

# データネットワークの特徴と設計

水池 健 中村 元

(株) KDD 研究所

## ●電話網とデータ網の違い

### 電話からデータへ通信トラフィックの移行

日常生活に欠くことのできない通信網は高度な発達を遂げ、今日ではダイヤルするだけで電話が世界各地とただちにつながり、メールアドレスを指定するだけで電子メールを簡単に送受することができる。このようにきわめて便利な通信網は、長く電話網を中心に構築されてきた。ところが、ここ数年のインターネットの爆発的な普及により、通信網の主流が急速にデータ網に移り変わりつつある。

一般に通信網は、利用者と通信事業者の間を接続するアクセス部分と長距離かつ広範囲に情報を伝送するために通信事業者が設定する基幹伝送部分に大別される。しかし、電話網とデータ網では、その構成や利用方法に種々の相違があり、通信トラフィックの性質も大きく異なる。

### 電話網の構成

電話網では、図-1のように、各家庭の電話機がメタリックペアケーブルによって最寄りの電話局の加入者交換機に接続され、遠隔地にある加入者交換機を相互に接続するために、中継回線が中継交換機を経由して設定される。中継回線は、多数の電話回線を多重化して搬送する伝送路であるが、その容量は接続されているすべての電話機に必要な容量を単純に加算した値よりは少なく、平均化された通常の通話量に見合うように設計されている。

### データ通信のしくみ

データ網は、データ(ビット列)を固定長あるいは可変長のかたまり(このかたまりをパケットと呼ぶ)で扱う伝送方式を中心に発展してきた。データ網では、1本の通信回線に複数の宛先のパケットを順次送信して、効率的にデータを伝送するほか、パケットを通番管理することにより、パケットの抜けの発見や伝送誤りの検出、さらに

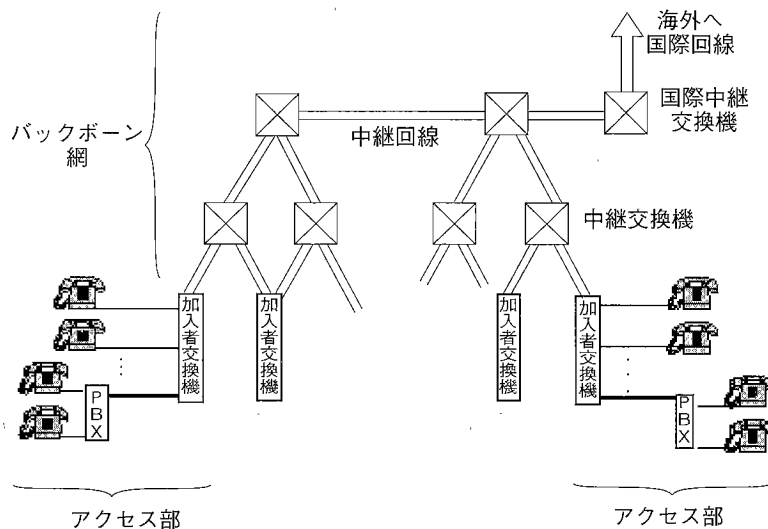


図-1 電話網の構成

それらの再送などが行われている。データ通信方式は、計算機間の通信を行うために必要な機能を階層的に分類して各階層の機能を標準化したOSI (Open Systems Interconnection) により基本的な体系が整備され、フレームと呼ばれる可変長のパケットを用いるフレームリレー交換やセルと呼ばれる固定長のパケットを用いるATM (Asynchronous Transfer Mode) 交換など多様な方式が実用化されている。

