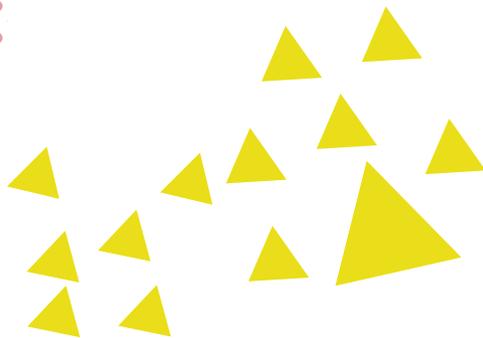
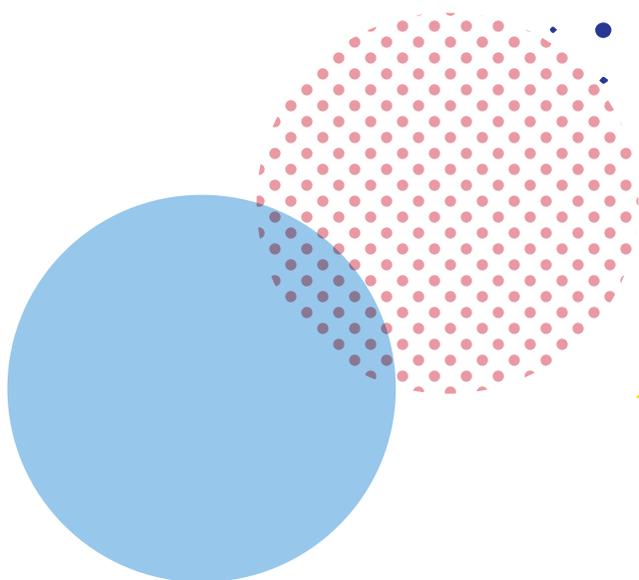
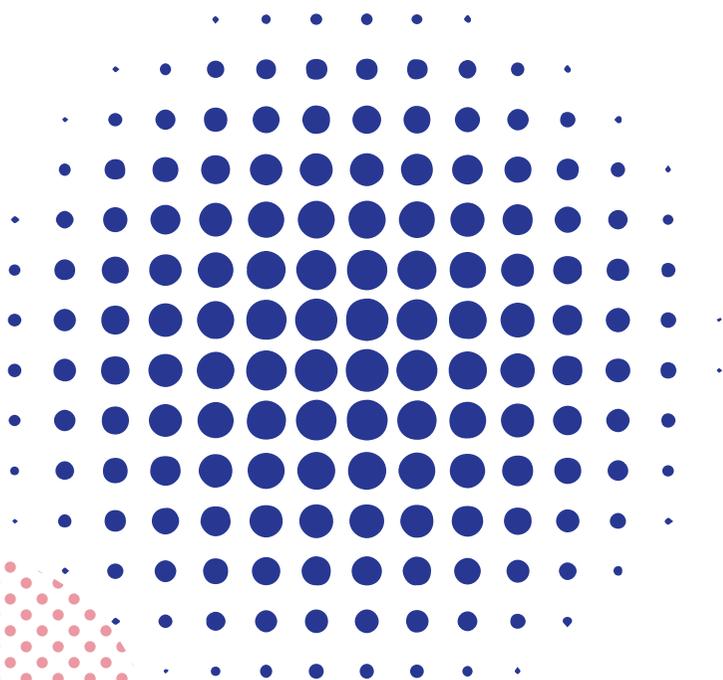
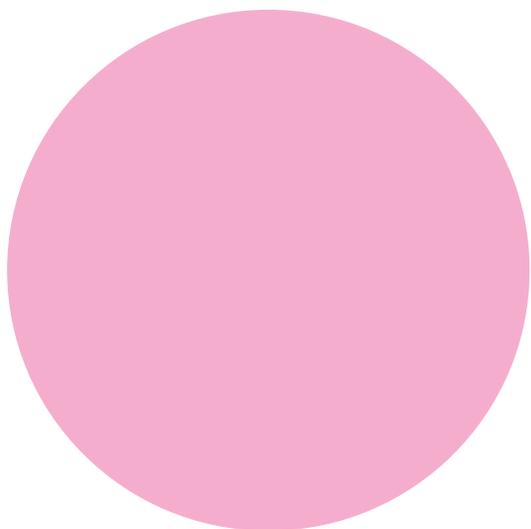


看護生理学

桑名 俊一 編著



看護生理学

桑名 俊一 編著

編集者

桑名俊一 植草学園大学 保健医療学部 教授

執筆者 (50音順)

- 荒田 昌子 兵庫医科大学 医学部 生理学 生体機能部門 准教授
(第10章)
- 有富 桂子 株式会社 エコトキシコロジー研究所 試験主任
(第1章、第12章)
- 石橋 仁 北里大学 医療衛生学部 生理学研究室 教授
(第3章、第8章)
- 角 友起 茨城県立医療大学 医科学センター 准教授
(第2章、第6章)
- 加藤 昌克 東京医療学院大学 保健医療学部 (元)教授
(第15章)
- 桑名 俊一 植草学園大学 保健医療学部 教授
(第1章、第9章、第11章、第13章、第14章)
- 小西 美ゆき 植草学園大学 保健医療学部 講師
(コラム関係)
- 杉野 一行 つくば国際大学 医療保健学部 理学療法学科 教授
(第7章)
- 中村 和弘 名古屋大学 大学院医学系研究科 統合生理学分野 教授
(第16章)
- 本間 典子 国立看護大学校 看護学部 教授
(第17章)
- 松川 寛二 広島大学 名誉教授
(第5章)
- 松田 輝 中部大学 生命健康科学部 理学療法学科 准教授
(第4章)
- 水村 和枝 中部大学 生命健康科学部 理学療法学科 (元)教授
(第4章)
- 村松 憲 杏林大学 保健学部 リハビリテーション学科 教授
(第6章)

はじめに

生理学はからだのなかの機能がどのように発現し、維持され、調節されているかを明らかにする学問です。医療の対象の多くはからだの構造や機能の変化をもつ人々であり、医師をはじめすべての医療従事者は正常な人体の構造と機能を理解する必要があります。看護師においても例外でなく患者の状態を正確に評価し、適切なケアを提供するためには、生理学の知識が不可欠です。本書は、「メデイカルスタッフ専門基礎シリーズ 新版 生理学」を基に、看護学生を対象に改訂したものです。内容については、高いレベルの生理学知識を平易にしかも系統的に記述するという方針は変えていませんので、看護実践者においても十分活用できると思います。

編者は、長年にわたり高校を卒業したばかりの看護学生に生理学を教えてきましたが、生理学と専門の看護学の間隔があるため、生理学に対して興味を失う学生が少なからずいることを実感してきました。この隔たりをなくすため、本書では「成長と老化」という章を設け、胎児から老人までのそれぞれのライフステージの生理機能の特徴を記載しました。これにより、看護専門分野の母性看護学、小児看護学、成人看護学、老年看護学との関連性が理解できるはずです。また、看護と生理学との関係を意識させるために、臨床で必要な知識・技術に関する知見をコラムに追加しました。

看護学生の皆さんが、本書を通じて生理学の知識を深め、看護学の専門分野そして将来の看護実践に自信を持って臨めるよう願っています。

最後に本書の執筆計画から出版までご尽力いただいた理工図書株式会社の皆さんに深く感謝いたします。

令和6年9月

編者 桑名俊一

目次

第1章 生理学の基礎／1

- 1 細胞とその環境／2
 - 1.1 生命の基本単位／2
 - 1.2 生体の機能的構成／2
- 2 恒常性の維持と調節機構／4
 - 2.1 恒常性の維持／4
 - 2.2 調節機構／4
- 3 細胞の機能的構造／5
 - 3.1 細胞膜／6
 - 3.2 細胞内小器官／8
 - 3.3 核／10
- 4 核酸と遺伝子／10
 - 4.1 核酸の種類と構造／10
 - 4.2 DNA と遺伝子／12
 - 4.3 遺伝情報の複製／12
 - 4.4 タンパク質合成／13
 - 4.5 ヌクレオチドの代謝／17
 - 4.6 遺伝的異常／19
- 5 幹細胞と再生医療／20
 - 5.1 幹細胞とは／20
 - 5.2 ES 細胞／21
 - 5.3 iPS 細胞／22
 - 5.4 iPS 細胞の臨床応用／22
- 問 題／23

第2章 神経系の基本的機能／27

- 1 神経細胞／28

- 1.1 神経細胞の構造／28
- 1.2 神経接続の基本的構成／29
- 1.3 神経細胞のイオン組成と細胞膜の構造／29
- 1.4 神経の静止電位／31
- 2 神経信号の発生／33**
 - 2.1 活動電位の発生／33
 - 2.2 閾膜電位と全か無かの法則／35
 - 2.3 相対不応期と絶対不応期／36
- 3 神経信号の伝わり／37**
 - 3.1 有髄神経と無髄神経／37
 - 3.2 興奮の伝導（活動電位の伝導）／38
 - 3.3 神経伝導速度／40
- 4 神経の連絡と神経信号の伝達／42**
 - 4.1 シナプス伝達／42
 - 4.2 興奮性シナプスと抑制性シナプス／43
 - 4.3 神経伝達物質／46
 - 4.4 シナプスの性質／49
 - 4.5 シナプス接続と神経回路／50
- 問 題／52

第3章 神経系の機能／55

- 1 概要／56
- 2 末梢神経系／57
 - 2.1 脳神経／57
 - 2.2 脊髄神経／60
- 3 自律神経系／61
 - 3.1 交感神経系／62
 - 3.2 副交感神経系／62
 - 3.3 自律神経系の化学伝達物質とその受容体／64
 - 3.4 自律神経節後線維の神経終末部／66
 - 3.5 自律神経系による内臓支配／66
 - 3.6 内臓求心性線維／67

- 3.7 自律機能の反射性調節／67
- 4 中枢神経系／68**
 - 4.1 脊髄の構造と機能／68
 - 4.2 脳の構造と機能／69
- 5 睡眠と覚醒／82**
 - 5.1 脳波／82
 - 5.2 睡眠・覚醒／83
- 6 学習と記憶／86**
 - 6.1 陳述記憶／87
 - 6.2 手続き記憶／88
 - 6.3 学習と記憶のメカニズム／88
 - 6.4 臨界期／89
- 問 題／90

第4章 感覚の生理／93

- 1 感覚総論／94**
 - 1.1 適刺激、様式／94
 - 1.2 刺激の強さと感覚の大きさの関係／94
 - 1.3 受容変換部位／96
 - 1.4 色々な条件下での感覚／97
- 2 体性感覚・内臓感覚／97**
 - 2.1 皮膚感覚／97
 - 2.2 深部感覚／104
 - 2.3 内臓感覚／106
 - 2.4 痛覚と痒み／107
- 3 化学感覚（味覚、嗅覚）／114**
 - 3.1 味の種類と受容体、味の受容器／114
 - 3.2 味覚の伝導路／116
 - 3.3 味覚が関与する反射／117
 - 3.4 においの種類とその受容器／118
 - 3.5 嗅覚の伝導路／119
- 4 視覚／119**

- 4.1 眼の構造と役割／119
- 4.2 眼の遠近調節／119
- 4.3 眼に入る光の量の調節／121
- 4.4 網膜／121
- 4.5 視覚の伝導路／123
- 5 聴覚、平衡感覚／123**
 - 5.1 音とは／123
 - 5.2 音が神経の信号に変えられるまで／125
 - 5.3 聴覚の伝導路／126
 - 5.4 平衡感覚の受容器／127
 - 5.5 平衡感覚の伝導路／127
- 問 題／129

第5章 筋肉・運動の生理／131

- 1 筋肉の種類と性質／132**
 - 1.1 筋肉の構造と分類／132
 - 1.2 骨格筋・心筋・平滑筋の構造と特性／132
 - 1.3 骨格筋・心筋・平滑筋の機能的特性／134
- 2 骨格筋の生理機能／135**
 - 2.1 骨格筋に分布する神経と血管／135
 - 2.2 羽状筋と平行筋／136
 - 2.3 筋収縮タンパクの微細構造／136
 - 2.4 運動神経と神経筋接合部と運動単位／138
 - 2.5 筋収縮の仕組みと ATP エネルギー／140
 - 2.6 ATP の合成機構／142
 - 2.7 骨格筋の機械的特性／146
 - 2.8 筋線維の分類：Type I 細胞と Type II 細胞／150
 - 2.9 筋肉の委縮と肥大／151
 - 2.10 筋血流量の調節／152
- 問 題／155

第6章 運動の制御機構／159

1 運動の実行／160

1.1 運動単位／160

1.2 筋張力の制御／162

2 運動の制御指令／163

2.1 基本的な運動のプログラム／163

2.2 上位運動中枢と運動指令の伝導路／168

2.3 大脳皮質運動野／170

2.4 大脳基底核／172

3 運動の調節／177

3.1 小脳による運動調節／177

問 題／180

第7章 血液の生理／183

1 血液の構成／184

2 有形血液成分／185

2.1 造血／185

2.2 赤血球／186

2.3 白血球／194

2.4 血小板／196

2.5 白血病／198

3 液体血液成分／198

3.1 血漿タンパク質／198

3.2 血液凝固因子／199

3.3 免疫物質／202

3.4 脂質／203

3.5 糖質／203

3.6 ミネラル／203

問 題／205

第8章 生体防御／209

- 1 リンパ組織／210
- 2 自然免疫／211
 - 2.1 食細胞による貪食／211
 - 2.2 補体／211
 - 2.3 好酸球と抗塩基球／212
 - 2.4 ナチュラルキラー細胞（NK 細胞）／212
 - 2.5 樹状細胞と抗原提示／213
 - 2.6 サイトカイン／214
 - 2.7 トル様受容体／215
- 3 適応免疫／215
 - 3.1 T リンパ球／216
 - 3.2 B リンパ球と抗体産生／219
 - 3.3 抗体の役割／221
 - 3.4 免疫記憶と予防接種／222
- 4 炎症／223
- 5 免疫の異常／224
 - 5.1 アレルギー／224
 - 5.2 自己免疫疾患／225
- 問 題／228

第9章 循環の生理／231

- 1 循環系の概要／232
- 2 心臓／234
 - 2.1 心臓の機能的構造／234
 - 2.2 心筋細胞の興奮と伝導／234
- 3 心電図／236
 - 3.1 心電図の記録法／237
 - 3.2 心電図の見かたと異常心電図／240
- 4 心臓のポンプ作用と心周期／242
 - 4.1 心周期／243

- 4.2 心音／244
- 5 心拍出量／245
- 6 血管系／245
 - 6.1 動脈／247
 - 6.2 毛細血管系／250
 - 6.3 静脈系／253
- 7 心臓・血管の調節機構／255
 - 7.1 心臓機能の調節／255
 - 7.2 血管運動の調節／256
- 8 特殊領域の循環／260
 - 8.1 肺循環／260
 - 8.2 冠状循環／261
 - 8.3 胎児の血液循環／262
 - 8.4 脳循環／263
- 9 リンパ管系／263
- 問 題／264

第10章 呼吸／268

- 1 呼吸器／269
 - 1.1 気道／269
 - 1.2 肺／270
- 2 呼吸運動／271
 - 2.1 胸郭運動／271
 - 2.2 呼吸筋／272
- 3 肺機能／274
 - 3.1 肺気量／274
 - 3.2 気道抵抗と換気障害／276
 - 3.3 肺コンプライアンス／278
- 4 体内のガス交換／282
 - 4.1 肺のガス交換／282
 - 4.2 血液による O₂ 運搬／284
 - 4.3 血液による CO₂ の運搬／288

- 5 末梢の受容器・反射／289
 - 5.1 末梢性化学受容器／289
 - 5.2 肺の機械容器／290
- 6 呼吸の神経性調節／292
 - 6.1 呼吸の運動制御について／292
 - 6.2 呼吸中枢／293
 - 6.3 中枢性化学受容／294
 - 6.4 安静時の換気量の調節機構／294
- 7 呼吸の随意性調節／295
 - 7.1 呼吸の随意性調節／295
 - 7.2 発声－呼吸連関／295
- 8 特殊呼吸、環境と呼吸／296
 - 8.1 異常呼吸の種類／296
 - 8.2 特殊環境の呼吸への影響／297
 - 8.3 運動と呼吸／298
- 問 題／299

第11章 消化・吸収／303

- 1 消化・吸収の概要／304
 - 1.1 消化器系の構造／304
 - 1.2 消化管運動の役割と様式／306
 - 1.3 自律神経系の働き／307
 - 1.4 三大栄養素の消化／307
- 2 口腔での消化／309
 - 2.1 そしゃく（咀嚼）／309
 - 2.2 唾液／309
 - 2.3 嚥下／310
- 3 胃での消化／312
 - 3.1 胃の運動／312
 - 3.2 胃液／313
- 4 小腸での消化と吸収／317
 - 4.1 小腸の運動／317

- 4.2 膵液／318
- 4.3 胆汁／320
- 4.4 小腸での消化・吸収／321
- 4.5 消化管ホルモンによる消化の調節／324
- 5 大腸／324
- 6 排便／325
- 問 題／327

第12章 栄養・代謝／329

- 1 概要／330
 - 1.1 栄養と栄養素／330
 - 1.2 代謝とは／331
- 2 エネルギー代謝／331
 - 2.1 エネルギー量とカロリー／331
 - 2.2 呼吸商（呼吸比）／332
 - 2.3 基礎代謝／333
 - 2.4 食事誘発性熱産生／334
 - 2.5 身体活動とエネルギー消費／334
- 3 栄養素の代謝／339
 - 3.1 糖質代謝／339
 - 3.2 タンパク質代謝／342
 - 3.3 脂質代謝／343
 - 3.4 絶食時の代謝／346
- 4 血糖の維持と糖尿病／347
 - 4.1 血糖の維持／347
 - 4.2 糖尿病／347
- 5 ビタミン／350
 - 5.1 脂溶性ビタミン／351
 - 5.2 水溶性ビタミン／354
- 6 ミネラル／356
 - 6.1 ナトリウム (Na)／357
 - 6.2 カリウム (K)／357

6.3 カルシウム (Ca) / 357

6.4 鉄 (Fe) / 359

問 題 / 360

第13章 腎臓の生理 / 363

1 腎臓の機能的構造 / 364

1.1 ネフロン / 365

1.2 腎循環系の特徴 / 366

2 尿の生成とその機序 / 367

2.1 糸球体濾過 / 368

2.2 再吸収される物質 / 370

2.3 分泌される物質 / 376

2.4 水素イオンの分泌と体液 $[H^+]$ 調節 / 376

2.5 クリアランス / 378

3 排尿 / 380

3.1 尿管 / 380

3.2 膀胱 / 380

3.3 排尿反射 / 381

問 題 / 383

第14章 体液の恒常性 / 385

1 体液の浸透圧濃度 / 386

1.1 溶液の濃度 / 386

1.2 体液の浸透圧濃度 / 387

2 体液量と体液の組成 / 388

2.1 体液量とその区分 / 388

2.2 体液の組成 / 390

3 体液浸透圧の調節機構 / 391

3.1 調節の概要 / 391

3.2 血漿量の調節 / 393

3.3 血漿 Na^+ 量の調節 / 395

- 4 体液 $[H^+]$ と pH / 398
 - 4.1 水素イオン濃度と pH / 398
 - 4.2 酸と塩基 / 399
 - 4.3 緩衝作用 / 399
 - 4.4 血液の緩衝系 / 400
- 5 血液 $[H^+]$ の調節機構 / 402
- 6 アシドーシスとアルカローシス / 404
 - 6.1 呼吸性アシドーシスと呼吸性アルカローシス / 404
 - 6.2 代謝性アシドーシスと代謝性アルカローシス / 404
- 7 代償作用 / 406
- 問 題 / 410

第 15 章 内分泌 / 416

- 1 ホルモン / 417
 - 1.1 ホルモンの種類と受容体 / 417
 - 1.2 ホルモン分泌の調節 / 422
 - 1.3 視床下部ホルモンと下垂体 / 422
 - 1.4 副腎髄質ホルモン / 428
 - 1.5 甲状腺刺激ホルモンと甲状腺ホルモン / 429
 - 1.6 膵臓と糖代謝 / 430
- 2 骨とカルシウム代謝 / 433
 - 2.1 骨とカルシウム / 433
 - 2.2 カルシウム代謝 / 433
- 3 生殖とホルモン / 434
 - 3.1 精子形成 / 435
 - 3.2 卵子の形成と排卵 / 436
 - 3.3 妊娠と分娩 / 438
- 問 題 / 441

第 16 章 体温の調節 / 443

- 1 体温とは / 444

- 1.1 核心温と外層温／444
- 1.2 検温／445
- 1.3 核心温の限界／446
- 2 体温のリズム／447**
 - 2.1 概日リズム／447
 - 2.2 概月リズム／448
- 3 熱の移動／448**
 - 3.1 非蒸散性熱損失／448
 - 3.2 蒸散性熱損失／449
- 4 体温調節反応／449**
 - 4.1 自律性体温調節反応／449
 - 4.2 行動性体温調節反応／454
- 5 自律性体温調節のメカニズム／454**
 - 5.1 体温調節の2つの制御様式／455
 - 5.2 体温調節中枢からの指令伝達メカニズム／458
- 6 発熱／460**
 - 6.1 発熱とうつ熱／460
 - 6.2 発熱の生理的意義／460
 - 6.3 発熱のメカニズム／463
- 問 題／464

第17章 成長と老化／467

- 1 ヒトのライフコース／468
- 2 受精から着床まで（＝母体の妊娠成立まで）／471
 - 2.1 先体反応から受精まで／471
 - 2.2 受精から着床まで／472
 - 2.3 妊娠の成立／472
- 3 胎芽期と胎児期＝母体の妊娠期／472
 - 3.1 胎児付属物／472
 - 3.2 胎芽期／476
 - 3.3 胎児期／478
 - 3.4 妊娠中の母体変化／478

- 4 分娩／480
 - 4.1 分娩と出生／480
 - 4.2 分娩後の母体の変化／482
- 5 個体の成長／482
 - 5.1 身長・体重の経時的変化／483
 - 5.2 各器官系の成長パターン／483
 - 5.3 器官系の発達と成長／484
- 6 個体の加齢・老化に伴う変化／491
 - 6.1 細胞レベルの老化／493
 - 6.2 組織レベルの老化／493
 - 6.3 器官系レベルの老化／494
- 7 個体レベルの老化／501
- 8 死／502
 - 8.1 死の受容／502
 - 8.2 臨死期の生体の変化／502
 - 8.3 死を含む状態／503
 - 8.4 死後の生体の変化／504
- 9 健康フロンティアとホメオスタシス／504
- 問 題／509

生理学の基礎

第1章

我々は誰しも自分の身体の不思議さについて興味や疑問をもったことがあると思う。例えば、なぜ息をしているか？ なぜ緊張すると心臓がドキドキするのか？ などの疑問である。一度考え始めると次々と疑問が湧き上がってくるはずである。生理学 (Physiology) とは、このような身体の仕組みについての疑問に対する答えを見つける学問である。一般に、病気や疾病は身体の仕組みが変化したために起こるので、専門的な医療を展開するためには正常な身体の仕組みを理解することが必要不可欠となる。このことから生理学は医療に携わる者が必ず学ぶものとなっている。また、最近の科学の進歩から、生理学の対象は目に見えない細胞や遺伝子のレベルまで広がっている。本章では、生命の基本となる細胞の機能と遺伝子の働きについて説明する。

1 細胞とその環境

1.1 生命の基本単位

地球に生命が生まれた約 38 億年前から現在に至るまで、生物は多様に進化してきた。生命の基本的な単位は**細胞** (cell) である。海に漂う単細胞動物は、**図 1.1** に示すように外界の水溶液 (外部環境) から栄養素と酸素 (O_2) を取り入れ、それを細胞内で利用し、エネルギーを取り出す。そして生じた代謝産物と二酸化炭素 (CO_2) を外界へ排出している。細胞は取り出したエネルギーを利用して細胞自体の運動や分泌、あるいは構成要素の合成を行う。

ヒトを含む陸上で生活する多細胞動物においても、個々の細胞は生命活動を維持するために、単細胞動物と同じように外界から栄養素と O_2 を摂取し、エネルギーを産生し、代謝産物を排出しなければならない。ただし、細胞が集まり体が大きくなるにつれて、個々の細胞は単細胞動物のようにエネルギー源を直接外界から摂取することができなくなってくるので、外界と細胞まで物質を運ぶ特別な運搬系が必要になってくる (**図 1.2**)。ヒトの場合、その働きを担うのが、循環系 (心臓血管系) であり、外部環境と細胞間を結んでいる。生体の個々の細胞を直接取り囲んでいる体液を間質液あるいは組織液という。間質液と血液をあわせて細胞外液という。単細胞動物を取り囲んでいるのが外部環境であり、ヒトの体の場合、これに相当するものが細胞外液であって、これを特に**内部環境**という。

1.2 生体の機能的構成

我々の体を構成している物質を化学的に見ると原子でありそれが結合した分子を

形成する。次にこれらの分子が集合し、生命の基本単位である細胞となる。多細胞動物では、同じ種類の細胞が集まって**組織** (tissue) となり特定の機能を行う。これは上皮組織、筋組織、神経組織、結合組織の4種類に分類される。これらの組織が組み合わさって心臓や肝臓などの**器官** (organ) となる。さらに器官が協調して特別な機能をもつようになる。この一群の器官を**系統** (system) といい、例えば、心臓、血液、血管が協調して循環系を形成する。これらの系統が統合されてヒト特有の構造と機能をもつ**個体** (organism) へとなる (図 1.3)。

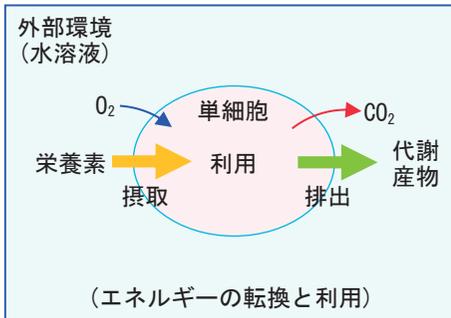


図 1.1 水中に生息する単細胞動物

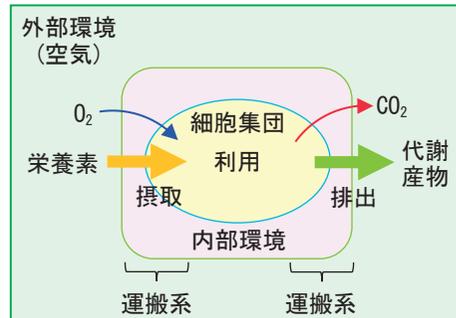


図 1.2 陸上に生息する多細胞動物

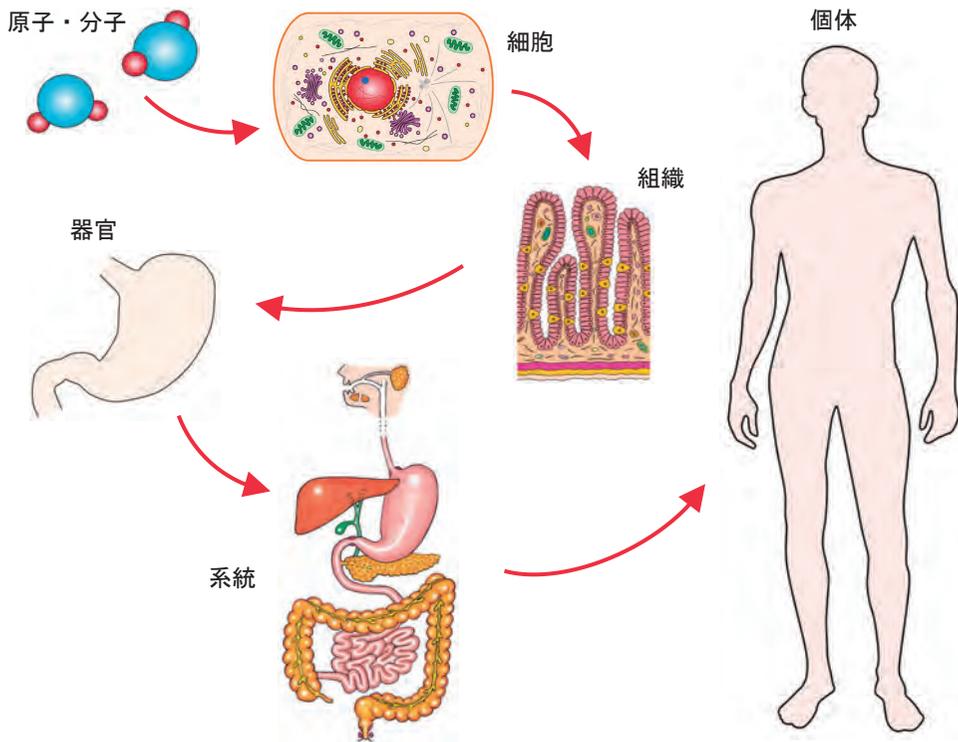


図 1.3 生体のレベル

2 恒常性の維持と調節機構

2.1 恒常性の維持

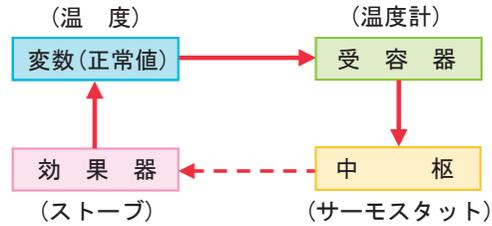
単細胞動物も多細胞動物も、細胞を取り巻く環境が安定していれば生命活動を維持することができる。しかし、外部環境は常に変化しているため、単細胞動物は生命活動を長期にわたって持続することは難しい。一方、多細胞動物では外部環境が大きく変化しても内部環境を一定に保ちさえすれば、生命活動は維持される。多細胞動物では、個々の器官や系統が単に集まったものでなく、たがいに協調して全体として内部環境を常に最適な状態に保つという目的を果たしている。生体のもつこのような性質を内部環境の**恒常性（ホメオスタシス (Homeostasis)**）の維持という。ほとんどの疾病は恒常性が維持できない結果と考えられる。

