

コネクショニズムを応用したバイリンガル研究 — ACC を想定した修正エルマンネットによる検証 —

Simulation of Language Learning in Japanese-English Bilinguals
Using a Modified Elman Net

石崎 貴士

中村 江里¹

Takashi ISHIZAKI

Eri NAKAMURA

This study aims to simulate the language learning process of Japanese or English monolinguals and Japanese-English bilinguals. Thus far, connectionist researchers have conducted learning simulations with neural networks constructed using computer software. In this study, one such network, the Elman Net (Elman, 1991, 1993), was used to successfully simulate the language learning process of Japanese or English monolinguals; however, the language learning process of Japanese-English bilinguals could not be simulated. According to previous neural-imaging studies on bilinguals (e.g., Abutalebi & Green, 2008), the brain region called the anterior cingulate cortex (ACC) plays a crucial role in the language processing of bilinguals. Therefore, in this study, a modified version of the Elman Net, which attached the ACC's function to the conventional Elman Net, was employed. Using this network, the language learning process of Japanese-English bilinguals was successfully simulated.

[キーワード] コネクショニズム, バイリンガル, エルマンネット, ACC

¹ 山形大学地域教育文化学部4年次生

1. はじめに

1.1 コネクショニズムとは

コネクショニズム (connectionism) は、人間の脳内の神経細胞がどのように働いているのか、その働きにヒントを得て考案された情報処理モデルのことで、心理学の分野では並列分散処理 (parallel distributed processing)、工学系の分野では神経回路網 (neural network) とも呼ばれている。人間の脳内で一つ一つの神経細胞が行っている興奮と伝達というきわめて単純な作業を、膨大な数の神経細胞で構成されたネットワーク上で一斉に分散して行うことにより、従来は規則を適用してなされると考えられていたレベルの情報処理も、規則を適用することなく神経細胞間の結合強度と個々の神経細胞の閾値を調整することのみで実行可能となることを、コンピュータを用いたシミュレーションによって実証してきた (守 1996)。

言語学においては、Chomsky (1965) 以降、生得論による言語習得観が主流となっている。子どもは生まれてから数年の間に母語の複雑な文法規則の体系を習得するが、実際に耳にする言語の具体例には質的にも量的にも欠陥がある。それにもかかわらず子どもは正しい文法体系を習得し、それまで聞いたことのない文も話せるようになる。これは子どもに生まれつき文法体系のもととなるような規則が備わっているからだとして Chomsky は主張している。これに対し、コネクショニストモデルを支持する研究者たちは、情報を適切に処理するために前提となるのは生得的に備わった神経細胞のネットワークそのものであるとし、子どもの母語習得に、そのような前提となる規則は不要であると反論している (シユピツァー 2001)。

1.2 エルマンネット (単純再帰ネットワーク)

コネクショニズムでコンピュータ上に構築される神経細胞のネットワークは、提示する課題によってタイプが異なる。例えば、Rumelhart & McClelland (1986) が、動詞の原形を入力するとそれに対応する過去形を出力する英語の規則動詞と不規則動詞の過去形を学習するシミュレーションで用いたのはパーセプトロン型のネットワークであった。しかし、Elman (1991, 1993) のように関係詞節を含んだ複雑な英文の統語 (語

順)を学習させるような場合は、パーセプトロン型のネットワークは適さない。なぜなら、パーセプトロン型のネットワークは過去時制の学習のように特定の対応パターンを学習することにおいては有効であるが、統語(語順)のような時系列データを扱うことは困難だからである(守2001)。そこで、Elmanはエルマンネット(単純再帰ネットワーク)を考案した。

エルマンネットの特徴は、入力層(input units)と出力層(output units)の間で内的表層を形成する隠れ層(hidden units)の状態を一時的に保持する文脈層(context units)を配していることである。そのため信号を入力すると、その1つ前の信号が入力されたときの隠れ層の状態を保持していた文脈層からの情報も隠れ層に入ってくるので、隠れ層には新しく入力された情報と文脈層からの情報とが混在することになる。この仕組みを利用することで、同じ信号(例:B)を入力しても、1つ前に入力された信号がAであればAB、A'であればA'Bというように隠れ層において区別できるようになる(Figure 1を参照)。

