

令和 2 年 6 月 17 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C) (特設分野研究)

研究期間：2017～2019

課題番号：17KT0123

研究課題名(和文)非線形性に基づく人工物システムの強化

研究課題名(英文)Enhancement of artificial systems based on nonlinearity

研究代表者

中田 聡 (Nakata, Satoshi)

広島大学・統合生命科学研究科(理)・教授

研究者番号：50217741

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、人工物システムを強化するために、非線形科学に基づいて、システムの情報次元、自律性、応答性、及び柔軟性を高めることを目的とした。

具体的には研究期間では次の(1)～(4)について実施した。(1)高次元情報を指標として、人工物システム自身の診断と周辺の評価(例：半導体ガスセンサの非線形応答)、(2)人工物システムを定常状態に復元するためのリミットサイクルの導入、(3)同調現象を活用して、周囲の環境に柔軟に応答できる人工物システムの開発、(4)時空間パターンを導入し、可塑性の高い時空間材料や環境モニターのシステムに応用した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的・社会的意義は次の通りである。人工物システムに依存した特徴的な非線形応答を高次元情報として、システム自身の耐久性や機能性の評価と環境診断ができる。2. 環境変化に対して、リミットサイクルの持つ軌跡の回復力や同期による安定な位相と周期のシフト機能を活用して、最適状態を自律的に導く。3. 環境に柔軟に自発的な時空間パターンが形成される。このような多様な応答により、様々な環境変化に対してシステムが柔軟に適合するとともに、時空間パターンに基づいた環境モニタリングができる。4. 生物の群れパターン等、複雑系から本質的要素を抽出する一方、システムを全体的に強化することができる。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to enhance information, autonomy, response, and flexibility of the system in order to strengthen artificial systems. During the research, the following examinations are performed. (1) Diagnosis of the artificial systems and evaluation of environment (e.g., nonlinear responses of semiconductor gas sensors to gases). (2) Introduction of limit cycle oscillation to reproduce the stable state for artificial systems. (3) Development of artificial systems which are flexibly responsive to the external environment based on synchronization. (4) Application of spatiotemporal pattern formation to the system for monitoring environment and spatio-temporally developed materials.

研究分野：界面の物理化学

キーワード：非線形科学 非平衡 パターン形成 自己組織化 振動 分岐 同期 リズム

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

非線形科学は、平衡状態から離れた非平衡状態で生じるリズムやパターンなど、特徴的な現象の解明に注目されて研究が行われてきた。そして国内外での多くの研究により、数多くの非線形現象が解明されてきた。その一方で、「人工物の強化」のために「非線形科学」がどのように貢献できるかについての議論はさほどなかったように思われる。ところが非線形科学の1つの大きな視点として、生体系で見られるリズムやパターンがあり、それらは生命活動を営む上で、特徴的かつ重要な現象とみなされている。つまり生物に学ぶ人工物の構築は、これまでにない新たな機能を発現することにつながるという学術的背景の芽が出ている状況であったと考えられる。

2. 研究の目的

そこで、生物に学ぶ非線形現象を「人工物の強化」のために活用することを提案し、「人工物の強化」を目的としたさまざまな研究者と議論を交えることにより、より現実的なシステムを構築することを目指すことを研究目的とした。その中で、「強化」の意味として、様々な環境下で柔軟かつ多様に振る舞える、自律性の高いシステムの構築を指すこととした。

3. 研究の方法

大きく分けると2つの方法で研究を進めた。1つは、「非線形性」を有効な情報次元として、人工物を強化するために活用することである。これは例えばこれまでのセンサは直流電圧といった一次元情報に基づいた化学分析であり、環境の変化や不純物はその応答を阻害するために、誤作動の問題が残っていた。そこで非線形性により得られた高次元情報を活用すれば、環境の変化や不純物応答を識別するだけでなく、センサにフィードバックすることによって強化できると考え、研究を行った。もう一つは非線形振動子の特徴であるリミットサイクル振動の活用である。生体系はリズムを整えることによって生命現象を維持している。例えば外部摂動により振動リズムが乱されても元のリズムに復元する能力を持つことが重要である。そこで非線形性を人工系に導入することにより自律性の高い人工物を構築し、その能力を強化する研究である。

