

通信ネットワークにおけるORの問題

橋田 温

1. はじめに

通信ネットワークのライフサイクルは、図1に示すように計画、設計、製造、設置、運用のフェーズから成るプロセスを繰り返す。これら通信ネットワークのライフサイクルの各フェーズにおいて、ORの問題は随所に見られる。たとえば、計画フェーズでは需要予測、トラヒック予測、サービス品質の規格決定が、設計フェーズではネットワーク構成評価、性能評価、パラメタ最適化、運用アルゴリズムの評価、全システムの総合評価などがある。また運用フェーズでは、トラヒック条件にもとづいたシステム構成要素の設備数・パラメタの設計、品質とトラヒックの測定、輻輳に対するトラヒック制御がある。

ここでは典型的なOR手法と関係の深い問題として、設計フェーズにおける、(1)ネットワークトポロジーの設計と、(2)サービス性能評価、を取り上げる。前者は数理計画法に、後者は待ち行列理論に関係が深い。

2. ネットワークトポロジーの設計

ネットワークのトポロジー（接続形態）は、トラヒック、サービス種類、サービス品質、コスト/料金などによって定まる。一般には、ある制約条件下で広義の総合コストを最小にする問題に定式化される。通信ネットワークは、基本的にはユーザーが用いる端末、交換機、および伝送路から成る。端末を集めて交換機（または集線装置）へ収容するネットワークをローカルアクセスネットワーク、交換機間を伝送路で結んだネットワークを中継ネットワークと呼ぶ（図2）。

ネットワークトポロジーのパラメタとしては、(1)端末の地理的分布、(2)トラヒック要求行列（発着対地間の交流トラヒック量）、(3)リソースの種類と容量、(4)トラヒック特性（通信呼の発生過程、サービス時間分布等）、

はしだ おん 筑波大学 大学院経営システム科学専攻
〒112 文京区大塚3-29-1

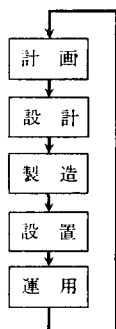


図1 通信ネットワークのライフサイクル

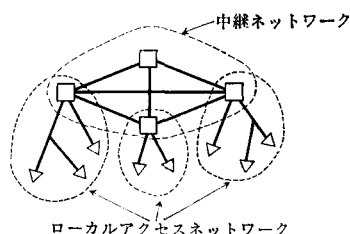


図2 一般のネットワークトポロジー

(5)ネットワークトポロジー、(6)ルーティング（通信呼の接続経路の選択方法）、(7)構成要素のコスト関数、(8)サービス品質、などがある。入力条件として与えられるものもあるが、トポロジー、ルーティング、サービス品質などは通常設計目標である。それらをすべて独立変数として問題を解くことは現実的に不可能であるため、どれかを独立変数とし残りを制約条件として最適化問題を解くこととなる。

2.1 中継ネットワークの設計

中継ネットワークは交換機であるノードと伝送路であるリンクからなる。ネットワークトポロジーとしては、ノードに区別がない非階層形（または分散型）ネットワークとノードの機能に階層がある階層型ネットワークがあり、問題の定式化が異なる。ほとんどの公衆電話網が前者の例であり、米国のコンピュータネットワーク ARPANET は後者の例である。

1) 分散型ネットワークの設計

与えられた入力条件下で、サービス品質などの制約条件を満たす総コスト最小のネットワークトポロジーを求めるいわゆるリンク容量割付問題であり、以下のように定式化される。

[入力条件]: ノード位置、トラヒック要求行列、最大リンク容量、コスト関数

[目的関数]: 総ネットワークコスト

[独立変数]: (i)トラフィックフロー, (ii)リンク容量

[制約条件]: (i)トラフィックフロー \leq 最大リンク容量

(ii)総合平均遅延 $T \leq T_{max}$

(iii)信頼性 (たとえば連結度 ≥ 2)

広義のコストとしての総合の品質評価尺度を考える場合もある。

トラフィックフローとリンク容量を同時に変数としてこの問題を厳密に解くことは、制約条件の性質、コスト関数の非線形性、伝送路の種類が多い、などの理由により非常に困難である。したがって、ヒューリスティックな方法として、初期トポロジーから出発してリンクを追加したり、削除したりしてコストを減減していく **Local Transform** 法が各種提案されている。