2.2 調節機構

先に述べたように、我々は常に外界と物質を交換している。体内の色々な値（正常値あるいは基準値、変化する値なので変数ともいう）を一定にするには、入ってくる量（入力）と出ていく量（出力）を同じにすればよい。例えば、体内の水分量は、尿や発汗などで水分が失われるが、その量に応じて水を摂取すれば、水分量は一定に保たれる。このように、出力が変化した場合、それにに応じて入力を変化させたり、あるいはその逆に入力の変化に応じて出力を変化させ一定の値に保つ。生体では、これらの正常値や入力量、出力量の情報を伝え合って恒常性を維持する機構が備わっており、情報を伝える役割を担っているのが神経系や内分泌系である。

恒常性の調節機構は、調節されている色々な値（変数）の他に少なくとも3つの構成要素からなっている。それは、**受容器 (receptor)**、**中枢 (control center)**、**効果器 (effector)** とよばれるものである。受容器とは検知器のことであり、血圧の変化を感受する圧受容器や、血液中の物質の変化を感受する化学受容器などである。これは変数を監視し、その情報を中枢に送る。中枢では受け取った情報を解析して適切な応答や作用を決定する。効果器は中枢からの情報によって実際に応答を実行するものである。応答の結果がフィードバックされて変数に影響を与える。これらの関係は、部屋の暖房システムを考えるとわかりやすい。部屋を暖めるストーブ（効果器）により部屋の温度（変数）が上昇する。温度計（受容器）で温度を測り、その温度が設定値より上昇するとサーモスタット（中枢）が働きストーブ（効果器）のスイッチを切るようになる。部屋の温度の調節と同じように、生体の調

節機構を模式的に示すのに図 1.4 のようにブロックダイアグラムとして表現することができる。情報の流れる方向は矢印で示してあり、実線はその前後の関係が比例（促進）的に、破線は反比例（抑制）的に変化することを意味する。例えば、この図で変数から受容器への関係が実線で示してあるのは、変数が増加したとき



() 内は室温の自動調節の場合を記入してある。実線は比例関係、破線は反比例関係を示す。

図 1.4 負のフィードバック機構

には受容器からの情報が増加することを意味している。中枢から効果器への関係は破線であるが、これは中枢の働きが増加すると効果器の働きが減少することを意味している。その結果、増加した変数はもとの値に戻るようになる。このような一周のフィードバックループの中に反比例関係（破線）が奇数個あるものを負のフィードバック機構（negative feedback mechanism）という。すなわち、何らかの原因で変数が上昇（減少）した場合、そこからループをもとに戻ってくると、変数は低下（上昇）してもとの値に戻るように調節される。恒常性維持の調節機構のほとんどは負のフィードバック機構による。正のフィードバック機構（positive feedback mechanism）というのは、ひとつのフィードバックループに反比例関係（破線）がゼロあるいは偶数個あるものである。これは、変数が増加するとそれを増幅させてさらに大きくさせることになる。生体内ではきわめてまれであるが、爆発的に変化が起こり持続的な調節を必要としない場合に使われる。神経の活動電位の発生や血液凝固などは正のフィードバック機構で行われている。

3 細胞の機能的構造

我々の体は約 37 兆個の細胞から構成されているといわれている。形も大きさもさまざまであるが、細胞はすべて同じ基本となる共通の機能を行う構造をもっている。一般的には、どの細胞も 3 つの領域あるいは構成部分をもっている。それは核、細胞質、そして細胞膜である。細胞質内には、ミトコンドリア、ゴルジ装置、小胞体、リボソーム、リソソーム、中心体など微細構造がある（図 1.5）。これらを細胞内小器官という。細胞の形や大きさだけでなくこれらの細胞内小器官の量や機能によって、さまざまな細胞の個性が出ることになる。

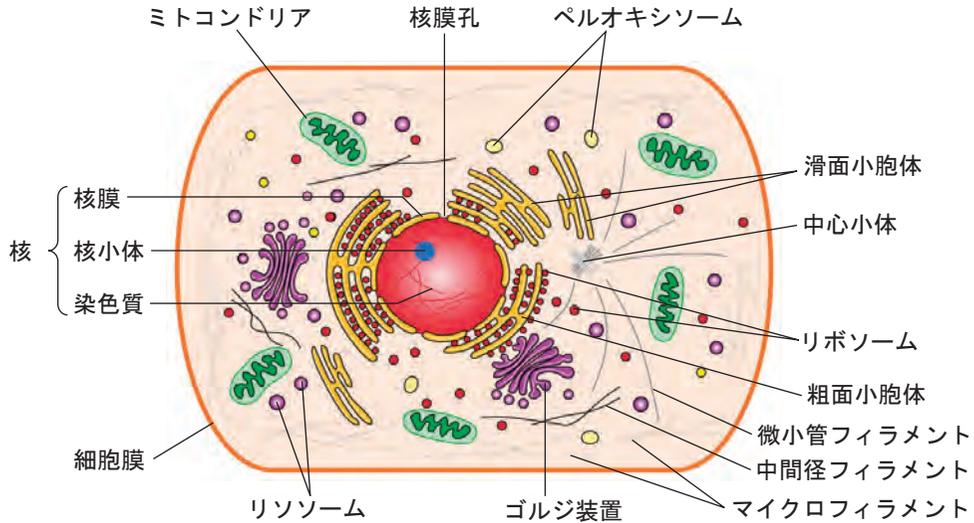


図 1.5 一般的な動物細胞の模式図

3.1 細胞膜

(1) 細胞膜の構造

細胞膜 (plasma membrane) は細胞の表面にあって細胞の内外を区切っている膜であり、形質膜ともよばれる。厚さは 10 nm^{*1} 以下ときわめて薄く、成分の約 80% はリン脂質であり、残りはタンパク質や糖脂質、糖タンパク質である。図 1.6 に示すように、細胞膜はリン脂質の二重層になっており、膜の外側が親水性、内側が疎水性になっている。したがって、脂溶性の物質は細胞膜を拡散によって通過できるが、水溶性の物質は簡単に通過できない。このため、膜のところどころにタンパク質が埋め込まれており、水溶性の物質はこれらのタンパク質内を通過して移動する。これらのタンパク質は特定のイオンを通すチャネル、物質の運搬体 (担体ともいう) あるいはホルモンと結合する受容体の働きをもつ。このように細胞膜は、単なる細胞内外を仕切る膜としての働きだけでなく、物質の移動の制限や細胞外の情報細胞内に伝えるなど、細胞のさまざまな機能を調節することができる。

(2) 細胞膜を介する物質の移動

細胞膜を介して物質が移動することを透過といい、物質によって透過様式が異なっている。透過様式には大別して、受動輸送と能動輸送がある (図 1.7)。受動輸送 (passive transport) は、電気化学的ポテンシャルに従って移動する様式のことである。具体的には、細胞膜をはさんで濃度差 (濃度勾配) があつた場合、濃度の高

*1 nm (ナノメートル) : 小さい数は m (ミリ) = 10^{-3} 、 μ (マイクロ) = 10^{-6} 、n (ナノ) = 10^{-9} などの接頭語を使う。1 nm は $1 \times 10^{-9} \text{ m}$ を意味する。

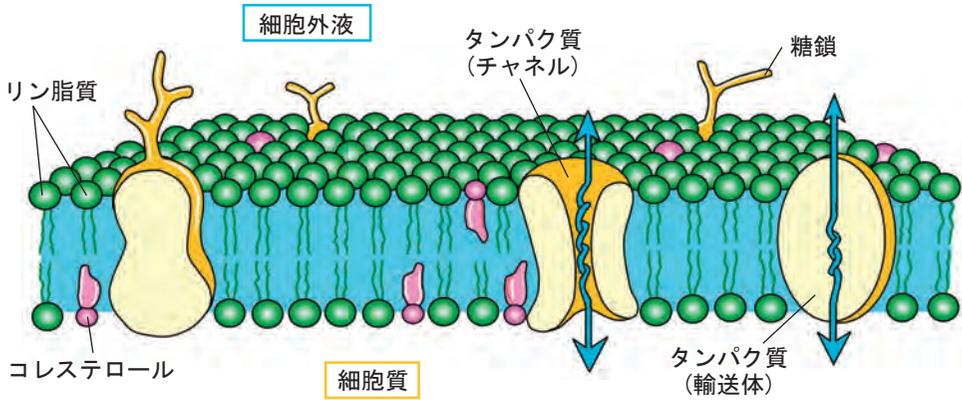


図 1.6 細胞膜の構造

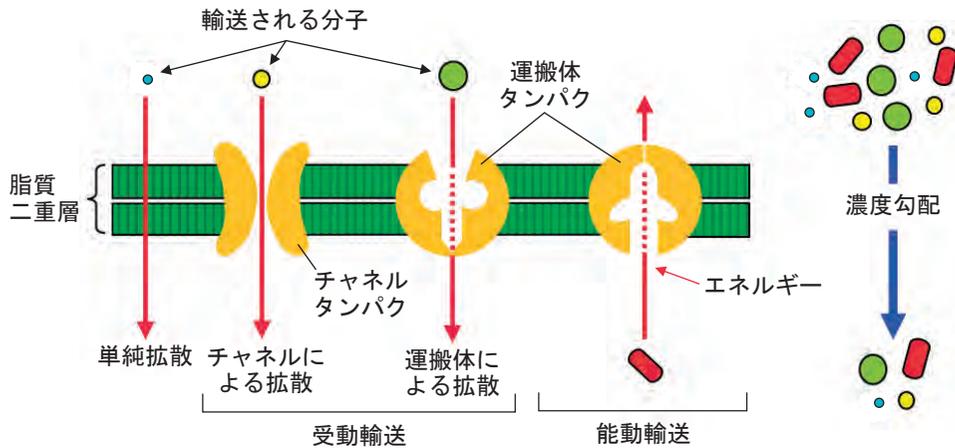


図 1.7 受動輸送と能動輸送

い方から低い方へ物質が移動する拡散である。単純拡散は、特定の運搬体を必要としない。これに対して、特定の運搬体を介して、濃度の高い方から低い方へ物質が移動する拡散を促通（あるいは促進）拡散という。濃度勾配に従ってイオンが特定のイオンチャンネルを通して移動したり、グルコースやアミノ酸が特定の輸送体を介して移動する様式がこれに相当する。

能動輸送 (active transport) は ATP のエネルギーを使って細胞膜を物質が移動する様式のことである。具体的には、濃度差にかかわらず一定方向に物質を移動させることができるため、濃度の低い方から高い方へ物質を移動させる場合に使われる。能動輸送には一次性能動輸送と二次性能動輸送とがある。一次性能動輸送には Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 H^+ などのイオンを電気化学的ポテンシャルに逆らって移動させるものがあり、ポンプ輸送とよばれる。その代表的なものに Na^+ ポンプがある。 Na^+ ポンプは、ATP の加水分解によるエネルギーを用いて、細胞内から細胞外へ 3 個の

Na^+ を汲み出すと同時に2個の K^+ を細胞外から細胞内へ汲み入れる。このため Na^+ ポンプは Na^+-K^+ ポンプあるいは $\text{Na}^+-\text{K}^+\text{ATPase}$ ともいわれる。すべての細胞にこのポンプが備わって働いているため、細胞内には K^+ が多く細胞外には Na^+ が多くなるというイオンの不均等が起こっている。

二次性能動輸送は、 Na^+ ポンプの働きで生じた細胞内外の Na^+ 濃度差を利用して他の物質を移動させる輸送である。 Na^+ と同じ方向に物質を輸送する輸送体は共輸送体とよばれ、グルコースやアミノ酸はこの共輸送体を使って細胞内に取り込まれる(図1.8)。逆に、 Na^+ と反対方向に物質を輸送する輸送体が逆輸送体とよばれ、 H^+ や Ca^{2+} は逆輸送体を使って細胞外に汲み出される。

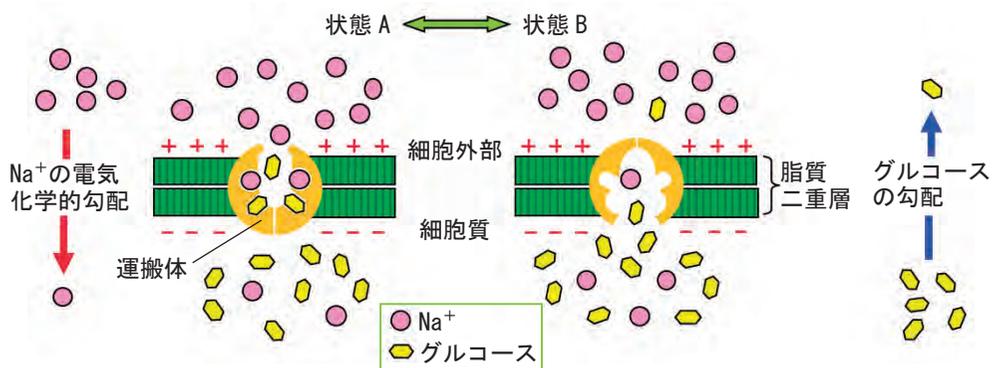


図 1.8 二次性能動輸送

3.2 細胞内小器官

(1) ミトコンドリア

ミトコンドリア (mitochondria) はソーセージ状の形をした小体で、内外の二重膜で覆われている。内膜は内側にクリスタとよばれる突起構造になっている。内膜および内膜で囲まれている部分 (マトリックス) には多くの酵素が含まれている。特に、内膜には電子伝達系や酸化的リン酸化に関与する酵素群が存在し、この部分でATPが合成される。ATPは高エネルギー化合物であり、これが分解されるときエネルギーが放出される。このエネルギーはあらゆる細胞活動に使われるが、筋肉や肝臓の細胞などでは多量のエネルギーを必要とするため、他の細胞に比べてミトコンドリアの密度が高くなっている。ミトコンドリアは原始真核細胞に寄生した細菌に起源をもつといわれており、後に述べる核内のDNAとは別に独自のDNAをもっている。

(2) リボソーム

リボソーム (ribosome) は小型の粒子であり、RNAの一種であるリボソームRNA

とタンパク質からできている。リボソーム上で伝令 RNA と運搬 RNA が結合し、タンパク質が合成される。

(3) 小胞体

小胞体 (endoplasmic reticulum) は細胞液の入った小さな管が網目状につながった構造をしており、膜は核膜とつながっている。小胞体には形態と機能面から2つのタイプがある。そのひとつは**粗面小胞体**で小胞を覆っている膜にリボソームが付着しているものである。リボソームで合成されたタンパク質が粗面小胞体内腔に蓄えられている。これに対し、リボソームが付着していない小胞体は滑らかな膜に包まれているので**滑面小胞体**とよばれる。滑面小胞体内腔の内容物は細胞で異なっている。筋細胞では Ca^{2+} が貯蔵され、副腎皮質ではステロイドホルモンが合成されている。

(4) ゴルジ体

ゴルジ体 (golgi apparatus) はゴルジ装置ともよばれ、袋状の小管が幾重にも並んだものであり、粗面小胞体から運ばれてきたタンパク質の濃縮、糖の付着を行う。ホルモン産生細胞では、ゴルジ体から遊離した小胞が細胞膜と融合し内容物を細胞外へ開口分泌する (エクソサイトーシス)。

(5) リソソームとペルオキシソーム

リソソーム (lysosome) はゴルジ体からつくられる球形の顆粒で内部にさまざまな物質の分解酵素を含んでいる。リソソームは、細胞が食作用や飲作用 (エンドサイトーシス) で取り込んだ物質を分解する。リソソームが細胞内に多量にある白血球は、顆粒の多さから顆粒球とよばれる。

ペルオキシソーム (peroxisome) は内腔に酸化酵素を含み、脂質の酸化や有害物質の処理を行う顆粒である。肝臓の細胞では、コレステロールから胆汁酸塩を産生する。

(6) 細胞骨格

細胞は、一般的には一定の形をもつが、変形したり移動したりする細胞もある。細胞が一定の形を維持するためにはその梁となる**細胞骨格** (cytoskeleton) が必要になってくる。また、細胞骨格を変形させることにより細胞を変形させたり移動させたりすることが可能となってくる。これらの細胞骨格は細いものからマイクロフィラメント、中間径フィラメントおよび微小管の3種類に分類されている。マイクロフィラメントは細胞の形の維持や変形に重要である。骨格筋細胞のマイクロフィラメントはアクチンというタンパク質からなり筋収縮に使われている。中間径フィラメントは、皮膚細胞のように形を強固に維持するために使われる。微小管は細胞分裂の過程および線毛・鞭毛をもつ細胞において重要である。

(7) 中心小体

中心小体 (centriole) は核の近くに存在する2個の円柱状のものである。内部は細い微小管からなっており、細胞分裂の際には紡錘体の2つの極となる。線毛や鞭毛をもつ細胞では中心小体から微小管を出して線毛や鞭毛の形を維持すると同時に線毛運動や鞭毛運動に関与する。

3.3 核

核 (nucleus) は細胞膜と同じような二重膜に包まれた球形状の構造をしている。核膜は多数の穴 (核膜孔) が開いており、この穴を通して核内と細胞質の間で物質が移動する。核内には濃く染色される核小体があるが、これはリボソームが集合したものであり、リボソームは核膜孔を通過して細胞質内に移動していく。核内には個人の遺伝情報をもつDNAが含まれている。非分裂期においてDNAはタンパク質と結合し、突起をもつ糸状のものが折りたたまれた構造をしている。これをクロマチンという。細胞分裂時にはクロマチンが凝集し、染色体として出現してくる。ヒトでは22対の常染色体と2本の性染色体の合計46本の染色体が出現する。

4 核酸と遺伝子

4.1 核酸の種類と構造

核酸 (nucleic acid) とは、細胞の核から単離された酸性物質であることから命名され、DNAとRNAをさす。DNAとは、**デオキシリボ核酸** (deoxyribonucleic acid) を略した名前で、2本の鎖がお互いに絡まりあった「**二重らせん構造**」をもつ。一方、RNAは**リボ核酸** (ribonucleic acid) を略した名前で、1本鎖である (図 1.9)。各々の鎖は、**ヌクレオチド**とよばれる単位の繰り返し (重合体) になっている (図 1.10)。

ヌクレオチドは、**糖**、**リン酸**、**塩基**の3つの成分で構成されている。糖は、5つの炭素を使った糖 (五炭糖、**ペントース**) で、DNAでは**デオキシリボース**、RNAでは**リボース**となる (図 1.11)。塩基は、核酸の機能において最も重要な部分であり、DNAの塩基は**アデニン (A)**、**チミン (T)**、**グアニン (G)**、**シトシン (C)**の4種類である。RNAではチミン (T) が**ウラシル (U)**に置き換わる。塩基のうち、AとGはプリン環をもつので**プリン塩基**、CとUとTはピリミジン環をもつので**ピリミジン塩基**とよぶ。DNAとRNAの構成成分をまとめると図 1.11 となり、両者の構造の違いをまとめると次の4点となる。①DNAは2本鎖、RNAは1本鎖である。②RNAの鎖の長

さは DNA と比べてはるかに短い。③糖の部分は DNA ではデオキシリボース、RNA ではリボースである。④RNA の塩基はチミン (T) がウラシル (U) に置き換わっている。



図 1.9 DNA と RNA

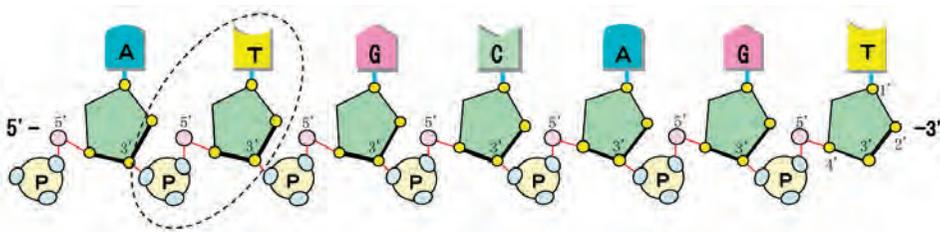


図 1.10 ヌクレオチドと核酸の構造

DNA と RNA の構成成分				
		DNA		RNA
塩基	プリン	ヌクレオチド	アデニン (A)、グアニン (G)	
	ピリミジン		チミン (T)、シトシン (C)	
糖 (ペントース)			デオキシリボース	リボース
リン酸		×	○	○

a) プリン環とピリミジン環の構造

プリン環

ピリミジン環

b) デオキシリボースとリボースの構造

リボース

デオキシリボース

OH が H となり O が抜けている。

c) ヌクレオシドとヌクレオチドの構造

ヌクレオチドからリン酸基を除いた部分をヌクレオシドとよぶ。
 ペントースに塩基が結合すると、ペントースの 5 つの炭素の表記は 1' ~ 5' に変わる。

図 1.11 DNA と RNA

4.2 DNA と遺伝子

DNA の2本の鎖は、4種類の塩基によって結合し、必ずAとTあるいはGとCがペアになっている（図1.12）。このペアを塩基対とよび、一方が決まると他方も決まるので、相補的塩基対とよばれる。2本の鎖は互いに向きあい（図1.12）、逆向きに寄り添って二重らせん構造をとっている（図1.9）。DNA上には、生物の体の構築や生命活動に必要なさまざまなタンパク質の設計図が並んでいる。この設計図の部分のことを遺伝子という。例えば図1.13では、DNA上に3つの遺伝子があり、それぞれA、B、Cの3つのタンパク質をつくるための設計図になっている。ヒトのすべての細胞のDNAには約22,000の遺伝子があり、1つの個体の体細胞はどれも同じDNAをもっている。細胞1つのDNAの長さは約2mもあり、その中で遺伝子の部分は、DNA全体の数パーセントに過ぎないと考えられている。

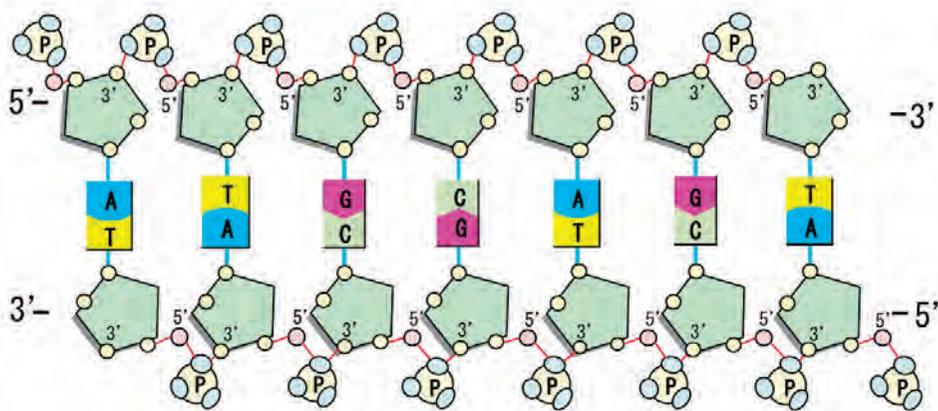


図1.12 DNAの塩基対

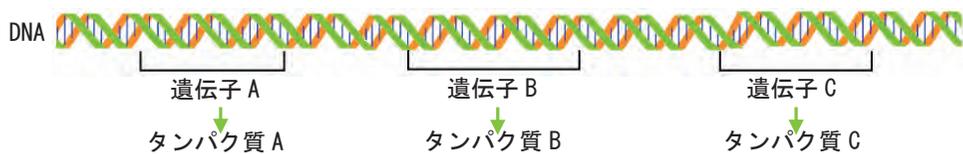


図1.13 DNAと遺伝子の関係

4.3 遺伝情報の複製

遺伝子は細胞から細胞へと伝えられなくてはならない。しかし、細胞分裂のときにそのまま遺伝子を分けると、分裂後の細胞がもつ遺伝子は半分に減ってしまう。そこで各々の細胞は、分裂の前に細胞がもつすべてのDNAをコピーして、2倍にしておく。そうすれば、分裂後もDNAの量は変わらず、細胞の親子は同じ遺伝子をもつことができる。DNAが自分のコピーをつくることを、DNAの複製という。複製にはDNAの二重らせん構造が重要な役割を果たす。最初に、DNAの2本の鎖が離れて、

各々の鎖が鋳型となって新しい鎖をつくる。塩基対の組み合わせは常に A と T、G と C と決まっているので、複製後の 2 本の DNA は同じ塩基の配列をもつことになる。そして、複製後の DNA の一方の鎖は必ず分裂前の細胞がもっていた鎖で、もう一方の鎖は新たにつくられた鎖となる。このような複製の仕方を、**半保存的複製**とよぶ(図 1.14)。

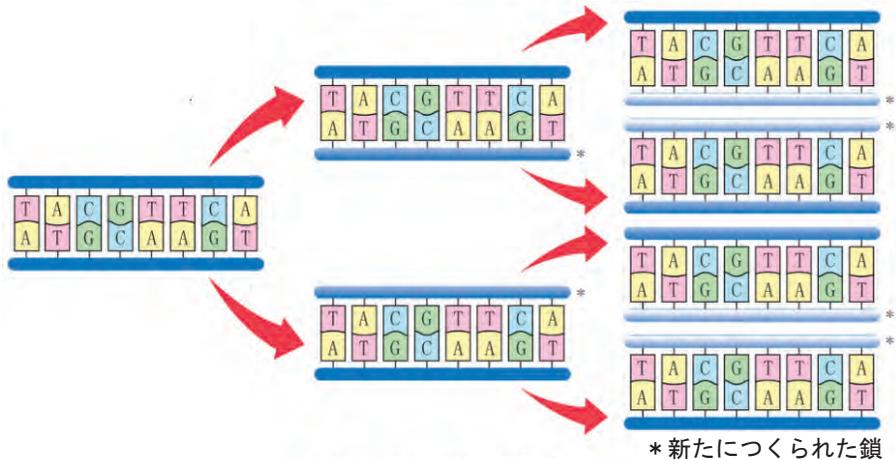


図 1.14 DNA の複製

4.4 タンパク質合成

タンパク質の設計図である遺伝子はどのように読み取られて機能するのか？ まず、細胞の核の中で、DNA 上の遺伝子のコピーが作られる。このコピーが RNA である。RNA には、**伝令 RNA** (messenger RNA : mRNA)、**運搬 RNA** (transfer RNA : tRNA)、**リボソーム RNA** (ribosomal RNA : rRNA) の 3 種類がある(表 1.1)。DNA 上の遺伝子のコピーは mRNA で、mRNA が作られる過程を**転写**という(図 1.15)。

表 1.1 3 種の RNA の役割

mRNA	事実上のタンパク質を作るための設計図のコピー
tRNA	タンパク質合成に必要な材料(アミノ酸)を運んでくる
rRNA	タンパク質合成工場であるリボソームを構成している成分(リボソームは rRNA とタンパク質で作られている)

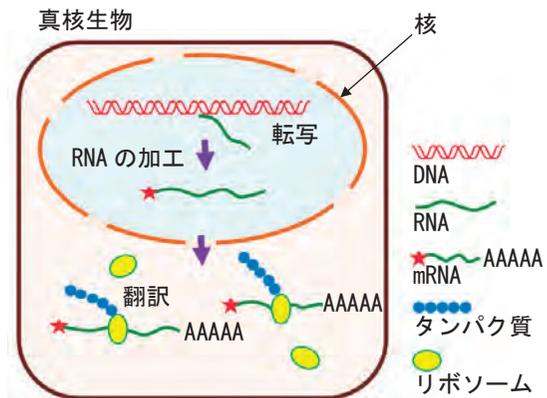


図 1.15 遺伝情報の発現

遺伝子のコピーである mRNA は加工され、核に開いた小さな穴を通して核の外に出る。核の外には、タンパク質の製造工場であるリボソームがたくさんあり、mRNA はこのリボソームと結合する。mRNA 上の塩基 3 つが 1 個のアミノ酸を指定する。この塩基 3 つによる暗号のことを**コドン**とよぶ。例えば、AUG はメチオニン、UGG はトリプトファンの暗号となる。この暗号で指定されたアミノ酸を tRNA がリボソームに運ぶ。これを繰り返すことで、設計図の通りにアミノ酸がつながれ、タンパク質が作られる。このタンパク質を作る過程を**翻訳**という。このように、DNA から RNA を経てタンパク質に至る遺伝情報の流れを**セントラルドグマ**とよぶ。

