

共創的コミュニケーションの前提

○小川 健一郎 (東京工業大学), 三宅 美博 (東京工業大学)

Necessary Conditions for Co-creative Communication

○Ken-ichiro OGAWA (TIT), and Yoshihiro MIYAKE (TIT)

Abstract: We propose a new mathematical frame, based on the connection theory of fiber bundles, to consider necessary conditions for co-creative communication. We apply this frame to the dynamics of bicoid proteins in a *Drosophila* embryogenesis. Then, this frame leads us to two conditions: (1) the dynamics described in an external coordinate can be identified with that in an internal coordinate; (2) differential operators in the dynamics satisfy an commutative diagram.

1. 緒言

共創システムとは、自律した個体同士がお互いの身体を介したコミュニケーションを行うことによって共同して秩序を創り上げていくシステムである。ここで重要なことは、一般に個体はお互いに異なる感覚を有するという点である。それゆえ、身体を通して生成される場を介した個体間のコミュニケーションが必要になると考えられる^[1]。それにより、システム全体として柔軟な秩序が形成される。このことは、人間社会における様々なシステムを観察すれば随所に見られるが、近年それらのシステムに様々な問題が生じているように思われる。このような社会的状況を踏まえると、人と人とのコミュニケーションを支援するシステムや、人とロボットとの円滑なコミュニケーションを実現するためのシステムなどの共創的コミュニケーション支援システムの早急な構築が求められる。そのためには、共創的コミュニケーションのメカニズムを体現する数理的なモデルが必要となる。これに関し、先行研究として例えば、位相の異なる振動子間の引き込み現象を記述する非線形振動子系の結合モデルや、主観的な時間感覚を有する個体間の共創的コミュニケーションを記述する二重ダイナミクスモデルなどがある^[2, 3, 4]。これらのモデルは、方程式の解である大域的なパターンとして場が生成することを説明するものであり、共創的コミュニケーション支援システムへの適用が期待される。

しかしながら、これらのモデルは、そもそもなぜ異なる感覚を有する個体同士の間にコミュニケーションが成り立つのか? という問題に答えるものではない。近年社会システムに生じている問題の根源に場の喪失があるのだとすると、それを再構築するためには、この問題について様々な観点から考察する必要がある。そのとき、特に問題となるのは以下の点であろう。

(1) 異なる感覚を有する個体同士がコミュニケー

ションを行う際に場の介在が必要となる条件は何か?

(2) その際にシステムの満たすべき条件は何か?
そこで、本研究では、共創システムの典型例である多細胞生物における生化学反応を例に取り、この問題に対して理論的な側面からのアプローチを試みる。

2. 多細胞生物における生化学反応系

多細胞生物の発生の過程において、様々なタンパク質が遺伝子の発現に関与する。例えば、典型的なモデル生物であるショウジョウバエの頭尾軸形成においては、ビコイドタンパク質が関与することが知られている^[5]。実験によると、ビコイドタンパク質の濃度パターンは、定常状態において指数関数に一致する^[6]。これより、ビコイドタンパク質のダイナミクスは、頭尾軸に沿った空間1次元(+時間1次元)の外部座標系において、次のような単純な拡散方程式で記述されることが分かる:

$$\partial_t A(x,t) = \alpha \partial_x^2 A(x,t) - \gamma A(x,t). \dots(1)$$

ここで、 $A(x,t)$ はビコイドタンパク質の濃度、 α はビコイドタンパク質の拡散定数、 γ はビコイドタンパク質の減少率を表す定数である。このビコイドタンパク質は、胸部の形成に関与するハンチバック遺伝子の発現を調整する役割を担うタンパク質である。具体的には、ビコイドタンパク質は、ホメオドメインという構造を持ち、ハンチバック遺伝子の上流配列に結合して転写調節を行う転写調整因子としての役割を果たしている。

式(1)は、発生の初期に初期胚の前極に局在するビコイド mRNA からビコイドタンパク質が生産され、生産されたビコイドタンパク質が次第に初期胚の後方に拡散しつつ分解するというダイナミクスを表している。このことは、ビコイドタンパク質は初期胚の中でお互いに相互作用することなく自由に拡散しているという