### データ網の構成

今日では、インターネットの爆発的な普及に伴い、IPパケット網が急速に中核的な位置を占めつつある。IPパケット網は、図-2に示すように、原則としてLANをバックボーン網で接続するように構成される。LANには、多くのパソコン端末およびホストやサーバとして用いられるワークステーションなどが接続され、パケットの損失や誤りの検出とそれらの再送が行われつつ、パケット単位でデータが行き交っている。宛先がLANの外であるパケットは、ルータと呼ばれる装置でIPアドレスにより識別されて、アクセスラインを経由してバックボーン網に送出される。アクセスラインは通常専用線を用い、通信事業者やインターネットサービスプロバイダ (ISP) の提供するバックボーン網のルータに接続される。個人ユーザの場合には、ISDNのような公衆通信網を介してISPの提供するアクセスサーバに接続するダイヤルアップ方式で、端末からバックボーン網にアクセスすることもできる。通常、LANやバックボーン網の境界に設置されたルータをエッジルータ、バックボーン網内のルータをコアルータと呼ぶ。バックボーン網にはコアルータが要所に配置され、相互に十分な伝送容量を有する専用バックボーン回線で接続される。さらに、複数のバックボーン網を効率よく接続するために、相互接続点 (IX) が設けられる。

### 電話網とデータ網の違い

電話網では、電話機を接続する通話回線は同一の固定伝送容量を有し、電話をかけるごとに交換機や中継回線を介して接続される。通話中は相手の電話機まで接続された1回線が保持されている。このような方式を回線交換方式と呼ぶ。この方式では、接続された通話回線では常に一定の伝送容量が保証されるが、空き回線がない場合はお話し中となり接続されない。

一方、データ網では、パソコンなどの端末からデータが発生するたびにパケットが送出される。パケットの送出

量や発生過程は、電子メールやファイル転送などで大幅に異なる。ルータやスイッチではパケットを到着順にバッファに一時保存し、ヘッダのアドレス情報などに従って所定のルートの伝送路にパケットを送信する。この方式をパケット交換と呼ぶ。バックボーン回線は、多数の端末やルータから流入するパケットを順次伝送することで共用されるため、十分な伝送容量を有するように設計される。ルータのバッファ容量やバックボーン回線の伝送容量が不足すると、伝送遅延が大きくなったりパケットの損失が発生したり、データ伝送の品質劣化が発生する可能性がある。

### ●データトラフィックの性質

#### 電話トラフィックの特徴

電話網では、個々の電話ユーザが電話をかける頻度は通常それほど高いものではなく、地震発生など特殊な場合を除いて他のユーザが電話をかける行動とは独立と考えられる。このような場合、加入者交換機に到着する電話の接続要求 (これを呼と呼ぶ) のふるまいを調べると、単位時間に発生する呼の個数は、発生する確率の低い出来事が起きる確率を表す分布として用いられるポアソン分布に従うことが知られている。また、呼の到着間隔は指数分布となる。さらに、通話時間の統計的な性質を調べると、通話の長さも指数分布を示すことが分かっている。

このモデルでは、待ち行列の理論を用いて中継回線の伝送容量を設計できる。待ち行列の理論は、確率論を応用してシステムの統計的なふるまいを解析する理論であり、交通問題や在庫管理などの広範な分野に適用されて

