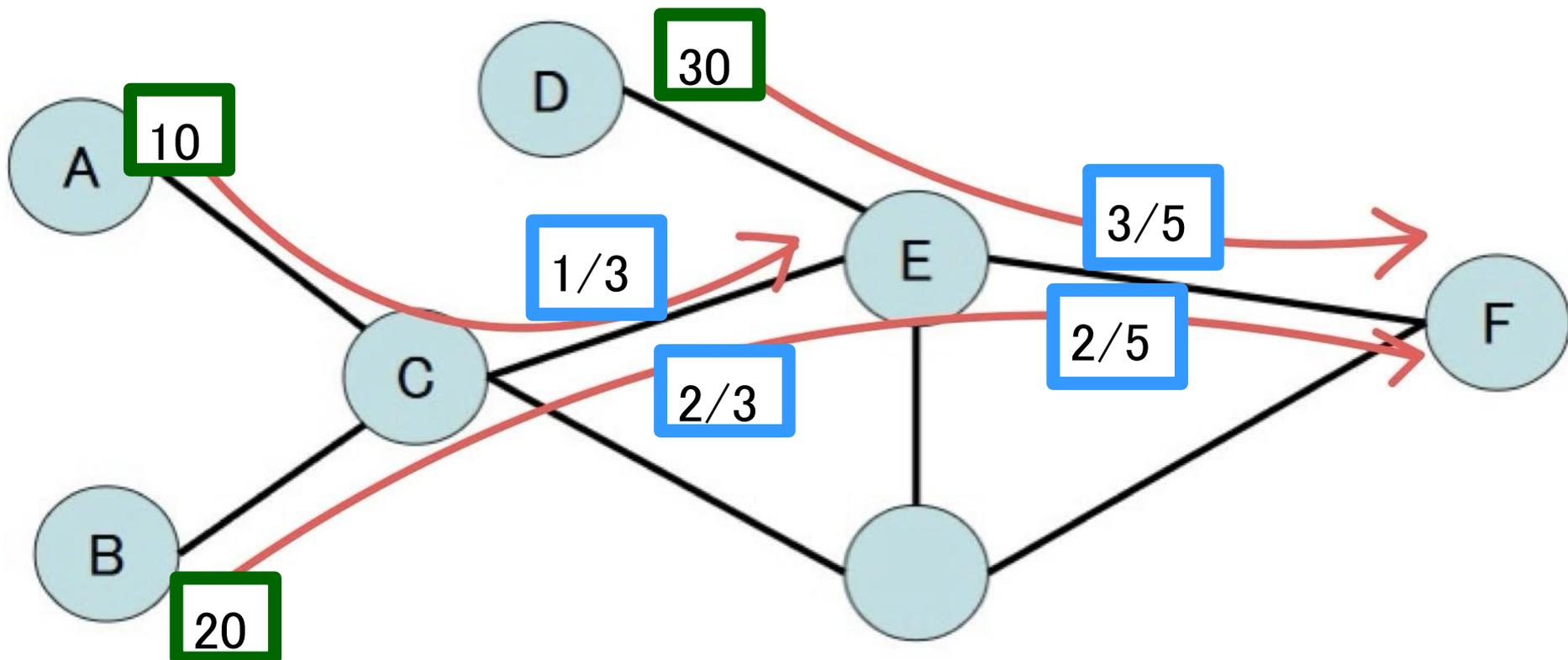
■ 重みの計算

- 各ISPが支払うトランジット費に比例して決定
- トランジット費は95%値を採用
- 過去のトラフィックデータを使用

$$R_{s,f,e} = \frac{(P_{95,s})^\alpha}{\sum_{k \in S_e} (P_{95,k})^\alpha}$$

S_e	リンクeを経由する発ノードの集合
$R_{s,f,e}$	s→f間のフローのリンクeにおける割当割合
$P_{95,s}$	送信ノードsの送信データ量の95%値
α	重み反映強度(支払額の優先度合)

