

# 情報表現の自己組織と学習ニューロチップ

## Self-organization of Information Representation and Learnable Neuro-chip

(研究プロジェクト番号: JSPS-RFTF 96I00104)

プロジェクトリーダー

塚田 稔 玉川大学工学部・教授

コアメンバー

斎藤 秀昭 玉川大学工学部・教授

星宮 望 東北大学大学院工学研究科・教授

合原 一幸 東京大学大学院新領域創成科学研究科・教授



### 1. 研究目的

本研究は生物神経回路の情報表現の自己組織化を生理実験的に究明し、新しい学習ニューロチップを設計することである。次の情報表現の自己組織化を理論と実験によって検証する。

- ・ダイナミック細胞集合情報表現
- ・時間相関情報統合
- ・時空間学習則
- ・非線形動的検索

### 2. 研究成果概要

#### 2-1 脳内情報表現の自己組織化

##### 2-1-1 海馬の時空間学習則

海馬では外界の時空間の出来事を文脈として一時的に記憶するために、時空間学習則が有効に働いていることを明らかにした。

時空間学習則は入力細胞間の発火の一致性 (Coincidence) と時間的加重特性に基づいて結合強度を変化させるもので、入力間の神経パルスの同期やタイミングおよび入力の時間パターンが結合変化に重要な働きをする<sup>1,2)</sup>。

$$\Delta W_{ij}(t) = \eta h \left( \sum_{m=0}^n I_{ij}(t_m) e^{-\lambda_2(t-t_{n-m})} - \theta \right)$$

$$I_{ij}(t) = w_{ij}(t) x_i(t) \sum_{k \neq i} (w_{kj}(t) x_k(t))$$

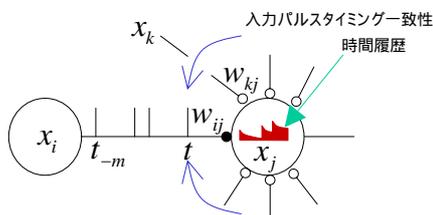


図1 時空間学習則

具体的な結果は次の2点に集約できる。  
時間パターン依存性長期増強 (LTP) と抑圧 (LTD)

刺激の頻度を一定として時間的パターンを変化させたマルコフ連鎖刺激を与えたとき、LTP の大きさは相続く時間間隔の系列相関に依存して変化する<sup>1,2,5,6)</sup>。すなわち LTP は時間パターンに敏感である。

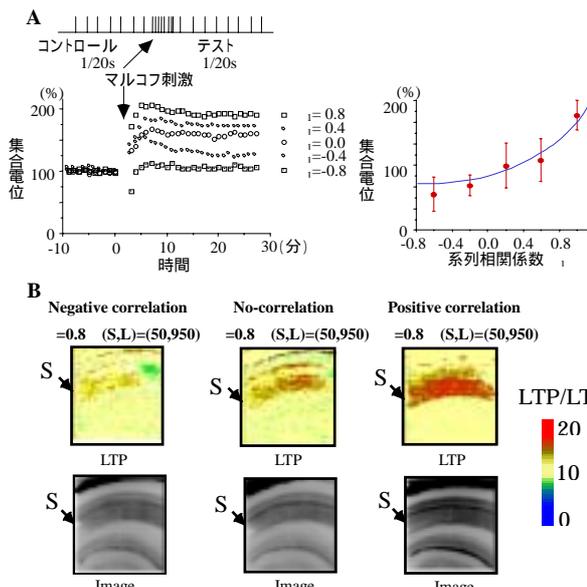


図2 時間パターン依存性 LTP (A) とその空間分布と海馬のイメージ図 (B)

#### 時間タイミング依存性 LTP/LTD

入力 - 入力間のタイミングの一致性 (Coincidence) にもとづく LTP の存在を明らかにし、時空間学習則仮説の妥当性を実験的に検証した<sup>7)</sup>。さらにタイミング依存性 LTD の存在も明らかにした。また、入力 - 出力間のタイミングに依存する LTP/LTD の存在も明らかとなった<sup>8,9)</sup>。

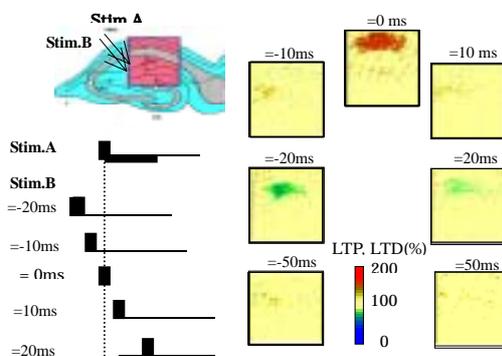


図3 2入力スパイクタイミング依存性 LTP/LTD (オプティカルイメージング)

## 2-1-2 海馬 - 皮質系の相互作用

クリック音刺激と海馬刺激を同時に与えた時は皮質上のダイナミックな検索は海馬刺激によって加速し、約 12ms という短い時間で高域から低域へと移動する。この情報表現はシナプス荷重を変化させることによってではなく機能的な動的セル集合によって実現されていることを明らかにした。この結果は海馬刺激と音刺激の一致性に基づく新しい検索のダイナミクスが皮質上に創り出されたことを意味する<sup>7)</sup>(図4)。