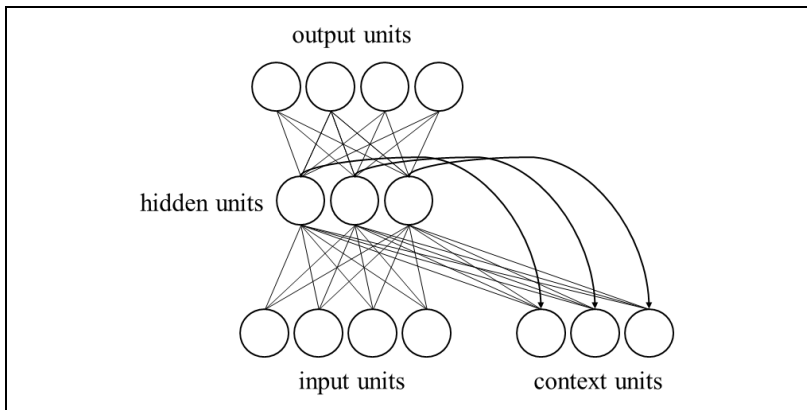


Figure 1. エルマンネットの構造
(Plunkett & Elman (1997: 152) をもとに作成)

加えて、エルマンネットでは出力として求められているものもパーセプトロン型のネットワークとは異なっている。つまり、特定の動詞の原

形に対応する過去形（のパターン）を出力として求めるのではなく、次に来る入力を予測させるのである。先述の Elman の例で言えば、関係代名詞（例：“who”）が入力された場合は、1つ前に入力された信号が“boy”であれば出力として“lives（のような三人称単数の主語に対応する動詞）”を、“boys”であれば“live（のような三人称複数の主語に対応する動詞）”を予測させることになる。シミュレーションでは、項目（単語）ごとに出力層のユニットを割り当てて、各ユニットの活性値を比較し、活性値が大きい項目ほど次の入力として出てくる確率が高いと判断する。Elman（1991）では、エルマンネットを用いて英語の関係詞節を含んだ複文構造を学習させた。学習完了後、結合強度を固定し、出力層のノードそれぞれの活性値を次の単語として生起する確率として調べたところ、“boys who Mary”の順で入力した場合は、単数主語に対応する他動詞のみに活性化が見られた。これはネットワークが“boys”を先行する目的語として認識していることを意味する。また“boys who Mary chases”の順で入力した場合には、他動詞“chases”の目的語となる名詞の活性化は見られず、複数主語に対応する動詞にのみ活性化が見られた。これはネットワークが先行する“boys”を“chases”の目的語として認識できているばかりでなく、そこで関係詞節が終わって、次に主節の動詞が続くことまで認識できていることを示している。

コネクショニズムのシミュレーションによって、従来、規則を適用して行われると考えられていた言語の処理が規則を介在させることなく再現できることが示された。このことは、母語話者が規則を意識することなく規則に適った言語使用を行っている事実と照らし合わせると大変興味深い。

2. 目的

2.1 先行研究

コネクショニズムをバイリンガル研究に応用しようと試みた先行研究に石崎（2015）がある。石崎（2015）は、今井（2010）が主張する言語カテゴリーの境界線を再現するシミュレーションを日本語母語話者・英語母語話者・バイリンガルを想定して実施した。今井（2010）は「ことばが世界を切り分ける」と主張している。例えば、私たちの動作は細

かな動きの差異まで考慮すると無限に近く存在するが、それらの動作がある基準に従ってくり、同じ動詞（例えば「歩く」、「走る」、「跳ぶ」等）という「ことば」を割り当ててカテゴリー化している(今井 2010: 5)。今井 (2010) は、このような言語カテゴリーが、その言語の母語話者の意識的な「認知」のみならず、無意識的な「知覚」にも影響を及ぼすとしている (今井 2010: 200)。

言語カテゴリーは母語によって形成されるため、母語が異なれば言語カテゴリーも違ってくる。実際、異なる2つの状況（動作）に対し、同じ表現（動詞）を割り当てて対応する言語もあれば、違う表現（動詞）を割り当てて対応する言語もある。例えば、下の Figure 2 で示した図1のような動作は日本語であればボウルにリンゴを「入れる」と言い、図2はペンにキャップを「はめる」、図3はタッパーにフタを「はめる」、図4はテーブルにカップを「置く」というように、4つの状況のうち図2と図3で同じ「はめる」という表現が用いられる。ところが英語の場合は、図1と2が“put in”という同じ表現、図3と4が“put on”という同じ表現になる (今井 2010:54)。





入れる	はめる	はめる	置く
図1	図2	図3	図4
			
PUT IN	PUT IN	PUT ON	PUT ON

Figure 2. 日本語・英語の言語カテゴリーの境界線例

(今井(2010: 54)をもとに作成)

