

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

佐野 愛莉[†] 上山 憲昭[†]

[†] 立命館大学 情報理工学部

〒567-8570 大阪府茨木市岩倉町 2-150

E-mail: [†]is0671sp@ed.ritsumei.ac.jp, ^{††}kamiaki@fc.ritsumei.ac.jp

あらまし インターネットは TCP/IP プロトコル群を基盤としたベストエフォート型のネットワークであり、基本的には通信品質が保証されない。そのため、トラフィックの増加に伴い遅延やスループットの低下が発生し、特定のユーザやサービス間で通信品質の不公平が生じることが課題となっている。現在、アクセス ISP (Internet Service Provider) などのエッジ領域では、SPQ (Strict Priority Queuing) と WFQ (Weighted Fair Queuing) を組み合わせることで、パケットの優先制御やフローごとの公平な帯域割り当てが行われている。しかし、膨大なトラフィックが集中するバックボーンネットワークにおいては、フロー単位での詳細な制御を行う WFQ の実装は計算コストやスケーラビリティの観点から困難であり、一般的に QoS クラス単位での大まかな制御に留まっている。一方、バックボーンネットワークを構成する ISP 間では、下位 ISP が上位 ISP に対して利用帯域に応じたトランジット費を支払っている。しかし、現状のクラス単位の制御では、この支払額の差異が帯域割り当てに反映されておらず、高額な接続料を支払っている ISP とそうでない ISP との間で、費用対効果の観点から不公平が生じている。そこで本稿では、ISP 間の経済的な公平性を実現するために、バックボーンネットワークにおいて Deficit Weighted Round Robin (DWRR) を用いた新たな帯域制御方式を提案する。提案手法では、各 ISP が支払うトランジット費に基づいて DWRR の重みを決定する。これにより、より多くの接続料を支払う ISP に対して大きな重み (quantum) を設定し、優先的に帯域を割り当てるこを可能にする。DWRR は不足カウンタ (deficit counter) を用いることで、可変長パケットであっても計算負荷を抑えつつ重みに応じた公平性を維持できるため、高速なバックボーンルータへの実装に適している。提案手法の有効性を検証するため、異なるトランジット費を設定した複数の ISP が接続するネットワーク環境を模擬し、提案方式によるスループットの配分効果を評価する。

キーワード 帯域制御、経済的公平性、DWRR、トランジット費、バックボーンネットワーク

Packet Scheduling Method Aimed at Economic Fairness Among ISPs

Airi SANO[†] and Noriaki KAMIYAMA[†]

[†] College of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University

2-150, Iwakura-cho, Ibaraki, Osaka 567-8570, Japan

E-mail: [†]is0671sp@ed.ritsumei.ac.jp, ^{††}kamiaki@fc.ritsumei.ac.jp

Abstract The Internet is a best-effort network based on the TCP/IP protocol suite, fundamentally offering no guaranteed communication quality. Consequently, increasing traffic leads to latency and throughput degradation, creating unfair communication quality between specific users or services. Currently, in edge areas such as access ISPs (Internet Service Providers), packet priority control and fair bandwidth allocation per flow are achieved by combining SPQ (Strict Priority Queuing) and WFQ (Weighted Fair Queuing). However, in backbone networks where massive traffic concentrates, implementing WFQ for detailed flow-level control is difficult from the perspectives of computational cost and scalability. Consequently, control is generally limited to coarse-grained management at the QoS class level. Meanwhile, among ISPs constituting the backbone network, downstream ISPs pay transit fees to upstream ISPs based on the bandwidth they consume. However, under the current class-based control, this difference in payment amounts is not reflected in bandwidth allocation, creating an unfair cost-benefit disparity between ISPs paying high connection fees and those paying less. Therefore, this paper proposes a new bandwidth control method using Deficit Weighted Round Robin (DWRR) in backbone networks to achieve economic fairness among ISPs. The proposed method determines the DWRR weight based on the transit fees paid by each ISP. This enables assigning a larger weight (quantum) to ISPs paying higher connection fees, allowing them to receive priority bandwidth allocation. DWRR utilizes a deficit counter, enabling it to maintain fairness according to weight while keeping computational load low even for variable-length packets. This makes it suitable for implementation on high-speed backbone routers. To verify the effectiveness of the proposed method, we simulate a network environment where multiple ISPs with different transit fees are connected and evaluate the throughput distribution effect achieved by the proposed scheme.

