

パケット交換網の輻輳制御

上村 邦夫

(日本電信電話公社 武蔵野電気通信研究所)

§1 はじめに

DDXパケット交換網は間もなくサービスを開始し、近い将来大規模な網に発展する見込みである。パケット交換網を拡大するため、局分割・増設等の数多くの検討が進められている。その一環として、複数交換機相互の影響を考慮し、網全体としての挙動を制御するという観点からの輻輳制御方式の確立が必要とされている。

電話網の輻輳制御については古くから研究が進められ、効果的な輻輳制御方式が明らかになってきている。しかしパケット交換網には以下に代表される特徴があり、新たに考え直す必要がある。

- (1)蓄積交換を行なう。
- (2)通信リンク設定後もパケット単位に交換処理を行なう。
- (3)電話網での一加入者に相当するロジカルチャネルを一台の端末で多数持つことができる。

本報告では、輻輳制御の目的「網のスループット*の低下を防止する」を実現するため、各交換機が行なう処理を明らかにした。

§2 輻輳制御の目的

本報告では、輻輳制御の目的を「網のスループットの低下を防止することとした。

網に高負荷が加わることにより網のスループットが極端に低下することは電話網で特に注目された問題である。電話網ではこれを異常輻輳と呼びこの異常輻輳を防止するのを輻輳制御

の目的としている。同じことはパケット交換網でも起り得る。たとえば、ある交換機に処理能力をはるかに越えるパケットが集中したとき、処理能力を越えた分のパケットは周囲の交換機に滞留し、(迂回を行えば、これらのパケットは周囲の交換機をたらい回しにされる)新たな輻輳を引き起こす可能性がある。最悪の場合網全体に輻輳が広がり、網の処理能力の大部分は網から出ることが不可能なパケットの処理に使われるため、スループットは極端に低下する。

網に高負荷が加わった場合、網の処理能力を越えた分のパケットを送ることは不可能である。(しかしスループットが極端に低下するのは防止しなければならない。

§3 前提条件

輻輳制御の機能を実現する上で特に問題になるのは次の二点である。

- (1)ハードウェアで実現するのか、ソフトウェアで実現するのか
- (2)各交換機に機能を分散するのか、網管理センター等に機能を集中するのか

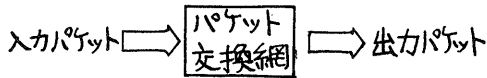
ここでは二者択一の問題として表現したが最適解は両者の中間にあると推定される。この最適解を求めるのは容易ではない。本資料では各交換機に機能を分散しこれをソフトウェアで実現することを前提条件とした。

§4 輻輳制御の基本機能

パケット交換網をひとつのブロックボックスと考え、次の最も単純な

*網のスループットは単位時間当りに網から出カされるパケット数である。

モデルを想定する。



このとき、

$$\text{スループット (出力パケット数)} = \frac{\text{網の処理量}}{\text{出力パケット当りの平均処理負荷}}$$

と表わせる。従ってスループットを最大にするには「網の処理量を上げる」と「出力パケット当りの処理負荷を抑える」の2つの方向がある。

網の処理量を上げる、つまり設備の有効利用を図るには、

1) 負荷分散(能力に余裕のある設備にパケットを分散する)を行なえばよい。

出力パケット当りの平均処理負荷を抑えるためには、

2) 過剰負荷の入力禁止(目的の端末へ届けられないパケットの入力を禁止する)を行なえばよい。

したがって、以上の2つの機能「負荷分散」「過剰負荷の入力禁止」を実現することになる。

§5 負荷分散機能の実現

DDXパケット交換網に適したルーチングアルゴリズムとして迂回方式が採用されている(文献1)。これは宛先交換機ごとにパケットを送出する伝送路とそれを走査する順序が決められており、パケットごとにこの順序に従って送出待行列長を調べ迂回閾値を超えていない(かつ障害でない)最初の出方路を選択する方式である(図1参照)。

この方式により伝送路の負荷が

高くなったときパケットは他の伝送路へ分散される。しかしこの方式では、パケットの迂回先は能力に余裕のある設備(伝送路・交換機)とは限らない。迂回先の設備に能力の余裕があるかどうかのチェックが抜けているわけである。そこで以上に述べた迂回方式の考え方をさらに発展させて、次のように考えることにした。「伝送路・交換機とも一定の負荷(α)になったとき迂回パケットの流入を禁止し、さらに高負荷($\beta, \beta > \alpha$)になったとき迂回を行なう。」

