

ACC を想定した修正エルマンネット — その適用可能性についての追検証 —

石 崎 貴 士

(山形大学大学院教育実践研究科)

中 村 江 里

(山形大学大学院教育実践研究科 M1 院生)

Further Evidence on a Connectionist Simulation Using a Modified Elman Net

Takashi ISHIZAKI

Eri NAKAMURA

Thus far, connectionist researchers have conducted learning simulations with neural networks using computer software. In Ishizaki and Nakamura (2019), one such network, the Elman Net (Elman, 1991), was used to simulate the language learning process of Japanese or English monolinguals and Japanese-English bilinguals. They found that the language learning process of Japanese or English monolinguals was successfully simulated. However, the learning process of Japanese-English bilinguals could not be simulated. According to previous neural-imaging studies on bilinguals (e.g., Abutalebi and Green, 2008), the frontal part of the cingulate cortex called the anterior cingulate cortex (ACC) plays a crucial role in the language learning processing of bilinguals. Therefore, Ishizaki and Nakamura (2019) modified the Elman Net to attach the ACC's function. With this modified Elman net, they found that the learning process of Japanese-English bilinguals could be successfully simulated. Yet, the learning target was phrases characterized by the language-specific differences of categorical representation (Imai, 2010). These phrases were also divided into chunks in a grammatically simplified manner. Thus, this study is aimed at replicating their simulation using a new data set of more grammatically complicated and realistic sentences. The results supported the findings of Ishizaki and Nakamura (2019).

[キーワード] コネクショニストモデル, バイリンガル, エルマンネット, ACC, 追検証

1 研究の背景

(1) コネクショニストモデル

コネクショニストモデル (connectionist model) とは、人間の脳における神経細胞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ある。人間の脳内の神経細胞一つ一つが行っているのは、興奮と伝達というきわめて単純な作業であるが、それ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くと、従来は規則の適用によっ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）の調整のみで学習が可能となる。このことを、コンピュータを用いたシミュレーションによって示したのがコネクショニストモデルであり、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 (守 1996)。

Chomsky (1965) 以降、言語学の分野では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。これは子どもに文法体系のもととなるような規則（普遍文法, Universal Grammar）が生まれつき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（e.g., Rumelhart & McClelland 1986）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普遍文法のような規則は不要であると反論している（シュピッツァー 2001）。

(2) 単純再帰ネットワーク（エルマンネット）

コネクショニストモデル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に用いたのはフィードフォワードのパーセプトロン型ネットワークであった。しかし、Elman（1991）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には、パーセプトロン型ネットワークは適さない。なぜなら、パーセプトロン型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、エルマンネットと呼ばれる独自の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、入力層と出力層の間で内的表層を形成する隠れ層の状態を一時的に保持する文脈層を配していることにある。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（図1を参照）。また、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。シミュレーションでは、項目（単語）ごとに入力層・出力層のユニットを割り当て、出力層での各ユニットの活性値を比較して、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。

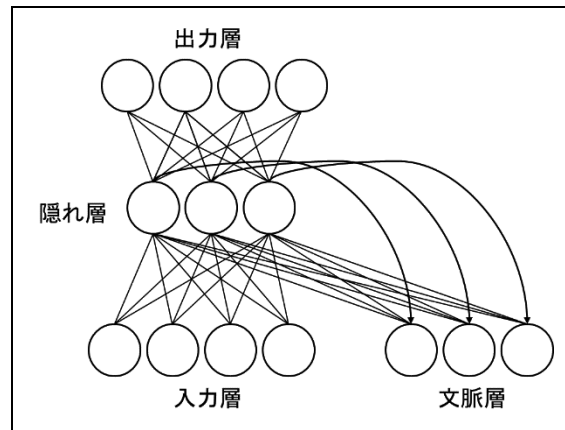


図1 エルマンネットの構造

(Plunkett & Elman (1997:152) をもとに作成)

Elman（1991）は、この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、出力層のユニット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。

