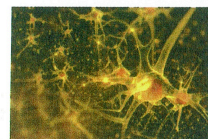
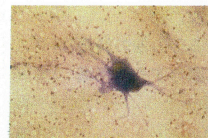


るようになった。1960年代に、高峰と上中のアドレナリン発見はAble研究室訪問の前であったことや、Ableの方法ではアドレナリン作用をもつ物質を結晶化できないことがわかった。ヨーロッパでは、高峰らの業績が認められ、スプラレニン(Adrenalin)は商標として用いられることはあっても、この物質そのものは「アドレナリン」と呼ぶ。しかし、米国では「エピネフリン」が今も使用されている。一方、日本では、生理学や生化学の分野や一般用語としては、アドレナリンという名称が用いられていたのに対し、「日本薬局方」ではこれまで「エピネフリン」が正式名称であったが、2006年3月に改定され、「アドレナリン」が正式な名称となった。

# 目 次



<b>1章 序 論</b>	(中村克樹) 1
行動神経科学の基礎	3
研究の目指すところ	4
行動神経科学の起源	4
自然淘汰と進化	10
機能主義と形質の遺伝	10
ヒトの脳の進化	12
ヒトや動物を対象とした研究における倫理的問題	15
動物を対象とした研究	15
ヒトを対象とした研究	17
神経科学の未来：職業と学習方略	18
神経科学を活かした職業	18
学 習 方 略	19

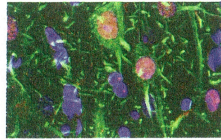


<b>2章 神経系の細胞の構造と機能</b>	25
	(日置寛之)
神経系の細胞	27
神経系：概説	27
ニューロン	28
支持細胞	33
血液脳関門	36
ニューロン内の情報伝達	38
神経情報伝達：概説	38

軸索の電位	39
膜電位	40
活動電位	42
活動電位の伝導	43
ニューロン間の情報伝達	46
シナプスの構造	47
神経伝達物質の放出	48
受容体の活性化	49
シナプス後電位	51
シナプス後電位の影響：神経統合	52
シナプス後電位の終了	53
自己受容体	54
ほかのタイプのシナプス	54
非シナプス性の化学的情報伝達	55

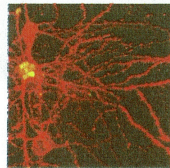


<b>3章 神経系の構造</b>	(佐藤暢哉) 59
神経系の基本的特徴	60
解剖学的方向	61
髄膜と脳室系	63
中枢神経系の構造と機能	66
前脳：終脳	66
前脳：間脳	71
中脳：中脳	73
菱脳：後脳と髄脳	75
脊 髄	75
末梢神経系の構造と機能	77
脳 神 経	77
脊 髄 神 経	77
自律神経系	78



4章 精神薬理学と神経伝達物質 83 (中村克樹)

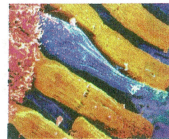
精神薬理学の原理 85
精神薬理学の概要 85
薬物動態 86
薬物の有効性 88
繰り返し投与の影響 89
ブラシーボ効果 90
薬物の作用部位 92
神経伝達物質の生成に対する作用 92
神経伝達物質の貯蔵と放出に対する作用 93
受容体に対する作用 94
神経伝達物質の再取込みや不活化に対する作用 94
神経伝達物質および神経調節物質 96
アミノ酸 97
アセチルコリン(ACh) 99
モノアミン 102
ペプチド 109
脂質 111



5章 研究方法・研究戦略 115 (井上謙一)

実験的切除 117
脳損傷が行動に及ぼす影響の評価 117
脳損傷の作製 118
脳定位手術 119
組織学的方法 121
神経結合のトレーシング 123
生きているヒトの脳構造の研究 127
神経活動の記録と刺激 132
神経活動の記録 132

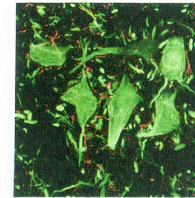
脳の代謝やシナプスの活動の記録 135
ニューロン活動の操作 137
神経化学的研究法 141
特定の神経化学物質を生成するニューロンの同定 141
特定の受容体の局在の同定 142
脳内で分泌される化学物質の計測 143
遺伝学的方法 145
双生児研究 145
養子研究 145
ゲノム研究 146
標的突然変異 146
アンチセンスオリゴヌクレオチド 147
ゲノム編集 147



6章 視覚 (稲垣未来男) 151

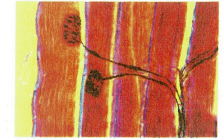
眼球 153
感覚と知覚についての序説 153
刺激：光 154
眼球的解剖 154
視細胞 156
情報変換 157
中心視と周辺視 158
視覚経路の概要 159
網膜から始まるその他の経路 160
視覚情報処理に関する脳領域 162
外側膝状体 162
一次視覚野 162
高次視覚野 165
色の知覚 167
網膜神経節細胞の役割 167
網膜の役割 167
一次視覚野と高次視覚野の役割 171
形の知覚 175
一次視覚野の役割 175
高次視覚野の役割 176
空間位置の知覚 184
網膜の役割 184
一次視覚野と高次視覚野の役割 184

方位と動きの知覚 187
一次視覚野の役割 187
高次視覚野の役割 187



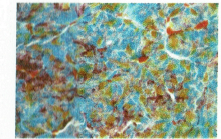
7章 聴覚, 身体感覚, 化学感覚 193 (伊藤浩介)

聴覚 195
刺激：音 195
耳の解剖 195
有毛細胞による聴覚情報の変換 197
聴覚経路 198
音の高さの知覚 201
音の大きさの知覚 203
音色の知覚 203
空間位置の知覚 204
複雑な音の知覚 207
音楽の知覚 209
前庭系 212
前庭器官の解剖 212
前庭経路 214
体性感覚 216
刺激 216
皮膚の解剖と受容器官 216
皮膚刺激の知覚 217
体性感覚経路 220
痛みの知覚 222
味覚 228
刺激 228
味蕾と味細胞の解剖 229
味覚情報の知覚 230
味覚経路 231
嗅覚 233
刺激および嗅覚器の解剖 233
嗅覚情報の変換 234
さまざまなにおいの知覚 235



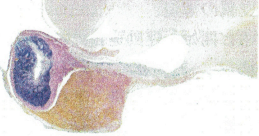
8章 運動の制御 239 (西村幸男・中山義久)

骨格筋 241
解剖 241
筋収縮の物理的基盤 242
筋からの感覚フィードバック 243
脊髄による運動の制御 245
単シナプス性伸張反射 245
γ運動系 247
多シナプス性反射 247
脳による運動の制御 249
運動関連皮質の構造 249
運動の計画と開始：運動連合野の役割 251
皮質下の構造 254
大脳皮質による運動の制御：下行路 260
複雑な運動行動 263
運動の模倣と理解：ミラーニューロンシステムの役割 263
到達運動と把握運動の制御：頭頂葉の役割 265
巧緻運動の障害：失行と統合運動障害 267
四肢の失行 267
構成失行 268
統合運動障害 269

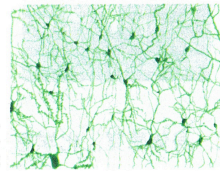


9章 睡眠と生体リズム (山中章弘) 271

睡眠とは 273
睡眠ステージ 273
睡眠中の脳活動 276
なぜ眠るのか 278
睡眠の機能 278
徐波睡眠の機能 279
レム睡眠の機能 281

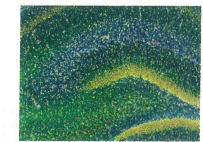
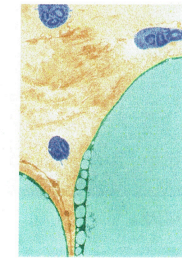
睡眠と学習	281
睡眠と覚醒の生理的機構	284
睡眠の神経制御	284
覚醒の神経制御	285
睡眠・覚醒の状態移行の神経制御	290
レム睡眠移行の神経制御	293
睡眠障害	297
不眠症	297
ナルコレプシー	297
レム睡眠行動障害	299
徐波睡眠に関連する問題	300
生物時計	301
サーカディアンリズムとツァイトgeber	301
視交叉上核	302
季節性リズムの制御：松果体とメラトニン	306
サーカディアンリズムの変化：交代勤務と時差ぼけ	307
	
<b>10章 生殖行動と親行動</b>	<b>311</b>
(花沢明俊)	
性発達	313
配偶子形成と受精	313
生殖器の発達	314
性成熟	316
ホルモンとフェロモンによる性行動の制御	320
女性生殖周期のホルモン制御	320
動物の性行動のホルモン制御	321
アンドロゲンの行動に対する形成作用：	
男性化と脱女性化	322
ヒトの性行動	323
フェロモンの作用	326
性行動の神経制御	330
オスの性行動	330
メスの性行動	332
パートナーとの絆形成	333
性的志向性	336
ホルモンの活性化作用および形成作用	336
ステロイドホルモンの役割	337
性的志向性と脳	338

性的志向性における出生前環境の役割	339
遺伝と性的志向性	340
親行動	342
げっ歯類の母性行動	342
母性行動のホルモン制御	343
母性行動の神経制御	344
父性行動の神経制御	346



**11章 情動** (倉岡康治) **349**

恐怖	351
情動反応の要素	351
動物を対象とした研究	351
ヒトを対象とした研究	355
攻撃	357
動物を対象とした研究	357
ヒトを対象とした研究	358
攻撃行動のホルモン制御	359
衝動制御	366
腹内側前頭野の役割	366
脳の発達と衝動制御	368
セロトニンと衝動制御	368
道徳的意思決定	369
情動コミュニケーション	372
表情による情動表出：生得的反応	372
情動コミュニケーションの神経基盤：認識	373
情動コミュニケーションの神経基盤：表出	380
感情	384
James-Lange 説	385
情動表出からのフィードバック	386



**13章 学習と記憶** (松本正幸) **433**

学習と記憶の概要	436
学習の種類	436
記憶の種類	440
刺激-反応学習	442
古典的条件づけ	442
オペラント条件づけ	444
運動学習	450
大脳皮質の役割	450
大脳基底核の役割	450
知覚学習	451
大脳皮質の役割	451
知覚情報の短期記憶への保持	452
関係学習	454
海馬の役割	455
大脳皮質の役割	459
健忘	460
海馬の役割	461
刺激-反応学習	463
運動学習	463
知覚学習	464
関係学習	464
長期増強	468
長期増強の誘発	469
NMDA 受容体の役割	470
AMPA 受容体の役割	471
シナプス変化の役割	472

**12章 摂食行動** (齋藤慈子) **389**

飲水行動	391
生理的調節機構	391
渇きの2つのタイプ	392
渇きの神経機構	395
代謝とは何か	397
短期的貯蔵所	398
長期的貯蔵所	398
空腹期	399
吸収期	399
何が食事を開始させるのか	401
環境要因	401
胃要因	401
代謝信号	402
何が食事をやめさせるのか	405
短期的な満腹	405
環境要因	405
感覚要因	406
胃要因	407
腸要因	407
肝臓要因	408
インシュリン	408
脂肪組織要因	409
脳内機構	411
脳幹	411
視床下部	411
肥満	418
考えられる原因	419
治療	422
摂食障害	426
考えられる原因	428
治療	430



14章 コミュニケーション 479

(中村克樹)

言語の生成と理解：脳内機構 481

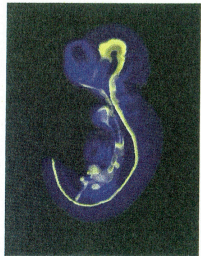
- 一側優位化 481
- 脳における言語の生成と理解 483
- バイリンガル能力 484
- プロソディ(韻律) 486
- 音声認識 487

言語の生成と理解の障害 488

- 言語の生成の障害：Broca失語 488
- 言語の理解の障害：Wernicke失語 491
- 伝導失語 497
- 聾者の失語 499
- 吃音 500

読字と書字の障害 503

- 純粹失読 503
- 読字の理解に向けて 505
- 書字の理解に向けて 512



15章 発達段階の神経系 517

(中村徳子)

神経系の発達 518

- 脳の発達の概要 518
- 出生前の脳の発達 519

出生後の脳の発達 523

発達障害 525

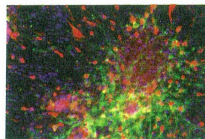
- 有毒化学物質 525
- 先天性代謝異常症 526
- Down症 527

自閉スペクトラム症 529

- 症状 530
- 遺伝要因と環境要因 530
- 脳の変化 531

注意欠如・多動症 535

- 症状 535
- 遺伝要因と環境要因 536
- 脳の変化 536



16章 神経疾患 (鴻池業保) 541

腫瘍と発作 542

- 腫瘍 543
- 発作 545

脳血管障害 549

- 原因 549
- 治療 550

外傷性脳損傷 555

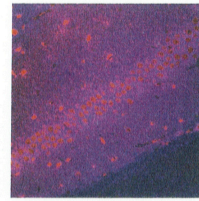
- 原因 555
- 治療 556

変性疾患 557

- 感染性海綿状脳症 557
- Parkinson病 559
- Huntington病 565
- 筋萎縮性側索硬化症 567
- 多発性硬化症 568
- 認知症 569
- Korsakoff症候群 574

感染症による疾患 576

- 脳炎 576
- 髄膜炎 577



17章 統合失調症と感情障害 579

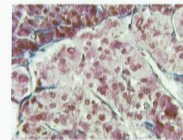
(功刀 浩・橋本みどり)

統合失調症 580

- 解説 581
- 遺伝要因 582
- 環境要因 584
- 統合失調症における異常 588
- 中脳辺縁系ドーパミン経路：陽性症状 591
- 中脳皮質系ドーパミン経路：陰性症状と認知症状 593

感情障害 598

- 解説 598
- 遺伝要因 599
- 生物学的治療 599
- 前頭葉の役割 604
- モノアミン仮説 606
- セロトニントランスポーターの役割 607
- ニューロン新生の役割 608
- サーカディアンリズムの役割 608



18章 ストレスと不安障害 615

(関口 敦)

ストレス 616

- ストレス反応の生理 617
- 長期間のストレスが健康に及ぼす影響 618
- ストレスが脳に及ぼす影響 620
- 精神神経免疫学 623

心的外傷後ストレス障害 627

- 症状 627

遺伝要因と環境要因 627

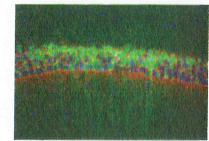
- 脳の変化 628
- 治療 629

不安障害 631

- 症状 631
- 遺伝要因と環境要因 631
- 脳の変化 632
- 治療 633

強迫性障害 635

- 症状 635
- 遺伝要因と環境要因 636
- 脳の変化 637
- 治療 637



19章 薬物濫用 (藤本 淳) 641

薬物濫用に共通の特徴 644

- 正の強化 645
- 負の強化 651

遺伝要因 654

- アルコール 655
- ニコチン 655
- 覚醒剤 655

濫用薬物に関連する脳内機構 657

- オピエート 657
- 覚醒剤 659
- ニコチン 660
- アルコール 664
- 大麻 667

薬物濫用の治療 670

- オピエート 670
- 覚醒剤 672
- ニコチン 672
- アルコール 673
- 脳刺激法 674

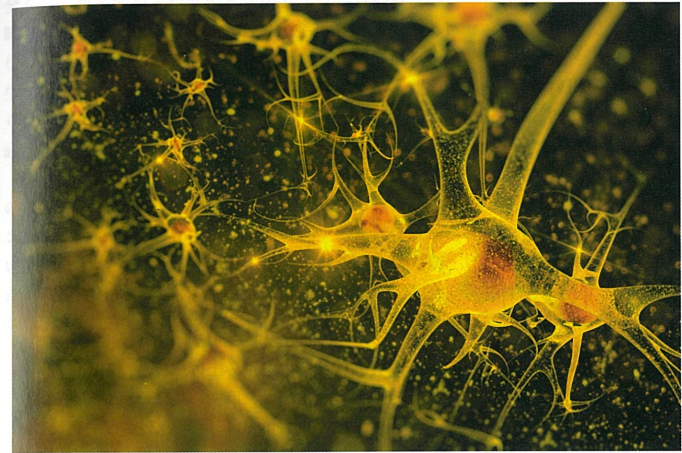
用語解説 677

参考文献 705

索引 759

# Chapter 1

## 序 論



Vfistudio/Shutterstock

ヒトの神経系には数十億個ものニューロンがある。

### 目次

行動神経科学の基礎  
研究の目指すところ  
行動神経科学の起源

自然淘汰と進化  
機能主義と形質の遺伝  
ヒトの脳の進化

ヒトや動物を対象とした研究における倫理的問題  
動物を対象とした研究  
ヒトを対象とした研究

神経科学の未来：職業と学習方略  
神経科学を活かした職業  
学習方略

## 研究の目指すところ

### 1.1 行動神経科学における般化と還元法の役割を比較せよ

すべての科学者が目指しているのは、研究している現象を説明することである。しかし、説明する explain というのはどういう意味だろうか。科学的な説明方法には般化と還元法の2つがある。般化 generalization では、実験から導き出した一般法則の例として現象を説明する。還元法 reduction では、複雑な現象を単純な事柄で説明する。

行動神経科学者は、行動を制御している生理過程を研究して行動を説明しようとする。しかし、単に還元主義者であってはいけない。行動を観察し、その行動と同時に起こる生理学的な現象に関連づけるだけでは不十分である。その行動の目的を理解しなければならない。たとえば、マウスは、ほかの多くのほ乳類と同じように巣をつくる。行動学的な観察によれば、マウスは2つの状況下で巣をつくることが知られている。気温が下がったときと妊娠したときである。妊娠していないマウスは涼しくなったときにだけ巣をつくるが、妊娠したマウスは気温とは関係なく巣をつくる。巣をつくるという同じ行動が異なる理由で起こるのである。巣をつくる行為は2つの異なる生理学的機構で制御されていることになる。巣をつくる行為は、体温制御の機構と関連した行動として研究することもできるし、親行動との関係でも研究できる。どちらの場合も、巣づくりでマウスが行う運動は同じ脳機構が制御しているが、この機構は異なる脳領域の情報によって活性化される。1つは体温検知器からの情報を受け取る領域で、もう1つは妊娠中に分泌されるホルモンの作用を受ける領域である。繰り返すが、行動を観察し、その行動を同時に起こる生理学的な現象と関連づけるだけでは不十分である。その行動の総合的な目的を理解しなければならない。

