

アルゴリズムのパワーと限界

リチャード・マニング・カーブ

本日は講演の機会を与えていただき、大変光栄に存じます。私の生まれ育った環境、受けてきた教育、コンピュータ科学者の道に私を導いた出来事、そしてこれまでに私が下してきた様々な決断などについてお話ししたいと思います。私は、コンピュータの発明後に大人になった最初の世代の一人です。学校教育を受けていた時期は、科学分野への大幅な支援強化策をアメリカが打ち出していた時に符合します。私は二つのすばらしい大学と優れた民間の研究所で仕事をする機会に恵まれました。私より前の世代の研究者は、これほど恵まれた環境を得ることはありませんでした。あと数年早く生まれていれば、おそらく今とは全く違った、そして間違いなく今より満足感に欠けるキャリアを歩んできたであろうことは想像に難くありません。

家族

私の家族は、マサチューセッツ州ボストンにあるドーチェスターという町に住んでいました。写真はドーチェスターの典型的な通りの冬景色です (Fig. 1)。私たちはこれとそっくりな通りに住んでいました。ドーチェスターは人種によって居住地区が分かれていて、私たちの街区は、私の家族を含めてほとんど全員がユダヤ系でした。住まいは小さなアパートで、私は三人の弟や妹と一緒に一部屋を使っていました。

私が成長する過程で一番大きな影響を与えてくれたのは、母でした。母は高校卒業後に就職しましたが、その後、夜間コースに長年通い、57歳でハーバード大学から学位を授かりました。子どもの教育を常に一番に考え、私の学校の成績が良かったことをとても誇りにしてくれました。また、家計は楽ではありませんでしたが、富そのものに価値があるのではない、ということも母は教えてくれました。

父は、ハーバード大学の出身でした。上品で慎ましく、近所の人からも広く慕われていました。元々は医学部を志望していたようでしたが、金銭的な理由でそれを断念して学校で数学を教えるようになり、最終的には学区の教育長まで務めました。教員の給料だけで

は十分ではなかったので、父は家庭教師をしたり、食料品店でアルバイトをしたり、百科事典のセールスをしたりと、様々な副業により一家を支えてくれました。

まだ小さかった頃、父の授業を見学したことがあり、その時のことは今でもよく覚えています。父は黒板にフリーハンドで、ほとんど完璧な円を描くことができました。後に、私だけではなく、弟のデイビッドや妹のキャロリンが教師になったのも決して偶然ではないと思います。デイビッドは社会学の教授で、キャロリンは英語の教諭です。私たちは父をお手本にして育ったのです。

両親はすでに亡くなってしまったのですが、母の一番下の妹である叔母のフィリスが、今日ここに来てくれたことを私はとても嬉しく思っています。叔母は私の子守をしてくれました。また、一緒に遊んだり勉強を教えてくれたり、本の読み方や自転車の乗り方も教えてくれました。

残念ながら、妻のダイアナと息子のジェレミーは、私と一緒にここに来ることができませんでしたが、彼らの存在なくして私の人生はこれほどまでに豊かで満ち足りたものとはならなかったでしょう。ちなみに、ダイアナはサンフランシスコ近代美術館でガイドを、ジェレミーはブランダイス大学で優等学生として経済学と心理学を学んでいます。

子どもの頃の思い出

私はおとなしい、静かな子どもで、よく本を読んでいた。古代ギリシャや『マルコ・ポーロの冒険』、カウボーイとアメリカン・インディアン、そしてアメリカの独立戦争についての本などが、今でも印象に残っています。詩も好きで朗読を楽しみました。また、地元の野球チーム、ボストン・レッドソックスの大ファンでした。海水浴に行ったり、自転車に乗ったりするのも好きでした。祖父が経営していた近所の食料品店で配達のアバイトをし、冬はそりに商品を載せて運んだりもしました。

学校の勉強は良くできましたので、他の子どもたちより早く学校に進み、飛び級もしました。その結果、クラスメートよりも年齢が下で、習字や図画工作といった、手先の器用さを必要とする教科では他の子どもたちに遅れをとっていました。今でもこうした作業には自信がなく、研究所でもずっと苦手にしてきました。

得意な科目はラテン語と数学でした。ラテン語が好きだったのは、文法の構造が論理的だったからです。10歳の時、「ボストン・クイズ・キッズ(Boston Quiz Kids)」というラジオ

番組に何度か出演したことがあるのですが、そこでは数学パズルを得意にしていました。その後、13歳で平面幾何学に出会い、そのパワフルかつエレガントな証明に魅せられた私は、仮病を使って学校を休み、家で幾何学の問題を解いたりしていました。

科学者を志望

私がハーバードに入学した頃は、科学分野の中では物理が最も人気があったのですが、自分は特に物理に向いているとは思えず、数学の方がぴったりくる感じがしていました。ところが、本格的に数学をやり始めたのは良いものの、当時のハーバードには、後にフィールズ賞やノーベル賞を受賞するような特段の才能を持った学生が在籍していたため、私の影は薄くなってしまいました。これにはいささか気落ちしましたが、確率論の先生であるハートリー・ロジャーズ教授が、そうした私を熱心に励ましてくれました。当時、私が特に関心を抱いていたのは、離散数学や離散確率といった学問を、野球の戦略やギャンブルのシステム、ゲーム理論などでの意思決定に応用することでした。当時、こうしたテーマは数学界の主流ではなく、数学担当の教授の多くもほとんど関心を示しませんでした。しかし、こうしたテーマは最近ますます大きな注目を集めるようになっていきます。

