

機関番号：13501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2007～2010

課題番号：19700217

研究課題名(和文) 海馬と大脳皮質における相補的な学習システムのモデル化に関する研究

研究課題名(英文) Modeling of the complementary learning systems between hippocampus and neocortex

研究代表者

服部 元信 (HATTORI MOTONOBU)

山梨大学・大学院医学工学総合研究部・准教授

研究者番号：40293435

研究成果の概要(和文)：本研究では、生理学、解剖学、神経心理学などの知見に基づき、海馬と大脳皮質を含む神経回路網のモデル化を行い、両者における相補的な学習の仕組みについて、その可能性を計算機シミュレーションによって調査した。その結果、海馬の構造自体が類似したパターン類似度を下げ、記憶の形成を容易にする働きがあること、海馬における神経新生がそれをさらに顕著にすること、海馬のカオス想起が大脳皮質における破局的忘却を抑制することなどを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In this research, we have examined the mechanism of the complementary learning between the hippocampus and the neocortex of the brain by using an artificial neural network model which is based on physiological, anatomical and neuropsychological findings. As the results, we have revealed that the structure of the hippocampus itself can decrease the similarity of patterns to be stored and makes easy to store them. This function can be exaggerated by the neuronal turnover in dentate gyrus. Moreover, we have shown that the chaotic recall in the hippocampal network can reduce catastrophic forgetting in the neocortical network.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	600,000	0	600,000
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
総計	3,200,000	780,000	3,980,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・感性情報学・ソフトコンピューティング

キーワード：海馬、大脳皮質、CLS理論、記憶、ニューラルネットワーク

## 1. 研究開始当初の背景

脳の機能において記憶はとりわけ重要であり、我々人間の知的な活動は記憶を抜きにしては語れない。心理学的には、記憶は宣言的記憶と手続的記憶に分類できる。手続的記憶は、自転車の乗り方などの必ずしも言語的に記述できない記憶である。一方、宣言的記憶は、意識的に思い出すことのできる様々な出来事に関する記憶(エピソード記憶)や事

実に関する記憶(意味記憶)からなり、思考や推論といった極めて高次な機能において利用されている。このため、人間のように知的で柔軟な情報処理システムを構築するにあたっては、如何にして宣言的記憶の形成過程を模倣するかが大変重要である。本研究では、脳を模倣した高次情報処理システムの構築を見据え、記憶の中でも特に宣言的記憶をターゲットとする。

記憶は最終的には大脳皮質に蓄えられるが、その過程で海馬が深く関与していることが知られている。これは、海馬やその周辺を含む部位をてんかんなどの治療のために切除した患者や、海馬に損傷を受けた患者に対する詳細な研究によって明らかになった。一般に、これらの患者は、手術や損傷を受けた後のことが記憶できない重度の前向き健忘を呈する。この記憶障害を受けるのは、宣言的記憶に限定されており、手続的記憶には影響がない。また、宣言的記憶については時間に依存した逆向性健忘が見られる。すなわち、手術や損傷を受ける直前に起こった出来事を思い出すことはできないが、過去に遡るほどこの記憶障害の程度は軽くなり、ずっと以前のことになると正しく思い出すことができるといった症状を呈する。以上の知見から、記憶は一旦、海馬に蓄えられた後、徐々に大脳皮質へと転写されていくものと考えられている。このように、短期的な記憶の座としての海馬の役割が注目され、海馬に関する生理学的な研究が近年極めて盛んに行われている。また、計算機科学の分野においても、海馬の計算モデルや工学モデルがいくつか提案されており、本研究代表者らもこれまでに、生理学並びに解剖学的な知見に基づき、海馬で記憶が変容していくモデルや海馬のCA3と呼ばれる部位が機能的に分離できることを示唆するモデルなどを提案している。しかし、こうした従来の研究では、海馬やその一部のみをモデル化の対象とすることがほとんどであった。

