

# バースト性待ち行列モデルにおける形態分析の評価手法と 公衆無線回線の最適配置の提案

小林 敏也<sup>1</sup> 奥田 隆史<sup>2</sup> 井手口 哲夫<sup>2</sup> 田 学軍<sup>2</sup>

**概要:** スマートフォンユーザは, 自身の利用場所や電波状況に応じてサーバである公衆通信回線または公衆無線 LAN に接続を要求し, スマートフォン向けのサービスを利用している. 各ユーザはどちらかに接続を要求しても同様のサービスを利用することができるため, 呼である接続要求数が集中することで, 呼の到着間隔が急激に増大するバースト性を有する傾向にある.

このような状況に対して, サービス提供者である通信キャリアは, 初期配置や施設管理・維持のためのコストを勘案した上で, ユーザが満足する平均応答時間や回線ブロック率などを満足するように公衆回線と Wi-Fi 設備をバランス良く配置する必要がある.

本研究ではこの配置問題を解決するために, 先ず, 公衆回線と Wi-Fi を併用するシステムを VCHS (Various Customers, Heterogeneous Servers) 待ち行列モデルとして表現する. 次に, このモデルの性能評価特性の近似曲線を, 線形計画問題における応答曲面として利用して配置問題を解決する手法を提案する.

次に, この応答曲面にネットワーク指標 QoE を導入し, ユーザの視点に基づいた配置数はどれほどとなるかを求める.

## Evaluate Bursty VCHS Queuing Models and Arrange optimally Public Network Systems

TOSHIYA KOBAYASHI<sup>1</sup> TAKASHI OKUDA<sup>2</sup> TETSUO IDEGUCHI<sup>2</sup> XUEJUN TIAN<sup>2</sup>

### 1. はじめに

現在のスマートフォンを中心とする端末ネットワークシステムにおいて, ユーザは自身の利用場所や電波状況に応じて, サーバである公衆通信回線 (以下, 公衆回線) または公衆無線 LAN (以下, Wi-Fi) のどちらかに対して接続を要求し, サービスを利用している [1].

このようなスマートフォンによるサーバへの接続とサービスの利用はいつでもどこでも可能であるため, サーバへの接続要求数が急激に増大する (バースト性を有する) 傾向にある. この理由として, 公衆回線と Wi-Fi 双方が配置された場所におけるユーザの行動が原因であると推測で

きる.

本稿では例として主要駅をあげる. ユーザが電車, 交通手段を利用して駅内に到着する. 到着したユーザは公衆回線または Wi-Fi のどちらかを選択し接続を要求する. この一連の行動により駅内に存在するユーザ人口が増加することで, 接続要求の到着間隔が急激に増大し, 結果としてバースト性を有することになる.

つまり現在のネットワークシステムは, 異なる処理能力を持つサーバが, 同様のサービスを提供できること, 呼であるユーザからの接続要求にバースト性を有する傾向にある, という特徴を持つ.

このような状況に対して, 各通信キャリアを主とするサービス提供者は対策として, どちらかに接続を要求しても同様のサービスを受けることができるメリットから, 各サーバの遅延回避を目的として配置を推進している [1]. しかしながら, こうした配置を行うためにはサービス提供者が初期費用などのコストを負担しなければならない. こ

<sup>1</sup> 現在, 愛知県立大学大学院 情報科学研究科 メディア情報専攻 Presently with Graduate School of Information Science and Technology, Aichi Prefectural University

<sup>2</sup> 現在, 愛知県立大学大学院 情報科学研究科 情報システム専攻 Presently with Graduate School of Information Science and Technology, Aichi Prefectural University

のため、ユーザを満足させる条件を満たした上で、初期配置や施設管理・維持のためのコストを勘案した公衆回線と Wi-Fi 設備をバランス良く配置する必要があるが、現在、この問題に対して数理的、解析的に求める手法が存在しない。

そこで、本研究ではこの配置問題を解決するために、まず、公衆回線と Wi-Fi を併用するシステムを VCHS (Various Customers, Heterogeneous Servers) 待ち行列モデル [2][3][4] として利用し、バースト性 VCHS 待ち行列モデルと表現する。次に、このモデルの性能評価特性の近似曲線を、線形計画問題における応答曲面 [5] として利用してサービス提供者の視点から配置問題を解決する手法を提案する。

