

バッファ制御を考慮した
パケット網のトラヒック特性
日本電信電話公社 武蔵野電気通信研究所
野村雅行 伊藤 剛 平田昭生

1. まえがき

最近、国の内外においてパケット交換網に対する関心が高まっており、ARPA (米)、Telemet (米)、TRANSPAC (仏)、DATAPAC (カナダ)、EPSS (英)等の稼働中あるいは計画中のパケット交換網が多い。当研究所においても、その研究を進めており、DDX-1室内実験を経てDDX-2所内試験を実施中である。本論文は、その検討の一部を紹介するものである。

パケット交換はデータ転送中にも交換機が関与する蓄積交換の一種である。したがって高速端末から低速端末へ無制限にデータを転送すると、低速端末を収容する交換機にパケットが滞留し、バッファ不足による輻輳を引起す危険がある。これに対処する1方法として計算機対応に交換機バッファを割当て、その数を超えた場合はパケットを廃棄する方法を検討した。

本論文では、このバッファ割当て式について、端末のトラヒック及び割当バッファ量をパラメータとし、網のスループット、パケット伝送遅延時間、廃棄率等の網のトラヒック特性を求めた。

2. バッファ割当て方式

本論文の検討においては次の点を前提に議論を進める。

- (1) 網に接続される端末は全て計算機端末である。以下計算機端末をホストと呼ぶ。
- (2) フロー制御^(注1)はホスト間で行なわれることを前提とし、交換機は行ないない。網は異常トラヒックに対するガードのみを考慮する。

以上を前提とし、網の異常トラヒックに対する対処方法として次の「共通バッファ方式」及び「バッファ割当て方式」を考えてみる。

〔共通バッファ方式〕

交換網の全バッファを共通とし、ホストに対し使用制限を設けない。交換機の全バッファが使用完了になればホストからの入力を拒否する。

〔バッファ割当て方式〕

1ホストが使用できる交換機バッファの数を制限する。制限数を超えた場合は、超えた分に該当するパケットを廃棄する。

この2方式の定性的評価を表2.1に示す。また網への入力に対するスループット^(注2)(処理能力)特性の解析を付録に示す。表2.1及び付録より次の点が明らかとなった。

(注1) 通信する2端末において送信側が受信可能速度を超えないように速度調整すること。とくにフロー制御のように、ホスト間において取られる通信に関する規約をホスト・ホスト・プロトコルと呼んでいる。

(注2) 単位時間に処理できるパケット数

- (1) ホスト間のフロー制御が十分に行なわれていない場合、交換機内にパケットが滞留し、バッファ使用効率の点で共通バッファ方式が有利である。
- (2) ホスト間のフロー制御が不十分な通信があれば、網のスループットが下り、他ホストの通信が阻害されることもある(付図4)。

以上の点から網のスループットを完全に維持するためにバッファ割当て方式が必要である。以下の3章において、このバッファ割当て方式について解析する。

表 2.1 バッファ管理手法

比較項目 \ 方式	共通バッファ方式	バッファ割当て方式
バッファ使用効率	全端末で共通に使用するのでは使用効率よ	端末にバッファ数を固定的に割当てるため、分割損があり、使用効率は共通バッファ方式よりも小さい。
交換機処理	特別な処理は不要。交換機内の全バッファが使用中になつて時パケットの受け付けを拒否する。	端末に対する出力キュー長の監視・廃棄処理が必要なので、交換機処理が複雑である。
異常トラセツクに対する耐力	障害等によるホスト間のフロー制御が十分に行なわれないホストがあると、交換機バッファが占有され、交換機スループットの低下、他ホストの通信の阻害が発生する。	交換機のバッファが端末対応に割当てられているのでバッファネットワークによるスループットの低下はない。

3. バッファ割当て方式の特性。

バッファ割当て方式では、パケットの廃棄がパケットの再送を招き、再送の増加による計算機の通信処理の増加や伝送遅延時間（パケットが計算機から送信され計算機に受信されるまでの時間）の増加を生じる。そこでバッファ割当て方式の廃棄率、再送回数、伝送遅延時間などの諸特性を明確にする。計算機

