

# 分子通信モデルの数式化とシミュレーションモデルに関する研究

義久 智樹 大阪大学サイバーメディアセンター講師

## 1 はじめに

近年 Bio-Inspired と呼ばれる生物に学んだ情報通信技術が盛んに研究されている。これらの研究は、応用先によって、分子通信のように生体を応用先とする研究と、ストリーミング配信といった計算機を応用先とする研究に分けられる。本論文では、両方の応用先を対象とし、2章で細胞周期を考慮した分子通信の数式化とシミュレーションモデルについて説明し、3章で生物に学ぶストリーミング伝送方式の数式化とシミュレーションモデルについてそれぞれ説明する。最後に4章で本論文をまとめる。

## 2 細胞周期を考慮した分子通信の数式化とシミュレーションモデル

### 2-1 背景

分子通信とは、たん白質やDNAといった分子の移動を制御することで、物質と情報を同時に伝達する通信技術である。例えば、生物に埋め込まれた人工臓器とセンサ間での通信や、必要最少量の薬剤を患部にピンポイント伝送するDDS (Drug/DNA Delivery System) への応用が考えられている。2005年3月に米国で開催された電気通信に関する権威ある国際会議の一つ INFOCOM2005 において「ナノスケール・コミュニケーション」と題し、分子通信に関するパネル討論が行われた等、世界的に注目されている。分子通信では、生化学現象で通信するため、電子通信に比べてエネルギー消費量が少ないという特徴がある。分子通信は、生物的な要素が多く含まれているため、実験結果に基づいた分子通信モデルの数式化、シミュレーションモデルの確立が重要な研究課題である。

分子通信では、分子を用いて通信を行うため、栄養素や薬といった物質の伝送が可能である。これらの物質を細胞に伝送する場合、細胞周期に応じて適切な物質を伝送する必要がある。細胞周期とは、細胞の成長過程であり、M期、G1期、S期、G2期といった幾つかの期間に分かれる。G2期が終わると次のM期に移って細胞周期を繰り返す。M期は染色体が分裂する期間であり、この期間に分裂を阻害する物質を与え、M期を長くしたうえで細胞に効果的な物質を与えるといった分子通信が考えられる。例えば、ガン細胞を死滅させる物質を長時間与えるために、M期に分裂阻害物質を与え、その後ガン細胞攻撃物質を長時間与えることで効果的にガン細胞を死滅させられる。しかし、細胞周期の開始時刻は細胞によって異なるため、単純な分子通信ではすべての細胞の細胞周期に応じて効果的に物質を伝送することができない。そこで本研究項目では、細胞周期を数式化し、幾つかの物質を各期間の長さを考慮して伝送する分子通信スケジュールを作成して効果的な物質伝送を考える。

### 2-2 シミュレーションモデル

本研究では、2-1節の例における分裂阻害物質を与えその後ガン細胞攻撃物質を与える、といった2段階の伝送を考える。多段階の伝送については、本研究で取り扱う2段階の伝送を繰り返すことで解決できると考える。細胞周期を考慮して分子通信を数式化した結果得られたシミュレーションモデルを図1に示す。

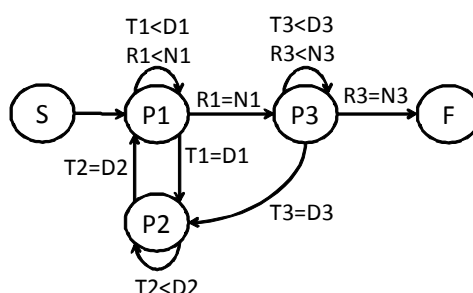


図1：細胞周期を考慮した分子通信のシミュレーションモデル

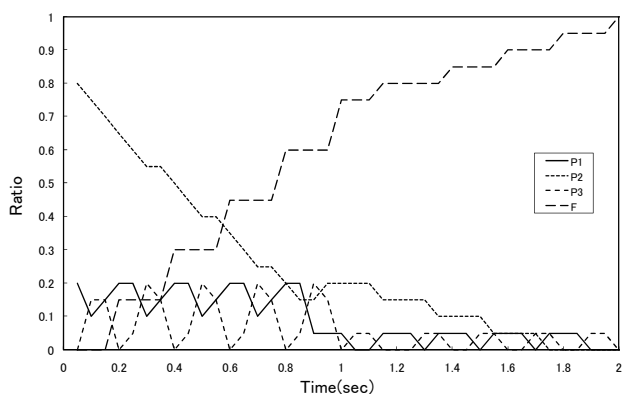


図 2 : シミュレーション結果 (0.1, 0.1)

