

令和元年6月25日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K00013

研究課題名(和文) NL探索問題の探索アルゴリズム分析によるメモリ領域量の解明

研究課題名(英文) An Analysis of Memory Space Usage by Algorithms Solving NL Search Problems

研究代表者

山上 智幸 (YAMAKAMI, TOMOYUKI)

福井大学・学術研究院工学系部門・教授

研究者番号：80230324

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：社会的な情報通信インフラ整備により、通信ネットワーク網を介してあらゆるデータが巨大データベースに収集・保存され、小型で利便性の高いスマートフォンやタブレット端末が主なデータ処理デバイスとしてユーザに利用されている。しかし、小型デバイスは情報を格納するメモリ領域が物理的に制限されていることから、本研究では、多くの実用的な探索問題を効率良く解く為に、オンライン通信・計算ソフトウェアの実行に必要な最少メモリ領域量を明らかにした。特に、メモリ領域量に関する実用的な作業用仮説を新たに提案し、この仮説の基で更に厳密な最少メモリ領域量を特定することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、小型デバイス上でビッグデータを取り扱うソフトウェア開発・設計に大きく貢献すると共に、今後社会インフラ設備の基盤となる情報産業の根幹を支える技術開発の支柱に成ると考えられる。特に本研究によって、多くの実用的な問題を処理するデバイスの小型化の技術的な限界が明確になり、メモリ効率の優れたソフトウェアによる巨大データ処理技術の進歩を著しく促すと期待できる。学術的にも、本研究が提案する作業用仮説は、デバイス内でのメモリ領域の効率的な使用方法の開発に向けた試金石となり、今後の探索問題研究の進歩と発展に多大な貢献が見込まれる。

研究成果の概要(英文)：A recent establishment of telecommunication infrastructure has made it possible to collect all sorts of data through worldwide computer networks and to store them in large-scale databases. Users are more prone to use hand-held devices, such as smartphones and tablets, to process instantly needed data that are streamlined by high-speed network connections. Unfortunately, in such small devices, memory space is physically limited due to their sheer size. This research sought for identifying the minimum memory usage of online software designed to solve many real-life problems. In particular, this work devised a practical working hypothesis, called the linear space hypothesis, and obtained much tighter bounds on the minimum usage of memory space under this new hypothesis. This work shall help industry design more sophisticated software running on small devices to solve real-life problems.

研究分野：情報学

キーワード：計算量理論 使用メモリ領域量 アルゴリズムの効率 線形領域仮説 オンラインアルゴリズム 弱線形メモリ領域還元

## 1. 研究開始当初の背景

情報社会の急速な成熟と共にあらゆる種類の情報（データ）がデータベースに収集・蓄積され、AI や深層学習など様々な応用の為に、こうして蓄積された膨大なデータ（ビッグデータ）の高速処理が近年益々必要になっている。こうしたデータは各ユーザに高速通信ネットワーク網を介してオンライン伝送され、ユーザ側の瞬時のデータ処理が要求される。従って、一旦メモリに蓄えながらのオフラインデータ処理では通信スピードに追いつけない。またオンラインデータ処理用デバイスとして、近年ではスマートフォンやタブレットのようにメモリ（記憶媒体）領域が物理的に制限されている小型端末の使用が主流になりつつある。デバイスの小型・軽量化はデジタル時代の必然的な流れであり、メモリ領域量の少ない小型デバイスを用いて重要な問題を効率良く解く場面が、今後一層多くなると予想される。一度に多量のメモリを消費する大型計算機上で稼働する多くのソフトウェア（アルゴリズム）は、メモリ領域の制約から小型端末では使用できない。そこで小型デバイス専用のメモリ効率の良いソフトウェア開発・設計が早急に求められている。しかし、これらを実現する為には新しい技術の開発が必要であり、その為の基礎研究が産業界のみならず学術的にも急務な課題である。メモリ領域が制限された小型端末上でビッグデータ処理を行う場合、既存の研究では、入力長  $n$  に対し対数 ( $O(\log n)$ ) メモリ領域量を用いた解法アルゴリズムの実行動作の分析が中心であり、そのために論理回路を用いた研究手法や証明論の見地からの研究手法など様々なアプローチが取られてきた。しかし、弱線形（サブリニア）メモリ領域量限定のデバイス上のアルゴリズムなどに関する基礎研究は皆無であり、新しいデータ処理方法の開発に繋がる研究も未だ十分に行われていない。こうした現状を打破し、今後の情報社会インフラ基盤の整備に貢献することが強く望まれていた。

