

# 5 ユビキタスネットワーク実現のためのQoSルーティング技術

京都大学学術情報メディアセンター  
岡部 寿男 okabe@i.kyoto-u.ac.jp

京都大学大学院情報学研究所  
藤川 賢治 fujikawa@real-internet.org

従来のインターネットは、ベストエフォート型のIPと輻輳制御機能を持つ1対1通信であるTCPの組合せとして発展してきた。それに対し、すべての電気機器にIPネットワーク機能が搭載される新世代のインターネットにおいては、現在の固定電話が持つ品質 (QoS) 保証の機能や、電波による放送が担っている広域マルチキャストの機能がすべて統合されたものになるのが必然である。本稿では、大規模ネットワークにおいてEnd-to-endでフロー単位のQoS保証とマルチキャストのルーティングを扱う際に必要となる、資源予約プロトコル、QoSメトリックと階層化、QoSマルチキャストのルーティングや課金モデルなどについて論ずる。



## ◎はじめに

次世代のインターネットでは、固定電話・携帯電話やテレビ/ラジオ放送とデータ通信とがすべてIP (Internet Protocol) ネットワークに統合され、インターネットの名に真にふさわしい全世界共通にして唯一の情報通信インフラとなると期待されている。そこでは、現在電話局において電話交換機が、CATV局において放送設備が担っている役割がインターネットの交換機であるIPルータで置き換えられ、電波による放送が広域IPマルチキャストを担うようになる。オフィスや家庭などでは、Fast EthernetやIEEE1394、IEEE802.11系の無線LAN技術、Bluetooth、赤外線、それに既設の電話線や電灯線を用いたLAN接続などさまざまなデータリンク層メディアがIPネットワークとして統合される。すなわち複数のデータリンクメディアを備えるあらゆる

機器がIPルータとして働き、IPネットワークの特徴である信頼性、冗長性が自律分散的に実現される。

このような“Everything over IP”としての次世代、次々世代のインターネットが、既存の通信線を単にIP化するにとどまらず、ネットワークにつながる世界中のあらゆるアプライアンスが、いつでも、どこからでも、任意の相手とEnd-to-endでIPにより通信を行えるようになることで、ユビキタスなネットワーク環境が実現される。その際、マルチメディアストリームデータ等の伝送に必要な品質 (Quality of Service; QoS) の保証がいつでも容易に得られることは必須である。さらに、QoS保証のあるIPマルチキャストを全地球規模で実現できれば、いつでも、どこからでも、誰もが、放送局のように世界に向けて映像を送信できるようになる。

本稿では、そのような次世代のインターネットの実現を目指して活動を行っている Real Internet Consortium ([www.real-internet.org](http://www.real-internet.org)) の研究の成果と課題を中心に、IPネットワークにおけるマルチメディアストリームデータの伝送のためのQoSルーティング技術について述べる。以下、まずQoSルーティングの基本的な考え方について述べる。ついでQoSルーティングにおけるリンク情報の広告を抑制する手法、およびネットワークの階層化とQoS情報の集約について示す。最後に、QoS保証マルチキャストのルーティングアルゴリズムと課金の問題について論ずる。

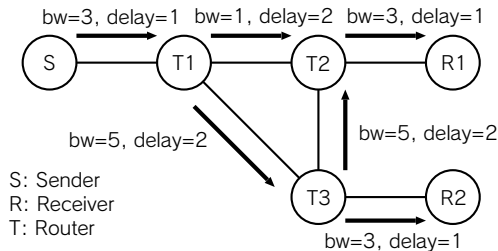
## ◎QoSルーティングの考え方

本稿では、IPネットワークにおけるマルチメディアストリームデータの実時間伝送を想定し、送信者から

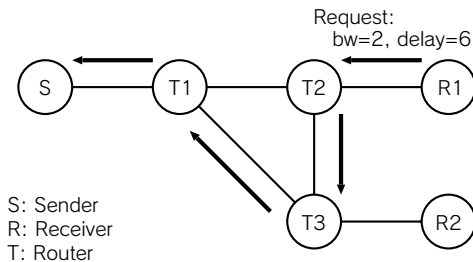
受信者へのある特定のフローに対するQoS保証, 具体的には帯域, 遅延, パケット損失率などのパラメータを保証するためのルーティング(経路制御)を考える. 扱うフローは, 受信者が1人であるユニキャストの場合と, 送信者1人に対し受信者が複数いるマルチキャスト

の場合とがある.

