



Heterarchical structure in coupled Time-State-scale Re-entrant System

笹井, 一人

(Degree)

博士 (理学)

(Date of Degree)

2008-03-25

(Date of Publication)

2009-08-04

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲4173

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1004173>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



氏 名	笹井 一人
博士の専攻分野の名称	博士（理学）
学 位 記 番 号	博い第 371 号
学位授与の 要 件	学位規則第 5 条第 1 項該当
学位授与の 日 付	平成 20 年 3 月 25 日

【 学位論文題目 】

Heterarchical structure in coupled Time-State-scale Re-entrant System（結合時間状態スケール相互再参入系におけるヘテラルキー構造）

審 査 委 員

主 査	教 授	郡司	幸夫
	教 授	向井	正
	教 授	兵頭	政幸

ヘテラルキー構造は、神経科学や人工知能、社会科学といった分野において提案されている、新しい階層性の概念である。通常の階層性は、下のレベルの階層の全体表現として1つ上の階層が存在するという、1方向（上方向）のみの因果関係を主体としているのに対して、ヘテラルキーは上の階層が下の階層に影響を及ぼすという、相互的な作用関係を用いる。この時、この相互作用の成立には、二つのレベルが同時に成立し、それらが混同されるという条件が必須である。なぜならば、相互作用は同レベル上でしか規定し得ない概念であるからである。しかしながら、計算論や力学系といった応用性に富んだ分野において、その同時性の表現は未だ確立されていない。我々は、この同時性の一つの表現として、時間・状態スケール相互再参入系(Time-State-scale Re-entrant System, ここではTSSRSと呼ぶ)を提案した。本論第1章においては、導入として、ヘテラルキーの基本的な概念とその重要性について議論する(本要約においては、この段落)。第2章において、我々はTSSRSの導出過程とその時間発展について議論する。第3章では、TSSRSが具体的な例（ここでは、神経生理学の一つの問題）においてどのような結果をもたらしうるかを議論する。第4章では、結論としてTSSRSの示す帰結とその発展性について述べている。

第2章

階層性の二つのレベルをシステム全体と部分システムに置き換える。通常の階層性では、部分システムの動作の統合としてシステム全体が表現され、二つのレベルは共立し得ない。我々はこの共立不可能性を自己言及文の矛盾によって表現する。自己言及文は、「この文は偽である。」という文であるが、この時「この」が指し示す語と文全体の二重性は「偽である」という述語の為に矛盾をきたす。ここで、いかにして部分と全体の混同が成立し得るか、という問いは、自己言及の矛盾がいかにして無効化されうるか、という問いへと置き換えられたわけである。この問いに対して、我々は、自己言及と対を成す、フレーム問題を導入する。フレーム問題は、この文全体の指し示しを無効化する概念である。自己言及の指し示し二重性は、フレーム問題による指し示しの無効化によって解体され、自己言及の矛盾は無効化される。この自己言及とフレーム問題を力学系において表現したものがTSSRSである。Grimらは、自己言及文の矛盾をより強調した、自己言及文「この文は、それが偽であると同様に真である。」を導入し、その論理式表現に時間のズレを導入する事で、自己言及に関する力学系表現を構築した。ここで表現される力学系は、自己言及の成立に関する信頼性、つまり部分—全体間の共立可能性を意味する。我々は、時間のズレの代わりに、自己言及とフレーム問題の相互再参入系を次に説明する形で導入することでヘテラルキー構造を表現する力学系を構築する。自己言及とフレーム問題それぞれの適用によって、自己言及文の二つの論理式表現が得られ、そこから二つの力学系が構成される。我々は、自己言及から得られる力学系を時間方向、フレーム問題から得られる力学系を状

態方向（ここでは、状態のビット列を指定する方向）に適用する。これらの直交する方向は、ビット列のねじれによって接続され、一つの力学系システムを構築する。これがTSSRSである。力学系における自己言及とフレーム問題の接続は、ビット列のスケールの指定（力学系においては状態空間の指定を意味する）と、指定された状態の時間発展が同時に行われるということを含意する。Grimらの提案した自己言及の力学系表現はカオスの振動を示したのに対して、TSSRSはその時間発展において、パルスを伴った間欠的挙動を示す。これは、自己言及として規定したシステム全体と部分システムの共立がその同時性によって間欠的信頼性（ある程度の時間は信頼できるが、いつか破綻する可能性を持つ信頼性）持ちうる事を意味する。