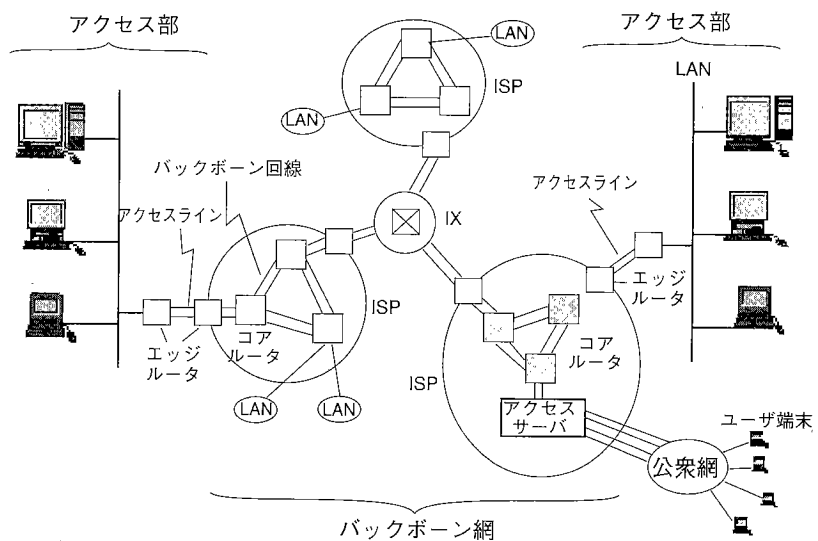


図-2 データ網の構成

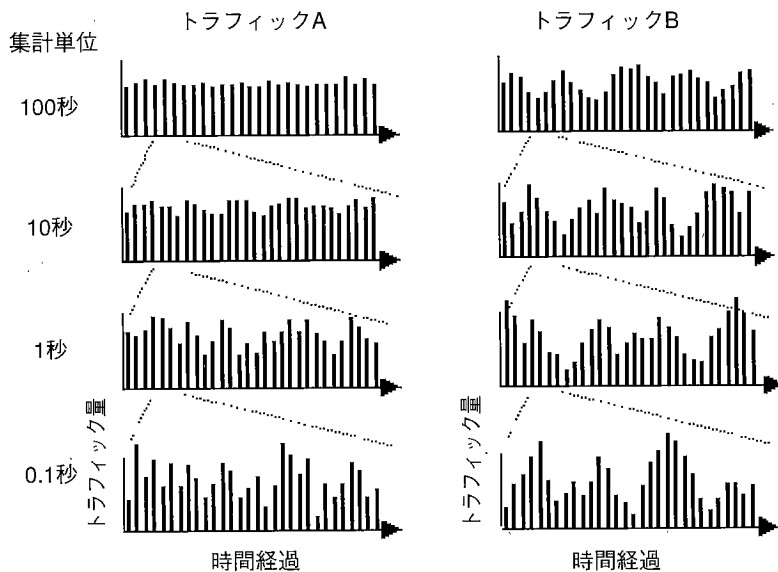


図-3 トラフィックの自己相似性 (概念図)

いる。単位時間当たりの呼の総延べ通話時間で通話トラフィック量を表す。トラフィック量と中継回線数を与えると、アーランの公式により中継回線の不足により呼が閉塞される確率が求められる。電話網の設計では、通話トラフィック量に対して、呼の閉塞確率が規定値以下となるように中継回線の数を決める。このようにして求められる中継回線の必要数は、実際に接続されている電話機の数より大幅に少なく、電話機が統計的に利用されることによる多重効果を考慮して経済的な電話網が設計されている。

### データトラフィックの特徴

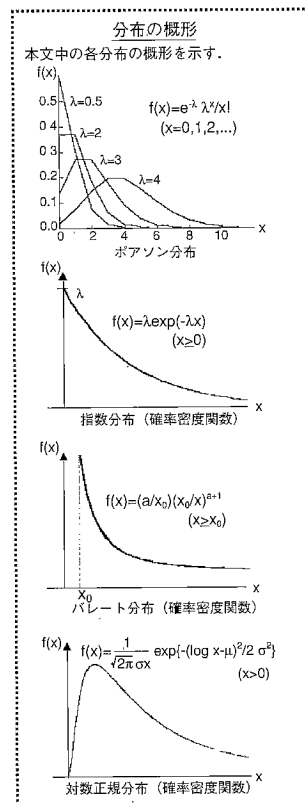
データ網では、加入者が電子メールやFTP (File Transfer Protocol), WWW (World Wide Web) などのアプリケーションを用いてデータ転送を行うことによりパケットが流れる。網内に流れるパケットの流量は、主に転送されるファイルやオブジェクトなどのデータサイズに依存する。昨今のインターネットバックボーン内に流れるトラフィックの大半は、WWWアプリケーションのデータ転送で、その転送データのサイズは、指数分布よりも裾の広いパレート分布や対数正規分布に近い統計分布になることが確認されている<sup>1)</sup>。これは、サイズの大きいデータの転送が比較的頻繁に行われ、大量のパケットが連続して転送される確率が高いことを示している。

