

平成 21 年 5 月 30 日現在

研究種目：若手研究 (B)
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18710131
 研究課題名 (和文) マルチメディアネットワークのための新しいトラフィックモデルに関する研究
 研究課題名 (英文) A new traffic model for multimedia networks
 研究代表者 増山 博之 (MASUYAMA HIROYUKI)
 (京都大学・大学院情報学研究科・助教)
 研究者番号：60378833

研究成果の概要：本課題では、マルチメディアネットワークにおける混雑現象の解明に向けて、マルチメディアトラフィックの数学モデルとしてマルチクラス・マルコフ型流体フローモデルを提案し、それを入力とする待ち行列モデルの解析とその応用を主たる目的とする。2006年度はマルチクラス・マルコフ型流体フローモデルを入力とする先着順型待ち行列モデルの理論解析および性能評価を実施し、2007年度以降は関連する待ち行列モデルや特殊な構造を持つマルコフ加法過程に関する理論的研究を行った。

交付額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2006年度 | 1,100,000 | 0 | 1,100,000 |
| 2007年度 | 1,000,000 | 0 | 1,000,000 |
| 2008年度 | 900,000 | 270,000 | 1,170,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,000,000 | 270,000 | 3,270,000 |

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学・社会システム工学・安全システム

キーワード：待ち行列, マルコフ型流体モデル, M/G/1型マルコフ連鎖, 定常裾確率, 漸近解析

1. 研究開始当初の背景

ブロードバンド通信が普及した今日では、多様化したニーズとトラフィックに対応したサービス品質制御技術の確立が強く望まれており、その実現にはマルチメディアトラフィックの適切なモデル化、さらには、それを入力とした待ち行列モデルの解析及び性能評価が極めて重要となっている。過去5年に渡って、研究代表者らはマルチメディアネットワークの性能評価解析モデルとして、マルチクラス・マルコフ型到着過程(MMAP: Multiclass Markovian Arrival Process)を入力とする待ち行列モデルを考え、その理

論解析および性能評価に関する研究を行ってきた。MMAPは待ち行列モデルの入力として扱いやすく、また、理論上は任意の到着過程を任意の精度で近似できることが知られているが、モデルパラメータが多く、実トラフィックへのフィッティングは容易ではない。このため、MMAP入力の待ち行列に関する理論的成果の応用はあまり進んでいない。したがって、実トラフィックへのフィッティングが容易な新しいトラフィックモデルの提案と、それを入力とする待ち行列モデルの研究は極めて重要であると考えられる。

近年、インターネット回線の急激な高速

化に伴い、パケットを流体として見たときの入力レートの変動がネットワークに対して支配的な影響を持つようになり、その結果、流体トラヒックモデルに注目が集まっている。一般的に、流体トラヒックモデルは加算的な個体を扱う通常のトラヒックモデルと比べ、モデルパラメータが少ないことが特徴としてあげられる。しかしながら、従来、理論解析が行われてきた流体待ち行列モデルでは到着フローが単一であるため、性質の異なるデータフローが混在するマルチメディアネットワークの特性を十分に表現することができない。そこで本研究では、マルチメディアトラヒックの解析モデルとして、マルチクラス・マルコフ型流体フロー(MMFF: Multiclass Markovian Fluid Flow)モデルを提案する。MMFFは前述のMMAPと同様、性質の異なる複数のデータフローが多重化されたトラヒックを表現できる一方で、いわゆる「流体近似」によってモデルパラメータが抑制されている。これにより、MMAPをトラヒックモデルに採用した場合と比べ、MMFFを入力とした待ち行列モデルに関する理論研究については円滑な応用が期待できる。

2. 研究の目的

(1) 数理モデルによる性能評価と知見収集

マルチメディアトラヒックに収容される個々のデータフローの特性やデータフロー間の相関構造が系内データ量や伝送遅延時間などの性能指標に及ぼす影響を、数理工学的見地から定性的・定量的に検証する。そのため、MMFFを入力とする待ち行列モデルを考え、系内流体量や遅延時間分布の平均や分散などの性能指標を導出する。さらに、理論解析に基づいた性能評価実験を実施し、マルチメディアトラヒックに対応したサービス品質制御技術の開発に向けた知見の収集を行う。また、これまで研究代表者らが取り組んできたMMAP入力の待ち行列モデルに関する研究結果と比較し、MMFFのトラフィックモデルとしての妥当性を検証する。この検証のため必要であれば、MMAP入力の待ち行列についても新たな理論解析を行う。