コラム mRNA ワクチン (mRNA 医薬品)

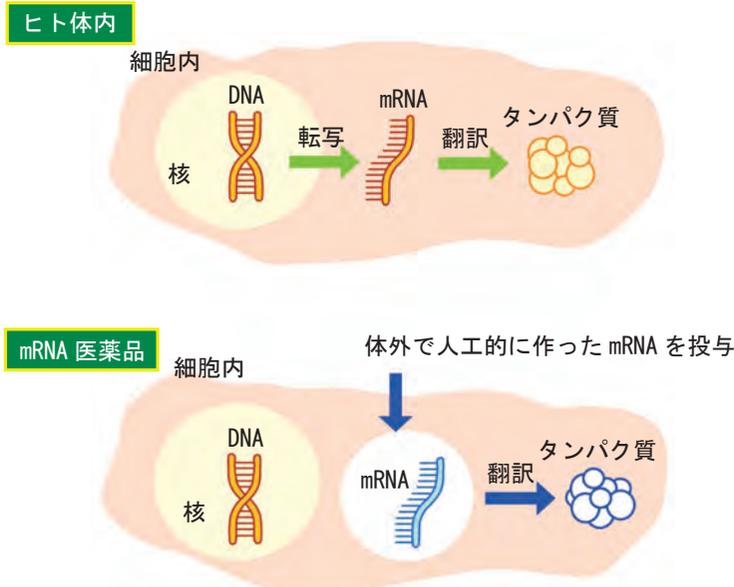
mRNA 医薬品は、タンパク質の設計図 (DNA) のコピーである mRNA を人工的に作成し、これを投与して特定のタンパク質を体内で作らせる医薬品である (図 1.16)。新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) の流行に伴い、米ファイザー社、独ビオンテック社などが開発した新型コロナウイルスワクチンは、mRNA 医薬品の実用化第一号となった。

ウイルスはスパイクタンパク質を介してヒトの細胞表面にある受容体と結合して感染を起こす。新型コロナウイルスワクチンの有効成分は、スパイクタンパク質をコードする mRNA で、接種により細胞に取り込まれると、新型コロナウイルスのスパイクタンパク質が一時的に発現する。体内ではこれに対する中和抗体が産生されるとともに、T 細胞などの細胞性免疫応答が誘導され、感染予防効果を発揮する (図 1.17)。

mRNA 医薬品のコンセプトは 1990 年代からあったが、mRNA は生体内ですぐに分解されてしまう・自然免疫を誘導する (免疫原性) などの性質をもつため、実用化の壁となっていた。しかし近年、ドラッグデリバリーシステム (DDS) などの技術が発展したことで、研究開発が進展した。新型コロナウイルスワクチンでは、コード領域に変異を挿入して中和抗体を産生しやすくし、DDS には LNP (lipid nanoparticle ; 脂質ナノ粒子) を使うことで、すぐに分解されることなく細胞に送達され、高い効果を発揮できるようになった。

mRNA 医薬品が期待されるポイントのひとつは、短期間で比較的簡単に設計することが可能である点である。新型コロナウイルスワクチンの開発ではウイルスのゲノム配列が公開されてから 1 年以内という前例のないスピードで実用化にこぎつけた。DNA を使った遺伝子治療と異なり、核内に送達する必要がないのでゲノムを変異させるリスクがなく、安全性に優れるとされる。理論上はどんなタ

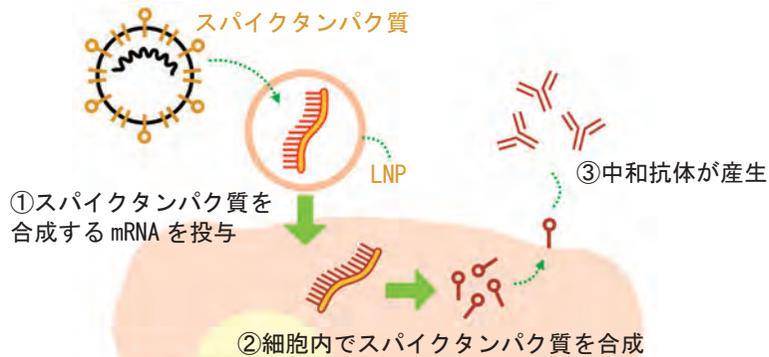
ンパク質でも治療のターゲットとすることが可能で、感染症ワクチンだけでなく、がん治療用ワクチン、再生医療などでも開発が進められている。



mRNA 医薬品のコンセプト：設計図を投与しタンパク質を作らせる

出典) AnswersNews <https://answers.ten-navi.com/pharmanews/20483/> を参考に作成

図 1.16 mRNA 医薬品とは



出典) AnswersNews <https://answers.ten-navi.com/pharmanews/20483/> を参考に作成

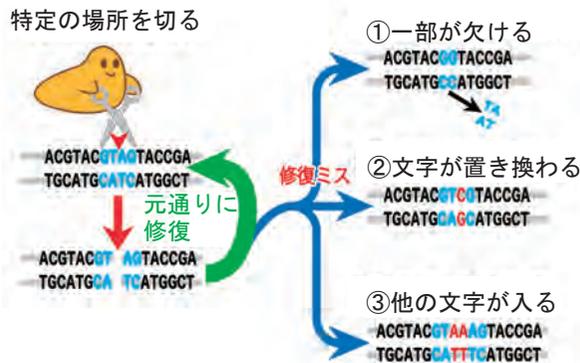
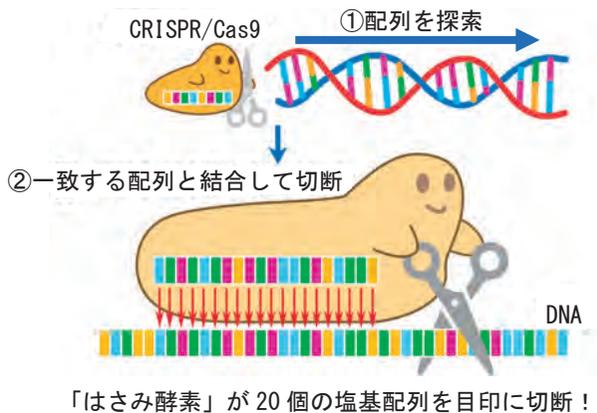
図 1.17 新型コロナ向け mRNA ワクチンの働き

コラム ゲノム編集

ゲノムとは、遺伝子 (gene) と染色体 (chromosome) から合成された言葉で、それぞれの生物の設計図の全体、つまり遺伝情報の 1 セットのことをさす。遺伝情報は DNA を構成する 4 種類の塩基 (A、T、G、C) の並び順によって暗号化され

て保存されており、ヒトのゲノム DNA は約 32 億塩基対から構成されている。

DNA は自然の放射線や紫外線などによって切断されることがある。生物はそれを修復する仕組みをもっているが、まれに修復ミスが起こることがあり、これが突然変異である。2020 年ノーベル化学賞を受賞した「ゲノム編集」は、「はさみ」を使ってゲノム DNA を意図的に切断し、自然界で起きている突然変異を狙った部位に起こさせる、つまり修復ミスを利用した技術である。「はさみ」としては主に「CRISPR/Cas9」が利用されている。CRISPR (クリスパー) はゲノムの狙った位置にくっつく RNA、Cas9 (キャスナイン) はその横を切るハサミの役割を果たす酵素で、DNA の塩基配列を目印にして結合し、そこで DNA を切断する。CRISPR は特定の 20 塩基にくっつくように設計されているが、この配列になる確率は約 1 兆分の 1 ときわめて低く (ATGC のうち 1 つが 1/4 の確率で 20 個連続するので、1/4 の 20 乗となる)、DNA の長い鎖の中で、ピンポイントで狙った配列を切断することができる (図 1.18)。



目的の場所に突然変異を起こすのがゲノム編集

出典) 農林水産会議リーフレット「ゲノム編集～新しい育種技術」より

図 1.18 ゲノム編集技術

従来の遺伝子組換え技術では、ある生物のゲノムの中に他の生物の遺伝子を挿入して、欲しい機能を得るため、想定しない機能をもつ生物を生み出す可能性や、新たな病気を引き起こす危険性など、安全面や倫理面の課題が実用化の妨げとなっていた。一方、ゲノム編集はあくまでその生物がもつDNAの狙った場所を切断して編集するため、遺伝子組換えと比較して安全性が高く、実用化が進んでいる。例えば、植物では、GABA（ γ -アミノ酪酸：アミノ酸の一種で脳機能改善効果や高血圧を改善する作用が認められている）を、元品種の4~5倍含むトマトが作られた。魚では、ミオスタチンという筋肉量に関係する遺伝子を抑制することを目的にゲノム編集を実施し、可食部が約2割増加したマダイが作られた。このような食品は、従来の品種改良法を用いても時間をかけて改良していけばいつかはできるものであるが、辛抱強くやって約100年かかるかもしれないものが、ゲノム編集では数年で商用化にこぎつけるというように、時間とコストを大幅に削減できる。

ゲノム編集は、自然界で起き得るような変異を加速させる技術であり、食糧危機克服や難病治療など、さまざまな分野で恩恵をもたらすことが期待されている。

4.5 ヌクレオチドの代謝

ヌクレオチドはDNAおよびRNAの合成原料であるとともに（図 1.19 の A）、補酵素の成分として代謝に関与したり、ATP（アデノシン三リン酸）などとしてエネルギー授受も担っている（第12章参照）。このようにヌクレオチドは重要な物質であるため、生体内では、リボース5-リン酸（ペントースリン酸経路から供給される）およびアミノ酸などを原料として、合成することができる。これらの原料をもとにヌクレオチドを新たにつくる経路を、**新生経路（de novo 経路）**（B）という。一方、分解過程で生じる塩基を再利用してヌクレオチドをつくる経路があり、これを**再生経路（サルベージ経路）**（C）とよぶ。サルベージ経路を利用することにより、エネルギーを節約することができる。

細胞が増殖するためにはDNAの複製が必要であり（図 1.14）、DNAの複製にはヌクレオチドが必要なため、DNA合成阻害薬やヌクレオチド合成阻害薬は**抗がん薬**として使われる。例えば、抗がん薬のメトトレキサートは、ビタミンB群のひとつである葉酸を活性型葉酸にする酵素の働きを阻止することにより、DNA合成を阻止し、細胞増殖を抑制する（第12章参照）。

ヌクレオチドの分解により生じるプリン塩基やピリミジン塩基は、すべてサルベージ経路で再利用されるわけではなく、一部はさらに分解される（E、F）。プリン塩

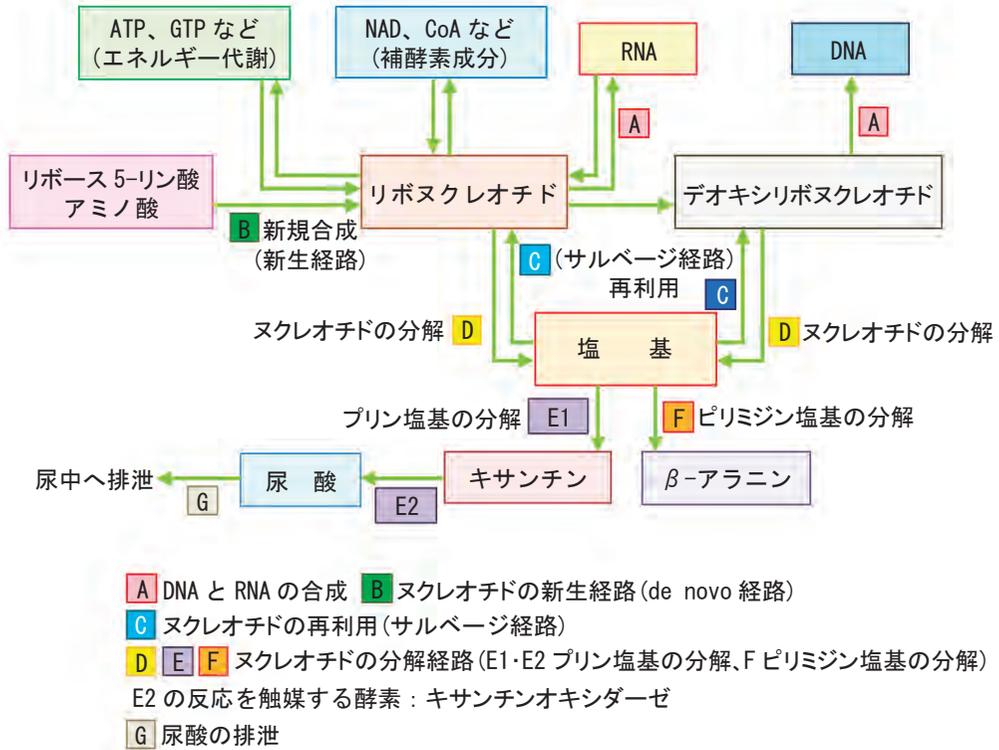


図 1.19 ヌクレオチドの代謝

基はキサンチンを経由して最終産物の尿酸に代謝され (E1、E2)、大部分は尿中へ排泄される (G)。

尿酸の産生過剰または排泄低下によって、尿酸の血中濃度が増加した状態 (7.0 mg/dL 以上) を**高尿酸血症**という。尿酸は溶解度が低いため、高尿酸血症が持続すると結晶となって関節内に析出し、激痛を伴う炎症が起こる。この急性の関節炎を**痛風**とよび、足の親指の第2関節に好発する。尿管で起こった場合は尿管結石、膀胱で起こった場合は膀胱結石とよび、これらをあわせて尿路結石とよぶ。高尿酸血症や痛風・尿路結石は、男性に圧倒的に多い (男女比約 20 : 1)。尿酸値は女性ホルモンにより調節されるため、閉経後の女性ではやや増加する。

尿酸の生成 (E2) を阻害する物質 (アロプリノール)、あるいは排泄 (G) を促進する物質 (ベンズブロマロンなど) は痛風の治療薬として使われる。アロプリノールは、キサンチンを尿酸に酸化する酵素であるキサンチンオキシダーゼ (E2 の過程を触媒する) を阻害し、尿酸の産生を抑制する。

4.6 遺伝的異常

遺伝的異常は、**染色体異常**と**遺伝子異常**に大別される（**図 1.20**）。染色体異常は、染色体の過剰または欠損によるもので、ダウン（Down）症候群やターナー（Turner）症候群などがある。

遺伝子異常は、**単一遺伝子異常**と**多遺伝子異常**に分けられる。単一遺伝子異常では、その遺伝子が設計図になっているタンパク質の異常により、細胞・組織の異常が生じ、疾患として発症する。遺伝子異常の結果として、ほとんどが酵素欠損による代謝異常（**先天性代謝異常**）となる。多遺伝子異常では、複数の遺伝子異常に加えて、環境因子が関与して発症する。例えば、2型糖尿病では、複数の遺伝子に加えて、過食、運動不足などの環境因子が関与する。

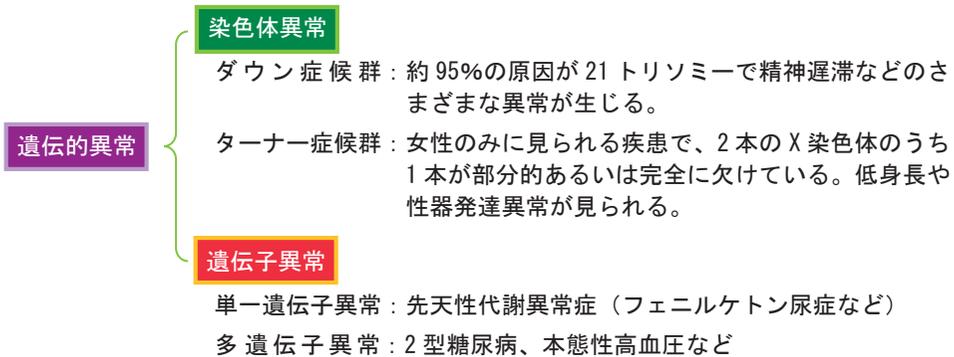


図 1.20 遺伝的異常

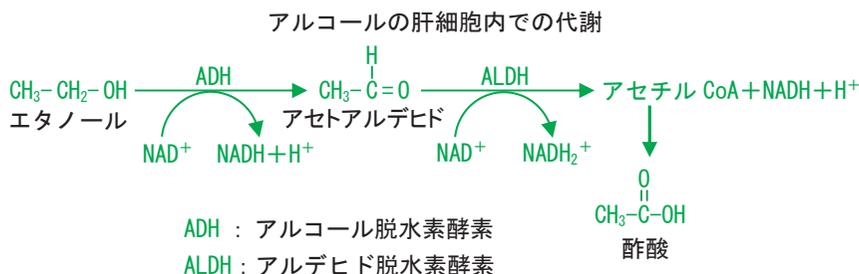
コラム お酒の強さと一塩基多形 (SNP)

お酒の主成分である**エタノール**（エチルアルコール）は、主に**肝臓**でアルコール脱水素酵素（ADH）によりアセトアルデヒドに酸化される。アセトアルデヒドはアルデヒド脱水素酵素（ALDH）により酢酸に酸化され、酢酸は最終的には二酸化炭素と水に分解される。アセトアルデヒドは毒性が強く、血中濃度が上昇すると、顔面紅潮、頭痛、悪心、嘔吐などの症状が現れる。常用飲酒ではアセトアルデヒドにより肝細胞が傷害され、アルコール性肝硬変など重篤な疾患を招く恐れがある。ALDH には、ALDH1 と ALDH2 の 2 つの**アイソザイム**（働きは同じであるが構造が違う酵素）が存在し、飲酒で生成するアセトアルデヒドは、主に ALDH2 により代謝され、無毒の酢酸になる。

ALDH2 酵素タンパク質は、遺伝子の塩基配列に基づいてアミノ酸が連結されることによりつくられる。この酵素タンパク質のアミノ酸のひとつが、グルタミン酸からリシンに置き換わると、アミノ酸が 1 個置き換わったただけにもかかわらず

酵素活性が消失し、アセトアルデヒドを酢酸に変えることができない。グルタミン酸の ALDH2 は ALDH2*1、リシンのものは ALDH2*2 と名付けられている。遺伝子は両親から受け継ぐので、両親からともに*1の遺伝子を受け継ぐと「*1/*1」、ともに*2の遺伝子を受け継ぐと「*2/*2」、*1と*2の遺伝子を受け継ぐと「*1/*2」となり、「*1/*1」は酒が飲めるタイプ、「*2/*2」は全く飲めないタイプ、「*1/*2」は飲むことはできるが、すぐ顔に出るタイプとなる。日本人は「*2/*2」型が10%（白人では1%）、「*1/*2」型と「*2/*2」型を加えて40%いるといわれている。また、東北、南九州では*1遺伝子をもつ人が多く、日本中部（中国、北陸、近畿、中部地方）では*2遺伝子の人が多いといわれている。

遺伝情報はDNAの塩基配列によって書かれている。遺伝情報はすべての人が同じではなく、個人ごとに違っている部分があり、この違いを遺伝子多型とよぶ。多型には色々な種類があるが、ALDH2のように、1塩基のみが置き換わっているものを一塩基多型（single nucleotide polymorphism: SNP、スニップ）とよぶ。近年では、SNPが糖尿病などの生活習慣病への罹りやすさや、薬への応答性に関係していることがわかってきた。SNPに基づく患者個々の体質に応じたより適切な医療は、「テーラーメイド医療」とよばれ、実用化と普及が期待されている。



5 幹細胞と再生医療

5.1 幹細胞とは

ヒトの体は約37兆個の細胞が集まってできているが、その中には「細胞を生む」ことができる細胞があり、それを幹細胞 (stem cell) という。幹細胞は「自己複製能」と「分化能」の2つの能力をもつ。つまり、分裂して「自分と同じ幹細胞」と「他の細胞に分化する細胞」を同時に作ることができる。幹細胞には、もともと体内に存在しているものと、人工的に作成されたものがある。

体内で実際に働いている幹細胞は成体幹細胞とよばれ、神経幹細胞、肝幹細胞、

造血幹細胞などがある。それぞれ決まった場所に存在し、限られた種類の細胞を作っている。例えば、骨髄の**造血幹細胞**は、赤血球や白血球などの血液細胞を作っている。胎児の血液に含まれる幹細胞は臍帯血幹細胞とよばれ、白血病などの治療に使われている（表 1.2）。一方、人工的に作成される幹細胞の代表は **iPS 細胞** と **ES 細胞** で、成体幹細胞と異なり、体を構成するすべての種類の細胞に分化できる「多能性」をもつので、**多能性幹細胞**とよばれる。

5.2 ES 細胞 (embryonic stem cell ; 胚性幹細胞)

ES 細胞は、初期胚（胚盤胞）から細胞を取り出し、あらゆる細胞に分化できる能力（多能性）をもったままで培養し続けることができるようにしたものである（図 1.21）。1981 年、イギリスのエヴァンス（Martin John Evans）によるマウス ES 細胞樹立を受けて、さまざまな動物に応用され、1998 年にはアメリカのトムソン（James Thomson）らがヒトでも樹立に成功した。

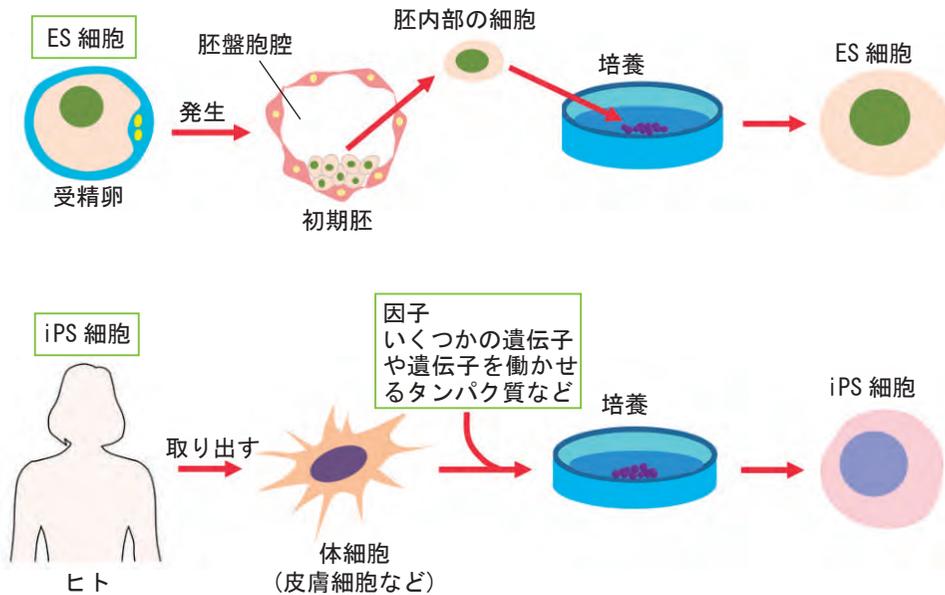
ES 細胞の実験的応用としては、シャーレの中で遺伝子操作をした細胞を受精卵に注入した後、母親の子宮に移植し、個体に発生させることで、ある特定の遺伝子を破壊した遺伝子欠損マウス（ノックアウトマウス）を作成することができる。ある遺伝子を欠損したマウスを通常のマウスと比較することで、破壊した遺伝子の機能を推定することができる。また、再生医療への応用が注目されてきたが、ES 細胞は他者の受精卵に由来するため**拒絶反応**の対象となることに加えて、ヒトの受精卵（胚）を破壊して作るという**倫理問題**を含んでいるためさまざまなハードルがある（表 1.2）。

表 1.2 幹細胞の種類と比較

	ES 細胞	iPS 細胞	臍帯血幹細胞	成体幹細胞
由 来	胚	体細胞	胎児の血液	体内に存在
多 能 性	あり	あり	なし	なし
倫理問題	あり	なし	なし	なし
拒絶反応	起こりやすい	起こりにくい	起こりにくい	起こらない
医療応用上の課題	腫瘍を作りやすい	腫瘍を作りやすい	白血病の治療に用いられている。採取できる細胞数に限りがある。	体外で増殖・維持するのが難しい

ES 細胞 (embryonic stem cell、胚性幹細胞)、ips 細胞 (induced pluripotent stem cell、人工多能性幹細胞)、臍帯血幹細胞 (cord blood stem cell)、成体幹細胞 (adult stem cell)。成体幹細胞は体性幹細胞 (somatic stem cells)、組織幹細胞 (tissue stem cell) とよばれる。

資料) 「幹細胞ハンドブック」京大 物質-細胞統合システム拠点 ips 細胞研究センター [CiRA] より改変



資料)「幹細胞ハンドブック」京都大学 物質-細胞統合システム iPS細胞研究センター[CiRA]より改変

図 1.21 ES細胞と iPS細胞の作製手順

5.3 iPS細胞 (induced pluripotent stem cell)

皮膚などの細胞に数種類の因子を導入し、培養することによって、さまざまな組織や臓器の細胞に分化する能力と、ほぼ無限に増殖する能力をもつようになった細胞のことで、人工多能性幹細胞または、誘導多能性幹細胞ともいわれる (図 1.21)。2006年に山中伸弥教授 (京都大学) が世界で初めてマウス体細胞を用いて樹立に成功し、2012年にノーベル医学生理学賞を受賞した。iPS細胞は胚の破壊にかかわる倫理問題がないうえ、患者自身の体細胞から作製できるため拒絶反応が起こりにくく、再生医療の本命として注目されている (表 1.2)。

5.4 iPS細胞の臨床応用

病気や怪我で正常な働きが損なわれた人体の組織や臓器の機能を、患者自身や他人の細胞の再生力を利用して回復させる治療法を再生医療という。この切り札として期待される iPS細胞の作成に成功して10年以上たち、実用化に向けた臨床研究が本格化している。iPS細胞の「多能性」を利用すれば、必要な細胞や組織を人工的に作成できる可能性があり、従来の臓器移植におけるドナー (臓器提供者) 不足問題などを克服できる画期的な医療技術のひとつとなる。さらに、iPS細胞を新薬開発に役立てる「iPS創薬」への期待も高まっている。

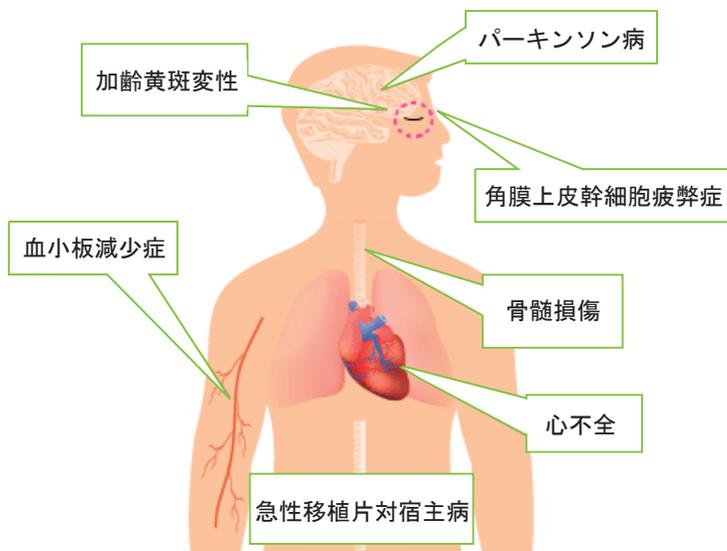
理化学研究所は2014年、世界初の臨床応用として、iPS細胞から作成した網膜の

細胞を目の難病である「加齢黄斑変性」の患者に移植した（図 1.22）。

厚生労働省は 2018 年 5 月、大阪大学の心臓病の臨床研究計画を了承した。虚血性心筋症で重症心不全になった患者の心臓に iPS 細胞から作製したシート状の心筋細胞を貼り付け、機能の回復を促す。

京都大学は 2018 年 8 月、パーキンソン病の患者に対し、iPS 細胞を使った治療の臨床試験（治験）を開始した。神経伝達物質のひとつであるドーパミンを産生するドーパミンニューロンの変性がパーキンソン病を引き起こすことが知られているが、治験ではドーパミンを出す神経細胞を iPS 細胞から作り、患者の脳に移植する。

