

# 同時想起数からみた短期シナプス可塑性を適用したワーキングメモリーモデル

Capacity of working memory with dynamic synapses

田中顕至 \*1      五十嵐康彦 \*1      岡田真人 \*2  
Kenji Tanaka      Yasuhiko Igarashi      Masato Okada

\*1 東京大学大学院新領域創成科学研究科  
Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo, Kashiwa, Japan

\*2 理化学研究所脳科学総合研究センター  
RIKEN Brain Science Institute, Wako, Japan

In pre-frontal cortex (PFC), electro physiological experiments have established a link between the neuronal activity and working memory that temporarily holds information. Previous study propose that the working memory model with short-term synaptic plasticity can reproduce a high activity persistent state and a oscillation activity state reported by several electro physiological experiments. We study two types of activity comparatively as keeping multiple items, using working memory model with short-term synaptic plasticity. As a result, working memory capacity by a high activity persistent state be easily influenced with background input, but by a oscillation activity state be hardly influenced with background input.

## 1. はじめに

ワーキングメモリーとは、外界の情報を一時的に保持する脳内の情報処理機能である [Baddeley 12]. 刺激が一時的に保持されている際、脳内において神経の高発火率活動が数秒間保持される現象が報告されており、脳内活動と相関していることが報告されている [Miyashita 88]. このような脳内活動を実現する理論モデルとして、Compte らはこのワーキングメモリーモデルに興奮性神経と抑制性神経を導入することで、ネットワーク空間上に持続的な発火活動を構築し、複数の記憶が保持できることを示した [Compte 00, Amit 03]. 一方で Mongillo らは短期シナプス可塑性を組み込むことにより、空間上でのバンプ構造に加え、時間上での振動的な発火活動のバンプを構築し、複数の記憶を保持できるワーキングメモリーモデルを構築した [Mongillo 08].

現在、ワーキングメモリーモデルには、持続的な発火状態による記憶保持と、振動的な発火状態による記憶保持の2つが示されている。このような背景において、それぞれの発火状態が同時記憶容量という機能面においてどのように異なるのか十分にわかっていない。そこで我々は Mongillo らのワーキングメモリーモデルを、発火率モデルにより簡素化し、ニューロン集団のネットワークモデルにより実装し [Mongillo 08, Barak 07], このシミュレーションを各パラメータによって包括的に行うことで、発火の2状態における同時記憶容量の特性を議論する。

## 2. 短期シナプス可塑性を組み込んだリカレントネットワークの発火率モデル

我々は、ワーキングメモリーモデルとして、 $P=8$  個の刺激選択的な興奮性ニューロン集団と、非刺激選択的な興奮性ニューロン集団、抑制性のニューロン集団から成るリカレントネットワークを用いた。本研究では、ネットワークの各集団のダイナミクスを発火率  $r_p$ ,  $r_{\text{non}}$ ,  $r_I$  で捉えるものとし、これを入力

$h_p$ ,  $h_{\text{non}}$ ,  $h_I$  によって更新させる。

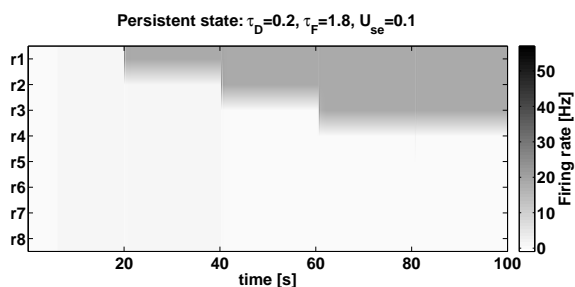
$$\frac{dr}{dt} = -\frac{r}{\tau_E} + \frac{\alpha}{\tau_E} \log \left[ 1 + \exp \left( \frac{h}{\alpha} \right) \right] \quad (1)$$