重み割り当ての例



● :ISP □ :95%値 □ :重み → :流れるデータ

C-EリンクでのAの重み: $10/10+20 = 1 / 3$

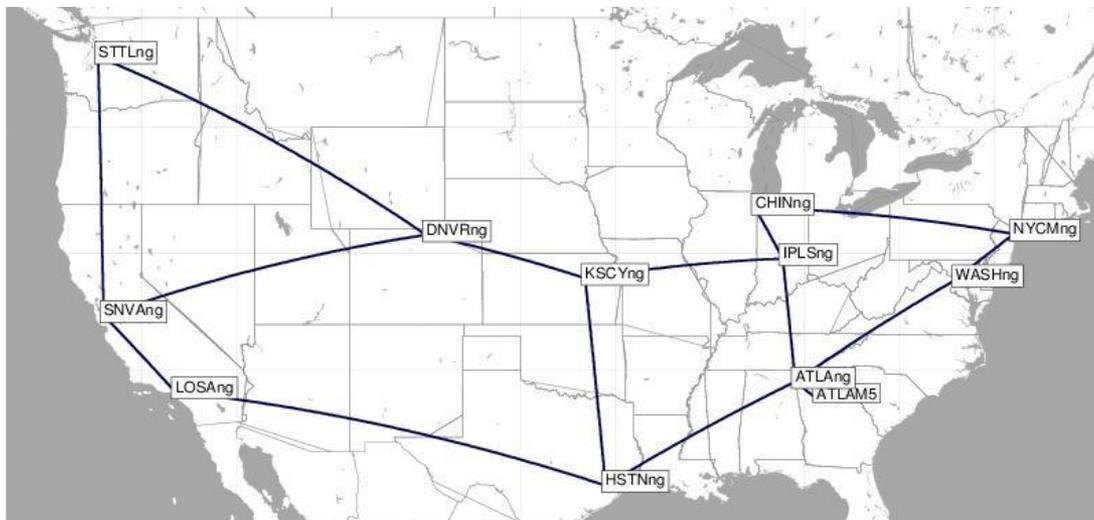
C-EリンクでのBの重み: $20/10+20 = 2 / 3$

E-FリンクでのAの重み: $30/30+20 = 3 / 5$

E-FリンクでのBの重み: $20/30+20 = 2 / 5$

評価条件

- トポロジ: Abilene Network (米国バックボーン、12ノード)。



- トラフィックデータ: ダウンロードデータを100倍にして使用。
- 重み反映に使うデマンド量の期間: 5月の1カ月間
- 送信データに使う期間: 翌月6月の1カ月間
- 評価指標:
 - スループット比率 = 実際の送信データ量 ÷ デマンド量
- 比較対象: 経済指標を考慮しない「基本方式」
- 変更して比較する条件: ①重み反映度 α ②リンク容量 β ③経路選択

リンク容量

- 各リンクを通るデマンド量の合計に β をかけたもの
- β が1未満だと輻輳状態

$$T_e = \beta \sum_{k \in D_e} d_s$$

T_e	リンク e を経由する総トラヒック量
β	リンク容量
D_e	リンク e を経由するデマンドの集合
d_s	リンク e を経由する発ノードsからのトラヒック量

