03–01038

待ち時間に対する品質感度を利用した優先制御コンテンツ配信

矢 守 恭 子　早稲田大学国際情報通信研究センター客員助教授

1 まえがき

近年，通信網のブロードバンド化により，ソフトウェアや動画などのリッチコンテンツを配信するサービスであるコンテンツ配信が注目されてきている。一般に，コンテンツなどのデータ取得の待ち時間が長くなれば，そのサービスに対するユーザの満足度（効用）は減少する。すなわち，コンテンツ取得までの待ち時間が小さければ，ユーザの効用は大きく，逆に待ち時間が長ければ効用は小さい。そこで，コンテンツ取得までの待ち時間に応じた優先度を設け差別化することにより，ユーザ効用を最大化することが可能となる。

待ち時間に対するユーザ効用の変化の割合は，データ受信にかかる待ち時間の単位やコンテンツの属性（データ量など）に応じた特徴があると考えられる。たとえば，文献[1]では，配信するコンテンツの属性と待ち時間の関係を，アンケート調査を用いて検討している。しかしながら，文献[1]のアンケート調査では，コンテンツの内容に関する検討や，優先制御の方法について具体的な検討が行われていない。

本研究では，優先制御の方式として，帯域保証とベストエフォートサービスによる差別化サービスを想定し，コンテンツの待ち時間に対するユーザ効用の変化の割合をアンケートにより調査する。そして，待ち時間と効用の関係を定量的に明らかにする。次に，配信コンテンツの内容について，ユーザ効用に影響を与える映像の特性を主観評価実験によって明らかにする。ここで論じる特性とは，視聴するユーザがそれぞれのジャンルの映像に求める画像・音声の性質を指す。最後に，アンケート調査より求めたユーザ行動モデルを用いて，差別化サービスによる優先制御の料金設定について検討し，ISP（Internet Service Provider）の収益最大化について述べる。

2 ユーザ効用を考慮した優先制御コンテンツ配信

一般に，コンテンツなどのデータ取得の待ち時間が長くなれば，そのサービスに対するユーザの満足度（効用）は減少する。現在のインターネットは，通信方式の特性上，転送時間を保証することができない。すべてのパケットは等しく扱われるため，急いで受信したいデータであっても，網が輻輳していれば受信までの時間に遅延が生じる。結果として，ユーザ効用を減少させる。この問題を解決する一つの手法として，データに優先度を設け，優先度の高いデータを優先的に送信する方法が考えられる。

一方，優先制御と効用の関係について，画像などのユーザ効用に着目した検討は行われているが，待ち時間に対する検討はまだほとんど行われていない。筆者らのこれまでの研究では，待ち時間対ユーザ効用の関係を主観評価実験により明らかにしている。結果，ユーザ効用は待ち時間の増加にともない，指数関数的もしくはべき乗関数的に減少することが分かった。しかしながら，文献[2]の主観評価実験では，ホームページを用いた静止画像の表示までの待ち時間について調査したため，秒単位の待ち時間についての結果を得たのみであり，分単位・時間単位の待ち時間に対する結果は得られていない。本研究では，データの取得に時間を要する大容量コンテンツ配信を想定し，リクエストの発生からコンテンツのデータすべてを受信するまでの待ち時間と，その待ち時間に対するユーザ効用の関係を定量的に明らかにする。また，本稿では優先制御の方法として差別化サービスを想定し，このサービスを利用した際のコンテンツ配信について検討する。

3 差別化サービス

ISP などのネットワーク事業者においては，優先制御を用いて複数クラスの品質を提供するサービスが検討されている。本稿では，このような複数の品質を提供するサービスを差別化サービスと定義する。

差別化サービスとしては，近い将来，複数クラスのベストエフォートサービス，あるいは帯域保証サービスが提供されると予想される。前者は DiffServ[3]による優先制御によってサービスを提供することができ，後者は

IntServ[4]による優先制御によってサービスを提供することができる。そのなかでも，差別化サービスを実現する技術としては Diffserv が有効であると考えられている。しかし，Diffserv では，重度の輻輳時に呼損が生じたり，パケット損失が生じたりすることが考えられる。実際に差別化サービスを提供する際は，呼損によってサービスが受けられない影響やパケット損失によって最低帯域以下の速度が生じる影響を考慮する必要があるが，本稿では最低保証帯域と支払意思額の解析に主眼を置いているため，呼損や最低保証帯域以下の速度は生じないものとして検討する。

本稿では，ISP が提供する差別化サービスとして，最低帯域幅を保証するサービスとベストエフォートサービスの 2 クラスサービスを想定する。以下にそのサービスを示す。

- 基本サービス
  インターネットに接続するサービス
  コア網ではベストエフォート
- 追加サービス
  コア網で帯域を保証

基本サービスは，インターネットに接続するためのサービスであり，帯域はネットワークの輻輳状況に応じて変動するため，品質が保証されない。追加サービスは，最低帯域を保証するサービスであり，輻輳時においても，最低保証帯域以上の帯域を確保する。

ユーザは ISP に基本料金を払うことによりベストエフォートサービスを利用でき，更に追加料金を払うことにより最低保証帯域幅サービスを利用できるものとする。通常コア網では，多くの人が帯域を分け合って利用するサービスしか提供されておらず，一人当たりの通信速度は保証されない。本稿では，コンテンツサーバとコア網，アクセス網を 1 社の ISP が提供するモデルを想定する。アクセス網は，十分な帯域があるものとする。**図 1** にサービスモデルを示す。