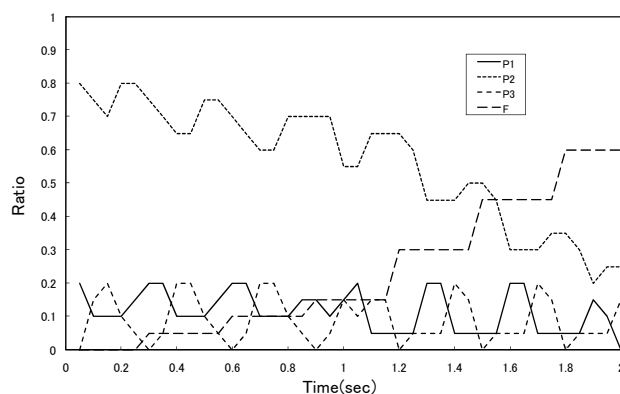


図 3 : シミュレーション結果 (0.2, 0.1)

状態 S は細胞周期が開始する状態である。状態 P1 は伝送の第 1 段階である。例えば、2-1 節の例の M 期に相当する。状態 P2 は第 1 段階の伝送が不十分だった場合に P1 から遷移する状態である。2-1 節の例では G1, S, G2 期に相当する。状態 P3 は第 1 段階の伝送が十分だった場合に P1 から遷移する状態である。M 期を長くした状態に相当する。状態 F は第 2 段階の伝送も十分に行われて伝送が成功した終了状態である。変数について、T1 は細胞が P1 に連続して存在する時間、T2, T3 は細胞が P2, P3 に連続して存在する時間を示し、D1 は P1 の期間、D2, D3 は P2, P3 の期間を示す。R1 は第 1 段階の物質の伝送量であり、R3 は第 2 段階の物質の伝送量である。例えば 2-1 節の例で細胞に伝送した分裂阻害物質の量が R1, ガン細胞攻撃物質の量が R3 に相当する。N1 は第 1 段階の伝送物質の効果が現れる伝送量であり、N3 は第 2 段階の物質の効果が現れる伝送量である。細胞周期が始まると、S から P1 に遷移する。P1 の期間は D1 であり、細胞は P1 の状態になってから D1 の間に第 1 段階の物質の量を十分に N1 まで伝送されなければ P2 に遷移する。十分に伝送されれば P3 に遷移する。P2 は第 1 段階の物質を伝送しても効果が得られない期間であり、細胞は P2 の状態になってから D2 経つまで P2 にあり、その後再び P1 に遷移する。P3 の期間は D3 であり、細胞は P3 の状態になってから D3 の間に第 2 段階の物質を N2 の量を伝送されれば伝送が終了し、終了状態となる。十分に伝送されなければ P2 に遷移する。細胞周期を考慮した現実的なモデルと考えている。

### 2-3 シミュレーション結果

2-2 節で説明したシミュレーションモデルを用いて伝送成功率のシミュレーションを行った。シミュレーションでは、通常の細胞周期 (D1+D2) を 1.0 とし、D1 を 0.2, D2 を 0.8 とした。D3 は 0.1 とした。効果が現れる十分な伝送 N1 は 0.1 の時間で与えられる量、N3 も 0.1 の時間で与えられる量とした。様々なパラメータ設定が考えられるが、今回は上記の設定でシミュレーションし、詳しい考察は今後行う予定である。図 2 の結果は、分子通信スケジュールを第 1 段階の物質を 0.1, 第 2 段階の物質を 0.1 と順番に繰り返して与えるとした場合であり、図 3 の結果は、第 1 段階の物質を 0.2, 第 2 段階の物質を 0.1 と順番に繰り返して与える場合である。横軸はシミュレーションの時間、縦軸は各状態の細胞の割合を示している。終了状態以外には増減があるが、時間が経つにつれて終了状態の細胞の割合が増えていることがわかる。これは、物質を順番に繰り返して何度も与えているためである。また終了状態になる細胞の変化が各段階の物質伝送の分子通信スケジュールに依存していることが分かる。今回のシミュレーションでは図 2 の第 1 段階の物質を 0.1, 第 2 段階の物質を 0.1 と繰り返す方が終了状態になる細胞の数が速いことが分かる。これは、細胞周期が繰り返されており、分子通信スケジュールとのタイミングによって細胞の状態遷移が変わるためである。例えば、図 2 の場合、時刻 1.0 では P1 の細胞が 0.05, P2 が 0.2, P3 が 0, F が 0.75 になっている。図 3 の場合、P1 が 0.15, P2 が 0.55, P3 が 0.15, F が 0.15 になっている。このため、細胞周期に合わせて伝送する物質を調整する必要がある。このスケジュールが非効率的な場合には、すべての細胞が終了状態にならない可能性もある。

