

修 士 論 文 の 和 文 要 旨

研究科・専攻	大学院 情報理工学 学研究科 総合情報学 専攻 博士前期課程		
氏 名	山城 愛	学籍番号	1130078
論 文 題 目	ルールベース学習に基づくワーキングメモリモデルの研究		
<p>要 旨</p> <p>ヒトは日常生活で様々な目的を持って行動している。その行動を発現させる脳内過程を知るためには、ワーキングメモリのメカニズムを解明する必要がある。Hazy, Frank & O'Reilly (2007) は、1-2-AX課題という新たなワーキングメモリ課題を提案し、その課題を正しく遂行させる神経回路の数理モデルを提案した。しかしながら、彼らのモデルでは、試行錯誤学習が前提となっているため、課題遂行を可能にする神経回路の学習には著しく時間を要する。一方、ヒトは課題ルールに関する言語的な説明を受けることによって、そのルールを理解し短時間で課題を遂行することができる。このように、言語によるルールの説明を前提としたヒトのワーキングメモリは、試行錯誤学習とは異なるメカニズムが想定される。</p> <p>そこで本研究では、神経解剖学や神経生理学的知見に基づいた神経回路モデルを構築し、言語的説明による学習を前提とするルールベース学習に基づくワーキングメモリの解明を試みた。なお、ワーキングメモリ課題としては、先行研究と同様に1-2-AX課題を想定してモデル化を行った。本研究では、卒業研究において考案した大脳皮質-基底核-視床ループの離散時間モデルを連続時間モデルに変更すると同時に、線条体ニューロンに特徴的な双安定静止膜電位と、Dingら(2008)によって示唆された視床から線条体への短期抑圧性を考慮に入れてモデル化を図った。構築したモデルを用いて1-2-AX課題の遂行のシミュレーションを実行し、系列呈示刺激に応じて呈示された情報の保持と消去が適切に行われていることを示すニューロン活動を再現することができた。また、実際にヒトが言語によるルール説明を受けることで1-2-AX課題を適切に遂行できるか否かを心理実験によって調べた。その結果、多くの被験者は適切に課題を遂行できることが確認されたが、少数の被験者において見られる誤った反応が、構築したワーキングメモリモデルにおける一部の結線削除することで再現できた。</p> <p>本研究によって、1-2-AX 課題の遂行に関するワーキングメモリの働きを再現する数理モデルを構築することができた。従来の試行錯誤学習では、関与するニューロン間のあらゆるシナプス結合の学習を想定しているのに対して、ルールベース学習では、生得的に備わっているいくつかの階層の異なる基本ループ構造の中から適切な階層のループ構造を選択することによって課題に合わせてワーキングメモリが再編されることが示唆された。このループ構造の選択による学習という新しい概念は、行動学習に関する認知神経科学に一石を投じるものと考えられる。</p>			

平成 24 年度 修士論文

ルールベース学習を用いた
ワーキングメモリモデルの研究

電気通信大学大学院 情報理工学研究科
総合情報学専攻 メディア情報学コース

1130078 山城 愛

指導教員 西野 哲朗 教授

提出 平成 25 年 1 月 31 日

目次

第1章 序論	3
1.1 はじめに	3
1.2 研究の目的	3
1.3 本論の構成	4
第2章 ワーキングメモリ	5
2.1 ワーキングメモリの定義	5
2.2 Baddeley のモデル	7
2.2.1 Goldman-Rakic のモデル	7
2.2.2 その他のモデル	8
2.3 ワーキングメモリ課題	8
2.3.1 検査課題	8
2.3.2 ストループ課題	9
2.3.3 ウィスコンシンカード分類課題	10
2.3.4 N-Back 課題	11
2.3.5 その他の課題	11
第3章 脳の構造	13
3.1 ニューロン	13
3.1.1 ニューロンの構造	13
3.1.2 シナプス	14
3.1.3 静止膜電位の双安定性	17
3.2 脳の区分	17
3.3 大脳皮質の構造	18
3.4 視床	19
3.5 大脳基底核の構造	19
3.6 大脳皮質-基底核-視床ループ構造	20
第4章 1-2-AX 課題モデル	22
4.1 1-2-AX 課題	22
4.2 提案モデル	23
4.2.1 ニューロンの数理モデル	24
4.2.2 大脳皮質-基底核-視床のループモデル	25

4.2.3	学習	26
第5章	計算機シミュレーション	33
5.1	シミュレーション概要	33
5.1.1	Outer loop 1, 2 の切り替え	33
5.1.2	Closed loop 1A	34
5.1.3	任意のシンボル列に対するネットワークの出力	36
第6章	1-2-AX 課題を用いた心理実験	38
6.1	被験者	38
6.2	実験目的	38
6.3	実験方法	38
6.3.1	実験環境	39
6.3.2	1-2-AX 課題	40
6.3.3	逆転課題	41
6.4	結果	42
6.4.1	実験 1	42
6.4.2	実験 2	43
第7章	考察と結論	52
7.1	考察	52
7.1.1	提案モデルについて	52
7.1.2	提案モデルと心理実験結果の比較	54
7.2	結論	59

第1章

序論

1.1 はじめに

近年, 様々な研究分野からのアプローチから, ヒト脳の構造や機能に関する多くの知見が得られている. 例えば, 電気生理学の分野においては, 微小電極を用いることで脳の神経細胞 (ニューロン) の活動の性質が明らかにされてきているし, 解剖学の分野では, 脳スライス標本を用いることで種々の細胞間の接続や全体的な脳の構造が明らかにされてきている. これらの知見は, 脳をミクロ的に捉えた知見といえる. 他方, 心理学や生理学の分野においては, 脳によって引き起こされるヒトの行動, 神経活動, 認識能力や記憶能力といった脳をマクロ的に捉えた研究成果が得られている.

しかし, このようなミクロとマクロの研究成果を直接結び付けて脳の仕組みを考えることは非常に困難である. そこで, ミクロな研究成果を基に脳の数理モデルを構築し, その挙動をマクロな研究成果を基にして理論的に解析することによって, 脳のミクロとマクロの研究成果を結びつけるという研究手法が考案された. これが, 理論的神経科学からの脳へのアプローチとして現在注目されている研究分野である.

その一つの成功例として, Alexandar & Crutcher(1990) や DeLong(1990) の大脳皮質-基底核-視床ループモデルがある. 彼らは, 解剖学的に確認されている大脳皮質, 大脳基底核, 視床の繊維結合からより重要な結合を抽出してそのループモデルを提案した. このモデルから導かれる仮説は, パーキンソン病やハンチントン病の実際の臨床所見を非常によく説明するものであることが明らかになった.

1.2 研究の目的

脳のマクロ的研究の一つに, ワーキングメモリの研究がある.

ワーキングメモリとは, 作動記憶または作業記憶と呼ばれることもあり, 名の通り, 記憶の一種である. しかし, 保持した情報を用いて判断を行い, 不要になった情

報は破棄するといった処理がその概念に含まれるという点が長期記憶や短期記憶と大きく異なる点である。

例えば、車の運転をする際に、まず目的地を設定する。そしてそこに至るまでのルートを作成し、常に道路状態や他の車やヒトの動きに注意しながら目的地まで運転する。このとき、目的地までのルート情報は、通過したルートの情報は覚えておく必要がないため忘却し、ルートから外れてしまった場合は、新たにルートの作成が行われる。この場合脳では、目的を遂行するために必要な情報を保持し、その情報を使用して状況判断し、情報の破棄などの操作が行われていると考えられる。このようにヒトは日々、様々な目的を設定し、その達成に向け動いている。

このワーキングメモリを脳の解剖学・生理学的知見に基づき数理モデル化する研究が行われている。Frank & O'Reilly は、1-2-AX 課題 という新たなワーキングメモリ課題を提案し、その課題を含めた複数のワーキングメモリ課題を遂行できる数理モデルを提案した [1]。しかし、彼らのモデルでは、モデルの学習として試行錯誤学習が前提となっている。

言語を習得したヒトは、課題を行う際に、言葉でその課題をルールを説明されれば、数回の試行でその課題を遂行することができる。そのため、ルールの把握を前提としていない試行錯誤の学習では、この過程をモデル化することは困難である。

そこで本研究では、言語での説明による学習を前提としたルールベース学習を用いたワーキングメモリのモデル化を試みる。また、モデル構造には、卒業研究時に考案した大脳皮質-基底核-視床ループ構造を用いたワーキングメモリのモデル [2] をルールベース学習が行えるように改良したモデルを使用する。なお、課題として、1-2-AX 課題を用いてモデル化を行う。また、1-2-AX 課題 [1] を実際にヒトが行った場合に課題の正答率や反応時間はどのように変化するかを計測し、この測定結果を用いて構築したモデルの検討を行う。

本研究の一部は、平成 24 年 12 月 8 日に開催された第 10 回日本ワーキングメモリ学会大会にて発表した [3]。

1.3 本論の構成

本論文は7つの章で構成されている。まず、第2章で本研究のテーマであるワーキングメモリについて、その定義と代表的なモデルについての説明を行う。第3章では、ヒトの脳を構成するニューロンの構造と特定のニューロンで見られる双安定な静止膜電位の性質について説明する。また、大脳皮質と大脳基底核それぞれの特性を説明し、本研究のワーキングメモリモデルのベースとなる大脳皮質-基底核ループを説明する。第4章では、本研究におけるワーキングメモリモデルの提案を行い、その振る舞いの説明を行う。ここで提案したモデルを計算機上で実現し、計算機実験を行った結果と分析を第5章で行う。第6章では、1-2-AX 課題を用いた心理実験とその結果を示す。最後に第7章で、本提案モデルに対する考察と本研究で得られた結果についてまとめる。

第2章

ワーキングメモリ

本章ではワーキングメモリについての定義付けをし、本研究におけるワーキングメモリの機能の考え方を述べる。そして最後にワーキングメモリ課題について述べる。

2.1 ワーキングメモリの定義

ワーキングメモリは記憶の分類から生まれた概念であるが、ただ単に情報を貯蔵するだけでなく、目的のためにその情報を処理する機能が付与された記憶システムである [4]。この情報を処理する機能を担っている部分系を中央実行系という。本研究では、ワーキングメモリを「目的を遂行するために情報を一次的に保持し操作するための構造およびその働き」と定義する。

記憶

ワーキングメモリは記憶が区分されていく中で生まれた概念である。ワーキングメモリを含めて記憶を分類したものが図 2.1 である。図 2.1 中に示した各用語の意味を以下に述べる。

- 短期記憶
一次的に経験した事象の表象が注意を向けられていることで意識内に保持されている状態またはその内容であり、容量制限がある。
- 長期記憶
学習の結果、注意を向けなくても長期的に保持されている記憶で、知識、認識、運動の基盤を与える。記憶の保持が安定していることと、保持されている情報量に制限がないことが特徴とされている。意識化できる記憶と、半ば自動的で意識化の難しい記憶に分けられる。前者は陳述記憶といい、後者は手続き記憶という。

- 手続き記憶

身体で覚えるタイプの記憶で、動作手順を意識しなくても思い出せるという特徴がある。例としては、自転車の乗り方やクルマの運転などが挙げられる。
- 陳述記憶

頭で覚えるタイプの記憶で、覚えている内容を言葉や図形で意識的に表現できることが特徴である。陳述記憶は、さらにエピソード記憶と意味記憶に分けられる。これらの記憶も言語的記憶(言葉で記銘・再認できる記憶)と非言語的記憶(想起・再認できる図形やパターンに関する記憶)の二種がある。

 - － エピソード記憶(出来事記憶)

その人の人生でただ一度限り生じたような出来事に関する記憶で、「～を覚えていますか」という質問に答えられるような記憶。
 - － 意味記憶

反復学習により獲得した知識で、「～を知っていますか」という質問に答えられるような記憶。

図2.1からわかるように、ワーキングメモリは短期記憶、長期記憶のそれぞれとかわりを持つ。短期記憶では、入力された情報が一時的に無意識的に保持され、その情報がリハーサルにより長期記憶に転送される。しかし、ワーキングメモリではそれがアクティブに保持され、必要がなくなれば消去される。そのため短期記憶の概念はワーキングメモリの枠組に吸収される。長期記憶では、意識的、意図的に想起された情報がアクティブに保持される。このことによりワーキングメモリは長期記憶の一部が活性化したものとも見ることもできる。ここで言う「アクティブ」とは利用可能な状態を指す。またリハーサルとは、情報を反復して想起することを指す。

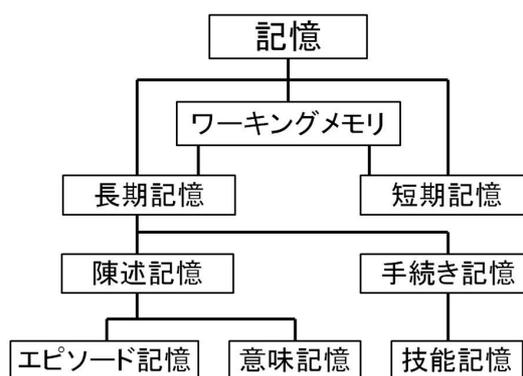


図 2.1: 記憶の分類 (一部改編)[5].

2.2 Baddeley のモデル

ワーキングメモリの代表的な概念モデルとして, Baddeley& Hitch のモデルとして知られている3コンポーネントモデル [6] が挙げられる. このモデルは2000年に Baddeley により4コンポーネントモデル [7] に拡張された. ここでは, この4コンポーネントモデルを紹介する.

図2.2に示したように, 4コンポーネントモデルは中央実行系の制御の下に, 音韻ループ, 視空間スケッチパッド, エピソードバッファの3つのサブシステムで構成されている. 中央実行系は, サブシステムからの情報の統合とサブシステムの制御, 注意による情報の抽出を行う. 音韻ループは, 音声情報を格納する. 視空間スケッチパッドは, 形, 色, 場所, 物体の速さに関する情報である視覚イメージや空間情報を格納する. エピソードバッファは, 音声と視空間情報を統合した出来事に関する表象を保持し, さらに長期記憶における意味情報や音楽情報などへのアクセスを担当する.

この3つのサブシステムはいずれも流動的なバッファとされ, そのもとにそれぞれのサブシステムに対応した長期記憶との相互作用を想定している.

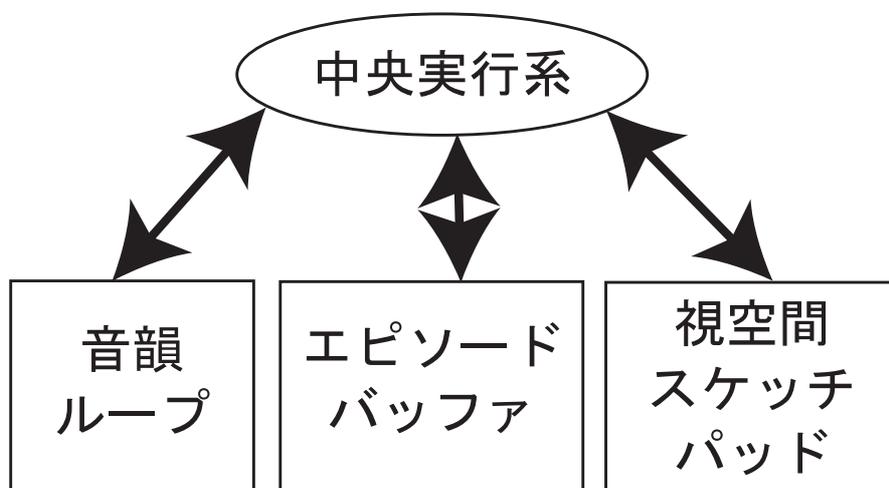


図 2.2: Baddeley の4コンポーネントモデル (一部改編)[4].

2.2.1 Goldman-Rakic のモデル

Goldman-Rakic はワーキングメモリを「認知に必要な働きであり, 決定や判断を下したり, 反応を生じるために, 情報を更新したり, 情報を長期記憶から取り出

したり、次々に入力する情報を統合する機構である」と説明した [8]. さらに前頭連合野外側部はワーキングメモリの実行に関わるが、処理される情報の種類に応じて異なるワーキングメモリが存在するとした。これは情報ドメイン特異的ワーキングメモリと呼ばれる [9].

2.2.2 その他のモデル

「ワーキングメモリは、外界からの入力やある活動の遂行により活性化（意識化）された状態にある長期記憶である」と考える研究者もいる。また、Joaquin Fuster はワーキングメモリと同様の意味で ”active memory” という表現を用いた [10].

Ericsson & Kintsch は ”Long-Term Working Memory(LT-WM)” という概念を用いており、「利用しやすい形で長期記憶に情報を貯蔵する手法を開発することによって、ワーキングメモリ容量を拡張するための領域特定（domain-specific）な技能を習得する」と説明している [11].

2.3 ワーキングメモリ課題

ワーキングメモリ課題とは、ワーキングメモリの機能や振る舞いを観察するために用いられる課題の総称である。現在までに、その実験目的に応じて多様なワーキングメモリ課題が作成・使用されている。同じ課題を用いる場合でも、着目する機能をより正確に計測するために、呈示刺激、レスポンス方法、被験者環境などを変化させることも行われる。

2.3.1 検査課題

脳損傷をもつ患者に対してさまざまな検査課題を課すことで、損傷箇所が与える影響を調べる研究は数多くなされてきた。現在は課題遂行時における脳の活動部位の様子を PET や fMRI で詳細に観察することが可能になっているため、課題遂行中のワーキングメモリと脳の活動部位との対応付けも数多くなされている。具体的な例として、前頭葉症状に特有な障害の形式として以下の5種が挙げられている [12].

- 概念またはセットの転換障害
「分類」が必要な課題において、特定の分類方法に固執する傾向がある。
- ステレオタイプの抑制の障害
習慣的な行為や認知傾向を抑制できない。
- 複数の情報の組織化の障害
事象の時間的順序を記憶・更新・検索する際に障害が発生する。

- 流暢性の障害
「s」から始まる英単語をできるだけ多く書いたり,異なる図形をできるだけ多く書いたりするような課題でその流暢性に障害が発生する.
- 言語による行為の制御の障害
実験者のする行為とは異なる行為をしなければならないことを説明できるにもかかわらず,実験者のまねをしてしまう.

