

平成 22 年 6 月 1 日現在

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2007～2009

課題番号：19200014

研究課題名（和文）学習・記憶の情報表現研究とその工学的モデルへの応用

研究課題名（英文）A study of information representation in learning and memory and its application to artificial models.

研究代表者 塚田 稔 (TSUKADA MINORU)

玉川大学・脳科学研究所・教授

研究者番号：80074392

研究成果の概要（和文）：

脳の記憶は外界（環境）からの感覚情報（ボトムアップ）と注意や予測など（トップダウン）の情報の相互作用によって創られている。高次の記憶に関連したニューロンにおいて、感覚からのボトムアップの記憶情報の書き込みでは時空間学習則(nonHEBB)が、注意などのトップダウン情報の書き込みではHEBB則が有効に働くことを理論と実験によって明らかにした。この実験結果に基づいて工学モデルによって実効性が確かめられた。

研究成果の概要（英文）：

In storing memory, sensory information (bottom-up) and awareness, consciousness and forecast information (top-down) interact on weight space of neural network. Our research revealed that spatio-temporal learning rule(STLR) and Hebb rule coexist in single pyramidal neurons of the hippocampal CA1 area. In STLR mechanism, synaptic weight changes on dendrite are determined by local association of input neurons (bottom-up) without soma firing whereas in Hebb mechanism the soma fires by top-down information such as awareness, consciousness and forecast (top-down). The coexistence of STLR (local) and Hebb (global) on the neuronal level may support this dynamic process that repeats itself until the internal model fits the external environment. These results were effectively applied to the artificial model.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	14,500,000	4,350,000	18,850,000
2008年度	13,800,000	4,140,000	17,940,000
2009年度	9,500,000	2,850,000	12,350,000
年度			
年度			
総計	37,800,000	11,340,000	49,140,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・知能情報学

キーワード：(1)時空間学習則 (2)ヘブ学習則 (3)記憶の情報表現 (4)計算論モデル

1. 研究開始当初の背景

脳の高次機能である推論や論理は因果律に基づいて問題解決を試みるのに対し、感性

や情動では論理構造を持たない直感の世界に基づいている。この情報創成の世界は環境からの入力がなくとも脳内で独自に働くこともできる。人間はこの世界が特別に発達し、サルと比較して格段の能力を持つに至ったと考えることができる。したがって、外界の脳内モデルの形成は外界からのボトムアップの情報と情報創成から見たトップダウンの情報を統合して創らなければならない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、ボトムアップとトップダウンによる脳内モデルはどのように構成しているだろうか？ すなわち学習と記憶の情報表現を生理実験とモデルによって明らかにし、工学モデルへの応用を試みる。

3. 研究の方法

(1) 海馬の文脈形成原理

①HEBB 則と時空間学習則 (nonHEBB) の情報表現の特徴の違いを明確にする生理実験 (海馬スライス) を実施する (福島、小島、塚田)。

HEBB 則は、類似な入力系列パターンを同一出力パターンに引き込む性質 (pattern completion) がある。それに比べ、時空間学習則は入力パターンに依存して異なった出力パターンを作り出すパターン分離機能が優れている。

開発した多点高速刺激装置を用いて海馬 CA1 錐体細胞の樹状突起を時空間に刺激し、パターン分離機能を調べる。そのとき、細胞体の発火をブロックした場合 (nonHEBB) と逆に、細胞体を刺激し逆伝搬スパイクを発生させた場合 (HEBB) についてパターン分離および pattern completion の機能を比較する。

この実験結果に基づいて、計算機シミュレーションを実施し、理論と実験が一致しない場合は理論仮説の修正を行う (酒井、塚田)。

②海馬 CA3-CA1 の神経回路において、コントロールコーディングの可能性を理論と生理実験 (海馬スライス) で検証する (福島、塚田、津田)。

開発した多点同時高速神経刺激装置を用いて、海馬 CA1 錐体細胞の樹状突起のシナプスをランダム時空間パターンで刺激する。この実験は可塑性の起きない状態 (定常状態) と可塑性のおきる状態 (非定常状態) に分けて解析する。データ解析においては研究協力者である津田一郎 (北大・理学部・教授) と共同で行う。

この実験によって、部分と全体の情報がどのように記憶されるかコーディングのメカニズムを明らかにできる。

(2) 海馬-皮質記憶システム

①海馬-聴覚皮質記憶システムにおいて、古典的恐怖条件付けによって聴覚と電気ショックの文脈情報の形成がどのように表現されるのかを、ラットを用いた行動実験によって明らかにする (井出、塚田)。

聴覚皮質における条件付けの効果を確かめるため、我々はモルモットを使った恐怖条件付け課題 (Galvan, and Weinberger, 2002) (純音と電気ショックのペアリング) を行う。このとき、聴覚恐怖条件付け後、電気ショックのみによるトップダウン情報 (phantom signals) がどのように働くか、その生理学的機能について検討する。

