

# 細胞分裂モデルにもとづくセンサー情報の送受信周期制御

荒川 伸一<sup>†</sup> 近重 裕次<sup>‡</sup> ライプニッツ 賢治<sup>§</sup>

原口 徳子<sup>‡</sup> 平岡 泰<sup>¶</sup> 村田 正幸<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 大阪大学大学院情報科学研究科 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-5

<sup>‡</sup> 国立研究開発法人 情報通信研究機構 未来 ICT 研究所

〒651-2492 兵庫県神戸市西区岩岡町岩岡 588-2

<sup>§</sup> 国立研究開発法人 情報通信研究機構 脳情報通信融合研究センター

〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-4

<sup>¶</sup> 大阪大学大学院生命機能研究科 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-3

E-mail: arakawa@ist.osaka-u.ac.jp

あらまし 極めて多数のセンサーデバイスが接続される IoT サービス環境では、ネットワーク制御に関わるオーバーヘッドが相対的に大きくなる。従って、ネットワーク制御の省電力化だけではなく、情報の発生源である末端システムにおけるセンシング処理やセンサー情報の発出タイミング等の挙動を適切に制御することによって、システム全体の省電力化を図る必要がある。本稿では、IoT サービスの末端機器が、自身の残余消費電力量にもとづいてシステム維持に係る処理とセンサー情報の発出タイミングを調整する制御機構として、リボソームの量を媒介としてシステム挙動を制御する細胞分裂モデルに着目し、細胞分裂モデルの解析式を示すとともに細胞分裂モデルをセンサー情報の送受信周期制御に用いた場合のサービス挙動を議論する。

キーワード Internet of Things, センサーネットワーク、細胞分裂モデル、システム制御

## Analysis of cell growth model

### and its possible application in IoT service systems

Shin'ichi Arakawa<sup>†</sup> Yuji Chikashige<sup>‡</sup> Kenji Leibnitz<sup>§</sup>

Tokuko Haraguchi<sup>‡</sup> Yasushi Hiraoka<sup>¶</sup> and Masayuki Murata<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University, 1-5 Yamada-Oka, Suita, Osaka, 565-0871 Japan

<sup>‡</sup> Advanced ICT Research Institute, NICT, 588-2, Iwaoka Nishi-ku, Kobe, Hyogo 651-2492 Japan

<sup>§</sup> Center for Information and Neural Networks, NICT, 1-4 Yamada-Oka, Suita, Osaka, 565-0871 Japan

<sup>¶</sup> Graduate School of Frontier BioScience, Osaka University, 1-3 Yamada-Oka, Suita, Osaka, 565-0871 Japan

E-mail: arakawa@ist.osaka-u.ac.jp

**Abstract** In IoT service environment where an extremely large number of sensor devices are connected, the overhead associated with network control becomes relatively large. Therefore, it is important to reduce the power consumption not only by improving network control method but by control mechanisms at the terminal system with an appropriate behavior on the sensing interval and/or intervals of information transmission. In this paper, we introduce a cell growth model where its behavior is controlled by the behavior of ribosomes. We show analytical formula of the cell growth model and discuss service behavior when the cell growth model is used for the control mechanisms of the sensing interval and/or intervals of information transmission.

**Keywords** Internet of Things, Sensor networks, Sensing system, Cell growth model, System control

## 1. はじめに

インターネットの社会普及を背景に、ネットワークを基盤とする新しいサービスが急速に普及しつつある。特に、Internet of Things (以下、IoT) は、あらゆる「モノ」の状態をセンサー等によって計測し、ネットワーク接続を介した情報交換や集約によって新たなサービス創発を促進しようとするものである。2014年におけるセンサーの世界出荷台数は約 250 億個であり[1]、これらのセンサーデバイスがインターネットを介して接続され、生体センシング、スマートシティなど、様々なアプリケーションが考えられている。

センサー情報を収集するアプリケーションやネットワーク技術は古くから検討がなされており、シンクノードと多数のセンサーノードがアドホックネットワークを構成し、センサーノードが発するセンサー情報をマルチホップでシンクノードへと送り届けることが考えられている [2, 3]。多くの研究では、例えば温度・気温測定などの定点観測系のアプリケーションを想定し、センサー情報は定期的に発生するものとし、その上でセンサー情報の配送経路の最適化を図っている。最適化はエネルギー消費量最小化や生存時間最大化を目指しており、センサー情報の中継を担うクラスターヘッドの選出・更新アルゴリズムが多数考案されている。