次に提案した最適配置問題解決手法を利用して、ネットワーク指標 QoS に代わる新たなネットワーク指標 QoE による結果を導出し、ユーザの心理状況に合わせた最適解を求め、ユーザの視点から最適配置数を求める。

以下、第 2 節では、本研究における設計方針について説明し、第 3 節で、線形計画問題で利用する応答曲面を求めるための応答曲面導出モデルとなる待ち行列モデルについて示す。第 4 節では数値例から結果を求め、その結果を利用して多項近似式を求める。この多項近似式を利用して線形計画問題を解き、最適配置数を示す。第 5 節ではネットワーク指標 QoE を導入し、QoE における最適配置数を第 2 節の設計方針に基づき求める。最後に第 6 節にてまとめる。

## 2. 設計方針

本研究では、ユーザを満足させる要素として平均応答時間と回線ブロック率を設定する。サービス提供者は両指標を目標値以下となる制約の下、設置費用が最小となるように、公衆回線、Wi-Fi の回線数を考えなければならない。なお公衆回線と Wi-Fi は必ず 1 個以上は配置する。この条件のもとで公衆回線と Wi-Fi をそれぞれどれほど配置する必要があるかを公衆回線と Wi-Fi の最適配置問題として検討する。

この問題の検討方法として線形計画法 [6] を用いる。公衆回線と Wi-Fi の最適配置問題から、目的、条件、変数を整理し、以下に示す。

目的、条件、変数

**目的** 設置費用が最小となる  
**条件** ユーザが満足する平均応答時間  
 ユーザが満足する回線ブロック率  
 それぞれ必ず 1 個以上配置すること  
**変数** 公衆回線と Wi-Fi のシステム数

この目的、条件、変数から目的関数、制約条件を定義し、公衆回線、Wi-Fi のシステム数 ( $s_g, s_w$ ) として、線形計画

問題を示す。

公衆回線と Wi-Fi の線形計画問題

**Minimize**  $c_g s_g + c_w s_w$

**Subject to**

$w_g W_g + w_w W_w \leq$  目標平均応答時間

$w_g B_g + w_w B_w \leq$  目標ブロック率

$s_g, s_w \geq$  最低システム数 (= 1)

この線形計画問題の最適解が、公衆回線、Wi-Fi の配置するシステム数 ( $s_g, s_w$ ) に帰着する。ここで  $s$  はシステム数、 $c$  は各システムの台数あたりの設置コストの比、 $W$  は平均応答時間、 $B$  は回線ブロック率を示し、その添え字  $g, w$  はそれぞれ公衆回線、Wi-Fi であることを意味する。

線形計画問題を解くためには、各システムの平均応答時間  $W$ 、回線ブロック率  $B$  の応答曲面をシステム数  $s$  の関数として表現する必要がある。しかしながら、現在のネットワークシステムから応答曲面をシステム数  $s$  の関数として表現することは困難である。

この理由としてマルコフ型の形態分析を利用することができないためである。従来の電話ネットワークシステムのようなマルコフ型待ち行列モデル [7] においては平均応答時間や回線ブロック率を定式から求められることが知られている。例として到着率がランダムでポアソン分布に従い、サーバの処理率が指数分布に従う、有限の待ち行列 M/M/s/K ならば、式 (1)、(2) より平均応答時間、回線ブロック率を解析的に求めることができる。

M/M/s/K

$$W = h \left( \frac{M}{s-a} + 1 \right) = h \left( \frac{M}{s(1-\rho)} + 1 \right) \quad (1)$$

$$B = \frac{a^s}{s!} \rho^{K-s} P_0 \quad (2)$$

$h$ : 平均サービス時間  $s$ : サーバ数  $K$ : バッファ量

$\rho$ : 利用率  $M$ : 待ち率  $a$ : 負荷

$P_0$ : システム内容客数が 0 である確率

しかしながら、当該システムにはバースト性を有する呼が到着することや公衆回線、Wi-Fi のように異なる処理能力を持つサーバを有していることから、マルコフ型待ち行列モデルの解析的により得られる結果を利用することは困難である。