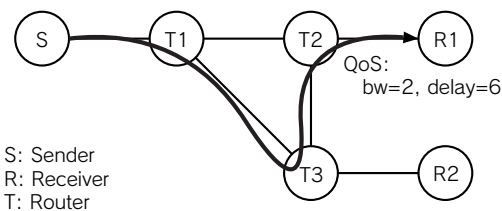
以下では, IntServにおけるGuaranteed Service (GS; RFC2212), あるいはDiffServにおけるExpedited Forwarding (EF; RFC2598)のような, フロー単位でのQoS保証ができる枠組みを前提に, RSVPなどで採用されている受信者主導型のフロー単位の資源予約におけるQoSルーティングを扱う. 資源予約のおおよその流れは以下ようになる.



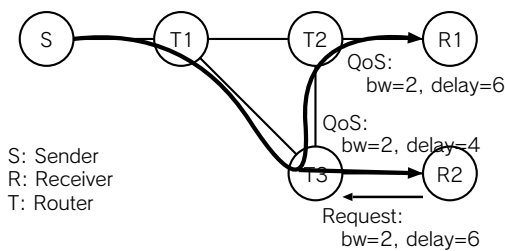
(a) QoS情報の広告



(b) 資源予約要求



(c) QoS保証されたフロー



(d) QoS保証されたマルチキャストフロー

図-1 QoSルーティングの原理

1. 各ルータは全ルータに対して各リンクのQoSパラメータをリンク情報として広告する. 図-1 (a)で, bwは帯域 (bandwidth), delayは遅延を示しており, 矢印の向きにデータを流すときに, 確保可能な帯域と保証可能な遅延時間を示している.

2. 受信者は, 帯域と遅延を指定して, 資源予約要求のためのメッセージ(シグナリングメッセージ)を送信する. シグナリングメッセージを受け取った各ルータは, 資源予約要求を記憶し, 資源予約可能な経路に沿ってシグナリングメッセージを送信者側に転送する. 図-1 (b)は受信ホストR1が帯域2, 遅延5のQoS要求で資源予約を行っているところを示している.

3. 資源予約が行われた経路の逆向きにデータパケットが転送される(図-1 (c)).

受信者側から資源予約を行うことにより, スケーラビリティのあるマルチキャストが実現できる. 受信者側から資源予約を行い, 同じフローに対する資源予約はマージすることで, 送信者が個々の受信者の情報を知ることなくマルチキャスト木が形成できる(図-1 (d)).

### ◎ QoSルーティングにおけるリンク情報広告

QoS保証は, ネットワーク上の帯域などの資源をフローが排他的に予約し, 占有することで実現される. QoSルーティングを行うルータは, フローごとの資源予約要求に対しQoSの保証が可能な経路を計算するために, 各リンクの残り利用可能帯域などの情報(リンク情報)を持ち, それに基づいてルーティングを行わなくてはならない. 残り利用可能帯域のようなパラメータの値は, 資源の予約や解放によって頻繁に変動する.

リンク状態型ルーティングプロトコルでは, リンクの状態が変動した場合, ルータはその情報を他のルータに伝えるためにリンク情報の広告を行う. ベストエフォートルーティングにおいては, リンク情報として管理者が静的に決めたメトリック値を用い, リンクの状態変化は切断と導通のみを扱うため, リンク情報の広告頻度はそれほど問題にはならなかった. しかし,

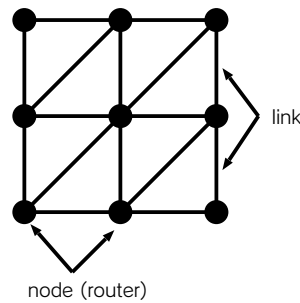


図-2 メッシュトポロジー

QoSルーティングにおいては、リンク情報が頻繁に変動するため、QoSルーティングに必要な正確性のある程度保ったまま、リンク情報の広告回数を抑える仕組みが必要となる。

