

失語、失読に関する神経心理学モデルの基礎

浅川伸一 asakawa@ieee.org

2019年2月19日

- Double dissociation, see wikipedia
- LARC errors
- Kana and Kanji dissociation in Japanese patients, Patterson, Sasanuma, Sato.
- Winner-take-all circuit in Angular gyrus

神経心理学的症状をニューラルネットワークをもちいて説明する試みは1980年代の第2次ニューロブームから存在した。2009年以降の第3次ニューロブームでは、その性能が向上し部分的には人間を上回る性能を示している。このような状況から第2次ブームでは未解決であったり実現が困難だと見なされた問題を解決できる緒があると考えられる。ここではこれらの概説を行う。本稿は3部構成になっている、(1)失語についての概説、(2)失読症、(3)意味障害、である。主に神経心理学的な解説を試みている。近年の深層学習への応用や貢献については触れていない。

1 はじめに

認知神経心理学とその関連諸分野と機械学習や人工知能と呼ばれる分野との交流は現状では活発であるとは言い難い。しかし、これらは同一対象を別の視点から眺めていると見做しうる。計算機科学の黎明期から、人間の認知機能は、その障害から理解しようとしてきたようにも思われる (Turing, 1950)。2010年代以前は、人間の知的能力に比肩しうる程度の計算機上の実装が存在し得なかったために神経心理学への貢献は存在してきた (Coltheart, Rastle, Perry, Langdon, & Ziegler, 2001; McClelland & Rumelhart, 1986; Plaut, McClelland, Seidenberg, & Patterson, 1996; Seidenberg & McClelland, 1989b) 駄菓子菓子、人口に膾炙したとは言い難い。2009年以降の深層学習の発展に伴い (浅川, 2016)^{*1}, 部分的には人間の認識能力を凌駕する機械学習モデル (He, Zhang, Ren, & Sun, 2015; Mnih et al., 2015) が発表されるにいたり、人間の認知能力と計算機モデルのそれを直接比較する「ロボットは東大に入れるか」^{*2}などの試みがなされている。

本稿では上述のような視点から機械学習モデルによる神経心理学的症状の説明を試みる。

神経心理学症状に関連した言語の障害から言語機能を考える際の基本的な概念の概説を試みる。言語能力はモダリティとして、「読む」「書く」「話す」「聞く」が考えられる。言語獲得、言語障害、言語能力の測定、母語以外の言語獲得、芸術分野への応用、機械学習系の自動翻訳を含む自然言語処理などを含めれば言語能力の包括範囲は多岐にわたる。言語は人間活動の基盤とも言える基本能力でもあり人間の知的活動への貢献大きい。

神経心理学と前提として、自然科学の意味での実験を行うことができないという問題が挙げられる。臨床家が行う検査は実験であるが、自然科学の意味で全独立変数を実験者が統制可能ではないという意味で準実験である。倫理的制約から人間に對して人工的に脳を破壊することが困難なことから、脳損傷、脳挫傷、脳梗塞など脳に障害を持つ患者を観察することから言語機能を類推することが行われてきた。動物実験では脳の一部を破壊して観察することが可能であるが、人間と同じような言語機能を持つ種では破壊実験の実施は困難である。従って、脳の障害が発生した患

^{*1} https://www.jstage.jst.go.jp/article/psychono/35/2/35_35.26/_pdf

^{*2} 東ロボプロジェクト

者が基本資料となる。一般に言語の障害を総括して**失語症 aphasia**と呼ぶ。

2 失語症

失語症の定義は、

- 知的な障害がない，かつ，
- 感覚，運動機能に障害がない

ことが前提となる。したがって中枢言語機能を反映した言語の障害と考えられる。言語はその機能が内包する内的過程、社会的役割などとも関連するためしばしば、計算機科学、言語学、認知科学、社会学、論理学、数学、哲学などの分野とも関連する(ルートビッヒ, 1921/2003)。

2.1 ウィルニッケ-リヒトハイム図式 Wernicke-Lichtheim schema

図1に古典的な失語症のモデルであるWernicke-Lichtheim図式を示したLichtheim(1885)。図中のAは聴覚的イメージの座、Mは発話に用いられる運動表象の座。Bは言語の概念が保持されている部位、aは聴覚情報の入力系、mは運動機能の言語中枢である。このモデルによれば、言語理解は $a \rightarrow A \rightarrow B$ 、発話は $B \rightarrow M \rightarrow m$ 、復唱は $a \rightarrow A \rightarrow M \rightarrow m$ という経路を通過することになる。Mが損傷されると理解はできるが自発的な発話と復唱(言われた言葉をそのまま口に出して言うこと)ができなくなり(**プローカ失語**)、Aが損傷を受けると言語理解と復唱の障害が生じる(**ウェルニッケ失語**)。実際この図式は患者の症状をよく説明し、モデルから予測される症状を呈する患者の発見もあって有効性が確認されている(岩田, 1996)。理論上 $A \rightarrow M$ の結合が断たれると復唱のみができなくなり、言語理解も自発発話も保たれる**伝導失語** conduction aphasiaが(図中の3)、 $A \rightarrow B$ 間の結合が切れると復唱はできるが言語理解が不能な**超皮質性感覚失語** trans-cortical sensory aphasiaが(図中の6)、また $B \rightarrow M$ の結線が切断されると復唱はできるが自発発話が侵される**超皮質性運動失語** trans-cortical motor aphasiaが生じることになる。さらに、 $M \rightarrow m$ では書字障害を伴わず発語に障害がみられる**純粹語啞**が生じる。

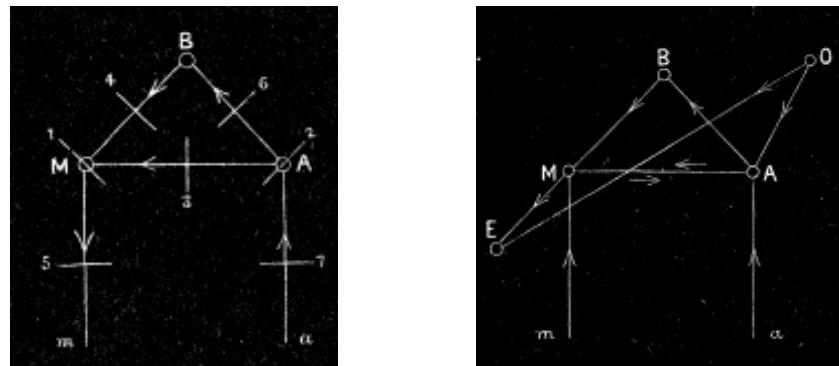


図1 Lichtheim(Lichtheim, 1885) Fig.1, Fig.2, a:聴覚入力, m:運動出力, A:聴覚中枢, M:運動中枢, B:概念中枢, O:視覚表象, E:書字中枢

表1 失語症の分類

	復唱	命名	聴理解	流暢性
ブローカ失語	中-重	中-重	軽度に困難	非流暢, 要努力, 遅い
ウィルニッケ失語	軽-重	軽-重	不良	流暢 言い間違い
伝導失語	悪い	悪い	相対的に良好	流暢
混合型超皮質性質語	軽度	悪い	悪い	非流暢
超皮質性運動失語	良好	軽-重	軽度	非流暢
超皮質性感覚失語	良好	中-重	悪い	流暢
全失語	悪い	悪い	悪い	非流暢
失名詞失語	軽度	中-重	軽度	流暢

2.2 ブローカ失語

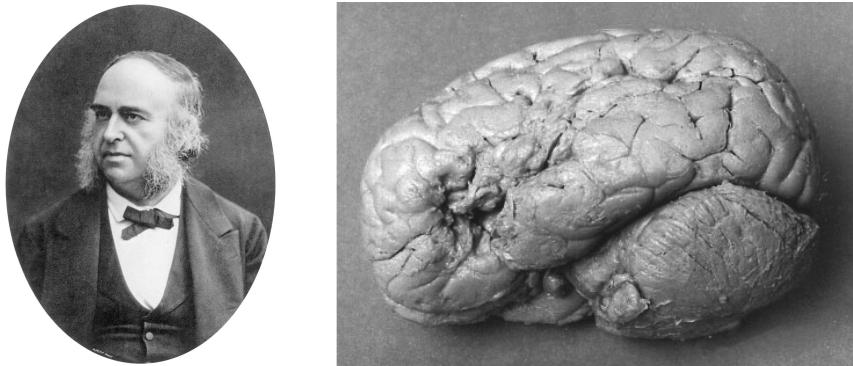


図2 左:ブローカ Wikipedia, 右:患者 Tan の死後剖検写真 (Dronkers et al., 2007)

言語の機能局在は Paul Broca による 1861 年 (明治維新は 1868 年) に始まる。Broca の経験した症例タンは、ほぼ「タン」としか発話できなかつたため、皆からタンさんと (ムッシュー・タン) と呼ばれていたという。図2に示すとおり、左半球前頭葉、ブロードマン 44 野、45 野領域が責任病巣であると一般には考えられてきた。

2.3 ウィルニッケ失語

カール・ウィルニッケによって提唱された主として聴覚言語の障害を主とする失語をウィルニッケ失語、その責任領野をウィルニッケ野と呼ぶ。ブローカ失語が発話困難を特徴とする失語であるのに対して、ウィルニッケ失語は発話は流暢だがしばしば意味のない発話となる。そのため“流暢性失語 fluent aphasia”とも称される。発話流暢であり、プロソディーも保たれ、文法も正しい場合が多いが、意味のない発話となる。ウィルニッケ失語症患者は、自発話中に挿入された無意味語や未関連語に気がつくことができない。この種の失語症患者は、単語の理解、単純な文の聴理解にも障害を示す。ウィルニッケ患者の責任病巣は、聴覚提示された語の理解が障害されているとみなされる。上側頭回 Superior Temporal Gyrus 後部 (ブロードマン 22 野後部) がウィルニッケ野とされる。聴覚野に隣接している。聴覚野は側頭平面 (ブロードマン 41 野, 42 野) にある。

Wernicke's (Receptive) Aphasia

■ YouTube videos

- ブローカ失語, ブローカ失語
- ウィルニッケ失語, ウィルニッケ失語



図3 ウィルニッケ Wikipedia

2.4 ゲシュヴィンド失語

一方、印刷文字を音読する際には異なる脳内機構が関与していると考えられている。文献上最初の記載はデジャリンであるとされる。1960年代になってゲシュヴィンドが離断症候群の名でレビュー論文を発表し、頭頂後頭連合野にある角界 Angular Gyrus(ブロードマン39野)、縁状回 Super Marginal Gyrus(ブロードマン40野)が関与する可能性が指摘された^{*3}。

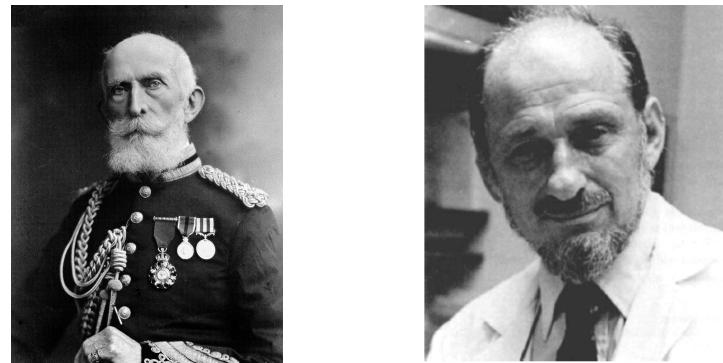


図4 左:デジャリン en.wikipedia.org/wiki/Joseph_Jules_Dejerine, 右:ゲシュヴィンド Gread Thoughts Treasury

^{*3} 尚、節見出しのゲシュヴィンド失語は[浅川の造語](#)である

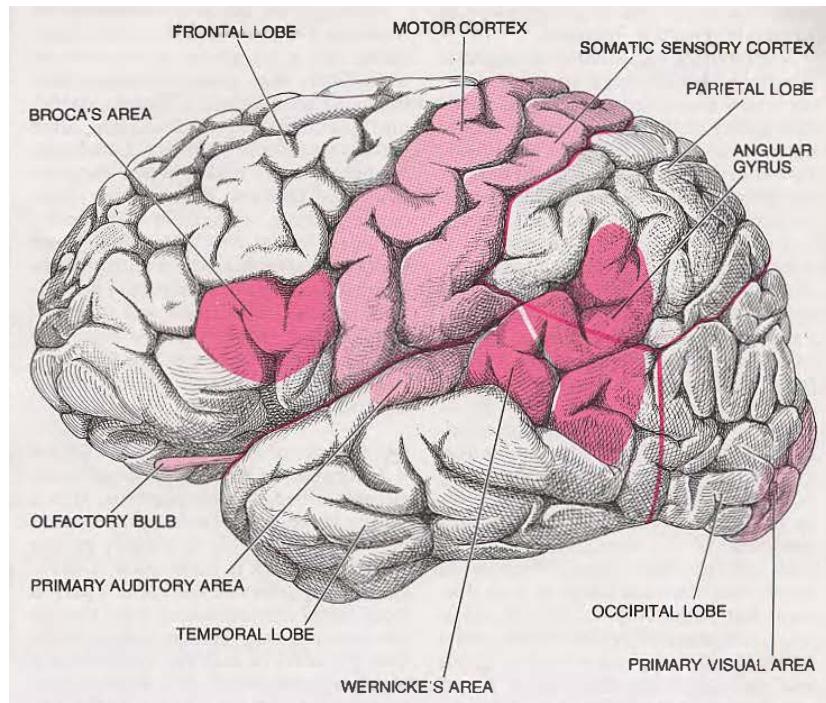


図5 From Geschwind (1974) page. 111

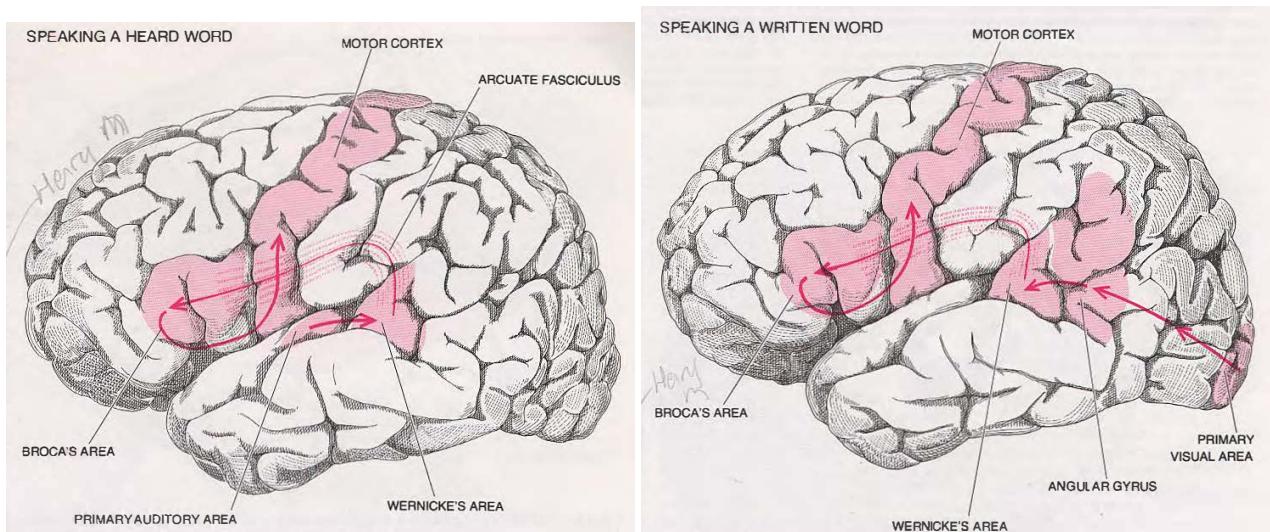


図6 From Geschwind (1974) page. 113

Dronkers et al. (2007)によれば、

- 症例「タン」は左前頭回を含む広範な領野が損傷されていた
- ブローカ自身はこのことを知ることがほぼできなかった(岩田先生談)

2.5 神経学的証拠

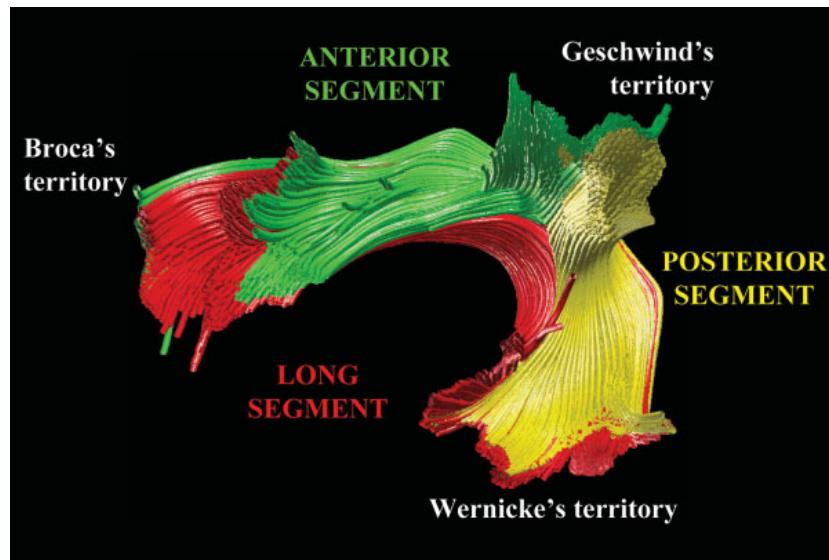


図 7 From Catani et al. (2005) Fig. 3: トラクトグラフィーに拠る纖維連絡の再構成図

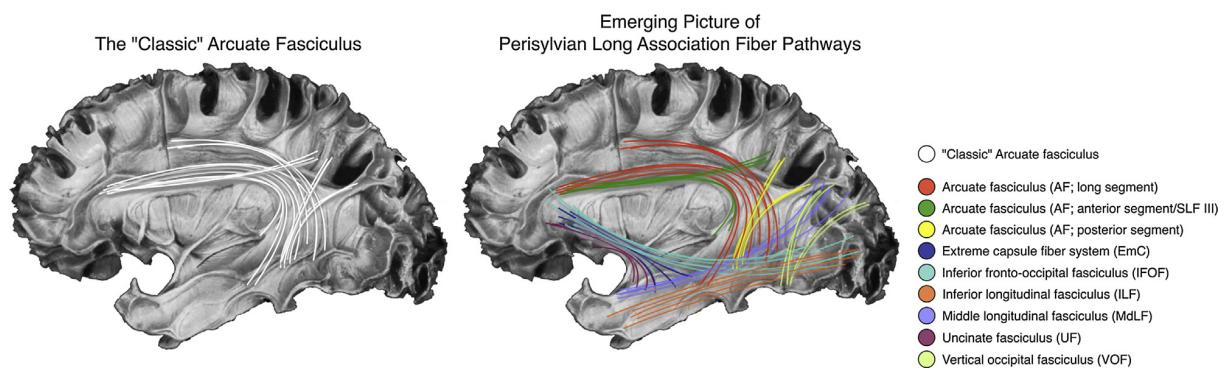


図 8 From Tremblay & Dick (2016) Fig. 4

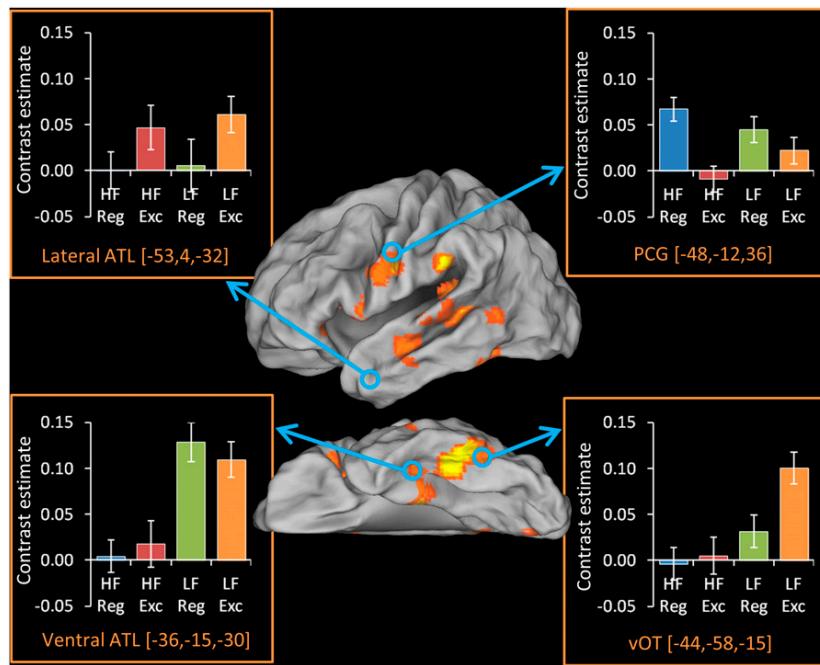


図9 From Hoffman et al. (201r), Fig. 1: HF:高頻度語, LF:低頻度語, Reg:規則語, Exc:例外語, ATL:側頭極 Anterior Temporal Lobe, PCG:中心前回 precentral gyrus, vOT:腹側後頭側頭皮質 ventral occipitotemporal cortex

