様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

平成 ２７ 年　 ５ 月　 １ 日現在

機関番号： １５４０１
研究種目： 基盤研究(C)
研究期間： 2012～2014
課題番号： ２４５０００１７

研究課題名（和文） 将来の計算機構としての可逆コンピューティングとその体系化

研究課題名（英文） Reversible Computing as a Future Computing Mechanism and Its Theoretical Systematization

研究代表者
森田　憲一（MORITA, Kenichi）

広島大学・工学（系）研究科（研究院）・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）　　1,800,000円

研究成果の概要（和文）：可逆コンピューティングは物理的可逆性と密接に関係した計算モデルであり、量子コンピューティングとともに微視的な物理的性質を演算に利用する将来の計算機構の開発の鍵となる。本研究では、可逆的な物理モデル、可逆論理素子と論理回路、可逆計算機システムなど、いくつかのレベルの可逆計算の諸モデルの特性を解明するとともに、それらの関係を明らかにし、理論全体を体系化した。特に、2状態可逆論理素子、可逆チューリング機械、可逆セルオートマトンなどの計算能力を研究し、いずれの場合も非常に単純なモデルでも万能性を有する（汎用計算システムを構成し得る）ことを示した。

研究成果の概要（英文）：Reversible computing is a paradigm of computation that has a close relation to physical reversibility. As in the case of quantum computing, it will also become important when we develop future computing systems that directly utilize microscopic physical phenomena for their logical operations. In this study, we investigated reversible physical models, reversible logic elements and circuits, and reversible computing systems, which form some hierarchical levels in reversible computing. We studied basic properties of these models, and systematized the obtained results in a theory of reversible computing. In particular, we clarified computational capabilities of 2-state reversible logic elements, reversible Turing machines, reversible cellular automata, and others, and showed that even very simple reversible systems exhibit computational universality.

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　可逆順序機械　可逆セルオートマトン　物理的可逆性

１．研究開始当初の背景

可逆性は元々、物理学において古くから議論されてきた性質であるが、計算機科学における可逆性の研究は、Landauer [4] が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」を主張したことに端を発する。その後、可逆チューリング機械 [1]、可逆論理素子[3]、可逆セルオートマトン[10]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視点から研究されるようになった。また Feynman [2] 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になることを論じた。可逆コンピュータの構成素子は究極的には原子・分子のスケールで実現されるべきものであるが、電子回路としての可逆論理素子の実装法の研究もある。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ナノテクノロジーの領域などでも注目されている。

研究代表者のこれまでの研究により、可逆コンピューティングの世界は、従来とは全く異なる斬新で興味深いアイデアを多く出し得ることが分かってきた。例えば、2 状態の可逆論理素子であるロータリー素子[6]は特にユニークなものであり、これにより、AND, OR, NOT から構成される従来型の計算機とは非常に様相を異にする、独特のアーキテクチャを持つ可逆コンピュータが可能であることが判明している。一方では、可逆コンピューティングの枠組みは多様であり、物理モデル、論理素子、計算システムの各レベルにおいて多くの計算モデルが存在し、さらにそれらが相互に密接に関係している。このため、個々の計算モデルをより深く研究するだけでなく、理論全体を体系化し、将来有用となり得る斬新な考え方を明確に提示することが不可欠であり、本研究ではそれをねらいの一つとしている。

２．研究の目的

物理的な可逆性は物質の微視的な挙動を特徴づける一特性であり、原子・分子レベルで起こる物理現象を演算に直接用いて高集積度の計算機を構成しようとする際に避けて通れない性質である。本研究は、可逆コンピューティングを、物理モデル、論理素子、計算システムなど、ミクロからマクロに至るまでの各レベルの計算モデル、およびそれらの相互関係について研究し、従来型の計算モデルにはない新しい計算原理の発見とその特質の解明を目指すものである。特に、どれほど単純な可逆的素過程から万能な計算システムが構成できるか、またそれに適した可逆コンピュータのアーキテクチャはどのようなものかを明らかにするとともに、理論の体系化を行う。