ここで、 $\tau_E$ ,  $\tau_I$  は興奮性細胞と抑制性細胞の細胞膜による時間遅れ定数とし、 $\alpha$  はノイズパラメータとした [Mongillo 08]. 入力  $h$  は、種々の入力の総和によって決定する。よって、 $p$  番目の刺激選択的な集団への入力を  $h_p = J_+^* r_p + J_-^* \sum_{k \neq p}^P r_k + \gamma J_+^* r_{\text{non}} - J_{EI}^* r_I + I$ , 非刺激選択的な集団への入力を  $h_{\text{non}} = \gamma J_+^* r_{\text{non}} + J_-^* \sum_{k=1}^P r_k - J_{EI}^* r_I + I$ , 抑制性集団への入力を  $h_I = -J_{II}^* r_I + J_{IE}^* r_{\text{non}} + J_{IE}^* \sum_{k=1}^P r_k + I$  のようにした。 $J_+$  は自己結合と、非刺激選択的な興奮性集団と刺激選択的な興奮性集団との結合強度であり、 $J_-^*$  は異なる刺激選択的な興奮性集団間の結合強度である。記憶を保持しない興奮性集団からの結合強度と自己結合は  $\gamma J_+^*$  とした [Mongillo 08]. 同様に、興奮性集団から抑制性集団への結合強度を  $J_{IE}^*$ , 抑制性集団の自己結合強度を  $J_{II}^*$ , 抑制性集団から興奮性集団への結合強度を  $J_{EI}^*$  とした。外部入力  $I$  は脳内の他の部位から伝播する連続的な背景入力と選択的な入力の和とし、それぞれの集団に入力した [Mongillo 08].

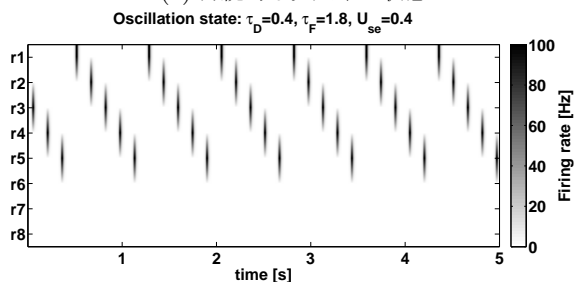
ここで、各シナプス結合  $J^*$  は短期シナプス可塑性を適用することにより、結合強度を一時的に変化させた [Barak 07]. このシナプスの動的な活動特性は、シナプス小胞の神経伝達物質残量割合  $x$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) と、カルシウムイオン残量割合  $u$  ( $0 \leq u \leq 1$ ) によって表され。発火が起こらなければ、神経伝達物質は時間遅れ  $\tau_D$  で初期状態  $x = 1$  に回復し、カルシウムイオンは  $\tau_F$  で初期状態  $u = U_{se}$  に回復する。これらの変数  $x$  と  $u$  のダイナミクスは下記の式のように示される [Barak 07].

$$\begin{aligned} J^* &= Jxu \\ \frac{du}{dt} &= \frac{U_{se} - u}{\tau_F} + U_{se}(1 - u)r \\ \frac{dx}{dt} &= \frac{1 - x}{\tau_D} - xur \end{aligned}$$

本研究では、興奮性ニューロン集団の結合  $J_+$ ,  $J_-$  において動的なシナプス結合の変化を適用し、その他は短期シナプス可塑



(a) 持続的な発火率の状態



(b) 振動的な発火率の状態

図 1: 同時記憶中の選択的集団発火率  $r_1 \dots r_8$  を時間変化で示した。また、それぞれの発火率を色調によって表した。

性を初期状態に固定した [Mongillo 08]。本研究ではこのモデルを用いて発火の 2 状態を比較する。

### 3. 結果

#### 3.1 同時記憶中の発火率状態

発火率の状態は刺激提示により持続的な発火率と振動的な発火率に遷移し、刺激提示後も持続される [Barak 07, Mongillo 08]。本節では、短期シナプス可塑性を組み込んだワーキングメモリーモデルが、先行研究に基づく発火の 2 状態を併せ持つモデルであることをシミュレーションによって示す。シミュレーションにより得られたそれぞれの発火率状態の同時記憶ダイナミクスを図 1 に示す。

