

令和 4 年 6 月 12 日現在

機関番号：24402

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2017～2021

課題番号：17H00733

研究課題名(和文) 分子通信技術の国際標準化と医療応用

研究課題名(英文) Molecular Communication: Standardization and Application Development

研究代表者

中野 賢 (Nakano, Tadashi)

大阪市立大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：70571173

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 27,400,000円

研究成果の概要(和文)：分子通信とは、生体内における通信形態を模倣した生化学反応に基づく情報通信パラダイムである。本研究では、分子通信を技術として確立することを長期目的として、分子通信方式の設計と評価、および、応用設計と概念実装を行った。具体的には、信号分子濃度が作る時間波形を利用した分子通信方式、送受信機が環境中を移動するモバイル分子通信、バイオナノマシンの集団が分子通信を介して協調的に動作し、標的となる腫瘍の検出や治療を行う協調型ドラッグデリバリシステム、がん細胞集団が相互作用を介して大規模な構造を形成する現象について研究を行った。本研究により分子通信の基盤となる技術やアプリケーションの研究開発が大きく進展した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果をまとめた論文は、情報通信分野で世界的に権威のある国際学術論文誌(PIEEEなど)に採択されたり、大規模な国際会議(IEEE GLOBECOM 2020)において最優秀論文賞を受賞したりするなど、学術的に高い評価を得ている。さらに、がん細胞生物学と関連する研究の成果については、生物物理学分野で権威のある学術雑誌にも採択され、一般にも広く報道された。本研究の成果は新しい通信技術の開発につながるだけでなく、生物学や医学の進展にも貢献することが期待される。

研究成果の概要(英文)：Molecular communication is a biologically inspired communication paradigm in which biological molecules are used to transmit information. In this project, we aimed to establish molecular communication as a communication technology and developed methods and systems of molecular communication. Toward the goal, we have developed methods of molecular communication to transmit information using chemical waves. We have also devised the concept of mobile molecular communication, molecular communication among mobile bio-nanomachines. We have also designed and developed cooperative drug delivery systems where a group of bio-nanomachines communicate using molecular communication to detect and deliver drug molecules to target locations. Further, we have modelled and analyzed systems of cancer cells that interact through molecular communication and form a large-scale structure. Research results obtained in this research project will form the basis of future molecular communication research.

研究分野：情報ネットワーク

キーワード：分子通信 情報ネットワーク ナノ医療 生命科学

## 1. 研究開始当初の背景

分子通信とは、生体内における通信形態を模倣した生化学反応に基づく新しい情報通信パラダイムである[1][2]。研究代表者らが2005年に世界に先駆けて提唱し、研究開発を進めてきた。分子通信は、酵素や蛋白質などの生体素材で構成されるバイオナノマシン間の通信に利用できる。分子通信は、体内埋込型バイオナノマシンを有機的に連携させるために利用できると考えられており、病気の診断や治療を自律的に行う生体内バイオセンサネットワークの構築に貢献するなど、医療分野への応用が強く期待されている。

分子通信は、従来の通信と同様に符号化、送信、伝播、受信、復号化の5つのプロセスで理解できる(図1)。まず、送信機が何らかのメッセージを分子で表現し(符号化)、環境中に放出する(送信)。環境中に放出された分子は熱揺らぎや他の分子の影響を受けながら環境中を伝搬する。分子が受信機の近傍に到達したとき、受信機と反応し(受信)、受信機の状態を変化させる(復号化)。つまり、受信機がメッセージを受け取る。分子通信は、従来の光や電気による通信とは全く異なる性質をもっている。情報を伝達する分子が熱揺らぎの影響を受けること、送受信機(例えば、遺伝子改変細胞)が信号分子に対して確率的に反応すること、更に、送受信機や信号分子が経時的に劣化することなどの理由から、分子通信は極めて不確実な通信手段となる。一方、超並列性や生体親和性といった既存の電気通信がもたない特徴を有しており、新しい通信の技術として期待される。