３．研究の方法

可逆コンピュータを可逆的な物理システムとして適切に実現することを究極の目標としたときに解明すべき理論的課題は、どれほど単純な可逆素子からコンピュータが構成できるか、また、可逆コンピュータに適したアーキテクチャはどのようなものか、というものである。本研究では、可逆的な物理モデル、可逆論理素子、可逆セルオートマトン、可逆チューリング機械を、論理万能性や計算万能性を保持したままどれほど単純化できるかという、従来からの研究をさらに押し進めるとともに、それらの相互関係を明らかにし、理論の体系化を行った。特に、可逆論理素子の万能性、可逆論理素子による可逆計算機モデルの効率的構成法、万能な可逆システムの記述複雑度(descriptional complexity)を研究することで、可逆コンピュータがどのような可逆的素過程から構成できるのか、どのような可逆論理素子が有用なのか、どれほど簡潔で斬新なアーキテクチャがありうるのか、という問に対する答を与える。

より具体的には以下の課題を研究した。

(1) 記憶つき可逆論理素子の万能性の解明
(2) 記憶つき可逆論理素子による可逆計算機モデルの構成法
(3) 種々の可逆計算機モデルの計算能力の解明と計算万能なシステムの単純化
(4) 可逆コンピューティング理論の体系化

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) 記憶つき可逆論理素子の万能性の解明

記憶付き可逆論理素子(reversible logic element with memory, RLEM）は、論理ゲートとは異なり、有限個の内部状態をもつ素子である。可逆論理回路の理論では当初、可逆論理ゲートが主に用いられてきたが、研究代表者によるこれまでの研究により、可逆チューリング機械や可逆順序機械が、ロータリー素子と呼ぶ 2 状態で各 4 本の入出力線をもつ RLEM によって非常に斬新な方法でしかも簡潔に構成できることが判明し[6]、RLEM の有用性が明らかになっている。

k 本の入出力をもつ 2 状態 RLEM は $2k!$ 種類存在するので、それに 0～$2k!-1$ の番号を系統的に付けることで、n 番目の素子を RLEM k-n で表す。例えば RLEM 4-31 の図による表現とその動作は図 1 のようになる。赤丸で示される信号（粒子）が破線を通過すると(a)のように元の状態を保ち、実線を通過すると(b)のように他方の状態に遷移する。

2 状態 k 入出力 RLEM で非縮退のもの（1 状態または k 未満の入出力線数の RLEM と等価でないもの）は無限個あるが、k>2 の場合には「すべての」非縮退 RLEM が万能である（可逆チューリング機械を構成できる）

ことは既に明らかにしている[9]。本研究では、[雑誌論文 4] において k=2 である 4 種類の非縮退 RLEM のうち 2-2, 2-3, 2-4 の 3 種類が非万能であることの厳密な証明を与えた。なお RLEM2-17 については未解決である。また同論文において、RLEM2-3, 2-4, 2-17 の中のどの 2 つの組合せも万能になること、および RLEM2-2 は他のどの非縮退 RLEM からも構成できることを証明し、RLEM2-17 を除くすべての 2 状態 RLEM の能力を解明した。

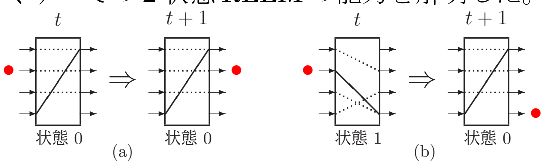

図 1. 可逆論理素子 RLEM 4-31 の動作。(a) 状態が変化しない場合と、(b) 変化する場合。

(2) 記憶つき可逆論理素子による可逆計算機モデルの構成法

可逆チューリング機械や可逆順序機械を RLEM によって実現するための簡潔な構成法、つまりアーキテクチャを研究するとともに、どの RLEM が構成に適するかを探った。

①ロータリー素子による構成法

2 状態 4 入出力 RLEM であるロータリー素子で可逆チューリング機械が構成できることはこれまでの研究[6]によって示されているが、[図書 1] ではそれを改良し、よりも簡潔な構成法を与えた。