生理学的機構は、ときには言語、記憶、気分といった心理学的過程も明らかにする。たとえば、脳の特定の領域の損傷によって、ヒトの言語機能にきわめて特異的な障害を生じる。こうした障害の性質をいくつも調べることで、言語機能が脳でどのように構成されているかを知ることができる。たとえば、音声の分析に重要な脳の領域の損傷は、書字にも障害を引き起こす。このことは、発話を認識する能力と書字能力は、関連する脳の機構に依存していることを示唆している。別の脳の領域の損傷は、見慣れない単語を発音することに著しい障害を引き起こすが、すでに見慣れた

単語を読むことには何の障害も起こさない。このことは、読字の理解には2つの処理過程があることを示唆する。1つは発音に関連した読字処理であり、もう1つは単語全体の視覚認知にかかわる読字処理である。

実際、行動神経科学の研究には般化と還元法という2つの説明形態がある。研究のアイデアは、行動に関する心理学的般化と生理学的機構の両方の知識によって刺激される。したがって、優秀な行動神経科学者は行動学と生理学の優れた専門家でなければならない。

## 行動神経科学の起源

### 1.2 さまざまな科学の分野から行動神経科学への歴史的および現代における貢献をまとめよ

ここでは、今日の行動神経科学分野へ貢献した過去の発見の足跡をたどり、私たちの、こころ、脳、行動への理解を深める。

#### 古代からの貢献：心臓と脳の役割

行動の生理学的研究(推論といってもよい)の起源は古代にさかのぼる。紀元前1700年頃のパピルス巻物には頭部外傷に対する手術の記録と現存する最も古い脳、脳脊髄液、髄膜、頭蓋骨の記述がある(Feldman and Goodrich, 1999)。

心臓が動いていることは生きている証であり、情動によって心臓はより激しく拍動するので、エジプト、インド、中国を含む多くの古代文明は、心臓を思考と情動の座と考えた。古代ギリシアでも同様であったが、Hippocrates(460-370 B.C.E.)は、この役割は脳にあるべきだと結論づけた。

ギリシアの学者のすべてがHippocratesに同意したわけではない。Aristotle(384-322 B.C.E.)はこの考えに同意せず、脳は心臓の情熱を冷ますために働いていると考えた。しかしGalen(130-200 C.E.)は、仔ウシ、ヒツジ、ブタ、ネコ、イヌ、イタチ、サル、類人猿の脳を解剖して研究し(Finger, 1994)、Aristotleの脳の考え方は「おかしいと結論した。なぜなら、心臓の情熱を冷ますためであるなら自然は脳を心臓からそんな遠くの場所に位置させないだろうし、(中略)すべての感覚のもと(感覚神経)を脳にくっつけないだろう。」(Galen, 1968 翻訳, p.387) (図 1.1)。

#### 哲学からの貢献：こころと身体の問題

歴史の最初から、ヒトは自分たちに生命を吹き込む何か触れることのできないもの、つまり、こころ mind, 魂 soul, 精神 spirit が自分たちの中にあると信

図 1.1 Galen(130-200 C.E.)



Photo Researchers/Science History Images/Alamy Stock Photo

じてきた。私たちはそれぞれが物理的な肉体をもって、筋がそれを動かし、眼や耳といった感覚器官によって私たちを取り巻く外界の情報を知覚する。私たちの肉体の中では、神経系が中心的な役割を果たし、感覚器官から情報を受け取り、筋の動きを制御している。しかし、こころはどのような役割を演じているのだろうか。こころは神経系を制御 control しているのだろうか。こころは神経系の一部 part of なのだろうか。身体のほかの部分と同じようにそれは物理的なもので、触れることができるものなのだろうか。あるいは、精神は隠されたままなのだろうか。

この難問は、歴史的にはいわゆるこころと身体の間

題 mind-body question として知られている。哲学者が何世紀にもわたって、この問題に答えようとしてきたが、最近になって、科学者がこの問題に取り組み始めた。基本的にこの問題に対して私たちは、二元論と一元論という2つの異なる取組みを行ってきた。二元論 dualism は現実の二面性を信じる立場である。つまり、こころと身体は別のもので、身体はごくふつうの物質であるのに、こころは物質ではないとする考えである。それに対して一元論 monism はこの世界のすべてのものは物質とエネルギーから成り立っていて、こころは神経系の働きにより生み出される現象だと信じる立場である(図 1.2)。

フランスの哲学者である René Descartes(1596-1650)の行動の制御におけるこころと脳の役割に関する推論は、近代史における行動神経科学研究の出発点となった。Descartesにとって動物は機械的装置であって、その行動は環境刺激によって制御されていると考えた。ヒトの身体に対する考えもほとんど同じで、つまり機械である。Descartesの観察によれば、身体の動きは自動的で非随意的である。たとえば、指が熱い物に触れると、即座に腕を引っ込める。この反応にはこころの関与は必要ではなく、自動的に起こる。Descartesはこれらの反応を反射 reflex と呼んだ(図 1.3)。

当時のほとんどの哲学者と同様に Descartes は二元論者であり、一人ひとりがヒトにしかない特質、すなわち、こころをもっていて、こころは現実世界の法則に従わないと信じていた。しかし、彼の考えは1つの

図 1.2 こころと身体の問題

一元論と二元論は、こころと身体の問題に対する2つの答えをもっている。

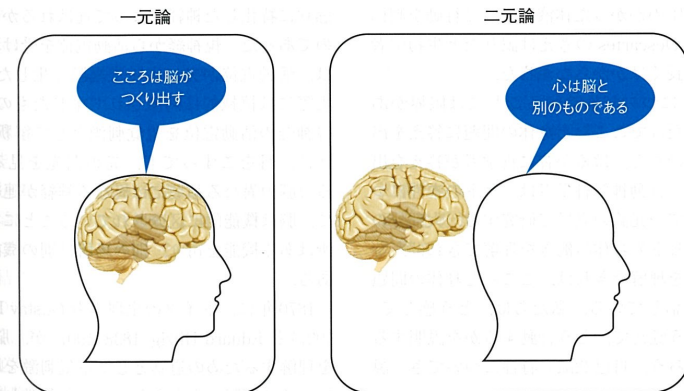
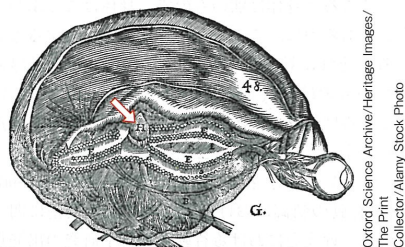


図 1.3 Descartes の仮説

Descartes は「魂」(私たちが今こう呼んでいるものは松果体に影響を与えることで筋の運動を制御している)と信じていた。彼の考えによれば、眼が視覚情報を脳に送り、脳では魂がその情報を観察する。魂が行動することを決めると、松果体(訳注: 図中の白矢印)が傾き、圧力のかかった体液が神経を通じて適当な筋へ流れる。



Oxford Science Archive/Heritage Images/  
The Print Collector/Alamy Stock Photo

重要なポイントではかの哲学者と異なっていた。彼がはじめて、ヒトのこのところとその単なる物理的な入れ物である脳との間につながりがあることを示唆したのだ。Descartes は、ここが身体の動きを制御している、逆に身体はその感覚器官を通じて環境の中で何が起きているのかに関する情報をここに提供していると信じていた。また、脳幹の一番上に位置して左右の大脳半球に埋もれている小さな器官である松果体でこの相互作用が起こっていると仮説をたてた。脳には体液で満たされた中空の空間(脳室 ventricle)があることに注目して、この体液に圧力が加えられていると仮定した。彼の仮説によれば、ここが行動を起こすと決定すると、松果体が小さなジョイスティックのように特定の方向に傾いて、体液が脳から特定の神経に流れ出る。そして、この体液の流れが筋をふくませ、その結果、動きが生じるのである。この節のあとで学ぶが、脳が圧のかかった体液によって行動を制御しているという Descartes の考えは誤りだと生物学者が証明するまで長くはかからなかった。

こころの特性について推論することには限界がある。もし考えるだけでこころと身体の問題に答えを出すことができるのなら、はるか昔に哲学者が答えを出していただろう。行動神経科学者は、ヒトの本性について実験を用いて一元論の立場で研究する。大部分の神経科学者は、ヒトの身体の動きを理解できれば、特に神経系の働きを理解できれば、こころと身体の問題は解決できると信じている。私たちは、どう感じて、どう考えて、どう覚えて、どう行動するかを説明することができるだろう。自己意識の特性についてさえ説明できるだろう。

### 生理学からの貢献： 神経系における電気的情報伝達

イタリアの生理学者 Luigi Galvani(1737-1798)は、カエルの神経を電気刺激すると、その神経についての筋が収縮することを発見した。神経と筋だけを体から取り出しても筋は収縮するので、筋が収縮する能力、神経が電気情報を筋に伝える能力は、それぞれの組織自体にそなわっている。Descartes の考えに反して、脳が神経を通して圧力で体液を送って筋をふくらませているのではなかった。Galvani の研究をきっかけとして、神経による情報伝達の研究、それによって筋が収縮するしくみの研究が始まった。実験生理学の発展における最も重要な人物の1人は、ドイツの生理学者 Johannes Müller(1801-1858)である。Müller は実験を生理学の分野にもち込んだ。それまでは、ほとんどの自然科学者は観察と分類だけを行っていた。観察と分類は必須だが、Müller は、体の働きを理解するためには、動物の体から器官を取り除いたり分離したりして、さまざまな化学物質に対する器官の反応を調べ、さらにいろいろ条件を変えたときに器官がどのように反応するかを実験的に調べなければならないと強調した。行動の生理学研究に対する彼の最も重要な貢献は、**特殊神経エネルギー説 doctrine of specific nerve energy** を提唱したことである。どの神経をとってみても、運ばれる基本的な信号(活動電位、電気インパルス)は同じであるが、どの神経が活動電位を伝えるかによって、異なる知覚が生じる。たとえば、視神経によって運ばれる活動電位は視覚イメージを生み、聴神経によって運ばれる活動電位は音の感覚を生み出す。なぜ同じ活動電位から異なる感覚が生じるのだろうか。

Müller の答えは、同じ活動電位であっても、ある感覚に特化した神経によって運ばれるから、というものであった。視神経から活動電位を受け取る脳の領域は、活動電位が光によって網膜で生じたのではなく、実際には機械的に刺激されて生じたものであっても、視神経の活動電位を視覚刺激として解釈する。(たとえば、目をこすっても、光の閃光を見ることができると結論づけた。この領域は Broca 野として知られるようになった(図 1.4)。その後、ほかの外科医たちは彼の結論を支持する結果を得た。14章で学ぶように、脳の特定の1領域に発話の機能が局在しているのではなく、発話には脳全体で組織された多くの異なる機能が必要である。それでもなお実験的切除法は、ヒトと動物の脳の理解のためにいまだ重要な研究

1870年に、ドイツの生理学者 Gustav Fritsch(1838-1927)と Eduard Hitzig(1838-1907)が、脳の生理機能を理解するための道具として電気刺激を用いた。彼らは、イヌの脳の表面を弱い電流で刺激して、その効果

を観察した。その結果、脳の特定の場所の異なる部位を刺激すると、反対側の身体の特定の筋が収縮することを発見した。この場所は一次運動野 primary motor cortex(MI)と呼ばれており、この領域のニューロンは、筋収縮を引き起こす脊髄の運動ニューロンに直接つながっていることがわかっている。また、脳のほかの領域が一次運動野とつながっていて、行動を制御していることもわかっている。たとえば、発話に関与する脳領域は、私たちが話す際に使う唇、舌、のどの筋を制御している一次運動野とつながっている。

ドイツの物理学者で生理学者の Hermann von Helmholtz(1821-1894)は、数々の生理学的過程に関する研究を行った。彼は神経における伝導速度を計測した最初の科学者でもある。それまで、神経伝導は電線の中の電気伝導と同じようにはば光の速さで伝わりと信じられていた。しかし Helmholtz は、神経伝導速度はもともと遅くて1秒間に27.4 m程度でしかないことを発見した。この発見により、2章で学ぶように、神経伝導が単純な電気現象でないことが明らかになった。

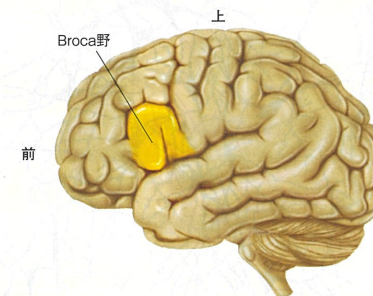
### 解剖学からの貢献：神経系の構造

Müller の実験の必要性の主張と、特殊神経エネルギー説からの論理的推論によって、研究者の間に脳を直接実験的に調べる機運が生まれた。フランスの生理学者 Pierre Flourens(1794-1867)は、実際に脳を実験的に調べた。Flourens は、動物の脳のいろいろな部分を切除して、その行動を観察した。動物ができなくなったことを観察することで、切除した脳の機能を推測した。このような研究は**実験的切除 experimental ablation**と呼ばれる。Flourens は、心拍数と呼吸数、目的のある運動、視覚と聴覚の反射を制御する脳の領域を発見したと報告した。

Flourens の研究からほどなくして、フランスの外科医 Paul Broca(1824-1880)は実験的切除をヒトの脳に適用した。もちろん意図的にヒトの脳の一部を切除するのではなく、脳卒中によって脳に損傷を受けたヒトの行動を観察したのである。1861年に、脳卒中によって話す能力を失った患者の脳の剖検を行い、左大脳皮質の前方部にある領域が発話に必要な機能を司っていると結論づけた。この領域は Broca 野として知られるようになった(図 1.4)。その後、ほかの外科医たちは彼の結論を支持する結果を得た。14章で学ぶように、脳の特定の1領域に発話の機能が局在しているのではなく、発話には脳全体で組織された多くの異なる機能が必要である。それでもなお実験的切除法は、ヒトと動物の脳の理解のためにいまだ重要な研究

図 1.4 Broca 野

この脳領域はフランスの外科医 Paul Broca にちなんで名づけられた。Broca は左脳のある場所が損傷を受けると話す能力が障害されることを発見した。



手法である。

チェコの生理学者 Jan Purkinje(1787-1869)は、19世紀半ばに中枢神経系と末梢神経系を研究した。彼は、心臓の収縮を制御している心細胞に終末を形成する神経線維である Purkinje 線維を発見した。また、顕微鏡を用いてさまざまな脳領域のニューロンの構造を調べ、小脳の Purkinje 細胞も発見した(Chvátal, 2017)。

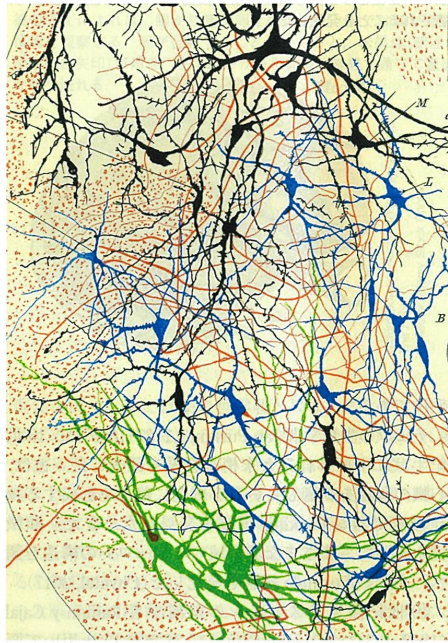
19世紀後半にスペインの解剖学者 Ramón y Cajal(1852-1934)は、Golgi 染色法(5章で学ぶ)を用いて脳内の個々のニューロンを調べた。彼は、脳、脊髄、網膜のニューロンの詳細な構造(顕微鏡で拡大されている)を描写した最初の研究者である。Cajal は、神経系は何十億もの個別のニューロンから構成されていると主張し、それまで支配的だった神経系はひと続きの網状の構造であるという説に異を唱えた。1906年に神経系の構造の研究に対して Cajal にノーベル賞が授与された。図 1.5 は彼の描画の一例である。

### 現代の研究の貢献

20世紀の実験生理学の発展には、弱い電気信号を検出する感度のよい増幅器、細胞内や細胞間での化学変化を解析するための神経化学的実験手法、細胞とその構成を見るための組織学的実験手法など、多くの重要な発明が貢献している。こうした発展や他の重要な発展に関しては、あとの章で詳しく述べる。

簡単に述べると、20世紀における神経科学への貢献のハイライトには、ニューロンが用いている電気信号や化学信号の発見から、さまざまな行動に関与する神経回路や脳構造、たとえば、社会行動を協調させるためのミラーニューロンシステム(8章で学ぶ)などの

図 1.5 Golgi 法で染色されたニューロン  
Santiago Ramón y Cajal によるニューロンの描画。



Science Source

発見まで含まれる。そのほか、重篤なうつ病や Parkinson 病などの障害に対する脳研究の知見を基にした新たな治療法もある(16章と17章で学ぶ)。

21世紀にも、すでにいくつかの重要な進歩や発見があった。研究者は脳の構造や機能の理解を深める努力を続けており、情報処理経路や神経回路に関して多くの新たな発見がなされた。たとえば、2014年のノーベル賞は、John O'Keefe(1939-)と May-Britt Moser(1963-)と Edvard Moser(1962-)の脳内の空間認知システム(脳内 GPS [global positioning system] と呼ぶこともある)の研究に与えられた。2017年には、Jeffrey Hall(1945-)と Michael Rosbash(1944-)と Michael Young(1949-)のサーカディアンリズムの分子制御機構の研究に対してノーベル賞が与えられた。