## 2. 研究の目的

メモリ領域が物理的に制限された小型機器（デバイス）上で、ビッグデータと呼ばれる巨大な情報処理を行うソフトウェア（アルゴリズム）の開発・設計を支援する基礎理論を展開し、アルゴリズムの使用メモリ領域量の詳細な分析を通して、学术界並びに産業界に向けて小型デバイス用ソフトウェア開発の今後の指針を示すことを目指す。これまでに知られている実用的な問題の多くは NL と呼ばれる「非決定性対数領域計算可能な問題群」に属し、これら NL 問題を解くために、小型デバイス上で実行されるアルゴリズムが必要とする最少メモリ領域量を明らかにする。本研究では、特に NL 問題の中でも最も難しい問題に焦点を絞り、それらを解く為に必要となる最少使用メモリ領域量の上下限値を特定することを目指す。このように最も困難な NL 問題は「NL 完全問題」と呼ばれ、その中には、張り巡らされたネットワーク網が断線した場合に生き残ったキー局間の接続経路を探索する「ネットワーク接続経路探索問題」がある。このような現実的で応用の広い問題を解く為のメモリ限定計算機モデルとして、本研究では対数メモリ領域量と弱線形メモリ領域量に注目する。既存の多項式時間計算との大きな違いとして、例えば、弱線形メモリ領域では入力データ全てを保持できず、何らかの方法によるデータ圧縮が計算過程で必要となることや、繰り返し（反復）ルーチンによるしらみ潰し探索法を取る事が出来ないなどがある。こうした難点を克服する為には新たなアイデアによるアルゴリズムの設計・開発が不可欠であり、それと共にアルゴリズムの使用メモリ領域の実質的な限界を示す必要がある。本研究では、斬新な構想と新たな視点から NL 完全問題の解法に挑戦し、理論と実用の両視点からアルゴリズム理論並びに計算量理論の進歩と発展への貢献を目標とする。

## 3. 研究の方法

小型デバイスによるビッグデータの効率的処理方法の確立を目指し、NL 探索問題を解くソフトウェア（アルゴリズム）の実行に欠かせないメモリ領域の最少量を明らかにすることで、メモリ効率の良いソフトウェア開発・設計に必要な基礎理論の構築を行う。特に、対数メモリ領域量と弱線形メモリ領域量の二つに注目し、以下の方法論に従ってアルゴリズムの実行過程の詳細な分析を行う。まず高速通信ネットワーク網を介してのオンラインデータ処理を行う小型機器モデルの一つである「有限オートマトン」をひな型に、それらが持つ機能を自然に拡張した汎用計算機モデルを導入し、このモデル上でアルゴリズムの実行効率を詳細に分析する。入力長に対し内部状態数が高々多項式である非決定性有限オートマトン群は、NL 問題の解法アルゴリズムと密接な関係があることを利用し、こうした有限オートマトン群を異種類の多項式状態数オートマトンに効率良く変換することで、NL 問題を解くために必要な最少メモリ領域量を決定する。更に、実用的な変換ツールである「弱線形領域還元性」を新たに開発し、ネットワーク接続経路探索問題を他の NL 問題へ効果的に還元する事で、多くの NL 探索問題に必要な最少メモリ領域量の相対的な上下限値を求める。更に、NL 完全問題の最少メモリ領域量の

下限に関する新たな作業用仮説（working hypothesis）を構築する。実用性の高い問題の幾つかに対し、この仮説からの自然な帰結を導き、得られた結果を精査することで仮説の有益性・妥当性を示す。