この他、脊髄損傷、角膜や血小板の疾患などへの応用も進んでいる。実用化に向けて、特に安全面に関して慎重な検証が求められるが、iPS 細胞をはじめとする万能細胞研究の裾野が広がり、前進することが期待される。



出典) ビジュアルニュース解説 nikkei4946.com

図 1.22 ES 細胞で治療を目指す疾患

問題

A. 多肢選択問題

1 正のフィードバック機構はどれか。

- a. 血圧上昇時の心拍数減少
- b. 体温上昇時の発汗
- c. 分娩時の子宮収縮
- d. 多飲時の尿量増加

2 タンパク合成が行われる細胞内小器官はどれか。

- a. 核 b. リボソーム c. リソソーム d. ミトコンドリア e. ゴルジ装置

3 細胞内におけるエネルギー産生や呼吸に関与する細胞内小器官はどれか。

- a. ミトコンドリア b. リボソーム c. ゴルジ装置 d. 小胞体 e. 核

4 Na^+ - K^+ ポンプについて誤っているのはどれか。

- a. エネルギーを必要とする。
b. 能動輸送である。
c. 濃度勾配に逆らってイオンを動かす。
d. 拡散によってイオンを動かす。

5 イオンチャネルについて正しいのはどれか。

- a. ATPを必要とする。
b. 特定のイオンを通す。
c. 濃度勾配に逆らってイオンを動かす。
d. 成分は細胞膜に埋め込まれた脂質である。

6 RNAに含まれないのはどれか。

- a. チミン b. グアニン c. シトシン d. ウラシル e. アデニン

7 遺伝子について正しいのはどれか。

- a. DNAは、体細胞分裂の前に複製される。
b. DNAは、1本のポリヌクレオチド鎖である。
c. DNAの遺伝子情報からmRNAが作られることを翻訳という。
d. RNAの塩基配列に基づき、アミノ酸がつながることを転写という。

8 核酸で正しいのはどれか。

- a. mRNAがアミノ酸をリボソームへ運ぶ。
b. DNAは1本のポリヌクレオチド鎖である。
c. DNAには遺伝子の発現を調節する部分がある。
d. RNAの塩基配列によってアミノ酸がつながることを複製という。

9 遺伝で正しいのはどれか。

- a. 細胞は器官によって異なる遺伝情報をもつ。
- b. 3つの塩基で1種類のアミノ酸をコードする。
- c. 動物と植物のDNAは異なる塩基をもつ。
- d. 遺伝情報に基づき核内で蛋白合成が行われる。

10 ヌクレオチドの代謝について正しいのはどれか。

- a. RNAは排泄される。
- b. DNAはRNAとして再利用される。
- c. 分解された塩基はすべて排泄される。
- d. プリン塩基の一部は尿酸として排泄される。

解答

(1) c (2) b (3) a (4) d (5) b (6) a (7) a (8) c (9) b (10) d

B. 記述式問題

- (1) クーラーを使って室温を一定に保つときの調節機構について、フィードバックのブロックダイアグラムを用いて説明せよ。
- (2) 細胞内小器官の名称をあげて、それぞれの機能を説明せよ。
- (3) 物質が細胞膜を受動的に通過できるかどうかを決定する細胞膜の構造的特性を2つ述べよ。
- (4) タンパク質合成においてDNAとRNAが果たす役割について説明せよ。



神経系の 基本的機能

第 2 章

神経信号の発生と伝わりのメカニズムについて学ぶ。神経信号は細胞体で発生し、軸索という神経突起を通して別の神経に伝えられる。神経細胞同士は直接物理的にはくっついておらず、軸索先端から放出される神経伝達物質によって次の神経細胞に情報を受け渡す。神経信号の発生には細胞内外のイオン組成およびイオンを通過させる通り道が重要な役割を果たす。

1 神経細胞

1.1 神経細胞の構造

神経細胞はニューロン (neuron) ともよばれる。細胞体の中心には核があり、細胞内には細胞内小器官が存在する。ニューロンの機能的特徴の最たるものは、細胞体において神経信号が発生するということである。その神経信号を他のニューロンに伝えるために用いる神経伝達物質も、この細胞体で合成される。神経信号や神経伝達物質については後述する。

ニューロンは他種の細胞とは異なる構造的特徴をもっている (図 2.1)。細胞体から伸びる軸索 (axon) はそのひとつである。軸索は細胞体で生じる神経信号を他のニューロンや筋肉に伝える伝送ケーブルの役割をもち、ヒトの身体において最も長いもので1mに達する。細胞体からは軸索だけではなく細い突起が多数出ている、樹の枝のような形をしているところから樹状突起 (dendrite) とよぶ。

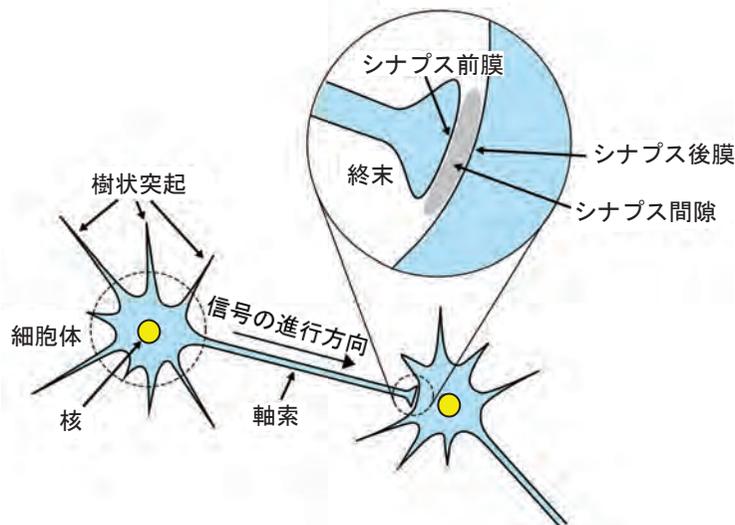


図 2.1 ニューロンとシナプス

1.2 神経接続の基本的構成

ニューロンの細胞体で発生した神経信号は軸索を伝導し、別のニューロンに伝えられる。軸索の先端（軸索終末とよぶ）と別のニューロンとの接続部をシナプス（synapse）とよぶ。シナプスにおいて2つのニューロンの細胞膜はシナプス間隙（synaptic cleft）というわずかな空間により隔てられているため、ここでの神経信号の伝達は化学物質（神経伝達物質）の授受によりなされる*1。神経信号（神経伝達物質）を送る側の細胞をシナプス前ニューロン、受け取る側をシナプス後ニューロンとよぶ。また、シナプス間隙に面したシナプス前ニューロン、シナプス後ニューロンの細胞膜は、それぞれシナプス前膜、シナプス後膜とよばれる（図2.1）。

シナプスの接続様式は大きく分けて、①軸索-細胞体、②軸索-樹状突起、③軸索-軸索の3種類がある（図2.2 ①②③）。通常はシナプス接続といえば①または②の型である。神経の細胞体の大きさは0.1mm以下と小さいため、樹状突起を大きく張り巡らせることでシナプスの場を広げている。すなわち樹状突起は神経信号を受け取るアンテナの役割を果たしている。

③の軸索-軸索タイプは軸索終末が別のニューロンの軸索終末に接続する特殊な型であり、その詳細は後述する。

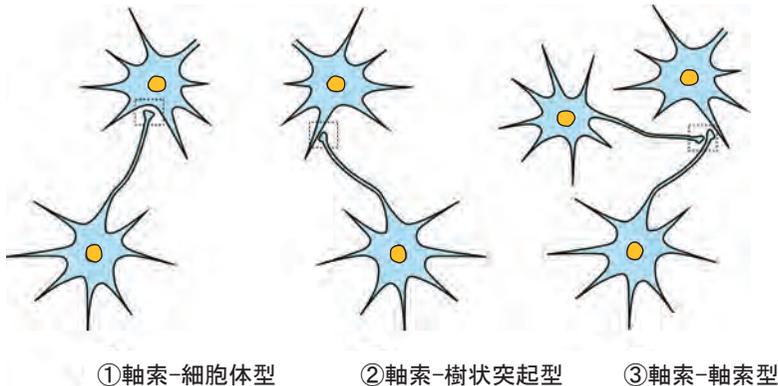


図2.2 シナプスの接続様式

1.3 神経細胞のイオン組成と細胞膜の構造

ニューロンの内外はさまざまなイオンを含んだ水溶液で満たされているが、細胞の内側と外側とでは各種イオンの濃度が違う（表2.1）。細胞内に高濃度に存在する

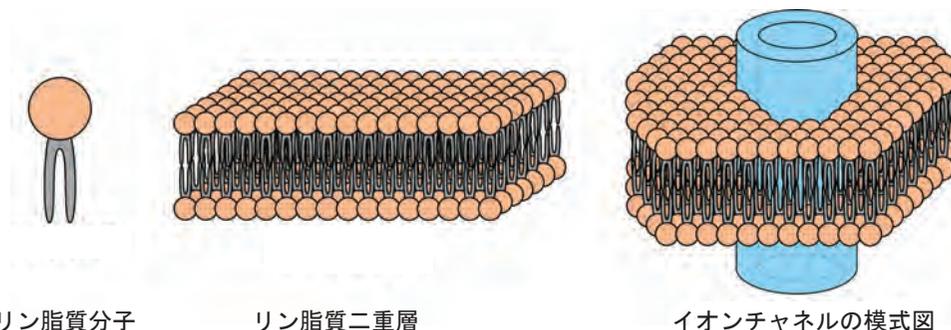
*1: シナプス間隙が存在しないで細胞膜同士が物理的に連結しているシナプスも存在する（電気シナプス）。そのため神経伝達物質を介するシナプスを化学シナプスとよぶこともあるが、通常はシナプスといえば化学シナプスを意味する。

のはカリウムイオン (K^+) である。一方細胞外液に多く含まれるイオンはナトリウムイオン (Na^+)、カルシウムイオン (Ca^{2+})、塩素イオン (Cl^-) などである。具体的には、ヒトの場合の細胞外液では 150 mM 程度の Na^+ 、細胞内液では 100mM 程度の K^+ が含まれている。

ニューロンも細胞の一種であるので、細胞膜はリン脂質二重層でできている (図 2.3)。水、イオンやタンパク質などの親水性物質は細胞膜を通過することはできな

表 2.1 神経細胞内外のイオン組成

	細胞外濃度 mM	細胞内濃度 mM	濃度比 外:内
K^+	5	100	1:20
Na^+	150	15	10:1
Ca^{2+}	2	0.0002	10.000:1
Cl^-	150	13	11.5:1



リン脂質分子

リン脂質二重層

イオンチャネルの模式図

図 2.3 細胞膜の構造とイオンチャネル

いが、膜上に設置されたチャネル (あるいはチャンネル) とよばれるトンネルのようなタンパク質を通して細胞内外を出入りすることができる。ニューロンにとって特に重要なチャネルはイオンチャネル (ion channel) である。イオンチャネルは特定の種類あるいは価数のイオンのみを通過させる孔である。チャネルを通したイオンの移動は受動的であり、濃度勾配による拡散力や電気力によって細胞内外を移動する。

細胞内外における Na^+ 、 K^+ の組成 (濃度差) は、後述する膜電位や活動電位の発生に重要な役割を果たす。この2つのイオンの細胞内外での濃度差は、神経細胞の膜上に設置された Na^+ - K^+ ポンプによって恒常的に維持されている (図 2.4)。これは3つの Na^+ を細胞外に汲み出し、その代わりに2つの K^+ を細胞内に汲み入れるイオン輸送装置である。 Na^+ - K^+ ポンプは細胞内の領域に Na^+ - K^+ ATPase という ATP (ア

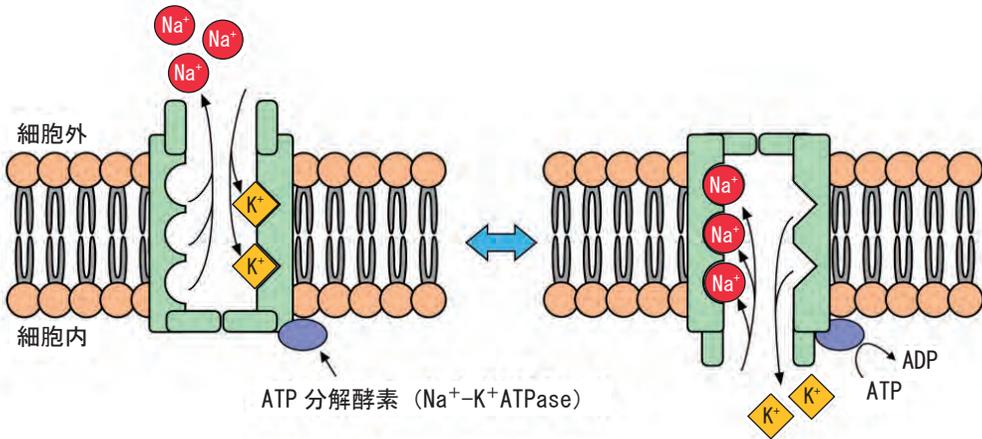


図 2.4 Na^+ - K^+ ポンプ

デノシン 3 リン酸) の分解酵素を備えており、ATP を分解して生まれるエネルギーをもとにポンプを駆動している。すなわち、 Na^+ - K^+ ポンプによるイオンの交換輸送はイオンチャネルのような受動輸送ではなく、エネルギーを消費する能動輸送である。

1.4 神経の静止電位

神経が電気信号を発生することは、17 世紀イタリアのガルバーニによって発見された。神経細胞は信号を発生する電池のようなものであり、その信号を伝える軸索はいわば電線である。電池にプラス、マイナス（極性）があるように、神経細胞も電気的な極性があり、細胞の内側の電位が外側に比べて約 -70mV になっている（分極している）。この細胞内外での電位の差を膜電位（membrane potential）という。細胞が静止状態（神経信号を発生していない）のときの膜電位を静止膜電位（resting membrane potential）とよぶ（図 2.5）。静止膜電位は細胞内外のイオン組成の差によって生み出され、特に K^+ の寄与が大きい。その仕組みを以下に述べる。

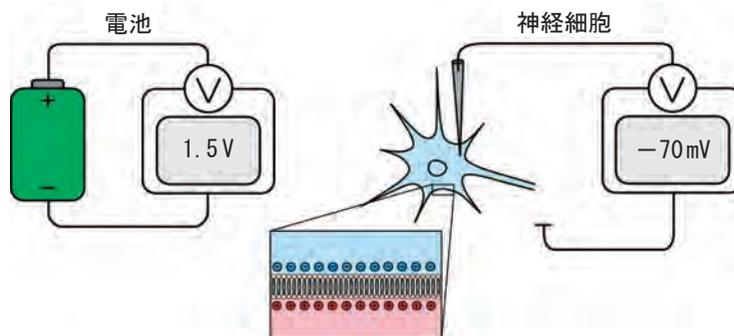


図 2.5 静止膜電位

K^+ は細胞膜に設置された K^+ チャネルを通り、細胞内外をわりと自由に往来できる。細胞内には K^+ が細胞外に比較して高濃度に存在するため、濃度勾配によって K^+ を細胞外へ流出させる力が発生する（図2.6 ①白矢印）。細胞内と外はいずれも陽イオンと陰イオン（図2.6内の A^- ）の数のバランスが取れているが、陽イオンである K^+ が濃度勾配に従って細胞外へ流出すると細胞内は陰イオンが余剰となるため、細胞内はマイナスの電位を示すようになる。マイナス電位は K^+ を細胞内に引き戻す電気力（図2.6 ②黒矢印）を生み出し、濃度勾配による K^+ の駆動力に逆らうこととなる。 K^+ 流出の持続によりマイナス電位の程度はより大きくなるため、 K^+ を細胞内に引き入れる電気力もさらに大きくなり、やがて濃度勾配と電気力という2つの力は拮抗し、 K^+ の移動はみかけ上停止する（=平衡状態に達する 図2.6 ③）。このときの膜電位をカリウム平衡電位（equilibrium potential for K^+ ）という。カリウム平衡電位は細胞内外の K^+ 濃度を使った以下の式で表現される。

$$E_k = 62 \log [K]_o / [K]_i \quad (\text{温度が } 37^\circ\text{C} \text{ の場合})$$

単位はmVである。 $[K]_i$ が $[K]_o$ の20倍くらい濃度が濃いとすると、細胞内電位は -80 mV となる。

実際の細胞では少量の Na^+ の細胞内流入が発生しており、それに対抗するように K^+ の流出が起きている。そのため、膜電位はカリウム平衡電位より若干浅くなり、約 -70 mV となっている。

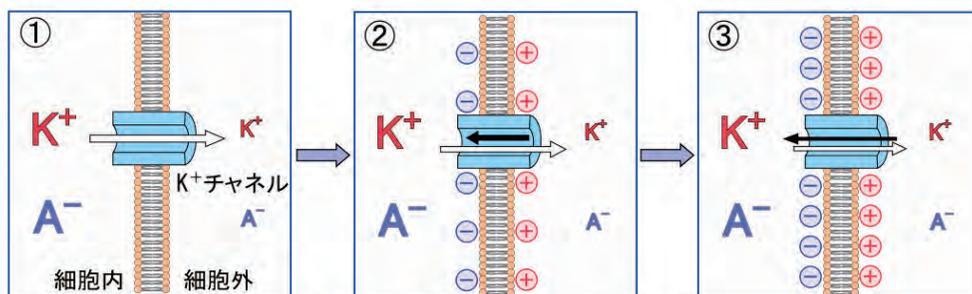


図2.6 カリウム平衡電位の発生

コラム 細胞膜と電気的二重層

平衡電位がマイナス電位だからといって、細胞内がどこでもマイナス電位になっているわけではない。 K^+ の流出によって細胞内に取り残された陰イオンは、プラス電荷を取り戻そうとして K^+ を細胞内に引きつける。引きつけておく場所は細胞膜である。つまり平衡状態にある細胞膜では、内側に陰イオン（マイナス電荷）、外側に K^+ （プラス電荷）が張りついた電気的二重層を形成している。

2 神経信号の発生

2.1 活動電位の発生

神経細胞が発生する電気信号の正体は、ごく短時間で終了する膜電位の逆転、すなわち静止状態ではマイナスであった膜電位が瞬間的にプラスに変化する現象である。この現象を**活動電位** (action potential) という。活動電位は**興奮** (excitation)、**インパルス** (impulse) などと言い換えられることもある。

活動電位は発生から終了まで2ミリ秒程度のごく短時間の現象であるが、そのわずかな時間の中でさまざまなメカニズムが働いている (図 2.7、図 2.8)。活動電位の発生過程は以下に述べる3つの相^{*2}に分けられる。

第1相は他の神経細胞からの信号を受け取る (シナプス入力が入る) ことで始まる。前述のように、神経細胞同士の信号の受け渡しは神経伝達物質により行われる。シナプス前ニューロンが放出した神経伝達物質は、シナプス後ニューロンの細胞膜に設置された**伝達物質作動性 Na⁺チャンネル**に結合し、その Na⁺チャンネルを開く。細胞外には Na⁺が高濃度に存在するので、開口したチャンネルを通して細胞内に Na⁺が流入する。すると Na⁺のもつ正の電荷によって膜電位は正の方向に偏移し、細胞内外の電位差が減少する (**脱分極** (depolarization))。

第1相においてシナプス前ニューロンからの信号入力十分に強く、膜電位が -50 mV 付近まで脱分極が進むと、細胞膜の上に多数存在する**膜電位依存性 Na⁺チャンネル**が一斉に開口し、第1相よりも遥かに多くの Na⁺が細胞内に流入する。それによって急激な脱分極が起こり、膜電位はついには 0 mV を超過して +30 mV 付近まで急上昇する (オーバーシュートする)。これが第2相である。

第3相は膜電位が静止状態まで回復する過程である。第2相において膜電位が +30 mV 付近まで上昇した直後より、Na⁺の膜透過性が急激に減少する (図 2.8 内の赤線は Na⁺の透過性を表している)。さらにタイミングを同じくして**膜電位依存性 K⁺チャンネル**が開口するため、K⁺の細胞外流出が起こり、膜電位は静止電位に向かって

***2:** 第1相つまりシナプス入力による脱分極現象は活動電位の「前段階」であり、正しい意味での活動電位は第2相以降をさす。しかし「ある神経が別の神経からの信号を受け取ることで自らも信号を発生させる」ということが神経回路機能の本質であることを考えると、シナプス入力とそれに続く活動電位を切り離して理解することは望ましくなく、初学者はワンセットとして頭に入れておくべきである。明確なシナプス入力がなくとも自発的に活動電位を発生させる細胞も確かに存在するが、それは高い学問レベルにおける例外事項である。また、シナプス入力があったとしても活動電位を起こさないことや、逆に活動電位が起こりづらくなることもあるが、それについては後で詳しく述べる。

(正確にはカリウム平衡電位に向かって) 急降下する。この電位下降を再分極 (re-polarization) とよぶ。膜電位が静止レベルに近づくにつれて K^+ 透過性は減少するが、静止電位に回復して以降も K^+ の細胞外流出が持続することがあり、その場合は一過性の過分極、すなわち静止電位より低い電位となる後過分極電位 (after-hyperpolarization potential) をもたらす (図 2.8 内の青線は K^+ の透過性を示す)。

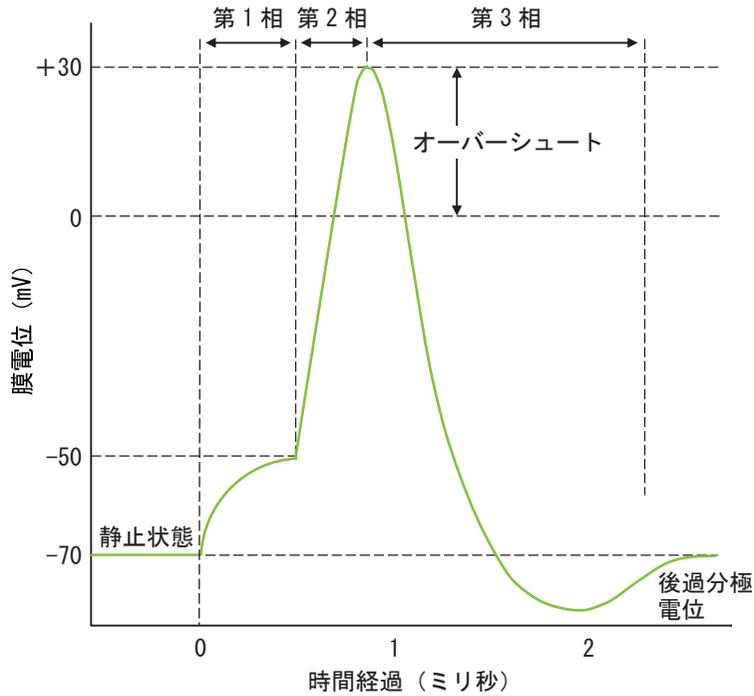


図 2.7 活動電位

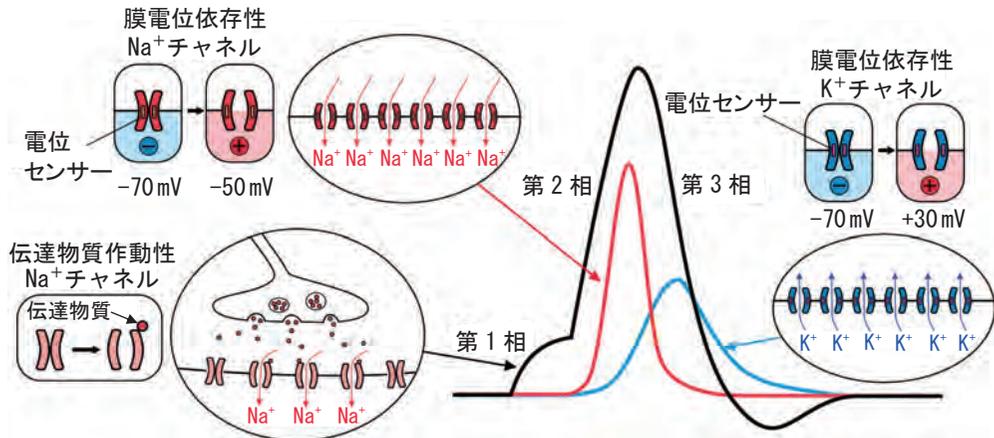


図 2.8 活動電位発生におけるイオンチャネルの開閉

コラム “膜電位依存性” の意味

膜電位依存性 Na^+ チャネル/ K^+ チャネルは細胞内領域に膜電位を感知するセンサー機構を備えており、膜の脱分極を検出してチャネルを開口する仕組みとなっている。先の通り膜電位依存性 Na^+ チャネルが開く電位の閾値は -50 mV 付近であり、 K^+ チャネルはそれと同じか、わずかに正側の電位で開口する。すなわち活動電位の発生に際して膜電位依存性 Na^+ チャネル/ K^+ チャネルはほぼ同時に開口するのだが、 K^+ チャネルの方が開口のスピード（単位時間当たりに開口状態に移行するチャネルの数）が遅く、 K^+ 透過性の増加が緩やかなため、前半では Na^+ 流入が優位となるので電位が上昇し、後半は K^+ 流出が優位となるため再分極が進む。2種類のイオンチャネルが絶妙なタイミングで開口・閉鎖する仕組みをもつことによって、持続時間わずか1ミリ秒という高解像度の信号生成が可能になっている。

2.2 閾膜電位と全か無かの法則

シナプス入力により脱分極が -50 mV に達すると、膜電位依存性 Na^+ チャネルが開口して活動電位が発生する。つまり -50 mV という電位が活動電位の発生の閾値（境界値）となっている。この電位のことを**閾膜電位**（threshold potential）という。もしシナプス入力による脱分極が -50 mV に達しなかった場合はどうなるのか。答えは「活動電位は発生せず、静止電位に戻る」である。脱分極（シナプス入力）があったとしても、必ずしも活動電位が起こるわけではないことに注意してもらいたい。

シナプス入力によって閾膜電位に達しさえすれば、細胞は常に同じサイズの活動電位を発生させる。つまり膜電位は必ず一定値までオーバーシュートする。これはシナプス入力による脱分極のスピード（シナプス入力の強さを反映している）に依存しない。すなわち活動電位は「出るか出ないか」という2択しか取り得ない現象であり、これを**全か無かの法則**（law of all or none）という（[図 2.9](#)）。

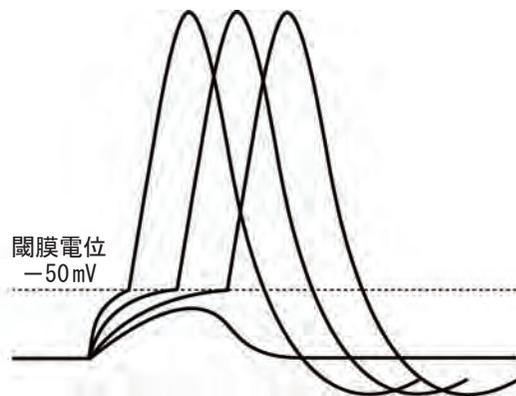


図 2.9 全か無かの法則

2.3 相対不応期と絶対不応期

いったん活動電位を発生した直後は、シナプス入力があったとしても活動電位の発生が制限される期間がある。この期間のことを**不応期** (refractory period) という。不応期には**相対不応期** (relative refractory period) と**絶対不応期** (absolute refractory period) がある。

相対不応期は活動電位が発生しにくい期間である。活動電位終了後は膜電位依存性 K^+ チャネルの開口が持続しており、 K^+ の細胞外流出が続いている（その結果、後過分極電位を呈する）。そのためシナプス入力による Na^+ 流入効果が打ち消され、脱分極が大きくなる。この場合、 K^+ 流出の影響を打ち消すくらい大きなシナプス入力があれば、細胞は閾膜電位まで脱分極し、活動電位を発生させることができる。相対不応期は活動電位終了から数ミリ秒間続く。

絶対不応期は活動電位が発生できない期間である。活動電位の発生の項でも述べたとおり、膜電位がオーバーシュートした直後より Na^+ の膜透過性が急激に減少していく。これは膜電位依存性 Na^+ チャネルの閉鎖ではなく、 Na^+ チャネルのもつ**不活性化ゲート** (inactivation gate) によるイオン通路の遮断が原因である (図 2.10)。不活性化ゲートによる Na^+ チャネルの遮断作用は活動電位終了後も一定期間持続し、この間は次の活動電位発生が完全に抑制される。伝達物質作動性 Na^+ チャネルは通常と同じ状態のため、シナプス入力による脱分極は起こすことができる。しかし閾膜電位に達しても、膜電位依存性 Na^+ チャネルは遮断されているため、活動電位が発生しないのである。

