

神経心理学と機能的脳画像研究とニューロコンピューティング

浅川 伸一[†]

[†] 東京女子大学情報処理センター
〒 167-8585 東京都杉並区善福寺 2-6-1
E-mail: asakawa@twcu.ac.jp

あらまし 本稿では神経心理学の概略と、その進歩に貢献してきた機能的脳画像研究のこれまでを紹介する。その中で特に角回の果たす機能的な役割について、神経心理学的知見と機能的脳画像研究との乖離について取り上げる。一般に角回に損傷が生じると、失読症と呼ばれる読みの障害が生じるにもかかわらず、機能的脳画像研究ではこの部位は活性化しないことが知られている。この乖離を矛盾無く説明するためのモデルとして角回が k-勝者占有回路 [6] として機能している可能性を指摘する。もしこの指摘が正しいのであれば、神経心理学所見と機能的脳画像研究からの知見とを矛盾なく統合して説明できることを意味する。ニューロコンピューティング研究は、我々の脳を学際的に説明するための道具として抽象的なモデル論的研究の役割を担うことが可能である。

キーワード 角回, k 勝者占有回路, 神経心理学, 機能的脳画像研究, ニューラルネットワークモデルの役割

Neuropsychology, Functional Neuroimaging and Neurocomputing

Shin-ichi ASAKAWA[†]

[†] Centre for Information Sciences,
Tokyo Woman's Christian University
2-6-1, Suginami, Tokyo, 167-8585 JAPAN
E-mail: asakawa@twcu.ac.jp

Abstract In this report, the author reviewed a brief history of neuropsychology, and its contribution of neuroimaging study. In the contents of this review, the author focused on the role of the left angular gyrus on reading letters aloud. In general, the alexia is emerged by the damage of the left angular gyrus. On the other hand, no activation was observed at the angular gyrus in the neuroimaging study in the meaning of the statistically significant level. In order to solve this dissociation between neuropsychological evidence and neuroimaging data, the author proposed the 3 layered neural network model in which the hidden layer was the kWTA circuit [6]. This model could explain both neuropsychological evidence and neuroimaging data without contradiction. Neurocomputing would play an important role as a tool for an abstract and an interdisciplinary modeling of the brain.

Key words Angular gyrus, k-Winners-Take-All circuit, neuropsychology, functional neuroimaging study, the role of neurocomputing

1. ま え が き

本稿では、神経心理学と機能的脳画像研究とニューロコンピューティングという三つの研究領域を統合して新しい理解を模索する可能性について議論する。臨床データとしての神経心理学的証拠、高次認知機能の生体情報処理の観察結果としての機能的脳画像研究とは、実際に我々が目にすることができる明らかなデータを提供してくれてはいる。しかし、これら二つの研究領域のデータがいくら蓄積されても最終的な脳のモデル、我々の脳はいかにして働くのか “how brain works?” という問

いに対して答えを与えてはくれない。そこには計算論的モデルが欠けている。ニューラルネットワークの視点を導入すれば、一件矛盾するよう見える神経心理学的所見と機能的脳画像研究のデータとを統合して理解することができる。このようなモデル論的な研究という意味においてニューロコンピューティングの果たす役割は大きいと言えよう。

本稿では、まず神経心理学の迎ってきた歴史と、その進歩に貢献してきた機能的脳画像研究の概略を紹介する (2. 節)。そして、その中で特に角回の果たす機能的な役割について、神経心理学的知見と機能的脳画像研究との乖離について取り上げる

(3. 節) . 一般に角回に損傷が生じると、失読症と呼ばれる視覚的機能は正常に保たれていて、発話も流暢であるが書かれた文字を読む際に困難が生じる失読症と呼ばれる障害が生じる。一方、機能的脳画像研究では、角回は活性化しないことが知られている。この両研究領域から得られた知識の乖離を矛盾無く説明するためのモデルとして、角回が k-勝者占有回路 [6] として機能しているモデルを提案する (4. 節) . もしこの指摘が正しいのであれば、ニューロコンピューティング研究は、神経心理学的所見と機能的脳画像研究とを結び付けるための抽象的なモデル論的研究としての価値があり、加えて角回、および皮質下の領域の計算論的意味付けも可能となることを論ずる。