#### 4. 研究成果

ネットワーク接続経路探索問題を始めとする有益な NL 問題に対し、オンライン通信・計算モデル上で使用するメモリ領域量を入力長の対数又は弱線形に制限したソフトウェア（アルゴリズム）の実行分析を行った。また、多項式時間解法アルゴリズムの使用メモリ領域量の下限を求める為に、実用的な作業用仮説として「線形領域仮説」を提唱し、その根幹となる弱線形領域計算の分析を行い、以下に記述する研究結果を得た。これらの成果は、国際会議での口頭発表と併せ、国際会議論文としてヨーロッパの出版社から出版され、既に一般公開されている。また、この報告書に記載の論文の幾つかは既に専門誌（ジャーナル）に投稿され、現在審査中である。尚、以下の記述で付帯の文献番号は、項目 5 のリストにある論文を指すものとする。

##### (1) オンライン通信・計算モデルの分析：

高速通信ネットワーク網を介して配送されたビッグデータの受信と共に瞬時の情報処理が要求されるオンライン計算において、メモリ容量が少なくとも瞬時のデータ処理が実行可能なソフトウェアの分析を行った。メモリ領域量が規定値に固定された小型デバイスの理論的な計算機モデルの一つに「有限オートマトン」がある。本研究では、有限オートマトンの他に「プッシュダウンオートマトン」や「書き換え限定オートマトン」などの計算機モデルを用い、こうしたモデル上でアルゴリズムの動作の分析を行うと共に、実行効率の理論的な上下限値を求めた。メモリ効率の比較対象として決定性アルゴリズム以外に、非決定性アルゴリズムを実装する理論的な計算機や、確率的（乱拓）アルゴリズムを扱う計算機、更に量子力学に基づいた量子アルゴリズムを実行する量子計算機などを用いた。

① まず、NL 問題を解くオンライン計算アルゴリズムに対して、そのメモリ領域量を入力長の対数に制限した計算機モデルの実行効率を分析した。計算機モデルとして、特に計算過程で使用可能な内部状態数が入力パラメータ  $n$  の多項式 ( $n^{O(1)}$ ) に限定された「多項式状態数オートマトン族」に焦点を当て、その動作状況を分析することで計算能力を理論的に計量した。この様なオートマトン族の研究は、1970 年代に Berman-Lingas や Sakoda-Sipser などによって展開され、近年になり再び脚光を浴び、ヨーロッパでは Kapoutsis の研究グループなどが精力的に研究を行なっている。このモデルの重要性は、多項式状態数を有するオートマトンの計算能力が、対数メモリ領域に制限したアルゴリズムの計算能力と計算論的に同等となることである。即ち、全ての NL 問題が対数メモリ領域量で解くことが出来るか否かを決定することは、状態数  $n$  の非決定性オートマトンを  $n$  の多項式状態数を有する同等な決定性オートマトンへ変換可能であるかを問うことと論理的に同値である。この事実から、有限オートマトンの動作分析が NL 問題のメモリ効率の良い解法手法の開発に繋がる事が分かる。従って、本研究では解析するオートマトンの種類を増やし、これら異種のオートマトンに固有の性質を詳細に調べることで、それぞれの計算能力の相対的な比較を行った。特に、これまでにない新たな取り組みとして確率的（乱択）計算プロセスと量子計算プロセスを取り上げ、多項式状態数オートマトンの実行効率を初めて明らかにした。これらの研究成果は、今後の対数メモリ領域研究の新たな枠組みの形成に寄与できると期待できる。[文献③⑪]

② オートマトンの内部状態数に一定の制限を課す代わりに、記憶デバイス上の各データ記号の直接的な書き換え回数を一定数に制限した計算機モデルに、Hibbard が 1960 年代に提案した「書き換え限定オートマトン」があり、近年イタリア人研究者 Pighizzini らの研究グループを中心に精力的に研究が進められている。これは、データの無制限の書き換えが物理的に不可能である記憶デバイスを有する現実的な計算機モデルである。特に各データ変更を多くとも 2 回まで認めた場合には、先入れ後出し方式メモリデバイス機能を有する「プッシュダウンオートマトン」と密接な関係がある事が既に知られている。通常決定性アルゴリズムとは異なり、確率的（乱択）アルゴリズムは確率的に遷移するプロセスを経て最終的な帰結に到達する手順であり、様々なアルゴリズム設計に用いられている基本ツールの一つである。本研究では、新たにこの計算機上で確率的（乱択）計算プロセスを実行し、そのプロセスの詳細な分析から、記憶データへのアクセス量と計算能力の新たな関係を明らかにした。特に、2 回変更に関しては、確率的（乱択）書き換え限定オートマトンは確率的（乱択）プッシュダウンオートマトンと密接に関連することを示した。[文献④]