この方式を伝送路・交換機に当てはめると以下のようになる。

5.1 伝送路に対する負荷の分散

伝送路に対する負荷は送出待行列長により評価できる。送出待行列長が再迂回閾値(α_L)に達したときこの伝送路へ迂回してきたパケットは再迂回する。また送出待行列長が迂回閾値(β_L)に達したときは迂回をする(図2参照)。なお、ある交換機で迂回し

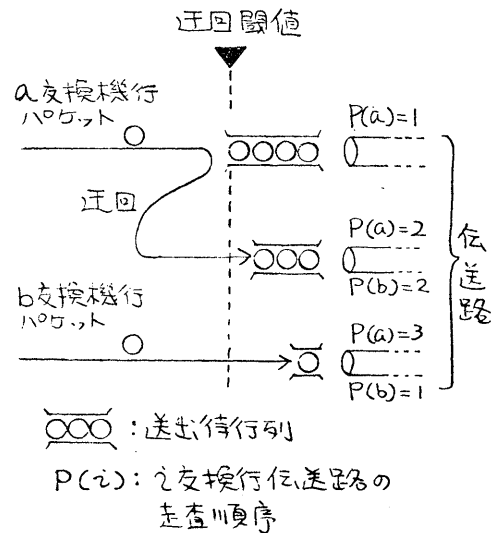


図1 迂回方式(原案)

*この外に「パケットを送るのに直接関係ない処理を中断する」などいくつか考えられるが、スループットの向上に大きな効果はないので検討項目から除外した。

たパケットは他の交換機でも迂回パケットとして処理する必要がある。そこで迂回が生じたときパケットにマークを記入する。(6.2節との関係から迂回・再迂回回数を表示する。)

5.2 交換機に対する負荷の分散

§5の始めに述べたように、交

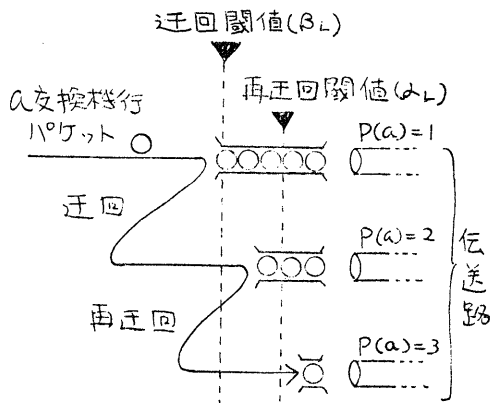


図2. 伝送路に対する負荷の分散

換機の負荷が高くなった場合、隣接交換機で伝送路に対する負荷を分散することによりある程度の負荷の分散は図れる。しかし、以下の点で不十分である。

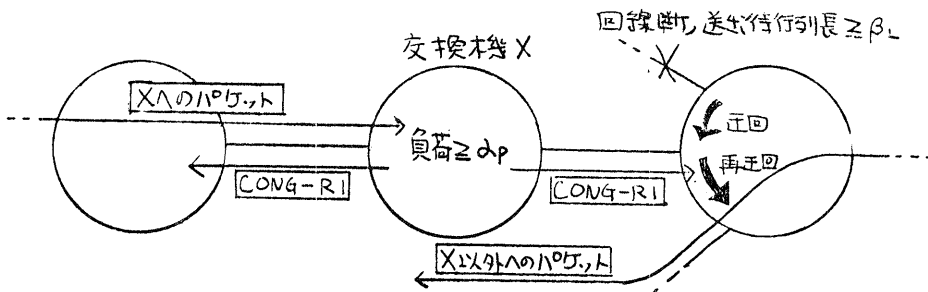
交換機に流入するパケットは次のように分類される。

(1) 自局落パケット (自交換機の収容する端末へ向うパケット)

(2) 中継パケット (他交換機の収容する端末へ向うパケット)