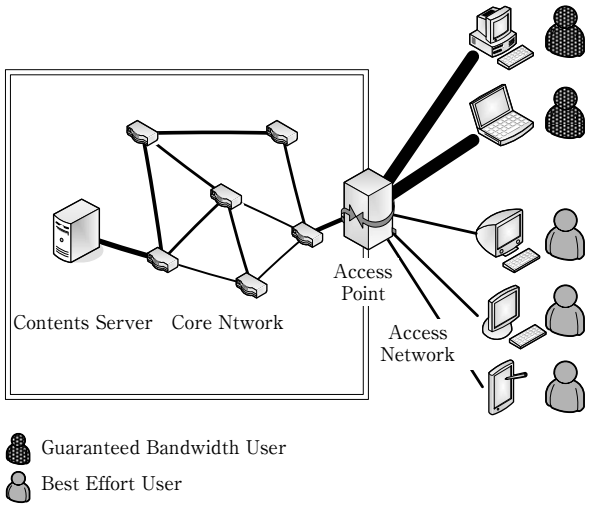

図 1　サービスモデル

4　待ち時間感度を測る測度：支払意思額

効用とは，人が意思決定を行う場合の代替案の選択を示す。選択される代替案は，意思決定者をより望ましい状態に導くものである。意思決定者であるユーザが評価すべきサービスをどの程度好ましいと思っているかを明確に示すことは難しいが，各サービスの属性に付いての相対的な満足度や属性間の関係，すなわち相対的な選考の程度について判断を下すことは比較的に容易である。そこで，本研究ではユーザが感じる効用を通信サービスに対する満足度とし，支払意思額（Willingness to Pay：WTP）や主観評価実験を用いて定量化する。そして，効用とサービス品質（帯域幅）との関係を明らかにする。

支払意思額は，環境経済学における CVM（Contingent Valuation Method：仮想市場評価法）で用いられる評価尺度で，あるサービスを利用するために費用を支払う必要がある場合，支払っても良いと考える金額のこと

である。支払意思額は，ユーザの限界効用を測定することができるため，効用の尺度として用いられている。支払意思額を用いることによりユーザのサービスに対する効用の変化を貨幣的に表すことができる[5]。

本稿では，コンテンツのダウンロード配信に着目し，保証帯域における待ち時間を提示することで，最低保証帯域と支払意思額の関係を求める。

5　ダウンロードの待ち時間に対するアンケート調査

ダウンロードにかかる待ち時間は，データ量が大きいと長時間になってしまうため，待ち時間を数値で提示する。ネットワークが空いている時間帯でデータをダウンロードする際の最短待ち時間例と，最低保証帯域幅でダウンロードする際の最長待ち時間例を数値で提示し，最低保証帯域幅に対する支払意思額を評価した。

今回の実験では，最大帯域幅の異なる 3 種類のサービスを想定する。非輻輳時に利用可能な最大帯域幅と最低保証帯域幅を**表 1** に示す。待ち時間を提示するデータ例を**表 2** に示す。また，各データに対する待ち時間の例を**表 3** に示す。

表 1　最大帯域幅と各保証帯域幅

利用可能最大帯域幅	最低保証帯域幅
5 Mbps	1，2，5 Mbps
20 Mbps	1，2，5，10，20Mbps
100 Mbps	1，2，5，10，20，50，100Mbps

表 2　ダウンロードデータの例

コンテンツ	データ量
音楽 1 曲（MP3 形式）	約 4 MB
文章データ（word file 10 pages）	約 300 KB
フロッピーディスク 1 枚分	約 1 MB
CD-ROM	700 MB
DVD-ROM	4.7 GB

表 3　ダウンロード完了までの待ち時間

最低保証帯域	1 Mbps	2 Mbps	5 Mbps	10Mbps	20Mbps
音楽 1 曲（MP3 形式）	32.0 秒	16.0 秒	6.4 秒	3.2 秒	1.6 秒
文章データ（word file 10 pages）	2.4 秒	1.0 秒	0.5 秒	0.2 秒	0.1 秒
フロッピーディスク 1 枚分	11.5 秒	5.8 秒	2.3 秒	1.2 秒	0.6 秒
CD-ROM	1 時間 33 分	46 分 30 秒	18 分 36 秒	9 分 18 秒	4 分 39 秒
DVD-ROM	10 時間 26 分	5 時間 13 分	2 時間 5 分	1 時間 2 分	31 分 20 秒

アンケートの回答形式は，支払意思額をそのまま記入する自由回答方式とし，基本サービスに対する料金と，差別化サービスに対する追加料金に対して質問する。調査対象者は，保証帯域に対する支払意思額の調査であることから，日常インターネットを利用している人を対象とする。

6　ダウンロードの待ち時間に対するアンケート調査の結果

被験者の属性調査結果を**表 4** に示す。また，各最低保証帯域に対する支払意思額を**図 2** に示す。

表 4　被験者数の属性

	平均	標準偏差
年齢	23.5 歳	0.95
回線速度	8.45Mbps	13.7
1 日のインターネット利用時間	4.20 時間	2.00
1 週間のインターネット利用日数	6.33 日	0.87

