

ユーザ効用によるネットワークサービスの比較評価

渡辺 啓[†] 村田 正幸[†] 宮原 秀夫[†]

Comparison of Network Services with User Utilities

Akira WATANABE[†], Masayuki MURATA[†], and Hideo MIYAHARA[†]

あらまし

現在, ISP (インターネットサービスプロバイダ) で広く用いられている料金制度は, ISP への接続時間を基準にしたものである. しかしながら, 接続時間は実際のネットワーク資源の使用量を表すものではない. また, 近年, インターネットにおける音声や動画などの実時間アプリケーションの開発も盛んであるが, 実時間通信が広く利用されるようになると, 現在の料金制度のもとでは, ユーザ間の公平性が保たれない可能性がある. 実時間通信のサポートのために, ネットワーク資源を予約することによって通信品質を保証する資源予約型サービスも検討されるようになっているが, 帯域予約に必要なコストを含めた評価は十分になされていない. そこで, 本論文ではユーザ効用を通信品質とコストによって定義し, 現状の料金制度におけるユーザ効用を明らかにし, また, 実時間通信アプリケーションと従来のデータ通信アプリケーションがネットワーク資源を共有している場合におけるユーザ効用を調べることによって, 料金制度を含めたネットワークサービスの比較評価を行っている.

キーワード 料金制度, 通信品質, ベストエフォート型サービス, 資源予約型サービス, ユーザ効用

1. はじめに

現在, ISP で広く採用されている料金制度は, ISP への接続時間を基準にしたものが多い. 例えば, 接続時間に比例した料金をユーザに課す従量制や, 月単位で一定料金を課す定額制, あるいはそれらの組み合わせによるものなどである. これらの違いは, ユーザの利用形態に応じたものであり, 例えば, メール中心のユーザは従量制を利用し, ヘビーユーザは定額制を利用する方が割安感が得られる. メール中心のユーザであれば, 必要なデータのみを転送する時間だけ ISP に接続するため, 接続時間において転送時間が占める割合は高くなる. しかしながら, Web 利用を中心としたユーザであれば, 接続時間の内, 転送時間が含む割合は, メール中心のユーザよりも小さくなるのが十分に考えられる. 従って, 接続時間のみでは, ユーザが利用するネットワーク資源量を正しく表現しているとは言えない. これは, インターネットが提供しているサービスが, データ通信を前提として, 各コネク

ションに対してネットワーク資源の保証を行わないベストエフォート型サービスであるにもかかわらず, 接続時間を基本とした料金制度を採用していることが一因に挙げられる.

また, 近年, 音声や動画などの実時間アプリケーションの開発が盛んに行われている. 現状では, 従来のベストエフォート型サービスを利用した片方向通信が主たる実現形態であるが, 一方で, QoS 保証を行うためにコネクションに対してネットワーク資源を確保する資源予約型サービスも考えられている [1]. この場合, 実時間アプリケーションが使用するネットワーク資源量をネットワークが把握していることが前提であり, 従って, ユーザに対して利用資源量に応じた料金を課すことも可能になると考えられる. しかしながら, RSVP を用いた資源予約型サービスに対してはスケーラビリティによる限界も指摘されている. そのため, その基本的な性能について, 実時間アプリケーションをベストエフォート型サービス, および, 資源予約型サービスに適用した場合の比較がなされているのが現状である [2], [3]. また, 現在の単純な料金制度では収入予測やトラフィック管理が単純であるのに対して, 資源予約型サービスでは, トラフィック管理が困難になり, また, トラフィック予測が正しく行われ

[†] 大阪大学 大学院基礎工学研究科 情報数理系専攻, 豊中市
Department of Infomatics and Mathematical Science, Graduate School of Engineering Science, Osaka University, Toyonaka, Osaka 560-8531, Japan

なければ収入予測も困難である可能性は大きい。

そこで、本論文ではユーザ効用を通信品質とそれにかかるコストによって定義し、料金制度やユーザの利用形態を考慮可能な評価モデルをまず構築する。特に、現在、インターネットのトラヒックの主流を占めている Web トラヒックと実時間トラヒックをモデル化の対象とし、それぞれをベストエフォート型サービスと資源予約型サービスに適用した場合を考える。次に、評価モデルの解析手法を示し、ユーザ効用の比較の定量的な評価を可能としている。数値例では、いくつかの料金制度とユーザモデルを想定し、それらをサービスモデルと組み合わせながらユーザ効用を調べることによって、現状の料金制度の問題点や効用を指標としたユーザの公平性の比較評価を示す。

以下、まず、2章において、本論文で対象とするサービスモデルとアプリケーションモデルを導入する。次に、3章では、まず、いくつかの料金制度に基づいたユーザ効用を導出し、また、数値例を用いてユーザ効用の比較を行う。次に、4章では、ベストエフォート型サービスと資源予約型サービスにおける実時間トラヒックと Web トラヒックのユーザ効用を解析的に導出し、その数値例を用いてサービスの比較を行う。最後に5章にまとめと今後の課題を述べる。

