

氏 名	もと いけ いく こ 元 池 育 子
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学位記番号	理 博 第 2279 号
学位授与の日付	平成 13 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専攻	理学研究科物理学・宇宙物理学専攻
学位論文題目	興奮場上での情報処理の試み

論文調査委員 (主 査) 教授 吉川 研 一 教授 蔵本 由 紀 教授 小 貫 明

論 文 内 容 の 要 旨

本申請論文は、興奮特性を持つ場（反応拡散場）の空間的非対称結合を用いて、情報処理の基本である信号伝播の単方向性や、論理演算、時間演算、メモリ、多値演算等の機能が実現されることを明らかにしたものである。これは、反応拡散系における拡散の効果が興奮場の幾何学的形状に鋭敏に依存することに注目し、その拡散の効果の違いを利用することによる、これまでにない情報処理様式を提案したものとなっている。生物では多様な細胞が興奮性を有していることが知られていることと対比して、このような興奮場上の演算様式に関する研究は興味深いと考えられる。以下、申請論文の各章ごとに沿って内容の要旨を述べる。

序論の第 1 章では、研究の背景と用いているモデル系の概略、および本申請論文の構成について述べている。本申請論文では、生物が普遍的に持つ物理化学的性質から情報処理機能がどのように生じるのかを知ることを目的としている。その手段として、多くの生物が持つ動的興奮特性と、情報処理のユニットとなっている細胞という空間的広がりを持つ場、そして要素間の相互作用の非対称性という性質を用いている。具体的には興奮特性を持つ場の、非対称相互作用を用いた系を用いることで、相互作用の大きさを変えることでどのような情報処理が得られるかを見る。モデル化にあたっては、各々の細胞を空間的な広がりのある興奮場とみなし、細胞間隙に相当する拡散場を介した二次元系を考えている。なお、相互作用の非対称性（ダイオード特性など）を生み出すにあたって、本申請論文では興奮場の空間形状の非対称性を用いている。

第 2 章では、興奮性を記述するにあたって本申請論文で用いている FitzHugh-Nagumo 方程式について、興奮現象の特性と関連させて常微分方程式の解の挙動を論じている。次に空間効果を取り入れた偏微分方程式について述べ、その後形状効果を定量的に取り扱うための拡散長概念について、説明を行っている。そして、形状と拡散長との関係について、基本的な性質を述べている。なお、ここでみた形状と拡散長との基本的な関係特性は、次章以後に述べる演算処理機能を持つ素子場の配置条件の基盤となっている。

第 3 章では、情報処理の基礎として、整流作用を持つ場の結合について述べている。これは先行した研究、興奮場の形状非対称性によって整流作用が生まれることを化学反応である BZ (Belousov-Zhabotinsky 反応) 反応の実験によって示した研究結果について、一般化された興奮場系（反応拡散系）で示したものであり、同時に触媒が異なる BZ 反応の実験、及び FitzHugh-Nagumo 方程式の元となった南雲氏の示した電気回路系でも表現可能であることを示している。

第 4 章では、第 2 章で述べた性質を用いて、一旦生物の情報処理から離れ、ノイマン型コンピュータの基礎となっているブール代数論理演算、論理和・否定・論理積・排他的論理和について、本論文で用いている興奮場の形状を用いた系でも実現可能であることが示されている。なお、ここでは場の演算により解釈としてブール代数論理演算が可能であることを示すとともに、時間情報の演算が自然な形で導入されることの意義を強調している。

第 5 章においても、第 2 章で述べた性質を用い、より生物の行う情報処理に近い、時間情報を陽に含んだ演算処理を論じている。具体的には、時間差検出、周波数検出、およびメモリ機能が興奮場の形状配置条件を変えることで実現可能である

ことが示されている。なお、メモリ機能においては、単興奮波情報の保持・消去・読み出しが可能であるとともに、複数の興奮波列も波列の時間間隔の情報をそのまま保持・消去・読み出しが可能であることが計算機実験、及びBZ反応を用いた現実空間での実験系において示されている。