②RLEM4-31 による構成法

従来は可逆計算機を簡潔に構成できる素子としてはロータリー素子以外には知られていなかったが、[雑誌論文 5] において RLEM4-31 (図 1) により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。図 2 は可逆チューリング機械の有限制御部の構成例である。この右方に可逆チューリング機械のテープに対応する回路が接続される。同論文ではさらに、RLEM4-31 が 3 入出力の RLEM3-7 を 2 個使って実現できることを示し、これらの素子の有用性を示した。また[雑誌論文 3] では、可逆順序機械を RLEM4-31 で構成する方法を与えた。

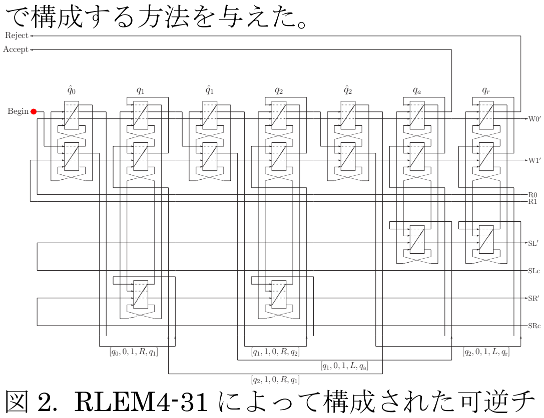

図 2. RLEM4-31 によって構成された可逆チューリング機械の有限制御部の例。

③RLEM2-3, 2-4 による構成法

2 入出力 RLEM である 2-3 と 2-4 の組合せが万能であることは既に明らかなっているが [5]、これらにより可逆チューリング機械および可逆順序機械が実際に簡潔に構成できることを[雑誌論文 2,9]において示した。

(3) 種々の可逆計算機モデルの計算能力の解明と計算万能なシステムの単純化

使用記憶領域が制限された可逆チューリング機械、可逆セルオートマトン等の計算能力を研究し、可逆性制約によって能力が低下しないことを示すいくつかの結果を証明した。また、万能可逆チューリング機械の記述複雑度をどれほど下げられるかを研究した。

①領域限定可逆チューリング機械の能力

チューリング機械の可逆性と決定性は双対な性質であり、その動作モードの組合せは、可逆で決定的、可逆で非決定的、非可逆で決定的、非可逆で非決定的の 4 種類ある (図 3)。記憶領域量が $S(n)$ (n は入力長) に限定された $S(n)$ 領域限定チューリング機械の形式言語受理能力が、これらの動作モードに依存してどう変化するかを研究した。この結果、非可逆で非決定的以外の 3 つのモードがすべて等価になることを簡潔な方法で証明した[雑誌論文 6]。また、$S(n)=\log n$ のクラスに属するマルチヘッド有限オートマトンも、可逆で決定的なものと非可逆で決定的なものとが等能力になる[雑誌論文 8]。

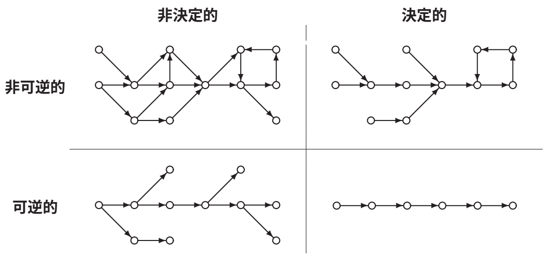

図 3. チューリング機械の 4 種の動作モード。各グラフは計算状況間の遷移関係の例。

②ブラウン運動的システムの計算能力

ブラウン運動に相当する性質をもつシステム、つまり計算過程が順方向だけでなく逆方向にも進みうるシステムは、対称的なシステムとも呼ばれ (図 4)、可逆性とも関係することが知られている。本研究では、このようなシステムを数学的に定式化し、計算能力や基本的性質を明らかにした[雑誌論文 7]。

