

Title	異種通信方式ネットワークの相互接続における特性解析
Author(s)	松本, 浩久
Citation	
Issue Date	1998-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/1122
Rights	
Description	Supervisor:日比野 靖, 情報科学研究科, 修士

修士論文

異種通信方式ネットワークの相互接続における特性解析

指導教官 日比野 靖 教授

北陸先端科学技術大学院大学
情報科学研究科情報システム学専攻

松本 浩久

1998年2月13日

要旨

本論文では、異種ネットワークを接続してネットワークを設計する時の指標を提案する。大規模なネットワークの多くは、異種ネットワークを相互接続して構築されている。ネットワークの構築は、ネットワーク内を伝搬するトラフィック特性によってその構築方法を変更する必要がある。

トラフィックモデルは、本学のネットワークでの実測結果から作成する。また、Ethernet と FDDI を用いてネットワークモデルを作成する。Ethernet は最も良く使われているネットワークであり、FDDI は高速でデータを転送する部分に使われている。双方のモデルと用いてシミュレーションを行ない、呼損率と平均待ち時間を計測する。シミュレーションの結果からネットワーク設計指標を提案する。

本論文では、ネットワークの構成、トラフィックモデル、ネットワークモデル、シミュレーションによる実験、そしてネットワーク設計指標の提案について述べる。

目次

1	はじめに	1
1.1	本研究の背景と目的	1
1.2	本論文の構成	2
2	ネットワークの構成	4
2.1	ネットワークトポロジー	4
2.1.1	バス型 LAN	4
2.1.2	トークンリング	6
2.2	ネットワーク待ち列モデル	7
2.3	QoS について	9
3	トラヒックモデル	11
3.1	概説	11
3.2	トラヒック測定	11
3.3	モデル化の対象とするトラヒック	12
3.4	確率分布関数とパラメータの推定	15
3.5	モデルの検定	16
3.6	トラヒックモデルの作成	17
3.6.1	典型トラヒックモデル	17
3.6.2	バーストトラヒックモデル	22
3.7	モデルの妥当性について	25
3.8	まとめ	31

4	ネットワークモデル	32
4.1	Ethernet モジュール	32
4.2	FDDI モジュール	34
4.3	ブリッジモジュール	35
5	シミュレーションによる実験	38
5.1	次イベント発生時刻の設定	38
5.1.1	Ethernet モジュール	38
5.1.2	FDDI モジュール	39
5.1.3	ブリッジモジュール	39
5.2	トラヒックモデル	40
5.3	シミュレーション	40
5.3.1	シミュレーション 1	40
5.3.2	シミュレーション 2	42
5.3.3	シミュレーション 3	44
5.3.4	シミュレーション 4	46
5.3.5	シミュレーション 5	48
5.3.6	シミュレーション 6	50
5.3.7	シミュレーション 7	51
5.3.8	シミュレーション 8	52
6	ネットワーク設計指標の提案	54
7	まとめ	56
7.1	本研究の成果	56
7.2	今後の課題	57

第 1 章

はじめに

1.1 本研究の背景と目的

コンピュータネットワークのようなパケット交換のネットワークを構築する場合、通信速度や通信方式の異なる通信路を相互接続することが多い。その構成は、複数の低速回線を多重化して高速回線へ接続する 경우가ほとんどである。以下に相互接続の利点を示す。

- 低速回線上のトラフィックを多重化して高速回線へ伝送する大群化効果。
- NFS のように、サーバを高速回線上に配置し複数台接続するクライアントのデータやアプリケーションを共有する。
- ブリッジやルータを用いることで簡単に構築が可能である。

本研究では、「快適なネットワーク環境の構築」を目的としている。しかし、十分な検討をしないで過剰設備を用意して帯域幅を確保したのでは、費用を浪費する。また、単純に通信速度やクライアント数を検討項目として設計したのでは、応答性の悪いシステムになってしまう可能性がある。したがって、ネットワークの特性を総合的に評価して、最小限度の設備で有効に活用可能なネットワークの構築が必要である。

ネットワークの性能を評価する従来の研究は、多くの場合パケットはランダムに発生するものと仮定し、その発生間隔時間は指数分布に従うものとされてきた。また、パケット長に関しては、特定の長さに固定するモデルあるいは Ethernet における最小長 (64 バイト) から最大長 (1518 バイト) までランダムに発生させるモデルが用いられてきた [1]。

アプリケーション毎に発生率を考慮して解析した例もあるが [2]、単一通信のみでの解析であり、実際のネットワークに伝送されるトラフィック特性とは異なる。

本研究では、現実のネットワークをモデル化して特性を解析するため、実際のネットワークにてトラフィックを測定し、実測結果からパケット発生間隔時間およびパケット長のトラフィックモデルを作成する。また、相互接続する各ネットワークの通信速度や通信方式をモデル化したネットワークモデルを作成する。双方のモデルを結合してシミュレーションを行い、クライアント、サーバおよびブリッジにおける遅延時間や呼損率を求める。この結果から、異種の通信路を組み合わせたネットワークにおけるトラフィック量の限界値を推定し、 QoS^1 の高いネットワークの設計指標を提案することを目的とする。

1.2 本論文の構成

本論文の構成は次のようになる。

第1章では本研究の背景と目的および本論文の構成を述べる。

ネットワークが欠かせなくなった今日、ネットワークを構築する時に用いる異種ネットワークを相互接続する利点とその性能解析について述べる。

第2章では本研究に用いるネットワーク構成について説明する。

相互接続するネットワークを例に上げる。また、ネットワーク性能の指標に必要な QoS について説明する。

第3章ではトラフィックモデルについて示す。

トラフィックを実際に使用しているネットワークにおいて実測し、その結果からトラフィックモデルを作成する。また、モデルの妥当性について述べる。

第4章ではネットワークモデルについて示す。

¹Quality of Service

第 2 章にて例に上げた相互接続するネットワークモデルの作成方法を説明する。

第 5 章ではトラヒックモデルとネットワークモデルを使用して行なうシミュレーションについての示す。

シミュレーションの方法を説明し、得られた結果および結果に対する考察を行なう。

第 6 章では第 5 章にて行なったシミュレーション結果から、ネットワークの設計指標を提案する。

第 7 章では本研究で得られた成果と今後の課題を述べる。

従来の研究に対して今回の研究で発展した点を述べる。

付録では代表的な待ち行列理論である $M/M/1$ の特性とシミュレーションにて利用する乱数発生メカニズムについて述べる。

第 2 章

ネットワークの構成

本研究では、ネットワークの例として低速回線としてバス型 LAN の Ethernet と高速回線としてトークンリングの FDDI を相互接続する。

2.1 ネットワークトポロジー

異種ネットワークを接続する装置としてブリッジやルータがある。ブリッジは、転送機能、フィルタリング機能、学習機能を持った第 1 層および第 2 層の装置である。ルータは経路制御などを行なう第 3 層の装置である。本研究で用いるネットワークトポロジーを図 2.1 に示す。異種ネットワークの例として、低速回線に Ethernet、高速回線に FDDI を用いる。各回線の物理層はそれぞれ 10Base-T、100Mbps の光ファイバとする。

Ethernet と FDDI はブリッジを介して相互接続する。Ethernet には複数台のクライアントを接続する。また、FDDI には 1 台のサーバおよび複数台のブリッジを接続する。

2.1.1 バス型 LAN

本研究で用いるバス型 LAN の Ethernet には以下の特性がある。

1. LAN に接続されているすべての機器は同一の packets (電気信号) を見ている。
2. 一つの LAN (セグメント) では同時に二つ以上のノードの通信はできない。

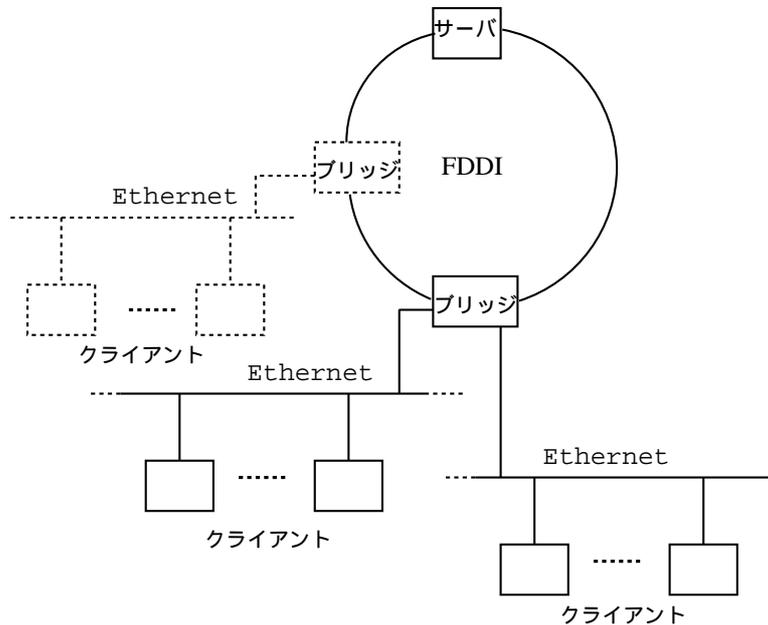


図 2.1: ネットワークトポロジー

この性質は、LAN の接続機器構成を簡便に行なう利点がある。しかし、構成面でうまく通信を行なうには、CSMA¹方式に衝突検出機構を追加した CSMA/CD²方式を用いる必要がある。

CSMA/CD の詳細について説明する。

1. CS(Carrier Sense):

ケーブルに接続されたアクティブなステーションは常にケーブル上の信号を聞き取る。

2. MA(Multiple Access):

送信すべきデータを持ったステーションは、他のステーションが送信していないことを 1 項の CS にて判断したうえでケーブル上に送信する。この際、複数のステーションが一つの伝送チャンネルにアクセスすることを許している。

3. CD(Collision Detection):

¹Carrier Sense Multiple Access

²Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection

表 2.1: Ethernet 仕様

項目	値
通信速度	10Mbps
通信方式	CSMA/CD
最大フレーム長	1518 オクテット
最小フレーム長	64 オクテット
スロット時間	51.2 μ s
フレーム間ギャップ	9.6 μ s
再送回数	16 回
バックオフ限界	10 回
ジャム信号サイズ	32 ビット

ケーブル上を電気信号が伝わる速度は、真空中では 1 秒間に約 30 万 km の速度で伝搬する光の速度 (c) に対して、同軸ケーブル上ではその約 65% の速度 ($0.65c$) で信号が伝わる。このため、あるステーションが既に送信を始めていてもその信号が伝わる時間遅れがあるため、別のステーションは 1 項の CS で他のどのステーションも送信していないと判断してしまい送信を始めてしまう可能性がある。Ethernet では各ステーションに送信権の優先順位を付けていないため、このような同時送信が発生する。

再送アルゴリズムには 1-persistent 方式を採用している。1-persistent 方式とは、通信メディアが空いていればすぐ送信を開始する方式。もし通信メディアがほかで使用中の場合はそれが空きしだいすぐに送信を開始する。

表 2.1 に本研究で用いる Ethernet の方式を示す。

2.1.2 トークンリング

トークンリング、すべてのノードが互いにポイント・ツー・ポイントで数珠つなぎに接続され、一つの閉じた輪を形成するものである。あるノードが送信したメッセージはノード間を順次中継されてゆく。各ノードは、メッセージが自分宛のものかどうか識別するた

めに自分のアドレスを認識している。また、自分宛でないメッセージは順次下流側のノードへ中継する機能を持っている。トークンリングではネットワークの制御を分散させる方式に完全分散方式とマスタ・コントローラ方式がある。

1. 完全分散方式:

トークンと呼ばれる特殊なメッセージを周回させ、トークンを受け取ったノードだけが伝送チャネルを使ってメッセージを送信できる。

2. マスタ・コントローラ方式:

どれか1台のノードがマスタ・コントローラとなりその他のノードに伝送チャネルの使用権を割り振る。

本研究では、完全分散方式を利用している。

FDDI³は、伝送媒体に光ファイバケーブルを使った100Mbpsの完全分散方式トークンリングネットワークである。トークンは3バイト長の特殊なフレームである。

ステーションはトークン保持時間の間トークンを保持できる。もし最初のフレームを送信した後、伝送に必要な時間が残されていたら次のフレームを送信できる。トークン保持時間を越えた場合あるいは次のフレームを伝送するのに必要な時間が残されていなかったら、トークンフレームをリングに戻す。

2.2 ネットワーク待ち列モデル

Ethernet上のクライアントがブリッジを介してFDDI上のサーバと接続しているネットワーク待ち列モデルを図2.2に示す。また、相互接続する各ネットワークの比較表を表2.2に示す。モデル化に必要な通信速度、通信方式、最大フレーム長、最小フレーム長のネットワーク特性が明記されている。

モデル化はMAC層を対象として行なう。ブリッジでは、受信したフレームをプロトコルに従ってヘッダーの付け換えを行ない、転送先のネットワークへ送信する。モデルでのヘッダーの付け換えは、FDDIからEthernetへの転送に限り、Ethernetの最小フレームよりも転送データが小さい場合は最小フレーム長を64バイトに詰め合わせる。また、FDDIからEthernetへの転送データがEthernetの最大フレーム長よりも大きい場