2. 神経心理学史略

言語と脳の関係については、古くは Gall (1758-1828) の骨相学にも遡ることができるが、脳内でさまざまな認知機能が、各小領域に分割されて処理されているという「機能局在仮説」が基本的な考え方である。機能局在説と対極をなす主張を、全体論仮説という。脳の言語機能を解明しようとする神経心理学の歴史は 1960 年代までは、局在説と全体説との間で揺れ動いてきたといっても過言ではない。

科学的な言語機能の局在説は Broca (1824-1880) の症例報告に始まる。Broca は脳の左半球前頭葉後下部の弁蓋部と三角部を含む下前頭回腹側部 (Broadmann の 44 野と 45 野)、いわゆる Broca 野と呼ばれる領域に障害を受けると失語症 (舌や口唇の運動機能は保たれているにもかかわらず言葉が話せない Broca 失語) の症状が出現することを報告した。

岩田 ([5],p.8) によれば、Broca は、この領野を話しことばにおける構音運動の協調性を保つ中枢であると考えた。一般に誤解されがちなこととして Broca は左前頭葉後部に話しことばの中枢が局在すると思われがちなのであるが、実際には構音運動の協調性を司る部位としていわゆる Broca 野の存在を主張したのである。したがって厳密に言えば、Broca は大脳皮質における言語機能の局在性を主張したのではなく、言語機能のうちの構音運動の協調性を保つ領野が左半球前頭葉後部に存在すると主張したのである。ブローカが言語機能についてこのような説を展開したことは 1860 年代という時代から考えれば、かなり斬新なアイデアであったと思われる。近年、機能的脳画像技術の進歩によって明らかにされてきたことは単純な言語課題を遂行するときさえ、きわめて多くの部位が関与していることが明らかになったことである。たとえば、島皮質、中側頭回、下側頭回、補足運動野、大脳基底核、視床、小脳皮質、小脳核、などが活性化されると言われている。このように言語とは特定の脳の一領野に局在したモジュールとしてとらえるのではなく、脳全体の複雑なネットワークの計算結果として考えるべきものである。このような現代的な意味でのネットワークの一部として Broca 野が機能していることを見抜いた Broca は卓越したセンスを持った研究者であったと考えられる。

続いて Wernicke (1848-1905) は左半球側頭葉上部の側頭平面から上側頭回後部にかけての領域、いわゆる Wernicke 野に障害を生じると別のタイプの失語症 (音声は聞こえるにもかか

わらず、言葉が理解できない Wernicke 失語) が現れることを報告した。Wernicke による言語獲得の説明は、乳幼児期に母親の話す語を聴くことによって、語音と意味の連合を成立させることであるが、それと同時に、母親の話す語音をそのまま復唱するという運動能力が成立し、語音の聴覚記憶心像と発語運動の運動表象が形成され、その間の精神運動反射が形成される (岩田 [5], p.11)、というものである。Wernicke およびその後 Lichtheim によって図式化されたモデル、は発話運動の座である左下前頭回後部と、語音の聴覚記憶心像である左上側頭回後部という二つの皮質領域を相互に結ぶ結合、およびその相互作用が言語機能の本質であるという考え方を確立させた。Broca が見出し、Wernicke によって、二つの領野の結合によって言語機能を説明しようとした考え方を古典的連合主義と呼ぶ。

Broca, Wernicke の報告後、全体説が優勢になり 1960 年代までは主として全体説が支配的となった。Broca の報告したタンと呼ばれる患者の死後剖検結果では、いわゆる Broca 野のみならず左脳の広範な領域に障害が認められ、Broca 野だけが言語を司る責任領野とは考えづらいという理由も挙げられるからである。