各対地間のスルーputの計算方法

① 1回目の割り当て

$$A_{s,f,e} = R_{s,f,e} \times T_e$$

送信したいデマンド量と一次割り当て量とで小さい方を選択

② 再分配時の重み

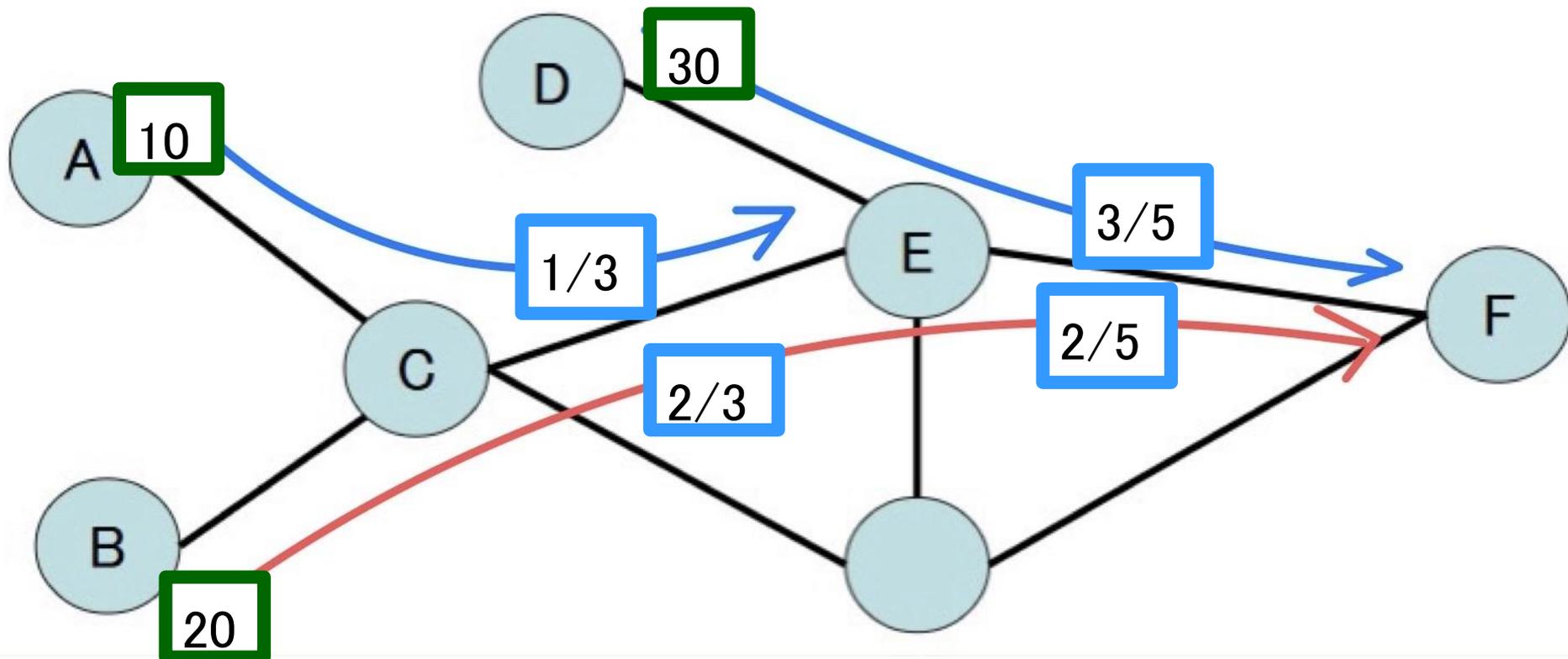
$$R_{s,f,e}^{(2)} = \frac{(P_{95,s})^\alpha}{\sum_{k \in S'} (P_{95,k})^\alpha}$$

③ 最終割り当て

$$A_{s,f,e}^{(final)} = A_{s,f,e}^{(1)} + \left(B \times R_{s,f,e}^{(2)} \right)$$

$A_{s,f,e}$	s→f間のフローのリンクeにおける割当量
$R_{s,f,e}$	s→f間のフローのリンクeにおける発ノードsの重み
T_e	リンクeを経由する総トラヒック量
$P_{95,s}$	送信ノードsの送信データ量の95%値
S'	1回目の割り当てで溢れた発ノードの集合
α	重み反映強度
B	一次割り当て後に、帯域が余ったノードの余剰分の合計

