OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	神経興奮の非線形力学系モデルの簡約化と解析
Author(s)	前田, 義信
Citation	大阪大学, 1998, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.11501/3144053
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

氏名	前田義信（まえだよしのぶ）
博士の専攻分野の名称	博士（工学）
学位記番号	第 13939 号
学位授与年月日	平成10年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当 基礎工学研究科物理系専攻
学位論文名	神経興奮の非線形力学系モデルの簡約化と解析
論文審査委員	（主査） 教授 佐藤 俊輔 （副査） 教授 福島 邦彦　教授 中野 馨　講師 土居 伸二

論文内容の要旨

神経細胞の膜の電気興奮現象（活動電位）には生体内の神経情報が符号化されており，そのダイナミクスは神経情報処理の結果出現したものである。本研究の目的は，神経細胞の膜の電気興奮現象を記述する力学系モデルの構築とその解析を通じて，神経興奮の実体を数理的な立場から明らかにすることである。

第1章では，本論文が神経系の情報処理機構に関する基礎的研究に位置づけられることを述べた。第2章では，軟体動物イソアワモチの食道環神経節ペースメーカ細胞の膜の興奮現象を記述するHodgkin-Huxley型のモデルが，パラメータ（直流刺激電流）値の変化に対して示すダイナミクスの多様性を調べた。第3章では，神経細胞モデルの振る舞いの本質的要素を抽出するために，力学系モデルを簡約化した。ここではKeplerの簡約化法を用いて変数の数を4つまで減らし，分岐図等の力学系の手法を併用することによって，同神経節細胞に関して初めて3変数モデル（最小変数モデル）を得ることに成功した。3変数簡約化モデルと元の8変数モデルのダイナミクスは定量的に一致する。第4章では，モデルの平衡点近傍の固有値解析と摂動法による解析を併用して前章で述べた簡約化法がはたらく機構を調べた。その結果，平衡点における線形化方程式のヤコビ行列の固有値のいくつかはパラメータ値にかかわらず常に負の値を持ち，対応する固有ベクトルで張られる部分空間を，簡約化モデルの状態点が通過しないことを示した。簡約化モデルの平衡点における線形化方程式のヤコビ行列の固有値が，元のモデルのヤコビ行列の残りの固有値をよく近似することを示した。また，Hodgkin-Huxley型の神経細胞モデルに特徴的なHopf分岐とサドル-ノード分岐に注目し，サドル-ノード分岐はKeplerの簡約化法適用によって定量的に再現されるが，Hopf分岐は定性的にしか再現されないことを明らかにした。第5章では，簡約化モデルの振る舞いを，（幾何学的）特異摂動法と分岐理論を用いて明らかにした。

以上のように本論文では，多変数で記述され実験データに裏付けられたHodgkin-Huxley型の神経細胞モデルが，ダイナミクスの相関次元とほぼ同じ位相次元を持つ最小変数モデルまで簡約化できることを示し，元のモデルと簡約化モデルの振る舞いを幾何学的かつ解析的に比較検討することによって，神経細胞の膜の電気興奮現象の本質を数理的な立場から明らかにした。

論文審査の結果の要旨

神経細胞の膜の電気的興奮の結果生じる活動電位の列には生体内の神経情報がコード化されている。膜の電気的興奮のメカニズムの解明は神経情報処理機構の仕組みを知る上で基本的に重要である。興奮現象を力学系理論の枠組みで体系的に論じることができる。そのためには膜の電気的興奮を定量的に再現する力学系モデルの構築と解析が必要である。本論文は，軟体動物イソアワモチの食道環神経節ペースメーカ細胞の自律的バースト放電について知られた非線形力学系モデル（空間固定されたHodgkin-Huxley＝以下HH＝型方程式）を解析し，同放電機構の数理的な側面を明らかにした。

本論文ではまず本研究が神経系の情報処理機構解明の基礎的研究に位置づけられることを述べた。第2章では，HH方程式とHodgkin-Huxleyの方法に従って構築された上記ペースメーカ細胞の8変数力学系モデルの，パラメータ（直流刺激電流）値に対する分岐構造を調べた。第3章では，このモデルの振る舞いの数理的本質を知るためにモデルの変数の数を減らす。Kepler等の簡約化法により変数を4つまで減らし，分岐図等の力学系の手法を併用して，3変数の最小変数モデルを得ることに成功した。3変数簡約化モデルと元の8変数モデルのダイナミクスは定量的に一致した。第4章では，系の平衡点近傍の線形固有値解析と摂動法を用いて簡約化が働く機構を論じ，以下を明らかにした。固有値解析におけるヤコビ行列の固有値のうち，パラメータ値の変化に対して常に負の値を持つものが変数の削減に関係する。すなわち，簡約化モデルの軌道はそれらの固有ベクトルで張られる部分位相空間を通過しない。簡約化モデルの平衡点近傍でのヤコビ行列の固有値が，簡約化によって削減されない元のモデルの固有値をほぼ定量的に再現する。また，HH型神経細胞モデルに特徴的なサドル-ノード分岐がKepler等の簡約化適用後も定量的に保存されるが，同じく特徴的なHopf分岐は定性的にしか再現されない。第5章では，簡約化モデルが示す複雑な興奮現象を幾何学的特異摂動法と分岐理論を用いて明らかにした。

以上のように本論文では，多変数で記述され実験データに裏付けられる神経細胞モデル（HH型方程式）が，ダイナミクスの相関次元とほぼ同じ位相次元を持つ最小変数モデルまで簡約化できることを示し，幾何学的かつ解析的に（局所的に）比較検討した。脳・神経系の構成素子である神経細胞の電気的振る舞いに関する基礎的知見を与えており，本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。