2.3.2 ストロープ課題

ストロープ課題は色と文字を利用した課題であり,以下のような3段階で行われる.最初に,色の名称を表す文字(例えば「黄」や「赤」など)が次々に呈示されるので,その文字を被験者に読んでもらう.その次に,呈示される色の名称を答えてもらう.最後に,色の名称を表す文字がその色の名称とは異なる色で(例えば「青」という文字が「黄」色で書かれて)呈示されるので,文字ではなく色を答えてもらう.遂行例を図2.3に示す.

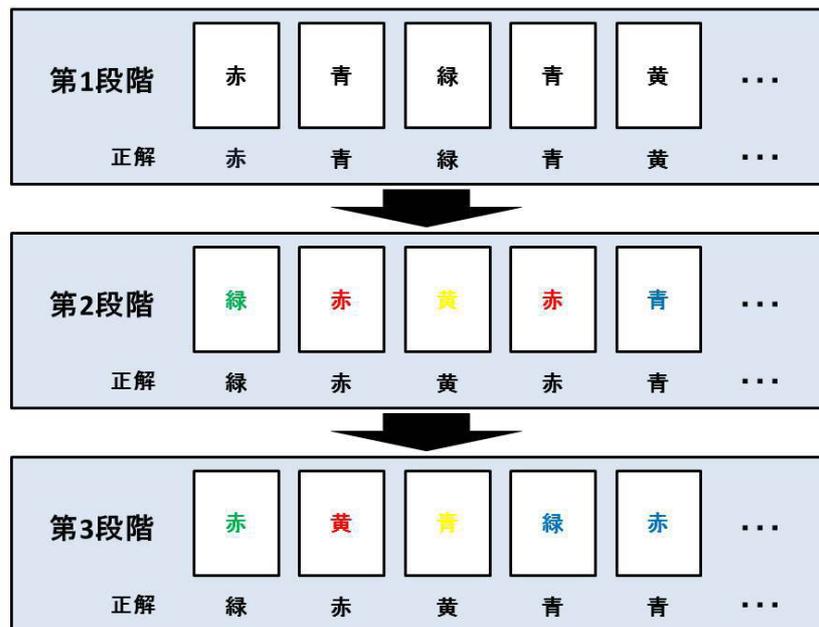


図 2.3: stroop 課題の実施例.

この課題で被験者は自然と文字の方へ注意が向き,反応してしまうので,それを抑制して色を答えなければならない.呈示された文字や色を単純に答える場合と比べて,第3段階の文字への反応を抑制して色を解答する場合は,解答の際にかかる反応時間が有意に長くなる傾向がある.これはストロープ効果と呼ばれる.

2.3.3 ウィスコンシンカード分類課題

ウィスコンシンカード分類課題は、あるルールに従って128枚のカードを被験者に正しく分類させる課題である。課題遂行の様子を図2.4に示す。各々のカードには、4種類の図形(丸印, 星印, 十字, 三角), 4種類の色(赤, 緑, 黄, 青)が組み合わさった計16種類の図柄が1個~4個描かれている。

はじめに、被験者の前にはサンプルカードとして4枚のカードが置かれる。被験者は、手前に積み重ねられたカードを上から順に1枚ずつ取り、その図柄や数を確認する。被験者はカードに描かれた図形, 色, 数を基にして独自の分類方法を考え、それによってカードを分類していく。実験従事者は自分自身が考えた分類方法に従って、被験者の解答(カードの分類)に対して結果(「正解」または「不正解」)を伝える。

よって、この課題で被験者は実験従事者から伝えられる結果(「正解」または「不正解」)を参考にしながら、実験従事者の分類方法を予想して解答をしなければならない。また、被験者が10回連続で正解すると、実験従事者は被験者に伝えることなく分類方法を変更する。すると、結果は「不正解」になるため、被験者は実験従事者の分類方法を再度予想しながら課題を遂行しなければならない。

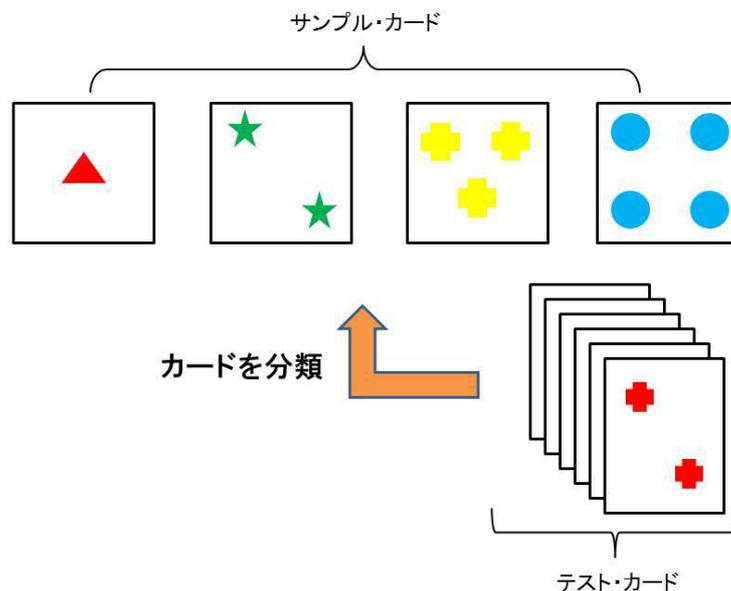


図 2.4: ウィスコンシンカード分類課題の様子(一部改編)[13].

このように、ウィスコンシンカード分類課題で被験者は実験従事者の結果をヒントにして、試行錯誤しながら分類方法の更新, 処理, 破棄などを行わなければならないため、ワーキングメモリに大きく関与すると考えられている。

2.3.4 N-Back 課題

N-Back 課題はワーキングメモリ課題として広く使われている。N に当てはまる非負整数の値によって、課題の内容が異なり、例えば、0-Back 課題の場合はあらかじめターゲットとなる数字を被験者に教えておき、その数字が呈示された時にボタンを押すという課題である。また、N の値が 1 以上の場合は、N 個前に呈示された数字の値が現在呈示されている数字の値と同じであればボタンを押す、という課題である。どちらの場合も、比較対象の数字の値が異なる場合はボタンを押してはいけない。この課題は呈示された数字の順序系列を保持し、適宜消去も行う必要がある。そのため、N の値を大きくするほど記憶の負荷が増すことになり、その難易度も上がると考えられる。課題遂行の具体例として、2-Back 課題の実施例を図 2.5 に示す。

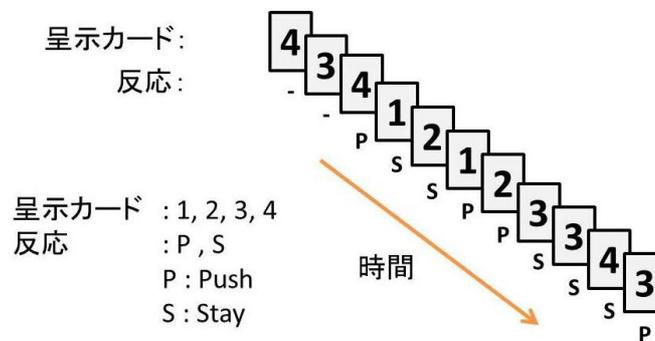


図 2.5: 2-Back 課題の実施例.

図中の反応欄において、ボタンを押すべきタイミングは「P(ush)」, 反対に押ししてはいけないタイミングは「S(tay)」で示されている。「P」の上方にあるカードがその 2 つ前のカードと同じであることから、図中の反応の正しさを確認することができる。なお、最初に呈示された二枚のカードに対しては反応を定義しない。

2.3.5 その他の課題

その他のワーキングメモリ課題として、ここでは Sternberg task, CPT について説明する。

Sternberg task とは、事前に呈示した一連の刺激 (数字やアルファベット文字などの) を記憶し、呈示間隔の後、探索段階において呈示される刺激が事前に記憶した刺激の中に含まれているか否かを問う、走査型の課題である。

CPT (持続処理課題 : Continuous Performance Test) では、一定時間の間、持続的に課題遂行を続けることが要求される。その中でも、CPT-X 課題はターゲット刺激となる“X”が呈示された場合のみ反応し、その他の刺激に対して反応してはい

けない。また、CPT-AX 課題とは、連続的に呈示される文字の中で”A”の後に”X”が呈示された場合のみ反応をする課題である。

本研究でを使用した 1-2-AX 課題は、CPT の一種である。1-2-AX 課題の詳細については 4.1 で記述する。

第3章

脳の構造

本研究では、脳神経科学の知見に基づきワーキングメモリのネットワークモデルを構築する。そこで本章では、脳内の情報を伝達するニューロン、ワーキングメモリの機能を可能にしていると考えられる大脳皮質と大脳基底核の構造及びそれらの神経核ニューロンからなるループ構造について説明する。

3.1 ニューロン

ニューロンとは、脳内に膨大な数存在する神経細胞であり、それらが互いに接続することで巨大な神経回路網を構成している。この神経回路網上で、ニューロンによる信号の伝達が行われることで、脳内の情報処理が行われる。

3.1.1 ニューロンの構造

ニューロンの模式図を図 3.1 に示す。

図 3.1 に示すように、ニューロンは細胞体、軸索、樹状突起の3つの部位からなる。細胞体から伸びている複数の短い突起が樹状突起と呼ばれ、さらにこの樹状突起とは異なる1本の長い突起は軸索と呼ばれる。細胞体と樹状突起は、他のニューロンの末端と結合しており、この結合部分をシナプス（詳細は次節で述べる）という。ニューロン間の信号の伝達は、このシナプスを介して行われる。このとき伝達される信号によって生じる細胞体内の電位を活動電位という。活動電位が生じていない状態にあるニューロンは、静止状態であるといい、活動電位が生じている状態にあるニューロンは発火状態であるという。また、信号を出力するニューロンをシナプス前 (Pre) ニューロン、その出力を受けるニューロンをシナプス後 (Post) ニューロンという。

ニューロンには、興奮性ニューロンと抑制性ニューロンの2種類が存在する。発火した興奮性ニューロンからの出力信号を受け取ったニューロンは、発火が促進さ

れる。対して、発火した抑制性ニューロンからの出力信号を受け取ったニューロンは、発火が抑制される [14].

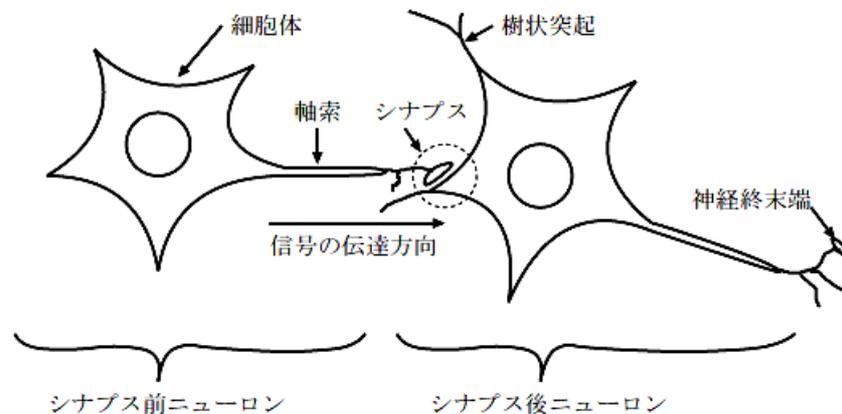


図 3.1: ニューロンの模式図.

3.1.2 シナプス

シナプスはニューロン同士が接続する箇所であり、シナプス前ニューロンからシナプス後ニューロンへの信号の受け渡しを行う役割を担う。ニューロンの細胞体と樹状突起は、他のニューロンの軸索の末端にある神経終末端とシナプスを介して結合している。シナプスの構造を図 3.2 に示す。

細胞体から出力された信号は、活動電位としてニューロンの軸索の末端に伝達される。しかし、神経終末端とシナプス後ニューロンとの間に 10~100nm のシナプス間隙と呼ばれる溝があるため、活動電位がニューロンの軸索の末端からシナプス後ニューロンに直接伝達されることはない。

このような構造をもったシナプスにおける情報伝達は、以下のように行われる [15].

1. 神経インパルスの伝播 (図 3.2) : 細胞体の電位がある閾値を超えると活動電位 (神経インパルス) が発生する。活動電位は軸索上を伝播し、シナプス終末に到達する。
2. シナプス終末部でのイオンチャネル開閉 : 活動電位によりシナプス終末部が脱分極する。その結果、シナプス終末部の電位依存性カルシウムチャネルが開き、カルシウムイオン Ca^{2+} の流入が起こる。
3. シナプス小胞の融合、伝達物質の放出 : Ca^{2+} が流入すると、神経伝達物質を含んだシナプス小胞がシナプス終末部に向かって動き出し、小胞の中に入っていた伝達物質がシナプス間隙に放出される。

4. 伝達物質の拡散：放出された伝達物質が拡散し、シナプス後膜に達する.
5. 伝達物質の受容体への結合：シナプス後膜に達した伝達物質は、膜状の受容体 (Receptor) と結合する.
6. イオンチャネルの開閉：受容体に伝達物質が結合すると、薬物作動性イオンチャネルの開閉が制御される. ここで、チャネル制御のメカニズムは大きく2種類に分けられる. 伝達物質受容後、直接チャネルの開閉が制御される「イオンチャネル直結型」と、伝達物質受容後、細胞内伝達物質 (セカンドメッセンジャー) を細胞内に放出し、チャネル開閉を制御する「代謝調節型」がある. チャネル開閉の結果、シナプス後細胞にはシナプス後電位が発生する. 生じた脱分極電位は興奮性シナプス後電位 (excitatory postsynaptic potential : EPSP), 過分極電位は抑制性シナプス後電位 (inhibitory postsynaptic potential : IPSP) と呼ばれる.
7. 伝達物質の回収, シナプス小胞の再利用：シナプス前膜やグリア細胞などには、放出された伝達物質をすみやかに細胞内に取り込み、神経伝達を終了させるトランスポーターが存在している. また、シナプス間隙には伝達物質を分解する酵素も存在する. 回収された伝達物質は、伝達物質として再利用される.

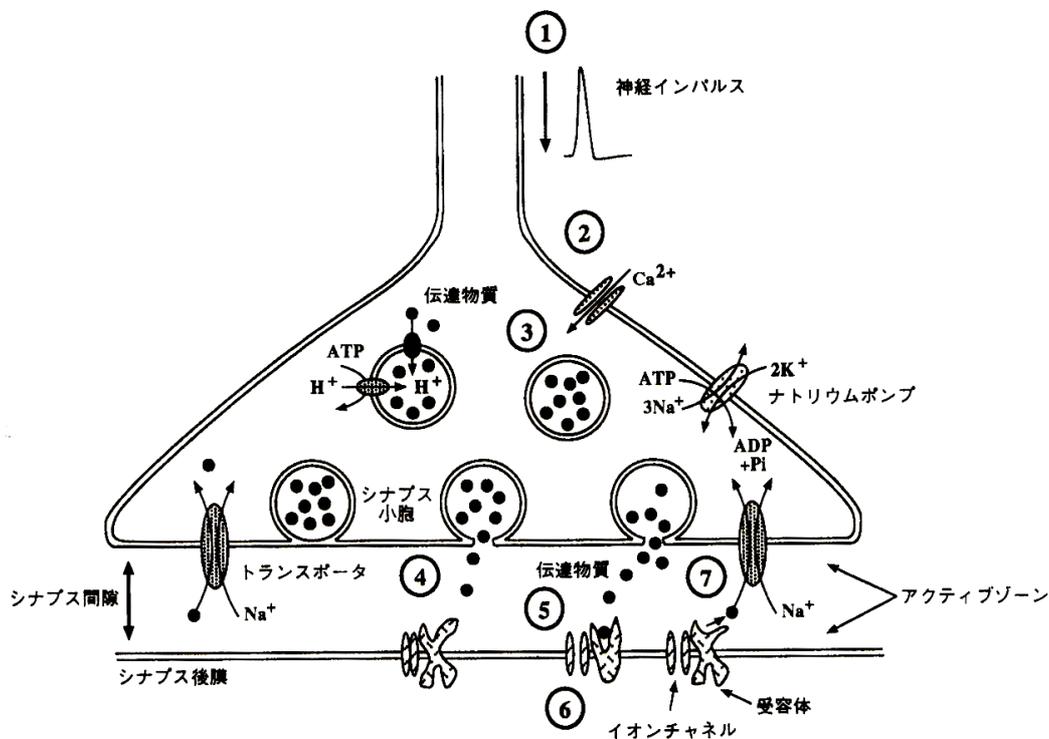


図 3.2: シナプスの構造 [16]

ヘッブ則

シナプス前ニューロンの伝える信号がシナプス後ニューロンを興奮させたときにそのシナプスが強化されるというヘッブが唱えた仮説. この仮説は興奮性シナプスで確認されている [14].

長期増強と長期抑圧

ある特定のシナプスを刺激し、同時に脱分極を与えるとそのシナプスの結合が強化される. これを長期増強 (long-term potentiation : LTP) という. 逆に、シナプスを刺激し、同時に過分極を与えると、そのシナプスの結合が消去される. これを長期抑圧 (long-term depression : LTD) という. このように、短期間の神経活動がそのシナプスの結合に長期的な影響を与える現象は、シナプス可塑性 (Plasticity) と呼ばれており、記憶と学習の分子基盤であることが示唆されている [17].

AMPA 受容体と NMDA 受容体

海馬の CA1 と呼ばれる領域における興奮性シナプスは、LTP のシナプス可塑性現象においてもっとも研究されている部位である. これまでの研究から、LTP の発現にはシナプス後細胞上の α -amino-3-hydroxy-5-methyl-4-isoxazole propionate (AMPA) 型グルタミン酸受容体 (AMPA) の反応性が増大することが重要であり、一方 LTP の誘導にはシナプス後部の *N*-methyl-D-aspartate (NMDA) 型グルタミン酸受容体 (NMDAR) が必須であることが明らかとなりつつある.

