

## 推薦論文

## Diffserv 網における公平な帯域分配のためのマーキング手法

秦野 智也<sup>†</sup> 野田 陽子<sup>††</sup> 重野 寛<sup>†</sup>  
岡田 謙一<sup>†</sup> 松下 温<sup>†††</sup>

Diffserv AF PHB は優先転送を行うきわめて有効な手段である。しかし、それぞれの Round Trip Time (RTT) の異なる TCP フローが集約されて適用された場合に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を提案する。提案マーキング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) を定義したうえで、各々のフローがその 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。提案マーキング方式として、集約に対してマーキングした後に個々のフローに対してのマーキングを行う AI マーキングと、個々のフローに対してマーキングした後に集約に対してのマーキングを行う IA マーキングを提案する。提案マーキング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、公平性を示す指標 (理想値が 1) が既存マーキングでは 0.82 となる状況において、AI マーキングでは 0.96, IA マーキングでは 0.99 に改善し、不公平な帯域分配の問題を改善できることを示す。

## Marking Method for Fair Bandwidth Allocation in Diffserv Network

TOMOYA HATANO,<sup>†</sup> YOKO NODA,<sup>††</sup> HIROSHI SHIGENO,<sup>†</sup>  
KENICHI OKADA<sup>†</sup> and YUTAKA MATSUSHITA<sup>†††</sup>

Diffserv AF PHB is an effective measure to conduct priority forwarding. However, it allocates bandwidth of each flow unfairly. In this paper, we propose a marking mechanism at the edge router to improve fairness of resource allocation within aggregates. Our marking mechanisms define the target rate of the fair bandwidth allocation as Fair Rate (FR), and mark packets at the edge router to ensure FR for each flow. Proposed mechanisms are AI marking mechanism, which marks packets for each flow after marking for aggregate, and IA marking mechanism, which marks packets for each flow before marking for aggregate. We evaluate capabilities of our marking mechanism through computer simulations. The result shows that Fairness (1 is ideal value) was improved to 0.96 for AI marking mechanism and 0.99 for IA marking mechanism, where fairness of existing marking mechanism is 0.82. Therefore our marking mechanism can provide fair bandwidth allocation within aggregates.

## 1. はじめに

近年インターネットの普及、アプリケーションの多様化により、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、QoS に主題をおいた研究が数多くなされてきている。これまでに QoS を保証するフレームワークとして Integrated Service (Intserv)<sup>1,2)</sup> と Differentiated Ser-

vices (Diffserv)<sup>3,4)</sup> 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注目が集まっている。

通常、Diffserv ではパケットをユーザとの間で結ばれた契約 (Service Level Agreement: SLA) に基づいて少数のクラスに分類する。具体的には同じ 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、その DSCP に応じてルータが施すトラフィック制御操作を行う。この際、同一 DSCP を持ち同一リンクを流れるパケット全体を DS 動作集合と呼ぶ。またルータで DS 動作集合に施すト

<sup>†</sup> 慶應義塾大学理工学部

Faculty of Science and Technology, Keio University

<sup>††</sup> プロクター・アンド・ガンブル・ファー・イースト・インク

Procter & Gamble Far East, Inc.

<sup>†††</sup> 東京工科大学

Tokyo University of Technology

本論文の内容は 2002 年 10 月の第 10 回 DPS ワークショップにて報告され、DPS 研究会主催により情報処理学会論文誌への掲載が推薦された論文である。

ラビック制御操作を Per Hop Behavior ( PHB ) と呼び、現在 Expedited Forwarding ( EF <sup>7)</sup> と Assured Forwarding ( AF <sup>8)</sup> 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 である。EF PHB では DS 動作集合ごとにネットワークが管理し保証する設定レートを DS 動作集合の入力レートより大きくしている。その結果、遅延、ジッタとパケットの廃棄率がごく小さくなり、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 である。パケットに優先度を示すマークを付け、ネットワークが輻輳した場合優先度が低いパケットから順に廃棄し、優先度が高い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。そのためパケットの優先度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 を用いたサービスである AF 型帯域保証サービスは、一般的にホスト集合からの複数ホストへのデータ転送についてネットワーク内で締結され、転送レートを平均的に保証する。ネットワークの境界ルータであるエッジルータにおいて平均転送レートが契約帯域以下の場合には適合パケットとして、契約帯域を超えた場合には超えた分を非適合パケットとしてパケットがマーキングされる。ネットワークの内部に存在するコアルータにおいて、エッジルータでマーキングしたパケット情報に応じて廃棄処理を行い、契約帯域を実現している。またこのサービスではパケットが複数のドメインを通過する場合でも、契約帯域を保証できる。