そこで本研究の設計方針として、まず、線形計画問題で利用する応答曲面を求めるために応答曲面導出モデルを作成し、待ち行列モデルシミュレーションにより、平均応答時間と回線ブロック率を求め、シミュレーション結果から多項近似式を導出し、応答曲面として利用する。次に、応答曲面を線形計画問題に利用し、最適解を解く。これが最適解を求めるまでの設計方針となる。

次節の第 3 節では、応答曲面導出モデルについて説明

する。

### 3. 応答曲面導出モデル

#### 3.1 想定環境

本研究の応答曲面導出モデルの想定環境を設定する。想定環境として、主要駅における駅内を想定し、ユーザは次のように行動する。ユーザが電車、交通手段を利用して駅内へ到着する。到着したユーザは公衆回線または Wi-Fi のどちらかを選択し接続を要求する (図 1 参照)。またユーザは公衆回線の接続を優先すると仮定し、これを確率で表現する。これは Wi-Fi に接続可能な範囲が限られてしまうためである。

駅内に到着する各ユーザはこの一連の行動を行うとする。

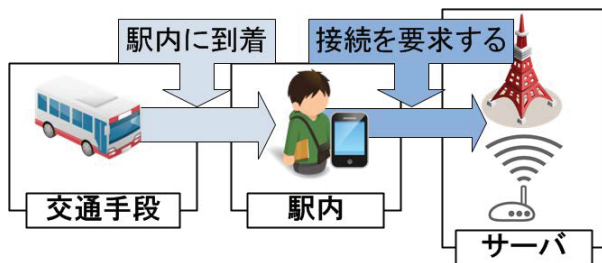


図 1 ユーザの一連の行動

各ユーザは複数の交通手段 (電車、バスなど) により駅内へ到着するため、到着するユーザにより駅内のユーザ人口が増加する。そして前述のユーザの一連の行動により、急激に増大する場合があります、呼の到着がバースト性を有する (図 2 参照)。バースト性は変動係数 (標準偏差/平均値) が 1 より大きいことから、2 次の超指数分布 (Hyper-exponential distribution,  $H_2$ ) [8] で近似し表現する。

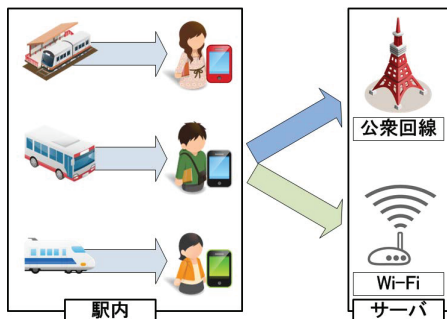


図 2 想定環境

これが応答曲面導出モデルの想定環境である。では次節ではこの想定環境を踏まえ、応答曲面導出モデルを作成する。

#### 3.2 バースト性 VCHS 待ち行列モデル

第 3.1 節の想定環境を踏まえ、応答曲面導出モデルを作成する。モデルの作成において、公衆回線と Wi-Fi ではそれぞれ異なる処理能力を持つため、”多様な仕事を持つユーザに対して多様な能力を持つサーバが処理を行う”待ち行列モデル **VCHS 待ち行列モデル** を利用する。本研究の応答曲面導出モデルはこの VCHS 待ち行列モデルを利用した **バースト性 VCHS 待ち行列モデル** (図 3 参照) と表現し、待ち行列モデルシミュレーションを行う。

ここで、ユーザの到着はバースト性を有するため、超指数分布に従うとする。一方、サービス時間は平均処理時間  $h = 1/\mu$  に従う指数分布に従うものとする。なお、公衆回線と Wi-Fi をそれぞれ異なる形態の待ち行列モデルとして表現する。公衆回線を想定する待ち行列モデルではサーバ数  $s_g = 1$  でバッファ量は  $K_g$  である  $H_2/M/1/K_g$  とする。一方、Wi-Fi を想定する待ち行列モデルでは、公衆回線と比較してサーバ数が  $s_w$  個とする  $H_2/M/s_w/K_w$  とする。

