

特別研究報告書

# 通信データ品質を差別化するための トラフィック制御に関する考察

指導教官

福嶋 雅夫 教授  
滝根 哲哉 助教授

京都大学工学部情報学科  
数理工学コース  
平成8年度入学

今川 裕人

平成12年2月15日提出

# 目次

<b>1</b>	<b>序文</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>スループットと遅延を考慮したサービス方式</b>	<b>1</b>
2.1	Assured Service Scheme . . . . .	1
2.2	Premium Service Scheme . . . . .	2
2.3	提案するサービス方式 . . . . .	2
<b>3</b>	<b>スループットならびに平均遅延の解析</b>	<b>3</b>
3.1	モデル化 . . . . .	3
3.2	性能解析 . . . . .	4
<b>4</b>	<b>各方式の性質</b>	<b>6</b>
4.1	システム全体の負荷に関する性質 . . . . .	7
4.1.1	スループット . . . . .	7
4.1.2	平均遅延 . . . . .	8
4.2	バッファ容量に関する性質 . . . . .	9
4.2.1	スループット . . . . .	9
4.2.2	平均遅延 . . . . .	10
4.3	到着率の比に関する性質 . . . . .	11
4.3.1	スループット . . . . .	11
4.3.2	平均遅延 . . . . .	11
4.4	RIOのパラメータに関する性質 . . . . .	12
<b>5</b>	<b>制御パラメータの設定法</b>	<b>13</b>
5.1	準備 . . . . .	13
5.2	パラメータの設定方法 . . . . .	15
<b>6</b>	<b>結論</b>	<b>16</b>
<b>A</b>	<b>付録</b>	<b>18</b>

## 1 序文

現在のインターネットにおけるパケット転送では、ベストエフォートサービスが大部分を占めている。ベストエフォートサービスではスループット、平均伝送遅延といった通信サービス品質 (QoS) を利用者に対して保証することができない。そこで利用者に対し QoS を保証し、公平なサービスを行うサービス方策が利用者、プロバイダの双方から期待されている [1] [3]。利用者により低コストで QoS を保証するための方策の一つに Differentiated Service がある。Differentiated Service では、パケットにラベル付けを行うことで幾つかのクラスに分け、クラス間の QoS を差別化する。現在までに、代表的なものとして Assured Service Scheme と Premium Service Scheme が提案されている。Assured Service Scheme ではパケットを確率的に棄却することによって、輻輳時における各クラスのスループットを保証する [1][4]。また、Premium Service Scheme ではクラス間に優先権を設け、各クラスの平均伝送遅延を保証する [1][2]。

これらスループットならびに遅延に関する差別化を実施した場合、インターネット上では、これらの指標が組み合わされたサービスクラス、すなわち、スループット、遅延の両方を保証するクラス、スループットを保証するクラス、遅延を保証するクラス、ベストエフォートサービスを行うクラスが混在し、これらのクラス間で QoS を差別化する必要がある。しかし、このようなスループットと遅延の両方を考慮したサービス方式についての研究はほとんど行われていない。

本報告では、スループットならびに遅延に関して差別化された 4 種類のクラスに対して差別化を行うサービス方式について考察する。特に、ルータのバッファ管理に関して遅延に関するクラス毎に個別のバッファを用意する分離型と、全てのクラスを 1 つのバッファへ収容する共有型の 2 種類を考える。それぞれのバッファ管理方式に対してモデル化を行い、輻輳時のスループットならびに遅延のシステムを記述する各パラメータに関する性質を考察する。さらに、各クラスの負荷と目標となる輻輳時のスループットならびに遅延が与えられたとき、共有型バッファ管理方式を用いて、与えられた目標を達成するための制御パラメータの設定法を提案し、数値実験によりその有効性を確認する。

## 2 スループットと遅延を考慮したサービス方式

ここでは Differentiated Service において従来提案されていた Assured Service Scheme と Premium Service Scheme の説明を行った後、スループットと遅延の両方を考慮した新しいサービス方式を提案する。

### 2.1 Assured Service Scheme

Assured Service Scheme では、到着するパケットをパケットの伝送率などのプロファイルによってラベル付けをして、クラス分けを行う。以下では、ラベル付けされたパケットを Tagged パケット (T パケット) と呼び、ラベル付けされていないパケットを Non Tagged パケット (NT パケット) と呼ぶ。ルータでは、ラベル情報をもとにバッファが一杯になる前に各パケットを確率的に棄却する。確率的な棄却を行うことでルータの輻輳を緩和すると共に、輻輳時における各クラスのスループットを保証する。ここで、受付確率の設定方法の代表的なものとして RIO (A RED with

In and Out packets) や THRESH が提案されている。RIO はバッファが一杯になるのを防ぐために、待ち行列長に基づいてパケットを確率的に棄却する。具体的には、待ち行列長が閾値を越えるとパケットの棄却を始め、待ち行列長に応じて棄却率を変化させる。さらに、T パケットと NT パケットで異なる棄却率を用いることによって、パケット間にサービス格差をつける。THRESH では、待ち行列長が閾値を越えると NT パケットは全て棄却される。T パケットはバッファが一杯になるまで受け付けられる [1]。

## 2.2 Premium Service Scheme

Premium Service Scheme では、クラス間に優先権を設け、各クラスの伝送遅延時間を保証する。各パケットは到着時、料金などのプロファイルを満たすパケットはラベル付けされ、優先権の高いクラス (クラス 1) と、優先権の低いクラス (クラス 2) とに区別される。ルータにおけるサービス規律は 2 つのクラスを持つ優先権付きサービスが用いられる。クラス 1 のパケットは優先的にサービスされるが、一方、クラス 2 のパケットはクラス 1 のパケットが全てサービスされて、クラス 1 のパケットが空となった場合のみサービスされる。このようにすることで、クラス 1 の遅延を減少させることができる [1]。

## 2.3 提案するサービス方式

Assured Service Scheme や Premium Service Scheme を用いてスループットならびに遅延に関する差別化を実施した場合、インターネット上では、これらの指標が組み合わせられたサービスクラス、すなわち、スループット、遅延の両方を保証するクラス、スループットを保証するクラス、遅延を保証するクラス、ベストエフォートサービスを行うクラスが混在し、これらのクラス間で QoS を差別化する必要がある。しかし、このようなスループットと遅延の両方を考慮したサービス方式についての研究はほとんど行われていない。

そこで今回スループットと遅延の両方を考慮したサービス方式を提案する。このサービス方式では、各パケットに対して 4 種類のクラス分けが行われる。各パケットはクラス 1 の Tagged パケット (1T パケット)、クラス 1 の Non Tagged パケット (1NT パケット)、クラス 2 の Tagged パケット (2T パケット)、クラス 2 の Non Tagged パケット (2NT パケット) の 4 種類に分別される。よって、1T パケットはスループット、遅延の両方を保証するクラス、1NT パケットは遅延を保証するクラス、2T パケットはスループットを保証するクラス、2NT パケットはベストエフォートサービスを行うクラスとなる。クラス 1 のパケットはクラス 2 のパケットに対して優先的にサービスされる。また、T パケットと NT パケットの間には受付確率を設定することでサービスの差別化が行なわれる。

ここでルータのバッファ管理方式を 2 種類提案する。一つめは、図 1 のように、クラス毎にそれぞれ別々のバッファにパケットを収容するバッファ管理方式を考える。以下ではこれを分離型バッファ方式と呼ぶ。

分離型バッファ方式ではクラス 1 のパケットとクラス 2 のパケットはそれぞれ別のバッファに収容されるため、サーバが混雑したとき優先権のあるクラス 1 のパケットのみがサービスされて、クラス 2 のパケットが全くサービスされず、スループットが保証されない可能性がある。そこで、

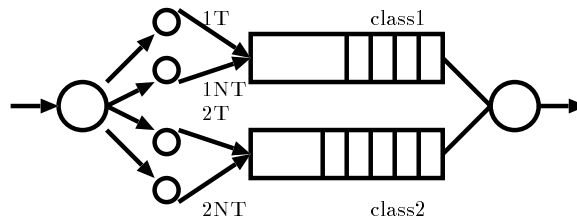


図 1: 分離型バッファ方式

全てのクラスを1つのバッファへ收容するバッファ管理方式を考える(図2)。こうすることでクラス2のパケットにもスループットが保証されることが期待される。しかし、全パケットが同一バッファに到着する中で各クラスのサービス差別化をするため、バッファ管理に困難さが伴う。以下ではこれを共有型バッファ方式と呼ぶ。

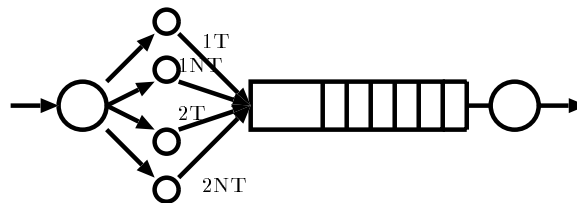


図 2: 共有型バッファ方式

### 3 スループットならびに平均遅延の解析

新しいサービス方式に対して提案した2つのバッファ管理方式を用いたルータをモデル化し、スループットならびに平均遅延の解析を行う。

#### 3.1 モデル化

クラス  $i$  ( $i = 1, 2$ ) の T パケット (NT パケット) の到着は率  $p_i \lambda_i$  ( $(1 - p_i) \lambda_i$ ) のポワソン過程に従うとし、クラス  $i$  のパケットのサービス時間は平均  $\mu_i$  をもつ独立同一な指数分布に従うとする。分離型バッファ方式におけるクラス  $i$  ( $i = 1, 2$ ) のバッファ容量を  $K_i$  とする。一方、共有型バッファ方式におけるバッファサイズを  $K$  とする。なお、2つのモデルの比較を行うため  $K = K_1 + K_2$  に固定する。

クラス1とクラス2のパケットの QoS の差別化を行うため、両バッファ方式において、クラス1のパケットはクラス2のパケットに関して優先権をもち、割り込み型優先規律によってサービスが行われるとする。なお、各クラス内では、パケットは到着順にサービスされる。

次に、T パケットと NT パケットの間の差別化を行うために、受付関数を定義する。この関数は、システムにパケットが到着したときの、システム内のクラス 1 とクラス 2 のパケット数の組  $(n_1, n_2)$  が与えられたとき、到着したパケットがバッファに収容される確率を表す。以下では、クラス  $i$  ( $i = 1, 2$ ) の  $j$  ( $j = T, NT$ ) パケットの受付関数を  $\alpha_{i,j}(n_1, n_2)$  とし、クラス  $i$  ( $i = 1, 2$ ) における全体の受付関数  $\alpha_i(n_1, n_2)$  を

$$\alpha_i(n_1, n_2) = p_i \alpha_{i,T}(n_1, n_2) + (1 - p_i) \alpha_{i,NT}(n_1, n_2) \quad (i = 1, 2)$$

とする。さらに、各クラスの客数が与えられたときのクラス  $i$  ( $i = 1, 2$ ) の実効到着率  $\lambda_i(n_1, n_2)$  を次式で定義する。

$$\lambda_i(n_1, n_2) = \lambda_i \alpha_i(n_1, n_2) \quad (i = 1, 2)$$

受付関数の具体的な設定方法として、本稿では、TAIL, RIO, THRESH の 3 通りについて考察する。以下に、共有型バッファ方式におけるこれらの設定方法を示す。分離型バッファ方式の場合は  $K$  を  $K_1 + K_2$  に置き換える。

**TAIL:** 特別なバッファ管理を行なわない。

$$\alpha_{i,j}(n_1, n_2) = 1 \quad (0 \leq n_1 + n_2 \leq K - 1, i = 1, 2, j = T, NT)$$

**RIO:** システム内のパケットの総数  $n_1 + n_2$  が閾値  $M$  になるまでは全てのパケットを受け付ける。閾値  $M$  を越えると各パケットは係数  $\alpha_{i,j}^*$  ( $i = 1, 2, j = T, NT$ ) をもつ一次直線で増加する確率でパケットを棄却する。

$$\alpha_{i,j}(n_1, n_2) = 1 \quad (0 \leq n_1 + n_2 \leq M, i = 1, 2, j = T, NT) \quad (1)$$

$$\alpha_{i,j}(n_1, n_2) = 1 - \frac{\alpha_{i,j}^*}{K - M} (n_1 + n_2 - M) \quad (M < n_1 + n_2 \leq K - 1, \quad (2) \\ i = 1, 2, j = T, NT)$$

**THRESH:** システム内のパケットの総数が閾値  $M$  になるまでは全てのパケットを受け付ける。閾値  $M$  を越えると NT パケットは全て棄却する。

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_{1,T}(n_1, n_2) = \alpha_{2,T}(n_1, n_2) = 1, \quad 0 \leq n_1 + n_2 \leq K - 1 \\ \alpha_{1,NT}(n_1, n_2) = \alpha_{2,NT}(n_1, n_2) = \begin{cases} 1, & 0 \leq n_1 + n_2 \leq M \\ 0, & M < n_1 + n_2 \leq K - 1 \end{cases} \end{array} \right.$$

### 3.2 性能解析

上記にモデルに対して、評価の指標となるスループットと平均遅延を導出する。システムの状態を各クラスのパケット数の組  $(n_1, n_2)$  で表現すると、ポアソン到着、指数サービスの仮定より、 $(n_1, n_2)$  はマルコフ連鎖を構成する。また、分離型バッファ方式の場合、状態数は  $(K_1 + 1) \times (K_2 + 1)$  となり、共有型バッファ方式の場合は  $(K + 1) \times (K + 1) / 2$  なので、共に有限状態マルコフ連鎖をなしている。

ここで、定常状態を仮定して、システムの状態が  $(n_1, n_2)$  である定常状態確率を  $\pi(n_1, n_2)$  とする。以下では、定常状態確率を効率的に計算する方法を分離型バッファ方式について示す。

ベクトル  $\vec{\pi}(n_2)$ ,  $(n_2 = 0, \dots, K_2)$ ,  $\vec{\pi}$ ,  $\vec{e}$ ,  $\vec{0}$  を次のように定義する。ただし、 $^T$  は転置を表す。

$$\begin{aligned}\vec{\pi}(n_2) &= (\pi(0, n_2), \dots, \pi(K_1, n_2)), \quad (n_2 = 0, \dots, K_2) \\ \vec{\pi} &= (\vec{\pi}(0), \dots, \vec{\pi}(K_2)) \\ \vec{e} &= (1, \dots, 1)^T \\ \vec{0} &= (0, \dots, 0)\end{aligned}$$

このとき、マルコフ連鎖の推移率行列を  $Q$  としたとき、次式が成立する。

$$\begin{aligned}\vec{\pi}Q &= \vec{0} \\ \vec{\pi} \cdot \vec{e} &= 1\end{aligned}\tag{3}$$

ここで推移率行列  $Q$  は行列  $A_i$  ( $i = 0, \dots, K_2$ ),  $U_j$  ( $j = 0, \dots, K_2 - 1$ ),  $D$  を用いて次のように表される。

$$Q = \begin{pmatrix} A_0 & U_0 & & & & & 0 \\ D & A_1 & U_1 & & & & \\ & D & A_2 & U_2 & & & \\ & & \ddots & \ddots & \ddots & & \\ & & & D & A_{K_2-1} & U_{K_2-1} & \\ 0 & & & & D & A_{K_2} & \end{pmatrix}$$

式 (3) を  $\vec{\pi}(n_2)$  を用いて書き換えると次のようになる。

$$\begin{cases} \vec{\pi}(0)A_0 + \vec{\pi}(1)D = \vec{0} \\ \vec{\pi}(n_2 - 1)U_{n_2-1} + \vec{\pi}(n_2)A_{n_2} + \vec{\pi}(n_2 + 1)D = \vec{0}, \quad (n_2 = 1, \dots, K_2 - 1) \\ \vec{\pi}(K_2 - 1)U_{K_2-1} + \vec{\pi}(K_2)A_{K_2} = \vec{0} \end{cases}\tag{4}$$

ここで行列  $D$  は次のような形で表されることに注意する。

$$D = \begin{pmatrix} \mu_2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & 0 \end{pmatrix}$$

さらにマルコフ連鎖のフロー均衡の関係より次式が導かれる。

$$\vec{\pi}(n_2 + 1)D = (\vec{\pi}(n_2)U_{n_2}\vec{e}, 0, \dots, 0), \quad (n_2 = 0, \dots, K_2 - 1)$$

この式を用いると、(4) 式は次のように書き換えられる。

$$\begin{cases} \vec{\pi}(0)A_0 + (\vec{\pi}(0)U_0\vec{e}, 0, \dots, 0) = \vec{0} \\ \vec{\pi}(n_2 - 1)U_{n_2-1} + \vec{\pi}(n_2)A_{n_2} + (\vec{\pi}(n_2)U_{n_2}\vec{e}, 0, \dots, 0) = \vec{0}, \quad (n_2 = 1, \dots, K_2 - 1) \\ \vec{\pi}(K_2 - 1)U_{K_2-1} + \vec{\pi}(K_2)A_{K_2} = \vec{0} \end{cases}\tag{5}$$

式 (5) は,  $K_1 + 1$  個の変数を持つ連立方程式を  $n_2 = 0$  から  $n_2 = K_2$  まで合計  $K_2 + 1$  回順次解くことにより定常確率が効率的に計算できることを示している. なお, 共有型バッファ方式についても同様の式を導くことができるが省略する.

