

STDP を用いたエピソード記憶から意味記憶を形成する 神経回路モデル

小林 雄作^{†*} 村越 一支[†]

A Neural Circuit Model Forming Semantic Memory from Episodic Memory
Using STDP

Yusaku KOBAYASHI^{†*} and Kazushi MURAKOSHI[†]

あらまし 思考・運動・認知など、ヒトの高次機能には記憶が重要な役割を果たしている。それら記憶のうち、意識することのできる意味記憶とエピソード記憶を取り上げる。意味記憶は、いくつものエピソード記憶から共通部分が抜き出されてできると考えられている。これまでの研究・実験で、脳のどの部位が記憶に関連しているか明らかにされているが、その神経回路がどのようになっているか、特に時間的に精緻なシナプス可塑性である STDP との関係において、明らかにされていない。そこで、脳の神経回路に基づいた、STDP を用いたエピソード記憶から意味記憶を形成するモデルを提案する。モデルに入力するパターン・内部の結線を変えてシミュレーションを行い、意味記憶を形成できるパラメータを調べた。その結果、意味記憶の形成には形成する領域への 3 経路からの結合及び回帰結合と、適切な伝達遅延が必要であることが示唆された。更に、形成された意味記憶に一部共通部分をもつ別の意味記憶を形成させた結果、提案モデルで意味ネットワークを形成されることが示唆された。

キーワード 意味記憶、エピソード記憶、神経回路モデル、STDP、意味ネットワーク

1. ま え が き

思考、認知、言語など、ヒトの高次機能には記憶が重要な役割を果たす。記憶がなければ他の高次機能は働かない。つまり、記憶の機能をなくしてしまうとヒトはヒトとして生きていけないということである。例えば、言葉の意味を知らなければ相手の言っていることが分からず、会話にならない。このように日々の生活の中で記憶される出来事や知識は陳述記憶と呼ばれ、学習を重ねることで長期にわたり保持される。陳述記憶は更に、出来事の記憶をエピソード記憶、知識や概念を意味記憶に分けられる。

これまでに研究・実験が積み重ねられ、記憶に関連している脳部位が明らかになってきている [1]。そのうち海馬とその周辺皮質はエピソード記憶などの長期記

憶の形成に関与していることが強く示唆されている。意味記憶には更に広汎な領域、中でも新皮質の感覚横断性連合野が関与する。

記憶障害に関する症例もこれまでにいくつか報告されている。H.M. 氏、R.B. 氏の症例では海馬の損傷により意味記憶とエピソード記憶に障害が現れる [2] ~ [4]。また、Alzheimer 病患者の海馬体ではシナプス可塑性が低下していることが指摘されている。病気の初期段階ではエピソード記憶に障害が目立ち、進行するにつれ意味記憶の障害も見られるようになる [5]。

記憶は、シナプスの伝達効率が変化することで形成されと考えられている。シナプス可塑性の規則はいくつか知られていて、最近では、神経細胞の発火タイミングに依存するスパイクタイミング依存性シナプス可塑性 (Spike-Timing-Dependent synaptic Plasticity; STDP) [6] が明らかにされている。これはシナプス前後の神経細胞において、前細胞の後に後細胞が発火すると伝達効率が増加し、後細胞の後に前細胞が発火すると効率が減少するものであり、ヘップ則を精緻に観測した現象と考えられる。この時間差に対

[†] 豊橋技術科学大学知識情報工学系、豊橋市
Department of Knowledge-based Information Engineering,
Toyohashi University of Technology, Toyohashi-shi, 441-
8580 Japan

* 現在 (株) メイテック

する非対称性は、神経回路を解明するために重要であると期待されている。

意味記憶とエピソード記憶は互いに関係し合っている。意味記憶はいくつかのエピソード記憶の共通部分から取り出され、エピソード記憶は意味記憶を構成要素とする。意味記憶とエピソード記憶は違う構造をもち、意味記憶は記憶の意味に沿った検索、エピソード記憶は時間の流れに沿った検索と、異なる目的のために使用されると考えられる [7]。しかし、関係があることが分かっているが、その神経回路がどのようになっているかはいまだ明らかにされていない。電気生理実験では脳の広範囲にわたる神経の挙動を観測できない。PET などを用いた実験では脳のどこが働いているのかは分かるが、どのように働いているかは分からない。特に、時間的に精緻な STDP との関係が見えてこない。

心理学では、意味記憶の構造をモデルとした意味ネットワーク [8], [9] が提案されている。これは、意味記憶が既に形成されている状態のモデルであり、構築する過程はない。また、海馬と新皮質を用いて陳述記憶を構築するモデルはいくつか提案されている [10] ~ [13]。しかし、どれもエピソード記憶と意味記憶の関係が明確ではなく、また学習則にヘッブ則を用いており記憶形成時の時間的に精緻な必要条件が見えてこない。

そこで本研究では、意味記憶がエピソード記憶から形成されるものと考え、直接入力及び海馬経由のエピソード記憶から、STDP を用いて連合野に意味記憶を形成するモデルを提案する。そして、エピソード記憶から意味記憶を形成する条件を明らかにする。意味記憶がエピソード記憶から形成されると考えるため、まずエピソード記憶を形成するモデルが必要であるが、既にエピソード記憶形成モデル [13] が提案されているので、本研究ではそのモデルをもとに STDP を用いた意味記憶形成モデルを構築する。

本論文の構成は以下のとおりである。2. では、提案モデルのもととなる記憶に関する脳の知見を述べる。その知見をもとに 3. で、モデルを提案する。4. では、提案モデルのシミュレーションを行い妥当性を検証する。最後に、5. でまとめる。

