

公平な帯域分配を実現するエッジルータの改善

秦野 智也[†] 野田 陽子[†] 坂井 達彦[†] 重野 寛[†] 岡田 謙一[†] 松下 温^{††}

[†] 慶應義塾大学理工学部 〒 223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1

^{††} 東京工科大学 〒 192-0982 東京都八王子市片倉町 1404-1

{hatano,yoko,sakai,shigeno,okada,on}@mos.ics.keio.ac.jp

概要: Diffserv AF PHB は優先転送を行う極めて有効な手段である。しかし、個々のフローの帯域が不公平に分配されるという問題がある。本論文で我々は公平な帯域分配を実現するために、エッジルータにおけるマーキング機構を提案する。提案マーキング機構は個々のフローに対しての公平とされる帯域分配量 Fair Rate (FR) を定義した上で、その FR を実現するようにエッジルータにおいて個々のフロー属性に基づいたマーキングを行う機構である。提案マーキング機構についてコンピュータシミュレーションによる評価を行った結果、不公平な帯域分配の問題を解決することを示した。

Improvement of Edge Router to Realize Fair Bandwidth Allocation

Tomoya HATANO[†], Yoko NODA[†], Tatsuhiko SAKAI[†], Hiroshi SHIGENO[†],
Ken-ichi OKADA[†] and Yutaka MATSUSHITA^{††}

[†] Faculty of Science and Engineering, Keio University Hiyoshi 3-14-1, Kouhoku-ku,
Yokohama-shi, 223-8522 Japan

^{††} Tokyo University of Technology Katakura-cho 1404-1, Hachioji-shi, 192-0982 Japan
{hatano,yoko,sakai,shigeno,okada,on}@mos.ics.keio.ac.jp

Abstract: Diffserv AF PHB is a effective measure to conduct priority forwarding. However, it has a problem that bandwidth of each flow is allocated unfairly. In this paper, we propose a marking mechanism at the edge router, to improve fairness of resource allocation within aggregates. Our marking mechanism defines the target rate of the fair bandwidth allocation called Fair Rate (FR) and marks packets at the edge router to ensure FR for each flow. We evaluate capabilities of our marking mechanism through computer simulations. The result shows that our marking mechanism can provide fair bandwidth allocation within aggregates.

1 はじめに

インターネットの普及により、QoS が問題となり様々なアプリケーションが要求する帯域、遅延やジッタといったサービス品質、Quality of Service (QoS) に主題をおいた研究が数多くなされている。これまでに QoS を保証するフレームワークとして Integrated Service (Intserv) [1] [2] や Differenti-

ated Services (Diffserv) [4] [6] などが提案されている。特に Diffserv を利用した QoS 保証サービスはスケーラブルな転送サービスであるため大きな注目が集まっている。

通常、Diffserv では同じ QoS 処理が必要なフローに属するパケットには同一 DSCP (Diffserv codepoint) を与えている。その DSCP に応じてルータが施すトラフィック制御操作を Per Hop Behavior

(PHB) と呼び、現在 PHB として Expedited Forwarding (EF) [7] と Assured Forwarding (AF) [8] が規定されている。

EF PHB は専用線のサービスを実現するための PHB であり、各ルータは、Diffserv 動作集合に、必ず設定レート以上のサービスレートを分配する。設定レートは Diffserv 動作集合ごとにオペレータが管理する。設定レートを入力した DS 動作集合の入力レートより大きくすることで、パケットがこのルータで待たされることはほとんどなくなり、結果、遅延、ジッター、パケットの廃棄率がごく小さくなる。したがって仮想専用線の実現などに使用できる。

一方、AF PHB は Better than Best Effort の実現のための定性的 PHB であり、あらかじめパケットに優先度のマークを付けておき、ネットワークが輻輳したならば優先度小のパケットから順に廃棄して、優先度大のパケットはできるだけそのまま伝送することを狙う PHB である。そのため優先度のパケットを区別する手段としてそれぞれに異なる DSCP を与える。

以上で説明した AF PHB を用いたサービス、AF 型帯域保証サービスは、あるホスト、またはホストの集合から複数のホストへの TCP データ転送について、ネットワーク内での転送レートを平均的に保証するサービスである。トラフィック調整仕様 (TCS) は保証転送レートを R Mbps とし、平均転送レートが R Mbps 以下のときは適合パケットに、 R Mbps を超えた場合には超えた分を非適合パケットに、マーキングを行う。これは複数のドメインを通過する場合でも、各ドメインは一様に R Mbps を保証可能である。

