

令和 4 年 6 月 16 日現在

機関番号：12102

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2021

課題番号：18K18006

研究課題名(和文) 処理能力可変型待ち行列システムの理論的深化と省エネデータセンターへの応用

研究課題名(英文) Deepening the theory of queueing systems with variable processing rate and their applications in energy-saving data-centers

研究代表者

フン・ドック トゥアン (Phung-Duc, Tuan)

筑波大学・システム情報系・准教授

研究者番号：20633465

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：現代の情報社会を支える情報基盤が大規模データセンターである。大規模データセンターは数万のコンピュータで構成され、大量の電力を消費している。しかしながら、現実ではこれらのコンピュータの稼働率が30~40%に留まる。そこで、稼働していないサーバを停止しておき、負荷が増加するときに停止したサーバを再稼働させることで電力消費量を抑えながら、ジョブの遅延時間が軽減されると期待される。本研究では該当データセンターを処理速度可変型待ち行列でモデル化・性能解析をすることで、データセンターの適切な運用方策を提案・性能評価を行う。

研究成果の学術的意義や社会的意義

昨今の情報社会において、Facebookなどのソーシャルネットワーク、Zoom、MS Teamsなどのビデオ会議、そしてDropboxなどのストレージサービスは日常生活及び仕事で不可欠となっている。これらのシステムを支える情報インフラ基盤はデータセンターである。データセンターでは多数のコンピュータが存在して、大量の電力を消費している。本研究課題では大規模データセンターを数理モデル化し、モデルを解析することで、システムを効率的に運営するための性能評価量を提供する。

研究成果の概要(英文)：Large-scale data centers are important information infrastructure that supports the modern information society. A large data center consists of tens of thousands of computers and consumes a large amount of power. However, in reality, the rate that these computers are busy processing jobs remains at 30-40%. Therefore, it is expected that the job delay time will be reduced while reducing the power consumption by turning off non-operating server and restarting the stopped server when the load increases. In this research, we propose the appropriate operation policy of the data center and evaluate the performance by modeling the relevant data center by queueing systems with a variable processing speed and analyzing the performance.

研究分野：数理情報学

キーワード：マルコフ連鎖 待ち行列理論 流体極限 拡散極限 データセンター スケール極限 省エネ

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

世界規模でみるとデータセンターの電力消費量は情報システム全体の電力消費量の大きな割合を示している。したがって、情報システムの電力消費量を削減するためにはデータセンターにおける省エネが非常に期待される。このため、データセンターにおいて、応答時間の性能を維持しながら電力消費量を抑えるメカニズムが非常に重要である。一方、実際に多くのデータセンター内のサーバの稼働率が30~40%に留まっている。しかし、現在の技術ではサーバがジョブを処理していなくても処理時の60%の電力を消費している。このため、大量の電力はジョブを処理していないサーバによって消費される待機電力である。そこで、単純な考え方としてデータセンターのサーバ数を減らせばよい。しかし、ジョブの到着が確率的に変動しており、この単純な方法を実施すると、ジョブの応答時間が非常に悪くなる。そこで、稼働していないサーバを一時的に停止しておき、処理すべきジョブが溜まるとまた停止したサーバを再び稼働させる ON-OFF の制御フレームワークが提案されている。ON-OFF 制御を実施すると、確かに電力が節約できる可能性があるが、応答時間が長くなってしまう。

本研究は大規模データセンターにおいて、電力消費量と遅延時間のトレードオフを超高速に解析し、データセンターにおける最適な運用方策を提供することが目的である。そのために ON-OFF 制御を採用するデータセンターを起動時間 (Setup 時間) がある複数サーバ待ち行列システムでモデル化・解析を行う。ON-OFF 制御は動的にサーバを制御する方法であり、ジョブを処理していない空きサーバを停止しておき、負荷が増大すると、またこれらのサーバを起動する。しかし、サーバを起動するために電力が必要であり、尚且つ時間がかかる。コンピュータの起動時間中は当然のことながら、仕事ができないが電力消費量は稼働時と同じ程度である。さらに、サーバの停止による遅延がサービス品質を劣化させ、ユーザの満足度を低下させてしまう。このために電力消費量と遅延時間の間にトレードオフ関係があり、両者を定量的に評価することでバランスの良い運用ができる。もっとも基本的な ON-OFF 制御を採用する複数サーバシステムでは系内ジョブ数と稼働中サーバの数の情報で二次元マルコフ連鎖を構成出来る。