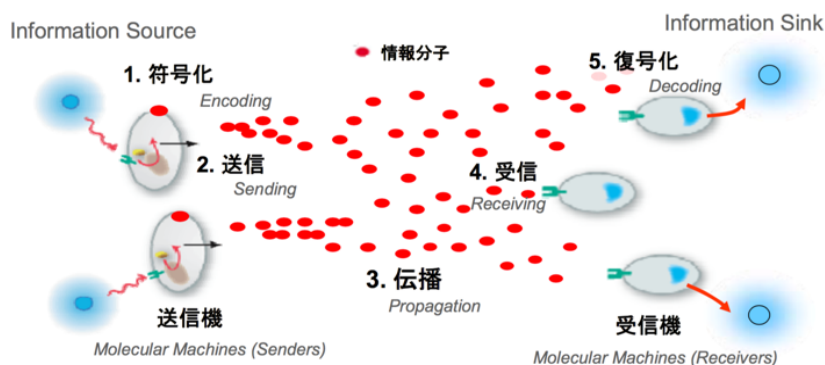


図1 分子通信の概要

## 2. 研究の目的

これまでの当該分野の研究では、各研究者が独自の想定に基づいて数理モデルを構築し、通信の性能や特性を評価するといったボトムアップ的な研究が進められてきた。今後、分子通信を通信の技術として普及させるためには、具体的なアプリケーションを設計、開発し、アプリケーションの要求事項に基づくトップダウン的な視点から分子通信を体系化することも重要になる。本研究では、分子通信を技術として確立することを研究の長期目的として、様々な分子通信方式の設計と評価、および、応用設計と概念実装を行った。

## 3. 研究の方法

本研究では、分子通信を技術として確立することを目的として、以下の研究を進めた。

- (1) **新しい分子通信方式に関する研究**: これまでの分子通信研究では信号分子の個数あるいは濃度で情報を表現することが考えられてきた。一方本研究では、信号分子濃度の時間変化(あるいは、信号分子濃度が作る時間波形)を利用して情報を伝播する新しい分子通信方式を設計し、評価した。
- (2) **モバイル分子通信に関する研究**: これまでの分子通信研究では送受信機の位置が変動しない静的な通信環境が想定されてきた。一方本研究では、送受信機が環境中を移動するモバイル分子通信を提案し、そのモデル化や計算機実験を行った。
- (3) **ドラッグデリバリーシステムの設計に関する研究**: 細胞等で実装するバイオナノマシンが分子通信を介して協調的に動作し、標的となる腫瘍細胞の検出や治療を行う協調型ドラッグデリバリー方式を設計し、計算機実験によりその性能を評価した。

- (4) **がん細胞集団の構造形成に関する研究**：がん細胞生物学の分野では、がん細胞集団が血管様構造を形成して成長するという報告がある。本研究では、がん細胞集団が血管様構造を形成する原理を分子通信の観点から理解することを目的として、がん細胞間の相互作用やがん細胞集団の移動を表すモデルを作成し、計算機実験および細胞生物実験を行った。

#### 4. 研究成果

##### (1) 分子通信方式に関する研究の成果

信号分子濃度の時間変化（あるいは、信号分子濃度が作る波形）を利用して情報を伝播する新しい分子通信方式を設計し、評価した。具体的には、従来の通信方式のように搬送波の振幅や周波数を利用して情報を伝播するが、化学反応により生じる複雑な形状の信号波形を利用することで、一つの波形に複数の振幅や周波数を載せて情報を伝播できる通信方式を考え[3]。また、信号分子が伝播する方向を制御するためのチャンネルスイッチの設計や計算機シミュレーションによる性能評価を行った[4]。本研究の成果は、IEEE Transactions on Communications や IEEE Communications Letters などの学術雑誌に掲載された[3][4]。

##### (2) モバイル分子通信に関する研究の成果

モバイル分子通信のための信号伝搬方式を設計、評価した。まず、信号分子中継機能をもつ移動型バイオナノマシンを利用した感染型信号伝搬方式を設計した[5][7]。従来の分子通信では、信号分子の拡散によって信号を伝搬する。この場合、信号強度は信号源からの距離とともに大幅に減少し、信号源から離れたバイオナノマシンは信号を認識できない。本研究では、DTN (Delay Tolerant Network) における感染型信号伝搬方式を参考にして、バイオナノマシンの運動性を利用して、信号分子を広範囲に伝搬させる感染型信号伝搬方式を設計した。また、数理モデルを構築し、数値実験によりその性能を調べた（図2）。