広告トラフィック量を減らす方法として、単純に時間制限を設ける方法と閾値を設ける方法が考えられている (RFC2676)<sup>1)</sup>。前者はリンク情報の広告を一定時間以上の間隔を空けて行うというものであり、これは確実にルーティング情報のトラフィック量を減らす直接的な方法である。後者は絶対的あるいは相対的な閾値を設定し、リンク情報中の各パラメータがその値以上に変化した時にのみ広告を行うものである。

ところで、QoSルーティングにおける資源予約の失敗は、ルーティングプロトコルがフローの要求を満たす経路を発見できない経路制御の失敗 (routing failure) と、不正確なリンク情報のために実際には資源が十分でない経路を選択してしまうセットアップの失敗 (set-up failure) の2種類に分けられる<sup>2)</sup>。広告されたリンク情報が不正確で本来のリンクの状態よりも「悪い」状態が広告されていた場合、最適でない経路が選択されるか、経路制御の失敗に至る一方、本来のリンクの状態よりも「良い」状態が広告されていた場合、セットアップの失敗が生じ得る。セットアップの失敗は、シグナリングメッセージが状態を確立しながら経路に沿って流れていって初めて検出されるものであり、オーバーヘッドが大きい。また、誤った経路を選択してしまうことで、他に要求を満たす経路がある場合でもそれを見落とすことになる。

単純な広告時間制限では、インターバルの間のパラメータ値の変化に追従できず、経路制御の失敗、セットアップの失敗のいずれもが発生し得る。一方閾値を用いた広告制限では、リンクの状態の不正確さの上界を閾値で抑えることができるため、悲観的な見積りを

行えばセットアップの失敗を避けることができる。

Real Internet Consortiumで開発したリンク状態型階層化QoSルーティングプロトコルHQLIP (Internet Draft; draft-ohita-ric-hqlip-02) では、セットアップの失敗を抑制するために、リンク情報の変化の良し悪しを考慮して、リンクの状態が悪い方に変化した場合には、リンク情報の広告を即座に行う一方、リンクの状態の変化が(いかなる点でも)悪くなっていない場合には、時間制限を設け、過去の悪い方への変化の履歴に応じて広告を遅延させる広告手法を採用している。

佐々木らは、簡単なネットワーク上で、従来の手法やHQLIPの手法を、広告トラフィック量、資源予約の成功率および失敗時のセットアップの失敗の割合について、シミュレーションによる評価実験により比較を行っている<sup>3)</sup>。ここでは以下の広告手法を比較する。

• **immediate**

リンクの状態が変化した場合に、制限なしに即座に広告する手法。

• **timer + threshold**

時間制限手法と閾値を用いる手法の組合せ。パラメータ値が一定値以上 (実験では利用可能帯域が100以上または50%以上) 変化していて、かつ一定時間間隔 (実験では15秒) 以上経過していないと広告を引き起こさない。

• **hqlip + threshold**

HQLIPで採用されている手法に、閾値を用いる手法を組み合わせたもの。パラメータ値が一定値以上 (実験では利用可能帯域100以上または50%以上) 変化していて、かつHQLIPの広告の条件を満たさなければ、広告を引き起こさない。

実験は、メッシュトポロジでサイズが $2 \times 2$ のもの(図-2)を用い、各々のリンクの帯域、遅延は一定として行った。予約フローの発生は、各ノードにおいてポワソン分布に従って1対1のフローを発生させ、目的ノードはネットワーク全体から一様分布に従って発生させた。フローの持続時間は指数分布、個々のフローの予約帯域は一様分布に従うものとし、ネットワークの負荷を一定に保ったままフローの到着率を変化させた。

図-3 (a) は、資源の予約や解放によってリンクの状態が変化し、それを他のノードに伝えるためのリンク情報の広告トラフィック量を表す。横軸は各ノードに対するフローに対する資源予約の平均発生間隔(秒)を、縦軸はシミュレーション実験中に発生した広告トラフィックのネットワーク全体における総量を表している。図-3 (b) に各手法の資源予約の失敗におけるセットアップの失敗の割合を示す。これらから、リンク情報の変化の良し悪しを考慮するHQLIPの手法に閾値を組み合わせると、時間制限に閾値を組み合わせる従来の手法と同程度の広告トラフィック量で、セットアップの失敗の率を、広告を即座に行う場合と同等に抑えることができることが分かる。

