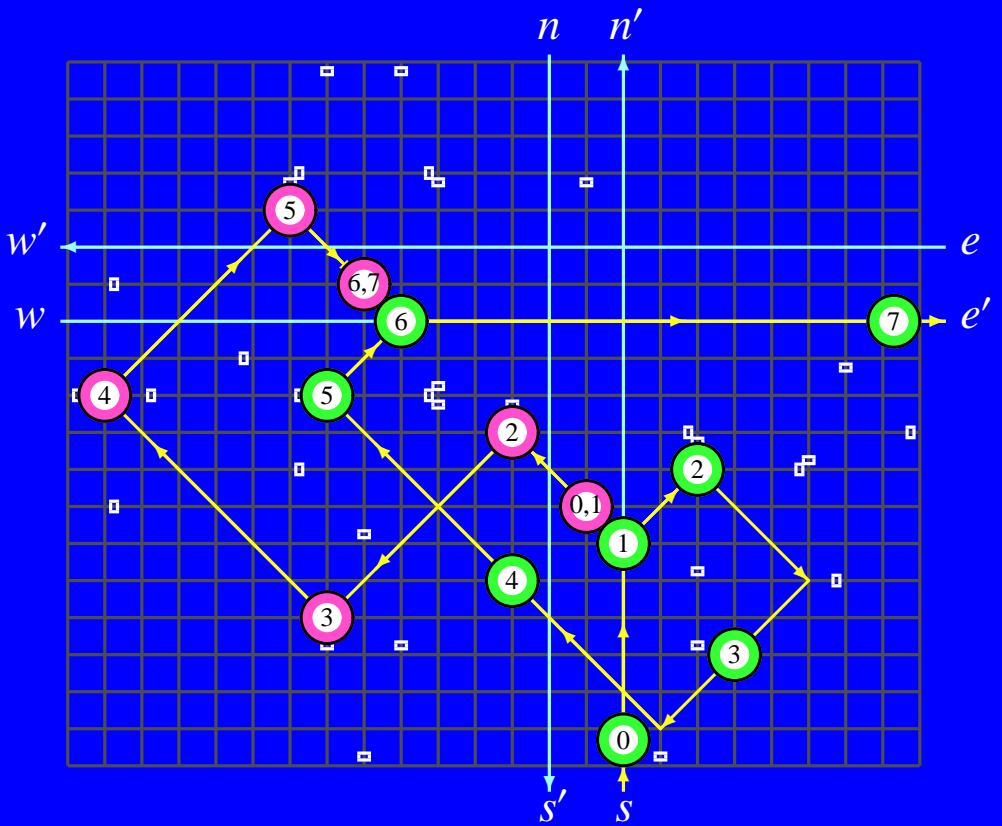


可逆計算

森田 憲一



本ファイルは次の図書の一部を収録したものである．

森田憲一：『可逆計算』（ナチュラルコンピューティング・シリーズ第5巻），
近代科学社，東京，2012年3月． ISBN978-4-7649-0422-4

This file contains a part of the following book.

Kenichi Morita: *Reversible Computing* (Natural Computing Series, Vol. 5),
Kindai Kagaku sha Co., Ltd., Tokyo, March 2012. ISBN978-4-7649-0422-4

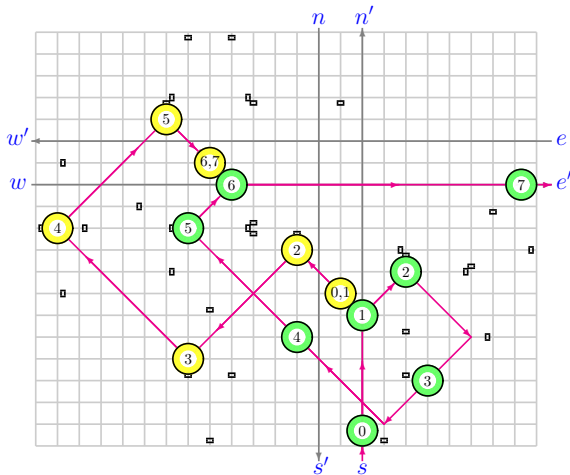


図 1: 可逆的な物理モデルであるビリヤードボールモデル (BBM) による, ロータリー素子と呼ぶ可逆論理素子の実現法 [1] (3.6 節). BBM は弾性衝突をする理想的なボールと反射板 (小さな長方形で表示) によって計算を遂行するモデルである. この図は, 図 3.32 (p.53) の過程を 1 枚の絵に描いたものである.

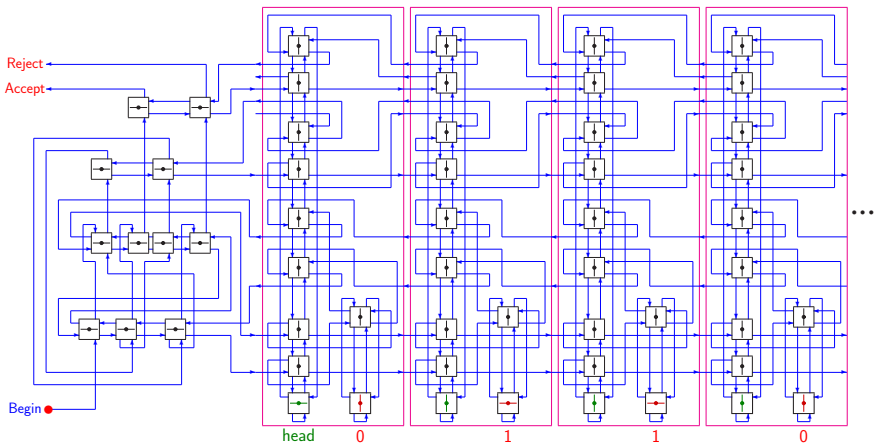


図 2: ロータリー素子により構成された可逆チューリング機械 (4.2 節). Begin に粒子を入力すると計算を開始し, 計算が終わると Accept または Reject から粒子が出力される. この計算の全過程は文献 [2] で見ることができる.