また、パケットの転送は、その時点における伝送路の混雑度合いやパケット転送プロトコルのふるまいなどの影響を受ける。たとえば、伝送路が混雑していて、ルータなどのバッファでパケットの損失や遅延が生じ、データ転送プロトコルの再送要求などが働くと、転送するパケッ

トの総量は再送分を含めて増加し、すべてのパケットを転送し終えるまでの時間も長くなる。伝送路混雑時にパケット転送量および転送時間が増加するという事は、混雑度をさらに増長することとなる。こうした転送プロトコルのふるまいは、前述の大量のパケットが連続して転送される確率の高さと合わせて、データ網において高負荷状態および低負荷状態が連続的に発生する傾向を強めている。一般的に、データトラフィックは、電話網における音声トラフィックに比べて、バースト性が強くなっている。

### データトラフィックのバースト性

データトラフィックのバースト性を表す指標の1つとして、トラフィック量の時間的な自己相似性というもの注目されている。図-3は、トラフィック量の時間的な自己相似性を説明するための概念図である。自己相似性とは、トラフィック量を集計する時間間隔を変化させた場合に、各時間間隔における集計結果の類似性を表す指標である。トラフィック量を集計する時間間隔(集計間隔)を0.1秒から100秒まで変化させると、各時刻におけるトラフィック量がランダムな場合には、トラフィックAのように集計間隔の増加に伴い、集計値のばらつきが減少する。しかし、各時刻におけるトラフィック量の値に相関があり、その相関が集計間隔を変化させても保持されるような場合には、トラフィックBのように集計間隔が増加しても集計値のばらつきが小さくならない。トラフィックBは、トラフィックAに比べると各集計間隔における集計値のばらつきに類似性が見られる(集計間隔を0.1秒から100秒まで変化させたにもかかわらず、トラフ



ック量を表す時系列のばらつき具合が似ている)。この類似性をトラフィックの自己相似性といい、トラフィックの増加あるいは減少の傾向が継続する性質を表すものである。データ網のバックボーンなどで実測されたIPトラフィックには、このような自己相似性が見られることが報告されている<sup>2)</sup>。

## ●データ網の性能要求と品質評価

### データ網の性能

従来、データ網では、データの転送エラーをなくすため、パケットの損失が少なくなるように転送することが重視されてきた。また、データ網で音声や画像の実時間転送や大規模データの転送などが行われるようになると、パケットの転送遅延時間を短くすることが必要になってきた。データ網において、パケット転送時の損失と遅延は、伝送路上とルータやATM交換機などのパケット交換機内で生じる。伝送路上で生じるパケットの損失および転送遅延は、光ファイバや無線リンクなどの物理的な伝送媒体の信号転送誤りおよび伝送速度に起因するもので、その物理媒体に依存する。これに対して、交換機内で生じるパケットの損失および転送遅延は、ノード内でパケットをバッファに蓄積する際に生じるものであり、バッファの大きさや構成、パケットの取り出し速度や順序、バッファに入るパケットの量や到着過程などに応じて変化する。データ網の品質は、伝送路及び交換機の両者で生じるパケットの損失および転送遅延を基に評価する。交換機で生じるパケットの損失や遅延時間の評価方法については、パケットのふるまいを統計的に解析する待ち行列の理論などと合わせてさまざまな研究が行われている。

### 通信サービスの品質

通信アプリケーションの多様化に伴い、さまざまな通信サービスが提供されるようになり、通信サービスごとの品質(QoS: Quality of Service)が規定されるようになった。ATM網では、伝送速度やパケット損失率、パケット転送時の最大遅延時間、遅延時間の変動範囲、パケットのバーストサイズなどを組み合わせてQoSが規定される。たとえば、ファイル転送では、パケット損失の少ないQoSが要求され、音声や画像の実時間転送では、転送遅延時間や遅延時間変動の少ないQoSが要求される。インターネットにおいても、こうしたQoSを扱うメカニズムの導入が進められている。

