

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25年 5月 12日現在

機関番号：20103

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2012

課題番号：20300105

研究課題名（和文） 時間記憶能の系統進化に対する実験的評価と非線形動力学構造

研究課題名（英文） Experimental evaluation of evolutionary development of memory ability and its analysis by nonlinear dynamics.

研究代表者

中垣 俊之（NAKAGAKI TOSHIYUKI）

公立はこだて未来大学・システム情報科学部・教授

研究者番号：70300887

研究成果の概要（和文）：

生物システムは天与の情報機械であり、その動作原理の解明は、基礎科学として興味深いばかりでなく、また新規情報技術の創成にもつながり社会的にも重要である。本研究では、単細胞生物である粘菌変形体を主なモデル生物として、その情報処理能力、特に時間記憶能の最も基本的なあり方を実験的に評価し、情報処理のアルゴリズムを考察した。細胞レベルで既に周期的なイベントの予測と想起の能力があること、それは代謝反応の多重リズム的な運動から表れることをつきとめた。同様な能力が、原生生物界から動物界、植物界にいたるまで広く共通して見られることを示唆できた。

研究成果の概要（英文）：

Bio-systems are nature-made machine for information processing. To study how they work is interesting from a scientific point of view and is important from a technological point of view. In this project, we focus on a model organism of *Physarum* plasmodium as one of the most elementary creature. The organism's capacity of information processing is evaluated by an experiment and its algorithm is proposed. We found that a cell can anticipate a periodic environmental event and recall it later, and that the capacity can be realized by a collective motion of biochemical poly-rhythmic oscillations. We suggested that the capacity of this kind may be common widely in phyllogenetic tree from protozoa to plant and animal.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
2009年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2010年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2011年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2012年度	2,100,000	630,000	2,730,000
総計	14,400,000	4,320,000	18,720,000

研究分野：生体生命情報学

科研費の分科・細目：情報学・生体生命情報学

キーワード：生体情報、生物情報処理の進化

1. 研究開始当初の背景

人間の知性は、情報科学の観点からすると非常に興味深い研究対象である。脳の情報処理は、並列的に結合した神経細胞間を

膜電位の興奮が伝わるというたったそれだけの過程によってなされている。そこには決定的な司令塔はない。このような比較的均質な能動的素子の集団が、どのように振

る舞うかを記述する強力な科学言語が非線形動力学である。

生物の情報処理は、何も神経系に限ったわけではない。進化の道筋を思い起こすと、それはむしろ水面にわずかばかり現れる氷山の一角に過ぎない。最も単純なレベルの生物、すなわちたった一つの細胞からなるような生物でも、それなりに情報処理をしている。否、研究が進むにつれ想像以上に賢いことが分かって来た。ゾウリムシが前に棲んでいた環境温度を記憶できたり、粘菌が迷路を解くことができたりというような驚くべき事実が報告されている。それらが長い地質年代を生き抜いて来たことに改めて思いを馳せると、これは当然のことなのかもしれない。我々人間の、いわば大先輩にあたるわけだから。生物の高次情報処理は、このような観点からすると、幅広い進化的な見通しのなかで捉えるのがよからう。

2. 研究の目的

本研究では、最も基本的な生物システムである細胞を中心に、生物情報処理の根源的なあり方を追求する。

3. 研究の方法

(1) 生物材料として、真正粘菌モジホリ *Physarum polycephalum* の変形体 *plasmodium*、原生動物繊毛虫アカゾウリムシ *Brepharisma*、緑色植物車軸藻 *Nitella* を用いて、動物行動学の手法に習い行動観察を行った。温度、湿度、光、電気などの刺激を周期的に与え、その後の反応を調べた。また時間空間変動環境下での粘菌の振る舞いを観察して、その最適性を評価した。

(2) 観察された生物の行動を、物質の運動という視点から数理モデル化した。モデルの挙動を解析し、情報処理のアルゴリズムとして捉え直した。非線形動力学と数値計算法を駆使した。

4. 研究成果

(1) 単細胞生物の粘菌とアカゾウリムシ、緑色植物の車軸藻という3つの生物種で周期的イベントに対する時間記憶能が見られた。これは、この時間記憶能が、種固有のものでなく一般的に見られる可能性を示す。

(2) 時間記憶能は、温度・湿度刺激の記憶のみならず、光の刺激や電気刺激に対しても見られることがわかった。これは、外界信号を受容する過程の背後に、情報処理を担う過程が存在することを示唆する。