問題を少し簡単にすると、トラフィックフローのみを変数とした最適ルーティング問題がある。ここで言うルーティングとは、トラフィックフロー(発着対の平均トラフィック量)をどうリンクに割当てるかという問題であり、個々の通信要求に対応した動的なルート選択方法(通信呼のルーティング)は除いてある。後者も非常に重要な問題であり、与えられたネットワークトポロジーに対し、通信呼が発生した時ネットワークの負荷状態に応じてスループット対遅延特性の観点から望ましい接続ルートを選択するアルゴリズムが求められる。

最適ルーティング問題は以下のように定式化される。

[入力条件]: ネットワークトポロジー, トラフィック要求行列, コスト関数

[目的関数]: (a)総コスト, (b)総合平均遅延

[変数]: トラフィックフロー

[制約条件]: (i)フロー保存則, (ii)リンク容量, (iii)総合平均遅延 $\leq T_{max}$ (目的関数(a)), コスト $\leq C_{max}$ (ii(b)), (iv)信頼性

この問題は凸制約条件のある非線形計画問題であり、主に **Feasible Direction** 法に属するヒューリスティックな解法が提案されている [1]。

2) 階層型ネットワークの設計

通常基本とするトポロジーはスター状であり、スター状の基幹回線に対し、バイパス回線をどのように設けるかという問題である。公衆電話網の設計法として古くから検討されてきた [2]。

2.2 ローカルアクセスネットワークの設計

端末と交換機候補の地理的分布が与えられたとき、(1)各端末を適当な交換機へスター状で接続する問題(交換

機への収容方法)と、(2)すでに各端末の収容区域が定まっているときに各区域で端末を交換機へツリー状(多重化装置を用いる)で接続する問題(端末接続ネットワークのトポロジー)がある。

1) 交換機への収容方法の設計

m 個の端末を n 個の交換機候補地に接続収容する問題として、以下のように定式化される。

[入力条件]: 端末の位置, 交換機候補位置, 交換機容量
コスト関数

[目的関数]: 総合コスト

[制約条件]: 交換機容量制限

この問題は混合0-1整数計画問題であり、施設配置問題としていろいろな解法が提案されている。大規模なネットワークを対象に、ここでもいわゆる貪欲解法の範疇に含まれるようなヒューリスティックな解法が提案されている [3]。

2) 端末接続トポロジーの設計

1台の交換機へ端末をツリー状に接続する問題であり、以下のように定式化される。

[入力条件]: 端末の位置, 交換機の位置, トラフィック要求行列, リンク容量, コスト関数

[目的関数]: 総リンクコスト

[制約条件]: (i)最大リンク容量, (ii)信頼性 (たとえばリンク断により接続不能となる端末数)

この問題は上述の問題と同様に混合0-1整数計画問題であるが、制約付き最小木問題としてヒューリスティックな解法が提案されている。

3. サービス性能評価

現在通信ネットワークは、大規模化かつ複雑化、コスト効果の追求、サービスの高度化・高信頼化へと向かっている。具体的な傾向としては、(1)CATV, LAN, MANなどの専用網の発展、(2)音声、データ、画像などの通信サービスが共通のデジタル技術と共用リソースで提供されるサービス総合デジタル網(ISDN)(図3)の発展、(3)通信サービス提供者のサービス追加・変更を容易にするとともに、ユーザのコスト効果のよいネット

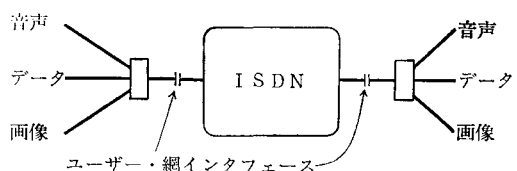


図3 サービス総合デジタル網のイメージ

ワーク構築を可能とするネットワークのインテリジェント化、(4)ネットワーク構築側のマルチベンダー化の要求と分散処理・分散データベース技術に対応したソフトウェア・ハードウェアのモジュラー型アーキテクチャ化、などがあげられる。

