

■ワークショップ

運動系列予測学習仮説

乾 敏郎*

要旨：言語中枢と呼ばれる複数領域からなるネットワークでの情報処理に関するモデルである「運動系列予測学習仮説」を提案した。我々はこの仮説を通じて、模倣学習と予測学習の重要性を主張した。ここでの模倣は、視覚情報から自己の運動情報への変換（見まね、ジェスチャーの理解）や聴覚情報から自己の運動情報（構音指令）への変換（聞きまね、復唱）が重要となる。他者の運動指令を予測しつつ、模倣学習を進めるというのが、運動系列予測学習仮説である。モデルでは、40野-44野においてメンタルシミュレーションが実現され、44野では系列情報の生成を、40野ではそれに対応する視覚または音韻情報が生成され、音韻情報は Wernicke 野を活動させ、視覚情報は楔前部、高次視覚野を活動させる。一方、45野-44野の相互作用を通じて、視覚、聴覚情報から次の運動指令（アクションユニット）が予測、生成される。

神経心理学 14; 144-149, 1998

Key word：言語機能、ニューラルネットワーク、予測学習、構文、ワーキングメモリ
language function, neural network model, prediction learning, syntax, working memory

近年、脳のイメージング研究が進み、人間の高次の脳内メカニズムについても徐々に明らかにされつつある。我々は、functional MRI を用いたニューロイメージングの研究とニューラルネットワークの理論的研究によって、言語・非言語コミュニケーション機能が脳内でいかに実現されているかを明らかにしようとしている。本稿ではこれらの研究の基礎をなす「運動系列予測学習仮説」について紹介する。これは主として言語中枢と呼ばれる複数領域からなるネットワークでの情報処理に関するモデルである。我々はこの仮説を通じて、模倣学習と予測学習の重要性を主張したい。以下では、ニューロイメージング研究の成果を基礎に関連領域の機能分担について考察する。

I 40野と島 (insula)

下頭頂葉の前部に40野がある。40野は次の

2つの課題で活動する。すなわち、手の使用と音韻のワーキングメモリ課題である。手の使用に関しては、

- 1) 手の動きを誘導するための体性感覚的空間情報の処理が右の40野でなされる。これは一種の自己中心的空間の表現と言える。
- 2) 手の運動のイメージ化において左の40野が活動する。また、手の運動系列の学習時に左の40野が活動する。

さらに、ジェスチャーの理解に左下頭頂葉が重要であることも知られている。一方、子音の系列の短期記憶課題から、音韻のワーキングメモリの一部の機能が左の40野にあることが明らかにされている。一般に音韻のワーキングメモリ課題では、Broca 野、左40野、島が同時に活動する。

II 聴覚野と Wernicke 野

1998年7月24日受理

Motor Sequence Prediction Learning Hypothesis

* 京都大学大学院情報学研究科, Toshio Inui : Department of Intelligence Science and Technology, Graduate School of Informatics, Kyoto University

(別刷請求先：〒606-8501 京都市左京区吉田本町 京都大学大学院情報学研究科 乾敏郎)

音韻を受容するときは両側の聴覚野が活動する。それが単語の場合には Wernicke 野の活動が見られる。単語の聴覚刺激の場合、特に意味処理を明示的に要求しなくとも Wernicke 野の活動が見られる。多くのイメージング研究から、Wernicke 野は音声認識（語音の処理）の中核であると考えられる。上側頭回のニューロンは、被験者本人が話しているときにも活動を示すとともに、逆に抑制されるニューロンもある。

III Broca 野

Broca 野も 40 野と同様、手の運動と音韻処理に関わっているようである。Broca 野は前方の下前頭回三角部と下前頭回弁蓋部に分かれる。前者が 45 野、後者が 44 野である。これらの領域はそれぞれ異なる機能を有していることが明らかにされつつある。

まず左の 44 野の活動が認められる課題として、

- ①音韻の短期記憶
- ②内言（internal speech）
- ③黙読
- ④手の運動イメージの生成
- ⑤手のパターン認知
- ⑥音楽のリズム判断課題

また左の 45 野の活動が認められる課題として、

- ①単語のリストや文を聞く
- ②単語を構成する音韻の検出課題
- ③単語リストの記銘時
- ④把持動作の観察
- ⑤視覚刺激の移動ルールの顕在学習時
- ⑥鏡映描写の学習の初期
- ⑦三段論法の推論