2. サービスモデルと想定トラヒック

まず、現状の ISP における主な料金制度を挙げる。現在の ISP ではベストエフォート型サービスが提供されており、ここでは次のように定義する。

ベストエフォート型サービス: ネットワーク内の資源を各コネクションに対してあらかじめ確保するようなことはしない。従って呼損は発生しない。また、ネットワーク内部においては、パケットは基本的に FIFO で転送される。

本論文では、以下の料金制度を想定してモデル化を進める。

(1) 従量制

従量制では、ユーザが ISP を利用した時間に比例した料金が課せられる。すなわち、図 1(a) のようなグラフで表すことができる。

(2) 定額制

一ヶ月などを単位として、接続時間に関わらず料金が一定の課金制度である (図 1(b))。

(3) 定額 + 従量制

従量制と定額制の中間の料金制度として、ある一定

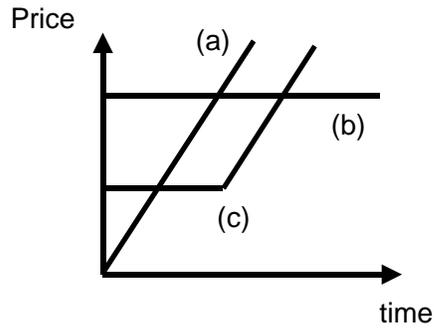


図 1 料金制度

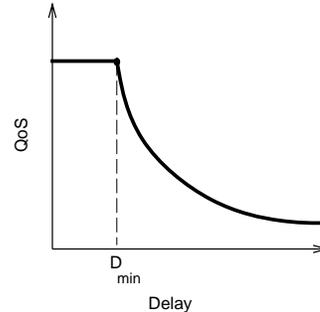


図 2 Web トラヒック $QoS_w(D)$

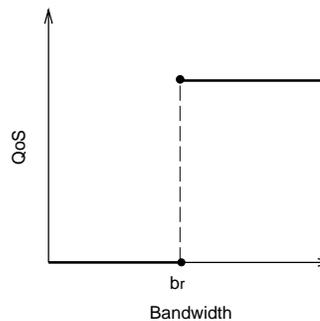


図 3 real-time トラヒック $QoS_r(b)$

時間までは料金が変わらず、その時間を越えると利用時間に比例した料金が必要となる定額 + 従量制度が考えられる (図 1(c))。

データ系アプリケーションとして、現在のトラヒックの大部分を占める http コネクションによる通信、すなわち、Web トラヒックを想定する。Web トラヒックの通信品質としてドキュメント転送遅延時間を考える。そのために、Web トラヒックの QoS 関数として

図 2 に示すようなドキュメント転送遅延時間に対して定義される関数を導入する．すなわち，遅延時間が D_{min} 以下の場合には，ユーザは十分な通信品質が得られていると感じ，遅延時間が D_{min} 以上になると遅延時間が大きいほどコネクションの通信品質が低いと感じるという関数である．

一方，実時間アプリケーションとして，双方向で音声や動画像による通信を行うアプリケーションを考える．実時間トラヒックは遅延の制約に厳しいため，その QoS 保証を行う場合，コネクションごとに帯域を保証する資源予約型サービスが必要となる．本論文では，次のように定義する．

資源予約型サービス： ネットワーク内の物理資源をコネクションに対してあらかじめ確保することによって，QoS 保証を可能とする．そのため，RSVP などのシグナリングプロトコルが必要となる．資源を確保できない場合は呼損とする．なお，資源予約型サービスにおいて予約対象となる資源としては，帯域やルータバッファなどさまざまなものが考えられ，また，通信品質の指標としてもスループットや遅延，パケット棄却率などが考えられる．しかし，本論文では，その実現性を考慮して帯域のみを予約の対象とし，その結果，実時間トラヒックは，スループットを通信保証の対象と考える [4]．実時間トラヒックは，帯域に対して QoS 関数が定義されているものとする．ただし，ここで考える QoS はコネクションが設定された後の通信品質を指すとし，例えば SN 比や MOS によって決定されるものであり，図 3 に示すような QoS 関数を考える．すなわち，帯域がある値 b_r より小さい場合，そのアプリケーションの通信品質は著しく劣化するため 0 になると考え，それ以上の場合には十分な通信品質が得られるものとする．実時間トラヒックが存在し，資源予約型サービスを利用する場合にも，データトラヒックは資源予約されていない帯域を使用するものとする．従って，帯域を予約するユーザは，帯域を優先利用するための料金を支払うと考える．

本論文では，以下のようにして，ネットワークサービスと料金制度の関係を明らかにしていく．まず，現状のベストエフォート型サービスを提供している ISP を対象に料金制度として，