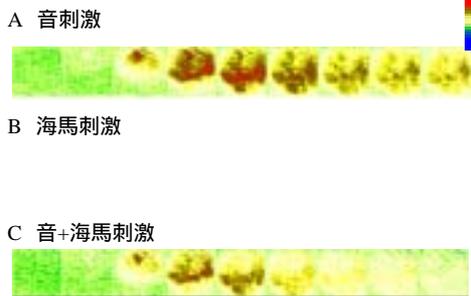


図4 オプティカルイメージングによる時空間応答

## 2-1-3 記憶の読み込み・読み出しに関するシミュレーションモデルの構築

2-1-1、2-1-2 の実験データにもとづいて海馬 - 皮質系の記憶のモデルを構築し、その機能を解析した(図5)。

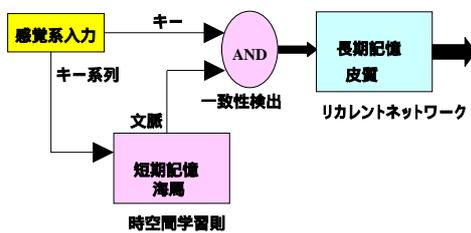


図5 海馬—皮質系の記憶モデル

このモデルは次の2段階の機能からなる。

1 段階：時空間学習則(本研究で提案した)が有効に働き海馬神経回路網に時空間の出来事の文脈を作る。

2 段階：ヘブの学習則により連合野に出来事の類似性の構造(距離空間)を持つ強固なアトラクター構造を作る。この際に海馬の文脈情報と感覚入力アドレス情報として使われる。

## 2-2 学習ニューロチップ[ハードウェア]

提案した4つの情報表現仮説を実装するための学習ニューロチップの特性は3つの機能に要約される。

- (1) 多入力の情報の時的一致性の検出。  
比較的速いダイナミクス(数 10ms)で多入力系列のインパルスの同時性のタイミングを検出する空間情報統合機能である。
- (2) 入力情報の“時間的履歴性”の検出。  
比較的遅いダイナミクス(数 100ms)で

入力系列の時間的積分を行う時間情報結合機能である。

- (3) (1)(2)の機能の乗算効果の検出。  
神経回路網の荷重空間に時空間文脈を作る機能となる。

(1)(2)を実現する回路として、電流ミラー様のアナログ電流メモリ回路を構成し学習回路を含まないプロトタイプチップを設計し、MOSIS0.8 $\mu$ mCMOS 技術で集積回路化に成功した<sup>3,4)</sup>(図6)。

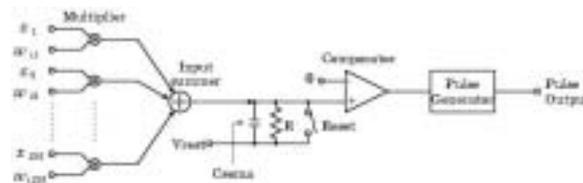


図6 シナプス集積回路

## 3. 結論

本研究は海馬 - 皮質系の計測システムにおいて、(1)ダイナミック細胞集合情報表現、(2)時間相関情報統合、(3)時空間学習則、(4)非線形動的検索のダイナミックな情報表現を理論と実験によって検証した。この情報表現にもとづいて海馬 - 皮質系の新しい記憶モデルを構築し、そのアナログ IC 化に成功した。

## 主な発表論文

- 1) M. Tsukada, T. Aihara, H. Saito and H. Kato: "Hippocampal LTP depends on spatial and temporal correlation of inputs," Neural Networks, 9 (1996) 1357-1365.
- 2) T. Aihara, M. Tsukada, M. C. Crair and S. Shinomoto: "Stimulus-dependent induction of long-term potentiation in CA1 area of the hippocampus; experiment and model," Hippocampus, 7 (1997) 416-426.
- 3) Y. Horio, K. Yasuda, M. Hanagata, and K. Aihara: "An asynchronous pulse neural network model and its analog IC implementation," Proc. Int. Conf. on Electronics, Circuits and Syst, 3 (1998) 301-304
- 4) N. Ichinose, K. Aihara, and K. Judd: "Extending the Concept of Isochrons from Oscillatory to Excitable System for Modeling an Excitable Neuron," International Journal of Bifurcation and Chaos, 8 (1998) 2375-2385
- 5) H. Matsuda, T. Aihara, M. Tatsuno, M. Tsukada and K. Aihara: "Chaotic stimulus dependent long-term potentiation in the hippocampal CA1 area," Biosystems, 58 (2000) 273-279.
- 6) T. Aihara, M. Tsukada and H. Matsuda: "Two dynamic processes for the induction of long-term potentiation in hippocampal CA1 area," Biological Cybernetics, 82 (2000) 189-195.
- 7) J. Yamamoto, H. Houji, M. Okada, M. Tsukada, H. Sasaki, K. Fukunishi and Y. Anzai: "An evoked dynamic interaction in the guinea pig auditory cortex by compound acoustic-hippocampal stimuli - An optical imaging analysis -," The Brain and Neural Networks, 6 (1999) 11-16
- 8) M. Tsukada: "Learning rules in the hippocampal network and their efficiency estimated through the model studies," Experimental Medicine, 18 (2000) 2673-2680
- 9) Y. Kobayashi, H. Shimazaki, T. Aihara, and M. Tsukada: "Spatial distributions of hippocampal LTP/LTD induced electrically from Schaffer collaterals and stratum oriens with relative timing," The Brain and Neural Networks, 8 (2001) 57-64