以上のようにイメージング研究から 44 野と 45 野は異なる課題で活動するが、この意味については後に詳しく考察する。また我々のイメージング研究から、構文解析に Broca 野が重要な機能を果たしていることが明らかにされた (Inui et al, 1998)。

IV その他の前頭葉機能

前頭葉の背外側中部（mid dorso-lateral prefrontal area）46 野は Broca 野の背側にあり、さまざまな課題で活動する。最近この領域は、モダリティーによらず、適切な反応の選択およびその指令に関わっているという考えに到達した (Frith, 1998)。刺激と反応（行動）の任意のマッピングがこの付近で形成されると考えられる。どの刺激のときにどう応答するかは任意に決められ、我々はすぐに学習できる。背外側前頭前野の後部に 9 野がある。9 野は従来、46 野とともにワーキングメモリのモニタリングをしている所だと考えられていた。これに加えてここではイメージの維持や操作に関わっていると考えことにする。関係の把握には 9 野と 6 野が重要な役割を果たすようである。なお 44 野と 9 野の境界付近は動詞の生成時に強く活動する。一方、6 野は外側部の運動前野と内側部の前補足運動野、および補足運動野に分かれる。最近これらいずれの部位もイメージ生成と関係していることがわかってきた。

V ワーキングメモリ再考

ワーキングメモリを構成する下位機能として中央実行装置、構音ループ、視空間スケッチパッドがある。中央実行装置は背外側中部前頭前野 (mid DLPFC) 46 野に対応する。9 野の一部を含むかもしれない。視空間スケッチパッドは前頭葉の 6 野や 9 野が後頭頭頂葉の楔前部に指令を送り、これがさらに後頭連合野（18 野、19 野）を活性化させることにより実現されていると考える。構音ループは構音器官を直接駆動し、発声するかしないか（内言）にかかわらず、運動指令信号を用いて、内的に音韻を保持する役割を果たしている。内言であっても、高次の聴覚野や Wernicke 野は活動することが知られてる。内言でも「自分の声が聞こえる」ような気がするのはこのためである。構音ループの脳内メカニズムは後に詳しく考察する。

VI 運動系列予測学習仮説

言語活動のうち最も重要なのが、構文処理であり、そのための文法獲得は認知発達における

最も重要な機能である。ところで我々はここで以下のような仮定を置くことにする。

- 1) 文法獲得を含む認知機能の発達には模倣機能が中心的役割を果たす。
- 2) 模倣により、対象（刺激）が自己中心的に表現される。
- 3) 自己中心的表現とは自己の身体運動を入力とする対象の順モデルである。
- 4) 自己中心的表現は対象の時間変化の予測を含む。

ここでの模倣には、視覚情報から自己の運動情報への変換（見まね、ジェスチャーの理解）や聴覚情報から自己の運動情報（構音指令）への変換（聞きまね、復唱）が重要となる機能となる。おそらく、予測と模倣の2つの機能が一体化されており、対象の動きを予測的に模倣学習を進めていると考えられている。つまり、他者の運動指令を予測しつつ、模倣学習を進めるというのが、運動系列予測学習仮説である。注意しなければならないのは、ここでの「運動系列」とは、4野が出す個々の筋肉への指令信号を意味しているのではなく、より高次の「アクションユニット」とでも呼ぶべきものである。つまり、より複雑な指令信号をまとめたチャンクの符号であると考ええる。これはおそらく視覚的あるいは聴覚的に分節（segmentation）された単位に対応している。このことは後で重要になる。

では脳の部位ではどこがこの機能を担っているのだろうか。

VII Broca 野の機能の再考

Broca 野が言語特有の領野ではないことはすでに述べたとおりである。この Broca 野こそが「運動系列予測学習」の中核をなす部位であると考えたい。もう一度 Broca 野が活動した課題を見てみよう。一領域の機能はおそらく一つの基本的な機能に対応しているはずである。それはまず系列の処理であると言える。44 野は運動（手と構音器官）系列の生成に関与しており、45 野は運動系列の認識に関与している。最近 Rizzolatti ら (1996) は、サルで人間の Bro-

ca 野に対応する場所で、ミラーニューロンと呼ばれるニューロンを発見している。これは実験者の把持行為を見ているとき応答し、かつサルが同じ行為を行ったときに応答する。これは我々の仮説を強く支持するデータである。