(3) ヒトは同様の時間記憶能を有すると期待できるが、他の多細胞生物として、オジギソウ、プラナリア、ヒドラで実験を行ったが、明確な結論には至らなかった。時間記憶能は、ゆらぎの大きい反応であり、十分な統計処理

を必要とすることがわかった。しかしながら、不可避的な大きいゆらぎの積極的な意義、すなわち生物行動の多様性や個性との関連が発展的に示唆された。

(4) 時間記憶能をもたらす動力的機構に関して、基本的な枠組みで構成した振動子集団モデルを提案した。時間記憶能が、化学反応の動的振る舞いとして実現されることがわかった。将来的にはこのモデルを幅広く健闘して、さらに発展させたい。

(5) 時間空間変動に対する適応能の評価として、鉄道網に似た多機能性ネットワークを作る能力を発見した。このことから、動的最適化問題を解く能力があることがわかってきた。

以上より、時間記憶能の最も基本的なあり方を提案できた。これにより、記憶のしくみに対する一般的な概念「記憶物質の生成による記憶の保持」とは異なるしくみ「物理的な運動の特質としての記憶の発生」を提案できた。

これまでの数理モデルは現象論的なものであり、現実の物質との対応についての知見はそれほど顧みなかった。そこで、細胞原形質のレオロジーについて基本的な性質の解明にも取り組んだ。

(6) 粘菌は、同じ毒物(キニーネ)刺激に対して、場合によって逃げたり、乗り越えたりした。この行動選択のしくみを、細胞原形質のゾルとゲルの運動方程式から提案した。

(7) 粘菌はゾルゲル変換を利用して、体内に物質循環流路ネットワークを作る。一様な場が不均一化して、流路が自発形成する様子を二相流体方程式(ブリックマン方程式)から提案した。

(8) 粘菌は蠕動運動により物質を輸送する。正味の物質輸送や物質の攪拌、あるいはそれらの効率について、粘性流の方程式から解析した。

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27件)

1. Q. Ma, A. Johansson, A. Tero, T. Nakagaki, D. J. T. Sumpter: "Current reinforced random walks for constructing transport network", *The Royal Soc. Interface*, Vol. 10, 20120864 (2013). doi:10.1098/rsif.2012.0864 査読あり
2. K. Itsuki, S. Sato, T. Saigusa and T. Nakagaki: "Ethological response to periodic stimulation in {Yit Chara} and {Yit Brepharisma}", *Natural Computing, Proceedings in Information and Communications Technology (PICT)*, Vol. 6,