### ◎階層化QoSルーティングにおけるリンク情報の集約

#### ■エリアによるネットワークの階層化

大規模ネットワークにおけるルーティングでは、ネットワークのトポロジー構造を、エリアと呼ばれる論理的なまとまりに階層的に分割し、リンク情報の集約を行うのが常識である。階層化によって、ルータの保

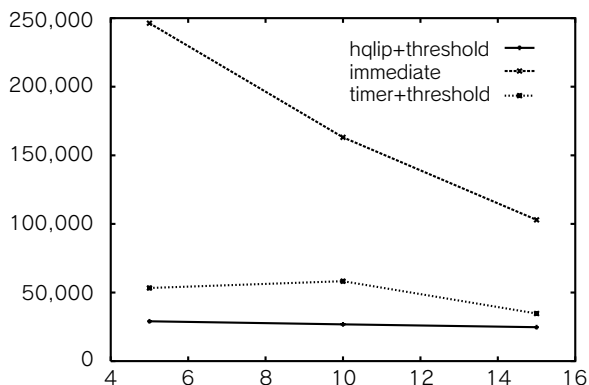
持すべきリンク情報の量を抑え、さらに階層化に伴うトポロジーの簡略化によって経路計算に要する時間を抑えることができる。OSPF(RFC1584)では階層は2つしかないが、PNNI ver.1(ATM Forum 0055.00)やHQLIPでは階層を多重に持つように定義されている。

図-4にHQLIPによるエリアによるネットワークの階層化の様子を示す。図-4 (a)にネットワークトポロジーを示す。図-4 (b)においてデータリンク層の各リンクに対して最下層のエリアを定義する。次に(b)で作成されたエリアのいくつかをまとめることで上位のエリアを定義する(図-4 (c))。以下、複数のエリアをまとめることで新たな上位のレベルのエリアを作成することを階層的に繰り返す。これにより、個々のルータ間のデータリンク層リンクに対するリンク情報が集約されて、エリア間の仮想的なリンクに関するリンク情報として表現されるようになる(図-4 (d))。

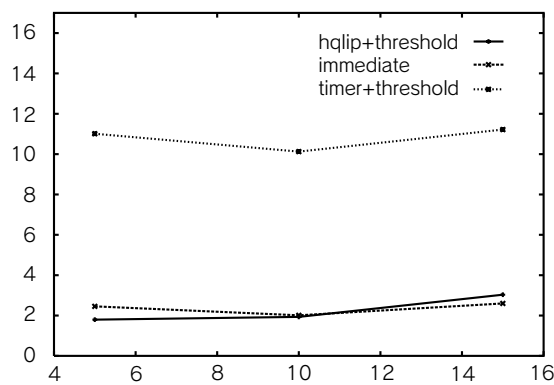
#### ■集約されたリンクのQoS情報

上位のレベルのエリア間の集約された仮想的なリンクが、下位のレベルでは2つの経路を持つ場合、ベストエフォートの経路制御においては、集約されたリンクの帯域は、下位の2つの経路の帯域の和と考えるのが自然かもしれない。しかし、フロー単位の資源予約を前提とするQoSルーティングにおいては、資源予約の要求のあったフローに対して要求を満たす経路を割り当てることができるかどうかの問題であるから、集約されたリンクの帯域は、下位の経路の帯域の最大値と考えるなければならない。

一般には、それぞれの経路での利用可能なQoSのパラメータは単純なスカラー量ではなく、(帯域、遅延)

