



研究ノート

パケット交換網における輻輳制御

中 西 暉*

1. はじめに

パケット交換方式は、1960年に P. Baran により提唱された方式であり、比較的短メッセージで頻繁に発生する会話形データ等に対して高速かつ高効率な通信が可能であるため、アメリカの ARPA 網を始めとして、コンピュータ・ネットワークにおいて広く用いられている。

パケット交換網はバッファリングの機能を有する待時式交換網であるため、トラヒックが特定の地域に集中したり、時間的に集中して発生した場合には、輻輳現象が生じ網機能が著しく劣化し、極端な場合には、網機能が完全に停止するデッドロック状態に陥込む。したがって、パケット交換網においては、これらの状況を未然に防止する何らかの輻輳制御機構が必要である。

輻輳制御には2つの方式、すなわち経路選択方式とフロー制御方式がある。前者の経路選択方式は、負荷を空間的に平均化する方式であり、網内に入力されたトラヒックを対象に、網状況に応じて輻輳地域をできるだけ回避するように経路設定を行い、速やかに目的局に着くよう制御する方式である。経路選択を行っても、網全体として見れば、入力負荷は一定であるので、経路選択方式は輻輳の一時的な回避には有効である（輻輳の発生を遅らせるという効果がある）が、輻輳の根本的な解決策とはなり得ない。

後者のフロー制御方式は、負荷を時間的に平均化する方式であり、網内に入力されるトラヒックを対象に、処理能力以上の負荷が網内に流入しないよう、網の入口において流入負荷を規制する方式である。本方式においては、規制を

ある程度以上強くすると、輻輳の根本的な解決が可能であるが、規制があまり強すぎると、網の有効利用が期待できなくなるというトレードオフ関係が存在するため、フロー制御方式においては、規制値を如何に設定するかが重要な課題の一つである。

本稿では、主として後者に属するウィンドウフロー制御方式に関するわれわれの研究の一端を紹介する。

2. ウィンドウフロー制御方式

ウィンドウフロー制御方式は、ACK なしに連続伝送できるパケット数にウィンドウ数（以下 W 数と略記する）と呼ばれる上限値を設け、入力パケットをこの上限値以下に規制することにより輻輳を防止する方式であり、制御の対象となるレベルに応じて次の3つに分けられる。

- (i) リンクバイリンク方式
- (ii) エンドツーエンド方式
- (iii) 等数制御方式

(i)のリンクバイリンク方式は、隣接局間のリンク上のパケット数を一定量、すなわち W 数以下に規制する方式であり、(ii)のエンドツーエンド方式は、発着信端末間の論理チャネル LC 上のパケット数に上限値を設ける方式であり、(iii)の等数制御方式は、全ネットワーク内に存在するパケット数に上限値を設ける方式である。

これら3方式について、シミュレーションにより簡単な特性評価を行ったところ、リンクバイリンク方式は、経由するすべてのリンクごとに規制を受けるため、全体として規制が強くなりすぎる傾向があること、及び等数制御方式では、発着信端末対によって規制の受け方かなりの不均衡が生じること等が明らかになった¹⁾。以上のことより、3者の中ではエンドツーエンド方式が最も良好な特性を示すと言え

*中西 暉 (Hikaru NAKANISHI), 大阪大学工学部, 通信工学科, 講師, 工博, 通信工学

る。また、パケット交換網の国際標準化を目指す CCITT (国際電信電話諮問委員会) の勧告 X. 25 でもエンドツーエンド方式が規定されている。

以下、エンドツーエンド方式に焦点を絞り、シミュレーションにより詳細な検討を行う。

3. エンドツーエンド方式の基本特性

図1に本方式の基本特性を調べるために用いた3局直列網モデルを示す。同図において、発信局の網外には論理チャンネル LC_{ij} ごとに入力待ち行列 IQ_{ij} があり、発生パケットは、Wに空きがないときには IQ に並べられ、Wに空きがあるときには即時に網内に入力される。また、Wの空きを示す ACK が発信局に到着したときに、IQ にパケットがあれば、その先頭が網内に入力される。なお、比較対象となる無規制方式では、到着パケットは即時に網内に入力され IQ には並ばない。