②過去の記憶と現在の状況に基づく未来の予測の文脈構成 (高橋、藤原、奥田、塚田)

海馬はエピソード記憶をはじめとするいくつかの種類の情報処理過程に深く関与していると考えられている。

ラットには左右のノーズポークを一定の遅延期間を挟んで交互に選択することを要求する遅延交代系列課題 (delayed alternation task: ALT 課題) と、同じく一定の遅延期間を挟んで視覚手がかりによってランダムに指示された方向のノーズポークを選択する視覚手がかり弁別課題 (visual cue-guided discrimination task: V 課題) の2つの課題を学習させる。ALT 課題では、過去の履歴を参考に次の行動決定をするのに対し、V 課題では現在の状況に基づいて次の行動を決めればよい。そこで本研究では、行動課題中のラットから背側 CA1 野のユニット活動を最大 12 本のテトロード電極による多細胞同時記録法によって計測し、上記の観点からラットのとった行動と神経活動との関連性について解析する。この研究タスクと同様な実験を人間で実施し、fMRI によって脳活動部位がどのように異なるかを明らかにする (奥田)。

過去の経験に基づいて、未来を予測して行動決定するオペラント学習実験 (人間と動物) をもとに計算論モデルを構築し、計算論モデルに基づいて工学的モデルへのフィージビリティを検討する (高橋、奥田、塚田、岡田、大森)。

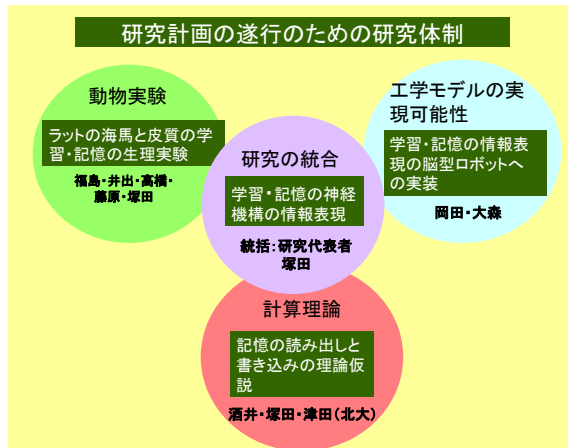
(3) 情報創成の視点から外界の脳モデルの情報表現について、新しい提案と脳型ロボットの実現の必要条件を具体的に示す (塚田、大森)。

(4) 研究計画を遂行するための研究体制 (図 1 参照)

本研究体制は次の3つのグループの融合研究によって推進する。

生理実験グループ (福島、井手、高橋、藤原、奥田、塚田)、計算論グループ (酒井、塚田、研究協力者: 津田)、工学モデルグループ (岡田、大森)。

図 1



4. 研究成果

(1) 動物脳の学習・記憶

①海馬ではボトムアップの時空間学習則 (nonHEBB) とトップダウンのHEBB 則 (スパイク・タイミング依存性長期増強) の相互作用によってシナプス加重が強化され、強化学習にも密接に関係することを生理実験とモデル・理論によって検証した (研究成果論文 1), 10), 14), 20), 21), 25)). トップダウン情報 (アテンションや予測情報) は θ 波の発生に基づいており、ボトムアップ情報 (感覚情報) は γ 波によって統合されている。記憶情報が両入力 of 相互作用によってどのように構成されているか実験結果に基づく基本モデルを構築した。今後は行動動物実験によっても確かめる必要がある。

②不安定な回路網 (カオス駆動ネットワーク, CA3) がカオスの遍歴によって一つの文脈を形成し、安定な回路網 (縮小ダイナミクス, CA1) はコントロールコーディングとしてその情報を符号化するカオス駆動縮小システムの計算論モデル (Tsuda1996, 2001) 仮説を実験で検証した (研究成果論文 5), 6), 24)). この結果、海馬 CA1 シナプス後電位において時空間時系列のコントロールコーディングの可能性が示され、今後シナプスの長期増強の現象を検証する必要がある。

③海馬一皮質記憶システムにおいて視覚、聴覚、経験、予測、推論、報酬、恐怖等の文脈情報の形成がどのように表現されるのかを動物行動実験によって明らかにした (研究成果論文 8), 9), 11), 15)). 特に行動課題中のラットから背側 CA1 野のユニット活動を最大 12 本のテトロード電極による多細胞同時記録法によって計測し、過去の経験に基づいて未来の行動決定する時の海馬ニューロンの情報表現を明らかにすることができた (研究成果論文 8), 9)).