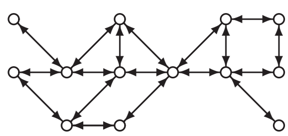

図 4. ブラウン運動的 (あるいは対称的) システムにおける計算状況間の遷移関係の例。

③小サイズの万能可逆チューリング機械

万能チューリング機械の状態数と記号数をどれほど少なくできるか、つまり計算万能性を有する機械の記述複雑度をどれだけ小さくできるかの研究は重要で、長い歴史がある（図 5 では◇で示されている）。万能可逆チューリング機械については、これまでの研究で、15 状態 6 記号と 17 状態 5 記号のものが得られている[7,8]。本研究では、24 状態 4 記号と 32 状態 3 記号の万能チューリング機械で可逆性制約を満たすものを構成した[雑誌論文 1]。さらに、前者を 2 記号の機械に変換することにより 138 状態 2 記号のものを得た。また[学会発表 1] では、任意の可逆チューリング機械を、4 状態および 3 状態の可逆チューリング機械に変換する方法を与えた。これを既存の万能可逆チューリング機械に適用することにより、4 状態 175 記号と 3 状態 36654 記号の万能可逆チューリング機械が得られる。図 5 はこれらの結果を示す。

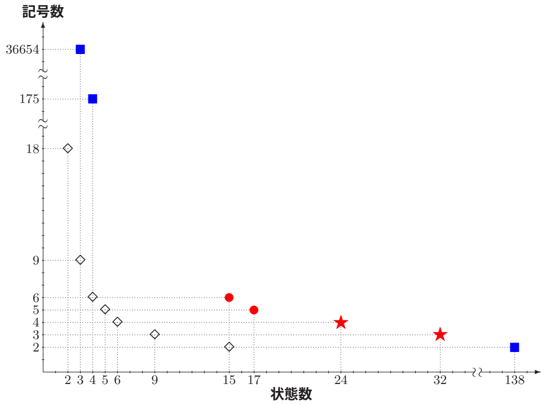

図 5．万能可逆チューリング機械（★, ●, ■）と、非可逆な万能チューリング機械（◇）。★は今回の、●はこれまでの研究で構成したもの、■はこれらを変換して得られたもの。

④可逆的で保存的なセルオートマトン

可逆性と共に重要な物理的性質である保存性に相当する性質を併せ持つ 1 次元 96 状態セルオートマトンで計算万能性を有するものが存在することを示した[学会発表 10]。これは次のようにして証明した。任意の s 状態 1 次元可逆分割セルオートマトンが、$4s$ 状態の 1 次元保存的可逆セルオートマトンで模倣できることを示し、それと 24 状態の計算万能な 1 次元可逆分割セルオートマトンの存在からこの結果を導いた。

⑤可逆セルオートマトンによる言語認識

形式言語（記号列集合）を認識するある種の可逆セルオートマトンを定式化し、その認識能力を研究した[学会発表 2]。このモデルは可逆性制約を付加しても認識能力が下がらず、非可逆なモデルおよび決定性線形有界オートマトンと等価になることを証明した。

(4) 可逆コンピューティング理論の体系化

可逆コンピューティングの諸モデルは各々独立に存在するのではなく、一般に他のモデルとも密接なつながりを持つ。また、ミクロなレベルからマクロなレベルまで、何層かの階層を構成している。つまり、可逆的な物理システムが最もミクロなレベルにあり、その上に可逆論理素子のレベル、可逆論理回路のレベルがあり、一番上に可逆計算機構のレベルがある。従って、それらの関係を明らかにし、理論全体を体系化するのも重要である。上記(1)～(3)の課題においてもこの点に留意して研究し、関係を導いてきた。

2 件の招待講演[学会発表 3,6]では、これらに重点をおいてサーベイと解説を行った。また、研究代表者が過去 20 数年間に上げた研究成果をこのような視点で体系化した英文単行本の執筆を平成 26 年度より進めており、平成 27 年度の出版を目指している（出版契約は Springer Japan と交わしている）。

