

電気通信網の複雑化とその理解

下川信祐

ATR光電波通信研究所

〒630-02 京都府相楽郡精華町光台2の2

E-mail: simogawa@atr-rd.atr.co.jp

要旨 通信網の本質を捉えることは容易ではない。一方、網の発達に伴って複雑性が拡大し、従来技術の困難として顕在化した。この困難は、従来技術との関係から網の本質の所在を示唆している。そこで、通信網とこれを支えるトラヒック技術に生じた複雑性の困難を分析し、その示唆に基づいて、網の発達が従来技術の基礎である輻輳論と独立であることを示した。更に、網発達の分析によって、網の能力を捉える視点としてシステムの‘可能性’を導入し、網の能力の一般的構造を直感的に論じた。また、応用として、従来の輻輳論で困難であった経験的設計則‘平等性’のメリットを明らかにした。

1. はじめに

通信は、相異なる複数のプロセスを前提とする。通信の普遍性は、このようなプロセスが豊富にあることに基づく。一方、多数のプロセスがあって、各通信のコストが無視できないとき、通信の集合体を処理する効果的な仕組みを要する。これが通信網である。

電気通信網は古くからある重要なシステムである。電話網の大規模さ・身近さ、データ通信網と産業の結び付き、インターネットの魅力等、詳細を述べるまでもなく通信網の存在や重要性はよく知れ渡っている。また、電気通信網は、大規模システムであるだけに、どのように効果的かという合理性が求められる。

合理性の要件を伴う重要なシステムであるにも関わらず、通信網を捉える一般理論は知られていない。これは主に次の二つの理由による。第一に、実は、通信網の概念は捉えにくく理論化し辛い。これは、実体において全てがコストに還元しうるため、網の背景である‘コスト’という視点では、殆ど何も捉えられないことによると考えられる。第二に、少なくともこれまでは、網そのものの理論を展開する必要性が少なかった。実際、基本的な仕様や設計の骨格は状況に応じて経験的に策定したものが適用でき、捉えにくい通信網の働きや意味を理論的に考える必要がなかった。

一方で、網を実際に設計・運用していく途上で問題が生じ、網に特徴的な枠組みが開発された。今世紀初頭にE.K.Eirangによって考案され、混雑回避や適性設備量算出の基礎となった待ち行列理論である。設計者によって考案される網やサブシステムの各方式に対して、評価者が待ち行列モデルを作成し、混雑一資源量特性（輻輳特性）を得て、適性な方式・運用法が決められてきた。これをトラヒック技術と呼ぶ。ただ、これはあくまで、設計・運用の過程で生ずる問題解決用の技術である。網に特徴的な枠組みではあっても、網そのものを捉えようと

するものではなかった。

近年、情報処理技術の進歩を背景に、通信網は飛躍的発展を目指している。一方、これに伴い、網をとりまく状況は複雑化し、方式・仕様の策定・考案と輻輳特性評価を繰り返す従来の方法は、次第に困難となってきた。

この困難さは、当初、複雑化に伴う手間の増大と考えられた。評価者は、考案される複雑な方式に対しても、パラメータを増やし組み合わせを複雑にした待ち行列モデルをたて、計算機を用いた辛抱強い解析や高次で動的な統計量の導入で、その方式の能力を特徴付けることが可能と考えてきた。しかし、この目標に到達できないだけでなく、絶望的な時間を要する評価や、説明のできない経験的設計則が現れてきた。また、最近になって収集が進んできた新方式のためのデータの中には、従来の設計・運用法や待ち行列理論が想定してきた基本仮定を破綻させる、著しく複雑な統計的特性を持つものが見いだされはじめた。

こうして、通信網の発達に伴う困難は著しく、これまで通信網を支えてきた技術の基礎をも破綻させることが解かってきた。現実問題としては、これに代り得る枠組みが必要だが、長年用いられた枠組みであり、また問題も‘複雑化’と捉え難く、代案は容易に見いだせない。

困難の状況は、一見、悲観的に映る。しかし、著しい問題の出現は新しい知見への好機である。即ち、視点を待ち行列理論やトラヒック技術から通信網に戻したとき、従来枠組みの破綻は、通信網に特徴的な何らかの構造が明確な対象（待ち行列理論）との食い違いを起こしている可能性がある。もしそうであれば、従来方法・理論の困難を通信網の視点から追及することによって、捉え難い通信網そのものに迫ることが期待できよう。結果として、困難を打開する手掛かりも期待できよう。

本稿では、このような狙いに従って、網に生じてきた複雑化の困難の構造を分析し、通信網の能力を捉える概念の探索を試みる。2-6節は網と生じた困難を解説する。2節では、最も基本的な電話網を例に、通信網を概観する。3節では、網の設計と運用を支える技術である、トラヒック技術の基本的役割と概要を示す。4節では、トラヒック技術の一般化である輻輳論のシステム評価の方法を述べる。5・6節では網発達に伴って生じてきた困難を述べる。7節では、困難の分析から輻輳論の限界を観察し、この示唆に基づいて網の能力把握における輻輳論の限界を明らかにする。8節では、網の発達を分析し、日常の標語通り、網形成・網発達の要点が自由性にあることを確認する。9節では、通信に対する‘可能な実現の豊かさ’としての自由性が網の能力を決定することを指摘し、その構造を抽出してシステムの可能性と呼ぶ。10節では、可能性の概念・視点に基づき、通信網の能力の構造を直感的に議論し、網の能力を決定する要因が輻輳と仮想性からなることを導く。最後に、可能性の応用として経験的設計則‘平等性’の問題を論じ、輻輳論では表現困難であったトークン保留時間短縮のメリットを抽出し、平等性の意味を明らかにする。

研究会報告

2. 電話における網

まず、最も基本的な電気通信網である電話網を例に、構造からその働きを吟味し、役割を特徴付ける。

構成的な解釈

電話網は通話サービスを行うシステムである。しかしこのような仕様の定義は、仕様に使われる概念が抽象的であり、既に何らかの背景を仮定しているため解かりにくい。ここでは、具体的に固定的なものから出発して網を構成から吟味する方法を取る。