次に定常状態確率を用いてスループットならびに平均遅延を表現する. ここで, スループットは単位時間当たりサービスを受けるパケットの平均数である. 2 つのモデルにおいて各パケットのスループット  $\lambda_{i,j}^*$  ( $i = 1, 2, j = T, NT$ ) は次のように表される.

分離型バッファ方式

$$\lambda_{1,T}^* = p_1 \sum_{n_1=0}^{K_1-1} \sum_{n_2=0}^{K_2} \lambda_1(n_1, n_2) \pi(n_1, n_2), \lambda_{1,NT}^* = (1-p_1) \sum_{n_1=0}^{K_1-1} \sum_{n_2=0}^{K_2} \lambda_1(n_1, n_2) \pi(n_1, n_2)$$

$$\lambda_{2,T}^* = p_2 \sum_{n_2=0}^{K_2-1} \sum_{n_1=0}^{K_1} \lambda_2(n_1, n_2) \pi(n_1, n_2), \lambda_{2,NT}^* = (1-p_2) \sum_{n_2=0}^{K_2-1} \sum_{n_1=0}^{K_1} \lambda_2(n_1, n_2) \pi(n_1, n_2)$$

共有型バッファ方式

$$\lambda_{1,T}^* = p_1 \sum_{n_1=0}^{K_1-1} \sum_{n_2=0}^{K_1-1-n_1} \lambda_1(n_1, n_2) \pi(n_1, n_2), \lambda_{1,NT}^* = (1-p_1) \sum_{n_1=0}^{K_1-1} \sum_{n_2=0}^{K_1-1-n_1} \lambda_1(n_1, n_2) \pi(n_1, n_2)$$

$$\lambda_{2,T}^* = p_2 \sum_{n_1=0}^{K_1-1} \sum_{n_2=0}^{K_1-1-n_1} \lambda_2(n_1, n_2) \pi(n_1, n_2), \lambda_{2,NT}^* = (1-p_2) \sum_{n_1=0}^{K_1-1} \sum_{n_2=0}^{K_1-1-n_1} \lambda_2(n_1, n_2) \pi(n_1, n_2)$$

一方, Little の公式より各クラスの平均遅延  $R_1, R_2$  を求めることができる.  $L_1, L_2$  を各クラスのシステム内平均パケット数,  $\lambda_1^*, \lambda_2^*$  を各クラスのスループットとしたとき, 各方式の平均遅延は下のように表される.

$$R_1 = \frac{L_1}{\lambda_1^*}, R_2 = \frac{L_2}{\lambda_2^*}$$

分離型バッファ方式

$$L_1 = \sum_{n_1=0}^{K_1} \sum_{n_2=0}^{K_2} n_1 \pi(n_1, n_2), L_2 = \sum_{n_1=0}^{K_1} \sum_{n_2=0}^{K_2} n_2 \pi(n_1, n_2)$$

$$\lambda_1^* = \sum_{n_1=0}^{K_1-1} \sum_{n_2=0}^{K_2} \lambda_1(n_1, n_2) \pi(n_1, n_2), \lambda_2^* = \sum_{n_2=0}^{K_2-1} \sum_{n_1=0}^{K_1} \lambda_2(n_1, n_2) \pi(n_1, n_2)$$

共有型バッファ方式

$$L_1 = \sum_{n_1=0}^K \sum_{n_2=0}^{K-n_1} n_1 \pi(n_1, n_2), L_2 = \sum_{n_1=0}^K \sum_{n_2=0}^{K-n_1} n_2 \pi(n_1, n_2)$$

$$\lambda_1^* = \sum_{n_1=0}^{K-1} \sum_{n_2=0}^{K-1-n_1} \lambda_1(n_1, n_2) \pi(n_1, n_2), \lambda_2^* = \sum_{n_1=0}^{K-1} \sum_{n_2=0}^{K-1-n_1} \lambda_2(n_1, n_2) \pi(n_1, n_2)$$

## 4 各方式の性質

前章の結果を用いて分離型バッファ方式と共有型バッファ方式のそれぞれについてスループットと平均遅延という2つの QoS を数値的に求めることができる. そこで, この章では数値実験によってシステムを記述する各パラメータに関する性質を考察する.



## 4.1 システム全体の負荷に関する性質

まず初めに、システム全体の負荷  $\rho$  ( $\rho = \rho_1 + \rho_2 = \lambda_1/\mu_1 + \lambda_2/\mu_2$ ) を変化させたときのスループット、平均遅延のグラフの挙動を見ることによって各方式の定性的な性質を調べる。今節で用いたシステムの各パラメータは次の通りである。  $K_1 = K_2 = 100$ ,  $K = 200$ ,  $\lambda_1 = \lambda_2$ ,  $\mu_1 = \mu_2 = 1.0$ ,  $p_1 = p_2 = 0.5$ 。また受付関数は、TAIL, RIO, THRESH の 3 通りで調べた。RIO, THRESH のパラメータを下に示す。

RIO:  $M = 100$ ,  $\alpha_{1,T}^* = 0.8$ ,  $\alpha_{1,NT}^* = 0.6$ ,  $\alpha_{2,T}^* = 0.4$ ,  $\alpha_{2,NT}^* = 0.2$ , THRESH:  $M = 100$ 。

### 4.1.1 スループット

まず、 $\rho$  に対するスループットの変化を調べる。分離型バッファ方式は図 3 に、共有型バッファ方式は図 4 に示す。TAIL では T パケットと NT パケットの間にサービス格差がない。さらに今節でのパラメータは 4 種類のパケットの到着率が全て等しいものを用いているので、各クラスでは T パケットと NT パケットのグラフの挙動は等しくなる。そこで始めに受付関数を TAIL としたときのグラフについて、クラス 1 とクラス 2 のサービス格差に注目して見ることにする。

分離型バッファ方式では、グラフの挙動は  $\rho$  について 3 つの場合に分けられる。第一に、 $\rho < 1$  のとき、各パケットのスループットは  $\rho$  に比例して増加している。各クラスのパケットのスループットに差はない。次に、 $1 < \rho < 2$  のとき、クラス 1 のパケットは  $\rho$  に比例して増加しているが、クラス 2 のパケットのスループットは減少して 0 に近づいている。最後に  $\rho > 2$  のとき、クラス 2 のパケットのスループットは完全に 0 となり、またクラス 1 のパケットは全体のスループットを 1T パケットと 1NT パケットが分け合う形になり、それぞれ 0.5 に収束している。

$\rho = 1$  と  $\rho = 2$  でグラフの挙動が変わる理由を考える。 $\rho < 1$  ではシステム全体の負荷に余裕があるので、スループットは  $\rho$  に比例して増加している。 $1 < \rho < 2$  ではクラス 1 の負荷  $\rho_1$  はまだ過負荷となっていないので、クラス 1 のスループットには影響が出ていない。しかし、システム全体としては過負荷となっており優先度の低いクラス 2 のバッファはほとんど一杯になっていると考えられる。クラス 2 のパケットがバッファ内に入るためにはクラス 2 のパケットがサービスされてクラス 2 のバッファに空きがでなければならない。だが、 $\rho_1$  が増えていくにつれてクラス 1 のバッファが空となる確率は減少し、クラス 2 のパケットがサービスされる機会も減少してしまう。そのため、クラス 2 はバッファに入れずスループットは減少してしまう。 $\rho > 2$  では、クラス 1 の負荷も 1 を越えてしまい、過負荷となるため、クラス 2 のスループットは完全になくなってしまふ。

次に共有型バッファ方式を見ると、グラフの挙動は  $\rho$  について 2 つの場合に分けられる。 $\rho < 1$  のとき、スループットは  $\rho$  に比例して増加している。 $\rho > 1$  では、各パケットのスループットは分岐してそれぞれの値へ収束している。分離型バッファ方式ではクラス 2 のスループットは  $\rho$  が大きくなると 0 となっていたが、共有型バッファ方式ではクラス 2 のパケットにもスループットが保証されている。この方式ではクラス 1 とクラス 2 のパケットが同じバッファに到着するため、バッファが一杯になってもクラス 2 はシステムに入ることができるとして考えられる。

さらに受付関数によるスループットの違いを見る。TAIL と比較して、RIO, THRESH では最終値に収束する  $\rho$  が大きくなっている。受付関数によってシステムが輻輳状態とならない  $\rho$  の

範囲が広がっていることがわかる．次に，RIO と THRESH の間の差について考える．システム内に入ったパケットはサービスを受けることができるため，各パケットのシステム内に入る確率によってスループットは決まる．システムが過負荷となった場合，システムに入る確率はバッファに一つだけ空きがある状態での到着率と受付関数の積に依存している．そのため，THRESH ではシステムが過負荷となると NT パケットはバッファに一つだけ空きがある状態での受付関数が 0 となっているためほとんど棄却されてしまい，T パケットのスループットのみが残る．一方，RIO では各パケットのバッファに一つだけ空きがある状態での受付関数と到着率の積の比に比例したスループットが得られている．つまり，バッファに一つだけ空きがある状態での受付関数をうまく設定すると各パケットの比をうまくコントロールできる事が予想される．

#### 4.1.2 平均遅延

$\rho$  を変化させたときの各パケットの平均遅延の変化を見る．図 5，図 6 に分離型バッファ方式のクラス 1 とクラス 2，図 8，図 9 に共有型バッファ方式のクラス 1，クラス 2 の平均遅延のグラフを示す．システムの各パラメータはスループットを見たときと同じものを用いた．図 6 のグラフは縦軸を log-scale で取っていることに注意する．

まず，図 5 と図 6 の分離型バッファ方式の平均遅延を見る．クラス 1 の平均遅延は  $\rho < 2$  までは抑えられている． $\rho > 2$  では受付関数によって収束するまでの時間に差はあるが，平均遅延は 100 に収束している．これはクラス 1 のバッファ容量  $K_1$  が 100 であることから自然な結果であると考えられる．クラス 2 の平均遅延を詳しく見るために  $\rho$  が小さいところに注目した図 7 を用意した．この図 7 と図 6 よりクラス 2 の平均遅延は  $\rho < 1$  までは抑えられているが， $\rho$  が 1 を越えると平均遅延は指数的に増加していくのがわかる．つまり， $\rho \gg 1$  ではクラス 2 がサービスされる可能性はほとんどない．

次に，図 8 と図 9 で共有型バッファ方式の平均遅延を見る．クラス 1 の平均遅延は  $\rho < 1$  までは，受付関数による差は出ていない． $\rho > 1$  では受付関数によりグラフは分岐している．また，平均遅延は  $\rho > 1$  では， $\rho$  が増えるにつれて減少している．一方，クラス 2 の平均遅延を見ると， $\rho < 1$  までは平均遅延は抑えられている． $\rho > 1$  では TAIL と THRESH の平均遅延は約 400 に収束している．RIO では他のものよりも平均遅延は大きくなっている．THRESH の場合， $1 < \rho < 2$  ではスループットのグラフを見たときの考察より，NT パケットがほとんど棄却されてしまうため，実質到着率は半分となり，その分平均遅延の増加が抑えられている． $\rho > 2$  以降は TAIL と同様の挙動を示している．

$\rho > 1$  でのクラス 2 の平均遅延について考える．あるクラス 2 のパケットが 1 つサービスされるのにかかる時間はそのパケット自身のサービスにかかる時間と，さらにクラス 1 がクラス 2 のパケットのサービスに割り込んできた場合，割り込んできたクラス 1 のパケットのサービス時間を足したものになる．この時，クラス 1 が割り込む回数を  $x$  とするとクラス 1，クラス 2 のサービス時間の平均はそれぞれ， $\mu_1^{-1}$ ， $\mu_2^{-1}$  なのでクラス 2 のパケットが 1 つサービスされるのにかかる時間は  $\mu_2^{-1} + x\mu_1^{-1}$  と表される．この  $x$  が  $\rho \gg 1$  でどのような値を取るかを考える． $\rho \gg 1$  でシステムの状態はバッファが一杯になっている状態と，バッファに一つだけ空きがある状態の 2 通りが考えられる．またその際，バッファ内はほとんどクラス 2 のパケットが占めており，クラ

クラス 1 が到着した場合にはクラス 1 はすぐにサービスされ、クラス 2 が到着した場合にはバッファ内がクラス 2 のパケットで占められ、クラス 2 のパケットがサービスされる。つまりバッファに一つだけ空きがある状態では、到着したパケットと同じクラスのパケットがサービスされる。すなわち、バッファに一つだけ空きがある状態での受付関数を考慮した到着率を考えて、 $x = (\text{クラス 1 の到着率}) / (\text{クラス 2 の到着率})$  となる。またクラス 2 のパケットがバッファに入ったとき、そのパケットがシステムを出ていくまでには、ほぼバッファ容量分のクラス 2 のパケットがサービスされなければいけない。つまりシステムが過負荷のときのクラス 2 の平均遅延は次のように近似できる。

$$R_2 \cong K(\mu_2^{-1} + x\mu_1^{-1})$$

この考察に基づいてクラス 2 の平均遅延を計算し、グラフの結果と比較する。 $\rho \gg 1$  のとき、TAIL と THRESH ではクラス 1 とクラス 2 の到着率は等しい。つまり  $x = 1$ 。また今回のパラメータでは  $\mu_1^{-1} = 1$ 、 $\mu_2^{-1} = 1$ 、 $K = 200$  なので平均遅延は  $R_2 \cong 200(1 + 1) = 400$  と計算される。RIO では  $x \cong 7/3$  となっており、 $R_2 \cong 200(1 + 7/3) \cong 667$  となり、この結果はグラフと一致する。

## 4.2 バッファ容量に関する性質

この節ではバッファ容量が変化したときの QoS について議論する。まずバッファの全容量を変えたときに注目する。次に分離型バッファ方式でクラス 1 とクラス 2 の容量の比を変えたときの QoS を見る。

### 4.2.1 スループット

4.1 節ではバッファの全容量を 200 に固定していた。ここで、バッファの全容量を変えた場合でも 4.1 節と同じ考察ができることを確かめる。 $K = 1000$ 、 $K_1 = K_2 = 500$  としてその他は 4.1 節と同じパラメータ、 $\lambda_1 = \lambda_2$ 、 $\mu_1 = \mu_2 = 1.0$ 、 $p_1 = p_2 = 0.5$ 。 $\alpha$ : TAIL, RIO, THRESH。RIO:  $M = 500$ 、 $\alpha_{1,T}^* = 0.8$ 、 $\alpha_{1,NT}^* = 0.6$ 、 $\alpha_{2,T}^* = 0.4$ 、 $\alpha_{2,NT}^* = 0.2$ 、THRESH:  $M = 500$ 、を用いて、スループットのグラフを比較する。

図 10 に分離型バッファ方式、図 11 に共有型バッファ方式のスループットのグラフを示した。対応する 4.1 節のグラフはそれぞれ図 3 と図 4 になる。グラフの形は 4.1 節と同じものが得られた。このことからバッファの全容量を変えてもスループットは  $\rho$  に対して同じようなグラフの挙動を示すことがわかる。

4.1 節で用いたパラメータでは、分離型バッファ方式のクラス 1 とクラス 2 のバッファ容量を  $K_1 : K_2 = 100 : 100$  とした。そこでクラス 1 とクラス 2 の容量の比を変えたときのスループットの変化を  $\rho = 1.5, 2.0, 2.5$  の 3 通りについてグラフを見る。今節でのその他のパラメータは次の通りである。 $K_1 + K_2 = 200$ 、 $\lambda_1 = \lambda_2$ 、 $\mu_1 = \mu_2 = 1.0$ 、 $p_1 = p_2 = 0.5$ 、 $\alpha$ : TAIL, RIO, THRESH、RIO:  $M = 100$ 、 $\alpha_{1,T}^* = 0.8$ 、 $\alpha_{1,NT}^* = 0.6$ 、 $\alpha_{2,T}^* = 0.4$ 、 $\alpha_{2,NT}^* = 0.2$ 。THRESH:  $M = 100$ 。

$\rho = 1.5, 2.0, 2.5$  のグラフをそれぞれ図 12、図 13、図 14 に示す。システム全体としては過負荷となっているため、優先度の低いクラス 2 はサービスされにくく、バッファは一杯に近い状態で

あると考えられる。3つのグラフに共通して、クラス1のバッファ容量が小さいときには、クラス2のスループットは若干改善している。これはクラス1のバッファ容量が小さいときには、クラス1のバッファが空になる確率が高まり、その分クラス2の packets がサービスされる確率も高まるためと考えられる。しかし、 $\rho$ が大きくなるとシステム全体が過負荷となるためクラス1のバッファ容量が小さいときでもクラス2のスループットはあまり改善されなくなる。

#### 4.2.2 平均遅延

スループットと同様の議論を平均遅延についても進める。始めにバッファの全容量を変化させたときの平均遅延を見る。

図15, 図16に分離型バッファ方式, 図17, 図18に共有型バッファ方式の平均遅延のグラフを示すパラメータは図10, 図11と同じものを用いた。分離型バッファ方式では $\rho$ が大きいためのクラス1の平均遅延はクラス1のバッファ容量分となっている。また、クラス2は $\rho$ が大きいため、平均遅延が爆発的に増加している。一方、共有型バッファ方式では $\rho$ が大きいための平均遅延はバッファに一つだけ空きがあるときの各クラスの到着率によって平均遅延は決まっている。