イメージングのデータからは、音韻や単語レベルでの系列処理に Broca 野が関わっているようである。さて、45 野が視覚情報、聴覚情報から運動情報への変換と予測を行っているとする、この部位は対象の自己中心的表現への変換を行っていると言えよう。一方、44 野は運動系列の生成に関わっていると考えよう。

すでに述べたように左の 40 野は、音韻のワーキングメモリの働きがあると同時に、手の運動系列の生成・学習時にも応答する。これは何を意味しているのであろうか。おそらく、Wernicke 野は、単語音のパターン認知、より正確に言えば単語音の識別を行っており、この部位では、単語音の聴覚的表現が作られているものと思われる。左の 40 野はこの符号を入力として短期的に構音ループによって記憶保持されているものと考えられる。ここで重要な点は、表現の一貫性である。44 野が運動系列の生成に関与しているとする、40 野との相互作用によって、それは聴覚情報に変換されねばならない。このような変換によって、44 野で生成された内言が 40 野を経由して、Wernicke 野を活性化させ、なおかつ高次聴覚野も活性化させられるのである。これによって、内言でも自分の声が聞こえることになる。これは手の運動系列の生成においても同様で 40 野との相互作用によって運動-視覚変換がなされる。つまり、40 野は 44 野との相互作用を行いながら、生成過程（メンタルシミュレーション）において系列の文脈情報を与えるのである。解剖学的に見ると領野間の結合は図 1 のようになる。ここで 45 野には、直接側頭、後頭葉から長連合繊維によって視覚情報や聴覚情報が入力される。45 野ではこれらの情報を入力して、次の情報を予測する。予測された情報は 45 野と 44 野の相互作用によって運動情報（アクションユニット）へ変換される。

