

# 電話網の混雑現象と輻輳制御

小沢 利久

電話網の異常輻輳は、回線系の輻輳により非常に多くの再呼が発生し、それが制御系の輻輳を引き起こすことで起きると考えられています。このメカニズムを待ち行列モデルをベースにして見ていきます。併せて、移動体電話網やインターネットとの類似点についても考えてみます。

キーワード：混雑現象、輻輳制御、電話網、待ち行列

## 1. はじめに

地震などの災害時やチケット予約のときなど、混雑のために電話がなかなか掛からなかったという経験をした人は多いと思います。混んでいるから掛からないといわれてしまえばそれまでですが、どのようにして掛かりにくくなるのかを待ち行列モデルを使って少し詳しく見ていきたいと思います。携帯電話やインターネットの時代に今さら電話の話と思う方もいるかもしれませんが、それらとの比較もしてみたいと思います。ただし、以下の話は標準的な内容ですので、電話会社が行っていることとは少しずれがあるかもしれません。

## 2. 電話網の仕組み 一回線系と制御系

ここでは、相手と通話ができる状態になることを「電話が繋がる」ということにし、電話が繋がる仕組みを簡単に説明します。電話機は加入者回線を介して最寄りの交換機に接続されており、交換機間は共用の中継回線で結ばれています(図1)。電話が繋がるとは、交換機間の中継回線を順次捕捉しながら相手側の電話機との間に通信路が設定されることを指します。

この通信路を設定するためには、相手電話番号を分析して、次にどの交換機との間の中継回線を捕捉するかを判断し、その指示をする必要があります。その判断と回線捕捉指示のために交換機にはコンピュータが付いています。さらに各交換機は電話番号を含む様々な情報を交換機間でやり取りするために共通線信号網というネットワークに接続されています。電話網のた

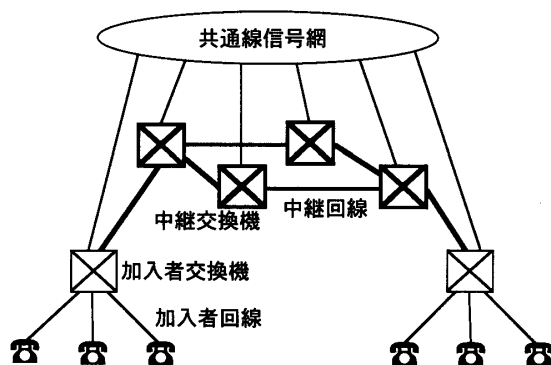


図1 電話網

めの特別なコンピュータネットワークと考えて下さい。このように、電話網は回線系システムと制御系システムから成り立っています。

## 3. 設備設計 一即時式と待時式

電話を掛けたいという要求を満たすためにはそれに見合った設備を用意しておかなければなりません。標準的な方法では、一日の内で最も電話の利用が多い一時間(最繁時間帯)を選び、その時間帯で、予め決められた設計基準を満たすように設備を用意します。これを設計容量ということにします。電話網には回線系と制御系がありますので、それぞれに設計容量を決めておく必要があります。

回線系では中継回線が設計対象の設備となります。通話中は捕捉した中継回線を占有して使いますので、設備の必要量は最繁時間帯における通話時間の総和を基にして算出します。単位時間あたりの通話時間の総和を呼量といいます。回線数の算出には待ち行列モデル  $M/G/S/S$  が使われます。これは即時式のモデルと呼ばれ、サーバ(回線)が空いていればそれを使い、空いていなければ即退去する(接続が拒否される)モ

おざわ としひさ

駒澤大学 経営学部

〒154-8525 世田谷区駒沢 1-23-1

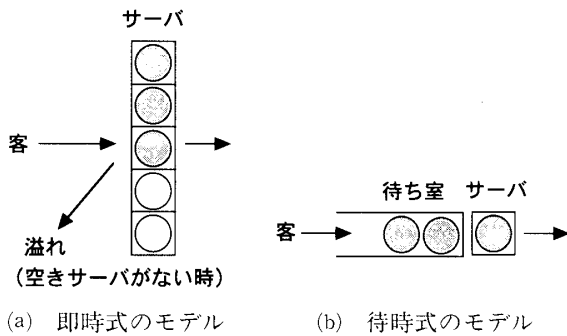


図2 即時式と待時式

デルであり、「待ち」がない待ち行列モデルとなっています(図2(a))。即時式という仕組みは実際の回線捕捉制御の方法をそのまま反映したものです。設計基準は接続が拒否される確率(呼損率)を用い、有名なアーランB式によってその呼損率を計算します。