これは、同じ状況であっても言語によって知覚されるポイントが異なるため、ある言語では2つの状況の間に類似性が抽出できても別の言語では類似性が抽出できないことを意味する。したがって言語が作り出す

カテゴリーの境界線は、日本語では図1と2、図3と4の間に、英語では図2と3の間に、それぞれ存在すると言える²。

石崎(2015)は、このような言語カテゴリーの境界線をシミュレーションによって再現することを試みた。まず、日本語母語話者と英語母語話者のそれぞれについてシミュレーションを実施したところ、どちらについても境界線を再現することができた。次に、日本語と英語の両方を学習するバイリンガルについてもシミュレーションを実施したところ、「はめる」という日本語の表現については日本語母語話者よりもリジッドな範囲で境界線が引かれ、「入れる」と“put in”, 「置く」と“put on”の間には明確な境界線が存在しないことが確認された。バイリンガルについては、今井(2010)も「二つの言語のそれぞれの母語話者と同じ『思考』を同時に二つ持っているということは考えにくい」(今井2010: 220)としながらもバイリンガル独自の言語カテゴリーの境界線について明確にしていなかったため、この結果は興味深いものであると思われる。

2.2 本研究の目的

しかし、石崎(2015)におけるシミュレーションは、母語話者やバイリンガルがすでに身につけている言語カテゴリーの境界線の「状態」を再現したものであって、それらの習得の「過程」を再現したものではない。それはシミュレーションに用いたのが、パーセプトロン型のネットワークであることに起因する。

そこで本研究では、先述のエルマンネットを用いて、言語カテゴリーの境界線(に沿った言語使用)を習得する「過程」について模擬する。その際、まず日本語と英語それぞれの母語話者の学習シミュレーションを行い、次に日本語と英語のバイリンガルの学習シミュレーションを実施する。

² 今井(2010:54)では、上段・下段に配した二段組みの図を用いてこれらのカテゴリーの境界線を表記している。石崎(2015)では、「カテゴリー知覚」の概念を応用して境界線の有無を判断するシミュレーションを実施する必要性から、動かされるモノと到達地点のモノとの関係から連続性を持たせて横一列に配置している。

3. 実験 I

3.1 信号変換のための共通フォーマット

コネクショニズムでは、神経細胞を繋ぐシナプスの結合強度と、それぞれの神経細胞が活性化する閾値を調整することにより、特定の刺激(入力信号)に対し望ましい反応(教師信号)が出力できるようになることを「学習」と見なす。本研究のように日本語と英語という異なる二つの言語による「学習」を再現するためには、これらの二言語を共通のフォーマットを用いて0か1の二値の信号に変換し、同一のネットワーク上でシミュレーションを行わなければならない。

本研究では、先述の言語カテゴリーの境界線により言語間の違いが、より顕著にあらわれる用例として、以下に示すものを学習の対象とした。

【日本語】

ボウル／に／リンゴ／を入れる
 窓／に／ガラス／をはめる
 タッパー／に／フタ／をはめる
 テーブル／に／カップ／を置く

【英語】

put / an apple / **in** / the bowl
 put / a glass / **in** / the window
 put / a lid / **on** / the Tupperware
 put / a cup / **on** / the table

シミュレーションでは、エルマンネットを用いて、斜線で区切ったこれらの構成要素を順に入力していき、次に続く構成要素を出力として予測させる。入出力の信号変換のフォーマットとしては、まず言語を特定するために1ビットを用いて日本語であれば“0”，英語であれば“1”とした。次に品詞を特定するために2ビットを用いて名詞なら“00”，動詞なら“01”，接置詞（前置詞・後置詞）なら“10”とした。ここまでの過程で同一のカテゴリーに複数の候補が存在した場合は、3ビットを用いてそれらを意味で区別した。その際、名詞のように日本語と英語で意味的に対応するものが一対一で存在した場合は、同じパターンを割り当

Table 1. コード変換表

構成要素	言語	品詞	意味
ボウル	0	00	000
窓	0	00	001
タッパー	0	00	010
テーブル	0	00	011
リンゴ	0	00	100
ガラス	0	00	101
フタ	0	00	110
カップ	0	00	111
を入れる	0	01	000
をはめる	0	01	010
を置く	0	01	100
に	0	10	000
the bowl	1	00	000
the window	1	00	001
the Tupperware	1	00	010
the table	1	00	011
an apple	1	00	100
a glass	1	00	101
a lid	1	00	110
a cup	1	00	111
put	1	01	000
in	1	10	000
on	1	10	100