(2) 理論解析を支える数学的道具の整備

MMFFやMMAPなどのように性質の異なる複数の到着流を入力とする待ち行列モデルの研究はまだ十分に行われていない。特に流体モデルについては、研究代表者が知る限りその理論解析に関する先行研究はない。

ところで、MMFFやMMAPを入力とする待ち行

列モデルの解析には、M/G/1型と呼ばれるある特殊な構造を持ったマルコフ加法過程の定常分布や基本期間分布が密接に関係しており、それに関連した数学理論の発展は本研究で扱う待ち行列モデルの解析を大きく前進させることにつながる。そこで、本研究ではそうしたマルコフ加法過程の理論解析を行い、マルチメディアネットワークの性能解析を支える待ち行列理論の発展にも貢献したいと考えている。

3. 研究の方法

(1) MMFF入力の基本待ち行列の解析

マルチメディアトラヒックが引き起こす混雑現象の特性を解明するため、MMFFを入力とする先着順型待ち行列モデルの解析及び性能評価を行う。従来研究とは異なり、系内経過時間に着目した新しい解析手法を用いることで、各クラスの系内流体量及び遅延時間に関するモーメントの再帰式を導出し、それを基に高速かつ安定した数値計算アルゴリズムを構築する。さらに、様々なパラメータ設定の下で性能評価実験を行い、入力レートの変動や各クラス間の相関が系内流体量や遅延時間に及ぼす影響について調べる。

(2) 関連する従来型待ち行列モデルの解析

新たに提案したMMFF入力の待ち行列モデルに対応する従来型待ち行列モデルの理論解析を行う。待ち行列理論によって導かれる性能指標はたくさんあるが、なかでも、系内客数(待ち行列長)の裾分布に関する漸近公式は、スイッチやルータ等のバッファ容量を設計する上で極めて重要である。本研究では公式の適用範囲を広げるため、マルコフ加法過程に関する新しい研究成果を利用し、既知の結果より緩い条件下で裾分布の幾何漸近公式や劣指数漸近公式を示す。

(3) 解析手法の発展に向けた基礎研究の実施

「2. 研究の目的」でも述べたが、MMFFやMMAPを入力とする待ち行列モデルの解析にはM/G/1型マルコフ加法過程の定常分布や基本期間分布が重要な役割を果たしている。ここでは特に、複素関数論、行列解析、大偏差理論などを利用し、それらの分布の裾確率が有する漸近特性の解明に焦点を置いて研究を行う。また、得られた理論的成果は、MMFFや

MMAP入力の待ち行列モデルへの応用にとどまらず、破産確率(Ruin Probability)の漸近解析への応用も期待できる。

4. 研究成果

(1) MMFFを入力する先着順型待ち行列の解析

従来行われてきた単一クラス流体待ち行列モデルの研究では、系内流体量分布がみたす線形微分方程式から行列指数分布を導出するというアプローチが取られてきた。しかしながら、従来のこうした解析手法は単一クラスモデルを前提としたものであり、マルチクラスモデルには全く通用しない。そこで、本研究では系内経過時間という概念を流体待ち行列モデルに導入し、従来とは異なる解析手法を取る。先着順型サービスを仮定すると、定常状態における系内経過時間内に到着する流体量は、定常系内流体量に一致することが示される。この事実を利用し、各クラスの定常系内流体量に関する結合母関数を導出した。こうした本研究の解析手法は従来の流体待ち行列研究とは一線を画したものであり、その独創性は非常に高いと言える。この研究成果は2006年7月に国際会議で発表し、その後2007年に海外英文誌に掲載された。