制御系では、交換機の制御部分と共通線信号網の両方を考えないとはいけません。ここでは前者だけを見てみます。交換機の制御部分はいわゆるコンピュータですので、コンピュータの処理能力やメモリ容量の設計が設備設計に相当します。処理は回線の接続要求毎に発生しますので、最繁時間帯における接続要求の数(これを呼数といいます)を基にして算出します。算出用の待ち行列モデルにはこれという決定版がないのですが、ここではM/G/1を使うとしておきます(シングルプロセッサを想定しました)。M/G/1は待ちのあるモデルであり、待時式のモデルと呼ばれています(図2(b))。設計基準には平均応答時間などが使われます。

ここで、回線系と制御系の設計容量の関係について触れておきます。複数の部分から成るシステムでは、どこか一部が初めに能力的限界に達するよう設計することがあります。そのような部分をボトルネックといいますが、電話網では一般に回線系がボトルネックとなるように設計されています。

#### 4. 異常輻輳と再呼

何らかのサービスを提供するどのようなシステムでも、そのシステムが単位時間当たり提供できるサービスの量には上限(処理能力)があります。電話網の場合はそれが設計呼量と設計呼数によって決まっているわけです。設計呼量、設計呼数とも通常時の最も混雑している時間帯を基に設定されていますので、何らかの要因で通常でない量の通話要求が発生すれば当然それを処理しきれない状態になります。設計負荷を超

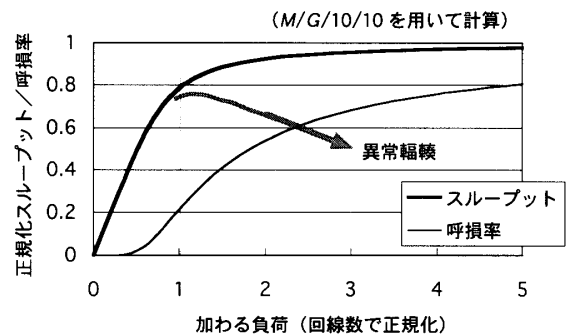


図3 スループットと呼損率

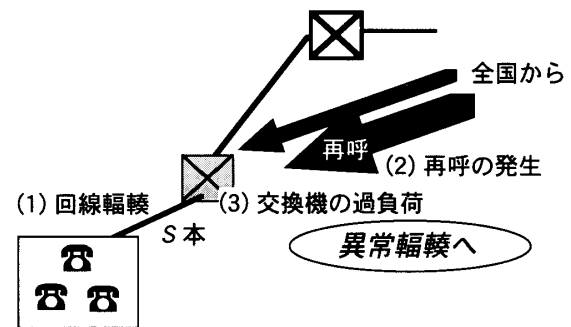


図4 電話網の異常輻輳

えたという意味でこれを過負荷といいます。

単位時間当たりの平均通話完了呼数をスループットということにします。過負荷によってこのスループットが大きく低下した状態が異常輻輳です。ここで、輻輳に「異常」と付けたのは、単に混雑(輻輳)しているだけではないという意味を込めています。ところで、待ち行列モデルを使って確かめられるように、負荷(加わる呼量)をゼロから増やしていくとスループットは初めそれに比例して増加し、その後、設計負荷のあたりで頭打ちとなり、後はほぼ横ばい状態となります。図3に、M/G/S/Sの場合を例として示しました。図には呼損率も並記してあります。負荷が非常に大きくなってもスループットは維持されているのが分かります。しかし、実際には、M/G/S/Sのモデルでは考慮されていない要因によって、スループットそのものが低下していきます。その様子をチケット予約センターが収容されている交換機の異常輻輳を例に見てみます(図4参照)。

予約受付開始時間頃から電話がかかり始め、その数が徐々に増えてきたとします。S本の予約受付回線が設定されている場合は受付電話回線の使用状況をM/G/S/Sでモデル化できますので、スループットや呼損率は負荷に応じて図3のようになると考えられます。ここで、交換機が回線系と制御系で構成され、それぞ

