

第76回アブダクション研究会開催のご案内

アブダクション研究会

世話人 福永征夫
TEL & FAX 0774-65-5382
E-mail : jfdf117@ybb.ne.jp

事務局 岩下幸功
TEL&FAX 042-356-3810
E-mail : yiwashita@syncreate.jp

第76回アブダクション研究会の開催について、下記の通りご案内を申し上げます。

(1) 第75回アブダクション研究会のご報告

◆9月25日(土)に開かれた前回の第75回アブダクション研究会では、最初に、『新たな領域の知識に挑戦する』というテーマで、尾上彰、野田敦史、福永征夫、富田洋平、依田耕市郎、八尾徹、の各会員が分担して、マーティン・エイモス著(ギボンズ京子訳)『ジェネシス・マシン——バイオコンピューティングへの挑戦——』(08日経BP社)の内容を読解して、説明報告をし、有意義な研鑽を致しました。

◆続いて、東京大学の陶山明先生に『DNAコンピューティング—越境するDNA—』と題するご講演をいただき、斯界の最先端の研究の動向に触れることができました。

(2)においては、ご専門の八尾徹氏にお願いをし要約していただいた、講演の概要を掲載しましたので、ご高覧下さい。

◆本会・懇親会ともに熱の入った質疑と対話が繰り広げられて、素晴らしい会合になりました。先ずは、ご多用の中をご講演いただきました陶山明先生とご出席の皆様にお礼を申し上げます。

◆マーティン・エイモス著(ギボンズ京子訳)『ジェネシス・マシン——バイオコンピューティングへの挑戦——』は、研究の展開と発展の経過について、学術の先人との連続性を重視しながら、時間と空間の織物を、隙間を許さずに、書き綴り、しかも、理論的な本質にも熱い視線を注いでいるという、自らに妥協のない重厚な筆致をとっています。後々に記憶の残る豊かな内容と余韻をもつ著作の一つになるかも知れません。

◆この本は、著者が強調するように、二つの科学領域、数学と生物学との全く新しいつながりに関する物語です。バイオコンピュータの最初の具体例を創り上げたL・エードルマンは、陶山明先生が指摘されたように、生物学から数学を見えています。もちろん、エードルマンは数学の出身者ですから、生物学を学び始める当初より、数学から生物学を見えています。

エードルマンは、数学⇒生物学の方向の広域的な知識と、生物学⇒数学の方向の広域的な知識との、双方の広域的な知識を相互に還流して、方向の違いによって変わることはない高次の普遍的な知識を探究する博物学徒を目指しているのだと思われます。

このような博物学的な、知識の探究の様相は、世話人が示しています『新たなアブダクションの定義』の試みの内容と軌を一にしています。

◆以下の概説は、この著作の第四章までの前半部に的を絞って、抜粋をし、要約して、編集をしました。

チューリングに始まって、エードルマンまでに至る、数学と生物学とのつながりについて、前後の流れの連続性と論点の本質を逃がすことのないように、大筋を、できるだけ正確に、分かりやすく、編集するように心がけました。

◆エードルマンが達成した仕事の記述を、よりよく理解するためのキーワードがあるとすれば、それは、
① チューリングマシン (TM) ・ 万能チューリングマシン (UTM)、② PCR (ポリメラーゼ連鎖反応) 法、
③ ハミルトン閉路問題 (HPP) と、その並列処理、の三つになるかも知れません。
いずれについても、関連する優れた記述を選んで、概説の中に添付しておきましたので、必須の資料としてお読み下さい。

◆皆様には、前回の会合へのご出席の有無に拘わりなく、概説の各項目の、それぞれを、独立に、そして、他の項目と、多様に、自在に、交叉させ、組み合わせながら、繰り返し、繰り返し、荒く、また、細かく、類似と差異の様相を、根気よく、粘りと執念をもって、お読み込みをいただき、何度も、何度も、思慮と反芻を重ねながら、吟味と玩味をいただき、人間を取り巻く、地球規模の難題の数々に、真正面から直面して、対処のできる、広域的な知識・高次の知識の探究と実践のための研鑽の糧として、大いに役立てられ、成果を積み重ねられますように心からご期待を申し上げます。

◆確認したいと思われる事項やご質問の事項があれば、世話人が、可能な限りの対処を致しますので、グループメールその他で、世話人宛に、遠慮なくお申し越し下さい。

=====

マーティン・エイモス著 (ギボンズ京子訳) 『ジェネシスマシン——バイオコンピューティングへの挑戦——』 (08日経BP社) の 概 説

◆◆ はじめに ◆◆

- [1] =二つの科学領域、数学と生物学との全く新しいつながりに関する物語である=
●これは古くからある二つの科学領域、数学と生物学との全く新しいつながりに関する物語である。
- [2] =21 世紀は、生物学とその関連分野の進歩が特徴となって輪郭をなしていく=
●物理学が原子爆弾をはじめ月面着陸やマイクロチップによって20世紀後半を独占したように、21 世紀は、生物学とその関連分野の進歩が特徴となって輪郭をなしていくことがますます明らかになってきている。多様な生物の新しいゲノム配列が驚くべき速さで作成されつつある。
- [3] =ヒトゲノム配列決定は精巧な数理アルゴリズムの開発によってはじめて可能となった=
●ヒトゲノム配列決定は、現代科学の時代におさめられた勝利のひとつであり、無数のDNA配列断片を渾然たる一体につなぎ合わせるための精巧な数理アルゴリズムの開発によってはじめて可能となった。
- [4] =生物有機体では、少なくとも30億年にわたり遺伝子配列が交換されて複写されてきた=
●単純な生物有機体は、人間が登場する以前に数百万年来存在し、化石記録によれば、少なくとも30億年にわたって遺伝子配列が交換されて複写されてきた。
- 生物系というのは、どのようなかたちであれ、情報を常に処理してきた。自然は、遺伝情報の部分的な交換、切除、組み換えおよび突然変異を絶え間なく続けることによって、はじめは何の見込みもない原初のドロドロしたものから、驚異的な数の有機体を進化させてきた。

[5] =生物系の豊かな問題解決能力をまねようと意識的に努力し自然の方策を導入してきた=

●われわれは過去数十年にわたり、生物系の豊かな問題解決能力をまねようと意識的に努力するなかで自然の方策を導入してきた。自然淘汰のモデルが有機的に「成長する」車の設計に用いられていたり、頭脳のシミュレーションが株式市場でのパターン認識に利用されている。

[6] =科学者の問い「計算手段として既存の自然体系を直に利用することは可能であろうか」=

●最近では、次のような問いをいただく科学者が増えてきている。「計算手段として既存の自然体系を直に利用することは可能であろうか」。言い換えれば、コンピュータやそのほか有用な機器を構築するのに、生物の組織を利用することはできるのか。

[7] =過去 10 年間に分子計算や細胞による計算、さらに合成生物学の分野が現れてきている=

●過去 10 年間に分子計算や細胞による計算、さらに新しいところでは、合成生物学という分野が現れ、この問いをさらに詳しく研究している。

◆◆ 生命の論理 ◆◆

[8] =自然の過程をシミュレートするのに多くの時間と労力を要することに驚いてはいけな=

●自然というのは、十分に理解できるようになると、往々にして悩ましいものである。巨大なタンパク質が一瞬のうちに折りたたんでしまう一方、ヒトが作った地球上で最も大きなコンピュータでは、ひとつの単純なタンパク質がどのようにその特定の形状をとるのかを予測するだけのことに、間断なく処理しても一年以上かかってしまう。

[9] =自然の理解を深めるには計算技術の進展と生物学への応用とが大きな配当を享受する=

●単純な自然の過程でさえシミュレートするのに、これほど多くの時間と労力を要することに驚いてはいけな。自然体系への理解をさらに深めるという意味では、計算技術の進展と生物学へのその応用とが大きな配当を享受するであろう。このことによって得られる知見がまた、コンピュータやそのほかの機器をどのように構築するかということについて新たな考え方を匂わせはじめている。

●「従来の」コンピュータが、生物系がいかに情報を処理しているのかを解明するのに役立っており、その理解そのものが今、これまでにない新しいタイプの情報処理機器の構築に用いられようとしている。

[10] =自然は計算・圧縮と工夫の名人で人間が取り組んでいる問題の多くを既に解決している=

●自然というものは、計算、圧縮および、工夫の名人である。作家ジャン・ベニユスが説明しているように、「自然というものは余儀なくして創意に富み、われわれが取り組んでいる問題の多くを既に解決してしまっている。動物や植物、微生物が熟練の技術者である。何がうまくいくのか、何が適切なのか、そして最も重要なのか、この地球上で何が持続するのを見つけ出した。38 億年をかけた研究開発の末、失敗作は化石となり、われわれを取り巻いているものがまさに生き残りの秘訣である」。

●バイオコンピューティングとは、シリコンではなくDNA分子や生細胞からコンピュータを作り上げることであり、本格的な科学研究分野のひとつとして10年ほど前に現れた。

[11] =遺伝子の機械を組み立てることでコンピュータ科学と生物学の関りに新時代が到来する=

●コンピュータ科学者デニス・シャシャは、「コンピュータ科学と生物学以上に対立するふたつの科学分野を想像するのは難しい。逸脱を誤りと考えるのがコンピュータ科学者なら、逸脱を驚きの対象と考えるのが生物学

者である」と言っている。

●新しい世代の生体工学者たちは、自然がもつ性質の多様性を制御したり排除しようというよりも、利用しようとしている。われわれ自身のジーン（ジェネシス）マシン〈この驚くべき性質の豊かさをまさにその中核で利用している装置〉を組み立てることによって、実用的な装置とアプリケーションの両方で、計算という考え方そのものに対する見方に関して、さらに生命の観点から、新しい時代の到来を告げようとしている。

●1997年にレン・エードルマンが語っている。「これは探求である。それも追求する価値のあるものである。この未開拓分野に人材をはじめ資材を送り込み、50年後にはどのようなコンピュータが可能であるのか道を切り開く必要がある」。

[12] =ノイマンやチューリングは計算と生物学のつながりを熟慮し計算機の基礎を築いた=

●ジョン・フォン・ノイマンやアラン・チューリングのような科学者が計算と生物学とのつながりを熟慮してこの分野の基礎を築いた。われわれの研究の原動力となっている根本的な問題には次のものがある。自然は「計算する」のか、そうであればどうやって計算するのか。細菌が計算しているといえたとしたら、それはどういう意味なのか。全く新たな計算の方法を提案するために自然体系をどのように利用したり、どのように思いつきを得ることができるのか。

[13] =チューリングがチューリングマシンという理想的なコンピュータの概念を確立した=

●チューリングの証明の中心は、チューリングマシン（TM）として知られることになる理想的なコンピュータの概念である。ある種のテープ再生機としてTMをおもいうかべてみよう。テープは個々のセクションまたは「四角」に区切られており、それぞれが少量の情報を含んでいるとする。TMのヘッドがテープの方に移動し、ある特定の四角の上に置かれるとまさにそのセクションの内容を読み取るか、書き込むか、消去することもある。