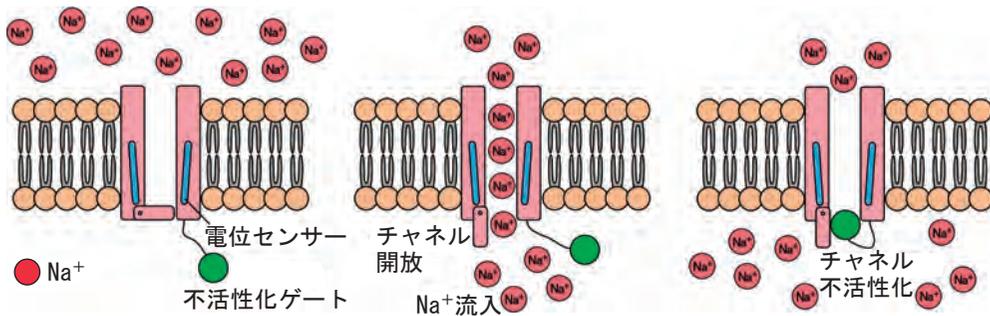


図 2.10 活動電位発生におけるイオンチャネルの開閉

コラム 不応期の意義

相対不応期・絶対不応期ともに、その開始時点は活動電位の終了より前にことに注意してもらいたい。もし不応期という性質がなく、静止電位に戻る前に

2回目の活動電位を発生してしまったら、前と後の2つの活動電位は融合してしまい、それぞれの見分けがつかなくなってしまう。もともと2つの信号だったものがくっついてひとつに見えてしまったら、情報は誤伝達されたことになる。2種類の不応期によって連続する2つの信号は明確に区別され、神経情報伝達の時間分解能が保たれている。ちなみに最も不応期の短い細胞の不応期は1ミリ秒以下で、1秒間に1,000回(1,000 Hz)の活動電位発生が可能である。

3 神経信号の伝わり

3.1 有髄神経と無髄神経

神経の軸索を顕微鏡で観察すると、多くの軸索が海苔巻のような構造で包まれている。この構造を**髄鞘**(myelin sheath)という(図2.11)。髄鞘はミエリンあるいはミエリン鞘とよばれることもある。髄鞘の正体はグリアという細胞の一種であり、軸索に何重にも取り巻いて絶縁体の役割を果たしている。中枢神経系における髄鞘はオリゴデンドログリア、末梢神経系ではシュワン細胞というグリア細胞が髄鞘を形成する。髄鞘は一定間隔ごとに途切れて軸索の細胞膜が露出している部分があり、発見者の名前をとって**ランビエ絞輪**(node of Ranvier)と名付けられている。このように髄鞘をもつ神経線維を**有髄神経**あるいは**有髄線維**という。一方で髄鞘をもたないものを**無髄神経**あるいは**無髄線維**という。我々を含む脊椎動物では有髄線維が多く、イカやタコのような無脊椎動物は無髄線維しかもたない。

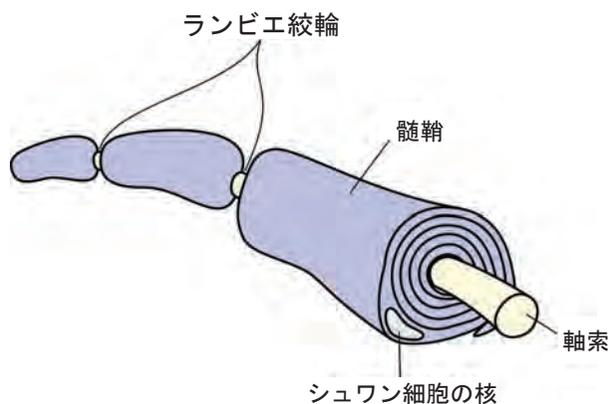


図 2.11 末梢神経における髄鞘の構造

3.2 興奮の伝導（活動電位の伝導）

活動電位の発生部位はニューロンの細胞体である（厳密には軸索の根元に近い部位）。細胞体で発生した活動電位は軸索を**伝導**（conduction）して軸索終末に至る。活動電位の伝導様式は無髄線維と有髄線維で若干異なる。まずは無髄線維における興奮伝導の仕組みについて述べる。

軸索を左から右に向かって活動電位が進行していると考えよう（**図 2.12**）。いま活動電位が起きている部位では Na^+ の流入によってプラス電荷量が高まっている（＝電位が上昇している）。興奮部位より前方にある未興奮部位の膜の内側はマイナス電荷が張りついているので、興奮部位のプラス電荷はマイナス電荷に引きつけられて移動し、マイナス電荷を中和することで電位を上昇させる（＝脱分極を起こす）。未興奮部位の膜電位はやがて閾膜電位に達し、活動電位を発生する。このようにしてある部位の興奮が別の部位の脱分極を促し、そこが興奮してまた別の部位の脱分極・・・という連鎖現象が起こるため、あたかも活動電位が軸索を移動しているように見える。ちなみに活動電位の伝導方向は常に細胞体→軸索終末と決まっており、逆行することはない。これは一旦興奮した軸索膜は不応期に入る（2.3 参照）ため、軸索終末側で発生している活動電位（過ぎ去った興奮）によって興奮できないからである。

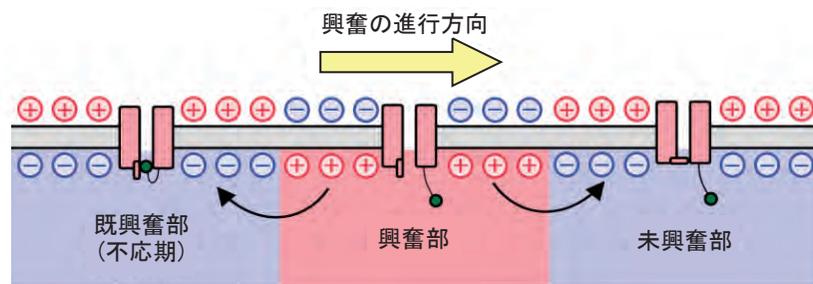


図 2.12 無髄神経における興奮伝導

次に有髄線維における興奮伝導を考える（**図 2.13**）。3.1 のとおり髄鞘に覆われた部位では細胞内と細胞外は完全に絶縁されており、細胞膜はランビエ絞輪部でのみ細胞外液に接している。そのため膜電位依存性 Na^+ チャネルを通した Na^+ の軸索内流入が可能なのはランビエ絞輪部のみとなり、活動電位の発生もこの部位に限られる。活動電位は途中の髄鞘部位を飛ばして次のランビエ絞輪に移動するように見えるため、この伝導様式を**跳躍伝導**（saltatory conduction）とよぶ。跳躍伝導のおかげで有髄線維における**神経伝導速度**（conduction velocity）は無髄線維のそれに比べて圧倒的に速い。

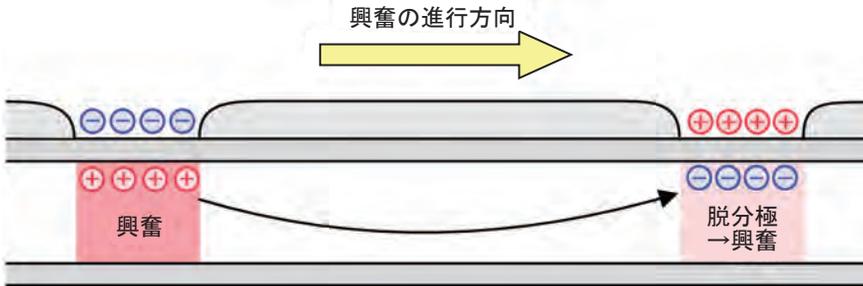


図 2.13 有髄神経における跳躍伝導

コラム 興奮伝導と局所電流

興奮伝導のメカニズムは軸索内外を流れる電流によって説明されるのが一般的である。この電流の要素は4つあって、①興奮部における電位依存性 Na^+ チャネルを通じた電流、②軸索外において未興奮部から興奮部へ流れる電流、③軸索内で興奮部から未興奮部へ流れる電流、④未興奮部において膜の内側から外側へ流れる電流、である。この4つの電流は全体としてひとつの電流ループ（電気回路）を形成しており、これを興奮伝導における局所電流とよぶ（図 2.14）。

電流とはすなわちプラス電荷の移動のことである。生体内では陽イオンがプラス電荷の運び屋となるため、陽イオンの移動がすなわち電流となる。そして電流は電位の高いところから低いところに向かって流れる性質がある。これらを踏まえて上記の4つの電流の正体を紐解いてみる。①の電流の正体はいうまでもなく Na^+ の移動である。そのためこの電流は内向きナトリウム電流とよばれる。この内向き電流はプラス電荷が軸索内へ吸い込まれているという見方もできる。その吸い込み口へのプラス電荷の供給路となっているのが②の電流である。③は興奮部－未興奮部間の電位差によって生じるプラス電荷の移動であり、本文ではそのように説明している。最後の④については若干ややこしい。③のプラス電荷の移動によって未興奮部の膜の内側のマイナス電荷が中和され、そのマイナス電荷に引きつけられていた膜の外側のプラス電荷が解き放たれる。プラス電荷が膜の内側へやってきて、そして膜の外側から離れていくので、全体的に見ると膜の内側から外側に電流（外向き電流）が流れているとみなせる。さて、多くの教科書では「外向き電流によって脱分極が起こり、やがて閾値に達する」と説明している。しかしながら未興奮部の脱分極において本質的なことは、先の電流③の正体である「興奮部から未興奮部へのプラス電荷の移動」と、それによる「未興奮部の膜の内側のマイナス電荷の中和＝電氣的二重層の解消」である。外向き電流はそれ

らの仕組みをある側面から観察したものに過ぎず、因果関係にはない。神経の電気生理学実験を経験でもしない限り、これらの電流の概念は初学者には理解困難である。

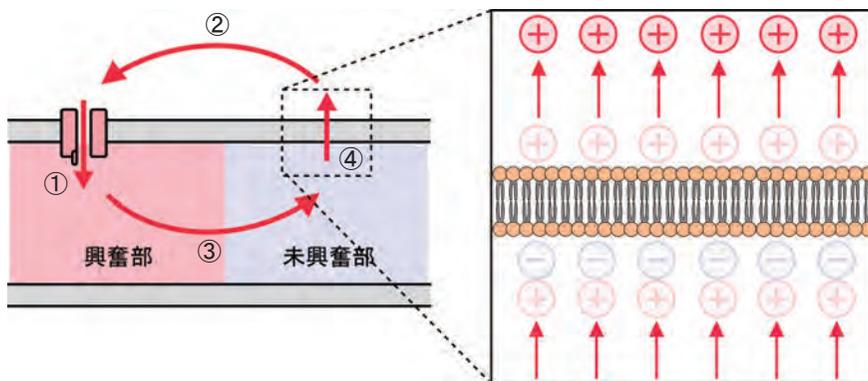


図 2.14 興奮伝導における局所電流

3.3 神経伝導速度

活動電位が軸索を伝導する速度を規定する要因のひとつは、上述した髓鞘の有無である。有髓線維における活動電位は跳躍伝導するため、無髓線維に比べて圧倒的に伝導速度が速い。もうひとつの重要な要因は軸索の太さである。軸索の断面積が大きい方が興奮部位から未興奮部位への Na^+ の移動がスムーズに行われ、脱分極の連鎖がより速くなるためである。イオンの移動を水の流りに例えるとわかりやすい。管の中を流れる単位時間当たりの水の量は、管が太い方がより多くなるのが容易に想像できるだろう。

神経伝導速度をより速い方から順番に並べて、最も伝導速度が速いカテゴリーから A、B、C と文字を割り当てたものを神経線維の文字分類という (表 2.2)。伝導速度が速いカテゴリーほど軸索直径が大きいこともこの表からわかる。そしてこのカテゴリーは神経線維の機能に対応している。神経線維のうち感覚神経だけを抽出し、神経伝導速度順に並べてローマ数字でカテゴリー化したものを数字分類という (表 2.3)。Ia は「ワンエー」あるいは「いちエー」と読む。アルファベットの I (アイ) ではないので注意してもらいたい。生理学の成書において各神経線維の機能を論ずるとき、文字分類あるいは数字分類のカテゴリー名称を用いることが多く、またどちらを用いるかは統一されていない。例えば、運動神経線維は「A α 線維」あるいは「 α 運動神経」と文字分類の名称でよばれることが多く、筋紡錘から伸びる感覚神経は文字分類のうえでは運動神経と同じ A α であるが、「Ia 神経」のように数字分類

が用いられるのが一般的である。今後さまざまな場所で神経の分類名が登場すると思われるが、その名称が指し示す神経線維の種類を即座に思い浮かべられるように、2つの分類表には親しんでもらいたい。

表 2.2 神経線維の文字分類

分類名	機能	直径 (μm)	伝導速度 (m/秒)	髄鞘
A α	体性運動、固有感覚	12~20	70~120	有
A β	触圧覚	5~12	30~70	有
A γ	錘内筋運動	3~6	15~30	有
A δ	鋭い痛覚、冷覚	2~5	12~30	有
B	交感神経節前線維	<3	3~15	有
C	鈍い痛覚、交感神経節後線維	0.3~1.3	0.7~2.3	無

表 2.3 神経線維の数字分類 (感覚神経)

分類名	機能	文字式分類
I a	筋紡錘のらせん終末	A α
I b	ゴルジ腱器官	A α
II	触圧覚	A β
III	鋭い痛覚、冷覚	A δ
IV	鈍い痛覚、温覚	C

コラム 神経軸索の再生

軸索の途中を切断や傷害すると、それより下流（末梢）側は変性し消える。しかし、もしその傷害部位が細胞体から十分下流であれば細胞体が軸索を再び伸ばし、もとの通りにつながることもある。すなわち、神経軸索は再生が可能である。ただし、軸索の伸びる速度は1mm/日程度である。したがって、再びつながって機能が復活するまでに数カ月を要する。ところで、神経や筋肉は本来細胞分裂しないので細胞体自身が傷害されると再生することはなく死滅する。ただし、他の神経細胞から軸索が伸びてきて、末梢の運動や感覚が回復することもある。以上は末梢神経の場合であるが、中枢神経（脳や脊髄）の神経細胞では今のところ再生は不可能とされている。しかし、再生できない分、他の細胞が代償することがある。例えば、左脳で失われた言語中枢の機能を右脳が代償することがある。その際のリハビリテーションの意義は大きい。

4 神経の連絡と神経信号の伝達

4.1 シナプス伝達

軸索の先端は他のニューロンや筋肉とシナプス接続するが、その接続部はシナプス間隙によって隔てられており、電気的現象である活動電位を直接伝えることはできない(1.2参照)。シナプスでの情報伝達は**神経伝達物質** (neurotransmitter) によって行われる。

軸索終末の内部には、神経伝達物質を包んだ**シナプス小胞** (synaptic vesicle) が存在する。活動電位が軸索を伝導して終末に到着すると、シナプス小胞が細胞膜に口を開いて神経伝達物質を放出する。この過程を**開口放出**という(図2.15)。放出された神経伝達物質はシナプス間隙を拡散し、シナプス後膜の受容体、すなわち伝達物質作動性イオンチャンネルに結合し、膜電位変化をもたらす。このようにして、シナプスでは電気信号→化学物質→電気信号と形態を変えつつ情報を伝達する。なお、シナプス間隙には神経伝達物質に対する分解酵素が存在する。神経伝達物質は受容体に結合して作用するとともに、この分解酵素で分解され作用を終了する。

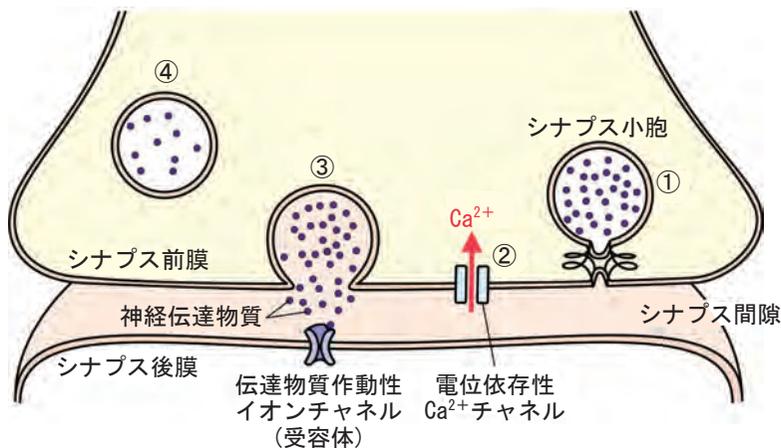


図 2.15 開口放出のしくみ

コラム Ca^{2+} シグナルと神経伝達

活動電位が軸索終末に到達すると、終末部の細胞膜上に存在する膜電位依存性 Ca^{2+} チャンネルというイオンチャンネルが開く。細胞内の Ca^{2+} は細胞外に比べて低濃度であるため、 Ca^{2+} はチャンネルを通して細胞内に流入する。静止状態においてシナプス小胞はシナプス前膜近傍に特殊なタンパク質を介してつなぎ止めら

れているが、活動電位の到達によって Ca^{2+} が流入し細胞内の Ca^{2+} 濃度が上昇すると、シナプス小胞膜はシナプス前膜と融合を果たし、開口放出に至る（シナプス小胞膜と細胞膜は同じ構造のため、両者は容易に融合する）。伝達物質を解き放った後に残った小胞膜は再び細胞内に取り込まれ、新たな神経伝達物質を充填して次の活動に備える。

4.2 興奮性シナプスと抑制性シナプス

これまでシナプス入力で生じる脱分極について詳しく述べてきた。しかし、シナプス作用には脱分極ではなく過分極（膜電位を下げる）をもたらすものもある。脱分極をもたらすシナプスを**興奮性シナプス**（excitatory synapse）とよぶ一方、過分極をもたらすものは**抑制性シナプス**（inhibitory synapse）とよばれる。過分極性の電位変化は膜電位を閾膜電位から遠ざけることになり、細胞が興奮しないように（興奮を抑えるように）働くため、抑制性という表現が使われる。興奮性シナプスの作用による脱分極現象を**興奮性シナプス後電位**（excitatory postsynaptic potential: EPSP）、抑制性シナプス作用による過分極現象を**抑制性シナプス後電位**（inhibitory postsynaptic potential: IPSP）とよぶ。

興奮性作用・抑制性作用を決める要因のひとつは、伝達物質作動性イオンチャネルの種類である。興奮性シナプスによって作動するイオンチャネルは、これまでも再三登場してきた伝達物質作動性 Na^+ チャネルである。一方で抑制性シナプスによって作動するのは**伝達物質作動性 Cl^- チャネル**である。シナプス入力（＝神経伝達物質の作用）によって伝達物質作動性 Cl^- チャネルが開口すると、細胞外に豊富に存在する Cl^- が細胞内に流入し、膜電位の低下をもたらす（[図 2.16](#)）。

シナプス作用の興奮・抑制を規定するもうひとつの因子は、神経伝達物質の種類である。ニューロンが神経伝達物質として用いる物質は、原則として1種類である。そのため、そのニューロンの信号伝達機能（シナプス接続先に対してどのような作用をもたらすか）は、保有・放出する神経伝達物質によって決まる。

神経伝達物質は興奮性に作用するもの（すなわち伝達物質作動性 Na^+ チャネルを開口させるもの）と抑制性に作用するもの（すなわち伝達物質作動性 Cl^- チャネルを開口させるもの）があり、それぞれ**興奮性伝達物質**（excitatory neurotransmitter）、**抑制性伝達物質**（inhibitory neurotransmitter）とよばれる。また、興奮性伝達物質をもつニューロン（すなわち相手に興奮をもたらすニューロン）は**興奮性ニューロン**（excitatory neuron）とよばれる。同じく抑制性伝達物質をもつニューロンは**抑制性ニューロン**（inhibitory neuron）に分けられる。

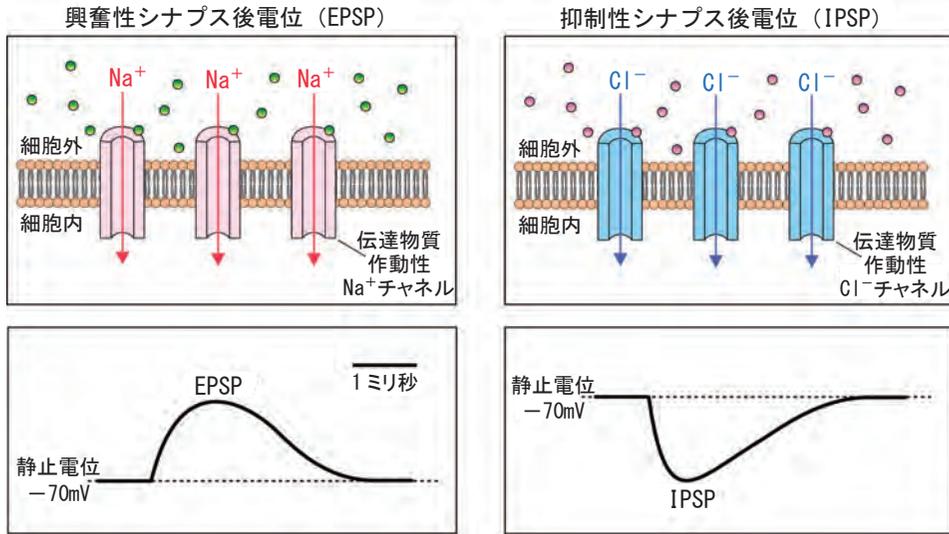


図 2.16 興奮性シナプス後電位と抑制性シナプス後電位

興奮性伝達物質の代表は**グルタミン酸** (glutamate) である。抑制性伝達物質では**γ-アミノ酪酸** (gamma-aminobutyric acid: GABA)、**グリシン** (glycine) などがある (図 2.17)。同種の神経伝達物質でも、作用相手やその受容体の性質によって興奮性に働く場合と抑制性に働く場合がある。例えば、ドーパミンはそれを受け止めるドーパミン受容体の型によって作用が反対になり、D1 受容体では興奮性、D2 受容体では抑制性の電位変化をもたらす (第 6 章 2.4 参照)。

ニューロンの機能的分類名として、そのニューロンがもつ神経伝達物質の種類を冠した〇〇作動性ニューロン (例:グルタミン酸作動性ニューロン) という言葉がある。前にも登場した「伝達物質作動性イオンチャンネル」と同じ「作動性」という言葉がついているが、その意味は全く反対であることに注意が必要である。伝達物質作動性イオンチャンネルが「伝達物質によって動き出すイオンチャンネル」であるのに対し、グルタミン酸作動性ニューロンは「グルタミン酸を放出するニューロン」という意味である*3。

*3: 伝達物質作動性イオンチャンネルでは「作動性」という言葉が機能自体を示しているため、直感的に受け入れやすいと思われる。一方で〇〇作動性ニューロンについてはその意味と「作動性」という言葉が一致・対応しておらず、初学者にとっては大変わかりづらい。英語では伝達物質作動性は transmitter-gated、直訳では「伝達物質によって開閉される」という意味であり、まさに名は体を表している。一方で、グルタミン酸作動性ニューロンは glutamatergic neuron という。「-ergic」は神経伝達物質に関する事柄でしか用いられない特殊表現であり、「関与する」という曖昧な意味をもつ。この英語に対して「作動性」という和訳が充てられた経緯は不明だが、日英いずれにしても名と体が一致しているとはいいがたい。日本語の「作動性」については「グルタミン酸ニューロン」「GABA ニューロン」のように省略されることも多く、この言葉の必然性はそれほどないといえる。したがって、初学者が学習するうえでは、この言葉は無視してしまってもさして問題はない。

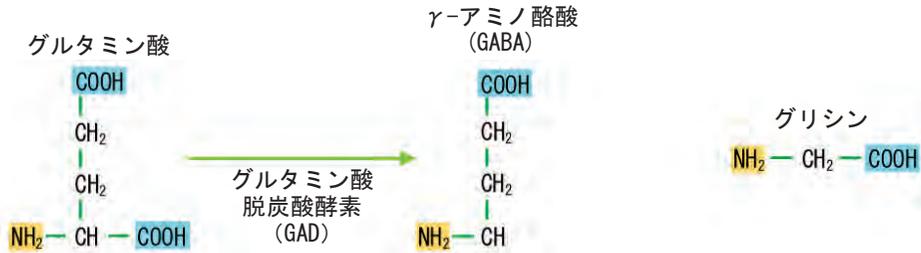


図 2.17 グルタミン酸、 γ -アミノ酪酸、グリシン

コラム IPSP とシナプス前抑制

シナプス接続様式において軸索-軸索型シナプスを紹介したが、このタイプは抑制性シナプスである。すなわち軸索終末部で Cl^- チャネルを開口させ、IPSPをもたらす。この抑制形式をシナプス前抑制 (presynaptic inhibition) という。上述の通り、シナプス前終末に興奮が到達して電位依存性 Ca^{2+} チャネルが開口することが神経伝達物質放出の必要条件となる。シナプス前抑制による過分極はシナプス終末に到達した興奮を弱めるあるいは打ち消す作用をもたらすので、伝達物質の放出にストップをかけることになる。この抑制形式の意義は「特定のシナプスの信号伝達を弱める」ことである。シナプス前抑制の実例は脊髄内の運動実行の神経回路にみられる (図 2.18)。皮膚感覚神経は脊髄内で運動神経細胞に対する間接的なシナプス接続をもっているが、脊髄内の抑制性ニューロンがこの接続をシナプス前抑制によって遮断している。運動実行の際に不要な感覚をシャットアウトする意義があると考えられている。

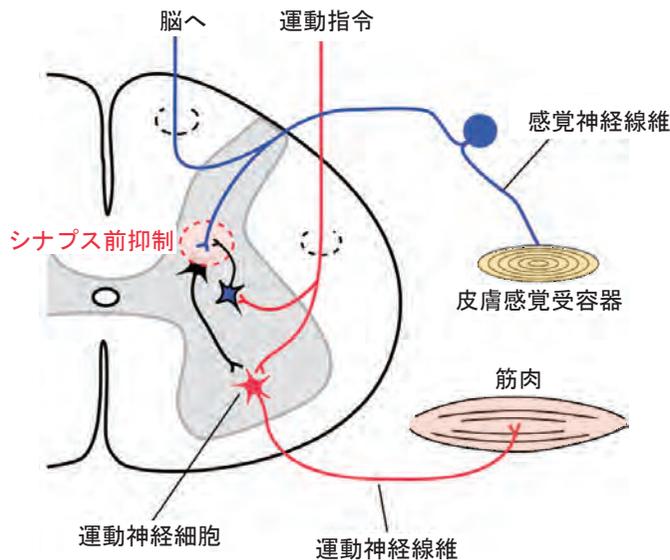


図 2.18 シナプス前抑制

4.3 神経伝達物質

神経系はさまざまな神経伝達物質を用い、複雑多彩な脳の機能を支えている。神経伝達物質の種類は50種類以上が発見されており、今後もその数は増えていくと考えられる。代表的な神経伝達物質を表2.4にまとめた。

神経伝達物質は、①アミノ酸、②アミノ酸に由来するアミン類（モノアミン）、③アミノ酸から構成されるペプチド、④アセチルコリン、のいずれかに分類される。グルタミン酸、グリシン、 γ -アミノ酪酸（GABA）はアミノ酸系の神経伝達物質である（図2.17）。グルタミン酸とグリシンは生体のタンパク質の構成要素でもあり、神経細胞以外の体細胞にも共通して存在する、ごくありふれたアミノ酸である。一方でGABAは神経細胞に特有の物質であり、神経伝達物質としてのみ機能する。GABAはグルタミン酸を材料に合成され、その合成にはグルタミン酸脱炭酸酵素（glutamic acid decarboxylase : GAD）がかかわっている。つまり、GADはGABA作動性ニューロン特有の酵素ということである。

モノアミンはドーパミン、ノルアドレナリン、アドレナリン、セロトニン、ヒスタミンといった神経伝達物質の総称である。モノアミンはひとつのアミノ基（ $-NH_2$ ）が芳香環とつながる化学構造をもつ。モノアミン類のうちドーパミン、ノルアドレナリン、アドレナリンはアミノ酸のひとつであるチロシンに由来しており（チロシ

表2.4 神経伝達物質の種類

分類	名称
アミノ酸	グルタミン酸
	γ -アミノ酪酸（GABA）
	グリシン
モノアミン	カテコールアミン（アドレナリン、ノルアドレナリン、ドーパミン）
	セロトニン（5-HT）
	ヒスタミン
ペプチド	バソプレッシン
	コレシストキニン
	ガストリン
	エンケファリン
	β エンドルフィン
	ソマトスタチン
	サブスタチンP
アセチルコリン	

ン→L-ジヒドロキシフェニルアラニン→ドーパミン→ノルアドレナリン→アドレナリン)、カテコール基という化学構造を有するため、カテコールアミンとよばれる(図 2.19)。大脳基底核における変性疾患の代表格であるパーキンソン病では、中脳黒質という場所のドーパミン作動性神経が消失することが原因である(第6章)。またドーパミン快楽感情や学習などの高次の脳機能にも重要なかわりをもつ。ノルアドレナリンは交感神経節後ニューロンが用いる伝達物質であり、交感神経系の機能発現に不可欠である(第3章)。また脳内の広範囲にノルアドレナリン作動性ニューロンが存在している。アドレナリンは副腎髄質から血中に放出されるホルモンとしての存在感が大きい物質であるが(第15章)、中枢神経系でも脳幹を中心にアドレナリン作動性ニューロンが存在することが知られている。