本論文では、Diffserv 網内の代表的な転送方式の 1 つである AF PHB 型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する。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 AF PHB 型帯域保証サービスに限らず、RTT の異なる TCP フロー間で転送レートが異なる場合に発生することが知られている<sup>7),8)</sup>。しかし Diffserv 網の AF PHB は優先転送であるため、転送レートをフロー間でより公平に保証する必要がある、問題はより深刻で早急な解決が求められる。

この問題を解決するため、本論文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である Aggregate-Individual ( AI ) マーキングおよび Individual-Aggregate ( IA ) マーキングを提案する。

提案マーキングは Diffserv 網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、その FR 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転送レート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とおりである。まず 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述べ、3 章でこの問題に対する関連研究について述べる。4 章では AI マーキング、IA マーキングを提案する。5 章で提案マーキングのシミュレーション評価を示し、6 章を結論とする。

## 2. 不公平な帯域分配

### 2.1 公平性の定義

Diffserv AF 型帯域保証サービスでは、一般的にホストごと、団体ごと、ユーザごとといった単位で契約が締結される。Diffserv ドメインは集約フローに対して契約帯域を保証するため、1 つの契約に対して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あうことでサービスを享受する。

しかし、集約内でのフローは各ユーザによって管理され、アクセス先もそれぞれ異なるために、TCP のウィンドウ増加速度などフローの特性が異なる。このような環境においても、異なるフローの特性が原因で不公平な転送レートで転送が行われるべきではない。そこで本論文では公平性をフローにおけるボトルネックが同じ場所にあるフロー間で同量の帯域を分配することと定義する。これはフローにおけるボトルネックが同じ場所にあるフロー間でフローの条件が同じである場合には帯域が同量に分配されるため、フローの RTT が異なる場合においても、その帯域幅が同量になることが必要であると考えたからである。またこの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 と呼び、契約帯域 (  $B$  ) と 1 つの契約内で集約されているフロー数 (  $N$  ) を用いて以下のように定義する。

$$FR = \frac{B}{N}. \quad (1)$$

### 2.2 不公平な帯域分配の一例

表 1 に集約内で RTT が異なるフロー間で発生する不公平な帯域分配の例を示す。この表は後の 5.1 節と同様の条件でシミュレーションを行った結果であり、ネットワーク内における集約内の各フローの転送レートを示している。表 1 より、集約フロー全体の転送

表 1 不公平な帯域分配の一例

Table 1 An example of unfair bandwidth allocation.

Flow #	RTT (ms)	FR (Mbps)	転送レート (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

レートは契約帯域を上回っているが、集約内の各フローに注目した場合、転送レートは RTT の小さいフローほど大きく、RTT の大きいフローほど小さくなっていることが分かる。このように、集約内の各フローの RTT が異なる場合、不公平な帯域分配が生じる。

### 2.3 不公平な帯域分配の原因

不公平な帯域分配には、TCP の輻輳制御機構とのパケット廃棄機構の 2 つの原因があげられる。これは 2 つの原因が密接に関係しているためである。

不公平な帯域分配には、データの送信速度をネットワークの状態に応じて調節する TCP の輻輳制御機構が大きな影響を与えている。この問題の原因として、TCP 輻輳ウィンドウの増加速度が各フローによって異なることがあげられる。TCP は正常転送時に輻輳ウィンドウを 1 RTT あたり 1 セグメントの割合で増加させる<sup>9)</sup>。これよりウィンドウ増加速度  $S$  は次のように計算される。

$$S = \frac{1}{RTT}. \quad (2)$$

したがって RTT の長いフローほどウィンドウの増加速度が遅くなる。そのため集約フロー中で相対的にウィンドウ増加速度の遅い TCP コネクションはネットワークの状態を速やかに反映したレート調節を行えず、ウィンドウ増加速度の速いフローに利用可能な帯域を多く奪われてしまう。結果としてフロー間の転送レートに不公平が生じる。

また 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マーケティングを行っており、Random Early Detection (RED) with IN and OUT (RIO)<sup>10)</sup> による確率的パケット廃棄を行うことが検討されている。ここでのマーケティングは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ため、パケットの廃棄される確率は転送レートの大きいフローも小さいフローも同じであり、不公平な帯域分配が生じる。

## 3. 関連研究

集約内の帯域分配の公平性については、現在までにその解決を目的とした様々な研究が行われている。不公平な帯域分配問題については、文献 11)~14) などでその改善に関する提案が行われている。改善のアプローチとして大きく TCP の輻輳制御機構の改善と Diffserv 網内の機能の改善がある。以下、それぞれについて述べる。

