

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

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。

目次

1	はじめに	2
2	失語症	3
2.1	失語の病巣	3
2.2	ウィルニッケ-リヒトハイム図式 Wernicke-Lichtheim schema	3
2.3	プローカ失語	5
2.4	ウィルニッケ失語	5
2.5	ゲシュヴィンド失語	6
2.6	神経学的証拠	8
3	失読症	9
3.1	用語解説	9
3.2	NETtalk	10
3.3	処理単位	10
3.4	文字の逐次読み Letter-by-Letter (LBL) reading	11
3.5	3つの失読症	11
3.6	日本語読字過程	12
3.7	発達性難読症	14
3.8	二重経路モデル	14
3.9	トライアングルモデル	15
3.10	入力表現	17
4	意味の障害	22
4.1	単一乖離と二重乖離	22
4.2	カテゴリー特異性障害	24
4.3	深層失読のシミュレーション	29
4.4	神経心理学的症状	30

4.5	モデル	30
4.6	破壊実験	32
4.7	認知心理学による基本カテゴリー仮説	32
4.8	側頭極=ハブ・スポーツ仮説	34
4.9	最近のモデル	36
5	まとめ	39
	References	39
付録 A	ブロードマンの地図	43
A.1	ブロードマン地図の各領野の説明	43
付録 B	ARPABET	47
付録 C	llichtheim2 Supplementary	49
付録 D	Rosch, Mervis, Gray, Johnson, & Boyes-Braem (1976) に用いられた刺激語リスト	52
付録 E	Hinton & Shallice (1991) に用いられた刺激	53

1 はじめに

脳の機能を調べる学問領域には**神経科学 neurology** が存在する。神経科学は**生理学 phisiology** や**生物学 biology** に説明の基礎を求める学問領域である。この意味で神経科学はボトムアップ的説明が求められる。一方、**神経心理学 neuropsychology** は、心的機能、認識能力、あるいは高次脳機能の説明を脳に求める。この意味で神経心理学がトップダウン的説明を求める。

ある機能や神経学的症状を説明するために、1. 動物実験に基づく、2. 脳画像に基づく、3. 神経心理学的所見を用いる研究手法が存在している。これら 3 つの研究手法に基礎的背景を提供するための方法論に**計算論的アプローチ computational approach** がある(たとえば Dayan & Abbott (2001); Sejnowski, Koch, & Churchland (1988))。本稿は、このような計算論的アプローチの中のニューラルネットワークによるシミュレーションについての基礎的資料を提示することを意図している。

認知神経心理学 cognitive neuropsychology とその関連諸分野である**機械学習 machine learning** や**人工知能 artificial intelligence** 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つ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とを直接比較する「ロボットは東大に入るか」^{*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

^{*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

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者が基本資料となる。

脳の傷害によって生じる、話す、書く、聽く、を含む言語機能の消失を失語症 **aphasia** と呼ぶ。一方、読むことについての障害を失読 **alexia** または難読 **dyslexia** と呼び、書くことの障害を失書 **agraphia** と呼ぶ。失書を伴う失読を失読失書 **alexia with agraphia** と呼ぶ(山鳥, 1985,などを参照)。神経心理学的症状は多岐に渡るので、「失」で始まる症状を列挙するだけでも、失音楽、失語、失行、失算、失書、失読、失認、失文法、失構音、などを挙げることができる。

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(ウィトゲンシュタイン, 1921/2003)。

2.1 失語の病巣

山鳥(1985)は、失語に関与する領域を中心言語領域と補足的領域に分けた。中心領域には、以下の6つを挙げている。

1. プローカ領域,
2. ウィルニッケ領域,
3. 角回 angular gyrus,
4. 弓状束 fasciculus arcuatus,
5. 島葉 insula,
6. 大脳基底核およびその周辺白質

一方の補足的領域には以下の3つを挙げている。

1. 視床
2. 補足運動野
3. 大脳辺縁系

2.2 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。

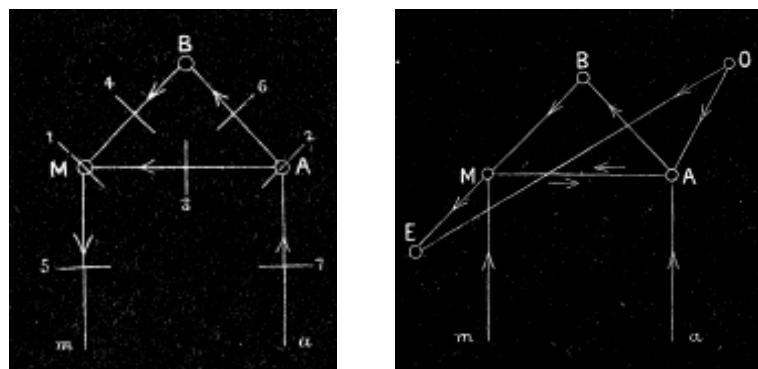


図 1 Lichtheim(Lichtheim, 1885) Fig.1, Fig.2, a:聴覚入力, m:運動出力, A:聴イメージ中枢, M:運動イメージ中枢, B:概念中枢, O:視覚表象, E:書字中枢

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
混合型超皮質性失語	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

2.2.1 リヒトハイム 2

Lichtheim2 は上野らによるシミュレーションモデルである (Ueno, Saito, Rogers, & Lambon Ralph, 2011)。

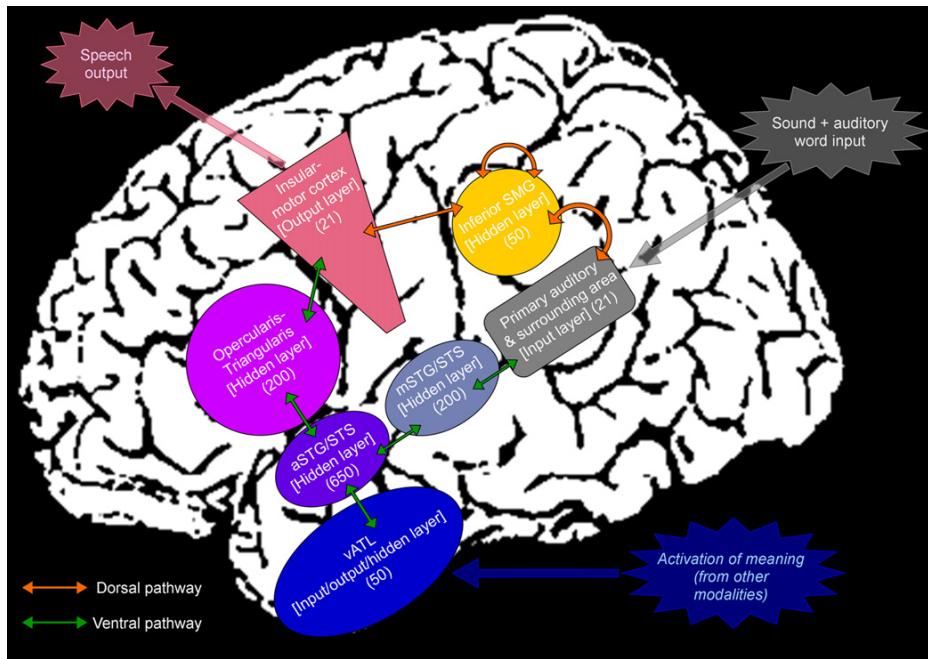


図2 From Ueno et al. (2011) Fig. 1

Lichtheim2 は日本語 3 モーラ単語で訓練された。高頻度語、低頻度語それぞれ 850 単語が用いられた。各単語は 21 次元のピッチとアクセントを表現した聴覚特徴ベクトルとみなされ、音韻運動出力は系列長 3 のモーラパターンとして表現された。抽象語の表現は 50 ビットのランダムパターン（當時 20 ビットがオンで残り 30 ビットはランダム）詳しくは??ページ付録 C 参照。

2.3 ブローカ失語

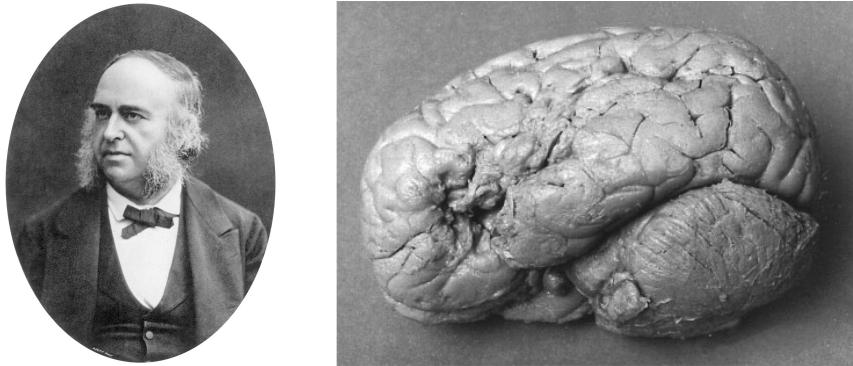


図3 左:ブローカ Wikipedia, 右:患者 Tan の死後剖検写真 (Dronkers et al., 2007)

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・タン）と呼ばれていたという。図3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。

2.4 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、その責任領域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4 ウィルニッケ Wikipedia

2.5 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}。

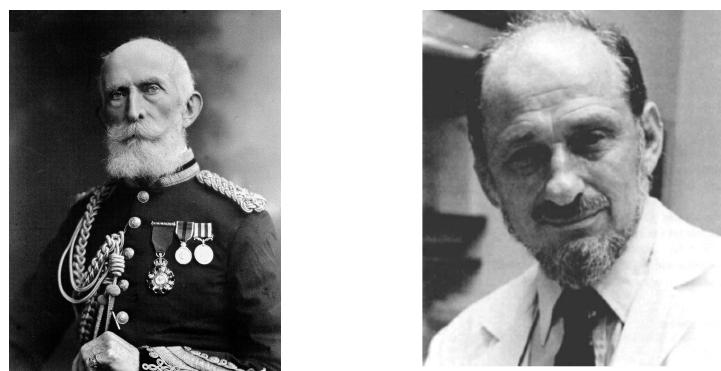


図5 左:デジャリン en.wikipedia.org/wiki/Joseph_Jules_Dejerine, 右:ゲシュヴィンド Gread Thoughts Treasury

^{*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

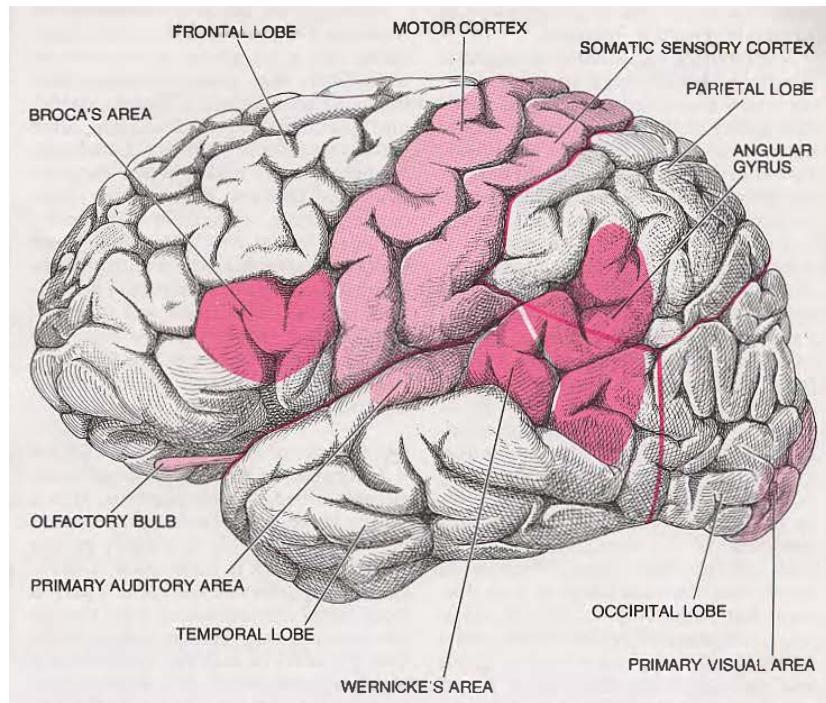


図6 From Geschwind (1974) page. 111

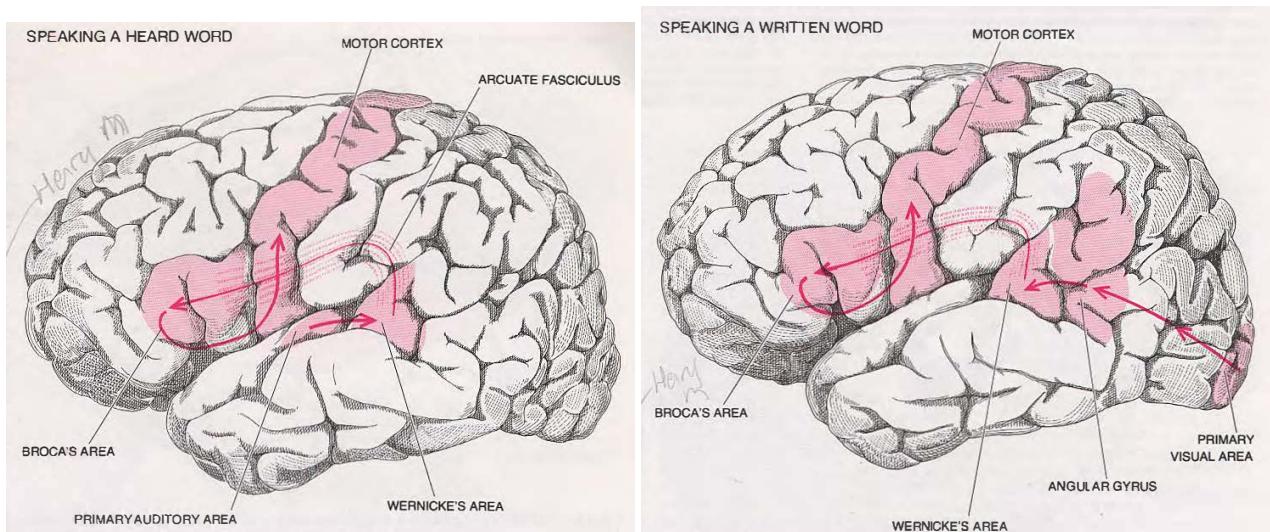


図7 From Geschwind (1974) page. 113

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)