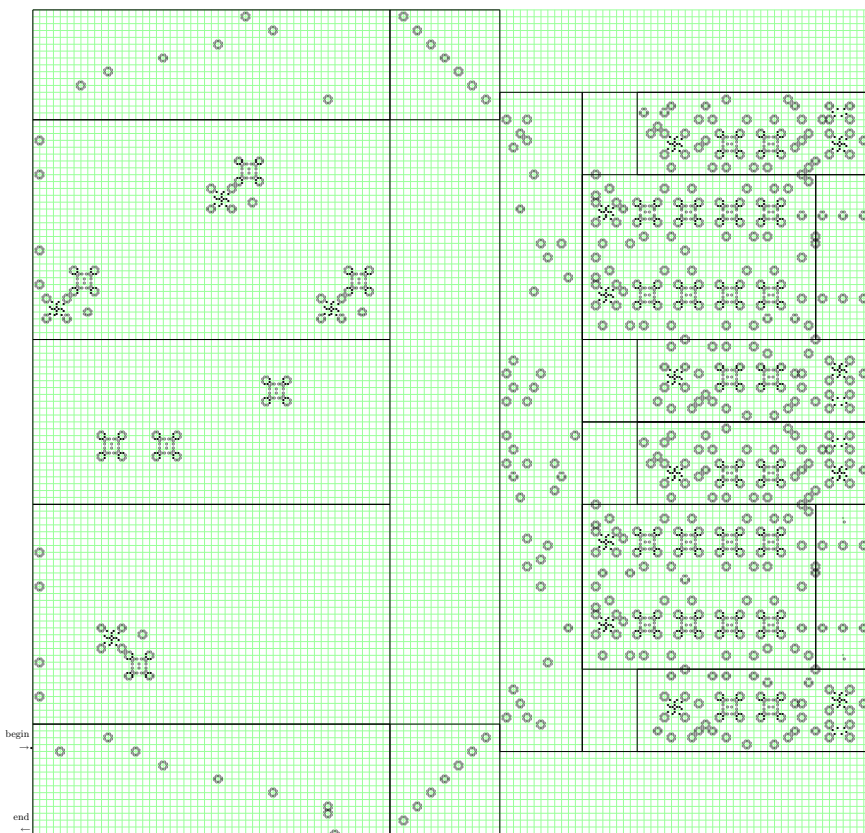


図 3: 計算万能な 2 次元 81 状態可逆セルオートマトン [3] の空間に埋め込まれた可逆カウンタ機械 (図 6.14 (p.163) と同じ図である)。なお, pdf ファイルのビューワーで本ページの図を拡大すれば細部を観察できる。このセルオートマトンによってどのように計算が実行されるかは, 文献 [4] 中の動画で見ることができる。

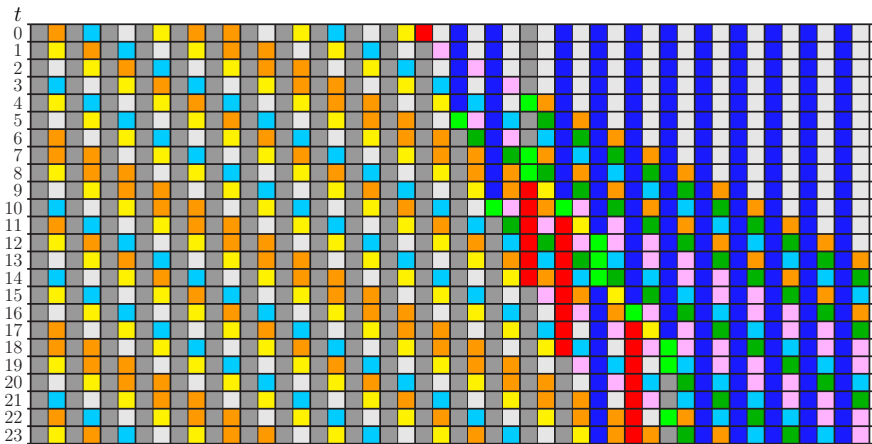


図 4: 万能な計算能力を持つ 1 次元 24 状態可逆セルオートマトン [5] がサイクリックタグシステムをシミュレートするときの状相 (セル空間全体の状態) の時間発展例 . これは図 7.5 (p.184) の各セルの状態を色で表したものである .

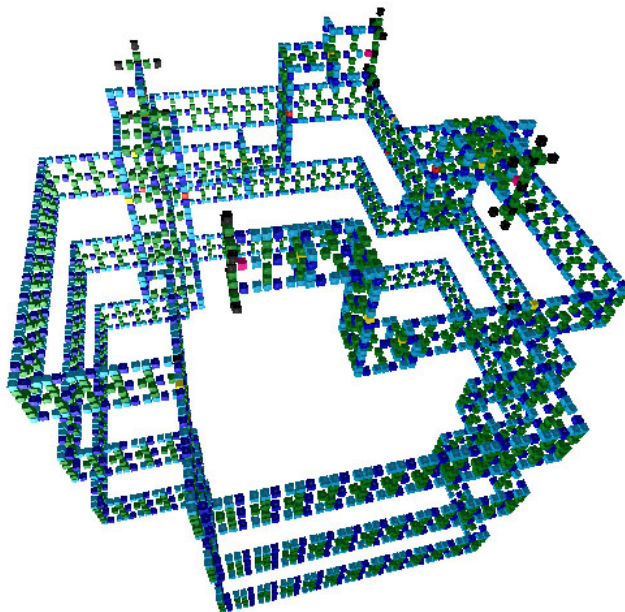


図 5: 3次元可逆セルオートマトンにおけるループの自己増殖 [6]. 図 8.6 (p.198) と同様, このセルオートマトンのシミュレータによって生成された画像である. 2次元および3次元可逆セルオートマトンでの自己増殖の様子は文献 [7] に含まれているいくつかの動画で見ることができる.