2 目的

(1) 先行研究（石崎・中村 2019）

石崎・中村（2019）は、このエルマンネットを用いてバイリンガルによる言語習得のシミュレーションを試みた。その際の学習のターゲットとして、今井（2010）が主張する言語カテゴリーの境界線に注目した。それは、言語カテゴリーの境界

線に焦点を当てることにより、言語間に存在する差異をより際立たせることができるのではないかと考えたためである。今井は「ことばが世界を切り分ける」と主張している。例えば、実際に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動作についても、私たちはそれらのある基準に従ってくり、動詞(例えば「歩く」、「走る」、「跳ぶ」等)という「ことば」のラベルを割り当ててカテゴリー化していると言える(今井 2010: 5)。しかも、このような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、日本語であれば①ボウルにリンゴを「入れる」と言い、②ペンにキャップを「はめる」、③タッパーにフタを「はめる」、④テーブルにカップを「置く」というように、②と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、①と②が“put in”, ③と④が“put on”という同じ表現になる(今井 2010: 54)。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。

そこで石崎・中村(2019)では、同じ場面(状況)を共有しながらも日本語と英語で言語カテゴリーの境界線に違いが見られる用例として以下に示すようなフレーズを学習の対象とした。¹⁾

【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た。その結果、日本語を学習する場合(日本語

の母語話者を想定)は、各文 11,000 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。また、英語を学習する場合(英語の母語話者を想定)も、各文 12,000 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。ところが、日本語と英語の両方を学習させた場合(ここでは二言語を同時に習得するバイリンガルを想定)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)の両方が正しい出力となることはなかった。

(2) 修正エルマンネット

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。そこで石崎・中村(2019)では、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ストモデル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、注意の制御に関することであり、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)。

そこで石崎・中村(2019)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(図2の囲みの部分が該当)。

この ACC を想定したエルマンネットを用いて先述のバイリンガルによる学習シミュレーションを実施したところ、各文 122,000 回の試行を経た段階で日本語と英語の全ての文に対し次に続く要素を正しく予測できるようになった。モノリンガルと比較すると 10 倍以上かかっているが、従来のエ

ルマンネットで各文 100 万回ずつの試行後でも学習が達成できなかったことを考慮すると注目に値する。但し、このエルマンネットの修正は探索的な提案に過ぎず、より一般的な主張とするためには多角的なデータの積み上げが必要となる。そこで本研究では、その一環として学習の対象をより現実的な統語構造を加味したものとし追検証を行うことにした。

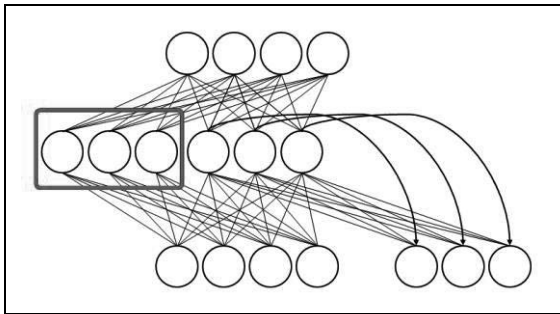


図2 修正エルマンネットの構造

(3) 修正エルマンネットを用いた追検証

石崎・中村 (2019) におけるシミュレーションでは、同じ動作 (状況) を共有しながらも日本語と英語で言語カテゴリーの境界線に違いが見られる用例として先述のようなフレーズを学習の対象としている。しかしながら、実際の言語の使用場面を考えた場合、フレーズのみが単独で存在するということは考えにくい。特に英語においては、主体を明確にしないまま動作について語ることは不自然であり、その主体 (主語) に応じて動詞の語形を変化させる (例えば、主語が三人称単数であれば現在形の動詞に-s を付加する、いわゆる三単現の-s) 必要もあるため非文法的であるともいえる。また、フレーズの構成要素の区切り方についても、日本語と英語の対応を優先してしまったため、本来であれば日本語と英語の差異が際立つ部分が丸め込まれてしまっていた。例えば、英語の他動詞と対応させるために、日本語においても助詞の「～を」を独立した要素とせず動詞に付加していたり、日本語には存在しない冠詞については、英語においても独立した要素とせず名詞に付加したりしていた。