[14] =装置の制御機構はヘッドがある情報を読み込んだときに何をするのかをヘッドに知らせる=

●TMの本当の力はこの装置の制御機構にあり、テープのヘッドがある情報を読み込んだときに何をするのかをヘッドに知らせる。この制御機構は、有限状態機械（FSM）と数学者が呼ぶものに相当する。任意のシステムが多く状態〈「有限」というのは、可能な状態の数がおそらく膨大ではあるが無限ではないことを意味しているに過ぎない〉のうちの一つにあるとき、そのシステムのふるまいを示すのにこのような装置が用いられている。状態とは、現在のシステムの「状況」や「進行状況」のことをいう《たとえば、電灯のスイッチには「入」と「切」のふたつの状態があるし、交通信号機は3つ、または、4つの状態があるが、そのうちのひとつをとるであろう》便宜上、時間が別々の「瞬間」のうちに動き、それぞれの瞬間にFSMが可能な状態のひとつだけをとるとしよう。

[15] =情報は内部の状態から得られるものと「外部」から得られるものの2種類に分けられる=

●情報は内部の状態から得られるものと「外部」から得られるものの2種類に分けられることに留意することが重要である。FSMには理論上の「知覚」能力のようなものがあり、外部からFSMに情報を入れることができる。TMの具体例では、テープから入力がある。

[16] =装置の制御機構はマシンのふるまいを決定する「規則表」ないしプログラムを符号化する=

●FSMの機構は、マシンが感覚入力と現在の状態とを鑑みてどのようにふるまうのかを決定するのに用いられる「規則表」ないしプログラムを符号化する。この規則表またはプログラムは、状態と入力のどの組み合わせでも、目に見える動作という意味でマシンがどのようにふるまうのかと、そのあとマシンがどの状態に移るのかを決定する。

=====

◆◆チューリングマシン (TM) の分かりやすい解説◆◆ [BeneDict 地球歴史館から引用]

チューリングマシンの処理の流れを下の表に示す。チューリングマシンは下記の表の「step 1」から「step 6」までを繰り返す。

「step 1」で、ヘッドが位置するメモリセルの値を読む。その値、つまり「②現在のメモリセルの値」と「①現在のstate」が一致する命令を、あらかじめ記述されたプログラム命令リストから探す。そこで、一致する命令がなければ、そこで実行停止。あれば、その命令に従い、下記の表のstep 3～5を実行する。これを繰り返し処理することになる。

処理の流れ

- | | |
|--------|---|
| step 1 | ヘッドの真下にあるメモリセルの値を読む |
| step 2 | 「①現在のstate」と「②現在のメモリセルの値」に一致する命令を捜し、なかったら実行停止 |
| step 3 | 命令で指示された「③新しいメモリセルの値」をヘッドの真下のメモリセルに書き込む |
| step 4 | 命令で指示された「④新しいstate」にstateを更新する |
| step 5 | 命令で指示された「⑤ヘッド移動」に従い、ヘッドを移動する |
| step 6 | step 1に戻る |

=====

◆◆チューリングマシン (TM) と万能チューリングマシン (UTM) の分かりやすい解説◆◆
[BeneDict 地球歴史館から引用]

◆チューリングマシン (TM)

1936年、エニグマ暗号解読の数年前、アラン・チューリングは後世に残る業績を残している。まだコンピュータが影も形もなかったとき、デジタルコンピュータの原型となるモデルを創り上げたのである。このモデルは、チューリングが書いた数学の論文の中で提唱されているが、脳が問題を解くプロセスを、仮想のコンピュータで真似ようとしたものだ。つまり、数学の問題を解く脳をモデル化し、それを仮想のコンピュータに置き換え、これに解かせたのである。

この仕組みを具体的にみてみよう。脳は、通常、いくつかの状態を持っている。例えば、「喜・怒・哀・楽」。これを脳の内部状態と呼ぶことにする。この内部状態は、脳への入力によって変化する。例えば、「侮辱」が脳に入力されると、内部状態は「怒」に変化する。このことから、脳が次のような性質を持つことが分かる。まず、有限個の内部状態をもつこと（喜・怒・哀・楽）。その内部状態が入力によって変化する（「侮辱」→「怒」）。どの入力でもどの状態に変化するかの手順が内蔵されていること（性格?）。以上3つである。このようなものを一般的に、オートマトンと呼んでいる。いわば自動機械だが、このような機械は、世界中にあふれている。認めたくはないが、脳＝人間もその1つかも知れない。

アラン・チューリングは、このオートマトンに記憶装置をつけ加え、脳を真似たのである。これがチューリングマシン (Turing Machine) だ。頭文字をとって、『TM』と呼ばれることも多い。記憶装置は、メモリセル（記憶単位）が連続した無限長のテープとなっているのが特徴だ。また、このテープを読み書きするためのヘッドがあるが、1度に1つのメモリセルしか読み書きできない。ヘッドは、テープ上を両方向に移動できるが、1回に移動できるのは、1メモリセル分だけだ。ビデオテープをイメージすると分かりやすい。

次に、チューリングマシンの動作。まず、ヘッドがテープからデータを読み取り、先のオートマトンに入力される。入力に従い、オートマトンの内部状態が変化し、その結果が出力として、テープに書き込まれる。次に、ヘッドが移動。そこで、ヘッドがまたテープからデータを読み取り、この処理が繰り返される。先の、入力と出力の関係は、すでに述べたように、オートマトン内部に内蔵されている。

◆万能チューリングマシン (UTM)

このチューリングマシンをさらに発展させたものが、万能チューリングマシンだ。Universal Turing Machine の頭文字をとって、『UTM』とも呼ばれている。このマシンは、先のチューリングマシンの入出力を保持するテープの他に、オートマトンの入力・内部状態・出力の対応表を記録したテープを備えている。

第1のテープは、データを読み書きするメモリ、第2のテープは、プログラムを格納するメモリに対応している。これは、現在のノイマンマシンにほかならない。

ただし、チューリングマシンとノイマンマシンは、アーキテクチャ（設計思想）がかなり異なる。木造建築と鉄筋建築の違いどころではない。ノイマンマシンに慣れ親しんだ技術者にとって、チューリングマシンは異形のコンピュータに見える。

チューリングマシンは概念上のモデルに過ぎないが、これを実体化すれば、立派なコンピュータになる。アラン・チューリングは、計算可能な問題は、すべてチューリングマシンで計算できることも証明している。ここでいう計算とは、広く問題解決を意味し、数値計算に限らない。記号処理、画像処理など、この世界で起こりうるほとんどのものが含まれる。また、チューリングマシンは、どんなコンピュータも模倣できるため、上記の証明は、現在、世界中で稼働しているノイマン型コンピュータにもあてはまる。

ただし、チューリングが、『どんな問題』も計算できるとは言っていないことに注意が必要だ。つまり、コンピュータで計算できるのは『計算可能な問題』と限定されているのだ。ここでいう『計算可能な問題』とは、チューリングマシン上で、有限ステップで実行できる手順が存在することを意味している。つまり、先のオートマトンで、入力と内部状態と出力の対応表がきちんと記述できることが条件となる。ノイマン型コンピュータで言えば、アルゴリズムで表せるもの、プログラムで書けるもの、となる。むろん、たいいてい問題が、計算可能な問題だ。

◆計算不能が意味するもの

プログラムで書けるものなら、すべてコンピュータで問題解決できる(というのは)考えてみれば当然である。アラン・チューリングは、計算可能な問題はすべてチューリングマシンで計算できることを証明したが、裏を返せば、チューリングマシンには『計算不可能な問題』が存在することになる。

これと同じことを、数学者ゲーデルが純粋数学で証明し(ているようだが、)専門外なので説明(はしない。)

そして、チューリングのもう1つの重要な証明。「チューリングマシンの実行結果は、実行する前に、予測することはできない」。(言え、)「あるプログラムがあったとして、そのプログラムの実行結果を事前に予測する普遍的なプログラムは存在しない」ということになる。つまり、プログラムが正しい答えを出すか否かを見極める普遍的なプログラム、つまり、バグを指摘する普遍的なプログラムや、未知のウィルス(プログラム)を発見する普遍的なプログラムはつくることができない、ということである。

これをチューリングマシンで説明すると、次のようになる。先のチューリングマシンの第1のテープに、判定対象となるプログラムをセットし、第2のテープに、判定プログラムをセットして、マシンを実行させる。このとき、第2のテープにどんな優れた判定プログラムをセットしても、第1のテープにセットされたプログラムの実行結果をあらかじめ予測することは不可能、ということになる。つまり、そのプログラムが何をするかは、プログラムを実行してみない限り分からないのである。ベテランのプログラマーなら感覚的に理解できることだが、数学的に証明されていることが重要だ。

◆チューリングテスト

チューリングには、別のユニークな業績もある。『チューリングテスト』だ。これは、その機械が人工智能と呼ばれるかどうかを判定するためのテスト。まず、人間がキーボードを使って、機械と会話をする。その人が、その機械を人間と誤認すれば、機械は人工智能とみなされる。

[17] =万能チューリングマシンは、どのようなコンピュータの動作もシミュレートできる=

●万能チューリングマシン (UTM) は、それ以外のどのようなコンピュータの動作もシミュレートできる。すなわち、「本物」のコンピュータで計算できるものなら何でも UTM で計算できると考えられる。この驚くべき結論は、コンピュータで動かせるどのプログラムも製造元やモデルを問わず、チューリングマシンで動くプログラムに書き換えることができることを意味する。いかなるコンピュータプログラムも、6つの基本動作からなる一連のステップに変換できる。もちろん、実際の計算のためにチューリングマシンは使われない。まず、物理的なマシンでは明らかに不可能なのに、チューリングは、マシンは無限のメモリをもたねばならないと定義している。加えて、チューリングマシンのプログラムを書くというのはきわめて「低レベル」の作業で、ぎこちなくわかりにくい結果が得られる。

[18] =チューリングは何が計算可能であるのかに、きわめて明確な制限があることを証明した=

●チューリングは何が計算可能または計算不可能であるのかにきわめて明確な制限があることを証明した。手段の有無に関わらず、解決できない問題があることを明らかにしたのである。

[19] =チューリングは計算可能なものなら TM は自然そのものの作業も再現できると提唱した=

●チャーチ=チューリングのテーゼとは、計算可能なものなら何でもチューリングマシンによって計算できるであろうというものである。チューリングはこれよりもさらに先に進み、物理的チャーチ=チューリングのテーゼというものを発表し、TMなら数学的機械の作業のみならず、自然そのものの作業をも再現できると提唱した。先達のデカルトと同じく、自然体系や生物系を本質的に有限状態機械として考えることができるというのがチューリングの見解であった。要するに、このような装置は内部状態と、それが何であろうと環境から少しずつ集められる情報とに依存している。

[20] =心の初期状態と環境からの情報の組み合わせが、その人の行動と次の心の状態を決定する=

●チューリングは、チャーチ=チューリングのテーゼは人の心にもあてはまると考えていた。スティーブン・レビーの説明によれば、「ある一時点では、ひとつの心は、ひとつの可能な状態にある。次の瞬間が来る前に、感覚の情報が入ってくる。自分の初期状態と周りの環境から来る情報の組み合わせが、その人の行動と次の心の状態を決定する。チューリングの主張は、心は有限状態の機械で、論理的な取り決め、つまり生物学的ないし物理的な力による規則表に従って、次の状態を決定しているというものであった」。