³Fiber Distributed Data Interface

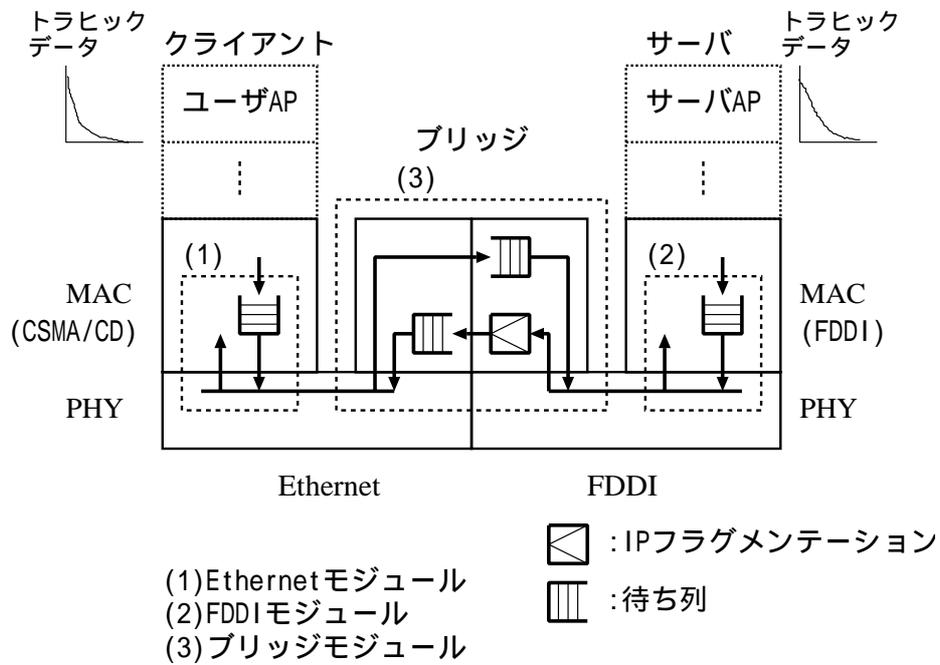


図 2.2: ネットワーク待ち列モデル

表 2.2: ネットワーク比較表

ネットワーク名	Ethernet	FDDI
通信速度	10Mbps	100Mbps
通信方式	CSMA/CD	Token Ring
最大フレーム長	1518 オクテット	4500 オクテット
最小フレーム長	64 オクテット	13 オクテット

合、Ethernet の最大フレーム単位にデータ長を分割する。この機能を IP フラグメンテーションという。本来、IP フラグメンテーションは第 3 層へ実装される機能だが、相互接続されるネットワークで MTU⁴に違いがあり転送時の機能として必要であるため、多くの Ethernet-FDDI ブリッジではこの機能が実装されている。本研究でも、本機能をブリッジの機能としてモデル化する。

2.3 QoS について

QoS を論じるためのパラメータとして、フレーム損失率 (FLR;Frame Loss Rate) およびフレーム平均待ち時間 (FWT;Frame Wait Time) を用いる。

FLT および FWT の特性を決定するのは、「フレーム到着間隔」、「サービス時間」、「平均待ち列長」、「バッファサイズ」である。

フレーム到着時間は、第 3 章にて述べるトラヒックモデルによって発呼される時間あるいは通信回線を通してブリッジの到着する時間で決定する。

サービス時間は、データ伝送時間およびバス確保時間によって決定する。データ伝送時間は第 3 章にて述べるトラヒックモデルによって発呼されるフレーム長の伝送に費やされる時間である。バス確保時間は、通信方式によって異なる。Ethernet にて用いている CSMA/CD は回線使用率によって著しく変化する。まず、キャリアセンス時間が長くなる。また、衝突回数が多くなり、それに伴って指数バックオフによる再試行までの待ち時間が長くなる。その結果としてバス確保時間は極端に増大する。FDDI はトークンを待つ時間によって異なる。トークンが自局に存在しており、トークン保持タイマに至る前に送信が完了するのであれば、送信を実行できる。しかし、トークンが他局にある場合、トークンが自局に回ってくるまで待たなければならない。そして、トークンを受信したらデータ送信を開始できる。

バッファサイズは、FLR に最も関係する。付録 1 に、待ち行列理論の最も代表的な例である、到着間隔がランダム、サービス時間は指数分布に従う、窓口が一つ、待ち列の長さは無量大と仮定した M/M/1 の各特性を示す。この待ち行列理論より、平均待ち時間は 1 フレームの処理時間 (サービス時間) と待ち列長の積で求めることができる。回線使用率の増加に伴ってサービス時間が長くなると、待ち列は長くなる。この際、バッファサ

⁴Maximum Transfar Unit

イズが無限大であれば、FLR はゼロになる。 $\frac{\lambda}{\mu}$ が 1 に近付くと、FWT は無限大に発散する。また、バッファサイズを一定の長さに制限すれば、FLR は大きくなるが FWT は一定値に収束する。以上の特性を利用し、バッファサイズを可変することで FLR と FWT の関係を導くことができる。

本論文ではバッファサイズを直接用いるのではなく、パケットの個数で規格化したバッファ個数を用いる。

第 3 章

トラヒックモデル

本章では、ユーザトラヒックのモデル化について述べる。

3.1 概説

ネットワークを構築する場合の設計基準となるのがユーザトラヒックである。もしこの設計基準を見誤れば、構築したネットワークが動作しなかったり応答性の悪いものになってしまう。したがって、想定されるユーザトラヒックを推定し、そのトラヒックに従ったネットワーク設計をしなければ、QoS の良いネットワークを構築することは困難である。

本研究では、ユーザトラヒックを実際に運用されているネットワークにおいて実測し、得られた結果から実験に使用するモデルを作成する。モデル化は、確率分布関数とそのパラメータを推定することにより行なう。モデルの適合度は、 χ^2 検定を用いて確認する [3, 4, 5]。

最後に、モデルの一般性を確認する。

3.2 トラヒック測定

トラヒックの測定は、本学のネットワークを用いて行なった。図 3.1 に測定に利用したネットワークセグメントのネットワーク構成を示す。セグメント内には 18 台のワークステーション (以下、WS と略記) NIS、BOOTP、NFS、WWW、DHCP、Apple talk を扱うサーバ 4 台、2 台のプリンタ (1 台はブリッジを介して Apple talk にて接続) パー

ソナルコンピュータ（以下、PC と略記）および測定端末が接続されている。なお、ほとんどの PC は不定期にしか接続されない。

測定は、バークレイパケットフィルターを使った tcpdump を用いて行なった。測定期間は、9月14日から10月4日までの3週間で、常時セグメント内を伝搬する全トラフィックを測定した。図 3.2に測定した3週間の推移を示す。1日あたりの平均パケット数は 6,223,000、標準偏差は 1,047,000 である。トラフィック分布は多量のトラフィックが伝搬する日が数日あるものの、曜日や日付に依存しないと考えられる。したがって、トラフィック測定結果の分析は全トラフィックを対象とする。但し、セグメント内に常時接続しているのは WS、サーバ、プリンタであり、常時接続されない PC は分析対象に含めない。

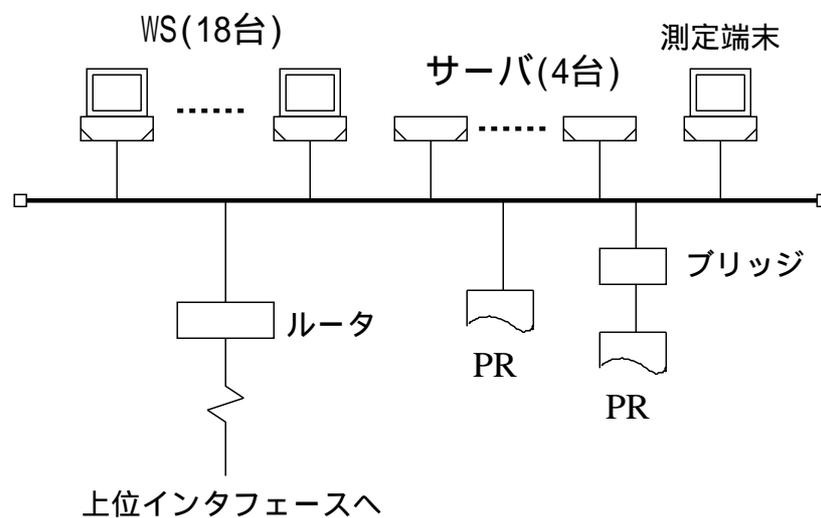


図 3.1: 測定セグメントのネットワーク構成

3.3 モデル化の対象とするトラフィック

コンピュータネットワークでのトラフィックは、次の条件に依存する 경우가大きく、極めて複雑である。

1. 人間の行動（スクリプト等による自動運転も含む）
2. プロトコル

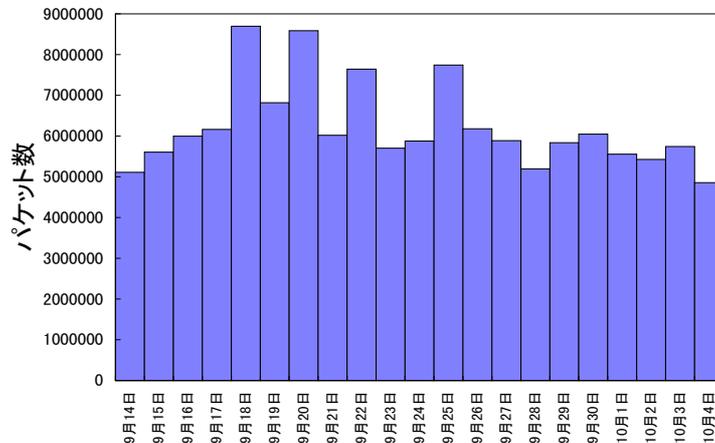


図 3.2: トラフィック分布の推移

3. アプリケーション

したがって、トラフィックパターンを一つのモデルとするのは困難である。このため、2つのモデル化を考える。

典型モデルの作成

1. 測定期間中の全トラフィックに対して、一日当りの平均パケット数および標準偏差を求める。一日の平均パケット数は 6,223,000 、標準偏差は 1,047,000 である。
2. 統計的代表的値となるパケット数が伝搬する一日(9月26日)に対して、1時間毎の分布を作成する。図 3.3に示す。この分布での1時間当りの平均パケット数は 257,000 、標準偏差は 220,000 である。
3. さらに統計的代表的値となるパケット数の1時間(12時)で、クライアント別の分布を作成する。図 3.4に示す。この分布における1クライアント当りの平均パケット数は 12,400 、標準偏差は 18,300 である。
4. 1クライアント当りのパケット数が統計的代表的値となるクライアント(クライアント3)に対して、クライアント側およびサーバ側の双方で発生間隔時間に対するパ

ケット数およびパケット長に対するパケット数の分布を作成する。

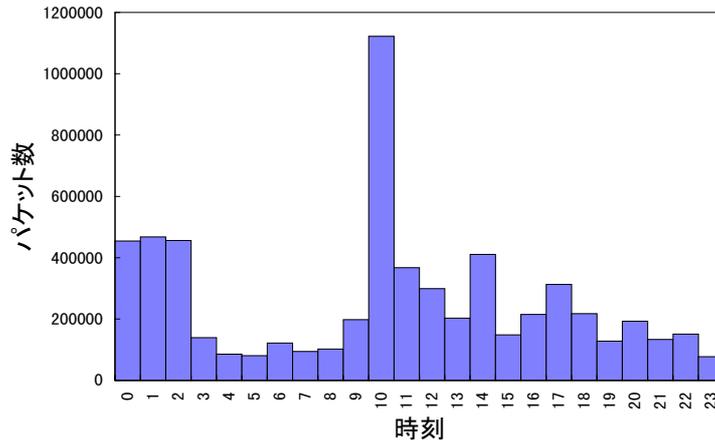


図 3.3: 平均トラヒック下の一日のトラヒック推移

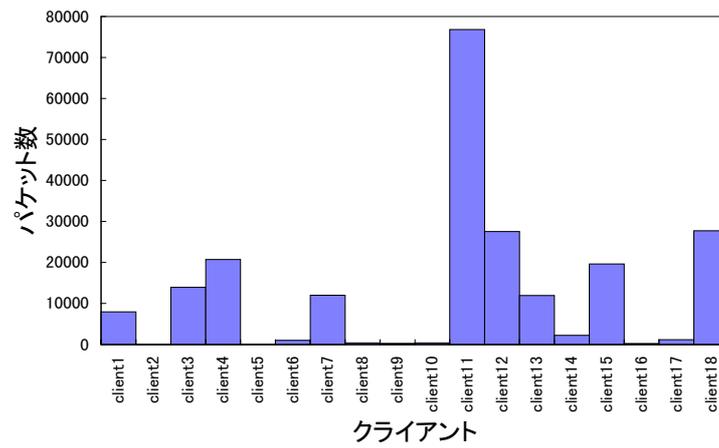


図 3.4: 平均トラヒック下のクライアント毎のトラヒック分布

バーストモデルの作成

1. 測定期間中のピークとなる一日(9月18日)の1時間毎の分布を作成する。図 3.5 に示す。
2. さらにピークとなる1時間(0時)で、図 3.6 に示すクライアント別の分布を作成し、最大パケットを授受しているクライアント(クライアント14)に対して、クライアント側およびサーバ側の双方で発生間隔時間に対するパケット数およびパケット長に対するパケット数の分布を作成する。

