

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月31日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2011

課題番号：22700322

研究課題名（和文） 粘菌アメーバの時空間振動ダイナミクスを活用するバイオコンピュータの研究開発

研究課題名（英文） Amoeba-based Computing using SpatioTemporal Oscillatory Dynamics of True Slime Mold

研究代表者

青野 真士 (AONO MASASHI)

独立行政法人理化学研究所・揺律機能研究チーム・基幹研究所研究員

研究者番号：00391839

研究成果の概要（和文）：

単細胞生物・真性粘菌は、中枢神経系を持たないが、環境刺激情報の記憶、最適化問題解決等の高度な情報処理を実現する。こうした自律分散型情報処理は、自発的に伸縮する繊維状タンパク群が、時空間振動ダイナミクスを自己組織化することにより実現するものと考えられる。本研究では、粘菌の自発的挙動に応じて光刺激をフィードバックするシステムを構築することで、時空間ダイナミクスが情報処理機能を創発する機序を解析し、その過程を再現する数理モデルを導出した。さらに、粘菌に類似したダイナミクスをもつ、近接場光相互作用する量子ドット系を用い、最も難しい組合せ最適化問題の一つである充足可能性問題の解探索を実現するシステムのアイデアを具体化し、特許出願を実現した。

研究成果の概要（英文）：

A single-celled amoeboid organism, the true slime mold *Physarum polycephalum*, exhibits sophisticated information processing capabilities such as learning environmental information and solving complex optimization problems. These distributed processing capabilities emerge from self-organized spatiotemporal oscillatory dynamics of autonomously oscillating actin-myosin systems. In this study, constructing a bio-computer which applies light stimuli in response to spontaneous behaviors of the organism, I analyzed how the spatiotemporal dynamics produce the information processing capabilities and derived a mathematical model which reproduces well the emergent processes. Moreover, I focused on some analogies between the spatiotemporal dynamics of the organism and that of optical near-field interactions in quantum dots, and applied for a patent on a solution search system which uses the quantum dots for searching for solutions to one of the most complex combinatorial optimization problems, the Boolean satisfiability problem.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・生体生命情報学

キーワード：自己組織化、創発、ナチュラルコンピューティング、最適化、意思決定、資源配分、カオス、複雑系

1. 研究開始当初の背景

真性粘菌は、Unconventional Computing あるいは Natural Computing と呼ばれる、計算機科学の分野で活発に研究され始めている。この分野は、従来のデジタル計算機とは異なる背景理論に基づく新しい計算原理の提案や、シリコンデバイスとは異なる素材を用い、その物性やダイナミクスを生かした新たな情報処理デバイス/システムの開発を目指すものである。

真性粘菌の情報処理能力に関する代表的なものとして、北海道大・中垣俊之らのグループによる、粘菌が迷路の入口と出口に置いた餌を最短経路で接続できるという、最適化問題の解決能力を有することを示した研究が挙げられる。また、同グループは、粘菌が、経験した周期的な温度変化を予測し、移動速度を周期的に変動させる、一種の記憶能力を有することを示した。

筆者は、粘菌を組込んだ計算機による創発的計算の「概念」を提案し、それを「実験」で実装し、その自発的挙動を「モデル化」した。

2. 研究の目的

「時空間パターンを自己組織化する分子素子集団は、どのような計算を創発できるか？」この問いは、情報科学、物理学、生命科学、脳科学、材料科学を含む広い学問領域にまたがる挑戦的な課題であり、具体的解答が与えられれば、簡素な分子素子集団の超並列動作により高度な情報処理を実現する方法論を確立でき、従来型デジタルコンピュータに基礎を置く現在の情報技術に重大な革新をもたらす可能性がある。本研究の目的は、粘菌の自発的挙動に応じ刺激をフィードバックする実験観察を通し、この問いにアプローチすることであった。

3. 研究の方法

本研究で開発したシステムは、巡回セールスマン問題(TSP)の解を探索できる。TSPは最も難しい組合せ最適化問題の一つであり、有効な解(巡回経路)の総数は、問題サイズ(都市数) N の増大とともに指数関数的($(N-1)!/2$)に成長する。本システムの探索は、粘菌の N^2 本の分枝(足)により行われる。それらが複雑な振動ダイナミクスに基づき伸び縮みしながら、どの足を伸ばせば光(嫌いな刺激)の照射リスクを最小化できるか試行錯誤し、最終的に N 本の分枝のみが伸長したとき、その組合せが一つの解を表現することとなる。このシステムは、フィードバック制御用プログラムのパラメータ設定を変えるだけで、様々な