Key words Bandwidth Control, Economic Fairness, DWRR, Transit Fee, Backbone Network

1. はじめに

インターネットは、TCP/IP や UDP/IP といったプロトコルによって構成されており、その設計思想はベストエフォート型サービスである。そのため、ネットワークの混雑時にはパケットの遅延や廃棄が発生し、品質は保証されない。データ通信量の爆発的な増加が続く現代において、こうした品質劣化は特定のユーザやサービス間での不公平な通信環境を招く要因となっている。

この不公平さを解消するため、ネットワークの接続点であるアクセス ISP においては、主に以下の 2 つの解決策が講じられている。第一に、Strict Priority Queuing (SPQ) である。これは、パケットに優先度クラスを設け、高優先のパケットを最優先で送信する方式である。第二に、Weighted Fair Queueing (WFQ) である。WFQ は各フローに重みを割り当て、その重みに基づいて帯域幅を公平に分配する。例えば、動画視聴やファイルダウンロードなどのフローが混在する場合でも、設定された比率で帯域を分け合うことが可能である。しかし、WFQ は個々のフローごとにキューイングと計算処理が必要となるため、膨大な数のフローを処理しなければならないバックボーンネットワークのルータに実装することは、ハードウェアリソースの観点から極めて困難であり、その適用はエッジルータに限られているのが現状である[1]。

そのため、アクセス ISP 同士や地域 ISP 同士を接続するバックボーンネットワークでは、フロー単位ではなく、より粒度の粗い「quality of service クラス」単位での帯域制御が行われている。バックボーンネットワークでは、複数の ISP が相互接続を行いデータ交換を行っているが、その際、下位の ISP は上位の ISP に対して、接続の対価として「トランジット費」を支払っている。しかし、現状の QoS クラス単位の制御では、技術的なトラフィック種別の区別はできても、「どの ISP がどれだけの料金を支払っているか」という経済的な情報は考慮されていない[3]。その結果、高額な料金を支払っている ISP も少額の ISP も同列に扱われる可能性があり、支払い料金に応じた公平性が実現できていないという課題がある。

そこで本稿では、ISP 間の経済的な公平性を実現するために、バックボーンネットワークにおいて Deficit Weighted Round Robin (DWRR) を用いた新たな帯域制御方式を提案する。提案手法では、各 ISP が支払うトランジット費に基づいてトランジットネットワーク上のルータの DWRR の重みを決定する。これにより、より多くの接続料を支払う ISP に対して大きな重み (quantum) を設定し、優先的に帯域を割り当てるこを可能にする。DWRR は不足カウンタ (deficit counter) を用いることで、可変長パケットであっても計算負荷を抑えつつ重みに応じた公平性を維持できるため、高速なバックボーンルータへの実装に適している。提案手法の有効性を検証するため、異なるトランジット費を設定した複数の ISP が接続するネットワーク環境を模擬し、提案方式によるスループットの配分効果を評価する。

2. 関連研究

2.1 SPQ (Strict Priority Queuing)

SPQ は、パケットに付与された優先度 (priority) に基づき、完全に階層化された送出制御を行う方式である。ルータ内に複数の優先度別キュー (High, Medium, Low 等) 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。スケ

ジューラは、最優先キューにパケットが存在する限り、それより下位のキューにあるパケットは一切送出されない。

- 利点: VoIP やリアルタイムビデオ会議など、遅延やジッタに対して極めて敏感なトラフィックに対して、最小の遅延を保証できる。

• 欠点: 高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「飢餓状態 (starvation)」が発生する。本稿の目的である ISP 間の経済的公平性の観点では、支払い額の差によって一方の通信を完全に遮断することは許容されず、SPQ の適用は不適切であるといえる。

2.2 WFQ (Weighted Fair Queueing)

WFQ は、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である[1][6]。

GPS では、各フロー f に対して重み w_f が割り当てられ、任意の時間区間において、バックログ (送信待ちデータ) があるフロー f は、同じポートを共有する全フローの集合 F の中で次式の比率でサービスを受ける。ポート全体の帯域を R としたとき、フロー f に割り当てられる帯域 R_f は以下のように定義される。

$$R_f = R \times \frac{w_f}{\sum_{k \in F} w_k} \quad (1)$$

WFQ では、各パケットに対して「仮想フィニッシュ時刻 (virtual finish time)」を計算し、その時刻が早い順にパケットを送出する。具体的には、システム全体の仮想時刻を r とし、フロー f に到着したパケットの仮想フィニッシュ時刻 $f.finish_time$ を以下のアルゴリズムで更新する。