- (1) 従量制
- (2) 定額制
- (3) 定額+従量制

を考え，それぞれにおける Web トラヒックのユーザ

効用を求めることによって，各料金制度を比較評価する．

次に，ネットワークサービスとして，

- (1) ベストエフォートサービス
- (2) 資源予約型サービス

を考え，それぞれのサービスに対して

- (1) Web トラヒック
- (2) 実時間トラヒック

を適用した場合のユーザ効用を求め，2 つのネットワークサービスを比較評価する．

3. 料金制度の比較

3.1 モデル化と解析結果

まず，ネットワークモデルとして図 4 に示すモデルを考える．すなわち，ISP は，容量 C を持つアクセス回線によりバックボーンネットワークに接続し，ユーザに対して電話回線を通じて N 回線まで接続可能なアクセスポイントを持っているとする．すなわち，最大 N 人までのユーザの同時接続を可能としている．

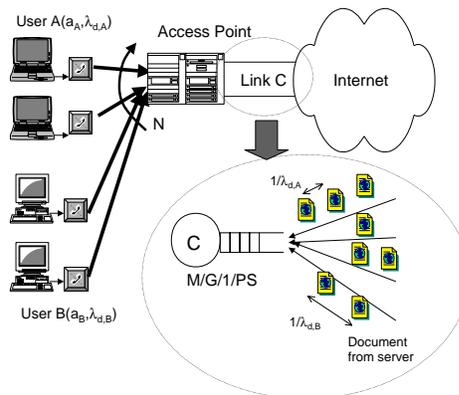


図 4 ネットワークモデル

ユーザには，2 種類のユーザ集合があると考え．まず，ユーザ集合 A は，ユーザ数 n_A からなり，各ユーザからの接続要求は平均 λ_A のポアソン分布で発生し，その接続時間は平均 $1/\mu_A$ の一般分布で与えられるものとする．また，ユーザ集合 B はユーザ数 n_B からなり，その接続要求発生率，接続時間は， λ_B のポアソン分布，平均 $1/\mu_B$ の指数分布で与えられるものとする．これは，例えば，ユーザ集合 A をライトユーザの集合，ユーザ集合 B をヘビーユーザの集合としてユーザモデルを表現することを意図している．

今、ユーザ集合 A の接続数を i 、ユーザ集合 B の接続数を j とした場合の状態を $s_{i,j}$ とあらわす。 $s_{i,j}$ の定常状態確率を $P_{i,j}$ とすると、 $P_{i,j}$ は、

$$P_{i,j} = P_{0,0} \times \frac{a_A^i}{i!} \frac{a_B^j}{j!}$$

$$P_{0,0} = 1 / \sum_{i=0}^N \left[\frac{a_A^i}{i!} \times \sum_{j=0}^{N-i} \frac{a_B^j}{j!} \right]$$

となる。ここで、 $a_A = n_A \times a_{one,A} (= \lambda_A / \mu_A)$ 、 $a_B = n_B \times a_{one,B} (= \lambda_B / \mu_B)$ である。

ユーザは ISP に接続中にドキュメント転送要求を行うと考える。 http によるドキュメント転送要求は、 M/G(log-normal)/1/PS でモデル化する [5] (図 4 参照)。ただし、ここではアクセス回線のみを評価の対象としている。ユーザ集合 A のドキュメント転送要求は平均 $\lambda_{d,A}$ のポアソン分布に従って発生し、また、ユーザ集合 B については $\lambda_{d,B}$ のポアソン分布とする。また、問題の簡単化のために、ユーザ集合 A、ユーザ集合 B から要求される転送ドキュメントの長さは、その平均値を X_m とする同一の対数正規分布で表せるものとする。以上より、上で求めた定常状態 $s_{i,j}$ において、システムに対するドキュメント転送要求発生率は、 $\lambda_{i,j} = (i\lambda_{d,A} + j\lambda_{d,B})$ となる。状態 $s_{i,j}$ におけるドキュメント転送を M/G(log-normal)/1/PS でモデル化すると、システムに対する負荷は $\rho_{i,j} = \lambda_{i,j} X_m$ で与えられ、状態 $s_{i,j}$ における平均ドキュメント転送時間 $D_{i,j}$ は、

$$D_{i,j} = \frac{X_m}{C - \rho_{i,j}}$$

となる。すなわち、ユーザ A、ユーザ B の平均ドキュメント転送時間 $D_{i,j,A}$ 、 $D_{i,j,B}$ は、それぞれ、

$$D_{i,j,A} = \lambda_{i,j} D_{i,j} / (i\lambda_{d,A})$$

$$D_{i,j,B} = \lambda_{i,j} D_{i,j} / (j\lambda_{d,B})$$

である。すなわち、ユーザ A、ユーザ B の平均 QoS_A 、 QoS_B は、

$$QoS_A = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^{N-i} P_{i,j} QoS_w(D_{i,j,A})$$

$$QoS_B = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^{N-i} P_{i,j} QoS_w(D_{i,j,B})$$

