は、この木を食べる竜脚類恐竜を見つけて、驚きに息をのんだ。この映画では、絶滅した動物種のDNAから、その動物種を作り出すというストーリーが展開されているが、どうやって恐竜に特定の樹木を食べることを教え込むのかという点は語られていない。これと同じことが種子バンクにも言えるのだ。確かにDNAは保存されているが、異なる種の間での複雑な関係、共生生物や病原体、そして種蒔き、手入れ、収穫、保存の方法を知っていた農民の伝統は失われている。本来の場所で生育しているそのままの状態で保存することが極めて重要で、それに伴う選別作業を保存することも同じように重要なのだ。ルワンダの女性による豆の品種の選別作業、そしてネパールでの米やヒヨコマメの品種の選別作業は、一般の植物育種学者よりも優れた結果を生み出すのだ。

もし多様性に価値があるとすれば、その価値の所有者は誰なのだろうか？ 本書中で最も良く書けていると思われる章において、

著者は、その答えが二極化し、それがますます顕著になってきていると記している。多くの熱帯諸国では、生物的海賊行為(biopiracy)への恐れが広く浸透している。これまで金持ちが貧乏人の財産を奪ってきたこと、そしてこれからも奪い続けていくという筋書きによって、ノートしか携帯していないような研究者による研究許可申請までが影響を受けている。また生物多様性保全条約の背景には、植物育種学者の権利の方が貧しい農民の権利より優先されているという強力な主張がある。しかし種子の交換によって利益を得るのが貧困国であるケースは多いのだ。例えば、ベトナムでは、IRRIを利用して作り出された品種に由来する米が収穫量のほとんどを占めている。これに対して米国の場合には、その割合は全体のわずか6分の1に過ぎない。

一部の諸国は完全保護を求めている。例えばエチオピアは、コーヒーの苗木の輸出を禁止している。コロンビアやコスタリカなどのコーヒー生産大国はコーヒーの保有遺伝子の

種類が少ないため、いったん病気が発生すれば、エチオピア産のコーヒーに席卷される可能性がある。もし両国間で報復措置を発動し合えば、その悪影響が広範囲に及ぶことは間違いないだろう。

生物資源調査(bioprospecting)に関する条約を締結している国々もあるが、こうした条約は功罪相半ばしている。例えば、それぞれの品種について誰が知的財産権の所有者なのか、という点が必ずしも明確になっていない。所有権を幅広く認めるようになると、これまで長い間、人類共通の遺伝子資源の形成に関与してきたのに、現代の特許法令による保護対象から漏れてしまった人々の権利が損なわれる、というのが著者の結論で、説得力をもって示されている。 ■

評者のStuart Pimmは、デューク大学ニコラス環境・地球科学学科(Nicholas School of the Environment and Earth Sciences, Duke University, Durham, North Carolina 27708, USA)に所属している。

essay concepts

死と税金と、熱力学の第二法則

可逆計算：論理的にも物理的にも逆にできるコンピューターの実現可能性とは？

原文：Going into reverse

Nature Vol.430(971)/26 August 2004;www.naturejpn.com/digest

Seth Lloyd

この世で確実なのは、1. 死ぬこと、2. 税金を払われること、3. 熱力学の第二法則がなりたつこと。この3つは、エネルギーやお金のように、役に立って手の届く形をしたものを(同量の)役に立たず手の届かない恰好に変換するプロセスだ。だが、この3つのプロセスにも付随的な効用がない訳ではない。税金は道路や学校の建設に使われる。熱力学の第二法則は車やコンピューターを動かし、代謝を促進する。そして死は、少なくとも、終身在職権を持つ教授のポストを空席に

してくれる。

人生に幸福をもたらすほとんどの物は、生命そのものを含めて、有用なものから無用なものへ、すなわち秩序から無秩序へのゆるやかな劣化、つまり物理学用語でいうエントロピー増大によって生じている。それでも、時にこうした避けられない資源の散逸を遅らせたり、ちょっとの間だけ止められたりしたなら、どんなに素晴らしいことだろう。

幸いなことに、熱力学の第二法則でも常にエントロピーが増大することは必要とされていない。エントロピーが一定のままである可

能性も残されているのだ。事実上可逆的な、ある種のプロセスが存在する。その場合、エネルギーは散逸せず、エントロピーも一定のままか、ほとんど変わらない。たとえば、化学反応は、非常にゆっくり起きれば可逆的である。その場合、段階ごとにごくごく少量のエネルギーが散逸される。トンネル効果や超伝導のようなコヒーレントな量子力学的なプロセスも、可逆的で、散逸せずに機能できる。そして原理的には、計算も可逆でありうる。