そこで、本研究においては、学習の対象をフレーズから文に変更し、文末の標識として日本語に句点 (。), 英語にピリオド (.) を加えた。これに伴い英語においては主語による動詞の語形変化

(三単現の-s) も学習の対象に加わった。また、日本語の助詞や英語の冠詞についても独立した要素として扱うこととし、それに伴い英語の不定冠詞については、後に続く名詞が母音で始まる際に“a”を“an”に変化させる課題も学習の対象に加わった。

【日本語】

私／が／ボウル／に／リンゴ／を／入れる／。
私／が／窓／に／ガラス／を／はめる／。
私／が／タッパー／に／フタ／を／はめる／。
私／が／テーブル／に／カップ／を／置く／。
彼／が／ボウル／に／リンゴ／を／入れる／。
彼／が／窓／に／ガラス／を／はめる／。
彼／が／タッパー／に／フタ／を／はめる／。
彼／が／テーブル／に／カップ／を／置く／。

【英語】

I / put / an / apple / in / the / bowl / .
I / put / a / glass / in / the / window / .
I / put / a / lid / on / the / Tupperware / .
I / put / a / cup / on / the / table / .
He / puts / an / apple / in / the / bowl / .
He / puts / a / glass / in / the / window / .
He / puts / a / lid / on / the / Tupperware / .
He / puts / a / cup / on / the / table / .

これらの文を学習の対象にすることにより、石崎・中村 (2019) よりも現実的な統語構造を加味したデータセットによるシミュレーションが可能となる。その際のリサーチ・クエスチョンは、以下の通りである。

- RQ1: 今回のデータセットを用いたシミュレーションにおいても、モノリンガルを想定した課題については石崎・中村 (2019) と同様に従来のエルマンネットでは学習が可能であるか。
- RQ2: 今回のデータセットを用いたシミュレーションにおいても、バイリンガルを想定した課題については石崎・中村 (2019) と同様に従来のエルマンネットでは学習が不可能であるか。
- RQ3: 今回のデータセットを用いたシミュレーションにおいても、バイリンガルを想定した課題については石崎・中村 (2019) と同様に ACC を想定した修正エルマンネットでは学習が可能であるか。

3 方法

(1) 信号変換フォーマット

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言語による「学習」を再現するには、これら異なる二言語を入出力するために共通のフォーマットで 0 と 1 から成る信号に変換する必要がある。しかも、このフォーマットによって二言語に共通する要素と二言語を区別する要素の両方が表出できなければならない。このことを踏まえ、本研究では Elman (1991) とは別の変換フォーマットを提案している。

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 3 ビットを用いて、代名詞なら“001”，名詞なら“010”，動詞なら“111”，接置詞（前置詞・後置詞）なら“101”，冠詞なら“110”，区切り符号（句点・ピリオド）なら“000”とした。ここまでの過程で同一のカテゴリーに存在する複数の候補については、さらに 3 ビットを用いてそれらを細分化した。但し、代名詞・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する場合は、同じパターンを割り当てるようにした。また、区切り符号のようにそれまでの区分けにより更なる細分化を必要としないものについては、便宜的に“000”を割り当てた（表 1 を参照）。以上、計 7 ビットを用いて入出力のために言語情報を信号変換した。

(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) ネットワークの設定

上述の 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。

表 1 コード変換表

言語	日本語	0
	英語	1
品詞	代名詞	001
	名詞	010
	動詞	111
	接置詞	101
	冠詞	110
	区切り符号	000
代名詞	私・I	000
	彼・He	001
名詞	ボウル・bowl	001
	窓・window	010
	タッパ・Tupperware	100
	テーブル・table	011
	リンゴ・apple	101
	ガラス・glass	110
	フタ・lid	111
	カップ・cup	000
	動詞	入れる
はめる		110
置く		011
put		101
puts		010
接置詞	が	001
	に	010
	を	100
	in	110
	on	101
冠詞	a	001
	an	010
	the	100
区切り符号	。・.	000