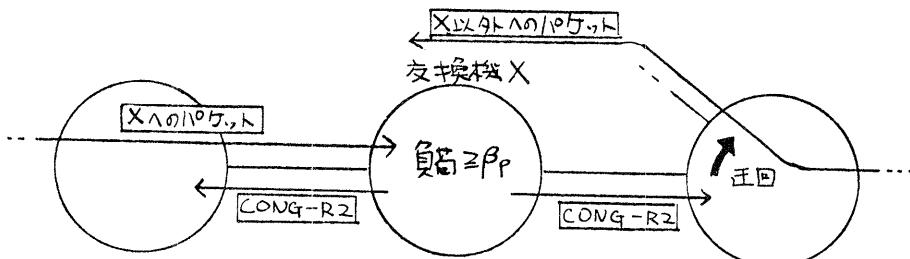
隣接交換機内の送出待行列が迂回閾値に達した場合、この2種類のパケットが迂回を始める。しかし、ある交換機の負荷が高くなった場合に迂回して目的の交換機に到達できるのは中継パケットだけであり、自局落パケットは網内を迷走する。

そこで、負荷が高くなった交換機から隣接交換機へ指示を出すことに



α_p : 迂回拒否値

CONG-R1: 迂回歴のある中継パケットの再迂回指示



β_p : 迂回開始値 ($\beta_p > \alpha_p$)

CONG-R2: 中継パケットの迂回指示

図3. 交換機に対する負荷の分散

する。具体的には、交換機の負荷が高くなり、迂回拒否値 (α_p) に達したときは、迂回歴のある中継パケットを送り込まぬよう隣接交換機に指示する。さらに負荷が増え迂回開始値 (β_p) に達したときは、隣接交換機に中継パケットの迂回を指示する。(図3参照)

また、負荷が迂回解除値 (β_p) 及び、迂回拒否解除値 ($\bar{\alpha}_p$) になったとき、それぞれ隣接局に解除を指示する。

§6 過剰負荷の入力禁止機能の実現

過剰負荷、つまり目的の端末へ届けられないパケットは

- 1) 着局(目的の交換機)へ届けられないパケット
 - 2) 着局に届いたが目的の端末へ届けられないパケット
- に分けられる。さらに、1) は原因により

- 1-1) 着局が過負荷状態
 - 1-2) 網内のいくつかの設備(交換機・伝送路)が過負荷状態又は障害
 - 1-3) 着局が障害(ダウン)
- に分けられる。これらは状況がかなり異なるので分けて検討する。

6.1 着局が過負荷状態の場合

5.3 に示したように、交換機の負荷が α_p を越えると迂回歴のある中継パケットの再迂回を行ない、 β_p を越えると中継パケットの迂回を行なう。

つまり、負荷分散を回っているわけである。(しかし以上を行なった後、さらに交換機の負荷が高ければ、それは収容端末からのパケットと他の交換機から収容端末へ向うパケットが多いためである。この状態で交換機的能力を越えると、越えた分のパケットはこの交換機に到着できない、届く見込みのないパケットを網内に入れると、網内を迷走し新たな輻輳の原因となる。従って、交換機的能力を越えた分を網の入口で止めることがポイントとなる。

網の入口で止めるために、収容端末に入力禁止を指示するとともに、他の交換機にも入力禁止を通知し、各交換機で問題の交換機への入力を禁止する。具体的には、負荷が入力規制値 (γ) に達したとき(負荷が能力を越えてからでは遅いので負荷率100%の手前で)他の全交換機と収容端末へ入力禁止を指示する。(図4参照)

交換機的能力を越えた量の算出は困難であるため、まず自交換機への入力をすべて禁止し、その後徐々に入力禁止を解除し、解除中断値 (δ) を越えたとき解除処理を中断し負荷の減少を待つ。徐々に解除する方法はいろいろ考えられるが、一秒ごとに全交換機数の $1/n$ の交換機と、 $1/n$ の収容端末に解除を通知することにした。