- (1) パケット到着時、 $f.finish_time = \max(f.finish_time, r) + \frac{pkt.size}{w_f}$ を計算。(ここでパケット長を重みで除した値を加算)。
- (2) ポートがアイドル状態のとき、バッファ内で最小の仮想フィニッシュ時刻を持つパケットを選択し、送出。
- (3) パケット送出後、仮想時刻 r を $r = r + \frac{pkt.size}{R}$ のように更新。

WFQ は重みに応じた最大最小公平性を達成するが、高速なスイッチハードウェア上で実装するには課題が多い。特に、パケットごとにフィニッシュ時刻を算出し、送出時にソートを行う処理は $O(\log N)$ (N はフロー数) のオーバーヘッドを要するため、スケーラビリティの観点から困難を伴う。

2.3 DRR (Deficit Round Robin)

DRR は、WFQ の高い計算負荷を解決し、 $O(1)$ で動作するように提案された方式である[2]。同様に計算量を抑える試みとして Self-Clocking Fair Queueing も提案されているが[7]、DRR はより実装が容易である。

DRR は各キュー i に対して以下の変数を用いる。

- **quantum (Q_i)**: 各ラウンドでキューに付与される送信権限 (バイト数)。

- **deficit counter (DC_i)**: 前のラウンドの繰り越し分。

スケジューラはキューを順次巡回し、 $DC_i + Q_i$ の値がパケットサイズ以上の場合は送出を許可する。送出後の残量は DC_i に格納され、次ラウンドに引き継がれる。これにより、パケットサイズが可変であっても長期的な公平性を維持できる。

2.4 DWRR (Deficit Weighted Round Robin)

DWRR は、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である。DWRR は、計算負荷を $O(1)$ に抑えつつ、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。

る[4].

重み付けのメカニズムとして、各キュー i に対して重み w_i が割り当てられる。標準的な DRR ではすべてのキューに均等な送信権限 (*quantum*) が与えられるが、DWRR では次のように各キューの送信権限 Q_i を決定する。

$$Q_i = w_i \times Q_{\text{base}} \quad (2)$$

ここで、 Q_{base} はネットワーク内で処理される最大パケットサイズ以上に設定される基底 *quantum* である。重み w_i が大きいキューほど、1 回のラウンドで送出できるバイト数 (*quantum*) が多くなり、結果としてより多くの帯域幅を獲得できる[4]。

DWRR の動作は、DRR と同様に不足カウンタ (Deficit Counter: DC_i) を用いて管理される。具体的な動作アルゴリズムと対応する式を以下に示す[4].

(1) 不足カウンタの更新: 各ラウンドの開始時に、キュー i の不足カウンタ DC_i に送信権限 Q_i が加算。

$$DC_i \leftarrow DC_i + Q_i \quad (3)$$

(2) パケット送出判断: キューの先頭パケットのサイズ L_{pkt} が DC_i 以下である限り、パケットの送出が許可。

$$L_{pkt} \leq DC_i \quad (4)$$

(3) 不足カウンタの減算: パケットを送出した後、 DC_i からそのパケットサイズ分を即座に減算。

$$DC_i \leftarrow DC_i - L_{pkt} \quad (5)$$

(4) 次ラウンドへの繰り越し: DC_i が不足してパケットを送出できなくなった場合 ($L_{pkt} > DC_i$)、その残量を保持したまま次のラウンドへ移行。(なお、キューが空になった場合には、 DC_i は 0 にリセット。)

DWRR の利点を以下に挙げる。

- **低計算負荷:** パケットの終了時刻をソートする必要がある WFQ とは異なり、 $O(1)$ の計算複雑度で動作するため、高速なバックボーンルータへの実装に適している。

- **遅延とスループットの制御:** 優先度の高いフローに対して大きな *quantum* を割り当てることで、混雑時におけるスループットの低下を効果的に抑制できる。

3. 提案方式

3.1 概要

提案方式では、ISP ごとの DWRR の重みを、各 ISP が支払うトランジット費に比例して決定する。トランジット費としては「95% 課金」を採用する。これにより、高額な料金を支払う ISP には大きな重みを与え、混雑時にも優先的に帯域を確保する。