3 失読症

失読症 **dyslexia** という語はギリシャ由来の「障害」を意味する “dys” と「単語」を意味する “lexis” から来ており、読みや綴り方に関する言語の障害を説明するために使用される。日本語では**失読症**、あるいは**難読症**である。研究者により「ディスレクシア」と表記して訛さない流儀もある。

英語表記では **dyslexia** と **alexia** と両表記がある。発達性 **developmental** と獲得性 **acquired** とが区別される。前者は教育の問題として取り上げられる (Schwartz, Marin, & M.Saffran, 1997)。失書 **agraphia** を伴う場合を**失読失書**、伴わない場合を**純粹失読 pure alexia** と呼ぶ。

中心性、周辺性の区別では、中心性難読を深層、表層、音韻の3種に分け、周辺性難読には、無視、注意、純粹、の3種が挙げられる (Coslett, 2000)。

■用語解説

正書法(論): orthography

音韻法(論): phonology

意味(論): semantics

それぞれの体系の中の要素をそれぞれ以下のように書くことがある

書記素: grapheme

音(韻)素: phoneme

意味(素): sememe

3.0.1 NETtalk

NETtalk はセノフスキによる英語を音読するニューラルネットワークモデルであり 1980 年代のニューラルネットワークブームの代表例である。

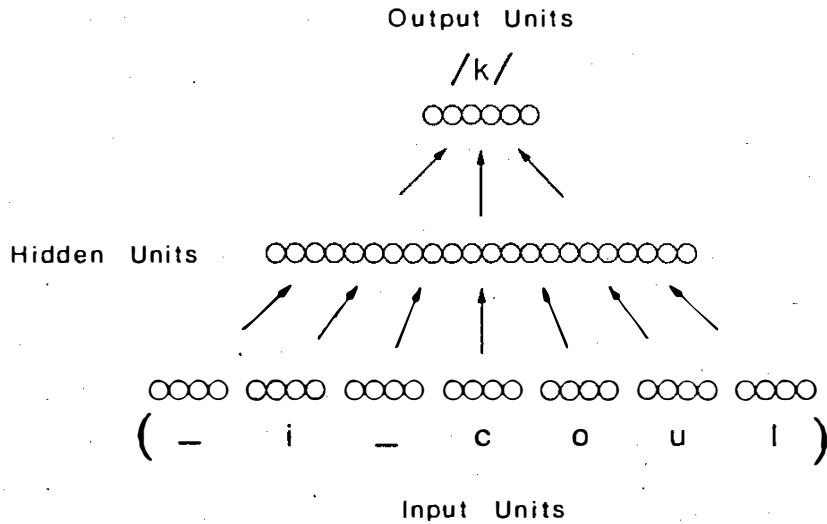


図 10 NETtalk(Sejnowski & Rosenberg, 1987)

3.1 処理単位

言葉情報処理の単位には、その大小の別により、文字 letter, 単語 word, 文章 sentence, 段落 paragraph, それ以上の大きな単位がある。それぞれに認識, 分類, 生成, などの処理機構が考えられている。

■単語音読課題に関する単語の分類 英単語は綴りと読みとの関係が準規則的 (quasi regular) であると言う。すなわち英単語には綴 (正書法 orthography) と発音 (音韻 (法) phonology) との間の対応関係が規則的な単語とそうでない単語が存在するからである。ここで、規則語, 不規則語, という用語を用いず、**一貫語** (consistent words), **非一貫語** (inconsistent words), **不規則語** (irregular words) の 3 種を区別する。一貫語と非一貫語は共に規則に従う読みであるが、同じ読みを共有する単語 (隣人あるいは仲間と呼ぶ) の多少で区別される。例えば AVE という綴りは, GAVE, SAVE, CAVE などの単語が存在するので一貫語に分類される。一方 HAVE は、これらの単語とは読み方を共有していないため非一貫語に分類される。不規則語は独自の読み方をする単語、例えば yacht を指す。

以下で概説するように、上述のような準規則的な単語音読過程は 2 つの研究の潮流で調べられてきた。一方は、ニューラルネットワークや人工知能研究であり、他方は文字や単語の読みに障害を持つ児童や言語機能に損傷を持つ患者の神経心理学である。

ニューラルネットワークや人工知能研究においては、規則に従う単語の読みとそうでない単語の読みを区別するアルゴリズムの研究と関連し、ルールベースでの判断やニューラルネットワークを用いたモデルが提案してきた。同様の問題が、英単語の過去形、過去分詞形の判断、生成問題にも当てはまる Rumelhart & McClelland (1985)。

一方、読みに障害を持つ患者の研究からは、各種類の単語 (一貫語、非一貫語、例外語、非単語) の読みの成績により言語の病理を診断する研究が行われてきている。

3.1.1 3 つの失読症

読字過程の障害には 3 種類ある。**音韻失読症** phonological dyslexia, **表層失読症** surface dyslexia, **深層失読症** deep dyslexia である。音韻性失読症の患者は実在する単語は読むことができるし、非単語を書き取ることもできるし、言われた単語を復唱することもできるが、非単語を読むことができない。たとえば ‘must’ は読むことができても実際に存在しないが発音可能な単語 must を発音することができない。二重経路モデル (DRC(Coltheart et al., 2001)) に照らして考えれば音韻失読は書記素から音韻へ変換 (直接経路) の障害と考えることができる。音韻性失読に選択的障害をもつ患者は、通常の単語であれば問題なく読めるので、一見すると失読患者ではないように見える。表層失読の患者は、規則語や非単語を読むことができるが、低頻度の例外語 (低頻度の例外語とは、語の出現頻度が低く、かつ、

その単語の読みが、書記素と音韻とを結びつける簡単なルールには則っていない語のことをいう、たとえば‘yacht’)を読むことができない。表層失読の患者は視覚性の誤り (dog を dot と言ったりする) もするが、意味の誤りはない。健常者であれば、たとえ自分の知らない単語であって、綴りと音の一般的対応関係から、それらしい発音をすることができる。ところが表層失読の患者はそれができない。表層失読はトライアングルモデルに沿って考えれば、意味への間接経路の障害と考えることができる。

深層失読の患者は音韻失読の患者と同じく非単語を読むことができない。このことに加えて、深層失読の患者は意味性の錯読を示す。たとえば‘dog’を‘cat’と言ったりする。また、視覚性の誤りを示すことがある。ときには上記 2 つの混ぜ合わさった読みの誤り、たとえば‘sympathy’を‘orchestra’と言ったりする (おそらく‘sympathy’と綴りの似ている‘symphony’を介して)。この種の患者は、抽象語と具体語の成績にも差があることがある。具体語である「椅子」よりも抽象語である「真実」の読みの成績が悪い。二重経路モデルによる深層失読の説明では、書記素から音韻への直接経路の障害の他に意味経路の障害が加わったとされる。

3.2 トライアングルモデル

パターソン、ザイデンベルク、マクレランド Patterson, Seidenberg, & McClelland (1989) はニューラルネットワークモデルによって脳損傷による読みの障害—難読症を説明しようと試みている。彼らのモデルは??節で紹介した表層失読患者の典型的な読み誤りを例証できる。彼女らは、失読症患者の示す読み誤りの症状の中には、正しい発音と読み誤りとの間の音韻的特徴の類似性が関係していることを明らかにした。彼女らのモデルでは視覚提示された単語 PINT を /pAnt/ と読み間違えるような誤りが生じる^{*4}。この種の誤りは従来、視覚的誤りとして分類されてきた。なぜなら英語では単母音文字 I は決して /A/ と発音されることはないので、患者は刺激文字 PINT を PAINT と見誤ったと解釈されてきたからである。ところが彼女らのモデルでは入力 PINT を与えても → /pAnt/ のような誤りを生じることがある。このことから、視覚的誤り分類されていた読みのエラーは、必ずしも視覚に起因する誤りとは言えないことを示している。PINT→ /pAnt/ の読み誤りは、全く同じ読み誤りが実際の患者でも報告されており、興味深い結果と言える。

3.3 モデルの構成

モデルはルーメルハートとマクレランド Rumelhart & McClelland (1986)に基づいている(図 11)。

^{*4} 一般には PINT を /pint/ と読み間違えるエラーの方が多い

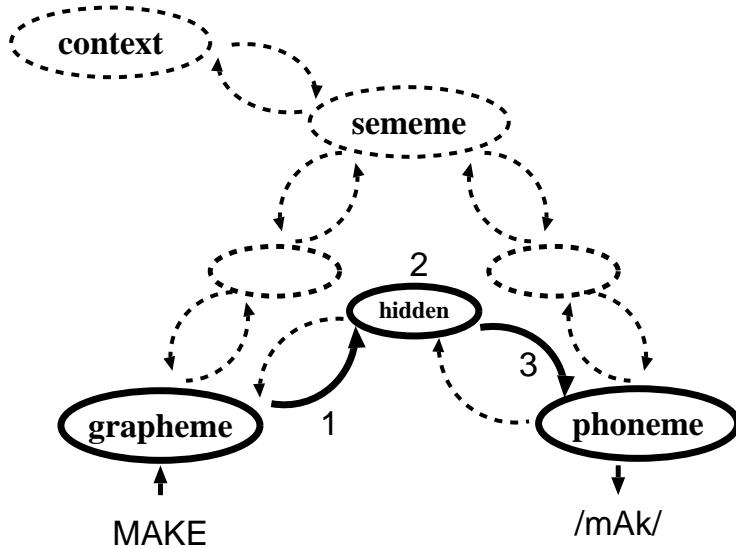


図 11 ザイデンバーグとマクレランドのトライアングルモデル。図中の実線の部分がパターソンらのシミュレーションに関係する部分である。図中の数字は後述する損傷の場所を表している

各層の素子数は書記素層 400、中間層 200、音韻層 460 であり、各層から次層への結合が全結合である。すなわち書記素層 → 中間層間の結合数は $400 \times 200 = 80000$ 、中間層 → 音韻層間は $200 \times 460 = 92000$ の結合が存在する。書記素層に入力された単語が中間層を介して音素層へ出力される。各素子の活性値は $[0, 1]$ 間の実数で、任意の単語は各素子の活性値の違いとして表現される。

3.4 入力表現

音素表現はルーメルハートとマクレランド Rumelhart & McClelland (1986) で開発された表現と同じで、連続する 3 音素が 1 素子として表現されている。この方法では、中央の文字の発音を表現するために、前後の文字も使用されおり、局所文脈情報表現 (あるいはトリプレット表現) と呼ばれることがある。トリプレット表現において MAKE という単語は [語の境界, M, A], [M, A, K], [A, K, E], [K, E, 語の境界] を表現する 4 つの素子の活性化として表現される。このような表現では素子数が (文字数 + 語の境界を表す記号) の 3 乗だけ必要になるが、彼らは表現の簡略化を行ない 16 素子にまで素子数を減らしている。たとえば [母音、摩擦音⁵、閉鎖音⁶] という表現は POST, SOFT などの単語で使われる表現である。このような 3 音素を 1 素子で表現することで文字位置情報を明示的に表現しないため入力層の素子数を文字数最長の単語に設定する必要が無い。

書記素層での情報表現も音韻表現と同様に、1 番目の文字に 10 文字、2、3 番目の文字に 10 文字づつからなるテーブルを乱数を用いて作成し、最終的にこの表現を 400 個の書記素層素子に変換して書記素層における情報表現としている。上記の連続する 3 文字から構成される局所文脈類似法により単語の類似性が表現されている。例えば MAKE は MADE や MATE に類似度が大きく、MILE や SMALL とは隔てて表現されることになる。

3.5 学習

結合係数、しきい値とともに $[-0.5, +0.5]$ で乱数によって初期化された。学習はバックプロパゲーション法によって行なわれ、学習に用いた単語は一音節語 2897 語で計 250 エポックで学習が成立するまで繰り返された。各語の頻度情報は対数変換して用いられた。すなわち最高頻度語の THE は 0.93、最低頻度語では 0.05 であった。これは 250 エポック中それぞれ 230 回と 12 回学習することを意味する。

⁵ f,v,ʃ など

⁶ p,b,t,d,k,g など

実行手順は、最初に入力パターンが書記素層に提示され、その活動が中間層から音韻層へと伝播される。

パーソンらは音韻誤差得点（ターゲットと音韻層に現れた出力との差の2乗和）が単語呼称課題の潜時と正確さとに関係すると仮定して、心理実験データとの比較を行なっている。誤差得点が低いことは速くて正確な反応が生じることを意味する。すなわちノイズが少ないと言うことが正確な反応を意味し、誤差が少ないと言うことがより速く反応基準に達すると仮定している⁷。

モデルの学習中の振舞いで注目すべき点は、頻度効果と規則性効果との交互作用についてである。心理実験では、低頻度語に比べて高頻度語の方が視覚提示された単語を発話するまでの潜時が短いことが知られている（頻度効果）。規則性効果とは不規則語の方が反応潜時が長いことを指す。頻度効果と規則性効果との交互作用とは、成人の心理実験結果では、高頻度語の場合には規則性効果が生じないが、低頻度語では規則性効果が認められる指す。モデルの訓練初期には、高・低頻度語とも大きな規則性効果が認められたが、250回の学習終了後、高頻度語での規則性効果が消失した。このことは、心理実験の結果と定性的に一致すると見なすことができる。

3.6 破壊実験

学習成立後の図11に数字で示した3つの部位を破壊した。損傷のシミュレーションでは該当部位の素子または結合を0.1, 0.2, 0.4, 0.6の割合で0にすることでなされた。図12に中間層の破壊（図12左）と中間層から音韻層への結合の離断（図12右）の2種類の損傷の影響を示した。

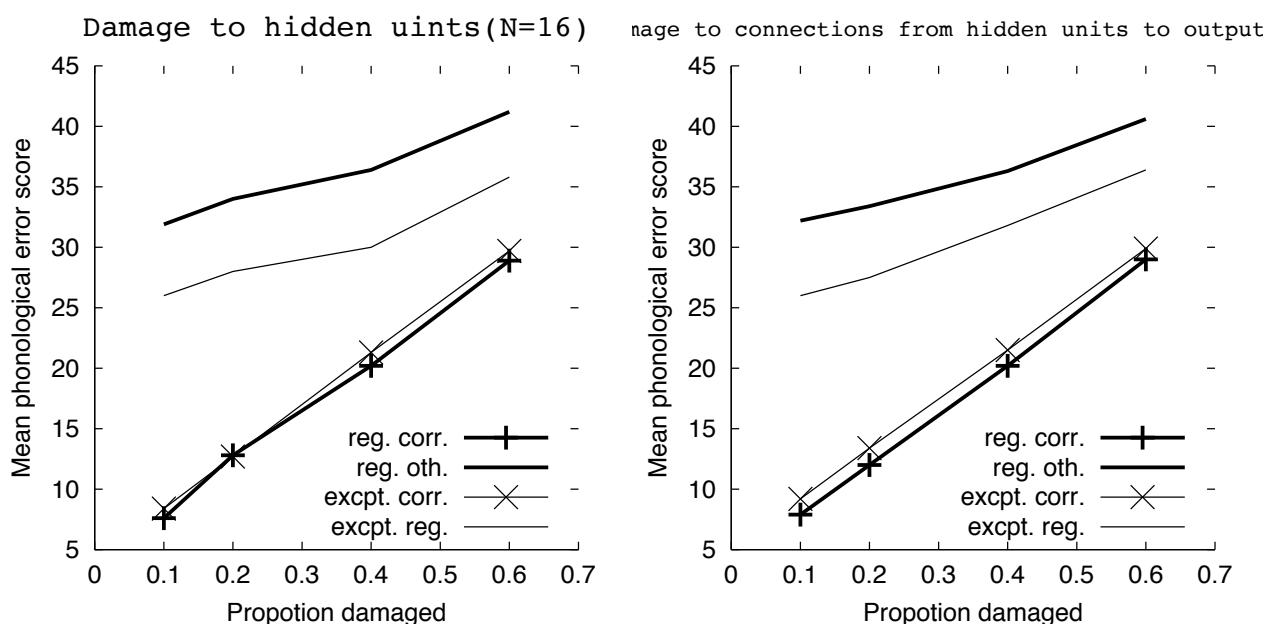


図12 破壊実験結果、右が中間層を破壊した場合、左は中間層から音韻層への結合を離断した場合。reg.corr.:規則語を正しく発音した場合、reg.oth.:規則語を正しく発音できなかった場合、except.corr.: 不規則語を正しく発音した場合、except.reg.: 不規則語を規則語の発音規則で発音した場合。例えば COVE を /kOv/ と発音すると reg.corr. に、/kUv/ と発音すれば reg.oth. に相当する。一方、MOVE を /mUv/ と発音すると except.cor. に、/mOv/ と発音すれば except.reg. に分類された。Patterson ら (1989) Table 7.3 を元に作成

図12から以下のようなことが読み取れる。

- 中間層の破壊と中間層から音韻層への結合を離断した場合とでは同じ傾向にあること
- 音韻誤差得点は、破壊の程度の関数として単調に増加すること
- 正しい発音の方が損傷の影響が大きいこと。すなわち損傷の程度が大きければ、正しい発音と誤りとの差が小

⁷ 反応時間のニューラルネットワークモデルについてはマクレランドの GRAIN モデルがある McClelland (1993)

さくなる。

- 規則語の正解と読み誤りとの差よりも、不規則語の正解と読み誤りとの差の方が小さいこと。

実験2では、訓練中に提示されなかった新奇語や音韻対応規則には従つてはいるが実際の英語には存在しない非単語を読ませることが行なわれた。モデルが新奇語を読むことができることは、モデルが一般的な発音規則を習得できたことを意味するが、非単語を読むことができることについては注意が必要である。図??の右の書記素音韻対応系が障害された場合、非単語の読みは一般に図??の左の経路を通過しなければならないと考えられてきたからである。そして彼らのモデルには図??の左の経路に対応するニューラルネットワークが実現されていない。このことは従来のた読みの誤りの分類に対して、加えて、背景となるボックス-アンド-アロー・モデルによる症例の検討に対して再考をせまるものであると言えよう。

彼女らはさらに、図12で示した結果が単語の頻度効果(実験3)による説明より、音韻的な類似性から説明できる(実験4)可能性を示唆している。

これらの結果と表層失読の患者の以下のような読みの特徴との対応が示唆される(Patterson et al., 1989, p.172, type IIの症状)。

- 規則語の音読より不規則語の音読の方が成績が悪いが、規則語の音読も障害されている。
- 音読の潜時は異常に遅い。一単語を音読するのに苦労している。
- 非単語の音読が障害されている。
- 規則化(不規則語を規則語のような音読規則に当てはめて発音する)だけでは誤りの大部分を説明できない。
- 意味性の誤りは認められない

モデルの成績と患者の症状との間の上記のような類似点から、ニューラルネットワークモデルが神経心理学に対して有効な道具になり得ると考える。

3.7 LARC errors

Patterson, Suzuki, Wydell, & Sasanuma (1995)

3.8 日本語かな漢字

Sato, Patterson, Fushimi, Maxim, & Bryan (2008); Shallice (1988)

