

研究報告書

「アメーバ計算パラダイム: 時空間ダイナミクスによる超高効率解探索」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 平成 25 年 10 月～平成 29 年 3 月

研究者: 青野 真士

1. 研究のねらい

さがけ研究者・青野が定式化した「アメーバモデル(AmoebaSAT)」は、環境に効率的に適応する粘菌アメーバのユニークな並列処理法に学んだアルゴリズムであり、揺らぎを伴った試行錯誤的な探索により、重要な組合せ最適化問題(NP 完全問題)である「充足可能性問題(Satisfiability Problem; 略称 SAT)」の膨大な数の解候補の中から正解を高速に発見できる。アメーバモデルは、従来型デジタルコンピュータ上でソフトウェアとして実行することもできるが、時空間ダイナミクスとして表現されているため、専用のハードウェアを構築して物理的に実装するのに適している。本研究のねらいは、従来のシリコンデバイスとは異なる確率的な挙動を示す先端デバイスを用いてアメーバモデルを実装することにより、様々な応用で威力を発揮する超小型・超低消費エネルギーの非ノイマン型コンピュータを開発し、そこから新たな計算パラダイムを開拓することである。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究は、組合せ最適化アルゴリズム「アメーバモデル」の解探索性能を理論的に評価し、これを先端デバイスにより実装するための計算アーキテクチャを具体化し、実社会で有用な応用を提案することを目指して進められた。これらの目標を達成するため、次の3つのテーマA)、B)、C)に沿って研究を進め、それぞれ重要な成果を挙げることができた(図 1)。

研究テーマ A) 「アメーバモデルの解探索性能の起源と限界を明らかにする基礎理論の構築」

アメーバモデルは、アメーバの足を表現する複数のユニットの「揺らぎ」を伴った試行錯誤のダイナミクスと、解くべき問題の制約条件を参照して複数ユニットの伸縮運動を制御するダイナミクス(「バウンスバック制御」と命名)とのハイブリッドダイナミクスにより解探索を行うアルゴリズムである。本研究では、「揺らぎ」と「バウンスバック制御」の双方を改善することで、より高速な解探索性能が実現することを確認した。また、その性能を従来最速の確率的局所探索アルゴリズムと比較し、今後アメーバモデルを物理的に実装することで、劇的に高速な解探索が実現できる可能性を示した。

研究テーマ B) 「デバイスによる実装形態を表現し評価するためのモデルの開発」

アナログ回路や先端デバイスを用いることで、アメーバモデルを実装できることを数値計算により示した。こうして、室温の熱揺らぎを利用して確率的動作を実現する、小型・低消費電力の新たな計算アーキテクチャが提案された。さらに、デジタル回路やアナログ回路により、アメーバモデルを物理的に実装した。これにより、アメーバモデルの優位性を、ハードウェアを用いて評価していくための基盤技術が確立された。

研究テーマ C) 「応用に適用できるモデルの開発」

アメーバモデルのバウンスバック制御を拡張し、化学反応をシミュレートできるモデルを提案した。そこでは、いくつかの物理化学法則を確率的制約条件として設定する。このモデルでは、時間発展が一時的に安定化した状態が安定な分子群の形成に対応し、その状態から他の状態への確率的遷移により、化学反応が表現される。将来的には、反応経路や副生成物の分析や発見、未知反応の速度論の半定量的なシミュレーションなどを、従来の第一原理計算を基礎とする手法では実現できない低計算コストで実現することが目標となる。