既存研究の仮定として、データセンターに到着する要求 (仕事) のジョブの処理時間や起動時間が指数分布と仮定したり単純な運用方式のみを仮定したり、非常に限定的である。そのため、既存研究の解析結果は大まかな性能評価として得られているが、現実的な運用に近づくためには、より精密な制御や運用方式の提案や汎用性の高いサービス時間分布を仮定したモデルの開発が必須である。そこで、本研究課題では研究代表者自身の成果を拡張しつつ、実際の省エネデータセンターにより近づくモデルの開発・解析を行う。

### 2. 研究の目的

上記にある、実際の省エネデータセンターにより近づくモデルの開発・解析を行う目的に向けて、新しいマルコフ連鎖や待ち行列モデルの開発を行い、以下の主な課題に取り組んだ。

課題 1) 実際のデータセンターではより高品質なサービスを提供するため一部のサーバを常に ON (固定ブロック) にして、他のサーバを負荷に応じて ON にしたり OFF にしたりする。このようにすることで、品質保証と電力節約の両立が可能であると考えられる。このモデルは研究代表者の過去文献の方法を使えば、解析が可能である。データセンター内のジョブ数の分布を計算でき、それを使えば平均応答時間や電力消費量を求めることが可能である。この成果は台湾の国立陽明交通大学のグループと共著論文として発表した。

課題 2) データセンターでは平均応答時間だけではなく、例えば、30 秒以内で 95% のジョブが処理完了されるような性能指標 (Service Level Agreement, SLA)、すなわち、応答時間の分布が必須となる。しかし、このシステムでは、後に到着するジョブもシステムの処理能力に影響するため、あるジョブが到着した時点のデータセンターの状態のみを使って応答時間の分布が計算出来ない。応答時間分布を計算するためには注目ジョブの前に並ぶジョブ数及び後ろに並んでいるジョブ数を考慮する必要があり、稼働数と合わせて三次元吸収マルコフ連鎖を考える必要がある。本研究課題ではこの課題に取り組み、共著論文を発表した。

課題 3) 実際の大規模なデータセンターでは一度に起動・シャットダウンするサーバが複数である。この特徴を踏まえて、ブロックでサーバを起動・シャットダウンをする複数サーバ待ち行列の提案・解析を行った。この研究では電力消費量を含む運用コストを最小化する最適なブロックのサイズを求めることが目的である。本テーマは台湾の国立陽明交通大学のグループと共同研究を行い、共著論文として発表した。

課題 4) 上記の研究テーマは複数サーバという現実的な仮定をする代わりに、ジョブの処理時間が指数分布に従うものと仮定した。しかし、実際のジョブ処理時間の分布はより複雑と考えられ、研究代表者はデータセンターのマクロな視点で見ると、データセンター全体を単一サーバ待ち行列システムと見なし、考察した。しかし、実際に複数サーバで節電のため電力を入れたり消したりする制御が行われるため、処理時間が系内の仕事量に依存していると考えることが自然である。このように、処理時間が系内仕事量に依存した任意分布に従った単一サーバ待ち行列の提案・解析を行った。本テーマは共著論文として発表した。さらに、より詳細な計算をするため、処理時間を相型分布と仮定し、系内仕事量の分布を計算できる形にした。この成果は共著論

文として発表した。

課題5)省エネ方策を実施することにより,ジョブが到着したときにすぐにサービスが受けられない事象が生じる。このような場合はジョブが後でサービスを受けるため再度の到着を試みることがあると考えられる。このようなジョブの再試行挙動を考慮する必要がある。研究代表者は再試行挙動を考慮したモデルの構築・解析を行った。また,再試行時間が長い場合のシステムの漸近的な挙動を調べた。これらの取り組みの結果は学術論文誌の論文として掲載した。