網の構成

網は端末、交換機、これらを結ぶ通信回線によって構成される。交換機（の協調処理）は、次の三つの基本機能を担う。

スイッチ：文字通り通信回線の接続関係を切り替えるものである。

呼処理：端末からの通信要求に応じて通信可能な状況を作り出す、若しくは不能な状況かを通知する一連の処理をおこなう。即ち、通話相手まで空き回線を探して切替指示し、且つ通話相手を呼び出す。また通信終了後、回線等の使用状況を空きに戻す。

課金：通信状況に応じて料金をカウントする。

網が提供する通信の空間C

電話網は上記の構成によって通信を効果的に提供（サービス）している。その効果を網が提供する通信を基に分析する。即ち、全端末間の相互の通信全体

$$C = \{(a, b), a, b \in T\}$$

を考える。ここでTは端末の全体、(a, b)はaによって要求されるbへの通信を表す。Cの大きさは、大きなNに対して

$$\text{Card}(C) \sim N^2,$$

$$N = \text{Card}(T),$$

と見做せる。ここでCard(●)は集合の要素の数(濃度)とする。

スイッチの効果

スイッチの導入によって、Cを支える通信回線が完全グラフから星型グラフへ移行でき、これによってCを提供する網の必要回線Rの規模が、 N^2 から、

$$\text{Card}(R) \sim N,$$

へと削減される。これは、自明な議論であるが、重要な仮定を用いている。即ち

(SW) ユーザは同時には一人の相手のみと通信する。従って、スイッチの直接の効果である $N^2 \rightarrow N$ は通話相手（着呼者）間の共用による。(SW)は決定性の条件であり、この仮定のみに基づく共用は複雑な制御を要しない。

呼処理を加えた効果

呼処理は通信回線の空き状況を判定し通信回線を設定する。この機能は、網の階層化により、上層（中継回線束）を共用できる。この共用は、

(SM)ユーザは間欠的(日常語の意味で)に通信する。

という仮定に基づいている。端末利用率 α に応じて中継回線が削減され、Rをさらに小さくする。(SM)は‘間欠性’という曖昧な要因(非決定性)を含み、これを利用するために、空き回線の順次捕捉という大規模な制御と、混雑を回避させるトラヒック技術(後述)を要する。

以上から、網は、スイッチと呼処理によって、通信の集合体が設備を共用する働きを担うことがわかる。

課金方式の効果

一方、課金の機能そのものは自明であるが、意味は深い。まず、課金はコストの負担方法を規定している。すなわち、共用する設備(回線など)費用を利用度に応じて負担する方法である。利用度見合いのコスト負担によって低利用のユーザにも妥当な費用となり、通信の利用機会を増やし、またユーザ間で公平な負担となる。ここに公衆通信網としての電話網の特徴がある。逆に、利用度見合いのコスト負担が適性である理由は、(SM)による共用にある。従って、利用度見合いの課金は、回線捕捉制御とトラヒック技術が必要とされる背景でもある。

網の役割

網の意味を明確にするため、網の役割をブラックボックス的にまとめれば、次のようである：

(Net-1) C全体を提供する

(Net-2) 設備量を減ずる

(Net-3) 利用度見合いのコスト分担を可能にする

である。これらを、非決定性を許容する共用によって実現している。また、その前提にはユーザの通信挙動(SW)、(SM)がある。なお、トラヒック技術と呼処理を用いれば、(SW)の条件をある程度流動化できる。従って、(SW)の決定性は網成立の必要条件ではない。

ユーザ

網を構成的に分析するために設定した電話網の各要素、端末、交換機、回線、という構成自体、ユーザの通信挙動と深い関係にある。従って、網の要素としてユーザを付け加える必要があるが、他の要素の明瞭性に比べ圧倒的に捉えにくい。具体的、固定的な要素から順次理解する立場からは、他の固定的構成要素と対等に考える事はできない。一方、系の主要点を固定的構成要素に置き、ユーザを環境と捉える立場が考えられる。しかし、網はユーザの通信のためにあるシステムであり、ユーザの通信挙動こそ網の内容であって、環境という把握はそぐわない。一方で、計算機網や統合網では、ユーザに対応する通信主体の概念は次第に流動化し、さらに捉えにくくなっていく。

3. トラヒック技術

網は正常に機能するために特徴的なエンジニアリングを要する。これが輻輳の問題に対処するトラヒック技術である。本節では、トラヒック技術を要する背景と技術が成立する前提を吟味し、トラヒック技術・待ち行列モ

デルの網における意味を明確にする。

混雑（輻輳）

トラヒック技術は混雑の問題を処理する技術である。混雑の問題は網の基本仮定(SM)に由来し、網にとって特徴的である。即ち、ユーザの通信挙動(SM)に基づく中継系の共用は、スイッチと空き回線捕捉により実行されるが、(SM)に含まれる非決定性によって競合し、待ち合わせ系を成す。

電話網では、中継回線の他に、呼処理に伴って交換機内に生ずる混雑がある。これは、呼処理が各ユーザからの通信要求に応じて間欠的に生じるため、呼処理を共通装置で行うことによる。

トラヒック技術

混雑はユーザの不便となるだけでなく、その拡大はシステムダウン等の深刻な危険性をまねく。一方で、混雑を回避すべく闇雲に資源を投入すれば、コストを引き上げる。従って、混雑を客観的に予測・評価して、資源量や運用方法を適切に設定する必要がある。そこで、混雑評価の枠組みとして待ち行列モデルが考案され、待ち合わせ系の評価・設計・運用が図られている。待ち合わせ系の問題を解決する一連の過程は、トラヒック技術と称される。

待ち行列モデル

待ち行列は、混雑を捉える確率モデルであり、これを基にトラヒック流（共通設備利用時間列の時間的流れ）・輻輳（待ち時間・ブロッキング）・共通設備量の間の統計的關係（輻輳特性）が分析される。例えば、最も基本的なM/G/1待ち行列とよばれるモデルは、ある簡易な確率法則に従うトラヒック流が、無限容量の待ち室で待ち合わせて、単一の共通設備（トラヒックを処理する意味から、サーバと呼ばれる）を利用する過程を表現し、この場合

(Q) 平均待ち時間(W)

=単位時間流入トラヒック量分散/2・共通設備空き率という具体的な関係式が成立する。ここでトラヒック量とは、トラヒック流とある時間区間に対して定義され、時間内においてトラヒック流が含む共通設備利用時間の総和である。