新しい遺伝学的手法も神経科学の分野で多くのおも

しろい発見をもたらした。オプトジェネティクスの開発により、光を使うことで個々のニューロンを選択的に活性化させ行動の変化を観察することが可能となった(5章参照)。CRISPR-Cas9法の開発によって、遺伝物質(DNA)の正確な編集が可能となった。この技術は、酵素(Cas9)がガイドRNA(guide RNA)と対になったDNAの断片を切り出して遺伝子を編集するものである。この技術が行動神経科学にどのような影響をもたらすかは、まさにこれから明らかになる。エピジェネティクス epigenetics は、遺伝子発現における環境要因の役割に注目した学問である。この学問では、環境に依存した遺伝子発現が、個々の行動に対してどのように大きな影響を及ぼすのかを調べる。

行動神経科学者が学際的な学問領域を進展させ続けている間、脳機能のコンピュータシミュレーションを開発する欧州のヒューマンブレインプロジェクト(Human Brain Project)や米国の BRAIN イニシアティブ(Brain Research through Advancing Innovative Neurotechnologies [BRAIN] initiative)など<sup>\*1</sup>は、生物学、化学、工学、心理学、生理学などの学問領域から多くの研究者を呼び集め続けている。行動神経科学は結局、その起源においても将来においても学際的な研究である。

### 神経科学の多様化

神経科学は多様な学際的な研究分野であり、研究者は世界中にいる。北米神経科学学会は1969年に500人の会員で創設された、脳や神経系の理解を目指す科学者や医師のための専門家の団体である。この国際的組織は90の異なる国の37000人ほどの会員からなる<sup>\*2</sup>。表 1.1 に神経科学に関連するノーベル賞の受賞者とその研究をまとめた。受賞者はさまざまな国の研究者で、男性も女性も含まれていることがわかる。神経科学では、女性や過小評価グループにも受容性が高く多様性を尊重している。

<sup>\*1</sup>(訳注) 日本では、2014年に革新的技術による脳機能ネットワークの全容解明(革新脳) Brain Mapping by Integrated Neurotechnologies for Disease Studies (Brain/MINDS) がスタートした。現在、オーストラリア、中国、韓国、カナダなどの国でもブレインプロジェクトが実施されている。

<sup>\*2</sup>(訳注) 日本神経科学学会は1974年に70名の会員で創設され、現在の会員数は約6000人。

表 1.1 神経科学に関連した研究に対するノーベル賞

受賞年	受賞者(国)	研究分野
1906	Camillo Golgi(イタリア), Santiago Ramón y Cajal(スペイン)	神経系の構造
1936	Sir Henry Hallett Dale(英国), Otto Loewi(オーストリア)	神経インパルスの化学伝達*
1963	Sir John Carew Eccles(オーストラリア), Sir Alan Lloyd Hodgkin(英国), Sir Andrew Fielding Huxley(英国)	神経細胞膜のイオン機構**
1970	Julius Axelrod(米国), Sir Bernard Katz(ドイツ, 米国), Ulf Svante von Euler(スウェーデン)	神経伝達物質
1981	David Hubel(カナダ, 米国), Torsten Wiesel(スウェーデン, 米国), Roger Sperry(米国)	神経系の機能***
2000	Arvid Carlsson(スウェーデン), Paul Greengard(米国), Eric Kandel(米国)	神経情報伝達
2014	John O'Keefe(米国, 英国), Edvard Moser(ノルウェー), May-Britt Moser(ノルウェー)	脳内空間認知システム
2017	Jeffrey Hall(米国), Michael Rosbash(米国), Michael Young(米国)	サーカディアンリズムの分子制御機構

\* (訳注) アセチルコリンが神経伝達物質であることの発見

\*\* (訳注) 活動電位のイオンチャンネル仮説

\*\*\* (訳注) 視覚情報処理(Hubel, Wiesel)と大脳半球の機能(Sperry)

## この節のまとめ

### 研究の目指すところ

#### 1.1 行動神経科学における一般化と還元法の役割を比較せよ

行動神経科学研究の結果を説明するとき、一般化は行動の一般法則を明らかにするために用いる。還元法は複雑な現象を単純な個別の事柄で説明するために用いる。どちらもヒトの行動を理解するために重要である。

### 行動神経科学の起源

#### 1.2 さまざまな科学の分野から行動神経科学への歴史のおよび現代における貢献をまとめよ

古代の学者は行動における脳の重要性について認めなかった。思考や情動を心臓の働きだと考える学者もいた。こころと身体の問題は、脳についての歴史的な視点(二元論)にも現代の視点(一元論)にも影響を与えている。フランスの哲学者 Descartes は、反射について記述したが、そのほかの行動は圧のかかった体液が筋を収縮させることで生じると信じていた。初期の生理学者は神経情報伝達の電氣的成分について研究した。Müller は、特殊神経エネルギー

説を提唱した。Fritsch と Hitzig は、脳の異なる部位を電気刺激して、その効果を観察した。Galvani は神経が電気情報を伝えていることを発見し、von Helmholtz は電気情報伝達の理解を深め、ニューロン間の化学的情報伝達の考えを導入した。研究が進み、脳や神経系の細胞の構造が明らかになった。Flourens と Broca は、切除法を用いてさまざまな脳の領域の機能を調べた。Purkinje と Cajal は、特定のニューロン群の構造や機能を調べた。現在もこうした領域の研究が続けられているが、特に行動の遺伝的あるいは分子的基盤に関する研究が行われている。今日では、行動神経科学は多様な国際的学際的な研究分野である。

### 考えてみよう

BRAIN イニシアティブやヒューマンブレインプロジェクトなどいくつかの新たな研究領域は、行動神経科学の将来を形づくろうとしている。行動神経科学の今後の研究と期待される発見について友人にメールを出してみよう。

## 自然淘汰と進化

Müller と von Helmholtz の伝統に従いながら、新たな結論に到達するために、生物学者たちは見えているものについて観察し、分類し、考え続けた。その中で最も重要で影響力のある生物学者は Charles Darwin (1809-1882) (図 1.6) である。Darwin は自然淘汰と進化論の原理を組み立て、生物学に革命を起こした。この原理は今日の行動神経科学の分野にも引き継がれている。科学の世界では、仮説 theory とは、いくつもの研究から得られた結果の積み重ねによって強く支持される説明である。

### 機能主義と形質の遺伝

#### 1.3 行動形質の進化における自然淘汰の役割を記述せよ

Darwin は自分の理論の中で、構造、色、行動など生物のすべての特徴は機能的意義をもっていると強調している。たとえば、ワシは、強力なかぎ爪と鋭いくちばしがあるので、獲物を捕らえ食べることができる。緑色の葉を食べる毛虫は、自分自身が緑色なので、葉の上ではトリから見つかりにくい。母親マウスがつくる巣は、子どもを暖かく保護し、危険から守ってくれる。行動それ自体は遺伝しない。遺伝によって引き継がれるのは行動を引き起こす構造、つまり脳である。Darwin の理論から機能主義 functionalism が

図 1.6 Charles Darwin (1809-1882)

Darwin の進化論は生物学の革命であり、初期の心理学者に強い影響を与えた。



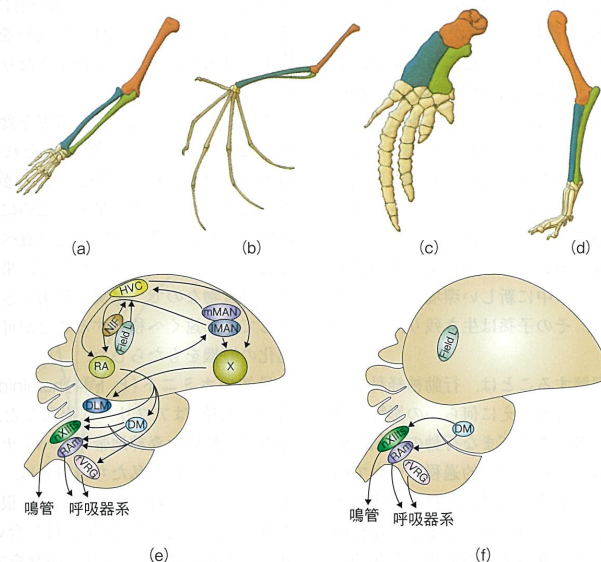
North Wind Picture Archives

始まった。この原理は、生物の特徴には有用な機能があるというものである。それゆえ、いろいろな行動の生理学的基盤を理解するためには、まずその行動によって何がなされるか(その行動の機能)を理解しなければならない。そのためには、研究する生物種の自然史について理解する必要があり、それによって行動を一連の文脈の中でとらえることができる。神経系のような複雑なものの働きを理解するためには、それがどのような機能を果たしているのかを知らなければならない。現存する生物は、遺伝的変異のために起こった長い一連の変化の産物である。だから厳密には、生物のすべての生理学的機構に目的 purpose があるとはいえない。しかし、それぞれの機構には機能 function があり、どのような機能が調べることができる。たとえば、図 1.7 に示すように、前肢は、ほ乳類の異なる種で異なる機能に適するようになった。適合は脳構造でも起こる。たとえば、ミヤマシトドなどの鳴禽類(ソングバード)のオスは高度に進化した脳構造をもっていて(原線条体のバスト核 robust nucleus of the archistriatum, 高次発声中枢 high vocal center, そして X 野 Area X)、これらの脳構造は近縁の非鳴禽類とは異なっている(図 1.7)。こうした鳴禽類に特有の脳構造によって、複雑な社会的環境的刺激に反応して歌うことを学習できる。オスの歌行動の機能は、繁殖相手を魅了して競争相手をおじけづかせることである。非鳴禽類には、こうした脳構造も関連する機能もない(Beecher and Brenowitz, 2005)。さまざまな鳴禽類の中で、オスだけが歌う種では、オスはメスに比べて大きな歌関連脳構造をもっている。一方、オスもメスも歌う種では、歌関連脳構造の大きさに性差はない(Brenowitz, 1997)。

Darwin は、種がどのようにして適応的な特徴を獲得するのかを進化論でまとめた。彼の理論の土台には、自然淘汰 natural selection の原理がある。Darwin は、ある種を構成する個体は必ずしもすべて同じでなく、その違いのうちのいくらかは子孫に受け継がれるということに注目した。もしある個体の特徴が高い繁殖成功度につながるなら、その個体の子孫はその好ましい特徴を遺伝的に受け継ぎ、さらに子孫を増やす。その結果として、その特徴は種の中でより優勢なものとなっていく。Darwin は、育種家が好ましい形質をもった動物だけを掛け合わせることで、その形質をもった系統をさらに発展させているのを見て、育種家が行う人工的淘汰がいろいろな種類のイヌやネコや家畜を生み出すなら、自然界ではおそらく自然淘汰が種の発展にかかわっているだろうと考えた。自然

図 1.7 異なる機能への構造の適合

図はヒト(a)、コウモリ(b)、クジラ(c)、イヌ(d)の前肢の骨を示している。自然淘汰の結果、これらの骨はそれぞれの機能に適合するようになった。鳴禽類(e)と非鳴禽類(f)の脳構造もそれぞれの種の歌行動に応じて異なる。さまざまな歌関連脳構造と歌行動の生成に関連する構造(鳴管と呼吸器系)への出力を示している。



界の長い時間の流れにおいては、進化の過程を形づくるのは、育種家の選択ではなく環境である。

Darwin らは、自然淘汰の原理となる機構については何も知らなかった。実際、分子遺伝学の原理は 20 世紀の半ばにはじめて発見された。簡単に、どのように進化の過程が起こるかを述べよう。すべての有性生殖をする多細胞生物は、文字どおり多くの細胞からできており、それぞれの細胞が染色体をもっている。染色体はタンパク質合成のレシピが書かれた大きな複雑な分子であり、そのタンパク質は、細胞が成長し機能するために必要なものである。つまり、染色体には、ある種のある個体をつくりあげるための(すなわち、発生の発達)の青写真が描かれている。もし、計画が変更されると異なる生物が生み出される。

染色体に描かれた計画は次から次に変更される。すなわち、突然変異が起こる。突然変異 mutation は、接合して新しい個体に発達する精子か卵の染色体に起こった偶発的な変化である。たとえば、精巣あるいは卵巣細胞の染色体にランダムな突然変異が起こると、その子孫に影響する突然変異が起きる。ほとんどの突然変異は有害で、子孫は生き残れないか、生き残って

も突然変異の有害な影響をもって生まれてくる。しかし、中には有益な突然変異もあり、その突然変異によってその個体は選択的優位性 selective advantage を獲得する。その結果、その個体はその種のほかの個体よりも高い確率で子孫を残すのに十分だけ長く生き、その結果、自分の染色体を自分の子孫に残すことができる。特定の病気に対する抵抗性、新しい種類の食物を消化できる能力、身を守ったり獲物を獲得したりするのに有効な武器、繁殖相手にとってより魅力的な外見など、さまざまな形質によって選択的優位性を獲得しうる。

突然変異で変化する形質は物理的なものである。染色体はタンパク質をつくり、それは細胞の構造と細胞内の生化学過程に影響する。しかし、これらの物理的な変化の影響 effect は動物の行動にも認められる。つまり、自然淘汰の過程は行動に間接的に影響するのである。たとえば、突然変異が脳に変化を起こし、小さな動物が行動を変化させ、近くで動きを感じるとじっと動かなくなるようになったとすれば、その動物は捕食動物が近くを通りかかったときに見つからずに逃げられる可能性が高くなる。この行動により、その動物

はより高い確率で生き残り子孫をつくることができる。その結果、将来の世代にじっと動かなくなる行動に関連する遺伝子を残すことになる。

突然変異の中には、すぐには望ましい形質ではないが、それをもっている不利益はないので、少なくとも種の一部の個体に遺伝的に受け継がれるものもある。そのような突然変異がいく千と起こった結果、ある特定の種の個体は多様な遺伝子をもつようになり、すべての個体がほかの個体とは少なくとも少し違った個体になる。多様性は種にとって絶対的に有利なことである。生物ごとに最適な生息地環境があり、環境が変化したとき、種はその変化に適応するか、さもなければ消滅する危険にさらされることになる。もしその種の一部の個体が多様な遺伝子、いわば遺伝子の詰め合わせをもっていて、その中に新しい環境に適応する特徴が含まれていれば、その子孫は生き残り、その種は存続する。

自然淘汰の原理を理解することは、行動神経科学の研究を行うすべての研究者の考えに何らかの影響を及ぼしている。ある研究者はさまざまな行動の遺伝機構とそうした行動の基盤となる生理学的過程について明確に考えている。また、ある研究者は、行動とその生理学的基盤を比較している。つまり、さまざまな種の動物の神経系を比較して、脳の構造の進化や進化的発達に対応する行動能力の進化に関する仮説を立てようとしている。多くの研究者が進化の問題に直接かかわっていないにもかかわらず、自然淘汰の原理は行動神経科学の考えにある方向性を与えている。特定の形質の選択的優位性は何であろうかと自問することがある。より複雑な生物でより複雑な機能を果たすためにすでに存在している生理学的機構を、自然はどのように使っているのだろうかと考えることもある。仮説を立てるときには、特定の説明が進化の観点から納得のいくものであるかどうか研究者は自問している。

## ヒトの脳の進化

### 1.4 ヒトの脳の進化に含まれる要因を確認せよ

進化する evolve とは徐々に発展するという意味である。進化 evolution の過程は、自然淘汰の結果として種の構造や生理が徐々に変化することである。生物が環境の中で利用されていない資源を利用できるような新しい特徴を得たとき、新しい種は進化する。

最初期人類の出現は、熱帯雨林が地上のほとんどを覆っていた新生代まで遡る。この森の中で、私たちの直接の祖先、霊長類は進化した。最初の霊長類は、最

初のほ乳類と同じように、小さく、昆虫あるいはトカゲやカエルなどの冷血の脊椎動物を捕食していた。彼らはつかむことのできる手をもっていたので、木の小さな枝をつかんで登ることができた。長い年月が経過すると大型の種が進化し、顔の前により大きな眼(とその眼で見たものを分析する脳)をもつようになり、樹上を移動したり獲物を捕まえたりすることができるようになった。

果実のなる木の進化は、果実を食べる霊長類に好機をもたらした。元来、色覚(とそれに関連する脳の感覚領域)の優位性は、おそらく、緑の葉の中から熟れた果実を識別し、その果実がだめになる前に、あるいはほかの動物がその果実を先に食べる前に、その果実を食べることにあった。そして、果実は非常に栄養に富んだ食物なので、果実を利用できることは、食物を探してより遠くへ移動することが可能な大型霊長類に進化の好機をもたらした。

最初期のホミニド(ヒト科)hominid<sup>\*3</sup>(ヒトのような大型類人猿)はアフリカに出現した。深い熱帯雨林ではなく、乾いた森林地帯やサバンナに出現した。果物を主食にしていた私たちの祖先は、果物はもちろんであるが、新たな特徴を獲得して、根や芋も食べられるようになり、さらに狩りや殺し合いをするようになった。狩りに使う道具、服をつくる道具、住居を建てる道具をつくった。火の使い方を発見した。また、イヌを飼い慣らしたことで狩りの能力が非常に高まり、イヌが捕食者の襲撃を知らせてくれるようになった。さらに、言語によって象徴的にコミュニケーションする能力を発達させた。

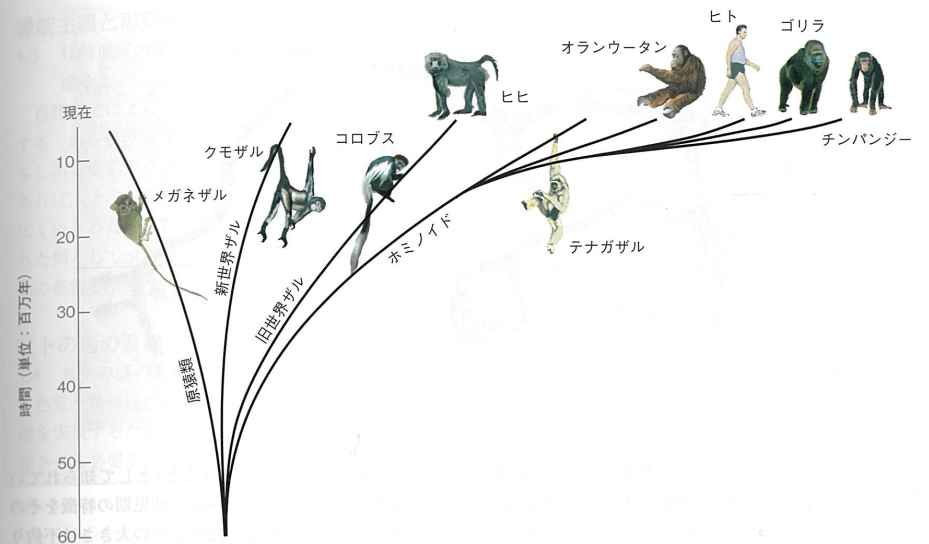
図 1.8 は霊長類の系統樹である。人類に最も近縁な生物、すなわちヒト以外で現在も生存しているホミニドは、チンパンジー(訳者注:ボノボも含む)、ゴリラ、オランウータンである。DNAの解析から、これら4つの種の間にはほとんど差がないことがわかった。たとえば、ヒトとチンパンジーでは99%ものDNAが共通である。

およそ170万年前にはじめて原人がアフリカを離れた。アフリカを離れた種、ホモ・エレクトス *Homo erectus* (「直立したヒト」)はヨーロッパとアジアの全域に広がっていった。ホモ・エレクトスの1つの系統がネアンデルタール *Homo neanderthalis* の祖先で、12

<sup>\*3</sup>(訳注) ホミニド hominid はヒト科。ヒト亜科(原生人類、化石人類、ボノボ、チンパンジー、ゴリラ)とオランウータン亜科(オランウータン)が含まれる。ホミノイド hominoid はヒト上科。ホミニドにテナガザル科を加えたまとまりをホミノイドという。

図 1.8 霊長類の進化

(Redrawn from Lewin, R. (1993.) *Human evolution: An illustrated introduction* (3rd ed.). Boston: Blackwell Scientific Publications. Reprinted with permission by Blackwell Science Ltd.)