まえがき

計算システムにおける可逆性というのは、そのシステムのどの時点の状態をとっても直前の時刻の状態を唯一に決められるという性質、つまりシステムの動作を時間軸の逆方向にも一意にたどれる性質をいう。このような性質は、一見すると非常に特殊で些細な性質のように見えるので、重要な意味を持っていないと考えてしまうかもしれない。しかしこれは、物理的な可逆性、とりわけ古典力学や量子力学における可逆性、すなわち時間軸の逆方向にも同じ物理法則が成り立つという性質と密接な関係を持っている。可逆計算 (reversible computing) というのは、したがって、そのような法則が成り立つ世界で計算がどのように遂行できるのかを研究するための理論的枠組みだと言ってよい。

量子力学が支配するような微視的世界では物理法則は可逆的である。一方、計算機素子は近年急速に微細化が進み、このような性質が成り立つ領域に近づきつつある。それゆえ、可逆性という自然の法則が計算や計算機にどのような制約を与えることになるのか、あるいは逆にこの性質をどのように利用すれば計算機がうまく構成できるのか、を明らかにするのは重要な課題である。これらの課題はこれまで多くの研究者により理論的に研究され、それに対する興味深い答が種々与えられている。本書は可逆計算をこのような視点からできるだけ平易に解説するものである。幸い可逆計算の枠組みは割合単純であり、結果を理解するのも容易である。むしろ既成概念にとらわれずに、つまり従来型の (非可逆な) 論理素子や計算モデルに引きずられずに考えるということが必要になってくる。

可逆計算の研究は 1960 年頃からその萌芽が見られ [8, 9]、比較的長い歴史を持つのだが、今なお発展の途上にあって完成されたものではない。実際、可逆計算に関してこれまでに得られている種々の成果の中で、どのようなものが将来有用になるのかは、率直に言って今は分からない点が多い。しかしなが

らこの研究分野は，従来型の計算システムとは大きく異なった思考法へと導いてくれるので，将来の計算システムを考えるための新たな視野を開き，また知的好奇心を呼び起こしてくれる．可逆計算はこのように，まだ多くの未知数を残していると同時に，これまでにはないような新しい発想が可能な領域である．本書が，従来型の計算機の枠組みにとらわれない少々風変わりな分野への入門書となれば幸いである．

私事になるが，著者が可逆計算の研究を始めたのは 1980 年代の半ばなので，もう 25 年以上前になる．当時著者が在籍していた大阪大学で，しばしば三井利夫先生，菅田一博先生に，計算機科学，生物学，物理学などの境界領域について議論をして頂いた．その中で，計算というものと物理的可逆性はどんな関係があるのだろうか，という話がふと出たことがあった．文献を調べてみると，Landauer[8]，Bennett[10]，Feynman[11]，Fredkin と Toffoli[12]らの先駆的な研究に行き当たり，彼らの論文に興味を持ったのが最初だった．この研究分野には計算の基礎理論の視点から見ても，まだまだ十分には分かっていない課題が多く存在することに気づき，その後，同僚や大学院生，学部生の協力を得て現在まで研究を続けてきた次第である．

本書は，東京大学の萩谷昌己先生，早稲田大学の横森貴先生のお勧めで執筆させて頂くことになった．このような機会を与えてくださった両先生にお礼を申し上げたい．また，原稿の査読と有益なコメントを頂いた横森先生に深く感謝いたしたい．さらに，日頃の熱心な討論によりインスピレーションを与えて頂いている広島大学の岩本宙造博士，今井克暢博士に謝意を表したい．また，出版に際してお世話になった近代科学社の小山透氏，高山哲司氏，ならびに \LaTeX 原稿の編集をして頂いた藤村行俊氏に厚くお礼を述べたい．それから，約 25 年前から今にいたるまでの間に研究協力を頂いた，大阪大学，山形大学，広島大学の，当時および現在の学生諸氏にも感謝の意を表する．学生諸氏は一人一人の名前をここに列挙できないほど多くの人数になった．また本書には，科研費基盤研究 (C)21500015，およびそれ以前の何回かの科研費による補助で得られた研究成果が多く含まれている．

目次

第 1 章	可逆計算とは	1
1.1	計算における可逆性	1
1.2	本書の構成と読み方	4
第 2 章	可逆チューリング機械	7
2.1	普通のチューリング機械と可逆チューリング機械	7
2.2	普通のチューリング機械を可逆的な機械に作り変える	13
第 3 章	可逆論理素子と可逆論理回路	23
3.1	可逆論理素子とは	23
3.2	可逆論理ゲート	25
3.3	可逆論理回路におけるゴミ情報の浄化法	32
3.4	ビリヤードボールで可逆論理ゲートをシミュレートする	38
3.5	記憶を持つ可逆論理素子であるロータリー素子も面白い	43
3.6	ビリヤードボールモデルによるロータリー素子の実現	51
第 4 章	可逆論理素子で可逆計算機を作る	55
4.1	ロータリー素子で可逆順序機械を作る	55
4.2	つづいて可逆チューリング機械をロータリー素子で作る	61
4.3	いろいろな 2 状態可逆論理素子とその万能性	72
第 5 章	可逆セルオートマトン	87
5.1	セルオートマトン (CA) とは	87
5.2	可逆セルオートマトン	96
5.3	可逆 CA の設計方法	102

5.4	可逆 CA で可逆チューリング機械をシミュレートする	119
5.5	単純な 2 次元可逆 CA で可逆論理回路をシミュレートする . . .	131
第 6 章	可逆カウンタ機械	145
6.1	可逆カウンタ機械とは	145
6.2	可逆カウンタ機械を 2 次元可逆 CA 中に実現する	155
第 7 章	計算万能で単純な可逆システム	167
7.1	万能可逆チューリング機械を構成する	167
7.2	単純な 1 次元万能可逆セルオートマトンを構成する	181
第 8 章	可逆セルオートマトンにおける自己増殖	189
8.1	自己増殖セルオートマトンとは	189
8.2	自己増殖するオブジェクトを可逆 CA 中に構成する	193
第 9 章	可逆計算の今後の展望	199

第1章 可逆計算とは

可逆計算という研究分野がどのようにして生まれてきたのか，またどのような意味と重要性を持っているのかを述べ，この分野の研究課題とその歴史を概観する．また，第2章以後の構成と内容，および本書の読み方についても述べる．

1.1 計算における可逆性

可逆性(reversibility)というのは，元々は物理学において議論されてきた性質である．その中で力学系における可逆性は，時間軸の正方向と負方向とで同じ物理法則が成立つことを言い，たとえば摩擦のない古典力学系や量子力学系はこの性質を持っている．このような可逆性が計算においても有用な概念であること，とりわけ計算に必要なエネルギーの問題を考える際に重要になることを最初に論じたのは Landauer[8] である．