これらのグラフから、バッファの全容量を変えた時でもこのシステムの定性的な性質は変わらないことが確かめられた。以後、バッファの全容量を200に固定した上で議論することにする。

次にクラス1とクラス2の容量の比を変えたときの平均遅延の変化を見る。

図19 ( $\rho = 1.5$ ), 図20 ( $\rho = 2.0$ ), 図21 ( $\rho = 2.5$ )にクラス1, 図22 ( $\rho = 1.5$ ), 図23 ( $\rho = 2.0$ ), 図24 ( $\rho = 2.5$ )にクラス2の平均遅延のグラフを示す。パラメータは図12, 図13, 図14と同じものを用いた。クラス1の平均遅延を見ると、 $\rho = 1.5$ では平均遅延自体は低く抑えられており、クラス1の平均遅延が小さいときに若干平均遅延の改善が見られるが全体としてはそれほどの変化は見られない。 $\rho \geq 2.0$ では平均遅延はクラス1のバッファ容量にほぼ比例して増加している。これは、 $\rho \geq 2.0$ ではクラス1の負荷 $\rho_1$ も1を越えるためクラス1のバッファは一杯に近い状態となり、到着したクラス1の packets はクラス1のバッファ容量分だけ待つと考えられる。

一方、クラス2の平均遅延を見ると、 $\rho$ によって異なる結果が得られた。 $\rho = 1.5$ の場合、クラス1のバッファ容量が大きいとき、つまりクラス2のバッファ容量が小さいときに平均遅延が低くなっている。これは、 $\rho = 1.5$ のときにはシステムは過負荷となっているためクラス2のバッファは一杯に近い状態であると考えられる。しかしまだクラス2にはサービスされる機会が残っているためクラス2のバッファ容量が小さい方が平均遅延は抑えられる。 $\rho = 2.0$ のときにはグラフの両端、つまりどちらかのクラスのバッファ容量が小さいときに平均遅延は減少している。クラス2のバッファ容量が小さいときに平均遅延が抑えられる理由は $\rho = 1.5$ のときと同じ理由が考えられる。

そこで、クラス1のバッファ容量が小さいときに平均遅延が抑えられる原因を考える。先ほど見た通り、クラス1のバッファ容量が小さいとき、クラス2のスループットは改善される。 $\rho = 2.0$ のときにはクラス2のサービスされる機会は非常に少なくなるため、クラス2のバッファ容量が大きくなることによる平均遅延の増加よりもスループットが改善されて平均遅延が減少する方が強くなると考えられる。 $\rho = 2.5$ を見ると、この傾向がさらに強くなっていることが分かる。 $\rho = 2.5$ では、クラス2の packets にはほとんどサービスの機会がないため、クラス1のバッファ容量に

対して指数的に平均遅延が増加している。3通りのグラフを見ることによって  $\rho > 1$  でのクラス2の平均遅延には2つの原因があると考えられる。一つは、クラス2のバッファ容量の増加による平均遅延の増加である。もう一つは、クラス2のサービスの機会が失われることによる平均遅延の増加である。 $1 < \rho < 2$  までは第一の原因の影響が強く、 $\rho > 2$  では第二の原因の影響が強くなっている。 $\rho = 2$  で二つの原因の影響力が逆転する理由としては、 $\rho = 2$  でクラス1の負荷  $\rho_1$  が1となり、クラス2のサービスの機会が失われることが考えられる。

### 4.3 到着率の比に関する性質

これまでクラス1とクラス2の到着率が等しいとして議論を進めてきた。この節ではクラス1とクラス2の到着率の比を変化させたときに QoS がどのように変化するかを調べる。前節と同様システム全体の負荷を  $\rho = 1.5, 2.0, 2.5$  としてグラフを見る。他のパラメータは次の通りである。 $K_1 = K_2 = 100, K = 200, \mu_1 = \mu_2 = 1.0, p_1 = p_2 = 0.5$ 。α: TAIL, RIO, THRESH。RIO:  $M = 100, \alpha_{1,T}^* = 0.8, \alpha_{1,NT}^* = 0.6, \alpha_{2,T}^* = 0.4, \alpha_{2,NT}^* = 0.2$ 。THRESH:  $M = 100$ 。

#### 4.3.1 スループット

図25 ( $\rho = 1.5$ )、図26 ( $\rho = 2.0$ )、図27 ( $\rho = 2.5$ ) に分離型バッファ方式、図28 ( $\rho = 1.5$ )、図29 ( $\rho = 2.0$ )、図30 ( $\rho = 2.5$ ) に共有型バッファ方式のスループットのグラフを示す。分離型バッファ方式では、3つのグラフに共通する性質を見ることができる。すなわち、 $\rho_1 < 1$  ではクラス2のスループットが保証されていることである。また、逆に  $\rho_1 \geq 1$  ではクラス2のスループットは0に収束している。このことからクラス1の負荷が1を越えないときには、クラス2のスループットは保証されることがわかる。

共有型バッファ方式では、各パケットのスループットはそれぞれの到着率にほぼ正比例する結果が得られた。つまり、この方式では各パケットはその到着率に応じたスループットが得られることが期待される。

#### 4.3.2 平均遅延

図31から図36に分離型バッファ方式、図37から図42に共有型バッファ方式の平均遅延のグラフを示す。分離型バッファ方式のクラス1の平均遅延は  $\rho_1 < 1$  では低く抑えられている。 $\rho_1 \geq 1$  ではクラス1が過負荷となるため、クラス1のバッファ容量  $K_1 = 100$  に向かって平均遅延は増加していく。クラス2の平均遅延のグラフを見るとここでも  $\rho_1 < 1$  では低く抑えられている。一方、 $\rho_1 \geq 1$  では平均遅延は指数的に増加している。この結果は前節で考察した分離型バッファ方式のクラス2の平均遅延の増加の2つの原因からも理解することができる。 $\rho_1 < 1$  ではクラス2にもサービスされる機会があり、そのため平均遅延はほぼクラス2のバッファ容量に応じた量となっている。一方、 $\rho_1 \geq 1$  となると、クラス2のパケットがサービスされる機会はほとんど失われてしまい、平均遅延は爆発的に増加している。

次に、共有型バッファ方式についてもグラフを見る。クラス1、クラス2は、共にクラス1の到着率が増加するにつれて平均遅延は増加している。これは4.1節で考察した通り、共有型バッファ方式では  $\rho > 1$  のとき、バッファに一つだけ空きがある状態での各パケットの到着率と受付

関数の積にスループットは影響される．クラス 1 の到着率が高まるとその分クラス 1 がバッファ内にとどまる確率が高まりクラス 1 の平均遅延は増加する．つまりクラス 1 のパケットが割り込む回数が増えるためクラス 2 の平均遅延も大きくなる．

#### 4.4 RIO のパラメータに関する性質

これまでの結果は，受付関数の RIO のパラメータは式 (1) ならびに式 (2) を用いた (4.1 節参照)．今節では RIO のパラメータを変えたときの QoS への影響を調べる．まず次の 2 つの場合についてスループットの変化を見る．なお，下の式は共有型バッファ方式のものであり，分離型バッファ方式の場合は  $K$  を  $K_1 + K_2$  に置き換える．

**RIO1:**

$$\alpha_{i,j}(n_1, n_2) = 1, \quad n_1 + n_2 \leq K/2 \quad (i = 1, 2, j = T, NT)$$

$$\begin{cases} \alpha_{1,T}(n_1, n_2) &= 1 - 0.2(4(n_1 + n_2) - 2K)/K, \\ \alpha_{1,NT}(n_1, n_2) &= 1 - 0.4(4(n_1 + n_2) - 2K)/K, \\ \alpha_{2,T}(n_1, n_2) &= 1 - 0.6(4(n_1 + n_2) - 2K)/K, \\ \alpha_{2,NT}(n_1, n_2) &= 1 - 0.8(4(n_1 + n_2) - 2K)/K, \end{cases} \quad K/2 < n_1 + n_2 \leq 3K/4$$

$$\begin{cases} \alpha_{1,T}(n_1, n_2) &= 0.8, \\ \alpha_{1,NT}(n_1, n_2) &= 0.6, \\ \alpha_{2,T}(n_1, n_2) &= 0.4, \\ \alpha_{2,NT}(n_1, n_2) &= 0.2, \end{cases} \quad 3K/4 < n_1 + n_2 \leq K - 1$$

**RIO2:**

$$\alpha_{i,j}(n_1, n_2) = 1, \quad n_1 + n_2 \leq 3K/4 \quad (i = 1, 2, j = T, NT)$$

$$\begin{cases} \alpha_{1,T}(n_1, n_2) &= 1 - 0.2(4(n_1 + n_2) - 3K)/K, \\ \alpha_{1,NT}(n_1, n_2) &= 1 - 0.4(4(n_1 + n_2) - 3K)/K, \\ \alpha_{2,T}(n_1, n_2) &= 1 - 0.6(4(n_1 + n_2) - 3K)/K, \\ \alpha_{2,NT}(n_1, n_2) &= 1 - 0.8(4(n_1 + n_2) - 3K)/K, \end{cases} \quad 3K/4 < n_1 + n_2 \leq K - 1$$

RIO1 は受付関数が台形型になっており，RIO2 は閾値を  $M = K/2$  から  $M = 3K/4$  に変更している．その他のパラメータは次の通りである． $K_1 = K_2 = 100$ ， $K = 200$ ， $\lambda_1 = \lambda_2$ ， $\mu_1 = \mu_2 = 1.0$ ， $p_1 = p_2 = 0.5$ ．元の RIO と RIO1, RIO2 のグラフを比較するため，図 43，図 44 を与える．

RIO1 では元の RIO とほとんど変化が見られない．しかし，RIO2 ではスループットが最終値に収束するまでの  $\rho$  が小さくなっている．これは，パケットを棄却する率が元の RIO よりも小さくなったのが原因と考えられる．パケットを棄却する率が小さい場合スループットの  $\rho$  への即応性が高まることが予想される．そこで，以下に示す RIO3, RIO4 を考える．RIO3 は受付関数の

値が元の RIO に対して大きくなっており，RIO4 では小さくなっている．なお，下の式は共有型バッファ方式の場合であり，分離型バッファ方式の場合は  $K$  を  $K_1 + K_2$  に置き換える．その他のパラメータに変更はない．

**RIO3:**

$$\alpha_{i,j}(n_1, n_2) = 1, \quad n_1 + n_2 \leq K/2 \quad (i = 1, 2, j = T, NT)$$

$$\begin{cases} \alpha_{1,T}(n_1, n_2) &= 1, \\ \alpha_{1,NT}(n_1, n_2) &= 1 - 0.25(2(n_1 + n_2) - K)/K, \\ \alpha_{2,T}(n_1, n_2) &= 1 - 0.5(2(n_1 + n_2) - K)/K, \\ \alpha_{2,NT}(n_1, n_2) &= 1 - 0.75(2(n_1 + n_2) - K)/K, \end{cases} \quad K/2 < n_1 + n_2 \leq K - 1$$

**RIO4:**

$$\alpha_{i,j}(n_1, n_2) = 1, \quad n_1 + n_2 \leq K/2 \quad (i = 1, 2, j = T, NT)$$

$$\begin{cases} \alpha_{1,T}(n_1, n_2) &= 1 - 0.36(2(n_1 + n_2) - K)/K, \\ \alpha_{1,NT}(n_1, n_2) &= 1 - 0.52(2(n_1 + n_2) - K)/K, \\ \alpha_{2,T}(n_1, n_2) &= 1 - 0.68(2(n_1 + n_2) - K)/K, \\ \alpha_{2,NT}(n_1, n_2) &= 1 - 0.84(2(n_1 + n_2) - K)/K, \end{cases} \quad K/2 < n_1 + n_2 \leq K - 1$$

図 45，図 46 に元の RIO と RIO3，RIO4 を比較するためのグラフを示す．RIO3 ではパケットの棄却率を元の RIO よりも小さいため最終的収束する  $\rho$  の値が RIO3 では元の RIO よりも速くなっている．一方，RIO4 では元の RIO よりも大きくなっているため，RIO4 では元の RIO よりも遅くなった．このことから，スループットの  $\rho$  への即応性を高めたい場合，RIO でのパケットの棄却率を小さくすればよいことがわかる．しかし，この場合パケットを確率的に棄却することでバッファが一杯になるのを防ぐという Assured Service での目的の一つが達成されなくなってしまう．即応性を高めるときの受付関数の設定はこの点に注意する必要がある．

## 5 制御パラメータの設定法

前章までの結果より共有型バッファ方式を用いると，4つのクラスの過負荷時のスループットならびに平均遅延を差別化できることが明らかになった．この章では，各パケットの負荷と目標となる輻輳時のスループットおよび平均遅延が与えられたときに，共有型バッファ方式を用いて，与えられた目標を達成するための制御パラメータの設定法を提案し，数値実験を行なう．

### 5.1 準備

制御パラメータの設定法を示す前に幾つか仮定をおく．実際のインターネット上では優先度の高いパケットが回線のほとんどを独占するようなケースは考えにくい．従って，優先度の低いパ

ケットの方が到着率が高く、優先度の高いパケットの到着率は低くなっていると予想される。そこでこの章では到着率に関して次式が成立すると仮定する。

$$\lambda_1(n_1, n_2) \leq \lambda_2(n_1, n_2) \quad (6)$$

この仮定の下では、クラス1の最大遅延は次のように考えることができる。平均遅延が最大となるのはバッファが一杯に近くなっており、受付関数はバッファに一つだけ空きがあるときの受付関数を考えればよい。左辺が大きいほど平均遅延も大きくなるので(4.3節)、式(6)の等号が成立しているときの平均遅延を考えるとよい。この条件での最大遅延は、4.1節などでクラス1とクラス2の到着率が等しいときの平均遅延のグラフをみれば推測できる。図8、図17より平均遅延は高々数個分のパケットの遅延で抑えられることがわかる。この理由を簡単に説明する。共有型バッファ方式では $\rho$ が大きくなるとクラス2のパケットがサービスされる機会が減り、バッファ内にはクラス2のパケットがその大部分を占めるようになる。このため、優先権のあるクラス1のパケットは高々数個のパケットの遅延ですむ。

次に使用するパラメータを定義する。1T, 1NT, 2T, 2NTパケットの到着率を改めて次のように表す。

$$\begin{aligned} \lambda_{1,T} &= \lambda_1 p_1, & \lambda_{1,NT} &= \lambda_1 (1 - p_1) \\ \lambda_{2,T} &= \lambda_2 p_2, & \lambda_{2,NT} &= \lambda_2 (1 - p_2) \end{aligned}$$

また、輻輳時における各クラスのスループットの目標比率を $a_{1,T}, a_{1,NT}, a_{2,T}, a_{2,NT}$ とする。さらに、クラス2の平均遅延の目標値を $R_2^*$ とする。バッファに一つだけ空きがあるときの受付確率を $\alpha_{i,j}^*$ , ( $i = 1, 2, j = T, NT$ ) ( $0 < \alpha_{i,j}^* < 1$ )とする。

各パケットの到着率と輻輳時におけるスループットの目標比率が与えられたとき、 $\rho$ が大きいときの各パケットの比は

$$\lambda_{1,T} \alpha_{1,T}^* : \lambda_{1,NT} \alpha_{1,NT}^* : \lambda_{2,T} \alpha_{2,T}^* : \lambda_{2,NT} \alpha_{2,NT}^*$$

となる。これらの目標比率は $a_{1,T}, a_{1,NT}, a_{2,T}, a_{2,NT}$ なので

$$\lambda_{1,T} \alpha_{1,T}^* : \lambda_{1,NT} \alpha_{1,NT}^* : \lambda_{2,T} \alpha_{2,T}^* : \lambda_{2,NT} \alpha_{2,NT}^* = a_{1,T} : a_{1,NT} : a_{2,T} : a_{2,NT} \quad (7)$$

となるように $\alpha_{i,j}^*$  ( $i = 1, 2, j = T, NT$ ) をきめればよい。すなわち

$$\alpha_{i,j}^* = \frac{a_{i,j}}{\lambda_{i,j}}, \quad (i = 1, 2, j = T, NT)$$

とすればよい。このとき、 $0 < \alpha_{i,j}^* < 1$ を満たすように注意しなければならない。そこで $\frac{a_{i,j}}{\lambda_{i,j}}$ が最大のものを $c$  ( $0 \leq c \leq 1$ )にしてその他の $\frac{a_{i,j}}{\lambda_{i,j}}$ を式(7)を満たすように決めれば $0 < \alpha_{i,j}^* < 1$  ( $i = 1, 2, j = T, NT$ )を満たす。また、 $c$ および閾値 $M$  ( $0 < M < K$ )を大きく取れば即応性を高めることができる。

さらに平均遅延をコントロールするための各クラスのバッファ容量を定める。クラス1に関しては前節での考察より数個のパケット分の遅延で抑えられる。一方、クラス2の平均遅延は4.1



節より次のように近似できるので，これよりバッファ容量  $K$  が決定される．

$$R_2 \cong K(\mu_2^{-1} + x\mu_1^{-1})$$

$$x = \frac{\text{クラス 1 の到着率}}{\text{クラス 2 の到着率}} = \frac{\lambda_{1,T}\alpha_{1,T}^* + \lambda_{1,NT}\alpha_{1,NT}^*}{\lambda_{2,T}\alpha_{2,T}^* + \lambda_{2,NT}\alpha_{2,NT}^*}$$

