JAIST Repository

https://dspace.jaist.ac.jp/

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
Туре	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



Japan Advanced Institute of Science and Technology

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

Copyright © 1998 by Hirohisa MATSUMOTO

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ヒック特性によってその構築方法を変 更する必要がある。

トラヒックモデルは、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、トラヒックモデル、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 CONT	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 3	32
	4.1	Ethernet $\exists \forall \exists \neg \mu$	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 3	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	ቃ	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場合がほとんどである。以下に相互接続の利点を示す。

- 低速回線上のトラヒ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ヒ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 ワークにてトラヒックを測定し、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 トラヒ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ヒック量の限界値を 推定し、QoS¹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章ではトラヒックモデルについて示す。

トラヒ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、その結果からトラヒ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パケット(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

項目	值
通信速度	$10 { m Mbps}$
通信方式	$\rm CSMA/CD$
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	$51.2~\mu{ m s}$
フレーム間ギャップ	9.6 μs
再送回数	16 回
バックオフ限界	10 🗖
ジャム信号サイズ	32 ビット

表 2.1: Ethernet 仕様

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変えを行ない、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変えは、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	${f Ethernet}$	FDDI
通信速度	$10 { m Mbps}$	$100 { m Mbps}$
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 ブ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 いは通信回線を通っ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 夕送信を開始できる。

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 さは無限大と仮定した 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となっ 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 ヒックを測定した。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。トラヒック分布は多量のトラヒックが伝搬 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、トラヒッ ク測定結果の分析は全トラヒックを対象とする。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。



上位インタフェースへ

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ヒック

コンピュータネットワークでのトラヒックは、次の条件に依存する場合が大きく、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: トラヒック分布の推移

3. アプリケーション

したがって、トラヒ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ヒックに対して、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値となるクライアント(クライアント) 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*(log₂(*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、

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{1}{2}(\frac{x-\mu}{\sigma})^2}$$
(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、

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

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、

$$f(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_y}} e^{-\frac{1}{2}(\frac{y-\mu_y}{\sigma_y})^2}$$
(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, σ_y =0.0013015	0.115324

表 3.2: クライアント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	$\hat{x} = 163.5634518, \sigma_x = 260.7360769$	6.002394
指数分布	$\lambda = 0.006113835$	2.386956
対数正規分布	\hat{y} =6.579365384, σ_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 3.7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、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、実測データは図 3.9に示すように NFS のパケットである NULL、コマンド、データが大半であるため、パケットサイズが限定されているからである。

したがって、パ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ヒック 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う。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-

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, σ_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, σ_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: 典型サーバトラヒック 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, σ_y =0.000606561	0.119375

表 3.6: クライアントバースト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	$\hat{x} = 805.5181796, \sigma_x = 697.6703113$	17.15096
指数分布	$\lambda = 0.001241437$	44.95545
対数正規分布	\hat{y} =7.470610698, σ_y =3.460510595	21.41851



図 3.14: 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 3.15: 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, σ_y =0.000669246	0.10314

表 3.8: サーババースト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	$\hat{x} = 1211.295492, \sigma_x = 935.4513586$	15.96284
指数分布	$\lambda = 0.000825562$	19.93356
対数正規分布	\hat{y} =9.473272713, σ_{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モデルを作成した。

なお、バーストトラヒックモデルのパケット長に対するパケット数分布も、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。補正した後のパケット長-パケット数 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。



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。
- さらに統計的代表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。
- 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 MULL 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 µs (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 で衝突の可能性が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 介した場合を想定し¹、

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

を衝突検出時間とし、CD へ遷移する。

- CD(Collision Detection):状態遷移があってから 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 (51.2µs) を基 準に、

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

整数 n は式 4.4の範囲からランダムに選択する。

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

衝突回数は 10 回以上の場合、再送間隔の上限は一定になるので、最大再送待ち時 間は 52.4*ms*(= 51.2*µs* × 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マを再設定して 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 100*ns* 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 51.2µs を経過させて PR へ遷移 する。

- PR:プリアンブルの送信開始。100*ns* 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:100*ns* 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	$6.3 \mathrm{ms}$	16.7%
クライアントバーストモデル	806Byte	$2.3 \mathrm{ms}$	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、引き続く 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ヒ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、引き続く 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、引き続く 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 受信しようろすると QoS が急激に悪化することがわかった。



図 5.4: バーストトラヒック呼損率特性



図 5.5: バースト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、引き続く 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 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、引き続く 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 5.8: 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。

項目	FLR	$\mathbf{FWT}[ms]$
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

表 5.2: シミュレーション 6 結果

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	$\mathbf{FWT}[ms]$
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、引き続く 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	$\mathbf{FWT}[ms]$
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 典型トラヒ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: 典型トラヒ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 にはトラヒ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 に伝搬するトラヒックによってその特性が変化することから、実測トラヒックからトラ ヒ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。

- トラヒ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ヒ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。
- ・ 典型トラヒ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、クライアントトラヒッ クの回線使用率は2% であるが、サーバトラヒ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 トラヒ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 ジのトラヒ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、クライアントトラヒックのみではな く、サーバトラヒ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。

- 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 実測トラヒ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良くなり、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。
- シミュレーションの入力データとして利用したトラヒックモデルは、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。

- 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 51.2µs 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。
- FDDIのトークン保持タイマは、従来の研究にて得られている推奨値を利用したが、 タイマ値の正当性を確認できなかった。このタイマ値はネットワークに伝搬するト ラヒ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。

待たされる確率 $\mathbf{P}_{\mathbf{q}} = \rho = \frac{\lambda}{\mu}$ 系内にいる平均呼数 $\mathbf{L} = \frac{\rho}{1-\rho}$ 平均待ち時間 $\mathbf{W}_{\mathbf{q}} = \frac{\rho}{\mu(1-\rho)}$

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ヒ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、

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

で与えられる。

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \tag{7.2}$$

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

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

となり、zの標準正規分布となる。したがって、

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

が得られる。n = 12とすることで、

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

平均発生率ふである指数分布の確率密度関数は、

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

で与えられ、分布関数 $g(\tau)$ は、

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

となる。式 7.7を 7について解くと、

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

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、

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

で与えられる。なお、*x_y*は確率変数 *x* の対数 (log₂(*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

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

$$x = 2^{x_y} \tag{7.11}$$

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).