れに設計容量が決められていたことを思い出して下さい。回線系は制御系の指示に従い空きがあれば繋げ(サービス受付)、なければ何もしないという単純な仕組みとなっています。そのため、負荷が大きくなっても回線系が要因でスループットが低下することは通常ありません。それに対して制御系では、全ての接続要求をいったん受け付け、繋げる/繋げないの判断をしないといけません。制御系がボトルネックにならないように設計されていればそれだけ処理能力に余裕がありますので、通話要求が増えても、その範囲内であれば問題なく処理できます。

しかし、ここで回線系が即時式であることのデメリットが現れます。空き回線がなければ直ぐに話中音が返され、ユーザはそれを聞いて直ぐに掛けなおすということが短い周期で繰り返されることになるからです。このような掛け直しによる通話要求のことを**再呼**といいます。再呼が発生すると、本来であれば一回で済んだ制御系の処理がその何倍にもなる可能性が出てきます。そして、それによって交換機の制御系が過負荷となり、接続要求を全て処理することはできなくなってきます。さらに回線の接続指示も満足に出せなくなり、結果として回線系のスループットも低下していきます。最悪の場合は、制御系がダウン(交換機のダウン)となることもあり得ます。制御系のスループットが低下する仕組みは複雑なようで詳しい所は分かりませんが、処理要求をたくさん取り込み過ぎて処理がうまく回らなくなった状態のようです。待ち行列モデルでいえば、 $M/G/1$ でトラヒック密度が1に近付いて待ち行列長が非常に長くなった状態を想像してみるとよいと思います。

地震などの災害時に起きる異常輻輳も、「回線系の輻輳」→「再呼」→「制御系の過負荷」→「電話網の異常輻輳」という経過をたどると考えられます。電話網の異常輻輳を「回線」がパンクするということがあるようですが、正しくは、「制御系」=「コンピュータ」がパンクしているわけです。また、現象面だけで見ると、DoS攻撃<sup>1</sup>を交換機(サーバ)が受けてサービス低下やサービス停止に陥るのが異常輻輳と捉えることができます。電話網における交換機の輻輳とインターネットにおけるサーバの輻輳はよく似たものといえます。

<sup>1</sup> Denial of Service attack のこと。非常に多くのホストから特定のサーバへ同時にアクセスすることで通常のサービスができなくなるようにすること。

## 5. 輻輳制御 —接続規制—

図3より、回線系のスループットは負荷が大きくなるほど上がっているのが分かります。このことから、制御系が過負荷とならない範囲でより多くの通話要求(再呼も含めて)があるほど結果的により多くの人が通話できると考えられます。例えば、「掛からない時には少し待ってから掛け直す<sup>2</sup>」ことにより再呼する間隔が適度に広がれば単位時間当りの総再呼数も押さえられ、過負荷にならないでかつスループットを高いままで維持できます。ただし、それを電話を掛ける人に頼るのは難しいでしょう。なぜなら、繋がるかどうかランダムに決まるのであれば掛け直す回数が多いほど繋がる可能性は高くなり、頻繁に掛け直した方がより有利となるからです(問題設定にもよりますが、非協力ゲームとして捉えれば、全ての人が頻繁に掛け直すという戦略の組が均衡点になります)。

そこで、電話網では**接続規制制御**[1]を行っています。これは輻輳交換機または輻輳地域への接続要求を電話網の入り口に当たる交換機で規制するものであり、 $t$ 秒当たり一つ通話要求を通す仕組みとなっています(図5)。 $t$ の値は輻輳の状況や輻輳交換機の設計負荷に応じて調整されます。電話網の入り口で規制するのは極力無駄な処理をしないようにするためですが、電話網の制御系をサーバの集まりと考えれば、サーバの負荷分散に当たる制御をしていると見ることもできます。輻輳交換機(輻輳サーバ)が受け持っていた接続制御の処理を他の交換機(サーバ)に割り振っているのです。