[21] =ノイマンは生体に基づく観察と、チューリングの万能計算とのつながりを示唆している=

●1948年、フォン・ノイマンはヒクソン・シンポジウムで「オートマトンに関する一般的かつ論理的見解」と題した有名な講演をした。ノイマンはチューリングの研究に触発されたところもあったが、ウォルター・マカロックとウォルター・ピッツの研究にも大いに関心を寄せていた。1943年にこのあたりは、神経系の機能が数理的にモデル化できることを明らかにした。人工神経ネットワークの前身である。

ノイマンは、このような実際の生体系<脳>に基づく観察と、チューリングの万能計算に関する研究との根本的なつながりを次のように示唆している。

「余すところなくはっきりと説明できるものなら何でも完全かつ明確に言葉で表現できるものなら何でも、ま

さにその事実から、それにふさわしい有限の神経ネットワークによってかたちにすることができる」。

●ノイマンがしているのは、事実上、万能チューリングマシンがヒトを含め生物なら何であろうとその動作を模倣することができるということである。レビーが詳しく説明しているように、「もちろん人間の行動を模倣したり、もっと簡単な生物体であるカプトムシやカシの木、バクテリアのようなものを模倣するにも、非常に長いテープが必要だろう。しかし、それは実行可能だ。その論理的根拠は完璧なように見えた。『生命はオートマトンの一つの網である』という言葉を理解するためには、実際の機械を作る必要はなかった」。

[22] =ノイマンは、自身を複製するプログラムを書くことの可能な自動機を構築しようと考えた=

●ノイマンは自分のオートマトン<自動機>を構築しようと思決した。何よりも最も根本的な自然の過程であろう自己繁殖ができるものである。それ自身の複製を作るようにプログラムを書くことが可能なマシンを構築しようと考えた。ノイマンはこの挑戦を自分に課したとき、実際の生物学的繁殖の基礎である生化学機構の大半がまだ不明であった。このころの生物学界では、DNAを興味深い分子であるとはほとんど考えていなかった。ノイマンによれば生命とは論理に基づくものであり、植物や動物も生化学的な機械に過ぎないという理由から、機械の繁殖が可能なはずである。

●ノイマンは、チューリングと志を同じくして、物事をそのむきだしの本質まで凝縮することを目指した。チューリングは計算という概念を、極端に限られた操作の信じられないほど単純な機械であり、なおかつ、このような機械には生命そのものを模倣することが可能であるというところにまでまとめあげた。ノイマンは、生物学の詳細から独立して考えて、自己繁殖を可能にする重要な論理的機能を特定する必要があることに気がついた。

[23] =ノイマンは機械の設計図の複写を子のマシンに挿入して機械を複製することを考えた=

●ノイマンは、機械一台が構成部品に囲まれて池に浮かんでいるのを想像した。ミッチェル・ワードロップが説明しているように、「この機械は万能組立機であるとする。特に、自分自身の設計図を与えられた場合には、この機械は自分の複製、つまり子の機械を組み立てることになる」。

きわめて重要なのは、ノイマンが考えたマシンの部品のひとつが記述転写機であったことである。これは、マシンに関する記述原本の写しを作成し、新しいマシンに挿入する。このような方法で、次世代以降が永久に繁殖を続けるために要する情報を残らず受け継いでいく。

●ノイマンの説明は驚くほど将来を予見するものであった。当時はまだ構造が未解明であった遺伝物質、DNAにはふたつの異なる役割があると考えたのである。遺伝物質は、一方で目立たない役割、子のマシンに受け継がれるマシンの設計図の役割を果たすが、他方では、マシンの構成部品の構造を指示するプログラムとして機能する。ノイマンがオートマトンを開発したのは1948年頃であり、DNAの構造が解明される5年以上も前でありながら、ノイマンは生物学的繁殖の機構を本質的につかんでいた。

[24] =ノイマンは遺伝子の機能をモデル化するコンピュータの命令を取り入れたいと考えていた=

●ヒクソン・シンポジウムの講演で、ノイマンは次のように述べた。『オートマトンの記述はさらに魅力的な面をもつ。たとえば、大ざっぱに言って、命令〔テープ〕が遺伝子の機能を発現させていることはほぼ明らかである。また、転写機構が繁殖の基本的な働き、言い換えれば、遺伝物質の複製を実行していることは明らかであり、それが生細胞の増殖では基礎的な営みであることは明白である。』

●1954年に死亡するまでの数年間、ノイマンは、「生体医科学の専門家と密接に連絡を取りあっていた。自己繁殖をはじめさらに多くの生体機能につながる遺伝子の機能をモデル化できるコンピュータの命令に関する思索を含め、生物学の利点をもっとコンピュータに取り入れたいと考えていた。」(ノーマン・マクレイ)

◆◆ 現代コンピューティングの誕生 ◆◆

[25] =1948年ノイマンはコンピュータの情報を二進法によって表現するのが望ましいと述べた=
●1948年、ノイマンはヒクソン・シンポジウムの講演の中で、コンピュータによって情報をどのように表現できるのかについて述べている。「十進法（基数 10）は最も広く用いられているもので、これまでに作られたデジタル機械はみなこの方式である。一方、最終的には二進法（基数2）が望ましいことが明らかになるであろうと思われ、このシステムを採用しているデジタル機械がいくつも製作されているところである。」

<クロード・シャノン アナログからデジタルへ>

[26] =第二次大戦前、多くの人々が先にはアナログコンピュータの発展があると信じていた=
●第二次世界大戦前、多くの人々がこれから先はアナログコンピュータの発展があると信じていた。このようなマシンには、処理する数値を表すのに現実連続する物理的な数量が用いられた。

[27] =数字を並びかえる「スパゲッティソート」は、有名なアナログアルゴリズムである=
●有名なアナログアルゴリズムが、「スパゲッティソート」である。解決しようとする問題は簡単である。数字一式が与えられ、これを降順に並びかえる。この例では、マシンの「ハードウェア」は、ゆでる前のスパゲッティの束である。コンピュータは、スパゲッティ1本づつに、並びかえる数字を割りあて、そのスパゲッティを数字に対応する長さで切ることによって設定される。数字の5、10、3を降順に並びかえることを考えてみよう。スパゲッティ3本をとってそれぞれ5センチ、10センチ、3センチの長さで切る。設定が終わったら、「処理」を実行する。単にスパゲッティを縦にして束ね、机の上でトントンと下側の端をそろえる。「読み取り」段階では、一番長いスパゲッティを抜きとって長さを測り整数値にし、スパゲッティがなくなるまでこの過程を繰り返す。

[28] =解決すべき問題が変わるとアナログ計算機はハードウェアを物理的に変える必要があった=
●現実のアナログコンピュータで用いられる数量はふつう電圧が電流であった。アナログコンピュータの問題は本質的に柔軟性に欠けることであった。特定の問題ひとつを解決するのは得意であるが、別の問題を解決するにはハードウェアを物理的に変えなければならなかった。

[29] =シャノンは計算機の構成部品に電源を入れたり切ったりするリレーに興味を引かれていた=
●アナログコンピュータのこの本質的な欠陥は、クロード・シャノンという名の若き実験助手にはいやというほどわかっていることであった。シャノンは、仕事で取り組んでいたコンピュータの各種構成部品の電源を入れたり切ったりするために用いる方法に特に興味を引かれていた。リレーが制御に用いられていた。リレーとは、電磁石によって制御される電気スイッチのことである。

[30] =シャノンはリレースイッチの動作とブール代数の論理とが似ていることに気がついた=
●重要なのは、リレースイッチの動作が以前に学んだ論理の一種に似ていることに気がついたことである。このことが、コンピュータの組み立て方に関するわれわれの理解を完全に根本的に変えることになる。リレースイッチそれぞれが常時、開か閉、言い換えれば、オフかオンの状態にある。この状況は、ある陳述が真偽のどちらかであるような数理論理学の状況をそのまま反映したようなものである。この数学体系全体は、考案者であるジョージ・ブールにちなんでブール代数として知られている。

●オンになったりオフになったりするスイッチが、論理値「真」ないし「偽」または、数値1ないし0をとることと同じように考えられるであろうと見抜いたところに、シャノンの優れた洞察力があった。

[31] =スイッチをつなぎ合わせ電気の流れを利用して AND、OR などを構成することができた=
●このように、回路中に真理値を運ぶ電気の流れを利用して AND、OR など基本的なブール演算を構成するために、さまざまな方法でスイッチをつなぎ合わせるすることができた。それまでだれも数理論理学の理論的な概念と毎日聞いている工学的機械の鈍い音とを結びつけたことがなかったため、これは意外な新事実であった。情報の流れという観点から計算をどのように考えることができるのかがわかりはじめてきている。流れるものが水や電気または何らかの物質からなることは特に関係ない。大切なのは、流れが何かしらの意味をもつことである。

[32] =複数の入力値に基づき回路が何らかの処理を実行し答えを出せることに気づいたのが重要=
●さらに重要なのは、入力値に基づいて回路が「はい」「いいえ」を決定できることにも気づいたことであろう。回路は複数の入力を取り込み、何らかの処理を実行して答えを出すことができる。自動車のシートベルト警報音をモデル化する問題を考えてみよう。〈エンジンの〉点火装置がオンかオフか 〈オンであれば出力が1、オフであれば0〉 を検知する複数の検知器と、運転座席のシートベルトが装着されているかどうか 〈装着されていれば1、そうでなければ0〉 を検知する検知器とがある。点火装置がオン 〈点火装置=1〉 であり、さらにシートベルトが装着されていない 〈シートベルト=0〉 状況のときのみ 〈最終出力1に対応して〉 ブザーが鳴るようにしたい。ブザーの出力として単純に OR ゲートを用いることができないのは明らかである。点火装置の状態に関係なく、シートベルトが装着されるとブザーが鳴ってしまうためである。しかし、〈NOT ゲートと AND ゲートのふたつのゲートを〉 組み合わせて回路を作れば望みの結果を得ることができる。

[33] =この洞察がスイッチを用いたコンピュータをプログラム可能なものにする道を開いた=
●これは、スイッチを用いたコンピュータを、柔軟でプログラム可能なものにする道を開いたことから、きわめて重大な洞察であった。

●旧式のアナログコンピュータで、物理的な機器の設定に「扱いにくいハードなコード」値を入力するよりも、ブールが考案した新しい論理に基づくコンピュータには、さまざまな入力を受けてその場に応じて処理するプログラムを入れることができた。

プログラム化された比較によって得た結果に従って、プログラムの異なる部分を実行するよう「選択する」ことによって、コンピュータは多種多様な環境にすばやく適応することができた。

●シャノンはただ進み続けた。20代はじめには既に現代のコンピュータ設計の基礎を築いた。

<現代コンピューティングの誕生>

[34] =戦前のマシンはチューリングマシン同様にプログラムとデータとが完全に区別されていた=
●戦前のマシンでは、プログラムとデータとが完全に区別されていた。チューリングマシンのように、管理プログラムと別途の読み取り用および書き込み用テープを用いてデータをコンピュータに入れた。

[35] =ノイマンはデータとプログラムコードとが同じ空間に問題なく共存できることを見抜いた=
●フォン・ノイマンがデータとプログラムコードとを別々に分けて取り扱うのではなく、両者が同じ空間に問題なく共存できることを見抜いたのは重要である。