＜引用文献＞

[1] Bennett, C.H., Logical reversibility of computation, IBM J. Res. Dev., Vol.17, pp.525-532, 1973.
[2] Feynman, R.P., Simulating physics with computers, Int. J. Theoret. Phys., Vol.21, pp.467-488, 1982.
[3] Fredkin, E., Toffoli, T., Conservative logic, Int. J. Theoret. Phys., Vol.21, pp.219-253, 1982.
[4] Landauer, R., Irreversibility and heat generation in the computing process, IBM J. Res. Dev., Vol.5, pp.183-191, 1961.
[5] Lee, J., Peper, F., Adachi, S., Morita, K., An asynchronous cellular automaton implementing 2-state 2-input 2-output reversed-twin reversible elements, LNCS 5191, pp.67-76, 2008.
[6] Morita, K., A simple reversible logic element and cellular automata for reversible computing, LNCS 2055, pp.102-113, 2001.
[7] Morita, K., Yamaguchi, Y, A universal reversible Turing machine, LNCS 4664, pp.90-98, 2007.
[8] Morita, K., Reversible computing and cellular automata ― A survey, Theoret. Comput. Sci., Vol.395, pp.101-131, 2008.
[9] 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.
[10] Toffoli, T., Computation and construction universality of reversible cellular automata, J. Comput. Syst. Sci., Vol.15, pp.213-231, 1977.

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, Universal reversible Turing machines with a small number of tape symbols, Fundamenta Informaticae, 査読有, Vol.138, pp.17-29, 2015.
DOI: 10.3233/FI-2015-1195
2. M.-X. Tang, J. Lee, K. Morita, General design of reversible sequential machines based on reversible logic elements, Theoretical Computer Science, 査読有, Vol.568, pp.19-27, 2015.
DOI: 10.1016/j.tcs.2014.11.032
3. K. Morita, T. Ogiro, How can we construct reversible machines out of reversible logic element with memory? Lecture Notes in Computer Science, Springer, 査読無, Vol.8808, pp.352-366, 2014.
DOI: 10.1007/978-3-319-13350-8_26
4. Y. Mukai, T. Ogiro, K. Morita, Universality problems on reversible logic elements with 1-bit memory, J. of Unconventional Computing, 査読有, Vol.10, pp.353-373, 2014.
http://www.oldcitypublishing.com/journals/ijuc-home/ijuc-issue-contents/ijuc-volume-10-numbers-5-6/ijuc-10-5-6-p-353-373/
5. K. Morita, R. Suyama, Compact realization of reversible Turing machines by 2-state reversible logic elements, Lecture Notes in Computer Science, Springer, 査読有, Vol.8553, pp.280-292, 2014.
DOI: 10.1007/978-3-319-08123-6_23
6. K. Morita, Reversibility in space-bounded computation (招待論文), Int. J. of General Systems, 査読無, Vol.43, pp.697-712, 2014.
DOI: 10.1080/03081079.2014.920998
7. F. Peper, J. Lee, J. Carmona, J. Cortadella, K. Morita, Brownian circuits: Fundamentals, ACM J. on Emerging Technologies in Computing Systems, 査読有, Vol.9, Article 3, 2013.
DOI: 10.1145/2422094.2422097
8. K. Morita, A deterministic two-way multi-head finite automaton can be converted into a reversible one with the same number of heads, Lecture Notes in Computer Science, Springer, 査読有, Vol.7581, pp.29-43, 2013.
DOI: 10.1007/978-3-642-36315-3_3
9. J. Lee, R.L. Yang, K. Morita, Design of 1-tape 2-symbol Turing machines based on reversible logic elements, Theoretical Computer Science, 査読有, Vol.460, pp.78-88, 2012.
DOI: 10.1016/j.tcs.2012.07.027