## ●データ網の設計ポイント

### データ網の設計項目

データ網の主要な設計パラメータとしては、網のトポ

ロジ、伝送路の種別・容量、交換機内のバッファの構成・容量・制御方法、パケットのルーティングなどがある。こうした設計パラメータを、網の品質や経済性、信頼性を追求しながら決定していくこととなるが、パラメータの数は、網規模が大きくなるに従って急激に増加し、さらに、設備障害時の復旧や長期的な設備増設・廃止などを考慮すると大幅に増加する。また、音声や画像、データなどを同じネットワーク上で伝送するマルチメディアサービスの普及により、パケットの伝送速度や損失率、転送遅延などに関するさまざまなQoSの要求が混在し、複雑な要求条件の下でパラメータ値を決定しなければならなくなってきた。こうした状況下では、すべての設計パラメータを一斉に決定することはせず、伝送路網の構成や伝送容量の設計、ルータや交換機内のバッファ設計、ルーティング計画などを段階的に決定することが多い。

### データ網の設計指針

交換機内におけるバッファの構成や制御方法に関する設計パラメータは、多様化するパケットの転送に関する要求条件を十分に考慮して決定する必要がある。たとえば、損失の少ない転送を要求するパケットと遅延の少ない転送を要求するパケットが混在する場合には、交換機で長さの異なる2つのバッファを用意し、損失を少なくしたいパケットは長めのバッファに、転送時間を短くしたいパケットは短めのバッファにそれぞれ蓄積したり、各バッファからパケットを取り出すタイミングを調整することにより、各パケットの転送に関する要求を満たすことができる。ATM網に関しては、パケットの到着過程やバッファ容量、バッファ損失の許容値などを基に、そのパケットの流れを仮想的な伝送帯域で評価し、網の設計や運用に利用する等価帯域手法などが開発されている<sup>3)</sup>。

### バースト性を考慮した網設計

データ網を設計する上では、データトラフィックのバースト性についても考慮する必要がある。図-4は、トラフィック量を表す2種類の時系列と、各時系列を容量無限大のバッファに入力した際のバッファ内パケット数を表す時系列である。トラフィックaおよびbは、平均および分散が同じ時系列である。ただし、トラフィックaは、各時刻におけるトラフィック量をランダムに決定した。これに対して、トラフィックbは、データ系トラフィックの基本特性と同様に自己相似モデルに基づくバースト性が生じるように生成された。両トラフィックをバッファに入力すると、トラフィックbのバッファ内パケット数は、トラフィックaに比べて10倍程度大きい値となっている。これは、トラフィックbでは、トラフィックの量の増加および減少が連続する傾向にあるため、トラフィック増加時にはバッファ内に急速にパケットが蓄積されることを示