AMPA は一価の陽イオンに対して透過性をもち、通常のシナプス伝達を担っている. 一方、NMDAR は上で述べたように可塑性の誘導を担っており、静止膜電位付近では Mg^{2+} による阻害を受けており機能しないが、高頻度刺激などにより多くのグルタミン酸が放出されシナプス後細胞が脱分極すると、 Mg^{2+} による阻害がはずれ活性化される. その結果、シナプス後細胞内への Ca^{2+} の流入が起こり、タンパク質リン酸化酵素をはじめとするシグナル伝達系を活性化させ、最終的に AMPA を介したシナプス伝達効率を増大させる (図 3.3).

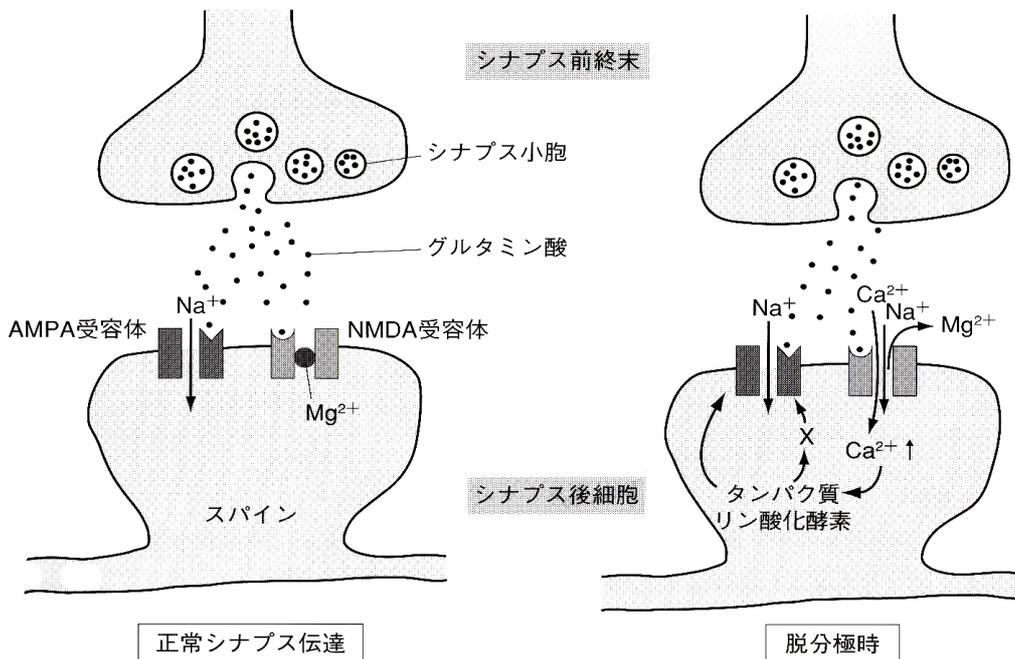


図 3.3: 海馬 CA1 領域における興奮性シナプス伝達と LTP の模式図 [14].

3.1.3 静止膜電位の双安定性

通常、ニューロンの静止膜電位は一つだけである。しかし、二つの安定した静止膜電位を持つニューロンが存在する。静止状態における二つの安定した膜電位を双安定な静止電位という。二つの安定した膜電位のうち、低い膜電位を持つ状態を Down state, 高い状態を Up state という。ニューロンが Up state にある場合は、他のニューロンからの興奮性の信号入力によって発火することができるが、Down state にある場合にはまったく発火しないか、きわめて低い頻度でしか発火しない。そのため、ニューロンが Up state にあるか Down state にあるかは脳内の情報処理に大きな影響を与えうる [18]。本研究ではこの Up state と Down state の遷移をゲート調節といい、ゲート調節に関する信号の入力をゲート入力という。

静止膜電位に双安定性を持つニューロンとして、線条体の出力細胞である Medium spiny neuron(MSN) が知られている。MSN は、多数のニューロンから同期した入力を受けるときに Down state から Up state に遷移するという実験結果がある [19]。

3.2 脳の区分

脳と延髄を合せて、「中枢神経系」と呼ぶ。脊柱(背骨)の中を通る脊髄が、頭に入ったところにあるのが延髄であり、そこから橋、中脳、間脳と続き、延髄から間脳までを脳幹と総称する。間脳の先の巨大な部位が大脳で、左右2つの半球に分かれ

ている。大脳の下、背側に張り出すように小脳が存在している。外側からは見えな
い大脳の中の方に、間脳を囲んで輪のように広がる部分が大脳辺縁系である。さら
に奥には大脳基底核がある。

3.3 大脳皮質の構造

大脳皮質は、神経細胞の細胞体が密に存在する灰白質で、シート状に大脳を覆っ
ている。大脳皮質では多数のしわがみられ、しわの隆起部は脳回、陥没部は脳溝と
称される。前頭葉、頭頂葉、側頭葉、後頭葉の四葉と島に区分される [14]。この順に
表面積は狭くなる。

大脳皮質は、機能により運動野、感覚野、連合野に区分される。前頭葉と頭頂葉を
区分しているのは中心溝と呼ばれる深い脳溝である。この中心溝の前方にあるの
が、運動の指令を出す運動領野である。運動領野は第一次運動野(運動野)と運動連
合野から構成され、後者はさらに運動前野と運動補足野に分けられている。運動連
合野は、運動が円滑に行われるように情報をまとめてプログラムして、運動野に送
る。これら3つの領域は互いに線維連絡をもっており、それぞれが下位運動中枢に
運動指令を送っている。

本研究では、抽象的な思考に関係する領域である前頭前野(prefrontal cortex:PFC)
と、抽象的な運動の指令に関係する補足運動野(supplementary motor area:SMA)
に着目してモデル化を図る。図3.4の赤い線で囲まれた領域が前頭葉、黄色の領域
が前頭前野、青の領域が補足運動野である。

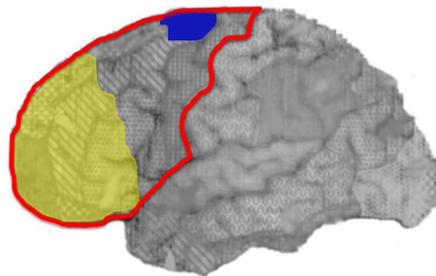


図 3.4: 前頭前野と補足運動野 [4].

3.4 視床

大脳皮質と大脳基底核のループ構造を考える上で重要な役割を担うのが視床 (thalamus) である。視床は種々の感覚伝導路の中継地であり、大脳皮質と線条体に興奮性入力を行う。視床から線条体の MSN への連続した投射に対しては短期抑圧が生じる [21]。解剖学的には間脳の一部であるが、大脳皮質と大脳基底核のループ構造は、視床があることにより構築されるため、大脳皮質と大脳基底核のループ構造を取り上げる場合は、暗黙のうちに視床も含まれている。大脳皮質と大脳基底核ループ構造の中での視床の役割は 3.6 節で述べる。

3.5 大脳基底核の構造

大脳基底核は、皮質下の神経核群の総称であり、線条体 (striatum)、淡蒼球、黒質、視床下核 (subthalamic nucleus:STN) から構成される¹。大脳基底核と視床の脳内での位置を図 3.5 に表す。

線条体 尾状核と被殻からなる。大脳皮質広域と黒質緻密部から入力を受け、淡蒼球と黒質網様部に対し抑制性出力を行う。また、線条体に存在する MSN は双安定な静止膜電位を持ち、大脳皮質からの入力を遮断するとゲート調節が見られないため、ゲート調節には大脳皮質が関与していると考えられている [18]。

淡蒼球 淡蒼球内節 (internal segment of globus pallidus:GPi)、淡蒼球外節 (external segment of globus pallidus:GPe) からなる。線条体からの抑制性入力を受け、淡蒼内節は視床、淡蒼球外節は視床下核へ抑制性出力を行う。淡蒼球は自家放電を行い、抑制性出力を受けなければ常に発火している [14]。

黒質 黒質緻密部 (substantia nigra pars compacta:SNc)、黒質網様部 (substantia nigra pars reticulata:SNr) からなる。黒質網様部は、随意運動や動機付けに関与するドーパミンにより線条体へ出力を行う [22]。このドーパミンが、大脳皮質と大脳基底核ループでの学習に関与していると考えられている。黒質緻密部は、視床に対し抑制性出力を行う。黒質網様部は自家放電を行い、抑制性出力を受けなければ常に発火している [14]。

視床下核 淡蒼球外節から抑制性入力を受け、淡蒼球内節と黒質網様部に対し興奮性出力を行う。

¹解剖学的には、視床下核と黒質は大脳基底核に含まれない。しかし、これらは線条体や淡蒼球と強い結合を有し、大脳基底核と共同して体制運動の調節を行っている。このため、視床下核と黒質も大脳基底核として扱われるのが一般的である [14]。

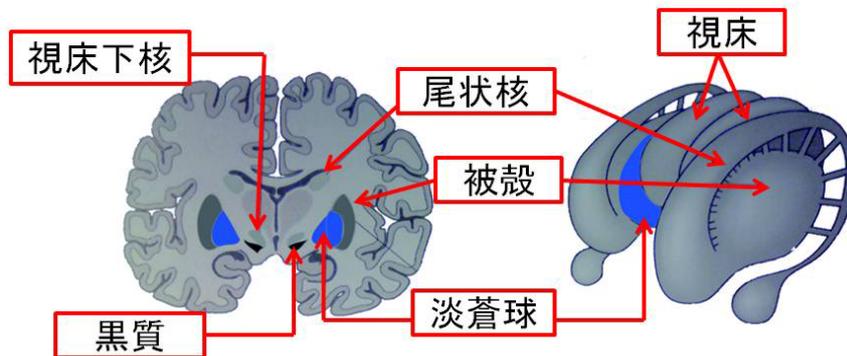


図 3.5: 大脳基底核と視床の各部位 (一部改編)[20].

3.6 大脳皮質-基底核-視床ループ構造

大脳皮質-基底核-視床のループ構造は、図 3.6 のように表せる。図 3.6 に示すように、線条体は大脳皮質から大脳基底核への入力部であり、黒質からはドーパミンを伝達物質とする報酬信号を受け学習の制御に関わっていると考えられている。一方、線条体の出力は淡蒼球や黒質の細胞の活動を抑制する。淡蒼球は、視床に投射し視床細胞を抑制する。このように線条体の活動は淡蒼球を中継する二重の抑制(脱抑制)によって視床の活動を昂進させることが知られている。また、淡蒼球は視床下核の細胞を抑制すると同時に、視床下核から興奮性のフィードバックを受ける。この中で、線条体から淡蒼球の内節部に出力するルート是直接路(Direct pathway)、線条体から淡蒼球の外節部と視床下核を介して淡蒼球の内節部に出力するルートを間接路(Indirect pathway)と呼ぶ。視床は大脳皮質へ投射する中継核であり、前頭葉皮質と大脳基底核は視床を介して閉ループ回路を形成している。本研究では、動機づけを行うと考えられるドーパミンが常に放出されていると仮定するため、黒質を除いたループ構造に基づいて数理モデルの構築を図る。

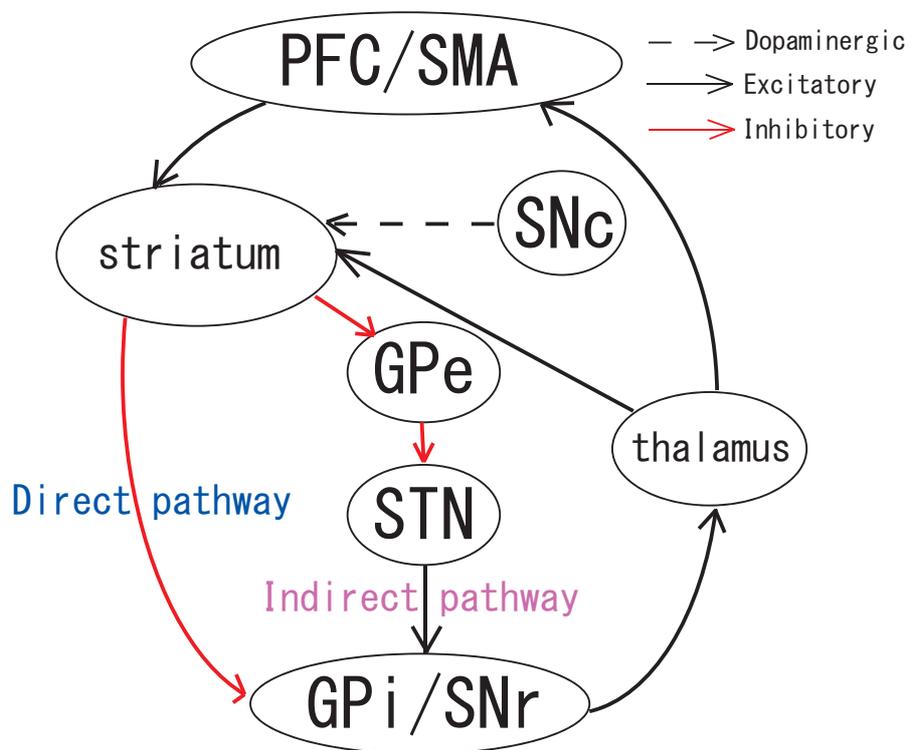


図 3.6: 大脳皮質と大脳基底核のループ構造.

第4章

1-2-AX 課題モデル

本章では、ワーキングメモリを使用する課題の一つである 1-2-AX 課題と、その課題を遂行する本提案モデルを紹介する。

4.1 1-2-AX 課題

1-2-AX 課題とは、O'Reilly ら [1] により提案されたある条件下で正しい順序を認識することを確認する課題である。課題の遂行例を図 4.1 に示す。

なお、本研究では、簡易化のため O'Reilly ら [1] が使用した 1-2-AX 課題からディストラクタである C と Z を除いきモデル化を行った。

本研究で使用した 1-2-AX 課題のルールは以下の通りである。

- 1, 2, A, B, X, Y のシンボルがランダムに呈示される。
- シンボル 1 が呈示された後からシンボル 2 が呈示される間に、シンボル A が呈示された直後にシンボル X が呈示されたとき、またはシンボル 2 が呈示された後からシンボル 1 が呈示される間に、シンボル B が呈示された直後にシンボル Y が呈示されたときを正しい順序とし、シンボル X や Y に対して右シフトキー (R) を押す。
- それ以外のシンボルが呈示されたときには、左シフトキー (L) を押す。

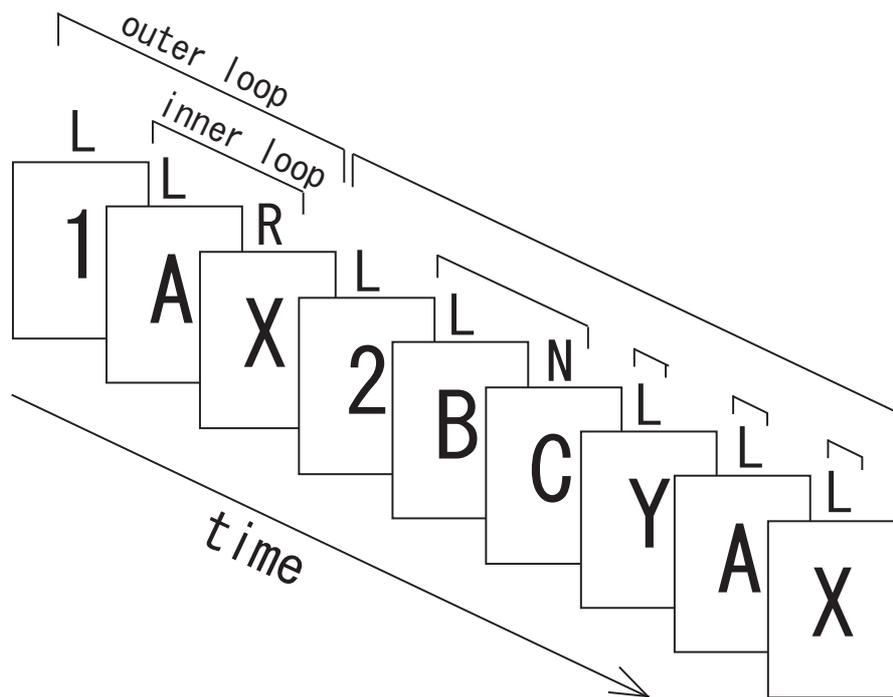


図 4.1: 1-2-AX 課題 (一部改編) [1].

図 4.1 中の Outer loop と Inner loop は以下のように定義される.

- Outer loop
数字カード (1 または 2) が呈示された後から異なる数字カードが呈示されるまでの間の期間.
- Inner loop
以下の期間をまとめて Inner loop と定義する.
 - カード 1 が呈示された後でカード 2 が呈示されるまでの間で, カード A が呈示された直後からその直後のカードに対する反応が示されるまでの間の期間.
 - カード 2 が呈示された後でカード 1 が呈示されるまでの間で, カード B が呈示された直後からその直後のカードに対する反応が示されるまでの間の期間.

4.2 提案モデル

第 3 章で述べた知見を基に 1-2-AX 課題を遂行するネットワークの数理モデルを設計・構築した.

