

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 4 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K00019

研究課題名(和文) 将来の計算機構としての可逆計算システムの効率化と体系化

研究課題名(英文) Reversible Computing Systems as Future Computing Mechanisms, Their Efficient Realization, and Theoretical Systematization

研究代表者

森田 憲一 (MORITA, Kenichi)

広島大学・工学研究科・名誉教授

研究者番号：00093469

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、微視的な物理的可逆性を直接的に計算に利用して高集積度・低消費エネルギーの計算機の開発に結びつけようとする可逆コンピューティングの理論的研究である。特に、どれほど単純な微視的可逆演算があれば計算万能性が保証されるのか、また、そのような可逆演算から可逆計算機を構築するのにどのような構成法をとれば効率的かを探求した。このために可逆セルオートマトン等のモデルを用いて研究し、極度に単純な微視的可逆演算からでも可逆計算機を構築できること、微視的可逆演算から可逆計算機に至る道筋の中間に2状態可逆論理素子を置くことで、簡潔かつ系統的に可逆計算機が構成できることを示すと共に、理論の体系化を行った。

研究成果の概要(英文)：Reversible computing is a research paradigm to study the problem how physical microscopic reversibility can be directly utilized to realize future computing systems that are highly integrated and with very low energy dissipation. In this study, we investigate theoretically how computational universality emerges from simple reversible microscopic laws, and how reversible computers can be constructed systematically and efficiently from such microscopic laws. We studied these problems using reversible cellular automata and some other reversible computing models. We showed that several reversible cellular automata with extremely simple local rules can be computationally universal. We then showed that by introducing a 2-state reversible logic element at an intermediate level we can construct reversible Turing machines very easily from reversible microscopic laws in a systematic manner. We also made a theoretical systematization of the theory of reversible computing.

研究分野：理論計算機科学

キーワード：可逆計算機構 可逆論理素子 可逆論理回路 可逆チューリング機械 可逆セルオートマトン 可逆コンピューティング 物理的可逆性

1. 研究開始当初の背景

これまでコンピュータの高速化・高集積化は、半導体技術の発展に伴い、飛躍的に進んできたが、現在の技術の延長だけでは数年後に限界に達するとみられている。それ以後も発展を続けるためには、原子レベルの物理現象を直接的に演算・操作に利用するような計算機構の開発へと進む必要がある。このような目標をもつ研究の流れはいくつかあり、可逆コンピューティングはそのうちの一つである。特に、微視的な物理法則は可逆であるため、物理的可逆性をどのように計算に有効利用するかは重要であり、可逆コンピューティングではこれが主要な課題となっている。

可逆的な計算システムとは、そのシステムのどの状態も直前の時刻の状態を高々一つしか持たないものをいう。つまり状態遷移の過程を一意的に過去に遡れるものである。計算システムに課されたこのような制約は非常に特殊に見えるかもしれないが、物理的な可逆性と密接に関係しており、重要な意味をもつことが Landauer [6] によって指摘された。彼はこのような論理的可逆性と物理的可逆性にどのような関係があるかを論じ、論理的非可逆性が不可避的に熱の放出を引き起こすという「Landauer の原理」を主張した。

これがきっかけとなり、可逆チューリング機械[1]、可逆論理ゲート[5]、可逆セルオートマトン[16]などの計算モデルがこの視点、つまり計算におけるエネルギー消費の観点から研究されるようになった。また Feynman [3,4] は物理学と計算機科学の境界領域では可逆コンピューティングと量子コンピューティングの考えが非常に重要なることを論じた。可逆コンピューティングは近年、これらの先駆的な研究が刺激となり、理論計算機科学の分野だけでなく、より応用的な可逆論理回路設計[2,17]などの研究も活発になっている。またナノテクノロジーの領域でも注目されている (例えば[18])。