3.1 モデル化と定式化。

バッファ割当て方式のモデルを図3.1のプロセスの入力が、ポアソン分布で、受信交換機で廃棄されたパケットが、網制御プログラムで再送されるとして考える。すると時刻 t における再送を含む送信トラヒック密度 $\lambda(t)$ について以下の式が成立する。

$$\lambda(t) = \int_0^t P_n(t-u) \lambda(t-u) f(u) du + Q(t)$$

$$\frac{d}{dt} P_0(t) = \mu(t) P_1(t) - \lambda(t) P_0(t)$$

$$\frac{d}{dt} P_i(t) = \mu(t) P_{i+1}(t)$$

$$-(\lambda(t) + \mu(t)) P_i(t) + \lambda(t) P_{i-1}(t) \quad (i=1, \dots, n-1)$$

$$\frac{d}{dt} P_n(t) = \lambda(t) P_{n-1}(t) - \mu(t) P_n(t)$$

ここで $P_i(t)$ は、時刻 t において交換機内に i パケット滞留している確率である。以上の式の平衡状態における解を表3.1に示す。

3.2 主な特性。

割当バッファ数、廃棄率、スループット、伝送遅延時間の諸量の関係をグラフにまとめ、以下に考察する。

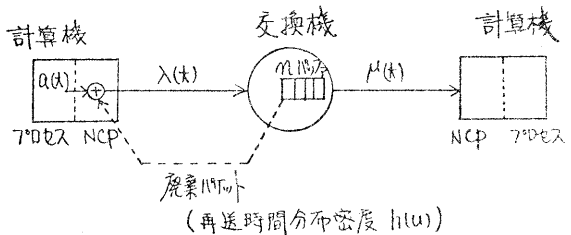


図3.1 廃棄の効果をもつトラヒックモデル

- $\lambda(t)$: 時刻 t にパケットの到着する確率密度。
 $Q(t)$: 時刻 t にプロセスからNCPへパケット送信要求の出る確率密度。ここでは、ポアソン分布を仮定するので一定である。すなわち $Q(t) = Q$ である。
 $\mu(t)$: 時刻 t に交換機から計算機が、パケットを受信終了する確率密度。ここでは、パケット受信時間分布を指数分布とするので $\mu(t) = \mu$ 一定である。
 n : 交換機内の計算機割当てバッファ数。
 $f(u)$: 交換機に廃棄されたパケットが、再送されて来るまでの再送時間分布。ここでは、 $f(u) du = \alpha e^{-\alpha u} du$ とする。また再送時間は、各パケット毎に独立とする。

表3.1 バッファ割当て方式の主な特性

項目	算出式	内容
廃棄率	$P_n = \lambda^n (\mu - \lambda) / (\mu^{n+1} - \lambda^{n+1})$	専用線の場合のバケット誤り率に相当。
平均プロセス送信速度	$Q = (1 - P_n) \lambda$	計算機の実質的なバケット送信速度。
平均再送回数	$P_n / (1 - P_n)$	計算機の通信処理の増加倍。
平均伝送遅延時間	$\frac{M}{\mu} + \frac{P_n}{(1 - P_n) \alpha}$	サービス品質、通信計算機のバケット利用率。
受信回線平均利用率	$1 - P_0$	回線の利用率。
平均有効スループット	$(1 - P_n) Q$	再送なしに受信計算機へ届くバケット量。

但し、 λ : 平均計算機送信速度（送信回線速度）

M : 交換機内平均送信

μ : 平均計算機受信速度（受信回線速度）

待ち行列長

$1/\alpha$: 平均再送時間

[プロセス送信速度と計算機送信速度]

プロセス送信速度（プロセスが実質的に送信しようとする送信速度）を a (PKT/s) とし、計算機送信速度を廃棄パケットの再送パケットも含む速度 λ (PKT/s) とすると、プロセス送信速度の増大にともなう、計算機送信速度は、再送パケットのため急増すると考えられる。図3.2にその様子を示す。またプロセス送信速度 a と計算機送信速度 λ の間には、 $a = (1 - P_m)\lambda$ の関係があるので、送信速度が受信速度と同速度の場合には、 $P_m = 1/(m+1)$ だからプロセス送信速度は、 $a = m \cdot \lambda / (m+1)$ となる。ただし m は、割当てバッファ数である。