(2) ヒト脳の学習・記憶

ヒト脳において、過去の経験をもとに未来の行動を決定・遂行する課題を開発し、機能的 MRI によって脳活動を測定した。その結果、記憶を基にした行動決定課題に特異的に海馬領域や内側前頭葉などの内側ネットワークの活動が見られることから、ヒト脳でも海馬を含む内側ネットワークが行動決定や遂行予測にも特異的に関与することが明らかとなった (研究成果論文 16), 22), 23), 31), 32))。

(3) 工学モデルへの応用

動物モデルに基づく学習・記憶の情報表現の工学的モデルへの応用に関し、ロボットの知的制御を実施した。対人コミュニケーションにおいて相手の意図を過去の行動から推測して行動決定する機能を実現した (研究成果論文 3), 12), 13), 18))。

この結果、平成 21 年 5 月に大阪で開催されたロボカップジャパンオープン 2009@ホームリーグにおいて、平成 20 年の優勝に続き 2 連覇をはたすとともに、「参照点に依存した確率モデルに基づくロボットの物体操作の実時間学習手法の開発」の成果に対して、人工知能学会賞を受賞した。さらに、ロボカップ世界大会において、平成 20 年度蘇州大会で優勝、平成 21 年度グラーツ (オーストリア) 大会では準優勝の成果を挙げた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 32 件) 査読有

1) 米山誠, 福島康弘, 小島比呂志, 塚田稔 : レーザーアンケーシング刺激による海馬 CA1 錐体細胞の樹状突起上の EPSP の時間・空間加重特性の解析. 日本神経回路学会誌, 17 (1), p. 2-11, 2010

2) Okazaki S, Kanoh S, Tsukada M, Oka K. : Neural Substrate of Sound Duration Discrimination during an Auditory Sequence in the Guinea Pig Primary Auditory Cortex. Hearing Research, 259, p. 107-16, 2010

3) 岡田浩之, 大森隆司 : ロボカップ@ホーム 人とロボットの共存を目指して. 人工知能学会論文誌, 25 巻 2 号, p. 229-236, 2010

4) 塚田稔 : 脳と芸術. 日本神経回路学会誌, 16 (2), p. 64-76, 2009

5) Kuroda S, Fukushima Y, Yamaguti Y, Tsukada M, Tsuda I. : Iterated Function

- Systems in the Hippocampal CA1. *Cogn Neurodyn* 3, p.205-222, 2009
- 6) Fukushima Y, Tsukada M, Tsuda I, Yamaguti Y, Kuroda S. : Coding mechanisms in hippocampal networks for learning and memory. *Advances in Neuro-Information Processing*, LNCS 5506: p.72-79, 2009
- 7) Kojima H, and Katsumata S. : An Analysis of Synaptic Transmission and its Plasticity by Glutamate Receptor Channel Kinetics Models and 2-photon Laser Photolysis. *LNCS*, Vol.5506, p.88-94, 2009
- 8) Takahashi M, Lauwereyns J, Sakurai Y, Tsukada M. : Behavioral state-depend episodic representations neuronal activity during spatial alternation. *Cogn Neurodyn*, 3, p.165-175, 2009
- 9) Takahashi M, Lauwereyns J, Sakurai Y, Tsukada M: A code for spatial alternation during fixation in rat hippocampal CA1 neurons. *Journal of Neurophysiology*, 102, p.556-567, 2009
- 10) Kaneki K, Araki O, Tsukada M. : Dual Synaptic Plasticity in the Hippocampus: Hebbian and Spatiotemporal Learning Dynamics. *Cognitive Neurodynamics*, 3, p.153-163, 2009
- 11) Ide Y, Lauwereyns J, and Tsukada M. : Optical Imaging of Plastic Changes Induced by Fear Conditioning in the Auditory Cortex of Guinea Pig. *Lecture Notes in Computer Science*, Springer, 5506, p.416-422, 2009
- 12) 横山 絢美, 大森隆司: 協調課題における意図推定に基づく行動決定過程のモデル的解析. *電子情報通信学会論文誌A*, Vol. J92-A, No. 11, pp. 734-742, Nov. 2009
- 13) 井上康之, 小川昭利, 荒井宏太, 松本秀彦, 松寄直幸, 小山幸子, 豊巻敦人, 大森隆司, 諸富 隆, 竹市博臣, 北崎充晃 : 聴覚事象関連電位への神経デコーディングの適用: 統計的識別手法の比較と脳波分析方法としての評価. *基礎心理学研究*, 28(1), 44-58, 2009
- 14) Sakai Y, and Wada K. : Multiple topological representation selforganized by spike-timing-dependent synaptic learning rule. *Cognitive Neurodynamics*, vol.3, no.1, p.33-38, 2009
- 15) Pan X, Sawa K, Tsuda I, Tsukada M, Sakagami M. : Reward prediction based on stimulus categorization in primate lateral prefrontal cortex. *Nature Neuroscience*, 11(6), p.703-712, 2008
- 16) Abe N, Okuda J, Suzuki M, Sasaki H, Matsuda T, Mori E, Tsukada M, Fujii T. : Neural correlates of true memory, false memory, and deception. *Cerebral Cortex* 18, p.2811-2819, 2008
- 17) Toujoh S, Nakazato Y, Maruo T, Katsumata S, Sakai K, Kojima H. : A system for rapid patterned photolysis by ultraviolet (UV) laser beam. *Proceedings of the Faculty of Engineering (Tamagawa University)*. No.43, p.13-22, 2008
- 18) 高橋英之, 大森隆司: 円滑な対人インタラクションを実現する対象認識に応じた認知的構え調整機構のモデル化. *認知科学*, Vol.15, No.1, p.202-215, 2008
(2008年度日本認知科学会論文賞受賞)
- 19) Imai M, Kita S, Nagumo M, Okada H. : Sound symbolism facilitates early verb learning. 『*Cognition*』, Vol.109, No.1, p.54-65, 2008
- 20) Sakai Y, and Fukai T. : The actor-critic learning is behind the matching law: Matching vs. optimal behaviors. *Neural Computation*, vol.20, No.1, p.227-251, 2008
- 21) Sakai Y, and Fukai T. : When does reward maximization lead to matching law? *PLoS One*, vol.3, No.11, p.e3795, 2008
- 22) Kawasaki M, Okuda J, et al. : Human posterior parietal cortex maintains color, shape and motion in visual short-term memory. *Brain Research* 1213, p.91-97, 2008
- 23) 奥田次郎: 未来への予見に携わる脳神経ネットワーク. *玉川大学脳科学研究所紀要* 1, p.13-23, 2008
- 24) Fukushima Y, Tsukada M, Tsuda I, Yamaguti Y, Kuroda S. : Spatial clustering property and its self-similarity in membrane potentials of hippocampal CA1 pyramidal neurons for a spatio-temporal input sequence. *Cognitive Neurodynamics* 1, p.305-316, 2007
- 25) Aihara T, Abiru Y, Yamazaki Y, Watanabe H, Fukushima Y, Tsukada M. : The relation between spike-timing dependent plasticity