万年前から3万年前の間、西ヨーロッパに住んでいた。ネアンデルタールは現代人に似ている。彼らは、石や木から道具をつくり、火の使い方を発見した。私たち自身、ホモ・サピエンス *Homo sapiens* は、東アフリカで10万年前頃に進化した。その一部はアフリカの別の地域に移住し、アフリカからアジア、ポリネシア、オーストラリア、ヨーロッパ、そしてアメリカへと移住した(図 1.9)。

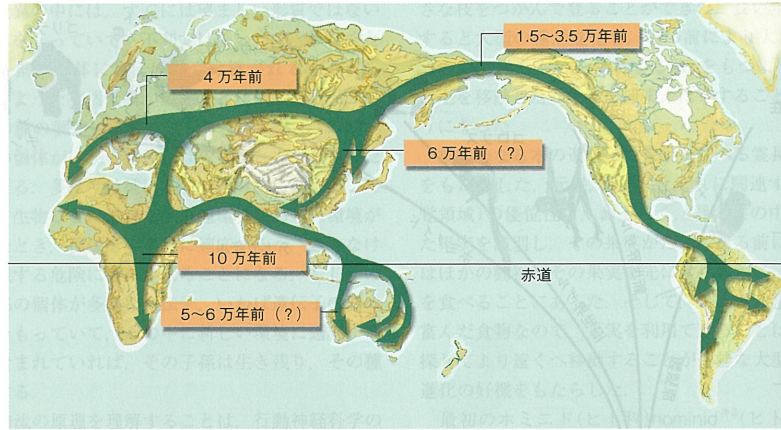
ヒトはほかの種との生存競争を可能にするいくつかの特徴をもっている。器用な手によって道具をつくり使うことができる。優れた色覚は熟れた果実や獲物の動物や危険な捕食者を見つけ出す手助けとなる。火を支配することで、食物を料理し、暖を取り、夜行性の捕食者を脅すことができる。直立姿勢と二足歩行(2本の後肢を使って歩く能力)によって、長い距離を効率的に歩くことが可能になり、眼の位置が高くなるので、平原を遠くまで見渡すことが可能になった。さらに二足歩行によって、(訳注:自由になった2本の前肢を使って)道具や食物をもち運ぶことが可能になり、果物や木の根や肉のかけらを部族にもち帰ることができるようになった。言語能力によって、部族全員の知識を集約することが可能になり、計画を立て、次の世代に情報を伝え、複雑な文明を確立し、その結果、支

配的な種としての地位を確立した。こういったことができるようになるには、複雑な能力を実現する霊長類の脳が必要である。

洗練された霊長類の脳は、女性の産道の大きさの制約の下で進化した。直立姿勢をとるようになった結果、女性の産道の大きさが制限された。新生児の頭の大きさは、安全な出産が可能な最大の大きさである。赤ちゃんの脳は、大人の身体的および知的能力を発揮できるほどには大きくも複雑でもないで、生まれて以降も脳が成長し続ける必要がある。実際、すべてのほ乳類(この意味ではすべての鳥類も)、神経系が発達する間、親の世話が必要である。若いほ乳類(特に幼いヒト)にとって、大人が面倒をみてくれる期間は、修行の期間として使える。結果として、特別な課題をこなすための特別な神経回路だけをもつ脳をつくるようには進化しなかった。そうではなく、霊長類の脳は経験によって変わっていく能力をもった神経回路に富んだものへと進化した。大人は子孫を養い、保護し、大人になったときに必要な技能を教える。特別な神経回路(たとえば、発話に使う複雑な音を分析する神経回路)はもちろん必要であるが、全般的に霊長類の脳は汎用的でありプログラム可能なコンピュータに非常に似ている。

図 1.9 人類の移住ルート

東アフリカで進化した人類が移動したと考えられるルート。  
(Redrawn with permission from Cavalli-Sforza, L. L. (1991.) Genes, peoples and languages. Scientific American, 265(5), p. 75.)



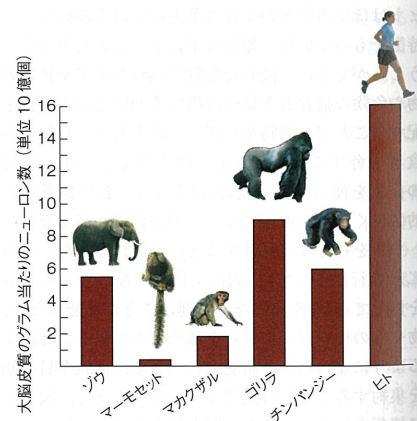
少なくとも知的能力にとって重要なことは、行動、学習、記憶、推論、計画の立案に使うことのできるニューロンをどのくらい脳はもっているのかということである。Herculano-Houzelら(2007)は、げっ歯類と霊長類のいくつかの種の脳を比較し、グラム当たりに含まれるニューロンの数がげっ歯類の脳に比べて霊長類の脳で多いことを発見した(図 1.10)。この結果を受け、「霊長類である私たちヒトは、誇らしいことに現存する生物で最も大きな脳をもっている。少なくとも霊長類の中で最もニューロンが多く、この最大の脳でなければ実現できない認知や行動を享受している。」と結論づけている(Herculano-Houzel, 2009, p.10)。

ヒトの脳の進化にはどのような遺伝的変化が必要だろうか。この問題は15章でより詳しく扱うが、最も重要な原理は、成熟過程のスピードが遅くなって、成長するためにより長い時間をかけられるようになったことだと示唆する証拠がある。後述するが、出生前の脳の細胞分裂の期間がヒトで長くなった結果、平均1400gの、およそ860億個のニューロンを含むまで大きくなった(Azevedo et al., 2009)。出生後も脳は成長を続ける。ニューロン新生はほとんど停止するが、すでに存在するニューロンが成長して互いの神経結合を完成させ、ニューロンを保護し支持するほかの種類細胞が増殖し始める。そして、思春期後期になってはじめて、新生児の脳のおよそ4倍の重さである1400gの大人の脳の大きさに達する。このような成熟期間の延長はネオテニー(幼形成熟)neoteny(簡単にいうと、

未熟な状態が長く続くということ)として知られている。成熟したヒトの頭蓋と脳は、幼児期の特徴をそのまま保持していて、身体に比べてその大きさは不釣り合いに大きい。

図 1.10 哺乳類の脳の比較

より複雑な行動を示す種は、行動、学習、記憶、推論、計画立案に利用可能なニューロンが多くある脳をもっている。げっ歯類の脳に比べて霊長類の脳はグラム当たりのニューロンが多く、大脳皮質のニューロンが多い。  
(Herculano-Houzel, S., and Marino, L. (1998.) A Comparison of Encephalization between Odontocete Cetaceans and Anthropoid Primates. Brain, Behavior and Evolution, 51(4), 230-238.)



## この節のまとめ

### 機能主義と形質の遺伝

#### 1.3 行動形質の進化における自然淘汰の役割を記述せよ

自然淘汰によって特定の機能をもった構造が進化する。ある種の個体はさまざまな構造をもっている。もしある構造がその個体の繁殖成功度を高めるのであれば、その子孫がその構造を受け継ぎ、その種に広くいきわたる。行動の基盤となる構造が受け継がれた例として、ある種の鳴禽類におけるオスの歌行動の基盤となる一連の脳構造がある。

### ヒトの脳の進化

#### 1.4 ヒトの脳の進化に含まれる要因を確認せよ

色覚や精緻運動制御や複雑な視覚や言語などの機能を実現するためには、より複雑な霊長類の脳を進化させる必要があった。霊長類の脳は、ほかの種と

比べてグラム当たり最も多くのニューロンをもっている。こうしたニューロン数の増加により、行動、学習、記憶、推論、計画の立案などが実現できるようになった。ヒトでは、生後も、また親の世話が必要な長い発達期間も、脳はさらに発達する。

### 考えてみよう

Kavoi と Jameela(2011)は、嗅覚の責任脳部位である嗅球は、脳全体の大きさの差を計算に入れてもヒトよりイヌのほうが大きいことを報告した。自然淘汰や人工的淘汰の原理を用いて、イヌがどのようにこの大きな嗅球をもつに至ったかについて仮説を立て、そのことがイヌの行動にどのように影響しているのか予想せよ。

## ヒトや動物を対象とした研究における倫理的問題

この本には、現在神経系に関して知られている多くの事実を記載している。こうした事実はどこから得られるのか。こうした事実は、コンピュータシミュレーション、個々の細胞、そして、しばしばヒトや動物を対象として実施される注意深く計画された実験の結果である。ヒトや動物を対象とした神経科学研究は倫理規定や監視の対象となる。この節ではこれらの問題を詳しくみていく。

### 動物を対象とした研究

#### 1.5 行動神経科学において研究に動物を用いる理由を概説せよ

この本でふれる研究の多くには、動物を対象とした実験が含まれる。人類の目的のために動物を使うとき、人道的に扱うこと、そして、その目的が価値のあるものであることを研究者は常に確信していなければならない。重要なのは、行動神経科学における研究がこの2つの条件を満たすよい例となることである。人

道的な取り扱い方法は方法の問題である。私たちは動物を健康で快適で清潔な状態に保つ方法を知っている。動物が術中あるいは術後に痛みを感じないように麻酔薬や鎮痛薬を投与する方法を知っている。また、適切な手術の実施や抗生物質の使用で感染を防ぐ方法も知っている。産業の先進諸国の多くでは、動物の世話について厳格な基準があり、動物に対する実験手法についても承認を求められる。動物の不適切な取り扱いに対するいいわけは許されない。実際、動物は人道的に扱われていて、多くの動物を用いている研究者は動物福祉を強く主張する者でもある。

研究の価値があるかどうかを判断するのは難しい問題である。私たちは動物をいろいろな目的に使用している。肉や卵を食べ、ミルクを飲み、皮をなめして利用し、人々の病気のために動物の臓器からインシュリンなどのホルモンを抽出することもあれば、訓練して農場で有用な仕事をするためや、私たちを楽しませるために使用したりする。ペットを飼うことでさえ、利己的利用の一形態である。つまり、家で一緒に住むと決めたのは、動物ではなく私たちである。事実、人類はその歴史において、ほかの動物を使い続けてきたのである。

ペットを飼うことは、科学的研究を行うよりも動物に苦痛を与える可能性がある。ペットを飼おうとする

人々は、ペットを飼うのに獣医を加えた専門家委員会から許可を受ける必要がなく、彼らの家が清潔で衛生的かどうか、ペットが適正に運動できる十分なスペースがあるかどうか、また餌が適切に与えられているかどうかについて定期的な検査を受ける必要もない、研究者にはこれらすべてが求められる。研究や教育における動物使用は必要不可欠なものであるにもかかわらず、なぜ動物愛護団体\*4がこれほどまでかたよった関心を研究や教育における動物使用に対して向けるのか謎である。人類は動物を食べなくても生きていけるし、狩猟をしなくても生活できる。また、毛皮がなくても行動できるが、研究と将来の研究者の訓練に動物を使わなければ、病気の理解や治療の進歩はない。それほど遠くない将来、私たち科学者はおそらくエボラウイルス病やマラリアや AIDS の感染を防ぐワクチンを開発するだろう。私たちがすでに克服した病気であっても、もし製薬会社が新たな治療の開発や試験のための動物を対象とした実験をできなくなると、その病気による新しい犠牲者が出るだろう。もし実験に動物が供給されなくなったら、製薬会社はヒトの病気の治療に使うホルモンを抽出できないし、私たちが今病気を予防するために使用しているワクチンの多くを用意できなくなる。

人類は医学的、心理学的、行動学的問題に直面していて、これらの問題の多くは生物学的研究によってしか解決できない。いくつかの主要な神経学的障害について考えてみよう。この章の冒頭で Jeremiah が経験したような脳卒中は、脳内の血管の出血あるいは梗塞によって起こるが、部分麻痺、失読、失書が起こり、友人や家族との語らいができなくなる。ニューロンの相互情報伝達に関する基礎的な動物を対象とした実験は、脳細胞の死の原因について重要な発見をもたらした\*5。この研究は、臨床の治療に役立つことを直接の目的として行われたものではなかった。しかし、このような研究には潜在的な価値があり、研究者自身にとっても驚きの結果となって現れる。

脳血管の血流がほんの数分妨げられると、その血管によって栄養が供給されている脳の領域が死ぬ。しかし、ある種の神経情報伝達を妨げる薬物を最初に投与すると、脳の損傷は防ぐことができる。脳卒中による

\*4(訳注) 動物の権利を過度に主張するグループと、一般の動物愛護運動グループは一線を画する。過度な主張を行い、大学、研究所に侵入して研究を妨害したり、研究者自身の生命を狙ったりするような過激な行動をとるグループはごく一部である。

\*5(訳注) 神経伝達物質、受容体、それに関連する分子生物学的研究のことをさしている。

脳の損傷を少なく抑える治療法の開発という意味で、この研究は重要である。この研究では血管を挟む手術がラットに行われ(動物は麻酔されている)、実際、脳に損傷を受ける動物もいる。また、すべての動物は最後に安楽殺されてその脳が調べられる。この研究の価値を考えれば、このような実験は、食用に動物を用いることと同様に正当なものだと同意するだろう。

この本であとで学ぶように、動物を使った研究によって、Parkinson 病、統合失調症、双極性障害、不安障害、強迫性障害、神経性食欲不振症、肥満、薬物濫用などの神経疾患と精神障害の原因と治療法についての重要な発見がなされてきた。これまでに大きな進歩があったが、まだ問題は残っていて、私たちが大いに悩ませている。動物を対象とした研究を続ける限り、この問題を解決することはできない。

研究に動物を使うのではなく、培養細胞やコンピュータを使えないかという人々がいる。限られた問題を解決するためには使えるかもしれないが、培養細胞やコンピュータは複雑な生物の代用にはならない。薬物濫用のような行動の問題を培養細胞で研究する方法はなく、動物の神経系の働きをシミュレートするようコンピュータをプログラムすることもできない。(もしできたとしても、私たちはすでにすべての解答を得ているはずである。)

## 動物を対象とした研究の監視

### 1.6 動物を対象とした研究の監視制度を確認せよ

米国では、動物を対象とした実験に対して連邦政府の研究資金を受ける研究機関は、動物実験委員会 Institutional Animal Care and Use Committee (IACUC) の設置が義務づけられている。典型的な動物実験委員会のメンバーには、獣医師、動物を対象とした研究をしている科学者、科学者ではない者、そしてその研究機関に雇用されていない一般の人が含まれている。このメンバーが委員となって、すべての動物が人道的で倫理的な扱いをされているかどうかを確認する目的で、動物を対象とした実験申請のすべてを審査する。非侵襲的な実験(野外研究や観察研究)でさえ審査を受け、動物実験委員会の承認を得る必要がある。この承認の過程を経ることは、当該研究の動物福祉の観点を保障するだけでなく、地域や州や連邦政府の規則に適合していることも保障することも示す。

## ヒトを対象とした研究

### 1.7 実験参加者に協力してもらう研究における倫理的配慮について議論せよ

すべての神経科学研究が動物を対象として実施されるわけではない。今日私たちが脳や行動について理解していることの多くは、ヒトを対象とした研究の結果である。人道的な研究状況に加え、ヒトを対象とした研究では、実験参加者からのインフォームド Consent と実験参加者保護に対する対策が重要である。インフォームド Consent informed consent は、研究者が実験に参加する可能性のあるすべての対象者に対して、研究の性質、データの収集法と保存法、参加することにより期待される費用と便益について説明して合意する過程のことである。こうした説明を受けたあとにはじめて、実験参加者が研究に協力するかどうかを決めることができる。インフォームド Consent のルールに違反すると、倫理的、法的、そして金銭的な罰を受けることになる。Havasupai Tribe v. Arizona Board of Regents の事件は、6年にも及ぶ論争の果てに、Arizona 州立大学が生体試料を返還して 70 万ドルを Havasupai 部族(訳注: ネイティブアメリカンの一部族)に支払うことで決着した。この決定は、曖昧で不完全なインフォームド Consent に対して出されたもので、そのために、元来肥満の研究のために収集された血液が、十分な説明のないまま統合失調症に関連する因子などを調べる研究に用いられたのである(Van Assche et al., 2013)。実験参加者保護はきわめて重要である。潜在的にデリケートなテーマ(薬物濫用における脳の変化の研究に違法薬物を用いるなど)を扱う行動神経科学研究においては特に重要である。