2.6 神経学的証拠

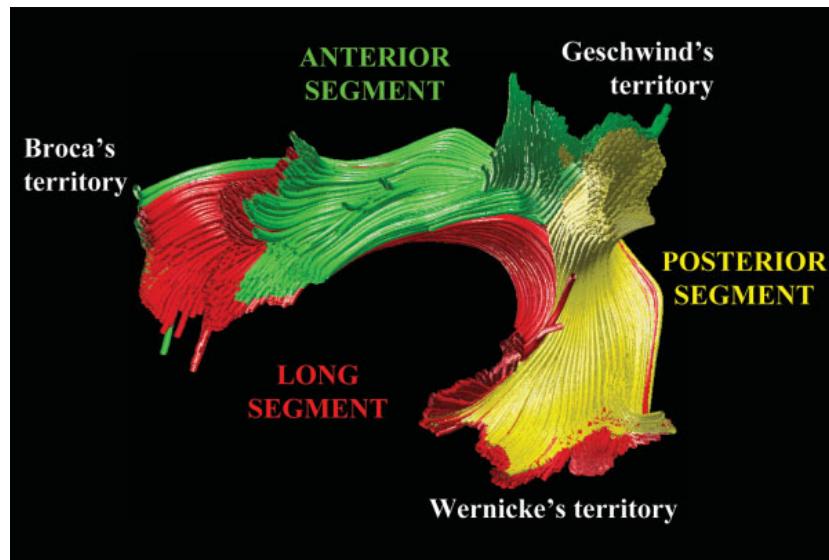


図8 From Catani et al. (2005) Fig. 3: トラクトグラフィーに拠る纖維連絡の再構成図

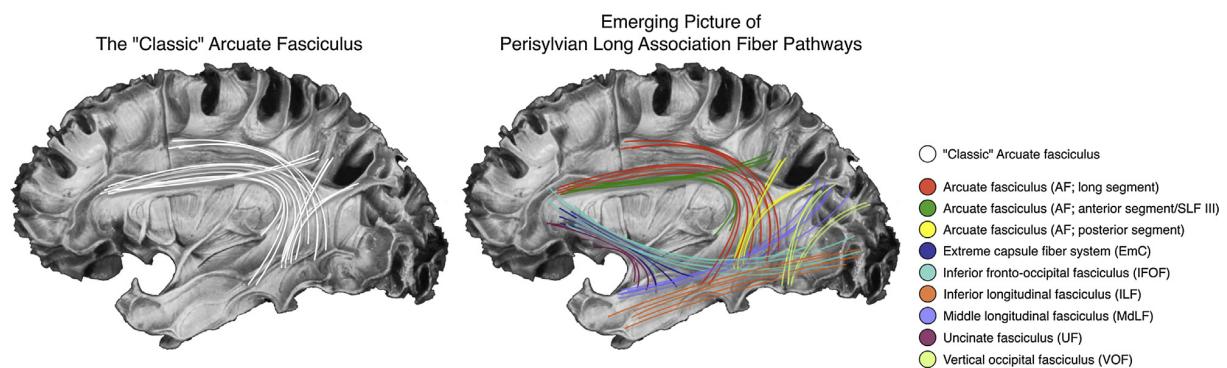


図9 From Tremblay & Dick (2016) Fig. 4

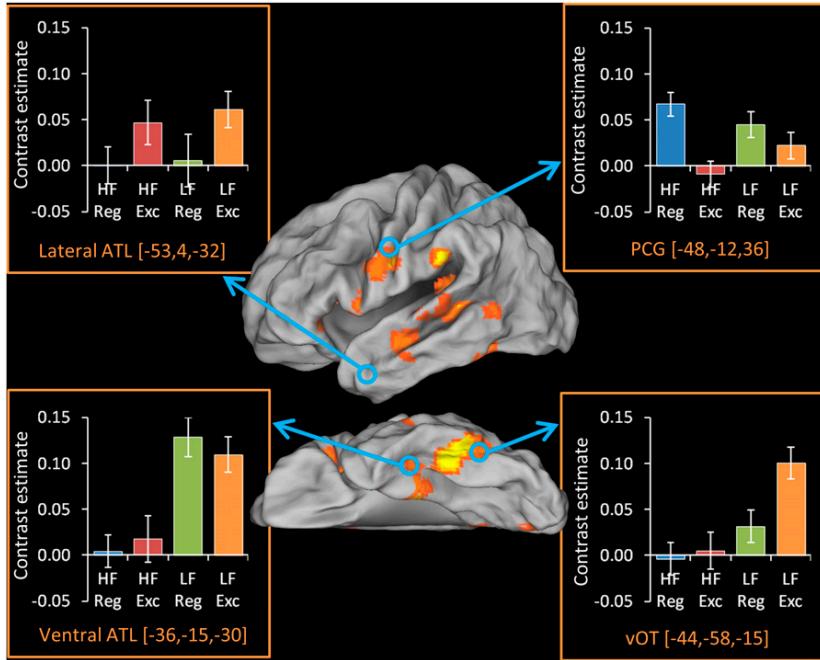


図 10 From Hoffman et al. (2011r), Fig. 1: HF:高頻度語, LF:低頻度語, Reg:規則語, Exc:例外語, ATL:側頭極 Anterior Temporal Lobe, PCG:中心前回 precentral gyrus, vOT:腹側後頭側頭皮質 ventral occipitotemporal cortex

3 失読症

3.1 用語解説

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

■入出力 言語情報処理を考える場合の入出力については, 入力情報は, 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), 運動感覚が挙げられる。一方, 出力情報は, 音声, 運動(書字, 描画, 指差し, 視線の移動など)である。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。入出力の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。

3.2 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。

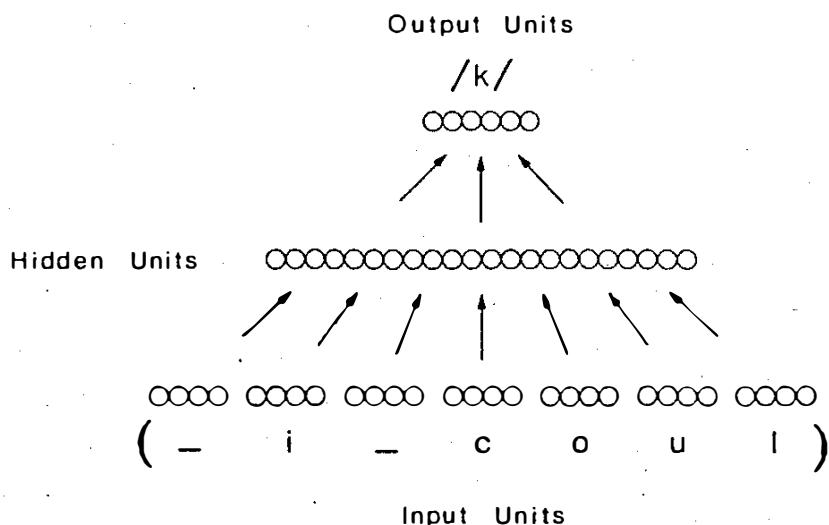


図 11 NETtalk(Sejnowski & Rosenberg, 1987)

3.3 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。

3.4 文字の逐次読み Letter-by-Letter (LBL) reading

失読症あるいは難読症の患者は単語の読みに要する時間が長くなることが知られている。複数の文字からなる単語を単語として把持し処理するのではなく、各文字を逐一読み上げるように見えることから**逐次読み letter by letter reading**と呼ばれる。健常者の単語音読潜時は通常1秒以下である。このことを考慮すれば図??の反応潜時は健常者とは異なる読字過程も想定されることを示唆していると解釈できる。

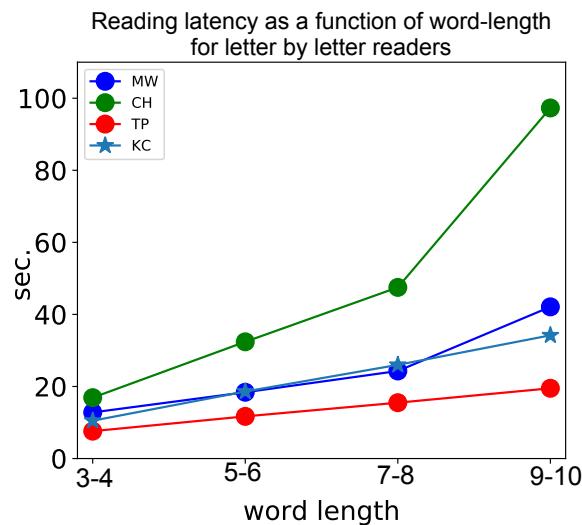


図 12 From Patterson & Kay (1982) Tab.1 を元に作成

3.5 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 *nust*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みえる。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つの混ぜ合わせた読みの誤り、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。

3.6 日本語読字過程

日本語の読字過程については、我が国の研究者を中心に検討が進んできた。Iwata (1984); Patterson, Suzuki, Wydell, & Sasanuma (1995); Sasanuma (1980) 文献も豊富である。一例を挙げれば、浅川 (2001); 岩田 (1996); 杉下 (1985); 笹沼 (1979); 山鳥 (1985),

漢字を “ideogram” カナを “phonogram” と読んでいたが近年では説明なしに kanji, kana でも海外で通じるようである。

TABLE II. Dissociated alexia and/or agraphia in three pathological conditions
○: preserved. ×: disturbed

Visual reading		Kinesthetic reading		Writing	
kana	kanji	kana	kana	kanji	
	×	×	○	○	×
	×	○	×	×	×
	○	×	○	○	×

図 13 From Iwata (1984) Tab. 2

Sugishita, K, Kabe, & Yunoki (1992) は漢字、カナに選択的な障害を持つ純粋例を各 46 名集めて検討した。その結果、従来の研究では漢字仮名の乖離と特定の機能局在を示す結果は、単独症例報告、または少数の症例報告に基づいており、結果の解釈を単純化しすぎていると指摘している。

3.6.1 LARC errors

LARC エラーとは Legitimate Alternative Reading of Components の意味である (Patterson et al., 1995)。失語症患者の読み誤りは、BLOOD は blude になるが GOOD にはならない。HOOT は foot になる。これは規則的な読みであっても頻度情報によることを意味している。

	<u>word</u>	<u>correct</u>	alternative
<u>High</u>			
Consist	規約	kiyaku	--
Incons- "reg"	石油	sekiyu	ishiabura
Incons- "irreg"	毛糸	keito	moushi
"Excep'n"	煙草	tabako	ensou
<u>Low</u>			
Consist	審査	shinsa	--
Incons- "reg"	車輪	sharin	kurumawa
Incons- "irreg"	物見	monomi	bukken
"Excep'n"	雪崩	nadare	yukikuzure

Fig. 2. Examples of two-character kanji words in each of four consistency conditions in each of two frequency bands, with the correct pronunciation of each example word and the most probable alternative pronunciation.

図 14 From Patterson et al. (1995) Fig. 2

3.6.2 日本語のトライアングルモデル

伊集院・伏見・辰巳 (2000); 伏見・伊集院・辰巳 (2000) は日本語の読みを行うトライアングルモデルを提案した。彼らのモデルは 2 文字分のグリッド ($16 \times 16 \times 2 = 512$) に漢字 2 文字語 5078 語, 各漢字の読みは 2 拍で, 漢字 2 文字で 4 拍になる熟語。および, 4 拍のカタカナ語 2013 語の計 7031 語であった。出力表現は図 15 右の如くであった。

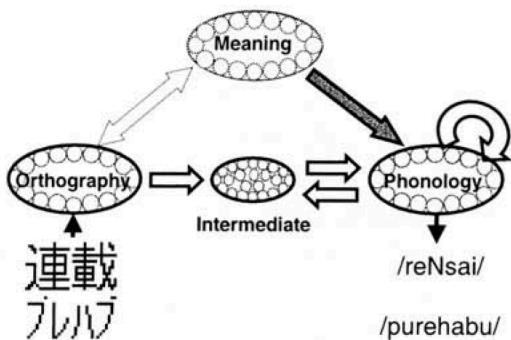


図 3 日本語を読むネットワークの構造

円はユニット, 楕円はユニット群(層), 白矢印はユニット間の結線を表す。意味層(Meaning)から音韻層への矢印に関しては、本文を参照のこと。今回、図中の点線で描かれている部分は、構築されていない。

表 1 シミュレーションで用いた出力表現例 (/reNsai/)

	26 子音	5 母音	促音	撥音
	@ k s t n h ... r w	a i u e o	Q	N
/re/	0 0 0 0 0 0 ... 1 0	0 0 0 1 0	0	0
/N/	0 0 0 0 0 0 ... 0 0	0 0 0 0 0	0	1
//	0 0 0 0 0 0 ... 0 0	0 0 0 0 0	0	0
/sa/	0 0 1 0 0 0 ... 0 0	1 0 0 0 0	0	0
/i/	1 0 0 0 0 0 ... 0 0	0 1 0 0 0	0	0
//	0 0 0 0 0 0 ... 0 0	0 0 0 0 0	0	0

図 15 From 伊集院ほか (2000) Fig. 2, Tab. 1

結果を図 16 に示した。トライアングルモデルでの意味層を乱数を用いて生成した疑似意味層に対して損傷を加えた結果が図 16 左 (a) であり、対応する患者の成績が (b) に示されている。音韻処理に損傷を加えた結果が図 16 右である。図 16 右 (a) はネットワークの、(b) は対応する患者の成績を示している。

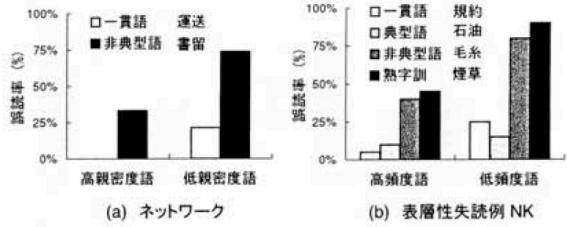


図 6

意味処理の障害として、擬似的意味情報を削除したネットワークにおける漢字語の単語属性効果 (a) と、表層性失読例 NK における単語属性効果 (b) (Patterson ら 1995)。とともに誤読率。

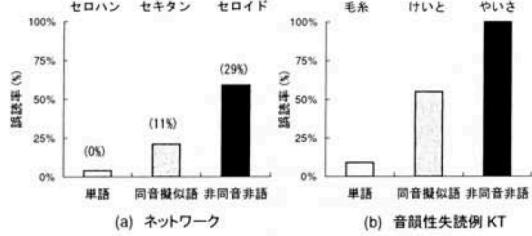


図 7

音韻処理に損傷を与えたネットワークにおけるカタカナ文字列の成績 (a)。なお括弧内は、損傷前の誤読率。(b) は音韻性失読例 KT における同音擬似語効果 (Patterson ら 1996 b より作成、心像性を込みにしたもの) を表示。

図 16 From Ijuin et al. (2000) Fig. 6, 7

3.6.3 日本語の視覚、音韻、意味の相互作用

Sato, Patterson, Fushimi, Maxim, & Bryan (2008) は意味、音韻、書記の三者関係を調べた。文字単語呼称成績と絵画命名課題との成績を比較した結果が図 17 に示されている。視覚提示された文字単語と絵画に対して音韻手がかりの実験で、120 語の名詞単語に対して、患者がターゲット語を想起できなかった場合、音韻手がかりが与えられた。ターゲット語の総拍長の 1 拍少ない拍までが手がかりとして与えられた。図 17 から、視覚情報と音韻手がかりの関係が、親密度 (familiarity) で変化していることを示している。

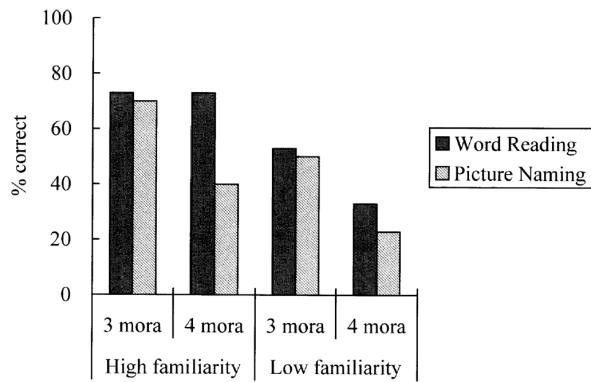


Figure 2. YT's performance in oral reading and picture naming.