この頃にはコンピュータに秘められた大きな潜在力が明白になりつつあり、私はハーバードの計算研究所で博士号を取ろうと決心しました。1957年のスプートニク・ショックで、技術分野にもブームが訪れていました。夏休みに興味深いアルバイトに就くことができた私は、そこでちょっとした成功を収め、ひょっとしたら自分もひとかどの人物になれるのではないかという思いが芽生えてきました。

博士号を取ってすぐに、幸運にも数理科学の研究者として IBM のトーマス・J・ワトソン研究センターに採用された私は、優秀な仲間と一緒に研究活動に没頭する自由を与えられました。当時、まだ数学者として一人前とは言えなかった私は、IBM で私の指導担当であった数学者のアラン・ホフマン氏との対話から多くのことを学びました。ホフマン氏は、組合せ数学について多くを語ってくれただけでなく、私の能力を信じてくれていました。また、ホフマン氏自身が数学の美しさを深く楽しんでいる様子を見聞きし、また、そうした喜びを分かち合うことへの氏の熱意に接する中で、教育・研究に対する自分なりのアプローチが固まっていきました。さらに、ランド研究所、プリンストン大学、米国国立標準局といったところで、意思決定問題への離散数学の応用に先駆的な仕事をしたすばらしい数学者

と知り合うこともできました。

IBM 在籍中は、ニューヨーク市内の複数の大学の夜間クラスで教えていました。そこで私は、講義の準備として新しい教材の予習をすることや学生との交流など、教えるという行為に関わるすべての事柄が好きでたまらない自分に気づきました。大学教授は自分の天職であるという考えが頭をもたげてきたのは、ちょうどこの頃でした。

アルゴリズムに対する思い

また、この頃には、アルゴリズムの研究が自分のライフワークになるであろうと考えるようになっていました。アルゴリズムとは、特定の問題を解くための体系的な計算手順のことを言います。最も身近なアルゴリズムというのは、学校の算数でも取り上げられるようなものですが、実はアルゴリズムは至るところに存在します。例えば、情報処理に関するあらゆるアプリケーションの中心となるのがアルゴリズムです。検索クエリの処理であれ、ネットワークを介したメッセージのルーティングであれ、ネットオークションであれ、アルゴリズムはその中核をなしています。電子商取引の基礎となるすべての暗号化プロトコルの中心にもデータの暗号化を行うアルゴリズムが存在するのですが、そのアルゴリズムの中にも、ある数が素数であるか否かを判定するための別のアルゴリズムが存在しています。そうしたアルゴリズムは数行で書き表すことができますが、非常に緻密であり、それがなければ現在のようにインターネットを使ってビジネスを行うことはできなかつたでしょう。

第 12 回(1996)京都賞を受賞した偉大なコンピュータ科学者、ドナルド・クヌース氏は、計算プロセスの構造を注意深く考えることに大きな美的喜びを見出すようなタイプの人々を、世間に認めさせることに成功しました。自分もそうした種類の人間であると自覚した瞬間のことは、今でもよく覚えています。それは、私の学友だったビル・イーストマン氏が、割り当て問題を解くための、いわゆるハンガリアン・アルゴリズムを示した時のことでした。ハンガリアン・アルゴリズムは、(得られる利益を最大にするように)労働者に仕事を割り当てるといふ、古典的な割り当て問題を解くためのアルゴリズムのことです。このアルゴリズムでは足し算と引き算以外の計算は一切行わず、そのエレガントなまでの簡素さに、私はすっかり心を奪われてしまったのです。しかも、このアルゴリズムを使えば、少ない計算ステップで解を見つけることが可能なのです。

アルゴリズムに最初に要求されることは、その正確さです。つまり、なすべきことがきちん

となされるということです。それに加えて、効率的でなくてはなりません。アルゴリズムの効率やコストを測定する際に我々が主に用いるのは、実行にかかる時間、荒っぽく言えば、基本ステップの数です。こうした物差しに照らし合わせてみて効率的と呼べるアルゴリズムを考案するために、私はかなりの時間を費やしてきました。

私が初めてアルゴリズム作りに挑戦したのは、まだ子どもの頃でした。当時、父が校長をしていた関係で、毎年秋に新しい学年が始まる前に、様々な制約を同時に満たした時間割を作らなければなりません。この教室、この時間でないとだめ、という授業や、一緒のコマに設定してはいけない組合せがあつたりするだけでなく、この曜日はだめ、という先生もいらっしゃいました。父は授業名を書いたインデックスカードの束を取り出して台所のテーブルに広げ、シャッフルをし始めました。残念ながら、私は大した力にはなれませんでした。莫大な数の理論上可能な時間割から、こうした条件すべてを満たすものを見つけ出す作業は、困難を極めました。このような作業は、ちょうど干草の山から一本の針を探し出すようなものです。この問題の攻略法として私が唯一思いついたのは、試行錯誤による探索作業でした。

この種のパズルのような問題、すなわち、莫大な数のパターンや配列の中から条件に合うものを探し出すという問題は、すべての科学分野、そして人間の活動のあらゆる領域で見ることができます。これらの問題を解く方法は、社会資源の効率的な活用に欠かせないツールとなります。例えば、工場における作業計画、コンピュータチップ上の部品の配置や配線、インターネット上でのメッセージや電力網を介した電気のルーティング、ヒトゲノムの配列決定などです。私の研究は、こうした組合せ探索問題に対する有用なアルゴリズムを構築して、その基本的な限界を明らかにすることにより、それらすべての分野に貢献しています。

複雑性

組合せ探索問題の解の中には、驚くほど簡単なものもあります。道路網のある地点から別の地点まで移動する際の最短ルートを計算するための効率的なアルゴリズムは、衛星技術を利用したカーナビゲーションシステムの基盤技術となっています。しかし、ほとんどの組合せ探索問題では、このように簡単な解は見つかりません。問題の記述の複雑度が増すにつれて、指数関数的に増大する計算リソースを求めているようでもあります。