4.2.1 ニューロンの数理モデル

本研究では、ニューロンのモデルとしてレートコーディングニューロンモデルを用いる。レートコーディングニューロンモデルは、ニューロン出力として発火頻度を出力とするニューロンモデルである。

線条体以外のニューロンの数理モデル

時刻 t におけるモデルニューロン j の出力を $\eta_j(t)$ とすると、 $\eta_j(t)$ は以下の式 4.1 で表される。

$$\eta_j(t) = f(\zeta_j(t) - \theta_j) \quad (4.1)$$

ここで、 θ_j はモデルニューロン j の閾値である。また β をゲインとすると f は式 4.2 で与えられる。 $\zeta_j(t)$ はモデルニューロン j の膜電位であり、それぞれ以下の式 4.3 で表される。

$$f(x) = \begin{cases} \tanh(\beta x), & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (4.2)$$

$$\tau_0 \frac{d\zeta_j(t)}{dt} = -\zeta_j(t) + I_j(t) \quad (4.3)$$

ここで、 τ_0 は膜電位の時定数である。さらに、 $I_j(t)$ はモデルニューロン j への入力信号で、モデルニューロン j にシナプス結合をしているモデルニューロンを i とすると、以下の式 4.4 で表される。

$$I_j(t) = \sum_i w_{ji} \eta_i(t) \quad (4.4)$$

ここで、 w_{ji} はモデルニューロン i からモデルニューロン j へのシナプス結合の伝達効率である。

線条体ニューロンの数理モデル

他のモデルニューロンと同様に、式 4.1 と式 4.2 を使用する。しかし、第 3 章で述べたように、線条体は他のニューロンと異なり、双安定な静止膜電位を持つ。そこで、時刻 t における線条体モデルニューロン j の膜電位 $\zeta_j^{str}(t)$ を以下の式 4.5 で表す。

$$\tau_0 \frac{d\zeta_j^{str}(t)}{dt} = -a\zeta_j^{str}(t)^3 + b\zeta_j^{str}(t)^2 - c\zeta_j^{str}(t) + I_j(t) \quad (4.5)$$

また、視床からの入力に対しては短期抑圧が生じるため、視床から線条体への入力信号 $I^{th \rightarrow str}(t)$ は視床の発火頻度 $\eta^{th}(t)$ と式 4.3 を用いてそれぞれ以下の式 4.6, 4.7 で表される.

$$I_j(t) = \sum_i w_{ji} \eta_i(t) + I^{th \rightarrow str}(t) \quad (4.6)$$

$$I^{th \rightarrow str}(t) = K_0 H(\eta^{th}(t)) - \frac{1}{\tau} \int_0^t \epsilon^{-\frac{t-t'}{\tau}} \eta^{th}(t') dt' \quad (4.7)$$

ここで、 K_0 は視床から線条体への入力信号の大きさを調節する係数であり、 τ は時定数、 H は以下の関数である.

$$H(x) = \begin{cases} x, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (4.8)$$

また、以後特にことわらない限り、モデルニューロンを単にニューロンと呼ぶことにする.

4.2.2 大脳皮質-基底核-視床のループモデル

1-2-AX 課題を遂行するために必要な機能を備えたワーキングメモリとしてのネットワークの数理モデルを、図 4.2 に示した大脳皮質 - 基底核 - 視床ループの構造を基に考案した. この数理モデルを以後、単に「ループ」と呼ぶ. 考案したループモデルの基本単位を図 4.2 に示す. この基本ループを複数繋ぎ合わせることでネットワークモデル全体を構築していく.

また、基本ループは大きく分けて以下の 4 つの機能をもつ.

- ループモデルの活性化の準備状態

外部ループの皮質ニューロンからある値以上の興奮性の入力信号 (図 4.2 中の Gate ON 信号) が線条体ニューロンに入力されると、線条体ニューロンの膜電位に双安定性が現れる. この状態をループの活性化準備状態と呼ぶ. この状態で線条体ニューロンにさらに皮質ニューロンまたは視床ニューロンからの入力信号があると、線条体ニューロンの膜電位は up state になり、発火頻度が高くなる. ループが活性化準備状態でなければ、線条体ニューロンは発火せず、淡蒼球内接または外節ニューロンの活動を抑制できなくなる. そのため、ループの直接路と間接路に信号は伝達されない.

- 情報の保持

直接路を介した ”大脳皮質 → 線条体 → 淡蒼球内節 → 視床 → 大脳皮質” の閉じたループ (Closed loop) 経路がこの役割を果たす. 皮質ニューロンに入力信号があると、皮質ニューロンは発火し、線条体ニューロンへ信号が伝

達される。ループが活性化準備状態である場合、直接路の線条体ニューロンは発火し、淡蒼球内節ニューロンの活動は抑制される。その結果、淡蒼球内節ニューロンによって活動を抑制されていた視床ニューロンは活性化し、その発火頻度が高くなる。そして、視床ニューロンの出力が皮質ニューロンの発火頻度を高くする。このように、この Closed loop 内で信号伝達が循環することで情報の保持が行われる。

- 情報の消去

間接路を介した ”大脳皮質 → 線条体 → 淡蒼球外節 → 視床下核” の経路がこの役割を果たす。ループの活性化状態で、外部ループの皮質ニューロンからある値以上の興奮性入力信号 (図 4.2 中の Gate OFF 信号) がこの経路内の線条体ニューロンに伝達されるとこの経路が活性化し、情報を保持している Closed Loop 内の淡蒼球内節ニューロンは活性化する。淡蒼球内節ニューロンの活性化はその先の視床ニューロンの活動を抑制し、視床ニューロンは皮質ニューロンを活性化できなくなる。その結果、Closed loop 内で信号伝達が循環せず、情報が保持できなくなる。これを情報の消去と呼ぶ。

- 入力信号に対する出力

直接路を介した ”大脳皮質 → 線条体 → 淡蒼球内節 → 視床” の経路 (Open loop) がこの役割を果たす。ループ内の皮質ニューロンへ入力信号があるとそれに対応する適切な箇所に視床ニューロンが出力を行う。

4.2.3 学習

本研究では、ネットワーク内の結合が全くない状態から課題を遂行するための回路が構成されるのではなく、脳内に基本的な回路が複数存在し、その中から課題遂行に必要な回路が選択されると仮定した。そして呈示されるシンボルと選択された基本回路の対応付けは興奮性シナプス結合の可塑性により行われると仮定した。この複数の基本回路から適切な回路が選択されることをルールベース学習とした。また、興奮性シナプス結合の可塑性は競合ヘップ学習を仮定し定式化した。

ルールベース学習

1-2-AX 課題を遂行するためには、4.1 で述べたルールから、特定の情報を保持し、呈示されたシンボルに対して右シフトキーを押すのか、または左シフトキーを押すのかを判断する必要がある。

- Outer loop の保持

注目すべき Inner loop を判断するために、シンボル 1 や シンボル 2 の情報

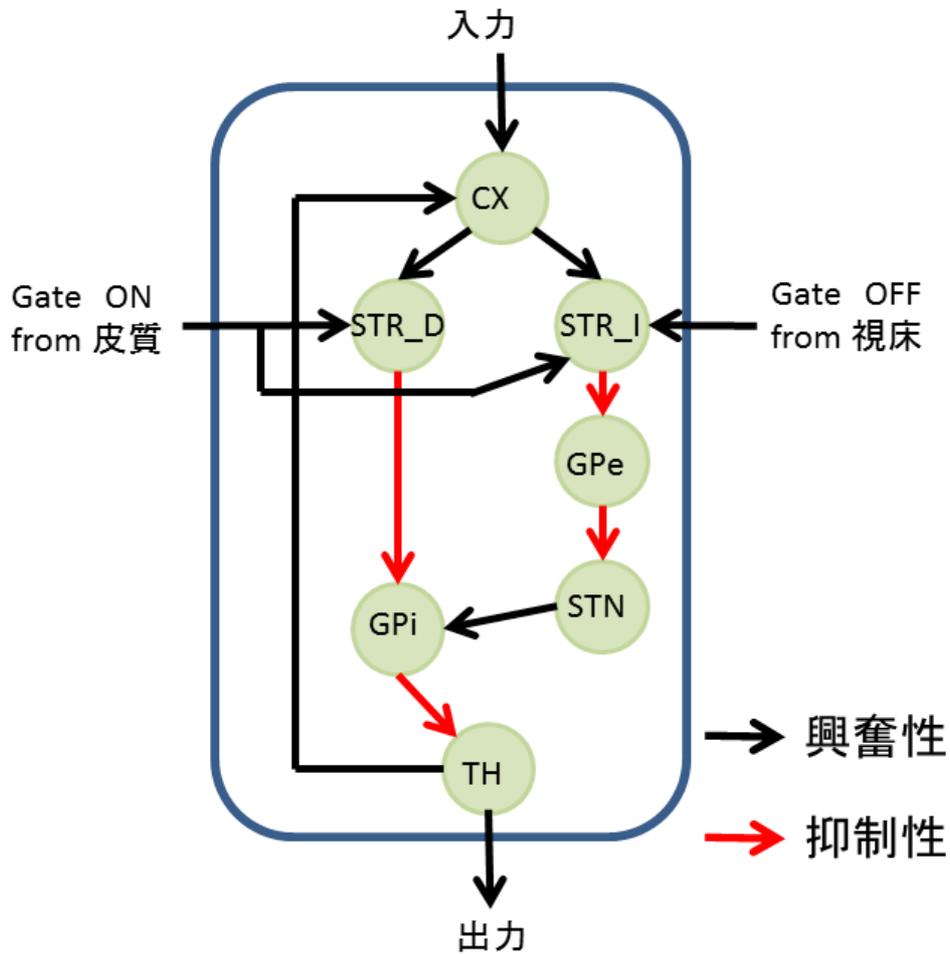


図 4.2: 大脳皮質-基底核-視床ループ.

を保持する。但し、シンボル 1 (2) の後にシンボル 2 (1) が呈示されたらシンボル 1 (2) の情報は破棄する。

- シンボル A, シンボル B の保持
シンボル 1 (2) が呈示された後にシンボル X が呈示されたとき、その直前に呈示されたシンボルがシンボル A(B) かそうでないかでシンボル X に対して右シフトキーを押すか左シフトキーを押すかが決まるためシンボル A (B) の情報を保持する。但し、シンボル A の次にはシンボル A, シンボル B の次にはシンボル B が呈示された場合を除き、シンボル A やシンボル B の後にシンボルが呈示されたら、シンボル A やシンボル B の情報は破棄する。
- シンボル X, シンボル Y には右か左かの 2 択

シンボル X(Y) の直前に シンボル A(B) が呈示され, かつ Outer loop がシンボル 1(2) のときは右シフトキー, それ以外の場合は左シフトキーを押す.

この学習では, 図 4.3 のようにルールが説明された段階で, 1-2-AX 課題を遂行可能なループ回路が選択されたと仮定した.

考案したルールベース学習後のネットワーク構成図を図 4.3 に示す. ○が一つのループを表している. 面取りされた□はいくつかのループから構成される機能的なユニットである.

図 4.3 中の各ユニットは以下のように対応付けている.

- Symbol ユニット
呈示されたシンボルに対応するループの皮質に入力するループ群.
- 1-2-AX Task ユニット
1-2-AX 課題に関係するループをアクティブにするための Gate ON 信号を出すループ.
- Open loop L ユニット
左シフトキーを押すシンボルから入力を皮質に入力を受け取り, 出力を緑の枠内のループの皮質へ行うループ群.
- Open loop R ユニット
右シフトキーを押すシンボルから入力を皮質に入力を受け取り, 出力を緑の枠内のループの皮質へ行うループ群.
- 緑の枠内のループユニット
補足運動野 (SMA) へ出力を行うループ群.
- SMA ユニット
L のループが出力を行うと, 左シフトキーを押す運動が開始され, R のループが出力を行うと右シフトキーを押す運動が開始されることを表すループ群.
- Closed loop 1, 2 ユニット
シンボル 1 や シンボル 2 の情報を維持するループ群. シンボル 1 が呈示されたら シンボル 2 の情報を, シンボル 2 が呈示されたらシンボル 1 の情報を破棄するために相互に Gate OFF 信号を伝達する.
- Closed loop 1A, 2B ユニット
シンボル 1 が呈示された後にシンボル A が呈示されたとき, またはシンボル 2 が呈示された後にシンボル B が呈示されたときにその情報を保持するループ群. Open loop L, R ユニットが Gate OFF 信号を伝達し, Gate OFF 信号が伝達されたループの活動が停止し, そのループで保持していた情報を破棄する. 但し, Closed loop 1A, 2B ユニット内の A(B) ループは Open loop 1, 2 ユニット内の A(B) からの Gate OFF 信号は伝達されない.

また、各ユニット間のシナプスを表す矢印については以下の通りである。

- 赤の矢印
皮質から直接路と間接路の線条体へ Gate ON 信号を入力する興奮性の結合を表す。
- 青の矢印
視床から間接路の線条体へ Gate OFF 信号を入力する興奮性の結合を表す。
- 黒の実線
興奮性結合かつ視床から皮質への繊維結合を表す。
- 黒の点線
興奮性結合かつ視床から皮質への繊維結合を表す。シナプス学習が行われる箇所である。

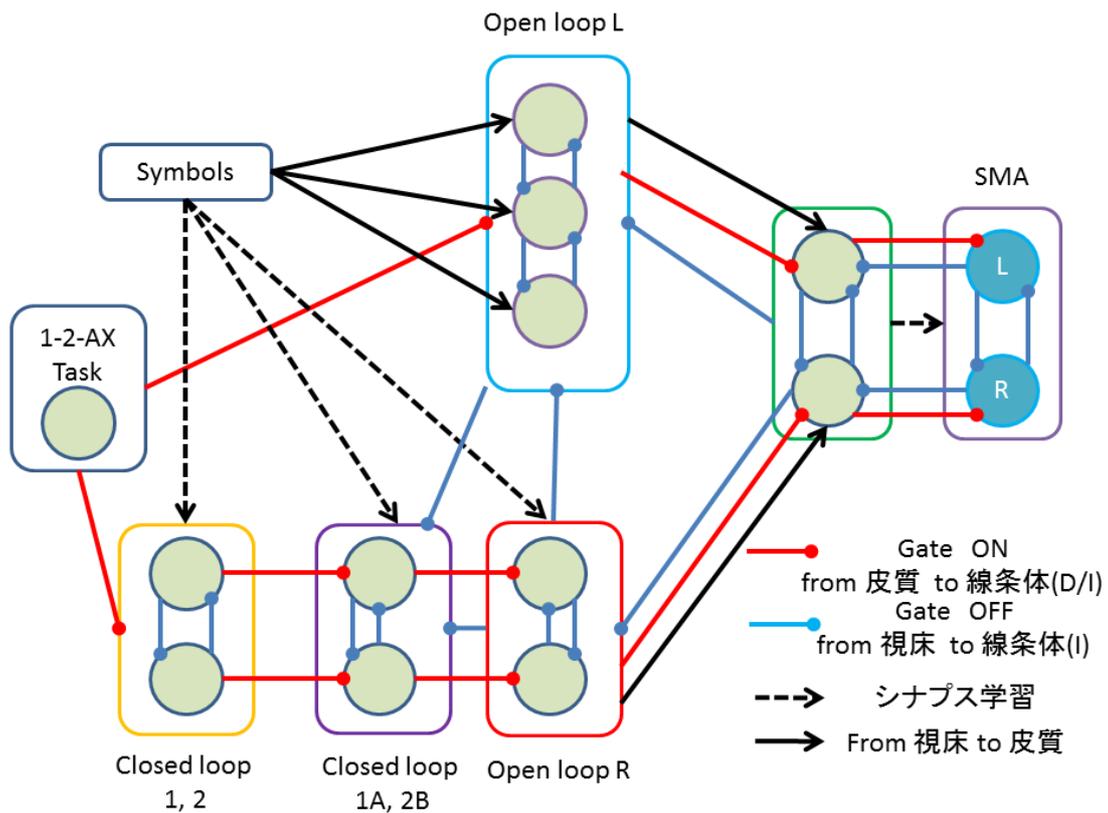


図 4.3: ルールベース学習後の大脳皮質-基底核-視床ループモデル。

競合ヘップ学習

競合ヘップ学習とは、複数のシナプス前ニューロンが一つのシナプス後ニューロンに結合している場合、シナプス後ニューロンと同時に活性化するシナプス前ニューロンからの結合の伝達効率が上がり、その他のシナプス前ニューロンとシナプス後ニューロンへの結合の伝達効率は下がるという学習である。学習の様子を図4.3に示す。○が一つのニューロンを表し、○の中が赤くなっていると活性化していることを表す。また、縦に2つ並んでいるニューロンがシナプス前ニューロン、2つのニューロンから入力を受けているニューロンがシナプス後ニューロンを表す。

時刻 t におけるシナプス前ニューロン i の伝達効率 w_{ji} のダイナミクスは以下の式で表される。

$$\tau' \frac{dw_{ji}(t)}{dt} = w_{ji} \left(a_{ji} - \sum_{i'=1}^N a_{ji'} w_{ji'} \right) \tag{4.9}$$

$$a_{ji} = \eta_i \zeta_j \tag{4.10}$$

ここで、 a_i はシナプス前ニューロン i とシナプス後ニューロン j の活動の積に比例する。また、 N は競合するシナプス前ニューロンの総数を表す。

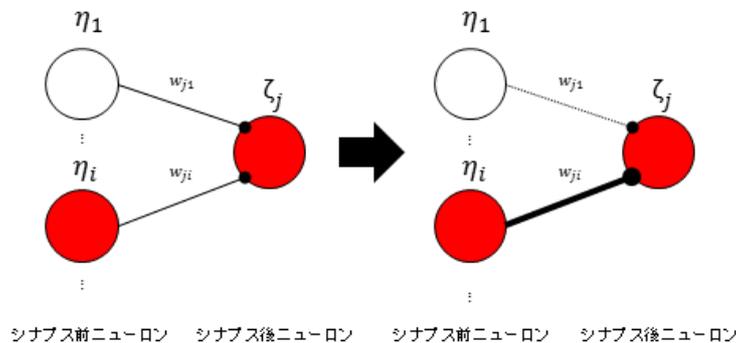


図 4.4: 競合ヘップ学習の様子。

例として、シナプス前ニューロン 2 個、シナプス後ニューロン 1 個の場合の競合ヘップ学習の過程を図 4.5 に示す。この場合の学習課程を説明する。

式 4.9 より、シナプス前ニューロン 1, 2 とシナプス後ニューロンのシナプス結合の伝達効率 w_1, w_2 の微分方程式は、以下の式 4.11, 式 4.12 となる。

$$\tau' \frac{dw_1(t)}{dt} = w_1 a_1 - w_{j1} (a_1 w_1 + a_2 w_2) \tag{4.11}$$

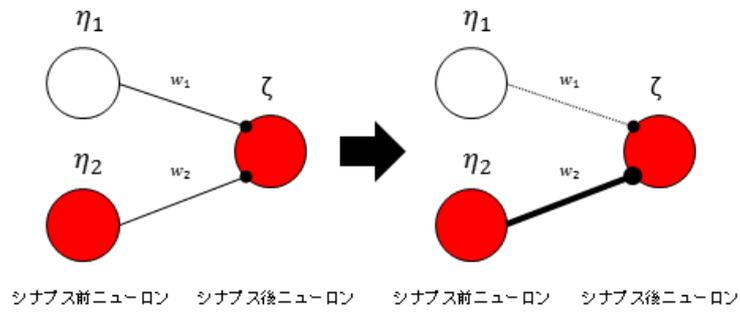


図 4.5: 競合ヘップ学習の例.

$$\tau' \frac{dw_2(t)}{dt} = w_2 a_2 - w_2 (a_1 w_1 + a_2 w_2) \quad (4.12)$$

式 4.11, 式 4.12 の定常解は, winner-take-all を記述しており, $a_1 > a_2$ の場合には, $(w_1 = 1, w_2 = 0)$ となり, $a_1 < a_2$ の場合には, $(w_1 = 0, w_2 = 1)$ となる.