### 2-4 まとめ

本研究項目では、細胞周期を考慮した分子通信の数式化とシミュレーションモデルを作成し、シミュレーションを行った。シミュレーションの結果、物質の伝送に成功して終了状態になる細胞の数が增加することが分かった。また、終了状態の細胞割合の増加率が物質伝送のスケジュールに依存するため、適切に物質伝送する必要があることが分かった。今後、さらに複雑なシミュレーションモデルや、他の伝送方法の提案を考えている。

### 3 生物に学ぶストリーミング伝送方式の数式化とシミュレーションモデル

#### 3-1 背景

近年 P2P (Peer-to-Peer) ストリーミング配信が注目を集めている。P2P ストリーミング配信では一般に、映像や音声といったストリーミングデータがピースと呼ばれる幾つかの部分に分割される。ストリーミングデータを再生する再生端末は、ピースを他の再生端末から受信してデータを集め、ある程度集まった時点で再生を開始する。大きなデータサイズのストリーミングデータが細かく分割されるため、多数の再生端末に配信しやすいという利点があるが、再生端末がストリーミングデータを連続的に再生できるように効率的にピースを配信する必要がある。ピースを配信する幾つかの手法が提案されているが、これらの手法では、*rarest first* と呼ばれる戦略を用いている [1, 2]。これは、ネットワーク内に存在する数が少ないピースを優先的に配信するという戦略である。しかし、初めから順番に再生し、再生端末が頻繁に接続切断を繰り返すようなネットワークには適していない。このため、本研究では *rarest first* とは異なる戦略を用いる。本研究では、P2P ストリーミング配信の環境は、蜂の蜜を集める行動と非常に似ていることを発見した。蜂の、複数の場所にある蜜を効率的に集めてくるといった行動が P2P ストリーミング配信のピースを集める動作とよく似ている。

本研究では、蜂の蜜を集める行動に発想を得たピースの収集手法を提案する。代表的な 3 種類の蜂があり、これらの蜂の蜜の集め方にはそれぞれ異なった特徴がある [3]。このため、本研究では、ミツバチ、マルハナバチ、クマバチの 3 種類の蜂のアルゴリズムを応用する。評価の結果、それぞれのアルゴリズムには適した状況があることが分かった。

#### 3-2 蜂に発想を得た P2P ストリーミングシステム

参考文献 4 に示すように生物に学んだ計算機システムは近年盛んに研究されている。例えば、参考文献 5 では蜂のコミュニケーション方法がアドホックネットワークに適用されている。また、参考文献 6 ではセンサネットワークに適用されている。本研究では、蜂の蜜を集めるアルゴリズムを P2P ストリーミングシステムに適用する。まず、蜂の蜜の集め方を説明する。

##### 3-2-1 蜂の蜜の集め方

花園にはたくさんの花があり、蜂は近くの花園に飛んで向かい、蜜を集める。蜜は一度にたくさん運ばれず、少しずつ運ばれる。花には匂がある。匂の花の蜜は上質なものとなり、蜂は匂の花の蜜を好む。蜂ごとに花の蜜の集め方が異なっている。あるものは素早く蜜を集め、グループを形成して集める蜂や、個々に集める蜂がいる。本研究では、特徴的なミツバチ、マルハナバチ、クマバチの 3 種類の蜂に焦点を当てる。それぞれの蜂の特徴を以下で説明する。

