

品質保証型帯域共有サービスの導入効果 — 経済的フィジビリティの検証 —

塩田茂雄
千葉大学

佐藤大輔
NTT

山本尚生
武蔵工業大学

(受理 2001年3月7日；再受理 2003年4月8日)

和文概要 本論文では、契約した帯域をユーザに固定的に割り当てる「帯域占有サービス」に代えて、ユーザに一定の品質を保証しつつ、共通の帯域リソースを複数のユーザ間で共有する「(品質保証型)帯域共有サービス」を導入することにより、ユーザとネットワーク事業者それぞれに経済的メリットが発生するような「帯域共有サービス」の料金形態について分析する。特に、「帯域占有サービス」では契約帯域が x のユーザに単位時間当たり $f(x)$ の料金が課せられ、一方、「帯域共有サービス」では平均使用帯域が x のユーザに単位時間当たり $g(x)$ の料金が課せられるケースを想定し、ユーザとネットワーク事業者それぞれに経済的メリットが発生するための、 $f(x)$ と $g(x)$ に関する十分条件を導く。更に、得られた条件と現在の(帯域占有型)専用線の料金体系の特徴を考慮した、「帯域共有サービス」の具体的な料金関数策定手順を提案する。

キーワード: 通信, インターネット, 品質, 専用線, 料金, 統計多重

1. はじめに

情報技術 (Information Technology: IT) への関心の高まり, 企業ネットワークの広域化/広帯域化, インターネットの利用拡大, 多彩なサービスの登場と料金の低廉化等の要因により専用線需要は近年大幅に拡大している。従来の専用線は企業の基幹回線としてプライベートネットワークのバックボーンに使われることが多かったが, 近年はインターネットサービスプロバイダー (Internet Service Provider: ISP) とエンドユーザ間の回線, ISP 内のバックボーン回線, 企業間エクストラネットの回線, IP-VPN へのアクセス回線としての需要もあり, その使われ方は多様化している。

従来の専用線の一般的なサービス形態は, ユーザとネットワーク事業者間で事前に固定的な帯域を契約し, ユーザは契約帯域を占有して通信を行うものである。通常, トラヒック需要は時間帯で変わり得るため (例えば, 企業ユーザのトラヒックは昼間が高く夜間は低い), このサービス形態ではトラヒック需要が最も高い時間帯 (最繁時間帯) の通信が阻害されないよう, ユーザは最繁時間帯のトラヒック量ベースで帯域を契約しなければならない。従って, トラヒック需要が低い時間帯では契約帯域の大部分が使われずに無駄となる。また, 契約時点で今後発生するトラヒック量が予想しにくい場合には, 契約帯域と実際のトラヒック量に乖離が生じやすい。実際のトラヒック量が少なければ, ユーザにとっては不必要に大きい帯域を契約して無駄に料金を払う結果となり, 逆のケースではスループットの低下といった品質劣化を引き起こし, 業務に支障をきたす。一方, 企業毎に最繁日/最繁時は一般に異なるが, ユーザに固定的に帯域が割り当てられるサービス形態では, ユーザ間で帯域を融通

し合い帯域リソースを有効活用することができず、その意味でネットワーク事業者にとっても不利益が発生し、更には社会的な資源の利用形態としても不経済なことになる。

このような事情を勘案すると、従来の専用線サービスのようにユーザが固定的に帯域を占有できる「帯域占有サービス」が必ずしも好ましいサービス形態とは言えない。むしろ、固定的に帯域を各ユーザに割り当てず、共通の帯域リソースをユーザ間で共有する「帯域共有サービス」の方が、ユーザとネットワーク事業者双方にとってより好ましい選択肢となる可能性がある。実際、インターネットやIP-VPNへの廉価なアクセス回線として近年相次いで登場した「ブロードバンドアクセスサービス」（例えば、NTTの「フレッツISDN/ADSL, Bフレッツ」、Yahooの「Yahoo BB」等）は全て帯域共有型のサービスである。これら帯域共有サービスは、必ずしも通信品質が保証されないベストエフォート型のサービスであるが、ATMの品質保証機能[21]を活用することにより、もしくはIntserv技術[4, 5, 25]やDiffserv技術[3, 11, 12]等を用いて特定の packets 流が優先的にアクセスできる帯域リソースをIPネットワーク内に確保することで、帯域共有サービスにおいても一定の品質を保証する技術の実用化検討が進められており[9, 16, 18, 26]、一部の通信事業者は企業向けの品質保証型のブロードバンドアクセスサービスを開始している[23]。

従来の帯域占有サービスでは、ユーザは最繁忙時間帯のトラヒック量見合いで帯域を契約するため、トラヒック量のピーク値ベースでの課金となる。従って、帯域共有サービスでは平均トラヒック量に応じて課金が行われるとすれば、帯域占有サービスよりも帯域共有サービスの方がユーザの料金負担は少ない。つまり、品質面で大きな差が無ければ、ユーザにとっては帯域共有サービスの方がコストパフォーマンスの優れたサービスである。一方、ネットワーク事業者側から見ると、帯域共有サービスでは各ユーザの料金負担が少ないため、その分、収入が減るが、統計多重効果により同じ設備量（帯域リソース）でより多くのユーザを収容できる、という意味での増収効果がある。従って、この両者のトレードオフでネットワーク事業者にとって帯域共有サービスが有利な選択肢であるか否かが決まる。

本論文は、上記の視点に立って、品質保証型帯域共有サービスの導入が、ユーザ/ネットワーク事業者双方にコストメリットを生むような帯域共有サービスの料金形態について分析し、帯域共有サービスの料金策定における簡便な指針を得ることを目的とするものである。一般に、通信サービスの導入に伴うコストメリットはユーザのトラヒック特性、要求品質レベル、事業者側で用意する設備量等に依存するが、例えばユーザのトラヒック特性を事前把握することは実際には困難であり、従って通常の問題設定では実際の料金策定に利用できる汎用的な結果を得ることは難しい。本論文ではユーザのトラヒック特性が以下の2つのタイプ

- － 共用帯域リソースが十分大きければ、平均トラヒック量ベースでの多重化が可能*
- － 共用帯域リソースが十分大きくとも、平均トラヒック量ベースでの多重化が不可能に分類できることに着目し、タイプ別にユーザ/ネットワーク事業者双方がコストメリットを得るような料金関数が満たすべき条件を導く。その結果、特に前者の場合、ユーザトラヒックに比して共通帯域リソースが十分大きく[†]、従って平均トラヒック量ベースでの多重

*本論文では、共有する帯域リソース w の最大利用可能ユーザ数を $n_{sh}(w)$ としたとき、 $w/n_{sh}(w)$ が $w \rightarrow \infty$ の極限でユーザの平均トラヒック量に収束する場合、「平均トラヒック量ベースでの多重化が可能」と呼ぶ。

[†]現在、最も利用ユーザ数の多いのは、NTTの「高速デジタル専用線」、「デジタルアクセスサービス」、「フレッツADSL」等の契約帯域が数Mbps以下の専用線である。一方、事業者の基幹網は波長多重方式を採用しており、1波長で数十ギガ程度の帯域が確保できる。つまり、各波長をそれぞれ共用帯域として利用すれば、

化が可能であれば、ユーザのトラヒック特性や要求品質に依存しない単純なコストメリット発生条件が得られることを示す。更に、この結果を利用し、現在の専用線サービスの料金体系の特徴を考慮した、帯域共有サービスの具体的な料金関数設定手順を提案する。なお、「平均トラヒック量ベースでの多重化の可否」は、ユーザトラヒック間の相関特性に強く依存するが、従来、通信トラヒック分野において、この「ユーザトラヒック間の相関」を陽に考慮した研究例は少ない。本論文は「ユーザトラヒック間の相関」の重要性に着目し、「平均トラヒック量ベースでの多重化の可否」と「ユーザトラヒック間の相関特性」の数学的関係を同時に明らかにする。

なお、ネットワークオークションや電子商取引のようにインターネットを利用した経済活動が活発化するにつれ、コンピュータサイエンス、OR、経済学の分野で特にオークションや動的プライシングに関する研究が近年活発化している [1, 7, 8, 10, 14, 17, 20]。しかし、本論文のように帯域共有サービスの経済効果を帯域占有サービスと比較するという視点からの研究は行われていない。

本論文の構成は以下の通りである。まず2章で、本論文で用いる評価モデルを説明する。ここでは、料金関数と統計多重効果の関係が考慮できる最も簡易なモデルである1リンクモデルを採用する。次いで3章で品質保証型帯域共有サービスの導入がユーザにとってコストメリットを生むための料金関数の十分条件を分析する。4章ではネットワーク事業者にとって品質保証型帯域共有サービスの導入がコストメリットを生むための条件を議論する。5章では、3章及び4章で得られた結果を用いて、帯域占有型サービスの料金関数が既知の場合に、帯域共有サービスの料金関数を定める具体的な手順を提案する。最後に、6章で現在のデジタル専用線及びATM専用線の料金体系を調査し、これに代わる品質保証型帯域共有サービスを導入する場合の料金関数の策定例を示すとともに、帯域共有サービスの導入に伴うユーザ/ネットワーク事業者双方のコストメリットを評価する。