実現スループットを求める例



● :ISP □ :95%値 □ :重み → :流れるデータ

<B→C→E→Fのフロー>

Bは15流したい

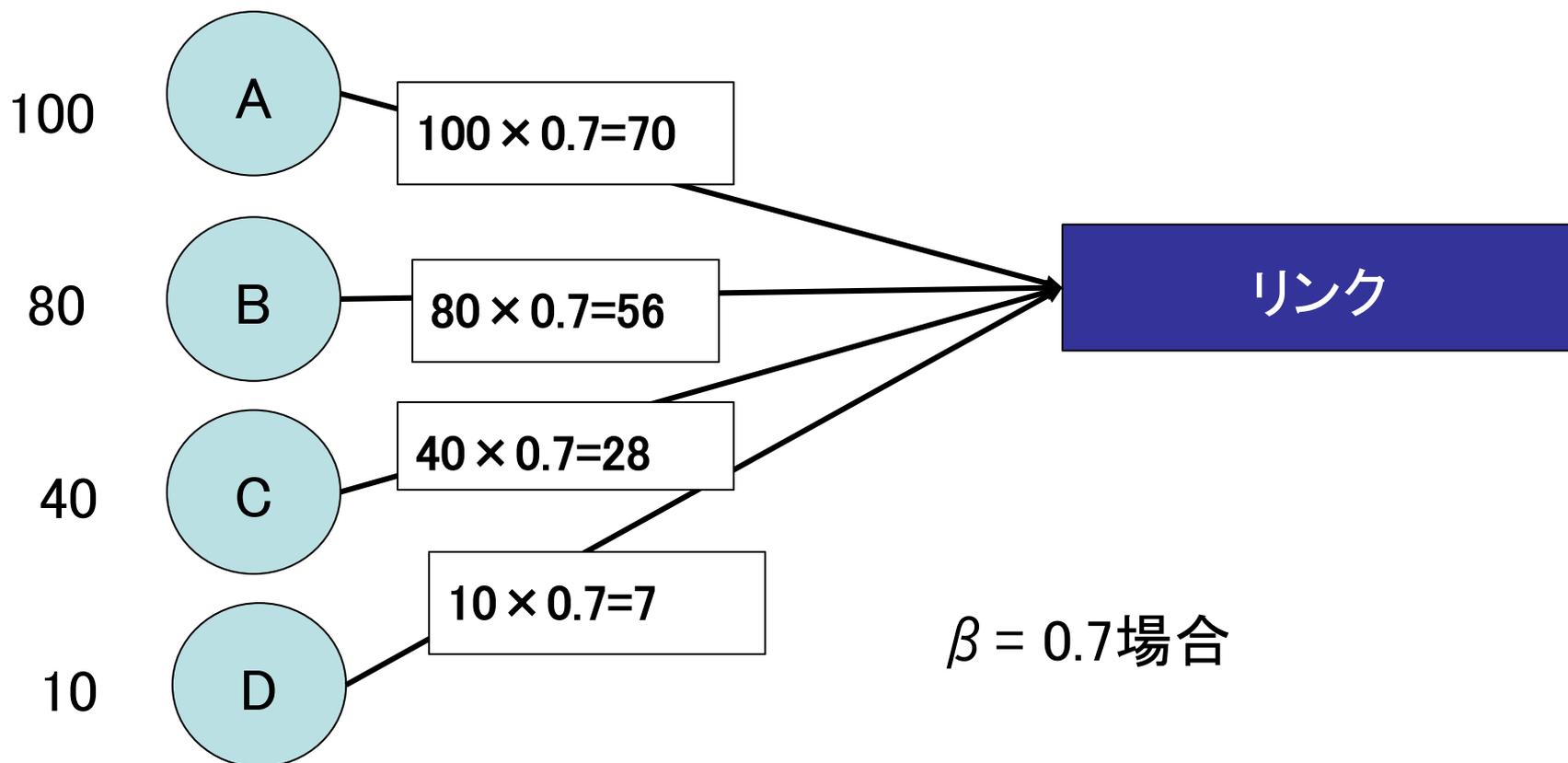
リンクC-Eで流せる量: $15 \times \frac{2}{3} = 10$