図 17 From Sato et al. (2008) Fig. 2

Shallice (1988) が議論したように、深層失読とその解釈はチャレンジングな課題である。

3.7 発達性難読症

3.8 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。

単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がある。

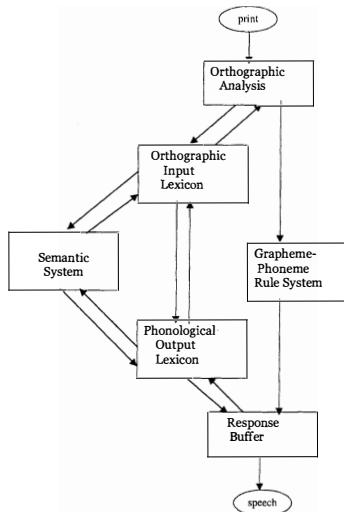


図18 二重経路モデル (Coltheart et al., 2001)への適用案

3.9 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。

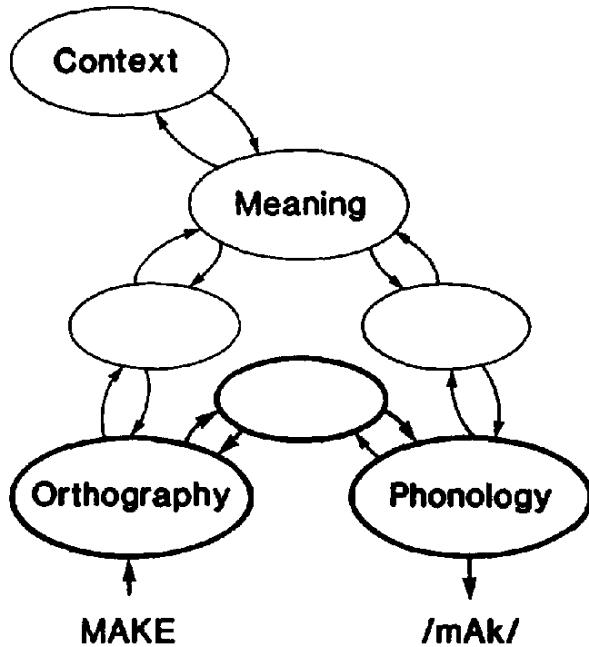


図 19 from Seidenberg & McClelland (1989a) Fig.1

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。

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。彼らのモデルは表層失読患者の典型的な読み誤りを例証できる。^{*4}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^{*5}。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。

3.9.1 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 20)。

^{*4} 本節は浅川(2001)に基づいている

^{*5} 一般には PINT を /pint/ と読み間違えるエラーの方が多い

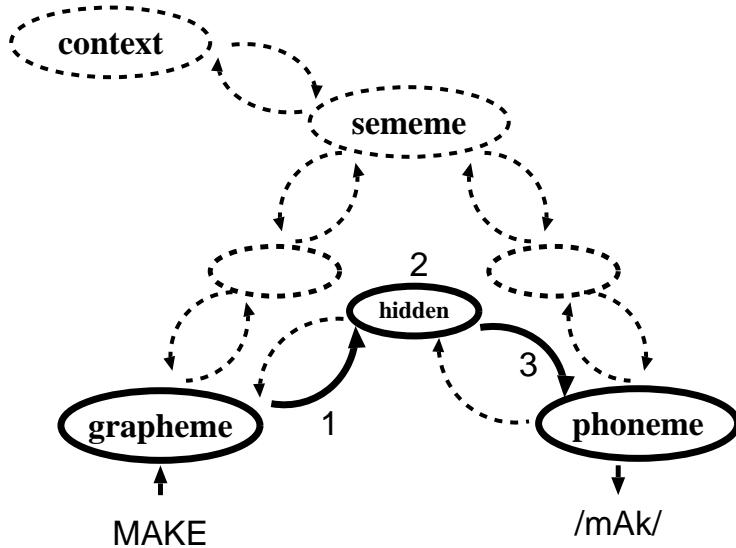


図 20 ザイデンバーグとマクレランドのトライアングルモデル。図中の実線の部分がパターソンらのシミュレーションに関する部分である。図中の数字は後述する損傷の場所を表している

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韻層へ出力される。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。

3.10 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⁶, 閉鎖音⁷] 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。

3.10.1 学習

結合係数, しきい値ともに $[-0.5, +0.5]$ 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。

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。

⁶f,v,ʃ など

⁷p,b,t,d,k,g など

パタ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^{*8}。

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間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間が長いことを指す。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。

3.10.2 破壊実験

学習成立後の図20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にすることになされた。図21に中間層の破壊（図21左）と中間層から音韻層への結合の離断（図21右）の2種類の損傷の影響を示した。

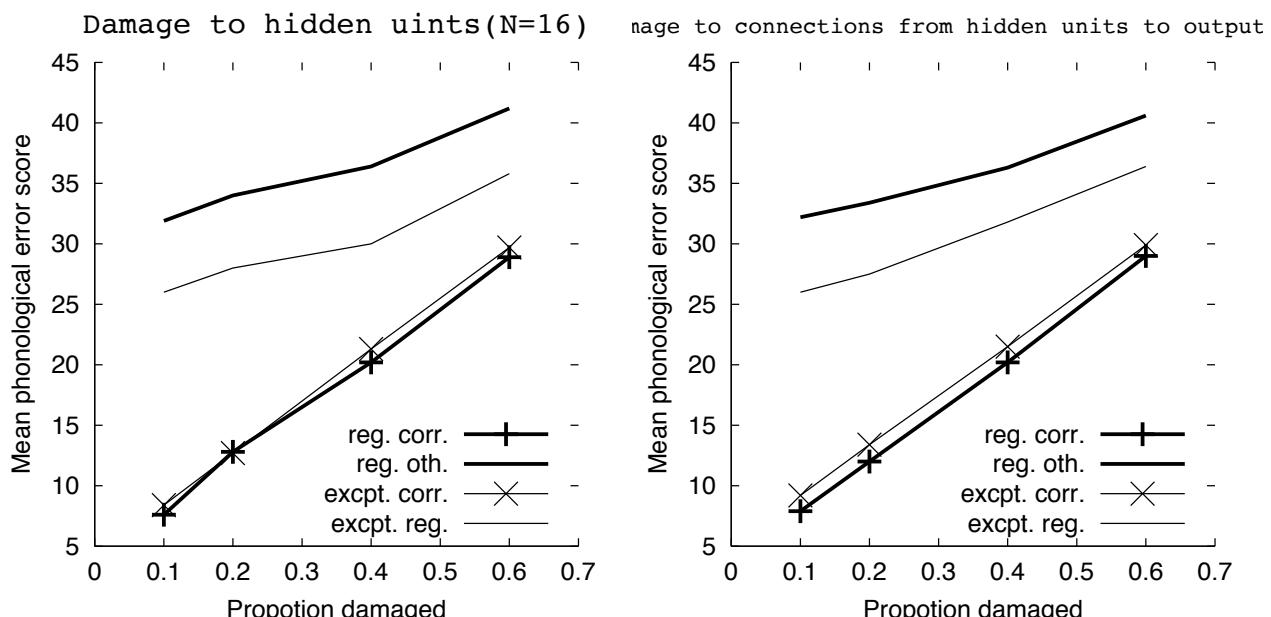


図21 破壊実験結果、右が中間層を破壊した場合、左は中間層から音韻層への結合を離断した場合。reg.corr.:規則語を正しく発音した場合、reg.oth.:規則語を正しく発音できなかった場合、except.corr.: 不規則語を正しく発音した場合、except.reg.: 不規則語を規則語の発音規則で発音した場合。例えば COVE を /kOv/ と発音すると reg.corr. に、/kUv/ と発音すれば reg.oth. に相当する。一方、MOVE を /mUv/ と発音すると except.cor. に、/mOv/ と発音すれば except.reg. に分類された。Patterson ら (1989) Table 7.3 を元に作成

図21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。

^{*8} 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)

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っ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18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18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18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21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。

3.10.3 SM89

Fig.22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.22の円内には用いられたユニット数が記されている。

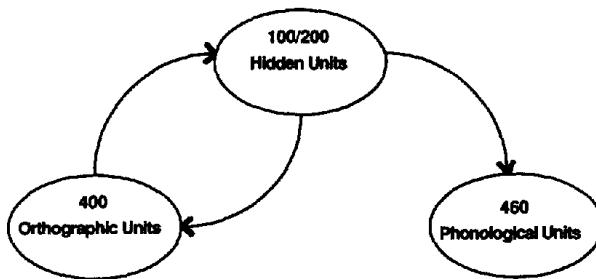


図22 Seidenberg & McClelland (1989a) Fig. 2 より実装された部分と層内のユニット数

■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う。自然言語処理NLPで用いられるBOW(Bag Of Words)と同じく用いられた項目の情報のみを表現し、順序情報が脱落することを意味する。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/ $\#S_t, sT_o, tO_p, oP\#$ /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。

■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

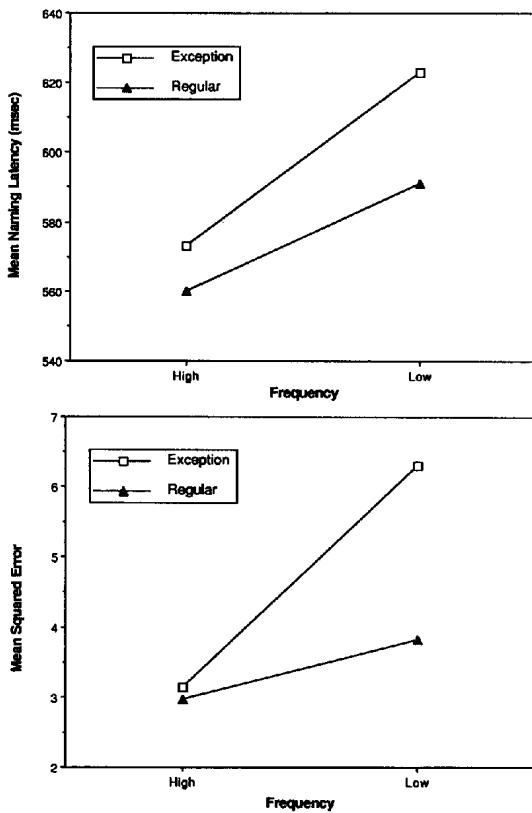


Figure 4. Results of the Taraban and McClelland (1987) study (upper graph) and the simulation data for 250 epochs (lower graph).

図 23 Seidenberg & McClelland (1989a) Fig. 4. Results of the Taraban and McClelland (1987) study (upper graph) and the simulation data for 250 epochs (lower graph).

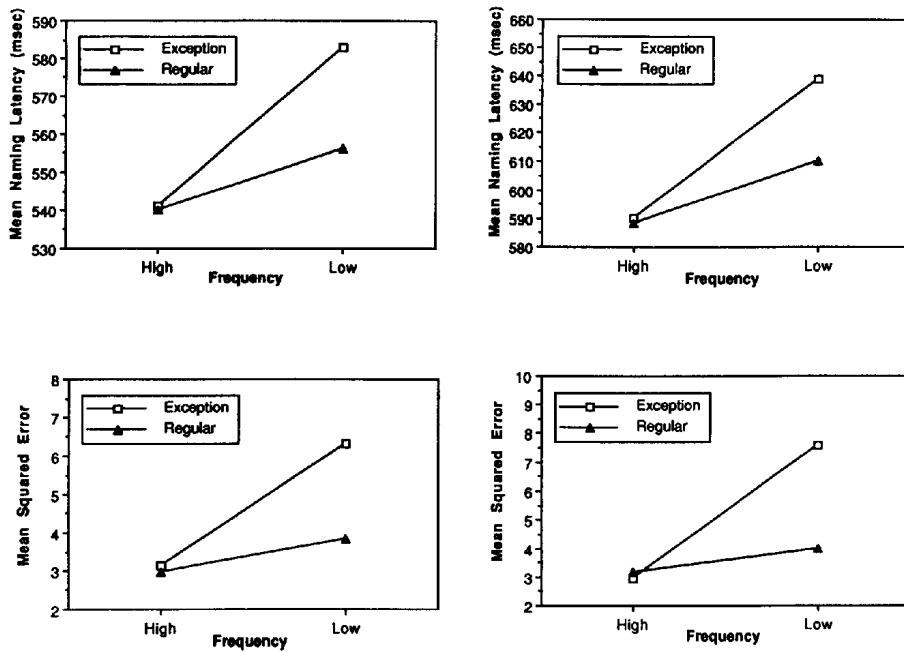


Figure 5. Results of the Seidenberg (1985c; left graphs) and Seidenberg, Waters, Barnes, & Tanenhaus (1984, Experiment 3; right graphs) studies: experiments (upper graphs) and simulations (lower graphs).

図 24 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).

