

抽象ヘテラルキー

Abstract Heterarchy

笹井一人*¹ 郡司ペギオー幸夫*²
Kazuto Sasai Yukio-Pegio Gunji

*¹神戸大学自然科学研究科

Graduate School of Science and Technology, Kobe University

*²神戸大学自然科学研究科

Graduate School of Science and Technology, Kobe University

The notion of abstract heterarchy is presented to address the paradoxical feature of formal description of heterarchical systems. It consists of the interaction between the two paradoxes, self-reference and frame-problem. Dynamical interaction on the two paradoxes is called time-state-scale re-entrant system (TSSRS) derived from two self-referential statements. We apply the TSSRS to the logical model of functional manifestation in the biological systems. The results from this model assist the assumption that a logical basis of biological processing is heterarchical feature of logical systems.

1. はじめに

生命を自律的な機械と仮定して、その機械の持つ論理的な性質を規定しようという試みは、システム理論の出発点であり、人工生命の科学の根幹となる議論である。システム理論による生命としてのシステムは、その機能的な性質を部分的なシステムに分割不可能であるとする還元不可能性を持つ。この還元不可能性を規定する限りにおいて、生命としてのシステムにおいて、その全体と部分/要素の間の階層性が肯定され、その間の関係が複雑系の科学につながる議論であるといえる。相互作用は元来同レベルの要素間においてのみ定義可能な概念である為に、ヘテラルキーの指し示す階層間の相互作用形式は従来の相互作用では表現不可能な形式である。これを可能にする方法として我々は自己言及-フレーム問題の相互作用系を構成する。ここで、自己言及は全体の要素への分割不可能性を示し、フレーム問題は要素の全体への統合不可能性を指し示す。これらの示唆する不可能性を不定性の生成と読み替え、相互に接続することによって動的な階層構造としてのヘテラルキーを抽象的な形でモデル化する。

2. 自己言及-フレーム問題のモデル化

本章では、まず前述した自己言及-フレーム問題の相互接続モデルの数理的な定義を行なう。次に、その応用として生体内情報処理の自己言及モデルにこれを適用する。自己言及-フレーム問題の相互接続モデルの力学的モデルとして時間状態スケール相互再参入系 [Gunji 08] を導入する。

2.1 時間状態スケール相互再参入系

時間状態スケール相互再参入系は以下の式、

$$x_{t+1} = f(x^*), \quad (1)$$

$$G(x) := \sum_{i=0}^{N-1} 2^{N-i-1} g^i(F(x))[0], \quad (2)$$

$$F(x) := \sum_{j=0}^{N-1} 2^{N-i-1} x[j], \quad (3)$$

で定義される力学系である。ここで、 x は実数の二進展開によるビット列であり、 $x^* = G(x)$ は以下で定義されるビット列
連絡先: 笹井一人, 神戸大学自然科学研究科, 神戸市灘区六甲台町 1-1, 078-803-5759, kazutosasai@mac.com

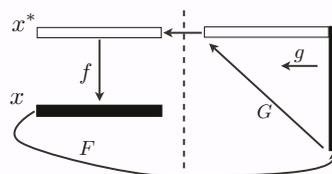


図 1: 時間状態スケール相互再参入系の時間発展の模式図

に関する操作である。また、 f, g はそれぞれ自己言及とフレーム問題を表現する、自己言及文より派生した力学系である。

図 1 に時間発展の模式図を示した。ビット列を棒状に表し、それぞれ縦方向を時間、横方向を状態スケールの方向に対応させる。

3. 生命システムとしての生体内シグナル伝達制御

例えば、電気的シグナルが化学的シグナルに変換されるように、生体内シグナル伝達機構はその情報媒体の変換形式によって複雑な情報処理を可能にしている。これらの変換機能は、各化学反応において一種のスイッチが存在し、それらの複雑な挙動によって制御される最も一般的な生命システムの形式の一つである。ここでは、この変換機構の論理モデルに対して時間状態スケール相互再参入形式を導入する事で、自律制御系としての生命システムに自己言及-フレーム問題が大きく関わる事を示す [Sasai 08]。

3.1 シグナル伝達の論理モデル

本論では、津田らの用いたシグナル伝達の論理モデル [Tsuda 97] を用いる。津田らはシグナル伝達機構の最も抽象化された論理モデルとして、活性/不活性のスイッチングを命題形式で表現した。 $\langle e \rangle$ を活性化、すなわち機能発現に関する命題、 $\langle i \rangle$ を不活性化、すなわち機能抑制に関する命題とする。活性・不活性の反応は、ある機能を実現するシステムの部分系が担っていると仮定すれば、反応の結果と部分系の働