リンクE-Fで流せる量: $15 \times \frac{2}{5} = 6$

ボトルネックリンクは
E-Fであり、Bが流せる
最終的トラフィック量は6

基本方式

- 提案方式の比較対象
- 経済的指標を考慮しない
- 同一リンクを経由するフロー間で一律に帯域を配分

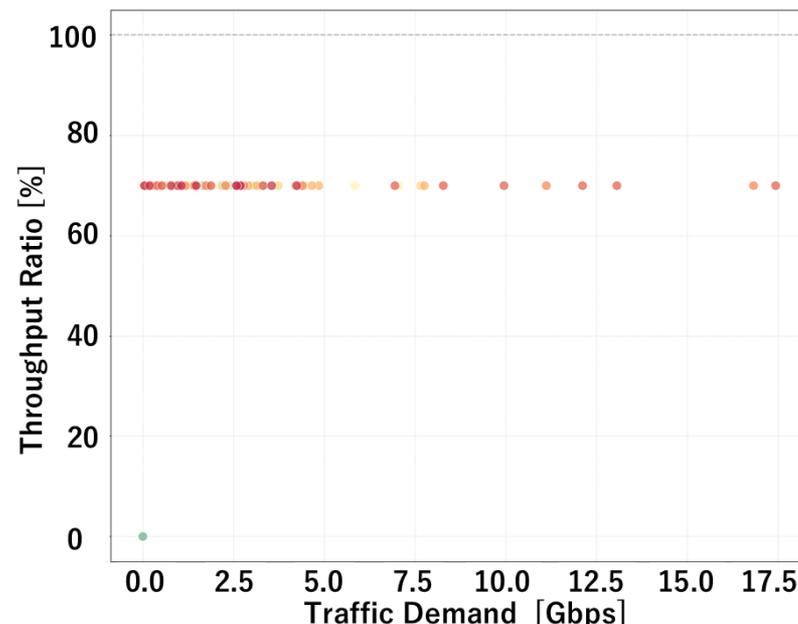
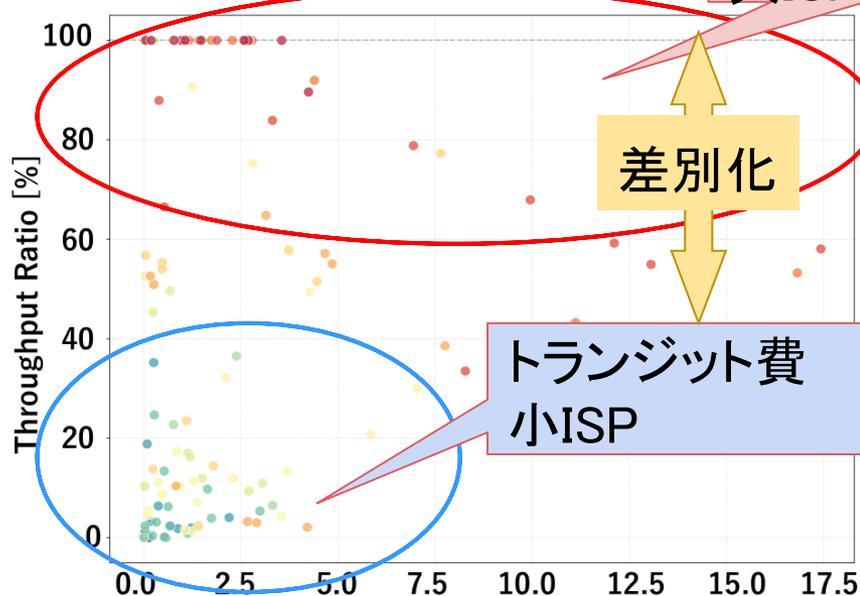


重み反映強度 α による影響 (最短経路)