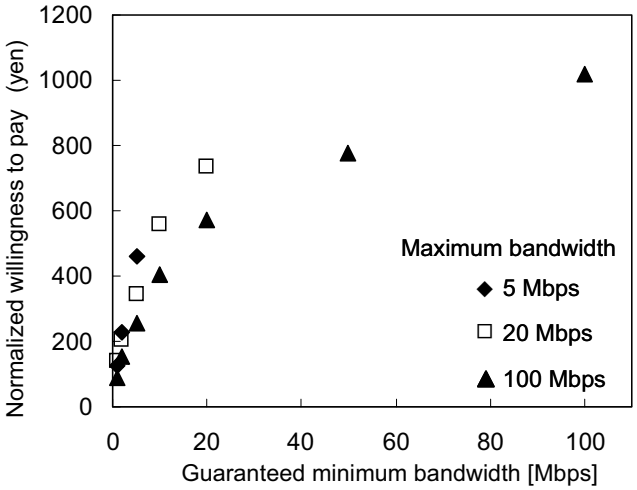

図 2　最低保証帯域幅と支払意思額の関係

図の縦軸は，各最低保証帯域幅に対する追加料金の平均値を示す。図より帯域幅が増加するに従い，支払意思額が増加することが分かる。非輻輳時に利用可能な帯域幅が小さい範囲では，待ち時間の減少割合に対し，ほぼ線形に近い形で支払意思額が増加している。一方，帯域幅の上限が大きい範囲では，支払意思額がなだらかに増加している。

7　コンテンツのジャンルと要求品質の関係

映像コンテンツを視聴する際，ユーザはその効用の対価として料金を支払う。効用は品質に応じて変化するが，その変化の度合は，コンテンツの内容や視聴条件によって異なる。映像コンテンツの属性はさまざまであり，ビットレートやフレームレートなどのエンコード特性，コンテンツの価格や入手方法，視聴環境や端末属性などが挙げられる。これらの要素が複合的にユーザ効用に対して影響を与えると考えられる。

筆者らのこれまでの研究では，コンテンツダウンロードサービスにおいて，ユーザ効用の変化に影響を与えるコンテンツの属性を明らかにしている。文献[1]では，映画，音楽，ソフトウェアなどのダウンロードを対象としており，各コンテンツのデータを取得するための待ち時間と，それに対する支払意思額の関係を定量的に評価している。結果，コンテンツの属性に応じて，待ち時間に対するユーザ効用の感じ方に違いがあることが分かった。しかしながら，ユーザが映像に求める音質や画質は，コンテンツのジャンルなどに応じて異なると考えられる。このような，映像コンテンツに求める特性とユーザ効用に関する研究はほとんど行われていない。

インターネットの広帯域化や携帯端末が多様化の影響を受け，さまざまなジャンルの映像コンテンツに対して，ユーザが視聴する際に求める品質は多様化していると考えられる。例えば，映画のようなコンテンツは画質も音質も高い品質を要求するが，ニュースなどは情報を理解できる程度の画像品質で十分と考えられる。また，ユーザの嗜好によって映像コンテンツに求める品質は異なると考えられる。

本稿では，ユーザ効用に影響を与える映像の特性を主観評価実験によって明らかにする。ここで論じる特性とは，視聴するユーザがそれぞれのジャンルの映像に求める画像・音声の性質を指す。

8　主観評価実験によるコンテンツのジャンル別ユーザ効用調査

本稿では，ユーザの効用に影響を与える映像コンテンツの特性を主観評価実験により明らかにする。実験では，パソコン上での映像コンテンツ視聴を想定し，各ジャンルに対する要求品質を評定尺度法により調査する。

評定尺度法とは，イメージやコンセプトなどの定性的な事象を定量的に評価する際に用いられる多変量解析の方法である。具体的には，数値的に表現することができない事柄に対して5～7段階の評価基準を設け，その評価値を定量化することにより定量的な評価を行う方法である。本実験では，5段階の品質評価基準を使用し，被験者が各ジャンルに求める特性を定量的に分析する。

評価用の映像コンテンツとして，全6ジャンル，各1～5個の計28個を用意する。ジャンルの選定は，文献[6]に示されているジャンル分類の中から行う。本実験では，スポーツ，映画，習い事，音楽，情報収集，エンターテインメントの6種類を用いる。各映像コンテンツは，同ジャンル内で，カメラアングルや内容がなるべく異なるものを用意する。映像コンテンツの長さは各10秒とする。

実験では，視聴環境や視聴端末，視聴希望回数，視聴動機，視聴希望時刻，画質や音質への評価，視聴の集中度（じっくり視聴するか，“ながら見”か）などを調査する。さらに，被験者の属性調査として，年齢，性別，職業，インターネット利用歴，インターネットで映像コンテンツを視聴する頻度について設問を設ける。

実験の流れを**図3**のフローチャートに示す。また，主観評価実験による調査の概要を**表5**に示す。

表5　調査の概要

調査対象者	インターネットを利用したことがある者，もしくはこれから利用する可能性のある者
調査期間	2004年12月3日から2005年1月13日
調査方法	対面調査法
回答方式	自由回答方式及び選択回答方式
標本数	50