2. 帯域占有サービスと帯域共有サービス

本稿では、通信開始に先だってユーザとネットワーク事業者間で固定的な帯域を契約し、ユーザは契約帯域を占有できるサービス形態を帯域占有サービスと定義する。電話や映像配信サービスのようなストリーミング型の通信には帯域占有サービスは好適であるが、Webページ閲覧 (HTTP)、電子メール送受信 (SMTP/POP3)、ファイル転送 (FTP) のように転送すべきトラヒック量がバースト的な場合には、帯域占有サービスでは帯域に無駄が生じやすく、またトラヒック量の変動特性が予測できない場合には適切な帯域契約値を定めることは難しい。

一方、帯域共有サービスとは、共通の帯域リソースを複数のユーザ間で共有するサービス形態である。このサービス形態では、トラヒックがバースト的に発生する通信の場合、通信料が平均使用帯域ベースで決定されれば、ユーザの負担する料金は帯域占有サービスに比べて少ない。また、ネットワーク事業者にとっても、統計多重効果により、同じ設備量でより多くのユーザにサービス提供が可能であるという利点がある。事実、1章で述べたように、ここ数年に登場したブロードバンドアクセスサービスの大半は帯域共有型であるが、これらは従来の帯域占有サービスに比べて通信料金が格安であることから、その需要は帯域占有サービスを凌ぐ勢いで急増している [23]。

共用帯域に 10^4 程度のユーザを収容できることになる。その意味で、「ユーザトラヒックに比して共通帯域リソースが十分大きい」という仮定は充分妥当である。

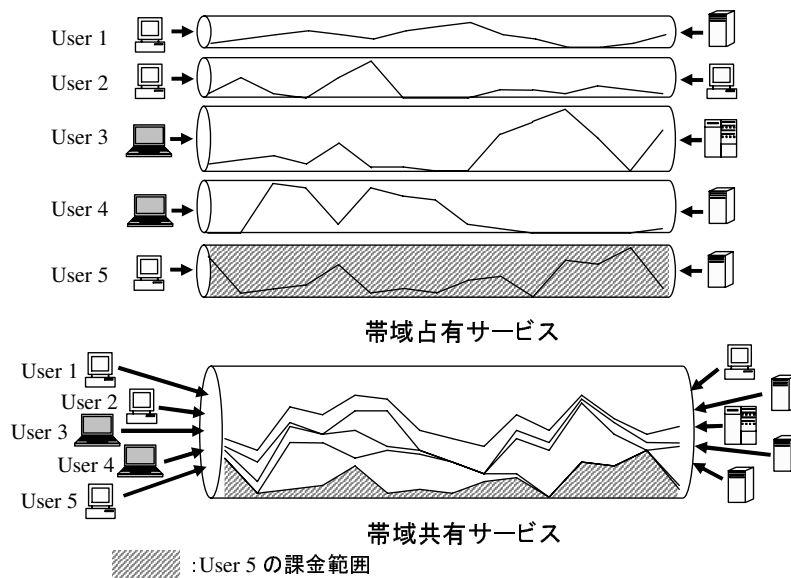


図 1: 帯域占有サービスと帯域共有サービス

以下では、帯域占有サービスと品質保証型帯域共有サービスの経済効果を分析するために本論文で採用するモデルを述べる。まず、インターネットに代表されるパケットネットワークの品質劣化は、通信経路上のネットワーク装置（ルータ等）でパケットが待たされることに伴う遅延、遅延時間のゆらぎ、またはネットワーク装置のバッファ溢れによるパケット損失等により引き起こされるが、これらはいずれも、ネットワークリソースを上回る量の情報（トラヒック）が瞬間的に加わることにより生じるものである。従って、本論文ではこの根本的な原因となっている現象で品質を表現することとし、「端末から送信された情報量（トラヒック量）がネットワークリソース（帯域）を上回る確率」により「品質」を評価することとする。さらに、分析を行うにあたり、以下の1リンクモデルを採用する。

[通信設備、トラヒック需要に関する前提条件]

- (1) ネットワーク事業者は拠点 A, B 間に通信設備を敷設してトータル w の帯域を確保し、これにより帯域占有サービスもしくは帯域共有サービスを提供する。
- (2) ユーザ i ($= 1, 2, \dots$) の拠点 A, B 間のトラヒック量 $X_i(t)$ (単位時間あたりのビット量) は確率的に変動する。 $X_i(t)$ は定常かつエルゴードとする。更に、 t を任意に固定したとき $X_i(t)$ は全ての i について同一の分布を持つとする。

[帯域占有サービスに関する前提条件]

- (3) 帯域占有サービスにおける各ユーザの契約帯域 c は以下で与えられるとする。

$$c = \inf\{y; P[X_i(t) > y] \leq q\}.$$

つまり、トラヒック量 X_i が契約帯域 c を上回る確率が q 以下であるように各ユーザは帯域を契約する。なお、 $E[X] \leq c$ とする[‡]。

(注：仮定(2)より、 c は t と i に依らない値となる。また X_i の期待値も i に依らない値になるため、その期待値は $E[X]$ のように添え字 i を省いて表す。)

[‡]仮に、 $E[X] > c$ ならば、およそ 50%以上の確率で、トラヒック量 X がネットワークリソース c を上回ることになる。これは、通常、許容できる品質レベルではないため、 $E[X] \leq c$ を前提とする。

- (4) ネットワーク事業者が収容できる帯域占有サービスユーザ数の上限 $n_{de}(w)$ は

$$n_{de}(w) = \lceil w/c \rceil,$$

で与えられる ($\lceil x \rceil$ は x を超えない最大の整数を表す).

- (5) ユーザが帯域 c を占有して帯域占有サービスを利用する場合の単位時間当りの料金は $f(c)$ に等しいとする. $f(x)$ は左連続な増加関数とする[§].

[帯域共有サービスに関する前提条件]

- (6) ネットワーク事業者が収容できる帯域共有サービスユーザ数の上限 $n_{sh}(w)$ は

$$n_{sh}(w) = \max\{n; P[\sum_{i=1}^n X_i > w] \leq q\}, \quad (1)$$

で与えられる. つまり帯域共有サービスでは, ユーザの総トラヒック量 $\sum_{i=1}^n X_i$ が用意した帯域リソース w を越える確率が q 以下に収まるように (つまり $P[\sum_{i=1}^n X_i \geq w] \leq q$ が満たされるように) 事業者はユーザ数を制限する.

- (7) ユーザ i が帯域共有サービスを時刻 0 から t_{hold} まで利用する場合の単位時間当りの料金は $g(\hat{X}_i(t_{hold}))$ で与えられるとする. ここで

$$\hat{X}_i(t_{hold}) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{1}{t_{hold}} \int_0^{t_{hold}} X_i(s) ds.$$

つまり, 帯域共有サービスでは, 通信時間内の平均使用帯域 $\hat{X}_i(t_{hold})$ ベースで課金が行われる一種の従量課金制を用いる. $g(x)$ も左連続な増加関数とする.

注 2.1. 式 (1) で利用した品質尺度 $P[\sum_{i=1}^n X_i > w]$ はシステムが輻輳状態にある時間割合 (総トラヒック量が帯域リソースを越える時間割合) に相当し, 個々のユーザが実感する品質とは異なる [13]. 例えば, 総トラヒック量が帯域リソースを越えている時間帯に, たまたまトラヒックを送信していないユーザがいたならば, システムとしては輻輳状態にあったとしても, そのユーザの実感品質は損なわれない. ただし, ユーザ実感品質をより正確に表現する品質評価尺度として

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P[\sum_{j=1}^i X_j > w],$$

等を用いたとしても, 本論文の結論は本質的に変わらないため, 本論文ではより簡易な式 (1) の品質評価尺度を用いる.

注 2.2. 従量課金制として (7) で述べたモデルの他に, 帯域共有サービスの利用料を $\int_0^{t_{hold}} g(X_i(s)) ds$ で定める方法も考えられるが, この場合, 通信事業者はトラヒックデータ収集の際に実時間で積分を実行してその結果を保持するか, 単位時間当たりのトラヒック量のログデータを保持する必要がある. 特に後者の場合, データの保持・管理に多くの稼働がかかることを考え, 本論文ではより簡易な (7) のモデルを採用した ((7) のモデルでは, 通信事業者は各ユーザの総トラヒック量と通話時間のみ管理すれば良い). なお, 現実には従量課金制として, 例えばトラヒック量の上位 95% 値 $X_i^{0.95}(t_{hold})$ を測定し, $g(X_i^{0.95}(t_{hold}))$ の値で課金する方法等が採用されている [27].

[§]現在の多くの専用線は, 契約可能な帯域がいくつかのとびとびの値 (64kbps, 128kbps, 384kbps 等) に限定され, 各ユーザは必要な帯域を上回る契約可能帯域の最小値で実際の契約を行うため, 料金関数は実質的に左連続である.