極めて多数のセンサーデバイスが接続される IoT サービス環境では、ネットワーク制御に関わるオーバーヘッドが相対的に大きくなる。これは、クラスターヘッドを導入して情報収集する際に、センサーデバイスが発する情報量はセンサーデバイス数に比例して増加し、その結果クラスターヘッドの消費電力量が増大し、クラスターヘッドの切替回数が多くなるためである。ネットワーク制御に関わるオーバーヘッドが相対的に増大し、システムの生存時間が短縮化されるなどの問題が生じる[4]。また、仮にネットワーク制御の工夫によって、制御オーバーヘッドの相対的な増大が抑制されたとしても、オーバーヘッドの絶対量の増大は回避できないものであり、IoT サービス環境構築の妨げになることは容易に想像される。そのため、ネットワーク制御の省電力化だけでなく、情報の発生源である末端システムにおけるセンシング処理やセンサー情報の発出タイミングを適切に制御することによって、システム全体の省電力化を図る必要がある。

本稿では、IoT サービスの末端システム（機器）が、自身の残余消費電力量にもとづいてシステム維持に係る処理とセンサー情報の発出タイミングを調整する制御機構を検討する。こ例えば、残余消費電力量が著しく低下している状況では、システム維持に係る処理量を必要最小限とし、センサーデバイスのセンシング周

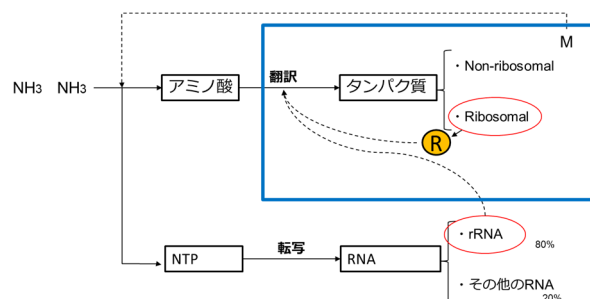


図 1: 細胞で生成される物質と依存関係

期や発出間隔を大きくすることで、自身の生存期間を最大化する。一方で、残余消費電力量が十分に確保されている場合には、センサー情報を通常周期で送り出す等の必要最小限の処理を行いつつも、省電力化を目的としたネットワーク制御に関わる処理リソースの配分を許容することが考えられる。

自身がおかれた環境の変化に対して適応的に振る舞うシステムの例として、細胞分裂システムがある。細胞は、細胞自身の活動に必要な物質の生成量と、生命活動の維持に必要なタンパク質の生成量を、栄養状態に応じて調整することが知られている[5]。本稿では、Ribosomal Dynamicsにもとづく細胞分裂モデルに着目し、そのダイナミクスの解析式を示す。また、細胞分裂モデルをセンサー情報の発出タイミング制御に適用した際に得られる効用を議論する。

本稿の構成は以下の通りである。2章では、Ribosomal Dynamicsにもとづく細胞分裂モデルを説明し、3章でその挙動を式を用いて表現する。4章では、細胞分裂モデルをIoT サービス環境におけるセンサー情報の発出周期に適用した際の挙動を議論する。本稿のまとめと今後の課題を5章で述べる。

## 2. 細胞分裂モデル

### 2.1. Ribosomal System

細胞で生成される物質と、それらの物質の依存関係を図 1 に示す。細胞は、システム外の窒素源 NH<sub>3</sub> を栄養素とし、生命の活動に必須となるアミノ酸やタンパク質を生成する。ただし、その生成過程においては、アミノ酸からタンパク質への翻訳に用いる rRNA やリボソーム (Ribosome) を併せて生成している。特にリボソームは、細胞が生成するタンパク質 (Ribosomal protein) によって構成するものの、他の生命活動に必要なタンパク質 (NonRibosomal protein) を生成する際の触媒として作用し、細胞分裂における重要な構成要素となっている。

このリボソームを介した細胞分裂システムを工学システムとして捉えると、システム活動の主目的である Non-ribosomal protein の生成と、細胞のシステム活