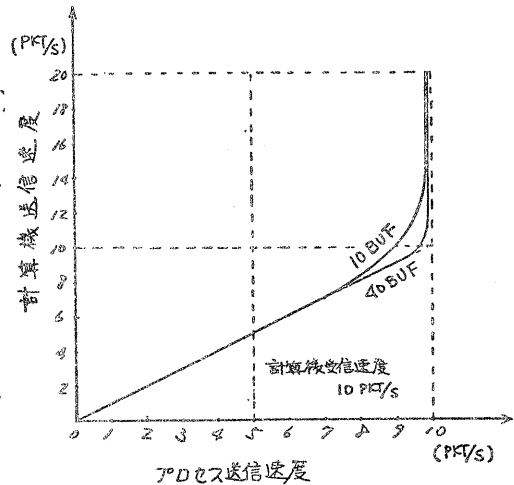


図3.2 プロセス送信速度と計算機送信速度

一方計算機送信速度は、送信回線速度以下に物理的に抑えられるので、上の結果から、例えば r (PKT/s) の同速度回線をもつ計算機間で通信する場合の最大プロセススループットは、割当てバッファ数が、 m バッファの時には、 $m \cdot r / (m+1)$ (PKT/s) である。

[再送回数と計算機送信速度]

計算機送信速度が増大すると、廃棄率が高くなり再送回数も増加する。その増加は、計算機通信処理の増大を意味する。(BUF) 図3.3に計算機送信速度と再送回数の関係を示す。図から送信速度が受信速度以上になると割当てバッファの多少にかかわらず $R = \lambda / \mu - 1$ に急速に漸近し、計算機の再送処理が急増する。

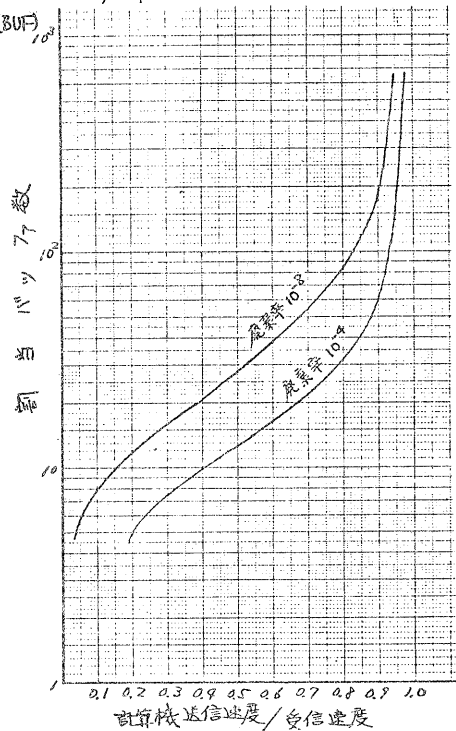


図3.4 廃棄率一定時の計算機送受信速度と割当てバッファ数

[廃棄率と割当てバッファ数]

パケット網を使用する計算機システムのアプリケーション毎に廃棄率に対する要求が異なると考えられる。そこで、計算機送受信速度比と割当てバッファ数の関係を図3.4に示す。

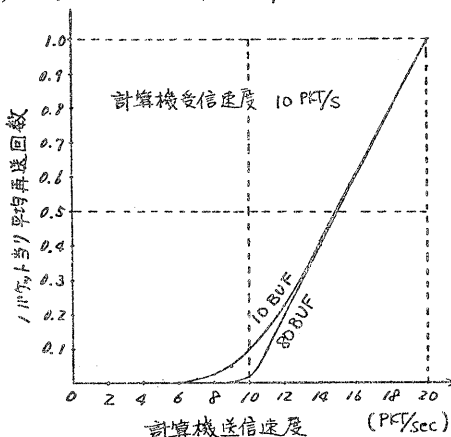


図3.3 平均再送回数と計算機送信速度

この図3.4から計算機は、自分のシステムに合った割当てバッファ数と送受信速度比を得ることが可能である。一え、受信交換機で1つの計算機に割当てることの出来るバッファ量は、最大100バッファ程度と考えられる。そこで、廃棄率を 10^{-8} 程度に抑えるためには、計算機送信速度を受信速度の80%程度に抑える必要がある。