ことを意味している。このとき、ビコイドタンパク質の空間パターンは、式(1)の定常解として、次のような指数関数で表されることになる：

$$A(x) = A_0 \exp(-\rho x), \quad \rho \equiv \sqrt{\gamma/D}. \quad \dots(2)$$

ここで、 A_0 は境界条件により決定される定数である。

3. 数理的な考察

以上の状況においてビコイドタンパク質には個体差を想定していないが、細胞の観点からすれば、全てのビコイドタンパク質が同質であるとは限らない。つまり、全てのビコイドタンパク質がハンチバック遺伝子の転写を調整できる形状にあるという保障はない。そこで、次の変換を考える：

$$U: A(x,t) \rightarrow A_E(x,t) = UA(x,t). \quad \dots(3)$$

ここで、 U は定数であり、 A_E はハンチバック遺伝子の転写調節を行うことができる実質的なビコイドタンパク質の濃度を表す。このとき、変換 U が空間と時間に依存しないので、 A_E は式(1)を満たすことが分かる。この場合、実質的なビコイドタンパク質にも個体差はないので、お互いの中で相互作用をすることはない。ここで、さらに次の変換を考えてみる：

$$U(x,t): A(x,t) \rightarrow A_E(x,t) = U(x,t)A(x,t). \quad \dots(4)$$

今度は変換 U が時間と空間に依存するので、 A_E は式(1)を満たさない。このことは、時間と空間毎に個体差を伴う実質的なビコイドタンパク質同士のダイナミクスは元のダイナミクスとは共存しないということを意味している。

しかし、たとえ個体差を伴っていたとしても A_E がタンパク質であることに変わりはないので、細胞の観点から、式(4)の変換を受けたとしても式(1)で記述されるダイナミクス自体は変わらないという状況を想定してみることは可能であろう。このことが成り立つためには、式(1)における微分作用素（時間微分と空間微分）をそれぞれ次のように置き換えなければならない：

$$\partial_t \rightarrow D_t \equiv \partial_t - T(x,t), \quad D_x \equiv \partial_x - X(x,t). \quad \dots(5)$$

ここで導入された関数 $T(x,t)$ と $X(x,t)$ は、式(4)の変換 $U(x,t)$ に対して、それぞれ次のように変換することが要請される：

$$T(x,t) \rightarrow T_E(x,t) = T(x,t) + (1/U)\partial_t U, \quad \dots(6.1)$$

$$X(x,t) \rightarrow X_E(x,t) = X(x,t) + (1/U)\partial_x U. \quad \dots(6.2)$$

このとき、式(4)の変換 $U(x,t)$ に対して、次の式が不変

となる：

$$D_t A(x,t) = \alpha D_x^2 A(x,t) - \gamma A(x,t). \quad \dots(7)$$

式(7)は変換 $U(x,t)$ によって新たに持ち込まれた時空の各点に付随した内部座標系から見たダイナミクスを表している。

4. 場が介在するコミュニケーション

式(7)に式(5)を代入すれば、式(7)は次のようになる：

$$\begin{aligned} \partial_t A(x,t) &= \alpha \partial_x^2 A(x,t) - \gamma A(x,t) \\ &+ TA - 2DX\partial_x A - D(\partial_x X)A + DX^2 A. \quad \dots(8) \end{aligned}$$

式(8)は内部座標系に基づく式(7)を外部座標系で見た式である。式(8)を外部座標系から見れば、ビコイドタンパク質 A と関数 T 、 X で表される場との間に新たに相互作用が生じたことが分かる。式(7)が成り立つ前提は、微分作用素に対する次の可換図式である：

$$D_t(UA) = U(D_t A), \quad D_x(UA) = U(D_x A). \quad \dots(9)$$

以上のことをまとめると、以下ようになる。

- (1) 外部座標系から見たダイナミクスと内部座標系から見たダイナミクスが同じになる場合、場の介在が必要となる。
- (2) そのための条件は式(9)で表される微分作用素の可換図式が成り立つことである。

つまり、上記の考察において、場は外部座標系と内部座標系との間でダイナミクスに整合性を持たせるための補償場として登場し、補償場は外部座標系から見た場合にしか顕在化しないという特徴を有していることが分かる。

さらに、上記の議論を空間方向に限定して、次のような現象について考察する。近年の実験結果によると、ショウジョウバエの初期胚において生成するビコイドタンパク質の濃度パターンには大幅な個体差があるにも関わらず、ハンチバック遺伝子が発現する境界位置にはほとんど差が見られない^[7]。つまり、ハンチバック遺伝子の発現する境界位置はビコイドタンパク質の濃度パターンの個体差に対してロバストなのである。このことを説明するために様々なモデルが提唱されているが、それらのモデルは仮説の域を出るものではない^[6,8]。この問題に対して本研究は次のような示唆を与える。各個体（初期胚）において生成するビコイドタンパク質の濃度パターン同士は、次の変換式

$$U(x): A(x) \rightarrow A_E(x) = U(x)A(x) \quad \dots(10)$$

によって関係付けられており、空間微分に対する式(9)