2. 記憶に関する脳の知見

本章では、提案モデルに必要な知見について触れておく。2.1 では対象とする脳部位の結合、2.2 では意

味記憶の学習則として取り上げた STDP、2.3 では提案モデルのもとにしたモデルをそれぞれ説明する。

2.1 神経連絡

これまでの解剖学的知見から、脳内では以下のような回路になっていると考えられている [1]。海馬体は主に歯状回・CA3・CA1・海馬台からなる。歯状回は嗅内野から主に入力を受け、CA3 に出力する。CA3 は CA1 へ出力し、CA1 は嗅内野・海馬台へ出力する。海馬体と大脳皮質は、嗅内野を介して相互にやり取りを行っている。

記憶障害に関する症例 [5] や動物実験 [14] から、海馬が陳述記憶の形成に関与し、長期記憶は他の脳部位に貯蔵されることが示唆されている。海馬を含む側頭葉内側部を切除した H.M. 氏の症例では、陳述記憶の形成に障害があった。また、手術前数年の記憶はあやふやであったが、より古い記憶は失われていなかった。

2.2 STDP

STDP は海馬以外にも、大脳新皮質で観測されている。Froemke ら [6] は生理実験により、シナプスを挟んだ前細胞と後細胞の発火時間差とシナプス可塑性に関係があることを示した。その関係とは、前細胞の後に後細胞が発火した場合にはシナプスの結合強度が増加し、前細胞の前に後細胞が発火した場合に結合強度が減少することである。前細胞の発火を基準にした前・後細胞の発火時間差を Δt [ms] とすると実験から求められたシナプス可塑性の増減 $F(\Delta t)$ [%] は、

$$F(\Delta t) = \begin{cases} 102 \exp\left(-\frac{|\Delta t|}{15.5}\right) & (\Delta t > 0) \\ -52 \exp\left(-\frac{|\Delta t|}{33.2}\right) & (\Delta t < 0) \end{cases} \quad (1)$$

である。

2.3 従来のモデル

伊藤らは、文献 [15] で提案したモデルを発展させ、海馬-連合野モデル [13] を提案している。このモデルは、時系列パターンを中期記憶として海馬で保持し、パターンの想起を繰り返すことで長期記憶を連合野に形成する。しかし、エピソード記憶しか扱っていないため、連合野に意味記憶を形成するということは扱っていない。提案モデルはこのモデルのもとに意味記憶を形成するモデルを考える。

3. 提案モデル

提案するモデルを図 1 に示し、概略を説明する。伊

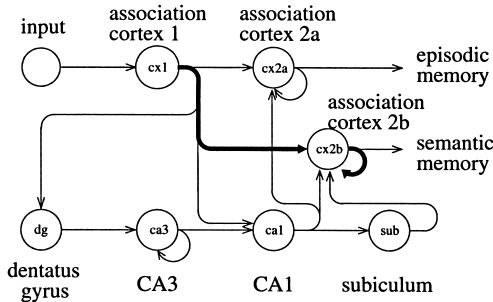


図 1 拡張したモデル
Fig. 1 Our extended model.

藤らの海馬-連合野モデル [13] と同じく、連合野第 1 層では入力そのまま反応し、歯状回、回帰結合をもつ海馬 CA3 層を経由し、時系列データを海馬内で学習し、海馬 CA1 層に出力する。本来なら、連合野と海馬の間に嗅内野層があるが、文献 [13] と同様に、入力と出力が同じで単なる仲介であるので簡単のため省略した。また、本研究では STDP という時間的に精緻な学習則を用いることを考慮し、伊藤らの海馬-連合野モデル [13] には海馬台がないが、CA1 から連合野 2b への経路と CA1 から海馬台を介した連合野 2b への経路 [16] の遅延入力による学習の違いがかなりあると予想されるので検討をするためモデルに新たに加えた。連合野第 2 層は a と b の二つ設け、a はエピソード記憶、b は意味記憶を保持する。非侵襲的な方法により脳活動を調べた実験 [17] ~ [19] により、エピソード記憶と意味記憶は脳の別の領域に保持されていることが示唆されているので、記憶をそれぞれ連合野 2a と連合野 2b に分けた。ただし現段階では、この連合野第 2 層の場所はそれほど特定できないので、大脳皮質連合野のある場所と考える。連合野 2a では、新たに加えた海馬台経由の投射を簡単化のためせず、伊藤らのモデルから変更を加えていない。一方、連合野 2b では意味記憶形成と STDP の関係を調べるため STDP を学習則として用いた。図 1 中の太い矢印は、STDP で結合強度が変化する神経結合を示している。

本研究では、入力パターンの時間差が重要であるとして STDP を取り上げた。STDP では時間差によりシナプス加重の変化率が変えることから、連合野第 2b 層へのすべての入力、すなわち連合野第 1 層から、海馬 CA1 から直接、海馬 CA1 から海馬台経由、に伝達遅延時間を設定し、伝達遅延の効果を検討する。STDP と神経細胞の伝達遅延時間は、脳の至るところで観測

されている。しかしながら本研究の目的が、連合野に意味記憶を形成することであるから、連合野第 2b 層と回帰入力以外には簡略化のため導入しなかった。

本モデルでは記憶の呼出しに関して、エピソード記憶では時間的な順序が関係ある時系列パターン、意味記憶を時間的な順序が関係ないパターンとして考える。例えば、A, B という二つの要素から成り立っている場合、あるエピソード記憶では、A だけが入力されたときに B が想起されたとしても、B だけが入力されたときに A は想起されない時間的な順序がある。一方、意味記憶においては、A だけが入力されたときに A と B が想起され、B だけが入力されたときも A と B が想起されるような場合と考える。これは、エピソード記憶は時間的な順序があることと、意味記憶は要素パターンの連合でできていると考えたからである。