次節ではこの応答曲面導出モデルによる待ち行列シミュレーションを行うための数値例について設定し、シミュレーションを行う。

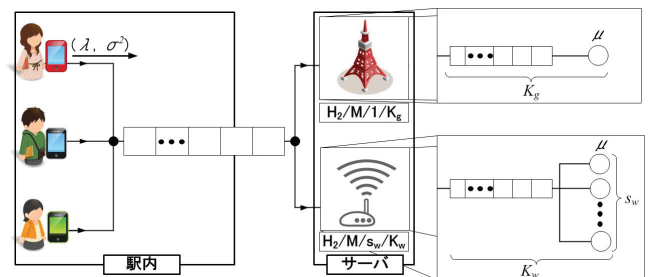


図 3 モデル図

## 4. 数値例

### 4.1 シミュレーション条件

シミュレーション条件を設定する。各形態の到着率は  $\lambda = 1/5 = 0.2$  で一定とし、平均処理時間  $h$  はサーバ 1 つあたりの負荷である利用率  $\rho (= \lambda h)$  の値が  $\rho = 0.1, 0.2, \dots, 1.0$  となるように値を定め、分散  $\sigma^2$  [8] の値を  $\sigma^2 = 30, 60, \dots, 210$  と変化させる。またサーバ数  $s_w$  は  $s_w = 1, 2, \dots, 5$  の間で変化させる。各形態のシステムの容量 ( $K_g, K_w$ ) は二形態ともに定数  $K_g = 10, K_w = 10$  とする。第 3.1 節の想定環境から  $H_2/M/s_w/K_w$  に接続する確率を  $1/10, 1/5, 1/3, 1/2$  とした場合を想定する。

この条件のもとで離散事象シミュレーションパッケージ Csim20 [9] を利用し、シミュレーションを行い、平均応答時間と回線ブロック率を求める。その一例として、次節では公衆回線に大多数のユーザが接続する場合と、公衆回線と Wi-Fi にそれぞれ半分程度のユーザが接続する場合の結果を示す。

## 4.2 シミュレーション結果

### 4.2.1 公衆回線に大多数のユーザが接続する場合

公衆回線に大多数のユーザが接続する場合、つまりユーザが Wi-Fi( $H_2/M/s_w/K_w$ ) に接続する確率が公衆回線 ( $H_2/M/1/K_g$ ) の  $1/10$  である場合において、公衆回線と  $s_w = 1$  の時の Wi-Fi の結果 (平均応答時間、回線ブロック率) をそれぞれ図 4, 5, 6, 7 に示す。

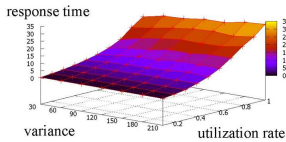


図 4 公衆回線の平均応答時間

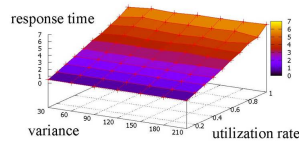


図 5 Wi-Fi の平均応答時間

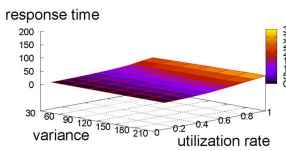


図 6 公衆回線の回線ブロック率

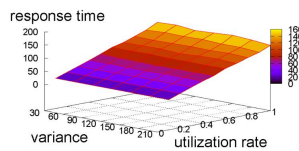


図 7 Wi-Fi の回線ブロック率

### 4.2.2 公衆回線と Wi-Fi にそれぞれ半分程度のユーザが接続する場合

次に、公衆回線と Wi-Fi へそれぞれ半分程度のユーザが接続する場合、つまりユーザが Wi-Fi( $H_2/M/s_w/K_w$ ) に接続する確率が公衆回線 ( $H_2/M/1/K_g$ ) の  $1/2$  である場合において、公衆回線と  $s_w = 1$  の時の Wi-Fi の結果 (平均応答時間、回線ブロック率) をそれぞれ図 8, 9, 10, 11 に示す。

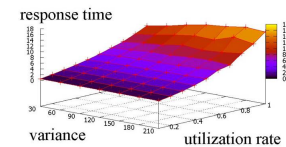


図 8 公衆回線の平均応答時間

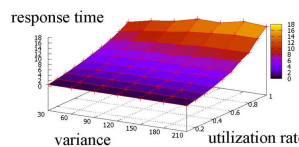


図 9 Wi-Fi の平均応答時間

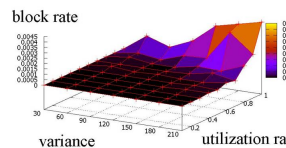


図 10 公衆回線の回線ブロック率

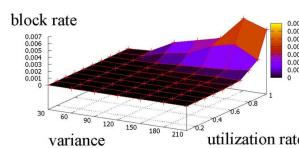


図 11 Wi-Fi の回線ブロック率

本節では  $s_w = 1, 2, \dots, 5$  と変化させ、かつユーザの接続状況が異なる複数の場合によるシミュレーション結果の一例として、図 4~11 を示した。次節では、シミュレーション結果から多項近似式を導出し、応答曲面として利用し、第 2 節にて示した線形計画問題を解く。