迂回拒否通知から解除までの処理の流れを、図5に示す。

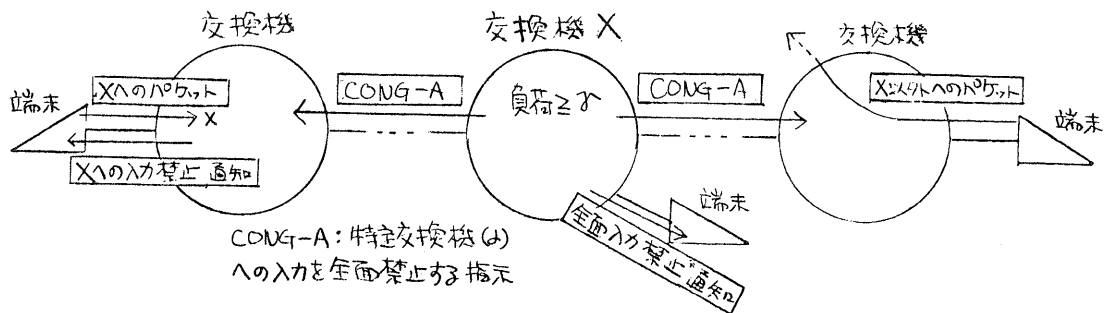


図4. 交換機への入力規制

6.2 網内のいくつかの設備が過負荷状態または障害のとき

パケットが本来通るルート(迂回が一度も行はれない場合に通るルート)上の交換機・伝送路の負荷が高くなったとき迂回が始まる。一度迂回が始まったパケットは、能力に余裕のある伝送路・交換機を求めて再迂回する。無制限の迂回は網をいたずらに混乱させるだけである。そこで、迂回・再迂回回数が迂回制限値(S)に達したとき、また、迂回先の伝送路が無いとき、このパケットを廃棄し、このパケットを送信した局へ通信を禁止する通知を送る。たとえば、X交換機からY交換機へ向うパケットを廃棄したとき、X交換機に対し、Y交換機行きの通信を止めるよう指示する。また一方の通信を止めると、(XからYへの通信)もう一方の通信(YからXへの通信)も意味がなくなる。そこで、Y交換機に対してもX交換機行きの通信を禁止する通知を送る。これらの規制通知パケットは迂回歴無し状態で送り出されるので、さきに、X交換機からY交換機に送られたパケット(再迂回している)が廃棄されているが、Y交換機にも届く可能性がある。しかし、

パケットを廃棄するごとにこれらの規制通知パケットを送っていたのでは、かえってパケットを増やしていることになる(一つのパケットの廃棄に際し二つの規制通知パケットを送る)。そこで、一定時間内は同一のペア(X交換機とY交換機)に対して再度規制通知パケットを送ることはしない。また、この規制通知パケットが迂回制限値(S)に達したときは、パケットを廃棄するだけとする。なお、二つの規制通知パケットのうち、一方が廃棄された場合に備え、通信を禁止している交換機(X交換機から見ればY交換機)からのパケット一つ一つに対し、入力規制を通知する。

規制の解除は、通信できる見込みのある場合にのみ行なうのが原則であるが、どの交換機もこの場合を判定することができないので、規制通知を受けとった交換機でタイミングをとり規制を解除する。

以上の処理の概要を図6に示す。

次に、迂回制限値に達するパケットが出た場合の網の状態を考察してみる。もし迂回パケットが多量に発生網全体を回ったとすると、負荷の少ないところへ再迂回するため、すべての