■規則/不規則、一貫/非一貫語 Glushko (1979) は規則非一貫語を定義した。読みを共有し形態的にも類似する隣接語 **neighbors** が多い場合である。GAVE, PAVE, SAVE, BRAVE など、一方隣人が少なければ HAVE, SAID, SHOE **非一貫語**となる。

Glushko (1979)によれば全ての隣接語が一貫語である**例外語 exception words**は反応潜時が長かった。
従って読字モデルで考慮すべき変数は、頻度の高低、規則/例外/非一貫、実(在する)単語/非単語、となる。

1. 高頻度規則語 **high-frequency regular**
2. 低頻度規則語 **low-frequency regular**
3. 高頻度非一貫語 **high-frequency inconsistent**
4. 低頻度非一貫語 **low-frequency inconsistent**
5. 非単語 **non words**

以下は Taraban & McClelland (1987) より

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**, **コード 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。⁹

4 意味の障害

意味の問題は，記憶，言語，社会，言語学，記号，情報，数学，哲学(ウイトゲンシュタイン, 1921/2003)において中心的な話題である。分野や領域ごとに，意味 semantics, 概念 concept, 範疇 category, プロトタイプ prototype, アイデア idea, などの用語が用いられるがここではそれらの用語に厳密な定義を与えることはしない。

意味に関する話題として以下を取り上げる。

1. 基本概念 (Rosch et al., 1976)
2. カテゴリー特異性 category specificity Warrington (1975); Warrington & Shallice (1979), Hinton & Shallice (1991); Plaut & Shallice (1993); Warrington & Shallice (1984) そのニューラルネットワークモデル (Farah & McClelland, 1991a)
3. 上位概念優位 super-ordinate category preservation (Warrington, 1975)
4. ATL hub-and-spoke Close & Pothos (2012); Rogers et al. (2004); Rogers & Patterson (2007) ChenRambon-Ralph2017 X 2
5. 意味の埋め込みモデル Mikolov, Chen, Corrado, & Dean (2013); Mikolov, Sutskever, Chen, Corrado, & Dean (2013); Mikolov, Yih, & Zweig (2013)

4.1 単一乖離と二重乖離

二重乖離 double dissociation の原則を最初に提唱したのは (Teuber, 1955) であるという (Bullinaria & Chater, 1993; 山鳥, 1985)。

課題 A と B とが二重に乖離しているとは，患者群の中には課題 A の成績が正常か正常に近い範囲に保たれ，かつ，課題 B の成績が障害されている場合で，かつ，その逆が見られる場合である。このとき課題 A と B とは**二重に乖離 doubly dissociated** しているという。

二重乖離は Fodor のモジュラリティ (Fodor, 1983) にまで遡る概念である。脳の機能を解明するための**神経科学 neurology** と異なり，心的機能と脳の構造や機能との関連に関心を持つ神経心理学では，心的機能の機能的独立性が重視される。そのため (a) 特定の心的機能のモジュールがどのように課題を実行しているのか，そして (b) モジュール間の連絡経路ではどのような情報が伝達されているのかに関心がある。この立場は情報処理的な**箱と矢印 box-and-arrow** モデルと親和性がある Coltheart (2008)。

一方**単一乖離 single dissociation** は，例えば視覚失認の患者が，触覚情報 tactile information から物品呼称が可能となるような場合を指す。この場合，視覚情報から物品の名称には到達できないが，触覚情報からは物品の名称が蓄えられている記憶領域へのアクセスが可能であると解釈できる。この場合は視覚情報から物品の名称への单一乖離である。

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。深層失読患者の示す症状の例については以下の図 25 参照のこと

⁹ 付録 ARPABET 参照

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 25 From Plaut & Shallice (1993)

一方で、損傷部位と特定の認知機能の結びつきについては、単一乖離、二重乖離と脳の領野を結びつけることが簡単ではない場合がある。Catani & ffytche (2005) が指摘するように特定の領野の損傷が、纖維連絡を有する他の領野へ副次的に影響を与える可能性がある。このため、損傷部位と認知機能との対応付けについては慎重になるべきである(図 26)。

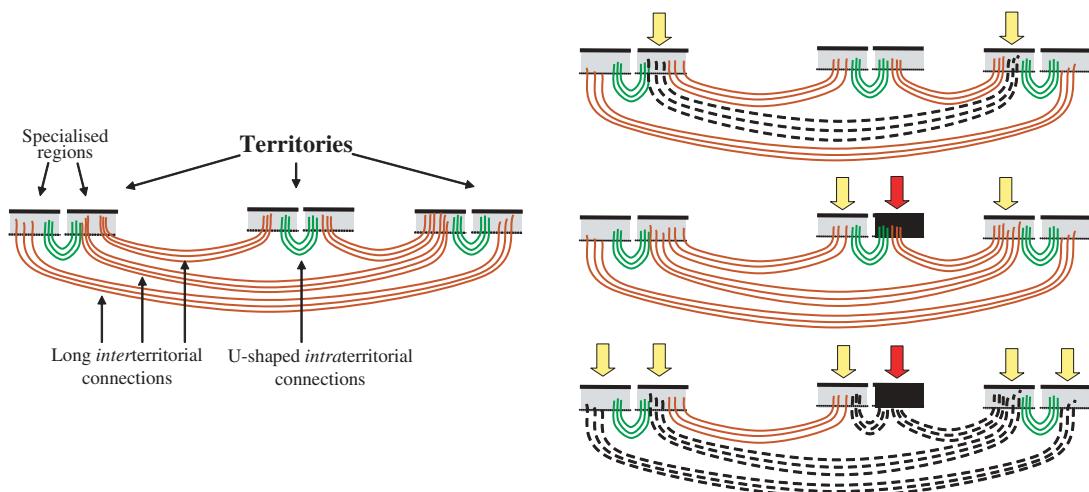


図 26 From Catani & ffytche (2005) Fig. 6

ニューラルネットワークモデルは、実際の脳に比して過度に単純化されたモデルであるということができる。神経心理学のための人工ニューラルネットワークシミュレーション研究の概念的妥当性及び関連性は、この過度に単純化したモデルにおける損傷の影響が、決定的に重要ではないという仮定に依存している。損傷の影響はネットワークの

規模に影響しないと想定されている。駄菓子菓子、ネットワークサイズのスケールが損傷とは独立であるという保証は未だ検証されていない。このことはニューラルネットワークの初期値依存性にも結びつき重要な問題であると考えられる。加えて異なるネットワークアーキテクチャや想定可能な場合にはそのアーキテクチャ決定方法について判断する基準が存在しない。現在のニューラルネットワークモデルの生物学的妥当性についての議論が十分ではない以上、この問題は特に重要である。

さらに重要な設計上の問題はニューラルネットワークが最小であるかどうか、すなわちそのネットワークモデルが問題を解くための必要最小数のユニットおよび結合を有しているか否かである。このネットワーク最小性は学習時間を短縮し、一般化可能性を向上させ、そして隠れ層における情報表現の解釈可能性を向上させる。ただし最小構成のネットワークは、分散表現を行っていない可能性がある。各ユニットあるいは結合の多様性の影響は小さくない。おそらく脳は予備の隠れユニットを持っているであろう。ネットワーク最小性は、より自然な状態の最小ではない条件で現出するものとは非常に異なった解を見出すことになるかも知れないという懸念を提起しうるのである。

これは訓練データの表現にも依存する。多くのシステムは複雑な表現を採用し「場当たり的な対処」をしている可能性がある。多くの場合、頻度情報の影響を訓練データに反映させる必要がある（例：読書モデルの単語の頻度）。頻度効果を効果的に実装する方法は明確になっていない。ネットワークが学習可能なように、例外語をより頻繁に提示する必要があるが、これを「場当たり的な対処」とみなすべきかどうかは不明である。

神経心理の患者は（常にではないが）病変が生じた後に課題成績の急速な改善を示すことある（Geschwind, 1985）。最小ネットワークを用いると、準最小になるように簡単にそのネットワークを損傷することができる。この場合、損傷後に再学習が可能である。このことは結果を混乱させる可能性がある。再学習によって乖離が生じたり、破壊されたり、さらには元に戻すことさえ可能である。最小ではないネットワークではこの問題は発生しない。再学習によって常に損傷が完全に補償され、乖離がまったく発生しなくなる。要約すると病変損傷のシミュレーションの解釈が非常に難しいのには理由がある。

ニューラルネットワークシミュレーションの有用性は以下のことに関連する（Bullinaria & Chater, 1993）。

1. ニューラルネットワークモデルは実際の脳で起こっていることと一致している
2. 完全分散システムでは二重乖離が可能であり、したがってモジュール性を推論するために使用することができない
3. 完全分散システムで学習することによってモジュール構造が自然に発生する可能性がある

4.2 カテゴリー特異性障害

カタゴリー特異性（範疇特異性）category specificity の意味障害とはある一つの意味カタゴリーだけが損傷され、他のカタゴリーは正常レベルに保たれる患者に対する記述に用いられる。Warrington & Shallice (1984) が報告して以来 100 以上の論文が刊行され、総説論文も多い (Capitani, Laiaconna, Mahon, & Caramazza, 2003; Humphreys & Forde, 2001; Tyler & Moss, 2001)。

図 27 は Warrington & Shallice (1984) の報告した 2 症例 (J.B.R と S.B.Y.) の結果を示している。視覚提示されたカラー写真、動物 48 枚、非動物 48 枚の呼称 (identified), 口述説明 (Named), いずれのカタゴリーに属するかの 2 者択一 (Superordinate) のそれぞれの成績を示している。続いて聴覚提示された語の写真を 5 つの刺激の中から選択する (Identified) ことが行われた。2 名の患者の成績に差はあるものの生物概念の成績が悪いことが示されている。

TABLE 4. EXPERIMENT 2. IDENTIFICATION OF PICTURES, NAMES, LIVING THINGS AND INANIMATE OBJECTS

	Living things				Inanimate objects			
	Visual		Auditory		Visual		Auditory	
	Identified	Named	Identified	Superordinate	Identified	Named	Identified	Superordinate
J.B.R. (5.8.80)	6	6	8	90	90	67	79	94
S.B.Y. (27.7.82)	0	0	0	75	75	0	52	85

Percentage correct identification score, naming score and superordinate score.

図 27 From Warrington & Shallice (1984) Tab. 2

二人の患者の口述説明を図 28 に示した。

Qualitatively the difference between the major categories was very striking. Some examples of their responses to the inanimate object words were as follows.

J.B.R. Tent—temporary outhouse, living home.
Briefcase—small case used by students to carry papers.
Compass—tools for telling direction you are going.
Torch—hand-held light.
Dustbin—bin for putting rubbish in.

S.B.Y. Wheelbarrow—object used by people to take material about.
Towel—material used to dry people.
Pram—used to carry people, with wheels and thing to sit on.
Submarine—ship that goes underneath sea.
Umbrella—object used to protect you from water that comes.

In contrast some examples of their responses to living things were as follows.

J.B.R. Parrot—don't know.
Daffodil—plant
Snail—an insect animal.
Eel—not well.
Ostrich—unusual.

S.B.Y. Duck—an animal.
Wasp—bird that flies.
Crocus—rubbish material.
Holly—what you drink.
Spider—person looking for things, he was a spider for a nation or country.

図 28 From Warrington & Shallice (1984) page 838

上の生物知識の選択的障害とは対照的に、Warrington & McCarthy (1987) は非生物に選択的な障害を示した患者 Y.O.T. を報告した (図 29)。手続きは同一カテゴリーに属するカラー写真を 5 枚提示し、その中から口頭で指示された刺激語の写真を選ぶというものであった。

TABLE I. CATEGORY SPECIFICITY*

<i>Animals</i>	<i>Flowers</i>	<i>Objects</i>
----------------	----------------	----------------

86	86	67
----	----	----

$n = 60$, chance = 20%.

*Percentage correct score on a spoken word/picture-matching test (animals, flowers, objects).

図 29 From Warrington & McCarthy (1987) Tab. 1

用いられた刺激は以下のとおりである。

Foods: Mushrooms, Sprouts, Lemon, Buns, Jam, Onions, Beam, Lolly, Steak, Strawberries, Milk, Soup, Ice cream, Lettuce, Pear

Animals: Lion, Duck, Chicken, Butterflies, Elephant, Dog, Horse, Sheep, Bird, Fish, Cat, Rabbit, Cow, Frog, Swan

Objects: Present, Crayons, Cotton, Bicycle, Camera, Rollerskates, Umbrella, Clothes pegs, Wheelbarrow, Mirror, Pram, Buttons, Balloons, Swing, Paints

図 30 は Crutch & Warrington (2003) の提案したモデルを表している。この図の中で、少なくとも単一乖離できる意味記憶のカテゴリーに以下の想定が可能なことを示している。以下のリストは図 30 の最下段を書かれているカテゴリーである。

- 果物と野菜
- 動物
- 非動物の食べ物
- 材料
- 道具/手で扱えるモノ
- 手で扱えないモノ
- 乗り物
- 体の一部

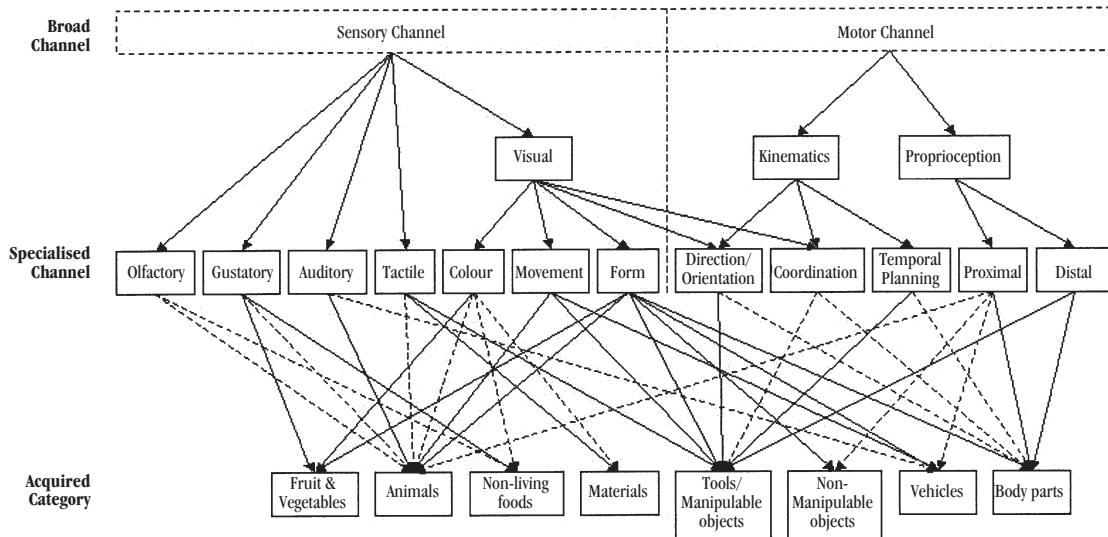


Figure 2. An illustration of the multiple processing channels account.