彼は，計算機において不要な情報を消去するなど，元の状態に戻れないという意味で非可逆な(不可逆とも言う)演算を実行すると必ず熱の発生を伴うことを指摘した．これはランダウアの原理(Landauer's principle)と呼ばれている．より具体的には，1ビットの情報が消去されると， $kT \ln 2$ のエネルギーが熱として計算機の外部に放出される(k はボルツマン定数， T は絶対温度)．この概略を説明すると次のようになる．物理的なシステムとしての計算機構の巨視的な状態に対応する微視的状態(配置とも言う)の個数は，1ビットの情報が完全に消されたならば $1/2$ に減ってしまう．これは，そのビットが0であることに対応する微視的状態と，1であることに対応する微

視的状態の両方の可能性があったのが、一方だけになることによる。そして物理的システムのエントロピーは、それがとることができる微視的状態の数の自然対数に k を乗じたものなので、その増加量は $k \ln \frac{1}{2}$ 、つまり $k \ln 2$ だけ減少する。熱力学の第二法則より、この減少量を補うために、外部環境である物理的システムのエントロピーが少なくとも $k \ln 2$ だけ増加しなければならない。このエントロピーの増加によって外部環境が受け取る熱量はそれに絶対温度 T を乗じたものとなるので、 $kT \ln 2$ となる。

一方、可逆的な演算の場合にはこういった不可避的な熱の発生をなくせる可能性がある。ただし、現在の計算機で用いられている電子素子は、演算が可逆か非可逆かに関係なくエネルギーを贅沢に消費するようなやり方で構成されている上に、論理演算そのもの以外に、たとえばクロック信号 (clock signal) の供給にも多くのエネルギーを費やしている。そのため、 $kT \ln 2$ という量はまったく無視できるほど小さく、この分を節約しても焼け石に水である。いずれにせよ現在の電子素子では、論理値の 0 と 1 を多数の電子の流れの平均的振舞いによって表現し、区別しているのだから、1 つの巨視的状態に属する微視的状態が莫大な数になる。しかしながら将来、論理的状態を少数個の微視的状態で実現できるようになると、論理的な可逆性が重要な特性になる。実際、理想的な状況下では、可逆的な演算を熱の発生なしにシミュレートできるような物理的システムのモデルを考えることができる。たとえば Fredkin と Toffoli によるビリヤードボールモデル [12] がそうであり、弾性衝突をするボールと反射板によって可逆的な演算を遂行する (3.4 節と 3.6 節を参照)。これはとても理解しやすく興味深いものだが、無限の精度が要求されるので、実際に作るのとは不可能である。しかし、このような機械的な装置ではなく、たとえば量子力学的なレベルの現象を使って実現できる可能性もあり得る。

計算における可逆性の研究の歴史は前述のように「計算の熱力学」に関連する問題から始まったが [8, 13]、単に計算に要するエネルギーを減らしたいということだけでなく、近年の計算機素子の微細化に伴い、将来的には微視的な物理的世界で成立つ法則を考慮に入れざるを得ない状況にあることも重要である。むしろ自然界の法則を積極的に利用することにより、斬新な計算機の仕組みや計算方式が見出せる場合がある。現在、ナチュラルコンピュー

ティング (Natural computing) と呼ばれている領域の研究は、多くはそういう立場でなされている。可逆計算と非常に近い関係にある量子計算 (quantum computing) もその1つであり、Feynman[11, 14, 15, 16] がそのような方向性を論じたことから始まった。量子力学系の時間発展は可逆であるため、可逆計算は量子計算の特別な場合と考えることができ、したがってその1つの基礎にもなっている (例えば [17] 参照)。もちろん可逆計算は、可逆性に焦点を当てたときに計算がどのように遂行できるかを考えるための枠組みとして独自の重要性を持っている。

計算の基礎理論の立場からの可逆計算の研究は、初期には Lecerf[9] による可逆チューリング機械に関するものがある。Bennett[10] はその後、任意の非可逆なチューリング機械に対して、それをシミュレートし、かつ計算終了時にゴミ情報をほとんど出さない可逆チューリング機械を構成できることを示した (2.2 節)。ゴミ情報は計算システムにおける熱の発生に関係するので、この結果は重要である。その後、1970年代から80年代にかけて、可逆論理素子と可逆論理回路 [12, 18, 19]、可逆セルオートマン [20, 21] などに関する先駆的研究により、種々の可逆計算のモデルが現れ、現在に至っている。このあたりの歴史は、たとえば参考文献 [22, 23] にある。

計算における可逆性は定義がとても簡単である。ある計算システムが可逆的であるというのは、そのシステムのどの状態も直前の時刻にとり得る状態を高々1つしか持たないものをいう。これを図で表すならば図 1.1 のようになる。つまり、1つの状態に合流してくるような2つ以上の異なった状態はないということである。もちろん、計算モデルがチューリング機械であるか、論理回路であるか、等々、によって可逆性の正確な定義は少しずつ異なるけれ

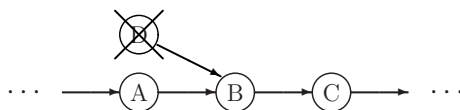


図 1.1: 可逆的な計算システムにおける状態の遷移。A, B, C などはシステム全体の状態を表す。もしこのシステムが可逆であり、状態 A から B に遷移するならば、A とは異なる状態 D で B に遷移するものがあってはならない。

ども、基本的には今述べた通りのことであって、それ以上でも以下でもない。

一方、物理学における可逆性には、先に述べた力学的な可逆性と、熱力学的な可逆性が知られている。このうち、計算の可逆性により関係が深いのは前者の力学的可逆性である。もちろんこれとて計算の可逆性と直接の関係があるのではない。しかし、ある計算システムが可逆である場合には、その計算過程を逆方向にたどる、いわば鏡像の関係にあるような「逆計算システム」が自然に定義できるので、その点で力学的可逆性と類似している。なお、化学においては可逆反応というのがあるが、これは順方向の反応と逆方向の反応の両方が起こる反応である。計算システムや力学系の場合は1方向にしか進まないの、可逆反応とはかなり性質が異なっており、これと混同すべきではない。それから、前述の Landauer の議論のように、計算モデルを実現しているような物理的システムのエントロピーを論じることは可能であるが、可逆計算モデルそれ自体はエントロピーとは無関係である。

