

分子通信による新しい ICT パラダイムの創生 (102107002)

Molecular Communication: A New ICT Paradigm

研究代表者

中野 賢 大阪大学生命機能研究科

Tadashi Nakano, Graduate School of Frontier Biosciences, Osaka University

研究分担者

ムーア ジョン マイケル[†] 岡家 豊^{††}

Moore John Michael[†] Yutaka Okaie^{††}

[†]ペンシルベニア州立大学応用研究所 ^{††}大阪大学生命機能研究科

[†]Applied Research Laboratory, Pennsylvania State University

^{††}Graduate School of Frontier Biosciences, Osaka University

研究期間 平成 22 年度～平成 24 年度

概要

分子通信とは、生体内における通信を模倣した生体分子や生化学反応に基づく通信技術であり、電磁波を利用できないバイオナノマシン間の通信や、酵素や蛋白質などのソフトマテリアルで構成される分子マシンの制御に適用できると期待されている。将来的には、体内埋め込み型バイオナノマシンを有機的に分子通信させることで知的な生体内バイオセンサネットワークを構築するなど、将来のバイオ ICT のキーテクノロジーを担う可能性をもつ。分子通信は情報通信・医療・環境など多分野への応用が期待される一方、これまでの研究では分子通信の特性が定量的に検証されていなかった。そこで本研究では、分子通信の可能性を理論的側面から探求した。具体的には、情報分子伝搬方式のモデル化と定量的評価、情報変調・復調方式のモデル化と定量的評価、高度な分子通信機構を実現するためのプロトコル設計を行った。

1. まえがき

分子通信とは、生体分子や生化学反応に基づくバイオナノマシンのための新しい情報通信パラダイムである (図 1) [1]。分子通信で想定するバイオナノマシンとは、ナノメートルからマイクロメートル程度の生体分子 (イオン、タンパク質、DNA 等)、あるいは、生体材料から人工的に作られた微小デバイスであり、例えば、分子モータ、人工ナノマシン、生細胞、改変細胞などを指す。バイオナノマシンはバイオ素材で構成されており、電気や光による既存の通信技術を利用できない。そこで、生体分子を伝播あるいは輸送することで情報伝達 (分子通信) を実現する。

分子通信は従来の光や電気による通信とは大きく異なる特徴をもつ。

- 分子による情報表現：分子通信では、情報分子の様々な特性を用いて情報を表現する。例えば、使用する分子の数 (濃度) やその時間変化 (濃度変化)、構造 (三次元構造や配列情報)、種類を用いて情報を表現する。情報のキャリアとして用いる情報分子は様々な物理的性質をもち、高密度の情報を表現できる可能性がある。また、情報のキャリアが種々の分子を認識、合成、破壊すなどの機能をもつ点も分子通信の特徴である。
- 生体親和性：バイオナノマシンは、生体分子に情報を符号化した情報分子を介して通信する。これは生物システムが持つ通信のメカニズムであり、細胞生物システムと直接通信できるという利点がある。分子通信の生体親和性は高く、医療分野への応用が期待されている。例えば、生体親和性の高い生物ナノマシンを体内に送り込み、体内の臓器や組織と通信をしながら、健康の維持管理をするようなシステムへの応用が考えられる。
- 化学エネルギーで駆動：生物システムが持つ通信に基づく分子通信は高いエネルギー効率を達成できる

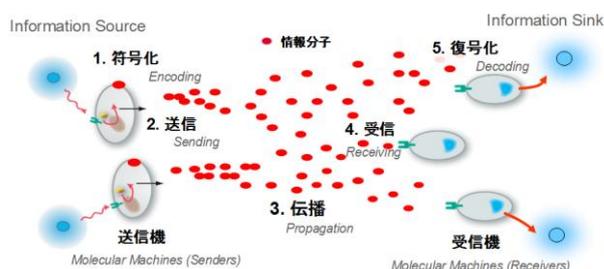


図 1 分子通信

可能性がある。また、分子通信では通信に必要なエネルギーを環境から補充できる場合がある。

- 不確実な通信：分子通信では、生体内のような溶液中を情報分子が伝搬することで通信を実現する。情報分子が熱揺らぎの影響を受けること、バイオナノマシンが情報分子に対して確率的に反応すること、更に、バイオナノマシン及び情報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しか提供できない。また、超低速で限られた範囲の通信手段しか提供できない。

2. 研究開発内容及び成果

本研究では、まず情報分子伝搬方式のモデル化と定量的評価を行った。これに基づき分子通信のための変調・復調方式のモデル化と定量的評価 [2]、および、高度な分子通信機構を実現するためのプロトコル設計 [3]を行った。以下では[2]および[3]の概要を述べる。

2.1 情報変調・復調方式の設計と評価

分子通信のための情報変調方式・復調方式を設計し、通信路容量の点でその性能を定量化した。図 2 にその概要を示す。送信機と受信機の距離を d (縦軸) とし、時間はスロットで分割されている (横軸) と仮定する (スロット長: τ)。また、0 及び 1 の 2 値符号を考える。これは例えば、送