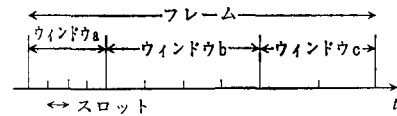
性能評価に影響が大きい傾向として、ISDNで実現される共用リソースによるマルチサービスと、インテリジェントネットワークやモジュラーアーキテクチャにおける分散処理・分散データベースを取り上げる。

3.1 共用リソースによるマルチサービス

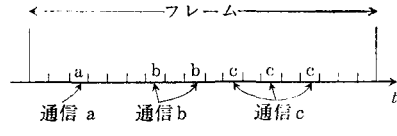
ISDNでは、その理念からユーザがネットワークにアクセスするところ（ユーザ・網インタフェース）では各種通信サービスのアクセスが統合されているが、中継ネットワークの中でも交換機や伝送路において複数のサービスがリソースを共用する場合がある。それらはサービス機能が異なるのは当然であるが、サービス品質要求、要求の発生過程、リソースの占有時間、など性能に影響の大きい要因が異なっている。たとえば、音声トラヒックに比べてデータ伝送の要求発生はバースト的であり、さらに動画通信の情報発生は周期性はあるが情報量の変動が大きい。音声情報の伝送では遅延は非常にきびしいが、データ伝送では比較的緩い。また音声と画像では通信路での情報紛失はある程度許容できるが、データ伝送ではそれが致命的となる場合が多く、誤り制御の導入が必須である。これらを共用リソースでサービスするマルチサービスの問題点としては、(1)共用リソースでサービスする範囲（共用にしない方が有利な場合がある）、(2)各サービスに対し異なるサービス品質を確保するための制御アルゴリズム、(3)リソースの設計方法、などがあ
る [4]。

例として、1本の高速回線を複数の通信サービスで共用する場合を考えてみよう。デジタル通信では1本の高速回線を時間をずらして複数の通信に用いる時分割多重方式が用いられている。すなわち、同一速度の端末 N 台が通信をする場合、時間をフレームと呼ばれる一定の長さの区切り、その間に各端末が1回ずつスロットと呼ばれる時間の間伝送路を使用する。効率の面から、 N 台より多い端末群に同じ伝送路を共用させ、伝送要求の発生に応じて N 個のスロットを順次割当てる要求時割当て方式が用いられる。

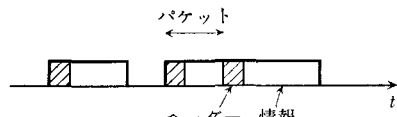
異なる伝送速度(レート)の通信サービスを統合するマルチレート伝送の場合は、マルチウィンドウ方式とマルチスロット方式がある。マルチウィンドウ方式では、1



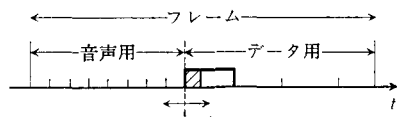
(a) マルチウィンドウ方式



(b) マルチスロット方式



(c) 非同期伝達モード



(d) 音声・データ統合フレーム(可変境界)

図 4 時分割多重化方式

フレーム内に各速度専用のウィンドウと呼ばれるスロット群(スロット長は速度対応に定められる)を設け、速度毎にそれぞれのウィンドウでサービスする(図4(a))。マルチスロット方式では、1フレームを基本伝送速度に対応したスロットで分割し、基本速度より遅い通信は1スロットを使用し、基本速度より速い通信は速度に応じて複数個のスロットを使用する方法である(図4(b))。この場合のサービス品質(たとえば呼損率)を求める問題は、呼種により同時使用回線数が異なる多元トラヒックの問題となる。

上述の時分割多重方式は、回線のフレームや基本速度を固定し要求発生に応じてスロットを割当てる方式であり、同期伝達モードと呼ばれる。これらの方法は統合される通信レートの需要予測に大きく依存するとともに、通信レートの数が増えるとフレームの決定方法やスロット割当方法が複雑になるなどの問題がある。それらに対する解決案として、フレームを用いない非同期伝達モードが提案されている(図4(c))。これは、もとのデジタル情報をパケットまたはセルと呼ばれる定められた長さの信号に分割して順次伝送路に送出する方法であり、競合が発生した場合は他のパケットの送信が終了するま