4. 研究成果

一定流速の条件下、周期的温度摂動による高次元情報として非線形応答の増幅に成功した。さらに高次元情報を用いて、センサの置かれる環境を自己診断し、最適条件で動作する環境を導くことに成功した。これにより半導体ガスセンサの応答性の増幅と共に環境適合性を強化した。次に、生物の持つ概日性や定常的な心臓の鼓動など、リミットサイクル振動を人工物系に導入する知るシステムを構築した。具体的には、解糖系振動反応を介した結合振動子系の実験結果に基づいて、化学振動反応である Belousov-Zhabotinsky 反応のカップリングの実験を行った。その結果、化学進行波のパターンとリズムをフィードバックした、最適条件で時空間発展する人工系を構築した。また、化学反応とカップルした、反応拡散系に基づく自己駆動運動の運動様相モードスイッチング系を構築し、最適な運動モードを自発的に発現することに成功した。具体的な研究成果を、次の(1)-(6)に示す。

(1) 半導体ガスセンサの非線形応答に基づくガス分析：従来のガスセンサは、ヒーター電圧一定、つまり温度一定の下、センサ電導度の直流値を情報、つまり一次元情報しか得られない。しかしながら実際のガス分析では、外部環境(湿度、酸素他空気中のガス濃度)と内部環境(センサの aging)の影響を受ける。それは半導体ガスセンサが原理的に可燃性ガスや蒸気に応答することが原因にある。そこでガスセンサの非線形応答を指標として、温度・吸着等、ガス種の燃焼機構の違いに基づいたガス種の識別と同時にセンサの置かれている環境を診断できるガスセンシングシステムを構築することを研究目的とした。具体的には従来行ってきた周期的温度摂動に流速を与えたところ、ガス吸着の違いが顕著になり、炭化水素ガス応答の増幅とアルコール蒸気応答の低下が得られた。これにより温度と流速の2次元観測に基づいて、たった一つのセンサでも高次元情報を獲得することができた。これにより従来周期的温度摂動だけで識別が困難であったガス種の識別の増幅に成功するとともに、外部環境又は内部状態の影響を診断しながらガスセンシングできる、人工物強化の1例であると考えられる。

(2) 化学振動反応を示すビーズの化学進行波と2つの非線形振動子の結合による同期パターン：化学振動反応の代表である Belousov-Zhabotinsky (BZ) 反応の触媒を直径 0.5-1.0 mm のイオン交換ビーズに吸着させた場合の化学進行波について実験を行った。まず単体のビーズについて、表面に触媒を吸着させた 2D ビーズと球体内部に触媒を吸着させた 3D ビーズを作成した。これにより、球体表面又は球体全体を伝播する化学進行波(ビーズ全体が振動するグローバル振動(GO))、ビーズの一端から反対方向に伝播するトラベリング波(TW)、スパイラル波)を発現することに成功した。これらの研究は細胞の表面又は内部で伝播する Ca^{2+} wave のダイナミクスを解明する上で重要なモデル実験系と言える。次にこれらのビーズを2つカップリングさせたときの化学波の時空間パターンについて研究を行った。その結果、3D ビーズで逆方向のトラベリング波をカップリングさせたところ、2個の距離に依存して、交互伝播、反転伝播、単指向伝播の3種類の伝播パターンが形成されることを見出した。このようにこれまで時間振動情報しか検出されていなかったが、新たに空間情報を検出することにより、環境変化に対して多様性かつ最適な応答ができる柔軟な人工物を構築することに成功した。