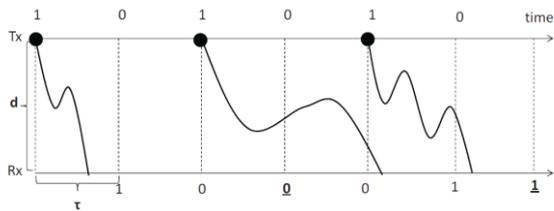


図2 熱ゆらぎによる分子通信

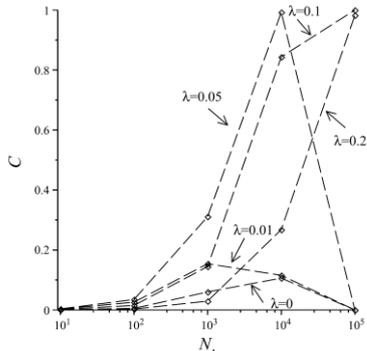


図3 通信路容量

信機（例えば、細胞）が特定のタンパク質の濃度が高い状態と低い状態をもち、また、受信機（別の細胞）も同様にタンパク質の濃度が高い状態と低い状態をもちと解釈する。最も単純な変調方式として、送信機は1を送信する場合、スロットの開始時刻に分子1個を環境中に放出し、0を送信する場合には何もしないものとする。また、環境中に置かれた分子は熱ゆらぎの影響を受けて、ランダムウォークにより環境中を移動する。受信機は、各スロットに到着した分子の個数を数え、到着分子数が1個以上であれば1、0個であれば0と解釈する。なお、図2では、送信機がビット列101010を送信し、受信機が100011を受信しており、ビット誤り率は2/6となる。

本研究では、以上に述べた通信路を記憶のある通信路としてモデル化し、通信路容量を計算した。その結果、想定した変調方式で達成できる通信路容量は、従来の感覚に従うと極めて低速であることが分かった（送受信機間距離に大きく依存するが、例えば、 $10\mu\text{m}$ の場合に、 10^{-4} bps程度）。そこで本研究では、これを向上するための変調・復調方式を検討した。その結果、送信分子数および分子の平均寿命を適切に調整すると1ビット/スロットに近い値を達成できることが分かった（図3）。直感的には、送信分子数（ N_1 ）が小さい、あるいは、平均寿命（ λ_1 ）が短い場合には、1の送信が失敗する確率が大きくなる。また、送信分子数が大きい、あるいは、平均寿命が長い場合には、後続スロットでスロット間干渉を起こす（0を送信する場合のエラー率が上昇するため）。これらを最適化することで情報伝達量を最大化できると理解した。

2.2 フロー制御方式の設計と評価

コンピュータネットワークにおけるフロー制御と同様に、受信機の処理能力を上回る速度で送信機が分子（情報分子）を送信する場合、受信機の処理が間に合わず、多くの分子が環境中に取り残されるようになる。このとき、拡散や経時的な劣化、あるいは、他の分子との反応によって、情報分子が消失し、通信効率が下がる場合がある。従って、受信機の分子処理能力に応じて、送信機が分子の送信レートを調整することが望ましい。

本研究では、この問題に対処するために2種類のフロー制御方式を設計した。ポジティブフィードバック方式（PF）では受信機からのフィードバック分子の濃度が上昇するに従い、送信機が送信レートを上げる。一方、ネガ

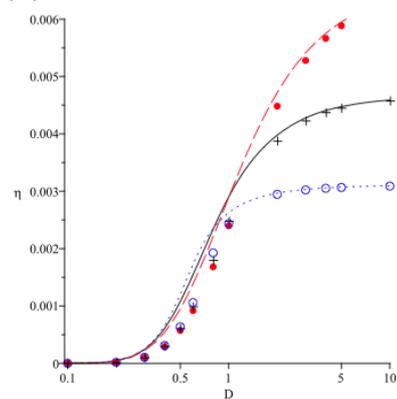


図4 フィードバック方式を用いた場合の通信効率

ティブフィードバック方式（NF）では、同様の状況において、送信レートを下げる。次に、PFおよびNFを通信効率（ μ ：受信機が処理する個数÷送信機が単位時間あたり送信する分子の個数）の点で比較評価した。図4に結果を示す。この図において、実線（黒）、点線（青）、破線（赤）は、フィードバックを使わない場合、PFを使った場合、NFを使った場合の通信効率（近似解）を示している。また、数値計算により得られた値を各シンボルでプロットしている。横軸はモデルパラメータの一つである拡散係数を示している。以上のように、様々なパラメータやフィードバック方式が通信効率に与える影響を調べ、実用的なシステムシステムを開発する際に有用となる設計指針を示した。

3. 今後の研究開発成果の展開及び波及効果創出への取り組み

今後、当該分野を次の展開へと進めるために、実験および理論の両面から研究を進めて行く予定である。分子生物学者と連携して、様々な分子通信方式をバイオ素材（生きた細胞等）に実装し、分子通信の実現可能性を実験的に検証していく予定である。また、具体的な応用事例として、生体内センサネットワークを想定し、その設計、および、実証実験を行う。同時に、工学的応用や実用化を見据えた標準化活動を進めて行く予定である。

4. むすび

本研究では、分子通信における情報分子伝搬方式のモデル化と定量的評価、情報の符号化/復号化方式のモデル化と定量的評価、高度な分子通信機構を実現するためのプロトコル設計を行った。今後は3.で述べた方針に従い、本研究分野の進展に貢献していきたいと考えている。

【誌上发表リスト】

- [1] T. Nakano, M. Moore, F. Wei, A. T. Vasilakos, and J. W. Shuai, "Molecular Communication and Networking: Opportunities and Challenges," IEEE Transactions on NanoBioscience, vol. 11, no. 2, pp. 135-148, June 2012.
- [2] T. Nakano, Y. Okaie, and J. Q. Liu, "Channel Model and Capacity Analysis of Molecular Communication with Brownian Motion," IEEE Communications Letters, vol. 16, no. 6, pp. 797-800, June 2012.
- [3] T. Nakano, Y. Okaie, and A. T. Vasilakos, "Transmission Rate Control for Molecular Communication among Biological Nanomachines," IEEE Journal of Selected Areas in Communication (JSAC) (accepted for publication).