で待ち合わせる事となる。待ち合わせを含んだ情報の伝達遅延を求める問題は、待ち行列理論またはシミュレーションにより検討される。

特に、遅延に厳しい音声通信と紛失に厳しいデータ通信が共用する場合は、主なサービス品質がそれぞれ呼損率と伝達遅延のため複雑な問題となる。音声サービスでは、遅延がきびしいため使用できる時間が周期的に割当てられる同期伝達モードを用いる固定長フレームを考え、データサービスには非同期伝達モードを用いるとする。

フレームを音声とデータで共用するには、フレーム内に境界を設けてそれぞれ専用的に使用する固定境界方式と、音声用のスロット群を定め、データは残りのスロットおよび未使用の音声用スロットも使用できる可変境界方式がある(図4(d))。この場合、データの遅延特性は音声通信の接続状況に影響されるため、複雑な待ち行列モデルとなる[5]。

さらに、音声、データ、画像を境界を分けずに統合して同じ伝送路で伝送するために、すべてのデジタル情報を同じ形のセルにして非同期伝達モードでサービスする方式が研究されており、より高速の情報伝送を対象とした広帯域ISDNの技術として有望視されている。その場合の問題としては、異なったサービス品質を与えるための制御方法、各種通信サービスに対するリソースの割当て方法、1つの通信要求の異常が他の通信サービスに影響をおよぼさないようにするトラヒック制御方法、などがある[6]。

(2) 分散処理・データベースの問題

広域の公衆網では交換機能は交換機に集中することがコスト効率上有利である。しかし、システム構成要素のコスト効率特性が技術の進歩により大きく変わってきたために、限られた地域を対象とした地域網(LAN)では交換機能が地域的に分散した形態が可能となった。たとえば、構内に張りめぐらされた1本の伝送路から成るLANでは、各端末が独立に伝送路にアクセスする場合が発生する。したがって、ほぼ同時に発生した伝送要求が互いに衝突するのを制御する方式(媒体アクセス制御)として、CSMA/CD、トークンパッシング、スロット化リング、などが提案されている。集中型の制御方式と異なり、地域的に離れた端末が独立にアクセスを行なうために異なった性能評価モデルとなり、待ち行列モデルとしては解析がむずかしい[7]。1つのトランザクションの処理がネットワーク上に分散している複数のアプリ

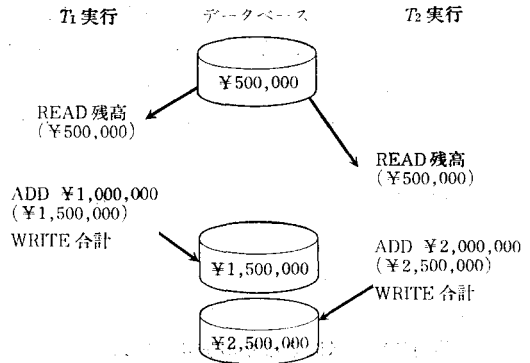


図5 データベースにおける更新の紛失

ケーションプロセスによって協調して実行される分散処理では、トランザクションの応答時間の評価には待ち行列ネットワークモデルが有効である。

分散データベースでは、複数のユーザがほぼ同時に同じデータベースの部分にアクセス(読み書き)したときに生じる問題がある。すなわち、普通の共用リソースの場合とは異なり、ユーザからのアクセスの順番を制御しないと、更新の紛失や検索の不一致などの矛盾が生じる。図5は同じ銀行口座に2つのトランザクション T_1, T_2 がほぼ同時にアクセスするとき生じる矛盾(更新の紛失)を示している。無矛盾を達成するために同時実行制御が行なわれる。