### 3.1 TCP 輻輳制御機構の改善

Fang ら<sup>11)</sup> はウィンドウサイズの増加速度を集約内のすべてのフローが一定値に統一することで公平な帯域分配を実現する提案を行っている。しかし TCP 輻輳制御機構の改善を行う場合、既存の TCP と提案の TCP が混在する環境がつねに予想され、輻輳制御機構の差異による不公平性の問題が残る。

### 3.2 Diffserv 網内の改善

Lin ら<sup>12)</sup> は個別フローの情報を利用する TSW プロファイラと RIO を用いたキュー管理方式の改善によって、スループットや公平性が向上することを示している。しかしこの提案はネットワーク内部のコアルータにおける変更を行う必要があり性能低下が懸念される。

エッジノードにおける制御については、Yeom ら<sup>13)</sup> はエッジノードがフローごとの情報を管理することで、異なる RTT を持つフローが集約された場合の公平性の向上を図る提案を行っている。また Nandy ら<sup>14)</sup> が RTT の相違による余剰帯域の分配の不公平性に対してポリサーアルゴリズムの改善をしている。これらの提案はエッジルータに個別のフローの RTT を把握する必要がありスケラビリティの問題がある。同時に RTT をエッジルータに知らせるためにエンドホストと連携する必要もある。

本論文では、エンドホストの変更、コアルータの優先転送の変更も行わない方法として、エッジルータのみで個々のフローの公平な帯域分配の実現を図る。

## 4. 提案マーケティング

この章ではエッジルータの機能を紹介したうえで、AI マーキング、IA マーキングを提案を提案する。また、比較対照として考えられる Individual (IND) マーキングも考案した。

### 4.1 エッジルータの機能

図 1 で示すように、エッジルータには、classifier、meter と marker の 3 つの機能がある。まずルータに入ってきたパケットに対して、classifier で集約ごとに分類し、meter で集約ごとの流入スループットを測定す

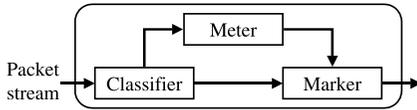


図 1 エッジルータの機能  
Fig. 1 System of edge router.

る．その後計測した流入スループットをもとに marker で優先度をパケットに付与する．すなわち，マーカにおいて低廃棄率のパケットには IN と，高廃棄率のパケットには OUT とマーキングする．このマーキングは契約単位である集約フローに対して確率的に行っている．そこで，本論文ではこのような集約単位でマーキングを行うマーカを集約マーカと呼び，集約マーカのみを備えた従来のマーキング方式を既存マーキングと呼ぶ．マーキング処理の後，エッジルータおよびコアルータにおいて，RIO により優先度情報に基づいた廃棄処理を行う．

ここで集約内の個々のフローに注目すると，既存マーキングはフロー間の公平性を考慮せずにマーキングしているため，パケットの廃棄率はフローごとの転送レートに関係なくどのフローでも同じである．したがって，フロー  $i$  の OUT パケットのレート， $R_{i\_out}$  は式 (3) で示される．ここでフロー  $i$  の転送レートを  $R_i$ ，フロー数を  $N$ ，契約帯域を  $B$  とする．

$$R_{i\_out} = \frac{\sum_{k=1}^N R_k - B}{\sum_{k=1}^N R_k} R_i. \quad (3)$$

4.2 AI マーキング

不公平な帯域分配を解決するためには，既存マーキングの機能を拡張し，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ことが必要である．そこで，集約マーカだけでなく，個別フローに対してマーキングを行う個別マーカを備えたマーキングを提案し，そのマーキング方法を AI マーキングと呼ぶ．

図 2 に AI マーキング機構を示す．AI マーキングは集約マーカ，個別マーカの順にマーキングを行う．既存マーキングと同様に集約マーカにおいて集約フローの契約帯域に等しい量だけ，パケットを IN にマーキングし，それを上回るパケットを OUT にマーキングを行う．その後，個別マーカにおいて転送レートが FR に満たないフローの OUT パケットを IN に再マーキングを行う．以上のマーキングにより AI マーキングは，転送レートが FR に満たないフローを優先転送する．

しかしこの方法は，個別マーカにおける再マーキン

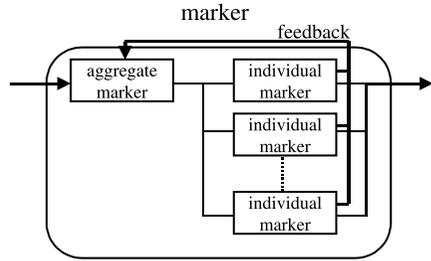


図 2 AI マーキング  
Fig. 2 AI marking mechanism.