モバイル分子通信のためのその他の信号伝搬方式として、移動型バイオナノマシンを利用した信号分子のルーティング方式[8]、移動型バイオナノマシンによるクラスタ形成方式[8]、移動型バイオナノマシンによるネットワーク形成方式[10]を提案し、設計と評価を行った。また、マクロスケール分子通信のための移動型ロボットの設計と開発を行った[6]。さらに、モバイル分子通信に関する知見をまとめた解説論文を執筆し、Proceedings of the IEEE において発表した[11]。また、モバイル分子通信の概念を応用して、血管内皮性細胞の運動性と細胞間分子通信の関係を分析した。その結果、細胞のランダムな運動により細胞間通信の性能が上がる場合があることを示した[12]。

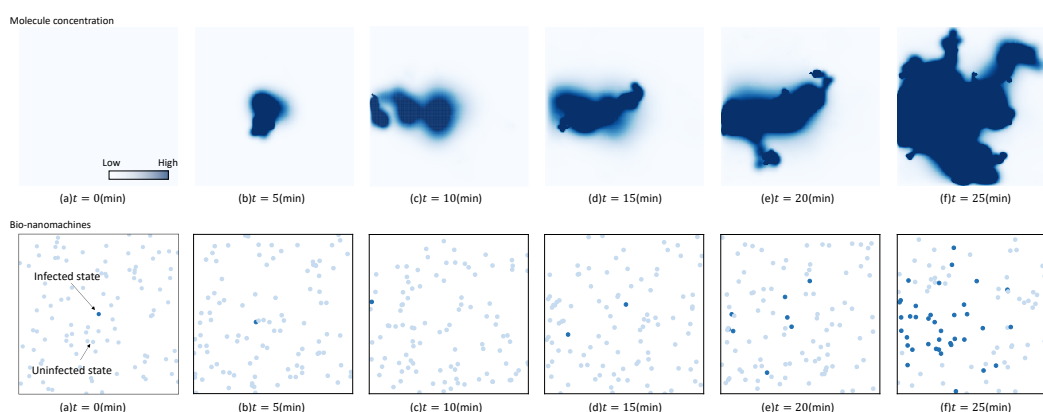


図2 感染型信号伝搬方式の数値実験

##### (3) ドラッグデリバリシステムの設計に関する研究の成果

細胞等で実装するバイオナノマシンが分子通信を介して協調的に動作し、標的となる腫瘍細胞の検出や治療を行う協調型ドラッグデリバリシステムを設計した(図3左)。このシステムでは、バイオナノマシンが標的と接触することで標的を検出する。標的を検出したバイオナノマシンは信号分子を放出し、環境中に信号分子の濃度勾配を形成する。標的の周辺に存在するバイオナノマシンは、信号分子を検出すると、その濃度勾配の高い方向、すなわち、標的の方向に移動すると同時に、信号分子を放出することで信号分子を中継する。信号分子を中継することにより、遠方に存在するバイオナノマシンも信号分子を検出し、標的の方向に移動できるようになる。そ

の結果、より多くのバイオナノマシンが標的付近に集合することが期待できる。このような協調型ドラッグデリバリスシステムの数理モデルを構築し、数値シミュレーションによって、性能を評価した(図3右)[13]。また体内の血管網のような複雑な環境を想定して協調型ドラッグデリバリスシステムの性能を分析した[14]。