[36] =主処理装置が自らの命令文およびデータの記憶を変更できる再プログラム可能なマシン=
●フォン・ノイマンのモデルでは、命令文とデータとは格納するのにひとつの記憶領域が用いられ、格納された命令文およびデータには主処理装置がアクセスし、変更することができる。つまり、マシンがそれ自身のプログラムを変更することができ、まさに再プログラム可能になっている。

[37] =現代のコンピュータはノイマン型で中央処理装置と記憶装置とをはっきりと区別している=
●現代のコンピュータのほとんどが、このノイマン型を追随しており、プログラムとデータではなく、プロセッサと記憶装置とをはっきりと区別している。今日のコンピュータで機能の中核をなすのは中央処理装置 < CPU > と記憶装置である。CPU チップは、コンピュータのふるまい方を基本的な面で全的に制御している頭脳である。

[38] =マシンの基本を制御するプロセッサ (CPU) が実行するのは同じ手順の繰り返しである=
●記憶装置にあるコンピュータプログラムとはごく単純な命令をならべた長い表に過ぎない。

CPU の制御部は、記憶装置から命令を読み取り、その命令がどの種のものであるかを判断し、必要なデータを入手し、そのデータを CPU の演算部の回路のしかるべき部分につながっている配線に注ぎこむ。

●一般に、CPU が実行するのは同じ手順の繰り返しである。

1. 実行する命令をとりに行く。 2. 命令が必要とするあらゆるデータを得る。 3. 命令を遂行 (実行) する。 4. 命令を実行した結果を保存する。

[39] =マシンに二値信号を用い電圧の山と谷からなる信号の流れが部品から部品へと情報を送る=
●プログラムとデータとが、プロセッサとは別にコンピュータの主記憶装置に保存されている。どのようにすればこのように保存できるのか。現代のコンピュータは、真偽、1または0、オンまたはオフという考え方を概念の中心とするデジタルの原則にのっとり作動する。情報の基本単位はビットである。これは、互いに排他的なふたつの値 <真または偽、1または0、オンまたはオフ> のうちのひとつをとることができる。

デジタルコンピュータの基本構成部品にはオンかオフのどちらか一方しかとらないという二値信号を用いており、それぞれ高い電圧ないし低い電圧によって電子で表現される。1101011 のような二進数列を符号化した山と谷からなるデジタル信号の流れによってひとつの CPU 部品から別の部品へと情報が送られる。

[40] =論理ゲートという演算用の部品をつなげて回路を作れる点にマシンの真の威力がある=
●CPU を構成している基本的な演算用の部品は論理ゲートとして知られている。最も単純なゲートは NOT ゲート。入力値ひとつ <1または0のどちらか> を取り込み、それを「ひっくり返す」または反転する。

このため、入力値1が出力値0に変わり、この逆もある。このほかによく用いられるふたつのゲートは AND と OR。説明のために、このふたつのゲートが入力値を厳密にふたつとり、出力値をひとつ出すと仮定する。実際には任意数の入力がある可能性もある。AND ゲートは、入力値が両方とも1であれば、そのときのみ出力値1を出す。どちらか一方の入力が0であれば出力は0である。OR ゲートは、どちらか一方の入力が1であれば結果1を出し、そうでなければ0を出力する。このようなゲートをつなげて回路を作ることができるという事実が真の威力がある。回路は、先のシートベルト警報音をモデル化する問題のように、複数の入力を取り込み、何らかの処理を実行して答えを出すことができる。

[41] =CPU の単純な論理ゲートをつなぎ合わせて回路にすることで有益な計算を実行できる=
●単純なゲートをつなぎ合わせて回路にすることによって有益な計算を実行できる。CPU は基本的に、さまざまなサブサーキットからなるきわめて大きな回路である。各サブサーキットには機能が定義されている。CPU を監督するのは、CPU の制御部であり、前述の四段階ループを実行する。

●制御部の制御装置は、記憶装置から命令を読み取り、その命令がどの種のものであるかを判断し、必要なデータを入手し、そのデータを CPU 回路のしかるべき部分につながっている配線に注ぎこむ。たとえば、ひとつの回路に数を表すビットストリームを二ヶ所から取り込む論理ゲートが1ブロックあるとすれば、このビットストリームに対して二進数計算を実行した後、配線を通して結果を返す。

[42] =マシンの記憶装置は巨大な二次元配列の「整理棚」で各々の棚が独自のアドレスをもつ=

●コンピュータの記憶装置 <メモリ> は、これを巨大な二次元配列の「整理棚」と仮定し、それぞれの棚が独自のアドレスをもつと考えることができる。特定の棚にある手紙を読んだりそこに新しい手紙をおくように、CPUの制御部の制御装置は、所定のアドレスにある記憶域から読み取るか、そこに書き込むことができる。

[43] =CPUが実行できる基本の命令を結合すると複雑なプログラムの構造をとることが可能に=

●CPUが実行できる基本的な命令を集めた一覧表が命令セットである。これは、プログラマーがプログラムを組むのに使用する基礎的な「構成要素」であり、チューリングマシンの基本操作と同じようなものである。これを基本的な化学元素と考える。どの元素もそれ自体は単純だが、結合すると驚くほど複雑な構造をとることができる。コンピュータプログラムにも同じことがいえる。

●最新技術を使ったコンピュータゲームやワープロソフトは、ADD、SUBTRACT、JUMPなど単純な命令のどてつもなく長い配列に過ぎない。当然ながら、このような命令をチューリングマシンの基本的な命令表にさらに分解することもできるが、現物のCPUは、TMのような構造にはなっていないため、この程度の抽象概念で作業する。あるCPUでは、ADD命令は識別子10110100をもち、制御装置がこのコードを読むと、次に続く2バイトは加算するふたつの数値を符号化していると識別する。

[44] =CPUチップにはトランジスタなど驚くほど小型化された装置が何百万個と集積する=

●シリコンウェーハからできたチップの上には、相互に接続され集積回路を作っている信じがたいほど小さなスイッチであるトランジスタをはじめ、驚くほど小型化された装置が何百万個とある。

●この回路は、コンピュータ内の重要な「意思決定」を残らず網羅している。それは、ソフトを動かしているのである。トランジスタをつなぎ合わせてさまざまな回路にすることによって、データが回路中に流れるようにする。回路が大きければ大きいほど潜在能力も大きくなる。チップに収められる部品が多くなればなるほど、チップがさらに強力になる。

<小型化していく驚くべきコンピュータ>

[45] =デジタル回路ではトランジスタが二進のスイッチとして働き電気の流れを制御する=

●デジタル回路では、ウィリアム・ショックレーなどの発明によるトランジスタが事実上、二進のオンオフスイッチとして働き電気の流れを制御する。コンピュータ・チップというのは、基本的に膨大な数のトランジスタが集積回路として並んでいるものである。

[46] =ムーアの法則では集積回路の部品数は1年半ごとに倍増してコンピュータの小型化が進む=

●1965年、ゴードン・ムーアは『エレクトロニクス』誌の記事で、シリコンで作られたコンピュータ・チップの処理能力は時間とともに急激に増大していると述べた。ムーアの予測をムーアの法則と呼ぶようになり、それによれば、集積回路に集積可能な部品数は実質的に1年半ごとに倍増する。そして、このことは、コンピュータの小型化がどんどん進むことを意味している。

[47] =プロセッサの処理能力が指数曲線で膨らめば早晚「とんでもないこと」が差し迫ってくる=

●この小型化はこのまま続くのか。その答えは「続かない」。時間をX軸とし、プロセッサの処理能力をY軸として曲線で表すとしたら、ムーアの法則では指数曲線となり、曲線はまたたく間に「膨らむ」。ムーアの言葉では、「かなり先のことを予想するとしたら、そのような指数関数なら、とんでもないことになる」。差し迫った「とんでもないこと」とは、シリコンに課された根本的な制約によるものであることが量子物理学から推測されている。

＜ムーアの法則か、ムーアの壁か＞

[48] =ゲートの厚さが5nmの限界幅に達すると電子の流れを制御できなくなると推測される=

●トランジスターとは、ゲートとして作用しているプロセッサの回路中に電流を送るものである。今のところ、ゲートには電子が通過できない壁となるのに十分な厚さがあり、電子を捕まえて制御している。既存のゲートではこれが確実にこなわれており、人々が迷路を通りぬけるように、電子がゲートからゲートへと行儀よくメッセージを運んでいる。ところが、ゲートが重大な限界の幅 <多くの人が5nmあたりと考えている> に達すると、電子は従来の規則に従って動くことをやめ、壁を通り抜けようとしはじめる。こうなってしまうと、電子たちがどこからやってきてどこへいったのか正確に把握することができなくなるため、論理が崩れる。

[49] =プロセッサチップに集積が進むと熱の漏れが溜まり、除去しないと確実な作動を妨げる=

●回路にトランジスターを集積することのもうひとつの問題が、内在的な「漏れ」にある。理想的な世界では、トランジスターがよく管理された蛇口のように作動する。オンになると水または電流が流れ、オフにすれば止まる。しかし、実際には、オフであってもトランジスターから微量の水または電流が常にしたり出ている。プロセッサチップではこの漏れが熱として現れ、チップが確実に作動するにはこの熱を除去する必要がある。

●このような問題をあわせて考えると、シリコンに終わりが告げられているように考える者もいれば、もう少し期待している者もいる。

＜シリコンの終りか＞

[50] =多くがシリコンの代替物探しに取り組み、ヒントを得ようと生物学に目を向ける者もいる=

●明らかに、多くの者が信頼性のあるシリコンの代替物探しに真剣に取り組んでいるところである。その大半が、新たなコンピュータの基礎となるものを求めて現実的で実際的な進歩を遂げている。チューリングマシン特有の制限を超えることを可能にする世界に関する新たな考え方として、量子計算が現在話題になっている。一方、なかには将来の計算回路基板に関するひらめきを得ようと生物学に目を向けている者もいる。

◆◆ 極小の世界に余裕あり ◆◆

[51] =1959年ファインマンが自然体系の情報収容能力には驚くべきものがあることを強調した=

●1959年に、物理学者リチャード・ファインマンが「極小の世界に余裕あり」と題された講演をし、自然体系の情報を格納する能力には驚くべきものがあることを強調した。

しかし、ファインマンは極端な考えを提案した。生物系の力を計算の諸目的に活かそうというのである。

「細胞の多くが極小とはいえ大いに活動的である。さまざまな物質を産生し、ありとあらゆる驚くべきことをやってのける。さらに、細胞は情報を格納する。われわれにも、やりたいと思うことをやってくれるものを極めて小さくすることができる、という可能性を考えてほしい。細胞レベルで動く物体を作ることができるという可能性を考えてほしい。

[52] =ファインマンの明解な着想に技術が追いつくには数十年先まで待たなければならなかった=

●ファインマンの明確な目的のある提案は、コンピュータが部屋の大きさ程もある怪物だった、当時からすると、時代を数十年先に進んだものであり、すばらしく明解な着想に技術が追いつくのを待たなければならなかった。その後、コンピュータが急速に発展し続けた。コンピュータと生物学がしっかりと結びつくようになり、学問分野におけるダンスともいえるようになった。

