

令和 4 年 6 月 21 日現在

機関番号：13903

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2021

課題番号：20K20999

研究課題名（和文）無線通信技術を導入した高信頼拡散型分子通信の創出

研究課題名（英文）Reliable molecular communication systems with wireless communication techniques

研究代表者

安在 大祐（Anzai, Daisuke）

名古屋工業大学・工学（系）研究科（研究院）・准教授

研究者番号：40611116

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,900,000円

研究成果の概要（和文）：体内に埋め込まれる医療機器が急速に発展しており、nmから $\mu\text{m}$ オーダーのバイオナノマシンやドラッグデリバリーシステムへの展開が期待されている。しかしながら、電磁波による無線通信では送受信アンテナサイズが原理的には波長（周波数の逆数）で決定されるためナノマシンへの適用は極めて困難である。本研究では特にバイオナノマシンやドラッグデリバリーシステムへの親和性が高い性質を持つ拡散型分子通信技術に着目し、環境パラメータ推定やMIMO伝送の適用により信頼性や通信速度の向上の実現可能性の検証を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでの拡散型分子通信の研究では理論解析による数学モデルの導出や通信方式においても限定的な検討に留まっていた。本研究は現実的な分子通信の環境下での通信特性の導出を目的に有限要素法による分子の拡散現象の解析を実施し、理想環境との差異を定量的に求め、その点において学術的意義がある。加えて、高度な無線通信技術であるMIMO伝送を分子通信への適用可能性を示し、高度な分子通信の実現に向けて寄与し、社会的意義を持つ研究成果をとっている。

研究成果の概要（英文）：Implantable medical devices have rapidly developed for realizing nanoscale bionanomachines and drug delivery systems. However, wireless communication based on electromagnetic waves is difficult to apply to nanomachines because their sizes of the transmit/receive antenna are determined by the wavelength. In this study, we focused on diffusive molecular communication technology, which has a potential feature to be applied to bionanomachines. This study investigated the feasibility to improve the reliability and throughput characteristics by introducing environmental parameter estimation and MIMO transmission.

研究分野：無線通信工学

キーワード：分子通信 インプラント機器

## 1. 研究開始当初の背景

### (1) 電磁波による無線通信の限界を超えるスケールに適応可能性を有する分子通信

体内に埋め込まれる医療機器が急速に発展しており、nm から  $\mu\text{m}$  オーダーのバイオナノマシンやドラッグデリバリーシステムへの展開が期待されている。これらのインプラント機器は互いに通信を行い協調的に動作する必要があるが、これまでのインプラント機器において実用化された通信技術のほとんど全てが電磁波を基本とした無線通信である。しかしながら、電磁波による無線通信では送受信アンテナサイズが原理的には波長（周波数の逆数）で決定されるため、 $\mu\text{m}$  から nm オーダーのナノマシンへの適用は極めて困難であり、電磁波による通信ではなくこれまでにない新しい媒体を介した通信技術の確立が必要不可欠である。本研究では特にバイオナノマシンやドラッグデリバリーシステムへの親和性が高い性質を持つ拡散型分子通信技術に着目する。

### (2) 無線通信技術を応用した拡散型分子通信技術の必要性

このようにナノスケールデバイスにも適用可能性を秘めた分子通信であるが、そのほとんどが基礎研究の段階であり、実用段階も視野に入れた分子通信技術の確立には至っていない。例えば、通信速度は数 bps と極めて低く、送受一対のみの通信路モデルとなり、多数のインプラント機器間を接続することは検討されていない。そこで本研究はこの拡散型分子通信において、分子通信において複数アンテナ伝送技術 (MIMO: Multiple-Output Multiple-Input) を導入し、高度な通信技術や変調方式を分子通信に適用することにより、通信速度の向上や複数のインプラント機器間を接続可能な高度な分子通信の実現を目指す。

## 2. 研究の目的

### (1) 拡散型分子通信における環境パラメータ推定に基づく信頼性の向上

バイオナノマシンと外部インターフェイスの通信を行う際にも分子通信は応用される。分子通信のテストベッドとして SPIONs (Superparamagnetic Iron Oxide Nanoparticles) を情報伝達分子として扱い、SPIONs の検出する受信機としてインダクタンスセンサー検討が行われている[2]。SPIONs を用いた検討により外部インターフェイスを用いたバイオナノマシンの制御に適用されることが期待される。しかし、SPIONs を用いたテストベッドは実用化に向けた環境とは異なるため、本研究では SPIONs を用いた検討を有限要素法 (FEM: Finite Element Method) を用いたシミュレーションにより実環境に近い状況で検討を行う。通信特性改善を目的として環境パラメータの最尤推定に基づく推定法及び、推定パラメータに基づいた最尤系列推定による復調法 (MLSE: Maximum Likelihood Sequence Estimation) の検討を行う。