一般に、商業、物理科学、工学、そして人文科学や社会科学の分野で生じる、時間割問題のような組合せ問題を解くのは非常に困難です。それぞれの授業を時間割に当てはめていく作業と同じように、配列の方法は膨大になります。しかし、すべての条件を満たしてくれるものは一握りしかありません。そこで、近道はないのか、ということが問題となります。一部の問題に対しては、巧妙かつ効果的なアルゴリズムがありますが、現実的な問題のほとんどでは、そのようなアルゴリズムは存在しないように思えます。小さなサイズの問題であれば解けるかもしれませんが、しかし、サイズが大きくなり、例えば、割り振らなければならない授業の数が増えたりすると、たとえ最高のアルゴリズムを用いたとしても計算の実行時間が爆発的に増える傾向にあります。すなわち、問題のサイズをほんの少し大きくただだけで、大雑把に言えば、実行時間は倍々に増えていくのです。

1960年代のIBM在職中は、コンピュータデザインやオペレーションズリサーチにおける組合せ問題の応用を数多く扱っていらしたので、計算におけるこのような組合せ爆発という問題には何度も苦い目に遭わされました。米国国立標準局にいた、慧眼な研究者、ジャック・エドモンズ氏との対話に刺激を受けた私は、こうした実行時間の指数関数的増大は、本質的に不可避な問題かどうかについて考え始めました。

さらに私は、計算の効率に対する基本的かつ本質的な限界を研究するコンピュータ科学の一分野である、計算複雑さの理論の進展についても注意を払っていました。物理学にエネルギー保存則や熱力学の法則、ハイゼンベルクの不確定性原理などの基本的法則があるように、計算複雑さの理論においても、計算効率に関する基本的かつ本質的な限界の確立に向け、現在、研究が続けられています。計算複雑さの理論によって、アルゴリズムの計算時間における組合せ爆発が説明できるか、という問いに到達したのは半ば自然の成り行きでしたが、その頃の私にはこうした問題を解明できるだけの用意はまだできていませんでした。

教授職に

1968年、私は、カリフォルニア大学バークレー校から教授職のオファーを受けました。IBMで研究を行うのは大変な名誉でしたし、そこでの研究は私自身にとって、コンピュータ科学者、そして数学者としての成長には欠かすことのできないものでした。この身を天職に捧げる時が来たのです。

1960年代後半のバークレーは、当時の社会変革の最前線にありました。ベトナム戦争の激しさは頂点に達しており、私が着任して間もなく、カンボジア侵攻に対する大規模な抗議活動がいくつも起こりました。学生がキャンパスを封鎖してしまったので、自宅で何度か授業を行ったのを覚えています。また、反戦を掲げた不法抗議行進に参加したことで逮捕された同僚の釈放を求めて、保釈金を支払ったこともあります。

当時、バークレーのコンピュータ科学関連組織も大荒れの状態でした。コンピュータ科学者の多くは電気工学科を活動の拠点としていたのですが、そのうち何人かは文理学部の下で新しい学科を立ち上げるために、電気工学科を去りました。この二つの学科が張り合うことは学問的にも社会的にも健全とは言えませんでしたので、大学側はこれらを一つにまとめて電気工学科内に置きました。私はこうした騒動のほんの数年前に大学に移ってきたばかりで、いずれのグループにも与していなかったため、経験不足は承知の上で新しい組織の長に選ばれることとなります。私は根っからの管理者タイプという訳でもありませんでしたし、また、在任期間も短かったのですが、事態を沈静化させるために一肌脱ぎ、新たな枠組みに対する承認を関係者から取り付け、再び一緒になって研究活動に邁進することを承知してもらったのです。

こうして学内の政治問題が一件落ち着いたバークレーは、コンピュータ科学に関する一大学科を立ち上げる準備を開始しました。バークレーでは常に、理論コンピュータ科学を専攻する学生のコミュニティがあり、皆、協調心と熱意に満ちあふれています。バークレーが理論面で成功を収めることができたのは、マニュエル・ブルム氏の存在に依るところが大きいと言えます。彼は、バークレーで私が最も親しくしていた25年来の同僚ですが、彼からは出来の良い学生だけではなく、すべての学生に敬意を持って接することを学びました。また最良の教授法とは、学生が自ら発見を行えるように導くこと、そして自身の研究に関しては、単に技術的な進展だけでなく、幅の広い、統合的なコンセプトを中心として研究を組み立てることの大切さを学びました。

教えることの喜び

教えることは、私のキャリアを通じて最大の喜びの一つです。他者の人生に影響を及ぼす行為としては、最も意義のあるものだと思います。まず、教材を一通り自分でマスターし、そこから首尾一貫した講義を組み立てる、という作業は本当に楽しいものです。こうした作

業は、私にとっても大切な学びの場となりました。講義では自分の個性を表現することもできますし、私自身が経験したことや普段考えていることを学生の前で披露することもできます。そして、常に新しい世代の学生たちとつながりを持つことができます。

また、研究室の才能ある学生を指導し、手本となる機会もかけがえのないものです。私は、これまで 41 名の博士の誕生を見守ってきましたが、大学や民間の研究所において第一線で活躍する者、起業した者、学会を牽引する者など、そのキャリアは多岐にわたります。彼らの中には、線形プログラミングに関する有名なアルゴリズムを発明した者、経済学とコンピュータ科学という二つの異なる分野の架け橋となった者、インターネット上でのデータ配信に関する画期的な手法を開発した者、コンピュータネットワークのリソースを効率的に共有するメカニズムを編み出した者、そして計算分子生物学に重大な貢献を行い、この分野で私の研究仲間兼アドバイザーとなった者もいます。こうした元教え子たちとは今でも連絡を取り合い、彼らの家族が成長していく様を見るのを楽しみにしています。