図 30 From Crutch & Warrington (2003) Fig.2

図 31 に Crutch & Warrington (2003) の報告を示した。人工物、動物、植物の各 40 刺激。semantic probe テストでは、三択一式で、属性に関する質問 (apple:pips, stone, segment) と連想についての質問 (ostrich: walk, swim, fly) とが設けられた。命名課題ではカラー写真が提示され刺激の名称を呼称することが求められた。結果を図 31 に示した。

Table 1. Number and percentage correct responses on the naming and semantic probe tasks

Category	Semantic probe task					
	Naming		Pictorial presentation		Auditory verbal presentation	
	N correct	% correct	N correct	% correct	N correct	% correct
Artefacts (N = 40)	29	73	39	98	39	98
Flora (N = 40)	7	18	25	63	28	70
Fauna (N = 40)	7	18	38	95	38	95

図 31 From Crutch & Warrington (2003) Tab. 1

図??に?の結果を示した。視覚提示刺激の質が線画、色付き線画、写真、実物と異なっていたが、果物と野菜の概念が一貫して悪いことが分かる。

Table 1 Number of correct naming responses

	Semantic category		
	Fruit	Vegetables	Other
Line drawings	5/11	7/11	11/11
Coloured drawings	4/6	5/7	18/18
Photographs	11/18	12/18	222/229
Real objects	10/13	13/23	11/11
Total	30/48 (0.63)	37/59 (0.63)	262/269 (0.97)

The ‘other’ category includes vehicles, toys, tools, animals, body parts, food products, school, bathroom, kitchen and personal items, clothing, colours, shapes and trees.

図 32 From Hart et al. (1985) Tab. 1

上記の結果からは特定のカテゴリーに属する対象の呼称成績に障害があるとの考えがあるが、これに対しては反証も存在する。図 33 左が原画像であり右上が模写、右下は 10 秒後の遅延再生画である。このようにある動物の特徴と考えられる視覚特徴を落としてしまうことから、視覚イメージ自体に損傷の影響が及んでいるとも考えられる。



図 33 From Patterson (2007) Fig. 3. 左が提示画。右上:模写。右下:10 秒後の再生画

同様の例を Rogers & Patterson (2007) Fig. 2(D) から示した(図??)。左が元画像であり、10 秒後の遅延複写画が右である。各動物の特徴である考えられる部位が消失していることが見て取れる。

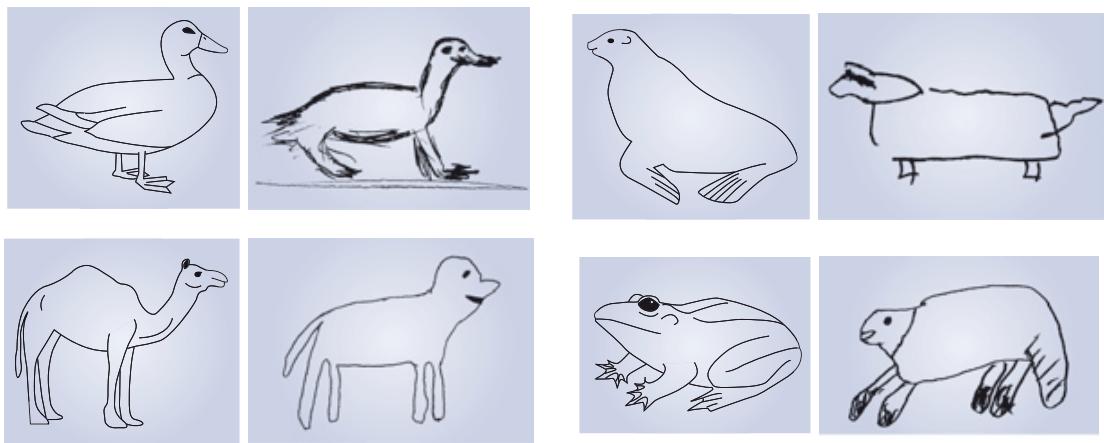


図 34 From Rogers & Patterson (2007) Fig. 2. 意味痴呆患者の遅延コピー例

4.3 深層失読のシミュレーション

深層失読を説明するニューラルネットワークモデルにはアトラクタネット attractor networks と呼ばれるモデルがある (Hinton, Plaut, & Shallice, 1993; Hinton & Shallice, 1991; Plaut & Shallice, 1993)。モデルの概要を図??に示した。図はフィードフォワード型の階層ネットワークにクリーンナップ層 cleanup layer を付加したネットワークである。認識を行うためだけであれば階層型のニューラルネットワークで精度は確保できると考えられる。ところが入力情報が劣化していたり、曖昧だったりした場合にクリーンナップ層を介して意味情報処理が行われると仮定される。

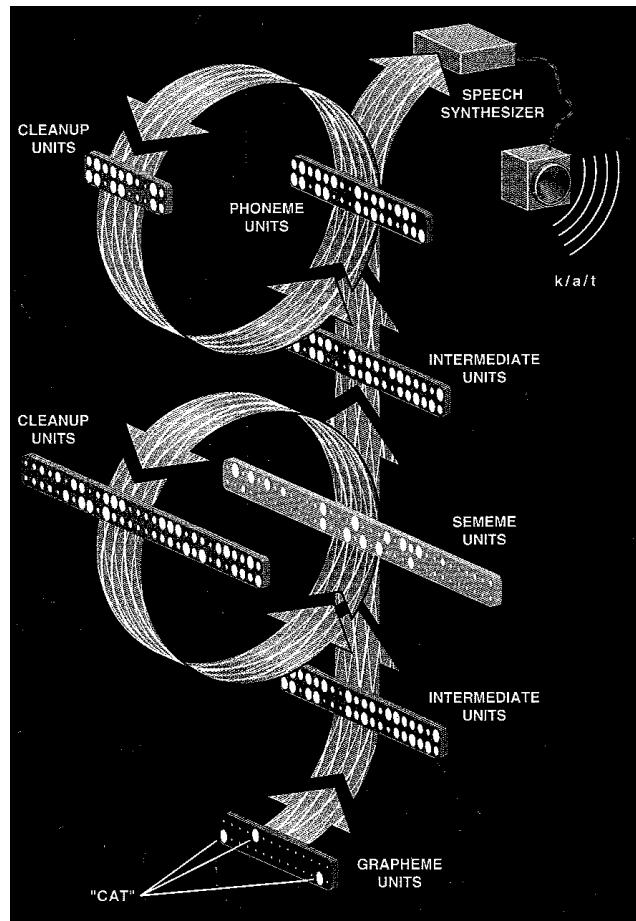


図 35 From Hinton et al. (1993) より

クリーンナップ層の影響で単語の検索が行われる過程の模式図を図 36 に示した。

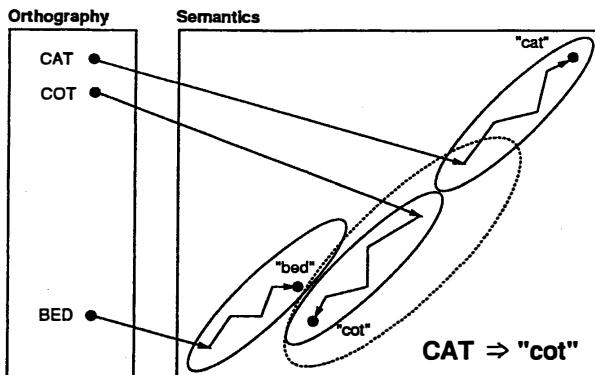


FIG. 4 How damage to semantic attractors can cause visual errors. The solid ovals depict the normal basins of attraction; the dotted one depicts a basin after semantic damage.

図 36 From ? Fig. 4

用いられた刺激は付録 53 ページ付録 E 節に掲載した。

4.3.1 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、についてファ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。

4.4 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。

ファ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。

4.5 モデル

彼女らのモデルを図 37 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。

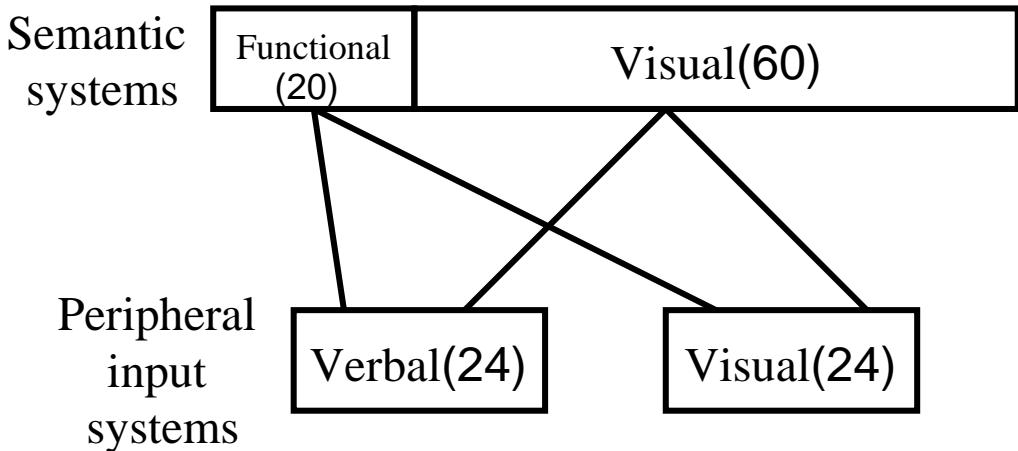


図37 ファラーとマクレランド (Farah & McClelland, 1991b) の意味記憶モデルの概念図。カッコ内の数字は数値実験で用いられたユニット数を表す。意味記憶内で機能的記憶と視覚的記憶のユニット数が異なるのは、彼らの論文中の実験1 (心理実験) の結果を反映している。

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。

4.6 破壊実験

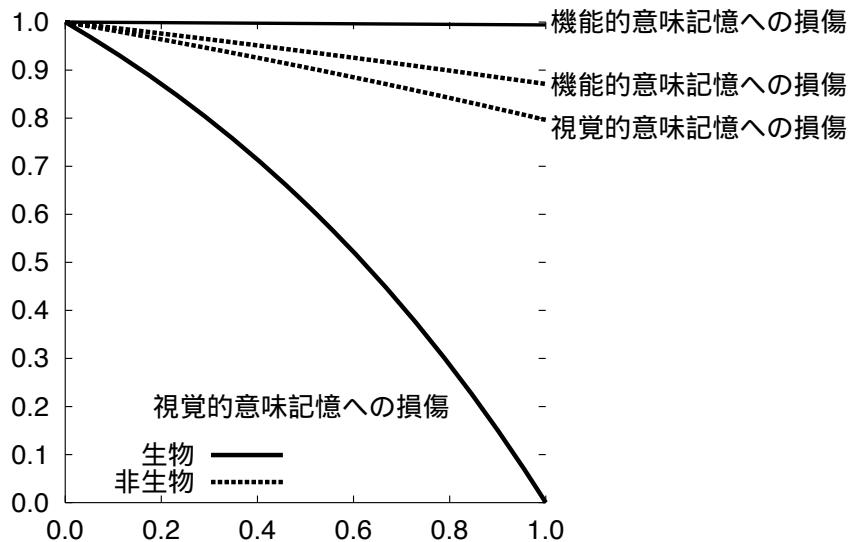


図 38 生物–非生物別の意味記憶内の損傷の程度と課題成績との関係 (Farah & McClelland, 1991b) の表 3 と図 2 より改変。彼らは各条件で 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 0.99 の 6 点について各 5 回づつしか数値実験を行なっていないため実際の曲線は滑らかにならない。そこで、指數関数に回帰させてプロットしなおした。指數回帰を用いれば唯一のパラメータを変化させることで 4 つの条件に対応する曲線を描くことができる。

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。

4.7 認知心理学による基本カテゴリー仮説

ここでは認知心理学の古典的な研究を紹介する。Rosch et al. (1976) は**基本カテゴリー basic category** を主張した。意味記憶あるいは概念構造が**木構造 tree structure** を成しているとの研究である。概念構造の階層構造は原理的には何層も想定可能である。しかし彼女は心理実験として操作可能な 3 層に注目した。3 層は上位、基本、下位と名付けられた。彼女によれば**基本カテゴリー basic category** は「情報を最大の情報、最高の手がかり妥当性、最良の判別可能性を持つカテゴリ」である (Rosch et al., 1976, page 383)。

上記の検証実験のためのプライミング実験結果を図 39 に示した。図から基本カテゴリーのプライム量が最も大きいことが分かる。

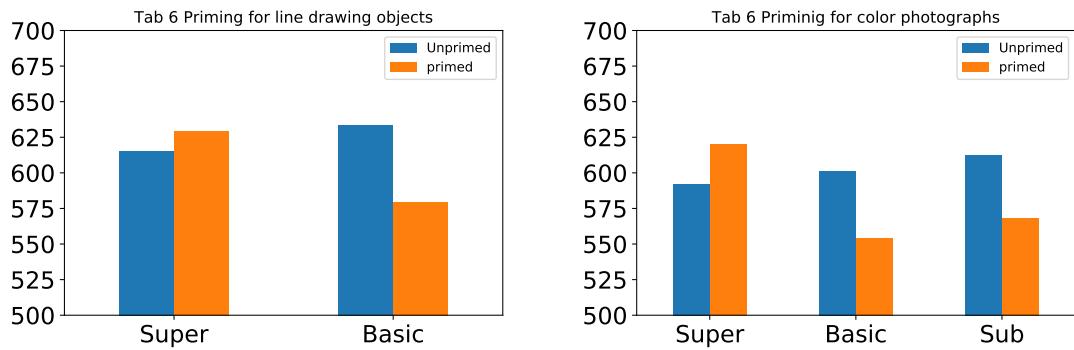


図 39 From Rosch et al. (1976) Tab. 6 を改変

同様にして、真偽判断実験結果を図 40 に示した。反応時間においても基本カテゴリーの判断時間が最も早くなることが分かる。

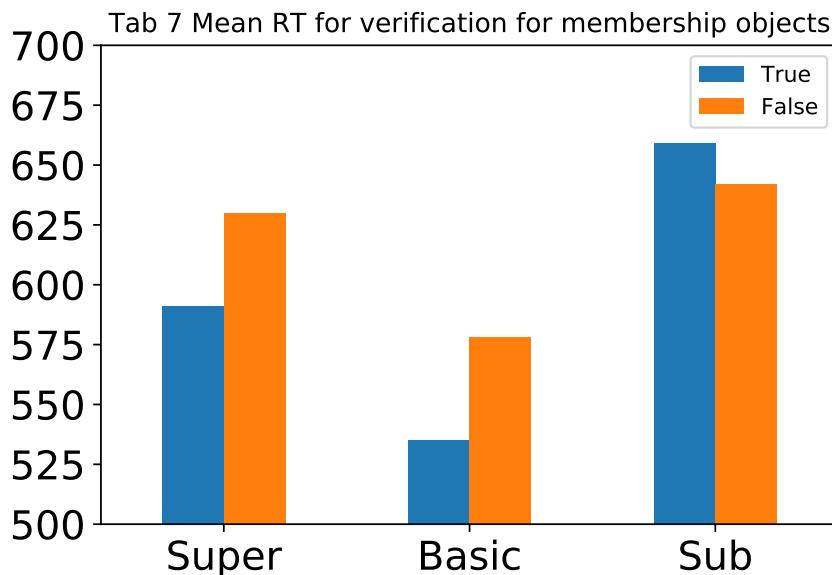


図 40 From Rosch et al. (1976) Tab. 7

彼女の実験 (Rosch et al., 1976) に用いられた刺激語リストは 52 図 54 にし示してある。

Collins & Quillian (1969) は、上述した意味の 3 階層について、各ノードを移動する回数によって反応時間が増加する様子を報告している。各概念の属性 (P) と上位であるか否か (A) を問う課題である。結果を図 41 に示した。PO, AO は同一階層 (ペンギンはペンギンである, カナリアは歌う), P1, A1 は 1 階層 (カナリアは鳥である, カナリアは飛ぶ), P2, A2 は 2 階層 (カナリアには皮膚がある。カナリアは動物である) 隔たっていた。結果は階層の隔たりが増すと反応時間が増加した。