トラヒック技術の前提

待ち行列モデルの解析では、トラヒック流が統計的に特徴付けられるという仮定があればよい。しかし、トラヒック技術を施して、網が正常に機能するには、トラヒック流、従ってユーザの通信挙動に幾つかの仮定を要する。

まず、トラヒック流の統計的性質が、測定等によって同定できることである。即ち、過去に収集したデータによって、実際に運用する時に

(PR) トラヒック流がある程度予測できること

である。次に輻輳特性が「設計可能」でなければならない。即ち、網において実際に運用者が調節可能な変数は

限られる。電話網では、正常時にはあらかじめ準備しておく回線数や、呼処理のための共通装置の規模が主要変数である。電話網において一般的ではないが、空き回線を検索していく方法（ルーチング）を変数と考えることは出来る。一方、異常時に規制信号を出して網に加わる負荷を食い止める規制制御も変数とできるが、これは網の正常動作時は使えない。これらの変数を（事前に）設定することで、混雑と資源量が適性となる必要がある。これは、輻輳特性に関する条件であるが、通常、輻輳特性が上記の意味で設計できるのは、トラヒック流に対する次の条件に基づく。

(SC) トラヒック流は大きさが意味をもつ。

待ち行列モデルでは、トラヒック流の規模を単位時間当りの平均トラヒック量と定義し、トラヒック強度と呼んでいる。通常採用されるトラヒック流の数学モデルでは、トラヒック強度によってトラヒック流の規模を特徴付けることができる。即ち、強度0であればトラヒック流は消滅しているモデルである。このため、得られる輻輳特性において、トラヒック強度と共通設備量（回線数、処理速度等に対応する）の比が輻輳のスケールを支配している。例えば、(Q)では

$$c = \text{共通設備量} / \text{トラヒック強度}$$

としたとき、平均遅延時間Wのcへの依存性W(c)は

$$W(c) \sim c^{-2}W(1) \text{ for large } c$$

であって、cが輻輳を支配している。この支配性は、(SC)に由来している。

4. 輻輳論的システム評価

電話網の形成に伴って考案されたトラヒック技術は、その後、通信・情報システム一般に適用された。輻輳特性の分析は、設計・運用を支える一般的なシステム評価方法と考えられ、特有の性能概念を形成した。一方、網の発達には、輻輳特性によるシステム評価に困難を来たしてきている。そこで本節では、輻輳特性評価の一般化された適用について、その役割と有効性を分析する。

輻輳論的システム評価

輻輳特性評価の適用は

(DF) 機能仕様策定と方式策定・設計と輻輳特性評価という過程によって、通信・情報処理サービスシステム一般へ拡大されてきた。(DF)は、おおよそ以下のようなものである。まず、あるシステム（例えば交換機の呼処理系）の果たすべき機能が開発者等によって策定され、仕様化される。開発者は、さらに機能を実現する構成（方式）を策定する。ここで網の主要なシステムであれば、ユーザの通信挙動に関わる待ち合わせ処理を伴う部分をもつ。ここでは、待ち合わせ系が混雑拡大すればシステムの能力が失われるため、待ち合わせモデルを作成し、輻輳特性を分析して容量/必要資源量が評価されることになる。例えば、交換機の呼処理の容量が「1,000erl/時」等と表現される（ここで、erlはトラヒック強度の単位）。

研究会報告

輻輳特性評価の基本的な役割

輻輳特性は、まず、固定された方式と機能仕様によって容量または必要資源量を与える。論理的な表現を用いれば、資源量または負荷量を論理変数とし、方式と機能仕様を論理定数として出発し、輻輳特性から必要資源量または許容負荷量（トラヒック強度）変数の条件を決めることを意味する。本稿ではこれを、容量・設備量評価と呼ぼう。一方、機能仕様を定数、方式を変数として輻輳特性評価によって、方式の選別が考えられることがある。すなわち、ある機能を実現する方式が混雑しやすければ、同様の機能を実現する他の方式より劣るという性能判断である。本稿では、これを効率性方式評価とよび、一見して効率性評価の考え方はもっともで、有効なものに思える。しかし、実は次に述べるように、適用にはかなり注意を要する。

効率性方式評価の前提

輻輳特性に基づく効率評価によって方式比較をするとき、その前提は、機能等に関する条件が明確で固定されている点であった（即ち、「定数」として明確に把握されていること）。従って、明確な機能仕様を策定する以前に、輻輳特性や効率の考え方を持ち込むことはできない。にも関わらず、この誤りに陥りやすい。これは、機能に関する条件を明確化することが容易ではないことや、仕様の明確度が効率を持ち出すのに不適切であっても、これに気づきにくい事等による。

例えば、電話網で、網の役割は(Net-1) - (Net-3)であった。(Net-1)と(Net-3)が仕様と考えられ、(Net-2)の資源効率を向上させる網の探求が重要と考えられやすい。実際、(Net-1)と(Net-3)は一見して自明に見え、機能仕様の条件が明白と映るからである。しかし、(Net-1)と(Net-3)の条件は実は難しい問題をはらんでいる。例えば、条件(Net-1)の「完全グラフ」は解かりやすく表現したものであって、実体は複雑である。実際、網の成立条件(SM)は完全グラフが仮想的に実現されればよいことを含んでいる。さらに、網によって提供されるべき通信の空間Cが、本来どのようなものであるべきか特徴付けることは簡単でない。通信需要の長期・短期・時間帯地域別などの傾向やその変化さらに、網間接続の改廃などCの実体には多様な項目が含まれる。これら进行分析し体系化して論理的に定数化させることは容易でない。逆に、実システム等では、削減可能な資源量の限界は容易に評価でき、効率化が不要なことが容易に解かる場合が多い。

5. 設計自由度の拡大と輻輳論的評価の困難

効率性の方式評価に対する上述の限定性にも関わらず、古典的な網では、輻輳特性によるシステム評価は十分有効であった。原始的なシステムでは、方式の選択肢や容量・資源量以外の変数を決める問題に比べて、容量・設備量を評価する問題は決して小さくなかったからである。