## 5.2 パラメータの設定方法

各パケットの到着率  $\rho$  が大きいときの各パケットのスループットの目標比率，および各クラスの平均遅延の目標が与えられたときに，各パケットの差別化をするための受付関数，およびバッファの全容量の設定方法を示す．

- 与えられるパラメータ

- 到着率  $\lambda_{i,j}$  ( $i = 1, 2, j = T, NT$ )
- 平均サービス時間  $\mu_i^{-1}$  ( $i = 1, 2$ )
- スループットの目標比率  $a_{i,j}$  ( $i = 1, 2, j = T, NT$ )
- クラス 2 の平均遅延の目標  $R_2$
- 即応性に関するパラメータ  $c, M$

- 設定方法

- スループット

パケットを次のように分ける．

$$\mathcal{D}_1 = \left\{ (i, j) \in \{(1, T), (1, NT), (2, T), (2, NT)\}, \frac{a_{i,j}}{\lambda_{i,j}} = \max\left(\frac{a_{1,T}}{\lambda_{1,T}}, \frac{a_{1,NT}}{\lambda_{1,NT}}, \frac{a_{2,T}}{\lambda_{2,T}}, \frac{a_{2,NT}}{\lambda_{2,NT}}\right) \right\}$$

$$\mathcal{D}_2 = \left\{ (i, j) \in \{(1, T), (1, NT), (2, T), (2, NT)\}, \frac{a_{i,j}}{\lambda_{i,j}} \neq \max\left(\frac{a_{1,T}}{\lambda_{1,T}}, \frac{a_{1,NT}}{\lambda_{1,NT}}, \frac{a_{2,T}}{\lambda_{2,T}}, \frac{a_{2,NT}}{\lambda_{2,NT}}\right) \right\}$$

さらに  $\alpha_{i,j}^*$  を次のように設定する．

$$\alpha_{i,j}^* = c, \quad (i, j) \in \mathcal{D}_1$$

$$\alpha_{i,j}^* = c \frac{\lambda_{i,j} a_{k,l}}{a_{i,j} \lambda_{k,l}}, \quad (i, j) \in \mathcal{D}_2, (k, l) \in \mathcal{D}_1$$

- 平均遅延

バッファ容量を次のように設定する．

$$K = \frac{R_2}{\mu_2^{-1} + x\mu_1^{-1}}$$

ここで，実際に到着率，目標値を与えて， $\rho$  が大きいときに目標値に制御されるかどうかを確認する．各クラスの平均サービス時間は  $\mu_1^{-1} = \mu_2^{-1} = 1.0$  とし，到着率に関して次の (a), (b) を考える．(a)  $\lambda_{1,T} : \lambda_{1,NT} : \lambda_{2,T} : \lambda_{2,NT} = 1 : 2 : 4 : 8$ ，(b)  $\lambda_{1,T} : \lambda_{1,NT} : \lambda_{2,T} : \lambda_{2,NT} = 1 : 4 : 8 : 16$ ．

なお、目標値は  $a_{1,T} : a_{1,NT} : a_{2,T} : a_{2,NT} = 1 : 2 : 3 : 4$  ,  $R_2^* = 300$  とする．また ,  $c = 0.8$  ,  $M = 105$  とした .

上記で提案した設定方法を用いて受付関数 , バッファ容量を設定すると次のようになる .

(a)  $\alpha_{1,T}^* = 0.8$  ,  $\alpha_{1,NT}^* = 0.8$  ,  $\alpha_{2,T}^* = 0.6$  ,  $\alpha_{2,NT}^* = 0.4$  ,  $M = 100$  ,  $K = 210$

(b)  $\alpha_{1,T}^* = 0.8$  ,  $\alpha_{1,NT}^* = 0.4$  ,  $\alpha_{2,T}^* = 0.3$  ,  $\alpha_{2,NT}^* = 0.2$  ,  $M = 100$  ,  $K = 210$

図 47 に (a) , 図 48 には (b) のグラフを示した . 両方の場合に対して  $\rho$  が大きいときに目標の比率スループットが制御されている . ただし (b) では受付確率が (a) に比べて低くなっているため ,  $\rho$  に対する即応性が悪くなっている .

次に , 図 49 にクラス 1 , 図 50 にはクラス 2 の平均遅延のグラフを示した . クラス 1 に関しては考察通り平均遅延は数個の packets 分に抑えられている . また , クラス 2 の平均遅延は制御の結果 , 目標の平均遅延 300 に収束している .

## 6 結論

スループットならびに平均遅延に関して差別化された 4 種類のクラスに対して差別化を行うサービス方式について考察した . 特に , ルータのバッファ管理に関して 2 種類のバッファ管理方式を考えた . それぞれのバッファ管理方式において , 輻輳時のスループットならびに平均遅延のシステムを記述する各パラメータに関する性質を考察した .

スループットに関しては分離型バッファ方式ではシステムが過負荷となると , クラス 2 の packets のスループットを保証することができない . 一方 , 共有型バッファ方式では過負荷時にもクラス 2 のスループットが保証することができることが明らかとなった . また , 平均遅延に関しては分離型バッファ方式ではクラス 1 の平均遅延はクラス 1 のバッファ容量に比例した平均遅延で抑えられ , クラス 2 の packets は膨大な遅延を被るが , クラス 1 のバッファ容量を小さくすることでクラス 2 のスループットと平均遅延をある程度保証できることがわかった . 一方 , 共有型バッファ方式のクラス 1 の平均遅延はシステム内のクラス 1 の packets 数個分の遅延で抑えられ , また , バッファ容量を調節することにより , クラス 2 の平均遅延も保証することができることが分かった . 特に , 平均遅延の大きさはバッファがほぼ一杯のときの到着率によって左右されることが明らかとなった . また , 両方式において , クラス 1 の負荷を 1 以下にすることでシステム全体を安定に運用することができることが分かった .

これらの結果から , 共有型バッファ管理方式を用いることにより , 4 つのクラスの過負荷時のスループットならびに平均遅延を差別化できることが明らかになった . さらに , 各クラスの負荷と目標となる輻輳時のスループットならびに平均遅延が与えられたとき , 共有型バッファ管理方式を用いて , 与えられた目標を達成するための制御パラメータの設定法を提案し , 数値実験によりその有効性を確認した .

今後の課題としては今回の考察では到着をポアソン到着 , サービスを指数サービスと仮定したが , これが一般の分布に従う場合にも同様の議論を展開し , システムの解析を行いたい .

謝 辞

日頃から御教授頂き、本研究に対しても熱心な御指導を賜った福嶋雅夫教授、ならびに本報告書作成にあたり細部に至るまで貴重な御指摘と御指導を頂いた滝根哲哉助教授に深く感謝の意を表します。また、大変お世話になった福嶋研究室の諸先輩方に厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] M. May, J. Bolot, A. Jean-Marie and C. Diot, “Simple performance models of differentiated service schemes for the Internet,” *IEEE INFOCOM '99*, pp.1385-1394, NY, 1999.
- [2] David D. Clark, “Adding service discrimination to the Internet,” LCS MIT Technical report, 1995.
- [3] T. V. Lakshman and D. Stiliadis, “High speed policy-based packet forwarding using efficient multi-dimensional range matching,” *Proc. ACM SIGCOM '98*, Vancouver, Canada, 1998.
- [4] W. Feng, D. Kandlur, D. Saha and K. Shin, “Adaptive packet marking for providing differentiated services in the Internet,” *Proc. ICNP '98*, Austin, TX, 1998.

## A 付録

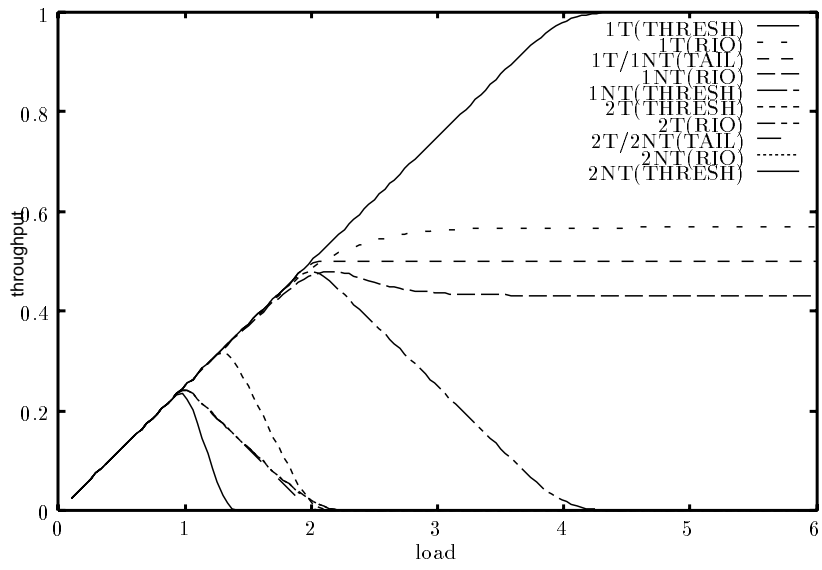


図 3: システム全体の負荷に対するスループットの変化 (分離型)

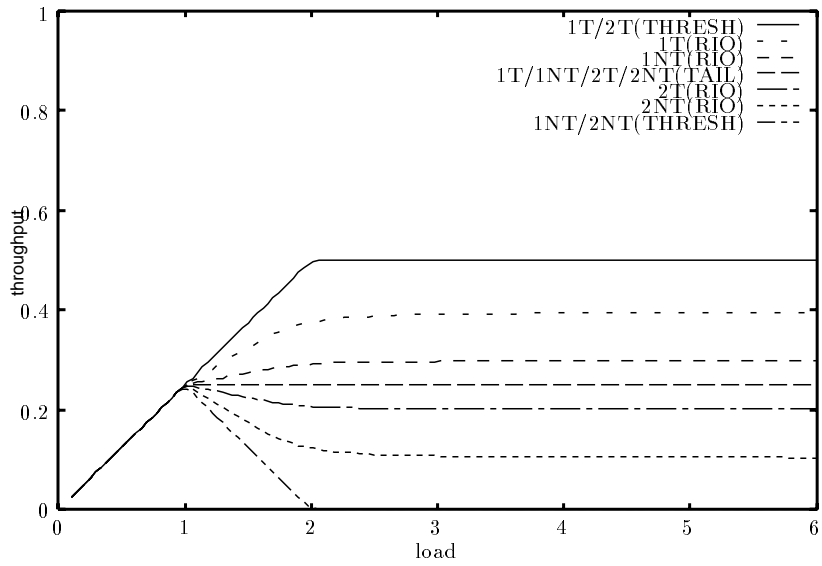


図 4: システム全体の負荷に対するスループットの変化 (共有型)

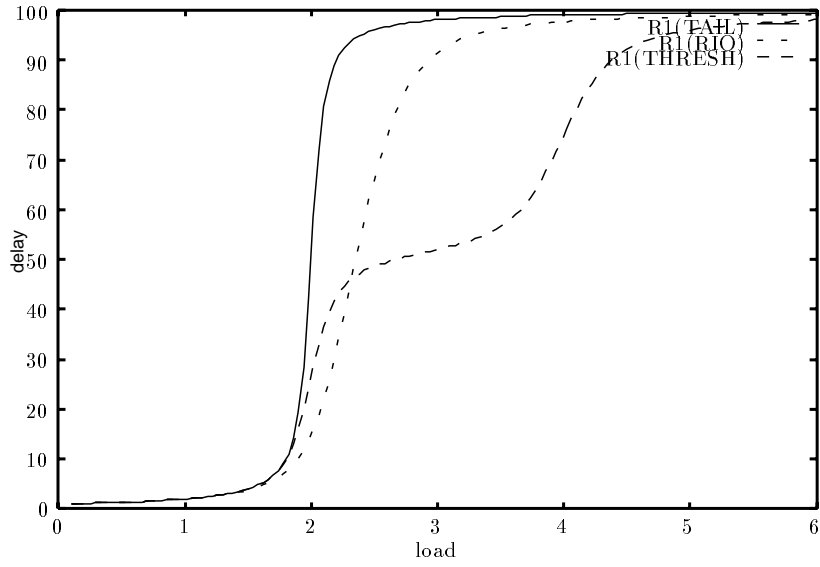


図 5: システム全体の負荷に対する平均遅延の変化 (分離型, クラス 1)

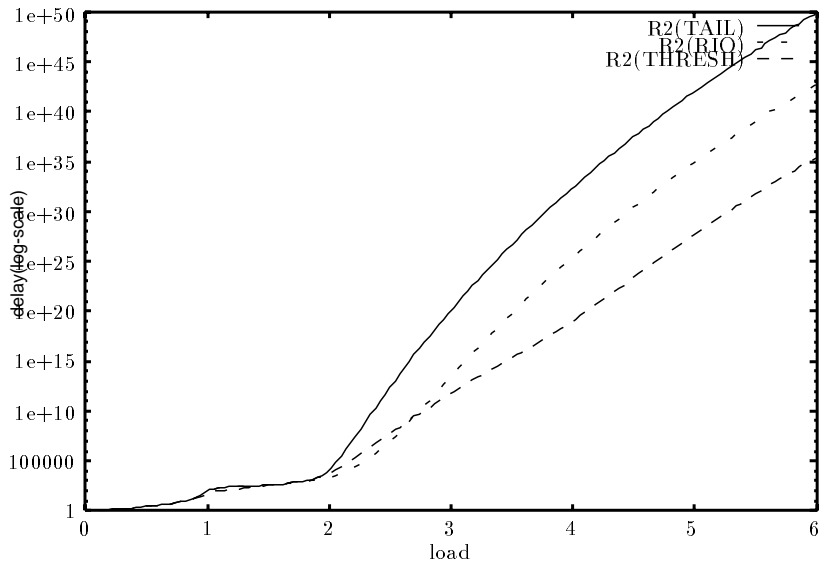


図 6: システム全体の負荷に対する平均遅延の変化 (分離型, クラス 2)

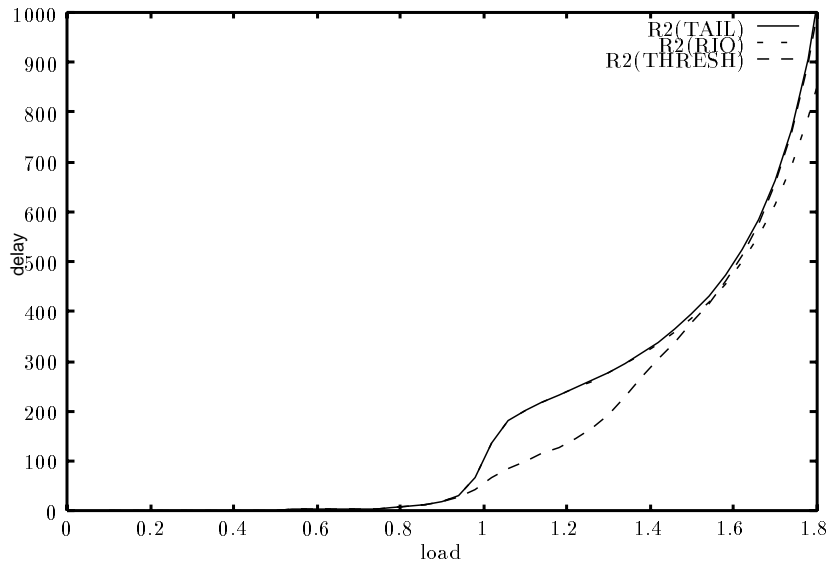


図 7: システム全体の負荷に対する平均遅延の変化 (分離型, クラス 2)

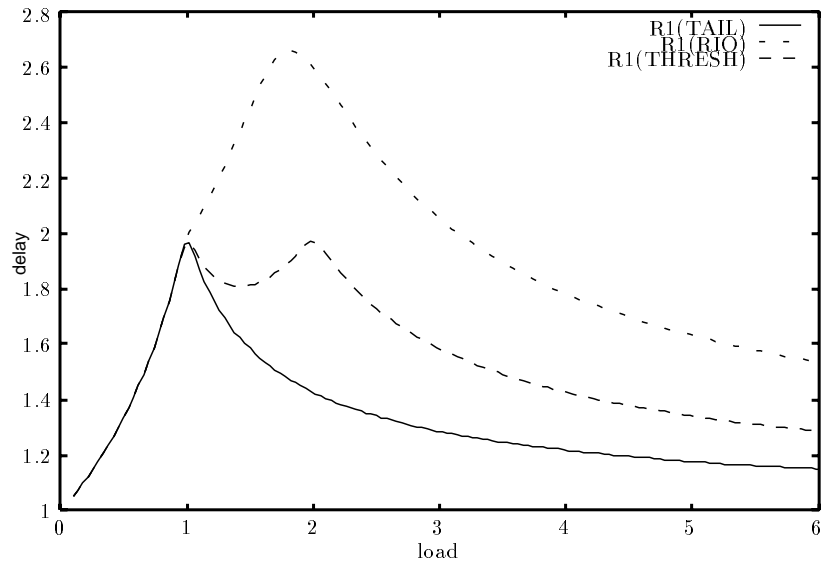


図 8: システム全体の負荷に対する平均遅延の変化 (共有型, クラス 1)