### 4.3 応答曲面の多項式近似、線形計画問題

図 4~11 を含めたシミュレーション結果を利用し、多変量解析により、公衆回線、Wi-Fi それぞれの平均応答時間 ( $W_g, W_w$ )、回線ブロック率 ( $B_g, B_w$ ) を、利用率  $\rho$ 、分散  $\sigma^2$  とシステム数  $s_g, s_w$  の多項近似式として表現すると、

$$W_g = 20.7\rho + 0.038\sigma^2 + 1.9s_g - 8.04$$

$$W_w = 17.4\rho + 0.003\sigma^2 + 2.51s_w - 8.52$$

$$B_g = 0.05\rho + 0.0001\sigma^2 + 0.0027s_g - 0.037$$

$$B_w = 0.00075\rho + 1.9 \times 10^{-6}\sigma^2 + 2.5 \times 10^{-6}s_w - 0.00048$$

となる。この式を線形計画問題の応答曲面として利用する。なお、第 2 節で示した線形計画問題では、所与の到着条件に対する  $s_g, s_w$  を求めることが目的であることから、利用率  $\rho$ 、分散  $\sigma^2$  には定数を用いる。

なお、所与の目標平均応答時間は 20 単位時間、目標ブロック率は 5%、その他のパラメータは表 1 に示す値とし、線形計画問題を解くと制約条件を満たす両システム最適配置数は、公衆回線が 1 個、Wi-Fi が 8 個であることがわかった。なお、今回の数値例の計算では変数も少ないことから表計算ソフトに実装されているソルバー機能 [10] を利用した。

表 1 想定モデルのパラメータ

利用率	分散	コスト (円)		重み	
$\rho$	$\sigma^2$	$c_g$	$c_w$	$w_g$	$w_w$
0.8	150	1,000	1	0.7	0.3

ここまで、最適配置数を求めた。しかしここまで求めた配置数はサービス提供者の視点からユーザが満足するであろうといった前提の条件を加え、求めたものである。つまり本当にユーザを考慮したかどうかわからない配置問題となっている。

そこで次に、ユーザを重要視した新たなネットワーク指標として QoE (Quality of Experience) [11] を利用して第 2 節の設計方針に基づき、最適解を求める。なお、応答曲面導出モデル、シミュレーション条件、想定モデルのパラメータはすべて第 3 節、第 4 節、第 4.3 節と同様の条件とする。

## 5. ネットワーク指標 QoE の導入

### 5.1 QoE (Quality of Experience, ユーザー体感品質)

QoE とは QoS に代わる新たなネットワーク指標でユーザの性格や心理状態など、ユーザ視点でのネットワークを評価する指標である。本研究では参考文献 [11] で提案されている価値関数 (図 12, 式 (3) 参照) を利用した QoE の導出を行う。

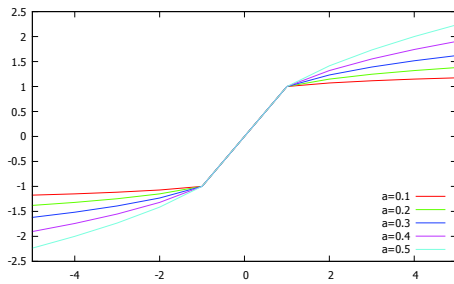


図 12 価値関数

$$f(x) = \begin{cases} x^a & (x \geq 0) \\ -l(-x)^b & (x < 0) \end{cases} \quad (3)$$

価値関数とは行動経済学上にて、経済活動において発生する利得や損失に対する心理変化を表現する関数である。式 (3) では  $x$  は利得および損失量を示し、心理変化量を  $f(x)$  とする。 $a$  は利得に関する心理変化の仕方を、 $b$  は損失に対する心理変化の仕方を定める定数である。また、 $l$  は損失回避性バイアスを示す。図 12 は、 $a, b$  がそれぞれ  $0.1, 0.2, \dots, 0.5$  の値の時の価値関数を示したものである。この時  $l = 1$  である。