③ 前述の 2 回変更確率的書き換え限定オートマトンと関連する確率的（乱拓）プッシュダウンオートマトンに着目し、本研究では、その動作環境の分析からオートマトンの認識能力の理論的境界を示した。ここで用いた分析手法には今回新たに「コルモゴロフ計算量」を適応し、この概念を使って確率的プッシュダウンオートマトンの計算能力の理論的境界を明らかにした。コルモゴロフ計算量とは、ある出力値をもたらすプログラムを 2 進

法で表現したときのビット数のことであり、この計算量を用いて各問題の解法アルゴリズムの難しさを評価することができる。これまで決定性プッシュダウンオートマトンにコルモゴロフ計算量を用いた例が2つあるだけで、本研究で初めてこの概念を確率的プッシュダウンオートマトンに応用し、非決定性プッシュダウンオートマトンで認識できるある特定の言語が、確率的プッシュダウンオートマトンでは認識不可能なことを証明した。[文献⑩]

④ 内部状態数が一定である前述のオートマトンの種類の殆どを模倣可能な理論的な計算機モデルに「トポロジカルオートマトン」がある。このモデルの特徴は、機械の内部状態がトポロジー空間上の連続写像に従って遷移する点であり、これまでに幾つかの異なる定義が与えられている。しかし、本研究が目標とするアルゴリズム分析の観点からは不十分な定義であった。そこで本研究ではトポロジカルオートマトンを再定義し、メモリ領域限定計算の能力の詳細な分析と、異なるトポロジーが齎す計算能力の比較を行った。一般のトポロジカルオートマトンを実装することは物理的に難しいが、各種オートマトンの動作環境の総括的な分析を行うことが可能である為、トポロジカルオートマトンの性質を詳細に調べることは今後の研究課題の一つである。[文献⑥]

## (2) 線形領域メモリ仮説の提案と検証：

膨大なデータを処理するメモリ領域が限定された小型デバイスの理論的な計算機モデルの一つとして、多項式時間内に入力データ長の弱線形（サブリニア）メモリ領域のみを用いてデータ処理が完了するものを新たに提案し、この機械上でNL問題を解くアルゴリズムの分析を行った。中でもNL完全問題の一つである「2SAT<sub>3</sub>問題」に注目し、その解法アルゴリズムのメモリ効率の下限値に関する実用的な作業用仮説を提案し、この仮説の妥当性と有益性を示した。

① 一般的に、NL問題を解くアルゴリズムの使用メモリ領域量と計算時間には何らかの相関関係が有ると考えられている。例えば、指数時間アルゴリズムを使用すると、NL決定問題は対数メモリ領域量で解く事が可能であることが Savitch によって証明されている。また、NL問題を解く多項式時間アルゴリズムの最少メモリ領域量に関しては、1998年に Barnes らによって少なくとも線形未満であることが示されている。従って、NL決定問題の中でも特に難しい問題の一つで「2SAT<sub>3</sub>問題」と呼ばれる制限された2積和標準形論理式の真偽決定問題も、ほぼ同等のメモリ領域量で解くことが可能である。しかし、Barnes らのメモリ領域量が理論的な下限値であることは未だ証明されていない未解決問題である。この未解決問題を解くために、本研究では、弱線形メモリ領域量を用いて多項式時間で実行可能なアルゴリズムに焦点を合わせ、「線形領域仮説」と呼ぶ新たな作業用仮説を立てた。この仮説は、弱線形メモリ領域限定多項式時間アルゴリズムで2SAT<sub>3</sub>問題を解こうとすると実行途中で必ずメモリが不足する、と予想するものである。言い換えれば、2SAT<sub>3</sub>問題を解く弱線形メモリ領域を使用する多項式時間アルゴリズムは存在しないと主張する仮説であり、前述の Barnes らによる解法アルゴリズムがほぼ最適であることを示唆する。この作業用仮説から、様々な実用的な問題に対し最低限必要となるメモリ領域量の下限が導かれることを示した。こうした事実から、実用性の高い問題を処理するソフトウェアの実行に必要なメモリ領域の最少値を求めることが可能となり、今後のソフトウェア開発に大きな貢献をすることが期待される。また、この線形領域仮説は、2001年に Impagliazzo らによって提案された基本的な仮説の一つである「指数時間仮説」と対をなすものであり、その真偽に関しては今後の計算量理論研究の重要な検証課題の一つとなると考えられる。[文献⑧⑬]

