

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月 14日現在

機関番号：17301

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22740070

研究課題名（和文） 通信品質保証システムのための確率ネットワーク算法の確立

研究課題名（英文） On Network Calculus for QoS guaranteeing systems

研究代表者

高田 寛之（TAKADA HIROYUKI）

長崎大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：10297616

研究成果の概要（和文）：入力過程についての条件が入力時点での独立性、定常性、トークンバケットに抑制されているという分布の種類をあまり問わない条件の下で FIFO ネットワークのバックログの分布の減衰率についての確率ネットワーク算法について調査した。

研究成果の概要（英文）：We have studied stochastic network calculus for per-flow backlogs in a FIFO network under the conditions that the input processes are independent, each process does not have independent increment but stationary increment, besides it is constrained by a token bucket.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	600,000	180,000	780,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
2012年度	400,000	120,000	520,000
年度			
年度			
総計	1,500,000	450,000	1,950,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：数学・数学一般（含確率論・統計数学）

キーワード：確率論、ネットワーク算法

## 1. 研究開始当初の背景

## 通信品質保証技術の必要性

近年のインターネット技術の発展とインターネットの急速な普及により、インターネットは電話網に代わる社会基盤ネットワークへ進化しつつある。NGN（次世代ネットワーク）では、インターネット、放送、固定電話、携帯電話の機能が TCP/IP ネットワーク上に統合された。

リアルタイム通信サービスには通信品質保証が必要不可欠である。例えば、電話での 110 や 119 コールのように人の命や財産に関連付けされたデータの通信は、他の通信よりも優先されるべきである。従来の電話網は、非バースト的な音声通信のみが流れていたた

め、通信品質保証が比較的容易であったが、統合ネットワークでは、バースト的な通信との混在により、バーストの影響を考慮する必要があるが出てきた。

バーストとは、一時的に回線を占有する通信の状態であり、動画通信などで発生しやすい。動画転送は圧縮なしの場合、音声よりもずっと大きな帯域を必要とするが、圧縮によって部分的に小さな帯域で済むようになる。しかし、情報量の大きいところは依然としてデータ量が大きい。すなわち平均転送レートは圧縮によって小さくなったものの、部分的にはデータ量が大きいところがどうしても残る。バーストは、一時的ではあるが他の通信の帯域も使ってしまう。これが遅延の原因となる。

通信品質保証技術は、「限りがある時間及び空間的資源を効率的に適切な者に配分する機能」と説明することができる。すなわち、帯域の割り当てとバーストに対する耐久値を適切に割り当てることで、遅延やパケット損失確率を一定値におさえる。

通信品質保証技術を実現するためには、遅延やパケット損失確率、またはそれらを計算する元となるバックログなどの混雑指標を計算する機構が必要である。具体的に、次世代ネットワークの要求仕様では、データの種類に応じていくつかのクラスが設定されていて、リアルタイムクラスでは、損失確率 0.001 以下、遅延が 100ms 以下というように性能基準が設定されている。監視機構は、現在のネットワークの状態がこれらの性能限界に収まっているか否かを計算できなければならない。

このように、通信品質保証技術は社会基盤としてのインターネット活用のために重要な機能である。しかしながら、後に述べるように、技術的課題がいくらか残されており、実用化のためには早急な対応が必要である。

#### 通信品質保証ネットワーク

道路交通網ではカーナビを用いて空いている迂回路への案内が行われているが、情報通信ネットワークではこの手法を採用することはできない。なぜなら、カーナビは道路交通網よりもはるかに早く情報伝達ができて、ネットワークの混雑状況が変化する前に運転手へ状態を知らせることができる。情報通信ネットワークでは情報伝達手段とデータ転送の速度が同じである。道路交通網で例えるなら、調査は車でしかできない。そして調査して道路交通情報センターへ通知して判断を下すころにはすでに道路の状況は変わっていて、その判断は無意味なものになる。情報ネットワークは道路交通網と異なり、データ転送と比較して速度差のある制御信号系ネットワークを作ることにはできない。この点を考慮して交通整理の仕組みを作る必要がある。

情報ネットワークにおける交通整理の方法として代表的なものは、プロビジョニング法である。これは、ユーザに予め転送するデータ量の特徴を教えもらい、資源配分機構が混雑状況を事前予測する方法である。道路交通網に例えると、マラソン大会を予定した主催者が警察に申請をして警察がマラソン用のコースを確保するという事に相当する。データ転送量が申告されたプロビジョニングを満たしているかどうかを判断するには、ネットワークの入り口に計測器を設置する。代表的な計測器はトークンバケットフィルタと呼ばれるものがある。これは、転送レートだけではなく、一時的なバーストも測ることができる。マラソン大会で例えると、トークンバケットフィルタは受付のようなものであり、予期していない未登録者の参加を防ぐ。もし