3. ユーザメリット発生条件

ユーザメリットが生ずる条件，つまり帯域共有サービスの単位時間当りの料金 $g(\hat{X}_i(t_{hold}))$ が，帯域占有サービスの単位時間当りの料金 $f(c)$ より安くなる十分条件は

$$g(E[X]+) \stackrel{\text{def}}{=} \lim_{x \searrow E[X]} g(x) \leq f(c), \quad (2)$$

で与えられる。実際，エルゴード性より

$$\lim_{t_{hold} \rightarrow \infty} \hat{X}_i(t_{hold}) = \lim_{t_{hold} \rightarrow \infty} \frac{1}{t_{hold}} \int_0^{t_{hold}} X_i(s) ds = E[X] \quad w.p.1,$$

が成立することと，料金関数 $g(x)$ は左連続で増加関数であることより，

$$\limsup_{t_{hold} \rightarrow \infty} g(\hat{X}_i(t_{hold})) \leq g(E[X]+) \leq f(c) \quad w.p.1,$$

となる。つまり，式(2)が満たされれば，充分長時間使用することにより帯域占有サービスよりも帯域共有サービスが確実に割安となる。なお， $E[X] \leq c$ より，

$$g(x) \text{ が連続関数，かつ } g(x) \leq f(x), \quad (3)$$

ならば，式(2)は自動的に成立する。式(3)は $f(x)$ と $g(x)$ の関数形のみに依存し，ユーザトラヒックの確率特性やユーザの要求品質には非依存であるため，帯域共有サービスの料金関数の策定の際の目安となりうるものであり，実用的な関係式を提供している。以下では式(3)の条件を「ユーザメリット発生条件」と呼ぶ。

4. ネットワーク事業者メリット発生条件

4.1. ユーザトラヒック間の相関特性と多重化効果との関係

次にネットワーク事業者サイドから見た両サービスのコストメリットを比較する。まず準備として，ユーザのトラヒック需要間の相関に関する二つの概念を導入する。

定義 4.1.

$$\frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \rightarrow E[X] \quad \text{in probability as } n \rightarrow \infty, \quad (4)$$

が成立するとき， $\{X_i\}$ は弱相関条件を満足すると呼ぶ。

定義 4.2. \mathbb{R} 上の確率変数 $Z (\neq 0)$ が存在し，

$$\frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \Rightarrow Z + E[X] \quad \text{as } n \rightarrow \infty, \quad (5)$$

が成立するとき， $\{X_i\}$ は強相関条件を満足すると呼ぶ (\Rightarrow は弱収束を表す [2])。

例えば， $\{X_i\}$ が独立同分布の場合は，($E[X] < \infty$ であれば) 大数の弱法則より式(4)が成立するため，弱相関条件が満足される。また，各ユーザのトラヒック需要が平均 a ，分散 v^2 の同一のガウス分布に従い，ユーザのトラヒック需要間の相関係数[¶]が全て γ に等しい場

[¶]確率変数 X と Y の相関係数 γ は次で定義される。

$$\gamma \stackrel{\text{def}}{=} \frac{E[(X - E[X])(Y - E[Y])]}{\sqrt{E[(X - E[X])^2]} \sqrt{E[(Y - E[Y])^2]}}$$

合, $\sum_{i=1}^n X_i/n$ は平均 a , 分散 $v^2(1+(n-1)\gamma)/n$ のガウス分布に従うから,

$$\frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \Rightarrow v\sqrt{\gamma}N(0,1) + E[X] \quad \text{as } n \rightarrow \infty,$$

が成立する ($N(0,1)$ は標準正規分布). 従って, 強相関条件が成立する.

以下の補題が成立する (証明は付録で示す).

補題 4.1. $\{X_i\}$ が弱相関条件を満たすならば,

$$\lim_{w \rightarrow \infty} \frac{n_{sh}(w)}{w} = \frac{1}{E[X]}.$$

補題 4.2. $\{X_i\}$ が強相関条件を満たすならば,

$$\liminf_{w \rightarrow \infty} \frac{n_{sh}(w)}{w} \geq \frac{1}{E[X] + \alpha}.$$

ここで α は方程式 $I_Z(\alpha) = -\log q$ の正の解であり, $I_Z(x)$ は次式で定義される.

$$I_Z(x) \stackrel{\text{def}}{=} \sup_{\theta} \{\theta x - \log E[e^{\theta Z}]\}.$$

つまり, 補題 4.1 は「ユーザトラヒックが弱相関条件を満たすならば, 平均トラヒック量ベースでの多重化が可能」であることを, 補題 4.2 は「ユーザトラヒックが強相関条件を満たす場合は, 平均利用量よりも割当帯域を少し広くとる必要があり, その際の帯域加算量は Z の確率特性から決定できること」をそれぞれ意味している.

先に示した, 各ユーザのトラヒック需要が平均 a , 分散 v^2 の同一のガウス分布に従う例の場合は

$$I_Z(x) = \frac{x^2}{2v^2\gamma},$$

となる. 従って, α は以下で与えられる.

$$\alpha = \sqrt{2v^2\gamma(-\log q)},$$

帯域占有サービスの場合の契約帯域は, 前提条件 (3) で示したように $P[X \geq c] \leq q$ を満たす最小の c で与えられるが, Chernoff の上限式^{||}により

$$P[X \geq c] \leq \exp\{-I_X(c)\} = \exp\{-(c-a)^2/2v^2\}.$$

従って, $\exp\{-(c-a)^2/2v^2\} \leq q$ が成立すれば, $P[X \geq c] \leq q$ は満たされる. これより

$$c \leq a + \sqrt{2v^2(-\log q)},$$

となる. 従って $0 \leq \gamma \leq 1$ を考慮すると, 常に $E[X](=a) + \alpha \leq c$ である.

^{||}Chernoff の上限式 [15]: 確率変数 X が W 以上である確率 $P[X \geq W]$ は以下のように上から評価できる.

$$P[X \geq W] \leq e^{-\theta W} E[e^{\theta X}], \quad \theta \geq 0$$

注 4.1. 補題 4.1 より, X が「裾の長い分布」[24] を持つとしても, ユーザトラヒックが互いに独立であれば, 平均トラヒック量ベースでの帯域割当は可能であることがわかる.

注 4.2. 通信ネットワークの輻輳の多くはルータ等のネットワークノードで発生し, 本論文の品質評価尺度 $P[\sum X_i > w]$ はこの輻輳の発生頻度をバッファレスモデル [13] で評価していることに相当する. ただし, 他の待ち行列モデル (例えば, 無限バッファモデル) では, 補題 4.1, 補題 4.2 は必ずしも成立しない. 例えば, ユーザトラヒックが互いに独立であっても, 各ユーザトラヒックが長期依存性 [22, 24] を有すると, 平均トラヒック量ベースでの多重化が不可能となる場合がある. ただし, トークンバケットのような regulator を通過したトラヒックについては, 少なくとも, 補題 4.1 と同様の結論が導かれる [19].

4.2. ネットワーク事業者メリット発生条件

次を定義する.

$$G_{de}(w) = \frac{n_{de}(w)f(c)}{w},$$

$$G_{sh}(w) = \frac{n_{sh}(w) \lim_{t_{hold} \rightarrow \infty} g(\hat{X}(t_{hold}))}{w}.$$

$G_{de}(w)$ は帯域 w の通信設備を利用して帯域占有サービスを提供する場合の単位帯域単位時間辺りの事業者収入, $G_{sh}(w)$ は (ユーザのサービス利用時間が十分長いとき) 帯域 w の通信設備を利用して帯域共有サービスを提供する場合の単位帯域単位時間辺りの事業者収入を表す. 以下, $G_{de}(w)$ と $G_{sh}(w)$ の大小関係を, 両サービスの経済メリットを比較する上で目安として用いる.

4.2.1 ユーザトラヒックが弱相関条件を満たす場合

この場合, $g(E[X])/E[X] \geq f(c)/c$ が満たされれば, 事業者側で用意する帯域リソースが (ユーザ 1 人当りのトラヒック量より) 充分大きい場合, 帯域共有サービスの導入によるコストメリットが事業者側にも発生する. 何故ならば,

$$\lim_{w \rightarrow \infty} G_{de}(w) = \lim_{w \rightarrow \infty} \frac{[w/c]f(c)}{w} = \frac{f(c)}{c},$$

であるが, 補題 4.1 と $g(x)$ が左連続であることより

$$\begin{aligned} \lim_{w \rightarrow \infty} G_{sh}(w) &= \lim_{w \rightarrow \infty} \lim_{t_{hold} \rightarrow \infty} \frac{n_{sh}(w)}{w} g(\hat{X}(t_{hold})) \\ &= \lim_{t_{hold} \rightarrow \infty} \frac{g(\hat{X}(t_{hold}))}{E[X]} \\ &\geq \frac{g(E[X])}{E[X]} \quad w.p.1. \end{aligned}$$

従って

$$\lim_{w \rightarrow \infty} G_{de}(w) \leq \lim_{w \rightarrow \infty} G_{sh}(w) \quad w.p.1,$$

が成立するからである. なお, $E[X] \leq c$ より,

$$g(x)/x \text{ が減少関数, かつ } f(x) \leq g(x), \quad (6)$$

ならば, $g(E[X])/E[X] \geq f(c)/c$ は自動的に成立する. 式 (6) は (式 (3) と同様に) $f(x)$ と $g(x)$ の関数形のみ依存し, ユーザトラヒックの確率特性やユーザの要求品質には非依存であるため, 帯域共有サービスの料金関数の策定の際の目安を与える. 以下では式 (6) の条件を「事業者メリット発生条件」と呼ぶこととする.

