

## 難問「巡回セールスマン問題」を新型コンピュータで解決

～アメーバの探索能力から着想を得てアナログ回路で実現。超スマート社会での活躍に期待～

### ポイント

- ・ 組合せ最適化問題をアメーバ生物「粘菌」の行動に学んだ新コンピュータ「電子アメーバ」で解決。
- ・ 「電子アメーバ」は実社会の難しい課題をシンプルかつコンパクトなアナログ回路で解決可能。
- ・ IoT デバイスなどに組込める小型で省電力のチップとして超スマート社会での活躍に期待。

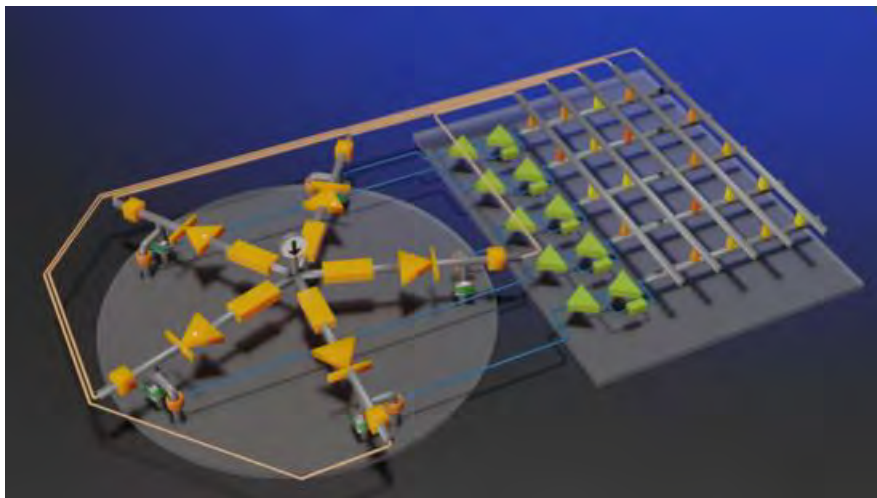
### 概要

北海道大学量子集積エレクトロニクス研究センターの葛西誠也教授らの研究グループは、Amoeba Energy 株式会社と共同で、アメーバ生物である粘菌の探索行動から着想を得た新型アナログコンピュータを開発し、代表的な組合せ最適化問題「巡回セールスマン問題\*1」を解くことに成功しました。

物流配送計画や勤務スケジュール作成など社会の様々な課題は、最適な変数の組合せを探し出す「組合せ最適化問題」と呼ばれる数学的問題を解くことで解決できます。しかし、従来型デジタルコンピュータは、組合せ最適化問題の解決を苦手としています。このため、近年は量子コンピュータを含めたイジングマシン\*2と呼ばれる新型コンピュータの提案が相次いでいますが、この方式では解くべき問題をマシンが扱える形式に変換することが大変難しく、実用上のネックとなっていました。

研究グループは、この問題点を回避できる、アメーバが巧みに栄養物質を見つけ出す行動に着目して開発されたアナログ回路からなる新方式コンピュータ「電子アメーバ」によって、最適化問題の中でも難度が高い巡回セールスマン問題の解を迅速に探し出すことに成功しました。生物が自然淘汰を経て獲得した探索能力をシンプルかつコンパクトな電子回路で再現した電子アメーバは、制約や要求が変わり続ける実社会の難しい課題の解決に貢献するとともに、身のまわりで活躍するIoT デバイスなどに組み込み可能な小型で低消費電力の新原理コンピュータにつながるものと期待されます。

なお、本研究成果は、2020年11月27日（金）公開の *Scientific Reports* 誌に掲載されました。



開発した電子アメーバの回路模式図。左側がアメーバコア、右側の格子状の回路が抵抗クロスバー。

## 【背景】

物流の配送スケジューリングや職場における勤務シフト作成など社会の様々な課題は、組合せ最適化問題と呼ばれる数学的問題を解くことで解決できます。実社会システムの様々な課題解決には、この問題の解決が必要不可欠ですが、組合せ最適化問題の多くは効率良く最適解を得る解き方が知られておらず、決められた手順に従って動作する従来型デジタルコンピュータが非常に苦手とする問題です。

近年、国内外の企業や研究機関においてイジングマシンと呼ばれる方式の組合せ最適化専用コンピュータの研究開発が活発化しています。世界初の商用量子コンピュータとして D-Wave 社が開発した量子アニーリングマシンもその一つです。しかし、実社会の課題をイジングマシンが扱える形式に変換する際に、高い専門知識と複雑な計算が必要でした。また、制約や要求が増大すると条件を満たさないものも解として提示してしまう弱点を抱えています。そのため、これらの問題点の解決が課題となっていました。