##### ・ミツバチ

ミツバチはグループを形成せずに個々に蜜を集める。ミツバチは他のミツバチが多数存在する競争的な地域に多い。花にとって厳しい環境で、花の数も少ない。このため、ミツバチは出来る限り早く蜜を集める。

##### ・マルハナバチ

マルハナバチはグループを作って蜜を集める。マルハナバチは比較的競争の少ない地域に多く、他のグループが少なく、花も豊富にある。このため、マルハナバチは蜜を集めるスピードよりも蜜の質を重要視する。

##### ・クマバチ

クマバチはミツバチと同様にグループを形成せずに個々に蜜を集める。クマバチは花を見つけるとすぐに蜜を集める。このため、クマバチは近くにある花から蜜を集める習性がある。

##### 3-2-2 P2P ストリーミングシステムと蜂

P2P ストリーミングにおけるピースの収集は蜂の蜜を集める行動と、以下の点でよく似ている。

まず、ストリーミングデータが蜜とよく似ている。P2P ストリーミングシステムでは、ストリーミングデータはピースに分割される。そして再生端末はデータを最初から最後まで再生するためにはすべてのデータが必要になる。また、初めの方から再生を始めるため、初めのピースほど重要になる。蜜も同様に分割され、少しずつ運ばれる。また、匂があり、匂の蜜ほど重要という点でストリーミングデータは蜜とよく似ている。

次に、再生端末が花園とよく似ている。再生端末はピースをもっており、花園には蜜が含まれている。

最後に、再生端末間の通信が蜂の蜜を集める行動とよく似ている。再生端末はピースを送受信するために互いに通信し、蜂も蜜を集めるためにグループを形成したり、個々で行動したりして蜜を集める。P2P ネットワークにおける通信には地域によって速度が変わるが、蜂もグループで集めるかそうでないかで蜜を集める速度が変わり、これも再生端末間の通信が蜂の蜜を集める行動とよく似ている点である。以上を表 1 にま

とめる。

蜂はたくさんの蜜を集められるように素早く蜜をあつめるため、蜂の蜜を集めるアルゴリズムはP2P ストリーミングシステムにおけるピース収集アルゴリズムにも有効と考える。

### 3-3 提案手法

#### 3-3-1 想定環境

P2P ストリーミングシステムでは、ピースを要求する再生端末はリーチャと呼ばれ、ピースを提供する再生端末はシーダと呼ばれる。特に、すべてのピースをもつシーダはスーパシーダと呼ばれる。図4に、ストリーミングデータが10個に分割された場合の例を示す。この図では、リーチャはシーダA～Dからピースを受信している。想定環境を以下に列挙する。

- ・再生端末はすべての再生端末のIPアドレスを知っている。
- ・再生端末は、再生要求を出してからピースを集める。
- ・ストリーミングデータの数は一つである。
- ・再生端末はデータの再生が終わるとネットワークから切断する。
- ・途切れる時間が少ないほど望ましい。

P2P ストリーミングシステムでは、トラッカと呼ばれる管理ノードが存在し、各再生端末の受信状況等を把握している。このため、再生端末は他の再生端末のIPアドレスをトラッカに問い合わせることができる。また、スーパシーダがあるため、システム内にはすべてのピースが必ず存在している。

#### 3-3-2 具体例

以下に具体的なピースの集め方を説明する。再生端末Pが60分の映像ファイルの再生要求を出す場合を考える。PはトラッカのIPアドレスをWebサイト等から取得し、トラッカに再生要求を出す。トラッカはPのIPアドレスを再生端末リストに追加し、現在接続中の再生端末リストをPに送信する。Pは、提案手法を用いてピースを受信する再生端末を決定し、ピースの送受信を始める。Pがピースの受信要求を出した再生端末をQとする。PはQがもつピースのリストを取得し、自身がもっていないピースの送信を依頼する。Pがピースの受信を完了すると、映像データのそのピースの部分再生できる。ピースの受信が再生に間に合わない場合には、その部分で途切れが発生することになる。提案手法では、この途切れを少なくすることを目的としている。