〔計算機間伝送遅延時間〕

計算機間の伝送遅延時間をパケットが網内に最初に送信されてから、受信計算機に受信されるまでの時間と定義すると、それは受信交換機に受信されるまでの再送中時間と交換機内の待ち時間である交換機内送信待ち時間の和である。そこで再送中時間および交換機内送信待ち時間について検討する。

① 再送中時間。

パケットが何回か再送を繰返し廃棄されずに交換機内に受信されるまでの時間が再送中時間である。そこで再送なしに交換機に受信された場合、再送中時間は、0である。平均再送中時間は、 $P_m / (1 - P_m) \alpha$ で計算されるが、 $P_m / (1 - P_m)$ は平均再送回数であり、割当てバッファ数の増大とともに減少することが、図3.3から明らかである。そこで平均再送中時間は、割当てバッファ数の増大とともに減少する。

② 交換機内送信待ち時間。

交換機内平均送信待ち時間は、Littleの定理から平均送信待ち行列長に比例すると考えられる。そこで、図3.5の計算機送信速度と平均送信待ち行列長の関係から割当てバッファ数の増大にしたがって、平均送信待ち行列長も増加し、計算機送受信速度比の大きい範囲では、著しく増加する。そこで、送信待ち時間についても、割当てバッファ数の増大にしたがって、平均送信待ち時間も増加する。

割当てバッファ数と諸量の関係をまとめると図3.6のようになる。図3.7に平均伝送遅延時間と割当てバッファ数の関係を示す。図3.7で特徴的なことは、再送時間が短い場合、最小の伝送遅延を与える割当てバッファ量が存在することである。また、パケットの遅延時間を問題にするような計算機システムでは、パケットの廃棄を少なくするために、割当てバッファ量を増加すると、伝送遅延時間が増加することがあり注意を要する。

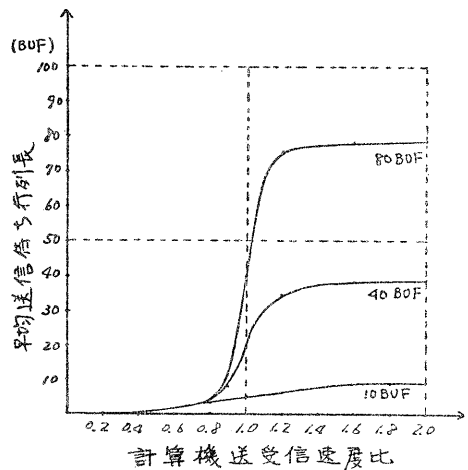


図3.5 計算機送受信速度比と平均送信待ち行列長

図3.6 割当てバッファ数と伝送遅延の関係。

割当てバッファ数	10 BUF	小 → 大	80 BUF
交換機内送信待ち時間	0.4 sec	小 → 大	0.88 sec
廃棄率	10^{-1}	大 → 小	10^{-5}
再送回数	0.1 回	大 → 小	0 回
再送中時間	0.1 sec	大 → 小	0 sec
伝送遅延時間	0.5 sec	← →	0.88 sec

但し 平均計算機入力 9 PCT/sec
 平均計算機出力 10 PCT/sec
 平均再送時間 1 sec

3.3 まとめ

(1) 送信抑圧バケットの必要性。

バッファ割当て方式は、網が規定する網・ホストプロトコル内にフロー制御バケットがなく、計算機・交換機両者の負荷が軽い、計算機送信速度が受信速度以上になると、廃棄率の増大によって網、計算機の処理負荷が増大する。しかし、その状態では、図3.8 せられがとうり、受信回線使用率は定常状態に達するため、受信速度以上に計算機送信速度を上げる意味は薄い。そこで、ホスト・ホストプロトコルで適正な制御がなされ、無駄なトラヒックの生じない網では、網・ホストプロトコルの負荷が軽く、アプリケーション毎にホスト・ホストプロトコルの設計が自由に出来るバッファ割当て方式が良い。しかし、ホスト・ホストプロトコルの適正な動作が期待出来ない網では、ある一定以上のトラヒックが生じた場合、交換機から送信抑圧(WABT)バケットをホストへ送信して、パケットの送信を抑止するような制御が必要となる。