### (2) MIMO 技術適用による通信特性の向上

拡散型分子通信において、受信分子での受信信号は拡散方程式を解くことにより CIR (Channel Impulse Response) として導出される。また、現在の分子通信の課題として、低データレートが挙げられる。そこで、伝送速度向上を目指し、拡散型分子通信における MIMO (Multiple Input Multiple Output) 技術適用の検討を行う。2分子を送信源とするような複雑なシステムモデルでは CIR の理論導出が困難となるため、本研究では上記と同様に FEM に基づいた計算機シミュレーションにより  $2 \times 2$  MIMO を適用した拡散型分子通信の CIR を数値的に解析により導出し、MIMO 適用による通信特性の向上効果の評価を行う。

## 3. 研究の方法

### (1) システムモデル

本研究では OOK (On-Off Keying) により変調を行う。“1”の符号を送信する際 SPIONs が注入され、“0”の符号を送信する際は SPIONs が注入されないことを示す。SPIONs は生体親和性が確立されている。図 1 はシミュレーションのシステムモデルを示す。本シミュレーションでの情報伝達は一定の水流が流れるチューブに SPIONs を注入することで行われる。層流、乱流になるかはレイノルズ数という無次元数によって予測され、本研究ではレイノルズ数による予測から層流でのシステムモデルを構築した。表 1 はシミュレーションパラメータを示す。

時間的に変動するパラメータを定期的に推定し、その推定結果を基にパラメータを調整することで環境の変動に対応した通信が可能となる。そこで最尤チャネルパラメータ推定法を用いて SIPON が拡散する経路の断面積の推定を行う。ここで、断面積をパラメータとする確率モデルを導出する必要があるが、本研究では断面積の変化に対して受信 SOPIONs 数はガウス分布に従う確率モデルを想定し、尤度関数を導出した。

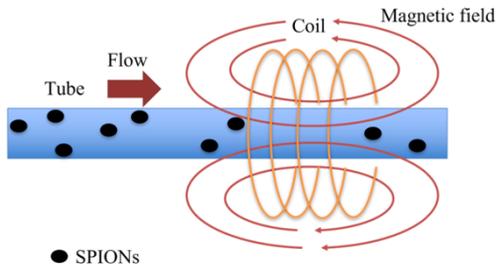


図 1. システムモデル

Coil inner radius	2.5 mm
Coil length	20 mm
Tube radius	1.2 mm
Tube length	5.0 mm
Propagation distance	50 mm
Flow rate	0.18 m/s
Injection volume	14, 28, 84 $\mu$ l
Iron stock concentration	7.5 mg/ml
Magnetic susceptibility	$8.78 \times 10^{-3}$ SI units

表 1. FEM シミュレーションパラメータ

## (2) MIMO 方式を用いた拡散型分子通信の評価環境

MIMO 方式を用いる拡散型分子通信では簡易化のため、図 2 に示すモデルを想定した。モデル環境は無限領域の 3 次元流体環境を想定する。環境中の粘性は一定、送信分子は体積を持たない点状送信源、受信分子はある半径をもつ球とする。送信分子から受信分子へ情報を伝達するための情報伝達分子を分子 A とする。まず、送信分子が分子 A を  $N_A$  個放出することで信号を送信する。そして、環境中に放出された分子は拡散係数  $D_A$  でブラウン運動により全方向に拡散し、一部が受信分子に到達する。このとき受信分子に到達した分子 A の濃度や受信分子数を検知することで信号の受信が行われるものとした。MIMO 方式として図 3 に示す  $2 \times 2$  MIMO 方式を採用し、各アンテナ間の CIR を求め、MIMO 方式における通信路容量からスループット特性の改善効果の評価した。