(2) 関連する従来型待ち行列モデルの解析

① 「複数サーバ待ち行列の過渡解析」

定常性を仮定しない過渡解析は応用上非常に重要であるが、MMFFを入力とする待ち行列モデルに対して過渡解析を行うのは困難である。そこで、代替モデルとして、集団マルコフ型到着過程(MMAPの特別な場合)を入力とする複数サーバ・固定長サービスモデルを考えた。これは流体を小さな固定長セルの集まりとして離散化したモデルに相当する。こうした代替モデルに対して過渡解析を行い、系内総セル量の時間依存状態分布に関する精度保証付き計算アルゴリズムを構築した。この成果は2007年3月、国内英文誌に掲載された。さらに、系内総セル量の定常裾分布の漸近的な性質についても研究を行い、一定の理論的成果を得ることができた。その成果は2006年4月に国内研究会で発表した。

② 「単一サーバ待ち行列の漸近解析」

近年、インターネットを流れるファイルサイズは裾の重い分布に従うことが確認されており、裾の重いサービス時間分布を持つ待ち行列モデルの解析は極めて重要である。当該研究では、最新の大偏差理論や行列解析法を駆使することで、集団マルコフ型到着過程を入力とする待ち行列モデルの系内客数分布の裾確率に対する劣指數的漸近公式を導出した。この漸近公式はある種

の極限公式であるが、基本的なシステムパラメータで記述されているため、スイッチやルータ等のバッファ容量の設計に向けた近似公式としての利用が期待される。また、非ポアソン型到着モデルに対して、系内客数分布の裾確率の劣指數的漸近公式を提示したのは当該研究が初めてである。この成果の一部は2008年1月国内研究会にて発表した。

(3) M/G/1型マルコフ加法過程に関する研究

M/G/1型マルコフ加法過程の一つである離散時間M/G/1型マルコフ連鎖の定常裾確率について研究を行った。定常裾確率は応用上重要な性能指標の一つであるが、一般に、漸化式による繰り返し計算によって求める以外に方法はないため、その減衰特性を正確に調べるのは容易ではない。よって、定常裾確率の漸近公式に関する研究が近年注目を集めている。ほとんどの先行研究では、定常裾確率の減衰が非周期的であるという仮定が置かれているが、本研究では、この仮定を外した条件下で漸近公式を導出すると共に、定常裾確率の減衰における周期と遷移確率行列を構成するブロック行列との関係を完全に解明した。これらの成果は2008年10月と2009年1月の国内研究会で発表し、共同研究者である大学院生が研究奨励賞などを受賞した。

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5件) ※ すべて査読あり

- (1) Shun Muraoka, Hiroyuki Masuyama, Shoji Kasahara and Yutaka Takahashi, "FEC Recovery Performance for VideoStreaming Services over Wired-Wireless Networks," Performance Evaluation, vol. 66, no. 6, 327-342, 2009.
- (2) Tuan Phung-Duc, Hiroyuki Masuyama, Shoji Kasahara and Yutaka Takahashi, "Performance Analysis of Optical Burst Switched Networks with Limited-Range Wavelength Conversion, Retransmission and Burst Segmentation," Journal of the Operations Research Society of Japan, vol. 52, no. 1, 58-74, 2009.
- (3) Yusuke Uchida, Sei Sunahara, Eisaburo Itakura, Hiroyuki Masuyama, Shoji Kasahara and Yutaka Takahashi, "Proactive Retransmission and Buffer Management for Layered Video

Transmission over Wireless Channel,"
IEICE Transactions on Communications,
vol.E91-B, no. 9, pp.2897-2906, 2008.

- (4) Hiroyuki Masuyama and Tetsuya Takine,
"Multiclass Markovian Fluid Queues,"
Queueing Systems, vol.56, nos.3-4,
pp.143-155, 2007.
- (5) Kentaro Daikoku, Hiroyuki Masuyama,
Tetsuya Takine and Yutaka Takahashi,
"Algorithmic Computation of the
Transient Queue Length Distribution in
the BMAP/D/c Queue," Journal of the
Operations Research Society of Japan,
vol.50, no.1, pp.55-72, 2007.