本研究では、入出力とも 7 ビットを用いて信号を特定するため、設定ファイルでもネットワーク

の入力層と出力層のそれぞれが7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、はじめにシミュレーションを行う従来型のエルマンネットでは、入力層や出力層のユニット数の倍となる14ユニットを設けた。一方、ACCを想定したエルマンネットについては、隠れ層のユニット数を14から倍の28に増やし、後半12ユニットのみを文脈層と関連付け、前半12ユニットは文脈層とは関連付けなかった。このことにより、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。

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（次に続く構成要素の予測）と教師信号（次に続く正しい構成要素）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（および文脈層以外のユニットの活性に係る閾値）を調整していく。このような入力を行うため、設定する入力信号は1つの文を表すのにそれぞれ8つの信号提示（sweep という）が必要となる。入力信号ファイルでは、この8つの信号を1セットとし、トレーニングの対象とする文（モノリンガルを想定した学習では日本語か英語で各8文、バイリンガルを想定した学習では日本語と英語の計16文）それぞれに対し10セットずつ（モノリンガルを想定した学習では計80セット、計640 sweeps、バイリンガルを想定した学習では計160セット、計1280 sweeps）用意した。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。なお、これらの入力に対応した適切な出力を設定する教師信号ファイルについては、入力信号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した。

(4) 手続き

本研究では、モノリンガルとして日本語または英語を習得する場合と、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）、モノリンガルとして日本語（または英語）を習得する場合を想定した入力信号ファイルを用いて学習をさせる。次にネットワークを初期状態に戻し、

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入力信号ファイルを用いて同じネットワークに学習をさせる。このバイリンガルを想定した学習シミュレーションについては、学習が達成できなかった場合、ACCを想定した修正エルマンネットを用いて再度シミュレーションを実施する。

tlearn を用いたシミュレーションの具体的な手順として、まず前節で示したネットワークの設定ファイルと当該の入力信号ファイルおよび教師信号ファイルによって構成されるプロジェクトファイルを指定し、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「25」とした）。これに対し、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「0.3」、慣性項を「0.4」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、各文に対しモノリンガル課題では100回ずつ、バイリンガル課題では1,000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。以上の作業をシミュレーションごとに繰り返す。

(5) 分析手法

まず、試行における実際の出力値と教師信号の値との差の総和をエラーの程度として RMS（Root Mean Square, 二乗平均平方根）を算出し、試行の進行とともにその変化を辿った RMS エラー曲線によって学習の推移を概観する。次に、個々の出力の分析として、学習の対象とした文（モノリンガル：8文、バイリンガル16文）について正しく学習しているかを、直前の構成要素を入力した時に、その後続く正しい構成要素を出力できているかを見ることで確認する。その際、トレーニング時

に記録しておいたウェイトファイルを用いて検証する。²⁾

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する翻訳機能が備わっているので、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。その際の留意点として、正解が複数にまたがる場合を考慮する必要がある。まず、文頭の第 1 要素については、どの文が来るのかがランダムであるため、文頭に来る要素（「私」、「彼」、「I」、「He」）は、全て正解とみなすことができる。さらに、日本語を出力する場合は、「が」の後の第 3 要素についても「ボール」、「窓」、「タッパー」、「テーブル」のどれが来ても正解となる。また、英語を出力する場合は、「put」あるいは「puts」の後の第 3 要素についても「an」と「a」のどちらも正解とみなすことができ、「a」の後の第 4 要素についても「glass」、「lid」、「cup」のいずれも正解と見なせる。

最終的な学習達成の判定については、ある時点のウェイトファイルで全ての文が正しい順序で構成要素を出力できたとしても、たまたま正しかったという可能性も否めないため、本研究では、それ以降のウェイトファイルでも連続して全ての文で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。

4 結果と考察

(1) モノリンガルを想定したシミュレーション

RQ1: 今回のデータセットを用いたシミュレーションにおいても、モノリンガルを想定した課題については石崎・中村 (2019) と同様に従来のエルマンネットで学習が可能であるか。