- Springer-Verlag, 3-13 (2013). Doi : 10.1007/978-4-431-54394-7_1 査読有り
3. I. Kunita, K. Yoshihara, A. Tero, K. Ito, C. F. Lee, M. D. Fricker and T. Nakagaki: "Adaptive path-finding and transport network formation by the amoeba-like organism *Dictyostelium*", Natural Computing, Proceedings in Information and Communications Technology (PICT), Vol. 6, Springer-Verlag, 14-29 (2013). DOI: 10.1007/978-4-431-54394-7_2 査読有り
 4. I. Kunita, K. Sato, Y. Tanaka, Y. Takikawa, H. Orihara, and T. Nakagaki: "Shear Banding in An F-actin Solution", Physical Review Letters, Vol. 109, 248303 (2012). DOI:10.1103/PhysRevLett.109.248303 査読有り
 5. K. Ueda, S. Takagi, and T. Nakagaki: "Tactic direction determined by the interaction between oscillatory chemical waves and rheological deformation in an amoeba", Physical Review E 86, 011927 (2012). doi: 10.1103/PhysRevE.86.011927 査読有り
 6. M. Iima and T. Nakagaki: "Transport and mixing of chemicals inside the body of a micro-organism", Journal of Mathematical Medicine and Biology, Vol. 29, 263-281 (2012)doi: 10.1093/imammb/dqr010 査読あり
 7. 中垣俊之: "知性とは何か 人間と自然のこれからを粘菌に訊く", 広告, 第 53 巻 2 号、通巻 389 号 -恋する芸術と科学-, 116-117、博報堂 (2012-Aug) 査読なし
 8. 中垣俊之: "粘菌からのぞく行動知の起源～学際的視点から～", 熊楠ワークス, NO. 39, 4-13 (2012-Apr) 査読なし
 9. 中垣俊之、小林亮: "原生生物粘菌による組み合わせ最適化法—物理現象として見た行動知—", 人工知能学会誌, Vol. 26, 482-493 (2012) 査読なし
 10. R. D. Guy, T. Nakagaki and Grady B. Wright: "Flow-induced channel formation in the cytoplasm of motile cells", Physical Review E, Vol. 84, 016310 (2011). DOI: 10.1103/PhysRevE.84.016310 査読あり
 11. K. Ueda, S. Takagi, Y. Nishiura, and T. Nakagaki: "Mathematical model for contemplative amoeboid locomotion", Physical Review E, 83, 021916 (2011). 査読あり
 12. 伊藤賢太郎、中垣俊之: "粘菌ネットワークの賢さ", 生物物理, Vol. 51(4), 178-181 (2011) 査読あり
 13. K. Ito, D. Sumpter, T. Nakagaki: "Risk management in spatio-temporally varying field by true slime mold", NOLTA (Nonlinear Theory and Application) journal, IEICE. Vol.1, 26-36 (2010). 査読あり
 14. U. Takuya, K. Takeda, T. Nakagaki, R. Kobayashi, A. Ishiguro: "Fully decentralized control of a soft-bodied robot inspired by true slime mold", Biological Cybernetics, 102, 261-269 (2010) 査読あり
 15. A. Tero, S. Takagi, T. Saigusa, K. Ito, D. P. Bebbler, M. D. Fricker, K. Yumiki, R. Kobayashi and T. Nakagaki: "Rules for biologically-inspired adaptive network design", Science, 327: 439-442 (2010) 査読あり
 16. 高木清二、中垣俊之: "真正粘菌による自己組織的な鉄道網設計", 現代化学, NO. 477, 48-51 (2010年12月) 査読なし
 17. Toshiyuki Nakagaki: "Foraging behaviors and potential computational ability of problem-solving in an amoeba", Proceedings in Information and Communications Technology (PICT2) Natural Computing, Proceedings of the 4th Int. Workshop on Natural Computing, Ed. by F. Pepper, H. Umeo, N. Matsui, T. Isokawa, Springer, 42-54 (2010). 査読なし
 18. 中垣俊之、手老篤史、小林亮: "適応ダイナミクスに基づく細胞計算能力", 第 54 回物性若手夏の学校講義ノート、物性研究、Vol. 93(6), 911-934 (2010 Mar) 査読なし
 19. A. Tero, T. Saigusa and T. Nakagaki: "Protoplasmic computing to memorize and recall periodic environmental events", Proceedings of International Workshop on Natural Computing (Springer-verlag), PICT 1, Springer-verlag: 213-221 (2009) 査読あり
 20. 手老篤史、小林亮、中垣俊之: "アメーバの迷路解きに学ぼう", 数理科学, NO.535, 7-11, (2008) 査読なし
- [学会発表] (計 45 件)
1. T. Nakagaki: "Computational ability of cells based on cell dynamics and adaptability", Vienna Biocenter PhD Symposium 2012 -BIOMIMETICS inspired by nature -, Vienna Biocenter, Austria(2012-11-8/9)
 2. T. Nakagaki: "Ethology and rheology of an amoeboid cell", The 16th Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences, Okinawa Convention Center, Japan (2012-10-28/11-1), plenary talk
 3. T. Nakagaki: "Exploring ethology of an amoeba by means of mathematical logic", Nonlinear Partial Differential Equations: Theory and Applications to Complex Systems, An International Conference in honor of Hiroshi Matano, Institut des Hautes Etudes Scientifiques, Gif-sur-Yvette, France (2012-6-25/28)
 4. T. Nakagaki: "Adaptive design of multi-functional network in a primitive organism", 12th Experimental Chaos and Complexity Conference, University of Michigan, USA (2012-5-16/19)