本研究では、Diffserv ネットワーク内の代表的な転送方式の一つである AF PHB を利用した帯域保証サービスにおける集約フロー中の不公平な帯域分配問題に注目した。これは、帯域保証契約を複数の Round Trip Time (RTT) の異なる TCP フローが集約される形態で締結した場合に、それぞれのフローの Diffserv ネットワーク内における帯域分配に不公平が生じてしまうという問題である。この問題は将来のインターネットにおけるサービスの公平な実現に重大な影響を与えるものであり、早急な解決が求められている。

このような問題を解決するため、本研究では集約フロー内の帯域分配の公平性を改善するマーキング

機構を提案する。提案機構は Diffserv ネットワークの境界に存在しているエッジルータが公平な帯域分配の目標値として Fair Rate (FR) を計算して、その目標帯域分配量に応じたマーキングを個々のフローに対して行うことで、集約フロー内の各フローのネットワーク内の帯域分配量をより公平な状態へ導こうとするものである。

本論文の構成は以下の通りである。まず第 2 章で Diffserv 網における集約フロー中の不公平な帯域分配問題について詳しく述べ、次に第 3 章においてその問題を解決する技術の提案マーキング機構について説明する。更に第 4 章で提案マーキング機構についての詳細なシミュレーション評価を示し、最後に第 5 章にて結論と今後の課題について述べる。

2 不公平な帯域分配

Diffserv AF PHB を用いた帯域保証サービスでは、一般的にホスト毎、ユーザ毎、団体毎といった単位で契約が締結され、Diffserv ドメイン内において、その契約単位ごとにフローを集約し、その契約を満たす優先的なデータ転送を行う。そのため、Diffserv ドメイン内において個々のフローの帯域分配量は考慮されない。また、TCP フローは RTT が異なる場合、ウィンドウサイズの増加量および帯域レートの増加量が異なる。したがって、Diffserv ドメイン内において RTT が異なる TCP フローが混在して送信される場合、個々のフローの帯域分配量が不公平にされるという問題が生じる。[9], [3]

Diffserv ドメインは集約フローに対して契約帯域量を保証するため、1 つの SLA には複数のフローが集約され、集約された各フローはネットワークが保証する帯域を分け合うことでサービスを楽しむことになる。すなわち、集約中の各フローはそのような公平な帯域量以上の速度で転送が行われる必要があるといえる。本研究ではこのような集約フロー内の各フローが達成すべき公平な転送レートを FR と定義する。FR は契約帯域量と 1 つの契約内で集約されているフロー数を用いて以下のように計算される。

$$FR = \frac{\text{契約帯域量}}{\text{集約フロー数}} \quad (1)$$

次に、RTT の異なるフローが集約された場合に発生する不公平な帯域分配について、コンピュータシミュレーションを利用した具体例を示す。

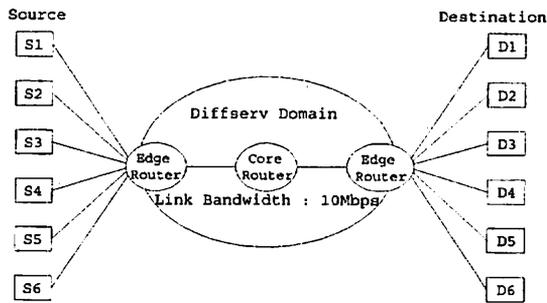


図 1: シミュレーションモデル

表 1: シミュレーション条件

契約帯域量	9 Mbps
集約内のフロー数	6 本
Fair Rate	1.5 Mbps
RTT	20ms, 40ms, 60ms, 80ms, 100ms, 120ms
転送プロトコル	全て TCP を使用

シミュレーション環境は図 1, シミュレーション条件は表 1 の通りである。以上のような条件でシミュレーションを実行し、表 2 にネットワーク内における各フローの帯域分配量を測定した結果を示す。表より明らかなように、集約フロー全体の帯域分配量は契約帯域量を上回っているが、集約内の各フローに注目した場合、相対的に RTT の小さなフローほどその帯域分配量は大きくなっている。また各フローの帯域分配量を比較した場合、相対的に RTT の大きなフローと少ないフローの帯域分配量が異なり RTT の大きなフローが不利に分配されていることが分かる。これは、フロー間の公平性の点から見て明らかに不公平な状態であると考えられる。

この不公平な帯域分配はエッジルータのキューイングによる影響である。Diffserv のエッジルータは契約単位である集約フローに対して RIO による確率的にパケット廃棄キューイングを行っており、集約内の個々のフローに注目した場合、個々のフローの公平性を考慮しないマーキング機構であるため、