第6章では第5章までに用いたFitzHugh-Nagumo方程式を拡張することでより情報量の多い、多値演算が可能になることが示されている。第5章までは、刺激の大きさと閾値の大小関係によるall-or-none型の1ビット演算と対比した系として論じてきているが、ここでは多値演算が可能であることを計算機実験により明らかにしている。具体的には系を記述する方程式、FitzHugh-Nagumo方程式を拡張し、興奮状態と振動状態との間の遷移を制御することのできるパラメータを導入している。このような拡張FitzHugh-Nagumo方程式を用いると、時間差検出においても、応答のパルス数によって時間差を検出できるような多値演算が実現できることなどが示されている。また、多値演算を前提においた場合に考えられる演算である、2入力の大小比較演算や差分演算も同様に実現可能であることが示されている。

第7章は本論文のまとめである。

以上のように、申請論文は、空間の幾何学的形状をデザインすることにより、興奮場で多様な情報処理を行うことが可能であることを示したものである。

論文審査の結果の要旨

生物がどのような機構で自律的な情報処理を行なっているかといった問題に対して、これまでに数多く研究がなされてきてはいるが、その本質は必ずしも明らかにされていない。例えば、生物を分子レベルまで還元して各々の要素の性質を調べ、それから要素を組み合わせさせて物性を理解しようとするボトムアップ的な手法、あるいは得られる結果としての機能から本質を推定しようというトップダウン的な手法などがとられてきている。しかし、ボトムアップ的な手法を取る場合は、現実の生きている細胞系を考えると、非常に多くの蛋白質やイオン、濃度差や電荷などそこに存在する要素の数は極めて多くなり、局所的な関係を記述することはできても、全体の本質を見抜くことは困難となる。一方、最終的な機能から本質を推定しようというトップダウン的な手法を取る場合は、生物のもつ「もの」としての物理化学的性質にまでたどり着けないことが多い。例を挙げると、例えば現在ニューラルネットワークモデルとして典型的なものでは、節と辺で結ばれた配線図で表現されることが多く、節の持つ演算機能はあらかじめ与えられ、そこでは、もともと神経細胞が持つ空間的な広がり効果は無視されている。

本研究では、多くの細胞（特に多細胞系）が示す性質、興奮特性に注目し、それを情報処理と関連させて議論したものである。具体的には、細胞と細胞の結合に相当する興奮特性を持つ場の結合系において、形状と相互作用の物性を関連させて、興奮場という要素同士の相互作用を非対称にすることによって、どのような情報処理が可能になるかの検証を行なっている。

研究の成果の一つとして、興奮波を情報の担体とみなすと、場の形状による相互作用の非対称性から、整流特性や時間情報を含む論理演算、そして時間差や周波数の検出機能程度の情報処理が行えることを明らかにしている。同様な前提のもとに、興奮波という情報を保持・読み出し・消去することが可能なメモリ機能も行えることを明らかにしている。

またこのような研究の延長として、系を記述する方程式を拡張することで、主に感覚神経等で代表されるような、入力の大さに対して応答波数が変わるような、よりアナログ的な応答を示す多値応答の系にも、発展可能であると期待される。

現在まで提唱されてきたニューラルネットワークモデルでは、素子や素子間における情報処理に必要な時間の概念は陽には含まれておらず、ステップ演算などの操作の手順で時間の矢を陰にとりいれている。本研究で述べられている演算においては、実空間の中を情報を担う興奮波は有限速度で伝播することから、情報伝播及び処理に対して必然的に時間の概念が含まれる。したがって演算自体に時間情報が用いられることとなり、従来のノイマン型の枠組みの中では扱えない時間情報を、自然に取り入れることができることを示している。参照クロックが存在し得ない生物の自律的な情報処理の解明に対して、この演算システムは糸口を与えることが期待される。また演算がクロックに支配されないならば、本来的な意味での並列演算の可能性を秘めていることにもなる。

また生物との分子生物学的な対応という視点から見ると、一般性のある反応拡散系という性質を用いていることから、例えば形状は変わらなくても活性度や拡散係数を調節することによって信号伝播が異なるという性質は、各種伝達物質（メッ

センサーやホルモン等)の役割と対比させると興味深い。

以上のように、一般的に生物がもちうる物理化学的性質のみに基づくことにより各種の情報処理が可能であること、及び空間的な広がりや形状と機能を結び付けた研究として、本論文には興味深い新しい結果と独創的なアイデアが含まれているものと認める。今後の問題点、展望も含めて本申請論文は理学博士の学位論文として価値あるものと認定される。

主論文に報告されている研究業績を中心に口頭質問を行った結果、合格と判断した。