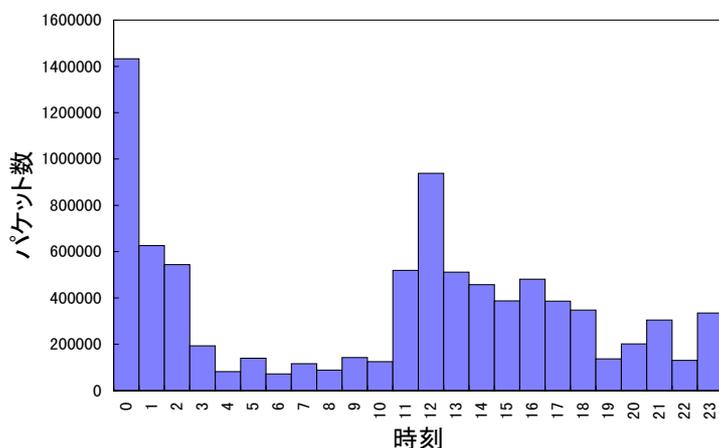


図 3.5: ピークトラヒック下の一日のトラヒック推移

3.4 確率分布関数とパラメータの推定

モデル化に必要な確率分布関数の候補を、正規分布、指数分布、対数正規分布とする。対数正規分布は、確率変数 x の対数 $y(\log_2(x))$ が正規分布に従う分布であり、確率変数が正の広い領域をとるような分布を表すのに適している。

平均 μ 、標準偏差 σ である正規分布の確率密度関数は、

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (3.1)$$

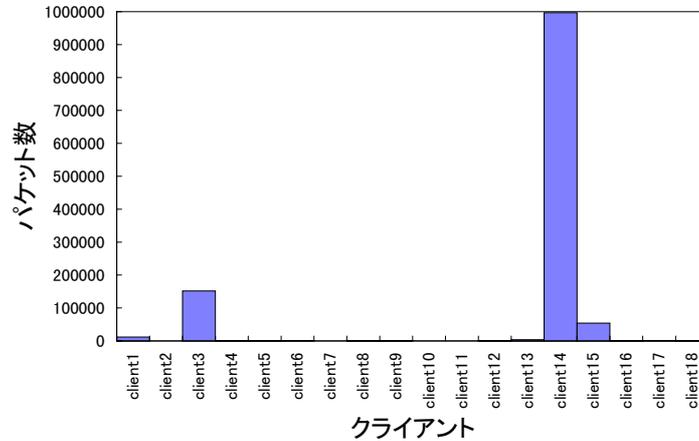


図 3.6: ピークトラヒック下のクライアント毎のトラヒック分布

で与えられる。平均発生率 λ である指数分布の確率密度関数は、

$$f(\tau) = \lambda e^{-\lambda\tau} \quad (3.2)$$

で与えられる。平均 μ_y 、標準偏差 σ_y である対数正規分布の確率密度関数は、

$$f(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{y-\mu_y}{\sigma_y}\right)^2} \quad (3.3)$$

で与えられる。なお、 y は確率変数 x の対数 ($\log_2(x)$) 表示である。

各分布のパラメータの推定は次のように行なう。正規分布および対数正規分布はサンプルデータの平均、標準偏差から推定する。指数分布はサンプルデータの平均から求めた発生率により推定する。

3.5 モデルの検定

モデルの検定は、 χ^2 を用いる。 χ^2 は、値が小さいほどモデルの適合度が高いことを意味する。したがって、複数のモデルを比較する場合は、 χ^2 が最も小さくなるモデルを選択すれば良い。

表 3.1: クライアント典型モデルの発生間隔に対する確率分布関数とパラメータ

確率分布関数	パラメータ	χ^2 検定値
正規分布	$\hat{x}=0.00753801, \sigma_x=0.009736807$	1.870234
指数分布	$\lambda=132.6610007$	0.279928
対数正規分布	$\hat{y}=0.001608778, \sigma_y=0.0013015$	0.115324

表 3.2: クライアント典型モデルのケット長に対する確率分布関数とパラメータ

確率分布関数	パラメータ	χ^2 検定値
正規分布	$\hat{x}=163.5634518, \sigma_x=260.7360769$	6.002394
指数分布	$\lambda=0.006113835$	2.386956
対数正規分布	$\hat{y}=6.579365384, \sigma_y=1.545042088$	2.068986

3.6 トラヒックモデルの作成

3.6.1 典型トラヒックモデル

クライアント側のモデル

モデルの候補となる各確率分布関数とパラメータおよび χ^2 検定値を表 3.1、表 3.2に示す。表より発生間隔に対するケット数分布では対数正規分布が最もモデルの適合度が高い。図 3.7に実測データと適合度が最も高い対数正規分布を示す。

また、図 3.8に示すように、ケット長に対するケット数分布は χ^2 の最も小さい対数正規分布でさえも実測データと対数正規分布は明らかに異なる。この理由は、実測データは図 3.9に示すように NFS のケットである NULL、コマンド、データが大半であるため、ケットサイズが限定されているからである。

したがって、ケット長に対しては確率分布関数によってモデル化することは困難であると判断し、テーブルによってモデルを作成することにした。

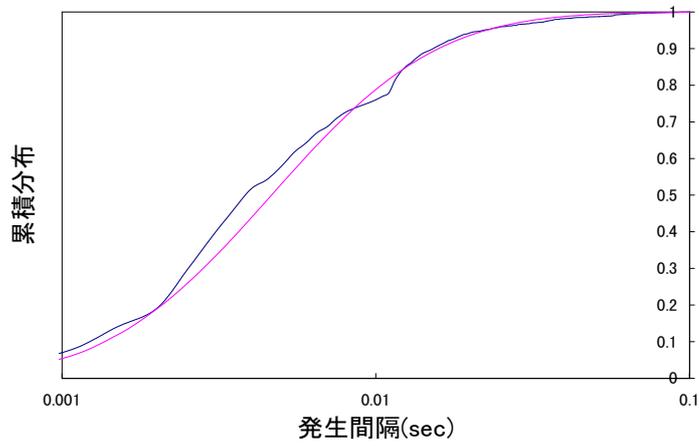


図 3.7: 発生間隔に対するパケット数 (実線: 実測データ、破線: 対数正規分布)

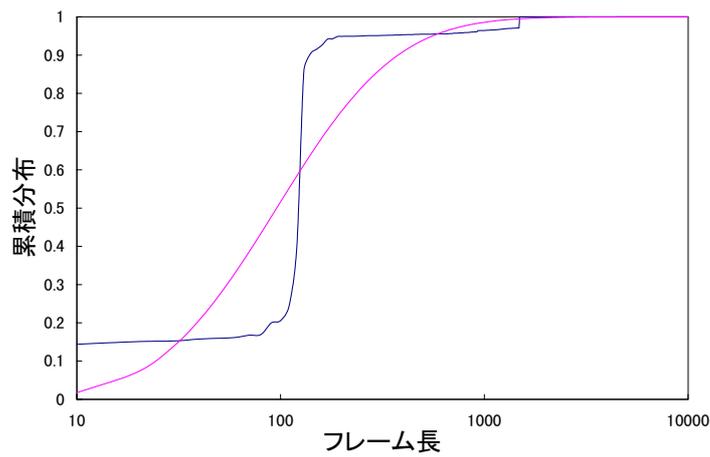


図 3.8: パケット長に対するパケット数 (実線: 実測データ、破線: 対数正規分布)

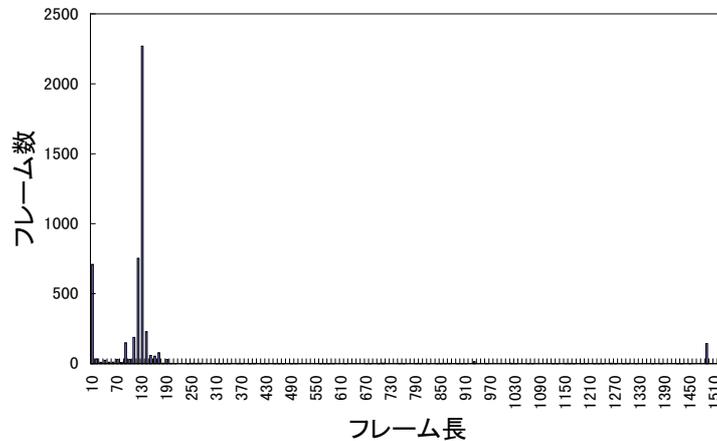


図 3.9: 典型クライアントトラフィック フレーム長分布 特性

サーバ側のモデル

モデルの候補となる各確率分布関数とパラメータおよび χ^2 検定値を表 3.3、表 3.4に示す。表より発生間隔に対するパケット数分布では対数正規分布が最もモデルの適合度が高い。図 3.10に実測データと適合度が最も高い対数正規分布を示す。

また、図 3.11に示すようにパケット長に対するパケット数分布は χ^2 の最も小さい対数正規分布でさえも、実測データと対数正規分布は明らかに異なる。この理由は、クライアント側と同様である。図 3.12にパケット長に対するパケット数の密度特性を示す。したがって、クライアント側と同様にテーブルによってモデルを作成した。

なお、シミュレーションにて使用するパケット長は、FDDI の MTU が最大長となるようにしている。この理由は、MTU 以上のパケットが発呼された場合 MTU 単位に分割され、分割したパケット毎に入力数をカウントしているので、実際の発呼数と入力数が異なってしまふ。これを防ぐため、パケット長に対するモデルは、最大長が MTU になるように予めサイズを分割し、各々のパケットを発生分布に加えている。例えば、元のパケット長が 8200 バイトとすると、MTU が 4500 バイトなので 3700 と 4500 バイトの 2 つに分割し、2 つのパケットとして密度分布に加える。このように補正した後のパケット長-パケット数 特性を図 3.13に示す。

表 3.3: サーバ典型モデルの発生間隔に対する確率分布関数とパラメータ

確率分布関数	パラメータ	χ^2 検定値
正規分布	$\hat{x}=0.007094981, \sigma_x=0.010994657$	3.188948
指数分布	$\lambda=140.9447126$	0.717174
対数正規分布	$\hat{y}=0.001543456, \sigma_y=0.000650645$	0.203582

表 3.4: サーバ典型モデルのパケット長に対する確率分布関数とパラメータ

確率分布関数	パラメータ	χ^2 検定値
正規分布	$\hat{x}=1500.176013, \sigma_x=2986.617534$	70.941148
指数分布	$\lambda=0.000666588$	140.404917
対数正規分布	$\hat{y}=7.15584664, \sigma_y=3.133602103$	10.480722

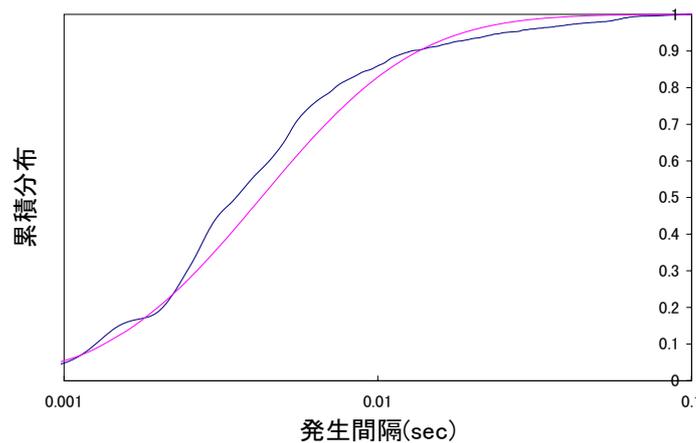


図 3.10: 発生間隔に対するパケット数 (実線: 実測データ、破線: 対数正規分布)

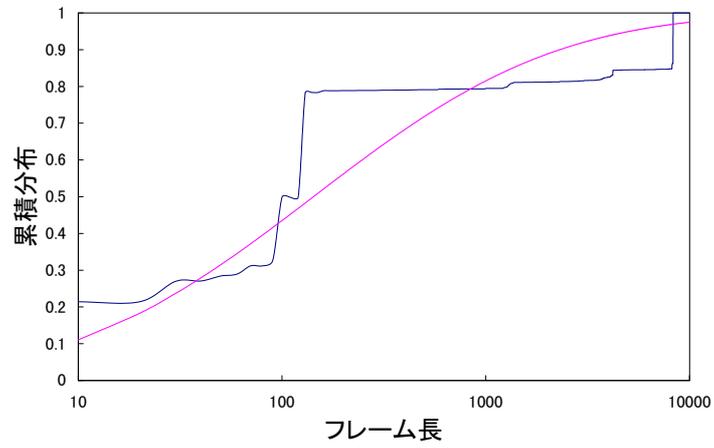


図 3.11: パケット長に対するパケット数 (実線 : 実測データ、破線 : 対数正規分布)

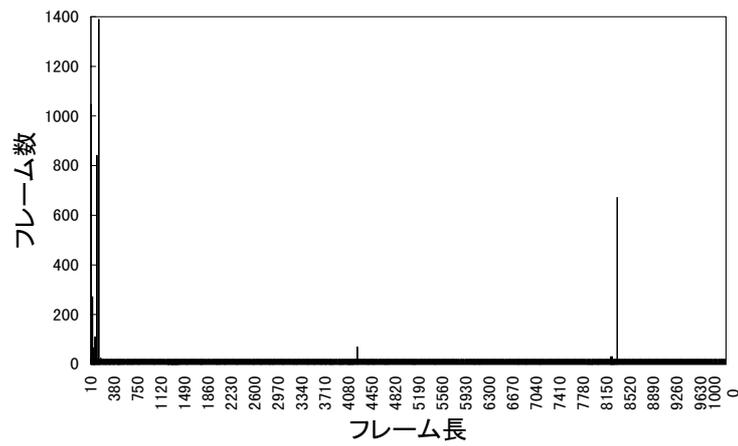


図 3.12: 典型サーバトラフィック パケット長分布特性

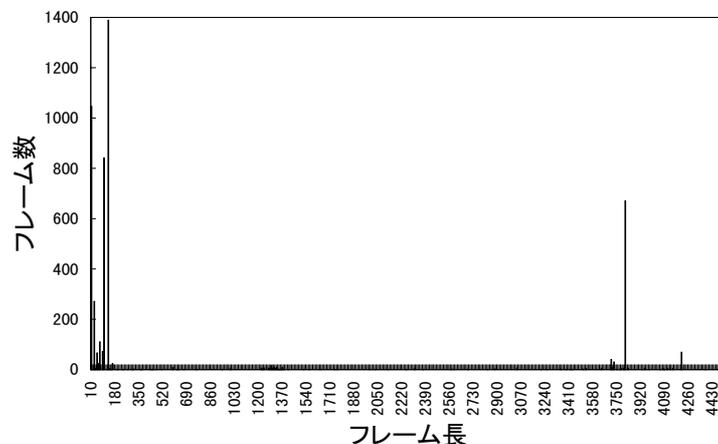


図 3.13: 典型サーバトラヒック パケット長分布特性 (補正後)