モデルの詳細は以下のとおりである。各層の各細胞素子は離散時間で同期的に状態更新を行う。本モデルでは、文献 [13] のモデルを一部利用している。文献 [13] のモデルと同じく連合野第 1 層の細胞 $i (i = 0, \dots, N-1)$ の状態は x_i^{cx1} で入力をそのまま反映している。その後、歯状回層、回帰結合をもつ海馬 CA3 層を用いて、海馬 CA1 層に学習した時系列データを出力する（未学習の場合は入力そのまま出力）。この海馬 CA1 の細胞 i の状態を x_i^{ca1} と表記し、連合野第 2b 層へのエピソード記憶形成及び本モデルで追加した連合野第 2b 層への意味記憶形成に利用する。連合野第 2b 層は、連合野第 1 層・海馬 CA1・海馬台・連合野第 2b 層回帰の 4 種類の入力がある。各入力の伝達遅延はそれぞれ $\Delta t^{cx2b-cx1}$, $\Delta t^{cx2b-ca1}$, $\Delta t^{cx2b-sub}$, $\Delta t^{cx2b-cx2b}$ とし、CA1 から海馬台への伝達遅延を $\Delta t^{sub-ca1}$ とする。連合野第 1 層、海馬 CA1 と海馬台の細胞 i の状態をそれぞれ x_i^{cx1} , x_i^{ca1} , x_i^{sub} とする。海馬台の細胞 i の時刻 t における状態 x_i^{sub} は

$$x_i^{sub}(t) = x_i^{ca1}(t - \Delta t^{sub-ca1}) \quad (2)$$

で与え、CA1 からの出力を遅延時間後に出力する。連合野第 2b 層の細胞 $i (i = 0, \dots, N-1)$ の時刻 t における状態 x_i^{cx2b} は

$$x_i^{cx2b}(t) = f \left(\sum_j^N w_{ij}^{cx2b-cx1} x_j^{cx1}(t - \Delta t^{cx2b-cx1}) + x_i^{ca1}(t - \Delta t^{cx2b-ca1}) + x_i^{sub}(t - \Delta t^{cx2b-sub}) \right)$$

$$+ \sum_k^N w_{ik}^{cx2b \cdot cx2b} x_k^{cx2b} (t - \Delta t^{cx2b \cdot cx2b}) - \theta^{cx2b} \Big) \quad (3)$$

で与えられる． N は連合野 2b の細胞数， $f(\cdot)$ は 0 より大きいとき 1 を出力するステップ関数， θ^{cx2b} はしきい値であり，状態が 1 のときは発火とする．シナプス結合強度は，例えば $w_{ij}^{areaA \cdot areaB}$ であれば，領域 B の j 番目の細胞から領域 A の i 番目の細胞へ結合を表している．連合野第 1 層からと連合野第 2b 層へ帰から連合野第 2b 層への結合は全結合させ，シナプス結合強度 $w_{ij}^{cx2b \cdot cx1}$ ， $w_{ik}^{cx2b \cdot cx2b}$ は STDP により値を変化させる．これらの結合強度の上限は w_{max}^{cx2b} とする．

4. シミュレーション

提案モデルの動作を確認するため，パラメータを変えながらシミュレーションを行った．変更するパラメータは表 1 に示すとおりである．表中の数値は，特に変更させない場合の値で，変更のあるものはその都度説明する．残りのパラメータを表 2 に示す．ここに載せていないパラメータは文献 [13] のまま使用している．パラメータの表では，連合野第 1 層を CX1，連合野第 2a 層を CX2a，連合野第 2b 層を CX2b，海馬 CA3 層を CA3，海馬 CA1 層を CA1，海馬歯状回層を DG，海馬台層を SUB とそれぞれ略記している．

伊藤らのモデル [13] からのパラメータ変更点は以下のとおりである．伊藤らのシミュレーション [13] では，Sperling の心理実験結果 [20] から 1 文字当りの短期記憶転送処理時間が 100 [ms] と見積もられることから，シミュレーションにおける各層の細胞素子の更新の単位時間を 100 [ms] に設定している．しかしながら，本論文では STDP による学習を考えると 100 [ms] の単位時間は長すぎることと，実際の神経細胞はミリ秒単位の反応性があることから，単位時間を 1 [ms] とした．Sperling の心理実験 [20] の後，視覚マスキングを用いた心理実験 [21], [22] により，1 文字当り 10 [ms] という処理時間が示唆された．前者と後者は一見矛盾するが，4～5 文字までは 10 [ms/文字] で処理しその後はしばらく休止するので，より多い文字数では平均 100 [ms/文字] になるのではないかと考えることができる．本論文では，10 [ms/文字] の処理速度を考慮し，時系列パターン内のパターンの提示間隔 T^{intvl} を 10 [ms] で与える．これに伴い，CX2a，CA3，CX2b

表 1 変更するパラメータ
Table 1 Changing parameters.

パラメータ	初期値
シミュレーション時間 T	70000 [ms]
時系列パターンの種類	3
時系列パターンの入力数	300
CA1 から CX2b への伝達遅延	
直接 $\Delta t^{cx2b \cdot ca1}$	15 [ms]
海馬台経由 $\Delta t^{sub \cdot ca1} + \Delta t^{cx2b \cdot sub}$	21 [ms]

表 2 パラメータリスト
Table 2 List of parameters.