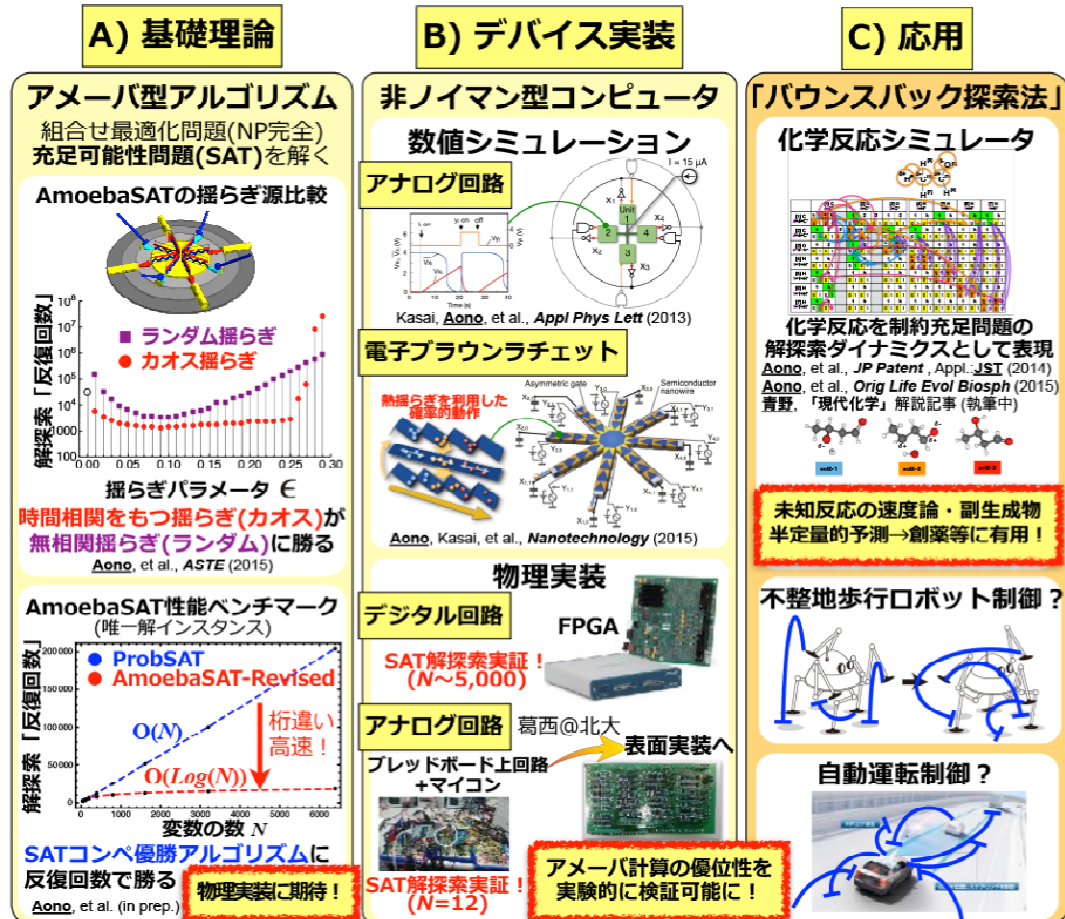


図1: 主な研究成果

(2) 詳細

研究テーマ A) 「アメーバモデルの解探索性能の起源と限界を明らかにする基礎理論の構築」

SAT は、複数の論理的制約条件を満たす真偽値の割当てを探索する問題である。アメーバモデルでは、各変数の真偽値がアメーバの足が伸長／縮退により表現され、ある組合せの足が伸長したとき制約条件により禁じられる足の伸長を抑制するよう導く「バウンスバック制御」のもとで、全ての足が同時並行的に伸び縮みを繰り返す(図2)。各足の抑制信号に対する応答は確率的に揺らぐため、試行錯誤的な解探索が実現し、全ての足が各自の伸長あるいは縮退を維持できる安定状態に到達したとき、SAT 解が得られる(図3)。本研究では、揺らぎ源として、ランダム(無相関)な白色雑音に代えて、時間相関をもつカオス振動子(ロジスティック写像)を用いると、解探索速度が向上することを示した(図 1, 論文 8,9,15)。また、バウンスバック制御規則を改善することにより、さらなる高速化を実現した(論文執筆中)。さ

らに、SAT アルゴリズム世界大会(2013)のランダム問題部門で優勝した「ProbSAT」と性能を比較し、問題サイズが大きくなると桁違いに少ない反復回数で解を発見できることを示した(図 1, 論文執筆中)。これは、今後先端デバイスによる物理実装でアメーバモデルの反復処理に要する時間を短縮できれば、劇的に高速な専用マシンが構築され得ることを示唆する。

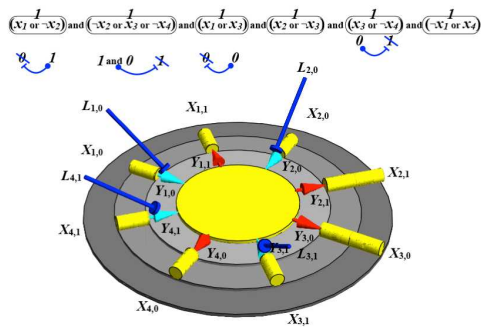


図2: バウンスバック制御

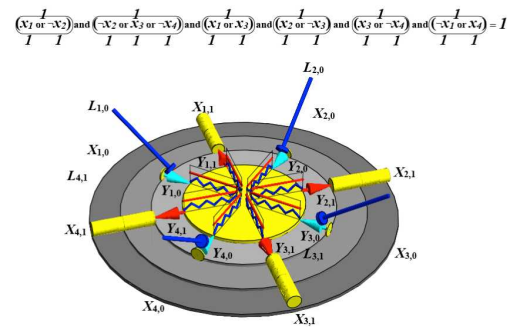


図3: 安定な SAT 解に到達した状態

一方、複数のアメーバユニットの体積の総和が保存され、バウンスバック制御が確率的報酬に応じて適用されるモデルを構築することにより、「多本腕バンディット問題」と呼ばれる意思決定問題の解を探索できることを示し(論文 4, 13)、関連研究を進めた(論文 7, 18,20)。

研究テーマ B) 「デバイスによる実装形態を表現し評価するためのモデルの開発」

デバイス実装のための第一歩として、回路シミュレータを用い、複数のコンデンサを並列接続したアナログ回路でアメーバを表現することにより SAT の一例である簡単な制約充足問題の解を探索できることを示した(図 1, 論文 1,2,3)。次に、SAT を解くアメーバモデルを、揺らぎを利用して確率的に揺らいだ応答を実現する「電子ブラウンラチェット」と呼ばれる半導体ナノワイヤ素子を用いて実装できることを、数値シミュレーションにより示した(図 1, 論文 11)。そこでは、揺らぎの統計的性質に依存して、従来の確率的局所探索アルゴリズムを凌ぐ高い解探索性能が実現する。これは、室温・小型・低消費エネルギーで NP 完全の組合せ最適化問題を高速に探索できる、新たな非ノイマン型アーキテクチャの提案である。