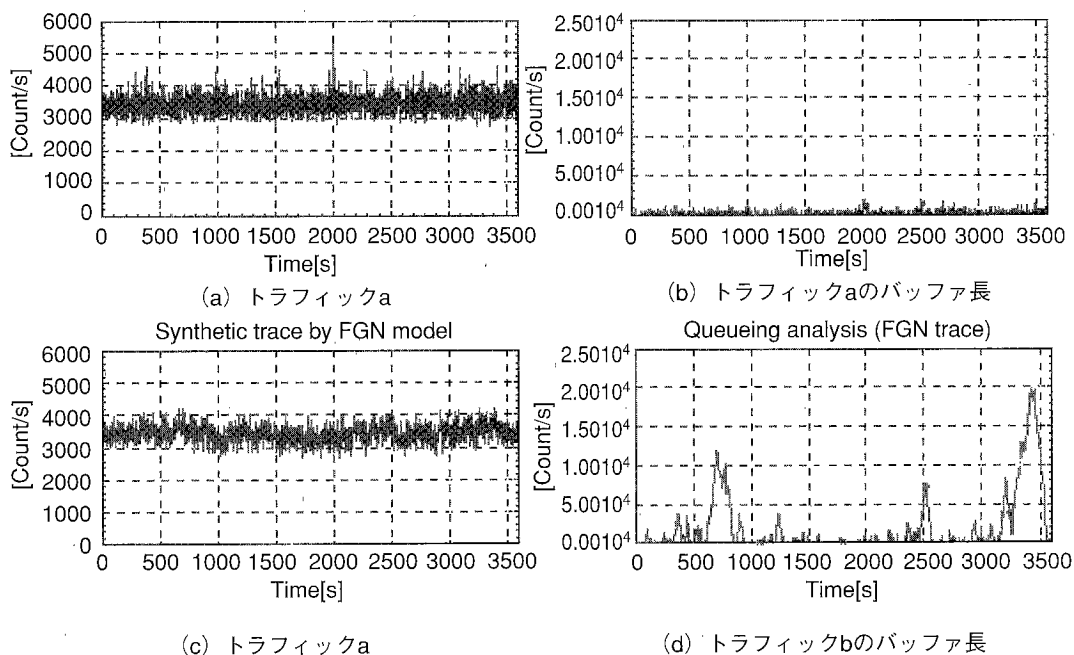


図-4 トラフィック量およびバッファ長時系列

している。バッファ内に蓄積されるパケット数が増加するということは、パケットの転送遅延が大きくなるとともに、バッファ容量が有限の場合にはパケットの損失も増大することとなる。データトラフィックのバースト性は、バッファ容量や伝送路容量の設計に多大な影響を与えるため、そうした影響を考慮することがデータ網を設計する際の重要な課題となっている。

## ●次世代データネットワークの設計に向けて

### IP over WDM

インターネットの普及により、バックボーン網の大容量化が急速に進む中、次世代の大容量データ網の本命と目されているのが、IP over WDMと呼ばれる方式である。波長分割多重 (WDM) は、1本の光ファイバに異なる波長で複数の光伝送路を設定する方式であり、大容量の光伝送路を効率よく提供できるものと期待されている。WDM網では、伝送経路上のファイバで同一波長を異なる光伝送路が重複使用することがないように経由ルートと波長を設定しなければならない。そのため、光ファイバ伝送容量の有効利用を目指した効率的な光伝送路の経由ルートおよび波長の設定が重要な設計項目として挙げられる。

### ワイヤレスデータ網

データ網のアクセス区間に関しては、移動体通信サービスを利用したモバイルコンピューティングをはじめ、光ファイバなどに比べて敷設が容易な無線回線によるアクセスライン、端末やルータを無線回線で接続するLANなど、ワイヤレスデータ網が普及してきている。無線回線の伝送品質は、建物による遮蔽や回線間の干渉など、周辺環境の影響を受けやすいため、ワイヤレスデータ網を構築、運用する際には無線回線区間の設計が重要となる。また、モバイルコンピューティングでは、携帯端末の移動に伴うトラフィックの変動も考慮する必要がある。ワイヤレスデータ網の効率的な設計は、高品質で経済的なアクセスラインを実現するだけでなく、限られた無線リソースの有効利用にもつながる。

#### 参考文献

- 1) Crovella, M. E. and Bestavros, A.: Self-Similarity in World Wide Web Traffic: Evidence and Possible Causes, IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol.5, No.6, pp.835-846 (1997).
- 2) Leland, W. E., Taqqu, M. S., Willinger, W. and Wilson, D. V.: On the Self-Similar Nature of Ethernet Traffic (Extended Version), IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol.2, No.1, pp.1-15 (1994).
- 3) Kelly, F. P.: Effective Bandwidths at Multi-Class Queues, Queueing Systems, Vol.9, pp.5-16 (1991).

(平成11年11月9日受付)