現在の計算機は、古代ギリシャの時代 [24] から知られている AND, OR, NOT という演算を基礎においている。これらの演算は人の思考過程の分析から出てきたものであって、人にとって考え易いという利点はあるが、自然界の法則を直接的には反映していない。可逆計算は、AND, OR, NOT とまったく無縁というわけではないが、これらが考え方の基礎になっているのではなく、物理的可逆性を何らかの形で反映した可逆的操作や演算が出発点になる。そのような基本的な可逆的操作は一通りではなく、多様な可能性があり、実際、どのような可逆的操作を出発点におけば自然界の法則とうまくマッチし、しかも可逆計算機の構成が容易になるのかというのが可逆計算の重要課題の1つである。

1.2 本書の構成と読み方

可逆計算はこれまで一般にはなじみが薄い分野だったので、とっつきにくいのではないかという先入観をお持ちの読者も少なくないと思われる。しかし可逆計算は、物理的な可逆性に相当するような制約 — 計算機のどの状態も直前の状態を高々1つしか持たない — を仮定した場合に、計算というものがどのように組立てられるのか、という素朴な問題を出発点としているので、

まさに素朴に考えればよく、多くの予備知識は必要としない。本書で仮定しているのは、大学の学部で習うような集合、写像、論理に関する基本的な概念ぐらいである。それ以外の事柄、たとえばオートマトン理論に出てくるような有限オートマトンやチューリング機械などは、予め知っているにこしたことはないけれども、知らなくても本書を読むだけで理解できるように説明したつもりである。

そうは言っても本書の内容は計算の基礎理論の一分野なので、数学的あるいは論理的にできるだけ厳密に話を進めないといけない、という事情がある。そのため、細かく丹念に追いかけて理解するのがかなり骨が折れる箇所もある。しかし幸い、本書で扱っている対象は、理論的で抽象的であるにもかかわらず、視覚化できるものが多くの部分を占めているので、図を多用してできるだけ分かりやすくそのイメージを伝えるようにつとめた。本書では定理の形で示されている結果も多く、それらに対してはなるべく本質的な点が理解できるように証明または証明概略を書くように心がけたが、証明が専門的になりすぎるものや、本書に書くには長すぎるものについては割愛せざるを得なかった。これらについて詳しく知りたい読者は参考文献を参照していただきたい。また、本書で述べられているいくつかのシステム（特に可逆論理回路や可逆セルオートマトン）の中には非常に複雑で、それらがどのように動作するのかを紙と鉛筆で確認するのがきわめて困難な場合もある。それらについてはコンピュータによるシミュレーション結果等をインターネットを通じてダウンロードできるように配慮した。

本書はこの章も含めて9つの章から成り、可逆計算のいろいろな理論的モデルとその性質、特に可逆的なシステムにおいて計算がどのように実行できるのかについて述べている。第2章はもっとも基本的な可逆計算モデルである可逆チューリング機械、第3章は種々の可逆論理素子とそれによって構成される可逆論理回路、第4章は可逆論理素子を使って可逆順序機械や可逆チューリング機械を構成する方法、第5章は可逆的な時空現象の抽象的モデルである可逆セルオートマトン、第6章は可逆カウンタ機械とそれを埋め込めるような単純な2次元可逆セルオートマトン、第7章は万能な可逆チューリング機械や可逆セルオートマトンをどれほど単純化できるかについて、第8章は

生物に類似した自己増殖機能を持つオブジェクトが構成できる可逆セルオートマトンについて、第9章は可逆計算の今後の展望について、それぞれ論じている。

第2~8章の内容は相互に密接に関係している部分も多いのだけれども、それぞれ独自の面白さをもっており、他とはある程度独立に理解することが可能である。そのため、どの章から読み始めても差支えない（それ以前の章にある定義や定理などを少しだけ参照しないといけないかも知れないが）。第2章の可逆チューリング機械はもっとも基本的な可逆計算のモデルだが、たとえば、第3章の可逆論理素子と可逆論理回路や、第5章の可逆セルオートマトンから読み始めるのも分かり易いかも知れない。また、多少難しい個所があった場合にはそこを読み飛ばしながら進んでもさしつかえない。あるいは、本文は読まずに、まず図とその説明だけを拾い読みしてもそれぞれの箇所の雰囲気ぐらいは知ることができるだろう。

本書は可逆計算を基礎理論の立場から述べたものであるため、それ以外の話題については扱わなかった。その中にはもちろん重要な問題も多くある。まず可逆計算機をどのようにハードウェアとして実現できるのかという課題がある。これは量子計算の分野におけるのと同様、困難であるが重要な課題である。可逆計算に関して、これまでにいくつかの試みがなされていて、たとえば断熱的回路 (adiabatic circuit) による可逆論理回路の実装 [25] などがある。しかし究極的には、微視的レベルでの物理的可逆性を直接的に用いた論理素子にまで持っていきたいところなので、その道のりは長い。一方、理論的な計算モデルではなく、より実際の可逆計算機のアーキテクチャや、可逆プログラミング言語（たとえば文献 [26]）に関する課題などもあるが、これも本書では扱わなかった。可逆計算にはこれらを含めてまだ多くの課題が残されており、今後の研究の発展が望まれる。

本章では、可逆計算とは何か、そしてこの研究分野がどのようにして生まれたかについて、その概要を説明した。また本書で扱っている内容と、それらの読み方についても述べた。

参考文献

- [1] K. Morita. Reversible computing and cellular automata — A survey. *Theoret. Comput. Sci.*, 395:101–131, 2008.
- [2] K. Morita. Constructing a reversible Turing machine by a rotary element, a reversible logic element with memory. Hiroshima University Institutional Repository, <http://ir.lib.hiroshima-u.ac.jp/00029224>, 2010.
- [3] K. Morita, Y. Tojima, K. Imai, and T. Ogiro. Universal computing in reversible and number-conserving two-dimensional cellular spaces. In *Collision-based Computing* (ed. A. Adamatzky), pages 161–199. Springer-Verlag, 2002.
- [4] K. Morita. Universal reversible cellular automata in which counter machines are concisely embedded. Hiroshima University Institutional Repository, <http://ir.lib.hiroshima-u.ac.jp/00031367>, 2011.
- [5] K. Morita. Simulating reversible Turing machines and cyclic tag systems by one-dimensional reversible cellular automata. *Theoret. Comput. Sci.*, 412:3856–3865, 2011.
- [6] K. Imai, T. Hori, and K. Morita. Self-reproduction in three-dimensional reversible cellular space. *Artif. Life*, 8:155–174, 2002.
- [7] K. Morita and K. Imai. Self-reproduction in two- and three-dimensional reversible cellular automata. Hiroshima University Institutional Repository, <http://ir.lib.hiroshima-u.ac.jp/00031368>, 2011.