研究代表者は 1980 年代後半から可逆コンピューティングの理論的研究を始めた。主要な成果として、1 次元可逆セルオートマトンの計算万能性[8]、2 記号 1 テープ可逆チューリング機械の計算万能性[9]、可逆 2 カウンタ機械の計算万能性[10]、ロータリー素子と呼ぶ新しい 2 状態可逆論理素子の提案とそれによる可逆チューリング機械の簡潔な構成法[11,14]、わずか 4 種類を除くあらゆる 2 状態可逆論理素子が万能性を有することの証明[13]、小サイズの万能可逆チューリング機械の構成[12]、記憶領域限定チューリング機械に可逆性制約を課しても能力が低下しないことの証明[14]などがある。これらの研究により、非常に単純な可逆計算モデルでも計算万能性をもち得ることが明らかになっている。さらに、可逆性を「制約」としてとらえるのではなく、その特性を積極的に利用することで、従来にはないコンピュータ・アーキテクチャや計算方式が可能となることも判明している。

2. 研究の目的

可逆コンピューティング研究の究極の目標は、言うまでもなく、可逆コンピュータの物理的実現である。しかし、ミクロなレベルの可逆的物理現象を適切に制御し、論理的な演算に利用できるようにするためには技術の発展を今しばらく待つ必要がある。

このような状況から考えて、理論的な研究によって解明すべき問題の第一点目として挙げられるのは、どれほど単純な可逆的基本操作から可逆計算システムが構築できるのかということである。すなわち、それから万能な可逆計算システムが組み立てられるような、できるだけ簡単な可逆的素過程にどのようなものがあるかという問題である。これに対する解がいくつか見つければ、将来、単純な可逆的物理現象を利用して可逆論理素子を実現するための大きな手掛かりになる。また、これに関係して、計算万能性を有する可逆システムをどれほど単純化できるかという問題も重要な研究課題である。言い換えれば、可逆システムがどれほどの複雑度とどのような機能をもてば十分な計算能力をもち得るのかという問題であり、これも物理的実現の容易さにかかわっている。

解明すべき問題の第二点目は、可逆コンピュータのアーキテクチャに関する問題である。現在の非可逆なコンピュータもそうであるが、可逆コンピュータにおいてもそのアーキテクチャはミクロからマクロなレベルに至るまで何段階かの階層構造をなしている。つまり、最も下位のレベルには非常に単純な可逆的素演算があり、その次のレベルにはそれから実現される可逆論理素子がある。可逆論理回路は可逆論理素子を組み合わせで作られるが、これを適切に設計することにより可逆的な機能モジュールとしての働きを持たせることができる。有用な機能モジュールを何種類か用意し、それを組み合わせることによって、最上位のレベルにある可逆コンピュータが構成できる。このような階層の中で、可逆的素演算、可逆論理素子、可逆的機能モジュールとしてどのようなものを選ぶかというのは重要な問題である。可逆コンピュータが簡潔に構成でき、しかもその上で計算が効率的に実行できるかは、それらの選択に大きく依存しているからである。

本研究は、従来のコンピュータの設計理論にはとらわれない新しい発想によって上記問題の解を見出そうとするものである。例えば、上記階層中の論理素子として、2 状態可逆論理素子を用いることにより、在来型の素子としてよく使われる論理ゲートよりもはるかに簡潔に可逆チューリング機械が構成できる。本研究では、可逆論理素子や種々の可逆計算システムのモデル各々の性質や能力の解明だけでなく、それら相互の関係やミクロからマクロなレベルに至る効率的な構成法の道筋を明らかにし、可逆コンピューティングの理論の体系化を目指す。

3. 研究の方法

本研究では、「2. 研究の目的」に記した2つの解明すべき問題を、可逆セルオートマトン、可逆チューリング機械、2状態可逆論理素子などの可逆計算モデルを用いて理論的に研究した。より具体的な研究課題は次のとおりである。

- (1) 非常に単純な2次元可逆セルオートマトンの計算万能性
 - (2) 小サイズの万能可逆チューリング機械
 - (3) 1次元セルオートマトンにおける可逆性
 - (4) 可逆コンピュータのアーキテクチャ
 - (5) 可逆コンピューティング理論の体系化
- 上記の5つの課題の内、(1)~(3)が解明すべき第一の問題に、(4),(5)が解明すべき第二の問題に該当している。