[53] =生物学とコンピュータ科学に共生関係が生じバイオフィォマティックス分野が生まれた=

●今では実験室で働く生物学者がDNAの断片を作製し、コンピュータソフトを用いて細菌をはじめショウジョウバエやヒトのゲノム配列を組み立てる。生物学とコンピュータ科学の間に共生関係が生まれ、数学者がアルゴリズムという武器を持ち込んで、生物学の問題に影響を与え、ゲノム計画によって作成された大量の生データを保存して分析するために、これまでにない新たな計算技術が開発された。バイオインフォマティクスという分野は新しい「魅力的な」科学として生まれた。

<生命の暗号による計算>

[54] =2002年エードルマンなど三人のRSA暗号の発明者がアメリカのチューリング賞を受賞=
●1978年に発表されて、国際的な取引を安全におこなうために用いられている暗号化方式は、発明者である三人のイニシャルにちなんでRSAと名づけられ、依然としてインターネット時代の中核をなすソフトウェア技術のひとつである。2002年、アメリカ計算機学会のチューリング賞が、レン・エードルマンを含む三人の発明者に授与された。

[55] =自分が新たな論題を生む方法は生物学・免疫学など新しい分野全体を考えることに始まる=
●南カリフォルニア大学 <USC> でコンピュータ科学を担っていた1983年当時、エードルマンがもつ生物学の概念からコンピュータ科学を解釈する能力と意欲とがあからさまになってきていた。エードルマンは「私が新たな論題を生み出す方法、生物学や免疫学、物理学をはじめとする新しい分野全体を考えることに始まる。私が異なる分野である数学の出身であるため、時にそのような分野の典型的な問題とは異なるものを考え出すことができる一風変わった見方を持ち込んでいる」と、説明している。

[56] =科学が専門化し難解になり自分の分野でも特定の一領域で知識の漏斗をのぞき込む傾向に=
●現代科学は、厳密に区分されていることが多く、個人やグループがみな知的風景の別々の部分に自分の権利を主張している。知識があまりにも専門化し、あまりにも難解になったため、学者が自分の分野でも特定の一領域で概念の漏斗をのぞき込むのに職業人生のすべてを費やすことができるほどである。おそらく数学でまさに最も有名な問題に膨大な時間とエネルギーとを費やして取り組んでいたエードルマンのような博学者でさえ、ときどき間違っただけの思い込みをすることがあると認めている。

[57] =長年フェルマーの最終定理に取り組んだが、ワイルズの証明を詳しく理解することはない=
●「私は長年フェルマーの最終定理に取り組んでいたが、アンドリュー・ワイルズが証明に成功した。私にはその論文が読めない。ワイルズは代数幾何学という手段を用いたが、私は代数的数論を用いていた。ワイルズの証明を詳しく理解することはないと思う。驚くほど専門化されているから」。このように視野が狭いのは数学者だけではない。エードルマンの見方によれば、「自分は分子生物学のなかでも酵素専門であり、酵素専門でもプロテアーゼの専門ということになる。往々にして、隣の部屋の研究者と話しさえできない」。

[58] =科学者が博学になることができる時代があったし再びそれが可能になりつつあると思う=
●一方、エードルマンは人工的な障壁が崩れることによる復活や再生の可能性を楽観的に考えている。「[歴史的な科学者]、博学な科学者に戻る可能性があると考えたい。例えば、これまでガウスほど偉大な数学者はいないだろうと思うが、天文学でも同じである。科学者が博学になることができる時代があったし、再びそれが可能になりつつあると思っている。科学研究の一部に事実を巧みに扱うこと、現実を熟考することがある。また、この部分はどの科学にも共通する。生物学をやっているが、数学や物理をやっているが変わらない。だからそれを習得すれば相当動きやすいし、私には数学がその習得方法のように思える。分子生物学のような分野に取りかかってもわりとすばやく基礎知識を得ることができる。いずれの科学も今わかるということじゃない。基礎知識とはいってもそれはもう膨大である。人ひとりが基礎知識を残らず知ることはあり得ないと思う。ただ、出来ることといえば、万能選手のようなものになること。考える方法を学び、科学のどの領域でも興味を引かれるものに必要な基礎知識を身につけるようにする。」

[59] =エードルマンは免疫学の最も重要な未解決問題に数学者が探求する美があると考えていた=

●エードルマンは再び新たな科学の挑戦に取りかかった。1990年、アメリカ合衆国だけで三万一千人を超える人がエイズで亡くなった。エードルマンは免疫学分野に惹かれており、「最も重要な未解決問題に数学者が探し求める美があると考えていた」。カリフォルニア大学ロサンゼルス校医学部の講義を聴講し、免疫系に関して文献研究をはじめた。

[60] =そしてエイズの問題がT細胞の増減を管理する身体の恒常性維持機構にあると主張した=

●「T細胞」として知られる白血球の一部の種類がHIV感染の主な標的である。ある人のヘルパーT細胞数が満足すべき閾値より下がると、エイズの全面攻撃は避けられない。

●エードルマンは、カリフォルニア大学サンフランシスコ校の同僚デイビッド・ウォフシと組んで、体内自己調整機構を中心としたエイズの理論をあっという間に明確に示し、根本的な問題は身体がT細胞の増減を管理するのに用いる恒常性維持機構にあることを示唆した。生体は、種々の体内過程を常に調整することによって安定な平衡〈または均衡〉が保たれるようになっている。

エードルマンが説明するように、感染者がヘルパーT細胞を失っていくとき、恒常性維持機構は損失前のT細胞数に戻すために、ヘルパーT細胞と、キラーT細胞の両タイプのT細胞を産生する。しかし、ヘルパーT細胞の総数は減少しており、この過程が継続されるとヘルパーT細胞が繰り返し希釈されることになり、臨界閾値以下にまで低減してエイズの発現をみることになる。

●エードルマンとウォフシは、キラーT細胞を意図的に壊滅することによって問題を解決するという画期的な治療法を提案した。ヘルパーT細胞が破壊されているなら、同じ量のキラーT細胞を破壊する。そうすれば、生体が再び細胞を産生するとどちらも等量になる。

[61] =エードルマンは自分達の理論の説得力のある提唱者になるため知識基盤を学ぼうと誓った=

●これに対し、少数の研究者がバトンを拾ってくれたとはいえ、この研究者らの論文にも一部懐疑的な反応があった。「HIVに強いられるものであろうが生来のものであろうが、不明瞭な恒常性維持を裏付ける有力な証拠というものはない」というのであった。

●一方、エードルマンは、このようなことに阻止されることなく、自分たちの理論の「もっと説得力のある提唱者になる」ために「知識基盤を身につけ」ようとさらに学ぶことを誓った。

エードルマンは、「遺伝子にとり憑かれ」猛烈な勢いで生物学を吸収していき、分子生物学者の実験技術を残らずとりあげて練習した。エードルマンはDNAを合成して細菌に注入したのち、この細菌を分解して結果を調べた。J・D・ワトソンほか著の有名な教科書を使って理論知識の基盤も広げていった。

<生命の暗号>

[62] =シュレーディンガーは染色体を媒体に生物学的情報を伝達するのが生命の特徴だと考えた=

●シュレーディンガーはフォン・ノイマンと同じく、情報という面から考えることによって生命を理解できると考えた。数字の配列〈1、3、4、2など〉というのは生データであり、ある状況で解釈されてはじめて情報となって意味を持つ。シュレーディンガーは、染色体を媒体として生物学的情報を伝達することが生命の特徴であると考えた。この情報の解釈によって生命の真髄があらわとなるであろう。

●生命が神秘的な生命力のようなものでなく、はっきりとした分子の情報に依存するという、シュレーディンガーの考え方は、若きジェームズ・ワトソンには大いに魅力的であった。

[63] =DNAの構造を解明したワトソンとクリックは分子生物学の分野の基本的な土台を作った=
●「この構造には、生物学的にきわめて興味深い新しい特徴がある」。1953年、ジェームズ・ワトソンとフランシス・クリックは二頁にわたる論文をこのようにさりげない一文からはじめた。そうすることによって、世界を根本的に変え、われわれの居場所をも変えることになる一連の活動の基盤を築いた。DNAの構造を解明することによって、ワトソンとクリックは基本的に分子生物学という分野の土台を作り、バイオテクノロジーや遺伝子配列解明の技術の発展やヒトゲノム計画へ道を切り拓いた。

<遺伝子の魔人>

[64] =DNAポリメラーゼはナノマシンだ。DNAに『飛び乗り』『読み取り』『書き込む』=
●エードルマンが次のように説明している。「ワトソンの本にDNAポリメラーゼの解説が出てきた。これは、酵素の王様、生命の創造主である。十分な条件下でDNAの鎖一本があれば、DNAポリメラーゼが二本目の「ワトソン-クリック」型相補鎖を産生する。CがGに、GがCに、AがTに、TがAにどれも全部置き換えられる。たとえば、CATGTCという分子があるとすれば、DNAポリメラーゼによってGTACAGという配列の新しい分子が産生されるであろう。ポリメラーゼによってDNAの複写が可能である。言い換えれば、これが細胞の再生を可能にし、最終的にはヒトの生殖が可能となる。厳格な還元主義者にとって生命というのは、DNAポリメラーゼによるDNAの複写に尽きるということになる。」
「DNAポリメラーゼは、驚くべき小さなナノマシンである。DNAの一本鎖に『飛び乗って』滑るように動き、通過する各塩基を『読み取り』ながら、その相補体を新たに成長しつつあるDNA鎖に『書き込んで』いく単分子である」。

[65] =DNAの文字でシュレーディンガーの生物学的情報が鎖状分子に保存され伝達されている=
●今やDNAという化合物のアルファベットを用いてシュレーディンガーの生物の定義である生物学的情報の伝達を裏付ける仕組みを全般的に理解したことになる。この情報は二進数の1や0を用いてコンピュータのなかに格納されるものではなく、化合物のアルファベットを用いて鎖状分子に保存されている。

[66] =各塩基を2ビットで表せば情報がDNAの一本鎖として容易に格納されるのが理解できる=
●例えば、8×8の格子の枠目を白<0>または黒<1>にして描かれたスマイリーフェイスのビットマップを考えれば、どのようにすれば情報がDNAの一本鎖として容易に格納されるのかが理解できる。すなわち、四文字のアルファベットによって、一文字につき情報を二ビットとして保存することができる。ビット「00」をA、「01」をG、「10」をC、「11」をT、にそれぞれ割り当てることにすれば、スマイリーフェイスを符号化している六十四文字(8×8)の二進列は、三十二文字のDNAの文字列として表現できることになる。

[67] =今や生物学が格納されている四文字の情報と細胞内での情報の変化に関する研究になった=
●エードルマンによれば、「今や生物学が、DNAに格納されている情報、言い換えれば、A、T、G、C、の四文字の文字列と、細胞内での情報の変化とに関する研究となっていた。ここに数学があったのだ」。
「生物学とはアルファベット四文字の有限文字列と、酵素がこの文字列に対して果たす機能のことである」。

[68] =エードルマンはチューリングマシンの動作とDNAポリメラーゼの類似にひらめきを得た=
●エードルマンがひらめきを得たのは、ポリメラーゼの作用に関して文献を読んでいるときであった。「この素晴らしい酵素に感心していると、1936年に説明されたものにそっくりだという強い印象を受けた」と思い出す。チューリングマシンのことを考えていたのであった。エーデルマンが説明するように、「チューリングマシンの一種に、テープ組と有限制御部と呼ばれる機構からできているものがあつた。データを読み取りながら『入力』テープに沿って移動し、同時にそのほかのデータを読み込んで書き込む『出力』テープにも沿って移動した」。エーデルマンは「有限制御はごく簡単な指示でプログラムすることができ、入力テープ