(3) 外部からの電位にตอบสนองする化学進行波の様相変化：3D ピーズでは GO と TW が双安定状態と単安定状態で発生することが知られているが、双安定状態ではどちらが生じるかは不明瞭であった。そこでピーズを電極に置き、電圧印加によって選択的に発現する系を見出した。これは正電位により抑制因子である Br^- を引き付けることで対称的な振動である GO を発現させ、逆に負電位により活性因子である HBrO_2 を電気化学的に発生させることにより、異方的な TW を発現することを明らかにした。これらの研究により、制御困難であった化学進行波を電圧制御することに成功することに成功した。これはリズムの自律的な調整により人工物を強化する 1 つの有効なシステムになると考えている。

(4) 解糖系振動子のカップリングによる同期現象：グルコースの分解を通じて生物がエネルギー変換する代謝過程である解糖系において生じる NADH 濃度の振動反応は、解糖系振動として知られ、生体系のリズムを解明する上で重要な現象である。具体的には、マイクロ粒子に酵母菌を導入することにより、解糖系振動子を作成し、複数個カップリングすることで生じる同期現象について実験と理論の両面から研究を行った。その中で、抗菌作用のあるキトサンを添加することによって解糖系振動反応に対する効果を解明することを目的とした。その結果、集団振動について 2 種類のキトサンの効果が生じることを見出した。つまり低濃度キトサンでは同期し、高濃度で非同期化した。これらの現象を、キトサンによる細胞膜透過性の増加とアセトアルデヒド除去のバランスで説明した。特に低濃度キトサンでは、細胞間結合の増加を誘発する同期プロモーターとして機能する可能性を数値計算に基づいて示した。またこの研究は、生体系で生じる同調リズムの強弱を外部から調節可能であることを示しており、人工物の強化や強弱の制御に応用できる可能性を示した。

(5) 局所的な光刺激に対する化学進行波の応答：Ru 触媒を用いた光感受性 BZ 反応系では、空間的に振動場又は興奮場を作成できる利点がある。本研究では、一次元的に進行する化学波(局所的な酸化状態の伝播)に対して、局所的な光刺激を化学波と同じ速度で進行させた場合の応答について実験と理論の両面から研究した。つまり 1 つの化学進行波のどの部分に光刺激が効果的に働くかを明らかにする研究である。その結果、化学波のアキレス腱と言える部分に光刺激を与えると効果的に化学波が消失することを実験と理論の両面から解明した。この研究により、これまで不明瞭であった非線形振動子の特徴である 1 つのリミットサイクルに対する局所的な刺激応答が実験と理論の両面から理解できる重要な知見が得られとともに、リミットサイクルによる軌道修正を人工物系に導入する上でも重要な情報になる。