1965 年に Geschwind [3] (1926-1984) は離断症候群 (disconnection syndromes) と呼ばれる論文を発表し、様々な言語活動は脳内の連合野とその繊維連絡によってなされているという説を唱えた。視覚-聴覚異種感覚連合が、角回、縁上回という頭頂葉下部にあるヒトにおいて特に発達した領野 (連合野の連合野とも呼ばれる) との線維連絡によって営まれており、さらに言語、高次認知機能の病理に関する諸症状はいわゆる離断仮説によって説明できることを論じた。現在では、言語に関連する脳の部位として、Broca 野、Wernicke 野、頭頂側頭連合野にある角回 (Broadmann の 39 野)、縁上回 (同 40 野)、などが知られている。また、Broca 野と Wernicke 野を結ぶ線維連絡 (弓状束) に損傷があると、言葉の選択の障害や復唱の障害を呈する伝導失語がおけると考えられている。角回の役割については、視覚性の言語刺激 (文字) を音韻に変換する際に重要な役割を果たすという説が一般的である。角回に損傷を生じると、失語症がなく、しかも視覚認知機能は正常に保たれ、さらに書字機能も保たれているにもかかわらず、書かれた文字を読むことができない純粹失読と呼ばれる症状が生じる。

ほぼ同じ時期に、Penfield ら [8] (1891-1976) は脳外手術中の局所麻酔下において皮質の微小電気刺激実験を行い、運動野や体性感覚野において機能局在が観察されることを示し、局在仮説が再認識されるようになった。この後、脳画像造影技術が開発され、神経心理学における研究の発展が加速されるようになる。それまでの失語症研究では、臨床的に詳細なデータが収集されても、死後の剖検 (autopsy) による以外にはその責任病巣を特定する方法が存在しなかった。臨床観察の時点と剖検の時点とが時間的に隔たっていると、その間に新たな脳病変が加わってしまう可能性があり、詳細な臨床所見と病理的所見との対応をとることができなくなる。また逆に剖検が詳細に行われたとしても、生前の神経心理学的症状の記述が不十分であれば価値ある研究にならない。このため失語症研究の実証的な研

究は遅々として進まなかった。

近年の脳研究において重要な進歩は、脳機能計測あるいは機能的脳画像研究と呼ばれる分野が飛躍的に進歩し、数多く研究がなされていることが挙げられる。まずは X 線 CT スキャンにより病巣部位を容易に直視できるようになった。さらに、PET と呼ばれる陽電子断層撮影法、機能的磁気共鳴映像法 fMRI、近赤外線分光法 NIRS など代表される機能的脳画像技術を用いて言語課題を遂行中の脳を非侵襲的に計測することで、さまざまな知見が積み重ねられている。機能的脳画像研究の成果の一つは、従来考えられていた Broca 野や Wernicke 野などの言語野以外にも実にさまざまな脳の領域が言語に関与していることが明らかになったことだろう。例えば、島皮質、中側頭回、下側頭回、補足運動野、大脳基底核、視床、小脳皮質、小脳核、などが言語課題を遂行中に活性化することが明らかとなっている。すなわちこれらの事実は、言語行為とは古典的な意味での機能局在説に基づくものではなく、脳全体の計算結果として言語の諸側面をとらえるべきものであるといえる。

近年における、もう一つの重要な発展は言語学、認知科学などの研究者が言語の障害やその機能の研究に参入して、その理論的適用の試みがなされていることである。とりわけ、ニューラルネットワークをもちいたシミュレーションによる言語機能の研究が挙げられる。解剖学、神経心理学、機能的脳画像研究などで得られた研究成果をもとにして、言語の機能的な抽象化された表現をコンピュータ上に実装し、プログラムの出力結果が人間の言語機能と等価とみなせるならば、その機能が脳内でも実現されている可能性が高いのではないかという主張がニューラルネットワークをもちいた言語研究である。コンピュータを用いたニューラルネットワークによる言語機能のシミュレーションでは、分かっていることはできるだけ取り入れ、未解明の部分には大胆な仮説を設けて脳の機能を模倣することをめざしている。シミュレートすべき機能が複雑であればある程、そこにいたる道筋はそう多くはないという情報論的必然性と言う概念に導かれてニューラルネットワーク研究は進歩してきた。近年における神経心理学は、機能的脳画像研究の進歩とニューラルネットワークによる理論的考察によって、大きく変化しようとしている。

