

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 渡辺 啓生

脳は、神経細胞(ニューロン)を構成単位とする大規模かつ複雑なネットワークである。個々のニューロンの挙動や接続の様式を数理モデル化し、シミュレーションおよび数理解析を行うことは脳の機能およびダイナミクスを理解する上で基本的かつ重要な研究手法である。現在でも脳の機能や構造に関して生理学や解剖学の研究から新たな発見が次々となされており、それらを取り入れた数理モデルを構築することは意義深いことと思われる。

ニューロンは、軸索というケーブルのような構造の先端部のシナプスと呼ばれる結合部分を介して互いに接続している。シナプスは、結合元のニューロンが発火と呼ばれる内部電位(膜電位と呼ばれる)の急激な上昇を起こした際に神経伝達物質を放出し、結合先の膜電位を上昇(興奮性)または下降(抑制性)させる。通常シナプスは、軸索とニューロンの細胞体または樹状突起と呼ばれる構造の間に形成されるが、近年二つのニューロン間のシナプス結合部分に、第三者のニューロンから伸びた軸索がシナプス結合し、神経伝達物質の放出を直接制御する「シナプス前シナプス」とでも言うべき構造が発見された。本来、一つのニューロンは興奮性または抑制性のどちらか一種類のシナプスしか持たないが、抑制性結合部分に興奮性ニューロンからの軸索がシナプス前シナプスを作ることで、あたかも一つのニューロンが興奮性と抑制性の二種類のシナプスを同時に備えたような状態を作ることが出来る。本論文は、シナプス前シナプスの存在を考慮し、本来興奮性である錐体ニューロンが抑制性結合も備えた場合のネットワークダイナミクスについて数値実験により検証している。

本論文は、“A Study on Effects of Direct Inter-pyramidal Inhibition on Neural Network Dynamics” (和文題目:「錐体ニューロン間の直接抑制がニューラルネットワークダイナミクスに与える影響に関する研究」)と題し、7章からなる。

第1章「General introduction」(序論)では、本研究の背景、および、過去のニューラルネットワークダイナミクスに関する研究と本研究との差異について述べている。

第2章「Models used in this study」(使用したモデル)では、本研究を進める上で使用したニューロン、およびシナプスのダイナミクスを記述する数理モデルを記述し、それらの性質についても説明している。

第3章「Primal results」(基礎的なシミュレーション結果)では、シナプス前シナプスの存在により、錐体ニューロンが興奮性、抑制性の両方のシナプスを持ちうる場合のダイナミクスを、ネットワークのサイズ、単位ニューロン当たりのシナプス結合の最大数など幾つかのパラメータを変えながらシミュレーションした結果を示し、また従来の一つのニューロンが一種類のシナプスしか持たない条件下でのシミュレーション結果との比較検証を、幾つかの統計量を用いて行っている。錐体ニューロン間に直接抑制がある場合、従来のネットワークに比べ非常に非同期的かつ非周期的な振る舞いが現れることが示され

ている。また、ダイナミクスに違いをもたらした原因についても考察している。

第 4 章「The effects of changing synaptic weight」（結合強度変化による影響）では、第 3 章では固定していたシナプスの結合強度をパラメータとして変化させて、それによって起こるダイナミクスの変化について検証している。ここでは、興奮性結合の強度のみが変化した場合、抑制性結合の強度のみが変化した場合、そして、両方の結合強度が同時に変化した場合の三つの条件に分けて検証を行っている。錐体ニューロン間の直接抑制が存在すると、抑制性結合のみ、または興奮抑制両方の結合強度が非常に小さく無視できる場合を除き、個々のニューロンが非周期的かつ非同期的に振舞うのに対し、古典的なネットワークではほとんどの場合、強く同期することが示されている。脳内ではシナプス結合の強度は学習の効果などにより絶えず変化しており、またアセチルコリンなどの脳内物質の放出により一時的な結合強度の変化が脳内の比較的広い範囲で起こりうるため、このような検証は重要であると思われる。

第 5 章「The effects of short term synaptic depression」（シナプス短期減少による影響）では、ニューロンの活動履歴に応じてシナプスの結合強度が動的に変化する「短期減少」という実際の現象をモデル化し、それがネットワークの挙動に与える影響を検証している。ここでも、錐体ニューロン間直接抑制の有無が大きく影響することが示されている。具体的には、短期減少が、古典的ネットワークにおいては、ニューロン間の同期を大きく強めるように作用するのに対し、錐体ニューロン間直接抑制があるネットワークではシナプス短期減少による影響がほとんど現れない場合もあることなどが示されており、これらの結果は錐体ニューロン間の直接抑制により、従来のものとは本質的に異なる性質をネットワークが持ちうることを示唆していると考えられる。

第 6 章「The responses for sinusoidal external input」（正弦波型入力に対する反応）では、ネットワークに様々な周波数の正弦波関数により変化する入力を与え、それに対するネットワークの応答を調べている。そして古典的ネットワークに比べ、錐体ニューロン間直接抑制を備えたネットワークでは、その単位時間当たりのニューロン集団の発火数に、与えた入力の周波数が強く反映されることがパワースペクトル解析などにより示されている。ニューラルネットワークによりこのような性質を付加するという結果は、今後錐体ニューロン間直接抑制の機能的意義や脳内での情報の表現形式など未解明の問題に対する足がかりとなる可能性があるものと考えられる。

第 7 章「Summary and general conclusion」（結論）では、以上の結果に対するまとめと議論を行っている。

以上を要するに、本論文は近年発見された「シナプス前シナプス」を数理モデルに取り込み、数値シミュレーションにより、それがニューラルネットワークのダイナミクスに与える影響を検証、分析、考察したものである。これは数理情報学および神経科学上貢献するところが大きい。

よって本論文は博士（情報理工学）の学位請求論文として合格と認められる。