3.6.2 バーストラヒックモデル

クライアント側のモデル

モデルの候補となる各確率分布関数とパラメータおよび χ^2 検定値を表 3.5、表 3.6 に示す。表より発生間隔に対するパケット数分布では対数正規分布が最もモデルの適合度が高い。図 3.14 に実測データと適合度が最も高い対数正規分布を示す。

また、図 3.15 に示すようにパケット長に対するパケット数分布は χ^2 の最も小さい正規分布でさえも、実測データと正規分布は明らかに異なる。この理由は典型モデルのクライアント側と同様である。図 3.16 にパケット長に対するパケット数の密度特性を示す。したがって、本モデルもテーブルによって作成した。

サーバ側のモデル

モデル化の候補となる各確率分布関数とパラメータおよび χ^2 検定値を表 3.7、表 3.8 に示す。表より発生間隔に対するパケット数分布では対数正規分布が最もモデルの適合度が高い。図 3.17 に実測データと適合度が最も高い対数正規分布を示す。

また、図 3.18 に示すようにパケット長に対するパケット数分布は χ^2 の最も小さい正規

表 3.5: クライアントバーストモデルの発生間隔に対する確率分布関数とパラメータ

確率分布関数	パラメータ	χ^2 検定値
正規分布	$\hat{x}=0.002652807, \sigma_x=0.005872258$	1.635434
指数分布	$\lambda=376.9592024$	0.307231
対数正規分布	$\hat{y}=0.000857072, \sigma_y=0.000606561$	0.119375

表 3.6: クライアントバーストモデルの packets 長に対する確率分布関数とパラメータ

確率分布関数	パラメータ	χ^2 検定値
正規分布	$\hat{x}=805.5181796, \sigma_x=697.6703113$	17.15096
指数分布	$\lambda=0.001241437$	44.95545
対数正規分布	$\hat{y}=7.470610698, \sigma_y=3.460510595$	21.41851

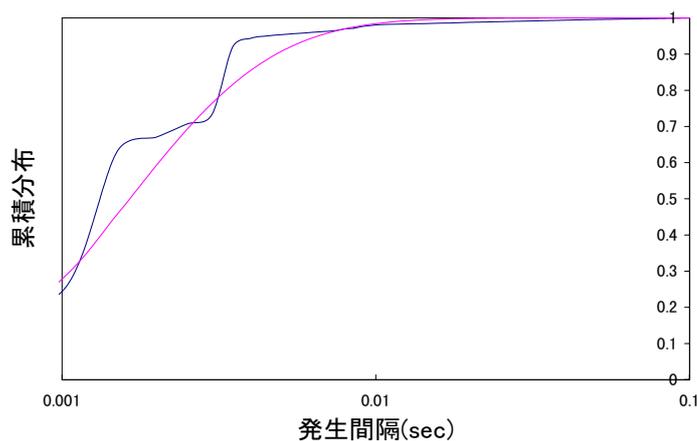


図 3.14: 発生間隔に対する packets 数 (実線: 実測データ、破線: 対数正規分布)

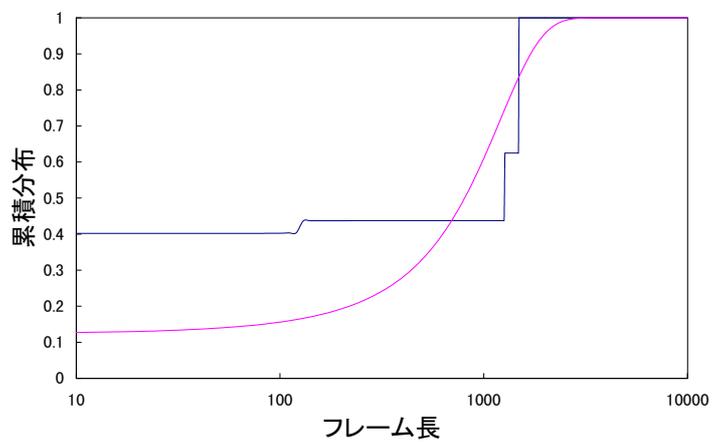


図 3.15: パケット長に対するパケット数 (実線 : 実測データ、破線 : 正規分布)

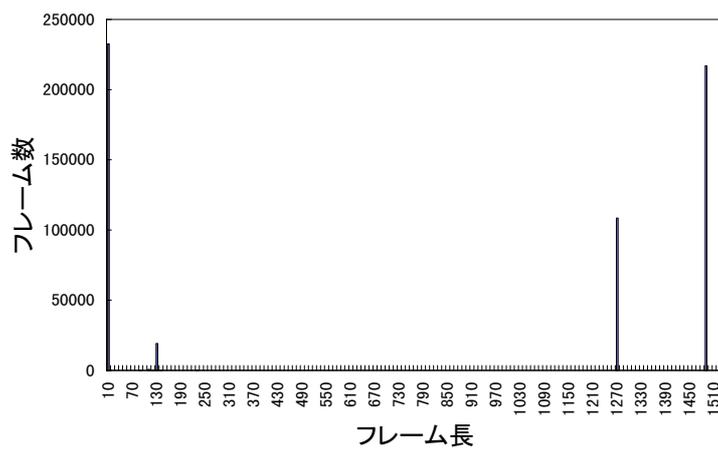


図 3.16: バーストクライアント フレーム長分布特性

表 3.7: サーババーストモデルの発生間隔に対する確率分布関数とパラメータ

確率分布関数	パラメータ	χ^2 検定値
正規分布	$\hat{x}=0.003526734, \sigma_x=0.006886869$	1.553102
指数分布	$\lambda=283.5484499$	0.291633
対数正規分布	$\hat{y}=0.001033002, \sigma_y=0.000669246$	0.10314

表 3.8: サーババーストモデルのケット長に対する確率分布関数とパラメータ

確率分布関数	パラメータ	χ^2 検定値
正規分布	$\hat{x}=1211.295492, \sigma_x=935.4513586$	15.96284
指数分布	$\lambda=0.000825562$	19.93356
対数正規分布	$\hat{y}=9.473272713, \sigma_y=1.840113191$	25.29008

分布でさえも、実測データと正規分布は明らかに異なる。この理由は典型モデルのサーバ側と同様である。図 3.19 にケット長に対するケット数の密度特性を示す。したがって、本モデルもテーブルによってモデルを作成した。

なお、バーストラヒックモデルのケット長に対するケット数分布も、クライアントトラヒックモデルと同様に FDDI の MTU 以上のサイズが発呼されないように補正を行なった。補正した後のケット長-ケット数 特性を図 3.20 に示す。

3.7 モデルの妥当性について

第 3.6 節にて作成したトラヒックモデルが妥当であるか確認する。確認方法は、ネットワークに伝搬するトラヒックをクライアント数で平均したモデルを作成する。確認モデルを以下のように作成する。

1. 測定期間中の全トラヒックに対して、一日当りの平均ケット数および標準偏差を求める。一日の平均ケット数は 6,223,000、標準偏差は 1,047,000 である。

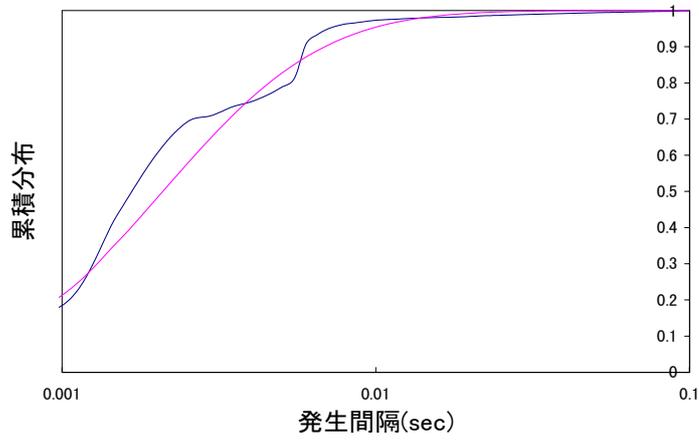


図 3.17: 発生間隔に対するパケット数 (実線 : 実測データ、破線 : 対数正規分布)

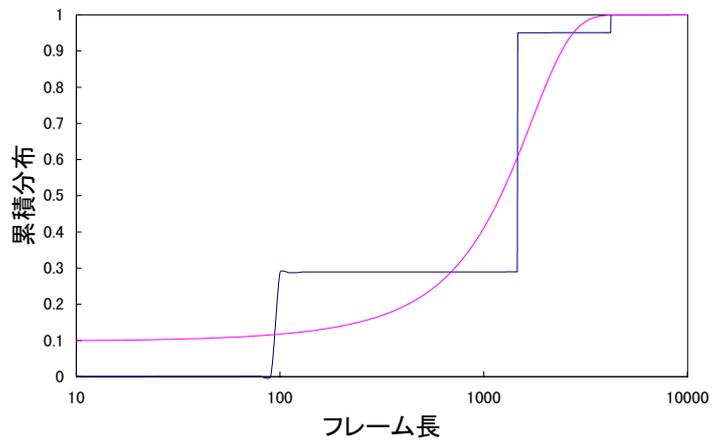


図 3.18: パケット長に対するパケット数 (実線 : 実測データ、破線 : 正規分布)

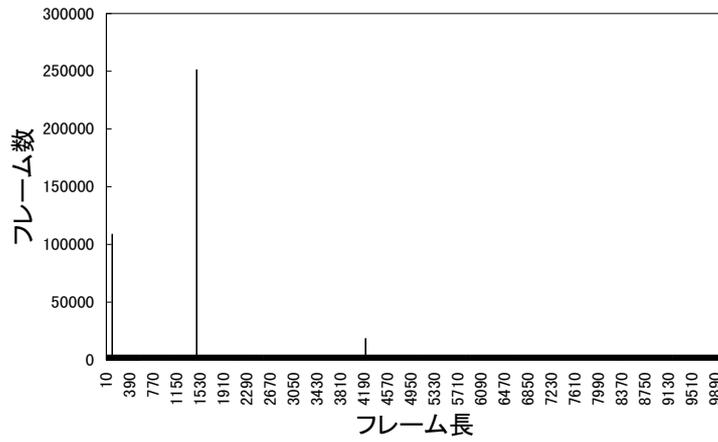


図 3.19: バーストサーバ フレーム長-フレーム数 特性

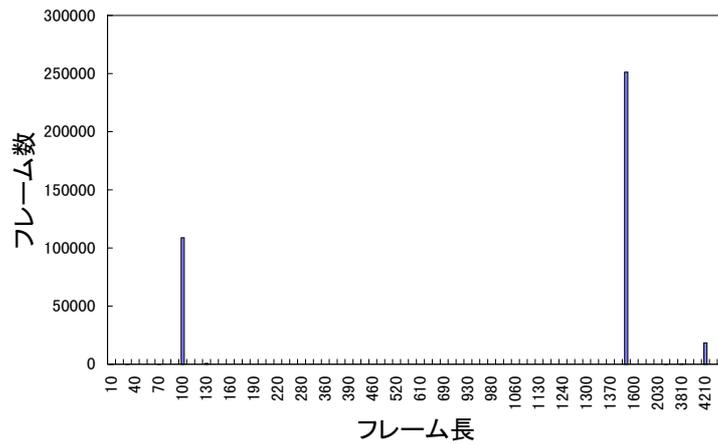


図 3.20: バーストサーバ フレーム長-フレーム数 特性 (補正後)

2. 統計的代表的値となるパケット数が伝搬する一日(9月26日)に対して、1時間毎の分布を作成する。図3.3に示す。この分布にでの1時間当りの平均パケット数は257,000、標準偏差は219,000である。
3. さらに統計的代表的値となるパケット数の1時間(12時)に伝搬している全トラヒックをモデル化の対象とする全クライアントの送信および受信別に分割する。この結果をクライアント数で平均する。
4. クライアント側の送信をクライアント出力、クライアント側の受信をサーバ出力として発生間隔時間に対するパケット数およびパケット長に対するパケット数の分布を作成する。

図3.21~3.24に平均したモデルを示す。図では実測データおよび対数正規分布にて近似した結果を表示している。

クライアントの発生時間に対するパケット数分布の図3.7と図3.21を比較すると、発生間隔が0.003秒のパケットが10数%増えている。これは、複数のクライアントをまとめた疑似トラヒックのためである。

クライアントのパケット長に対するパケット数分布の図3.8と図3.22を比較すると、データ長はNFSに対するNULL、コマンド、データであるが、一般化したモデルの方が平均モデルよりもデータ部分で15%程度大きくなっている。これは、一般的には今回の平均トラヒックよりもデータ量が大きくなるものと思われる。

サーバの発生時間に対するパケット数分布の図3.10と図3.23を比較すると、発生間隔が0.01~0.05msで5%位の相違があるもののほぼ同様の特性を示している。

サーバのパケット長に対するパケット数分布の図3.11と図3.24を比較すると、データ長はNFSに対するNULL、コマンド、データであり、平均モデルの方が一般化したモデルよりもNULLデータ部分で8%程度大きくなっているものの、大きな特性の相違はない。