② 弱線形メモリ領域量を使用して多項式時間で解くことが可能な問題群（クラス）を PsubLIN と呼び、このクラスの性質を詳細に分析することを目指した。前述の線形領域仮説に密接に関連する概念として、弱線形メモリ領域量を用いて多項式時間で変換を行う「弱線形メモリ還元性」を導入し、実用的なツール（道具）として定式化した。還元性は計算量理論では基本的な概念であると共に、2つの問題の計算の複雑さを比較する手段の一つであり、実用性の高いツールとして用いられている。線形メモリ領域還元性は、Cook や Karp らが1970年代に導入した多項式時間還元性と対になるものであり、最も重要な点は、この還元性がクラス PsubLIN の中で閉じているという事実である。本研究では、現実的な問題を解く上で必要となる最少メモリ領域量を比較・対照するために、この新しい還元性を使って、様々なNL関連問題の相対的な必要最少メモリ領域量を調べた。2つの問題がこの還元性を用いて互いに還元し合う場合、同程度のメモリ領域を必要とすることが示され、本研究ではこの事実から、2SAT<sub>3</sub>問題とネットワーク接続経路探索問題は同程度のメモリ領域を必要とすることを証明した。即ち、線形領域仮説の基では、この問題を解く弱線形メモリ領域多項式時間アルゴリズムは存在しないことが導かれる。即ち、ネットワーク接続経路探索問題の必要最少メモリ領域量が弱線形より大きなことが帰結される。逆に、この問題の難しさから2SAT<sub>3</sub>問題の難しさが帰結され、結果として線形領域仮説が真であることが示される。この他にも、グラフに関連する幾つかのNL完全問題に対し、弱線形メモリ還元性を用いてそれぞれの計算量の比較を行った。[文献⑦⑬]

### (3) 線形領域仮説の応用：

前述の通り、ネットワーク接続経路探索問題を解く多項式時間アルゴリズムは、必ず弱線形以上のメモリ領域を必要とすることが線形領域仮説から帰結される。この作業用仮説の更なる応用を模索する上で重要になるのは、この仮説を異なる分野の概念で再記述することである。これにより応用の幅が広がり、異分野での新たな発見が十分期待される。本研究では、形式言語・オートマトン理論分野の概念のみを用いて線形領域仮説を再記述することに成功した。項目(1)で述べた通り、非決定性オートマトンから多項式状態数決定性オートマトンへの変換は、NL問題群が対数メモリ領域量で解けることと密接に関連している。その類似性から、線形領域仮説がある種の多項式状態数オートマトンと関連していることが類推される。まず、入力パラメタ  $n$  に依存する「パラメタ付き決定問題」を定義し、内部状態数が  $n$  個に限定された非決定性オートマトンを、 $n$  の多項式状態数を有する「交代性オートマトン」の中で、特に計算を記述するグラフ(計算グラフ)の各ユニバーサルレベルの幅が弱線形に制限されたもので模倣できる場合を想定した。交代性オートマトンは、非決定性オートマトンの自然な拡張であり、非決定的なステップと汎決定的なステップを交互に選択する計算機モデルである。特に計算グラフの幅が一定量で抑えられる交代性オートマトンは、これまで考えられていなかった。本研究では、前述の模倣が常に可能であることと、線形領域仮説が真であることが論理的に同値であることを証明した。これは、線形領域仮説とメモリを持たない計算機モデルであるオートマトンとの相互関連を初めて具体的に示した例であり、これにより線形領域仮説の形式言語・オートマトン理論への応用が可能となった。[文献⑤⑫]