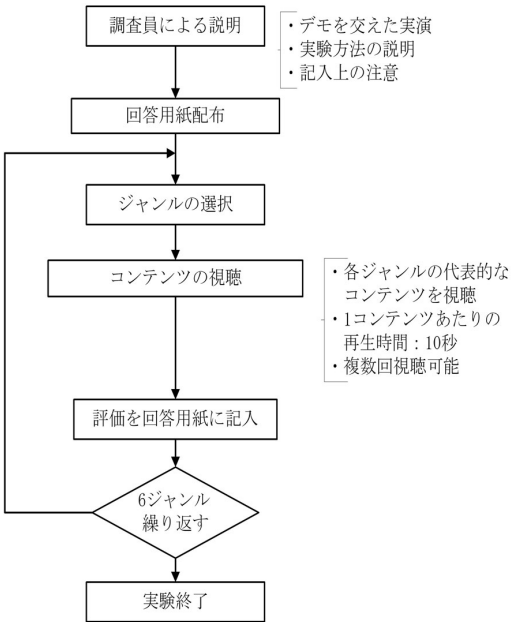

図3　実験のフローチャート

実験では，数多くのデータを得られるよう，実験環境としてラップトップパソコンを用いる。被験者は，調査員の指示に従い，実際にパソコンを操作して映像を視聴する感覚で評価する。

実験に用いた画面を**図4**に示す。実験画面はHTMLで作成されており，パソコンを使用して映像コンテンツ

を視聴する状況を擬似的に再現している。また，実験で用いる映像コンテンツはハードディスク内に蓄積されており，ローカルに再生している。

一つのジャンルにつき評価画面を 1 ページ用意する。評価画面には，評価対象としているジャンル名，映像コンテンツのサンプル画面，サンプル映像の説明文，次のページへのリンクを表示する。サンプル画像をクリックすると映像コンテンツが再生される。被験者はこの画面を操作し，サンプル映像を視聴する。映像コンテンツは何度視聴してもよいものとする。被験者は十分に映像コンテンツを視聴した後，調査用紙に評価を記入する。実験に用いた映像コンテンツのデータを**表 6** に示す。

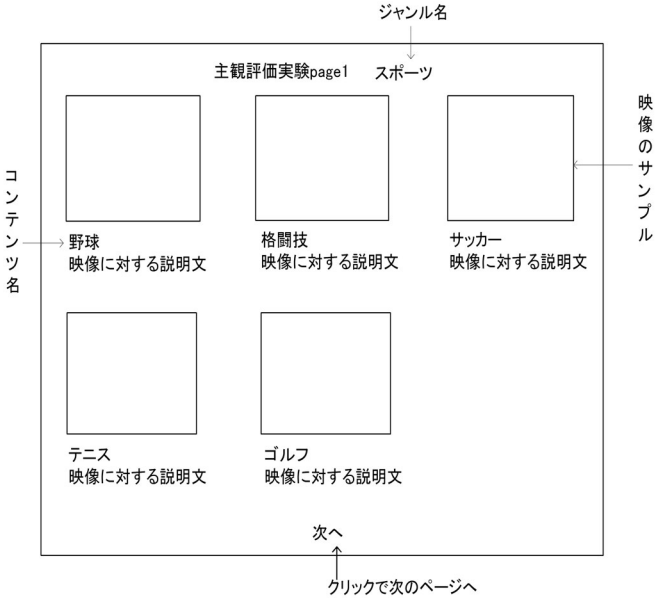

図 4　実験の表示画面例

表 6　映像コンテンツのデータ

形式	AVI
画面サイズ	720×480
時間	10 秒
フレームレート	29 フレーム／秒

表 7　実験用パソコンのスペック及び観視条件

条件	詳細
コンピュータの機種	iBook G4
OS	MAC OS X
CPU	PowerPC G4 (1.1)
CPU 速度	1.07GHz
メモリ	1.25GB
モニタ	1024×728
カラー	約 1670 万色
観視距離	40～60cm

実験に用いたラップトップパソコンのスペックと観視条件を**表 7** に示す。実験時間は一人当たり約40分を想定している。音声については外部の音と干渉しないように，ヘッドホンを用いる。また，ラップトップパソコンの省電力モードによる再生映像の品質劣化を防ぐために，必ず電源が確保できる場所で実験を行う。

９　主観評価実験によるコンテンツのジャンル別ユーザ効用調査

(a)　被験者の属性

本実験の有効回答数は53（男性40，女性13）であった。被験者の属性を**表 8** に示す。また，インターネット上で配信される映像コンテンツの視聴頻度を**図 5** に示す。

表 8　被験者の属性

	平均	標準偏差
年齢	22.7 歳	3.81
インターネットの利用歴	5.8 年	2.31

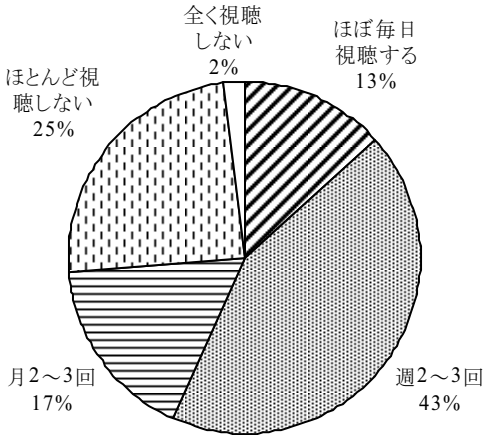

図 5　被験者がインターネット上で配信されている映像コンテンツを視聴する頻度

表 8 より，被験者の多くは20代であり，インターネットの利用歴が長いユーザであることが分かる。これは，被験者の多くが大学院生並びに学部学生であったためと考えられる。