グの結果，IN のパケットが契約帯域を超過し，他の契約にも影響を及ぼす恐れがある．この解決策として，再マーキングによる IN パケットの超過量を集約マーカにフィードバックし，次に入ってくるパケットに対してその量だけ IN パケットの数を減らすことにする．

AI マーキングでは，転送レートが FR に満たないフローへの OUT マーキングが行われず，転送レートが FR を超えるフローに対してはそのフローの転送レートに比例した量の OUT マーキングを行う．以上より  $R_{i\_out}$  は式 (4) で示される．ここで  $R_i$  が FR を超えたフロー  $i$  の集合を  $X$  とする．

$$R_{i\_out} = \begin{cases} \frac{\sum_{k=1}^N R_k - B}{\sum_{k \in X} R_k} R_i & \text{if } i \in X \\ 0 & \text{if } i \notin X \end{cases}. \quad (4)$$

4.3 IA マーキング

AI マーキングは，FR に満たないフローに対してのみ優先的にマーキングを行う．つまり，AI マーキングは FR に達していないフローの転送レートを FR まで上げるが，フローの平均転送レートを FR にするマーキングを行っているわけではない．

AI マーキングの FR を超えたフローについて考察する．上で述べたように OUT パケットの量はそのフローの転送レートに比例する．また TCP フローのウィンドウは式 (2) で示すように徐々に増加するため，フローの送信レートが大きく FR を上回ることはほとんどない．以上の 2 点から，FR を超えたフロー間では OUT パケットがほとんど同じ比で存在していると考えられる．そのため，フローの転送レートが FR を超えると，そのフローのパケットが廃棄される可能性がある．このような現象が繰り返し同じフローで行われると，そのフローが長時間 FR 以下のレートで転送することになり，平均転送レートが FR を下回ることになる．

この問題を解決しフローの平均転送レートを FR にするには，FR を超えた後でも優先的なマーキングを行う必要がある．具体的には転送レートの多いフロー

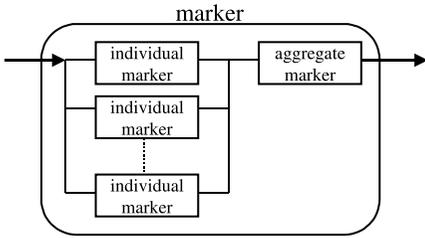


図 3 IA マーキング

Fig. 3 IA marking mechanism.

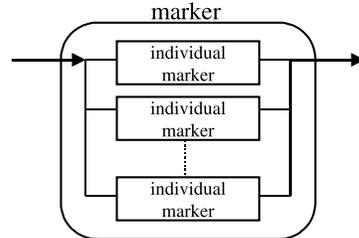


図 4 IND マーキング

Fig. 4 IND marking mechanism.

の廃棄率を高く、転送レートの少ないフローの廃棄率を低くすることである。そこで、AI マーキングより公平なマーキングを実現するために、転送レートがFRを超えている場合でも転送レートの少ないフローに対する優先的なマーキングを行う方法として、IA マーキングを提案する。

図 3 に IA マーキング機構を示す。IA マーキング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 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。FR を下回るレートのフローはすべてのパケットに対して IN にマーキングする。次に集約マーカで、IN および OUT のレートの最適化を行う。具体的には OUT パケットの一部を IN に再マーキングし、集約フローの IN パケットのレートを契約帯域に等しくする。これは、個別マーカ終了時点では、FR を下回るレートのフローがある場合、その分だけ IN パケットが契約帯域より少なくなるからである。IN パケットが少ない状態は契約帯域に達しないときにもパケットが廃棄される点や、非契約帯域が空いている場合にその帯域を有効利用できないという点で問題である。

IA マーキングは OUT マーキングおよび再マーキングは FR を上回るフローのパケットに対して行われるために、OUT パケットはフローの転送レートのうち FR を上回るレートの比で存在する。したがって  $R_{i\_out}$  は式 (5) で示される。

$$R_{i\_out} = \begin{cases} \frac{\sum_{k=1}^N R_k - B}{\sum_{k \in X} (R_k - FR)} (R_i - FR) & \text{if } i \in X \\ 0 & \text{if } i \notin X \end{cases} \quad (5)$$

以上より IA マーキングは、FR の超過量に比例するように OUT マーキングを行うために、転送レートに比例して OUT マーキングを行う AI マーキングよりも相対的に送信レートの高いフローを優先的に廃棄でき、より公平な帯域分配を実現すると期待できる。

#### 4.4 IND マーキング

また AI マーキングおよび IA マーキングの有効性を確認するために、個別マーカのみを持ち、個々にしかマーキングを行わない場合を考え、本論文ではこのマーキングを IND マーキングと呼ぶ。