提案方式 $\alpha=3$

トランジット費
大ISP

基本方式

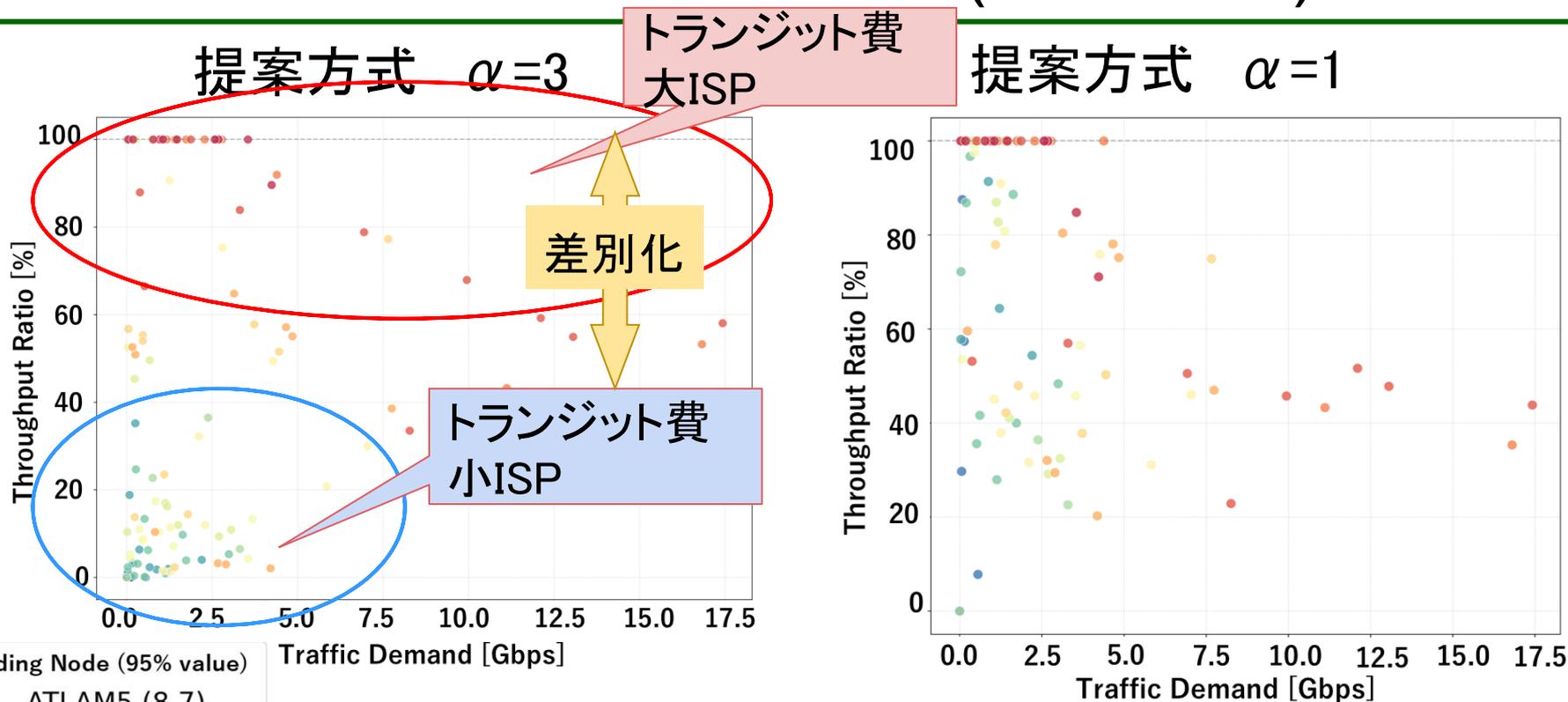


Sending Node (95% value) Traffic Demand [Gbps]

- ATLAM5 (8.7)
- HSTNng (105.9)
- KSCYng (128.0)
- SNVAng (170.5)
- STTLng (180.1)
- ATLang (222.1)
- DNVRng (332.8)
- IPLSng (411.8)
- NYCMng (653.8)
- LOSAng (669.4)
- WASHng (909.5)
- CHINng (2308.8)

- リンク容量 β は0.7
- 横軸: 要求トラフィック量
- 縦軸: スループット比率 = 実際の送信データ量 ÷ デマンド量
- 基本方式: 支払額に応じたスループット比率 ✖
- 提案方式: 支払額に応じたスループット比率 ○