4.2..2 ユーザトラヒックが強相関条件を満たす場合

この場合,

$$g(E[X])/(E[X] + \alpha) \geq f(c)/c, \quad (7)$$

が満たされれば, 事業者側で用意する帯域リソースが充分大きい場合, 帯域共有サービスの導入によるコストメリットが事業者側にも発生する. 何故ならば,

$$\lim_{w \rightarrow \infty} G_{de}(w) = \lim_{w \rightarrow \infty} \frac{[w/c]f(c)}{w} = \frac{f(c)}{c}.$$

一方, 補題 4.2 と $g(x)$ が左連続であることより

$$\begin{aligned} \liminf_{w \rightarrow \infty} G_{sh}(w) &= \liminf_{w \rightarrow \infty} \lim_{t_{hold} \rightarrow \infty} \frac{n_{sh}(w)}{w} g(\hat{X}(t_{hold})) \\ &\geq \lim_{t_{hold} \rightarrow \infty} \frac{g(\hat{X}(t_{hold}))}{E[X] + \alpha} \\ &\geq \frac{g(E[X])}{E[X] + \alpha} \quad w.p.1. \end{aligned}$$

従って

$$\lim_{w \rightarrow \infty} G_{de}(w) \leq \lim_{w \rightarrow \infty} G_{sh}(w) \quad w.p.1,$$

が成立するからである. なお $g(E[X])/(E[X] + \alpha) \geq f(c)/c$ は式 (6) のような単純な条件への置き換えはできない. ユーザが品質基準 q で使うための帯域 c の大きさはユーザトラヒックの確率特性やユーザの要求品質に依存し, α はこれに加えてユーザトラヒック間の相関特性にも依存するため, 事業者サイドのコストメリットの発生の有無はこれらを全て勘案して評価する必要がある.

5. 帯域共有サービスの料金関数設定手順

本章では, 4章までの結論を踏まえ, 帯域占有サービスの料金関数 $f(x)$ が既知の場合に, 帯域共有サービスの料金関数 $g(x)$ を設定するための1手順を示す.

6章で示すように, 現在の専用線サービス(帯域占有サービス)の料金関数は左連続な階段関数であり, その近似連続曲線 $f_{app}(x)$ を求めると, $f_{app}(x)/x$ は一般に単調減少関数となる. そこで, $g(x) \stackrel{\text{def}}{=} g_0 + f_{app}(x)$ とおいて, $f(x) \geq g(x)$ を満たすように g_0 を調整すれば, $g(x)$ は3章で示した「ユーザメリット発生条件」(式(3))を満たす. 一方, $f(x) \leq g(x)$ を満たすように g_0 を調整すれば, $g(x)$ は4章で示した「事業者メリット発生条件」(式(6))を満たすことになる. この様子を図2に示す.

図2からわかるように, ユーザコストメリットと事業者コストメリットはトレードオフの関係にあり, 「ユーザメリット発生条件」を満たす帯域共有サービス料金関数群と「事業者メリット発生条件」を満たす帯域共有サービス料金関数群は重ならない. 更に, どちらにも属さない中間的な料金関数群が存在し(図2のハッチング部分), この料金関数群の場合, ユーザメリット及び事業者メリットが得られるか否かはユーザトラヒックの確率特性やユーザの要求品質に依存する.

なお, 6章で示すように, 「事業者メリット発生条件」を満たすように料金関数 $g(x)$ を設定すると, 基本料に相当する $g(0)$ の値が大きすぎて, 現実的な料金設定にならないことが多い. 一方, 「ユーザメリット発生条件」を満たすように料金関数 $g(x)$ を設定すると, 基本

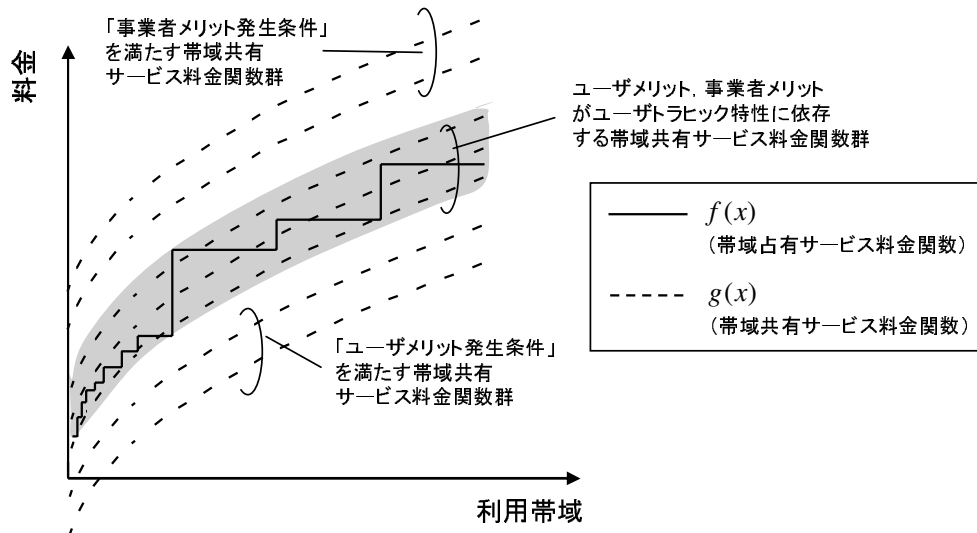


図 2: 料金関数とユーザ/事業者メリット発生条件の関係

料に相当する $g(0)$ が負の値となる。従って、実際の料金関数は、その中間の料金関数群の中から、選択するのが適当である。更に、「事業者メリット発生条件」(式(6))はあくまで、弱相関条件が成立する場合において、事業者コストメリットが発生するための十分条件を示すものであり、弱相関条件が成立しない場合(強相関条件が成立する場合)は、式(6)は事業者コストメリットが発生するための十分条件とはならない。従って、具体的に料金関数を選択した上で、強相関条件が成立する場合を想定し、ユーザトラフィック間の相関係数を仮定して、事業者コストメリットの発生の有無を式(7)により分析する手順を踏むことも必要である。

以下、簡単に、帯域共有サービスの料金関数設定手順をまとめる。

1. 帯域占有型専用線の料金関数の連続近似関数 $f_{app}(x)$ を求める。
2. 帯域共有サービスの料金関数を $g(x) \stackrel{\text{def}}{=} f_{app}(x) + g_0$ で与え、基本料に相当する $g(0)$ の値がユーザにとって割安感が残るように、 g_0 の値を調整する。
3. (帯域共有サービスを提供するための専用設備の構築、運用費用などが回収できる程度以上の) 事業者コストメリットが得られているかを、ユーザトラフィックの確率特性やユーザの要求品質に基づいて式(7)の成立可否を数値的に調べることで確認する。

注 5..1. 上で述べた手順を適用する上では、 $f_{app}(x)/x$ が減少関数となるような連続近似関数 $f_{app}(x)$ を帯域占有型サービスの料金関数が有していることが本質的である。現在の(帯域占有型)専用線の料金関数の多くは6章で示されるようにこの条件を満たしており、その意味で、帯域共有サービスを導入しやすい条件が整っているといえる。

注 5..2. 式(7)の成立可否は Z の確率特性(分布)に依存するが、 Z の分布は $\{X_1, X_2, \dots\}$ の同時確率分布から決まり、また $\{X_1, X_2, \dots\}$ の同時確率分布を正確に同定することは困難である。従って、実際の手順としては、 X がガウス分布に従うと仮定し、更にこの仮定のもとでは、4.1章で述べたように、おおむね

$$c = a + \sqrt{2v^2(-\log q)}, \quad \alpha = \sqrt{2v^2\gamma(-\log q)}$$

が成立することを用いて、ユーザトラフィックの平均 (a)、分散 (v^2) および相関係数 (γ) か

ら式(7)の成立の可否を判断するのが適当と思われる。6.2章の数値例ではこの手法で式(7)の成立可否を調べている。

6. 分析例

6.1. 各種専用線の料金体系

本章では実際の各種専用線の料金体系を調べ、帯域共有サービス導入時の効果を分析する。まず分析対象として、NTT東日本の「高速デジタル専用線」(0.064Mbps~6Mbps) [28]を選ぶ。図3は「高速デジタル専用線」(0~15km)の月額料金関数 $f(x)$ の形状を示したものである。同図には、 $f_{appr}(x) = 289.1x^{1/2.055}$ (千円)の形状も併せて示した。

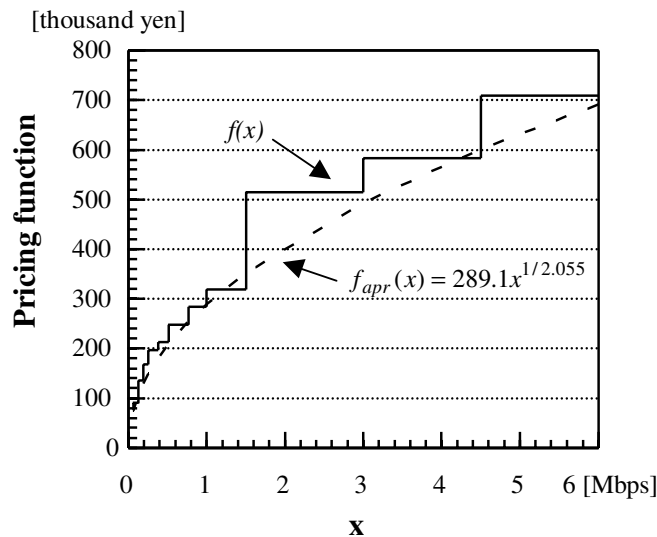


図 3: 高速デジタル専用線の利用料

図3より、 $f_{appr}(x)$ は $f(x)$ の良い近似関数であることが確認できる。今、帯域共有サービスの料金関数 $g(x)$ を

$$g(x) = f_{appr}(x) - 18.0 = 289.1x^{1/2.055} - 18.0 \text{ (千円)}$$

で与えると、全領域で $g(x) \leq f(x)$ が成立するから、 $f(x)$ と $g(x)$ は「ユーザメリット発生条件」(式(3))を満たすが、基本料が負の値(-18000円)となる。一方、

$$g(x) = f_{appr}(x) + 162.8 = 289.1x^{1/2.055} + 162.8 \text{ (千円)}$$

で与えると、全領域で $f(x) \leq g(x)$ が成立し、かつ $g(x)/x$ は減少関数であるから、 $f(x)$ と $g(x)$ は「事業者メリット発生条件」(式(6))を満たすが、基本料は162800円と高額になる。従って、 g_0 は0以上162.8(千円)以下の値に設定するのが現実的と思われる。