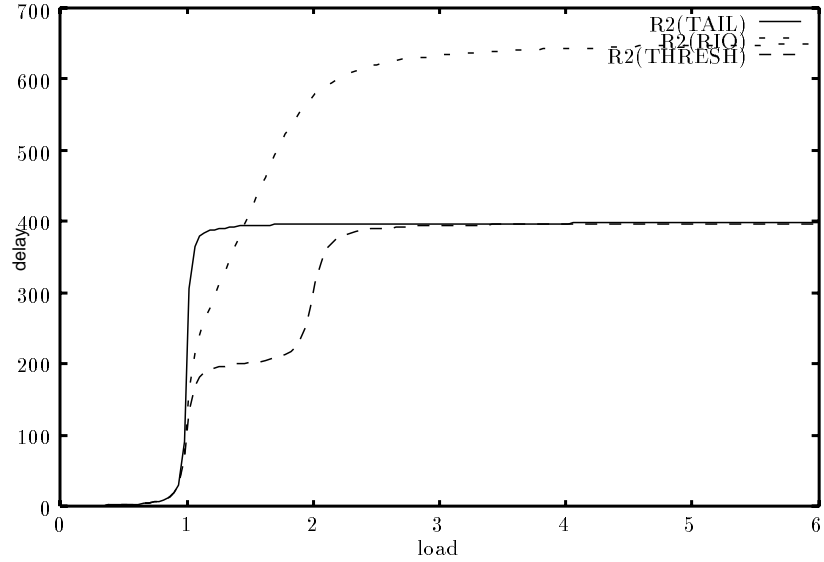


図 9: システム全体の負荷に対する平均遅延の変化 (共有型, クラス 2)

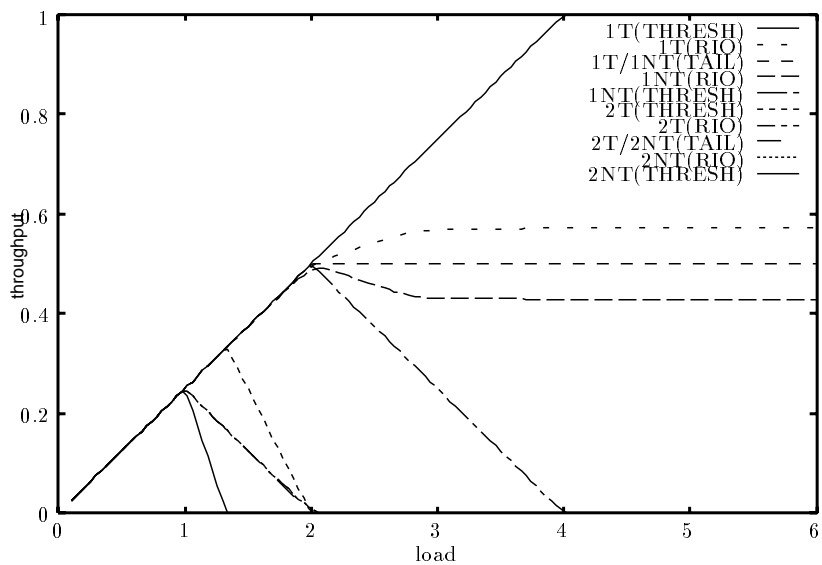


図 10: システム全体の負荷に対するスループットの変化 (分離型,  $K_1 = 500$ ,  $K_2 = 500$ )

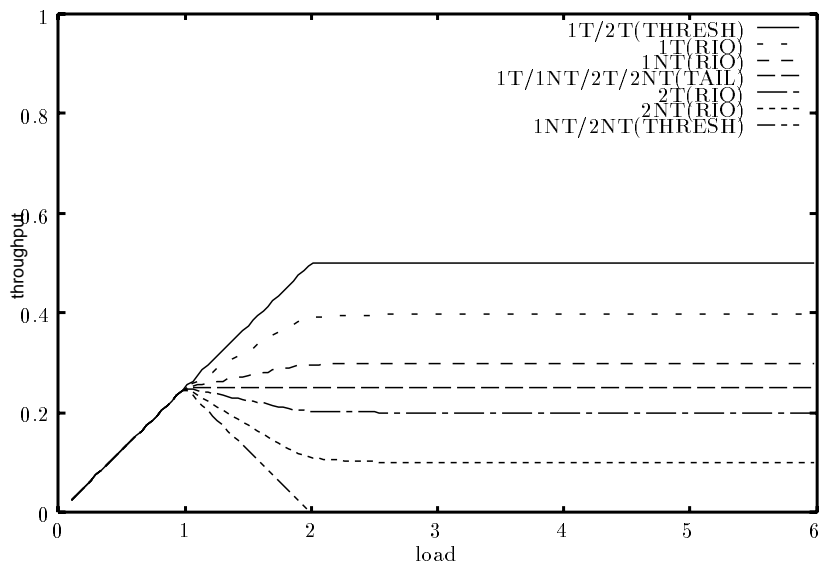


図 11: システム全体の負荷に対するスループットの変化 (共有型,  $K = 1000$ )



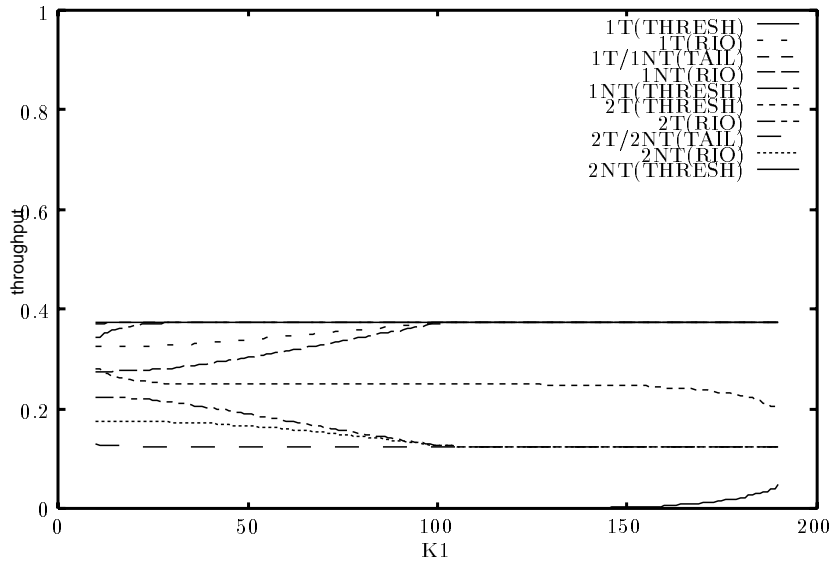


図 12: クラス 1 のバッファ容量に対するスループットの変化 (分離型,  $\rho = 1.5$ )

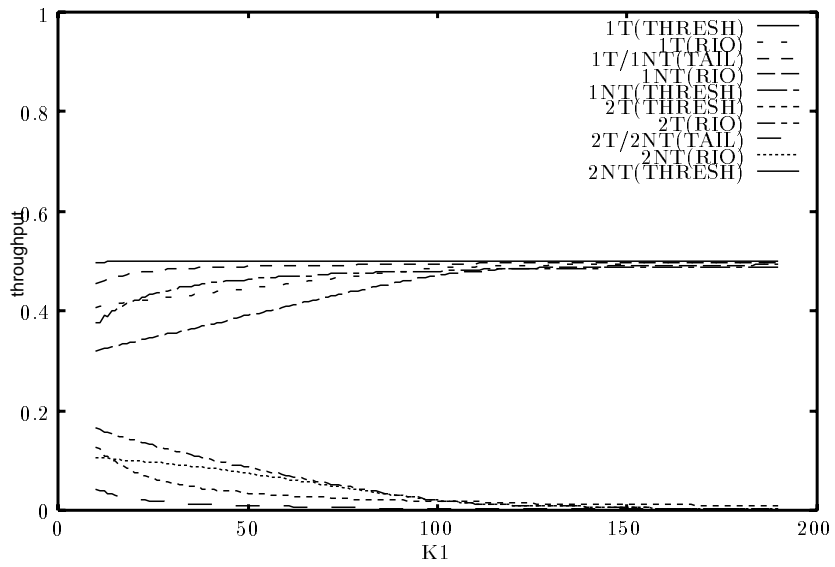


図 13: クラス 1 のバッファ容量に対するスループットの変化 (分離型,  $\rho = 2.0$ )

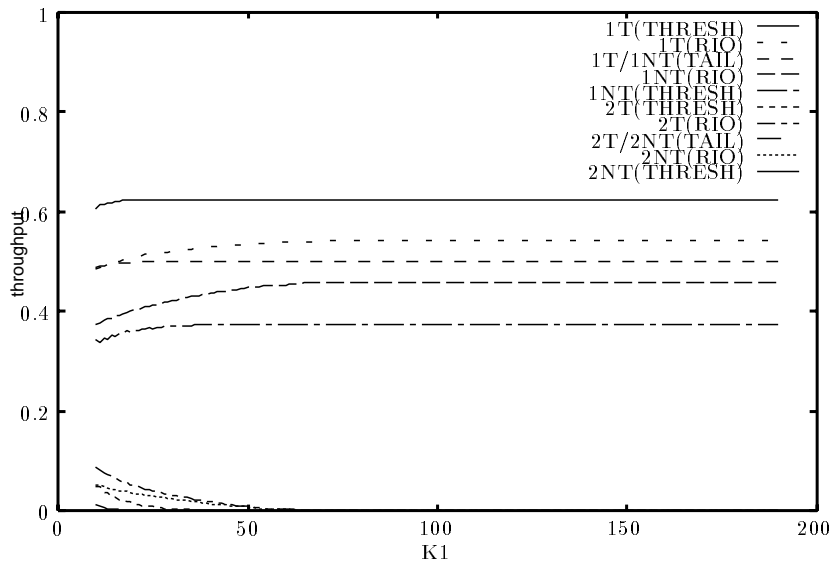


図 14: クラス 1 のバッファ容量に対するスループットの変化 (分離型,  $\rho = 2.5$ )

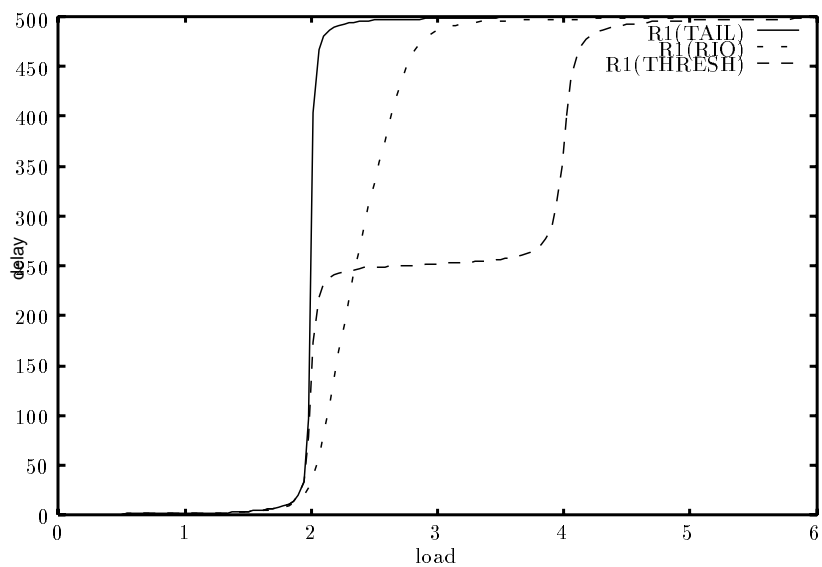


図 15: システム全体の負荷に対する平均遅延の変化 (分離型, クラス 1,  $K_1 = 500$ ,  $K_2 = 500$ )

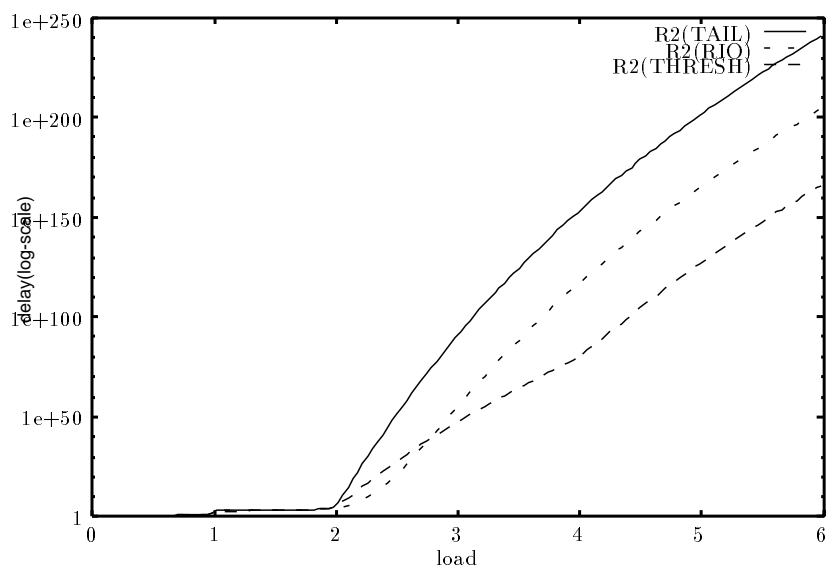


図 16: システム全体の負荷に対する平均遅延の変化 (分離型, クラス 2,  $K_1 = 500$ ,  $K_2 = 500$ )

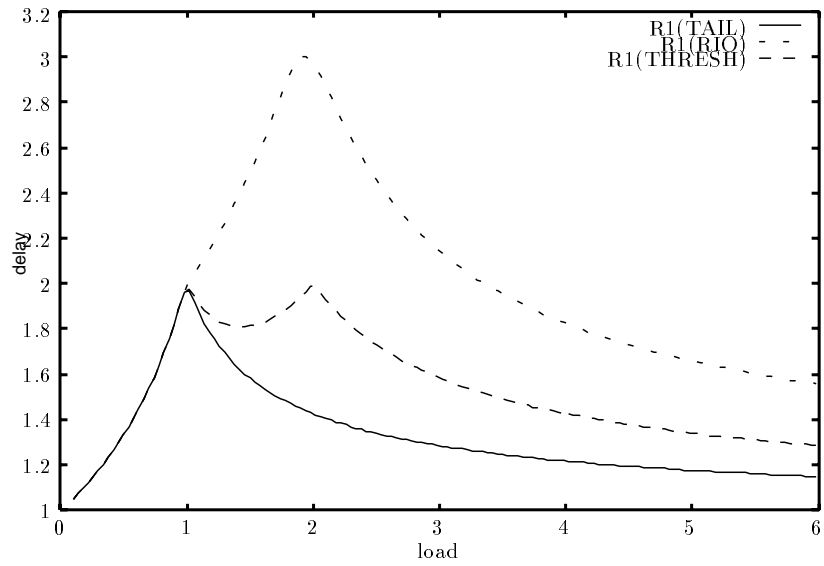


図 17: システム全体の負荷に対する平均遅延の変化 (共有型, クラス 1,  $K = 1000$ )

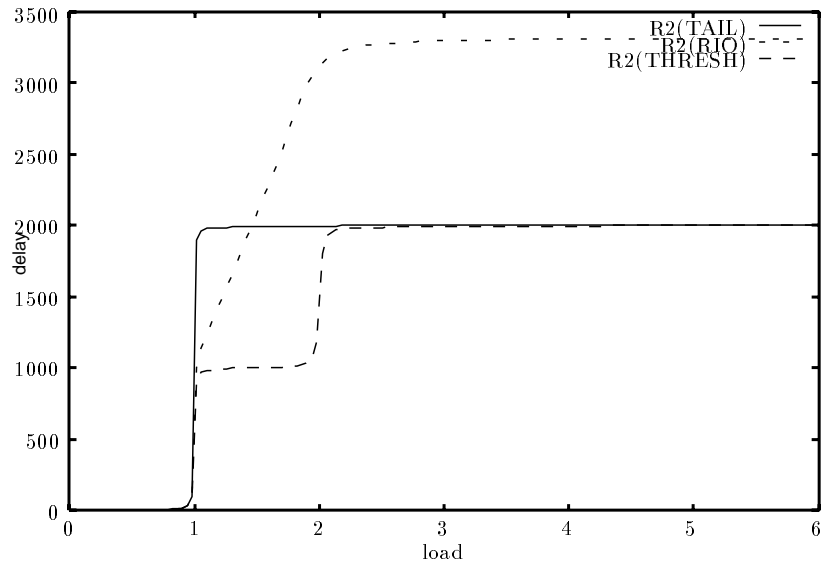


図 18: システム全体の負荷に対する平均遅延の変化 (共有型, クラス 2,  $K = 1000$ )