パラメータ	値
各細胞素子の更新単位時間	1 [ms]
時系列パターン内の間隔 T^{intvl}	10 [ms]
時系列パターンの間隔 T^{rest}	200 [ms]
細胞数 N (連合野, CA1)	50
細胞数 n (DG, CA3)	20
連合野学習定数 α	0.003
海馬学習定数 β	0.1
CX1 から CX2b へのすべての結合強度の初期値	0.01
CX2b の回帰のすべての結合強度の初期値	0.002
CX2b への STDP 結合強度上限 w_{max}^{cx2b}	0.2
CX2b しきい値 θ^{cx2b}	0.5
CX2a の回帰入力の伝達遅延 $\Delta t^{cx2a \cdot cx2a}$	T^{intvl}
CA3 の回帰入力の伝達遅延 $\Delta t^{ca3 \cdot ca3}$	T^{intvl}
CX2b の回帰入力の伝達遅延 $\Delta t^{cx2b \cdot cx2b}$	T^{intvl}
CX1 から CX2b への伝達遅延 $\Delta t^{cx2b \cdot cx1}$	5 [ms]
CX2b 不応期 t_{ref}	3 [ms]

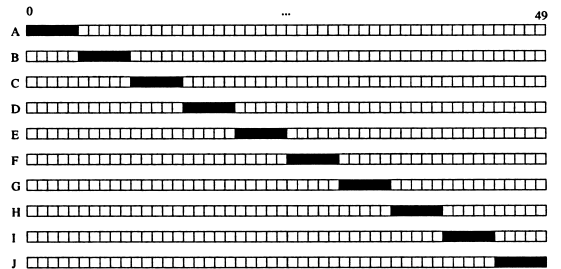


図 2 重ならない入力パターン
Fig. 2 Input patterns without overlap.

の各回帰入力の伝達遅延時間 $\Delta t^{cx2a \cdot cx2a}$ ， $\Delta t^{ca3 \cdot ca3}$ ， $\Delta t^{cx2b \cdot cx2b}$ をすべて T^{intvl} に設定した．単位時間を 1 [ms] としたことから，実際の神経細胞の発火動作に合うように 1 回発火した後しばらく発火しない不応期を設け，また，連合野学習時定数 α と海馬学習時定数 β をもとよりも適当に小さく設定した．また，Froemke ら [6] の生理実験で 60 から 80 の前・後細胞へのペアスパイクを与えていることから，シミュレーション時の 1 回の更新当りの STDP による増減率は，式 (1) の 60 分の 1 で行った．

入力するパターンは一部を除き図 2 に示す 10 種

類で、50 個の要素 0 か 1 で図の黒塗が 1、白塗が 0 で、各パターンは互いに重なり合った部分がない。例えば、パターン A は、0 番から 4 番要素までが 1 で表されている。時系列パターンを (ABC) と表記したときはパターン A, B, C を順に連合野 1 層へ入力する。(AB?) と表記したときの?は、その時系列パターン内にある以外のパターンを意味し、(ABC), (ABD), ... を意味する。このとき時系列パターン内の提示間隔は、 T^{intvl} [ms] で、ある時系列パターンの次に別の時系列パターンを提示するときは、間隔 T^{rest} [ms] で与える。

ここで、時系列パターンの長さを考察する。長い系列を提示し再生する心理実験 [23] により、系列の初めの方の項目の再生が良い初頭効果と終わりの方の項目の再生が良い親近効果が知られている。初頭効果が起こるのは、更に心理実験 [24], [25] により調べられ、リハーサルによって長期記憶に移行しているためと示唆されている。この初頭効果が見られるのは初めの長さ 3 の系列までであり、長さ 4 以上では再生率はかなり低い。本論文のモデルで扱っているエピソード記憶、意味記憶においても、初頭効果で必要であると考えられる繰返し入力が当然必要であるが、長い系列を提示し再生する心理実験の状況よりもより多くの繰返し入力が必要と考えられる。以上のことから、エピソード記憶、意味記憶を形成する際に長い系列から、せいぜい長さ 3 程度の系列が繰り返されていると考えることができ、以下、長さ 3 の時系列パターンだけを考える。

表 1 と表 2 の設定は、いろいろシミュレーションをした結果、うまくいった設定である。この設定で、時系列パターン (AB?) として (ABC), (ABD), (ABE) の 3 時系列パターンを繰返し提示したときの様子を図 3 に示す。横軸は時間、縦軸は出力パターンである。上から順に、連合野第 1 層 (入力と等価)、連合野第 2a 層 (エピソード記憶)、連合野第 2b 層 (意味記憶) の出力である。海馬の各層も出力があるが、意味記憶の形成を見る上では直接関係はないので、省略した。神経細胞の発火は四角で表している。時系列パターンの提示の間隔 T^{rest} [ms] は、お互いの学習が干渉しないように 200 [ms] と設定している。この時点では学習初期で、入力パターンがほぼそのまま出力されている。以降、結果の評価のときにも、同じ形式の図で示す。

図 3 に示すように時系列パターン (AB?) を 300 回入力して学習させた後、入力された時系列パターンを構成している単一のパターンを入力し、記憶の形成を

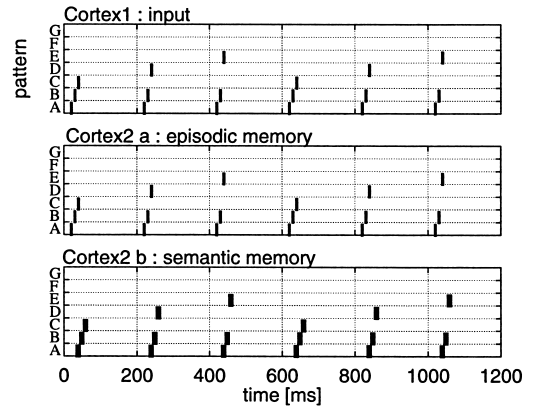


図 3 時系列パターン (AB?) を繰返し提示
Fig. 3 Reptitional presentation of the pattern (AB?).