図 5 は，インターネット上で配信される映像コンテンツの視聴頻度を示している。図より，「ほぼ毎日視聴する」，「週２～３回」と回答した被験者を合わせると，全体の54%に上る。半数以上の被験者が，頻繁に映像コンテンツを視聴していることが分かる。一方，「全く視聴しない」または「ほとんど視聴しない」と回答した被験者は合計で27%であり，本実験に参加した被験者の四分の一が，映像コンテンツ配信に興味がない，若しくは視聴経験がなかった。

(b)　画質・音質に関する重視度

画質と音質について，以下の４項目について主観評価実験を行い，それぞれの重視度を調査した。

・画質重視度
　画像の品質をどれだけ重視しているか。
・音質重視度
　音声の品質をどれだけ重視しているか。
・映像の全体重視度
　映像の細部に至るまで（背景や映像の中心）の品質をどれだけ重視しているか。
・映像の細部重視度
　映像の重要部分のみの品質をどれだけ重視しているか。

映像の全体重視度とは，映像の細かい部分や動きのない背景などすべての部分を含めた画面全体という意味であり，音と画像をあわせた全体という意味ではない。

被験者は，ジャンルごとに，それぞれの重視度について「とてもそう思う」，「そう思う」，「どちらでもない」，「そう思わない」，「全くそう思わない」の５段階で評価する。各評価の高い順に５から１の重み付けをし，各

ジャンルの相加平均をとって MOS（Mean Opinion Score）値を求める。**表 9** 並びに**図 6** にその結果を示す。なお，映像の全体重視度を全体重視度，映像の細部重視度を細部重視度と表記する。

表 9　主観評価実験の結果

ジャンル名	画質重視度	音質重視度	全体重視度	細部重視度
スポーツ	4.13	3.17	3.83	3.74
映画	4.60	4.51	4.60	3.98
習い事	2.81	3.43	3.19	3.17
音楽	3.74	4.74	4.11	3.30
ｴﾝﾀｰﾃｲﾝﾒﾝﾄ	3.59	3.43	3.74	3.21
情報収集	2.72	2.96	3.11	2.94
平均	3.60	3.71	3.76	3.39
標準偏差	0.74	0.73	0.56	0.39

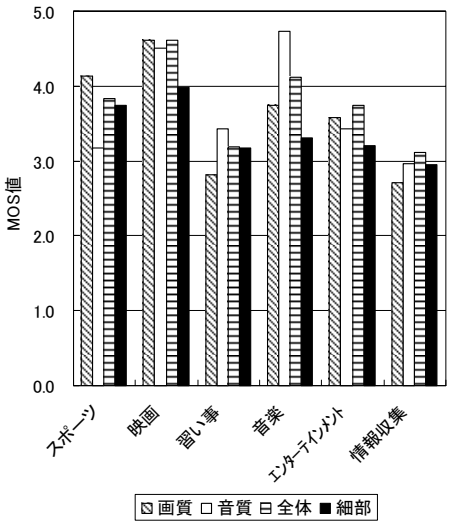

図 6　ジャンル別の画質，音質の重視度

表より，映画に関する評価は，画質・音質・全体重視度ともに4.5を越えている。つまり，被験者は映画に対して画質や音質を非常に重視していることが分かる。また，音楽の映像コンテンツについては，やはり音質の重視度が高い。一方，習い事と情報収集に関しては，他の映像コンテンツより低い値を示している，これは，他のジャンルと比べ視聴の目的が異なるためであると考察される。つまり，この二つのコンテンツは，画像や音声を楽しむのではなく，学習や情報の取得が目的であるため，情報が理解できる程度の品質があればよいという評価と考えられる。

10　主成分分析による調査

本実験の結果を基に，画質重視度，音質重視度，映像の全体重視度，映像の細部重視度の四つを説明変数として主成分分析を行う。主成分分析とは，いくつかの成分を合成（圧縮）して，それより少ない数の成分にし，その総合力や特性を求める方法である。

主成分分析では，説明変数のデータの単位が同じ場合は分散・共分散行列を，異なる場合は相関行列を用いて分析する。今回はデータの単位が同じであるので分散・共分散行列を用いる。

第一主成分の寄与率は0.813，第二主成分の寄与率は0.175となる．第二主成分までで累計寄与率が0.988となるので，第一主成分と第二主成分によって映像コンテンツの特性が説明されていると考えることができる。したがって，第二主成分までを用いて分析を行う。以下に第一主成分 y_1 を式(1)に，第二主成分 y_2 を式(2)に示す。

$$y_1 = 0.932x_1 + 0.826x_2 + 0.994x_3 + 0.841x_4 \quad (1)$$

$$y_2 = -0.357x_1 + 0.562x_2 - 0.038x_3 - 0.455x_4 \quad (2)$$

ここで x_1 を画質重視度，x_2 を音質重視度，x_3 を映像の全体重視度，x_4 を映像の細部重視度とする。

主成分分析で得られた各変数の係数は，主成分の分散に対応しており，その主成分が元のデータの情報をどの程度保持しているか表している。(1)の各変数の係数より，第一主成分は，全体重視度の情報を一番多く保持していることになる。しかしながら，全体的に各係数の値の差が小さいので，画質重視度，音質重視度，全体重視度，細部重視度のどれも同程度の影響を与えている。一般に，主成分分析では，第一主成分は総合的な品質を表すことが多いといわれていることから考えても，本結果は妥当といえる。