IND マーキングとは IA マーキングと異なり、個別マーカの後に、集約マーカがないもので、そのマーキング機構を図 4 に示す。そのためルータの負荷を考えた場合は、IND マーキングのほうが提案マーキングよりも処理が速くなると考えられる。しかし、IA マーキング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、IND マーキングは IA マーキングと同じ個別マーカでパケットを OUT にマーキングしているため、同等の公平性を実現すると考えられる。IND マーキングの OUT パケットのレートを式 (6) に示す。

$$R_{i\_OUT} = \begin{cases} R_i - FR & \text{if } i \in X \\ 0 & \text{if } i \notin X \end{cases} \quad (6)$$

#### 4.5 スケーラビリティ

提案マーキングである AI マーキングと IA マーキングでは、個別マーカを設置することで個々のフロー間での公平性の問題の解決を試みている。しかし、個々のフローを制御するため、フロー数が多くなった場合、スケーラビリティの問題に直面する。

提案方式を Intserv と比較しそのスケーラビリティの差について考察する。Intserv ではすべてのフローに対して帯域予約を行い、個々のフローに対しての制御を行う。一方、提案方式では個々のフローに対して制御は行われない。そのため予約を行わない点で Intserv と比べスケーラビリティの問題を改善しているといえる。しかし、スケーラビリティの問題を完全に解決しているわけではなく、この点は今後の課題となる。

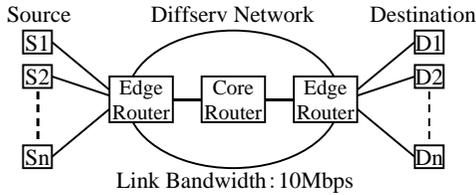


図 5 シミュレーションモデル  
Fig. 5 Simulation model.

5. 評価

Diffserv AF 型帯域保証サービスでエッジルータにおいて AI マーキング, IA マーキングを適応した場合の集約フロー内の公平な帯域分配を確認するために, コンピュータシミュレーションによる評価を行った. シミュレータとして network simulator ver.2( ns-2 )<sup>5)</sup>を用いた.

図 5 に本評価のシミュレーショントポロジーを示す. ボトルネックを共有するフロー間で同量の帯域を分配するという公平性を評価するために, ボトルネックに着目している図 5 のモデルをトポロジーとして採用した. このモデルにおいて複数本の TCP バルクデータをそれぞれ送信し, Diffserv 網内で契約帯域 9 Mbps の 1 つのフローに集約するものとした. このとき FR の値は 1.5 Mbps ( 9 Mbps / 6 本 ) となる. 各々のフローの RTT は評価内容により変化させる. 提案マーキングである AI マーキング, IA マーキングと比較対照としての既存マーキング, IND マーキングの 4 つのマーキングについて比較を行い, 帯域分配の公平性と帯域利用率について評価する.

5.1 帯域分配の公平性 1

図 6 に各マーキングにおける個々のフローの転送レートを示し, 表 2 に集約フローの転送レートと Fairness index (  $F$  )<sup>6)</sup>を示す. ここでは, 一般的に起こりやすいであろう環境として, 6 つの TCP フローの RTT が 20, 40, 60, 80, 100, 120 ms である条件で行った.  $F$  は式 (7) で示される公平性を示す指標の 1 つであり,  $F = 1$  に近いほど公平性が高い.

$$F = \frac{(\sum_{i=1}^N R_i)^2}{N \times \sum_{i=1}^N (R_i)^2} \tag{7}$$

表 2 より, 4 つのマーキングにおける集約フローの転送レートがほぼ同量であることが分かる. さらに, 図 6 より個々のフローの転送レートは既存マーキングでは RTT の大小に大きく依存しているのに対して, 提案マーキングではその点を改善していることが分かる. 特に IA マーキングと IND マーキングは, RTT の長

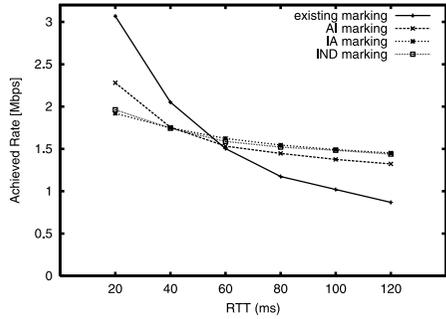


図 6 フローと転送レートの関係

Fig. 6 The relation between RTTs and achieved rate.

表 2 基本動作での結果  
Table 2 Basic simulation result.

marker	集約フローの帯域	F
existing marking	9.688 Mbps	0.8205
AI marking	9.716 Mbps	0.9608
IA marking	9.784 Mbps	0.9903
IND marking	9.739 Mbps	0.9878

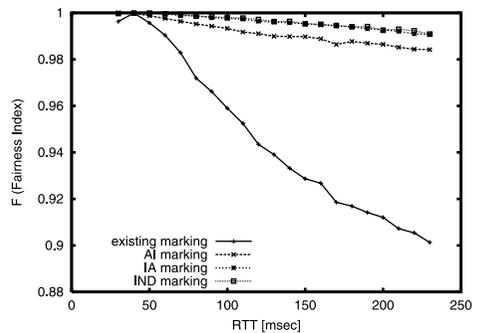


図 7 RTT に対する帯域分配の関係

Fig. 7 Relation between RTT and achieved rate.