3. 言語の病理に関する責任領域

現在までに、言語に関わる領域として、ほぼ合意が得られていると考えられるの部位は、左半球前頭葉後部(弁蓋部と三角部を含む下前頭回腹側部、いわゆる Broca 野、Broadmann の 44, 45 野)。ただし、岩田 [5](p.44-51) は 44 野と 45 野との間には機能的な差異があると主張している。左半球上側頭回後部(Wernicke 野、Broadmann の 22 野後半部)、左頭頂後方下部領域、すなわち、角回 (angular gyrus)、Broadmann の 39 野と縁上回 (supramarginal gyrus) 同 40 野 (Paulesu, Frith and Frackowiak [7] など)、上前頭回後部、補足運動野と運動野の一部 (Broadmann の 4 野と 6 野) これは Penfield と Rasmussen [8](邦訳 p.142, 図 55) の皮質への電気刺激によって明らかにされた。さらに側頭後頭部外側下面 (同 20 野, 21

野) などである。そのほかにも島 (insula) 皮質を挙げる研究者もいる [2]。皮質下領域としては、大脳基底核 (basal ganglia、尾状核 caudate nuclei、被殻 putamen、淡蒼球 globus pallidus、視床 thalamus、視床枕 pulvinar) であり、これらの領域の損傷によって失語症的症候を発症するという報告もなされている。様々な種類の言語の病理が存在するが、その責任病巣はほとんど左半球に局在化 (側性化 lateralization) している。これら各部位がどのような言語行為の機能的役割をになっているのかは今後の課題である。

文字の読みにおいて重要だと考えられているのが、角回、縁上回である。これらの領域の役割については、視覚性の言語刺激 (文字) を音韻に変換する際に重要な役割を果たすという説が一般的である。角回に損傷を生じると、発話困難がなく、しかも視覚認知機能は正常に保たれ、さらに書字機能も保たれているにもかかわらず、書かれた文字を読むことができない純粋失読 (pure alexia) と呼ばれる症状が生じる。Geschwind [3] によれば角回は視覚文字—音韻変換の中継路ではなく、聴覚、視覚、触覚の連合野の中間に位置する「連合野相互の連合野」として、異種感覚記憶痕跡間の連合を営む領域であるとされている。もしこの仮説が正しいのなら角回は特定の感覚モダリティによらない抽象的な言語表象がこの領域で表象されていることになる。角回、縁上回を含む頭頂後頭連合野は Flechsig (1847-1929) のいう髓鞘化の時期がもっとも遅い領域にあたる ([3], 邦訳 p.56) ことから、霊長類、特にヒトにおいて特化した領域であるといえることができる。

PET を用いた脳の活性化を調べた研究では、言語課題によって Broca 野に相当する領域には活性化が見られることがほぼ合意が得られていると考えられる。しかし、角回については活性化が見出されていないという意見もあり (山鳥・河村 [9], p.68-70)、脳損傷患者のデータと機能的脳画像研究のデータとの乖離が問題となっている。

4. 角回の損傷によって読みに障害が生じるのに PET 研究では活性化が見出せないのはなぜか

前述のとおり、角回の損傷によって読字障害が生ずるにもかかわらず PET 研究では角回が賦活されないといわれている (山鳥・河村 [9], p.70)。調べた限りでは Horwitz ら [4] の研究で角回の賦活が確認されているのみである。しかし彼らの用いた解析手法は角回と縁状回との偏相関係数を求めたものであり、通常のスブトラクション法とは異なっている。

では、なぜ PET で角回の活性化が検出できないのだろうか。本稿ではこのことを説明するためのモデルを提案する。図 1 は、角回でおこっていると想像されるニューロンの活動状態を模式的に表したものである。単語音読時には PET の解像度よりも、少ないニューロンが活性化し、その部位を平均化してみると、結果として統計的な有意差が認められなくなることを図示したものである。また提示された任意の文字に対して活性化するニューロンが文字ごとに異なるとすれば、すべてのスキャンを合算して、コントロール課題とのスブトラクションによって血