これを防がないなら、マラソンコースから人が溢れ、十分な幅のコースをとっていたにも関わらず、コース内で大渋滞を起こしてしまう。

#### ネットワーク算法

プロビジョニングベース通信品質保証の枠組みにおいて、バーストを持つ通信を含むネットワークにおける損失確率や遅延などの性能尺度を計算する方法として確定的ネットワーク算法と確率ネットワーク算法が提案されている。

確定的ネットワーク算法は、ネットワークの性能尺度の上界を計算するための代数体系を与える。この計算規則に沿うことでネットワークが大規模で複雑なトポロジを持ったとしても性能尺度を素早く計算することができる。しかしながら、確定的ネットワーク算法は、コース幅を最大にとるのと同じである。複数の通信のバーストが同時に発生するとき限り、その瞬間だけ有効であるがほとんどの他の時間帯は誰も使わないのにコースを占有しているような状況を引き起こす。これは明らかに資源の無駄である。過剰配分問題を回避するために、統計的多重効果を考慮する必要がある。

統計的多重効果とは、実質的に必要なコース幅は最悪値より小さいということである。複数の独立な波を重ねあわせるときと波の一番高いところを重ね合わせるのでは全体の波の高さは異なる。

統計的多重効果は確率変数の和の分布を考慮することに等しい。このため、確率ネットワーク算法の研究が盛んに行われている。ところが、確定的ネットワーク算法では容易に評価できたものが確率ネットワーク算法では難しくなる。確定的ネットワーク算法では、プロビジョニングデータだけで最悪値を計算できるのであるが、確率ネットワーク算法では、使用帯域の平均や分散など統計的情報が追加で必要になる。しかし、これらはプロビジョニングデータには含まれない場合もあり、入力過程の情報は陽に与えられないことがしばしば発生する。この場合においても、プロビジョニングデータのみを用いて得られる混雑指標を計算して資源配分する必要がある。

このようにネットワーク設計者にとって確率ネットワーク算法はまだ研究レベルの理論であり、必ずしも使い勝手は良くない。

#### 学術的研究背景

最近、小林、高橋、高田は、大偏差定理をフロー数に適用することで、入力過程についての情報が部分的（定常性、フロー間の独立性、トークンバケットによって制御されている）である条件の下で優先処理ノードからなるネットワークのバックログや遅延の総和の分布の減衰率を評価した。分布の減衰率は、統計的区間推定や検定法でいうところの判断

のしきい値である  $p$  値の近似値を求めるために必要な量である。

小林らで採用された確率ネットワーク算法は、次の4つの理論に基づく。

### 大偏差原理

大偏差原理は確率の評価を漸近対数累積母関数の評価に帰着させるために用いる。

### フロー別バックログ

バックログ (待ち行列長、バッファ使用量) は遅延や損失確率を計算する元となる基本尺度であり、この情報について評価できれば、簡単な修正によりほかの指標についても計算ができる。フロー別バックログとは、全体のバックログのうち特定のフローに関するものの総量である。この量はしばしば、ネットワークの基本要素である外部入力関数及びサービス率とノードのサービス規律と基本的な演算  $\max, \min, +$  を用いて記述される。特にここでは、この3つの演算を基本演算子と呼ぶ。

### 漸近対数累積母関数と基本演算子の交換則

確率変数列  $X, Y$  及び漸近対数累積母関数作用素  $C$  に対して、以下の法則が成立する。

$$(x) \quad C(\max(X, Y)) = \max(C(X), C(Y))$$

$$(y) \quad C(\min(X, Y)) \leq \min(C(X), C(Y))$$

$$(z) \quad X, Y \text{ が独立なら } C(X+Y) = C(X) + C(Y)$$

式(x)(y)は独立性を必要としないので非常に強力である。これらの法則から有限個の基本演算子の任意の合成を  $F$ 、ネットワーク要素の集まりを  $Z$  とかくと、 $C(F(Z)) \leq F(C(Z))$  という評価ができる。

### 実効帯域評価

各ネットワーク要素に関する特徴付けは実行帯域によって行われる。 $A$  がトークンレート  $r$ 、バースト耐久値  $b$  のトークンパケットに抑制されるならば、 $A(s, s+t) \leq rt+b$  が成り立ち、更に定常増分性とエルゴードを満たすならば、 $C(A(s, s+t)) \leq \theta(rt+b) + \ln(b \exp(-\theta(rt+b)) + rt) - \ln(rt+b)$  が成り立つ。このようにしてトークンパケットを通るフローの外部入力過程の特徴づけが行われる。