以上より、今回作成した平均トラヒックモデルは特殊な場合ではなく、モデルとして適合することが確認できた。

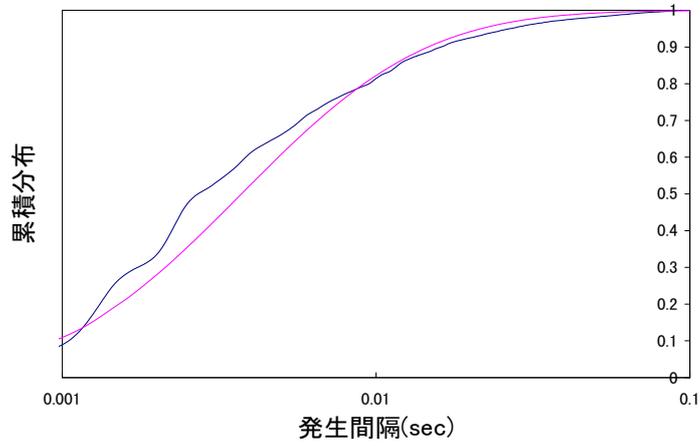


図 3.21: クライアント発生間隔に対するパケット数
 (実線: 実測データ、破線: 対数正規分布)

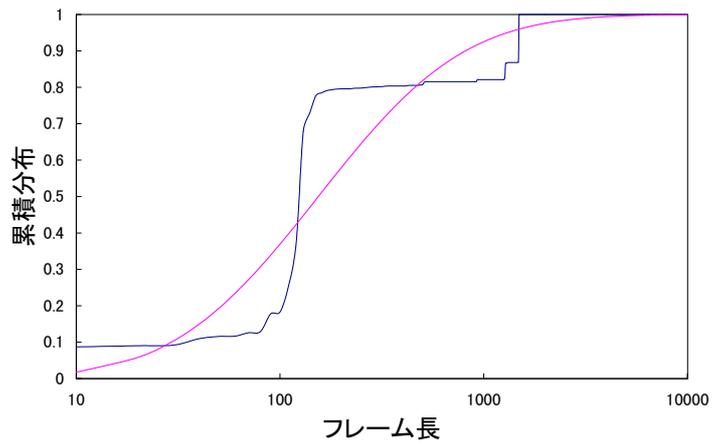


図 3.22: クライアントパケット長に対するパケット数
 (実線: 実測データ、破線: 対数正規分布)

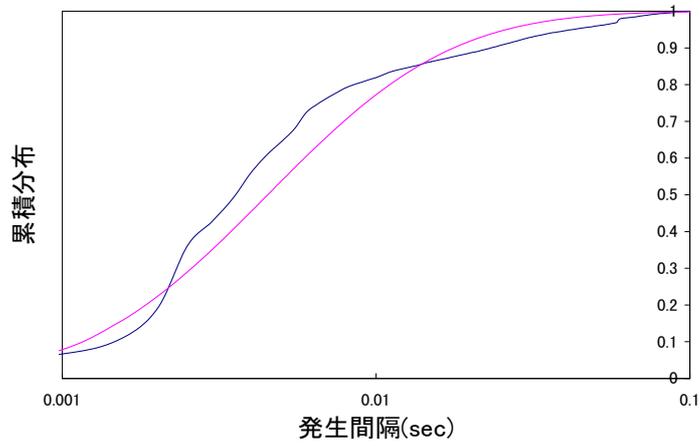


図 3.23: サーバ発生間隔に対するパケット数 (実線 : 実測データ、破線 : 対数正規分布)

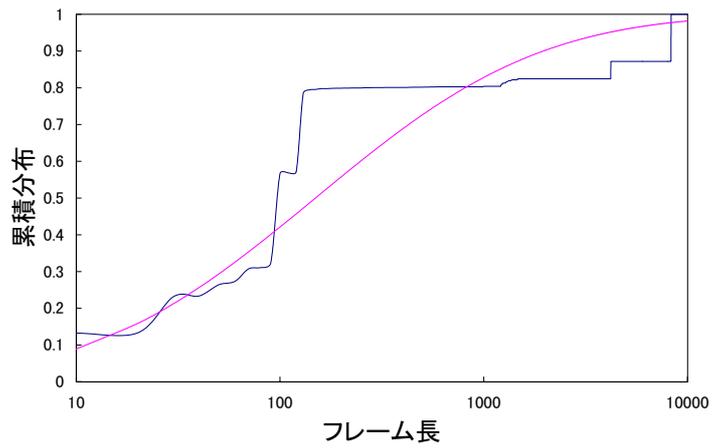


図 3.24: サーバパケット長に対するパケット数 (実線 : 実測データ、破線 : 対数正規分布)

3.8 まとめ

トラヒックモデルについてまとめる。

- 発生間隔時間に対するパケット数の分布は対数正規分布でモデル化ができた。これはコンピュータネットワークでのパケットは、発生間隔の短い呼が集中して発生していることを意味している。
- バーストトラヒックは発生間隔が典型トラヒックに対して短い呼が多い。
- クライアント平均モデルと、典型トラヒックモデルを比較すると、特性がほぼ一致している。したがって、今回作成した典型トラヒックモデルは、特別な場合のモデルではなく一般的なモデルに近いと言える。
- パケット長に対するモデルは、特定のサイズを持った呼が多いため、確率分布関数でモデル化することは不可能だった。このため、本モデルは確率分布関数によるモデル化はせず、テーブルを作成し発呼モデルとした。

第 4 章

ネットワークモデル

本章では、第 2 章にて述べたネットワークのモデル化を行なう。

図 2.2 に示すようにシミュレータモジュールは (1) Ethernet モジュール、(2) FDDI モジュール、(3) ブリッジモジュールとする。クライアントのユーザ AP からの要求を想定した、発呼モデルによって発呼された呼がバッファに挿入されると、Ethernet を介してブリッジに転送される。さらにブリッジから FDDI を介してサーバへ転送される。また、サーバ AP の要求を想定した、発呼モデルによって発呼された呼がバッファに挿入されると、FDDI を介してブリッジに転送される。さらにブリッジから Ethernet を介してクライアントへ転送される。双方のトラヒックを重畳してシミュレーションを行なう。この際、クライアントはサーバとのみ通信するものとする。したがって、Ethernet 上に複数のクライアントが存在する場合、お互いのクライアントは通信しないものと仮定する。

4.1 Ethernet モジュール

本モジュールは、CSMA/CD によって状態遷移を行ない、伝送路にパケットを出力する。CSMA/CD 方式は伝送路上のキャリアの有無が動作に直接影響する。本モジュールでは衝突ウインドを $51.2 \mu\text{s}$ (64 バイト長に相当) とする。この値の導出は以降に示すが、この衝突ウインドでキャリアの有無を判定する [6, 7]。

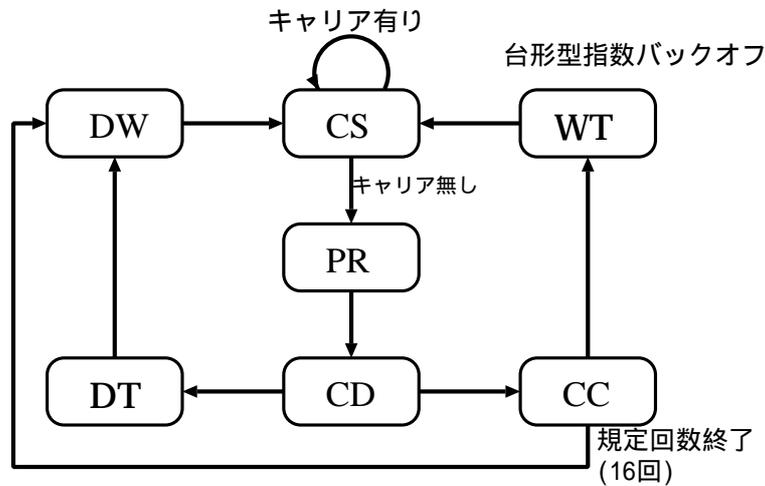


図 4.1: Ethernet モジュール状態遷移図

状態遷移

各クライアントの Ethernet モジュールは図 4.1に従って状態遷移を行なう。クライアントの状態は Ethernet の状態ではなく、クライアントモデル毎の状態を規定している。

- DW(Data Wait):データ待ちの状態。バッファにデータが入力されると CS に遷移する。
- CS(Carrier Sense):キャリアセンスを行なう。キャリアがなければ PR に遷移する。
- PR(Preamble):フレームの送信を開始する状態。衝突の可能性があるため、CD 状態にて衝突検出を行なう。図 4.2に示すように、Ethernet で衝突の可能性のあるのは送信を開始してから式 4.1で求められる時間 T 以内である。

$$T = \frac{2l}{c} \tag{4.1}$$

l は最長ノード間距離で、 c は信号速度である。クライアント $S1$ からクライアント $S2$ への伝搬時間に t 時間かかると仮定する。 $S1$ が送信開始後 $t - e$ 時間に $S2$ が送信開始すると、 $S1$ が衝突を検出する時間は $2t - e$ である。 $e \approx 0$ とすると $S1$ が衝突を検出する最高時間は $2t$ である。Ethernet の最大長を $2500m$ 、レピータを 4 台

介した場合は想定し¹、

$$T = \frac{2500 \times 2}{3 \times 10^8} + 2.1 \times 4 \times 2 = 33.5\mu s < 51.2\mu s \quad (4.2)$$

を衝突検出時間とし、CD へ遷移する。

- CD(Collision Detection):状態遷移があつてから T 時間経過した時点で衝突があると CC に状態遷移する。衝突がなければ TR に遷移する。
- DT(Data Transmission):データの送信状態。送信終了後、DW へ遷移する。
- CC(Collision Count):衝突を検出した状態。32bit のジャム信号を送信する。衝突回数が 16 回以下の時 ($cdcount < 16$) は WT へ遷移する。また、衝突回数が 16 回の時は送信失敗として DW へ遷移する。
- WT(Wait):再送信ための待ち時間状態。指定時間経過後 CS へ遷移する。再送信開始時間は台形型指数バックオフに従う。再送信間隔はスロットタイム ($51.2\mu s$) を基準に、

$$\text{再送信間隔 } T = 51.2\mu s \times n \quad (4.3)$$

整数 n は式 4.4の範囲からランダムに選択する。

$$0 \leq n < 2^k [k = \min(m, 10); m \text{ は衝突回数}] \quad (4.4)$$

衝突回数は 10 回以上の場合、再送信間隔の上限は一定になるので、最大再送待ち時間は $52.4ms (= 51.2\mu s \times 1023)$ となる。

4.2 FDDI モジュール

本モジュールは、トークンの取得によって状態遷移を行ない、伝送路にフレームを出力する。トークンリング方式は伝送路上トークンを取得すると送信権を得る。トークンは取得するとトークン保持タイマが完了するまで持ち続けることができる。しかし、送信データがない場合はトークンを解放する。トークン保持タイマ値は従来の研究によって得られている $8ms$ とする [7]。

¹レピータの AUI ポート- AUI ポート間遅延は $800ns$ 、入力ポート遅延は $800ns$ 、出力ポート遅延は $500ns$ とする。したがって、レピータ 1 台の遅延は $2.1\mu s$ となる。

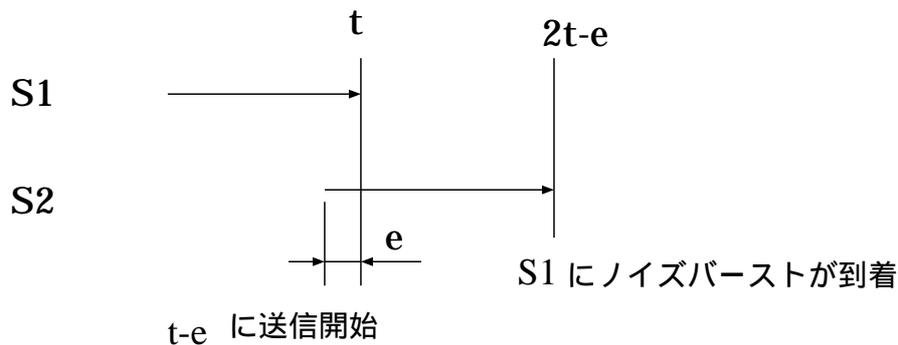


図 4.2: 衝突の検出

状態遷移

FDDI モジュールは図 4.3に従って状態遷移を行なう。

- DW(Data Wait):データ待ちの状態。バッファにデータが入力されると既にトークンを取得しているか判定する。トークンを取得しているが、データ送信中にトークン保持タイムアウトに達する場合はトークンを解放して TW へ遷移する。送信完了までトークン保持タイムアウトに達しない場合は DT に遷移する。また、トークンを取得していない時は TW に遷移する。
- TW(Token Wait):トークン待ちを行なう。トークンを取得するとトークン保持タイムを再設定して DT へ遷移する。
- DT(Data Transmission):データの送信状態。送信終了後、DW へ遷移する。

4.3 ブリッジモジュール

本モジュールは、Ethernet モジュールと FDDI モジュールの双方を利用してクライアントからサーバへの伝送およびサーバからクライアントへの伝送を行なうシミュレータである。その他の機能を以下に示す。