第二主成分の係数は，音質重視度の係数が正の値であり，それ以外の係数は負の値である。つまり，第二主成分が正の方向に大きくなると画質より音質を重視，負の方向に大きくなると音声以外，つまり画像に関する項目を重視することが分かる。次に，x_3 と x_4 の係数に着目すると，映像の全体に対する重要度と細部に対する重要度の重みが異なることが分かる。つまり，画面中で重要な部分よりも，映像全体の品質の方が重要視されている。

各ジャンルの主成分得点を**表10**に示す。また，**図 7** に各得点の散布図を示す。ここで，第一主成分を横軸，第二主成分を縦軸とする。

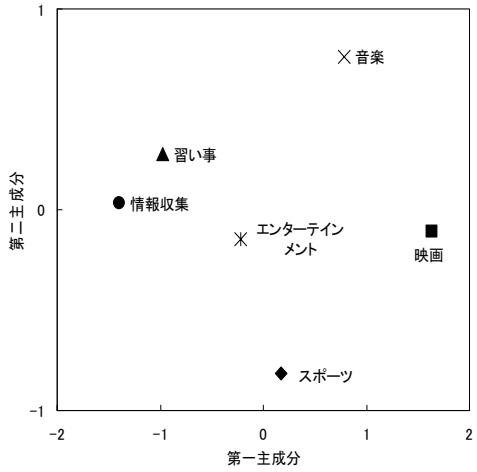

図 7　主成分分析の結果

表10　主成分得点表

	第一主成分	第二主成分
スポーツ	0.170	-0.816
映画	1.640	-0.108
習い事	-0.980	0.278
音楽	0.789	0.761
エンターテインメント	-0.223	-0.147
情報収集	-1.396	0.032

図より各ジャンルについて考察する。映画は第一主成分の値が最も高い。したがって，他のジャンルに比べてすべての品質が重視されていることが分かる。一方，情報収集や習い事は品質に対する要求が低い。また，音楽は第二主成分の値が最も高く，音質が重視されていることが分かる。逆にスポーツに関しては，視聴者は音質よりも画質を重視して視聴したい意向があると考えられる。エンターテインメントは，他のジャンルに比べ，画質重視度は高くも低くもなく，画質と音質は重視する傾向にある。

11　クラスタ分析による調査

主成分分析の結果を基に，クラスタ分析を行う。クラスタ分析とは，いろいろな特性をもつサンプルを類似性の指標をもとに似たもの同士を集め，いくつかのグループに分類する方法の呼称である。

本稿では，**図 7** 上の各点を座標点とみなし，ユークリッド距離を求めてクラスタ分析を行い，類似の特性をもつジャンルのグループを作成する。グループ化には階層的方法を用いる。階層的方法とは最もユークリッド距離が近いサンプルが隣り合うように並べるもので，結果を樹形図で表すことができる。結果を**図 8** の樹形図に示す。

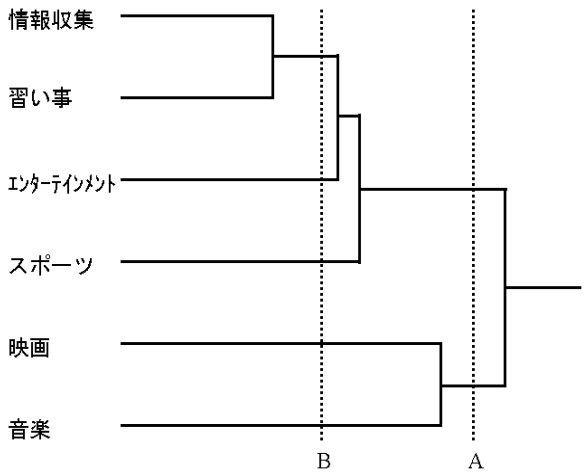

図 8　クラスタ分析による樹形図

図 8 を，ユークリッド距離の最大値から45%（A 点）の位置で区切る。ここで区切った場合のグループは以下の通りである。

・グループ A1：映画，音楽

・グループ A2：スポーツ，エンターテインメント，情報収集，習い事

A 点におけるグループ化では，第一主成分（映像品質の重視度）によって分けることができ，すべての品質を重視するグループと，そうでないグループに分けることができる。グループ A1 は特に娯楽性が高いコンテンツであり，市場価格が高いものと考えられる。それに対し，A2 の映像コンテンツはテレビ放送などで視聴可能なコンテンツであり，A1 ほどの品質は求めていないと考えられる。

次に，**図 8** をユークリッド距離の最大値から25%（B 点）で区切りグループ分けを行う。各グループに含まれるコンテンツとの特性は以下の通りである。

・グループ B1：情報収集，習い事
　全体的な品質をそれほど重視しない

・グループ B2：エンターテインメント
　画像と音質の双方を重視する

・グループ B3：スポーツ
　画像を重視する

・グループ B4：映画
　全体的な品質を重視する
　また画像と音質の双方を重視する

・グループ B5：音楽
　音質を重視する

ここでは，第一主成分と第二主成分（画質と音質のどちらを重視するか）によって分類されている。分類から，視聴者は情報収集と習い事については似た特性を感じていることが分かる。このように，視聴者は各ジャンルに対して求める特性に違いがあり，四つの設問項目についてユーザが重視する品質によって分類することができる。

