談

話

室

大沢さん追悼: 50 年先への千里眼 (7)

ランダムではない揺らぎをもつ細胞の 計算能力

青野真士^{1,2,3}

¹Amoeba Energy株式会社

²慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科

³慶應義塾大学大学院理工学研究科

1. 揺らぎをもつ細胞の意志?

私はこれまで、Bio-inspired Computing と呼ばれる生物学と計算機科学の境界領域で、生物の情報処理原理に学んだ物理現象を利用する計算アーキテクチャの研究をしてきた。大沢氏に直接お話を伺ったことはないが、院生時代に氏のゾウリムシの自発性に関する論考¹⁾に触れる機会があり、そこから自身の研究テーマの決定に際し重要なインスピレーションをいただいた。外部からの刺激がなくとも自発的に方向転換するゾウリムシ。同じ条件の刺激に対しても、自発的に異なる方向へと移動する「生きものらしさ」を感じる。それは、この細胞の内部に「揺らぎ」の生成源があるから可能になるのであり、そこにゾウリムシの「意志」を理解する鍵があると論じられていた。だが、揺らぎと自由意志の関係は一筋縄ではいかない。どう理解すべきか? 以来、私はこの問いと格闘することになった。

外部刺激に対し完全に決定論的に応答するシステムは、何も考えずに動作するマシンでしかない。たしかに、そこに自由意志はなさそうである。しかし、かといって完全に確率論的な揺らぎが支配するシステムは、何も考えずにサイコロの目に従って行動しているに過ぎない。そこに自由意志があると言うのも気が引ける。もし、完全に決定論的ではなく、完全に確率論的でもない、中間領域があるのだとすれば、そこにこそ自由意志の成立する余地があるのかもしれない。では、その中間領域とは何か? カオスだろうか? しかし、カオス的システムの不規則性や予測不可能性も、もとをたどれば、微小な確率的ノイズではないか。その程度のことので「自ら考えている」などと言えるのだろうか? 当時の私は、そこから先に進めなくなっていた。

そうした逡巡が、私が単細胞アメーバ生物・真性粘

菌 (*Physarum polycephalum*) 変形体の「考える力」を定量的に評価する実験システムの構築を進める契機となった。このシステムは、粘菌の計算能力を利用して組合せ最適化問題の解を探索するバイオコンピュータともみなせるので、「粘菌計算機」と名付けられた。

2. 粘菌計算機

巡回セールスマン問題とは、 n 個の都市と各都市間の移動距離を定めた地図を与えられたセールスマンが、各都市を一度だけ訪問し出発都市に戻る巡回ルートのうち、総移動距離が最短になるものを求める組合せ最適化問題である。組合せ爆発を生じるこの問題の最適解 (厳密な最短ルート) を多項式時間で得る方法は知られていない。いま、都市名 V とその訪問順 k で識別される n^2 本の溝をもつ障壁構造を用意し、粘菌がその仮足 (体の一部) を伸縮できるようにする (図 1a)²⁾。溝 Vk で伸びている仮足の長さ (面積の割合) を状態値としてカメラで計測する (図 1b)。プロジェクタで照射する光に対し嫌光応答を示す仮足は、原則的に照射 ON の溝で縮退し、照射 OFF の溝で伸長する。だが、粘菌のダイナミクス (後述) は、時として照射 ON の溝で仮足を伸ばしたり、OFF の溝で縮めたりする動作を、小さな確率で発生させる。この「揺らぎ動作」が、広範な状態空間の探索を可能にする。

巡回ルート訪問の制約と都市間距離の情報 (図 1c) を重み行列の抑制結合値で表現するニューラルネットワーク型の計算式に基づき、6 秒毎に全仮足の状態を参照し全光照射状態を更新する。すると、粘菌はどの組合せの仮足を伸ばせば体面積を最大化しつつ被照射リスクを最小化できるか判断するための試行錯誤を重ね、最終的に n 本の照射 OFF の溝でのみ仮足を伸長する。伸長した仮足の組合せが合法解 (巡回ルート)

Computational Capacity of a Cell Exhibiting Non-random Fluctuation

Masashi AONO^{1,2,3}

¹Amoeba Energy Co., Ltd.