### 3. 研究の方法

課題1に対して,研究代表者自身の過去文献の方法を拡張して解析した。具体的に該当システムを稼働サーバ数と系内容数という二つの情報を用いて二次元マルコフ連鎖を構築し解析した。このマルコフ連鎖は特別な推移構造を持つため,状態数と同じオーダーの計算量で定常分布を計算することができ,それによって高速な性能評価を可能にした。

課題2ではシステムの定常分布を求める部分は課題1と同じ方法でできたが,応答時間を求めるためには,到着したジョブが特定の状態で到着した場合,その状態から出発して,そのジョブの処理が終わるまでの時間の分布を計算する必要がある。しかし,この時間の間に新たに到着するジョブがサーバの処理速度を変える可能性があるため,注目ジョブの後に到着するジョブの情報も保持する必要がある。そこで,注目ジョブの前に並ぶジョブ数,稼働サーバ数と後で到着ジョブ数の3次元で構成する吸収マルコフ連鎖を解析することで,応答時間の分布が得られた。

課題3では課題1及び2の方法を拡張し,システムの定常分布を求め,平均応答時間及び消費電力量を求めることができた。さらにこれらに基づくコスト関数を最小化するため,最適化理論を用いて,最適なブロックサイズなどを求めた。

課題4は再生理論の結果及びレベルクロッシング法を用いて,系内仕事量の分布に関する微分方程式を導出・解析した。さらに,ジョブの分布が相型である場合,微分方程式の解はより詳細に計算できることを示せた。それに加えて,流体型待ち行列の理論を駆使して,系内仕事量の閾値に応じて変化するサービス速度の場合について別の解を求めた。

課題5では再試行中客数,稼働中サーバ数とサーバ群に入ったジョブ数の3次元マルコフ連鎖を構築して,安定性を調べるとともに数値計算によりシステムの性能を調べた。さらに,再試行時間が長い場合に関して流体極限及び拡散極限を調べ,より簡潔にシステムの本質を調べることができた。