(2) 廃棄率の計算機へ与える影響。

① 計算機通信処理負荷の増加。

再送回数と計算機送信速度の検討から計算機送信速度を受信速度以下に抑えれば、割当てバッファが、10 以上ならば、10%以下の増加である。

② 伝送遅延時間の増加。

1パケット当りの再送回数と比例して増加するが、計算機送信速度が受信速度を越えない限り、割当てバッファが、10 バッファ 以上あれば、再送時間の10%以内の増加である。

③ プロセス送信速度。

再送パケットのためのプロセス送信速度は、送信回線速度まで上昇させることは出来ないが、プロセス送信速度と計算機送信速度の検討から、送受信回線速度が同じ場合には、最大プロセス送信速度は、 $nr/(m+1)$ である。ここで、 r :回線速度、 n :割当てバッファ数。

(3) 割当てバッファ数の決定。

割当てバッファ数を決定する要素には、廃棄率と伝送遅延時間が考えられる。希望する伝送遅延時間を得るために必要な割当てバッファ数を図3.4が

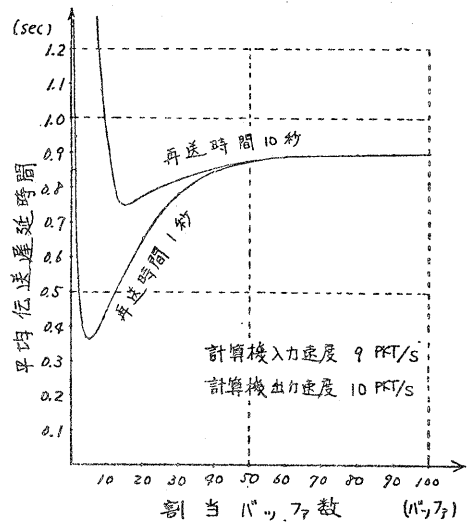


図3.7 割当バッファ数と平均伝送遅延時間

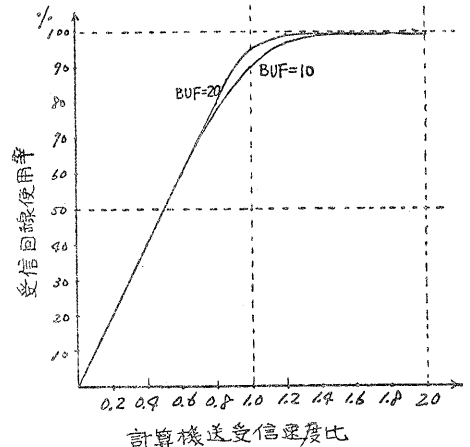


図3.8 計算機送受信速度比と受信回線利用率

う得られる。また、図3.4から希望する廃棄率を得るために必要な最大計算機送受比が、伝送遅延時間により定る割当てバッファから決定される。

4. バッファ割当方式とホスト間フロー制御

前章においてはホスト・ホストプロトコルを設計するための諸特性を求めた。本章ではバッファ割当方式に適するホスト側のフロー制御手法について述べる。

4.1 ホスト間フロー制御方式

(1) 統計的設計

ホストに到着するパケットの率（パケット/秒）とホスト受信可能速度から交換機のパケットバッファの同時保留数を概算し、廃棄率を見込んで割当バッファを契約する。

(2) 呼対応ウィンド方式

相手端末からの確認応答無しに送信することのできるパケットの数を決め、無制限に交換機へ入力しないよう制御する（図4.1）。この送信可能な数をウィンドサイズと呼んでいる。図4.2にウィンドサイズを w とした場合のシーケンスを示す。ウィンドサイズは呼を設定する際に相手端末との間で設定される。特徴として次の点が挙げられる。