セロトニンはアミノ酸のトリプトファンから合成されるモノアミン系神経伝達物質である(図 2.20)。セロトニンは正式には5-ヒドロキシトリプタミン(5-hydroxytryptamine)といい、5-HTと略されることがある。セロトニン作動性ニューロンは主として脳幹に多数存在し、脳内の広範囲に対してセロトニンを送り出している。セロトニンは不安障害や気分障害(うつ病)といった精神疾患との関連が指摘されており、セロトニンによるシナプス効果を持続させる薬剤である選択的セロトニン再取り込み阻害薬(SSRI)は、精神科臨床でよく用いられている。

ペプチドはアミノ酸が連結したものであるため、神経伝達物質の4つの分類の中でその分子は最も大きい。神経伝達物質としてのペプチドは神経ペプチド(ニュー

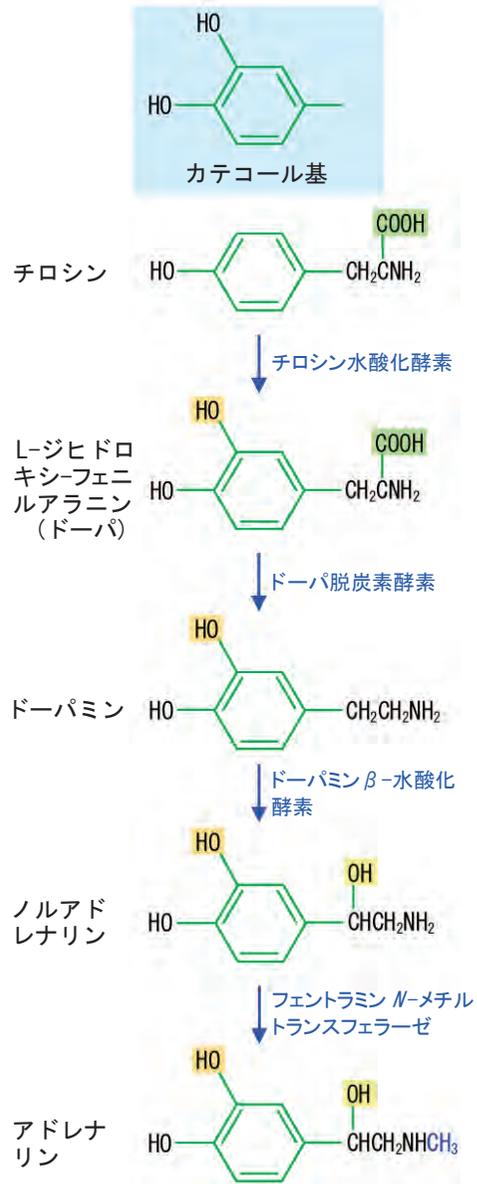


図 2.19 モノアミン類

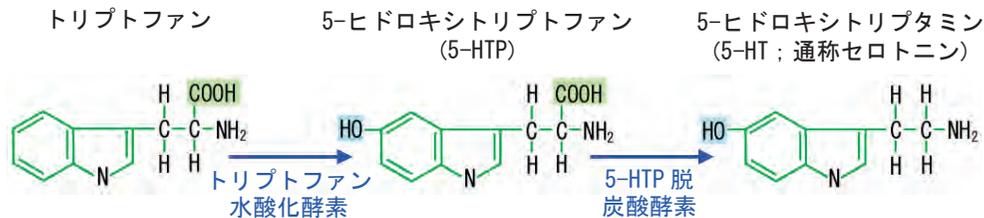


図 2.20 セロトニン

ロペプチド)ともよばれる。神経ペプチドの中にはバソプレッシンなどのホルモンとして既によく知られている物質がある。第15章の内分泌で詳しく学ぶが、下垂体後葉においてバソプレッシンを血中に放出している細胞は視床下部に存在し、その実態はニューロンであるため、神経内分泌系といわれる。近年、神経内分泌系のニューロンはその放出物質(ホルモン)を神経伝達物質としても用い、別のニューロンへの情報伝達にも利用していることがわかってきている。同じような例として、消化管運動を調節するホルモン(コレスistolキニン、ガストリンなど)も神経伝達物質としての役割をもっていることがわかっている。また、麻酔や鎮痛に関する物質であるオピオイド(β -エンドルフィン、エンケファリンなど)も神経ペプチドである。

神経ペプチドは神経伝達物質としては比較的新しい概念ではあるが、近年、続々と新しい神経ペプチドが発見・同定されており、実態としては最も数・種類が多い伝達物質であると考えられている。

アセチルコリン(ACh)は運動神経がもつ伝達物質であり、神経筋接合部において骨格筋に向かって放出され、筋収縮の引き金となる。それとは別に、アセチルコリンは自律神経系(交感神経・副交感神経節前ニューロン、副交感神経節後ニューロン)がもつ伝達物質でもある。また脳内ではアセチルコリンをもつニューロン(コリン作動性ニューロン)は多数存在し、脳のさまざまな機能に深く関与している(第3章、第5章参照)。

アセチルコリンはニューロンの軸索終末において、アセチルCoAとコリンから合成される(図2.21)。またコリン作動性ニューロンはアセチルコリンを分解する酵素であるアセチルコリンエステラーゼ(acetylcholinesterase: AChE)をアセチルコリンとともにシナプス間隙に放出する。シナプス終末から放出されたアセチルコリンはAChEによって酢酸とコリンに分解される。分解されたコリンはコリン輸送体によってシナプス終末内に運ばれ、アセチルコリンの合成に再利用される。

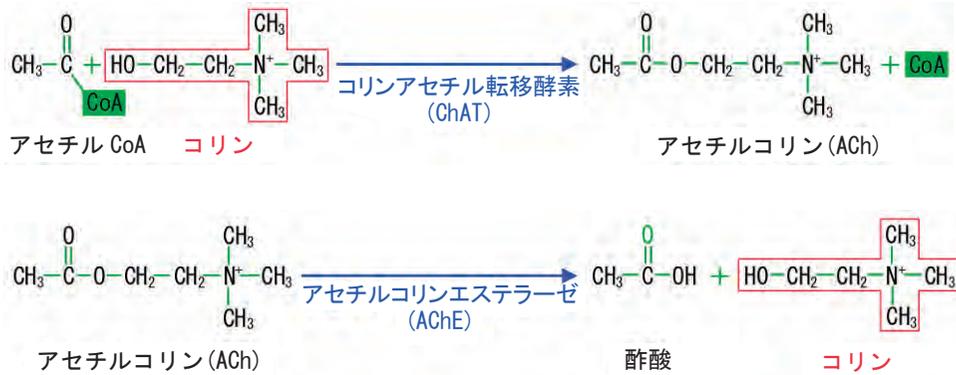


図 2.21 アセチルコリン

コラム アセチルコリンと地下鉄サリン事件

1995年(平成7年)3月20日午前8時頃、東京都内の帝都高速度交通営団(現東京メトロ)丸の内線、日比谷線各2編成、千代田線1編成、計5編成の地下鉄車内において、化学兵器として使用される神経ガス・サリンがオウム真理教信者により散布された。この行為により、乗客や駅員ら14人が死亡、負傷者数は約6,300人に上り、戦後最大最悪のテロ事件となった。サリンはアセチルコリンエステラーゼを阻害することで神経機能を障害する毒物である。アセチルコリンが分解されずシナプス作用(運動神経作用、副交感神経作用)の異常な増強・持続が起こるため、被害者には全身の筋痙攣や呼吸筋麻痺(呼吸停止)、瞳孔括約筋(副交感神経支配)の持続収縮による瞳孔系の縮小(縮瞳)といった症状が見られた。

4.4 シナプスの性質

シナプス前ニューロン側の一発の活動電位とそれに続くシナプス作用のみでは、シナプス後ニューロン側に起こるEPSPの大きさが不十分で、閾膜電位に達しない場合がある。しかし、次々と活動電位が到着してシナプス入力が続くと、EPSPが重積して大きくなり、興奮が引き起こされる。このような膜電位変化の積み重なりをシナプスの**時間的加重**(temporal summation)という。また1個のニューロンに対して通常複数のニューロンがシナプス接続しているが、それらのシナプス入力と同時に起こった場合、ひとつのシナプス入力に比べてより大きなEPSPを発生させる。これをシナプスの**空間的加重**(spatial summation)という(図 2.22)。中枢神経系では1対1のシナプスのみで信号伝達が決定されることはまれであり、空間的加重による信号伝達の調節は神経回路の機能的多様性を担っている。2つのシナプス加重は興奮性に限ったものではなく、抑制性伝達(IPSP)にも同様のことが起こり得る。

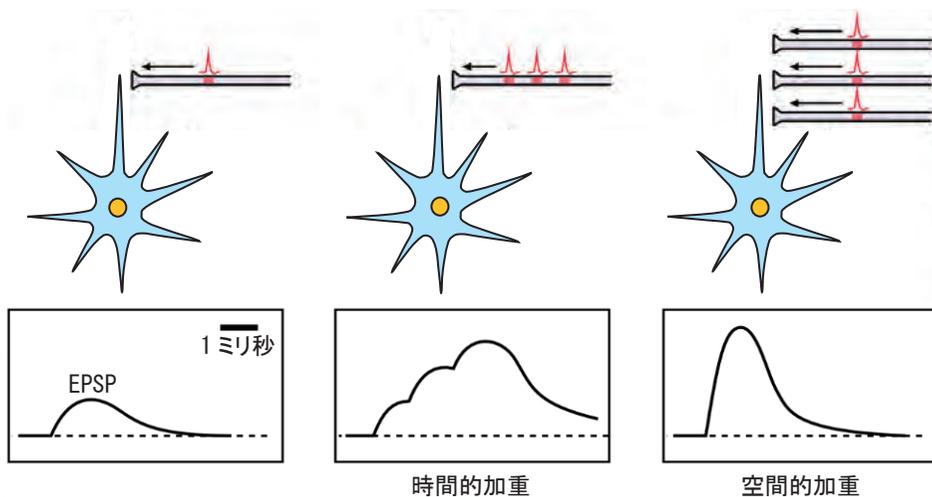


図 2.22 シナプス入力の時間的加重と空間的加重

コラム シナプスの易疲労性

カエルの坐骨神経を腓腹筋につながったまま取り出した神経筋標本において、その坐骨神経に対して繰り返し電気刺激を行ってみる。刺激開始当初は腓腹筋に大きな収縮が見られるが、時間経過とともに収縮はどんどん小さくなり、やがて収縮しなくなる。まるで筋肉が疲労して動かなくなったように見える。しかし、腓腹筋自体を直接電気刺激してみると、最初と同じように大きな収縮を見せる。すなわち、筋肉は疲労してはいない。しかし、この標本の神経筋のつなぎ目（神経筋接合部）を電子顕微鏡で観察してみると、シナプス小胞が大幅に減少していることが見出せる。すなわち、繰り返しの興奮によって神経伝達物質が枯渇してしまい、腓腹筋への信号伝達ができなくなっていたのである。過度の運動によるいわゆる「疲労」には、神経筋シナプスにおける信号伝達不全が無関係ではないと考えられる。労働に伴う精神的疲労（中枢性疲労）においても、脳内のシナプスにおける機能不全が関与していることも示唆される。

4.5 シナプス接続と神経回路

通常1個のニューロンの軸索は分岐して複数の神経に同時に情報を伝える。このような接続様式を**発散**（divergence）という。また、シナプス入力を受ける1個のニューロンから見ると、多くの場合複数のニューロンの軸索が接続している。このような神経回路の様式を**収束あるいは収斂**（convergence）という。このようにして、ニューロン同士は互いに複雑な接続をして神経回路網を形成している（図 2.23）。

別のニューロンを介して自分自身に情報を戻す回路もあり、このような神経回路を**反回** (recurrent) という。具体的には、下肢の筋を支配する運動ニューロンにおいて軸索の分枝が脊髄内でひるがえり、抑制性ニューロン (図中のグレーの神経) を介してもとの運動ニューロンにシナプスする例がある。この抑制性ニューロンは発見者の名前を取って**レンショウ細胞** (Renshaw cell)、この回路様式を**レンショウ抑制** (Renshaw inhibition) とよぶ。

別のニューロンを介して自分以外の周囲のニューロンを抑制する回路形式を**側方抑制** (lateral inhibition) とよぶ。視覚系を初めとする感覚系神経回路によく見られ、感覚信号の流れる道を狭めて興奮する場所と興奮しない場所のコントラストを高める (図 2.24)。

神経の興奮は興奮性シナプスだけで生じるわけではない。抑制性シナプスを介し

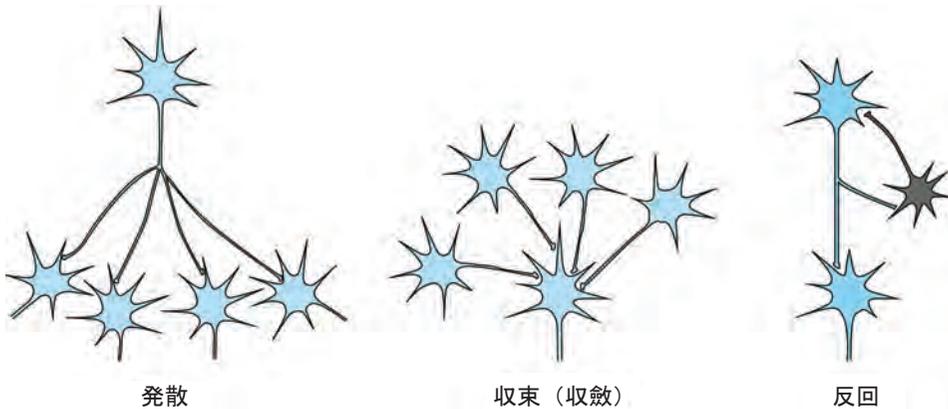


図 2.23 神経回路の基本様式 (1)

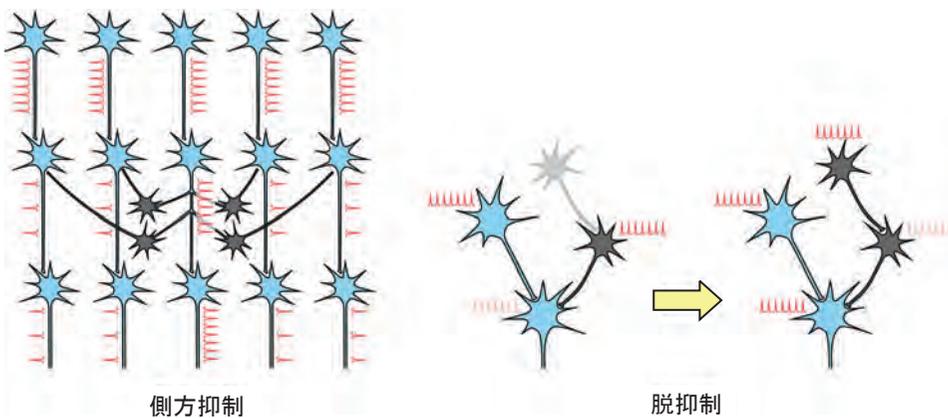


図 2.24 神経回路の基本様式 (2)

て興奮を引き起こすこともできる。あるニューロンAにシナプスしている抑制性ニューロンBが別の抑制性ニューロンCによって抑制を受ければ、Aに対するBの抑制が解除され、Aは興奮できるようになる。このようなメカニズムを脱抑制（disinhibition）という。我々の神経系の中で脱抑制が用いられているケースは珍しくなく、例えば大脳基底核の緻密な神経回路（第6章2.4参照）はその最たるものである。

問 題

A. 多肢選択問題

1 骨格筋の細胞膜には（ ）に対する受容体がある。自己抗体がこの受容体の働きを阻害すると骨格筋は収縮できなくなる。（ ）に入る神経伝達物質として正しいのはどれか。

- a. アセチルコリン b. アドレナリン c. ドーパミン d. ノルアドレナリン

2 神経伝達物質と効果器の組み合わせで正しいのはどれか。

- a. γ -アミノ酪酸 (GABA) — 気管
 b. アセチルコリン — 瞳孔括約筋
 c. アドレナリン — 血管
 d. セロトニン — 心筋
 e. ドーパミン — 汗腺

3 神経伝達物質はどれか。

- a. アルブミン b. フィブリン c. アセチルコリン d. エリスロポエチン

4 運動神経の神経伝達物質はどれか。

- a. ドーパミン
 b. ヒスタミン
 c. セロトニン
 d. アドレナリン
 e. アセチルコリン

5 神経伝達物質でカテコールアミンはどれか。

- a. ドーパミン b. セロトニン c. γ -アミノ酪酸 (GABA) d. アセチルコリン

6 活動電位について正しいのはどれか。

- a. 脱分極が閾値以上に達すると発生する。
b. 細胞内が一過性に負（マイナス）の逆転電位となる。
c. 脱分極期には細胞膜のカリウム透過性が高くなる。
d. 有髄神経ではプルキンエ細胞間隙を跳躍伝導する。

7 正しいのはどれか。

- a. 神経細胞内は細胞外に比べて Na^+ が多い。
b. イオンチャネルのイオン移動は能動的に行われる。
c. Na^+ - K^+ ポンプは Na^+ を細胞内に取り込み、 K^+ を細胞外に排出する。
d. Na^+ - K^+ ポンプは ATP によって駆動される。

8 正しいのはどれか。

- a. 活動電位は発生から終了までが 1 秒程度の現象である。
b. 膜電位が上昇して細胞内外の電位差が減少することを過分極という。
c. 活動電位において膜電位が正に逆転することを脱分極という。
d. 活動電位の後半で膜電位が下降してもとの状態に戻る過程を再分極という。

9 正しいのはどれか。

- a. 神経伝達物質による脱分極は伝達物質作動性 K^+ チャネルの開口による。
b. 脱分極が -50 mV 付近に達すると膜電位依存性 Na^+ チャネルが開く。
c. 再分極は K^+ の細胞内への流入による。
d. 後過分極電位は膜電位依存性 Na^+ チャネルの開口の持続による。

10 1本の神経線維を電気刺激した場合の興奮伝導の説明で正しいのはどれか。

- a. 興奮は一方向に伝わる。
b. 興奮は減衰せずに伝わる。
c. 興奮は細い線維ほど速く伝わる。
d. 興奮は並走する別の線維に伝わる。

解答

(1) a (2) b (3) c (4) e (5) a (6) a (7) d (8) d (9) b (10) b

B. 記述式問題

- (1) 静止電位と活動電位発生の機序を説明せよ。
- (2) シナプスでの興奮の伝達の機序を説明せよ。
- (3) 神経線維の分類と機能について説明せよ。
- (4) 主な神経伝達物質とその機能について説明せよ。

索引

数字

ギリシャ数字

I型アレルギー	224
II型アレルギー	225
III型アレルギー	225
IV型アレルギー	225

1

1型糖尿病	348
1秒量	276
1秒率	276, 277
1回拍出量	245
1回呼吸気量	274
1回換気量	274

2

2型糖尿病	348
2,3-ジホスホグリセリン酸	287

和文

あ

アイソザイム	19
アウエルバッハ神経叢	66, 304
アクアポリン	388
悪性貧血	193
悪玉コレステロール	344
アクチン	140
アクチンフィラメント	137
アジソン病	428
アシドーシス	346, 399, 404
アストログリア	57
アセチル CoA	339, 341, 343
アセチルコリン	48, 315, 320
アセチルコリンエステラーゼ	48
アデニン	10
アデノシンーリン酸	332
アデノシン二リン酸	331
アデノシン三リン酸	17, 138, 331
アトウォーターの係数	332
アドレナリン	46, 64, 427, 428
アドレナリン作動性線維	154
アドレナリン受容体	65
アブミ骨	125
アポクリン腺	453
アポタンパク質	203
アミノ酸誘導体ホルモン	417

アミロイドの沈着	493
アルカローシス	399, 404
アルドステロン	370, 392, 396, 427
アルファ波	82
アルブミン	198
アレルギー	224
アレルギー免疫療法	228
アロディニア	111
アンジオテンシン II	397, 428
アンジオテンシン系	257
暗順応	123
安静時振戦	176
アンドロゲン	435

い

イオンチャネル	30
異化	331
異化作用	431
閾値	95
閾膜電位	35
胃相	316
一塩基多型	20
一次運動野	76, 170
一次運動野の体部位再現	171
一次凝集	196
一次視覚野	77
一次性能動輸送	7
一次性感覚野	77, 101
一次痛	107
逸脱酵素	356
一般型	484
遺伝子	12
遺伝子異常	19
イヌリン	378
意味記憶	88
イリタント受容器	290
飲水中枢	395
インスリン	430
インスリン様成長因子	426
インスリン様成長因子-I	424
インターフェロン	214
インターロイキン	215, 463
咽頭相	310
インパルス	33

う

ウイスコンシン・カード・ソーティ ングテスト	494
ウエルニッケ野	76
ウエルニッケ脳症	354
羽状筋	136
うつ熱	460
ウラシル	10
運動神経	56
運動前野	170
運動単位	138, 160
運動ニューロン	69
運搬 RNA	13
運搬体	6

え

栄養膜細胞	474
腋窩温	445
液性免疫	194, 202, 216
エクササイズ	335
エクソサイトーシス	9
エクリン腺	453
エコノミー症候群	254
エストロゲン	426, 436, 439, 474, 476
エネルギー代謝	498
エネルギー代謝率	335
エピソード記憶	86
エビネフリン	64
エフェクター T 細胞	218
エリスロポエチン	189
遠位尿細管	366
塩基	399
塩基対	12
嚥下	310
エンケファリン	48, 111
遠心性運動	149
遠心性神経	56
遠心性の作用	108
延髄	70
延髄物側腹内側部	111
エンドクリン	417
エンドルフィン	111

お

横隔神経	274
横隔膜呼吸	274
黄体	437

- 黄体形成ホルモン…………… 424
 黄体ホルモン…………… 436
 黄疸…………… 190
 嘔吐中枢…………… 317
 黄斑…………… 121
 オートクリン…………… 417
 オーバーシュート…………… 33, 35, 36
 オキシトシン…………… 425, 439, 482
 オキシヘモグロビン…………… 284
 悪阻…………… 480
 遅い痛み…………… 107
 オッディの括約筋…………… 321
 オピオイド…………… 48
 オプソニン作用…………… 222
 オリーブ…………… 70
 オリゴデンドログリア…………… 57
 温罨法…………… 464
 温痛覚…………… 485
 温点…………… 98
 温度感受性ニューロン…………… 456
 温ニューロン…………… 456
 温熱性発汗…………… 453
 温熱的中性域…………… 450
 オンライン制御…………… 179
- か**
- 外因子…………… 193
 下位運動中枢…………… 164
 概月リズム…………… 448
 開口放出…………… 42, 417, 429
 外肛門括約筋…………… 325
 外呼吸…………… 268
 介在板…………… 234
 概日リズム…………… 72, 447, 448
 外層温…………… 444
 外層部…………… 444
 外側運動制御系…………… 170
 外側結合腕傍核…………… 457
 外側膝状体…………… 123
 回腸…………… 317
 外転神経…………… 59
 解糖系…………… 339
 外尿道括約筋…………… 381
 海馬…………… 80
 外胚葉…………… 477
 咳反射…………… 292
 解剖学的死腔…………… 277
 回盲弁…………… 317
 外リンパ…………… 125
 カイロミクロン…………… 203, 343
 化学的緩衝作用…………… 403
 化学的要因…………… 492
- 蝸牛管…………… 125
 蝸牛神経核…………… 126
 核…………… 10
 核鎖線維…………… 164
 核酸…………… 10
 拡散…………… 188
 核心温…………… 444, 447
 核心部…………… 444
 核袋線維…………… 164
 拡張期血圧…………… 247
 核内受容体…………… 419, 420
 角膜…………… 119
 核膜孔…………… 10
 下垂体後葉…………… 425
 下垂体前葉…………… 423
 下垂体中葉…………… 423
 下垂体門脈系…………… 423
 ガストリン…………… 48, 315
 仮性疼痛反応…………… 113
 顎下腺…………… 309
 脚気…………… 354
 滑車神経…………… 59
 褐色脂肪…………… 490
 褐色脂肪組織…………… 451
 活性型ビタミンD…………… 352
 活動張力…………… 147
 活動電位…………… 33
 滑面小胞体…………… 9
 括約筋…………… 304
 カテーテル…………… 255
 カテコールアミン…………… 47
 カハールの介在細胞…………… 66
 花粉症…………… 228
 鎌状赤血球症…………… 193
 硝子体…………… 119
 カリウム…………… 357
 カリウム平衡電位…………… 32
 顆粒球…………… 194
 カルシウム…………… 357
 カルシウム代謝…………… 499
 カルシトニン…………… 434
 カルシトニン遺伝子関連ペプチド…………… 108
 カルバミノヘモグロビン…………… 288
 カルボキシペプチダーゼ…………… 318
 感覚受容器…………… 94
 感覚神経…………… 56, 94
 感覚神経終末…………… 96
 換気閾値…………… 298
 換気率…………… 275
 感作…………… 111
 幹細胞…………… 20
- 間質液…………… 184, 388
 間質細胞…………… 435
 緩衝価…………… 400
 冠状循環…………… 261
 緩衝能…………… 400
 間接ビリルビン…………… 190
 関節リウマチ…………… 215
 間接路…………… 173
 杆体…………… 119, 121
 関電極…………… 238
 間脳…………… 72
 顔面神経…………… 59
 関連痛…………… 109
- き**
- 記憶…………… 485
 器官形成期…………… 472
 気胸…………… 272
 基質準位のリン酸化…………… 343
 偽足…………… 196
 基礎代謝…………… 333
 基礎代謝量…………… 333, 334
 拮抗支配…………… 61
 基底側脱落膜…………… 473
 企図振戦…………… 179
 希突起膠細胞…………… 57
 キヌタ骨…………… 125
 キネステジア…………… 106
 機能的残気量…………… 275
 キモトリプシン…………… 318
 逆説睡眠…………… 83
 キャッスル因子…………… 193
 吸引…………… 309
 嗅覚…………… 494
 嗅覚野…………… 119
 球形囊…………… 125, 127
 嗅細胞…………… 118
 吸収…………… 304
 球状核…………… 178
 嗅上皮…………… 118
 嗅神経…………… 57
 求心神経…………… 94
 求心性運動…………… 149
 求心性神経…………… 56
 急性減圧症候群…………… 297
 急性骨髄性白血病…………… 198
 急性白血病…………… 198
 急性リンパ性白血病…………… 198
 吸息…………… 271
 急速眼球運動…………… 83
 吸息ニューロン…………… 293
 嗅脳…………… 80

橋……………70
 橋核……………178
 胸式呼吸……………274
 強縮……………146
 胸腺……………210
 協調運動障害……………179
 胸部誘導……………237, 238
 強膜……………119
 虚血性心疾患……………242, 261
 巨人症……………426
 巨赤芽球性貧血……………193, 355
 キラー T 細胞……………214
 筋委縮……………151
 近位尿細管……………366
 近距離反射……………121
 筋原線維……………136
 筋節……………137
 筋線維……………135
 筋線維束……………136
 筋層……………304
 緊張性支配……………62
 筋肥大……………152
 筋紡錘……………104, 164

く

グアニン……………10
 空間的加重……………49, 97
 空腸……………317
 クエン酸回路…143, 339, 341, 342
 くしゃみ反射……………292
 駆出期……………244
 クスマウル型呼吸……………296
 屈曲反射……………166
 クッシング症候群……………398, 428
 クッパー細胞……………190
 クラウゼ終棍……………98
 クラススイッチ……………219
 グリア細胞……………56
 クリアランス試験……………378
 グリコーゲン……………337
 クリスマス因子……………200
 グルカゴン……………430, 431
 グルクロン酸抱合……………190
 グルコース……………142
 くる病……………352
 クレアチニン……………378
 クレアチンリン酸……………142
 クレチン症……………430
 クロスプレゼンテーション…214
 グロブリン……………198
 クロマチン……………10
 クワシオルコル……………338