第3章

ニューラルネットワーク等の計算論的神経科学において、近年注目されている問題にパルス間隔に依存するニューロン発火の存在がある。通常の計算論的神経科学におけるニューロン発火のモデルは、下位レベルの構造である酵素反応系における実際の各反応は十分に速いとして無視できるとされてきた。ところが、パルス間隔に依存する発火は、パルス間における酵素反応系の変化が積極的に作用していることを意味し、それらが無視できないという問題を提示した。このような状況では、ヘテラルキー構造が重要とされる。ここでは、酵素反応系全体が示すニューロン発火の機能的発現と、各酵素反応の部分システムの変化がそれぞれシステム全体と部分システムに置き換えられる。以前に示した通り、二つのレベルの同時の共立は、その運動の時間スケールが異なるという性質から、従来のモデル構築法においてこれを表現するのは困難であり、これらの効果は時間遅れや、ノイズを加えるといった方法によってしか表現されていない。我々は、これに対してTSSRSを応用する事で、この問題に関する一つの表現法を提案する。津田らは、酵素反応系における機能発現のモデルとして、活性化酵素であるキナーゼと不活性化酵素であるホスファターゼの酵素反応を酵素反応系の自己言及命題として表現しそこから得られる力学系を酵素反応系に関する抽象表現として提案した。我々は、この自己言及命題にTSSRSを導入する事で、ヘテラルキー構造を酵素反応系において表現するモデルを構築する。ここでは、酵素反応系全体における自己言及命題を時間方向の力学系とし、それぞれの酵素反応をそれら自身における自己言及文として定義しそれを状態方向の力学系とした。これをTSSRSとして接続する時、そのモデルは、酵素反応系全体の機能発現と、各酵素反応による状態変化の同時性が保証された状況の抽象表現となる。津田らの提出したモデルがカオス的挙動を示したのに対して、我々の提出したモデルは、間欠性を伴った複雑な挙動を示した。次いで、我々はこのモデルの解析を行なった。その結果、複雑な挙動は、固定解周辺にアトラクトされる時間スケールの長い間欠的挙動と、周期解周辺にアトラクトされる時間スケールの短い間欠的挙動が存在する事を示し、その間がカオス的な揺らぎによって接続されている

(氏名： 笹井 一人 NO. 3)

ことを示し、さらにこれらの挙動は自己言及とフレーム問題を接続する事によって生じたフラクタル構造が起因している事を示した。次に、我々は酵素反応系の活性化状態の持続時間の確率分布を推定した。この確率分布は傾き・2 のべき分布を示した。

第 4 章

我々は、時間状態スケール相互再参入系(TSSRS)によって、ヘテラルキー構造を有する力学系モデルを提案した。Grim らの自己言及に起因する力学系はカオスの信頼性を示したが、我々のモデルはある程度の（間欠的）信頼性を提示した。次に、我々はこのモデルをヘテラルキー構造の具体例として、ニューロン発火に関する酵素反応系の機能発現モデルに導入した。結果として、このモデルは、長い時間スケールと短い時間スケールの運動が共存する、階層性を伴った運動を示した。酵素反応系の活性化時間に対応する状態持続時間の確率分布は傾き・2 のべき則を示した。このべき則はレビ飛行と呼ばれるランダムに存在する解の探索行動において最適な運動であるとされる運動に見られる法則であり、イオンチャネル等、生体系の様々な機能において実際に見つかっている。この結果は、計算論的神経科学のみならず、システム全体—部分システムの相互作用が無視できない系において、自己言及—フレーム問題の接続が重要な概念を構成することを示唆している。