4

で与えられる。ただし、 $C - \rho_{i,j} \leq 0$ の場合は遅延時間が無限大になるので、その場合の QoS は 0 とする。

次に、前章で述べた料金制度を本論文で取り扱っているモデルへの適用を考える。まず、料金制度を表す関数として $Cost_x(h)$ を導入し、 $x = 1, 2, 3$ はそれぞれ図 5 に示した 3 つのコスト関数をあらわすものとする。 QoS_A 、 QoS_B は、1 ドキュメントあたりの QoS として定義しているため、接続中、単位時間当りに送信するパケット数を QoS にかけた値をユーザの正の効用とする。一方、単位時間あたりの接続料金を負の効用と定義する。ここで、料金を支払う時間単位 (例えば、月) を h とすると、ユーザ A、ユーザ B のユーザ効用 U_A 、 U_B は以下の式で与えられる。

$$U_A = h a_A \lambda_{d,A} QoS_A - Cost_A(h a_A) \quad (1)$$

$$U_B = h a_B \lambda_{d,B} QoS_B - Cost_B(h a_B) \quad (2)$$

ただし、 $Cost_A(\cdot)$ 、 $Cost_B(\cdot)$ は、ユーザ集合 A、B に適用されたコスト関数とする。

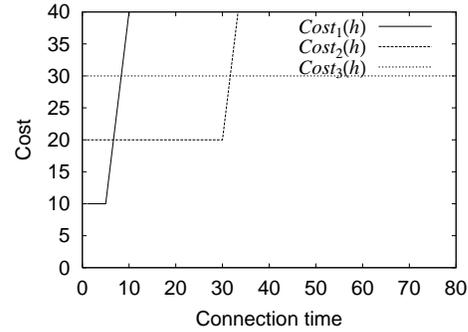


図 5 コスト関数

3.2 比較評価

本節では、前節で求めた解析結果を用いて、Webトラフィックのユーザ効用と料金制度の関係を明らかにする。図 5 に示した 3 つのコスト関数を評価の対象とする。まず、 $Cost_1(h)$ は接続時間 5 時間 / 月までは定額 1000 円で、さらに利用した場合は 10 円 / 1 分の従量制となるものである。次に、 $Cost_2(h)$ は接続時間 30 時間 / 月までは定額 2000 円で、さらに利用した場合は 10 円 / 1 分の従量制となるものである。最後に $Cost_3(h)$ は月額 3000 円の定額制である。

QoS 関数については、ドキュメント転送遅延時間 D が 20ms のとき 5 となり、 D が 20ms 以上の場合は $QoS_w(D) = 0.1/D$ となるように設定した。

さらに、式 (1), (2) における $a_x h$ が 5 時間の時に $Cost_1(a_x h) = 10$, 30 時間の時 $Cost_2(a_x h) = 20$ となるように実際の料金 100 分の 1 にコスト関数を正規化した。また、文献 [5] のデータに基づいて平均ドキュメント長 $X_m = 9.1488\text{KB}$ とし、回線容量 $C = 10\text{Mbps}$ とした。

3.2.1 $Cost_1(h)$ と $Cost_2(h)$ を用いた場合の比較

まず、 $Cost_1(h)$ と $Cost_2(h)$ を提供しているプロバイダを想定する。ユーザ集合 A は $Cost_1(h)$ を利用するものとし、ユーザ集合 B は $Cost_2(h)$ を利用するとする。 $Cost_1(h)$ を利用しているユーザは固定料金が許される接続時間が短いため、頻繁にドキュメント転送を行う場合を想定し、ドキュメント転送要求発生率 $\lambda_{d,A}$ を大きな値に設定する。一方、 $Cost_2(h)$ を利用しているユーザは、接続している間のドキュメント転送要求発生率 $\lambda_{d,B}$ は、 $\lambda_{d,A}$ よりも小さな値に設定する。以下、同時接続可能数 $N = 200$ 、ユーザ数 $n_A = 200$, $n_B = 200$ とし、集合 A に属するユーザの平均接続時間を 4.5 時間とし、集合 B については平均 25 時間とする。また、ドキュメント転送要求発生率については $\lambda_{d,B} = 0.6$ を固定にし、 $\lambda_{d,A}$ を 2.0 から 4.0 まで増加させた場合の効用 U_A, U_B を図 6 に示す。図 6 より $\lambda_{d,A}$ が 3.3 を越えると U_A が U_B

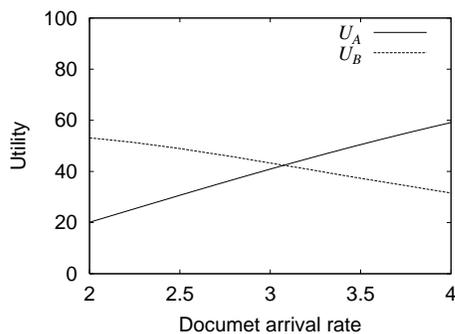


図 6 $\lambda_{d,A}$ を変化させた場合

を逆転する。しかしながら $\lambda_{d,B}$ は今 0.6 に固定しており、実際には単位時間あたり 5 倍近くのドキュメントを送信してはじめて同じユーザ効用を得られることになる。従って、 $Cost_1(h)$ のユーザはプロバイダに接続した時は絶えず転送要求をするようなユーザでないと、十分なユーザ効用は得られないことを意味している。