教え子から、キャリア形成のための基本的なアドバイスを求められました。以下はその時に語ったことです。まず、自分が得意なものは何か、また何をするのが好きかをよく知った上で職業を選びなさい。ソクラテスの言葉を借りるなら、「汝自身を知れ」ということです。その時々々の流行を追うのではなく、いままさに重要になろうとしている新分野の研究をなさい。エキサイティングな問題を見つけるために、境界領域の研究動向に注意を払いなさい。自分を信じ、自分のセンスと判断に自信を持ちなさい。たとえゆっくりでも、進歩は必ずあるということを理解すべきです。遅々として進まないような状況でも、創造の過程を楽しみなさい。仲間との交際を楽しみ、アイデアの交換を惜しんではいけません。もし、本当に研究者としての資質に恵まれて生まれてきたならば、進歩がないような状況下でも、研究テーマの持つ美しさゆえに楽しめるようになるでしょう。

NP 完全性

1971 年、バークレーで一緒だったスティーブン・クック氏が発表した論文を読んだ私は、計算における組合せ爆発は避けられないとする問題に、計算複雑さの理論を応用することはできないものだろうか、と考え始めるようになりました。クック氏は、非常に多くの組合せ問題の様々なバージョンを含んだ、現在は NP と呼ばれる問題のクラスを定義しました。このクラスには有名な問題が数多く含まれています。中には、その起源を有名な数学者ガウ

スの時代に求めることができる問題もありますが、200年経った今でも効率的な解が得られていません。クック氏は特に、このクラスにおいて充足可能性問題として知られる数理論理の問題が困難であることを示しました。組合せ探索問題に取り組んだ経験を持つ私は、良く知られている組合せ探索問題の多くも、この充足可能性問題と同じくらい難しいのではないかと思うようになりました。そこで私は、充足可能性問題から始め、「還元」という手法を用いて、NPクラスの問題の中で解くことが同程度に難しい一連の問題を見出しました。NPクラスというのは、非常に大きなクラスで、ほとんどすべての組合せ問題を含んでいます。すなわち、NPクラスの中で解くのが最も難しい問題は、NP完全問題と呼ばれています。新しい問題がNP完全問題であることを証明する方法は簡単です。その問題を解くための効率的なアルゴリズムが既に存在するのであれば、そのアルゴリズムを用いることによって、NP完全であると分かっている他の問題も解くことができるはずなので、それを証明すればよいのです。このように、一つの問題を別の問題に「還元」という手法を用い、私は、一見すると関係が全く無いように思える、工学・数学・自然科学・生物学・商業などの幅広い分野にわたる21の古典的な問題がNP完全であることを証明しました。これらのうち一つでも効率的に解くことができれば、他のものもすべて効率的に解くことができるという意味において、NP完全問題はすべて同等だと言えます。これまでに還元という手法によって、何千もの問題がNP完全であることが証明されました。今日、理論計算機科学の分野の専門家によって発表されている多くの還元法は、私が提案したものよりもずっと複雑になっています。現在でも毎日のように、新しい還元法やNP完全の証明が発表されています。ここにNP完全問題の例を一つ示します(Fig. 2)。これはパッキング問題といわれる問題で、大きな長方形の中に大きさの異なる小さな長方形を互いに重なり合わないように配置する方法があるか否かを問うものです。このような例では、ある配置が与えられた時に、それが条件を満たしているかどうかを検証するのは簡単です。しかし、NP完全問題とはこのような検証をすることではなく、条件を満たす配置が存在するか否かを判定することなのです。NP問題の特徴は、解が与えられた場合、その正しさを検証するのは簡単だけれども、解そのものを見つけるのが非常に難しい点にあると思います。

これからお見せする3つのイラストは、それぞれ、ある会社員が上司にNP完全問題の解法に失敗したことを報告する方法を示しています。(Fig. 3)の「彼」は、NP完全に関する知識を持ち合わせておらず、自分が失敗の責任を取ろうとして、「どうしても効率的なアル

ゴリズムが見つかりません。自分の能力が至りませんで…」と言います。(Fig. 4)の「彼」は、「PとNPは等しくない」と言います。すなわち、NP完全問題は難しいという、現在も未解決の数学的問題を知る必要があるようです。この場合、彼は、「効率的なアルゴリズムが見つからないのですが、そもそもそうしたアルゴリズムは存在しないはずですよ」と言うでしょう。(Fig. 5)は、現在、我々が持っている知識のレベルを示しています。おびただしい数の失敗により得られた証拠は、あらゆるNP完全問題を解く効率的なアルゴリズムは今後も決して見つからないであろう、ということを示唆しています。しかし、理論的な数学問題は、経験ではなく、証明によって解かれるべきであり、この推測が正しいと証明されるまでには、まだまだ時間がかかるようです。

NP完全問題に関連した、多くの発展がこれまでにありました。例えば、私が初めてある種の問題を取り扱った時には、これらがNP完全問題であるかどうか判別できませんでした。そのうちの一つは、与えられた数が素数かどうかを判定する問題でした。ほんの数年前のことですが、この問題はPというクラスに属することが証明されました。つまり、この問題を効率的に解くアルゴリズムは存在するのです。

別の方向の発展は、1990年頃に開発された美しい理論、PCP理論と呼ばれる確率的検査可能証明理論に基づいています。クラスPとクラスNPが等しくないという仮定のもとでは、PCP理論によって、ある種の問題は厳密に解くのが難しいばかりか、近似的にさえ解くことが難しいことを示す還元法が与えられます。