アメーバモデルの物理実装を、複数の異なる回路構成により実現した。デジタル回路(Field Programmable Gate Array; FPGA)を用い、揺らぎ源をカオス振動子により構成することで、変数の数 $N=5,000$ の SAT 解探索の正常動作を確認した(図 1, 論文執筆中)。また、北海道大・葛西誠也研究室と共同で、ブレッドボード上のアナログ回路により $N=4$ の SAT 解探索の正常動作を実証した(論文 17)。さらに、ブレッドボード上のアナログ回路とバウンスバック制御を実行するマイコンを組合せる新たな回路構成を確立し、 $N=12$ の SAT 解探索を実証するとともに(図 1)、その性能を最大化する揺らぎの確率と持続時間のパラメータ値の存在を見出した(論文執筆中)。今後この回路構成の集積度を表面実装により向上させ、解探索時間が問題サイズ N の関数としてどう成長するかを評価する。こうして、アメーバモデルの優位性を、ハードウェアを用いて実験的に検証していくための基盤技術が確立された。

一方、多本腕バンディット問題を解く意思決定システムに関しても、その原型を量子ドット(論文 5,6)、非圧縮性流体(論文 10,19)、単一光子(論文 14)、および原子スイッチ(論文 16, 特許 2)を用いて物理的に実装できることを示した。

研究テーマ C) 「応用に適用できるモデルの開発」

自然現象のシミュレーションによく用いられる分子動力学法は、多数の粒子の引力や斥力による集合や離散を記述するが、それ自体では原子間結合の生成と開裂を扱えず、化学反応は表現できない。一方、反応式と反応速度が既知であれば、それらが定義する連立常微分方程式を解くシミュレーション手法が有効であるが、この手法は未知の反応に適用することはできない。未知の反応を扱うには、第一原理計算を基礎とする手法が必要になるが、現在最速のスパコンを用いても、数マイクロ秒以上の計算を実用的な時間内で実行することは難しい。この困難は今後数桁の性能向上が見られたとしても依然として立ちどころの課題であり、大規模な化学反応の長時間にわたるシミュレーションを実現するには、ハードウェアとソフトウェアの両面で全く新しいアプローチが待望されている。本研究では、アメーバモデルを拡張して、未知の化学反応をシミュレートできるモデルを提案した(図 1, 論文 12, 特許 1)。ここでは、「バウンスバック制御」の方針を拡張し、原子間の結合の生成や開裂において存在するいくつかの物理化学法則(ルイスのオクテット則、結合解離エネルギー、分極、イオン化等)を確率的制約条件として設定する。このモデルでは、時間発展が一時的に安定化した状態が、安定な分子群の形成に対応する。そして、複数の(準)安定状態間の確率的に遷移として、化学反応が表現される。現段階で、熱力学的安定性(ある状態の維持されやすさ)と反応速度論(ある状態から他の状態への遷移の起こりやすさ)をパラメータ(バウンスバック適用確率)により調節可能となっている。これにより将来、未知の化学反応経路、副生成物、速度論を半定量的に予測するための基礎が固められた。

3. 今後の展開

物理実装

SAT は NP 完全問題であり、多くの複雑な組合せ最適化問題を SAT に変換することができる。よって、高速な SAT 解探索マシンには高い汎用性があり、実社会の多くの組合せ最適化の場面で活躍できると期待される。さきがけ研究により、デジタル回路、アナログ回路、および先端デバイスを用いた物理的ハードウェア実装方法が複数確立され、小さなサイズの SAT 問題につき解探索の正常動作を実証することができた。今後は、大きなサイズの SAT 問題に対し、集積性、高速性、消費エネルギーなどの観点から従来手法と比較してどのような優位性をもっているかを詳細に検証する。そして、そこから明らかとなる優位性を最大限に引き出す形で新たな計算パラダイムを提唱し、様々な社会実装へと展開していく。

社会実装

さきがけ研究により、アメーバモデルを拡張した化学反応シミュレーションモデルが構築され、未知の化学反応経路、副生成物、速度論を半定量的に予測するための基礎が固められた。今後は、確率的制約条件とそれらのパラメータの適切な設定方法を確立し、有機化学合成や新薬の開発などの応用を大きく前進させることを目標とし、研究を進めていく。こうした応用の成功のためには、従来型デジタル計算機上で走るソフトウェア、あるいは、クラウド側で高速計算を実行できる専用ハードウェアの開発が並行して進められる必要があるだろう。

一方、アメーバモデルの特長の一つは、確率的な挙動を示す先端デバイスを用いることで小型・低消費電力で実装できる可能性を有していることである。こうした実装が優位性を発揮するのは、携帯端末や自律航行ロボットなど、エッジ側で低消費電力の高速最適化計算を必要