## 6. 電話/携帯/メール

今までの話をもとにして、どのような通信手段が輻

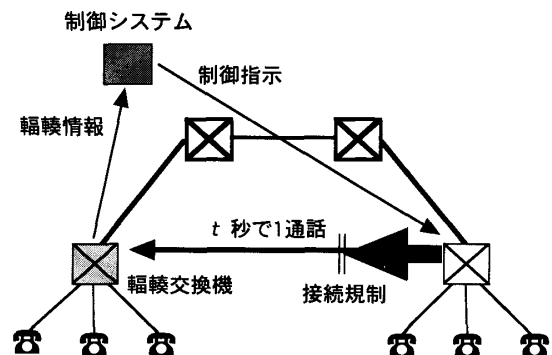


図5 接続規制制御

<sup>2</sup> 状況にもよりますが、少し待ったからといって掛かりやすくなるということはありません。

輻しにくい、あるいは異常輻輳になりにくいのかを一般論として考えてみたいと思います。

まず、どのような通信手段を支えるシステムにも処理能力の限界があり、その範囲内でしかサービスは提供できません。混み具合はシステムの処理能力とそれを利用する人数の比で決まりますから、その意味では前者に比べて後者が少ない通信手段ほどよいということになります。

電話の接続という点では通信路が有線か無線かの区別はありません。固定電話でも中継回線が無線で構成されているといったことがあります。携帯電話はアクセス部分（端末とネットワークを結ぶ部分）に無線を取り入れた電話ですから基本的には固定電話網と同じように輻輳する可能性があります。また、携帯電話のネットワークには、位置登録など、端末の所在を登録したり、調べたりするための機能が一種のコンピュータネットワークとして構成されていますのでその部分が輻輳する可能性もあります。携帯電話のネットワークも固定電話のネットワークと同様に、異常輻輳になりにくいかどうかはしっかりとした輻輳制御機能が備わっているかに依存しているわけです。

次に、インターネットを通信手段として使う場合を考えてみます。インターネットについては、データ通信の輻輳とサーバの輻輳に分けて考えるのがよいでしょう。前者についてはTCPによるフロー制御（単位時間当たりに送りだすデータ量を送り側のコンピュータで調整する機能）によってルータ（パケットの交換機）が輻輳しないようになっています。詳しくは本特集号の記事[2]を見て下さい。後者については「即時型サービス」と「待時型サービス」に分けて考えてみます<sup>3</sup>。ここで、「即時型サービス」は即時の応答を求めるサービスを指すことにします。Webページによる情報の提供や商品の注文がその例となります。「待時型サービス」は即時の応答を求めないサービスを指すことにします。例としては電子メールが挙げられま

す<sup>4</sup>。

即時型サービスについては、サーバの混雑によりなかなか応答が返ってこないとユーザが再度同じ要求を出す可能性があります。混雑度に応じてどの程度の平均応答時間になるかは待ち行列モデルを使って評価できますが、いずれにせよ、再度の要求の発生は再呼の発生と同じ意味を持ちますのでそれによってサーバが過負荷となり、結果として異常輻輳に陥る危険があります。これに対して、待時型サービスではそのサービスの特性上、再呼の発生に類似した現象は起らないと考えられます。例えば、電子メールでは、メールを送受信するサーバ（メールサーバ）やネットワークが混雑すればメールが相手側に届くまでの時間は伸びますが、交換機の異常輻輳のような現象は起きないと考えられます。電話のサービスではありますが、NTTの災害時伝言ダイヤルサービスも待時型サービスの特性をうまく利用したサービスであるといえます。

## 7. おわりに

地震が起きたらどの通信手段を用いればよいかの答えを出そうとも考えましたが、中身も環境も日々変わっている状況ではそれは無理なことでした。ただし、考えるためのヒントは示せたのではないかと思います。

待ち行列モデルはサービスの提供とそこで発生する混雑現象を分析するための基本モデルです。この記事ではその待ち行列モデルを通信網、特に電話網の異常輻輳現象を説明するための概念モデルとして用いました。さらにそのモデルを解析することで定量的な評価も可能になることを付け加えておきたいと思います。

## 参考文献

- [1] 岡田忠信：ネットワークアーキテクチャ，電気通信協会，1994.
- [2] 石橋，川原：TCPフロー制御における帯域共有のモデル，本誌特集号，2004.

<sup>3</sup> サーバが要求を処理する仕組みは交換機の制御系と同様に待時式のモデルで表されますが、ここではユーザとのやり取りの時間的推移から分類しています。

<sup>4</sup> 若い人たちの携帯メールの使い方は考慮していません。