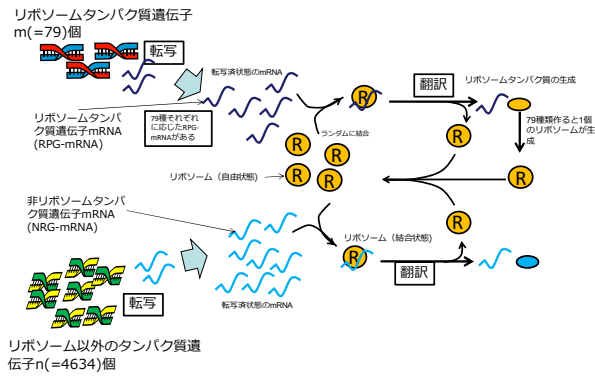


図 2: Ribosomal Dynamics

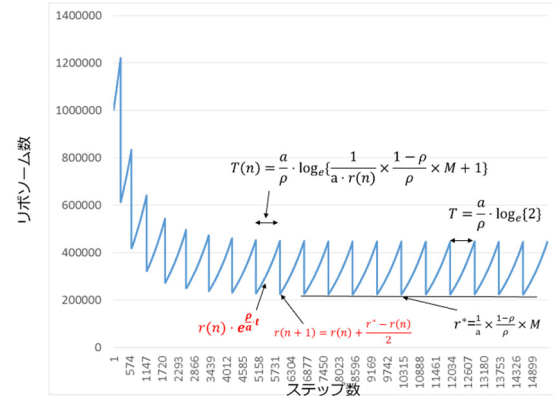


図 3: 1 細胞内のリボソーム数の推移

動維持に必要となる ribosomal protein の生成を、システム入力 (NH3) の変化に応じて巧みに調整していることが出来る。

## 2.2. Ribosomal Dynamics にもとづく細胞分裂モデル

Ribosomal System の挙動の単純モデル[5]を図 2 に示す。単純モデルでは、Ribosomal protein 生成に必要な情報が記録されたリボソームタンパク質遺伝子と Non-ribosomal protein 生成に必要な情報が記録された非リボソームタンパク質遺伝子がある。個々の遺伝子に対応する mRNA は、その遺伝情報を読み出し、リボソームと結合してタンパク質を生成する。タンパク質生成後は mRNA とリボソームは分離される。リボソームは、それを構成する Ribosomal protein がすべて生成された時に 1 つ新たに作り出される。また、細胞は、Non-ribosomal protein の生成量が一定に達した時に分裂する

## 2.3. 生物学実験

文献[5]では、酵母菌を対象として、窒素源が十分にある場合と不足している場合それぞれについて、細胞分裂システムの活動を実験的に計測している。ただし、個々の細胞の分裂の様相は観察できないため、細胞集団としての遺伝子発現レベル等を測定している。

生物学実験では、

- ・ 窒素源が潤沢にある場合、Ribosomal protein の生成割合が 0.46 である
- ・ 窒素源が 1/100 となる低栄養状態では、分裂周期が 1.1 倍に増加すること

が明らかとなっている。また、低栄養状態の細胞集団の重量測定によって、リボソームの量が減少することがわかっている。これらのことから、酵母菌の細胞では、栄養源である窒素源の変化に対してリボソームの量 (Ribosomal protein の量) を調整することで、細胞分裂周期や細胞増殖速度を制御する機構が備わっていると言える。

## 3. 細胞分裂モデルの数学解析

遺伝情報が mRNA に転写され、リボソームと結合してタンパク質を生成する過程を 1 ステップとした時、ステップ数  $t$  時点における 1 細胞あたりのリボソーム数  $R(t)$  は、

$$R(t) = r_0 \cdot e^{\frac{\rho}{a}t}$$

となる。 $r_0$  は初期リボソーム数であり、ステップ数  $t$  が増加するとともに指数的に増加する。ただし、 $\rho$  は mRNA の全体数に対する Ribosomal protein に対応する mRNA 数であり、Ribosomal protein の生成割合に対応している。以降、R-fraction と呼ぶ。また、 $a$  は Ribosomal Protein からリボソームが組成されるレートを表している。酵母菌では 79 種類の Ribosomal Protein によってリボソームが組成されることが知られている。ただし各 Ribosomal Protein は一律のレートで生成されないため、 $a$  はおよそ 230 となる。