3.9 発達性難読症

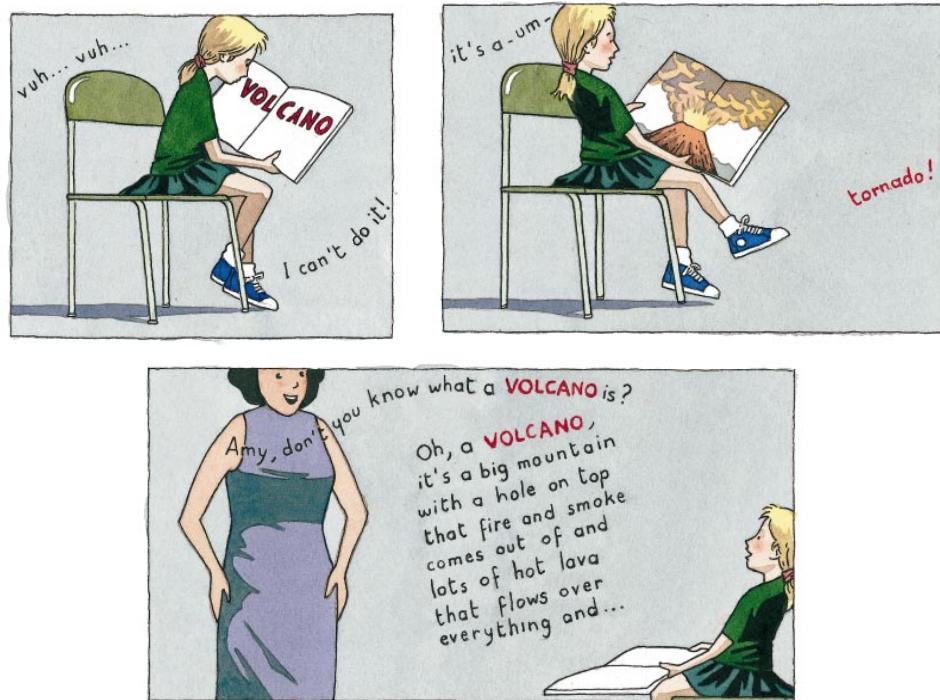


図 13 from Shaywitz (1996)

3.10 入出力

言語情報処理を考える場合の入出力について考える。入力は、視覚(画像や動画などの場合と文字や記号などの2つに大別される)、聴覚(音声、音楽)、運動感覚がある。一方、出力は、音声、運動(書字、描画、指差し、視線の移動など)がある。これらの入出力を分類アルゴリズムを通して学習可能であると考えるのが一般的である。入出力をそれぞれをモダリティ(modality、様相、様式)というが生理学における感覚入力の別に加えて、細分類がなされることもある。たとえば、視覚における、明るさ、色、線分の方位、聴覚における周波数帯域などは別モダリティと考えられる場合もある。各モダリティは独立した入力装置と見なさる場合が多い。

3.11 二重経路モデル

印刷された文字を音読する場合を考える。Coltheartら(Coltheart, Curtis, Atkins, & Haller, 1993; Coltheart & Rastle, 1994; Coltheart et al., 2001)によって開発された記号処理的な読みのモデルである二重経路モデル(Dual Route Cascaded model)では、印制文字を音韻へ変換するための明示的な規則に基づく直接経路と、規則にあてはまらない単語を読むための単語ベースのルックアップテーブルをもつ間接経路(語彙経路)とから構成されている。ルックアップテーブルとは、それぞれの単語が登録された表のようなものだと考えればよい(書記素語彙目録という)。このルックアップテーブルにエントリのある単語項目は、この一対一対応関係のある間接経路を通って読まれ、ルックアップテーブルに登録されていない単語は書記素音韻対応規則系を通って発話に至る。

单一経路か二重経路かという議論ではなく、直接経路と間接経路の処理の違いに関する議論である。二重経路モデルとニューラルネットワークモデルであるトライアングルモデルとの違いは、二重経路モデルの特徴は明示的で記号処理的なルール(ルックアップテーブル)を用いるということにある。すなわち、二重経路モデルでは2つの経路間のどちらの経路を通って印刷された文字が読まれるかを決めるための(離散的な)スイッチが仮定されていることである。

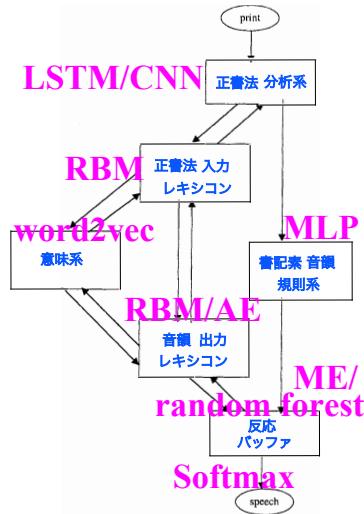


図 14 二重経路モデル (Coltheart et al., 2001)への適用案

3.12 トライアングルモデル

トライアングルモデル (Plaut et al., 1996; Seidenberg & McClelland, 1989a) では明示的で記号処理的なルール（ルックアップテーブル）あるいはスイッチの存在を仮定しない。代わりに、トライアングルモデルでは同時的、相互作用的処理が仮定される。書記素、音韻、意味の情報は各ユニット群内／群間で分散表現されており、類似した単語は、ユニット群内の類似した活性パターンとして表現されている。

トライアングルモデルにおける直接経路においては、多くの単語と発音規則が一致する規則語と高頻度の不規則語が学習される。一方低頻度の不規則語は意味系に依存すると仮定される。したがって直接経路は単語の頻度効果に、すなわち単語の統計情報（生起確率）に敏感である。規則語および高頻度例外語と低頻度例外語との処理の違いには労働の分割（division of labor）とよばれる作用が関与する。対照的に規則に基づく二重経路モデルでは高頻度不規則語を扱うことが期待できない。さらに、2つの経路間の離散的なスイッチをもつ代わりに、トライアングルモデルでは同時的、相互作用的処理による、軟らかい労働の分割が行われる。

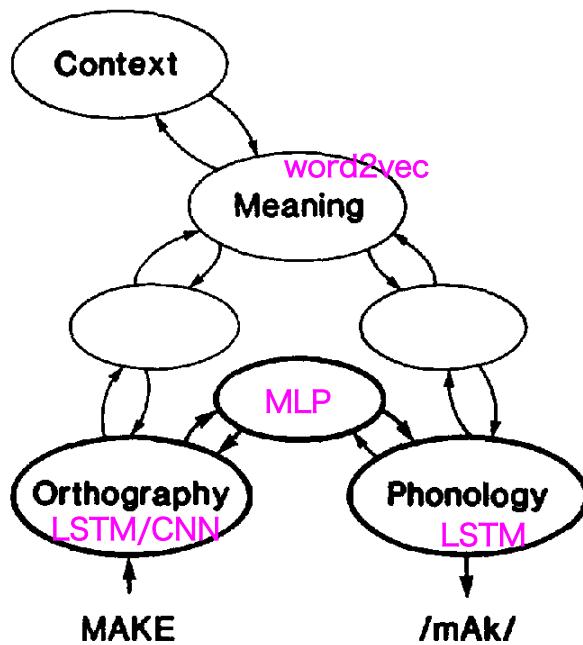


図 15 Seidenberg & McClelland (1989a)

トライアングルモデルでは英語の単音節単語約3000語を読むことができる。初期のトライアングルモデル(Seidenberg & McClelland, 1989a)では、非単語を読むことができなかつたため、人間の読みのモデルとしては適当でないという批判を受けていた。

3.12.1 SM89

Wikergeln, 非単語の読み。Fig.16に示したのはSM89で実装されたモデルである。各モジュールはニューラルネットワークの1層であり、Fig.16の円内には用いられたユニット数が記されている。

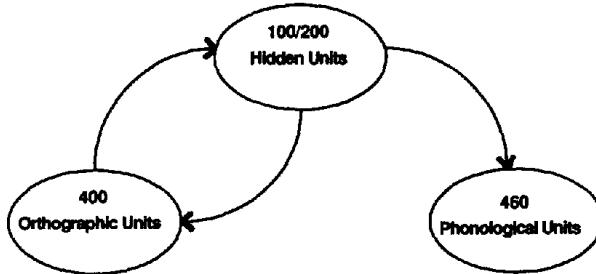


図 16 Seidenberg & McClelland (1989a) Fig. 2 より実装された部分と層内のユニット数

■SM89の入出力表現 Bag of Letters表現では、「TAB」と「BAT」とが同じ発音を与えることになってしまふ。そこで(Wickelgren, 1969)の3連図式(triples schema)が用いられた。3連表現とはstopは $/\#S_{t,s}T_{o,t}O_{p,o}P_{\#}/$ と表現される。この3連図式はfastTextでも用いられているJoulin et al. (2017)。MAKEは_MA, MAK, AKE, KE_と入力される。同様に出力表現/mAk/は_mA, mAk, aK_と表現された。

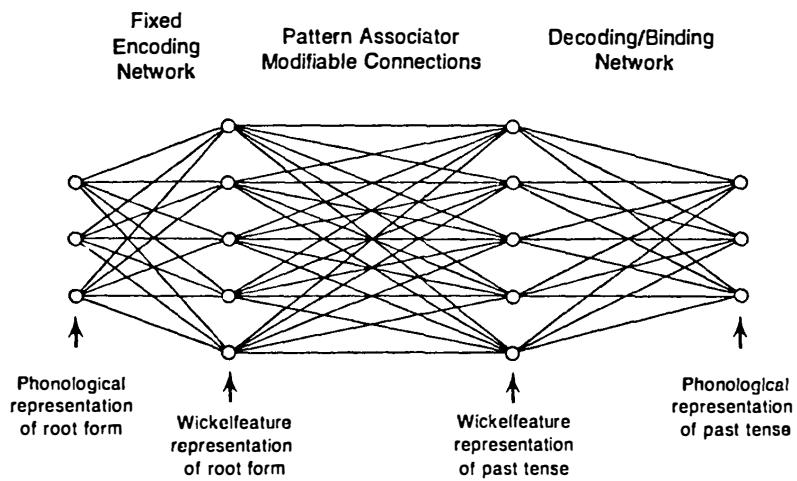


図 17 Rumelhart & McClelland (1985) Fig.1

■データ 2897 語の単音節語 monosyllabic words, うち 13 語は homogrpah (同型異音)

$$p = K \log (\text{frequency} + 2). \quad (1)$$

homograph は以下の通り: bass, bow, dave, house, lead, live, read, row, sow, tear, wind, wound

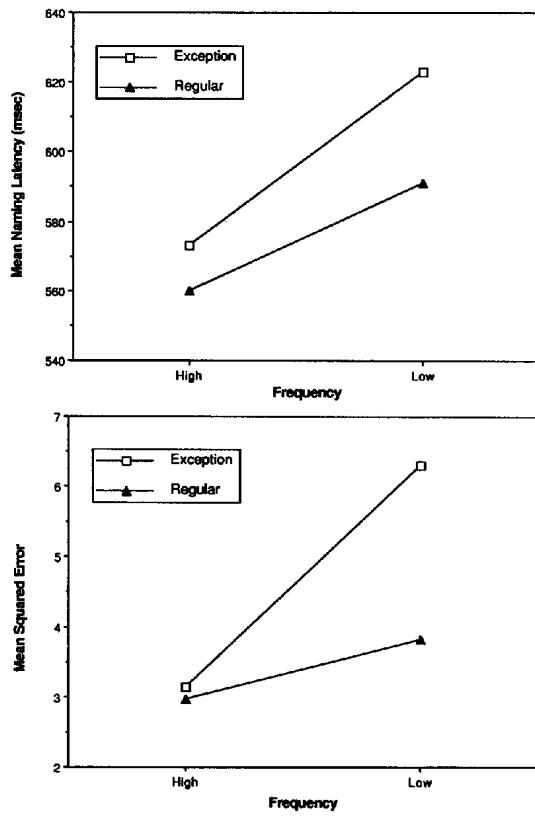


Figure 4. Results of the Taraban and McClelland (1987) study (upper graph) and the simulation data for 250 epochs (lower graph).

図 18 Seidenberg & McClelland (1989a) Fig. 4. Results of the Taraban and McClelland (1987) study (upper graph) and the simulation data for 250 epochs (lower graph).

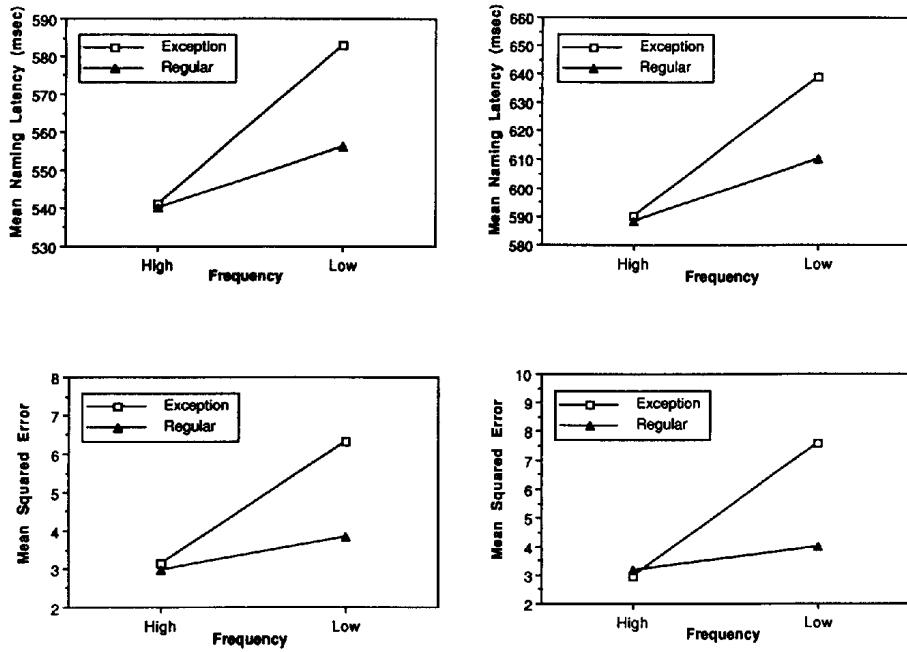


Figure 5. Results of the Seidenberg (1985c; left graphs) and Seidenberg, Waters, Barnes, & Tanenhaus (1984, Experiment 3; right graphs) studies: experiments (upper graphs) and simulations (lower graphs).

図 19 Seidenberg & McClelland (1989a) Fig. 5. Results of the Seidenberg (1985c; left graphs) and Seidenberg, Waters, Barnes, & Tanenhaus (1984, Experiment 3; right graphs) studies: experiments (upper graphs) and simulations (lower graphs).

■Regular inconsistent words In an important article, Glushko (1979) studied a class of words called regular inconsistent. These words, such as GAVE, PAID, and FOE, have two critical properties. Their pronunciations can be derived by rule; in fact, most of these words' neighbors rhyme (e.g., GAVE, PAVE, SAVE, BRAVE). However, each of these words has an exception word neighbor (e.g., HAVE, SAID, and SHOE, respectively).

Research in this area has been marked by the development and revision of several taxonomies based on different properties of words or perceptual units thought to be theoretically relevant. In part, this research was motivated by the fact that several models, incorporating very different representational and processing assumptions, all predict longer naming latencies for exception words compared with regular words. In the dual-route model (Coltheart, 1978), longer latencies result because readers attempt to pronounce exception words by applying grapheme-phoneme correspondence rules, resulting in a temporary misanalysis. In Glushko's (1979) model, a word is pronounced by analogy to similarly spelled neighboring words. The fact that the neighbors of an exception word are all regular was thought to interfere with generating its pronunciation. According to Brown (1987), the factor that determines naming latencies is the number of times a spelling pattern (word body) occurs with a particular pronunciation. A regular word such as DUST contains a word body, -UST, that is pronounced/ust/in many words. An exception word such as SWAMP contains a word body, -AMP, that is pronounced/omp/in only one word, the exception itself. Hence, the frequency of a spelling-sound correspondence could be the source of the exception effect.

We examined the model's processing of regular inconsistent words using stimuli from the Taraban and McClelland experiment described previously, which also included

low/high freq, regular/exception/inconsistent, word/non-word

1. **high-frequency regular**
2. **low-frequency regular**
3. **high-frequency inconsistent**

4. low-frequency inconsistent
5. matched regular word controls

以下は Taraban & McClelland (1987) より

consistent: words have the same primary vowel sound and very similar pronunciations, like the rhyming words *dish*, *wish*, and *fish* the pronunciation will be easy to synthesize (Glushko, 1979, 1981).

These orthographic **neighbors** of the target-based on the identical spelling for the vowel and the consonant cluster ending- are phonological **friends** and tend to support the activation of the target pronunciation

An **exception** effect could result in the following way. When an exception word like *have* is the target, it supports its own activation, but also supports the activation of words that are visually similar to it, like *save*, *wave*, and *gave* -again, the similarity is based on the identical spelling of the vowel and consonant ending. *Gave*, *save*, and *wave* support the same vowel pronunciation, and they could **conspire** against the target word. These **conspirators** are **enemies** of *have* since they contain major phonological discrepancies with respect to the vowel and inhibit phonological features of this target word in favor of their own. Conspiracy relations of this sort could underlie longer processing times for exception words, since the exceptions must overcome the phonological interference from the conspirators.

High Freq exception: are, both, break, choose, come, do, does, done, foot, give, great, have, move, put, pull, said, says, shall, want, watch, were, what, word, work.

Low Freq. exception: bowl, broad, bush, deaf, doll, flood, gross, lose, pear, phast, pint, plow, rouse, sew, shoe, spook, swamp, swarm, touch, wad, wand, wash, wool, worm

High Freq regular-inconsistent: base, bone, but, catch, cool, days, dear, flew, flat, five, form, go, goes, grow, here, home, meat, paid, plant, roll, root, sand, small, speak

Low Freq regular-inconsistent: brood, cook, cord, cove, cramp, dare, fowl, gull, harm, hoe, lash, leaf, loss, mad, moose, moth, mouse, mush, pork, pose, pouch, rave, tint, toad

Plaut et al. (1996) では入力表現を工夫し、**オンセット** onset, **母音** vowel, **コーダ** code という 3 つの部分から構成される**母音中心表現**とよばれる表現を用いている。この入力表現の工夫により非単語の読みについても人間と同程度の能力があることが示された。トライアングルモデルの読むことができる単語は、単音節の単語である。すなわち、母音については 1 つだけのコーディングが必要である。加えて母音の前後に子音のクラスターが必要である。母音の前の子音をオンセット、母音の後の子音をコーダという。したがって、単語 ‘make’ の入力表現は、オンセットが ‘M’、母音が ‘A’、コーダが ‘K’ などと表現する。

3.13 意味障害のモデル

Hinton & Shallice (1991); Plaut & Shallice (1993); Warrington & Shallice (1979),
 Mikolov, Chen, Corrado, & Dean (2013); Mikolov, Sutskever, Chen, Corrado, & Dean (2013); Mikolov, Yih, & Zweig (2013)

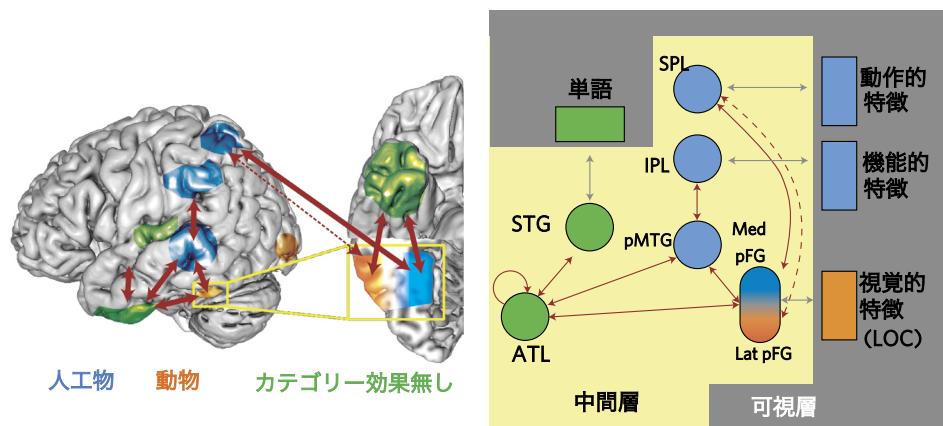
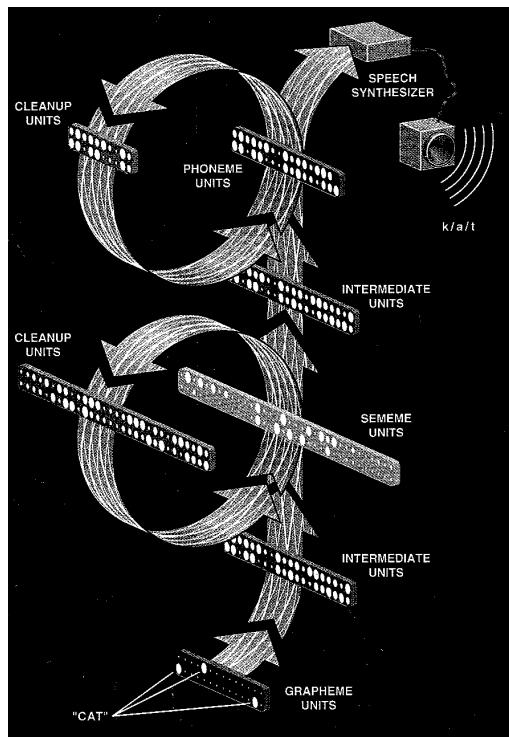


図 20 Chen et al. (2017) より

4 意味記憶

4.1 意味性の障害

Coltheart, Patterson, & Marshall (1987) は、深層失読が、ボックスアンドアロー・モデルへの挑戦であり、同時に他の症状を併発することから認知神経心理学における問題点であると指摘している。多様な意味性錯読を生じさせるモデルは未だない。以下の図 21 参照のこと

Beginning with the semantic errors, Coltheart (1980a) also extended the list of common properties to 12 (examples of errors are from DE, Patterson & Marcel, 1977):

1. Semantic errors (e.g. BLOWING → “wind,” VIEW → “scene,” NIGHT → “sleep,” GONE → “lost”).
2. Visual errors (e.g. WHILE → “white,” SCANDAL → “sandals,” POLITE → “politics,” BADGE → “bandage”).
3. Function-word substitutions (e.g. WAS → “and,” ME → “my,” OFF → “from,” THEY → “the”).
4. Derivational errors (e.g., CLASSIFY → “class,” FACT → “facts,” MARRIAGE → “married,” BUY → “bought”).
5. Nonlexical derivation of phonology from print is impossible (e.g. pronouncing nonwords, judging if two nonwords rhyme).
6. Lexical derivation of phonology from print is impaired (e.g. judging if two words rhyme).
7. Words with low imageability/concreteness (e.g. JUSTICE) are harder to read than words with high imageability/concreteness (e.g. TABLE).
8. Verbs are harder than adjectives, which are harder than nouns, in reading aloud;
9. Functions words are more difficult than content words in reading aloud.
10. Writing is impaired (spontaneous or to dictation).
11. Auditory-verbal short-term memory is impaired.
12. Whether a word can be read at all depends on its sentence context (e.g. FLY as a noun is easier than FLY as a verb).