3.2.2 $Cost_2(h)$ と $Cost_3(h)$ を用いた場合の比較

次に、 $Cost_2(h)$ と $Cost_3(h)$ を提供しているプロバイダを想定する。ユーザ集合 A は $Cost_2(h)$ を利用し、ユーザ集合 B は $Cost_3(h)$ を利用すると考える。 $Cost_2(h)$, $Cost_3(h)$ を利用するユーザは、それぞれ接続時間が異なる。ユーザ A は、接続時間が 30 時間以上になると従量制に変わるため、ユーザ B に比べて接続時間内にデータ転送する割合が多くなる傾向にあると考えられる。そこで、ドキュメント到着率 $\lambda_{d,A}$ は、 $\lambda_{d,B}$ よりも大きな値に設定した。以下、パラメータとして、 $N = 200$, $n_A = 200$, $n_B = 200$ とし、集合 A のユーザの平均接続時間を 25 時間、集合 B のユーザは平均 60 時間とする。ドキュメント転送要求率については $\lambda_{d,A} = 0.6$ に固定し、 $\lambda_{d,B}$ を 0.1 から 0.6 まで変化させた。この時のユーザ効用を図 7 に示す。

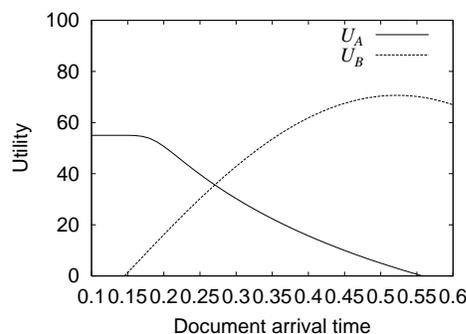


図 7 $\lambda_{d,B}$ を変化させた場合

図 7 より、 $\lambda_{d,B}$ が $\lambda_{d,A}$ に比べて小さい場合は、 U_A の方が U_B よりも大きな値を示す。これは $Cost_3(h)$ のユーザがネットワークに対して大きな負荷を与えていない状態であり、この場合は $Cost_2(h)$ のユーザは十分な QoS が得られている。しかしながら、 $Cost_3(h)$ のユーザのドキュメント転送要求発生率がさらに大きくなれば、ネットワークが混んできて $Cost_2(h)$ のユーザの QoS が減少してしまうため、結果的に $Cost_2(h)$ のユーザの効用が減少してしまう。従って、ドキュメント転送要求率が異なれば、必ずしも接続時間の大きいユーザの方が得すると限らないことがわかる。

3.2.3 2つのユーザ集合が共に $Cost_3(h)$ を用いた場合の比較

最後に、 $Cost_3(h)$ のみを提供しているプロバイダを想定する。ここでは 2 つのユーザ集合においてドキュ

メント要求発生率は等しいが、接続時間が異なる場合を調べる。ドキュメント到着率を $\lambda_{d,A} = \lambda_{d,B} = 0.2$ とし、 $N = 200$, $n_A = 200$, $n_B = 200$ とする。ユーザ A の平均接続時間を 70 時間とし、ユーザ B の平均接続時間を 50 時間から 100 時間に変化させた場合のそれぞれのユーザ効用を図 8 に示す。図 8 より、ユーザ B の平均接続時間が小さい場合は、ユーザ集合 A の効用 U_A が小さく、逆に平均接続時間が大きくなると U_B が大きな値を示す。したがって、定額制は接続時間の長いユーザが有利になる料金制度であることがこの図からもわかるが、効用 U_A も大きな減少は見られず、接続時間の短いユーザにとっても必ずしも不利とは言えない。

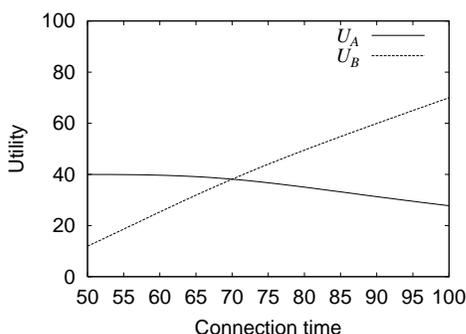


図 8 ユーザ B の平均接続時間を変化

4. ベストエフォート型サービスと帯域予約型サービスの比較

本章では、実時間トラヒックと Web トラヒックが混在した時に、それらをベストエフォート型サービスに適用した場合、帯域予約型サービスに適用された場合のそれぞれについてユーザ効用を求め、その比較を行う。