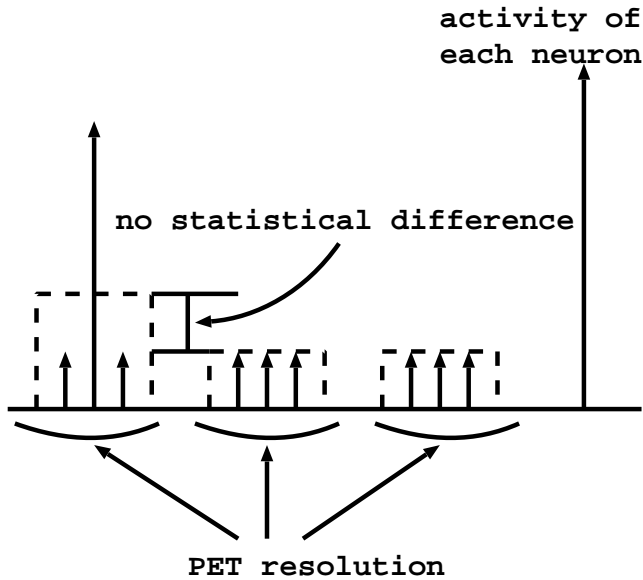


図 1 活性化が認められない理由の概念図

Fig. 1 The reason why there are no significant differences in PET study. The activity of each neuron might be different in each letter and each condition

流量の変化を検定する統計的手法では有意差を生じないと想像される。

上記のような説明を具体的に表現するために、後頭葉の視覚野を入力層、角回を中間層、言語野を出力層と考える 3 層のニューラルネットワークモデルを考える (図 2)。このとき中間

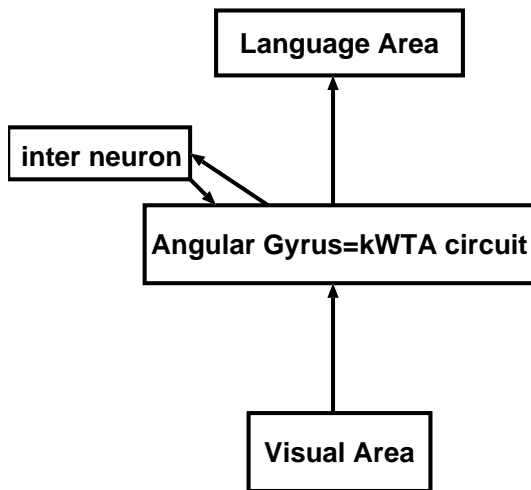


図 2 提案するモデルの模式図

Fig. 2 The model proposed in this report.

層、すなわち角回において勝者占有回路が存在すると仮定する。勝者占有回路とは、少数のユニットのみが活性化し、その他の多くのニューロンは活性化しないようにするための回路である。勝者 (k) が 1 つの場合にはいくつか実装の方法があるが、たった一つのユニットを勝者とするのは現実的ではないだろう。現実には PET の解像度よりもはるかに少ないが 1 ではない少数の k 個のユニットが活性化していると考えるのが妥当である。Majani ら [6] の提案した kWTA 回路は $k \geq 2$ の任意

の数の勝者を設定できる回路であり、本稿でも Majani らのアルゴリズムを採用することとする。Majani らの kWTA 回路を実現するためには、中間層のユニット間の相互作用を制御するインターニューロンが必要である (図 3)。インターニューロ

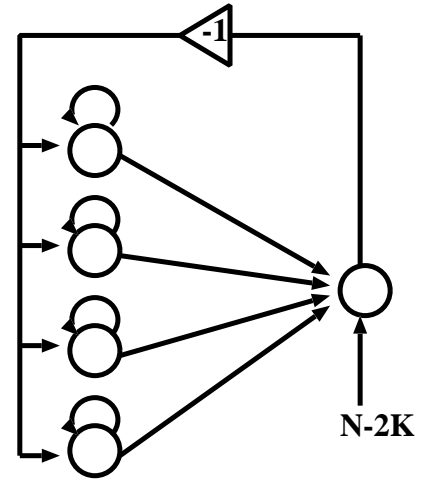


図 3 k 勝者占有回路

Fig. 3 k -Winners-Take-All circuit.