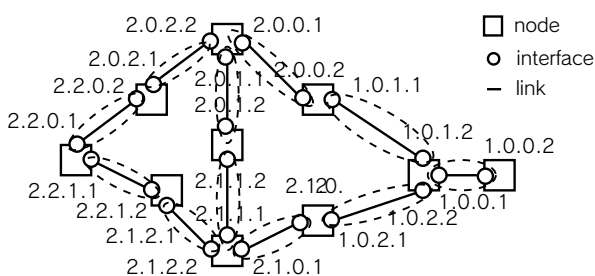


(a) 広告トラフィック量

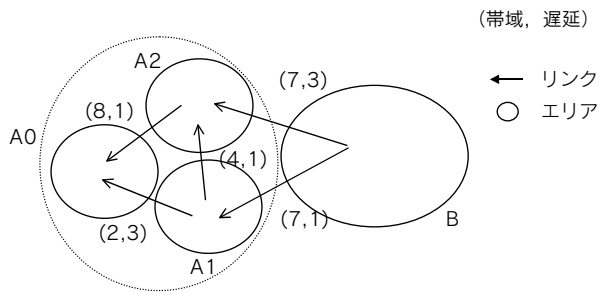


(b) 資源予約におけるセットアップの失敗の率

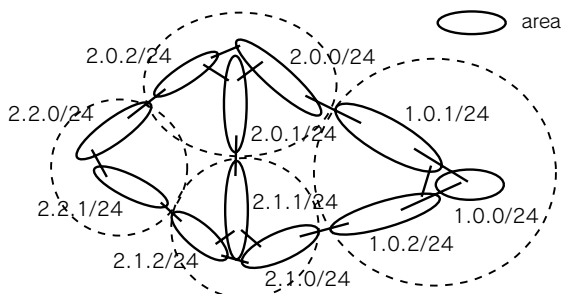
図-3 リンク情報広告手法の比較



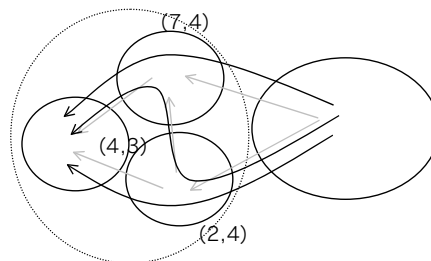
(a) ネットワークトポロジー



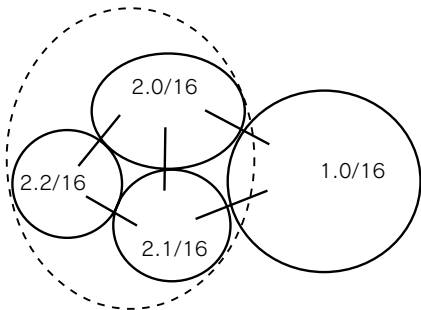
(a) リンクのQoS情報



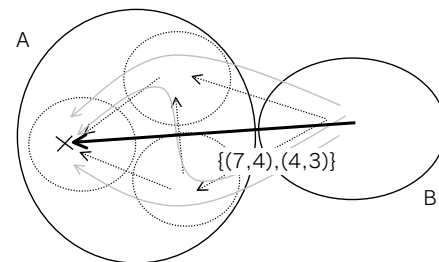
(b) データリンク層にエリアを適用



(b) 経路のQoS情報



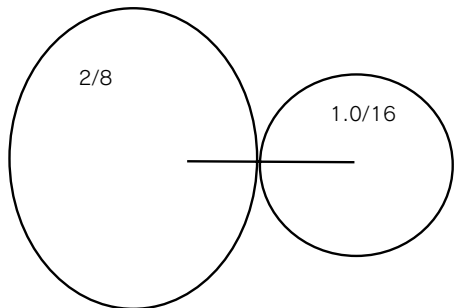
(c) 階層化を適用



× エリア中心

(c) 複数の経路を集約した仮想リンクのQoS情報

図-5 ネットワークの階層化によるリンク情報の集約



(d) さらに階層化

図-4 HQLIPにおける階層化の例

のようなベクトル量となる。例として、A0, A1, A2, Bの4つのエリアが図-5 (a) のようなリンクで結ばれているとする。このときA0からBへ至る経路は図-5 (b) のように3つある。各経路のQoSパラメータは、帯域に関しては経路を構成する各リンクの帯域の最小値、遅延に関しては各リンクの遅延の和であり、それぞれ(7, 4), (4, 3), (2, 4)となる。