4.1 モデル化、および、解析

4.1.1 ベストエフォート型サービスに適用した場合

ネットワークのモデルは前章と同じとする。ただし、ユーザ集合 A を実時間アプリケーションを使用するユーザの集合とし、ユーザ集合 B をデータ系アプリケーション (Web) を使用するユーザの集合と考える (図 9)。ここでは議論の簡単化のため、集合 A のユーザは、実時間アプリケーションのみの使用し、

実時間通信を行う時間はプロバイダとの接続時間に等しいと仮定する。

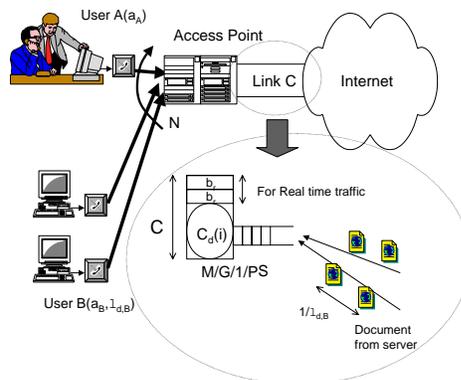


図 9 ネットワークモデル 2

まず、ISP に接続されているユーザ集合 A のユーザ数を i 、ユーザ集合 B のユーザ数を j とし、その状態 $t_{i,j}$ における実時間アプリケーション、Web トラヒックの QoS を考える。状態 $t_{i,j}$ の定常状態確率は前章において与えた $s_{i,j}$ とまったく同じ方法で導出でき、その定常状態確率を再び $P_{i,j}$ とする。

ベストエフォート型サービスでは、実時間トラヒックは UDP により、また Web トラヒックは TCP により通信していると考えられる。UDP が存在する場合、TCP はそのウィンドウフロー制御によって送信レートが減少するため [6]、ここでは実時間トラヒックは通信品質を満足できる帯域 b_r で送信を行い、その未使用の帯域を Web トラヒックが使用するものとする [7]。すべての実時間アプリケーションが同じ帯域 b_r を使用すると仮定すると、実時間アプリケーションを使用するユーザ数が i の時に、Web トラヒックが使用できる帯域 $C_d(i)$ は以下の式で与えられる。

$$C_d(i) = \max\{C - i \times b_r, 0\}$$

これより、 $t_{i,j}$ におけるドキュメント転送遅延時間 $D_{i,j}$ は、

$$D_{i,j} = \frac{X_m}{C_d(i) - j\lambda_{d,B}X_m}$$

となる。従って、Web トラヒックの平均 $QoS_{w,b}$ は以下の式で与えられる。

$$QoS_{w,b} = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^{N-i} P_{i,j} QoS_w(D_{i,j})$$

次に実時間アプリケーションユーザの QoS を求める。実時間アプリケーションは、帯域 b_r を使用できれば、すなわち $i \leq m = \lfloor C/b_r \rfloor$ であれば、 $\alpha(b_r)$ を得ることができ、一方、 $i > m$ であれば、十分な帯域が確保できないために QoS は 0 とする。従って、平均 $QoS_{r,b}$ は以下の式で与えられる。

$$QoS_{r,b} = \frac{1}{a_A} \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^{N-i} i P_{i,j} QoS_r(b_r)$$

実時間トラフィック、Web トラフィックのユーザ効用 $U_{r,b}$ 、 $U_{w,b}$ は、そのコストを考慮することによって、以下の式で与えられる。

$$U_{r,b} = h_{a_A} QoS_{r,b} - Cost_A(h_{a_A})$$

$$U_{w,b} = h_{a_B} \lambda_{d,B} QoS_{w,b} - Cost_B(h_{a_B})$$

4.1.2 資源予約型サービスに適用した場合

ベストエフォート型サービスと同様に、集合 A を実時間アプリケーションのユーザ集合、集合 B を Web トラフィックのユーザ集合とする。資源予約型サービスにおいては、帯域予約を行うユーザは、通信開始時にあらかじめ帯域予約を要求する。すなわち、接続要求時に帯域 b_r を申告し、ネットワークが帯域 b_r を確保できるならば、その接続を受け付ける。ここでは、その帯域予約の対象は ISP のバックボーンネットワークへのアクセス回線のみを考える。ただし、たとえ帯域 b_r を確保できる状態であっても、Web トラフィックのユーザを含めて最大接続数 N によって抑えられている可能性はある。ここで、Web ユーザは、帯域予約されていない帯域を利用している。ただし、実時間アプリケーションがその帯域予約によってすべての帯域を使用してしまわないように、Web トラフィックの保護帯域として最低帯域 $Cdr(\leq C)$ を確保すると考える。よって、同時接続可能な実時間アプリケーションユーザ数は、最大 $m_2 = \lfloor (C - Cdr)/b_r \rfloor$ となる。

まず、実時間アプリケーションのユーザ数が i 、Web のユーザ数が j である状態を $u_{i,j}$ とすると、 $u_{i,j}$ の定常状態確率 $Q_{i,j}$ は、

$$Q_{i,j} = Q_{0,0} \times \frac{a_A^i a_B^j}{i! j!}$$

$$Q_{0,0} = 1 / \sum_{i=0}^{m_2} \left[\frac{a_A^i}{i!} \times \sum_{j=0}^{N-i} \frac{a_B^j}{j!} \right]$$