表 2: 測定結果

Flow #	RTT (ms)	FR (Mbps)	帯域分配量 (Mbps)
1	20	1.500	3.069
2	40	1.500	2.052
3	60	1.500	1.504
4	80	1.500	1.174
5	100	1.500	1.021
6	120	1.500	0.868
Total		9.000	9.688

パケットの廃棄される確率は帯域分配量の多いフローのパケットも少ないフローのパケットも同じであり、不公平な帯域分配が生じる。

以上により、集約フロー内に RTT の異なるフローが混在した場合、帯域分配は公平にならず RTT の長いフローよりも RTT の短いフローがより多く帯域確保してしまうという問題が生じる。

3 提案マーキング機構

既存マーキング機構の場合、契約単位であるユーザ毎、ホスト毎といった集約フローに対してマーキングを行う。しかし、個々のフローの公平な帯域分配を実現するためには、個々のフローに対してマーキングを行うことが必要であると考えられる。

そこで、提案マーキング機構では、既存マーキング機構の機能を拡張し、集約に対するマーキングだけでなく、個々のフローに対してマーキングを行う機構を提案する。

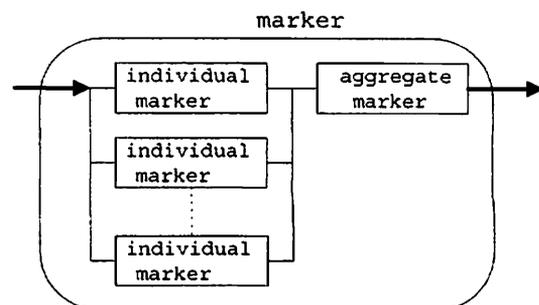


図 2: 提案マーキング機構

図2に提案マーキング機構のシステムを示す。提案マーキング機構はまず、個別マーカで、個々のフローのFRを実現するために、FRのレートに等しい量だけINにマーキングし、それを上回るパケットに対してはOUTにマーキングする。また、FRを下回るレートのフローはすべてのパケットに、INマーキングを行う。次に、集約マーカで、INおよびOUTのパケットレートの最適化を行う。個々のマーキングのみを行った時点では、FRを下回るレートのフローがある場合、INのレートが契約レートに達しないため、その分だけ、OUTマーキングが過剰になり、INのマーキングが少なくなっている。つまり、集約マーカにおいて、集約のフローでOUTマーキングされたパケットをINに再マーキングし、INのマーキング量を契約帯域量に等しくする。この際、OUTマーキングは個々のフローのFRを上回る帯域割分配量の比で、マーキングを行う。

以上のマーキングシステムにより提案マーキング機構は、FRに満たないフローを優先して転送することで、公平な帯域分配が実現できる。

また提案マーキング機構の有効性を確認するために、個々にしかマーキングを行わない場合についても考える。本論文では、このマーキング機構を個別マーキング機構と呼ぶ。図3で示すように、個別マーキング機構は、個別マーカのみが存在し、集約マーキングを行わない。

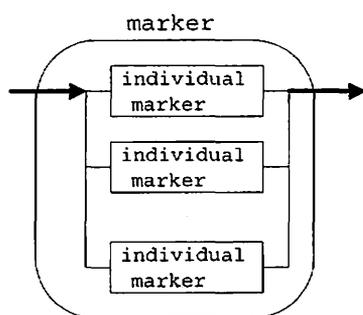


図3: 個別マーキング機構

個別マーキング機構は、提案マーキング機構のシステムと異なり、個別マーカの後には、集約マーカがない。そのためルータの負荷を考えた場合は、個別マーキング機構のほうがより提案マーキング機構よりも処理が速くなると考えられる。しかし、提

案マーキング機構では集約マーカを設置することで、高廃棄率による過剰なパケット廃棄を回避でき、集約マーカの有無による影響は全体の帯域利用率に反映されると考えられる。また、提案マーキング機構と個別マーキング機構は同じ方法で個別にマーキングを行い、常にFRをINマーキングしているため、同様の公平性を実現していると考えられる。

4 評価

Diffserv AF PHB を利用した帯域保証サービスでの集約フロー内の帯域の公平な帯域分配を確認するために、既存マーキング機構、提案マーキング機構と個別マーキング機構について、network simulator ver.2(ns-2)を用いたコンピュータシミュレーションによる評価を行った。

本シミュレーションは図1で示したようなシミュレーションモデルを用いた。6本のTCPバルクデータをそれぞれ送信し、Diffservネットワーク内で契約帯域量9Mbpsの1つのフローに集約する。各々のフローのRTTは評価内容により変化させる。エッジルータでは既存マーキング機構、提案マーキング機構と個別マーキング機構の3つのマーキング機構の比較を行い、帯域分配の公平性と帯域利用率について評価する。