とするアプリケーションである。そこで今後は、未知の不整地においてもその場で自律的に効率的な航行パターンを発見できる歩行ロボットや自動運転車の制御システムへと組込むことを想定し、センサーから高周波数で更新される入力情報を(中央処理系に伝達することなく)末端部において即座に分散処理できるハードウェアの研究開発を進める(図 1)。

4. 評価

(1) 自己評価

(研究者)

本研究は、さきがけ研究者・青野が定式化した組合せ最適化アルゴリズム「アメーバモデル」について、A)解探索性能を理論的に評価し、B)先端デバイスにより実装するための計算アーキテクチャを具体化し、C)実社会で有用な応用を提案することを目標として進められた。アメーバモデルの物理実装および社会実装の実現のためには、多くの共同研究者の継続的な協力が必要となる。そして、それが実現した先に、未知の答えを自ら導き出す創造的コンピュータを生む新たな計算パラダイムの開拓という大目標に向かう長い道のりが見えてくる。そこで、このさきがけ研究を開始するにあたり、期間内あるいは終了後に、目標 A)、B)、C)のそれぞれの分野の専門家にこれからアメーバ計算の共同研究を継続的に進めてみたいと思わせられるだけの結果と将来像とを提示できるようになっていることを目指した。その観点からすると、現時点で目標 A)、B)、C)のいずれに関しても強力な共同研究者の輪が広がってきており、それらの達成状況は良好であると自己評価したい。期間内の研究実施体制としては、目標 A)、B)、C)の多岐にわたる研究項目の達成のために、多くの協力者による分業体制を上手く確立することができたと考える。具体的には、目標 B)のハードウェア実装を北海道大学・葛西誠也教授とその学生2名および専門業者に担当していただいた。また、さきがけ予算で雇用した学生アシスタントおよび研究補助員(のべ5名)により、目標 A)、C)のプログラム開発や性能評価作業を分担して進めることができた。研究費は、ハードウェアおよびソフトウェアの開発費および人件費に重点的に配分し、研究成果へと直結するように執行することができたと考える。最後に、これらの研究成果の科学技術及び社会・経済への波及効果について、できる限り楽観的な期待を述べる。本さきがけ研究により、アメーバモデルをデジタル回路、アナログ回路、および先端デバイスを用いて物理的に実装する方法が複数確立された。これは将来、高い汎用性をもつ高速な SAT 解探索マシンの開発へとつながり、従来のシリコンデバイスとは異なる確率的な挙動を示す先端デバイスを生産する新たな半導体産業やそこから広がる新たな計算パラダイムの誕生をもたらし得ると期待する。また、本さきがけ研究により、アメーバモデルを拡張した化学反応シミュレーションモデルが構築され、未知の化学反応経路、副生成物、速度論を半定量的に予測するための基礎が固められた。今後、確率的制約条件とそれらのパラメータの適切な設定方法が確立できれば、従来の計算手法では実現できない大規模で長時間の化学反応シミュレーションが可能となり、有機化学合成や創薬などの応用が大きく前進し得ると期待する。

(2) 研究総括評価(本研究課題について、研究期間中に実施された、年2回の領域会議での評価フィードバックを踏まえつつ、以下の通り、事後評価を行った)。

(研究総括)

このテーマはアメーバ計算の基礎理論からアメーバのデバイス実装、応用分野の探索と多岐にわたるが、実験サイドと共同研究することなどにより各方面で進歩が認められる。アメーバ計算の形が次第に見えつつあると考える。特に SAT 問題でのベンチマーキングがなされ、CPU 時間では劣るが、反復回数では勝るという、アメーバの物理実装を肯定するデータを示した。またアメーバモデルの化学反応への応用を検討し求核付加反応を表現できた。国際口頭発表 22、国際招待講演 11 が示すように、様々な分野でアメーバ計算の宣伝、普及に努めたことも評価できる。目標通りの成果を達成している。

特に FPGA により アメーバを自作したことは高く評価できる。当面、デジタルアメーバの問題点を洗い出すことに時間を割かれると思われるが、実体化したことによる今後の進化が期待できる。従来の情報処理を超える新しいアーキテクチャーの可能性を示したことで科学技術のみならず実社会へのインパクトは大きいと考えられる。

本さがけ研究領域内で交流の成果が新たな超伝導量子回路を用いたアメーバの共同研究に発展、更に NEDO「IoT 推進のための横断技術開発プロジェクト」への採択に至り、研究者としての飛躍につながった。

今後は超伝導量子回路等のナノデバイス回路にアメーバアーキテクチャーを実装すること、および具体的アプリケーションとしての化学反応シミュレーションの発展に期待が持てる。実用段階では量子アニーリングやコヒーレントイジングマシンなどとの競合も問題になると思われるが、小型化に活路を見出せると考える。更にアメーバの基礎理論は他のゆらぎを用いた計算への応用可能性を有するものである。今後、電子回路の特許出願など知財確保が期待される。