#### 3-3-3 提案手法

以下に、蜂の蜜を集める行動から発想を得た、提案する3個の手法を説明する。

##### ・ミツバチ法

ミツバチは出来る限り速く蜜を集める。このためミツバチ法では、受信速度の最も速い再生端末からピースを受信する。受信速度は、ピースのリストを取得する際に計算できる。

##### ・マルハナバチ法

マルハナバチは、匂の花から蜜を集める。このためマルハナバチ法では、再生中のピースに最も近いピースをもつ再生端末から受信を行う。各再生端末は、ピースのリストを交換することで、再生中のピースに近いピースを認識できる。

##### ・クマバチ法

クマバチは最も近い花園から蜜を集める。このためクマバチ法では、自身が再生要求を出した時刻からさかのぼって最も近い時刻で再生要求を出した再生端末からピースを受信する。

表1：P2P ストリーミングと蜂の世界の対応

P2P ストリーミング	蜂の世界
再生端末	花園
ピース	蜜
前の方のピース	匂の蜜
通信	蜂の行動

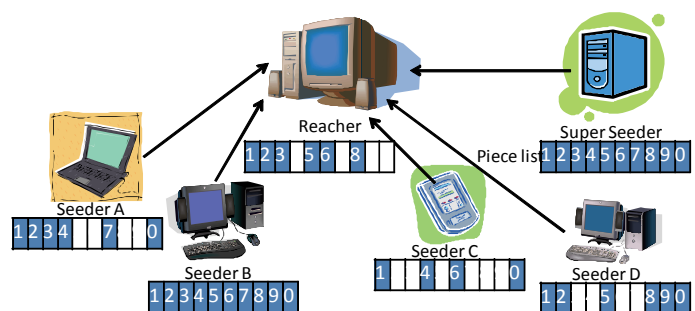


図4：システム環境

### 3-3 評価

蜂の蜜を集めるアルゴリズムを適用した評価を示す。本研究では、これらの手法を、既存の他の手法と比較する。表 2 に評価に用いたパラメタの値を示す。

#### 3-3-1 途切れ時間

提案手法の主な目的は、途切れ時間を削減することである。本項では、各再生端末の合計の途切れ時間を評価する。評価結果を図 5 に示す。縦軸は途切れ時間の合計であり、横軸は再生端末が再生要求を出した時刻である。例えば、時刻 0 のプロットは、時刻 0 に再生要求を出した再生端末の総途切れ時間を示す。Honey はミツバチ法、Bumble はマルハナバチ法、Carpenter はクマバチ法を示す。Sequential とは直前に再生要求を出した再生端末からピースを受信する既存手法を示し、Window とはある一定区間内のピースのみ受信する既存手法を示す。

この図から、ミツバチ法がほぼ全ての再生端末において短い途切れ時間を与えていることが分かる。他の手法が例えば 709, 1065, 1491 秒等で途切れ時間が増加していてもミツバチ法では増加していない。これは、再生端末が再生を終了してネットワークから切断すると、その再生端末からピースを受信していた再生端末の途切れ時間が長くなるためである。ミツバチ法では、出来る限り速くピースを集めるため、ネットワークから切断する前にピースの受信を完了できる。シミュレーションの初めの方の段階では、マルハナバチ法とクマバチ法がよい値を与えている。これは、再生端末の数が少ない場合には、ミツバチ法の利点が効果的に生かされていないためである。

例えば、時刻 3000 で再生要求を出した再生端末のミツバチ法における途切れ時間は 3.4 秒である。これが提案手法の中で最も短い値となる。

#### 3-3-1 途切れ回数

再生端末は少ない途切れ回数の方が好ましいと考えられる。そこで再生途切れ回数を評価した。結果を図 6 に示す。縦軸は途切れ回数であり、横軸は先ほどと同じく再生要求を出した時刻である。

途切れ回数についても、ミツバチ法がよい値を与えていることがわかる。

表 2：評価に用いたパラメタと値

パラメタ	値
到着率	ポアソン分布, 平均 60 秒
再生レート	512Kbps (MPEG4)
再生時間	30 分
ピースのデータサイズ	256K バイト (デフォルト)
シミュレーション時間	6 時間
出帯域	最大 800Kbps, 最小 400Kbps
入帯域	最大 1.5Mbps, 最小 1Mbps