[学会発表] (計 32 件)

- (1) Kenji Kirihara, Hiroyuki Masuyama,
Shoji Kasahara and Yutaka Takahashi,
"On the performance of
H.264/SVC-based video streaming
services with FEC recovery," 電子情
報通信学会技術研究報告 (NS2008-148),
pp.27-32, 沖縄残波岬ロイヤルホテル,
2009/03/03-04.
- (2) Tuan Phung-Duc, 増山 博之,
笠原 正治, 高橋 豊, "Continued
fraction solutions of M/M/3/3 and
M/M/4/4 retrial queues," 第 27 回待
ち行列シンポジウム「確率モデルとそ
の応用」, pp.98-107, pp.128-137, 長野
県松本市, 2009/01/21-23.
- (3) 倉谷 和彦, 増山 博之, 笠原 正治,
高橋 豊, "Performance analysis of
decentralized load distribution
systems in peer-to-peer communication
networks: an approach by
peer-population process with
nonstationary input," 第 27 回待ち行
列シンポジウム「確率モデルとその応
用」, pp.128-137, 長野県松本市,
2009/01/21-23.
- (4) Tatsuaki Kimura, Kentaro Daikoku,
Hiroyuki Masuyama and Yutaka
Takahashi, "Light-tailed
Asymptotics of Stationary Tail
Probability Vectors of Markov Chains
of M/G/1 Type," 第 27 回待ち行列シ
ンポジウム「確率モデルとその応用」,
pp.188-197, 長野県松本市,
2009/1/21-23.
- (5) 木村 達明, 増山 博之, 高橋 豊,

"M/G/1 型マルコフ連鎖における定常裾
分布ベクトルの幾何漸近公式," 日本
OR学会 研究部会「若手によるOR横断研
究」主催「若手研究交流会 2008」, 奈良
県明日香村, 2008/10/11-12.

- (6) フンドック トゥアン, 増山 博之, 笠
原 正治, 高橋 豊, "系内状態に依存し
た到着・サービスを有する M/M/c/K 再試
行型待ち行列," 日本 OR学会 研究部会
「若手による OR 横断研究」主催「若手研
究交流会 2008」, 奈良県明日香村,
2008/10/11-12.
- (7) 倉谷 和彦, 増山 博之, 笠原 正治,
高橋 豊, "時間依存型ピア母集団過程
と非斉時無限サーバ・モデルによる P2P
実時間サービス網の性能評価," イン
ターネット技術第 163 委員会 (ITRC) 次
世代ネットワーク構築のための基盤技
術研究分科会 (NGN) ワークショップ
(ITRC-NGN 2008), 三重県桑名市,
2008/09/24-25.
- (8) 桐原 健爾, 増山 博之, 笠原 正治,
高橋 豊, "GI+M/M/1/K による可変ブロ
ックサイズを考慮したストリーミング
配信の性能解析: FEC による品質改善効
果の検討," インターネット技術第 163
委員会 (ITRC) 次世代ネットワーク構築
のための基盤技術研究分科会 (NGN) ワ
ークショップ (ITRC-NGN 2008), 三重県桑
名市, 2008/09/24-25.
- (9) Tuan Phung-Duc, Hiroyuki Masuyama,
Shoji, KASAHARA, TAKAHASHI Yutaka,
"On Continued Fraction Solutions for
Markov Chains Arising from
Multiserver Retrial Queues with
Balking," 日本オペレーションズ・リ
サーチ学会 2008 年秋季研究発表会, ア
ブストラクト集, pp.264-265, 札幌市,
2008/09/10-11.
- (10) 倉谷 和彦, 増山 博之, 笠原 正治,
高橋 豊, "時間依存型ピア母集団過程
を考慮した P2P 実時間サービス網の性能
解析 ~ 非斉時ポアソン過程を持つ
無限サーバ・モデルによるアプローチ
~, " 信学技報, vol.108, no.203,
NS2008-57, pp.87-92, 東北大学,
2008/09/11-12.
- (11) Tomoya Tainaka, Hiroyuki Masuyama,
Shoji Kasahara and Yutaka Takahashi,
"An analytical approach to
throughput unfairness in IEEE 802.11