4.1 帯域分配の公平性 1

提案マーキング機構の基本的な動作を確認するため、2章で説明したシミュレーションと同じ環境でシミュレーションを行った。

この評価において、個々のフローの帯域分配量、集約フローの帯域量と以下の式で示される公平性を示す指標であるF (Fairness index) [5]を測定した。

$$F = \frac{(\sum_{i=1}^N R_i)^2}{N \times \sum_{i=1}^N (R_i)^2} \quad (2)$$

図4と表3に既存マーキング機構、提案マーキング機構と個別マーキング機構についての各々の測定結果をまとめる。

表より、3つのマーキング機構における集約フローの帯域量がほぼ同じであることがわかる。さらに、図より個々のフローの帯域分配量は既存マーキ

ング機構が RTT の変化に対して大きく分散しているのに対して、提案マーキング機構と個別マーキングは、RTT の長いフローと短いフローの帯域分配量の差が少なく FR に近づいていることがわかる。以上から、提案機構は公平性が改善されていることが示された。

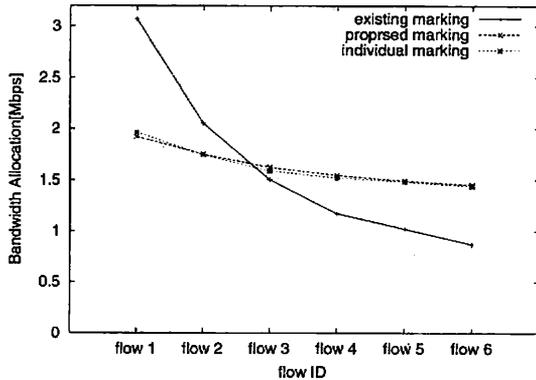


図 4: フローの RTT と帯域分配の関係

表 3: 基本動作での結果

marker	集約フローの帯域	F
existing	9.688 Mbps	0.8205
proposed	9.784 Mbps	0.9903
individual	9.739 Mbps	0.9878

4.2 帯域分配の公平性 2

次に提案機構がどの程度公平性を改善するかを評価するため、個々のフローが 40 ms, 40 ms, 40 ms, 40 ms, 40 ms, T ms (可変) と一本だけ RTT が異なるようにフローを集約し、そのフローの RTT を変化させた場合の各フローの帯域分配の公平性を評価する。

図 5 に、各マーキング機構における変化させた RTT と当該フローのネットワーク内で測定したスループットの関係を示す。図より、フローの RTT が増加するに従って、既存マーキング機構は著しくそのフローの帯域分配量が低下しているのに対して、提案マーキング機構と個別マーキング機構は FR に近い値を維持して推移している。このことに

より、RTT の比が 40 ms と 230 ms という 6 倍と長くなるという厳しい状況でも、提案マーキング機構、個別マーキング機構は既存マーキング機構と比べ、公平な帯域分配を実現できることが示された。

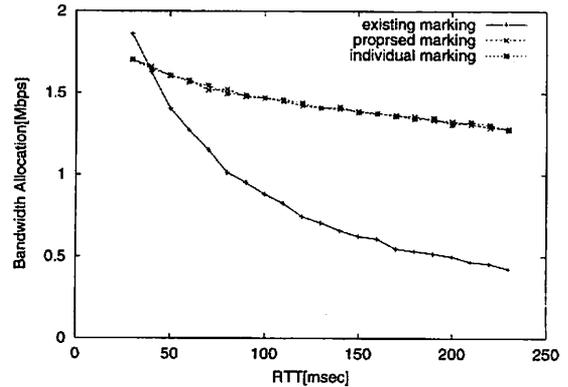


図 5: RTT に対する帯域分配の関係

4.3 余剰帯域利用率

次に、契約されていない送信可能な帯域である余剰帯域の帯域利用率についての 3 つのマーキング機構の測定結果をまとめる。

シミュレーション条件を表 4 にまとめる。

表 4: シミュレーション条件 (余剰帯域利用率)

RTT	40ms, 40ms, 40ms, 40ms, 40ms, T ms(可変)
転送プロトコル	フロー 1 UDP(0.1 Mbps) ほか全て TCP を使用

図 6 に、各マーキング機構における変化させた RTT と余剰帯域利用率の関係を示す。既存マーキング機構および提案マーキング機構は RTT の長さに関わらず、余剰帯域を 70% 前後で利用できているのに対して、個別マーキング機構は、余剰帯域を 40% 前後しか利用できていない。これは、既存マーキング機構および提案マーキング機構は マーキングにおいて、IN のマーキング量を契約帯域と等しい量にしているのに対して、個別マーキング機構は IN マーキングの量を調節しておらず、OUT マーキングの量が過剰になっているため、個別マーキン