交換機の負荷

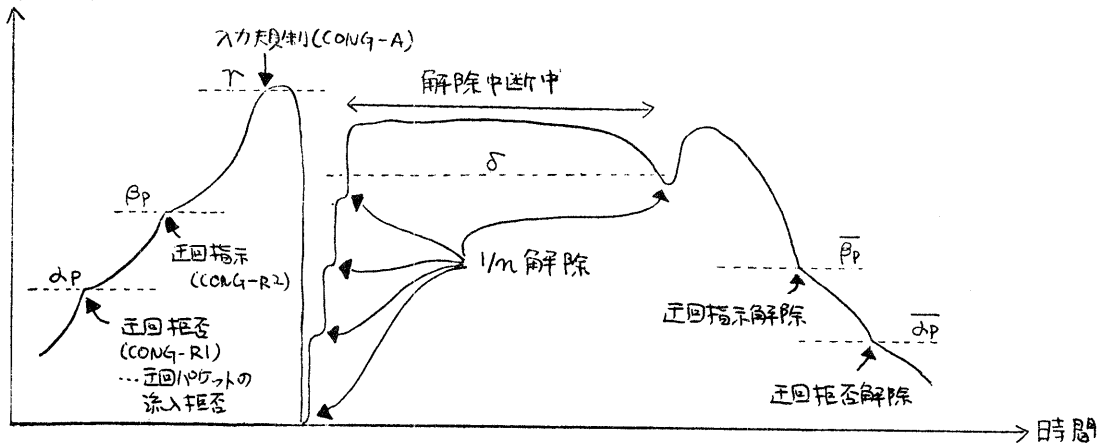


図5 交換機の輻輳制御処理の流れ

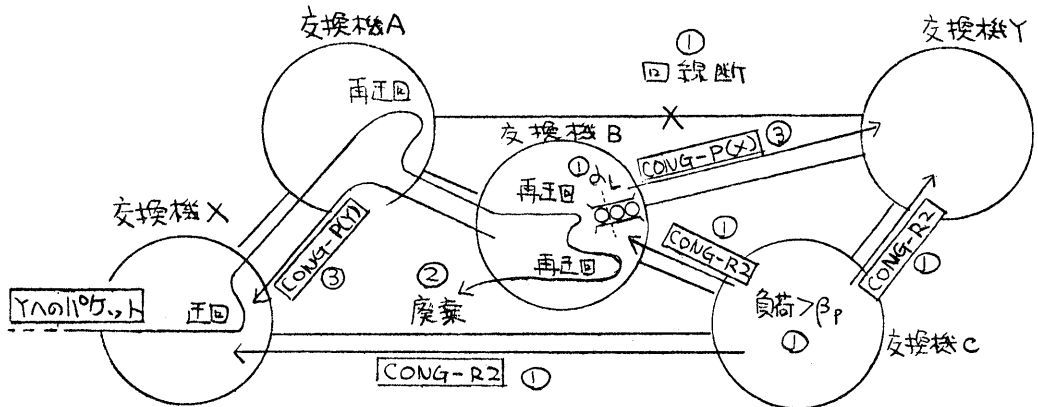
伝達路は最低でも再迂回開始値 (α_L) の負荷がかかり、またすべての交換機は最低でも迂回拒否値 (α_P) の負荷がかかる。従って、このとき別の原因で迂回が始まれば、このパケットも必ず迂回制限値にかかる。つまり、一度も迂回しないパケットだけが通れる状態である。このとき、迂回パケットによる負荷で、本来迂回しないはずのパケットまで迂回を始めることがあるが、ひとつの重要な問題である。

α_L, α_P までは、伝送路・交換機の能力に余裕があり迂回パケットを受け付けても良い状態であるから、上記の問題は起きないはずである。また、

負荷が α_L, α_P に達すれば、迂回パケットの流入は止まる。しかし、伝達路の場合で考えてみると、 α_L に達し、迂回パケットの流入が止っても、それまでに流入したパケットが送信待行列の外に残っているため、完全に迂回パケットの影響が無くなったわけではない。これらを考慮して、 α_L, α_P と β_L, β_P の値を決めなければならぬが、詳細な検討は今後の課題としたい。

6.3 着局が障害の場合

着局が障害になったとき、この交換機へ向うパケットはその周囲の交換機を迷走する。この迷走を極力防止するため、隣接局（着局と伝送路によ



CONG-P(i) : i 交換機行きの通信を(一定時間)止める指示

[説明]

- ① 迂回が生じない場合 交換機 X から Y に向うパケットは X → C → Y と通る
- ② 交換機 C の負荷が迂回開始値 (β_P) を超え、交換機 X, B, Y に 迂回パケットの迂回指示 (CONG-R2) が出たとする。
 - ・ 交換機 B から Y へ行く回線の送出待行列長が「再迂回開始値 (α_L)」を超えたとする。
 - ・ 交換機 A から Y へ行く回線が「障害」とする。
- ③ このとき、交換機 X から Y へ向うパケットは 迂回・再迂回をくり返し、交換機 B 内で「放棄」される。
- ④ 交換機 B から X へ Y への通信を一定時間止めることを指示する (CONG-P(Y))
 交換機 B から Y へ X への通信を一定時間止めることを指示する (CONG-P(X))