新たな学際領域である脳神経倫理学(ニューロエシックス) neuroethics は、ヒトを対象とした神経科学研究のための倫理学の意味をよりよく理解し、最適に実践するための学問である。専門家による研究班の 2014 年の報告では、(1)脳イメージングと脳プライバシー、(2)認知症と個性と嗜好変化、(3)認知的エンハンスメントと公正、(4)深部脳刺激研究と倫理的に難

しい精神外科の歴史というテーマについて調査することによって、神経科学研究の倫理的に問題をあぶり出した(Presidential Commission for the Study of Bioethical Issues, 2014)。研究班はすべてのレベルの教育を通じて倫理と科学の統合を目指すことを推奨した。

## ヒトを対象とした研究の監視

### 1.8 ヒトを対象とした研究の監視制度を確認せよ

動物を対象とした研究と同様に、ヒトを対象とした研究も、脳の健康や病気に関する私たちの理解を深めるために不可欠である。動物を対象とした研究と同じように、ヒトを対象とした研究にもさまざまな規制があり、専門家や一般の人からなる審査委員会において審査され承認を得なければならない。研究倫理審査委員会 Institutional Review Board (IRB) は動物実験委員会と似た機能を持ち、研究における実験参加者の倫理的待遇を保障するものである(図 1.11)。典型的な研究倫理審査委員会のメンバーは、科学の専門家、科学を専門としない者、一般の人からなる。この審査委員会は実験参加者を保護することを目的とする。

図 1.11 ヒトを対象とした行動神経科学研究

研究者は実験参加者とともに、情動、学習、記憶、行動などの機能の基になる脳機構について明らかにする。



## この節のまとめ

### 動物を対象とした研究

#### 1.5 行動神経科学において研究に動物を用いる理由を概説せよ

動物は神経系の理解を進め、病気やけがの治療法を開発するために行動神経科学研究に用いられる。ヒトを対象とした研究を実施することが不可能、もしくは不適當であるときや、細胞モデルやコンピュータプログラムが神経系の複雑さをシミュレートできないときに動物モデルを用いる。

#### 1.6 動物を対象とした研究の監視制度を確認せよ

人道的な動物の取り扱いが地域や州や連邦政府の規則により管理されている。動物実験委員会(IACUC)は、動物を用いる実験申請を審査し、研究における動物の福祉を保護することを目的としている。

### ヒトを対象とした研究

#### 1.7 実験参加者に協力してもらう研究における倫理的配慮について議論せよ

実験参加者に協力してもらう研究における倫理的配慮には、インフォームドコンセントや守秘義務と

いった保護が含まれる。脳神経倫理学は、神経科学研究のための倫理学の意味をよりよく理解し、最速に実践するための学問である。

#### 1.8 ヒトを対象とした研究の監視制度を確認せよ

研究倫理審査委員会(IRB)は実験参加者の保護を目的としており、科学の専門家、科学を専門としない者、一般の人からなる。研究倫理審査委員会は、ヒトを対象とした研究申請を審査する。

### 考えてみよう

行動神経科学研究は、特有の倫理的配慮を必要とする。たとえば、注意や学習をエンハンスする薬の開発、対象者の気分や信念を明らかにするイメージング技術の進歩、攻撃的な行動を予測するテストの立案などは、すべて倫理的ジレンマの問題をはらんでいる。これらの例の1つを取り上げ、倫理的な問題を確認し、その研究を実施すべきか否かについての考えを示し、その理由も答えよ。実施した場合、どのような対策が実験参加者保護に適當だろうか。

大きな学問領域に属している。神経科学者は、解剖学、化学、生理学、発達、機能といった神経系のすべての側面にかかわっている。神経科学の研究領域は、分子遺伝学の研究から社会行動の研究までを含んでいる。行動神経科学者 behavioral neuroscientist は、ヒトや動物を対象として観察できるすべての行動現象を研究する。脳以外の身体(特にホルモンを分泌する内分泌系)と相互に関係しながら、行動の制御において果たす神経系の役割について理解しようとしている。感覚の情報処理過程、睡眠、情動行動、摂食行動、攻撃行動、性行動、親行動、学習と記憶などについて研究する。また、ヒトが経験する症状、たとえば、不安症、うつ病、恐怖症、強迫性障害などの疾患の動物モデルを使った研究も行う。この本で触れている領域の本来の名称は生理心理学 physiological psychology であるが、一般的に、生物心理学 biological psychology、biopsychology、心理生物学 psychobiology、そして最も一般的には行動神経科学 behavioral neuroscience といった名称が使われる。

## 神経科学の未来：職業と学習方略

行動神経科学とは何か。また、行動神経科学者は何をしているのか。この広範な刺激に満ちた研究領域についてより深く学習するための最適な方法は何か。この本を読み終える頃には、こうした疑問に対してかなり多くの答えを持っているだろう。この節では、この分野に関して述べるとともに、行動神経科学を専攻した後には活躍できる職業についても述べる。さらに、この魅力的な学問を勉強するに際して、その一助となる学習方略についても述べたい。

### 神経科学を活かした職業

#### 1.9 行動神経科学を活かした職業を確認せよ

行動神経科学は神経科学 neuroscience と呼ばれる

行動神経科学と重なりが多い研究領域は、神経学(神経内科) neurology と認知神経科学 cognitive neuroscience である。神経内科医は神経系の病気を診断し治療する内科医である。大半の神経内科医は臨床医学にだけかかわっているが、研究を行う医師もいる\*6。神経内科医は、自然な原因で脳が損傷された患者さんの行動を、さまざまな行動を行ってもらいながら、脳のさまざまな領域の活動を先端の脳機能イメージング技術を用いて研究する。脳機能イメージング研究は認知神経科学者も行う。認知神経科学者は、博士号の学位 Ph. D.(多くは心理学)をもつ、神経学の原理や方法に関して特別な訓練を受けた研究者である。

行動神経科学者として職についている人々のほとんどは、心理学が学際的な大学院課程を修了して博士号の学位 Ph. D. をもっている。大学院課程には、心理学、生物学、化学、生化学、コンピュータサイエンスなどの研究領域の教員がかかわっている\*7。行動神経科学者として職についている人々のほとんどが、総合大学か単科大学に勤務していて、教育と研究に携わっている。研究のための研究所に勤務する人々もいる。たとえば、中央政府や私立の慈善団体が所有し運営する研究所である。産業界で働く研究者は少なく、通常は薬物の行動に対する影響を評価することに関心をもつ製薬会社に勤務する人々がいる程度である。

教授、つまり独立した研究者\*8 になるには、博士号の学位、通常は Ph. D. をとらなければならない。ただし一部の人は医師の国家資格 M. D.(medical doctor) を取得してから研究を始める。大部分の行動神経科学者は、大学院の課程を修了したのち、2年ないしそれ以上の期間一時的なポストドク\*9 の職につき、独立した研究者の主宰する研究室でさらに研究歴を積み、この間に、研究での発見に関する論文を書き、科学雑誌に投稿する。これらの論文業績は独立した研究

\*6(訳注) 日本でも基礎研究にかかわる神経内科医の数は多くない。また、研究にかかわる神経内科医でも分子生物学の分野にかかわる研究者が多く、脳機能イメージング研究を行う研究者は少ない。脳機能イメージング研究は日本でも行われている。心理学などの分野から参加する研究者は増えてきたが、数学などの分野からの参加者はまだまだ少なく、欧米に比べ立ち遅れている。

\*7(訳注) このあたりの事情は日本では異なる。歴史的に見ると日本では、この分野の研究者の多くは医学部、歯学部を卒業している。次第に、理学部、薬学部、文学部の出身者が増えてきており、また近年になって、本文中にあげた学際的な学部、学科が新設され、その出身者も増えてきた。ただし、臨床的な研究部門では依然として医学部の出身者が多い。

\*8(訳注) ここでいう教授は独立した研究者の意味で、日本の大学の教授 full professor だけでなく准教授 associate professor などを含む。

\*9(訳注) 2~3年程度の契約で雇われて研究をする博士号を取得した研究者のこと。一考を併記。

者として職を得るために重要な要因である\*10。

神経科学の研究に従事するすべての研究者が博士号の学位をもっているわけではない。学部卒業や修士号の学位をもつ研究技術者が、独立した研究者のために欠かすことのできない補助的役割を果たす。技術者は、仕事に関する経験を積み、教育を受け続けることができ、その結果、独立して研究を管理し、遂行する責任を引き受けることもできるようになる(図 1.12)。

## 学習方略

#### 1.10 行動神経科学を学ぶために効果的な学習方略を記述せよ

脳は複雑な器官である。結局、私たちのすべての能力、すべての複雑さにかかわっている。科学者はこの器官について長い年月研究してきたし、(特に近年は)それがどのように機能するのか調べてきた。これまでの脳研究の発展を2、3の簡単な文章で要約することは不可能である。だから、この本はたくさんの情報を含んでいる。この本は、この情報を論理的に体系立てて、何を知るべきかを知っていくべき順番に並べてある(結局何かを理解するためには、まず別なことを理解する必要があることもある)。できるかぎり明確に記述するように努め、例はできるだけ簡潔かつ生き生きと説明するようにした。しかし、単に読み流しただけでこの本の中の情報を取得できると思ってもらっては困る。少し努力をする必要がある。



行動神経科学を学ぶためには、事実を覚えるだけでは不十分である。もちろん、神経系の各部分の名前、化学物質や薬物の名前、特定の現象の科学的専門用語、それを研究するための方法など、記憶すべき事項はある。しかし、それらを記憶しただけでは、学ばなければならないもののうちのわずかな部分を知ったにすぎず、知の探求のゴールからはほど遠い。確かなことは、現在私たちが信じている「事実」の多くが、実は正しくないとされる日がいつかあるということである。もし、現在の事実を覚えることしかやらなかったら、これらの事実が訂正されたとき、あなたはいったいどうなるだろう。

学習に関して現実的なアドバイスをしたい、あなた自身、これまでの学歴を通じて勉強してきたの

\*10(訳注) 経歴に関しては、日本もあまり変わらない。ただし日本では、医学部、歯学部以外に、神経科学に関連した教室はまだ少なく、ポジションも少ない。日本でもポストドクのポジションは増えたが、その後の職を探るのが難しくなり、10年以上ポストドクを続ける場合も少なくない。

図 1.12 神経科学の道を進むには

神経科学者として働くにはどのような訓練が必要だろうか、神経科学者はどこで働いているのだろうか。このタイムラインを見て理解しよう。

時期	説明	写真
高校生	神経科学に興味をもつ高校生は、生物学、化学、心理学などの科学の授業を受けるとよい	
大学生	神経科学に興味をもつ学生は、生物学、化学、心理学、神経科学、そして関連領域を勉強するとよい。研究室で研究補助者として働く学生や、研究者との間にメンター関係を築く学生もいる。神経科学に興味をもつ卒業生は技術者や研究補助者として働くことも可能である。	
大学院生	大学卒業後に1年から数年、大学院課程に進学することができる。大学院課程では通常、高度な教育を受けて研究を行う。大学院生は、(メンターの指導の下)研究を行い結果を発表することが求められる。大学院課程を修了したのちには、中等教育機関あるいは高等教育機関で教育したり、研究職についたり、あるいは企業で働いたりすることが可能である*。	
ポスドク	ポスドク研究員**はより独立して研究ができる。また、ポスドク研究員の期間に、専門的な研究領域でのさらなる訓練を受けたり、専門的な研究手技を身につけたりする。ポスドクの期間を終了したのちには、中等教育機関あるいは高等教育機関で教育したり、研究職についたり、あるいは企業で働いたりすることが可能である。	

\* (訳注) 日本では、4年制の大学卒業後に大学院課程に進学し、2年の修士課程で経験を積む。大学院課程では、高度な教育を受けるとともに、実際にテーマを決めて研究を行う。大学院生は(指導教員の指導の下)、その研究結果をまとめて発表することが求められる。修士課程を修了すると、3年の博士課程(医学部卒業の場合には修士課程はなく4年の博士課程がある)に進学することができる。博士課程では、自分の研究を論文としてまとめ、それが学位にふさわしいと判断されると、博士号の学位を授与される。修士課程で卒業し、企業などの研究所で研究をしたり働いたりする学生も多い。

\*\* (訳注) 2~3年程度の契約で雇われて研究をする博士号を取得した研究者。

で、間違いなくその過程で何らかの有用な学習方略を学んできていたであろう。効率的で効果的な学習技術に磨きをかけてきたとしても、少なくともそれらを改善する方法があるかもしれないという可能性を考慮したほうがよい。この節では、行動神経科学についての学習効率を最大化するいくつかの提案をするつもりだ。ここでの提案は、学習に関する実験的研究に基づいたものである。

- **意味のあるグループに情報を整理したノートをつくれ。単にハイライトするな。** 新しい情報を既存の知識につなげることは学習において重要な方法である。このためには、手にした新しい情報について能動的に考え、その情報を自分の現在の知識に結びつける方法を見つける必要がある。これは能動的で複雑な過程であり、時間と努力を要す。情報を自分自身がまとめて作ったノートの知識と結びつけることなく、マーカーでのハイライトや下線を引くだけの作業は受動的であり、手書きしたりタイピングしたりして自分自身のノートをつくることと比べて学習や記憶を促進しない。これまでの研究から、ハイライトや下線を引くだけではテストの成績はよくなるし、学習に有害な場合もあることが示されている(Dunlosky et al., 2013)。
- **誰かに教えることで自ら学べ。** ある節や章を読み終えたなら、そこにあった情報をどのようにほかの誰かに伝えるかを考えよ。クラスメートでも友人でも、あるいは好奇心旺盛な家族でもよい。この作業は、その節の一番重要な点について考える助けになる。Nestojkoら(2014)は、ある複雑な文章を読む課題において、その内容をほかの誰かに教える準備をした学生は、試験のために学習した学生より、後に行ったテストでよい成績になることを示した。
- **テストを受ける環境で勉強するか、さまざまな環境で勉強せよ。** 状況依存学習 state-dependent learningの理論に基づけば、ある環境で学習した情報は同じ環境で最も思い出しやすい。環境が成績を向上させる効果の理論的背景は、コンテキスト(壁の色、イス、まわりの人々など)が、その環境で以前に学習した情報を思い出す重要な手がかりを与えているということである。もし、テストを受ける環境で勉強ができなければ、できる限り多くの同じ要素を使ってみることである(同じコンピュータを使い、同じペンを使い、同じノート

- の取り方をすると、というように)。あるいは、テストを受けるときに、ある1つあるいはいくつかの手がかりに依存しないように、多くの違う環境で勉強してみることである(家や学生会館や学生寮など)。状況依存学習の興味深い実験で、GoddenとBaddeley(1975)は、大学生のスキューバダイバーに水中と陸上それぞれで読んで得た情報をテストした。その結果、水中で学習した情報は水中でのテストで最もよく思い出すことができ、学習とテストのコンテキストが異なるときの成績が最も悪いものだった(たとえば、水中で学習した情報を陸上でテストした場合など)。
- **気が散るものは最小限にして勉強せよ。** 脳は困難な課題(神経科学の勉強のように!)に集中しているときに最もよく働く(Hattie and Yates, 2014)。可能な限りテレビ、ソーシャルメディア、スマートフォンを消し、静かな環境で勉強せよ。Leeら(2012)は、大学生を科学と歴史と政治を学習する3つの群に分けた。静かな環境で勉強するグループ、無視してもよいテレビ番組が流れている状況で勉強するグループ、流れているテレビ番組の内容をあとでテストされるのでテレビにも課題にも注意を払わなければならないグループに分けた。学生は選択肢から正解を選ぶテストを受けたところ、想像通り、課題にもテレビにも注意を払わなければならない学生は成績が最も悪かった。
- **詰め込むな。分散して勉強せよ。** 新しい情報を長時間かけて一度に勉強するより、それぞれが短い時間になっても2回に分けて勉強するほうがより効果的に覚えられる。詰め込むな。何か新しいことを学習するときには、一度勉強しておいて、学習度合いを確認される前や最終テストや課題の前など別の日に再度勉強するのがよい。自分のスケジュールの中で教室の課題やテストの予定に合わせて勉強の計画を立てなければならないだろうが、ある学習の分散効果は、すでにこの本の中に仕組んである。読解や勉強を分散させるときにどんなものにも合うこれだという間隔はないが、経験則から、1日から数日あければよい(Carpenter et al., 2012)。
- **一番難しいことは、最初にするか最後にせよ。** 古典的な心理学の研究によると、一連の単語のリストを覚える課題において、最初の単語(初頭効果 primacy effect)と最後の単語(新近効果 recency effect)の再生が、最も成績がよくなる。この原則が行動神経科学の勉強にも当てはまる。たとえば、

3章で大脳皮質や視床や髄膜について学んでいくとき、すでに髄膜の各部についてほとんど知っている、でも大脳皮質や視床についての理解に自信がもてないなら、最初に大脳皮質について勉強し、次に髄膜について勉強し、最後に視床を勉強せよ。

●**記憶術を使え。**記憶術は新しい情報を保持するための近道である。たとえば、ストーリー記憶法 story chaining は、関係のない覚えるべきものを1つの短い話に登場させる方法。場所記憶法 method of loci は、よく知った道のいくつかの場所に覚えるべきものを配置してその道を歩くことをイメージする方法。アクロスティック(折句) acrostic は最初の文字から単語をつくりリストを示す方法(たとえば、大脳皮質の4つの葉, frontal, parietal, occipital, temporal を示すために FPOT という語を使う)(Hattie and Yates, 2014)。