てるようにした。また、日本語の「に」や英語の“put”のように区別する必要のないものについては、便宜的に“000”を割り当てた (Table 1 を参照) ³。

3.2 シミュレータ

本研究では、Plunkett たちによって開発された“tlearn”を用いてシミュレーションを行う (Plunkett & Elman 1997, McLeod, Plunkett & Rolls 1998)。この tlearn は、Windows や Mac といった汎用性の高い OS 上で動作し、操作性にも優れているのみならずインターネット上で公開されており、無料でダウンロードすることができる。また、操作方法についても Plunkett & Elman (1997) や McLeod, Plunkett & Rolls (1998) などのマニュアルに詳しく説明されている。

3.3 ネットワークの設定

tlearn を用いてシミュレーションを実行するには、ネットワークの構成を設定する設定ファイル (configuration file)、ネットワークに提示する入力信号を設定する入力信号ファイル (data file)、個々の入力信号に対する正しい出力を設定する教師信号ファイル (teach file) という 3 種類のファイルを作成しなければならない。

本研究では入出力とも 6 ビットを用いて信号を特定するため、設定ファイル (ファイル拡張子は “.cf”) でもネットワークの入力層と出力層のそれぞれが 6 ユニットになるよう設定した。また、隠れ層と文脈層については、入力層や出力層のユニット数の倍となる 12 ユニットの設けた (設定ファイルでの項目ごとの設定の詳細については Figure 3 を参照)。

入力層にはコード化された文の構成要素を表象する信号が、それぞれ一つずつ提示され、出力層での出力と教師信号との差に基づいて、適切なコードが出力されるようユニット間の結合強度を調整していく。この

³ 今回のシミュレーションでは、日本語と英語との対応を考慮したため、厳密な意味での品詞区分に適っていない。例えば、英語の他動詞“put”と対応させるために日本語の「を」を独立させずに後に続く動詞と併せて一つとして扱っている。また、日本語の名詞に冠詞がついていないため、英語の冠詞についても独立させずに後に続く名詞と併せて一つとして扱い、定冠詞と不定冠詞は意味で区分している。

ような入力を行うため、まず、日本語または英語を母語として習得するモノリンガルの場合を想定した入力信号ファイル（ファイルの拡張子は “.data”）を作成する。設定する入力信号は、1つの文を表すのにそれぞれ4つの信号提示（sweep という）が必要となる。この4つの信号を1セットとし、トレーニングの対象とする日本語文（4文）それぞれに対し10セットずつ、計40セット（計160 sweeps）用意する。作成した入力信号ファイルには、これらのセットがランダムに配置されており、このファイルを一巡（1 epoch という）すると、各文に対し10回ずつトレーニングを行ったことになる。

```

NODES:
nodes = 30
inputs = 6
outputs = 6
output nodes are 13-18
CONNECTIONS:
groups = 0
1-18   from 0
1-12   from i1-i6
1-12   from 19-30
13-18  from 1-12
19-30  from 1-12 = 1. & 1. fixed one-to-one
SPECIAL:
linear = 19-30
weight_limit = 0.1
selected = 1-12

```

Figure 3. 設定ファイルでの入力内容

最初から日本語と英語の両方を学習するバイリンガルを想定した入力信号ファイルについても同様の手順で作成するが、トレーニングの対象として日本語文（4文）とそれに対応する英語文（4文）の両方を組み込まなければならない。ファイル一巡で、各文に対し10回ずつのトレーニングを行うためには、両言語の文（8文）に対し10セットずつ、計80セット（計320 sweeps）を用意し、それらをランダムに配置する必要がある。また、これらの入力に対応する適切な出力を設定する教師信号ファイル（ファイル拡張子は “.teach”）については、データファイル

の先頭の行を最後の行に移動することにより作成する。

3.4 手続き

本研究では、母語として日本語、または英語を習得する場合、そしてバイリンガルとして初めから日本語と英語を同時に習得する場合のそれぞれの学習を模擬する。研究の大まかな流れとして、まず被験者を特定し、その被験者に適した学習率と慣性項を設定した後（これを初期状態とする）、母語として日本語（または英語）を習得する場合を想定したデータファイルを用いて学習をさせる（母語習得のシミュレーション）。次にネットワークを初期状態に戻して、最初から日本語と英語の両方を習得するバイリンガルを想定したデータファイルを用いて学習をさせる（バイリンガルによる学習のシミュレーション）。これらのシミュレーションの結果を踏まえ、学習の過程にどのような違いが見られるかを考察する。