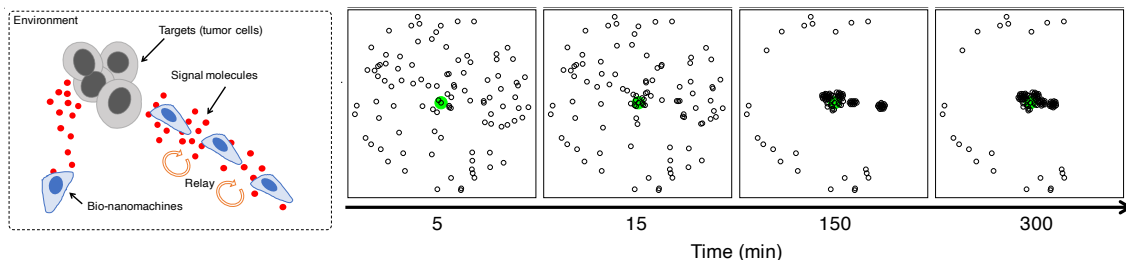


図3 (左) 協調型ドラッグデリバリスシステムの概要、(右) 計算機実験の結果

#### (4) がん細胞集団の構造形成に関する研究の成果

がん細胞集団が細胞間の分子通信を介して相互作用し血管様構造を形成する現象を解明することを目的として、がん細胞集団の顕微鏡観察実験、がん細胞の移動モデルの設計、計算機実験を行った。顕微鏡観察実験の結果、がん細胞集団は、細胞密度が低い場合、孤立した離島構造を形成すること、細胞密度が高い場合、隙間の少ない大陸構造を形成すること、その間の細胞密度で、特徴的な血管様構造を形成することが分かった(図4A)。タイムラプス観察により個々の細胞の運動を分析し、細胞間には遠隔力と接触力が働くと考えた。細胞 $i$ に働く力として、遠隔力 $F_i^m$ と接触力 $F_i^{cn}$ を仮定し、この二つの力の合力が速度 $v_i$ で移動するときの抗力 $\mu v_i$ と釣り合う状態を考えて( $\mu$ : 比例定数)、細胞の運動方程式( $\mu v_i = F_i^m + F_i^{cn}$ )を作成した。この方程式を基にした計算機実験を行い、がん細胞集団が初期密度に依存して種々の構造を形成する現象を再現できることを確認した(図4B)。さらに、構築したモデルに基づく計算機実験を通して、遠隔力や接触力を決定するパラメータががん細胞集団の形成する構造にどのような影響を与えるかを分析した。本研究で構築した手法や得られた知見は、今後のがん研究の発展に寄与すると考えられる。本研究の成果をまとめた論文は、生物物理学の分野で権威のある学術論文誌に採択された[15]。また新聞記事などを通して広く一般に報道された。

本研究ではまた、ヒト脳腫瘍細胞の集団が特徴的な幾何学的構造を形成する原理を理解するために、タイムラプス動画の分析、シミュレーションモデルの構築、数値実験による実験結果の再現を行なった(図5)。その結果、がん細胞が移動と増殖を切り替えながら大規模な構造を形成していくことが分かった。本研究の成果をまとめた論文は、IEEEが主催する国際会議 IEEE GLOBAL COMMUNICATIONS CONFERENCE 2020において最優秀論文に選ばれた[16]。さらに、分子通信の医療応用に関する論文を執筆し、国際学術雑誌 IEEE Transactions on Molecular, Biological and Multiscale Communicationsにおいて発表した[17]。

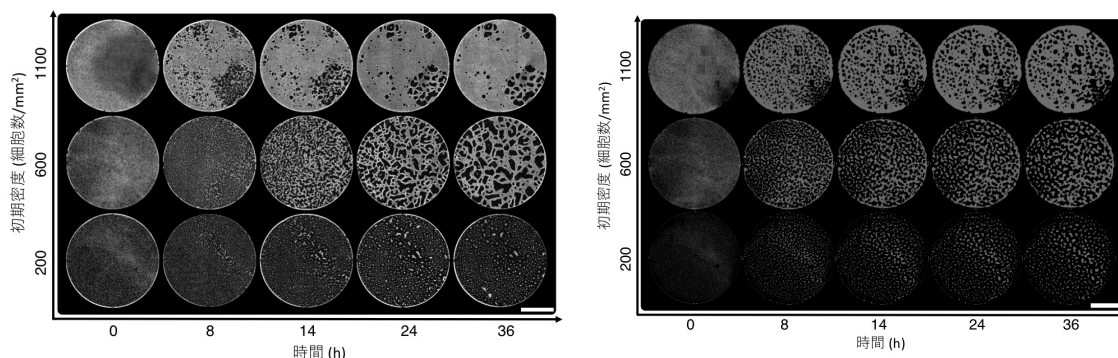


図4 (左) 顕微鏡観察実験の結果、(右) 計算機実験の結果

<引用文献>

- [1] T. Nakano, "Molecular Communication: A 10 Year Retrospective," **IEEE Transactions on Molecular, Biological and Multi-scale Communications**, vol. 3, no. 2, pp. 71–78, June 2017.
- [2] T. Suda and T. Nakano, "Molecular Communication: A Personal Perspective," **IEEE Transactions on Nanobioscience**, vol. 17, no. 4, pp. 424–432, July 2018.
- [3] P. He, T. Nakano, P. Lio', Y. Mao, Q. Liu, and K. Yang, "Stochastic Channel Switching of Frequency-encoded Signals in Molecular Communication Networks," **IEEE Communications Letters**, vol. 22, no. 2, pp. 332–335, Feb. 2018.