●**絵を描け。**新たな語や概念を勉強するなら、その絵を描いてみよう。絵を描くと、定義を写すだけより新しい情報が記憶に残りやすい。これは若者でも高齢者でも記憶に残りやすい方法である。たった4秒描くだけでも効果がある。研究者は、手を動かすことや描画における能動的な推敲が学習の促進をもたらすと考えている。

本書の構成について:

- 本文、図はできるだけ近くにまとめた。経験か

ら、本を読むときに最もイライラすることの1つに、いつ図を見るのかわからないことがある。本書では、必要なときにすべて示されている。

- それぞれの章は患者に実際に起きていることを示す症例から始まる。そして「学習目標」を明示した。症例研究は、その章で学ぶべきことを個人的な問題として捉え、より関連づけるために用いた。「学習目標」は、その章で取り上げた重要な考えに集中しやすくするために用意した。
- 細いゴシックや太字になっている語がある。細いゴシックは強調したい語か新しい語、太字(用語解説にリストされている)は行動神経科学の用語の一部の重要語で、これらの多くを以降の章で再び目にするだろう。
- 節の最後には2つのまとめ、「この節のまとめ」と「考えてみよう」がある。「この節のまとめ」では、その節の重要なポイントを再確認する。「考えてみよう」では、学んだことを新しい状況に応用したり、関連するトピックに対して考えを広げたりすることができる。章の最後には、復習問題を用意し、学んだことをどの程度理解しているかを評価できるようにしている。

あなたはすでに行動神経科学に必要なものが何であるかを感覚的に理解した。ようこそ、「神経科学テキスト」の世界へ。次の章はニューロンと支持細胞の構造と機能、神経系の最も重要な要素についてである。

## この節のまとめ

### 神経科学を活かした職業

#### 1.9 行動神経科学を活かした職業を確認せよ

この領域の研究者は、一般の神経科学、行動神経科学、そして認知神経科学の分野で研究している。神経学者(神経内科医)は神経系に特化した内科医である。神経科学領域で職を求める研究者は大学や企業で働くケースが多く、ふつうは大学院教育を受けている。

### 学習方略

#### 1.10 行動神経科学を学ぶために効果的な学習方略を記述せよ

能動的な学習方略が最も効果的である。ノートをとって、教える練習をしてほかの誰かと情報を共有し、学習環境とテスト環境の特徴が重なるように考

慮し、気が散るものは最小限にして、分散して繰り返し勉強し、難しいものをいつ勉強するか注意深く計画し、学習を促進するために利用できるなら記憶術を使え。

### 考えてみよう

行動神経科学者として働くとはどういうことだろう。オンライン検索して、行動神経科学者の求人広告を見つけ、仕事内容と資格を注意して読め。どのような資格が求められているのか、なぜそうした経験や訓練が求められているのか、そのポジションの研究者がどのような責任や活動に従事するか考えよ。

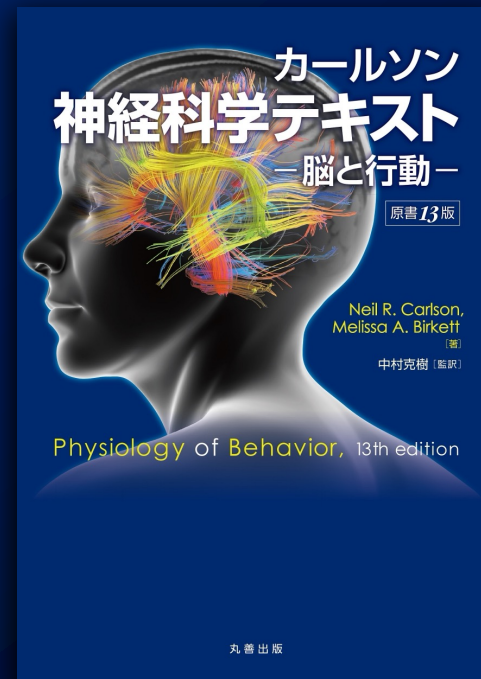
## 復習問題

1. 行動神経科学の研究が目指すところを説明せよ。
2. 行動神経科学の歴史的起源について記述せよ。
3. 行動形質の進化における自然淘汰の役割について記述せよ。
4. ヒトとヒトの脳が進化について説明せよ。
5. 動物を対象とした行動神経科学研究の価値について評価せよ。
6. ヒトを対象とした行動神経科学研究における重要な倫理的配慮を確認せよ。
7. 神経科学者になるために受けなければならない教育についてまとめよ。
8. 神経科学における就業機会について記述せよ。
9. 2つの効果的な学習方略を行動神経科学の勉強にどのように応用できるか記述せよ。

# 「心の科学」

## 脳科学研究科の教員カタログ (全教員オムニバス)

一応、復習できる  
知識と結びつけたい





# Chapter 1

# 序 論



ヒトの神経系には数十億個ものニューロンがある。

## 目 次

### 行動神経科学の基礎

研究の目指すところ  
行動神経科学の起源

### 自然淘汰と進化

機能主義と形質の遺伝  
ヒトの脳の進化

### ヒトや動物を対象とした研究における倫理的問題

動物を対象とした研究  
ヒトを対象とした研究

### 神経科学の未来：職業と学習方略

神経科学を活かした職業  
学 習 方 略

# カールソン 神経科学テキスト 第1章

## 行動神経科学の起源

哲学からの貢献：こころと身体の問題 一元論・二元論

生理学からの貢献：電気的情報伝達

解剖学からの貢献：神経の構造と機能地図

} 第2章～

## 自然淘汰と進化

「生まれか育ちか」 「中立進化」 「収斂進化」

## 倫理的問題

「研究者倫理」

## 職業と学習方略

学習方略

# 一元論と二元論

一元論



二元論



# 心の科学とは？

# 心の科学とは？

客観が科学の根源。

主観（心）は科学にならない？

# 心の関連分野

対象

科学

客観

神経科学：  
脳を物質として理解

行動主義：  
行動として見えるものしか  
対象としない

心理学：心と行動を理解

脳科学：  
脳を機能として理解

認知主義：  
心の中の概念の理解を目指す

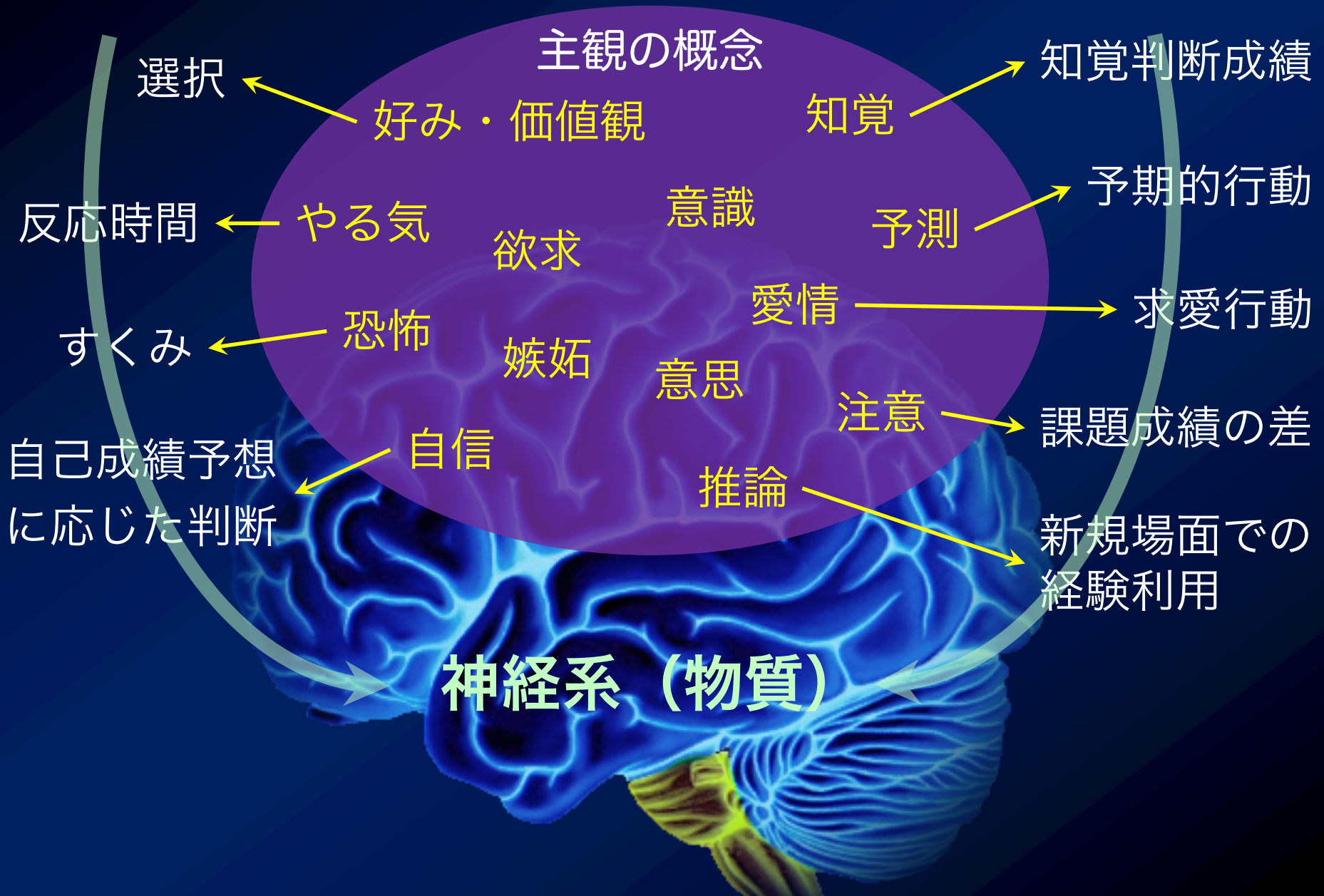
主観

対象は純粋に主観（科学ではない） 表現は客観的

数学：  
心の中で完結する機能を  
数式で客観的に表現

哲学：  
心の中で完結する機能を  
自然言語で客観的に表現

# 心の中を指向する科学



# 心の中を指向する科学

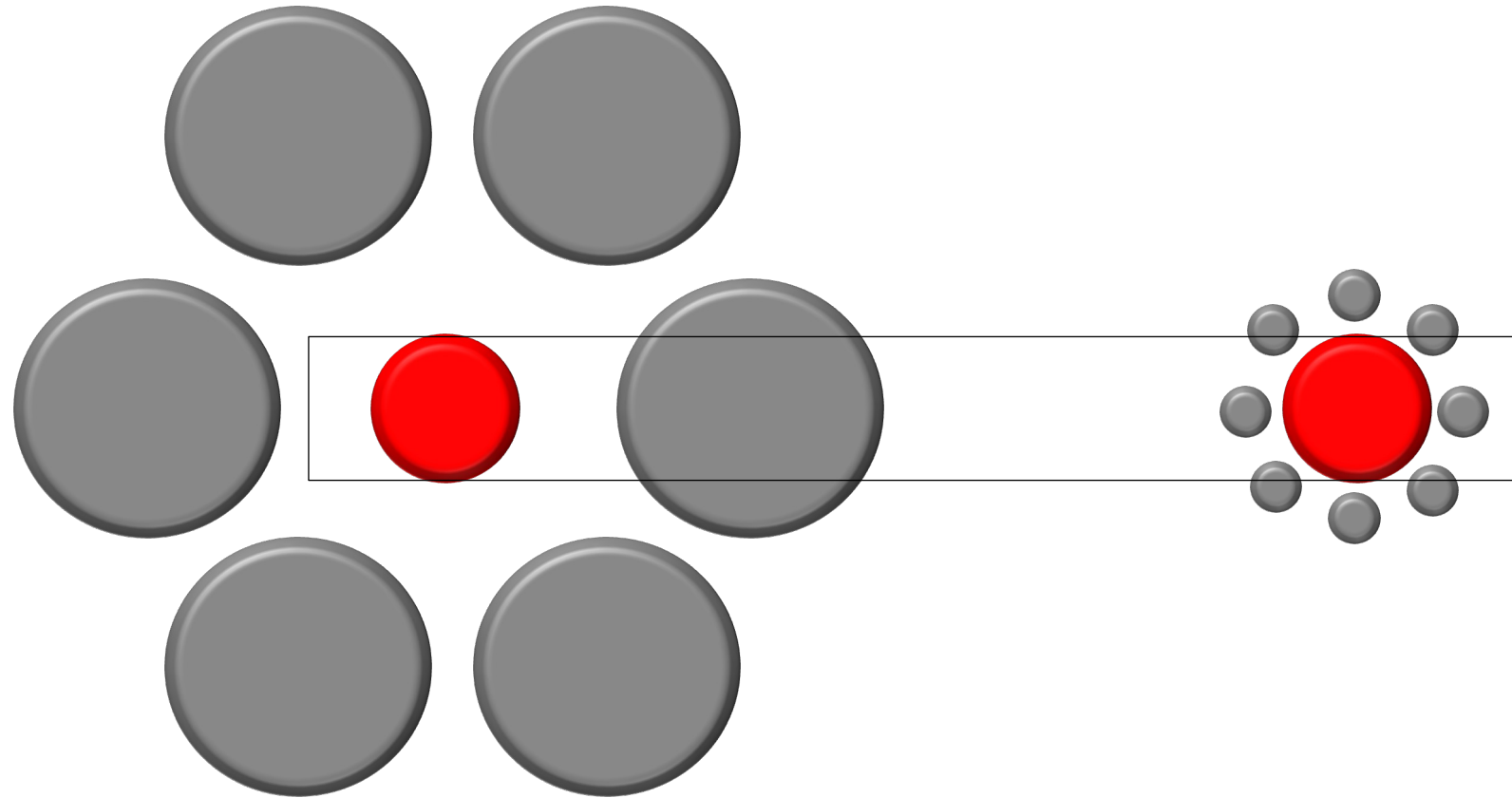
主観の概念そのものを対象とするのを  
避けることによって、  
科学として成立させてきた

## 現状

物質としての脳に関する知識は着実に  
積み上がってきているが、  
心そのものはわかった気がしない

意識が関わるとさらに厄介

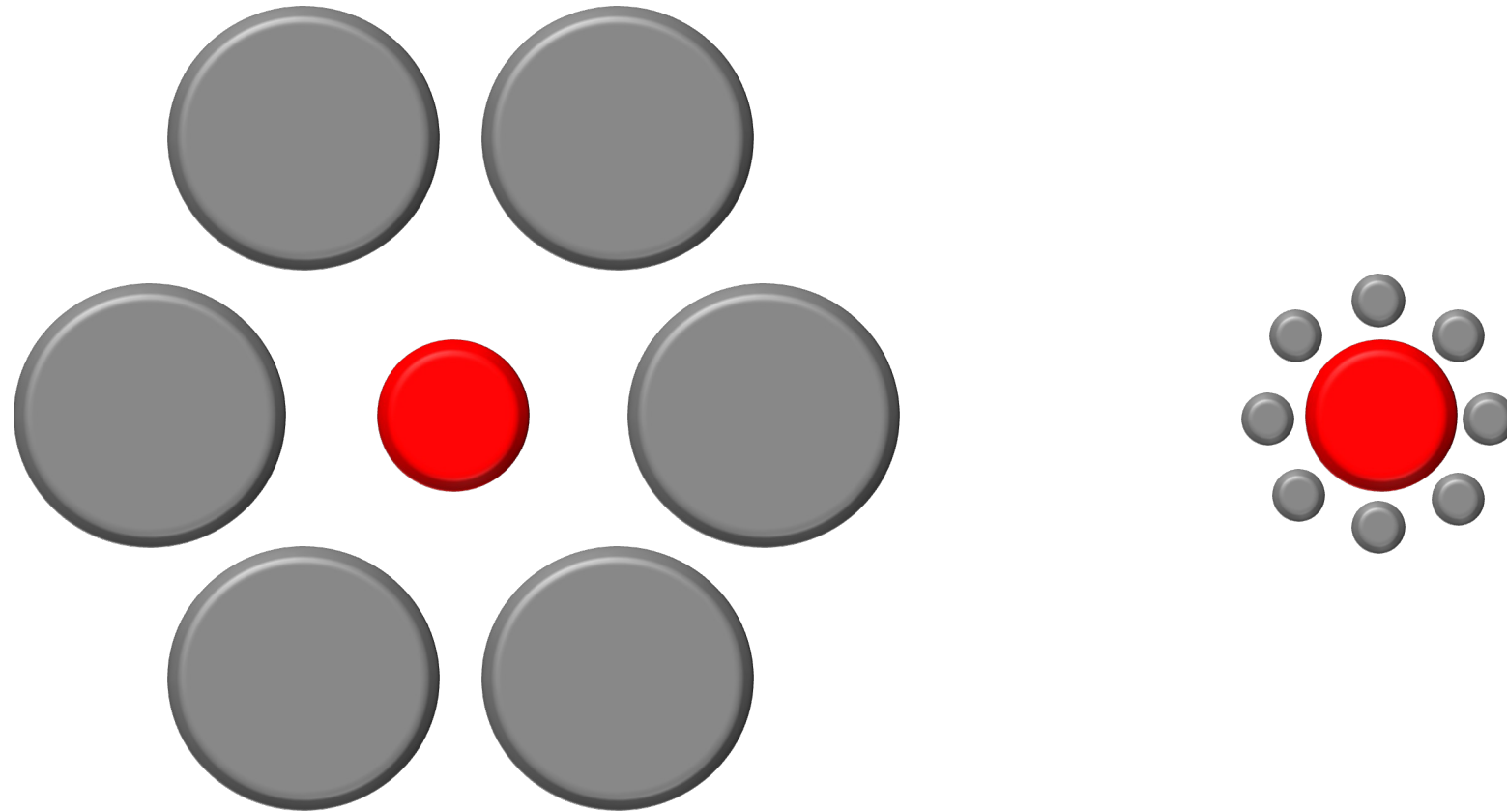
# エビングハウス錯視



錯視：実際がわかっているにもかかわらず、違って見える

意識の上ではわからない脳の処理が存在

# エビングハウス錯視



赤い丸を手で取るうとすると、

**指の幅に錯視が反映されない！**

(Goodale & Milner 1992 Trends in Neurosci)