図 21 From Plaut & Shallice (1993)

1. カテゴリー特異性 category specificity Warrington (1975); Warrington & Shallice (1979, 1984)
2. 基本概念優位性 basic category(Rosch, Mervis, Gray, Johnson, & Boyes-Braem, 1976)
3. 上位概念保存 super-ordinate category preservation(Warrington, 1975)

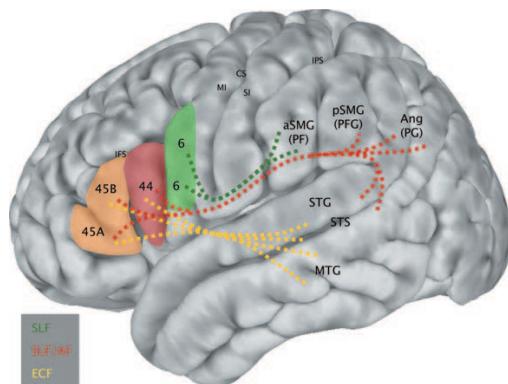


図 22 from Kelly et al. (2010)

Schematic diagram integrating the observed patterns of functional connectivity between BAs 6, 44 and 45 and perisylvian parietal and temporal regions (i.e. the results of the present study) with information concerning the white matter tracts that join these regions, derived from experimental anatomical tracer studies in the macaque monkey that can demonstrate the precise origin, trajectory and termination of axonal fiber systems (Petrides & Pandya, 2009). Lines are dashed to indicate that the white matter pathways underlying the observed functional connectivity are hypothesized, but not measured directly in the present study. SLF, superior longitudinal fasciculus; AF, arcuate fasciculus; ECF, extreme

capsule fasciculus.

4.2 認知心理学による基本カテゴリー仮説

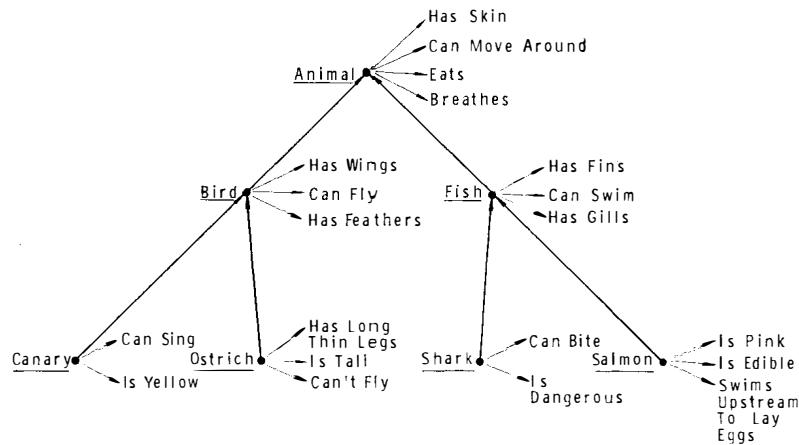


図 23 From Collins & Quillian (1969)

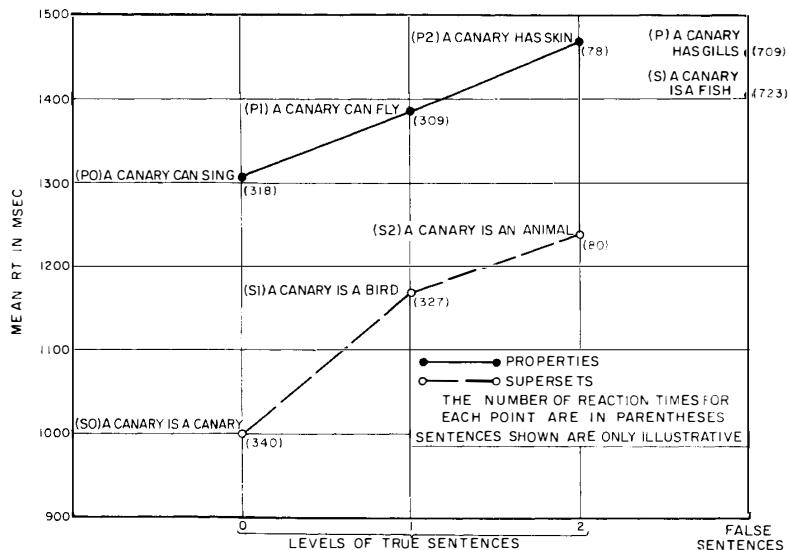


図 24 From Collins & Quillian (1969)

TABLE 7
MEAN REACTION TIMES (MSEC) FOR VERIFICATION OF CATEGORY MEMBERSHIP OF OBJECTS

Response type	Type of name		
	Superordinate	Basic level	Subordinate
True	591	535	659
False	630	578	642

図 25 From Rosch et al. (1976) Tab. 7

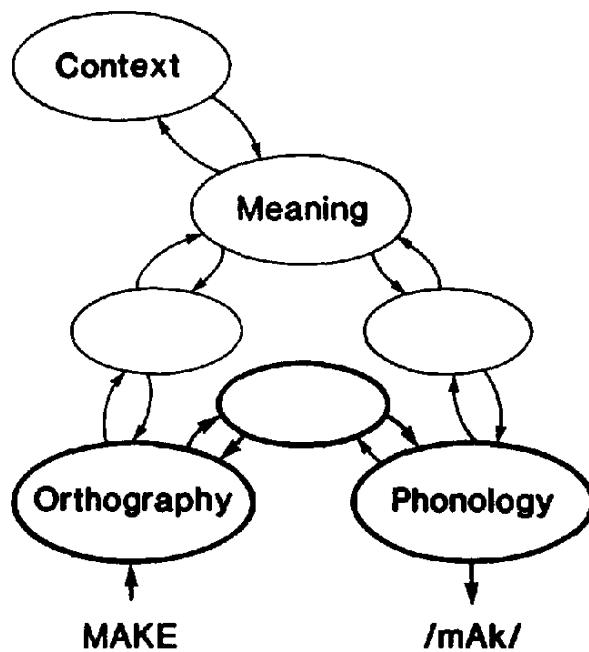


図 26 from Seidenberg & McClelland (1989a) Fig.1

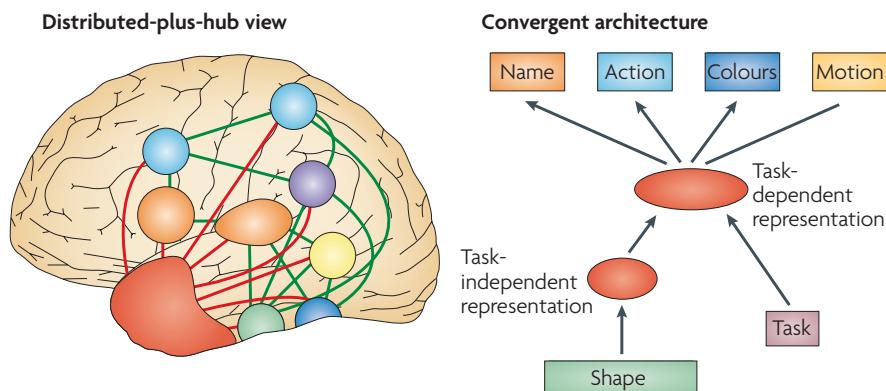


図 27 From Patterson et al. (2007) Fig.1

4.3 選択的に障害される概念

- animate/inanimate (objects)
- concrete/abstract words
- fruits, vegetables
- food
- colors
- gems
- action
- vehicles

4.4 Hub and spoke hypothesis

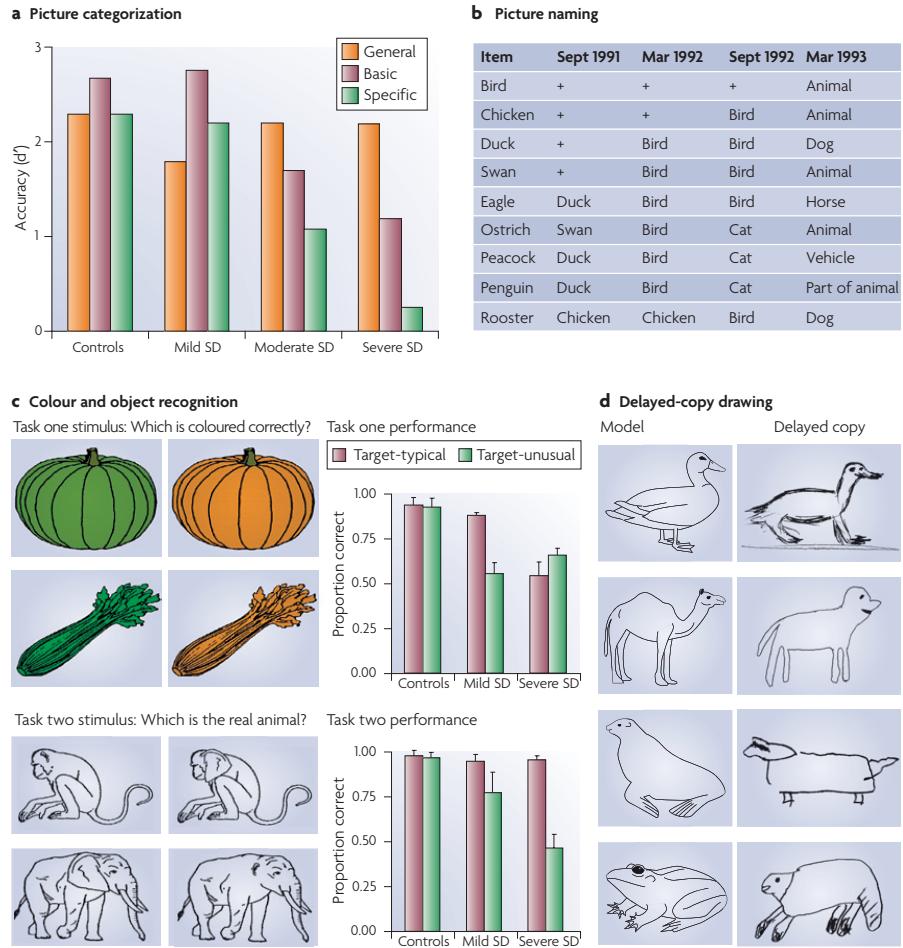


図 28 From Patterson et al. (2007) Fig.2

4.5 The syndrome of semantic dementia

One of the most prominent symptoms of semantic dementia (SD) is anomia: failure to name objects, concepts and people, whether in response to stimulus presentation or in spontaneous speech. Patients with other causes of anomia, and occasionally even healthy people, sometimes fail to name something because, although they know what it is, they cannot find the word for it at that moment. Anomia in SD does not result from this kind of word-finding difficulty but instead reflects degraded knowledge of the object or concept. When we asked one of our patients to name a picture of a zebra, she replied: “It’s a horse, ain’t it?” Then, pointing to the stripes, she added, “But what are these funny things for?”

For SD patients, the degree of success in naming (and, indeed, in any measure of conceptual knowledge) is largely independent of the modalities of input and output. Naming is most commonly assessed by presenting pictures and asking for a verbal naming response; however, SD patients are just as unsuccessful, indeed usually more so, if the stimulus is a description of the item to be named (for example, “What do we call the African animal with black and white stripes?”), or is the item’s characteristic sound (for example, a telephone ringing or a dog barking), or if the patient is asked to write the name rather than say it.

The degree of success or failure in any semantic test in SD patients is determined by four principal factors[72,92]: the

severity or stage of progression of the disease; the familiarity of the object (the deficit is always more pronounced for less familiar things, words and concepts); the object's typicality (there are fewer successes for things that are atypical of their kind); and the specificity of information required by the task (for example, a patient might be able to identify an apple as something to eat without being able to identify it as an apple).

Most cognitive functions apart from semantic memory are reasonably well-preserved in patients with SD, at least until late in the disease. Thus — provided that the tests do not refer to or require access to semantic knowledge — SD patients have reasonably normal capabilities in general intelligence, problem solving, visuo-spatial function, short-term memory, episodic memory, simple calculation skills, and so on.

4.6 ATL hub and spoke hypothesis

Why the anterior temporal lobe? This Review summarizes evidence for the hypotheses that, first, semantic generalization requires a single amodal hub and, second, that the neuroanatomical site of this hub is the anterior temporal lobe (ATL). Assuming, for the moment, that these hypotheses are valid, why is the ATL a neuroanatomically sensible place for the semantic hub? One reason that is sometimes offered is the fact, known from non-human primate physiology⁹³, that many primary sensory and motor areas, along with their related association cortices, connect to the ATL. This is true, but not a unique feature of the ATL: the 'tristate' junction of the temporal, parietal and occipital lobes, including the angular gyrus, has the same feature of being well connected to input from multiple modalities, and indeed some researchers have ascribed a similar cross-modal mapping function to this area^{14,94}. It is worth noting that cross-modal is not the same as a - modal: the region around the angular gyrus might serve to combine information from several modalities but still not have the genuinely amodal function of a semantic hub. Two neuroanatomical facts about the ATL region might make it an appropriate candidate for extracting amodal conceptual information. First, it is neuroanatomically proximal to the amygdala and to other limbic structures, as well as to the orbito-frontal cortex — regions that are known to be important for the processing of emotion and reward⁹⁵. Given that affective response to some extent pervades everything that we perceive, do and know, ATL regions might be well suited to computing associations between affect and more value-neutral sensory, motor and linguistic aspects of conceptual knowledge. Second, the ATL regions that seem so crucial to semantic memory are immediately adjacent to the anterior parts of the medial temporal lobe memory system — a system that is critical for rapid learning of new episodic information. As episodes must contribute to the gradual acquisition of new conceptual knowledge, it makes sense for episodic and semantic systems to be situated in close proximity.

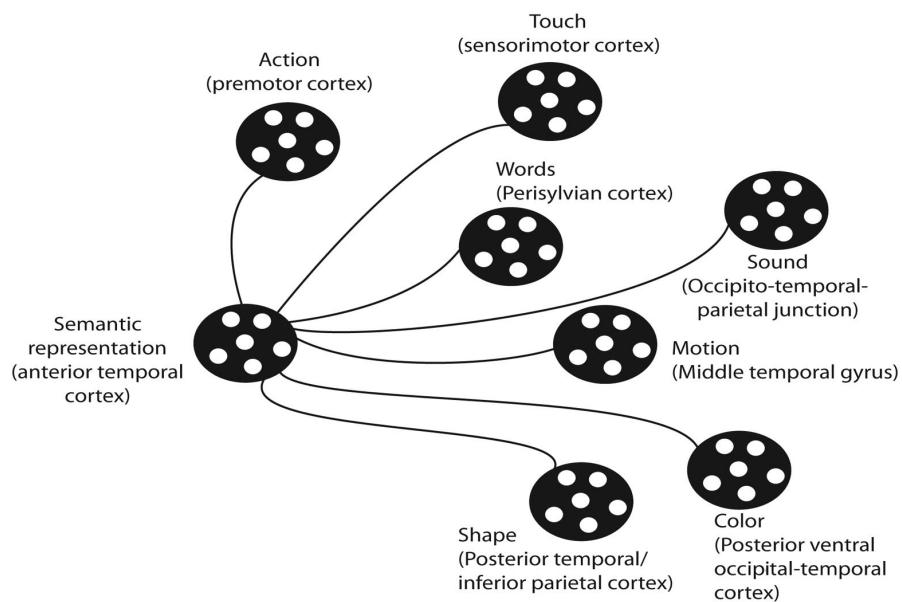


図 29 From Patterson et al. (2007) Fig.3

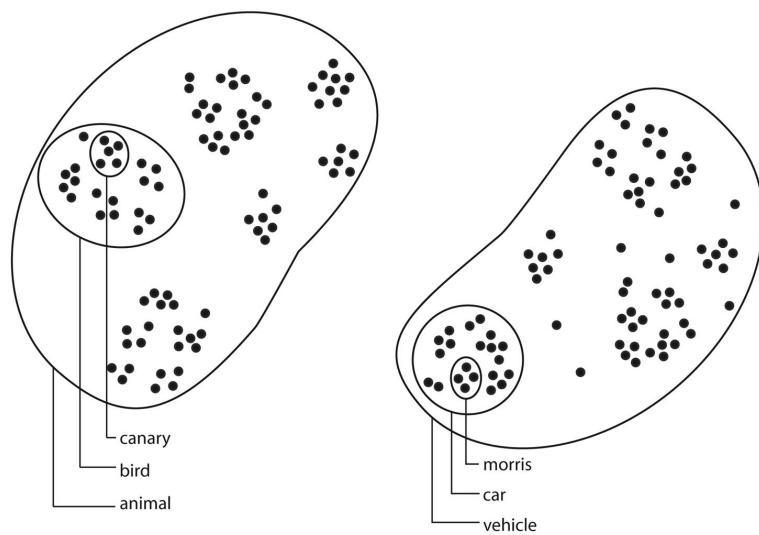


図 30 From Patterson et al. (2007) Fig.4

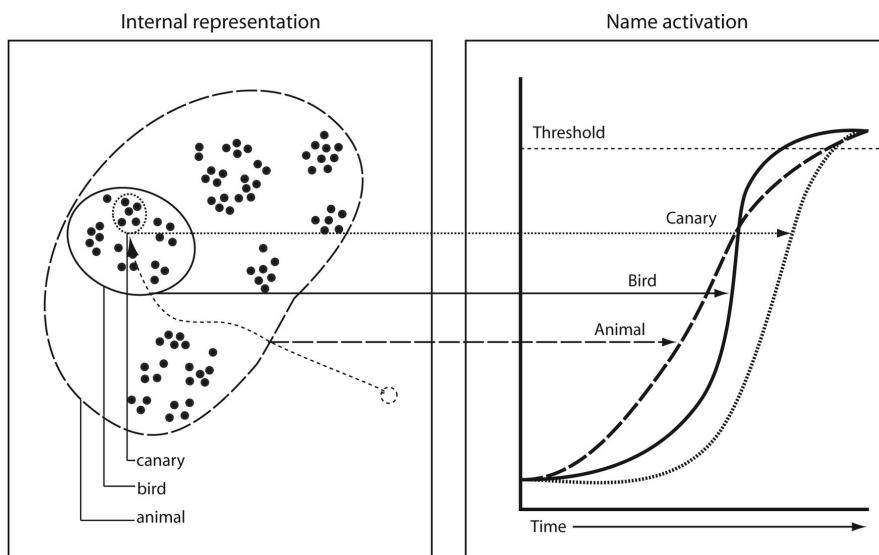


図 31 From Patterson et al. (2007) Fig.5

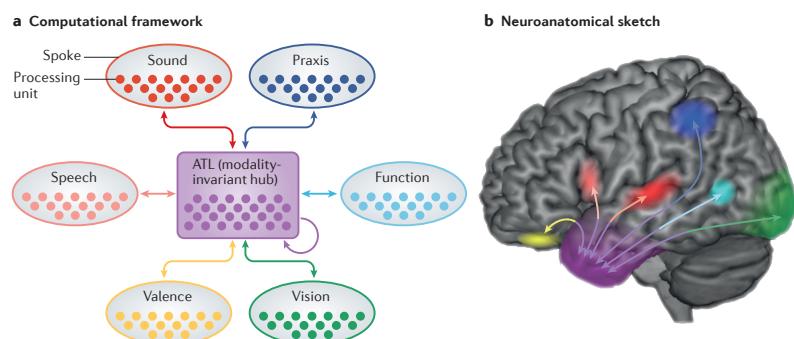


図 32 From Ralph et al. (2016) Fig.1

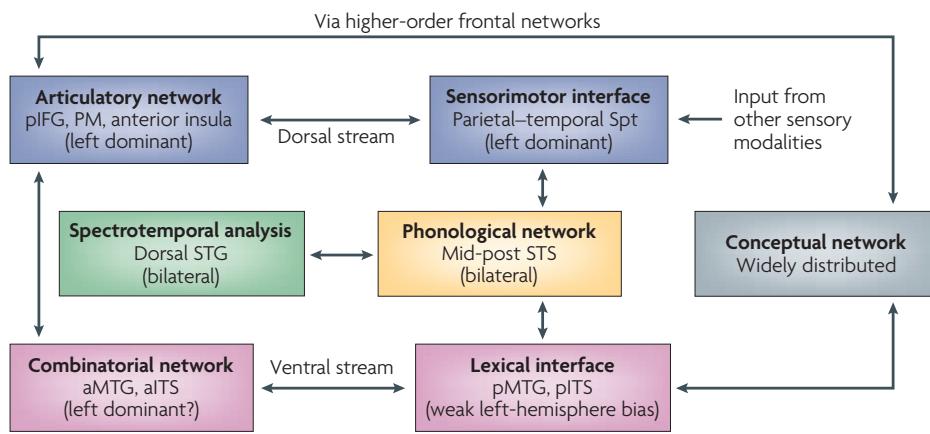


図 33 From Hickok & Poeppel (2007)