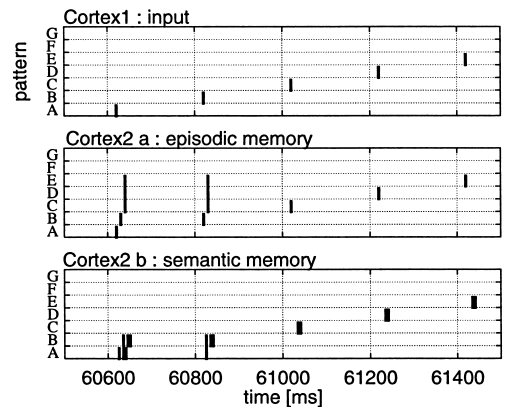


図 4 (AB?) を入力した場合の記憶の形成
Fig. 4 Formation of memory in (AB?) input.

確認する。結果の図 4 では、記憶時に提示されたすべての単一パターンすなわち、A, B, C, D, E を順に 200 [ms] 間隔で入力したときの、各層の出力を表示している。図 4 では、パターン A を入力したとき、連合野 2b 層 (意味記憶層) に A も B も出力が出ていて、パターン B を入力したときも、A も B も出力が出ている。また、C, D, E を入力したときは、それぞれの単独パターンが連合野 2b 層に出力される。このように、入力した時系列パターンの共通部分 A, B から構成され、A だけが入力されたときに B が想起され、B だけが入力されたときも A が想起され、かつ、共通部分以外の C, D, E がそれぞれ単独で入力されたときには、そのそれぞれが単独で出力された場合、意味記憶の形成に成功したと考える。

ほかに行ったシミュレーションを大きく分類すると、

- (1) 連合野第 2b 層への入力を変える
連合野第 2b 層への結合及び伝達遅延時間の影響
- (2) 時系列パターンに共通している部分を変える
(AB?) 以外での時系列パターンの意味記憶が形成
- (3) 時系列パターンの種類を変える
入力する時系列の数が増える, あるいはパターンに重なりがある場合の意味記憶の形成
- (4) ある意味記憶を形成した後に他の意味記憶を形成する
意味記憶のネットワークが形成
の 5 種類である. 以上のシミュレーションを以下に示す.

4.1 連合野第 2b 層への入力を変える

本節では, 連合野第 2b 層への結合及び伝達遅延時間の影響を示す. 4.1.1 では伝達遅延時間を変え, 意味記憶形成に与える影響を示す. 4.1.2 では回路の結線を変え, 提案した回路でなければ, 意味記憶が形成されないことを示す.

4.1.1 伝達遅延を変える

本モデルでは, 連合野 2b 層に入力する情報にしか伝達遅延時間を設けていないので, 遅延時間の絶対的な値には意味はなく, 相対的な値のみ意味がある. STDP により, 複数の入力の時間差によって, シナプスの結合強度の変化割合が変わるからである. したがって, 連合野 1 層からの遅延時間 $\Delta t^{cx2a-cx2a}$ を 5 [ms] と固定し, CA1 から直接と CA1 から海馬台経由の遅延時間 $\Delta t^{cx2b-ca1}$ と $\Delta t^{sub-ca1} + \Delta t^{cx2b-sub}$ をいろいろ変えて調べた. 残りの回帰の遅延時間 $\Delta t^{cx2b-cx2b}$ は, 入力時系列内のパターン間隔 T^{intvl} に設定しており, ここでは 10 [ms] である.

その結果, 意味記憶が形成されたのは,

$$\begin{aligned}\Delta t^{cx2b-ca1} &= 13 - 16 \text{ [ms]} \\ \Delta t^{sub-ca1} + \Delta t^{cx2b-sub} &= 21 - 22 \text{ [ms]}\end{aligned}\quad (4)$$

であった (例えば, 先に示した図 4). つまり, 連合野 1 層から時系列パターンの情報が到着してから, 8 ~ 11 [ms] 後に CA1 から直接入力 that 到着 (二つ目のパターン付近) し, 16 ~ 17 [ms] 後に CA1 から海馬台経由の入力が到着 (二つ目と三つ目のパターンの間) したときである.

失敗した例として, 海馬台からの遅延時間を 18 [ms] に変更した結果を, 図 5 に示す. A を単独で提示したときにが連合野 2b 層に A, B 双方が出力されないの, 意味記憶は形成されていない.

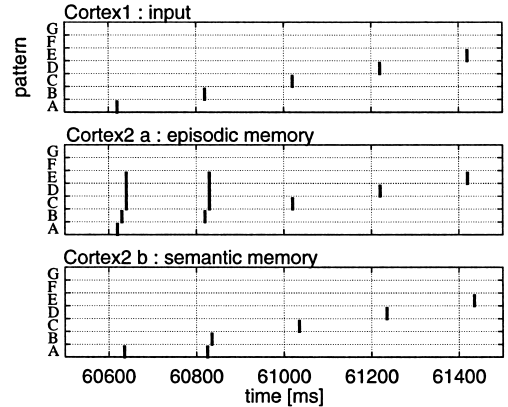


図 5 海馬台伝達遅延 18 [ms] での記憶の形成
Fig.5 Formation of memory in 18 [ms] propagation delay from subiculum.

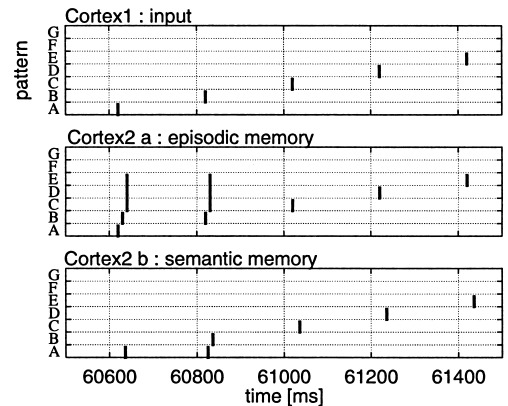


図 6 CA1 から海馬台経由の入力がないときの記憶の形成
Fig.6 Formation of memory without input from CA1 via subiculum.