一方、人間を模倣した高次情報処理システムの構築を目指すには、記憶の形成過程をより巨視的にシステムとして捉えることが不可欠である。すなわち、外界からの入力が見馬を経由して最終的に大脳皮質に蓄えられる過程全体を模倣することが肝要である。これまでの生理学並びに神経心理学的な研究から、海馬と大脳皮質において相補的な学習が行われているとする理論（CLS：Complementary Learning Systems理論）が提唱されている。最終的な記憶の貯蔵庫である大脳皮質は、単に記憶を保持するだけでなく、既存の知識構造に新たな知識を加え体系立てていくという働きをしている。したがって、既存の知識を壊さないためには、非常にゆっくりとした学習が必要になる。これに対して、記憶の一次的なバッファである海馬では、新しい情報を高速に次々と記憶する必要がある。CLS理論は、海馬と大脳皮質においてこのような学習が行われている原理的かつ機能的理由を指摘しているが、海馬から大脳皮質へどのようにして記憶が転写されるのかの詳細については何ら具体的に述べていない。この仕組みについては、現在でもまだよくわかっていないが、宣言的記憶の形成過程を

模倣するにあたっては、記憶の転写を含めた、海馬と大脳皮質における相互作用を明らかにすることが極めて重要である。

## 2. 研究の目的

本研究では、生理学、解剖学、神経心理学などの知見に基づき、海馬と大脳皮質を含む神経回路網のモデル化を行い、宣言的記憶を長期記憶として形成するシステムを構築することを目的とする。海馬のモデル化にあたっては、近年になって発見された、海馬歯状回における顆粒細胞の発生・死滅現象に関する知見を採り入れ、この現象が海馬で必要とされる高速な学習、追加学習などの能力とどのように関係しているのかを明らかにする。また、CLS理論は、一時的な記憶の貯蔵庫である海馬が大脳皮質の神経回路網に対して教師として働き、長期記憶と構造的な知識の形成に寄与していると示唆しているが、その具体的なメカニズムはまだ解明されていない。近年の睡眠中の脳活動の研究によると、霊長類、げっ歯目ともに、徐波睡眠期と呼ばれる期間に、高頻度の特徴的な活動が海馬で見られることがわかっている。この活動は大脳皮質まで伝搬することも明らかになっており、こうした睡眠中の海馬の活動が大脳皮質への記憶の転写に関わっている可能性がある。本研究では、こうした知見やこれまでの人工神経回路網の研究で得られた知見を採り入れ、海馬と大脳皮質における相補的な学習の仕組みを主に計算機シミュレーションによって検討する。

## 3. 研究の方法

本研究課題は以下のように実施した。

(1) 海馬に関する生物学的研究の調査  
詳細な研究が行われているげっ歯目を中心に、海馬全般並びに歯状回の顆粒細胞の発生・死滅現象に関する生物学的知見の調査を行った。文献による調査を中心に、国内外の学会等にも参加して、情報収集を行った。なお、このような調査、情報収集は終了年度まで継続的に行った。

(2) 海馬モデルの構築

(1)で得られた知見を基に、海馬モデルの構築を行った。モデルには、歯状回における神経新生の知見を採り入れ、神経新生が記憶の形成に果たす役割について、計算機実験により調査を行った。また、海馬CA3に関する最新の解剖学・生理学的知見に基づいたモデルの構築も行い、その特性を計算機シミュレーションにより調査した。

(3) 宣言的記憶に関する神経心理学的知見の調査

海馬と大脳皮質に関する神経心理学的知見と関連する記憶モデルについて調査を行った。

(4) 海馬と大脳皮質の相補的な学習システムのモデル化

海馬と大脳皮質を含む神経回路網のモデル化を行い、海馬に一時的に保持されている記憶を大脳皮質へと転写する仕組みについて、計算機シミュレーションによって検討した。

4. 研究成果

(1) 海馬モデル

海馬に関する生物学的知見を採り入れた海馬モデルについては、計算機シミュレーションの結果、以下のことが明らかになった。

① 海馬システムにおける情報処理

海馬は脳の中央に位置しており、主に DG, CA3, CA1 からなる領域である。また、海馬と外部との入出力領域として嗅内野 (Entorhinal Cortex:EC)がある。EC と海馬の各領域の間は、貫通枝と呼ばれる繊維で結合しており、CA3 から CA1 への結合は Shaffer 側枝、DG から CA3 は苔状繊維により結合している。中でも、苔状繊維は、スパースであるが非常に強力であることが知られている。また、CA3 には反回側枝と呼ばれる自己フィードバック結合があるのが特徴である。これらの結合を通して、海馬は EC から受けた入力の情報処理を行っている。さらに、Yackel らが行った電気生理学的実験により、海馬は学習時と想起時に異なる領域を利用していることが明らかになっており、学習時には、情報の伝達順で示すと EC→DG→CA3→CA1 が、一方、想起時には、EC→CA3→CA1 が支配的になることがわかっている。以上のような知見に加え、各領域間の結合率、各領域の神経細胞の発火率、ラットの海馬に基づいた神経細胞数などを用いて、海馬システムのモデル化を行い (図 1)、計算機シミュレーションによりその特性を調べた。その結果、海馬の構造自体に、類似したパターンの類似度を下げる働きがあることがわかった。すなわち、海馬の構造は、入力されたパターンの追加学習を容易にし、記憶容量を増加させる働きがあるといえる。こうした機能は、記憶の第一次的な貯蔵庫である海馬にとって不可欠であると考えられる。