- [8] R. Landauer. Irreversibility and heat generation in the computing process. *IBM J. Res. Dev.*, 5:183–191, 1961.
- [9] Y. Lecerf. Machines de Turing réversibles — récursive insolubilité en $n \in \mathbb{N}$ de l'équation $u = \theta^n u$, où θ est un isomorphisme de codes. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de L'académie des Sciences*, 257:2597–2600, 1963.
- [10] C. H. Bennett. Logical reversibility of computation. *IBM J. Res. Dev.*, 17:525–532, 1973.
- [11] R.P. Feynman. Simulating physics with computers. *Int. J. Theoret. Phys.*, 21:467–488, 1982.
- [12] E. Fredkin and T. Toffoli. Conservative logic. *Int. J. Theoret. Phys.*, 21:219–253, 1982.
- [13] C.H. Bennett. The thermodynamics of computation—a review. *Int. J. Theoret. Phys.*, 21:905–940, 1982.
- [14] R.P. Feynman. Quantum mechanical computers. *Opt. News*, 11:11–46, 1985.
- [15] R.P. ファインマン (江沢洋訳). 未来の計算機. 数学セミナー, 25(1):6–18, 1986. 『聞かせてよ, ファインマンさん』(大貫昌子, 江沢洋訳), 岩波書店, 2009, にも収録.
- [16] R.P. Feynman. *Feynman lectures on computation* (eds., A.J.G. Hey and R.W. Allen). Perseus Books, Reading, Massachusetts, 1996. A. ヘイ, R. アレン編 (原康夫, 中山健, 松田和典訳): 『ファインマン計算機科学』, 岩波書店, 1999.
- [17] J. Gruska. *Quantum Computing*. McGraw-Hill, London, 1999. J. Gruska (伊藤正美, 今井克暢, 岩本宙造, 外山政文, 森田憲一訳): 『量子コンピューティング』, 森北出版, 2003.

- [18] T. Toffoli. Reversible computing. In *Automata, Languages and Programming*, LNCS 85, pages 632–644. Springer-Verlag, 1980.
- [19] T. Toffoli. Bicontinuous extensions of invertible combinatorial functions. *Math. Syst. Theory*, 14:12–23, 1981.
- [20] T. Toffoli. Computation and construction universality of reversible cellular automata. *J. Comput. Syst. Sci.*, 15:213–231, 1977.
- [21] N. Margolus. Physics-like model of computation. *Physica D*, 10:81–95, 1984.
- [22] C.H. Bennett. Notes on the history of reversible computation. *IBM J. Res. Dev.*, 32:16–23, 1988.
- [23] T. Toffoli and N. Margolus. Invertible cellular automata: a review. *Physica D*, 45:229–253, 1990.
- [24] J.M. Bocheński. *Ancient Formal Logic*. North-Holland, Amsterdam, 1951. J.M. ボヘンスキー (岩野秀明訳): 『古代形式論理学』, 公論社, 1980.
- [25] M. Frank. *Reversibility for efficient computing*. PhD thesis, MIT, 1999.
- [26] T. Yokoyama. Reversible computation and reversible programming languages. *Electron. Notes in Theoret. Comput. Sci.*, 253:71–81, 2010.
- [27] A.M. Turing. On computable numbers, with an application to the Entscheidungsproblem. *Proc. London Math. Soc.*, Series 2, 42:230–265, 1936.
- [28] K. Morita, A. Shirasaki, and Y. Gono. A 1-tape 2-symbol reversible Turing machine. *Trans. IEICE Japan*, E-72:223–228, 1989.
- [29] D. Woods and T. Neary. The complexity of small universal Turing machines: a survey. *Theoret. Comput. Sci.*, 410:443–450, 2009.

- [30] K. Morita. A simple reversible logic element and cellular automata for reversible computing. In *Proc. 3rd Int. Conf. on Machines, Computations, and Universality*, LNCS 2055, pages 102–113. Springer-Verlag, 2001.
- [31] K. Morita, T. Ogiro, K. Tanaka, and H. Kato. Classification and universality of reversible logic elements with one-bit memory. In *Proc. 4th Int. Conf. on Machines, Computations, and Universality*, LNCS 3354, pages 245–256. Springer-Verlag, 2005.
- [32] K. Morita. A new universal logic element for reversible computing. In *Grammars and Automata for String Processing* (eds. C. Martin-Vide, and V. Mitran), pages 285–294. Taylor & Francis, London, 2003.
- [33] K. Morita. A simple construction method of a reversible finite automaton out of Fredkin gates, and its related problem. *Trans. IEICE Japan*, E-73:978–984, 1990.
- [34] T. Ogiro, A. Kanno, K. Tanaka, H. Kato, and K. Morita. Nondegenerate 2-state 3-symbol reversible logic elements are all universal. *Int. J. Unconventional Comput.*, 1:47–67, 2005.
- [35] K. Morita, T. Ogiro, A. Alhazov, and T. Tanizawa. Non-degenerate 2-state reversible logic elements with three or more symbols are all universal. *J. Multiple-Valued Logic and Soft Computing*, 18:37–54, 2012.
- [36] J. Lee, F. Peper, S. Adachi, and K. Morita. An asynchronous cellular automaton implementing 2-state 2-input 2-output reversed-twin reversible elements. In *Proc. ACRI 2008*, LNCS 5191, pages 67–76. Springer-Verlag, 2008.
- [37] T. Ogiro, A. Alhazov, T. Tanizawa, and K. Morita. Universality of 2-state 3-symbol reversible logic elements — a direct simulation method of a rotary element. In *IWNC 2009, PICT 2*, pages 252–259. Springer-Verlag, 2010.
- [38] J. von Neumann. *Theory of Self-reproducing Automata* (ed. A.W. Burks). The University of Illinois Press, Urbana, 1966. J.フォンノイマン (A.W.