異なる問題状況を設定できる。こうすることで、問題サイズ N を大きくしていったときに、本システム解探索能力がどのように変化するかを広範に調査する事が可能となった。

4. 研究成果

TSPの問題サイズを $N=4,5,6,7,8$ と大きくして行ったときの性能を比較した。その結果、 N が増大しても解の質は劣化せず($N=8$ の場合、上位約19%の短い経路長)、解到達時間は N に比例することが分かった。つまり、探索空間の成長が N の非線形関数となるにもかかわらず、探索に要する「時間」等の資源の増大を N の線形関数に抑えながら、「正確さ」は維持することができているのだ。このことは、本ダイナミクスが、ある程度正確な計算を「探索コスト」を低く抑えながら実現できる「経済的」な探索能力を有している可能性を示唆する。これは、類似したダイナミクスを活用するデバイスの優位性を主張する一つの論拠となり得る。

「経済的」な探索能力が創発する過程を再現する数理モデルを導出した。このモデルは、総リソース量(原形質体積に相当)を一定に保存するという拘束条件がかかった結合振動子系である。こうした特殊な結合により、個々の振動子の挙動は安定かつ単純であっても、システム全体のレベルで、不安定かつ複雑な振舞いが創発することを示す事に成功した。この不安定性と複雑性が、高い解探索能力をもたらさう事が示唆された。

一方、粘菌内の原形質輸送ダイナミクスと、量子ドット間の近接場光相互作用を介した光励起輸送は、ともに非局所的な空間相関や時間相関をもつダイナミクスとして記述され、両者の間には興味深い類似性がある。筆者は、粘菌の解探索に用いたフィードバック制御を応用することで、量子ドット系を用いてNP完全問題として知られる充足可能性問題(SAT)の解を探索できることを示唆する数理モデルを定式化した。このアイデアを共同研究者とともに詳細に検討し、特許出願を実現するに至った。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計10件)

- ① **Masashi Aono**, Liping Zhu, Song-Ju Kim, Masahiko Hara, "Performance enhancement of amoeba-based neurocomputer for 8-city traveling salesman problem", Proceedings of 2011 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA), Kobe, Japan, 104-107 (2011). (査読有)
- ② Liping Zhu, **Masashi Aono**, Song-Ju Kim, Masahiko Hara, "Problem-size scalability of amoeba-based neurocomputer for traveling salesman problem", Proceedings of 2011 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA), Kobe, Japan, 108-111 (2011). (査読有)
- ③ Song-Ju Kim, Etsushi Nameda, **Masashi Aono**, Masahiko Hara, "Adaptive tug-of-war model for two-armed bandit problem, Proceedings of 2011 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA), Kobe, Japan, 176-179 (2011). (査読有)
- ④ **Masashi Aono**, Yoshito Hirata, Masahiko Hara, Kazuyuki Aihara, "Greedy versus social: Resource-competing oscillator network as a model of amoeba-based neurocomputer", Natural Computing10, 1219-1244 (2011). (査読有)
- ⑤ **Masashi Aono**, Liping Zhu, Masahiko Hara, "Amoeba-based neurocomputing for 8-city traveling salesman problem", International Journal of Unconventional Computing 7 (6), 463-480, (2011). (査読有)
- ⑥ **青野真士**, 金成主, Liping Zhu, 原正彦, "粘菌ニューロコンピュータとその参照モデル:巡回セールスマン問題解決能力の問題サイズ依存性", 電子情報通信学会, 複雑コミュニケーションサイエンス研究会 (CCS), CCS-2011-024, 29-35 (2011). (査読無)
- ⑦ 金成主, **青野真士**, 行田悦資, 原正彦, "粘菌の意思決定を模した網引きモデル:正確で速い並列探索アルゴリズムの物理的実装に向けて", 電子情報通信学会, 複雑コミュニケーションサイエンス研究会 (CCS), CCS-2011-025, 36-41 (2011). (査読無)
- ⑧ **青野真士**, 金成主, Liping Zhu, 行田悦資, 原正彦, "粘菌コンピュータと確率探索アルゴリズム", 「システム/制御/情報 (ISCIE)」第55巻第12号「システム制御情報における確率論の先端応用」特集号, 526-531 (2011). (査読無)
- ⑨ **青野真士**, 金成主, 原正彦, "粘菌を組