5. T. Nakagaki : "Transport networks adaptive to flow in true slime mold and beyond", Seminar on Mechanisms of Transport Across Adaptive Biological Networks and a Changing World, Radcliff Institute For Advanced Study, Harvard University, USA (2012-3-16/17)
 6. T. Nakagaki : " How does an amoeba tackle a maze?", Shanhai Lecture organized and hosted by Prof. Rolf Pfeifer (University of Zurich, Swiss), Future University Hakodate (2011-10-29)
 7. T. Nakagaki : "Problem solving by slime mold and its equation of physical motion", Two day workshop on Problem solving by slime mold, University of Uppsala, Sweden (2011-09-20)
 8. T. Nakagaki : "Ethological dynamics in {¥it Physarum} plasmodium", The 4th European Science Foundation Conference on Functional Dynamics, Praha, Czech Republic (2011-09-21/24)
 9. T. Nakagaki : "Behavioral smartness and its simple dynamics in a giant amoeba of {¥it Physarum} plasmodium", Dynamic organization and motility of single cells, Max-Planck Institute for the Physics of Complex Systems, Dresden, Germany, (2011-08-30/09-01)
 10. T. Nakagaki : "Behavioral smartness and its simple dynamics in an giant amoeba of Physarum polycephalum", Minischool/Workshop on Signals and Spatio-temporal patterns in simple bio-systems, University of Copenhagen, Niels Bohr Institute, Denmark (2011-08-25/27)
 11. Y. Tanaka, T. Nakagaki : Minisymposium "Dynamics of Protoplasm in Amoeboid Cells: "Mechanics of peristaltic locomotion driven by contraction waves and friction control", SIAM Conference on Applications of Dynamical Systems , Snowbird, Saltlake City , USA (2011-05-25)
 12. T. Nakagaki : "Ethology of plasmodial amoeba of slime mold in relation to the capacity of information processing in cell", 2nd GCOE International Symposium of Animal Global Health. Special lecture. Obihiro University of Agriculture and Veterinary Medicine (2010-04-04)
 13. T. Nakagaki : "Ethology of amoeba viewed from nonlinear dynamics", La 13e Rencontre du Non-lineaire, Institut Henri Poincare (2010-3)
 14. T. Nakagaki : "Solving a multi-purpose optimization problem by amoeboid computing ", 8th International Conference on Unconventional Computation, Workshop on Novel Computing Substrates, University of Aozores, Ponta Delgada, Portugal (2009-09)
 15. T. Nakagaki : "Cells anticipate periodic events", American Physical Society March Meeting, Pittsburgh, USA (2009-03)
 16. T. Nakagaki "Information processing in cells based on nonlinear biochemical dynamics -behavioral smartness in slime molds-", Gordon Research Conference on Dynamic Instabilities And Oscillations In Chemical Systems , Colby College, Maine , USA (2008-07)
 17. T. Nakagaki, A. Tero, T. Saigusa and R. Kobayashi "Information processing at cell level -smart behaviors in an amoeba of Physarum-", Korean Physical Society Meeting , Dejeon , Korea (2008-04)
- [図書] (計4件)
1. 中垣俊之 文、斉藤俊行 絵、「かしこい単細胞 粘菌」、福音館書店 月刊「たくさんのふしぎ」第332号 (2012-11)
 2. 小林亮、中垣俊之 “真正粘菌の運動と知性” [理論生物学(望月敦編著)] Pp. 176-200, 2011年. 共立出版
 3. 中垣俊之、「粘菌—その驚くべき知性—」PHPサイエンスワールド新書 (2010-4) 1-198. PHP 研究所
 4. M. D. Fricker, L. Boddy, T. Nakagaki, D. Bebbler: "Adaptive biological networks" in [Adaptive Networks: Theory, Models and Applications] edited by T. Gross and H. Sayama, 51-70, Springer Verlag (2009)
- [その他]
- 報道等 (新聞)
1. 中垣俊之 : 「粘菌でコンピューター進化」中日新聞, 11月25日 (2012)
 2. 中垣俊之 : Gray Matter -The wisdom of slime-(by A. Adamatzky and A. Ilachinski), New York Times, SundayReview (May 13, 2012)
 3. 朝日新聞 2010/10/1 粘菌またイグノーベル賞
 4. 朝日新聞 2010/11/18 オピニオン記者有論 イグの心意気 枠から飛び出した科学に光
 5. 朝日新聞 2010/11/20 科学あっちこっち面白い はこだて未来大 中垣教授「粘菌」で2度目のイグノーベル賞
 6. 朝日小学生新聞 2010/10/2 粘菌使って鉄道網設計
 7. 朝日小学生新聞 2010/10/19 マンガニュース ワカッタくん イグノーベル賞って何?
 8. 毎日新聞 2010/10/1 イグノーベル賞 鉄道網に「粘菌の知恵」
 9. 読売新聞 2010/10/12 旬のひと 粘菌研究でイグノーベル賞を受賞した公立はこ