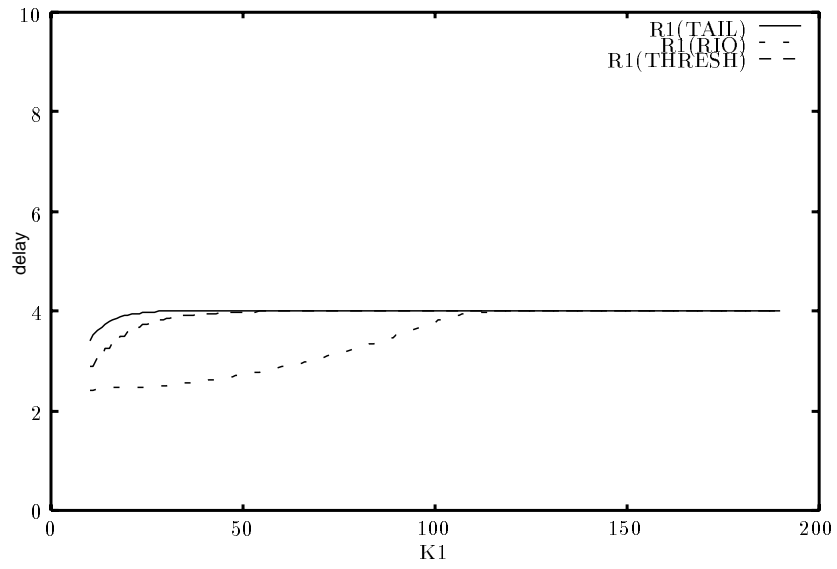


図 19: クラス 1 のバッファ容量に対する平均遅延の変化 (分離型, クラス 1,  $\rho = 1.5$ )

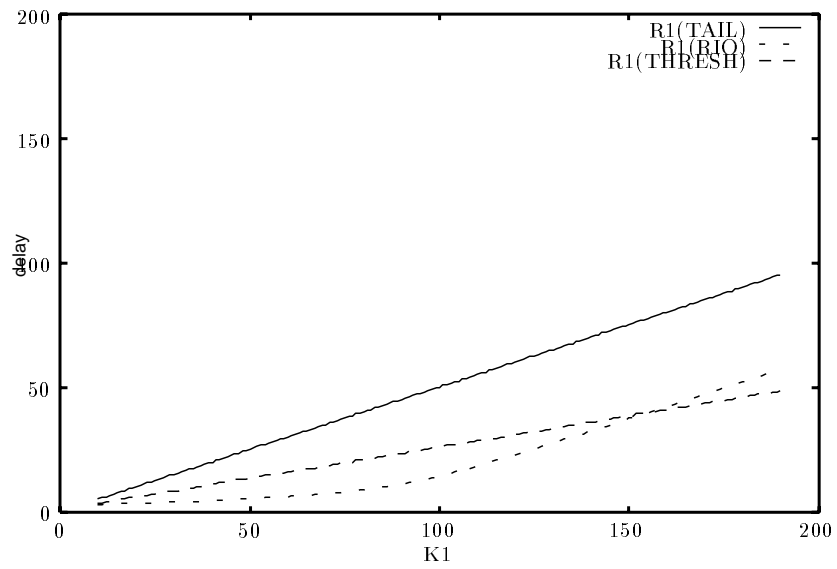


図 20: クラス 1 のバッファ容量に対する平均遅延の変化 (分離型, クラス 1,  $\rho = 2.0$ )

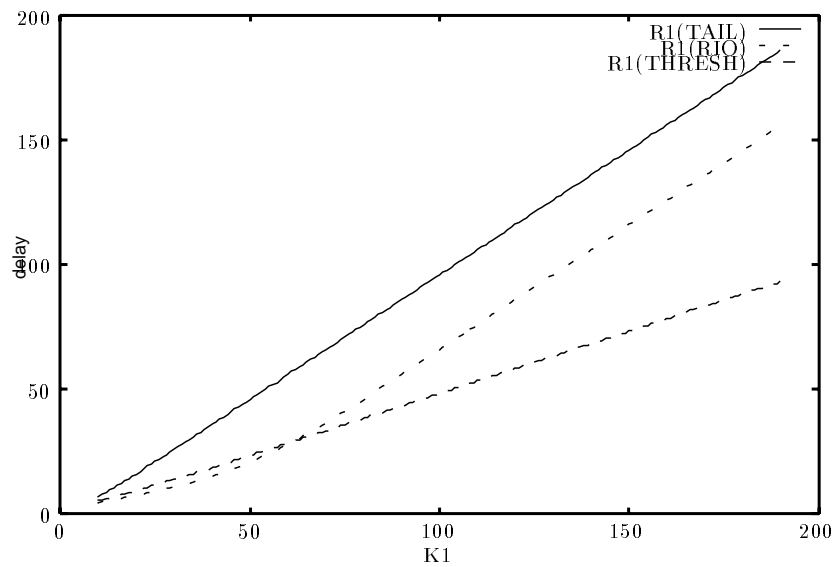


図 21: クラス 1 のバッファ容量に対する平均遅延の変化 (分離型, クラス 1,  $\rho = 2.5$ )

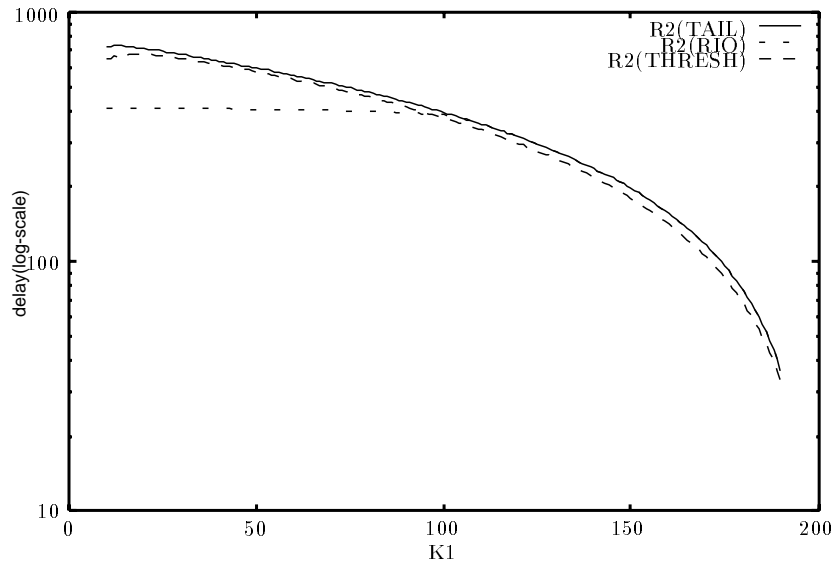


図 22: クラス 1 のバッファ容量に対する平均遅延の変化 (分離型, クラス 2,  $\rho = 1.5$ )

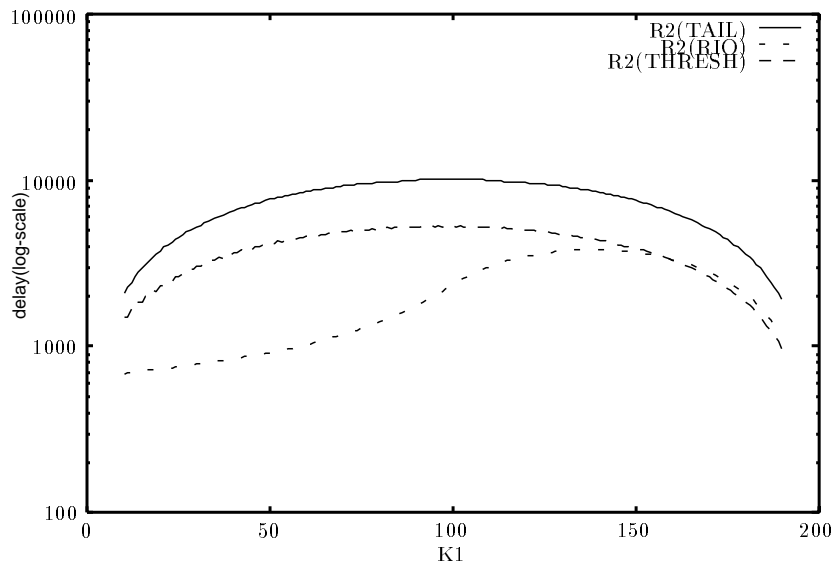


図 23: クラス 1 のバッファ容量に対する平均遅延の変化 (分離型, クラス 2,  $\rho = 2.0$ )

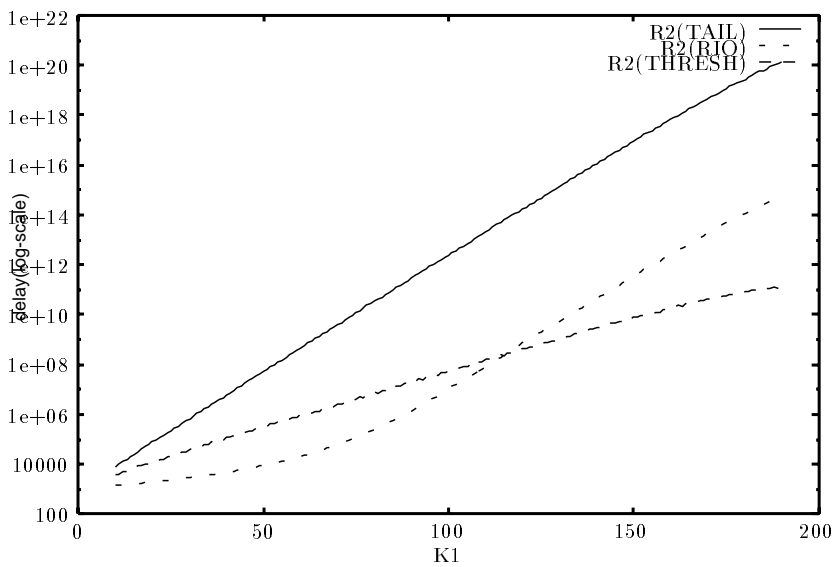


図 24: クラス 1 のバッファ容量に対する平均遅延の変化 (分離型, クラス 2,  $\rho = 2.5$ )

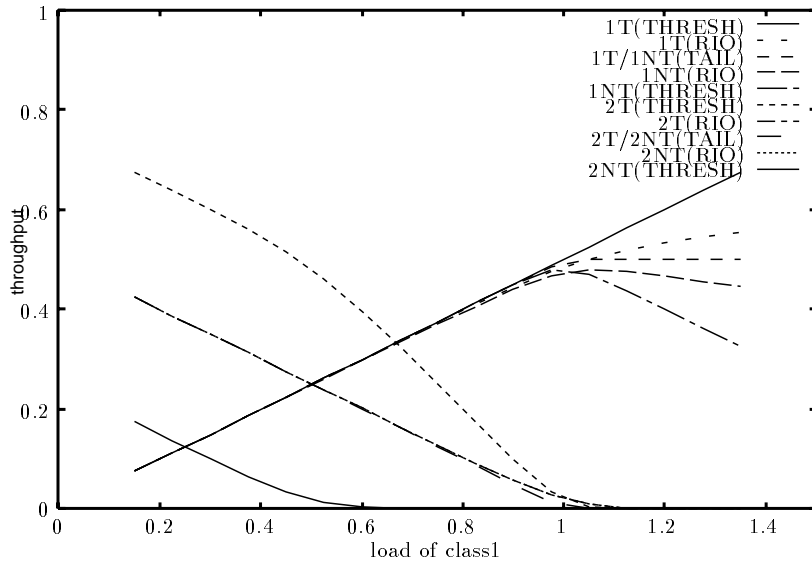


図 25: クラス 1 の負荷に対するスループットの変化 (分離型,  $\rho = 1.5$ )

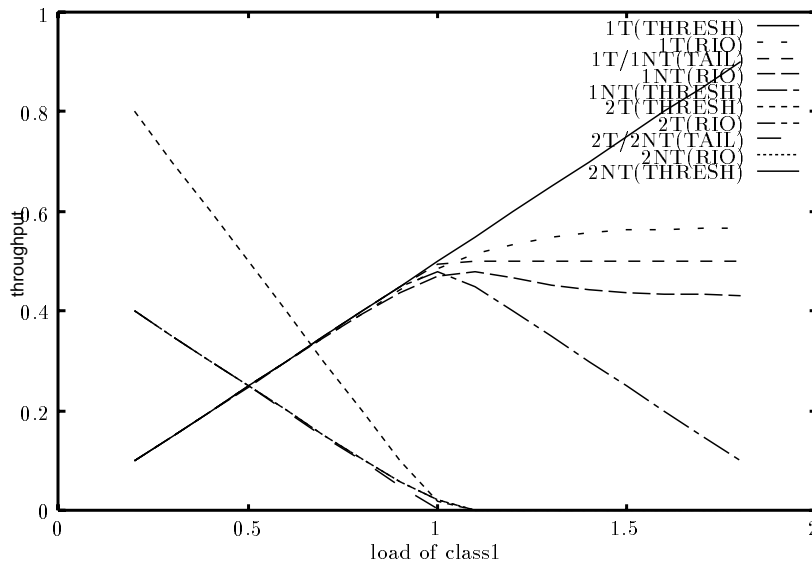


図 26: クラス 1 の負荷に対するスループットの変化 (分離型,  $\rho = 2.0$ )

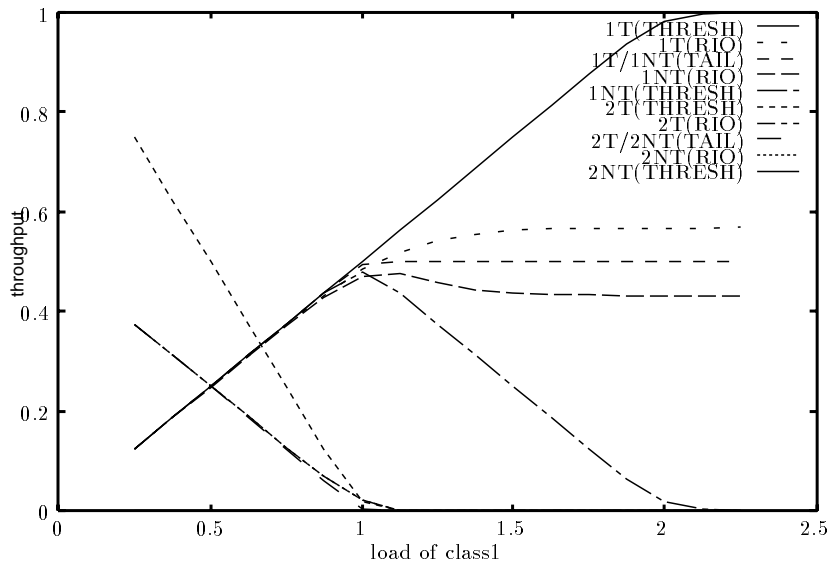


図 27: クラス 1 の負荷に対するスループットの変化 (分離型,  $\rho = 2.5$ )

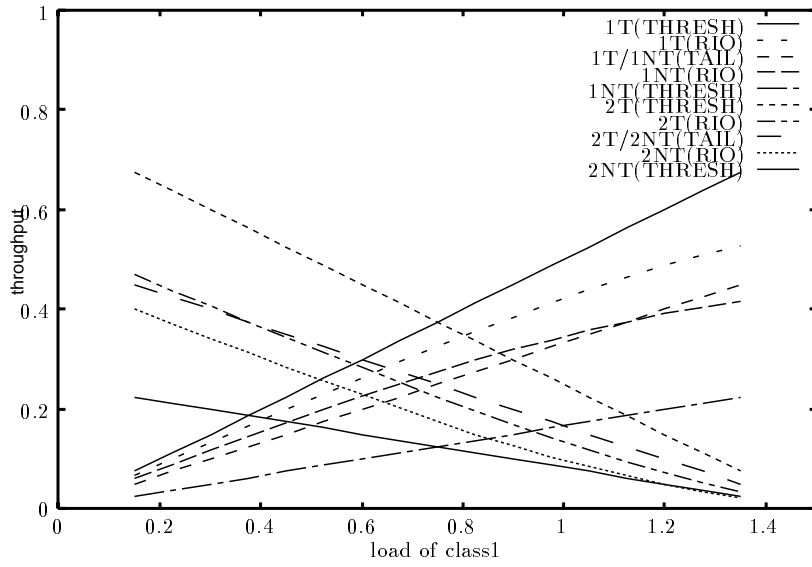


図 28: クラス 1 の負荷に対するスループットの変化 (共有型,  $\rho = 1.5$ )

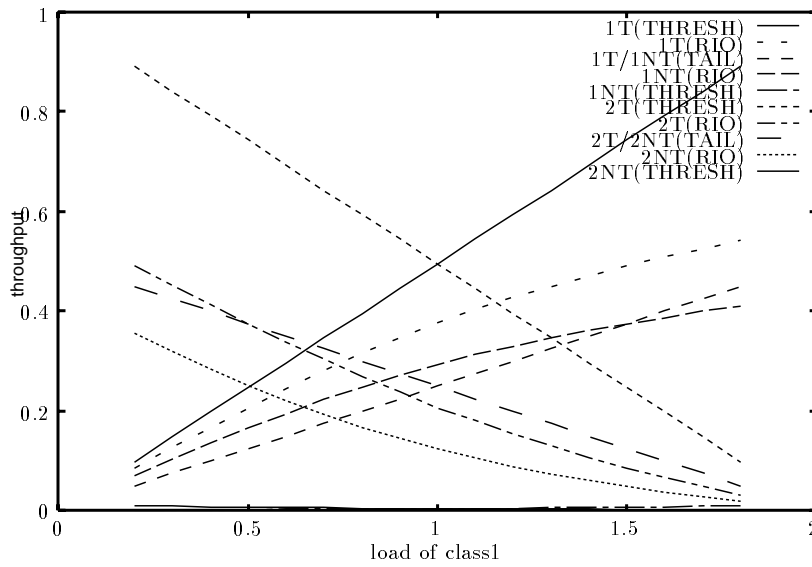


図 29: クラス 1 の負荷に対するスループットの変化 (共有型,  $\rho = 2.0$ )