- IP フラグメンテーション機能：
FDDI から Ethernet への伝送で、FDDI 上のフレーム長が Ethernet の MTU より

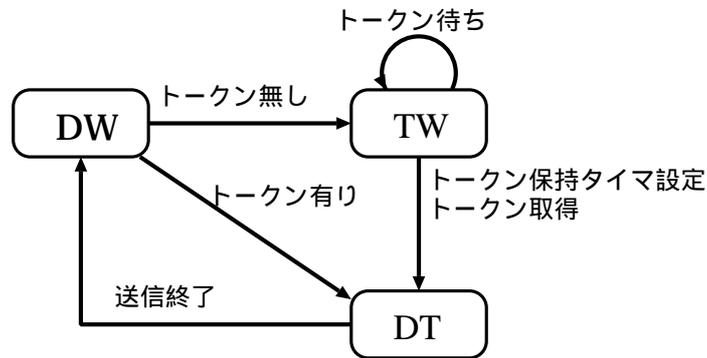


図 4.3: FDDI モジュール状態遷移図

も大きい場合、FDDI 上のフレームを最大長が Ethernet の MTU になるように分割する機能。

● 転送機能：

ブリッジに接続する Ethernet が複数本の場合、どの回線に転送するか決定する機能。サーバでの発呼時に宛先が付けられて送信されてくるので、この宛先を見ることによって転送先を決定する。

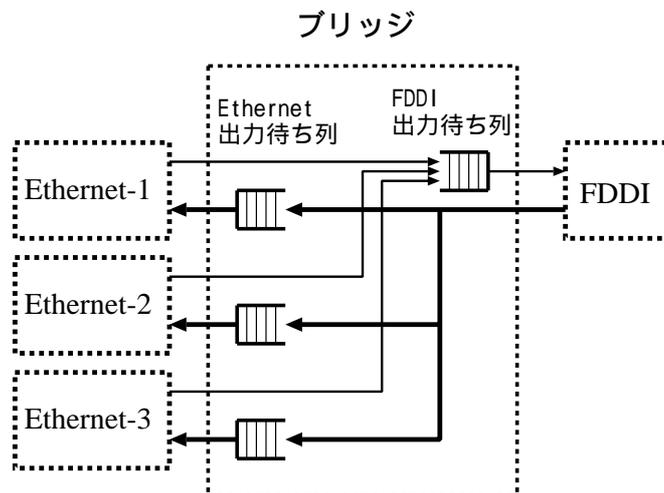


図 4.4: ブリッジの待ち列構成

ブリッジの待ち列構成を図 4.4に示す。図では例として Ethernet が 3 本の場合を示している。各々の Ethernet からブリッジに入力されたフレームはブリッジの FDDI 出力待

ち列に挿入される。また、FDDI からブリッジに入力されたフレームは必要に応じて IP フラグメンテーションを行なった後、転送先の Ethernet 出力待ち列に挿入される。

第 5 章

シミュレーションによる実験

シミュレーションは、各ネットワークにおける次イベントの発生時刻までの時間を経過時間とするイベント駆動方式で行なう。イベントの発生については 5.1 項にて詳細を述べる [8]。

シミュレーションにて、FLR と FWT を求める。FLR は入力フレーム数と出力フレーム数の差分を入力フレーム数で割ったものである。FWT は出力されたフレームに対して伝送に費やした総時間を出力フレーム数で割った平均値である。

5.1 次イベント発生時刻の設定

本項では、Ethernet モジュール、FDDI モジュール、ブリッジモジュールでのステーションの状態における次イベント発生時刻の計算について述べる。

5.1.1 Ethernet モジュール

- DW:バッファ内にデータが存在するか判定を行ない、再判定を行なう時間およびキャリアセンスへ遷移する時間共に $100ns$ を経過させる。
- CS:他のクライアントがプリアンブル送信状態またはデータ送信状態またはジャム信号送信状態である場合は、再度キャリアセンスを行なう間隔として $100ns$ を経過させる。また、キャリアを検出しなかった場合は $51.2\mu s$ を経過させて PR へ遷移する。

- PR: プリアンプルの送信開始。100ns を経過させて CD へ遷移する。
- CD: 衝突を検出した場合は、32bit のジャム信号送信時間 (3.2μs) を経過させ CC へ遷移する。衝突を検出しなかった場合は、乱数にて発呼したフレーム長に応じた送信時間にフレーム GAP 時間 (9.6μs) を加え、衝突待ち時間 (51.2μs) を引いた時間を経過させ DT へ遷移する。
- DT: 送信終了後、100ns を経過させ DW へ遷移する。
- CD: 衝突回数が 16 回以下の時は、衝突回数に応じた最長時間から乱数によって決定された再試行までの待ち時間を経過させ WT へ遷移する。衝突回数が 16 回の時は 100ns を経過させ DW へ遷移する。
- WT: 100ns を経過させ DW へ遷移する。

5.1.2 FDDI モジュール

- DW: バッファ内にデータが存在するか判定を行なう。再判定を行なう時間およびキャリアセンスへ遷移する時間は 1 シミュレーションクロックとする¹。
- TW: トークン待ちのループ時間は 1 シミュレーションクロックとする。トークンを取得した場合は、乱数にて発呼したフレーム長に応じた送信時間を経過させ、DT へ遷移する。
- DT: 1 シミュレーションクロックを経過させ DW へ遷移する。

5.1.3 ブリッジモジュール

ブリッジモジュールでのイベント発生時間は以下による。

- Ethernet → FDDI (以下、ブリッジ上りとする):
FDDI モジュールを共通に使用する。
- FDDI → Ethernet (以下、ブリッジ下りとする):
Ethernet モジュールを共通に使用する。

¹シミュレーションの実装上、最小単位の 10ns とする。

表 5.1: トラヒックの条件

モデル名	平均フレーム長	平均発生間隔	Ethernet での回線使用率 (1台当り)
クライアント典型モデル	164Byte	7.2ms	2.1%
サーバ典型モデル	1298Byte	6.3ms	16.7%
クライアントバーストモデル	806Byte	2.3ms	28.8%
サーババーストモデル	1211Byte	3.2ms	31.7%

5.2 トラヒックモデル

シミュレーションに用いるトラヒックモデルの条件を表 5.1に示す。このモデルを入力データとして使用する。

5.3 シミュレーション

5.3.1 シミュレーション 1

シミュレーション方法

従来用いられていた発生間隔時間を指数分布を用いる方法と今回用いた対数正規分布の比較を行なう。

以下の条件下でシミュレーションを行ない、平均待ち時間特性（以下、FWT と略記）を比較する。

- トラヒックモデルは典型モデルを用いる。
- サーバ側の発呼を止めクライアントのみで実験を行ない、Ethernet におけるクライアントの待ち時間を求める。
- クライアントのバッファ数は 10 個とする。
- クライアント数を 1 ~ 11 台まで変化させる。

- シミュレーション時間は 15 秒とする。但し、最初の 5 秒は過渡状態とし、引き続き 10 秒間を計測期間とする。

シミュレーション結果

図 5.1 にクライアント数に対するクライアントでの FWT 特性を示す。従来の研究で用いられていた指数分布の方が今回の研究で用いた対数正規分布よりも待ち時間が長くなる結果が得られた。

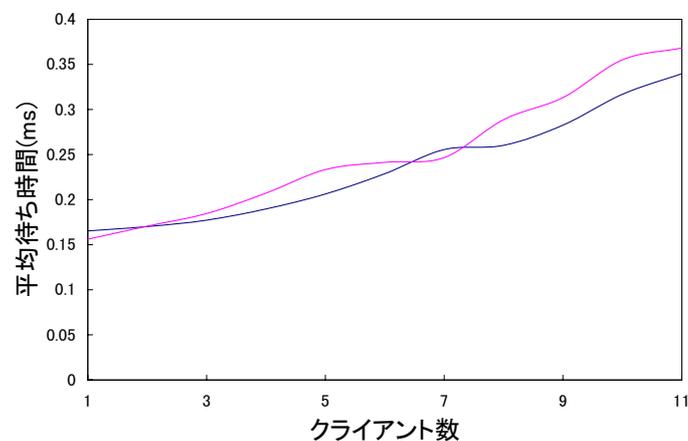


図 5.1: 対数正規分布 (実線) と指数分布 (破線) の比較

考察

従来の研究にて用いられていた発生間隔時間を指数分布と仮定する手法は、今回用いた対数正規分布よりも平均待ち時間が長くなった。この理由は、対数正規分布の方が発生間隔時間の平均値に集中しているためである。

この結果から、今回用いた対数正規分布は実際に伝搬するトラフィックパターンにより近い分布であり、従来の研究よりも正確な解析ができることがわかった。

5.3.2 シミュレーション 2

シミュレーション方法

ブリッジ下りに対する特性について実験を行なう。以下の条件下でシミュレーションを行ない、ブリッジ下りの呼損率（以下、FLR と略記）および FWT 特性を確認する。

- トラヒックモデルは典型モデルを用いる。
- クライアント、サーバ、ブリッジ上りの各バッファ数は呼損が発生しないように発呼数に対して十分大きい数とする。
- ブリッジ下りのバッファ数をパラメータとして変化させる。バッファ数は 5,10,20,40,100 個とする。
- さらにクライアント数を 1～7 台まで変化させる。
- シミュレーション時間は 15 秒とする。但し、最初の 5 秒は過渡状態とし、引き続き 10 秒間を計測期間とする。

シミュレーション結果

図 5.2、5.3 にクライアント数に対するブリッジ下りでの FLR および FWT 特性をそれぞれ示す。FLR はバッファ数が小さいほど大きく、逆に FWT は短くなっている。

考察

ブリッジ下りでの FLR および FWT 特性はクライアント数が 5 台以上で急増している。この理由は、クライアント数が 1 台の時、Ethernet の回線使用率が 18% であるため、クライアント数が 5 台時の回線使用率は 90% 以上になるからである。また、待ち時間はバッファ数に依存して一定値に収束している。

この結果から、典型モデルのトラヒックを伝搬するクライアントが 5 台以上になると急激に QoS が悪化することがわかった。実動作ではブリッジやルータにおいて呼損が発生するとサーバ側の発呼を停止させるので、待ち時間はさらに長くなる。

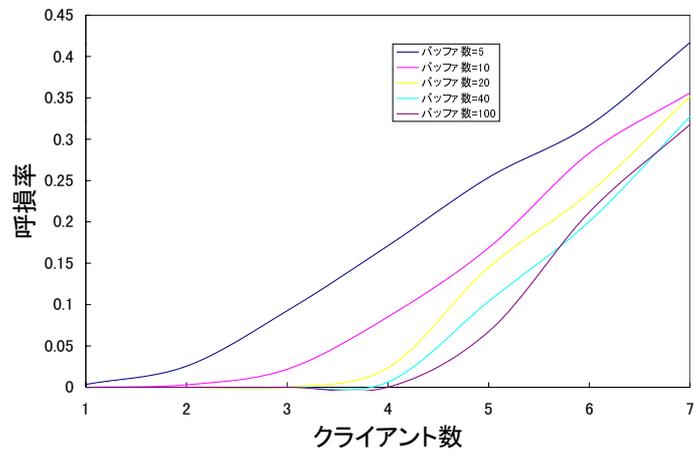


図 5.2: 典型トラヒック呼損率特性

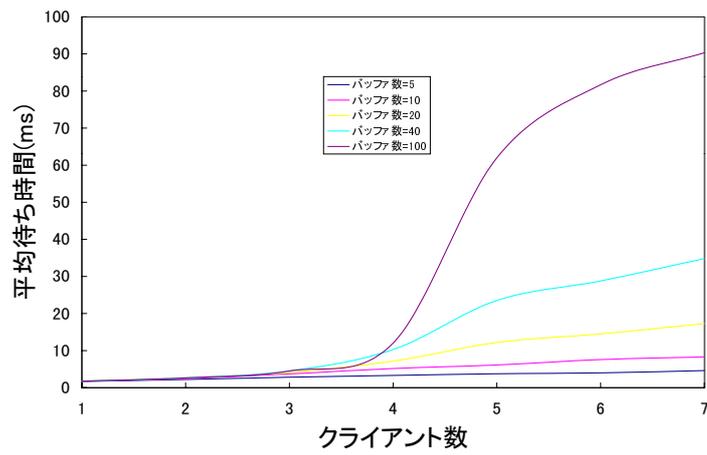


図 5.3: 典型トラヒック待ち時間特性

5.3.3 シミュレーション 3

シミュレーション方法

ブリッジ下りに対する特性をバーストラヒックで実験する。以下の条件下でシミュレーションを行ない、ブリッジ下りの FLR および FWT を確認する。

- トラヒックモデルはバーストモデルを用いる。
- クライアント、サーバ、ブリッジ上りの各バッファ数は呼損が発生しないように発呼数に対して十分大きい数とする。
- ブリッジ下りのバッファ数をパラメータとして変化させる。バッファ数は 50,100,200 個とする。
- さらにクライアント数を 1 ~ 5 台まで変化させる。
- シミュレーション時間は 15 秒とする。但し、最初の 5 秒は過渡状態とし、引き続き 10 秒間を計測期間とする。

シミュレーション結果

図 5.4、5.5 にクライアント数に対するブリッジ下りでの FLR および FWT 特性をそれぞれ示す。FLR はクライアント数が 2 台以上でバッファ数に関係なく増大しており、クライアント数が 4 台の時、80%に達している。また、FWT はクライアント数が 2 台以上で 100 ミリ秒以上になっており、クライアント数が 4 台でバッファ数が 200 個の時 1 秒以上になっている。

考察

バーストラヒックはクライアント数が 1 台の場合、呼損はなく平均待ち時間は $4.7ms$ である。しかし、クライアント数が 2 台以上の場合、FLR および FWT 共に急激に増大している。クライアント 1 台がバーストラヒックを送受信した場合、Ethernet 上の回線使用率は 62% に達している。これは、1 台のクライアントしか回線を使用できないことを示している。