グ機構の packets 廃棄率が高くなっているからである。以上から、提案機構は余剰帯域利用率の点で、個別マーキング機構より優れていることが分かる。

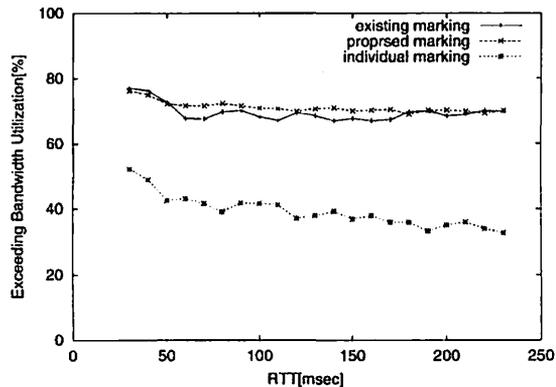


図 6: RTT に対する余剰帯域利用率の関係

5 終わりに

本研究では Diffserv ネットワーク内の代表的な転送方式の一つである AF PHB を適用した帯域保証サービスにおける集約フロー中の不公平な帯域分配問題に注目した。これは帯域保証契約が複数のフローで締結され、集約フロー内の各 TCP フローの RTT が異なる場合に、TCP の輻輳制御機構が原因で生じる、それぞれのフローの帯域分配量が不公平になる問題である。

その解決策として、エッジルータによる公平な帯域分配量を実現するマーキング方法を提案した。この提案マーキング機構は、集約フローに対するマーキングを行うだけでなく、個々のフローに対するマーキングを行っている。

コンピュータシミュレーションを用いたその有効性の検証の結果、次のことが分かった。1つ目は既存マーキング機構よりも提案マーキング機構を用いた場合において、RTT の長いフローに対しての帯域分配量が増加した。そして、これらの機構方式は RTT の長さが大きくなってでも実現できる。2つ目は個別マーキング機構よりも提案マーキング機構を用いた場合に、余剰帯域の利用率が増加した。

以上のシミュレーション結果から、提案マーキング機構は状況に応じた効率的で公平な帯域分配を行うマーキングを行っていることが分かる。したがっ

て、提案機構はインターネット上での公平な帯域保証サービス実現の一助となると考えられる。

本研究の提案マーキング機構には以下、2つの問題点が挙げられ、それらの点を改善することが今後の課題となる。

個別のフローに対するマーカーを設置しているため、エッジルータの負荷および処理時間を無視できなくなりスケラビリティに関する問題が生ずる。その改善方法の一例として、個別に帯域分配量の計測およびマーキングを行わず、個別のフローに対して FR を実現する機構が必要である。

RTT の異なったフローを送信した場合、RTT の長いフローと短いフローの長さの比が大きい条件において、RTT の長いフローは FR の帯域分配量を達成できていない点である。この点を解決するためには、OUT マーキングをさらに RTT の長いフローが優先されるようにマーキングを行う必要があると考える。

参考文献

- [1] A.Sastry F.Baker, J.Krawczyk. Integrated Services Management Information Base using SMIPv2. RFC2213, IETF, Sep. 1997.
- [2] F.Baker, J.Krawczyk, A.Sastry. Integrated Services Management Information Base Guaranteed Service Extensions using SMIPv2. RFC2214, IETF, Sep. 1997.
- [3] J.Ibanez and K.Nichols. Preliminary Simulation Evaluation of an Assured Service. Technical report, Internet draft, IETF, Aug. 1998.
- [4] K. Nichols, S. Blake, F. Baker, D. Black. Definition of the Differentiated Service Field (DS Field) in the IPv4 and IPv6 Headers. RFC2474, IETF, Dec. 1998.
- [5] R. Jain et al. Throughput Fairness Index: An Explanation. Princeton Ph.D. thesis, ATM forum, Aug 99-0045. 1999.
- [6] S. Blake, D. Black, M. Carlson, E. Davies, Z. Wang. An Architecture for Differentiated Services. RFC2475, IETF, Dec. 1998.
- [7] V. Jacobson, K. Nichols and K. Poduri. An Expedited Forwarding PHB. RFC2598, IETF, Jun. 1999.
- [8] V. Jacobson, K. Nichols and K. Poduri. An Expedited Forwarding PHB. RFC2597, IETF, Jun. 1999.
- [9] Wenjia Fang. Differentiated services: Architecture, mechanisms and an evaluation. Princeton Ph.D. thesis, 2000.