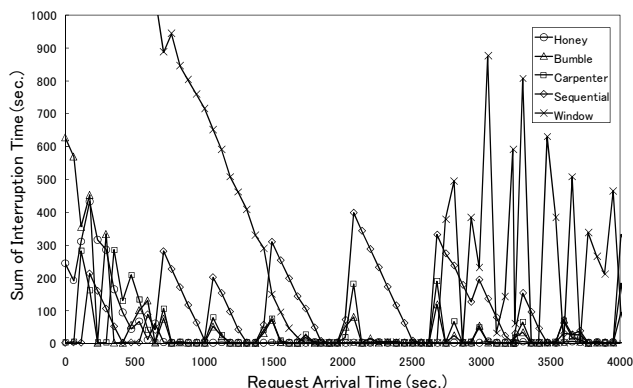


図 5：途切れ時間のシミュレーション結果

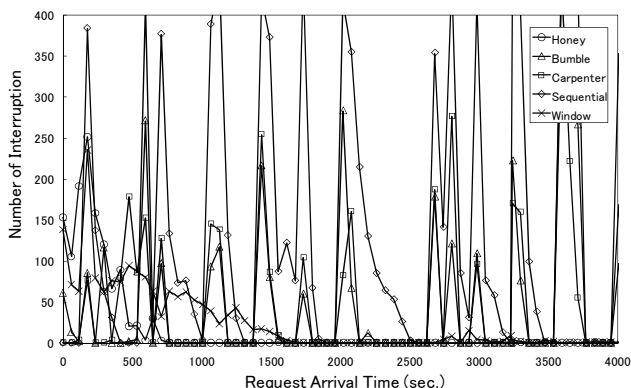


図 6：途切れ回数のシミュレーション結果

### 3-4 まとめ

本研究項目では、生物に学ぶストリーミング伝送方式の数式化とシミュレーションモデルを作成し、シミュレーションを行った。提案手法は、ミツバチ、マルハナバチ、クマバチの3種類の蜂の蜜を集めるアルゴリズムを応用している。シミュレーションの結果、ストリーミング配信の開始直後にはマルハナバチとクマバチのアルゴリズムが有効であり、データが十分に配信された後では、ミツバチのアルゴリズムが適していることが明らかになった。今後、さらに詳細なシミュレーションや時間ごとに手法を変更する手法を考えている。

## 4 まとめ

本論文では、Bio-Inspired 技術を分子通信とストリーミング配信に応用し、それぞれの研究についてまとめた。各章のまとめに記述したように、これらの研究にはまだ課題が残っているため、今後さらに進める予定である。

### 【参考文献】

1. Dana, C., Li, D., Harrison, D., and Chuah, C.-N., BASS: BitTorrent Assisted Streaming System for Video-on-Demand. In Proc. of IEEE Workshop on Multimedia Signal Processing, pp. 1-4, 2005.
2. Shah, P. and Paris, J.-F., Peer-to-Peer Multimedia Streaming Using BitTorrent. In Proc. of International Performance of Computers and Communication Conference (IPCCC'07), pp. 340-347, 2007.
3. Wright, R., Mulder, P., and Reed, H., Honey Bees, Bumble Bees, Carpenter Bees, and Sweat Bees. In Oklahoma Cooperative Extension Fact Sheets, EPP-7317, 2007.
4. Suda, T., Nakano, T., and Fujii, K., Applications of Biological Concepts to Designs of Computer Networks and Network Applications. The Handbook of Computer Networks, John Wiley & Sons Inc, 2007.
5. Wedde, H. F., Farooq, M., Pannenbaecker, T., Vogel, B., Mueller, C., Meth, J., and Jeruschkat, R., BeeAdHoc: An Energy Efficient Routing Algorithm for Mobile Ad Hoc Networks Inspired by Bee Behavior. In Proc. of Genetic and Evolutionary Computation, pp. 153-160, 2005.
6. Saleem, M. and Farooq, M., BeeSensor: A Bee-Inspired Power Aware Routing Protocol for Wireless Sensor Networks . In Springer Lecture Notes in Computer Science, Vol. 4448, pp. 81-90, 2007.

### 〈発表資料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
Bee-Inspired Data Collection Methods for P2P Streaming Systems	Proceedings of 3rd International Conference on Bio-Inspired Models of Network, Information, and Computing Systems 2008	2008年11月