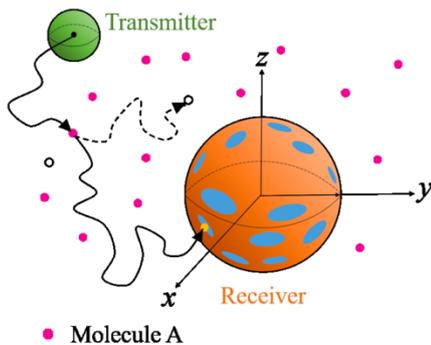


図 2. MIMO 評価環境のシステムモデル

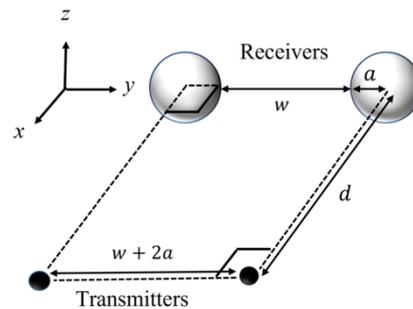


図 3. 送受信分子の配置 ( $2 \times 2$  MIMO)

## 4. 研究成果

### (1) 環境パラメータ推定による通信の信頼性向上効果の評価

図 4 は実験により得られた SPIONs の注入量別の磁化率の時間変化と FEM により得られた結果を示す。図 4 より実験結果とシミュレーション結果が  $14 \mu$ l と  $28 \mu$ l であるときに近い値となり  $84 \mu$ l であるときに結果が一致していない理由として、FEM によるシミュレーションでは粒子の重力、大きさを想定していないことが考えられる。さらに、SPIONs の注入量が増えるほど磁化率が大きくなることを確認できるが、注入量が増えるに伴い磁化率の変化が検出される時間が長くなっていることから通信を行う際に符号間干渉 (ISI: Inter-Symbol Interference) の影響が大きくなる懸念がある。図 5 は断面積  $1.2 \text{ mm}^2$  としたときの BER (Bit Error Rate) 特性を示す。なお、断面積の情報が未知である場合には断面積を  $2.4 \text{ mm}^2$  と仮定して復調を行った。断面積の情報が未知の環境で、最尤パラメータ推定法によるパラメータ推定によりしきい値、最尤系列推定法での復調ともに通信特性改善効果が確認された。さらに、しきい値による復調と比べ、拡散経路の断面積を推定し最尤系列推定法による復調では  $5.9 \text{ dB}$  の通信特性が改善されていることが確認された。