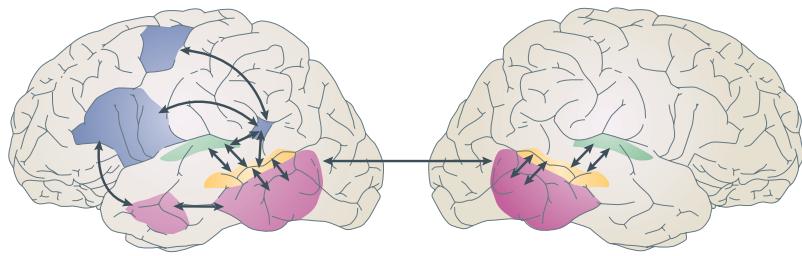


図 34 From Hickok & Poeppel (2007)

4.7 深層失読のシミュレーション

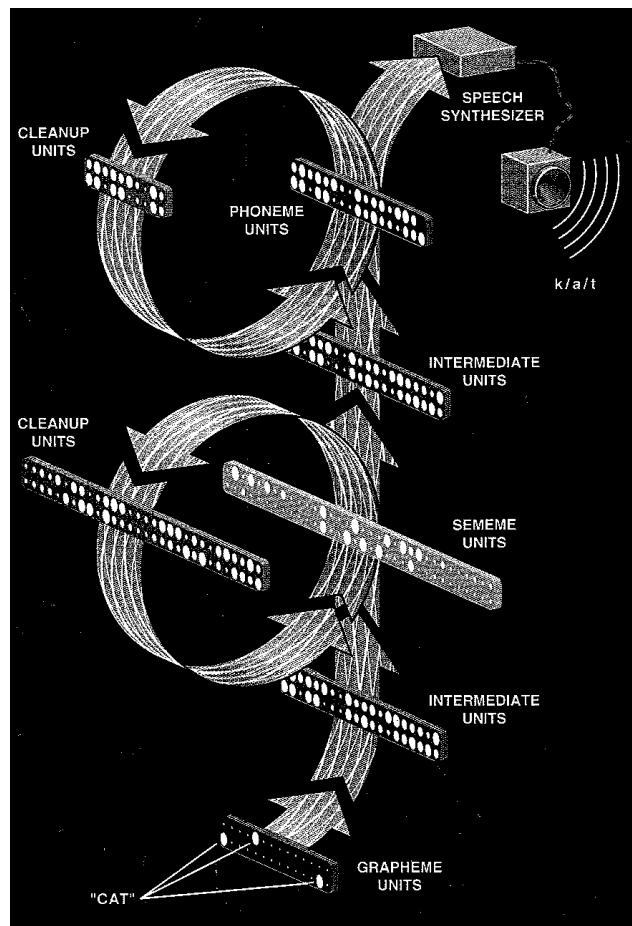


図 35 From Hinton et al. (1993) より

4.8 単語埋め込みモデル

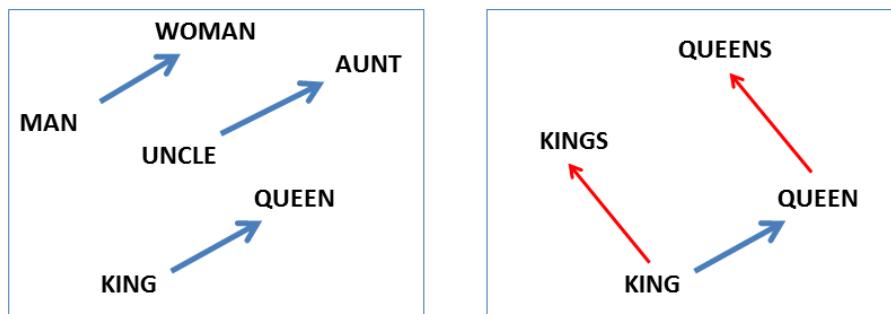


図 36 Mikolov et al. (2013) より

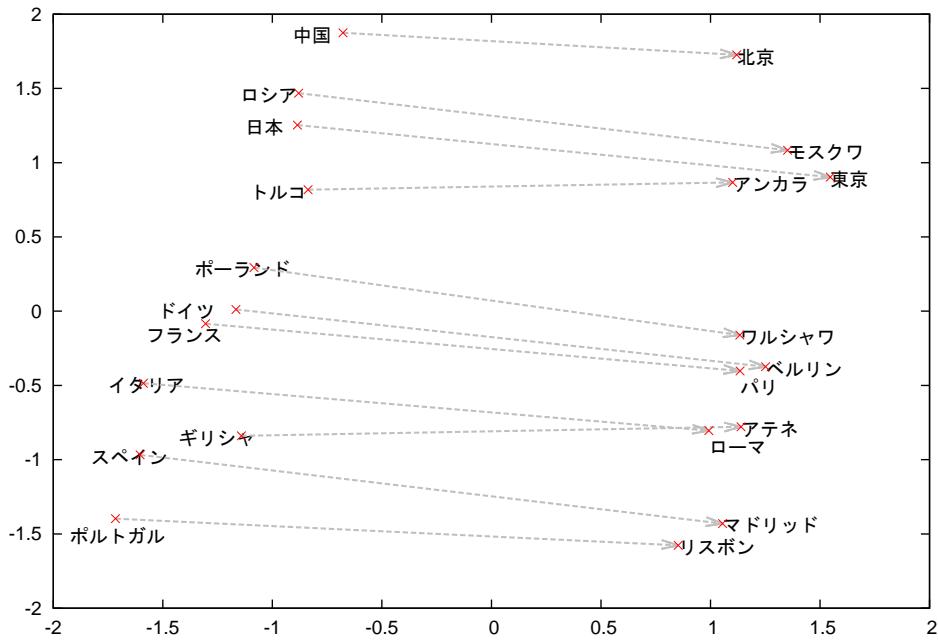


図 37 Mikolov et al. (2013) より

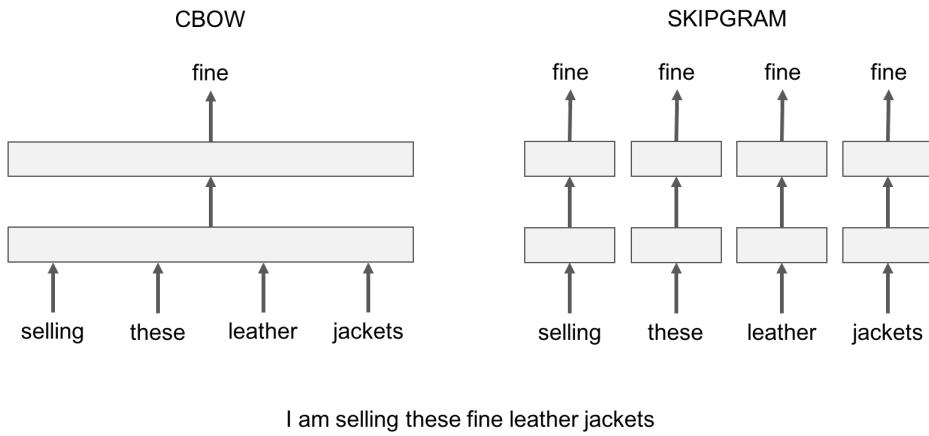


図 38 左:CBOW, 右:スキップグラム Joulin et al. (2017)

For a word w with N word vector sets $\{c(w)\}$ representing the words found in its contexts, and window size W , the empirical variance is:

$$\Sigma_w = \frac{1}{NW} \sum_i^N \sum_j^W (c(w)_{ij} - w)(c(w)_{ij} - w)^T \quad (2)$$

This is an estimator for the covariance of a distribution assuming that the mean is fixed at w . In practice, it is also necessary to add a small *ridge* term $\delta > 0$ to the diagonal of the matrix to regularize and avoid numerical problems when inverting.

4.9 アトラクタ

深層失読と表層失読。それまでのモデルは次のようである。

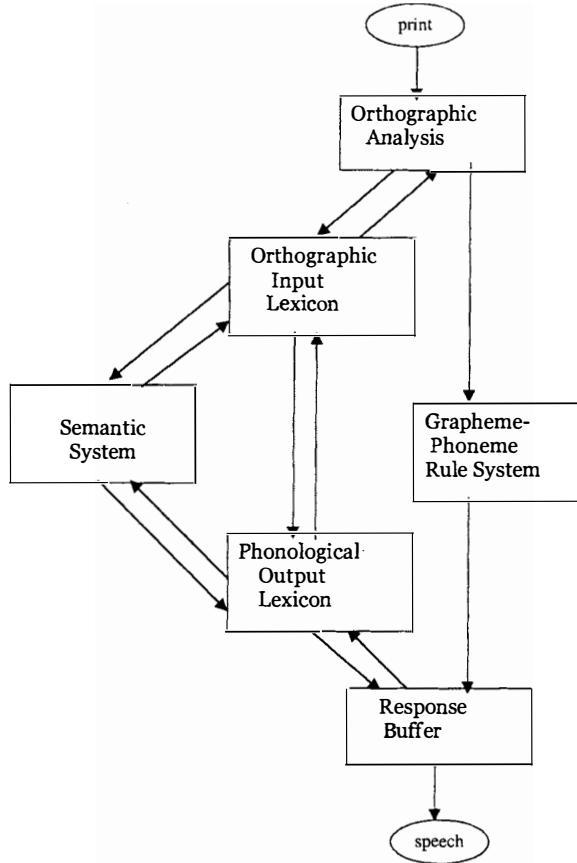


図 39 古典的な読みのモデルの一例

しかしこれでは、英語の音韻ルールに則った単語と不規則な発音をする単語の違いしか説明できず。我々日本人の表語体系には合致しない。もちろん、かな=表層系、漢字=深層系と考えている研究者も多い
上流の壊すか、下流を壊すか、

4.10 アトラクターの説明

2つの素子 x, y を考えて $w_{yx} = -1, w_{xy} = 1, w_{xx} = w_{yy} = c$ とすると

$$\begin{pmatrix} \frac{dx}{dt} \\ \frac{dy}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c & 1 \\ -1 & c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt} \mathbf{x} = \mathbf{Mx} \quad (4)$$

このときの振る舞いは行列 \mathbf{M} によってきまり、 \mathbf{M} の 2 つの固有値は $c \pm i$ で与えられる。

$c = 0$ なら同心円状の解となる。このことは次のようにしても確かめることができる。 x, y を極座標に変換して

$$\begin{aligned} x &= r \cos \theta \\ y &= r \sin \theta \end{aligned}$$

で表される r, θ を用いて書き直せば

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \frac{dx}{dt} \\ \frac{dy}{dt} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \frac{dr}{dt} \cos \theta - r \sin \theta \frac{d\theta}{dt} \\ \frac{dr}{dt} \sin \theta + r \cos \theta \frac{d\theta}{dt} \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \cos \theta & -r \sin \theta \\ \sin \theta & r \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{dr}{dt} \\ \frac{d\theta}{dt} \end{pmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial r} & \frac{\partial x}{\partial \theta} \\ \frac{\partial y}{\partial r} & \frac{\partial y}{\partial \theta} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{dr}{dt} \\ \frac{d\theta}{dt} \end{pmatrix} \\
&= \mathbf{J} \begin{pmatrix} \frac{dr}{dt} \\ \frac{d\theta}{dt} \end{pmatrix}
\end{aligned} \tag{5}$$

なので、行列 M の x, y を r, θ に変換して

$$\begin{aligned}
\left\{ \begin{pmatrix} \frac{dx}{dt} \\ \frac{dy}{dt} \end{pmatrix} = \right\} \mathbf{J} \begin{pmatrix} \frac{dr}{dt} \\ \frac{d\theta}{dt} \end{pmatrix} &= M \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \\
\mathbf{J} \begin{pmatrix} \frac{dr}{dt} \\ \frac{d\theta}{dt} \end{pmatrix} &= M \begin{pmatrix} r \cos \theta \\ r \sin \theta \end{pmatrix} \\
\begin{pmatrix} \frac{dr}{dt} \\ \frac{d\theta}{dt} \end{pmatrix} &= J^{-1} M \begin{pmatrix} r \cos \theta \\ r \sin \theta \end{pmatrix} \\
\begin{pmatrix} \frac{dr}{dt} \\ \frac{d\theta}{dt} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} cr \\ -1 \end{pmatrix}
\end{aligned} \tag{6}$$

従って解曲線

$$r(t) = r(0)e^{ct} \tag{7}$$

$$\theta(t) = \theta_0 - t \tag{8}$$

を得る。

この曲線群は c の値によって、 $c > 0$ なら渦巻き状に発散、 $c < 0$ なら原点に収束し、 $c = 0$ のとき渦心点となる。いずれの場合も時計回り ($-t$) 方向に進行する。

c が x, y の関数であれば、より複雑な関数となる。例えば $c = 1 - x^2 - y^2$ のような

$$\begin{aligned}
\frac{dx}{dt} &= \{1 - x^2 - y^2\}x + y \\
\frac{dy}{dt} &= -x + \{1 - x^2 - y^2\}y
\end{aligned} \tag{9}$$

であればリミットサイクルとなる。

実際に上記と同じような解法でといてみると

$$r(t) = \frac{1}{e^{-2t}\left(1 - \frac{1}{r(0)}\right) - 1} \tag{10}$$

のようになる。

$$\begin{pmatrix} \frac{dx}{dt} \\ \frac{dy}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c & 1 \\ -1 & c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \tag{11}$$

$$\frac{d}{dt} \mathbf{x} = M \mathbf{x} \tag{12}$$

4.11 未完成

意義素ユニットを相互に繋いだり、

具体語と抽象語の区別は意味記憶のエントリー数の違いで、具体語の方がエントリー数が多い。

Table 1
Words Used in the Model

Indoor objects	Animals	Body parts	Foods	Outdoor objects
Bed	Bug	Back	Bun	Bog
Can	Cat	Bone	Ham	Dew
Cot	Cow	Gut	Hock	Dune
Cup	Dog	Hip	Lime	Log
Gem	Hawk	Leg	Nut	Mud
Mat	Pig	Lip	Pop	Park
Mug	Ram	Pore	Pork	Rock
Pan	Rat	Rib	Rum	Tor

図 40 Hinton & Shallice (1991) Tab.1

Table B1
Semantic Features

No.	Feature	No.	Feature
1	max-size-less-foot	34	partof-limb
2	max-size-foot-to-two-yards	35	surfaceof-body
3	max-size-greater-two-yards	36	interiorof-body
		37	above-waist
4	main-shape-2D	38	mammal
5	main-shape-3D	39	wild
6	cross-section-rectangular	40	fierce
7	cross-section-circular	41	does-fly
8	has-legs	42	does-swim
9	white	43	does-run
10	brown	44	living
11	green	45	carnivore
12	color-other-strong	46	madeof-metal
13	varied-colors	47	madeof-wood
14	transparent	48	madeof-liquid
15	dark	49	madeof-other-nonliving
16	hard	50	gotfrom-plants
17	soft	51	gotfrom-animals
18	sweet	52	pleasant
19	tastes-strong	53	unpleasant
20	moves	54	man-made
21	indoors	55	container
22	in-kitchen	56	for-cooking
23	in-bedroom	57	for-eating-drinking
24	in-living-room	58	for-other
25	on-ground	59	used-alone
26	on-surface	60	for-breakfast
27	otherwise-supported	61	for-lunch-dinner
28	in-country	62	for-snack
29	found-woods	63	for-drink
30	found-near-sea	64	particularly-assoc-child
31	found-near-streams	65	particularly-assoc-adult
32	found-mountains	66	used-for-recreation
33	found-on-farms	67	human
		68	component

Note. Directly interconnected sememes occur within the same section.