(1)では、2次元可逆セルオートマトンのクラスで、わずか4つの遷移規則で規定されるようなものを考え、どのような可逆的素過程があれば計算万能性が発現するかを調べた。(2)では、万能可逆チューリング機械の状態数と記号数をどれほど小さくできるかを、特に状態数の少ないものについて研究した。(3)では、1次元可逆セルオートマトンに対する可逆性制約がその言語受理能力にどのように影響するかを研究した。また、非可逆な1次元セルオートマトンにおける可逆論理ゲートの実現法についても考察した。(4)では、単純な可逆的素過程から、可逆コンピュータのモデルである可逆チューリング機械を段階的に構成するための効果的な道筋、つまりアーキテクチャを研究した。ここでは特に、2状態可逆論理素子を中間段階に置くことが鍵となっている。(5)ではこれらの成果をふまえて可逆コンピューティング理論の体系化を行い、論文や国際会議等で発表するとともに、これまでの集大成を英文の単行本として出版した。

4. 研究成果

「3. 研究の方法」に挙げた各課題について研究して得た成果を以下に詳述する。

- (1) 非常に単純な2次元可逆セルオートマトンの計算万能性

初等的三角形分割セルオートマトン (elementary triangular partitioned cellular automaton, ETPCA) は、図1のように多数の正三角形セルから構成される並列システムで、各セルは3つの部分に分割され、各部分は0と1(空白と●で表示)の2状態をもつ。

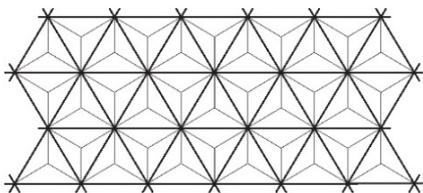


図1. 初等的三角形分割セルオートマトン (ETPCA) の空間。

各セルの状態遷移は図2の例のような、わずか4つの遷移規則で規定され、これらによりETPCAの局所遷移関数が規定される。三角形セルオートマトンは、四角形のものに比べて辺を介して接する近傍セルの数が少ないため、局所遷移関数が非常に単純になり得、計算万能性がどのような可逆的法則から発現するかの研究に非常に適している。

ここでは、図2の例の遷移規則をもつETPCAを、ETPCA 0157と書く。また、局所遷移関数が単射であるものを可逆ETPCAと呼ぶ。これまでに、可逆ETPCA 0157が計算万能性を有することがImai and Morita [7]によって示されている。

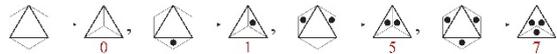


図2. 識別番号0157をもつETPCAの4つの遷移規則。ETPCAでは回転対称性を仮定。

本研究では全部で256種類存在するETPCAを82の同値類に分類した後、まず、図3の遷移規則をもつ可逆ETPCA 0347について研究した。この可逆ETPCAは、極度に単純な遷移規則にもかかわらず、グライダーと呼ぶ空間を移動するパターンが存在するなど、非常に複雑で興味深い振舞いを示すことが判明した [雑誌論文 1,8, 学会発表 5,7,8]。また、グライダーを信号として用いることにより、Fredkin ゲートと呼ぶ万能な可逆論理ゲートがセル空間中に実現できることを示した [雑誌論文 1]。従って、可逆ETPCA 0347は計算万能である。



図3. 可逆ETPCA 0347の4つの遷移規則。

次に、図4の遷移規則をもつ可逆ETPCA 0137について研究した。この可逆ETPCAでは、信号線と呼ぶパターンに沿って信号を進ませることができ、それらの相互作用によって、やはり万能な可逆論理ゲートを実現できる [雑誌論文 7]。従って、可逆ETPCA 0347も計算万能である。



図4. 可逆ETPCA 0137の4つの遷移規則。

256種類のETPCAの中には等価なものも存在する。例えば、0157と0457は鏡像演算の下で等価、0157と0267は0-1反転演算の下で等価、0267と0237は鏡像演算の下で等価である。同様に、ETPCA 0247と等価なものに0617, 7430, 7160が、またETPCA 0137と等価なものに0467がある。従って、これまでに10種類のETPCAが計算万能性を有することが判明している [雑誌論文 6]。