いフローと短いフローの転送レートの差が少なく, すべてのフローが FR である 1.5 Mbps ( 9 Mbps / 6 本 ) に近づいているため, より公平な帯域分配を実現しているといえる. またこのことは表 2 の  $F$  から分かる.

5.2 帯域分配の公平性 2

さらに, 提案マーキングが別の状況においてどの程度公平性を改善するかの評価を行った. その環境としてフロー間の RTT が大きく異なる状況を想定し, RTT が 40 ms のフロー 5 本と  $t$  ms (可変) のフロー 1 本を集約した状況で評価を行った. 図 7 に RTT の値  $t$  に対する各マーキングの  $F$  について示す.

図 7 より, フローの RTT が増加するに従って, 既存マーキングは個別マーカが存在せず, 個々のフローの公平性をまったく意識していないため, 著しく  $F$  が低下していることが分かる. それに対して, 他のマーキ

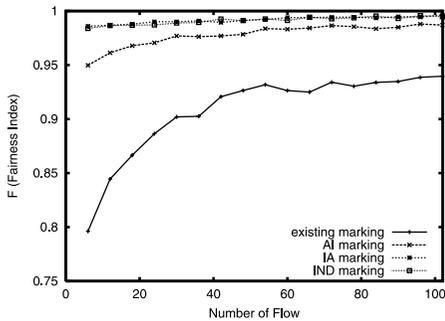


図 8 フロー数に対する帯域分配の関係

Fig. 8 Relation between the number of flows and fairness index.

ング,特に IA マーキングと IND マーキングは,RTT が長い場合  $F$  が減少するものの,1 に近い値を維持して推移している.以上から,RTT の比が 40 ms と 230 ms という 6 倍の開きがある厳しい状況でも,IA マーキング,IND マーキングは公平な帯域分配を実現しているといえる.

フロー間の OUT パケットの比に着目すると,式 (4)~(6) より AI マーキングでは転送レート ( $R_i$ ) の比に等しく,ある程度の公平性を実現している.一方,IA マーキング,IND マーキングでは,FR を超過した転送レート ( $R_i - FR$ ) の比に等しい.したがって,IA マーキング,IND マーキングは,AI マーキングと比べて,OUT パケットが転送レートの多いフローに対して相対的に多く,転送レートの少ないフローに対して相対的に少なくなる.以上より,IA マーキング,IND マーキングは FR を下回る場合だけでなく,FR を上回る場合にも転送レートの少ないフローを優先しており,公平な帯域分配を行う.

### 5.3 帯域分配の公平性 3

また,フロー数の変化に対して,提案方式がどのように公平を改善するかを評価するために,異なるフロー数で転送した状況においてシミュレーションを行った.シミュレーション条件として,RTT が 20, 40, 60, 80, 100, 120 ms の 6 種類のフローが同数ずつある環境を考え,図 8 にその結果を示す.

図 8 より,既存マーキング方式でフロー数が大きくなるにつれて,各々のフロー帯域分配が少なくなり相対的に帯域の分散が減少し,徐々に公平になるものの,依然不公平に帯域分配されていることが分かる.一方,他のマーキング,特に IA マーキングと IND マーキングはフロー数が増加しても,公平性を改善している.AI マーキングと IA マーキング,IND マーキング間で公平性の違いは,5.2 節で述べたのと同様,マーキングされる OUT パケットの量の差が原因と考えられる.

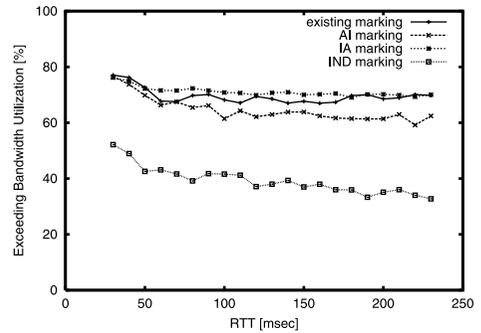


図 9 RTT に対する余剰帯域利用率の関係

Fig. 9 Relation between RTT and exceeding bandwidth utilization.

