

動的素子のネットワークの数理

青柳 富誌生

京都大学大学院情報学研究科、〒606-8501 京都市左京区吉田本町

aoyagi@acs.i.kyoto-u.ac.jp

Dynamics in co-evolving networks of active elements

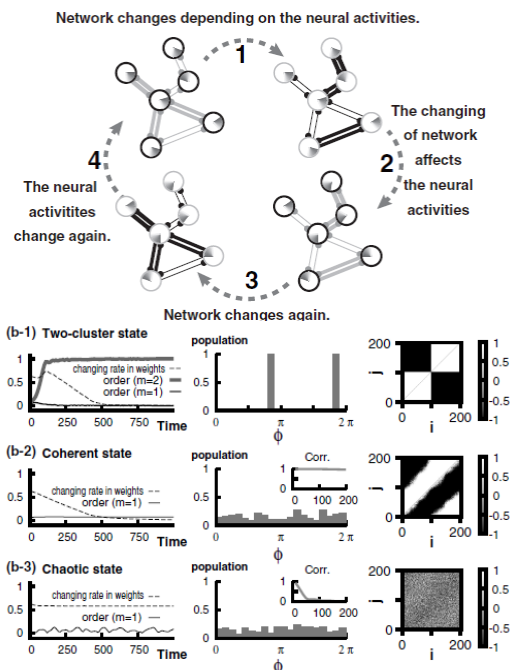
Graduate School of Informatics, Kyoto University, Kyoto 606-8502, Japan

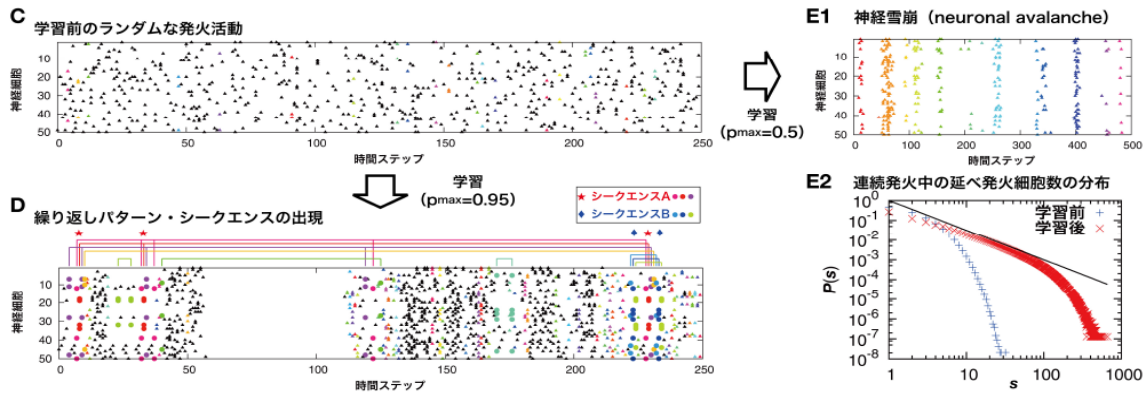
Abstract: We investigate the co-evolving dynamics in a weighted network of various dynamical elements, in which the state of the elements at the nodes and the weights of the links interact with each other. First, we examine the network of phase oscillators with various local rules for the weight of the link, and next investigate the recurrent networks of neurons with the learning rule of an extension of the infomax principle.