同時実行制御には、ロック法、時間刻印法、仮想リングトークン法、楽観的制御法などがあるが、ロック法が最もよく用いられる。ロック法は、アクセスする前にほかのユーザが使用できないように必要なデータをロックし、アクセスが終了するにつれてロックを解除する方法である。特に、トランザクションの処理途中でも必要なデータを逐次ロックする動的ロック法の場合は、トランザクションの処理の流れをロックを追加するフェーズと解除するフェーズに分ける2相ロック法が望ましい。性能上は、他のユーザがロックしているデータへのアクセスに待ち合わせが生じ、それが通信ネットワークのサービス品質に影響をおよぼす[8]。また、ロック法では他のユーザのアクセス要求との競合によりデッドロックが発生する可能性があり、その検出および解消法を必要とする。

4. おわりに

通信ネットワークはますます大規模で複雑になり、またそれを構成している部分システムのシステムライフサイクルが短くなる傾向にある。通信サービスを受けるユ

ーザーの要求も多様化し、不確定要素が多くなっている。それらに対して、通信ネットワークでは、共通リソースによる効率的なマルチサービスやネットワーク内の多くの場所に情報処理技術やAI技術を持ち込んだ分散インテリジェンス化、交換機や伝送装置などの各種装置のモジュラー構成化、システム構築の融通性を狙ったマルチベンダー化などで対応しようとしている。このような不確定要素が多かつ多面的な評価が必要となる問題に対しては、ORの手法のみならずシステム制御理論、多属性効用理論、ファジー理論、AI、ニューロンネットワークなどあらゆるアプローチからの試みが必要であろう。また、一般にシステム工学で強調されているように、個々のネットワーク構成要素に関する詳細な検討よりも、通信ネットワーク全体としてバランスのとれた検討が重要であり、構造的アプローチも要求される[9]。

参 考 文 献

[1] D. Bertsekas and R. Gallager, *Data Networks*, Prentice-Hall International, 1987
 [2] C. W. Pratt, "The Concept of Marginal Overflow in Alternating Routing," *Australian Telecommunications Research*, 1, pp. 76-82, 1967
 [3] A. Kershenbaum, "Capacitated Facility Location," *Current Advances in Distributed*

Computing and Communications (Y. Temini (ed.)), Computer Science Press, 1987

[4] K. Kodaira and K. Kawashima, "Traffic Studies Related to the Japanese ISDN," *ITC Specialists Seminar on ISDN Traffic Issues*, Brussels, May 5-7, 1986
 [5] M. Schwartz, *Telecommunication Networks: Protocols, Modeling and Analysis*, Addison-Wesley, 1987
 [6] J. Y. Hui, "Network, Transport, and Switching Integration for Broadband Communications," *IEEE Network Magazine*, pp. 40-51, 1989
 [7] J. L. Hammond and P. J. P. O' Reilly, *Performance Analysis of Local Computer Networks*, Addison-Wesley, 1986
 [8] Y. C. Tay, N. Goodman and R. Suri, "Locking Performance in Centralized Databases," *ACM Trans. on Database Systems*, 10, pp. 415-462, 1985
 [9] O. Hashida, "Systems Engineering and Traffic Engineering," *Teletraffic Science for Cost-Effective Systems. Networks and Services* (M. Bonatti(ed.)), North-Holland, pp. 1582-1588, 1989

「論文・事例研究」の原稿募集!

ORの特徴は実践にあるといわれています。実践的な応用をぬきにした理論ということはORでは考えられません。本誌でも以前から会員の皆様からの事例研究の報告をお願いしてきましたが、まだ十分な成果をあげているとはいえません。

「論文・事例研究」は企業、研究所、大学等で実際に行なった事例を論文としてまとめたものを広く会員の皆様に紹介することを目的として作られた欄です。この論文は2人のレフリーによって正式に審査されますが、マネジメント、行政、工学等の広い分野において適用対象の新しさ、適用方法の新しさ、適用範囲の広さ等が論理的、科学的に論じられたものでありますならば、積極的に採用する方針です。皆様のご投稿をお願い申し上げます。

投稿要領：学会原稿用紙36枚(25字×12行)以内(図・表を含む)
 (ワープロ可)投稿先はOR学会事務局OR誌編集委員会宛。

なお、原稿の他コピーを2部添付してください。

レフリー審査の結果、改訂をお願いしたり、採択されない場合があることをご了解ください。また、原稿は、採択・不採択にかかわらず、原本、コピーともお返してきません。(OR誌編集委員会)