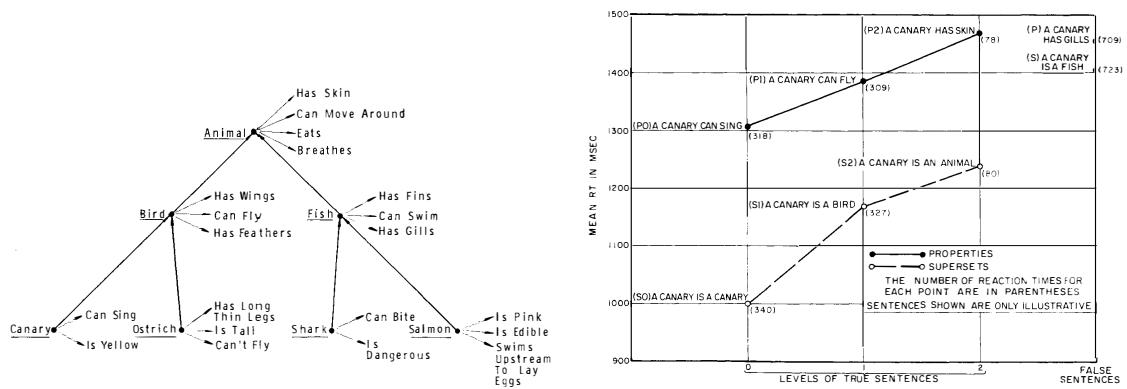


図 41 From Collins & Quillian (1969), Fig. 1 and Fig. 2

4.8 側頭極=ハブ・スパーク仮説

ここまでで、健常者においては基本カテゴリーに関する処理が早いことが分かった(基本カテゴリー優位性 basic category advantage)。しかし、一方で意味痴呆患者においては上位カテゴリーが保存される。記憶は獲得年齢効果 AoA: Age of Acquisition Effect が認められるとされる。すなわち、発達初期において獲得した記憶内容は、もっとも頑健であり、忘却されにくいとされる。基本カテゴリーは、この獲得年齢効果に従っているように見える。ところが意味痴呆患者における上位概念が保たれるという報告は矛盾しているように思われる。

一連の側頭極=ハブ・スパーク仮説はこの矛盾を解消するために提案された(Chen, Lambon-Ralph, & Rogers, 2017; Patterson, Nestor, & Rogers, 2007; Ralph, Jefferies, Patterson, & Rogers, 2017; Rogers & Patterson, 2007)。

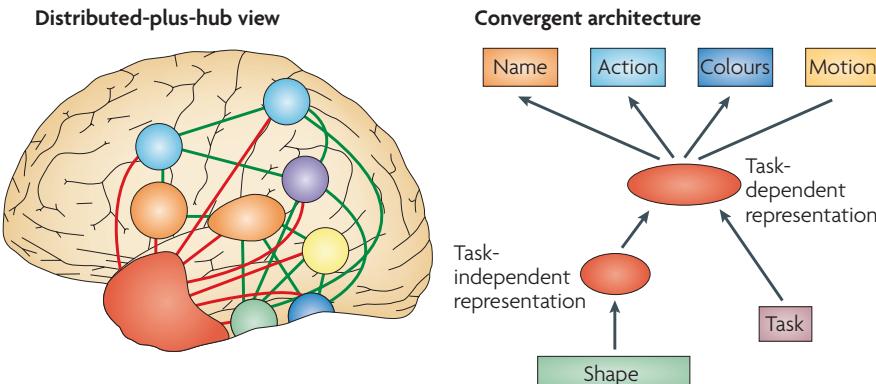


図 42 From Patterson et al. (2007) Fig.1

側頭極=ハブ・スパーク仮説が依拠するモデルである McClelland & Rogers (2003); Rogers & McClelland (2004) が提案したモデルの概略を図 43 に示した。このモデルは Rumelhart & Todd (1993)に基づく。

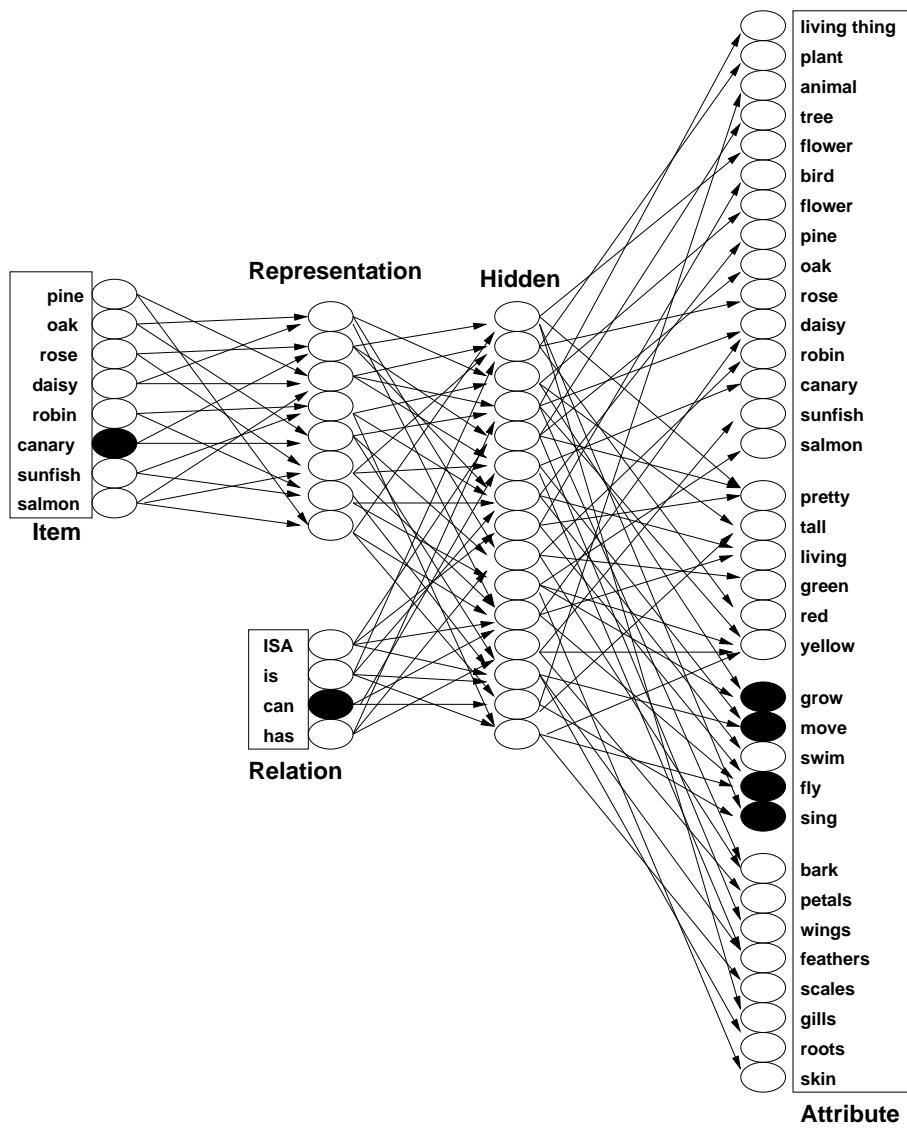


図 43 From Rogers & McClelland (2004) Fig.4

彼らは図 44 に示した。

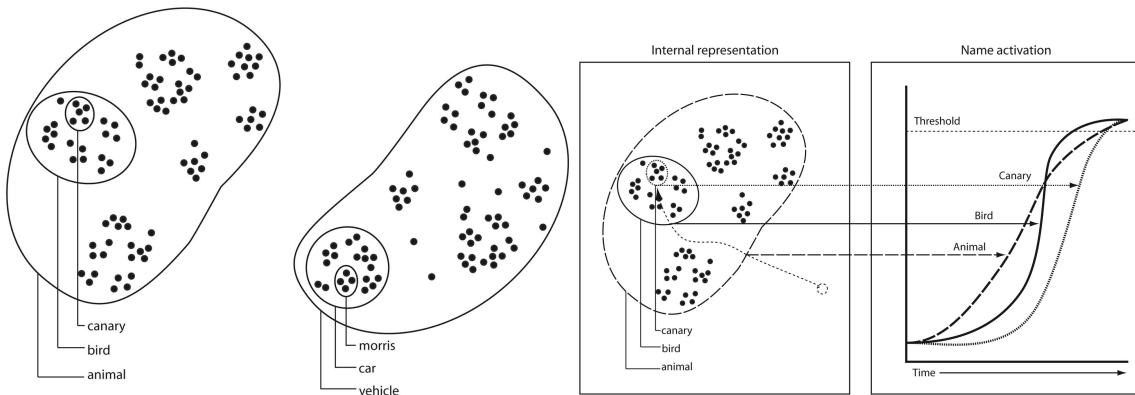


図 44 From Rogers et al. (2004) Fig. 4 and 5

彼らのモデルには伝統的なカテゴリー論、プロトタイプ論からの批判もある (Close & Pothos, 2012)。しかし側頭極＝ハブ・スパーク仮説に基づいて健常者と意味痴呆患者と課題成績を同時に説明しようとする試みは評価される Chen

et al. (2017); Ralph et al. (2017)。

図45はRogers & McClelland (2004)による学習過程を概念分化と捉える説明である。

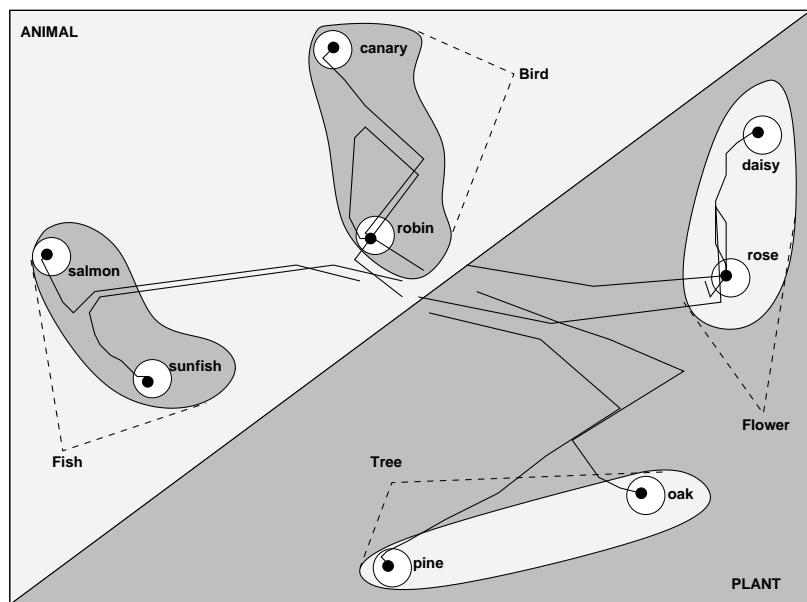


図45 From Rogers & McClelland (2004) Fig. 3.9

4.9 最近のモデル

Chen et al. (2017); Ralph et al. (2017)は側頭極=ハブ・スパーク仮説と機能的脳画像のメタ分析に基づいて、健常者と意味痴呆患者の課題成績を統一して説明するモデルを提案したこと。