これらの結果は、極度に単純な可逆的法則からでも、計算万能性や複雑な挙動が発現し得ることを示している。

(2) 小サイズの万能可逆チューリング機械

非可逆な万能チューリングで状態数と記号数の少ないものを見出す研究は長い歴史をもつ。万能可逆チューリング機械 (universal reversible Turing machine; URTM) をどこまで小型化できるかは、非可逆の場合と同様に重要である。研究代表者はこれまで、いくつかの小サイズの URTM を与えたが、今回は 10 状態 8 記号および 13 状態 7 記号の URTM を構成した [学会発表 9, 図書 3]。これらをプロットしたものが図 5 である。10 状態 8 記号の URTM は状態数と記号数の積がこれまでに知られている URTM の中で最小である。また 13 状態 7 記号の URTM は規則数が 57 個で、これまでの最小の規則数となっている。

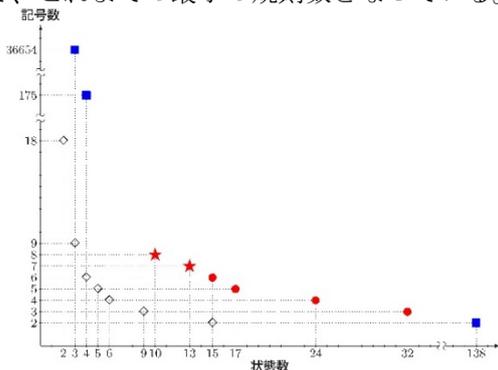


図 5. 万能可逆チューリング機械の状態数と記号数。★は今回の、●はこれまでの研究で構成したもの、■はこれらを変換して得られたもの、◇は非可逆な万能チューリング機械。

(3) 1次元セルオートマトンにおける可逆性

1次元可逆セルオートマトンの計算能力、特に形式言語の受理能力を研究するために、可逆分割セルオートマトン受理機および可逆反復配列受理機と呼ぶ2種類のモデルを提案した。これらの受理能力が非可逆な決定性線形有界オートマトンと等能力となり、従って、可逆性制約を付加しても能力が下がらないことを示した [雑誌論文 3, 9]。また、非可逆な2状態の1次元セルオートマトンにおいて可逆論理ゲートを構成するための方法について考察した [雑誌論文 2, 学会発表 4, 図書 1]。

(4) 可逆コンピュータのアーキテクチャ

研究課題(1)の成果にあるように、極度に単純な遷移規則をもつセルオートマトンにおいても万能な可逆論理ゲートが実現でき、計算万能となることが判明している。しかしこのような空間内に可逆コンピュータを構成しようとしたとき、可逆論理ゲートを用いたのでは実装が非常に困難となる。なぜならゲートにおいては2つ以上の信号を全く同時に到達させねばならないが、可逆的な空間では一方の信号が他方を「待つ」ことは不可能だからである。研究代表者はこの問題を解決するために2状態の可逆論理素子(reversible logic element with memory, RLEM)を提案し、それによって可逆チューリング機械が簡潔に構成できることを示した [11, 15]。図 6 は識別番

号 4-31 をもつ RLEM である。

本研究では、可逆セルオートマトン ETPCA 0347 のように単純な遷移規則をもつものでも、RLEM4-31 を中間段階に置くことで簡潔に可逆チューリング機械を構成できることを示した [雑誌論文 1, 5, 学会発表 1, 2, 3]。つまり図 7 のように、(a) ETPCA 0347 の単純な遷移規則を基に、(b) 信号の制御や演算に使える有用な現象を見出し、(c) それらを用いて RLEM4-31 を実現し、(d) 可逆チューリング機械を構成する、という道筋を与えた。この道筋全体は、Golly と呼ぶ汎用のセルオートマトン・シミュレータで確認できる [その他 2]。

将来、可逆コンピュータを物理的に実現する際に使える可逆的な物理法則は、図 7(a)とは全く異なっているだろうが、中間に適切な論理素子や機能モジュールを仮定すれば、極度に単純な法則からでも簡潔かつ体系的に可逆コンピュータを構成し得るという結果は重要である。