〔学会発表〕（計 10 件）

1. K. Morita, Reversible Turing machines with a small number of states, 6th Workshop on Non-Classical models of Automata and Applications, 2014 年 7 月 28-29 日, Kassel (Germany).
http://www.theory.informatik.uni-kassel.de/NCMA2014/
2. K. Morita, Language recognition by reversible partitioned cellular automata, 20th Int. Workshop on Cellular Automata and Discrete Complex Systems, 2014 年 7 月 7-9 日，イーグレひめじ（姫路市）．
http://www.eng.u-hyogo.ac.jp/eecs/eecs12/automata2014/
3. K. Morita, Reversible logic elements with memory and their universality (招待講演), 6th Conference on Machines, Computations and Universality, 2013 年 9 月 9-11 日, Zurich (Switzerland).
DOI: 10.4204/EPTCS.128.3
http://mcu2013.ini.uzh.ch/
4. K. Morita, Reversible multi-head finite automata and space-bounded Turing machines, 京都大学数理解析研究所研究集会「理論計算機科学の新展開」，2013 年 1 月 28-30 日，京都大学（京都市）．
http://www.kurims.kyoto-u.ac.jp/~kyodo/kokyuroku/contents/pdf/1849-11.pdf
5. 森田憲一，メモリー限定計算における可逆性，先端ナチュラルコンピューティングとその応用調査研究会，2012 年 12 月 15 日，イーグレひめじ（姫路市）．
http://www.eng.u-hyogo.ac.jp/eecs/eecs12/ANCA/anca.html
6. K. Morita, Reversible computing systems, logic circuits, and cellular automata (招待講演), 3rd Int. Conference on Networking and Computing, 2012 年 12 月 5-7 日，沖縄県男女共同参画センター（那覇市）．
DOI: 10.1109/ICNC.2012.10
http://is-candar.org/icnc12/invited_talks/
7. 岡佳史，森田憲一，岩本宙造，今井克暢，算術式を認識する可逆マルチヘッド有限オートマトン，平成 24 年度電気・情報関連学会中国支部連合大会，2012 年 10 月 20 日，島根大学（松江市）．
http://www2.infonets.hiroshima-u.ac.jp/rentai/2012/program/1204.html
8. 陶山嶺，森田憲一，岩本宙造，今井克暢，2 状態 3 記号可逆論理素子による可逆順序機械の構成法，平成 24 年度電気・情報関連学会中国支部連合大会，2012 年 10 月 20 日，島根大学（松江市）．
http://www2.infonets.hiroshima-u.ac.jp/rentai/2012/program/1204.html

9. 宮本健太郎，森田憲一，岩本宙造，今井克暢, 2 階の可逆セルオートマトンに関する一考察，平成 24 年度電気・情報関連学会中国支部連合大会，2012 年 10 月 20 日，島根大学（松江市）．
http://www2.infonets.hiroshima-u.ac.jp/rentai/2012/program/1203.html
10. K. Morita, Universality of one-dimensional reversible and number-conserving cellular automata, 18th Int. Workshop on Cellular Automata and Discrete Complex Systems, 2012 年 9 月 19-21 日, La Marana (France).
DOI: 10.4204/EPTCS.90.12

〔図書〕（計 1 件）
1. A. Adamatzky (ed.), Automata, Universality, Computation, Springer, p.418, 2015.（分担部分：K. Morita, Chapter 6: Constructing reversible Turing machines by reversible logic element with memory, pp.127-138)
DOI: 10.1007/978-3-319-09039-9_6

〔その他〕
ホームページ等
1. K. Morita, Constructing small universal reversible Turing machines, 2015.
http://ir.lib.hiroshima-u.ac.jp/00036736
2. K. Morita, Compact realization of reversible Turing machines by 2-state reversible logic elements, 2014.
http://ir.lib.hiroshima-u.ac.jp/00036076
3. K. Morita, Reversible Turing machines with a small number of states, 2014.
http://ir.lib.hiroshima-u.ac.jp/00036075
4. K. Morita, Language recognition by reversible partitioned cellular automata, 2014.
http://ir.lib.hiroshima-u.ac.jp/00036074
5. K. Morita, Reversible computing systems, logic circuits, and cellular automata, 2012.
http://ir.lib.hiroshima-u.ac.jp/00033877
6. K. Morita, Universality of one-dimensional reversible and number-conserving cellular automata, 2012.
http://ir.lib.hiroshima-u.ac.jp/00033876
7. K. Morita, A deterministic two-way multi-head finite automaton can be converted into a reversible one with the same number of heads, 2012.
http://ir.lib.hiroshima-u.ac.jp/00033875

６．研究組織
(1)研究代表者
森田　憲一（MORITA, Kenichi）
広島大学・大学院工学研究院・名誉教授
研究者番号：０００９３４６９