3.2 重みの算出手順

各リンク e における送信ノード s の割当割合 $R_{s,e}$ を以下のように決定する。まず、過去のトラフィック観測データから各送信ノード s の送信データ量の 95% 値 $P_{95,s}$ を算出する。これを用い、リンク e を利用する全ノード集合 S_e における各フローの重みを次式で算出する。

$$R_{s,e} = \frac{(P_{95,s})^\alpha}{\sum_{k \in S_e} (P_{95,k})^\alpha} \quad (6)$$

ここで、 α は支払額を帯域配分に反映させる強度を調整するパ

ラメタである。

4. 性能評価

4.1 各対地間のスループットの計算方法

(1) 一次割り当て: リンク e を経由する総トラヒック量 T_e に対して、発ノード s のフローに対する一次割当量 $A_{s,e}^{(1)}$ を $A_{s,e}^{(1)} = R_{s,e} \times T_e$ とする。ただしこの時、 $A_{s,e}^{(1)}$ は、デマンド量と $R_{s,e} \times T_e$ のうち小さい方の値に設定する。

(2) 再分配計算: 一次割り当て後に、帯域が余ったノードの余剰分を合計し B とする。一方で、要求量に満たず「溢れた」発ノードの集合を S するとき、これらの発ノード間での再割り当て割合 $R_{s,e}^{(2)}$ を次式で算出する。

$$R_{s,e}^{(2)} = \frac{(P_{95,s})^\alpha}{\sum_{k \in S} (P_{95,k})^\alpha} \quad (7)$$

(3) 最終割当量の決定: 各都市 s がリンク e に送信できる最終的なトラヒック量は、一次割当量に余剰分の再配分量を加えた次式となる。

$$A_{s,e}^{(final)} = A_{s,e}^{(1)} + (B \times R_{s,e}^{(2)}) \quad (8)$$

最終的なスループットは、バス上の全リンクにおける $A_{s,e}^{(final)}$ の最小値 (ボトルネック) として決定される。

4.2 評価条件

対象トポロジには、米国で構築された、大学や研究機関を結ぶバックボーン Abilene Network (12 ノード) を対象とする(図 1)[5]。

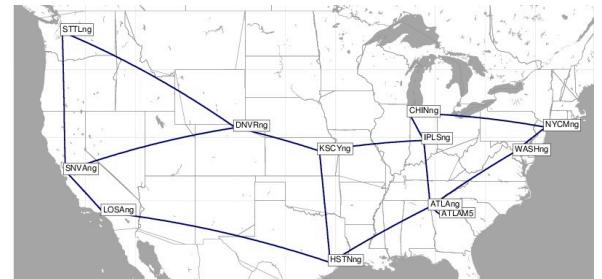


図 1 Abilene Network のネットワーク構成 (12 ノード)

各対地ノード間にに対して、式 (8) で算出される実スループットを、その対地ノード間のトラヒックデマンド量で除した値で定義する、達成スループット比率を各対地ペアに対して算出して、提案方式によりどの程度、支払いトランジット費に応じた公平なスループット配分が実現されるかを評価する。提案方式の有効性を評価するため、経済的指標を考慮しないで、同一リンクを経由するフロー間で一律に帯域を配分する「基本方式」と比較する。

snd-lib が公開している 5 分ごとの対地間トラヒック量を 100 倍した値を各対地間のデマンド量として用いる。そしてリンク負荷状態を調整するために、各リンクを経由するトラヒック量を β 倍した値を、各リンクの容量とする。

ISP 間の実際の契約・運用サイクルを想定し、5 月の 1 カ月間のトラフィック観測データから各発ノード s の 95% 値 $P_{95,s}$ を算出する。この算出された値を重みの基礎とし、翌月である 6 月のトラフィック制御に適用する。評価に用いるトラフィックデータ[5]としては、重みの算出根拠となった 5 月のデマンド量の平均値に最も近い、6 月 25 日 16 時 00 分を使用する。

4.3 重み反映強度 α の影響

第一の評価として、ISP が支払うトランジット費（95% 課金量 $P_{95,s}$ ）をどの程度帯域配分に反映させるかを決定する重み係数 α の感度分析を行う。提案方式 $R_{s,e} = (P_{95,s})^\alpha / \sum(P_{95,k})^\alpha$ において、 α の値を 1.5, 2, 3 と変化させ、各 ISP の達成スループット比率を比較する。 α を増大させることで、高額な料金を支払っている ISP に対してより優先的にリソースを分配する制御が可能となる。本評価では、この α の変化が各 ISP の最終的なスループットおよび公平性にどのように寄与するかを検証する。経路選択には最短距離経路を想定する。以後、数値結果は、横軸にトラフィックデマンド量、縦軸に達成スループット比率を、各対地ペアに対してプロットした散布図を示す。各プロットの色は 95% 値（支払料金に相当）を示し、暖色ほど高額、寒色ほど低額な発ノードを表す。