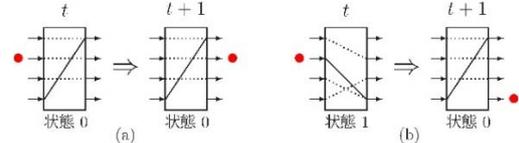


図 6. 2状態可逆論理素子 RLEM4-31 [15]。(a)状態が遷移する場合と (b)遷移しない場合。

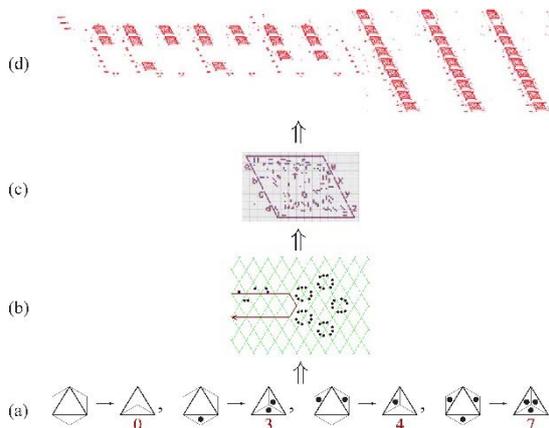


図 7. 可逆コンピュータの階層的構成。(a)可逆セルオートマトンの遷移規則。(b)可逆セル空間における有用な現象。(c)2状態可逆論理素子の実現。(d)可逆チューリング機械の構成。

(5) 可逆コンピューティング理論の体系化

上記(4)にも述べたように、可逆コンピューティングの研究は、可逆セルオートマトン、可逆論理素子、可逆チューリング機械など、個々のモデルの性質や能力を明らかにするだけでなく、下位レベルのモデルによる上位レベルのモデルの構成法や、それらの関係の解明など、総合的に進める必要がある。

本研究ではこのような視点から理論全体の体系化と研究の位置づけを行った。特に、研究代表者が過去約 30 年間に行った研究成果をまとめた英文の単行本を出版した [図書 2]。また、これらに関する論文の出版や学会発表なども行った [雑誌論文 4, 5, 学会発表 1, 5]。