図 41 Hinton & Shallice (1991) Tab.1

Table B2
The Words and Their Positive Semantic Features

Word	Features from Table B1																				
Bed	2	4	6	8	13	17	21	23	25	47	50	52	54	58							
Can	1	5	7	13	16	21	22	26	46	54	55	56	57	59	61	62	63				
Cot	2	5	6	13	17	21	23	25	47	50	52	54	58	64							
Cup	1	5	7	9	16	21	22	24	27	49	54	55	56	57	60	62	63				
Gem	1	5	13	14	16	21	23	24	27	49	52	54	58	59	65						
Mat	2	4	6	10	15	17	21	22	24	25	26	49	54	57	58						
Mug	1	5	7	13	16	21	22	24	26	49	54	55	57	59	60	62	63				
Pan	2	5	7	9	16	21	22	26	46	54	55	56	61	65							
Bug	1	5	8	13	15	20	25	28	29	31	33	39	41	43	44	53					
Cat	2	5	7	8	13	15	17	20	21	22	24	25	28	33	38	40	43	44	52	66	
Cow	3	5	7	8	13	15	20	25	28	31	33	38	43	44	52	57	65				
Dog	2	5	7	8	10	20	21	22	24	25	28	33	38	40	42	43	44	45	52	66	
Hawk	2	5	8	10	15	20	27	28	29	32	39	40	41	44	45	66					
Pig	2	5	7	8	12	17	20	25	28	33	38	43	44	57	65						
Ram	2	5	7	8	9	20	25	28	31	32	33	38	40	43	44	65					
Rat	1	5	7	8	10	15	20	25	28	33	38	39	40	42	43	44	45	53			
Back	2	4	6	12	16	20	21	27	35	37	44	67	68								
Bone	1	5	7	9	16	21	27	34	36	37	44	67	68								
Gut	3	4	7	9	17	21	27	36	37	44	53	67	68								
Hip	1	4	12	16	20	21	27	36	44	67	68										
Leg	2	5	7	12	16	20	21	25	34	35	36	44	67	68							
Lip	1	4	6	12	17	20	21	27	35	37	44	67	68								
Pore	1	4	7	12	17	21	27	34	35	37	44	67	68								
Rib	1	4	16	21	22	23	24	27	36	37	44	67	68								
Bun	1	5	7	10	17	18	19	21	22	26	50	52	54	62	64						
Ham	1	5	12	15	17	19	21	22	26	33	51	52	54	56	57	61	62				
Hock	2	5	7	14	19	21	22	26	48	50	52	54	57	59	61	63	65				
Lime	1	5	7	11	17	18	19	21	22	26	44	50	52	57	59	61	62				
Nut	1	5	7	10	15	16	19	21	22	24	26	28	29	44	50	52	57	59	62		
Pop	2	5	7	14	18	19	20	21	22	24	26	48	52	54	57	59	62	63	64		
Pork	1	5	9	17	19	21	22	26	33	51	52	56	57	61							
Rum	2	5	7	14	19	21	24	26	48	50	52	54	57	59	63	65					
Bog	3	4	11	17	20	25	28	31	32	39	48	49	53								
Dew	1	4	14	17	25	28	29	31	32	33	48	49	52								
Dune	3	5	10	17	25	28	30	39	49	52	66										
Log	2	5	7	10	15	16	25	28	29	33	47	50	58								
Mud	3	4	10	15	17	20	25	28	29	30	31	32	33	49	53	58	64	66			
Park	3	4	11	25	28	31	39	49	50	52	54	58	64	66							
Rock	3	5	10	15	16	25	28	30	31	32	39	49	58	66							
Tor	3	5	10	15	16	25	28	32	39	49	52	66									

図 42 Hinton & Shallice (1991) Tab.1

4.12 FM91

意味記憶は、個々の対象についてカテゴリー毎に構成されているのかそれとも、それとも意味記憶はモダリティー毎に構成されているのか、についてフラーとマクレランド Farah & McClelland (1991a) が行なった研究を紹介する。彼らのモデルによれば、モダリティーに依存した意味記憶表象を考えれば、カテゴリーに基づく意味記憶表象は説明できることを意味し、認知心理学でしばしば話題になる記憶表象論争に対する一つの解答を与えている。

4.13 神経心理学的症状

実際の脳損傷患者の中には、動物や植物などの生物の知識について障害がある一方で、非生物の知識については健常のまま保たれている患者が存在する Warrington & Shallice (1984)。ウォリントンとシャリスは、生物の知識と非生物の知識との間で選択的な障害が起こるのは、異なる感覚運動経路からの情報の重みの差異を反映しているためではないか、と述べている。すなわち、生物は主に感覚的な性質によって互いを区別することが多いが、非生物は主に機能によって分類される。ある動物、例えばヒョウは、他の肉食動物と比べて主に視覚的な特徴によって差別化される。これとは対照的に、机の知識については、他の家具との違いを記述するときには主に機能、すなわち何のために使うのか、によって差別化される。それゆえ、障害のある知識と健全に保たれている知識との違いは、生物-非生物の違いなのではなく、対象を記述している特徴が感覚-機能の違いであるかも知れない。

フラーとマクレランドのモデルは上記の感覚-機能仮説が意味記憶障害を説明できることを例示するために作成された。分散表現された2種類の意味記憶、すなわち視覚的意味記憶と機能的意味記憶とが損傷を受けたとき、生物-非生物の知識が障害されることを説明できる。

4.14 モデル

彼らのモデルを図 43 に示す。3つのユニット群、すなわち記憶を表現する意味記憶系と、入出力を表現する2つの周辺系、視覚ユニット群と言語ユニット群とがある。

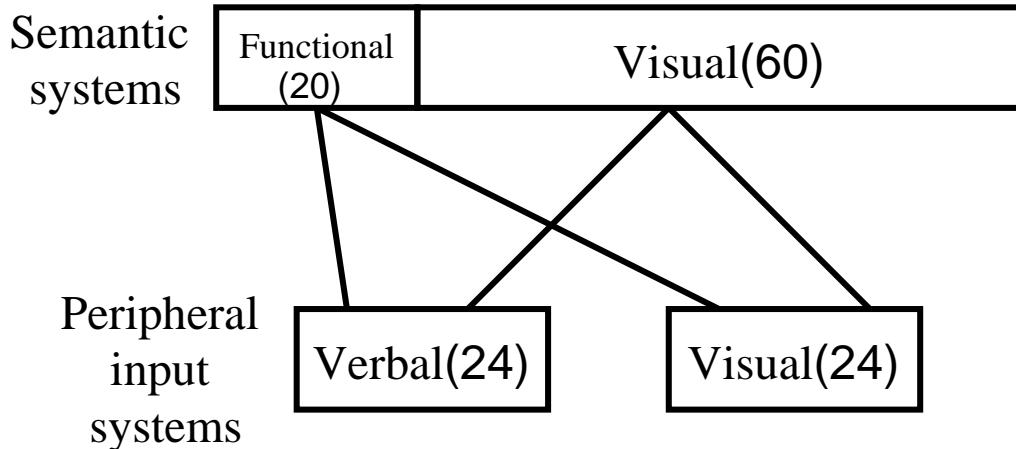


図 43 ファラーとマクレランド (Farah & McClelland, 1991b) の意味記憶モデルの概念図。カッコ内の数字は数値実験で用いられたユニット数を表す。意味記憶内で機能的記憶と視覚的記憶のユニット数が異なるのは、彼らの論文中の実験 1 (心理実験) の結果を反映している。

言語ユニット群と視覚ユニット群との間を除いて、全てのユニットに群間および群内結合が存在する。各ユニットの活性値は $(-1, +1)$ の間をとる実数値であり、しきい値は無い。各ユニットの活性値は同期的に更新された。すなわち、それぞれのユニットの活性値を計算するタイミングは全ユニットについて同時である。各周期ごとに、そのユニットに対して出力を送っている全てのユニットの活性値と結合係数からそのユニットの活性値が計算される。

それぞれ 10 個づつ、生物と非生物を表す刺激が乱数を用いて作成され、モデルに提示された。生物と非生物とを表す項目は、視覚情報と名前情報との比率が変えられた。生物項目では平均して 16.1 の視覚意味記憶ユニット、2.1 の機能意味記憶ユニット。非生物では 9.4 の視覚意味記憶ユニット、6.7 の機能意味記憶ユニットを用いて表現された。

誤差修正学習手続きによってネットワークが訓練された。絵画パターンが提示されたときに対応する意味記憶パターンと言語パターンが産出されるように、また、言語パターンが提示されたときには対応する意味記憶パターンと視覚パターンが産出されるように訓練された。各訓練試行では、生物、もしくは非生物に対応する絵の名前が名前ユニット群あるいは絵画入力ユニット群に対して提示され、そして、ネットワークは解が安定するまで 10 サイクルの活性値の更新が行なわれた。ユニット間の結合係数は学習についてはデルタルールが用いられた。

4.15 破壊実験

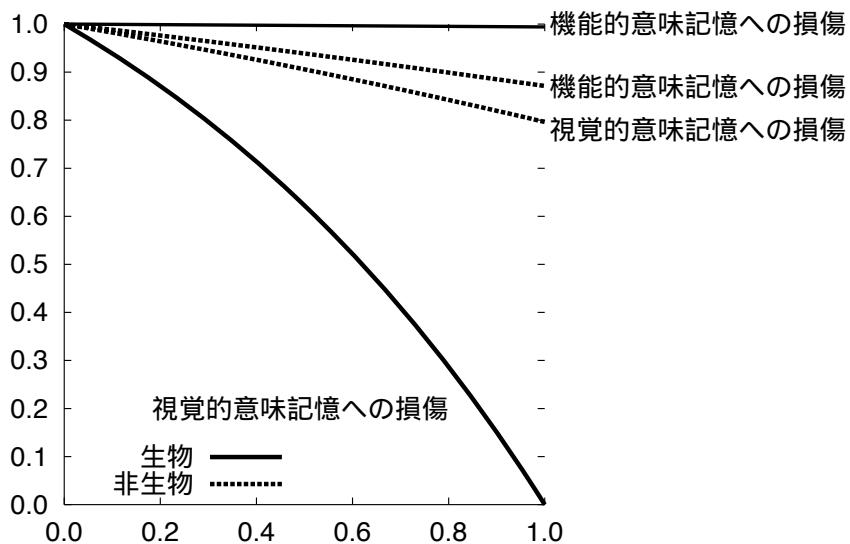


図 44 生物–非生物別の意味記憶内の損傷の程度と課題成績との関係 (Farah & McClelland, 1991b) の表 3 と図 2 より改変。彼らは各条件で 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 0.99 の 6 点について各 5 回づつしか数値実験を行なっていないため実際の曲線は滑らかにならない。そこで、指数関数に回帰させてプロットしなおした。指數回帰を用いれば唯一のパラメータを変化させることで 4 つの条件に対応する曲線を描くことができる。

彼女らは、実験 3 でモダリティに依存した意味記憶障害、すなわち、耳で聞いたときには理解できるが、目で見たときには特定のカテゴリーについての知識に障害を生じる患者のシミュレーションを行ない。実験 4 では、??節で説明した雑音を加える方法によるシミュレーションを行なっている。

結果から、モダリティ依存の意味記憶構造だけを用いて、カテゴリー依存の障害を説明できることが確認された。

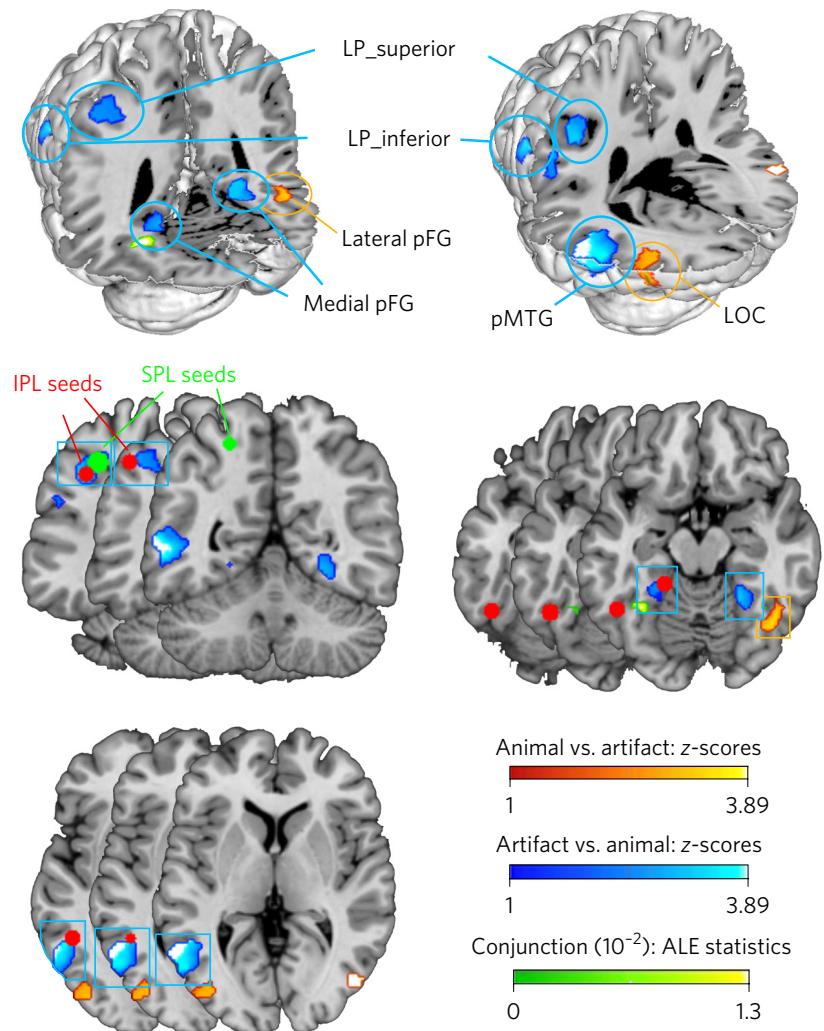


Figure 1 | ALE analysis showing regions that systematically respond more to animals than artifacts (orange), more to artifacts than animals (blue), or equally to both (green). Red dots indicate seed points from ALE analysis and literature review. LP, lateral parietal; LOC, lateral occipital complex.

図 45 Chen et al. (2017)

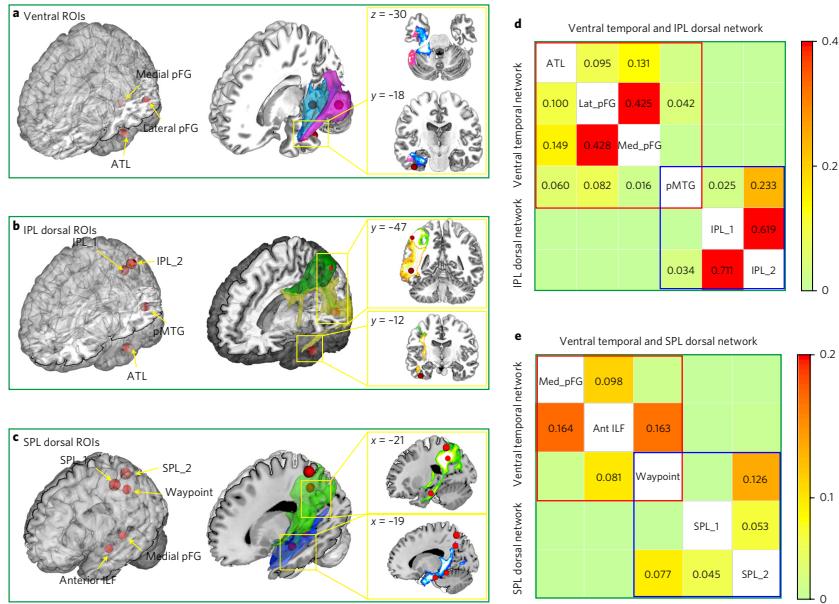


Figure 2 | Tractography results. Red spheres indicate seed points from ALE analysis and literature review. **a–c**, White-matter connectivity of cortical semantic network revealed by probabilistic tractography. Streams from medial (blue) and lateral (pink) pFG project to ATL (a). Streams from pMTG (yellow) project to ATL and IPL, while IPL streams (green) project to pMTG but not ATL (b). Streams from inferior ATL white matter (blue) pass by medial pFG and branch superiorly, where they intersect SPL streamlines (green) (c). The waypoint seed was placed at this intersection. *x*, *y*, and *z* refer to coordinates in MNI (Montreal Neurological Institute) space. **d,e**, Matrices showing significant connectivity of temporal regions with IPL regions via the pMTG and with SPL regions via the tract identified by the waypoint seed. Numbers indicate group-averaged probability estimates (0–1) from seed (column) to target (row) regions.

図 46 Chen et al. (2017)

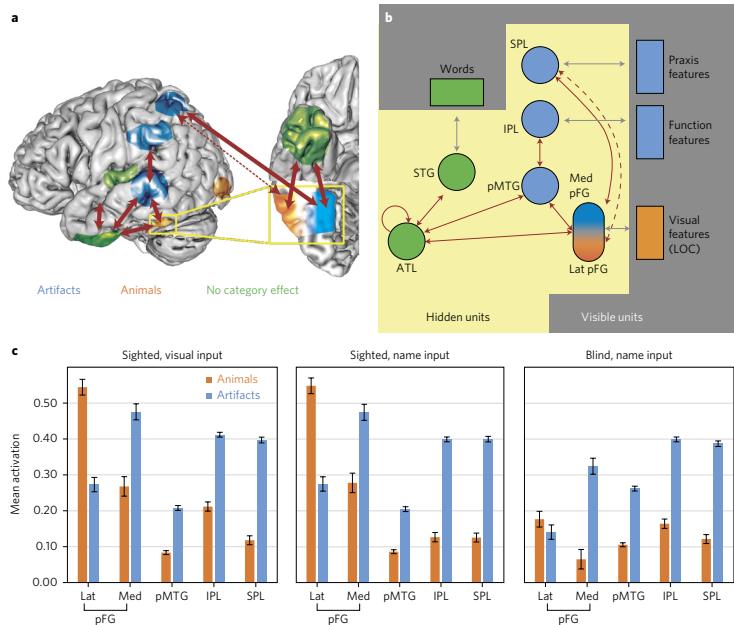


Figure 3 | Model architecture and functional magnetic resonance imaging (fMRI) data simulations. **a**, Schematic showing ALE and connectivity results. Red arrows indicate significant connectivity in tractography while colored regions indicate semantic category effects in the ALE analysis. The dotted arrow indicates that connectivity diminishes from medial to lateral pFG. **b**, Architecture of the corresponding neural network model. Boxes indicate layers that directly encode features of objects (visible units) and circles indicate model analogues of cortical ROIs where representations are learned (hidden units). For visible units, blue indicates more active features for animals than artifacts while orange indicates the reverse. For hidden units, circle colour indicates expected category effects using the same scheme as panel a. Red arrows indicate model connections that correspond to tractography results; grey arrows indicate connections that mediate activation between visible and hidden units. **c**, Mean unit activation for animals or artifacts in each model ROI, for visual and word inputs of the 'sighted' model (left and middle) and for word inputs in the 'blind' model (right). Error bars represent standard errors of means across individual simulation runs.

図 47 Chen et al. (2017)

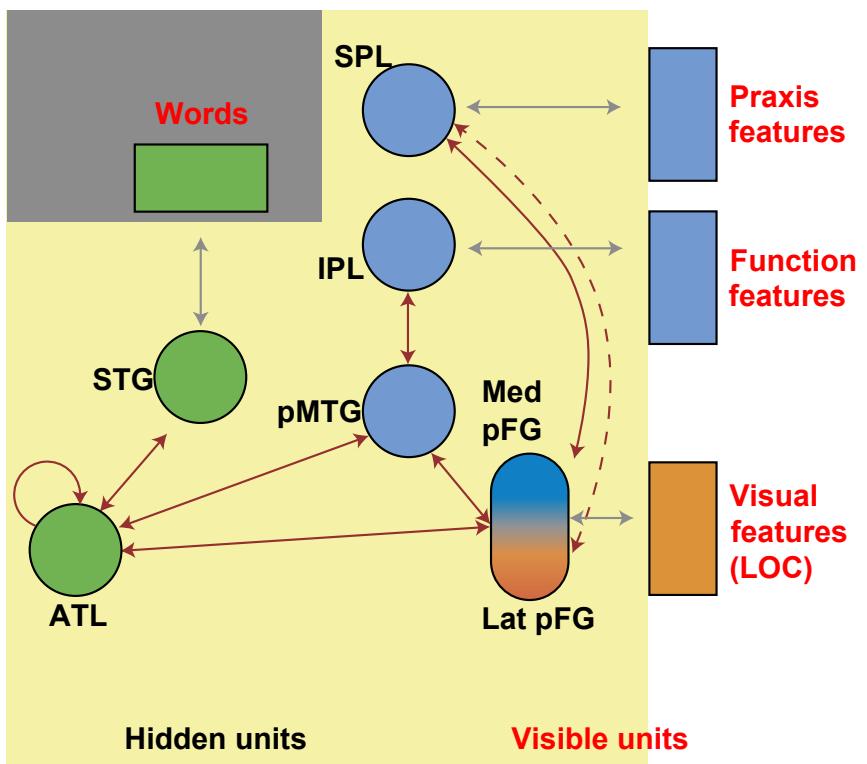


図 48 Chen et al. (2017)

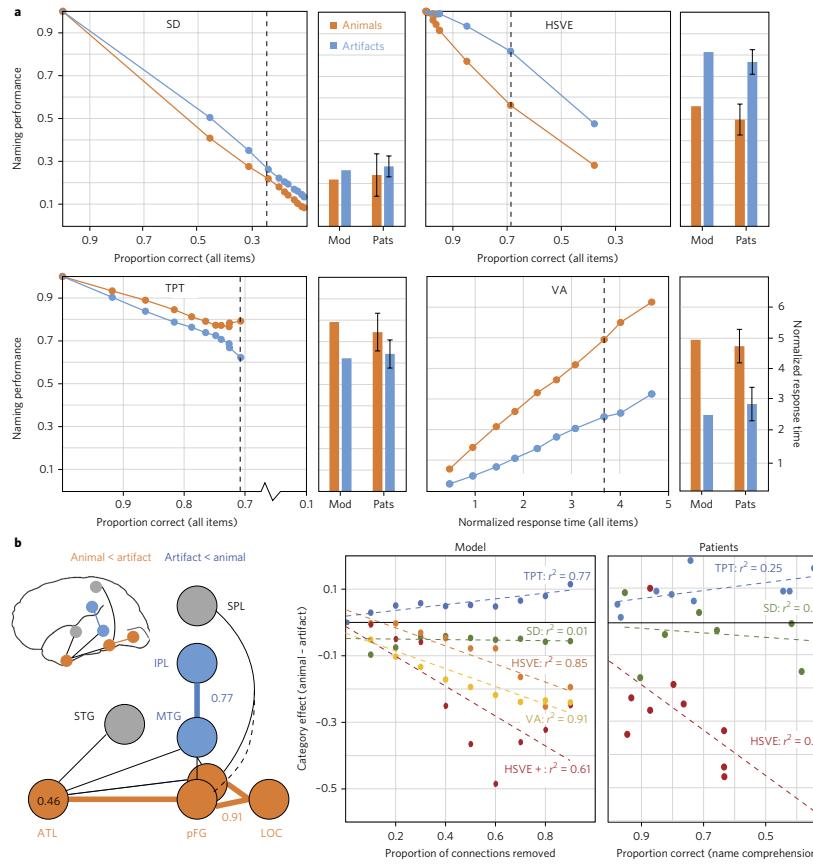


Figure 4 | Results of patient simulations. **a**, Line plots show model naming accuracy for animals and artifacts at 10 increasing levels of damage for each disorder plotted against overall accuracy (all items). Dashed vertical lines indicate the damage level that most closely matches mean overall accuracy in the corresponding patient group. HSVE data are for the homogeneous damage model (HSVE); data for the asymmetric damage model (HSVE+) appear in Supplementary Fig. 5. Bar plots show accuracy by category for the model (Mod) at this level compared with patient (Pats) means/standard errors reported elsewhere^{78,93,94}. **b**, Lesion-symptom mapping results. Left, layers/connections in which lesion size predicts increasing artifact (blue) or animal (orange) disadvantage. The dashed line represents weaker connectivity from lateral pFG to SPL. Middle, correlation between lesion size and category effect in each simulated patient group. Right, category effect size in naming plotted against overall impairment as measured by word comprehension (SD and HSVE) or overall naming (TPT) in case-series studies of real patients.