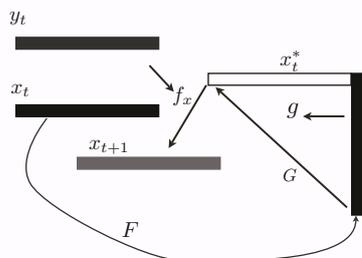


図 2: 時間状態スケール相互再参入系を用いた生体内情報処理の論理モデルにおける時間発展の模式図。図は x 方向についてであり、 y 方向も同様である。

きは次の論理式によって表現する事が出来る。

$$\langle e \rangle \Leftarrow \langle e \rangle \leftrightarrow \langle e \rangle \wedge \neg \langle i \rangle, \quad (4)$$

$$\langle i \rangle \Leftarrow \langle i \rangle \leftrightarrow \langle e \rangle \wedge \neg \langle i \rangle \quad (5)$$

ここで、左辺の $\langle e \rangle$ 、 $\langle i \rangle$ は反応の結果、中央のそれらは反応前、右辺の共通項 $\langle e \rangle \wedge \neg \langle i \rangle$ は反応を表す。不活性化に関する命題が自己言及の形を取ることに注目されたい。生体内情報処理がヘテラルキー構造を持つと仮定し、これに時間状態スケール相互参入系を用いる。この時、フレーム問題は各部分系の計算において発現する概念であるから、ここで各部分系におけるフレーム問題を表現する命題をそれらについての単一の自己言及文として置き、時間状態スケール相互再参入形式を構成することで、以下の力学系モデルを得る。

$$x_{t+1} = f_x(x_t^*, y_t), \quad (6)$$

$$y_{t+1} = f_y(x_t, y_t^*), \quad (7)$$

$$(8)$$

ここで、 f_x 、 f_y は最初の論理式に由来する力学系、* は前章で定義したものと同様の操作である。

3.2 数値シミュレーション

前節で定義した、時間状態スケール相互再参入系を用いた生体内情報処理の論理モデルについて数値シミュレーションを行なった。ここでは、主な結果として図 3 に値 $x - y$ の時間発展 [Sasai 08] を示した。津田らのモデルがある領域内におけるカオスの挙動を示した (図 3(b)) のに対して、我々のモデルは間欠的な挙動を伴ったカオスの挙動を示した (図 3(a))。津田らの示したカオス領域は、その境界が生体内反応機構における閾値的挙動の起源を明らかにしたが、閾値そのものの起源については、それが外部から付与され、且つうまく調節されなければならないという意味で、明らかにされなかった。さらに、解析結果としてスペクトル解析を行なった。パワースペクトルの分布は、周波数の高い領域と低い領域が分割された階層構造を示す、ベキ領域で構成されることを明らかにした。このような時間スケールの階層構造は実際のタンパク質活性化反応において発見されている構造であり [Henzler-Wildman 07]、時間状態スケール相互再参入系は論理モデルにおける生体内情報処理の理解において、妥当な基礎的論理構造を示唆しているといえる。

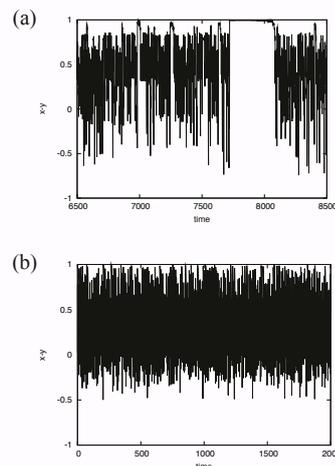


図 3: 値 $x - y$ の時間発展。(a) 時間状態スケール相互再参入系を用いたモデル。(b) 津田の論理モデル。

4. 結論

本論では、まず自律機械としての生命システムをヘテラルキー構造を持つシステムとして仮定し、その抽象的形式を自己言及一フレーム問題の相互作用形式で表現し、さらにその力学系モデルとして時間状態スケール相互再参入系を定義した。次に、これを生体内情報処理の論理モデルへと適用し、その仮定の妥当性を支持する数値シミュレーションを行なった。本論の重要性は、生命システムの形式的理解には、階層間の混同における矛盾を積極的に取り込んで利用することが創発的挙動に大きく関係するという議論が重要であるということである。これら矛盾に対する能動的態度は、ねじれた形での階層の記述・表現を構成し、それによって生命システム創発的な側面が浮き彫りにされるとことを示唆している。

参考文献

- [Gunji 08] Gunji, Y.-P., Sasai, K., and Wakisaka, S.: Abstract heterarchy: Time/state-scale re-entrant form, *BioSystems*, Vol. 91, pp. 13–33 (2008)
- [Henzler-Wildman 07] Henzler-Wildman, K., Lei, M., Thai, V., Kerns, S. J., Karplus, M., and Kern, D.: A hierarchy of timescales in protein dynamics is linked to enzyme catalysis, *Nature*, Vol. 450, No. 7171, pp. 913–916 (2007)
- [Sasai 08] Sasai, K. and Gunji, Y.-P.: Heterarchy in biological systems; a logic-based dynamical model of abstract biological network derived from time-state-scale re-entrant form, *BioSystems*, Vol. 92, No. 2, pp. 182–188 (2008)
- [Tsuda 97] Tsuda, I. and Tadaki, K.: A logic-based dynamical theory for a genesis of biological threshold, *BioSystems*, Vol. 42, pp. 45–64 (1997)