12　帯域幅保証サービス選択行動モデルと料金設定

本稿では，差別化サービスにおけるユーザの帯域保証サービス選択行動を，非集計行動モデルによってモデル化する[7]。本モデルでは，料金体系やサービス内容については3で定義したモデルに準じ，優先クラスは帯域保証を行うものとする。ユーザの行動が，追加サービスと基本サービスを受ける（選択肢１），基本サービスのみ受ける（選択肢２），の二択であるとき，ユーザ s が追加サービスを受ける確率すなわち選択肢１を選択する確率は次式で示される。

$$P_{1n} = \frac{1}{1 + \exp(V_{2n} - V_{1n})} \tag{3}$$

また，式(3)内の効用 V_{1n}，V_{2n} は式(4)で与えられえる。

$$\begin{cases} V_{1n} = \theta B \\ V_{2n} = 0 \end{cases} \tag{4}$$

ここで，B は帯域保証サービスに参加したときのユーザの利得を表す。このときユーザの利得 B を以下のように定義する。

$$B = W - C_{\mathrm{op}} \tag{5}$$

追加料金を c_{op}，支払意思額を W とする。式(5)では，ユーザは提示された追加料金を c_{op} と自身の支払意思額 W を比較し，利得が 0 より大きければ，帯域保証サービスを利用する。一方，利得が 0 以下なら帯域保証サービスを利用しないものとする。

13　シミュレーションによる評価

非集計行動モデルでは，選択行動結果の複数サンプルから最尤推定と呼ばれる統計処理を行うことで効用のパラメータ θ を求めることができる。本稿では，シミュレーションにより重み係数を推定する。

シミュレーションでは，文献[8]で得た保証帯域に対する支払意思額の平均と標準偏差に基づき，保証帯域ごとに1000人のユーザを正規乱数で発生させる。シミュレーションを行う保証帯域は，100kbps，200kbps，500kbps，1Mbps，2Mbps，5Mbps，10Mbps，20Mbps，50Mbps，100Mbps の10種類とする。サービスの基本料金を3000円，シミュレーション回数を10000回とする。また，課金体系は月額定額制を想定する。

ユーザ効用

シミュレーションによって求めた重み係数より，帯域保証サービスに参加した際のユーザ効用を算出する。ここで，式(4)より帯域保証サービスに参加しない場合のユーザ効用は 0 とする。

帯域保証サービスに参加した際のユーザ効用は，式(4)と式(5)より，

$$U_{(c_{\mathrm{op}})}^{(b)} = \theta \left(W_{\mathrm{ave}}^{(b)} - c_{\mathrm{op}} \right) \tag{6}$$

となる。ここで，$U_{(c_{\mathrm{op}})}^{(b)}$ を保証帯域 b，追加料金 c_{op} のときのユーザ効用，$W_{\mathrm{ave}}^{(b)}$ を保証帯域 b のときの支払意思額の平均値とする。

サービス参加確率

保証帯域 b，追加料金 c_{op} としたときのユーザのサービス参加確率を求める。式(3)と式(6)より，ユーザが帯域保証サービスにする参加する確率は，

$$P_{(c_{\mathrm{op}})}^{(b)} = \frac{1}{1 + \exp\left(-U_{c_{\mathrm{op}}}^{(b)} \right)} \tag{7}$$

となる。ただし $P_{(c_{\mathrm{op}})}^{(b)}$ を保証帯域 b，追加料金 c_{op} のときのサービス参加確率とする。

帯域保証サービスによる ISP の収入

保証帯域 b，追加料金 c_{op} としたときの ISP の帯域保証サービスによる収入は，式(5)より，

$$R_{(c_{\mathrm{op}})}^{(b)} = 1000 \times P_{(c_{\mathrm{op}})}^{(b)} \cdot c_{\mathrm{op}} \tag{8}$$

となる。また，シミュレーション条件よりユーザ数は 1000 とする。ただし，ネットワークの輻輳などによるユーザのサービス離脱は考えない。

14　シミュレーション結果

シミュレーションにより得られた料金とユーザ効用の関係を図 9，料金と参加確率の関係を図10，料金と収入の関係を**図11**に示す。ここでは，10種類の保証帯域について検討しているが，図では特徴的な結果のみを示すこととし，各図に 5Mbps，10Mbps，20Mbps，100Mbps の時の変化を示す。また，ここで示す料金は追加料金／基本料金として正規化した値である。

図 9 より，料金が高くなるに従い，ユーザ効用は減少することが分かる。また**図10**では，それに呼応するように，ユーザ効用とサービス参加確率は料金が高くなるに従って単調に減少していることが分かる。特に，ユーザ効用は，料金が低いときの変化に敏感に反応し，料金の僅かな増加に対し急激に減少する。

図11より，ISP の収入は料金の増加に伴い初め単調に増加し，ある料金を境に減少することが分かる。収入の最大値を示すときのユーザの参加確率は 0.91 である。すなわち，最適料金はユーザの参加確率が 9 割以上となる範囲に存在する。