検討により判明した回路のボトルネックや揺らぎ・乱数発生方法などの更なる技術面の深堀と、特に小型・低電力が求められるロボットへの適用などについて研究を深めてほしい。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1. S. Kasai, **M. Aono**, M. Naruse, “Amoeba-inspired computing architecture implemented using charge dynamics in parallel capacitance network,” *Applied Physics Letters* 103, 163703 (2013); DOI: 10.1063/1.4826143
2. **青野真士**, 成瀬誠, 金成主, 巳波弘佳, “粘菌アメーバから着想を得た計算パラダイムとナノフォトニクス・電子デバイス実現,” *信学技報 (IEICE Technical Report)* ED2013-132, SDM2013-147, pp. 1-6 (2014).
3. 巳波弘佳, **青野真士**, 成瀬誠, 葛西誠也, “粘菌アメーバ型解探索アルゴリズムとそのナノデバイスによる実現,” *信学技報 (IEICE Technical Report)* COMP2013-71, pp. 77-82 (2014).
4. **M. Aono**, S.-J. Kim, M. Hara, T. Munakata, “Amoeba-inspired Tug-of-War algorithms for exploration-exploitation dilemma in extended Bandit Problem,” *BioSystems* 117, 1-9 (2014); DOI: 10.1016/j.biosystems.2013.12.007
5. W. Nomura, M. Naruse, **M. Aono**, S.-J. Kim, T. Kawazoe, T. Yatsui, M. Ohtsu, “Demonstration of controlling the spatiotemporal dynamics of optical near-field

excitation transfer in Y-junction structure consisting of randomly distributed quantum dots,” *Advances in Optical Technologies*, Volume 2014, Article ID 569684 (2014).

6. M. Naruse, W. Nomura, M. Aono, M. Ohtsu, Y. Sonnefraud, A. Drezet, S. Huant, S.-J. Kim, “Decision making based on optical excitation transfer via near-field interactions between quantum dots,” *Journal of Applied Physics* 116, 154303 (2014); DOI:10.1063/1.4898570
7. M. Naruse, S.-J. Kim, M. Aono, H. Hori, M. Ohtsu, “Chaotic oscillation and random-number generation based on nanoscale optical-energy transfer,” *Scientific Reports* 4: 6039 (2014); DOI:10.1038/srep06039
8. M. Aono, S.-J. Kim, S. Kasai, H. Miwa, M. Naruse, “Amoeba-inspired heuristic search for NP-complete problem solution at the nanoscale,” Proceedings of the 2014 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (*NOLTA 2014*), pp.499–502 (2014).
9. M. Aono, S.-J. Kim, S. Kasai, H. Miwa, M. Naruse, “Amoeba-inspired spatiotemporal dynamics for solving the satisfiability problem,” *Advances in Science, Technology and Environmentology* Vol. B11, 37–40 (2015).
10. S.-J. Kim, M. Aono, “Decision maker using coupled incompressible-fluid cylinders,” *Advances in Science, Technology and Environmentology* Vol. B11, 41–46 (2015).
11. M. Aono, S. Kasai, S.-J. Kim, M. Wakabayashi, H. Miwa, M. Naruse, “Amoeba-inspired nanoarchitectonic computing implemented using electrical Brownian ratchets,” *Nanotechnology* 26, 234001 (2015); DOI:10.1088/0957-4484/26/23/234001
12. M. Aono, M. Wakabayashi, “Amoeba-inspired heuristic search dynamics for exploring chemical reaction paths,” *Origins of Life and Evolution of Biospheres* 45 (3), 339–345 (2015); DOI:10.1007/s11084-015-9450-5
13. S.-J. Kim, M. Aono, E. Nameda, “Efficient decision-making by volume-conserving physical object,” *New Journal of Physics* 17, 083023 (2015); DOI: 10.1088/1367-2630/17/8/083023
14. M. Naruse, M. Berthel, A. Drezet, S. Huant, M. Aono, H. Hori, S.-J. Kim, “Single-photon decision maker,” *Scientific Reports* 5, 13253 (2015); DOI: 10.1038/srep13253
15. M. Aono, S.-J. Kim, S. Kasai, H. Miwa, M. Naruse, “Amoeba-inspired spatiotemporal dynamics for physically implemented satisfiability problem solvers,” *Proceedings of Pragmatics of SAT 2015* (2015).
16. S.-J. Kim, T. Tsuruoka, T. Hasegawa, M. Aono, K. Terabe, M. Aono, “Decision maker based on atomic switches,” *AIMS Materials Science* 3(1), 245–259 (2016); DOI: 10.3934/matricsci.2016.1.245
17. 若宮 遼, 葛西誠也, 青野真士, 成瀬 誠, 巳波弘佳, “アメーバ型最適化問題解探索アルゴリズムの電子回路実装,” *信学技報 (IEICE Technical Report)* ED2014–152, pp. 81–85 (2015).
18. K. Iwayama, Y. Hirata, M. Aono, L. Zhu, M. Hara, K. Aihara, “Decision-making ability of *Physarum polycephalum* enhanced by its coordinated spatiotemporal oscillatory

dynamics,” <i>Bioinspiration & Biomimetics</i> 11, 036001 (2016); DOI:10.1088/1748-3190/11/3/036001
19. S.-J. Kim, M. Naruse, <u>M. Aono</u> , “Harnessing the computational power of fluids for optimization of collective decision making,” <i>Philosophies</i> 1(3), 245–260 2016; DOI: 10.3390/philosophies1030245
20. S.-J. Kim, M. Naruse, <u>M. Aono</u> , H. Hori, T. Akimoto, “Random walk with chaotically driven bias,” <i>Scientific Reports</i> 6, 38634 (2016); DOI: 10.1038/srep38634.