- multihop wireless LANs,"The 3rd Asia-Pacific Symposium on Queueing Theory and Network Applications (QTNA2008), Taipei, Taiwan, July 30-August 2, 2008.
- (12) Tuan Phung-Duc, Hiroyuki Masuyama, Shoji Kasahara and Yutaka Takahashi, "Analytical Solutions for M/M/3/3 and M/M/4/4 Retrial Queues," The 3rd Asia-Pacific Symposium on Queueing Theory and Network Applications (QTNA2008), Taipei, Taiwan, July 30-August 2, 2008.
- (13) Kazuhiko Kuraya, Hiroyuki Masuyama, Shoji Kasahara and Yutaka Takahashi, "Performance Analysis of Decentralized User Information Management System for Peer-to-Peer Real-Time Communication Services," The 6th Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP08), pp.520-524, Graz, Austria, July 23-25, 2008.
- (14) フンドック トゥアン, 増山 博之, 笠原 正治, 高橋 豊, "確率的サーバ選択・再試行型待ち行列を用いたバースト・セグメンテーション法と波長変換器の性能評価," 日本オペレーションズ・リサーチ学会 2008 年春季研究発表会, アブストラクト集, pp.128-129, 京都市, 2008/03/25-26.
- (15) Tatsuaki Kimura, Hiroyuki Masuyama and Yutaka Takahashi, "Geometric Asymptotics of the Tail Distribution Vector of a Markov Chain of M/G/1 Type," Chinese Academy of Sciences - Kyoro University Joint Workshop on Mathematical Methods for Informatics, Engineering and Management, Beijing, China, 2008/03/17-18.
- (16) Shuichiro Senda, Hiroyuki Masuyama, Shoji Kasahara and Yutaka Takahashi, "A Stochastic Fluid Model Approach to the Analysis of User-Level QoS Performance of On-Demand P2P Streaming Services," 電子情報通信学会技術研究報告 (NS2007-139), pp.53-58, 万国津梁館 (沖縄), 2008/03/07-08.
- (17) 倉谷 和彦, 増山 博之, 笠原 正治, 高橋 豊, "オンラインノード数の変動を考慮した P2P 実時間通信サービスの性能解析," 電子情報通信学会技術研究報告 (NS2007-164), pp.187-192, 万国津梁館 (沖縄), 2008/03/07-08.
- (18) Shun Muraoka, Hiroyuki Masuyama, Shoji Kasahara and Yutaka Takahashi, "On the Performance of FEC Recovery for Video Streaming Services over Wired-Wireless Networks," 電子情報通信学会技術研究報告 (NS2007-180), pp.275-278, 万国津梁館 (沖縄), 2008/03/07-08.
- (19) Hiroyuki Masuyama, Bin Liu and Tetsuya Takine, "Subexponential Asymptotics of the BMAP/GI/1 Queue, 待ち行列シンポジウム「確率モデルとその応用」," pp.87-96, 京都市, 2008/01/21-23.
- (20) 村岡 俊, 増山 博之, 笠原 正治, 高橋 豊, "Performance Analysis of FEC Recovery for Video Streaming Services over Wired-Wireless Networks," 待ち行列シンポジウム「確率モデルとその応用」, pp.168-177, 京都市, 2008/01/21-23.
- (21) 増山 博之, "M/GI/1 待ち行列における系内客数分布の劣指数的漸近特性について," 日本 OR 学会研究部会「若手 OR 研究者の会」第 10 回研究会, 京都大学, 2007/12/08.
- (22) Kenji Kiriara, Hiroyuki Masuyama, Shoji Kasahara and Yutaka Takahashi, "Performance Analysis of a Decentralized Content Delivery System with FEC Recovery," Queueing Theory and Network Applications 2007 (QTNA2007), pp.243-252, Kobe, August 1-4, 2007.
- (23) Shun Muraoka, Hiroyuki Masuyama, Shoji Kasahara and Yutaka Takahashi, "Performance Analysis of FEC Recovery Using Finite-Buffer Queueing System with General Renewal and Poisson Inputs," Managing Traffic Performance in Converged Networks, Proceedings of the 20th International Teletraffic Congress - ITC20, LNCS4516, Springer-Verlag, pp.707-718, Ottawa, Canada, June 17-21, 2007.
- (24) 倉谷 和彦, 増山 博之, 笠原 正治,

高橋 豊, ``ピアノード数の時間変動を考慮したP2P実時間サービス網の性能解析,`` 電子情報通信学会 2007年総合大会, 講演論文集, B-6-24, 名城大学, 2007/03/20.