NTT東日本は高速デジタル専用線より安価な(故障対応グレードが劣る)専用線サービスとして「デジタルアクセス」サービス[28]を提供している。図4はこの「デジタルアクセス」の月額利用料(0~15km)を示したものである。同図には、デジタルアクセスの利用料の近似関数($f_{appr}(x) = 128.3x^{1/1.746}$)も併せて示した。傾向は図3と同様である。この場合は、帯域共有サービスの料金関数を $g(x) = 128.3x^{1/1.746} - 9.8$ (千円)で与えれば、 $g(x)$ と $f(x)$ は「ユーザメリット発生条件」を満たすが、基本料が負の値(-9800円)となる。一

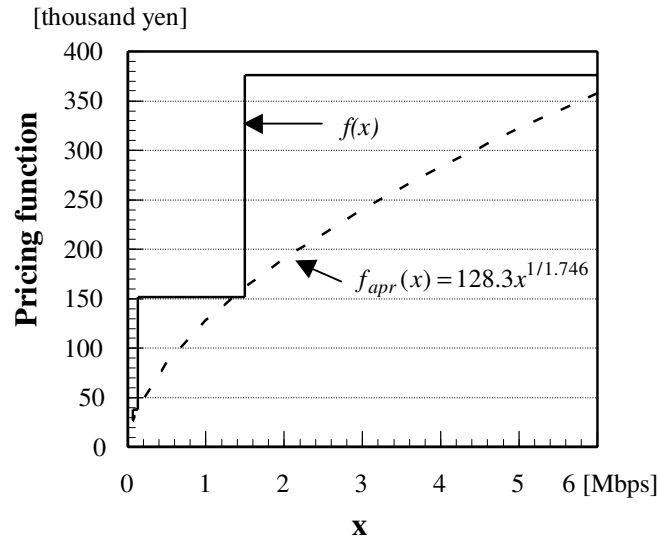


図 4: デジタルアクセスの利用料

方，帯域共有サービスの料金関数を $g(x) = 128.3x^{1/1.746} + 214.2$ (千円) で与えれば， $g(x)$ と $f(x)$ は「事業者メリット発生条件」を満たすが，基本料 (214200 円) が高額である。従って，この場合も g_0 は 0 以上 214.2 以下に設定するのが現実的である。

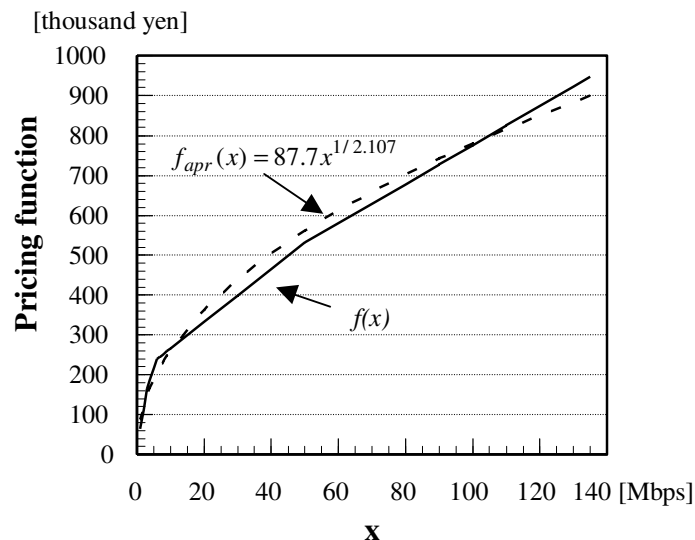


図 5: ATM メガリンクの利用料

最後に NTT 東日本の ATM 専用線「ATM メガリンク」[28] の月額基本回線専用料 $f(x)$ (0~15km；契約帯域が 1~135Mbps の場合のみ表示) を図 5 に示す。この専用線は，先の二つに比べて広帯域であり，契約帯域をほぼ連続的 (1Mbps 単位程度) に設定できる点の特徴である。図 5 より，「ATM メガリンク」の料金関数は $f_{apr}(x) = 87.7x^{1/2.107}$ (千円) で，良く近似できることがわかる。この場合は，帯域共有サービスの料金関数を

$$g(x) = 87.7x^{1/2.107} - 42.2 \text{ (千円)}$$

で与えれば， $g(x)$ と $f(x)$ は「ユーザメリット発生条件」を満たすが，基本料が負の値とな

る。一方、帯域共有サービスの料金関数を

$$g(x) = 87.7x^{1/2.107} + 47.5 \text{ (千円)}$$

で与えれば、 $g(x)$ と $f(x)$ は「事業者メリット発生条件」を満たし、基本料（47500円）も比較的、現実的な額に抑えられる。

6.2. 帯域共有サービスの経済効果

次に、6.1節で示した帯域共有サービスの料金関数の例を基に、ユーザトラヒックが強相関条件を満たすケースを対象として、帯域共有サービスが導入された際のユーザ/事業者双方のコストメリットの有無を分析する。4.2.2章で述べたように、ユーザトラヒックが強相関条件を満たす場合、帯域共有サービスの導入メリットの有無は、ユーザトラヒックの確率特性に依存するが、一般に通信事業者はユーザトラヒックの統計情報を公開していないため、以下ではユーザトラヒックが（平均と分散の二つのパラメタを指定すれば分析でき、汎用的に用いられている）ガウス分布に従うという仮定を置き、そのもとで、ガウス分布のパラメタとユーザトラヒック間の相関係数を振らせて結果を調べる。（なお、ユーザトラヒックが弱相関条件を満たす場合の結果は、以下で相関係数を0とおいた場合の結果に等しい。）

6.2.1 小規模ユーザ

まず、6Mbps以下の契約帯域で高速デジタル専用線を利用する、比較的小規模ユーザを想定する。特に、ユーザトラヒックの平均ビットレートを0.5Mbpsと仮定し、ビットレートの標準偏差と平均の比を0から2.56まで、また相関係数を0から1まで振らせて、ユーザ及び事業者にとっての帯域共有サービスの導入メリットの有無を式(2)及び式(7)の成立可否により判断する。（以下では、品質目標値 q は 10^{-4} に設定した。この場合、ビットレートの標準偏差と平均の比が2.56のケースは帯域占有サービスでの契約帯域 c がおおよそ6Mbpsであるケースに該当する。なお、品質目標値を振らせても、以下で述べる結論は本質的に変わらない。）

図6(a)は帯域共有サービスの料金関数を $g(x) = 289.1x^{1/2.055}$ (千円) と設定した場合の結果である。図の記号はそれぞれ

- ：ユーザ/事業者双方にとって帯域共有サービスが有利（式(2)、及び式(7)が成立）
- ：ユーザにとって帯域共有サービスが有利（式(2)のみ成立）
- ▲：事業者にとって帯域共有サービスが有利（式(7)のみ成立）

を意味している。図6(a)では全ての点でユーザメリットが発生しているが、事業者メリットが発生する領域はユーザ間の相関係数が0の場合にほぼ限られており、この料金設定では帯域共有サービスの導入は事業者に不利となる。一方、図6(b)は（「事業者メリット発生条件」を満たすように）帯域共有サービスの料金関数を $g(x) = 289.1x^{1/2.055} + 162.8$ (千円) と設定した場合の結果である。この場合は、相関係数が0.3以下ならば事業者メリットが発生するが、逆に比較的フラットなトラヒック特性を持つ（分散と平均の比が小さい）ユーザの場合、必ずしもコストメリットが発生しない。さらに、（この料金設定は基本料が高すぎることを考慮し、基本料を1/4にした）以下の料金設定 $g(x) = 289.1x^{1/2.055} + 40.7$ (千円) での結果を図6(c)に示した。この場合は、相関係数が0であれば（つまりユーザトラヒックが独立、もしくは弱相関条件を満たせば）帯域共有サービスの導入は事業者に有利であるが、相関係数が0.2以上での導入は事業者に不利である。一方、完全にフラットなトラヒックを有する（分散が0の）ユーザを除き、ユーザメリットが発生する。このように、ユーザや事