<引用文献>

- [1] Bennett, C.H., Logical reversibility of computation, *IBM J. Res. Dev.*, Vol.17, pp.525-532, 1973.
- [2] De Vos, A., *Reversible Computing: Fundamentals, Quantum Computing, and Applications*, Wiley-VCH, 2010.
- [3] Feynman, R.P., Simulating physics with computers, *Int. J. Theoret. Phys.*, Vol.21, pp.467-488, 1982.
- [4] Feynman, R.P., Quantum mechanical computers, *Opt. News*, Vol.11, pp.11-46, 1985.
- [5] Fredkin, E., Toffoli, T., Conservative logic, *Int. J. Theoret. Phys.*, Vol.21, pp.219-253, 1982.
- [6] Landauer, R., Irreversibility and heat generation in the computing process, *IBM J. Res. Dev.*, Vol.5, pp.183-191, 1961.
- [7] Imai, K., Morita, K., A computation-universal two-dimensional 8-state triangular reversible cellular automaton, *Theoret. Comput. Sci.*, Vol.231, pp.181-191, 2000.
- [8] Morita, K., Harao, M., Computation universality of one-dimensional reversible (injective) cellular automata, *Trans. IEICE Japan*, Vol.E-72, pp.758-762, 1989.
- [9] Morita, K., Shirasaki, A., Gono, Y., A 1-tape 2-symbol reversible Turing machine, *Trans. IEICE Japan*, Vol.E-72, pp.223-228, 1989.
- [10] Morita, K., Universality of a reversible two-counter machine, *Theoret. Comput. Sci.*, Vol.168, pp.303-320, 1996.
- [11] Morita, K., A simple reversible logic element and cellular automata for reversible computing, *Lecture Notes in Computer Science*, Vol.2055, pp.102-113, 2001.
- [12] Morita, K., Yamaguchi, Y., A universal reversible Turing machine, *Lecture Notes in Computer Science*, Vol.4664, pp.90-98, 2007.
- [13] Morita, K., Ogiro, T., Alhazov, A., Tanizawa, T., Non-degenerate 2-state reversible logic elements with three or more symbols are all universal, *J. Mult.-Valued Logic and Soft Computing*, Vol.18, pp.37-54, 2012.
- [14] Morita, K., Reversibility in space-bounded computation, *Int. J. of General Systems*, Vol.43, pp.697-712, 2014.
- [15] Morita, K., Suyama, R., Compact realization of reversible Turing machines by 2-state reversible logic elements, *Lecture Notes in Computer Science*, Vol.8553, pp.280-292, 2014.
- [16] Toffoli, T., Computation and construction universality of reversible cellular automata, *J. Comput. Syst. Sci.*, Vol.15, pp.213-231, 1977.
- [17] Wille, R., Drechsler, R.: *Towards a Design Flow for Reversible Logic*, Springer, 2010.
- [18] Winfree, E., Self-healing tile sets, *Nanotechnology: Science and Computation*, Springer, pp.55-78, 2006.
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 9 件)
1. K. Morita, A universal non-conservative reversible elementary triangular partitioned cellular automaton that shows complex behavior, *Natural Computing*, 査読有, 2018.
<https://doi.org/10.1007/s11047-017-9655-9>
 2. G.J. Martinez, K. Morita, Conservative computing in a one-dimensional cellular automaton with memory, *J. of Cellular Automata*, 査読有, Vol.13, pp. 325-346, 2018.
<http://www.oldcitypublishing.com/journals/jca-home/jca-issue-contents/jca-volume-13-number-4-2018/jca-13-4-p-325-346/>
 3. K. Morita, Language recognition by reversible partitioned cellular automata and iterative arrays, *J. of Cellular Automata*, 査読有, Vol.13, pp. 183-213, 2018.
<http://www.oldcitypublishing.com/journals/jca-home/jca-issue-contents/jca-volume-13-number-3-2018/jca-13-3-p-183-213/>
 4. A. Adamatzky, S. Akl, M. Burgin, C.S. Calude, J.F. Costa, M.M. Dehshibi, Y.-P. Gunji, Z. Konkoli, B. MacLennan, B. Marchal, M. Margenstern, G.J. Martinez, R. Mayne, K. Morita, A. Schumann, Y.D. Sergeev, G.Ch. Sirakoulis, S. Stepney, K. Svozil, H. Zenil, East-West paths to unconventional computing, *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, 査読有, Vol.131, pp.469-493, 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.pbiomolbio.2017.08.004>
 5. K. Morita, Finding a pathway from reversible microscopic laws to reversible computers, *Int. J. Unconventional Computing*, 査読有, Vol.13, pp. 203-213, 2017.
<http://www.oldcitypublishing.com/journals/ijuc-home/ijuc-issue-contents/ijuc-volume-13-number-3-2017/ijuc-13-3-p-203-213/>
 6. K. Morita, Elementary triangular partitioned cellular automata, 数理解析研究所講究録, 査読無, Vol.2040, pp. 10-20, 2017.
<http://www.kurims.kyoto-u.ac.jp/~kyodo/kokyuroku/contents/2040.html>
 7. K. Morita, Universality of 8-state reversible and conservative triangular partitioned cellular automata, *Lecture Notes in Computer Science*, Springer, 査読有, Vol.9863, pp.45-54, 2016.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-44365-2_5
 8. K. Morita, An 8-state simple reversible triangular cellular automaton that exhibits complex behavior, *Lecture Notes in Computer Science*, Springer, 査読有, Vol.9664, pp.170-184, 2016.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-39300-1_14
 9. K. Morita, Language recognition by reversible partitioned cellular automata, *Lecture Notes in*

Computer Science, Springer, 査読有, Vol.8996, pp.106-120, 2015.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-18812-6_9

[学会発表] (計 9 件)