現在、計算複雑さの理論の分野や、理論計算機科学に関連した分野においては、「P対NP問題」、すなわち、二つの複雑性クラスが同じか同じでないかを解くことは残念ながらできていませんので、「PとNPが等しくないならば、次のようなことが成り立つ」という条件付きの定理が数多く存在します。ここで、2つの例を挙げてみます。最初の例は、PとNPが等しくないならば、情報伝達に有用な暗号化プロトコルは破られない、というものです。次の例は、PとNPが等しくないならば、ある問題は近似的に解くことさえ難しい、というものです。このように、NとNP双方の複雑性クラスが等しいか否かを解決するのは大変重要なことです。NP完全問題を効率的に解けるかどうかという問題は、「P対NP問題」と呼ばれています。これは、現在未解決の数学問題の中では大変有名なもので、クレイ数学研究所がその解に百万ドルの懸賞金を提示している7つの問題の一つです。また、この問題は、果たして証明法の発見は証明法の検証よりも困難であるか、と問うのに等しく、我々が考えるように、証明法の発見には本質的に創造的なインスピレーションが必要なのか、と

いう問いにもつながるため、多くの難問の中でも、哲学的に特に大きな意義を持っています。NP 完全は、計算の複雑性の抽象的理論と組合せ問題を解くという現実的な作業をつなぐ、最も重要な架け橋であると言えます。今もなお、「NP 完全」という言葉を、タイトルやアブストラクト、またはキーワードに含んでいる論文が、毎年 6,000 本ほど発表されています。NP 完全は、大学でコンピュータ科学を専攻する学生全員が学ばなければならない、理論計算機科学のトピックなのです。

NP 完全によって、様々な分野の科学者が計算の有する基本的な限界に関心を持つようになりました。NP 完全は今や専門用語としての意味に加えて、動的システムのカオス、経済学の限定合理性、理想的とされる投票システムの不可能性、人工知能は人間の脳を刺激することができないこと、そして遺伝的非決定論などを含む現象におけるメタファーにもなっています。

NP 完全の研究は、純粋数学のコミュニティーにおける計算複雑さの理論に対する認識を改めさせ、その地位の向上に貢献しました。1975 年、私はプリンストン大学の高等研究所で行ったヘルマン・ヴァイル・レクチャーのテーマとして複雑さの理論を取り上げましたが、その数年後には、この分野におけるプログラムが同研究所で立ち上がり、成功を収めました。1985 年には、フィールズ賞を受賞したスティーヴン・スメイル氏とともに、バークレーの数理科学研究所で計算の複雑さに関する年間プログラムのまとめ役をしました。

ある組合せ探索問題が NP 完全であると分かった場合には、いくつかの対処方法があります。例えば、車で様々な町を巡回する計画を立てるとします。それぞれの町間の移動時間は分かっている、全部の町を回るトータルの移動時間をできるだけ短くする方法を考えます。これは「巡回セールスマン問題」と呼ばれる、一般的な NP 完全問題です。この問題は NP 完全なので、あらゆるケースに当てはまる解を持つ効率的なアルゴリズムを期待することはできません。しかし、(Fig. 6)に示すように、特定の例における解を見つけ出すことは可能かもしれません。

もし不可能であっても、シンプルな試行錯誤的アプローチを用いることによって、最適とは行かないまでも十分に満足できる解を得ることができるかもしれません。実際に我々は、計算が速く、典型的なケースにはまずまずの解を与えてくれる発見的(ヒューリスティック)アルゴリズムをしばしば利用しています。ただし、そのパフォーマンスを普遍的に保証することはできません。(Fig. 6)は、101 の町を回る時のヒューリスティックな方法で得られた解を示しています。こういった発見的アルゴリズムは、現実には発生する問題で大きな成果を

上げることがしばしばありますが、なぜ そうなるかについては理論的に説明されていません。時にはこうしたヒューリスティックなアルゴリズムが、大半もしくはほとんどの例に適用可能であることを証明することもできますが、果たしてそれがすべての例に適用され得るのかというのは別の問題です。

計算生物学

1990年、ヒトの遺伝学的構造を解析するという大きな目標を掲げてヒトゲノム解析プロジェクトが始まりました。我々の遺伝的資質というものは、主に染色体の中にあるDNAで構成されています。DNA分子とは、A、C、T、Gという4種類の塩基のいずれかを持ったヌクレオチドが2本の鎖状に長く連なったものです。従って、このプロジェクトが基本的に目指したことは、ヒトゲノム、すなわち染色体中に含まれる30億個のヌクレオチドの配列解析を行うことでした。最先端の技術を用いることにより、ごく低い誤り率で、それぞれ数百のヌクレオチドを含む、数百万の無作為な断片の配列を決定することができました。(Fig. 7)は、短いDNA配列を自動的に読み取る機械から得られたデータを示しています。

私は、この数百万のノイズを含んだデータの断片から長いDNAの配列を再構築する、という組合せ問題にすぐさま惹きつけられました。こうした作業の第一歩は、ゲノムに沿って散らばった数万というランドマーク配列の位置を決定するという、いわゆる物理的マッピング問題でした。1990年代には、私は少数の学生から成るチームをいくつか組織し、この物理的マッピング問題を解決するためのアルゴリズムとソフトウェアの開発を行いました。私たちのアプローチは科学的な見地からは大きな成功を収めることができたのですが、影響度という点ではほとんどありませんでした。なぜなら、当時、ゲノム配列を構築するためのデータのとりまとめを行っていた中核的な研究機関と十分なつながりが無かったからです。