### 4. 研究成果

課題1の成果として,モデルの提案・解析を行い,省エネデータセンターのほか,5Gネットワークへ応用を言及し,台湾国立陽明交通大学のグループと国際会議で発表するとともに共著論文を発表した。課題2は応答時間の分布を求め,データセンターのSLA指標(Service Level Agreement)として提案した。成果は国際学術論文誌に掲載した。課題3において,サーバをグループで起動したり,シャットダウンしたりすることで,データセンター内の電力を抑えながら性能を維持する方法について提案・解析を行い,その成果がIEEE Transactions on Mobile Computing誌に掲載された。課題4の特筆な結果として,ジョブの処理時間が任意の分布に従う場合を仮定して,系内仕事量の分布の特徴づけを行った。この成果は国際会議QTNA2019で論文として発表し, Best Paper Awardを受賞した。さらに,ジョブの処理時間が相型分布に従う場合と系内の仕事量に応じてサービスの速度を複数の閾値で制御し,動的に変化するモデルを提案・解析した。この成果はQueueing Systems誌で出版された。課題5の安定性及び数値計算による性能評価の成果と再試行時間が長い場合の流体極限及び拡散極限に関する成果をそれぞれ論文誌の論文として発表した。それに加え,速度可変サービスシステムの確率モデルを網羅的にサーベイし,招待論文として英文書籍の一章として出版した。そのほか,本科研費課題の補助を受けた期間において,ほかのテーマも新たに展開し,多くの研究成果を出すことができた。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計32件（うち査読付論文 32件 / うち国際共著 23件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Nazarov Anatoly, Moiseev Alexander, Phung-Duc Tuan, Paul Svetlana	4. 巻 8
2. 論文標題 Diffusion Limit of Multi-Server Retrial Queue with Setup Time	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Mathematics	6. 最初と最後の頁 2232 ~ 2232
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/math8122232	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Sakuma Yutaka, Boxma Onno, Phung-Duc Tuan	4. 巻 98
2. 論文標題 An M/PH/1 queue with workload-dependent processing speed and vacations	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Queueing Systems	6. 最初と最後の頁 373 ~ 405
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11134-021-09701-2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Dragieva Velika, Phung-Duc Tuan	4. 巻 12023
2. 論文標題 Queueing Analysis of Cognitive Radio Networks with Finite Number of Secondary Users	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 18 ~ 32
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-62885-7_2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Yazici Mehmet Akif, Phung-Duc Tuan	4. 巻 12289
2. 論文標題 M/M/1 Vacation Queue with Multiple Thresholds: A Fluid Analysis	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 148 ~ 152
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-59854-9_12	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Phung-Duc Tuan	4. 巻 -
2. 論文標題 Batch Arrival Multiserver Queue with State-Dependent Setup for Energy-Saving Data Center	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Probability and Stochastic Processes	6. 最初と最後の頁 421 ~ 440
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-981-15-5951-8_25	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nazarov Anatoly, Phung-Duc Tuan, Izmailova Yana	4. 巻 12563
2. 論文標題 Multidimensional Central Limit Theorem of the Multiclass M/M/1/1 Retrial Queue	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 298 ~ 310
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-66471-8_23	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Nazarov Anatoly, Phung-Duc Tuan, Paul Svetlana, Lizyura Olga	4. 巻 12563
2. 論文標題 Diffusion Approximation for Multiserver Retrial Queue with Two-Way Communication	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 567 ~ 578
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-66471-8_43	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Nazarov Anatoly, Phung-Duc Tuan, Paul Svetlana, Lizyura Olga, Shulgina Kseniya	4. 巻 1391
2. 論文標題 Central Limit Theorem for an M/M/1/1 Retrial Queue with Unreliable Server and Two-Way Communication	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Communications in Computer and Information Science	6. 最初と最後の頁 120 ~ 130
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-72247-0_9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Nazarov Anatoly, Phung-Duc Tuan, Izmailova Yana	4. 巻 1391
2. 論文標題 Asymptotic-Diffusion Analysis of Multiserver Retrial Queueing System with Priority Customers	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Communications in Computer and Information Science	6. 最初と最後の頁 236 ~ 250
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-72247-0_18	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yajima, M. and Phung-Duc, T.	4. 巻 129
2. 論文標題 A Central Limit Theorem for a Markov-Modulated Infinite-Server Queue with Batch Poisson Arrivals and Binomial Catastrophes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Performance Evaluation	6. 最初と最後の頁 2-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.peva.2020.102082	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Phung-Duc, T. and Kawanishi, K.	4. 巻 15
2. 論文標題 Multiserver Retrial Queue with Setup Time and its Application to Data Centers	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Industrial and Management Optimization	6. 最初と最後の頁 15-35
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.peva.2018.10.002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nazarov, A., Phung-Duc, T. and Paul, S.	4. 巻 28
2. 論文標題 Slow Retrial Asymptotics for a Single Server Queue with Two-Way Communication and Markov Modulated Poisson Input	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Systems Science and Systems Engineering	6. 最初と最後の頁 181-193
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11518-018-5404-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Fiems, D. and Phung-Duc, T.	4. 巻 277
2. 論文標題 Light-Traffic Analysis of Random Access Systems without Collisions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Annals of Operations Research	6. 最初と最後の頁 311-327
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10479-017-2636-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Devos Arnaud, Walraevens Joris, Phung-Duc Tuan, Bruneel Herwig	4. 巻 16
2. 論文標題 Analysis of the queue lengths in a priority retrial queue with constant retrial policy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Industrial and Management Optimization	6. 最初と最後の頁 2813 ~ 2842
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3934/jimo.2019082	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Phung-Duc Tuan, Kawanishi Ken ' ichi	4. 巻 293
2. 論文標題 Delay performance of data-center queue with setup policy and abandonment	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Annals of Operations Research	6. 最初と最後の頁 269 ~ 293
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10479-019-03268-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Dragieva Velika I., Phung-Duc Tuan	4. 巻 293
2. 論文標題 A finite-source M/G/1 retrial queue with outgoing calls	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Annals of Operations Research	6. 最初と最後の頁 101 ~ 121
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10479-019-03359-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Dragieva Velika, Phung-Duc Tuan	4. 巻 1109
2. 論文標題 On the Busy Period in a Finite-Source Retrial Queue with Outgoing Calls	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Communications in Computer and Information Science	6. 最初と最後の頁 1~13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-33388-1_1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Nazarov, A., Phung-Duc, T., Paul, S. and Lizura, O.	4. 巻 1109
2. 論文標題 Single Server Queues with Batch Poisson Input and Multiple Types of Outgoing Calls	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Communications in Computer and Information Science	6. 最初と最後の頁 177-187
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-33388-1_15	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Nazarov, A., Phung-Duc, T., Paul, S. and Lizura, O.	4. 巻 11965
2. 論文標題 Asymptotic-Diffusion Analysis for Retrial Queue with Batch Poisson Input and Multiple Types of Outgoing Calls	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 207-222
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-36614-8_16	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Dragieva Velika, Phung-Duc Tuan	4. 巻 12023
2. 論文標題 Queueing Analysis of Cognitive Radio Networks with Finite Number of Secondary Users	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 18~32
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-62885-7_2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する