- ・通信中の呼に関するウィンドサイズの和の数を交換機にバッファを予約すればパケットの廃棄を非常に小さくすることができる。
- ・着呼が多い場合はホスト内バッファと交換機内のバッファと対応がつかないためパケット廃棄が増える危険がある。したがって着呼を見込んで、多くは交換機バッファを契約するか、あるいは交換機において割当バッファと着呼用バッファを別管理とする必要がある。
- ・1呼あたりのデータパケット数が非常に多い場合には有効な方法である。

(3) ホスト対応ウィンド方式

通信相手が閉域グループにより限定されている場合にはホスト対応ウィンドサイズを設定し、制御することが考えられる。図4.3に例を示す。図中においては3台のホスト（A, B, C）が閉域を構成しており、B及びCからAへの送信制御方法を示す。B及びCのホストは各プロセス共通なウィンドを設定し、信号パケット、データパケットを一括してフロー制御する。

特徴として次の点が挙げられる。

- ・ホストAは交換機内の割当バッファ N を $w_C + w_B$ 契約すれば廃棄は起らない。
- ・閉域が前提であるので一般不特定のユーザと相手とするホストには適用不可である。

4.2 ホスト間フロー制御に関する考察

- (1) 閉域を前提とすればホスト対応ウィンド方式が最もよいと思われる。ウィンドサイズの和を交換機内に契約すれば紛争のない確実なデータ転送ができる。

- (2) 会話形通信が多い場合は統計的な設計で十分である。またファイルトランスファと混在する場合は、ファイルトランスファに呼対応ウィンド方式を適用して一定以上のバッファ保留が起らないよう考慮し、残りのバッファで会話通信を処理するよう考慮する必要がある。
- (3) 呼対応ウィンド方式は着呼パケットに対して対応がつかないので、その分の増加を見償って割り当てるバッファを契約する必要がある。しかし急激な着呼の増加も考えられ、それによる廃棄の確率は残るだろう。
- (4) 交換機はホスト間のフロー制御信号を見ないなので相手ホストがフロー制御を無視してパケットを送って来る場合、他の正常なパケットまで廃棄される危険がある。しかも最終的には網がフロー制御に関与する必要があると来る可能性がある。