### 5.4 余剰帯域利用率

図 9 に,各マーキングにおける RTT と余剰帯域利用率の関係を示す.ここで,Diffserv 網内のベストエフォート用の帯域や,AF のための帯域であっても契約されていない帯域で,どのフローでも利用可能な帯域を余剰帯域と呼ぶ.シミュレーション条件として集約フロー内に RTT が 40 ms のフロー 5 本と  $t$  ms (可変) のフロー 1 本あり,RTT が 40 ms のフロー 1 つが 0.1 Mbps の UDP を転送した場合を考える.

図 9 より,既存マーキングおよび IA マーキングは RTT の長さにかかわらず余剰帯域を約 70% で利用できていることが分かる.これに対して,AI マーキングは余剰帯域を約 60% しか利用できず,IND マーキングは余剰帯域を約 40% しか利用できていない.既存マーキングおよび IA マーキングは集約マーカにおいて,つねに IN のマーキング量を契約帯域と等しい量に調節し,帯域を有効利用している.一方で AI マーキングは IN のマーキング超過量をフィードバックし,その分 OUT とマーキングする.したがって,フィードバックの遅延により輻輳回避後も余分に廃棄され,帯域の利用率が下がる.また,IND マーキングは IN パケットの量を調節しておらず,OUT パケットの量が過剰であるため,パケット廃棄率が高くなっている.以上から,IA マーキングは余剰帯域利用率の点で,AI マーキング,IND マーキングより優れていることが分かる.

### 5.5 考 察

本評価では,様々な RTT やフロー数についての評価を行い,IA マーキングが公平で余剰帯域を有効利用することが分かった.しかし,RTT の差が大きくなるにつれて,公平性が悪化することも観察され,この場合 IA マーキングの効果は低下する.また,本論文では  $F$  という指標で公平性を評価するために,シン

グルボトルネックリンクを用いたが、異なったトポロジーでの評価は、公平性の定義から考え直す必要があり、本論文の検討範囲を超えるものと考えられる。

## 6. おわりに

本論文では Diffserv 網内の代表的な転送方式の 1 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。その解決策として、エッジルータによる公平な帯域分配を実現するマーキングである AI マーキングおよび IA マーキングを提案した。

コンピュータシミュレーションを用いた評価の結果、不公平が生じやすい場合において、F が既存マーキングでは 0.82 である状況で、AI マーキングでは 0.96 に、IA マーキングでは 0.99 に改善し IA マーキングが最も公平な帯域分配を実現していることが分かった。また、余剰帯域についての評価においては、つねに AI マーキングが約 60% 利用でき、IA マーキングが約 70% 利用できており、IA マーキングが余剰帯域を有効に利用できるマーキングを行っていることが分かった。したがって、IA マーキングは既存マーキング、AI マーキングおよび個別マーキングと比べ、帯域の公平性、余剰帯域の利用率が優れており、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。

今後の課題として参考文献より負荷が軽いとはいうものの、各フローに対して処理を行うエッジルータの負荷および処理時間についてのスケラビリティの問題があげられ、どの程度の規模において適応可能か検討の必要がある。また、RTT の長いフローは FR の転送レートを達成できていない場合があるため、より公平な帯域分配の点で改善の余地がある。

謝辞 本研究は 21 世紀 COE プログラム研究拠点形成費補助金による補助のもとで行われた。

## 参 考 文 献

- 1) Baker, F., Krawczyk, J. and Sastry, A.: Integrated Services Management Information Base using SMIv2, *IETF*, RFC2213 (1997).
- 2) Baker, F., Krawczyk, J. and Sastry, A.: Integrated Services Management Information Base Guaranteed Service Extensions using SMIv2, *IETF*, RFC2214 (1997).
- 3) Nichols, K., Blake, S., Baker, F. and Black, D.: Definition of the Differentiated Service Field (DS Field) in the IPv4 and IPv6 Headers, *IETF*, RFC2474 (1998).