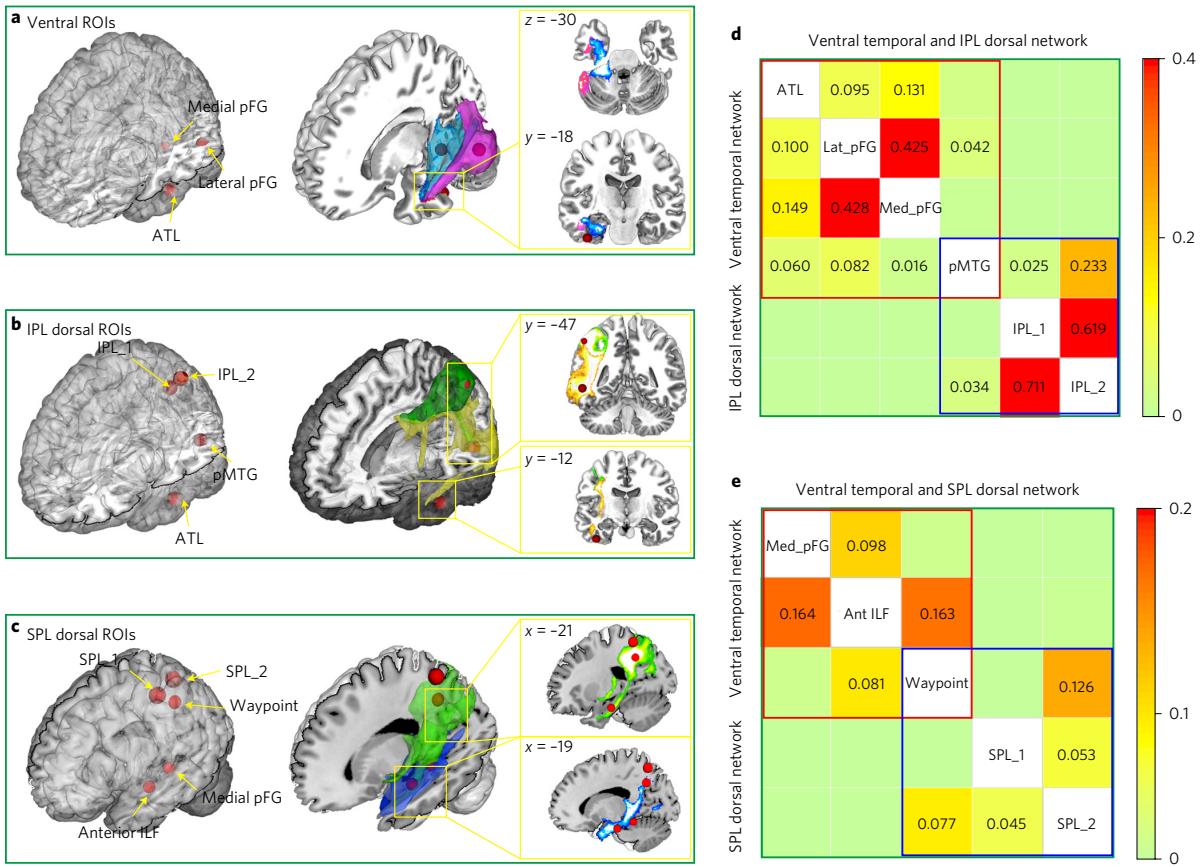


Figure 2 | Tractography results. Red spheres indicate seed points from ALE analysis and literature review. **a**, **c**, White-matter connectivity of cortical semantic network revealed by probabilistic tractography. Streams from medial (blue) and lateral (pink) pFG project to ATL (**a**). Streams from 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 From Chen et al. (2017) Fig. 2

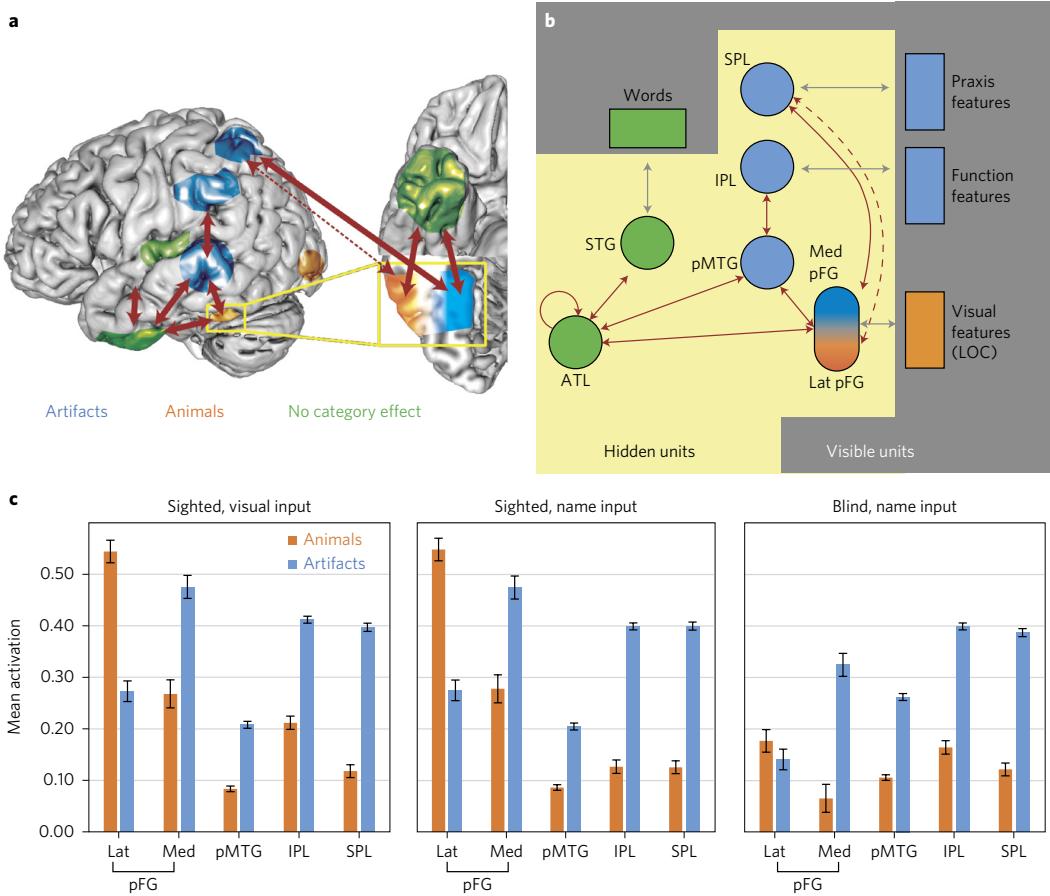


Figure 3 | Model architecture and functional magnetic resonance imaging (fMRI) data simulations. **a**, Schematic showing ALE and connectivity results. Red arrows indicate significant connectivity in tractography while coloured regions indicate semantic category effects in the ALE analysis. The dotted 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 From Chen et al. (2017) Fig. 3

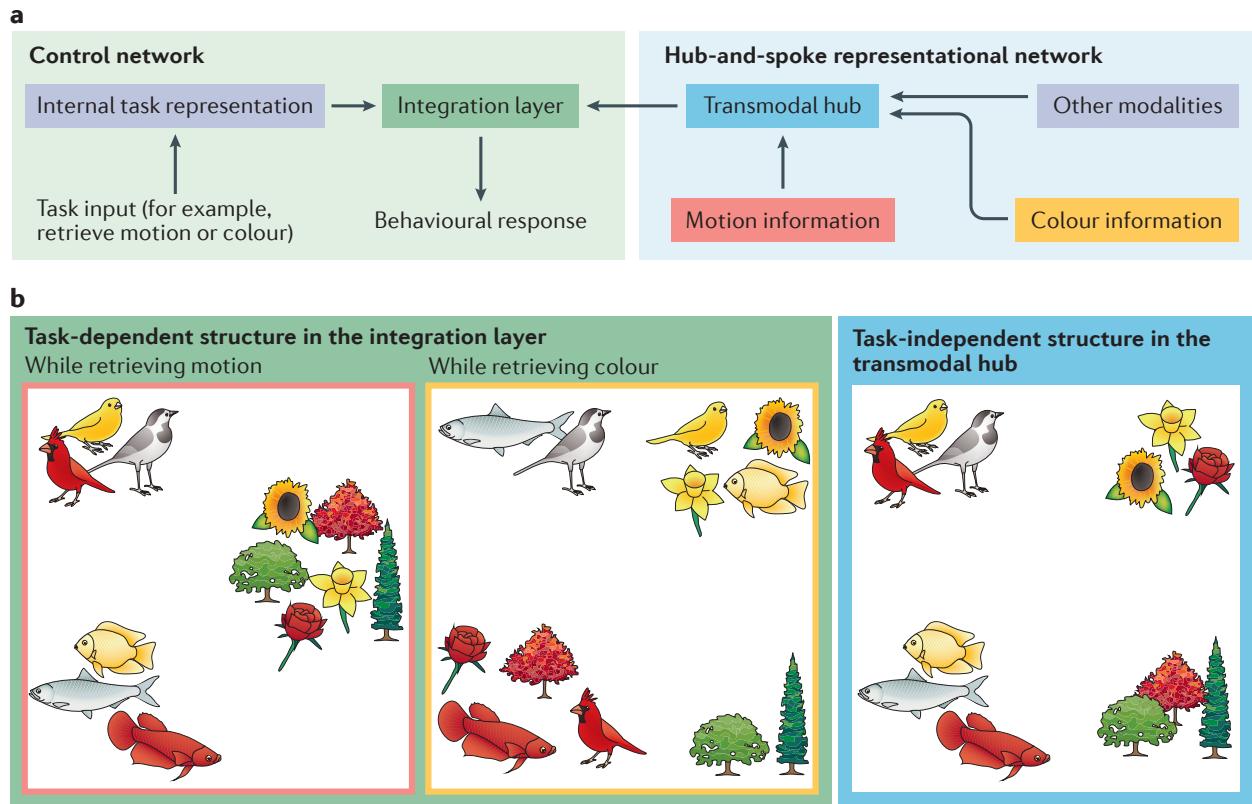


図 48 From ? Box 4

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ろうと考えている。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により汎用人工知能完成に向けた一里塚となると考える。

References

- 浅川伸一. (2001). 脳損傷とニューラルネットワークモデル—神経心理学への適用例—. 守一雄・都築 誉史・楠見 孝 (編)『コネクションニストモデルと心理学』(pp. 51–66). 北大路書房.
- 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.
- Bullinaria, J. A., & Chater, N. (1993). Double dissociation in artificial neural networks: Implications for neuropsychology. In *Proceedings of the Fifteenth Annual Conference of the Cognitive Science Society* (pp. 283–288). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Capitani, E., Laiaconna, M., Mahon, B. Z., & Caramazza, A. (2003). What are the facts of semantic category-specific deficits? a critical review of the clinical evidence. *Cognitive Neuropsychology*, 20, 213–261.
- Catani, M., & ffytche, D. H. (2005). The rises and falls of disconnection syndromes. *Brain*, 128, 2224–2239.

- 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.
- Close, J., & Pothos, E. M. (2012). “object categorization: Reversals and explanations of the basic-level advantage” (rogers & patterson, 2007): A simplicity account. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *65*, 1615–1632.
- Collins, A. M., & Quillian, M. R. (1969). Retrieval time from semantic memory. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, *8*, 240–247.
- Coltheart, M. (2008). *Cognitive neuropsychology* (No. 2).
- 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: Routledge.
- 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.
- Crutch, S. J., & Warrington, E. K. (2003). The selective impairment of fruit and vegetable knowledge:amultiple processing channels account of fine-grain category specificity. *Cognitive Neuropsychology*, *20*, 355–372.
- Dayan, P., & Abbott, L. F. (2001). *Theoretical neuroscience*. Cambridge, MA: MIT press.
- 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.
- Fodor, J. A. (1983). *The modularity of mind*. Cambridge, MA: MIT press.
- 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.
- Hart, J., John, Berndt, R. S., & Caramazza, A. (1985). Category-specific naming deficit following cerebral infarction. *Nature*, *316*, 439–440.
- He, K., Zhang, X., Ren, S., & Sun, J. (2015). Deep residual learning for image recognition. *arXiv:1512.03383*.
- 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. (201r). Triangulation of the neurocomputational architecture underpinning reading aloud. *PNAS*.
- Humphreys, G. W., & Forde, E. M. E. (2001). Hierarchies, similarity, and interactivity in object recognition: “category-specific” neuropsychological deficits. *Behavioral and Brain Sciences*, *24*, 453–509.
- Ijuin, M., Fushimi, T., Patterson, K., Sakuma, N., Tanaka, M., Tatsumi, I., Kondo, T., & Amano, S. (2000). A connectionist approach to naming disorders of japanese in dyslexic patients. In *Proceedings of the 6th International Conference of Spoken Language Processing* (pp. 32–37). Beijing, China.
- 伊集院睦雄・伏見貴夫・辰巳格. (2000). 漢字・仮名で書かれた単語・非単語の音読に関するトライアングル・モデル (2). 『失語症研究』, *20*, 127–135.
- Iwata, M. (1984). Kanji versus kana; neuropsychological correlates of the japanese writing system. *Trends in Neurosciences*, *7*, 290–293.
- 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.

- 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. (Synergies in experimental psychology, artificial intelligence and cognitive neuroscience)
- McClelland, J. L., & Rogers, T. T. (2003). The parallel distributed processing approach to semantic cognition. *Nature Neuroscience*, 4, 310–313.
- 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., Wierstra, D., Legg, S., & Hassabis, D. (2015). Human-level control through deep reinforcement learning. *Nature*, 518, 529–533.
- Patterson, K. (2007). The reign of typicality in semantic memory. *Philosophical Transactions of Royal Society. B*, 362, 813–821.
- Patterson, K., & Kay, J. (1982). Letter-by-letter reading: Psychological descriptions of a neurological syndrome. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology A: Human Experimental Psychology*, 411–441.
- 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. (2017). The neural and computational bases of semantic cognition. *Nature reviews Neuroscience*.
- Rogers, T. T., Lambon Ralph, M. A., Garrard, P., Bozeat, S., McClelland, J. L., Hodges, J., & Patterson, K. (2004). Structure and deterioration of semantic memory: A neuropsychological and computational investigation. *Psychological Review*, 111, 205–235.
- Rogers, T. T., & McClelland, J. L. (2004). *Semantic cognition: A parallel distributed processing approach*. Cambridge, MA: The MIT press.
- Rogers, T. T., & Patterson, K. (2007). Object categorization: Reversals and explanations of the basic-level advantage. *Journal of Experimental Psychology: General*, 136, 451–469.
- 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.

- Rumelhart, D. E., & Todd, P. M. (1993). *Learning and connectionist representations*. Cambridge, MA, US: The MIT Press.
- Sasanuma, S. (1980). Acquired dyslexia in Japanese: Clinical features and underlying mechanisms. In M. Coltheart, K. E. Patterson, & J. C. Marshall (Eds.), *Deep dyslexia*. Routledge and Kegan Paul, London.
- 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., Koch, C., & Churchland, P. S. (1988). Computational neuroscience. *Science*, 241, 1299–1306.
- 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.
- 杉下守弘. (1985). 『言語と脳』. 東京: 紀伊國屋書店.
- Sugishita, M., K. O., Kabe, S., & Yunoki, K. (1992). A critical appraisal of neuropsychological correlates of Japanese ideogram (kanji) and phonogram (kana) reading. *Brain*, 115, 1563–1568.
- 笛沼澄子. (1979). 『失語症とその治療』. 東京: 大修館書店.
- Taraban, R., & McClelland, J. L. (1987). Conspiracy effects in word pronunciation. *Journal of Memory and Language*, 26, 608–631.
- Teuber, H.-L. (1955). Physiological psychology. *Annual Review of Psychology*, 6, 267–296. (PMID: 14377367)
- 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.
- Tyler, L. K., & Moss, H. E. (2001). Concepts and categories: What is the evidence for neural specialisation? *Behavioral and Brain Sciences*, 24, 495–496.
- Ueno, T., Saito, S., Rogers, T. T., & Lambon Ralph, M. A. (2011). Lichtheim 2: Synthesizing aphasia and the neural basis of language in a neurocomputational model of the dual dorsal-ventral language pathways. *Neuron*, 72, 385–396.
- Warrington, E. K. (1975). The selective impairment of semantic memory. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 27, 635–657.
- Warrington, E. K., & McCarthy, R. A. (1987). Categories of knowledge further fractionations and an attempted integration. *Brain*, 110, 1273–1296.
- 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.
- ウイトゲンシュタインルートビッヒ. (2003). 『論理哲学論考』 (野矢茂樹, Trans.). 岩波書店. (Original work published 1921)
- 山鳥重. (1985). 『神経心理学入門』. 東京: 医学書院.
- 伏見貴夫・伊集院睦雄・辰巳格. (2000). 漢字・仮名で書かれた単語・非単語の音読に関するトライアングル・モデル(1). 『失語症研究』, 20, 115–126.