1. 著者名 Nakamura Ayane, Phung-Duc Tuan, Ando Hiroyasu	4. 巻 12023
2. 論文標題 Queueing Analysis for a Mixed Model of Carsharing and Ridesharing	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 42 ~ 56
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-62885-7_4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Phung-Duc Tuan, Fiems Dieter	4. 巻 12023
2. 論文標題 Exact Performance Analysis of Retrial Queues with Collisions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 144 ~ 157
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-62885-7_11	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Makino, Y. and Phung-Duc, T.	4. 巻 -
2. 論文標題 Queueing Analysis of Taxi Stand Considering Boarding Time	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of The 2019 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (NOLTA2019)	6. 最初と最後の頁 32-35
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Walraevens Joris, Claeys Dieter, Phung-Duc Tuan	4. 巻 127-128
2. 論文標題 Asymptotics of queue length distributions in priority retrial queues	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Performance Evaluation	6. 最初と最後の頁 235 ~ 252
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.peva.2018.10.004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Phung-Duc Tuan, Kawanishi Ken'ichi	4. 巻 15
2. 論文標題 Multiserver retrial queue with setup time and its application to data centers	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Industrial & Management Optimization	6. 最初と最後の頁 15 ~ 35
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3934/jimo.2018030	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yajima Moeko, Phung-Duc Tuan	4. 巻 129
2. 論文標題 A central limit theorem for a Markov-modulated infinite-server queue with batch Poisson arrivals and binomial catastrophes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Performance Evaluation	6. 最初と最後の頁 2 ~ 14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.peva.2018.10.002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nazarov Anatoly, Phung-Duc Tuan, Paul Svetlana	4. 巻 28
2. 論文標題 Slow Retrial Asymptotics for a Single Server Queue with Two-Way Communication and Markov Modulated Poisson Input	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Systems Science and Systems Engineering	6. 最初と最後の頁 181 ~ 193
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11518-018-5404-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Morozov Evsey, Phung-Duc Tuan	4. 巻 10932
2. 論文標題 Regenerative Analysis of Two-Way Communication Orbit-Queue with General Service Time	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 22 ~ 32
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-319-93736-6_2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Paul Svetlana、Phung-Duc Tuan	4. 巻 912
2. 論文標題 Retrial Queueing Model with Two-Way Communication, Unreliable Server and Resume of Interrupted Call for Cognitive Radio Networks	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Communications in Computer and Information Science	6. 最初と最後の頁 213 ~ 224
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-319-97595-5_17	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Nazarov Anatoly、Phung-Duc Tuan、Paul Svetlana	4. 巻 919
2. 論文標題 Unreliable Single-Server Queue with Two-Way Communication and Retrials of Blocked and Interrupted Calls for Cognitive Radio Networks	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Communications in Computer and Information Science	6. 最初と最後の頁 276 ~ 287
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-319-99447-5_24	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Ren Yi、Phung-Duc Tuan、Liu Yi-Kuan、Chen Jyh-Cheng、Lin Yi-Hao	4. 巻 -
2. 論文標題 ASA: Adaptive VNF Scaling Algorithm for 5G Mobile Networks	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of 2018 IEEE 7th International Conference on Cloud Networking (CloudNet)	6. 最初と最後の頁 1 ~ 4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/CloudNet.2018.8549542	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yajima M.、Phung-Duc T.	4. 巻 46
2. 論文標題 A central limit theorem for a Markov-modulated infinite-server queue with batch Poisson arrivals and binomial catastrophes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review	6. 最初と最後の頁 33 ~ 34
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3308897.3308911	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計24件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 13件）