しかし、網の発達に伴って、この状況は大きく変化しつつある。本節では、網の発達に伴うシステム設計の変

貌が輻輳特性に基づく評価にもたらしつつある困難を述べる。

パケット網

パケット網の登場は、トラヒック技術の問題を顕在化させる典型的な変化である。パケットはデータ通信（計算機間通信）において登場した。デジタル回線（0又は1の時系列を送受信できる回線）を仮定する。一つのパケットは宛先などの通信処理情報であるヘッダとユーザが送りたい通信内容である少量のユーザデータからなる。パケット網においては、パケットの転送連鎖により通信が行われる。即ち、パケットは、到着した交換ノードで宛先情報に基づいて次のノードに転送され、この繰り返しによって通信相手先に到達する。

パケット導入には、さまざまな理由が挙げられている[Ya]。しかし、他の代替を排除する主要因は、計算機間通信の次の性質によると考えられる：

(PS)通信中に実際に要する情報転送が通信時間の中で間欠的に生ずる。

即ち、通信の実体(PS)に見合った資源消費構造を網上に定義するためには、パケットの導入が必要である。これに伴って、パケット網では電話網に比べて

(IC) 回線資源消費の粒度が著しく細かくなっている。

即ち、電話網の消費単位（交換単位）が交換機間の回線×通話時間であるのに対し、パケット網ではパケット一つである。

システム評価の複雑化

パケットに基づく網がシステム評価にもたらす最初の問題は、システム評価の複雑化である。まず、(PS)と(IC)により、

(FR) 通信における資源消費過程の自由度が一気に拡大

している。これにより、システムの持つべき機能やそれを実装する方式の選択幅も著しく拡大する（機能・方式の多様化）。その象徴的な例は、所謂階層化プロトコル（例えば[Ma]）とその標準化の作業である。同時に、機能仕様や方式構造は複雑となる（仕様・構造の複雑化）。従って、容量・設備量評価の手間は著しく増大する。即ち、方式構造の複雑化は、モデルの複雑化（待ち行列の分岐（多重待ち行列）や網形成（待ち行列網）を生じる。また、機能仕様の複雑化は、システムが考慮すべきトラヒック流の範囲を拡大し（ピーク性の考慮等）、輻輳に関する規定方法を詳細にする。例えば、平均遅延時間に代わって遅延分布値による規定が採用される。また、損失率の規定が小さくなる（粒度の小さい条件の積によって通信過程の適性な処理となるため）。これらは、分析の手間を著しく増大させ、容量・設備量評価には計算機シミュレーションを用いた辛抱強い解析が必要となる。

システム評価の縮退

機能・方式の多様化は4節で述べたように、輻輳論的

システム評価の有効性を限定していく。即ち、機能の多様化は機能仕様の明示的または潜在的な流動性・不定性を意味する。これは、機能仕様の固定を前提とする効率からの方式評価を一層難しくする。この点と、容量・設備量評価における手間の増大は、方式の選別に対する輻輳評価の役割と機会を減少させる。その一方で、方式の多様化はシステム設計における方式選定過程を拡大し、相対的に、容量・設備量評価の役割が小さくなる。

輻輳論的方式評価

システム評価のかかる限界に対し、従来の考え方は、概ね次のようなものである（例えば[Sm2]）：

*

まず、容量・資源量評価は輻輳の規模的な側面を捉えたものである。一方、多様な方式を区別する尺度として、輻輳の規模は単純すぎる。方式の差異は輻輳の規模だけでなく、より高次で動的な量を導入しなければならない。そのような尺度として、例えば、遅延時間の分布形や溢れのパターン、待ち合わせ過程の緩和時間などが考えられる。また、輻輳評価尺度の高次化は機能仕様の条件の傾向でもあり、方式の分離に適している。さらに、輻輳の構造を詳しく調べれば、待ち合わせ系の能力を特徴付ける事ができよう。

*

このように輻輳（混雑）の全構造によって、待ち合わせ系の方式を選別、または、能力の特徴付けを図ることを、輻輳論的方式評価と呼ぶことにする。

輻輳論的方式評価の問題

輻輳評価尺度の拡大という方策は、待ち合わせ系の問題を原理的に解決するかに見える。しかし、評価項目の拡大によっても、輻輳論のシステム評価の縮退は容易に免れない。

第一に、評価の手間の意味での困難さに起因する問題を解決してはいない。寧ろ、高次で動的な輻輳特性量を持ち出すことは、資源量評価でも手間を拡大する。また、方式評価では方式が変数であり、資源量以外の非規模的パラメータを捉える必要がある。輻輳高次量の方式パラメータ依存性を明らかにする作業は、著しく困難である。

第二に、輻輳を規模以外の特性量で扱うことは、輻輳論のシステム評価が、外部（機能仕様化過程等）への依存性・従属性を拡大していることを意味している。従って、輻輳評価の役割がより相対化し、縮小してきていることを示している。何故なら、輻輳の規模の意味は、輻輳（混雑）の原始的・直感的な意味と同時に定まり、待ち合わせ系が取り出された時点で定まる。従って、輻輳の規模は、外部に意味付けを求めない明瞭な尺度である。これに対して、遅延の分散や分布形、損失パターン、待ち合わせ過程の緩和時間といった量は、混雑の原始的直感で意味が定まるものではなく、待ち合わせ系の働きによって初めて意味が定まる。即ち、システムの機能策定・機能仕様の詳細化の過程（システム評価の外部）から定まる。従って、これら高次的な量がシステ

ムのメリットやデメリットとどのように関わるかは、輻輳論の全く外部にある。よって、高次・動的量の選択や性能的優劣関係など、方式選別を支配するポイントは、全て外部に属している。

輻輳論のみでは説明不可能な設計則 ‘平等性’

輻輳のプリミティブな意味では捉えられない、簡単な待ち合わせ系の制御パラメータ例を示す。この例は、待ち行列の分岐として最も基本的であり、輻輳論が自己完結には程遠い枠組みであることが了解できる：

・ポーリングモデル

N本のトラヒック流がN個の無限容量待ち室に加わり、単一のサーバが巡回して処理を進めるモデルがある。トークンリングLANをはじめ適用範囲の広い待ち合わせ系である。サーバが待ち室間の移動に費やす時間は0とする。トラヒック入力に標準的で対称なものとし、安定条件を満たすとする。

・トークン保留時間

ポーリングモデルでは、サーバが継続して待ち室に留まる時間を決めてはじめて系の動作が定まる。この時間をトークン保留時間(THTと略記する)という。THT=∞であれば、サーバは、滞在中の待ち室内にトラヒックが溜まっている間これを処理し続け、空きになれば直ちに次へ向かう。トークン保留時間は全待ち室で同一とする。