上記の方法の組み合わせることにより、基本演算子で構成される評価指標の分布減衰率の上界が得られる。

従来の議論における不足点・問題点

(1) FIFO 処理に関するフロー別バックログは、どのように書けるか不明である。

(2) 不等式 (y) が等号成立するための条件は何かわからない。一般に (y) が成立しない場合でも使える (y) の左辺の評価式は何か。

(3) 実効帯域に関する不等式において等号成立するための条件は何か。

(4) より精密な評価のために非指数部の  $n$  に関する多項式係数について評価する必要がある。

(5) この他に実効帯域評価のために必要な定常増分性やエルゴード性のチェックはどの

ように行うべきか。

(6) 不等式 (z) の  $X, Y$  の独立性をどのようにチェックするべきか、独立性がない場合は左辺をどのように評価するべきかなどの課題がある。

### 研究の重要性・独創性

このように、実用化のために超えなければならない課題はまだたくさん残っているのが現状である。本研究の独創性は、入力過程に対する条件が、スタンダードな待ち行列理論のものとは異なるという点にある。従って数学の問題として新しい。もちろん、理論的な興味だけでなく、この問題に対する解は、ネットワーク技術の発展に貢献する。

### 2. 研究の目的

先に述べた問題点・疑問点を動機にして、本研究では (1) ~ (4) について解決したい。

以下の条件を満たす離散時間モデルのフロー別バックログの漸近解析を行う。

全てのノードは FIFO 規則で処理を行い、処理能力は一定である。入力フローはたくさんあって、互いに独立であり、各入力フローは定常でエルゴード的である。各入力フローは、トークンパケットフィルタによって制限されている。しかし、そのパラメータはフロー毎に異なって良い。

特にトークンパケットによる特徴付けは通常の待ち行列理論とは異なる入力の特徴付けである。これらの条件の下で、単一ノードモデル、直列ネットワークモデル、リング型ネットワークモデルなどにおいてフロー別バックログの分布の裾の減衰率の上界を求める。

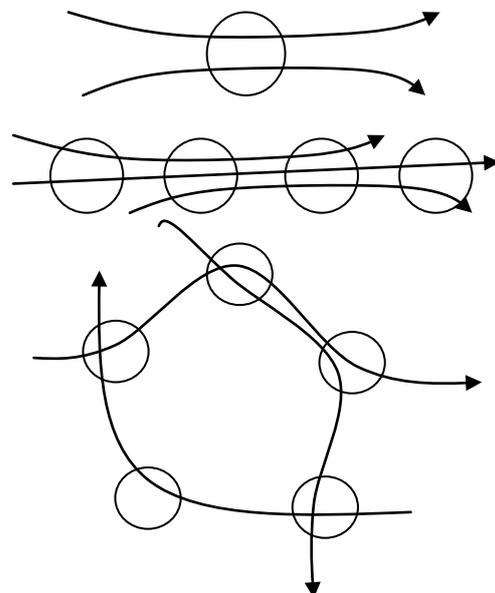


図. 単一ノードモデル、直列ネットワーク、リング型ネットワーク

### 3. 研究の方法

学術的研究背景で述べた方法に沿って行い、FIFO モデルに対応する差分として、FIFO モデルにおけるフロー別バックログを求める。漸近対数累積母関数と基本演算子間の交換法則を適用するために、我々は離散時間システムを考える。しかしながら、FIFO 規則は、到着時刻のタイムスタンプが若いパケットから処理するという規則であるので、同時刻の到着タイムスタンプを持つ異なるフローのパケットの処理順序は決まらない。つまり、slot 内の処理規則を決めない限り一意にサンプルパスは定まらない。この問題を回避するためには、slot 内処理規則を定めるか、複数のサンプルパスから作られるバックログの上下界を評価するかのどちらかを選択しなければならない。slot 内処理規則を決めるのは、適用できるモデルを狭めてしまうし、なによりも全てのポリシーを網羅することができない。そこで上下界を評価する方法をとる。