(2)特許出願

研究期間累積件数:2 件

1.

発 明 者: 青野真士, 若林政光

発明の名称: 物質探索システム及び方法,物質探索プログラム

出 願 人: 科学技術振興機構

出 願 日: 2014/3/20

出 願 番 号: 特願 2014-059133

2.

発 明 者: 金成主, 鶴岡徹, 長谷川剛, 青野正和, 青野真士

発明の名称: 意思決定装置

出 願 人: 物質・材料研究機構

出 願 日: 2016/1/20

出 願 番 号: 特願 2016-008632

(3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

国際学会招待講演

1. <u>M. Aono</u> , “Amoeba-inspired Beyond-Neumann Computing: Solving Intractable Computational Problems using Nanoscale Photoexcitation Transfer Dynamics,” Swiss-Japanese Workshop on Light and Matter on the Nanoscale, Lausanne, Switzerland, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne (EPFL), Oct. 4, 2013.
2. <u>M. Aono</u> , S.-J. Kim, M. Naruse, S. Kasai, H. Miwa, “Amoeba-inspired Nanoarchitectonic Computing,” MANA International Symposium 2014, International Center for Materials Nanoarchitectonics (WPI-MANA), National Institute for Materials Science (NIMS), Tsukuba, March 4–8, 2014.
3. <u>M. Aono</u> , S.-J. Kim, S. Kasai, H. Miwa, M. Naruse, “Amoeba-inspired Heuristic Search for NP-complete Problem Solution at the Nanoscale,” 2014 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA 2014), Luzern, Switzerland, September 14–18, 2014.
4. <u>M. Aono</u> , S.-J. Kim, S. Kasai, H. Miwa, M. Naruse, “Amoeba-inspired Computing Paradigm,” New Challenges in Complex Systems Science, Waseda AICS Symposium and the 14th Slovenia-Japan Seminar, Waseda University, Tokyo, October 24–26, 2014.
5. <u>M. Aono</u> , “Amoeba-inspired Nanoarchitectonic Computing for Solving Computationally

	Demanding Problems (Keynote Lecture),” The 15th edition of Trends in Nanotechnology International Conference (TNT2014), Barcelona, Spain, October 27–31, 2014.
6.	M. Aono , “Amoeba-inspired Computing Systems and Models for Solving Computationally Demanding Problems at the Nanoscale,” Swiss–Japan Workshop 2015, The international workshop on Nanoscale Electron–Photon Interactions via Energy Dissipation and Fluctuation, Les Diablerets, Switzerland, September 7, 2015.
7.	M. Aono , “Amoeba-inspired Computing: Chemical Reaction as Solution Searching,” Workshop on Proto-computation and Proto-life, Harvard University, Boston, MA, USA, December 10, 2016.
8.	M. Aono , “Amoeba-inspired Computing Architectures,” MANA International Symposium 2017, International Center for Materials Nanoarchitectonics (WPI-MANA), National Institute for Materials Science (NIMS), Tsukuba, February 28– March 3, 2017.

国内学会招待講演

1.	青野真土 , “粘菌に学んだアメーバ計算パラダイム,” 第 23 回 SKIL フォーラム, 特定非営利活動法人科学知総合研究所 (SKIL), 武田先端知ビル, 東京大学本郷キャンパス, 2013 年 10 月 18 日.
2.	青野真土 , “知性と生命の起源を探索するアメーバ計算モデル,” 電子情報通信学会 情報ネットワーク科学研究会, 関西学院大学 大阪梅田キャンパス, 大阪市, 2013 年 11 月 22 日.
3.	青野真土 , “ナノ光励起移動の時空間ダイナミクスによる組合せ最適化問題解探索,” レーザー学会年次大会 シンポジウム「プラズモン・ナノフォトニクス」, 小倉市国際会議場, 小倉市, 2014 年 1 月 22 日.
4.	青野真土 , 成瀬誠, 金成主, 巳波弘佳, “粘菌アメーバから着想を得た計算パラダイムとナノフォトニクス・電子デバイス実現,” 電子情報通信学会 電子デバイス研究会, 北海道大学, 2014 年 2 月 27 日.
5.	青野真土 , “粘菌アメーバの解探索ダイナミクスに着想を得た生化学シミュレーションモデル,” 総研大「生命概念の普遍化—宇宙の生命」第5回研究会, 広島大学学士会館, 2014 年 6 月 19 日.
6.	青野真土 , “アメーバ計算パラダイム: 時空間ダイナミクスによる最適解探索,” 複雑コミュニケーションサイエンス次元研究専門委員会パネルセッション, 電子情報通信学会総合大会, 立命館大学, 草津市, 2015 年 3 月 11 日.
7.	青野真土 , “粘菌アメーバから着想を得た計算パラダイム,” 第 2 期第 2 回(通算第 15 回)レーザー学会技術専門委員会「レーザーのカオス・ノイズ・ダイナミクスとその応用」, 理化学研究所 東京連絡事務所, 2015 年 7 月 31 日.
8.	青野真土 , “アメーバ計算から自然知能へ,” 第 2 回自然知能セミナー, 東京工業大学地球生命研究所, 2016 年 4 月 21 日.
9.	青野真土 , 成瀬誠, 葛西誠也, 金成主, “アメーバ計算パラダイム: 自然知能デバイスの創生,” 応用物理学会第 10 回集積化 MEMS 技術研究会, 東京大学駒場リサーチキャンパス, 2016 年 5 月 20 日.