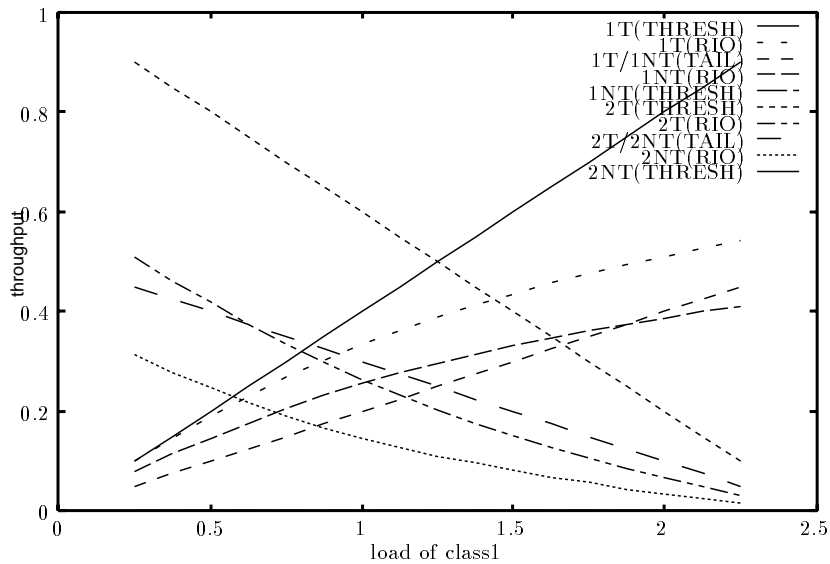


図 30: クラス 1 の負荷に対するスループットの変化 (共有型,  $\rho = 2.5$ )

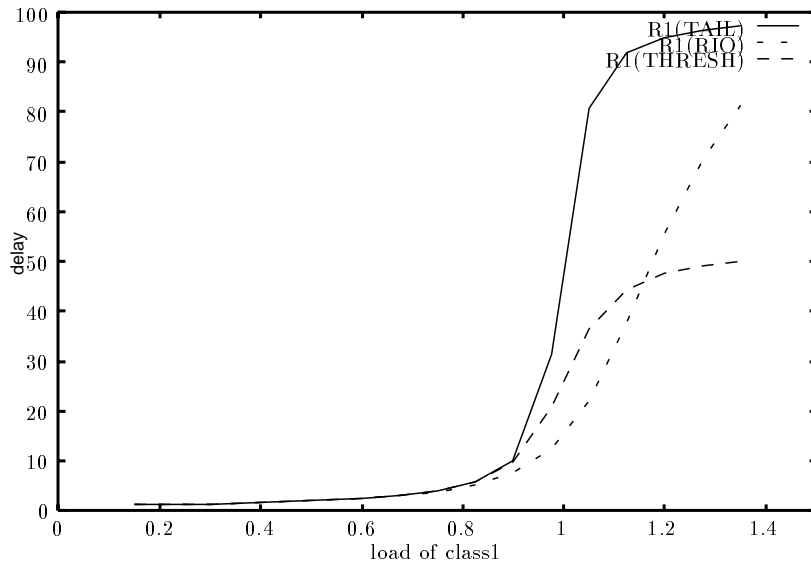


図 31: クラス 1 の負荷に対する平均遅延の変化 (分離型, クラス 1,  $\rho = 1.5$ )

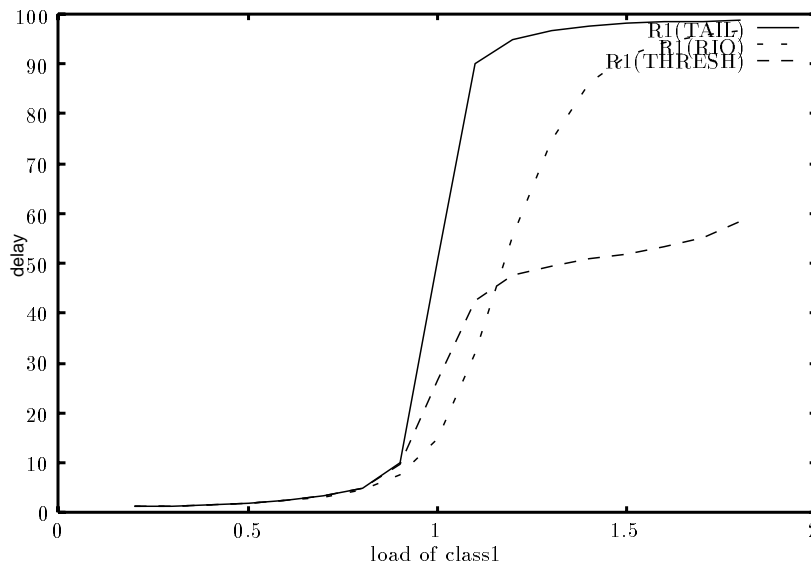


図 32: クラス 1 の負荷に対する平均遅延の変化 (分離型, クラス 1,  $\rho = 2.0$ )

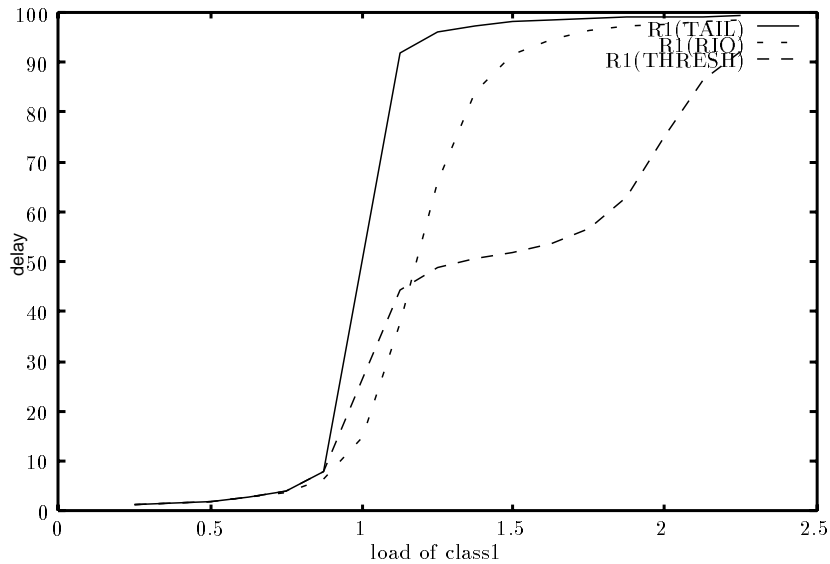


図 33: クラス 1 の負荷に対する平均遅延の変化 (分離型, クラス 1,  $\rho = 2.5$ )



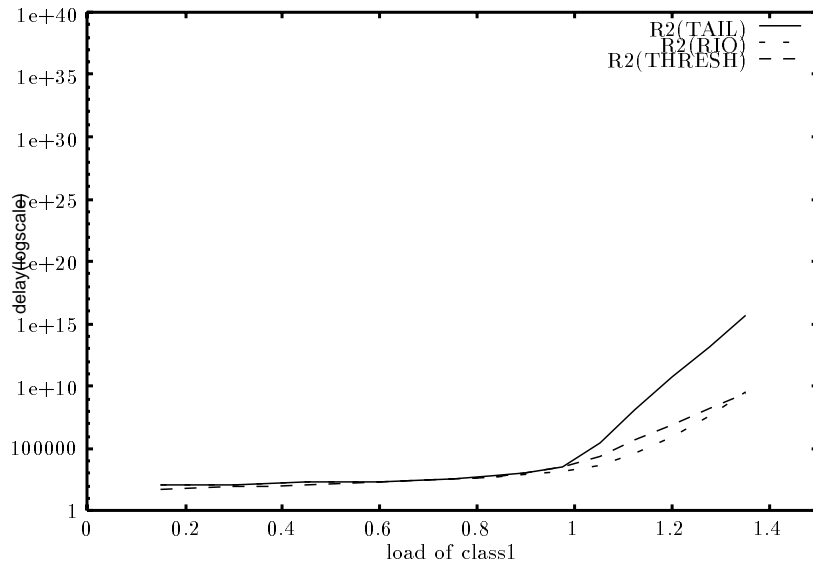


図 34: クラス 1 の負荷に対する平均遅延の変化 (分離型, クラス 2,  $\rho = 1.5$ )

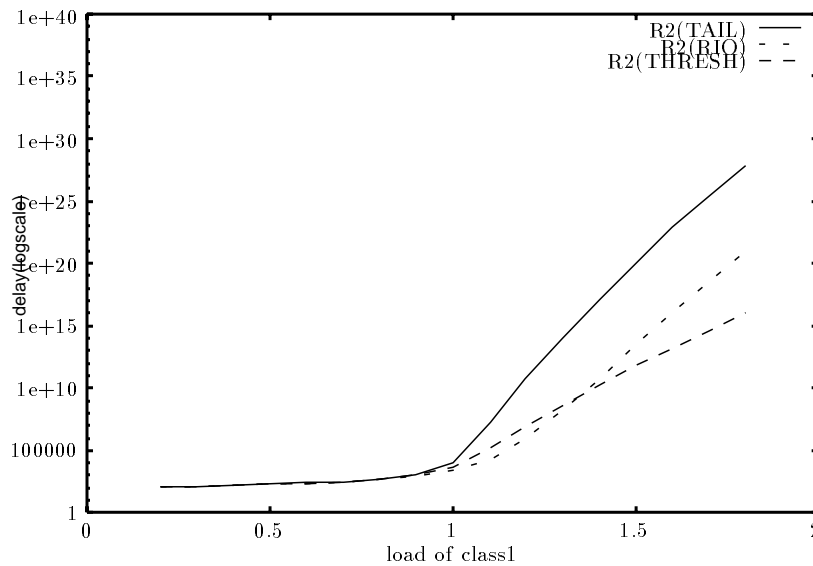


図 35: クラス 1 の負荷に対する平均遅延の変化 (分離型, クラス 2,  $\rho = 2.0$ )

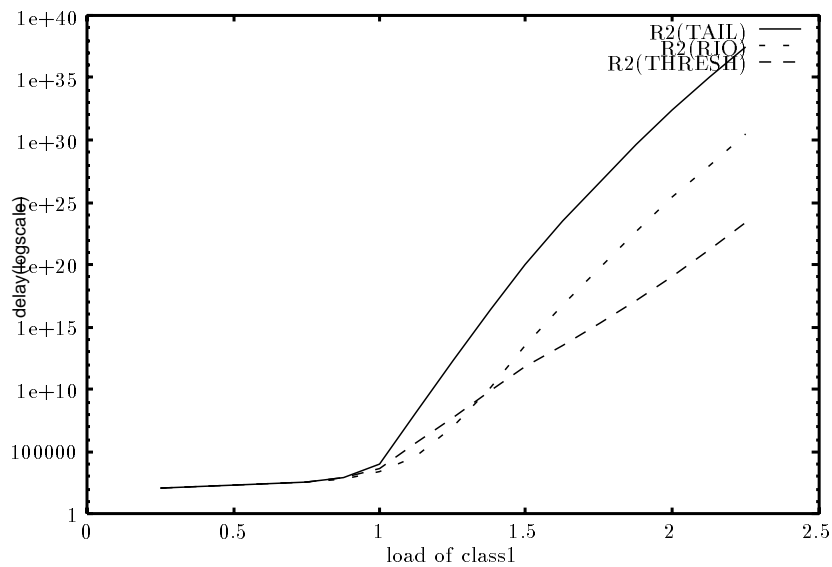


図 36: クラス 1 の負荷に対する平均遅延の変化 (分離型, クラス 2,  $\rho = 2.5$ )

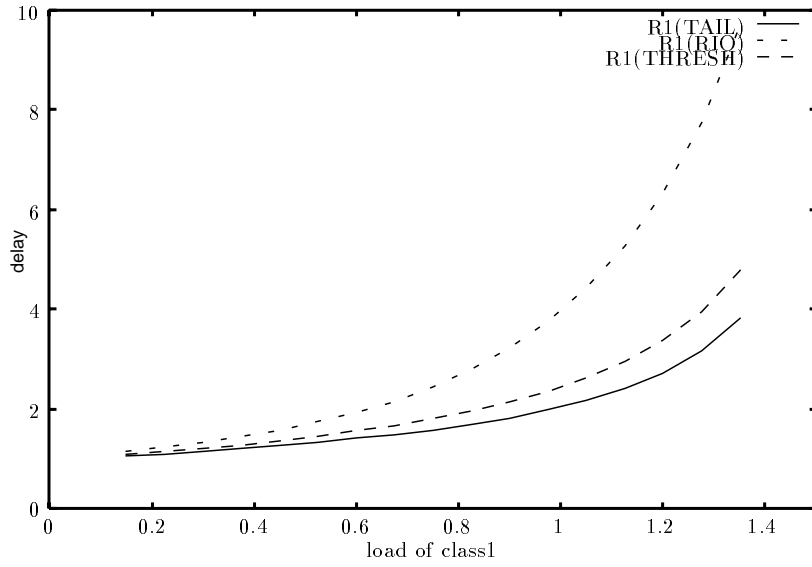


図 37: クラス 1 の負荷に対する平均遅延の変化 (共有型, クラス 1,  $\rho = 1.5$ )

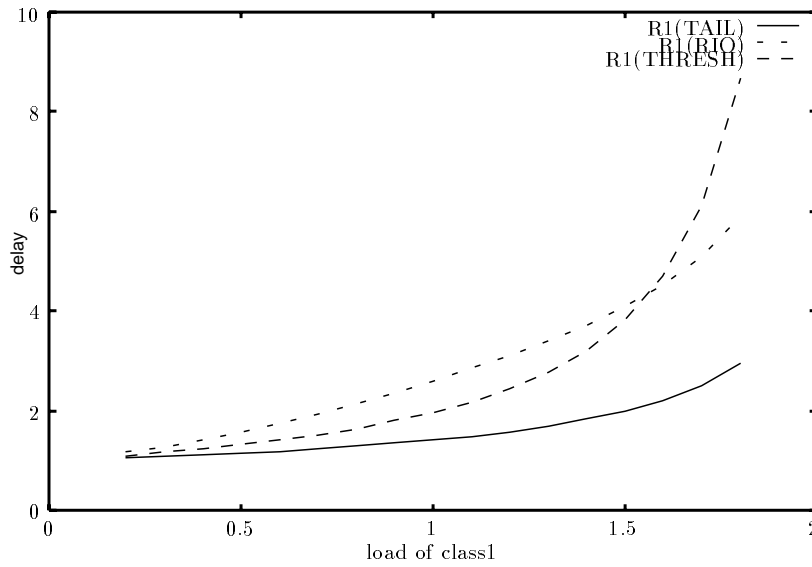


図 38: クラス 1 の負荷に対する平均遅延の変化 (共有型, クラス 1,  $\rho = 2.0$ )

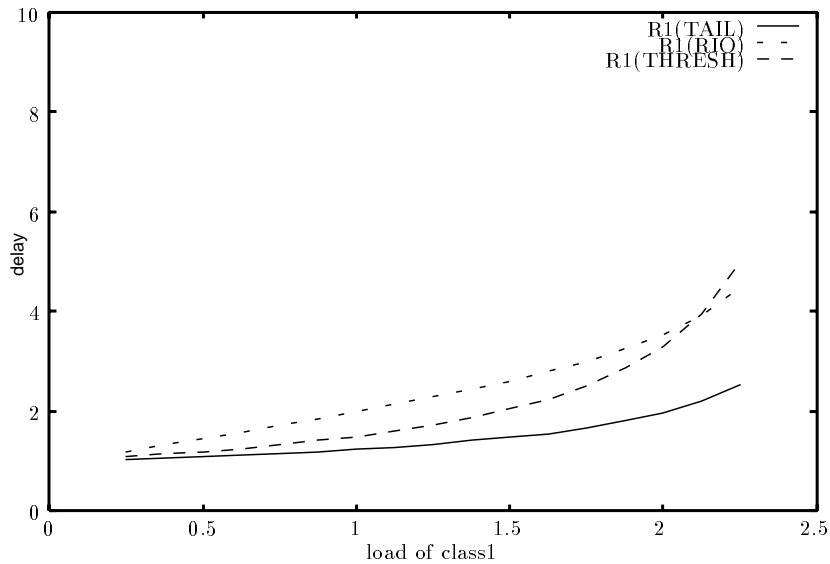


図 39: クラス 1 の負荷に対する平均遅延の変化 (共有型, クラス 1,  $\rho = 2.5$ )