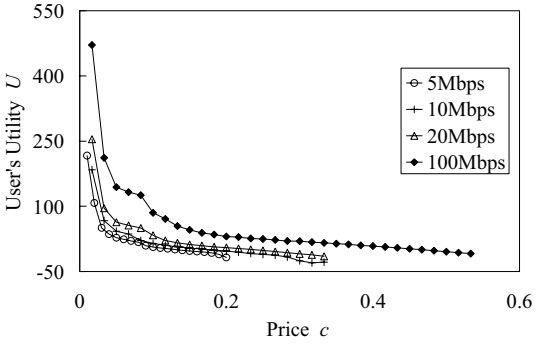

図 9　料金とユーザ効用

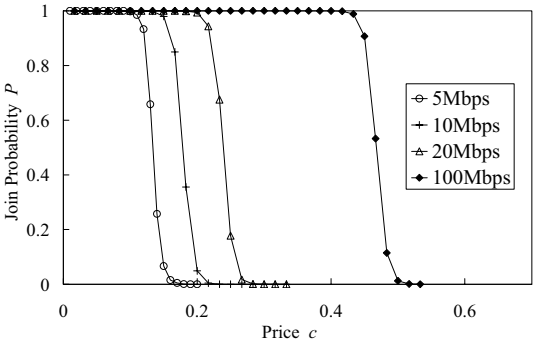

図10　料金と参加確率

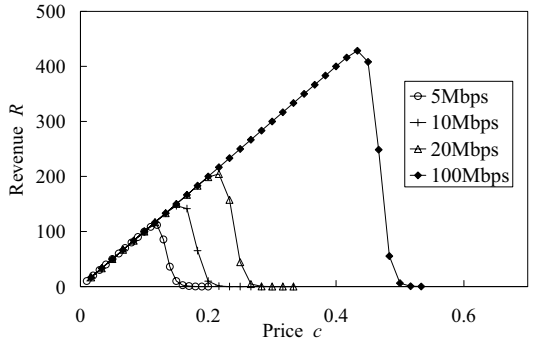

図11　料金と収入

15 むすび

本稿では，優先制御の方式として，帯域保証とベストエフォートサービスによる差別化サービスを想定し，コンテンツの待ち時間に対するユーザ効用の変化の割合をアンケートにより調査した。アンケート調査の結果より，非輻輳時に利用可能な帯域幅が小さい範囲では，待ち時間の減少割合に対し，ほぼ線形に近い形で支払意思額が増加している。一方，帯域幅の上限が大きい範囲では，支払意思額がなだらかに変化することが分かった。

また，配信コンテンツの内容について，ユーザ効用に影響を与える映像の特性を主観評価実験によって明らかにした。コンテンツの視聴者の各ジャンルに対して求める特性には違いがあり，四つの設問項目についてユーザが重視する品質によって分類することが可能である。最後に，アンケート調査より求めたユーザ行動モデルを用いて，差別化サービスによる優先制御の料金設定について検討し，ISP の収益最大化となる条件を示した。

文 献

[1] 矢守恭子，野村一智，冨田健，田中良明，“配信待ち時間と効用の関係におけるコンテンツ属性の主要因分析，”信学技報, NS2002-169, pp.49-52, Nov 2002.

[2] K. Nomura, K. Yamori, E. Takahashi, T. Miyoshi, and Y. Tanaka, “Waiting Time versus Utility to Download Images,” 4th Asia-Pacific Symposium on Information and Telecommunication Technologies (APSITT 2001), Kathmandu, Nepal / Atami, Japan, Session 5, pp.128-132, Nov. 2001.

[3] S.Blake, D.Black, M.Carlson, E.Davies, Z.Wang, and W.Weiss, “An architecture for differentiated services,” RFC2475, Dec. 1998.

[4] R.Braden, “Integrated services in the Internet architecture,” RFC1633, July 1994.

[5] 栗山浩一, 公共事情と環境の価値 CVMガイドブック, 築地書館, 東京, 1997.

[6] スカイライトコンサルティング株式会社，“ストリーミングユーザ調査2004,” Aug. 2004. http://www.skylight.co.jp/topics/streaming_2004.pdf

[7] 黒川洸，“非集計行動モデルの理論と実際，”（社）土木学会，1995.

[8] 伊藤博礼，矢守恭子，田中良明，“定額制体域保証サービスの支払意思額の分析,” 信学技報，CQ2003-38, pp.29-32, July 2003.

〈発 表 資 料〉

題　　名	掲 載 誌 ・ 学 会 名 等	発 表 年 月
制限式割込み形優先制御におけるユーザ効用最大化	電子情報通信学会技術研究報告, No.CQ2004-65	2004年 7 月
帯域保証サービスにおけるユーザ効用の導出	電子情報通信学会通信ソサイエティ大会, No.B-11-10	2004年 9 月
最低保証帯域幅の品質評価と支払意思額の関係	電子情報通信学会通信ソサイエティ大会, No.B-11-11	2004年 9 月
最低保証帯域幅の主観品質評価と支払意思額の分析	電子情報通信学会技術研究報告, No.CQ2004-95	2004年11月
帯域保証サービス選択行動モデルによる最適料金設定	電子情報通信学会技術研究報告, No.NS2004-201	2005年 3 月
映像特性に応じたコンテンツ分類法	電子情報通信学会総合大会, No.B-11-27	2005年 3 月
帯域保証サービスの収入最大化と最適価格	電子情報通信学会総合大会, No.B-11-28	2005年 3 月