図 2 に基本方式の結果を、図 3～図 5 に提案方式の α の 3 つの値の各場合における結果を各々示す。ただしリンク容量の設定パラメタ β は 0.7 に設定した。図 2 に示すように、基本方式では課金料とは無関係に、全ての対地の達成スループット比率が同じ値 (β) となる。

一方、提案方式においては、高額なトランジット費を支払っている上位の発ノードの達成スループット比率が著しく改善され、100% に近い値を維持していることが確認できる。一方で、支払額が少ない ISP の達成スループット比率は大きく低下しており、 α を調整することで「より多く支払う ISP の品質を優先的に保護する」という経済的な公平性が実現されていると言える。また α の増加に伴い、トランジット費の大小による達成スループット比率の差別化がより顕著となる。

以上の結果から、提案手法はバックボーンネットワークにおいて、ISP 間の契約に基づいた柔軟な帯域割り当てを可能にする有効な手段であることが確認できる。

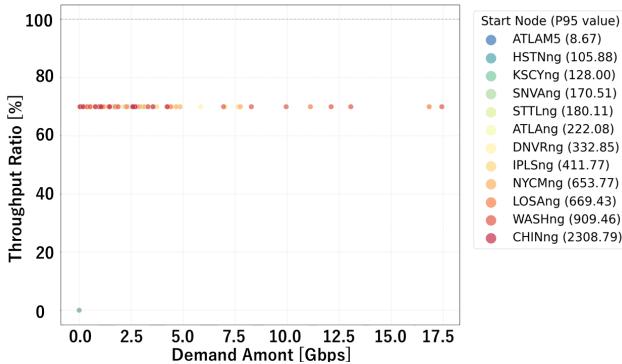


図 2 $\beta = 0.7$ における基本方式の各 ISP の達成スループット比率

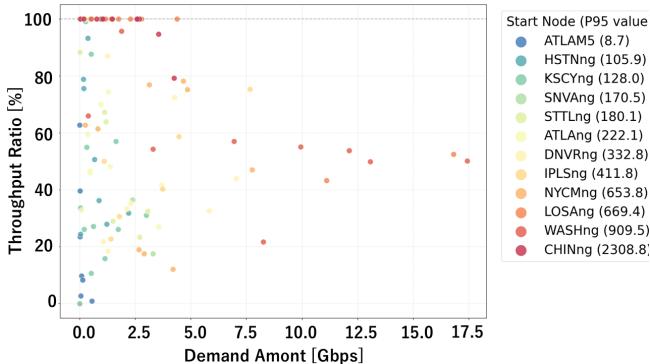


図 3 $\alpha = 1.5, \beta = 0.7$ における提案方式の各 ISP の達成スループット比率

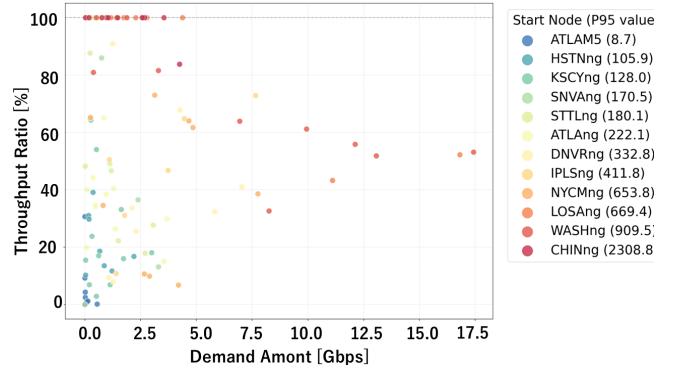


図 4 $\alpha = 2, \beta = 0.7$ における提案方式の各 ISP の達成スループット比率

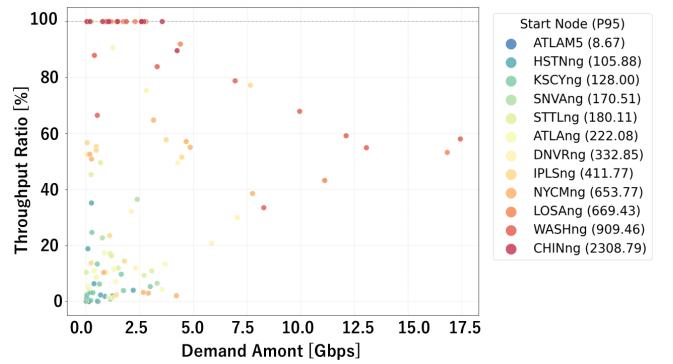


図 5 $\alpha = 3, \beta = 0.7$ における提案方式の各 ISP の達成スループット比率

4.4 リンク容量係数 β による混雑状況の変化

第二の評価として、ネットワーク全体の混雑度が提案方式の有効性に与える影響を調査する。各リンク e の容量 C_e を $C_e = \beta \times C_{base}$ と定義する。 C_{base} は、解析対象とする時点において、全発ノードから送信をしたいトラフィック量の合計である。 β を変化させることで、軽負荷状態からボトルネックが発生する過負荷状態を模擬する。特に β が小さく、リンク容量が需要を下回る混雑状況下において、DWRR による重み付け制御が、支払額の多い ISP のトラフィックをどの程度保護し、経済的観点からの公平な分配（達成スループット比率の維持）を実現できるかを定量的に評価する。今回は、リンク容量を基準の半分 ($\beta = 0.5$) まで削減し、ネットワーク全体で深刻なボトルネックが発生している過負荷状態を想定した考察を行う。経路選択には最短距離経路を想定する。

図 6 は、混雑状況下での基本方式の結果を示している。この状況において、基本方式では各 ISP に対して均等にリソースを配分するため、支払っているトランジット費の多寡に関わらず、図 2 に比べてすべての ISP の達成スループット比率が一律に大幅低下していることが分かる。一方、図 7 の提案方式では一律に大幅低下することはなく、トランジット費に基づいて達成スループット比率が差別化されることが確認できる。また送信割合が 70% 以上であるノードが 38 ノードあり、1 つもない基本方式と比べて全体的に達成スループット比率が高いことも確認できる。