み込んだバイオコンピュータ", バイオサイエンスとインダストリー 68 (5), 346-349 (2010). (査読無)

- ⑩ **青野真士**, "真性粘菌アメーバの時空間振動ダイナミクスによる自己組織的計算", 電気化学および工業物理化学 78 (9), 779-782 (2010). (査読無)

[学会発表] (計11件)

- ① **青野真士**, 招待講演: "粘菌コンピューティング:時空間振動ダイナミクスによるボトムアップ型資源配分最適化", 情報処理学会, 第151回DPS研究会, 2012年5月22日, 那覇, 沖縄県青年会館.
- ② **青野真士**, 招待講演: "時空間振動ダイナミクスによる資源配分と意思決定の全体最適化", 東京大学工学部, ナノフォトニクスオープンセミナー, 2011年11月17日, 東京, 日本.
- ③ **青野真士**, "粘菌コンピューティング:時空間相関ダイナミクスを活用した資源配分の全体最適化", 第2回複雑コミュニケーションサイエンス研究会2011年11月11日, 宮古島, 日本.
- ④ **Masashi Aono**, "Performance enhancement of amoeba-based neurocomputer for 8-city traveling salesman problem", International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA), 2011年9月5日, 神戸, 日本.
- ⑤ **Masashi Aono**, "Amoeba-based neurocomputing and resource-competing oscillator networks", SIAM Conference on Applications of Dynamical Systems (2011), 2011年5月24日, Snowbird, Utah, USA.
- ⑥ **青野真士**, "粘菌コンピュータから見えてきたもの", 理化学研究所 社会知創成中村特別研究室+揺律機能研究チーム 連携ワークショップ「生物を律する揺らぎのメカニズムを追い求めて」, 2011年4月20日, 和光, 日本
- ⑦ **Masashi Aono**, 招待講演: "Amoeba-based chaotic neurocomputing: Spatiotemporally-correlated search dynamics for optimization problems, 3rd International Conference on Chaos Revolution in Science, Technology, and Society (ICR2011), 2011年2月22日, University of Indonesia, Depok City, Indonesia.
- ⑧ **Masashi Aono** 招待講演: "Amoeba-based neurocomputing: Spatio-temporal dynamics for overall optimization in resource allocation and decision making", 34th Mathematical Sciences based on Modeling, Analysis and

Simulation Seminar, Meiji University
Global COE Program, 2010年12月20日,
Meiji University, Ikuta, Kanagawa,
Japan.

- ⑨ **青野真士, 招待講演:** “真正粘菌コンピュータと資源総量保存型振動子ネットワークによる並列探索”, 屋久島非線形問題若手ワークショップ～非線形科学と情報通信科学のフロンティア開拓～, 2010年11月6日, 環境文化研修センター, 屋久島, 鹿児島, 日本.
- ⑩ **青野真士, 招待講演:** “真性粘菌コンピューティング”, 分子ロボティクス研究会7月定例会, 2010年7月30日, Campus Innovation Center, 田町, 東京, 日本.
- ⑪ **Masashi Aono,** Song.-Ju Kim, Yoshito Hirata, Masahiko Hara, Kazuyuki Aihara, 口頭発表: “Scalability of amoeba-based neurocomputer for traveling salesman problem”, 1st International Workshop on Computing with Spatiotemporal Dynamics (CSD10), 2010年6月23日, The University of Tokyo, Hongo, Tokyo, Japan.

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

名称: 量子ドットによる解探索システム
発明者: 青野真士, 金成主, 原正彦, 成瀬誠, 川添忠, 大津元一
権利者: 理化学研究所
種類:
番号: 特願2012-116725
出願年月日: 2012年5月22日.
国内外の別: 近日中に国外出願予定

○取得状況 (計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

[その他]

ホームページ等

<http://arn.local.frs.riken.jp/~aono/index-j.html>

<http://www.youtube.com/user/MasashiAONO/videos>

学会運営活動

1. 国際研究会 Information Physics and Computing in Nano-scale Photonics and Materials 2012, オルレアン, フランス, 2012年9月: プログラム委員
2. 電子情報通信学会 複雑コミュニケーションサイエンス時限研究専門委員会: 幹事補佐

6. 研究組織

(1) 研究代表者

青野 真士 (AONO MASASHI)

独立行政法人理化学研究所・揺律機能研究チーム・基幹研究所研究員

研究者番号: 00391839