図 49 Chen et al. (2017)

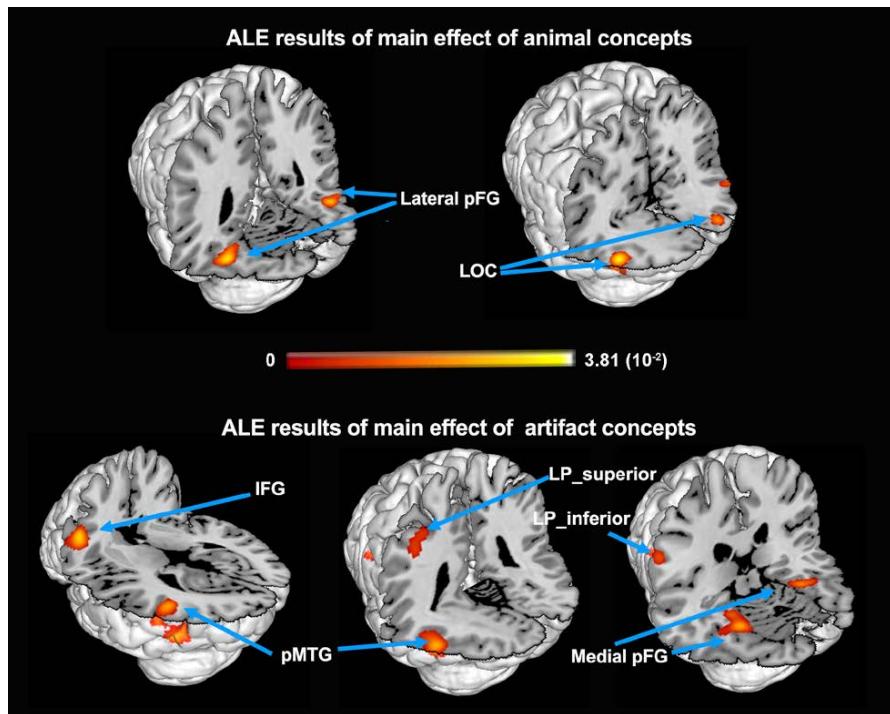


図 50 Chen et al. (2017)

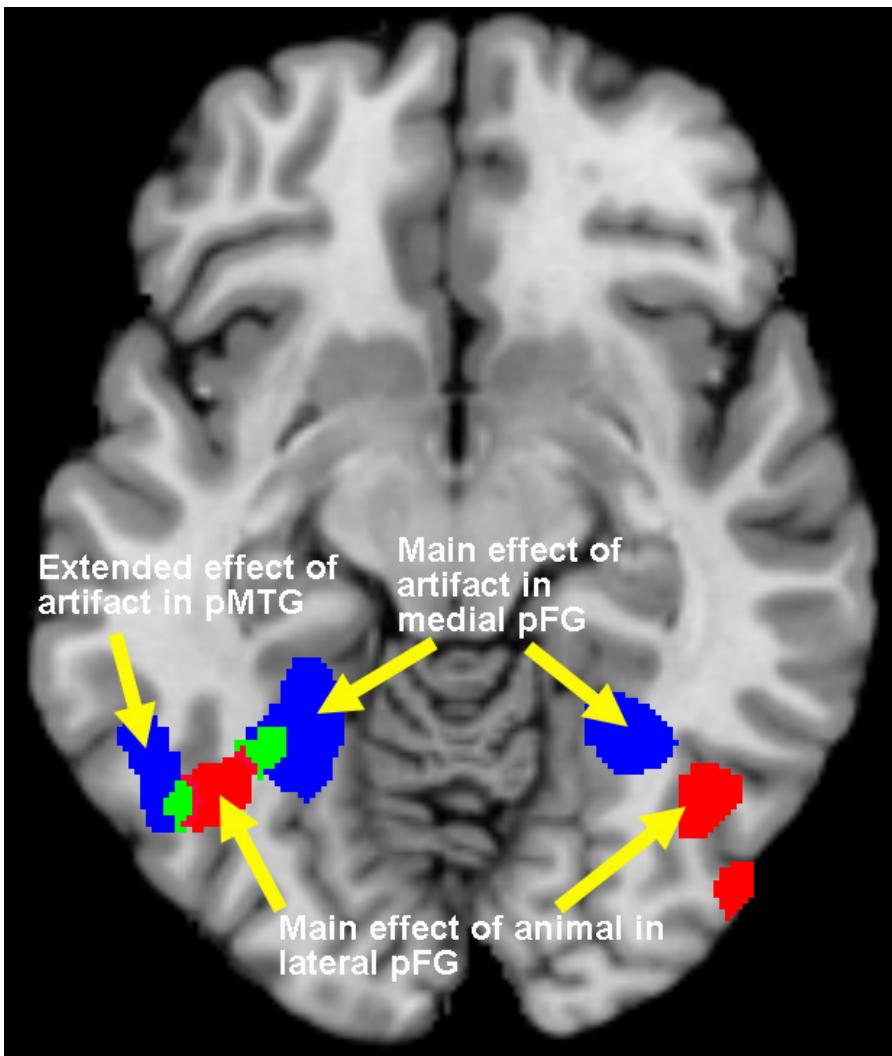


図 51 Chen et al. (2017)

5 まとめ

昨今の深層学習、機械学習のモデルは人間に比肩する性能を示すようになってきた。本稿では、このような情勢に鑑み、神経心理学モデルを機械学習モデルを用いて構築する試みを考えた。

本稿の試みのように、神経心理学モデルに対して機械学習モデルを適用することにより、診断補助、治療計画立案、自立支援、評価手法の確立と提案、などこの分野に対する貢献が可能だらうと考えている。これにより、患者とその家族、脳神経外科医師、言語聴覚治療士、作業療法士、理学療法士、神経心理学者、高次脳機能障害に関心を持つ機械学習関係者との相互交流が促進され、これらの領域が活性化することが期待できる。本来、同じ目的を持つ領域を相互に結びつけることで、あらたな発展が関係するすべての領域にとって刺激的で良好な関係を構築できるのではないかと期待できる。進化上、他の種には存在しないという意味で人間にしか持ち得なかった言語機能に光を当てることにより全脳アーキテクチャの解明と完成に向けた一里塚となると考える。

References

- 浅川伸一. (2016). 深層学習をめぐる最近の熱狂. 『基礎心理学研究』, 35, 149–162.
 Brodmann, K. (1909). *Vergleichende Lokalisationslehre der Großhirnrinde*. Leipzig, Germany: Verlag von Johann Ambrosius Barth.
 Catani, M., Jones, D. K., & ffytche, D. H. (2005). Perisylvian language networks of the human brain. *57*, 8–16.

- Chen, L., Lambon-Ralph, M. A., & Rogers, T. T. (2017). A unified model of human semantic knowledge and its disorders. *Nature Human Behaviour*, 1, 1–10.
- Collins, A. M., & Quillian, M. R. (1969). Retrieval time from semantic memory. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 8, 240–247.
- Coltheart, M., Curtis, B., Atkins, P., & Haller, M. (1993). Models of reading aloud: Dual-route and parallel-distributed-processing approaches. *Psychological Review*, 100, 589–608.
- Coltheart, M., Patterson, K., & Marshall, J. C. (Eds.). (1987). *Deep dyslexia since 1980*. New York, NY: International library of psychology.
- Coltheart, M., & Rastle, K. (1994). Serial processing in reading aloud: Evidence for dual-route models of reading. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 20, 1197–1211.
- Coltheart, M., Rastle, K., Perry, C., Langdon, R., & Ziegler, J. (2001). DRC: A dual route cascaded model of visual word recognition and reading aloud. *Psychological Review*, 108, 204–256.
- Coslett, H. B. (2000). Acquired dyslexia. *Seminar in Neurology*, 20, 419–426.
- Dronkers, N. F., Plaisant, O., Iba-Zizen, M. T., & Cabanis, E. A. (2007). Paul Broca's historic cases: high resolution MR imaging of the brains of leborgne and lelong. *Brain*, 130, 1432–1441.
- Farah, M. J., & McClelland, J. L. (1991a). A computational model of semantic memory impairment: Modality specificity and emergent category specificity. *Journal of Experimental Psychology: General*, 120, 339–357.
- Farah, M. J., & McClelland, J. L. (1991b). A computational model of semantic memory impairment: Modality specificity and emergent category specificity. *Journal of Experimental Psychology: General*, 120, 339–357.
- Geschwind, N. (1974). Specializations of the human brain. *Scientific American*, 241, 180–199.
- Glushko, R. J. (1979). The organization and activation of orthographic knowledge in reading aloud. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 5, 674–691.
- He, K., Zhang, X., Ren, S., & Sun, J. (2015). Deep residual learning for image recognition. *arXiv:1512.03383*.
- Hickok, G., & Poeppel, D. (2007). The cortical organization of speech processing. *Nature Reviews Neuroscience*, 8, 393–402.
- Hinton, G. E., Plaut, D. C., & Shallice, T. (1993). Simulating brain damage. *Scientific American*, 76–82.
- Hinton, G. E., & Shallice, T. (1991). Lesioning an attractor network: Investigations of acquired dyslexia. *Psychological Review*, 98, 74–95.
- Hoffman, P., Ralha, M. A. L., & Woollamsa, A. M. (2011). Triangulation of the neurocomputational architecture underpinning reading aloud. *PNAS*.
- 岩田 誠. (1996). 『脳とことば—言語の神経機構』. 東京: 共立出版.
- Joulin, A., Grave, E., Bojanowski, P., Douze, M., Jégou, H., & Mikolov, T. (2017). FASTTEXT.ZIP: Compressing text classification models. In Y. Bengio & Y. LeCun (Eds.), *The proceedings of International Conference on Learning Representations (ICLR)*. Toulon, France.
- Kelly, C., Uddin, L. Q., Shehzad, Z., Margulies, D. S., Castellanos, F. X., Milham, M. P., & Petrides, M. (2010). Broca's region: linking human brain functional connectivity data and non-human primate tracing anatomy studies. *European Journal of Neuroscience*, 32, 383–398.
- Lichtheim, L. (1885). On aphasia. *Brain*, 433–484.
- McClelland, J. L. (1993). Toward a theory of information processing in graded, random, interactive network. In D. E. Meyer & S. Kornblum (Eds.), *Attention and performance XIV: Synergies in experimental psychology, artificial intelligence and cognitive neuroscience* (p. 655–688). MIT Press, MA, USA.
- McClelland, J. L., & Rumelhart, D. E. (1986). Amnesia and distributed memory. In J. L. McClelland & D. E. Rumelhart (Eds.), *Parallel distributed processing: Explorations in the microstructure of cognition* (Vol. 2, pp. 503–527). Cambridge, MA, USA: MIT Press.
- Mikolov, T., Chen, K., Corrado, G., & Dean, J. (2013). Efficient estimation of word representations in vector space. In Y. Bengio & Y. Lecun (Eds.), *Proceedings in the International Conference on Learning Representations (ICLR) Workshop*. Scottsdale, Arizona, USA.
- Mikolov, T., Sutskever, I., Chen, K., Corrado, G. S., & Dean, J. (2013). Distributed representations of words and phrases and their compositionality. In C. J. C. Burges, L. Bottou, M. Welling, Z. Ghahramani, & K. Weinberger (Eds.), *Advances in neural information processing systems 26* (pp. 3111–3119). Curran Associates, Inc.
- Mikolov, T., Yih, W. tau, & Zweig, G. (2013). Linguistic regularities in continuous space word representations. In *Proceedings of the 2013 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies*

NAACL. Atlanta, WA, USA.

- Mnih, V., Kavukchuoglu, K., Silver, D., Rusu, A. A., Veness, J., Bellemare, M. G., Graves, A., Riedmiller, M., Fidjeland, A. K., Ostrovski, G., Petersen, S., Beattie, C., Sadik, A., Antonoglou, I., King, H., Kumaran, D., Wierstr, D., Legg, S., & Hassabis, D. (2015). Human-level control through deep reinforcement learning. *Nature*, 518, 529–533.
- Patterson, K., Nestor, P. J., & Rogers, T. T. (2007). Where do you know what you know? the representation of semantic knowledge in the human brain. *Nature Reviews Neuroscience*, 8, 976–987.
- Patterson, K., Seidenberg, M. S., & McClelland, J. L. (1989). Connections and disconnections: acquired dyslexia in a computational model of reading processes. In R. G. M. Morris (Ed.), *Parallel distributed processing: Implications for psychology and neurobiology* (pp. 131–181). Oxford University Press.
- Patterson, K., Suzuki, T., Wydell, T., & Sasanuma, S. (1995). Progressive aphasia and surface alexia in Japanese. *Neurocase*, 1, 155–165.
- Plaut, D., McClelland, J. L., Seidenberg, M. S., & Patterson, K. (1996). Understanding normal and impaired word reading: Computational principles in quasi-regular domains. *Psychological Review*, 103, 56–115.
- Plaut, D., & Shallice, T. (1993). Deep dyslexia: A case study of connectionist neuropsychology. *Cognitive Neuropsychology*, 10, 377–500.
- Ralph, M. A. L., Jefferies, E., Patterson, K., & Rogers, T. T. (2016). The neural and computational bases of semantic cognition. *Nature reviews Neuroscience*.
- Rosch, E., Mervis, C. B., Gray, W. D., Johnson, D. M., & Boyes-Braem, P. (1976). Basic objects in natural categories. *Cognitive Psychology*, 8, 382–439.
- Rumelhart, D. E., & McClelland, J. L. (1985). On learning the past tenses of English verbs. In *Parallel distributed processing: Explorations in the microstructure of cognition*: (Vol. 2: Psychological and Biological Models). Cambridge, MA: Bradford Books/MIT Press.
- Rumelhart, D. E., & McClelland, J. L. (1986). On learning the past tenses of English verbs. In D. E. Rumelhart & J. L. McClelland (Eds.), *Parallel distributed processing: Explorations in the microstructures of cognition* (Vol. 2, pp. 216–271). Cambridge, MA, USA: MIT Press.
- Sato, H., Patterson, K., Fushimi, T., Maxim, J., & Bryan, K. (2008). Deep dyslexia for kanji and phonological dyslexia for kana: Different manifestations from a common source. *Neurocase*, 14, 508–524.
- Schwartz, M. F., Marin, O. S., & M. Saffran, E. (1997). Dissociations of language function in dementia: A case study. *Brain and Language*, 7, 277–306.
- Seidenberg, M. S., & McClelland, J. L. (1989a). A distributed, developmental model of word recognition and naming. *Psychological Review*, 96, 523–568.
- Seidenberg, M. S., & McClelland, J. L. (1989b). A distributed, developmental model of word recognition and naming. *Psychological Review*, 96, 523–568.
- Sejnowski, T. J., & Rosenberg, C. R. (1987). Parallel networks that learn to pronounce English text. *Complex Systems*, 1, 145–168.
- Shallice, T. (1988). *From neuropsychology to mental structure*. New York, NY: Cambridge University Press.
- Shaywitz, S. E. (1996). Dyslexia. *Scientific American*, 275, 98–104.
- Taraban, R., & McClelland, J. L. (1987). Conspiracy effects in word pronunciation. *Journal of Memory and Language*, 26, 608–631.
- Tremblay, P., & Dick, A. S. (2016). Broca and Wernicke are dead, or moving past the classic model of language neurobiology. *Brain & Language*, 162, 60–71.
- Turing, A. M. (1950). Computing machinery and intelligence. *Mind A quarterly review of psychology and philosophy*, LIX 236, 433–460.
- Warrington, E. K. (1975). The selective impairment of semantic memory. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 27, 635–657.
- Warrington, E. K., & Shallice, T. (1979). Semantic access dyslexia. *Brain*, 102, 43–63.
- Warrington, E. K., & Shallice, T. (1984). Category specific semantic impairment. *Brain*, 107, 829–854.
- Wickelgren, W. A. (1969). Context-sensitive coding, associative memory, and serial order in (speech) behavior. *Psychological Review*, 76, 1–15.
- ルートビッヒ ウィトゲンシュタイン. (2003). 『論理哲学論考』 (野矢 茂樹, Trans.). 岩波書店. (Original work published 1921)

付録 A ブロードマンの地図

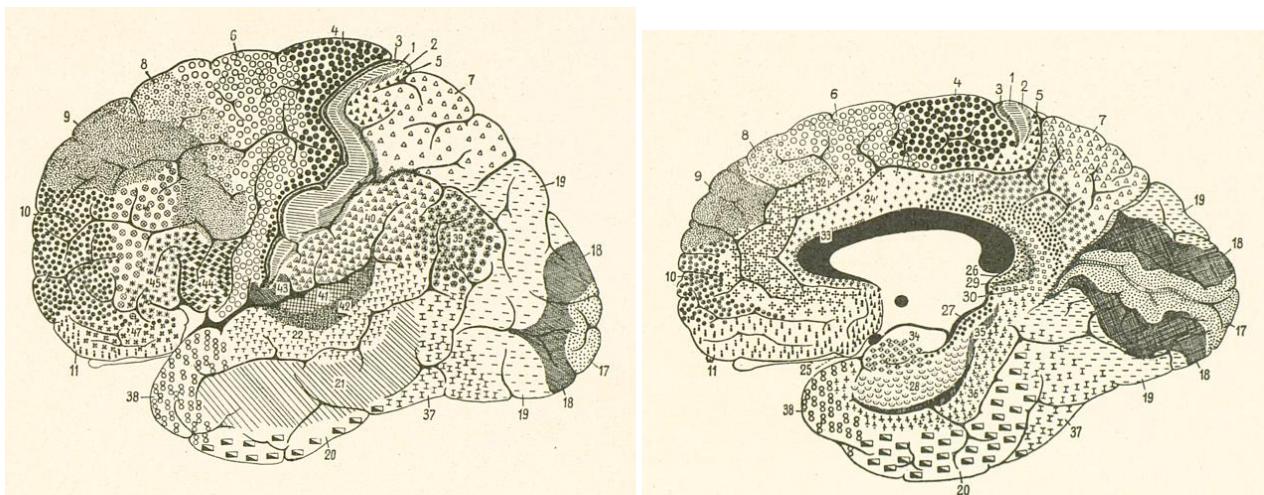


図 52 From (Brodmann, 1909, Page 131)

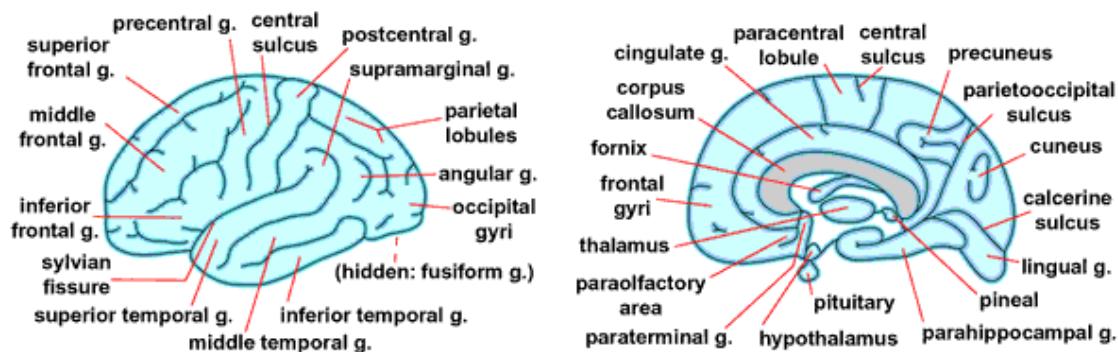


図 53 <https://spot.colorado.edu/~dubin/talks/brodmann/gyri.html>

A.1 ブロードマン地図の各領野の説明

Edited from NeuroNames

- 1. **intermediate postcentral** (area postcentralis intermedia). Located in the postcentral gyrus. Bounded cytoarchitecturally by the rostral postcentral area 3 and the caudal postcentral area 2 and, at its ventral tip, by the subcentral area 43.
- 2. **caudal postcentral** (area postcentralis caudalis). Located primarily in the caudal portion of the postcentral gyrus and the rostral lip of the postcentral sulcus with a caudal extension along the intraparietal sulcus. Cytoarchitecturally bounded rostrally by the intermediate postcentral area 1 and caudally by the prefrontal area 5, the superior parietal area 7 and the supramarginal area 40.
- 3. **rostral postcentral** (area postcentralis oralis). Located primarily in the rostral portion of the postcentral gyrus including the caudal bank of the central sulcus. At either end of the sulcus it can extend beyond the depth of the sulcus into the precentral gyrus. Cytoarchitecturally bounded rostrally by the gigantopyramidal area 4 and caudally by the intermediate postcentral area 1.
- 4. **gigantopyramidal** (area gigantopyramidalis). Located in the precentral gyrus. Cytoarchitecturally the caudal boundary with the rostral postcentral area 3 does not coincide precisely with the floor of the central sulcus but lies

variably in the banks of the postcentral gyrus and the precentral gyrus. The area also does not extend in all cases to the cingulate sulcus medially or to the end of the central sulcus ventro-laterally. Bounded rostrally by the frontal agranular area 6.