(6) 自己駆動体の集団行動によるパターン形成：人工の自己駆動体を用いた集団行動は、生物の複雑な集団行動を解明する上で重要であるとともに、集団パターン形成を活用した人工物は、環境変化に対して多様にตอบสนองする柔軟な材料になる可能性が高い。具体的には、複数個の樟脳円板を水面に浮かべる実験を行った。その結果、数密度に依存して特徴的なパターンを形成することに成功した。この自己駆動系の駆動力は表面張力差であり、駆動体間に働く表面張力差の斥力と高濃度条件における引力によるクラスター化によって理論的にも説明することができた。さらに種類の異なる樟脳円板を用いて引力・斥力のバランスを変えたところ、異なるクラスターパターンを形成することを見出した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計17件（うち査読付論文 16件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Nakata Satoshi, Nasu Kyoko, Irie Yasutaka, Hatano Sayaka	4. 巻 35
2. 論文標題 Self-Propelled Motion of a Camphor Disk on a Photosensitive Amphiphilic Molecular Layer	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Langmuir	6. 最初と最後の頁 4233 ~ 4237
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.langmuir.8b04285	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Nakata Satoshi, Nomura Mio, Yamaguchi Yuta, Hishida Mafumi, Kitahata Hiroyuki, Katsumoto Yukiteru, Denda Mitsuhiro, Kumazawa Noriyuki	4. 巻 560
2. 論文標題 Characteristic responses of a 1,2-dipalmitoleoyl-sn-glycero-3- phosphoethanolamine molecular layer depending on the number of CH(OH) groups in polyols	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects	6. 最初と最後の頁 149 ~ 153
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.colsurfa.2018.10.012	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Shibata Kenichi, Amemiya Takashi, Kawakita Yu, Obase Kohei, Itoh Kiminori, Takinoue Masahiro, Nakata Satoshi, Yamaguchi Tomohiko	4. 巻 285
2. 論文標題 Promotion and inhibition of synchronous glycolytic oscillations in yeast by chitosan	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The FEBS Journal	6. 最初と最後の頁 2679 ~ 2690
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/febs.14513	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Amemiya Takashi, Shibata Kenichi, Du Yichen, Nakata Satoshi, Yamaguchi Tomohiko	4. 巻 29
2. 論文標題 Modeling studies of heterogeneities in glycolytic oscillations in HeLa cervical cancer cells	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science	6. 最初と最後の頁 033132 ~ 033132
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5087216	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nakata Satoshi, Kayahara Katsuhiko, Kuze Masakazu, Ginder Elliott, Nagayama Masaharu, Nishimori Hiraku	4. 巻 14
2. 論文標題 Synchronization of self-propelled soft pendulums	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Soft Matter	6. 最初と最後の頁 3791 ~ 3798
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/c8sm00517f	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nakata Satoshi, Nomura Mio, Seki Yota, Deguchi Ayano, Fukuhara Koichi, Denda Mitsuhiro, Kumazawa Noriyuki	4. 巻 546
2. 論文標題 Characteristic responses of a 1,2-di-myristoyl- sn -glycero-3-phosphocholine molecular layer to polymeric surfactants at an air/water interface	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Colloids and Surfaces A	6. 最初と最後の頁 163 ~ 167
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.colsurfa.2018.02.066	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tenno Ryoichi, Gunjima You, Yoshii Miyu, Kitahata Hiroyuki, Gorecki Jerzy, Suematsu Nobuhiko J., Nakata Satoshi	4. 巻 122
2. 論文標題 Period of Oscillatory Motion of a Camphor Boat Determined by the Dissolution and Diffusion of Camphor Molecules	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry B	6. 最初と最後の頁 2610 ~ 2615
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.7b11903	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kuze Masakazu, Kitahata Hiroyuki, Steinbock Oliver, Nakata Satoshi	4. 巻 122
2. 論文標題 Distinguishing the Dynamic Fingerprints of Two- and Three-Dimensional Chemical Waves in Microbeads	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry A	6. 最初と最後の頁 1967 ~ 1971
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpca.7b12210	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Nakata Satoshi, Kayahara Katsuhiko, Yamamoto Hiroya, Skrobanska Paulina, Gorecki Jerzy, Awazu Akinori, Nishimori Hiraku, Kitahata Hiroyuki	4. 巻 122
2. 論文標題 Reciprocating Motion of a Self-Propelled Rotor Induced by Forced Halt and Release Operations	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 3482 ~ 3487
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.7b12089	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 K. Nishi, S. Suzuki, K. Kayahara, M. Kuze, H. Kitahata, S. Nakata, Y. Nishiura	4. 巻 95