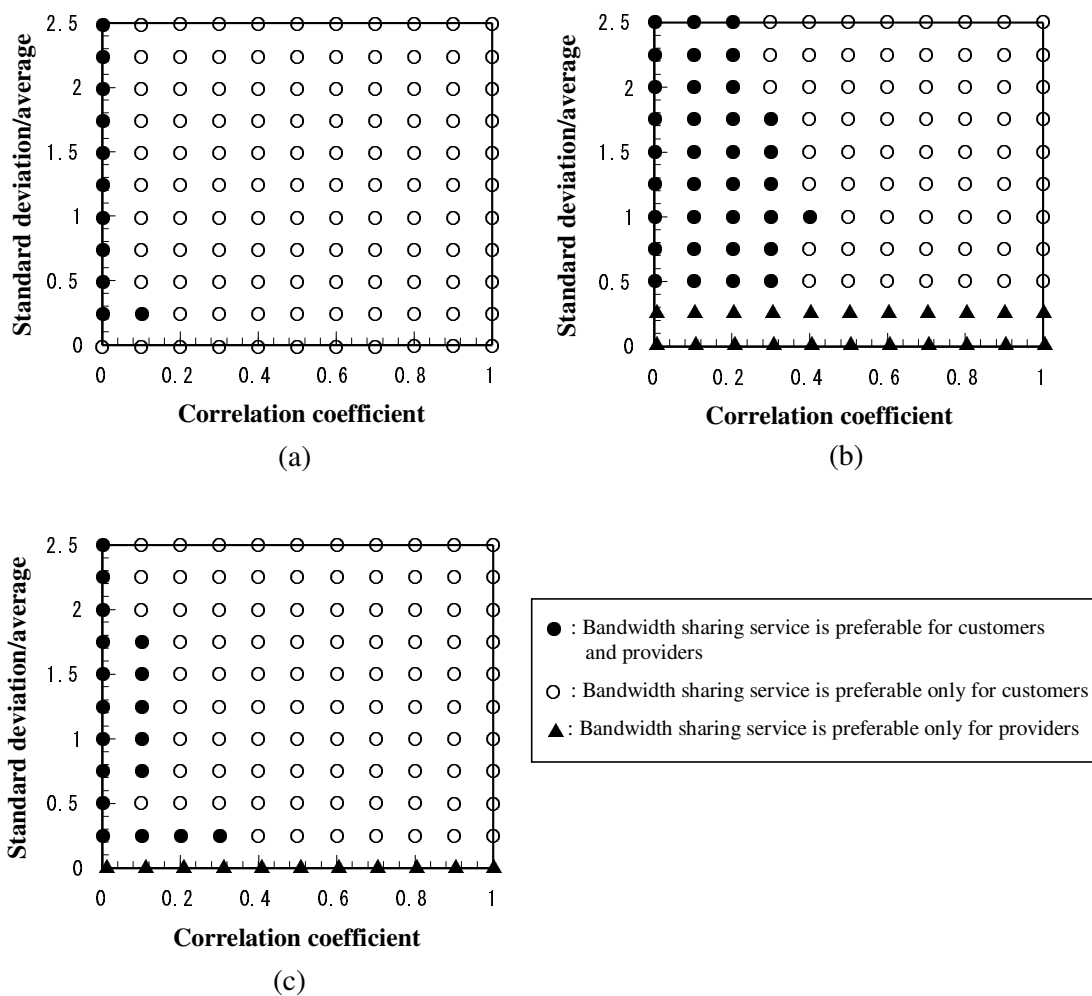


図 6: 帯域共有サービスが有利となる領域

業者のコストメリットが発生する条件は、ユーザトラヒックの相関係数に大きく依存し、帯域共有サービスの導入によるコストメリットを得るためには、相関の大きさを考慮したデリケートな料金設定、あるいは、ユーザトラヒックの収容替え（どのユーザトラヒックをどの共通帯域に割り当てるかの定期的な見直し）が必要である。

6.2.2 大規模ユーザ

ついで、ATMメガリンクを利用する大規模ユーザを想定し、同様の評価を行った。ユーザトラヒックの平均ビットレートを2Mbpsと仮定し（この値は、学術用の広域ATMネットワークで以前トラヒック測定を行った際に、1VPあたりの平均ビットレートがおよそ2Mbpsであったことを考慮したものである）、先と同様に、ビットレートの標準偏差と平均の比を0から2.56まで、また相関係数を0から1まで振らせて、ユーザ及び事業者にとっての帯域共有サービスの導入メリットの有無を式(2)及び式(7)が成立するか否かにより調べた。

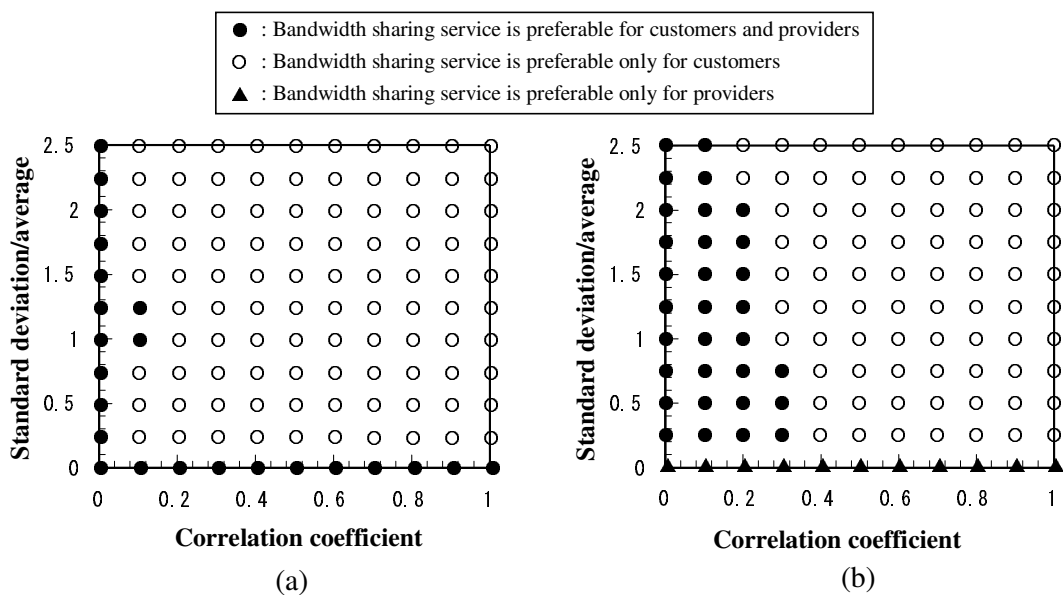


図 7: 帯域共有サービスが有利となる領域

図 7(a) は帯域共有サービスの料金関数を $g(x) = 87.7x^{1/2.107}$ (千円) と設定した場合の結果を、また図 7(b) は「事業者コストメリット発生条件」条件を満たすように料金関数を $g(x) = 87.7x^{1/2.107} + 47.5$ (千円) と設定した場合の結果をそれぞれ表したものである。最初の料金関数の設定では、全ての点でユーザメリットが発生するものの、事業者メリットが発生する領域は、ユーザトラヒック間の相関が小さい場合に限られる。一方、2 番目の設定であれば相関係数が 0.3 程度でも事業者に導入メリットが発生し、完全にフラットなトラヒック特性を有する（分散が 0 の）ユーザを除き、ユーザにとってもコストメリットが得られることになる。

6.3. ブロードバンドアクセスサービスの料金関数分析

最後に、インターネットや IP-VPN への格安の広帯域アクセス回線として注目されている各種ブロードバンドアクセスサービスの中で、特に、NTT 東/西日本の「フレッツ ISDN」、 「フレッツ ADSL」、 「B フレッツ」 [29] をとりあげ、これらの料金設定と 6.1 節で示した帯域共有型サービスの料金関数設定例の比較/分析を試みる。表 1 は、これらサービスの契約帯域と月額料金をまとめたものである。

表 1: ブロードバンドアクセスサービスの月額料金

サービス名	帯域	月額料金
フレッツISDN	64kbps	2800円
フレッツADSL	1.5Mbps(下り)	2900円
フレッツADSL	8Mbps(下り)	3100円
Bフレッツ ファミリータイプ	10Mbps	6100円
Bフレッツ ベーシックタイプ	100Mbps	10100円

(表1における, フレッツ ISDN とフレッツ ADSL の月額料金はそれぞれ ISDN 基本料及び電話基本料を含まない額である. また, B フレッツについては表1に掲げた以外にも様々なメニューがあるが, ここでは代表的なもののみ示した.)

表1に掲げたサービスは, いずれも従量課金制でなく定額料金制を採用している. また, ユーザは帯域を契約する必要があるが, 契約帯域は使用可能帯域の最大値に相当しており, その帯域が常時保証されるものではない(その意味で品質非保証である). 従って, 本論文で検討した品質保証型帯域共有サービスとは前提条件が異なるが, 以下, いくつかの仮定において, 6.1節で紹介した品質保証型帯域共有サービスの料金関数設定例との比較を試みる. まず, 上記ブロードバンドアクセスサービスの各ユーザの平均利用帯域と契約帯域の比(使用率)は ρ とおく. このとき, 契約帯域が x のブロードバンドアクセスサービスユーザの平均利用帯域を ρx に等しい. 今, 帯域共有サービスの料金関数を(デジタル専用線の料金ベースに定めた) $g(x) = 289.1x^{1/2.055}$ (6.1節参照)とおくと, 表1のブロードバンドアクセスサービスにおいて契約帯域が x のユーザが, 本論文で定義する帯域共有サービスを利用した場合の月額料金は $289.1(\rho x)^{1/2.055}$ に等しい. 同様に, 帯域共有サービスの料金関数を(ATM専用線ベースに定めた) $g(x) = 87.7x^{1/2.107}$ (6.1節参照)で与えると, 表1のブロードバンドアクセスサービスにおいて契約帯域が x のユーザが, 本論文で定義する帯域共有サービスを利用した場合の月額料金は $87.7(\rho x)^{1/2.107}$ となる.