の存在はニューロンの活動が統合されている部位が存在することからも支持されると考えられる (Damasio [1] など)。インターニューロンの候補としては、先に述べた皮質下領域の損傷によっても失語症的症状が発現することから、皮質下領域の中のどれかを想定しても良いかも知れない。

したがって本モデルは通常の 3 層パーセプトロンの計算とは異なり、中間層の出力がただちに出力層へと送られるわけではない。入力層からの信号によって活性化された中間層の各ユニットはインターニューロンを介したユニット間の kWTA 回路によって安定した解が得られるまで繰り返し計算を行い、その出力結果が出力層へと送られることとなる。

4.1 数値実験

上記のことを実証するために簡単な数値実験を行った。

入力層、出力層のユニットをそれぞれ 10 とし、中間層のユニット数を 100 個とした 3 層のパーセプトロンを考える。200 個の 2 値 (0,1) 乱数を生成し 10 次元 10 個の入力データと教師信号データとしてこのネットワークに訓練させた。乱数を別の乱数へと写像する学習であるから、明確な規則が存在せずネットワークにとっては難しい課題といえよう。

出力層のユニットの出力関数は $y = f(x) = 1/(1 + e^{-x})$ という一般に用いられているロジスティック関数とした。ここで y はユニットの出力、 x は入力を表す。

中間層の出力関数に関しては次のようにした。Majani ら [6] の提案した kWTA 回路では出力関数 f が

$$y = f(x) = \tanh(x) \quad (1)$$

で定義される出力値が $[-1, +1]$ で定義された回路である。しかしこの出力関数をそのまま用いるのは本稿の目的に照らして考えると適切ではない。なぜなら n 個のユニットのうち k 個

のユニットが +1 に近い値を取り $n - k$ 個のユニットが -1 に近い値を取るとすれば、結果的に $n - k$ 個のユニットは -1 という強い情報を出力層に送ることになるからである。従って本稿では Majani らのアルゴリズムをそのまま適用して k 個の勝者が残るようになるまで繰り返し計算を行い収束させた後

$$z = \frac{1}{2}y + \frac{1}{2} = 0.5 \tanh(x) + 0.5 \quad (2)$$

という変換を行って値域が $[0, 1]$ になるようにした。この z を最終的な中間層の出力として扱うこととした。学習則は

$$\Delta w = -\epsilon \frac{\partial E}{\partial w} \quad (3)$$

という一般に用いられている誤差逆伝播法を用いた。厳密に言えば中間層と入力層との間の誤差修正に必要な $\partial y / \partial x$ は出力関数が $1 / (1 + e^{-x})$ で定義されているロジスティック関数の場合の場合 $\partial f / \partial x = f(x)(1 - f(x))$ である。ところが Majani らのアルゴリズムは出力が \tanh で定義されているため、中間層ユニットから入力層ユニットへの結合係数を計算するためには、(1) 式から $\partial y / \partial x = d \tanh(x) / dx = 1 - f(x)^2$ とすべきであるが、(2) 式のような変換を行っているので近似的にロジスティック関数であると見なして $\partial y / \partial x = f(x)(1 - f(x))$ として学習を行わせた。

4.2 結果

図 4 右は $k = 2$ として学習が成立したネットワークに任意のデータを与えたときの 100 個の中間層ユニットの活動を表したものである。円の半径が活動の大きさ (0 ~ 1 の実数) 大きさが活動の強さを表している。便宜上 10×10 の正方形にして表示してあるが空間的な配置には意味がない。比較のために通常のバックプロパゲーション法で同じ問題を学習させたネットワークに同じデータを与えたときの状態を図 4 左に示した。図

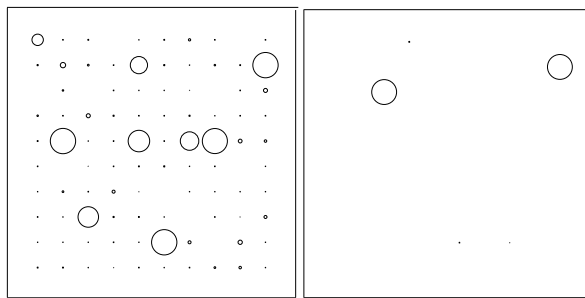


図 4 単純なバックプロパゲーション法をもちいた場合の中間層の活性化の様子 (左図) と k 勝者占有回路 ($k=2$) とした場合の活性化 (右図) の差

Fig.4 The difference of activations between a simple BP method(left) and hidden layer = kWTAK circuit(right).