`tlearn` を用いた具体的な手順としては、まず前節で設定したネットワークの設定ファイルと個々のシミュレーションに合ったデータファイルおよび教師信号ファイルを指定して、ネットワークのトレーニングを実行するためのプロジェクトファイルを作成する。また、トレーニング実行の際のオプション設定（**Training Options**）で、ユニット間の初期結合強度をランダムに割り振る乱数の種（**random seed**）の値を入力する。この値を統一することにより、特定の被験者を想定することができる（本研究では「602」とした）。このランダムシードに対し、適当な学習率（**learning rate**）と慣性項（**momentum**）も設定する（本研究では学習率を「0.1」、慣性項を「0.3」とした）。エルマンネットでは入力信号の提示順序は決まっているため、入力信号の提示方法については“**Train Sequentially**”を選択する。また、後の検証のためにトレーニング途中でのユニット間の結合強度を記録する“**Dump weights**”をチェックし、各文に対し 1000 回ずつのトレーニングを実施した時点での結合強度をファイル（ウェイトファイルという）として記録しておく。トレーニング実行後、テストオプション（**Testing Options**）の設定画面で、これらのファイルを指定し、どの段階で全ての入力に対し正しい出力ができるようになったのかを、付属の翻訳機能を活用しながら特定する（分

析手法の詳細については次節で述べる)。以上の作業をシミュレーションごとに繰り返す。

3.5 分析手法

エルマンネットにおける出力の分析としては、学習の対象とした日本語（または英語）による4文について正しく学べているかを、直前の要素を入力した時に、その後続く正しい要素を出力できているかによって検証する。そのため検証用に当該の4文それぞれを構成要素ごとに1度だけ提示する新たな入力信号ファイルと教師信号ファイルを作成する必要がある（バイリンガルについては日本語と英語を合わせた8文が対象となる）。また、実際のテストングにおいては、これらのファイルを2週走らせて検証を行う。これは、ネットワークが課題を認識するための助走として1週走らせた後に2週目の出力を見ることで、より課題に則した結果を得るためである。

`tlearn` には、0か1の二値で出力された信号のパターンを当該の構成要素に変換してくれる翻訳機能が備わっている。この機能を活用して正しい要素を予測できているかを見ていくわけであるが、その際、留意すべき点として、正解が複数にまたがる場合がある。まず、日本語を出力する場合は、第1要素として、どの文が来るのかは完全にランダムであるため正確に予想することができない。そこで、文頭に来る要素（「ボール」、「窓」、「タッパー」、「テーブル」）は、全て正解とみなすことができる（バイリンガルの出力においては、これらに加えて“`put`”も正解となる）。また、英語を出力する場合は、どの文も第1要素が“`put`”で始まるため、この段階でどの文なのかは特定できない。そのため第2要素の予測については、“`an apple`”, “`a glass`”, “`a lid`”, “`a cup`”の全てを正解とみなすことができる。

尚、学習が達成されたかの判定については、一度全てにおいて正しい出力をすることができたとしても、たまたま正しかったという可能性も否めない。そこで本研究では、5回連続で全ての出力を正しく行うことができた場合のみ学習が達成されたとみなすこととする。

3.6 結果と考察

各文に対し 1000 回トレーニングするごとに記録しておいたウェイトファイルを用いて、その時点での出力についての判定結果を確認し、以下に示す凡例に従い表にまとめた。まず、正しい出力の場合は「○」を記入、完全な間違いか「？」が出力された場合は出力された要素を記入、正解が複数あるため教師信号とは異なるが正解と言える場合は出力された要素を括弧で記入した。また、学習の達成についても 5 回連続で全ての要素に対し正しい出力が見られた段階から網掛けを施した。

結果として、日本語を母語として習得する場合は、延べ 176000 sweeps、各文 1 万 1 千回の試行を経た段階で、4 つの文を構成する全ての要素に対して正しい予測ができるようになった (Table 2 を参照)。また、英語を母語として習得する場合は、延べ 192000 sweeps、各文 1 万 2 千回の試行を経た段階で、正しい予測ができるようになった (Table 3 を参照)。ところが、バイリンガルの場合は、各文 100 万回の試行を行っても日本語文 (4 文) と英語文 (4 文) の両方で正しい出力をすることはできなかった (Table 4 を参照)。