② 歯状回の神経新生の記憶形成における役割

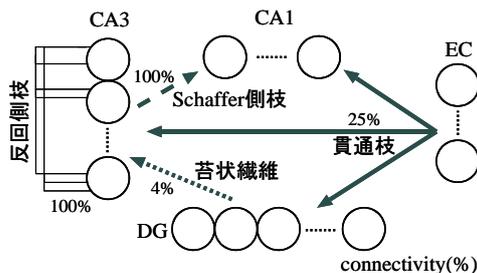


図 1: 海馬システムのモデル。

従来、脳の成熟後には新しい神経細胞は生まれないと信じられてきた。そのため、成体の脳では、神経細胞は死滅していくのみと考えられてきた。しかし、近年の生理学的な研究により、海馬の DG において、顆粒細胞が新たに誕生する現象が発見された。すなわち、DG では神経細胞の新生と死滅、つまり神経細胞置換が繰り返し起こっていることが明らかになった。ラットによる研究では、生後 35 日の若い個体の場合、一日当たり DG のおよそ 1%の細胞が入れ替わっていることがわかっている。また、成体のラットでは神経細胞置換の割合が減少することも明らかになっている。一方で、DG における神経新生の役割については諸説があり、まだ完全に解明されていない。そこで、海馬システムに DG における神経細胞置換を採り入れ、その役割を計算機シミュレーションによって調査した。

神経細胞置換のモデル化は、ある一定の割合で DG の神経細胞をランダムに選択し、その細胞の持つ EC, CA3 への結合を削除し、各層間の結合率に基づいて再結合させることで実装した。また、構築した海馬モデルは、成体のラットの海馬の約 1000 分の 1 の規模としたため、神経細胞置換の効果を調査するためには極端な変化が必要であると考え、神経細胞置換の割合を 0~100%の間で設定した。

図 2 は、10 個からなる入力パターンの類似度 (方向余弦) を 8 通りに変化させたときの神経細胞置換の割合に対する想起パターン数を示した結果である。この図からわかる通り、神経細胞置換の割合が大きくなると正しく想起できるパターン数が増加することがわかる。つまり、神経細胞置換の割合が大きくなるにつれて、記憶容量が増大するという結果が得られた。図 3 は入力パターンの類似度が 0.42 のときの神経細胞置換の割合と DG におけるパターンの類似度及び想起数との関係を示している。この図から、神経細胞置換の割合が大きくなるにしたがって、DG に形成されるパターンの類似度が低下してい