付録 A ブロードマンの地図

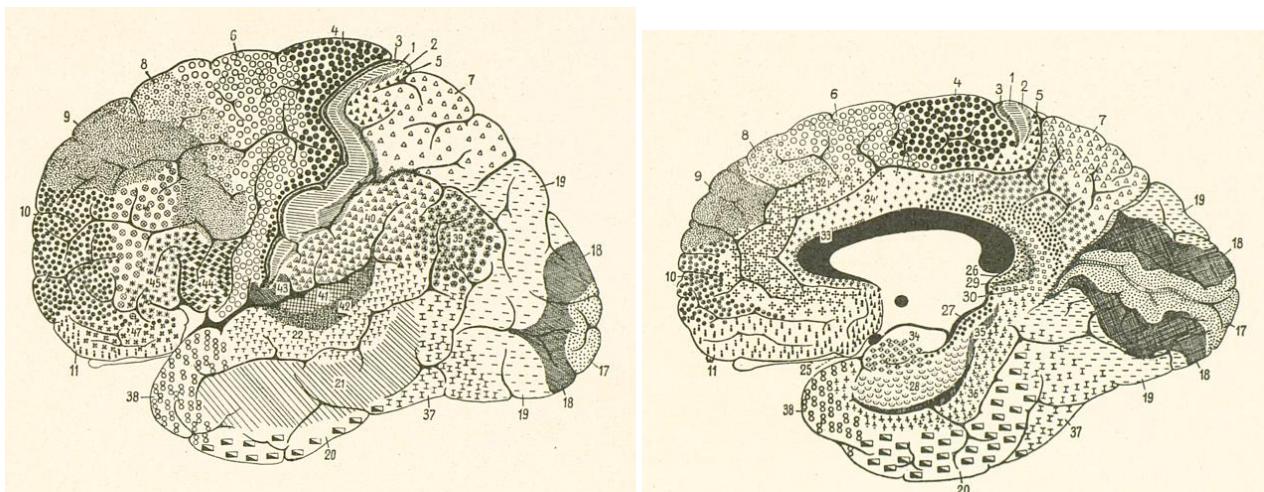


図 49 From (Brodmann, 1909, Page 131)

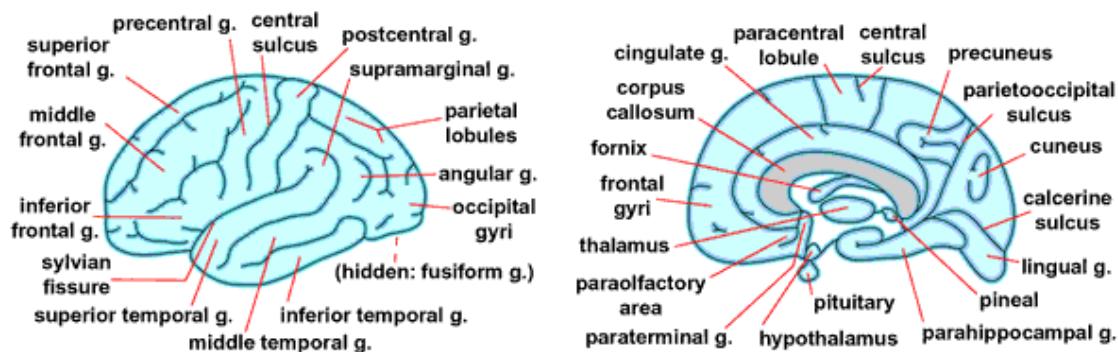


図 50 <https://spot.colorado.edu/~dubin/talks/brodmann/gyri.html>

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 Symbol	ARPAbet Symbol	Word	IPA Transcription	ARPAbet 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	['kætnip]	[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	['nʌtmɛg]	[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	['hɔrsrædɪʃ]	[h ao r s r ae d ih sh]
[ʔ]	[q]	uh-oh	[?ə?ou]	[q ah q ow]
[r]	[dx]	butter	['baɪtə]	[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 Symbol	ARPAbet Symbol	Word	IPA Transcription	ARPAbet 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	['hɛðə]	[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]	[ræ.'kun]	['ku.ɡə]	['si.vit]
ARPAbet	[jækəl]	[ræk u n]	[kuw 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

付録 C lichtheim2 Supplementary

Item-selection

Table. Word-frequency and number of words in each cell of the training set

		Accent types		
		Flat-words	Type-1 words	Type-2 words
High frequent words		Log-10 Word frequency		
	Mean	3.58	3.58	3.58
	SD	0.44	0.46	0.54
	Number of words	500	330	25
	Frequency per million	Mean: 33.5, SD: 65.1, Range: 4.2-628.5		
Low frequent words		Log-10 Word frequency		
	Mean	1.79	1.80	1.80
	SD	0.72	0.72	0.72
	Number of words	500	330	25
	Frequency per million	Mean: 0.7, SD: 0.9, Range: 0.0008-4.09		

Japanese non-homophone, tri-mora nouns were used in this study. Shorter words were avoided because a very high proportion of them are homophones. Any homophone items from the tri-mora corpus were removed from the corpus as were seven words that contained a loan sound (e.g., [v]). Tri-mora words are also a useful length in that they clearly represent examples of time-varying word stimuli (see Main Text). From this word cohort, we selected 1710 training words while taking into account the following two variables: *word-frequency* and *pitch accent types*. The details are described below.

Word-frequency was obtained from the NTT Japanese psycholinguistic database(Amano and Kondo, 1999; Amano and Kondo, 2000; Sakuma et al., 2005), derived from the *Asahi* newspaper over a 14 year duration. This large sample contains approximately 240 million words¹. Words that appeared just once (i.e., raw count word-frequency = 1) were excluded (404 words).

For tri-mora words in length, there are four types of pitch accent: *flat* words, *type-1* words, *type-2* words, and *type-3* words(Kindaichi, 2001). Type-3 words were excluded from this study as they were too rare to include. We selected high-frequent (HF) and low-frequent (LF) items from the remaining three accent categories so that the ratio of each accent type in the training set was identical to the entire NTT database (Ueno et al., In preparation). The table above summarizes the properties of the 1710 words included in the training set. The remaining 3511 tri-mora nouns in the database were used for testing generalization.

図 51 From Ueno et al. (2011), Supplementaly page 13

Representations

Twenty units in the input/output sound layers were dedicated to represent the distributed phonetic encoding of each mora and one unit was used to code the pitch accent types. Thus, a sequential presentation of three vectors (each, 21-bit) allowed us to represent every tri-mora word in the training corpus, uniquely. The specific coding are summarised below.

Table. Phonetic coding of each mora

Consonants

	Cons	App	Son	Cont	Strid	Nas	Voi	Asp	Glot	Ant	Dist	Lab	High	Low	Back
[k]	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
[k̥]	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0
[g]	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1
[g̥]	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0
[s]	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0
[ʃ]	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0
[t̪]	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0
[t̥]	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	0
[t̪̥]	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0
[t̥̥]	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	0
[ts]	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
[d̪]	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0
[n̪]	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0
[ɲ̪]	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0
[h̪]	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0
[ç̪]	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0
[ɸ̪]	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
[b̪]	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0
[b̥̪]	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0
[p̪]	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
[p̥̪]	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0
[m̪]	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0
[m̥̪]	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0
[j̪]	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0
[r̪]	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0
[r̥̪]	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0
[ɯ̪]	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	1
[N̪]	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1
[Q̪]	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0

Vowels	Voi	Rd	High	Low	Back
[a̪]	1	0	0	1	1
[e̪]	1	0	0	0	0
[i̪]	1	0	1	0	0
[o̪]	1	1	0	0	1
[ɯ̪]	1	0	1	0	1
No vowel	0	0	0	0	0

Abbreviations: Cons = consonantal; Apprx = approximant; Son = sonorant; Cont = continuant; Strid = strident; Nas = nasal; Voi = voiced; Asp = aspirated; Glot = glottalized; Rd = labial round; Ant = Coronal anterior; Dist = Coronal distributed; Lab = labial; High = Dorsal high; Low = Dorsal low; Back = Dorsal back

図 52 From Ueno et al. (2011), Supplemental page 12

Phonetic coding of each mora.

Each mora was represented as the concatenation of the corresponding consonant and vowel(Matsumura, 2006), each of which can be coded in terms of distinctive phonetic features. The table above (*phonetic coding of each mora*) summarises the distinctive phonetic features of each consonant and each vowel in Japanese (Halle and Clements, 1983). Note that, other languages use additional features to define each phoneme (e.g., long vowels) but these are redundant in Japanese and so were not included in these simulations. As a result, each Japanese consonant was represented by a vector of 15 distinctive features and every Japanese vowel by a vector of 5 bits.

Pitch accent coding of each mora.

An additional unit was dedicated to code the pitch accent pattern of each word. Specifically, this unit was turned ‘on’ when a high pitch accented mora was processed (see the table below). Thus, in the case of flat words, this unit was turned ‘on’ when the 2nd and the 3rd moras were presented to the input layer or when these two moras were generated from the sound output layer. The same was true to the 1st mora of type-1 words and to the 2nd mora of type-2 words, respectively.

Table. The ‘on’/‘off’ status of one of the units in the input/output sound layer as a function of mora position and accent types

	Accent types		
	Flat-words	Type-1 words	Type-2 words
1st mora	Off	On	Off
2nd mora	On	Off	On
3rd mora	On	Off	Off

Semantic representations

Semantic representations were abstract vector patterns of 50 bits. Each exemplar pattern was generated from 50 prototype patterns (Plaut and Kello, 1999; Rogers et al., 2004) in the following way. Each ‘prototype’ patterns were created by randomly setting 20/50 units to a value of 1 and 40 exemplars were generated from each prototype by randomly setting 10/20 ‘on’ units to a value of 0. This procedure ensured that the 40 exemplars within the same prototype were relatively similar with each other (i.e., shorter Euclidian distance in the 50-bit multi-dimensional vector space) and relatively dissimilar with the exemplars from other prototypes (i.e., longer Euclidian distance). The resultant 2000 exemplars were checked to ensure that every pattern was different in the ‘on’/‘off’ status of at least four units to all the other semantic patterns. These resultant semantic patterns were randomly assigned to one of the 1710 auditory-motor patterns to ensure the arbitrary mapping between the two representations of each word.

図 53 From Ueno et al. (2011), Supplemental page 13

付録 D Rosch et al. (1976) に用いられた刺激語リスト

TABLE I
THE NINE TAXONOMIES USED AS STIMULI

Superordinate	Basic level	Subordinates	
Nonbiological taxonomies			
Musical instrument	Guitar	Folk guitar	Classical guitar
	Piano	Grand piano	Upright piano
	Drum	Kettle drum	Base drum
Fruit ^a	Apple	Delicious apple	Mackintosh apple
	Peach	Freestone peach	Cling peach
	Grapes	Concord grapes	Green seedless grapes
Tool	Hammer	Ball-peen hammer	Claw hammer
	Saw	Hack hand saw	Cross-cutting hand saw
	Screwdriver	Phillips screwdriver	Regular screwdriver
Clothing	Pants	Levis	Double knit pants
	Socks	Knee socks	Ankle socks
	Shirt	Dress shirt	Knit shirt
Furniture	Table	Kitchen table	Dining room table
	Lamp	Floor lamp	Desk lamp
	Chair	Kitchen chair	Living room chair
Vehicle	Car	Sports car	Four door sedan car
	Bus	City bus	Cross country bus
	Truck	Pick up truck	Tractor-trailer truck
Biological taxonomies			
Tree	Maple	Silver maple	Sugar maple
	Birch	River birch	White birch
	Oak	White oak	Red oak
Fish	Bass	Sea bass	Striped bass
	Trout	Rainbow trout	Steelhead trout
	Salmon	Blueback salmon	Chinook salmon
Bird	Cardinal	Easter cardinal	Grey tailed cardinal
	Eagle	Bald eagle	Golden eagle
	Sparrow	Song sparrow	Field sparrow

図 54 From Rosch et al. (1976) Tab. 1

付録 E Hinton & Shallice (1991) に用いられた刺激

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 55 From 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
4	main-shape-2D	37	above-waist
5	main-shape-3D	38	mammal
6	cross-section-rectangular	39	wild
7	cross-section-circular	40	fierce
8	has-legs	41	does-fly
9	white	42	does-swim
10	brown	43	does-run
11	green	44	living
12	color-other-strong	45	carnivore
13	varied-colors	46	madeof-metal
14	transparent	47	madeof-wood
15	dark	48	madeof-liquid
16	hard	49	madeof-other-nonliving
17	soft	50	gotfrom-plants
18	sweet	51	gotfrom-animals
19	tastes-strong	52	pleasant
20	moves	53	unpleasant
21	indoors	54	man-made
22	in-kitchen	55	container
23	in-bedroom	56	for-cooking
24	in-living-room	57	for-eating-drinking
25	on-ground	58	for-other
26	on-surface	59	used-alone
27	otherwise-supported	60	for-breakfast
28	in-country	61	for-lunch-dinner
29	found-woods	62	for-snack
30	found-near-sea	63	for-drink
31	found-near-streams	64	particularly-assoc-child
32	found-mountains	65	particularly-assoc-adult
33	found-on-farms	66	used-for-recreation
		67	human
		68	component

Note. Directly interconnected sememes occur within the same section.

図 56 From Hinton & Shallice (1991) Tab. B1

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
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
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	62
Pop	2	5	7	14	18	19	20	21	22	24	26	48	52	54	57	59	62	63
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	
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 57 From Hinton & Shallice (1991) Tab. B2