1. 発表者名 Phung-Duc, T. and Fiems, D.
2. 発表標題 Exact Performance Analysis of Retrial Queues with Collisions
3. 学会等名 ASMTA 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Dragieva, V. I. and Phung-Duc, T.
2. 発表標題 Queueing Analysis of Cognitive Radio Networks with Finite Number of Secondary Users
3. 学会等名 ASMTA 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nakamura, A., Phung-Duc, T. and Ando, H.
2. 発表標題 Queueing Analysis for a Mixed Model of Carsharing and Ridesharing
3. 学会等名 ASMTA2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 日出山 慎人, Phung-Duc Tuan, 岡田 幸彦
2. 発表標題 待ち行列理論を用いた宅配サービスシステムのモデル化と性能解析
3. 学会等名 第36回(2019年度)待ち行列シンポジウム「確率モデルとその応用」
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 町田 由登, Phung-Duc Tuan,
2. 発表標題 待ち行列システムとしてのガソリンスタンドの解析と性能評価
3. 学会等名 第36回(2019年度)待ち行列シンポジウム「確率モデルとその応用」
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 阿久津 康平, Phung-Duc Tuan, Lai Yuan-Cheng, Lin Ying-Dar
2. 発表標題 待ち行列モデルによるモバイルエッジコンピューティングの性能評価
3. 学会等名 第36回(2019年度)待ち行列シンポジウム「確率モデルとその応用」
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中村 彩音, Phung-Duc Tuan, 安東 弘泰
2. 発表標題 待ち行列理論を用いたカーシェアリングとライドシェアリングの混合モデル
3. 学会等名 第36回(2019年度)待ち行列シンポジウム「確率モデルとその応用」
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中村彩音, Phung-Duc Tuan, 安東弘泰
2. 発表標題 カーシェアリングとライドシェアリングの混合モデルに関する検討
3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会2019年度秋季研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Makino, Y. and Phung-Duc, T.
2. 発表標題 Queueing Analysis of Taxi Stand Considering Boarding Time
3. 学会等名 The 2019 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (NOLTA2019), Kuala Lumpur, Malaysia, December 2-6, 2019. (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nazarov, A., Phung-Duc, T., Paul, S. and Lizura, O.
2. 発表標題 Asymptotic-Diffusion Analysis for Retrial Queue with Batch Poisson Input and Multiple Types of Outgoing Calls
3. 学会等名 Distributed Computer and Communication Networks, DCCN 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nazarov, A., Phung-Duc, T., Paul, S. and Lizura, O.
2. 発表標題 Single Server Queues with Batch Poisson Input and Multiple Types of Outgoing Calls
3. 学会等名 ITMM 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yajima M., Phung-Duc T.
2. 発表標題 A central limit theorem for a Markov-modulated infinite-server queue with batch Poisson arrivals and binomial catastrophes
3. 学会等名 IFIP Performance 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ren Yi, Phung-Duc Tuan, Liu Yi-Kuan, Chen Jyh-Cheng, Lin Yi-Hao
2. 発表標題 ASA: Adaptive VNF Scaling Algorithm for 5G Mobile Networks
3. 学会等名 IEEE CloudNet2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Morozov Evsey, Phung-Duc Tuan
2. 発表標題 Regenerative Analysis of Two-Way Communication Orbit-Queue with General Service Time
3. 学会等名 QTNA2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Phung-Duc, T. and Kawanishi, K.
2. 発表標題 Delay Performance of Data Center Queue with Staggered Setup Policy and Abandonment
3. 学会等名 QTNA2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hideyama, S. and Phung-Duc, T.
2. 発表標題 Queueing Model for Data Center with Server-Block Setup Time
3. 学会等名 QTNA2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yajima, M. and Phung-Duc, T.
2. 発表標題 A Scaling Limit for Markov-modulated MX/M/ Queue with Binomial Catastrophes
3. 学会等名 QTNA2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Dragieva, V. and Phung-Duc, T.
2. 発表標題 An M/G/1//K retrial queue with outgoing calls
3. 学会等名 QTNA2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 日出山慎人, Phung-Duc Tuan, 岡田幸彦
2. 発表標題 待ち行列理論を用いた宅配ボックスサービスのモデル化
3. 学会等名 日本経 営工 学会2018年秋季 大会, pp. 10-12, 2018年10月27-28日.
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 日出山慎人, Phung-Duc Tuan, 岡田幸彦
2. 発表標題 待ち行列モデルを用いた宅配ボックスサービスの 性能解析
3. 学会等名 第35回 (2018年度) 待ち行列シンポジウム
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 巻野 侑大, Phung-Duc Tuan
2. 発表標題 乗車時間を考慮したタクシー待ち行列モデルの解析
3. 学会等名 第35回(2018年度)待ち行列シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 阿久津 康平, Phung-Duc Tuan
2. 発表標題 再試行型待ち行列を用いた単一チャネルコグニティブ無線の解析
3. 学会等名 第35回(2018年度)待ち行列シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 日出山慎人, Phung-Duc Tuan, 岡田幸彦
2. 発表標題 待ち行列を用いた宅配ボックスサービスのモデル化と解析
3. 学会等名 日本 応用数学会2019年研究 部会連 合発表会(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 矢島 萌子, フンドック トゥアン
2. 発表標題 一般分布に従う起動時間を有する処理速度可変サーバの待ち行列によるモデル化と性能評価
3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会2019年春季研究発表会
4. 発表年 2019年