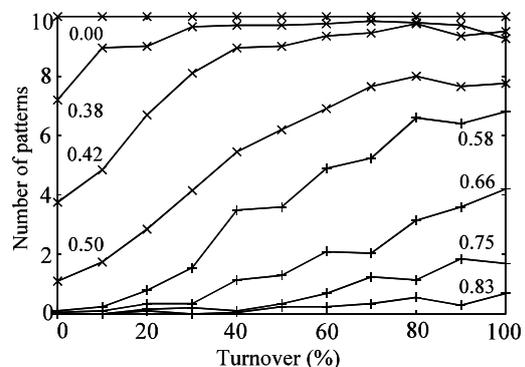


図 2: 入力パターンの類似度 (図中の数値) による想起数の比較。

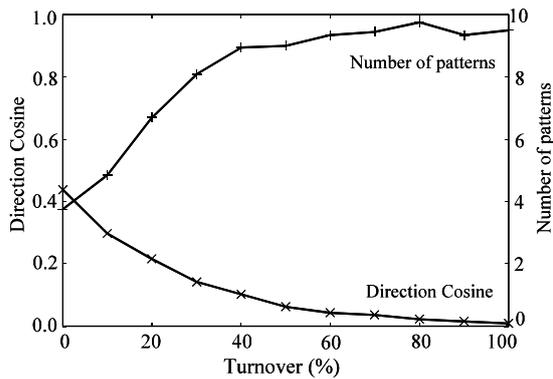


図 3：神経細胞置換の割合と DG におけるパターンの類似度と想起数の関係。

くことがわかる。すなわち、神経細胞置換によってパターンの直交性が高くなるため、パターンの記憶が容易になり、結果として記憶容量が増加したといえる。また、パターン間の相関が低くなるため、神経細胞置換がない場合に比べて少ない学習回数で高速に記憶の獲得が可能になることがわかった。先述のように、海馬はその構造自体に入力パターンの類似度を下げる働きがあるが、一連の計算機シミュレーションから、DG の神経細胞置換がこれをより顕著にしている可能性があるということが明らかになった。

### ③ 海馬 CA3 の空間・時間選択性

海馬の解剖学・生理学的知見により、CA3 における反回側枝の投射範囲が神経細胞の存在位置によって変化していること、並びに、生体の神経回路網の学習則であるスパイクタイミング依存性シナプス可塑性が樹状突起上の位置によって対称・非対称という2つのプロファイルに変化することが明らかになっている。こうした知見を採り入れた海馬 CA3 モデルを構築して計算機シミュレーションを行った結果、海馬 CA3 が空間選択性を持つ領域と時間選択性を持つ領域に分離でき、これらが、部分的に重複する複数のエピソードを記憶する際に問題となる曖昧性の解消に寄与している可能性があることを示すことができた。さらに、ラットの記憶実験によく用いられる T 字迷路課題を想定した時系列を用いて、これら2つの選択性の相互作用が時系列情報の曖昧性の解消に有効であることを計算機シミュレーションにより検証した。

### (2) 海馬と大脳皮質の相補的な学習

CLS 理論に基づき、海馬と大脳皮質を含む神経回路網のモデル化を行い、海馬と大脳皮質における相補的な学習の仕組みを計算機シミュレーションによって調査した。構築したモデルは、図 4 に示すように、構造と学習方法の異なる 2 つのネットワークからなり、それぞれ海馬と大脳皮質に相当する。前者に相当するネットワークには、海馬 CA3 と同様

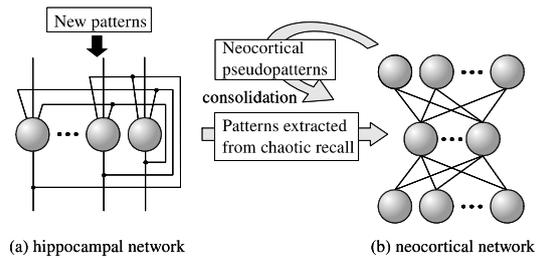


図 4：デュアルネットワークモデル。

に再帰的な結合を有する、相互結合型の連想記憶モデルを採用した。このモデルに忘却付きのヘップ学習を導入することにより、海馬で行われていると考えられる、高速かつ逐次的な学習が可能となり、また、短期的な記憶として機能することがわかった。一方、後者のネットワークは、誤差逆伝播法で学習される階層型ニューラルネットワークとした。これにより、長期記憶を実現するための大記憶容量が実現可能となった。

海馬から大脳皮質へ記憶を転写する際には、どのようにして海馬に蓄えられた記憶を取り出すかが大きな問題である。記憶は、海馬ネットワーク全体の重みに分散して蓄えられているが、重みを見ただけではそこにどんなパターンが記憶されているかを知ることができない。この問題を解決する一つの可能性として、海馬ネットワークの連想記憶モデルにカオスニューロンを導入した。そして、ランダムな初期状態からカオスによる動的連想によって、海馬に蓄えられた記憶を抽出することを試みたところ、うまく機能することが確認できた。ここで抽出された記憶パターン群は、大脳皮質ネットワークの教師信号として用いることが可能であるが、これだけを用いて学習を行うと、既に大脳皮質ネットワークに蓄えられている記憶が破壊されてしまう可能性が高い。さらに、大脳皮質ネットワークは長期記憶の座であるため、上述の海馬ネットワークの場合のように、カオス連想によって、既に記憶したパターンすべてを抽出するようなことは困難であり、生体の脳でもこうしたことを行っている可能性は極めて低いと考えられる。そこで、大脳皮質ネットワークにランダムな入力を与え、得られた出力との組を複数用意した。このようにして生成した擬似パターン群とカオス想起によって抽出されたパターン群を大脳皮質ネットワークに学習させることで、破局的忘却を抑制しつつ、海馬から大脳皮質への記憶の転写を可能とし、長期記憶を形成できることを明らかにした。特に、海馬から抽出されたパターン群と相関の高い擬似パターン群を用いることで、より破局的忘却の抑制を実現できることがわかった。

input:   
 output: 

(a)従来法(goodness=0.973)

input:   
 output: 

(b)提案法(goodness=0.998)

図 5 : 想起結果.