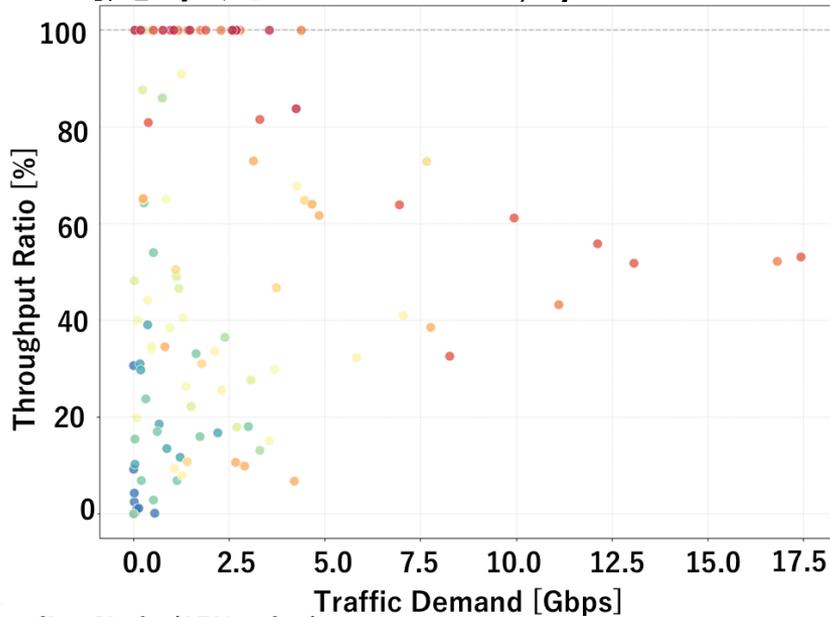
重み反映強度 α による影響 (最短経路)



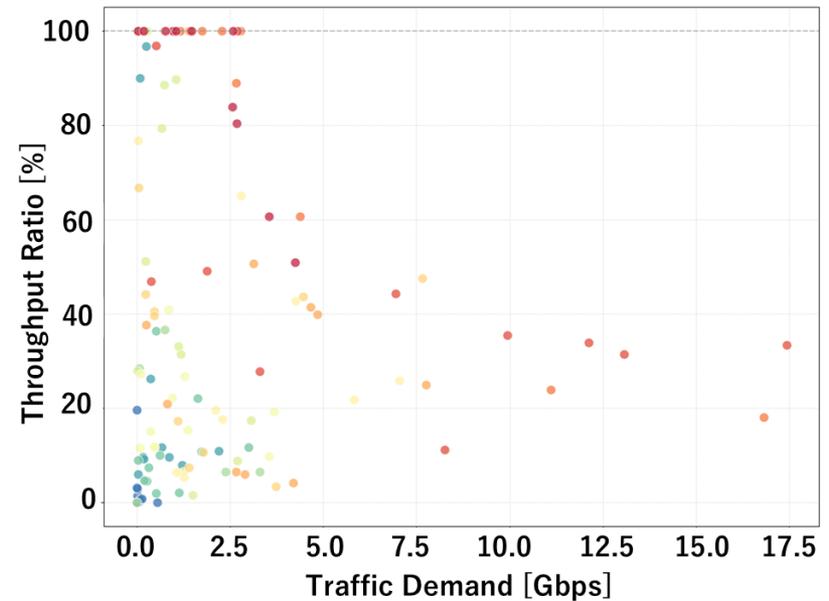
- リンク容量 β は0.7
- 横軸: 要求トラフィック
- 縦軸: スループット比率 = 実際の送信データ量 ÷ デマンド量
- 提案方式: 支払額に応じたスループット比率 α
- α を大きくするほど支払額の影響が大きくなる

リンク容量 β による影響 (最短経路)