ステップ  $t$  で細胞 1 つが生成する Ribosomal protein 数  $P_r(t)$  は  $\rho \cdot R(t)$  であり、細胞 1 つが生成する Non-ribosomal protein 数は  $(1-\rho) \cdot R(t)$  となる。

$n$  回目の細胞分裂が行われた後の細胞分裂周期を  $T(n)$  と表記し、定常状態での細胞分裂周期を  $T$  と表記する。倍化時間  $T$  の間に細胞 1 つが生成する Non-ribosomal protein 数は、

$$\int_0^{T(n)} P_{nr}(t) dt$$

となり、

$$\int_0^{T(n)} P_{nr}(t) dt = a \cdot \frac{1-\rho}{\rho} \cdot r_0 \cdot [e^{\frac{\rho}{a}T(n)} - 1]$$

となる。細胞は、Non-ribosomal protein の生成数が  $M$  となったときに分裂するため、

$$M = a \cdot \frac{1-\rho}{\rho} \cdot r_0 \cdot [e^{\frac{\rho}{a}T(n)} - 1]$$

が導かれる。以上の関係式にもとづき、ステップ数  $t$  におけるリボソーム数を求めた結果を図 3 に示す。こ

の図では、初期リボソーム数を 1 億としている。ステップ開始直後は Ribosomal Protein が過剰であり、Non-ribosomal protein の生成レートが高く、短い時間で  $M$  に達し細胞が分裂する。分裂によってリボソーム数は半減され、それに伴い細胞分裂周期は長くなる。

定常状態では、細胞分裂によりリボソーム数が半減するものの、Non-ribosomal protein を  $M$  生成する間に同量のリボソーム数が生成される。従って、細胞が定常状態にあり、細胞分裂周期でリボソーム数が変わらないものとする、定常状態における細胞分裂直後のリボソーム数  $r^*$  に関する以下の式が導かれる。

$$r^* = \left( \frac{1}{a} \cdot \frac{1-\rho}{\rho} \times M + r^* \right) / 2$$

すなわち、

$$r^* = 1/a \times (1-\rho)/\rho \times M$$

であり、定常状態における細胞分裂直後のリボソーム数  $r^*$  は  $a$ 、 $\rho$ 、 $M$  に依存することがわかる。なお、 $n$  回目の細胞分裂直後のリボソーム数  $r(n)$  は、

$$\begin{aligned} r(n+1) &= \frac{r^* + r(n)}{2} \\ &= (2 * r(n) + (r^* - r(n))) / 2 \\ &= r(n) + (r^* - r(n)) / 2 \end{aligned}$$

となる。これより、Ribosomal Dynamics にもとづく細胞分裂モデルでは、P-control に従ってリボソーム数の制御がなされることがわかる。

#### 4. 細胞分裂モデルにもとづくセンサー情報の送受信周期制御

タンパク質は、生物の生命活動に必須となる物質であり、細胞の活動によってタンパク質が生み出される。ただし、細胞は、生命活動に直接的に必要となるタンパク質のみを生成するのではなく、タンパク質を生成する際に利用されるリボソームの生成機構、ならびに、リボソームを構成する ribosomal protein の生成機構を内包している。

リボソームを含む生物システムを情報システムとして捉えると、non-ribosomal protein は情報システムのアウトプットであり、ribosomal protein およびリボソームは情報システムのアウトプットを維持/調整するための内部機構と捉えることができる。この時、 $M$  は情報システムのアウトプットの量であり、 $a$  は内部機構の動作効率もしくはオーバーヘッドと見立てることができる。また、 $\rho$  は、内部機構の処理リソースとアウトプットの処理リソースの配分割合に相当する。2.3 節にまとめた生物学実験で得られた結果では、栄養物質である窒素源が減少すると、 $\rho$  が調整されリボソーム数が減少し、その結果倍化時間が延伸されることがわかっている。情報システムにおいては、内部機構の処

理リソース量を低下させ、情報システムのアウトプットの維持に努めていることとなる。

IoT システムにおいては、栄養物質は電力量そのものであると捉えることができる。IoT システムでは電力（栄養物質）を消費し、センサーにより得られるセンサー情報をサンプリングおよび CPU 処理し、無線通信によってセンター等に情報送信を行う。Ribosomal Dynamics を用いて IoT システムの挙動を解釈すると、