今回のシミュレーションでは、ランダムシード、学習率、慣性項を統一することで同一の被験者を想定している。母語としての日本語・英語の習得については、それぞれ問題なく学習を達成しており、しかもそのタイミングが各文 1 万 1 千回 (日本語) と各文 1 万 2 千回 (英語) で近似していることも興味深い。一方、バイリンガルの学習については、どれだけトレーニングを重ねても日本語文と英語文の全てを正しく出力できるようにはならなかった。しかし、実際にバイリンガルとして二言語を流暢に話す人が存在している以上、二言語を同時に処理することは可能なはずであり、したがって、バイリンガルはモノリンガルとは異なる方法で言語を処理している可能性が示唆されたとも考えられる。

4. 実験 II

4.1 修正エルマンネットの提案

実験 I での結果を踏まえ、バイリンガル独自の言語処理について先行研究に当たった。その際、もともとコネクショニズムは脳における神経細胞のネットワークをモデルにしているため、バイリンガルの脳に関する

Table 3. 母語習得 (英語) のシミュレーション結果

入力	Sweeps (上段 = 遅べ / 下段 = 各文)									
	144000	160000	176000	192000	208000	224000	240000	256000		
出力 (正)	9000	10000	11000	12000	13000	14000	15000	16000		
put	○	○	○	○	○	○	○	○		
an apple	○	○	○	○	○	○	○	○		
in	○	○	○	○	○	○	○	○		
the bowl	○	○	○	○	○	○	○	○		
put	○	○	○	○	○	○	○	○		
a glass	(a cup)	(a cup)	(a cup)	(a cup)	(a cup)	(a cup)	(a cup)	(a cup)		(a cup)
in	○	○	○	○	○	○	○	○		○
the window	○	○	○	○	○	○	○	○		○
put	○	○	○	○	○	○	○	○		○
put	(a cup)	(a cup)	(a cup)	(a cup)	(a cup)	(a cup)	(a cup)	(a cup)		(a cup)
a lid	○	○	○	○	○	○	○	○		○
on	○	○	○	○	○	○	○	○		○
the Tupperware	the table	the table	the table	the table	the table	the table	the table	the table		the table
put	○	○	○	○	○	○	○	○		○
put	(an apple)	(an apple)	(an apple)	(an apple)	(an apple)	(an apple)	(an apple)	(an apple)		(an apple)
a cup	○	○	○	○	○	○	○	○		○
on	○	○	○	○	○	○	○	○		○
the table	○	○	○	○	○	○	○	○		○
put	○	○	○	○	○	○	○	○		○

る研究に着目した。バイリンガル脳の神経画像研究を行った Abutalebi & Green (2008) によると、バイリンガルが1つの言語で話そうとする場合、もう1つの言語を使おうとする衝動を ACC (Anterior cingulate cortex, 前帯状皮質) が抑制していること、またその当該言語をいつどのように使うのかという意志決定を絶えず行っていることが明らかになった。ACC とは、脳梁の外側に位置する皮質領域である帯状回の前部を指す。ACC の主な役割は、注意の制御に關することであり、自動的に活性化された過程を抑制することで、関係ない刺激を無視して脳の活動の焦点を絞り込むことを司ると考えられている (荳阪 2002)。

そこで本研究では、この ACC を想定した部位をエルマンネットに組み込むことにした。具体的には、文脈層から独立した隠れ層のユニットを新たに設けることにより、これらのユニットが従来の出力に影響を及ぼすことで自動化の抑制や注意の制御の役割を果たすことを期待した (Figure 4 の囲みの部分が該当)。