にA, T, C, G, の文字列を読み込んで出力テープにワトソンクリック型の相補的文字列を書き込むプログラムを容易に書くことができる。DNA ポリメラーゼとの類似点はこれ以上ははっきりしようがない」という。

[69] =チューリング機械が万能である点からポリメラーゼにも同じことがいえると気づいたのだ=
●エードルマンは、チューリングマシンが万能である—言い換えれば、計算可能なものなら何でも計算できる—ことから、ポリメラーゼにも同じことがいえると気がつき、「チューリングマシンをプログラムしてワトソンクリック相補鎖を作製したり、数字を因数分解したり、チェスをしたりすることができることに気づいた。」

[70] =ポリメラーゼを情報処理の論理的機械として解釈し生物学と数理科学の新たな関係を見た=
●エーデルマンは想像で重要な飛躍を果たした。ポリメラーゼ酵素をほかの生物学的分子と合体するタンパク質としてではなく、情報の鎖を処理する論理的な機械として解釈することによって、生物学とコンピュータ科学の新たな関係に向けて最初の暫定的な措置を進めはじめていた。
「コンピュータ科学と数学—いろんな意味で同じものである—および生物学というふたつの古典的な科学の間にあるもっと親密な関係を探るものである」。戦後四十年、先達に刺激され、ひとりの暗号学者が再びコンピュータの発展に重大な影響を与えようとしていた。

<遺伝子機械の誕生>

[71] =エードルマンは適切な問題を選んで科学の「原理の証明」実験をしなければならなかった=
●エードルマンの最初の仕事は解決すべき適切な問題を選ぶことであった。問題の難易度と予想される成功率との微妙なバランスをとらなければならなかった。要するに、エードルマンは科学者が呼ぶところの「原理の証明」実験をしなければならなかった。それは、原則として重要な成果を得ることが可能であり、長期的に見て少なくともある程度は見込みがあることを実例によって明示することであった。

[72] =証明実験の対象に説明は易しく解決が難しいハミルトン閉路問題を用いることにした=
●エーデルマンは理論コンピュータ科学に関する知識を頼りに、最終的にハミルトン閉路問題 <HPP = HAMILTONIAN PATH PROBLEM> を用いることに決めた。説明するのは易しいが解決するのはきわめて難しい、この問題は、数学者が一般に「おもしろい」と表現するものであるが、それは「難しい」を遠回りに表現しているに過ぎない。

[73] =節点sを出て全節点を一度だけ通過し節点tで終わる一方向路が存在するかという問題だ=
●HPP は次のように説明できる。一方通行の道路でつながれた都市が数都市あるとしたら、旅行者がそのうちのひとつの都市から旅をはじめ、各都市を全部一度だけ訪れ、最初とは異なる都市で旅を終えることができるような道が存在するであろうか、という問題だ。都市を空港として、道路を航空路として考えることもできる。大切なのは、グラフとして知られる基礎的な表現である。

●原理を証明するための実験なので、エードルマンは手はじめとして比較的小さくて、唯一の解答がある、あるグラフを選んだ。それは、特定の「ホーム節点」①に始まって、別の「終点節点」⑦で終わり、それぞれの節点を一回、たった一度だけ通る道があるかというグラフである。

[74] =エードルマンのアルゴリズムは「スパゲッティソート」アルゴリズムに驚くほど似ていた=
●この問題を解くためのエードルマンのDNA を用いたアルゴリズムは、スパゲッティソートアルゴリズムの方法に驚くほど似ていた。

[75] =一連の手順はHPP を解くための高いレベルで表現された簡素なアルゴリズムであった=
●エードルマンのアルゴリズムは次のような一連の手順からなっていた。

1. グラフからランダムな経路をいくつか生成して、大きな一セットとする。
2. このセットのそれぞれの経路に対して次のことを実行する。(a) 「基点」に始まって「終点」で終わることを確認する。そうでなければ、その経路は捨てる。(b) 経路が正しい数の節点を通ることを確認する。多すぎたり少なすぎたりすればハミルトン閉路ではないため、その経路は捨てる。(c) 経路がそれぞれの節点を通ることを節点ごとに確認する。通っていないければ、その経路は捨てる。
3. この段階で残っている経路があれば「ハミルトン閉路あり」と報告し、そうでなければ「残念。原則に当てはまる経路なし」とする。

[76] =エードルマンは問題の解答の候補となる十分な数の様々なランダム経路を作ろうと考えた=
 ●エードルマンは、問題の解答として考えられるもの、つまり、グラフを通るさまざまなランダム経路をいくつか作り出すことを考えた。十分な数のランダム経路を作れば、少なくともそのうちの 하나가単なる偶然でも問題に対する正しい解答をコード化するだろうと自信を強くもつことができる。

[77] =解答の候補として山ほどのランダムな初期解答を得ると一連の規則を当てはめていった=
 ●エードルマンは、山ほどのランダムな初期解答を得ると、アルゴリズムの各規則を当てはめていった。

●規則の2 (a) : 経路は特定の節点 <この場合、節点①> から始まり、別の特定の節点 <この場合、節点⑦> で終わらなければならない。エードルマンはPCR法という分子の「複写」技術を用いて、偶然にも運よく①にはじまり⑦で終わる経路の複写を何十億と作製した。あまりにも多量に複写されたため解の「プール」では発現量という面で、この経路がそれ以外の経路を完全に圧倒した。この規則にあてはまらない経路なら、原則的に没となった。

●規則の2 (b) : どの経路も全部正しい数の節点を必ず一度だけ通るというものである。これは、正しい経路が始点と終点とを含めて、順序は問わないが、七節点の長さになるということである。エードルマンは、前の段階で残った経路一式をとって、分子のスパゲッティソートを実施し、節点七つ分の長さをもつ経路に相当する鎖を残した。

●規則の2 (c) : グラフの各節点が一回登場する必要がある。今、手もちにあるのは①にはじまり⑦で終わり、七つの節点からなる経路である。エードルマンはここで分子の「釣り竿」を用い、プールから何度も経路を取り出した。まず配列のどこかに節点②を含む経路のみを釣り上げることからはじめ、次の段階のために取っておき、残りは節点がひとつ足りないことになるため、捨てられた。釣り上げられた経路を残らず別のプールに入れると、そのプールから、配列のどこかに節点③を含む経路をつり上げた。再度このような経路を取っておいて残りを捨て、節点④、⑤ および⑥ に関して、この工程を繰り返した。この段階が終了した時点で経路が残っていれば、その経路は基準の全部に当てはまるため、正しいハミルトン閉路をコード化しているはずであることがエードルマンにはわかっていた。実際にも、この実験の最後に、そのような経路が残っていたため、エードルマンには実験が成功したことがわかった。

◆◆ エードルマンのコンピュータ 「TT-100」 ◆◆

[78] =計算にDNA分子を用いる鍵は他の分子と同様に実験室で自由に生成できる点にあった=
 ●エードルマンは、アルゴリズムを実行する媒体としてスパゲッティやトランジスターの集合を用いるよりも、個々の分子を使いたいと思っていた。計算にDNAを用いる鍵は、そのほかの多数の分子と同じように、実験室で好きなように生成できることにあった。

[79] =どうアルゴリズムを実行したのか。『サイエンティフィック・アメリカン』で説明した例＝
●エードルマンがどのようにして自分のアルゴリズムを実行したのか。エードルマンが『サイエンティフィック・アメリカン』誌で説明した例がある。アトランタ、ボストン、デトロイト、シカゴ、の四つの節点を持つ有向グラフが示されている。アトランタから出発してデトロイトで終わりたいものとする。このグラフを一分も眺めれば、アトランターボストンシカゴデトロイトという唯一のハミルトン閉路があることが分かる。

[80] =各都市に<姓と名>の二つの部分からなるDNAの「名前」をつけることから始めた＝
●エードルマンは、各都市に、姓と名の、二つの部分からなるDNAの「名前」をつけることから始めた。アトランタの配列はACTTGCAGとなり、ACTTという名とGCAGという姓から成り立っている。一方、ボストンはTCGGACTG <TCGGの名とACTGの姓> となるなど、各都市に名前をつけた。

[81] =都市にはワトソンクリック型相補体でそのDNA名に特有の相補的なDNA名がある＝
●それぞれの都市には、ワトソンクリック型相補体に基づくそのDNA名に特有の「相補的」なDNA名もある。アトランタの相補的な名前は、TGAACGTCとなる。

[82] =出発地の都市の姓をとり目的地の都市の名をつなげることで各接続に特有の便名をつける＝
●このあと、出発地となる都市の姓をとって、それに目的地の名をつなげることによって、各接続に特有の「便名」をつける。アトランタからボストンへの航空便なら、アトランタの姓のGCAGのあとにボストンの名TCGGを続けることによって、GCAGTCGGという便名になる。

[83] =対応するDNA配列を合成し都市の四本・航空便の六本・計十本のDNA試験管ができる＝
●いずれの都市にも相補的な名前をつけることに加え、各接続には便名を順につけ、対応するDNA配列を合成する。これによって、DNAの試験管が、都市に対して四本、航空便に対して六本、の合計十本できあがり、それぞれが特定の短い一本鎖、ストランドを含んでいる。

[84] =各試験管からの一つまみを一緒にして水・酵素を加えて混ぜると一秒で解答を得ていた＝
●次に、各試験管から「一つまみ」 <それでも10の15乗個の分子が含まれている> をとって、一本の共通試験管に入れ、水・酵素などを加えて、全部一緒によく混ぜる。そして、一秒を過ぎたところで、エードルマンは解答を得ていた。

[85] =共通試験管の中では便名のDNA分子と都市名のDNA分子が偶然に接触し結合が起きる＝
●共通試験管の中では、次のような結合が起こることになる。まず、アトランタ発のボストン便 <GCAGTCGG> をコード化している分子が、ボストンの相補的な名前を表わす分子 <AGCCTGAC> と偶然に接触するかもしれない。接触すれば、このふたつの分子は、ワトソンクリック相補性の配列同士が互いに引き付けられるために、下の左のように結合する。次いで、この分子錯体が、再び無作為にボストン発のシカゴ便配列に出会ったとすれば、ボストンのストランドに、下の中央の様に結合する。更に、順繰りに分子配列がシカゴ発のデトロイト便配列に出会ったとすれば、下の右のように結合することとなる。

[アトランターボストン]	[アトランターボストン]	[アトランターボストン]
[ボストン]	[ボストン]	[ボストン]
	[ボストンシカゴ]	[ボストンシカゴ]
		[シカゴ]
		[シカゴデトロイト]

[86] =何百兆個という分子の相互作用が同時に起きて並列処理で経路の全部が一度に作られる＝
●エードルマンは説明する。「何百兆個という分子の相互作用が同時に起きることによって、このような経路

の全部が一度に作られる。これはものすごい並列処理だ。多くの数のDNA分子ではじめてうえに、グラフが小さかったので、少なくともひとつの分子が、解であるアトランタ-ボストン-シカゴ-デトロイトを通るハミルトン閉路をコード化するであろうことはほぼ確実であった。数学的問題の解法をひとつの分子に収められることは驚きである。」