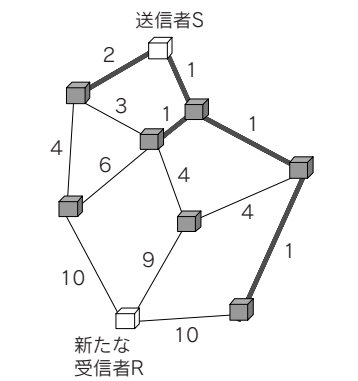
ここで、A0, A1, A2の3つのエリアを1つのエリアAに集約した際の、AからBへの仮想的なリンクで利用可能なQoSのパラメータ値はどのように定めるべきであろうか？ 3つの経路のQoSのパラメータのうち、(7, 4)と(2, 4)については(7, 4)の方が「良い」が、(7, 4)

と(4,3)とでは、片方は帯域が広く他方は遅延が小さいので優劣をつけることができない。仮に、集約されたリンクのQoSのパラメータとしてどちらか一方だけを選択をすると、上位のリンクは選択しなかった方の経路を用いば満たすことのできるQoS要求を満足できなくなる。そのため階層化QoSルーティングにおいて最下位のリンクQoSのパラメータがベクトル量である

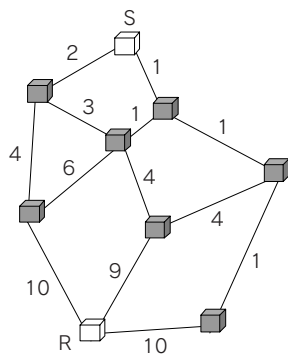
場合には、上位の仮想的なリンクが複数のベクトルからなるQoS情報を持つことを許す必要がある。この場合は、AからBへの仮想的なリンクのQoS情報を、{(7,4), (4,3)}のような(帯域, 遅延)のかたちの2つのベクトルの組で表すことになる。

ここで、ベクトルの組で表現されるリンク情報には半順序関係がある。また、与えられた2つのリンク情報からそのどちらよりも悪いリンク情報(下限)、そのどちらよりも良いリンク情報(上限)を求めることができ、ベクトルの列で表現されるリンク情報全体の半順序集合は束(lattice)を構成する<sup>3)</sup>。前章で述べたリンク情報の広告制限手法で用いられるリンク情報の良い悪いの関係は、階層化QoSルーティングにおいてはこのような半順序関係に基づいて判定される。

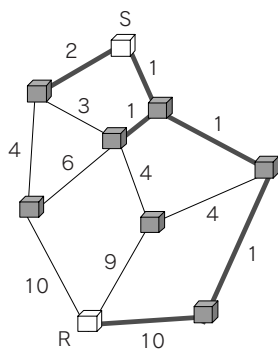
1つのリンクに対するQoS情報のベクトルの個数に制限を設けないと、上位の仮想的なリンクの持つQoS情報がいくらかでも大きくなってしまい、リンク情報の集



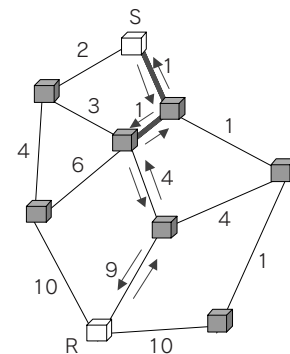
(a) ネットワークとマルチキャストフロー



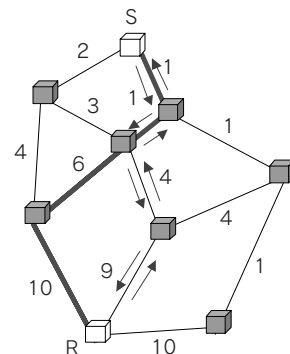
(b) フローの状態を考慮しない場合



(c) 最適なマルチキャスト木



(d) PQCによるフローに関する情報の収集



(e) PQCにより構成されるマルチキャスト木

図-6 個別フローの状態の収集と選択される経路

約の効果が無い。そのため、1つの仮想的なリンクの持つQoSのベクトルの数を一定値に制限してリンク情報が過度に大きくなることを防ぐ必要がある、その際にも半順序関係が用いられる。たとえば  $\{(7, 4), (4, 3)\}$  の2つのベクトルからなるQoS情報を、1つのベクトルからなるQoS情報に置き換える際には、 $(7, 4)$  と  $(4, 3)$  の下限(帯域については最小値、遅延については最大値をとったもの)である  $(4, 4)$  とする。