パークス編補，高橋秀俊監訳):『自己増殖オートマトンの理論』，岩波書店，1975．

- [39] M. Gardner. Mathematical games. *Sci. Am.*, 223 (4):120–123, 1970.
- [40] M. Gardner. Mathematical games. *Sci. Am.*, 224 (2):112–117, 1971.
- [41] W. Poundstone. *The Recursive Universe — Cosmic Complexity and the Limits of Scientific Knowledge*. William Morrow & Co., 1984. W. パウンドストーン (有澤誠訳):『ライフゲームの宇宙』，日本評論社，1990．
- [42] E. Berlekamp, J. Conway, and R. Guy. *Winning Ways for Your Mathematical Plays*, Vol.2. Academic Press, New York, 1982.
- [43] T. Rokicki and A. Trevorrow. Golly, an open source, cross-platform application for exploring Conway’s Game of Life and other cellular automata. <http://golly.sourceforge.net/>, 2005.
- [44] S. Wolfram. *A New Kind of Science*. Wolfram Media Inc., 2002.
- [45] M. Cook. Universality in elementary cellular automata. *Complex Syst.*, 15:1–40, 2004.
- [46] G.A. Hedlund. Endomorphisms and automorphisms of the shift dynamical system. *Math. Syst. Theory*, 3:320–375, 1969.
- [47] D. Richardson. Tessellations with local transformations. *J. Comput. Syst. Sci.*, 6:373–388, 1972.
- [48] E.F. Moore. Machine models of self-reproduction. *Proc. Symposia in Applied Mathematics, Am. Math. Soc.*, 14:17–33, 1962.
- [49] J. Myhill. The converse of Moore’s Garden-of-Eden theorem. *Proc. Am. Math. Soc.*, 14:658–686, 1963.
- [50] J. Kari. Theory of cellular automata: a survey. *Theoret. Comput. Sci.*, 334:3–33, 2005.

- [51] S. Amoroso and Y.N. Patt. Decision procedures for surjectivity and injectivity of parallel maps for tessellation structures. *J. Comput. Syst. Sci.*, 6:448–464, 1972.
- [52] J. Kari. Reversibility and surjectivity problems of cellular automata. *J. Comput. Syst. Sci.*, 48:149–182, 1994.
- [53] K. Morita and M. Harao. Computation universality of one-dimensional reversible (injective) cellular automata. *Trans. IEICE Japan*, E72:758–762, 1989.
- [54] K. Morita. Reversible cellular automata. In *Handbook of Natural Computing* (eds. G. Rozenberg, T. Bäck, J.N. Kok). Springer-Verlag, (to appear).
- [55] K. Morita and S. Ueno. Computation-universal models of two-dimensional 16-state reversible cellular automata. *IEICE Trans. Inf. & Syst.*, E75-D:141–147, 1992.
- [56] K. Imai and K. Morita. A computation-universal two-dimensional 8-state triangular reversible cellular automaton. *Theoret. Comput. Sci.*, 231:181–191, 2000.
- [57] M.L. Minsky. *Computation: Finite and Infinite Machines*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1967. M.L. Minsky (金山裕訳): 『計算機の数学的理論』, 近代科学社, 1970.
- [58] K. Morita. Universality of a reversible two-counter machine. *Theoret. Comput. Sci.*, 168:303–320, 1996.
- [59] E.L. Post. Formal reductions of the general combinatorial decision problem. *Am. J. Math.*, 65:197–215, 1943.
- [60] Y. Rogozhin. Small universal Turing machines. *Theoret. Comput. Sci.*, 168:215–240, 1996.

- [61] J. Cocke and M. Minsky. Universality of tag systems with $P = 2$. *J. Assoc. Comput. Mach.*, 11:15–20, 1964.
- [62] K. Morita and Y. Yamaguchi. A universal reversible Turing machine. In *Proc. 5th Int. Conf. on Machines, Computations, and Universality*, LNCS 4664, pages 90–98. Springer-Verlag, 2007.
- [63] K. Morita. Simple universal one-dimensional reversible cellular automata. *J. Cell. Autom.*, 2:159–166, 2007.
- [64] K. Imai and K. Morita. Firing squad synchronization problem in reversible cellular automata. *Theoret. Comput. Sci.*, 165:475–482, 1996.
- [65] C.G. Langton. Self-reproduction in cellular automata. *Physica D*, 10:135–144, 1984.
- [66] K. Morita and K. Imai. Self-reproduction in a reversible cellular space. *Theoret. Comput. Sci.*, 168:337–366, 1996.

索引

- * (star operator) , 169
- 2-TS (2-tag system) , 170
- 2 階のセルオートマトン (second-order cellular automaton) ,
106
- 2 状態可逆論理素子 (2-state reversible logic element) , 43, 72

- BBM (billiard ball model) , 38

- CA (cellular automaton) , 92
- CNOT ゲート (controlled NOT gate) ,
26
- CTS (cyclic tag system) , 173
- CTSH (cyclic tag system with halt-
ing condition) , 173

- ε (the empty string) , 169

- GoL (Game of Life) , 90

- k カウンタ機械 (k -counter machine) ,
146

- m -TS (m -tag system) , 168, 169
- m 近傍 (m -neighbor) , **93**

- m 状態可逆論理素子 (m -state reversible logic element) , 25
- m タグシステム (m -tag system, m -TS) , 168, **169**

- \mathbb{N} (the set of all natural numbers) ,
147

- pr_i (projection) , 112

- TM (Turing machine) , 10
- TS (tag system) , 168

- \mathbb{Z} (the set of all integers) , 92

- 位相 (phase) , **173**
- 一斉射撃問題 (firing squad synchronization problem) , **189**
- 一般化 AND/NAND ゲート (generalized AND/NAND gate) ,
26

