MOSFET を用いた 2 次元ニューロンモデルの設計と実装に関する研究

RA 竹本享史
新領域創成科学研究科複雑理工学専攻

概要

脳の優れた情報処理能力を工学的な応用に生かすことは脳科学の大きな目標であり，脳型情報処理システムの構成理論とそのハードウェア化の基盤技術の確立を目指す上で，神経細胞の機能を模倣した電子回路を設計することは重要である．最近，電子回路ニューロンの設計に位相解析や分岐解析といった数理的手法を取り入れた Mathematical-model-based design が提案された[1]．この方法では，ハードウェアの特性を効率よく取り込んだ回路設計が可能なため，生物ニューロンに近く，しかも回路規模が小さいニューロン回路が実現できる．

本研究では，Mathematical-model-based design に従い，ニューロンを 2 変数の単純な位相構造で表現した MOSFET による電子回路ニューロンモデルを提案する．Hodgkin によると，発火特性の違いから生物ニューロンはクラス I・クラス II の 2 つのクラスに分類される．提案する回路は，数個の回路パラメータを変更することで，クラス I, 狭いチャンネルと呼ばれる位相構造を持つクラス I*, クラス II など様々なタイプのニューロンモデルを実現できる．本モデルの個別部品による実装を行い，提案回路が生体ニューロンの持つ性質を正しく継承していることを理論・実験の両面から評価した．また数値計算によって，本回路をギャップジャンクションで結合した場合，あるパラメータ領域で様々な時空間カオスが生じることを確認した．

1 電子回路ニューロンの設計

ニューロンのクラスの分類は，モデルの次元に依存しない概念であるが，2 変数モデルで議論できることが知られている．ここでは数理的に扱いやすいこの 2 変数縮約モデルに議論を限定する．2 変数縮約モデルは，膜電位 V と（縮約された）不活性化変数 μ で表現され，その力学的挙動はこの 2 変数のナルクラインによって特徴付けられる．多くの場合，V のナルクラインは (V, μ) の相空間上で逆 N 型となり，一方，μ のナルクラインはクラス I ニューロンで U 型であり，クラス II ニューロンでは直線的になる．クラス I ニューロンの中に，発火の閾値近傍で，相空間の 2 つのナルクラインの間に狭いチャンネルと呼ばれる幾何構造が出現されるものがあり，これはクラス I*と呼ばれる[2]．

提案する 2 次元ニューロンモデルは，標準的な CMOS プロセスで集積回路化可能なエンハンスメント型 MOSFET を用いて設計した．使用する MOSFET の多くは，低消費電力・数理モデル構築の容易さなどの利点から，ドレイン電流がゲート電圧に対し，指数関数的な依存性を持つサブスレッショルド領域で動作させる．図 1 に，電子回路ニューロンモデルのブロック図を示す．本モデルは逆 N 型非線形回路・U 型非線形回路・線形性の良い電圧電流 (V-I) 変換器[3]の 3 つの主要回路を組み合わせることで実現した[4].

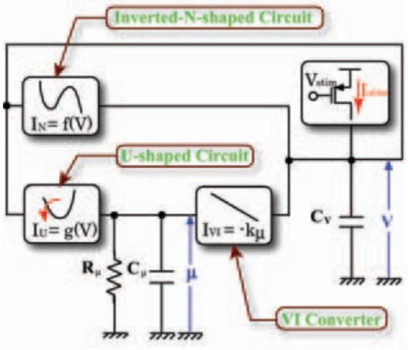

図 1: 電子回路ニューロンのブロック図

各非線形回路の入出力特性は，抵抗値を変えることで容易に変更でき，この柔軟性によって，本回路はクラス I, II, I*といった様々なタイプのニューロンモデルを実現できる．

2 電子回路ニューロンの実装

提案回路を互いにコンプリ (特性の揃ったN型P型 FET) である個別部品 (2SK1133/2SJ166) を用いて実装し，動作特性の検証を行った．図2に提案回路の位相構造例を示す．各モードにおける回路パラメータは，理論モデルの位相構造と類似するように設定した．