け

形質細胞……………219
 楔状束核……………101
 系統……………3
 頸動脈小体……………289
 経肺圧……………278
 血液型抗原……………191
 血液凝固因子……………353
 血液凝固カスケード……………201
 血液-脳関門……………263
 血管外遊出……………194
 血球……………184
 血色素……………185
 血漿……………184, 198, 388
 血漿膠質浸透圧……………198
 血漿タンパク質……………198
 血漿トロンボプラスチン前駆物質……………200
 血小板……………196
 血小板因子……………196
 血小板血栓……………196
 血小板減少性紫斑病……………196
 血小板栓子……………196
 血小板無力症……………196
 血清……………198
 血栓……………199
 血糖……………339
 血餅……………199
 血友病 A……………201
 血友病 B……………201
 ケトアシドーシス……………346
 ケトーシス……………346
 ケトン体……………404
 ゲノム……………15
 ゲノム編集……………15, 16
 ケモカイン……………224
 減感作療法……………228
 嫌気の解糖……………142
 言語……………485
 原始反射……………486
 原発性アルドステロン症……………398
 原発性高血圧……………250

こ

高アンモニア血症……………342
 高閾値機械受容器……………107
 高エネルギー化合物……………331
 好塩基球……………194, 212
 効果器……………4
 後角……………69
 交感神経系……………61
 交感神経節前ニューロン……………459

好気の解糖過程……………143
 好気のリン酸化……………299
 口腔相……………310
 高血圧……………398
 抗血清……………198
 抗原……………213
 抗原抗体反応……………191
 抗原提示細胞……………195, 213
 後根……………60, 69
 後根神経節……………69
 虹彩……………119
 交叉性伸展反射……………166
 抗酸化剤……………352
 好酸球……………212
 恒常性……………4
 甲状腺刺激ホルモン……………424
 甲状腺ホルモン……………429
 膠質浸透圧……………390
 酵素共役型受容体……………420
 高体温症……………460
 好中球……………194, 211
 高張液……………388
 行動性体温調節反応……………449
 後頭葉……………74
 高尿酸血症……………18
 高比重リボタンパク質……………343
 興奮……………33
 興奮性シナプス……………43
 興奮性シナプス後電位……………43
 興奮性シナプス電位……………151
 興奮性伝達物質……………43
 興奮性ニューロン……………43
 興奮伝導系……………235
 興奮頻度……………146
 抗利尿ホルモン……………372
 交連線維……………80
 コール酸……………320
 後過分極電位……………34
 呼吸運動……………271
 呼吸商……………332
 呼吸性アシドーシス……………404
 呼吸性アルカローシス……………404
 呼吸性代償……………298
 呼吸中枢……………292
 呼吸比……………332
 黒質……………172
 後索核……………101
 鼓室階……………125
 呼息……………271
 呼息ニューロン……………293
 個体……………3
 五大栄養素……………331

骨髄	185, 210	サルコメア	137	耳石器	127
骨髄幹細胞	185	サルベージ経路	17	自然環境要因	492
骨髄系前駆細胞	186	酸	399	自然免疫	194, 210
骨粗しょう症	358, 434, 500	酸化リン酸化	343	持続性支配	62
骨軟化症	352	酸化ヘモグロビン	188	室頂核	178
コドン	14	残気量	275	質問紙法	113
小人症	426	三叉神経	59, 101	至適長	147
後腹側内側核	101	三叉神経主知覚核	101	自動体外式除細動器	241
固有感覚	104	産褥期	482	自動能	154
コラーゲン線維	196	三尖弁	234, 244	シトシン	10
コリン作動性神経	64	三層性胚盤	477	シナプス	29
コルサコフ症候群	87	酸素化	188	シナプス間隙	29
ゴルジ臓器	104, 165	酸素解離曲線	188, 285	シナプス後膜	29
ゴルジ体	9	酸素負債	145	シナプス小胞	42
コルチ器	125	三大栄養素	330	シナプス前膜	29
コレシストキニン	48, 320	散瞳	121	シナプス前抑制	45
コレステロール	352	産熱	449	シパリング	452
コロイド浸透圧	390	三胚葉	477	紫斑病	196
コロトコフ音	250	三半規管	125, 127	視放線	123
さ		し		射精管	435
サーカディアンリズム	72, 485	シータ波	82	ジャパンコーマスケール	505
サーファクタント	270, 280	耳温	445	収縮期	242
差閾	95	視蓋脊髓路	169	収縮期血圧	247
催奇形性因子	476	視覚	485, 486, 494	自由神経終末	98
最高血圧	247	視覚的アナログスケール	112	縦走筋	304
最終月経開始日	472	耳下腺	309	収束あるいは収斂	50
臍静脈	476	弛緩期	242	収束投射説	109
サイズの原理	151	弛緩期血圧	247	重炭酸イオン	189, 288
再生経路	17	時間的加重	49, 97	重炭酸塩緩衝系	401, 403, 406, 407, 409
再生不良性貧血	193	子宮	436, 478	十二指腸	317
臍帯	472, 476	糸球体	366	終脳	74
最大酸素摂取量	298	糸球体濾過量	369, 378	終板	138
最低血圧	247	軸索	28	終末消化	321
臍動脈	476	軸索反射	108	終末細動脈	251
サイトカイン	214, 223	シクロオキシゲナーゼ	463	充満期	244
再分極	34	自己分泌	417	絨毛膜	473
細胞	2	視細胞	121	絨毛膜有毛部	473
細胞外液	388	脂質異常症	344, 345	縮瞳	121
細胞骨格	9	脂質代謝	499	主細胞	314
細胞死	504	思春期スパート	483	樹状細胞	195, 213
細胞傷害性T細胞	216	視床	72	樹状突起	28
細胞傷害性Tリンパ球	218	視床下核	72, 172	受精日	472
細胞性免疫	194, 2166	菌状核	178	受精卵	438
細胞内液	388	視床下部	72	受精輸送	6, 323
細胞膜	6	視床下部ホルモン	423	腫瘍壊死因子	215
細胞膜受容体	419	視床後腹側内側核	101	受容器	4
サイロキシンT ₄	429	視床上部	72	受容体	6
作業記憶	86	茸状乳頭	115	受容変換部位	96
鎖骨下静脈	263	視神経	58	順応	97
サブスタンスP	108	雌性前核	471	上位運動中枢	164, 168
サルコペニア	496, 501	耳石	127	漿液性唾液	309

- 消化…………… 304
 小膠細胞…………… 57
 蒸散性熱損失…………… 448, 449
 蒸散性熱放散反応…………… 450, 453
 脂溶性ビタミン…………… 350
 小腸…………… 317
 小脳…………… 73
 小脳半球…………… 177
 小胞体…………… 9
 漿膜…………… 304
 静脈管…………… 262
 静脈還流量…………… 245
 静脈血…………… 188
 静脈弁…………… 254
 食事誘発性熱産生…………… 334
 触点…………… 98
 食道相…………… 312
 植物状態…………… 503
 触誘発性疼痛…………… 111
 女性ホルモン補充療法…………… 500
 触覚…………… 485
 徐波睡眠…………… 83
 自律神経系…………… 56
 自律性体温調節システム…………… 455
 自律性体温調節反応…………… 449
 視力…………… 486
 シルビウス裂…………… 74
 侵害刺激…………… 107
 侵害受容器…………… 107
 新型コロナウイルス感染症…………… 14
 新型コロナウイルスワクチン…………… 14
 心起電力ベクトル…………… 239
 神経型…………… 484
 神経筋接合部…………… 138
 神経膠細胞…………… 56
 神経支配比…………… 138, 160
 神経障害性疼痛…………… 111
 神経性炎症…………… 108
 神経伝達物質…………… 42
 神経伝導速度…………… 38
 神経ペプチド…………… 108
 腎血漿流量…………… 367
 腎血流量…………… 367
 心周期…………… 237, 242
 心室…………… 234
 腎小体…………… 365
 新生経路…………… 17
 新生児呼吸窮迫症候群…………… 280
 腎性糖尿病…………… 375
 腎臓…………… 364
 心臓血管中枢…………… 256
 心臓死…………… 503
 腎単位…………… 365
 伸張反射…………… 105, 164
 陣痛…………… 480
 心的外傷後ストレス症候群…………… 440
 心電図…………… 236
 心電図誘導法…………… 239
 浸透…………… 387
 浸透圧…………… 387
 浸透圧受容器…………… 394
 浸透圧濃度…………… 387
 心拍出量…………… 245
 心拍数…………… 237
 新皮質…………… 74
 深部体温…………… 445
 心ベクトル…………… 239
 心房…………… 234
 心房収縮期…………… 244
 真毛細血管…………… 250
- す**
- 睽アミラーゼ…………… 318
 睥液…………… 318
 錘外筋…………… 104
 推算糸球体濾過量…………… 380
 推尺異常…………… 179
 髓鞘…………… 37
 水晶体…………… 119
 水素イオン濃度指数…………… 398
 睥臓…………… 430
 錐体…………… 70, 119, 121
 錐体交叉…………… 70
 錐体路…………… 70, 169
 睥島…………… 430
 錘内筋…………… 104
 錘内筋線維…………… 164
 水分平衡…………… 394
 睡眠時無呼吸症候群…………… 84, 297
 水溶性ビタミン…………… 350
 数字分類…………… 40
 スキャモンの成長曲線…………… 484
 スターリングの仮説…………… 252
 スターリングの心臓の法則…………… 148, 245
 ステュアート因子…………… 199
 ステロイドホルモン…………… 417, 427, 476
 ストレス反応…………… 439
 スパイクタンパク質…………… 14
 スパイロメーター…………… 274
 スポーツ貧血…………… 193
- せ**
- 生活習慣病…………… 345
 精管…………… 435
 精細管…………… 435
 静止張力…………… 147
 静止膜電位…………… 31
 星状膠細胞…………… 57
 生殖器系型…………… 484
 精神性発汗…………… 453
 精巢…………… 435
 精巢上体…………… 435
 成体幹細胞…………… 20
 生体恒常性…………… 414
 静的運動…………… 148
 精囊…………… 435
 正のフィードバック機構…………… 5
 生物学的要因…………… 492
 生理学的死腔…………… 277
 生理的緩衝作用…………… 404
 赤芽球…………… 186
 赤核脊髓路…………… 169
 脊髓…………… 101
 脊髓視床路…………… 109
 脊髓小脳…………… 177
 脊髓神経…………… 60, 101
 脊髓神経節…………… 69
 脊髓反射…………… 164
 脊髓膀胱中枢…………… 381
 セクレチン…………… 316, 320
 舌咽神経…………… 59
 舌下温…………… 445
 舌下神経…………… 60
 舌下腺…………… 309
 赤血球…………… 186
 節後線維…………… 62
 節前線維…………… 62
 絶対不応期…………… 36
 セルトリ細胞…………… 435
 セロトニン…………… 46, 47
 全か無かの法則…………… 35
 潜函病…………… 297
 前根…………… 60, 69
 栓状核…………… 178
 線条体…………… 172
 染色体異常…………… 19
 先体反応…………… 471
 善玉コレステロール…………… 344
 全張力…………… 147
 前庭階…………… 125
 前庭小脳…………… 177
 前庭神経核…………… 177
 前庭脊髓反射…………… 169
 前庭脊髓路…………… 169
 先天性代謝異常…………… 19
 蠕動運動…………… 306, 318, 380

前頭葉	74	体幹失調	178	タンパク質代謝	498
前頭連合野	79	対光反射	121	ち	
セントラルドグマ	14	対向流系	374	チアノーゼ	189, 285
全肺気量	275	対向流増幅系	374	チェーン・ストークス型呼吸	296
前房水	119	胎児型ヘモグロビン	487	腔	436
前立腺	435	胎児期	472, 478	腔前庭	436
そ		胎児循環	481	知能	485
臓器感覚	106	胎児-胎盤単位	476	緻密部	172
双極細胞	121	胎児付属物	472	チミン	10
造血幹細胞	21, 185	代謝	331	着床	472
造血前駆細胞	186	代謝水	393	チャネル	6
増高単極肢誘導	237, 238	代謝性アシドーシス	404, 405	中位核	178
桑実胚	472	代謝性アルカローシス	404, 406	中間径フィラメント	9
相対不応期	36	体循環	232	中心窩	121
僧帽細胞	119	代償作用	406	中心管	69
僧帽弁	234, 244	大食細胞	195	中心小体	10
相補の塩基対	12	体性神経系	56	中枢	4
側頭葉	74	大前庭腺	436	中枢神経系	56
側頭連合野	79	大腸	324	中枢性化学感受領域	294
側方抑制	51	多遺伝子異常	19	中枢性睡眠時無呼吸	84
組織	3	大動脈小体	289	中枢パターン発生器	168
組織因子	200	大動脈弁	234, 244	中性脂肪	337
組織プラスミノーゲン活性化因子	201	第二次性徴	490	中脳	70
咀嚼	309	第二発育急進期	483	中脳水道中心灰白質	111
側角	69	大脳	74	中胚葉	477
ソマトスタチン	425, 430	大脳基底核	74, 172	虫部	177
粗面小胞体	9	大脳小脳	178	中和作用	221
た		大脳皮質	74	腸胃反射	313
第I脳神経	57	胎盤	438, 472, 473	聴覚	485, 494
第II脳神経	58	胎盤腔	473	長期記憶	86
第III脳神経	58	対比の増強	97	腸相	310, 316
第IV脳神経	59	対流	448	超低比重リポタンパク質	343
第V脳神経	59	胎齢	472	超低密度リポタンパク質	203
第VI脳神経	59	ダウン症候群	19	跳躍伝導	38
第VII脳神経	59	唾液	309	直接ビリルビン	190
第VIII脳神経	59	唾液アミラーゼ	309	直接路	173
第IX脳神経	59	唾液分泌反射	117	貯蔵鉄	190
第X脳神経	59	脱分極	33	陳述記憶	86
第XI脳神経	59	脱抑制	52	チン小帯	119
第XII脳神経	60	脱落膜	473	つ	
第I誘導	238	多能性幹細胞	21	痛覚過敏	111
第II誘導	238	単一遺伝子異常	19	痛点	98
第III誘導	238	短期記憶	86	痛風	18
ターナー症候群	19	単球	195	ツチ骨	125
第一次性徴	490	探查電極	238	つわり	480
第一発育急進期	483	炭酸脱水酵素	189, 288, 377	て	
体温調節性発汗	453	胆汁酸塩	320	低アルブミン血症	198
体温調節中枢	454	胆汁色素	320	低タンパク血症	198
体温調節能	496	単収縮	146	低張液	388
胎芽期	472	炭水化物	307		
		淡蒼球	172		
		タンパク質エネルギー栄養障害			

- 低比重リポタンパク質…………… 343
 低密度リポタンパク質…………… 203
 テーラーメイド医療…………… 20
 デオキシコール酸…………… 320
 デオキシヘモグロビン…………… 284
 デオキシリボース…………… 10
 デオキシリボ核酸…………… 10
 適応免疫…………… 210
 適刺激…………… 94
 テストステロン…………… 435
 テタヌス…………… 146
 鉄…………… 359
 鉄欠乏性贫血…………… 193, 480
 手続き記憶…………… 86, 88
 デヒドロエピアンドロステロン
 ……………… 476
 デヒドロエピアンドロステロン硫
 酸…………… 476
 デルタ波…………… 83
 テロメア…………… 493
 電解質コルチコイド…………… 427
 電気心軸…………… 240
 電氣的二重層…………… 32
 電子伝達系…………… 339, 341, 342
 転写…………… 13
 伝達物質作動性 Cl^- チャネル…………… 43
 伝達物質作動性 Na^+ チャネル…………… 33
 伝導…………… 38, 448
 伝令 RNA…………… 13
- と**
- 同化…………… 331
 同化ホルモン…………… 431
 動眼神経…………… 58
 瞳孔括約筋…………… 121
 瞳孔散大筋…………… 121
 糖質コルチコイド…………… 427
 等尺性収縮…………… 148
 投射線維…………… 80
 糖新生…………… 342, 346
 等張液…………… 388
 等張性運動…………… 148
 頭頂葉…………… 74
 頭頂連合野…………… 79
 動的運動…………… 148
 動的平衡…………… 386
 糖尿病…………… 346, 347, 375
 洞房結節…………… 235
 動静脈酸素較差…………… 299
 動脈圧受容器…………… 258
 動脈管…………… 262
 動脈管索…………… 481
- 動脈血…………… 186
 動脈血管へのコレステロール沈着
 ……………… 493
 透明帯反応…………… 471
 透明体…………… 471
 同名半盲…………… 123
 等容性弛緩期…………… 244
 等容性収縮期…………… 243
 トーヌス…………… 62, 450
 ドーパミン…………… 46, 47
 ドーパミンニューロン…………… 173, 175
 特異動的作用…………… 334
 特殊感覚エネルギーの法則…………… 94
 特殊心筋…………… 235
 トラウマ…………… 440
 トランスフェリン…………… 190
 トリアシルグリセロール…………… 337, 343
 トリプシン…………… 318
 トリプトファン…………… 354
 トリヨードサイロニン T_3 …… 429
 努力性肺活量…………… 276
 トル様受容体…………… 215
 トロポニン…………… 138
 トロポミオシン…………… 138
 トロンビン…………… 199
 貪食作用…………… 211
- な**
- ナイアシン…………… 354
 内因子…………… 193
 内因性オピオイド…………… 111
 内因性鎮痛系…………… 111
 ナイブキラー T 細胞…………… 214
 ナイブヘルパー T 細胞…………… 214
 内肛門括約筋…………… 325
 内呼吸…………… 268
 内在神経系…………… 304
 内耳神経…………… 59
 内臓脂肪症候群…………… 338
 内臓痛覚…………… 106
 内臓反射…………… 495
 内側運動制御系…………… 170
 内尿道括約筋…………… 381
 内胚葉…………… 477
 内部環境…………… 2
 内分泌…………… 417
 内リンパ…………… 125
 ナチュラルキラー細胞
 ……………… 194, 212
 ナトリウム…………… 357
- ぬ**
- ヌクレオチド…………… 10, 17
- ね**
- ネガティブフィードバック
 ……………… 455
 ネガティブフィードバック制御
 ……………… 456
 熱産生…………… 449
 熱中症…………… 460
 熱放散…………… 450
 ネフローゼ症候群…………… 369
 ネフロン…………… 365, 380
 粘性性唾液…………… 309
 粘膜層…………… 304
- の**
- 脳回…………… 74
 脳幹…………… 70
 脳幹網様体…………… 70
 脳幹網様体賦活系…………… 70
 脳溝…………… 74
 脳死…………… 503
 脳脊髄液…………… 68
 脳相…………… 310, 316
 脳塞栓症…………… 196
 能動輸送…………… 6, 322
 脳波…………… 82
 脳梁…………… 74
 ノーベル医学生理学賞…………… 21
- に**
- ニコチン性受容体…………… 65

- ノルアドレナリン
 46, 47, 427, 428
- ノルアドレナリン作動性神経
 64
- ノルエピネフリン
 64
- ノンレム睡眠
 83
- は**
- パーキンソン病
 175
- ハーゲマン因子
 200
- 肺
 270
- 背外側橋被蓋
 111
- 肺活量
 275
- 肺コンプライアンス
 278
- 肺サーファクタント
 488
- 肺循環
 232, 260
- 肺伸展受容器
 290
- 肺動脈弁
 234, 244
- 排尿筋
 380
- 排尿反射
 382
- 排尿反射中枢
 381
- 肺の圧容積関係
 278
- 肺の弾性圧
 272
- 灰白質
 69
- 胚盤胞
 438, 472
- 排便反射
 326
- 肺胞
 269, 270
- 肺胞換気量
 277
- 肺胞気
 270
- 肺胞毛細血管ブロック
 284
- 白質
 69
- 薄束核
 101
- 破骨細胞
 195
- 播種性血管内凝固症候群
 202
- バセドウ病
 430
- バソプレシン
 48, 392, 425
- パチニ小体
 98
- 発火頻度
 146
- 発汗
 453
- 白血球
 194
- 白血病
 198
- 発散
 50
- 発熱
 460
- バビンスキー反射
 167
- パペッツ回路
 87
- 速い痛み
 107
- パラアミノ馬尿酸
 376, 379
- パラクリン
 417
- パラサイロイドホルモン
 433
- パルスオキシメーター
 286
- バルトリン腺
 436
- 反回
 51
- 反回神経
 59
- 半透膜
 387
- パントテン酸
 356
- 半保存的複製
 12
- ひ**
- 非運動性身体活動によるエネルギー消費
 334
- ビオー型呼吸
 296
- 被殻
 172
- 非活動性侵害受容器
 107
- 非呼吸性アシドーシス
 404
- 非呼吸性アルカローシス
 405
- 皮質脊髄路
 169
- 非重炭酸塩緩衝系
 401, 403, 409
- 尾状核
 172
- 微小管
 9
- 非蒸散性熱損失
 448
- 非蒸散性熱放散反応
 450
- ヒス束
 235
- ヒスタミン
 46, 315
- 非ステロイド性抗炎症剤
 463
- 脾臓
 185, 210
- ビタミンA
 351
- ビタミンB₁
 354
- ビタミンB₁₂
 356
- ビタミンB₂
 354
- ビタミンB₆
 355
- ビタミンC
 356
- ビタミンD
 352
- ビタミンE
 352
- ビタミンK
 353
- ビタミンK依存性凝固因子
 201
- ビタミンM
 186
- 必須アミノ酸
 342
- ヒト絨毛性性腺刺激ホルモン
 474
- ヒト絨毛性ソマトマンモトロピン
 474
- ヒト成長ホルモン
 426
- 皮膚感覚
 495
- 皮膚血管反応
 450
- 皮膚分節
 60
- 非ふるえ熱産生
 451
- 非抱合型ビリルビン
 190
- 標準肢誘導
 237, 238
- ビリベルジン
 190
- ビリミジン塩基
 10
- ビリルビン
 190, 320
- ビルビン酸
 339
- ファゴリソソーム
 211
- ファンデルワールスカ
 221
- フィードバック機構
 5
- フィードバック制御
 422
- フィードフォワード
 455
- フィードフォワード制御
 456, 457
- フィブリノーゲン
 198
- フィブリン
 199
- フィロキノン
 353
- フェイススケール
 112
- フェリチン
 190
- 不応期
 36
- フォン・ヴィレブランド因子
 196
- 不可欠アミノ酸
 342
- 不活性化ゲート
 36
- 不可避的水分損失量
 394
- 不感蒸散
 394, 449
- 不感蒸泄
 449
- 不関電極
 238
- 副交感神経系
 61
- 副甲状腺
 429
- 副甲状腺ホルモン
 433, 434
- 腹式呼吸
 274, 488
- 副腎
 427, 484
- 副腎アンドロゲン
 427
- 副神経
 59
- 副腎髄質
 428
- 副腎皮質刺激ホルモン
 422
- 副腎皮質刺激ホルモン放出ホルモ
 422, 474, 476
- 副腎皮質ホルモン
 423, 427
- 複製
 12
- 浮腫
 253
- プチアリン
 309
- 物理学的要因
 492
- プラスミノーゲン
 202
- プラスミノーゲン活性化抑制因子
 202
- プラスミン
 201
- プリン塩基
 10
- ふるえ熱産生
 452
- ブルキンエ線維
 235
- フレイル
 501
- ブレイクモーターニューロン
 459
- ブローカ野
 76
- ブロードマン領野
 74
- プロゲステロン
 426, 436, 439, 474, 476
- プロコンバーチン
 200
- プロスタグランジン
 439, 481
- プロスタグランジンE₂
 463
- プロトロンビン
 199

ふ

ファゴソーム
 211

- プロトロンビン時間…………… 201
 プロトンポンプ…………… 314
 プロラクチン
 …………… 426, 427, 439, 482
 分化…………… 185
 分時肺胞換気量…………… 277
 分節運動…………… 306, 318
 分泌小胞…………… 417
 分娩…………… 439, 480
- へ**
- 平滑筋…………… 134
 平均電気軸…………… 240
 閉経…………… 500
 平衡感覚…………… 495
 平行筋…………… 136
 平衡砂…………… 127
 平衡斑…………… 127
 閉塞性睡眠時無呼吸…………… 84
 ベータ波…………… 82
 ヘーリング・プロイエル反射
 …………… 67, 290
 壁在血栓…………… 196
 壁細胞…………… 314
 ベッツの錐体細胞…………… 75
 ヘパリン…………… 201
 ペプシン…………… 313
 ペプチドホルモン…………… 417
 ヘマトクリット値…………… 185
 ヘム核…………… 186
 ヘモグロビン…………… 186, 284, 349
 ベル・マジヤンディーの法則… 69
 ペルオキシソーム…………… 9
 ヘルパー T 細胞…………… 214, 216
 辺縁皮質…………… 74
 ヘンダーソン・ハッセルバルヒの
 式…………… 407
 ペントース…………… 10
 扁桃体…………… 81
 ヘンネマンのサイズの原理… 162
 弁閉鎖…………… 99
 片葉小節葉…………… 177
 ヘンリーの法則…………… 407
 ヘンレの係蹄…………… 366
- ほ**
- 膀胱…………… 380
 抱合型ビリルビン…………… 190
 傍糸球体装置…………… 368
 房室結節…………… 235
 放射…………… 448
 紡錘状筋…………… 136
 放線冠…………… 471
- 傍虫部…………… 177
 胞胚…………… 438
 傍分泌…………… 417
 傍濾胞細胞…………… 429, 434
 ボーア効果…………… 188, 286
 ボーマン嚢…………… 366
 ホールデン効果…………… 288
 補酵素…………… 17
 補足運動野…………… 170
 補体…………… 211
 ホメオスタシス…………… 4, 414
 ポリモーダル受容器…………… 107
 本態性高血圧…………… 250
 翻訳…………… 14
- ま**
- マイクロフィラメント…………… 9
 マイスナー小体…………… 98
 マイスネル神経叢…………… 66, 304
 マギル疼痛質間紙…………… 113
 膜消化…………… 321
 膜侵襲複合体…………… 211
 膜電位…………… 31
 膜電位依存性 K⁺チャネル …… 33
 膜電位依存性 Na⁺チャネル… 33
 マクロファージ…………… 195, 210, 211
 末梢神経系…………… 56
 マトリックス…………… 8
 マラスムス…………… 338
 慢性骨髄性白血病…………… 198
 慢性白血病…………… 198
 慢性閉塞性肺疾患…………… 497
 慢性リンパ性白血病…………… 198
- み**
- ミエリン鞘…………… 37
 ミオシン…………… 140
 ミオシンフィラメント…………… 137
 味覚…………… 485, 486, 494
 味覚性発汗…………… 117
 味覚相…………… 310
 ミクログリア…………… 57
 味細胞…………… 115
 味神経…………… 115
 水チャネル…………… 371
 ミトコンドリア…………… 8, 339, 341
 脈圧…………… 247
 味蕾…………… 115
- む**
- 無顆粒球…………… 194
 無髄神経…………… 37
 無髄線維…………… 37
- ムスカリン性受容体…………… 65
 無痛症…………… 107
 無痛無汗症…………… 108
- め**
- 明順応…………… 123
 迷走神経…………… 59
 メタ細動脈…………… 251
 メタボリックシンドローム
 …………… 338, 345, 500
 メッツ…………… 335
 メトトレキサート…………… 355
 メナキノン…………… 353
 メモリー B リンパ球…………… 222
 メモリー細胞傷害性 T 細胞… 222
 メモリーヘルパー T 細胞… 222
 メルケル盤…………… 98
 免疫…………… 194
 免疫寛容…………… 224
 免疫グロブリン…………… 219
 免疫チェックポイント阻害薬
 …………… 227
- も**
- 盲点…………… 121
 網膜…………… 119
 毛様体小帯…………… 119
 網様体脊髄路…………… 169
 網様部…………… 172
 文字分類…………… 40
 モダリティ…………… 94
 モノアミン…………… 46, 47
- や**
- 夜盲症…………… 351
- ゆ**
- 有郭乳頭…………… 115
 有髄神経…………… 37
 有髄線維…………… 37
 雄性前核…………… 471
 遊離脂肪酸…………… 143
 輸液…………… 398
 輸出細動脈…………… 366
 輸入細動脈…………… 366
- よ**
- 溶血性貧血…………… 193
 葉酸…………… 186, 355
 葉状乳頭…………… 115
 羊水…………… 473
 羊膜…………… 472, 473
 容量血管…………… 253