提案方式 $\alpha=2, \beta=0.7$



提案方式 $\alpha=2, \beta=0.5$

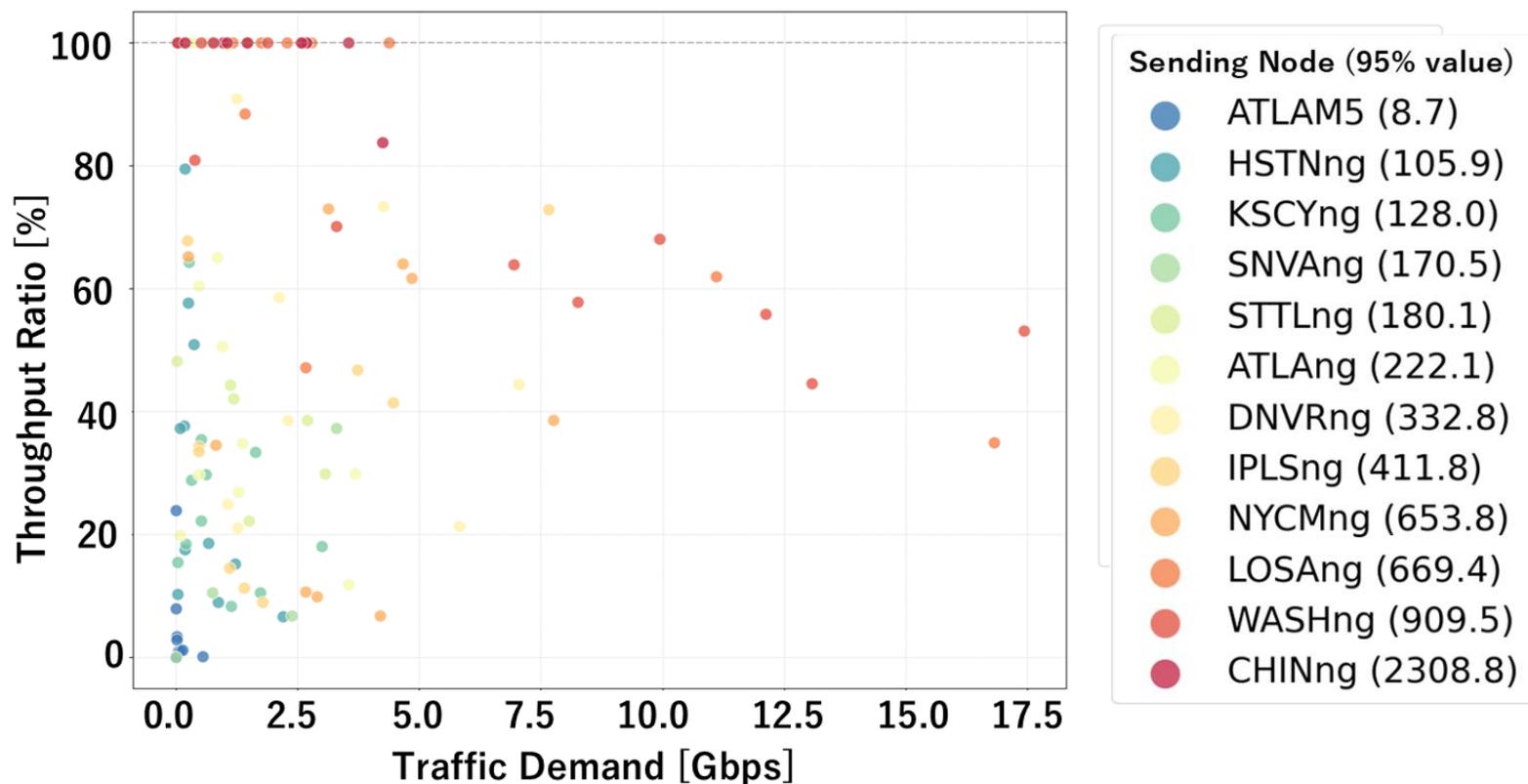


Sending Node (95% value)

- ATLAM5 (8.7)
- HSTNng (105.9)
- KSCYng (128.0)
- SNVAng (170.5)
- STTLng (180.1)
- ATLANg (222.1)
- DNVRng (332.8)
- IPLSng (411.8)
- NYCMng (653.8)
- LOSAng (669.4)
- WASHng (909.5)
- CHINng (2308.8)

- リンク容量 β を0.5に変更
- 横軸: 要求トラフィック
- 縦軸: スループット比率 = 実際の送信データ量 ÷ デマンド量
- 全体的に下がるものの、支払額に応じたスループット比率を達成

経路選択アルゴリズムの影響



- $\alpha = 2, \beta = 0.7$
- 最短ホップ数でも支払額に応じて送信されていた
- 経路選択に関わらず提案方式は有効である

まとめ

- 支払額に応じた分配できてない
- 95%値にもとづいて重みを設定し帯域を分配
- 提案方式により、支払額に応じたスループットの差別化を実現