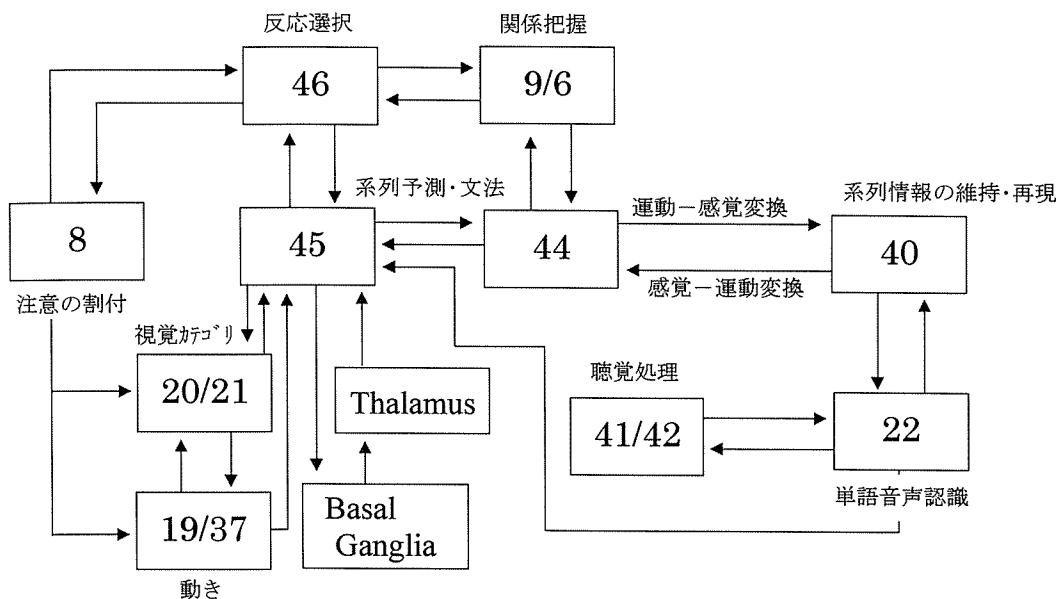


図1 領野間の結合と機能

以上を整理すると、40野-44野においてはメンタルシミュレーションが実現され、44野では系列情報の生成を、40野ではそれに対応する視覚または音韻情報が生成され、音韻情報はWernicke野を活動させ、視覚情報は楔前部、高次視覚野を活動させる。一方、45野-44野の相互作用を通じて、視覚、聴覚情報から次の運動指令（アクションユニット）が予測、生成される。つまり、45野-44野-40野-Wernicke野-聴覚野の経路によって、次の聴覚情報を予測し、構音するため、スムーズな運動を内部で生成することができる。

VII 予測は可能か、予測によって何ができるのか

人工ニューラルネットワークの研究から、上記のような予測がワーキングメモリを持つ回帰型ネットワーク（recurrent network）で可能であることが示唆されている（図2）。このようなネットワークを用いると、自然言語の文法がうめ込み構造も含めて潜在的に学習できることが明らかにされてきた（乾，1997）。さらに、格関係も学習可能である（玉森，乾，1998）。

すると、これらの情報を9野および6野で対象間の関係の把握に用い、さらに後頭葉の楔前

出力（時刻 $t+1$ の入力を予測する）

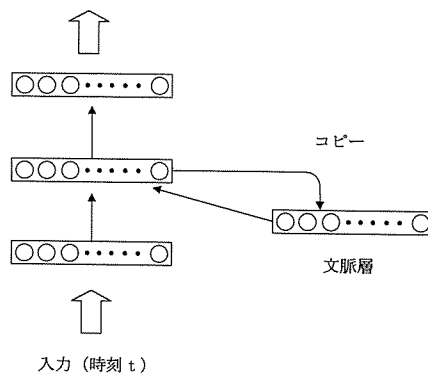


図2 回帰型ニューラルネットワークの構造

部との相互作用によってイメージ化することが可能である。

IX ワーキングメモリ再考： 2種類のワーキングメモリ？

上で述べたように、イメージングの研究から、44野と40野の相互作用により音韻のワーキングメモリが構成されていると考えられる。この指令を与えるのが46野である。ところで多くのワーキングメモリ課題では情報の単なる維持を要求するにすぎない。そして40野はこの機

能の中核をなしているものと考えられる。しかしニューラルネットに予測学習をさせるときに使われるワーキングメモリはもっとダイナミックに状態が変わるものであり、過去の履歴を取り入れた文脈情報を与えるものなのである（そしてそれが簡単に実現できるところが理論のミソなのである）。我々の仮説では45野（あるいは46野の後部も含む）が予測的処理を行い予測学習によって文法的知識を取り込むことが可能になるのである。ではそのときに使われるワーキングメモリは40野と同じ情報なのだろうか。いくつかの可能性が考えられる。まず第一は40野の情報を間接的に利用する（40野から45野への直接経路はない）。第二は、聴覚野の情報を利用し聴覚野の一部がその役割を果たす。第三は45野内に回帰ネットワークの構造が埋め込まれている。さらに第四は、前頭葉から大脳基底核、視床を経由して再び前頭葉にフィードバックされる経路である。最近大脳基底核が運動系列の学習に関与しているという証拠が多数示されている。我々はこれらの中で最後の可能性が最も高いのではないかと考えている（図2参照）。

X 左の45野はなぜ単語リストの記録時に活動するのか

解剖学的には45野は下側頭葉と連絡している。下側頭葉はイメージング研究から視覚情報のカテゴリー化を行っていると考えられる。カテゴリー化はさまざまなレベルで行われていると思われる。このカテゴリー情報はさまざまな経路を経て、さまざまな属性情報と連合している。つまり下側頭葉は意味情報の中の上位の情報を提供してくれる。45野がこの領域と連絡しているということは、言語の構文解析（系列分析）と意味解析の統合の場でもあるということである。記録時に、被験者が系列中の各単語に対し深い処理（すなわち意味処理）を行うために、左の45野が活動するのであろう。