となる。また、状態 $u_{i,j}$ において Web トラフィックが使用できる帯域 $C_d(i)$ は、

$$C_d(i) = \max\{C - i \times b_r, Cdr\} \quad (3)$$

となる。状態 $u_{i,j}$ におけるドキュメント転送遅延時間 $D_{i,j}$ は、

$$D_{i,j} = \frac{X_m}{C_d(i) - j \lambda_{d,B} X_m}$$

となり、Web トラフィックの平均 $QoS_{w,r}$ は以下の式で与えられる。

$$QoS_{w,r} = \sum_{i=0}^{m_2} \sum_{j=0}^{N-i} Q_{i,j} QoS_r(D_{i,j})$$

次に実時間アプリケーションの QoS を求める。実時間アプリケーションは、接続されれば帯域 b_r を使用できるので、QoS 値として $\alpha(b_r)$ を得ることができ。従って、実時間アプリケーションの呼損率を Pb_r とすると、平均 $QoS_{r,r}$ は以下の式となる。

$$QoS_{r,r} = (1 - Pb_r) \alpha(b_r)$$

ただし、 Pb_r は状態確率 $u_{i,j}$ ($i = m_2$ or $i + j = N$) の総和である。すなわち、以下の式で与えられる。

$$Pb_r = \sum_{j=0}^{N-m_2} Q_{m_2,j} + \sum_{i=0}^{m_2-1} Q_{i,N-i}$$

帯域使用料金は、ユーザが使用した時間、および、帯域量に比例すると考える。すなわち、比例係数を p_{bw} とすると、各ユーザは $p_{bw} \times a_A h \times b_r$ のコストが必要となる。従って、ユーザ効用は以下の式で与えられる。

$$U_{r,r} = h_{a_A} QoS_{r,r} - (1 - Pb_r) h_{a_A} p_{bw} b_r$$

$$U_{w,r} = h_{a_B} \lambda_{d,B} QoS_{w,r} - Cost(h_{a_B})$$

4.2 比較評価

本節では、前節で求めた解析結果に基づいた評価例を示す。ここでは、実時間トラフィック量を変化させることによって、ベストエフォート型サービスならびに資源予約型サービスにおけるユーザ効用の変化を調べる。そのために、 $N = 200$ 、 $n_B = 200$ に固定し、 n_A を 100 から 300 まで増加させている。集合 A のユーザについては平均接続時間を 40 時間とし、B については平均 60 時間とする。また、実時間アプリ

ケーションの要求帯域 $b_r = 128Kbps$ とし、そのとき $QoS_r(b_r) = 5$ とする。ドキュメント転送要求発生率 $\lambda_{d,B} = 0.2$ とした。また、Web トラフィックの保護帯域 C_{dr} は、回線容量 C の 20% とした。Web トラフィックのコスト関数については、両サービスともに $Cost_3(h)$ を用いる。

帯域 b_r を $128Kbps$ とし、その時のコスト $p_{bw}bw$ は、現在の電話網の料金を参考にして 10 円 / 3 分とする。この場合、200 円 / 1 時間となり、3.2 節と同様にコストを実際の料金の 100 分の 1 とする。つまり、 $p_{bw}b_r \times 1 = 2$ となるように設定した。上記の条件である平均 40 時間の場合、呼損しなければコストは 80 (ベストエフォート型サービスでは 30) となる。

アクセス回線容量 C を 10Mbps, 15Mbps, 20Mbps とした場合の、ベストエフォート型サービス、資源予約型サービスにおけるユーザ効用 $U_{r,b}$, $U_{w,b}$, $U_{r,r}$, $U_{w,r}$ を図 10, 11 に示す。図 10 より、 $C = 10Mbps$

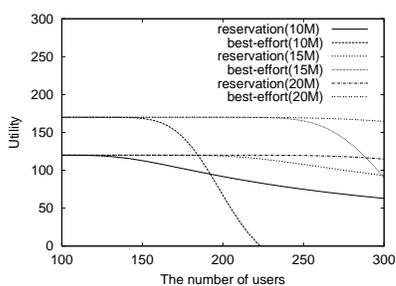


図 10 実時間アプリケーションの効用 $U_{r,b}$, $U_{r,r}$

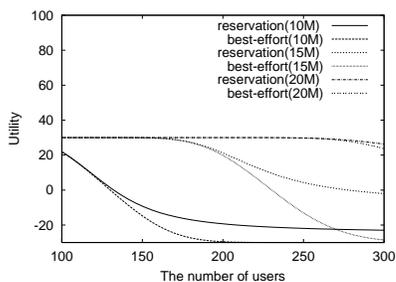


図 11 Web ユーザの効用—ユーザ数が増加 $U_{w,b}$, $U_{w,r}$

の場合、実時間トラフィックが少なければ、ベストエフォート型サービスと資源予約型サービスのユーザ効用の差は、ほとんどない。しかしながら、実時間トラフィックが 150 まで増加すると、ベストエフォート