ヒトゲノムの暫定的な配列が初めて発表された2000年以来、多くの生命体のゲノム配列が解析されてきましたが、この配列を決定する作業というのは、生細胞がどのように機能しているかを解明するための第一歩に過ぎません。こうした配列内の遺伝子を決定することは、今後の課題として残されています。配列が決まることにより、遺伝子がRNAやたんぱく質などの生体分子の生成をどのようにコントロールしているかを解明することや、(Fig. 8)に示す通り、細胞の複製、自己修復、構造の維持、他の細胞との相互作用、環境への

反応、そして体内で特定の機能を発現するために一緒に働く生体分子の複雑なネットワークに関する推論が可能になると思います。多くの疑問が頭に浮かんできます。「肝細胞、血球、皮膚細胞の機能は、同じ遺伝子を含んでいるにもかかわらず、全く機能が異なっているのはなぜか?」「なぜ、がん細胞の振舞いは正常細胞とは異なっているのか?」「私たちのゲノムにおける差異のどの部分が疾病と関連しているのか?」「細胞の機能をコントロールしている複雑な制御ネットワークや免疫システムを本当に理解できるのか?」。このような分野においては、このたび京都賞と一緒に受賞したポーソン博士が根幹的な研究をされています。私は、ポーソン博士のような生物学者になろうとしたわけではありませんが、上記のような問いに答えるためのデータ解析を数学的に支援しようと考えていたので、そのために必要な生物学の知識を習得しようと努めました。今携わっている研究は特に、ゲノムレベルでの個体間の違いが病気への罹りやすさにどう関係しているのか、というものです。

この分野に関しては、私の教え子であり、現在は逆に私がアドバイスを貰う立場になっている優秀な年下の科学者と仕事をするという幸運に恵まれています。彼らは生物学に関する知識を私と共有することによって、こうした細胞の秘密を明らかにするにはどのようなアルゴリズムの問題が解明されなければならないかを明確にする作業を手助けしてくれています。大変優秀な生物学者であるワシントン大学のガレット・オーデル教授は、今私たちの多くが取り組もうとしている挑戦を次のように表現しています。「相互に強く作用しているような遺伝子のグループにゲノムを分けることによって、ゲノム全体がどのように機能しているかを理解できるようになるだろう。一旦これらのネットワーク・モジュールを特定し、その機能を理解したならば、今度はそのようなネットワーク間の相互作用を明らかにすることになり、それを続けていけば、長い時間がかかるかもしれないが、やがては、ゲノム全体の機能を理解することができるようになるだろう」。

「計算」レンズ

最後に、コンピュータ科学がこれから迎えるであろう方向性についての私の考えをお話したいと思います。コンピュータ科学は、「人工物の科学」と呼ばれてきました。これは、コンピュータ、プログラム、アルゴリズムなど、自然界に元々存在するのではなく人為的に考え出され、特定の目的に使用されるようなものを基本的に取り扱っているためです。しかし、

自然界で発生するシステムティックなプロセスの中にも、計算を必要とするという意味において、コンピュータ科学の範疇に分類することができるものがあります。こうしたプロセスの多くは生体システム、すなわち、ニューロンのネットワークによる学習、免疫系が侵入してきた微生物に対して防御態勢を整えるプロセス、胚発達の過程で細胞が特定の機能を得るプロセス、鳥の群れや蟻のコロニーの自己組織性といった動物群集の集団挙動、そして種の進化などで見られます。このような生物の様々なレベルにおいて、「自然はどの程度計算しているのか?」「いろいろな過程はどの程度アルゴリズム的なのか?」といった問いが浮かんできます。例えば、「蟻のコロニーの自己組織性はアルゴリズム的なのか?そして、そのアルゴリズムを理解できるのか?」(Fig. 9)。

また、細胞は計算を行うのか(Fig. 10)?免疫系は計算を行うのか(Fig. 11)?脳は計算を行うのか(Fig. 12)?最後の問いに関連したおもしろい質問があります。「脳は機械的なのか?」というものです。もし、脳内で生起する全ての生化学反応を記述できたとすれば、例えば、「意識」のようなものまでも説明できるようになるのでしょうか?個人的には、このようなことができるようになるとは思いません。

ここまで、アルゴリズム的な性質を持った生物学的過程が計算レンズを通して見るとどのように見えるかについて話してきました。計算レンズという考え方は、人工物へも適用できます。インターネットを考えてみましょう。それを完全にデザインしたり、特徴づけたりすることはできません。インターネットは、むしろ複雑システムとして出現しました。そして、それは同時に計算科学的なものであり、社会的なものであり、経済的なものでもあります。その中では、多くの独立した主体が調和することなく行動しています。そのために、インターネットは、一人のクリエイターによって作られた人工的なものとしてよりも、自発的に進化する組織として研究されています。インターネットやウェブについて見識を持っている同僚のクリストス・パパミディトリューは、「最初は、他の分野のパイオニアが宇宙や細胞や脳や市場に立ち向かった時に感じたのと同じ戸惑いを感じながら、人工物に立ち向かわざるを得なかった」と言っています。

インターネットの研究は、新興のコンピュータシステムとしてなされていますが、それと同時に、社会科学の研究対象にもなりつつあります。インターネットに基づいたネットワークや、個人、組織、コミュニティーを互いに関連づけるウェブに基づいた相互作用のネットワークでは、1分おきにデータが蓄積され、利用可能となっています。このような状況においては、以下のような問いが次々と浮かんできます。アイデアや意見や制度や技術が、ネッ

トワークを通してどのように広がっていくのか？まとまりのあるコミュニティーやサブコミュニティーをどのようにして特定できるのか？「6次の隔たり」現象をどのようにして調査し、理解できるのか？