4.1.2 連合野第 1 層との結線を変える

まず, CA1 から海馬台経由の連合野 2b 層への入力がないと意味記憶が形成されないことを示す. 海馬台からの入力は重みを 0 としている. 結果を, 図 6 に示す. A を提示したとき B が連合野 2b 層に出力されないの, 意味記憶は形成されていない.

次に, CA1 から直接連合野 2b 層への入力がないと意味記憶が形成されないことを示す. CA1 からの入力は重みを 0 としている. 結果を, 図 7 に示す. A を提示したとき B が連合野 2b 層に出力されないの, 意味記憶は形成されていない.

このほかにも, 連合野第 1 層から連合野 2b 層への結合重みを 0 にした場合, 連合野 2b 層での回帰結合重みを 0 にした場合, いずれの結果において意味記憶

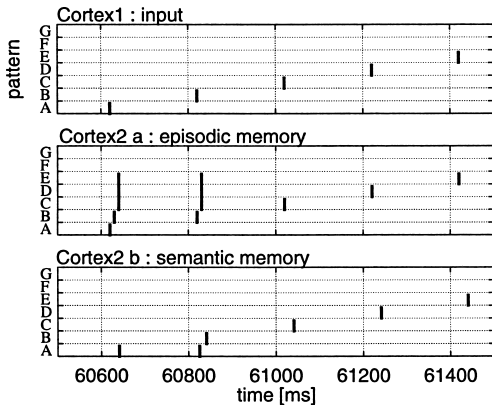


図 7 CA1 からの直接入力がないときの記憶の形成
Fig. 7 Formation of memory without direct input from CA1.

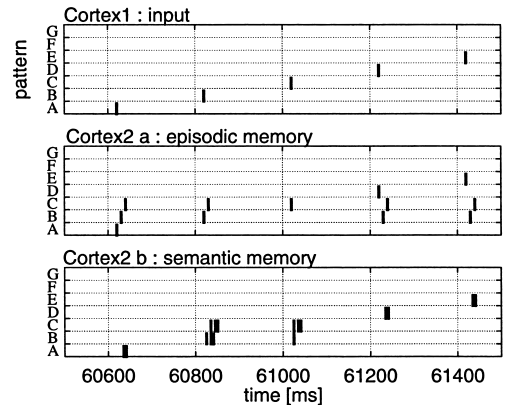


図 9 (?BC) を入力した場合の記憶の形成
Fig. 9 Formation of memory in (?BC) input.

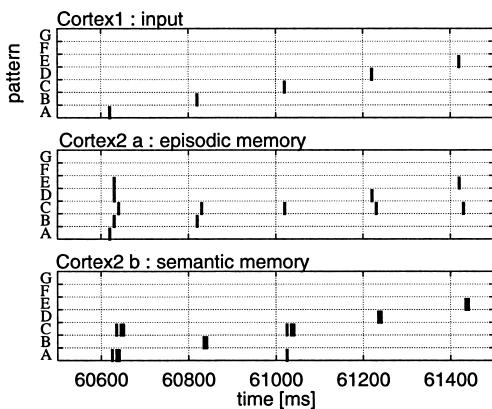


図 8 (A?C) を入力した場合の記憶の形成
Fig. 8 Formation of memory in (A?C) input.

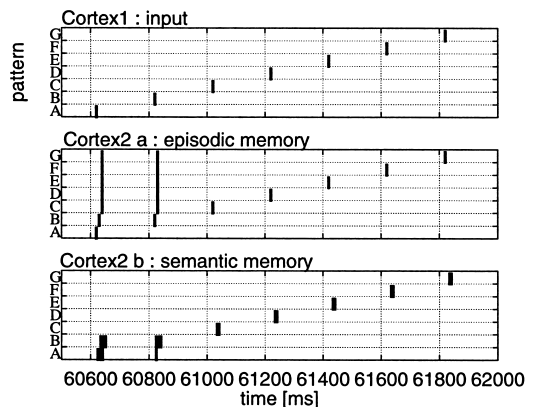


図 10 5 種類入力した場合の記憶の形成
Fig. 10 Formation of memory in five types of input.

は形成されなかった。

ここでは、(AB?) 以外の時系列パターン (A?C) と (?BC) についてシミュレーションを行い、意味記憶が形成されるか確認する。

まず、(A?C) として、(ABC), (ADC), (AEC) の 3 種類を入力する。この場合、A, C が意味記憶として形成されることが期待される。結果を、図 8 に示す。(AB?) と同様に、(A?C) でも意味記憶が形成された。

次に、(?BC) として、(ABC), (DBC), (EBC) の 3 種類を入力する。この場合、B, C が意味記憶として形成されることが期待される。結果を、図 9 に示す。(AB?) と同様に、(?BC) でも意味記憶が形成された。

4.2 入力する時系列パターンの種類を変える

前節までは、入力する時系列パターンの種類が 3 であった。ここでは、5 種類についてシミュレーション

を行う。更に、重なりのあるパターンを 3 種類入力した場合も確認する。

4.2.1 5 種類

入力する時系列パターンの種類が多くなっても、共通する部分が意味記憶として記憶されるはずである。入力する時系列パターンは、(ABC), (ABD), (ABE), (ABF), (ABG) の 5 種類である。

結果を、図 10 に示す。入力する時系列パターンの種類が増えても、共通する部分の意味記憶が形成された。

4.2.2 重なりのあるパターン 3 種類

これまで入力したパターンは互いに重なりのないものであった。ここでは、図 11 に示すパターンを組み合わせた時系列パターンから (ABC), (ABD), (ABE), の 3 種類を入力する。重なりのあるパターンでも意味記憶が形成されるかを確認する。

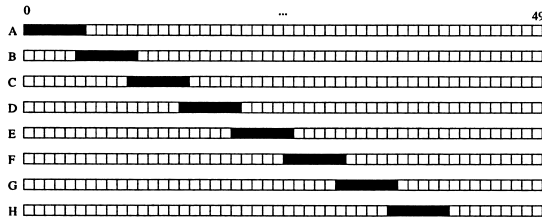


図 11 重なりのある入力パターン
Fig. 11 Input patterns with overlap.