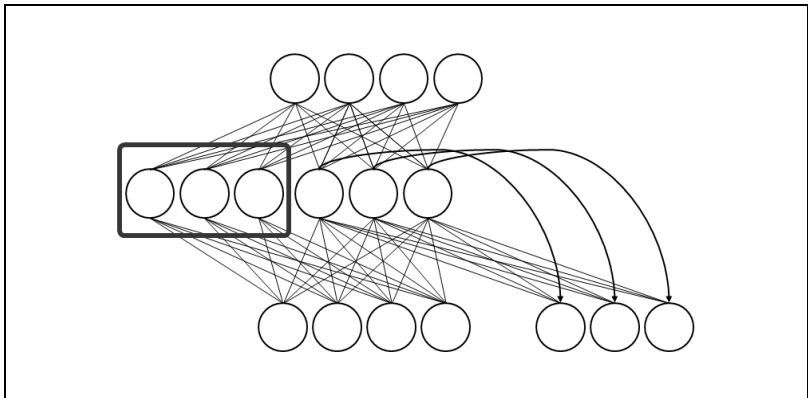


Figure 4. 修正エルマンネットの構造

4.2 ネットワークの設定

この ACC を想定した修正エルマンネットの機能を、実験 I で構築した tlearn 上のネットワークに組み込むため、設定ファイルを以下のように

に修正する。まず、隠れ層のユニット数を 12 から倍の 24 に増やす。次に文脈層との結合について、隠れ層ユニットの前半 12 ユニットは文脈層とは関連付けず、後半 12 ユニットのみを文脈層と関連付けた。このことによって、前半 12 ユニットの隠れ層が ACC の役割を担うことを想定した（設定ファイルでの項目ごとの設定の詳細については Figure 5 を参照）。

```
NODES:
nodes = 42
inputs = 6
outputs = 6
output nodes are 25-30
CONNECTIONS:
groups = 0
1-30    from 0
1-24    from i1-i6
13-24   from 31-42
25-30   from 1-24
31-42   from 13-24 = 1. & 1. fixed one-to-one
SPECIAL:
linear = 31-42
weight_limit = 0.1
selected = 1-24
```

Figure 5. 設定ファイルでの入力内容

4.3 手続きと分析手法

実験 I でのバイリンガルのシミュレーション結果と比較するため、実験 II でも実験 I と同様のランダムシード (602)、学習率 (0.1)、慣性項 (0.3) を用いて同一の被験者を想定する。また、手続きについても、実験 I のバイリンガルのシミュレーションと同様の入力信号ファイルと教師信号ファイルを用いて同様の手法により実施する。トレーニング実施後の分析についても、実験 I でのバイリンガルのシミュレーションと同様の手法を用いる。

4.4 結果と考察

トレーニング実施後、各文 1000 回試行するごとに記録しておいたウ

Table 5. バイリンガルのシミュレーション結果 (修正エルマンネット)

		Sweeps (上段 = 送入 / 下段 = 各次)									
入力	出力 (正)	3808000	3840000	3872000	3904000	3936000	3968000	4000000	4032000		
		1190000	1200000	1210000	1220000	1230000	1240000	1250000	1260000		
ボウル	に	○	○	○	○	○	○	○	○		
に	リング	○	○	○	○	○	○	○	○		
リング	をに入れる	○	○	○	○	○	○	○	○		
をを入れる	器	(put)	(put)	(put)	(put)	(put)	(put)	(put)	(put)		
器	に	○	○	○	○	○	○	○	○		
ガラス	ガラス	リング	リング	フタ	○	○	○	○	○		
をはめる	をはめる	○	○	○	○	○	○	○	○		
タッパー	タッパー	(put)	(put)	(put)	(put)	(put)	(put)	(put)	(put)		
に	に	○	○	○	○	○	○	○	○		
に	フタ	○	○	○	○	○	○	○	○		
フタ	をはめる	○	○	○	○	○	○	○	○		
をはめる	テーブル	(put)	(put)	(put)	(put)	(put)	(put)	(put)	(put)		
テーブル	に	○	○	○	○	○	○	○	○		
に	カップ	○	○	○	○	○	○	○	○		
カップ	を置く	○	○	○	○	○	○	○	○		
を置く	put	○	○	○	○	○	○	○	○		
put	an apple	○	○	○	○	○	○	○	○		
an apple	in	○	○	○	○	○	○	○	○		
in	the bowl	○	○	○	○	○	○	○	○		
the bowl	put	(器)	(器)	(器)	(器)	(器)	(器)	(器)	(器)		
put	a glass	○	○	○	○	○	○	○	○		
a glass	in	○	○	○	○	○	○	○	○		
in	the window	○	○	○	○	○	○	○	○		
the window	put	(ボウル)	(ボウル)	(ボウル)	(ボウル)	(ボウル)	(ボウル)	(ボウル)	(ボウル)		
put	a lid	(a glass)	(a glass)	(a glass)	(a glass)	(a glass)	(a glass)	(a glass)	(a glass)		
a lid	on	○	○	○	○	○	○	○	○		
on	the Tupperware	○	○	○	○	○	○	○	○		
the Tupperware	put	(ボウル)	(ボウル)	(ボウル)	(ボウル)	(ボウル)	(ボウル)	(ボウル)	(ボウル)		
put	a cup	(a glass)	(a glass)	(a glass)	(a glass)	(a glass)	(a glass)	(a glass)	(a glass)		
a cup	on	○	○	○	○	○	○	○	○		
on	the table	○	○	○	○	○	○	○	○		
the table	ボウル	(put)	(put)	(put)	(put)	(put)	(put)	(put)	(put)		