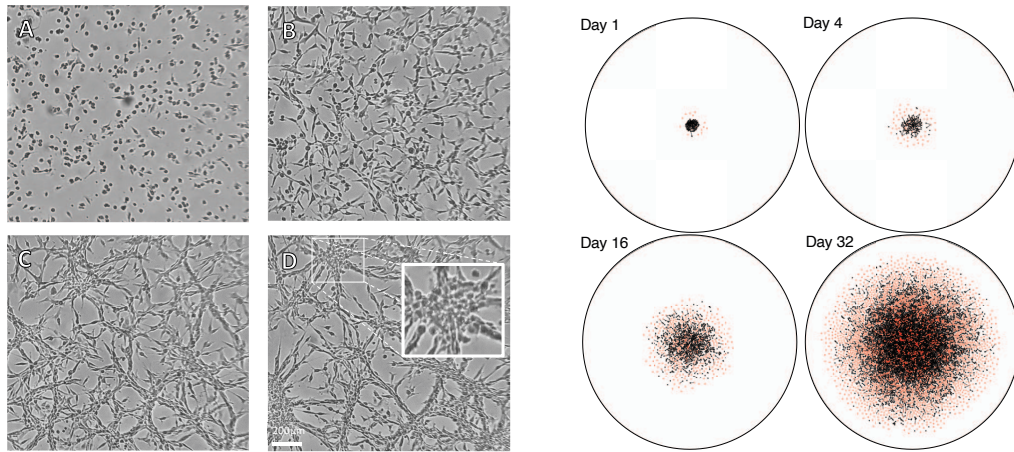


図5 (左) 顕微鏡観察実験の結果、(B) 計算機実験の結果

- [4] T. Nakano and T. Suda, “Molecular Communication Using Dynamic Properties of Oscillating and Propagating Patterns in Concentration of Information Molecules,” **IEEE Transactions on Communications**, vol. 65, no. 8, pp. 3386–3398, May 2017.
- [5] S. Ishiyama, T. Nakano, Y. Okaie, and T. Hara, “Epidemic Information Dissemination in Mobile Molecular Communication Systems,” in Proc. **IEEE Global Communications Conference (IEEE GLOBECOM 2018)**, 7 pages, UAE, Dec. 2018.
- [6] H. Zhai, L. Yang, T. Nakano, Q. Liu and K. Yang, “Bio-inspired Design and Implementation of Mobile Molecular Communication Systems at the Macroscale,” in Proc. **IEEE Global Communications Conference (IEEE GLOBECOM 2018)**, 6 pages, UAE, Dec. 2018.
- [7] P. He, T. Nakano, D. Wu, B. Yang, H. Liu, and X. Han, “Calcium Signaling in Mobile Molecular Communication Networks,” in Proc. **2019 IEEE Global Communications Conference (IEEE GLOBECOM 2019)**, 6 pages, USA, Dec. 2019.
- [8] T. Suda and T. Nakano, “Modeling the Stochastic Behavior of Kinesin-Coated Beads,” in Proc. **2019 IEEE International Conference on Communications (IEEE ICC 2019)**, 7 pages, China, May 2019.
- [9] T. Nakano and T. Suda, “Modeling and Simulations of Bio-nanomachines for Spatiotemporal Pattern Formation,” in Proc. **5th ACM/IEEE International Conference on Nanoscale Computing and Communication (ACM/IEEE NanoCom 2018)**, 6 pages, Iceland, Sept. 2018.
- [10] K. Yonekura, T. Nakano, Y. Okaie, T. Hara, and K. Harumoto, “Network Formation Model of Bio-nanomachines Based on Directed Migration and Adhesion,” in Proc. **IEEE Wireless Communications and Networking Conference (IEEE WCNC 2020)**, 6 pages, South Korea, May 2020.
- [11] T. Nakano, Y. Okaie, S. Kobayashi, T. Hara, Y. Hiraoka, and T. Haraguchi, “Methods and Applications of Mobile Molecular Communication,” **Proceedings of the IEEE**, vol. 107, no. 7, pp. 1442–1456, July 2019.
- [12] T. Nakano, L. Lin, Y. Okaie, C. Wu, H. Yan, T. Hara, and K. Harumoto, “Random Cell Motion Enhances the Capacity of Cell-cell Communication,” **IEEE Transactions on Molecular, Biological and Multiscale Communications**, vol. 5, issue. 2, 158–162, Nov. 2019.
- [13] S. Ishiyama, T. Nakano, Y. Okaie, T. Hara, and K. Harumoto, “Cooperative Signaling and Directed Migration of Bio-nanomachines in Mobile Molecular Communication,” in Proc. **7th ACM International Conference on Nanoscale Computing and Communication (ACM NANOCOM 2020)**, 7 pages, USA, Sept. 2020.
- [14] S. Iwasaki and T. Nakano, “Graph-based Modeling of Mobile Molecular Communication Systems,” **IEEE Communications Letters**, vol. 22, no. 2, pp. 376–379, Feb. 2018.
- [15] T. Nakano, Y. Okaie, Y. Kinugasa, T. Koujin, T. Suda, Y. Hiraoka, and T. Haraguchi, “Roles of Remote and Contact Forces in Epithelial Cell Structure Formation,” **Biophysical Journal**, vol. 118, issue 6, 1466–1478, March 2020.
- [16] T. Nakano, Y. Okaie, N. Dietis and A. D. Odysseos, “Growing Bio-nanomachine Networks: Application to Malignant Tumor Evolution and Progression,” in Proc. **2020 IEEE Global Communications Conference (IEEE GLOBECOM 2020)**, Taiwan, Dec. 2020.