## ◎QoS保証マルチキャストルーティング

### ■個別フローの状態の収集

QoS保証マルチキャストルーティングにおいては、自分が参加しようとしているマルチキャストフローに対して現在どのような配送木が構築されているかを、各受信者が資源予約を行う前にどれだけ知っているかで、選択できる経路が異なってくる。

例として、図-6(a)に示すようなネットワークがあり、送信者Sから太線で示されるようなマルチキャストフローが配信されている状態で、新たな受信者Rがこのフローに対して経路を確立しようとする状況を考える。フローの帯域は5であり、各リンクの数値はそのリンクの空き帯域を示している。

PNNIのように各フローの状態をまったく把握せずにQoSを満たす経路を計算する方式では、受信者Rが持つQoSルーティングのための情報は図-6(b)のようになる。その時点の配送木を考慮しないと、受信者Rから送信者Sへの帯域5以上の経路は存在しないように見えるので、経路制御の失敗が生じる。

QOSPF (Internet Draft; draft-ietf-pkix-ipki-ecdsa-00) のように各フローの状態を完全に把握して経路を計算する方式では、受信者Rは図-6(a)に示される情報を完全に知っているため、最適経路として図-6(c)に示す経路を選択することが可能である。しかしそのためには当該フローに関する全情報を受信者のところに何らかの方法で集める必要がある、大規模ネットワークにおいては現実的でない。特に送信者と受信者が近い場合に無駄な情報が収集されることになる。

PQC<sup>4)</sup>は、RSVPのようなシグナリングプロトコルを前提に、シグナリングプロトコルのPathメッセージにPQ(Path QoS)と呼ばれるリンクにおける各フローの情報を含めて各ルータに集め、それによってQoSルーティングプロトコルによって広告されている情報を修正し経路計算を行う方式である。例では、受信者Rは送信者Sに対して最短経路に沿って送ったPathメッセージに対する応答により、図-6(d)に示すマルチキャスト木の

一部に関する情報を得る。これに従えば、最適経路ではないものの、図-6(e)のような経路を発見することができる。PQCは、Pathメッセージの送られる経路(すなわち受信者から送信者へのベストエフォートトラフィックの最短経路)に沿ってのみ、当該フローに対する現在の配送木の情報を集める方法と考えることができる。

### ■QoSマルチキャストと課金

IPネットワークにおけるQoSのパラメータとしては、帯域と遅延が典型的であるが、商用サービスを考える上では課金も重要である。すなわち、有限のネットワーク資源を、ネットワーク上に遍在し互いに協調しあうことのない多数のユーザ間で上手に共有させるためには、何らかの課金制度により交通整理を行うことが必須である。その際、ユーザの立場からすれば、必要なQoS要求を満たす経路であれば最も安価なものを選択したい。

既存の電話網のシステムでは、双方向の資源予約が発呼者主導で行われる。課金は発呼者側となるのが普通であるが、フリーダイヤル(0120)のような受呼者側負担や、ナビダイヤル(0570)のような発呼者と受呼者の負担区分があらかじめ決まっているような方式も実現している。また、LCRやマイラインサービスのように発呼者が安価な経路を選択する仕組みもある。我々がここで考えているインターネットにおける資源予約では、単方向のフローの予約が受信者主導で行われることを想定しているが、将来のインターネットが既存の電話網で実現されているサービスをすべて包含するためには、課金については送信者負担部分と受信者負担部分とを自由に組み合わせ設定できるようになっていることが必要である。

マルチキャストの場合の課金は少々複雑である。現行の電波による放送では、放送局の設備や電波使用料などの費用は送信側が負担し、それを広告料やコンテンツごとの料金徴収などで回収している。これは送信側負担と考えることができる。この場合の送信にかかる費用はマルチキャストの受信者数に依存しない。一方、電波による放送は視聴できるエリアが限定されている。どうしてもある放送局の番組をそのサービスエリア外から視聴したい場合、サービスエリア内に中継機材を設置し、別の地域へ転送するということが技術的に可能である。これは、中継機材から先の通信費を受信者が負担しているとみなすことができる。このとき中継放送の受信者が同地域に複数いて所要の通信費を分担することにすれば、マルチキャストの受信者が多