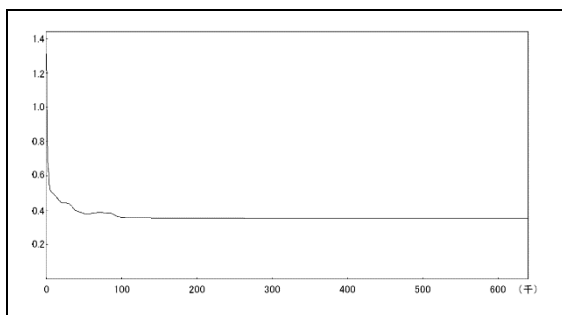


図 3 モノリンガルとしての日本語学習
(RMS エラー曲線)

図 3 は、従来のエルマンネットを用いてモノリ

ンガルとしての日本語学習を模擬した結果である。8 種類の日本語の文に対し、各文 10,000 回 (640,000 sweeps) の学習を行ったところ、上図の RMS エラー曲線が示すように学習が収束していく様子が見られた。そこで、ウェイトファイルを用いて個々の出力についての検証を行ったところ、各文 1,400 回の試行を経た段階 (89,600 sweeps) で 8 種類全ての日本語文に対し正しい出力ができるようになっていたことがわかった。

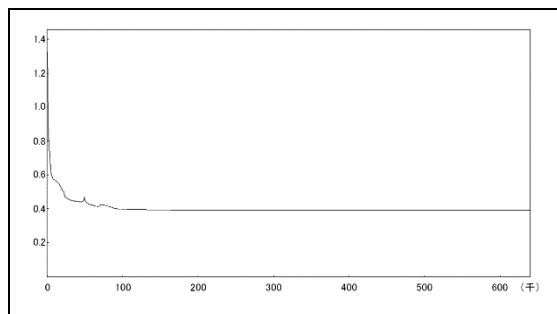


図 4 モノリンガルとしての英語学習
(RMS エラー曲線)

また、図 4 は、従来のエルマンネットを用いてモノリンガルとしての英語学習を模擬した結果である。8 種類の英語の文に対し、日本語の時と同様に各文 10,000 回 (640,000 sweeps) の学習を行ったところ、上図の RMS エラー曲線が示すように学習が収束していく様子が見られた。そこで、ウェイトファイルを用いて個々の出力についての検証を行ったところ、各文 1,300 回の試行を経た段階 (83,200 sweeps) で 8 種類全ての英語文に対し正しい出力ができるようになっていたことがわかった。文法的な観点からすれば、英語の方が定冠詞 (the)・不定冠詞 (a と an) の使い分けや動詞における三単現の-s の有無、同位置における前置詞の使い分け等、日本語よりも課題が複雑なはずであるが、学習完了までに要した回数が日本語と比べてほぼ差がなかったことは興味深いと思われる。

以上のことから、モノリンガルを想定した課題については石崎・中村 (2019) と同様に従来のエルマンネットで学習が可能であることが確認された。

(2) バイリンガルを想定したシミュレーション

RQ2: 今回のデータセットを用いたシミュレーションにおいても、バイリンガルを想定した課題

については石崎・中村 (2019) と同様に従来のエルマンネットでは学習が不可能であるか。

図5は、従来のエルマンネットを用いて日本語と英語のバイリンガルとしての学習を模擬した結果である。8種類の日本語文と8種類の英語文それぞれに対し、モノリンガルの10倍の100,000回(12,800,000 sweeps)の学習を行ったが、下図のRMSエラー曲線が示すように学習の収束は見られなかった。また、ウェイトファイルを用いて個々の出力についての検証も行ったが、日本語文と英語文の16種類全てで正しい出力ができた事例は見られなかった。従って、学習が達成されたとみなすことはできず、石崎・中村(2019)と同様、バイリンガルを想定した課題については従来のエルマンネットでは学習ができないことが確認された。