学習後のネットワークモデル

競合ヘップ学習後のネットワークモデルは図 4.6 のように構成した.

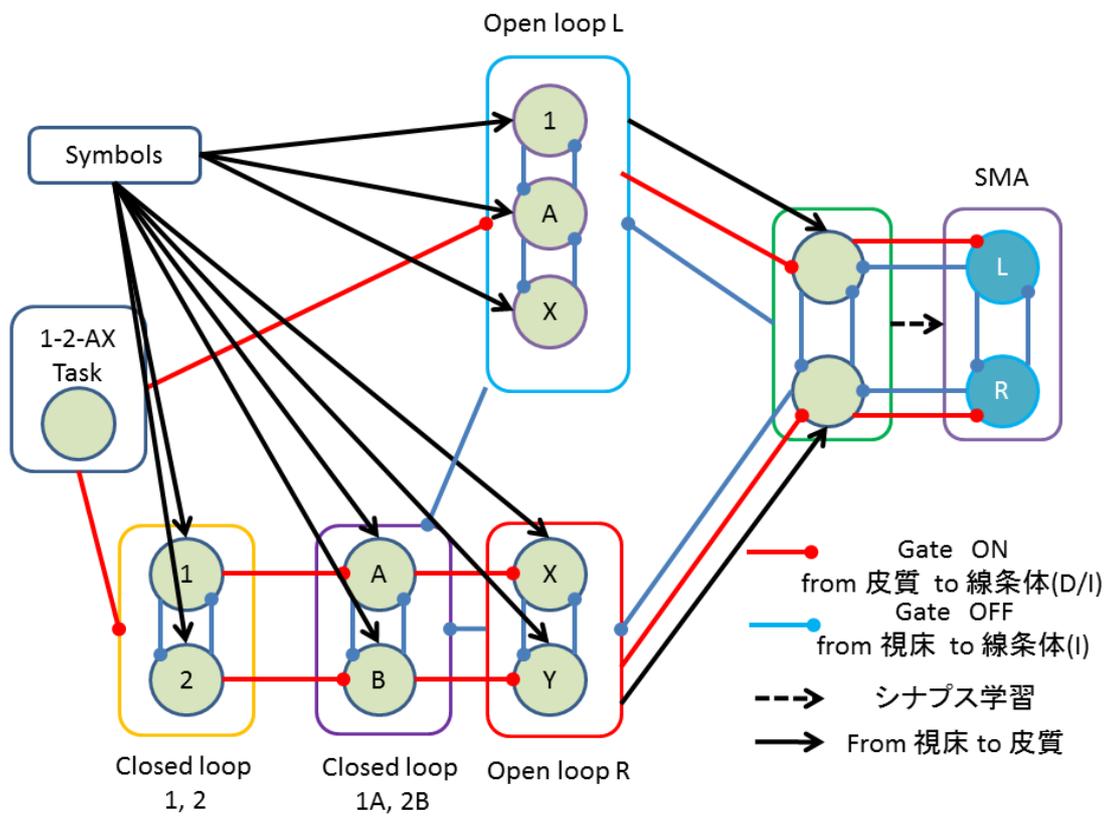


図 4.6: 学習後のネットワークモデル.

第5章

計算機シミュレーション

本章では, 1-2-AX 課題ワーキングメモリに対する本提案モデルの計算機シミュレーションを実行した結果の報告と, その結果に対する分析を示す.

5.1 シミュレーション概要

シミュレーションでは, ルール説明後の学習が終わった後のモデルを用いて, 入力された任意のシンボル列に対して 4.1 節で示した 1-2-AX 課題のルールに適した出力が得られるかを確認した. 1, A, X と 2, B, Y の各ループの挙動は同じであったため, 今回の結果では 1AX に着目して示す.

シミュレーション条件は以下のように設定した.

- シンボル入力ステップ数 = 400
- シンボル入力間隔 = 3000

5.1.1 Outer loop 1, 2 の切り替え

シンボル 1, 2 を順に入力した場合における Outer loop 1 と 2 の各ニューロンの出力結果を図 5.1, 図 5.2 に示す. なお, 横軸はステップ数, 縦軸は発火頻度, 赤の実線はシンボル入力, 緑の実線は視床から間接路の線条体ニューロンへの短期抑圧な入力を表す. また, 紫色の実線は直接路の線条体ニューロン, 水色の実線は間接路の線条体ニューロン, 黄色の実線は淡蒼球外節ニューロン, 黒色の実線は視床下核ニューロン, 橙色の実線は淡蒼球内節ニューロン, 灰色の実線は視床ニューロンの出力を表す.

図 5.1, 図 5.2 より, Outer loop 1 のループは Outer loop 2 のループが活動を始めた場合には, そのループ活動を停止させていることがわかる. この結果から, Outer loop の切り替えが正しく行えていることが確認できた.

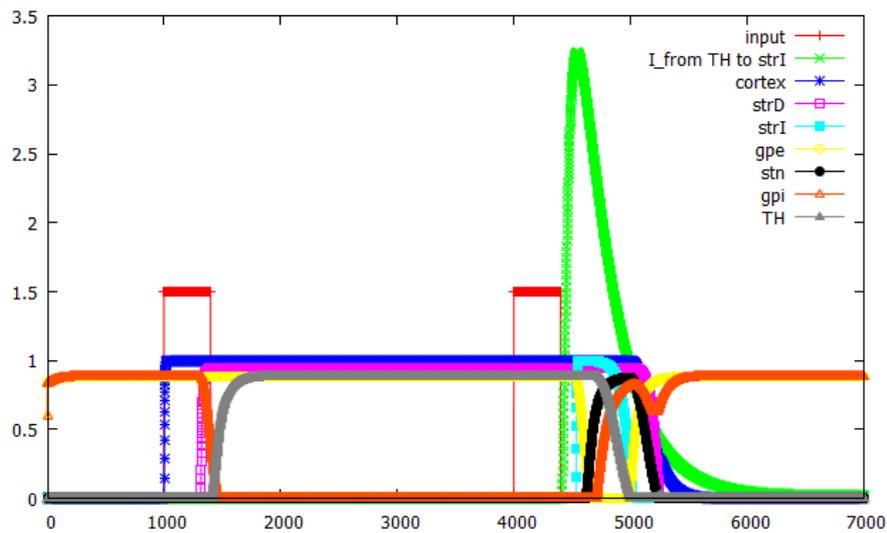


図 5.1: シンボル 1, 2 を順に入力した場合における Outer loop 1 の各ニューロンの出力結果.

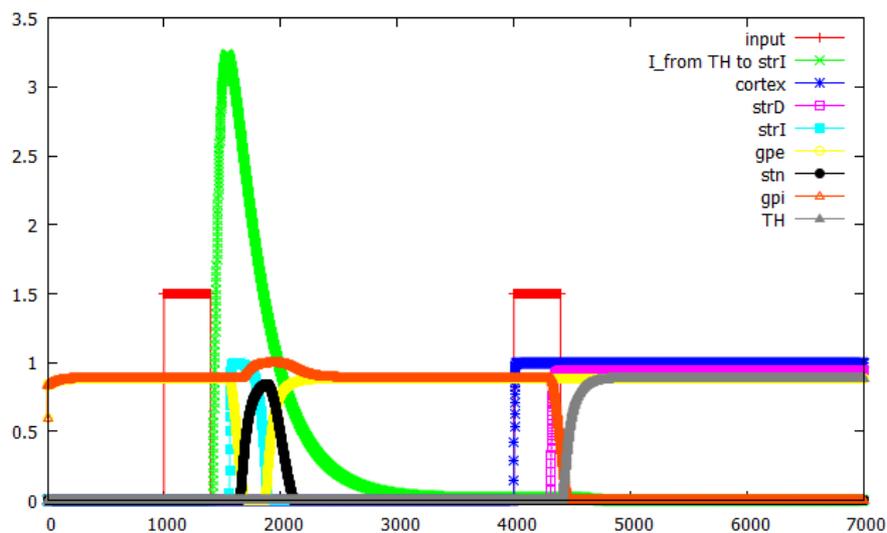


図 5.2: シンボル 1, 2 を順に入力した場合における Outer loop 2 の各ニューロンの出力結果.

5.1.2 Closed loop 1A

シンボル 1, A, X を入力した場合における Closed loop 1A 内の各ニューロンの出力結果と、膜電位の変化と間接路の線条体ニューロンモデルに入力する外部ループからの入力, Closed loop 1 内の各ニューロンの出力を図 5.3, 図 5.4, 5.5 に示す.

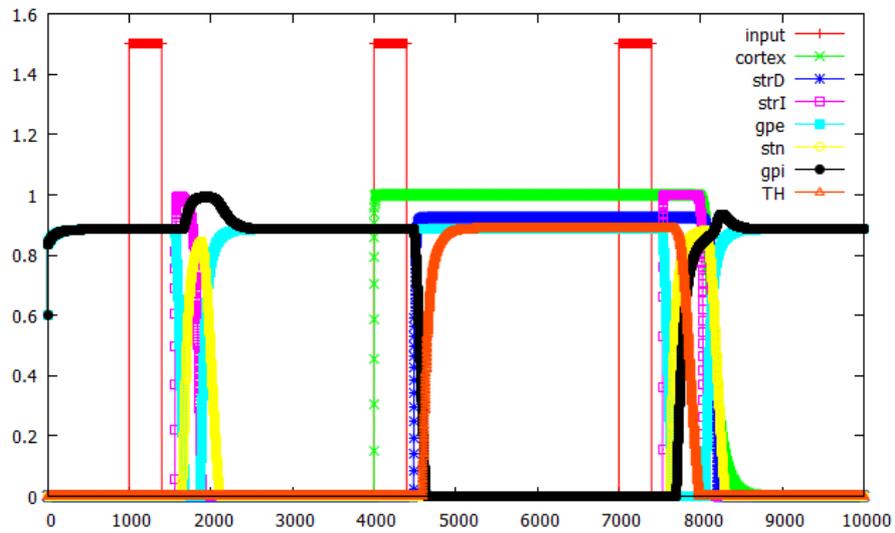


図 5.3: シンボル 1, A, X を入力した場合における Closed loop 1A 内の各ニューロンの出力結果.

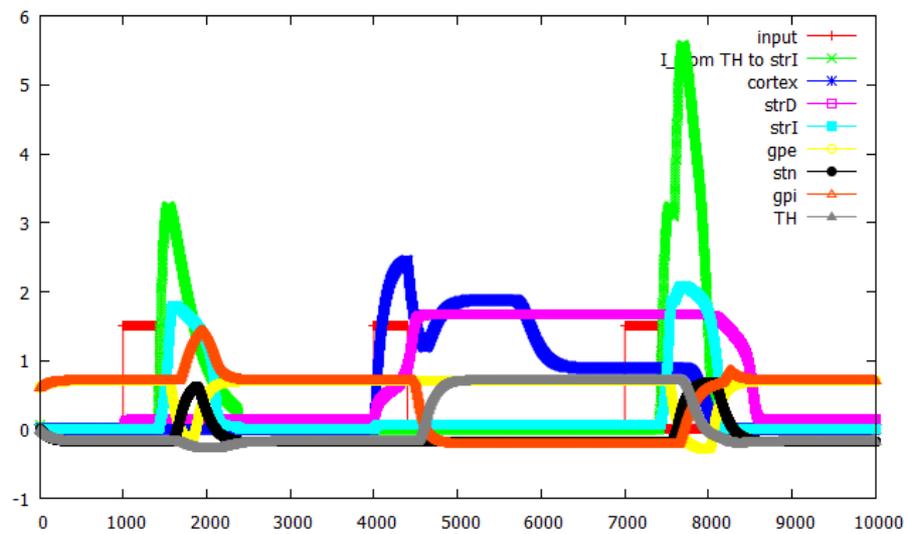


図 5.4: シンボル 1, A, X を入力した場合における Closed loop 1A 内の各ニューロンの膜電位の変化.

図 5.3 より, シンボル 1 が入力された後にシンボル A が入力された場合, Closed loop A のループは活動を維持し続けることが確認できた.

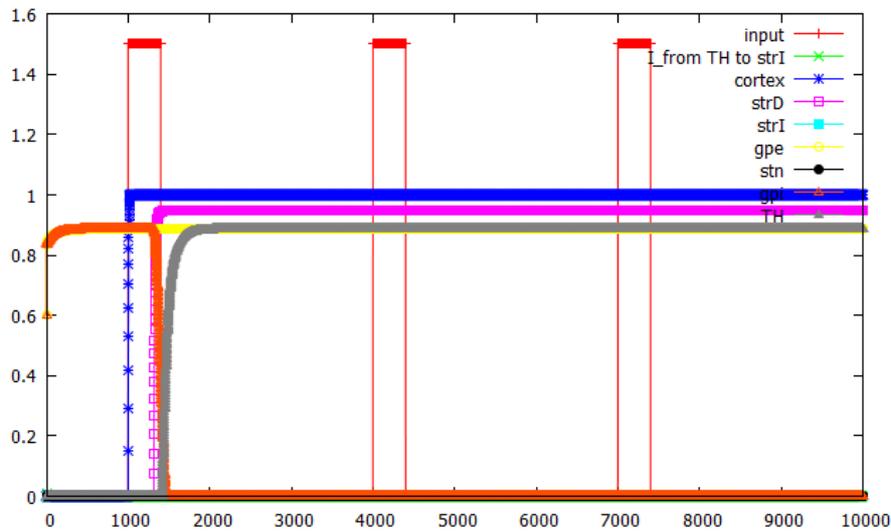


図 5.5: シンボル 1, A, X を入力した場合における Closed loop 1 内の各ニューロンの出力結果.

5.1.3 任意のシンボル列に対するネットワークの出力

シンボル 1, A, X, X, A, B, X を順に入力した場合と シンボル 1, 2, B, Y を順に入力した場合の SMA ループモデルにおける視床ニューロンの発火頻度を図 5.6, 図 5.7 に示す. なお, 横軸はステップ数, 縦軸は発火頻度, 赤の実線はシンボル入力, 緑の実線は SMA L ループモデルにおける視床ニューロンの発火頻度, 青の実線は SMA R ループモデルにおける視床ニューロンの発火頻度を表し, 各発火頻度が 0.8 以上の場合にネットワーク全体の出力が右シフトキー (R) を押すまたは左シフトキー (L) を押すかが決定するとする.

シンボル 1, A, X, X, A, B, X を順に入力した場合と シンボル 1, 2, B, Y を順に入力した場合の正しい回答は, 1-2-AX 課題のルールからそれぞれ L, L, R, L, L, L, L と L, L, L, R である. 図 5.6, 図 5.7 からルールに則った出力が得られていることが分かる.

以上, 任意のシンボル列に対して 1-2-AX 課題のルールに即した出力を考案したネットワークが出力できていることが確認できた. この結果, 大脳皮質-基底核-視床ループ構造と線条体の特質を再現し, 1-2-AX 課題を遂行できるモデルが構築できたと言える.

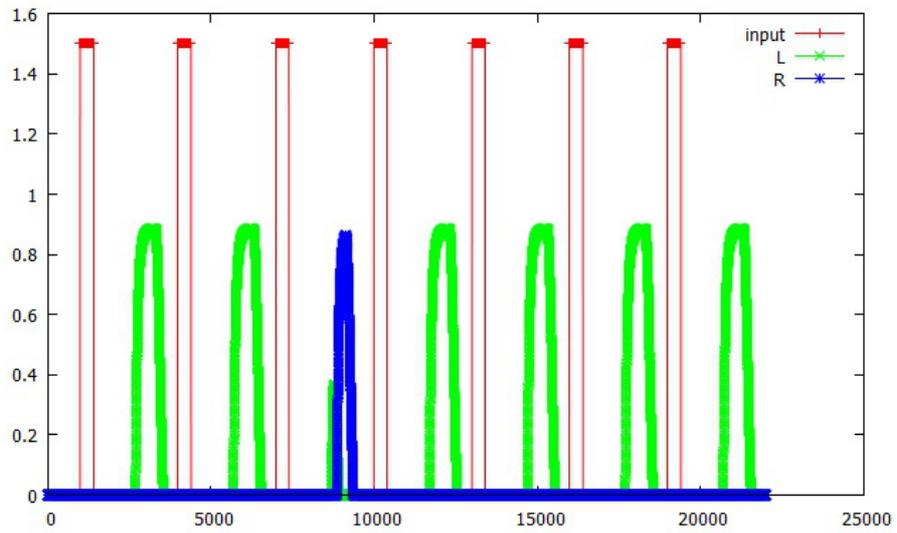


図 5.6: シンボル 1 A X X A B X を入力した際のシミュレーション結果.