無意識のうちに（潜在的に）  
進行する学習もある

明示的な学習だけではない！

学習とは？

経験によって

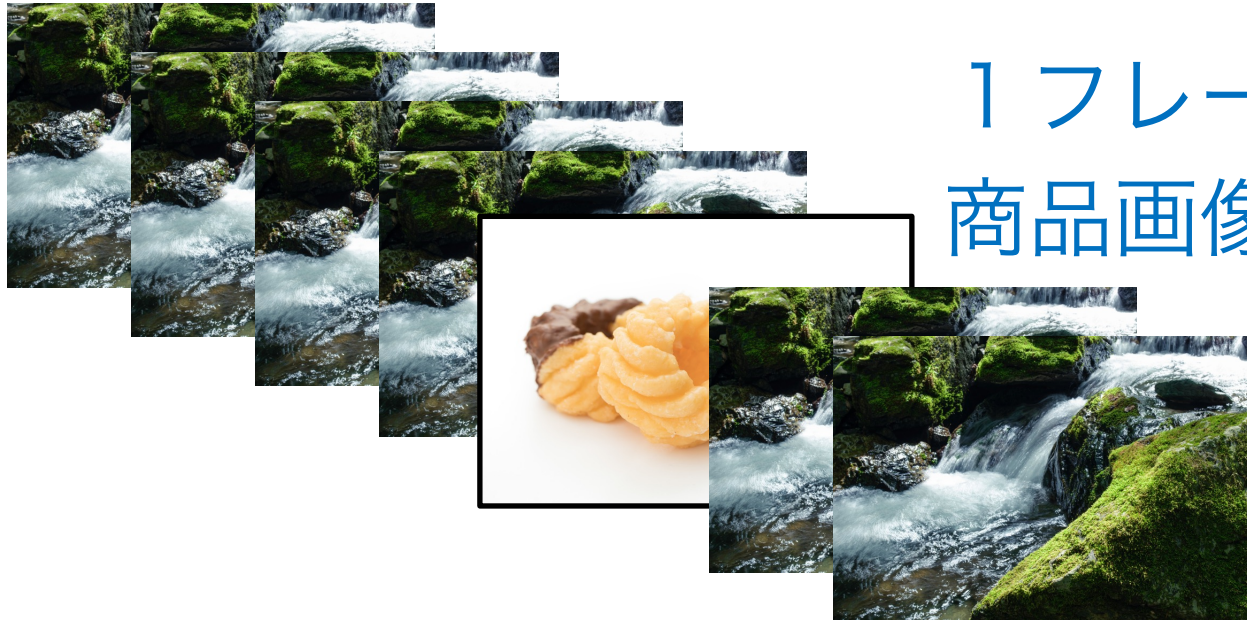
行動（入出力）の仕方が

変化すること

# 潜在的な学習の例

## サブリミナル効果

### CM映像



1フレームだけ  
商品画像を挟む

商品画像は意識にのぼらないのに好きになる？

# 潜在的な学習の例

サブリミナル効果

潜在的な知覚学習

(Karni & Sagi, 1991 PNAS)

(Seitz & Watanabe, 2003 Nature)

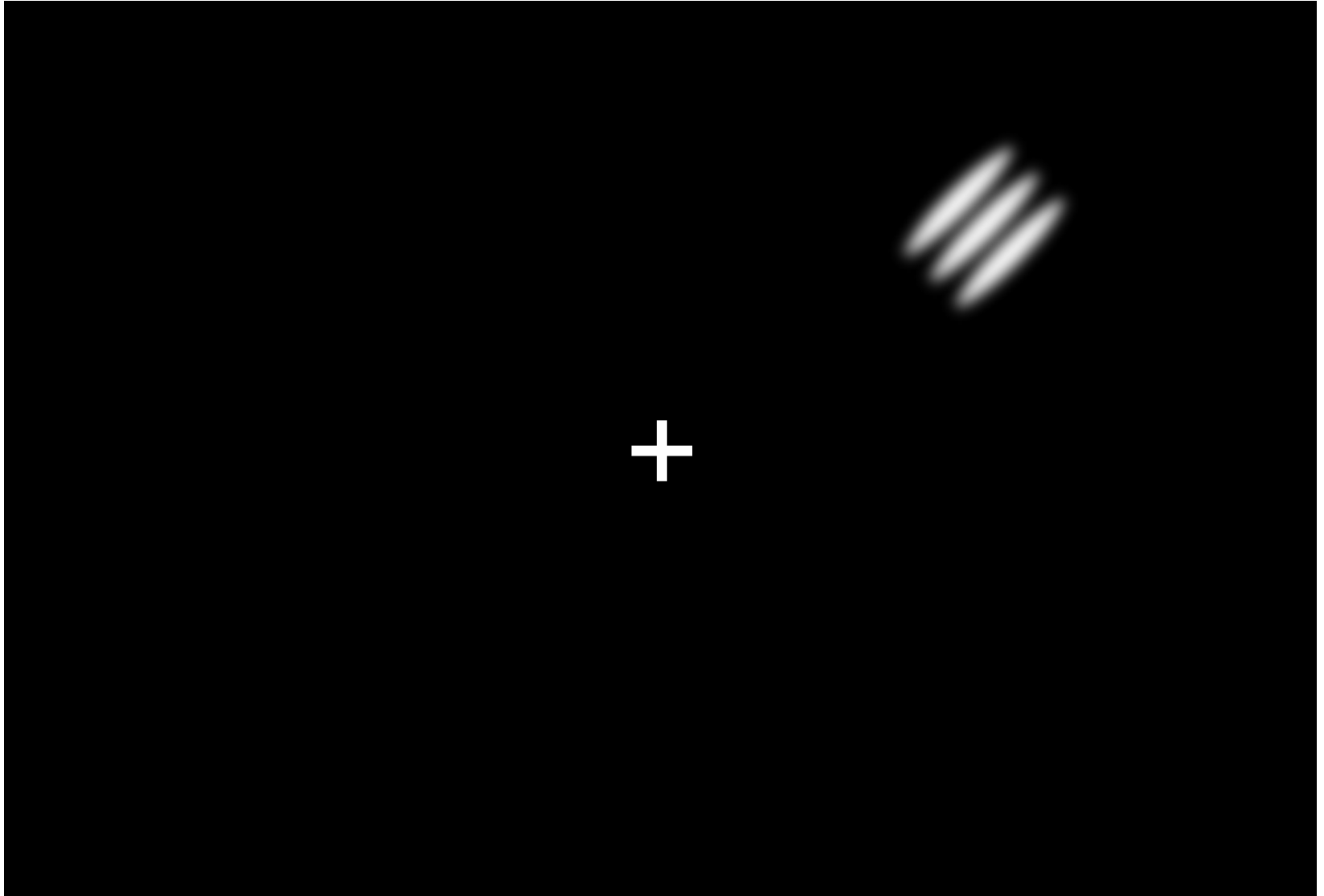
(Seitz et al. 2009 Neuron)

見えていない画像でも

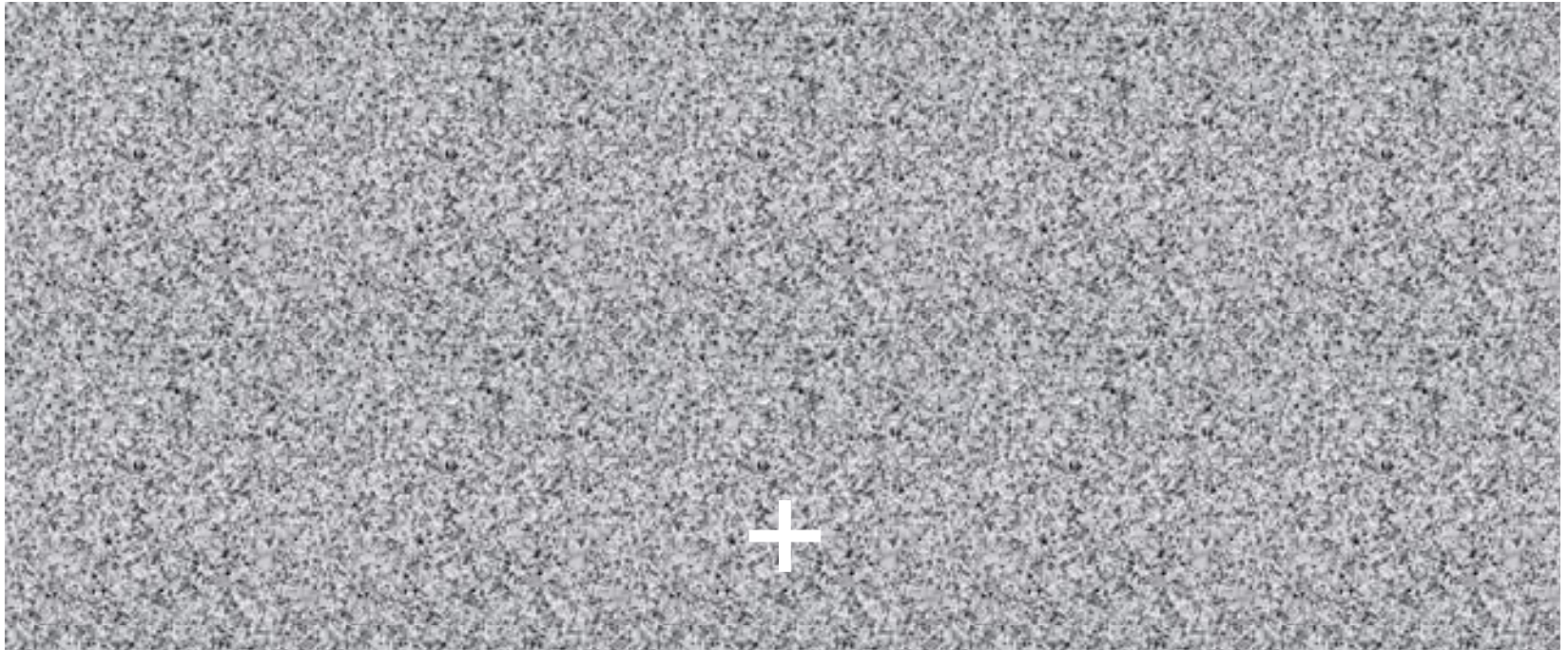
繰り返し提示することにより

判別成績が上がる

# 潜在的な知覚学習



# 潜在的な知覚学習



直後にマスクを出すと、

直前に提示していたものが見えなくなる



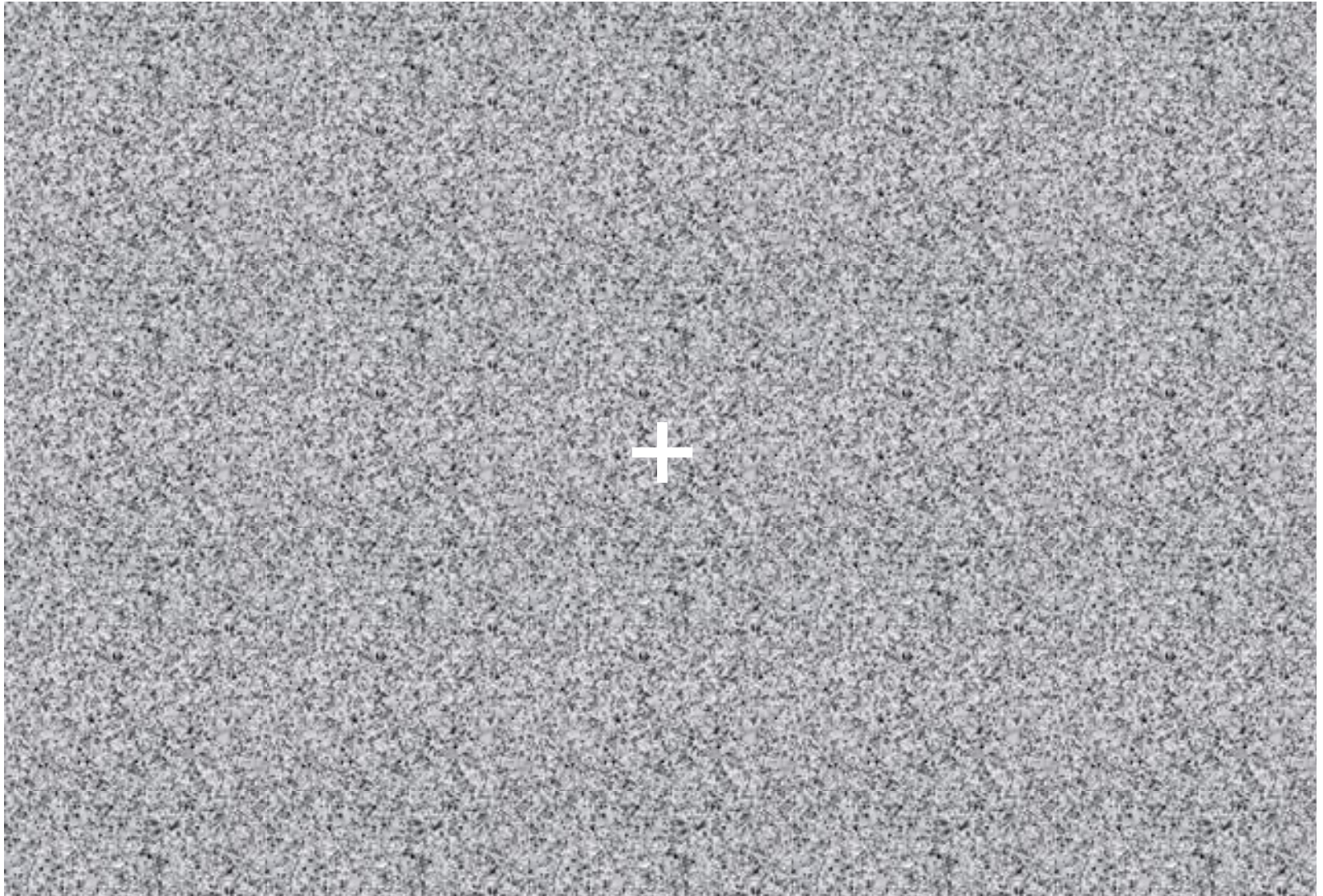
Backward Masking (Massaro 1973 J. Exp. Psy)