氏名	笹井 一人		
論文 題目	Heterarchical Structure in Coupled Time-State-scale Re-entrant System (結合時間状態スケール再参入系におけるヘテラルキー構造) 相互		
審査 委員	区 分	職 名	氏 名
	主 査	教授	郡司 幸夫
	副 査	教授	向井 正
	副 査	教授	兵頭 政幸
	副 査		印
	副 査		印
要 旨			
本研究は、哲学的言明の計算論的表現に端を発したグリムらの研究を継承し、認識・同定に潜在する自己言及の様相を力学系によって表し、その意義を解説した研究である。先行研究において自己言及文の力学系における表現は、カオス力学系であると考えられてきた。生化学ネットワークに潜む自己言及系は、カオス力学系との結合系とみなされ、そこに閾値の創発が見出された。しかし、矛盾を直接帰結するような自己言及は、実際には何らかの形で無効にされ、明示的に見出されることはない。ここではその理由を、階層間の相互作用と階層内の相互作用とを共立させるヘテラルキー構造に求め、ヘテラルキーゆえに自己言及の成立前提が無効にされていると考える。この様相をまずは、自己言及にフレーム問題が接続した形式として一般化し、さらにこれを力学系として展開する。これをここでは時間状態スケール再参入系と呼んでいる。最終的にこのような形式の生化学的意味を明らかにするため、キナーゼ・リン酸化酵素ネットワークにおいて時間状態スケール再参入系を導入し、その挙動を導入しない先行研究と比較している。その結果時間状態スケール再参入系の導入によって、生物系の多くが有する適応的な計算能力が認められ、その意味が判明した。 第 1 章は、自己言及や矛盾と生物・認識システムとの関係にかかわる研究史について述べている。意識はデカルトのコギトを持ち出すまでもなく、存在と存在に対する規定作用との両義性から、自己言及の様相が避けられない。生命も同じく、自己組織化・自己製作という点に、自己言及の様相は不可避免的に見出される。しかし、論理的には自己言及が矛盾を帰結し排除されるのに対し、生命や意識はこれをものともせず、そこにある。この理由がどこにあるのかに対し、生物学者は階層構造に求める。とくにマッカロックの提唱したヘテラルキーは、近年経済活動を含む社会システム、細胞内相互作用と細胞間相互作用の両者を伴う多細胞システムにおいて、複雑系の文脈で注目されている。 このような自己言及と生物システムとの関連を踏まえ、自己言及と力学系の関係に関する研究史が述べられる。グリムは自己言及形式を、恒等関係の導入によって複雑に構成し、さらにウカチェビッチ論理を導入してテント写像を得た。こうして自己言及とカオス力学系が関係付けられた。またパラドクスを帰結する対話の隠喩に時間の同時性とずれの両者を導入することでカオスが得られることも示された。その後、時間のずれの導入を生化学ネットワークで展開する研究が進んだ。本研究は、これに対し、システム全体とサブシステムにおける自己言及との関係にヘテラルキーを見出すとき、時間のずれのみでシステム内の自己言及を構成することは不可能であろうと示唆し、ここにフレーム問題の接続が必要であると唱えている。 第 2 章では、自己言及にフレーム問題を接続し、自己言及を無効にするという形式が構想され、これを力学系として表し、時間状態スケール再参入形式を得ている。 まず自己言及が現実は無効化されているという様相が論じられる。自己言及は、部分と全体を両義的に指し示すことで矛盾を含意する。これは指し示しの不定性に関する操作的な表現と考えられる。他方、指し示しの不定性に関する意味論的表現がフレーム問題である。自己言及とフレーム問題は、一般には同じ問題の異なる表現と捉えられるが、ここでは両者を接続するという方法論が吟味される。すなわち、フレーム問題は、指し示しの操作以前に、指示を意味論的に決定することが不可能性だと指摘する。そこで自己言及にフレーム問題を接続すれば、自己言及の前提が無効になり、矛盾は含意されないというわけだ。			