### (4) 他の計算機モデルの解析：

これまでに述べた研究成果の他に、多項式時間量子計算の新たな数理モデルとして「帰納的(に構成された)量子関数族」を提案し、これらが既存の計算機モデルと一致することを証明した。量子力学に基づく計算機(量子コンピュータ)の概念自体は既に1980年代に提唱され、量子コンピュータは既存の計算機が到達し得なかった計算能力を有し、将来の情報処理技術には不可欠なものとして精力的に研究と開発が進められている。近年 D-Wave Systems や IBM などの企業が量子コンピュータを製品化している。量子コンピュータ上での計算は量子計算と呼ばれ、通常の計算とは大きく異なっている。例えば、ビット単位のデータ処理の代わりに、「量子ビット」と呼ばれる量子状態を処理するプロセスが実行される。この量子ビットは、物理的に様々な方法で実装され、大容量のデータを量子的に重ね合わせて同時に保持することができる。本研究で導入した帰納的量子関数群は、これまでに提案されてきた量子回路や量子チューリング機械などの計算機モデルとは大きく異なる新たなモデルであり、量子コンピュータの計算能力の分析に役立つことが期待される。[文献⑨]

### (5) まとめ：

本研究では、多くの実用的な問題を含む NL 問題群を小型デバイス上で効率良く解くアルゴリズムの開発・設計を目指し、理論的な計算機モデル上で実行されるアルゴリズムの詳細な動作分析を行った。特に、対数及び弱線形メモリ領域に制限された多項式時間計算に焦点を絞り、NL問題を解くアルゴリズムが必要とする最少メモリ領域量を特定することを目指した。対数メモリ領域に制限された計算は多項式状態数を持つ有限オートマトン群と計算能力において同等であり、データ通信を取り扱うオンライン計算の汎用計算機モデルとしても用いられることから、有限オートマトン群の詳細な分析を行なった。この他に、各種特性を拡張して得られた別種のオートマトン群の動作も分析し、異種類オートマトン間での変換の実効率を明らかにした。更に、NL完全問題の一つである  $2SAT_3$  問題に関する線形領域仮説を新たに導入し、この仮説の基で多くの実用的な NL 問題の必要最少メモリ領域量の下限を求めた。

### (6) 今後に残された重要な課題：

メモリ領域を限定した計算は計算時間を制限した計算と大きく異なり、アルゴリズムの分析方法も未だ確立しておらず、また分析結果の予想も難しい。従って、小型デバイスに適した計算理論の構築には、新たな分析方法を考案し、より精密なアルゴリズムの分析を行うことが求められる。実用的な作業用仮説である線形領域仮説は最少メモリ領域量の下限を示すには有意義であるが、この仮説からの更に多くの自然な帰結を発見することが必要である。これにより小型デバイス上でのビッグデータの効率的な処理方法が確立することが期待できる。線形領域仮説の真偽を明らかにすることは重要な課題であるが、喫緊の目標としてはこの仮説が正しいという妥当性を数多く示すことである。線形領域仮説の真偽には、特にパラメタ付き計算量クラス  $P_{sub}LIN$  の特性を明らかにすることが大切である。また、多項式状態数オートマトン群の分析で新たに考案した計算グラフの幅に制限の付いた交代性オートマトンの研究も、今後の重要な課題の一つである。これらの課題は今後の研究で解決していく必要がある。

## 5. 主な発表論文

〔雑誌論文〕（計 2 件）

- ① T. Yamakami. “Quantum list decoding of classical block codes of polynomially small rate from quantumly corrupted codewords.” *Baltic Journal of Modern Computing*, Vol.4(4), pp.753-788, 2016. (doi: 10.22364/bjmc.201) 査読有り
- ② T. Yamakami. “Pseudorandom generators against advised context-free languages.” *Theoretical Computer Science*, Vol.613, pp.1—27, 2016. (doi:10.1016/j.tcs.2015.10.026) 査読有り