他のいくつかの分野も、計算レンズを通して見る事が可能です。電子レベルでの計算デバイスの挙動は、量子力学で記述される必要がありますし、量子計算の抽象的な数学モデルの構築へと導くものと思われます。量子コンピュータの実現が待ち望まれています。それは、量子コンピュータの情報基本単位が、キュービットになるためです。現在使われているコンピュータの情報基本単位はビットといわれるもので、0と1の値しかとることができません。キュービットはこれに比べると、ずっと多くの情報を担うことができます。量子コンピュータの潜在能力を十分に生かすことができるかどうかは大変興味ある問題です。量子コンピュータを作るための技術はまだ確立されていませんが、その能力については既に調べられています。また、量子力学の標準理論の正しさを検証する実験にも、量子コンピュータを使うことができます。今後、このような検証実験について、より多くのアイデアが提案されるようになると思われます。私の同僚、ウメシュ・バジラーニは、「量子コンピュータは強力な計算機というよりも、むしろ量子力学を検証するためのものだ」と言っています。

計算理論は、統計物理学とも深い関係があります。統計物理学は、互いに相互作用を及ぼし合う、原子・分子・分子スピンなどの集合を確率論的に取り扱う学問です。水が凍る現象や、金属が強磁性化する現象などを取り扱います。このような現象を取り扱う統計物理学と、コンピュータ科学とは、共通する考えを持っているように思われます。なぜなら、コンピュータ科学では、多数の組合せ論的変数や条件を含む確率論的モデルや、インターネットを通して互いにコミュニケーションしたり、交渉したりする主体を含む確率論的モデルを取り扱うからです。

計算理論は、経済とも共通する考え方を含んでいます。例えば、経済メカニズムデザインという分野では、計算理論と同じような考えが使われています。この分野は、インターネット上での商取引に必要な経済メカニズムの発展に影響されています。経済デザインはある種のアルゴリズムで、その入力は個人的なデータや個人的な興味をもった主体によってなされます。一例が、オンラインオークションです。経済メカニズムデザインのゴールは、参加者に何らかのインセンティブを与えることによって、その目的を正直に表明させ、社会福祉や社会利益を最大にするといったデザイナーのゴールを達成するように行動させることだと思われます。計算理論と経済との別の接点は、計算ゲーム理論です。古典的なゲ

ーム理論では、参加者が完全に合理的に振舞うと仮定して、利害が対立する参加者がどのように振舞うかを研究していました。複雑系としての計算ゲーム理論では、新たな要素、すなわち、計算量について上限が存在するために、参加者の戦略的振舞いが制限され得るという点を導入しています。そのために参加者は、完全に合理的に判断したり、振舞ったりすることができなくなる可能性があります。

これまでの大まかな説明により、計算における限界や制限というレンズを通して、どのように物理的・社会的・工学的システムが見えてくるかを説明してきました。そして、計算における限界や制限がもたらす新しいものの捉え方や考え方も提示しています。コンピュータ科学におけるこのような見方や考え方は、科学研究の中心を占めるようになると思われます。私の将来の研究も、このような方向に沿ったものであると考えています。

最後に、個人的な見解を述べさせていただいて講演を終わります。研究を主体とする大学の教授は、少なくとも私にとっては、世の中で最高の職業です。個人の自主性の占める割合が大きく、優秀な学生の指導や彼らの手本となることができるだけでなく、科学技術の新しい分野における最先端の研究を支え、後押ししてくれる環境が整っています。研究者がこうしたキャリアを歩むことが可能となった時代に生まれたことは、私にとって幸運でした。