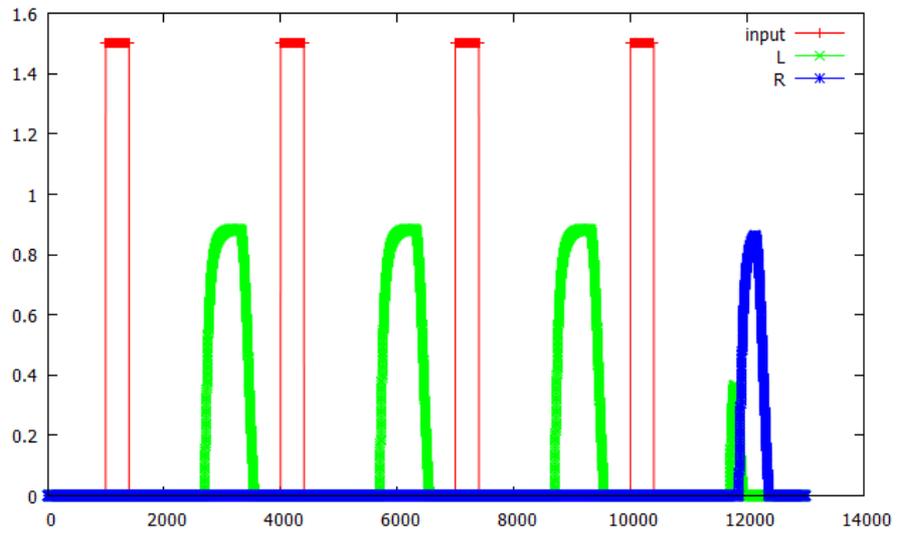


図 5.7: シンボル 1 2 B Y を入力した際のシミュレーション結果.

第6章

1-2-AX 課題を用いた心理実験

本章では, 1-2-AX 課題を実際にヒトに対して実施した心理実験について説明する.

6.1 被験者

本実験における被験対象者は身心ともに健全な 20 代の男女であり, 協力してもらった被験者 13 名 (男: 10 名, 女: 3 名) は電気通信大学に通う学生である (2013 年 1 月現在). この内, 3 名 (女: 1 名) は実験を構築する際のモニターとして協力してもらい, 実験 1 は 6 名 (女: 1 名), 実験 2 は 4 名 (女: 1 名) 分の被験者データを得た. 被験者の年齢は 21~25 歳で平均年齢は約 23.2 歳であった.

なお, 本実験は電気通信大学の「ヒトを対象とする実験に関する倫理規程」を順守しており, 倫理委員会からの承認を受けている. すべての被験者は同意書に記入をした後, 実験への協力を開始した.

6.2 実験目的

Frank & O'Reilly(2007) の論文では, 1-2-AX 課題をヒトに対して行ったデータが得られなかったため, 1-2-AX 課題をヒトに対して実施した場合のデータを取る必要が生じたため, 今回実験を行った. 課題のルールをきちんと理解した上で課題を行う場合, 被験者の課題正答率の変化や反応時間の変化を調べる. その結果からヒトがルールを教えられた場合にどのようにワーキングメモリが働くのかを考察し, 考案したモデルを検証する.

6.3 実験方法

本実験は, 課題のルール説明方法を変化させ, 課題のルールが把握できた場合とできなかった場合の正答率の差を検証する実験 (実験 1), 課題のルールが把握でき

た場合の正答率と反応時間を検証する実験(実験2)を行った。また、実験課題として、1-2-AX 課題とその逆転課題を使用し、10セッション被験者に実施した。逆転課題とは、1-2-AX 課題とルールは同じだが、シンボルを入れ替えたものである。各実験の課題のルール説明方法と各課題の詳細については6.3.2節と6.3.3節に示す。

逆転課題終了後、被験者に対して質問紙調査を行った。この質問紙調査では、各被験者の課題遂行方法や被験者が感じた難易度・達成度などについて調査を行った。実験1, 実験2共に以下の順序で行った。

- 実験と同意依頼文の説明
- 1-2-AX 課題実施(10セッション行う)
- 逆転課題実施(10セッション行う)
- 質問紙調査実施

6.3.1 実験環境

本実験で以下のものを使用し、東3号館807教室で実験を行った。

- ノートパソコン
本実験では、実験従事者として執筆者がノートパソコンを操作し、課題の制御を行った。このノートパソコン上でPEBLを用いて1-2-AX 課題とその逆転課題を構築した。PEBLで実行される課題は、液晶ディスプレイに表示され、被験者の解答反応はキーボードからノートパソコンへ入力される。
- PEBL
本実験で使用した1-2-AX 課題とその逆転課題は心理学実験用のソフトウェアである「PEBL (The Psychology Experiment Building Language)」を用いて作成した。PEBLはコンピュータベースの実験やテストを設計、実行するための無料のクロスプラットフォームシステムである[24]。独自の実験を設計したり、既成の実験素材を使用すること、そして、ライセンスやチャージ無しで自由に実験を交換することが可能である。また、簡単に複数のコンピューティングプラットフォーム上で使用できるように設計されている。PEBLは主にC++でプログラムされており、それだけでなく、構文解析のためにflexやbisonも使用している。しかし、実際に使用する際にはC++に関する知識は必要としないため、容易に所望の課題を構築することができる。
- 液晶ディスプレイ
今回、使用した液晶ディスプレイは24インチである。このディスプレイに縦横比が1280×800のウィンドウを表示し、その中に課題のインストラクショ

ンや画像が呈示される。被験者は着席した状態で、0.6m 前に設置された液晶ディスプレイに呈示される画像を見ながら課題を遂行する。

- キーボード

被験者は、課題の説明時にはキーボードのスペースキーを、課題遂行時には右シフトキー、左シフトキーを用いて課題に対して回答する。課題遂行時のホームポジションは、右シフトキーと左シフトキーの上に人差し指を置いた状態とした。

実験環境を図 6.1 に示す。



図 6.1: 実験環境.

6.3.2 1-2-AX 課題

まず初めに、1-2-AX 課題のルールを説明文と正しい回答例の図を呈示し、被験者にルールを把握してもらった。実験 1 はルール説明文と回答例の図は 1 回だけ呈示した。実験 2 は、ルール説明文→回答例の図→ルール説明文→回答例の図のように、ルール説明文とその回答例を再度呈示した。回答例の呈示後、課題の遂行を開始し、ランダムに呈示される 1, 2, A, B, X, Y の 6 種類のシンボルに対して、キーボードの右シフトキーまたは左シフトキーを押して被験者は回答した。キー入力にはシンボル呈示直後から入力を受け付け、連打した場合は最初のキー入力のみ記録

した。また、シンボルはキー入力が行われるまで呈示したため、被験者の反応時間がシンボルの呈示時間と一致する。キー入力を行った後から次のシンボルが呈示されるまでの時間は、250ms, 500ms, 750ms, 1000ms, 1250ms の五種類の中から毎回ランダムに決定した。

シンボルは60個を一つのセッションとし、被験者は一つの課題につき10セッション行った。表6.1に1セッションで呈示されるシンボルとその数を示す。但し、課題の説明があるのは、1回目のセッションのみとした。60シンボル中、右シフトキーを押すシンボルは8個となるようにシンボルを呈示した。

表 6.1: 1セッションで呈示されるシンボルとその数.

シンボル	1	2	A	B	X	Y
シンボル数	2	2	14	14	14	14

6.3.3 逆転課題

逆転課題とは、1-2-AX 課題のシンボルを入れ替えた課題である。本実験で使用する逆転課題のルールを以下に示す。

- 1, 2, A, B, X, Y のシンボルがランダムに呈示される。
- シンボル X が呈示された後からシンボル Y が呈示される間に、シンボル 1 が呈示された直後にシンボル B が呈示されたとき、またはシンボル Y が呈示された後からシンボル X が呈示される間に、シンボル 2 が呈示された直後にシンボル A が呈示されたときを正しい順序とし、シンボル B や A に対して右シフトキーを押す。
- それ以外のシンボルが呈示されたときには、左シフトキーを押す。

1-2-AX 課題と同様に、課題を実施する。

逆転課題も 1-2-AX 課題と同様に、シンボルは60個を一つのセッションとし、被験者は一つの課題につき10セッション行った。表6.2に1セッションで呈示されるシンボルとその数を示す。但し、課題の説明があるのは、1回目のセッションのみとした。60シンボル中、右シフトキーを押すシンボルは8個となるようにシンボルを呈示した。

表 6.2: 1セッションで呈示されるシンボルとその数.

シンボル	1	2	A	B	X	Y
シンボル数	14	14	14	14	2	2

6.4 結果

6.3節で示したように, 1-2-AX 課題とその逆転課題を各 10セッションずつ行った. その遂行結果を実験 1 と実験 2 に分けて報告する. なお, 被験者は匿名性を確保するため, 実験 1 は被験者 A ~ F, 実験 2 は被験者 G ~ J と表記する.

1-2-AX 課題と逆転課題では, 右シフトキーが正しく押せるかどうかによりその課題を遂行できているかどうかを調べることができる. そのため, 1-2-AX 課題ではシンボル X とシンボル Y が呈示された場合のレスポンスと, 右シフトキーが押すべきシンボルに対するレスポンスに着目して結果をまとめる. 逆転課題については, シンボル A とシンボル B が呈示された場合のレスポンスと, 右シフトキーが押すべきシンボルに対するレスポンスに着目して結果をまとめる.

6.4.1 実験 1

課題のルールが把握できた場合とできなかった場合の正答率の差を検証する実験であるため, 1-2-AX 課題の正答率とその質問紙調査の結果について報告する. 実験 1 では, 被験者 B, F がルールを把握でき, 被験者 A, C, D, E は 1-2-AX 課題のルールを把握できなかった. 被験者 A は Outer loop にかかわらず, シンボル A, シンボル X が連続して呈示された場合にはシンボル X に対して右シフトキーを押し, シンボル B, シンボル Y が連続して呈示された場合にはシンボル Y に対して右シフトキーを押していた.

質問紙調査結果

被験者 A ~ F の質問紙調査による課題難易度と達成度の結果を表 6.3 に示す. 被験者 A の課題達成度のデータは得られなかった.

表 6.3: 質問紙調査による課題難易度と達成度の結果.

被験者	A	B	C	D	E	F
難易度	難しい	難しい	とても難しい	ふつう	ふつう	難しい
達成度 [%]	-	50	50	65	70	60~70

正答率

被験者 A ~ F の 1-2-AX 課題における右シフトキーを押す反応が正解であるレスポンスの正答率 (以降, R の正答率と呼ぶ) とシンボル A とシンボル B が呈示された場合のレスポンス (以降, X, Y の正答率と呼ぶ) をまとめて表 6.4, 表 6.5 に示す. 表 6.4, 表 6.5 から, 1-2-AX 課題のルールが正しく把握できている場合には, 正答率 80 % 以上で課題を遂行できていることが確認できた.

表 6.4: 実験 1 の R の正答率 [%].

被験者 \ セッション	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	100	100	87.5	100	100	100	75	75	100	100
B	50	87.5	87.5	100	87.5	100	100	100	100	100
C	0	0	0	0	37.5	25	25	12.5	25	25
D	0	0	0	0	12.5	0	0	0	0	0
E	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F	87.5	100	87.5	100	100	100	100	100	100	100

表 6.5: 実験 1 の X, Y の正答率 [%].

被験者 \ セッション	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	82.1	78.6	75	82.1	82.1	78.6	67.9	78.6	85.6	71.4
B	78.6	92.9	92.9	96.4	82.9	100	100	100	92.4	100
C	57.1	67.9	71.4	71.4	64.3	60.7	60.7	60.7	57.1	57.1
D	71.4	71.4	71.4	71.4	78.6	71.4	71.4	71.4	71.4	71.4
E	71.4	71.4	71.4	71.4	71.4	71.4	71.4	71.4	71.4	71.4
F	96.4	96.4	92.9	92.9	96.4	100	96.4	100	100	96.4

6.4.2 実験 2

正答率

被験者 G ~ J の 1-2-AX 課題と逆転課題における R の正答率を図 6.2 に示す. 縦軸は正答率, 横軸は課題の種類を表す.

また, 課題別全被験者の各セッションの R の正答率を図 6.3, 図 6.4 に示す.

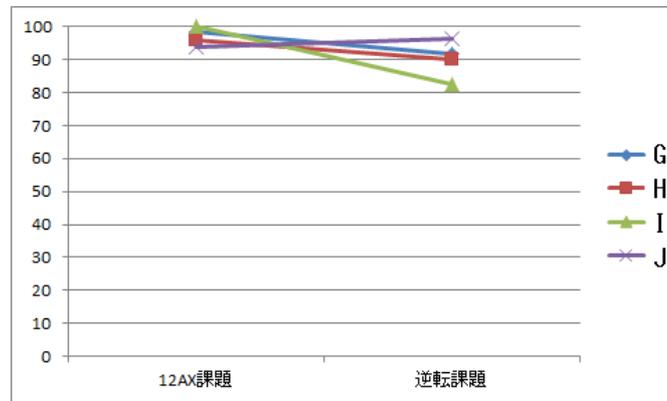


図 6.2: 全被験者の 1-2-AX 課題と逆転課題の R の正答率.

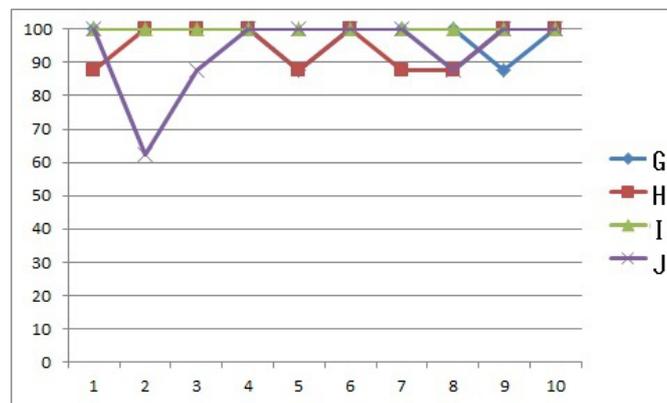


図 6.3: 1-2-AX 課題の R の正答率 (セッション毎).

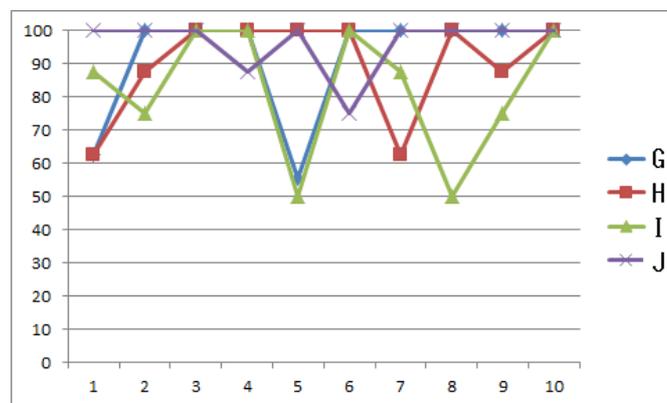


図 6.4: 逆転課題の R の正答率 (セッション毎).

反応時間

本実験の反応時間とは、シンボルが呈示されてからキーを押すまでの時間を指す。特に、右シフトキーを押す場合の反応時間(以降、Rの反応時間と呼ぶ)に着目した。全被験者の各セッションの平均反応時間を課題別にまとめたものを図 6.5, 図 6.6 に示す。横軸がセッション、縦軸が反応時間 [ms] を表す。

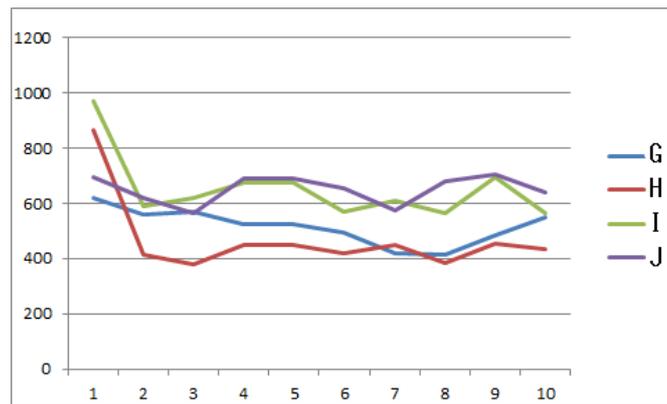


図 6.5: 1-2-AX 課題における各セッション毎の R の平均反応時間.

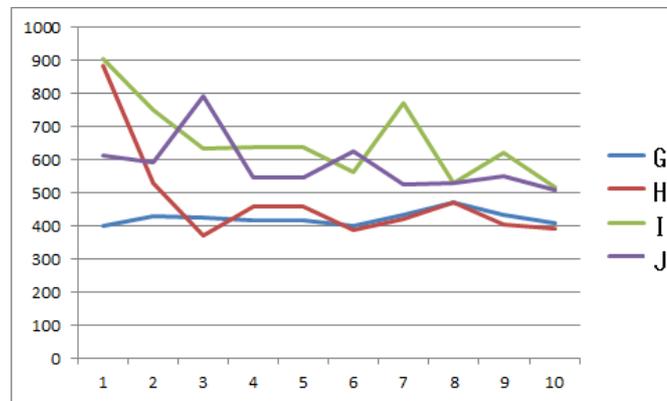


図 6.6: 逆転課題における各セッション毎の R の平均反応時間.

次に、被験者毎に 1-2-AX 課題と逆転課題の各セッションの平均反応時間をまとめたものを図 6.7, 図 6.8, 図 6.9, 図 6.10 に示す。

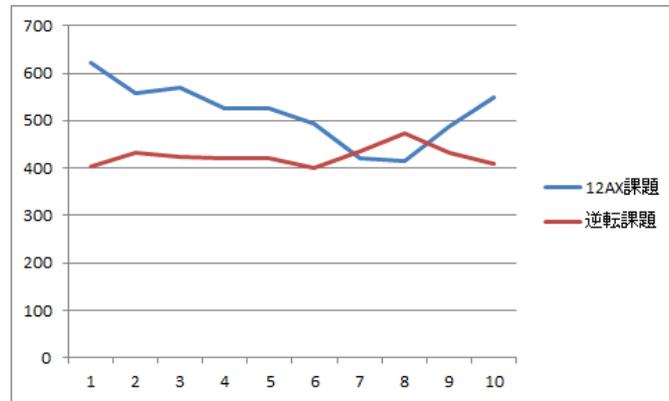


図 6.7: (被験者 G) 各セッション毎の R の平均反応時間.