## 【研究手法】

アメーバ生物である真性粘菌は、単細胞であるにもかかわらず、不定形の体を環境に適した最も良い形に変形できる高度な計算能力を持つことが知られています。先行研究で、アメーバ生物を組込んだ「粘菌コンピュータ」が難度の高い組合せ最適化問題「巡回セールスマン問題」の良い解を探索できることが示されていました。

そこで研究グループは、アメーバが変形するメカニズムをアナログ電子回路中の電子の動きで再現する独自の「アメーバコア」に、制約条件をコンパクトに表現する「抵抗クロスバー」を組合せた新方式のコンピュータ「電子アメーバ」を開発しました (p.1 図)。本方式では、巡回セールスマン問題を定義する都市間距離をクロスバーの交点にある抵抗値で表現し、クロスバーによって定義される電子環境の中でアメーバコアが解を探索します。都市配置や距離は、抵抗値を変えるだけで簡単に変更できます。

## 【研究成果】

今回開発した電子アメーバにより、4 都市問題の最短経路を探し出すことに成功しました (図 1)。より大きな都市数の問題に対する探索性能を回路シミュレータを用いて調べると、電子アメーバが探し出せる巡回経路長は、無作為抽出法<sup>\*3</sup>により得られた平均的経路長よりも常に短く (図 2a)、経路を探すために要する時間も都市数に比例する程度に抑えられることがわかりました (図 2b)。理論的には都市数が増えると経路の候補が爆発的に増加しますが、電子アメーバは全ての経路候補を参照しなくても短い経路を見つけ出すことができます。この高い探索能力はアメーバ生物を用いた粘菌コンピュータが持つ特長と同様であり、電子アメーバは生物が自然淘汰を経て獲得した優れた能力を再現しているといえます。

さらに、巡回セールスマン問題を解く代表的なアルゴリズム (2-opt 法<sup>\*4</sup>) と探索時間を比較したところ、都市数が多くなるほど電子アメーバが有利になることがわかりました (図 2b)。

なお、YouTube (<https://youtu.be/NKxmO-oXF6o>) でアメーバの高い探索能力を示唆する粘菌コンピュータの実験結果と、電子アメーバが実際に解を探索する回路動作をまとめた動画を閲覧できます。

## 【今後への期待】

本研究成果は、スーパーコンピュータでも解決困難な組合せ最適化問題の解法や、制約や要求が変わり続ける実社会システムの多様な課題にも適応できる新原理コンピュータの実現につながる事が

期待されます。Amoeba Energy 株式会社は、既に複数の企業や大学と共同で実用化に向けた研究開発を進めています。

また、電子アメーバとクロスバー構造は、一般的な半導体デバイスで構成されたシンプルかつコンパクトな回路であり、半導体集積回路技術を利用することで小型・低消費電力の専用計算チップを作製できます。今後、IoT デバイスなどにも組み込み可能な小型で省電力の組合せ最適化チップとして、超スマート社会「Society 5.0」における様々な場面での活躍が期待されます。

### 【謝辞】

本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費助成事業・科学研究費補助金基盤研究（B）「使い易いマン・マシンインターフェースのための適応型非線形筋電検出技術の開拓」（課題番号 H8H01487）の助成を受け実施されました。

### 論文情報

論文名	Amoeba-inspired analog electronic computing system integrating resistance crossbar for solving the travelling salesman problem（巡回セールスマン問題を解くクロスバー構造を備えた粘菌アメーバに着想を得た電子計算システム）
著者名	齊藤健太 <sup>1,2</sup> 、青野真士 <sup>3,4,5</sup> 、葛西誠也 <sup>1,6</sup> （ <sup>1</sup> 北海道大学量子集積エレクトロニクス研究センター、 <sup>2</sup> 北海道大学大学院情報科学院、 <sup>3</sup> Amoeba Energy 株式会社、 <sup>4</sup> 慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科、 <sup>5</sup> 慶應義塾大学大学院理工学研究科、 <sup>6</sup> 北海道大学人間知×脳×AI 研究教育センター）
雑誌名	<i>Scientific Reports</i> （自然科学の専門誌）
DOI	10.1038/s41598-020-77617-7
公表日	2020年11月27日（金）（オンライン公開）