- Non-ribosomal protein の生成量が  $M$  に達した時に、無線通信を行い、
- Ribosomal protein は無線通信以外の内部処理に用いられるシステムリソースであり、
- Ribosomal protein/Non-ribosomal protein の生成割合を、システムパラメーター  $\rho$  によって調整する

となる。なお、ここではリボソーム数が一定数増える毎にシステムを起動しセンサー情報をサンプリングするものとし、サンプリングした結果を即時外部に送信するのではなく、 $M$  生成に相当する時間を待って、外部に送信することを想定している。生物学実験における栄養物質の過多は、IoT システムにおける太陽光発電や無線給電によって不定となる残余電力量の過多となり、残余電力量に応じて内部処理に用いられるシステムリソースと、外部通信に用いられるシステムリソースの配分を行うものと解釈される。 $M$  は、単なる無線電波の送受信の消費電力ではなく、競合による再送を含むプロトコルオーバーヘッドを含めて情報送信に必要な電力量と解釈すれば良い。

内部処理に用いられるシステムリソースは、センサーからの情報取得と情報処理に割かれるシステムリソースであり、そのリソース量はリボソーム数に対応する。例えば、栄養（電力）が全くない時にはリボソーム数は最小 (1) とする。すると、Non-ribosomal protein が  $M$  個生成される時間は最大化され、結果として情報送信の周期が最大化される。また、何らかの要因でリボソーム数が過剰となった場合、無線通信を行う周期を段階的に延伸することになる。

酵母菌の細胞では、低栄養状態では R-fraction を調整してリボソームの量を減少させ、分裂周期を 1.1 倍程度にしている。Ribosomal Dynamics にもとづく細胞分裂モデルを用いてセンサー情報の送受信周期を制御する場合、IoT システムにおいては残余電力量が少ない状況でサンプリング数を減少させ、情報送信周期を 1.1 倍程度の延伸とする制御がなされることがなる。

#### 5. まとめと今後の課題

極めて多数のセンサーデバイスが接続される IoT サービス環境では、ネットワーク制御に関わるオーバーヘッドが相対的に大きくなる。従って、ネットワーク

制御の省電力化だけではなく、情報の発生源である末端システムにおけるセンシング処理やセンサー情報の発出タイミング等の挙動を適切に制御することによって、システム全体の省電力化を図る必要がある。

本稿では、IoT サービスの末端システム（機器）が、自身の残余消費電力量にもとづいてシステム維持に係る処理とセンサー情報の発出タイミングを調整する制御機構として、リボソームの量を媒介としてシステム挙動を制御する細胞分裂モデルに着目し、細胞分裂モデルの解析式を示した。また、細胞分裂モデルをセンサー情報の送受信周期制御に用いた場合のシステム挙動を述べた。

本稿では細胞分裂システムの応用例を述べるに留まっており、IoT サービス環境に適用するためには多くの課題が残されている。まず、酵母菌を対象とした生物学実験で得られた  $\alpha$ 、 $\rho$ 、 $M$  の経験的数値は、必ずしも IoT サービス環境と合致するものではない。従って、細胞分裂システムが想定通り動作するパラメータ領域を明らかにする必要がある。また、細胞分裂システムにおけるリボソーム数は P 制御となっていたが、IoT サービス環境においては PI 制御や PID 制御が他の選択肢として考えられる。この点については、細胞分裂システムが何故 P 制御となっているか（進化を止めているか）の理解を深める必要がある。

## 参考文献

- [1] JEITA, “センサ・グローバル状況調査”, 2015
- [2] I.F. Akyildiz, et. al., “A survey on sensor networks,” IEEE Communications Magazine, vol. 40, no. 8, pp. 102-144, Nov. 2002.
- [3] L. Zhaohua, et. al., “Survey on network lifetime research for wireless sensor networks,” in Proc. of 2009 2nd IEEE International Conference on Broadband Network & Multimedia Technology, pp. 899-902, 2009.
- [4] H. Li, Y. Liu, W. Chen, W. Jia, B. Li, J. Xiong, “COCA: constructing optimal clustering architecture to maximize sensor network lifetime,” Computer Communications, vol. 36, no. 3, pp. 256-268, Feb. 2013.
- [5] Y. Chikashige, et.al., “Cellular economy in fission yeast cells continuously cultured with limited nitrogen resources,” Scientific Reports, vol. 5, Nov. 2015.