図 5 はアルファベットパターン 8 文字を 2 文字ずつ順に追加学習をさせたときの脳皮質ネットワークにおける想起結果を示している。従来のモデルでは、海馬に相当するネットワークにも階層型ニューラルネットワークを用い、海馬から脳皮質への記憶の転写に擬似パターンを用いているため、記憶の転写が不完全で、特に、初期に学習した A から I のパターンについて忘却が激しいことがわかる。一方、提案したモデルでは、海馬ネットワークによるカオスを用いた動的連想によって、海馬に記憶されたパターンを抽出することができるため、脳皮質ネットワークへほぼ完全な形で記憶の転写が可能となる。学習したパターンがどれだけ正しく想起できているかを示す指標である goodness(最大値 1)は、提案法において 0.998 となり、従来法に比べ大幅に破局的忘却が抑制できることがわかる。

さらに、海馬ネットワークを図 1 に示すような EC, DG, CA3 からなる多層構造のネットワークに拡張したところ、1 層のみのモデルでは学習が困難であった非常に類似度の高いパターンの学習が可能になるとともに、記憶容量が大幅に改善されることが明らかになった。

#### 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 9 件)

- ① Hattori, M., Dual-Network Model Using a Chaotic Neural Network, Proceedings of IEEE and INNS International Joint Conference on Neural Networks, 1678-1682, 2010, 査読有
- ② Hattori, M., Avoiding Catastrophic Forgetting by Dual-Network Memory Model Using a Chaotic Neural Network, Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology, 60, 851-855, 2009, 査読有
- ③ Samura, T., Hattori, M. and Ishizaki, S.,

Significance for Hippocampal Memory of Context-Like Information Generated in Hippocampal CA3c, Lecture Notes in Computer Science, 5506, 344-351, 2009, 査読有

- ④ Wakagi, Y. and Hattori, M., A model of hippocampal learning with neuronal turnover in dentate gyrus, International Journal of Mathematics and Computers in Simulation, 2, 215-222, 2008, 査読有
- ⑤ Wakagi, Y. and Hattori, M., Effect of neuronal turnover in a hippocampal model, Proceedings of the 12th WSEAS International Conference on Systems, 626-630, 2008, 査読有
- ⑥ Samura, T., Hattori, M. and Ishizaki, S., Sequence disambiguation and pattern completion by cooperation between autoassociative and heteroassociative memories of functionally divided hippocampal CA3, Neurocomputing, 71, 3176-3183, 2008, 査読有
- ⑦ 佐村俊和, 服部元信, 石崎俊, 空間・時間選択性に基づく海馬 CA3 の分離と時系列曖昧性解消への関与, 情報科学技術レターズ, 6, 195-198, 2007, 査読有

[学会発表] (計 5 件)

- ① 佐村俊和, 服部元信, 石崎俊, 海馬 CA3 下位領域レベルの構造と学習則に基づく 2 つの情報選択性領域, 日本神経回路網学会 Brain Inspired-System 研究会, 2009 年 7 月 24 日, 九州工業大学
- ② 若木裕子, 服部元信, 神経細胞置換を取り入れたニューラルネットワークモデル, 情報処理学会第 71 回全国大会, 2009 年 3 月 12 日, 立命館大学
- ③ 佐村俊和, 服部元信, 菊池進一, 石崎俊, 海馬 CA3 の空間・時間選択性の相互作用による T 字迷路課題を想定したループ時系列の曖昧性解消, 第 7 回情報科学技術フォーラム, 2008 年 9 月 3 日, 慶應義塾大学

#### 6. 研究組織

- (1) 研究代表者  
服部 元信 (HATTORI MOTONOBU)  
 山梨大学・大学院医学工学総合研究部・准教授  
 研究者番号 : 40293435
- (2) 研究分担者  
 なし
- (3) 連携研究者  
 なし