10. **青野真土**, “自然知能システム: 粘菌の計算パワーを活用する,” シンポジウム「人工生体プログラマブルシステム ～精密構造設計から分子ロボティクスへ～」, 第 54 回日本生物物理学会年会, つくば国際会議場, 2016 年 11 月 27 日.
11. **青野真土**, “粘菌アメーバに学んだ自然計算デバイス,” 第 70 回研究会「脳型コンピューティングの最前線～生物、ニューロモルフィックから人工知能まで～」, 超精密加工専門委員会, 精密工学会, メルパルク大阪, 2016 年 12 月 16 日.
12. **青野真土**, “アメーバ型アルゴリズムから自然計算デバイスへ,” シンポジウム「ナチュラルコンピューティングとレーザーカオス」, レーザー学会学術講演会第 37 回年次大会, 徳島大学, 2017 年 1 月 8 日.
13. **青野真土**, “粘菌アメーバに学んだナノアーキテククス計算,” 応用物理学会 有機分子・バイオエレクトロニクス分科会 2 月研究会「生命知能が紡ぐ次世代コンピューティング～分子エレクトロニクスへの展開は可能か?～」東京大学駒場キャンパス, 2017 年 2 月 21 日.

国際学会発表

1. **M. Aono**, “Amoeba-inspired heuristic search dynamics for exploring the origins of life (oral),” The 2nd ELSI (Earth-Life Science Institute) International Symposium, Tokyo, Japan, March 24–26, 2014.
2. **M. Aono**, “Solution-searching models for exploring the origins of life (oral),” Origins 2014, Nara-ken New Public Hall, Nara, Japan, July 6–11, 2014.
3. **M. Aono**, S.-J. Kim, M. Wakabayashi, S. Kasai, H. Miwa, M. Naruse, “Amoeba-inspired spatiotemporal dynamics for physically implemented satisfiability problem solvers (oral),” Pragmatics of SAT 2015, Austin, Texas, United States, September 23, 2015
4. **M. Aono**, “Amoeba-inspired computing paradigm for solving NP-complete problems at the nanoscale (oral),” Workshop on Nanoscale Parallel Computing and Decision Making, Tampere, Finland, November 2, 2015.
5. **M. Aono**, “Amoeba-inspired search dynamics for simulating collective dynamics of attracting and repelling units (poster),” Gordon Research Conference on Protein Folding Dynamics, Galveston, Texas, January 11–12, 2016.
6. **M. Aono**, “Amoeba-inspired heuristic search dynamics for semi-quantitative estimation of unknown chemical kinetics (oral),” CINF 96, Division of Chemical Information, 252nd American Chemical Society National Meeting, Philadelphia, PA, USA, August 25, 2016.
7. **M. Aono**, “Amoeba-inspired heuristic search dynamics for simulating complex chemical reaction networks (oral),” 5th Japan-Korea Joint Workshop on Complex Communication Sciences, Pukyong National University, Busan, Korea, October 21, 2016.

国内学会発表

1. 葛西誠也, **青野真土**, 成瀬誠, 巳波佳弘, 若宮遼, “最適化問題探索電子アメーバ,” 第 61 回応用物理学会春季学術講演会 (講演予稿集 p. 09–070), 相模原市, 2014 年 3 月 17 日.
2. **青野真土**, 野村航, 成瀬誠, 金成主, 大津元一, “量子ドット間近接場光励起移動を用い

た意思決定機構とその基礎実験,” 第 61 回応用物理学会春季学術講演会 (講演予稿集 p. 03-109), 相模原市, 2014 年 3 月 17 日.
3. 青野真士 , “化学進化の反応経路を探索する複雑系計算モデル,” 日本進化学会 第 16 回大阪大会 ワークショップ「初期地球での生命誕生プロセスの網渡り」, 高槻現代劇場, 2014 年 8 月 23 日
4. 若宮遼, 葛西誠也, 青野真士 , 成瀬誠, 已波弘佳, “粘菌型解探索システムにおける自発的解探索の検討,” 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 講演番号 19a-A7-6, 北海道大学, 札幌市, 2014 年 9 月 19 日.
5. 若宮遼, 葛西誠也, 青野真士 , 成瀬 誠, 已波弘佳, “アメーバ型最適化問題解探索アルゴリズムの電子回路実装”, 電子情報通信学会電子デバイス・シリコン材料デバイス合同研究会, 札幌市, 2015 年 2 月 6 日.
6. 若宮 遼, 葛西誠也, 青野真士 , 成瀬 誠, 已波弘佳, “アメーバ型 SAT アルゴリズムの電子回路実装と動作速度,” 電子情報通信学会総合大会 (講演論文集 p. 57), 草津市, 2015 年 3 月 11 日.
7. 斉藤健太, 葛西誠也, 青野真士 , “電子アメーバにおけるエラーと SAT 解探索効率の関係,” 2016 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 講演番号 C10-01, 北海道大学, 札幌市, 2016 年 9 月 21 日.