エイトファイルを用いてテストングを行い、日本語と英語の全ての文に対し次に続く要素が正しく予測できるようになったかを確認したところ、延べ 3904000sweeps, 各文 10 万 2 千回の試行を経た段階で、正しく予測できるようになった (Table 5 を参照)。このことは、実験 I で各文 100 万回ずつの試行後でも学習が達成できなかったことから鑑みると注目に値する。

本研究で新たに考案された修正エルマンネットによって、Abutalebi & Green (2008) の「バイリンガルが脳内でモノリンガルとは違う言語処理をしている」という主張を再現することができた。また、モノリンガルが各文 1 万 1 千回 (日本語) と各文 1 万 2 千回 (英語) で学習を達成しているのに対し、バイリンガルの場合は各文 10 万 2 千回と 10 倍近くかかっていることも大変興味深い。

5. 今後の課題

本研究では、ACC を想定した修正エルマンネットを用いてバイリンガルの学習シミュレーションを行った。今後は第二言語の習得を模擬したシミュレーションも行い、従来型のエルマンネットを用いての結果と比較して、本研究で示唆されたことが第二言語の習得においても言えるかどうかを検証していく予定である。

また本研究では、想定した被験者が一人であるため、今回の結果のみで一般的な結論を語るのは早計かもしれない。他の被験者による検証 (異なるランダムシードを用いる) を行ったり、クラスター分析など他の分析手法を取り入れたりするなど、より多角的な観点からのシミュレーション結果が積み上げられていくことが望まれる。

本研究における役割分担について

本研究における役割分担としては、研究のフレームとマネジメント及び実験の指導を石崎が担当し、実験の実施と分析については中村が担当した。また、実験の計画立案と結果の考察については両者で相談しながら実施した。また、論文の執筆に当たっては、石崎が 1, 2, 4.1 と 5 の、

中村が 3 と 4.2 から 4.4 の素稿を執筆し、その後、互いに校閲を行った。

参考文献

- Abutalebi, J., & Green, D. W. (2008) Control mechanisms in bilingual language production: Neural evidence from language switching studies. *Language and Cognitive Processes*, 23, 557-582.
- Chomsky, N. (1965) *Aspects of the Theory of Syntax*. Cambridge, MA: MIT Press. (安井 稔 (訳) (1970) 『文法理論の諸相』, 研究社)
- Elman, J. L. (1991) Distributed representations, simple recurrent networks, and grammatical structure. *Machine Learning*, 7, 195-225.
- Elman, J. L. (1993) Learning and development in neural networks: The importance of starting small. *Cognition*, 48, 71-99.
- 石崎貴士 (2015). 「バイリンガルにおける言語カテゴリーの境界線 : コネクショニストモデルによるシミュレーション」『東北英語教育学会研究紀要』第 35 号, 1-13.
- 今井むつみ (2010) 『ことばと思考』, 岩波書店.
- McLeod, P., Plunkett, K. & Rolls, E. T. (1998) *Introduction to Connectionist Modeling of Cognitive Processes*. Oxford: Oxford University Press. (深谷澄男 (監訳) (2005). 『認知過程のコネクショニスト・モデル』, 北樹出版)
- 守 一雄 (1996) 『やさしい PDP モデルの話 : 文系読者のためのニューラルネットワーク理論入門』, 新曜社.
- 守 一雄 (2001) 「単純再帰ネットワーク (エルマンネット) による文法の獲得」守 一雄・都築 誉史・楠見 孝 (編) 『コネクショニストモデルと心理学: 脳のシミュレーションによる心の理解』, 北大路書房.
- 荻阪満里子 (2002) 『脳のメモ帳 ワーキングメモリ』, 新曜社
- Plunkett, K., & Elman, J. L. (1997) *Exercises in Rethinking Innateness*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Rumelhart, D. E. & McClelland, J. L. (1986) On learning the past tenses of English verbs. In D. E. Rumelhart, J. L. McClelland &

the PDP Research Group (Eds.), *Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition*, Vol. 2 (pp. 216-271). Cambridge, MA: MIT Press.

シュピッツァー, M. (2001) 『脳 回路網の中の精神 : ニューラルネットが描く地図』(村井 俊哉・山岸 洋 (訳)), 新曜社 (Spitzer, M. (1996) *Geist im Netz: Modelle für Lernen, Denken und Handeln*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag. の邦訳)