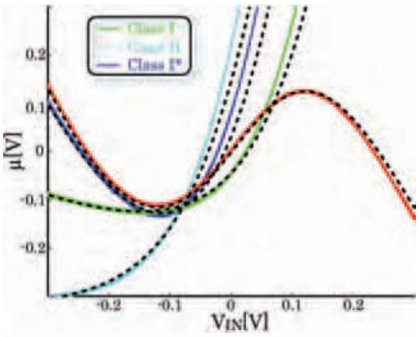

図2: 電子回路ニューロンの位相構造．実線が回路実験，点線が理論モデルの結果を示す

設計したニューロン回路が生体ニューロンの性質を再現できることを確認するために，(a) 神経興奮の特徴，(b) クラスI，クラスIIの異なるスパイク発生機構，(c) 周期刺激に対するカオス的応答，の3つの性質について検証した．図3にクラスIIにおけるカオス的応答の実験結果を示す．

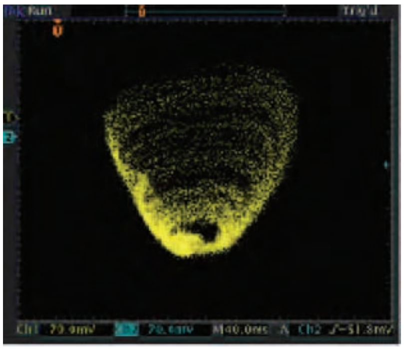

図3: クラスIIにおける非周期的応答時のμ-V相平面

近年，大脳新皮質における抑制性細胞間において，膨大な量のギャップジャンクション (GJ) と呼ばれる電気結合が報告され，GJで結合された系が脳の符号化・情報表現に果たしている機能的役割について注目が集まっている．今回，提案回路を1次元的に20個並べ，互いに隣の細胞とGJ結合を持った空間的配置を考え，各モードにおけるシステムレベルの挙動を数値計算により検証した．結合の強度はすべて一様とし，またGJによる電気結合は線形抵抗で表現した．ネットワークの挙動は結合強度に依存して変化し，クラスI*モード時のみ，時空間カオス的な挙動が観測された．観測されるカオスパターンの中には，全同期した状態と非同期の状態の遷移を不規則に繰り返す挙動も見られた (図4参照).

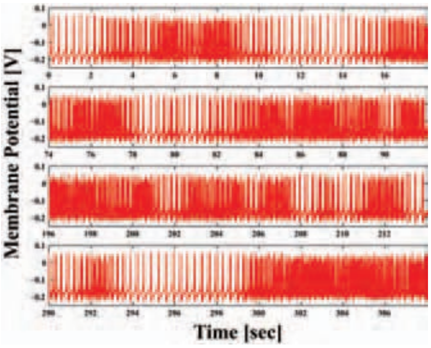

図4: GJ結合系で観測された全同期と非同期のカオス的な遷移

3 まとめ

本研究では数理的手法を回路設計に導入することで，MOSFETによりコンパクトに実装できる，生物ニューロンに近い性質を持つ2次元ニューロンモデルを提案した．本モデルを個別部品により実装し，生体ニューロンの持つ性質を正しく再現していることを確認した．また，数値計算によってギャップジャンクション結合系での時空カオスを確認した．

参考文献

[1] T. Kohno and K. Aihara, A MOSFET-based model of a Class 2 Nerve membrane, *IEEE Trans. Neural Networks*, Vol. 16(3), pp. 754－773, 2004.

[2] H. Fujii and I. Tsuda, Itinerant dynamics of class I* neurons coupled by gap junctions, *COMPUTATIONAL NEUROSCIENCE: CORTICAL DYNAMICS LECTURE NOTES IN COMPUTER SCIENCE*, Vol. 3146, pp. 140－160, 2004

[3] T. Takemoto, T. Kohno and K. Aihara, MOSFET Implementation of Class I* Neurons Coupled by Gap Junctions, *to be published in Journal of Artificial and Life and Robotics,* Vol. 1 (1), 2006, in press

[4] T. Takemoto, T. Kohno and K. Aihara, Circuit Implementation and Dynamics of A Two-Dimensional MOSFET Neuron Model, *International Journal of Bifurcation and Chaos,* in press