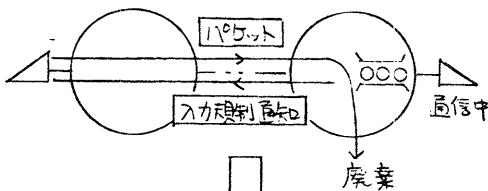
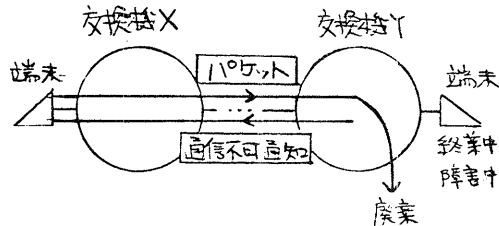
図6 網内のいくつかの設備が過負荷状態または障害になったときの入力規制

り直接接続されている交換機)で迂回再迂回が発生したときは、1回の迂回再迂回を u 回($u > 1$)とカウントする。

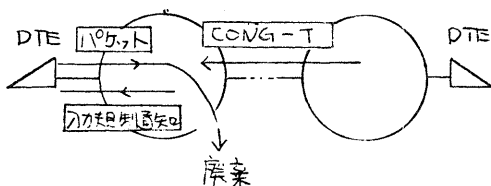
具体的に入力規制処理は、6.2で示した方式による。

6.4 端末に届く見込みのないパケットの入力規制

端末を網(收容交換機)から見たとき、状態は、終業中・障害中・通信中に大別される。終業中・障害中の端末へ向うパケットは届く見込みがないことが明らかであり、到着したパケットがあれば廃棄され、その送信元の端末へ入力不可が通知される。通信中



- ・ 廃棄パケット数/単位時間
が一定値以上
- ・ 交換機Yが高負荷



CONG-T: 特定端末への入力規制通知

図7. 端末へ届く見込みのないパケットの入力規制

の端末に対しては、到着パケット数の平滑化をねらいとして、WABT方式による、網と端末の流量制御が行なわれている(文献1)。これは端末への送信待行列長が一定値に達したとき、新規に到着したパケットを廃棄し、送出元の端末へ入力規制を通知する方式である。

廃棄され入力規制が返送されるパケットが少ないときは、以上の方式で特に問題はない。しかし大量に発生し、かつ着信側の端末を收容する交換機が高負荷となったときは、網の入口で規制する必要がある。つまり、全交換機へ通知し、該当端末への入力パケットを規制する。具体的処理を図7に示す。

§7 まとめ

本資料では、輻輳制御機能を各交換機に分散し、ソフトウェアで実現することを前提条件として、輻輳制御の目的「網のスループット低下の防止」を達成するための処理を求めた。

- スループットの向上を図るには、
- (1) 負荷分散(能力に余裕のある設備にパケットを分散する)
 - (2) 過剰負荷の入力禁止(目的の端末へ届けることが不可能なパケットの入力を禁止する)

の2つの方向があることを示した。

これを更現するための基本機能として、

- (1) 伝送路・交換機が高負荷(β)になったとき、迂回を行なう。
- (2) 伝送路・交換機が一定の負荷(α , $\alpha < \beta$)になったとき、迂回パケットの流入を禁止する。
- (3) どの伝送路・交換機からも流入を禁止されたパケットを届く見込みのないパケットと判定する。

の3つを考え、これらを適用した具体的なアルゴリズムを示した。

§8 今後の検討課題

本資料で求めたアルゴリズムの定量的な評価とパラメータ値の決定を進めるとともに、網管理センター等の導入についても検討を進めていきたい。

[謝 辞]

本検討に対し、多くの有益な助言と御指導をいただきました、松本室長、奥田調査役をはじめとするパケット交換研究室の皆様へ感謝します。

[参考文献]

- (1) 竹中市郎・与井満・大西広一
「DDX-2パケット交換網のトラヒック制御」研究実用化報告
Vol. 26, No. 11, 1977
- (2) 上村邦夫・金牧一夫・一色耕治
「パケット交換網の網品質の検討」
信学会交換研究会資料 SE78-87
, 1978
- (3) SIMON S. Lam
"Congestion Control of Store-and-Forward Networks by Input Buffer Limits" IEEE TRANS.
of COM Vol. Com-27. No. 1
, 1978