- 抑制性シナプス……………43
 抑制性シナプス後電位……………43
 抑制性伝達物質……………43
 抑制性ニューロン……………43
 予備吸気量……………274
 予備呼気量……………275
- ら**
 ライディヒ細胞……………435
 卵円窩……………481
 卵円孔……………262
 卵割……………472
 卵管……………436
 卵形囊……………125, 127
 ランゲルハンス細胞……………213
 ランゲルハンス島……………430
 卵巢……………436
 ランビエ絞輪……………37
 卵胞刺激ホルモン……………424, 435
 卵胞ホルモン……………436
 卵膜……………472
- り**
 リソソーム……………9
 リパーゼ……………318
 リボース……………10
 リボ核酸……………10
 リボソーム……………8, 14
 リボソーム RNA……………13
 リポタンパク質……………203, 343
 リポフスチンの沈着……………493
 臨界期……………477
 輪走筋……………304
 リンパ液……………184
 リンパ球……………194
 リンパ系型……………484
 リンパ系前駆細胞……………186
 リンパ節……………210
 リンパ本幹……………263
- る**
 ルッフィニ終末……………98
- れ**
 冷罨法……………464
 冷点……………98
 冷ニューロン……………456
 レニン-アンジオテンシン-アルドステロン系……………257
 レニン-アンジオテンシン系……………396
 レニン-アンジオテンシン血管収縮系……………257
 レム睡眠……………83
 連合線維……………80
 連合野……………78
 レンショウ細胞……………51
 レンショウ抑制……………51
- ろ**
 老化赤血球……………190
 ローランド・モリス障害質問紙……………113
 肋間神経……………274
 ロドブシン……………351
- わ**
 ワイドベース歩行……………179
 ワルファリン……………201
- 英文**
- A**
 A (α) 細胞……………430
 abducens nerve……………59
 ABO 式血液型……………191, 192
 absolute refractory period……………36
 absorption……………304
 accessory nerve……………59
 acetylcholinesterase……………48
 AChE……………48
 acquired immunity……………210
 acrosome reaction……………471
 ACTH……………422, 423
 active transport……………7
 Activities of daily living……………496
 acute leukemia……………198
 acute lymphoid leukemia……………198
 acute myelogenous leukemia……………198
 adaptation……………96
 adaptive immunity……………210
 Addison's disease……………428
 adenosine diphosphate……………331
 adenosine metaphosphate……………332
 adenosine triphosphate……………331
 adequate stimulus……………94
 ADH……………372, 392
 ADL……………496, 501
 ADP……………331
 adrenaline……………64
 AED……………241
 aerobic phosphoryration……………299
 afferent nerve……………56, 94
 after-hyperpolarization potential……………34
 albumin……………198
 aldosterone……………392, 427
 ALL……………198
 allodynia……………111
 alveolar ventilation……………277
 alveolar-capillary block……………284
 alveolus……………268
 AML……………198
 AMP……………332
 anabolism……………331
 anatomical dead space……………277
 angiotensin II……………428
 antidiuretic hormone……………372, 392
 antigen……………213
 antigen presenting cell……………195, 213
 antiserum……………198
 aortic body……………289
 APC……………195
 aplastic anemia……………193
 apocrine gland……………453
 apoprotein……………203
 AQP……………388
 aquaporin……………388
 aqueous humor……………119
 arterial blood……………186
 arterial-venous oxygen difference……………299
 association area……………78
 ATP……………17, 138, 140, 142, 331, 339
 atrium……………234
 Auerbach's plexus……………304
 autocrine……………417
 Automated External Defibrillator……………241
 autonomic nervous system……………56
 autonomic thermoregulatory response……………449
 autoregulation……………154
 aVF……………238
 aVL……………238
 aVR……………238
 axon……………28
 axon reflex……………108
- B**
 B cell……………194
 B lymphocyte……………194
 B (β) 細胞……………430
 basal ganglia……………74, 172

- basal metabolism..... 333
 Basedow's disease 430
 basophil..... 194, 212
 behavioral thermoregulatory response..... 449
 Bell-Magendie's law..... 69
 bicarbonate ion 189
 bilirubin 190
 biliverdin..... 190
 Biot breathing..... 296
 blind spot..... 121
 blood cell..... 184
 blood clot..... 199
 blood coagulation cascade 201
 blood glucose 339
 blood group antigen 191
 blood pigment 185
 blood plasma..... 388
 BM..... 333
 BMI 338
 Body Mass Index 338
 Bohr effect 188, 286
 bone marrow 185, 210
 bone marrow stem cell 185
 brain stem..... 70
 brown adipose tissue..... 451
 buffer capacity 400
- C**
- carbamino hemoglobin..... 288
 carbon dioxide dissociation curve 288
 carbonic anhydrase 189, 288, 377
 carboxypeptidase..... 318
 carotid body..... 289
 Castle's intrinsic factor 193
 catabolism..... 331
 caudate nucleus 172
 CCK 320
 cell-mediated immunity 216
 cellular immunity 194
 central canal 69
 central nervous system..... 56
 Central Pattern Generator 168
 centriole 10
 cerebellar hemisphere 177
 cerebellum..... 73
 cerebral cortex 74
 cerebral embolism 196
 cerebrocerebellum 178
 cerebrospinal fluid..... 68
 cerebrum..... 74
 CGRP..... 108
 Cheyne-Stokes breathing 296
 chief cell..... 314
 cholecystokinin 320
 cholinergic nerve 64
 Christmas factor..... 200
 chronic leukemia..... 198
 chronic lymphoid leukemia 198
 chronic myelogenous leukemia 198
 chylomicron 203, 343
 chymotrypsin..... 318
 circadian rhythm..... 447
 circalunar rhythm 448
 CLL 198
 CM..... 343
 CML 198
 CO₂ 解離曲線 288
 cold-sensitive neuron..... 456
 collagen fiber 196
 colloid osmotic pressure..... 390
 concentric exercise 149
 conduction..... 38, 448
 conduction velocity 38
 cone..... 119
 conjugated bilirubin..... 190
 control center..... 4
 convection..... 448
 convergence 50
 COPD..... 497
 core..... 444
 core temperature..... 444
 cornea..... 119
 corpus callosum 74
 cortico-spinal tract..... 169
 corticotropin-releasing hormone 474
 counter current system..... 374
 COVID-19..... 14
 CPG 168
 cretinism 430
 CRH 422, 423, 474, 476
 Cushing's syndrome..... 428
 cutaneous vasomotor response 450
 cyanosis..... 285
 cyclooxygenase..... 463
 cytoskeleton..... 9
- D**
- D (δ) 細胞 430
 de novo 経路..... 17
 deep body temperature 445
 dendrite..... 28
 dendritic cell..... 213
 dentate nucleus 178
 deoxyhemoglobin 284
 deoxyribonucleic acid 10
 depolarization..... 33
 dermatome 60
 DHEA..... 476
 DHEA-S..... 476
 diabetes mellitus 375
 diaporesis..... 194
 DIC 202
 diencephalon..... 72
 diet induced thermogenesis 334
 differential threshold..... 95
 differentiation 185
 diffusion 188
 digestion 304
 direct bilirubin..... 190
 disinhibition 52
 disseminated intravascular coagulation 202
 DIT 334
 divergence..... 50
 DNA 10
 DNA エラー 493
 dorsal horn 69
 dorsal root 60, 69
 dorsal root ganglion..... 69
 duodenum..... 317
 dynamic exercise..... 148
- E**
- eccentric exercise..... 149
 eccrine gland 453
 ECF 388
 ECG 236
 EEG 82
 effector..... 4
 efferent nerve..... 56
 Electrocardiogram 236
 electroencephalogram..... 82
 emboliform nucleus..... 178
 emotional sweating..... 453
 endocrine 417
 endogenous opioids..... 111

- endoplasmic reticulum 9
 eosinophil 212
 epithalamus 72
 EPO 189
 EPSP 43, 151
 erythroblast 186
 erythrocyte 186
 erythropoietin 189
 ES 細胞 21
 Ex 335
 excitatory neuron 43
 excitatory neurotransmitter
 43
 excitatory postsynaptic
 potential 43
 excitatory synapse 43
 exocytosis 417
 expiration 271
 expiratory reserve volume
 275
 external respiration 268
 extracellular fluid 388
 extrafusal muscle fiber 104
 extrinsic factor 193
- F**
- face scale 112
 facial nerve 59
 fastigial nucleus 178
 Fechner の法則 95
 feedforward 455
 ferritin 190
 FEV 276
 fever 460
 FFA 143
 fibrin 199
 fibrinogen 198
 firing rate 146
 first pain 107
 flocculonodular lobe 177
 forced expiratory volume 276
 fovea centralis 121
 free nerve ending 98
 frontal lobe 74
 FSH 424, 435
 functional residual volume
 275
- G**
- GFR 369
 GH 426
 GHRH 424
 GIP 431
 globosus nucleus 178
 globulin 198
 globus pallidus 172
 glossopharyngeal nerve 59
 GLP-1 431
 glucagon-like peptide-1 431
 glucose-dependent
 insulinotropic peptide 431
 glucuronidation 190
 GnRH 424
 golgi apparatus 9
 Golgi tendon organ 104, 165
 granulocyte 194
 gray matter 69
 GTP 結合タンパク質 65
 G タンパク質 65
 G タンパク質共役型受容体 420
- H**
- Hageman factor 200
 HbA1c 348, 349
 HbF 487
 hCG 474
 hCS 474
 HDL 203, 343
 heat accumulation 460
 heat dissipation 450
 heatstroke 460
 hematocrit 185
 hematopoiesis 185
 hematopoietic progenitor cell
 186
 hematopoietic stem cell 185
 heme nucleus 186
 hemoglobin 186
 hemolytic anemia 193
 hemophilia A 201
 hemophilia B 201
 hemopoiesis 185
 heparin 201
 Hering-Breuer 67
 Hering-Breuer reflex 290
 high density lipoprotein
 203, 343
 homeostasis 4, 414
 homonymous hemianopsia 123
 HRT 500, 501
 HSC 185
 Ht 185
 human chorionic gonadotropin
 474
 human chronic
 somatomammotropin 474
 humoral immunity 194, 202, 216
 hyperalgesia 111
 hyperthermia 460
 hypertonic solution 388
 hypoalbuminemia 198
 hypoglossal nerve 60
 hypoproteinemia 198
 hypothalamus 72
- I**
- ICF 388
 IFN 214
 IgA 220, 488
 IgD 220
 IgE 220
 IGF 426
 IGF-I 425, 434
 IgG 221, 488
 IgM 221, 488
 IL 215
 ileum 317
 immune tolerance 224
 immunity 194
 inactivation gate 36
 indirect bilirubin 190
 inhibitory neuron 43
 inhibitory neurotransmitter
 43
 inhibitory postsynaptic
 potential 43
 inhibitory synapse 43
 innate immunity 194, 210
 insensible perspiration 449
 inspiration 271
 inspiratory reserve volume 274
 insulin-like growth factor-I
 425
 intercostal nerve 274
 interferon 214
 interleukin 215, 463
 internal respiration 268
 interpositus nucleus 178
 interstitial cells of Cajal
 66
 interstitial fluid 184, 388
 intracellular fluid 388
 intrafusal muscle fiber 104
 intrinsic factor 193
 ion channel 30
 ion-deficiency anemia 193
 IPSP 43

- iPS 細胞21, 22, 23
iris 119
irritant receptor 290
ISF 388
isometric contraction 148
isotonic exercise 148
isotonic solution 388
- J**
jaundice 190
JCS 505
jejunum 317
juxta-pulmonary capillary
receptor 290
J 受容器 290
- K**
kidney 364
kinesthesia 106
Korbinian Brodmann 74
Krause end bulb 98
Kupffer cell 190
Kussmaul breathing 296
- L**
lactate threshold 298
Langerhans cell 213
large intestine 324
lateral horn 69
lateral inhibition 51
lateral parabrachial nucleus
..... 457
law of all or none 35
Law of specific sensory
energies 94
LDL 203, 343
lens 119
leukemia 198
LH 424, 437
limbic cortex 74
lipoprotein 203
low density lipoprotein
..... 203, 343
lung 270
lung compliance 278
lymph 184
lymph node 210
lymphocyte 194
lymphoid progenitor cell 186
lysosome 9
- M**
MAC 211
macrophage 195, 211
macula 127
macula lutea 121
maximal oxygen consumption
rate 298
medial lemniscus 101
medulla oblongata 70
megakaryocyte 196
megaloblastic anemia 193
Meissner's corpuscle 98
Meissner's plexus 304
membrane attack complex 211
membrane potential 31
Merkel's disk 98
mesencephalon 70
messenger RNA 13
metabolic acidosis 404
metabolic alkalosis 404
Metabolic Equivalents 335
metabolism 331
METs 335
midbrain 70
minute ventilation 277
mitochondria 8
monocyte 195
motor nerve 56
motor unit 138, 158
mRNA 13, 14
mRNA 医薬品 14
mRNA ワクチン 14
mural thrombus 196
muscle atrophy 151
muscle fascicle 136
muscle fiber 135
muscle hypertrophy 152
muscle spindle 104, 164
myelin sheath 37
myeloid progenitor cell 186
myofibril 136
- N**
Na⁺-K⁺ATPase 30
Na⁺-K⁺ポンプ 30, 370
NADH 339, 341
natural immunity 210
natural killer 細胞 212
NEAT 334
negative feedback 455
negative feedback mechanism
..... 5
neocortex 74
nephron 365
nervus laryngeus recurrens 59
neurogenic inflammation 108
neurotransmitter 42
neutrophil 194, 211
NK cell 194
NK 細胞 212
nociceptor 107
node of Ranvier 37
nonevaporative heat loss 448
non-exercise activity
thermogenesis 334
nonrespiratory acidosis 404
nonrespiratory alkalosis 405
nonshivering thermogenesis
..... 451
noradrenergic nerve 64
noxious stimulus 107
nucleus 10
- O**
occipital lobe 74
oculomotor nerve 58
optic nerve 58
organ 3
organ of Corti 125
organism 3
osmoreceptor 394
osmotic concentration 387
osmotic pressure 387
osteoclast 195
osteoporosis 434
otolith organ 127
Oxygen debt 145
oxygen dissociation curve
..... 188, 285
oxygenation 188
oxyhemoglobin 188, 284
- P**
Pacini corpuscle 98
PAH 379
PAI-1 202
pancreatic juice 318
Papez 回路 87
paracrine 417
paradoxical sleep 83
parasympathetic nervous system
..... 61
parathyroid hormone 433
paravermis 177
parietal cell 314
parietal lobe 74
passive transport 6

- PEM 337, 346
 peripheral nervous system 56
 peristaltic movement 306
 pernicious anemia 193
 peroxisome 9
 perspiration 453
 PGs 481
 pH 398
 phagocytosis 211
 phagolysosome 211
 phagosome 211
 photoreceptor 121
 phrenic nerve 274
 physiological dead space 277
 plasma 184, 198
 plasma cell 219
 plasma colloid osmotic pressure 198
 plasma membrane 6
 plasma protein 198
 plasma thromboplastin antecedent 200
 plasmin 201
 plasminogen 202
 plasminogen activator inhibitor-1 202
 platelet 196
 platelet factor 196
 platelet plug 196
 platelet thrombus 196
 pneumothorax 272
 pons 70
 positive feedback mechanism 5
 posttraumatic stress disorder 440
 power function 96
 power of hydrogen ion concentration 398
 PQ 間隔 236
 premotor area 170
 premotor neuron 459
 pressure-volume relation 278
 presynaptic inhibition 45
 primary aggregation 196
 primary motor area 76, 170
 primary sensory area 77
 primary somatosensory area 101
 primary visual area 77
 PRL 426
 proconvertin 200
 proprioception 104
 prostaglandin E₂ 463
 protein-energy malnutrition 337
 prothrombin 199
 prothrombin time 201
 pseudopod 196
 PTA 200
 PTH 433, 434
 PTSD 440
 ptyalin 309
 pulmonary circulation 232
 pulmonary elastic pressure 272
 pulmonary stretch receptor 290
 Purkinje fiber 235
 purpura 196
 putamen 172
 P波 236, 237
- Q**
- QRS 群 236, 237, 240
- R**
- radiation 448
 rapid eye movement 83
 RBC 186
 RBF 367
 receptor 4
 recurrent 51
 red blood cell 186
 referred pain 109
 refractory period 36
 relative metabolic rate 335
 relative refractory period 36
 renal blood flow 367
 renal diabetes 375
 renal plasma flow 367
 Renshaw cell 51
 Renshaw inhibition 51
 repolarization 34
 residual volume 275
 respiratory acidosis 404
 respiratory alkalosis 404
 respiratory center 292
 respiratory compensation 298
 respiratory movement 271
 respiratory quotient 332
 resting membrane potential 31
 reticular formation 70
 retina 119
 Rh(-) 型 191
 Rh(+) 型 191
 ribonucleic acid 10
 ribosomal RNA 13
 ribosome 8
 RMR 335
 RNA 10, 12
 rod 119
 RPF 367
 RQ 332
 rRNA 13
 Ruffini ending 98
- S**
- SA node 235
 saliva 309
 saltatory conduction 38
 sarcomere 137
 sclera 119
 SDA 334
 second pain 107
 secondary aggregation 196
 secondary hemostasis 199
 secretin 320
 secretory vesicle 417
 segmental movement 306
 semicircular canal 127
 senescent erythrocyte 190
 sensitization 111
 sensory nerve 56, 94
 sensory receptor terminal 96
 serum 198
 shell 444
 shell temperature 444
 shivering thermogenesis 452
 sickle cell anemia 193
 silent nociceptor 107
 sinoatrial node 235
 site of sensory transduction 96
 size principle 151, 162
 sleep apnea syndrome 84, 297
 small intestine 317
 SNP 20
 somatic nervous system 56
 spatial summation 49
 specific dynamic action 334
 spinal reflex 164
 spinocerebellum 177
 spinothalamic tract 109
 spleen 185, 210
 sports anemia 193
 Starling's hypothesis 252
 static exercise 148
 Stevens のベキ関数 96

- storage ion 190
 stretch reflex 105
 striatum 172
 Stuart factor 199
 ST 部分 237
 substantia nigra 172
 substantia nigra pars compacta
 172
 substantia nigra pars
 reticulate 172
 subthalamic nucleus 72, 172
 supplementary motor area 170
 sweating 453
 sympathetic nervous system 61
 sympathetic preganglionic
 neuron 459
 synapse 29
 synaptic cleft 29
 synaptic vesicle 42
 system 3
 systemic circulation 232
- T**
- T cell 194
 T lymphocyte 194
 taste bud 115
 taste cell 115
 TCA 回路 143, 341
 tectospinal tract 169
 telencephalon 74
 temporal lobe 74
 temporal summation 49
 tetanus 146
 Tfh 細胞 217
 TG 337
 Th17 細胞 218
 Th1 細胞 217
 Th2 細胞 217
 thalamus 72
 thermoneutral zone 450
 thermoregulatory center 454
 thermoregulatory sweating
 453
 thermosensitiv neuron 456
 threshold 95
 threshold potential 35
 thrombocytopenic purpura 196
 thrombathenia 196
 thrombin 199
 thrombus 199
 thymus 210
 tidal volume 274
- tissue 3
 tissue factor 200
 tissue plasminogen activator
 202
 TLR 215
 TNF 215
 Toll-like receptor 215
 tonus 450
 total lung capacity 275
 touch evoked pain 111
 tPA 202
 transfer RNA 13
 transferrin 190
 transpulmonary pressure 278
 Treg 細胞 218
 TRH 424
 triacylglycerol 337
 trigeminal nerve 59, 101
 tRNA 13
 trochlear nerve 59
 trypsin 318
 TSH 424
 tumor necrosis factor 215
 twitch 146
 Type II a 150, 161
 Type II b 150, 161
 Type I 150, 161
 T 波 236, 237
- U**
- unconjugated bilirubin 190
 ureter 380
 urinary bladder 380
- V**
- vagus nerve 59
 VAS 112
 venous blood 188
 ventilation ratio 275
 ventiration threshold 298
 ventral horn 69
 ventral root 60, 69
 ventricle 234
 vermis 177
 very low density lipoprotein
 203, 343
 vestibular nucleus 177
 vestibulocerebellum 177
 vestibulocochlear nerve 59
 vestibulospinal reflex 169
 vestibulospinal tract 169
 visual analogue scale 112
 visual pigment 121
- vital capacity 275
 vitamin K dependent blood
 coagulation factor 201
 vitreous humor 119
 VLDL 203, 343
 von Willebrand factor 196
 vWF 196
- W**
- warm-sensitiv neuron 456
 water balance 394
 Weber の法則 95
 white matter 69

参考文献

第4章

- 1) 犬童康弘「先天性無痛無汗症小児内科」40巻p1701~1707 2008
- 2) B. Lynn, S. Schutterle, and F. K. Pierau. *J.Physiol. (Lond.)*494 (2) : 587-593, 1996
- 3) K. Sauerstein, M. Klede, M. Hilliges, and M. Schmelz. *J.Physiol. (Lond.)* 529 : 803-810, 2000
- 4) 倉石泰「痒みの発生機序と鎮痒薬の薬理」日本薬理学雑誌139巻p160-164 2012
- 5) エリザベス・ロジン (大沢満里子訳) トマトのうま味山口静子監修「うま味の文化・UMAMIの科学」p151-153, 丸善、1 999
- 6) M. Behrens and W. Meyerhof. Gustatory and extragustatory functions of mammalian tastereceptors. *Physiol Behav.*105 (1) : 4-13, 2011

第5章

- 1) 二宮石雄、安藤啓司、彼末一之、松川寛二編「スタンダード生理学第2版」文光堂2007
- 2) 佐藤昭夫、佐藤優子、五嶋摩理「自律機能生理学」金芳堂1995
- 3) 斉藤満編「循環Ⅱ 運動時の調節と適応」ナッブ2007
- 4) 岡田泰伸監訳「ギャノン生理学 (原書23版)」丸善2010
- 5) Guyton AC: *Textbook of Medical Physiology* (8th Edition), W.B. Saunders, 1991.
- 6) McArdle WD, Katch FI, Katch VL: *Exercise Physiology* (6th Edition) , LippincottWilliams & Wilkins, 2007.
- 8) Kandel ER, Schwartz JH, Jessell TM: *Principles of Neural Science* (4th Edition) , McGraw-Hill, 2000.

第9章

- 1) Waller AD, A demonstration on man of electromotive changes accompanying the heart's beat, *J.Physiol* (1887) 8:229-34
- 2) Rivera-Ruiz, M., Cajavilca, C., and Varon, J., Einthoven's string galvanometer: The first electrocardiograph, *Tex Heart Inst J* (2008) 35:174-178
- 3) Goldberger E., A single indifferent, electrocardiographic electrode of zero potential and a technique of obtaining augmented, unipolar, extremity leads. *Am Heart J*(1942) 23:483-492
- 4) Willson FN, et al., The precordial electrocardiogram, *Am Heart J* (1944) 27:19-85
- 5) Patterson SW, Piper H, and Starling EH, The regulation of the heart beat *J Physiol*(1914) 48:465-513
- 6) Boron WF, Boulpaep EL, *Medical Physiology* 第2版(2008), 469-473 Saunders 社, ISBN-10: 1416031154
- 7) Guideline Subcommittee of the WHO-International Society of Hypertension Mild Hypertension Liason Committee, 1999 World Health Organization-International Society of Hypertension guidelines for the management of hypertension, *J.Hypertension* (1999) 17, 151-183
- 8) Mancia G and Zanchetti A, One hundred years of auscultatory blood pressure: commemorating N. S. Korotkoff, *J. Hypertension* (2005) 23: 1-2
- 9) Charkoudian, N., Skin blood flow in adult human thermoregulation: How it works, when it does not, and why, *Mayo Clin Proc* (2003) 78:603-612
- 10) Surawicz, B et al., AHA/ACCF/HRS Recommendations for the Standardization and Interpretation of the Electrocardiogram, *Circulation* (2009) 119: e235-e240, <http://circ.ahajournals.org/content/119/10/e235/T1.expansion.html>

第10章

- 1) Merrill EG, Lipski J, Kubin L, Fedorko L, *Brain Res.* 1983.
- 2) Ezure K, 1990.
- 3) Onimaru H, Arata A, Homma I, 1988.
- 4) Kawai A, Onimaru H, Homma I, *J Physiol.*, 2006.
- 5) Amiel J. et al., *Nat Genet.*, 2003.
- 6) Arata A., *Respir Physiol Neurobiol.*, 2009.
- 7) Smith et al., *Science*, 1991.

第13章

- 1) 名津井悌次郎「現代看護学基礎講座3 新版生理学」真興交易医書出版部1993
- 2) Douglas C. Eaton, John P. Pooler. Vander's Renal Physiology, Eighth Edition, McGrawHill Education. 2013
- 3) 坂井建夫・河原克雅「人体の正常構造と機能V 腎・泌尿器」日本医事新報社1999

第14章

- 1) 名津井悌次郎「現代看護学基礎講座3 新版生理学」真興交易医書出版部1993
- 2) Kinsey Smith, Fluids & Electrolytes A conceptual approach, Churchill Livingstone.1980
- 3) 北岡建樹「楽しくイラストで学ぶ水・電解質の知識」南山堂1989
- 4) Davenport HW, The ABC of Acid-Base Chemistry, The University of Chicago Press.1974
- 5) 黒川清「水・電解質と酸塩基平衡－ Step by Step で考える－」南江堂2003

第16章

- 1) Aschoff and Wever, Naturwissenschaften, 45:477-485, 1958
- 2) 入来正躬ら「内科」62:162-65, 1988
- 3) 入来正躬「体温生理学テキスト」文光堂
- 4) Scales et al., J. Appl. Physiol., 65:1840-846, 1988
- 5) 小澤濤司、福田康一郎「標準生理学第7版」医学書院
- 6) Nakamura and Morrison, Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 107:8848-853, 2010
- 7) Nakamura and Morrison, Am. J. Physiol., 292:R127-136, 2007
- 8) Merklin, Anat. Rec., 178:637-45, 1974
- 9) Saito et al., Diabetes, 58:1526-531, 2009
- 10) Nakamura and Morrison, J. Physiol., 589:3641-658, 2011
- 11) Nakamura et al., Neurosci. Lett., 260:117-20, 1999
- 12) Nakamura, Am. J. Physiol., 301:R1207-1228, 2011
- 13) Kataoka et al., Cell Metab., 20:346-58, 2014

第17章

- 1) Barlow, Linda A. 2022. "The Sense of Taste: Development, Regeneration, and Dysfunction." *WIREs Mechanisms of Disease* 14 (3): e1547.
- 2) バーン・レヴィ「生理学 原著第3版」西村書店, 2003年
- 3) コスタンゾ「明解生理学 原著第7版」エルゼビア・ジャパン株式会社, 2023年
- 4) 深井 喜代子、佐伯由香、福田博之「新看護生理学テキスト」南江堂, 2008年
- 5) 福田恵美子「人間発達学」中外医学社, 2022年
- 6) ギャノン「生理学 原著第26版」丸善出版, 2022年
- 7) 菱沼典子「看護形態機能学」日本看護協会出版会, 2017年
- 8) 菱沼典子「看護につながる形態機能学」メヂカルフレンド社, 2017年
- 9) 石川紀子、中川有加、村越毅「The 分娩」メディカ出版, 2021年
- 10) Jiang, Rong-San, and Yi-Fang Chiang. 2023. "Effect of Age and Gender on Taste Function as Measured by the Waterless Empirical Taste Test." *Diagnostics (Basel, Switzerland)* 13 (20).
<https://doi.org/10.3390/diagnostics13203172>.
- 11) 開道貴信「3ステップ解剖生理学」南江堂, 2022年
- 12) 辛島千恵子「人間発達とライフサイクル」理工図書, 2019年
- 13) 荃津智子、守口絵里「Nursing Textbook Series 小児看護学」医歯薬出版株式会社, 2023年
- 14) 桑名俊一、荒田明子「生理学」理工図書, 2016年
- 15) ムーア「人体発生学 原著第11版」医歯薬出版, 2022年
- 16) 永田恭介「ヒトの生物学」原著第5版, 丸善株式会社, 2007年
- (19) 岡田隆夫「集中講義生理学 第3版」メジカルビュー社, 2022年
- (20) 佐久間康夫「カラー図解よくわかる生理学の基礎 第2版」メディカルサイエンスインターナショナル, 2017年
- (21) 鮫島浩、大月恵理子「みえる生命誕生」南江堂, 2022年
- (22) Sylvia S. Mader, Michael Windelspecht, Humanbiology 17thEd. McGrawHill 社2023年
- (23) 上田晃、内田さえ、鍵谷方子、原田彰宏「人体の構造と機能 第6版」, 医歯薬出版2023年

看護生理学

2024年9月30日 初版第1刷発行



編著者 桑名俊一

発行者 柴山斐呂子

発行所 理工図書株式会社

〒102-0082 東京都千代田区一番町27-2
電話 03 (3230) 0221 (代表)
FAX 03 (3262) 8247
振替口座 00180-3-36087 番
<http://www.rikohtosho.co.jp>

© 桑名俊一 2024 Printed in Japan ISBN978-4-8446-0966-7

印刷・製本 丸井工文社

〈日本複製権センター委託出版物〉

*本書を無断で複写複製（コピー）することは、著作権法上の例外を除き、禁じられています。本書をコピーされる場合は、事前に日本複製権センター（電話：03-3401-2382）の許諾を受けてください。

*本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製は著作権法上の例外を除き禁じられています。本書を代行業者等の第三者に依頼してスキャンやデジタル化することは、たとえ個人や家庭内の利用でも著作権法違反です。

★自然科学書協会会員★工学書協会会員★土木・建築書協会会員