- 4) Blake, S., Black, D., Carlson, M., Davies, E., Wang, Z. and Weiss, W.: An Architecture for Differentiated Services, *IETF*, RFC2475 (1998).
- 5) Jacobson, V., Nichols, K. and Poduri, K.: An Expedited Forwarding PHB, *IETF*, RFC2598 (1999).
- 6) Heinanen, J., Baker, F., Weiss, W. and Wroclawski, J.: Assured forwarding PHB group, *IETF*, RFC2597 (1997).
- 7) Fang, W.: Differentiated services: Architecture, mechanisms and an evaluation, Princeton Ph.D. thesis (2000).
- 8) Ibanez, J. and Nichols, K.: Preliminary Simulation Evaluation of an Assured Service, *IETF*, Draft (1998).
- 9) Allman, M., Paxson, V. and Stevens, W.: TCP Congestion Control, *IETF*, RFC2581 (1999).
- 10) Clark, D. and Fang, W.: Explicit allocation of best-effort packet delivery service, *IEEE/ACM Trans. Networking*, Vol.6, No.4, pp.362-373 (1998).
- 11) Fang, W. and Peterson, L.: TCP mechanisms for Diff-Serv Architecture, Princeton University, CS Dept., Technical Report TR-605-99 (1999).
- 12) Lin, W., Zheng, R. and Hou, J.: How to make assured services more assured, *ICNP'99*, pp.182-191 (1999).
- 13) Yeom, I. and Reddy, N.: Realizing throughput guarantees in a differentiated services network, *ICMCS*, Vol.2, pp.372-376 (1999).
- 14) Nandy, B., Seddigh, N., et al.: Intelligent Traffic Conditioners for Assured Forwarding Based Differentiated Services Networks, *NETWORKING 2000*, pp.540-554 (2000).
- 15) The network simulator ver.2 - ns-2.  
<http://www.isi.edu/nsnam/ns/>
- 16) Jain, R., et al.: Throughput Fairness Index: An Explanation, *ATM Forum 99-0045* (1999).

(平成 14 年 12 月 20 日受付)

(平成 15 年 10 月 16 日採録)

## 推 薦 文

当該論文は、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し、シミュレーションによる評価を行いその有効性を示したものであり、第 10 回マルチメディア通信と分散処理 (DPS) ワークショップにおいて、同プログラム委員会の審査により高評価を得て Best Paper Award を受賞しており、これを推薦することとしたい。

(DPS 研究会主査 東野 輝夫)



秦野 智也(学生会員)

2002年慶應義塾大学理工学部情報工学科卒業。現在、同大学大学院理工学研究科開放環境科学専攻情報通信メディア工学専修修士課程在学中。2000年、2002年セパタクロー世界選手権日本代表。ネットワークプロトコルの研究に従事。



野田 陽子(正会員)

2003年慶應義塾大学大学院理工学研究科開放環境科学専攻情報通信メディア工学専修修士課程修了。同年P&G入社。



重野 寛(正会員)

1990年慶應義塾大学理工学部計測工学科卒業。1997年同大学大学院理工学研究科博士課程修了。1998年同大学理工学部情報工学科助手(有期)。現在、同大学理工学部情報工学科助教授。博士(工学)。計算機ネットワーク・プロトコル、モバイル・コンピューティング、マルチメディア・アプリケーション等の研究に従事。情報処理学会マルチメディア通信と分散処理研究会幹事。著書『～ネットワーク・ユーザのための～無線LAN技術講座』(ソフト・リサーチ・センター)、『コンピュータネットワーク』(オーム社)等。電子情報通信学会、IEEE、ACM各会員。



岡田 謙一(正会員)

慶應義塾大学理工学部情報工学科助教授、工学博士。専門は、グループウェア、コンピュータ・ヒューマン・インタラクション『コラボレーションとコミュニケーション』(共立出版)をはじめ著書多数。GN研究会運営委員、MBL研究会運営委員、日本VR学会仮想都市研究会幹事。情報処理学会論文誌編集主査、電子情報通信学会論文誌編集委員。ECSCW2001プログラム委員、INTERACT2001財務委員長。IEEE、ACM、電子情報通信学会、人工知能学会会員。1995年度情報処理学会論文賞、情報処理学会40周年記念論文賞、2000年度情報処理学会論文賞受賞。



松下 温(正会員)

1963年慶應義塾大学工学部電気工学科卒業。1968年イリノイ大学大学院コンピュータサイエンス専攻修了。1989年4月より2002年3月まで慶應義塾大学理工学部教授。2002年4月より東京工科大学コンピュータサイエンス学部長、教授および慶應義塾大学理工学部客員教授。工学博士。マルチメディア通信、コンピュータネットワーク、グループウェア等の研究に従事。情報処理学会理事、同学会副会長、マルチメディア通信と分散処理研究会委員長、グループウェア研究会委員長、MIS研究会委員長、バーチャルリアリティ学会サイバースペースと仮想都市研究会委員長等を歴任。現在、情報処理学会ITS研究会主査。郵政省、通産省、建設省、農水省、都市基盤整備公団、行政情報システム研究所等の委員長、座長、委員を多数歴任。『やさしいLANの知識』(オーム社)、『201x年の世界』(共立出版)等著書多数。1993年情報処理学会ベストオーサ賞、1995年および2000年情報処理学会論文賞、2000年10月情報処理学会40周年記念90年代学会誌論文賞、2000年10月電子情報通信学会フェロー、2000年10月VR学会サイバースペース研究会、2001年5月情報処理学会功績賞。2002年3月情報処理学会フェロー、電子情報通信学会、人工知能学会、ファジィ学会、IEEE、ACM各会員。