〔国際会議論文〕（計 8 件）

- ③ T. Yamakami. “Nonuniform families of polynomial-size quantum finite automata and quantum logarithmic-space computation with polynomial-size advice”, *Proceedings of the 13th International Conference on Language and Automata Theory and Applications (LATA 2019)*, Saint Petersburg, Russia, March 26—29, 2019, *Lecture Notes in Computer Science*, Springer-Verlag, Vol.11417, pp.134—145. (doi.org/10.1007/978-3-030-13435-8\_10) 査読有り
- ④ T. Yamakami. “Behavioral strengths and weaknesses of various models of limited automata”, *Proceedings of the 45th International Conference on Current Trends in Theory and Practice of Computer Science (SOFSEM 2019)*, Nový Smokovec, Slovakia, January 27—30, 2019, *Lecture Notes in Computer Science*, Springer-Verlag, Vol.11376, pp.519—530. (doi.org/10.1007/978-3-030-10801-4\_40) 査読有り
- ⑤ T. Yamakami. “State complexity characterizations of parameterized degree-bounded graph connectivity, sub-linear space computation, and the linear space hypothesis”, *Proceedings of the 20th IFIP WG 1.02 International Conference on Descriptive Complexity of Formal Systems (DCFS 2018)*, Halifax, Canada, July 25—27, 2018, *Lecture Notes in Computer Science*, Springer-Verlag, Vol.10952, pp.237—249, 2018. (doi.org/10.1007/978-3-319-94631-3\_20) 査読有り
- ⑥ T. Yamakami. “One-way topological automata and the tantalizing effects of their topological features”, *Proceedings of the 10th Workshop on Non-Classical Models of Automata and Applications (NCMA 2018)*, Košice, Slovakia, August 21—22, 2018, *Österreichische Computer Gesellschaft 2018, the Austrian Computer Society*, pp.197—214. (ISBN 978-3-903035-21-8) 査読有り
- ⑦ T. Yamakami. “Parameterized graph connectivity and polynomial-time sub-linear-space short reductions (preliminary report)”, *Proceedings of the 11th International Workshop on Reachability Problems (RP 2017)*, Egham, UK, September 7—9, 2017, *Lecture Notes in Computer Science*, Springer-Verlag, Vol.10506, pp.176—191, 2017. (doi.org/10.1007/978-3-319-67089-8\_13) 査読有り
- ⑧ T. Yamakami. “The 2CNF Boolean formula satisfiability problem and the linear space hypothesis”, *Proceedings of the 42nd International Symposium on Mathematical Foundations of Computer Science (MFCS 2017)*, Aalborg, Denmark, August 21—25, 2017, *Leibniz International Proceedings in Informatics (LIPIcs)*, Schloss Dagstuhl - Leibniz-Zentrum fuer Informatik 2017, vol. 83, 62:1—62:14. (doi:10.4230/LIPIcs.MFCS.2017.6) 査読有り
- ⑨ T. Yamakami. “A recursive definition of quantum polynomial time computability (extended abstract)”, *Proceedings of the 9th Workshop on Non-Classical Models of Automata and Applications (NCMA 2017)*, Prague, Czech Republic, August 17—18, 2017, *Österreichische Computer Gesellschaft 2017, the Austrian Computer Society*, pp.243—258, 2017. (ISBN: 978-3-903035-18-8) 査読有り
- ⑩ T. Yamakami. “One-way bounded-error probabilistic pushdown automata and Kolmogorov complexity (preliminary report)”, *Proceedings of the 21st International Conference on Developments in Language Theory (DLT 2017)*, Liège, Belgium, August 7—11, 2017, *Lecture Notes in Computer Science*, Springer-Verlag, Vol.10396, pp.353—364, 2017. (doi: 10.1007/978-3-319-62809-7\_28) 査読有り

〔研究会発表〕（計 3 件）

- ⑪ T. Yamakami. “Non-uniform state complexity of quantum finite automata and quantum polynomial-time logarithmic-space computation with quantum advice –(preliminary report)–”. 電子情報通信学会、量子情報技術研究会（QIT）, 2018 年
- ⑫ T. Yamakami. “State complexity characterizations of parameterized degree-bounded graph connectivity, sub-linear space computability, and the linear space hypothesis”. 情報処理学会、アルゴリズム研究会（SIGAL）, 2018 年
- ⑬ T. Yamakami. “The linear space hypothesis and its connection to two-way finite automata”. *The 6th Conference on Highlights of Logic, Games and Automata (Highlights 2018)*, September 19—21, 2018, Berlin, Germany. 査読有り

〔その他〕

ホームページ（研究成果情報）

<http://tomoyukiyamakami.info/>