1. K. Morita, Simple reversible triangular cellular automata (video talk) (招待講演), *Conference of Celebration of Late Prof. H.V. McIntosh Achievements*, 2017 年 11 月 29-30 日 Puebla (Mexico).
http://uncomp.uwe.ac.uk/HVM/Poster_files/posterKeynotes-HHVM.pdf
2. K. Morita, Making reversible Turing machines in a reversible elementary triangular partitioned cellular automaton, 2017 年度夏の LA シンポジウム, 2017 年 7 月 18-20 日, 天童.
<http://www.shino.ecei.tohoku.ac.jp/semi/LA2017/summer.php>
3. K. Morita, Making reversible Turing machines in a reversible elementary triangular partitioned cellular automaton, *23rd Int. Workshop on Cellular Automata and Discrete Complex Systems*, 2017 年 6 月 7-9 日, Milan.
<https://automata2017.wordpress.com/>
4. G.J. Martinez, A. Adamatzky, K. Morita, Collision-based computing in elementary cellular automata with memory, *11th Int. Workshop on Natural Computing*, 2017 年 5 月 13-14 日, 秋田.
https://uploads.strikinglycdn.com/files/21b8884a-0e3f-45d8-abf5-3a1682f2d19b/NEW11IWNC_PROGRAM20170509.pdf?id=71336
5. K. Morita, A simple reversible cellular automaton that shows complex behavior, *11th Int. Workshop on Natural Computing*, 2017 年 5 月 13-14 日, 秋田.
https://uploads.strikinglycdn.com/files/21b8884a-0e3f-45d8-abf5-3a1682f2d19b/NEW11IWNC_PROGRAM20170509.pdf?id=71336
6. K. Morita, Constructing a computer out of billiard balls (招待講演), *Popular Lectures for Students and General Audience*, *11th Int. Workshop on Natural Computing*, 2017 年 5 月 12 日, 秋田.
<https://uploads.strikinglycdn.com/files/21b8884a-0e3f-45d8-abf5-3a1682f2d19b/PopularLecturePoster11thIWNC.pdf?id=71339>
7. K. Morita, A non-conservative reversible elementary triangular partitioned cellular automaton, *CiNet Workshop on Cellular Automata, Distributed Computing, and Mobile Agents*, 2017 年 2 月 8 日, 吹田.
http://cinet.jp/event/20170125_2480
8. K. Morita, Complex behavior in elementary triangular partitioned cellular automata, 2016 年度冬の LA シンポジウム, 2017 年 2 月 1-3 日, 京都.

<https://junkawahara.github.io/la2016/la2016wintprogram.pdf>

9. K. Morita, Making universal reversible Turing machines, *7th Conference on Machines, Computations and Universality*, 2015 年 9 月 9-11 日, Famagusta (North Cyprus).
<http://mcu2015.emu.edu.tr/mcu2015/>

[図書] (計 3 件)

1. A. Adamatzky (ed.), *Reversibility and Universality: Essays Presented to Kenichi Morita on the Occasion of his 70th Birthday*, Springer, Cham, p.484, 2018. (分担部分: G.J. Martinez, A. Adamatzky, K. Morita, Logical gates via gliders collisions, pp. 199-220).
https://doi.org/10.1007/978-3-319-73216-9_9
2. K. Morita, *Theory of Reversible Computing*, Springer, Tokyo, p.457, 2017.
<https://doi.org/10.1007/978-4-431-56606-9>
3. A. Adamatzky (ed.), *Advances in Unconventional Computing Vol.1: Theory*, Springer, Cham, p.874, 2017. (分担部分: K. Morita, Chapter 10: Two small universal reversible Turing machines, pp. 221-237).
https://doi.org/10.1007/978-3-319-33924-5_10

[その他]

ホームページ等

1. K. Morita, Simple reversible triangular cellular automata (video talk), 広島大学学術情報リポジトリ, No. 44512, 2017.
<http://ir.lib.hiroshima-u.ac.jp/00044512>
2. K. Morita, Reversible world: Data set for simulating a reversible elementary triangular partitioned cellular automaton on Golly, 広島大学学術情報リポジトリ, No. 42655, 2017.
<http://ir.lib.hiroshima-u.ac.jp/00042655>
3. K. Morita, Reversible and conservative elementary triangular partitioned cellular automata (slides), 広島大学学術情報リポジトリ, No. 39997, 2016.
<http://ir.lib.hiroshima-u.ac.jp/00039997>
4. K. Morita, A reversible elementary triangular partitioned cellular automaton that exhibits complex behavior (slides), 広島大学学術情報リポジトリ, No. 39321, 2016.
<http://ir.lib.hiroshima-u.ac.jp/00039321>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森田 憲一 (MORITA, Kenichi)

広島大学・大学院工学研究科・名誉教授
研究者番号: 00093469

(2) 研究協力者

Andrew ADAMATZKY

University of the West of England, UK,
Professor

Genaro Juarez MARTINEZ

National Polytechnic Institute of Mexico,
Associate Professor