・経験則 ‘平等性’

トークン保留時間は輻輳の規模に無関係である。実際、各待ち室に共通（対称性から）の平均待ち時間は、THTの値によらず一定となる。無論、THTを大きく設定すれば、待ち時間の変動が大きくなり、待ち時間のゆらぎを大きくさせることは了解できる。しかし、待ち時間の揺らぎの意味を、輻輳の直感のみで解釈するのは困難である。無論、輻輳の状況にバラツキが大きいと不都合が多いことは、応用上の経験からは推察され‘平等性・公平性の問題’等と呼ばれる。しかし、そのメリットの客観的評価は、輻輳の構造から与えられるものではない。たとえば、待ち行列モデルで通常用いられる名称、資源消費単位=‘客’という考え方が意味を持てば‘平等性’という解釈も有効であろう。しかし、LANのモデル等では、‘平等性’が適用されるべき通信主体と資源消費単位であるパケットでは時間スケールが全く異なる。THTが同一であれば、既に通信主体間は平等であって、THTの長さは平等性の問題とは呼べない。

この例は、輻輳論の外部依存性を明示的に与えるものである。より注意して観察すれば、輻輳論の機能仕様への依存は本質的なものであことが解かる。実際、最も簡単な、輻輳規模による容量・設備量評価の場合でも、適正な輻輳規模範囲の規定（例えば「10%以下の損失率」）、は輻輳論の範囲ではない。この構造の拡大に対して、輻輳論は術をもたないのである。

研究会報告

6. トラヒックダイナミクスの拡大と困難

前節では、網の発達に伴ってシステム設計の自由度が拡大し、輻輳特性に基づくシステム評価の有効性が次第に限定されて来たことを見た。即ち、方式評価における有効性が縮小し、資源量・容量評価は労力が拡大してきた。この問題は、トラヒック技術の適用がシステムの機能仕様策定に依存していることによる。一方でトラヒック技術は、より基本的な前提として、通信等に伴うトラヒック流の性質(PR), (SC)を必要とし、資源量・容量評価を可能にしている。網の発達は、この前提をも崩しはじめています。

強度0のバーストラヒック流

トラヒック技術が有効になるのは、輻輳特性が「設計可能」であることに基づいていた(3節)。即ち、問題となる輻輳が、システムにとって(より正確には設計者にとって)変更可能な変数で支配できることであった。これが可能であったのは、トラヒック流が「規模」によって支配されていることによる。即ち、トラヒック流の規模を事前に見積ることができ、これが、システムの変更可能な変数である資源量(回線数など)に対応して、輻輳の規模を支配できた。この枠組みはトラヒック流が規模によって支配される限りは有効であり、輻輳特性の尺度の選択を高次・動的なものに変更しても、統計的特性量である限り資源量によって支配できる。

このように、トラヒック流の規模支配性は資源量変数を有効にして「輻輳系」を設計可能にする重要な性質である。資源量・容量評価はこの可能性に基づいている。しかし、開発が進められつつあるATM(非同期転送モード)と呼ばれる網のある方式(統計多重方式)の模擬実験において、標準的な規模によって支配されないトラヒック流が見いだされている[Sm1]。

模擬実験で得られたトラヒック流の時間区間 $[0, T]$ 内の時点列データ $\{t_j, j \leq M\}$ は、以下の通り、特異な統計的性質を呈した。

$$\begin{aligned} \text{シブ規則} \quad & \frac{1}{N} \text{Nr} \{ |t_j - t_{j-1}| \geq x \} \propto 1/x^\alpha \quad (\text{JP}) \\ 1/f \text{ゆらぎ} \quad & \frac{1}{T} \left| \int_0^T e^{-ft} \sqrt{-1} d_t \text{Max} \{ t_j \leq t \} \right|^2 \propto 1/f^\gamma \quad (1f) \end{aligned}$$

$$\text{指数の } \alpha, \gamma \text{ の条件 } 0 < \alpha - \gamma < 1 \quad (\text{ID})$$

これらの統計則はMandelbrotがエラーのモデルに用いたレビダストの統計則である。(JP)と(1f)は、発生間隔の平均が無限大に発散する傾向を示し、統計法則(不変測度)の全容量が無限大となる。この性質は、無限間欠性と呼ばれるが、従来の規模尺度であるトラヒック強度は消滅してしまう。一方で、トラヒックの集中は激しく、短時間の間に著しい混雑を生じる。このトラヒック流が加わる待ち合わせ系ではトラヒック強度によって支配されない輻輳が生じる。さらに、規模をもつトラヒックと混在すれば、輻輳を支配する尺度の定義も困難となる。こうして、輻輳系の設計が困難となってくる。

7. 輻輳論と網発達

トラヒック技術における困難の拡大は、網の発達という通信網にとって重要な変化がもたらす顕著な過程である。従って、網発達が困難を拡大する構造には、網の能力を捉えるのに有効な情報が現れているだろう。そこで、本節では、まず、困難(複雑化)の構造を分析し、待ち行列理論の主題である輻輳論の適用において、複雑化が外部条件として生じていることを注意する。次に、この観測を一般化し、輻輳論のメリットと網発達が独立であることを指摘する。従って、網の重要な能力要素が網発達にあるとすれば、それは輻輳論の外部にあることが解かる。

輻輳論の外部条件複雑化としての困難

網発達によるトラヒック技術の困難は、「輻輳論適用時の外部条件複雑化」という共通の形式を備えている。これを説明しよう。まず、これまで述べてきたトラヒック技術の困難は、何れも技術の適用対象からもたらされたものである。実際、困難の原因である設計自由度の拡大・トラヒック流の複雑性の拡大は、トラヒック技術を適用してシステム評価や資源量・容量評価を行う適用対象の複雑化である。一方、トラヒック技術の基礎を成すのは、待ち行列モデルの輻輳特性分析(輻輳論)である。従って、困難の構造は、輻輳論に対してその外部条件の複雑化という形を取っている。