and Ca²⁺ dynamics in the hippocampal CA1 network. *Neuroscience* 145, p.80-87, 2007

26)Fujiwara K, Fujiwara H, Tsukada M, Aihara K. :Reproducing Bursting Interspike Interval Statistics of the Gustatory Cortex. *BioSystems* 90, p.442-448, 2007

27)Tsukada M, Yamazaki Y, Kojima H. : Interaction between the Spatio-Temporal Learning Rule (STLR) and Hebb type (HEBB) in single pyramidal cells in the hippocampal CA1 Area. *Cognitive Neurodynamics* 1.2, p.157-167, 2007

28)Kurosaki K, Omori T. : Children Construct Novel Word Meaning Ad-hoc Based on Known Words: Computational Model of Shape and Material Biases. *Cognitive Systems Research*, Vol.8, No.2, p.110-130, 2007

29)Toyomura A, Koyama S, Miyamaoto T, Terao A, Omori T, Murohashi H, Kuriki S. : Neural Correlates of Auditory Feedback Control in Human. *Neuroscience*, 146, p.499-503, 2007

30)Kurashige H, and Sakai Y. : Dynamically Sliding Threshold Model Reproduces the Initial-Strength Dependence of Spike-Timing-Dependent Synaptic Plasticity. *J.Phys.Soc.Jpn*, vol.76, No.11, p.114802-8, 2007

31)Okuda J: Prospection or projection: Neurobiological basis of stimulus-independent mental traveling. *Behavioral and Brain Sciences*, 30(3) p.299, 328-329, 2007

32)Okuda J, et al. : Differential involvement of regions in rostral prefrontal cortex (Brodmann Area 10) in time- and event-based prospective memory. *International Journal of Psychophysiology*, 64(3), p.233-246, 2007

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等
なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

塚田 稔 (TSUKADA MINORU)
玉川大学・脳科学研究所・教授
研究者番号：80074392

(3) 連携研究者

小島 比呂志 (KOJIMA HIROSHI)
玉川大学・工学部・教授
研究者番号：50281671

大森 隆司 (KOJIMA HIROSHI)
玉川大学・工学部・教授
研究者番号：50143384

岡田 浩之 (OKADA HIROYUKI)
玉川大学・工学部・教授
研究者番号：10349326

酒井 裕 (SAKAI YUTAKA)
玉川大学・脳科学研究所・准教授
研究者番号：70323376

奥田 次郎 (OKUDA JIRO)
京都産業大学・コンピュータ理工学科・准教授
研究者番号：80384725