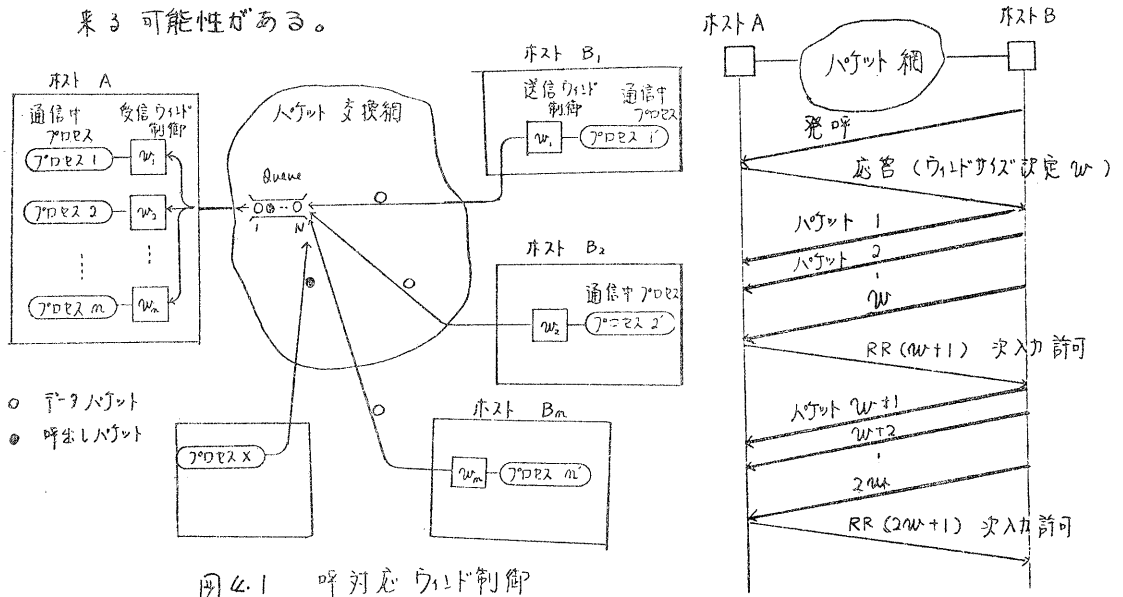


図 4.1 呼対応ウィンド制御

w : ウィンドサイズ。確認応答無しに連続して送信できるパケット数

$RR(w+1)$: w 番目までのパケットの確認、及び次の送信を許可する信号

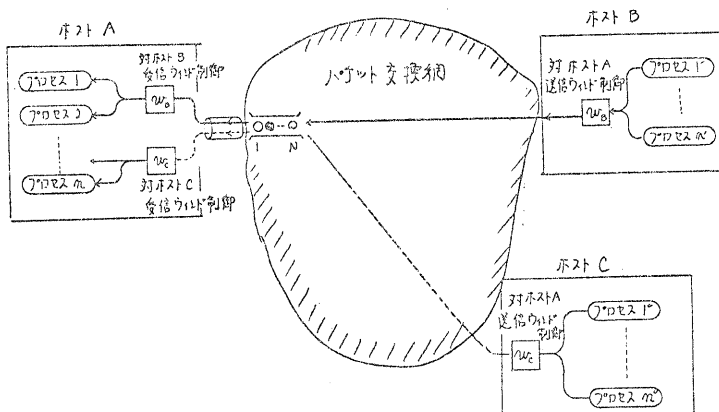


図 4.2 呼対応ウィンド方式
ミ-ケレス 例

図 4.3 計算機対応ウィンド方式

5. あとがき

本論文ではパケット交換網としてバッファ割り当て方式を採用した場合にフロッタラヒック特性の解析及びホスト間フロー制御の対策を述べた。

ユーザのフロー制御に対する要求条件は不明であるので、ユーザのプログラム設計の自由度と網の輻輳防止に注目し、インタフェースが簡単明瞭であるバッファ割り当て方式について考察したが、3章及び5章の検討で示すようにホスト間のフロー制御を適当に選ぶことにより効率よい、パケット紛失の少ないパケット伝送が可能と思われる。

しかしながら一般公報網を前提とした場合、再送によるオーバーヘッドの増加あるいはホスト障害時における廃棄率の増加は問題であるので、今後、如何なるフロー制御信号を用いてホスト間のフロー制御に介入するか、検討の必要がある。

謝辞

終つて本検討にあつた御指導、御協力頂いた関係各位に深く感謝いたします。

参考文献

- (1) Little, J.D.C. : A proof of the queuing formula: $L = \lambda W$, Operations Research Soc. Am., vol. 9, pp. 383-387, 1961
- (2) 伊藤, 他 : パケット交換網におけるフロー制御について, 電子通信学会全国大会, 1975
- (3) M. Ireland : Queuing analysis of a buffer allocation scheme for a packet switch, IEEE, Dec. 1975
- (4) 伊藤, 他 : パケット交換制御方式の検討, 電子通信学会交換研究会 SE76-8, 1976

(付録) 共通バッファ方式とバッファ割り当て方式のスループット

フロー制御を行わない場合のホスト単位のバッファ割当の必要性について付図1のようなモデルで考える。2のモデルでは共通バッファを使用する部分とホスト単位の割当バッファ部分があり、共通バッファ部分が全交換機バッファと等しい時が共通バッファ方式である。交換機の平衡状態を表わすためにベクトル記法を導入する。

交換機内の第 i 方路の送信待行列長が x_i であることをベクトル $X = (x_1, \dots, x_n)$ で示し、単位ベクトルを e_i で表わすとバッファ割り当て方式に関する制約条件は n 個の交換機内存在可能な状態に対応するベクトルの集合 S は以下の通りである。

$$S = \left\{ (x_1, \dots, x_n) \mid \sum_{i=1}^n [(x_i - m_i), 0]^+ \leq m_0 \right\}$$
$$[a, b]^+ = \max(a, b)$$