図8(a)は $289.1(\rho x)^{1/2.055}$ と実際のブロードバンドアクセスサービスの月額料金を $\rho = 0.001$ 及び $\rho = 0.0001$ の場合で比較したものである. 図8(a)より, いずれの場合も実際のブロードバンドアクセスサービスの料金の方が安い. 図8(b)は $g(x) = 87.7(\rho x)^{1/2.107}$ と実際のブロードバンドアクセスサービスの月額料金を比較したものである. この場合は, ブロードバンドアクセスサービスの月額料金は $\rho = 0.001$ と $\rho = 0.0001$ の中間位に位置する. つまり, 現在のブロードバンドアクセスサービスの利用者の使用率が0.1%~0.01%であるならば, ATMメガリンクの料金関数ベースに定めた帯域共有サービスの料金体系と, 現在のブロードバンドアクセスサービスの料金体系が概ね一致することになる. いいかえれば, 使用率が0.1%~0.01%程度以下のATM専用線ユーザがブロードバンドアクセスサービスに切り替えた場合にのみ, 事業者コストメリットが発生することになる. 「使用率が0.1%~0.01%」は実際のユーザの使用状況をかなり過小評価している可能性が強く, その意味で, 品質非保証であることを考慮しても, 現在のブロードバンドアクセスサービスは極めて格安なサービスであり, ユーザ使用率がこの仮定を上回る場合に, 現在のブロードバンドアクセスサー

ビスは必ずしも事業者に経済的なメリットを生む料金設定とは言い難い。(もしくは、「使用率が0.1%~0.01%」を前提に、現状以上に多くのユーザを多重する必要がある、その場合、品質劣化が避けられない危険性がある。)

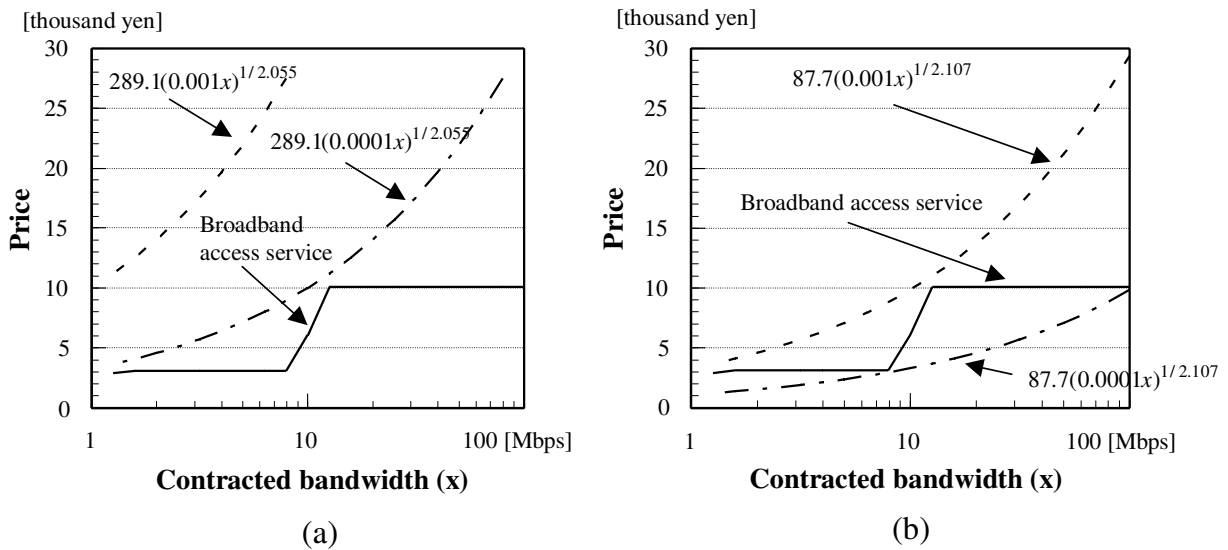


図 8: ブロードバンドアクセスサービスと品質保証型帯域共有サービスの月額料金比較

7. まとめ

本稿では、QoS 技術の進展に伴い今後の需要拡大が見込まれる品質保証型帯域共有サービスが、ユーザ/ネットワーク事業者双方にもたらす経済上のメリットについて分析した。特に、ユーザとネットワーク事業者それぞれにコストメリットが発生するための料金関数に関する十分条件を、ユーザトラフィック特性やユーザ要求品質になるべく非依存な形になるように整理した。また、導いた条件を利用して、帯域占有型サービスの料金関数が既知の場合に、帯域共有サービスの料金関数を定める具体的な手順を提案した。更に、現在の主な帯域占有型専用線サービス（高速デジタル専用線、デジタルアクセス、ATM 専用線）の料金体系を調査し、これらに代わる帯域共有型専用線サービスを導入する場合の料金関数の設定例を示すとともに、導入の際のユーザ/ネットワーク事業者双方のコストメリットの発生の有無を数値的に評価した。

本論文では、帯域共有サービスの料金関数の設定例として、(1) 帯域占有型専用線の料金関数の近似（連続）関数を求め、(2) その近似関数に（帯域共有サービスを提供するための専用設備の構築費用などを見込んだ）基本料相当を加算し、(3) ネットワーク事業者にとってサービス導入メリットが発生し、かつユーザにとって割安感が残るように基本料を調整する、という手順を示したが、これ以外にも料金関数の設定方法は多数考えられる。また本稿の結果は、簡易な 1 リンクモデルによる分析であり、ユーザのトラフィック需要の確率特性が全て同一である、といった仮定に基づいたものである。そのため、必ずしも包括的な結果が得られているわけではないが、本質的な部分は基本的に議論できており、得られた結果は、品質保証型帯域共有サービスの導入の際の経営判断に活用することも充分可能と考える。実際、帯域共有型専用線サービスはまだサービス揺籃期にあり、6.3 章で示したように、必ずしもコストベースの料金には落ち着いていないが、サービスが本格化してそのマーケットも

成熟してくると、本論文で検討したようなコストベースの料金設定がサービスの正常な発展の上で必要となると思われる。

本稿の結果より、特にユーザ間のトラヒック相関が強い場合、品質保証型帯域共有サービスの導入は必ずしも事業者に経済上のメリットを与えないという結論が得られた。但し、まえがきで述べたように、ネットワーク事業者にとっての帯域共有サービスの経済上のメリットとして、帯域共有サービスのようにコストパフォーマンスの優れたサービスを提供することにより、他事業者からユーザを獲得したり潜在的な市場規模を拡大できるという点があり、本論文ではこの点が加味されていないことから、本稿の結論が直ちにトラヒック相関が強い場合における品質保証型帯域共有サービスの経済上のデメリットを意味するものではない。また、市場規模の拡大が利用形態のバラエティーを広げてトラヒック相関の一層の減少を招く可能性も十分に期待できる。今後はこのような市場の反応自体を含めた総合的な分析が必要と考えられる。

また、本稿では、議論の見通しを良くするため、ユーザのトラヒック需要の確率的性質(平均値, 分散など)は全て等しい, つまり1種類のユーザしかいないとしたが, 複数種類のユーザがいる場合への本稿の枠組みの拡張と, その場合の品質保証型帯域共有サービスの導入メリットの分析も今後の課題である。

謝辞

本論文を作成するにあたり, 多数の大変有益なコメントをいただいた査読者の方々に深謝いたします。

参考文献

- [1] A. Andersson, M. Tenhunen, and F. Ygge: Integer Programming for combinatorial auction winner determination. *Proc. of the Fourth International Conference on Multiagent Systems (ICMAS-00)*, (2000) 39–46.
- [2] P. Billingsley: *Convergence of Probability Measure* (Wiley, New York, 1968).
- [3] S. Blake *et al.*: An architecture for differentiated services. *Internet RFC*, **2475** (1998).
- [4] R. Braden, R. Clark, and S. Shenker: Integrated services in the Internet architecture: an overview. *Internet RFC*, **1633** (1994).
- [5] R. Braden, L. Zhang, S. Berson, S. Herzog, and S. Jamin: Resource ReSerVation Protocol (RSVP) – version 1 functional specification. *Internet RFC*, **2205** (1997).
- [6] A. J. Bucklew: *Large Deviation Techniques in Decision, Simulation, and Estimation* (Jones Wiley & Sons, 1990).
- [7] R. Cocchi, S. Shenker, D. Estrin, and L. Zhang: Pricing in computer networks: motivation, formulation, and example. *IEEE/ACM Trans. Networking*, **1** (1993) 614–627.
- [8] C. Courcoubetis, A. Dimaki, and M.I. Reiman: Providing bandwidth guarantees over a best-effort network: call-admission and pricing. *IEEE INFOCOM 2001*, (2001) 459–467.
- [9] P. Ferguson and G. Huston: *Quality of Service: Delivering QoS on the Internet and in Corporate Networks* (John Wiley & Sons, 1999).