- **5. prepirital** (area praeparietalis). Occupies the superior parietal lobule and a portion of the postcentral gyrus, particularly on the medial aspect of the hemisphere. Bounded approximately by the cingulate sulcus on the medial aspect of the hemisphere and by the superior postcentral sulcus on the lateral aspect. Cytoarchitecturally bounded by the caudal postcentral area 2, the superior parietal area 7 and on the medial bank of the hemisphere by the gigantopyramidal area 4 and the dorsal posterior cingulate area 31.
- **6. agranular frontal** (area frontalis agranularis). Located primarily in the caudal portions of the superior frontal gyrus and the middle frontal gyrus and the rostral portions of the precentral gyrus not occupied by the gigantopyramidal area 4. It extends from the cingulate sulcus on the medial aspect of the hemisphere to the lateral sulcus on the lateral aspect. Cytoarchitecturally bounded rostrally by the frontal region and caudally by the gigantopyramidal area 4.
- **7. superior parietal** (area parietalis superior). Occupies much of the superior parietal lobule and some of the precuneus. Bounded approximately by the superior postcentral sulcus rostrally, the intraparietal sulcus laterally, the parieto-occipital sulcus caudally and, on the medial bank of the hemisphere, the subparietal sulcus. Cytoarchitecturally bounded rostrally by the prepirital area 5 and the caudal postcentral area 2; caudally by the peristriate area 19; and medially by the dorsal posterior cingulate area 31.
- **8. intermediate frontal** (area frontalis intermedia). Located primarily in the superior frontal gyrus extending from the cingulate sulcus on the medial surface over the margin of the hemisphere to the middle frontal gyrus. Cytoarchitecturally bounded caudally by the agranular frontal area 6 and ventrally by the granular frontal area 9.
- **9. granular frontal** (area frontalis granularis). Occupies portions of the superior frontal gyrus and the middle frontal gyrus. Its approximate boundary on the medial aspect of the hemisphere is the cingulate sulcus and, on the lateral aspect, the inferior frontal sulcus. Cytoarchitecturally bounded dorsocaudally by the intermediate frontal area 8, caudally by the agranular frontal area 6, and ventrally by the frontopolar area 10, the middle frontal area 46 and the opercular area 44.
- **10. frontopolar** (area frontopolaris). Occupies the most rostral portions of the superior frontal gyrus and the middle frontal gyrus. On the medial aspect of the hemisphere it is bounded ventrally by the superior rostral sulcus. It does not extend as far as the cingulate sulcus. Cytoarchitecturally bounded dorsally by the granular frontal area 9, caudally by the middle frontal area 46, and ventrally by the orbital area 47 and by the frontopolar area 12.
- **11. prefrontal** (area praefrontalis). Constitutes most of the orbital gyri, gyrus rectus and the most rostral portion of the superior frontal gyrus. Bounded medially by the inferior rostral sulcus and laterally approximately by the frontomarginal sulcus. Cytoarchitecturally bounded on the rostral and lateral aspects of the hemisphere by the frontopolar area 10, the orbital area 47, and the triangular area 45; on the medial surface it is bounded dorsally by the area 12 and caudally by the subgenual area 25.
- **12. prefrontal** (area praefrontalis). Occupies the area between the superior rostral sulcus and the inferior rostral sulcus. Cytoarchitecturally bounded dorsally by the frontopolar area 10 and the dorsal anterior cingulate area 32; caudally, ventrally and rostrally it is bounded by the prefrontal area 11. (Originally described as part of prefrontal area 11 but not shown in the map, subsequently it was labeled as an independent area 12.)
- **17. striate** (area striata). Part of the occipital lobe of the cerebral cortex that is defined on the basis of cyto- and myeloarchitecture, primarily by the band/stripe of Gennari.
- **18. parastriate** (area parastriata). Located in parts of the cuneus, the lingual gyrus and the lateral occipital gyrus of the occipital lobe. Cytoarchitecturally bounded on one side by the striate area 17, from which it is distinguished by absence of a band/stripe of Gennari, and on the other by the peristriate area 19.

- **19. peristriate** (area perstriata). Located in parts of the lingual gyrus, the cuneus, the lateral occipital gyrus and the superior occipital gyrus of the occipital lobe where it is bounded approximately by the parieto-occipital sulcus. Cytoarchitecturally bounded on one side by the parastriate area 18 which it surrounds. Rostrally it is bounded by the angular area 39 and the occipitotemporal area 37.
- **20. inferior temporal** (area temporalis inferior). Corresponds approximately to the inferior temporal gyrus. Cytoarchitecturally bounded medially by the entorhinal area 36, laterally by the middle temporal area 21, rostrally by the temporopolar area 38 and caudally by the occipitotemporal area 37.
- **21. middle temporal** (area temporalis media). Corresponds approximately to the middle temporal gyrus. Bounded rostrally by the temporopolar area 38, ventrally by the inferior temporal area 20, caudally by the occipitotemporal area 37, and dorsally by the superior temporal area 22.
- **22. superior temporal** (area temporalis superior). Corresponds approximately to the lateral and caudal two thirds of the superior temporal gyrus. Bounded rostrally by the temporopolar area 38, medially by the posterior transverse temporal area 42, ventrocaudally by the middle temporal area 21 and dorsocaudally by the supramarginal area 39.
- **23. ventral posterior cingulate** (area cingularis posterior ventralis). Occupies most of the posterior cingulate gyrus adjacent to the corpus callosum. At the caudal extreme it is bounded approximately by the parieto-occipital sulcus. Cytoarchitecturally bounded dorsally by the dorsal posterior cingulate area 31, rostrally by the ventral anterior cingulate area 24, and ventrostrally in its caudal half by the retrosplenial region.
- **24. ventral anterior cingulate** (area cingularis anterior ventralis). Occupies most of the anterior cingulate gyrus in an arc around the genu of corpus callosum. Its outer border corresponds approximately to the cingulate sulcus. Cytoarchitecturally bounded internally by the pregenual area 33, externally by the dorsal anterior cingulate area 32, and caudally by the ventral posterior cingulate area 23 and the dorsal posterior cingulate area 31.
- **25. subgenual** (area subgenualis). A narrow band located in the caudal portion of the subcallosal area adjacent to the paraterminal gyrus from which it is separated by the posterior parolfactory sulcus. It is bounded by the prefrontal area 11 rostrally and by the paraterminal gyrus caudally.
- **26. ectosplenial** (area ectosplenialis). A narrow band located in the isthmus of cingulate gyrus adjacent to the fasciolar gyrus internally. It is bounded externally by the granular retrolimbic area 29.
- **28. entorhinal** (area entorhinalis). Located in the entorhinal area on the medial aspect of the temporal lobe. It and the dorsal entorhinal area 34 together constitute approximately the entorhinal area.
- **29. granular retrolimbic** (area retrolimbica granularis). A narrow band located in the isthmus of cingulate gyrus. Cytoarchitecturally bounded internally by the ectosplenial area 26 and externally by the agranular retrolimbic area 30.
- **30. agranular retrolimbic** (area retrolimbica agranularis). Located in the isthmus of cingulate gyrus. Cytoarchitecturally bounded internally by the granular retrolimbic area 29, dorsally by the ventral posterior cingulate area 23 and ventrolaterally by the entorhinal area 36.
- **31. dorsal posterior cingulate** (area cingularis posterior dorsalis). Occupies portions of the posterior cingulate gyrus and medial aspect of the parietal lobe. Approximate boundaries are the cingulate sulcus dorsally and the parieto-occipital sulcus caudally. It partially surrounds the subparietal sulcus. Cytoarchitecturally bounded rostrally by the ventral anterior cingulate area 24, ventrally by the ventral posterior cingulate area 23, dorsally by the gigantopyramidal area 4 and prefrontal area 5 and caudally by the superior parietal area 7.
- **32. dorsal anterior cingulate** (area cingularis anterior dorsalis). Forms an outer arc around the anterior cingulate gyrus. The cingulate sulcus defines approximately its inner boundary and the superior rostral sulcus its ventral boundary; rostrally it extends almost to the margin of the frontal lobe. Cytoarchitecturally bounded internally by the ventral anterior cingulate area 24, externally by medial margins of the agranular frontal area 6, intermediate frontal area 8, granular frontal area 9, frontopolar area 10, and prefrontal area 11.

- **33. pregenual** (area praegenualis). A narrow band located in the anterior cingulate gyrus adjacent to the supracallosal gyrus in the depth of the callosal sulcus. Cytoarchitecturally bounded by the ventral anterior cingulate area 24 and the supracallosal gyrus.
- **34. dorsal entorhinal** (area entorhinalis dorsalis). Located in the entorhinal area on the medial aspect of the temporal lobe. It and the entorhinal area 28 together constitute approximately the entorhinal area.
- **35. perirhinal** (area perirhinalis). Located along the rhinal sulcus. Cytoarchitecturally bounded medially by the entorhinal area 28 and laterally by the ectorhinal area 36.
- **36. ectorhinal** (area ectorhinalis). Located primarily in the fusiform gyrus, with its medial boundary corresponding approximately to the rhinal sulcus. Cytoarchitecturally bounded laterally and caudally by the inferior temporal area 20, medially by the perirhinal area 35 and rostrally by the temporopolar area 38.
- **37. occipitotemporal** (area occipitotemporalis). Located primarily in the caudal portions of the fusiform gyrus and inferior temporal gyrus on the mediobasal and lateral surfaces at the caudal extreme of the temporal lobe. Cytoarchitecturally bounded caudally by the peristriate area 19, rostrally by the inferior temporal area 20 and middle temporal area 21 and dorsally on the lateral aspect of the hemisphere by the angular area 39.
- **38. temporopolar** (area temporopolaris). Located primarily in the most rostral portions of the superior temporal gyrus and the middle temporal gyrus. Cytoarchitecturally bounded caudally by the inferior temporal area 20, the middle temporal area 21, the superior temporal area 22 and the ectorhinal area 36.
- **39. angular** (area angularis). Corresponds to the angular gyrus surrounding the caudal tip of the superior temporal sulcus. Dorsally it is bounded approximately by the intraparietal sulcus. Cytoarchitecturally bounded rostrally by the supramarginal area 40, dorsally and caudally by the peristriate area 19, and ventrally by the occipitotemporal area 37.
- **40. supramarginal** (area supramarginalis). Located primarily in the supramarginal gyrus surrounding the posterior ascending limb of lateral sulcus. Bounded approximately by the intraparietal sulcus, the inferior postcentral sulcus the posterior subcentral sulcus and the lateral sulcus. Cytoarchitecturally bounded caudally by the angular area 39, rostrally and dorsally by the caudal postcentral area 2, and ventrally by the subcentral area 43 and the superior temporal area 22.
- **41. anterior transverse temporal** (area temporalis transversa anterior). Occupies the anterior transverse temporal gyrus in the bank of the lateral sulcus on the dorsal surface of the temporal lobe. Cytoarchitecturally bounded medially by the parainsular area 52 and laterally by the posterior transverse temporal area 42.
- **42. posterior transverse temporal** (area temporalis transversa posterior). Located in the bank of the lateral sulcus on the dorsal surface of the temporal lobe. Cytoarchitecturally bounded medially by the anterior transverse temporal area 41 and laterally by the superior temporal area 22.
- **43. subcentral** (area subcentralis). Occupies the postcentral gyrus and the precentral gyrus between the ventrolateral extreme of the central sulcus and the depth of the lateral sulcus at the insula. Its rostral and caudal borders are approximated by the anterior subcentral sulcus and the posterior subcentral sulcus respectively. Cytoarchitecturally bounded rostrally by the agranular frontal area 6 and caudally, for the most part, by the caudal postcentral area 2 and the supramarginal area 40.
- **44. opercular** (area opercularis). Corresponds approximately to the opercular part of the inferior frontal gyrus. Bounded caudally by the inferior precentral sulcus and rostrally by the anterior ascending limb of lateral sulcus. It surrounds the diagonal sulcus. In the depth of the lateral sulcus it borders on the insula. Cytoarchitectonically bounded caudally and dorsally by the agranular frontal area 6, dorsally by the granular frontal area 9 and rostrally by the triangular area 45.
- **45. triangular** (area triangularis). Occupies the triangular part of the inferior frontal gyrus and, surrounding the anterior horizontal limb of lateral sulcus, a portion of the orbital part of inferior frontal gyrus. Bounded caudally by the anterior ascending limb of lateral sulcus, it borders on the insula in the depth of the lateral sulcus .

Cytoarchitectonically bounded caudally by the opercular area 44, rostrodorsally by the middle frontal area 46 and ventrally by the orbital area 47.

- **46. middle frontal** (area frontalis media). Occupies approximately the middle third of the middle frontal gyrus and the most rostral portion of the inferior frontal gyrus. Cytoarchitecturally bounded dorsally by the granular frontal area 9, rostroventrally by the frontopolar area 10 and caudally by the triangular area 45.
- **47. orbital** (area orbitalis). Surrounds the caudal portion of the orbital sulcus from which it extends laterally into the orbital part of inferior frontal gyrus. Cytoarchitectonically bounded caudally by the triangular area 45, medially by the prefrontal area 11, and rostrally by the area frontopolaris 10.
- **48. retrosubicular** (area retrosubicularis). Located on the medial surface of the temporal lobe. Cytoarchitectually bounded rostrally by the perirhinal area 35 and medially by the presubiculum. (While described by Brodmann, it was not included in his areal maps of human cortex.)
- **52. parainsular** (area parainsularis) Located in the bank of the lateral sulcus on the dorsal surface of the temporal lobe. Its medial boundary corresponds approximately to the junction between the temporal lobe and the insula. Cytoarchitecturally bounded laterally by the anterior transverse temporal area 41.
- **13, 14, 15, 16, 27, 49, 50, 51** monkey only

付録 B ARPABET

表2 ARPABET vowels

1-letter	2-letter	IPA	Example(s)
a	AA	ɑ	balm, bot
@	AE	æ	bat
A	AH	ʌ	butt
c	AO	ɔ	bought
W	AW	aʊ	bout
x	AX	ə	about
N/A	AXR	ə̯	letter
Y	AY	aɪ	bite
E	EH	ɛ	bet
R	ER	ɛ̯	bird
e	EY	eɪ	bait
I	IH	i	bit
X	IX	ɪ	roses, rabbit
i	IY	i	beat
o	OW	oʊ	boat
O	OY	ɔɪ	boy
U	UH	ʊ	book
u	UW	u	boot
N/A	UX	ʊ̯	dude

IPA	ARPAbet	IPA	ARPAbet	
Symbol	Symbol	Word	Transcription	Transcription
[p]	[p]	parsley	['parsli]	[p a r s l i y]
[t]	[t]	tarragon	['tarəgən]	[t ae r a x g aa n]
[k]	[k]	catnip	['katnip]	[k ae t n ix p]
[b]	[b]	bay	[beɪ]	[b ey]
[d]	[d]	dill	[dɪl]	[d ih l]
[g]	[g]	garlic	['garlik]	[g aa r l ix k]
[m]	[m]	mimic	[mɪmɪk]	[m ih n t]
[n]	[n]	nutmeg	['nʌtmɪg]	[n ah t m eh g]
[ŋ]	[ŋ]	ginseng	['dʒɪnsɪŋ]	[jh ih n s ix ng]
[f]	[f]	fennel	['fenl]	[f eh n el]
[v]	[v]	clove	['klov]	[k l ow v]
[θ]	[θ]	thistle	['θɪsl]	[th ih s el]
[ð]	[ð]	heather	['haðə]	[h eh dh axr]
[s]	[s]	sage	[seɪdʒ]	[s ey jh]
[z]	[z]	hazelnut	['herzl̩nʌt]	[h ey z el n ah t]
[ʃ]	[ʃ]	squash	['skwɔʃ]	[s k w a sh]
[ʒ]	[ʒ]	ambrosia	['æm'brouʒə]	[ae m b r o w zh ax]
[tʃ]	[tʃ]	chicory	['tʃɪk ɔɪ]	[ch ih k axr iy]
[dʒ]	[dʒ]	sage	[seɪdʒ]	[s ey jh]
[l]	[l]	licorice	['lɪkɔɪf]	[l ih k axr ix sh]
[w]	[w]	kiwi	['kiwi]	[k iy w iy]
[r]	[r]	parsley	['parsli]	[p aa r s l i y]
[j]	[y]	yew	[ju]	[y uw]
[h]	[h]	horseradish	['hɔrsrədɪʃ]	[h ao r s r ae d ih sh]
[ʔ]	[q]	uh-oh	[?ə?ou]	[q ah q ow]
[r]	[dx]	butter	['bʌtə]	[b ah dx axr]
[ɾ]	[nx]	wintergreen	['wɪntəgrɪn]	[w ih nx axr g r i n]
[l]	[el]	thistle	['θɪsl]	[th ih s el]

Figure 4.1 IPA and ARPAbet symbols for transcription of English consonants.

IPA	ARPAbet	IPA	ARPAbet	
Symbol	Symbol	Word	Transcription	Transcription
[i]	[i]	lily	['lɪlɪ]	[l ih l iy]
[ɪ]	[ih]	lily	['lɪlɪ]	[l ih l iy]
[eɪ]	[ey]	daisy	['deɪzɪ]	[d ey z i]
[ɛ]	[eh]	poinsettia	['poɪn'setiə]	[p oy n s eh dx iy ax]
[æ]	[ae]	aster	['æstə]	[a s t axr]
[ɑ]	[aa]	pappy	['papɪ]	[p aa p i]
[ɔ]	[ao]	orchid	['ɔrkɪd]	[ao r k ix d]
[ʊ]	[uh]	woodruff	['wudrəf]	[w uh d r ah f]
[oʊ]	[ow]	lotus	['lou̯s]	[l ow dx ax s]
[ʊ]	[uw]	tulip	['tulɪp]	[t uw l ix p]
[ʌ]	[uh]	buttercup	['bʌtər'kʌp]	[b uh dx axr k uh p]
[ɹ]	[er]	bird	['bɜ:d]	[b er d]
[aɪ]	[ay]	iris	['ɪris]	[ay r ix s]
[aʊ]	[aw]	sunflower	['sænfloʊər]	[s ah n f l aw axr]
[oɪ]	[oy]	poinsettia	['poɪn'setiə]	[p oy n s eh dx iy ax]
[ju]	[y uw]	feverfew	['fɪvəfju]	[f iy v axr f y u]
[ɔ]	[ax]	woodruff	['wudrəf]	[w uh d r ax f]
[ə]	[axr]	heather	['heðə]	[h eh dh axr]
[ɪ]	[ix]	tulip	['tulɪp]	[t uw l ix p]
[ʊ]	[ux]		[]	[]

Figure 4.2 IPA and ARPAbet symbols for transcription of English vowels

Word	jackal	raccoon	cougar	civet
IPA	['dʒækəl]	[rə.'kun]	['ku.ɡə]	['si.vit]
ARPAbet	[jæk ae k el]	[r ae e k uw n]	[ku uw g axr]	[s ih v ix t]

Figure 4.3 The mapping between IPA symbols and letters in English orthography is complicated; both IPA [k] and English orthographic [c] have many alternative realizations