- [17] A. D. Odysseos and T. Nakano, “Bionanomachine Diagnostics and Nanonetwork Therapeutic in Brain Malignancies with Bionanodevice Interfaces,” **IEEE Transactions on Molecular, Biological and Multiscale Communications**, vol. 8, no. 1, pp. 28–35, May 2021.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 5件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 T. Nakano, L. Lin, Y. Okaie, C. Wu, H. Yan, T. Hara, and K. Harumoto	4. 巻 5
2. 論文標題 Random Cell Motion Enhances the Capacity of Cell-cell Communication	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Molecular, Biological and Multiscale Communications	6. 最初と最後の頁 158-162
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TMBMC.2020.2983909	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 T. Nakano, Y. Okaie, Y. Kinugasa, T. Koujin, T. Suda, Y. Hiraoka, and T. Haraguchi	4. 巻 118
2. 論文標題 Roles of Remote and Contact Forces in Epithelial Cell Structure Formation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Biophysical Journal	6. 最初と最後の頁 1466-1478
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.bpj.2020.01.037	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 T. Nakano, Y. Okaie, S. Kobayashi, T. Hara, Y. Hiraoka, and T. Haraguchi	4. 巻 107
2. 論文標題 Methods and Applications of Mobile Molecular Communication	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the IEEE	6. 最初と最後の頁 1442-1456
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/JPROC.2019.2917625	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 T. Suda and T. Nakano	4. 巻 17
2. 論文標題 Molecular communication: A personal perspective	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Nanobioscience	6. 最初と最後の頁 424-432
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TNB.2018.2851951	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. Iwasaki and T. Nakano	4. 巻 22
2. 論文標題 Graph-based Modeling of Mobile Molecular Communication Systems	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Communications Letters	6. 最初と最後の頁 376-379
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LCOMM.2017.2765628	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 P. He, T. Nakano, P. Lio', Y. Mao, Q. Liu and K. Yang	4. 巻 22
2. 論文標題 Stochastic Channel Switching of Frequency-encoded Signals in Molecular Communication Networks	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Communications Letters	6. 最初と最後の頁 332-335
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LCOMM.2017.2768537	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 T. Nakano	4. 巻 3
2. 論文標題 Molecular Communication: A 10 Year Retrospective	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Molecular, Biological and Multi-scale Communications	6. 最初と最後の頁 71-78
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LCOMM.2017.2768537	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 T. Nakano and T. Suda	4. 巻 65
2. 論文標題 Molecular Communication Using Dynamic Properties of Oscillating and Propagating Patterns in Concentration of Information Molecules	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Communications	6. 最初と最後の頁 3386-3398
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TCOMM.2017.2700856	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