1 台のクライアントがバーストラヒックを送受信している時に他のクライアントが送受信しようすると QoS が急激に悪化することがわかった。

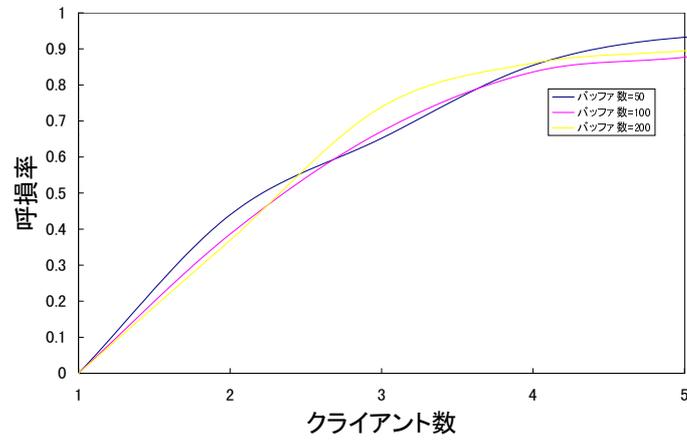


図 5.4: バーストラヒック呼損率特性

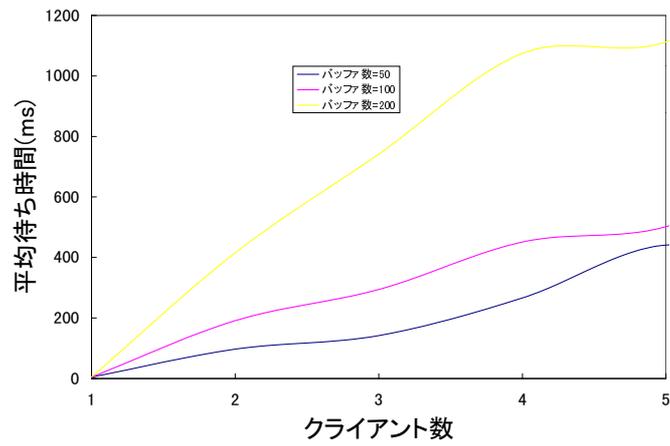


図 5.5: バーストラヒック待ち時間特性

5.3.4 シミュレーション 4

シミュレーション方法

FDDI に対する特性について実験を行なう。以下の条件下でシミュレーションを行ない、ブリッジ上りでの FLR および FWT 特性を確認する。

- トラヒックモデルは典型モデルを用いる。
- クライアント、サーバ、ブリッジ下りの各バッファ数は呼損が発生しないように発呼数に対して十分大きい数とする。
- FDDI に接続するブリッジは 1 台とする。
- ブリッジに接続する Ethernet の本数をパラメータとする。Ethernet の本数を 1,5,10,20,30,40,50 本と変化させる。
- さらに、ブリッジ上りのバッファ数を 1,2,3,5,10,20,30,40,50,100 個と変化させる。
- Ethernet に接続するクライアント数は 1 台のみとする。
- シミュレーション時間は 15 秒とする。但し、最初の 5 秒は過渡状態とし、引き続き 10 秒間を計測期間とする。

シミュレーション結果

図 5.6、5.7 にクライアント数に対するブリッジ上りでの FLR および FWT 特性をそれぞれ示す。FLR はバッファ数が小さいほど大きく、逆に FWT は呼損が発生するクライアント数ではバッファ数が小さいほど短くなっている。

考察

ブリッジ上りでの FLR および FWT 特性はクライアント数が 40 台以上で急増している。この理由は、ブリッジに接続する Ethernet 数が 1 本、すなわちクライアント数が 1 台の時、FDDI の回線使用率が 1.8% であるため、クライアント数が 50 台での回線使用率は 90% 以上になるからである。

この結果から、典型モデルのトラヒックを伝搬するクライアントが 40 台以上になると急激に QoS が悪化することがわかった。

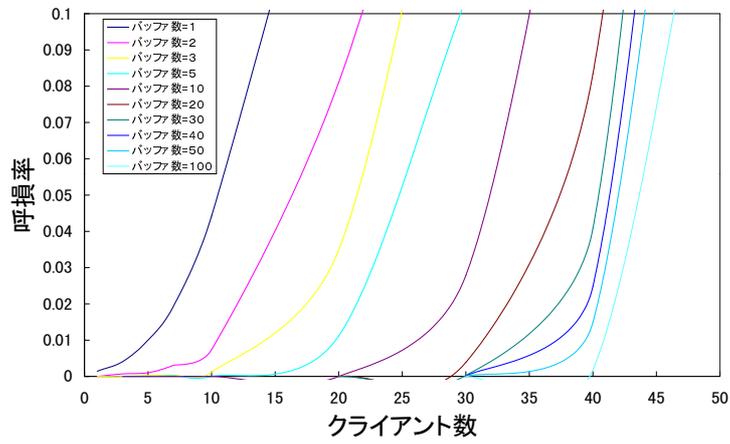


図 5.6: ブリッジ 1 台での FDDI 呼損率特性

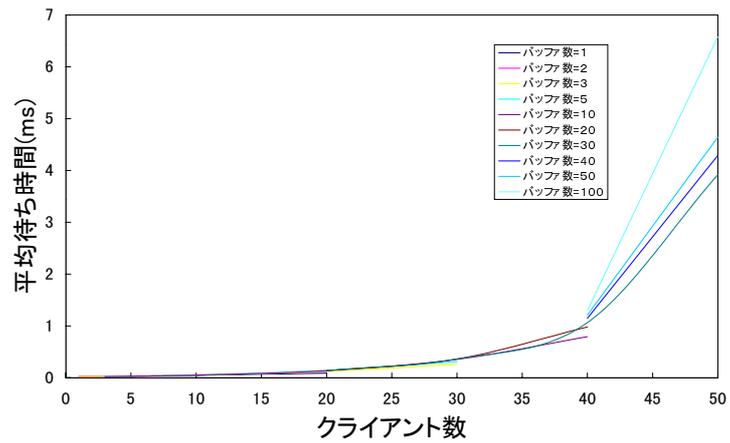


図 5.7: ブリッジ 1 台での FDDI 待ち時間特性

5.3.5 シミュレーション 5

シミュレーション方法

FDDI にブリッジを複数台接続した場合の特性について実験を行なう。以下の条件下でシミュレーションを行ない、ブリッジ上りでの FLR および FWT 特性を確認する。

- トラフィックモデルは典型モデルを用いる。
- クライアント、サーバ、ブリッジ下りの各バッファ数は呼損が発生しないように発呼数に対して十分大きい数とする。
- FDDI に接続するブリッジは 10 台とする。
- 各ブリッジに接続する Ethernet の本数をパラメータとする。Ethernet の本数を 1 ~ 5 本まで変化させる。また、すべてのブリッジに接続する Ethernet の本数は、同数本とする。
- さらに、ブリッジ上りのバッファ数を 2,3,4,5,7,10,15,20 個と変化させる。
- Ethernet に接続するクライアント数は 1 台のみとする。
- シミュレーション時間は 15 秒とする。但し、最初の 5 秒は過渡状態とし、引き続き 10 秒間を計測期間とする。

シミュレーション結果

図 5.8、5.9 にクライアント数に対するブリッジ上りでの FLR および FWT 特性をそれぞれ示す。FLR はバッファ数が小さいほど大きく、逆に FWT は呼損が発生するクライアント数ではバッファ数が小さいほど短くなっている。

考察

ブリッジ上りでの FLR および FWT 特性はクライアント数が 40 台以上で急増している。この理由は、シミュレーション 4 と同様である。

この結果から、平均モデルのトラフィックを伝搬するクライアントが 40 台以上になると急激に QoS が悪化することがわかった。

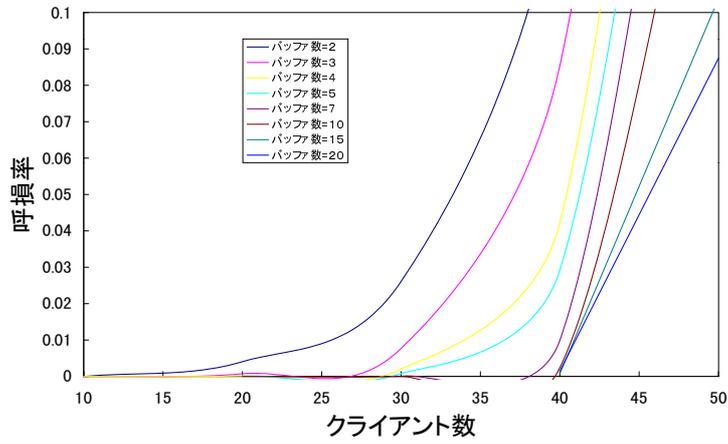


図 5.8: ブリッジ 10 台での FDDI 呼損率特性

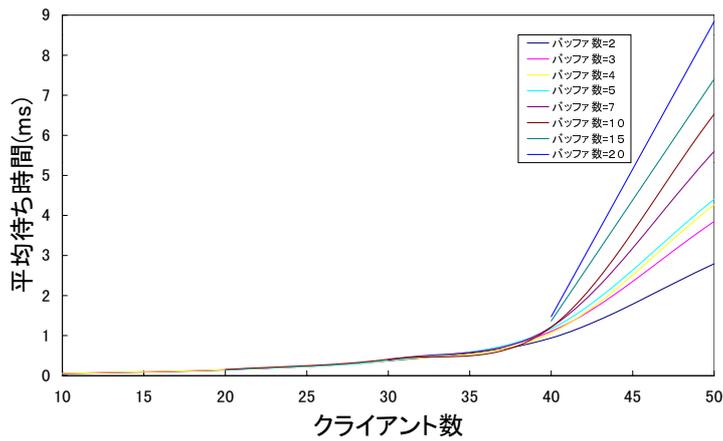


図 5.9: ブリッジ 10 台での FDDI 待ち時間特性

5.3.6 シミュレーション 6

シミュレーション方法

特定の構成でのシミュレーションを行ない、Ethernet および FDDI のブリッジでの特性について実験を行なう。以下の条件下でシミュレーションを行ない、ブリッジ上りおよび下りでの FLR および FWT 特性を確認する。

- トラフィックモデルは典型モデルを用いる。
- FDDI 上のブリッジは 1 台とする。
- 1 台のブリッジに Ethernet を 10 本接続する。
- 全ての Ethernet にはクライアントを 5 台接続する。
- クライアント、サーバのバッファ数は 500 個とする。
- ブリッジ上り、下りのバッファ数は 100 個とする。
- シミュレーション時間は 15 秒とする。但し、最初の 5 秒は過渡状態とし、引き続き 10 秒間を計測期間とする。

シミュレーション結果

本シミュレーションの結果とシミュレーション 4 のクライアント数が 50 台でバッファ数が 100 個の FLR と FWT を表 5.2 に示す。

表 5.2: シミュレーション 6 結果

項目	FLR	FWT[ms]
シミュレーション 6 (ブリッジ上り)	0.20043	6.369
シミュレーション 4 (ブリッジ上り)	0.16688	6.575
シミュレーション 6 (ブリッジ下り)	0.06658	408.7
シミュレーション 4 (ブリッジ下り)	0.00000	1.870

考察

ブリッジ上りでは、FWT はほぼ同じ値だが、FLR は本シミュレーションの方が 20% 大きくなっている。シミュレーション 3 では 1 本の Ethernet に 1 台のクライアントしか接続していないため、発呼時のトラヒック特性が変化せずにブリッジのバッファに入力する。しかし、本シミュレーションで用いる構成は Ethernet に 5 台のクライアントが接続しているため、Ethernet の回線使用率は 90% 以上になっており、クライアントにおいて呼損が発生している。また、すべてのクライアントは送信待ち状態になっており、回線が空くとすぐに送信が開始される。このため、ブリッジでは到着間隔時間の短い呼が多くなり多数の呼損が発生するものと思われる。

また、ブリッジ下りでは、FLR および FWT 共に本シミュレーションの方が大きな値になっている。したがって、本シミュレーションの構成は QoS の悪い条件であることがわかる。

5.3.7 シミュレーション 7

シミュレーション方法

特定の構成でのシミュレーションを行ない、Ethernet および FDDI のブリッジでの特性について実験を行なう。以下の条件下でシミュレーションを行ない、ブリッジ上りおよび下りでの FLR および FWT 特性を確認する。

- トラヒックモデルは典型モデルを用いる。
- FDDI 上のブリッジは 10 台とする。
- 1 台のブリッジに Ethernet を 1 本接続する。
- 全ての Ethernet にはクライアントを 4 台接続する。
- クライアント、サーバのバッファ数は 500 個とする。
- ブリッジ上り、下りのバッファ数はそれぞれ 10,100 個とする。
- シミュレーション時間は 15 秒とする。但し、最初の 5 秒は過渡状態とし、引き続く 10 秒間を計測期間とする。

シミュレーション結果

本シミュレーションの結果とシミュレーション5のクライアント数が40台でブリッジ上りのバッファ数が10個のFLRとFWTを表5.3に示す。

表 5.3: シミュレーション7結果

項目	FLR	FWT[ms]
シミュレーション7(ブリッジ上り)	0.10858	1.191
シミュレーション5(ブリッジ上り)	0.00239	1.213

考察

FWTはほぼ同じ値だが、FLRは本シミュレーションの方が極端に大きくなっている。シミュレーション5では1台のブリッジに4本のEthernetを接続し、各Ethernetには1台のクライアントのみ接続しているため、発呼時のトラヒック特性が変化せずにブリッジのバッファに入力する。しかし、本シミュレーションで用いるネットワーク構成では、シミュレーション6と同じようにブリッジへ到着間隔時間の短い呼が多く到着するため、多数の呼損が発生するものと思われる。なお、FDDIには合計で40台のクライアントが接続しているため、FDDIの回線使用率は74%以上になっている。