- だて未来大教授
10. 読売新聞 2010/11/20 タイムカプセル 生物学者 中垣俊之さん
 11. 日本経済新聞 2010/10/1 粘菌の知恵で鉄道整備
 12. 日本経済新聞 2010/10/30 粘菌侮れぬ実力 生き物共通の謎を追う
 13. 北海道新聞 2010/10/1 中垣教授 再び受賞 はこだて未来大 粘菌「知恵」研究で
 14. 北海道新聞 2010/10/27 現代かわら版 笑いは地球を救う イグノーベル賞
 15. 北海道新聞 2010/11/5 粘菌と人間 知性の源流を探検する
 16. 中日新聞 2010/12/7 研究室発：合理的 答え導く単細胞生物
 17. 中垣 俊之：朝日小学生新聞 2009 年 01 月 01 日 「おもしろ版ノーベル賞「イグノーベル賞」、迷路の最短経路を解く粘菌、単細胞でも賢い、などと紹介される」
 18. 手老 篤史、小林 亮、中垣 俊之：毎日新聞 2008 年 11 月 23 日 「単細胞生物なのに迷路が得意な粘菌一同質集まり賢さ実現ー」
 19. 手老 篤史、小林 亮、中垣 俊之：読売新聞 2008 年 11 月 10 日 「考える粘菌、迷路で最短ルート、光さける工夫も」
 20. 中垣 俊之：朝日新聞 2008 年 10 月 13 日 「「ひと」欄にノーベル賞のパロディ「イグノーベル賞」を受けたとして紹介記事掲載」
 21. T. Nakagaki：Dagens Nyheter 2008 年 08 月 30 日 “スウェーデン最大の大衆紙で見開き 2 頁の記事として、粘菌の知性に関する研究が「Svampar ar smartare an du tror」として紹介された。”
 22. T. Nakagaki：DiePresse 2008 年 07 月 25 日 “オーストリアの新聞にて、細胞の賢さに関する研究が「Einzeller sind so smart!」として紹介された。”

報道等 (テレビ)

1. NHK ニュースネットワーク北海道 2010/10/01
2. NHK ニュースネットワーク北海道 2010/11/15
3. フジテレビたけしの平成教育委員会 2010/11/21
4. フジテレビたけしの新教育白書 2010/11/20
5. フジテレビニュース FNN 2010/10/01
6. NHK クローズアップ現代 2010/12/13
7. 中垣 俊之：NHK 総合テレビ爆笑問題の日本の教養 爆問学問 140 回を記念して行われた企画「今夜決定 爆ノーベル賞」(2011 年 3 月 8 日)にて、粘菌の賢さを探る我々の研究が第一回の爆ノーベル賞を受賞した。

8. 中垣 俊之：NHK 総合テレビ爆笑問題の日本の教養 爆問学問「単細胞は天才なのだ！」2009 年 12 月 15 日「30 分の番組で粘菌の賢さを探る我々の研究が紹介された」
9. 三枝 徹、手老 篤史、中垣 俊之：NHK 教育 TV「サイエンスゼロ」2008 年 12 月 28 日「教育科学番組であるサイエンスゼロでの 2008 年年間ランキング特集にて、「ゼロのツボ」コーナーで粘菌研究がイグノーベル賞受賞とともに紹介された。」
10. 中垣 俊之：テレビ局 NHK 北海道 2008 年 11 月 13 日「夕方のニュース「まるごとニュース北海道」にて「イグノーベル賞と粘菌研究について」報道された。」
11. 中垣 俊之：テレビ局 UHB 2008 年 10 月 21 日「夕方のニュースにて「イグノーベル賞と粘菌研究について」報道された。」
12. 中垣 俊之：NHK ラジオ 2008 年 10 月 03 日「番組「ラジオ朝一番」にて文化の日にちなんだ話題として「迷路を解く粘菌の研究」として 15 分ほどインタビュー形式で紹介された。」
13. 手老 篤史、小林 亮、中垣 俊之：フジテレビ「特ダネ」2008 年 10 月 01 日「「パズルを解く粘菌の研究」に対するイグノーベル賞認知科学賞受賞の報道」

ホームページ

http://www.fun.ac.jp/staff/staff_comp/nakagakitoshiyuki.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中垣俊之 (NAKAGAKI TOSHIYUKI)

公立はこだて未来大学・システム情報科学部・教授

研究者番号：70300887

(2) 研究分担者

三枝徹 (TETSU SAIGUSA)

北海道大学・工学研究科・博士研究員

研究者番号：50421954

(平成 20 年度のみ)