網発達における輻輳論の限界

「網の能力」と呼ぶべき概念や構造があると仮定したとき、「適用時外部条件の複雑化」という困難の構造は、網の能力の所在を示唆している。即ち、網の能力の拡大は、網の発達の内部にあって輻輳論の外部にある(輻輳の特性評価では意味が付けられない)と推測される。これを検証するため、以下では、輻輳特性評価によって可能なメリットの議論(輻輳論的メリット論)を吟味し、輻輳論によって網発達の利点が殆ど説明できないことを示す。

輻輳論的メリット論

待ち行列理論の主題は、輻輳の特性を論じることにある。即ち、ある輻輳の尺度が、待ち行列の処理機構・トラヒック流の構造にどのように依存しているかを明らかにすることである。この過程が輻輳特性評価(輻輳論)である。トラヒック工学の基礎を与えているのは、輻輳論に他ならない。まず、輻輳論のみで可能なメリットの議論は、輻輳規模の比較に他ならない。これを示そう。

メリットの言明Aは、システム(の構造)sに対して、sの輻輳特性Q(s)を通して、sのある変化 $s_1 \rightarrow s_2$ のメリットを言明したものである。従ってAは good if $G(Q(s_1), Q(s_2))$ という形式をとる。輻輳論は主にQ(s)の構造を問題とする。条件Gは、輻輳特性Q(s)で関係が記述される指標を用いた比較関係と仮定できよう。一方、指標の中で輻輳論の範囲内でシステムの優劣を表現できると考えて良いものは、輻輳の規模に関する尺度、資源

量, 入力トラヒックに限られよう。例えば, 複雑な輻輳の尺度は輻輳論の範囲では認められない。即ち, 輻輳の規模に関する規定であれば, 輻輳論が本来伴う尺度として認められようが, 分散等の高次統計量や緩和時間などの動的な特性量は輻輳論が最初から伴っている比較尺度とは考えられない。高次な量を輻輳論の範囲内で持ち出せるのは, $Q(s)$ を通じて, 原始的な尺度しか含まない G に帰着できるときに限られる。こうして, 輻輳論によって可能なメリットの言明 A は, 輻輳規模・資源量・入力トラヒックの関係をういた比較の言明に帰着できる。ここで, 輻輳規模の特定の値には輻輳論のみでは意味がつかないので, 条件 G 内で, 輻輳規模の値は (\forall で束縛された) 変数である。これを用いれば, G は輻輳規模の比較の言明に帰着できる。

輻輳論のメリットの限界

輻輳規模のみによってシステムの変化・工夫のメリットを論じることが適切でない場合は多い。例えば, 優先処理や資源割当制御 (ユーザに一度期に割り当てる設備量を限定する構造, パケット型の網では基本的な構造) の導入理由は説明できない。また, 複雑化の要因として, しばしば考えられる大規模化も, 輻輳規模のみの説明では限界がある。大規模化を輻輳のスケールメリットで説明することもあるが, 網拡大によって生じる通信相手の拡大 (通信の生成) はより基本的なメリットであり, 輻輳論で論じる性質のものではない。

8. 自由度拡大としての網発達

トラヒック技術に顕在化した困難の構造は, 網の能力の本質的要素が輻輳論のメリットでは捉えられないことを示していた。実際, 網発達と輻輳論のメリット論の接点は殆どなかった。そこで, 本節では, 網の能力の概念を求めて網発達を吟味する。網形成・網発達の要点は自由度の拡大にある。

網の形成・発達

通信に対して標語的に用いられる「何時でも, 何処で, 誰とでも, どんな情報でも・・・」といった言葉は通信の自由性を意味している。網の形成・発達は, まさに, 通信の自由性の拡大の過程である。これを確認しよう。

網の形成($\text{Net } r \rightarrow s$)は, 設備集合 r における各設備の原始的な能力のみが提供する機能 $C(r)$ を可能な通信の集合 $C(s)$ として飛躍的に拡大させることにある。実際, 電話網は通信回線を刻んでスイッチを導入し, 通話の空間的 (相手) および時間的な限定性 (間欠性) に基づき, 同規模回線資源集合 r によって可能な通話の空間を $|C(s)| = |C(r)|^2$ オーダへ拡大している。これは網の形成 ($\text{Net } r \rightarrow s$)による C の拡大である。

網の発達は, s の構造の変化($s_1 \rightarrow s_2$)が, C の飛躍的拡大をもたらすものである。例えば, 大規模化($s_1, s_2, \dots, s_k \rightarrow s_1 \cup s_2 \cup \dots \cup s_k$)は, C を k^2 オーダで拡大させる。一方, デジタル化が網に対して与えた期待は, メディア間での流用を拡大すること (統合化) で, s によって提

供できる通信の空間 C を加法的に拡大するものである。パケット化は, 資源消費単位の粒度を微細化し, 通信資源を流動化させた。流動化は, 計算機間通信における情報転送の間欠性に基づいて, 多彩な通信形態を可能にして C を質的に拡大した。セル化(ATM)は, 実時間のスイッチングにより通信資源の流動性を向上させ, C の更なる飛躍的拡大を狙っている。

自由性の拡大

可能な通信の集合 C の‘大きさ’は, 網形成や網発達の把握に, 一貫して利用できた。この C の‘大きさ’の意味は「通信の自由性」であろう。実際, 柔軟化・大規模化・統合化・流動化・流動性の向上といった網形成・網発達の諸相は, すべて通信の自由性を拡大していると言える。これから, 網の能力は, 自由性の生成・拡大に属すると考えられる。即ち, 網 s の役割は, 資源 r の基本機能が提供する衝突の無い少数の通信の空間 $C(r)$ から, 衝突を含むが, 豊富な通信の空間 $C(s)$ への拡大・変質にあるだろう。

なお, 公衆網で重要なのは, 通信相手・通信形式としての C の拡大のみではない。資源消費に応じた課金によってコスト負担の自由度が保持・拡大され, 料金構造をこめて可能な通信 C を拡大している点である。即ち, 公衆網において, トラヒックの生成は C の課金の構造を反映する。

9. 可能な実現の豊かさとしての網の能力

網形成・網発達の要点が, 自由性の生成・拡大にあることは了解できた。それでは, システムのどのような自由性が網の能力と考えられるのだろうか? 本節では, 自由性が, 正確には, 可能な実現の豊かさとして網の能力を決定していることを注意し, この構造を抽出してシステム (網) の可能性と呼ぶ。また, 可能性による能力決定の例として, 通信路・計算機・貨幣を挙げ, その一般性を注意する。