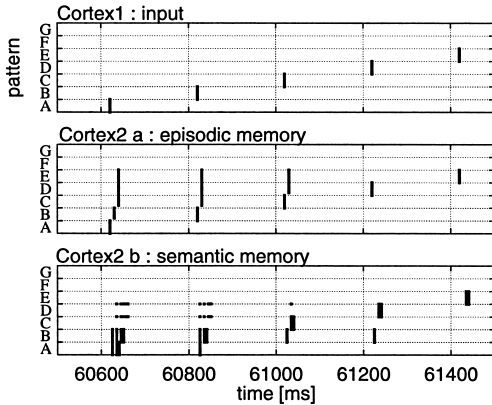


図 12 重なりのあるパターンを入力した場合の記憶の形成
Fig. 12 Formation of memory in input patterns with overlap.

結果を、図 12 に示す．重なりのあるパターンでも共通部分の記憶が形成されている．しかし、余計な想起もされてしまい、意味記憶の形成が不完全である．このため、より少ない時系列パターンを入力回数を 200 として行った結果を、図 13 に示す．重なりのあるパターンでも、重なっている部分の入力回数が多くなければ意味記憶は形成される．

4.3 (AB?) を記憶させた後に (?BC) を記憶させる

(AB?) の記憶が形成された後に (?BC) を記憶させた場合はどのようなものかを確認する．これは意味記憶のネットワークを形成することに相当する．

(AB?) を学習後の図 4 に、追加して (?BC) として (ABC), (FBC), (GBC) を入力させ学習した後の状態を図 14 に示す．A を入力した場合は AB, ABC, BC, C が、B の場合は ABC, BC, B が、C の場合は BC, C が次々想起され、意味記憶を形成できている．

意味ネットワーク [8], [9] は事実とその関係をモデル化している．図 14 の想起結果から、C, B, A の順に意味ネットワークにおける上位の概念と対応させるこ

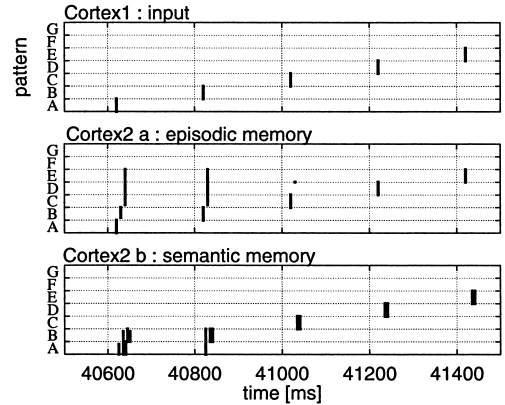


図 13 重なりのあるパターンを 200 回入力した場合の記憶の形成
Fig. 13 Formation of memory in input patterns (200 times) with overlap.

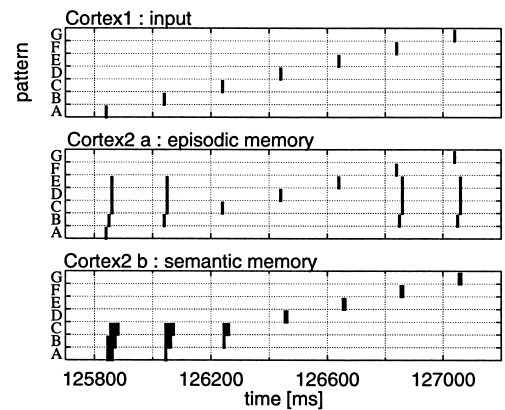


図 14 (AB?) の後に (?BC) を入力した後の記憶の形成
Fig. 14 Formation of memory in (?BC) input after (AB?).

とができる．例えば、C を動物、B を鳥、A をカナリヤとすると、記憶させるときは、最初に (AB?) を提示した後に (?BC) を提示したので、カナリヤと鳥の結び付きを記憶した後に、鳥と動物の結び付きを記憶させたことにシミュレーションは対応する．そして、想起のときは、例えば、カナリヤが入力された結果、カナリヤと鳥、カナリヤと鳥と動物、鳥と動物、そして動物と次々想起していったことになる．この呼出しに関しては、上位や下位のレベルの異なる概念の想起には、レベルの移動をすればするほど時間がかかるという心理実験の結果からの示唆 [8] に定性的に一致している．

5. む す び

生理学・解剖学で明らかにされているデータに基づいて神経回路モデルを構成し、発火時間差から学習する STDP を用いたエピソード記憶から意味記憶を形成させることができた。モデルに入力するパターン・内部の結線を変えてシミュレーションを行い、意味記憶を正しく形成できる条件を調べた。その結果、意味記憶の形成には形成する領域への 3 経路からの結合及び回帰結合と、適切な伝達遅延が必要であることが示唆された。

更に、形成された意味記憶に一部共通部分をもつ別の意味記憶を形成させた後、意味記憶の想起を行った。意味記憶を保持する層には、意味記憶から別の意味記憶を想起する、連想記憶のような状態を示し、提案モデルで意味ネットワークを形成されることが示唆された。

重なりのあるパターンを入力したときに、適切な入力回数でなければならなかった。実際にそうなのか、あるいは、学習の適切なところで学習が停止するような機構が備わっているか検討するのは、今後の課題である。仮に学習の適切なところで学習が停止するような機構がある場合、今回のモデルには採用していない抑制性の結合は、候補の一つである。

結合強度が上下関係を表しているのかについては、更なる考察が必要である。また、形成された意味記憶がエピソード記憶に与える影響を考えることが今後の課題として挙げられる。