今から40年以上も前に、Rolf Landauerは、計算と熱力学の第二法則の間に基本的な関連

性があることに気づいた。物理プロセスと同様に、論理プロセスだって、可逆な場合もあれば不可逆な場合もある。論理演算は、出力から入力データを推論できる場合、可逆的だという。例えば、0を1に変える、あるいは1を0に変換するNOT演算は可逆的である。なぜならば、 $Y = \text{NOT } X$ の場合、出力Yが0だとわかれば入力Xが1だったと推論できるからだ。対照的に、ERASE(=消去)演算は、その入力に関係なく常に出力が0となるので不可逆である。出力から入力の情報が得られないからだ。

Landauerは、論理的な不可逆性と物理的な不可逆性の間の強い関連性を指摘した。第一に、NOTのような論理的に可逆な演算は、物理的に可逆な演算を使って実行できる。例えば、ある軸の周りを時計回りにスピンする陽子がYESと記憶(=レジスター)され、反時計回りにスピンする陽子がNOと記憶されるとすれば、磁場をかけることにより、散逸やエントロピーの増大なしに、陽子をYESからNOへ反転させたり、また元に戻したりすることができる。反転するスピンは、物理的に可逆な方法でNOT演算を行なう。

第二に、ERASEのような論理的に不可逆な演算は、物理的な不可逆性を必要とする。コンピュータのメモリーの1ビットは、極小のコンデンサーの電荷によって記憶される。コンデンサーを充電されていない状態に戻して、ビットを消去すれば、2回に1回は、コンデンサーの中のエネルギーが熱として散逸する勘定になる。

従来の計算法は、可逆と不可逆の両方の論理演算から成り立っている。したがって当初、論理的な不可逆性は物理的な不可逆性を必要とするという考え方(Landauerの原理)は、計算には散逸がつきものだということを意味していると思われていた。ところが、Charles BennettとEd Fredkinが、それぞれ別々に、論理的に不可逆な演算のほとんどは、それよりもう少し複雑な可逆演算に組み込めることに気づいた。その結果、計算は、原理的には、ゆっくりした化学反応やコヒーレントな量子プロセスのような可逆な物理プロセスを使っ

て実行することができる。より複雑な可逆プロセスに組み込めないような、論理的に不可逆なプロセスの1つが「消去」である。コンピュータから、あるビットの最後のコピーを消去したとき、他のどこかでエントロピーが増大せざるをえない。

過去10年にわたって、論理的および物理的な可逆計算は、論理的に可逆なCMOS(=相補型金属酸化膜半導体)回路を利用してつくられてきた。おそらく、さらに印象的なのは、試作段階にある量子コンピューターが、非常に小さく単純とはいえ、微視的レベルにおいて、ほとんど無視できるほどのエントロピーしか生じさせないことだろう。量子コンピューターは、論理的および物理的に可逆な方法で計算を実行するデバイスに、今のところ最も近いものだ。(もちろん、量子コンピューターを動かすために必要な、レーザーや超伝導磁石や希釈冷却装置は多くの熱を発生する。しかし、量子コンピューターの「心臓部」で行なわれる量子論理演算それ自体は、基本的には可逆で、ほとんどエネルギーを散逸しない。)

ではどんな落とし穴があるのか? Bennettの当初の構想と可逆的なCMOSコンピューターにおいて、問題は、速度がゼロの極限においてのみ散逸がゼロになることだ。量子コ

ンピューターの場合、落とし穴は、詩人John Donneの言葉を借りるのであれば、キュービットは独立自足の孤島ではないということだ。1キュービットの、残りの宇宙との相互作用がどれほど弱かろうとも、遅かれ早かれ、相互作用の1つがそのキュービットを反転させ、計算にエラーを生じさせるだろう。

エントロピーの積み重ねのように、エラーは望まれない情報から成っている。コンピューターは、エラーを検出し訂正する誤り訂正コードにより、誤った情報を消去して整理することもできる。だが、Landauerの原理によって、コンピューターの中の1ビットを消去することは、他のどこかでのエントロピーの増大を必要とする。コンピューターにとって、エラーはエントロピーの究極の発生源なのだ。

もちろん、エラーだらけでゆっくりした計算なら、いくらでも散逸を抑えて実行できる。しかし、熱力学の第二法則によれば、速く正確に計算しようとすれば散逸は避けられない。

では、「最期」はあるのだろうか? 計算も、あらゆる物理プロセスのように、ゆっくりと終わっていくのだろうか? いや、実際には、宇宙の膨張が自由エネルギーを供給し続け、エラーを棄てる環境を用意し続けるかぎり、既知の物理学法則によれば、どうやらコンピューターは永久に計算を続けられそうだ。永遠のコンピューターは、いったいぜんたい何を計算するのだろうか? その答えは、待つしか方法はないだろう。

筆者のSeth Lloydは、マサチューセッツ工科大学の機械工学部(the Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology 3-160, Cambridge, Massachusetts 02139, USA)に所属している。

FURTHER READING

See articles by R. Landauer, C. H. Bennett and S. Lloyd in Leff, H. S. & Rex, A. F. (eds) *Maxwell's Demon 2: Entropy, Classical and Quantum Information, Computing*, 2nd edition (Institute of Physics, Bristol, 2003).