●エードルマンの説明で注目すべきは「並列処理」という言葉だ。従来の計算用語では、それは「同時に多くのことをする」という意味であり、一般には、それぞれがひとつのタスクをこなすCPUチップを多数用いることによってできる。

[87] =ヒトによる並列処理の例が戦時中のマンハッタン計画でファインマンによって実践された=

●ヒトによる並列処理の実際の例が戦時中のマンハッタン計画でファインマンによって実践された。ジェイムズ・グリックが著書『ファインマンさんの愉快な人生』で述べている。「理論家たちは、計算史上で何か新しいことをしようと計画しはじめた。それは、計算機と工場の流れ作業とを組み合わせたものであった。ファインマンと同僚のメトロポリスは、ひとりが数を三乗して次に送り、もうひとりが除算をするなど各自で複雑な方程式を解く人々をずらりと並べた。数値計算に結びつけた大量生産であった。何列にも並んだ女性が、コンピュータ内部の仕組みをシミュレートしていた。

[88] =分子全体のランダム運動の並列処理によってブラウン運動によるコンピュータを実践した=

●エードルマンの実験では、どれもがみな互いにぶつかり合い明確な規則に従って選択的に接合する無数の分子それぞれによる全体のランダム運動によって並列処理が実現される。この意味では、エードルマンは、1982年にベネットが予測したブラウン運動に基づくコンピュータの縮小版を実践したことになる。

[89] =解である、始点がアトランタで終点がデトロイトの経路の量をPCR法で大きく増幅した=

●エードルマンは、DNA分子の並列処理によって解の可能性のある経路を試験管に得ると、次の段階ではアトランタにはじまりデトロイトで終わる経路のみを大きく増幅し、これ以外の経路をはるかに上回る量となるようにした。PCR〈ポリメラーゼ連鎖反応〉法を用いて、試験管でDNA複製を実施し、アトランタにはじまりデトロイトで終わる経路のみを大きく増幅したのだ。

=====

◆◆ジェームス・D・ワトソンほか著=青木訳『DNA』（O3講談社）◆◆

◆PCRを発明したのは、当時シータス社の社員だったキャリー・マリスである。マリスはPCRの発明により1993年にノーベル化学賞を受賞した。

◆PCRの手続きはとても簡単だ。まず化学的な方法により、DNAの複製したい部分の両端にある塩基配列と同じプライマーをふたつ作る〈プライマーとは、二十塩基ほどの長さの一本鎖DNAのこと〉。

次に、組織のサンプルから抽出した鋳型DNAに、そのプライマーを加えてやる。この鋳型にはほぼゲノム全体が含まれている。目標は、欲しい領域のサンプルを大量に増幅させることである。DNAの二本鎖は95度に熱せられるとほどけだす。それぞれのプライマーは、ほどけた鋳型DNAのうち、自分と相補的な配列のところにくっつく。こうして鋳型DNAの一本鎖の途中に、二十塩基対ほどの小さな二本鎖の領域がふたつできることになる。

◆DNAポリメラーゼという酵素は、DNA鎖に沿って塩基対を相補的に挿入することでDNAを複製するが、DNAが二本鎖になっている位置からしか複製を開始することができない。したがってDNAポリメラーゼは、

プライマーとそれに相補的な鋳型がくっついて二本鎖になったところから複製を開始することになる。ポリメラーゼはふたつのプライマーの位置から鋳型 DNA の相補的コピーを挿入していくから、結果的に、目的の部分が複製されることになる。

◆このサイクルが一周すると、目的の DNA 配列は二倍になっている。そこでふたたびサンプルを加熱し、同じことを繰り返せば、プライマーに挟まれた部分はさらに二倍になる。これを繰り返すたびに、目的の領域は二倍ずつ増えていく。PCR を 25 回繰り返せば、二時間もしないうちに目的の DNA を 2 の 25 乗倍（約 3400 万倍）に増やすことができる。鋳型 DNA、プライマー、DNA ポリメラーゼ、そして四種類の塩基から出発して、目的の DNA 領域を大量に含む溶液が得られるのである。

◆当初、PCR の大きな課題だったのは、95 度では DNA ポリメラーゼが壊れてしまうことだった。そのためサイクルを繰り返すたびに、この酵素を新たに加えてやらなければならなかった。ポリメラーゼは高価なので、PCR は強力な方法だが、高価な酵素を破壊するプロセスが含まれている限り、費用の面で現実的でないことがすぐに明らかになった。しかし幸運なことに、自然が救いの手を差し伸べてくれた。

◆この酵素は初め大腸菌から採られていたが、大腸菌は 37 度という温度に適応している。しかしそれよりもずっと温度の高い環境に生息している生物がたくさんあり、それらがもつタンパク質は、DNA ポリメラーゼを含め、長い年月をかけた自然選択によって高熱にも耐えられるようになっているのだ。今日 PCR には、テルムス・アクアティクスという、イエローストーン国立公園の温泉に棲む細菌から採った DNA ポリメラーゼが使われるのが普通である。

=====

[90] =PCR 法は DNA 配列を単離して増幅する仕事を簡単化し関係者に絶大な影響を与えた=

●対象とする DNA 配列を単離して増幅する技術といえば、以前は、DNA 配列を細菌に組み込んでクローン化することであり、分子の複製を菌に頼っていた。技術者が DNA を収穫するのに、時間が長くかかったし、DNA を細菌に植え込むことがうまくいかないこともあった。1990 年の『サイエンス』誌の記事には、「わずか二年ほど前、研究者たちにとって生物試料の大量の遺伝子から特定の DNA 部分を多量に得ることはきわめて骨の折れることであった。PCR 法は、その仕事を簡単にすることによってゲノムの解読に携わる研究者をはじめ、エイズ研究者、進化生物学者、診断医や法医学者に至るまで絶大な影響を与えている。」と説明されている。

[91] =初期解答の非ハミルトン分子を取り除くため正しい始・終点の DNA 鎖のみを大増幅した=

●エードルマンは、山ほどのランダムな初期解答を得ると、アルゴリズムの各規則をあてはめていった。山ほどのランダムな初期経路を得たあとでは、非ハミルトン閉路をコードしている分子が 100 兆個もあり、このような分子を取り除かなければならなかったからだ。エードルマンは PCR 法を用いてアトランタにはじまりデトロイトで終わる DNA 鎖のみを大量に増幅したのだ。

[92] =PCR 後には、多くの正しい始・終点の分子と少数の正しくない始・終点の分子を得た=

●PCR 法を実行したあとに、試験管に試料を取れば、エードルマンは正しい出発都市と正しい終着都市とをコードした多数の複製された分子と、ごく少数の規則の 2 (a) に当てはまらない分子を得ることになった。

[93] =ゲル電気泳動法のスパゲッティソートで四都市分に相当する長さの分子鎖のみを残した=

●規則の 2 (b) に進む。エードルマンは、前の段階で残った経路一式をとって、分子のスパゲッティソートを実施し、アトランターボストン-シカゴ-デトロイトという節点四つ分の長さをもつ経路に相当する鎖を残

した。エードルマンが並べ替えに用いた方法は、ゲル電気泳動法といわれるものだった。

[94] =親和性精製による分子の魚釣りで各節点の存在を確認した後に目指すストランドが残った=
●規則の2 (c)。このアルゴリズムの最終段階は分子の魚釣りである。エードルマンが分子を釣り上げるのに用いた手法は、親和性精製と呼ばれ、自然界で最も強い接着力を持つピオチンとアピシンという分子を利用したものであった。この工程によって、全都市の名前を含む一本のストランドを探し出せば、それが必ずハミルトン閉路をコードしていることがわかっていて、エードルマンは、ゲルをベースとしたDNA 配列決定方法を用いて、最終的に手元に残ったストランドが期待した経路をコード化していることを確認した。

[95] =DNA はアルゴリズムを実行しているのではなく小型化された分子メモリの役割を果たす=
●ハミルトン閉路の計算は、初めのストランド数兆個を混合するや否や、ほぼ即時に終わったのであった。ストランドが自己組織化して多くのさまざまな構造を作り、少なくともそのうちひとつが正しい解答をコードしていた。正しい解答を周りの騒音から読み出すのは一苦労であり時間のかかる仕事であった。大切な点は、DNA がアルゴリズムを「実行」しているわけではないことである。DNA は単にきわめて小型化された分子メモリの役割を果たし、このメモリ上で多くのさまざまな生物学的工程が行われていると考えられる。

[96] =DNA 計算の基本は「この特定の配列を含むストランド全部を保持して残りは廃棄する」=
●アルゴリズムないし「プログラム」は、DNA の「メモリ」上で実行される一連の操作としてコード化される。シリコンチップ内の基本動作が「このメモリセルの内容がゼロであればこの場所に飛び」ことであるように、DNA 計算の基本は「この特定の配列を含むストランド全部を保持して残りは廃棄する」ということになろう。

[97] =エードルマンの仕事が真に画期的であったのは分子コンピュータの原理を証明したことだ=
●エードルマンはメモリの設定を十分にすることからはじめ、実験室での操作からなる生物学的プログラムをつなげることによって、動作の中心で分子操作を利用する計算機、「ファインマン・マシン」の最初の本物の具体例を創りあげた。大切なのは問題への解答ではなかった。真に画期的であったのは、分子コンピュータの原理を証明したことであった。

[98] =1994 年のエードルマンの論文「組み合わせ問題の分子計算による解法」は反響を呼んだ=
●エードルマンは、実験に用いた 100 マイクロリットルの試験管にちなんで新しい「コンピュータ」を「TT-100」と命名した。エードルマンの論文「組み合わせ問題の分子計算による解法」は 1994 年 11 月 11 日の『サイエンス』誌に登場して、すぐに反響を呼んだ。同じ誌上で、デイビッド・ギフォードは、エードルマンの実験が「コンピュータ科学と分子生物学に関するわれわれの考え方を根本的に変えるであろう」と述べている。

=====

◆ 『 Introduction to Computational Molecular Biology 』 SETUBAL / MEIDANIS ・ 97 ◆

9. COMPUTING WITH DNA

この本を通して、われわれは分子生物学における問題解決を手助けする多くのアルゴリズムを見てきた。この章では、困難なアルゴリズムの問題を解決するために分子生物学をどのように用いるか、という（これまでの章とは）反対の方向にむかう驚くべき結果を提示する。これらの結果は、DNA コンピューティングと呼ばれる刺激的な新しい分野を創り出している。その最終的な目標は、非常に効率的な生体分子のコンピュータを創り出すことである。まだ実用的な分野

からは遠いが、欠点のひとつひとつに熱心な研究が傾けられており、近い将来に新たな発展が生まれるのは確かである。

9.1 THE HAMILTONIAN PATH PROBLEM

◆この節でわれわれは、実験室で DNA 分子を用いて、有向グラフのハミルトン閉路問題をどのように解決するのか、を記述する。それは、実験の手順がグラフの頂点の数と共に線形的に増加するという方法を用いている。