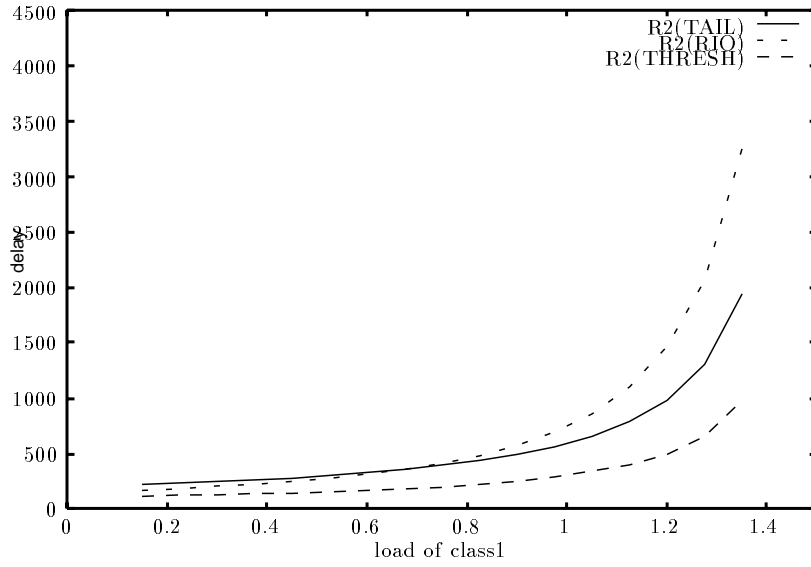


図 40: クラス 1 の負荷に対する平均遅延の変化 (共有型, クラス 2,  $\rho = 1.5$ )

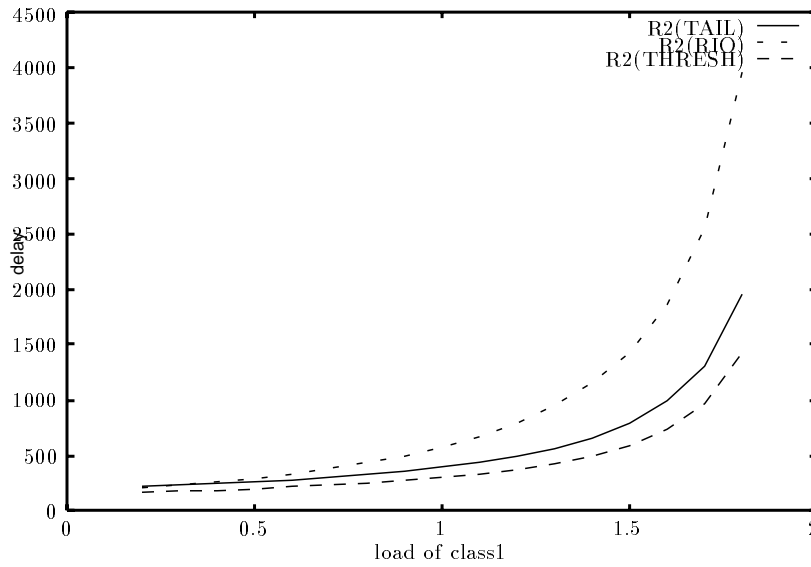


図 41: クラス 1 の負荷に対する平均遅延の変化 (共有型, クラス 2,  $\rho = 2.0$ )

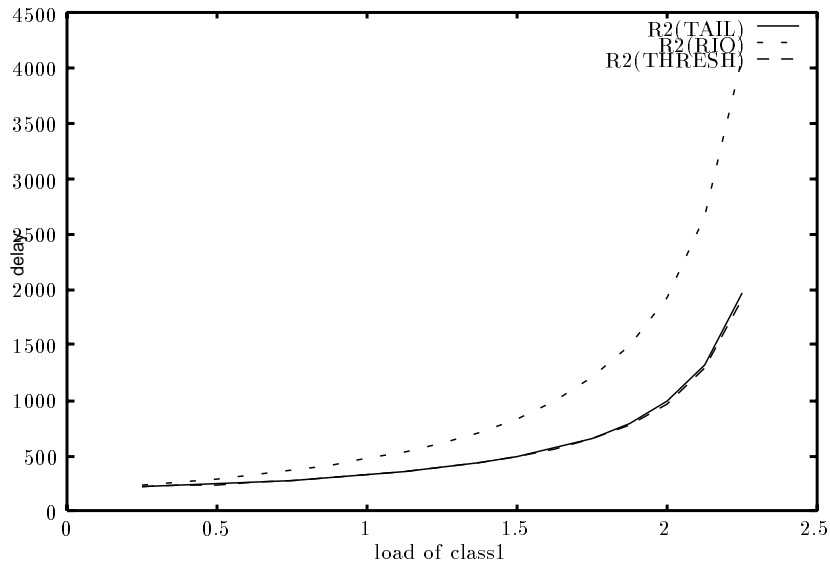


図 42: クラス 1 の負荷に対する平均遅延の変化 (共有型, クラス 2,  $\rho = 2.5$ )

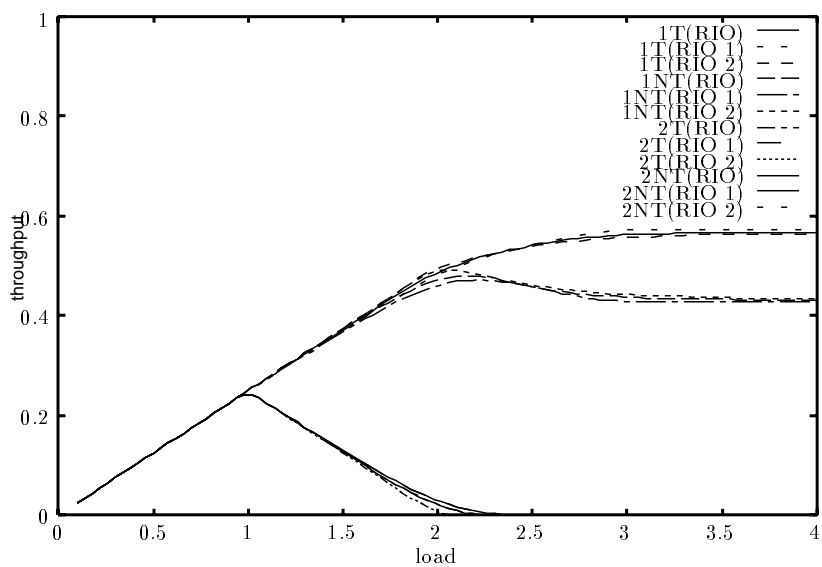


図 43: システム全体の負荷に対するスループットの変化 (分離型)

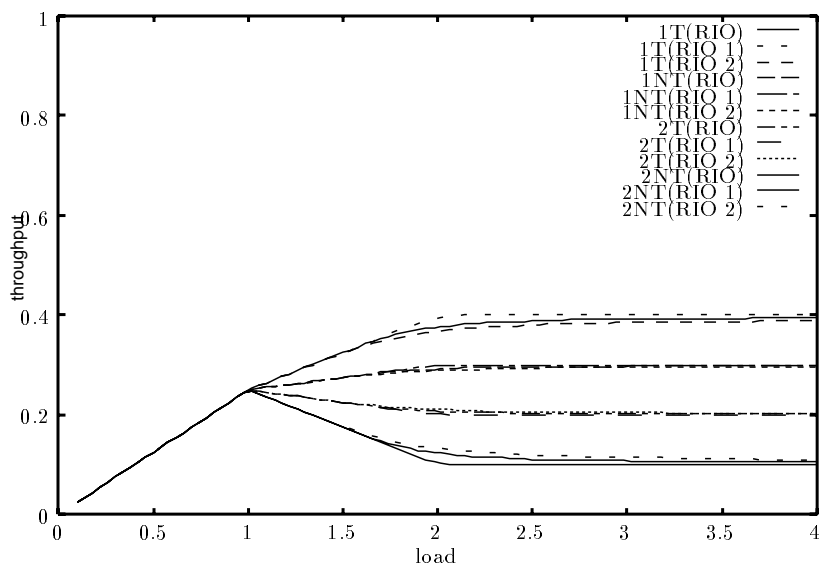


図 44: システム全体の負荷に対するスループットの変化 (共有型)

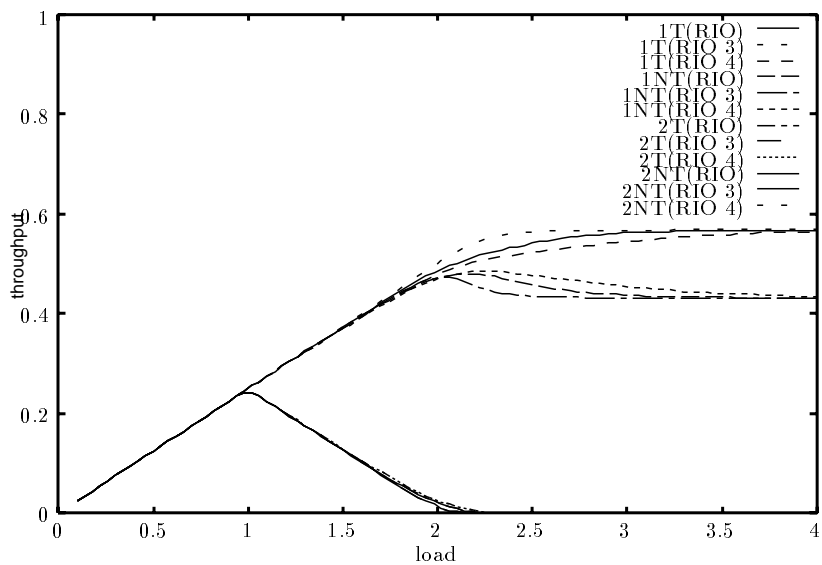


図 45: システム全体の負荷に対するスループットの変化 (分離型)

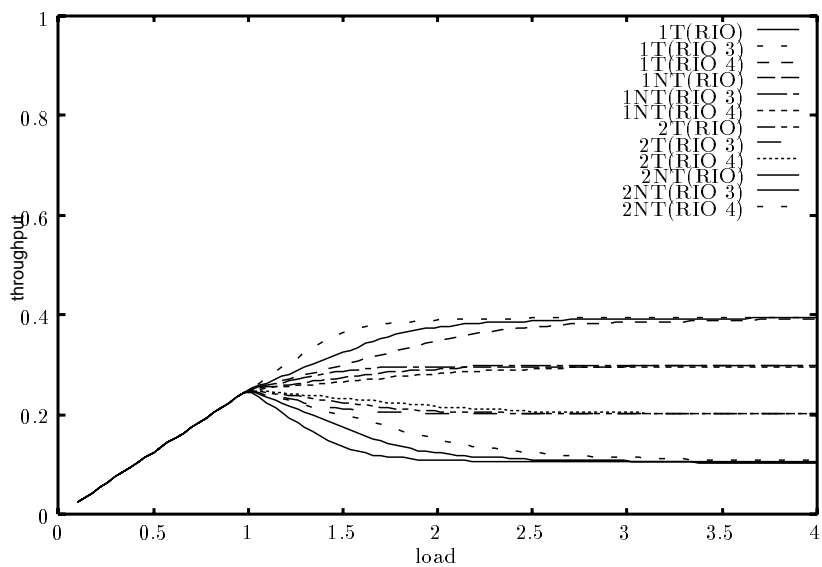


図 46: システム全体の負荷に対するスループットの変化 (共有型)

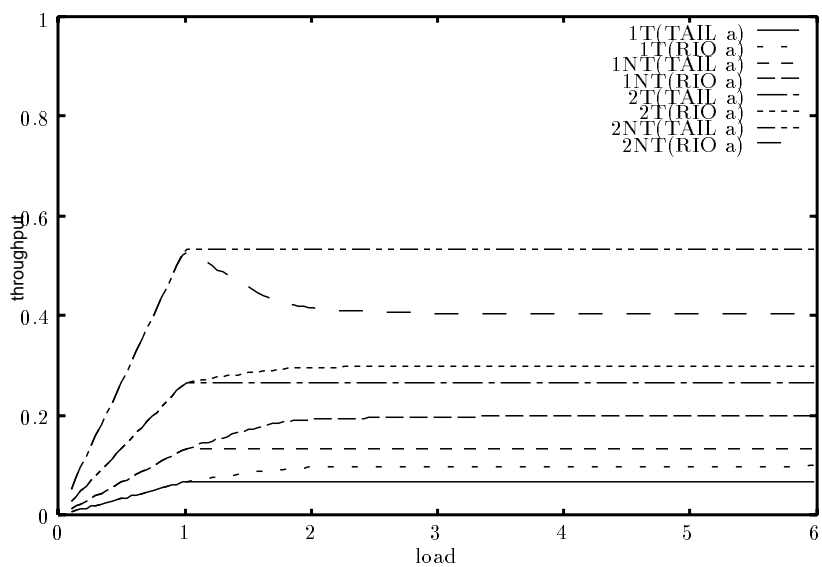


図 47: システム全体の負荷に対するスループットの変化 (共有型, (a))

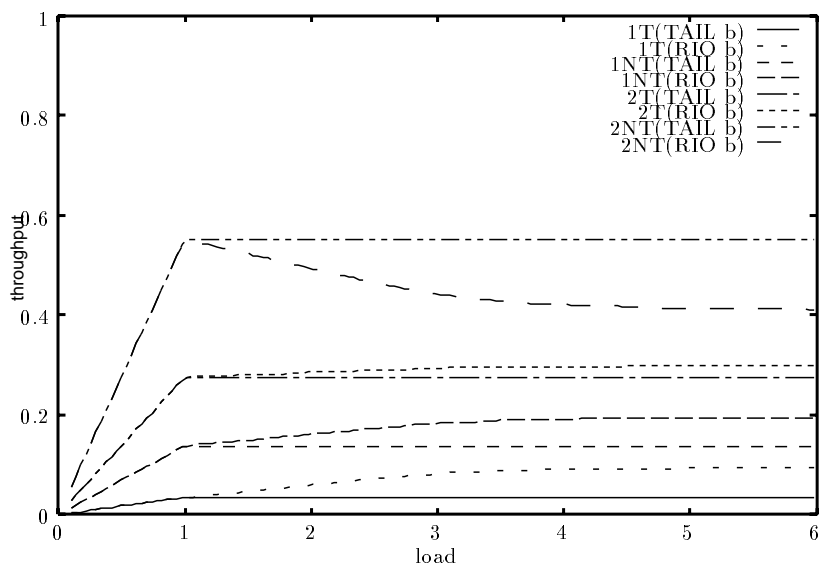


図 48: システム全体の負荷に対するスループットの変化 (共有型, (b))

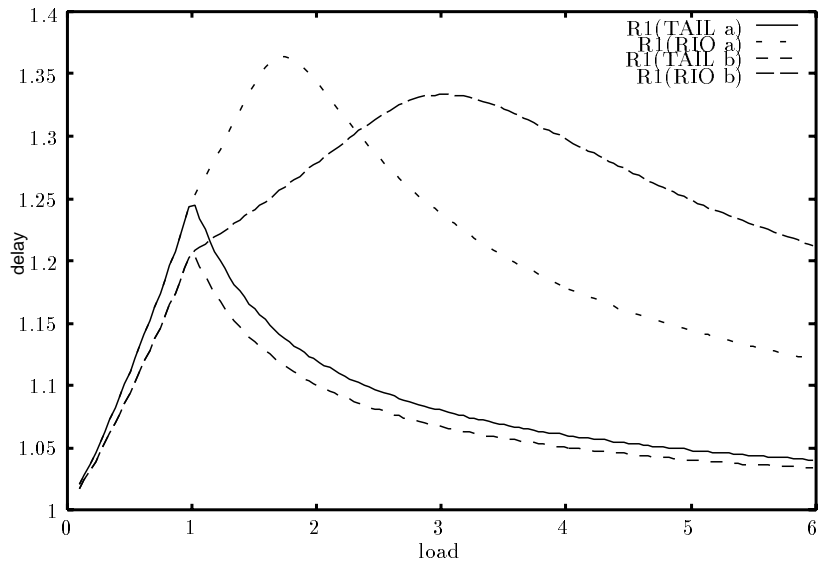


図 49: システム全体の負荷に対する平均遅延の変化 (共有型, クラス 1)

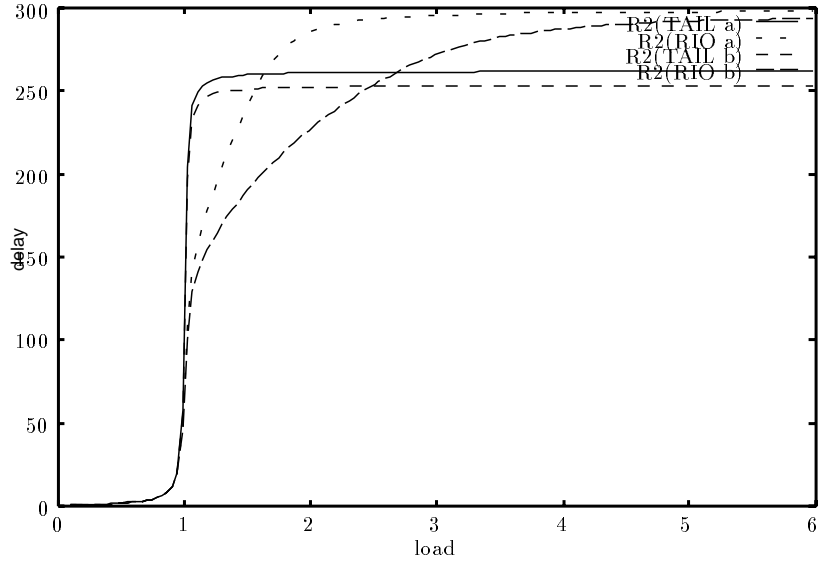


図 50: システム全体の負荷に対する平均遅延の変化 (共有型, クラス 2)