²Graduate School of Media and Governance, Keio University

³Graduate School of Science and Technology, Keio University

図 1

(a) 粘菌 (b) 粘菌計算機の構成。 (c) 巡回セールスマン問題の地図の例。 (d) 粘菌計算機が探索した巡回ルート CHDEGFABC を表現する状態。

図 2

二本の粘菌仮足の長さの時系列変化。

を表す。図 1d は、粘菌が導いた、ルート長の短さが上位約 20% の準最適解の例である。

合法解の数は n の階乗関数として爆発的に成長するが、それに応じて粘菌は探索の時間と質（ルート長の短さ）をどう変化させるだろうか？ $n = 4 \sim 8$ の地図を用いて実験を行ったところ、粘菌計算機は、そこそこの質の良い近似解を、探索に要する時間の増大を n のほぼ線形関数に抑えながら、 n が増大してもその質を劣化させることなく探索することができた³⁾。

粘菌の体は一種の振動媒質である。アクトミオシン系が架橋したゲル状の細胞外質が、約 1 分周期で収縮と弛緩状態の間を振動している。この振動の繰返しにより、仮足は伸長したり縮退したりする（図 2）。仮足は、照射 ON の溝であっても弛緩位相のときは伸長し、OFF の溝でも収縮位相のときには縮退する。それが一因となり「揺らぎ動作」が生じる。すなわち、一本の仮足が生成する振動は、時間的（自己）相関をもって揺らいでいる。時系列解析の結果、粘菌仮足のデータの少なくとも一部は、ランダムな揺らぎではなく、カオス的ダイナミクスから生成されたものと推論された²⁾。さらに、離れた複数の仮足の先端は、振動位相の同期や脱同期を繰返すカオス的ダイナミクスを

介し、空間的相関をもった揺らぎを示していた。

こうした時間・空間的相関をもつランダムではない揺らぎは、粘菌に「考える力」を授けるだろうか？我々は、粘菌の揺らぎの相関の強さと、粘菌計算機の探索能力（解探索に要する時間および探索された解の質）の関係を調査した。粘菌の時空間振動ダイナミクスのコヒーレンスの強さを時系列解析の手法で評価したところ、相関が強い個体であるほど、探索能力が高いことがわかった⁴⁾。さらに、粘菌のもつ揺らぎの相関をランダムノイズの印加により破壊する設定の粘菌計算機を用いた対照実験からは、相関の破壊に伴って探索能力が著しく低下することが明らかになった³⁾。しかし、これらの結果は、ある特定の環境のもとで、ある特殊な揺らぎが探索能力の向上に寄与することを示しているに過ぎない。それはわかっている。

3. むすび

その後、粘菌計算機の解探索ダイナミクスの本質的部分を抽出したアルゴリズムを定式化した私は、それらを電子回路により物理的に実装することで、組合せ最適化問題を高速に解く非ノイマン型計算機の開発に邁進するに至った⁵⁾。自ら会社まで起業した。揺らぎと自由意志について悩んでいた頃からすると、随分遠いところまで来てしまった気がする。だが、インスピレーションの根幹は変わっていない。いまの私は、回路を流れる電流ダイナミクスの並行性や、デバイスの揺らぎからもたらされる確率的動作を活用し、既存手法より「生きものらしい」やり方で、実社会の課題をより柔軟に解決できる方法論を提示したいのである。

文 献

- 1) 大沢文夫 (2017) 「生きものらしさ」をもとめて、藤原書店、東京。
- 2) Aono, M. *et al.* (2009) *New Gener. Comput.* **27**, 129-157. DOI: 10.1007/s00354-008-0058-4.
- 3) Zhu, L. *et al.* (2018) *R. Soc. Open Sci.* **5**, 180396. DOI: 10.1098/rsos.180396.
- 4) Iwayama, K. *et al.* (2016) *Bioinspir. Biomim.* **11**, 036001. DOI: 10.1088/1748-3190/11/3/036001.
- 5) Aono, M. (2020) *Jpn. J. Appl. Phys.* **59**, 060502. DOI: 10.35848/1347-4065/ab8e05.

青野真士（あおの まさし）

Amoeba Energy 株式会社代表取締役社長

慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科特任教授

慶應義塾大学大学院理工学研究科特任教授

1999 年慶應義塾大学環境情報学部卒業。2004 年神戸大学大学院

自然科学研究科にて博士（理学）取得。理化学研究所、東京工業

大学地球生命研究所、JST さきがけ、文部科学大臣表彰若手科学

者賞受賞を経て、2017 年慶應義塾大学環境情報学部准教授着任。

2018 年 Amoeba Energy 株式会社を起業。2020 年度より現職。

研究内容 複雑系、自然計算、非ノイマン型計算機

連絡先: 〒252-0882 神奈川県藤沢市遠藤 5322

E-mail: aono@amoebaenergy.com

URL: <http://web.sfc.keio.ac.jp/~aono/>