Keywords: complex network, phase oscillator, nonlinear dynamics, recurrent infomax

【はじめに】 神経ネットワークは、周期発火や興奮的性質を示すニューロンが、その活動に応じてネットワークを形成し、高度な情報処理能力を発揮している。また、インターネットは今日まで大規模に成長したにもかかわらず、基本的なプロトコルは変更せずに機能している。そういった系の特徴として、何らかの内部自由度をもつダイナミックな素子が、ネットワークを形成することで、集団として興味深い性質を示している点がある。このような観点で、最近行った研究結果を幾つか紹介する。

【ネットワーク構造と各素子のダイナミクス】 神経ネットワークの結合構造は、ニューロンの発火活動に依存して動的に変化する事実がある。そこで、結合の変化規則を各素子の状態に応じて決めた場合、どのようなダイナミックな振る舞いやネットワーク構造が現れるか、一般的な枠組みで研究しておくことは重要である。現時点では系統的な理論研究自体が少なく、講演では状況を以下に限定して解析した結果を紹介する。(仮定1) 単体の素子のダイナミクスとしてリミットサイクル振動に限定して考える。これは、例えばニューロンの場合周期的発火をしている事に相当する。(仮定2) 結合の変化は、関連する二つの振動子の位相差のみ依存すると仮定する。これは、ニューロンのイメージで言えば、発火の絶対時刻ではなく、相対時刻に意味があることの反映である。以上の仮定の下、結合の変化規則を様々に変えてみたところ、3種類の動的振る舞いが見られた:(a) 2クラスターの定常状態 (b) 位相関係を保ったコヒーレントな定常状態 (c) カオスの振る舞い。情報量的な解析から、(b) 状態が記憶装置としてもっとも性能が良い事がわかり、この場合の変化規則は STDP と呼ばれるものに類似している事がわかった。





【マクロな指標を指針としたネットワーク】動的素子のネットワークの構造は、何らかのマクロな指標を最適化するように構成されている、という考え方がある。例えば、水は低い所へ移動する様にエネルギー等の何かの量を最小化（あるいは最大化）するような定式化で理解する方法である。ここで取り上げる神経ネットワークは、生物の環境に対する適応性を高めるために進化した。もう少し言えば、中枢神経系では情報保持・伝達効率を最適化していることが予想される。この最適性を原理（情報量最大化(Infomax)原理)として神経細胞の挙動を理解しようとする試みがある。先行研究では Infomax 原理の適用はフィードフォワードネットワークに限られてきたが、一般的な神経系ではリカレント結合が普遍的に存在する。このような状況で、情報保持能力を最適化（リカレント情報量最大化）したときに生ずる現象を、これまで報告されている新皮質についての実験結果と比較した。リカレントネットワークで相次ぐ二つのステップの発火状態の間の相互情報量を最大化することで、発火連鎖、神経雪崩、一次視覚野単純型細胞類似の選択性が生ずることがわかった。これら皮質について *in vivo* もしくは *in vitro* で確認されている現象が再現されたことは、皮質が情報保持能力について最適化されており情報保持能力を高めるように学習していることを示している。

また、別のマクロな最適指標として、振動子ネットワークでは位相や振動子の揃い具合を示すオーダーパラメーターを考えることもできる。予備的研究では、位相と振動数の引き込みどちらを最大化するかでネットワークの構造が異なることが示されており、この点に関しても時間があれば報告したい。

【おわりに】ダイナミックな素子が相互作用して結合構造を自律的に変えていくネットワーク系の研究は、今後更に重要になると考えられる。その際、理論の果たす役割は、様々な分野の個別的な研究に、統一的観点を与え、更なる研究を刺激することであると考えられる。そういった意味で、この方向の研究を少しでも活性化できれば幸いである。

【謝辞】本研究の成果は、主として京都大学医学研究科の田中琢真氏、金子武嗣氏、京都大学情報学研究科の青木高明氏、伊賀志朗氏、吉井義裕氏（現日立）、統計数理研究所の伊庭幸人氏、大阪大学理学研究科の茶碗谷毅氏との共同研究の成果である。

【参考文献】

Recurrent infomax generates cell assemblies, neuronal avalanches, and simple cell-like selectivity, T. Tanaka, T. Kaneko, T. Aoyagi, *Neural Computation* (*in press*).

Co-evolution of Phases and Connection Strengths in a Network of Phase Oscillators, T. Aoki, T. Aoyagi, submitted.