文 献

- [1] 丹治 順, 吉澤修治 (編), 脳の高次機能, 朝倉書店, 2001.
- [2] W. Scoville and B. Milner, "Loss of recent memory after bilateral hippocampal lesions," *J. Neuropsychiatry Clin. Neurosci.*, vol.12, pp.103-113, 1957.
- [3] S. Corkin, D. Amaral, G. Gonzalez, K. Johnson, and B. Hyman, "H.M.'s medial temporal lobe lesion: Findings from magnetic resonance imaging," *J. Neurosci.*, vol.17, pp.3964-3979, 1997.
- [4] S. Zola-Morgan, L. Squire, and D. Amaral, "Human amnesia and the medial temporal region: Enduring memory impairment following a bilateral lesion limited to field CA1 of the hippocampus," *J. Neurosci.*, vol.6, pp.2950-2967, 1986.
- [5] B. Milner, S. Corkin, and H. Teuber, "Further analysis of the hippocampal amnesic syndrome: 14-year follow-up study of H.M.," *Neuropsychologia*, vol.6, pp.215-234, 1968.
- [6] R.C. Froemke and Y. Dan, "Spike-timing-dependent synaptic modification induced by natural spike trains," *Nature*, vol.416, pp.433-438, 2002.
- [7] 平井有三, 視覚と記憶の情報処理, 培風館, 1995.
- [8] A. Collins and M. Quillian, "Retrieval time from semantic memory," *J. Verbal Learn. Verbal Behav.*, vol.8, pp.240-247, 1969.
- [9] A. Collins and E. Loftus, "A spreading activation theory of semantic processing," *Psychological Review*, vol.82, pp.407-425, 1975.
- [10] P. Alvarez and L.R. Squire, "Memory consolidation and the medial temporal lobe: A simple network model," *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, vol.91, pp.7041-7045, 1994.
- [11] J.L. McClelland and B.L. McNaughton, "Why there are complementary learning systems in the hippocampus and neocortex: Insights from the successes and failures of connectionist models of learning and memory," *Psychological Review*, vol.102, pp.419-457, 1995.
- [12] S. Káli and P. Dayan, "Off-line replay maintains declarative memories in a model of hippocampal-neocortical interactions," *Nat. Neurosci.*, vol.7, pp.286-294, 2004.
- [13] 伊藤 真, 猪苗代盛, 黒岩丈介, 沢田康次, "海馬-連合野モデルによる時系列パターンの長期記憶形成," 信学技報, NLP2000-18, NC2000-12, 2000.
- [14] S. Zola-Morgan and L. Squire, "The primate hippocampal formation: Evidence for a time-limited role in memory storage," *Science*, vol.250, pp.288-290, 1990.
- [15] 伊藤 真, 黒岩丈介, 三宅章吾, "海馬を用いた記憶システムの神経回路網モデル," 信学論 (D-II), vol.J82-D-II, no.2, pp.276-286, Feb. 1999.
- [16] M.P. Witter, P.A. Naber, T. van Haeften, W.C. Machielsen, S.A. Rombouts, F. Barkhof, P. Scheltens, and F.H. Lopes da Silva, "Cortico-hippocampal communication by way of parallel parahippocampal-subicular pathways," *Hippocampus*, vol.10, pp.398-410, 2000.
- [17] F. Wood, B. Taylor, R. Penny, and D. Stump, "Regional cerebral blood flow response to recognition memory versus semantic classification tasks," *Brain Lang.*, vol.9, pp.113-122, 1980.
- [18] G. Dalla Barba, V. Parlato, A. Jovet, Y. Samson, and S. Pappata, "Cortical networks implicated in semantic and episodic memory: Common or unique?," *Cortex*, vol.34, pp.547-561, 1998.
- [19] H. Platel, J.-C. Barcon, B. Desgranges, F. Bernard, and F. Eustache, "Semantic and episodic memory of music are subserved by distinct neural networks," *Neuroimage*, vol.20, pp.244-256, 2003.
- [20] G. Sperling, "The information available in brief visual presentations," *Psychol. Monogr.: Gen. Appl.*, vol.74, pp.1-29, 1960.
- [21] G. Sperling, "A model for visual memory tasks,"

- Hum. Factors, vol.5, pp.19–36, 1963.
- [22] B. Scharf and L. Lefton, “Backward and forward masking as a function of stimulus and task parameters,” J. Exp. Psychol., vol.84, pp.331–338, 1970.
- [23] B.B. Murdock, Jr., “The serial position effect of free recall,” J. Exp. Psychol., vol.64, pp.482–488, 1962.
- [24] L. Postman and L. Phillips, “Short-term temporal changes in free recall,” Q.J. Exp. Psychol., vol.17, pp.132–138, 1965.
- [25] M. Glanzer and A. Cunitz, “Two storage mechanisms in free-recall,” J. Verbal Learn. Verbal Behav., vol.5, pp.351–360, 1966.

(平成 16 年 7 月 27 日受付, 17 年 4 月 26 日再受付)



小林 雄作

平 14 豊橋技科大・工・知識情報卒．平
16 同大大学院修士課程了．現在 (株)メ
イテック．記憶の神経回路に興味をもつ．



村越 一支 (正員)

平 3 千葉大・工・電気卒．平 9 同大
大学院自然科学研究科博士課程了．博士 (工
学)．同年, 東工大・大学院総合理工学研
究科・助手, 平 13 豊橋技科大・知識情報
工学系・講師, 平 17 助教授, 現在に至る．
錯視モデル構築による視覚情報処理機構の
解明, 神経スパイクの発火タイミングの解析の研究に従事．日
本神経回路学会, 日本視覚学会, 日本認知科学会, 北米神経科
学学会, 日本神経科学学会各会員．