ここで m_i は i 方路割当バッファ, m_0 は共通バッファである。以上の記法により交換機内に i 方路送信待パケットが x_i 存在する状態を $S(X)$ と表わし、その

状態確率を $P(X)$ とすれば, 状態方程式は次のようになる。

$$\sum_{x-e_i \in S} \{ P(x-e_i) \cdot a_i - P(x) \cdot b_i \} + \sum_{x+e_i \in S} \{ P(x+e_i) \cdot b_i - P(x) \cdot a_i \} = 0 \quad \text{for } x \in S$$

$$\sum_{x \in S} P(x) = 1$$

この方程式の解は以下のようになる。

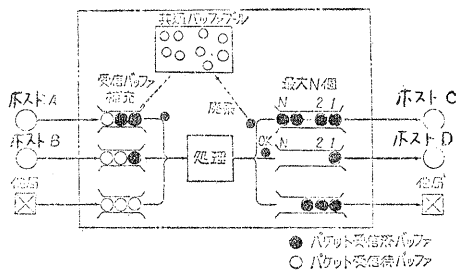
$$P(x) = C \prod_{i=1}^m p_i^{x_i} \quad p_i = \frac{a_i}{b_i}$$

$$C = \frac{1}{\sum_{x \in S} \prod_{i=1}^m p_i^{x_i}}$$

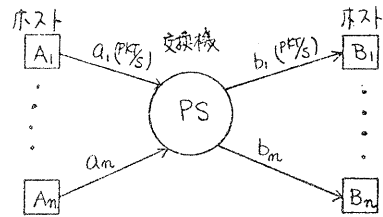
具体的なモデルについて両方式の比較を行なう(付図2)。交換機バッファ数は10とし、バッファ割当方式では、割当数をホストB, Dに各々バッファ割当て、2バッファを共通バッファとする。ホストA, B間にはトラヒック一定としホストC, D間のトラヒックを変化させた場合の交換機スループット, A・B間のスループットは付図3のようになる。

付図3では共通バッファ方式のスループットが過負荷時に低下し、バッファ割当方式の場合、低下していない。理由は共通バッファ方式ではC-D間トラヒックで交換機バッファが全部使用され、A・B間の通信が妨害されるためである。

この結果からフロー制御を行わない場合ホスト毎にバッファを割当てるバッファ割当方式を採用する必要がある。付図4にバッファ割当方式の具体的な制御方式を述べる。同様の結果は参考文献[3]にも報告されている。

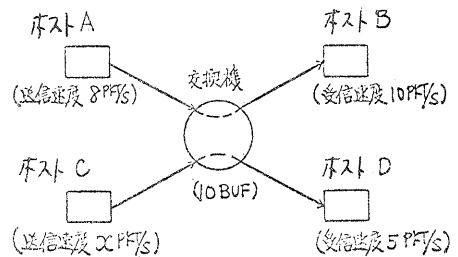


付図4 バッファ割当方式

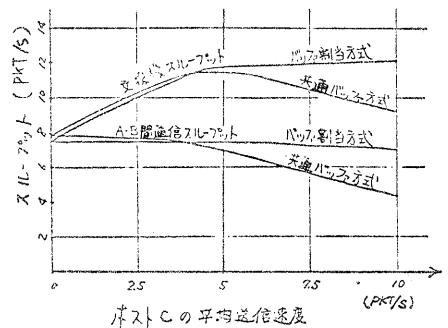


- ① ホスト A_i からホスト B_i へ平均 a_i (PKT/s) のポアソン分布でパケットを送信する。
- ② ホスト B_i のパケット受信時間は、平均 $1/b_i$ (sec) の指数分布にしたがう。
- ③ 交換機内のバッファ管理は、以下の通り。
ホスト B_i に対して m_i バッファの割当バッファ。共通バッファとして m_0 バッファ。
交換機全バッファ数 $N = \sum_{i=0}^n m_i$

付図1 バッファ管理交換機モデル



付図2 簡単なトラヒックモデル



付図3 バッファ割当方式のスループット