〔学会発表〕 計16件（うち招待講演 5件 / うち国際学会 15件）

1. 発表者名 K. Yonekura, T. Nakano, Y. Okaie, T. Hara, and K. Harumoto
2. 発表標題 Network Formation Model of Bio-nanomachines Based on Directed Migration and Adhesion
3. 学会等名 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (IEEE WCNC 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 P. He, T. Nakano, D. Wu, B. Yang, H. Liu, and X. Han
2. 発表標題 Calcium Signaling in Mobile Molecular Communication Networks
3. 学会等名 IEEE Global Communications Conference (IEEE GLOBECOM 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Ishiyama, T. Nakano, Y. Okaie, T. Hara and K. Harumoto
2. 発表標題 Data-driven Simulation of Epidemic Information Dissemination in Mobile Molecular Communication
3. 学会等名 ACM International Conference on Nanoscale Computing and Communication (ACM NanoCom 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Suda and T. Nakano
2. 発表標題 Modeling the Stochastic Behavior of Kinesin-Coated Beads
3. 学会等名 IEEE International Conference on Communications (IEEE ICC 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 L. Yang, X. Ge, Q. Liu, K. Yang, Y. Chen and T. Nakano
2. 発表標題 Chemotaxis-based Multi-hop Molecular Nanonetworks for Target Detection
3. 学会等名 IEEE/CIC ICC 2019 Workshop on Molecular, Biological, and Multiscale Communications (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中野 賢
2. 発表標題 分子通信と形態形成
3. 学会等名 電子情報通信学会 情報ネットワーク科学研究会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Ishiyama, T. Nakano, Y. Okaie, and T. Hara
2. 発表標題 Epidemic Information Dissemination in Mobile Molecular Communication Systems
3. 学会等名 IEEE Global Communications Conference (IEEE Globecom 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Zhai, L. Yang, T. Nakano, Q. Liu and K. Yang
2. 発表標題 Bio-inspired Design and Implementation of Mobile Molecular Communication Systems at the Macroscale
3. 学会等名 IEEE Global Communications Conference (IEEE Globecom 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Nakano and T. Suda
2. 発表標題 Modeling and Simulations of Bio-nanomachines for Spatiotemporal Pattern Formation
3. 学会等名 5th ACM/IEEE International Conference on Nanoscale Computing and Communication (ACM/IEEE NanoCom 2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Nakano
2. 発表標題 Pattern Formation by Mobile Molecular Communication Systems
3. 学会等名 International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC 2018), Special session on Nano Communication Networks (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Furuhashi, J. Mitzman, J. Suzuki, T. Nakano, Y. Okaie, and H. Fukuda
2. 発表標題 Impacts of SW-ARQ on the Latency and Reliability of Diffusive, In-sequence Molecular Communication
3. 学会等名 2018 International Workshop on Molecular, Biological and Multiscale Communications (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Chen, Y. Zhou, R. Murch, and T. Nakano
2. 発表標題 Communication-inspired Model of Epidemic Spreading and Mitigation
3. 学会等名 2018 International Workshop on Molecular, Biological and Multiscale Communications (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Suda and T. Nakano
2. 発表標題 Molecular Communication as a Biological System
3. 学会等名 2018 International Workshop on Molecular, Biological and Multiscale Communications (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Nakano
2. 発表標題 Decoding Dynamic Signals in Molecular Communication
3. 学会等名 2017 IEEE Information Theory Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 T. Nakano
2. 発表標題 Molecular Communication Networks: Applications to Targeted Drug Delivery
3. 学会等名 The 15th Canadian Workshop on Information Theory (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 T. Nakano
2. 発表標題 Mobile Molecular Communication Networks for Targeted Drug Delivery
3. 学会等名 The 2nd Workshop on Molecular Communications (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
中国	同済大学	中国科技大学	重慶郵電大学	
英国	エセックス大学			
米国	University of Massachusetts, Boston	University Net. Group		
キプロス	University of Cyprus			