フロー別バックログの上下界を得る slot 内処理規則は、同じタイムスタンプを持つパケットが複数あるとき、注目するフローに関するパケットよりも他のフローを優先的に処理するモデルを考えるとよい。このモデルを FIFOSP (FIFO-slotwise-Priority) モデルと呼ぶ。FIFOSP が FIFO モデルの境界モデルになっていることを示すには時刻  $t$  において処理が完了する最後のパケットの到着タイムスタンプ及び、時刻  $t$  から遡って最後にアイドルであった時刻に着目することで、フロー別バックログの上界と下界を得ることができる。さらにこれらのタイムスタンプの定義から、フロー別バックログはある max-min 問題の解として表現できる。

注目する集約フローとその他の集約フローの役割は対称である。総バックログはそれぞれのフローに関するフロー別バックログの和としてかけるので、その他のフローのフロー別バックログの上界関数を使えば、注目するフローのフロー別バックログの下界関数を得ることができる。

先行研究で与えられた方法は、減衰率のみの解析方法であるが、より精密な評価のために Bahadur-Rao の定理を適用して多項式係数部も推定できる。しかし、正確に入力過程についての分散がわからないと使えない。

実効帯域関数は時刻  $t$  について、原点を通り、単調増加凹関数であり、 $t$  が十分大きいとき直線  $\theta(rt+b)$  に下側から漸近する。この線形上界関数は、入力用最悪値評価を適用したのと同様である。また、基本演算の構造は交換法則によって保存されているので、全ての入力関数に線形上界関数を適用すると、最悪値評価を再発見することができる。このようにして実効帯域を用いると最悪値評価よりも真にタイトな評価が得られる。

ネットワークモデルへの拡張は、ノードとノードの直列接続が、畳込み演算で表現できることと、畳込み演算は有限個の基本演算子によって構成されることを考慮するとやはり同様の議論が適用できる。しかしながら、リング型トポロジの場合は、他のフローの影響が注目するノードの出力に依存することになるので少し注意が必要である。フローは独立増分性を持つとは限らないので、過去の入力の影響が他のフローに伝搬してくると、独立性による分解ができない。そこでそのような項にだけ、線形上界関数を適用する。線形上界関数は最悪値評価であり、独立性とは無関係に適用ができる。これにより実効帯域だけで評価できる場合より少し悪い評価が得られるが、それでも全ての項に対して線形上界関数を適用する場合（すなわち最悪値評価）よりはましな評価が得られる。以上が本研究のアイデアであった。

### 4. 研究成果

雑誌論文 3 では、単一ノードと直列ネットワークの場合について解析を行い、研究方法で予想したとおりのことが証明できた。また数値結果を示した。フロー A の本数は 10、フロー B の本数は 50、トークンレートは 40Mbps、バースト耐性は 4Mbits=500KBytes、ノードの処理速度は 250Mbps とした。数値計算は max-min 問題の変数の量が多いために計算量が膨大であったために、1 ノードの評価しか行わなかった。優先処理ノードで評価を代用したときとの差を示した。念のため、この計算はモンテカルロシミュレーションではなく、数学的に予想した分布の上界の対数表示したものである。

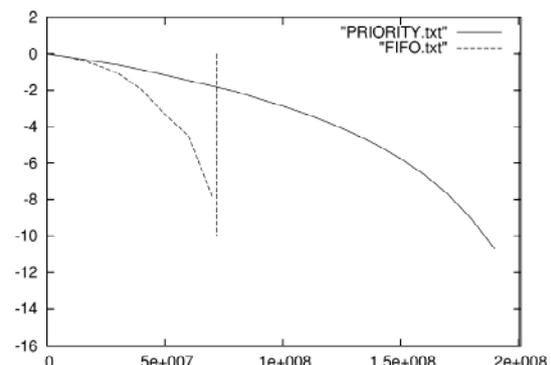


図. FIFO モデルと優先モデルのバックログ分布比較

図の見方を説明する。横軸はバッファ容量、縦軸がバックログの確率分布である。FIFO の曲線（下側）に漸近している縦の線は、最悪値評価によって得られる境界を表す。例えば、確率 0.001 のときは、1000 パケットあたり 1 回だけ最悪値評価の約 55% のバックログになるという意味である。なお、最悪値評価の 90% のバックログになる確率はおおよそ

0.000001 程度である。一方、優先処理ノードだと思って評価すると 0.01 の確率のところで FIFO の最悪値評価を越えてしまう。したがって優先処理モデルで確率評価するよりは、FIFO モデルで最悪値評価をしたほうがよい。

雑誌論文 2 では多項式係数の評価を行った。Bahadur-Rao 定理は、平均および分散の情報を必要とするが、分散は分母にあるため、上界ではなく下界もしくは正確な値が必要であることがわかった。