Fig. 1

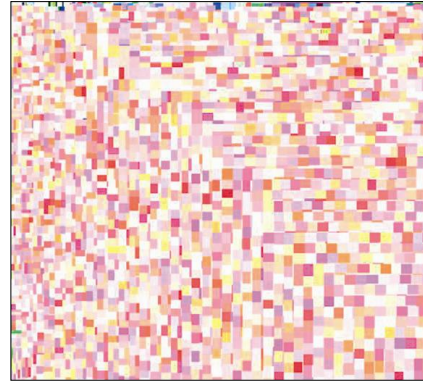


Fig. 2

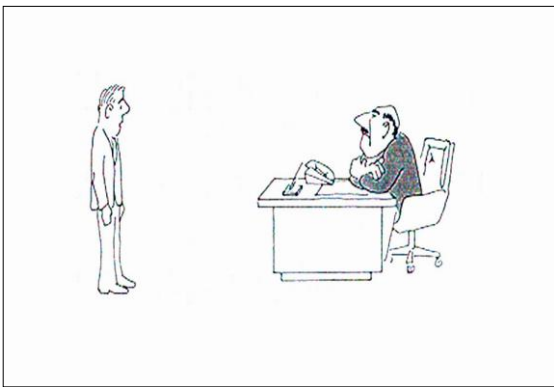


Fig. 3

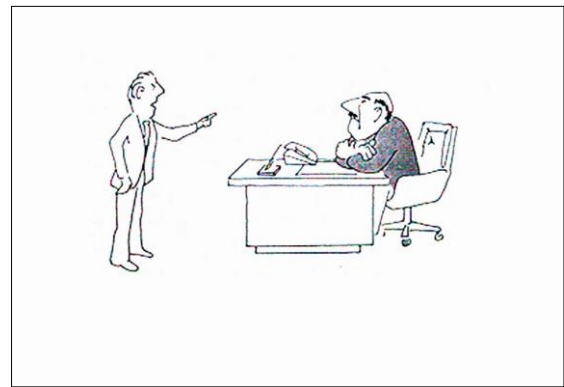


Fig. 4

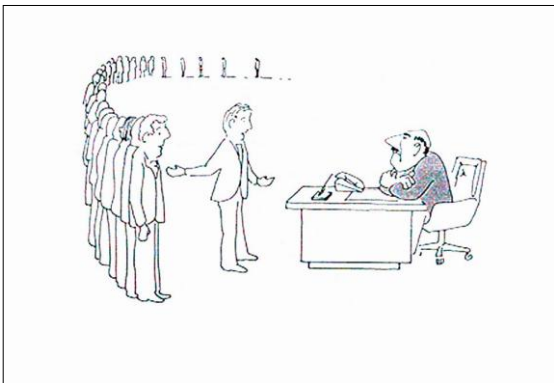


Fig. 5

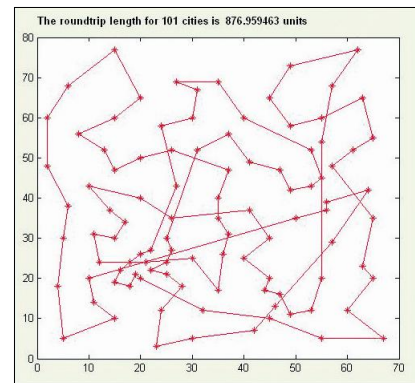


Fig. 6

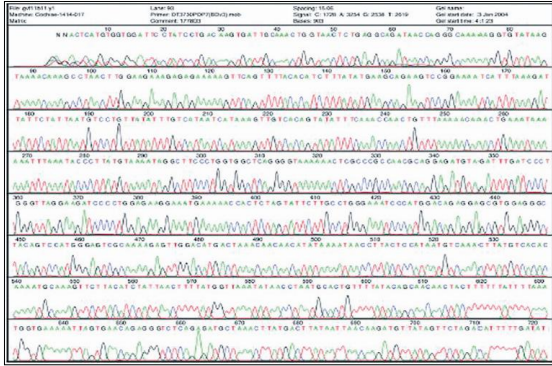


Fig. 7

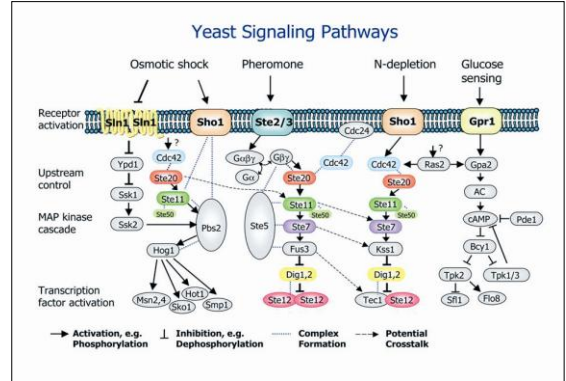


Fig. 8

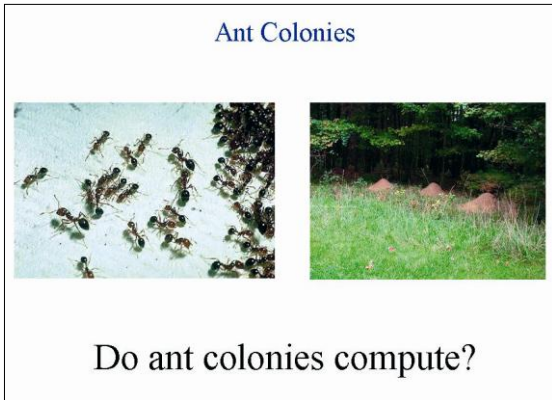


Fig. 9

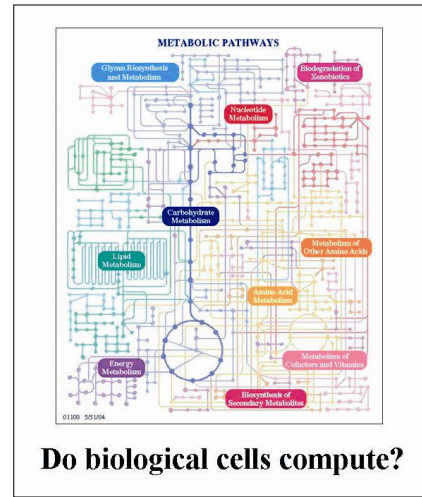


Fig. 10

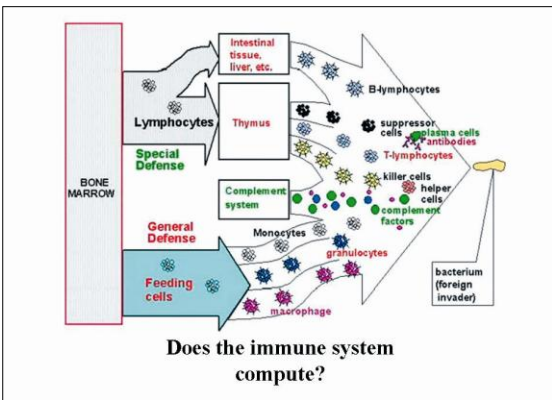


Fig. 11

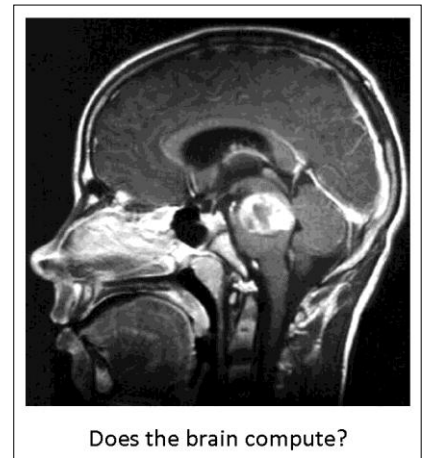


Fig. 12