5.3.8 シミュレーション8

シミュレーション方法

FDDI上のブリッジを1台として複数のEthernetを1台のブリッジに集線する場合と、ブリッジを10台として各ブリッジに1本のEthernetを接続する場合、FDDI上のレスポンスを比較する。

- トラヒックモデルは典型モデルを用いる。
- FDDI上のブリッジは1台および10台とする。
- ブリッジが1台の場合はブリッジに20本のEthernetを接続する。ブリッジが10台の場合は各ブリッジに2本のEthernetを接続する。

- 全ての Ethernet に接続するクライアントは 1 台とする。
- クライアント、サーバ、ブリッジ上り下りのバッファ数は呼損が発生しないように大きくする。
- シミュレーション時間は 15 秒とする。但し、最初の 5 秒は過渡状態とし、引き続き 10 秒間を計測期間とする。

シミュレーション結果

ブリッジが 1 台と時と 10 台の時の結果を表 5.4 に示す。

表 5.4: シミュレーション 8 結果

項目	FDDI 回線使用率	FWT[ms]
ブリッジ 1 台	0.36506	0.139
ブリッジ 10 台	0.37784	0.152

考察

FDDI 上に接続するブリッジが 1 台の時の方が、10 台の時よりも短くなっている。また、回線使用率は 10 台の方が高くなっている。ブリッジが多い場合、トークン待ちの遅れによって待ち時間が伸びていることがわかる。この結果より、FDDI 上に複数のブリッジを配置するよりもブリッジを 1 台にして多数の Ethernet を集線した方がレスポンスが高いことがわかった。

第 6 章

ネットワーク設計指標の提案

提案 1

図 5.2 に示す各バッファ長における FLR がゼロになる FWT を図 5.3 から求めた呼損率をゼロにした時の待ち時間特性を図 6.1 に示す。図 6.1 よりクライアント数が 5 台以上になると平均待ち時間が急増しているのがわかる。したがって、すべてのクライアントが典型トラフィックを伝搬しているネットワークでは、1 本の Ethernet に接続するクライアントを 4 台に制限して設計する必要がある。

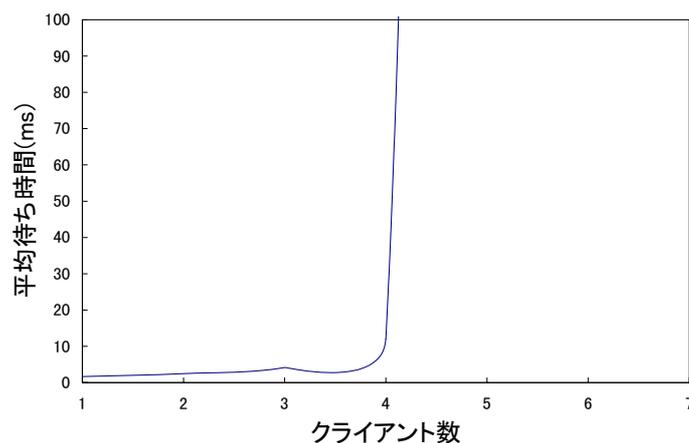


図 6.1: 典型トラフィックでの呼損率ゼロ時の平均待ち時間

提案 2

異種通信方式ネットワークを相互接続する時、例えば Ethernet と FDDI を接続する場合は、以下のように設計することによって QoS の良い設計ができる。

1. Ethernet にはトラフィック量に応じてクライアント数を制限しなければならない。
2. 1 台のブリッジに多くの Ethernet を接続する。
3. FDDI 上に接続するブリッジ数が少なくした方が、FDDI 上のレスポンスが向上する。

第 7 章

まとめ

7.1 本研究の成果

本論文では、異種ネットワークを接続してネットワークを構築する場合、ネットワークに伝搬するトラフィックによってその特性が変化することから、実測トラフィックからトラフィックモデルを作成し、使用するネットワークの通信方式や通信速度からネットワークモデルを作成する。得られた双方のモデルによってシミュレーションを行ない、FLR および FWT を測定する。この結果を利用して、ネットワーク設計指標を提案した。

本研究では、以下のことが明らかになった。

- トラフィックをポアソン到着と仮定し、その発生間隔時間は指数分布に従うとしてきた従来の研究よりも、本論文で行なった対数正規分布を用いて作成したモデルの方がトラフィックを分布関数を使用してモデル化する場合において、より正確な発生間隔時間のモデル化が可能である。
- パケット長に対するモデルは、特定のサイズを持った呼が多いため、確率分布関数でモデル化することは不可能だった。このため、本モデルは確率分布関数によるモデル化はせず、テーブルを作成し発呼モデルとした。
- 典型トラフィックを授受するクライアントを Ethernet に接続する場合、クライアント数が 5 台以上になると急激に QoS が悪化する。この理由は、クライアントトラフィックの回線使用率は 2% であるが、サーバトラフィックの回線使用率は 16% なので、合計で 18% の回線を使用するからである。このようにクライアントよりもサーバの

フレーム長が大きく、また IP フラグメンテーションも行なわれる。さらに、サーバトラフィックにはクライアントへの応答が重ね合わされている。このため、回線がフルになるとブリッジにおいて呼損が増大する。これはクライアントに対してブリッジのトラフィックが多いにもかかわらず、回線にはクライアントと同じ帯域しか割り当てられていないからである。この結果から、クライアントトラフィックのみではなく、サーバトラフィックを考慮してネットワークを設計する必要がある。

- 1台のブリッジの接続する Ethernet の本数を多くして1本の Ethernet に接続するクライアント数を少なくする方が、1台のブリッジに接続する Ethernet の本数を少なくして1本の Ethernet に複数台のクライアントを接続するよりも QoS が高い。
- FDDI 上に接続するブリッジを1台とした場合と FDDI 上に接続するブリッジを10台とした場合は、シミュレーション8の結果より、ブリッジを1台にした方が FDDI のレスポンスが向上する。

7.2 今後の課題

今回行なった研究は、シミュレーションに留まってしまい、実際のシステムを構築した動作確認まで至らなかった。また、シミュレーションは MAC 層を対象としたもので、実動作とは異なる。したがって、今後は3層以上を考慮し、アプリケーションを含めたシミュレーションを行なうことによって、さらに詳細な解析が可能になる。この際、単一のアプリケーションに限らず、複数のアプリケーションを想定すれば実動作に近いモデル化となる。

最後に、今回の研究でやり残した事項について述べる。

1. 従来の研究で用いられていた、データ長を一定にした場合と今回の研究で利用した実測トラフィックとの相違を確認できなかった。一定長を用いる場合は、回線を使用する時間が一定になるため回線利用効率が悪くなり、呼損率や待ち時間特性の良い結果が得られると想定できる。
2. シミュレーションの入力データとして利用したトラフィックモデルは、典型モデルおよびバーストモデルのどちらかで、両モデルを混在させた発呼をする場合、すなわち、典型モデルで発呼するクライアントとバーストモデルで発呼するクライアント

を混在させる確認ができなかった。クライアントが異なるモデルを用いて発呼した場合、サーバモデルもクライアントが発呼しているモデルに応じて発呼モデルを変更する必要がある。

3. Ethernet の衝突検出では、全てのノード間の距離を最大と仮定して衝突ウインドを $51.2\mu s$ にしている。一部屋に設置した LAN を想定したシミュレーションをする場合、ノード間の距離が決まっているのでこの距離をデータとして持ち、衝突ウインドを発呼しているノードからテーブルによって変更するようにすればより実際のモデルを想定した解析ができる。
4. FDDI のトークン保持タイムは、従来の研究にて得られている推奨値を利用したが、タイム値の正当性を確認できなかった。このタイム値はネットワークに伝搬するトラフィック特性によって変化するべきものであり、FLR や FWT への影響度も大きいので、パラメータとして変化させて適切な値に決定する必要がある。
5. シミュレーション 6 および 7 の考察にて議論した 1 本の Ethernet に複数のクライアントを接続した時、ブリッジに到着する間隔を計測してその特性の確認ができなかった。シミュレーション結果から、発生間隔の短い呼が多い指数分布に近くなることが予想できる。
6. 今回例に上げた Ethernet と FDDI 以外のネットワークへの対応を行なう。

付録

1 M/M/1 モデルの特性

到着間隔 λ がランダムで、サービス時間 μ が指数分布に従い、窓口が一つと仮定した場合の特性を以下に示す。

$$\text{待たされる確率} \quad P_q = \rho = \frac{\lambda}{\mu}$$

$$\text{系内にいる平均呼数} \quad L = \frac{\rho}{1 - \rho}$$

$$\text{平均待ち時間} \quad W_q = \frac{\rho}{\mu(1 - \rho)}$$

2 乱数発生メカニズム

本項では、第3章にて作成したトラフィックモデルをシミュレーションにて用いる際に利用する乱数の発生について述べる [9]。

正規乱数の発生モデル

平均 μ 、標準偏差 σ である正規分布の確率密度関数は、

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (7.1)$$

で与えられる。

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (7.2)$$

とおくと標準化された分布に変換できる。ここで、中心極限定理より一様乱数 $rand_i$ を n 個合計したものの分布は、平均値が $n/2$ 、分散は $n/12$ の正規分布になることから、式 7.2 より

$$z = \sqrt{\frac{12}{n}} \left(\sum_{i=1}^n rand_i - \frac{n}{2} \right) \quad (7.3)$$

となり、 z の標準正規分布となる。したがって、

$$x = \sigma \times \sqrt{\frac{12}{n}} \left(\sum_{i=1}^n rand_i - \frac{n}{2} \right) + \mu \quad (7.4)$$

が得られる。 $n = 12$ とすることで、

$$x = \sigma \times \left(\sum_{i=1}^{12} rand_i - 6 \right) + \mu \quad (7.5)$$

が得られる。式 7.5 を用いて、一様乱数を 12 回加えることで正規乱数を得る。

指数乱数の発生モデル

平均発生率 λ である指数分布の確率密度関数は、

$$f(\tau) = \lambda e^{-\lambda\tau} \quad (7.6)$$

で与えられ、分布関数 $g(\tau)$ は、

$$g(\tau) = 1 - e^{-\lambda\tau} \quad (7.7)$$

となる。式 7.7 を τ について解くと、

$$\tau = -\frac{1}{\lambda} \log(1 - g(\tau)) \quad (7.8)$$

が得られ、式 7.8 の $g(\tau)$ を乱数発生させると、指数乱数を得る。

対数正規乱数の発生モデル

平均 μ_y 、標準偏差 σ_y である対数正規分布の確率密度関数は、

$$f(x_y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x_y - \mu_y}{\sigma_y}\right)^2} \quad (7.9)$$

で与えられる。なお、 x_y は確率変数 x の対数 ($\log_2(x)$) 表示である。

正規乱数と同様にして求めると、対数正規乱数は式 7.5 は

$$x_y = \sigma_y \times \left(\sum_{i=1}^{12} rand_i - 6 \right) + \mu_y \quad (7.10)$$

となる。第3でのモデル作成時に2の対数を求めて分布を作成したので、対数正規乱数からシミュレーションで用いる乱数を得るためには2の指数を求めれば良い。したがって、

$$x = 2^{x_y} \quad (7.11)$$

から、必要な乱数が得られる。

謝辞

本研究を行なうにあたり、日頃御指導を賜わり、また幾多の発表の機会を与えて頂きました日比野靖教授に心から深謝致します。また、適切な御示唆、御指導を賜わりました横田治夫助教授に深く感謝致します。

堀口進教授には本論文をまとめるに当り御指導を頂きました。厚くお礼申し上げます。

また、丹康雄博士にはトラヒック測定、シミュレーション実験、実験設備など多様な面でお世話になりました。深く感謝致します。

日頃から有益な御助言、御指導を頂きました杉野栄二博士、宮崎純博士に感謝致します。

日比野研究室の福田次良氏には、トラヒックの集計、シミュレーションプログラムなど御指導頂きました。

シミュレーション実験の際、快くマシンを使用させていただきました研究室の皆様に感謝します。

最後に、貴重な御意見、御討論を頂きました日比野・横田研究室の皆様に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- [1] 里吉務, 高原幹夫: “サブネットワークとして CSMA/CD-LAN をもつ Token Ring LAN の伝送特性の評価”, 電子情報通信学会論文誌, B-1, Vol.J73-B-1, No.7, pp.603-609(July 1990).
- [2] 石田陽子, 高原幹夫: “イーサネット上のトラヒック特性によるパケット発生モデルについて”, 電子情報通信学会論文誌, B-1, Vol.J78-B-1, No.11, pp.664-671(Nov 1995).
- [3] 名部正彦, 馬場健一, 村田正幸, 宮原秀夫: “World-Wide-Web におけるユーザトラヒックの分析”, 信学技報 IN96-74, pp.91-96(1996).
- [4] V.Paxson: “Empirically Derived Analytic Models of Wide-Area TCP Connections”, IEEE/ACM Transactions on Networking, vol2, no.4, pp.316-336(1994).
- [5] S.Pederson and M.Johnson: “Estimating Model Discrepancy”, Technometrics, vol32, no.3, pp.305-314(1990).
- [6] A.S.Tanenbaum: “Computer Networks”, Prentice-Hall(1996).
- [7] 泉谷建司: “～LAN 技術解説～ Ethernet と FDDI”, ソフト・リサーチ・センター (1993).
- [8] 石原進, 岡田稔, 岩田晃, 櫻井桂一: “イベント駆動方式による LAN 通信解析モデル”, 電子情報通信学会論文誌, A, Vol.J78-A, No.8, pp.961-964(Aug 1995).
- [9] 石川宏: “C によるシミュレーションプログラミング”, ソフトバンク (1994).