いほど費用負担が小さくなる。すなわち、交通機関における、乗合バスのような同乗者の数に関係ない課金体系と、タクシーの相乗りのように費用を同乗者数で按分する課金体系との両方が考えられるということである。

現行の電波による放送においては、番組の割当ては放送局により固定的に行われているが、QoS保証のあるIPマルチキャストが実現されたインターネットでは、誰もが適正な課金を負担することで「インターネット放送局」になることができる。また受信者は、世界中のどこにいても、放送局との距離や受信者の数に応じた金額を負担することで視聴できる。このためには、マルチキャストの課金体系において、送信者負担部分と受信者負担部分の両方を扱えるようになっていくこととマルチキャストにおける費用負担が「乗合バス」と「タクシー相乗り」の両方に対応していることが必要である。さらに、ここでは述べられなかったが、エリアによるネットワークの階層化と、エリアに対応する事業者間の精算の仕組みも備えている必要がある。Real Internet Consortiumで開発した資源予約プロトコルSRSVP (Internet Draft; draft-fujikawa-ric-srsvp-03) は、以上の点を考慮して設計された課金プロトコルが実装されている<sup>5)</sup>。

## ◎おわりに

すべての電気機器にIPネットワーク機能が搭載される新世代のインターネットにおいては、現在の固定電話が持つ品質(QoS)保証の機能や、電波による放送が担っている広域マルチキャストの機能がすべて統合されたものになる。本稿では、そのような考えのもとに、全世界規模をも対象としたEnd-to-endのQoSマルチキャストルーティングのための基礎技術について述べた。

今日のインターネットでは、ほとんどのサービスが、ベストエフォート型のIPネットワーク環境を前提に、TCPによる1対1のデータ伝送上で実現されている。TCPは、ネットワークの混雑に応じて速度を調節する優れた輻輳制御機能を備えており、ネットワーク層レベルでのQoS保証のない環境下で安定した伝送を可能としている。しかし、そのことが逆にインターネットにおけるQoS保証やマルチキャストの普及を妨げている面があることも事実である。ここで述べたように、IPネットワークにおけるフロー単位でのQoS保証やマルチキャストに必要な要素技術は確立してきており、またプロトコルの実装も完成している。今後はその普及のための努力やキラーアプリケーションの開発が望まれるところである。

現在、次世代ネットワークとして、家電機器のような各種アプライアンスにネットワーク機能を取り込む研究・開発や標準化活動が盛んに行われている。今後の研究開発が、いかにアプライアンスを既存のネットワークに接続するかという観点にとどまらず、アプライアンスを取り込みつつ地球規模のヘテロジニアスなネットワークとして成長を続けるインターネットを、どう運用し、その上でのサービスをどう実現していくかという観点にたつて、さらなる進展を得ることを期待したい。

## 参考文献

- 1) Apostolopoulos, G., Guerin, R. and Kamat, S.: Implementation and Performance Measurements of QoS Routing Extensions to OSPF, INFOCOM '99, pp.680-688 (1999).
- 2) Shaikh, A., Rexford, J. and Shin, K. G.: Evaluating the Impact of Stale Link State on Quality-of-Service Routing, IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol.9, No.2 (2001).
- 3) 佐々木基晴, 小山洋一, 藤川賢治, 岡部寿男: QoSルーティングにおけるメトリック情報の良し悪しに応じたLSAの時間間隔制限手法, 情報処理学会研究報告・DPS-105 (2001).
- 4) Goto, Y., Ohta, M. and Araki, K.: Path QoS Collection for Stable Hop-by-Hop QoS Routing, Proc. Inet97 (1997).
- 5) 盛 威, 藤川賢治, 岡部寿男: QoS保証マルチキャストを提供するインターネット上での課金方式, 情報処理学会研究報告・QAI (2002). (平成14年5月10日受付)