XI 文の生成

ニューラルネットの理論的研究から以下の3

つの処理はほぼ同じ構造のネットワークで実現可能である。

- 1) 単語を構成する文字の系列情報の分析や単語の切れ目の分節化。
- 2) 文を構成する単語の系列情報から文法的知識の獲得。
- 3) 文章を構成する文の系列処理による文章理解。

45野のこれらの処理を階層的に行えるようなネットワークがあると予想される。しかしこれはあくまで意味情報を「直接的に」扱わない。意味が付与されるのは前節で述べたように、下側頭葉との相互作用による。8野と高次視覚野の相互作用により、適切な視覚情報が切り出され、それが45野の知識を使い、6野や9野で関係が把握されると、それを44野を経由して発話が可能となる。

XII 展 望

本研究では、文法を含む系列行動の知識の見まね、聞きまねを通じた獲得過程を基礎に、言語領野間の情報処理モデルを提案した。模倣行動は単に人間の言語認知過程においてのみ重要なのではない。アリストテレスは模倣こそが人間の基本的機能であると説いたし、社会心理学においても親子関係のような社会関係にある場合、模倣学習が重要であることが指摘されている。さらにバンデューラは、モデルの行動を直接実行しなくとも、観察するだけで模倣が生じることがあることを指摘し、観察学習と呼び、社会現象を説明する一つの基礎過程として注目した。このように人間の根元的な機能としての模倣学習に、予測機能を付加することによって認知機能だけでなく広く社会現象までもがこの枠組みでとらえられる可能性がある。

追記 本研究は、平成9年度科学技術庁科学振興調整費による「ヒトを含む霊長類のコミュニケーションの研究」、および文部省科学研究費重点領域研究「高次脳機能のシステム的理解」(A)(1)08279102)の補助を受けた。

文 献

- 1) Frith C : The role of dorsolateral prefrontal cortex in the selection of action. Proceedings of the 17th Conference of Attention and Performance July, London, 1998
- 2) 乾敏郎 : 文理解過程のネットワークモデル. 心理学評論 40, 303-316, 1997
- 3) Inui T, Otsu Y, Tanaka S et al : A functional MRI analysis of comprehension processes of Japanese sentences. NeuroReport 9, 1998 (in press)
- 4) Rizzolatti G, Fadiga L, Gallese V et al : Premotor cortex and the recognition of motor actions. Cognitive Brain Research 3, 131-141, 1996
- 5) 玉森彩弥香, 乾敏郎 : Elman ネットによる文法獲得 : 疑問文, 受動態, θ 役割について. 日本心理学会第 62 回発表論文集, 1998

Motor sequence prediction learning hypothesis

Toshio Inui*

*Department of Intelligence Science and Technology, Graduate School of Informatics, Kyoto University

We introduced our neural model concerning language functions which is called the "Motor sequence prediction learning hypothesis". In this model, the region that generates articulation and hand movement is the posterior part of Broca's area, namely Area 44, also known as the pars opercularis of the inferior frontal gyrus. What then is the role of Area 45, the pars triangularis within Broca's area? We maintain that visual and auditory information is transformed into articulatory and hand activity, and works to predict motor sequences. In other words, the pars triangularis transforms visual and auditory information into information for the individual's (articulatory) motor behavior, and, by means of interaction with the working memory, allows the prediction of subsequent motor sequences. Furthermore, interaction between Area 40 and 44, transforms between motor information and auditory and visual information. I would argue that Area 40 can perform such a function due to interactions with Wernicke's area with-

in Brodman's Area 22. For the production of silent speech or inner speech within our heads, the generating programs of Area 44 are activated, and via the articulatory-to-auditory transformation occurring at the supramarginal gyrus, we can "hear" our own inner speech. This mechanism is thought to be a fundamental process in various thinking behavior. Furthermore, we assume the prediction learning of word sequences as a model of syntax acquisition. Furthermore, the prediction learning of word order is related to the following functions. The first is the process of language understanding and the second is the process of language generation. In both processes, predictive processing and the control of predictive processing are important and this predictive learning of word order plays an important role. For both language understanding and generation, undoubtedly smooth and rapid processing is necessary. We believe that Area 45 is involved in both prediction and control.

(Japanese Journal of Neuropsychology 14 ; 144-149, 1998)