## 〔図書〕 計3件

1. 著者名 Marco Gribaudo, Mauro Iacono, Tuan Phung-Duc, Rostislav Razumchik	4. 発行年 2020年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 161
3. 書名 Computer Performance Engineering - 16th European Workshop, EPEW 2019, Milan, Italy, November 28-29, 2019, Revised Selected Papers	

1. 著者名 Tuan Phung Duc, Sabine Wittevrongel, Shoji Kasahara	4. 発行年 2019年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 389
3. 書名 Queueing Theory and Network Applications - 14th International Conference, QTNA 2019, Ghent, Belgium, August 27-29, 2019, Proceedings	

1. 著者名 Yutaka Takahashi, Tuan Phung-Duc, Sabine Wittevrongel, Wuyi Yue (編著)	4. 発行年 2018年
2. 出版社 Springer, Cham	5. 総ページ数 249
3. 書名 Queueing Theory and Network Applications	

## 〔産業財産権〕

## 〔その他〕

代表者ウェブサイト  
<https://www.sk.tsukuba.ac.jp/~tuan/>

## 6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

## 7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

## 8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
オランダ	Eindhoven University of Technology			
ベルギー	Ghent University			
オランダ	Eindhoven University of Technology			
ブルガリア	University of Forestry			
ベルギー	Ghent University			
ロシア連邦	Tomsk University	Petrozavodsk State University		
その他の国・地域	National Yang Ming Chiao Tung University			
トルコ	Istanbul Technical University			