

審査の結果の要旨

氏名 窪田 智之

本論文は、神経系の情報処理が、定常状態ではなく、過渡状態によって実現されることを実証している。具体的には、情報処理容量と呼ばれる指標が、定常状態だけでなく、過渡状態でも推定可能となるように適用範囲を拡張した。さらに、神経細胞の分散培養系とマウス1次視覚野の神経活動データを用いて、その妥当性を示している。

第1章「序論」では、従来の神経系の情報処理仮説に関する問題点をまとめたうえで、「過渡ダイナミクス」仮説と、同仮説を理論的に説明しうる **reservoir computing (RC)** を紹介している。古典的には、神経系は、入力を与え続けた後の定常状態によって情報を表現すると考えられてきた。しかし定常状態に達するまでには非常に長い時間がかかり、実際に定常状態が利用されているとは考え難い。一方で、入力に依存して過渡的（時間依存的に）に変化する系は過渡ダイナミクスと呼ばれる。過渡ダイナミクスは、**RC** と呼ばれる、力学系を計算資源として利用する機械学習を用いて説明でき、さらに、**RC** の包括的な情報処理能力指標である情報処理容量を用いることで神経系の情報処理を解明できる可能性があった。ただし従来の **RC** の理論的枠組みでは、力学系に時間への非依存性 (**Echo-state property; ESP**) を課すため、適用範囲を時変系に拡張する必要があった。これらの背景を踏まえ、神経系の情報処理が過渡状態によって実現されることを示すために、情報処理容量の適用範囲の拡張、拡張前の情報処理容量の神経活動への適用、拡張後の情報処理容量の神経活動への適用の3点を課題として導いている。

第2章「神経細胞の分散培養系の **ESP** と情報処理容量」では、神経細胞の分散培養系の活動を853電極で計測し、**ESP** および従来の情報処理容量を調べた。その結果、30 ms 以下の刺激間隔では、スパイク時刻の差が20 ms 以下になり、**ESP** が成り立つと考えられた。しかし、1次の情報処理容量の総和は1以下となり、総和の最大値である電極数853に比べ非常に小さかった。

第3章「マウス1次視覚野の **ESP** と情報処理容量」では、約11,000の神経細胞から構成されるマウスの1次視覚野(V1)を用いて **ESP** と従来の情報処理容量を調べた。その結果、初期値鋭敏性を表す最大 **Lyapunov** 指数はいずれも正

になり、系が ESP を有さないことが示唆された。さらに、V1 の 1 次の情報処理容量を推定し、RC の代表的な力学系である echo state network (ESN) の容量と比較した。その結果、1 次の情報処理容量の総和は、1~3 ノード程度の ESN の容量の総和と同等であり、非常に小さかった。

第 4 章「時変な力学系の情報処理」では、時変な reservoir を対象にできるような情報処理容量理論を拡張した。まず、べき級数展開の一種である多項式カオス展開を利用し、情報処理容量を導出した。その結果、正規直交化された状態の時系列を展開したときの係数ベクトルの 2 乗ノルムが情報処理容量に一致することを証明した。次に、情報処理容量を推定するときの入力分布を任意の分布へと拡張した。1 次元 ESN を例に、12 種類の入力分布と、目標出力として一般化多項式カオス(gPC)と任意多項式カオス(aPC)を用いた場合の情報処理容量を推定した。どの場合でも情報処理容量の総和が最大値であるランクに一致し、情報処理容量に利用できることが示された。さらに、多項式カオス展開の基底に時間基底を加え、時間依存多項式カオス展開を用いて、時間と入力 の両方に依存する時変系の情報処理容量を導出した。時変系が情報処理容量を有する実例を示すため、リミットサイクル系の情報処理容量を調べた。その結果、容量の内訳には、時間と入力の連成項による容量が含まれ、系が従来法では計測できなかった連成項によって入力情報を処理することを明らかにした。以上から、時変系にも適用できる情報処理容量の理論が構築された。

第 5 章「時変系としての神経系の情報処理容量」では、拡張された情報処理容量を、分散培養系とマウス V1 の神経活動に適用した。その結果、分散培養系の情報処理容量では時変な 5, 6 次の容量が支配的であること、また、マウス V1 でも特定種類の時間依存多項式カオスに対応する容量が支配的であることを示した。これらの結果は、神経系の情報処理が、入力と時間の連成項で表現される可能性を示唆する。

第 6 章「考察」では、本研究で得られた手法の発展性を議論している。拡張された情報処理容量が、様々な時系列機械学習の情報処理の内実を解明する可能性と、過渡状態を用いた機械学習が今後展開される可能性を提示している。

第 7 章「結論」では、本研究で得られた知見が要約され、神経系では定常状態ではなく過渡状態で情報処理が実現されると結論付けている。

以上を要するに、本研究は、従来の神経系における情報処理の仮説と理論を拡張し、その妥当性を実データによって裏付けており、神経科学、情報科学、工学に対して、多大な学術的な貢献が認められる。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。