本研究では、待ち行列モデルシミュレーションの結果(平均応答時間、回線ブロック率)を QoE に変換し、応答曲面を求める。ただし、回線ブロック率はユーザの心理状況を含む必要がない。したがって、平均応答時間のみ QoE による導出を行い、平均応答時間は常に 0 以上となることから、式 (4) を利用する。この式の  $x$  に平均応答時間を代入することで、QoE を導出する。

$$f(x) = x^a \quad (x \geq 0, a = 0.1, 0.2, \dots, 0.5) \quad (4)$$

応答曲面を求めるためには、回線ブロック率も必要である。そこで第 4 節の回線ブロック率 ( $B_g, B_w$ ) を利用する。では、本節の導出方法に従い、次節にて結果を示す。

## 5.2 数値例

第 5.1 節から  $a = 0.1, 0.2, \dots, 0.5$  における QoE での平均応答時間を求めた。本稿ではその一例として、第 4.2 節のシミュレーション結果(図 4, 5, 8, 9)を QoE に変換した結果を図 13, 14, 15, 16 に示す。なお、図 13, 14, 15, 16 は  $a = 0.5$  で求めた結果である。

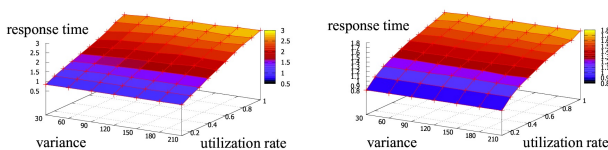


図 13 公衆回線の平均応答時間

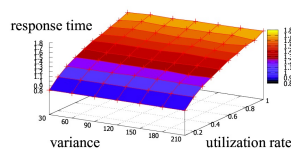


図 14 Wi-Fi の平均応答時間

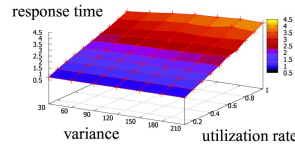


図 15 公衆回線の平均応答時間

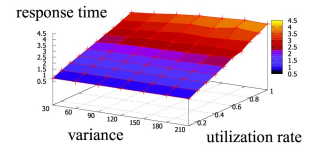


図 16 Wi-Fi の平均応答時間

本節では第 4.2 節と同様に、応答曲面を求めるために、結果を示した。次節では、QoE に変換した結果を利用して、多項近似式を求め、最適解を求める。

## 5.3 応答曲面の多項式近似、線形計画問題

第 5.1 節の方法で導出した QoE での平均応答時間を多変量解析より、多項近似式を求め、第 4.3 節と同様に線形計画問題の応答曲面として利用する。そして第 2 節の設計方針に基づき、最適解を求めた。 $a = 0.1, 0.2, \dots, 0.5$  の最適解を表 2 に示す。

表 2 最適解

a	公衆回線(個)	Wi-Fi(個)
0.1	1	1
0.2	1	1
0.3	1	1
0.4	1	1
0.5	1	1

表 2 から、ネットワーク指標 QoE の場合、最適配置数は公衆回線、Wi-Fi 双方で 1 個ずつ配置する必要があることが分かった。

QoS, QoE それぞれにて最適解を求めたところ、最適解が異なることが分かった。つまり、ユーザとサービス提供者との認識に差が生じている。次節では QoS と QoE との変化を比較し、それぞれ認識にどれほど差があるのかを調べる。

## 5.4 QoS と QoE

QoS と QoE では最適解が異なるため、ユーザとサービス提供者との認識に差が生じていることが分かった。そこで QoS と QoE の変化を調べ、比較する。本研究では QoS と QoE の変化を調べるために、第 4.2 節の図 4 参照と第 5.2 節の図 13( $a = 0.5$ )を利用する。利用率が 0.5 の時の分散  $\sigma^2$  と平均応答時間の変化を QoS と QoE で比較する(図 17 参照)。ここではより詳細な数値を表 3 に示す。