- エデンの園 (Garden of Eden) , **100**
- エデンの園定理 (Garden-of-Eden theorem) , **101**

- オラクル (oracle) , **181**

- 回転対称 (rotation-symmetry), **131**
 カウンタ機械 (counter machine),
146
 可逆カウンタ機械 (reversible counter
 machine), 145, **148**
 可逆計算 (reversible computing),
 v, 1
 可逆順序機械 (reversible sequential
 machine), **56**, 84
 可逆性 (reversibility), **1**, 3
 可逆セルオートマトン (reversible
 cellular automaton), 87, 96,
99, 102
 可逆チューリング機械 (reversible
 Turing machine), 7, **10**,
 61, 70, 84, 119, 126
 可逆プログラミング言語 (reversible
 programming language),
 6, 202
 可逆分割セルオートマトン (reversible
 partitioned cellular automa-
 ton), **117**
 可逆論理回路 (reversible logic cir-
 cuit), **29**, 32, 131
 可逆論理ゲート (reversible logic gate),
25, 38
 可逆論理素子 (reversible logic ele-
 ment), **23**, 55
 関数的に完全 (functionally complete),
28
 規則番号 110 番の初等的セルオー
 トマトン (the elementary
 cellular automaton of rule
 110), 95, 182
 逆回路 (inverse circuit), **34**
 逆ゲート (inverse gate), **33**
 逆スイッチゲート (inverse switch
 gate), **33**
 逆セルオートマトン (inverse cellu-
 lar automaton), **99**
 逆相互作用ゲート (inverse interac-
 tion gate), **33**
 鏡像対称 (reflection-symmetry), **132**
 局所関数 (local function), **92**
 近傍 (neighborhood), **92**
 近傍半径 (radius of neighborhood),
94
 空列 (the empty string, ε), 169
 クロック信号 (clock signal), 2, 60,
 70
 計算万能性 (computation-universality),
8
 ケイリーグラフ (Cayley graph),
138
 決定性カウンタ機械 (deterministic
 counter machine), **147**
 決定性チューリング機械 (determin-
 istic Turing machine), **10**
 ゲーデル数 (Gödel number), **154**

- ゲームオブライフ (Game of Life, GoL), 87, **90**, 94
- ゴミ情報 (garbage information), **15**, 32, 70, 84
- サイクリックタグシステム (cyclic tag system, CTS), 168, **173**, 186
- 自己増殖 (self-reproduction), **190**
- 自己増殖可逆セルオートマトン (self-reproducing reversible cellular automaton), 193
- 自己複製 (self-replication), 88, **190**
- 時点表示 (instantaneous description), **147**, **173**
- 射影 (projection), **112**
- 縮退 (degenerate), **77**
- 順序機械 (sequential machine), **56**
- 状相 (configuration), **92**
- 衝突ゲート (collision gate), **31**
- 初等的セルオートマトン (elementary cellular automaton), **94**
- スイッチゲート (switch gate), **30**
- 静止状態 (quiescent state), **92**
- セルオートマトン (cellular automaton, CA), 87, **92**
- 遷移規則 (transition rule), **92**
- 全射 (surjection), **100**
- 全射セルオートマトン (surjective cellular automaton), **100**
- 相互作用ゲート (interaction gate), **31**
- 大域関数 (global function), **92**
- タグシステム (tag system, TS), **168**
- 単射 (injection), 23, **25**
- 単射セルオートマトン (injective cellular automaton), **98**
- 断熱的回路 (adiabatic circuit), **6**
- 遅延素子 (delay element), **45**
- チャーチ-チューリングのテーゼ (Church-Turing thesis), **8**
- チューリング機械 (Turing machine, TM), 7, **10**, 148, 171
- 停止条件付きサイクリックタグシステム (cyclic tag system with halting condition, CTSH), **173**, 180
- 等方的 (isotropic), **132**
- トフォリゲート (Toffoli gate), **27**
- ナチュラルコンピューティング (Natural computing), **2**
- ノイマン近傍 (von Neumann neighborhood), **93**

- ノイマンの自己増殖基準 (von Neumann's criterion of self-reproduction), **190**
- ノイマンの自己増殖セルオートマトン (von Neumann's self-reproducing cellular automaton), **190**
- 反転可能セルオートマトン (invertible cellular automaton), **98**
- 万能可逆セルオートマトン (universal reversible cellular automaton), **131**, 141, 165, 181, 182, 186
- 万能可逆チューリング機械 (universal reversible Turing machine), **20**, 167, 177, 180
- 万能構成機 (universal constructor), **190**
- 万能チューリング機械 (universal Turing machine), **20**, 167
- 非可逆カウンタ機械 (irreversible counter machine), **148**
- 非可逆チューリング機械 (irreversible Turing machine), **11**
- 非決定性チューリング機械 (nondeterministic Turing machine), **10**
- ビット保存的 (bit-conserving), **28**
- ビリヤードボールモデル (billiard ball model, BBM), **38**, 51
- フレドキングゲート (Fredkin gate), **25**, 60, 131
- フレドキン自己複製セルオートマトン (Fredkin's self-replicating cellular automaton), **88**, 94
- ブロック型局所関数 (block-type local function), **103**
- ブロックセルオートマトン (block cellular automaton), **103**
- 分割セルオートマトン (partitioned cellular automaton), 109, **112**
- 分岐 (fan-out), **28**
- マーゴラス近傍 (Margolus neighborhood), **103**
- ミーラー型 (Mealy type), **56**
- ムーア近傍 (Moore neighborhood), **93**
- 無限状相 (infinite configuration), **92**
- 有限オートマトン (finite automaton), **56**
- 有限状相 (finite configuration), **92**
- 有限部分を除き周期的 (ultimately periodic), 70, 141, **181**

ラングトンの自己増殖基準 (Langton's criterion of self-reproduction),
190, **192**

ラングトンの自己増殖セルオート
マトン (Langton's self-reproducing
cellular automaton), **192**

ランダウアの原理 (Landauer's prin-
ciple), **1**

量子計算 (quantum computing), **3**,
199

ロータリー素子 (rotary element),
43, 51, 55, 60, 61, 70

論理回路 (logic circuit), **27**

論理関数 (logic function), **25**

論理ゲート (logic gate), **25**

論理的に万能 (logically universal),
27