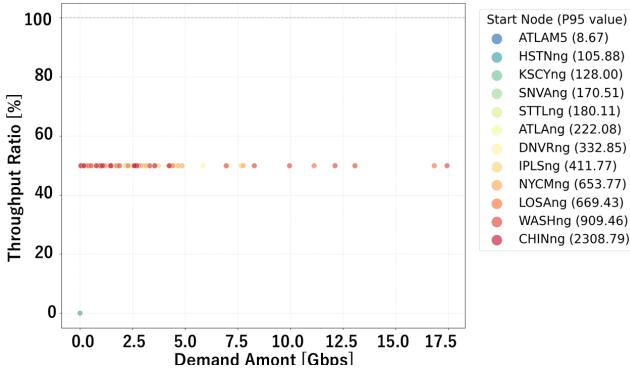


図 6 $\beta = 0.5$ における基本方式の各 ISP の達成スループット比率

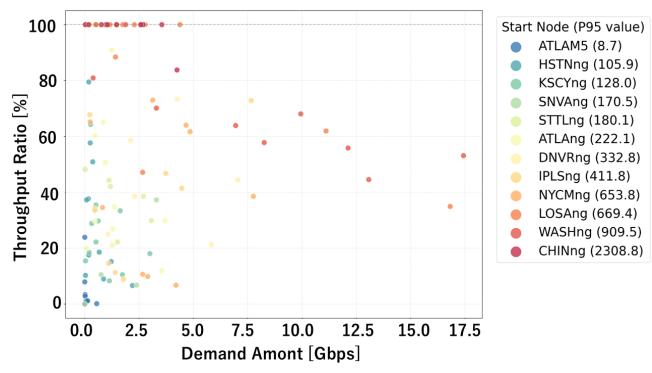


図 8 最短ホップ数経路における各 ISP の達成スループット比率

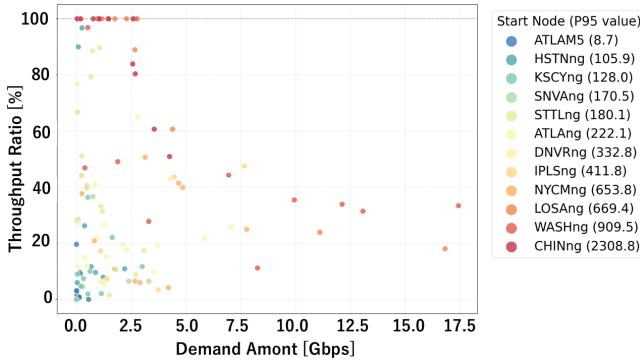


図 7 $\alpha = 2, \beta = 0.5$ における提案方式の各 ISP の達成スループット比率

4.5 経路選択アルゴリズムによる影響

ネットワーク内におけるトラフィックの分布は、採用されるルーティングアルゴリズムに大きく依存する。前節までの評価では、最短距離経路を用いたが、本節では最短ホップ経路を用いた場合について評価する。そしてルーティング法が異なる場合でも,DWRR による重み付け制御が、ISP 間の経済的公平性をいかに維持できるかを評価する。

最短ホップ経路を用いた場合の評価結果を図 8 示す。ここでは、ネットワーク全体の混雑状況を揃えるため、前々節と同様にリンク容量係数 $\beta = 0.7$ とし、反映強度 $\alpha = 2$ における各 ISP の達成スループット比率を測定した。

図 8 に示す通り、最短ホップ経路を用いた場合も、提案方式が 95% 値に基づく重みを適切に反映し、意図した達成スループット比率の差別化を達成できていることが分かる。

ここで、経路選択アルゴリズムの相違が通信品質に与える影響を評価するため、達成スループット比率 80% 以上を維持したノードの数を比較する。最短ホップ経路では 46 ペアであったのに対し、最短経路では 52 ペアに達した。この差異は、最短経路の方がネットワーク内のトラフィック分散効果が高く、特定のリンクへの過度な集中を回避できたためと考えられる。以上より、本評価環境においては最短経路を採用することで、より多くのフローに対して高水準な通信品質を提供できることが明らかとなった。

これらの結果から、バックボーンネットワークの運用において経路制御ポリシーが変更された場合でも、提案する DWRR ベースの帯域制御を組み合わせることで、ISP 間の経済的契約に基づいた公平なリソース配分を一貫して実行可能であることが確認できる。

5. まとめ

本稿では、インターネットのバックボーンネットワークにおける ISP 間の経済的公平性を実現するため、トランジット費(95% 課金量)に基づいた動的な帯域制御方式を提案し、その有効性を評価した。