◆ハミルトン閉路問題が NP 完全であるという 2.3 節の記述を思い起こしてほしい。

2.3 節：・・・

◇ 理論コンピュータ科学者の主な仕事のひとつは問題を二つのクラスに分類することである。

一つは、<クラス P に属する>効率的なアルゴリズムが存在する問題で、

もう一つは<複雑性解析として知られる>そうしたアルゴリズムが存在しない問題だ。

◇ 不幸にして、まだ分類の決まっていない、非常に重要な問題のクラスがあるのだ。

これまでのところ誰もそうした問題の効率的なアルゴリズムを発見できていないが、誰も効率的なアルゴリズムが存在しないとは証明していない。これらの問題が NP 完全の問題なのだ。

◇ NP 完全の問題は、NP のクラスに属する。NP は解決法が見つければ（解が）多項式時間内に確認することのできる問題のクラスである。NP は、また（一つの）部分集合として、クラス P を含む。

◇ NP 完全の問題は、きわめて厳密な意味で、クラス NP の中で最も困難な問題である。

・・・

◆（ハミルトン閉路問題は NP 完全であるのだが、実験の手順がグラフの頂点の数と共に線形的に増加するという。）この方法が、 $P=NP$ であるという証拠にはならない。なぜなら、本質的にこの方法は、指数関数的な数の手順を総当りで遂行するアルゴリズムであるからだ。

◆ この方法を用いると、実験の手順がグラフの頂点の数と共に線形的に増加するようにできるというのは、この方法では、実験の手順の一番最初に、指数関数的な数の手順が並列的に処理されるという事実があるからだ。

◆ 定式化すれば、解決すべき問題はこうになる。 $|V|=n$, $|E|=m$ （訳注：V は頂点で、E は辺）であり、2つの区別された頂点、s および t （訳注：s は始点で、t は終点）のある、有向グラフ $G=(V, E)$ が与えられたとする。そのグラフが、長さ<辺の数>が $n-1$ で、かつ、すべて別の頂点を通る、一つの行路 $\langle s, v_1, v_2, \dots, t \rangle$ を有するか否かを立証せよ。・・・

◆ 総当りのアルゴリズムというのは非常に簡単だ。正確に $n-1$ の辺をもつ、全ての可能な行路を生成せよ。そして、その中の一つが問題の制約に従っていることを立証せよ。

◆ そのような行路には、最大 $(n-2)$ の階乗の数がある。何となれば、そのような行路の最初の頂点で、われわれは、 $(n-2)$ の数の頂点を選択でき、二番目の頂点では、 $(n-3)$ の数の頂点を選択できる。以下、同様に続き、階乗の組み合わせを生じることになるからだ。

◆ 下に提示する方法の場合には、上記のような形で行路が生成されることはない。むしろ、最初の段階で、膨大な数のランダムな行路が創り出される。行路がランダム生成されているという事実は、一つ一つの行路が、他の全ての行路からは独立に、生成されることを可能にしているのだ。これが故に、全ての行路が同時に創り出され得るということだ。その完全なアルゴリズムは、次のようになる。

1. ランダムな行路を生成せよ。

2. 前の段階で創り出された全ての行路から、s で始まり、t で終わる行路だけを残せ。

3. 残っている全ての行路から、正確に、n 個の頂点を通っているものだけを残せ。

4. 残っている全ての行路から、各頂点を、少なくとも一度通っているものだけを残せ。

5. 何らかの行路が残っていれば、「行路あり」と答えよ。そうでなければ、「行路なし」と答えよ。

（抜粋・英文和訳の文責：福永征夫）

=====

(2) 東京大学の 陶山 明 先生に『DNAコンピューティング—越境するDNA—』と題するご講演をいただき、斯界の最先端の研究の動向に触れることができました。

以下には、ご専門の八尾 徹 氏にお願いをし要約していただいた、陶山 明 先生の講演の概要を掲載します。

=====

陶山明先生に「DNA コンピューティング」のお話をして頂きました。

1994年にL・Adlemanが「最初のDNAコンピュータ」をサイエンス誌に発表して急に盛り上がった機運が、そのあと世界的に低迷し、今は徐々に着実に進歩している状況にあるとのこと。

その中で、陶山グループは、生命体はDNAコンピュータであるという見方と、DNAコンピュータの目指す道は電子コンピュータでは原理的に扱えない問題を処理するためのコンピュータであるという考えの下に、新たなコンセプトで次の2種類のDNAコンピュータを開発してきました。

一つは、2002年に発表したハイブリッドDNAコンピュータです。これは、計算全体の中で高い並列性を必要とするところはDNAの分子反応で、その他の逐次処理が主であるところは電子コンピュータで処理を行うハイブリッド型のDNAコンピュータです。AdlemanのアドホックなDNAコンピュータと違って汎用型のDNAコンピュータであるため、複雑なアルゴリズムを実装したプログラムを実行することができます。

もう一つは、2004年に発表した自律型DNAコンピュータRTRACS (Reverse-TRanscription and TRanscription-based Autonomous Computing System) です。これは、生体がDNAとRNAを使い分けていることに着目して考案した自律型のDNAコンピュータです。化学的に安定なDNAは計算全体を通して不変であるプログラムの記述に使われ、化学的に不安定で分解され易いRNAは変数の記述に使われています。すなわち、DNAが状態遷移ルールを、RNAが状態変数を与えることによって自律的に計算処理を行うDNAコンピュータです。RTRACSは現在も開発が続けられています(Phys. Rev. E, 78, 041921, 2008)。RTRACSは、生体と親和性が高だけでなく、これまでの電子コンピュータに比べて非常に小さいので、細胞内に入れて働かせることができる潜在能力を持っています。細胞内の仕組みを研究する有力な道具となり得ると同時に、インテリジェントな薬として動かすことができる可能性があります。

DNAコンピュータにより実現されるDNAコンピューティングは、分子が持つ情報をデジタル化せずに直接入力して処理できるという、電子コンピュータにはない優れた特徴を持っています。この特徴を利用して生体情報を解析するDEAN (DCN-Encoding Analysis) 法を、JSTのグラントを得て開発しています。DEAN法は、ハイブリッドDNAコンピュータでもRTRACSでも、あるいは、マニュアル操作でも使うことができます。

さらに、DNAコンピューティングは分子が持つ情報の直接入力だけでなく、計算結果も分子として直接出力することができます。これらの特徴を応用して、最近「ナノデバイス遺伝子」及び「DNAインキ」を開発しました。前者は、ナノ部品をアセンブルするための二次元格子の足場をDNAに書かれた設計図に基づいて作るもので、今後多くの応用が考えられます。後者は、2007年に一応完成し、微量で真贋判定や食品検査の分析が出来ると期待されましたが、測定時間がかかることが難点でした。それが最近時間短縮に成功し、明るい見通しが立ってきたところです。

このような新しい技術は、実用までに多くの難関があります。まず新しいブレークスルーの内容とその大きな展開可能性を正しく認識してもらう必要があります。またその中核技術を発展させるためにいくつかの新たな課題（例、効率・安定性など）を解決しなければなりません。資金と人材と期間が必要になります。これらを育てる土壌が必要でしょう。

以上、陶山さんのご講演の概略を若干の私見を交えてまとめてみました。（八尾記）

=====

（3）各界、各分野の皆様の積極的なご参加をお願いします

既存の領域的な知識をベースにして、新たな領域的な知識を探索し、それらを広域的に組み換えて、より高次の領域的な知識を仮説形式的に創造することを目標に、アブダクション研究の飛躍を期して参りますので、各界、各分野の皆様の積極的なご参加をお願いします。

記

◇ 日 時： 2010年11月27日（土） 13:00～17:00（例会）
17:15～19:15（懇親会）

◇ 場 所： 日本電気企業年金会館 2階和室（中山氏のお名前で申し込み）

東京都 世田谷区 代沢5丁目33-12 電話：03-3413-0111（代）

- * 当日の連絡先（岩下幸功・携帯電話）070-5541-4742
- * 小田急線／京王・井の頭線 下北沢駅 下車 徒歩約8分
- * 会場の地図は、グループメールのブリーフケース内「下北沢 NEC 厚生年金基金会館 MA p」に記載。 <http://groups.yahoo.co.jp/group/abduction/files/>

◇ テーマ： 研究発表

『 N・ウィーナーに学ぶ <サイバネティクス> とアブダクション 』

飯塚道夫氏（永井国際特許事務所・弁理士）

◆ 文 献： N・ウィーナー著＝池原・弥永・室賀・戸田共訳＝「サイバネティクス」

第2版 (88 岩波書店)

◆ N・ウィーナーには、「サイバネティックスはいかにして生まれたか」(02・みすず書房)、
「人間機械論」(99・みすず書房)もあり、参考になります。

◇プログラム:

- | | | |
|---------------|----------------------|-------------|
| (1) 開会諸連絡: | | 13:00~13:10 |
| (2) 研究発表: | < PART 1. > | 13:10~14:25 |
| | 休 憩 | 14:25~14:30 |
| | < PART 2. > | 14:30~15:45 |
| | 休 憩 | 15:45~15:50 |
| (3) 総合的な意見交換: | | 15:50~16:50 |
| (4) 閉会諸連絡: | | 16:50~17:00 |
| (5) 懇 親 会 : | <皆様の積極的なご参加を期待しています> | |
| | | 17:15~19:15 |

第76回 アブダクション研究会 (11/27) の出欠連絡

●11/22 (月) までの返信にご協力下さい。ご連絡なしの当日出席も無論可ですが、会場や資料の準備の都合もありますので、できるだけ、ご協力くださるようお願いいたします。

FA X: 042-356-3810
E-mail: abduction-owner@yahooroups.jp 岩下 幸功 行

出 席	出 席
●11/27 (土) の 研究会に、未定ですが 調 整 します。 ●懇親会に、未定ですが 調 整 します。	
欠 席	欠 席

☆ 出欠の連絡は、グループメールメニューの「投票」コーナーから行うこともできます。
<http://groups.yahoo.co.jp/group/abduction/polls>

* 次々回第77回アブダクション研究会は、2011年1月29日(土)に開催いたします。

* 2011年1月の研究会は、尾上 彰 氏に、『ゲーデル、エッシャー、バughとアブダクション』(仮題)のテーマで、ご発表をいただきます。

* 大いにご期待をいただき、奮ってご参加ください。

ご署名 _____

<定例アンケート調査>

もしご協力がいただければ、という趣旨であり、必須ではありません。

皆様のメッセージ集として他の会員にも伝達しますので、情報の交流に積極的に参画下さい。

- (1) 今、アブダクションの研究・実践と関連のある事項で特に興味をもって取り組んでおられること。
- (2) 研究会の議論の場を通してINTERSECTIONALなアイデアや知見のINCUBATIONが進んでおり、例会で発表したいと思っておられること。
- (3) これまで(第1回~第75回)の研究発表やなされた議論(「議事録」を参照下さい)に関して、さらに改めて質疑や意見を表明したいと考えておられること
- (4) アブダクションの観点から、注目すべき人・研究グループ・著書(古今東西不問)。
- (5) 細分化された「知」の再構築を図るという視点から、注目すべき人・研究グループ・著書(古今東西不問)。
- (6) 貴方ご自身がお考えになられている「知」の定義とは?
- (7) その他のご意見、ご要望、連絡事項など。

特に他学会・研究会での発表内容や発表論文等についても是非お知らせ下さい。

.....

.....

.....

.....

.....

.....