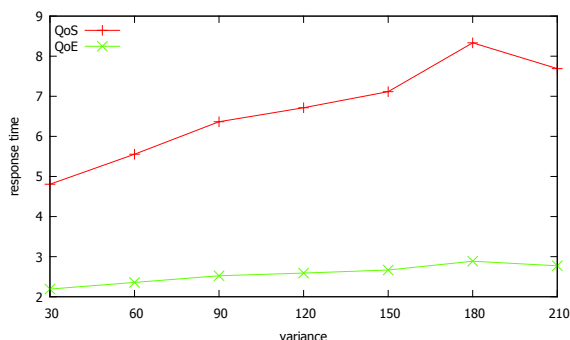


図 17 QoS と QoE

表 3 図 17 の数値結果

$\sigma^2$	QoS	QoE
30	4.80595	2.192247705
60	5.55419	2.356732908
90	6.36508	2.522911017
120	6.71463	2.522911017
150	7.11575	2.667536317
180	8.33414	2.886891061
210	7.69058	2.773189499

QoS と QoE を比較すると、QoS よりも平均応答時間が小さい。つまりユーザはこの平均応答時間に対してサービス提供者が懸念するほど長いと感じていないことがわかる。

本節から、ユーザとサービス提供者との認識には大きな差が生じていることが確認された。このことからサービス提供者が必要であると認識している配置数よりも少ない、1 個ずつの配置で十分であるということを示している。

## 6. まとめ

本研究ではサービス提供者がネットワーク環境を整備する際、ユーザを満足させる平均応答時間や回線ブロック率を満たし、かつサービス提供者が安価なコストで配置できる公衆回線と WI-Fi の配置配置数がどれほどか検討するため、線形計画問題から最適解を求めた。本研究の結果から公衆回線は 1 個で WI-Fi は 8 個が妥当であると示した。

またユーザの視点から最適解を考えるために、QoS に代わる新たなネットワーク指標 QoE を導入し、同様の設計方針に基づいて、ユーザの視点からの最適配置数を求めた。その結果、ユーザ QoE による最適解では公衆回線、Wi-Fi 双方が 1 個であることが分かった。

以上のことから本研究の配置問題において、必要となる配置数は、公衆回線、Wi-Fi 双方で、1 個ずつである。

今後の課題として、本研究の線形計画問題ではユーザを満足させる条件として平均応答時間と回線ブロック率のみに着目した。今後は QoE の内容を含む条件を増やすことで、よりユーザの視点に焦点を当てた条件のもとで線形計画問題を解く必要があると考えられる。また QoE を待ち行列モデルに反映させるために、想定環境とモデルの見直

しを行う必要がある。

## 参考文献

- [1] 岸田 重行, “Wi-Fi オフロードにまい進する通信事業者”, 日経コミュニケーション, pp.84-85, 2011 年 9 月号.
- [2] 清水 哲, 能上 慎也, “量的・質的 VCHS 問題のシミュレーション評価”, 信学技報, vol.110, IN2010-108, pp.63-68, 2010.
- [3] 木村 龍明, 奥田 隆史, 井手口 哲夫, 田 学軍, “公衆無線 LASN によるデータダウンロードサービスにおけるユーザの協調行動の有効性に関する研究”, 電子情報通信学会論文誌 B, vol.J96-8, No.7, pp.662-669, 2013.
- [4] 野中 優, 野上 慎也, “多様な客に対する能力別サーバ割り当て問題について”, 電子情報通信学会総合大会講演論文集, pp.131, B-7-54, 2008.
- [5] 穴井 宏和, 『数理最適化の実践ガイド』, 講談社, 2013.
- [6] 松井 泰子他, 『入門オペレーションズ・リサーチ』, 東海大学出版会, 2008.
- [7] 村上 泰司, 『わかりやすい情報交換工学第 1 版』, 森北出版, 2009.
- [8] Haruo Akimaru and Konosuke Kawashima, *Teketraffic Theory and Applications*, Springer-Verlag, 1992.
- [9] Mesquite Software, <http://www.mesquite.com>, 2013 年閲覧.
- [10] Microsoft Office, “ソルバーについて”, <http://office.microsoft.com/ja-jp/excel-help/HP005198368.aspx>, 2013 年閲覧.
- [11] 橋口 裕太, 奥田 隆史, 井手口 哲夫, 田 学軍, “QoE を指標としたネットワーク資源動的割り当て手法の提案と性能評価”, 信学技報, vol.113, IA2013-85, pp.37-42, 2014.