の可換図式が成り立つので、補償場 X が介在することによって、内部座標系で見れば、各個体で同じビコイドタンパク質のダイナミクスに従うことになる。このとき、内部座標系で見た初期条件に個体差がなければ、得られる解は同一の濃度パターンとなる。このことは、細胞（核）はそれぞれ自分の置かれた位置において実質的なビコイドタンパク質に反応するということを意味する。もちろん、この考えについても仮説の域を出るものではないが、共創システムのロバスト性に対して新たな考察の糸口を与えるものと思われる。

5. 結言

以上の考察から、最初に提起した問題（1）、（2）について次のようなことが示唆される。感覚にはそれに付随する座標系が存在し、感覚をその座標値で表すことができるとした場合、異なる感覚を有する個体同士が局所的に同じ行動（ダイナミクス）を共有するという認識を得るに際して、それを補償するものとして場が外的に顕在化する。ここで重要なことは、お互いが自身の座標値を合わせるということではないという点である。また、上記のような認識を得ることが可能な行動には可換図式が成り立つという制限がつく。

もちろん、上記の考察自体、可能性の域を出るものではない。例えば、タンパク質の形状が変化することによって、その運動に変化が生じるかも知れない。そのような場合には、相互作用に場の介在する条件を統一的な枠組みの中で説明することは困難であり、個別の枠組みにおいて考察する必要があるものと思われる。その意味において、上記の考察は限られた枠組みでの話でしかない。従って、上記の枠組みがどこまで適用可能であるかを調べるために、今後さらなる考察を行う必要がある。他方、逆にこのように枠組みを絞ることによって、例えば、時間方向に限定すれば共創システムにおける異種感覚統合の問題に対して、また、空間方向に限定すれば、上記のように、共創システムにおけるロバスト性の問題に対して考察するための新たな切り口を与えることが期待される。

なお、上記の考察における数学的な枠組みは、ファイバー束の接続理論として知られており^[9]、特に物理学ではゲージ理論として成功しており、例えば、変形体の運動をモデル化する際に適用されている^[10]。上記の考察ではタンパク質のダイナミクスを表す最も簡単なモデル方程式に対してこの理論を適用したわけだが、その他にも上記の枠組みが適用可能な対象について考察することが今後の課題として残されている。

参考文献

- [1] Miyake Y., “Co-creation systems: Ma and communication”, *Culture and Neural Frames of Cognition and Communication*, pp.139-152, Springer-Verlag, Heidelberg (2011).
- [2] Hove, M.J., Suzuki, K., Uchitomi, H., Orimo, S., Miyake, Y., “Interactive rhythmic auditory stimulation reinstates natural 1/f timing in gait of Parkinson’s patients”, *PLoS ONE*, 7(3), e32600, pp.1-8 (2012).
- [3] Miyake Y., Yamaguchi Y., Yano M., and Shimizu H., “Environmental-development self-organization of positional information in coupled nonlinear oscillation system: a new principle of real-time coordinative control in biological distributed system”, *IEICE Trans. Fundamentals Vol.E76-A*, pp.780-785 (1993).
- [4] Kon H. and Miyake Y., “An analysis and modeling of mutual synchronization in corporative tapping”, *Transaction of Japanese Human Interface Society*, Vol.7, No.4, pp.61-70 (2005).
- [5] Alberts B., Bary D., Lewis J., Raff M., ke Roberts, and Watson J.D., *Molecular Biology of The Cell*, 3th-ed., Garland Publishing, Inc., New York (1994).
- [6] Houchmandzadeh B., Wieschaus E. and Leibler S., “Precise domain specification in the development *Drosophila* embryo”, *Phys. Rev. E* 72, 061920, pp.1-7 (2005).
- [7] Houchmandzadeh B., Wieschaus E. and Leibler S., “Establishment of developmental precision and proportion in the early *Drosophila* embryo”, *Nature* 415, pp.798-802 (2002).
- [8] Ogawa K. and Miyake Y., “Generation model of positional values as cell operation during the development of multicellular organisms”, *BioSystems* 103, pp.400-409, (2011).
- [9] Shapere A. and Wilczek F., “Gauge kinetics of deformable bodies”, *American Journal of Physics*, Vol.57, No. 6, pp.514-518 (1989).
- [10] Isham C.J., *Modern differential geometry for physicists*, 2nd-ed., World Scientific Publishing, Co. Pte. Ltd., Singapore (2003).