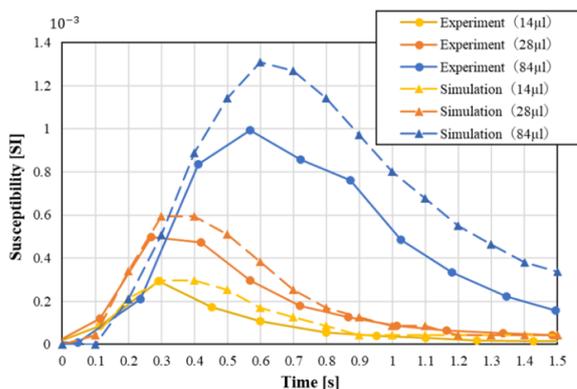


図 4. 透磁率の時間変化

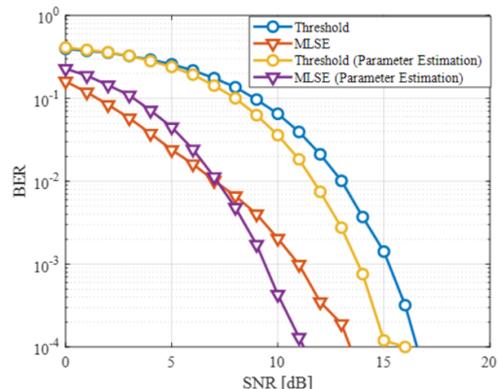


図 5. 環境パラメータ推定による BER 特性

## (2) MIMO 方式による通信特性の向上評価

図 6 より、2 分子を送信源とした  $2 \times 2$  MIMO 方式によって、送受信分子が 1 対の SISO (Single-Input Single-Output) と比較して通信路容量が向上し、SNR (Signal-to-Noise power Ratio) が 35 dB において  $w = 0.5 \mu\text{m}$  では約 1.5 倍の通信路容量の達成が確認された。また、図 6 より送信分子間と受信分子間距離を狭くすると、信号間干渉の影響が大きくなり、 $w = 0.5 \mu\text{m}$  と比べ、 $w = 0.3 \mu\text{m}$  で  $0.3 \text{ bit/s/Hz}$ 、 $w = 0.1 \mu\text{m}$  で  $0.5 \text{ bit/s/Hz}$  通信路容量が低下することを確認できた。図 7 は MIMO 方式におけるスループット特性を示す。ここで、送受信分子数に基づく方法とピークの受信分子数に基づく方法をそれぞれ Method A と Method B とした。図 7 のスループット特性の結果より、 $2 \times 2$  MIMO 方式により  $E_b/N_0$  特性が 0 から 30 dB の範囲で SISO 方式と比較して、スループット向上効果が得られることが示された。その結果として 25 dB では SISO 方式から 2 倍のスループットを達成した。

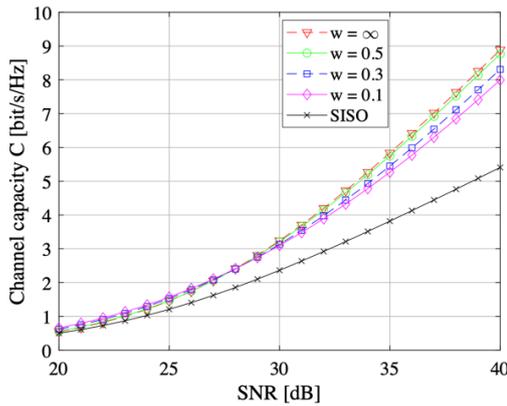


図 6. MIMO 方式における通信路容量

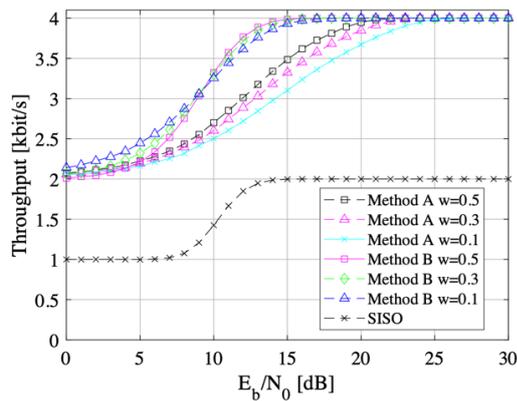


図 7. MIMO 方式におけるスループット特性

## 5. 総括

本研究は拡散型分子通信に着目し、無線通信技術に基づいた通信特性の BER 特性、通信路容量とスループット特性の改善を目指した。拡散型分子通信は環境パラメータの影響を強く受けることが本研究による解析から示され、環境パラメータ推定の有効性が確認された。加えて、無線通信技術において伝送速度向上に有効な MIMO 方式を拡散型分子通信に適用した。本シミュレーション解析により、拡散型分子通信においても MIMO 方式は有効に動作し、 $2 \times 2$  MIMO 方式においては定量的な観点で有効性が評価され、最大 2 倍のスループット特性の改善が可能であることが確認された。

### <引用文献>

- ① T. Nakano, et. al., Molecular Communication, Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2013.
- ② Y. Chen, T. Nakano, M. Mahfuz, and W. Guo, Bio-inspired Information and Communication Technologies, Springer Press, 2020.
- ③ H. Unterweger et al., “Experimental molecular communication testbed based on magnetic nanoparticles in duct flow,” in Proc. 2018 IEEE 19th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC), 2018, pp. 1-5.

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 S. Zeising, K. Ararat, A. Thalmayer, D. Anzai, G. Fischer, J. Kirchner	4. 巻 21 (3180)
2. 論文標題 Systematic Performance Evaluation of a Novel Optimized Differential Localization Method for Capsule Endoscopes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 1-22
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 鳥山肖太, 安在大祐, 王建青
2. 発表標題 拡散型分子通信における環境パラメータ推定が通信特性に及ぼす影響
3. 学会等名 電子情報通信学会通信方式研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Zeising, K. Ararat, A. Thalmayer, D. Anzai, G. Fischer, J. Kirchner
2. 発表標題 Static Magnetic Localization of Capsule Endoscopes by Applying the Dipole Model with Optimal Simulation-Parameters
3. 学会等名 7th International Electronic Conference on Sensors and Applications (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鳥山肖太, 犬塚涼介, 安在大祐
2. 発表標題 環境パラメータ推定に基づいた拡散型分子通信方式の一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2022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		
ドイツ	フリードリヒ・アレクサンダー 大学エアランゲン=ニュルンベルク		