シミュレーション評価により得られた主な知見を以下にまとめる。まず、全 ISP を一律に扱う基本方式では、リンク混雑時に高支払額の ISP であっても一律に大幅な通信品質の低下を免れなかつたが、提案方式では支払額に応じた優先的な帯域確保が可能となることを確認した。次に、重みの反映強度 α を大きく設定することで、より強力な優先制御が可能となり、深刻な混雑状況 ($\beta = 0.5$) 下においても、高支払額 ISP の達成スループット比率を 100% に近い水準で保護できることを示した。さらに、最短距離経路および最小ホップ数経路の異なるルーティング環境下においても、提案方式は 95% 値に基づく重みを正確に反映し、意図した帯域配分を実行できることを確認した。これにより、バックボーンの運用ポリシーが変更された場合でも、提案手法が経済的公平性を一貫して担保できることが確認された。

6. 謝 辞

本研究は JSPS 科研費 (25K03113, 23K28078) の助成を受けたものである。ここに記して謝意を表す。

文 献

- [1] W. Chen, et al., "Enhancing Fairness for Approximate Weighted Fair Queueing With a Single Queue," IEEE/ACM Trans. Networking, Oct. 2024.
- [2] M. Shreedhar, et al., "Efficient fair queuing using deficit round-robin," IEEE/ACM Trans. Networking, 1996.
- [3] L. Brown, et al., "Principles for Internet Congestion Management," ACM SIGCOMM 2025.
- [4] P. B. Bök, et al., "I-DWRR - An Insolvency Enabled Scheduling Scheme extending Deficit Weighted Round Robin," Proc. IEEE MENS, 2011.
- [5] SNDlib, <https://sndlib.put.poznan.pl/>
- [6] A. K. Parekh and R. G. Gallager, "A generalized processor sharing approach to flow control in integrated services networks: the single-node case," IEEE/ACM Trans. Networking, June 1993.
- [7] S. J. Golestani, "A self-clocking fair queueing scheme for broadband applications," IEEE INFOCOM 1994.