受賞

1. 青野真士 , 平成 27 年度 電子情報通信学会 NOLTA ソサイエティ 貢献賞 (研究専門委員会運営; 複雑コミュニケーションサイエンス研究専門委員会の運営及び活動に対する貢献), 2015 年 9 月 9 日.
2. 青野真士 , 平成 28 年度 文部科学大臣表彰「若手科学者賞」, 粘菌アメーバに着想を得た革新的コンピュータの研究, 2016 年 4 月 20 日.

著作物

1. M. Naruse, N. Tate, M. Aono , M. Ohtsu, “Nanointelligence: Information Physics Fundamentals for Nanophotonics,” In: M. Naruse (ed.), Nanophotonic Information Physics (Springer, Berlin), pp. 1-39 (2014).
2. M. Aono , S.-J. Kim, M. Naruse, M. Wakabayashi, H. Hori, M. Ohtsu, M. Hara, “A Nanophotonic Computing Paradigm: Problem-Solving and Decision-Making Systems Using Spatiotemporal Photoexcitation Transfer Dynamics,” In: M. Naruse (ed.), Nanophotonic Information Physics (Springer, Berlin), pp. 223-244 (2014).
3. 青野真士 , “粘菌計算,” 「自然計算へのいざない」小林聡, 萩谷昌己, 横森貴 編著 (ナチュラルコンピューティング・シリーズ 第 0 巻), 近代科学社, 第 6 章, 167-194 (2015); ISBN-13: 978-4764904880.

メディア報道等

1. リクルート・キーマンズネット (オンラインニュース), “「粘菌型コンピュータ」って何だ?,” 2013 年 10 月 16 日.
2. TV Bros., わらしべマッドサイエンティスト 第 80 回 “粘菌アルゴリズム,” 2013 年 10 月 26 日.

3. SPIE Newsroom (米国オンラインニュース), “Nanophotonics for efficient solution searching and decision making,” 2014 年 1 月 6 日.
4. JST News (科学技術振興機構発行月刊誌) 裏表紙, さきがける科学人 Vol.30, “粘菌の動きで問題解決,” 2014 年 10 月 1 日.
5. 結界師: お殿様, 小学館コミック(My First Big), “スペシャル対談: 田辺イエロウ×青野真士,” 2015 年 4 月 15 日.
6. Phys.org (英国オンラインニュース), “Amoeba-inspired computing system outperforms conventional optimization methods,” 2015 年 6 月 1 日.
7. Nanotechweb.org (英国オンラインニュース), “Lab Talk: The wisdom of amoeba outperforms artificial intelligence,” 2015 年 6 月 8 日.
8. NICT/NIMS プレスリリース, “単一光子を用いた意思決定の実証に成功,” 2015 年 8 月 19 日.
9. Phys.org (英国オンラインニュース), “Researchers show that an iron bar is capable of decision-making,” 2015 年 8 月 24 日.
10. Mail Online (英国オンラインニュース), “Do inanimate objects THINK? Scientists claim that an iron bar can make 'decisions',” 2015 年 8 月 24 日.
11. MIT Technology Review (米国オンラインニュース), “First demonstration of photonic intelligence,” 2015 年 9 月 10 日.
12. Nanotechweb.org (英国オンラインニュース), “Single photons could help make complex decisions,” 2015 年 9 月 16 日.
13. Phys.org (英国オンラインニュース), “Single photon decision-maker solves multi-armed bandit problem,” 2015 年 9 月 17 日.
14. Nature Japan (オンラインニュース), “Single-photon decision maker,” 2015 年 10 月 26 日.
15. 日経産業新聞, “半導体の革新: 粘菌にヒント,” 2015 年 12 月 7 日.
16. 日経産業新聞, “次世代の先導者: 粘菌まねたコンピューター ～生命の起源解明に懸ける～,” 2016 年 1 月 14 日.
17. Nanotechweb.org (英国オンラインニュース), “Fostering strategies in materials design,” 2016 年 3 月 30 日.
18. CREST・さきがけ ナノエレクトロニクス研究領域 News Letter vol. 3, “「アメーバ型」探索コンピュータをナノエレクトロニクスにより実現するアーキテクチャを設計,” 2016 年 3 月.
19. 東工大ニュース (東工大ホームページ), “平成 28 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰で「若手科学者賞」を受賞,” 2016 年 5 月 11 日.
20. NEDO ニュースリリース, “IoT 推進のための横断技術開発プロジェクトに着手—2030 年の高度 IoT 社会を支える基盤技術を開発—,” 2016 年 7 月 8 日.