可能性=可能な実現の豊かさ

通信網は, 通信 (並行な通信) という対象があって, これを実現するシステムである。通信の自由性とは, 実現可能な対象 (並行な通信) の豊かさには他ならない。この豊かさが網の能力と考えられる。実際, 網における通信集合の処理を考えよう。この網が他の網より優れていると考えるのは, 同時に処理できる通信の数だけではない。通信時に選択可能な通信相手, 通信形態の豊富さは本質的である。従って, 可能な実現全体の豊かさが網の絶対的な能力を決定していると考えられる。

この能力決定の構造は次のように抽出できる:

$$(P-0) \quad \mathfrak{R} = (O, S, \phi)$$

$$(P-1) \quad O \text{ は実現対象の空間}$$

網において, O は, 並行な通信過程である。ただし, O の要素は実現されるものであって, 実現以前に意味が定まらなければならない。従って, O の要素は, 個々のシステムとは独立に考えらるものであり, 個々の並行通信

研究会報告

過程の実現に関する条件を列挙した抽象的なものとする。

(P-2) Sは、対象を実現するシステム（実現機構）の集合

網において、Sの要素は、個々の網を示す。

(P-3) \mathcal{O} はSの要素sに対して可能な実現としてOの部分に対応させる写像

$$\mathcal{O} : S \ni s \mapsto O(s) \subset O$$

O(s)の順序関係（包含関係）から各システム間の性能の優劣が定まっている。

網において、O(s)は、実現可能な（抽象的で並行な）通信過程の空間である。

\mathcal{R} を実現系、Oの要素oを対象、Sの要素sを実現機構（システム）、O(s)をsの可能性空間と呼ぶ。また、O(s)の何らかの‘豊かさ’を、一般に可能性と呼ぼう。

可能性が能力を決定する例

以下では、実現系の例を挙げる。

まず、通信路を考えよう。通信路の実現対象Oは、通信文、即ち、アルファベットの列からなる。あるアルファベットAを固定し、OをAの無限列の空間とする。ここで、列の添数は物理的なスケールを伴わせ、全てのスケールを考慮に置いておく。Aをアルファベットにもつ通信路sは、その能力に応じて、転送可能なアルファベット列の空間O(s)をOの部分に定める。O(s)の豊かさがsの容量に対応することは自明だろう。次に計算機を考える。ある命令集合Wを指定した時、逐次計算機sの能力が通信路と同様にO(s)の規模によって決定されていることは了解できよう。最後に、象徴的な例として、貨幣を考えよう。例えば、ある貨幣（例えば1万円、正確には1万円とその流通を支える隔れたシステム）sの能力は、交換（購入）可能な商品の空間O(s)で決まる。即ち、経済でいう流動性は、実現系の可能性に他ならない。

10. 通信網の可能性構造

本節では、網における可能性を原始的に分析する。

可能性を基にしてシステムの能力を論じるには、実現対象Oの記述やシステムs（対象の実現機構）の記述を与えなければならない。システムの定義も含めて整理しなければならない問題が多く、いまここで記述の理論を展開する段階ではない。たとえば、複雑な通信プロトコルの取り扱いを視野に入れば、数理論理的な取り扱いも考慮しなければならなくなる。この問題は現在も発達しつつある並行計算の理論[Hr, Ml, Ac]とからむ。

数学的な定義は省略して、‘並行通信過程（の実現条件）’からなる対象空間O、‘システムsの可能な並行過程全体’である可能性空間O(s)を直感的に論じ、輻輳・仮想性とといった基本的な概念が、可能性の側面として捉えられることを指摘する。

最後に、可能性の視点の有効性を示す具体的な例として、5節で述べた経験則‘平等性’を論じる。可能性空間の導入によって、従来の輻輳論では捉えられない‘平等性’のメリットを明らかにすることができる。

通信要求の間欠性・許容性と対象の柔構造

通信要求は、間欠的であると同時に条件としての許容度がある。この2点に基づいて、並行な通信過程の実現条件（対象）は、柔軟な構造をもつ。対象（並行通信過程）の柔軟性は、流動的な実現機構sによって、豊かな可能性空間O(s)の獲得を可能とする。これが、流動化・柔軟化による通信網の能力生成の要点である。

実現空間C(s)

通信網では、通信路等と異なり、実現される対象の記述は条件であり、対象oを満足する実現cが与えられれば、oは実現されたことになる。こうしてO(s)が定まっている。即ち、網sが与えられたとき、対象の空間Oに関わらず、s上に展開しうる形式的な実現の成す空間C(s)が与えられれば、O(s)は決定しうる。そこで、対象のなす空間であるO(s)の構造を実現の空間C(s)の構造から論ずることとする。

柔構造と実現cにおける仮想性・排他性

間欠性・許容性に基づく対象o（並行通信過程の実現条件）の柔構造は、対象oの実現cに、二つの特徴的な構造を生じる。即ち、仮想的並行性と成分間排他性である。並行通信過程の成分である各通信過程は、同時には実現されていない。即ち、並行性は実体として資源量を越えては実体化せず、仮想性を帯びている。一方で、同時に実現されないことは、成分の通信過程間では排他性が生じている

C(s)の自由度の構造

O(s)の豊かさの構造は、C(s)のそれを反映すると考えられる。そこで、C(s)の一般元cの自由度を考えよう。cは並行な通信過程の列からなる。cの自由度は、資源を（通信路自由度）を消費して獲得するものと、そうでないものにわかれると考えられる。上述によれば、後者は、並行性における仮想性に由来すると考えられる。ここで、