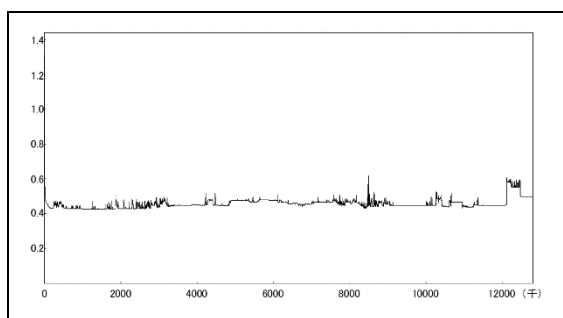


図5 バイリンガルとしての学習
(従来のエルマンネット)

RQ3: 今回のデータセットを用いたシミュレーションにおいても、バイリンガルを想定した課題については石崎・中村(2019)と同様にACCを想定した修正エルマンネットで学習が可能であるか。

上述の通り、バイリンガルを想定した学習シミュレーションについては従来のエルマンネットで学習が達成できなかったため、ACCを想定した修正エルマンネットを用いて再度シミュレーションを実施した。図6は、修正エルマンネットを用いてバイリンガルの学習を模擬した結果である。日本語文と英語文それぞれに対し、先ほどと同様100,000回(12,800,000 sweeps)の学習を行ったところ、下図のRMSエラー曲線が示すように学習が収束していく様子が見られた。そこで、ウエイ

トファイルを用いて個々の出力についての検証を行ったところ、各文77,000回の試行を経た段階(9,856,000 sweeps)で日本語文と英語文16種類全てに対し正しい出力ができるようになっていたことがわかった。以上のことから、バイリンガルを想定した課題については石崎・中村(2019)と同様にACCを想定した修正エルマンネットで学習が可能であることが確認された。

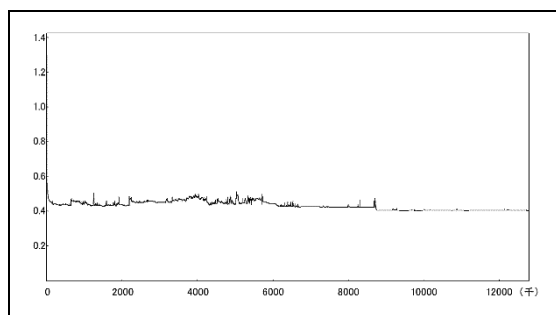


図6 バイリンガルとしての学習
(修正エルマンネット)

5 今後の課題

本研究では、石崎・中村(2019)が探索的に提案した修正エルマンネットについて、より現実的な統語構造を加味したデータセットを用いた追検証を実施し、先行研究を支持する結果が得られた。しかしながら、本研究で想定した被験者は一人(random seedを統一)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(異なるrandom seedを用いる)による検証や他の入力信号ファイル(被験者を取り巻く言語環境を想定)による検証を行ったり、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、今後、より多角的な観点からのシミュレーション結果を積み上げていく必要がある。

また、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が、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。

注

* 本研究における役割分担としては、中村がシミュレーションの実行・分析に係る元データとフォ

ーマットの作成を担当し、実験の実施と分析については石崎が担当した。また、論文の執筆に当たっては、石崎が素稿を執筆し、その後、互いに校閲を行った。

1) 本研究に先立って石崎 (2015) では、このような言語カテゴリーの境界線をパーセプトロン型のネットワークで再現することを試みた。日本語・英語それぞれのモノリンガルについてシミュレーションを実施したところ、そのどちらについても境界線を再現することができた。また、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、独自の境界線があることが示された。これについては今井(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) としながらバイリンガル独自の言語カテゴリーの境界線を明示していないため、興味深いものであると思われる。

2) 検証用に、当該の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。実際のテストングにおいては、このファイルを 2 周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 周走らせた後に 2 周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。

引用文献

- 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.
- 今井むつみ(2010) 『ことばと思考』, 岩波書店.
- 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.
- 石崎貴士・中村江里(2019) 「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」, 『山形英語研究』, 第 16 号, 13-34.
- 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, pp. 26-37.
- 荳阪満里子 (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)