2. 論文標題 Achilles' heel of a traveling pulse subject to a local external stimulus	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 062209-1 ~ 8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.95.062209	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 H. Nishimori, N. J. Suematsu, S. Nakata	4. 巻 86
2. 論文標題 Collective behavior of camphor floats migrating on the water surface	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 101012-1 ~ 9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.86.101012	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 S. Tanaka, S. Nakata, T. Kano	4. 巻 86
2. 論文標題 Dynamic ordering in a swarm of floating droplets driven by solutal Marangoni effect	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 101004-1 ~ 9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.86.101004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 J. Gorecki, H. Kitahata, N. J. Suematsu, Y. Koyano, P. Skrobanska, M. Gryciuk, M. Malecki, T. Tanabe, H. Yamamoto, S. Nakata	4. 巻 19
2. 論文標題 Unidirectional motion of a camphor disk on water forced by interactions between surface camphor concentration and dynamically changing boundaries	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Chemistry Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 18767 ~ 18772
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C7CP03252H	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 S. Nakata, Y. Seki, M. Nomura, K. Fukuhara, M. Denda	4. 巻 90
2. 論文標題 Characteristic isotherms for a mixed molecular layer composed of phospholipid and fatty acid	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Bulletin Chemical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 801 ~ 806
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/bcsj.20170045	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Y. Satoh, Y. Sogabe, K. Kayahara, S. Tanaka, M. Nagayama, S. Nakata	4. 巻 13
2. 論文標題 Self-inverted reciprocation of an oil droplet on a surfactant solution	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Soft Matter	6. 最初と最後の頁 3422 ~ 3430
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/c7sm00252a	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 H. Kitahata, H. Yamamoto, M. Hata, Y. S. Ikura, S. Nakata	4. 巻 520
2. 論文標題 Relaxation dynamics of the Marangoni convection roll structure induced by camphor concentration gradient	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Colloids and Surfaces A	6. 最初と最後の頁 436 ~ 441
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.colsurfa.2017.01.048	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 S. Nakata, M. Nomura, H. Yamamoto, S. Izumi, N. J. Suematsu, Y. Ikura, T. Amemiya	4. 巻 56
2. 論文標題 Periodic oscillatory motion of a self-propelled motor driven by decomposition of H ₂ O ₂ by catalase	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Angewandte Chemie International Edition	6. 最初と最後の頁 861 ~ 864
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/anie.201609971	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 中田 聡
2. 発表標題 自己駆動体の往復運動
3. 学会等名 反応拡散系と実験の融合 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中田 聡
2. 発表標題 あたかも生き物のように振る舞う自己駆動体
3. 学会等名 電子科学研究所 公開シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松藤丈郎・中田 聡
2. 発表標題 形状に依存する自己駆動体の自己反転
3. 学会等名 日本化学会春季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 久世雅和・中田 聡 他
2. 発表標題 2個のBZビーズのカップリングによる化学波の進行方向の変化
3. 学会等名 日本化学会春季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 坂本麻里・中田 聡
2. 発表標題 BZ振動子に発現する時空間パターンの電圧制御
3. 学会等名 日本化学会春季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 入江康孝・中田 聡 他
2. 発表標題 水面滑走するクマリン粒子の加水分解に対する応答
3. 学会等名 日本化学会春季年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Satoshi Nakata
2. 発表標題 Characteristic motion of a self-organized object based on nonlinearity
3. 学会等名 Dynamics Days Europe (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Satoshi Nakata, eds. et al.	4. 発行年 2019年
2. 出版社 Royal Society of Chemistry	5. 総ページ数 371
3. 書名 Self-organized motion	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>研究室ホームページ http://www.mls.sci.hiroshima-u.ac.jp/bukkan/index_j.html 研究業績 http://www.mls.sci.hiroshima-u.ac.jp/bukkan/gyouseki.htm</p>
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	雨宮 隆 (Amemiya Takashi) (60344149)	横浜国立大学・大学院環境情報研究院・教授 (12701)	
連携研究者	長山 雅晴 (Nagayama Maaharu) (20314289)	北海道大学・電子科学研究所・教授 (10101)	
連携研究者	北畑 裕之 (Kitahata Hiroyuki) (20378532)	千葉大学・大学院理学研究科・准教授 (12501)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携 研究者	末松 信彦 (Suematsu Nobuhiko) (80542274)	明治大学・総合数理学部・准教授 (32682)	