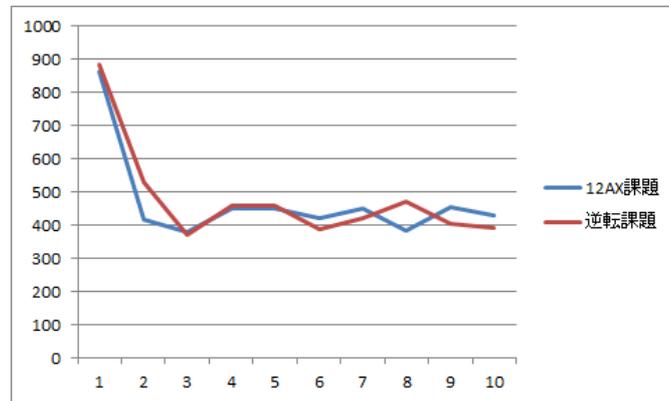


図 6.8: (被験者 I) 各セッション毎の R の平均反応時間.

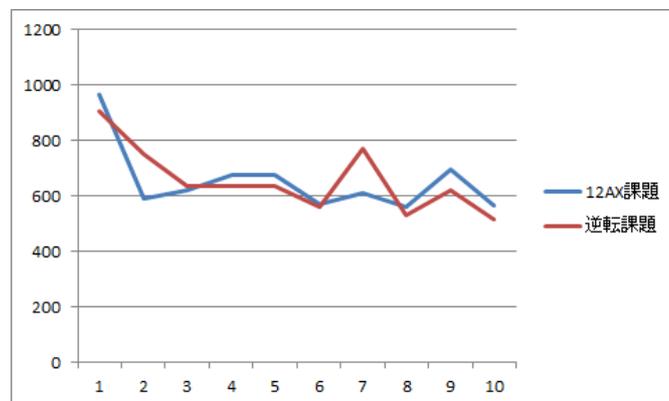


図 6.9: (被験者 I) 各セッション毎の R の平均反応時間.

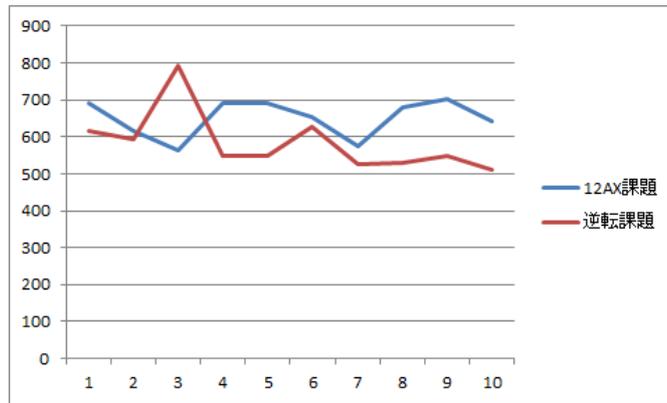


図 6.10: (被験者 J) 各セッション毎の R の平均反応時間.

次に、右シフトキーを押す場合の反応時間と左シフトキーを押す場合の反応時間を比較するため、1-2-AX 課題における以下の 3 種類の反応時間を各被験者毎にヒストグラムし、図 6.11、図 6.12、図 6.13、図 6.14 にまとめた。なお、ビンは 50ms とした。

- R の反応時間
- シンボル X とシンボル Y に対して左シフトキーを押すことが正解の場合の反応時間 (以降、XY の L の反応時間と呼ぶ)
- シンボル A, シンボル B に対する反応時間 (以降、AB の L の反応時間と呼ぶ)

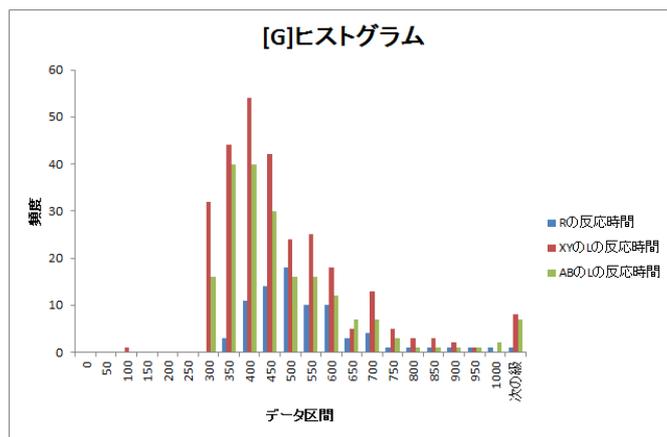


図 6.11: 被験者 G の反応時間.

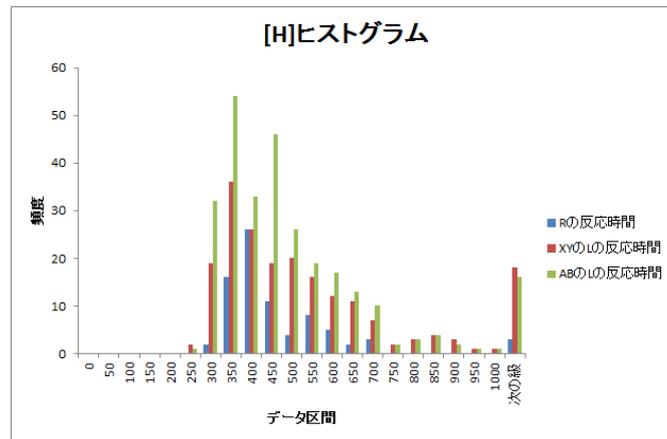


図 6.12: 被験者 H の反応時間.

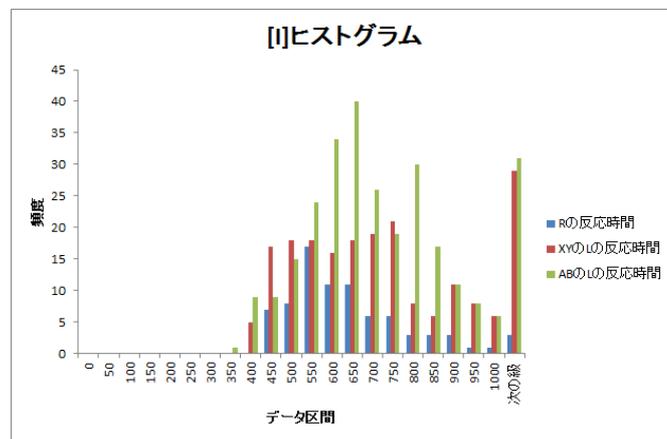


図 6.13: 被験者 I の反応時間.

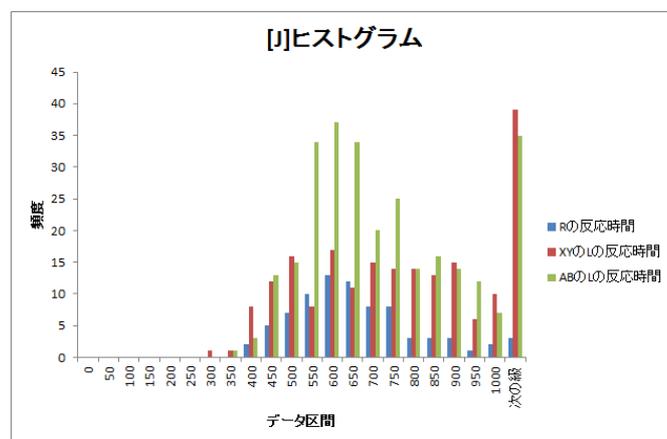


図 6.14: 被験者 J の反応時間.

また, R の反応時間と XY の L の反応時間, XY の L の反応時間と AB の反応時間 に対して分散が等しくないと仮定した 2 標本による t 検定を行った. その結果を表 6.6, 表 6.7 に示す.

t_R は R の平均反応時間, t_{XY} は XY の L の平均反応時間, t_{AB} は AB の平均反応時間, σ は標準偏差を表す.

表 6.6: R の反応時間と XY の L の反応時間.

被験者	$t_{XY} \pm \sigma$	$t_R \pm \sigma$	p	有意差
G	478.6 \pm 267.5	518.9 \pm 164.7	0.064	s
H	539.2 \pm 323.6	466.3 \pm 274.3	0.029	s
I	742.4 \pm 310.0	644.9 \pm 254.1	0.0036	s
J	776.9 \pm 289.8	644.9 \pm 172.8	2.3×10^{-6}	s

表 6.7: XY の L の反応時間と AB の反応時間.

被験者	$t_{XY} \pm \sigma$	$t_{AB} \pm \sigma$	p	有意差
G	478.6 \pm 267.5	465.4 \pm 210.1	0.28	ns
H	539.2 \pm 323.6	518.7 \pm 375.5	0.26	ns
I	742.4 \pm 310.0	739.7 \pm 320.6	0.46	ns
J	776.9 \pm 289.8	749.9 \pm 345.8	0.18	ns

表 6.6 から, R の反応時間と XY の L の反応時間の間には有意差があることが確認できた ($p < 0.1$). また, 表 6.7 から左シフトキーを押す場合の反応時間の間には有意差がないことが確認できた ($p > 0.1$).

質問紙調査

逆転課題終了後に質問紙調査を行った。この調査では主に、課題の難易度と達成度、ルール把握度を調査した。課題の難易度は「とても難しい」、「難しい」、「普通」、「易しい」、「とても易しい」の5段階で被験者に表現してもらった。達成度は完璧に遂行できた場合は100%、全くできなかった場合を80%とした。また、ルール把握度はルールが把握できたかどうかを「はい」か「いいえ」で答えてもらい、「はい」の場合はルールを回答させた。4人の被験者全員がルールを把握していた。

質問紙調査の課題難易度と達成度の結果を表6.8, 表6.9に示す。

表 6.8: 質問紙調査による課題難易度結果.

被験者	G	H	I	J
1-2-AX 課題	ふつう	ふつう	ふつう	ふつう
逆転課題	ふつう	難しい	難しい	難しい

表 6.9: 質問紙調査による課題達成度結果 [%].

被験者	G	H	I	J
1-2-AX 課題	95	80	75	80
逆転課題	90	70	65	50

また、難しいと回答した被験者 H, I, J は、その理由として、逆転課題遂行時に 1-2-AX 課題の影響が残っており、そのため 1-2-AX 課題と比較して逆転課題の方が難しいと感じたと述べていた。また、1-2-AX 課題では、Outer loop が 1 と 2, Inner loop が AX, BY と数字プラスアルファベットの昇順で右シフトキーを押すルールが決められているのに対し、逆転課題では、Outer loop が X と Y, Inner loop が 1B, 2A と規則性のない組み合わせかつ、Outer loop と右シフトキーか左シフトキーかレスポンスに 2 択が生じるシンボルが B と A というどちらもアルファベットであることから Outer loop と Inner loop を混同してしまったため難しかったという意見もあった。

しかし、難しいと回答しても、どの被験者も 1 回目のセッション内で逆転課題に慣れ、その後、回答に困る様子はあまり見られなかった。

また、各実験 10 セッションずつ行ったため、集中力の低下があったかどうかを確認した結果、被験者 I 以外から集中力が切れたという感想があった。具体的には、被験者 G は逆転課題の 8 セッション目から、被験者 H は各課題の 5, 6 セッション目の頃、被験者 J は 1-2-AX 課題の 5, 6 セッション目以降から集中力が切れたと報告を受けた。この集中力低下の原因として、6 種類という限られたシンボルを各課題

600 個, 両課題合わせて 1200 個呈示したこと, かつ単調な課題だったことが考えられる.

全被験者共通して, 説明文と回答例の図を比較すると回答例の方が課題のルールを把握しやすかったと回答していた. また, 逆転課題では, 1-2-AX 課題で使ったシンボルのと逆転課題で使用するシンボルとの切り替えは難しかったが, 大まかなルール自体は両課題とも同じであったため, 1-2-AX 課題より逆転課題の方が課題に慣れるのが早かったと回答していた.

第7章

考察と結論

本章ではまず提案モデルについての考察を行い, 次に提案モデルと心理実験結果を比較して考察を行う. 最後に, 本研究の結論を述べる.

7.1 考察

7.1.1 提案モデルについて

提案モデル構築の要となる「大脳皮質-基底核-視床ループによる情報の保持と消去」と「線条体ニューロン膜電位の双安定性の再現」の2点について考察する.

大脳皮質-基底核-視床ループによる情報の保持と消去

まず, 情報の保持について考察する. シンボル 2, A, X を順に入力した場合のシミュレーション結果を図 7.1 に示す. 図 7.1 と図 5.3 からシンボル 1 が入力された場合にのみ Closed loop 1A が活性化し, シンボル A の情報が保持されていることが確認できた. また, 図 5.5 からシンボル 1 は Closed loop 1 のループを活性化させることでその情報を保持できていることが確認できた. 以上のことから, 提案したループによる情報の保持が正しく再現できた.

次に, 情報の消去について考察する. 図 5.1, 図 5.2 から, Closed loop 1 と Closed loop 2 は同時にループ活動を維持していない. これは, シンボル 1 が入力された場合は Closed loop 1 を活性化させることでそのループ活動を維持し, その後, シンボル 2 が入力された場合には, Closed loop 1 のループを停止し, Closed loop 2 のループを活性化できているためである. このとき, Closed loop 1 の停止には, Closed loop 2 の視床ニューロンから Closed loop 1 の間接路の線条体への入力が短期抑圧になっていることが確認できる. この短期抑圧をなくした場合の Closed loop 1 内と Closed loop 2 の各ニューロンの出力結果をそれぞれ図 7.2, 図 7.3 に示す. 図 7.2 から, Closed loop 1 はシンボル 2 の入力によってループ活動を停止できていな

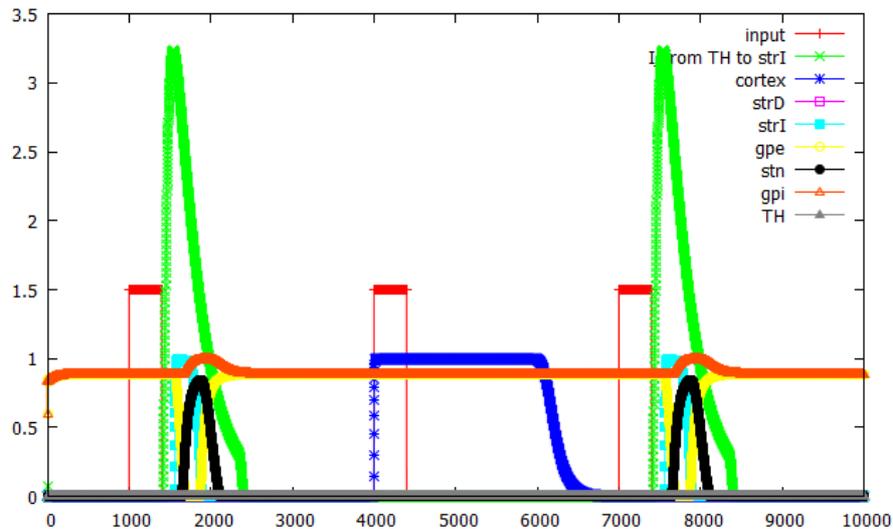


図 7.1: シンボル 2, A, X を入力した場合における Closed 1A 内の各ニューロンの出力結果.

い. 図 7.3 をみると, Closed loop 1 内の視床ニューロンが常に Closed loop 2 の間接路の線条体ニューロンに Gate OFF 信号を入力し続けているため, Closed loop 2 の間接路が活性化し続けているためである. よって, 正しいタイミングでループの間接路を活性化させるためには, 他のループの視床ニューロンから間接路の線条体ニューロンへの入力が短期抑圧でなければならないことが確認できた.

以上の結果から, 他のループの視床ニューロンから間接路の線条体への短期抑圧を再現してループによる情報の消去が正しく再現できた.

線条体ニューロン膜電位の双安定性の再現

提案モデルでは, 線条体ニューロン膜電位を再現するため, 式 4.5 を考案した. シミュレーションでは, $a = 4, b = 11, c = 8.5$ とした. 図 7.4 にそのグラフを示す.

図 5.3, 図 5.4 の直接路の線条体ニューロンを見ると, 皮質ニューロンの出力により活動電位が生じやすい up state になり, 皮質ニューロンから入力をなくなると活動電位の生じにくい down state になっていることが分かる. また, 図 5.5 のように, Closed loop 1A は Closed loop 1 の皮質ニューロンから Gate ON 信号入力を受けているため, Gate ON 信号入力と皮質ニューロンの同期入力の有無により up state と down state に遷移していることが確認できた. この結果から, 提案モデルでは線条体ニューロンに双安定性静止膜電位を再現することができたと考えられる.

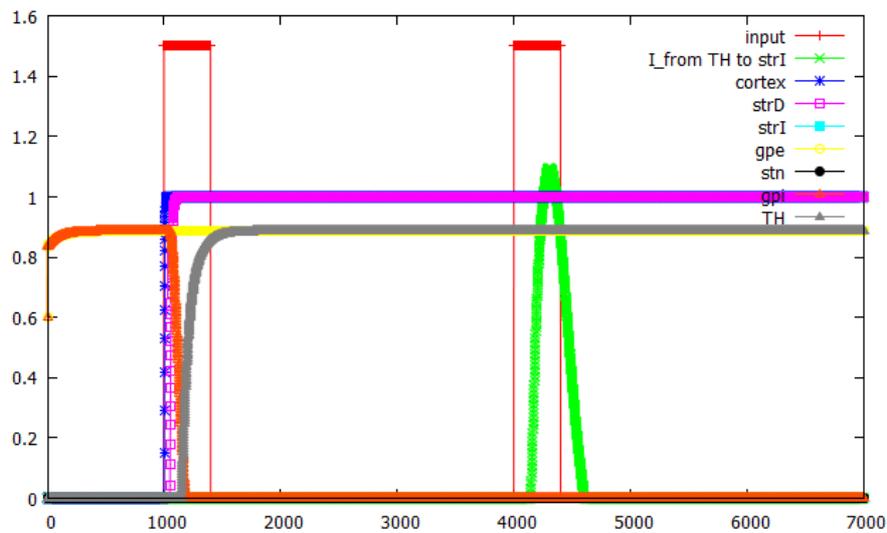


図 7.2: シンボル 1, 2 を入力した場合における Closed loop 1 内の各ニューロンの出力結果.