図1に示した3局直列網に対し、式(1)のW行列を設定したときのエンドツーエンド方式の平均全遅延特性を回線利用率 ρ をパラメータとして図2に示す。

$$[W] = \begin{pmatrix} 0 & 8 & W_{13} \\ 0 & 0 & 8 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここで、平均全遅延とは、LC ごとの全遅延=入力待ち時間+網内遅延をすべての LC について平均したものである。

図2より、高負荷時 ($\rho=0.964$) には、 W_{13} の増加につれて平均全遅延はゆっくり増加し、 $W_{13}=\infty$ のときには無規制の場合よりも少し大きい値に達する。一方、 W_{13} を小さくするにつれて LC₁₃ パケットの入力待ち時間が増大するために平均全遅延が増大し、過制御領域では無限大に発散する。ここで特に注意すべきことは、

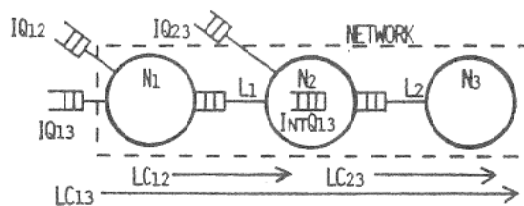


図1 シミュレーションモデル (3局直列網)

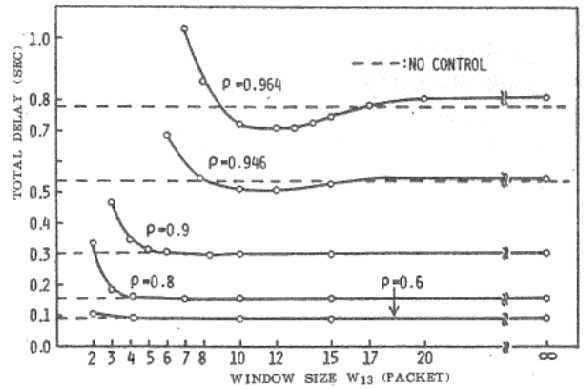


図2 平均全遅延特性

エンドツーエンド方式を用いると、パケットは入力制限を受けて網外の入力待ち行列に並べられることがあるにもかかわらず、入力規制を行わない無規制の場合よりも平均全遅延が小さくなる領域があり、その最小値を与える最適W数 ($\rho=0.964$ では $W_{13opt}=12$) が存在することである。この最適W数は、無規制における各 LC の平均滞留パケット数にほぼ等しい。

エンドツーエンド方式が上記のような優れた特性を示すのは、無規制の場合にはパケットは到着順に網内へ入力されるために同一の LC に属するパケットが回線上で集団性をもつことが多いのに対し、エンドツーエンド方式では、パケットの網入力に際して上記の集団性を緩和して回線上でのパケットの順序がより規則的になるような入換え (入順制御) が行われるからであると考えられる²⁾。

なお、網規模を拡張した場合についても、エンドツーエンド方式は上記と同様な優れた特性を示すことを確かめている。

4. 遅延解析と最適ウィンドウ割当て

エンドツーエンド方式を網に実装するに当たっては、W数などのシステムパラメータの決定手法を確立することが重要である。

このような問題に対して、Kleinrock は単一 LC 損失系モデル (1つの LC トラヒックのみが存在する L 段の直列網で、規制を受けたパケットは網外で棄却されるモデル) の解析を行い最適W数は段数 L に等しくなることを示している³⁾。また、Pennotti 等は複数 LC 損失系モデルの解析を行っている⁴⁾。

最近, Reiser は単一 LC 待時系モデルを取り上げ, Norton の等価流量法を用いて網外遅延の近似解析を行い, 待時系における準最適W数は段数Lの2倍となることを示している⁵⁾.