- [10] Y. Fujishima, K. Leyton-Brown, and Y. Shoham: Taming the computational complexity of combinatorial auctions: optimal and approximate approaches. *Proc. of the 16th Joint Conference on Artificial Intelligence*, (1999).
- [11] J. Heinanen, T. Finland, F. Baker, W. Weiss, and J. Wroclawski: Assured Forwarding PHB Group. *Internet RFC*, **2597** (1999).
- [12] V. Jacobson, K. Nichols, *et al.*: An expedited Forwarding PHB. *Internet RFC*, **2598** (1999).
- [13] F.P. Kelly: Notes on effective bandwidth. In F.P. Kelly, S. Zachary, and I. Ziedins (eds.): *Stochastic Networks: Theory and Applications*, (Oxford Science Publications, 1996), 141–168.
- [14] F.P. Kelly, A.K. Maullo, and D.K.H. Tan: Rate control in communication networks: shadow prices, proportional fairness and stability. *Journal of the Operation Research Society*, **49** (1998) 237–252.
- [15] L. Kleinrock: *Queueing Systems Volume I: Theory* (Jones and Barlett Publishers, 1975).
- [16] 小泉 稔, 三宅 滋, 平島陽子: ポリシーベースによる QoS 制御 (オーム社, 2001).
- [17] Y. Masuda and S. Whang: Dynamic pricing for network service: equilibrium and stability. *Management Science*, **45–6** (1999) 857–869.
- [18] 三宅 功, 井上 一郎: 広域 IP ネットワーク技術の展望と標準化. 電子情報通信学会誌, **4** (2000) 263–275.
- [19] 中村 究, 塩田 茂雄: レギュレータ透過型トラヒックに関する多重化特性. 電子情報通信学会 技術研究報告, **IN-2003-31** (2003) 41–46.
- [20] M.H. Rothkopf, A. Pekec, and R.M. Harstad: Computationally manageable combinatorial auctions. *Management Science*, **44** (1998) 1131–1147.
- [21] H. Saito: *Teletraffic Technologies in ATM Networks* (Artech House, Boston, 1994).
- [22] 佐藤昌平, 吉田万貴子: 次世代インターネットとトラヒック工学. 電子情報通信学会論文誌, **J85–B–6** (2002) 875–889.
- [23] 杉山 泰一, 中川 ヒロミ, 島津 忠承, 閑歳 孝子: 2002～2003年の企業ネットを読む. 日経コミュニケーション 1月7日号, (2002) 263–275.
- [24] 滝根哲哉: 通信トラヒック理論における最近の話題—裾野の長い分布を要素に持つモデル—. 電子情報通信学会 第15回 回路とシステムワークショップ, (2002) 317–322.
- [25] P. White: RSVP and integrated services in the Internet: a tutorial. *IEEE Commun. Mag.*, **34** (1997) 100–106.
- [26] 横井弘文, 山本尚生: 次世代専用線ネットワークにおけるサービス品質考慮型展開. 電子情報通信学会 春季総合大会, **B–7–100** (2001).
- [27] 例えば http://www.jens.co.jp/mis_eth/price.html.
- [28] <http://www.ntt-east.co.jp/senyo/service/>.
- [29] http://www.ntt-east.co.jp/flets/index_f.html.

付録

以下では、本文において使用した二つの補題を証明する。

補題 4.1. $\{X_i\}$ が弱相関条件を満たすならば,

$$\lim_{w \rightarrow \infty} \frac{n_{sh}(w)}{w} = \frac{1}{E[X]}.$$

Proof. 次を定義する.

$$N(w) \stackrel{\text{def}}{=} \max\{n; \sum_{i=1}^n X_i \leq w\}.$$

$\{X_i\}$ が弱相関条件を満たすことから, 任意の $\epsilon > 0$ について,

$$\begin{aligned} P\left[\frac{N(w)}{w} \geq \frac{1}{E[X]} + \epsilon\right] &= P\left[\sum_{i=1}^{\lceil (1/E[X] + \epsilon)w \rceil} X_i \leq w\right] \rightarrow 0 \quad \text{as } w \rightarrow \infty, \\ P\left[\frac{N(w)}{w} < \frac{1}{E[X]} - \epsilon\right] &= P\left[\sum_{i=1}^{\lceil (1/E[X] - \epsilon)w \rceil} X_i > w\right] \rightarrow 0 \quad \text{as } w \rightarrow \infty, \end{aligned}$$

従って,

$$\frac{N(w)}{w} \rightarrow \frac{1}{E[X]} \quad \text{in probability.}$$

さて, 次に注意する.

$$P[n_{sh}(w) > N(w)] = P\left[\sum_{i=1}^{n_{sh}(w)} X_i > w\right] \leq q. \quad (\text{A.1})$$

一方, 次が成立する.

$$\begin{aligned} P[n_{sh}(w) > N(w)] &= P\left[\frac{n_{sh}(w)}{w} - \frac{1}{E[X]} + \frac{1}{E[X]} - \frac{N(w)}{w} > 0\right] \quad (\text{A.2}) \\ &= P\left[\frac{1}{E[X]} - \frac{N(w)}{w} > -\left(\frac{n_{sh}(w)}{w} - \frac{1}{E[X]}\right)\right] \\ &\geq P\left[\left|\frac{1}{E[X]} - \frac{N(w)}{w}\right| < \frac{n_{sh}(w)}{w} - \frac{1}{E[X]}; \frac{n_{sh}(w)}{w} > \frac{1}{E[X]}\right]. \end{aligned}$$

今,

$$\epsilon \stackrel{\text{def}}{=} \limsup_{w \rightarrow \infty} \frac{n_{sh}(w)}{w} - \frac{1}{E[X]} > 0,$$

を仮定する. $\frac{N(w)}{w}$ は $\frac{1}{E[X]}$ に確率収束することから, ある w_0 が存在して,

$$\forall w > w_0 \quad P\left[\left|\frac{1}{E[X]} - \frac{N(w)}{w}\right| < \frac{\epsilon}{2}\right] > q,$$

が成り立つ. 従って, $\frac{n_{sh}(w)}{w} - \frac{1}{E[X]} \geq \frac{\epsilon}{2}$ を満たすように $w (> w_0)$ をとると $(\limsup_{w \rightarrow \infty} \frac{n_{sh}(w)}{w} - \frac{1}{E[X]} = \epsilon$ よりこれは可能), 式 (A.2) より, $P[n_{sh}(w) > N(w)] > q$ が成立することになるが, これは式 (A.1) と矛盾する. 従って, $\epsilon \leq 0$, つまり

$$\limsup_{w \rightarrow \infty} \frac{n_{sh}(w)}{w} \leq \frac{1}{E[X]},$$

である。
一方,

$$P[n_{sh}(w) + 1 > N(w)] = P\left[\sum_{i=1}^{n_{sh}(w)+1} X_i > w\right] > q, \quad (\text{A.3})$$

であることに注意する。さらに

$$\begin{aligned} & P[n_{sh}(w) + 1 > N(w)] \\ &= P\left[\frac{n_{sh}(w) + 1}{w} - \frac{1}{E[X]} + \frac{1}{E[X]} - \frac{N(w)}{w} > 0\right] \\ &= P\left[\frac{1}{E[X]} - \frac{N(w)}{w} > -\left(\frac{n_{sh}(w) + 1}{w} - \frac{1}{E[X]}\right)\right] \\ &\leq P\left[\left|\frac{1}{E[X]} - \frac{N(w)}{w}\right| > \frac{n_{sh}(w)}{w} - \frac{1}{E[X]}; \frac{n_{sh}(w)}{w} < \frac{1}{E[X]}\right] + P\left[\frac{n_{sh}(w)}{w} \geq \frac{1}{E[X]}\right], \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

が成立するが、今度は,

$$\epsilon \stackrel{\text{def}}{=} \liminf_{w \rightarrow \infty} \frac{n_{sh}(w)}{w} - \frac{1}{E[X]} < 0,$$

を仮定すると、同様の議論より式 (A.4) の最終式が q より小さくなることを示せる。この結果は式 (A.3) と矛盾するため、 $\epsilon \geq 0$ 、つまり

$$\liminf_{w \rightarrow \infty} \frac{n_{sh}(w)}{w} \geq \frac{1}{E[X]},$$

が成立する。以上より、 $\lim_{w \rightarrow \infty} \frac{n_{sh}(w)}{w} = \frac{1}{E[X]}$ が示された。□

補題 4.2. $\{X_i\}$ が強相関条件を満たすならば,

$$\liminf_{w \rightarrow \infty} \frac{n_{sh}(w)}{w} = \frac{1}{E[X] + \alpha}.$$

ここで α は方程式 $I_Z(\alpha) = -\log q$ の正の解であり、 $I_Z(x)$ は次式で定義される。

$$I_Z(x) \stackrel{\text{def}}{=} \sup_{\theta} \{\theta x - \log E[e^{\theta Z}]\}.$$

Proof. $\frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$ は $Z + E[X]$ に弱収束することから,

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} P\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \geq E[X] + \alpha\right] \leq P[Z \geq \alpha].$$

Chernoff の上限式より、任意の $\theta \geq 0$ について

$$P[Z \geq \alpha] \leq e^{-\theta\alpha} E[e^{\theta Z}],$$

が成立するから、 $\alpha > 0$ のとき**、 θ について Supremum をとると、

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} P\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \geq E[X] + \alpha\right] \leq e^{-I_Z(\alpha)} = q.$$

**Chernoff の上限式から考えると、 $I_Z(\alpha)$ の定義の中の Supremum の範囲は $\theta \geq 0$ に限定されるが、 $\alpha > 0$ のときは Supremum の範囲を実軸全体に広げても同じ値を与える。例えば、Bucklew[6] p. 10.

つまり十分 n_0 を大きくとれば

$$\forall n \geq n_0 \quad P\left[\sum_{i=1}^n X_i \geq n(E[X] + \alpha)\right] \leq q,$$

が成立する。従って

$$\forall n \geq n_0 \quad n_{sh}(n(E[X] + \alpha)) \geq n.$$

よって

$$\liminf_{w \rightarrow \infty} \frac{n_{sh}(w)}{w} \geq \frac{1}{E[X] + \alpha}.$$

以上証明された。 □

塩田 茂雄

千葉大学工学部都市環境システム学科

〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33

E-mail: shioda@faculty.chiba-u.jp