型サービスのユーザ効用 $U_{w,b}$ が小さくなり、その結果 $U_{r,b}$ との差が大きくなる。資源予約型サービスのユーザ効用 $U_{w,r}$ も小さくなるが、帯域使用料が高いために $U_{r,r}$ との差はベストエフォート型サービスほど大きくない。さらに実時間トラフィックが増加すると QoS が非常に小さくなってしまい、ベストエフォート型サービスのユーザ効用はどちらも 0 よりも小さくなってしまふ。しかしながら、回線容量が 15Mbps に増加すると、ベストエフォート型サービスと資源予約型サービスのユーザ効用の差は小さくなり、20Mbps になると、逆にベストエフォート型サービスの方が料金が安いので、ベストエフォート型サービスのユーザ効用の方が大きくなっている。すなわち、実時間トラフィックが増加した場合、十分な回線容量を得ることができなければ、ベストエフォート型サービスでは十分なユーザ効用が得ることができず、その場合は資源予約型サービスが必要であると言える。

5. むすび

本論文では、ユーザ効用を尺度として、ISP における料金制度の比較評価を行った。さらに、実時間トラフィックを考慮したネットワークモデルにおけるユーザ効用を求め、ベストエフォート型サービス、資源予約型サービスの比較を行った。その結果、現在広く使用されているベストエフォートトラフィックにおける接続時間を基にした料金制度では、ユーザが使用するネットワーク資源に対応した料金制度とは言えないことが分かった。その結果、今後、実時間トラフィックの割合が増加した場合、十分な回線容量を得ることができなければ、ユーザ間の公平性がとることが困難になり、その場合は予約型サービスが必要であることを明らかにした。

本論文では、ISP が設定する回線容量に対するコストとユーザが負担する料金の関係を考慮してない。そこで、回線容量とそのコストの関係がネットワークサービスとそのユーザ効用に与える影響を調べていく必要がある。

文 献

- [1] R. Braden, D. Clark, and S. Shenker, "Integrated services in the internet architecture," *Internet RFC* 1633, July 1994.
- [2] 渡辺啓, 馬場健一, 村田正幸, 宮原秀夫, "ユーザ QoS を考慮した動的帯域管理方式の性能評価," 電子情報通信学会論文誌掲載予定.
- [3] L. Brealau and S. Shenker, "Best-effort versus reser-

- vations: A simple comparative analysis,” *CCR ACM Sigcomm*, vol. 28, October 1998.
- [4] 村田 正幸, “マルチメディアネットワークにおける通信品質保証の実現と課題,” 電子情報通信学会論文誌 (B-I), vol. J80-B-1, pp. 296-304, June 1997.
- [5] 名部正彦, 馬場健一, 村田正幸, 宮原秀夫, “インターネット・アクセスネットワーク設計のための WWW トラフィックの分析とモデル化,” 電子情報通信学会論文誌 (B-I), vol. J80-B-1, pp. 428-437, June 1997.
- [6] S. F. Jamshid Mahdavi, “TCP-friendly unicast rate-based flow control,” *Technical note sent to the end2end-interest mailing list*, January 1997.
- [7] Akira Watanabe, Masayuki Murata and Hideo Miyahara, “Which provides better utility to users, best-effort service or reservation-based service?,” in *Proceedings of ITCS-CSCC*, pp. 1190-1193, July 1999.
- (平成年月日受付, 月日再受付)

渡辺 啓 (学生員)

平 10 阪大・基礎工・情報卒・同年, 同大大学院博士前期課程入学・在学中・広帯域通信網の帯域管理方式に関する研究に従事。

村田 正幸 (正員)

昭 57 阪大・基礎工・情報卒, 昭 59 同大大学院博士前期課程了。同年, 日本アイ・ピー・エム (株) 入社。同社東京基礎研究所を経て, 昭 62 阪大大型計算機センター・助手, 平 1 阪大・基礎工・助手, 平 3 同講師, 平 4 同助教授。平 11 同教授。この間, 待ち行列理論, システム性能評価, 高速ネットワークなどの研究に従事。工博。IEEE, ACM, The Internet Society, 情報処理学会各会員。

宮原 秀夫 (正員)

昭 42 阪大・工・通信卒。昭 47 同大大学院博士課程了。昭 48 京大・工・助手。昭 55 阪大・基礎工・助教授。昭 62 阪大・大型計算機センター教授。平 1 阪大・基礎工・情報・教授。平 7 より阪大・大型計算機センター長兼任。昭和 58~59 米国 IBM トーマスワトソン研究所客員研究員。システム性能評価, マルチメディアシステム, 広帯域通信網, ネットワーク管理に関する研究に従事。平 2 本会論文章受賞。IEEE, 情報処理学会会員。