# 潜在的な知覚学習

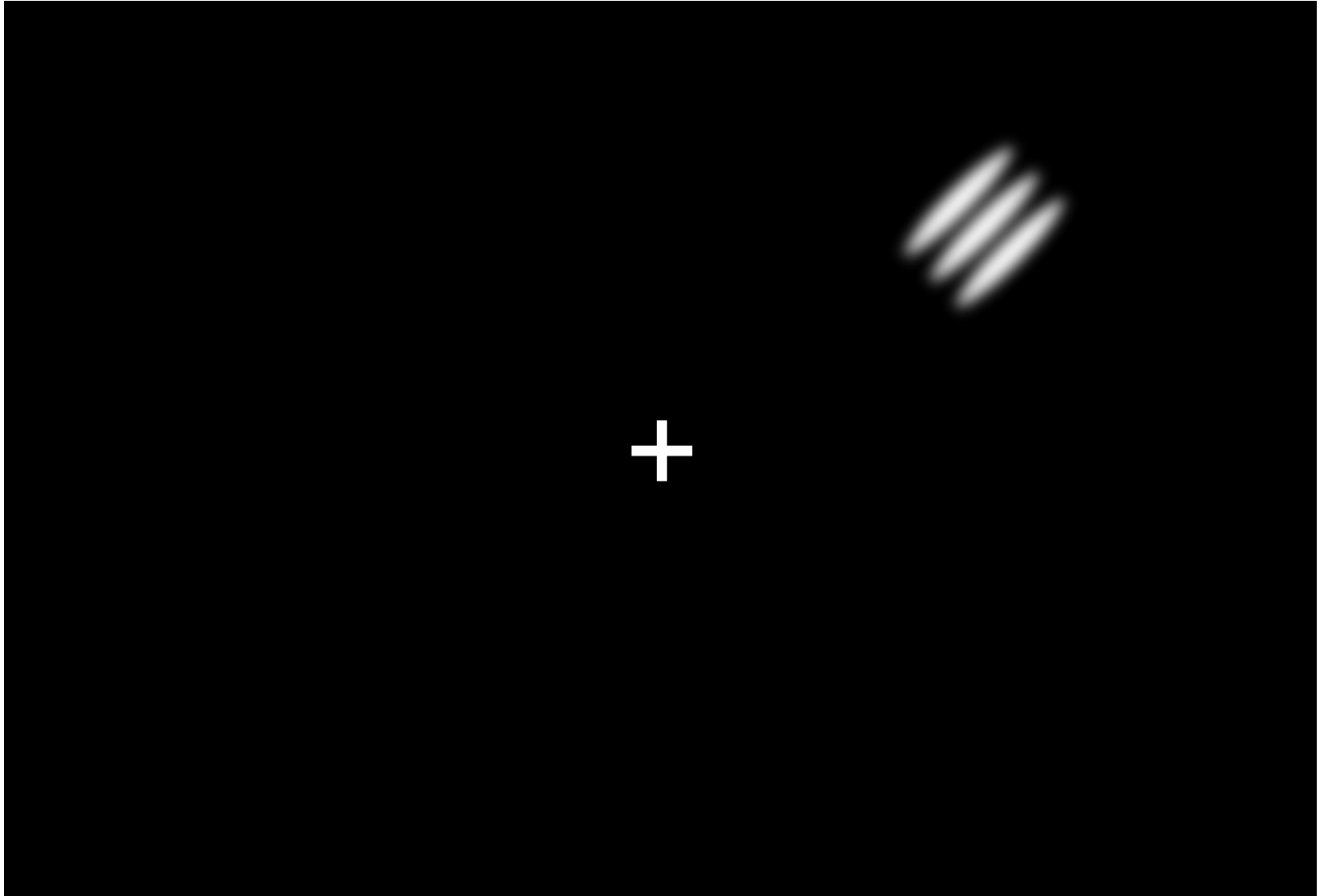
+



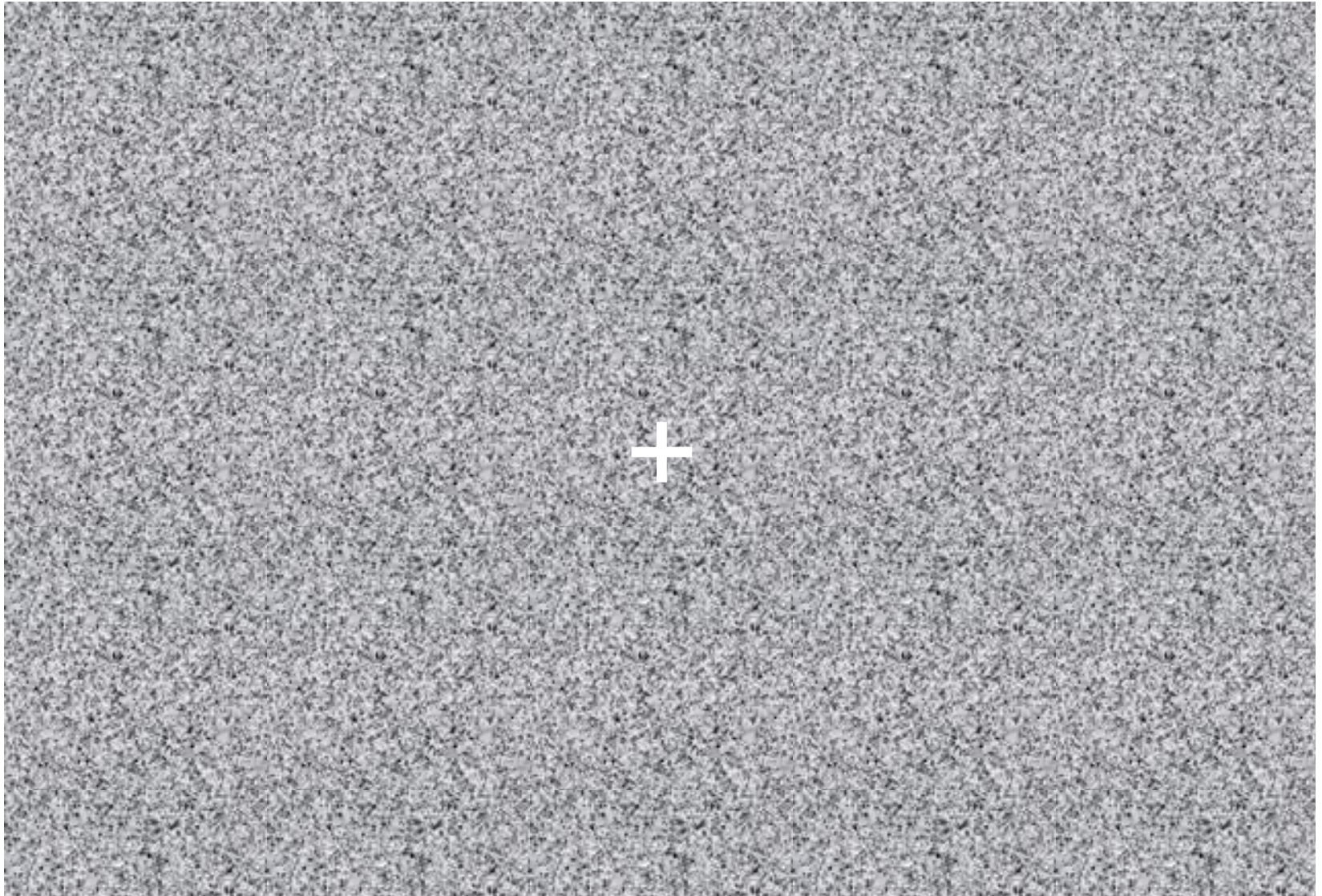
# 潜在的な知覚学習



# 潜在的な知覚学習



# 潜在的な知覚学習



どちらに傾いていたかを当てる

# 潜在的な学習の例

サブリミナル効果

潜在的な知覚学習

見えていないのに

どちらに傾いていたか、

当てられるようになる

**見えるようになったわけではない！**

意識が関わるとさらに厄介

意識に上ってなくても、  
できてしまう行動がいっぱい  
行動では観測できない！

# 心の科学とは？

客観が科学の根源。  
主観（心）は科学にならない？

「どんな対象に心を感じるか？」  
だったら客観として議論できる？

# 心の科学とは？

雲に心は？

網膜に心は？

培養スライスに心は？

ペッパーに心は？

ネズミに心は？

ミツバチに心は？

# 心の科学とは？

雲に心は？

仕組みの理解と予測可能性とは別物  
～カオス～

網膜に心は？

培養スライスに心は？

ペッパーに心は？

ネズミに心は？

ミツバチに心は？

仕組みを理解できていないのに  
自分の「心」では理解できる部分に「心」を感じる

## 私なりの「心」の定義

コンピュータではまだ実現できない  
(仕組みがわかっていない)  
脳の機能を司る実体

わかってしまえばもはや「心」ではない

「心の科学」とは心の領域を剥ぎ取っていくこと

**本当に  
主観は科学にならないのか？**

物理学は宇宙の起源を語る

観測できる現象 (客観)

加速器、望遠鏡、カミオカンデ

再現

万物理論

並進対称性, 回転対称性,  
座標不変, 光速不変,  
ゲージ対称性, ...

納得いく公理

物理学は宇宙の起源を語る

類推

観測できる現象 (客観)

加速器、望遠鏡、カミオカンデ

再現

万物理論

並進対称性, 回転対称性,  
座標不変, 光速不変,  
ゲージ対称性, ...

納得いく公理

物理学は宇宙の起源を語る

意識理論は主観を語る

類推

観測できる現象 (客観)

加速器、望遠鏡、カミオカンデ

観測できる現象 (客観)

睡眠/覚醒, 多義図形

再現

再現

万物理論

意識理論

並進対称性, 回転対称性,  
座標不変, 光速不変,  
ゲージ対称性, ...

存在, 情報, 構造, 統合,  
排他性, ...

納得いく公理

納得いく公理

物理学は宇宙の起源を語る

類推

観測できる現象 (客観)

加速器、望遠鏡、カミオカンデ

再現

万物理論

並進対称性, 回転対称性,  
座標不変, 光速不変,  
ゲージ対称性, ...

納得いく公理

意識理論は主観を語る

類推

観測できる現象 (客観)

睡眠/覚醒, 多義図形

再現

意識理論

存在, 情報, 構造, 統合,  
排他性, ...

納得いく公理

# 一元論と二元論

## 心の科学とは？

「主観」と「客観」という二元性を一元的（客観的）な理解に繋げようとする科学

# 自然淘汰と進化

「生まれか育ちか」 「中立進化」 「収斂進化」

脳は何のためにある？

# 脳は何のためにある？

遺伝子：種の環境適応のため

脳：個体の環境適応（学習）のため

脳科学において、

どこまで「生まれ」で

どこから「育ち」か？

という問いは常につきまとう

常に意識していなければならないが、  
うまく避けないと成果が出せない

# 中立進化説

## ダーウィンの進化論

生殖に有利な遺伝子が残る

## 中立進化説

生殖に不利ではない遺伝子が残る

どうでもいいものも残っている  
脳は無駄に複雑かもしれない

# 中立進化説

## ダーウィンの進化論

生殖に有利な遺伝子が残る

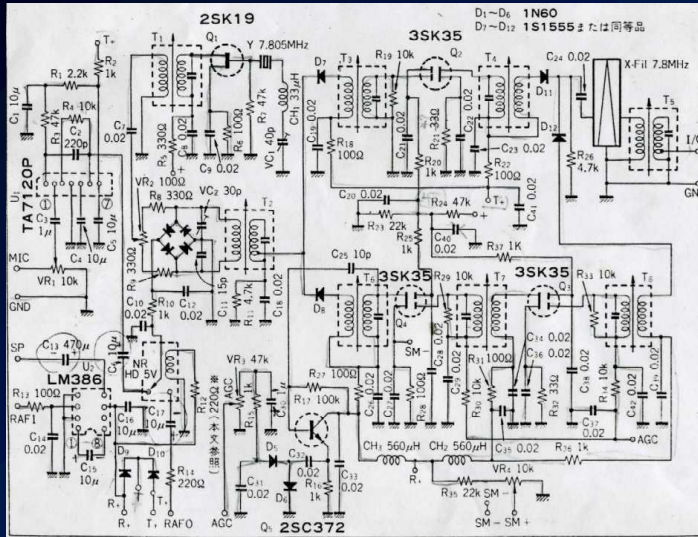
## 中立進化説

生殖に不利ではない遺伝子が残る

どうでもいいものも残っている  
脳は無駄に複雑かもしれない

# アナログ回路の職人

## 職人が作ったアナログ回路



冗長な回路で、ノイズをキャンセルし、全体として高性能が出るように設計

素人が回路図を見ても何をやっているのかさっぱりわからない

脳の全ての神経回路が同定できたとして  
本当に脳の情報処理アルゴリズムがわかるのか？

# 収斂進化

進化の系統で離れていても、  
同じ機能が有効な適応戦略をとれば、  
同様の形質を持つように進化する

**Science**

AAAS

**Universality in the Evolution of Orientation Columns in the Visual Cortex**

Matthias Kaschube, *et al.*

*Science* **330**, 1113 (2010);

DOI: 10.1126/science.1194869

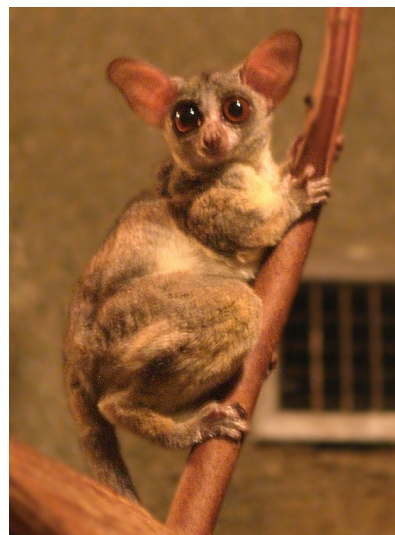
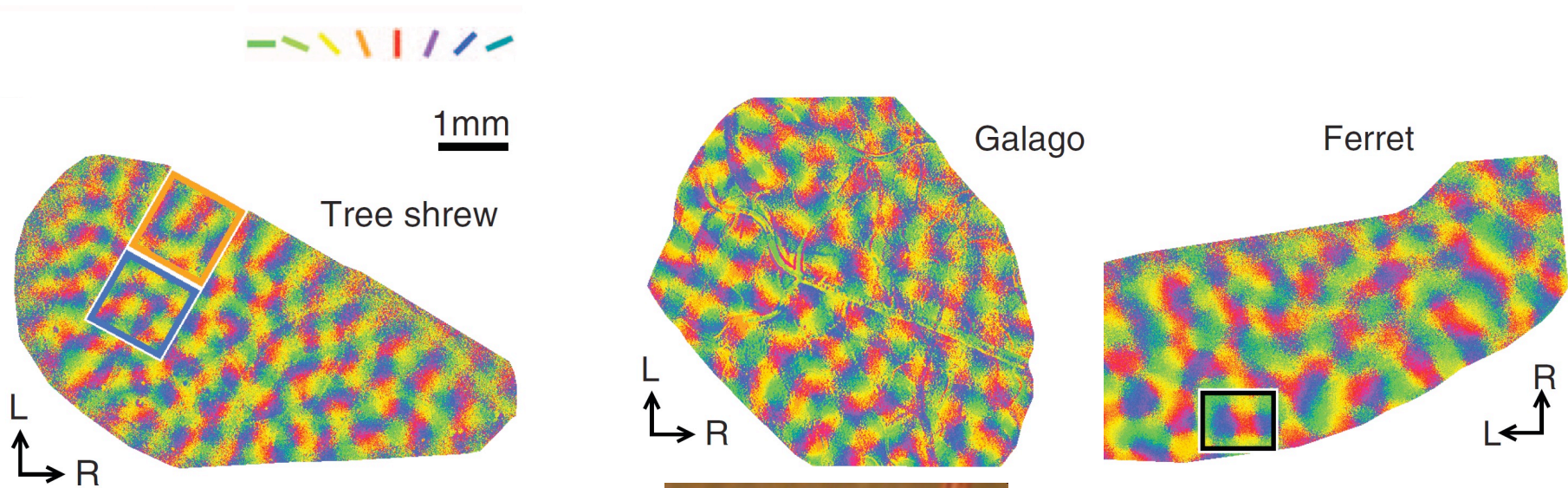
NEUROSCIENCE

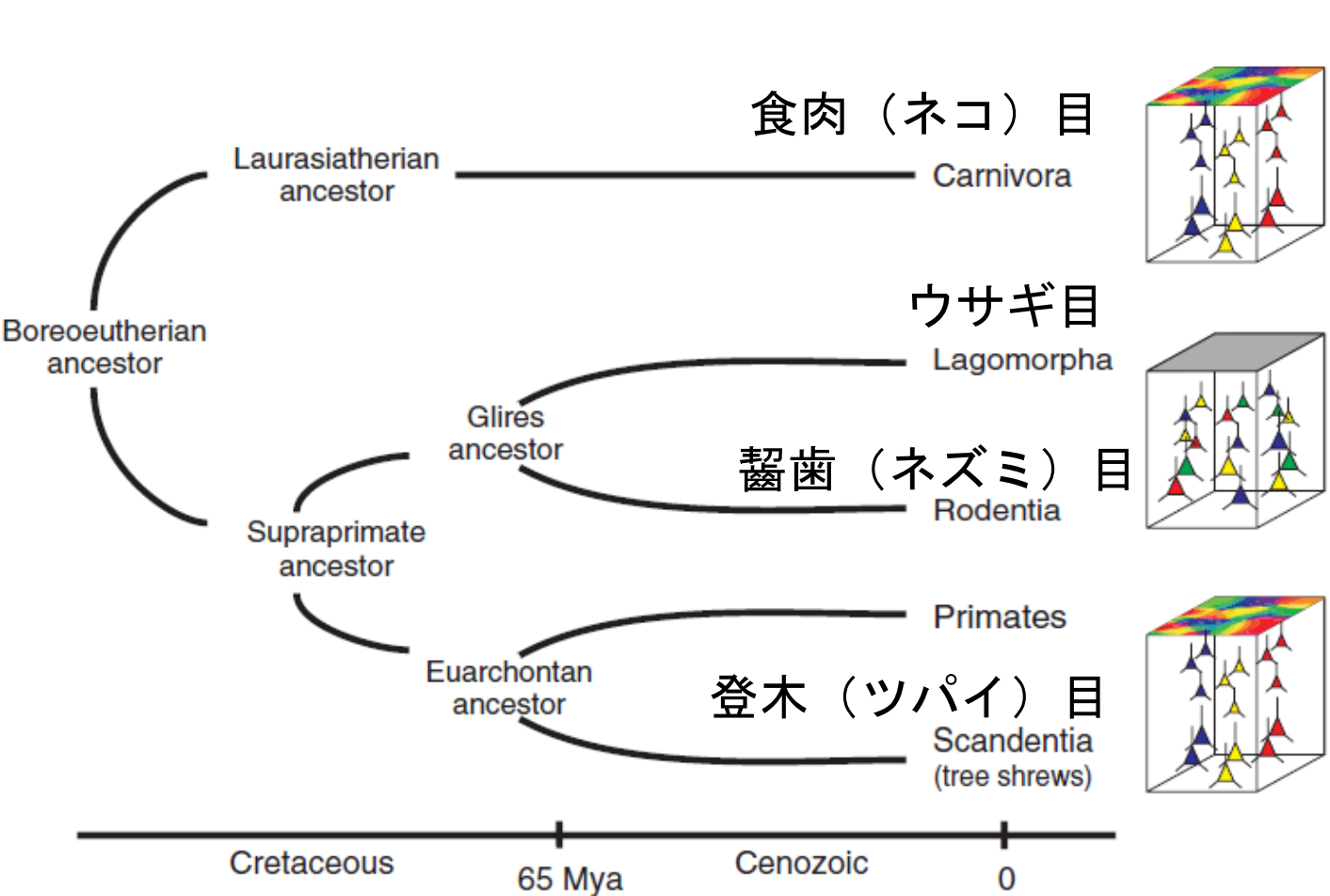
# $\pi$ = Visual Cortex

**Kenneth D. Miller**

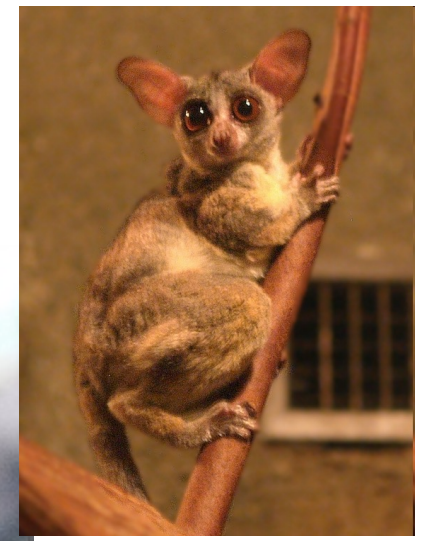
Three distantly-related mammals share a brain architecture characterized by a density of  $\pi$

# 視覚野の方位選択性マップ





Ferret



Galago



Tree shrews



# 學習方略

知識を身につけることは重要じゃない。

知識を生成する能力を身につけることが重要。

- \*意味あるグループに情報を整理したノートをつくれ。  
単にハイライトするな。
- \*誰かに教えることで自ら学べ。
- \*テストを受ける環境で勉強するか、さまざまな環境で勉強せよ。
- \*気が散るものは最小限にして勉強せよ。
- \*詰め込むな。分散して勉強せよ。
- \*一番難しいことは、最初にするか最後にせよ。
- \*記憶術を使え。
- \*絵を描け。