筆者等は, 複数 LC 待時系モデルに対して, 図3に示すように各 LCr が通過する中継回線 l の実効処理率 $\bar{\mu}_{lr}$ (回線 l を共有する他の LC との相互干渉を加味した LCr にとってのみかけ上の処理率) を求めることにより, 複数 LC モデルを複数個の単一 LC モデルに分解し, それぞれの解を求め, これらが複数 LC 間で成立すべき関係式を満たすように実効処理率の修正を行い, 収束するまでこの過程を繰返し実行する近似解析手法を確立した⁶⁾.

本解析手法により求めた数値例を図4に示す. 同図は5局直列網において $W_1=2, W_4=6$ に固定し, $W_2+W_3+W_5=16$ の条件下で求めた平均全遅延特性であり, α_r は LCr

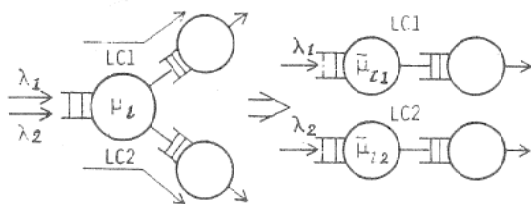


図3 回線 l における複数 LC の分解

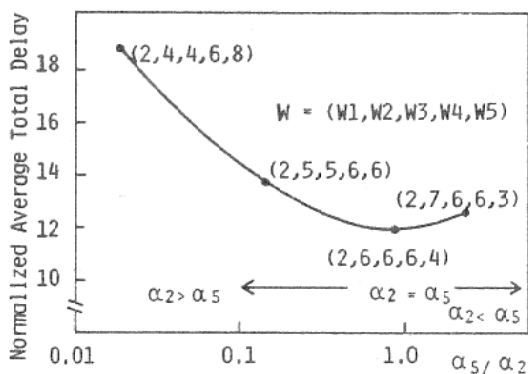


図4 平均全遅延 vs. α_5/α_2

の入力規制度 (LCr パケットが網外に並ぶ確率) である. 同図より, $\alpha_5/\alpha_2=1$, すなわち各 LCr の入力規制度を均等化するようなW割当てが有効であり, そのとき全遅延が最小となることがわかる.

5. おわりに

以上, パケット交換網における輻輳制御方式として, 特にウィンドウフロー制御方式を取り上げ, 本方式のもつ興味ある性質を明らかにするとともに, 実装化に際して重要な最適ウィンドウ割当て問題について考察し, その一つの解を与えた.

網内のトラヒック状況に適応してウィンドウ数を変化させるダイナミック・ウィンドウフロー制御方式の検討, 及び経路選択方式とフロー制御方式の相互影響についての考察と最適な組み合わせ等が今後に残された課題である.

文 献

- 1) 秋吉, 中西, 真田, 手塚: “ウィンドウフロー制御を用いたパケット交換網の伝送遅延特性”, 電子通信学会論文誌 J65-B, 3 (昭57-03).
- 2) 秋吉, 中西, 真田, 手塚: “エンドツーエンドウィンドウフロー制御のもつ網入力順序調整効果”, 電子通信学会論文誌 J65-B, 4 (昭57-04).
- 3) Kleinrock, L.: “On Flow Control in Computer Networks”, Proc. of ICC'78, 27.2.1 (1978).
- 4) Pennotti, M. and Schwartz, M.: “Congestion Control in Store and Forward Tandem Links”, IEEE Trans. COM-23, 12 (Dec. 1975).
- 5) Reiser, M.: “A Queueing Network Analysis of Computer Communication Networks with Window Control”, IEEE Trans. COM-27, 8 (Aug. 1979).
- 6) 鈴木, 秋吉, 中西, 真田, 手塚: “ウィンドウフロー制御を用いた待時系パケット網の遅延解析と最適ウィンドウ割当て”, 電子通信学会論文誌 J68-B, 3 (昭60-03).