4 から分かるとおり、バックプロパゲーション法を用いた場合にはおよそ 10 % ほどのユニットに活性が見られるのに対して、中間層に kWTA 回路を導入し $k = 2$ とした場合は 2 個のユニットが活性しているのみである。図 4 左のようにバックプロパゲーション法を用いれば中間層における情報が分散されて表現されているため、多少の損傷を受けたとしても性能の劣化は少なくなることが予想される。一方、kWTA 回路を中間層に実

装した図 4 右の場合、活動しすべきユニットが損傷を受ければ確実に誤答、むしろ、無反応と言った方がよい状態になるだろう。先にも述べたとおりこれが角回でおこっていると考えるのも良いだろう。

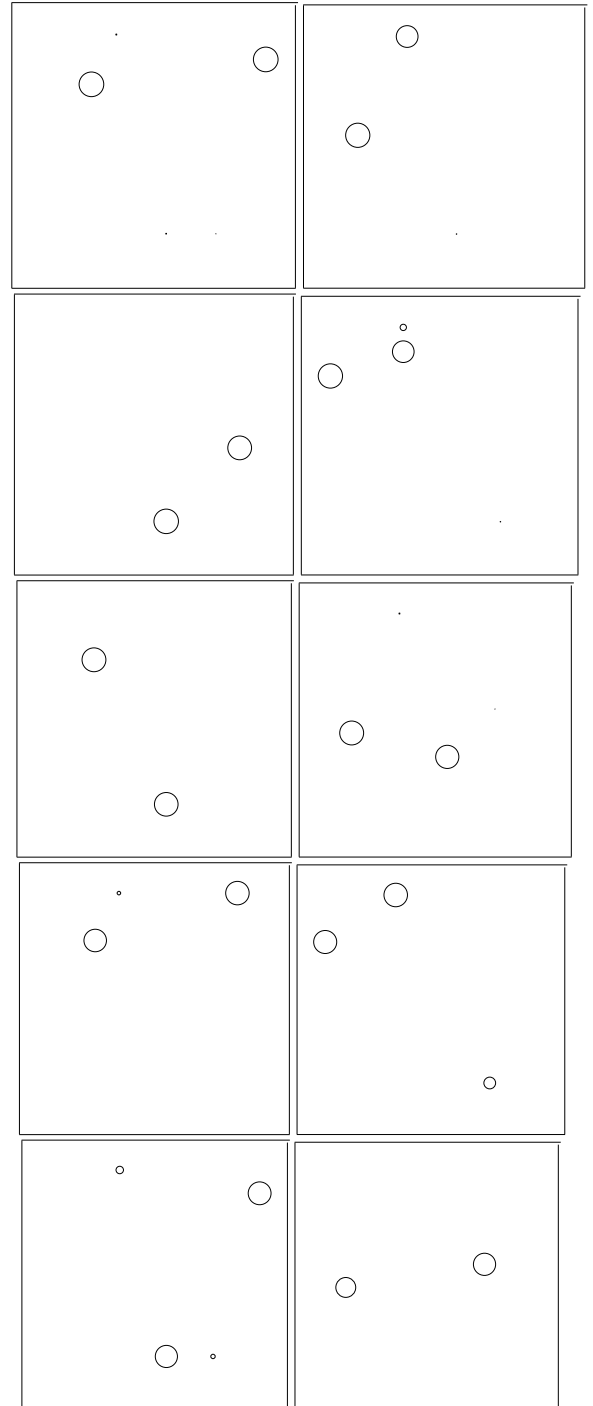


図 5 すべての入力パターンに対する kWTA 回路の活動の様子 ($k=2$)
Fig.5 All the activation patterns for each input($k=2$)

すべての入力パターンに対する kWTA 回路の出力の様子を図 5 に示した。すべてのパターンに対して共通に活動するユニットは無いと考えて良いであろう。

中間層のユニット数を 36, 49, 64, 81, 100 と 5 とおりに変

化させ、 k も 2~8 まで変化させてみたが結果はいずれも収束し、同じような傾向を示した。

4.3 考察

10 個の 10 次元バイナリ乱数の写像という小さなモデルでの試みでしかないが、通常のバックプロパゲーションと同じように収束し希望どおりの解が得られることがわかった。このことは角回が k WTA 回路の役割を担い、後頭葉の視覚野を入力層、角回を中間層、言語野を出力層と見なす 3 層のパーセプトロンと考えて良く、中間層である角回では皮質下の領野があると想定されるインターニューロンを介して k WTA 回路が実現されているという可能性を示唆するものである。角回の役割と皮質下領域との繊維連絡の存在とその計算論的意味がこのようにして解釈可能である。

