

フィードバック結合を持つネットワークにおける入力シグナルの伝播と保持

伊藤 孝男¹, 津田 一郎²

¹ 北海道大学大学院 理学研究科

² 北海道大学 電子科学研究所 計算論的生命科学

近年, アトラクター, 遷移過程, 同期などの非線型力学系の諸概念が神経科学の理論, 実験の両面から脚光を浴びつつある. 特に, 実験で観察されている動的で遷移的な振舞いの解釈について, カオスやカオス的遍歴の観点から, またカオスによる情報処理という観点から議論されている. これは神経細胞や神経回路網の複雑で遷移的な活動と脳の高次機能との関係を理解する上で必要な一歩である. 理論モデルの観点からは, カオスネットワークが少なくとも動的連想記憶, エピソード記憶, 記憶の想起を形成する能力を持ち得ることは示されており, また他方でカオスの存在がシナプス学習に効果的であることが実験的にも指摘されている. さらに, 入力によりネットワークがカオスを生成する場合には, 相空間における引き伸ばし, 折り畳み, 縮小などの継続的な操作により入力情報が大幅に加工され得ると思われる. そこで, 神経細胞や化学物質, あるいはそれらの複合から成るネットワークがカオス的な振舞いを示す時, 入力情報はいかに処理されるかが, 重要な問題として提起できる.

このような背景のもとで, BZ 写像を一次元的に線形に結合した系における入力情報の伝播が調べられてきた [1,2]. そこでは結合が一方方向性であるモデルが調べられ, 分岐パラメータ, 結合定数のある組合せにおいて, 入力情報が伝播すること, および入力した周期状態が保持されることが示された. しかし, カオスネットワークが脳の高次機能における情報処理に有益かどうかを示すためには, フィードバック結合を持つネットワークにおいて入力情報の伝播, 保持等が可能かどうかを調べる必要がある. 本研究では, その一つの試みとして, 双方向結合を含む結合写像系を構成し, 外部入力シグナルの伝達, 加工を調べた.

興奮性ニューロンと抑制性ニューロンの相互結合系はある条件のもとで次元写像

$$x(t+1) = \tanh(\gamma_e(x(t) - \alpha_e)) - \omega \tanh(\gamma_i(x(t) - \alpha_i)) + J,$$

に帰着される. ここで, γ_e, γ_i は各ニューロンの閾値ダイナミクスにおける steepness パラメータ, α_e, α_i は各ニューロンの閾値, ω はシナプス強度の比, J は外部入力をそれぞれ表す. この写像 (tanh モデル) はパラメータのある条件のもとでは, BZ 型の写像に似たグラフとなる (図 1).

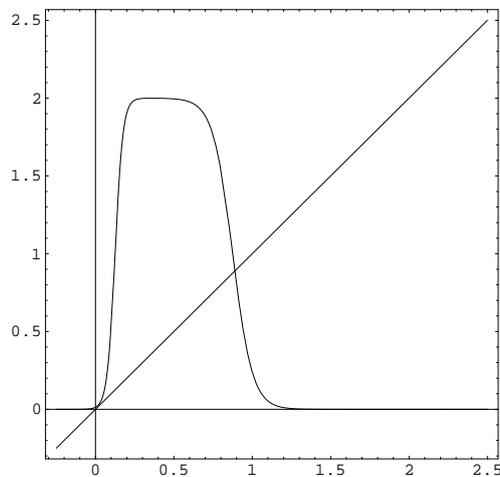


図 1 tanh モデルのグラフ . $\gamma_e = 20, \gamma_i = 8, \alpha_e = 0.125, \alpha_i = 0.875, \omega = 1, J = 0$.

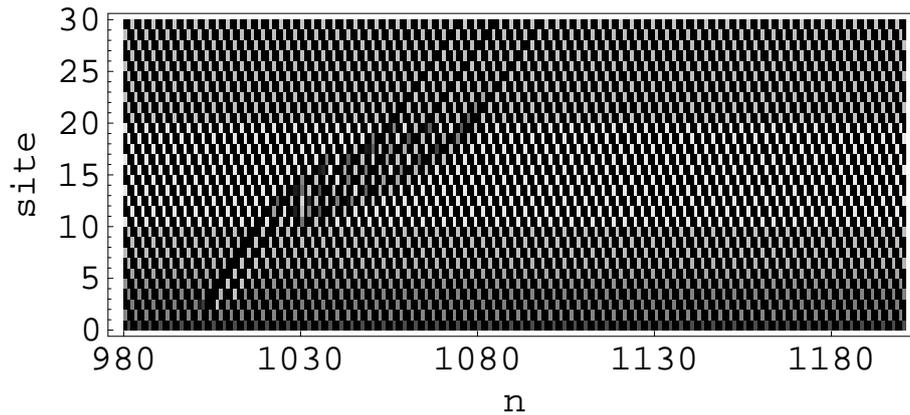


図2 各要素の状態変数 $x_n^k \in [0.7, 2.3]$ を gray scale でプロットした時空間ダイアグラム．横軸が時間，縦軸が各要素の index を表す．3 番目の要素に入れたパルスが双方向領域 ($k = 11, \dots, 20$) において加工されながら，下流領域 ($k = 21, \dots, 30$) にまで伝達されている様子を表している．

tanh モデルを要素力学系として持つ結合系を次のように構成した．

$$\begin{aligned} x_{n+1}^k &= f(x_n^k, p^k) + D(x_n^{k-1} - x_n^k), & (\text{unidirectional domain, } k = 1, \dots, 10; 21, \dots, 30), \\ x_{n+1}^k &= f(x_n^k, p^k) + D(x_n^{k-1} - x_n^k + x_n^{k+1}), & (\text{bidirectional domain, } k = 11, \dots, 20). \end{aligned}$$

ここで， x_n^k は k 番目要素の n ステップでの状態変数， p^k は k 番目要素の分岐パラメータ， D は結合定数である．結合系全体では上流，下流に一方方向結合領域があり，その中間に双方向に結合した領域がある構成となっている．

上流の一つの要素に外部入力を入れ，それが双方向領域においてどのように伝わるかを調べた．外部入力として，ある時刻にのみ入力を入れる場合と，外部力学系のカオス解を入れ続ける場合の二つの場合に数値計算を行った．パルス入力においては，パルスが双方向領域においてある種の加工を受けながら下流に伝播される現象が見られた（図2）．またカオスの入力においては，入力したカオス運動と結合系の各要素の運動との間の時間付き相互情報量を評価し，その結果，外部入力の情報が双方向領域を含め下流領域においても保持されていることが示された．さらに，系のパラメータをコントロールすることにより，入力の双方向領域における伝播速度（すなわち滞在時間）の調節が可能であることが示された．

参考文献

- [1] K. Matsumoto and I. Tsuda, “Extended information in one-dimensional maps”, *Physica D* **26** (1987) 347-357.
- [2] I. Tsuda and H. Shimizu, “Self-organization of the dynamical channel”, *Complex Systems —Operational Approaches in Neurobiology, Physics and Computers* (ed. H. Haken, Springer-Verlag, 1985) 240-251.