- (25) 大黒 健太朗, 増山 博之, 滝根 哲哉, 高橋 豊, ``Periodicity in Geometric Asymptotics of Markov Chains of M/G/1 Type,`` 待ち行列シンポジウム「確率モデルとその応用」, pp.106-115, 福島県郡山市, 2007/01/22-24.
- (26) Tuan Phung-Duc, 増山 博之, 笠原 正治, 高橋 豊, ``Performance Analysis of Burst Segmentation with Upper-layer Retransmission for Optical Burst Switched Networks,`` 待ち行列シンポジウム「確率モデルとその応用」, pp.175-184. 福島県郡山市, 2007/01/22-24.
- (27) 大黒 健太朗, 増山 博之, 滝根 哲哉, 高橋 豊, ``BMAP/D/c 待ち行列における系内客数分布の漸近解析,`` 日本OR学会研究部会「若手OR研究者の会」第4回研究会, 京都大学, 2006/10/27.
- (28) Tuan Phung-Duc, Hiroyuki Masuyama, Shoji Kasahara and Yutaka Takahashi, ``Burst Segmentation with Upper-Layer Retransmission and Its Effect on Wavelength Utilization for Optical Burst Switched Networks,`` Proceedings of the First International Conference on Communications and Electronics (ICCE'06), pp.35-40, Hanoi, Vietnam, October 10-14, 2006.
- (29) 千田 修一郎, 増山 博之, 笠原 正治, 高橋 豊, ``大容量ファイル転送における前方誤り訂正方式のバーストロス耐性解析,`` 電子情報通信学会 2006年ソサイエティ大会講演論文集, B-6-46, 金沢大学, 2006/09/19-22.
- (30) 村岡 俊, 増山 博之, 笠原 正治, 高橋 豊, ``バックグラウンド・トラヒックを考慮したFECの性能評価,`` 日本オペレーションズ・リサーチ学会 2006年度秋季研究発表会, アブストラクト集, pp.120-121, 愛知大学, 2006/09/12-13.
- (31) Shuichiro Senda, Hiroyuki Masuyama, Shoji Kasahara and Yutaka Takahashi, ``FEC Performance in Large File

Transfer over Bursty Channels,`` Proceedings of the 4th International Working Conference on Performance Modelling and Evaluation of Heterogeneous Networks (HET-NETs'06), D. Kouvatso (ed), pp.P07/1-10, West Yorkshire, U.K., September, 10-13, 2006.

- (32) 大黒 健太朗, 増山 博之, 滝根 哲哉, 高橋 豊, ``BMAP/D/c 待ち行列における系内客数分布の幾何漸近特性のための十分条件,`` 電子情報通信学会技術研究報告 (NS2006-1), pp.1-4, ホテル日航高知 旭ロイヤル (高知県), 2006/04/20-21.

[産業財産権]

○出願状況 (計2件)

- (1) 名称: データ通信システム, データ送信装置データ送信方法, データ受信装置およびデータ受信方法
発明者: 板倉 英三郎, 砂原 星, 高橋 豊, 笠原 正治, 増山 博之, 内田 祐介
権利者: 同上
種類: 特許
番号: PCT/JP2007/066917
出願年月日: 2007年8月30日
国内外の別: 国際
- (2) 名称: スケーラブル映像配信に向けた予測再送制御
発明者: 板倉 英三郎, 砂原 星, 高橋 豊, 笠原 正治, 増山 博之, 内田 祐介
権利者: 同上
種類: 特許
番号: 特願 2006-242187
出願年月日: 2006年9月6日
国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

<http://infosys.sys.i.kyoto-u.ac.jp/~masuyama/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

増山 博之 (MASUYAMA HIROYUKI)
京都大学・大学院情報学研究科・助教
研究者番号: 60378833