(Ver) 仮想性 := 並行性 / 消費資源量

一方、前者に従って、資源消費により自由度を獲得しようとしたとき、排他性によって自由度が妨げられる。これは輻輳に他ならない。以上まとめれば、定性的に

(Str1) C(s)の豊かさ ~ 仮想性・資源量 / 輻輳

という関係が得られる。O(s)の構造も、右辺に従うと考えられる。また、資源量は工夫としての網sの能力を表現しない。網の純粋な能力は：

(Str2) C(s)の豊かさ / 資源量 ~ 仮想性 / 輻輳

と考えられる。これは、仮想的並行を巧みに用いて、豊富なサービスを遅延・劣化なく提供する網が高性能であるという（もった）結論を示している。

経験的設計則‘平等性’のメリット

最後に、可能性の応用として、5節で述べた輻輳論では説明不可能な経験的設計則‘平等性’を、メリットと

して表現できることを述べる。可能性空間を介することで、プロセス代数 $\{Hr, M\}$ の適用が可能となり、平等性のメリットを把握できる。

・インタリーブ

インタリーブはプロセス間の演算である。この演算により、可能空間の重要な自由度拡大を記述することができる。二つのプロセス P, Q が $P = \langle p[1], p[2], \dots, p[n] \rangle$, $Q = \langle q[1], q[2], \dots, q[m] \rangle$ と表現されるとき、 P と Q のインタリーブは、

$$P \parallel Q = \langle x[1], x[2], \dots, x[n+m] \rangle;$$

$$x[i[1]] = p[1], \dots, x[i[n]] = p[n],$$

$$x[i'[1]] = q[1], \dots, x[i'[m]] = q[m],$$

$$i \in \text{IHom}(\{1, \dots, n\}, \{1, \dots, m+n\})$$

$$i' \in \text{IHom}(\{1, \dots, m\}, \{1, \dots, n+m\} - \text{Im}[i])$$

で、与えられるプロセスの集合である。ここで、 $\text{IHom}(A, B)$ は順序集合 A, B に対し、 A から B への順序保存単射のなす空間とする。 $\text{Im}[i]$ は射像 i の像。

$$\text{Card}[\text{IHom}(\{1, \dots, m\}, \{1, \dots, n+m\} - \text{Im}[i])] = 1$$

である。ここで、プロセス表記

$$\langle p[1], p[2], \dots, p[n] \rangle$$

は、 $p(i)$ が番目の状態遷移要求によって目的の遷移が達成されたことを表現する。 $p(i)$ をビット列の書き換えとすることで、通信過程と見做せる。

・多重アクセス系の形式的可能性空間

N 本のパケット通信端末が同一の通信チャンネルに適宜アクセスして通信する系を多重アクセス系と呼ぶ。5節のポーリングは多重アクセスの一つの方式に他ならない。

インタリーブは、多重アクセスの基本的能力を、次のように表現できる。 $N=2$ で、プロセス P, Q が共通資源を用いて処理されるとしよう。多重アクセスが導入されないとき(s_0)に(形式的な)可能性空間は $O(s_0) = \{P; Q; P\}$ である。ここで $P; Q$ はプロセス P と Q の順次結合を表し、プロセス P のあと続いて Q が処理されることを意味する。これに対して多重アクセス s_m の(形式的な)可能性空間は $O(s_m) = P \parallel Q$ である。 $O(s_m) \supset O(s_0)$ であって、この拡大は著しく大きい。

この議論は、一見、自明に見えるかも知れない。しかし、可能性空間の各要素は、並行プロセス(P, Q)にとって、何れかしか実現できない選択肢であり、多重アクセスの導入により著しく実現の選択肢が拡大することがわかる。インタリーブは仮想性の拡大に他ならない。

・平等性のメリット

上述の議論は、直ちにトークン保留時間設計の問題(平等性の問題)に適用できる。実際、トークン保留時間の短さが、不完全ではあるが、インタリーブを担い、多重アクセス系としての本来機能を担っている事が解かる。従って、平等性を強めること(トークン保留時間圧縮)は、'形式的'な可能性空間 $O(s)$ を拡大することに他ならない。即ち、多重アクセス系の(形式的な)能力を拡大している。これは、可能性の視点により初めて明確にできた点である。即ち、トークン保留時間短縮の利点を、輻輳論で説明することはできない。実際、7節に見たとおり輻輳論では輻輳規模の縮小としてのみ利点が

表現できた。しかし、トークン保留時間圧縮は輻輳の規模を変えない(むしろ拡大する)事はよく知られている。可能性空間の導入によって、トークン保留時間縮小が、輻輳という自由度の障害としてより、寧ろ、インタリーブという自由度の拡大として容易に捉えられることがわかる。

11. まとめ

通信網の設計・運用を支える技術に生じた複雑化の困難を手掛かりに、通信網の能力を捉える試論を示した。困難の問題を突き詰めた結果、従来性能評価が基本的な能力要素を欠いていたことが明らかとなった。これは、通信網の柔構造と社会性により、メリットよりもデメリットの方が客観性を要することによると考えられる。

今後は、この基本的な検討を踏まえ、数学的な枠組みを準備しつつ、通信・情報処理システムにおける性能の構造を明らかにして行きたい。かかるシステムにおける複雑性の役割も、その過程で理解できると考えている。

文献

- [Ac] Aczel, P., Non-well-founded Sets, CSLI Lecture Notes 14. CSLI 1988.
- [F] 藤木, 雁部, 通信トラヒック理論. 丸善 1980.
- [Hg] 萩谷 昌巳, ソフトウェア科学のための論理学, 岩波講座ソフトウェア科学11. 岩波 1994.
- [Hr] Hoare, C.A.R., Communicating Sequential Processes. Prentice-Hall 1985 (邦訳, 吉田信博, ホーアCSPモデルの理論 丸善 1992).
- [Ma] Madron, T.W., Local Area Networks. Wiley 1988.
- [Ml] Milner, R., Communication and Concurrency. Prentice-Hall 1989.
- [Sm1] 下川信祐, Modeling of infinitely intermittent traffic streams via the Palm theory, 1994年度日本オペレーションズ・リサーチ学会春季研究発表会アブストラクト集, pp195-196(1994).
- [Sm2] Shingawa, S., and Takahashi, Y., On a set of interdeparture time distributions of the M/G/1 queue with server vacations, J. Operat Res. Soc. Japan, Vol. 36, No. 4, pp.206-219(1993).
- [St] 齊藤 洋, これからのトラヒック設計を目指して: ノンパラメトリック法によるATMセル損失評価, 電子情報通信学会論文誌, B-I, Vol. J 76-B-I, No. 3, pp.197-208(1993).
- [Tkg] Takagi, H., Analysis of Polling Systems. MIT Press. 1986.
- [Ts] Tasaka, S., Performance Analysis of Multiple Access Protocols. MIT Press. 1986.
- [Ya] 山内正彌(監修), パケット交換技術とその応用. 電子情報通信学会編 1980.