発火率は短期促成性と抑圧のバランスによって、持続的な状態 (図 1 (a)) と振動的状態 (図 1 (b)) の両方に遷移した。先行研究と同様に、複数のニューロン集団に刺激を与えることで、複数のニューロン集団が記憶状態を維持でき、また、記憶状態を増やしていくとそれ以上記憶状態を維持できなくなった [Amit 03, Mongillo 08]。

#### 3.2 短期シナプス可塑性と発火率状態・記憶容量

前述の結果より、これまで先行研究で示された発火率の 2 状態が、短期シナプス可塑性を組み込んだリカレントネットワークモデルにおいて同時記憶を行うことがわかった。そこで本節では、発火率の 2 状態と記憶容量が短期シナプス可塑性によってどのように変化するかを示す。我々は、前述の手法でニューロン集団に刺激を与え同時数を調べ、それぞれの発火率状態の領域を示した。

発火率の 2 状態の領域とその記憶容量を図 2 に示す。振動的発火率状態の同時記憶領域と持続的な発火率状態の同時記憶領域を比較すると、振動的発火率状態の方がより広い領域において同時記憶が行えることがわかり、同時記憶容量がよりロバストな特性を持っていることがわかった。

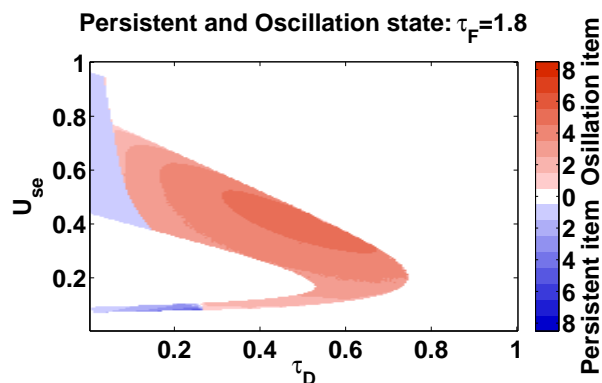


図 2: 記憶容量をカラーマップの色調で示した。色調は振動的発火率状態を赤、持続的な発火率状態を青で示し、記憶容量が増大するほど濃い色とした。

### 4. まとめ

我々は先行研究に基づき、持続的な発火率状態と振動的な発火率状態の両方を再現するワーキングメモリーを用いて、各発火率状態の特性を調べた。結果として、持続的な発火率状態よりも振動的な発火率状態の方が、パラメータによって同時記憶容量が変化しにくい、ロバスト性を持っていることがわかった。

### 参考文献

- [Amit 03] Amit, D. J., Bernacchia, A. and Yakovlev, V.: Multiple-object Working Memory –A Model for Behavioral Performance, *Cereb. Cortex*, vol. 13, no. 5, pp. 435–443, (2003).
- [Baddeley 12] Baddeley, A.: Working Memory: Theories, Models, and Controversies, *Annu. Rev. Psychol.*, vol. 63, pp. 1–29, (2012).
- [Barak 07] Barak, O., Tsodyks, M.: Persistent activity in neural networks with dynamic synapses, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, vol. 3, no. 2, pp. e35, (2007).
- [Compte 00] Compte, A., Brubel, N., Goldman-Rakie, P. S. and Wang, X. J.: Synaptic Mechanisms and Network Dynamics Underlying Spatial Working Memory in a Cortical Network Model, *Cereb. Cortex*, vol. 10, no. 9, pp. 910–923, (1995).
- [Miyashita 88] Naya, Y., Sakai, K. and Miyashita, Y.: Activity of primate inferotemporal neurons related to a sought target in pair-association task, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, vol. 93, no. 7, pp. 2664–2669, (1988).
- [Mongillo 08] Mongillo, G., Barak, O. and Tsodyks, M.: Synaptic Theory of Working Memory, *Science*, vol. 319, no. 5869, pp. 1543–1546, (2008).