このことは神経心理学的所見と機能的脳画像研究の乖離を説明する一つのモデルとして角回 = k WTA 回路仮説が有力な候補となりうることを示していると考えられる。冒頭でも述べたとおり、ニューラルネットワークの視点を導入すれば一件矛盾するように見える神経心理学的所見と機能的脳画像研究のデータを統合して理解することができる。このようなモデル論的な研究によって脳の理解が可能となると考える。そしてこのことこそがニューロコンピューティングの果たす役割ではないだろうか。

今後の展開としては、本稿で提唱した「角回 = k WTA 回路仮説」が正しいとするならば、角回の損傷によって純粋失読がみられることに加え、しばしば観察されるように、失読症の患者は健常者の音読潜時に比べて非常に時間がかかることを説明できるかも知れない。また皮質下領域の損傷をインターニューロンの破壊と同一視して捉えることもでき、そのシミュレーションも可能であろう。さらに、実問題に適用した場合、すなわち数千語の文字列を学習させた場合の振る舞い、そして、認知心理学実験で行われているような非単語を読ませることによる般化の様子などを試みてみるべきであろう。一つのモデルによって複数の現象が説明可能であればより説得力を持つからである。モデルが説得力を持ち、かつ神経心理学、機能的脳画像研究に対して有益なフィードバックを与えることができれば、真の意味での学最適な研究の礎となることができるだろう。

5. おわりに

本稿では、神経心理学の歴史を概観し、機能的脳画像研究の急速な進歩によってさまざまな事実明らかとなってきていることを概観した。この中で古典的な神経心理学所見と機能的脳画像研究との乖離、すなわち単語音読時における角回の役割について取り上げ、角回を k 勝者占有回路と考えれば二つの研究領域から得られた知見を矛盾なく説明できるモデルとなることを示した。

ニューラルネットワークを用いたモデル論的研究としてニューロコンピューティングが果たす役割とはまさにこの点にあると考える。現在の技術レベルでは説明が難しいこのような、臨床データと機能的脳画像研究との乖離を抽象的なモデル論的考察により解決する糸口を提供する、このような試みが共同研究の

形となってさらなる発展が期待できると考える。

文 献

- [1] Damasio, A., The Brain Binds Entities and Events by Multiregional Activation from Convergence Zone, *Neural Computation*, Vol.1, 123-132, 1989.
- [2] Dronkers, N.F., New Brain Region for Coordinating Speech and Articulation, *Nature*, Vol.384, 159-161, 1996.
- [3] Geschwind, N., Disconnexion Syndromes in Animals and Man, *Brain*, 237-294, 585-644, 1965 (邦訳「高次脳機能の基礎」河内十郎訳, 新曜社, 1984)
- [4] Horwitz, B., Rumsey J.M., and Donohue, B.C., Functional Connectivity of the Angular Gyrus in Normal Reading and Dyslexia *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 8939-8944, 1998.
- [5] 岩田誠, 脳とことば, 共立出版, 1996.
- [6] Majani E., Erlanson, R. and Abu-Mostafa Y., On the k -Winners-Take-All Network, 634-642, in D. S. Touretzky (Ed) *Advances in Neural Information Processing Systems*, Vol. 1, Morgan Kaufmann, San Mateo, CA, 1989
- [7] Paulesu, E., Frith, C.D., and Frackowiak, R.S.U., The Neural Correlates of the Verbal Component of Working Memory, *Nature*, vol. 362, 342-345, 1993.
- [8] Penfield, W. and Rasmussen, T., *The Cerebral Cortex of Man: A Clinical Study of Localization of Function*, The Macmillan Company, N.Y., 1950. (邦訳「脳の機能と行動」, 岩本隆茂・中原淳一・西里静彦訳, 福村出版, 1986)
- [9] 山鳥重, 河村満, *神経心理学の挑戦*, 医学書院, 2000.