### お問い合わせ先

北海道大学量子集積エレクトロニクス研究センター 教授 葛西誠也（かさいせいや）

T E L 011-706-6509 F A X 011-716-6004 メール kasai@rciqe.hokudai.ac.jp

U R L <https://www.rciqe.hokudai.ac.jp>

Amoeba Energy 株式会社 代表取締役社長 青野真士（あおのまさし）

メール public@amoebaenergy.com U R L <https://amoebaenergy.com>

### 配信元

北海道大学総務企画部広報課（〒060-0808 札幌市北区北8条西5丁目）

T E L 011-706-2610 F A X 011-706-2092 メール kouhou@jimu.hokudai.ac.jp

Amoeba Energy 株式会社（〒251-0052 藤沢市藤沢1009番地6中島ビル3階）

## 【用語解説】

- \* 1 巡回セールスマン問題 … セールスマンが指定都市をそれぞれ一度だけ訪問し出発都市に戻る巡回経路のうち移動距離が最短となるものを導く問題。計算複雑性理論において NP 困難問題に分類され、多項式時間（実用的時間）内で最適解を導く手法が知られていない複雑な組合せ最適化問題として有名。
- \* 2 イジングマシン … 磁性体（磁石）のモデルである「イジングモデル」がエネルギー最小状態に自然に収束する物理過程を、組合せ最適化問題の最適解を探すプロセスに対応させ、確率的な動作を模倣できるハードウェアにより解を探索する専用コンピュータ。
- \* 3 無作為抽出法 … セールスマンが現時刻滞在している都市から次時刻に訪問する都市を両都市間の移動距離を考慮せずランダムに選択して巡回経路を決定していく方法。
- \* 4 2-opt 法 … ある巡回経路を選択するところから開始し、その経路のうちでランダムに選ばれた 2 都市間の経路を部分的に入れ替え、これにより経路長が短縮されるならば入れ替えを採用するという部分的な改善操作を繰り返すことで、より経路長の短い巡回経路への到達を導く方法。

## 【参考図】

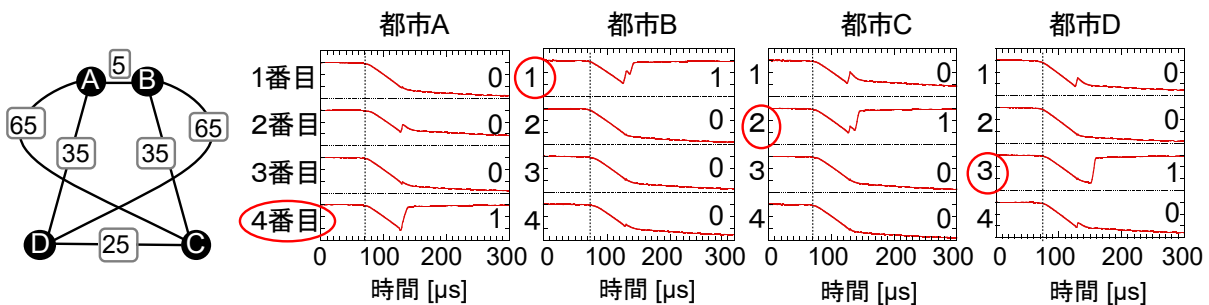


図 1. 解いた巡回セールスマン問題の問題と試作システムの出力波形。"1"となる出力が訪問順を表す。得られた解 A→D→C→B→A であり、最短経路になっている。

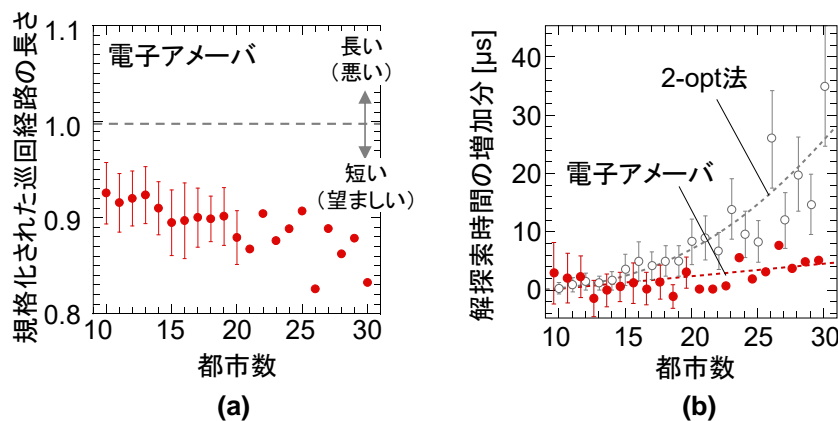


図 2. 回路シミュレーションによる電子アメーバ性能評価結果。

- (a) 得られた巡回経路長と都市数の関係。縦軸は無作為抽出法によって得られた巡回経路長の平均値で規格化されており、平均経路長よりも常に短い経路を探し出している。
- (b) 都市数が増えたときに解探索時間がどの程度長くなるか評価した結果。従来コンピュータ上に実装された 2-opt 法が電子アメーバが見つけたものと等しい距離の巡回経路を見つけ出す時間を比較した。縦軸は 10 都市の探索時間からの増分をプロット。都市数が増すほど電子アメーバの方が有利になる。