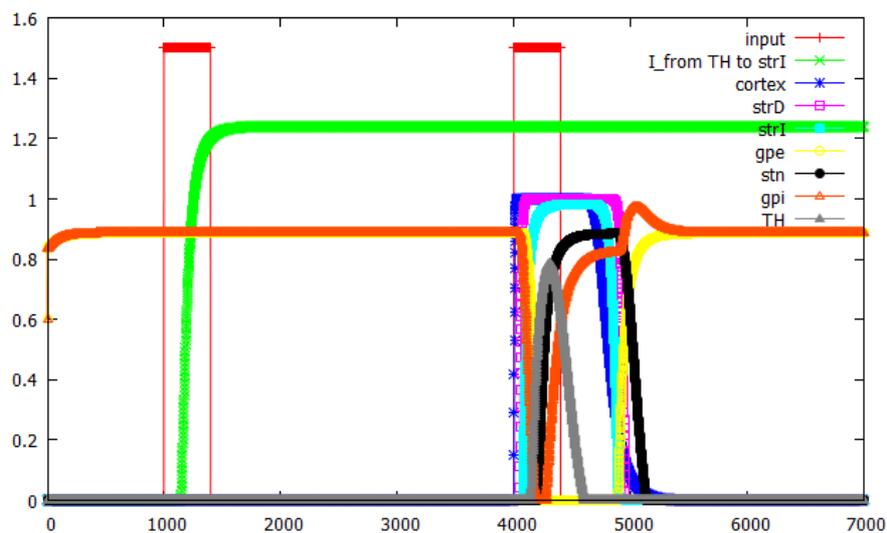


図 7.3: シンボル 1, 2 を入力した場合における Closed loop 2 内の各ニューロンの出力結果.

7.1.2 提案モデルと心理実験結果の比較

ルールベース学習

ルールを理解して課題遂行した場合, 被験者 B 以外は 1 セッション目から正答率は 100 % となった. 一般に, サルにワーキングメモリ課題を遂行させる場合, 年

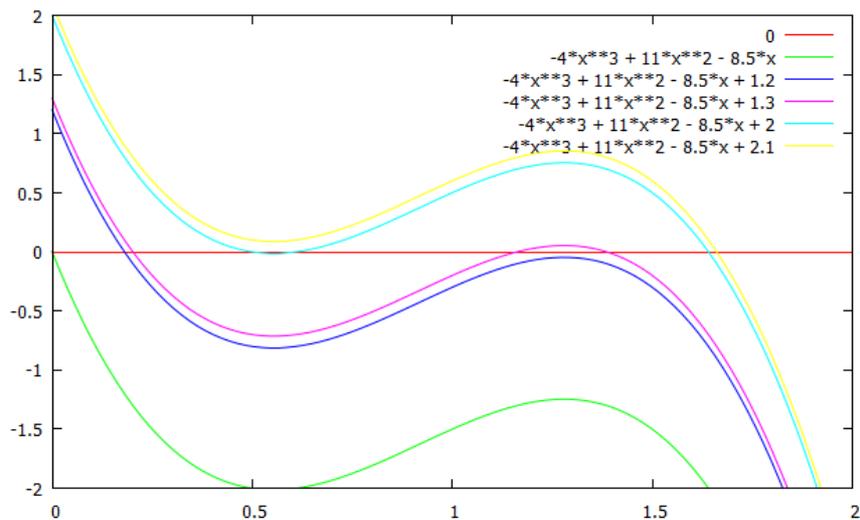


図 7.4: シミュレーションで使用した式 4.5 の図.

単位の時間が掛かる。ヒトとサルの実験で大きく異なる部分が、言語的な課題の説明が行えるかどうかであると考えられる。そのため、今回 1 セッション目で正答率が 100 % となった結果は、ヒトは試行錯誤ではなくルールベース学習が行われていると考えられる。

また、被験者 A がシンボル 1 とシンボル 2 の呈示の有無にかかわらず、シンボル A, シンボル X が連続して呈示された場合にはシンボル X に対して右シフトキーを押し、シンボル B, シンボル Y が連続して呈示された場合にはシンボル Y に対して右シフトキーを押していたという現象は、図 4.3 のように考案したネットワークモデルから Closed loop 1 と Closed loop 2 を取り除いたネットワークを使用して課題を遂行したと考えられる。今回構築したモデルから Closed loop 1 と Closed loop 2 を取り除いた場合のシミュレーション結果を図 7.5 に示す。図 7.5 から、ネットワーク全体の出力として、シンボル 1 とシンボル 2 の呈示の有無にかかわらず、シンボル A, シンボル X が連続して呈示された場合にはシンボル X に対して右シフトキーを押し、シンボル B, シンボル Y が連続して呈示された場合にはシンボル Y に対して右シフトキーを押す出力となっていることが確認できる。

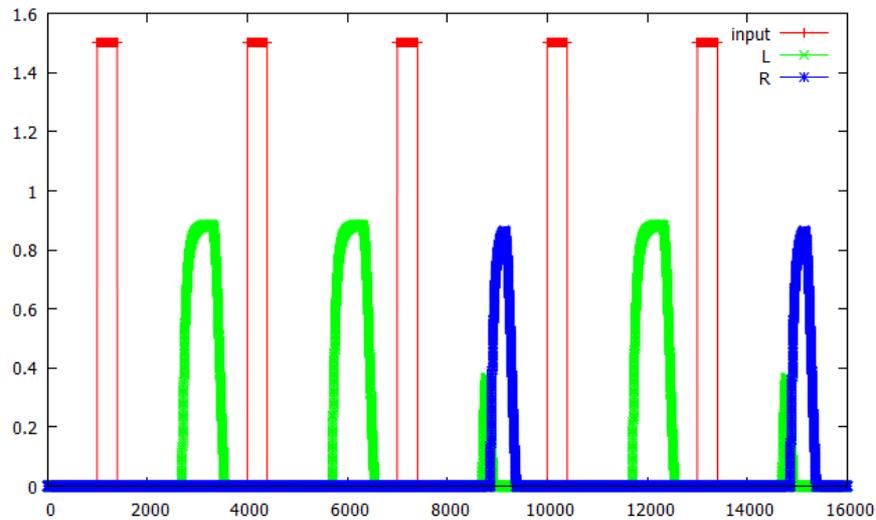


図 7.5: Closed loop 1, 2 ループがない場合のシミュレーション結果.

また, 3 人のモニターのうち, 1 名はシンボル X, シンボル Y に対して右シフトキーを押し, それ以外のシンボルに対しては, 左シフトキーを押しというルールで 1-2-AX 課題を行っていた. これらのことから, 以下のような回路が予め脳内に構築されているのではないかと考えられる. この回路を図 7.6 にまとめて示す.

提案モデルでは, 課題のルールを説明した場合, ルールベース学習によって 4 番目の回路が選択されたと仮定した. しかし心理実験結果から, 被験者は課題のルールを説明された場合, 1~4 の回路のうちから適切な回路を選択する学習が行われていると考えられる.

1. 全てのシンボルに対して左シフトキーを押し回路
2. 特定のシンボルに対しのみ右シフトキーを押し回路
3. 特定のシンボル 2 つが連続して呈示された場合に, 2 つめのシンボルに対して右シフトキーを押し回路
4. あるシンボルが呈示された後に, 特定のシンボル 2 つが連続して呈示された場合に, 2 つめのシンボルに対して右シフトキーを押し回路

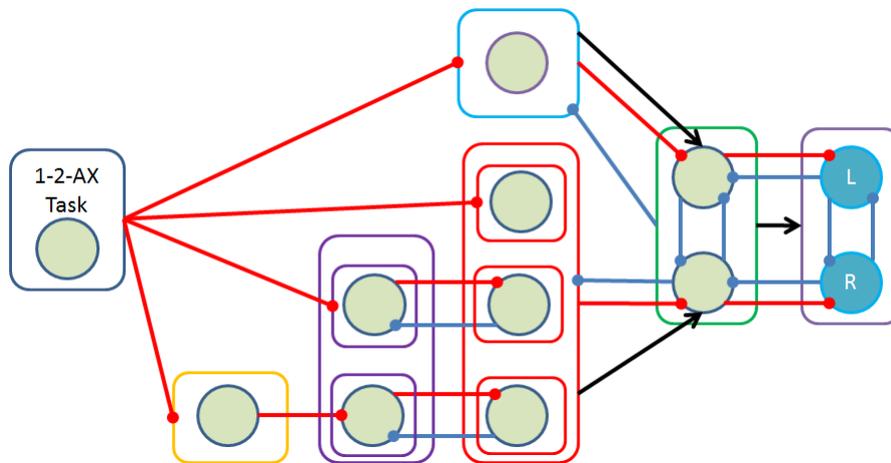


図 7.6: 脳内のネットワークモデル図.

正答率と反応時間について

実験 2 の正答率と反応時間について考察する.

被験者 G ~ H は 1-2-AX 課題のルールを把握できたにも関わらず, 正答率は 100[%] となっていない. これは, 集中力の低下や無意識のキー連打により生じたものではないかと考えた. そこで, 集中力の低下とキー連打の発生をノイズによるものと仮定し, 提案モデルの Open loop L, R の線条体ニューロンに対してホワイトノイズを加え, $\sigma = 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$ の場合のシミュレーションを行った.

シミュレーション条件を以下に示す.

- 入力シンボル数 : 600
- 入力シンボル列 : 被験者 G と同じ
- 反応ステップ数の計測 : SMA L ループの視床ニューロンの出力が 0.85 以上, または SMA R ループの視床ニューロンの出力が 0.8 以上となったときのステップからシンボル入力開始ステップ数を引いたステップ数

シミュレーション結果の正答率を表 7.1, 反応時間のヒストグラムを図 7.7 に示す. ヒストグラムはビンを 50 とした. 図 7.7 の横軸はステップ数, 赤い矢印はノイズがない場合の SMA L ループの視床ニューロンの出力が 0.85 以上となった場合の反応ステップ数 (以降, s_L と表記する) 1920, SMA R ループの視床ニューロンの出力が 0.8 以上となった場合の反応ステップ数 (以降, s_R と表記する) 2020 を示す.

被験者 G は左シフトキーを押す場合の反応時間と右シフトキーを押す場合の反応時間では左シフトキーを押す場合の反応時間の方が早いことが図 6.11 からわかり, 表 6.6 からその 2 つの反応時間に有意差がわかることが確認できる. シミュレー

シミュレーション結果も同様に、 s_L と s_R では s_L の方がステップ数が少ないことが分かる。よって、右シフトキーと左シフトキーを押す場合の反応時間の差を提案モデルでは再現することができた。

次に表 7.1 を見ると、 σ の値が増加しているとき正答率が現象していることが確認できた。よって、ホワイトノイズを用いて正答率が下がることを提案モデルで再現することができた。

表 7.1: ノイズをいれたシミュレーションの正答率 [%].

σ	0	0.25	0.5	0.75	1.0
正答率 [%]	100	100	98.5	98.2	81.3

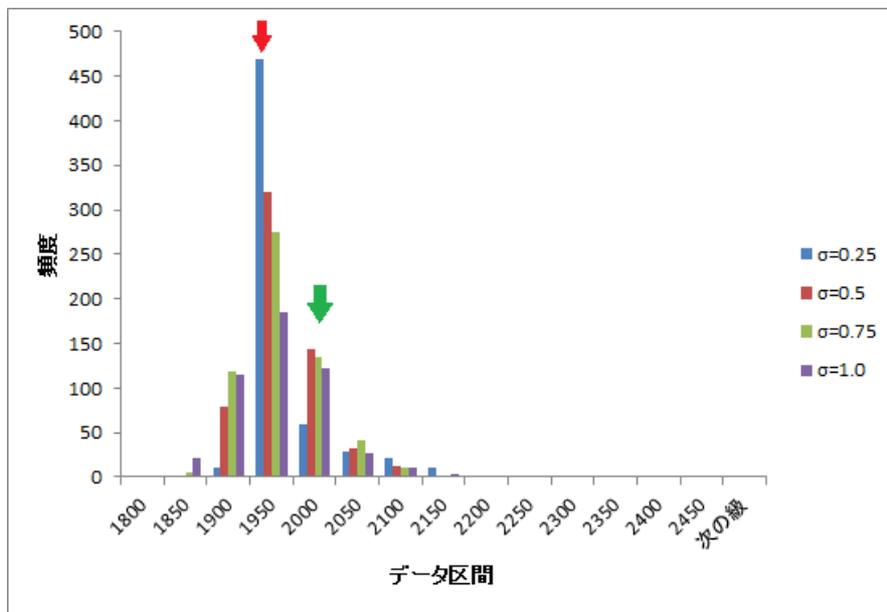


図 7.7: 提案モデルにノイズを入れた場合の反応時間.

被験者 G のヒストグラム 図 6.11 とシミュレーションのヒストグラム 図 7.7 を比較すると、シミュレーションのヒストグラムはノイズなしの s_L と s_R を中心に分布しているのに対し、被験者 G の分布は右に尾を引いている。特に 1000ms 以降の反応時間については、今回考案したモデルに含めなかった連想記憶やより早く課題遂行するための学習機構などによって再現できるのではないかと考えられる。

7.2 結論

本研究では, 大脳皮質-基底核-視床ループと各ニューロンの生理学的性質, 課題の言語的ルール説明に基づくルールベース学習を用いて1-2-AX課題を遂行可能なワーキングメモリモデルを構築することができた. また, 1-2-AX課題を用いて心理実験を行い, その結果と提案モデルのシミュレーション結果を比較することで, 提案モデルが被験者の反応時間の一部と正答率の変化を再現可能なことを確認した. そして, 深さの異なる階層的な基本回路によりワーキングメモリ課題が遂行されている可能性が示唆された.

謝辞

本研究を進めるにあたり, 指導教員の西野哲朗教授には多大なご指導と暖かいを賜りました. 心より感謝申し上げます.

田中繁特任教授には研究の進め方や研究生活の送り方, そして論文の執筆に際し細やかなご指導, 助言を頂きました. 厚く御礼申し上げます.

昨年脳研究グループに所属していた黄川田 翔氏には, 心理実験のプログラム作成や実験申請について, 菊池 紘氏にはシミュレーションプログラム作成について多くのご助言を頂きました. 多大な感謝を申し上げます.

最後に, 研究生生活をサポートしていただき, 様々なアドバイスをして下さった西野・若月研究室の皆様には深く感謝を申し上げます.

参考文献

- [1] Hazy TE, Frank MJ, O'Reilly RC. (2007). "Towards an executive without a homunculus: computational models of the prefrontal cortex/basal ganglia system". *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, 362(1485):1601-1613.
- [2] 山城愛. (2010). "大脳皮質と大脳基底核のネットワークモデルを用いたワーキングメモリの研究". 電気通信大学卒業論文.
- [3] 山城愛, 田中繁. (2012). "大脳皮質-基底核-視床ループ構造とルールベース学習を用いたワーキングメモリモデルの研究". 第10回日本ワーキングメモリ学会大会.
- [4] 苧阪直行編著. (2008). "ワーキングメモリの脳内表現". 京都大学学術出版会.
- [5] 苧阪直行著. (1998). "心と脳の科学". 岩波書店.
- [6] Baddeley A D, Hitch G. (1974). "The psychology of learning and motivation". *Advances in research and theory*. New York: Academic Press, 8:47-89.
- [7] Baddeley A D. (2000). "The episodic buffer: a new component of working memory?". *Trends in Cognitive Science*. 4:417-423.
- [8] Goldman-Rakic PS(1992). Working memory and the mind. *Scientific American* 3: 110-117.
- [9] Goldman-Rakic PS(1987). Circuitry of primate prefrontal cortex and regulation of behavior by representational memory. *Handbook of Physiology* 5(1): 373-417.
- [10] Fuster JM(1995). *Memory in the Cerebral Cortex: An Empirical Approach to Neural Networks in the Human and Nonhuman Primate*. Cambridge, MA. The MIT Press.
- [11] Ericsson KA, Kintsch W(1995). Long-term working memory. *Psychological Review* 102: 211-245.
- [12] 鹿島晴雄, 加藤元一郎 (1993). 前頭葉機能検査－障害の形式と評価法－. *神経研究の進歩*, 37, 93-109.

- [13] 船橋新太郎 (2005). 前頭葉の謎を解く. 京都大学学術出版会.
- [14] 伊藤正男監修, 金澤一郎, 篠田義一, 廣川信隆, 御子柴克彦, 宮下保司編集. (2003). “脳神経科学”. 三輪書店.
- [15] Jonston, D. Wu, S. M. (1995) Foundations of Cellular Neurophysiology. MIT Press.
- [16] 久野 宗, 三晶 昌美 編集. (1998) ”脳神経の化学ニューロン”, 岩波講座現代医学の基礎 6, 岩波書店.
- [17] 甘利 俊一, 外山 敬介 編集. (2000) ”脳科学大辞典”, 朝倉書店.
- [18] 内田豪. (2007). “神経細胞の膜電位がもつ双安定性と状態遷移:その仕組みと情報処理における役割”. 生物物理 47(6):pp362-367, 日本生物物理学会.
- [19] Wilson CJ, Kawaguchi Y. (1996). “The origins of two-state spontaneous membrane potential fluctuations spiny neuron”. J Neurosci, 16:2397-2410.
- [20] 福永篤志. (2009). “図解雑学 よくわかる 脳のしくみ”. ナツメ社.
- [21] Ding, j. Peterson, J D. Surmeier, J. (2008). “Corticostriatal and Thalamostriatal Synapses Have Distinctive Properties”. J Neurosci, 28(25):6483-6492.
- [22] 渡辺雅彦. (2008). “脳・神経科学入門講座 前編”. 羊土社.
- [23] Carrasco RC, Forcada ML, Valdés-Muñoz MA, Neco RP. (2000). “Stable encoding of finite-state machines in discrete-time recurrent neural nets with sigmoid units”. Neural Comput, 12(9):pp2129-2174.
- [24] PEBL: The Psychology Experiment Building Language
<http://pebl.sourceforge.net/>
- [25] 黄川田翔. (2011). “Item-Back 課題を用いたワーキングメモリの研究”. 電気通信大学卒業論文.
- [26] 佐藤雄亮. (2011). “大脳皮質-基底核-視床ループモデルとドーパミン作動性ニューロンモデルに基づく順序情報生成・学習メカニズムの研究”. 電気通信大学修士論文.
- [27] 佐藤亮太. (2011). “戦略の選択・変更にかかわるニューロン活動のメカニズムに関する研究”. 電気通信大学修士論文.