氏名	笹井 一人
実際、グリムの用いるような自己言及文では、「これは偽である」という体裁をとり、「これ」が何を指し示しているかが重要な関心事となる。嘘つき文が矛盾を含意するというとき、「これ」が文全体指示することは自明であると仮定されているが、掲示板に書かれた文のすべてを指すのか、当該の文のみなのか判明しない状況も想定可能である。そのような状況で、掲示板の一部に「ではない」と書かれた無関係にも思える落書きが、本当に当該の文と無関係か否か判定できない場合も想定可能だ。もし「ではない」もまた指し示される全体の一部をなすのなら、この場合、嘘つき文はもはや自己言及形式をとらず、矛盾を含意しない。すくなくともこのような指し示しが意味論的に決定できない状況は、原理的に回避できず、むしろ、決定してしまえるのは、いわゆる言語ゲームの習慣に依拠するものと考えられる。したがって、たとえ自己言及においてすら、指し示しの意味論的決定不能性は避けられない。これこそ、自己言及にフレーム問題が接続された状況である。 ここではさらに、自己言及にフレーム問題が接続された状況を、力学系として構成する。まずグリムの提案する嘘つき文が与えられる。これをウカチェビッチ論理で表すとき、含意の定義の可能性が複数あることが示される。これを用いて嘘つき文に関する二種類の表現が与えられ、その各々によって、テント写像と変形テント写像が得られる。テント写像は、グリム同様、時間発展を表す力学系と定義される。それは自己言及ループの時間軸に関する表現と考えられる。これに対し、双対的な変形テント写像は、フレーム問題に相当する表現と考えられる。力学系において、意味論は状態の指定であり、意味論に関する不定さは、初期・境界条件の不定さを意味する。ここでは状態を実数で定義し、有限ビット列で計算する。したがって状態の確定、条件を指定する操作は、ビット列の下位の桁を追っていく操作となる。こうして有限ビット列を確定し、これにテント写像を適用し続ける操作に自己言及が、ビット列を確定していく操作にフレーム問題が見出され、両者の合成に、フレーム問題の接続した自己言及が見出される。ただし時間軸と状態スケールを指定する軸とは直行しており、二つの操作の合成は単純なテント・変形テント写像の合成ではない。これが時間状態スケール再参入系である。それはカオス力学系とは異なり、これ自体間欠的パルスを発して臨海の挙動を示すものとなっている。 第3章は時間状態スケール再参入系をキナーゼ・リン酸化酵素ネットワークに適用し、その挙動を評価している。先行研究ではこの系の自己言及的論理式をウカチェビッチ論理で表して力学系とし、さらに二つの変数のうち一方に時間のずれを導入し他方を同時にすることで、或る領域にのみカオスの挙動が限定される結果を得ている。これによってネットワークの中で内的にカオスが制御されると提唱されてきた。これに対し本研究では、キナーゼ・リン酸化酵素ネットワークに時間状態スケール再参入系を組み込むことで、このネットワークのヘテラルキー構造を実装している。通常想定されるキナーゼ・リン酸化酵素ネットワークに、各々の酵素が自己言及的なサブシステムを成していると考え、導入すれば先行研究における、時間のずれ・同時性をいれないモデルとなる。これに対し本研究では、サブシステムを時間状態スケール再参入系としてシステム・サブシステム間の階層性を導入している。時間軸と状態スケールの指定軸が直行していることにより、階層間の異質性が表現され、階層性が本質的役割を果たすと考えられる。 時間状態スケール再参入系を組み込まれたキナーゼ・リン酸化酵素系は、時間発展において間欠的な挙動を示す。これは先行研究の時間発展では認められない。この間欠的挙動は、三つの部分から構成される。周期解に間欠的に誘引され離脱することを繰り返す運動、固定解付近の間欠的パルス、その両者の間の遷移である。この三相における運動はスペクトル解析によって異なる種類のゆらぎと解釈された。また二つの解の間の遷移には、リターンマップにおける自己相似的構造がきいており、それによって劇的な変動がもたらされると論じられている。またキナーゼ活性化の時間間隙分布をみると、先行研究では認められなかったレビフライト分布が認められた。このような分布は、効率のよい反応を探索する際の分布としてしばしば生物の挙動に一般的に認められるものであり、ヘテラルキーの特徴を示す挙動だろうと述べられている。 第4章は結論である。時間状態スケール再参入系の導入によって、キナーゼ・リン酸化酵素系はカオスの挙動よりも規則的な挙動が出現し、異なる時間スケールの混在する系と理解されるにいたった。この運動はヘテラルキー構造からもたらされるリターンマップ上の自己相似構造に起因すると述べられている。 本論文は、ヘテラルキー構造の有する、階層内・間運動の齟齬を力学系において構成し、その挙動の解析から、タンパク質の機能的挙動にヘテラルキーの構造が関与していることを明らかにした。これは、複雑系の科学や計算の哲学について重要な知見を得たものとして価値ある集積であると認める。よって学位申請者の笹井一人は、博士（理学）の学位を得る資格があるものと認める。	