雑誌論文 1 では、2 ノードのリング型ネットワークに限定してバックログ分布の減衰解析を行い、研究方法に述べたことを証明した。

さらに全体を通してわかったことであるが、実効帯域関数の導出には必ずしも定常増分性やエルゴード性は必要なくて、入力過程の期待値を時刻の関数として陽に得られるのであればどんな場合であっても構わないということがわかった。定常増分性とエルゴード性があると、期待値の上界がトークンレートとバースト耐性値だけで与えられるために条件に課していた。このように得られる情報が増えれば増えるほど精密な評価ができるということもわかった。これは非常に自然で当たり前のことである。

今後の課題としてわかったのは、ネットワークモデルになると莫大な計算量が必要であって、これをなんとかしないと、判断が瞬時にできない。問題は、max-min 問題を解くときに目的関数が二つの非線形関数の min の最大値を求めるところにあって、代数的に解を求めることができない。しかしながら、数値解析的には、この二つの関数は単調かつ連続でどちらも凹関数であるという特徴がある。また、二つの関数は傾きがそれぞれ正と負であることはわかるので、それらの交点を探せばよいので、ニュートン法などで方程式を解く案が考えられる。

別の課題として、新たにわかったのは、漸近対数累積簿関数と min の交換法則について等号成立するための条件がわかっていないということである。特に確率変数列  $X, Y$  の独立性が担保できないときに max に関する交換は無条件にできるのに対して、min の場合は特殊ケース（独立、 $X$  はパラメータ  $\alpha, n$  のガンマ分布に従う、 $Y$  はパラメータ  $\beta, n$  のガンマ分布に従う）においてはパラメータによっては交換法則が成立していない場合があることが数値計算的に確かめられた。例にあげたケースは  $E(\min(X_n, Y_n))$  が正確に計算できるが、 $(1/n) \ln E(\min(X_n, Y_n))$  の極限値を計算する際に二項係数の処理が非常にむずかしく数学的な証明のレベルで交換法則が成立しないことはまだ確かめられていない。一般的にはどのような場合に交換法則が成立しない（等号が成立しない）か不明である。

Min に関する交換法則の等号成立条件を明確にすると、入力過程の累積積率母関数が陽にわかっているときに、正確な減衰率を求められる条件がわかるということである。

フローそのものがループ構造を持つ場合や折り返し双方向通信があるようなより複雑なトポロジを持つモデルに対しての拡張についても興味深い課題である。特に折り返しフローのモデルではルータと異なる特性を持つサーバなどについても出力過程を特徴づけることによって、ルータと同じような扱いでネットワークの性能を評価することができるかもしれない。

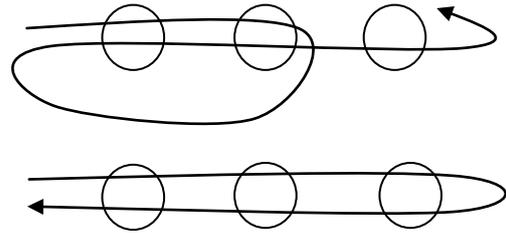


図. 自己ループをフローを持つネットワークと折り返しフローがあるネットワーク

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

高田 寛之 FIFO ノードとトークンパケットに調整された多入力を伴う非フィードフォワードネットワークに対する確率ネットワーク算法、待ち行列シンポジウム報文集、査読無、61-70、(2013-01)

高田 寛之、小林 和朝、Bahadur-Rao theorem and many flows asymptotics for tandem network with token bucket filters、待ち行列シンポジウム報文集、査読無、159-165、(2012-01)

高田 寛之、小林 和朝、FIFO 待ち行列と確率的ネットワーク算法、待ち行列シンポジウム報文集、査読無、228-233、(2011-01)

[学会発表] (計 3 件)

高田 寛之 FIFO ノードとトークンパケットに調整された多入力を伴う非フィードフォワードネットワークに対する確率ネットワーク算法、待ち行列シンポジウム、長崎県長崎市(2013-01)

高田 寛之、小林 和朝、Bahadur-Rao theorem and many flows asymptotics for tandem network with token bucket filters、待ち行列シンポジウム、静岡県浜松市、(2012-01)

高田 寛之、小林 和朝、FIFO 待ち行列と確率的ネットワーク算法、待ち行列シンポジウム

ム、京都府京都市、(2011-01)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)  
該当なし

○取得状況(計0件)  
該当なし

〔その他〕

ホームページ等  
該当なし

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

高田 寛之 (TAKADA HIROYUKI)  
長崎大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号：10297616

(2)研究分担者

該当なし

(3)連携研究者

該当なし